

การบำบัดน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มด้วยกระบวนการ
แบบไร้อากาศสองขั้นตอน



นางสาวจิรวรรณ ออดยะกุล

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

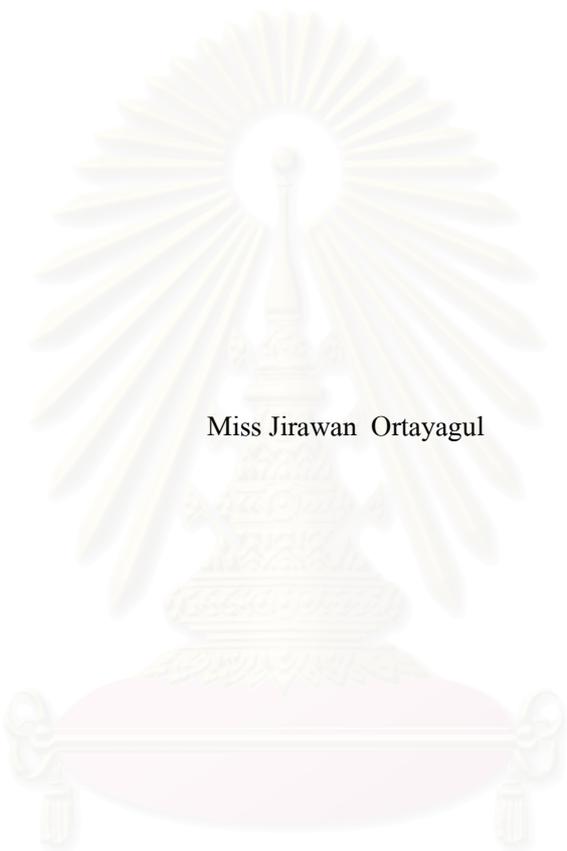
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม (สหสาขาวิชา)

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2549

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

TREATMENT OF PALM OIL MILL WASTEWATER
BY TWO-STAGE ANAEROBIC PROCESS



Miss Jirawan Ortayagul

สถาบันวิทยบริการ

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science Program in Environmental Science
(Interdisciplinary Program)

Graduate School

Chulalongkorn University

Academic Year 2006

Copyright of Chulalongkorn University

จิรวรรณ ออดยะกุล : การบำบัดน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มด้วยกระบวนการแบบ
 ไร้อากาศสองขั้นตอน (TREATMENT OF PALM OIL MILL WASTEWATER BY
 TWO-STAGE ANAEROBIC PROCESS) อ.ที่ปรึกษา: ผศ.ดร.ชาญวิทย์ โฆษิตานนท์,
 อ.ที่ปรึกษาร่วม: ดร.สมชาย ดารารัตน์, 147 หน้า

การแบ่งขั้นตอนของกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศออกจากกัน เป็นตัวแปรที่มี
 ความสำคัญส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศวิทยาของจุลินทรีย์ และลักษณะเฉพาะของระบบยูเอสบีอย่างมี
 นัยสำคัญ ในการวิจัยนี้ได้ทำการ ศึกษาประเมินกระบวนการไร้อากาศสองขั้นตอน โดยใช้ถัง
 ปฏิกริยาระดับห้องปฏิบัติการซึ่งประกอบด้วยถังสร้างกรดแบบเอชยูเอสบี ปริมาตรใช้งาน 14 ลิตร
 และระบบยูเอสบี ขนาด 3.139 ลิตร ในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มที่มีปริมาณ
 ซีไอดี ประมาณ 101,333 – 137,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ถึงปฏิกริยาทั้งสองถัง เติมน้ำในระบบที่
 อุณหภูมิห้อง การวิจัยครั้งนี้มีจุดประสงค์ในการหาสภาวะการไฮโดรไลซิสที่เหมาะสมเพื่อกำจัด
 ของแข็งแขวนลอยระเหย เปลี่ยนสารอินทรีย์ให้กลายเป็นกรดไขมันระเหย และหาประสิทธิภาพ
 ของการแบ่งขั้นตอนภายใต้สภาวะคงตัว ถึงปฏิกริยาเอชยูเอสบีได้ค่าเดินระบบที่ค่าพีเอชเริ่มต้น
 6.00 และระยะเวลาพักทางชลศาสตร์ 14 วัน จากการทดลองไฮโดรไลซิส ซึ่งมีประสิทธิภาพ
 การกำจัดร้อยละ 75.94 เมื่อป้อนของแข็งแขวนลอยระเหยความเข้มข้นประมาณ 63,300 มิลลิกรัม
 ต่อลิตร และมีประสิทธิภาพการสร้างกรดไขมันระเหยร้อยละ 91.18 ± 6.98 และจากการเดินระบบ
 ถึงปฏิกริยาเอชยูเอสบี มีประสิทธิภาพการกำจัดร้อยละ 58.21 ± 4.69 เมื่อป้อนของแข็งแขวนลอย
 ระเหยความเข้มข้นประมาณ $51,903.70 \pm 2,630.51$ มิลลิกรัมต่อลิตร และมีประสิทธิภาพการสร้าง
 กรดไขมันระเหยร้อยละ 84.64 ± 2.87 สำหรับขั้นตอนการสร้างก๊าซมีเทนระบบยูเอสบี มี
 ประสิทธิภาพเหมาะสมในการกำจัดสารอินทรีย์ ร้อยละ 79.54 ± 2.77 ที่ระยะเวลาพักทางชล
 ศาสตร์ 24 ชั่วโมง ที่อัตราสารอินทรีย์ 28 กิโลกรัมซีไอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน องค์ประกอบ
 ก๊าซมีเทนในก๊าซชีวภาพ มีค่าร้อยละ 65.7 ± 1.37 และมีประสิทธิภาพการสร้างก๊าซมีเทน 0.11 –
 0.15 ลิตรต่อกรัมบีไอดีที่ถูกกำจัด สภาพค่างที่เพิ่มขึ้นช่วยให้ถึงปฏิกริยาสร้างก๊าซมีเทนค่างพีเอช
 ประมาณ 7.5 และการหมุนเวียนน้ำออกจากระบบกลับ ช่วยลดความต้องการเติมสารเพิ่มสภาพค่าง
 ให้กับถังปฏิกริยาสร้างก๊าซมีเทน

สาขาวิชา วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม ลายมือชื่อนิสิต จิรวรรณ ออดยะกุล
 ปีการศึกษา 2549 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา
 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม S.N

#4689205820: MAJOR OF ENVIRONMENTAL SCIENCE

KEY WORD: PALM OIL MILL/TWO-STAGE ANAEROBIC/UASB/HUSB/HYDROLYSIS

JIRAWAN ORTAYAGUL: TREATMENT OF PALM OIL MILL WASTEWATER BY TWO-STAGE ANAEROBIC PROCESS. THESIS ADVISOR: ASST. PROF. CHARNWIT KOSITANONT, Ph.D. THESIS CO-ADVISOR: SOMCHAI DARARAT, Ph.D., 147 pp.

Phase separation of anaerobic process is an importance parameter significantly affecting microbial ecology and characteristics of UASB reactor. In this study two-stage anaerobic process was evaluated in laboratory-scale reactors which consist an acid tank called Hydrolysis Upflow Sludge Blanket (HUSB) 14 L working volume and UASB 3.139 L receiving feed from a palm oil mill wastewater containing COD of 101,333 – 137,000 mg/L. The two reactors operated at room temperature. This study was focused on determining the optimum hydrolysis condition for volatile suspended solid (VSS) removal, enhance organic solid to volatile fatty acid (VFA) and determining the efficiency of phase separation under steady state conditions, HUSB reactor was conducted at initial pH 6.00 and hydraulic retention time (HRT) of 14 days. Removal efficiencies of 75.94% were achieved at feed VSS concentration of 63,600 mg/L and the increasing of VFA was 91.18 ± 6.98 % in batch experiment, and removal efficiencies of 58.21 ± 4.69 % were achieved at feed VSS concentration of $51,903.70 \pm 2,630.51$ mg/L and the increasing of VFA was 84.64 ± 2.87 % for continuous reactor (HUSB). In the methanogenesis phase, the UASB reactor was achieved 79.54 ± 2.77 % COD removal efficiency at hydraulic retention time (HRT) 24 hours at organic loading 28 kg COD/m³-d. Methane content in the produced biogas was 65.7 ± 1.37 % and a methane yield at optimum loading of 0.11 – 0.15 L/g BOD_{Removed}. An increasing alkalinity maintained the methanogenic reactor at around 7.5 and effluent recirculation alleviated the need for alkali additions to the feed of the methanogenic reactor.

Field of study Environmental Science..... Student's signature Jirawan Ortayagul
 Academic year 2006..... Advisor's signature C. Kositanont
 Co-advisor's signature S. R

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชาญวิทย์ โฆษิตานนท์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ ดร.สมชาย คารารัตน์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ซึ่งกรุณาให้คำปรึกษา และข้อคิดเห็นต่างๆเกี่ยวกับการวิจัยมาโดยตลอด ทำให้ผู้วิจัยสามารถดำเนินการวิจัยจนประสบความสำเร็จด้วยดี จึงขอขอบพระคุณไว้ ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.สมใจ เพ็งปรีชา (ประธานกรรมการ), รองศาสตราจารย์ ดร.ชเรศ ศรีสถิตย์ (กรรมการ) และนายไชยยุทธ กลิ่นสุคนธ์ (กรรมการ) ที่ได้ให้คำแนะนำในการปรับปรุงและแก้ไขให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย ที่ให้การสนับสนุนด้านสถานที่และทุนในการทำวิจัย ขอขอบพระคุณโรงแรมบันยันทรี ที่ร่วมให้ทุนสนับสนุนการวิจัยในครั้งนี้ด้วย ขอขอบพระคุณ บริษัท ชุมพรอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์ม จำกัด (มหาชน) ที่ให้ความอนุเคราะห์น้ำเสียที่ใช้ในการวิจัย และขอขอบพระคุณ บริษัท เสริมสุข (ปทุมธานี) จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์เมล็ดตะกอนจุลินทรีย์ที่ใช้ในการวิจัย

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ห้องธุรการสหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อมทุกท่าน ที่อำนวยความสะดวกในการติดต่อประสานงาน และเจ้าหน้าที่ของ วว. คุณทวิศักดิ์ หอมดอกไม้ ที่ช่วยติดตั้งและซ่อมแซมอุปกรณ์ต่างๆ และคุณปฐมพร พูลสวัสดิ์ ที่ได้ให้คำแนะนำในการทำวิจัย

ขอขอบคุณ พี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆ อาทิ คุณคณิต ออตตะกุล, คุณปริญา มาลัยลอย, คุณศรัณพิชญ์ สุพานิช, คุณจุฑามาศ กิจจานุรักษ์, คุณมธุรส แสงไพโรจน์, คุณกมลวรรณ พุ่มไม้, คุณเฉลิมชัย นามกระจาย, คุณชูชัย ล้ออุทัย, คุณบัญญัติการ วินัยพานิช, คุณบุญญานิช บริเวชานันท์, คุณกิตติภูมิ พุ่มแดง, คุณศุภกิตต์ เจียรสุวรรณ และท่านอื่นๆ ทุกท่านที่มีได้กล่าวไว้ ณ ที่นี้ ที่ได้ให้ความช่วยเหลือทั้งด้านอุปกรณ์ แรงงาน คำปรึกษาและกำลังใจ ตลอดมาจนทำให้การดำเนินการวิจัยและการสอบผ่านไปได้ด้วยดี

ท้ายนี้ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณและระลึกถึงพระคุณ บิดา-มารดา ที่ได้อบรมเลี้ยงดู และให้การสนับสนุนในทุกๆ ด้าน รวมทั้งพี่สาว (สิริรักษ์ ออตตะกุล) และครอบครัว ที่ให้การสนับสนุนในทุกๆด้านเช่นกัน ท่านเหล่านี้เป็นกำลังใจที่สำคัญที่สุดสำหรับผู้วิจัยเสมอมา จนถึงวันที่ประสบความสำเร็จทางการศึกษา จึงขอมอบความดีต่างๆ ที่เกิดขึ้นให้ท่านเหล่านี้ด้วยความรักและเคารพตลอดไป

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ.....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ข้อได้เปรียบ-เสียเปรียบของกระบวนการบำบัดแบบไร้อากาศ.....	4
2.2 หลักการพื้นฐาน.....	6
2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ.....	13
2.4 ระบบยูเอเอสบี (Upflow Anaerobic Sludge Blanket : UASB).....	28
2.5 การพัฒนาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัด แบบประสิทธิภาพสูง.....	38
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	39
บทที่ 3 อุปกรณ์ เครื่องมือ และวิธีการทดลอง.....	56
3.1 น้ำเสียที่ใช้ในการทดลอง.....	56
3.2 หัวเชื้อตะกอนจุลินทรีย์ที่ใช้ในการเดินระบบถังสร้างก๊าซมีเทน (ถัง ปฏิกริยาแบบยูเอเอสบี).....	57
3.3 อุปกรณ์และเครื่องมือทดลอง.....	59
3.4 อุปกรณ์และเครื่องมือวิเคราะห์ผลการทดลองในห้องปฏิบัติการ.....	60
3.5 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	64
3.6 การประเมินประสิทธิภาพของระบบ.....	71

	หน้า
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์.....	72
4.1 การทดลองไฮโดรไลซิสตัวอย่างน้ำเสียที่ใช้ในการทดลอง เพื่อการ ทดสอบเบื้องต้นหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการเดินระบบถังสร้างกรด.....	73
4.2 ผลของระยะเวลาพักพักทางจุลศาสตร์ต่อประสิทธิภาพการเดินระบบถัง สร้างกรด.....	76
4.3 ประสิทธิภาพการเดินระบบถังสร้างก๊าซมีเทน.....	93
4.4 ลักษณะของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์.....	120
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ.....	125
รายการอ้างอิง.....	127
ภาคผนวก.....	132
ภาคผนวก ก สารอาหารเสริม.....	133
ภาคผนวก ข การคำนวณปริมาณเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ที่เติมลงในถังปฏิกริยา ยูเอเอสบี.....	134
ภาคผนวก ค การคำนวณอัตราภาระสารอินทรีย์.....	135
ภาคผนวก ง ข้อมูลก๊าซชีวภาพและอุณหภูมิของการเดินระบบถังสร้างก๊าซ มีเทน.....	141
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	147

สารบัญตาราง

	หน้า	
ตารางที่ 1.1	ข้อกำหนดขั้นต่ำสุดสำหรับน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มที่จะปล่อยสู่แหล่งน้ำสาธารณะ.....	2
ตารางที่ 2.1	แบคทีเรียสร้างกรดอินทรีย์ (Organic acids producing bacteria).....	9
ตารางที่ 2.2	การจำแนกชนิดของแบคทีเรียสร้างก๊าซมีเทน.....	10
ตารางที่ 2.3	ชนิดและแหล่งที่อยู่ของแบคทีเรียสร้างก๊าซมีเทน.....	10
ตารางที่ 2.4	องค์ประกอบของสารอาหารอนินทรีย์ สำหรับการศึกษาระบบไร้อากาศ.....	23
ตารางที่ 2.5	ปริมาณภาระซีโอดี(COD loading) ที่แนะนำสำหรับถังปฏิกริยายูเอสบีที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ซึ่งกำจัดซีโอดีได้ ร้อยละ 85-95.....	32
ตารางที่ 2.6	ค่าความเร็วไหลขึ้นและความสูงของถังปฏิกริยาที่แนะนำสำหรับถังปฏิกริยายูเอสบี.....	33
ตารางที่ 3.1	ลักษณะสมบัติของตัวอย่างน้ำเสียจากกระบวนการผลิตน้ำมันปาล์มดิบที่ใช้ในการทดลอง.....	57
ตารางที่ 3.2	แสดงค่าพารามิเตอร์กับตำแหน่งที่ทำการศึกษาของระบบบำบัด และวิธีการวิเคราะห์.....	65
ตารางที่ 3.3	พารามิเตอร์และความถี่ในการวิเคราะห์ผลการทดลองของถังสร้างกรด..	70
ตารางที่ 3.4	พารามิเตอร์และความถี่ในการวิเคราะห์ผลการทดลองของถังสร้างก๊าซมีเทน.....	70
ตารางที่ 3.5	พารามิเตอร์และความถี่ในการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของตะกอนเมื่อดจุลินทรีย์.....	71
ตารางที่ 4.1	ปริมาณและประสิทธิภาพการสร้างกรดไขมันระเหยเฉลี่ยตลอดการทดลองไฮโดรไลซิส.....	75
ตารางที่ 4.2	ปริมาณสภาพต่างเฉลี่ยในน้ำเข้าและออกจากระบบของถังสร้างกรด ที่ระยะเวลาพักทางชีวศาสตร์ 14 , 10 และ 20 วัน.....	88
ตารางที่ 4.3	ปริมาณซีโอดีในน้ำเข้าและออกจากระบบ และประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีเฉลี่ย ของถังสร้างกรดที่ระยะเวลาพักทางชีวศาสตร์ 14 , 10 และ 20 วัน.....	90

	หน้า
ตารางที่ 4.4 ปริมาณการกำจัดซีโอดีและประสิทธิภาพเฉลี่ย ที่อัตราการระเหยอินทรีย์ 4, 10, 15, 20, 25 และ 28 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน ที่สภาวะคงที่.....	99
ตารางที่ 4.5 ปริมาณการกำจัดบีโอดีและประสิทธิภาพเฉลี่ย ที่อัตราการระเหยอินทรีย์ 4, 10, 15, 20, 25 และ 28 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน ที่สภาวะคงที่.....	101
ตารางที่ 4.6 ปริมาณการกำจัดกรดไขมันระเหยและประสิทธิภาพเฉลี่ย ที่อัตราการระเหยอินทรีย์ 4, 10, 15, 20, 25 และ 28 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน ที่สภาวะคงที่.....	103
ตารางที่ 4.7 ปริมาณสภาพต่างเฉลี่ย และอัตราส่วนระหว่างกรดไขมันระเหยต่อสภาพต่าง ที่อัตราการระเหยอินทรีย์ 4, 10, 15, 20, 25 และ 28 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน ที่สภาวะคงที่.....	106
ตารางที่ 4.8 ค่าพีเอชเฉลี่ย ที่อัตราการระเหยอินทรีย์ 4, 10, 15, 20, 25 และ 28 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน ที่สภาวะคงที่.....	106
ตารางที่ 4.9 ปริมาณการกำจัดของแข็งแขวนลอยระเหยและประสิทธิภาพเฉลี่ย ที่อัตราการระเหยอินทรีย์ 4, 10, 15, 20, 25 และ 28 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน ที่สภาวะคงที่.....	114
ตารางที่ 4.10 ปริมาณการกำจัดและประสิทธิภาพน้ำมันและไขมันที่อัตราการระเหยอินทรีย์ 15, 20, 25 และ 28 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน ที่สภาวะคงที่.....	116
ตารางที่ 4.11 อัตราการสร้างก๊าซชีวภาพและก๊าซมีเทนเฉลี่ย ที่อัตราการระเหยอินทรีย์ 4, 10, 15, 20, 25 และ 28 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน ที่สภาวะคงที่.....	118
ตารางที่ 4.12 ประสิทธิภาพการสร้างก๊าซมีเทนเปรียบเทียบกับปริมาณสารอินทรีย์ที่ถูกกำจัดเฉลี่ย ที่อัตราการระเหยอินทรีย์ 4, 10, 15, 20, 25 และ 28 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน ที่สภาวะคงที่.....	119
ตารางที่ ก.1 สารอาหารเสริม (Vanderbilt media).....	133
ตารางที่ ง.1 ปริมาตรก๊าซชีวภาพและอุณหภูมิ ที่อัตราการระเหยอินทรีย์ 4 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน.....	141

	หน้า
ตารางที่ ง.2 ปริมาตรก๊าซชีวภาพและอุณหภูมิ ที่อัตราการระเหยอินทรีย์ 10 กิโลกรัม ชีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน.....	142
ตารางที่ ง.3 ปริมาตรก๊าซชีวภาพและอุณหภูมิ ที่อัตราการระเหยอินทรีย์ 15 กิโลกรัม ชีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน.....	143
ตารางที่ ง.4 ปริมาตรก๊าซชีวภาพและอุณหภูมิ ที่อัตราการระเหยอินทรีย์ 20 กิโลกรัม ชีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน.....	144
ตารางที่ ง.5 ปริมาตรก๊าซชีวภาพและอุณหภูมิ ที่อัตราการระเหยอินทรีย์ 25 กิโลกรัม ชีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน.....	145
ตารางที่ ง.6 ปริมาตรก๊าซชีวภาพและอุณหภูมิ ที่อัตราการระเหยอินทรีย์ 28 กิโลกรัม ชีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน.....	146

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 2.1	กระบวนการไร้อากาศ..... 11
ภาพที่ 2.2	การส่งผ่านพลังงานในแต่ละขั้นตอนของกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศ..... 12
ภาพที่ 2.3	ความสัมพันธ์ระหว่างการทำงานของจุลินทรีย์สร้างก๊าซมีเทน (Methanogens) กับ ค่าพีเอช (pH)..... 15
ภาพที่ 2.4	การตอบสนองของระบบกรองแบบไร้อากาศ (anaerobic filter) ต่อการลดระดับค่าพีเอชแบบไม่สม่ำเสมอ..... 15
ภาพที่ 2.5	ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระกับความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจน..... 21
ภาพที่ 2.6	ความสัมพันธ์ระหว่างแอม โมเนียที่ไม่แตกตัว (Un-ionized NH ₃) กับ อุณหภูมิ ที่ระดับพีเอชต่างๆ..... 26
ภาพที่ 2.7	กราฟแสดงการปรับสภาพของจุลินทรีย์สร้างมีเทนกับความเข้มข้นของโซเดียมอออน..... 27
ภาพที่ 2.8	ส่วนประกอบหลักของถังปฏิกริยาอุเอเอสบี (UASB reactor)..... 29
ภาพที่ 2.9	ตัวอย่างการประยุกต์รูปแบบถังปฏิกริยาอุเอเอสบีเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงาน..... 29
ภาพที่ 2.10	รูปร่างของแบคทีเรีย..... 35
ภาพที่ 2.11	เม็ดตะกอนจุลินทรีย์ที่ประกอบด้วยแบคทีเรียกลุ่ม <i>Methanosarcina</i> 36
ภาพที่ 2.12	องค์ประกอบของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ เสนอโดย McLeod และคณะ..... 36
ภาพที่ 3.1	แสดงลักษณะทางกายภาพของน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม..... 55
ภาพที่ 3.2	ลักษณะตะกอนเม็จุลินทรีย์ ที่ใช้ในการทดลอง..... 58
ภาพที่ 3.3	การสร้างความคุ้นเคยของตะกอนเม็จุลินทรีย์ให้เข้ากับตัวอย่างน้ำเสีย.... 59
ภาพที่ 3.4	ถังสร้างกรดแบบ Hydrolysis Upflow Sludge Blanket (HUSB) ที่ใช้ในการทดลอง..... 61
ภาพที่ 3.5	ถังสร้างก๊าซมีเทนแบบ Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB) ที่ใช้ในการทดลอง..... 62
ภาพที่ 3.6	เครื่องวัดปริมาตรก๊าซ (gas meter)..... 63

	หน้า
ภาพที่ 3.7 การเดินระบบของระบบบำบัดน้ำเสียแบบยูเอเอสบี (UASB) ที่มีถังสร้างกรวดแบบ Hydrolysis Upflow Sludge Blanket (HUSB).....	64
ภาพที่ 3.8 การทดลองไฮโดรไลซิสตัวอย่างน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม.....	66
ภาพที่ 3.9 การเดินระบบถังสร้างกรวดแบบเอชยูเอสบี (HUSB).....	67
ภาพที่ 3.10 การเดินระบบถังสร้างก๊าซมีเทนแบบยูเอเอสบี (UASB).....	68
ภาพที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลากับปริมาณของแข็งแขวนลอยระเหยของชุดทดลองที่ 1, 2 และ 3.....	74
ภาพที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลากับประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอยระเหยของการทดลองไฮโดรไลซิสชุดทดลองที่ 1, 2 และ 3.....	74
ภาพที่ 4.3 เปรียบเทียบประสิทธิภาพเฉลี่ยของการสร้างกรวดไขมันระเหยของการทดลองไฮโดรไลซิส ของชุดทดลองที่ 1, 2 และ 3.....	75
ภาพที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลากับปริมาณและประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอยระเหย ที่ระยะเวลากักพักทางชลศาสตร์ 14 วัน.....	79
ภาพที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลากับปริมาณและประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอยระเหย ที่ระยะเวลากักพักทางชลศาสตร์ 10 วัน.....	79
ภาพที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลากับปริมาณและประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอยระเหย ที่ระยะเวลากักพักทางชลศาสตร์ 20 วัน.....	80
ภาพที่ 4.7 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอยระเหยเฉลี่ยที่สภาวะคงที่ ที่ระยะเวลากักพักทางชลศาสตร์ 10 และ 14 วัน.....	80
ภาพที่ 4.8 การแยกชั้นของตะกอนและของเหลว ที่ระยะเวลากักพักทางชลศาสตร์ 14 วัน.....	81
ภาพที่ 4.9 การแยกชั้นของตะกอนและของเหลวหลังผ่านการตกตะกอนด้วยการหมุนเหวี่ยง ที่ระยะเวลากักพักทางชลศาสตร์ 14 วัน.....	81
ภาพที่ 4.10 การแยกชั้นของตะกอนและของเหลว ที่ระยะเวลากักพักทางชลศาสตร์ 10 วัน.....	82
ภาพที่ 4.11 การแยกชั้นของตะกอนและของเหลวหลังผ่านการตกตะกอนด้วยการหมุนเหวี่ยง ที่ระยะเวลากักพักทางชลศาสตร์ 10 วัน.....	82

	หน้า
ภาพที่ 4.12 การแยกชั้นของตะกอนและของเหลว ที่ระยะเวลาพักทางชลศาสตร์ 20 วัน.....	83
ภาพที่ 4.13 การแยกชั้นของตะกอนและของเหลวหลังผ่านการตกตะกอนด้วยการหมุนเหวี่ยง ที่ระยะเวลาพักทางชลศาสตร์ 20 วัน.....	83
ภาพที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลากับปริมาณและประสิทธิภาพการสร้างกรดไขมันระเหย ที่ระยะเวลาพักทางชลศาสตร์ 14 วัน.....	85
ภาพที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลากับปริมาณและประสิทธิภาพการสร้างกรดไขมันระเหย ที่ระยะเวลาพักทางชลศาสตร์ 10 วัน.....	85
ภาพที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลากับปริมาณและประสิทธิภาพการสร้างกรดไขมันระเหย ที่ระยะเวลาพักทางชลศาสตร์ 20 วัน.....	86
ภาพที่ 4.17 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการสร้างกรดไขมันระเหย ที่สภาวะแนวโน้มค่อนข้างคงที่ ที่ระยะเวลาพักทางชลศาสตร์ 14 ,10 และ 20 วัน.....	86
ภาพที่ 4.18 การเปรียบเทียบระหว่างปริมาณกรดไขมันระเหยเฉลี่ย ของน้ำเข้าและออกจากระบบ ที่สภาวะแนวโน้มค่อนข้างคงที่ ที่ระยะเวลาพักทางชลศาสตร์ 14 , 10 และ20 วัน.....	87
ภาพที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลากับค่าพีเอช และความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสภาพต่าง ในน้ำเข้าระบบและน้ำออกจากระบบ ที่ระยะเวลาพักทางชลศาสตร์ 14 วัน.....	89
ภาพที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลากับค่าพีเอช และความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสภาพต่าง ในน้ำเข้าระบบและน้ำออกจากระบบ ที่ระยะเวลาพักทางชลศาสตร์ 10 วัน.....	89
ภาพที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลากับค่าพีเอช และความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสภาพต่าง ในน้ำเข้าระบบและน้ำออกจากระบบ ที่ระยะเวลาพักทางชลศาสตร์ 20 วัน.....	90
ภาพที่ 4.22 ความสัมพันธ์ของปริมาณและประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี ที่ระยะเวลาพักทางชลศาสตร์ 14 วัน.....	91
ภาพที่ 4.23 ความสัมพันธ์ของปริมาณและประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี ที่ระยะเวลาพักทางชลศาสตร์ 10 วัน.....	92

หน้า

ภาพที่ 4.24	ความสัมพันธ์ของปริมาณและประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี ที่ระยะเวลา กักพักทางชลศาสตร์ 20 วัน.....	92
ภาพที่ 4.25	ความสัมพันธ์ของปริมาณและประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี ที่อัตราภาระ สารอินทรีย์ 4 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน.....	95
ภาพที่ 4.26	ความสัมพันธ์ของปริมาณและประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี ที่อัตราภาระ สารอินทรีย์ 10 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน.....	95
ภาพที่ 4.27	ความสัมพันธ์ของปริมาณและประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี ที่อัตราภาระ สารอินทรีย์ 15 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน.....	96
ภาพที่ 4.28	ความสัมพันธ์ของปริมาณและประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี ที่อัตราภาระ สารอินทรีย์ 20 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน.....	96
ภาพที่ 4.29	ความสัมพันธ์ของปริมาณและประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี ที่อัตราภาระ สารอินทรีย์ 25 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน.....	97
ภาพที่ 4.30	เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี ที่อัตราภาระสารอินทรีย์ 4, 10, 15, 20 และ 25 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน.....	97
ภาพที่ 4.31	การยกตัวของชั้นตะกอนจุลินทรีย์ภายในถังสร้างก๊าซมีเทนแบบ ยูเอเอสบี.....	98
ภาพที่ 4.32	ความสัมพันธ์ของปริมาณและประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี เมื่อเดิน ระบบด้วยน้ำเสียจริง ที่อัตราภาระสารอินทรีย์ 28 กิโลกรัมซีโอดีต่อ ลูกบาศก์เมตรต่อวัน.....	98
ภาพที่ 4.33	เปรียบเทียบปริมาณการกำจัดซีโอดีเฉลี่ย ที่อัตราภาระสารอินทรีย์ 4, 10, 15, 20, 25 และ 28 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน ที่สภาวะคงที่....	99
ภาพที่ 4.34	เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี ที่อัตราภาระสารอินทรีย์ 4, 10, 15, 20, 25 และ 28 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน ที่สภาวะคงที่....	100
ภาพที่ 4.35	เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดบีโอดี ที่อัตราภาระสารอินทรีย์ 4, 10, 15, 20, 25 และ 28 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน ที่สภาวะคงที่....	101
ภาพที่ 4.36	เปรียบเทียบปริมาณการกำจัดบีโอดีเฉลี่ย ที่อัตราภาระสารอินทรีย์ 4, 10, 15, 20, 25 และ 28 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน ที่สภาวะคงที่....	102

	หน้า	
ภาพที่ 4.37	เปรียบเทียบปริมาณการกำจัดกรดไขมันระเหยเจลลี่ ที่อัตราการระ สารอินทรีย์ 4, 10, 15, 20, 25 และ 28 กิโลกรัมชีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อ วัน ที่สภาวะคงที่.....	103
ภาพที่ 4.38	เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดกรดไขมันระเหยเจลลี่ ที่อัตราการระ สารอินทรีย์ 4, 10, 15, 20, 25 และ 28 กิโลกรัมชีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อ วัน ที่สภาวะคงที่.....	104
ภาพที่ 4.39	ค่าพีเอชและสภาพค่าที่ อัตราการระสารอินทรีย์ 4 กิโลกรัมชีโอดีต่อ ลูกบาศก์เมตรต่อวัน	108
ภาพที่ 4.40	ค่าพีเอชและสภาพค่าที่ อัตราการระสารอินทรีย์ 10 กิโลกรัมชีโอดีต่อ ลูกบาศก์เมตรต่อวัน.....	108
ภาพที่ 4.41	พีเอชและสภาพค่าที่ อัตราการระสารอินทรีย์ 15 กิโลกรัมชีโอดีต่อ ลูกบาศก์เมตรต่อวัน.....	109
ภาพที่ 4.42	พีเอชและสภาพค่าที่ อัตราการระสารอินทรีย์ 20 กิโลกรัมชีโอดีต่อ ลูกบาศก์เมตรต่อวัน.....	109
ภาพที่ 4.43	ค่าพีเอชและสภาพค่าที่ อัตราการระสารอินทรีย์ 25 กิโลกรัมชีโอดีต่อ ลูกบาศก์เมตรต่อวัน.....	110
ภาพที่ 4.44	ค่าพีเอชและสภาพค่าที่ อัตราการระสารอินทรีย์ 28 กิโลกรัมชีโอดีต่อ ลูกบาศก์เมตรต่อวัน.....	110
ภาพที่ 4.45	เปรียบเทียบสภาพค่าในน้ำเข้าและออกจากระบบ ที่อัตราการระ สารอินทรีย์ 4, 10, 15, 20, 25 และ 28 กิโลกรัมชีโอดีต่อลูกบาศก์เมตร ต่อวัน ที่สภาวะคงที่.....	111
ภาพที่ 4.46	เปรียบเทียบอัตราส่วนกรดไขมันระเหยต่อสภาพค่าในน้ำออกจากระบบ ที่อัตราการระสารอินทรีย์ 4, 10, 15, 20, 25 และ 28 กิโลกรัมชีโอดีต่อ ลูกบาศก์เมตรต่อวัน ที่สภาวะคงที่.....	111
ภาพที่ 4.47	เปรียบเทียบค่าพีเอชในน้ำเข้าและออกจากระบบ ที่อัตราการระ สารอินทรีย์ 4, 10, 15, 20, 25 และ 28 กิโลกรัมชีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อ วัน ที่สภาวะคงที่.....	112

	หน้า	
ภาพที่ 4.48	เปรียบเทียบปริมาณการกำจัดของแข็งแขวนลอยระเหยเฉลี่ย ที่อัตรา การสารอินทรีย์ 4, 10, 15, 20, 25 และ 28 กิโลกรัมชีโอดีต่อลูกบาศก์ เมตรต่อวัน ที่สภาวะคง.....	114
ภาพที่ 4.49	เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอยระเหย ที่อัตรา การสารอินทรีย์ 4, 10, 15, 20, 25 และ 28 กิโลกรัมชีโอดีต่อลูกบาศก์ เมตรต่อวัน ที่สภาวะคงที่.....	115
ภาพที่ 4.50	เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดน้ำมันและไขมันที่อัตราการระ สารอินทรีย์ 15, 20, 25 และ 28 กิโลกรัมชีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน....	116
ภาพที่ 4.51	เปรียบเทียบอัตราการสร้างก๊าซชีวภาพและก๊าซมีเทนเฉลี่ยที่อัตราการระ สารอินทรีย์ 4, 10, 15, 20, 25 และ 28 กิโลกรัมชีโอดีต่อลูกบาศก์เมตร ต่อวัน.....	118
ภาพที่ 4.52	เปรียบเทียบประสิทธิภาพการสร้างก๊าซมีเทนเปรียบเทียบกับปริมาณ สารอินทรีย์ที่ถูกกำจัดเฉลี่ย ที่อัตราการสารอินทรีย์ 4, 10, 15, 20, 25 และ 28 กิโลกรัมชีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน.....	120
ภาพที่ 4.53	ลักษณะภายนอกของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ที่ใช้ในการทดลอง (กำลังขยาย × 85).....	123
ภาพที่ 4.54	ลักษณะชั้นต่างๆ ของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ที่ใช้ในการทดลอง (กำลังขยาย × 7,000).....	124

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ประเด็นด้านสิ่งแวดล้อมและพลังงานในปัจจุบันกำลังเป็นประเด็นที่ทั่วโลกทุกภาคส่วนต่างตื่นตัว ให้ความสำคัญจัดความสำคัญเป็นอันดับแรกๆ เนื่องจากส่งผลกระทบต่อทุกคนอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ พลังงานในรูปแบบต่างๆ ถือว่าเป็นสิ่งจำเป็นในการประกอบกิจกรรมต่างๆ เช่น การใช้น้ำมันปิโตรเลียมเป็นเชื้อเพลิงในยานพาหนะชนิดต่างๆ และโรงงานอุตสาหกรรม และการใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตไฟฟ้า เป็นต้น จากตัวอย่างดังกล่าวจะเห็นได้ว่าเชื้อเพลิงเหล่านั้นเป็นทรัพยากรที่ใช้แล้วหมดไปและใช้ระยะเวลายาวนานในการสร้างขึ้นมาทดแทน ของเสียที่เกิดขึ้นจากการใช้เชื้อเพลิงดังกล่าวปลดปล่อยมลพิษออกสู่สิ่งแวดล้อม และแหล่งของเชื้อเพลิงประเภทนี้ยังมีจำนวนจำกัดอีกด้วย ซึ่งคาดว่าแหล่งเชื้อเพลิงประเภทดังกล่าวย่อมจะลดลงและหมดไป จนไม่สามารถตอบสนองความต้องการใช้พลังงานที่มากขึ้นเรื่อยๆ ในอนาคต ดังนั้นจึงควรทำการศึกษาเพื่อหาแหล่งพลังงานทดแทน ซึ่งควรที่จะผลิตขึ้นได้ง่าย ผลิตได้อย่างต่อเนื่องและใช้ต้นทุนในการผลิตต่ำ ในปัจจุบันจึงเริ่มมีการผลิตพลังงานทดแทนจากของเสียประเภทต่างๆ เช่น ขยะ และน้ำเสีย เป็นต้น น้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มก็เป็นน้ำเสียประเภทหนึ่งที่มีลักษณะเฉพาะแตกต่างจากน้ำเสียทั่วไป โดยมีความเข้มข้นของค่าพารามิเตอร์ต่างๆ สูงมาก ซึ่งคุณสมบัติน้ำเสียจากกระบวนการสกัดน้ำมันปาล์มแบบมาตรฐานมีค่า บีโอดี (BOD), ซีโอดี (COD), ของแข็งแขวนลอย (SS) และ น้ำมันและไขมัน (O&G) ประมาณ 27, 52, 13 และ 9 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ (อุตสาหกรรม,กระทรวง.กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2540) และน้ำเสียจากโรงงานประเภทนี้แม้จะผ่านการบำบัดทางชีวภาพอย่างมีประสิทธิภาพแล้วน้ำทิ้งที่ได้ยังมีค่าต่างๆ สูงกว่าค่ามาตรฐานน้ำทิ้งโดยทั่วไป และเนื่องจากกฎหมายไทยในปัจจุบันได้คำนึงถึงสิ่งแวดล้อม ดังนั้น กรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรมจึงได้จัดทำข้อกำหนดขั้นต่ำสำหรับคุณภาพน้ำทิ้งของอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์มที่ปล่อยลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ แสดงดังตารางที่ 1.1 (อุตสาหกรรม,กระทรวง.กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2540)

ในปีพ.ศ. 2538 ประเทศไทยมีโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มทั้งหมด 49 โรงงาน เป็นโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มแบบมาตรฐาน 17 โรงงาน ซึ่งมีกำลังการผลิตรวมมากกว่าร้อยละ 60 ของกำลังการผลิตรวมทั้งหมด (อุตสาหกรรม,กระทรวง.กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2540) ในกระบวนการผลิตมีการใช้น้ำปริมาณมากจึงก่อให้เกิดน้ำเสียปริมาณมากตามไปด้วย ในปัจจุบันส่วนใหญ่จะใช้ระบบบำบัดน้ำเสียแบบบ่อหมักในการบำบัดน้ำเสียที่เกิดขึ้น ซึ่งใช้พื้นที่ในการก่อสร้างมากทำให้ค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างและการบำบัดน้ำเสียสูง ดังนั้นถ้าสามารถเลือกกระบวนการบำบัดน้ำเสียที่

ใช้พื้นที่น้อย มีประสิทธิภาพสูงในการบำบัดน้ำเสีย และยังได้พลังงานทดแทนมาใช้ในรูปก๊าซชีวภาพ จะช่วยให้การบำบัดน้ำเสียเกิดความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์มากขึ้น

ตารางที่ 1.1 ข้อกำหนดขั้นต่ำสุดสำหรับน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มที่จะปล่อยสู่แหล่งน้ำสาธารณะ (อุตสาหกรรม,กระทรวง.กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2540)

ปัจจัย	ค่ากำหนดขั้นต่ำสุด
บีโอดี	< 100 มิลลิกรัมต่อลิตร
ซีโอดี	< 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร
ของแข็งแขวนลอย	< 150 มิลลิกรัมต่อลิตร
น้ำมันและไขมัน	< 25 มิลลิกรัมต่อลิตร
ไนโตรเจนทั้งหมด	< 50 มิลลิกรัมต่อลิตร
พีเอช	5 ถึง 9
อุณหภูมิ	< 40 องศาเซลเซียส

การศึกษาครั้งนี้ จึงได้เลือกกระบวนการทางชีวภาพ แบบไร้อากาศสองขั้นตอนเพื่อให้จุลินทรีย์ชนิดไร้อากาศ (anaerobic microorganism) ทำหน้าที่ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสีย และเปลี่ยนรูปสารอินทรีย์เหล่านั้นให้กลายเป็นกรดระเหย (volatile acid : VA) และกรดอะซิติก (CH_3COOH) ในถังแรกด้วยระบบเฮชยูเอสบี (HUSB) และเปลี่ยนเป็นก๊าซมีเทน (CH_4) ในถังที่สอง ซึ่งเป็นระบบยูเอเอสบี (UASB)

ซึ่งกระบวนการสองขั้นตอนดังกล่าวยังช่วยลดปัญหาการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีการบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม ซึ่งปัญหาส่วนใหญ่เป็นผลมาจากการที่น้ำเสียดังกล่าวมีการปนเปื้อนของของแข็งแขวนลอยและไขมันในปริมาณที่สูง ซึ่งส่งผลให้เกิดการชะล้างตะกอนจุลินทรีย์ออกจากระบบสูงมากจนถึงปฏิบัติการไม่สามารถเดินระบบได้ รวมถึงก่อปัญหาในกระบวนการเริ่มต้นเดินระบบของ ถังปฏิกริยาเฮชยูเอสบี ดังนั้นกระบวนการเปลี่ยนรูปของแข็งแขวนลอยและไขมันไปเป็นกรดอินทรีย์ระเหยที่มีประสิทธิภาพ จึงเป็นขั้นตอนที่สำคัญที่จะช่วยอำนวยความสะดวกในการเดินระบบยูเอเอสบี เป็นไปได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการสร้างกรดระเหย และประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งแขวนลอยระเหย (volatile suspended solid: VSS) ของถังสร้างกรดแบบเอชยูเอสบี (Hydrolysis Upflow Sludge Blanket ; HUSB)
2. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม ด้วยระบบบำบัดน้ำเสีย แบบไร้อากาศสองขั้นตอนที่มีถังสร้างกรดต่ออนุกรมด้วยถังสร้างก๊าซมีเทนระบบยูเอเอสบี (Upflow Anaerobic Sludge Blanket ; UASB)
3. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ (biogas) ซึ่งเป็นผลพลอยได้ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการแบบไร้อากาศสองขั้นตอน

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. ใช้ระบบบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการแบบไร้อากาศสองขั้นตอนระดับห้องปฏิบัติการที่มีถังสร้างกรดแบบเอชยูเอสบี ทรงกระบอก สูง 0.95 เมตร เส้นผ่าศูนย์กลาง 0.17 เมตร ความจุประมาณ 0.022 ลูกบาศก์เมตร ต่ออนุกรมกับระบบยูเอเอสบี ทรงกระบอก สูง 1.00 เมตร เส้นผ่าศูนย์กลาง 0.055 เมตร ความจุ 3.139 ลิตร
2. ใช้หัวเชื้อตะกอนเมล็ดจุลินทรีย์ (granulation seed) ในระบบยูเอเอสบี ของบริษัท เสริมสุข (ปทุมธานี) จำกัด ในการเริ่มเดินระบบ (start up)
3. ตัวอย่างน้ำเสียที่ใช้ทดลองเก็บจากจุดปล่อยน้ำเสียของกระบวนการผลิตน้ำมันปาล์มดิบ (Crude Palm Oil ; CPO) จากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม บริษัท ชุมพรอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์ม จำกัด (มหาชน) ซึ่งจะทำการเก็บตัวอย่างน้ำเสียครั้งละ 100 ลิตร และทำการเก็บรักษาตัวอย่างในห้องเย็นที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส
4. ทำการทดลองทุกขั้นตอนตลอดการทดลองที่อุณหภูมิห้อง อุณหภูมิประมาณ 30-36 องศาเซลเซียส

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้แนวทางในการผลิตก๊าซชีวภาพเพื่อเป็นพลังงานทดแทนจากของเสียประเภทน้ำเสียที่มีความเข้มข้นสูง ซึ่งเป็นการนำของเสียมาใช้ให้เกิดประโยชน์และใช้ทรัพยากรได้อย่างคุ้มค่า
2. ได้แนวทางในการสร้างระบบบำบัดน้ำเสียประสิทธิภาพสูงในอนาคต
3. ได้ข้อมูลเบื้องต้นสำหรับการออกแบบระบบบำบัดแบบยูเอเอสบี ขึ้นโรงงานนำทาง (pilot plant) ที่มีถังสร้างกรดแบบเอชยูเอสบี

บทที่ 2

ทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การบำบัดทางชีวภาพถูกใช้อย่างกว้างขวางในการกำจัดเท่าๆ กับการใช้ทำให้คงตัวบางส่วน หรือโดยสมบูรณ์ของสับสเตรท (substrate) ที่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้ในน้ำเสีย ถึงแม้ว่าการอธิบายลักษณะของของเสียส่วนใหญ่จะมุ่งพิจารณาปริมาณสารอินทรีย์ที่มีอยู่ก็ตาม

จุดประสงค์ของการบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพ คือ การรวมตัว และกำจัดของแข็งคอลลอยด์ (colloids) ที่ไม่สามารถตกตะกอนได้ และทำให้สารอินทรีย์คงตัว สำหรับน้ำเสียที่เกิดจากการเกษตร มีจุดประสงค์ในการกำจัดสารอาหาร โดยเฉพาะ ไนโตรเจน และฟอสฟอรัส ซึ่งสามารถกระตุ้นการเจริญเติบโตของพืชน้ำ สำหรับน้ำเสียจากอุตสาหกรรมมีจุดประสงค์เพื่อกำจัด หรือลดการปนเปื้อนของสารประกอบอินทรีย์และสารประกอบอนินทรีย์ (Tchobanoglous และBurton, 1991)

เป็นระยะเวลายาวนานมาแล้วที่เชื่อกันว่าการย่อยสลายแบบไร้อากาศ (anaerobic digestion) เกิดขึ้นช้าและประยุกต์ใช้ได้เพียงจำกัดอย่างมากกับสารประกอบอินทรีย์ต่างๆ ซึ่งอคติที่เกิดขึ้นเป็นสิ่งที่ไร้เหตุผล การจัดกลุ่มทางชีวเคมีในจุลินทรีย์ไร้อากาศเทียบเคียงได้กับจุลินทรีย์ใช้ออกซิเจน ปัญหาจึงไม่ได้เกิดจากกิจกรรมทางชีววิทยาแต่เกิดจากเวลาที่เพิ่มขึ้นเท่าตัว (Aivasidis และคณะ, 1988 อ้างถึงใน Speece, 1996)

เมื่อมีข้อบ่งชี้ในการบำบัดฟื้นฟูและการปล่อยน้ำเสียเกิดขึ้น ความเป็นไปได้ในทางเศรษฐศาสตร์และการปฏิบัติในการบำบัดจึงถูกนำมาพิจารณา เนื่องจากพิสูจน์ได้ว่าความจุในการย่อยสลายสารประกอบที่เป็นพิษดีเท่ากับสารมลพิษโดยทั่วไป ส่วนมากสำหรับน้ำเสียอุตสาหกรรมแล้ว เทคโนโลยีแบบไร้อากาศในทุกวันนี้มีความก้าวหน้า มีประโยชน์ในระดับสูงเพื่อฟื้นฟูน้ำเสียที่ออกมาจากอุตสาหกรรมต่างๆ การบำบัดแบบไร้อากาศกับน้ำเสียที่มีความเข้มข้นปานกลางและความเข้มข้นสูงซึ่งในปัจจุบันได้รับการยอมรับว่าเป็นเทคโนโลยีที่ได้รับการพิสูจน์แล้ว (Wheatley, 1990 อ้างถึงใน Speece, 1996)

เหตุผลพื้นฐานที่ทำให้กระบวนการบำบัดแบบไร้อากาศได้รับความสนใจนั้น พิจารณาได้จากข้อได้เปรียบ-เสียเปรียบของกระบวนการเหล่านี้

2.1 ข้อได้เปรียบ-เสียเปรียบของกระบวนการบำบัดแบบไร้อากาศ

ข้อได้เปรียบของกระบวนการบำบัดแบบไร้อากาศ พิจารณาจากด้านพลังงาน การผลิตมวลชีวภาพปริมาณต่ำ มีความต้องการสารอาหารน้อยกว่า และรับค่าภาระได้สูงกว่า นอกจากนี้เมื่อ

พิจารณาด้านพลังงานจะพบว่ากระบวนการไร้อากาศมีการผลิตพลังงานสุทธิมากกว่าการนำไปใช้
เช่นที่เกิดขึ้นในกระบวนการใช้ออกซิเจน

ข้อได้เปรียบของกระบวนการไร้อากาศ

- ต้องการพลังงานต่ำในการทำงานของกระบวนการ
- มีการผลิตสลัดจ์ (sludge) ชีวภาพปริมาณต่ำ จึงช่วยลดค่าใช้จ่ายในการกำจัดมวลชีวภาพที่เกิดขึ้น
- ต้องการสารอาหารปริมาณต่ำ จึงช่วยลดค่าใช้จ่ายในการเติมสารอาหารเสริมไนโตรเจน และฟอสฟอรัส
- สามารถผลิตก๊าซมีเทน (CH_4) ซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดพลังงานทดแทน เป็นการอนุรักษ์พลังงานทำให้เกิดความคุ้มค่าทางนิเวศวิทยาและทางเศรษฐศาสตร์
- ใช้ถึงปฏิกริยาขนาดเล็กกว่า จึงเป็นการลดพื้นที่ในการติดตั้ง
- สารประกอบอินทรีย์ส่วนใหญ่ที่ได้รับการปรับสภาพจนคุ้นเคยแล้วสามารถเปลี่ยนรูปได้ และสามารถย่อยสลายสารที่ไม่สามารถย่อยสลายด้วยกระบวนการใช้ออกซิเจนได้
- ไม่ต้องการความเข้มงวดในการดูแลการเดินระบบมากนัก
- หลีกเลี่ยงการเกิดฟองบริเวณผิวหน้าของน้ำเสีย
- กระบวนการบำบัดมีความคงตัวและสามารถบำบัดเป็นครั้งคราวไม่ต่อเนื่องได้
- มีการตอบสนองต่อสับสเตรทที่ป้อนเข้าสู่ระบบได้อย่างรวดเร็ว หลังจากหยุดป้อนเป็นระยะเวลายาวนาน

ข้อเสียเปรียบของกระบวนการไร้อากาศ

- ใช้ระยะเวลาในการเริ่มต้นเดินระบบยาวนาน เพื่อพัฒนามวลชีวภาพที่จำเป็น
- อาจมีความต้องการสภาพด่าง (alkalinity) และ/หรือ อีออน (ions) พิเศษเพิ่มเติม
- ความเป็นไปได้ในการสร้างสภาพด่าง มีปริมาณไม่เพียงพอในน้ำเสียที่เจือจาง หรือน้ำเสียคาร์โบไฮเดรต
- คุณภาพน้ำที่ออกจากระบบอาจจะยังไม่ดีเพียงพอที่จะปล่อยออกสู่แหล่งน้ำ ในบางกรณีอาจต้องการกระบวนการบำบัดต่อเนื่องด้วยกระบวนการบำบัดแบบใช้ออกซิเจนเพื่อให้ได้ค่าการปลดปล่อย (discharge) ที่ต้องการ
- ไม่สามารถกำจัดไนโตรเจน และฟอสฟอรัสชีวภาพได้ และไม่สามารถเกิดปฏิกริยาไนตริฟิเคชัน (nitrification) ได้
- มีความไวมาก ต่ออิทธิพลของอุณหภูมิที่ต่ำลงต่ออัตราการเกิดปฏิกริยา
- มีความไวต่อการรบกวนของสารพิษ
- Chlorinated aliphatics มีความเป็นพิษสูงต่อจุลินทรีย์สร้างก๊าซมีเทน (methanogens)

- มีการสร้างกลิ่นและก๊าซที่ทำให้เกิดการกัดกร่อน จากซัลไฟด์ (H_2S) และกลิ่นที่สร้างขึ้นมาจาก ซัลเฟต (SO_4^{2-}) ที่ถูกป้อนเข้าไปในระบบ
- จากน้ำเสียที่มีความเข้มข้นต่ำไม่เพียงพอต่อการสร้างก๊าซมีเทนจึงต้องเตรียมให้ความร้อนเพิ่มขึ้นถึงอุณหภูมิที่เหมาะสมที่ 35 องศาเซลเซียส
- ต้องการความเข้มข้นของแอมโมเนีย (NH_3) สูง (40-70 มิลลิกรัมต่อลิตร) สำหรับค่าสูงสุดของกิจกรรมของจุลินทรีย์

การเปรียบเทียบเทคโนโลยีทางชีวภาพแบบไร้อากาศกับแบบใช้ออกซิเจน (Speece, 1996)

- อัตราการระสาดอินทรีย์ (organic loading rate) ของกระบวนการไร้อากาศสูงกว่ากระบวนการใช้ออกซิเจน 5-10 เท่า
- อัตราการสังเคราะห์มวลชีวภาพของกระบวนการไร้อากาศเกิดเพียงร้อยละ 5-20 ของกระบวนการใช้ออกซิเจน
- ความต้องการสารอาหารมีเพียงร้อยละ 5-20 ของกระบวนการใช้ออกซิเจน
- มวลชีวภาพแบบไร้อากาศเก็บรักษาได้นานนับเดือนหรือนับปี โดยไม่ทำให้การทำงานเสื่อมสภาพมาก
- กระบวนการไร้อากาศไม่ต้องการพลังงานในการเติมอากาศเหมือนดังเช่นกระบวนการใช้ออกซิเจน ที่ต้องการพลังงาน 500-2,000 กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อ 1,000 กิโลกรัมซีโอดี (kwhr/ 1,000 kgCOD)
- กระบวนการไร้อากาศผลิตก๊าซมีเทน 12,000,000 บีทียูต่อ 1,000 กิโลกรัมซีโอดีที่ถูกกำจัด (BTU/ 1,000 kgCOD_{removed})

2.2 หลักการพื้นฐาน

2.2.1 กลไกการย่อยสลายสารอินทรีย์ของกระบวนการไร้อากาศ

การทำงานของกลุ่มจุลินทรีย์ในกระบวนการบำบัดแบบไร้อากาศ เป็นการทำงาน of กระบวนการต่างๆ ร่วมกันซึ่งมีความเกี่ยวข้องกับจุลินทรีย์ในหลายระดับชั้น (class) และสารตัวกลาง (intermediates) หลายขั้นตอน

กระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศเกิดขึ้น 3 ขั้นตอน ตามลำดับ ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 กระบวนการไฮโดรไลซิส (Hydrolysis)

กระบวนการไฮโดรไลซิส เป็นกระบวนการเปลี่ยนสารประกอบโมเลกุลขนาดใหญ่ เช่น คาร์โบไฮเดรต โปรตีน และไขมัน ให้กลายเป็นสารประกอบที่มีโมเลกุลขนาดเล็กลง เช่น น้ำตาล กรดอะมิโน (amiono acid) และกรดไขมัน (fatty acid) ตามลำดับ เพื่อให้จุลินทรีย์ดูดซึม

เข้าสู่เซลล์ได้ โดยจุลินทรีย์กลุ่มไฮโดรไลซิงแบคทีเรีย (hydrolyzing bacteria) จะผลิตเอนไซม์และปล่อยเอนไซม์ออกมาเพื่อเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสในกระบวนการย่อยสลายภายนอกเซลล์ ตัวอย่างเช่นจุลินทรีย์จะปล่อยเอนไซม์ เซลลูเลส (cellulase) ย่อยสลายเซลลูโลส (cellulose), ไลเปส (lipase) ย่อยสลายไขมันให้กลายเป็นกรดไขมันระเหยสายสั้น (smaller chained fatty acids), โปรตีเอส (protease) ย่อยสลายโปรตีนให้กลายเป็นกรดอะมิโน (amino acids) ซึ่งกลุ่มจุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้องกับการสร้างกรดอินทรีย์ต่างๆ แสดงดังตารางที่ 2.1 ในการย่อยสลายนั้นสารจำพวกโพลีเมอร์จะมีอัตราการไฮโดรไลซิสช้าลง เช่น โพลีแซคคาไรด์ (polysaccharides) ถูกไฮโดรไลซิสได้ช้ากว่ากลูโคส ซึ่งโดยทั่วไปจะเป็นขั้นตอนจำกัดอัตราปฏิกิริยาของกระบวนการหมักคาร์โบไฮเดรต เช่นเดียวกับการไฮโดรไลซิสเซลลูโลส มักจะเป็นขั้นตอนที่ช้าที่สุดในกระบวนการย่อยสลาย เพราะฉะนั้นการทำงานของแบคทีเรียในขั้นตอนที่หนึ่งนี้จะช้ากว่าเมื่อเปรียบเทียบกับขั้นตอนที่สองและสาม (Chawla, 1986)

ขั้นตอนที่ 2 กระบวนการสร้างกรด (Acidogenesis) และการสร้างกรดอะซิติก (Acetogenesis)

กระบวนการสร้างกรด คือ ปฏิกิริยาการย่อยสลายสารประกอบโมเลกุลเล็ก ด้วยกระบวนการหมัก (fermentation) โดยจุลินทรีย์สร้างกรด โดยการดูดซึมผลผลิตของขั้นตอนที่ 1 เข้าไปในเซลล์เพื่อใช้เป็นอาหารและถูกเปลี่ยนไปเป็นกรดไขมันระเหย (Volatile Fatty Acid : VFA) เช่น อะซิติก (CH_3COOH) บิวไทริก ($\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CH}_2\text{COOH}$) และ โพรไพโอนิก ($\text{CH}_3\text{CH}_2\text{COOH}$) เป็นต้น นอกจากผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่ที่เป็นกรดอินทรีย์แล้วยังสามารถพบผลิตภัณฑ์ชนิดอื่นๆ ด้วย เช่น ก๊าซไฮโดรเจน (H_2) กับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ขึ้นอยู่กับชนิดของจุลินทรีย์และสภาวะแวดล้อมของปฏิกิริยา ทั้งนี้ปัจจัยที่เกี่ยวข้อง 2 ประการ คือ ชนิดของสับสเตรทและความดันพาร์เชียลของก๊าซไฮโดรเจน (hydrogen partial pressure) ที่เกิดขึ้น เช่น กรดไขมันชนิดสายยาวถูกย่อยสลายกลายเป็นอะซิติก และก๊าซไฮโดรเจนภายใต้สภาวะที่ความดันพาร์เชียลของก๊าซไฮโดรเจนมีค่าต่ำ แต่จะย่อยสลายกลายเป็นบิวไทริก และ โพรไพโอนิก เมื่ออยู่ภายใต้สภาวะที่ก๊าซไฮโดรเจนมีความดันพาร์เชียลสูง

จากนั้น กรดอินทรีย์ที่เกิดขึ้น จะเข้าสู่กระบวนการสร้างกรดอะซิติก คือ ปฏิกิริยาการย่อยสลายกรดไขมันระเหยที่เกิดจากกระบวนการสร้างกรด ให้กลายเป็นกรดอะซิติก โดยการทำงานของจุลินทรีย์กลุ่มอะซิโตเจนิค (acitogenics) หรือเรียกว่า จุลินทรีย์สร้างกรดอะซิติก ซึ่งมีบทบาทสำคัญในการเป็นตัวเชื่อมระหว่างขั้นตอนการสร้างกรดและขั้นตอนการสร้างก๊าซมีเทน เนื่องจากการสร้างก๊าซมีเทนโดยจุลินทรีย์สร้างก๊าซมีเทนนั้นต้องการสับสเตรทที่มีความเฉพาะเจาะจงมาก ได้แก่ อะซิติก ฟอรั่มิก (HCOOH) ก๊าซไฮโดรเจน เมทานอล (CH_3OH) และเมทิลามีน (CH_3NH_2) สับสเตรทที่เป็นกรดไขมันระเหยดังกล่าวจะต้องมีคาร์บอนไม่เกิน 2 อะตอม

โดยต้องมีสภาวะแวดล้อมที่เหมาะสมสำหรับจุลินทรีย์อะซิโตเจนิก ซึ่งในขั้นตอนนี้ จะเกิดขึ้นได้เฉพาะในสภาวะที่ไฮโดรเจนมีความดันพาร์เซิลต่ำเท่านั้น

จุลินทรีย์กลุ่มที่สามารถสร้างก๊าซไฮโดรเจนได้ จะมีความสามารถในการย่อยสลายกรดไขมันระเหย ที่มีคาร์บอนมากกว่า 2 อะตอม ให้กลายเป็นกรดอะซิติก ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และก๊าซไฮโดรเจน ภายใต้สภาวะที่ก๊าซไฮโดรเจนมีความดันพาร์เซิลต่ำกว่า 2×10^{-3} บรรยากาศ และต่ำกว่า 9×10^{-3} บรรยากาศ สำหรับการย่อยสลายกรดบิวไทรริกและกรดโพรไพโอนิก ตามลำดับ (มันสิน ตันฑุลเวศม์, 2542) ดังสมการที่ (2.1) และ (2.2)

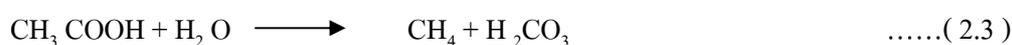


ขั้นตอนที่ 3 กระบวนการสร้างก๊าซมีเทน (methanogenesis)

กระบวนการสร้างก๊าซมีเทน คือ ปฏิกิริยาการเปลี่ยนกรดอะซิติก หรือก๊าซไฮโดรเจน ไปเป็นก๊าซมีเทนภายใต้สภาวะที่ไร้อากาศอย่างเด็ดขาด โดยจุลินทรีย์กลุ่มสร้างก๊าซมีเทนจุลินทรีย์ในกลุ่มนี้มีอัตราการเจริญเติบโตช้ามาก และมีความไวต่อสภาวะแวดล้อมอย่างมาก ไม่อาจเจริญเติบโตได้ดี เมื่ออยู่ในสภาวะแวดล้อมนอกช่วงค่าพีเอช (pH) 6.8-9.2 (สุบัติน นิมรัตน์, 2548) สามารถใช้สารตั้งต้นเพียงบางชนิดที่มีคาร์บอนเพียง 1 หรือ 2 คาร์บอน เท่านั้น ดังนั้น จุลินทรีย์กลุ่มนี้จึงต้องอาศัยจุลินทรีย์ชนิดอื่นๆ เปลี่ยนกรดไขมันระเหยต่างๆ ให้เป็นกรดอะซิติก หรือก๊าซไฮโดรเจนก่อน จึงจะสามารถสร้างก๊าซมีเทนได้ นอกจากนี้ยังสามารถใช้เมทานอล ฟอรั่มิก เป็นสับสเตรทในการสร้างก๊าซมีเทนได้อีกด้วย

สามารถจำแนกจุลินทรีย์ทำหน้าที่สร้างก๊าซมีเทนได้เป็น 3 กลุ่ม ตามประเภทของสารตั้งต้น ดังนี้

1) จุลินทรีย์กลุ่มที่สร้างก๊าซมีเทนจากกรดอะซิติก (Obligate Acetoclastic Methanogen) จุลินทรีย์กลุ่มนี้สามารถบริโภคอะซิติกเป็นแหล่งคาร์บอนได้เพียงอย่างเดียว แสดงดังสมการที่ (2.3)



2) จุลินทรีย์กลุ่มที่สร้างก๊าซมีเทนจากก๊าซไฮโดรเจน (Obligate hydrogenotrophic methanogen หรือ H_2 Utilizer) จุลินทรีย์กลุ่มนี้สามารถสร้างก๊าซมีเทนโดยใช้ก๊าซไฮโดรเจนเป็นแหล่งพลังงานและใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นแหล่งคาร์บอน แสดงดังสมการที่ (2.4)



