อัตราหมุนเวียนน้ำทิ้งในระบบแผ่นกั้นไร้ออกซิเจนที่เหมาะสม ต่อการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำกากส่า

สำนักงานวิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

นางสาวธันยพร นงค์นวล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2552
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

OPTIMUM RATE OF EFFLUENT RECYCLE IN ANAEROBIC BAFFLED REACTOR ON BIOGAS PRODUCTION FROM DISTILLERY WASTEWATER

Miss Thunyaporn Nongnual

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Engineering Program in Environmental Engineering

Department of Environmental Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2009

Copyright of Chulalongkorn University

520750

หัวข้อวิทยานิพนธ์	อัตราหมุนเวียนน้ำทิ้งในระบบแผ่นกั้นไร้ออกซิเจนที่เหมาะสมต่อการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำกากส่า
โดย	นางสาวธันยพร นงค์นวล
สาขาวิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร. อรทัย ชวาลภาฤทธิ์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร. บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. ธเรศ ศรีสถิตย์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร. อรทัย ชวาลภาฤทธิ์)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ศิริมา ปัญญาเมธีกุล)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(อาจารย์ ดร. พรรณวดี สุวัฒิกะ)

ธันยพร นงค์นวล : อัตราหมุนเวียนน้ำทิ้งในระบบแผ่นกั้นไร้ออกซิเจนที่เหมาะสมต่อการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำกากส่า. (OPTIMUM RATE OF EFFLUENT RECYCLE IN ANAEROBIC BAFFLED REACTOR ON BIOGAS PRODUCTION FROM DISTILLERY WASTEWATER) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : รศ. ดร. อรทัย ชวาลภาฤทธิ์, 123 หน้า.

งานวิจัยนี้ศึกษาอัตราหมุนเวียนน้ำทิ้งภายในระบบที่เหมาะสมต่อการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำกากส่า โดยใช้ระบบบำบัดแบบแผ่นกั้นไร้ออกซิเจนระดับห้องปฏิบัติการ ขนาด 20 ลิตร ซึ่งภายในถังปฏิกรณ์แบ่งออกเป็น 5 ห้อง โดยป้อนน้ำเสียเข้าระบบมีความเข้มข้นซีโอดีคงที่เท่ากับ 25,000 มก./ล. ซึ่งคิดเป็นภาระบรรทุกสารอินทรีย์เท่ากับ 6.25 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.–วัน ระยะเวลากักพักชลศาสตร์คงที่ 4 วัน แล้วแปรผันอัตราหมุนเวียนน้ำทิ้งเท่ากับ 1, 2, 4 และ 6 เท่า โดยมีชุดควบคุม คือ สภาวะที่ไม่มีการหมุนเวียนน้ำทิ้ง พบว่า ระบบมีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีที่ชุดควบคุม อัตราหมุนเวียนน้ำทิ้ง 1, 2, 4 และ 6 เท่า เท่ากับ ร้อยละ 72.35, 76.36, 77.43, 80.57 และ 77.55 ตามลำดับ และมีการผลิตก๊าซชีวภาพเท่ากับ 35.53, 43.81, 50.59, 53.46 และ 45.14 ลิตร/วัน ตามลำดับ คิดเป็นปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพ 0.40, 0.46, 0.52, 0.55 และ 0.50 ลิตร/กรัมซีโอดีที่ถูกกำจัด ตามลำดับ และทุกชุดการทดลองมีก๊าซมีเทนเป็นองค์ประกอบมากกว่าร้อยละ 60 ซึ่งตลอดช่วงการทดลองอัตราส่วนของกรดไขมันระเหยต่อสภาพความเป็นด่างทั้งหมดมีค่าต่ำกว่า 0.22

จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าเมื่ออัตราหมุนเวียนน้ำทิ้งสูงขึ้น ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีและการผลิตก๊าซชีวภาพจะสูงขึ้นตามไปด้วย โดยที่อัตราหมุนเวียนน้ำทิ้งเท่ากับ 4 เท่ามีประสิทธิภาพประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีและการผลิตก๊าซชีวภาพสูงสุด จากนั้นที่อัตราหมุนเวียนน้ำทิ้งที่สูงกว่านี้ประสิทธิภาพการกำจัดและการผลิตก๊าซชีวภาพเริ่มมีแนวโน้มลดลง

ภาควิชา.....วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม.....ลายมือชื่อนิสิต.....ธันยพร นงค์นวล.....

