

การผลิตก๊าซมีเทนจากขยะ โดยกระบวนการชีวภาพแบบไร้อากาศสองขั้นตอน



นายสมชาย เจียมธีรสกุล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมสุขาภิบาล

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พ.ศ. 2530

ISBN 974-568-414-7

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

013045

i 1000336x

PRODUCTION OF METHANE GAS FROM SOLID WASTES

BY

A TWO-STAGE ANAEROBIC PROCESS

Mr.Somchai Jeanteerasakul

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Engineering

Department of Sanitary Engineering

Graduate School

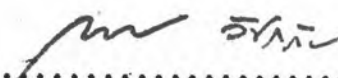
Chulalongkorn University

1987

ISBN 974-568-414-7

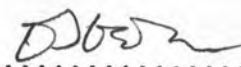
หัวข้อวิทยานิพนธ์ การผลิตก๊าซมีเทนจากขยะโดยกระบวนการชีวภาพแบบไร้อากาศสองขั้นตอน  
โดย นายสมชาย เจริญธีรสกุล  
ภาควิชา วิศวกรรมสุขาภิบาล  
อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุทธิรักษ์ สุจริตตานนท์


บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต

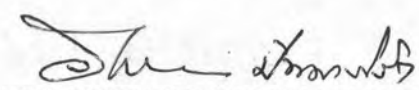
  
..... คณะบดีบัณฑิตวิทยาลัย  
(ศาสตราจารย์ ดร.ถาวร วัชรากิจ)

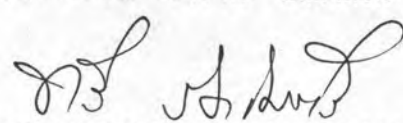
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



  
..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.ธงชัย พรรณสวัสดิ์)

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุทธิรักษ์ สุจริตตานนท์)

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม  
(รองศาสตราจารย์ วีรวรรณ ปัทมาภีรัต)

  
..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ทวี จิตไมตรี)

สมชาย เจียมธีรสกุล : การผลิตก๊าซมีเทนจากขยะโดยกระบวนการชีวภาพแบบไร้อากาศสอง  
ขั้นตอน (PRODUCTION OF METHANE GAS FROM SOLID WASTES BY A TWO-STAGE  
ANAEROBIC PROCESS) อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุทธิรักษ์ สุจริตदानนท์,  
รองศาสตราจารย์ วีรวรรณ ปัทมาภีรัต, 201 หน้า.

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาถึงความเป็นไปได้ของการเปลี่ยนขยะสดเป็นก๊าซมีเทน โดยวิธีการ  
ย่อยสลายแบบไร้อากาศสองขั้นตอน ก๊าซชีวภาพที่ได้ สามารถนำกลับมาใช้เป็นเชื้อเพลิงหรือพลังงานทดแทน  
และจะ เปรียบเทียบประสิทธิภาพกับการย่อยสลายขยะแบบไร้อากาศขั้นตอนเดียว ที่ได้มีผู้ทำไว้แล้ว

ผลจากการศึกษาโดยใช้ระยะเวลาในการหมักต่าง ๆ กันคือ 3.49, 5.17, 11.39 และ  
15.91 วัน ที่อัตราการบ่อนสารอาหารระหว่าง 0.18 ถึง 0.80 กก ของแข็งระเหยที่ใส่ต่อ<sup>3</sup> -วัน ปรากฏ  
ว่าได้ปริมาณก๊าซ ต่อน้ำหนักของแข็งระเหยที่ใส่เข้าไปอยู่ระหว่าง 0.052 ถึง 0.228 ลิตรต่อกรัม และมี  
องค์ประกอบของก๊าซมีเทนอยู่ประมาณ 58.98 ถึง 66.91 เปอร์เซ็นต์ โดยที่ระยะเวลาในการหมัก 8.47 วัน  
จะให้ปริมาณก๊าซ ต่อน้ำหนักของแข็งระเหยที่ใส่เข้าไปสูงที่สุด คือ 0.300 ลิตรมีเทน ต่อกรัมของแข็งระเห  
ที่ใส่เข้าไป และมีองค์ประกอบของมีเทนสูงด้วย

พบว่าประสิทธิภาพส่วนรวมของกระบวนการหมักแบบไร้อากาศสองขั้นตอน สูงกว่าการหมักแบบไร้อ  
ากาศขั้นตอนเดียว โดยสามารถกำจัดซีโอดีทั้งหมดอยู่ระหว่าง 59.63 ถึง 94.38 เปอร์เซ็นต์ และการ  
กำจัดของแข็งทั้งหมด 88.67 ถึง 97.79 เปอร์เซ็นต์