นอกจากนี้ ยังสามารถใช้ฟอร์มิกเป็นสารตั้งต้นได้ เนื่องจากฟอร์มิก สามารถเปลี่ยนเป็นก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ได้ง่าย (สุบัญญัติ นิรมรัตน์, 2548) แสดงดังสมการที่ (2.5)



3) จุลินทรีย์กลุ่มที่สร้างก๊าซมีเทนจากก๊าซไฮโดรเจน หรืออะซิติก (Hydrogenotrophic / acetoclastic methanogen) จุลินทรีย์กลุ่มนี้สามารถใช้ทั้งกรดอะซิติก และก๊าซไฮโดรเจน เป็นสารตั้งต้นในการสร้างก๊าซมีเทน แต่จะชอบใช้ก๊าซไฮโดรเจนเป็นสารตั้งต้นมากกว่า ตัวอย่างการจำแนกจุลินทรีย์กลุ่มที่สร้างก๊าซมีเทน แสดงดัง ตารางที่ 2.2 และตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.1 แบคทีเรียสร้างกรดอินทรีย์ (Organic acids producing bacteria) (Chawla, 1986)

Bacteria	pH	Temp. ($^{\circ}C$)	Products formed
<i>Bacillus cereus</i>	5.2	25-30	acetic , lactic
<i>Bacillus knelfelkampii</i>	5.2-8.0	25-35	acetic , lactic
<i>Bacillus megaterium</i>	5.2-7.5	28-35	acetic , lactic
<i>Bacteriodes succinogenes</i>	5.2-7.5	25-35	acetic , succinic
<i>Clostridium carnofoetidum</i>	5.0-8.5	25-37	
<i>Clostridium cellobioparum</i>	5.0-8.5	36-38	formic , acetic , lactic , ethanol , CO_2
<i>Clostridium dissolvens</i>	5.0-8.5	35-51	formic , acetic , lactic , succinic
<i>Clostridium theymocellulaseum</i>	5.0-8.5	55-65	formic , acetic , lactic , succinic , ethanol
<i>Pseudomonas formicans</i>	-	33-42	formic , acetic , lactic , succinic , ethanol
<i>Ruminococcus flavifaciens</i>	-	33-38	formic , acetic , lactic , succinic

ตารางที่ 2.2 การจำแนกชนิดของแบคทีเรียสร้างก๊าซมีเทน (Bitton, 1994 อ้างถึงใน สุบัญญัติ นิมรัตน์, 2548)

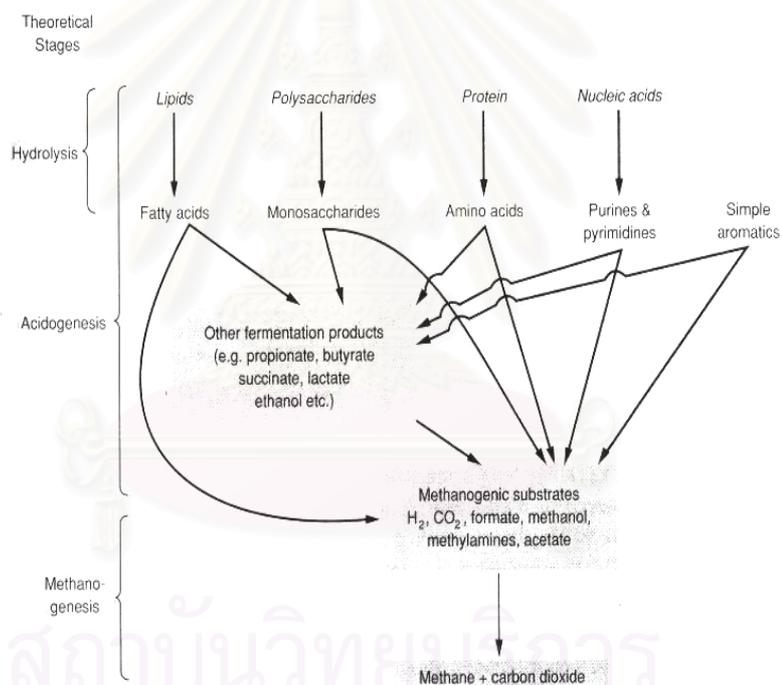
อันดับของแบคทีเรียสร้าง ก๊าซมีเทน (Order)	ตระกูลของแบคทีเรีย สร้างก๊าซมีเทน (Family)	สกุลของแบคทีเรียสร้าง ก๊าซมีเทน (Genus)	ชนิดของแบคทีเรียสร้าง ก๊าซมีเทน (Species)
Methanobacteriales	Methanobacteriaceae	<i>Methanobacterium</i>	<i>M. formicum</i> <i>M. bryanri</i> <i>M.thermoautotrophicum</i> <i>M.ruminantium</i>
		<i>Methanobrevibacter</i>	<i>M. arboriphilus</i> <i>M. smithii</i> <i>M. vannielli</i>
Methanococcales	Methanococcaceae	<i>Methanococcus</i> <i>Methanomicrobium</i>	<i>M. voltae</i> <i>M. mobile</i>
Methanomicrobiales	Methanomicrobiaceae	<i>Methanogenium</i>	<i>M. cariaci</i> <i>M. marisnigri</i>
		<i>Methanosprillum</i>	<i>M. hungatei</i> <i>M. barkeri</i>
	Methanosarcinaceae	<i>Methanosarcina</i>	<i>M. mазie</i>

ตารางที่ 2.3 ชนิดและแหล่งที่อยู่ของแบคทีเรียสร้างก๊าซมีเทน (สุบัญญัติ นิมรัตน์, 2548)

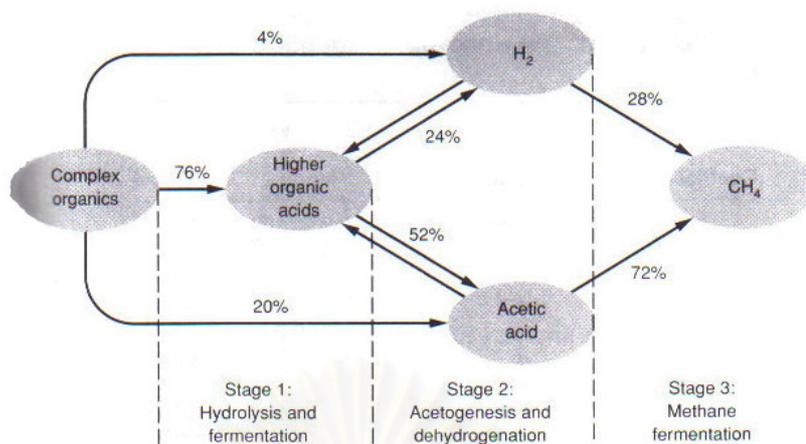
ชนิดของแบคทีเรีย	สารตั้งต้น	ชนิดของแบคทีเรีย	สารตั้งต้น
<i>Methanobacterium bryantii</i>	H ₂	<i>Methanogenium cariaci</i>	H ₂ และ HCOOH
<i>M. formicum</i>	H ₂ และ HCOOH	<i>M. marisnigi</i>	H ₂ และ HCOOH
<i>M. thermoautotrophicum</i>	H ₂	<i>M. tatii</i>	H ₂ และ HCOOH
<i>M. alcaliphilum</i>	H ₂	<i>M. olentagyi</i>	H ₂
<i>Methanobrevibacter arboriphilus</i>	H ₂	<i>M. thermophilicum</i>	H ₂ และ HCOOH
<i>M. ruminantium</i>	H ₂ และ HCOOH	<i>M. bourgense</i>	H ₂ และ HCOOH
<i>M. smithii</i>	H ₂ และ HCOOH	<i>M. aggregans</i>	H ₂ และ HCOOH
<i>Methanococcus vannilii</i>	H ₂ และ HCOOH	<i>Methanococcoides</i>	CH ₃ NH ₂ และ
<i>M. voltae</i>	H ₂ และ HCOOH	<i>methylutens</i>	CH ₃ OH
<i>M. deltae</i>	H ₂ และ HCOOH	<i>Methanotherix soehngnii</i>	CH ₃ COOH
<i>M. maripaludis</i>	H ₂ และ HCOOH	<i>M. concilii</i>	CH ₃ COOH

ตารางที่ 2.3 (ต่อ) ชนิดและแหล่งที่อยู่ของแบคทีเรียสร้างก๊าซมีเทน (ดูบันทึก นิมรัตน์, 2548)

ชนิดของแบคทีเรีย	สารตั้งต้น	ชนิดของแบคทีเรีย	สารตั้งต้น
<i>M. jannaschii</i>	H ₂	<i>Methanothermus fevidus</i>	H ₂
<i>M. thermolithoautotrophicus</i>	H ₂ และ HCOOH		และ(CH ₃) ₂ NH
<i>M. frisius</i>	H ₂ , CH ₃ OH, CH ₃ NH ₂ และ (CH ₃) ₃ N	<i>Methanosarcina barkeri</i>	CH ₃ OH, CH ₃ COOH
<i>Methanomicrbium mobile</i>	H ₂ และ HCOOH		



ภาพที่ 2.1 กระบวนการไร้อากาศ (Tchobanoglous และBurton, 1991)



ภาพที่ 2.2 การส่งผ่านพลังงานในแต่ละขั้นตอนของกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศ (Tchobanoglous และBurton, 1991)

ในกระบวนการบำบัดทางชีววิทยานั้นการเจริญเติบโตของเซลล์จะเกิดขึ้นไปพร้อมกับการออกซิเดชัน (oxidation) ของสารประกอบอินทรีย์หรือสารประกอบอินทรีย์ อัตราส่วนของปริมาณการสร้างมวลชีวภาพต่อปริมาณการบริโภคสับเสตรท (กรัมของมวลชีวภาพต่อกรัมของกรดไขมันระเหย) (g biomass/g VFAs) หมายถึง ผลผลิตมวลชีวภาพ (biomass yield) หรือโดยทั่วไปหมายถึง ความสัมพันธ์ของการให้อิเล็กตรอน (electron donor used)

$$\text{Biomass Yield } Y = \frac{\text{g biomass produced}}{\text{g substrate utilized (i.e, consumed)}} \quad \dots\dots(2.6)$$

สำหรับการย่อยสลายของกรดไขมันระเหย (VFAs) แบบไร้อากาศเพื่อสร้างก๊าซมีเทน ผลผลิต (yield) จะถูกกล่าวถึงในรูป g biomass / g VFAs ที่ใช้ไป ซึ่งเป็นความสัมพันธ์เชิงปริมาณกับปริมาณสารประกอบที่ใช้ไป

สำหรับการบำบัดแบบใช้ออกซิเจน หรือไร้อากาศ ของน้ำเสียจากชุมชนและอุตสาหกรรม ซึ่งมีปริมาณสารประกอบอินทรีย์จำนวนมาก ผลผลิตจะอยู่บนพื้นฐานของพารามิเตอร์ที่สามารถวัดได้ ซึ่งสะท้อนถึงการบริโภคสารประกอบอินทรีย์ทั้งหมด เช่น ซีโอดี (COD) หรือ บีโอดี (BOD) เป็นต้น ดังนั้นผลผลิตอาจอยู่ในรูป กรัมของมวลชีวภาพต่อกรัมของซีโอดีที่ถูกกำจัด (g biomass / g COD_{removed}) หรือ กรัมของมวลชีวภาพต่อกรัมของบีโอดีที่ถูกกำจัด (g biomass / g BOD_{removed}) (Tchobanoglous และBurton, 1991)

2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ

2.3.1 อุณหภูมิ

การย่อยสลายสารอินทรีย์ในกระบวนการไร้อากาศนั้น อุณหภูมิที่เหมาะสมมีอยู่ 2 ช่วง คือ ช่วงการทำงานของ มีโซฟิลิกแบคทีเรีย (mesophilic Bacteria) ซึ่งมีอุณหภูมิอยู่ในช่วง 30-40 องศาเซลเซียส และช่วงการทำงานของเทอร์โมฟิลิกแบคทีเรีย (thermophilic Bacteria) ซึ่งมีอุณหภูมิอยู่ในช่วง 45-55 องศาเซลเซียส โดยอุณหภูมินั้นจะมีผลต่อการสร้างก๊าซของแบคทีเรีย การลดหรือเพิ่มอุณหภูมิแม้เพียง 2-3 องศาเซลเซียส จะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงก๊าซมีเทนเป็นอย่างมาก (อุตสาหกรรม, กระทรวง. กรมโรงงานอุตสาหกรรมและสมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย, 2545) มีรายงานว่า กระบวนการสร้างก๊าซมีเทนสามารถเกิดขึ้นได้ในช่วงอุณหภูมิ 4-100 องศาเซลเซียส ซึ่งมีความเกี่ยวข้องกับชนิดแบคทีเรียสร้างก๊าซมีเทน (Methanogenic species) หลากหลายชนิด ซึ่งโดยทั่วไปแล้วถึงปฏิกิริยาแบบไร้อากาศจะเดินระบบ ในช่วงการทำงานแบบมีโซฟิลิก อุณหภูมิ 30-37 องศาเซลเซียส แต่ถ้าการทำงานอยู่ในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่านี้ จะต้องใช้ระยะเวลาสัมผัสนานขึ้น (longer contact times) และต้องการมวลชีวภาพมากขึ้น และเมื่ออุณหภูมิลดต่ำลงความเข้มข้นของกรดระเหย (volatile acid) มักจะเพิ่มขึ้น เพราะ อัตราการเมแทบอลิซึม (metabolism rate) ของแบคทีเรียสร้างกรดได้รับผลกระทบต่ำกว่าแบคทีเรียสร้างก๊าซมีเทน การเพิ่มขึ้นของกรดไขมันระเหย จากกรณีนี้ มีความเป็นไปได้ที่ระบบจะต้องการ ความจุบัฟเฟอร์ (buffer capacity) เพิ่มขึ้น เพื่อให้สอดคล้องกับการลดลงของค่าพีเอชอย่างรุนแรง ดังนั้น การลดลงของอุณหภูมิจึงทำให้เกิดผลสะท้อนรุนแรงมากในการเดินระบบ แทบจะทุกค่าความจุสูงสุด (maximum capacity) (Speece, 1996) ช่วงอุณหภูมิของถึงปฏิกิริยาที่นิยมใช้สำหรับการเดินระบบอยู่ในช่วง 25-35 องศาเซลเซียส ซึ่งจะช่วยสนับสนุนให้เกิดปฏิกิริยาทางชีวภาพสูงสุด และทำให้การบำบัดมีเสถียรภาพมากขึ้น (Tchobanoglous, Burton และ Stensel, 2004)

2.3.2 ค่าพีเอช

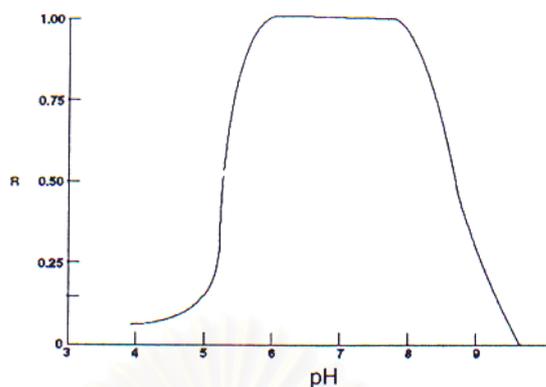
ค่าพีเอชเป็นปัจจัยบ่งชี้สภาพภายในของกระบวนการไร้อากาศได้ แต่การเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอช เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของกรดระเหย จะเกิดขึ้นซ้ำ ดังนั้น ค่าพีเอช จึงเป็นตัวบ่งชี้ที่แสดงผลออกมาได้ซ้ำสำหรับการแก้ไขสถานะในระบบบำบัดแบบไร้อากาศ เมื่อเปรียบเทียบกับค่าความเข้มข้นของกรดระเหยง่าย (อุตสาหกรรม, กระทรวง. กรมโรงงานอุตสาหกรรมและสมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย, 2545)

เนื่องจากแบคทีเรียสร้างก๊าซมีเทน จะทำงานได้ดีที่สภาวะค่าพีเอชใกล้เคียงความเป็นกลางโดยทั่วไป จึงยอมรับกันว่าเป็นช่วงค่าพีเอชสูงสุด (optimal pH range) ของสิ่งแวดล้อมภายในถึงปฏิกิริยาจะต้องอยู่ในช่วงระหว่างประมาณ 6.5-8.2 (ภายใต้บางสภาวะอาจมีความเป็นไปได้ที่จะเดินระบบที่ค่าพีเอช 6.0 แต่สภาพต่างจากไบคาร์บอเนต (HCO_3^-) ไม่สามารถที่จะคงสภาพ

บัฟเฟอร์ได้ดีภายใต้สภาวะนี้) จึงจะสามารถเดินระบบให้ประสบความสำเร็จได้ การทำงานของจุลินทรีย์จะมีผลจากการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชของน้ำเสียที่ป้อนเข้าสู่ระบบ ซึ่งจะเป็นการเปลี่ยนแปลงในการปรับสมดุลและอาจจะเสียสมดุลของการปรับให้เป็นกลาง (neutralize) ด้วยตัวของระบบบำบัดได้ องค์ประกอบของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และกรดไขมันระเหยสายสั้น (volatile short chain fatty acids) มีแนวโน้มที่จะทำให้ค่าพีเอชลดต่ำลง ขณะที่ความเป็นด่างประจวบ (alkalinity-generating cations) จำพวกแอมโมเนียมไอออน (NH_4^+) จากการย่อยสลายโปรตีนและโซเดียมจากการย่อยสลายสบูจะช่วยเพิ่มความเป็นด่างและค่าพีเอช (Speece, 1996)

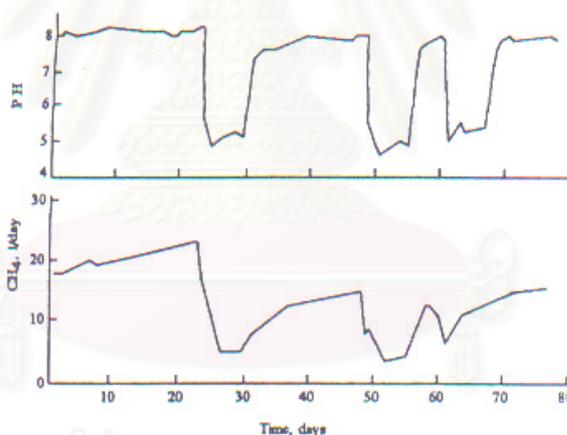
แต่อย่างไรก็ตาม ค่าพีเอชยังเป็นสิ่งสำคัญในการควบคุมระบบการหมักแบบไร้อากาศ โดยค่าพีเอชที่เหมาะสมควรอยู่ในช่วง 6.7-7.4 (อุตสาหกรรม, กระทรวง, กรมโรงงานอุตสาหกรรมและสมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย, 2545) หรือในช่วงค่าพีเอชประมาณ 6.8-9.2 (มันสิน ตันกุลเวศม์, 2542) ซึ่งเหมาะแก่การทำงานและการเจริญเติบโตของแบคทีเรียสร้างก๊าซมีเทน

ถ้าค่าพีเอชอยู่ในช่วงที่ไม่เป็นกลางการเจริญเติบโตของแบคทีเรียที่สร้างก๊าซมีเทนจะถูกยับยั้งทำให้ระบบล้มเหลวได้ และการปรับและรักษาระดับค่าพีเอช ให้เป็นกลางยังเป็นเรื่องจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องทำก่อนเรื่องใดๆ ในระหว่างที่มีการแก้ไขระบบล้มเหลวให้ฟื้นตัว การยกระดับค่าพีเอชให้สูงขึ้นจนอยู่ในช่วงที่เป็นกลาง สามารถใช้สารเคมีได้หลายชนิด เช่น ปูนขาวและโซเดียมไบคาร์บอเนต (NaHCO_3) เป็นต้น ถ้าไม่ใช้สารเคมีก็อาจเพิ่มค่าพีเอชได้โดยกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ออกบางส่วนจากส่วนผสมของก๊าซชีวภาพ (มันสิน ตันกุลเวศม์, 2542) แต่การเพิ่มค่าพีเอชโดยการกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกไปโดยตรง ด้วยวิธีใดวิธีหนึ่งจะทำให้ค่าพีเอชเพิ่มขึ้นได้ชั่วคราวโดยที่ระดับสภาพด่างไม่เพิ่มขึ้นด้วย และผลสุดท้ายระดับค่าพีเอชจะลดลงเหลือเท่าเดิมเมื่อก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ถูกสร้างเพิ่มขึ้น (มันสิน ตันกุลเวศม์, 2542) ระบบหลักทางเคมีที่ควบคุมค่าพีเอช ได้แก่ สมดุลก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์-ไบคาร์บอเนต (carbondioxide-bicarbonate equilibrium) (Cheremisinooff, 1994) (ภาพที่ 2.3-2.4)



เมื่อ R คือ การทำงานของจุลินทรีย์สร้างก๊าซมีเทน

ภาพที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างการทำงานของจุลินทรีย์สร้างก๊าซมีเทน (Methanogens) กับ ค่าพีเอช (pH) (Speece, 1996)



ภาพที่ 2.4 การตอบสนองของระบบกรองแบบไร้อากาศ (anaerobic filter) ต่อการลดระดับค่าพีเอช แบบไม่สม่ำเสมอ (Speece, 1996)

2.3.3 สภาพด่าง (Alkalinity)

สภาพด่างทั้งหมด ในระบบไร้อากาศจะมีการเปลี่ยนแปลงน้อย สภาพความเป็นด่างที่มีความสำคัญ คือ สภาพด่างไบคาร์บอเนต ซึ่งจะทำหน้าที่บัฟเฟอร์ เมื่อมีกรดไขมันระเหยเกิดขึ้นในระบบ แต่ปัจจัยที่สำคัญที่ควรพิจารณามากกว่าสภาพด่าง ได้แก่ อัตราส่วนความเข้มข้นของกรดไขมันระเหยต่อความเข้มข้นสภาพด่างไบคาร์บอเนต ($VFA : HCO_3^-$) ซึ่งถ้ามีอัตราส่วน $VFA : HCO_3^-$ น้อยกว่า 0.4 ระบบจะมีบัฟเฟอร์สูง แต่ถ้าอัตราส่วนนี้มีค่าสูงกว่า 0.8 แสดงว่าระบบ

กำลังอยู่ในขั้นที่ค่าพีเอชจะลดลงอย่างรวดเร็ว ถ้ากรดไขมันระเหยมีการเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย (อุตสาหกรรม, กระทรวง. กรมโรงงานอุตสาหกรรมและสมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย, 2545)

ในการรักษาระดับค่าพีเอชให้มีค่าเป็นกลางหรือใกล้เคียง สำหรับระบบที่มีปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูงในองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพที่ผลิตขึ้นจากระบบไร้อากาศ โดยทั่วไปอยู่ในช่วงร้อยละ 30 – 50 ระบบจะมีความต้องการความเข้มข้นของสภาพต่างอยู่ในช่วง 2,000 – 4,000 มิลลิกรัมต่อลิตรในรูปของแคลเซียมคาร์บอเนต (mg / L as CaCO₃) ซึ่งมักจะได้รับจากน้ำเสียที่ป้อนเข้าสู่ระบบ ในบางกรณีสร้างขึ้นจากการย่อยสลายโปรตีนและกรดอะมิโน ซึ่งถ้าต้องเติมสารเคมีเพื่อควบคุมค่าพีเอช จะทำให้เกิดความสิ้นเปลืองขึ้น ในการบำบัดแบบไร้อากาศ ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชกับสภาพต่างซึ่งควบคุมด้วยสารเคมีไบคาร์บอเนต (Tchobanoglous, Burton และ Stensel, 2004) แสดงดังสมการที่ (2.7) และ (2.8)



$$\frac{[\text{HCO}_3^-][\text{H}^+]}{[\text{H}_2\text{CO}_3]} = \text{Ka}_1 \quad \text{.....(2.8)}$$

Ka_1 = first acid dissociation constant ,

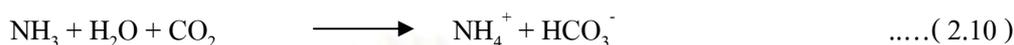
which is a function of ionic strength and temperature

การกำหนดระดับความเข้มข้นของสภาพต่างที่จะทำให้ระบบบำบัดมีกำลังบำบัดที่เหมาะสมนั้น ขึ้นอยู่กับลักษณะสมบัติและความเข้มข้นของน้ำเสีย ถ้าน้ำเสียมีความเข้มข้นสูงก็มีโอกาสจะผลิตก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้มาก ความต้องการความจุฬเฟอร์ของระบบจะเพิ่มขึ้น ระบบไร้อากาศ(ที่ปิดฝา) ควรมีความเข้มข้นสภาพต่างประมาณ 1,500 – 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร (มันสิน ตันทุลเวศม์, 2542)

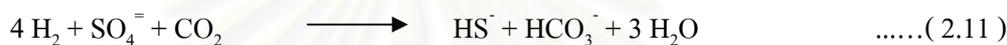
ลักษณะของน้ำเสียหลายประเภท ทำให้เกิดสภาพต่างจากการเมแทบอลิซึม (metabolism-generated alkalinity) ซึ่งทำให้สภาพต่างเพิ่มขึ้นจากการเมแทบอลิซึมสารประกอบอินทรีย์ โดยปลดปล่อยประจุบวก (cation) ด้วยเหตุนี้จึงเป็นผลให้สภาพต่างของน้ำที่ป้อนเข้าระบบมีปริมาณอยู่ในระดับเพียงร้อยละ มิลลิกรัม แต่เมื่อผ่านการเมแทบอลิซึมแล้วทำให้สภาพต่างเพิ่มขึ้นอยู่ในระดับพันมิลลิกรัม ซึ่งตัวแปรที่กำหนดสภาพต่างจากกระบวนการนี้ ได้แก่ ความเข้มข้นของสารประกอบอินทรีย์ที่ย่อยสลายแล้วปล่อยอิออนบวก เช่น โปรตีน เกลือของกรดอินทรีย์ (organic acids) หรือ สบู่ (soaps) และปฏิกิริยารีดักชันของซัลเฟต/ซัลไฟต์ (sulfate / sulfite reduction) ที่วัดได้ (Speece, 1996)

การผลิตสภาพต่างจากโปรตีน ซัลเฟต และซัลไฟด์ แสดงดังสมการที่ (2.9) – (2.13) ต่อไปนี้

การผลิตสภาพต่างจากโปรตีน



การผลิตสภาพต่างจากซัลเฟต และซัลไฟด์



และถ้าไม่มีการปลดปล่อยออกซิเจนจากสารอินทรีย์ระหว่างการย่อยสลาย จะไม่มีสภาพต่างเกิดขึ้นกรณีตัวอย่าง เช่น คาร์โบไฮเดรต น้ำตาล กรดอินทรีย์ อัลดีไฮด์ (aldehydes) คีโตน (ketones) และเอสเทอร์ (esters)

Anderson และ Yang (1992b) อ้างถึงใน Speece (1996) ได้กล่าวสรุปว่า ความเข้มข้นของกรดไขมันระเหย ซัลเฟต สารประกอบไนโตรเจน และซีโอดี ส่งผลใกล้ชิดต่อความต้องการสภาพต่างสำหรับการควบคุมค่าพีเอชในการบำบัดแบบไร้อากาศ

ปัจจัยที่กำหนดปริมาณสภาพต่าง (Factors determining available reserve alkalinity) (Speece, 1996) ได้แก่

- ปริมาณการหมุนเวียนน้ำกลับ (effluent recycle capacity)
- การเมแทบอลิซึมขั้นแรกของสภาพต่างของน้ำในกระบวนการ (pre-metabolism alkalinity of process water)
- การเมแทบอลิซึมสภาพต่างจากน้ำเสียที่เข้าระบบ (feedstock alkalinity metabolism-generation potential)
- ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในน้ำเสียที่เข้าระบบ (organic concentration in the feedstream)
- การควบคุมกระบวนการ (process control)

- อัตราการเปลี่ยนสารมลพิษไปเป็นกรดไขมันระเหย (rate of pollutant conversion to VFA)
- การเพิ่มความเข้มข้นของกรดไขมันระเหยอย่างเรื้อรัง (chronic elevated volatile acids concentrations)
- การเดินระบบแบบเทอร์โมฟิลิก (thermophilic operation)
- การจัดการก๊าซ (gas phase management)
- ค่าใช้จ่ายในการเสริมสภาพต่าง (supplemental alkalinity economics)

ปริมาณสภาพต่างสำรองในถังปฏิกรณ์ที่เหมาะสมกับการเปลี่ยนแปลงกรดไขมันระเหย (VFA) ระหว่างการเดินระบบปกติ จะขึ้นอยู่กับปัจจัย (Speece, 1996) ดังต่อไปนี้

1) องค์ประกอบของกระบวนการซึ่งทำให้เกิดการสำรองสภาพต่างสูงสุด

ถ้าถังปฏิกรณ์เป็นแบบซีเอสทีอาร์ (Completely Stirred Tank Reactor ; CSTR) ความเข้มข้นกรดไขมันระเหย มีความเข้มข้นเท่ากันทั่วทั้งถังปฏิกรณ์ซึ่งตามปกติจะมีความเข้มข้นต่ำ และมีอัตราการบริโภคกรดไขมันระเหยคงที่ แต่ถ้าถังปฏิกรณ์เป็นแบบไหลตามกัน (plugflow) จะมีการสร้างกรดไขมันระเหย เพิ่มขึ้นในส่วนป้อนน้ำเข้าซึ่งอัตราการสร้างจะเร็วกว่าอัตราการบริโภค กรดไขมันระเหย โดยแบคทีเรียสร้างก๊าซมีเทน ดังนั้น ถังปฏิกรณ์ที่มีองค์ประกอบแบบไหลตามกัน จึงมีความต้องการสภาพต่างสำรองเพื่อรักษาค่าพีเอชในบริเวณป้อนน้ำเข้าในขณะถังปฏิกรณ์แบบซีเอสทีอาร์ แบบกวนผสมด้วยก๊าซอัตราสูง (highly gas – mixed) หรือแบบไหลตามกันที่มีการหมุนเวียนกลับสูง (high recycle rate plug flow reactors) ไม่มีความจำเป็นดังกล่าว

2) การหมุนเวียนน้ำกลับมาบำบัด

การหมุนเวียนน้ำกลับนั้นมิใช่เป็นการลดความต้องการสภาพต่างเพื่อสภาพความเป็นกลางของกรดคาร์บอนิก (H_2CO_3) เป็นเพียงการเจือจางซีโอดีที่เข้าระบบ จึงยังคงมีความต้องการสภาพต่างและลดกรดไขมันระเหย แต่ถ้าอัตราส่วนการหมุนเวียนน้ำกลับหรือมีการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกไปเพิ่มขึ้น องค์ประกอบของถังปฏิกรณ์แบบไหลตามกันจะเปลี่ยนไปคล้ายถังปฏิกรณ์ซีเอสทีอาร์มากขึ้นจึงอาจช่วยลดผลกระทบได้ ความต้องการขั้นต่ำของสภาพต่างไปคาร์บอนเนต มีค่าประมาณ 1.2 กรัมแคลเซียมคาร์บอเนตต่อกรัมซีโอดีในน้ำเข้าที่เปลี่ยนไปเป็นกรดไขมันระเหย ($g CaCO_3 / g influent COD converted to VFA$) ทำให้มีค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้นในการเดินระบบระดับ โรงบำบัด (full-scale plant)

Moosbrugger และคณะ (1993) อ้างถึงใน Speece (1996) ได้ทำการทดลองหมุนเวียนน้ำออกจากระบบกลับเพื่อลดซีโอดีของน้ำเข้าระบบจาก 27,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ลงเหลือ 790 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้อัตราส่วนการเวียนน้ำกลับ 33/1 ซึ่งไม่มีผลกระทบต่อการกำจัดซีโอดี ทำให้ประหยัดค่าใช้จ่ายสำหรับการปรับสภาพต่าง

3) สภาพต่างก่อนการเมแทบอลิซึม (pre-metabolism alkalinity) ของกระบวนการ

เป็นสภาพต่างที่ได้จากน้ำเสียที่ผ่านกระบวนการดีไนตริฟิเคชันทางชีววิทยา (biological denitrification) หรือน้ำเสียที่ได้จากกระบวนการเติมโซดาไฟ (caustic soda ; NaOH) หรือ โซดาแอช (soda ash ; Na_2CO_3) ทำให้เกิดสภาพต่างประเภทนี้ขึ้น

4) ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในน้ำเสียที่ป้อนเข้าสู่ระบบ

การสะสมของกรดระเหยสูงสุดที่เป็นไปได้ ถูกจำกัดด้วยความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในน้ำเสีย เพราะค่าซีโอดีของกรดระเหยที่เกิดจากการเปลี่ยนรูปและสะสม จะมีค่าไม่เกินความเข้มข้นของซีโอดีที่ป้อนเข้าระบบ ดังนั้นความต้องการสภาพต่างสำหรับทำให้กรดระเหยในถังปฏิกริยาแบบไหลตามกันมีสถานะเป็นกลาง จึงควรทำการเจือจางให้เหมาะสม

5) ผลดีจากการควบคุมระบบ

การดูแลระบบอย่างใกล้ชิดจะช่วยควบคุมการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของกรดไขมันระเหยได้ เช่น การจำกัดการป้อน การเติมต่างลงไป ถ้ากรดระเหยเพิ่มขึ้น ซึ่งอาจติดตั้งเครื่องควบคุมค่าพีเอช (pH-controller) ในการควบคุมค่าพีเอช ซึ่งจะช่วยลดค่าใช้จ่ายในการเติมต่างปริมาณมากเพื่อปรับสภาพความเป็นกลางในกรณีฉุกเฉิน

6) อัตราการเปลี่ยนมลภาวะ ไปเป็นกรดระเหย

อัตราการเปลี่ยนมลภาวะไปเป็นกรดระเหยขึ้นอยู่กับความยากง่ายในการย่อยสลาย อัตราการเปลี่ยนแปลงนี้จะควบคุมการเปลี่ยนแปลงกรดระเหยโดยส่วนใหญ่ จึงเป็นเหตุให้ระบบต้องมีการสำรองสภาพต่างเอาไว้ กระบวนการไฮโดรไลซิสจะเป็นอัตราจำกัดสำหรับสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายยาก และภายใต้การทำงานความเข้มข้นของกรดระเหย จะค่อนข้างต่ำ

สารอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้อย่างสมบูรณ์ เช่น น้ำตาล และสารอินทรีย์พื้นฐานจะเปลี่ยนเป็นกรดระเหย ดังนั้น ขั้นตอนจำกัดอัตราปฏิกริยาจึงกลายเป็นกระบวนการสร้างก๊าซมีเทน ซึ่งสามารถทำให้เกิดการสะสมกรดไขมันระเหย และต้องการสภาพต่างสำรอง

7) การเพิ่มความเข้มข้นของกรดระเหย อย่างเรื่อรัง

การเพิ่มความเข้มข้นของ กรดระเหยอย่างเรื่อรังนี้ต้องการสภาพต่างที่เพียงพอที่จะไปรักษาระดับพีเอชให้เป็นกลาง การเพิ่มระดับของกรดไขมันระเหย มีสาเหตุจากสารพิษหรือบางครั้งมาจากการจำกัดไนโตรเจนหรือฟอสฟอรัส ถ้ากรดไขมันระเหยชนิดเด่น ได้แก่ โพรไพโอเนต ควรใช้กระบวนการแบบขั้นตอน และ/หรือ เม็ดจุลินทรีย์บนฟิล์มชีวภาพ (biofilms)

8) การเดินระบบแบบเทอร์โมฟิลิก

Pfeffer (1981) อ้างถึงใน Speece (1996) กล่าวว่า การเพิ่มอุณหภูมิมีผลต่อค่าพีเอช สภาพต่างและองค์ประกอบของก๊าซ ผลของอุณหภูมิแสดงออกมาใน 2 รูปแบบ ได้แก่

- (1.) โดยการเปลี่ยนแปลงค่าคงที่สมดุลของระบบไบคาร์บอเนต
- (2.) โดยการเปลี่ยนความดันไอของน้ำ

การละลายของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ในน้ำจะมีความเข้มข้นลดลงครึ่งหนึ่งจากที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ไปที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส การลดลงเช่นนี้ทำให้ความต้องการสภาพต่างของช่วงเทอร์โมฟิลิก ลดลงด้วย (Speece, 1996)

2.3.4 กรดระเหย

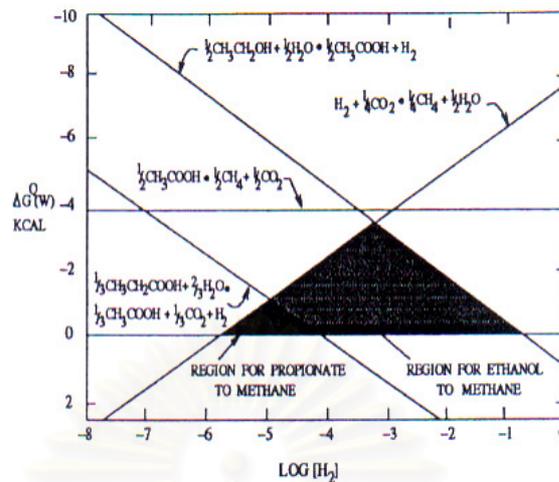
2.3.4.1 อะซิเตต (Acetate)

สารประกอบมลภาวะอินทรีย์ เช่น คาร์โบไฮเดรตเป็นส่วนประกอบหลักของก๊าซมีเทน ซึ่งได้จากการใช้อะซิเตต เป็นสารตั้งต้นโดยตรง เนื่องจาก อะซิเตตเป็นสารตั้งต้นหลัก ดังนั้นระบบไร้อากาศที่ทำงานได้ดี จึงต้องจัดการอะซิเตตได้อย่างมีประสิทธิภาพและกำจัดให้มีความเข้มข้นต่ำในน้ำออกจากระบบ

2.3.4.2 โพรไพโอเนต (propionate)

โพรไพโอเนตเป็นสารตัวกลางพื้นฐานจากการเมแทบอลิซึม ของน้ำตาล โปรตีน กรดระเหยโมเลกุลใหญ่ และสารประกอบอินทรีย์ อาจมีมากกว่าร้อยละ 20 ที่เกิดการถ่ายเทของอิเล็กตรอน และเปลี่ยนไปเป็นก๊าซมีเทนในที่สุด

การทำงานที่เหมาะสมของกระบวนการไร้อากาศขึ้นอยู่กับ การส่งผ่านของสับสเตรทที่ไม่ถูกขัดขวางจากโพรไพโอเนตและก๊าซไฮโดรเจน ดังนั้นโพรไพโอเนตจึงมีความสัมพันธ์ที่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการนี้ โดยตามปกติแล้วโพรไพโอเนตสามารถเปลี่ยนเป็นอะซิเตต และก๊าซไฮโดรเจนได้ การเปลี่ยนแปลงนี้เกิดขึ้นได้เมื่อความดันก๊าซไฮโดรเจนต่ำกว่า 10^{-4} บรรยากาศ หรือ 100 ส่วนในล้านส่วน (ppm) แสดง ดังภาพที่ 2.5



ภาพที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระกับความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจน (Speece, 1996)

ถ้าความเข้มข้นของโพรไพโอเนตมีค่าต่ำจะเป็นตัวบ่งชี้การทำงานที่ดีของระบบไร้อากาศ แต่การเพิ่มขึ้นของระดับโพรไพโอเนต ไม่จำเป็นที่จะต้องมีความผิดปกติจากก๊าซไฮโดรเจนมีปริมาณสูงเกินไปเสมอไป เพราะยังมีปัจจัยอื่นๆที่เกี่ยวข้องอีกหลายปัจจัย การเพิ่มความเข้มข้นของโพรไพโอเนตอาจเป็นตัวบ่งชี้ความยากในขั้นตอนเมแทบอลิซึม ในขั้นเดียว หรือมากกว่านั้น ของการบำบัดแบบไร้อากาศ

ผลการทดลองจากห้องปฏิบัติการ ที่ไม่มีการจำกัดความเข้มข้นของโพรไพโอเนต แต่ควบคุมถึงปฏิกิริยาแบบตะกอนแขวนลอย (suspended growth reactors) อัดโนมิติด้วยคอมพิวเตอร์ มีอัตราการบริโภคโพรไพโอเนต ต่ำประมาณ 6 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน ($\text{kg/m}^3 \cdot \text{d}$) ขณะที่ถังปฏิกิริยาเยอเอสบี มีอัตราการบริโภคประมาณ 22 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน แสดงให้เห็นว่าความใกล้ชิดกันของมวลชีวภาพภายในกลุ่มแสดงบทบาทที่สำคัญ

การเมแทบอลิซึมโพรไพโอเนต ของมวลชีวภาพชนิดเม็ดจะลดลงอย่างรุนแรง ถ้ามีประชากรเพียงกลุ่มเดียวและอยู่ในรูปแบบการเดินระบบแบบซีเอสทีอาร์ ดังนั้น จะเห็นได้ว่าอัตราการบริโภคก๊าซไฮโดรเจน (H_2 -utilization rate) มีนัยสำคัญเพิ่มขึ้น เมื่อลดความแตกต่างระหว่างเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ กับฟิล์มชีวภาพ ระหว่างผู้ผลิตกับผู้บริโภคก๊าซไฮโดรเจน (H_2 -producers/ H_2 -utilizers)

การเพิ่มความเข้มข้นของกรดโพรไพโอนิกสามารถยับยั้งการสร้างก๊าซมีเทน ผลกระทบจากการยับยั้งนี้ เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตที่ผลิตและย่อยสลายกรดไขมันระเหย

อย่างไรก็ดี แบคทีเรียอาจปรับตัวต่อผลการยับยั้งของกรดโพรไพโอเนตที่ไม่แตกตัวเป็นไอออน ดังนั้นการเมแทบอลิซึม จึงคืนสู่สภาพเดิมได้

จากงานวิจัยของ Speece พบว่า โพรไพโอเนตความเข้มข้น 3,000 มิลลิกรัมต่อลิตร จะไม่ทำให้ระบบเกิดการยับยั้งขึ้น และ McCarty และ Brousseau (1963) อ้างถึงใน Speece (1996) พบว่า ระบบสามารถทนทานได้ถึง 8,000 มิลลิกรัมต่อลิตร

2.3.4.3. ฟอर्मेट (formate)

จลนศาสตร์ (kinetics) ของกระบวนการสร้างก๊าซมีเทน จากฟอर्मेटรวดเร็วกว่าที่สร้างจาก อะซิเตต และก๊าซไฮโดรเจน ซึ่งฟอर्मेटให้ซีโอดีต่อหน่วย (unit mass) 0.348 กรัมซีโอดีต่อกรัมฟอर्मेट (g COD/g formate) น้อยกว่ากรดไขมันระเหยชนิดอื่น ปัจจุบันนี้แสดงถึงความเป็นไปได้ที่ระบบจุลินทรีย์ (microbial systems) ใช้เป็นเส้นทางลดอิกวาเลนต์ (equivalents) ผ่านฟอर्मेट ก่อนข้างมากกว่าโพรไพโอเนต หรือก๊าซไฮโดรเจน ซึ่งอาจจะเสถียรต่อภาระที่ทำให้ระบบล้มเหลว (shock loads) มากกว่า

แต่ค่าความเข้มข้นของฟอर्मेट มักจะไม่นำมาใช้ในการบำบัดแบบไร้อากาศ เนื่องจากตรวจสอบได้ยาก แต่ก็มีการวิจัยบางชิ้นนำไปใช้ตรวจสอบเช่นกัน

โดยทั่วไประบบไร้อากาศควรมีปริมาณกรดระเหยประมาณ 50-500 มิลลิกรัมต่อลิตร จึงต้องมีการควบคุมการย่อยสลายสารอินทรีย์เป็นกรดระเหยกับการเปลี่ยนแปลงกรดระเหยไปเป็นก๊าซมีเทนให้สมดุลกัน (อุตสาหกรรม, กระทรวง. กรมโรงงานอุตสาหกรรมและสมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย, 2545)

2.3.5 สารอาหารที่จำเป็น

เนื่องจากกระบวนการบำบัดแบบไร้อากาศผลิตสัจน้อย ดังนั้น จึงมีความต้องการไนโตรเจน และฟอสฟอรัส ในการเจริญเติบโตของมวลชีวภาพน้อย แต่ในน้ำเสียบางประเภท ขาดแคลนสารอาหารเหล่านี้ จึงต้องเติมเสริมเข้าไป ซึ่งจะขึ้นอยู่กับลักษณะของสับสเตรทและอายุสัจ สารอาหารที่ต้องการ 100 มิลลิกรัมมวลชีวภาพ (mg of biomass) ได้แก่ ไนโตรเจน, ฟอสฟอรัส และซัลเฟอร์ อยู่ในช่วง 10 - 13, 2 - 2.6 และ 1 - 2 มิลลิกรัม ตามลำดับ (Tchobanoglous, Burton และ Stensel, 2004) และโดยทั่วไปในระบบไร้อากาศจะนิยมควบคุมอัตราส่วนต่ำสุดของสารอาหารที่ต้องการสำหรับการเจริญเติบโต ฟอสฟอรัส : ไนโตรเจน : คาร์บอน = 1 : 6 : 100 (Cheremisinoff, 1994)

อย่างไรก็ตาม ควรมีความเข้มข้นของไนโตรเจน ภายในถังปฏิกริยาอยู่ในช่วง 40 - 70 มิลลิกรัมต่อลิตร เพื่อป้องกันการขาดแคลนไนโตรเจน (Speece, 1996)

และถ้าต้องการรักษาการทำงานสูงสุดของจุลินทรีย์สร้างก๊าซมีเทนระบบจะต้องการ ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และซัลเฟอร์ เท่ากับ 500, 10 และ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ (Speece, 1996)

โลหะปริมาณน้อย (trace metals) ที่สำคัญที่ช่วยกระตุ้นการทำงานของจุลินทรีย์สร้างก๊าซมีเทน ได้แก่ เหล็ก (Fe) โคบอลต์ (Co) นิกเกิล (Ni) และ สังกะสี (Zn) ปริมาณที่แนะนำ ได้แก่ 0.02 , 0.004 , 0.003 และ 0.02 มิลลิกรัมต่อกรัมอะซิเตตที่ผลิตขึ้น (mg/g acetate produced) ตามลำดับ และกระบวนการบำบัดแบบไร้อากาศที่มีความเข้มข้นของกรดไขมันระเหยสูง โลหะปริมาณน้อยต่อลิตรของถังปฏิกรณ์ที่แนะนำ ได้แก่ เฟอร์รัสคลอไรด์ (FeCl_2) 1.0 มิลลิกรัม โคบอลต์คลอไรด์ (CoCl_2) 0.1 มิลลิกรัม นิกเกิลคลอไรด์ (NiCl_2) 0.1 มิลลิกรัม และซิงค์คลอไรด์ (ZnCl_2) 0.1 มิลลิกรัม (Tchobanoglous, Burton และ Stensel, 2004) และใช้สารอาหารอนินทรีย์เพื่อรักษามวลชีวภาพในการทดลองที่เตรียมได้ ดังแสดงในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 องค์ประกอบของสารอาหารอนินทรีย์ สำหรับการศึกษาระบบไร้อากาศ (Speece, 1996)

Constituent	Concentration in Reactor (mg/L)
NH_4Cl	400
$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	400
KCl	400
$\text{Na}_2\text{S} \cdot 9\text{H}_2\text{O}$	300
$\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	50
$(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$	80
$\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	40
$\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	10
KI	10
$(\text{NaPO}_3)_6$	10
$\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	0.5
NH_4VO_3	0.5
$\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	0.5
ZnCl_2	0.5

ตารางที่ 2.4 (ต่อ) องค์ประกอบของสารอาหารอินทรีย์ สำหรับการศึกษาระบบไร้อากาศ (Speece, 1996)

Constituent	Concentration in Reactor (mg/L)
$\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	0.5
$\text{NaMoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	0.5
H_3BO_3	0.5
$\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	0.5
$\text{NaWO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	0.5
Na_2SeO_3	0.5
Cysteine	10
NaHCO_3	6000

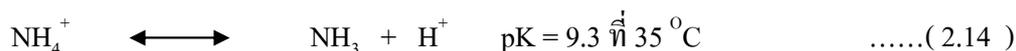
2.3.6 สารพิษ

สารพิษ คือ สารที่ส่งผลกระทบต่ออย่างรุนแรงต่อการเมแทบอลิซึมของแบคทีเรียซึ่งไม่จำเป็นต้องทำให้มีการตายเกิดขึ้น และสารพิษนั้นจะหมายถึง องค์ประกอบในน้ำเสีย ที่เป็นสาเหตุให้เกิดผลกระทบดังกล่าว สารพิษที่มีผลกระทบต่อระบบไร้อากาศที่สำคัญ ได้แก่

1) แอมโมเนีย

ความเป็นพิษของแอมโมเนียมักจะพบในน้ำเสียที่มีความเข้มข้นของแอมโมเนียสูง หรือมีสารตั้งต้นประเภทโปรตีน

การแตกตัวของแอมโมเนีย (NH_3 ionization) จะถูกควบคุมโดยค่าพีเอชและอุณหภูมิ ซึ่งมีการแตกตัว ดังสมการที่ (2.14) โดยแอมโมเนียมีความเป็นพิษมากกว่า (Speece, 1996) แต่ถ้าค่าพีเอช เท่ากับ 7.2 หรือต่ำกว่า แอมโมเนีย เกือบทั้งหมดจะอยู่ในรูปของแอมโมเนียมไอออนซึ่งมีความเป็นพิษน้อย (อุตสาหกรรม, กระทรวง. กรมโรงงานอุตสาหกรรมและสมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย, 2545)



$$\text{NH}_3 = N_{\text{Total}} / [1 + \text{H}^+/\text{K}]$$

Wiegant และ Zeeman (1986) พบว่า แอมโมเนียมีบทบาทเป็นตัวยับยั้งอย่างแรงในการสร้างก๊าซมีเทนจากก๊าซไฮโดรเจน แต่มีผลกระทบต่อการสร้างโดยใช้อะซิเตตต่ำกว่า

ถ้าปริมาณแอมโมเนียมไนโตรเจน ($\text{NH}_4^+ -\text{N}$) สูง การลดอุณหภูมิให้ต่ำกว่า 55 องศาเซลเซียส เป็นผลให้ผลผลิตก๊าซชีวภาพเพิ่มขึ้นและกระบวนการมีเสถียรภาพมากขึ้น เพราะจะเป็นการลดความเข้มข้นของแอมโมเนีย (NH_3) ทำให้การย่อยสลายกรดไขมันระเหย (VFA) ดีขึ้น

2) ซัลไฟด์

สำหรับจุลินทรีย์ชนิดเมธานที่เพิ่มขึ้นในระบบที่มีซัลเฟตจะถูกยับยั้งโดยไฮโดรเจนซัลไฟด์ซึ่งจะขึ้นอยู่กับค่าพีเอชด้วย ถ้าค่าพีเอชมีค่าเป็นด่างผลการยับยั้งนั้นจะมากกว่าที่ค่าพีเอชเป็นกลางหรือกรด แต่ถ้าจุลินทรีย์เกิดขึ้นในระบบที่ไม่มีซัลเฟต การยับยั้งจะมีสาเหตุจากไฮโดรเจนซัลไฟด์อิสระที่ไม่ขึ้นอยู่กับค่าพีเอช และผลกระทบจากความเป็นพิษของซัลไฟด์อยู่ในรูปความเข้มข้นของไฮโดรเจนซัลไฟด์เท่านั้น (Speece, 1996)

ซัลไฟด์มีผลเสียต่อแบคทีเรียสร้างมีเทน เนื่องจากสามารถดกผลึกเหล็กนิเกิลและโลหะที่จำเป็นต่างๆ และเมื่อซัลไฟด์ในรูปของก๊าซไฮโดรเจนมีระดับความเข้มข้นสูงกว่า 100-150 มิลลิกรัมต่อลิตร จะเป็นพิษต่อแบคทีเรียสร้างก๊าซมีเทน (อุตสาหกรรม, กระทรวง. กรมโรงงานอุตสาหกรรมและสมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย, 2545)

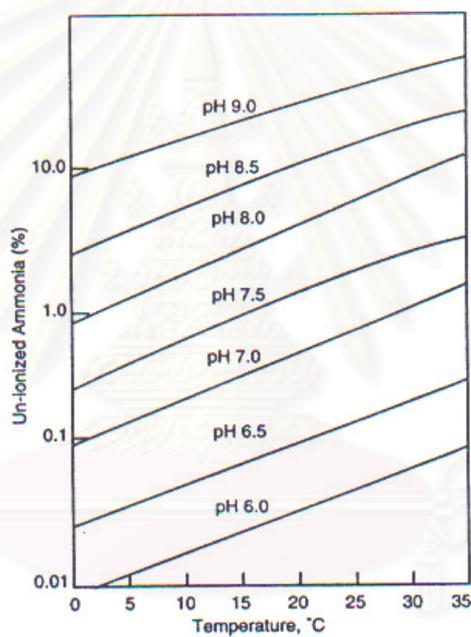
3) ประจุบวกของโลหะ (cation)

การเติมเบสเพื่อควบคุมพีเอชของระบบไร้อากาศ จะส่งผลให้ปริมาณของประจุบวกของโลหะเบาที่เกี่ยวข้องกับเบส ได้แก่ โซเดียม โพแทสเซียม แคลเซียม และแมงกานีส (Mn) ที่พบในระบบสูงขึ้นและสามารถทำให้เกิดความเป็นพิษได้ (อุตสาหกรรม, กระทรวง. กรมโรงงานอุตสาหกรรมและสมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย, 2545)

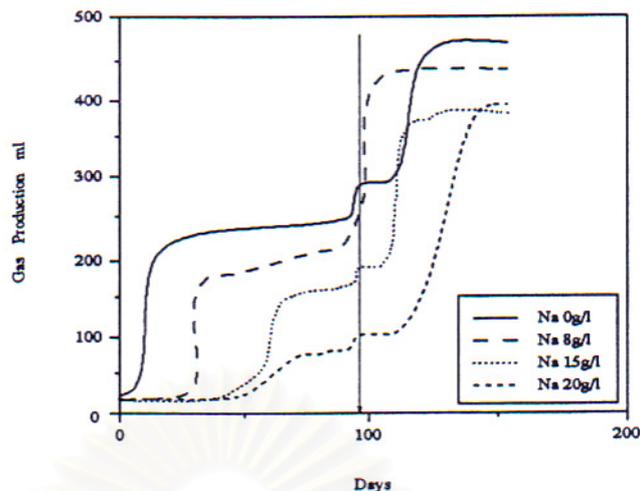
ความเป็นพิษจากโซเดียม จะเกิดกับมวลชีวภาพในระบบไร้อากาศที่ไม่ได้รับการปรับสภาพให้เกิดความคุ้นเคย ดังนั้นสิ่งสำคัญ คือ ความเป็นไปได้ในการปรับสภาพให้เกิดความคุ้นเคย, ความสัมพันธ์ของอัตราเมแทบอลิซึมภายหลังการปรับสภาพ และการรักษาลักษณะการปรับสภาพตลอดช่วงระยะเวลา ภาพที่ 2.7 แสดงการปรับสภาพของจุลินทรีย์สร้างก๊าซมีเทนให้คุ้นเคยกับความเข้มข้นของโซเดียมไอออน (Na^+)

ระบบไร้อากาศแบบเดิมที่รับความเข้มข้นของโซเดียมไอออนได้ 5,000 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อทำการปรับสภาพแล้วสามารถรับความเข้มข้นได้สูงถึง 15,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่อัตราการบริโภคร้อยละ 50 ของการควบคุมโซเดียมไอออนระดับต่ำ (Speece, 1996)

ความเป็นพิษจากโพแทสเซียม มีผลกระทบหลักที่เกิดจากโพแทสเซียม อีออน (K^+) ทำให้เกิดการลดลงของอัตราการบริโภคสับสเตรทสูงสุดจำเพาะ (maximum specific substrate utilization rate) หรือ k_{max} (Kugelman และ Chin, 1971 อ้างถึงใน Speece, 1996) (ภาพที่ 2.6-2.7)



ภาพที่ 2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างแอมโมเนียที่ไม่แตกตัว (Un-ionized NH_3) กับอุณหภูมิ ที่ระดับพีเอชต่างๆ (Speece, 1996)



ภาพที่ 2.7 กราฟแสดงการปรับสภาพของจุลินทรีย์สร้างมีเทนกับความเข้มข้นของโซเดียมไอออน (Speece, 1996)

2.3.7 ศักยภาพการให้และรับอิเล็กตรอน (Oxidation-Reduction Reaction)

ศักยภาพการให้และรับอิเล็กตรอน หรือ ปฏิกิริยารีดอกซ์ (Redox Reaction) คือ ปฏิกิริยาที่มีการถ่ายเทอิเล็กตรอนจากสารหนึ่งไปสู่อีกสารหนึ่ง โดยวัดความแตกต่างด้านความสามารถ ในการให้หรือรับอิเล็กตรอนระหว่างปฏิกิริยาทั้งสองด้วยค่า ออกซิเดชัน-รีดักชันโพเทนเชียล หรือ โออาร์พี (ORP) อาจมีค่าเป็นบวกหรือลบก็ได้ ถ้าวัดค่าโออาร์พี ได้ค่าบวกมาก แสดงว่าสารละลายมีความสามารถในการให้อิเล็กตรอนได้ดี

โดยทั่วไปจะวัดโออาร์พีได้ค่าบวกในน้ำที่มีออกซิเจน หรือไนเตรตและวัดค่าโออาร์พี ได้ค่าลบในน้ำเสียที่ปราศจากออกซิเจน (มันลีน ตันจุลเวศม์, 2542) ซึ่งสารอินทรีย์ในน้ำเสียจะเป็นตัวให้อิเล็กตรอนและเป็นแหล่งพลังงานที่สำคัญในระบบไร้อากาศ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ หรือกรดอะซิติคจะเป็นตัวรับอิเล็กตรอนโดยถังย่อยไร้อากาศที่ดีจะต้องมีค่าโออาร์พีอยู่ในช่วง -300 ถึง -500 มิลลิโวลต์ ถ้าค่าโออาร์พีมีค่าเป็นลบน้อยๆ หรือมีค่าเป็นบวก แสดงว่าปฏิกิริยาย่อยสลายแบบไร้อากาศเกิดขึ้นน้อยหรือไม่เกิดขึ้น (อุตสาหกรรม, กระทรวง. กรม โรงงานอุตสาหกรรมและสมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย, 2545)

2.4 ระบบยูเอเอสบี (Upflow Anaerobic Sludge Blanket : UASB)

2.4.1 ประวัติความเป็นมาของระบบยูเอเอสบี

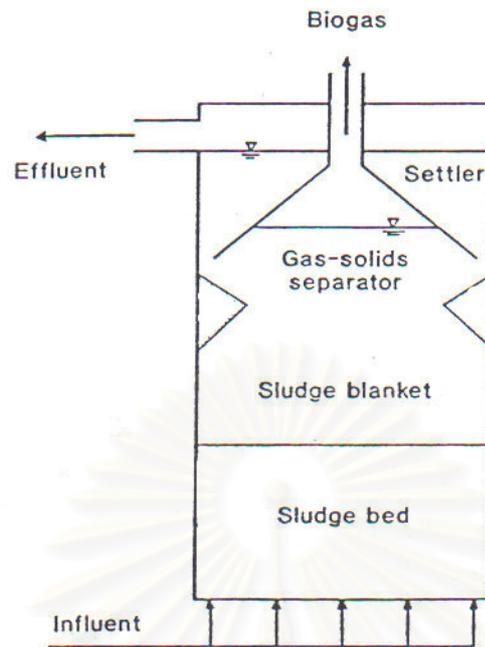
ในปี 1972 Lettinga และคณะ ได้ทำการศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากกากน้ำตาลโดยใช้ระบบบำบัดแบบไร้อากาศ และนำไปสู่การพัฒนาของระบบยูเอเอสบีขึ้น ระหว่างปี 1974 ถึง ปี 1977 ได้มีการสร้างโรงบำบัดน้ำเสียนำร่อง (pilot plants) ระบบยูเอเอสบีขึ้นในประเทศเนเธอร์แลนด์ ซึ่งมีขนาด 6, 30 และ 200 ลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ และระบบยูเอเอสบีเต็มมาตราส่วน (full-scale) มีขนาด 800 ลูกบาศก์เมตร ได้ถูกสร้างขึ้นในปี 1978 เพื่อใช้บำบัดน้ำเสียจากโรงงานน้ำตาล สามารถกำจัดซีโอดีได้ร้อยละ 88 ที่ภาระสารอินทรีย์ (organic loading) 16.25 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน ($\text{kgCOD}/\text{m}^3\text{-d}$) นับแต่นั้นเป็นต้นมาจึงมีการนำไปใช้เพื่อบำบัดน้ำเสียประเภทต่างๆ ทั่วโลก ซึ่งประสิทธิภาพด้านการประหยัดค่าใช้จ่ายและความสามารถรับภาระสารอินทรีย์สูงๆ ได้ จึงทำให้ระบบยูเอเอสบีได้รับความสนใจ (Lin และ Yang, 1991)

2.4.2 หลักการทำงานของระบบยูเอเอสบี

ถึงปฏิกิริยายูเอเอสบี มีส่วนประกอบหลัก 4 ส่วน แสดงดังภาพที่ 2.8 ซึ่งประกอบด้วย

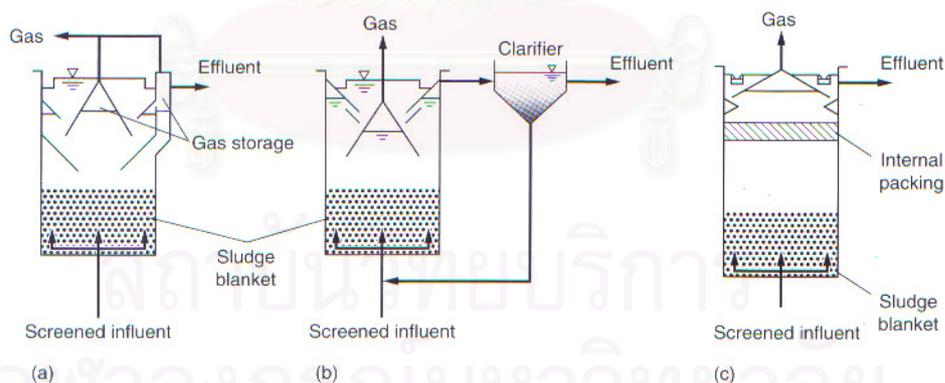
- 1) ชั้นตะกอนจมตัว (sludge bed) คือ ชั้นของมวลชีวภาพจมตัวอยู่ที่ก้นถังปฏิกิริยา
- 2) ชั้นตะกอนแขวนลอย (sludge blanket) คือ ชั้นของอนุภาคแขวนลอยที่ถูกล้วนผสมด้วยก๊าซที่เกิดขึ้นในกระบวนการ ซึ่งการย่อยสลายทางชีวภาพของน้ำเสียที่เข้าระบบทางก้นถังปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นในบริเวณนี้ และบริเวณชั้นตะกอนจมตัวด้วย
- 3) ส่วนแยกก๊าซ-ของแข็ง (gas-solids separator : GSS) คือ อุปกรณ์ในการแยกก๊าซออกจากของเหลว
- 4) ส่วนตกตะกอน (settlement compartment) คือ บริเวณสงบนิ่ง อนุภาคของสลัดจ์ ที่เข้ามาในบริเวณตกตะกอนนี้ จะตกกลับลงสู่ถังปฏิกิริยา มีปริมาณน้อยมากที่จะถูกชะล้างออกไปกับน้ำออกจากถังปฏิกิริยา

เนื่องจากกระบวนการของระบบยูเอเอสบี สามารถรักษามวลชีวภาพได้สูงและมีความสามารถเฉพาะตัวสูงในการรับอัตราภาระสารอินทรีย์จึงสามารถกำจัดซีโอดีได้ดี และจากการที่สามารถแยกก๊าซ ของเหลว และของแข็งภายในถังปฏิกิริยา และไม่จำเป็นต้องใช้ตัวกลางเพื่อให้แบคทีเรียยึดเกาะ จึงช่วยลดปัญหาการอุดตันและประหยัดค่าใช้จ่ายต่ำกว่าระบบไร้อากาศอื่นๆ (Lin และ Yang, 1991)



