

การบำบัดน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มด้วยกระบวนการ
แบบไร้อากาศสองขั้นตอน



นางสาวจิรวรรณ ออตะยะกุล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม (สหสาขาวิชา)
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2549
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

Miss Jirawan Ortayagul

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

491467

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การบำบัดน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มด้วยกระบวนการ
แบบไร้อากาศสองขั้นตอน

โดย

นางสาวจิรวรรณ ออดยะกุล

สาขาวิชา

วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชาญวิทย์ โฆษิตานนท์


อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

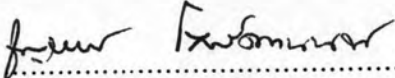
ดร. สมชาย ดารารัตน์

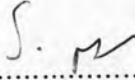
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

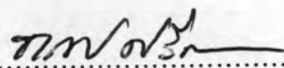
..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ม.ร.ว. ภัทยา ติงศภัทิย์)


คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

 ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. สมใจ เพ็งปรีชา)

 อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชาญวิทย์ โฆษิตานนท์)

 อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(ดร. สมชาย ดารารัตน์)

 กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. ธเรศ ศรีสฤติย์)

 กรรมการ
(นาย ไชยยุทธ กลิ่นสุคนธ์)

จิรวรรณ ออตยะกุล : การบำบัดน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มด้วยกระบวนการแบบ
 ไร้อากาศสองขั้นตอน (TREATMENT OF PALM OIL MILL WASTEWATER BY
 TWO-STAGE ANAEROBIC PROCESS) อ.ที่ปรึกษา: ผศ.ดร.ชาญวิทย์ โฆษิตานนท์,
 อ.ที่ปรึกษาร่วม: ดร.สมชาย คารารัตน์, 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 เติมน้ำที่
 อุณหภูมิห้อง การวิจัยครั้งนี้มีจุดประสงค์ในการหาสภาวะการไฮโดรไลซิสที่เหมาะสมเพื่อกำจัด
 ของแข็งแขวนลอยระเหย เปลี่ยนสารอินทรีย์ให้กลายเป็นกรดไขมันระเหย และหาประสิทธิภาพ
 ของการแบ่งขั้นตอนภายใต้สภาวะคงตัว ถึงปฏิกริยาเอชยูเอสบีได้ค่าเดินระบบที่ค่าพีเอชเริ่มต้น
 6.00 และระยะเวลาพักทางชีวศาสตร์ 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 ที่ระยะเวลาพักทางชีว
 ศาสตร์ 24 ชั่วโมง ที่อัตราภาระสารอินทรีย์ 28 กิโลกรัมซีไอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน องค์กรประกอบ
 ก๊าซมีเทนในก๊าซชีวภาพ มีค่าร้อยละ 65.7 ± 1.37 และมีประสิทธิภาพการสร้างก๊าซมีเทน $0.11 -$
 0.15 ลิตรต่อกรัมบีไอดีที่ถูกกำจัด สภาพต่างที่เพิ่มขึ้นช่วยให้ถึงปฏิกริยาสร้างก๊าซมีเทนคงค่าพีเอช
 ประมาณ 7.5 และการหมุนเวียนน้ำออกจากระบบกลับ ช่วยลดความต้องการเติมสารเพิ่มสภาพต่าง
 ให้กับถึงปฏิกริยาสร้างก๊าซมีเทน

สาขาวิชา วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม ลายมือชื่อนิสิต จิรวรรณ ออตยะกุล
 ปีการศึกษา 2549 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา *Prof. Dr. Chuanwit*
 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม *S. R.*

#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 โฉมิตานนท์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ ดร.สมชาย คารารัตน์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ซึ่งกรุณาให้คำปรึกษา และข้อคิดเห็นต่างๆเกี่ยวกับการวิจัยมาโดยตลอด ทำให้ผู้วิจัยสามารถดำเนินการวิจัยจนประสบความสำเร็จด้วยดี จึงขอขอบพระคุณไว้ ณ ที่นี้