ภาควิชา ..... วิศวกรรมสาขาภิบาล  
สาขาวิชา ..... วิศวกรรมสาขาภิบาล  
ปีการศึกษา ..... 2530

ลายมือชื่อนิสิต ..... พงษ์ วัฒนศิริ  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ..... N. S.  
..... วัฒนศิริ

SOMCHAI JEAMTEERASAKUL : PRODUCTION OF METHANE GAS FROM SOLID WASTES BY A TWO-STAGE ANAEROBIC PROCESS. THESIS ADVISOR : ASSISTANT PROFESSOR SUTHIRAK SUJARITTANONTA, Ed.D., ASSOCIATE PROFESSOR WEERAWAN PATTAMAPIRAT, 201 pp.

The objective of this study is to investigate the possibility of conversion of garbage to methane gas by a two-stage anaerobic digestion. Biogas product can be used as an energy source. The efficiency of the process is compared to the single-stage anaerobic digestion of garbage which was studied.

The results of the study at various hydraulic retention time of 3.49, 5.17, 11.39 and 15.91 days and the substrate concentration between 0.18 to 0.80 kg VS added/m<sup>3</sup>-day indicated that the total value of gas yield expressed in litter of gas per gram of volatile solids added were between 0.052 to 0.228 and the composition of methane gas were between 58.98 to 66.91%. For hydraulic retention time of 8.47 days, the gas yield was optimum at 0.300 lCH<sub>4</sub>/gmVS added and also the composition of methane gas was also high.

It was found that the efficiency of the two-stage anaerobic digestion was higher than the single-stage anaerobic digestion process. The percentage of total COD removal were between 56.98 to 94.38 % and the total solid removal were between 86.67 to 97.79 %.



ภาควิชา ..... วิศวกรรมสุขาภิบาล  
สาขาวิชา ..... วิศวกรรมสุขาภิบาล  
ปีการศึกษา ..... 2530

ลายมือชื่อนิสิต ..... นาย พิณณัฐภรณ์  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....  
.....



## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณท่านผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุทธิรักษ์ สุจริตตานนท์ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษา ในการวิจัย และท่านรองศาสตราจารย์ วีรวรรณ บัณฑากิรัต อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม รวมทั้งท่านอาจารย์ทุกท่านในภาควิชา วิศวกรรมสุขาภิบาล ที่ได้ให้คำปรึกษาแนะนำ จนทำให้งานวิจัยนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้

ขอขอบคุณ ศูนย์พันธุวิศวกรรมและเทคโนโลยีชีวภาพแห่งชาติ กระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและการพลังงาน ซึ่งเป็นเจ้าของเงินทุนในการทำวิจัยนี้

ขอขอบคุณ คุณสมศรี เจียมธีรสกุลน้องของผู้วิจัย ที่มีส่วนสำคัญให้งานเขียนวิทยานิพนธ์นี้สิ้นสุดท้ายให้สำเร็จลงได้

และผู้ที่มีส่วนอย่างสูงสุดต่อการเรียน จนสำเร็จของผู้วิจัย ซึ่งตลอดเวลาเป็นผู้ที่ได้ทำงานอย่างหนัก สละหยาดเหงื่อ แรงกาย แรงใจ ตลอดจนได้ให้กำลังใจแก่ผู้วิจัย จนสำเร็จการศึกษา ก็คือ แม่ ดังนั้นประโยชน์และคุณค่าที่พึงมีใด ๆ จึงขอมอบเป็นคุณความดีของท่านรวมทั้งพ่อผู้จากไป ก่อนจะเห็นความสำเร็จของผู้วิจัย

สมชาย เจียมธีรสกุล



## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย .....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	จ
กิตติกรรมประกาศ .....	ฉ
สารบัญ .....	ช
สารบัญตาราง .....	ฅ
สารบัญรูป .....	ท
บทที่	
1     บทนำ .....	1
2     วัตถุประสงค์และขอบเขตของการวิจัย .....	3
2.1 วัตถุประสงค์ของการวิจัย .....	3
2.2 ขอบเขตของการวิจัย .....	3
3     ทฤษฎี .....	4
3.1 กล่าวนำ .....	4
3.2 กระบวนการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศ .....	4
3.2.1 การแตกสลายโพลีเมอร์ .....	6
3.2.2 การสร้างกรด .....	7
3.2.3 การสร้างมีเทน .....	7
3.3 ชนิดของจุลินทรีย์ในการย่อยสลายโดยไม่ใช้ออกซิเจน .....	10
3.3.1 แบคทีเรียที่ทำให้เกิดกรด .....	10
3.3.2 แบคทีเรียที่ทำให้เกิดก๊าซมีเทน .....	10
3.3.3 แบคทีเรียพวกรีดิวซ์ซัลเฟต .....	11