ภาพที่ 2.8 ส่วนประกอบหลักของถังปฏิกริยาเยอเอสบี (UASB reactor) (Lin และ Yang, 1991)

นอกจากนี้ ยังมีการประยุกต์รูปแบบถังปฏิกริยาเยอเอสบี โดยการเพิ่มเติม ส่วนประกอบบางอย่างเข้าไป เพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการทำงาน แสดงดังภาพที่ 2.9



ภาพที่ 2.9 ตัวอย่างการประยุกต์รูปแบบถังปฏิกริยาเยอเอสบีเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงาน (Tchobanoglous, Burton และ Stensel, 2004)

2.4.3 ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการทำงานของระบบยูเอเอสบี

2.4.3.1 โครงสร้างของถังปฏิกริยายูเอเอสบี

(1) ขนาดถังปฏิกริยา (Dimensions) (Lin และ Yang, 1991)

ขนาดถังปฏิกริยาถูกกำหนดจากภาระสารอินทรีย์ หรือภาระชลศาสตร์ (hydraulic loading) ความเร็วของของเหลวบนผิวหน้าตกตะกอนและธรรมชาติของน้ำเสีย การออกแบบในระดับเต็มมาตราส่วน ค่าความปลอดภัยสูงสุดในการออกแบบจะต้องมีภาระสารอินทรีย์ 15-20 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน และความเร็วในการจมตัวจำเพาะ (settler superficial velocities) 1.2-1.5 เมตรต่อชั่วโมง (m/h) สำหรับน้ำเสียเข้มข้นต้องการถังปฏิกริยาขนาดใหญ่เหมาะสมกับภาระสารอินทรีย์ ในทางตรงข้ามน้ำเสียเจือจางจำเป็นจะต้องมีพื้นที่ผิวหน้ากว้างเพื่อลดความเร็วใกล้ผิวหน้า

ในทางทฤษฎี ไม่มีการจำกัดขนาดของถังปฏิกริยายูเอเอสบี แต่ถ้าขนาดใหญ่มากกว่า 1,500 ลูกบาศก์เมตร อาจทำให้เกิดปัญหาในการก่อสร้างและเดินระบบได้ จึงใช้ถังปฏิกริยาขนาดเล็กหลายๆถังขนานกันแทน และแนะนำให้ความสูงของถังไม่เกินกว่า 6 เมตร

(2) เครื่องแยกก๊าซ-ของแข็ง (Lin และ Yang, 1991)

เครื่องมือดังกล่าว จะทำการแยกก๊าซชีวภาพออกจากของเหลวที่ผสมกันอยู่ ตะกอนที่จมตัวได้จะเข้าสู่ส่วนจมตัว และตกกลับเข้าสู่ส่วนย่อยสลาย

ส่วนหักเหที่ลาดเอียงประมาณ 50 องศา กับแนวราบของระบบทำให้ได้เปรียบสำหรับการไหลแนวตั้งของก๊าซในของเหลว และไม่ขัดขวางการตกกลับของสลัดจ์ บริเวณส่วนตกตะกอน ความเร็วของการไหลในบริเวณนี้ควรมีความเร็วสูงสุด 2-5 เมตรต่อชั่วโมง ผิวหน้าระหว่างก๊าซและของเหลวภายในกรวย เครื่องแยกก๊าซ-ของแข็ง ควรจะเกิดการกวนได้ดีและมีพื้นที่เพียงพอที่จะปลดปล่อยก๊าซออกไปได้ง่าย และควรป้องกันตะกอนลอยที่ชะล้างออกไป ดังนั้นบริเวณนี้ควรมีพื้นที่กว้างพอที่จะหลีกเลี่ยงการก่อตัวของตะกอนลอย

(3) ระบบการป้อนน้ำ (Inlet system) (Lin และ Yang, 1991)

โดยปกติสภาวะในการเดินระบบภายใต้อุณหภูมิต่ำ หรือภาระสารอินทรีย์ต่ำ ทำให้ผลผลิตก๊าซต่ำเกินกว่าจะกวนผสมได้อย่างเหมาะสม ดังนั้นระบบการป้อนน้ำและการกวนผสมจึงมีความจำเป็นเพื่อลดช่องว่างและการลัดวงจรในชั้นตะกอนจมตัว ระบบการป้อนน้ำที่ดี จะสนับสนุนการสัมผัสระหว่างตะกอนกับน้ำเสีย สำหรับน้ำเสียความเข้มข้นต่ำจะมีความวิกฤตของช่องว่างมากกว่า เนื่องจากมีการสร้างก๊าซที่จะช่วยกวนผสมชั้นตะกอนแขวนลอยน้อย

ในการเดินระบบถึงปฏิภณระดับเต็มมาตรส่วนที่มีภาระสารอินทรีย์สูง 6 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน มีความต้องการจุลกระจายน้ำหนึ่งจุดต่อพื้นที่ 7-10 ตารางเมตร จะทำให้การทำงานมีประสิทธิภาพ

สำหรับน้ำเสียเจือจางที่มีการกวนผสมจากก๊าซต่ำต้องการจุลกระจายน้ำหนึ่งจุด ทุก 1-2 ตารางเมตร

2.4.3.2 ปัจจัยที่ส่งผลต่อการทำงานของถังปฏิภณยูเอเอสบี

(1) ลักษณะของน้ำเสีย

สารที่ปรากฏอยู่ในน้ำเสียนั้นสามารถเปลี่ยนเป็นเม็ดตะกอน แต่สารดังกล่าวอาจเป็นสาเหตุของฟอง หรือตะกอนลอยได้ด้วยเช่นกัน และน้ำเสียที่มีส่วนประกอบของโปรตีน และ/หรือไขมัน มีแนวโน้มที่จะเป็นสาเหตุของปัญหาดังกล่าว ดังนั้นอัตราส่วนระหว่างอนุภาคกับซีโอดีละลาย (soluble COD) จึงถูกใช้ในการกำหนดภาระของถังปฏิภณยูเอเอสบีและการประยุกต์ใช้กระบวนการ ถ้าอัตราส่วนดังกล่าวเพิ่มขึ้นการรวมตัวของเม็ดตะกอนจะลดลง (Lettinga และ Hulshoff Pol, 1991 อ้างถึงใน Tchobanoglous, Burton และ Stensel, 2004)

(2) ปริมาณภาระสารอินทรีย์

ภาระซีโอดี (COD loading) เป็นตัวแทนของความรุนแรงของน้ำเสียของถังปฏิภณยูเอเอสบี น้ำเสียหลายประเภทมีซีโอดีอยู่ในช่วง 12-20 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน สามารถถูกกำจัดได้ร้อยละ 90-95 ที่อุณหภูมิ 30-35 องศาเซลเซียส ขณะที่การกำจัดซีโอดีต่ำกว่าร้อยละ 90 มีของแข็งทั้งหมด (TSS) สูง และใช้ความเร็วไหลขึ้น (upflow velocities) สูง จะช่วยพัฒนาตะกอนเม็ด (granulated sludge) ขึ้นและชะล้างของแข็งอื่นๆออกไป ที่สภาวะนี้จึงมีปริมาณภาระสารอินทรีย์สูงกว่าสัดส่วนของซีโอดีในน้ำเสียและความเข้มข้นของของแข็งทั้งหมด แสดงดังตารางที่ 2.5 ส่วนน้ำเสียที่มีภาระสูง ซึ่งประกอบด้วยกรดไขมันระเหยเป็นส่วนใหญ่ จำเป็นต้องใช้ตะกอนเม็ดมากขึ้นด้วย (Tchobanoglous, Burton และ Stensel, 2004)

(3) ความเร็วไหลขึ้น (Upflow velocity)

ความเร็วไหลขึ้นนั้นขึ้นอยู่กับอัตราการไหลและพื้นที่ของถังปฏิภณซึ่งมีการแนะนำไว้ แสดงดังตารางที่ 2.5

สำหรับน้ำเสียความเข้มข้นต่ำนั้น ความเร็วและความสูงของถังปฏิภณ (reactor height) ประเมินได้จากปริมาตรของถังปฏิภณยูเอเอสบี และสำหรับน้ำเสียความเข้มข้นสูงจะประเมินจากปริมาณภาระสารอินทรีย์

$$\text{ความเร็วไหลขึ้น (v)} = \frac{\text{อัตราการไหล (Q)}}{\text{พื้นที่หน้าตัดของถังปฏิกรณ์ (A)}} \quad \dots\dots(2.15)$$

เมื่อ $v =$ design upflow superficial velocity , m/h
 $A =$ reactor cross-section area , m²
 $Q =$ influent flowrate, m³/h

ตารางที่ 2.5 ปริมาณภาระซีโอดี(COD loading) ที่แนะนำสำหรับถังปฏิกรณ์ยูเอเอสบี ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ซึ่งกำจัดซีโอดีได้ ร้อยละ 85-95 (Tchobanoglous, Burton และ Stensel, 2004)

Wastewater COD , mg/L	Fraction as particulate COD	Volumetric loading , kg COD/m ³ -d		
		Flocculent sludge	Granular sludge With high TSS removal	Granular sludge With little TSS removal
1,000-2,000	0.10-0.30	2-4	2-4	8-12
	0.30-0.60	2-4	2-4	8-14
	0.60-1.00	na	na	na
2,000-6,000	0.10-0.30	3-5	3-5	12-18
	0.30-0.60	4-8	2-6	12-24
	0.60-1.00	4-8	2-6	na
6,000-9,000	0.10-0.30	4-6	4-6	15-20
	0.30-0.60	5-7	3-7	15-24
	0.60-1.00	6-8	3-8	na
9,000-18,000	0.10-0.30	5-8	4-6	15-24
	0.30-0.60	na	3-7	na
	0.60-1.00	na	3-7	na

หมายเหตุ : kg/m³-d \times 62.4280 = lb/10³ ft³-d

ตารางที่ 2.6 ค่าความเร็วไหลขึ้นและความสูงของถังปฏิกริยาที่แนะนำสำหรับถังปฏิกริยาเยอเอสบี (Tchobanoglous, Burton และStensel, 2004)

Wastewater type	Upflow velocity , m/h		Reactor height , m	
	Range	Typical	Range	Typical
COD nearly 100% soluble	1.0-3.0	1.5	6-10	8
COD partially soluble	1.0-1.25	1.0	3-7	6
Domestic wastewater	0.8-1.0	0.7	3-5	5

หมายเหตุ : m 3.2808 = ft. , m/h 3.2808 = ft/h.

(4) อุณหภูมิในการเดินระบบ (Operating temperature)

โดยส่วนใหญ่แล้วการเดินระบบเยอเอสบีจะกระทำที่อุณหภูมิ 30-35 องศาเซลเซียส แต่ในบางกรณีอาจเดินระบบที่อุณหภูมิต่ำกว่านี้ได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับคุณภาพของตะกอนในระบบไร้อากาศ (anaerobic sludge) และลักษณะของน้ำเสียด้วย (Lin and Yang, 1991) ตัวอย่างของภาระสารอินทรีย์ที่สัมพันธ์กับบทบาทของอุณหภูมิที่มีผลต่อน้ำเสียที่มีส่วนประกอบหลัก ได้แก่ ซีโอดีละลายน้ำ (soluble COD) (Tchobanoglous, Burton และStensel, 2004)

(5) บทบาทของสภาพด่างของระบบเยอเอสบี (UASB alkalinity role)

ผลจากน้ำเข้าระบบทั้งหมดจนกระทั่งออกจากระบบ มีความสัมพันธ์กับการสูญเสียสภาพด่างสุทธิออกจากระบบน้อย ดังนั้นหน้าที่ของสภาพด่าง จึงได้แก่เป็นตัวตั้งต้นควบคุมการลดลงของพีเอชในบริเวณที่มีก๊าซไฮโดรเจน (H_2 zone) เกิดขึ้นสูง สภาพด่างที่เติมเสริมลงในน้ำเข้าระบบในที่สุดแล้วจะกลายเป็นของเสียในน้ำออกจากระบบ ตัวอย่างเช่น ของเสียประเภทคาร์โบไฮเดรตมีความต้องการสภาพด่าง 1.2-1.6 กรัมสภาพด่างในรูปแคลเซียมคาร์บอเนตต่อกรัมซีโอดีน้ำเข้าระบบ (g Alk as $CaCO_3$ /g influent COD) ซึ่งทำให้พอเพียงในการรักษาพีเอชสูงกว่า 6.6 (Speece, 1996)

2.4.3.3 ชนิดของจุลินทรีย์ในระบบเยอเอสบี

Methanoseata และMethanosarcina species เป็นแบคทีเรียสร้างก๊าซมีเทนเพียง 2 กลุ่ม ซึ่งสามารถย่อยสลายอะซิเตตได้ Westernman's team ได้รายงานไว้ว่า ความเข้มข้นเริ่มต้นต่ำสุด (The minimum threshold concentrations : S_{min}) มีความแตกต่างกันสำหรับการบริโภคอะซิเตตของแบคทีเรียสร้างมีเทน ดังนี้ 67, 24 และ 4 มิลลิกรัมต่อลิตร สำหรับ *Methanosacina barkeri* , *Methanosacina mазie* และ *Methanoseata* ตามลำดับ (Speece, 1996)

การรวมตัวและเสริมการทำงานซึ่งกันและกันของมวลชีวภาพที่รวมตัวกันในบางครั้งมีประโยชน์จากการบริโภคของฟิล์มชีวภาพ และเมื่อบุจุลินทรีย์ในกระบวนการไร้อากาศ

ความพิเศษของกลุ่มจุลินทรีย์ไร้อากาศเหล่านี้ในฟิล์มชีวภาพ และเมื่อดูจุลินทรีย์ ทำให้เกิดการ ทำงานร่วมกันสูงสุดระหว่างสิ่งมีชีวิตที่ทำงานร่วมกัน โดยลดระยะทางในการแพร่เพื่อส่งผ่านใน กระบวนการเมแทบอลิซึม เซลล์ที่มีความสัมพันธ์ใกล้ชิดหรืออยู่เป็นชุมชนจะมีความได้เปรียบใน การย่อยสลายสับสเตรทที่ผลิตก๊าซไฮโดรเจน(H_2 -producing substrates) เช่น คาร์โบไฮเดรต โพรไพ โอเนต บิวทิเรต เอทานอล (CH_3CH_2OH) และ โพรพานอล ($CH_3CH_2CH_2OH$) เป็นต้น

จากโครงสร้างของกลุ่มจุลินทรีย์ในระบบไร้อากาศ สังเกตพบแบคทีเรียที่ คล้ายกับ *Methanosarcina* ซึ่งคาดว่ามีความสามารถจำเพาะ (specific activity) อยู่ในชั้นนอกของ กลุ่มจุลินทรีย์ไร้อากาศซึ่งมีจำนวนมากกว่าแบคทีเรียที่คล้ายกับ *Methanosaeta* ในชั้นที่อยู่ถัดเข้าไป ภายใน และพบแบคทีเรียชนิดเด่นที่ทำหน้าที่หมัก (fermentative bacteria) อยู่ในชั้นนอก แต่ ในทางตรงข้ามแบคทีเรียที่ย่อยสลายโพรไพโอเนต(propionate-degrading bacteria) จะปรากฏเด่น อยู่ลึกเข้าไปข้างใน จุลินทรีย์ที่บริโภคโพรไพโอเนตจะหยุดอยู่ด้านในที่ว่างของฟิล์มชีวภาพ หรือ หลบอยู่ในเมื่อดตะกอนจุลินทรีย์ ขณะที่แบคทีเรียสร้างก๊าซมีเทนจากการบริโภคก๊าซไฮโดรเจน ปรากฏเด่นในชั้นนอกสุด กิจกรรมของแบคทีเรียสร้างอะซิติก(aceticlastic activity) จะกระจาย สม่ำเสมอทั่วผิวที่อยู่ถัดเข้าไปของฟิล์มชีวภาพหรือเมื่อดจุลินทรีย์ (การเปลี่ยนอะซิติกไปเป็นก๊าซ มีเทนไม่ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนกับโพรไพโอเนต) แต่ถึงอย่างไรก็ตามผิวหน้าชั้น ถัดไปยังคงมีแบคทีเรียที่คล้าย *Methanosaeta* (*Methanothrix*) ปรากฏโดดเด่นอยู่ (Guiot และคณะ, 1992 อ้างถึงใน Speece, 1996)

ซึ่งในระบบยูเอเอสบีมีความเร็วไหลขึ้นช่วยกำหนดค่าความดันจำเพาะ คงที่ (constant selection pressure) ของจุลินทรีย์ซึ่งสามารถเกาะกันได้เพื่อก่อตัวเป็นเมื่อดตะกอน จุลินทรีย์และจมตัวได้ดี (Paussand Guiot, 1993 อ้างถึงใน Speece, 1996)

De Zeeuw (1987) อ้างถึงใน Hulshoff Pol และคณะ (2004) อธิบาย รูปแบบต่างๆ ของเมื่อดตะกอนในการทดลองเริ่มต้นเดินระบบ(start-up) ของระบบยูเอเอสบีระดับ ห้องปฏิบัติการทดลองโดยใช้กรดไขมันระเหยเป็นสับสเตรทประกอบด้วย 3 รูปแบบ ดังนี้

(1) เมื่อดตะกอนทรงกลมอัดแน่น มีองค์ประกอบหลักเป็นแบคทีเรียรูปร่าง แบบท่อน (rod-shaped bacteria) ลักษณะคล้าย *Methanothrix soehngenii* สายสั้น หรือเซลล์เดี่ยว แสดงดังภาพที่ 2.10 (ก)

(2) เมื่อดตะกอนค่อนข้างกลม มีองค์ประกอบหลักเป็นแบคทีเรียแบบเส้น ใย (filamentous bacteria) สานกันหลวมๆ เกาะติดกับอนุภาคที่สอดแทรกอยู่ แบคทีเรียที่พบ โดยทั่วไปมีลักษณะคล้าย *Methanothrix soehngenii* แสดงดังภาพที่ 2.10 (ข)

(3) เมื่อดตะกอนทรงกลมอัดแน่น ประกอบด้วยแบคทีเรียกลุ่ม *Methanosarcina*-type เป็นกลุ่มเด่น แสดงดังภาพที่ 2.11

ซึ่งการเกิดตะกอนจุลินทรีย์แต่ละชนิด อธิบายด้วยพื้นฐานของการคัดเลือกของตะกอน และการคัดกรองและขยายตัวของชั้นตะกอนจมตัว และความแตกต่างของแรงดัน และอายุสลัดจ์ แต่เมื่อตะกอน *Methanosarcina* จะพัฒนาและรวมกลุ่มกันโดยไม่ขึ้นอยู่กับค่าแรงดัน ซึ่งภายในกลุ่มนี้จะมีโพรงจำนวนมากที่สามารถเป็นที่อยู่ของแบคทีเรียชนิดอื่น อย่างไรก็ตามการทดลองนี้ใช้เพียงอะซิเตตความเข้มข้น 1 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตร เป็นสับสเตรทเพียงอย่างเดียว ซึ่ง *Methanosarcina* สามารถที่จะเจริญได้ดีกว่า *Methanotrix*



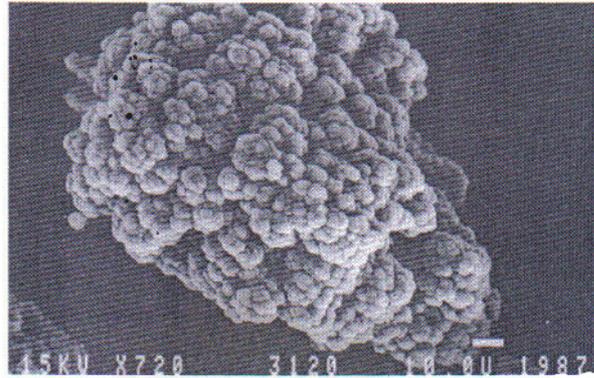
(ก)

(ข)

ภาพที่ 2.10 รูปร่างของแบคทีเรีย (Hulshoff Pol และคณะ, 2004)

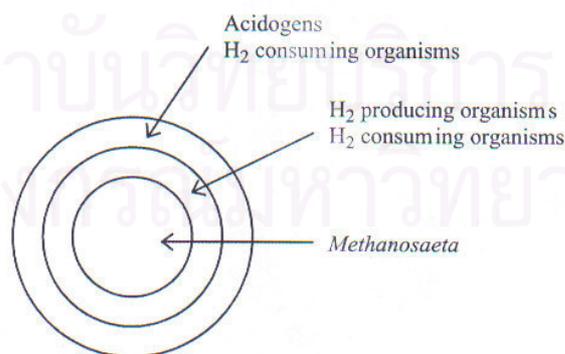
(ก) แบคทีเรียรูปร่างแบบท่อน (rod-shaped bacteria) คล้าย *Methanotrix soehngenii*

(ข) แบคทีเรียรูปร่างแบบเส้นใย (filamentous bacteria) ลักษณะคล้าย *Methanotrix soehngenii*



ภาพที่ 2.11 เม็ดตะกอนจุลินทรีย์ที่ประกอบด้วยแบคทีเรียกลุ่ม *Methanosarcina* (Hulshoff Pol และคณะ, 2004)

จากการทดลองของ McLeod และคณะ (1990) อ้างถึงใน Hulshoff Pol และคณะ (2004) อ้างว่ากลุ่มจุลินทรีย์ที่ย่อยสลายซูโครส เป็นแกนกลางและจะมีจุลินทรีย์กลุ่มอื่นๆ มาเกาะกันเป็นชั้นซ้อนกัน ดังภาพที่ 2.12 โดยที่ชั้นนอกสุดเป็นแบคทีเรียที่ทำหน้าที่หมักโดยใช้สับสเตรทที่อยู่ในสารละลาย ได้ผลิตภัณฑ์เป็นกรดอินทรีย์ซึ่งเป็นสับสเตรทให้กับจุลินทรีย์สร้างอะซิเตตต่อไป และในชั้นนี้ยังมีจุลินทรีย์ใช้ก๊าซไฮโดรเจนอิสระ (free H_2) ชั้นกลางมีจุลินทรีย์บริโภคน้ำตาลไฮโดรเจนอยู่ด้วยเช่นกันซึ่งจะร่วมกันกำจัดก๊าซไฮโดรเจนที่เกิดจากจุลินทรีย์ที่สร้างอะซิเตต (H_2 -producing acetogens) เหลือแต่อะซิเตตให้ *Methanotrix* จากการรวมกันและเรียงระดับชั้นผู้บริโภคน้ำตาล (trophic groups) ที่แตกต่างกันทำให้การทำงานของจุลินทรีย์สร้างอะซิเตต อยู่ในระดับสูงอย่างต่อเนื่อง



ภาพที่ 2.12 องค์ประกอบของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ เสนอโดย McLeod และคณะ (Hulshoff Pol และคณะ, 2004)

ปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อเมื่อดตะกอนจุลินทรีย์ในระบบไร้อากาศ (Boonyakitsombut, 2004)

- ต้องการแรงขับทางชลศาสตร์ (hydrodynamic shear force) โดยมีความเร็วไหลที่สูง และระยะเวลาพักชลศาสตร์ต่ำ (low HRT) ในระยะเริ่มสร้างเมื่อดตะกอนจุลินทรีย์เพื่อไล่อุจลินทรีย์บางส่วนที่รบกวนการเกิดเมื่อดตะกอนจุลินทรีย์ออกไป อัตราการระสารถอินทรีย์ต้องเริ่มที่ความเข้มข้นต่ำ แล้วจึงค่อยๆเพิ่มความเข้มข้นขึ้นไป ถ้าอัตราการระสารถอินทรีย์มีค่าสูงเกินไปจะทำให้เมื่อดตะกอนอ่อนแอ และมีการสร้างก๊าซมากเกินไป ซึ่งจะเป็นผลให้ไม่เกิดการรวมตัวของเมื่อดตะกอน และมีการชะล้าง (wash-out) ของเซลล์ออกไป

- ลักษณะของน้ำเสียมีผลต่อรูปแบบ องค์ประกอบ และโครงสร้างของเมื่อดตะกอน สัปดาห์ที่มีพลังงานสูง เช่น คาร์โบไฮเดรต ทำให้รูปแบบเมื่อดตะกอนมีเอ็กโซตราเซลล์ลาโพลิเมอร์ (Extracellular polymer ; ECP) เส้นใยยึดเกาะระหว่างเซลล์รวมตัวกัน

- ลักษณะของหัวเชื้อตะกอนจุลินทรีย์ (seed sludge) ที่มีน้ำหนักจะมีข้อได้เปรียบซึ่งเกิดการชะล้างออกไปได้น้อย และการเติมโพลิเมอร์ และอิออนบวก เช่น Ca^{2+} , Mg^{2+} , Fe^{2+} และ Fe^{3+} สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการสร้างเมื่อดตะกอนได้อีกด้วย

- อุณหภูมิและค่าพีเอชก็มีส่วนสำคัญเช่นกัน โดยอุณหภูมิที่เหมาะสมอยู่ระหว่าง 30-35 องศาเซลเซียส ถ้าต่ำกว่า 30 องศาเซลเซียส จะเกิดการยับยั้งขึ้น ส่วนค่าพีเอชที่เหมาะสมนั้นอยู่ระหว่าง 5.5-8.0 ถ้าค่าพีเอชอยู่ในช่วง 8.5-11.0 จะทำให้เมื่อดตะกอนจุลินทรีย์อ่อนแอได้ แต่ค่าพีเอชต่ำกว่า 5.0 จะทำให้ความแข็งแรงของเมื่อดตะกอนจุลินทรีย์ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ

ข้อดี-ข้อเสีย ของระบบยูเอเอสบี

ข้อดี

- ลดค่าใช้จ่าย เพราะไม่ต้องใช้ตัวกลางให้จุลินทรีย์ยึดเกาะ
- รักษามวลจุลินทรีย์ได้สูง จึงสามารถรับภาระสารถอินทรีย์ได้สูง
- เนื่องจากเป็นระบบปิด จึงสามารถนำก๊าซมีเทนที่เป็นองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นไปใช้เป็นเชื้อเพลิงได้
- สามารถแยกตะกอนจุลินทรีย์ออกจากน้ำเสียได้ง่าย

ข้อเสีย

- ต้องใช้ระยะเวลาในการเริ่มต้นเดินระบบ (start-up) ก่อนใช้งาน
- ต้องเลี้ยงจุลินทรีย์ให้จับตัวเป็นเมื่อด มิฉะนั้นจะด้อยประสิทธิภาพ

-ต้องพยายามรักษาตะกอนจุลินทรีย์ในระบบให้เหมาะสม เพื่อมิให้อัตราการสารอินทรีย์ลดลง

-ต้องมีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพที่เหมาะสมเพื่อช่วยในการกวนตะกอน

-น้ำเสียแต่ละประเภทมีผลต่อการเกิดและคุณสมบัติของเม็ตะกอนจุลินทรีย์แตกต่างกัน

2.5 การพัฒนาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัด แบบประสิทธิภาพสูง

จากความแตกต่างของสภาวะการทำงานของจุลินทรีย์ 2 กลุ่มในระบบไร้อากาศ ได้แก่ จุลินทรีย์สร้างกรด และจุลินทรีย์สร้างก๊าซมีเทน ดังที่ได้กล่าวไปแล้วนั้น การแยกขั้นตอน (separation of phase) จึงเป็นวิธีการเลือกสภาวะที่เหมาะสม (optimal conditions) ในการเดินระบบของแต่ละกระบวนการ ซึ่งจะช่วยให้เพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของจุลินทรีย์ เป็นเหตุให้อัตราการสร้างกรดและการสร้างก๊าซชีวภาพสามารถเกิดขึ้นอย่างสูงสุด ระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศจึงมีประสิทธิภาพสูงขึ้นด้วย

อย่างไรก็ตาม ในแต่ละขั้นตอนก็ยังคงมีจุลินทรีย์ของขั้นตอนอื่นปะปนอยู่ แต่ไม่ได้มีบทบาทสำคัญในขั้นตอนที่มีสภาวะที่ไม่เหมาะสมกับการเจริญเติบโตหรือการทำงาน ซึ่งจุลินทรีย์กลุ่มนี้อาจเรียกว่า จุลินทรีย์กลุ่มที่ไม่เด่น ก็ได้

เทคนิคที่เหมาะสมที่สุดในการแยกกระบวนการออกเป็นสองขั้นตอน คือ การควบคุมอัตราการป้อนสารอินทรีย์ โดยใช้อัตราการป้อนสารอินทรีย์ ในถังสร้างกรดสูง (HRT ต่ำ) ซึ่งจะทำให้มีปริมาณกรดไขมันระเหยสูง มีผลในการยับยั้งการทำงานของแบคทีเรียกลุ่มสร้างก๊าซมีเทนในถังสร้างกรดโดยตรงและการที่ระยะเวลาพักทางชลศาสตร์ต่ำ ส่งผลให้จุลินทรีย์สร้างมีเทนเจริญเติบโตไม่ทัน ส่วนในถังสร้างก๊าซมีเทนจะใช้อัตราการป้อนสารอินทรีย์ ต่ำกว่าในถังสร้างกรด (HRT ยาวนานกว่า) (นาฏนดา ธรินทร์วรกุลปต์, 2537) จากเทคนิคดังกล่าวจะส่งผลถึงค่าพีเอชในระบบด้วย ซึ่งมีผลต่อจุลินทรีย์แต่ละประเภท จึงอาจใช้ค่าพีเอชในการแยกขั้นตอนได้เช่นกัน

2.5.1 ลักษณะการทำงานของระบบไร้อากาศแบบสองขั้นตอน

ระบบบำบัดไร้อากาศแบบสองขั้นตอน ประกอบด้วยถังปฏิริยาจำนวน 2 ถังต่อเนื่องกัน

ถังปฏิริยาแรก ได้แก่ ถังปฏิริยาสร้างกรด เดินระบบด้วยสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการเจริญเติบโตและการทำงานของจุลินทรีย์สร้างกรด ซึ่งในขั้นตอนนี้จะเกิดกระบวนการสร้างกรดไขมันระเหย โดยค่าพีเอชที่ทำให้การสร้างกรดสูงสุดอยู่ในช่วงพีเอช 4-6.5 อายุสัปดาห์อยู่ระหว่าง 2 ชั่วโมง ถึง 2 วัน ซึ่งยากต่อการเพิ่มจำนวนของจุลินทรีย์สร้างก๊าซมีเทน ภายใต้สภาวะนี้ทำให้เกิดการสะสมของกรดไขมันระเหยซึ่งส่งผลให้ค่าพีเอชลดต่ำลง (Speece, 1996)

ถึงปฏิบัติการที่สอง ได้แก่ ถึงปฏิบัติการสร้างก๊าซมีเทน เติมนระบบด้วยสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการเจริญเติบโตและการทำงานของจุลินทรีย์สร้างก๊าซมีเทน ซึ่งในขั้นตอนนี้จะเกิดกระบวนการสร้างก๊าซมีเทนโดยการใส่กรดไขมันระเหยจากขั้นตอนแรกเป็นสับสเตรทและการทำปฏิกริยากันของก๊าซไฮโดรเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ สำหรับขั้นตอนนี้ค่าพีเอช ที่ทำให้การสร้างก๊าซมีเทนสูงสุดอยู่ในช่วงค่าพีเอช 6.5-8.2 ใช้อายุสตัลด์จมากกว่า 7-15 วัน เพื่อป้องกันการชะล้างของจุลินทรีย์สร้างก๊าซมีเทน (Speece, 1996)

จากการศึกษาของ The Aivasidis group (1988) อ้างถึงใน Speece (1996) กระบวนการสองขั้นตอนที่มีค่าพีเอช 4-5 ในขั้นตอนแรกนั้น มีคุณภาพของน้ำออกจากกระบวนดีกว่าสามารถกำจัดของแข็งแขวนลอย (SS) และซีโอดี ได้มากกว่า อัตราภาระสูงสุด (maximum loading rates) ของขั้นตอนเดียว และการกำจัดซีโอดีในขั้นตอนสร้างก๊าซมีเทนของระบบไร้อากาศแบบสองขั้นตอนนี้มีค่ามากกว่าของระบบแบบขั้นตอนเดียว 2 เท่า และมีความคงตัวสูงกว่าด้วย

แต่ข้อเสียที่ปรากฏในการนำไปประยุกต์ใช้ เป็นเรื่องของค่าใช้จ่ายและการเดินระบบเพื่อให้เกิดการแยกขั้นตอนอย่างแท้จริง

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ระบบบำบัดน้ำเสียแบบ ยูเอเอสบีซึ่งมีความสามารถในการรับภาระสารอินทรีย์ สูงกว่าระบบไร้อากาศแบบอื่นๆ และมีประสิทธิภาพสูงในการบำบัดน้ำเสีย ซึ่งทำให้น้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วมีคุณภาพดี เนื่องจากแบคทีเรียจะถูกเลี้ยงให้จับตัวกันเป็นเม็ดขนาดใหญ่จนกระทั่งมีน้ำหนักมากและสามารถตกตะกอนได้ดีป้องกันมิให้แบคทีเรียหลุดออกจากกระบวนได้ดีกว่าระบบบำบัดแบบอื่นและไม่ทำให้ถึงปฏิบัติการต้องเสียปริมาตรใช้งาน (มันสิน ตันฑกุลเวศม์, 2542) ส่วนแยกของเหลวและก๊าซ ในถึงปฏิบัติการยูเอเอสบี ทำหน้าที่เก็บและกระจายก๊าซชีวภาพและแยกมวลจุลินทรีย์ออกจากน้ำที่ออกจากถึงปฏิบัติการ มวลจุลินทรีย์จะตกกลับอยู่ในถึงปฏิบัติการเนื่องจากความเร็วไหลขึ้นที่ลดลงในบริเวณตกตะกอน (Angenent และDague, 1995) ซึ่งส่วนนี้จัดได้ว่าเป็นส่วนประกอบที่สำคัญของระบบยูเอเอสบีสำหรับบำบัดน้ำเสียบางประเภท จึงมีความพยายามพัฒนารูปแบบให้มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น โดย Caixeta, Cammarota และXavier (2002) ศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมผลิตเนื้อสัตว์ ซึ่งใช้ระบบยูเอเอสบีปริมาตร 7.2 ลิตร ติดตั้งระบบแยก 3 สถานะ (a solid-liquid-gas separation system) รูปแบบใหม่ ซึ่งประกอบด้วยแผ่นหักเห 3 ชั้น ติดอยู่กับแกนกลาง และวางสลับซ้อนเหลื่อมกัน 1.5 เซนติเมตร ทำมุม 30 องศา บำบัดน้ำเสียที่มีความเข้มข้นซีโอดี, บีโอดี, ไขมัน, ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด และของแข็งแขวนลอยระเหย เท่ากับ 2,000-6,000 , 1,300-2,300 , 40-600 , 850-6,300 และ 660-5,250 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ และมีค่าพีเอช 6.03-6.06 เติมนระบบต่อเนื่องด้วยระยะเวลาพักทางชลศาสตร์ 14, 18 และ 22 ชั่วโมง เป็นระยะเวลา 80 วัน ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ซึ่งน้ำเสียดังกล่าวได้ผ่านกระบวนการบำบัดเบื้องต้นด้วยตะแกรง

กรอง (screening) การทำให้ลอย (flotation) และการปรับสภาพ (equalization) พบว่ามีการสร้างก๊าซมีเทนเฉลี่ย 11 ลิตรต่อวัน ที่สภาวะมาตรฐาน (STP) ในการทดลอง 3 ช่วง เติมน้ำด้วยค่าการสารอินทรีย์ ช่วง 2.7-10.8 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดี และบีโอดีร้อยละ 77-90 และร้อยละ 95 ตามลำดับ ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอยทั้งหมดร้อยละ 81-86 ผลการทดลองดังกล่าวสนับสนุนว่า ระบบแยก 3 สถานะที่ทำการทดลองนี้มีประสิทธิภาพที่เหมาะสม (optimum efficiency) เป็นไปได้ที่จะประยุกต์ในการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมอื่น

Klinsukont และคณะ (1999) ได้ทำการศึกษาวิจัยต่อเนื่องจากระยะแรกในโครงการบำบัดน้ำเสียของโรงงานผลิตแป้งจากข้าวด้วยระบบโรงงานต้นแบบโดยใช้ระบบหมักไร้อากาศชนิดยูเอเอสบี ในการศึกษาวิจัยนี้เป็นการศึกษาเมื่อดึงตะกอนจุลินทรีย์ในระบบยูเอเอสบี โดยใช้ตะกอนแบคทีเรียจากก้อนบ่อหมักของโรงงานขอสงเป็นหัวเชื้อตะกอน น้ำเสียที่ใช้มีลักษณะดังนี้ ค่าพีเอช เท่ากับ 4.67 ค่าบีโอดี, ซีโอดี, ของแข็งแขวนลอย, ไนโตรเจนทั้งหมด และฟอสฟอรัส 2,634 , 3,761 , 1,182 , 57 และ 72 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ผลการเดินระบบยูเอเอสบีเป็นเวลา 9 เดือน พบว่าต้องมีการบำบัดน้ำเสียขั้นต้น โดยระบบ Solubilization เพื่อลดค่าของแข็งแขวนลอยของน้ำเสียไม่ให้เกิน 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ก่อนสูบเข้าถังยูเอเอสบี มิฉะนั้นจะเกิดการลอยตัวของตะกอนแบคทีเรีย เมื่อเดินระบบที่อัตราการรับน้ำเสียสูงสุดที่ค่าระยะเวลาพักทางชลศาสตร์ 16-18 ชั่วโมง ระบบสามารถรับค่าการซีโอดีและบีโอดีได้ 2.23 และ 2.02 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีและบีโอดีได้ร้อยละ 81 และ 95 ตามลำดับ สรุปว่ามีความเป็นไปได้ในการผลิตแบคทีเรียแบบเม็ดในถังยูเอเอสบี จากแบคทีเรียท้องถิ่นที่นำมาจากก้อนบ่อหมักของโรงงานขอสง ผลการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการและโรงงานต้นแบบ สามารถยืนยันได้ในเรื่องนี้ แต่เม็ดตะกอนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5-1.0 มิลลิเมตร เกิดขึ้นช้ำมาก ดังนั้นถ้าต้องการให้ได้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 มิลลิเมตร หรือใหญ่กว่าจะต้องใช้เวลาเดินระบบหลายปี จึงจะยืนยันผลได้แน่นอน

จากนั้น Klinsukont และ Ploypatarapinyo (2000) ได้ทำการศึกษาวิจัยการบำบัดน้ำเสียของโรงงานผลิตแป้งจากข้าวในระดับโรงงานต้นแบบโดยใช้ระบบหมักไร้อากาศที่เรียกว่า ระบบยูเอเอสบี น้ำเสียที่ได้มีลักษณะเฉลี่ยดังนี้ ค่าพีเอช เท่ากับ 4.6 ค่าบีโอดี, ซีโอดี, ของแข็งแขวนลอย, ไนโตรเจนทั้งหมด และฟอสฟอรัส 2,700 , 5,400 , 2,600 , 100 และ 60 มิลลิกรัมต่อลิตร ผลการเดินระบบตลอดเวลา 24 เดือน จนอยู่ที่สภาวะคงที่ พบว่าระบบยูเอเอสบีต้องทำการบำบัดขั้นต้นก่อน โดยใช้ระบบ Solubilization เพื่อลดค่าของแข็งแขวนลอยของน้ำเสียไม่ให้เกิน 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ก่อนสูบเข้าถังยูเอเอสบี มิฉะนั้นจะเกิดการลอยตัวของเม็ดตะกอนแบคทีเรีย เมื่อเข้าระบบยูเอเอสบีที่อัตราการรับน้ำเสียสูงสุดที่ค่าระยะเวลาพักทางชลศาสตร์ 10 ชั่วโมง ระบบสามารถรับค่าการซีโอดีและบีโอดีได้ 4.8 และ 3.3 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีอยู่

ในช่วงร้อยละ 85-90 ในขณะที่สามารถกำจัดบีโอดีได้ไม่ต่ำกว่าร้อยละ 90 ถ้าจะมีเทนที่เกิดขึ้นมีค่า 0.35 ลูกบาศก์เมตรต่อกิโลกรัมบีโอดีที่ถูกกำจัด

และเนื่องจากระบบยูเอเอสบีมีความสามารถรับภาระสารอินทรีย์สูงได้ดี จึงมักจะมีการนำไปใช้ในการศึกษาเพื่อบำบัดน้ำเสียที่มีความเข้มข้นสูง ชานาญ กายประสิทธิ์ (2538) ศึกษาประสิทธิภาพของระบบยูเอเอสบีในการบำบัดน้ำเสียความเข้มข้นสูง โดยใช้ถังยูเอเอสบีขนาด 192 ลิตร จำนวน 2 ถัง ที่มีอุปกรณ์แยกก๊าซ-ตะกอนแขวนลอยแตกต่างกัน น้ำเสียที่ใช้ในการทดลองนี้เป็นน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้น้ำسابะรดเข้มข้นมาเจือจางให้มีค่าซีโอดีประมาณ 9,000 และ 12,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ป้อนเข้าสู่ถังปฏิกรณ์ยูเอเอสบีทั้งสองถังอย่างต่อเนื่อง ภายใต้ระยะเวลาเก็บกักน้ำ 24 ชั่วโมง ทำให้มีค่าภาระสารอินทรีย์ 9.0 และ 12.0 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน ตามลำดับ และได้มีการเติมไนโตรเจนและฟอสฟอรัสเพื่อให้มีอัตราส่วน ซีโอดี : ไนโตรเจน : ฟอสฟอรัส เท่ากับ 100 : 3 : 1 ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่า ระบบยูเอเอสบีสามารถบำบัดน้ำเสียความเข้มข้นสูงได้อย่างมีประสิทธิภาพที่ค่าภาระสารอินทรีย์ 9.0 และ 12.0 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน สามารถลดซีโอดีได้ร้อยละ 80-90 และร้อยละ 83-90 ตามลำดับ ปริมาณก๊าซชีวภาพทั้งหมดที่เกิดขึ้นเฉลี่ย 431-561 และ 565-641 ลิตรต่อวัน ตามลำดับ โดยมีก๊าซมีเทนในสัดส่วนร้อยละ 70 และร้อยละ 69-73 ตามลำดับ อัตราการผลิตก๊าซมีเทนประมาณ 0.22-0.24 และ 0.22 ลูกบาศก์เมตรต่อกิโลกรัมซีโอดีที่ถูกกำจัด ตามลำดับ ความแตกต่างของอุปกรณ์แยกก๊าซ-ตะกอนแขวนลอยไม่ได้แสดงผลที่แตกต่างต่อประสิทธิภาพของระบบอย่างมีนัยสำคัญ และพบว่าระบบยูเอเอสบีดังกล่าวทำงานได้ดีขึ้น เมื่อเติมนิเกิลและโคบอลต์ให้กับน้ำเสียด้วยอัตราส่วน ซีโอดี : นิเกิล และ ซีโอดี : โคบอลต์ เท่ากับ 100 : 0.1 และ 100 : 0.1 ตามลำดับ

ในระบบบำบัดแบบไร้อากาศมีการเปลี่ยนสารละลายอินทรีย์ส่วนมากไปเป็นก๊าซชีวภาพซึ่งประกอบด้วยก๊าซมีเทนร้อยละ 60 และคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 30 และมีมวลชีวภาพเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น (อุตสาหกรรม, กระทรวง.กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2540) การสร้างก๊าซมีเทนโดยจุลินทรีย์สร้างก๊าซมีเทนนั้นมีข้อจำกัดทั้งสภาวะที่ต้องเป็นแบบไร้อากาศอย่างเด็ดขาด สับสเตรทที่ต้องเป็นกรดไขมันระเหยที่มีคาร์บอนไม่เกิน 2 อะตอม และเจริญเติบโตได้ดีในช่วงค่าพีเอชระหว่าง 6.8 – 7.2 (มันสิน ตันฑกุลเวศม์, 2542) ซึ่งมีความแตกต่างจากจุลินทรีย์พวกที่สร้างกรดจากการศึกษาของ Sanders (2001) กล่าวว่า กระบวนการไฮโดรไลซิสอนุภาคสับสเตรท เมื่อค่าพีเอชและอุณหภูมิคงที่ปริมาณพื้นผิวในการไฮโดรไลซิสเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญสำหรับอัตราการไฮโดรไลซิสส่วนพารามิเตอร์อื่น ๆ มีความสำคัญเป็นอันดับรองลงมา

การย่อยสลายแบบไร้อากาศนั้น เป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพสำหรับบำบัดน้ำเสียที่มีปริมาณสารอินทรีย์สูง ระหว่างกระบวนการบำบัด จุลินทรีย์จะทำการไฮโดรไลซ์ ไขมัน น้ำมัน และคาร์โบไฮเดรต ในรูปของ น้ำตาล แป้ง เพคติน (pectin) และเพนโตซาน (pentosan) ไปเป็นกรด

ไขมันระเหย และไอโซบิวทิลแอลกอฮอล์ (isobutyl alcohol) สารประกอบเหล่านี้มักจะมิกไลน์เหม็น และเป็นมลพิษทางอากาศ (Pasertsan และ Pasertsan, 1996)

Azbar, Ursillo และ Speece (2001) ได้ศึกษาบทบาทของความยากง่ายของสับสเตรท (ขนาดโมเลกุล) และรูปแบบกระบวนการในการบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ เพื่อกำหนดพารามิเตอร์ของเทคโนโลยีของจุลินทรีย์สร้างก๊าซมีเทนที่เหมาะสม ซึ่งใช้สับสเตรท 5 ชนิด ได้แก่ กลูโคส โพรไพโอเนต บิวไทเรต เอทานอล และแลคเตต ผสมกับกากของเสียซึ่งประกอบด้วย คาร์โบไฮเดรต ร้อยละ 60 โปรตีนร้อยละ 34 และไขมันร้อยละ 6 เติลระบบด้วยถังปฏิกรณ์ 5 รูปแบบ ที่อุณหภูมิ 35 ± 1 องศาเซลเซียส ได้แก่ (1) batch-fed single-stage continuous stirred tank reactor (CSTR) (2) continuously fed single-stage CSTR (3) two-phase CSTR (4) two-stage CSTR และ (5) single-stage UASB โดยระบบรูปแบบที่ 1-4 เติลระบบด้วยระยะเวลาพักทางชีวศาสตร์และอายุสัปดาห์ 20 วัน ส่วนระบบรูปแบบที่ 5 เติลระบบด้วยระยะเวลาพักทางชีวศาสตร์ 2 วัน ป้อนสับสเตรทความเข้มข้น 20,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ใช้ระยะเวลาเติลระบบอย่างน้อย 60 วัน หรือเท่ากับ 3 เท่าของอายุสัปดาห์ พบว่าความยากง่ายของสับสเตรทที่พบมีนัยสำคัญน้อยต่อ ระบบรูปแบบ two-phase, two-stage และ ยูเอสบี แต่ขนาดของโมเลกุลและชนิดคาร์บอนในสารประกอบ หรือตัวกลาง มีนัยสำคัญต่อประสิทธิภาพการย่อยสลายสับสเตรทในน้ำเข้าระบบ ภายใต้ระบบรูปแบบ single-stage CSTR ซึ่งมีผลผลิตสับสเตรทที่แสดงออกมาแก่ที่สุด ซีโอดีในน้ำออกมีค่าสูงสุด และพบโพรไพโอเนตมากที่สุด ในซีโอดีที่เหลืออยู่ในน้ำออก

สำหรับทางเลือก การบำบัด Pasertsan และ Pasertsan (1996) แนะนำว่าควรทำในถังปฏิกรณ์ซึ่งทำให้ได้รับก๊าซชีวภาพ ซึ่งสามารถผลิตได้จากจุลินทรีย์ไร้อากาศแบบมีโซฟิลิก (mesophilic anaerobes) ที่อัตรา 0.57 ลูกบาศก์เมตรต่อกิโลกรัมซีโอดีที่บริโภคต่อวัน และมีปริมาณก๊าซมีเทนร้อยละ 60-69

เนื่องจากความแตกต่างของสภาวะที่เหมาะสมของจุลินทรีย์แต่ละประเภท จึงได้มีการแยกขั้นตอนการเติลระบบออกเป็นสองขั้นตอน ซึ่งค่าพีเอชเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญในการควบคุมระบบ เพื่อให้การเติลระบบแต่ละขั้นตอนมีประสิทธิภาพ ซึ่งจากงานวิจัยต่างๆ มีการควบคุมค่าพีเอชหลายวิธีด้วยกัน เช่น การเติมสารเคมี ซึ่งอาจส่งผลดีและผลเสียต่อองค์ประกอบต่างๆ ของระบบได้ ดังตัวอย่าง การทดลองของ Van Langerak และคณะ (2000) ที่เริ่มเติลระบบถังปฏิกรณ์แบบยูเอสบีที่ใช้หัวเชื้อตะกอนเริ่มต้นจากระบบยูเอสบีของโรงงานกระดาษ ป้อนน้ำเสียที่ประกอบด้วยน้ำเสียที่เป็นกรดผสมกับแคลเซียมคาร์บอเนตความเข้มข้น 780-1,560 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าเกิดการจับกลุ่มของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์อย่างรวดเร็ว มีปริมาณแก๊สสูง ซึ่งการทำงานจำเพาะของแบคทีเรียสร้างมีเทน (specific methanogenic activity : SMA) ลดลงอย่างรวดเร็ว เป็นผลให้การกำจัดซีโอดีไม่มีประสิทธิภาพ เมื่อลดปริมาณความเข้มข้น แคลเซียมคาร์บอเนตลงเหลือ 390 มิลลิกรัมต่อลิตร

เกิดการตกตะกอนน้อยลงในกลุ่มสลัดจ์ แต่จะไปเกาะอยู่บริเวณส่วนของแก้วหรือพลาสติกของถัง ปฏิกริยาแทน

ถ้าระบบสามารถปรับสมดุลได้โดยไม่ต้องเติมสารอินทรีย์เพิ่มเข้าไปย่อมเป็นทางเลือกที่ดีอย่างแน่นอน จากการทดลองของ Alejandra, Manuel และ Carmen (2001) เริ่มเดินระบบยูเอเอสบี ปริมาตรใช้งาน 22.3 ลูกบาศก์เมตร ที่ระยะเวลาพักทางชลศาสตร์ 22 วัน นำหัวเชื้อตะกอนจุลินทรีย์จากโรงบำบัดแห่งอื่นที่เหมาะสมมาปรับสภาพเพื่อใช้งาน เพื่อให้สลัดจ์จากระบบแอกติเวตเตดสลัดจ์ (activated sludge) ของโรงงานผลิตน้ำตาลเกิดการคงตัว พบว่าสามารถกำจัดซีไอดีได้สูงถึงร้อยละ 98 ค่าเฉลี่ยร้อยละ 76 เมื่อเพิ่มภาระสารอินทรีย์จาก 0.67 จนถึง 1.024 กิโลกรัมซีไอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน และไม่มี ความจำเป็นต้องปรับสภาพความเป็นกลางให้แก่ น้ำเสียเข้าระบบ เนื่องจากความจุไบคาร์บอเนตภายในถังปฏิกริยาที่ได้รับจากเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ เมื่อป้อนด้วยสัดส่วนของสลัดจ์ร้อยละ 50 และน้ำเสยร้อยละ 50 สามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ 7.61 ลูกบาศก์เมตร ที่สภาวะมาตรฐาน และจากการศึกษาของ Dararat (1996) ยังพบว่าระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศแบบอัตราสูง (high rate) สามารถย่อยสลายอะซิเตต และโพรไพโอเนต ได้อย่างมีประสิทธิภาพที่ค่าพีเอช 6.0 ดังนั้นจึงไม่มีความจำเป็นที่จะต้องปรับค่าพีเอช จนเป็นกลาง โดยเฉพาะอย่างยิ่ง *Methanosarcina* ซึ่งเป็นแบคทีเรียสร้างก๊าซมีเทนที่สามารถเจริญที่ค่าพีเอชเหมาะสมที่ 6.0 จะเป็นประโยชน์อย่างมากในการนำไปประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำเสียที่เป็นกรด หรือมีศักยภาพผลิตความเป็นด่างได้ต่ำ โดยลดค่าใช้จ่ายในการเติมด่างเพื่อปรับค่าพีเอช ซึ่งค่าใช้จ่ายในการเดินระบบจะสามารถลดลงจนถึงจุดคุ้มทุนทางเศรษฐศาสตร์

และเมื่อแยกกระบวนการสร้างกรดเพื่อสร้างกรดอะซิติกและกระบวนการสร้างก๊าซมีเทนออกจากกันได้ จะทำให้จุลินทรีย์ในระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศมีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียและมีประสิทธิภาพในการสร้างก๊าซมีเทนเพิ่มขึ้น และสามารถควบคุมสภาวะการทำงานของระบบได้ง่ายขึ้นอีกด้วย

นอกจากนี้ Haandel & Lettinga อ้างถึงใน Seghezze และคณะ (1998) ยังกล่าวว่า การใช้ระบบแบบสองขั้นตอนนี้จะมีประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอยในถังปฏิกริยาใบแรกสูงกว่า การกำจัดสารอินทรีย์และต้องทำการกำจัดสลัดจ์ส่วนเกินและเกิดการย่อยสลายในถังปฏิกริยาใบที่สอง Wang อ้างถึงใน Seghezze และคณะ (1998) ได้ใช้กระบวนการที่ประกอบด้วยถังปฏิกริยาแบบเอชยูเอสบี และตามด้วยถังปฏิกริยาแบบอีจีเอสบี (Expanded granular sludge bed ; EGSB) และใช้งานร่วมกับถังคงตัว เดินระบบที่อุณหภูมิต่างๆ กันด้วยระยะเวลาพักทางชลศาสตร์ 2 วัน พบว่าถังปฏิกริยาเอชยูเอสบี ทำหน้าที่คล้ายกับระบบยูเอเอสบี ที่สามารถรับภาระสูง ซึ่งเกิดการไฮโดรไลซ์กำจัดของแข็งแขวนลอยได้มากกว่าร้อยละ 50 ที่อุณหภูมิมากกว่า 19 องศาเซลเซียส ระยะเวลาพักทางชลศาสตร์ของถังปฏิกริยาเอชยูเอสบีถูกประยุกต์ใช้เหมือนกับถังตกตะกอนขั้นที่หนึ่งแต่มีประสิทธิภาพการกำจัด ซีไอดี, บีไอดี และของแข็งแขวนลอยสูงกว่า และจาก

การศึกษาของ Kaijun (1994) พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอยจากน้ำเสียชุมชนของถังปฏิกริยาเอชยูเอสบี มากกว่าร้อยละ 85 อัตราการไฮโดรไลซิส เท่ากับร้อยละ 48 ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส

จึงได้มีการเดินระบบแบบสองขั้นตอนซึ่งมีผู้ศึกษาโดยทดลองนำถังปฏิกริยาแบบต่างๆมาต่อกันแล้วใช้บำบัดน้ำเสียประเภทต่างๆ นาฏนดา ธรินทรวัรคุปต์ (2537) ได้ทำการวิจัยโดยใช้ระบบตัวกลางกรอง-ยูเอสบี แบบอุณหภูมิสูง ชนิดสองขั้นตอนสำหรับบำบัดน้ำกากส่าที่มีค่าบีโอดี, ซีโอดี และ ของแข็งแขวนลอยระเหย ประมาณ 28,000, 90,000 และ 6,000-11,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ และค่าพีเอช 4.6-5.8 พบว่า ระบบมีเสถียรภาพสูงสามารถรับอัตราการป้อนสารอินทรีย์ได้สูงถึง 10.96 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน ช่วงอัตราการป้อนสารอินทรีย์ที่เหมาะสมสำหรับระบบหมักนี้คือ 6.38-10.02 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน ในส่วนของถังสร้างกรดแบบตัวกลางกรองสามารถรับอัตราการป้อนสารอินทรีย์ได้สูงถึง 46.50 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน และผลิตกรดไขมันระเหยสูงสุดเท่ากับ 4,775 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ 8.2 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน ในขณะที่ถังสร้างมีเทนแบบยูเอสบีรับอัตราการป้อนสารอินทรีย์ได้เพียง 4.04 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวันและเมื่อปริมาณกรดไขมันระเหยที่เข้าสู่ถังสร้างมีเทนเพิ่มขึ้นมากกว่า 2,250 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าการทำงานของแบคทีเรียในถังสร้างมีเทนแบบยูเอสบีเริ่มล้มเหลว

ทวิชัย วีระเศรษฐนันท์ (2540) ศึกษาสมรรถนะของระบบยูเอสบีในการบำบัดน้ำทิ้งจากบ่อกรดแบบไร้อากาศ โดยการวิจัยแบ่งออกเป็น 2 ส่วน การทดลองส่วนที่ 1 (ไม่มีถังสร้างกรด) ใช้แต่ถังปฏิกริยาเอชยูเอสบี 2 ถังที่เหมือนกัน ทดลองบำบัดน้ำเสียให้มีความเข้มข้นของซีโอดีประมาณ 5,000 มิลลิกรัมต่อลิตร และทำการทดลองที่อัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ 8 และ 10 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน การทดลองที่ 2 (มีถังสร้างกรด) ใช้ระบบยูเอสบีแบบมีถังสร้างกรด ทดลองบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ที่เตรียมจากน้ำสับประดเข้มข้นเจือจางด้วยน้ำประปา โดยเตรียมน้ำเสียให้มีความเข้มข้นซีโอดีประมาณ 3,300 , 5,000 , 6,700 และ 8,300 มิลลิกรัมต่อลิตร และทำการทดลองที่อัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ 10, 15, 20 และ 25 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน ใช้โซเดียมคาร์บอเนตเป็นสารบัฟเฟอร์ในทุกๆ การทดลอง ผลการทดลองส่วนที่ 1 พบว่า เมื่อใช้ถังปฏิกริยาเอชยูเอสบีชุดที่ 1 และ 2 ทดลองบำบัดน้ำเสียที่อัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ 8 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน ที่ระยะเวลาพักทางชลศาสตร์ 15 ชั่วโมง ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีเท่ากับร้อยละ 93 และ 92 ตามลำดับ และมีอัตราการผลิตก๊าซมีเทนเท่ากับ 0.37 และ 0.32 ลิตรต่อกรัมซีโอดีที่ถูกกำจัด ตามลำดับ เมื่อใช้ถังปฏิกริยาเอชยูเอสบีชุดที่ 1 ทดลองบำบัดน้ำเสียที่อัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ 10 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน ที่ระยะเวลาพักทางชลศาสตร์ 12 ชั่วโมง พบว่า ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีเท่ากับร้อยละ 94 และมีอัตราการผลิตก๊าซมีเทนเท่ากับ 0.37 ลิตรต่อกรัมซีโอดีที่ถูกกำจัด ส่วนถังปฏิกริยาเอชยูเอสบีชุดที่ 2 ได้เสียสมดุลการทำงาน

ก่อนถึงสภาวะคงที่ ส่วนการทดลองส่วนที่ 2 ซึ่งใช้ระบบยูเอเอสบีแบบมีถังสร้างกรดทดลองบำบัดน้ำเสียที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 10, 15, 20 และ 25 กิโลกรัมชีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน ที่ระยะเวลาพักพักทางชลศาสตร์ 12 และ 8 ชั่วโมง ตามลำดับ พบว่า ประสิทธิภาพการกำจัดชีโอดีเท่ากับร้อยละ 93, 91, 90 และ 85 ตามลำดับ และมีอัตราการผลิตก๊าซมีเทนเท่ากับ 0.31, 0.37, 0.33 และ 0.35 ลิตรต่อกรัมชีโอดีที่ถูกกำจัด ตามลำดับ เมื่อพิจารณาความเข้มข้นของโซดาแอสที่เติมให้แก่ระบบในการทดลองส่วนที่ 1 พบว่า มีค่าเท่ากับ 1.50 และ 3.0 กรัมต่อลิตร ที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 8 และ 10 กิโลกรัมชีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน ส่วนการทดลองส่วนที่ 2 เติมโซเดียมคาร์บอเนตเข้มข้นเท่ากับ 1.98, 3.00, 4.02 และ 4.98 กรัมต่อลิตร ที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 10, 15, 20 และ 25 กิโลกรัมชีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน ตามลำดับ จากผลการทดลองสรุปว่าระบบยูเอเอสบีสามารถบำบัดน้ำทิ้งจากบ่อกรดแบบไร้อากาศได้อย่างมีประสิทธิภาพและปริมาณค่าที่เติมให้ระบบน่าจะมีค่าสูงเกินไป ทำให้ค่าบำบัดน้ำเสียมีค่าสูงมาก

ทรงพล คราม โคมุท (2544) ศึกษาเปรียบเทียบความสามารถในการบำบัดชีโอดีของน้ำเสียจากลำด้วยระบบยูเอเอสบีที่ทำงานร่วมกับระบบกรองไร้อากาศจำนวน 2 คอลัมน์ ซึ่งภายในคอลัมน์ทั้งสองจะบรรจุตัวกลางพลาสติกโพลีเอทิลีนที่แตกต่างกัน การทดลองจะใช้คอลัมน์จำนวน 2 ชุด ที่ทำด้วยวัสดุพีวีซีใส ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 70 มิลลิเมตร และสูง 2,800 มิลลิเมตร โดยภายในคอลัมน์ที่ 1 จะบรรจุตัวกลางพลาสติกโพลีเอทิลีนรูปวงแหวนที่มีพื้นที่ผิว 187 ตารางเมตรต่อลูกบาศก์เมตรของตัวกลาง ในขณะที่ภายในคอลัมน์ที่ 2 จะบรรจุตัวกลางพลาสติกโพลีเอทิลีนรูปทรงกลมที่มีพื้นที่ผิว 135 ตารางเมตรต่อลูกบาศก์เมตรของตัวกลาง และกำหนดให้ความสูงของชั้นตัวกลางภายในคอลัมน์ ทั้งสองสูงเท่ากัน 1.25 เมตร และทำการป้อนน้ำเสียจากลำเป็นแบบไหลขึ้นที่อัตราสูบ 7.5 ลิตรต่อวัน โดยจะมีการแปรเปลี่ยนค่าชีโอดีของน้ำจากลำเป็น 3,500 และ 4,500 ซึ่งคิดเป็นอัตราภาระอินทรีย์ 2.33 และ 3 กิโลกรัมชีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน ตามลำดับ จากการศึกษาพบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดชีโอดีของคอลัมน์ที่ 1 เท่ากับ ร้อยละ 58 และ 65 และคอลัมน์ที่ 2 จะให้ประสิทธิภาพในการกำจัดชีโอดีเท่ากับ ร้อยละ 55 และ 65 ที่อัตราภาระอินทรีย์ 2.33 และ 3 กิโลกรัมชีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน ตามลำดับ และคอลัมน์ที่ 1 ให้ประสิทธิภาพในการกำจัดชีโอดีร้อยละ 41 และ 45 และสำหรับคอลัมน์ที่ 2 จะให้ประสิทธิภาพในการกำจัดชีโอดีร้อยละ 45 และ 51 ที่อัตราภาระอินทรีย์ 2.33 และ 3 กิโลกรัมชีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน ตามลำดับ ส่วนค่าตะกอนแขวนลอยในน้ำทิ้งของคอลัมน์ที่ 1 มีค่าเท่ากับ 198 และ 110 มิลลิกรัมต่อลิตร ส่วนคอลัมน์ที่ 2 มีค่าเท่ากับ 137 และ 63 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่อัตราภาระอินทรีย์ 2.33 และ 3 กิโลกรัมชีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน โดยก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจากคอลัมน์ที่ 1 เฉลี่ยเป็น 4.6 และ 6.9 ลิตรต่อวัน ซึ่งมีปริมาณก๊าซมีเทนร้อยละ 57.43 และ 66.76 ที่อัตราภาระอินทรีย์ 2.33 และ 3 กิโลกรัมชีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน ตามลำดับ ส่วนคอลัมน์ ที่ 2 จะเกิดก๊าซชีวภาพเฉลี่ยเท่ากับ 5.2 และ 8.2 ลิตรต่อวัน ซึ่งมีปริมาณก๊าซมีเทนร้อยละ 56.70 และ 71.77 ที่อัตราภาระอินทรีย์ 2.33 และ 3 กิโลกรัมชี