สาขาวิชา.....วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม.....ลายมือชื่ออ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....

ปีการศึกษา.....2552.....

5170328921 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING
KEYWORDS : EFFLUENT RECYCLE / BIOGAS / DISTILLERY WASTEWATER / ANAEROBIC BAFFLED REACTOR

THUNYAPORN NONGNUAL : OPTIMUM RATE OF EFFLUENT RECYCLE IN ANAEROBIC BAFFLED REACTOR ON BIOGAS PRODUCTION FROM DISTILLERY WASTEWATER. THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. ORATHAI CHAVALPARIT, Ph.D., 123 pp.

The aim of this research were investigated the optimum rate of effluent recycle in Anaerobic Baffled Reactor (ABR) to biogas production from distillery wastewater, a laboratory scale anaerobic baffled reactor with a liquid volume of 20 liters that consisting of equal 5 compartments is used. The experiments are operated at constant COD concentrations of 25,000 mg/L (organic loading rate 6.25 kg-COD/m^3-day) HRT of 4 days and increasing effluent recycle ratios (1, 2, 4 and 6). The control is without effluent recycle. At control, effluent recycle ratio of 1, 2, 4 and 6 times had the COD removal efficiency equal to 72.35%, 76.36%, 77.43%, 80.57% and 77.55% respectively. Biogas production were 35.53, 43.81, 50.59, 53.46 and 45.14 L/d or 0.40, 0.46, 0.52, 0.55 และ 0.50 34.18, 45.81 and 53.76 L/gCOD removed respectively. And all experiments result indicated the biogas production over 60% of methane. The ratio of volatile fatty acid to alkalinity was less than 0.22 throughout the experiments.

The COD removal efficiency and biogas production increased with increased effluent recycle ratio. At effluent recycle ratio of 4 had the highest efficiency of COD removal and biogas production. But COD removal efficiency and biogas production trend to decreased with increased higher effluent recycle ratio of 4

Department : Environmental Engineering Student's Signature : Thunyaporn Nongnual
Field of Study : Environmental Engineering Advisor's Signature : Orathai Chavalparit
Academic Year : 2009

กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร. อรทัย ชวาลภาฤทธิ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้ให้สำเร็จได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร. ธเรศ ศรีสถิตย์ ดร. พรรณวดี สุวัฒิกะ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ศิริมา ปัญญาเมธีกุล ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งแก่ผู้ทำวิทยานิพนธ์ และตรวจสอบแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ทุกท่านที่กรุณาอบรมสั่งสอนและถ่ายทอดความรู้แก่ผู้ทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ทุกท่านที่เอื้ออำนวยความสะดวกช่วยเหลือด้านเอกสารและการใช้ห้องปฏิบัติการ

ขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ และน้องๆ สำหรับความช่วยเหลือและเป็นกำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์ให้ประสบความสำเร็จ

ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัวที่ให้กำลังใจและความช่วยเหลือในการทำวิทยานิพนธ์ตลอดมาจนประสบความสำเร็จ

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... จ

กิตติกรรมประกาศ..... ฉ

สารบัญ..... ช

สารบัญตาราง..... ญ

สารบัญภาพ..... ฎ

บทที่ 1 บทนำ..... 1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา..... 1

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย..... 2

1.3 ขอบเขตของการวิจัย..... 2

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ..... 2

บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... 3

2.1 น้ำกากส่า..... 3

2.1.1 กระบวนการผลิตสุราจากกากน้ำตาล..... 3

2.1.2 ประเภทน้ำเสียจากโรงงานสุรา..... 5

2.1.3 ลักษณะของน้ำเสียของโรงงานสุรากลั่น..... 5

2.1.4 การใช้ประโยชน์จากกากส่าในปัจจุบัน..... 7

2.1.5 การบำบัดน้ำกากส่า..... 9

2.2 การบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจน..... 10

2.2.1 กลไกการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน..... 10

2.2.2 แบคทีเรียที่เกี่ยวข้อง..... 12

2.2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อระบบบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจน..... 16