3.4	ปัจจัยที่มีผลต่อเสถียรภาพของระบบ .....	11
3.4.1	ปัจจัยทางด้านสิ่งแวดล้อม .....	12
	ก) พีเอช .....	12
	ข) ความเป็นด่าง .....	16
	ค) กรดไคลาไทล์ .....	19
	ง) อุณหภูมิ .....	21
	จ) อาหารเสริม .....	24
	ฉ) สารพิษ .....	26
	1) พิษของกรดไคลาไทล์ .....	27
	2) พิษของเกลืออนินทรีย์ .....	27
	3) พิษของโลหะหนัก .....	30
	4) พิษของก๊าซบางชนิด .....	33
	5) พิษของสารอินทรีย์ .....	35
3.4.2	ปัจจัยทางด้านการทำงาน .....	36
	ก) ระยะเวลาในการหมัก .....	36
	ข) อัตราการให้สารอินทรีย์ .....	36
	ค) ความเข้มข้นของของแข็ง .....	36
	ง) การกวน .....	39
	จ) ปริมาณความร้อนและสมดุลความร้อน .....	40
3.5	สาเหตุของการล้มเหลวของระบบ .....	41
3.5.1	การให้ของเหลวเข้าสู่ระบบมากเกินไป .....	41
3.5.2	การให้สารอินทรีย์เข้าสู่ระบบมากเกินไป .....	42
3.5.3	การให้สารพิษเข้าสู่ระบบมากเกินไป .....	42
3.6	องค์ประกอบและปริมาณก๊าซที่ได้ .....	42
3.7	พลังงานจากก๊าซชีวภาพ .....	43



3.8	ความสัมพันธ์ทางจุลศาสตร์ของจุลินทรีย์กับการย่อยสลายสารอินทรีย์ .....	45
3.9	การย่อยสลายแบบไร้อากาศสองขั้นตอน .....	54
3.9.1	ข้อดีและข้อเสียของการย่อยสลายแบบไร้อากาศแบบธรรมดา	54
3.9.2	การพัฒนาของระบบการย่อยสลายแบบไร้อากาศสองขั้นตอน .	55
3.9.3	ข้อดีและข้อเสียของระบบการย่อยสลายแบบไร้อากาศ สองขั้นตอน .....	56
3.9.4	วิธีการแยกขั้นตอนการทำงาน .....	58
3.9.5	การศึกษาที่ผ่านมาและการนำไปใช้งาน .....	59
3.9.6	การศึกษาทางจุลศาสตร์ .....	64
4	การวางแผนการทดลองและวิจัย .....	68
4.1	แผนการทดลอง .....	68
4.2	วิธีเริ่มการทดลอง .....	68
4.3	การเตรียมสารอาหาร .....	73
4.4	การบ้อนสารอาหาร .....	73
4.5	เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง .....	77
4.5.1	ถังหมักกรด .....	77
4.5.2	ถังตกตะกอน .....	77
4.5.3	ถังหมักก๊าซ .....	80
4.5.4	เครื่องตั้งเวลา .....	80
4.5.5	บิมพ์บ้อนสารอาหารและเวียนตะกอน .....	80
4.5.6	บิมพ์สำหรับการกวน .....	80
4.5.7	มอเตอร์สำหรับการกวนสารอาหาร .....	80
4.5.8	เครื่องบดขยะ .....	83
4.5.9	ก๊าซมิเตอร์ .....	83
4.6	วิธีวิเคราะห์ .....	83