ไอศิ์ต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน ตามลำดับ ผลการทดลองพบว่าคอลัมน์ที่ 1 และคอลัมน์ที่ 2 จะมีแนวโน้มในการกำจัดซีไอศิ์และสีที่ใกล้เคียงกัน รวมไปถึงค่าตัวแปรต่างๆที่สภาวะคงตัวของทั้งสองคอลัมน์ก็จะใกล้เคียงกันด้วย แต่คอลัมน์ที่ 2 จะมีประสิทธิภาพในการกักเก็บเซลล์ได้ดีกว่าคอลัมน์ที่ 1 แสดงให้เห็นว่าลักษณะของตัวกลางจะมีผลต่อการกักเก็บเซลล์ภายในคอลัมน์ และเมื่อมีการเพิ่มอัตราภาระอินทรีย์จะพบว่าระบบก็ยังสามารถดำเนินไปได้ ส่วนจากการทดลองที่ระยะความสูงต่างๆของคอลัมน์ พบว่าการกำจัดซีไอศิ์และสีส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นบริเวณด้านล่างของคอลัมน์ในส่วนของชั้นตะกอนแบคทีเรียเนื่องจากน้ำเสียที่เข้ามามีปริมาณของสารอินทรีย์ที่น้อยสลายง่ายอยู่มาก ซึ่งจากการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน จะพบว่าแบคทีเรียที่เกิดขึ้นภายในคอลัมน์ทั้งสอง เป็นแบคทีเรียที่มีหลากหลายสายพันธุ์อาศัยอยู่ร่วมกัน

อิศระ รัตนปริยานุช (2546) ทำการวิจัยเพื่อศึกษาประสิทธิภาพของระบบแอนแอโรบิกไฮบริดฟิลเตอร์ที่มีถังหมักกรดน้ำในการบำบัดน้ำกากส่า ทำการทดลองโดยใช้น้ำกากส่าเข้มข้นจากบ่อบำบัดแบบไร้อากาศมาทำการเจือจาง และใช้น้ำตาลเป็นสารอาหารปฐมภูมิ โดยมีอัตราส่วนซีไอศิ์ของน้ำกากส่าต่อซีไอศิ์ของน้ำตาลเป็น 1:3 การทดลองมีค่าภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 4, 5, 6 และ 7 กิโลกรัมซีไอศิ์ต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน การศึกษาแบ่งออกเป็นสองขั้นตอน การทดลองขั้นที่หนึ่ง ทำการศึกษาระยะเวลาเก็บกักที่เหมาะสมของถังหมักกรดในแต่ละภาระบรรทุกอินทรีย์ การทดลองขั้นที่สอง ใช้ถังหมักกรดที่มีเวลาเก็บกักที่เหมาะสมซึ่งได้จากการทดลองขั้นที่หนึ่งมาทำการศึกษาประสิทธิภาพของระบบแอนแอโรบิกไฮบริดฟิลเตอร์ที่มีถังหมักกรดน้ำ ผลการศึกษาจากการทดลองขั้นที่หนึ่งพบว่า ที่ภาระบรรทุกอินทรีย์ 4, 5, 6 และ 7 กิโลกรัมซีไอศิ์ต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน มีเวลาเก็บกักที่เหมาะสมในถังหมักกรดเท่ากับ 6, 6, 12 และ 24 ชั่วโมง ตามลำดับ ประสิทธิภาพในการกำจัดซีไอศิ์ร้อยละ 16.7, 17.3, 14.9 และ 14.9 ตามลำดับ และมีประสิทธิภาพการกำจัดสีร้อยละ 21.2, 21.7, 20.9 และ 19.5 ตามลำดับ ส่วนผลการทดลองในขั้นที่สองพบว่า ที่ภาระบรรทุกอินทรีย์ 4, 5, 6 และ 7 กิโลกรัมซีไอศิ์ต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน ประสิทธิภาพในการกำจัดซีไอศิ์ร้อยละ 65.6, 64.1, 55.4 และ 52.0 ตามลำดับ มีประสิทธิภาพการกำจัดสีร้อยละ 28.1, 25.2, 22.8 และ 20.0 ตามลำดับ และมีปริมาณก๊าซชีวภาพเกิดขึ้น 7.0, 10.0, 8.0 และ 5.0 ลิตรต่อวันตามลำดับ เมื่อเติมธาตุникเกิดและโคบอลท์ในน้ำเสียเข้าระบบในอัตราส่วน ซีไอศิ์ต่อникเกิด และซีไอศิ์ต่อโคบอลท์ เป็น 100:0.01 และ 100:0.01 ตามลำดับ พบว่า ที่ภาระบรรทุกอินทรีย์ 4, 5, 6 และ 7 กิโลกรัมซีไอศิ์ต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน มีประสิทธิภาพในการกำจัดซีไอศิ์เพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 68.3, 66.6, 58.5 และ 52.7 ตามลำดับ มีประสิทธิภาพลดสีไม่แตกต่างโดยมีประสิทธิภาพร้อยละ 28.3, 25.4, 22.2 และ 19.9 ตามลำดับ และมีปริมาณก๊าซชีวภาพเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 8.32, 10.88, 8.51 และ 5.32 ตามลำดับ สรุปได้ว่า ถังหมักกรดมีส่วนสำคัญในการกำจัดน้ำกากส่า ประสิทธิภาพของระบบบำบัดโดยรวมลดลงเมื่อภาระบรรทุกสารอินทรีย์เพิ่มขึ้น นิกเกิดและโคบอลท์มีส่วนสำคัญในการเพิ่มประสิทธิภาพของระบบ

Halalshah และคณะ (2005) ทำการทดลองเดินระบบยูเอเอสบีขนาด 96 ลูกบาศก์เมตร ถึงปฏิบัติการในขั้นตอนแรกและขั้นตอนที่สองมีปริมาตร 60 และ 36 ลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ เดินระบบเป็นระยะเวลา 2.5 ปี ภายใต้อุณหภูมิที่แตกต่างกัน เพื่อประเมินความเป็นไปได้ที่จะบำบัดน้ำเสียชุมชนที่มีความเข้มข้นสูง (ซีโอดีทั้งหมด 1,531 มิลลิกรัมต่อลิตร) มีค่าซีโอดีทั้งหมด, ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด, ของแข็งแขวนลอยระเหย และกรดไขมันระเหย เท่ากับ 1,419-1,650 , 352-431 , 238-373 และ 162-194 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ค่าพีเอช 6.88-7.17 เดินระบบที่อุณหภูมิห้อง ค่าเฉลี่ยระหว่าง 18 และ 25 องศาเซลเซียส สำหรับฤดูหนาวและฤดูร้อน ตามลำดับ ระหว่างช่วงปีแรกถึงปฏิบัติการเดินระบบด้วยระบบแบบสองขั้นตอน ที่ระยะเวลากักพักทางชลศาสตร์ 8-10 และ 5-6 ชั่วโมง สำหรับขั้นตอนแรกและขั้นตอนที่สอง ตามลำดับ ขั้นตอนแรกเดินระบบที่อัตราภาระสารอินทรีย์ในช่วง 3.6-5.0 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน ขั้นตอนที่สองเดินระบบที่อัตราภาระสารอินทรีย์ในช่วง 2.9-4.6 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน ผลการทดลองพบว่า ขั้นตอนแรกมีการกำจัดซีโอดีทั้งหมดและซีโอดีแขวนลอยเฉลี่ยร้อยละ 51 และ 60 ตามลำดับ โดยปราศจากนัยสำคัญจากผลกระทบของอุณหภูมิ แต่ถึงปฏิบัติการขั้นตอนที่สองไม่มีเสถียรภาพ อุณหภูมิส่งผลต่อความคงตัวของสลัดจ์ ระหว่างช่วงปีที่ 2 ขั้นตอนแรกเดินระบบโดยใช้ถังปฏิบัติการยูเอเอสบีขั้นตอนเดียว ที่อัตราภาระสารอินทรีย์ในช่วง 1.5-1.8 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน ที่ระยะเวลากักพักทางชลศาสตร์ 24 ชั่วโมง ผลการทดลองพบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีทั้งหมดเฉลี่ยร้อยละ 62 ในระหว่างช่วงฤดูร้อน ขณะที่ประสิทธิภาพตกลงมาที่ร้อยละ 51 ในระหว่างช่วงฤดูหนาว แต่อย่างไรก็ตามของแข็งแขวนลอยในน้ำออกมีความคงตัวด้วยอัตราส่วนของแข็งแขวนลอยระเหยต่อของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (VSS/TSS) ประมาณ 0.50 ตลอดทั้งปี สลัดจ์ในถังปฏิบัติการขั้นตอนเดียวมีความคงตัวดี และแสดงการจมตัวดีเยี่ยม และระหว่างช่วง 3 เดือนสุดท้ายของการศึกษา สลัดจ์ถูกปล่อยเป็นปกติจากถังปฏิบัติการยูเอเอสบีขั้นตอนเดียว ผลการทดลองพบว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญในรูปของซีโอดีทั้งหมด บนพื้นฐานของการทดลองนี้พบว่า ถังปฏิบัติการแบบขั้นตอนเดียวเดินระบบที่ระยะเวลากักพักทางชลศาสตร์ยาวนานดีกว่าระบบแบบสองขั้นตอน ที่สภาวะของประเทศจอร์แดน

Mahmoud และคณะ (2004) ทำการบำบัดน้ำเสียที่อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส โดยใช้ระบบ UASB-Digester ซึ่งเดินระบบยูเอเอสบีที่ระยะเวลากักพักทางชลศาสตร์ 6 ชั่วโมง และควบคุมอุณหภูมิที่ 15 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำเสียชุมชนในช่วงฤดูหนาวของประเทศในตะวันออกกลาง ส่วนถังย่อยสลายเดินระบบที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ผลการทดลองพบว่า ระบบ UASB-Digester มีประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีสูงกว่าระบบยูเอเอสบีแบบขั้นตอนเดียวที่ระดับนัยสำคัญร้อยละ 5 มีประสิทธิภาพของระบบ UASB-Digester ในการกำจัดซีโอดีทั้งหมด, ซีโอดีแขวนลอย, ซีโอดีคอลลอยด์ และซีโอดีละลาย ร้อยละ 66, 87, 44 และ 30 ตามลำดับ มีการสร้างสลัดจ์ส่วนเกินต่ำมากและมีความคงตัวดีสามารถกำจัดน้ำได้ดี การหมุนเวียนสลัดจ์ในระบบ

UASB-Digester ช่วยเพิ่มทั้งการกำจัดของแข็งทางกายภาพและการเปลี่ยนรูป ทำให้การสร้างก๊าซมีเทนจากที่พบในระบบยูเอเอสบีแบบขั้นตอนเดียวจากร้อยละ 20 เพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 47 ในระบบ UASB-Digester ระบบยูเอเอสบีแบบขั้นตอนเดียวมีประสิทธิภาพการกำจัดชีโอดีทั้งหมด, ชีโอดีแขวนลอย, ชีโอดีคอลลอยด์ และชีโอดีละลาย ร้อยละ 40, 73, 3 และ 5 ตามลำดับ ระบบ UASB-Digester และระบบยูเอเอสบีแบบขั้นตอนเดียว มีเสถียรภาพของสลัดจ์ เท่ากับ 0.47 และ 0.36 กรัมมีเทน-ชีโอดีต่อกรัมชีโอดี ($\text{gCH}_4\text{-COD/gCOD}$) ตามลำดับ จึงคาดว่า ระบบ UASB-Digester สามารถใช้สำหรับการบำบัดน้ำเสียชุมชนแบบไร้อากาศที่อุณหภูมิทำได้

Wang และ Banks (2003) ศึกษาเปรียบเทียบระหว่างการย่อยสลายแบบไร้อากาศสองขั้นตอนในการบำบัดของเสียรวมจากโรงฆ่าสัตว์กับถังปฏิกริยาแบบไหลผ่านขั้นตอนเดียวแบบเดิมหรือเอสพีอาร์ (a conventional single-pass reactor : SPR) วัตถุประสงค์ของการศึกษาเพื่อศึกษาหาทางแก้ปัญหาที่เกิดจากการสะสมของกรดไขมันระเหย และแอมโมเนียในเอสพีอาร์ที่กวนผสมอย่างสมบูรณ์แบบเดิม ซึ่งเชื่อว่าการเพิ่มขึ้นนี้เป็นผลให้อัตราส่วนของ คาร์บอน : ไนโตรเจน ของน้ำเสียที่ป้อนเข้าสู่ระบบมีค่าต่ำ ระบบย่อยสลายแบบสองขั้นตอนประกอบด้วยถังปฏิกริยาแบบกวนผสมสมบูรณ์ปริมาตรใช้งาน 30 ลิตร ซึ่งมีระยะเวลาพักทางจุลชีวศาสตร์สั้นกว่าอายุสลัดจ์ การเดินระบบดังกล่าวมีความเกี่ยวข้องกับการไหลผ่านของเหลว (hydraulic flush) และถูกออกแบบมาเพื่อรองรับองค์ประกอบพวกเส้นใยของน้ำเสียที่อยู่ในถังปฏิกริยา ขณะเดียวกันทำให้เกิดการชะล้างอย่างรวดเร็วของสารตัวกลางที่เกิดจากการไฮโดรไลซิสและการหมัก และถังปฏิกริยาแบบของเหลวไหลผ่าน หรือ เอชเอฟอาร์ (hydraulic flush reactor : HFR) เดินระบบที่ ระยะเวลาพักทางจุลชีวศาสตร์ 2 วัน อายุสลัดจ์ 10 วัน เมื่อเปรียบเทียบผลการทำงานของเอชเอฟอาร์กับเอสพีอาร์ ที่ค่าอัตราการระเหยของแข็งทั้งหมด 3, 4, 5, 6, 7 และ 8 กิโลกรัมของแข็งทั้งหมดต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน ($\text{kgTS/m}^3\text{-d}$) พบว่า ถังปฏิกริยาเอสพีอาร์ ล้มเหลวที่อัตราการระเหยของแข็งทั้งหมด 5 กิโลกรัมของแข็งทั้งหมดต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน และมีการลดลงของของแข็งสูงสุดเพียงร้อยละ 41 ขณะที่เอชเอฟอาร์ลดของแข็งได้ถึงร้อยละ 66 และมีผลการทำงานที่ค่าอัตราการระเหยของแข็งทั้งหมด เป็นที่น่าพอใจถึง 7 กิโลกรัมของแข็งทั้งหมดต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน ระบบกรองไร้อากาศ (anaerobic filter) ถูกใช้เป็นขั้นตอนที่สองต่อจากเอชเอฟอาร์ เพื่อใช้บำบัดของเหลวที่ออกจากขั้นตอนแรก เดินระบบที่ ระยะเวลาพักทางจุลชีวศาสตร์ 1 วัน ด้วยอัตราการอยู่ในช่วง 4.0-13.1 กิโลกรัมชีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน การกำจัดชีโอดีประมาณร้อยละ 95 และมีอัตราการผลิตก๊าซมีเทนสูงถึง 0.34 ลูกบาศก์เมตรมีเทนต่อกิโลกรัมชีโอดีที่ถูกกำจัด ($\text{m}^3\text{CH}_4/\text{kgCOD}_{\text{remove}}$) ระบบแบบสองขั้นตอนนี้มีผลการทำงานดีที่สุด สามารถลดของแข็งได้ร้อยละ 66 กำจัดชีโอดีร้อยละ 81.7 และมีผลผลิตก๊าซมีเทนทั้งหมด 0.21 ลูกบาศก์เมตรมีเทนต่อกิโลกรัมของแข็งทั้งหมดที่ป้อนเข้าไป ที่อัตราการระเหย 7.02 กิโลกรัมของแข็งทั้งหมดต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน

Beal และ Raman (2000) ทำการศึกษาโดยใช้ระบบแบบไร้อากาศระดับห้องปฏิบัติการ 2 ถึงปฏิริยาต่อเนื่องกัน ทดสอบความสามารถในการกำจัดสารอินทรีย์คาร์บอนจากน้ำเสียจากการทำลูกกวาดและขนมหวานโดยใช้น้ำเสียที่แยกเก็บรักษาระหว่างความเข้มข้นต่ำและสูงที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส ผสมกันด้วยอัตราส่วนโดยปริมาตร 9:1 และใช้น้ำประปาเจือจางถ้าจำเป็น ระบบดังกล่าวประกอบด้วย ระบบยูเอเอสบีขนาด 20 ลิตร เต็มหัวเชื้อปริมาตร 6 ลิตรหรือร้อยละ 30 ของปริมาตรถัง เติมน้ำที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส แล้วตามด้วยระบบกรองไร้อากาศแบบไหลลง (downflow anaerobic filter) ขนาด 25 ลิตร มีปริมาตรใช้งาน 10 ลิตร ได้รับหัวเชื้อแบคทีเรียที่ชะล้างออกมาจากถังปฏิริยาแรก เติมน้ำที่อุณหภูมิแวดล้อมประมาณ 25 องศาเซลเซียส ระยะเวลาพักทางชีวศาสตร์รวมทั้งหมด 2.4 วัน ตรวจสอบผลการทำงานของถังปฏิริยาโดยติดตามค่าซีโอดี, พีเอช, กรดไขมันระเหย, สภาพต่าง และการผลิตและองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ ผลการทดลองพบว่า ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีทั้งหมดของระบบร้อยละ 98 ที่อัตราภาระสารอินทรีย์ทั้งหมด 12.5 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน ระบบยูเอเอสบีสามารถทำงานได้อย่างเต็มที่ที่อัตราภาระสารอินทรีย์สูงซีโอดีที่ป้อน 20 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน และการหมุนเวียนน้ำกลับเข้าระบบทำให้สามารถเดินระบบด้วยน้ำเข้าที่มีความเข้มข้นซีโอดีถึง 30 กรัมต่อลิตร การเปลี่ยนแปลงขึ้นลงของบัพเฟอร์มีประสิทธิภาพในน้ำออกจากถังปฏิริยาเยเอสบี ขณะที่ระบบกรองแบบไหลลงกำจัดซีโอดีได้มากกว่าร้อยละ 50 และรักษาระดับความเข้มข้นของซีโอดีในน้ำออกมีความเข้มข้นต่ำกว่า 400 มิลลิกรัมต่อลิตร

Blonskaja, Menert และ Vilu (2003) ศึกษาการย่อยสลายแบบไร้อากาศของของเสียจากโรงกลั่นสุรา ซึ่งมีค่าซีโอดี, บีโอดี, ไนโตรเจนทั้งหมดและฟอสฟอรัสทั้งหมด เท่ากับ 49,000-53,000 , 24,000-27,000 , 975-1320 และ 613-690 มิลลิกรัมต่อลิตรและมวลสารแห้ง (dry matter) 39-42 กรัมต่อลิตร ด้วยระบบมีโซฟิลิกสองขั้นตอน (mesophilic two-stage system) ที่อุณหภูมิ 36 ± 1.5 องศาเซลเซียส ซึ่งประกอบด้วย ระบบกรองไร้อากาศ หรือเอเอฟ (Anaerobic Filter : AF) และระบบยูเอเอสบี ทดลองที่ระยะเวลากักทางชีวศาสตร์ 10-19 วัน ที่อัตราภาระ 2.5-5.1 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน ค่าพีเอช 5.2-5.9 สำหรับขั้นตอนแรก และเพิ่มระยะเวลากักทางชีวศาสตร์ขึ้นไปเป็น 20-39 วัน เพื่อให้สอดคล้องกับอัตราภาระ 0.6-2.5 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน สำหรับขั้นตอนที่สอง ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีร้อยละ 54 และ 93 สำหรับขั้นตอนแรกและขั้นตอนที่สอง ตามลำดับ ถังปฏิริยาสร้างกรดมีการเปลี่ยนซีโอดีตั้งต้นไปเป็นกรดไขมันระเหยเป็นที่น่าพอใจมีค่าเฉลี่ยร้อยละ 20.5 เป็นผลให้การทำงานเป็นปกติด้วยตัวเอง ค่าพีเอชภายในถังปฏิริยาสร้างมีเทนอยู่ในช่วง 7.2-7.8 การสร้างก๊าซชีวภาพในขั้นตอนที่สองสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ (6 ลิตรต่อวัน) มากกว่าในขั้นตอนแรก (1 ลิตรต่อวัน) และจากการศึกษาพบว่าอัตราการสร้างก๊าซชีวภาพเพิ่มขึ้นตามอัตราภาระสารอินทรีย์ที่สูงขึ้น สภาวะที่เหมาะสมที่แนะนำเพื่อการทำงานที่เสถียร ได้แก่ ที่ภาระสารอินทรีย์ 2-4 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน พีเอช 6.0 สำหรับ

ขั้นตอนสร้างกรด และที่ภาระสารอินทรีย์ 1-2 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน ที่พีเอช 7.6 สำหรับขั้นตอนสร้างก๊าซมีเทน ส่วนขั้นตอนที่สอง มีอัตราส่วนของกรดไขมันระเหยต่อสภาพต่าง 0.05-0.14 แสดงถึงความเสถียรของระบบ อัตราการเจริญเติบโตของแบคทีเรียของประชากรแบคทีเรียสร้างอะซิติกต่อแบคทีเรียสร้างก๊าซมีเทน (acetogenic/methanogenic) กำหนดจาก microcalorimetry ซึ่งมีค่าสูงกว่าในขั้นตอนการแยกจุลินทรีย์สร้างก๊าซมีเทน

Herrman และ Jannke (2001) ทำการศึกษาโดยใช้ถังย่อยสลายแบบสองขั้นตอนระดับห้องปฏิบัติการ ซึ่งประกอบด้วยถังปฏิกิริยาสร้างกรดแบบกวนต่อเนื่องควบคุมด้วยพีเอช (continuously stirred pH-controlled acidification reactor) ขนาด 1.2 ลิตร และถังปฏิกิริยาสร้างมีเทนแบบตัวกลางกรองไหลขึ้น (upflow fixed-bed methane reactor) ขนาด 1.2 ลิตร สูง 70 เซนติเมตร เติมน้ำเสียอย่างต่อเนื่องด้วยน้ำเสียจากโรงงานกลั่นสุราความเข้มข้นสูงค่าซีโอดี, ไนโตรเจนทั้งหมด, แอมโมเนียไนโตรเจน, ฟอสฟอรัสทั้งหมด และฟีนอลทั้งหมด เท่ากับ 9,000, 42, 8, 19 และ 12.8 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ค่าพีเอช 6.4 ซึ่งใช้เป็นสับสเตรทเพียงอย่างเดียวหรือใช้เป็นสับสเตรทตั้งต้น เติมน้ำเสียที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส ถึงปฏิกิริยาแรกควบคุมค่าพีเอช 6.2 ± 0.1 โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ การหมักรวมกันของฟลาโวนอยด์ (flavonoids) ซึ่งเป็นกลุ่มใหญ่ของสารประกอบโพลีฟีนอลิก (polyphenolic) ตามธรรมชาติโดยทั่วไปพบในเนื้อเยื่อของพืชชั้นสูงส่วนมาก ที่พบทั่วไปสองชนิดคือ รูทีน (rutin) และเฮสเปอร์ิดิน (hesperidin) ได้ถูกนำมาศึกษา โดยเติมลงในถังปฏิกิริยาแรก ใช้ระยะเวลาพักทางจุลชีววิทยารวมทั้งหมด 48-50 ชั่วโมง และอัตราภาระสารอินทรีย์ในถังปฏิกิริยาสร้างมีเทนอยู่ในช่วง 8-10 กรัมซีโอดีต่อลิตรต่อวัน การเติมรูทีนและเฮสเปอร์ิดินสูงถึง 0.71 กรัมต่อลิตรของถังปฏิกิริยาต่อวัน ไม่ปรากฏผลรุนแรงต่อการทำงานของถังปฏิกิริยา ในรูปของกรดไขมันระเหย ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีและลักษณะเฉพาะในการผลิตก๊าซชีวภาพ ฟลาโวนอยด์ไกลโคไซด์ (flavonoid glycosides) ที่เติมเข้าไปถูกเปลี่ยนอย่างรวดเร็วในถังปฏิกิริยาสร้างกรดให้ผลผลิตเป็นไฮดรอกซีอะโรมาติก (hydroxyaromatic) หลายรูปแบบ เมื่อมีเฮสเปอร์ิดินเป็นสับสเตรทร่วม (cosubstrate) ผลผลิตที่เกิดขึ้นทุกรูปแบบถูกกำจัดอย่างสมบูรณ์ระหว่างผ่านถังปฏิกิริยาสร้างมีเทน ขณะที่กรณีของรูทีน จะมีการสร้าง m-cresol และ 4-hydroxyphenylacetate จำนวนมากในตัวกลาง (medium) และยังคงเหลืออยู่ในน้ำที่ออกจากถังปฏิกิริยาสร้างมีเทน

จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าระบบบำบัดแบบไร้อากาศมักจะนิยมใช้กับน้ำเสียประเภทต่างๆ ที่มีความเข้มข้นสูงด้วยจุดประสงค์ที่แตกต่างกันไป สำหรับน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มนั้นเป็นน้ำเสียอีกประเภทหนึ่งเช่นกันที่มีความเข้มข้นสูง ซึ่งมีคุณสมบัติ หรือพารามิเตอร์ต่างๆ แตกต่างจากน้ำเสียประเภทอื่นๆ ซึ่งมีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการสกัดน้ำมันปาล์มซึ่งทดลองใช้กระบวนการบำบัดรูปแบบต่างๆ โดย สุวิทย์ สุวรรณโณ (2544) ทำการศึกษาการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียที่ได้จากบริษัทยูนิวานิช น้ำมันปาล์ม จำกัด

(มหาชน) ในถังหมักแบบกะภายใต้สภาวะไร้อากาศ โดยได้ทำการศึกษาที่สภาวะความเข้มข้นของน้ำเสียร้อยละ 100, 85 และ 75 ที่ความเข้มข้นของหัวเชื้อเริ่มต้นร้อยละ 25, 20 และ 15 โดยทำการบ่มที่อุณหภูมิห้อง(29) 35 และ 40 องศาเซลเซียส จากผลการทดลอง พบว่า สภาวะที่เหมาะสมต่อการย่อยสลายสารอินทรีย์ได้ดีที่สุดคือ ที่ความเข้มข้นของน้ำเสียร้อยละ 85 ความเข้มข้นของหัวเชื้อเริ่มต้นร้อยละ 20 และใช้อุณหภูมิในการบ่มที่ 40 องศาเซลเซียส สามารถให้ปริมาณก๊าซมีเทนสูงสุดเท่ากับ 47.5 มิลลิลิตร (โดยวัดปริมาตรของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้การแทนที่ปริมาณก๊าซ) โดยใช้เวลาในการบ่มทั้งหมด 40 วัน

Ugocji (1997) ศึกษาการย่อยสลายทางชีวภาพภายใต้สภาวะไร้อากาศของน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มที่มีองค์ประกอบแบบ fiber-free non-oil components ซึ่งได้รับจากส่วนตกตะกอนของโรงงานน้ำมัน น้ำเสียจากโรงงานประเภทนี้ในประเทศไนจีเรียโดยทั่วไปมีลักษณะขุ่น สีน้ำตาลหรือเทา มีความเข้มข้นของแข็งทั้งหมดเฉลี่ย 50,000 มิลลิกรัมต่อลิตร บีโอดี 15,000-30,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งใช้เป็นตัวชี้วัดมลภาวะ เมื่อผลผลิตที่ได้รับการยอมรับด้านสิ่งแวดล้อมได้บังคับใช้ วิธีการย่อยสลายรูปแบบนี้มีความนิยมมากกว่ารูปแบบใช้ออกซิเจน ท่ามกลางปัจจัยอื่นๆ ที่ชุมชนต้องการประสิทธิภาพการกำจัดชีโอดี และบีโอดี และการเดินระบบที่เหมาะสม งานวิจัยนี้ใช้การทดลองที่เตรียมขึ้น 3 รูปแบบ ได้แก่ ระบบบ่อไร้อากาศขั้นตอนเดียว (single stage anaerobic ponding system) บ่อกวนด้วยน้ำเสียดิบที่ปรับสภาพให้เป็นกลางด้วยแคลเซียมคาร์บอเนตถึงไร้อากาศย่อยสลายขั้นตอนเดียวกวนผสมด้วยความเร็ววงที่ (single stage anaerobic tank digester with a certain degree of mixing) บ่อกวนด้วยน้ำเสียดิบปรับความเป็นกลางด้วยน้ำเสียที่ได้รับการปรับสภาพแล้วให้ได้ค่าที่เหมาะสม และการหมุนเวียนสลัดจ์ในถังไร้อากาศขั้นตอนเดียว (recycle spent POME sludge in a single stage anaerobic tank) หมุนเวียนสลัดจ์กลับร้อยละ 50 จากผลการทดลองที่ได้รับ แสดงให้เห็นว่า ประสิทธิภาพที่ได้รับจากการทดลองทั้ง 3 รูปแบบที่เตรียมขึ้น มีประสิทธิภาพร้อยละ 96.91, 96.50 และ 94.5 ตามลำดับ หลังจากระยะเวลาพักทางชีวศาสตร์ 10 วัน ค่าผลผลิตเฉลี่ยภายหลังจากการย่อยสลายจากรูปแบบการย่อยสลายที่แนะนำสำหรับชาวบ้าน พบว่าได้ก๊าซชีวภาพ 2.4 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อลูกบาศก์เมตรถึงปฏิกิริยาต่อวัน ($\text{cm}^3/\text{m}^3\text{-d}$) และเหลือของแข็ง 1,900 มิลลิกรัมต่อลิตร

ปริญญา มาลัยลอย (2548) ศึกษาผลของการบำบัดเบื้องต้นต่อประสิทธิภาพของระบบยูเอเอสบีระดับห้องปฏิบัติการในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม ที่มีค่าชีโอดีทั้งหมด, ชีโอดีละลาย, บีโอดี, ของแข็งแขวนลอย, ของแข็งแขวนลอยระเหย, กรดไขมันระเหย, สภาวะต่างและน้ำมันและไขมัน เท่ากับ 112,500 , 60,517 , 53,400 , 78,570 , 67,475 , 36,143 , 3,600 , 2,568 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ค่าพีเอช 4.29 การบำบัดเบื้องต้นแบ่งออกเป็นสองส่วน ได้แก่ การกรองด้วยชั้นทรายกรอง และการกรองด้วยชั้นทรายกรองร่วมกับชั้นถ่านกรองโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อลดค่าของแข็งแขวนลอย และกรดระเหยง่ายบางชนิดที่อาจส่งผลกระทบต่อการทำงานของระบบยูเอเอสบี ผล

การทดลองพบว่า การกรองด้วยชั้นทรายกรองสามารถกำจัดซีไอดี, ของแข็งแขวนลอย และกรดไขมันระเหยได้ร้อยละ 69.86, 99.8 และ 76.7 ตามลำดับ และการกรองด้วยชั้นทรายกรองร่วมกับชั้นถ่านกรองสามารถกำจัดซีไอดี, ของแข็งแขวนลอย และกรดไขมันระเหยได้ร้อยละ 64.59, 99.5 และ 77 ตามลำดับ น้ำเสียที่ผ่านการกรองมีค่าพีเอชสูงกว่า 7.00 ซึ่งส่งผลดีต่อการเดินระบบยูเอเอสบีในขั้นต่อไป การทดลองขั้นต่อไปใช้ถังปฏิกริยา 3 ชุด โดยชุดที่ 1 ป้อนน้ำเสียที่ผ่านชั้นทรายกรอง ชุดที่ 2 ป้อนน้ำเสียที่ผ่านชั้นทรายกรองร่วมกับชั้นถ่านกรอง และชุดที่ 3 ป้อนน้ำเสียสด พบว่าถังปฏิกริยาชุดที่ 3 ล้มเหลวไม่สามารถเดินระบบได้ ส่วนถังปฏิกริยาชุดที่ 1 และ 2 เดินระบบที่อัตราภาระสารอินทรีย์ 0.5, 0.75, 1.0 และ 1.5 กรัมซีไอดีต่อกรัมของแข็งแขวนลอยระเหยต่อวัน ที่ระยะเวลาพักทางชีวศาสตร์ 12 ชั่วโมง มีประสิทธิภาพในการกำจัดซีไอดีสำหรับถังปฏิกริยาชุดที่ 1 เท่ากับร้อยละ 33.79, 47.79, 59.82 และ 37.48 ตามลำดับ และสำหรับถังปฏิกริยาชุดที่ 2 เท่ากับร้อยละ 28.23, 42.69, 56.01 และ 35.72 ตามลำดับ ปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นเทียบกับปริมาณซีไอดีที่ถูกกำจัด พบว่ามีค่าประมาณ 0.4-0.51 ลิตรต่อกรัมซีไอดีที่ถูกกำจัด ที่อัตราภาระสารอินทรีย์ 0.5-1.0 กรัมซีไอดีต่อกรัมของแข็งแขวนลอยระเหยต่อวัน แต่จะมีค่าลดต่ำลงเหลือเพียง 0.2-0.33 ลิตรต่อกรัมซีไอดีที่ถูกกำจัด เมื่ออัตราภาระสารอินทรีย์เพิ่มขึ้นเท่ากับ 1.5 กรัมซีไอดีต่อกรัมของแข็งแขวนลอยระเหยต่อวัน

ธนวัฒน์ รักกมล, สุเมธ ไชยประพัทธ์ และอุดมพล พิชน์ไพบูลย์ (2549) ศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์และอนินทรีย์ของน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มซึ่งมีค่าซีไอดีทั้งหมด, บีไอดี, ของแข็งแขวนลอย, กรดระเหยง่าย, แอมโมเนียไนโตรเจน, ฟอสฟอรัสทั้งหมด และน้ำมันและไขมัน เท่ากับ 4,200-13,720 , 3,364-5,622 , 2,700-7,670 , 210-573 , 224-301 , 0.87-6.52 และ 39-174 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ค่าพีเอช 7.00-7.34 ภายใต้อัตราเทอร์โมฟิลิก (55 ± 1 องศาเซลเซียส) และมีไซฟิลิก (35 ± 1 องศาเซลเซียส) โดยระบบเอเอสบีอาร์ซึ่งเป็นระบบถังปฏิกริยาระดับห้องปฏิบัติการ มีปริมาตรใช้งานขนาด 5 ลิตร ซึ่งเดินระบบที่อัตราภาระบรรทุก 0.50-5.00 กิโลกรัมซีไอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน หรือที่ระยะเวลาพักทางชีวศาสตร์ 2-10 วัน น้ำเสียเข้าระบบมีความเข้มข้นของซีไอดีเฉลี่ยเท่ากับ 9,284 มิลลิกรัมต่อลิตร เริ่มต้นระบบโดยใช้ตะกอนหัวเชื้อจากระบบยูเอเอสบี โดยใช้ความเข้มข้นตะกอนจุลินทรีย์ในรูปเอ็มแอลเอสเอส ประมาณ 18,000 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็นระยะเวลา 45 วัน ที่อัตราภาระบรรทุก 0.23 กิโลกรัมซีไอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน จนระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ ผลการทดลองพบว่าถังปฏิกริยาเทอร์โมฟิลิกมีประสิทธิภาพในการกำจัดซีไอดีทั้งหมด ของแข็งแขวน และน้ำมันและไขมัน ร้อยละ 51.42-78.98, 26-98-72.92 และ 10.41-40.44 ตามลำดับ ส่วนถังปฏิกริยามีไซฟิลิกมีประสิทธิภาพในการกำจัดซีไอดีทั้งหมด ของแข็งแขวนลอย และน้ำมันและไขมัน ร้อยละ 52.36-75.47, 35.30-71.59 และ 21.70-74.89 ตามลำดับ ซึ่งที่อัตราภาระบรรทุก 1.0 กิโลกรัมซีไอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน (ระยะเวลาพักทางชีวศาสตร์ 10 วัน) ระบบทั้งสองชนิดมีประสิทธิภาพสูงที่สุด ส่วนอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ

จะเพิ่มขึ้นตามอัตราภาระบรรทุก ซึ่งมีปริมาณการผลิตก๊าซชีวภาพต่อปริมาตรถังเท่ากับ 0.06-0.18 ลิตรต่อลิตรต่อวัน ของถังปฏิกรณ์เทอร์โมฟิลิก และ 0.06-0.17 ลิตรต่อลิตรต่อวัน ของถังปฏิกรณ์มีโซฟิลิก โดยรวมถึงปฏิกรณ์ทั้งสองชนิดมีประสิทธิภาพในการบำบัดชีโอดีทั้งหมดใกล้เคียงกันแต่เมื่อวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ พบว่าส่วนใหญ่ถังปฏิกรณ์เทอร์โมฟิลิกมีประสิทธิภาพการบำบัดชีโอดีทั้งหมดสูงกว่าถังปฏิกรณ์มีโซฟิลิกอย่างมีนัยสำคัญ

Yacob, Shirai และคณะ (2006) เติบโตระบบถังปฏิกรณ์แบบปิดขนาด 500 ลูกบาศก์เมตร เพื่อประเมินประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม ซึ่งมีค่าชีโอดีอยู่ในช่วง 34,150-78,450 มิลลิกรัมต่อลิตร เปรียบเทียบกับถังปฏิกรณ์แบบเปิดระหว่างเริ่มเดินระบบพบว่า มีประสิทธิภาพในการกำจัดชีโอดีสูงถึงร้อยละ 97 และมีอัตราส่วนระหว่างกรดไขมันระเหยต่อสภาพต่างเป็นที่น่าพอใจมีค่าระหว่าง 0.1 และ 0.3 ซึ่งประสบความสำเร็จในการเดินระบบที่ระยะเวลาพักทางจุลชีวศาสตร์ต่ำสุด 17 วัน ภายในระยะเวลาไม่น้อยกว่า 3 เดือน ขณะที่ถังปฏิกรณ์แบบเปิดมีประสิทธิภาพในการกำจัดชีโอดีสูงเพียงร้อยละ 80.7 ที่ระยะเวลาพักทางจุลชีวศาสตร์ 20 วัน มีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพสูงในช่วงแรก แต่อย่างไรก็ตามลดลงระหว่างเพิ่มอัตราภาระสารอินทรีย์ เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางเคมีของน้ำเสียอย่างกะทันหัน จึงส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของระบบ การเริ่มเดินระบบนี้บรรลุวัตถุประสงค์ โดยสามารถสร้างประชากรจุลินทรีย์ที่ทำงานได้ดี ซึ่งแสดงออกในรูปของประสิทธิภาพการกำจัดชีโอดี, ค่าพีเอช, อัตราส่วนระหว่างกรดไขมันระเหยต่อสภาพต่าง และระยะเวลาพักทางจุลชีวศาสตร์

Najafpour และคณะ (2006) ศึกษาการใช้ถังปฏิกรณ์ยูเอเอสเอฟเอฟ (upflow anaerobic sludge-fixed film : UASFF) ซึ่งเป็นถังปฏิกรณ์ชีวภาพที่ใช้ตะกอนเม็ดแบบหนึ่งที่เปลี่ยนสารอินทรีย์ไปเป็นก๊าซมีเทนด้วยเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ได้อย่างรวดเร็ว ถังปฏิกรณ์ยูเอเอสเอฟเอฟ เป็นถังปฏิกรณ์แบบไฮบริด (hybride) ที่ประกอบด้วยส่วนยูเอเอสเอฟ (upflow fixed film : UFF) มีลักษณะเป็นฟิล์มชีวภาพเกาะติดอยู่ด้านบนเหนือส่วนของระบบยูเอเอสบี ซึ่งปัญหาหลักของระบบยูเอเอสบี คือใช้ระยะเวลาเริ่มเดินระบบยาวนานประมาณ 2-4 เดือน ในการศึกษาครั้งนี้ลักษณะการไหล (tubular flow behavior) ของระบบยูเอเอสเอฟเอฟ ถูกพัฒนาให้ใช้ระยะเวลาเริ่มต้นเดินระบบสั้นลงที่ระยะเวลาพักทางจุลชีวศาสตร์ต่ำ 1.5 และ 3 วัน สำหรับบำบัดน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม มีค่าชีโอดี, ชีโอดีละลาย, บีโอดี, ของแข็งแขวนลอย, น้ำมันและไขมัน และไนโตรเจนทั้งหมด เท่ากับ 42,500-55,700 , 22,000-24,000 , 23,000-26,000 , 16,500-19,500 , 4,900-5,700 และ 500-700 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ค่าพีเอช 3.8-4.4 ตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 1 ชั่วโมงก่อน เจือจางด้วยน้ำประปาและปรับพีเอช 6.8 ก่อนป้อนเข้าถังปฏิกรณ์ หัวเชื้อตะกอนนำมาจากแหล่งต่างๆผสมกันมีค่าของแข็งระเหยทั้งหมด 10,300 มิลลิกรัมต่อลิตร เติบโตระบบที่อุณหภูมิ 38 องศาเซลเซียส สารอินทรีย์เพิ่มขึ้นทีละน้อยจาก 2.63-23.15 กรัมชีโอดีต่อลิตรต่อวัน เม็ดตะกอนจุลินทรีย์ถูกพัฒนาขึ้นอย่างรวดเร็วภายในระยะเวลา 20 วัน ขนาดเพิ่มขึ้นจาก pinpoint จนถึง 2 มิลลิเมตร การ

กำจัดซีโอดีสูงร้อยละ 89 และ 97 ที่ระยะเวลาพักทางชลศาสตร์ 1.5 และ 3 วัน ตามลำดับ ผลผลิตมีเทน 0.346 ลิตรมีเทนต่อกรัมซีโอดีที่ถูกกำจัด ที่อัตราภาระสารอินทรีย์สูงสุด การใช้ส่วนยูเอเอฟเอฟ ติดตั้งภายในเป็นเหตุให้ มวลชีวภาพที่รวมกลุ่มกัน (flocculated biomass) ตกตะกอนเหนือมวลชีวภาพของชั้นสลัดจ์แขวนลอย (sludge blanket biomass) ที่ตกตะกอนอยู่ รักษาความเหมาะสมและธรรมชาติของ hydrophobic core ในการสร้าง spatial arrangement ของชนิดจุลินทรีย์ในกระบวนการของเมื่ตะกอนชีวภาพเต็มวัย

Yacob, Hassan และคณะ (2006) ได้ศึกษาการใช้น้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มเป็นแหล่งพลังงานทดแทนจากการสร้างก๊าซมีเทนและปลดปล่อยก๊าซมีเทนจากกระบวนการบำบัดแบบไร้อากาศ โดยทำการวัดการปลดปล่อยก๊าซมีเทนจากบ่อไร้อากาศ 2 บ่อ เป็นระยะเวลา 52 สัปดาห์ พบว่า ปริมาณก๊าซมีเทนอยู่ระหว่างร้อยละ 35.0 และร้อยละ 70.0 องค์กรประกอบของก๊าซมีเทนที่มีค่าต่ำเชื่อว่า เกิดจากการผันแปรคุณสมบัติทางเคมีของน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มช่วงกว้าง และปริมาณการปล่อยเข้าสู่บ่อซึ่งมีคุณภาพและปริมาณไม่คงที่ในแต่ละช่วงเวลา ส่งผลต่อการเจริญเติบโตและการทำงานของจุลินทรีย์ โดยเฉพาะจุลินทรีย์สร้างก๊าซมีเทน และมีผลต่ออัตราการปลดปล่อยก๊าซมีเทนด้วย และช่วงของอัตราการไหลของก๊าซชีวภาพอยู่ระหว่าง 0.5 และ 2.4 ลิตรต่อนาทีต่อตารางเมตร ปริมาณการปลดปล่อยก๊าซมีเทนทั้งหมดต่อบ่อไร้อากาศเท่ากับ 1,043.1 กิโลกรัมต่อวัน จากการศึกษาชี้ให้เห็นว่าระบบบ่อไร้อากาศมีประสิทธิภาพมากกว่าระบบถังย่อยสลายแบบเปิด สำหรับการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม ซึ่งมี 2 ปัจจัยหลักที่มีผลต่อการปลดปล่อยก๊าซมีเทนได้แก่ กิจกรรมของโรงงาน และฤดูกาลเพาะปลูก

มีนักวิจัยหลายท่านได้ให้ความสนใจนำกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศสองขั้นตอนมาใช้ในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม ซึ่งทำการออกแบบกระบวนการในรูปแบบต่างๆ กันแล้วทำการทดสอบประสิทธิภาพของกระบวนการ Ng และ Chin (1985) ทำการศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม ซึ่งมีค่าซีโอดี, บีโอดี, กรดระเหย, สภาวะต่าง, ของแข็งแขวนลอย และ ของแข็งแขวนลอยระเหย เฉลี่ย 62,934 , 26,222 , 1,503 , 1,094 , 26,456 และ 22,149 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ค่าพีเอชเฉลี่ย 4.1 และประกอบด้วยส่วนที่ย่อยสลายยากสูง โดยใช้ระบบสองขั้นตอนระดับห้องปฏิบัติการที่อุณหภูมิ 32 องศาเซลเซียส ถึงหมักที่ใช้เป็นถังกวน 2 ถังต่ออนุกรมกัน บ่อน้ำเสียต่อเนื่อง พบว่า แม้ปริมาณกรดไขมันระเหยในน้ำเสียที่ออกจากถังปฏิกริยาสร้างกรดมีค่าสูงถึง 5,458 มิลลิกรัมต่อลิตร ก็ตาม แต่ไม่มีการยับยั้งการทำงานของแบคทีเรียในถังปฏิกริยาสร้างมีเทน ค่าพีเอชของระบบเท่ากับ 7.2 ประสิทธิภาพในการลดปริมาณสารอินทรีย์ร้อยละ 78, 81 และ 85 ที่ระยะเวลาพักทางชลศาสตร์ในถังปฏิกริยาสร้างกรด 1 วัน และถังปฏิกริยาสร้างมีเทน 10, 20 และ 30 วัน ตามลำดับ โดยไม่มีการหมุนเวียนเซลล์กลับเข้าสู่ระบบ ผลผลิตก๊าซของขั้นตอนสร้างมีเทน 0.98-2.2 ลิตรต่อกรัมบีโอดีที่ถูกบริโภค

Borja, Banks และ Sanchez (1996) ได้ใช้ถึงปฏิบัติการยูเอเอสบี 2 ถึงต่ออนุกรมกันทำหน้าที่เป็นถึงสร้างกรดและถึงสร้างมีเทนศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มซึ่งมีค่าซีโอดี, บีโอดี และของแข็งแขวนลอยประมาณ 40,000 , 15,000 และ 4,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ พบว่า ถึงสร้างกรดสามารถปรับตัวเข้ากับน้ำเสียที่มีความเข้มข้นของแข็งแขวนลอย 5,400 มิลลิกรัมต่อลิตร ได้อย่างรวดเร็วและทนทาน แล้วค่อยๆทำการเพิ่มค่าภาระขึ้นในระยะเวลา 100 วัน เป็นผลให้การไฮโดรไลซิสและการสร้างกรดให้อัตราผลผลิตกรดอะซิติกสูงสุด 4.1 กรัมต่อลิตรต่อวัน ที่อัตราภาระซีโอดี 16.6 กรัมต่อลิตรต่อวัน มีค่าพีเอช ประมาณ 5.8 ถึงปฏิบัติการสร้างมีเทนสามารถปรับตัวได้อย่างรวดเร็วในการรับน้ำเสียที่ออกจากถึงปฏิบัติการสร้างกรด เมื่อเพิ่มอัตราภาระซีโอดีในถึงปฏิบัติการสร้างก๊าซมีเทนถึง 60 กรัมต่อลิตรต่อวัน พบว่าประสิทธิภาพของระบบลดลงอย่างมีนัยสำคัญ และพบการสะสมของกรดไขมันระเหยสายยาว การทำงานของถึงปฏิบัติการสร้างมีเทนมีประสิทธิภาพดี ที่อัตราภาระซีโอดี 30 กรัมต่อลิตรต่อวัน ขณะเดียวกันสามารถผลิตก๊าซมีเทนได้ดีและลดค่าซีโอดี ได้มากกว่าร้อยละ 90 และมีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนกรดกลายเป็นก๊าซมีเทน



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

อุปกรณ์ เครื่องมือ และวิธีการทดลอง

3.1 น้ำเสียที่ใช้ในการทดลอง

ตัวอย่างน้ำเสียที่ใช้ทดลองเก็บจากจุดปล่อยน้ำเสียของกระบวนการผลิตน้ำมันปาล์มดิบ (Crude Palm Oil : CPO) จากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม บริษัท ชุมพรอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์ม จำกัด (มหาชน) น้ำเสียดังกล่าวมีลักษณะเป็นของเหลวขุ่น สีน้ำตาล เมื่อตั้งทิ้งไว้จะเกิดการแยกตัวของส่วนใสและตะกอนออกจากกัน แต่ไม่มีการแบ่งชั้นของส่วนของเหลวใสกับตะกอนอย่างชัดเจน (ภาพที่ 3.1) ผลการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของตัวอย่างน้ำเสียจากกระบวนการผลิตน้ำมันปาล์มดิบที่ใช้ในการทดลองโดยเฉลี่ย แสดงดังตารางที่ 3.1



ภาพที่ 3.1 ลักษณะทางกายภาพของน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม

ตารางที่ 3.1 ลักษณะสมบัติของตัวอย่างน้ำเสียจากกระบวนการผลิตน้ำมันปาล์มดิบที่ใช้ในการทดลอง

พารามิเตอร์	ผลการวิเคราะห์
ค่าพีเอช (pH)	4.29
บีโอดี (Biochemical Oxygen Demand : BOD)	53,400 มิลลิกรัมต่อลิตร
ซีโอดี (Chemical Oxygen Demand : COD)	112,500 มิลลิกรัมต่อลิตร
ของแข็งแขวนลอย (Total Suspended Solid : TSS)	55,175 มิลลิกรัมต่อลิตร
ของแข็งแขวนลอยระเหย (Volatile Suspended Solid : VSS)	49,092 มิลลิกรัมต่อลิตร
ไขมันและน้ำมัน (Grease and Oil : G&O)	2,568 มิลลิกรัมต่อลิตร
กรดไขมันระเหย (Volatile Fatty Acid : VFA)	1,502.34 มิลลิกรัมต่อลิตร

การเก็บตัวอย่างน้ำเสียเพื่อใช้ในการทดลอง จะทำการเก็บตัวอย่างน้ำเสียครั้งละประมาณ 100 ลิตร และทำการเก็บรักษาตัวอย่างน้ำเสียในห้องเย็นที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส

3.2 หัวเชื้อตะกอนจุลินทรีย์ที่ใช้ในการเดินระบบถังสร้างก๊าซมีเทน (ถังปฏิบัติการแบบยูเอเอสบี)

ตะกอนจุลินทรีย์ที่ใช้ในการเดินระบบถังสร้างก๊าซมีเทนในการทดลองนี้ เป็นการนำหัวเชื้อตะกอนเมล็ดจุลินทรีย์ (granulation seed) จากระบบยูเอเอสบี ซึ่งเดินระบบบำบัดน้ำเสียที่มีองค์ประกอบของน้ำตาลเป็นหลัก ซึ่งได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท เสริมสุข (ปทุมธานี) จำกัด มาใช้ในการเริ่มเดินระบบ (start up) และเดินระบบ (Operation)

ตะกอนเมล็ดจุลินทรีย์ที่ใช้ในการทดลอง มีลักษณะค่อนข้างกลม เส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 1 มิลลิเมตร สีน้ำตาลเข้ม แสดงดังภาพที่ 3.2 มีค่าเอ็มแอลวีเอสเอส (MLVSS) ประมาณ 62,780 มิลลิกรัมต่อลิตร

โดยนำตะกอนเมล็ดจุลินทรีย์ ดังกล่าวมาทำการสร้างความคุ้นเคย (acclimatization) ให้เข้ากับน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มที่ใช้ในการทดลอง ดังนี้

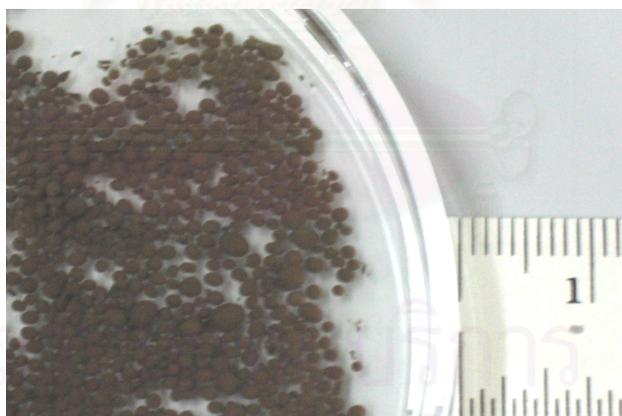
เตรียมขวดน้ำเกลือ (serum bottle) ขนาด 1 ลิตร บรรจุตะกอนเมล็ดจุลินทรีย์ สารอาหารเสริม (Vanderbilt media) (ภาคผนวก ก) และน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม ประมาณ 700, 50

และ 50 มิลลิลิตร ตามลำดับ แล้วทำการพ่นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และก๊าซไนโตรเจน (N_2) อัตราส่วน 30 : 70 ลงในขวดเป็นระยะเวลา 5 นาที หลังจากนั้นปิดฝาขวดให้สนิทด้วยจุกยาง เพื่อป้องกันอากาศผ่านเข้าสู่ขวด แสดงดังภาพที่ 3.3 แล้วใช้เข็มฉีดยาเจาะเพื่อระบายก๊าซที่เกิดขึ้น จากปฏิกิริยาการย่อยสลายน้ำเสียของตะกอนเมื่อดูดซับน้ำเสียทุกวัน เพื่อป้องกันการระเบิดจากแรงดันของก๊าซที่เกิดขึ้นสะสมอยู่ในขวด

สำหรับก๊าซที่ระบายออกมานั้น จะทำการวัดปริมาตรก๊าซและเก็บข้อมูลเพื่อทดสอบสภาพความคุ้นเคยของเมื่อดูดซับน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มก่อนนำไปใช้ในการเดินระบบ ดังนี้

1. วัดปริมาตรก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นในแต่ละวันแล้วนำข้อมูลไปเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลา กับ ปริมาตรก๊าซมีเทนสะสม

2. เมื่อกราฟผ่านจุดที่มีความชันสูงสุดแล้ว แสดงว่าเมื่อดูดซับน้ำเสียมีความสามารถจำเพาะสูงสุดในการสร้างก๊าซมีเทน หรือสามารถสร้างความคุ้นเคยกับน้ำเสียดังกล่าวแล้ว



ภาพที่ 3.2 ลักษณะตะกอนเมื่อดูดซับน้ำเสีย ที่ใช้ในการทดลอง



ภาพที่ 3.3 การสร้างความคุ้นเคย ของตะกอนเมื่อดูดซับอินทรีย์ให้เข้ากับตัวอย่างน้ำเสีย

3.3 อุปกรณ์และเครื่องมือทดลอง

ในการทดลองประกอบด้วยอุปกรณ์และเครื่องมือต่างๆ ดังนี้

3.3.1 ถังสร้างกรด (Acid Tank)

ในการทดลองใช้ถังปฏิกริยาระดับห้องปฏิบัติการ แบบเฮชยูเอสบี (Hydrolysis Upflow Sludge Blanket ; HUSB) ทรงกระบอกผลิตจากพลาสติกอะคริลิกใส (acrylic) สูง 0.95 เมตร เส้นผ่าศูนย์กลาง 0.17 เมตร ความจุประมาณ 0.022 ลูกบาศก์เมตร กำหนดปริมาตรใช้งาน (working volume) 14 ลิตร ติดตั้งมอเตอร์และไบพัสแดนเลส เพื่อกวนตะกอนและไล่ก๊าซภายในถังปฏิกริยา ตัวอย่างน้ำเสียจะถูกป้อนเข้าทางด้านล่างของถังปฏิกริยา และไหลล้นออกจากทางด้านบนของถังปฏิกริยา แสดงดังภาพที่ 3.4

3.3.2 ถังสร้างก๊าซมีเทน (Methane Tank)

ในการทดลองใช้ถังปฏิกริยาระดับห้องปฏิบัติการ แบบยูเอเอสบี (Upflow Anaerobic Sludge Blanket ; UASB) ทรงกระบอกผลิตจากพลาสติกอะคริลิกใส สูง 1.00 เมตร เส้นผ่าศูนย์กลาง 0.055 เมตร มีปริมาตรใช้งาน 3.139 ลิตร ภายในบรรจุขดลวดสแตนเลสสูง 0.45 เมตร เพื่อป้องกันการไหลล้นของน้ำเสียที่ป้อนเข้าสู่ระบบ ด้านบนติดตั้งชุดแยกก๊าซและส่วนตกตะกอน (Gas Solid Separation : GSS) ตัวอย่างน้ำเสียจะถูกป้อนเข้าทางด้านล่างของถังปฏิกริยาของเหลว ก๊าซ และตะกอนแขวนลอยจะไหลขึ้นสู่ด้านบนผ่านชุดแยกก๊าซและส่วนตกตะกอนของเหลวจะไหลล้นออกทางทางด้านข้างส่วนบนของถังปฏิกริยา ส่วนก๊าซที่เกิดขึ้นจะไหลแยกออก

จากท่อด้านบนเข้าสู่เครื่องวัดปริมาตรก๊าซ (gas meter) และเกิดการตกกลับของตะกอนแขวนลอยที่ไหลขึ้นไปปะทะกับส่วนตกตะกอน แสดงดังภาพที่ 3.5

3.3.3 เครื่องวัดปริมาตรก๊าซ (gas meter)

เป็นอุปกรณ์ที่ผลิตจากพลาสติกอะคริลิกใส มีลักษณะเป็นกล่องสี่เหลี่ยม ภายในมีช่องรับก๊าซมีลักษณะเป็นช่องรับก๊าซสามเหลี่ยม 2 ช่อง มีความจุข้างละ 40 มิลลิลิตร สามารถพลิกกลับไปมาได้ แสดงดังภาพที่ 3.6 เมื่อก๊าซที่เกิดขึ้นไหลเข้าสู่ช่องรับก๊าซและสะสมก๊าซขึ้นเรื่อยๆ จนเต็มช่อง แรงดันของก๊าซภายในจะดันให้เกิดการพลิกกลับ วงจรไฟฟ้าที่ต่ออยู่กับแกนของช่องรับก๊าซจะส่งสัญญาณให้เครื่องนับจำนวนการพลิกของช่องรับก๊าซ และช่องรับก๊าซอีกข้างจะเข้ามาทำหน้าที่แทนในลักษณะเดียวกัน และทำงานวนกลับไปกลับมาเช่นนี้ตลอดระยะเวลาที่มีก๊าซเข้าสู่เครื่องวัดปริมาตรก๊าซ

3.3.4 อุปกรณ์ป้อนน้ำเสียเข้าสู่ระบบ

3.3.4.1 อุปกรณ์ป้อนน้ำเสียเข้าสู่ถังสร้างกรด

ในการป้อนตัวอย่างน้ำเสียเข้าสู่ถังสร้างกรด ประกอบด้วย

1) เครื่องกวนแบบแท่งแม่เหล็ก (magnetic stirrer) ยี่ห้อ VELP SCIENTIFICA จำนวน 1 เครื่อง เพื่อกวนผสมตัวอย่างน้ำเสียให้ผสมเป็นเนื้อเดียวกันในขณะที่ป้อนเข้าสู่ถังสร้างกรด

2) เครื่องปั๊มแบบรีดสาย (peristaltic pump) ยี่ห้อ VELP SCIENTIFICA model: SP311 สำหรับป้อนน้ำเสียเข้าสู่ถังสร้างกรด

3) เครื่องควบคุมเวลา (timer) ยี่ห้อ DIEHL Diletta model: typ 881-3 เพื่อควบคุมระยะเวลาในการสูบน้ำเสียของปั๊มเข้าสู่ถังสร้างกรด

3.3.4.2 อุปกรณ์ป้อนน้ำเสียเข้าสู่ถังสร้างก๊าซมีเทน

ใช้เครื่องปั๊มแบบรีดสาย (peristaltic pump) model: 7554-85 Cartridge pump model: 7519-10 และ Cartridge model: 7519-85 ยี่ห้อ MASTERFLEX L/S™ สำหรับการป้อนน้ำเสียเข้าสู่ถังสร้างก๊าซมีเทน

3.4 อุปกรณ์และเครื่องมือวิเคราะห์ผลการทดลองในห้องปฏิบัติการ

1) เครื่องวัดอุณหภูมิ (thermometer)

2) เครื่องวัดค่าพีเอช (pH meter) ยี่ห้อ CONSORT model: C830

3) ตู้อบ

4) เตาเผา (furnance) ยี่ห้อ Barnstead International model: 6010

5) เตาไฟฟ้าพร้อมเครื่องกวนแท่งแม่เหล็ก (stirring hotplate) ยี่ห้อ FAVORIT model: HS0707V2

6) เครื่องชั่งแบบละเอียด 4 ตำแหน่ง ยี่ห้อ AND model: GR-200

7) ปัมดูดสุญญากาศ (vacuum pump) ยี่ห้อ GAST model: 0523-101Q-G588EDX

8) โถดูดความชื้น (dessicator)

9) เครื่องปั่นเหวี่ยงสารให้ตกตะกอน (centrifuge) ยี่ห้อ NUVE model: CN180

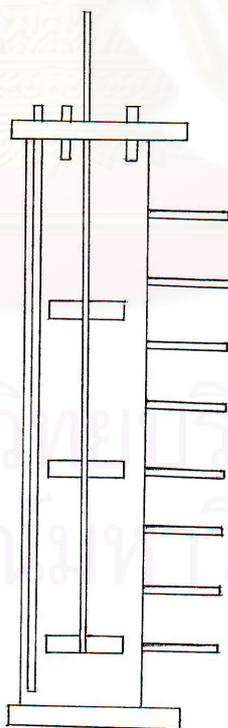
10) เตาชั่งยี่ห้อ HANNA model: C9800-02

11) เครื่องวัดปริมาณออกซิเจน (Laboratory dissolved oxygenmeter) ยี่ห้อ WTW model: inoLab Oxi Level 2

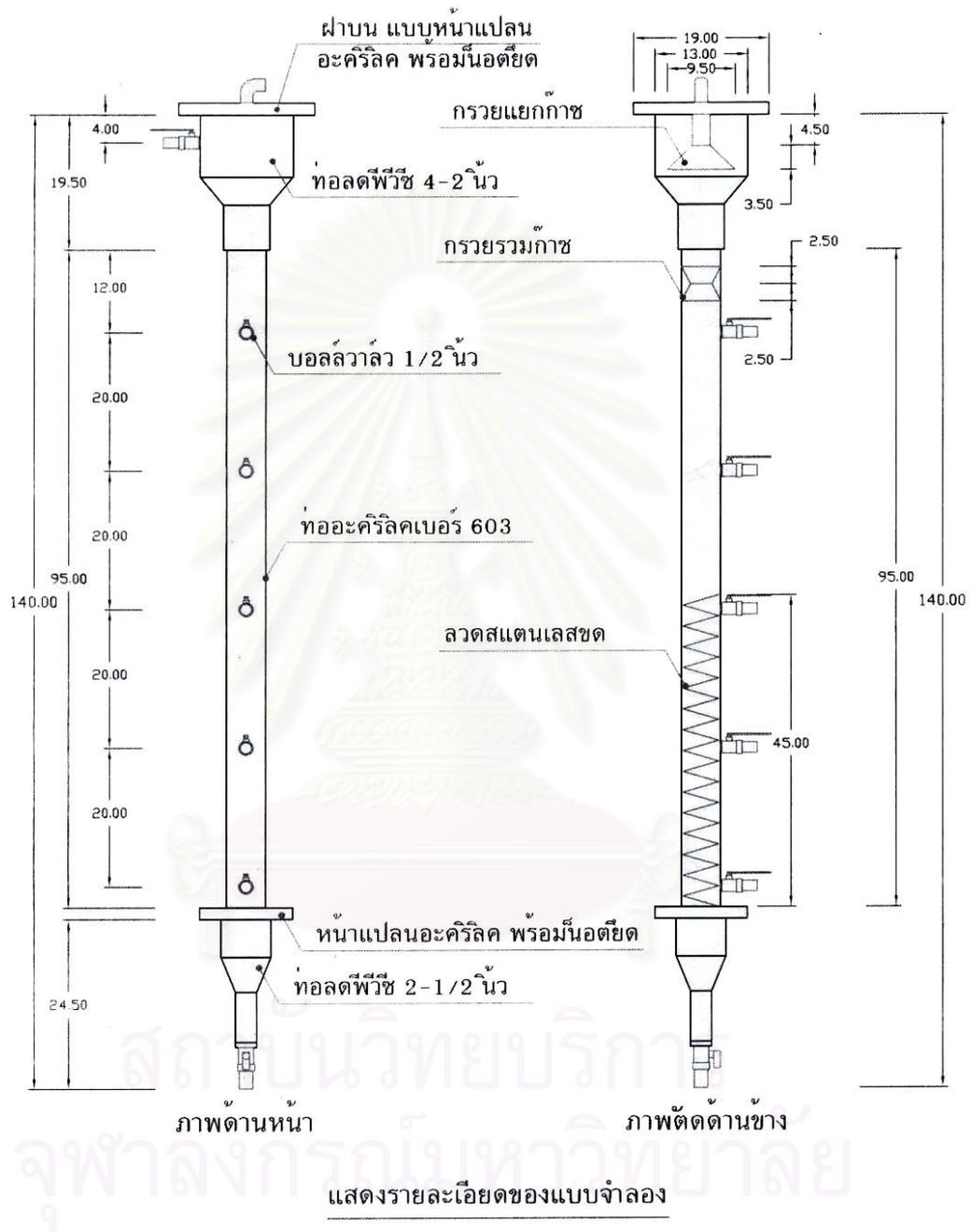
12) หัววัดออกซิเจน ยี่ห้อ WTW model: cellOx 325-3