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

ขอขอบพระคุณสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย ที่ให้การสนับสนุนด้านสถานที่และทุนในการทำวิจัย ขอขอบพระคุณโรงแรมบันยันท์ ที่ร่วมให้ทุนสนับสนุนการวิจัยในครั้งนี้ด้วย ขอขอบพระคุณ บริษัท ชุมพรอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์ม จำกัด (มหาชน) ที่ให้ความอนุเคราะห์นำเสียที่ใช้ในการวิจัย และขอขอบพระคุณ บริษัท เสริมสุข (ปทุมธานี) จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์เมล็ดตะกอนจุลินทรีย์ที่ใช้ในการวิจัย

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ห้องธุรการสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อมทุกท่าน ที่อำนวยความสะดวกในการติดต่อประสานงาน และเจ้าหน้าที่ของ วว. คุณทวีศักดิ์ หอมดอกไม้ ที่ช่วยติดตั้งและซ่อมแซมอุปกรณ์ต่างๆ และคุณปฐมพร พุฒสวัสดิ์ ที่ได้ให้คำแนะนำในการทำวิจัย

ขอขอบคุณ พี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆ อาทิ คุณคณิต ออดยะกุล, คุณปริญญา มาลัยลอย, คุณศรัณพิชญ์ สุพานิช, คุณจุฬามาศ กิจจานุกฤษณ์, คุณมธุรส แสงไพโรจน์, คุณกมลวรรณ พุ่มไม้, คุณเฉลิมชัย นามกระจ่าย, คุณชูชัย ล้ออุทัย, คุณบัญชาการ วินัยพานิช, คุณปญญาณิช บริวธานันท์, คุณกิตติภูมิ พุ่มแดง, คุณศุภกิตต์ เจียรสุวรรณ และท่านอื่นๆ ทุกท่านที่มีได้กล่าวไว้ ณ ที่นี้ ที่ได้ให้ความช่วยเหลือทั้งด้านอุปกรณ์ แรงงาน คำปรึกษาและกำลังใจ ตลอดจนมาจนทำให้การดำเนินการวิจัยและการสอบผ่านไปได้ด้วยดี

ท้ายนี้ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณและระลึกถึงพระคุณ บิดา-มารดา ที่ได้อบรมเลี้ยงดู และให้การสนับสนุนในทุกๆ ด้าน รวมทั้งพี่สาว (สิริรักษ์ ออดยะกุล) 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 (ถังปฏิกริยาแบบยูเอเอสบี).....	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 ผลของระยะเวลาพักทางคลศาสตร์ต่อประสิทธิภาพการเดินระบบถัง 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	องค์ประกอบของสารอาหารอินทรีย์ สำหรับการศึกษาระบบไร้อากาศ	23
ตารางที่ 2.5	ปริมาณภาระซีโอดี(COD loading) ที่แนะนำสำหรับถังปฏิกริยาเยอเอสบีที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ซึ่งกำจัดซีโอดีได้ ร้อยละ 85-95.....	32
ตารางที่ 2.6	ค่าความเร็วไหลขึ้นและความสูงของถังปฏิกริยาที่แนะนำสำหรับถังปฏิกริยาเยอเอสบี.....	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	พารามิเตอร์และความถี่ในการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของตะกอนเม็คจุลินทรีย์.....	71
ตารางที่ 4.1	ปริมาณและประสิทธิภาพการสร้างกรดไขมันระเหยเฉลี่ยตลอดการทดลองไฮโดรไลซิส.....	75
ตารางที่ 4.2	ปริมาณสภาพต่างเฉลี่ยในน้ำเข้าและออกจากระบบของถังสร้างกรด ที่ระยะเวลาพักทางชลศาสตร์ 14 , 10 และ 20 วัน.....	88
ตารางที่ 4.3	ปริมาณซีโอดีในน้ำเข้าและออกจากระบบ และประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีเฉลี่ย ของถังสร้างกรดที่ระยะเวลาพักทางชลศาสตร์ 14 , 10 และ 20 วัน.....	90