4.6.1	พีเอช .....	83
4.6.2	สภาพความเป็นต่างและกรดโวลทาไทล์ .....	83
4.6.3	ของแข็งทั้งหมดและของแข็งระเหย .....	85
4.6.4	ของแข็งแขวนลอยและของแข็งระเหยแขวนลอย .....	85
4.6.5	ซีโอติ และไนโตรเจน .....	86
4.6.6	องค์ประกอบของก๊าซ .....	86
5	ผลการวิจัยและการอภิปรายผล .....	89
5.1	การเริ่มต้น .....	89
5.2	การทดลองและผลการทดลอง .....	90
5.3	การเปลี่ยนแปลงค่าต่าง ๆ ของระบบทั้งหมด .....	91
5.3.1	พีเอช, ความเป็นต่าง และกรดโวลทาไทล์ .....	91
5.3.2	ซีโอติ .....	104
5.3.3	ของแข็ง และตะกอนของแข็งในระบบ .....	111
5.3.4	ไนโตรเจน .....	112
5.3.5	ก๊าซ .....	112
5.4	การเปลี่ยนแปลงภายในถังหมักก๊าซที่ระยะเวลาการหมักต่าง ๆ .....	115
5.4.1	พีเอช, ความเป็นต่าง และกรดโวลทาไทล์ .....	115
5.4.2	ซีโอติ .....	119
5.4.3	ตะกอนในถังหมัก .....	119
5.4.4	ไนโตรเจน .....	120
5.4.5	ก๊าซ .....	122
5.5	ตะกอนและแบคทีเรียที่พบในถังหมัก .....	127
5.6	การวิเคราะห์และเปรียบเทียบผล .....	132
6	สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ .....	142
6.1	สรุปผลวิจัย .....	142

บทที่	หน้า
6.2 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยที่น่าจะทำต่อไป .....	143
7 ความสำคัญทางวิศวกรรม .....	144
เอกสารอ้างอิง .....	146
ภาคผนวก .....	158
ก. ผลการวิเคราะห์ตัวอย่างก๊าซ .....	158
ข. ชาวที่เกี่ยวข้อง .....	169
ประวัติผู้เขียน .....	182

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1	แสดงองค์ประกอบทางเคมีของ Sewage sludge, Solid wastes, Manure of hens และ Beef cattle manure ..... 6
3.2	แสดงอัตราการย่อยสลายของเซลล์ูโลสภายใต้การย่อยสลายแบบไร้อากาศ ... 8
3.3	ปัจจัยทางด้านสิ่งแวดล้อมและด้านการควบคุม ..... 12
3.4	แสดงผลการทดลองต่าง ๆ เกี่ยวกับผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิต่อการเกิดก๊าซ ..... 25
3.5	ความเข้มข้นของการกระตุ้นและยับยั้งของอัลคาไล และอัลคาไลเอิร์ทที่เป็นประจุบวก ..... 29
3.6	ผลของ ammonia-nitrogen ต่อระบบบำบัดน้ำทิ้งแบบไม่ใช้ออกซิเจน ..... 34
3.7	ปริมาณก๊าซที่ได้ตามทฤษฎีจากองค์ประกอบต่าง ๆ ของพืช ..... 43
3.8	แสดงปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดจากการย่อยสลายวัสดุจำพวกพืชผัก ..... 44
3.9	คุณสมบัติทางฟิสิกส์และเคมีของก๊าซมีเทน ..... 46
3.10	สรุปรวมสมการของระบบการย่อยสลายแบบต่าง ๆ ..... 53
3.11	ตารางรวบรวมการใช้งานของระบบการย่อยสลายแบบไร้อากาศสองขั้นตอน ทั้งที่เป็นโครงการนำร่อง และโรงงานเต็มรูป ..... 63
4.1	ผลการวัดค่าเปอร์เซ็นต์ของแข็ง และของแข็งระเหยของพืชผักบางชนิด ที่ใช้เป็นตัวอย่างขยะ ..... 75
4.2	แสดงค่าเฉลี่ยของสารอาหารที่ใช้ในการทดลองในถังกวนใส่อาหาร ..... 76
5.1	สรุปค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่ได้จากการทดลอง ..... 92
5.2	แสดงคุณลักษณะของสลัดจ์ที่ออกจากระบบ ที่ระยะเวลาในการหมักต่าง ๆ .... 93
5.3	สรุปค่าเปอร์เซ็นต์สะสมของการกำจัดกรดโวลลาไทล์ และซีไอดี ภายในถังหมักต่าง ๆ ของระบบ ที่ HRT ต่าง ๆ ของถังหมักก๊าซ ..... 104

ตารางที่	๕
	หน้า
5.4	ค่าเปอร์เซ็นต์ของการกำจัดซีโอดีของระบบ ที่ HRT ต่าง ๆ ..... 110
5.5	สรุปค่าตัวแปรที่ได้จากการทดลอง ภายในถังหมักก๊าซ ที่ HRT ต่าง ๆ ..... 116
5.6	สรุปผลการทดลองและการวิเคราะห์ของระบบ ..... 133
5.7	แสดงปริมาณของแข็งทั้งหมดและของแข็งระเหยที่ถูกทำลายไป ..... 139
5.8	แสดงปริมาณของแข็งทั้งหมดและของแข็งระเหยที่ถูกทำลายไปของการทดลอง การหมักแบบไร้อากาศสองขั้นตอน ..... 140
5.9	ตารางการเปรียบเทียบค่าอัตราการเกิดก๊าซต่อของแข็งระเหย และซีโอดี ที่ใส่เข้าไป ..... 141
7.1	ปริมาณก๊าซชีวภาพสำหรับใช้ในกิจกรรมต่าง ๆ ..... 145

## สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
3.1	การย่อยสลายสารอินทรีย์ที่เป็นของแข็งภายใต้ภาวะไร้อากาศ .....	5
3.2	ผลของอุณหภูมิและพีเอชต่ออัตราสูงสุดของการใช้เซลล์โลส .....	9
3.3	ความสัมพันธ์ทางทฤษฎีระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์, พีเอช และความเป็นต่าง ของถังหมักไร้ออกซิเจน .....	14
3.4	ความสัมพันธ์ระหว่างพีเอช และความเข้มข้นไบคาร์บอเนต .....	18
3.5	ผลของอุณหภูมิที่มีต่อระยะเวลาการย่อยสลาย .....	22
3.6	ผลของอุณหภูมิ และระยะเวลาการหมักต่ออัตราการเกิดก๊าซจากขยะ .....	23
3.7	อิทธิพลของเกลือต่อปฏิกิริยาการทำงานของแบคทีเรียชนิดที่ไม่ใช้ออกซิเจน ...	28
3.8	แสดงความสัมพันธ์ของ cation 2 ชนิด คือ A และ B ซึ่งเมื่ออยู่ด้วยกันแล้ว จะเกิด antagonism หรือ synergism ได้ .....	31
3.9	ปฏิกิริยาการทำลายพิษของโลหะหนักโดยซัลไฟด์ ( $S^{2-}$ ) ในสภาวะที่ไม่มี ออกซิเจน .....	32
3.10	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการจ่ายสารอินทรีย์, ความเข้มข้นของของแข็ง ที่เข้าสู่ระบบ และระยะเวลาการหมัก .....	37
3.11	การเปลี่ยนแปลงของของแข็งระเหยที่ถูกทำลายไปกับระยะเวลาการหมัก ....	38
3.12	อัตราการใช้สารอาหารต่อหน่วยน้ำหนักของมวลเซลล์ ต่อความเข้มข้นของ สารอาหารที่จำกัด .....	48
3.13	ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการกักเก็บตะกอน, ความเข้มข้นของน้ำเสีย ที่ออกจากระบบ และประสิทธิภาพของการกำจัดทางชีววิทยาแบบไหลต่อเนื่อง .	51
3.14	แผนผังแสดงระบบการย่อยสลายแบบต่าง ๆ .....	53
3.15	แบบจำลองทางกายภาพของกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศสองขั้นตอน ..	57

รูปที่	หน้า
3.16 ชุดอุปกรณ์การทดลองการหมักแบบสองขั้นตอนของ Ghosh et al. ....	60
3.17 แผนผังการทดลองการย่อยสลายแบบไร้อากาศสองขั้นตอนของ Pohland & Massey .....	61
3.18 แผนผังการทดลองการย่อยสลายแบบไร้อากาศสองขั้นตอนของ Ghosh et al.	62
3.19 งบประมาณที่ใช้ในการหมักน้ำกากส่าเพื่อให้ได้ก๊าซมีเทนสำหรับโรงงานสุรา 12 โรง ในประเทศไทย .....	64
4.1 ขั้นตอนการทำงานของระบบการย่อยสลายแบบไร้อากาศสองขั้นตอน .....	69
4.2 แผนผัง (flow chart) การจัดระบบถังหมักในห้องปฏิบัติการ .....	70
4.3 ชุดอุปกรณ์การวิจัยในห้องปฏิบัติการ .....	71
4.4 สภาพทั่วไปของตลาดสามย่านที่เป็นแหล่งเก็บตัวอย่างขยะเพื่อการทดลอง.....	74
4.5 ขยะทั่วไปที่เกิดประจำวันจากตลาดสามย่านที่นำมาใช้ทดลอง .....	74
4.6 ถังหมักกรด (Acid Reactor) .....	78
4.7 ถังตกตะกอน (Clarifier) .....	79
4.8 ถังหมักก๊าซ (Methane Reactor) .....	81
4.9 บัมพ์สำหรับบ่อนสารอาหารและเวียนตะกอนกลับ .....	82
4.10 ก๊าซมิเตอร์ (Gas meter) .....	84
4.11 เครื่องต้มกลั่นสำหรับหา แอมโมเนีย-ไนโตรเจน และทีเคเอ็น .....	87
4.12 เครื่อง GC-7AG และอุปกรณ์ประกอบสำหรับวิเคราะห์หาเปอร์เซ็นต์องค์ประกอบของก๊าซ .....	87
4.13 เครื่อง Orsat Gas Analyzer .....	88
5.1 การเปลี่ยนแปลงของพีเอช, สภาพความเป็นด่าง และกรดโวลาทิลของการทดลองชุดที่สอง ที่ HRT ของถังหมักก๊าซเท่ากับ 2.61 วัน .....	94
5.2 การเปลี่ยนแปลงของพีเอช, สภาพความเป็นด่าง และกรดโวลาทิลของการทดลองชุดที่หนึ่ง ที่ HRT ของถังหมักก๊าซเท่ากับ 4.28 วัน .....	95