13) เครื่องวัดและควบคุมอุณหภูมิ ยี่ห้อ Uunion model: UN-618D/817

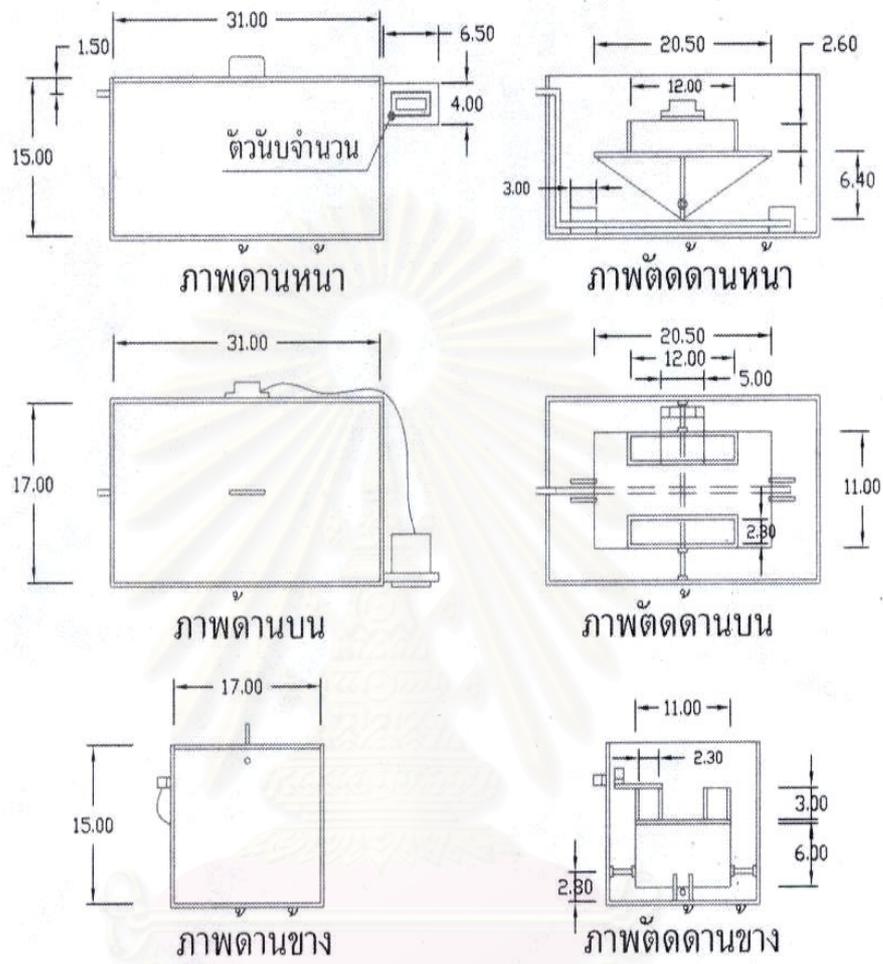
14) เตาหุ้มไฟฟ้า (heating mantle)



ภาพที่ 3.4 ถังสร้างกรดแบบ Hydrólýsýs Upflow Sludge Blanket (HUSB) ที่ใช้ในการทดลอง



ภาพที่ 3.5 ถังสร้างก๊าซมีเทนแบบ Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB) ที่ใช้ในการทดลอง



แสดงรายละเอียดของกล่องวัดก๊าซ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาพที่ 3.6 เครื่องวัดปริมาตรก๊าซ (gas meter)

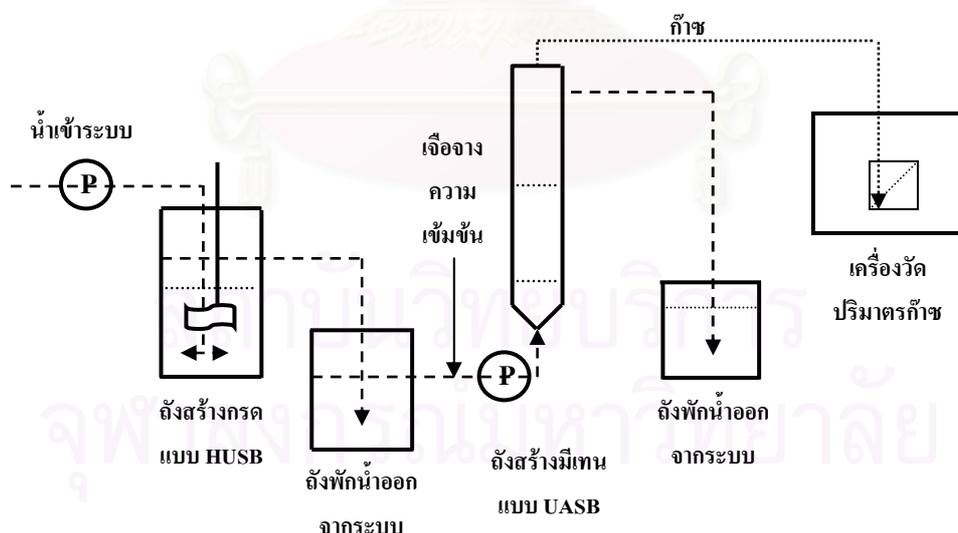
3.5 วิธีการดำเนินการวิจัย

3.5.1 วิธีการเดินระบบ

3.5.1.1 แผนผังการทำงานของระบบ

ตัวอย่างน้ำเสียที่ไม่มีการปรับเปลี่ยนสภาพใดๆ จะถูกป้อนเข้าสู่ถังสร้างกรดจากทางด้านล่างของถังแบบกึ่งต่อเนื่อง (semi continuous) เพื่อให้มีระยะเวลาพักทางชลศาสตร์ ตามความต้องการ และมีการกวน เป็นระยะไม่ต่อเนื่องตลอดเวลาเพื่อไล่ก๊าซที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสที่แทรกอยู่ภายในชั้นตะกอน ซึ่งจะมีผลทำให้เกิดการแยกชั้นลอยตัวและไหลออกจากถัง ตามลำดับ และการกวนยังช่วยทำให้ตัวอย่างน้ำเสียที่ป้อนกับตะกอนจุลินทรีย์ภายในถังสร้างกรดมีโอกาสสัมผัสกันมากขึ้น

ตัวอย่างน้ำเสียที่ถูกกักพักไว้จะไหลล้นเข้าสู่ถังพักน้ำออก ต่อจากนั้นจะทำการเจือจางความเข้มข้นเพื่อให้มีอัตราภาระสารอินทรีย์ ตามแผนการทดลอง ก่อนที่จะป้อนเข้าสู่ถังสร้างก๊าซมีเทนทางด้านล่างของถัง ตัวอย่างน้ำเสียที่ผ่านถังสร้างก๊าซมีเทนและก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจะไหลผ่านชุดแยกก๊าซและส่วนตกตะกอนด้านบนของถัง โดยที่น้ำเสียจะไหลล้นเข้าสู่ถังพักน้ำ ส่วนก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจะไหลเข้าสู่เครื่องวัดปริมาตรก๊าซ และตะกอนแขวนลอยจะปะทะกับส่วนตกตะกอนและตกกลับสู่ด้านล่าง แสดงดังภาพที่ 3.7



ภาพที่ 3.7 การเดินระบบของระบบบำบัดน้ำเสียแบบยูเอเอสบี (UASB) ที่มีถังสร้างกรดแบบ Hydrolysis Upflow Sludge Blanket (HUSB)

3.5.1.2 แผนการทดลอง

ในการทดลองจะทำการศึกษาขั้นตอนการสร้างกรดและขั้นตอนการสร้างก๊าซมีเทนแยกออกจากกัน เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม (optimum condition) ของแต่ละขั้นตอน ซึ่งมีพารามิเตอร์ที่ต้องการศึกษา ดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 แสดงค่าพารามิเตอร์กับตำแหน่งที่ทำการศึกษาของระบบบำบัด และวิธีการวิเคราะห์

พารามิเตอร์	ถังสร้างกรด	ถังสร้าง ก๊าซมีเทน	วิธีการวิเคราะห์ หรือ เครื่องมือทดลอง
อุณหภูมิ	*	*	Thermometer
ค่าพีเอช (pH)	*	*	pH Meter
กรดระเหย (VA)	*	*	Distillation Method
สภาพด่าง (alkalinity)	*	*	Titration Method วิธีของ Dilallo & Albertson
ของแข็งแขวนลอย (SS)	*	*	Total Suspended Solids Dried at 103 – 105 °C
ของแข็งแขวนลอยระเหย (VSS)	*	*	Fixed and Volatile Solids Ignite at 500 °C
ซีโอดี (COD)	*	*	Closed Reflux , Titrimetric Method
บีโอดี (BOD)		*	5 – Day BOD Test
น้ำมันและไขมัน (O&G)		*	Partition-Gravimetric Method
ก๊าซชีวภาพ (biogas)		*	Gas Meter
องค์ประกอบก๊าซชีวภาพ (%CH ₄)		*	Oldham Pocket Explosimeter- catharometer type Ex2000c
ลักษณะภายนอกและภายในของ ตะกอนเมื่อดูดซับ		*	Scanning Electron Microscope

หมายเหตุ : ทุกพารามิเตอร์วิเคราะห์ตามวิธีมาตรฐาน (American Public Health Association, American Water Works Association and Water Pollution Control Federation, 1998) ยกเว้น การวิเคราะห์สภาพด่าง ใช้วิธีของ Dilallo & Albertson ตามคู่มือวิเคราะห์น้ำเสีย (คณะกรรมการจัดทำคู่มือวิเคราะห์น้ำเสีย สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย, 2540) การวิเคราะห์ก๊าซชีวภาพ และลักษณะทางกายภาพของเมื่อดูดซับ

1) การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของถังสร้างกรด

ในการทดลองนี้จะแบ่งออกเป็น 2 ช่วง ด้วยกันคือ ช่วงที่ 1 การทดลองเพื่อหา สภาวะการไฮโดรไลซิสที่เหมาะสม (optimum hydrolysis condition) เบื้องต้น เพื่อให้ได้ข้อมูลเบื้องต้นนำไปใช้ในการเดินระบบถังสร้างกรด และช่วงที่ 2 การเดินระบบถังสร้างกรดเพื่อทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมของถังสร้างกรด (optimum condition of acid tank)

1.1) การทดลองไฮโดรไลซิส

เนื่องจากขั้นตอนแรกของกระบวนการสองขั้นตอน ช่วงค่าพีเอชที่เหมาะสมที่สุดอยู่ระหว่างค่าพีเอช 4.00-6.50 (Speece, 1996) จึงทำการทดลองโดยกำหนดค่าพีเอช

เริ่มต้น ที่ค่าพีเอชจริงของตัวอย่างน้ำเสีย (ค่าพีเอช 4.80) ค่าพีเอช 5.50 และค่าพีเอช 6.00 โดยใช้ โซเดียมไบคาร์บอเนต (NaHCO_3) เป็นสารเคมีปรับค่าพีเอช แล้วทำการทดลองไฮโดรไลซิสตัวอย่าง น้ำเสียทั้ง 3 ชุดการทดลอง โดยทำการบรรจุตัวอย่างน้ำเสียปริมาตร 900 มิลลิลิตร ลงใน Flask ขนาด 1 ลิตร ปิดฝาให้สนิทด้วยจุกยางที่ต่อท่อเพื่อระบายก๊าซที่เกิดขึ้น ซึ่งมีปลายจุ่มอยู่ในน้ำ แล้วทำการกวนตัวอย่างน้ำเสียอย่างต่อเนื่องด้วยเครื่องกวนแท่งแม่เหล็ก (magnetic stirrer) แสดงดัง ภาพที่ 3.8 แล้วทำการเก็บตัวอย่างวิเคราะห์ผลการทดลองต่อเนื่องทุกวัน เพื่อทำการวิเคราะห์หา ระยะเวลาที่กักพักทางชีวศาสตร์ ที่เหมาะสมที่สุดจากการทดลองที่มีประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอยระเหย ได้มากที่สุด และวิเคราะห์ประสิทธิภาพการสร้างกรดไขมันระเหย



ภาพที่ 3.8 การทดลองไฮโดรไลซิสตัวอย่างน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม

1.2) การเดินระบบถึงสร้างกรด

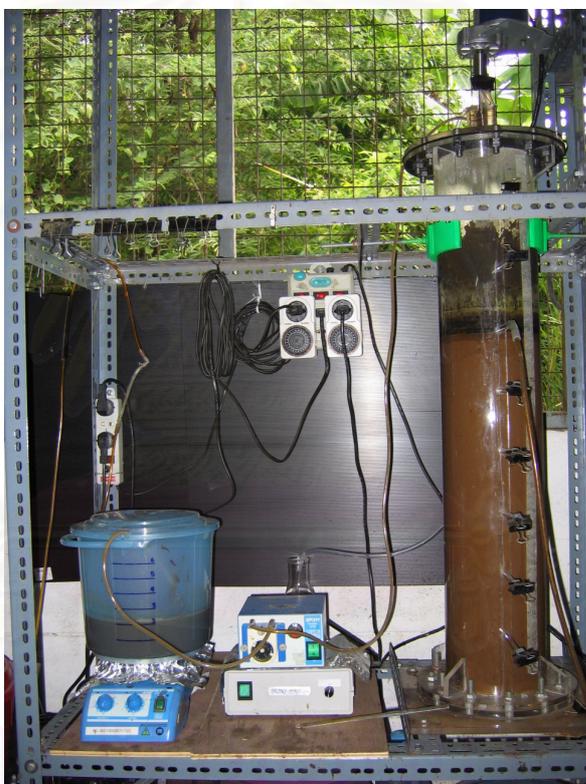
เลือกค่าพีเอชเริ่มต้น และระยะเวลาที่กักพักทางชีวศาสตร์ที่เหมาะสมจากการทดลองไฮโดรไลซิส (ข้อ 1.1) นำมาใช้ในการเดินระบบของถังสร้างกรด ตัวอย่างน้ำเสียที่ป้อนเข้าสู่ถังสร้างกรด จะใช้ตัวอย่างน้ำเสียจริงที่ไม่มีการปรับเปลี่ยนลักษณะสมบัติใดๆ แล้วทำการทดสอบประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอยระเหยและประสิทธิภาพการสร้างกรดไขมันระเหย

ในการทดสอบประสิทธิภาพของถังสร้างกรดจะใช้ระยะเวลาในการเดินระบบอย่างน้อยเท่ากับระยะเวลาที่กักพักทางชีวศาสตร์ แล้วเดินระบบต่อจนประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอยระเหย คงที่เป็นระยะเวลา 5 วัน

หลังจากที่ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอยระเหยคงที่แล้ว จึงทำการลดระยะเวลาที่กักพักทางชีวศาสตร์ลงจากระยะเวลาที่กักพักทางชีวศาสตร์ที่ได้จากการทดลอง

ไฮโดรไลซิส เติบระบบจนประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอยระเหยคงที่ แล้วจึงเพิ่มระยะเวลาพักทางชลศาสตร์ ขึ้นจากระยะเวลาพักทางชลศาสตร์ที่ได้จากการทดลองไฮโดรไลซิส เพื่อเปรียบเทียบผลของระยะเวลาพักทางชลศาสตร์ ต่อประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอยระเหย และประสิทธิภาพการสร้างกรดไขมันระเหยซึ่งจากการทดลองไฮโดรไลซิส ได้ระยะเวลาพักทางชลศาสตร์ที่เหมาะสม 14 วัน ดังนั้นในการเดินระบบ จึงเลือกระยะเวลาพักทางชลศาสตร์ ในการเดินระบบครั้งนี้ได้แก่ 14 วัน, 10 วัน และ 20 วัน ตามลำดับ

ในระหว่างการเดินระบบถึงสร้างกรด จะทำการทิ้งตะกอนส่วนเกินออกจากระบบ สัปดาห์ละ 1 ครั้ง โดยใช้เกณฑ์การทิ้งตะกอน ร้อยละ 50 ของของแข็งแขวนลอยระเหยสะสมที่ป้อนเข้าสู่ถังสร้างกรด



ภาพที่ 3.9 การเดินระบบถังสร้างกรดแบบเอชยูเอสบี (HUSB)

2) การศึกษาสถานะที่เหมาะสมของถังสร้างก๊าซมีเทน

ทำการป้อนน้ำเสียเข้าสู่ถังสร้างก๊าซมีเทน ด้วยระยะเวลาพักทางชลศาสตร์ 24 ชั่วโมง อัตราการไหล 2.2 มิลลิลิตรต่อนาที โดยทำการเจือจางตัวอย่างน้ำเสียที่ออกจากถังสร้างกรด ซึ่งเก็บรักษาในห้องเย็นอุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส ด้วยน้ำประปาตั้งแต่เริ่มทำการทดลองเป็นระยะเวลา 7 วัน และใช้โซเดียมไบคาร์บอเนต (NaHCO_3) เป็นสารเคมีปรับค่าพีเอชและ

ปรับสภาพต่าง ก่อนทำการป้อนเข้าสู่ถังสร้างก๊าซมีเทน หลังจากวันที่ 7 ของการทดลองจึงเปลี่ยนไปใช้น้ำที่ออกจากถังสร้างก๊าซมีเทนเป็นน้ำเจือจาง เพื่อเพิ่มสภาพต่างและลดปริมาณการเติมสารเคมีเพื่อปรับสภาพต่าง โดยควบคุมค่าพีเอชอยู่ในช่วง 6.8-7.8 และขณะเดินระบบจะใช้กระดาษแข็งหุ้มถังปฏิกิริยาเพื่อป้องกันการรบกวนจากแสงซึ่งจะส่งผลต่อการทำงานของระบบไร้อากาศได้

ป้อนภาระสารอินทรีย์เข้าสู่ถังสร้างก๊าซมีเทน และเพิ่มภาระสารอินทรีย์ขึ้นเรื่อยๆ เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ ดังนี้ 0.20, 0.50, 0.75, 1.00 และ 1.25 กรัมซีโอดีต่อกรัมของแข็งแขวนลอยระเหยต่อวัน (g COD/ gVSS-d) เป็นลำดับ จนระบบเกือบจะล้มเหลว เก็บตัวอย่างวิเคราะห์ผลการทดลองระหว่างเดินระบบ เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ที่ภาระสารอินทรีย์ต่างๆ แล้วนำข้อมูลมาเขียนกราฟ เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสารอินทรีย์สูงสุด (optimum organic removal)

แล้วนำสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสารอินทรีย์สูงสุดที่ได้จากการทดลองไปทดลองเดินระบบด้วยน้ำเสียจริง

วัดอัตราการสร้างก๊าซชีวภาพด้วยเครื่องวัดปริมาตรก๊าซ และวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพในรูปร้อยละก๊าซมีเทนโดยปริมาตร (%CH₄)



ภาพที่ 3.10 การเดินระบบถังสร้างก๊าซมีเทนแบบยูเอเอสบี (UASB)

3.5.1.3 การเริ่มต้นเดินระบบ

การเริ่มต้นเดินระบบจะต้องทำการติดตั้งเครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ดำเนินการทดลองและทำการทดสอบความพร้อมของอุปกรณ์ต่างๆ โดยเฉพาะรอยรั่วของถังปฏิกริยาเยอเอสบี โดยใช้น้ำสบู่ในการทดสอบ เมื่อตรวจสอบความเรียบร้อยแล้วจึงเริ่มต้นเดินระบบ ดังนี้

1) การเริ่มต้นเดินระบบถังสร้างกรด

กำหนดปริมาตรใช้งานของถังสร้างกรดที่ระดับ 14 ลิตร เพื่อให้ระดับน้ำด้านบนอยู่ในระดับเดียวกับใบพัดกวนน้ำเสีย นำมูลวัวละลายน้ำประปาแล้วกรองเส้นใย(เศษหญ้า) ออกเพื่อใช้เป็นหัวเชื้อจุลินทรีย์ ได้ค่าเอ็มแอลวีเอสเอส (MLVSS) เท่ากับ 9,300 มิลลิกรัมต่อลิตร จากนั้นเติมหัวเชื้อลงในถังสร้างกรดให้มีความเข้มข้น 5,000 มิลลิกรัมต่อลิตรถึงปฏิกริยา

จากนั้นเติมตัวอย่างน้ำเสียจนได้ปริมาตร 14 ลิตร และเติมโพลิเมอร์ (polymer) Praestol 852 BC ด้วยอัตราส่วน 5 มิลลิกรัมต่อกรัมวีเอสเอส เพื่อให้ตะกอนภายในถังปฏิกริยาจับตัวเป็นชั้นคักจับตะกอนน้ำเสียที่ป้อนเข้าสู่ถังปฏิกริยา กวนตะกอนน้ำเสียภายในถังสร้างกรดด้วยอัตราเร็วประมาณ 100 รอบต่อนาที เป็นระยะเวลา 15 นาที หยุด 1 ชั่วโมง 45 นาที เป็นระยะเวลา 7 วัน เพื่อปรับสภาพ หัวเชื้อจุลินทรีย์(มูลวัว) ให้คุ้นเคยกับตัวอย่างน้ำเสียจากโรงงาน สกัดน้ำมันปลา และปรับค่าพีเอชภายในถังสร้างกรดให้มีค่าพีเอช 6.00 ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ก่อนจะเริ่มป้อนน้ำเสีย ซึ่งใช้ตัวอย่างน้ำเสียที่ไม่มีการปรับเปลี่ยนลักษณะสมบัติใดๆ หลังจากนั้นดำเนินการทดลองตามแผนการทดลองต่อไป

2) การเริ่มต้นเดินระบบถังสร้างก๊าซมีเทน

นำตะกอนเมื่อดิจินทรีย์ที่ผ่านการปรับสภาพแล้ว เติมลงในถังปฏิกริยาเยอเอสบีโดยกำหนดค่าเอ็มแอลวีเอสเอส (MLVSS) เท่ากับ 20,000 มิลลิกรัมของแข็งแขวนลอยระยะเหยต่อลิตรของถังปฏิกริยา พร้อมกับสารอาหารเสริม Vanderbilt media (ภาคผนวก ก) จนเต็มถึงปฏิกริยา ปิดฝาให้สนิทและต่อท่อก๊าซเข้ากับเครื่องวัดปริมาตรก๊าซ จากนั้นพ่นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และก๊าซไนโตรเจน (N₂) ด้วยอัตราส่วน CO₂ : N₂ = 30 : 70 เป็นระยะเวลา 5 นาที เพื่อไล่ก๊าซออกซิเจนหลังจากนั้นจึงเริ่มป้อนน้ำเสียตามแผนการทดลอง

3.5.2 การวิเคราะห์ผลการทดลองระหว่างเดินระบบ

3.5.2.1 การวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำเสียและก๊าซชีวภาพ

1) ถังสร้างกรด

ตารางที่ 3.3 พารามิเตอร์และความถี่ในการวิเคราะห์ผลการทดลองของถังสร้างกรด

พารามิเตอร์	ความถี่ในการวิเคราะห์	
	น้ำเข้าถังสร้างกรด	น้ำออกจากถังสร้างกรด
อุณหภูมิ, °C	-	ทุกวัน
ค่าพีเอช (pH)	1 ครั้ง/สัปดาห์	ทุกวัน
กรดไขมันระเหย (VFA) , มิลลิกรัมต่อลิตร	1 ครั้ง/สัปดาห์	ทุกวัน
สภาพด่าง (Alk) , มิลลิกรัมต่อลิตร	1 ครั้ง/สัปดาห์	ทุกวัน
ซีโอดี (COD), มิลลิกรัมต่อลิตร	1 ครั้ง/สัปดาห์	2 ครั้ง/สัปดาห์
ของแข็งแขวนลอย (SS), มิลลิกรัมต่อลิตร	1 ครั้ง/สัปดาห์	ทุกวัน
ของแข็งแขวนลอยระเหย (VSS), มิลลิกรัมต่อลิตร	1 ครั้ง/สัปดาห์	ทุกวัน

2) ถังสร้างก๊าซมีเทน

ตารางที่ 3.4 พารามิเตอร์และความถี่ในการวิเคราะห์ผลการทดลองของถังสร้างก๊าซมีเทน

พารามิเตอร์	ความถี่ในการวิเคราะห์	
	น้ำเข้าถังสร้างก๊าซมีเทน	น้ำออกจากถังสร้างก๊าซมีเทน
อุณหภูมิ, °C	-	ทุกวัน
ค่าพีเอช (pH)	3 ครั้ง/สัปดาห์	3 ครั้ง/สัปดาห์
กรดไขมันระเหย (VFA) , มิลลิกรัมต่อลิตร	3 ครั้ง/สัปดาห์	3 ครั้ง/สัปดาห์
สภาพด่าง (Alk) , มิลลิกรัมต่อลิตร	3 ครั้ง/สัปดาห์	3 ครั้ง/สัปดาห์
ซีโอดี (COD), มิลลิกรัมต่อลิตร	3 ครั้ง/สัปดาห์	3 ครั้ง/สัปดาห์
บีโอดี (BOD), มิลลิกรัมต่อลิตร	2 ครั้ง/สัปดาห์	2 ครั้ง/สัปดาห์
ของแข็งแขวนลอย (SS), มิลลิกรัมต่อลิตร	1 ครั้ง/สัปดาห์	1 ครั้ง/สัปดาห์
ของแข็งแขวนลอยระเหย (VSS), มิลลิกรัมต่อลิตร	1 ครั้ง/สัปดาห์	1 ครั้ง/สัปดาห์
น้ำมันและไขมัน (G&O), มิลลิกรัมต่อลิตร	ที่สภาวะคงตัว	ที่สภาวะคงตัว
อัตราการสร้างก๊าซชีวภาพ , มิลลิลิตรต่อวัน	ทุกวัน	
องค์ประกอบก๊าซชีวภาพ (%CH ₄) , ร้อยละก๊าซมีเทนโดยปริมาตร	ที่สภาวะคงตัว	

3.5.2.2 การวิเคราะห์ตัวอย่างตะกอนเมื่อดูดซับอินทรีย์

ตารางที่ 3.5 พารามิเตอร์และความถี่ในการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของตะกอนเมื่อดูดซับอินทรีย์

พารามิเตอร์	ความถี่ในการวิเคราะห์	วิธีการวิเคราะห์
ลักษณะภายนอกของตะกอนเมื่อดูดซับอินทรีย์	ก่อน/หลัง การทดลอง	Scanning Electron Microscope
ลักษณะภายในของตะกอนเมื่อดูดซับอินทรีย์	ก่อน/หลัง การทดลอง	Scanning Electron Microscope

3.6 การประเมินประสิทธิภาพของระบบ

คำนวณประสิทธิภาพของระบบจากข้อมูลการวิเคราะห์ผลการทดลอง

3.6.1 การประเมินประสิทธิภาพถังสร้างกรด

ทำการประเมินประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอยระเหย(VSS removal) และประสิทธิภาพการสร้างกรดไขมันระเหย ที่ระยะเวลาพักทางชีวศาสตร์ต่างๆ เพื่อเปรียบเทียบสภาวะที่เหมาะสม (optimum condition) ในการเดินระบบถังสร้างกรด

3.6.2 การประเมินประสิทธิภาพถังสร้างก๊าซมีเทน

ทำการประเมินประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ ประสิทธิภาพการกำจัดบีโอดี ประสิทธิภาพการกำจัดกรดไขมันระเหย ประสิทธิภาพการกำจัดน้ำมันและไขมัน และประสิทธิภาพการสร้างก๊าซชีวภาพ และก๊าซมีเทนที่อัตราการป้อนภาระสารอินทรีย์ ต่างๆ เพื่อเปรียบเทียบสภาวะที่เหมาะสมในการเดินระบบถังสร้างก๊าซมีเทน

และติดตามตรวจสอบ (monitoring) ค่าพีเอช สภาพความเป็นด่าง และอุณหภูมิของระบบเพื่อประเมินเสถียรภาพของระบบ

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์

การวิจัยนี้ ใช้น้ำเสียสดจากกระบวนการผลิตของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มที่ยังไม่ทำการเจือจางเพื่อสร้างกรด โดยใช้ระยะเวลาพักทางชีวศาสตร์ 14 วัน ตามผลการทดลองไฮโดรไลซิส น้ำเสียเบื้องต้น เมื่อถึงสร้างกรดสามารถกำจัดของแข็งแขวนลอยได้อย่างคงที่แล้วจึงทดลองแปรผันระยะเวลาพักทางชีวศาสตร์ เป็นระยะเวลา 10 และ 20 วัน ตามลำดับ

จากนั้นนำน้ำเสียที่ออกจากถังสร้างกรดมาทำการเจือจางให้มีอัตราการป้อนสารอินทรีย์เริ่มต้นตั้งแต่ 0.2 ไปจนถึง 1.25 กรัมซีโอดีต่อกรัมของแข็งแขวนลอยระเหยต่อวัน (g COD/ g VSS-d) หรือ 4 ไปจนถึง 25 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน ใช้ระยะเวลาพักทางชีวศาสตร์ 24 ชั่วโมงคงที่ตลอดการทดลอง ซึ่งจะทำให้การเปลี่ยนอัตราการป้อนสารอินทรีย์เมื่อถึงปฏิบัติการสร้างก๊าซมีเทนมีประสิทธิภาพคงที่ โดยช่วงการคงที่มีค่าต่ำสุดและสูงสุดต่างกันไม่เกินร้อยละ 10

เมื่อตะกอนจุลินทรีย์ที่เติมลงในถังสร้างก๊าซมีเทนแบบยูเอเอสบี จากการทดลองพบว่า ค่าความเข้มข้นของของแข็งแขวนลอยระเหย เท่ากับ 62,780 มิลลิกรัมต่อลิตร จากการกำหนดค่าเอ็มแอลวีเอสเอส (MLVSS) เมื่อตะกอนจุลินทรีย์ที่เติมลงในถังสร้างก๊าซมีเทน เท่ากับ 20,000 มิลลิกรัมของแข็งแขวนลอยระเหยต่อลิตรของถังปฏิบัติการ ดังนั้น จึงเติมเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ปริมาตร 1 ลิตรลงในถังสร้างก๊าซมีเทนเพื่อใช้ในการบำบัด (ภาคผนวก ข)

สาเหตุที่ต้องทำการป้อนน้ำเสียโดยไม่ใช้ปั๊มเข้าสู่ถังสร้างก๊าซมีเทนโดยตรง เนื่องจากน้ำเสียที่ออกจากถังสร้างกรดมีปริมาณน้ำเสียไม่เพียงพอในการป้อนเข้าสู่ถังสร้างก๊าซมีเทนสำหรับอัตราการป้อนสารอินทรีย์ในบางอัตรา เพราะระยะเวลาพักทางชีวศาสตร์ของถังปฏิบัติการทั้งสองขั้นตอนแตกต่างกันมาก ทำให้อัตราการไหลของน้ำที่เข้าและออกจากถังปฏิบัติการแตกต่างกันมากด้วยเช่นกัน และนอกจากนี้ น้ำเสียที่ออกจากถังสร้างกรดยังคงมีความเข้มข้นของพารามิเตอร์ต่างๆ สูงอยู่อีกด้วย

สำหรับการอภิปรายผลการทดลองแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ดังนี้

ส่วนที่ 1 อภิปรายผลการทดลองไฮโดรไลซิส

ส่วนที่ 2 อภิปรายผลการทดลองที่เกี่ยวข้องกับถังสร้างกรด

ส่วนที่ 3 อภิปรายผลการทดลองที่เกี่ยวข้องกับถังสร้างก๊าซมีเทน

4.1 การทดลองไฮโดรไลซิสตัวอย่างน้ำเสียที่ใช้ในการทดลอง เพื่อการทดสอบเบื้องต้นหาสถานะที่เหมาะสมสำหรับการเดินระบบถังสร้างกรด

4.1.1 ค่าพีเอชเริ่มต้นที่เหมาะสมของน้ำเสียในกระบวนการไฮโดรไลซิสเพื่อกำจัดของแข็งแขวนลอยระเหย และสร้างกรดไขมันระเหย

ในการทดลองเพื่อหาค่าพีเอชเริ่มต้นที่เหมาะสมในการไฮโดรไลซิสตัวอย่างน้ำเสียเพื่อกำจัดของแข็งแขวนลอยระเหย ได้จัดชุดทดลองโดยแปรผันค่าพีเอชเริ่มต้นของตัวอย่างน้ำเสีย 3 ชุด การทดลอง ได้แก่

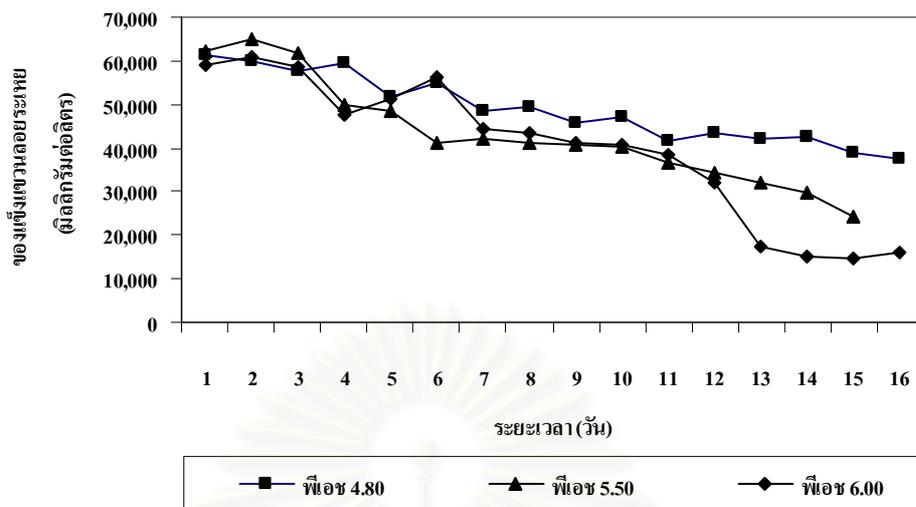
ชุดทดลองที่ 1 ที่ค่าพีเอชจริงของน้ำเสีย (ค่าพีเอช ประมาณ 4.80)

ชุดทดลองที่ 2 ที่ค่าพีเอช เท่ากับ 5.50

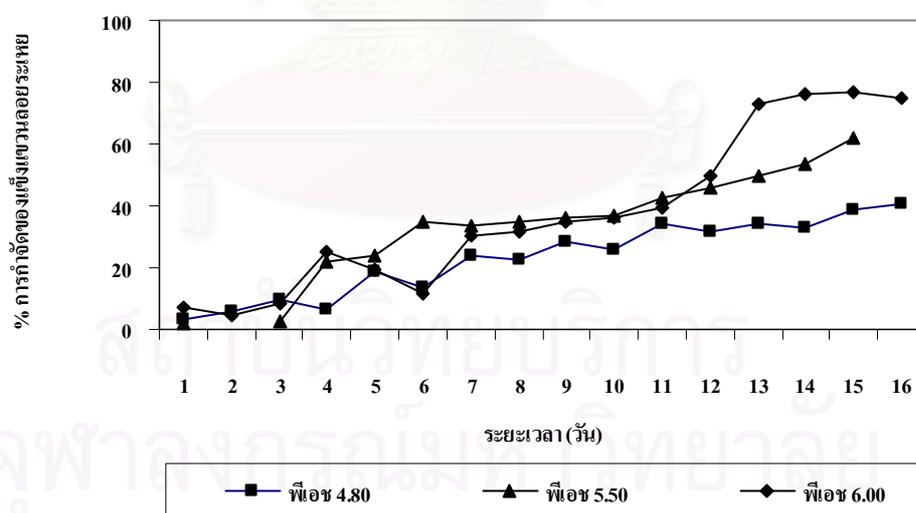
ชุดทดลองที่ 3 ที่ค่าพีเอช เท่ากับ 6.00

ชุดการทดลองทั้ง 3 ชุด แสดงดังภาพที่ 3.7 การดำเนินการทดลองจะทำการกวนตัวอย่างน้ำเสียซึ่งมีความเข้มข้นของของแข็งแขวนลอยระเหย เท่ากับ 63,600 มิลลิกรัมต่อลิตร อย่างต่อเนื่องด้วยความเร็วรอบเท่ากันทั้ง 3 ชุดทดลอง ผลการทดลองพบว่า ตั้งแต่วันแรกของการทดลอง ประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งแขวนลอยระเหย เพิ่มขึ้นทีละน้อยโดยมีค่าใกล้เคียงกันทั้ง 3 ชุดทดลอง จนกระทั่งวันที่ 12 ของการทดลอง ประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งแขวนลอยระเหย เริ่มมีค่าแตกต่างกัน จนกระทั่งวันที่ 13 ของการทดลอง ประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งแขวนลอยระเหยของชุดทดลองที่ 3 มีประสิทธิภาพสูงกว่าชุดทดลองที่ 1 และ 2 อย่างชัดเจน โดยมีความเข้มข้นของของแข็งแขวนลอยระเหยเหลืออยู่ เท่ากับ 17,400 , 42,000 และ 32,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ (ภาพที่ 4.1) และมีประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอยระเหยร้อยละ 72.67 , 33.96 และ 49.69 ตามลำดับ ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอยระเหยของชุดการทดลองที่ 3 เริ่มคงที่ในวันที่ 14 ของการทดลอง ดังแสดงในภาพที่ 4.2 ซึ่งมีประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งแขวนลอยระเหยประมาณร้อยละ 75.94 ซึ่งมีประสิทธิภาพดีที่สุดและสูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับชุดทดลองที่ 1 และ 2 ซึ่งมีประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งแขวนลอยระเหยประมาณร้อยละ 33.02 และ 53.30 ตามลำดับ

สำหรับผลการทดลองประสิทธิภาพการสร้างกรดไขมันระเหย พบว่า ชุดการทดลองทั้ง 3 ชุด มีประสิทธิภาพการสร้างกรดไขมันระเหยเฉลี่ยร้อยละ 91.18 ± 6.98 , 89.49 ± 5.47 และ 93.13 ± 3.87 ที่ค่าพีเอชเริ่มต้น 4.80, 5.50 และ 6.00 ตามลำดับ (ภาพที่ 4.3)



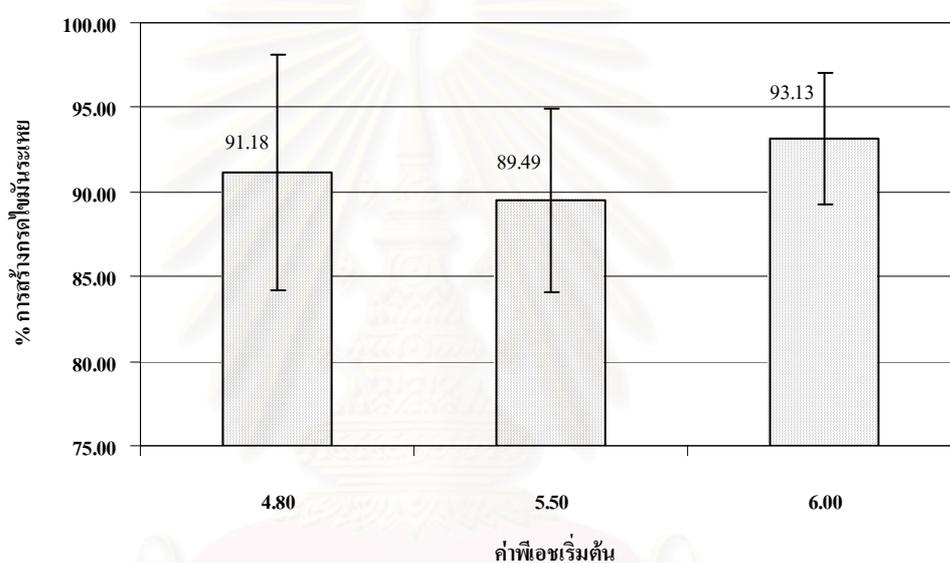
ภาพที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลากับปริมาณของแรงเฉือนของชุดทดลองที่ 1, 2 และ 3



ภาพที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลากับประสิทธิภาพการกำจัดของแรงเฉือนของชุดทดลองไฮโดรไลซิสชุดทดลองที่ 1, 2 และ 3

ตารางที่ 4.1 ปริมาณและประสิทธิภาพการสร้างกรดไขมันระเหยเฉลี่ยตลอดการทดลองไฮโดรไลซิส

ชุดทดลองที่	ค่าพีเอช		ค่าเฉลี่ยกรดไขมันระเหย (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ประสิทธิภาพการสร้างกรด ไขมันระเหย
	เริ่มต้น	เฉลี่ย		
1	4.80	4.33	111,589.30±114,129.13	91.18 ± 6.98
2	5.50	5.18	73,200.00±56,225.10	89.49 ±5.47
3	6.00	5.78	99,482.14±41,729.71	93.13 ± 3.87



ภาพที่ 4.3 เปรียบเทียบประสิทธิภาพเฉลี่ยของการสร้างกรดไขมันระเหยของการทดลองไฮโดรไลซิส ของชุดทดลองที่ 1, 2 และ 3

จากผลการทดลองข้างต้น จะเห็นได้ว่าชุดการทดลองทั้ง 3 ชุด มีประสิทธิภาพการสร้างกรดไขมันระเหยใกล้เคียงกันซึ่งอาจเป็นผลจากการเพิ่มจำนวนจุลินทรีย์ภายในระบบปิดและมีการเกาะตัวเป็นฟิล์มชีวภาพที่บริเวณผนังขวดของชุดทดลองแต่ละชุดซึ่งสังเกตจากราบตะกอนที่เกาะบนผนังขวดทดลองทำให้เกิดการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียได้มากและเร็วขึ้น และที่ระดับพีเอชทั้งสามค่าดังกล่าวอยู่ในช่วงที่ไม่เหมาะสมสำหรับการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์สร้างก๊าซมีเทน จึงมีการเปลี่ยนรูปของกรดไขมันระเหยไปเป็นก๊าซมีเทนน้อยมาก ทำให้มีการสะสมของกรดไขมันระเหยภายในระบบขึ้น นอกจากนี้จุลินทรีย์สร้างกรดยังใช้กรดไขมันระเหยเปลี่ยนรูปเป็นก๊าซไฮโดรเจน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และเซลล์จุลินทรีย์ ด้วยเช่นกัน ดังนั้น อัตราการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ที่ไม่เท่ากันที่ค่าพีเอชต่างกันจึงทำให้มีปริมาณการบริโภคกรดไขมันระเหยต่างกัน ชุด

การทดลองที่จุลินทรีย์มีอัตราการเจริญเติบโตช้ากว่าจะบริโภคกรดไขมันระเหยน้อยกว่า จึงทำให้เหลือปริมาณกรดไขมันระเหยสะสมมากกว่าชุดการทดลองที่จุลินทรีย์เจริญเติบโตได้เร็วกว่า เป็นเหตุให้ทั้ง 3 ชุดการทดลองมีการสร้างกรดไขมันระเหยได้ใกล้เคียงกัน และเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งแขวนลอยระเหย พบว่าชุดการทดลองที่ 3 มีประสิทธิภาพสูงสุด แต่ในขณะเดียวกันมีค่าความเข้มข้นของกรดไขมันระเหยใกล้เคียงกับชุดการทดลองที่ 1 และ 2 จึงเลือกสถานะของชุดทดลองที่ 3 ซึ่งมีค่าพีเอชเริ่มต้น 6.00 และระยะเวลาพักทางชลศาสตร์ 14 วัน ไปใช้ในการทดลองเดินระบบถึงสร้างกรดต่อไป

4.2 ผลของระยะเวลาพักทางชลศาสตร์ต่อประสิทธิภาพการเดินระบบถึงสร้างกรด

การเดินระบบถึงสร้างกรดใช้ค่าพีเอชเริ่มต้น 6.00 ที่ระยะเวลาพักทางชลศาสตร์ 14 วัน แล้วจึงเดินระบบถึงสร้างกรดที่ระยะเวลาพักทางชลศาสตร์ 10 และ 20 วัน ตามลำดับ เพื่อทดสอบเปรียบเทียบความแตกต่างของประสิทธิภาพในด้านต่างๆ ระหว่างที่ทำการเดินระบบนั้นจะทำการทิ้งตะกอนออกจากระบบ 1 ครั้งต่อสัปดาห์ เพื่อทิ้งตะกอนส่วนเกินบางส่วนที่เกิดจากการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์สร้างกรดซึ่งมีอัตราการเจริญเติบโตเร็ว และอาจเพิ่มปริมาณตะกอนในน้ำออกจากถึงสร้างกรด ดังนั้นจึงต้องพยายามรักษาสมดุลภายในระบบระหว่างสารอินทรีย์ที่เข้าสู่ระบบกับปริมาณจุลินทรีย์เพื่อให้การทำงานมีประสิทธิภาพ และระหว่างการเดินระบบจุลินทรีย์จะสร้างก๊าซขึ้นมาซึ่งจะเกิดการสะสมภายในชั้นตะกอนจนทำให้เกิดการยกตัวของชั้นตะกอนได้ เนื่องจากน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มมีลักษณะขุ่นและหนืดจากสารแขวนลอยต่างๆ ที่เป็นองค์ประกอบจึงเป็นเหตุให้ก๊าซไม่สามารถผ่านชั้นตะกอนดังกล่าวออกมาได้สะดวกจึงต้องมีการกวนเป็นระยะเพื่อไล่ก๊าซดังกล่าว และยังส่งผลดีต่อการสัมผัสระหว่างจุลินทรีย์และสารอินทรีย์ในระบบด้วย

4.2.1 การกำจัดของแข็งแขวนลอยระเหย

จากการทดลองเดินระบบถึงสร้างกรด พบว่า ปริมาณของแข็งแขวนลอยระเหยที่ป้อนเข้าสู่ระบบ ที่ระยะเวลาพักทางชลศาสตร์ 14, 10 และ 20 วัน มีช่วงความเข้มข้นเฉลี่ย $51,903.70 \pm 2,630.51$, $45,940.74 \pm 4,315.29$ และ $49,723.68 \pm 4,747.88$ มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ เริ่มทำการทดลองที่ระยะเวลาพักทางชลศาสตร์ 14 วัน เดินระบบเป็นระยะเวลา 27 วัน แสดงดังภาพที่ 4.4 จากการวิเคราะห์ ปริมาณของแข็งแขวนลอยระเหยในน้ำออกจากระบบ ช่วงเริ่มต้นการเดินระบบ วันที่ 1-8 หรือประมาณ 1 สัปดาห์ มีช่วงความเข้มข้นระหว่าง 41,000 – 49,900 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งยังคงมีความเข้มข้นสูงใกล้เคียงกับน้ำเข้าระบบ ที่มีช่วงความเข้มข้นระหว่าง 49,200 – 50,100 มิลลิกรัมต่อลิตร ส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอยระเหยต่ำ น้อยกว่าร้อยละ 15 อธิบายได้ว่า การปรับตัวของจุลินทรีย์ภายในระบบยังไม่เข้าสู่สถานะที่

สมดุลระหว่างปริมาณสารอินทรีย์กับจำนวนประชากรจุลินทรีย์จึงต้องอาศัยระยะเวลาในการปรับตัวระยะหนึ่งเพื่อให้คุ้นเคยกับสภาวะแวดล้อมด้วยเช่นกัน หลังผ่านระยะเวลาปรับตัวแล้วพบว่า วันที่ 9 – 21 ของการเดินระบบ ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอยสูงขึ้นกว่าช่วงที่ผ่านมา สูงกว่าร้อยละ 20 แต่ยังคงต่ำกว่าร้อยละ 50 ปริมาณของแข็งแขวนลอยระเหยในน้ำเข้าระบบ และน้ำออกจากระบบ มีช่วงความเข้มข้นเฉลี่ย $52,315.38 \pm 1,668.26$ และ $33,892.31 \pm 5,001.08$ มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ซึ่งแสดงถึงการทำงานที่ดีขึ้นของจุลินทรีย์ภายในระบบ เป็นสัญญาณที่บอกรถึงการปรับตัวเข้าสู่สภาวะการทำงานที่สมดุลขึ้นจึงส่งผลให้การทำงานของจุลินทรีย์มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น และวันที่ 22 – 26 ของการเดินระบบ รวมระยะเวลา 5 วัน ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอยระเหยสูงกว่าร้อยละ 50 ค่าเฉลี่ยร้อยละ 58.21 ± 4.69 และมีแนวโน้มค่อนข้างคงที่ ปริมาณของแข็งแขวนลอยระเหยในน้ำเข้าระบบ และน้ำออกจากระบบ มีช่วงความเข้มข้นเฉลี่ย $55,540.00 \pm 1,878.30$ และ $23,000.00 \pm 2,581.67$ มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการทำงานของระบบที่เข้าสู่สภาวะสมดุลหรือสภาวะคงที่

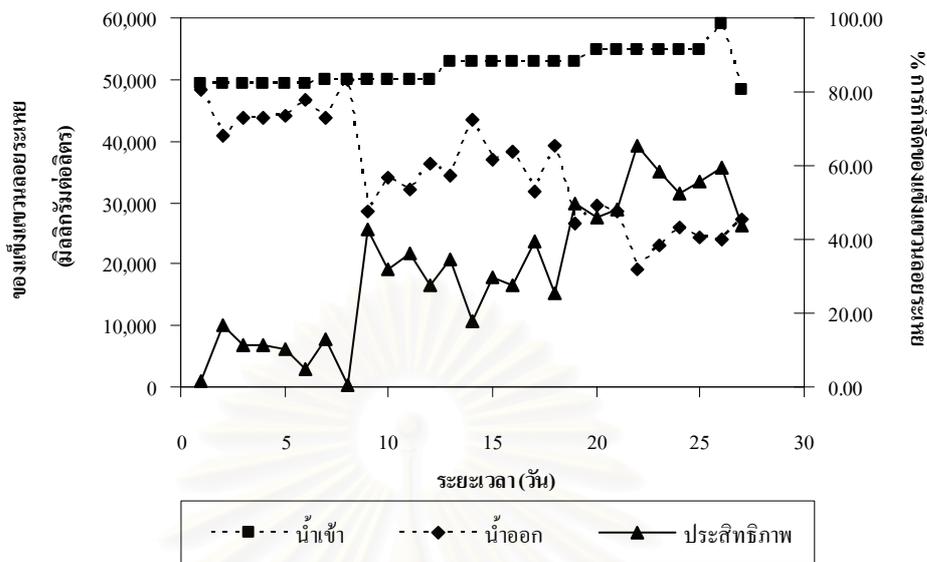
หลังจากระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ที่ระยะเวลาพักทางชลศาสตร์ 14 วันแล้ว จึงลดระยะเวลาพักทางชลศาสตร์ลงเหลือ 10 วัน เดินระบบเป็นระยะเวลา 27 วัน แสดงดังภาพที่ 4.5 พบว่า ช่วง 9 วันแรกของการเดินระบบประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอยระเหยยังคงสูงกว่าร้อยละ 50 หลังจากนั้นประสิทธิภาพเริ่มลดลงซึ่งมีระดับต่ำกว่าร้อยละ 50 สาเหตุที่ประสิทธิภาพลดลงนี้อาจเนื่องมาจากตอนแรกเป็นช่วงรอยต่อของการเดินระบบที่ระยะเวลาพักทางชลศาสตร์ 14 วัน จึงเป็นเหตุให้จุลินทรีย์ภายในระบบมีปริมาณที่มากพอที่จะทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่เมื่อทำการทิ้งตะกอนส่วนเกินแล้วเดินระบบต่อไปทำให้มีปริมาณจุลินทรีย์เริ่มที่จะเข้าสู่สมดุลกับปริมาณสารอินทรีย์ที่ป้อนเข้าสู่ระบบที่สภาวะใหม่ และเนื่องจากการลดระยะเวลาพักทางชลศาสตร์ลงจึงทำให้จุลินทรีย์มีระยะเวลาสัมผัสสารอินทรีย์ลดลง ดังนั้นการย่อยสลายสารอินทรีย์จึงเกิดขึ้นน้อยลง ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอยจึงลดลงตามไปด้วย เมื่อติดตามผลการเดินระบบต่อไปพบว่า ช่วงวันที่ 20 – 24 ของการเดินระบบ รวมระยะเวลา 5 วัน ระบบปรับเข้าสู่สมดุลใหม่ พบว่า ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอยระเหยมีค่าเฉลี่ยร้อยละ 33.93 ± 3.09 และมีแนวโน้มค่อนข้างคงที่ ปริมาณของแข็งแขวนลอยระเหยในน้ำเข้าระบบ และน้ำออกจากระบบ มีความเข้มข้นเฉลี่ย $38,560.00 \pm 3,711.87$ และ $25,560.00 \pm 3,690.93$ มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการทำงานของระบบที่เข้าสู่สภาวะสมดุลหรือสภาวะคงที่

หลังจากระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ที่ระยะเวลาพักทางชลศาสตร์ 10 วันแล้ว จึงเพิ่มระยะเวลาพักทางชลศาสตร์ขึ้นเป็น 20 วัน เพื่อทดสอบเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างการเดินระบบที่ผ่านมา เดินระบบเป็นระยะเวลา 38 วัน แสดงดังภาพที่ 4.6 พบว่า ในช่วงแรกของการเดินระบบผลการทดลองที่ได้จะคล้ายกับการเดินระบบช่วงแรกที่ระยะเวลาพักทางชลศาสตร์ 10 วัน โดยประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอยระเหยต่ำกว่าร้อยละ 50 อยู่ในช่วงประมาณร้อยละ

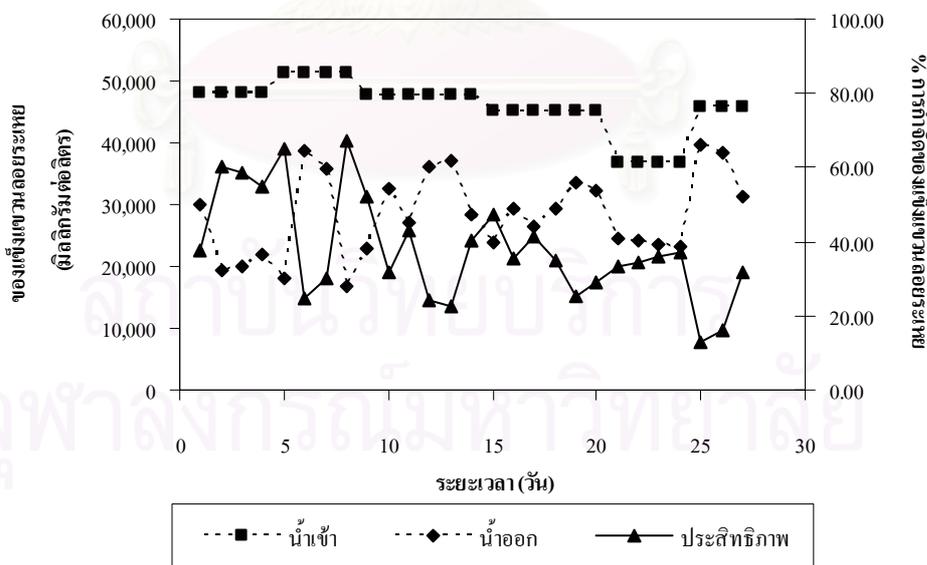
22.28 -47.70 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับการเดินระบบที่ระยะเวลาพักทางชลศาสตร์ 10 วัน ก่อนที่จะเปลี่ยนระยะเวลาพักทางชลศาสตร์ อธิบายได้ว่าระบบอยู่ในช่วงปรับสมดุลเช่นเดียวกับการเดินระบบที่ผ่านมา ซึ่งช่วงที่มีการปรับสมดุลนี้อยู่ในช่วงวันที่ 1 – 11 รวมระยะเวลา 11 วันหลังจากนั้นประสิทธิภาพเริ่มเพิ่มสูงขึ้นซึ่งมีระดับสูงกว่าร้อยละ 50 สาเหตุที่ประสิทธิภาพสูงขึ้นนี้เกิดจากระยะเวลาสัมผัสระหว่างจุลินทรีย์กับสารอินทรีย์ยาวนานขึ้น จึงทำให้เกิดการย่อยสลายสารอินทรีย์ได้มากขึ้นด้วย จากการวิเคราะห์ผลการทดลอง พบว่า ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอยระเหย ที่ระยะเวลาพักทางชลศาสตร์ 20 วันนี้ เมื่อเข้าสู่สภาวะที่เหมาะสมของระบบแล้วจะมีประสิทธิภาพสูงมาก แต่ค่าที่ได้นั้นมีการขึ้นลง ไม่มีแนวโน้มคงที่ มีค่าสูงสุดร้อยละ 89.18

จากผลการทดลองดังกล่าวข้างต้น กล่าวได้ว่าประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอยระเหยที่ระยะเวลาพักทางชลศาสตร์ 20 วัน ดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับที่ระยะเวลาพักทางชลศาสตร์ 14 และ 10 วัน และที่ระยะเวลาพักทางชลศาสตร์ 14 วัน มีประสิทธิภาพที่สภาวะคงที่เฉลี่ยสูงกว่าร้อยละ 50 ซึ่งอยู่ในระดับที่น่าพอใจ ขณะที่ระยะเวลาพักทางชลศาสตร์ 10 วัน มีประสิทธิภาพที่สภาวะคงที่เฉลี่ยต่ำกว่าร้อยละ 50 แสดงดังภาพที่ 4.7 และจากภาพที่ 4.8 – 4.13 แสดงการเปรียบเทียบการแยกชั้นของน้ำที่เข้าและออกจากระบบที่ระยะเวลาพักทางชลศาสตร์ 14 , 10 และ 20 วัน สังเกตได้ว่าที่ระยะเวลาพักทางชลศาสตร์ 20 และ 14 วัน มีการแยกชั้นระหว่างชั้นตะกอนกับชั้นของเหลวอย่างชัดเจน ขณะที่ระยะเวลาพักทางชลศาสตร์ 10 วัน สังเกตการแยกชั้นไม่ชัดเจนซึ่งแสดงถึงสัดส่วนของตะกอนมีปริมาณใกล้เคียงสัดส่วนของของเหลว ดังนั้น การพิจารณาความเหมาะสมในการนำไปประยุกต์ใช้ยังคงต้องพิจารณาปัจจัยอื่นประกอบด้วย เช่น ปริมาตรถังปฏิกรณ์ที่ใช้เดินระบบ และพื้นที่ในการติดตั้งระบบ เป็นต้น สำหรับความเข้มข้นของของแข็งแขวนลอยระเหยที่อยู่ภายในถังปฏิกรณ์ก่อนเดินระบบมีค่า 48,778 , 46,517 และ 42,590 มิลลิกรัมต่อลิตร และหลังเดินระบบ 47,523 , 51,613 และ 48,109 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ระยะเวลาพักทางชลศาสตร์ 14 , 10 และ 20 วัน ตามลำดับ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับความเข้มข้นของของแข็งแขวนลอยระเหยที่ป้อนเข้าสู่ระบบแสดงให้เห็นว่าปริมาณของแข็งแขวนลอยดังกล่าวถูกย่อยสลายและเปลี่ยนรูปไปทำให้เหลือตะกอนส่วนเกินในปริมาณที่สมดุล

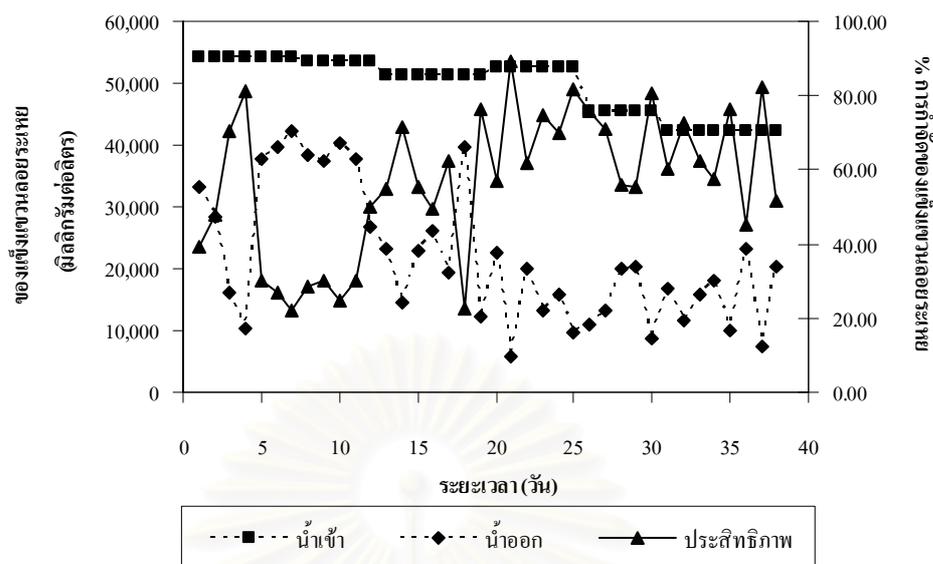
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



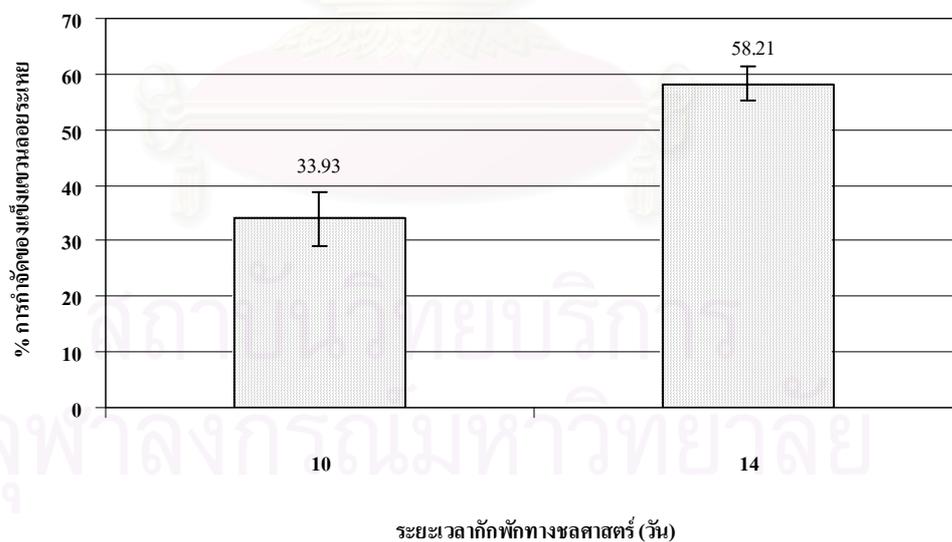
ภาพที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลากับปริมาณและประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอยระเหย ที่ระยะเวลาพักทางชลศาสตร์ 14 วัน



ภาพที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลากับปริมาณและประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอยระเหย ที่ระยะเวลาพักทางชลศาสตร์ 10 วัน



ภาพที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลากับปริมาณและประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอยระเหย ที่ระยะเวลากักพักทางชลศาสตร์ 20 วัน