2.3 ระบบแผ่นกั้นไร้ออกซิเจน..... 21

2.3.1 การศึกษาและพัฒนาเกี่ยวกับระบบแผ่นกั้นไร้ออกซิเจน..... 21

2.3.2 ข้อดีและข้อด้อยของระบบแผ่นกั้นไร้ออกซิเจน..... 23

2.4 การหมุนเวียนน้ำทิ้ง..... 24

2.4.1 ข้อดี และข้อด้อยของการหมุนเวียนน้ำทิ้ง..... 24

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... 25

หน้า

2.5.1 การบำบัดน้ำกากส่า..... 25
2.5.2 ระบบแผ่นกั้นไร้ออกซิเจน..... 27
2.5.3 ระบบบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจนที่มีการหมุนเวียนน้ำทิ้ง..... 29
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย..... 32
3.1 แผนการวิจัย..... 32
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย..... 32
3.2.1 ระบบแผ่นกั้นไร้ออกซิเจน..... 31
3.2.2 ชุดอุปกรณ์วัดก๊าซแบบแทนที่น้ำ..... 34
3.2.3 เครื่องสูบน้ำเสียเข้าระบบ..... 35
3.2.4 ถังป้อนน้ำเสียและถังพักน้ำทิ้ง..... 35
3.3 วิธีดำเนินการทดลอง..... 36
3.3.1 การเตรียมน้ำเสีย..... 36
3.3.2 การเริ่มต้นระบบ (Start up)..... 36
3.3.3 การเดินระบบ..... 36
3.4 ตัวแปรที่ใช้ในการวิจัย..... 38
3.4.1 ตัวแปรอิสระ..... 38
3.4.2 ตัวแปรตาม..... 38
3.4.3 ตัวแปรควบคุม..... 38
3.5 การเก็บตัวอย่างและการวิเคราะห์ผล..... 39
บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล..... 41
4.1 ลักษณะสมบัติของน้ำกากส่าที่ใช้ในการทดลอง..... 41
4.2 การศึกษาผลของอัตราหมุนเวียนน้ำทิ้ง..... 42
4.2.1 พีเอช..... 42
4.2.2 อุณหภูมิและความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน..... 44
4.2.3 กรดไขมันระเหย..... 46
4.2.4 สภาพความเป็นด่างทั้งหมด..... 48
4.2.5 อัตราส่วนกรดไขมันระเหยต่อสภาพความเป็นด่างทั้งหมด..... 51
4.2.6 ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี..... 53
4.2.7 ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอย..... 56
4.2.8 การผลิตก๊าซชีวภาพ..... 58

หน้า

4.3 สรุปประสิทธิภาพการบำบัดน้ำกากส่าโดยระบบแผ่นกั้นไร้ออกซิเจนที่อัตราหมุนเวียนน้ำทิ้งต่างๆ..... 62
4.4 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการทดลองกับงานวิจัยอื่นๆ..... 65
4.5 ประสิทธิภาพตามระยะทางของระบบแผ่นกั้นไร้ออกซิเจนในการบำบัดน้ำกากส่า..... 66
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ..... 70
5.1 สรุปและอภิปรายผลการวิจัย..... 70
5.2 ข้อเสนอแนะ..... 71
รายการอ้างอิง..... 72
ภาคผนวก..... 76
ภาคผนวก ก ผลการทดลอง..... 77
ภาคผนวก ข ประสิทธิภาพตามระยะทางของระบบ..... 115
ภาคผนวก ค ผลวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ..... 119
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์..... 123