รูปที่		หน้า
5.3	การเปลี่ยนแปลงของพีเอช, สภาพความเป็นด่าง และกรดไวลาไทล์ ของการทดลองชุดที่หนึ่ง ที่ HRT ของถังหมักก๊าซเท่ากับ 10.50 วัน .....	96
5.4	การเปลี่ยนแปลงของพีเอช, สภาพความเป็นด่าง และกรดไวลาไทล์ ของการทดลองชุดที่สอง ที่ HRT ของถังหมักก๊าซเท่ากับ 15.03 วัน .....	97
5.5	แสดงค่าเปอร์เซ็นต์สะสมของกรดไวลาไทล์ที่ถูกกำจัดในถังหมักต่าง ๆ ของการทดลองชุดที่สอง ที่ HRT ของถังหมักก๊าซเท่ากับ 2.61 วัน .....	100
5.6	แสดงค่าเปอร์เซ็นต์สะสมของกรดไวลาไทล์ที่ถูกกำจัดในถังหมักต่าง ๆ ของการทดลองชุดที่หนึ่ง ที่ HRT ของถังหมักก๊าซเท่ากับ 4.28 วัน .....	100
5.7	แสดงค่าเปอร์เซ็นต์สะสมของกรดไวลาไทล์ที่ถูกกำจัดในถังหมักต่าง ๆ ของการทดลองชุดที่หนึ่ง ที่ HRT ของถังหมักก๊าซเท่ากับ 10.50 วัน .....	101
5.8	แสดงค่าเปอร์เซ็นต์สะสมของกรดไวลาไทล์ที่ถูกกำจัดในถังหมักต่าง ๆ ของการทดลองชุดที่สอง ที่ HRT ของถังหมักก๊าซเท่ากับ 15.03 วัน .....	101
5.9	การเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนของกรดไวลาไทล์ต่อสภาพความเป็นด่าง ของการทดลองชุดที่สอง ที่ HRT ของถังหมักก๊าซเท่ากับ 2.61 วัน .....	102
5.10	การเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนของกรดไวลาไทล์ต่อสภาพความเป็นด่าง ของการทดลองชุดที่หนึ่ง ที่ HRT ของถังหมักก๊าซเท่ากับ 4.28 วัน .....	102
5.11	การเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนของกรดไวลาไทล์ต่อสภาพความเป็นด่าง ของการทดลองชุดที่หนึ่ง ที่ HRT ของถังหมักก๊าซเท่ากับ 10.50 วัน .....	103
5.12	การเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนของกรดไวลาไทล์ต่อสภาพความเป็นด่าง ของการทดลองชุดที่สอง ที่ HRT ของถังหมักก๊าซเท่ากับ 15.03 วัน .....	103
5.13	การเปลี่ยนแปลงค่า COD ภายในถังหมักต่าง ๆ ของการทดลองชุดที่สอง ที่ HRT ของถังหมักก๊าซเท่ากับ 2.61 วัน .....	105
5.14	แสดงค่าเปอร์เซ็นต์สะสมของ COD ที่ถูกกำจัด ของการทดลองชุดที่สอง ที่ HRT ของถังหมักก๊าซเท่ากับ 2.61 วัน .....	105