ภาพที่ 4.7 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอยระเหยเฉลี่ยที่สภาวะคงที่ ที่ระยะเวลากักพักทางชลศาสตร์ 10 และ 14 วัน



ภาพที่ 4.8 การแยกชั้นของตะกอนและของเหลว ที่ระยะเวลาพักทางชลศาสตร์ 14 วัน
(ซ้าย) น้ำเข้าระบบ (ขวา) น้ำออกจากระบบ



ภาพที่ 4.9 การแยกชั้นของตะกอนและของเหลวหลังการตกตะกอนด้วยการหมุนเหวี่ยง
ที่ระยะเวลาพักทางชลศาสตร์ 14 วัน
(ซ้าย-ฝาสีขาว) น้ำเข้าระบบ (ขวา-ฝาสีน้ำเงิน) น้ำออกจากระบบ



ภาพที่ 4.10 การแยกชั้นของตะกอนและของเหลว ที่ระยะเวลาพักทางชลศาสตร์ 10 วัน
(ซ้าย) น้ำเข้าระบบ (ขวา) น้ำออกจากระบบ



ภาพที่ 4.11 การแยกชั้นของตะกอนและของเหลวหลังผ่านการตกตะกอนด้วยการหมุนเหวี่ยง
ที่ระยะเวลาพักทางชลศาสตร์ 10 วัน
(ซ้าย-ฟาสีขาว) น้ำเข้าระบบ (ขวา-ฟาสีน้ำเงิน) น้ำออกจากระบบ



ภาพที่ 4.12 การแยกชั้นของตะกอนและของเหลว ที่ระยะเวลาพักทางชลศาสตร์ 20 วัน
(ซ้าย) น้ำเข้าระบบ (ขวา) น้ำออกจากระบบ

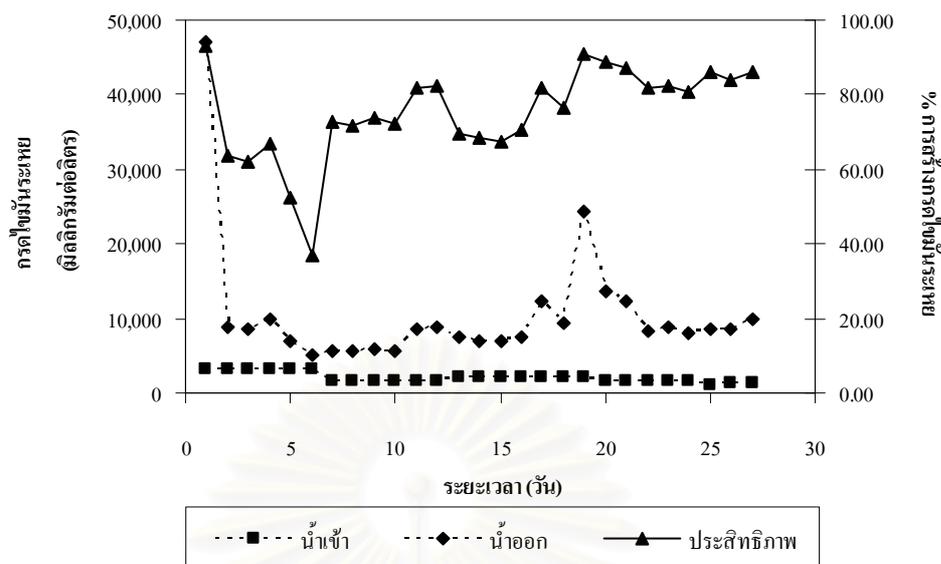


ภาพที่ 4.13 การแยกชั้นของตะกอนและของเหลวหลังผ่านการตกตะกอนด้วยการหมุนเหวี่ยง
ที่ระยะเวลาพักทางชลศาสตร์ 20 วัน
(ซ้าย-ฝาสีแดง) น้ำเข้าระบบ (ขวา-ฝาสีขาว) น้ำออกจากระบบ

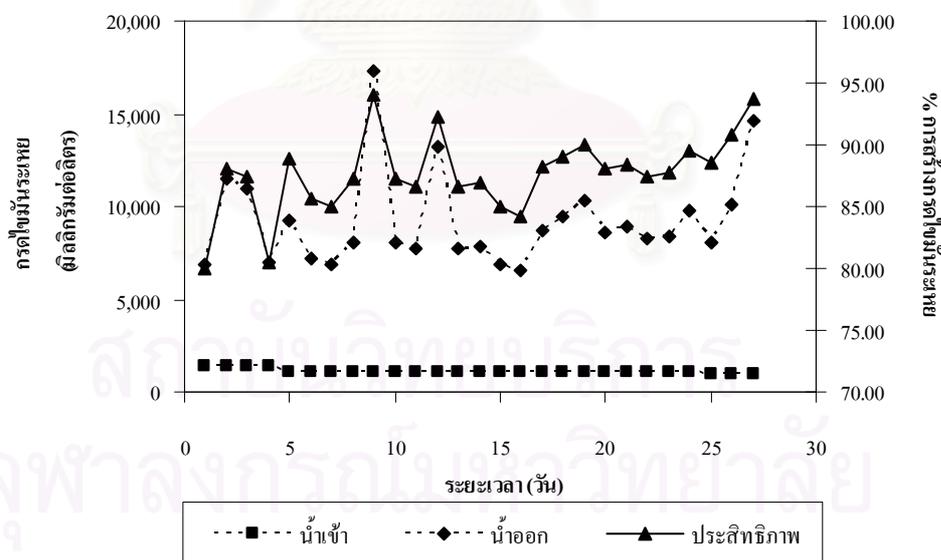
4.2.2 การสร้างกรดไขมันระเหย

ผลการวิเคราะห์การสร้างกรดไขมันระเหยจากการเดินระบบที่ระยะเวลาพักพักทางชลศาสตร์ 14 , 10 และ 20 วัน พบว่า ความเข้มข้นของกรดไขมันระเหยในน้ำเข้าระบบที่สภาวะแนวโน้มก่อนข้างคองที่มีค่าเฉลี่ย $1,457.15 \pm 129.59$, $1,000.52 \pm 48.05$ และ $2,914.29 \pm 0.00$ มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ และความเข้มข้นในน้ำออกจากระบบที่สภาวะแนวโน้มก่อนข้างคองที่มีค่าเฉลี่ย $9,771.43 \pm 2,073.41$, $9,553.25 \pm 1,828.90$ และ $9,685.72 \pm 289.77$ มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ประสิทธิภาพการสร้างกรดไขมันระเหยที่สภาวะแนวโน้มก่อนข้างคองที่เฉลี่ยร้อยละ 84.64 ± 2.87 , 89.23 ± 1.78 และ 69.89 ± 0.93 ตามลำดับ จากผลการวิเคราะห์ดังกล่าวแสดงดังภาพที่ 4.14 – 4.16 สังเกตพบว่า เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพเฉลี่ยที่สภาวะคองที่ดังกล่าว ที่ระยะเวลาพักพักทางชลศาสตร์ 10 วันซึ่งเป็นระยะเวลาสั้นที่สุด มีประสิทธิภาพการสร้างกรดไขมันระเหยสูงที่สุด และที่ระยะเวลาพักพักทางชลศาสตร์ 20 วันซึ่งเป็นระยะเวลายาวนานที่สุดมีประสิทธิภาพการสร้างกรดไขมันระเหยต่ำที่สุด กล่าวได้ว่าระยะเวลาพักพักทางชลศาสตร์มีผลต่อประสิทธิภาพการสร้างกรดไขมันระเหยโดยอธิบายได้ว่า กรดไขมันระเหยที่สร้างขึ้นจะถูกนำไปใช้(บริโภค)จาก จุลินทรีย์ที่อยู่ในระบบด้วยเช่นกัน ดังนั้นเมื่อกรดไขมันระเหยที่เกิดขึ้นถูกกักเก็บอยู่ในระบบหรือถึงปฏิกิริยาเป็นระยะเวลานานจึงถูกจุลินทรีย์นำไปใช้ได้มากเป็นเหตุให้เหลือกรดไขมันระเหยที่ออกจากระบบลดลง ในทางตรงข้ามเมื่อระยะเวลาที่กรดไขมันระเหยที่เกิดขึ้นถูกกักเก็บอยู่ในระบบต่ำลงจุลินทรีย์จึงมีโอกาใช้กรดไขมันระเหยน้อยลงเป็นเหตุให้เหลือกรดไขมันระเหยที่ออกจากระบบเพิ่มขึ้น แต่เมื่อพิจารณาปริมาณกรดไขมันระเหยที่ออกจากระบบ พบว่า มีปริมาณไม่แตกต่างกันที่ทุกระยะเวลาพักพักทางชลศาสตร์ ดังนั้น ในการนำไปประยุกต์ใช้นั้นที่ระยะเวลาพักพักทางชลศาสตร์ 14 วัน จากการทดลองนี้มีความเหมาะสมที่สุด เนื่องจากประสิทธิภาพการจัดของแข็งแขวนลอยระเหยที่ระยะเวลาพักพักทางชลศาสตร์นี้อยู่ในระดับที่สูงกว่าร้อยละ 50 และมีระยะเวลาพักพักทางชลศาสตร์ต่ำกว่าที่ 20 วัน ซึ่งมีผลต่อขนาดของถังปฏิกิริยาที่ใช้ในการเดินระบบ

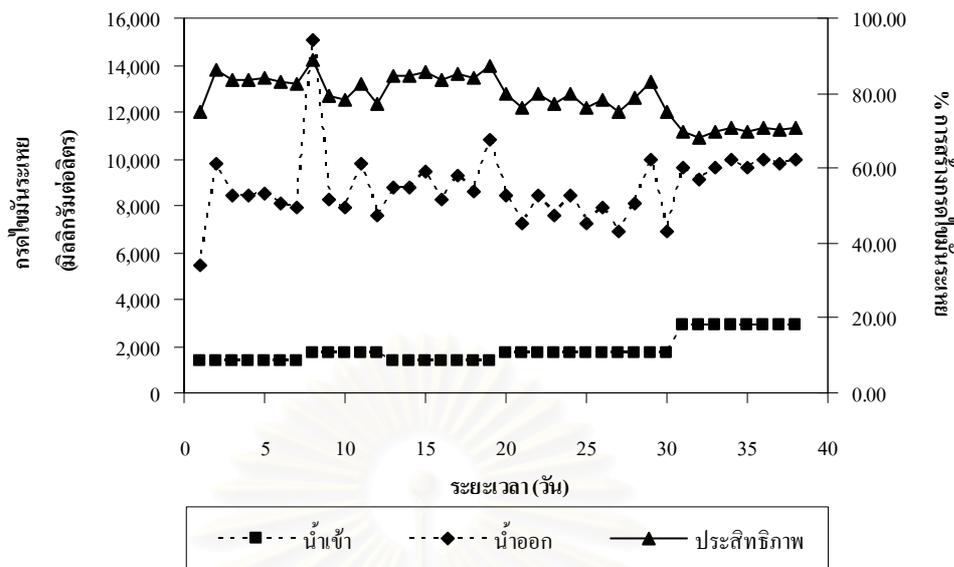
ข้อสังเกตจากการเดินระบบที่ระยะเวลาพักพักทางชลศาสตร์ 14 วัน พบว่า วันแรกของการเดินระบบมีความเข้มข้นของกรดไขมันระเหยที่ออกจากระบบสูงมาก 46,971.43 มิลลิกรัมต่อลิตร หลังจากนั้นจึงลดลงและอยู่ในระดับที่ใกล้เคียงกัน สาเหตุดังกล่าวเกิดจากการปรับสภาพในช่วงเริ่มต้นเดินระบบถึงสร้างกรดเพื่อให้หัวเชื้อจุลินทรีย์จากมูลวัวคุ่นชินกับน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม เป็นระยะเวลา 7 วัน ซึ่งในช่วงเวลาดังกล่าวไม่มีการถ่ายเทน้ำเสียเข้าและออกจากระบบ จึงทำให้เกิดการสะสมของกรดไขมันระเหยภายในถังปฏิกิริยา ดังนั้นเมื่อเริ่มป้อนน้ำเสียเข้าสู่ระบบ จึงส่งผลให้น้ำที่ออกจากระบบเป็นน้ำเสียที่มีความเข้มข้นของกรดไขมันระเหยสูงจากการถูกกักพักในถังปฏิกิริยา



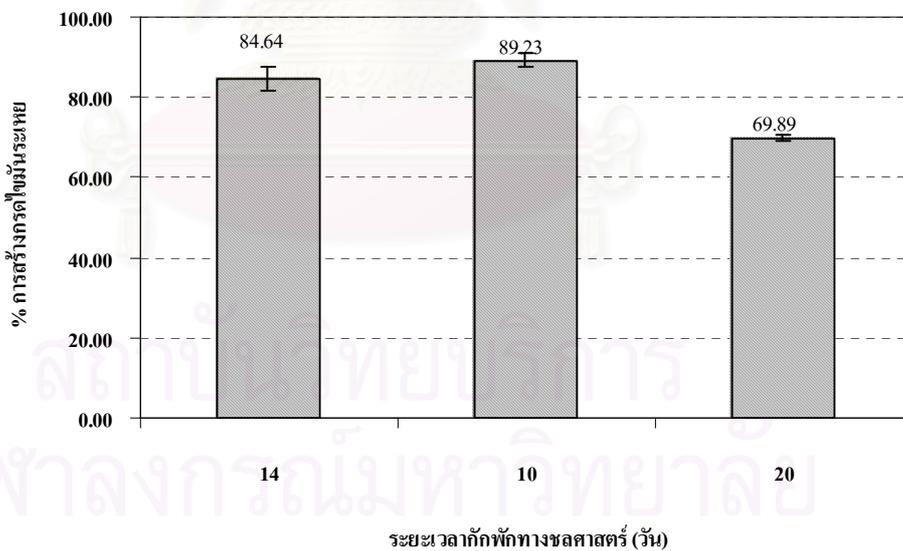
ภาพที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลากับปริมาณและประสิทธิภาพการสร้างกรดไขมันระเหย ที่ระยะเวลากักพักทางชลศาสตร์ 14 วัน



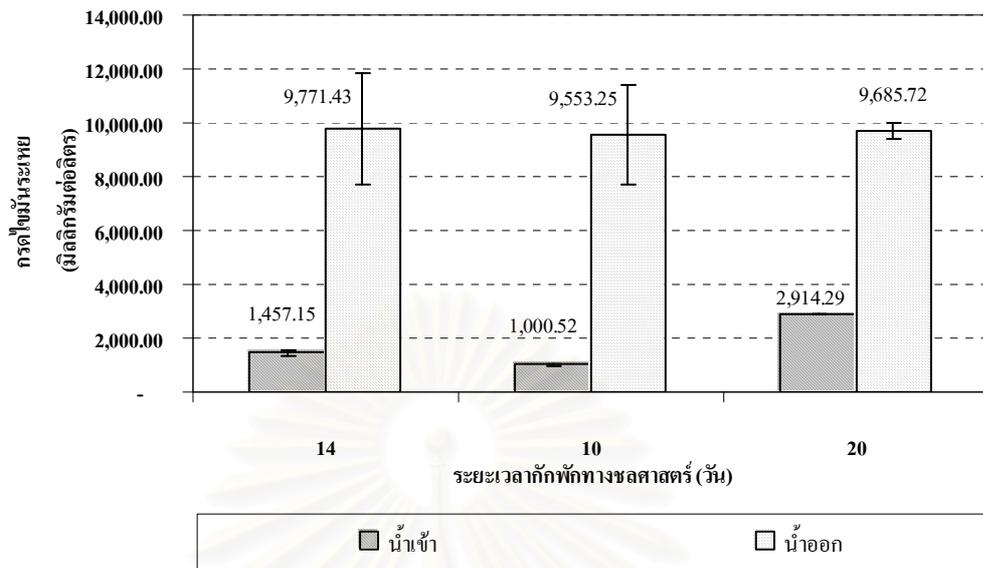
ภาพที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลากับปริมาณและประสิทธิภาพการสร้างกรดไขมันระเหย ที่ระยะเวลากักพักทางชลศาสตร์ 10 วัน



ภาพที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลากับปริมาณและประสิทธิภาพการสร้างกรดไขมันระเหย ที่ระยะเวลากักพักทางชลศาสตร์ 20 วัน



ภาพที่ 4.17 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการสร้างกรดไขมันระเหย ที่สถานะแวนโวม์ค่อนข้างคงที่ ที่ระยะเวลากักพักทางชลศาสตร์ 14 ,10 และ 20 วัน



ภาพที่ 4.18 การเปรียบเทียบระหว่างปริมาณกรดไขมันระเหยเฉลี่ย ของน้ำเข้าและออกจากระบบ ที่สถานะแนวโน้มก่อนข้างคงที่ ที่ระยะเวลาพักทางชลศาสตร์ 14 , 10 และ 20 วัน

4.2.3 ค่าพีเอชและสภาพต่าง

ข้อมูลค่าพีเอชและสภาพต่างของถังสร้างกรดจากการทดลองเดินระบบแสดงดังภาพที่ 4.19 – 4.21 น้ำเสียที่ป้อนเข้าสู่ถังสร้างกรดที่ระยะเวลาพักทางชลศาสตร์ทั้ง 3 ค่า สำหรับการทดลองนี้ใช้น้ำเสียสดที่ไม่มีการปรับค่าพีเอชก่อนเข้าสู่ถังสร้างกรด ดังนั้นจึงเป็นค่าพีเอชจริงของน้ำเสีย มีค่าพีเอชอยู่ในช่วง ประมาณ 4.10–5.10 ซึ่งมีสถานะเป็นกรด ประกอบกับถึงปฏิกิริยาที่ใช้เป็นถังสร้างกรดมีการปล่อยให้อากาศถ่ายเทได้บ้างหรือมีสถานะแบบแฟคัลเททีฟ (facultative) จึงช่วยยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์สร้างก๊าซมีเทน และมีส่วนช่วยรักษาภาวะกรด ส่งผลให้เกิดการแยกชั้นตอนสร้างกรดอย่างแท้จริงด้วย มีค่าพีเอชในน้ำออกจากระบบเฉลี่ย 4.36 ± 0.19 , 4.94 ± 0.03 และ 4.98 ± 0.13 ที่ระยะเวลาพักทางชลศาสตร์ 14 , 10 และ 20 วัน ตามลำดับ จากข้อมูลดังกล่าว แสดงให้เห็นได้ว่าระบบของถังสร้างกรดรักษาภาวะของชั้นตอนสร้างกรดไว้ได้ ซึ่งชั้นตอนแรกของกระบวนการสองชั้นตอน ช่วงค่าพีเอชที่เหมาะสมที่สุดอยู่ระหว่างค่าพีเอช 4.00-6.50 (Speece, 1996) ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่าน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มที่ใช้ทดลองนี้มีค่าพีเอชที่เหมาะสมกับกระบวนการสองชั้นตอนที่ทำการทดลอง

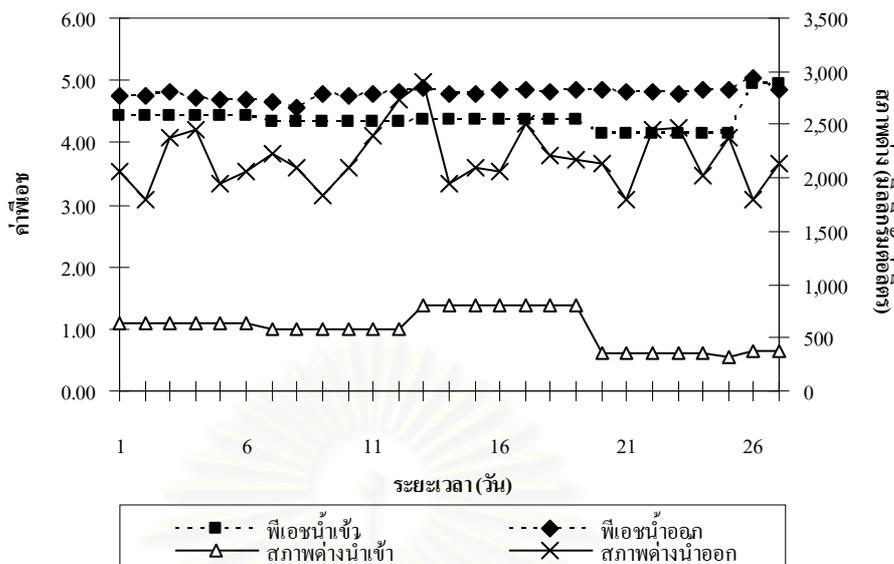
จากการสังเกตสภาพต่างในน้ำเข้าระบบและน้ำออกจากระบบ แสดงดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ปริมาณสภาพต่างเฉลี่ยในน้ำเข้าและออกจากระบบของถังสร้างกรด ที่ระยะเวลาพักทางชลศาสตร์ 14 , 10 และ 20 วัน

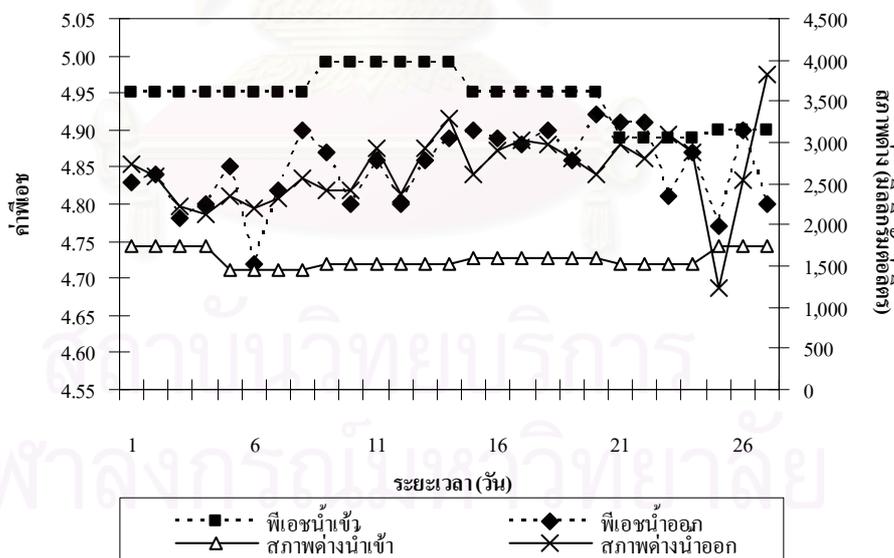
ระยะเวลาพักทางชลศาสตร์ (วัน)	ค่าเฉลี่ยสภาพต่าง (มิลลิกรัมต่อลิตร)	
	น้ำเข้า	น้ำออก
14	580.93 ± 172.16	2,189.63 ± 279.34
10	1,588.89 ± 107.49	2,659.26 ± 470.33
20	1,567.76 ± 90.78	2,757.76 ± 236.17

จากตารางดังกล่าวข้างต้น ที่ระยะเวลาพักทางชลศาสตร์ 14 , 10 และ 20 วัน ระบบสามารถสร้างสภาพต่างเพิ่มขึ้นเฉลี่ย ประมาณ 3.77 , 1.67 และ 1.67 เท่า ตามลำดับ ซึ่งช่วงความเข้มข้นของสภาพต่างในน้ำออกจากระบบดังกล่าว ที่อยู่ในช่วงประมาณ 2,000 – 2,700 มิลลิกรัมต่อลิตร เพียงพอที่จะเป็นบัฟเฟอร์เพื่อรักษาสมดุลสภาพกรด-ด่าง ภายในระบบไร้อากาศ ซึ่งโดยทั่วไปความเข้มข้นของสภาพต่างที่เหมาะสมจะอยู่ในช่วง 2,000 – 4,000 มิลลิกรัมต่อลิตร (Tchobanoglous, Burton และ Stensel, 2004) ค่าความเข้มข้นของสภาพต่างที่ค่อนข้างสูงนี้ เนื่องมาจากการปลดปล่อยอ็อกซิเจนจากการ เมแทบอลิซึมสารประกอบอินทรีย์ ซึ่งความเข้มข้นของสารประกอบอินทรีย์ที่ย่อยสลายแล้วปลดปล่อยอ็อกซิเจน เช่น โปรตีน จะเป็นตัวกำหนดสภาพต่าง (Speece, 1996) และการย่อยสลายสารอินทรีย์ในโตรเจนในน้ำเสีย หรือจากการย่อยตัวของแบคทีเรียในถังปฏิกริยาทำให้เกิดแอมโมเนียซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดของสภาพต่างแอมโมเนีย (NH₃) สามารถละลายน้ำและเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสทำให้เกิดอ็อกซิเจนแอมโมเนียม (NH₄⁺) และอ็อกซิเจนไฮดรอกไซด์ (OH⁻) และคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดจากการย่อยสลายสารอินทรีย์สามารถละลายน้ำได้กลายเป็น H₂CO₃ เมื่อทำปฏิกิริยากับ OH⁻ ได้ HCO₃⁻ ซึ่งทั้ง OH⁻ และ HCO₃⁻ ล้วนแต่เป็นส่วนประกอบของสภาพต่างในน้ำ (มันสิน ตันกุลเวศม์ และ มั่นรักษ์ ตันกุลเวศม์, 2545)

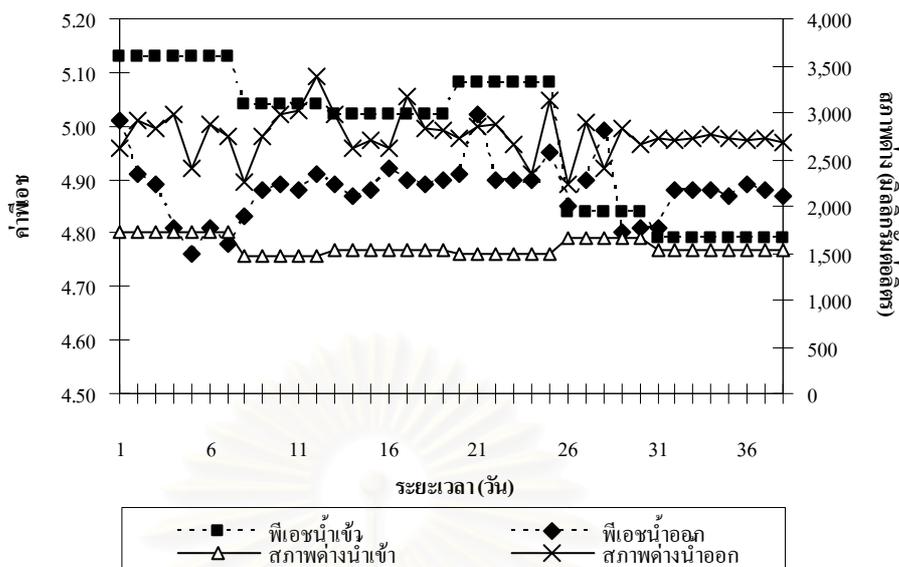
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาพที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลากับค่าพีเอช และความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสภาพต่าง ในน้ำเข้าระบบและน้ำออกจากระบบ ที่ระยะเวลาพักทางชลศาสตร์ 14 วัน



ภาพที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลากับค่าพีเอช และความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสภาพต่าง ในน้ำเข้าระบบและน้ำออกจากระบบ ที่ระยะเวลาพักทางชลศาสตร์ 10 วัน



ภาพที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลากับค่าพีเอช และความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสภาพต่าง ในน้ำเข้าระบบและน้ำออกจากระบบ ที่ระยะเวลากักพักทางชลศาสตร์ 20 วัน

4.2.4 การกำจัดซีโอดี

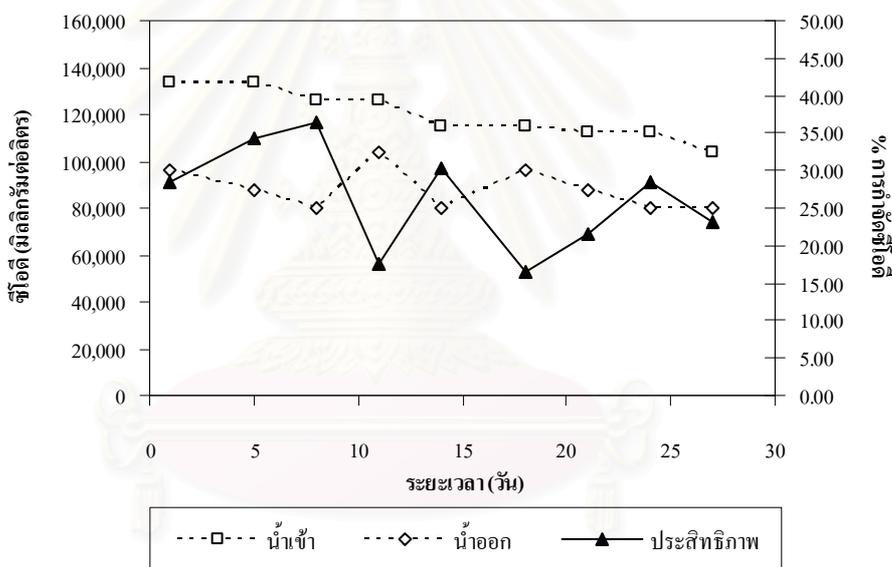
ปริมาณสารอินทรีย์ที่เข้าและออกจากระบบของถังสร้างกรวดวิเคราะห์ด้วยค่าซีโอดีรวมทั้งหมด (ภาพที่ 4.22 -4.24) เนื่องจากน้ำเสียมีความเข้มข้นสูงและมีส่วนประกอบที่ย่อยสลายได้ยาก เช่น เซลลูโลส รวมอยู่ด้วย พบว่า ความเข้มข้นของซีโอดีในน้ำเข้าและออกจากระบบเฉลี่ยแสดงดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ปริมาณซีโอดีในน้ำเข้าและออกจากระบบ และประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีเฉลี่ย ของถังสร้างกรวดที่ระยะเวลากักพักทางชลศาสตร์ 14 , 10 และ 20 วัน

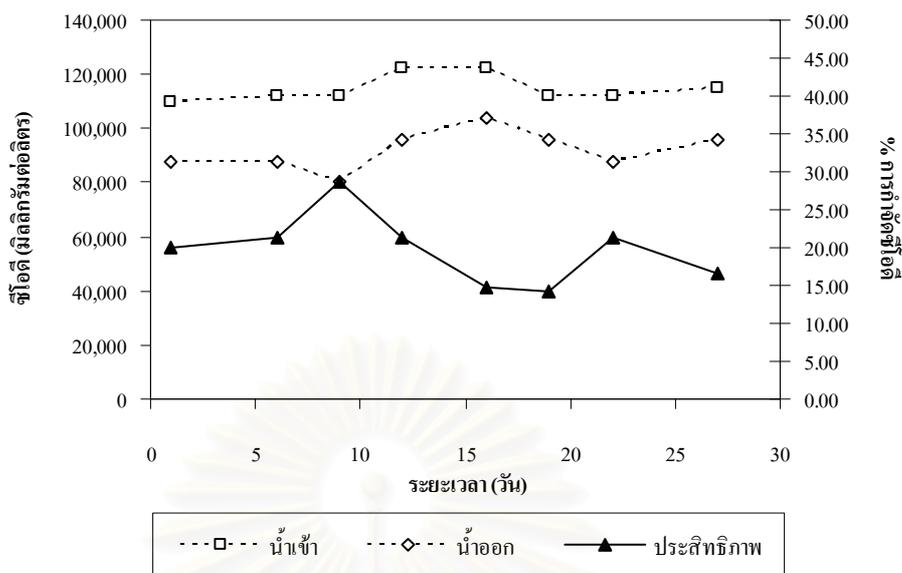
ระยะเวลากักพักทางชลศาสตร์ (วัน)	ค่าเฉลี่ยซีโอดี (มิลลิกรัมต่อลิตร)		ประสิทธิภาพการกำจัด
	น้ำเข้า	น้ำออก	
14	119,777.78±10,592.19	88,000.00±8,944.27	26.30±7.10
10	114,625.00±4,749.06	92,000.00±7,406.56	19.79±4.65
20	113,589.69±11,527.93	84,102.56±11,856.69	25.44±12.07

และจากตารางที่ 4.3 ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีเฉลี่ยร้อยละ 26.30 ± 7.10 , 19.76 ± 19.79 และ 25.44 ± 12.07 ตามลำดับ สำหรับขั้นตอนการสร้างกรวดจะเกิดปฏิกิริยาการเปลี่ยนรูปของสารอินทรีย์อนุภาคใหญ่กลายเป็นอนุภาคที่มีขนาดเล็กลงเป็นหลัก ดังนั้นจะสังเกตได้ว่าประสิทธิภาพการกำจัด

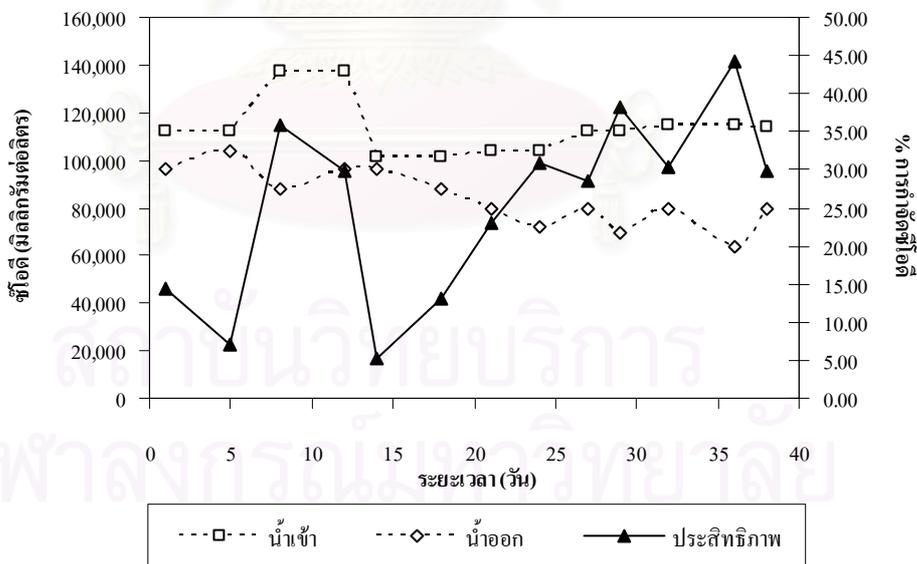
ซีโอดีหรือการใช้สารอินทรีย์ในรูปซีโอดีอยู่ในระดับต่ำ ซึ่งการกำจัดซีโอดีจะเกิดขึ้นในขั้นตอนที่สองที่จุลินทรีย์สร้างมีเทนจะบริโภคซีโอดีในรูปที่สามารถบริโภคได้จากขั้นตอนแรก ได้ผลิตภัณฑ์ออกมาเป็นก๊าซมีเทน และที่ระยะเวลาพักทางชลศาสตร์ 14 และ 20 วัน มีประสิทธิภาพสูงกว่าที่ระยะเวลาพักทางชลศาสตร์ 10 วัน เนื่องจากที่ระยะเวลาพักทางชลศาสตร์ 14 และ 20 มีการสร้างกรดไขมันระเหยง่ายซึ่งเป็นซีโอดีรูปหนึ่งที่อยู่ในซีโอดีรวมทั้งหมดสูงกว่าที่ระยะเวลาพักทางชลศาสตร์ 10 วัน จึงเกิดการสูญเสียจากการระเหยร่วมกับการบริโภคไปบางส่วนของจุลินทรีย์ในระบบ ซึ่งไม่ได้เกิดจากการบริโภคเพียงอย่างเดียวเหมือนที่เกิดขึ้นกับการสร้างกรดในขั้นตอนที่สอง เนื่องจากถึงสร้างกรดที่ใช้ทำการทดลองไม่ได้เปิดสนิทอากาศสามารถผ่านเข้าออกได้



ภาพที่ 4.22 ความสัมพันธ์ของปริมาณและประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี ที่ระยะเวลาพักทางชลศาสตร์ 14 วัน



ภาพที่ 4.23 ความสัมพันธ์ของปริมาณและประสิทธิภาพการกำจัดซีโอติ ที่ระยะเวลากักพักทางชลศาสตร์ 10 วัน



ภาพที่ 4.24 ความสัมพันธ์ของปริมาณและประสิทธิภาพการกำจัดซีโอติ ที่ระยะเวลากักพักทางชลศาสตร์ 20 วัน

4.3 ประสิทธิภาพการเดินระบบถังสร้างก๊าซมีเทน

การเดินระบบถังสร้างก๊าซมีเทนใช้ระยะเวลาพักทางชลศาสตร์ 24 ชั่วโมง การป้อนน้ำเสียเข้าสู่ระบบในสัปดาห์ (7 วัน) แรกทำการปรับสภาพด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์เพื่อให้ระบบมี pH เพียงพอเพื่อรักษาค่าพีเอชให้อยู่ในระดับที่เป็นกลางลดความเสี่ยงของการล้นเหลวของระบบ เพราะในระยะแรกต้องใช้ระยะเวลาเพื่อปรับสมดุลของระบบ และน้ำเสียที่เจือจางด้วยน้ำประปาเพียงอย่างเดียวทำให้สภาพต่างไม่เพียงพอต่อความต้องการของระบบ หลังจากนั้นจึงเจือจางน้ำเสียที่ป้อนเข้าสู่ระบบด้วยน้ำที่ออกจากระบบซึ่งมีสภาพต่างเหลืออยู่จึงช่วยรักษาปริมาณสภาพต่างให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมได้

4.3.1 การกำจัดซีโอดี

ผลการเดินระบบถังสร้างก๊าซมีเทนที่ค่าภาระสารอินทรีย์ 0.20, 0.50, 0.75, 1.00 และ 1.25 กรัมซีโอดีต่อกรัมของแข็งแขวนลอยระเหยต่อวัน หรืออัตราภาระสารอินทรีย์ 4, 10, 15, 20 และ 25 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน แสดงดังภาพที่ 4.25 – 4.29 จากการทดลองเดินระบบพบว่า ประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ซึ่งวิเคราะห์ในรูปของประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีรวมทั้งหมดมีค่าเฉลี่ยเมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ร้อยละ 84.70 ± 5.13 , 82.48 ± 3.99 , 89.19 ± 3.48 , 83.33 ± 0.00 และ 80.90 ± 3.92 ตามลำดับ จากประสิทธิภาพดังกล่าวพบว่า ถังสร้างก๊าซมีเทนมีประสิทธิภาพสูงสุดที่อัตราภาระสารอินทรีย์ 15 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน แสดงดังภาพที่ 4.30 สังเกตได้ว่าประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีรวมทั้งหมดทุกอัตราภาระสารอินทรีย์มีค่าสูงกว่าร้อยละ 80 อาจเนื่องมาจากเชื้อจุลินทรีย์ที่ใช้ในการทดลองเดินระบบเป็นเชื้อตะกอนแบบเม็คทำให้ระบบสามารถรักษามวลจุลินทรีย์ได้มาก และอุณหภูมิระหว่างเดินระบบอยู่ในช่วงประมาณ 30 - 36 องศาเซลเซียส ส่งผลให้จุลินทรีย์สามารถทำงานได้ดี จึงสามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ได้ปริมาณมาก และอุณหภูมิในการเดินระบบดังกล่าวอยู่ระหว่างช่วงการทำงานแบบมีโซฟิลิก ดังนั้นจึงช่วยสนับสนุนให้เกิดปฏิกิริยาทางชีวภาพสูงสุด

เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี ที่อัตราภาระสารอินทรีย์ 4, 15, 20, 25 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน (ภาพที่ 4.30) พบว่า มีประสิทธิภาพใกล้เคียงกัน แต่ที่อัตราภาระสารอินทรีย์ 10 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน ประสิทธิภาพต่ำกว่าที่อัตราภาระสารอินทรีย์อื่นๆ อาจมีสาเหตุจากอัตราภาระสารอินทรีย์ที่เพิ่มขึ้นประมาณ 2 เท่า ของภาระสารอินทรีย์ที่ใช้เดินระบบก่อนเปลี่ยนอัตราภาระสารอินทรีย์ จุลินทรีย์จึงอาจอยู่ในช่วงปรับตัวต่อสารอาหารที่เพิ่มขึ้นปริมาณมากจึงทำให้ประสิทธิภาพลดลง

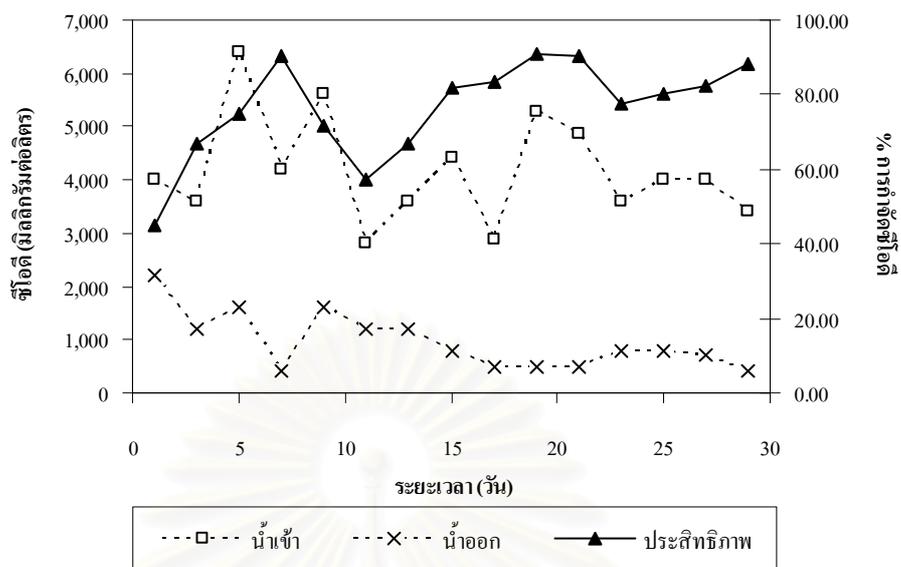
ถึงแม้ว่าที่อัตราภาระสารอินทรีย์ 20 และ 25 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน จะมีประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีรวมทั้งหมดสูงกว่าร้อยละ 80 ก็ตาม แต่เริ่มเกิดความผิดปกติในการเดินระบบขึ้น ได้แก่ ชั้นตะกอนเม็คจุลินทรีย์เกิดการยกตัวขึ้นด้านบน และเกิดแรงดัน

ด้านทานการสูบน้ำเสียป้อนเข้าสู่ระบบ แสดงดังภาพที่ 4.31 เนื่องจากตะกอนแขวนลอยในน้ำเสียมีปริมาณความเข้มข้นเพิ่มขึ้น(รายงานผลการวิเคราะห์ในหัวข้อต่อไป) เมื่อป้อนน้ำเสียเข้าไปเรื่อยๆ ตะกอนแขวนลอยดังกล่าวจึงเข้าไปอุดตันบริเวณช่องว่างระหว่างเม็ดตะกอนจุลินทรีย์เมื่อช่องว่างถูกอุดจนเต็มแล้วน้ำเสียที่ป้อนเข้าไปใหม่จึงไม่สามารถไหลผ่านขึ้นสู่ด้านบนของถังปฏิกริยาเยอเอสบีได้ชั้นตะกอนจึงยกตัวลอยขึ้น และเมื่อแรงดันภายในถังปฏิกริยาเยอเอสบีสูงกว่าแรงดันของปั๊มที่ใช้ป้อนน้ำเสียจึงไม่สามารถป้อนน้ำเสียเข้าสู่ระบบได้ในเบื้องต้นแก้ไขปัญหที่เกิดขึ้นโดยใช้แรงสั่นสะเทือนให้กับถังปฏิกริยาเยอเอสบีโดยการเคาะด้วยค้อนยาง ถ้าไม่ทำการเคาะจะไม่สามารถเดินระบบได้ซึ่งกล่าวได้ว่าระบบเข้าใกล้สภาวะล้มเหลว ดังนั้นการทดลองที่อัตราภาระสารอินทรีย์ 20 และ 25 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวันจึงเพิ่มความถี่ในการวิเคราะห์ผลการทดลองโดยทำการวิเคราะห์ทุกวัน เมื่อการเคาะดังกล่าวเริ่มมีความถี่และใช้เวลานานขึ้น จึงยุติการทดลองที่อัตราภาระสารอินทรีย์ 25 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน และสรุปว่าที่อัตราภาระสารอินทรีย์ 15 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน เป็นสภาวะที่เหมาะสมในการเดินระบบถึงสร้างก๊าซมีเทน ที่ระยะเวลาพักทางชลศาสตร์ 24 ชั่วโมง

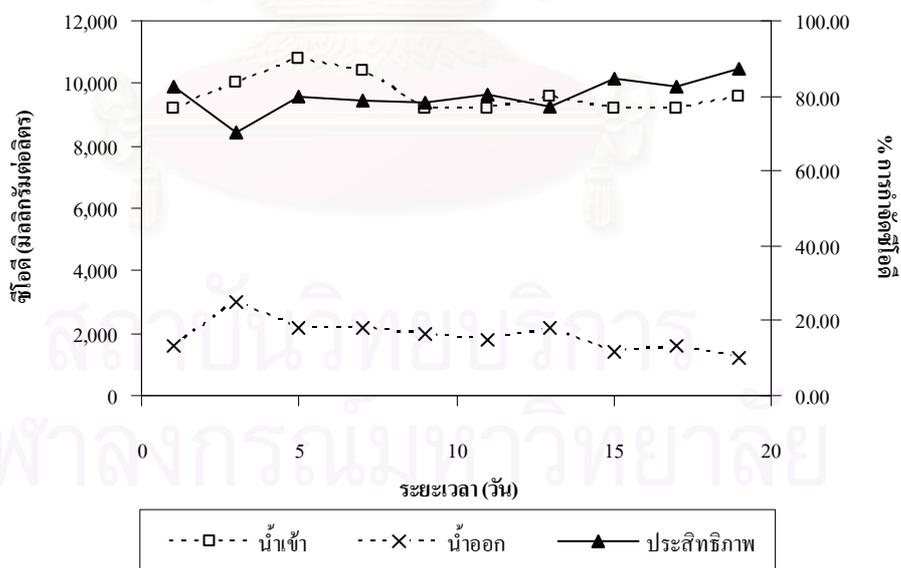
เมื่อทราบสภาวะที่เหมาะสมในการเดินระบบถึงสร้างก๊าซมีเทนแล้วจึงใช้น้ำเสียจริงป้อนเข้าสู่ระบบด้วยอัตราภาระสารอินทรีย์ดังกล่าว และมีอัตราส่วนระหว่างน้ำเสียสดต่อน้ำหมุนเวียนกลับมาใช้ใหม่(ไม่ผสมน้ำประปา) เท่ากับ 1:5 ได้อัตราภาระสารอินทรีย์ประมาณ 28 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน พบว่า ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีรวมทั้งหมดเฉลี่ยที่สภาวะคงที่ มีค่าร้อยละ 79.54 ± 2.77 แสดงดังภาพที่ 4.32 สังเกตได้ว่าประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีรวมทั้งหมดลดลง สาเหตุที่ทำให้ประสิทธิภาพลดลงน่าจะมีสาเหตุจากตะกอนแขวนลอยที่เพิ่มขึ้นคือส่วนที่จุลินทรีย์ไม่สามารถย่อยสลายได้ทัน และส่วนที่ย่อยสลายยากปะปนอยู่ปริมาณสูง ซึ่งที่อัตราภาระสารอินทรีย์นี้ทำการวิเคราะห์ผลการทดลองเดินระบบทุกวันเช่นกัน

จากปัญหาการเดินระบบที่ผ่านมา ที่เกิดขึ้นจากตะกอนแขวนลอยเข้าไปอุดตันภายในชั้นตะกอนทำให้เกิดการยกตัวของชั้นตะกอนขึ้น เนื่องจากถังปฏิกริยาที่ใช้มีขนาดเล็กและมีพื้นที่หน้าตัดแคบ ประกอบกับช่องป้อนน้ำเสียมีขนาดเล็กและมีเพียงจุดเดียว จึงทำให้เกิดปัญหาดังกล่าว ซึ่งตามปกติการเดินระบบระดับเต็มมาตราส่วน (full-scale) ที่อัตราภาระสารอินทรีย์สูงกว่า 6 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน ต้องใช้หัวป้อนน้ำ 1 หัวต่อพื้นที่หน้าตัด 7-10 ตารางเมตร จึงจะมีประสิทธิภาพที่ดี (Lin และ Yang, 1991)

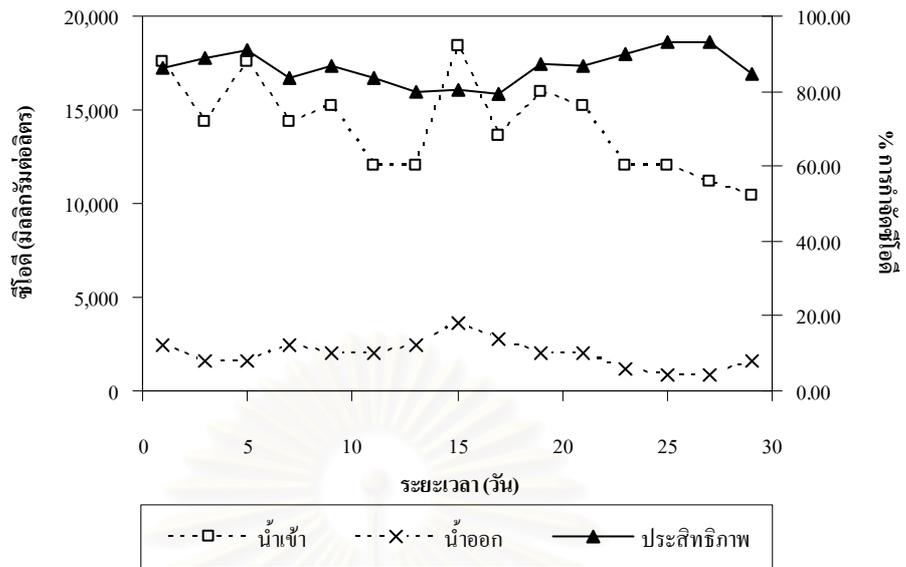
เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบปริมาณการกำจัดซีโอดี (ภาพที่ 4.33) ที่อัตราภาระสารอินทรีย์ 4, 10, 15, 20, 25 และ 28 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน พบว่า ที่อัตราภาระสารอินทรีย์ 28 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน ถึงแม้จะมีประสิทธิภาพต่ำที่สุด (ภาพที่ 4.34) แต่มีปริมาณการกำจัดซีโอดีเฉลี่ยที่สภาวะคงที่ สูงที่สุด ดังนั้น ในการนำไปประยุกต์ใช้กับระบบจริงจึงน่าจะมีความเหมาะสมสำหรับการเดินระบบที่สุด



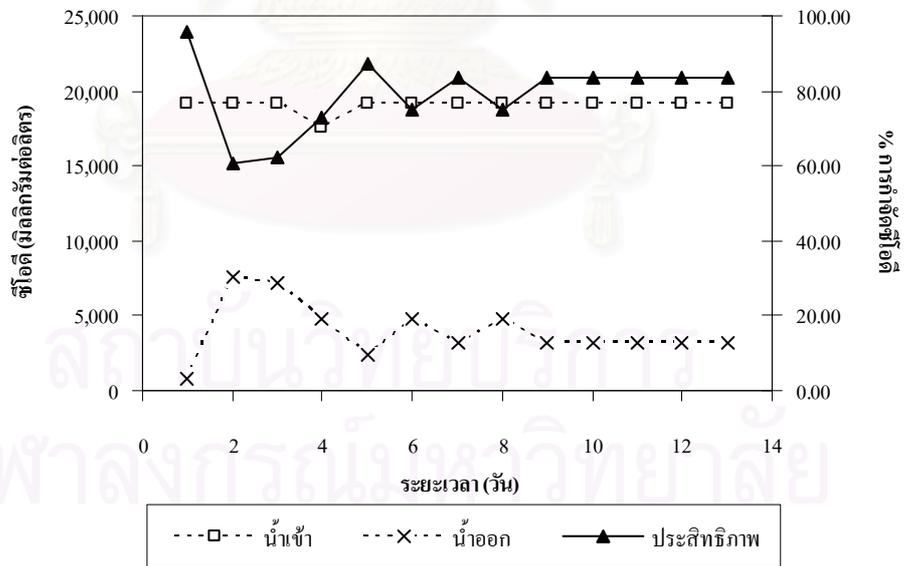
ภาพที่ 4.25 ความสัมพันธ์ของปริมาณและประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี ที่อัตราสารอินทรีย์ 4 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน



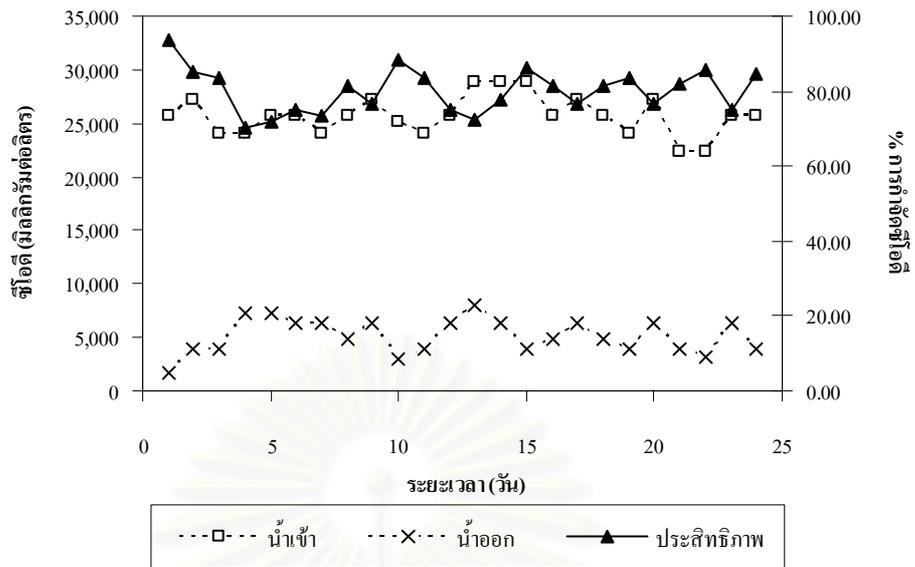
ภาพที่ 4.26 ความสัมพันธ์ของปริมาณและประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี ที่อัตราสารอินทรีย์ 10 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน



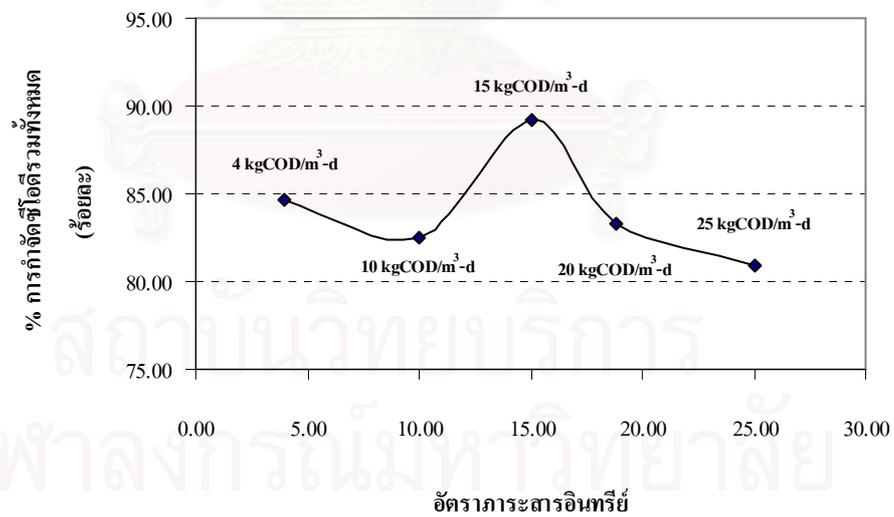
ภาพที่ 4.27 ความสัมพันธ์ของปริมาณและประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี ที่อัตราสารอินทรีย์ 15 กิโลกรัมซีโอดีต่อกบ/เมตรต่อวัน



ภาพที่ 4.28 ความสัมพันธ์ของปริมาณและประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี ที่อัตราสารอินทรีย์ 20 กิโลกรัมซีโอดีต่อกบ/เมตรต่อวัน



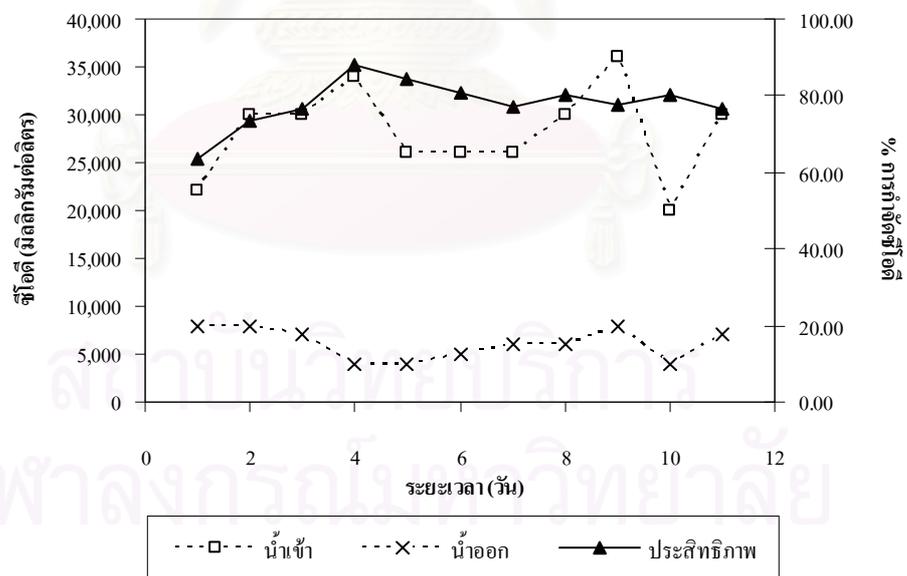
ภาพที่ 4.29 ความสัมพันธ์ของปริมาณและประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี ที่อัตราการแ่สารอินทรีย์ 25 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน



ภาพที่ 4.30 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี ที่อัตราการแ่สารอินทรีย์ 4, 10, 15, 20 และ 25 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน



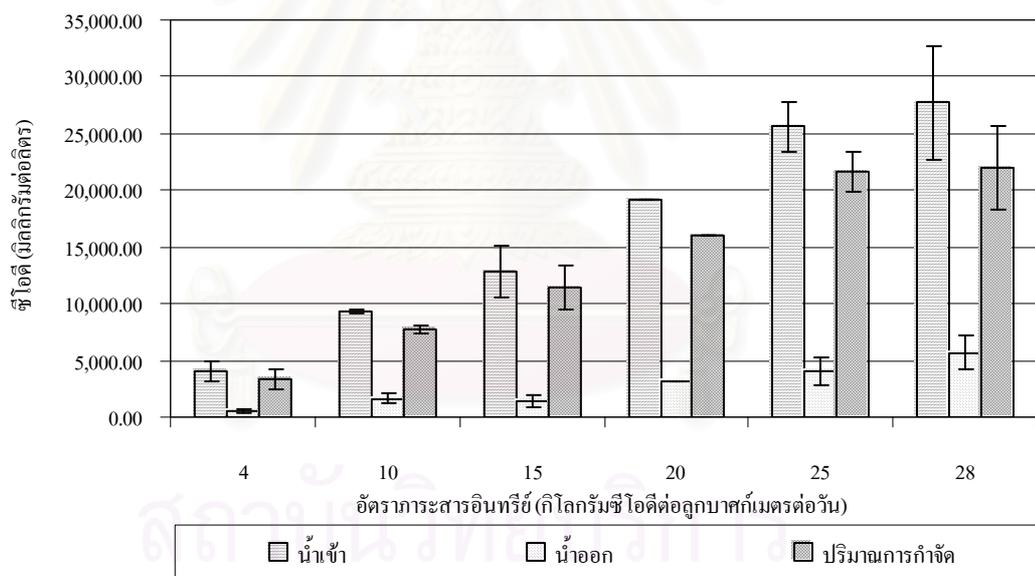
ภาพที่ 4.31 การยกตัวของชั้นตะกอนจุลินทรีย์ภายในถังสร้างก๊าซมีเทนแบบยูเอเอสบี



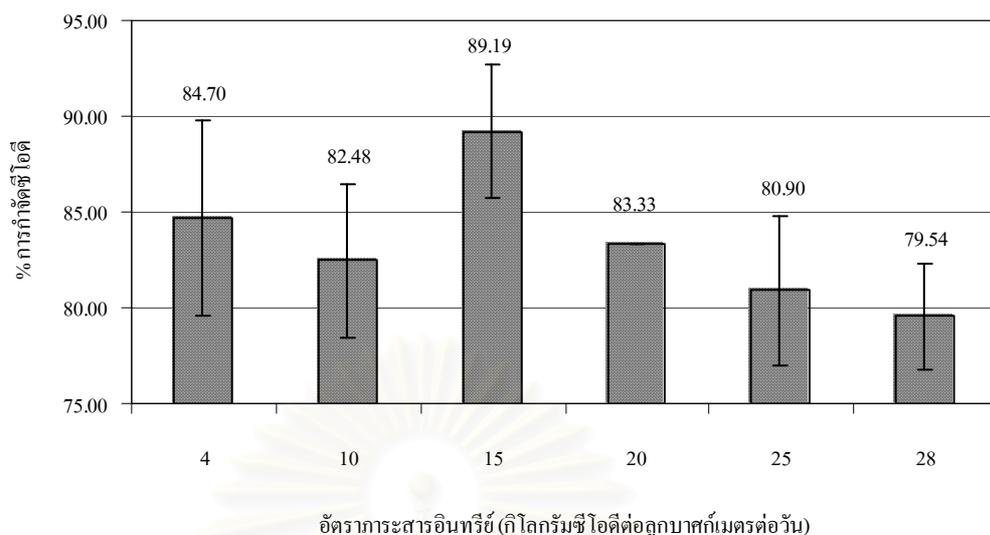
ภาพที่ 4.32 ความสัมพันธ์ของปริมาณและประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี เมื่อเดินระบบด้วยน้ำเสียจริง ที่อัตราภาระสารอินทรีย์ 28 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน

ตารางที่ 4.4 ปริมาณการกำจัดซีโอดีและประสิทธิภาพเฉลี่ย ที่อัตราการสารอินทรีย์ 4, 10, 15, 20, 25 และ 28 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน ที่สภาวะคงที่

อัตราการสารอินทรีย์ (kgCOD/m ³ -d)	ค่าเฉลี่ยซีโอดี (มิลลิกรัมต่อลิตร)			
	น้ำเข้า	น้ำออก	ปริมาณการกำจัด	ประสิทธิภาพ
4	4,005.71±835.36	591.43±169.65	3,414.29±868.77	84.70± 5.13
10	9,360.00±219.09	1,640.00±384.71	7,720.00±414.73	82.48±3.99
15	12,800.00±2,262.74	1,400.00±551.36	11,400.00±1,905.78	89.19±3.48
20	19,200.00±0.00	3,200.00±0.000	16,000.00±0.00	83.33±0.00
25	25,600.00±2,200.17	4,000.00±1,229.93	21,600.00±1,752.71	80.90±3.92
28	27,714.29±4,956.96	5,714.29± 1,496.03	22,000.00±3,696.85	79.54±2.77



ภาพที่ 4.33 เปรียบเทียบปริมาณการกำจัดซีโอดีเฉลี่ย ที่อัตราการสารอินทรีย์ 4, 10, 15, 20, 25 และ 28 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน ที่สภาวะคงที่



ภาพที่ 4.34 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดี ที่อัตราสารอินทรีย์ 4, 10, 15, 20, 25 และ 28 กิโลกรัมซีไอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน ที่สภาวะคง