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

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

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	ความสัมพันธ์ระหว่างแอมโมเนียที่ไม่แตกตัว (Un-ionized NH ₃) กับ อุณหภูมิ ที่ระดับพีเอชต่างๆ..... 26
ภาพที่ 2.7	กราฟแสดงการปรับสภาพของจุลินทรีย์สร้างมีเทนกับความเข้มข้นของโซเดียมไอออน..... 27
ภาพที่ 2.8	ส่วนประกอบหลักของถังปฏิกริยายูเอเอสบี (UASB reactor)..... 29
ภาพที่ 2.9	ตัวอย่างการประยุกต์รูปแบบถังปฏิกริยายูเอเอสบีเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงาน..... 29
ภาพที่ 2.10	รูปร่างของแบคทีเรีย..... 35
ภาพที่ 2.11	เม็ดตะกอนจุลินทรีย์ที่ประกอบด้วยแบคทีเรียกลุ่ม <i>Methanosarcina</i> 36
ภาพที่ 2.12	องค์ประกอบของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ เสนอ โดย McLeod และคณะ..... 36
ภาพที่ 3.1	แสดงลักษณะทางกายภาพของน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม..... 55
ภาพที่ 3.2	ลักษณะตะกอนเม็ดจุลินทรีย์ ที่ใช้ในการทดลอง..... 58
ภาพที่ 3.3	การสร้างความคุ้นเคยของตะกอนเม็ดจุลินทรีย์ให้เข้ากับตัวอย่างน้ำเสีย.... 59
ภาพที่ 3.4	ถังสร้างกรดแบบ Hrydrolysis 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) ที่มีถังสร้าง กรวดแบบ Hydrolysis Upflow Sludge Blanket (HUSB).....	64
ภาพที่ 3.8 การทดลองไฮโดรไลซิสตัวอย่างน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม.....	66
ภาพที่ 3.9 การเดินระบบถังสร้างกรวดแบบเอชยูเอเอสบี (HUSB).....	67
ภาพที่ 3.10 การเดินระบบถังสร้างก๊าซมีเทนแบบยูเอเอสบี (UASB).....	68
ภาพที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลากับปริมาณของแฉังแขวนลอยระเหยของ ชุดทดลองที่ 1, 2 และ 3.....	74
ภาพที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลากับประสิทธิภาพการกำจัดของแฉัง แขวนลอยระเหยของการทดลองไฮโดรไลซิสชุดทดลองที่ 1, 2 และ 3.....	74
ภาพที่ 4.3 เปรียบเทียบประสิทธิภาพเฉลี่ยของการสร้างกรดไขมันระเหยของการ ทดลองไฮโดรไลซิส ของชุดทดลองที่ 1, 2 และ 3.....	75
ภาพที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลากับปริมาณและประสิทธิภาพการกำจัด ของแฉังแขวนลอยระเหย ที่ระยะเวลากักพักทางชีวศาสตร์ 14 วัน.....	79
ภาพที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลากับปริมาณและประสิทธิภาพการกำจัด ของแฉังแขวนลอยระเหย ที่ระยะเวลากักพักทางชีวศาสตร์ 10 วัน.....	79
ภาพที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลากับปริมาณและประสิทธิภาพการกำจัด ของแฉังแขวนลอยระเหย ที่ระยะเวลากักพักทางชีวศาสตร์ 20 วัน.....	80
ภาพที่ 4.7 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดของแฉังแขวนลอยระเหยเฉลี่ยที่ สภาวะคงที่ ที่ระยะเวลากักพักทางชีวศาสตร์ 10 และ 14 วัน.....	80
ภาพที่ 4.8 การแยกชั้นของตะกอนและของเหลว ที่ระยะเวลากักพักทางชีวศาสตร์ 14 วัน.....	81
ภาพที่ 4.9 การแยกชั้นของตะกอนและของเหลวหลังผ่านการตกตะกอนด้วยการ หมุนเหวี่ยง ที่ระยะเวลากักพักทางชีวศาสตร์ 14 วัน.....	81
ภาพที่ 4.10 การแยกชั้นของตะกอนและของเหลว ที่ระยะเวลากักพักทางชีวศาสตร์ 10 วัน.....	82
ภาพที่ 4.11 การแยกชั้นของตะกอนและของเหลวหลังผ่านการตกตะกอนด้วยการ หมุนเหวี่ยง ที่ระยะเวลากักพักทางชีวศาสตร์ 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 ความสัมพันธ์ของปริมาณและประสิทธิภาพการกำจัดชีโอดี ที่ระยะเวลา กักพักทางชลศาสตร์ 20 วัน.....	92
ภาพที่ 4.25 ความสัมพันธ์ของปริมาณและประสิทธิภาพการกำจัดชีโอดี ที่อัตราภาระ สารอินทรีย์ 4 กิโลกรัมชีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน.....	95
ภาพที่ 4.26 ความสัมพันธ์ของปริมาณและประสิทธิภาพการกำจัดชีโอดี ที่อัตราภาระ สารอินทรีย์ 10 กิโลกรัมชีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน.....	95
ภาพที่ 4.27 ความสัมพันธ์ของปริมาณและประสิทธิภาพการกำจัดชีโอดี ที่อัตราภาระ สารอินทรีย์ 15 กิโลกรัมชีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน.....	96
ภาพที่ 4.28 ความสัมพันธ์ของปริมาณและประสิทธิภาพการกำจัดชีโอดี ที่อัตราภาระ สารอินทรีย์ 20 กิโลกรัมชีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน.....	96
ภาพที่ 4.29 ความสัมพันธ์ของปริมาณและประสิทธิภาพการกำจัดชีโอดี ที่อัตราภาระ สารอินทรีย์ 25 กิโลกรัมชีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน.....	97
ภาพที่ 4.30 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดชีโอดี ที่อัตราภาระสารอินทรีย์ 4, 10, 15, 20 และ 25 กิโลกรัมชีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน.....	97
ภาพที่ 4.31 การยกตัวของชั้นตะกอนจุลินทรีย์ภายในถังสร้างก๊าซมีเทนแบบ ยูเอเอสบี.....	98
ภาพที่ 4.32 ความสัมพันธ์ของปริมาณและประสิทธิภาพการกำจัดชีโอดี เมื่อเดิน ระบบด้วยน้ำเสียจริง ที่อัตราภาระสารอินทรีย์ 28 กิโลกรัมชีโอดีต่อ ลูกบาศก์เมตรต่อวัน.....	98
ภาพที่ 4.33 เปรียบเทียบปริมาณการกำจัดชีโอดีเฉลี่ย ที่อัตราภาระสารอินทรีย์ 4, 10, 15, 20, 25 และ 28 กิโลกรัมชีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน ที่สภาวะคงที่....	99
ภาพที่ 4.34 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดชีโอดี ที่อัตราภาระสารอินทรีย์ 4, 10, 15, 20, 25 และ 28 กิโลกรัมชีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน ที่สภาวะคงที่....	100
ภาพที่ 4.35 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดชีโอดี ที่อัตราภาระสารอินทรีย์ 4, 10, 15, 20, 25 และ 28 กิโลกรัมชีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน ที่สภาวะคงที่....	101
ภาพที่ 4.36 เปรียบเทียบปริมาณการกำจัดชีโอดีเฉลี่ย ที่อัตราภาระสารอินทรีย์ 4, 10, 15, 20, 25 และ 28 กิโลกรัมชีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน ที่สภาวะคงที่....	102

	หน้า
ภาพที่ 4.37 เปรียบเทียบปริมาณการกำจัดกรดไขมันระเหยเจ็ลลี่ ที่อัตราการระ สารอินทรีย์ 4, 10, 15, 20, 25 และ 28 กิโลกรัมชีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อ วัน ที่สภาวะคงที่.....	103
ภาพที่ 4.38 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดกรดไขมันระเหยเจ็ลลี่ ที่อัตราการระ สารอินทรีย์ 4, 10, 15, 20, 25 และ 28 กิโลกรัมชีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อ วัน ที่สภาวะคงที่.....	104
ภาพที่ 4.39 ค่าพีเอชและสภาพด่าง ที่อัตราการระสารอินทรีย์ 4 กิโลกรัมชีโอดีต่อ ลูกบาศก์เมตรต่อวัน	108
ภาพที่ 4.40 ค่าพีเอชและสภาพด่าง ที่อัตราการระสารอินทรีย์ 10 กิโลกรัมชีโอดีต่อ ลูกบาศก์เมตรต่อวัน.....	108
ภาพที่ 4.41 พีเอชและสภาพด่าง ที่อัตราการระสารอินทรีย์ 15 กิโลกรัมชีโอดีต่อ ลูกบาศก์เมตรต่อวัน.....	109
ภาพที่ 4.42 พีเอชและสภาพด่าง ที่อัตราการระสารอินทรีย์ 20 กิโลกรัมชีโอดีต่อ ลูกบาศก์เมตรต่อวัน.....	109
ภาพที่ 4.43 ค่าพีเอชและสภาพด่าง ที่อัตราการระสารอินทรีย์ 25 กิโลกรัมชีโอดีต่อ ลูกบาศก์เมตรต่อวัน.....	110
ภาพที่ 4.44 ค่าพีเอชและสภาพด่าง ที่อัตราการระสารอินทรีย์ 28 กิโลกรัมชีโอดีต่อ ลูกบาศก์เมตรต่อวัน.....	110
ภาพที่ 4.45 เปรียบเทียบสภาพด่างในน้ำเข้าและออกจากระบบ ที่อัตราการระ สารอินทรีย์ 4, 10, 15, 20, 25 และ 28 กิโลกรัมชีโอดีต่อลูกบาศก์เมตร ต่อวัน ที่สภาวะคงที่.....	111
ภาพที่ 4.46 เปรียบเทียบอัตราส่วนกรดไขมันระเหยต่อสภาพด่างในน้ำออกจากระบบ 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 การระเหยอินทรีย์ 4, 10, 15, 20, 25 และ 28 กิโลกรัมชีโอดีต่อลูกบาศก์ เมตรต่อวัน ที่สภาวะคง.....	114
ภาพที่ 4.49	เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอยระเหย ที่อัตรา การระเหยอินทรีย์ 4, 10, 15, 20, 25 และ 28 กิโลกรัมชีโอดีต่อลูกบาศก์ เมตรต่อวัน ที่สภาวะคงที่.....	115
ภาพที่ 4.50	เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดน้ำมันและไขมันที่อัตราการระ เหยอินทรีย์ 15, 20, 25 และ 28 กิโลกรัมชีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน....	116
ภาพที่ 4.51	เปรียบเทียบอัตราการสร้างก๊าซชีวภาพและก๊าซมีเทนเฉลี่ยที่อัตราการระ เหยอินทรีย์ 4, 10, 15, 20, 25 และ 28 กิโลกรัมชีโอดีต่อลูกบาศก์เมตร ต่อวัน.....	118
ภาพที่ 4.52	เปรียบเทียบประสิทธิภาพการสร้างก๊าซมีเทนเปรียบเทียบกับปริมาณ สารอินทรีย์ที่ถูกกำจัดเฉลี่ย ที่อัตราการระเหยอินทรีย์ 4, 10, 15, 20, 25 และ 28 กิโลกรัมชีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน.....	120
ภาพที่ 4.53	ลักษณะภายนอกของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ที่ใช้ในการทดลอง (กำลังขยาย $\times 85$).....	123
ภาพที่ 4.54	ลักษณะชั้นต่างๆ ของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ที่ใช้ในการทดลอง (กำลังขยาย $\times 7,000$).....	124