รูปที่	หน้า
5.15	การเปลี่ยนแปลงค่า COD ภายในถังหมักต่าง ๆ ของการทดลองชุดที่หนึ่ง ที่ HRT ของถังหมักก๊าซเท่ากับ 4.28 วัน ..... 106
5.16	แสดงค่าเปอร์เซ็นต์สะสมของ COD ที่ถูกกำจัด ของการทดลองชุดที่หนึ่ง ที่ HRT ของถังหมักก๊าซเท่ากับ 4.28 วัน ..... 106
5.17	การเปลี่ยนแปลงค่า COD ภายในถังหมักต่าง ๆ ของการทดลองชุดที่หนึ่ง ที่ HRT ของถังหมักก๊าซเท่ากับ 10.50 วัน ..... 107
5.18	แสดงค่าเปอร์เซ็นต์สะสมของ COD ที่ถูกกำจัด ของการทดลองชุดที่หนึ่ง ที่ HRT ของถังหมักก๊าซเท่ากับ 10.50 วัน ..... 107
5.19	การเปลี่ยนแปลงค่า COD ภายในถังหมักต่าง ๆ ของการทดลองชุดที่สอง ที่ HRT ของถังหมักก๊าซเท่ากับ 15.03 วัน ..... 108
5.20	แสดงค่าเปอร์เซ็นต์สะสมของ COD ที่ถูกกำจัด ของการทดลองชุดที่สอง ที่ HRT ของถังหมักก๊าซเท่ากับ 15.03 วัน ..... 108
5.21	แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ของการกำจัด COD ของระบบ ที่ HRT รวมเท่ากับ 3.49, 5.17, 11.39 และ 15.91 วัน ..... 110
5.22	การเปลี่ยนแปลงของ $\text{NH}_3\text{-N}$ , Organic-N และ TKN ในถังหมักต่าง ๆ ของการทดลองชุดที่สอง ที่ HRT ของถังหมักก๊าซเท่ากับ 2.61 วัน ..... 113
5.23	การเปลี่ยนแปลงของ $\text{NH}_3\text{-N}$ , Organic-N และ TKN ในถังหมักต่าง ๆ ของการทดลองชุดที่หนึ่ง ที่ HRT ของถังหมักก๊าซเท่ากับ 4.28 วัน ..... 113
5.24	การเปลี่ยนแปลงของ $\text{NH}_3\text{-N}$ , Organic-N และ TKN ในถังหมักต่าง ๆ ของการทดลองชุดที่หนึ่ง ที่ HRT ของถังหมักก๊าซเท่ากับ 10.50 วัน ..... 114
5.25	การเปลี่ยนแปลงของ $\text{NH}_3\text{-N}$ , Organic-N และ TKN ในถังหมักต่าง ๆ ของการทดลองชุดที่สอง ที่ HRT ของถังหมักก๊าซเท่ากับ 15.03 วัน ..... 114
5.26	การเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอช ในถังหมักก๊าซที่ HRT ต่าง ๆ กัน ..... 117
5.27	การเปลี่ยนแปลงของสภาพความเป็นด่าง ในถังหมักก๊าซที่ HRT ต่าง ๆ กัน .. 117
5.28	การเปลี่ยนแปลงของกรดเวลาไทล์ ในถังหมักก๊าซที่ HRT ต่าง ๆ กัน ..... 118

รูปที่	หน้า
5.29	อัตราส่วนของกรดโวลาทิลต่อสภาพความเป็นด่าง ในถังหมักก๊าซ ที่ HRT ของถังหมักก๊าซต่าง ๆ กัน ..... 118
5.30	แสดงการเปลี่ยนแปลงค่าของ COD ทั้งหมด และ COD ละลาย ในถังหมักก๊าซ ที่ HRT ของถังหมักก๊าซต่าง ๆ กัน ..... 120
5.31	แสดงการเปลี่ยนแปลงค่าของ COD ทั้งหมด และ COD ละลาย ในถังหมักก๊าซ ที่ถูกกำจัดจากถังตกตะกอน ที่ HRT ของถังหมักก๊าซต่าง ๆ กัน ..... 121
5.32	แสดงค่าเป็นเปอร์เซ็นต์ของ COD ทั้งหมด และ COD ละลาย ในถังหมักก๊าซ ที่ถูกกำจัดจากถังตกตะกอน ที่ HRT ของถังหมักก๊าซต่าง ๆ กัน ..... 121
5.33	ตะกอนมวลเซลล์ที่มีในถังหมักก๊าซ ที่ HRT ของถังหมักก๊าซต่าง ๆ กัน ..... 123
5.34	การเปลี่ยนแปลงของ $NH_3-N$ , Organic-N และ TKN ในถังหมักก๊าซ ที่ HRT ของถังหมักก๊าซต่าง ๆ กัน ..... 123
5.35	เปอร์เซ็นต์องค์ประกอบของก๊าซชนิดต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในถังหมักก๊าซ ที่ HRT ต่าง ๆ ของถังหมักก๊าซ วิเคราะห์ด้วยเครื่อง GC-7AG ..... 124
5.36	แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ของก๊าซชนิดต่าง ๆ ที่พบในถังหมักก๊าซ ที่ HRT ต่าง ๆ ของถังหมักก๊าซ ..... 125
5.37	อัตราการผลิตก๊าซต่อวันที่ HRT ต่าง ๆ ของถังหมักก๊าซ ..... 126
5.38	อัตราส่วนการผลิตก๊าซ ต่อปริมาตรของถังหมักก๊าซ ที่ HRT ต่าง ๆ ..... 126
5.39	อัตราการผลิตก๊าซมีเทน ต่อกรัม COD ที่ใช้ไปในถังหมักก๊าซ ที่ HRT ต่าง ๆ . 127
5.40	ตะกอนที่พบในถังหมักกรด กำลังขยาย 100 เท่า ..... 128
5.41	ตะกอนและเศษท่อนำอาหารของพืชที่พบในถังหมักกรด กำลังขยาย 400 เท่า . 128
5.42	แบคทีเรียที่พบในถังหมักกรด กำลังขยาย 1,000 เท่า ..... 129
5.43	ตะกอนที่พบในถังหมักก๊าซ กำลังขยาย 100 เท่า ..... 130
5.44	ตะกอนและเศษท่อนำอาหารของพืชที่พบในถังหมักก๊าซ กำลังขยาย 400 เท่า . 130
5.45	แบคทีเรียที่พบในถังหมักก๊าซ กำลังขยาย 1,000 เท่า ..... 131
5.46	แสดงเปอร์เซ็นต์การกำจัด COD และ VS ของระบบที่ HRT ต่าง ๆ ..... 134

รูปที่	หน้า
5.47	เปอร์เซ็นต์การผลิตก๊าซมีเทนรวมของระบบที่ HRT ต่าง ๆ ..... 134
5.48	ความสัมพันธ์ระหว่าง ลิตรมีเทนต่อกรัมของแข็งระเหยที่ใส่เข้าไป กับ 1/HRT 135
5.49	ความสัมพันธ์ระหว่าง ลิตรมีเทนต่อกรัมของแข็งระเหยที่ใส่เข้าไป กับ 1/HRT จากงานวิจัยของ คักตี้ชัย โอภาสวัชชัย (2527) ..... 136
5.50	ความสัมพันธ์ระหว่าง HRT กับการเกิดก๊าซ ..... 136
5.51	อัตราการเกิดก๊าซต่อปริมาตรของถังหมัก ของระบบที่ HRT ต่าง ๆ ..... 137
5.52	อัตราการเกิดก๊าซมีเทนที่ระยะเวลาในการหมัก 10, 15 และ 25 วัน ..... 137
ก.1	แสดงค่ามาตรฐานที่ปรับก่อนการหาค่าเปอร์เซ็นต์ของก๊าซออกซิเจน, ไนโตรเจน และมีเทน ..... 159
ก.2	แสดงค่ามาตรฐานที่ปรับก่อนการหาค่าเปอร์เซ็นต์ของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ . 160
ก.3	แสดงผลการวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์ของก๊าซออกซิเจน, ไนโตรเจน และมีเทน จากถังหมักก๊าซใบที่หนึ่ง ที่ HRT เท่ากับ 2.61 วัน ..... 161
ก.4	แสดงผลการวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์ของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ จากถังหมักก๊าซใบที่หนึ่ง ที่ HRT เท่ากับ 2.61 วัน ..... 162
ก.5	แสดงผลการวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์ของก๊าซออกซิเจน, ไนโตรเจน และมีเทน จากถังหมักก๊าซใบที่หนึ่ง ที่ HRT เท่ากับ 4.28 วัน ..... 163
ก.6	แสดงผลการวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์ของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ จากถังหมักก๊าซใบที่หนึ่ง ที่ HRT เท่ากับ 4.28 วัน ..... 164
ก.7	แสดงผลการวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์ของก๊าซออกซิเจน, ไนโตรเจน และมีเทน จากถังหมักก๊าซใบที่สอง ที่ HRT เท่ากับ 10.50 วัน ..... 165
ก.8	แสดงผลการวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์ของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ จากถังหมักก๊าซใบที่สอง ที่ HRT เท่ากับ 10.50 วัน ..... 166
ก.9	แสดงผลการวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์ของก๊าซออกซิเจน, ไนโตรเจน และมีเทน จากถังหมักก๊าซใบที่สอง ที่ HRT เท่ากับ 15.03 วัน ..... 167
ก.10	แสดงผลการวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์ของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ จากถังหมักก๊าซใบที่สอง ที่ HRT เท่ากับ 15.03 วัน ..... 168