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	ลักษณะน้ำกากส่า	5
2.2	สารอาหารที่แบคทีเรียสร้างมีเทนนำไปใช้ได้	15
2.3	ความเข้มข้นของอิออนประจุบวกของโลหะเบาที่มีผลกระตุ้นและยับยั้งการทำงานของจุลินทรีย์	19
2.4	ข้อดีและข้อด้อยของระบบแผ่นกั้นไร้ออกซิเจน	23
2.5	ข้อดีและข้อด้อยเสียของการหมุนเวียนน้ำทิ้ง	24
3.1	การแปรผันอัตราการหมุนเวียนน้ำทิ้ง	38
3.2	จุดเก็บตัวอย่างและวิธีการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ	40
4.1	ลักษณะสมบัติน้ำเสียที่ใช้ในการทดลอง	41
4.2	ระยะเวลาการเดินระบบในสภาวะที่มีการหมุนเวียนน้ำทิ้ง	42
4.3	กรดไขมันระเหยเฉลี่ยของน้ำเสียเข้าและออกจากระบบที่อัตราการหมุนเวียนน้ำต่างๆ	47
4.4	สภาพความเป็นด่างทั้งหมดเฉลี่ยของน้ำเสียเข้าและออกจากระบบที่อัตราการหมุนเวียนน้ำต่างๆ	50
4.5	ค่าเฉลี่ยอัตราส่วนกรดไขมันระเหยต่อสภาพความเป็นด่างทั้งหมดเฉลี่ยของน้ำเสียเข้าและออกจากระบบที่อัตราหมุนเวียนน้ำต่างๆ	52
4.6	สรุปค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีที่อัตราหมุนเวียนน้ำต่างๆ	55
4.7	สรุปค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอยที่อัตราหมุนเวียนน้ำทิ้งต่างๆ	57
4.8	สรุปค่าเฉลี่ยอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพและอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพต่อ 1 กรัมซีโอดีที่ถูกกำจัดที่สภาวะคงตัวของอัตราการหมุนเวียนน้ำต่างๆ	60
4.9	ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำกากส่าโดยระบบแผ่นกั้นไร้ออกซิเจนที่อัตราหมุนเวียนน้ำทิ้งต่างๆ	62
4.10	เปรียบเทียบประสิทธิภาพการทดลองกับงานวิจัยอื่นๆ	65

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2.1	กระบวนการผลิตสุราจากกากน้ำตาลของโรงงานสุรากลั่น	4
2.2	กลไกการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน	12
3.1	ลักษณะชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	33
3.2	ระบบแผ่นกั้นไร้ออกซิเจน	34
3.3	ชุดอุปกรณ์วัดก๊าซแบบแทนที่น้ำ	35
3.4	แผนภาพขั้นตอนการทดลองช่วงการเดินระบบ	37
3.5	จุดเก็บตัวอย่างน้ำ ก๊าซ และตะกอนจุลชีพ	39
4.1	ลักษณะน้ำกากส่าที่ใช้ในการทดลอง	41
4.2	พีเอชน้ำเสียเข้าและออกจากระบบที่อัตราหมุนเวียนน้ำทิ้งเท่ากับ 0, 1 และ 4 เท่า	43
4.3	พีเอชน้ำเสียเข้าและออกจากระบบที่อัตราหมุนเวียนน้ำทิ้งเท่ากับ 0, 2 และ 6 เท่า	43
4.4	อุณหภูมิน้ำเสียเข้าและออกจากระบบที่อัตราหมุนเวียนน้ำทิ้งเท่ากับ 0, 1 และ 4 เท่า	45
4.5	อุณหภูมิน้ำเสียเข้าและออกจากระบบที่อัตราหมุนเวียนน้ำทิ้งเท่ากับ 0, 2 และ 6 เท่า	45
4.6	กรดไขมันระเหยของน้ำทิ้งออกจากระบบที่อัตราหมุนเวียนน้ำทิ้งเท่ากับ 0, 1 และ 4 เท่า	46
4.7	กรดไขมันระเหยของน้ำทิ้งออกจากระบบที่อัตราหมุนเวียนน้ำทิ้งเท่ากับ 0, 2 และ 6 เท่า	46
4.8	เปรียบเทียบกรดไขมันระเหยเข้าและออกจากระบบที่อัตราหมุนเวียนน้ำทิ้งต่างๆ	48
4.9	สภาพความเป็นด่างทั้งหมดของน้ำออกจากระบบที่อัตราหมุนเวียนน้ำทิ้งเท่ากับ 0, 1 และ 4 เท่า	49
4.10	สภาพความเป็นด่างทั้งหมดของน้ำออกจากระบบที่อัตราหมุนเวียนน้ำทิ้งเท่ากับ 0, 2 และ 6 เท่า	49
4.11	เปรียบเทียบสภาพความเป็นด่างทั้งหมดเข้าและออกจากระบบที่อัตราหมุนเวียนน้ำทิ้งต่างๆ	50
4.12	อัตราส่วนกรดไขมันระเหยต่อสภาพความเป็นด่างทั้งหมดของน้ำออกจากระบบที่อัตราหมุนเวียนน้ำทิ้งเท่ากับ 0, 1 และ 4 เท่า	51
4.13	อัตราส่วนกรดไขมันระเหยต่อสภาพความเป็นด่างทั้งหมดของน้ำออกจากระบบที่อัตราหมุนเวียนน้ำทิ้งเท่ากับ 0, 2 และ 6 เท่า	51
4.14	เปรียบเทียบอัตราส่วนกรดไขมันระเหยต่อสภาพความเป็นด่างทั้งหมดของน้ำเข้าและออกจากระบบที่อัตราหมุนเวียนน้ำทิ้งต่างๆ	53

ภาพที่ หน้า

4.15 ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีที่อัตราหมุนเวียนน้ำทิ้งเท่ากับ 0, 1 และ 4 เท่า..... 54
4.16 ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีที่อัตราหมุนเวียนน้ำทิ้งเท่ากับ 0, 2 และ 6 เท่า..... 54
4.17 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีที่อัตราหมุนเวียนน้ำทิ้งต่างๆ..... 55
4.18 ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอยที่อัตราหมุนเวียนน้ำทิ้งเท่ากับ 0, 1 และ 4 เท่า..... 56
4.19 ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอยที่อัตราหมุนเวียนน้ำทิ้งเท่ากับ 0, 2 และ 6 เท่า..... 56
4.20 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอยที่อัตราหมุนเวียนน้ำทิ้งต่างๆ..... 58
4.21 การผลิตก๊าซชีวภาพที่อัตราหมุนเวียนน้ำทิ้งเท่ากับ 0, 1 และ 4 เท่า..... 59
4.22 การผลิตก๊าซชีวภาพที่อัตราหมุนเวียนน้ำทิ้งเท่ากับ 0, 2 และ 6 เท่า..... 59
4.23 เปรียบเทียบการผลิตก๊าซชีวภาพ ก๊าซมีเทนและร้อยละของปริมาณก๊าซมีเทนที่อัตราหมุนเวียนน้ำทิ้งต่างๆ..... 61
4.24 เปรียบเทียบปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพต่อซีโอดีที่ถูกกำจัดและปริมาณก๊าซมีเทนต่อซีโอดีที่ถูกกำจัดที่อัตราหมุนเวียนน้ำทิ้งต่างๆ..... 62
4.25 ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี ของแข็งแขวนลอย และการผลิตก๊าซชีวภาพที่อัตราหมุนเวียนน้ำทิ้งต่างๆ..... 63
4.26 ปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพต่อซีโอดีที่ถูกกำจัด ปริมาณก๊าซมีเทนต่อซีโอดีที่ถูกกำจัดและอัตราส่วนกรดไขมันระเหยต่อสภาพความเป็นด่างทั้งหมดที่อัตราหมุนเวียนน้ำทิ้งต่างๆ... 64
4.27 ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีตามระยะทางของ ABR1..... 66
4.28 ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีตามระยะทางของ ABR2..... 66
4.29 ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีและของแข็งแขวนลอยตามระยะทางของระบบ..... 67
4.30 สภาวะการทำงานตามระยะทางของระบบ..... 68