4.3.2 การกำจัดบีไอดี

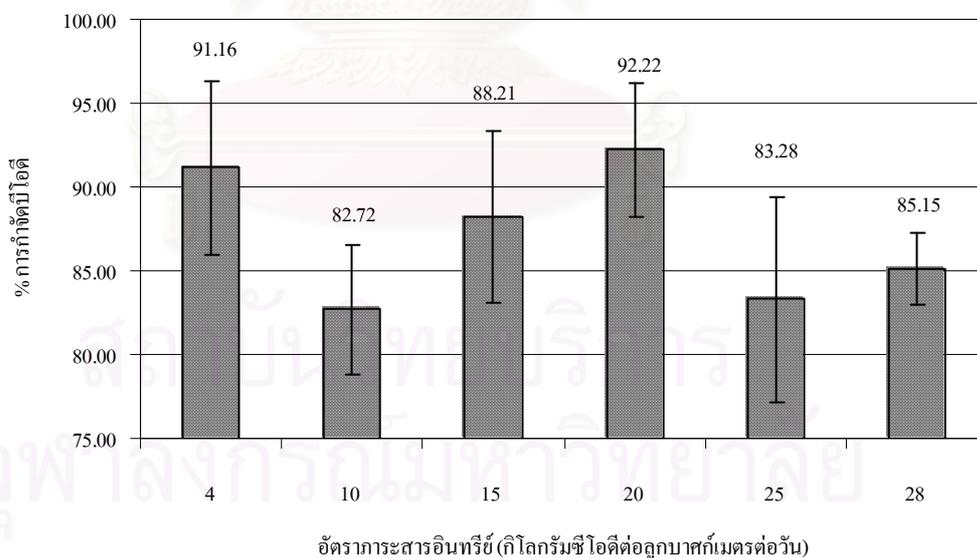
ผลการเดินระบบถังสร้างก๊าซมีเทนที่อัตราสารอินทรีย์ 4, 10, 15, 20, 25 และ 28 กิโลกรัมซีไอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวันพบว่า ปริมาณการกำจัดและประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ซึ่งวิเคราะห์ในรูปของประสิทธิภาพการกำจัดบีไอดีรวมทั้งหมด แสดงดังตารางที่ 4.5 จากผลดังกล่าวข้างต้นจะเห็นได้ว่า ถังสร้างก๊าซมีเทนมีประสิทธิภาพการกำจัดบีไอดีรวมทั้งหมดสูงกว่าร้อยละ 80 (ภาพที่ 4.35) ซึ่งแสดงถึงความสามารถของจุลินทรีย์ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ทางชีวภาพในน้ำเสียได้ดีและน้ำเสียมีองค์ประกอบของสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายทางชีวภาพได้ง่ายสูงเมื่อพิจารณาอัตราส่วนบีไอดีต่อซีไอดีของน้ำเข้าสู่ระบบทุกอัตราสารอินทรีย์อยู่ในช่วงประมาณ 0.30 – 0.90 ซึ่งอัตราส่วนบีไอดีต่อซีไอดี ถ้ามีค่าเท่ากับ 0.5 หรือมากกว่าแล้ว จะสามารถพิจารณาได้ว่าน้ำเสียนั้นบำบัดด้วยกระบวนการทางชีวภาพได้ง่าย แต่ถ้าอัตราส่วนต่ำกว่าประมาณ 0.30 อาจมีสารประกอบที่เป็นพิษปะปนอยู่ หรือต้องการจุลินทรีย์ที่มีความคุ้นเคยเพื่อให้เกิดความเสถียร (Tchobanoglous, Burton และ Stensel, 2004)

เมื่อเปรียบเทียบปริมาณการกำจัดบีไอดีเฉลี่ยที่สภาวะคงที่ที่อัตราสารอินทรีย์ 4, 10, 15, 20, 25 และ 28 กิโลกรัมซีไอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน (ภาพที่ 4.36) พบว่า ที่อัตราสารอินทรีย์ 28 กิโลกรัมซีไอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน มีความเข้มข้นบีไอดีในน้ำเข้าระบบสูงที่สุดประมาณ $15,747.86 \pm 2,478.67$ มิลลิกรัมต่อลิตร ในขณะที่น้ำออกมีความเข้มข้นบีไอดีประมาณ $2,366.43 \pm 638.31$ มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งอาจกล่าวได้ว่าใกล้เคียงกับอัตราสารอินทรีย์อื่น และมีปริมาณการกำจัดบีไอดีสูงสุดประมาณ $13,381.43 \pm 1,906.88$ มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อเปรียบเทียบกับ

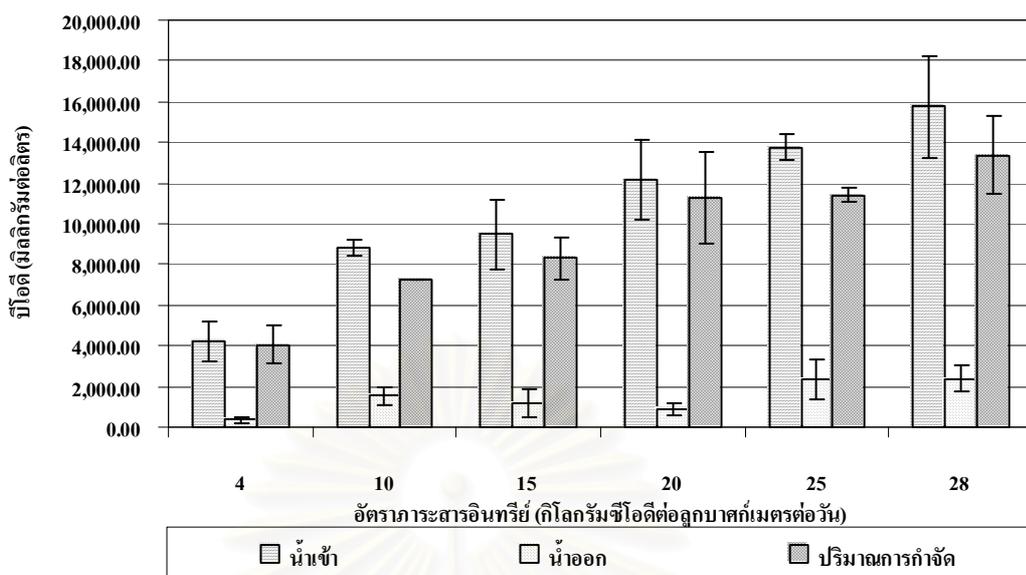
อัตราภาระสารอินทรีย์อื่น ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณการกำจัดซีโอดี ดังนั้น ที่อัตราภาระสารอินทรีย์ 28 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน จึงมีความเหมาะสมในการกำจัดบีโอดี สำหรับการทดลองนี้

ตารางที่ 4.5 ปริมาณการกำจัดบีโอดีและประสิทธิภาพเฉลี่ย ที่อัตราภาระสารอินทรีย์ 4, 10, 15, 20, 25 และ 28 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน ที่สภาวะคงที่

อัตราภาระสารอินทรีย์ (kgCOD/m ³ -d)	ค่าเฉลี่ยบีโอดี (มิลลิกรัมต่อลิตร)			
	น้ำเข้า	น้ำออก	ปริมาณการกำจัด	ประสิทธิภาพ
4	4,262.50±981.22	370.50±161.93	4,045.79±925.66	91.16±5.19
10	8,837.50±413.66	1,535.00±413.66	7,302.50±0.00	82.72±3.87
15	9,490.00±1,725.34	1,163.25±691.90	8,326.75±1,033.44	88.21±5.15
20	12,166.67±1,962.99	895.83±309.05	11,270.83±2,241.77	92.22±4.02
25	13,740.00±649.52	2,322.50±964.85	11,417.50±382.43	83.28±6.13
28	15,747.86±2,478.67	2,366.43± 638.31	13,381.43±1,906.88	85.15±2.12



ภาพที่ 4.35 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดบีโอดี ที่อัตราภาระสารอินทรีย์ 4, 10, 15, 20, 25 และ 28 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน ที่สภาวะคง



ภาพที่ 4.36 เปรียบเทียบปริมาณการกำจัดบีโอดีเฉลี่ย ที่อัตราสารอินทรีย์ 4, 10, 15, 20, 25 และ 28 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน ที่สภาวะคง

4.3.3 การกำจัดกรดไขมันระเหย

ผลการเดินระบบถังสร้างก๊าซมีเทนที่อัตราสารอินทรีย์ 4, 10, 15, 20, 25 และ 28 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน พบว่า มีปริมาณและประสิทธิภาพการกำจัดกรดไขมันระเหยที่สภาวะคงที่ แสดงดังตารางที่ 4.6 เมื่อเปรียบเทียบปริมาณการกำจัดกรดไขมันระเหยที่อัตราสารอินทรีย์ต่างๆ ที่สภาวะคงที่ (ภาพที่ 4.37) พบว่า ที่อัตราสารอินทรีย์ 28 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน มีปริมาณกรดไขมันระเหยในน้ำเข้าระบบประมาณ $2,130.61 \pm 134.88$ มิลลิกรัมต่อลิตร ต่ำกว่าที่อัตราสารอินทรีย์ 15, 20 และ 25 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน ซึ่งค่าดังกล่าว ไม่สอดคล้องกับปริมาณบีโอดีในน้ำเข้าระบบ อาจมีสาเหตุมาจากน้ำเสียที่เข้าสู่ระบบที่อัตราสารอินทรีย์ดังกล่าวมีองค์ประกอบที่มีสัดส่วนของกรดไขมันระเหยต่ำกว่าสารอินทรีย์ชนิดอื่นที่เป็นองค์ประกอบ เช่น เซลล์จากผลปาล์มที่ยังไม่เปลี่ยนรูปไปเป็นกรดไขมันระเหย และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างอัตราสารอินทรีย์ 4 กับ 10 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน พบว่า ที่อัตราสารอินทรีย์ 4 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน ปริมาณกรดไขมันระเหยในน้ำเข้าระบบต่ำกว่า ซึ่งอธิบายได้ในทำนองเดียวกันกับที่อัตราสารอินทรีย์ 28 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน

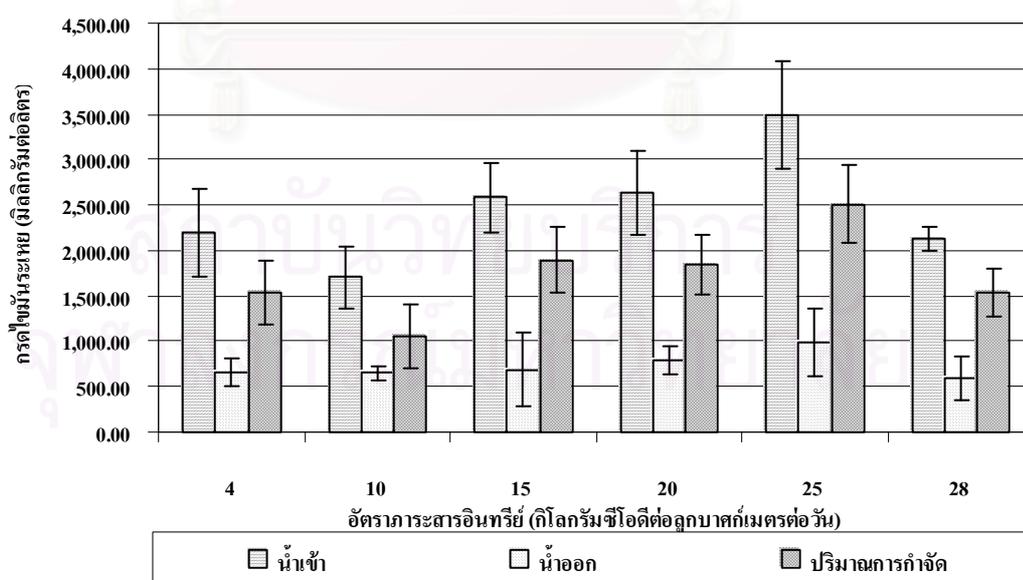
เมื่อพิจารณาด้านประสิทธิภาพการกำจัดกรดไขมันระเหย พบว่า ที่อัตราสารอินทรีย์ 4, 15, 20, 25 และ 28 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน มีประสิทธิภาพใกล้เคียงกันประมาณร้อยละ 70 (ภาพที่ 4.38) แต่ที่อัตราสารอินทรีย์ 10 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์

เมตรต่อวัน ประสิทธิภาพต่ำประมาณร้อยละ 60 อาจมีสาเหตุจากอัตราการระเหยอินทรีย์ที่เพิ่มขึ้นประมาณ 2 เท่า ของการระเหยอินทรีย์ที่ใช้เดินระบบก่อนเปลี่ยนอัตราการระเหยอินทรีย์จุลินทรีย์จึงอาจอยู่ในช่วงปรับตัวจึงทำให้ประสิทธิภาพลดลง สอดคล้องกับประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีและบีโอดี

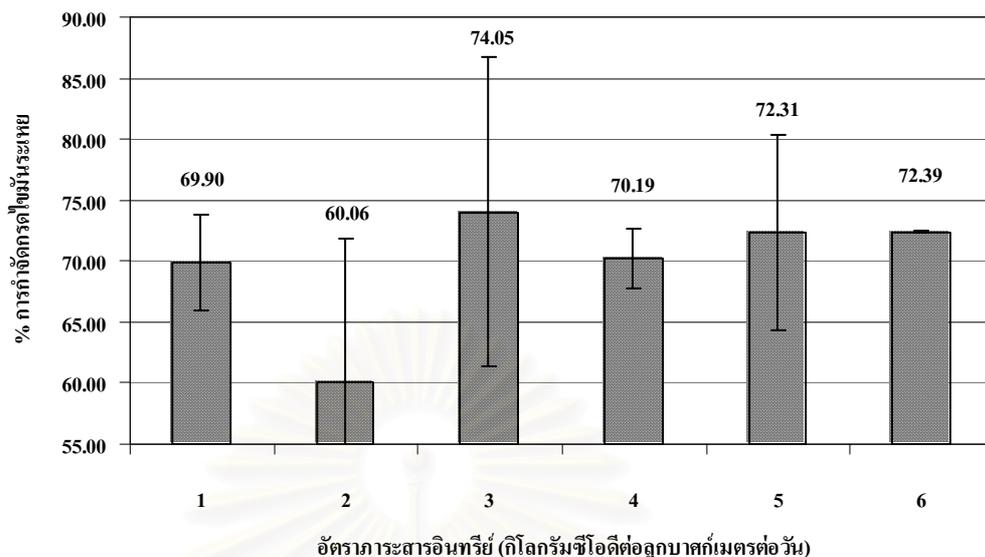
ดังนั้น เมื่อพิจารณาผลของการกำจัดซีโอดีและบีโอดีร่วมด้วย กล่าวได้ว่า การกำจัดกรดไขมันระเหย ที่อัตราการระเหยอินทรีย์ 28 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน ยังคงมีความเหมาะสมสำหรับการเดินระบบดังกล่าว

ตารางที่ 4.6 ปริมาณการกำจัดกรดไขมันระเหยและประสิทธิภาพเฉลี่ย ที่อัตราการระเหยอินทรีย์ 4, 10, 15, 20, 25 และ 28 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน ที่สภาวะคงที่

อัตราการระเหยอินทรีย์ (kgCOD/m ³ -d)	ค่าเฉลี่ยกรดไขมันระเหย (มิลลิกรัมต่อลิตร)			
	น้ำเข้า	น้ำออก	ปริมาณการกำจัด	ประสิทธิภาพ
4	2,195.92±478.78	661.32±154.24	1,534.70±357.13	69.90±3.99
10	1,702.86±343.81	651.43±76.66	1,051.43±353.64	60.06±11.81
15	2,581.72±391.60	685.71±402.04	1,896.00±364.38	74.05±12.60
20	2,639.96±463.18	788.57±153.33	1,851.39±329.77	70.19±2.51
25	3,490.91±600.11	981.82±368.40	2,509.09±428.73	72.31±7.99
28	2,130.61±134.88	587.76± 239.53	1,542.85±261.86	72.39±0.10



ภาพที่ 4.37 เปรียบเทียบปริมาณการกำจัดกรดไขมันระเหยเฉลี่ย ที่อัตราการระเหยอินทรีย์ 4, 10, 15, 20, 25 และ 28 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน ที่สภาวะคง



ภาพที่ 4.38 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดคราบน้ำมันระเหยเฉลี่ย ที่อัตราสารอินทรีย์ 4, 10, 15, 20, 25 และ 28 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน ที่สภาวะคง

4.3.4 ค่าพีเอชและสภาพต่าง

เมื่ออัตราการป้อนสารอินทรีย์เพิ่มขึ้น สภาพต่างของน้ำเสียที่เข้าระบบมีความเข้มข้นของสภาพต่างสูงขึ้น และขณะเดียวกันน้ำเสียที่ออกจากระบบมีความเข้มข้นของสภาพต่างสูงขึ้นด้วยเช่นกัน และพบว่าความเข้มข้นสภาพต่างของทั้งน้ำเข้าระบบและน้ำออกจากระบบมีค่าใกล้เคียงกันในแต่ละอัตราสารอินทรีย์ ที่อัตราสารอินทรีย์ 4, 10, 15, 20, 25 และ 28 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน (ภาพที่ 4.39 – 4.44) สภาพต่างดังกล่าวในน้ำเข้าระบบมิได้เติมสารเคมีเพื่อเพิ่มสภาพต่าง ยกเว้นช่วงวันที่ 1 - 7 ของอัตราสารอินทรีย์ 4 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน ที่ใช้สารเคมีโซเดียมไบคาร์บอเนตเติมลงในน้ำเข้าสู่ระบบจนกระทั่งค่าพีเอชมีค่าประมาณ 6.8 เพื่อเป็นการสำรองบัฟเฟอร์ภายในระบบเพื่อรักษาระดับพีเอชที่เหมาะสมของจุลินทรีย์สร้างก๊าซมีเทน เนื่องจากระยะแรกของการเดินระบบจุลินทรีย์จะต้องปรับตัวกับสภาวะแวดล้อมใหม่ จึงเป็นการป้องกันการขัดขวางการทำงานของจุลินทรีย์ที่อาจเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอชที่ไม่เหมาะสมภายในระบบ

จากผลการทดลองเดินระบบ กล่าวได้ว่า ที่อัตราสารอินทรีย์ 20, 25 และ 28 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน เมื่อพิจารณาจากความเข้มข้นของสภาพต่างที่สภาวะคงที่แสดงดังตารางที่ 4.7 พบว่า ที่อัตราสารอินทรีย์ดังกล่าว ระบบการทำงานของจุลินทรีย์ภายในถังสร้างก๊าซมีเทนแบบยูเอเอสบี อยู่ในสภาวะที่สมดุลเพราะมีความเข้มข้นของสภาพต่างในน้ำเข้า

และออกจากระบบใกล้เคียงกันอยู่ในช่วงประมาณ 3,000 – 4,000 มิลลิกรัมต่อลิตร(ภาพที่ 4.45) มีค่าพีเอชเฉลี่ยประมาณ 7.47 – 8.94 ข้อมูลแสดงดังตารางที่ 4.8 ซึ่งระบบไร้อากาศที่ส่งเสริมให้จุลินทรีย์มีประสิทธิภาพในการเจริญเติบโต และ การทำงานควรมีความเข้มข้นของสภาพต่างอยู่ระหว่างช่วง 2,000 – 4,000 มิลลิกรัมต่อลิตรในรูปของแคลเซียมคาร์บอเนต (Tchobanoglous, Burton และStensel, 2004) และระบบไร้อากาศที่ปิดฝาควรมีความเข้มข้นของสภาพต่างประมาณ 1,500 – 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร (มันสิน คัตกุลเวสม์, 2542) ดังนั้นจึงมีความจุฟเฟอร์เพียงพอเพื่อรักษาระดับค่าพีเอชให้อยู่ในช่วงที่ใกล้เคียงระดับที่เป็นกลางช่วงประมาณ 6.5 – 9.2 ซึ่งเป็นช่วงที่จุลินทรีย์สร้างก๊าซมีเทนเจริญเติบโตและทำงานได้ดี ดังนั้น จึงมีความเหมาะสมต่อการทำงานของจุลินทรีย์ นอกจากนี้ยังสังเกต พบว่าที่อัตราภาระสารอินทรีย์ 20 กิโลกรัมชีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน มีความเข้มข้นของสภาพต่างในน้ำออกจากระบบสูงกว่าในน้ำเข้าระบบ อาจเนื่องมาจากมีปริมาณสารประกอบไนโตรเจนในน้ำเข้าระบบสูง เมื่อเกิดการย่อยสลายจึงทำให้มีความเข้มข้นของสภาพต่างสูงขึ้นด้วย ส่วนที่อัตราภาระสารอินทรีย์ 28 กิโลกรัมชีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน มีความเข้มข้นของสภาพต่างในน้ำออกจากระบบมีปริมาณต่ำ เนื่องจากที่อัตราภาระสารอินทรีย์นี้มีความเข้มข้นของชีโอดีและกรดไขมันระเหยในน้ำเข้าระบบสูง จึงใช้สภาพต่างในการรักษาสมดุลกรด-ด่างของระบบสูงด้วยจึงทำให้สภาพต่างในน้ำออกจากระบบลดลงค่อนข้างมาก

ขณะที่อัตราภาระสารอินทรีย์ที่ 4, 10 และ 15 กิโลกรัมชีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน ถึงแม้ว่าจะมีความเข้มข้นของสภาพต่างในน้ำเข้าและออกจากระบบต่ำกว่า 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร และมีเพียงน้ำเข้าระบบที่อัตราภาระสารอินทรีย์ 10 กิโลกรัมชีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน ที่มีความเข้มข้นของสภาพต่างสูงกว่า 1,500 มิลลิกรัมต่อลิตร ก็ตาม แต่ค่าพีเอชในน้ำเข้าและออกจากระบบยังคงมีค่าอยู่ในช่วงประมาณ 7.74 – 8.57 ซึ่งยังคงเป็นช่วงที่จุลินทรีย์สร้างก๊าซมีเทนมีประสิทธิภาพในการทำงานได้ดี และสังเกตพบว่าในวันที่ 7 และ 9 ของการเดินระบบที่อัตราภาระสารอินทรีย์ 10 กิโลกรัมชีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน พบว่ามีความเข้มข้นของสภาพต่างในน้ำเข้าระบบสูงกว่าวันอื่นๆ ที่อัตราภาระสารอินทรีย์นี้ อาจมีสาเหตุเนื่องมาจากปริมาณสภาพต่างของน้ำเสียที่ออกจากถังสร้างกรดที่ใช้เตรียมน้ำเข้าสู่ระบบของช่วง 2 วันดังกล่าวมีปริมาณสูง

จากผลดังกล่าวข้างต้นแสดงให้เห็นว่าน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มนั้น น่าจะมีส่วนช่วยเพิ่มสภาพต่างจากการย่อยสลายสารประกอบจำพวกไนโตรเจน ที่ยังหลงเหลือจากขั้นตอนของการสร้างกรดทำให้เกิดสภาพต่างจากแอมโมเนียเพิ่มขึ้นอีก และสภาพต่างที่เกิดจากปฏิกิริยารีดักชันของซัลเฟตและซัลไฟต์ นอกจากสภาพต่างที่เกิดขึ้นภายในระบบขณะนั้นแล้วยังมีสภาพต่างที่ได้รับจากน้ำเสียที่ออกจากถังสร้างกรดและน้ำออกจากระบบหมุนเวียนกลับมาใช้ใหม่ด้วยเช่นกัน

ตารางที่ 4.7 ปริมาณสภาพต่างเฉลี่ย และอัตราส่วนระหว่างกรดไขมันระเหยต่อสภาพต่าง ที่อัตราการสารอินทรีย์ 4, 10, 15, 20, 25 และ 28 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน ที่สภาวะคงที่

อัตราการสารอินทรีย์ (kgCOD/m ³ -d)	ค่าเฉลี่ยสภาพต่าง (มิลลิกรัมต่อลิตร)		อัตราส่วน กรดไขมันระเหย / สภาพต่าง
	น้ำเข้า	น้ำออก	
4	773.14±288.01	895.14±267.49	0.82±0.37
10	1,615.00±160.66	1,445.00±309.94	0.46±0.07
15	1,330.00±383.00	1,135.00±229.54	0.58±0.25
20	2,980.00±201.87	3,370.00±430.26	0.24±0.06
25	3,395.45±367.22	3,115.91±557.14	0.32±0.10
28	3,907.14±402.26	3,541.00± 631.84	0.05±0.06

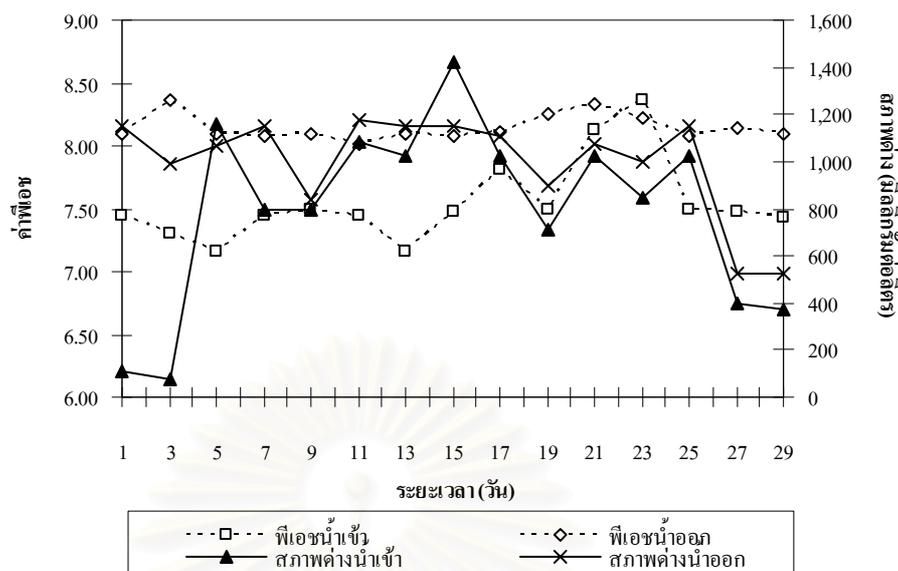
ตารางที่ 4.8 ค่าพีเอชเฉลี่ย ที่อัตราการสารอินทรีย์ 4, 10, 15, 20, 25 และ 28 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน ที่สภาวะคงที่

อัตราการสารอินทรีย์ (kgCOD/m ³ -d)	ค่าเฉลี่ยค่าพีเอช (มิลลิกรัมต่อลิตร)	
	น้ำเข้า	น้ำออก
4	7.74±0.37	8.18±0.10
10	7.94±0.09	8.33±0.04
15	7.98±0.19	8.57±0.25
20	7.97±0.39	8.94±0.36
25	7.47±0.15	8.43±0.08
28	7.57±0.15	8.50±0.09

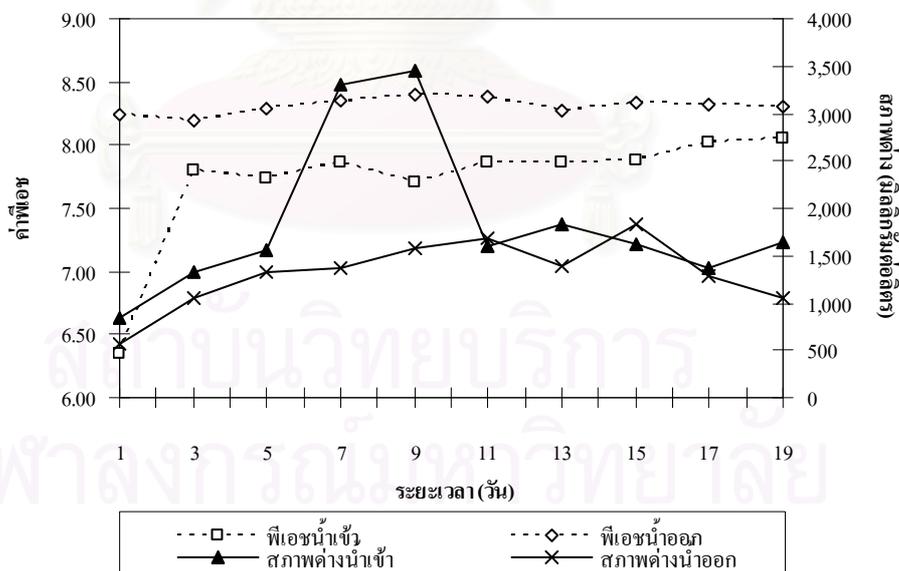
และเมื่อพิจารณาถึงอัตราส่วนความเข้มข้นของกรดไขมันระเหยต่อความเข้มข้นของสภาพต่างไบคาร์บอเนต (VFA : HCO₃⁻) ที่สภาวะคงที่ แสดงดังภาพที่ 4.46 พบว่า ที่อัตราการสารอินทรีย์ 4 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน เท่ากับ 0.82 ± 0.37 จะเห็นได้ว่าอัตราส่วนดังกล่าวมีค่าสูง ซึ่งโดยปกติทั่วไป อัตราส่วนความเข้มข้นของกรดไขมันระเหยต่อความเข้มข้นของสภาพต่างไบคาร์บอเนตที่มีค่าน้อยกว่า 0.4 ระบบจะมีบีฟเฟอร์สูง แต่ถ้าอัตราส่วนนี้มีค่าสูงกว่า 0.8 แสดงถึงว่าระบบกำลังอยู่ในขั้นที่ค่าพีเอชจะลดลงอย่างรวดเร็ว ถ้ากรดไขมันระเหยมีการเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย (อุตสาหกรรม, กระทรวง. กรมโรงงานอุตสาหกรรมและและสมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย, 2545) แสดงว่าช่วงเริ่มต้นเดินระบบถึงสร้างก๊าซมีเทน ซึ่งเป็นช่วงที่จุลินทรีย์กำลังปรับตัวต่อสภาวะแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลงไปนั้น ดังนั้นความจุบีฟเฟอร์อาจมีค่าต่ำจึงเป็นเหตุให้ต้องเติมสารเคมีจำพวกไบคาร์บอเนต เพื่อเพิ่มสภาพต่างให้ระบบมีบีฟเฟอร์เพียงพอในการรักษาสมดุลของระบบ เพื่อป้องกันผลกระทบที่อาจจะเกิดขึ้นกับการทำงานของจุลินทรีย์ซึ่งจะนำไปสู่การล้มเหลวของ

ระบบได้ ที่อัตราการระเหยอินทรีย์ 10 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน ช่วง 2 วันแรก อัตราส่วนความเข้มข้นของกรดไขมันระเหยต่อความเข้มข้นของสภาพต่างไบคาร์บอเนต มีค่าสูงมาก 2.09 และ 1.31 ตามลำดับ เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอัตราการระเหยอินทรีย์ที่เพิ่มขึ้นประมาณ 2 เท่า จึงทำให้ความจุฟเฟอรัภายในระบบไม่พอเพียงและเสียดุล แต่หลังจากนั้นระบบเริ่มเข้าสู่สมดุลอีกครั้ง และมีสมดุลของบัฟเฟอร์ในระบบดี อัตราส่วนดังกล่าวที่สภาวะคงที่มีค่าเฉลี่ย 0.46 ซึ่งเป็นช่วงที่แสดงถึงว่าระบบค่อนข้างที่จะมีบัฟเฟอร์สูง ที่อัตราการระเหยอินทรีย์ 15 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน มีลักษณะคล้ายกับที่อัตราการระเหยอินทรีย์ 10 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตร คือ ช่วง 2 วันแรกอัตราส่วนดังกล่าวมีค่าสูง เท่ากับ 1.29 และ 3.30 ตามลำดับ เนื่องจากการปรับตัวเข้าสู่สภาวะใหม่ หลังจากนั้นที่สภาวะคงที่มีค่าเฉลี่ย 0.58 แสดงถึงสภาวะการทำงานของระบบค่อนข้างดี ที่อัตราการระเหยอินทรีย์ 20 และ 25 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน มีอัตราส่วนความเข้มข้นของกรดไขมันระเหยต่อความเข้มข้นของสภาพต่างไบคาร์บอเนต ที่สภาวะคงที่เฉลี่ย 0.24 และ 0.32 ตามลำดับ แสดงถึงว่า ระบบมีความจุฟเฟอรัสูงทำให้การทำงานของระบบมีความสมดุล และที่อัตราการระเหยอินทรีย์ 28 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน ที่สภาวะคงที่มีค่าเฉลี่ย 0.05 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าระบบมีความจุฟเฟอรัสูงมาก ระบบจึงมีความสมดุลและมีเสถียรภาพสูงสำหรับการเดินระบบ ลดความเสี่ยงจากการล้มเหลวของระบบ และมีอัตราส่วนของกรดไขมันระเหยต่อสภาพต่างต่ำสุดหรือดีที่สุด เมื่อทำการเปรียบเทียบ ที่ทุกๆ อัตราการระเหยอินทรีย์ มีความเหมาะสมสำหรับการนำไปใช้งานต่อไป

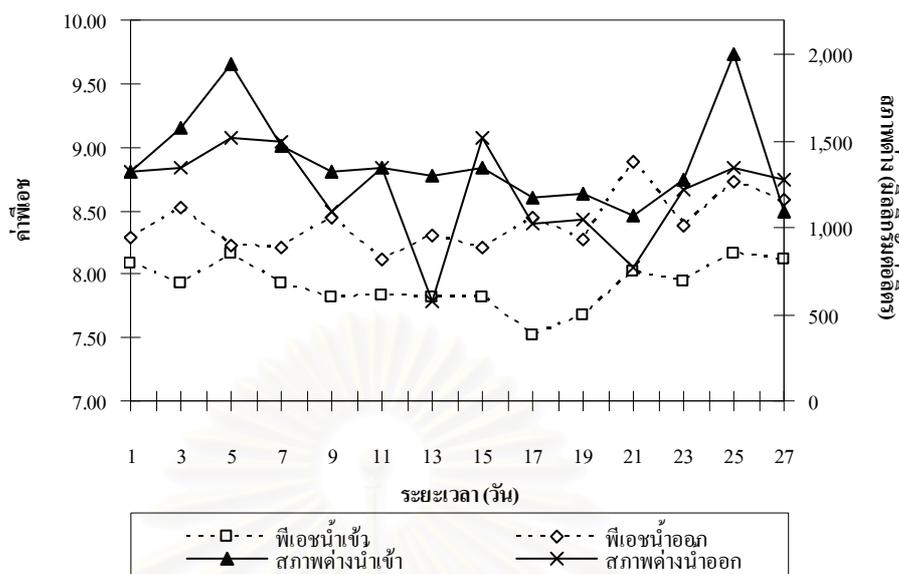
จากผลของอัตราส่วนความเข้มข้นของกรดไขมันระเหยต่อความเข้มข้นของสภาพต่างไบคาร์บอเนตดังกล่าวข้างต้น ส่งผลให้มีค่าพีเอชเฉลี่ยในน้ำเข้าและออกจากระบบที่สภาวะคงที่ที่อัตราการระเหยอินทรีย์ 4, 10, 15, 20, 25 และ 28 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน แสดงดังตารางที่ 4.8 และภาพที่ 4.39 – 4.44 มีค่าใกล้เคียงกัน (ภาพที่ 4.47) ซึ่งค่าพีเอชจากผลการทดลองเดินระบบที่ทุกอัตราการระเหยอินทรีย์ดังกล่าวข้างต้นอยู่ในช่วงที่ใกล้กับระดับความเป็นกลาง ซึ่งมีความสัมพันธ์กับสภาพต่างดังที่ได้กล่าวมาแล้ว จึงเป็นผลให้มีสภาวะที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตและการทำงานของจุลินทรีย์ จากการสู่มตัวอย่างน้ำเสียภายในถังปฏิกริยาเยอเอสบี พบว่า มีค่าพีเอชประมาณ 7.5 ที่ทุกอัตราการระเหยอินทรีย์ ดังนั้น ระบบจึงทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพและมีเสถียรภาพจึงส่งผลให้จุลินทรีย์กำจัดสารอินทรีย์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ



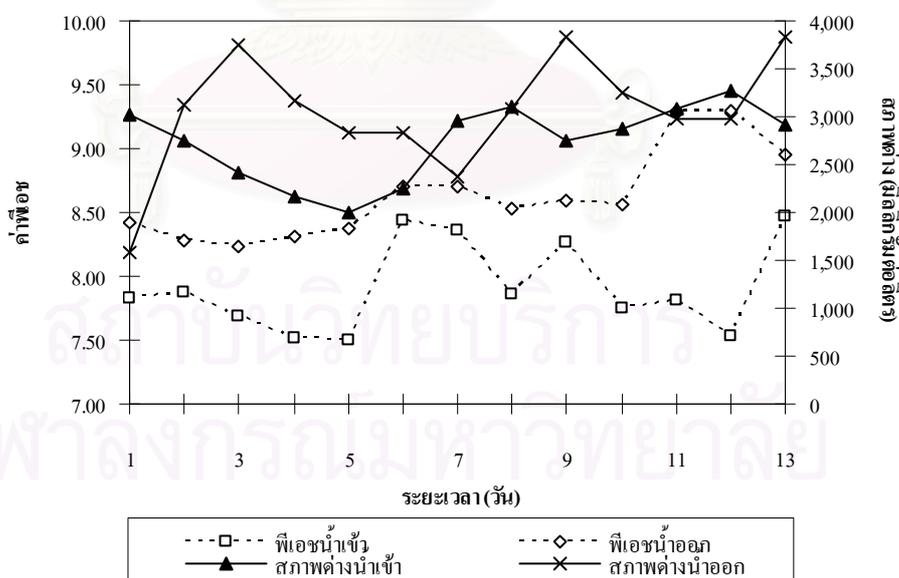
ภาพที่ 4.39 ค่าพีเอชและสภาพต่าง ที่อัตราสารอินทรีย์ 4 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตร ต่อวัน



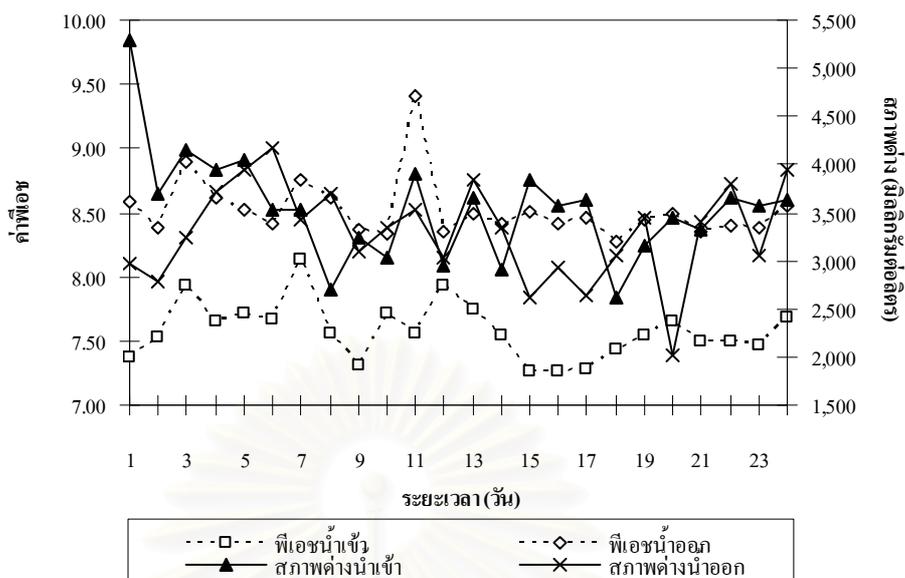
ภาพที่ 4.40 ค่าพีเอชและสภาพต่าง ที่อัตราสารอินทรีย์ 10 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตร ต่อวัน



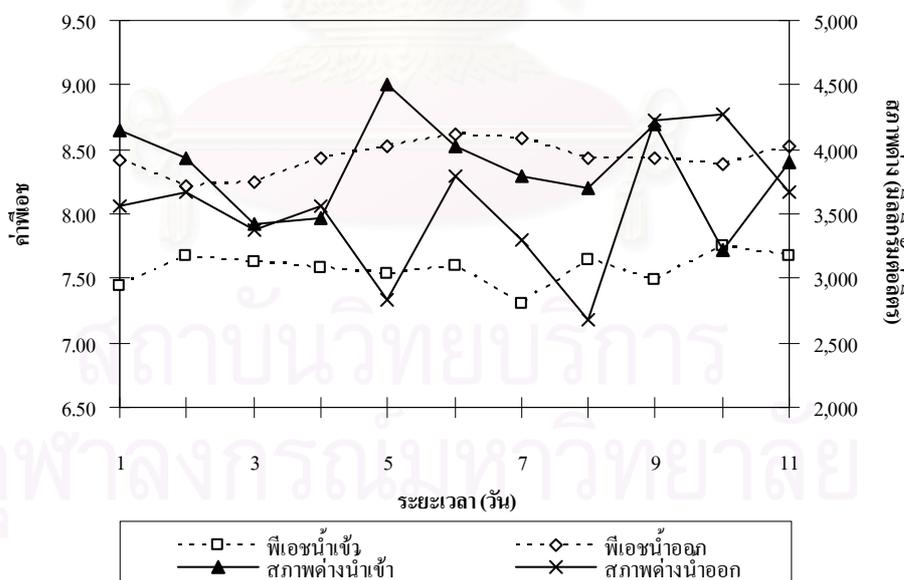
ภาพที่ 4.41 ค่าพีเอชและสภาพต่าง ที่อัตราสารอินทรีย์ 15 กิโลกรัมซีไอดีต่อลูกบาศก์เมตร ต่อวัน



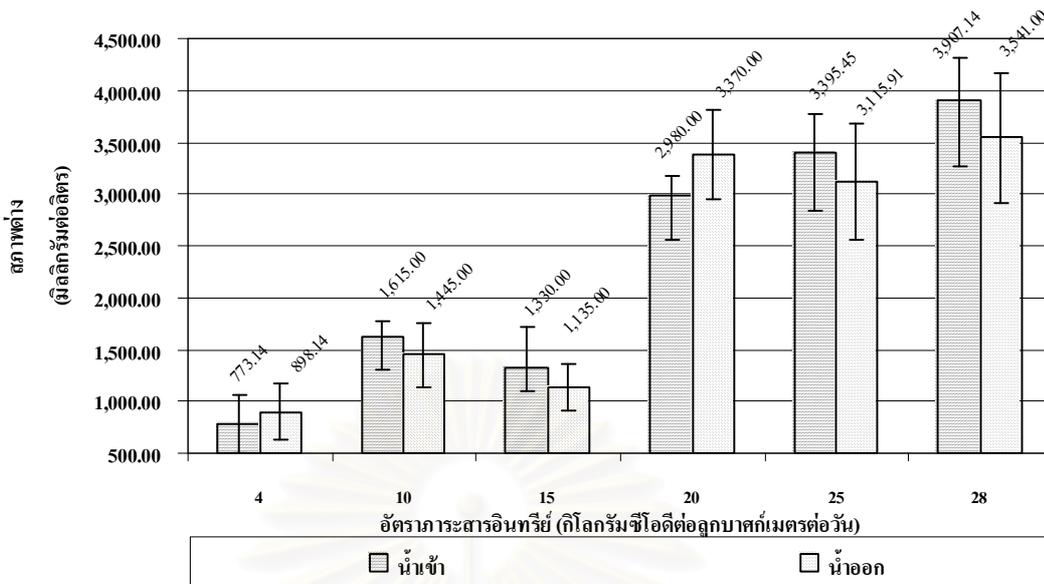
ภาพที่ 4.42 ค่าพีเอชและสภาพต่าง ที่อัตราสารอินทรีย์ 20 กิโลกรัมซีไอดีต่อลูกบาศก์เมตร ต่อวัน



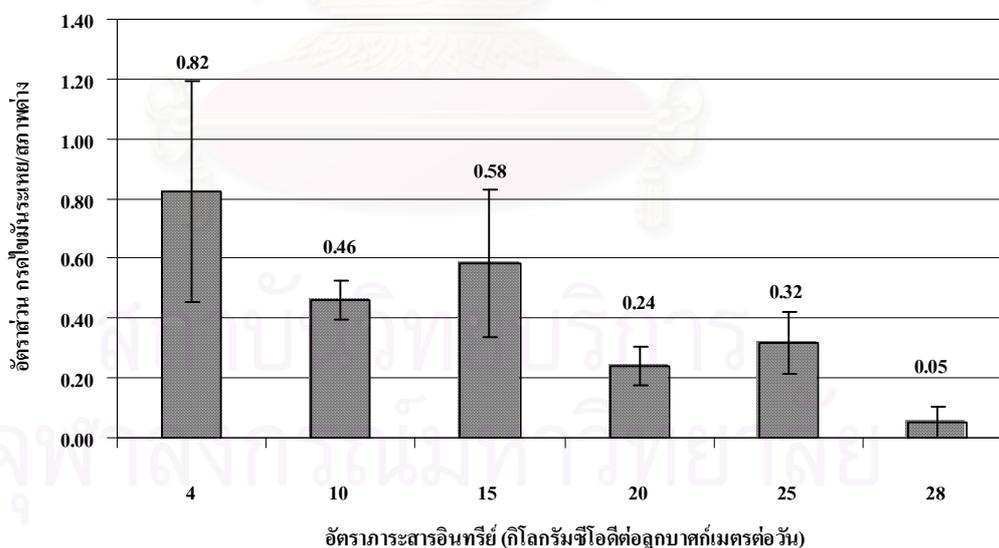
ภาพที่ 4.43 ค่าพีเอชและสภาพต่าง ที่อัตราสารอินทรีย์ 25 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตร ต่อวัน



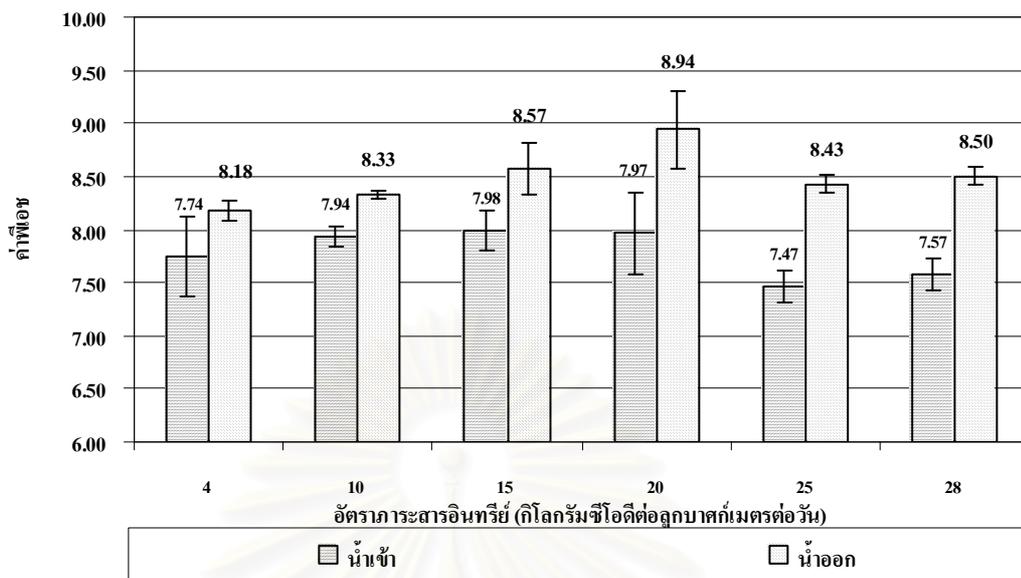
ภาพที่ 4.44 ค่าพีเอชและสภาพต่าง ที่อัตราสารอินทรีย์ 28 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตร ต่อวัน



ภาพที่ 4.45 เปรียบเทียบสภาพต่างในน้ำเข้าและออกจากระบบ ที่อัตราปุ๋ยไนโตรเจน 4, 10, 15, 20, 25 และ 28 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน ที่สภาวะคงที่



ภาพที่ 4.46 เปรียบเทียบอัตราส่วนกรดไขมันระเหยต่อสภาพต่างในน้ำออกจากระบบ ที่อัตราปุ๋ยไนโตรเจน 4, 10, 15, 20, 25 และ 28 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน ที่สภาวะคงที่



ภาพที่ 4.47 เปรียบเทียบค่าพีเอชในน้ำเข้าและออกจากระบบ ที่อัตราภาระสารอินทรีย์ 4, 10, 15, 20, 25 และ 28 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน ที่สภาวะคงที่

4.3.5 ปริมาณของแข็งแขวนลอยระเหย

จากการตรวจสอบปริมาณของแข็งแขวนลอยระเหยในน้ำเสีย ซึ่งมีองค์ประกอบของสารอินทรีย์ต่างๆ เช่น เซลล์ของผลปาล์ม ไนมัน และ กรดไขมันระเหย เป็นต้น ที่เข้าและออกจากระบบของถังปฏิกริยาสร้างก๊าซมีเทนแบบยูเอสบีนั่น ทำการตรวจสอบสัปดาห์ละ 1 ครั้ง จนกระทั่งเริ่มสังเกตพบความผิดปกติในการทำงานของระบบที่อัตราภาระสารอินทรีย์ 20 และ 25 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน ได้แก่ การอุดตันและยกชั้นลอยตัวของชั้นตะกอน ดังที่ได้กล่าวไว้แล้วในหัวข้อการกำจัดซีโอดี จึงเพิ่มการตรวจสอบขึ้นเป็นสัปดาห์ละ 2 ครั้ง และที่อัตราภาระสารอินทรีย์ 28 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน ได้ทำการตรวจสอบทุกวันเนื่องจากมีความเข้มข้นของของแข็งแขวนลอยระเหยสูงกว่า 10,000 มิลลิกรัมต่อลิตร จากผลการตรวจสอบความเข้มข้นของของแข็งแขวนลอยระเหยในน้ำเข้าและออกจากระบบ ที่สภาวะคงที่ ที่อัตราภาระสารอินทรีย์ 4, 10, 15, 20, 25 และ 28 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน แสดงดังตารางที่ 4.9 และเปรียบเทียบปริมาณการกำจัด ดังภาพที่ 4.48 สังเกตได้ว่า ประสิทธิภาพการกำจัดดังกล่าวค่อนข้างสูงและมากกว่าร้อยละ 60 แสดงว่าจุลินทรีย์มีประสิทธิภาพในการย่อยสลายของแข็งแขวนลอยระเหย หรือสารอินทรีย์ได้ดี และกล่าวได้ว่าน้ำเสียสามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้ง่าย นอกจากนี้ ปริมาณตะกอนแขวนลอยบางส่วนที่หายไปจากกลายเป็นแก๊สให้จุลินทรีย์ยึดเกาะและรวมกลุ่มกันเกิดเป็นเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ขึ้นใหม่ และตกตะกอนอยู่ในถังในถังปฏิกริยาด้วยเช่นกัน นอกจากนี้ ยังเกิดมีตะกอนลอย (scum) ลอยอยู่ด้านบน ซึ่งเกิดจากฟอง

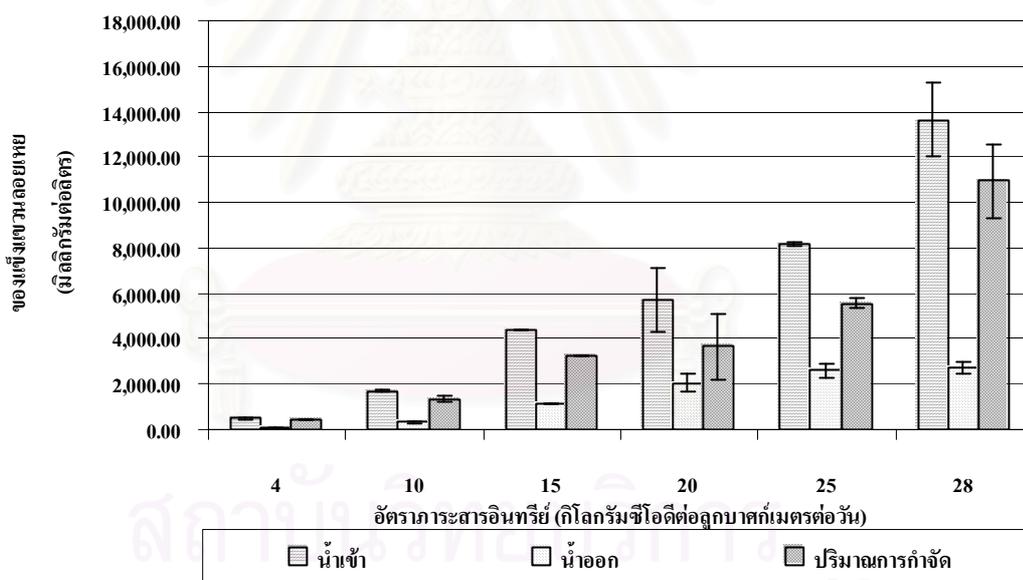
ก๊าซที่เกิดขึ้นระหว่างการเดินระบบ พาให้ตะกอนลอยขึ้นด้านบนจนเกิดเป็นชั้นโฟม ปริมาณตะกอนแขวนลอยส่วนหนึ่งที่หายไปยังอาจเกิดจากตะกอนลอยดังกล่าวไหลขึ้นไปติด ที่ทางออกของท่อก๊าซ และเมื่อสะสมมากขึ้นก็ทำให้เกิดปัญหาการอุดตันด้วยเช่นกัน ผลกระทบที่เกิดขึ้นได้แก่ ก๊าซชีวภาพเกิดการระบายออกไม่สะดวก จึงไหลย้อนออกทางท่อน้ำออกจากระบบแทนซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นและต้องการกักเก็บสูญหายไปบางส่วน ซึ่งอาจแก้ไขได้โดยออกแบบให้มีช่องระบายก๊าซกว้างขึ้น เพื่อลดโอกาสที่ตะกอนลอยจะลอยขึ้นไปอุดตันเนื่องจากแรงดันของฟองก๊าซ

สิ่งผิดปกติที่เกิดขึ้น ดังที่ได้กล่าวมาแล้วเริ่มสังเกตเห็นที่อัตราภาระสารอินทรีย์ 20 และ 25 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน ซึ่งมีความเข้มข้นของของแข็งแขวนลอยระเหยในน้ำเข้าระบบเฉลี่ย ที่สภาวะคงที่ $5,686.67 \pm 1,382.04$ และ $8,150.00 \pm 70.71$ มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ และเมื่อเดินระบบที่อัตราภาระสารอินทรีย์ 28 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน ซึ่งมีความเข้มข้นของของแข็งแขวนลอยระเหยในน้ำเข้าระบบเฉลี่ย ที่สภาวะคงที่ $10,935.71$ มิลลิกรัมต่อลิตร ก็เกิดปัญหาในการทำงานเหมือนกัน เช่นกัน ซึ่งส่งผลกระทบต่อปริมาณก๊าซชีวภาพที่กักเก็บได้

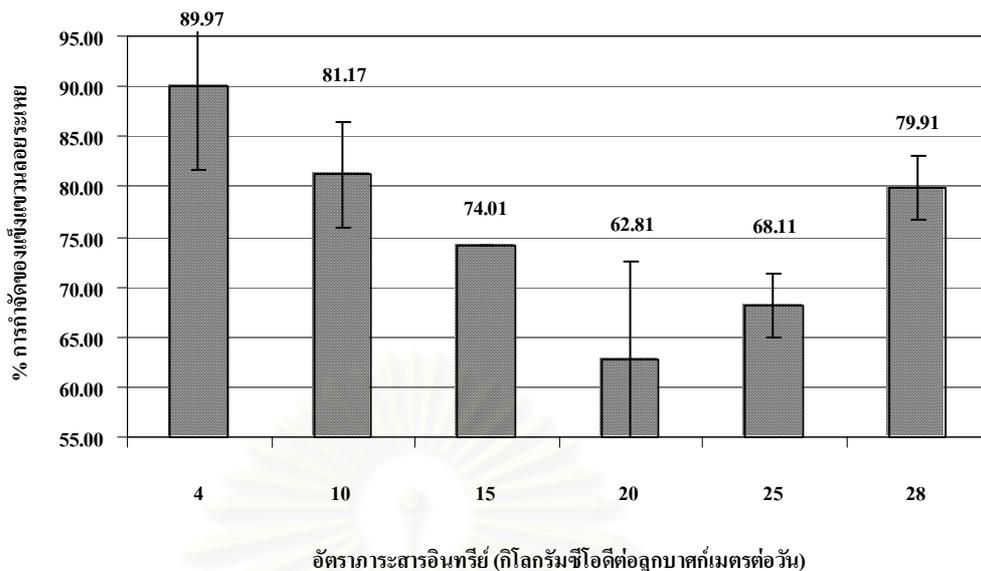
จากการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอยระเหยที่ทุกๆอัตราภาระสารอินทรีย์ (ภาพที่ 4.49) พบว่า ที่อัตราภาระสารอินทรีย์ 4 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน มีประสิทธิภาพเฉลี่ยที่สภาวะคงที่สูงสุด อาจเนื่องมาจากปริมาณสารอินทรีย์ที่เข้าสู่ระบบต่ำ ดังนั้นเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณจุลินทรีย์ที่อยู่ภายในถังปฏิกรณ์ ที่มีความเข้มข้นถึง 20,000 มิลลิกรัมต่อลิตรถึงปฏิกรณ์ จึงทำให้จุลินทรีย์สามารถกำจัดสารอินทรีย์ในรูปของแข็งแขวนลอยระเหยได้สูง แต่เมื่อพิจารณาด้านปริมาณการกำจัดของแข็งแขวนลอยระเหย พบว่า ที่อัตราภาระสารอินทรีย์ 28 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน มีปริมาณการกำจัดของแข็งแขวนลอยระเหยสูงที่สุด และเมื่อทำการเปรียบเทียบปริมาณความเข้มข้นของของแข็งแขวนลอยระเหยในน้ำออกจากระบบเฉลี่ยที่สภาวะคงที่ มีค่า $2,041.00 \pm 374.96$, $2,600.00 \pm 282.84$ และ $2,707.14 \pm 276.78$ ที่อัตราภาระสารอินทรีย์ 20, 25 และ 28 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าน้ำออกจากระบบทั้งสามอัตราภาระสารอินทรีย์ดังกล่าว มีความเข้มข้นของของแข็งแขวนลอยระเหยใกล้เคียงกัน ในขณะที่อัตราภาระสารอินทรีย์ 28 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน มีความเข้มข้นของของแข็งแขวนลอยระเหยในน้ำเข้าระบบสูงที่สุด ดังนั้น ถึงแม้ว่าที่อัตราภาระสารอินทรีย์ 4 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน จะมีประสิทธิภาพการกำจัดสูงที่สุด แต่เมื่อพิจารณาจากข้อมูลปริมาณการกำจัดประกอบกัน จะเห็นได้ว่าที่อัตราภาระสารอินทรีย์ 28 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน มีความเหมาะสมสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้งานมากที่สุด และมีความสอดคล้องกับการกำจัดซีโอดีและบีโอดี

ตารางที่ 4.9 ปริมาณการกำจัดของแข็งแขวนลอยระเหยและประสิทธิภาพเฉลี่ย ที่อัตราแระสารอินทรีย์ 4, 10, 15, 20, 25 และ 28 กิโลกรัมชีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน ที่สภาวะคงที่

อัตราแระสารอินทรีย์ (kgCOD/m ³ -d)	ค่าเฉลี่ยของแข็งแขวนลอยระเหย (มิลลิกรัมต่อลิตร)			
	น้ำเข้า	น้ำออก	ปริมาณการกำจัด	ประสิทธิภาพ
4	512.50±45.96	53.34±47.14	459.17±1.18	89.97±8.30
10	1,670.00±42.43	313.34±80.14	1,356.67±122.56	81.17±5.28
15	4,425.00±0.00	1,150.00±0.00	3,275.00±0.00	74.01±0.00
20	5,686.67±1,382.04	2,041.00±374.96	3,645.67±1,427.51	62.81±9.77
25	8,150.00±70.71	2,600.00±282.84	5,550.00±212.13	68.11±3.19
28	13,642.86±1,595.68	2,707.14±276.78	10,935.71±1,653.08	79.91±3.16



ภาพที่ 4.48 เปรียบเทียบปริมาณการกำจัดของแข็งแขวนลอยระเหยเฉลี่ย ที่อัตราแระสารอินทรีย์ 4, 10, 15, 20, 25 และ 28 กิโลกรัมชีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน ที่สภาวะคง



ภาพที่ 4.49 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอยระเหย ที่อัตราสารอินทรีย์ 4, 10, 15, 20, 25 และ 28 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน ที่สภาวะคงที่

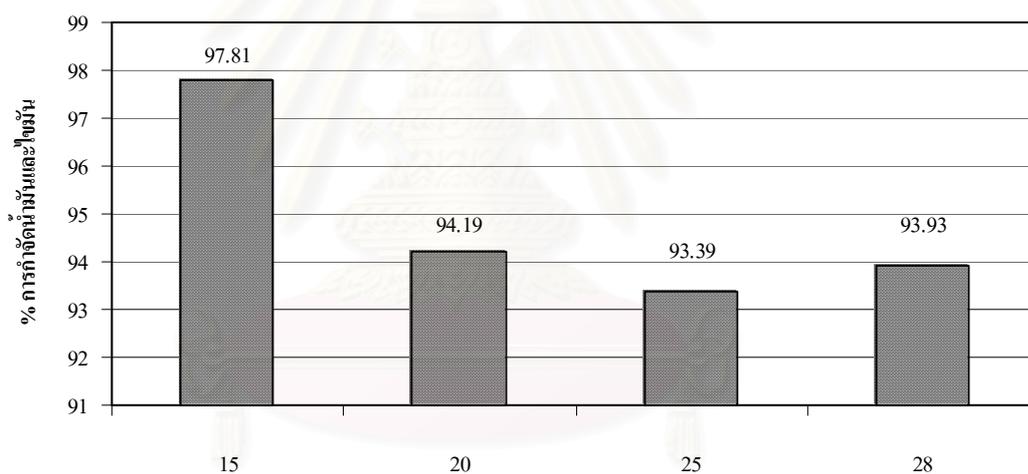
4.3.6 ปริมาณน้ำมันและไขมัน

การตรวจสอบปริมาณน้ำมันและไขมัน ที่เข้าและออกจากระบบถึงปฏิกิริยาสร้างก๊าซมีเทน ทำการตรวจวัดความเข้มข้นของน้ำมันและไขมันเมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ที่อัตราสารอินทรีย์ 15, 20, 25 และ 28 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน แสดงดังตารางที่ 4.10 ยกเว้นที่อัตราสารอินทรีย์ 4 และ 10 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดน้ำมัน จะเห็นได้ว่าระบบสามารถกำจัดน้ำมันและไขมันได้สูง และมีประสิทธิภาพการกำจัดน้ำมันและไขมันได้ใกล้เคียงกันไม่แตกต่างกันอย่างชัดเจนที่ทุกอัตราสารอินทรีย์ (ภาพที่ 4.50)

จากข้อมูลดังกล่าวข้างต้น เมื่อความเข้มข้นของน้ำมันและไขมันที่เข้าสู่ระบบอยู่ช่วงประมาณ 1,000 – 1,700 มิลลิกรัมต่อลิตร ไม่พบการชะล้างของจุลินทรีย์ออกจากระบบยูเอเอสบี ซึ่งอาจมีผลกระทบมาจากไขมันที่จะไปเคลือบที่ผิวของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ ทำให้เม็ดตะกอนจุลินทรีย์ไม่สามารถทำงานได้ และจากการสังเกตด้วยตาเปล่าไม่พบการลอยตัวของชั้นไขมันทั้งในน้ำเข้าและออกจากระบบ ดังนั้น อาจกล่าวได้ว่าระดับความเข้มข้นเฉลี่ยของน้ำมันและไขมันดังกล่าว ไม่ส่งผลอันตรายเป็นการรบกวนการทำงานของระบบ แต่อาจเปลี่ยนรูปไปเป็นกรดไขมันระเหยด้วยเช่นกัน ซึ่งจุลินทรีย์สร้างก๊าซมีเทนสามารถนำไปใช้ต่อไปได้

ตารางที่ 4.10 ปริมาณการกำจัดและประสิทธิภาพน้ำมันและไขมัน ที่อัตราการสารอินทรีย์ 15, 20, 25 และ 28 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน ที่สภาวะคงที่

อัตราการสารอินทรีย์ (kgCOD/m ³ -d)	น้ำมันและไขมัน (มิลลิกรัมต่อลิตร)			
	น้ำเข้า	น้ำออก	ปริมาณการกำจัด	ประสิทธิภาพ
15	1,093.7	24.0	1,069.7	97.81
20	1,687.6	98.0	1,589.6	94.19
25	1,694.8	112.0	1,582.8	93.39
28	1,714.6	104.0	1,610.6	93.93



อัตราการสารอินทรีย์ (กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน)

ภาพที่ 4.50 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดน้ำมันและไขมันที่อัตราการสารอินทรีย์ 15, 20, 25 และ 28 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน

4.3.7 การสร้างก๊าซชีวภาพ

4.3.7.1 ประสิทธิภาพการสร้างก๊าซชีวภาพ

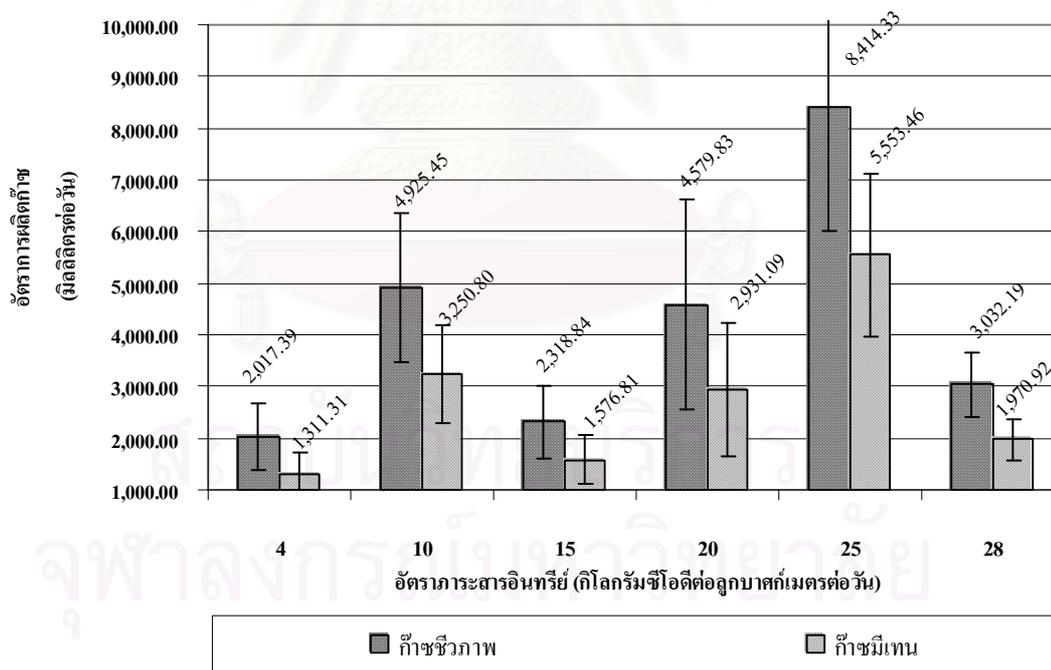
อัตราการสร้างก๊าซชีวภาพเฉลี่ยที่สภาวะคงที่ ที่อัตราการระสาดอินทรีย์ 4, 10, 15, 20, 25 และ 28 กิโลกรัมชีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน รายงานผลการศึกษาในหน่วยมิลลิเมตรต่อวัน ที่สภาวะมาตรฐาน (อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส) แสดงดังตารางที่ 4.11 เมื่อเปรียบเทียบอัตราการสร้างก๊าซชีวภาพดังกล่าวระหว่างแต่ละอัตราการระสาดอินทรีย์ พบว่า ที่อัตราการระสาดอินทรีย์ 25 กิโลกรัมชีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน มีค่าเฉลี่ยที่สภาวะคงที่สูงที่สุด (ภาพที่ 4.51) แต่มีความแปรปรวนของข้อมูลค่อนข้างสูง อัตราการสร้างก๊าซชีวภาพที่อัตราการระสาดอินทรีย์ 20, 25 และ 28 กิโลกรัมชีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน มีความสัมพันธ์สอดคล้องกับปริมาณการกำจัดกรดไขมันระเหย ซึ่งมีค่าเฉลี่ย ที่สภาวะคงที่ $1,851.39 \pm 392.77$, $2,509.09 \pm 428.73$ และ $1,542.85 \pm 261.86$ มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ มีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพเฉลี่ยที่สภาวะคงที่ $4,579.83 \pm$, $8,414.33 \pm$ และ $3,391.64 \pm$ มิลลิเมตรต่อวัน ตามลำดับ จากความสัมพันธ์ดังกล่าว จึงทำให้ที่อัตราการระสาดอินทรีย์ 25 กิโลกรัมชีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน มีอัตราการสร้างก๊าซชีวภาพสูงกว่าที่อัตราการระสาดอินทรีย์ 28 กิโลกรัมชีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน ที่มีปริมาณสารอินทรีย์เข้าสู่ระบบสูงกว่า ทั้งนี้เนื่องจากจุลินทรีย์สร้างก๊าซมีเทน ซึ่งก๊าซชนิดนี้เป็นก๊าซที่มีสัดส่วนการเกิดขึ้นในระบบมากกว่าก๊าซชนิดอื่น สามารถบริโภคสารอินทรีย์ที่มีคาร์บอนไม่เกิน 2 อะตอม เช่น กรดอะซิติก เท่านั้น ปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นจึงมีความสัมพันธ์กับปริมาณการกำจัดกรดไขมันระเหยดังที่ได้กล่าวมา ส่วนที่อัตราการระสาดอินทรีย์ 15 กิโลกรัมชีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน อัตราการสร้างก๊าซชีวภาพต่ำซึ่งไม่สอดคล้องกับปริมาณการกำจัดกรดไขมันระเหย เกิดการสูญเสียก๊าซชีวภาพบางส่วน เนื่องจากระหว่างการดำเนินการทดลอง แรงดันระหว่างเครื่องวัดปริมาตรก๊าซกับปลายท่อน้ำออกจากระบบไม่สมดุลกัน ก๊าซจึงไหลออกทางท่อน้ำออกจากระบบแทน นอกจากนี้ อุณหภูมิห้องของสถานที่ทำการทดลองในช่วงเวลากลางวันและกลางคืนมีความแตกต่างกันมาก โดยในช่วงกลางวันจะมีอุณหภูมิสูงแต่ในช่วงกลางคืนอุณหภูมิลดต่ำลงมาก จึงส่งผลต่อปริมาตรก๊าซที่วัดได้ด้วยเช่นกัน

และจากผลการตรวจวัดร้อยละก๊าซมีเทนโดยปริมาตร (%CH₄) ที่อัตราการระสาดอินทรีย์ 4, 10, 15, 20, 25 และ 28 กิโลกรัมชีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน มีค่าเท่ากับร้อยละ 65, 66, 68, 64, 66 และ 65 ตามลำดับ จึงประมาณได้ว่ามีปริมาณก๊าซมีเทนเกิดขึ้นเฉลี่ย ที่สภาวะคงที่ $1,311.31 \pm 425.23$, $3,250.80 \pm 950.98$, $1,576.81 \pm 472.69$, $2,931.09 \pm 1,303.87$, $5,553.46 \pm 1,579.03$ และ $1,970.92 \pm 401.52$ มิลลิเมตรต่อวัน ตามลำดับ (ตารางที่ 4.11) ส่วนอีกประมาณร้อยละ 30-35 มีองค์ประกอบหลักเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และมีก๊าซอื่นๆ เกิดขึ้นอีกเพียงเล็กน้อย เช่น ก๊าซไฮโดรเจน ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ และไอน้ำ จากร้อยละก๊าซมีเทนโดยปริมาตรดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าระบบถังสร้างก๊าซมีเทนนี้ มีประสิทธิภาพค่อนข้างดี เนื่องจากตามปกติระบบไร้อากาศที่มีประสิทธิภาพสูงจะมีร้อยละก๊าซมีเทนโดยปริมาตรประมาณร้อยละ 70 และผลดังกล่าวยังสามารถประมาณความ

ต้องการสภาพต่างของระบบได้ด้วย โดยทั่วไปถ้าอยู่ในช่วงร้อยละ 30-50 ระบบจะต้องการความเข้มข้นของสภาพต่างอยู่ในช่วง 2,000 - 4,000 มิลลิกรัมต่อลิตรในรูปของแคลเซียมคาร์บอเนต (Tchobanoglous, Burton และ Stensel, 2004) ดังนั้นจึงอาจใช้เป็นอีกพารามิเตอร์หนึ่งที่สามารถบอกสภาพการทำงานของระบบเพื่อปรับสภาพต่างให้เหมาะสมได้เช่นกัน

ตารางที่ 4.11 อัตราการสร้างก๊าซชีวภาพและก๊าซมีเทนเฉลี่ย ที่อัตราการสารอินทรีย์ 4, 10, 15, 20, 25 และ 28 กิโลกรัมชีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน ที่สภาวะคงที่

อัตราการสารอินทรีย์ (kgCOD/m ³ -d)	อัตราการสร้างก๊าซ (มิลลิลิตรต่อวัน)	
	ก๊าซชีวภาพ	ก๊าซมีเทน
4	2,017.39±654.20	1,311.31±425.23
10	4,925.45±1,440.88	3,250±950.98
15	2,318.84±695.13	1,576.81±472.69
20	4,579.83±2,037.29	2,931.09±1,303.87
25	8,414.33±2,392.47	5,553.46±1,579.03
28	3,032.19±617.72	1,970.92±401.52



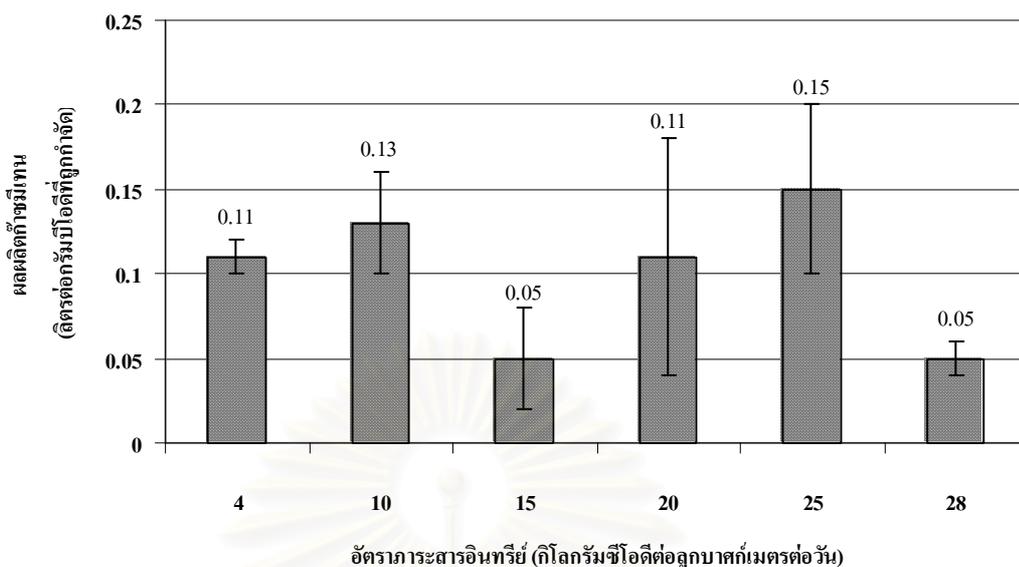
ภาพที่ 4.51 เปรียบเทียบอัตราสร้างก๊าซชีวภาพและก๊าซมีเทนเฉลี่ยที่อัตราการสารอินทรีย์ 4, 10, 15, 20, 25 และ 28 กิโลกรัมชีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน

4.3.7.2 ประสิทธิภาพการสร้างก๊าซมีเทนเปรียบเทียบกับปริมาณสารอินทรีย์ที่ถูกกำจัด

เมื่อเปรียบเทียบปริมาณก๊าซมีเทนที่สร้างขึ้นที่สภาวะมาตรฐาน (อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส) ต่อปริมาณสารอินทรีย์ในรูปบีโอดีที่ถูกกำจัด ที่อัตราการระสาดอินทรีย์ 4, 10, 15, 20, 25 และ 28 กิโลกรัมชีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน แสดงดังตารางที่ 4.12 สังเกตได้ว่า ประสิทธิภาพดังกล่าวมีค่าใกล้เคียงกันที่อัตราการระสาดอินทรีย์ 4, 10, 20, และ 25 กิโลกรัมชีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน (ภาพที่ 4.52) อาจเนื่องจากปริมาณเมล็ดตะกอนจุลินทรีย์ในระบบมีปริมาณสูงและจุลินทรีย์สร้างก๊าซมีเทนมีประสิทธิภาพการทำงานที่ค่อนข้างดี มีค่าเฉลี่ยร้อยละก๊าซมีเทนโดยปริมาตรของทุกอัตราการระสาดอินทรีย์ เท่ากับ 65.7 ± 1.37 แต่ที่อัตราการระสาดอินทรีย์ 15 และ 28 กิโลกรัมชีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน มีประสิทธิภาพต่ำกว่าที่อัตราการระสาดอินทรีย์อื่นๆที่กล่าวมาแล้ว เนื่องจากความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการสร้างก๊าซและปัญหาที่เกิดขึ้นดังที่ได้วิจารณ์ไว้แล้ว ถ้าสามารถเพิ่มปริมาณกรดไขมันระเหย และออกแบบอุปกรณ์กักเก็บให้ดีขึ้น รวมทั้งควบคุมอุณหภูมิระหว่างเดินระบบ อาจได้ค่าใกล้เคียงกัน

ตารางที่ 4.12 ประสิทธิภาพการสร้างก๊าซมีเทนเปรียบเทียบกับปริมาณสารอินทรีย์ที่ถูกกำจัดเฉลี่ยที่อัตราการระสาดอินทรีย์ 4, 10, 15, 20, 25 และ 28 กิโลกรัมชีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน ที่สภาวะคงที่

อัตราการระสาดอินทรีย์ (kgCOD/m ³ -d)	ประสิทธิภาพการสร้างก๊าซมีเทน (ลิตรมีเทนต่อกรัมบีโอดีที่ถูกกำจัด)
4	0.11±0.01
10	0.13±0.03
15	0.05±0.03
20	0.11±0.07
25	0.15±0.05
28	0.05±0.01



ภาพที่ 4.52 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการสร้างก๊าซมีเทนเปรียบเทียบกับปริมาณสารอินทรีย์ที่ถูกกำจัดเฉลี่ย ที่อัตราสารอินทรีย์ 4, 10, 15, 20, 25 และ 28 กิโลกรัมชีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน

4.4 ลักษณะของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์

เม็ดตะกอนจุลินทรีย์ที่นำมาปรับสภาพเพื่อใช้ในการทดลองเดินระบบนี้เป็นเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ที่คุ้นเคยกับการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียที่มีองค์ประกอบของน้ำตาล จึงต้องนำมาสร้างความคุ้นเคยกับน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มก่อนที่จะทำการเดินระบบเพื่อให้จุลินทรีย์มีความพร้อมและทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ลักษณะภายนอกและภายในของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ศึกษาด้วยกล้องอิเล็กตรอนไมโครสโคป (Scanning Electron Microscope : SEM) จากการส่องตัวอย่างเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ก่อนการสร้างความคุ้นเคย หลังทำการสร้างความคุ้นเคย และหลังการทดลองเดินระบบ

4.4.1 ลักษณะภายนอกของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์

ลักษณะภายนอกของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ที่นำมาจากระบบบำบัดน้ำเสียอื่นก่อนเริ่มทำการสร้างความคุ้นเคย แสดงดังภาพที่ 4.53 (ก) มีลักษณะรูปทรงค่อนข้างรี เส้นผ่าศูนย์กลางด้านกว้าง 940 ไมโครเมตร เส้นผ่าศูนย์กลางด้านแคบ 800 ไมโครเมตร พื้นผิวข้างนอกค่อนข้างเรียบ หลังจากทำการสร้างความคุ้นเคยด้วยน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มแล้ว ลักษณะภายนอกของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ยังคงมีลักษณะคล้ายกับก่อนสร้างความคุ้นเคย สังกัดไม่พบการเปลี่ยนแปลง แต่มีขนาดใหญ่ขึ้นเล็กน้อย เส้นผ่าศูนย์กลางด้านกว้าง 1000 ไมโครเมตร

เส้นผ่าศูนย์กลางด้านแคบ 900 ไมโครเมตร แสดงดังภาพที่ 4.53 (ข) ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่าเม็ดตะกอนจุลินทรีย์มีการทำงานและเจริญเติบโตได้ตามปกติ สามารถสร้างความคุ้นเคยเข้ากับน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มได้ เม็ดตะกอนจุลินทรีย์จึงมีขนาดใหญ่ขึ้น และสภาพภายนอกของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์หลังการทดลองเดินระบบ แสดงดังภาพที่ 4.53 (ค) สังเกตพบว่า ลักษณะรูปร่างของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์มีลักษณะค่อนข้างรี เส้นผ่าศูนย์กลางด้านกว้าง 1200 ไมโครเมตร เส้นผ่าศูนย์กลางด้านแคบ 940 ไมโครเมตร ซึ่งมีขนาดใหญ่ขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ก่อนและหลังสร้างความคุ้นเคย และพบรอยแยกบนเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ส่วนใหญ่ ซึ่งอาจเกิดจากการสร้างและปลดปล่อยก๊าซจากจุลินทรีย์ภายในเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ เนื่องจากน้ำเสียที่ใช้ทดลองมีความเข้มข้นสูง จุลินทรีย์ภายในจึงได้รับสารอาหารเพิ่มขึ้นสามารถสร้างก๊าซได้เพิ่มขึ้น และดันให้เม็ดตะกอนจุลินทรีย์แยกออก ซึ่งข้อสังเกตดังกล่าวอาจบ่งชี้ถึงประสิทธิภาพการทำงานที่ดีของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ที่นำมาทำการสร้างความคุ้นเคยใช้งานต่อน้ำเสียที่ทดลองเดินระบบ และจากการเปรียบเทียบค่าเอ็มแอลวีเอสเอส ของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ที่ใช้ก่อนและหลังการทดลองพบว่า มีค่า 62,780 มิลลิกรัมต่อลิตร เพิ่มขึ้นเป็น 74,650 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ซึ่งช่วยสนับสนุนว่า จุลินทรีย์ที่นำมาทำการสร้างความคุ้นเคยใช้งาน มีการเจริญเติบโตได้ดีในน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มที่ใช้ในการทดลองนี้

4.4.2 การศึกษาลักษณะภายในของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ ภาพที่ 4.54

จากการศึกษาลักษณะภายในของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ พบว่า เม็ดตะกอนจุลินทรีย์ก่อนทำการสร้างความคุ้นเคย (ก) บริเวณชั้นในของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ มีลักษณะเป็น โพรงไม่พบสิ่งที่มีลักษณะคล้ายแบคทีเรียกลุ่มต่างๆที่น่าจะพบอยู่ภายในเม็ดตะกอนจุลินทรีย์อาจเนื่องมาจากเป็นบริเวณที่สารอาหารเข้าไปไม่ถึง บริเวณชั้นกลาง พบแบคทีเรียรูปร่างท่อนแทรกตัวอยู่ระหว่างอนุภาคที่สอดแทรกอยู่ และบริเวณชั้นนอกสุด พบแบคทีเรียรูปร่างท่อนคล้ายกับบริเวณชั้นกลางแต่มีความหนาแน่นมากกว่า แบคทีเรียรูปร่างแบบท่อนที่พบดังกล่าวมีลักษณะคล้าย *Methanoxix soehngeni* ที่ De Zeeuw (1987) อ้างถึงใน Hulshoff Pol และคณะ (2004) ได้อธิบายรูปแบบต่างๆของเม็ดตะกอนในการทดลองเริ่มต้นเดินระบบ(start-up) ของระบบยูเอเอสบีระดับห้องปฏิบัติการทดลองโดยใช้กรดไขมันระเหยเป็นสับสเตรท

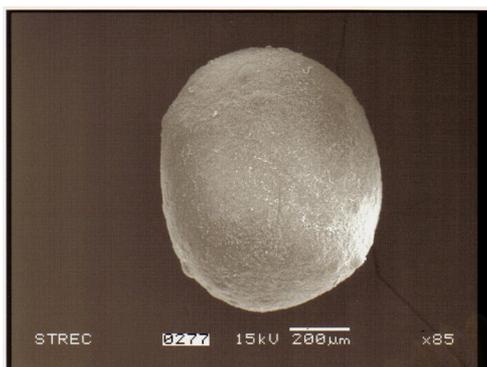
หลังทำการสร้างความคุ้นเคย เม็ดตะกอนจุลินทรีย์แล้ว (ข) พบว่า บริเวณชั้นในมีลักษณะเป็นโพรงคล้ายกับก่อนการปรับสภาพ บริเวณชั้นกลางมีลักษณะเป็นโพรงพบแบคทีเรียรูปร่างท่อนลักษณะ เช่นเดียวกับก่อนการสร้างความคุ้นเคย แต่มีความหนาแน่นมากกว่า ส่วนบริเวณชั้นนอกสุดมีลักษณะเป็น โพรงเช่นกัน พบแบคทีเรียรูปร่างท่อนและมีความหนาแน่นคล้ายกับบริเวณชั้นกลางและมีความหนาแน่นบริเวณ โพรงที่เกิดขึ้นมาก อาจเป็นช่องทางระบายออกของ

ก๊าซที่จุลินทรีย์สร้างขึ้นหรือเกิดการตายของจุลินทรีย์บางส่วนขณะสร้างความคุ้นเคย ให้เข้ากับสภาวะแวดล้อมใหม่

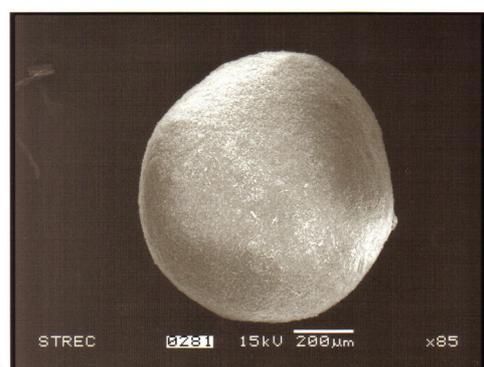
และหลังการทดลองเดินระบบ (ค) บริเวณชั้นในสุดของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์พบแบคทีเรียรูปร่างท่อนคล้าย *Methanothrix soehngeni* (De Zeeuw, 1987 อ้างถึงใน Hulshoff Pol และคณะ, 2004) อาจเกิดจากการเจริญของแบคทีเรียจากชั้นกลางเข้าไปสู่ชั้นในเนื่องจากน้ำเสียมีความเข้มข้นสูงจึงส่งผลให้แบคทีเรียภายในได้รับสารอาหารเพียงพอจึงเจริญเติบโตได้ดี บริเวณชั้นกลางและชั้นนอกสุดพบแบคทีเรียรูปร่างท่อนคล้าย *Methanothrix soehngeni* เช่นกัน และมีความหนาแน่นมาก แสดงถึงการเจริญเติบโตได้ดีของแบคทีเรียจึงสามารถเพิ่มจำนวนมากขึ้นและอาจเป็นสาเหตุให้เม็ดตะกอนจุลินทรีย์สร้างก๊าซเพิ่มมากขึ้นและดันให้เม็ดตะกอนจุลินทรีย์ขยายตัวจนแยกออกจากกัน

จากผลการศึกษาดังกล่าว แสดงให้เห็นว่าเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ที่นำมาทำการสร้างความคุ้นเคย ก่อนการดำเนินการทดลองสามารถปรับตัวเข้ากับสภาวะแวดล้อมใหม่ของระบบถึงสร้างก๊าซมีเทนที่ใช้บำบัดน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มได้ดี ส่งผลให้การเดินระบบมีประสิทธิภาพที่ดี

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



(ก)



(ข)



(ค)

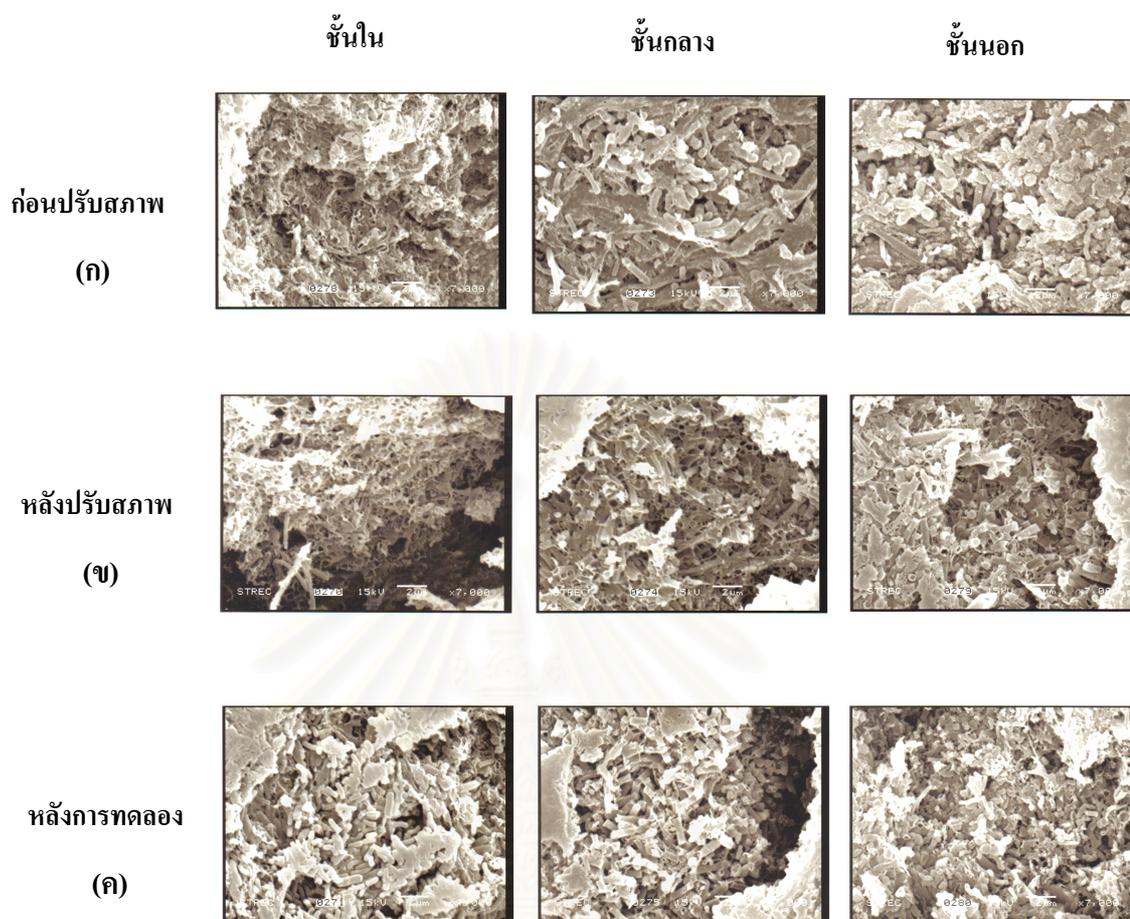
ภาพที่ 4.53 ลักษณะภายนอกของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ที่ใช้ในการทดลอง (กำลังขยาย $\times 85$)

(ก) ก่อนการปรับสภาพ

(ข) หลังการปรับสภาพ

(ค) หลังการทดลองเดินระบบ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาพที่ 4.54 ลักษณะชั้นต่างๆ ของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ที่ใช้ในการทดลอง (กำลังขยาย $\times 7,000$)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ

จากผลการศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มด้วยกระบวนการไร้อากาศสองขั้นตอน สามารถสรุปได้ ดังนี้

1. ค่าพีเอชเริ่มต้นที่เหมาะสมต่อการเดินระบบถังสร้างกรดนี้คือ 6.00 และค่าพีเอชของน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มที่ใช้ในการทดลองมีค่า 4.10 – 5.10 อยู่ในช่วงที่มีความเหมาะสมสำหรับการเดินระบบถังสร้างกรดจึงไม่มีความจำเป็นต้องทำการปรับสภาพของน้ำเสียก่อนเข้าระบบ และน้ำเสียที่ผ่านถังสร้างกรดมีปริมาณสภาพต่างเพิ่มขึ้นซึ่งส่งผลดีที่จะช่วยเพิ่มบีโอฟลูร์ให้กับถังสร้างก๊าซมีเทนในขั้นตอนที่สอง ลดการเติมสารเคมีเพิ่มสภาพต่าง

2. ระยะเวลาพักพักทางจุลศาสตร์ที่เหมาะสมสำหรับการเดินระบบถังสร้างกรดนี้คือ 14 วัน เดินระบบที่อุณหภูมิห้องช่วงการทำงานแบบมีไซฟิสิกของจุลินทรีย์ 27 -37 องศาเซลเซียส มีประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอยระเหยเฉลี่ยที่สภาวะคงที่ ร้อยละ 58.21 ± 4.69 มีประสิทธิภาพการสร้างกรดไขมันระเหยเฉลี่ยที่สภาวะคงที่ร้อยละ 84.64 ± 2.87

3. การเดินระบบถังสร้างก๊าซมีเทน มีสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการกำจัดสารอินทรีย์ที่อัตราภาระสารอินทรีย์ 28 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน (ความเข้มข้นของซีโอดีประมาณ $28,181.82 \pm 4,771.13$ มิลลิกรัมต่อลิตร) มีประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์เฉลี่ยที่สภาวะคงที่ร้อยละ 79.54 ± 2.77 ที่ระยะเวลาพักพักทางจุลศาสตร์ 24 ชั่วโมง เดินระบบที่อุณหภูมิห้องช่วงอุณหภูมิการทำงานแบบมีไซฟิสิก

4. ถังสร้างก๊าซมีเทนแบบยูเอเอสบีในขั้นตอนที่สองนี้เมื่อใช้บำบัดน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม จะมีความจุบีโอฟลูร์สูง ทำให้ค่าพีเอชอยู่ในช่วงที่ใกล้ค่าความเป็นกลางมีค่าพีเอชภายในระบบประมาณ 7.5 ซึ่งเหมาะสมสำหรับการเจริญเติบโตและการทำงานของจุลินทรีย์สร้างก๊าซมีเทน ระบบจึงทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพและมีเสถียรภาพ และมีความต้องการสารเคมีเพิ่มสภาพต่างน้อยมาก

5. อัตราการสร้างก๊าซชีวภาพมีความสัมพันธ์กับปริมาณการกำจัดกรดไขมันระเหยและประสิทธิภาพการสร้างก๊าซมีเทนของการทดลองนี้ประมาณ 0.11 – 0.15 ลิตรต่อกรัมบีโอดีที่ถูก

กำจัด ร้อยละก๊าซมีเทนโดยปริมาตร (%CH₄) มีค่าประมาณร้อยละ 65.7 ± 1.37 อัตราการระสารอินทรีย์ที่เหมาะสมสำหรับสร้างก๊าซมีเทน คือ 20 , 25 และ 28 กิโลกรัมชีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน

6. เมื่อดตะกอนจุลินทรีย์ที่เติมลงในถังปฏิกริยาสร้างก๊าซมีเทนแบบยูเอเอสบีปริมาณ 20,000 มิลลิกรัมต่อลิตรถังปฏิกริยา มีปริมาณเพียงพอสำหรับการเดินระบบอย่างมีประสิทธิภาพและสามารถปรับตัวเข้ากับสภาวะแวดล้อมและลักษณะของน้ำเสียและเจริญเติบโตได้ดี จุลินทรีย์ที่พบภายในเมื่อดตะกอนจุลินทรีย์ชนิดเด่นมีรูปร่างแบบท่อน มีลักษณะคล้าย *Methanothrix soehngeni*

ข้อเสนอแนะ

1. เนื่องจากปัญหาที่เกิดจากตะกอนแขวนลอยอุดตันช่องว่างระหว่างเมื่อดตะกอนจุลินทรีย์จึงอาจทำการปรับปรุงถังปฏิกริยาแบบยูเอเอสบีโดยการติดตั้งใบพัดภายในถังปฏิกริยาเพื่อช่วยกวนเป็นครั้งคราว
2. ทดลองเดินระบบด้วยถังปฏิกริยาที่มีปริมาตรสูงขึ้นซึ่งอาจช่วยลดปัญหาที่เกิดจากการอุดตันของตะกอนแขวนลอยภายในถังปฏิกริยา
3. ศึกษาการทดลองเดินระบบแบบไร้อากาศสองขั้นนี้ที่สภาวะที่เหมาะสมด้วยเมื่อดตะกอนจุลินทรีย์ที่สร้างขึ้นจากน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม
4. ศึกษาการเดินระบบแบบไร้อากาศสองขั้นนี้ที่สภาวะที่เหมาะสม โดยใช้ถังปฏิกริยา ระดับ โรงงานนำทาง และระดับ โรงงาน
5. ศึกษาเปรียบเทียบผลของระยะเวลาพักทางชลศาสตร์ของถังสร้างก๊าซมีเทนแบบยูเอเอสบีที่เหมาะสมกับน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม
6. ศึกษาทดลองเดินระบบเปรียบเทียบกับช่วงการทำแบบเทอร์โมฟิลิก
7. ศึกษาการเพิ่มขึ้นตอนการบำบัดโดยการติดตั้งถังปฏิกริยาเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดและลดตะกอนแขวนลอย
8. ศึกษาการนำตะกอนส่วนเกินที่ทิ้งออกจากระบบไปใช้ประโยชน์ต่อไป เช่น การพัฒนาปุ๋ยชีวภาพ เป็นต้น

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

- คณะกรรมการจัดทำคู่มือวิเคราะห์น้ำเสีย สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย. 2540. คู่มือวิเคราะห์น้ำเสีย. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพมหานคร: สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย.
- ชำนาญ ภายประสิทธิ์. 2538. การใช้ยูเอเอสบีในการบำบัดน้ำเสียเข้มข้นสูง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ทรงพล ครามโกมุท. 2544. การกำจัดสีจากน้ำเสียกากสำโดยใช้ระบบยูเอเอสบีที่ทำงานร่วมกับระบบกรองไร้อากาศ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ทวีชัย ชีระเศรษฐนันท์. 2540. การใช้ยูเอเอสบีบำบัดน้ำทิ้งจากบ่อกรดแบบไร้ออกซิเจน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ธนาวัฒน์ รักกมล, สุเมธ ไชยประพัทธ์ และอุดมผล พิชนไพบุรย์. 2549. ประสิทธิภาพของระบบบำบัดน้ำเสียเอเอสบีอาร์ แบบเทอร์โมฟิลิกและมีไซฟิลิกในการบำบัดน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม. [CD-ROM]. กรุงเทพมหานคร: สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม. แหล่งที่มา: เอกสารประกอบการประชุมวิชาการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติครั้งที่ 5 [8 มีนาคม 2549]
- นาฏนดา ชรินทร์วรกุลต์. 2537. ระบบตัวกลางกรอง-ยูเอเอสบีแบบอุณหภูมิสูงชนิดสองขั้นตอนสำหรับบำบัดน้ำกากสำ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาเคมีเทคนิค บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ปริญญา วัลย์ลอย. 2548. การศึกษาผลของการบำบัดเบื้องต้นแบบกายภาพ-เคมี ต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานผลิตน้ำมันปาล์มโดยถังปฏิกรณ์แบบยูเอเอสบี. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- มันสิน ตันกุลเวศม์. 2542. เทคโนโลยีบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรม. เล่มที่ 2, พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- มันสิน ตันกุลเวศม์ และมันรัช ตันกุลเวศม์. 2545. เคมีวิทยาของน้ำและน้ำเสีย. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สุบัณฑิต นิมรัตน์. 2548. จุลชีววิทยาของน้ำเสีย. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

- สุวิทย์ สุวรรณโณ. 2544. การย่อยสลายน้ำเสียจากโรงงานปาล์มน้ำมันโดยกระบวนการทางชีวภาพแบบไร้อากาศเพื่อผลิตก๊าซมีเทน. ภาควิชาอุตสาหกรรมเกษตร คณะเกษตรศาสตร์ นครศรีธรรมราช สถาบันเทคโนโลยีราชมงคลนครศรีธรรมราช.
- อิสระ รัตนปรียานุช. 2546. การบำบัดน้ำเสียจากสาโดยใช้ระบบแอนแอโรบิกไฮบริดฟิลเตอร์ที่มีถังหมักกรวดน้ำ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ. ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- อุตสาหกรรม, กระทรวง. กรมโรงงานอุตสาหกรรม. สำนักเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม. 2540. คู่มือการจัดการสิ่งแวดล้อมอุตสาหกรรมการสกัดน้ำมันปาล์ม. (ม.ป.ท.).
- อุตสาหกรรม, กระทรวง. กรมโรงงานอุตสาหกรรมและสมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย. 2545. ตำราระบบบำบัดมลพิษน้ำ. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย.

ภาษาอังกฤษ

- Castro-Gozález, A.; Enríquez-Poy, M. and Durán-de-Bazúa, C. 2001. Design, construction, and starting-up of an anaerobic reactor for the stabilisation, handling, and disposal of excess biological sludge generated in a wastewater treatment plant. Anaerobe 7: 143-149.
- Angenent, L.; and Dague, R.R.. 1996. A laboratory-scale comparison of the UASB and ASBR processes. Proceedings of the 50th Industrial Waste Conference, pp.365-377. United States of America: ANN ARBOR PRESS.
- American Public Health Association, American Water Works Association and Water Pollution Control Federation. 1998. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 20 th ed. New York: APHA .
- Azbar, N.; Ursillo, P. and Speece, R.E. 2001. Effect of process configuration and substrate complexity on the performance of anaerobic process. Wat. Res. 35: 817-829.
- Beal, L.J. and Raman, D.R. 2000. Sequential two-stage anaerobic treatment of confectionery wastewater. J.agric. Engng Res. 76: 211-217.
- Blonskaja, V.; Menert, A. and Vilu, R. 2003. Use of two-stage anaerobic treatment for distillery waste. Advances in Environmental Research 7: 671-678.
- Boonyakitsombut, S. 2004. Anaerobic granulation in UASB reactors. EEAT Yearbook and Directory.

- Borja, R.; Banks, C.J.; and Sanchez, E.. 1996. Anaerobic treatment of palm oil mill effluent in two-stage up-flow anaerobic sludge blanket (UASB) system. Journal of Biotechnology 45: 125-135.
- Caixeta, C.E.T.; Cammarota, M.C. and Xavier, A.M.F. 2002. Slaughterhouse wastewater treatment: evaluation of a new three-phase separation system in a UASB reactor. Bioresource Technology 81: 61-69.
- Cheremisinoff, P.N. 1994. Biomanagement of wastewater and wastes. U.S.A: PTR Prentice Hall.
- Dararat, S. 1996. Effect of sub-optimal temperature and pH performance of UASB granule Methanothix and Methanosarcina. Master's Thesis. Department of engineering in environmental and water resources engineering, Vanderbilt University.
- Gray, N.F. 1989. Biology of wastewater treatment. New York: Oxford University Press.
- Halalshah, M.; Sawajneh, Z.; Zu'bi, M.; Zeeman, G.; Lier, J.; Fayyad, M. and Lettinga, G. 2005. Treatment of strong domestic sewage in a 96 m³ UASB reactor operated at ambient temperature: two-stage versus single-stage reactor. Bioresource Technology 96: 577-585.
- Herrmann, A.P. and Janke, H.D. 2001. Cofermentation of rutin and hesperidin during two-stage anaerobic pre-treatment of high-loaded brewery wastewater. Wat. Res. 35: 2583-2588.
- Hulshoff Pol, L.W.; S.I. de Castro Lopes; Lettinga, G. and Lens P.N.L. 2004. Anaerobic sludge granulation. Water Research 38: 1376-1389.
- Kaijun, W. 1994. Integrated anaerobic and aerobic treatment of sewage. Doctoral dissertation. Department of Environmental Technology, Wageningen University.
- Klinsukont, C. and Ploypatrapinyo, P. 2000. Biogas generation from UASB pilot plant reactor of starch wastewater treatment. Bangkok: Thailand Institute of Scientific and Technological Research. (Mimeographed)
- Klinsukont, C.; Teekakul, S.; Disathien, P.; Suchakarn, C. and Lekrungrongkit, J. 1999. Study on sludge granulation in UASB reactor. Bangkok: Thailand Institute of Scientific and Technological Research. (Mimeographed)
- Lin, K. and Yang, Z. 1991. Technical review on the UASB process. Intern J. Environmental Studies 39: 203-222.

- Mahmoud, N.; Zeeman, G.; Gijzen, H. and Lettinga, G. 2004. Anaerobic sewage treatment in a one-stage UASB reactor and a combined UASB-Digestion system. Water Research 38: 2348-2358.
- Najafpour, G.D.; Zinatizadeh, A.A.L.; Mahamad, A.R.; Isa, M.H. and Nasrollahzdeh, H. 2006. High-rate anaerobic digestion of palm oil mill effluent in an upflow anaerobic sludge-fixed film bioreactor. Process Biochemistry 41: 370-379.
- Ng, W.J.; Wong, K.K.; and Chin, K.K.. 1985. Technical note: Two-phase anaerobic treatment kinetics of palm oil wastes. Water Research 19: 667-669.
- Prasertsan, S. and Prasertsan, P. 1996. Biomass residues from palm oil mills in Thailand: an overview on quantity and potential usage. Biomass and Bioenergy 11: 387-395.
- Sanders, W.T.M. 2001. Anaerobic hydrolysis during the digestion of complex substrate. Wageningen university dissertation no.2953[online]. Available form: <http://library.wur.nl/wda/abstracts/ab2953.html> [2005, July 5].
- Seghezzi, L.; Zeeman, G.; Lier, J.B.; Hamelers, H.V.M.; and Lettinga, G. 1998. A review: The anaerobic treatment of sewage in UASB and EGSB reactors. Bioresource Technology 65: 175-190.
- Speece, R.E. 1996. Anaerobic biotechnology for industrial wastewaters. Tennessee: Archae Press.
- Tchobanoglous, G. and Burton, F.L. 1991. Wastewater engineering treatment disposal and reuse. 3 rd ed. Singapore: McGraw-Hill.
- Tchobanoglous, G.; Burton, F.L. and Stensel H.D. 2004. Wastewater engineering treatment disposal and reuse. 4 th ed. Singapore: McGraw-Hill.
- Ugoji, O.E. 1997. Anaerobic digestion of palm oil mill effluent and its utilization as fertilizer for environmental protection. Renewable Energy 10: 291-294.
- Van Langerak, E.P.A.; Ramaekers, H.; Wiechers, J.; Veeken, A.H.M.; Hamelers, H.V.M. and Lettinga, G. 2000. Impact of location of CaCO₃ precipitation on the development of intact anaerobic sludge. Wat. Res. 34: 437-446.
- Wang, Z. and Banks, C.J. 2003. Evaluation of a two stage anaerobic digester for the treatment of mixed abattoir wastes. Process Biochemistry 38: 1267-1273.
- Wiegant, W.M. and Zeeman, G. 1986. The mechanism of ammonia inhibition in the thermophilic digestion of livestock wastes. Agricultural wastes 16: 243-253.

Yacob, S.; Hassan, M.A.; Shirai, Y.; Wakisaka, M. and Subash, S. 2006. Baseline study of methane emission from anaerobic ponds of palm oil mill effluent treatment. Science of the total Environment 366: 187-196.

Yacob, S.; Shirai, Y.; Hassan, M.A.; Wakisaka, M. and Subash, S. 2006. Start-up operation of semi-commercial closed anaerobic digester for palm oil mill effluent treatment. Process Biochemistry 41: 962-964.



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก
สารอาหารเสริม

ตารางที่ ก.1 สารอาหารเสริม (Vanderbilt media)

สารเคมี	ความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)
KI	10
MnCl ₂ (H ₂ O) ₄	10
FeCl ₂ (H ₂ O) ₆	40
CoCl ₂ (H ₂ O) ₆	10
NH ₄ Cl	1200
(NH ₄) ₂ HPO ₄	80
(NaPO ₃) ₆	10
KCl	400
CaCl ₂ (H ₂ O) ₂	748
MgSO ₄ (H ₂ O) ₃	463.5
Cysteine	10
NaHCO ₃	6000
Na ₂ S(H ₂ O) ₉	300
Na ₂ SeO ₄	0.50
AlCl ₃ (H ₂ O) ₆	0.50
H ₃ BO ₃	0.50
CuCl ₂ (H ₂ O) ₆	0.50
Na ₂ MoO ₄ (H ₂ O) ₂	0.50
NH ₄ VO ₃	0.50
NaWO ₄ (H ₂ O) ₂	0.50
NiCl ₂ (H ₂ O) ₆	0.50
ZnCl ₂	0.50

ที่มา : Dararat, 1996

ภาคผนวก ข

การคำนวณปริมาณเมล็ดตะกอนจุลินทรีย์ที่เติมลงในถังปฏิกริยาเยอเอสบี

$$\begin{aligned} \text{กำหนดให้ปริมาณเมล็ดตะกอนจุลินทรีย์ภายในถังปฏิกริยา} &= 20,000 \text{ มิลลิกรัมต่อลิตร} \\ \text{ปริมาตรของถังปฏิกริยา} &= 3.139 \text{ ลิตร} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น ต้องเติมเมล็ดตะกอนจุลินทรีย์ลงในถังปฏิกริยา} \\ &= 20,000 \text{ มิลลิกรัมต่อลิตร} \times 3.139 \text{ ลิตร} \\ &= 62,780 \text{ มิลลิกรัม} \end{aligned}$$

$$\text{เมล็ดตะกอนจุลินทรีย์มีความเข้มข้นของแข็งแขวนลอยของ} \approx 62,780 \text{ มิลลิกรัมต่อลิตร}$$

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น ต้องเติมเมล็ดตะกอนจุลินทรีย์ปริมาตร} &= 62,780 \text{ มิลลิกรัม} \\ &= 63,050 \text{ มิลลิกรัมต่อลิตร} \\ &= 0.9957 \text{ ลิตร} \\ &\approx 1 \text{ ลิตร} \end{aligned}$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ค

การคำนวณอัตราการสารถีอินทรีย์

เริ่มต้นการทดลอง

กำหนด [COD] = 4,000 mg/L และ HRT = 1 วัน สามารถคำนวณค่าการสารถีอินทรีย์ (gCOD /gVSS-d) ได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
 \text{COD loading} &= 4 \text{ gCOD/L} \times 3.139 \text{ L/d} \\
 (\text{load 1}) &= 12.56 \text{ gCOD/d} \\
 &= \frac{12.56 \text{ gCOD/d}}{62.78 \text{ gVSS}} \\
 &= 0.20 \text{ gCOD/gVSS-d}
 \end{aligned}$$

อัตราการสารถีอินทรีย์ 4 กิโลกรัมชีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน

$$\text{COD loading} = 0.2 \text{ gCOD/gVSS-d}$$

$$\begin{aligned}
 1 \text{ gVSS ใช้ COD} & 0.2 \text{ gCOD/d} \\
 62.78 \text{ gVSS ใช้ COD} & 62.78 \times 0.2 = 12.56 \text{ gCOD/d}
 \end{aligned}$$

1 วัน ป้อนน้ำเสีย 3.139 L

$$\begin{aligned}
 [\text{COD}] &= \frac{12.56 \text{ gCOD/d}}{3.139 \text{ L/d}} \\
 &= 4 \text{ gCOD/L} \\
 &= 4,000 \text{ mgCOD/L} \\
 \text{OLR} &= 4,000 \text{ mg/L} \times 2.2 \text{ mL/min} \div 3.139 \text{ L} \\
 &= 4,000 \text{ mg/L} \times 1,000 \text{ L/m}^3 \times (1/10^6) \text{ kgCOD/mg} \times 2.2 \text{ mL/min} \\
 &\quad \times (1/10^6) \text{ m}^3/\text{mL} \times 24 \times 60 \text{ min/d} \div 3.139 \text{ L} \\
 &= 4,000 \times (3.168 \times 10^{-6}) \text{ kgCOD/d} \div 3.139 \text{ L} \\
 &= 1.2672 \times 10^{-2} \div 3.139 \text{ L} \\
 &= (1.2672 \times 10^{-2}) \div (3.139 \times 10^{-3}) \text{ kgCOD/m}^3\text{-d} \\
 &= 4.037 \approx 4 \text{ kgCOD/m}^3\text{-d}
 \end{aligned}$$

อัตราการระสารอินทรีย์ 10 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน

$$\text{COD loading} = 0.5 \text{ gCOD/gVSS-d}$$

$$\begin{array}{ll} 1 \text{ gVSS ใช้ COD} & 0.5 \text{ gCOD/d} \\ 62.78 \text{ gVSS ใช้ COD} & 62.78 \times 0.5 = 31.39 \text{ gCOD/d} \end{array}$$

1 วัน ป้อนน้ำเสีย 3.139 L

$$\begin{aligned} [\text{COD}] &= \frac{31.39 \text{ gCOD/d}}{3.139 \text{ L/d}} \\ &= 10 \text{ gCOD/L} \\ &= 10,000 \text{ mgCOD/L} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{OLR} &= 10,000 \times (3.168 \times 10^{-6}) \text{ kgCOD/d} \div 3.139 \text{ L} \\ &= 3.168 \times 10^{-2} \text{ kgCOD/d} \div 3.139 \text{ L} \\ &= (3.168 \times 10^{-2}) \div (3.139 \times 10^{-3}) \text{ kgCOD/m}^3\text{-d} \\ &= 10.009 \approx 10 \text{ kgCOD/m}^3\text{-d} \end{aligned}$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

อัตราการระสารอินทรีย์ 15 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน

$$\text{COD loading} = 0.75 \text{ gCOD/gVSS-d}$$

$$\begin{array}{ll} 1 \text{ gVSS ใช้ COD} & 0.75 \text{ gCOD/d} \\ 62.78 \text{ gVSS ใช้ COD} & 62.78 \times 0.75 = 47.09 \text{ gCOD/d} \end{array}$$

1 วัน ป้อนน้ำเสีย 3.139 L

$$\begin{aligned} [\text{COD}] &= \frac{47.09 \text{ gCOD/d}}{3.139 \text{ L/d}} \\ &= 15 \text{ gCOD/L} \\ &= 15,000 \text{ mgCOD/L} \\ \text{OLR} &= 15,000 \times (3.168 \times 10^{-6}) \text{ kgCOD/d} \div 3.139 \text{ L} \\ &= 4.752 \times 10^{-2} \text{ kgCOD/d} \div 3.139 \text{ L} \\ &= (4.752 \times 10^{-2}) \div (3.139 \times 10^{-3}) \text{ kgCOD/m}^3\text{-d} \\ &= 15.139 \approx 15 \text{ kgCOD/m}^3\text{-d} \end{aligned}$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

อัตราการสารอินทรีย์ 20 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน

$$\text{COD loading} = 1.00 \text{ gCOD/gVSS-d}$$

$$\begin{array}{ll} 1 \text{ gVSS ใช้ COD} & 1.00 \text{ gCOD/d} \\ 62.78 \text{ gVSS ใช้ COD} & 62.78 \times 1.00 = 62.78 \text{ gCOD/d} \end{array}$$

1 วัน ป้อนน้ำเสีย 3.139 L

$$\begin{aligned} [\text{COD}] &= \frac{62.78 \text{ gCOD/d}}{3.139 \text{ L/d}} \\ &= 20 \text{ gCOD/L} \\ &= 20,000 \text{ mgCOD/L} \\ \text{OLR} &= 20,000 \times (3.168 \times 10^{-6}) \text{ kgCOD/d} \div 3.139 \text{ L} \\ &= 6.336 \times 10^{-2} \text{ kgCOD/d} \div 3.139 \text{ L} \\ &= (6.336 \times 10^{-2}) \div (3.139 \times 10^{-3}) \text{ kgCOD/m}^3\text{-d} \\ &= 20.185 \approx 20 \text{ kgCOD/m}^3\text{-d} \end{aligned}$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

อัตราการสารอินทรีย์ 25 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน

$$\text{COD loading} = 1.25 \text{ gCOD/gVSS-d}$$

$$\begin{array}{ll} 1 \text{ gVSS ใช้ COD} & 1.25 \text{ gCOD/d} \\ 62.78 \text{ gVSS ใช้ COD} & 62.78 \times 1.25 = 78.48 \text{ gCOD/d} \end{array}$$

1 วัน ป้อนน้ำเสีย 3.139 L

$$\begin{aligned} [\text{COD}] &= \frac{78.48 \text{ gCOD/d}}{3.139 \text{ L/d}} \\ &= 25 \text{ gCOD/L} \\ &= 25,000 \text{ mgCOD/L} \\ \text{OLR} &= 25,000 \times (3.168 \times 10^{-6}) \text{ kgCOD/d} \div 3.139 \text{ L} \\ &= 7.9 \times 10^{-2} \text{ kgCOD/d} \div 3.139 \text{ L} \\ &= (7.9 \times 10^{-2}) \div (3.139 \times 10^{-3}) \text{ kgCOD/m}^3\text{-d} \\ &= 25.167 \approx 25 \text{ kgCOD/m}^3\text{-d} \end{aligned}$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

อัตราการระสารอินทรีย์ 28 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน

$$\begin{aligned}
 \text{OLR} &= 28,000 \times (3.168 \times 10^{-6}) \text{ kgCOD/d} \div 3.139 \text{ L} \\
 &= 8.9 \times 10^{-2} \text{ kgCOD/d} \div 3.139 \text{ L} \\
 &= (8.9 \times 10^{-2}) \div (3.139 \times 10^{-3}) \text{ kgCOD/m}^3\text{-d} \\
 &= 28.353 \quad \approx \quad 28 \text{ kgCOD/m}^3\text{-d}
 \end{aligned}$$



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ง

ข้อมูลก๊าซชีวภาพและอุณหภูมิจากการเดินระบบถังสร้างก๊าซมีเทน

ตารางที่ ง.1 ปริมาณก๊าซชีวภาพและอุณหภูมิจากการเดินระบบถังสร้างก๊าซมีเทน ที่อัตราภาระสารอินทรีย์ 4 กิโลกรัมชีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน

วันที่ ทำการทดลอง	อุณหภูมิ (องศา เซลเซียส)	ก๊าซชีวภาพ (มิลลิลิตร)		ก๊าซมีเทน
		ณ อุณหภูมิห้อง	ณ สภาวะมาตรฐาน (25 องศาเซลเซียส)	ณ สภาวะมาตรฐาน (25 องศาเซลเซียส)
1	34.0	1,356.23	1,316.47	855.71
2	35.0	1,610.40	1,558.11	1,012.77
3	36.0	2,221.60	2,142.51	1,392.63
4	35.0	1,444.25	1,397.36	908.28
5	35.0	1,708.64	1,653.16	1,074.56
6	34.0	852.07	827.09	537.61
7	36.0	4,379.38	4,223.48	2,745.26
8	36.0	1,325.27	1,278.09	830.76
9	29.0	203.85	201.15	130.75
10	35.0	1,960.85	1,897.19	1,233.17
11	36.0	2,642.91	2,548.83	1,656.74
12	36.0	2,355.83	2,271.97	1,476.78
13	37.0	3,458.39	3,324.52	2,160.94
14	32.0	3,338.52	3,261.90	2,120.23
15	36.0	3,728.93	3,596.18	2,337.52
16	35.0	3,556.70	3,441.22	2,236.79
17	34.0	2,436.25	2,364.83	1,537.14
18	37.0	2,574.41	2,474.76	1,608.59
19	33.0	2,412.34	2,349.27	1,527.03
20	27.0	2,293.47	2,278.18	1,480.82
21	33.0	2,654.75	2,585.34	1,680.47
22	35.0	2,548.31	2,465.57	1,602.62
23	32.0	1,375.80	1,344.22	873.75
24	37.5	1,486.70	1,426.85	927.45
25	37.0	1,858.06	1,786.14	1,160.99
26	34.0	1,850.65	1,796.40	1,167.66
27	34.0	1,586.68	1,540.16	1,001.11
28	34.0	1,337.70	1,298.48	844.01
29	29.0	1,106.74	1,092.08	709.85

ตารางที่ ง.2 ปริมาณก๊าซชีวภาพและอุณหภูมิต่ออัตราการระเหยอินทรีย์ 10 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน

วันที่ทำการทดลอง	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ก๊าซชีวภาพ (มิลลิลิตร)		ก๊าซมีเทน
		ณ อุณหภูมิห้อง	ณ สภาวะมาตรฐาน (25 องศาเซลเซียส)	ณ สภาวะมาตรฐาน (25 องศาเซลเซียส)
1	33.0	4,063.26	3,957.03	2,611.64
2	34.0	5,121.75	4,971.60	3,281.26
3	35.0	5,001.90	4,839.50	3,194.07
4	35.0	6,578.38	6,364.80	4,200.77
5	32.0	4,589.81	4,484.47	2,959.75
6	28.0	3,983.19	3,943.49	2,602.70
7	30.0	4,274.66	4,204.12	2,774.72
8	30.5	6,702.55	6,581.09	4,343.52
9	30.0	4,741.03	4,662.80	3,077.44
10	31.0	6,713.20	6,580.70	4,343.26
11	33.0	6,693.95	6,518.94	4,302.50
12	33.0	7,172.90	6,985.37	4,610.35
13	34.0	5,358.14	5,201.06	3,432.70
14	33.0	3,925.39	3,822.77	2,523.03
15	32.0	4,045.48	3,952.63	2,608.74
16	31.0	3,489.38	3,420.51	2,257.54
17	32.0	4,374.68	4,274.28	2,821.02
18	34.0	3,625.17	3,518.89	2,322.47
19	32.0	6,790.44	6,634.59	4,378.83

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ง.3 ปริมาณก๊าซชีวภาพและอุณหภูมิจากถังหมักที่อัตราการระเหยอินทรีย์ 15 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน

วันที่ทำการทดลอง	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ก๊าซชีวภาพ (มิลลิลิตร)		ก๊าซมีเทน
		ณ อุณหภูมิห้อง	ณ สภาวะมาตรฐาน (25 องศาเซลเซียส)	ณ สภาวะมาตรฐาน (25 องศาเซลเซียส)
1	32.0	6,790.44	6,634.59	4,511.52
2	28.0	4,566.90	4,521.38	3,074.54
3	35.0	2,235.03	2,162.46	1,470.48
4	31.0	4,636.53	4,545.02	3,090.61
5	36.0	5,074.89	4,894.23	3,328.08
6	36.0	5,163.88	4,980.05	3,386.44
7	36.0	4,830.09	4,658.15	3,167.54
8	36.0	5,063.74	4,883.48	3,320.76
9	33.0	4,323.00	4,209.98	2,862.79
10	34.0	1,501.56	1,457.54	991.13
11	32.0	4,680.00	4,572.59	3,109.36
12	31.0	7,373.28	7,227.75	4,914.87
13	34.0	6,390.77	6,203.42	4,218.32
14	31.0	6,675.90	6,544.14	4,450.01
15	30.0	4,881.36	4,800.81	3,264.55
16	27.0	3,693.37	3,668.75	2,494.75
17	32.0	2,943.07	2,875.52	1,955.36
18	29.0	2,735.62	2,699.39	1,835.58
19	30.0	2,231.89	2,195.06	1,492.64
20	29.0	3,410.53	3,365.36	2,288.44
21	25.0	1,775.72	1,775.72	1,207.49
22	30.0	1,333.53	1,311.52	891.84
23	32.0	1,622.54	1,585.30	1,078.00
24	30.0	2,435.71	2,395.52	1,628.95
25	32.0	1,902.92	1,859.25	1,264.29
26	33.0	3,007.47	2,928.84	1,991.61
27	35.0	2,114.62	2,045.96	1,391.26
28	30.0	3,410.53	3,354.25	2,280.89
29	30.0	2,735.62	2,690.48	1,829.52

ตารางที่ ง.4 ปริมาณก๊าซชีวภาพและอุณหภูมิต่ออัตราการสารอินทรีย์ 20 กิโลกรัมซีไอต่อ
ลูกบาศก์เมตรต่อวัน

วันที่ ทำการทดลอง	อุณหภูมิ (องศา เซลเซียส)	ก๊าซชีวภาพ (มิลลิเมตร)		ก๊าซมีเทน
		ณ อุณหภูมิห้อง	ณ สภาวะมาตรฐาน (25 องศาเซลเซียส)	ณ สภาวะมาตรฐาน (25 องศาเซลเซียส)
1	30.0	7,027.00	6,911.04	4,423.07
2	29.0	3,394.61	3,349.65	2,143.77
3	28.0	3,016.92	2,986.85	1,911.58
4	32.0	2,451.06	2,394.81	1,532.68
5	32.0	1,738.73	1,698.82	1,087.25
6	33.0	3,256.05	3,170.92	2,029.39
7	33.5	2,883.52	2,803.55	1,794.27
8	34.0	4,437.33	4,307.25	2,756.64
9	32.0	8,290.09	8,099.83	5,183.89
10	32.0	3,456.00	3,376.68	2,161.08
11	33.0	3,214.25	3,130.22	2,003.34
12	30.0	4,600.87	4,524.95	2,895.97
13	32.0	3,856.00	3,767.50	2,411.20

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ง.5 ปริมาณก๊าซชีวภาพและอุณหภูมิต่ออัตราการระเหยอินทรีย์ 25 กิโลกรัมชีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน

วันที่ทำการทดลอง	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ก๊าซชีวภาพ (มิลลิเมตร)		ก๊าซมีเทน
		ณ อุณหภูมิห้อง	ณ สภาวะมาตรฐาน (25 องศาเซลเซียส)	ณ สภาวะมาตรฐาน (25 องศาเซลเซียส)
1	33.0	5,040.51	4,908.73	3,239.76
2	30.0	6,577.78	6,469.24	4,269.70
3	33.0	4,577.98	4,458.29	2,942.47
4	32.0	2,858.92	2,793.31	1,843.58
5	32.0	5,211.43	5,091.82	3,360.60
6	31.0	3,696.26	3,623.31	2,391.38
7	32.0	4,383.93	4,283.32	2,826.99
8	30.0	3,413.62	3,357.29	2,215.81
9	31.0	5,546.02	5,436.56	3,588.13
10	27.0	7,041.76	6,994.81	4,616.58
11	29.0	7,685.96	7,584.16	5,005.55
12	32.0	3,475.57	3,395.80	2,241.23
13	33.5	9,509.07	9,245.36	6,101.94
14	32.0	13,784.62	13,468.25	8,889.05
15	33.0	6,548.21	6,377.01	4,208.83
16	32.0	8,613.08	8,415.40	5,554.17
17	34.0	9,817.12	9,529.32	6,289.35
18	31.0	7,200.00	7,057.89	4,658.21
19	31.0	4,779.00	4,684.68	3,091.89
20	29.0	6,101.53	6,020.72	3,973.67
21	32.0	10,562.24	10,319.83	6,811.09
22	34.0	9,731.33	9,446.05	6,234.39
23	31.0	8,944.10	8,767.57	5,786.60
24	30.0	8,613.08	8,470.95	5,590.83

ตารางที่ ๓.6 ปริมาณก๊าซชีวภาพและอุณหภูมิต่ออัตราการสารอินทรีย์ 28 กิโลกรัมซีไอต่อ
ลูกบาศก์เมตรต่อวัน

วันที่ ทำการทดลอง	อุณหภูมิ (องศา เซลเซียส)	ก๊าซชีวภาพ (มิลลิลิตร)		ก๊าซมีเทน
		ณ อุณหภูมิห้อง	ณ สภาวะมาตรฐาน (25 องศาเซลเซียส)	ณ สภาวะมาตรฐาน (25 องศาเซลเซียส)
1	33.0	6,280.00	6,115.82	3,975.28
2	34.0	4,050.28	3,931.54	2,555.50
3	34.0	4,095.00	3,974.95	2,583.72
4	33.5	2,119.18	2,060.41	1,339.27
5	34.0	3,019.92	2,931.39	1,905.40
6	32.0	3,340.31	3,268.65	2,121.37
7	32.0	2,982.00	2,913.56	1,893.81
8	30.0	2,663.58	2,619.63	1,702.76
9	30.0	2,098.60	2,063.97	1,341.58
10	33.5	4,120.00	4,005.74	2,603.73
11	35.0	3,542.39	3,427.38	2,227.80

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวจิรวรรณ ออตตะกุล เกิดเมื่อวันที่ 4 มิถุนายน พ.ศ.2523 ที่จังหวัดราชบุรี จบการศึกษาปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต(วท.บ.) สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม จากคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร เมื่อปี พ.ศ.2546

ผลงานทางวิชาการที่ผ่านมาได้เข้าร่วมเสนอบทความเรื่อง การบำบัดน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มด้วยกระบวนการไร้ออกซิเจนสองขั้นตอน ในการประชุมวิชาการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติครั้งที่ 5 ระหว่างวันที่ 8-9 มีนาคม พ.ศ.2549 ณ โรงแรมสยามซิตี้ กรุงเทพฯ



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย