

การบำบัดเบื้องต้นโดยใช้วิธีทางความร้อนและทางชีวภาพต่อความสามารถในการ
ย่อยสลายของไบโอดีในระบบไร้อากาศ



นาย สุรพงศ์ นนทประเสริฐ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2553

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

THERMAL AND BIOLOGICAL PRETREATMENT ON ANAEROBIC DIGESTION
POTENTIAL OF SUGARCANE LEAVES



Mr. Surapong Nontaprasert

ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
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 2010

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การบำบัดเบื้องต้นโดยใช้วิธีทางความร้อนและทางชีวภาพต่อ

ความสามารถในการย่อยสลายของไบโอดีในระบบไร้อากาศ

โดย

นายสุรพงศ์ นนทประเสริฐ


สาขาวิชา

วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

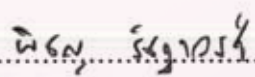
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิชญ รัชฎาวงศ์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารธุรกิจ


..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศนันทวงค์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ชวลิต รัตนธรรมสกุล)


..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิชญ รัชฎาวงศ์)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริมา ปัญญาเมธิกุล)


..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนิท เรืองรุ่งชัยกุล)

สุรพงศ์ นนทประเสริฐ : การบำบัดเบื้องต้นโดยใช้วิธีทางความร้อนและทางชีวภาพต่อความสามารถในการย่อยสลายของใบช้อยในระบบไร้อากาศ. (THERMAL AND BIOLOGICAL PRETREATMENT ON ANAEROBIC DIGESTION POTENTIAL OF SUGARCANE LEAVES) อ. ที่ปริกษานิพนธ์หลัก : ผศ.ดร.พิชญ รัชฎาวงศ์, 188 หน้า.

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาผลการบำบัดเบื้องต้นทางความร้อนและทางชีวภาพที่มีผลต่อความสามารถในการย่อยสลายสารอินทรีย์ของใบช้อยในระบบไร้อากาศ โดยศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากใบช้อยที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นด้วยระบบไร้อากาศ และการปฏิบัติการจริงในระดับถังหมัก ในงานวิจัยนี้แบ่งการทดลองออกเป็น 3 การทดลอง คือ การทดลองที่ 1 ศึกษาผลการบำบัดเบื้องต้นด้วยไอน้ำ การบำบัดเบื้องต้นด้วยน้ำร้อน และการบำบัดเบื้องต้นทางชีวภาพ การทดลองที่ 2 เป็นการทดลองการผลิตก๊าซชีวภาพของใบช้อยที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นด้วยวิธีการทำ Biochemical Methane Potential (BMP) และการทดลองที่ 3 ศึกษาการปฏิบัติการจริงด้วยถังหมักไร้อากาศขนาด 40 ลิตร

ผลการทดลองที่ 1 พบว่าค่าซีไอดีละลายของน้ำย่อยจากใบช้อยที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นด้วยไอน้ำที่ระยะเวลา 60 นาที จะมีค่าซีไอดีละลายเฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ 5,634±95 มิลลิกรัมต่อลิตร และการบำบัดเบื้องต้นทางชีวภาพที่อัตราส่วน 1:2 ระยะเวลา 7 วัน มีค่าซีไอดีละลายเฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ 6,375±393 มิลลิกรัมต่อลิตร เปรียบเทียบกับค่าซีไอดีละลายของน้ำย่อยจากใบช้อยที่ไม่ได้ผ่านการบำบัดเบื้องต้นมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1,980±92 มิลลิกรัมต่อลิตร เห็นได้ว่าใบช้อยเมื่อผ่านการบำบัดเบื้องต้นแล้วมีค่าซีไอดีละลายที่เพิ่มขึ้น

ผลการทดลองที่ 2 พบว่าอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพของใบช้อยและน้ำย่อยจากใบช้อยที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นด้วยไอน้ำที่ระยะเวลา 60 นาที มีปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมสูงสุดเท่ากับ 373.46 มิลลิลิตร โดยปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมของใบช้อยและน้ำย่อยจากใบช้อยที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นมีค่าอยู่ในช่วง 112.99-373.47 มิลลิลิตร เปรียบเทียบกับปริมาณก๊าซชีวภาพของใบช้อยที่ไม่ได้ผ่านการบำบัดเบื้องต้นมีปริมาณก๊าซชีวภาพรวมเท่ากับ 82.57 มิลลิลิตร ใบช้อยและน้ำย่อยที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นแล้วจะมีอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพที่สูงกว่าใบช้อยที่ไม่ผ่านการบำบัดเบื้องต้น

ผลการทดลองที่ 3 พบว่าตัวอย่างที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นด้วยไอน้ำและการบำบัดเบื้องต้นด้วยน้ำร้อนที่ระยะเวลา 60 นาที มีปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมเท่ากับ 954 และ 405 มิลลิลิตรต่อกรัมของแข็งระเหย ตามลำดับ โดยมีค่าความเข้มข้นของก๊าซมีเทนสูงสุดร้อยละ 50.2 และ 49.6 9 ตามลำดับสำหรับการบำบัดเบื้องต้นทางชีวภาพที่อัตราส่วนมูลวัวต่อใบช้อย 1:3 และที่อัตราส่วนมูลวัวต่อใบช้อย 1:2 ระยะเวลาการบำบัด 7 วันมีปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม เท่ากับ 436 และ 516 มิลลิลิตรต่อกรัมของแข็งระเหย ตามลำดับ มีค่าความเข้มข้นของก๊าซมีเทนสูงสุดร้อยละ 40.9 และ 61.6 ตามลำดับ โดยการบำบัดเบื้องต้นด้วยไอน้ำที่ระยะเวลา 60 นาที มีปริมาณก๊าซชีวภาพเกิดขึ้นสูงที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองที่ 2

ภาควิชา.....วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม.....ลายมือชื่อ.....สุรพงศ์ นนทประเสริฐ.....
 สาขาวิชา.....วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม.....ลายมือชื่อ.....ที่ปริกษานิพนธ์หลัก.....ผศ.ดร.พิชญ รัชฎาวงศ์.....
 ปีการศึกษา.....2553.....

5070702821 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEYWORDS : THERMAL PRETREATMENT / BIOLOGICAL PRETREATMENT /
LIGNOCELLULOSIC BIOMASS/ ANAEROBIC DIGESTION / BIOGAS

SURAPONG NONTAPRASERT :THERMAL AND BIOLOGICAL PRETREATMENT
ON ANAEROBIC DIGESTION POTENTIAL OF SUGARCANE LEAVES.ADVISOR
: ASST.PROF. PICHAYA RACHDAWONG, Ph.D., 188pp.

This research aimed to study thermal and biological pretreatment processes that affect biodegradability of sugarcane leaves in anaerobic condition and to study biogas production in both bottle (BMP) and lab scale settings. This research was divided into 3 experiments. The first experiment was the study of pretreatment method: steam pretreatments (SP), hot water pretreatments (HP), and biological pretreatments (BP). The second experiment was the study of biogas production of pretreated sugarcane leaves with biochemical methane potential (BMP) modified anaerobic process. The final experiment was the study at lab scale anaerobic digestion in 40-liter reactor.

The results of the first experiment showed that the soluble COD (sCOD) of leachate mixture from pretreated sugarcane leaves were $5,634 \pm 95$ mg/l for steam pretreated at 60 minutes and was $6,375 \pm 393$ mg/l for biological pretreated at mixing ratio 1:2 at 7 day. Comparison with the sCOD of no pretreated sugarcane leaves of $1,980 \pm 143$ mg/l. The results of the first experiment showed that the sCOD of pretreated sugarcane leaves was higher than the no pretreated leaves.

Results of the second experiment showed that the volume of biogas of the 60 minute higher steam pretreated sugarcane leaves was 373.46 ml. The biogas of thermal and biological pretreated samples were in the range of 112.99-373.47 ml. They were than 82.57 ml of no pretreated sugarcane leaves. The results of second experiment showed that the cumulative biogas production from pretreated sugarcane leaves was higher than those with no pretreatment.

The results of the third experiment showed that volume of cumulative biogas, were 954 and 405 ml/g VS for SP 60 minute sample and HP 60 minute sample respectively. The cumulative biogas were 436 and 516 ml/g VS for BP 1:3 (7 day) sample and BP 1:2 (7 day) sample respectively. The percentage of methane was 50.2% and 49.6% for SP 60 and HP 60 respectively and was 40.9% and 61.6% for BP 1:3 (7 day) and BP 1:2 (7 day) respectively. The results of third experiment showed that highest rate of cumulative biogas production was from SP 60 minute. This is in consistent with second experiment.

Department : Environmental Engineering Student's Signature สุรพงศ์ นนท์ประเสริฐ
Field of Study : Environmental Engineering Advisor's Signature ปิชญา รักษาดำรง
Academic Year : 2010

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความกรุณา และช่วยเหลือจากบุคคลหลายท่าน ผู้วิจัยจึงขอกราบขอบพระคุณทุกท่าน ดังนี้

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พิชญ รัชฎาวงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้ความรู้ คำแนะนำ ข้อคิดเห็น และตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนเสร็จสมบูรณ์ รวมทั้งช่วยเหลือและสนับสนุนในการวิจัยจนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ได้สละเวลาเพื่อเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.ชวลิต รัตนธรรมสกุล ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริมา ปัญญาเมธีกุล และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนิต เรืองรุ่งชัยกุล ซึ่งทุกท่านได้ให้คำแนะนำอันเป็นแนวทางที่ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ทุนอุดหนุนวิทยานิพนธ์สำหรับงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณ อาจารย์ ดร.จักรกริณี เนื่องจำนงค์ ภาควิชาสัตวบาล คณะสัตวแพทยศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่อนุเคราะห์ให้ห้องปฏิบัติการที่ใช้ในงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณ คุณสมพงษ์ รุ่งกิจวัฒนานุกูล เจ้าของไร่อ้อยที่จังหวัดกาญจนบุรี ที่ให้ความอนุเคราะห์ไร่อ้อยที่ใช้ในงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณรุ่นพี่ และเพื่อนๆ นิสิตปริญญาโททุกคน ที่ให้ความช่วยเหลือในเชิงวิชาการ และแรงกายในการทำวิจัยนี้

สุดท้ายนี้ที่สำคัญที่สุด ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ คุณแม่ คุณพ่อ ที่ช่วยเหลือทุกอย่างในงานวิจัยนี้ ทั้งแรงกาย เช่น ขับรถไปเก็บใบอ้อย และการหั่นใบอ้อย ทั้งแรงใจ โดยให้กำลังใจ ให้คำปรึกษา และให้ความรัก ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญอย่างยิ่งแก่ผู้วิจัยเสมอมา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญภาพ.....	ฐ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ปริมาณของไบโอดี.....	4
2.2 โครงสร้างผนังเซลล์ของพืช.....	5
2.2.1 เซลลูโลส.....	8
2.2.2 เฮมิเซลลูโลส.....	9
2.2.3 ลิกนิน.....	10
2.3 กระบวนการบำบัดเบื้องต้นเพื่อย่อยสลายโครงสร้างชีวมวล.....	12
2.4 กระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศ.....	18
2.4.1 จุลชีววิทยาและชีวเคมีของกระบวนการไร้อากาศ.....	20
2.4.2 ขั้นตอนของปฏิกิริยาการย่อยสลายแบบไร้อากาศ.....	24
2.5 รูปแบบของระบบบำบัดแบบไม่ใช้อากาศ.....	28
2.5.1 ถังย่อย (digestion tank).....	29
2.5.2 ถังย่อยแบบสัมผัส (anaerobic contact).....	30
2.5.3 ถังย่อยแบบแยกเชื้อ.....	31
2.5.4 ถังกรองไร้อากาศ (anaerobic filter).....	32
2.5.5 ระบบชั้นลอยตัวแบบไม่ใช้อากาศ (anaerobic fluidized bed).....	33

	หน้า
2.5.6 ระบบยูเอเอเอสบี (upflow anaerobic sludge blanket).....	34
2.5.7 ระบบอีจีเอสบี (expanded granular sludge bed).....	35
2.5.8 ระบบจานหมุนไร้อากาศ.....	36
2.5.9 ระบบแผ่นกั้นไร้อากาศ (anaerobic baffled reactor).....	36
2.5.10 บ่อหมักแบบไร้อากาศ.....	37
2.6 ลักษณะการเดินระบบของถังหมักไร้อากาศสำหรับของแข็ง.....	38
2.7 ปัจจัยสภาวะแวดล้อมที่มีผลต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ.....	39
2.7.1 ลักษณะและองค์ประกอบของสารอินทรีย์ที่เติมให้แก่ถังหมักไร้อากาศ...	39
2.7.2 สารอาหาร.....	40
2.7.3 ปริมาณน้ำภายในถังหมักไร้อากาศ.....	40
2.7.4 การผสม.....	41
2.7.5 ความเป็นกรด-ด่าง และสภาพต่าง.....	41
2.7.6 อัตราการระสารถอินทรีย์และกรดไขมันระเหย.....	42
2.7.7 สารพิษ.....	42
2.7.8 อุณหภูมิ.....	42
2.7.9 ปริมาณออกซิเจน.....	43
2.8 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	44
บทที่ 3 ขั้นตอนและวิธีดำเนินการวิจัย.....	48
3.1 แผนการทดลอง.....	48
3.2 ใบข้อยที่ใช้ในการวิจัย.....	49
3.3 เชื้อจุลินทรีย์ที่ใช้ในการวิจัย.....	50
3.4 เครื่องมือ อุปกรณ์ และสารเคมี.....	51
3.4.1 หม้อไอน้ำความดัน.....	51
3.4.2 อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ.....	52
3.4.3 เครื่องเขย่า.....	53
3.4.4 อุปกรณ์การทดลองหาคักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทน.....	53
3.4.5 ถังปฏิกริยา.....	55
3.4.6 อุปกรณ์อื่นๆ.....	57
3.4.7 สารเคมีที่ใช้ในการวิจัย.....	57

	หน้า
3.4.8 สารอาหารเสริม.....	58
3.5 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	59
3.5.1 การทดลองที่ 1.....	59
3.5.2 การทดลองที่ 2.....	68
3.5.3 การทดลองที่ 3.....	71
3.6 วิธีการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในงานวิจัยนี้.....	76
3.7 ผลจากการทดลองวิธีการทำ BMP ในเบื้องต้นก่อนดำเนินงานวิจัย.....	76
บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล.....	78
4.1 ผลการวิเคราะห์เบื้องต้นของไบโอดี.....	78
4.2 ผลการวิเคราะห์เบื้องต้นของหัวเชื้อจุลินทรีย์.....	80
4.3 ผลการทดลองที่ 1.....	81
4.3.1 ผลการวิเคราะห์ค่าซีไอดีละลายของตัวอย่างในการทดลองที่ 1.....	81
4.3.2 ของแข็งระเหยในไบโอดีที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้น.....	87
4.4 ผลการทดลองที่ 2.....	89
4.4.1 ผลการวัดปริมาณก๊าซชีวภาพในการทดลองที่ 2.....	89
4.4.2 ผลการวิเคราะห์กรดไขมันระเหยสภาพต่าง และความเป็นกรดต่าง..	99
4.4.3 ผลการวิเคราะห์ความเข้มข้นของก๊าซมีเทนในการทดลองที่ 2.....	115
4.4.4 ความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน.....	117
4.5 ผลการทดลองที่ 3.....	121
4.5.1 ผลการวัดปริมาณก๊าซชีวภาพในการทดลองที่ 3.....	122
4.5.2 ผลการวิเคราะห์ปริมาณก๊าซชีวภาพต่อกรัมของแข็งระเหย ในการทดลองที่ 3.....	124
4.5.3 ผลการวัดค่าซีไอดีละลายในการทดลองที่ 3.....	128
4.5.4 ผลการวิเคราะห์ค่ากรดไขมันระเหย สภาพต่าง และความเป็น กรดต่างในการทดลองที่ 3.....	137
4.5.5 ผลการวิเคราะห์ความเข้มข้นของก๊าซมีเทนในการทดลองที่ 3.....	143
4.5.6 ผลการวิเคราะห์ค่าของแข็งทั้งหมดและของแข็งระเหย ในการทดลองที่ 3.....	143

	หน้า
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ.....	146
สรุปผลการทดลอง.....	146
ข้อเสนอแนะ.....	148
รายการอ้างอิง.....	149
ภาคผนวก.....	155
ภาคผนวก ก ผลการทดลองที่ 1.....	156
ภาคผนวก ข ผลการทดลองที่ 2.....	159
ภาคผนวก ค ผลการทดลองที่ 3.....	174
ภาคผนวก ง ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของใบอ้อย.....	180
ภาคผนวก จ วิธีวิเคราะห์พารามิเตอร์ที่ใช้ในงานวิจัย.....	182
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	188



 ศูนย์วิทยทรัพยากร
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1-1	แสดงสถิติของปริมาณผลผลิตการปลูกอ้อยของประเทศไทย แบ่งเป็นรายภาค ระหว่างปี พ.ศ. 2549-2551.....	4
2.1-2	ปริมาณใบอ้อยที่เหลือทิ้งของประเทศไทย ระหว่างปี พ.ศ. 2549-2551.....	5
2.2-1	องค์ประกอบของลิกโนเซลลูโลสในวัตถุดิบชนิดต่างๆ.....	7
2.4.1-1	สารอาหารที่จุลินทรีย์สร้างมีเทนนำไปใช้ได้.....	23
3.2-1	พารามิเตอร์เบื้องต้นของใบอ้อยที่ทำการวิเคราะห์.....	50
3.3-1	พารามิเตอร์เบื้องต้นของหัวเชื้อจุลินทรีย์ที่ทำการวิเคราะห์.....	51
3.4.8-1	ปริมาณสารอาหารเสริมในระบบไร้อากาศ.....	58
3.5.1-1	ตัวแปรในการทดลองที่ 1 ชุดการทดลองที่ 1.....	61
3.5.1-2	ตัวแปรในการทดลองที่ 1 ชุดการทดลองที่ 2.....	64
3.5.1-3	ตัวแปรในการทดลองที่ 1 ชุดการทดลองที่ 3.....	67
3.5.2-1	ตัวแปรในการทดลองที่ 2.....	70
3.5.3-1	ตัวแปรในการทดลองที่ 3.....	74
3.6-1	แสดงวิธีการวิเคราะห์พารามิเตอร์.....	76
4.1-1	ผลการวิเคราะห์เบื้องต้นของใบอ้อยที่ใช้ในการทดลอง.....	78
4.1-2	แสดงองค์ประกอบทางเคมีของใบอ้อย.....	79
4.2-1	ผลการวิเคราะห์เบื้องต้นของมูลวัวที่ใช้ในการทดลอง.....	80
4.3.1-1	ผลการวิเคราะห์ค่าซีไอดีละลายของน้ำย่อยจากตัวอย่างใบอ้อยที่ผ่านการ บำบัดเบื้องต้นทางความร้อนและทางชีวภาพ และใบอ้อยที่ไม่ได้ผ่านการ บำบัดเบื้องต้น.....	82
4.4.2-1	แสดงผลการวิเคราะห์ค่าความเป็นกรด-ด่างในการทดลองที่ 2.....	112
4.4.3-1	ความเข้มข้นของก๊าซมีเทนที่วิเคราะห์ได้จากก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้น.....	115
4.5.3-1	ผลการวิเคราะห์ค่าซีไอดีละลายของน้ำย่อยจากตัวอย่างใบอ้อยที่ผ่าน การบำบัดเบื้องต้นทางความร้อน.....	130
4.5.3-2	ผลการวิเคราะห์ค่าซีไอดีละลายของน้ำย่อยจากตัวอย่างใบอ้อยที่ผ่าน การบำบัดเบื้องต้นทางชีวภาพ.....	131

ตารางที่	หน้า
ก-1	ผลการวิเคราะห์ค่าซีไอดีละลายของน้ำย่อยจากตัวอย่างไบอ้อยที่ผ่านการ บำบัดเบื้องต้นทางความร้อนและทางชีวภาพ และไบอ้อยที่ไม่ได้ผ่านการ บำบัดเบื้องต้น..... 157
ข-1	แสดงค่าของแข็งทั้งหมด ค่าความชื้น และค่าของแข็งระเหยในการทดลองที่ 2... 160
ข-2	ปริมาณก๊าซชีวภาพรายวันของตัวอย่างที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นทางความร้อน.. 161
ข-3	ปริมาณก๊าซชีวภาพรายวันของตัวอย่างที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นทางชีวภาพ..... 164
ข-4	แสดงค่ากรดไขมันระเหยในการทดลองที่ 2..... 170
ข-5	แสดงค่าสภาพต่างในการทดลองที่ 2..... 172
ค-1	ปริมาณก๊าซชีวภาพของถังหมักที่ 1 และถังหมักที่ 2..... 175
ค-2	แสดงค่า VFA ที่วิเคราะห์ได้ในในการทดลองที่ 2..... 177
ค-3	แสดงค่าสภาพต่างที่วิเคราะห์ได้ในในการทดลองที่ 2..... 178
ค-4	แสดงความเข้มข้นของก๊าซมีเทนที่วัดได้จากถังหมักที่ 1 และ 2..... 179

สารบัญภาพ

รูปที่		หน้า
2.2-1	โครงสร้างของลิกโนเซลลูโลส ประกอบด้วย เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินที่พบในเซลล์พืช.....	6
2.2.1-1	โครงสร้างของเซลลูโลส.....	8
2.2.1-2	บริเวณคริสตัลไลน์และอะมอร์ฟัสในเซลลูโลส.....	9
2.2.2-1	โครงสร้างของเฮมิเซลลูโลส.....	10
2.2.3-1	โครงสร้างของลิกนิน.....	11
2.2.3-2	สารตั้งต้นที่ใช้ในการสร้างลิกนิน.....	11
2.3-1	ขั้นตอนการแยกเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินออกจากกันและทำลายโครงสร้างคริสตัลไลน์ของเซลลูโลส.....	12
2.4-1	ปฏิกริยารีดอกซ์ในการบำบัดน้ำเสีย.....	19
2.4.1-1	ขั้นตอนของปฏิกริยาไม่ใช้อากาศ.....	20
2.4.2-1	ขั้นตอนการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไม่ใช้อากาศ.....	25
2.4.2-2	แสดงสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์ที่ได้จากขั้นตอนไฮโดรไลซิส และเอโนไซม์ที่ใช้....	26
2.5.1-1	ถังย่อยชนิดอัตราต่ำ.....	29
2.5.1-2	ถังย่อยชนิดอัตราสูง.....	30
2.5.1-3	ถังย่อยชนิดอัตราสูงที่มีการแยกตะกอน.....	30
2.5.2-1	ถังย่อยแบบสัมผัส.....	31
2.5.3-1	ถังย่อยแบบแยกเชื้อ.....	32
2.5.4-1	ถังกรองไร้อากาศ.....	33
2.5.5-1	ระบบชั้นลอยตัวแบบไม่ใช้อากาศ.....	34
2.5.6-1	ระบบยูเอเอสบี (UASB).....	35
2.5.7-1	ระบบอีจีเอสบี (EGSB).....	36
2.5.8-1	ระบบจานหมุนไร้อากาศ.....	36
2.5.9-1	ระบบแผ่นกั้นไร้อากาศ.....	37
2.5.10-1	บ่อหมักแบบไร้อากาศ.....	37
2.7.8-1	ผลของอุณหภูมิที่มีผลต่ออัตราการเจริญเติบโตของเซลล์.....	43
3.4.1-1	หม้อไอน้ำความดัน.....	52

รูปที่	หน้า	
3.4.2-1	อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ.....	52
3.4.3-1	เครื่องเขย่า.....	53
3.4.4-1	ขวดซีรัมสี่ขาขนาด 125 มิลลิลิตร.....	54
3.4.4-2	ก๊าซไนโตรเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์.....	54
3.4.4-3	เครื่องวัดปริมาณก๊าซชีวภาพแบบ U-Tube.....	54
3.4.5-1	รูปแบบและขนาดถังปฏิกรณ์.....	55
3.4.5-2	ถังหมักไร้อากาศที่ใช้ในการทดลองที่ 3.....	56
3.4.5-3	จุดเก็บตัวอย่างและชุดอุปกรณ์วัดปริมาณก๊าซชีวภาพ.....	56
3.5.1-1	ขั้นตอนการทดลองที่ 1 ชุดที่ 1.....	60
3.5.1-2	ขั้นตอนการทดลองที่ 1 ชุดที่ 2.....	63
3.5.1-3	ขั้นตอนการทดลองที่ 1 ชุดที่ 3.....	66
3.5.2-1	ขั้นตอนการทดลองที่ 2.....	69
3.5.3-1	ขั้นตอนการทดลองที่ 3.....	73
4.3.1-1	แสดงค่าซีไอที่ละลายในไบอ้อยที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นทางความร้อนและทางชีวภาพเปรียบเทียบกับไบอ้อยที่ไม่ได้ผ่านการบำบัดเบื้องต้นของการทดลองที่ 1	84
4.4.1-1	ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมของการหมักไบอ้อยที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นด้วยไอน้ำและน้ำร้อนในการทดลองที่ 2.....	90
4.4.1-2	ปริมาณก๊าซชีวภาพรายวันของการหมักไบอ้อยที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นด้วยไอน้ำและน้ำร้อนในการทดลองที่ 2.....	90
4.4.1-3	ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมของไบอ้อยที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นทางชีวภาพที่อัตราส่วนผสมปริมาณมูลวัวต่อไบอ้อย 1:6.....	92
4.4.1-4	ปริมาณก๊าซชีวภาพรายวันของไบอ้อยที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นทางชีวภาพที่อัตราส่วนผสมปริมาณมูลวัวต่อไบอ้อย 1:6.....	92
4.4.1-5	ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมของไบอ้อยที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นทางชีวภาพที่อัตราส่วนผสมปริมาณมูลวัวต่อไบอ้อย 1:3.....	93
4.4.1-6	ปริมาณก๊าซชีวภาพรายวันของไบอ้อยที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นทางชีวภาพที่อัตราส่วนผสมปริมาณมูลวัวต่อไบอ้อย 1:3.....	94
4.4.1-7	ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมของไบอ้อยที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นทางชีวภาพที่อัตราส่วนผสมปริมาณมูลวัวต่อไบอ้อย 1:2.....	95

รูปที่	หน้า
4.4.1-8 ปริมาณก๊าซชีวภาพรายวันของไบโอดีปที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นทางชีวภาพที่ 2 อัตราส่วนผสมปริมาณมูลวัวต่อไบโอดีป 1.....	95
4.4.1-9 กราฟเปรียบเทียบปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดสะสมระหว่างไบโอดีปที่ไม่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นและไบโอดีปที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นทางความร้อนและทางชีวภาพ	97
4.4.1-10 ร้อยละการเพิ่มของปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมของตัวอย่างไบโอดีปที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นทางความร้อนและทางชีวภาพ.....	99
4.4.2-1 แสดงปริมาณกรดไขมันระเหยในน้ำย่อยของไบโอดีปที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นทางความร้อนด้วยไอน้ำจากการหมักในขวดซีรัมของการทดลองที่ 2.....	101
4.4.2-2 แสดงปริมาณกรดไขมันระเหยในน้ำย่อยของไบโอดีปที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นทางความร้อนด้วยน้ำร้อนจากการหมักในขวดซีรัมของการทดลองที่ 2.....	102
4.4.2-3 แสดงปริมาณกรดไขมันระเหยในน้ำย่อยของไบโอดีปที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นทางชีวภาพที่อัตราส่วนผสมปริมาณมูลวัวต่อไบโอดีป 1:6 ในการทดลองที่ 2.....	103
4.4.2-4 แสดงปริมาณกรดไขมันระเหยในน้ำย่อยของไบโอดีปที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นทางชีวภาพที่อัตราส่วนผสมปริมาณมูลวัวต่อไบโอดีป 1:3 ในการทดลองที่ 2.....	104
4.4.2-5 แสดงปริมาณกรดไขมันระเหยในน้ำย่อยของไบโอดีปที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นทางชีวภาพที่อัตราส่วนผสมปริมาณมูลวัวต่อไบโอดีป 1:2 ในการทดลองที่ 2.....	105
4.4.2-6 แสดงปริมาณสภาพต่างในน้ำย่อยของไบโอดีปที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นทางความร้อนด้วยไอน้ำจากการหมักในขวดซีรัมของการทดลองที่ 2.....	106
4.4.2-7 แสดงปริมาณสภาพต่างในน้ำย่อยของไบโอดีปที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นทางความร้อนด้วยน้ำร้อนจากการหมักในขวดซีรัมของการทดลองที่ 2.....	106
4.4.2-8 แสดงปริมาณสภาพต่างในน้ำย่อยของไบโอดีปที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นทางชีวภาพที่อัตราส่วนผสมปริมาณมูลวัวต่อไบโอดีป 1:6 ในการทดลองที่ 2.....	107
4.4.2-9 แสดงปริมาณสภาพต่างในน้ำย่อยของไบโอดีปที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นทางชีวภาพที่อัตราส่วนผสมปริมาณมูลวัวต่อไบโอดีป 1:3 ในการทดลองที่ 2.....	108
4.4.2-10 แสดงปริมาณสภาพต่างในน้ำย่อยของไบโอดีปที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นทางชีวภาพที่อัตราส่วนผสมปริมาณมูลวัวต่อไบโอดีป 1:2 ในการทดลองที่ 2.....	109
4.4.2-11 ค่าความเป็นกรด-ด่างของไบโอดีปที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นด้วยไอน้ำ.....	110
4.4.2-12 ค่าความเป็นกรด-ด่างของไบโอดีปที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นด้วยน้ำร้อน.....	110

รูปที่	หน้า	
4.4.2-13	ค่าความเป็นกรด-ด่างของไบอ้อยที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นทางชีวภาพที่อัตราส่วนผสมมูลวัวต่อบิอ้อย 1:6.....	110
4.4.2-14	ค่าความเป็นกรด-ด่างของไบอ้อยที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นทางชีวภาพที่อัตราส่วนผสมมูลวัวต่อบิอ้อย 1:3.....	111
4.4.2-15	ค่าความเป็นกรด-ด่างของไบอ้อยที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นทางชีวภาพที่อัตราส่วนผสมมูลวัวต่อบิอ้อย 1:2.....	111
4.4.4-1	แสดงค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันของไบอ้อยที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นด้วยไอน้ำ.....	118
4.4.4-2	แสดงค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันของไบอ้อยที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นด้วยน้ำร้อน.....	119
4.4.4-3	แสดงค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันของไบอ้อยที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นทางชีวภาพที่อัตราส่วนผสมมูลวัวต่อบิอ้อย 1:6.....	119
4.4.4-4	แสดงค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันของไบอ้อยที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นทางชีวภาพที่อัตราส่วนผสมมูลวัวต่อบิอ้อย 1:3.....	120
4.4.4-5	แสดงค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันของไบอ้อยที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นทางชีวภาพที่อัตราส่วนผสมมูลวัวต่อบิอ้อย 1:2.....	120
4.5.1-1	ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมของตัวอย่าง SP 60, HP 60, BP 1:3 (7) และ BP 1:2 (7) ในการทดลองที่ 3.....	122
4.5.1-2	ปริมาณก๊าซชีวภาพรายวันของตัวอย่าง SP 60, HP 60, BP 1:3 (7) และ BP 1:2 (7) ในการทดลองที่ 3.....	121
4.5.2-1	ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมต่อปริมาณกรัมของแข็งระเหยของตัวอย่าง SP 60, HP 60, BP 1:3 (7) และ BP 1:2 (7) ในการทดลองที่ 3.....	125
4.5.2-2	ปริมาณก๊าซชีวภาพรายวันต่อปริมาณกรัมของแข็งระเหยของตัวอย่าง SP 60, HP 60, BP 1:3 (7) และ BP 1:2 (7) ในการทดลองที่ 3.....	125
4.5.2-3	กราฟเปรียบเทียบปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมต่อกรัมของแข็งระเหยของการทดลองที่ 2 และการทดลองที่ 3.....	127
4.5.3-1	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าซีไอดีละลาย ปริมาณก๊าซชีวภาพรายวัน และปริมาณก๊าซมีเทนของถังหมักไร้อากาศที่ 1 (SP 60).....	132

รูปที่	หน้า
4.5.3-2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าซีไอดีละลาย ปริมาณก๊าซชีวภาพรายวัน และปริมาณ ก๊าซมีเทนของถังหมักไร้อากาศที่ 2 (HP 60).....	133
4.5.3-3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าซีไอดีละลาย ปริมาณก๊าซชีวภาพรายวัน และปริมาณ ก๊าซมีเทนของถังหมักไร้อากาศที่ 1 (BP 1:3_7).....	135
4.5.3-4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าซีไอดีละลาย ปริมาณก๊าซชีวภาพรายวัน และปริมาณ ก๊าซมีเทนของถังหมักไร้อากาศที่ 2 (BP 1:2_7).....	136
4.5.4-1 ปริมาณกรดไขมันระเหยของถังหมักที่ 1 (SP 60) และถังหมักที่ 2 (HP 60).....	138
4.5.4-2 ปริมาณกรดไขมันระเหยของถังหมักที่ 1 (BP 1:3 (7)) และถังหมักที่ 2 (BP 1:2 (7)).....	139
4.5.4-3 ค่าสภาพต่างของถังหมักที่ 1 (SP 60) และถังหมักที่ 2 (HP 60).....	140
4.5.4-4 ค่าสภาพต่างของถังหมักที่ 1 (BP 1:3 (7)) และถังหมักที่ 2 (BP 1:2 (7)).....	141
4.5.4-5 ค่าความเป็นกรด-ต่างในถังหมักที่ 1 (SP 60) และถังหมักที่ 2 (HP 60).....	141
4.5.4-6 ค่าความเป็นกรด-ต่างในถังหมักที่ 1 (BP 1:3 (7)) และถังหมักที่ 2 (BP 1:2 (7))..	142
4.5.6-1 ค่าของแข็งทั้งหมดของถังหมักที่ 1 และถังหมักที่ 2.....	144
4.5.6-2 ค่าของแข็งระเหยของถังหมักที่ 1 และถังหมักที่ 2.....	144
4.5.7-1 ค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันของถังหมักไร้อากาศในการทดลองที่ 3....	145
ง-1 แสดงผลการวิเคราะห์ปริมาณเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน.....	181

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

อ้อยเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญชนิดหนึ่งของประเทศไทย มีจุดประสงค์ของการปลูกเพื่อนำมาผลิตเป็นน้ำตาลเป็นหลัก หลังจากช่วงฤดูเก็บอ้อย หรือเก็บเกี่ยวอ้อยระหว่างเดือนพฤศจิกายน-มีนาคม จะมียอดอ้อยและใบอ้อยเป็นเศษเหลือทิ้งไว้ในไร่ ส่วนใหญ่จะปล่อยให้แห้งและนำไปเผา สำหรับส่วนต่างๆ ของอ้อย ประกอบด้วย ส่วนลำต้น 60 เปอร์เซ็นต์ ส่วนยอด 30 เปอร์เซ็นต์ และใบอ้อย 10 เปอร์เซ็นต์ (Golh, 1975) จากรายงานของสำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร ปีเพาะปลูก พ.ศ. 2551 พบว่า ประเทศไทยมีพื้นที่ปลูกอ้อยประมาณ 6.6 ล้านไร่ มีผลผลิตรวมทั้งหมด 73.5 ล้านตัน แบ่งเป็นภาคอีสาน 28 ล้านตัน ภาคกลาง 25 ล้านตัน และภาคเหนือ 20.5 ล้านตัน เมื่อทำการคำนวณจากปริมาณผลผลิตทั้งหมดเทียบกับร้อยละส่วนประกอบของต้นอ้อย พบว่ามีปริมาณยอดอ้อยและใบอ้อยเหลือทิ้งรวม 29.4 ล้านตัน ประกอบด้วย ยอดอ้อย 22.05 ล้านตัน และใบอ้อย 7.35 ล้านตัน ซึ่งถ้ามีการกำจัดโดยการเผาทิ้งจะทำให้เกิดมลพิษทางอากาศเป็นจำนวนมาก ปัจจุบันจึงมีแนวคิดในการนำเศษที่เหลือทิ้งกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่ โดยวัตถุดิบชีวมวลประเภทเซลลูโลส (cellulosic biomass) สามารถนำมาผลิตเป็นเชื้อเพลิงชีวภาพได้ ซึ่งการนำวัสดุจากพืชหรือวัสดุเหลือทิ้งจากการเกษตรมาทำเป็นเชื้อเพลิงจะไม่ส่งผลกระทบต่อแหล่งอาหารของมนุษย์ และอาหารของสัตว์ อีกทั้งยังไม่ต้องไปเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางด้านพลังงานและการทำเกษตรกรรมของประเทศ และพลังงานที่ได้จากวัตถุดิบชีวมวลประเภทเซลลูโลสสามารถนำไปใช้ในภาคการขนส่ง ร่วมกับเชื้อเพลิงชีวภาพอื่นๆ เช่น ที่ได้มาจากแป้ง น้ำตาลจากพืช และน้ำมันพืชใช้แล้ว เป็นต้น (เช่น เอทานอล และไบโอดีเซล เป็นต้น) โดยพลังงานชีวภาพที่ได้ทั้งหมดนี้สามารถนำไปทดแทนการใช้น้ำมันปิโตรเลียมของประเทศได้

จากงานวิจัยโดยทั่วไปแล้วในส่วนของยอดอ้อยจะนิยมนำไปใช้เป็นอาหารสัตว์เพิ่มมากขึ้น แต่สำหรับในส่วนของใบอ้อยจะมีปัญหาเรื่องการย่อยสลาย เพราะในใบอ้อยประกอบด้วยโครงสร้างที่ไม่ละลายน้ำมีลักษณะเป็นพอลิเมอร์สายโซ่ยาวประกอบขึ้นจากน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวหลายโมเลกุลต่อกัน เรียกว่า ลิกโนเซลลูโลส ประกอบด้วย เซลลูโลส 40-80 เปอร์เซ็นต์ เฮมิเซลลูโลส 10-40 เปอร์เซ็นต์ และลิกนิน 5-25 เปอร์เซ็นต์ (Eriksson และคณะ, 1990) จึงทำให้การย่อยสลายของใบอ้อยใช้เวลานาน ดังนั้นจึงมีแนวคิดในการนำใบอ้อยไปทำการบำบัดเบื้องต้นด้วยวิธีการต่างๆ เช่น การบำบัดด้วยความร้อน การบำบัดทางชีวภาพ การลดขนาด และการบำบัดด้วย

สารละลายกรด/ด่าง เป็นต้น ทั้งนี้เพื่อให้ลิแกนด์ในเซลล์ลูโลสถูกย่อยสลายได้มากขึ้นก่อนนำไปย่อยสลายในถังหมักไร้อากาศเพื่อผลิตก๊าซชีวภาพต่อไป

สำหรับงานวิจัยนี้จะมุ่งเน้นศึกษากระบวนการบำบัดในเบื้องต้นทางความร้อน และทางชีวภาพที่มีผลต่อความสามารถในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในใบอ้อยด้วยระบบไร้อากาศ และทำการศึกษาศักยภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพของใบอ้อยที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้น รวมถึงทำการศึกษ ปริมาณและความเข้มข้นของก๊าซมีเทนในก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายด้วยระบบไร้อากาศ เพื่อนำไปใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานที่สามารถนำไปพัฒนาวิธีการย่อยสลายวัตถุดิบชีวมวลที่มีโครงสร้างลิแกนด์ในเซลล์ลูโลสเป็นองค์ประกอบ เพื่อพิจารณานำไปใช้เป็นพลังงานทางเลือกต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาความสามารถในการถูกย่อยสลายสารอินทรีย์ในใบอ้อย โดยวิธีการบำบัดเบื้องต้นทางความร้อน และการบำบัดเบื้องต้นทางชีวภาพ
2. เพื่อศึกษาศักยภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพของใบอ้อยที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นทางความร้อนและการบำบัดเบื้องต้นทางชีวภาพ
3. เพื่อศึกษาปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพ และความเข้มข้นของก๊าซมีเทน ที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายใบอ้อยที่ผ่านกระบวนการบำบัดเบื้องต้นทางความร้อน และกระบวนการบำบัดเบื้องต้นทางชีวภาพ โดยใช้ถังหมักไร้อากาศขนาด 40 ลิตร

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ ณ ห้องปฏิบัติการวิจัย ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยแบ่งออกเป็น 3 การทดลอง ดังนี้

การทดลองที่ 1 : เป็นการทดลองย่อยสลายสารอินทรีย์ในใบอ้อยโดยวิธีการบำบัดเบื้องต้นทางความร้อน และวิธีการบำบัดเบื้องต้นทางชีวภาพ

การทดลองที่ 2 : เป็นการทดลองหาค่าศักยภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพ ด้วยวิธีการทำ Biochemical Methane Potential (BMP) ของไบโอดีปที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นทางความร้อน และการบำบัดเบื้องต้นทางชีวภาพ

การทดลองที่ 3 : เป็นการทดลองผลิตก๊าซชีวภาพด้วยถังหมักไร้อากาศโดยใช้ไบโอดีปที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นทางความร้อนและการบำบัดเบื้องต้นทางชีวภาพ รวมถึงความเข้มข้นของก๊าซมีเทนในก๊าซชีวภาพ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เป็นแนวทางในการนำของเสียหรือวัสดุที่เหลือทิ้งจากการเกษตรกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่ โดยการนำมาใช้เป็นพลังงานทางเลือกต่อไป
2. เป็นแนวทางในการพัฒนาปรับปรุงวิธีการกำจัดหรือการย่อยสลายวัตถุดิบประเภทชีวมวลที่มีลิกโนเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบ
3. เป็นข้อมูลพื้นฐานในการวางแผน และออกแบบระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากวัตถุดิบประเภทชีวมวลที่มีลิกโนเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบด้วยถังหมักไร้อากาศ

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ปริมาณของใบอ้อย

จากรายงานของสำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ พ.ศ. 2549-2551 พบว่าประเทศไทยมีปริมาณผลผลิตการเพาะปลูกอ้อยเพิ่มขึ้นทุกปี และมีแนวโน้มของปริมาณของผลผลิตที่เพิ่มมากขึ้น แสดงดังตารางที่ 2.1-1

ตารางที่ 2.1-1 แสดงสถิติของปริมาณผลผลิตการปลูกอ้อยของประเทศไทย แบ่งเป็นรายภาค ระหว่างปี พ.ศ. 2549-2551 (กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, 2551)

ภาคการเพาะปลูก	ปริมาณผลผลิต (ตัน)		
	พ.ศ. 2549	พ.ศ. 2550	พ.ศ. 2551
- ภาคเหนือ	13,674,457	19,045,978	20,569,372
- ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ	15,666,587	22,469,011	27,890,193
- ภาคกลาง	18,317,053	22,850,493	25,042,045
รวมทั้งประเทศ	47,658,097	64,365,482	73,501,610

จากข้อมูลในตารางที่ 2.1-1 พบว่า ในปี พ.ศ. 2551 ประเทศไทยมีผลผลิตรวมทั้งประเทศประมาณ 73.5 ล้านตัน แบ่งเป็นภาคเหนือ 20.5 ล้านตัน ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ 28 ล้านตัน และภาคกลาง 25 ล้านตัน ทำให้ประเทศไทยมีปริมาณใบอ้อยเหลือทิ้งเป็นจำนวนมาก โดยคำนวณจากผลผลิตอ้อยเทียบกับร้อยละส่วนประกอบของต้นอ้อย ประกอบด้วยส่วนลำต้น ร้อยละ 60 ส่วนยอดร้อยละ 30 และใบอ้อยร้อยละ 10 (Golh, 1975) แสดงดังตารางที่ 2.1-2

ตารางที่ 2.1-2 ปริมาณไบโอดีที่เหลือทิ้งของประเทศไทย ระหว่างปี พ.ศ. 2549-2551

ชนิด	ปริมาณ (ตัน) ^{1/}		
	พ.ศ.2549	พ.ศ.2550	พ.ศ.2551
- ไบโอดี	4,765,809.7	6,436,548.2	7,350,161

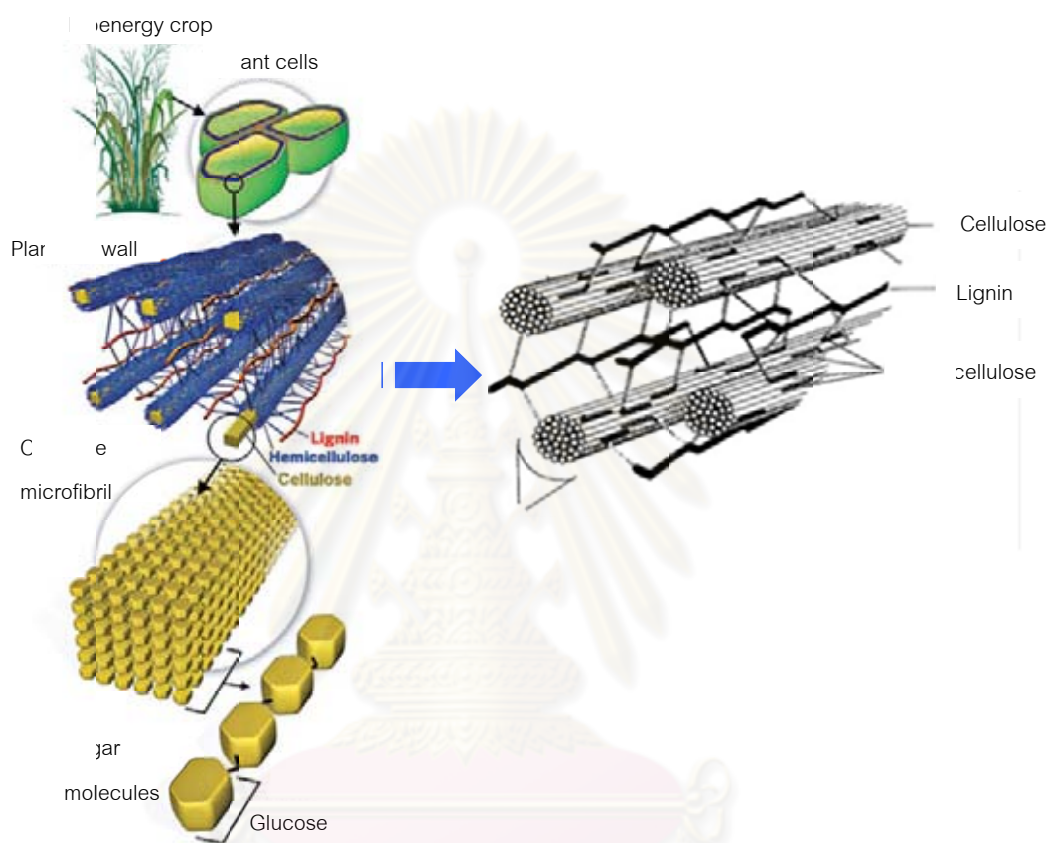
หมายเหตุ: ^{1/} คำนวณมาจากปริมาณผลผลิตในตารางที่ 2.1-1 โดยปริมาณไบโอดีคำนวณที่ร้อยละ 10 ของผลผลิต

ไบโอดีจัดเป็นของเสียจากการเกษตร โดยส่วนใหญ่เกษตรกรจะปล่อยทิ้งไว้ให้แห้งและเผา จากตารางที่ 2.1-2 พบว่าปริมาณไบโอดีที่เกิดขึ้นต่อปีนั้นมีจำนวนมาก (ประมาณ 7.35 ล้านตัน สำหรับปี พ.ศ. 2551) และมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมทางอากาศเป็นจำนวนมาก และอาจไปทำลายผลผลิตของพื้นที่เพาะปลูกอ้อยข้างเคียงที่ยังไม่ได้เก็บเกี่ยวได้ อีกทั้งยังเป็นการหาแหล่งพลังงานใหม่ เพื่อลดการใช้เชื้อเพลิงจากฟอสซิล ดังนั้น จึงมีแนวคิดในการนำวัสดุเศษประเภทชีวมวลจากเซลลูโลสมาผลิตเป็นเชื้อเพลิงชีวภาพ เช่น ก๊าซชีวภาพ (biogas) เอทานอล (ethanol) และไบโอเอทานอล (bioethanol) เป็นต้น สำหรับการผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพจากวัสดุเศษชีวมวลประเภทเซลลูโลสจะต้องใช้การแตกสลายโครงสร้างลิกโนเซลลูโลส (lignocellulose) ที่มาจากพืชพลังงาน หรือวัสดุที่เหลือทิ้งจากการเกษตร โดยการสลายโครงสร้างลิกโนเซลลูโลสที่ประกอบด้วยเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ให้แยกออกจากกัน เพื่อที่จะนำเอาเซลลูโลสซึ่งเป็นพอลิแซ็กคาไรด์ที่ประกอบขึ้นจากน้ำตาลไปใช้เป็นสารตั้งต้นในการหมักแบบไร้อากาศเพื่อผลิตเป็นเชื้อเพลิงชีวภาพต่อไป

2.2 โครงสร้างผนังเซลล์ของพืช

พืชเป็นแหล่งทรัพยากรธรรมชาติที่สามารถปลูกทดแทนและเป็นทรัพยากรที่สามารถหมุนเวียนนำกลับมาใช้ใหม่ได้ อีกทั้งยังมีปริมาณมาก ดังนั้นพืชจึงเป็นแหล่งสารประกอบอินทรีย์แหล่งใหญ่ที่สำคัญ โดยพืชมีองค์ประกอบหลักที่สำคัญ คือ ลิกโนเซลลูโลส (lignocellulose) เป็นองค์ประกอบของชีวมวลที่พบในผนังเซลล์ของพืชประกอบด้วย เซลลูโลส (cellulose) ที่เป็นไมโครไฟบริลฝังอยู่ในเฮมิเซลลูโลส (hemicellulose) และลิกนิน (lignin) แสดงดังรูปที่ 2.2-1 ดังนั้นจึงเรียกรวมกันว่า ลิกโนเซลลูโลส นอกจากนี้ยังพบสารประกอบอื่นๆ ที่เรียกว่า

สารแทรก (extractive) ซึ่งเป็นสารที่ไม่ใช่องค์ประกอบของผนังเซลล์ เช่น ไขมัน กรดไขมัน เรซิน ฟีนอลิก เทลือ และแร่ธาตุเป็นต้น (Lee และคณะ, 2007) โดยวัสดุประเภทลิกโนเซลลูโลสแต่ละชนิดจะมีสัดส่วนของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินที่แตกต่างกันไป แสดงดังตารางที่ 2.2-1



รูปที่ 2.2-1 โครงสร้างของลิกโนเซลลูโลสประกอบด้วย เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส

และลิกนินที่พบในเซลล์พืช (Ritter, 2008)

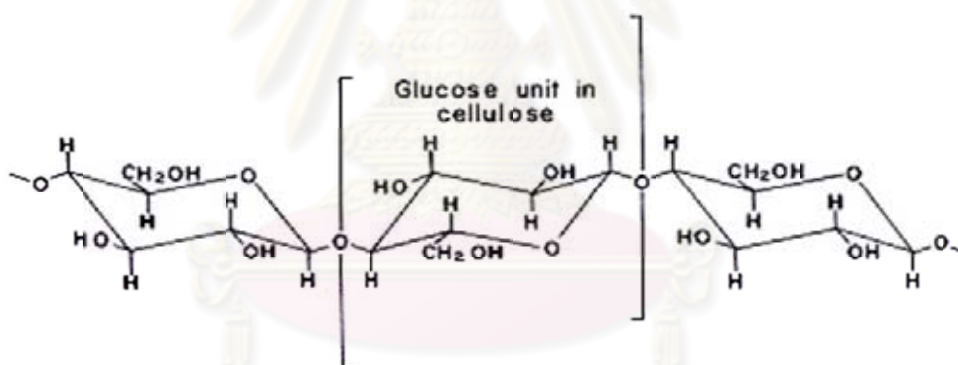
ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.2-1 องค์ประกอบของลิกโนเซลลูโลสในวัตถุดิบชนิดต่างๆ (Sun และ Cheng, 2002)

วัตถุดิบประเภทลิกโนเซลลูโลส	เซลลูโลส	เฮมิเซลลูโลส	ลิกนิน
	(ร้อยละ)	(ร้อยละ)	(ร้อยละ)
เปลือกถั่ว	25-30	25-30	30-40
ซังข้าวโพด	45	35	15
ฟางข้าวสาลี	30	50	15
ฟางข้าวเจ้า	32.1	24.0	18.0
ชานอ้อย	33.4	30.0	18.9
หญ้าเบอร์มิวดา	25.0	35.7	6.4
หญ้าสวิตช์	45.0	31.4	12.0
หญ้าออร์ชาร์ด	32.0	40.0	4.7
ลำต้นไม้เนื้อแข็ง	40-50	24-40	18-25
ลำต้นไม้เนื้ออ่อน	45-50	25-35	25-35
กระดาษ	85-99	0	0-15
กระดาษหนังสือพิมพ์	40-55	25-40	18-30
ของเสียจากอุตสาหกรรมเยื่อกระดาษ	60-70	10-20	5-10
หญ้าชนิดต่างๆ	25-40	25-50	10-30

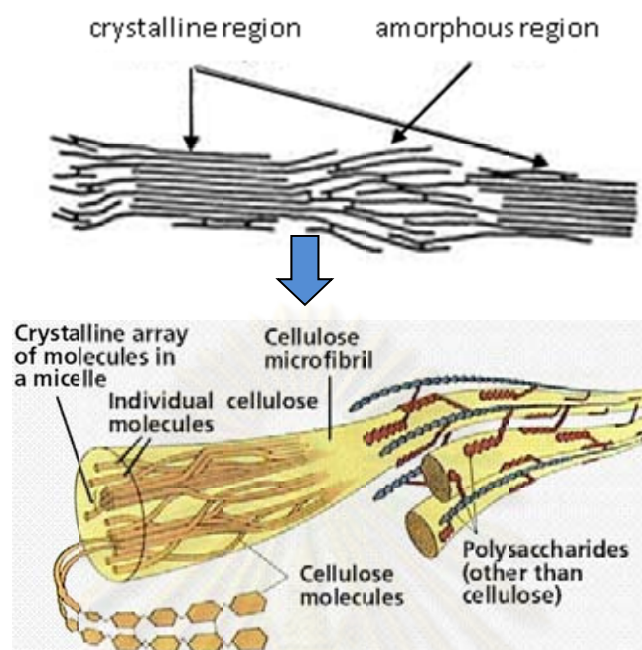
2.2.1 เซลลูโลส

เซลลูโลสเป็นองค์ประกอบหลักที่สำคัญในผนังเซลล์พืชและมีปริมาณมากที่สุด เซลลูโลสจะพบตามผนังเซลล์พืชทุกชนิด มีประมาณร้อยละ 40-60 ของน้ำหนักชีวมวลแห้ง (Hamelinck และคณะ, 2005) โดยเซลลูโลสเป็นคาร์โบไฮเดรตที่เป็นพอลิแซ็กคาไรด์ คือ โพลิเมอร์ (homopolymer) ของดี-กลูโคส (D-glucose) หลายโมเลกุลเรียงต่อกันด้วย พันธะเบตา-1,4-กลูโคซิดิก (β 1,4-glucosidic bond) โดยมีการตั้งโมเลกุลของน้ำออก มีสูตรทางเคมีคือ $(C_6H_{10}O_5)_n$ โดยที่ n คือ จำนวนโมเลกุลของดี-กลูโคสที่เรียงต่อกัน 2 โมเลกุลเป็นไดเมอร์ เรียกว่า เซลโลไบโอส ซึ่งเป็นหน่วยพื้นฐานของเซลลูโลสที่เรียงซ้ำต่อกันเป็นโครงสร้างสายลูกโซ่ยาวไม่มีกิ่งแขนง แสดงดังรูปที่ 2.2.1-1 เห็นได้ว่าเซลลูโลสมีลักษณะเป็นเส้นตรงส่งผลให้เซลลูโลสมีพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลจำนวนมาก มีลักษณะเป็นมัดที่เป็นระเบียบมีความแข็งแรงและทนทานต่อการย่อยสลาย (Ritter, 2008)



รูปที่ 2.2.1-1 โครงสร้างของเซลลูโลส (Bodig และ Jayne, 1993; Carbohydrates, 2006)

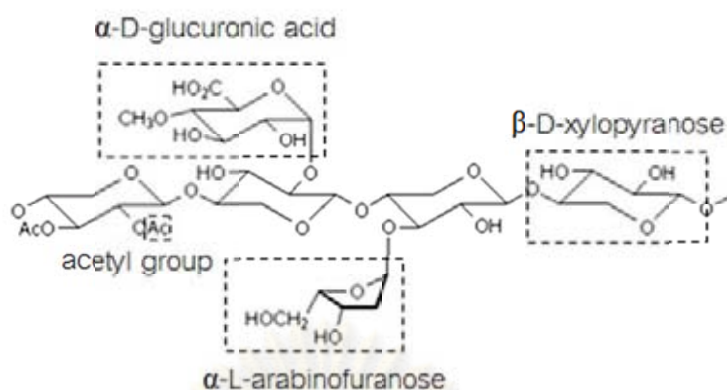
เซลลูโลสแต่ละสายที่ขนานกันจะมีการเชื่อมต่อกันด้วยพันธะไฮโดรเจนจนเกิดเป็นมัดของไมโครไฟบริล โดยเรียกบริเวณที่มีพันธะไฮโดรเจนหนาแน่นว่า บริเวณคริสตัลไลน์ที่เป็นบริเวณของเซลลูโลสที่มีการจัดเรียงตัวเป็นระเบียบ สำหรับในส่วนของพันธะไฮโดรเจนหนาแน่นน้อย เรียกว่าบริเวณอะมอร์ฟัสซึ่งเป็นบริเวณที่เซลลูโลสมีการจัดเรียงตัวกันอย่างหลวมๆ ไม่เป็นระเบียบ แสดงดังรูปที่ 2.2.1-2 ดังนั้นการย่อยสลายจึงเกิดขึ้นที่บริเวณอะมอร์ฟัสได้ง่ายและเร็ว (Lee, Pagan และ Rogers, 1983)



รูปที่ 2.2.1-2 บริเวณคริสตไลน์และอะมอร์ฟัสในเซลลูโลส (Van der Reyden, 1992;
Purves และคณะ, 2008)

2.2.2 เฮมิเซลลูโลส

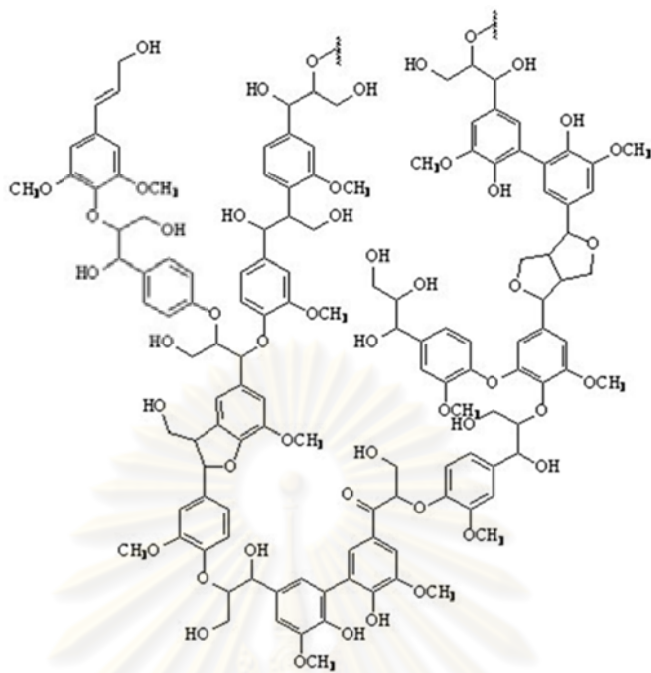
เฮมิเซลลูโลสเป็นสารอินทรีย์ที่พบมากเป็นอันดับที่สองรองจากเซลลูโลส มีประมาณร้อยละ 20-40 ของน้ำหนักชีวมวลแห้ง (Hamelinck และคณะ, 2005) เป็นพอลิแซ็กคาไรด์ที่มีความหลากหลายแตกต่างกันระหว่างพืชต่างชนิดซึ่งจะไม่เหมือนเซลลูโลส ทำหน้าที่เสริมสร้างผนังเซลล์พืชให้แข็งแรง มีลักษณะเป็นเฮเทอร์โพลีเมอร์ซึ่งจะแตกต่างกับเซลลูโลสที่เป็นโฮโมพอลิเมอร์ ประกอบด้วยน้ำตาลหลายชนิด เช่น ดี-ไซโลส แอล-แรมโนส และแอล-อะราบิโนส (ที่เป็นน้ำตาลคาร์บอน 5 อะตอม) ดี-กลูโคส ดี-แมนโนส และดี-กาแลกโตส (ที่เป็นน้ำตาลคาร์บอน 6 อะตอม) และกรดยูโรนิก สำหรับสายโซ่หลักของเฮมิเซลลูโลสอาจเป็นโฮโมพอลิเมอร์หรือเฮเทอร์โพลีเมอร์ที่มีกิ่งสั้นๆ ที่ตำแหน่งพันธะเบตา-1,4-กลูโคซิดิก หรืออาจเป็นพันธะเบตา-1,3-กลูโคซิดิก นอกจากนี้อาจมีหมู่อะซิติลมาเกาะด้วย (Purwadi, 2006) สำหรับโครงสร้างของเฮมิเซลลูโลสแสดงดังรูปที่ 2.2.2-1 ซึ่งจากการที่เฮมิเซลลูโลสมีโครงสร้างที่มีกิ่งจึงทำให้ถูกย่อยสลายได้ง่ายกว่าเซลลูโลส



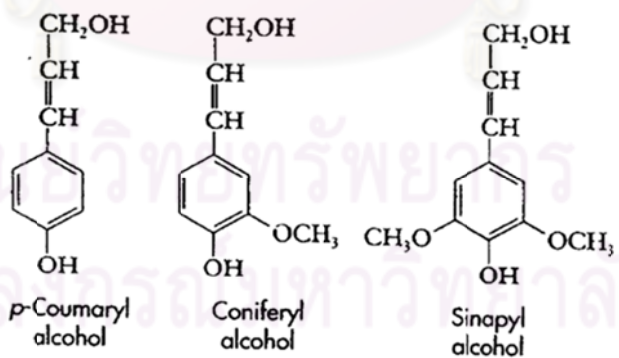
รูปที่ 2.2.2-1 โครงสร้างของเฮมิเซลลูโลส (Fort, 2006)

2.2.3 ลิกนิน

ลิกนินเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง มีประมาณร้อยละ 10-20 ของน้ำหนักชีวมวลแห้ง (Hamelinck และคณะ, 2005) โดยลิกนินจะไม่ละลายน้ำ ไม่มีคุณสมบัติในการยืดหยุ่น โดยอยู่ร่วมกับเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสในผนังเซลล์ของพืชชั้นสูง เป็นองค์ประกอบของไม้เนื้อแข็งและเนื้ออ่อน ลิกนินจะทำหน้าที่เพิ่มความแข็งแรงให้แก่ลำต้นโดยการแทรกตัวเข้าไปในช่องว่างระหว่างเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส ทำให้ต้นไม้มีความแข็งแรง ไม่ละลายน้ำ แต่สามารถละลายได้ในตัวทำละลายอินทรีย์บางชนิด เช่น เอทานอล เมทานอล ในที่ร้อน และสารละลายไซเดียมไฮดรอกไซด์ สำหรับโครงสร้างของลิกนินเป็นพอลิเมอร์แบบวง หรือสารประกอบอะโรมาติกแสดงดังรูปที่ 2.2.3-1 มีหน่วยย่อยเป็นฟีนิลโพรเพนเรียงต่อกันแบบสุ่มที่เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ C-O-C หรือพันธะ C-C ของสารตั้งต้น โคนิเฟอร์ิล แอลกอฮอล์ (coniferyl alcohol) ซินาพิล แอลกอฮอล์ (sinapyl alcohol) และพี-โคลมาริล แอลกอฮอล์ (p-coumaryl alcohol) ซึ่งเป็นแอลกอฮอล์ที่ได้มาจาก พี-ไฮดรอกซิลไซนามายแอลกอฮอล์ ดังแสดงในรูปที่ 2.2.3-2 โดยพืชแต่ละชนิดจะมีองค์ประกอบของโมโนเมอร์ที่มาต่อเรียงกันเป็นลิกนินแตกต่างกันออกไป



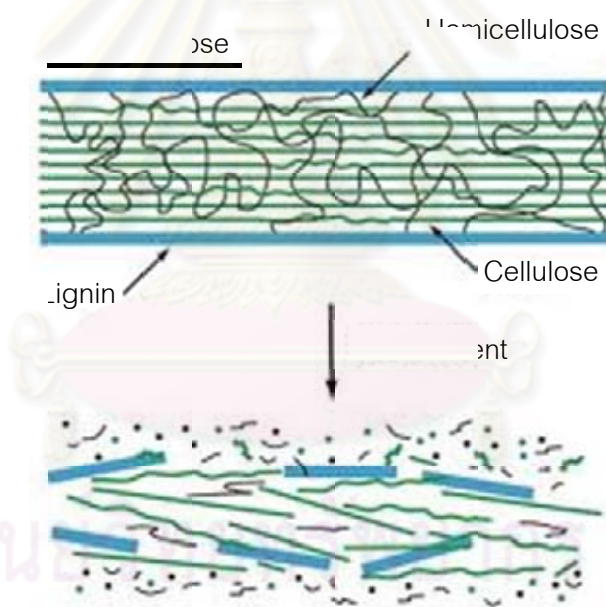
รูปที่ 2.2.3-1 โครงสร้างของลิกนิน (Gregory, 2007)



รูปที่ 2.2.3-2 สารตั้งต้นที่ใช้ในการสร้างลิกนิน (Glazer และ Nikaido, 1995)

2.3 กระบวนการบำบัดเบื้องต้นเพื่อย่อยสลายโครงสร้างชีวมวล

กระบวนการบำบัดเบื้องต้นด้วยวิธีการต่างๆ เช่น การบำบัดเบื้องต้นทางความร้อน การบำบัดเบื้องต้นทางชีวภาพ และการบำบัดเบื้องต้นทางกายภาพ/เคมี เป็นต้น ต่างมีจุดประสงค์เพื่อปรับสภาพชีวมวลที่มีองค์ประกอบของลิกโนเซลลูโลสออกจากกัน ประกอบด้วย เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน แสดงดังรูปที่ 2.3-1 โดยกระบวนการบำบัดเบื้องต้นมีจุดมุ่งหมายสำคัญในการปรับสภาพพืชเพื่อแยกคาร์โบไฮเดรตออกจากการยึดจับของลิกนิน โดยจะต้องมีการทำลายโครงสร้างทางเคมีของน้ำตาลให้น้อยที่สุดด้วย (Mielenz, 2001) นอกจากนี้การบำบัดเบื้องต้นยังเป็นการเพิ่มความสามารถในการย่อยสลายของจุลินทรีย์ในระบบไร้อากาศ เช่น การเพิ่มรูพรุน การเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัส และการลดโครงสร้างผลึก (crystalline) ของเซลลูโลส (Sun และ Cheng, 2002)



รูปที่ 2.3-1 ขั้นตอนการแยกเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินออกจากกัน

และทำลายโครงสร้างผลึก (crystalline) ของเซลลูโลส (Hector และคณะ, 2008)

การบำบัดเบื้องต้นของวัสดุประเภทลิกโนเซลลูโลสโดยทั่วไปมี 5 วิธี มีดังนี้

1. การบำบัดเบื้องต้นด้วยวิธีทางกายภาพ (physical pretreatment) เป็นการลดขนาดเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวในการเข้าทำปฏิกิริยาของจุลินทรีย์ในระบบ ทำให้เกิดย่อยสลายได้ดีขึ้น ซึ่งการลดขนาดนั้นมีหลายวิธี คือ การตัด การบด การฉีก และการไม่ เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีวิธีการแยกสลายด้วยความร้อนซึ่งเป็นวิธีการทางกายภาพวิธีหนึ่งโดยใช้อุณหภูมิสูง

2. การบำบัดเบื้องต้นด้วยวิธีทางเคมีฟิสิกส์ (physico-chemical pretreatment) เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพมากกว่าวิธีทางกายภาพ เช่น วิธีการระเบิดด้วยไอน้ำ (steam explosion หรือ autohydrolysis) เป็นวิธีที่มีการศึกษามากที่สุด โดยจะใช้ไอน้ำแรงดันสูงที่ทำให้เกิดปฏิกิริยา autohydrolysis ที่อุณหภูมิประมาณ 160-260 องศาเซลเซียส ที่ความดัน 6.9-48.3 บาร์ จากนั้นปล่อยทิ้งไว้ภายใต้ความดันบรรยากาศ เมื่อความดันลดลงอย่างรวดเร็วจะส่งผลให้โครงสร้างลิกโนเซลลูโลสของวัตถุดิบแตกออก (Sun และ Cheng, 2002) ซึ่งสามารถแยกเซลลูโลสออกจากเฮมิเซลลูโลสและลิกนิน ทำให้เกิดการย่อยสลายของเซลลูโลสได้ดี นอกจากนี้เฮมิเซลลูโลสที่ถูกละลายบางส่วนจะเปลี่ยนสภาพเป็นกรดอินทรีย์ ซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการย่อยสลายของเฮมิเซลลูโลสระหว่างการบำบัดเบื้องต้นด้วย (Hendriks และ Zeeman, 2008) สำหรับปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัดเบื้องต้นด้วยวิธีการระเบิดด้วยไอน้ำ คือ อุณหภูมิ ระยะเวลาที่ใช้ ขนาดของวัตถุดิบ และปริมาณความชื้น โดยวิธีนี้เป็นวิธีที่เหมาะสมกับการบำบัดเบื้องต้นวัสดุประเภทไม้เนื้อแข็งและวัสดุเหลือทิ้งจากการเกษตร แต่ไม่เหมาะสมกับวัสดุประเภทไม้เนื้ออ่อน (Sanchez และ Cardona, 2008)

การบำบัดด้วยน้ำร้อน เป็นการใช้น้ำร้อนทำหน้าที่เป็นตัวทำละลายและชะล้างสารละลายน้ำตาลที่เกิดจากการสลายตัวของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน เนื่องจากความร้อน ส่งผลให้พื้นผิวสัมผัสเซลลูโลสในชีวมวลเพิ่มขึ้น นอกจากนี้การใช้น้ำร้อนจะมีส่วนช่วยในการชะล้างสารพิษที่เกิดขึ้นในระหว่างการบำบัดเบื้องต้นด้วยความร้อนได้อีกด้วย แต่การบำบัดเบื้องต้นด้วยน้ำร้อนจำเป็นต้องควบคุมความเป็นกรด-ด่างระหว่างการบำบัดให้อยู่ในช่วง 4-7 เพื่อป้องกันการเกิดผลิตภัณฑ์ใหม่ของสารละลายน้ำตาลที่เกิดจากการสลายตัวของเฮมิเซลลูโลสซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่ไม่ต้องการสำหรับการผลิตก๊าซชีวภาพ

3. การบำบัดเบื้องต้นด้วยวิธีทางเคมี (chemical pretreatment) เป็นวิธีการบำบัดเบื้องต้นด้วยการใช้สารเคมีชนิดต่างๆ โดยสามารถแบ่งวิธีการบำบัดเบื้องต้นด้วยสารเคมีออกเป็น 4 วิธี (Sun และ Cheng, 2002) มีดังนี้

3.1 การบำบัดเบื้องต้นด้วยสารละลายกรด สามารถทำได้ทั้งใช้กรดเข้มข้น (strong acid pretreatment) และกรดเจือจาง (dilute acid pretreatment) มีรายละเอียดดังนี้

(1) การใช้กรดเข้มข้น เช่น การใช้กรดซัลฟูริก และกรดไฮโดรคลอริก เป็นต้น ซึ่งเป็นสารที่ทำให้เกิดการย่อยสลายเฮมิเซลลูโลส และลิกนินที่ห่อหุ้มมัดของเซลลูโลสได้ดี ทำให้พื้นผิวสัมผัสในการทำปฏิกิริยาของเซลลูโลสเพิ่มมากขึ้น แต่ข้อเสียของการใช้กรดเข้มข้นคือ กรดที่มีความเข้มข้นสูงจะมีความเป็นพิษ มีฤทธิ์การกัดกร่อนที่รุนแรง จึงจำเป็นต้องใช้วัสดุที่ทนทานต่อการกัดกร่อนได้

(2) การใช้กรดเจือจาง เป็นวิธีการบำบัดเบื้องต้นที่มีการนำมาศึกษามากที่สุด เกิดขึ้นที่อุณหภูมิปานกลาง โดยจะใช้กรดเจือจาง เช่น กรดซัลฟูริก และกรดไนตริก เป็นต้น แต่ที่นิยมใช้ส่วนใหญ่คือใช้กรดซัลฟูริกเจือจาง สำหรับหน้าที่ของกรดอ่อนนั้นจะเข้าไปย่อยสลายเฮมิเซลลูโลสให้เป็นน้ำตาล และทำการกำจัดเฮมิเซลลูโลสและลิกนินบางส่วนออก เพื่อเพิ่มพื้นผิวสัมผัสทำให้เซลลูโลสถูกย่อยสลายได้ดีขึ้น แต่ข้อเสียของวิธีการนี้คือ มีต้นทุนในการบำบัดเบื้องต้นสูงกว่าการบำบัดเบื้องต้นด้วยวิธีทางกายภาพ และวิธีทางเคมีฟิสิกส์ โดยจะต้องมีการทำให้ค่าความเป็นกรด-ด่างให้มีค่าเป็นกลาง ก่อนนำไปใช้สำหรับกระบวนการหมักแบบไร้อากาศหรือกระบวนการย่อยสลายด้วยเอนไซม์ นอกจากนี้การใช้กรดอ่อนดังกล่าวยังก่อให้เกิดการสร้างสารประกอบ เช่น เพอร์ฟอรอล และการสร้างผลึกใหม่ของสารละลายน้ำตาลที่เกิดจากการสลายตัวของเฮมิเซลลูโลส ขึ้นในขั้นตอนไฮโดรไลซิส ซึ่งมีความเป็นพิษต่อจุลินทรีย์ที่ใช้ในกระบวนการหมัก (Sun และ Cheng, 2002)

สำหรับการบำบัดเบื้องต้นด้วยสารละลายกรดเข้มข้นจะมีโอกาสเกิดตะกอน และการสร้างผลึกใหม่ของน้ำตาลมากกว่าการบำบัดเบื้องต้นด้วยสารละลายกรดเจือจาง นอกจากนี้ การใช้กรดซัลฟูริก และกรดไนตริก ในการนำมาใช้บำบัดเบื้องต้นเพื่อผลิตก๊าซชีวภาพ อาจส่งผลให้สัดส่วนของก๊าซมีเทนในก๊าซชีวภาพมีค่าน้อยหรือไม่เกิดขึ้นเลย เนื่องจากเกิดการแย่งรับอิเล็กตรอนของซัลเฟต (SO_4^{2-}) และไนเตรท (NO_3^-) ในสภาวะไร้อากาศ ซึ่งจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) และก๊าซไนโตรเจน (N_2) แทน

3.2 การบำบัดเบื้องต้นด้วยสารละลายต่าง วิธีนี้จะใช้อุณหภูมิและความดันต่ำกว่าการบำบัดเบื้องต้นด้วยวิธีอื่นๆ สามารถเกิดขึ้นภายใต้สภาวะบรรยากาศได้ แต่ใช้ระยะเวลาที่นาน การบำบัดเบื้องต้นด้วยต่างมีจุดประสงค์เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิว โดยการสลายพันธะระหว่างเฮมิเซลลูโลส และพันธะลิกนินที่เชื่อมต่อกับคาร์โบไฮเดรต สามารถกำจัดลิกนินได้โดยไม่ส่งผลกระทบต่อ

ต่อองค์ประกอบอื่นๆ (Balat และคณะ, 2008) สำหรับการบำบัดเบื้องต้นด้วยสารละลายต่าง เช่น ไฮโดรเจนไฮดรอกไซด์เจือจาง จะส่งผลให้เกิดการสลายตัวของเฮมิเซลลูโลส และวัตถุประสงค์เกิดการพองตัว ทำให้พื้นผิวสัมผัสในการทำปฏิกิริยาในโครงสร้างชีวมวลเพิ่มมากขึ้น แต่ข้อเสียคืออาจเกิดการสูญเสียอินทรีย์คาร์บอนจากการสลายตัวของสารละลายน้ำตาลที่เกิดจากการสลายตัวของโครงสร้างลิกโนเซลลูโลสระหว่างการบำบัดเบื้องต้นด้วยสารละลายต่าง และอาจก่อให้เกิดสารเพอร์ฟอรอล ซึ่งเป็นสารพิษที่ไปยับยั้งการทำงานของยีสต์ในกระบวนการผลิตเอทานอล แต่จะส่งผลน้อยต่อการทำงานของจุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทนในกระบวนการไร้อากาศ

3.3 การบำบัดเบื้องต้นด้วยการออกซิไดซ์ โดยการบำบัดเบื้องต้นด้วยวิธีนี้จะนิยมใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) และอะซิติกเปอร์ออกไซด์ ($C_2H_4O_3$) ที่มีความเป็นด่าง เป็นวิธีที่สามารถลดความเป็นผลึกคริสตัลไลน์ของเซลลูโลส เพื่อให้พื้นผิวสัมผัสในการทำปฏิกิริยาของเซลลูโลสในโครงสร้างชีวมวลเพิ่มขึ้น และไม่เกิดสารยับยั้งหรือสารที่เป็นพิษ เช่น เพอร์ฟอรอล และไฮดรอกซีเมทิลเพอร์ฟอรอล (Saha และ Cotta, 2006)

3.4 การบำบัดเบื้องต้นด้วยการใช้โอโซน (ozonolysis) โดยวิธีการบำบัดนี้สามารถย่อยสลายเฮมิเซลลูโลสและลิกนินได้ การบำบัดเบื้องต้นด้วยวิธีนี้มีข้อดีคือสามารถกำจัดลิกนินได้อย่างมีประสิทธิภาพ ไม่ก่อให้เกิดสารยับยั้งหรือสารพิษในกระบวนการย่อยสลาย และสามารถเกิดปฏิกิริยาภายใต้ความดันและอุณหภูมิห้องได้ แต่มีข้อเสียคือมีต้นทุนที่ใช้ในการบำบัดเบื้องต้นสูงเนื่องจากต้องใช้ปริมาณโอโซนเป็นจำนวนมาก (Vidal และ Molinier, 1988 อ้างถึงใน Sun และ Cheng, 2002)

4. การบำบัดเบื้องต้นทางชีวภาพ (biological pretreatment) เป็นการใช้เชื้อจุลินทรีย์ในการย่อยสลายลิกนิน และเฮมิเซลลูโลส เช่น white-rot fungi ซึ่งเป็นเชื้อราที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดในการปรับสภาพวัตถุดิบประเภทลิกโนเซลลูโลสด้วยวิธีทางชีวภาพ (Sun และ Cheng, 2002) การย่อยสลายลิกนินด้วยเชื้อราดังกล่าวสามารถผลิตเอนไซม์ย่อยสลายลิกนิน ได้แก่ ลิกนินเพอร์ออกซิเดส แมงกานีสเพอร์ออกซิเดส และแลคเคส ซึ่งข้อดีของการบำบัดเบื้องต้นด้วยวิธีทางชีวภาพ คือ ใช้พลังงานน้อย และเกิดได้ในสภาวะที่ไม่รุนแรง แต่มีข้อเสียคือต้องใช้ระยะเวลาในการย่อยสลายลิกนินที่ยาวนาน (Silverstein, 2004)

5. การบำบัดเบื้องต้นแบบผสมผสาน (combinations pretreatment)

การบำบัดเบื้องต้นด้วยวิธีนี้ เป็นวิธีการบำบัดที่นำกระบวนการบำบัดดั่งที่กล่าวมาในข้างต้นมาผสมผสานเข้าด้วยกัน ทั้งนี้เพื่อต้องการปรับปรุงประสิทธิภาพในการบำบัดเบื้องต้นให้สูงขึ้น (Hendriks และ Zeeman, 2008) สำหรับวิธีการบำบัดเบื้องต้นด้วยกระบวนการผสมแบบต่างๆ มีหลายวิธีดังนี้

5.1 การบำบัดเบื้องต้นด้วยความร้อนร่วมกับสารละลายกรด (thermal pretreatment in combination with acid pretreatment) การบำบัดเบื้องต้นด้วยความร้อนร่วมกับสารละลายกรด เป็นวิธีการที่ปรับปรุงจากกระบวนการบำบัดด้วยความร้อน โดยการเติมสารละลายกรดเพื่อใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาการสลายตัวของเฮมิเซลลูโลสในชีวมวล ซึ่งมีหลักการทำงานคล้ายกับการบำบัดด้วยไอน้ำ คือจะดำเนินการที่อุณหภูมิและความดันสูงๆ แต่จะมีการฉีดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) เข้าไปในไอน้ำที่ใช้ในการบำบัด ทำให้ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ถูกเปลี่ยนเป็นกรดซัลฟูริก (H_2SO_4) ที่ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยการบำบัดด้วยไอน้ำผสมกับซัลเฟอร์ไดออกไซด์จะมีข้อได้เปรียบกว่าการบำบัดด้วยสารละลายกรดตรงที่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ง่าย (Chynoweth และ Isaacson, 1989) แต่วิธีการบำบัดนี้ไม่สามารถหลีกเลี่ยงการเกิดของสารยับยั้งหรือสารพิษ คือ เฟอร์ฟูรอลที่มีผลในการยับยั้งการทำงานของจุลินทรีย์ในกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพและเอทานอลได้ (Grohmann และคณะ, 1985)

5.2 การบำบัดเบื้องต้นด้วยความร้อนร่วมกับสารละลายด่าง (thermal pretreatment in combination with alkaline pretreatment) การบำบัดเบื้องต้นด้วยความร้อนร่วมกับสารละลายด่าง มีหลักการทำงานคล้ายกับการบำบัดเบื้องต้นด้วยความร้อนร่วมกับสารละลายกรด เพียงแต่ใช้สารละลายด่างแทนสารละลายกรดในการบำบัด โดยการบำบัดเบื้องต้นด้วยความร้อนร่วมกับสารละลายด่างจะดำเนินการที่อุณหภูมิ 100-150 องศาเซลเซียส และมีการเติมแคลเซียมไฮดรอกไซด์ หรือปูนขาว ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ในสัดส่วน 0.1 กรัม ของปูนขาวต่อ 1 กรัมชีวมวล (Chang และคณะ, 2001) ซึ่งการบำบัดเบื้องต้นด้วยวิธีการดังกล่าวจะทำให้เกิดการสลายตัวของโครงสร้างลิกนินในชีวมวลได้ แต่ไม่สามารถย่อยสลายโครงสร้างชีวมวลที่มอดิฟายของลิกนินในปริมาณสูงได้ (Kaar และ Holtzapple, 2000) สำหรับข้อดีของการใช้สารละลายด่างในวิธีการบำบัดเบื้องต้นด้วยวิธีดังกล่าวคือ สารเคมีที่ใช้มีราคาถูก และปลอดภัย นอกจากนี้ยังสามารถนำหินปูนกลับมาใช้ใหม่ได้โดยการทำปฏิกิริยาระหว่างสารละลายหลังการบำบัดเบื้องต้นกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และได้

ผลิตภัณฑ์พลอยได้คือ แคลเซียมคาร์บอเนต หรือหินปูน (CaCO_3) จากนั้นจึงนำไปเผาให้ได้ปูนขาวต่อไป

5.3 การบำบัดเบื้องต้นด้วยความร้อนร่วมกับตัวออกซิไดซ์ (thermal pretreatment in combination with oxidation pretreatment) การบำบัดเบื้องต้นด้วยความร้อนร่วมกับตัวออกซิไดซ์ โดยการนำชีวมวลที่ต้องการบำบัดไปแช่ในตัวออกซิไดซ์ เช่น อะซิติกเพอร์ออกไซด์ จากนั้นจึงนำไปบำบัดด้วยไอน้ำ ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้หลังจากกระบวนการบำบัดเบื้องต้นดังกล่าว จะไม่ใช่ น้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวเหมือนผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการบำบัดด้วยไอน้ำหรือสารละลายกรด นอกจากนี้สารประกอบของฟีนอลที่เกิดขึ้นระหว่างการบำบัดเบื้องต้นด้วยความร้อน และตัวออกซิไดซ์จะสลายตัวเป็นกรดคาร์บอกซิลิก (carboxylic acid) เป็นผลให้ปริมาณของเพอร์ฟอรอลที่เกิดระหว่างการบำบัดมีปริมาณต่ำ แต่ก็ยังมีการสลายตัวของน้ำตาลระหว่างการบำบัดด้วยวิธีนี้อยู่

5.4 การบำบัดเบื้องต้นด้วยความร้อนร่วมกับตัวออกซิไดซ์แบบต่าง (thermal pretreatment in combination with alkaline oxidative pretreatment) การบำบัดเบื้องต้นด้วยความร้อนร่วมกับตัวออกซิไดซ์แบบต่าง มีหลักการทำงานคล้ายกับการบำบัดเบื้องต้นด้วยความร้อนร่วมกับสารละลายต่าง โดยจะมีการเติมออกซิเจน ทำหน้าที่เป็นตัวออกซิไดซ์ (oxidizing agent) ซึ่งการบำบัดเบื้องต้นด้วยวิธีการนี้จะทำให้เกิดการสูญเสียน้ำตาลระหว่างการบำบัดน้อย และพบว่าชีวมวลที่นำไปบำบัดมีความสามารถในการย่อยสลายด้วยเอนไซม์มากขึ้น แต่ไม่สามารถใช้ได้ผลกับชีวมวลที่มีลิกนินเป็นองค์ประกอบในปริมาณที่สูงได้ (Chang และคณะ, 2001)

5.5 การบำบัดเบื้องต้นด้วยแอมโมเนีย และคาร์บอนไดออกไซด์ (ammonia and carbon dioxide pretreatment) การบำบัดเบื้องต้นด้วยแอมโมเนีย และคาร์บอนไดออกไซด์ มีหลักการทำงานคล้ายกับวิธีการบำบัดด้วยไอน้ำ คือจะดำเนินการบำบัดที่อุณหภูมิและความดันสูงๆ โดยการนำชีวมวลไปแช่ในแอมโมเนียเหลวก่อนนำไปบำบัดด้วยไอน้ำ ซึ่งแอมโมเนียมีคุณสมบัติในการทำให้โครงสร้างเส้นใยของเซลลูโลสขยายตัว และเมื่อทำการลดความดันของระบบลงอย่างรวดเร็วจะส่งผลให้เกิดการระเหยของแอมโมเนีย (NH_3) ทำให้โครงสร้างพอลิเมอร์ในชีวมวลเกิดการแตกหัก สำหรับการบำบัดเบื้องต้นด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นการบำบัดที่ใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในสภาวะที่มีแรงดันและอุณหภูมิที่สูง (ประมาณ 200 องศาเซลเซียส) จะทำให้เกิดของเหลวที่มีสภาพเป็นกรดเกิดขึ้นในระหว่างทำการบำบัด เนื่องจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ใช้มีความดันสูง และกรดที่เกิดขึ้นสามารถย่อยสลายโครงสร้างเฮมิเซลลูโลสของชีวมวลได้

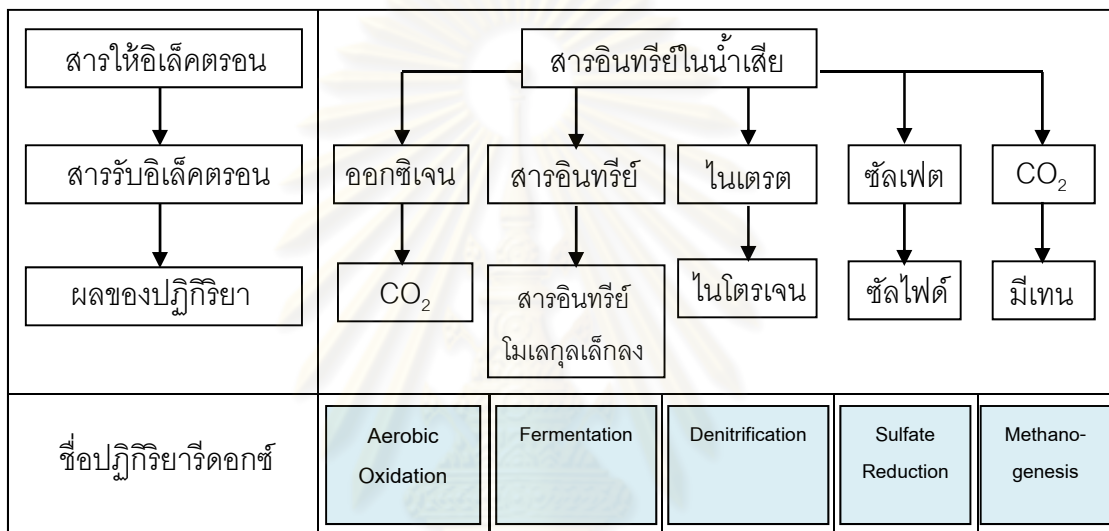
วิธีการบำบัดเบื้องต้นเพื่อทำลายโครงสร้างลิกโนเซลลูโลสที่เป็นองค์ประกอบในชีวมวล มีหลายวิธีดังที่กล่าวมาแล้วในช่วงต้น โดยการเลือกใช้วิธีการใดนั้นจะต้องพิจารณาถึงชนิดหรือประเภทของชีวมวล องค์ประกอบของชีวมวลที่ต้องการบำบัดเบื้องต้น และจุดประสงค์ในการบำบัดชีวมวลเพื่อใช้ผลิตก๊าซชีวภาพ หรือผลิตเป็นเอทานอล เป็นต้น

2.4 กระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศ (มันซิน ตันทูลเวศม์, 2542)

กระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศเป็นกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้อากาศที่มีความซับซ้อนโดยอาศัยจุลินทรีย์หลายกลุ่มทำงานร่วมกัน ความสัมพันธ์ของกลุ่มจุลินทรีย์นี้มีทั้งการพึ่งพาอาศัยกันและการแข่งขันกัน เมื่อมีสารอินทรีย์เข้าสู่ระบบจะถูกเปลี่ยนรูปไปเนื่องจากการย่อยสลายโดยกลุ่มจุลินทรีย์หลายๆ กลุ่มต่อกัน ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการย่อยสลายของกลุ่มจุลินทรีย์หนึ่งจะถูกย่อยสลายต่อไปโดยกลุ่มจุลินทรีย์อีกกลุ่มหนึ่ง เกิดเป็นความสัมพันธ์แบบพึ่งพาอาศัยกัน แต่ถ้าผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นสามารถใช้จุลินทรีย์หลายๆ กลุ่มที่ใช้สารอาหารชนิดเดียวกันก็ทำให้เกิดความสัมพันธ์แบบแข่งขันกันขึ้น โดยกลุ่มจุลินทรีย์หลายๆ กลุ่มที่อาศัยอยู่ร่วมกันและมีปฏิสัมพันธ์เหล่านี้เองที่ทำให้เกิดปฏิกิริยารีดอกซ์และเปลี่ยนรูปสารอินทรีย์ให้อยู่ในรูปแบบต่างๆ เช่น กรดอินทรีย์ (organic acid) ก๊าซมีเทน (CH_4) ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) เป็นต้น แต่การทำงานของจุลินทรีย์ในระบบไร้อากาศที่ย่อยสลายสารอินทรีย์ เช่น การทำงานของกลุ่มจุลินทรีย์ต่างๆ และสัดส่วนการใช้สารอินทรีย์ เป็นต้น จะขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ โดยเฉพาะปัจจัยทางสภาวะแวดล้อมที่จะส่งผลให้จุลินทรีย์กลุ่มใดกลุ่มหนึ่งที่เด่นที่สุดในระบบ โดยทั่วไปถ้าพิจารณาในระบบไร้อากาศที่ผลิตก๊าซมีเทน จะต้องมีกลุ่มจุลินทรีย์สร้างมีเทนทำงานเด่นที่สุด และในขณะเดียวกันจุลินทรีย์ในกลุ่มสร้างกรดก็สามารถทำงานที่สัมพันธ์กับจุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทนได้อย่างมีประสิทธิภาพ เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์หลักเป็นก๊าซมีเทนต่อไป

กลไกพื้นฐานในการบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพไม่ว่าจะเป็นแบบใช้อากาศหรือไม่ใช้อากาศก็ตามจะมีปฏิกิริยาเคมีแบบออกซิเดชันรีดักชัน หรือเรียกว่าปฏิกิริยารีดอกซ์ (redox reaction) แสดงดังรูปที่ 2.4-1 ปฏิกิริยารีดอกซ์หมายถึง ปฏิกิริยาที่มีการถ่ายเทอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นระหว่างสารให้และรับอิเล็กตรอน ซึ่งสารให้อิเล็กตรอนส่วนใหญ่มักเป็นสารอินทรีย์ ส่วนสารรับอิเล็กตรอน เช่น ออกซิเจน ไนเตรต และคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นต้น การถ่ายเทอิเล็กตรอนในปฏิกิริยาทางรีดอกซ์จะได้พลังงานเกิดขึ้นจำนวนหนึ่ง โดยพลังงานที่เกิดขึ้นส่วนหนึ่งจะสูญเสียไปอยู่ในรูปของพลังงานความร้อน และพลังงานอีกส่วนหนึ่งจะถูกนำไปใช้ในการดำรงชีวิตและสร้าง

เซลล์ใหม่ ดังนั้น สารอินทรีย์จึงเป็นทั้งแหล่งพลังงานและแหล่งคาร์บอนของจุลินทรีย์ ทั้งนี้สารรับอิเล็กตรอนในน้ำเสียมีหลายชนิด ผลของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นก็ต่างกันไปตามชนิดของสารรับอิเล็กตรอน เช่น ถ้าสารรับอิเล็กตรอนเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาที่เรียกว่า Methanogenesis เป็นต้น ดังนั้นพื้นฐานของระบบไร้อากาศคือ การเปลี่ยนรูปสารอินทรีย์ด้วยปฏิกิริยารีดอกซ์โดยใช้จุลินทรีย์กลุ่มที่ไม่ใช้อากาศ ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้ก็จะแตกต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับสภาวะของของเสียกับปริมาณ และชนิดของจุลินทรีย์ในระบบ



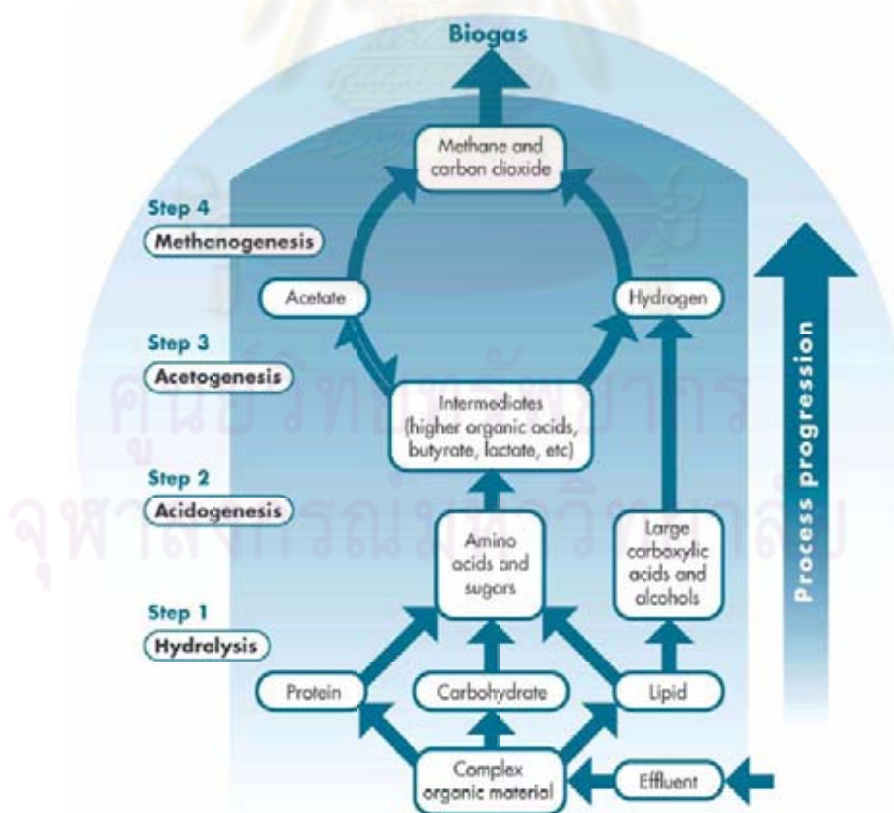
รูปที่ 2.4-1 ปฏิกิริยารีดอกซ์ในการบำบัดน้ำเสีย (มันสิน ตันฑุลเวศม์, 2542)

สำหรับกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไร้อากาศโดยทั่วไปสามารถเกิดขึ้นเองตามธรรมชาติเมื่อเกิดการสะสมของสารอินทรีย์ในสภาวะไร้อากาศ โดยมีความชื้น และมีจุลินทรีย์ในระบบไร้อากาศ (anaerobic microorganism) ที่มีปริมาณเพียงพอ ซึ่งกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นก๊าซชีวภาพ (biogas) มีองค์ประกอบหลักคือ ก๊าซมีเทน (CH₄) ประมาณ 60-65 เปอร์เซ็นต์ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ประมาณ 35-38 เปอร์เซ็นต์ ส่วนที่เหลืออีกประมาณ 2 เปอร์เซ็นต์ จะเป็นก๊าซอื่นๆ เช่น แอมโมเนีย ไนโตรเจน ไฮโดรเจน และไฮโดรเจนซัลไฟด์ เป็นต้น เมื่อกำจัดสิ่งปนเปื้อนออกจากก๊าซชีวภาพแล้วสามารถนำไปใช้เป็นพลังงานทดแทนได้

2.4.1 จุลชีววิทยาและชีวเคมีของกระบวนการไร้อากาศ

กระบวนการย่อยแบบไม่ใช้อากาศ (anaerobic digestion) เป็นการเปลี่ยนสารอินทรีย์ให้กลายเป็นก๊าซมีเทน ดังที่กล่าวแล้วในข้างต้นว่าสารอินทรีย์จะถูกจุลินทรีย์หลาย ๆ กลุ่มในระบบไร้อากาศทำการย่อยสลายให้กลายเป็นก๊าซมีเทนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยอาศัยปฏิสัมพันธ์ของกลุ่มจุลินทรีย์ต่างๆ ที่มีการพึ่งพาอาศัยกัน โดยกระบวนการไม่ใช้อากาศแบ่งออกเป็น 4 ขั้นตอน แสดงดังรูปที่ 2.4.1-1 มีรายละเอียดดังนี้

1. ขั้นตอนไฮโดรไลซิส (hydrolysis)
2. ขั้นตอนการสร้างกรดไขมันระเหย (acidogenesis)
3. ขั้นตอนสร้างกรดอะซิเตท (acetogenesis)
4. ขั้นตอนการสร้างมีเทน (methanogenesis)



รูปที่ 2.4.1-1 ขั้นตอนของปฏิกิริยาไม่ใช้อากาศ (Wheatley และคณะ, 1997)

ขั้นตอนทั้ง 4 ที่กล่าวมาในข้างต้น จะต้องอาศัยจุลินทรีย์ในระบบไร้อากาศ 3 ประเภท ดังนี้

1) จุลินทรีย์กลุ่มสร้างกรดไขมันระเหย (Acidogenic microorganism)

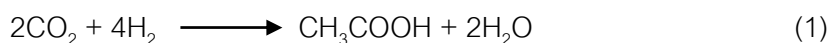
ในขั้นตอนการสร้างกรดไขมันระเหย (volatile fatty acid : VFA) ของกระบวนการไร้อากาศ จะเกิดกรดที่ผลิตขึ้นโดยจุลินทรีย์ชนิดที่ไม่ใช้อากาศ (obligate anaerobic) มากกว่าชนิดที่ใช้อากาศได้บางส่วน (facultative) ทั้งนี้เพราะ จุลินทรีย์ชนิดไม่ใช้อากาศมีจำนวนมากกว่าชนิดที่ใช้อากาศได้บางส่วน โดยจุลินทรีย์ไม่ใช้อากาศชนิด obligate anaerobic ที่มีบทบาทในการสร้างกรดไขมันระเหย ก็คือ กลุ่ม Clostridium ซึ่งมีเมตาบอลิซึม (metabolism) หลายแบบที่สามารถใช้สารอาหารที่เป็นแป้งหรือโปรตีนได้ ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาการย่อยสลายที่ได้หลายชนิด เช่น กรดบิวทิริก กรดอะซิติก ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซไฮโดรเจน เอทานอล บิวทานอล และอะซีโตน เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีจุลินทรีย์ในกลุ่ม Propionibacterium ที่ผลิตกรดพริกพิออนิก (propionic acid) และกรดอะซิติกจากกรดแลคติก (Fenchel และ Finlay, 1995 ; Madigan และคณะ, 1997)

2) จุลินทรีย์กลุ่มสร้างกรดอะซิติก (Acetogenic microorganism)

ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์กลุ่มสร้างกรดไขมันระเหย ดังที่กล่าวในข้างต้น ซึ่งผลิตภัณฑ์บางชนิดยังเป็นสารโมเลกุลใหญ่ที่จุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทน (methanogenic microorganism) ไม่สามารถนำไปใช้เป็นสารอาหารได้ จึงต้องมีการแลกเปลี่ยนสารเหล่านั้นให้กลายเป็นสารอาหารที่ง่ายสำหรับจุลินทรีย์ที่สร้างมีเทนเพื่อให้สามารถดูดซึมเข้าไปใช้ในเซลล์ได้ ดังนั้นจุลินทรีย์ที่ย่อยกรดไขมันระเหยโมเลกุลใหญ่ให้กลายเป็นกรดอะซิติก ไฮโดรเจน และคาร์บอนไดออกไซด์ได้นั้น สามารถแบ่งออกเป็น 2 ชนิด ดังนี้

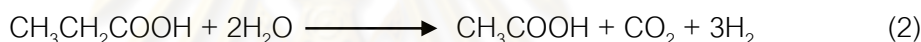
2.1) จุลินทรีย์ชนิดสร้างกรดอะซิติก (Homoacetogenic microorganism)

หลักการทำงานของจุลินทรีย์ชนิดนี้ คือใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นตัวรับอิเล็กตรอนและแหล่งคาร์บอน และใช้ก๊าซไฮโดรเจนเป็นสารให้อิเล็กตรอนเพื่อเปลี่ยนคาร์บอนไดออกไซด์ให้เป็นกรดอะซิติก ดังสมการ (1)



2.2) จุลินทรีย์ชนิดสร้างกรดอะซิติกที่ผลิตไฮโดรเจนได้ (H₂-producing acetogenic microorganism)

แบคทีเรียชนิดนี้จะใช้กรดไขมันระเหย (ที่ไม่ใช่กรดอะซิติก) หรือแอลกอฮอล์เป็นสารอาหาร และสร้างกรดอะซิติกและก๊าซไฮโดรเจนซึ่งเป็นสารอาหารของจุลินทรีย์สร้างมีเทนขึ้นมา ดังนั้นจุลินทรีย์ชนิดนี้จึงมีบทบาทสำคัญเพราะเป็นตัวเชื่อมระหว่างจุลินทรีย์สร้างกรดกับจุลินทรีย์สร้างมีเทน อย่างไรก็ตาม จุลินทรีย์ชนิดนี้จะไม่เจริญเติบโตเมื่ออยู่ตามลำพังเพราะเมื่อมีการสะสมของก๊าซไฮโดรเจนที่ผลิตขึ้นมาจะทำให้มีความดันพาร์เชียลของไฮโดรเจนสูงขึ้น ส่งผลให้ปฏิกิริยาสร้างกรดอะซิติกหยุดการเจริญเติบโต ดังนั้นจึงต้องมีการกำจัดไฮโดรเจนก่อนจุลินทรีย์สร้างกรดอะซิติกจึงจะเจริญเติบโตได้ โดยจุลินทรีย์สร้างมีเทนจะเข้ามามีบทบาทในตรงนี้เพราะจุลินทรีย์สร้างมีเทนสามารถใช้ไฮโดรเจนเป็นสารอาหารได้ สำหรับแบคทีเรียในกลุ่มนี้จะสร้างก๊าซไฮโดรเจนและพลังงานจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ ดังสมการ (2)



3) จุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทน (Methanogenic microorganism)

จุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทนเป็นจุลินทรีย์ชนิดที่ไม่ใช้อากาศเด็ดขาด (obligate anaerobic) ซึ่งไม่อาจทนต่อสภาวะที่มีออกซิเจนได้แม้มีปริมาณเพียงเล็กน้อย สามารถจำแนกประเภทตามสารอาหารที่ใช้ในกระบวนการสร้างมีเทนได้ 3 ประเภท แสดงดังตารางที่ 2.4.1-1 มีรายละเอียดดังนี้

3.1) จุลินทรีย์ในกลุ่มสร้างมีเทนจากกรดอะซิติก (acetoclastic methanogenes)

จุลินทรีย์กลุ่มนี้จะใช้กรดอะซิติก (CH₃COOH) เป็นสารตั้งต้นในการสร้างก๊าซมีเทน และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งเป็นปฏิกิริยาหลักในการสร้างก๊าซมีเทน และการกำจัดสารอินทรีย์ส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นจากจุลินทรีย์ของกลุ่มนี้ ดังสมการ (3)

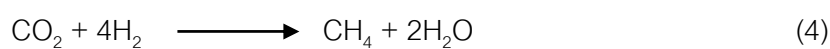


ตารางที่ 2.4.1-1 สารอาหารที่จุลินทรีย์สร้างมีเทนนำไปใช้ได้ (Madigan และคณะ, 1997)

สารอาหาร	พลังงาน ΔG° (KJ/reaction)
1. ประเภทอะซีเตท	
- Acetate, CH_3COO^-	-31
2. ประเภทคาร์บอนไดออกไซด์	
- คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2)	-131
- ฟอร์เมต (HCOO^-)	-145
- คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO)	-210
3. ประเภทสารเมทิล	
- Methanol, CH_3OH	-319
- Methylamine, $(\text{CH}_3)_3\text{-N}$	-230
- Dimethylamine, $(\text{CH}_3)_2\text{NH}_2^+$	-230
- Trimethylamine, $(\text{CH}_3)_3\text{NH}^+$	-666

3.2) จุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทนจากคาร์บอนไดออกไซด์ และไฮโดรเจน (hydrogenotrophic methanogenes)

เป็นกลุ่มจุลินทรีย์ที่ใช้ก๊าซไฮโดรเจนในการผลิตก๊าซมีเทนโดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์เป็นแหล่งคาร์บอน ดังสมการ



สำหรับปฏิกิริยาการรวมตัวของ CO_2 และ H_2 เพื่อผลิตก๊าซมีเทนจะได้พลังงานสูงกว่าปฏิกิริยาที่กรดอินทรีย์ (กรดอะซิติก) ถูกเปลี่ยนไปเป็นก๊าซมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์ ดังนั้น จุลินทรีย์จึงชอบที่จะใช้ก๊าซไฮโดรเจนกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มากกว่า

3.3) จุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทนจากสารประเภทเมทิล (methylotrophic methanogens)

จุลินทรีย์กลุ่มนี้ใช้สารที่มี methyl group ($-\text{CH}_3$) เป็นสารตั้งต้นสำหรับการผลิต CH_4 ได้แก่ เมทานอล (methanol ; CH_3OH) และเมทิลลามาาย (methylamine ; $(\text{CH}_3)_3\text{-N}$) ดังสมการ (5) และ (6)



2.4.2 ขั้นตอนของปฏิกิริยาการย่อยสลายแบบไร้อากาศ

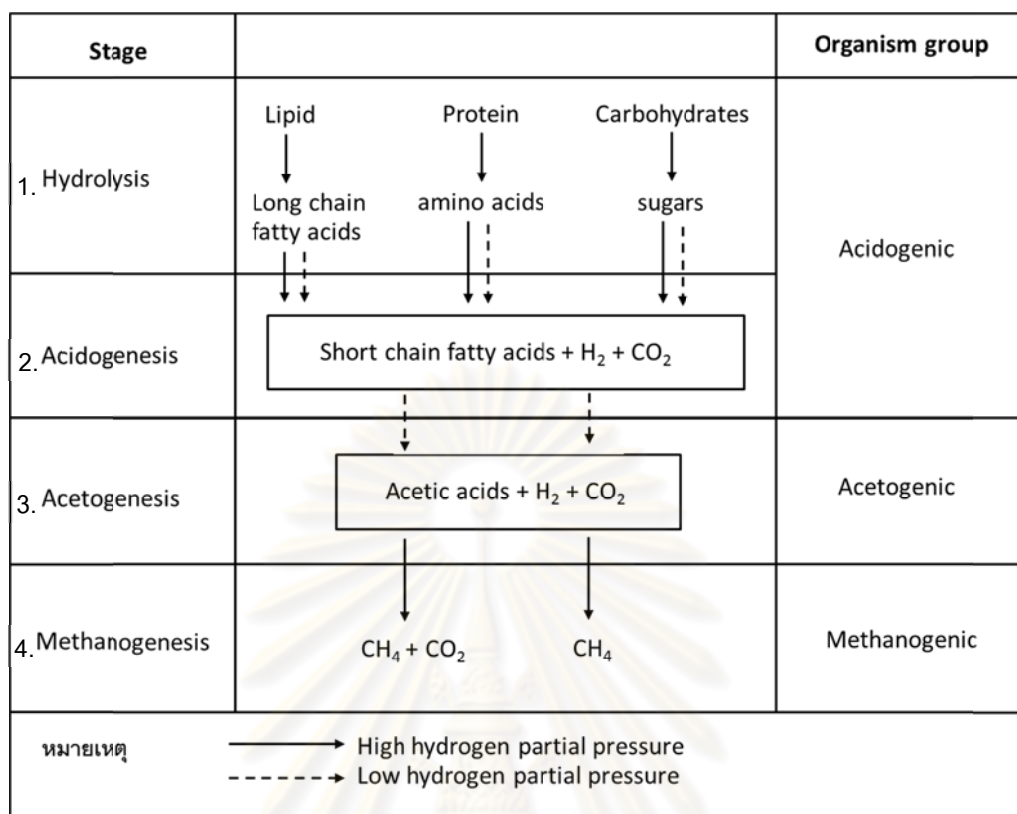
ดังที่ได้กล่าวไว้แล้วในข้างต้นว่า กระบวนการแบบไม่ใช้อากาศมี 4 ขั้นตอนหลักที่เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องไปตามลำดับ โดยขั้นตอนการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไม่ใช้อากาศสรุปได้ดังรูปที่ 2.4.2-1 มีรายละเอียดดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 การย่อยสลายแบบไฮโดรไลซิส (hydrolysis)

ขั้นตอนที่ 2 การสร้างกรดไขมันระเหย (acidogenesis)

ขั้นตอนที่ 3 การสร้างกรดอะซิติก (acetogenesis)

ขั้นตอนที่ 4 การสร้างมีเทน (methanogenesis)



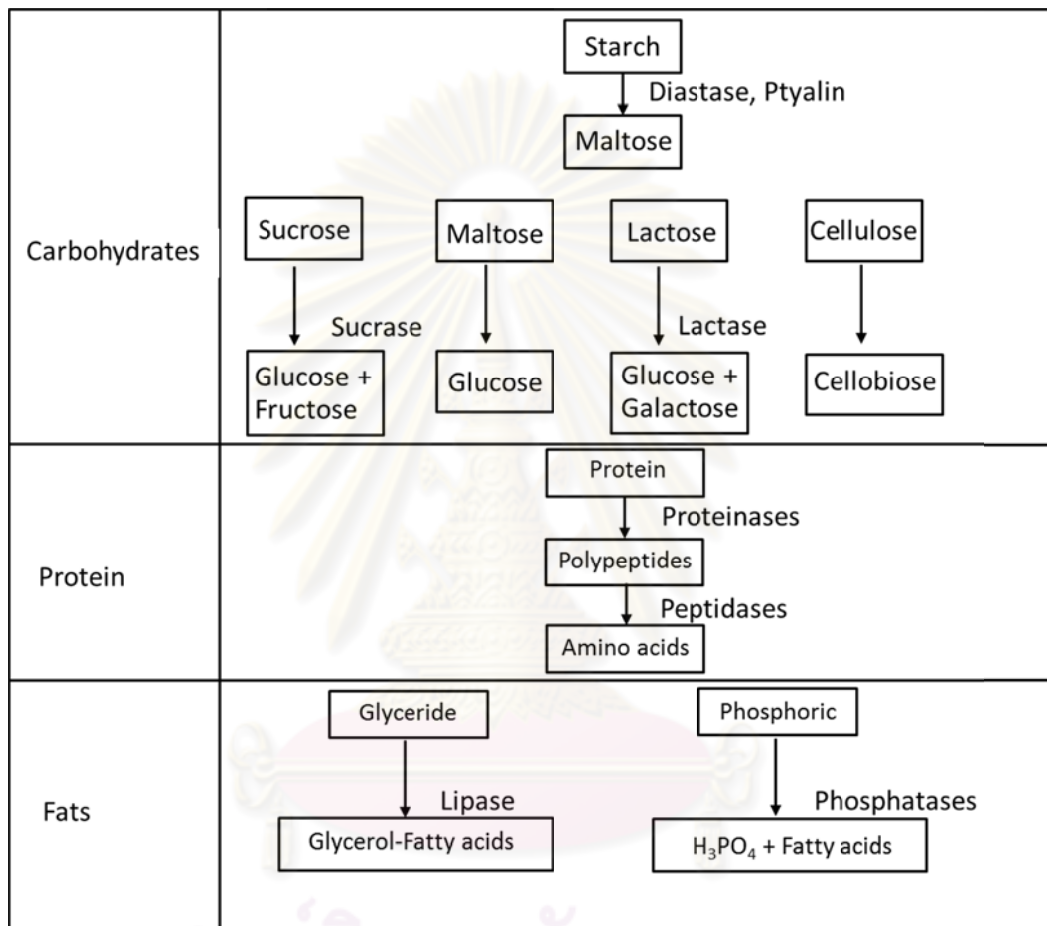
รูปที่ 2.4.2-1 ขั้นตอนการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไม่ใช้อากาศ (Sam-soon และคณะ, 1990)

ขั้นตอนที่ 1 การย่อยสลายแบบไฮโดรไลซิส (Hydrolysis)

จุลินทรีย์ในระบบไร้อากาศจะใช้สารอินทรีย์เป็นแหล่งคาร์บอนและเป็นแหล่งพลังงาน โดยการนำเอาสารอินทรีย์ไปใช้โดยจุลินทรีย์ ซึ่งจะต้องมีการขนส่งสารอินทรีย์เข้าสู่เซลล์ก่อน จากนั้นจะเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ขึ้นภายในเซลล์ และได้พลังงานในการดำรงชีวิตและการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ ดังนั้นสารอินทรีย์ที่มีขนาดใหญ่จะไม่สามารถขนส่งเข้าสู่เซลล์ได้โดยตรง จึงจำเป็นต้องผ่านกระบวนการย่อยสลายให้โมเลกุลของสารอินทรีย์มีขนาดเล็กลงเสียก่อน

การย่อยสลายไฮโดรไลซิสเป็นขั้นตอนการย่อยสลายสารประกอบโมเลกุลใหญ่ เช่น คาร์โบไฮเดรต ไขมัน และโปรตีน ให้เป็นสารประกอบโมเลกุลเล็ก เช่น น้ำตาล กรดอะมิโน และกรดไขมันชนิดยาว ตามลำดับ โดยการให้จุลินทรีย์หลายๆ ชนิด ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นจุลินทรีย์กลุ่มสร้างกรดด้วยการผลิตเอนไซม์ขึ้นภายในเซลล์และปล่อยเอนไซม์ออกมาออกเซลล์ ซึ่งจะลดพลังงานในกระตุ้นการเกิดปฏิกิริยา เป็นผลให้ปฏิกิริยาเกิดได้เร็วขึ้น แต่เอนไซม์เป็นโปรตีนที่มีความเฉพาะเจาะจงต่อปฏิกิริยา และตัวทำปฏิกิริยา ดังนั้นจุลินทรีย์ต้องสร้างเอนไซม์ที่ใช้ได้เฉพาะ

กับสารอินทรีย์ที่มีอยู่ในของเสีย เช่น ไซอะไมเลส (amylase) ย่อยสลายแป้งและไกลโคเจนให้เป็นน้ำตาล หรือไลโปไซม์ไลเปส (lipase) ย่อยสลายไขมัน และไลเปดให้เป็นกลีเซอรอล และกรดไขมัน หรือไซโทโปรตีนเนส (proteinase) และเปปติเดส (peptidase) ย่อยสลายโปรตีนให้กลายเป็นกรดอะมิโน เป็นต้น แสดงดังรูปที่ 2.4.2-2



รูปที่ 2.4.2-2 สารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์ที่ได้จากขั้นตอนไฮโดรไลซิส และเอนไซม์ที่ใช้

(Sawyer และ McCarty, 1993)

ขั้นตอนการย่อยสลายแบบไฮโดรไลซิสเป็นขั้นตอนที่ค่อนข้างช้า และเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราเร็วของปฏิกิริยา ซึ่งความเร็วของปฏิกิริยาจะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ที่เป็นสารตั้งต้นของปฏิกิริยาเคมี ความเข้มข้นของเอนไซม์ อุณหภูมิ ความเป็นกรด-ด่าง พื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างเอนไซม์กับสารอินทรีย์ เป็นต้น ทำให้เวลาที่ใช้ในการย่อยสลายสารแต่ละชนิดแตกต่างกัน

ขั้นตอนที่ 2 การสร้างกรดไขมันระเหย (Acidogenesis)

ผลิตภัณฑ์จากขั้นตอนไฮโดรไลซิส (น้ำตาล กรดอะมิโน และกรดไขมันชนิดยาว) จะถูกจุลินทรีย์กลุ่มสร้างกรดดูดซึมเข้าไปภายในเซลล์เพื่อใช้เป็นแหล่งคาร์บอนและแหล่งพลังงานโดยผ่านกระบวนการหมัก (fermentation) และถูกเปลี่ยนเป็นกรดไขมันระเหย (volatile fatty acid; VFA) เช่น กรดอะซิติก กรดไพรูวิก และกรดบิวทิริก เป็นต้น ซึ่งการที่จะเกิดกรดไขมันระเหยชนิดใดนั้น จะขึ้นอยู่กับความดันของไฮโดรเจนในระบบ (hydrogen partial pressure) ถ้าหากระบบมีความดันของไฮโดรเจนในระบบสูงจะเกิดกรดไพรูวิก และกรดบิวทิริกมาก แต่ในระบบไร้อากาศต้องการให้มีความดันของไฮโดรเจนต่ำเพื่อทำให้เกิดกรดอะซิติกให้มากที่สุด เพราะกรดอะซิติกเป็นสารตั้งต้นในปฏิกิริยาหลักของการสร้างก๊าซมีเทน

ขั้นตอนที่ 3 การสร้างกรดอะซิติกจากกรดไขมันระเหย (Acetogenesis)

จุลินทรีย์สร้างอะซิเตทมีบทบาทสำคัญในการเป็นตัวเชื่อมระหว่างขั้นตอนการสร้างกรดและขั้นตอนการสร้างมีเทน ซึ่งจุลินทรีย์ชนิดสร้างมีเทนนั้นต้องการซับสเตรท (substrate) ที่เฉพาะเจาะจงมากได้แก่ กรดอะซิติก กรดฟอร์มิก ไฮโดรเจน เมทานอล และเมธิลามีน เป็นต้น โดยกรดไขมันระเหยที่มีคาร์บอนมากกว่า 2 อะตอมไม่อาจใช้เป็นซับสเตรทในการผลิตมีเทนได้โดยตรง และจุลินทรีย์สร้างอะซิเตทที่สามารถผลิตไฮโดรเจนได้ มีความสามารถในการย่อยสลายกรดไขมันระเหยที่มีคาร์บอนมากกว่า 2 อะตอม ให้กลายเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ กรดอะซิติก และไฮโดรเจน ภายใต้สภาวะที่ไฮโดรเจนมีความดันพาร์เชียลต่ำกว่า 2×10^{-3} บรรยากาศ และต่ำกว่า 9×10^{-3} บรรยากาศ สำหรับการย่อยสลายกรดบิวทิริกและกรดไพรูวิกตามลำดับ โดยในขั้นตอนที่ 3 นี้ จะเกิดขึ้นได้เฉพาะในสภาวะที่ไฮโดรเจนมีความดันพาร์เชียลต่ำๆ เท่านั้น กรดไขมันระเหยไม่สามารถย่อยสลายกลายเป็นกรดอะซิติกภายใต้สภาวะที่มีไฮโดรเจนความดันพาร์เชียลสูงได้

ขั้นตอนที่ 4 การสร้างมีเทน (Methanogenesis)

กรดอะซิติกหรือก๊าซไฮโดรเจนที่ได้จากขั้นตอนการสร้างกรด จะถูกจุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทนใช้เป็นแหล่งคาร์บอน และแหล่งพลังงาน ได้ก๊าซมีเทน (CH_4) และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) เป็นผลิตภัณฑ์ นอกจากนี้กรดไขมันระเหยที่มีคาร์บอนมากกว่า 2 อะตอม ไม่สามารถถูกเปลี่ยนเป็นมีเทนได้โดยตรง ดังนั้นจุลินทรีย์จะต้องเปลี่ยนกรดไขมันระเหยต่างๆ ให้เป็นกรดอะซิติกหรือไฮโดรเจนเสียก่อนจึงจะใช้ผลิตมีเทนได้ อีกทั้งจุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทนบางชนิดอาจจะใช้ซับสเตรทบางชนิดในการผลิตก๊าซมีเทน เช่น เมทานอล และกรดฟอร์มิก เป็นต้น

2.5 รูปแบบของระบบบำบัดแบบไม่ใช้อากาศ (มันลิน ตันทูลเวศม์, 2542)

กระบวนการไม่ใช้อากาศสามารถใช้ได้ทั้งการบำบัดน้ำเสียและการบำบัดสลัดจ์ (ของแข็ง) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับว่าถึงปฏิกิริยาจะเป็นแบบใด และไม่ว่าวัตถุประสงค์ของการบำบัดจะเป็นแบบใดก็ตาม กระบวนการแบบไม่ใช้อากาศจะมีลักษณะที่สำคัญเหมือนกัน คือ สามารถผลิตก๊าซชีวภาพจากสารอินทรีย์ได้ สำหรับกระบวนการบำบัดสลัดจ์ (ของแข็ง) มักเป็นถึงรูปแบบเดียวคือ ถังย่อย (digestion tank) ส่วนในรูปแบบอื่นๆ มักใช้ในการบำบัดน้ำเสีย

ถึงปฏิกิริยาชีวภาพแบบไม่ใช้อากาศได้มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องจากถึงปฏิกิริยาที่ใช้สำหรับการหมักธรรมดาจนถึงกระบวนการที่มีการหมักอัตราสูงที่ใช้เวลานั้นมาก โดยสามารถสรุปรูปแบบของถึงปฏิกิริยาที่ใช้กันในปัจจุบันได้ดังนี้

1) รูปแบบถึงปฏิกิริยาชนิดที่จุลินทรีย์เติบโตแขวนลอยอยู่ในน้ำเสีย (suspended growth) เช่น ถึง completely mixed และถึง anaerobic contact เป็นต้น ซึ่งจะอาศัยการกวนให้แบคทีเรียผสมกับน้ำเสียภายในถึงปฏิกิริยา และอาจจำเป็นต้องมีถึงตกตะกอนเพื่อแยกน้ำที่ผ่านกระบวนการบำบัดและเชื้อจุลินทรีย์ออกจากกัน โดยมีการหมุนเวียนเชื้อจุลินทรีย์กลับเข้าสู่ถึงปฏิกิริยาอีกครั้ง โดยถึงปฏิกิริยาแบบนี้จะมีปริมาณเชื้อจุลินทรีย์และอายุตะกอน (SRT) ต่ำ โดยมีข้อจำกัดในความทนต่อสารพิษและการเปลี่ยนแปลงสภาวะการทำงานของระบบเนื่องจากอายุตะกอนที่ต่ำ แต่เหมาะสมสำหรับการใช้บำบัดน้ำเสียที่มีอนุภาคของแข็ง และน้ำเสียที่มีความเข้มข้นสูง โดยงานวิจัยนี้จะนำรูปแบบถึง completely mixed มาใช้ในการทดลองด้วยการหมักแบบไร้อากาศ

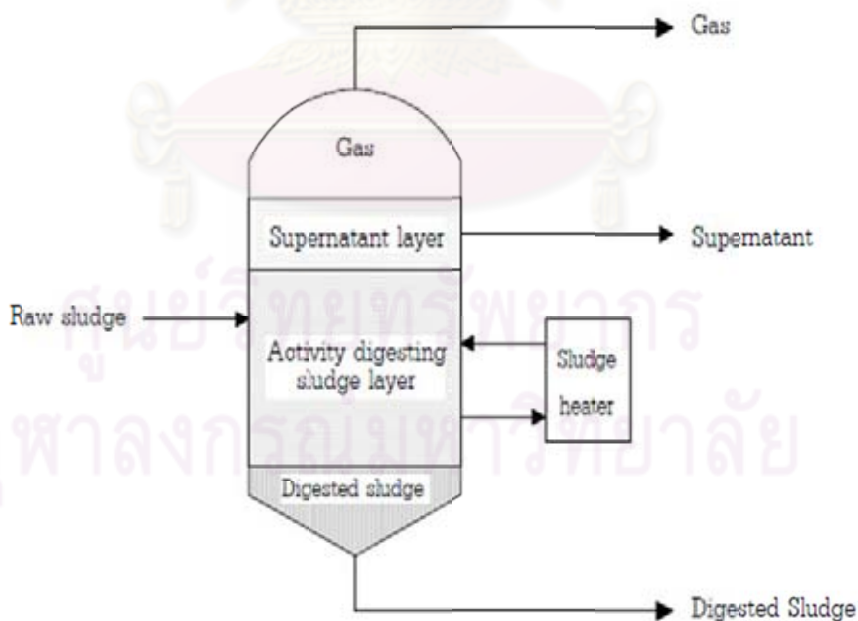
2) รูปแบบถึงปฏิกิริยาชนิดที่จุลินทรีย์เติบโตอยู่ติดกับตัวกลาง (supported growth) เช่น ถึง anaerobic filter ถึง expanded bed และถึง fluidized bed เป็นต้น เนื่องจากจุลินทรีย์แบบไม่ใช้อากาศไม่สามารถตกตะกอนได้ดี และอาจหลุดออกไปจากระบบได้ ดังนั้นจึงมีผู้คิดค้นที่จะให้เชื้อจุลินทรีย์ยึดติดกับตัวกลาง เปรียบเสมือนตัวกลางนั้นถูกใช้เป็นตัวกรองไม่ให้เชื้อจุลินทรีย์ออกไปจากระบบ ทำให้อายุของตะกอน และปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ในระบบสูงและมีเสถียรภาพ ทำให้มีความทนต่อสารพิษและการเปลี่ยนแปลงสภาวะการทำงานของระบบได้ดี แต่จะเหมาะสมกับการใช้บำบัดน้ำเสียที่มีความเข้มข้นต่ำและใช้บำบัดน้ำเสียที่มีอนุภาคของแข็งได้บ้าง

3) รูปแบบถังปฏิกริยาแบบผสมผสาน (hybrid) เช่น ถัง UASB และ anaerobic pond เป็นต้น ซึ่งเป็นการนำข้อดีมาใช้และตัดปัญหาข้อด้อยของรูปแบบของถังปฏิกริยาทั้งสองแบบในข้างต้น โดยถังปฏิกริยาดังกล่าวมีอายุของตะกอน และปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ในระบบสูงและมีเสถียรภาพ ทำให้มีความคงทนต่อสารพิษและการเปลี่ยนแปลงสภาวะการทำงานของระบบได้ดี มีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียสูงและใช้บำบัดน้ำเสียที่มีอนุภาคของแข็งได้บ้าง

2.5.1 ถังย่อยแบบไร้อากาศ (anaerobic digestion tank)

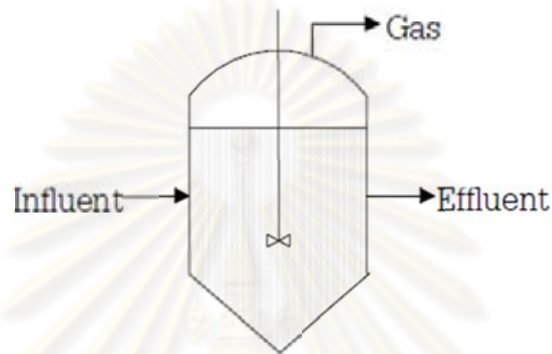
ระบบนี้จะใช้ในการบำบัดสลัดจ์ (ของแข็ง) ซึ่งเป็นตะกอนอินทรีย์ โดยแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ

1) ถังย่อยไร้อากาศแบบอัตราต่ำ (low rate anaerobic digester) แสดงดังรูปที่ 2.5.1-1 เป็นถังย่อยไร้อากาศที่ไม่มีการกวนตะกอนและไม่ปรับอุณหภูมิ ดังนั้นปฏิกริยาที่เกิดขึ้นภายในถังจึงช้าและไม่ทั่วถึง

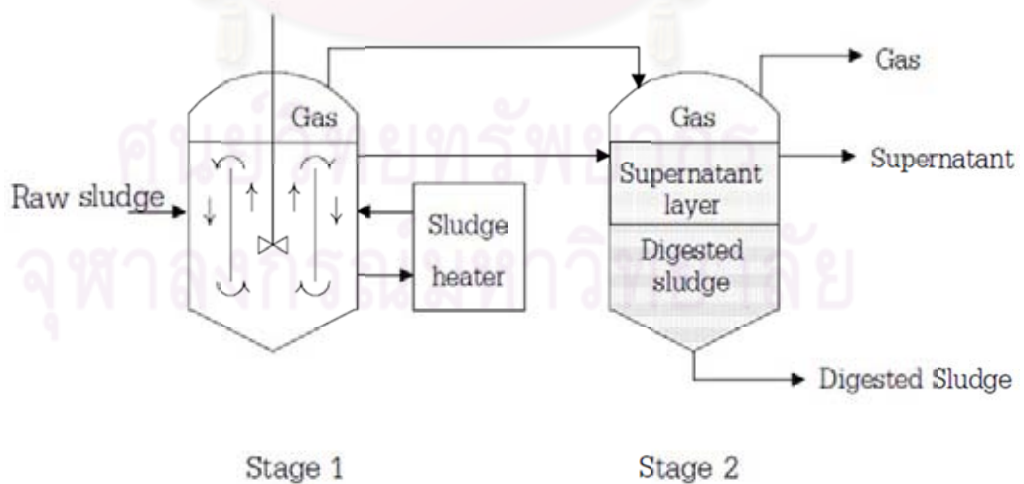


รูปที่ 2.5.1-1 ถังย่อยชนิดอัตราต่ำ (มันลีน ตัณฑุลเวศม์, 2542)

2) ถังย่อยไร้อากาศแบบอัตราสูง (high rate anaerobic digester) แสดงดังรูปที่ 2.5.1-2 เป็นถังย่อยไร้อากาศที่มีการกวนและอาจมีการปรับอุณหภูมิด้วย ซึ่งทำให้ปฏิกิริยาที่ใช้กำจัดสารอินทรีย์เกิดขึ้นได้ดีกว่าแบบแรก และในรูปที่ 2.5.1-3 เป็นถังย่อยแบบอัตราสูงที่มีถัง 2 ชุด โดยมีการแยกตะกอนสลัดจ์ชุดที่ 1 ออกจากถังย่อยสลัดจ์ชุดที่ 2 ซึ่งสามารถทำให้ได้สลัดจ์ที่ย่อยแล้วมีความเข้มข้นสูงและน้ำทิ้งที่ปล่อยออกมีตะกอนแขวนลอยต่ำ



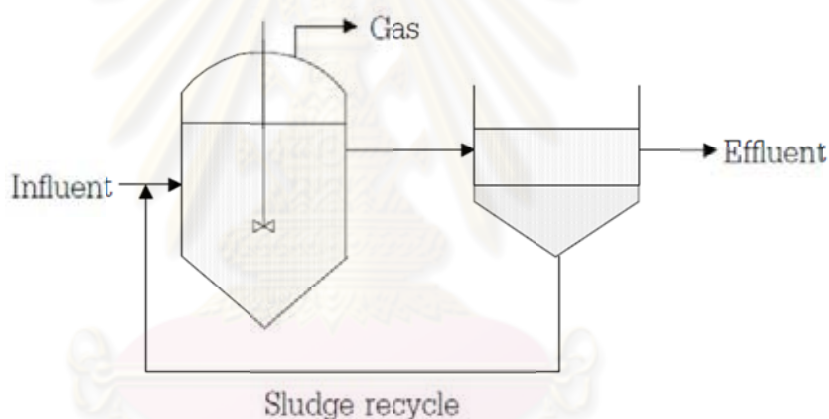
รูปที่ 2.5.1-2 ถังย่อยชนิดอัตราสูง (มันลิน ตันฑุลเวศม์, 2542)



รูปที่ 2.5.1-3 ถังย่อยชนิดอัตราสูงที่มีการแยกตะกอน (มันลิน ตันฑุลเวศม์, 2542)

2.5.2 ถังย่อยแบบสัมผัส (anaerobic contact)

ถังย่อยแบบนี้ใช้ในการกำจัดสารอินทรีย์ที่อยู่ในน้ำเสีย ซึ่งสารอินทรีย์ที่ต้องการกำจัดอาจเป็นของแข็งหรือสารละลายก็ได้ ถังย่อยแบบสัมผัสดังกล่าว จะเป็นถังปฏิกริยาแบบมีการหมุนเวียนตะกอนหรือไม่มีก็ได้ แต่จะนิยมใช้ถังย่อยที่มีการหมุนเวียนตะกอน (แสดงดังรูปที่ 2.5.2-1) ดังนั้นถังย่อยแบบสัมผัสนี้จึงมีส่วนประกอบที่คล้ายกับระบบเติมอากาศแบบตะกอนเร่ง (activated sludge) ซึ่งบางครั้งอาจเรียกว่าระบบตะกอนเร่งแบบไม่ใช้อากาศ อย่างไรก็ตามระบบดังกล่าวไม่สามารถบำบัดน้ำเสียได้ดีเหมือนกับระบบเติมอากาศแบบตะกอนเร่ง กล่าวคือไม่สามารถสะสมแบคทีเรียในระบบให้คงที่ได้ เนื่องจากปริมาณสลัดจ์ที่เกิดขึ้นไม่สามารถตกตะกอนได้ดีเหมือนสลัดจ์ของระบบตะกอนเร่ง จึงมีการหลุดหนีของสลัดจ์เกิดขึ้นตลอดเวลาอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ จึงไม่เป็นที่นิยมในปัจจุบันและระบบมีความสามารถในการรับภาระสารอินทรีย์ได้ต่ำ

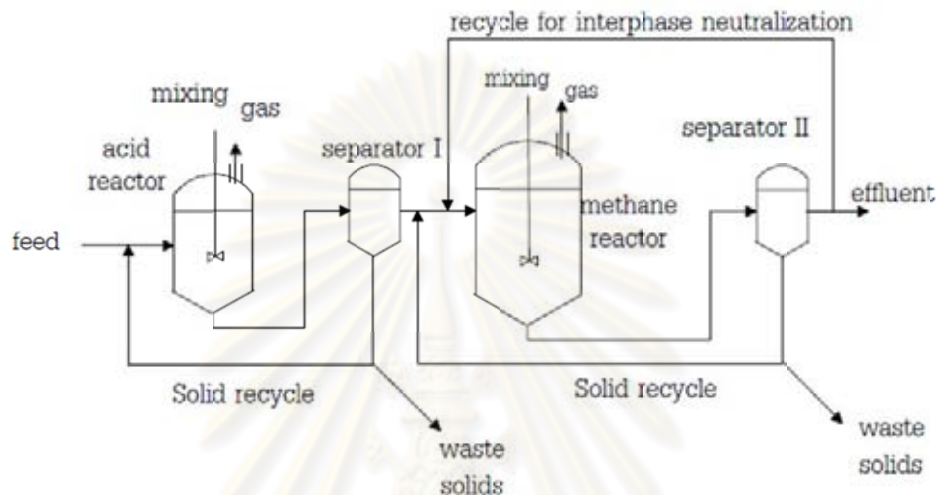


รูปที่ 2.5.2-1 ถังย่อยแบบสัมผัส (มันสิน ตัณฑุลเวศม์, 2542)

2.5.3 ถังย่อยแบบแยกเชื้อ

เนื่องจากได้มีการออกแบบถังย่อยแบบแยกเชื้อ เพื่อให้แบคทีเรียชนิดสร้างกรด และแบคทีเรียชนิดสร้างมีเทนเติบโตอยู่ในถังย่อยอย่างละใบ โดยที่สามารถควบคุมให้มีสภาวะที่เหมาะสมและแตกต่างกันได้ ลักษณะนี้เชื่อว่าแบคทีเรียแต่ละชนิดจะทำงานได้ดีและเป็นการใช้ประโยชน์จากถังปฏิกริยาได้เต็มที่ และสามารถควบคุมการทำงานของถังย่อยให้มีความสะดวกยิ่งขึ้น (แสดงดังรูปที่ 2.5.3-1) จากรูปแสดงให้เห็นถึงส่วนประกอบของถังย่อยแบบแยกเชื้อที่ใช้ค่าความเป็นกรด-ด่างเป็นตัวกำหนด และควบคุมแบคทีเรียในถังย่อย โดยถังใบแรกมีค่าความเป็นกรด-ด่าง

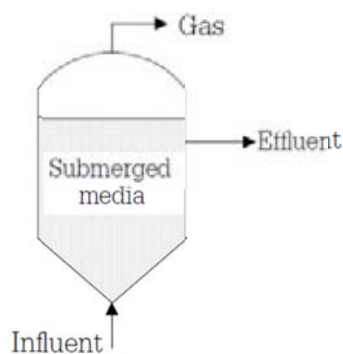
ประมาณ 6 ซึ่งจะมีแต่แบคทีเรียประเภทสร้างกรด ส่วนในถังที่สองจะมีค่าความเป็นกรด-ด่าง ประมาณ 7 ซึ่งจะมีแบคทีเรียชนิดสร้างมีเทน โดยการควบคุมค่าความเป็นกรด-ด่างแบบอัตโนมัติ เป็นสิ่งจำเป็นสำหรับถังใบแรกเท่านั้น โดยก๊าซไฮโดรเจนที่สร้างขึ้นในถังใบแรกจะถูกปล่อยทิ้ง ออกไปจากถังเพื่อไม่ให้เกิดการสะสมตัวจนเป็นพิษต่อแบคทีเรียที่สร้างกรด



รูปที่ 2.5.3-1 ถังย่อยแบบแยกเชื้อ (มันลิน ตันทุลเวศม์, 2542)

2.5.4 ถังกรองไร้อากาศ (anaerobic filter)

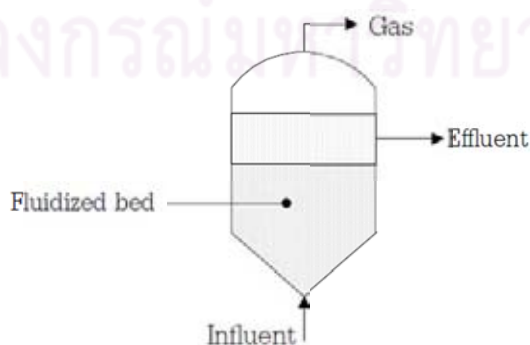
ลักษณะทั่วไปของถังกรองไร้อากาศมีส่วนประกอบที่สำคัญคือ ถังมีทรงสูง มีลักษณะคล้ายถังกรอง ภายในบรรจุด้วยหินขนาด 1.5-2 นิ้ว หรือใช้ตัวกลางแบบพลาสติกได้ โดยน้ำเสียจะไหลจากด้านล่างขึ้นสู่ด้านบน ซึ่งลักษณะเช่นนี้จะทำให้น้ำท่วมตัวกลางอยู่ตลอดเวลา (แสดงดังรูปที่ 2.5.4-1) ถ้ามีการทำให้แบคทีเรียส่วนใหญ่ยึดจับตัวกลางอยู่ภายในถังกรอง น้ำไหลออกจะมีความใสโดยไม่ต้องใช้ถังตกตะกอน โดยปกติถังกรองไร้อากาศจะมีขนาดเล็กกว่าถังย่อยแบบธรรมดาเพราะมีอัตราการบำบัดที่สูงกว่าหรือใช้เวลาในการกักน้ำต่ำกว่า อย่างไรก็ตาม ถังกรองแบบไร้อากาศมีข้อเสียคือ ต้องหาวิธีการกระจายน้ำเสียให้ไหลเข้าถังกรองไร้อากาศให้ได้เหมาะสม และมีปัญหาเรื่องการอุดตัน แต่สามารถควบคุมได้โดยการกำจัดของแข็งแขวนลอยออกจากน้ำเสีย ก่อนที่จะส่งเข้าถังกรองแบบไร้อากาศ เช่น ทำการตกตะกอนน้ำเสียก่อนส่งเข้าระบบ แต่ข้อดีคือ ระบบถังกรองไร้อากาศมีความสามารถในการเก็บกักเซลล์แบคทีเรียได้ดี



รูปที่ 2.5.4-1 ถังกรองไร้อากาศ (มันลิน ตันซุลเวศม์, 2542)

2.5.5 ระบบชั้นลอยตัวแบบไม่ใช้อากาศ (anaerobic fluidized bed)

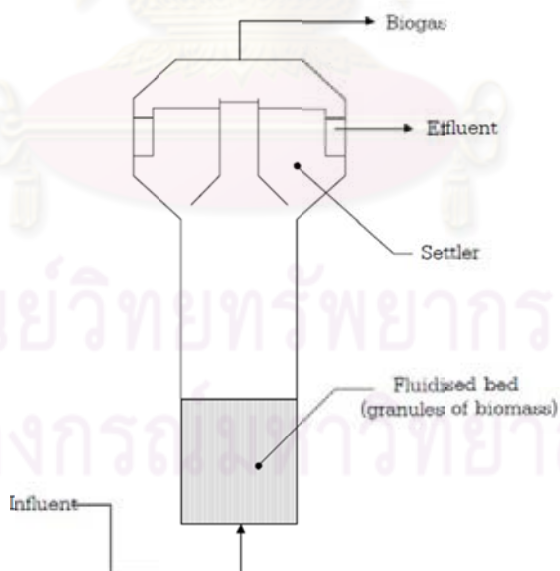
ระบบแบบนี้จะคล้ายคลึงกับระบบถังกรองไร้อากาศตรงที่มีน้ำไหลจากด้านล่าง ขึ้นสู่ด้านบน โดยตัวกลางจัดเป็นระบบฟิล์มตรึง (fixed film) แบบไม่ใช้อากาศที่มีสารตัวกลางขนาดเล็กเท่าเม็ดทรายเป็นที่จับเกาะของแบคทีเรีย (แสดงดังรูปที่ 2.5.5-1) โดยอัตราการไหลของน้ำเสียจะต้องสูงมากจนกระทั่งทำให้มีการลอยตัวของสารตัวกลาง ตัวอย่างของสารตัวกลางที่มีการทดลองใช้ในห้องปฏิบัติการ ได้แก่ ทราย แอนทราไซต์ และถ่านกัมมันต์ เป็นต้น การใช้สารตัวกลางขนาดเล็ก เมื่อเปรียบเทียบกับระบบถังกรองไร้อากาศ ทำให้ระบบนี้มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงมาก (โดยคิดต่อหน่วยปริมาตร) ซึ่งทำให้มีแบคทีเรียจำนวนมากอยู่ในระบบ อัตราเร็วในการบำบัดน้ำเสียของระบบนี้จึงสูงมาก โดยถึงปฏิกิริยาที่ใช้ระบบนี้จึงมีขนาดเล็กกว่าระบบอื่นๆ ใดๆก็ตาม ด้วยลักษณะการทำงานที่ต้องทำให้สารตัวกลางลอยตัวตลอดเวลา ทำให้เกิดปัญหาในการออกแบบและควบคุมระบบหลายอย่าง อีกทั้งยังสิ้นเปลืองพลังงานในการทำให้สารตัวกลางลอยตัวสูงกว่าระบบอื่น ทำให้ระบบนี้จึงไม่ได้รับความนิยม



รูปที่ 2.5.5-1 ระบบชั้นลอยตัวแบบไม่ใช้อากาศ (มันลิน ตันซุลเวศม์, 2542)

2.5.6 ระบบยูเอเอสบี (upflow anaerobic sludge blanket)

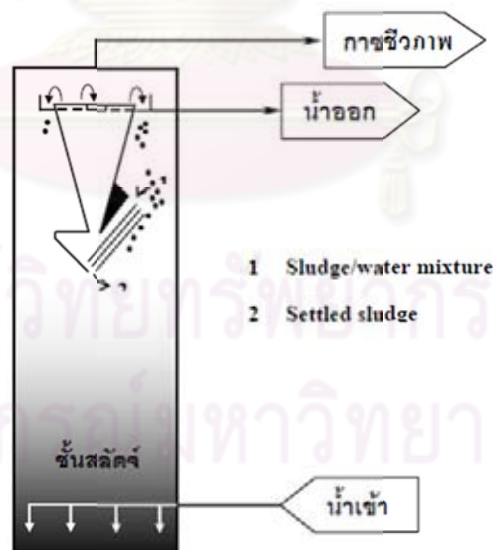
ระบบยูเอเอสบีมีทิศทางการไหลของน้ำเสียจากด้านล่างขึ้นสู่ด้านบนโดยไม่ต้องใช้สารตัวกลาง แต่จะมีแบคทีเรียที่เจริญเติบโตจับตัวกันเป็นเม็ดขนาดใหญ่และมีน้ำหนักมากสามารถตกตะกอนได้ดี โดยเม็ดของสลัดจ์ขนาดใหญ่จะจมตัวอยู่ด้านล่าง ส่วนเม็ดขนาดเล็กจะอยู่ทางด้านบน ซึ่งตอนบนของถังยูเอเอสบีมีอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่แยกเม็ดตะกอนขนาดเล็กและก๊าซชีวภาพออกจากน้ำเสีย เรียกว่า gas solid separator หรือระบบแยกก๊าซและของแข็งแขวนลอยออกจากน้ำ โดยก๊าซจะถูกเก็บรวบรวมไปใช้ประโยชน์ และเม็ดตะกอนจะถูกดักและกลับเข้าสู่ถัง (แสดงดังรูปที่ 2.5.6-1) โดยการเลี้ยงแบคทีเรียไม่ใช้ออกาศในระบบนี้ให้สามารถจับตัวเป็นก้อนเม็ดใหญ่นั้นเป็นเรื่องยาก เนื่องจากโดยธรรมชาติของแบคทีเรียไม่ใช้ออกาศจะไม่ชอบการจับตัวกันเป็นกลุ่มฟล็อก ทั้งนี้ระบบดังกล่าวมีผู้ที่นำไปใช้และสามารถควบคุมระบบได้ดีอ้างว่า ระบบสามารถรับภาระสารอินทรีย์ได้สูงกว่าระบบไม่ใช้ออกาศแบบอื่น และสามารถปล่อยน้ำทิ้งที่มีคุณภาพสูงได้ เนื่องจากระบบยูเอเอสบีสามารถป้องกันไม่ให้แบคทีเรียหลุดออกจากระบบได้ดีกว่าระบบอื่น



รูปที่ 2.5.6-1 ระบบยูเอเอสบี (UASB) (มันสิน ตัณฑุลเวศม์, 2542)

2.5.7 ระบบอีจีเอสบี (expanded granular sludge bed)

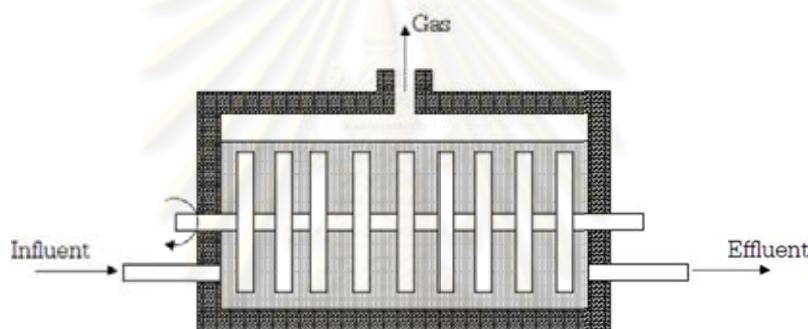
ระบบอีจีเอสบีปรับปรุงมาจากระบบยูเอเอสบี โดยทำให้มีความเร็วน้ำไหลขึ้นสูงประมาณ 3-10 เมตรต่อชั่วโมง ทำให้ชั้นสลัดจ์มีการขยายตัวมากกว่าระบบยูเอเอสบี จึงช่วยทำให้มีการสัมผัสระหว่างน้ำเสียและเม็ดแบคทีเรียได้ทั่วถึง ทำให้มีประสิทธิภาพมากกว่าระบบยูเอเอสบี สำหรับการดำเนินงานของระบบอีจีเอสบี คือน้ำเสียจะไหลเข้าระบบทางด้านล่างโดยผ่านระบบท่อกระจายน้ำแบบพิเศษ ภายในระบบจะมีชั้นสลัดจ์ที่เป็นเม็ดแบคทีเรีย ซึ่งเม็ดสลัดจ์จะมีขนาดใหญ่ขึ้นจนสามารถตกตะกอนได้ดี มีความเร็วในการตกตะกอนประมาณ 60-80 เมตรต่อชั่วโมง (แสดงดังรูปที่ 2.5.7-1) การย่อยสลายสารอินทรีย์ให้กลายเป็นก๊าซมีเทนจะเกิดขึ้นภายในชั้นสลัดจ์ เมื่อน้ำเสียไหลขึ้นถึงด้านบนของถังซึ่งจะเป็นส่วนของระบบแยกก๊าซและของแข็งแขวนลอยออกจากน้ำ ซึ่งก๊าซชีวภาพและของแข็งแขวนลอยจะถูกแยกออกจากรน้ำเสียที่บำบัดแล้ว ก๊าซจะลอยตัวขึ้นสู่ผิวน้ำ ส่วนของแข็งแขวนลอยจะกลับลงไปยังข้างล่างของระบบอีจีเอสบี โดยระบบแยกก๊าซและของแข็งแขวนลอยออกจากน้ำของถังหมักแบบอีจีเอสบี เป็นระบบที่ออกแบบพิเศษให้สามารถทำงานได้ดีกว่าระบบแยกก๊าซและของแข็งแขวนลอยออกจากน้ำของถังยูเอเอสบี กล่าวคือสามารถรับอัตราการไหลได้สูงกว่านั่นเอง



รูปที่ 2.5.7-1 ระบบอีจีเอสบี (EGSB) (กรมควบคุมมลพิษ, 2546)

2.5.8 ระบบจานหมุนไร้อากาศ (anaerobic rotating biological contactor)

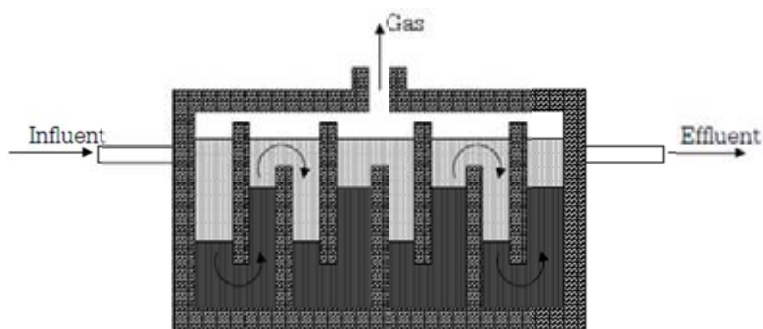
ระบบดังกล่าวได้เริ่มมีการทดลองโดยใช้บำบัดน้ำเสียที่มีคาร์โบไฮเดรตเป็นองค์ประกอบหลัก เนื่องจากต้องการลดการใช้พลังงานในการสูบน้ำเสียในการหมุนเวียนในระบบชั้นลอยตัวไร้อากาศ โดยนำข้อดีของระบบฟิล์มตรึง และจานหมุนชีวภาพมาใช้ในระบบไร้อากาศ ซึ่งการทำงานของระบบจานหมุนไร้อากาศมีลักษณะคล้ายกับระบบจานหมุนชีวภาพแบบธรรมดา ต่างกันตรงที่ระบบไร้อากาศจะมีฝาปิดเพื่อไม่ให้สัมผัสอากาศจากภายนอก และมีช่องระบายก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นออกทางด้านบน (แสดงดังรูปที่ 2.5.8-1) ระบบดังกล่าวมีแบคทีเรียที่ไม่ใช้อากาศสามารถยึดเกาะและเจริญเติบโตได้ดีบนแผ่นจาน และสามารถรองรับภาระสารอินทรีย์และภาระอัตราทางชีวศาสตร์ที่สูงขึ้นอย่างกะทันหันได้ดี



รูปที่ 2.5.8-1 ระบบจานหมุนไร้อากาศ (มันสิน ตัณฑุลเวศม์, 2542)

2.5.9 ระบบแผ่นกั้นไร้อากาศ (anaerobic baffled reactor)

ลักษณะการทำงานของระบบแผ่นกั้นไร้อากาศ คือ ในระบบจะมีแผ่นกั้นเพื่อบังคับน้ำเสียให้ไหลขึ้นลงอยู่ในแนวตั้ง (แสดงดังรูปที่ 2.5.9-1) ถึงปฏิกิริยาไม่จำเป็นต้องมีความสูงมากเหมือนกับระบบไร้อากาศแบบอื่นๆ ทำให้เสียค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างต่ำ ระบบดังกล่าวมีพื้นที่ผิวน้ำมากทำให้แบคทีเรียมีพื้นที่ตกตะกอนสูงกว่าระบบอื่นๆ ซึ่งการแยกตะกอนแขวนลอยออกจากน้ำจึงสามารถทำได้ดี โดยไม่ต้องมีการใช้อุปกรณ์แยกตะกอนอื่นๆ และก๊าซสามารถแยกตัวออกจากน้ำได้ดี และระบบดังกล่าวทำให้การเก็บกักเซลล์เกิดขึ้นได้ดี ทำให้มีมวลแบคทีเรียสะสมอยู่ในระบบเป็นจำนวนมาก และสามารถบำบัดน้ำเสียจึงสามารถเกิดขึ้นได้ในอัตราที่สูง



รูปที่ 2.5.9-1 ระบบแผ่นกั้นไร้อากาศ (มันลีน ตันซูลเวสท์, 2542)

2.5.10 บ่อหมักแบบไร้อากาศ (anaerobic pond)

บ่อหมักแบบไร้อากาศเป็นระบบบำบัดน้ำเสียแบบที่ง่ายที่สุด โดยบ่อดังกล่าวมักเป็นบ่อดินขนาดใหญ่ที่มีความลึกประมาณ 3-4 เมตร และไม่มีฝาปิด มีระยะเวลาที่น้ำนานหลายวัน ภายในระยะเวลาดังกล่าวน้ำเสียจะถูกย่อยด้วยปฏิกิริยาแบบไร้อากาศ เนื่องจากบ่อหมักแบบไร้อากาศมีขนาดใหญ่จึงต้องใช้ขนาดที่ดินเป็นจำนวนมากในการก่อสร้าง นอกจากนี้ยังอาจจะมีปัญหาเรื่องกลิ่นรบกวน ระบบบ่อหมักแบบไร้อากาศจึงเหมาะสำหรับใช้ในชนบท หรือชานเมืองที่มีราคาที่ดินไม่สูงมากนัก และมีผู้คนอาศัยอยู่ไม่หนาแน่น ทั้งนี้เพื่อมิให้มีปัญหาเรื่องกลิ่นเหม็นเป็นที่น่ารังเกียจ ในปัจจุบันจึงมีความพยายามในการปิดปากบ่อไร้อากาศ เพื่อป้องกันเรื่องกลิ่นเหม็น และเพื่อเก็บก๊าซชีวภาพนำไปใช้ประโยชน์ ซึ่งปัจจุบันนิยมใช้แผ่นโพลีเอทิลีนปิดบ่อหมักไร้อากาศ (แสดงดังรูปที่ 2.5.10-1) ข้อดีการปิดปากบ่อคือ ทำให้สามารถสร้างในพื้นที่ใกล้ชุมชนได้



รูปที่ 2.5.10-1 บ่อหมักแบบไร้อากาศ (กรมควบคุมมลพิษ, 2546)

2.6 ลักษณะการเดินระบบของถังหมักไร้อากาศสำหรับของแข็ง

ลักษณะการเดินระบบของถังหมักไร้อากาศสำหรับของแข็ง (วิษณุพนธ์ ธรานนท์, 2551) สามารถจำแนกได้ดังนี้

1) จำแนกตามปริมาณของแข็งในถังหมักไร้อากาศ ประกอบด้วยถังหมักไร้อากาศแบบเปียก (wet anaerobic digester) มีปริมาณของแข็งในสารอินทรีย์ประมาณร้อยละ 10-15 โดยปริมาตรของถังปฏิกรณ์ และถังหมักไร้อากาศแบบแห้ง (dry anaerobic digester) มีปริมาณของแข็งในสารอินทรีย์สูงถึงร้อยละ 20-40 โดยปริมาตรของถังปฏิกรณ์

2) จำแนกตามลักษณะการเติมสารอินทรีย์ให้แก่ถังหมักไร้อากาศ ประกอบด้วย ถังหมักไร้อากาศแบบที่ละเท (batch anaerobic digester) เป็นถังหมักที่มีการเติมสารอินทรีย์และจุลินทรีย์ในระบบไร้อากาศลงในถังหมัก แล้วรอให้เกิดกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศสิ้นสุดลง จากนั้นจึงนำสารอินทรีย์ที่ถูกย่อยสลายแล้วออกจากถังหมักก่อนทำการเติมสารอินทรีย์เข้าไปเพื่อทำการย่อยสลายรอบใหม่

ถังหมักแบบต่อเนื่อง (continuous anaerobic digester) เป็นถังหมักไร้อากาศที่มีการเติมสารอินทรีย์ที่ต้องการย่อยสลายอย่างต่อเนื่องลงในถังหมัก โดยจะมีการถ่ายเทสารอินทรีย์ที่ถูกย่อยสลายแล้วออกจากถังหมักด้วย

3) จำแนกตามขั้นตอนการย่อยสลาย ประกอบด้วย ถังหมักไร้อากาศแบบหลายขั้นตอน (multi-step anaerobic digester) เป็นถังหมักไร้อากาศที่มีการแบ่งขั้นตอนและปฏิกรณ์ที่เกิดขึ้นในแต่ละถังปฏิกรณ์ โดยใช้ปัจจัยต่างๆ เช่น สารอาหาร ชนิดของจุลินทรีย์ และอุณหภูมิ เป็นต้น โดยในการแบ่งขั้นตอนการย่อยสลายเพื่อให้กระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์มีประสิทธิภาพมากขึ้น เช่น ถังหมักสองขั้นตอน (two-phase anaerobic digester) หรือแบบแยกเชื้อดั่งที่กล่าวมาแล้วในข้างต้น คือ ถังหมักไร้อากาศที่มีการแยกกระบวนการสร้างกรดและกระบวนการสร้างมีเทนออกจากกันโดยใช้ถังหมักสองถัง ซึ่งแต่ละถังจะมีการเติมอาหารและปรับสภาวะภายในถังให้เหมาะสมในแต่ละกระบวนการ เป็นผลให้ประสิทธิภาพในการย่อยสลายและปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นสูงกว่าถังหมักที่มีกระบวนการสร้างกรด และกระบวนการสร้างมีเทนรวมอยู่ในถังปฏิกรณ์ใบเดียวกัน (single-step anaerobic digester)

4) จำแนกตามการย่อยสลายร่วม เป็นกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศที่มีการผสมมูลสัตว์ เช่น มูลสุกร มูลวัว มูลไก่ เป็นต้น ร่วมกับขยะมูลฝอย (municipal solid waste) เพื่อปรับปรุงสัดส่วนของปริมาณคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C:N ratio) ในการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไร้อากาศ เป็นผลให้ปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นสูงกว่าการหมักของขยะอินทรีย์เพียงอย่างเดียว

2.7 ปัจจัยสภาวะแวดล้อมที่มีผลต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ

จุลินทรีย์ในระบบไร้อากาศ โดยเฉพาะจุลินทรีย์ในกลุ่มสร้างมีเทนนั้นมีความอ่อนไหวต่อสภาพแวดล้อมภายในถังหมัก กล่าวคือ มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาทางชีวเคมีต่ำ และสามารถเจริญเติบโตได้เฉพาะในสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมเท่านั้น ดังนั้นในการเดินระบบไร้อากาศจะต้องคำนึงถึงปัจจัยต่างๆ ดังต่อไปนี้

2.7.1 ลักษณะและองค์ประกอบของสารอินทรีย์ที่เติมให้แก่ถังหมักไร้อากาศ (characteristics and composition of feedstock)

สารอินทรีย์ที่ใช้เป็นวัตถุดิบในการย่อยสลายแบบไร้อากาศเพื่อผลิตก๊าซชีวภาพนั้นมีหลายประเภท เช่น ขยะชุมชน (municipal solid waste) มูลสัตว์ (animal manure) และของเสียจากการเกษตร (agricultural waste) เป็นต้น โดยสารอินทรีย์ในแต่ละประเภทนั้นมีลักษณะและองค์ประกอบที่แตกต่างกัน ทำให้ศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนของสารอินทรีย์แต่ละประเภทแตกต่างกันด้วย สำหรับการย่อยสลายแบบไร้อากาศที่มีการผลิตก๊าซชีวภาพควรทำการปรับปรุงความสามารถในการย่อยสลายของสารอินทรีย์ที่ใช้เป็นวัตถุดิบเพื่อเพิ่มศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนของสารอินทรีย์นั้นด้วยการบำบัดเบื้องต้นก่อน เช่น ของเสียจากการเกษตรส่วนใหญ่จะมีโครงสร้างชีวมวลที่ประกอบด้วยลิกโนเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบหลัก ส่งผลให้ศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนต่ำ ดังนั้นจึงควรทำการบำบัดเบื้องต้นด้วยวิธีการต่างๆ ดังที่กล่าวมาแล้วในข้างต้นก่อนนำไปทำการย่อยสลายแบบไร้อากาศต่อไป

2.7.2 สารอาหาร (macro nutrient)

เนื่องจากปริมาณเซลล์ของจุลินทรีย์ที่สร้างขึ้นมาในกระบวนการไม่ใช้ออกซิเจนจะมีน้อยกว่าแบบใช้ออกซิเจน ซึ่งจากอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนต่อฟอสฟอรัสต่อซัลเฟอร์ (C:N:P:S) ในเซลล์มีค่าประมาณ 100:10:1:1 ดังนั้นจึงจำเป็นต้องรักษาอัตราส่วนนี้ไว้ไม่ให้หายไปกว่านี้ ทำให้จุลินทรีย์ต้องการอาหารเสริมนอกเหนือจากคาร์บอน เช่น ไนโตรเจนและฟอสฟอรัส ซึ่งมีอัตราส่วนระหว่างปีโอดีต่อไนโตรเจนต่อฟอสฟอรัสอย่างน้อยควรมีค่าเท่ากับ 100:1:0.2 นอกจากนี้ยังมีธาตุอาหารบางอย่างที่จุลินทรีย์ชนิดสร้างมีเทนต้องการในปริมาณที่น้อยแต่ก็ขาดไม่ได้ คือ เหล็ก โคบอลต์ นิเกิล และซัลเฟอร์

สำหรับกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศที่มีของแข็งในปริมาณที่สูง (ประมาณร้อยละ 40 โดยปริมาตร หรือสูงกว่า) มีสัดส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N ratio) ที่เหมาะสมในกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศมีค่าอยู่ในช่วง 20-30 โดยในกรณีที่มีสัดส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนมีค่าสูงเกินไปในระหว่างกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศ ไนโตรเจนจะถูกนำไปใช้อย่างรวดเร็วในการสร้างเซลล์ของจุลินทรีย์ และเมื่อไนโตรเจนภายในระบบไม่เพียงพอต่อการนำไปสร้างเซลล์ของจุลินทรีย์จะส่งผลให้กระบวนการย่อยสลายลดต่ำลง และปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นก็ลดลงตามไปด้วย ในทางกลับกันถ้าสัดส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนมีค่าต่ำเกินไป จะทำให้เกิดการสะสมของไนโตรเจนในรูปของแอมโมเนียส่งผลให้ค่าความเป็นกรด-ด่างของระบบสูงขึ้น โดยถ้ามีค่าสูงถึง 8.5 ขึ้นไป โดยจะไปยับยั้งการทำงานของจุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทนในระบบได้

ส่วนกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศที่มีปริมาณของแข็งต่ำ (ประมาณร้อยละ 10-15 โดยปริมาตร) ค่าสัดส่วนของสารอาหารที่จุลินทรีย์ในระบบไร้อากาศจำเป็นต้องใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ และการสร้างเซลล์ส่วนใหญ่จะใช้ในรูปของสัดส่วนซีโอดีต่อไนโตรเจนต่อฟอสฟอรัส (COD:N:P) มีค่าเท่ากับ 100:2:0.4 (Speece, 1996)

2.7.3 ปริมาณน้ำภายในถังหมักไร้อากาศ

ปริมาณน้ำภายในถังหมักไร้อากาศเป็นปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลกระทบต่อความเร็วในการเกิดปฏิกิริยาการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายในถังหมักไร้อากาศ ทั้งนี้เพราะน้ำเป็นสถานะหลักของสารที่เกิดปฏิกิริยาทางชีวเคมีของจุลินทรีย์ ดังนั้น ถ้าภายในถังหมักไร้อากาศมีปริมาณน้ำเพียงพอที่จะทำให้อัตราการย่อยสลายเกิดเร็วขึ้น เป็นผลให้ปริมาณก๊าซชีวภาพสูงขึ้นตามไปด้วย (Patrick และ Philip, 2002)

2.7.4 การผสม (mixing)

การผสมเป็นการทำให้จุลินทรีย์ในระบบมีโอกาสสัมผัสกับอาหารมากขึ้น ส่งผลให้ปฏิกิริยาการย่อยสลายเกิดเร็วขึ้น การผสมสามารถลดเวลาเก็บกักของถังปฏิกิริยาได้ ซึ่งวิธีการกวนผสมโดยใช้ใบพัดกวนจะมีประสิทธิภาพสูงกว่าการผสมแบบหมุนเวียนภายในระบบ โดยการกวนผสมสามารถเลือกรูปแบบได้ทั้งการผสมแบบต่อเนื่องและเป็นช่วงเวลา จุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทนมีความไวต่อการกวนผสมเร็วมาก (rapid mixed, velocity gradient, $G > 500 \text{ s}^{-1}$) ดังนั้นจึงควรหลีกเลี่ยงการผสมที่อาจทำให้จุลินทรีย์สร้างมีเทนหลุดออกจากระบบ ซึ่งอาจทำให้ระบบล้มเหลวได้ (Gerardi, 2003)

2.7.5 ความเป็นกรด-ด่าง และสภาพด่าง (pH and alkalinity)

ความเป็นกรด-ด่าง (pH) ที่เหมาะสมต่อกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศจะอยู่ในช่วง 6-7 ซึ่งการตรวจวัดความเป็นกรด-ด่างภายในระบบสามารถบอกถึงเสถียรภาพของระบบไร้อากาศได้ เช่น มีค่าความเป็นกรดแสดงว่าอาจเกิดการสะสมของกรดไขมันระเหยภายในระบบทำให้ค่าความเป็นกรดมากขึ้น ซึ่งส่งผลให้ไปยับยั้งการทำงานของจุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทนได้

สภาพด่าง (alkalinity) คือ ความสามารถในการสะเทินกรด ซึ่งเป็นสิ่งที่สำคัญมากในกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศ ทั้งนี้เพื่อใช้ในการควบคุมค่าความเป็นกรด-ด่างของระบบให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสม และป้องกันค่าความเป็นกรด-ด่าง ในระบบไร้อากาศไม่ให้ลดลงอย่างรวดเร็ว โดยสมดุลหลักในการควบคุมความเป็นกรด-ด่าง ของกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศคือ สมดุลของไบคาร์บอเนต (bicarbonate system) ประกอบด้วย คาร์บอเนต (CO_3^{2-}) และไบคาร์บอเนต (HCO_3^-) ดังปฏิกิริยา



ในการเพิ่มเสถียรภาพของระบบควรมีสภาพด่างที่เพียงพอสำหรับป้องกันการลดลงของความเป็นกรด-ด่างอย่างรวดเร็ว ซึ่งเกิดจากการสะสมของกรดไขมันระเหยในขั้นตอนการสร้างกรด (acidogenesis) โดยทั่วไปการเพิ่มสภาพด่างให้แก่ระบบจะทำโดยการเติมโซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) โดยที่ต้องเติมในปริมาณที่เหมาะสม เพราะถ้าหากเติมมากเกินไปอาจทำให้เกิดความเป็นพิษต่อจุลินทรีย์ในระบบไร้อากาศได้ (วิชญ์นนท์ ธรานนท์, 2551)

2.7.6 อัตราภาระสารอินทรีย์และกรดไขมันระเหย (organic loading rate and volatile fatty acid)

อัตราภาระสารอินทรีย์เป็นปัจจัยสำคัญสำหรับถังหมักไร้อากาศแบบต่อเนื่อง (continuous anaerobic digester) และมักเป็นสาเหตุของการติดขัดหรือล้มเหลวของระบบไร้อากาศ เช่น การใช้อัตราภาระสารอินทรีย์สูงเกินไป (overloading) ทำให้จุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทนใช้กรดไขมันระเหยที่เกิดขึ้นจากขั้นตอนการสร้างกรดไม่ทัน ส่งผลให้เกิดการสะสมของกรดไขมันระเหยและมีส่วนในการเพิ่มความดันพาร์เชียลของไฮโดรเจน (hydrogen partial pressure) ภายในระบบไร้อากาศ ทำให้เกิดกรดไขมันระเหยที่มีจำนวนอะตอมคาร์บอนมากกว่า 2 อะตอม เช่น กรดโพรพิโอนิก และกรดบิวทิริก ซึ่งเป็นกรดไขมันระเหยที่จุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทนไม่สามารถนำไปใช้ได้ และเมื่อกรดไขมันระเหยที่เกิดขึ้นดังกล่าวไม่ถูกใช้จะทำให้เกิดการสะสมจนมีปริมาณมากขึ้นจะทำให้ความเป็นกรด-ด่างภายในระบบลดลงจนไม่เหมาะสมในการดำรงอยู่ของจุลินทรีย์ในระบบไร้อากาศ (Valdez-Vazquez และ Poggi-Varaldo, 2008) ดังนั้นในการเพิ่มอัตราภาระสารอินทรีย์ที่ป้อนเข้าสู่ระบบควรค่อยๆ เพิ่มทีละน้อย และการเปลี่ยนอัตราภาระสารอินทรีย์แต่ละครั้งควรรอให้ระบบเข้าสู่สภาวะคงตัว (steady-state) ก่อนแล้วจึงเพิ่มอัตราภาระสารอินทรีย์ให้ได้ตามอัตราส่วนที่ต้องการ

2.7.7 สารพิษ

สารที่เป็นพิษต่อจุลินทรีย์ในระบบไร้อากาศ โดยเฉพาะจุลินทรีย์ในกลุ่มสร้างมีเทนจะมีอยู่หลายชนิด และระดับความรุนแรงขึ้นอยู่กับชนิดและความเข้มข้นของสารเหล่านั้น ซึ่งสารพิษบางตัวเป็นสารอาหารที่จำเป็นแต่ต้องมีปริมาณที่พอเหมาะ ถ้ามีมากเกินไปจะกลายเป็นพิษได้ โดยการมีไอออนบวก (cation) เช่น โซเดียมในระบบไร้อากาศ แต่ถ้ามีไอออนบวกโลหะหนัก เช่น ยาฆ่าแมลง และสารพิษอื่นๆ ภายในระบบไร้อากาศที่มีความเข้มข้นที่มากพอจะเป็นพิษต่อจุลินทรีย์ในระบบ และมีผลยับยั้งการทำงานของจุลินทรีย์กลุ่มต่างๆ ภายในระบบ (กรมควบคุมมลพิษ, 2546)

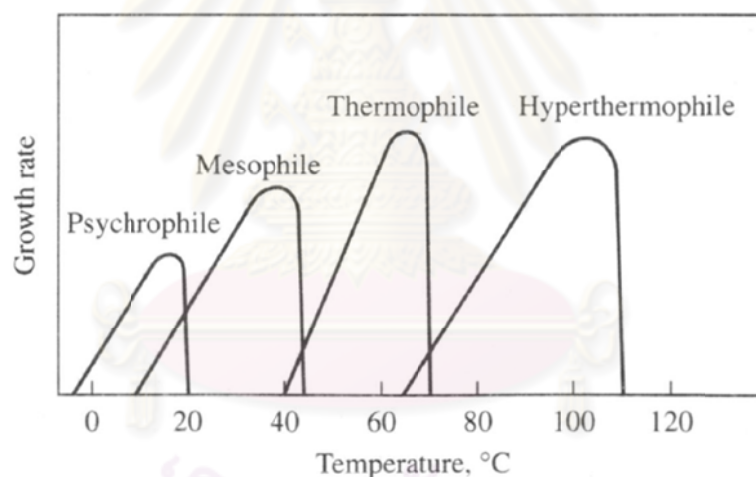
2.7.8 อุณหภูมิ (temperature)

ช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในระบบไร้อากาศมีอยู่ 2 ช่วงคือ

- ช่วง 8-45 องศาเซลเซียส เรียกว่า เมโซฟิลิก (mesophilic)

- ช่วง 40-70 องศาเซลเซียส เรียกว่า เทอร์โมฟิลิก (thermophilic)

ตามปกติแล้วเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีและการทำงานของเอนไซม์ภายในเซลล์จะเร็วขึ้น และอัตราการเจริญเติบโตก็เพิ่มขึ้นตามไปด้วย แต่ถ้าอุณหภูมิเพิ่มขึ้นสูงเกินกว่าที่จุลินทรีย์ทำงานได้ จะทำให้ โปรตีน กรดนิวคลีอิก และส่วนประกอบของเซลล์หลายๆ ส่วนจะถูกทำลายจนไม่อาจกลับคืนสภาพได้ ดังนั้นการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิจึงเป็นการเพิ่มการเจริญเติบโตและการทำงานของเซลล์ได้จนถึงอุณหภูมิหนึ่ง และเมื่ออุณหภูมิสูงกว่านั้น จะทำให้การทำงานและการเจริญเติบโตลดลงเป็นศูนย์อย่างรวดเร็วมาก (ดังรูปที่ 2.7.8-1) สำหรับช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมในภูมิภาคเขตร้อนแบบประเทศไทย คือช่วงอุณหภูมิ 25-37 องศาเซลเซียส (mesophilic temperature) (กรมควบคุมมลพิษ, 2546)



รูปที่ 2.7.8-1 ผลของอุณหภูมิที่มีผลต่ออัตราการเจริญเติบโตของเซลล์

(Rittmann และ McCarty, 2001)

2.7.9 ปริมาณออกซิเจน

ออกซิเจนจะเป็นพิษอย่างมากต่อระบบไร้อากาศแม้จะมีปริมาณเพียงเล็กน้อย เพราะจะทำให้เกิดการแตกตัวของโมเลกุลเอนไซม์ในตัวจุลินทรีย์ของระบบไร้อากาศ และทำให้เกิดการยับยั้งกระบวนการผลิตมีเทนได้ (กรมควบคุมมลพิษ, 2546)

2.8 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Carmen (2008) ได้ทำการศึกษาการทำงานของเชื้อราที่สามารถย่อยสลายโครงสร้างลิกโนเซลลูโลส เพื่อดูประสิทธิภาพสูงสุดในการทำงานของเอนไซม์ในระบบ โดยแบ่งการทำงานของเชื้อราออกเป็น 2 ประเภท คือ ใช้ย่อยเซลลูโลสในโครงสร้างชีวมวล และใช้ในการย่อยแบบไฮโดรไลซิส ซึ่งเชื้อราจะสร้างน้ำย่อยเพื่อไปย่อยสลายโครงสร้างเซลลูโลสซึ่งเป็นพอลิแซคคาไรด์ให้เป็นน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว หรือกลูโคส โดยชีวมวลที่ใช้ในการทดลองนำมาจากของเสียจากการเกษตร ของเสียจากการทำป่าไม้ และของเสียจากชุมชน ที่มีปริมาณอยู่มากในธรรมชาติและมีศักยภาพในการย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ซึ่งจากการหมักชีวมวลด้วยเชื้อราชนิดต่างๆ ที่สามารถผลิตเอนไซม์เพื่อใช้ในการย่อยสลายลิกโนเซลลูโลสจะได้น้ำตาลโมเลกุลเชิงเดี่ยว เช่น กลูโคส เมนโนส และไซโลส เป็นต้น และนำน้ำตาลเชิงเดี่ยวที่ได้ไปหมักต่อเพื่อผลิตเป็นเชื้อเพลิงชีวภาพ เช่น เอทานอล แอลกอฮอล์ และก๊าซมีเทน เป็นต้น

Hendriks และ Zeeman (2008) ได้ทำการศึกษาวิธีการบำบัดเบื้องต้นแบบต่างๆ ที่สามารถย่อยสลายโครงสร้างชีวมวลที่มีลิกโนเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบ โดยองค์ประกอบหลักของลิกโนเซลลูโลสที่มีผลต่อการย่อยสลาย คือ ลิกนิน และเฮมิเซลลูโลส ดังนั้นจึงทำการศึกษาถึงวิธีการบำบัดเบื้องต้นด้วยวิธีต่างๆ เช่น การบำบัดเบื้องต้นทางความร้อน (ประกอบด้วย การใช้ไอน้ำและการใช้น้ำร้อน) การบำบัดเบื้องต้นด้วยสารละลายกรด การบำบัดเบื้องต้นด้วยสารละลายด่าง การบำบัดเบื้องต้นด้วยตัวออกซิไดซ์ การบำบัดเบื้องต้นด้วยกระบวนการผสมผสาน (ประกอบด้วย การบำบัดเบื้องต้นด้วยความร้อนร่วมกับสารละลายกรด การบำบัดเบื้องต้นด้วยความร้อนร่วมกับสารละลายด่าง การบำบัดเบื้องต้นด้วยความร้อนร่วมกับตัวออกซิไดซ์ การบำบัดเบื้องต้นด้วยความร้อนร่วมกับตัวออกซิไดซ์แบบต่าง และการบำบัดเบื้องต้นด้วยแอมโมเนีย และคาร์บอนไดออกไซด์)

Nallathambi (2004) ได้ทำการทดลองหาศักยภาพในการผลิตมีเทนจากของเสียประเภทผลไม้และผัก เพื่อทำการเปรียบเทียบอัตราการผลิตก๊าซมีเทนของแต่ละตัวอย่าง โดยมีการเติมสารอาหารลงไป จากการทดลองพบว่าของเสียจำพวกผลไม้มีอัตราการการผลิตก๊าซมีเทนอยู่ในช่วง 0.18-0.732 ลิตรต่อกรัมของแข็งระเหย และค่า kinetics อยู่ในช่วง 0.016-0.122 d⁻¹ ส่วนของเสียจำพวกผักมีอัตราการการผลิตก๊าซมีเทนอยู่ในช่วง 0.19-0.40 ลิตรต่อกรัมของแข็งระเหย และค่า kinetics อยู่ในช่วง 0.053-0.125 d⁻¹

Krishna และคณะ (2001) ได้ทำการศึกษาขั้นตอนการผลิตแซ็กคาไรด์และขบวนการหมัก เพื่อใช้ในการผลิตเอทานอลจากลิกโนเซลลูโลสที่มาจากของเสียจากการเกษตร โดยใช้ราชนิด *Trichoderma reesei* และยีสต์ โดยการศึกษาดังกล่าวจะเปรียบเทียบการทำงานของยีสต์ทั้ง 2 ชนิด ประกอบด้วย *k. fragilis* และ *S. cerevisiae* จากการทดลองพบว่า ยีสต์ชนิด *k. fragilis* มีประสิทธิภาพการทำงานดีที่สุด สามารถผลิตเอทานอลได้ร้อยละ 2.5-3.5 ต่อปริมาตร และยีสต์ชนิด *S. cerevisiae* สามารถผลิตเอทานอลได้ร้อยละ 2.0-2.5 ต่อปริมาตร โดยเอทานอลที่ได้มาจากการย่อยเซลลูโลสด้วยเบต้ากลูโคซิเดส (β -glucosidase) จากการศึกษาดังกล่าวพบว่า สามารถนำแซ็กคาไรด์จากชีวมวลมาใช้ประโยชน์เป็นพลังงานทางเลือกได้

Wang และคณะ (1994) ได้ทำการศึกษาการย่อยสลายทางชีวภาพแบบไร้อากาศของเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสจากของเสียจากหลุมฝังกลบด้วยวิธีการวิเคราะห์หาค่าศักยภาพการผลิตมีเทน (biochemical methane potential : BMP) โดยเก็บตัวอย่างจากหลุมฝังกลบจำนวน 10 ตัวอย่าง แล้วนำมาใส่ไว้ในขวดซีรัมขนาด 125 มิลลิลิตร จากนั้นเติมสารอาหารและเชื้อจุลินทรีย์ใส่ในขวด และนำตัวอย่างไปวิเคราะห์หาปริมาณเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน จากการทดลองพบว่า วัตถุประสงค์ร้อยละของก๊าซมีเทนเฉลี่ยได้เท่ากับ 19.1 โดยถ้าตัวอย่างที่มีปริมาณเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสสูงจะมีอัตราการผลิตก๊าซมีเทนเกิดขึ้นสูงตามไปด้วย

Fernandes และคณะ (2008) ได้ทำการศึกษาผลของการบำบัดเบื้องต้นด้วยวิธีเคมี-ความร้อน เพื่อหาอัตราการย่อยสลายทางชีวภาพและอัตราการย่อยแบบไฮโดรไลซิสของชีวมวล ซึ่งชีวมวลที่ใช้ประกอบด้วย หญ้าแห้ง ฟาง และไม้เฟิร์น โดยวิธีการบำบัดเบื้องต้นทางเคมี-ความร้อน ประกอบด้วย การใช้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ 110 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส ใช้เวลา 16 ชั่วโมง การใช้แอมโมเนียมคาร์บอเนต 100 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส ใช้เวลา 2 ชั่วโมง และการใช้กรดมาเลอิก 90 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ใช้เวลา 30 นาที จากผลการทดลองพบว่าชีวมวล (หญ้าแห้ง ฟาง และไม้เฟิร์น) ที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นด้วยการใช้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ แอมโมเนียมคาร์บอเนต การใช้กรดมาเลอิก และที่ไม่ผ่านการบำบัดเบื้องต้น พบว่า สามารถผลิตก๊าซมีเทนได้ประมาณร้อยละ 40-60, 25-55 และ 15-35 ของค่าซีไอดีตามลำดับ

Shyman และ Sharma (1993) ได้ทำการศึกษากระบวนการหมักแบบไร้อากาศซึ่งใช้วัตถุดิบ คือ มูลวัวอย่างเดียวกับมูลวัวผสมแกลบ และไบโอม่วงกับไบฟิชีอื่นๆ ในถังหมักขนาดเล็กชนิดทีละเท (batch) ประกอบด้วยทรงกระบอกและทรงลูกบาศก์ โดยดำเนินการหมักที่

สภาวะของแข็ง (TS) ร้อยละ 16-19 ซึ่งมีปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นต่อถังประมาณ 202-499 ลิตรต่อวันต่อลูกบาศก์เมตร ที่ระยะเวลาการหมัก 7 สัปดาห์ และ 196-407 ลิตรต่อวันต่อลูกบาศก์เมตร ที่ระยะเวลาการหมัก 10 สัปดาห์ โดยเปรียบเทียบกับปริมาณก๊าซ 204-372 ลิตรต่อวันต่อลูกบาศก์เมตร ที่สภาวะของแข็งทั่วไป (conventional) คือที่สภาวะของแข็งร้อยละ 8-9 ระยะเวลาในการหมัก 7 สัปดาห์ โดยอัตราการผลิตก๊าซจะเทียบกับค่าของแข็งเป็นหลัก จากการทดลองในสภาวะการหมักที่เพิ่มค่าของแข็งขึ้นเรื่อยๆ (ร้อยละ 16-19) พบว่า ที่ค่าของแข็งที่ร้อยละ 19 จะเริ่มส่งผลให้อัตราในการผลิตก๊าซของระบบเริ่มลดลง

Hartmann และคณะ (1999) ได้ศึกษาการบำบัดชีวมวลด้วยเครื่องลดขนาดที่มีลักษณะเป็นใบมีดหมุน ก่อนนำไปย่อยสลายด้วยกระบวนการไร้อากาศ พบว่า มีปริมาณก๊าซมีเทนเพิ่มขึ้นร้อยละ 25 และได้ทำการพิจารณาการกระจายตัวของอนุภาค พบว่า ศักยภาพการเกิดก๊าซชีวภาพไม่มีความสัมพันธ์กับเส้นใยที่มีขนาดเล็ก จึงสรุปได้ว่าการที่ก๊าซชีวภาพเกิดมากขึ้นจะมาจากการบำบัดด้วยการลดขนาดชีวมวล

Jewell (1980) ได้ทำการทดลองโดยใช้ของเสียจากการเกษตร เช่น มูลสัตว์ ฟางข้าว และข้าวโพด โดยใช้ถังหมักแบบทีละเท (batch) อย่างง่าย พบว่า สามารถผลิตก๊าซมีเทนได้อย่างมีประสิทธิภาพแม้จะมีปริมาณของแข็งทั้งหมดมากถึงร้อยละ 50 ซึ่งจากผลการทดลองประสิทธิภาพการผลิตก๊าซมีเทนจะลดลงเมื่อมีปริมาณของแข็งทั้งหมดมากกว่าร้อยละ 32.5 ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส และในระยะเวลาการหมัก 160 วัน โดยใช้มูลสัตว์และฟางข้าวผสมกันที่ปริมาณของแข็งทั้งหมดประมาณร้อยละ 25 มีประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซมีเทนได้ประมาณร้อยละ 50-60

Lane (1984) ได้ทำการทดลองโดยนำแอปเปิ้ล ชั่งข้าวโพด และสับปะรด มาทำการหมักเป็นเวลา 226 วัน ด้วยอัตราการป้อนสารอินทรีย์ 3.5-4.25 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน โดยมีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพประมาณ 0.43-0.57 ลิตรต่อกรัมของสารอินทรีย์ที่ป้อนเข้าระบบ และได้ก๊าซมีเทนเป็นองค์ประกอบประมาณร้อยละ 50-60

Nand (1992) ได้ทำการทดลองโดยใช้ผักและผลไม้ เช่น มะม่วง สับปะรด มะเขือเทศ ขนุน กั้วย และเปลือกส้ม เป็นวัตถุดิบโดยไม่มีการเติมน้ำเพื่อลดปริมาณ total solid ซึ่งมีระยะเวลาในการหมัก 100 วัน ในถังหมักขนาด 60 ลิตร ที่ HRT 20 วัน สามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ประมาณ 0.6 ลูกบาศก์เมตรต่อกิโลกรัมของแข็งระเหย และได้ก๊าซมีเทนเป็นองค์ประกอบประมาณร้อยละ 51-53

Alvarez และคณะ (1993) ได้ทำการทดลองโดยใช้ผักและผลไม้ เช่น มะเขือเทศ ดอกกะหล่ำ แดงกว่า ผักกาดและเปลือกส้ม เป็นวัตถุดิบที่มีปริมาณ total solid ร้อยละ 45.11 ที่ระยะเวลาการหมัก 35 วัน ในถังหมักสองชั้นตอนขนาด 0.13 และ 0.05 ลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ ที่ระยะเวลาเก็บกัก 25 วัน สามารถผลิตก๊าซได้สูงสุดในวันที่ 10 ของการทดลอง มีปริมาณเท่ากับ 3.6 ลิตร และได้ก๊าซมีเทนเป็นองค์ประกอบสูงสุดประมาณร้อยละ 75



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

ขั้นตอนและวิธีดำเนินการวิจัย

3.1 แผนการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาในระดับห้องปฏิบัติการ มุ่งเน้นศึกษากระบวนการบำบัดเบื้องต้นทางความร้อนและทางชีวภาพที่มีผลต่อความสามารถในการย่อยสลายสารอินทรีย์ของไบโอดีปในระบบไร้อากาศ และทำการศึกษาอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพของไบโอดีปที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้น โดยแบ่งออกเป็น 3 การทดลอง มีรายละเอียดดังนี้

การทดลองที่ 1 : เป็นการทดลองการบำบัดเบื้องต้นทางความร้อนและทางชีวภาพ มีจุดประสงค์เพื่อย่อยสลายโครงสร้างเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ให้แยกออกจากกัน โดยนำไบโอดีปที่ใช้ในการทดลองไปวิเคราะห์หาค่าซีไอดีละลาย ค่าของแข็ง (TS) และของแข็งระเหย (VS) ก่อนทำการทดลอง และหลังการทดลอง จากนั้นบันทึกค่าเพื่อใช้ในการประเมินประสิทธิภาพในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในไบโอดีป เพื่อนำไปใช้ในการทดลองที่ 2 และการทดลองที่ 3 ต่อไป โดยแบ่งออกเป็น 3 ชุดการทดลอง ได้ดังนี้

- ชุดการทดลองที่ 1 : เป็นการบำบัดเบื้องต้นด้วยไอน้ำ โดยใช้หม้อไอน้ำ ความดัน นำไบโอดีปที่หั่นแบบหยาบขนาดประมาณ 0.5-1.0 เซนติเมตร ใส่ลงหม้อไอน้ำ โดยกำหนดระยะเวลาในการบำบัดเบื้องต้นของตัวอย่างไบโอดีปที่ 15, 30 และ 60 นาที จากนั้นนำไบโอดีปที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นดังกล่าวมาวิเคราะห์หาค่าซีไอดีละลาย

- ชุดการทดลองที่ 2 : เป็นการบำบัดเบื้องต้นด้วยน้ำร้อน โดยใช้อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ นำไบโอดีปที่หั่นแบบหยาบขนาดประมาณ 0.5-1.0 เซนติเมตร ใส่ลงอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ โดยกำหนดระยะเวลาในการบำบัดเบื้องต้นของตัวอย่างไบโอดีปที่ 15, 30 และ 60 นาที จากนั้นนำไบโอดีปที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นดังกล่าวมาวิเคราะห์หาค่าซีไอดีละลาย

- ชุดการทดลองที่ 3 : เป็นการบำบัดเบื้องต้นทางชีวภาพโดยใช้มูลวัวเป็นหัวเชื้อในการบำบัดเบื้องต้น โดยผสมมูลวัวกับไบโอดีปในขวดทดลองรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร ที่อัตราส่วนผสมโดยน้ำหนักเปียก (Wet Weight) ของปริมาณมูลวัวต่อไบโอดีป 1:6, 1:3 และ 1:2 แล้วนำไปเขย่าผสมด้วยเครื่องเขย่า กำหนดระยะเวลาในการบำบัดเบื้องต้นไว้ที่ 1, 3, 5 และ 7 วัน จากนั้นนำไบโอดีปที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นดังกล่าวมาวิเคราะห์หาค่าซีไอดีละลาย

การทดลองที่ 2 : เป็นการทดลองหาอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพของไบโอดีปที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นด้วยความร้อนและทางชีวภาพจากการทดลองที่ 1 โดยวิธีการทำ Biochemical Methane Potential (BMP) มีขั้นตอนการทดลอง คือ นำตัวอย่างจากการทดลองที่ 1 มาหมักแบบไร้อากาศในขวดซีรัมขนาด 125 มิลลิลิตร เพื่อวัดหาปริมาณการผลิตก๊าซชีวภาพ ซึ่งจะทำให้การเปรียบเทียบกับไบโอดีปที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการบำบัดเบื้องต้น โดยนำตัวอย่างไบโอดีปที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นจากการทดลองที่ 1 หัวเชื้อจุลินทรีย์ (ใช้มูลวัว) และสารอาหารเติมลงในขวดซีรัม ทำการใส่ก๊าซออกซิเจนออกให้หมดโดยใช้ก๊าซไนโตรเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อัตราส่วน 70:30 ปรับค่าความเป็นกรด-ด่างให้อยู่ในช่วง 6.8-7.2 ปิดฝาขวดด้วยฝายางและครอบด้วยฝาลอหุมีเนียมให้สนิทเพื่อป้องกันอากาศเข้าไป โดยต้องมีช่องเจาะสำหรับวัดก๊าซชีวภาพ และทำการวัดปริมาณก๊าซชีวภาพทุกๆ วันด้วยเครื่องวัดปริมาณก๊าซชีวภาพแบบ U-Tube จนกระทั่งไม่มีก๊าซเกิดขึ้นหรือเกิดขึ้นน้อยมาก โดยอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองนี้ประกอบด้วย ขวดซีรัมขนาด 125 มิลลิลิตร ก๊าซไนโตรเจน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และเครื่องวัดปริมาณก๊าซชีวภาพแบบ U-Tube โดยทำการทดลองตัวอย่างละ 3 ขั้ว

การทดลองที่ 3 : เป็นการทดลองเพื่อผลิตก๊าซชีวภาพด้วยถังหมักไร้อากาศโดยใช้ไบโอดีปที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นด้วยความร้อนและกระบวนการทางชีวภาพที่มีความสามารถในการผลิตก๊าซชีวภาพที่ดีที่สุดของการทดลองที่ 2 มาใช้ในการทดลองในถังหมักไร้อากาศ (ประกอบด้วย การบำบัดเบื้องต้นด้วยไอน้ำและน้ำร้อนอย่างละ 1 ตัวอย่าง และการบำบัดเบื้องต้นด้วยกระบวนการทางชีวภาพ 2 ตัวอย่าง) โดยใช้ถังหมักปริมาตร 40 ลิตร จำนวน 2 ถัง และวิเคราะห์จากค่าซีไอดี ค่าของแข็ง ปริมาณก๊าซชีวภาพและความเข้มข้นของก๊าซมีเทน

3.2 ไบโอดีปที่ใช้ในการวิจัย

ไบโอดีปที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นไบโอดีปพันธุ์อุทอง 9 ซึ่งปรับปรุงและพัฒนาสายพันธุ์โดยนักวิจัยของศูนย์วิจัยและพัฒนาการเกษตรสุพรรณบุรี โดยงานวิจัยนี้เก็บรวบรวมมาจากไร้อ้อยที่จังหวัด กาญจนบุรี จากนั้นนำมาหมักแบบหยาบ และทำการวิเคราะห์พารามิเตอร์เบื้องต้น (สำหรับองค์ประกอบทางเคมีของไบโอดีปได้ส่งวิเคราะห์ที่กรมวิทยาศาสตร์บริการ) แสดงดังตารางที่ 3.2-1

ตารางที่ 3.2-1 พารามิเตอร์เบื้องต้นของใบอ้อยที่ทำการวิเคราะห์

พารามิเตอร์	วิธีวิเคราะห์
ความชื้น	Standard method # 2540 (Dried 103-105 ⁰ C)
ของแข็งทั้งหมด	Standard method # 2540 (Dried 103-105 ⁰ C)
ของแข็งระเหย	Standard method # 2540 (Dried 500-600 ⁰ C)
ไฮโดรเซลลูโลส	TAPPI T 203 Section
- อัลฟ่าเซลลูโลส	TAPPI T 203 om-93
- เบต้าเซลลูโลส	TAPPI T 203 om-93
- แกมม่าเซลลูโลส	TAPPI T 203 om-93
ลิกนิน	TAPPI T 222 om-88
ปริมาณเถ้า	TAPPI T 222 om-88

3.3 เชื้อจุลินทรีย์ที่ใช้ในการวิจัย

เชื้อจุลินทรีย์ที่ใช้ในการวิจัยคือ ใช้มูลวัว โดยรวบรวมมาจากฟาร์มเลี้ยงสัตว์ของ คณะสัตวแพทยศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยมูลวัวดังกล่าวจะนำไปใช้เป็นหัวเชื้อในการบำบัดเบื้องต้นทางชีวภาพในการทดลองที่ 1 ใช้เป็นหัวเชื้อสำหรับระบบไร้อากาศในการทำ BMP ในการทดลองที่ 2 และการหมักในถังหมักไร้อากาศในการทดลองที่ 3 ซึ่งต้องทำการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ดังตารางที่ 3.3-1

ตารางที่ 3.3-1 พารามิเตอร์เบื้องต้นของหัวเชื้อจุลินทรีย์ที่ทำกรวิเคราะห์

พารามิเตอร์	วิธีวิเคราะห์
ความชื้น	Standard method # 2540 (Dried 103-105 ⁰ C)
ของแข็งทั้งหมด	Standard method # 2540 (Dried 103-105 ⁰ C)
ของแข็งระเหย	Standard method # 2540 (Dried 500-600 ⁰ C)
ซีไอดี	Standard method # 5220 (Close reflux)
สภาพต่าง	Standard method # 2320 (Titration method)
ความเป็นกรด-ต่าง	Electronic pH meter with glass electrode method
ความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน	ORP meter

3.4 เครื่องมือ อุปกรณ์ และสารเคมี

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง มีดังนี้

3.4.1 หม้อไอน้ำความดัน

งานวิจัยนี้ใช้หม้อไอน้ำความดันที่สามารถควบคุมอุณหภูมิและความดันได้ยี่ห้อ All American รุ่น model No.1941x ขนาดความจุ 39 ลิตร แสดงดังรูปที่ 3.4.1-1 สำหรับการควบคุมความดันเป็นการป้องกันการสูญเสียวัตถุดิบ (mass loss) ออกจากระบบ



รูปที่ 3.4.1-1 หม้อไอน้ำความดัน

3.4.2 อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ

งานวิจัยนี้ใช้อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ ที่สามารถควบคุมอุณหภูมิได้ แสดงดังรูปที่

3.4.2-1



รูปที่ 3.4.2-1 อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ

3.4.3 เครื่องเขย่า

งานวิจัยนี้ใช้เครื่องเขย่า โดยใช้เพื่อให้เกิดการกวนผสมกันระหว่างมูลวัวกับใบอ้อยในการทดลองการบำบัดเบื้องต้นทางชีวภาพ แสดงดังรูปที่ 3.4.3-1



รูปที่ 3.4.3-1 เครื่องเขย่า

3.4.4 อุปกรณ์และสารเคมีสำหรับการทดลองหาคักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทน (Biochemical Methane Potential: BMP)

ใช้ขวดซีรัมสีขาขนาด 125 มิลลิลิตร ในการทดลองที่ 2 ซึ่งเป็นการทดลองหาคักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทน (BMP) (Speece, 1996) โดยสามารถแบ่งจำนวนขวดตัวอย่างจากการทดลองได้ดังนี้

(1) จำนวนตัวอย่างที่ใช้เพื่อวัดปริมาณก๊าซชีวภาพ รวม 20 ตัวอย่าง ใช้ขวดซีรัมรวมทั้งหมด 60 ขวด มีรายละเอียดดังนี้

- ตัวอย่างจากการบำบัดเบื้องต้นด้วยไอน้ำ 3 ตัวอย่าง ทำ 3 ซ้ำ ใช้ขวดซีรัมจำนวน 9 ขวด

- ตัวอย่างจากการบำบัดเบื้องต้นด้วยน้ำร้อน 3 ตัวอย่าง ทำ 3 ซ้ำ ใช้ขวดซีรัมจำนวน 9 ขวด

- ตัวอย่างจากการบำบัดเบื้องต้นทางชีวภาพ 12 ตัวอย่าง ทำ 3 ซ้ำ ใช้ขวดซีรัมจำนวน 36 ขวด

- ตัวอย่างควบคุมโดยไม่ใส่ตัวอย่างจำนวน 1 ตัวอย่าง 3 ซ้ำ ใช้ขวดซีรัม
จำนวน 3 ขวด

- ตัวอย่างใบอ้อยที่ไม่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นจำนวน 1 ตัวอย่าง ทำ 3 ซ้ำ
ใช้ขวดซีรัมจำนวน 3 ขวด

(2) จำนวนตัวอย่างที่ใช้วิเคราะห์ค่ากรดไขมันระเหยและค่าความเป็นกรด-ด่าง
ซึ่งจำนวนตัวอย่างจะเท่ากับตัวอย่างที่ใช้วัดปริมาณก๊าซชีวภาพคือ 20 ตัวอย่าง แต่จะทำเก็บ
ตัวอย่างจำนวน 5 ครั้ง ดังนั้นจึงต้องใช้ขวดซีรัมรวมทั้งหมด 100 ขวด

โดยสรุปแล้วต้องใช้จำนวนขวดซีรัมรวมทั้งหมดจำนวน 160 ขวด โดยในการ
ทดลองที่ 2 นี้ หลังจากที่ได้ตัวอย่าง สารอาหาร และหัวเชื้อจุลินทรีย์ลงในขวดซีรัมแล้ว ก่อนที่จะทำ
การปิดฝาขวด จะต้องใส่ก๊าซออกซิเจนที่อยู่ภายในขวดด้วยก๊าซไนโตรเจนต่อคาร์บอนไดออกไซด์ที่
อัตราส่วน 70:30 (Owen และคณะ, 1979) โดยอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองนี้ประกอบด้วย ขวดซีรัม
ขนาด 125 มิลลิลิตร (แสดงดังรูปที่ 3.4.4-1) ก๊าซไนโตรเจนต่อก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (แสดงดังรูป
ที่ 3.4.4-2) และเครื่องวัดปริมาณก๊าซชีวภาพแบบ U-Tube (แสดงดังรูปที่ 3.4.4-3)



รูปที่ 3.4.4-1 ขวดซีรัมสีชาขนาด 125 มิลลิลิตร



รูปที่ 3.4.4-2 ก๊าซไนโตรเจนและก๊าซ
คาร์บอนไดออกไซด์

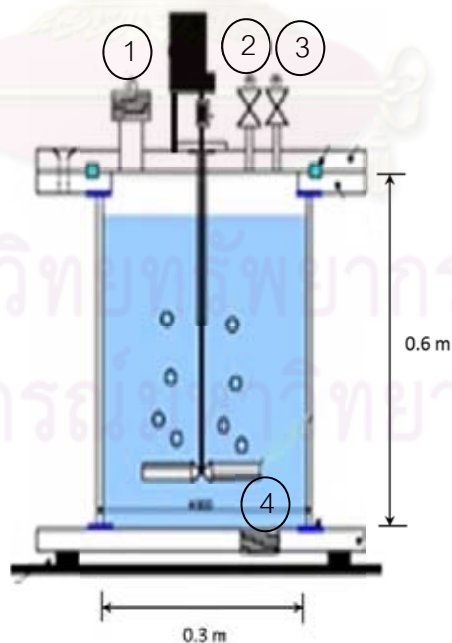


รูปที่ 3.4.4-3 เครื่องวัดปริมาณก๊าซ
ชีวภาพแบบ U-Tube

3.4.5 ถังปฏิกรณ์

ถังปฏิกรณ์ที่ใช้ในการทดลองที่ 3 เป็นถังหมักแบบไร้อากาศ ขนาด 40 ลิตร จำนวน 2 ถัง แสดงดังรูปที่ 3.4.5-1 โดยถังดังกล่าวทำมาจากอะครีลิก มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.3 เมตร สูง 0.6 เมตร ฝาปิดถังหมักไร้อากาศมีแผ่นยางกันเพื่อให้แน่ใจว่าถังหมักนี้ปิดสนิทไม่มีอากาศเข้าไป และติดตั้งช่องต่างๆ จำนวน 4 ช่อง ประกอบด้วย ช่องที่ 1 ใช้สำหรับใส่ตัวอย่างลงในถังหมัก ช่องที่ 2 ใช้สำหรับเก็บตัวอย่างก๊าซชีวภาพเพื่อนำไปวิเคราะห์ต่อไป ช่องที่ 3 ใช้สำหรับใส่ก๊าซไนโตรเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพื่อไล่ก๊าซออกซิเจนออกจากถังหมัก โดยช่องที่ 1, 2 และ 3 ติดตั้งอยู่ที่ด้านบนฝาปิดของถังหมักไร้อากาศ สำหรับช่องที่ 4 ใช้เป็นช่องระบายตะกอนก้นถังหมักไร้อากาศนี้เป็นถังแบบกวนผสมซึ่งมีการติดตั้งใบกวนที่ด้านบนของถัง สำหรับถังหมักไร้อากาศที่ใช้ในงานวิจัยนี้แสดงดังรูปที่ 3.4.5-2

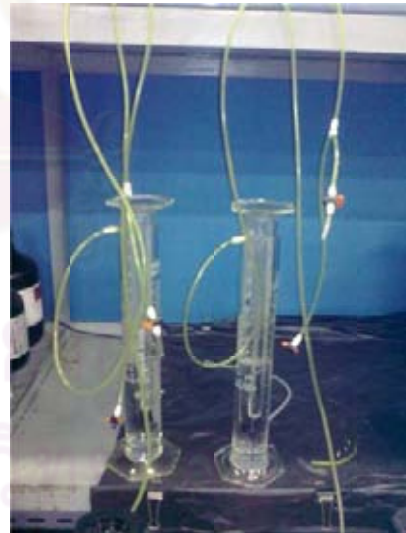
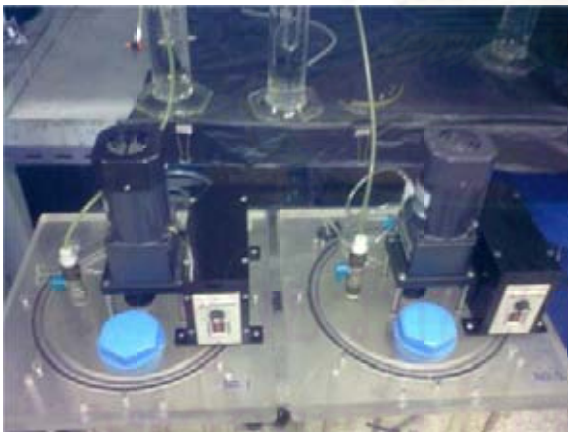
สำหรับปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นภายในถังหมักไร้อากาศ ได้ถูกรวบรวมและวัดปริมาณก๊าซโดยอาศัยหลักการแทนที่น้ำของก๊าซที่เกิดขึ้น (inverted glass cylinder method) ซึ่งอุปกรณ์รวบรวมและวัดปริมาณก๊าซประกอบด้วยกระบอกตวงขนาด 1 ลิตร ประกอบเข้ากับกระบอกตวง 2 ลิตร แสดงดังรูปที่ 3.4.5-3 จากนั้นทำการปรับค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำให้ต่ำกว่า 3 เพื่อป้องกันการละลายน้ำของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์



รูปที่ 3.4.5-1 รูปแบบและขนาดถังปฏิกรณ์



รูปที่ 3.4.5-2 ถังหมักไร้อากาศที่ใช้ในการทดลองที่ 3



รูปที่ 3.4.5-3 จุดเก็บตัวอย่างและชุดอุปกรณ์วัดปริมาณก๊าซชีวภาพ

3.4.6 อุปกรณ์อื่นๆ

1. เครื่องวัดความเป็นกรด-ด่าง และอุณหภูมิ
2. เครื่องวัดความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน
3. ตู้อบควบคุมอุณหภูมิที่ 103-105 องศาเซลเซียส
4. ตู้อบซีไอดีควบคุมอุณหภูมิที่ 150-180 องศาเซลเซียส
5. เตาเผาควบคุมอุณหภูมิที่ 550 ± 50 องศาเซลเซียส
6. เครื่องอังไอน้ำ และเทอร์โมมิเตอร์
7. เตาไฟฟ้า
8. เครื่องชั่งละเอียด ทศนิยม 4 ตำแหน่ง และเครื่องชั่งแบบหยาบ
9. ถังเก็บตัวอย่างก๊าซ
10. ถ้วยกระเบื้อง และขวดแก้วทดลองรูปชมพู่

3.4.7 สารเคมีที่ใช้ในการวิจัย

1. สารละลายมาตรฐานโปตัสเซียมไดโครเมต 0.1 นอร์มัล
2. สารละลายกรดซัลฟูริกผสมซิลเวอร์ซัลเฟต
3. สารละลายเฟอร์โรอิน อินดิเคเตอร์
4. สารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต 0.1 นอร์มัล
5. โซเดียมไฮดรอกไซด์ 6 นอร์มัล
6. ฟีนอล์ฟทาลีน อินดิเคเตอร์
7. กรดซัลฟูริกเข้มข้น

3.4.8 สารอาหารเสริม

ในงานวิจัยนี้มีการเติมสารอาหารที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในระบบ โดยปริมาณและชนิดสารอาหารเสริมที่เติมในถังหมักไร้อากาศและในการทดลอง BMP แสดงดังตารางที่ 3.4.8-1

ตารางที่ 3.4.8-1 ปริมาณสารอาหารเสริมในระบบไร้อากาศ (Speece, 1996)

ชนิดของสารเคมี	ความเข้มข้น (มก./ล.)	ชนิดของสารเคมี	ความเข้มข้น (มก./ล.)
<u>สารอาหารเสริมหลัก</u>		<u>สารอาหารเสริมรอง (ต่อ)</u>	
NH ₄ Cl	400	CuCl ₂ ·2H ₂ O	0.5
MgSO ₄ ·7(H ₂ O)	400	ZnCl ₂	0.5
KCl	400	AlCl ₃ ·6H ₂ O	0.5
Na ₂ S·9H ₂ O	300	Na ₂ MoO ₄ ·2H ₂ O	0.5
CaCl ₂ ·2H ₂ O	50	H ₃ BO ₃	0.5
(NH ₄) ₂ HPO ₄	80	NiCl ₂ ·6H ₂ O	0.5
<u>สารอาหารเสริมรอง</u>		Na ₂ WO ₄ ·2H ₂ O	0.5
FeCl ₂ ·4H ₂ O	40	Na ₂ SeO ₄	0.5
CoCl ₂ ·6H ₂ O	10	<u>สารเสริมความ</u>	
KI	10	<u>เป็นต่าง</u>	
(NaPO ₃) ₆	0.5	NaHCO ₃	6000
MnCl ₂ ·4H ₂ O	0.5		
NH ₄ VO ₃	0.5		

3.5 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

การดำเนินงานวิจัยนี้แบ่งการทดลองออกเป็น 3 การทดลอง มีรายละเอียดดังนี้

3.5.1 การทดลองที่ 1

เป็นการทดลองการบำบัดเบื้องต้นด้วยความร้อนและทางชีวภาพมีจุดประสงค์เพื่อย่อยสลายโครงสร้างเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ให้แยกออกจากกัน เพื่อที่จะนำเอาเซลลูโลสซึ่งเป็นพอลิแซ็กคาไรด์ที่เป็นสารประกอบของน้ำตาลไปใช้เป็นสารตั้งต้นในการหมักแบบไร้อากาศเพื่อผลิตเป็นเชื้อเพลิงชีวภาพต่อไป โดยนำน้ำย่อยไบอ้อยที่ใช้ในการทดลองไปวิเคราะห์หาค่าซีโอดีละลาย (sCOD) ค่าของแข็ง (TS) และของแข็งระเหย (VS) ก่อนทำการทดลอง และหลังการทดลอง จากนั้นบันทึกค่าเพื่อใช้ในการประเมินประสิทธิภาพในการย่อยสลายสารอินทรีย์ของไบอ้อย จากนั้นจึงนำไปใช้ในการทดลองที่ 2 และการทดลองที่ 3 ต่อไป โดยการทดลองที่ 1 ประกอบด้วย 3 ชุดการทดลอง

- ชุดการทดลองที่ 1 : การบำบัดเบื้องต้นด้วยไอน้ำ มีขั้นตอนการทดลองแสดงดังรูปที่ 3.5.1-1 และตารางที่ 3.5.1-1 มีรายละเอียดดังนี้

1. นำไบอ้อยมาหั่นแบบหยาบขนาด 0.5-1.0 เซนติเมตร
2. นำไบอ้อยไปวิเคราะห์หาค่าซีโอดีละลาย (sCOD) และค่าของแข็งระเหย (VS) ก่อนทำการทดลอง จากนั้นบันทึกค่าเพื่อใช้ในการประเมินประสิทธิภาพการบำบัดเบื้องต้นด้วยไอน้ำต่อไป
3. นำไปใส่ไว้ในหม้อไอน้ำโดยแบ่งระยะเวลาในการบำบัดเบื้องต้นที่ 15, 30 และ 60 นาที ควบคุมอุณหภูมิไว้ที่ 127 องศาเซลเซียส ที่สภาวะความดัน 1.5 บาร์
4. นำไบอ้อยที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นด้วยไอน้ำทั้ง 3 ระยะเวลาในการบำบัดเบื้องต้นมาวิเคราะห์หาค่าซีโอดีละลาย และค่าของแข็งระเหย เพื่อประเมินประสิทธิภาพการบำบัดเบื้องต้น
5. นำไบอ้อยที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นด้วยไอน้ำทั้ง 3 ระยะเวลาในการบำบัดเบื้องต้นไปใช้ในการทดลองที่ 2 ต่อไป



รูปที่ 3.5.1-1 ขั้นตอนการทดลองที่ 1 ชุดที่ 1

ตารางที่ 3.5.1-1 ตัวแปรในการทดลองที่ 1 ชุดการทดลองที่ 1

ตัวแปรควบคุม	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
1. วัสดุดิบ	ใบอ้อยแห้งแบบหยาบขนาด 0.5-1.0 เซนติเมตร
2. ปริมาณของใบอ้อย	500 กรัมต่อ 1 ชุดการทดลอง
3. อุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง	127 องศาเซลเซียส (260 องศาฟาเรนไฮต์)
4. ความดัน	1.5 บาร์ (22 psi)
ตัวแปรที่ต้องการศึกษา	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
1. ระยะเวลาการบำบัดเบื้องต้น	15 นาที 30 นาที และ 60 นาที
ตัวแปรตามที่ต้องการศึกษา	พารามิเตอร์ที่วิเคราะห์
1. ประสิทธิภาพในการบำบัดเบื้องต้น	ซีไอดีละลาย ของแข็งระเหย
พารามิเตอร์ที่วิเคราะห์	วิธีวิเคราะห์
1. ซีไอดีละลาย (soluble COD)	Standard method#5220 (close reflux)
2. ปริมาณของแข็งระเหย	Standard method#2540 (Dried 500-600 ⁰ C)

- ชุดการทดลองที่ 2 : การบำบัดเบื้องต้นด้วยน้ำร้อน มีขั้นตอนการทดลองแสดง
ดังรูปที่ 3.5.1-2 และตารางที่ 3.5.1-2 มีรายละเอียดดังนี้

1. นำใบฉ่อยมาหั่นแบบหยาบขนาด 0.5-1.0 เซนติเมตร
2. นำใบฉ่อยไปวิเคราะห์หาค่าซีโอดีละลาย (sCOD) และค่าของแข็งระเหย (VS)
ก่อนทำการทดลอง จากนั้นบันทึกค่าเพื่อใช้ในการประเมินประสิทธิภาพการบำบัดเบื้องต้นด้วย
น้ำร้อนต่อไป
3. นำใบใส่ไว้ในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิโดยแบ่งระยะเวลาในการบำบัดเบื้องต้นที่
15, 30 และ 60 นาที ควบคุมอุณหภูมิไว้ที่ประมาณ 90 ± 2 องศาเซลเซียส
4. นำใบฉ่อยที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นด้วยน้ำร้อนทั้ง 3 ระยะเวลาในการบำบัด
เบื้องต้นมาวิเคราะห์หาค่าซีโอดีละลาย และค่าของแข็งระเหย เพื่อประเมินประสิทธิภาพการบำบัด
เบื้องต้น
5. นำใบฉ่อยที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นด้วยน้ำร้อนทั้ง 3 ระยะเวลาในการบำบัด
เบื้องต้นไปใช้ในการทดลองที่ 2 ต่อไป



รูปที่ 3.5.1-2 ขั้นตอนการทดลองที่ 1 ชุดที่ 2

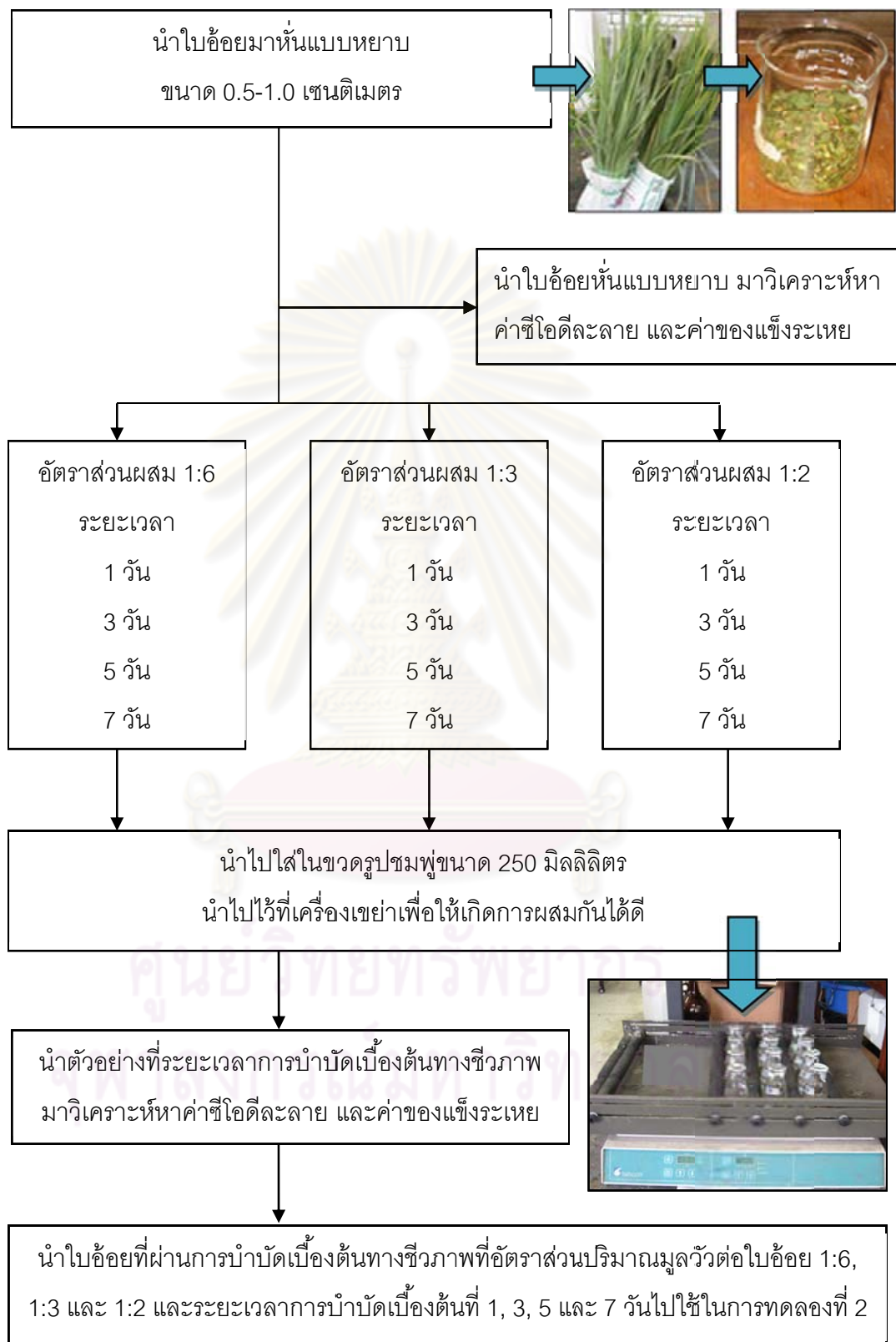
ตารางที่ 3.5.1-2 ตัวแปรในการทดลองที่ 1 ชุดการทดลองที่ 2

ตัวแปรควบคุม	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
1. วัสดุดิบ	ใบอ้อยแห้งแบบหยาบขนาด 0.5-1.0 เซนติเมตร
2. ปริมาณของใบอ้อย	500 กรัมต่อ 1 ชุดการทดลอง
3. อุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง	90±2 องศาเซลเซียส
4. ความดัน	1.013 บาร์
ตัวแปรที่ต้องการศึกษา	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
1. ระยะเวลาการบำบัดเบื้องต้น	15, 30 และ 60 นาที
ตัวแปรตามที่ต้องการศึกษา	พารามิเตอร์ที่วิเคราะห์
1. ประสิทธิภาพในการบำบัดเบื้องต้น	ซีโอดีละลาย ของแข็งระเหย
พารามิเตอร์ที่วิเคราะห์	วิธีวิเคราะห์
1. ซีโอดีละลาย (soluble COD)	Standard method#5220 (close reflux)
2. ปริมาณของแข็งระเหย	Standard method#2540 (Dried 500-600°C)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

- การทดลองชุดที่ 3 : การบำบัดเบื้องต้นทางชีวภาพโดยใช้มูลวัวเป็นหัวเชื้อในการบำบัดเบื้องต้น โดยผสมมูลวัวกับใบอ้อยในขวดทดลองรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร ที่อัตราส่วนผสมโดยน้ำหนักเปียก (wet weight) ของปริมาณมูลวัวต่อใบอ้อย 1:6, 1:3 และ 1:2 แล้วนำไปไว้ในที่เครื่องเขย่า กำหนดระยะเวลาในการบำบัดเบื้องต้นไว้ที่ 1, 3, 5 และ 7 วัน จากนั้นนำใบอ้อยที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นดังกล่าวมาวิเคราะห์หาค่าซีโอดีละลาย มีขั้นตอนการทดลองแสดงดังรูปที่ 3.5.1-3 และตารางที่ 3.5.1-3 มีรายละเอียดดังนี้

1. นำใบอ้อยมาหั่นแบบหยาบขนาด 0.5-1.0 เซนติเมตร
2. นำใบอ้อยไปวิเคราะห์หาค่าซีโอดีละลาย (sCOD) และค่าของแข็งระเหย (VS) ก่อนทำการทดลอง จากนั้นบันทึกค่าเพื่อใช้ในการประเมินประสิทธิภาพการบำบัดเบื้องต้นทางชีวภาพต่อไป
3. ผสมมูลวัวกับใบอ้อยในขวดทดลองรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร ที่อัตราส่วนผสมโดยน้ำหนักเปียก (wet weight) ของปริมาณมูลวัวต่อใบอ้อย 1:6, 1:3 และ 1:2 แล้วนำไปไว้ในที่เครื่องเขย่าเพื่อให้มูลวัวกับใบอ้อยเกิดการผสมกันได้ดี กำหนดระยะเวลาในการบำบัดเบื้องต้นไว้ที่ 1, 3, 5 และ 7 วัน
4. นำใบอ้อยที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นทางชีวภาพที่อัตราส่วนปริมาณมูลวัวต่อใบอ้อย 1:6, 1:3 และ 1:2 และระยะเวลาการบำบัดเบื้องต้นที่ 1, 3, 5 และ 7 วัน มาวิเคราะห์หาค่าซีโอดีละลาย และค่าของแข็งระเหย เพื่อประเมินประสิทธิภาพการบำบัดเบื้องต้น
5. นำใบอ้อยที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นทางชีวภาพที่อัตราส่วนปริมาณมูลวัวต่อใบอ้อย 1:6, 1:3 และ 1:2 และระยะเวลาการบำบัดเบื้องต้นที่ 1, 3, 5 และ 7 วันไปใช้ในการทดลองที่ 2 ต่อไป



รูปที่ 3.5.1-3 ขั้นตอนการทดลองที่ 1 ชุดที่ 3

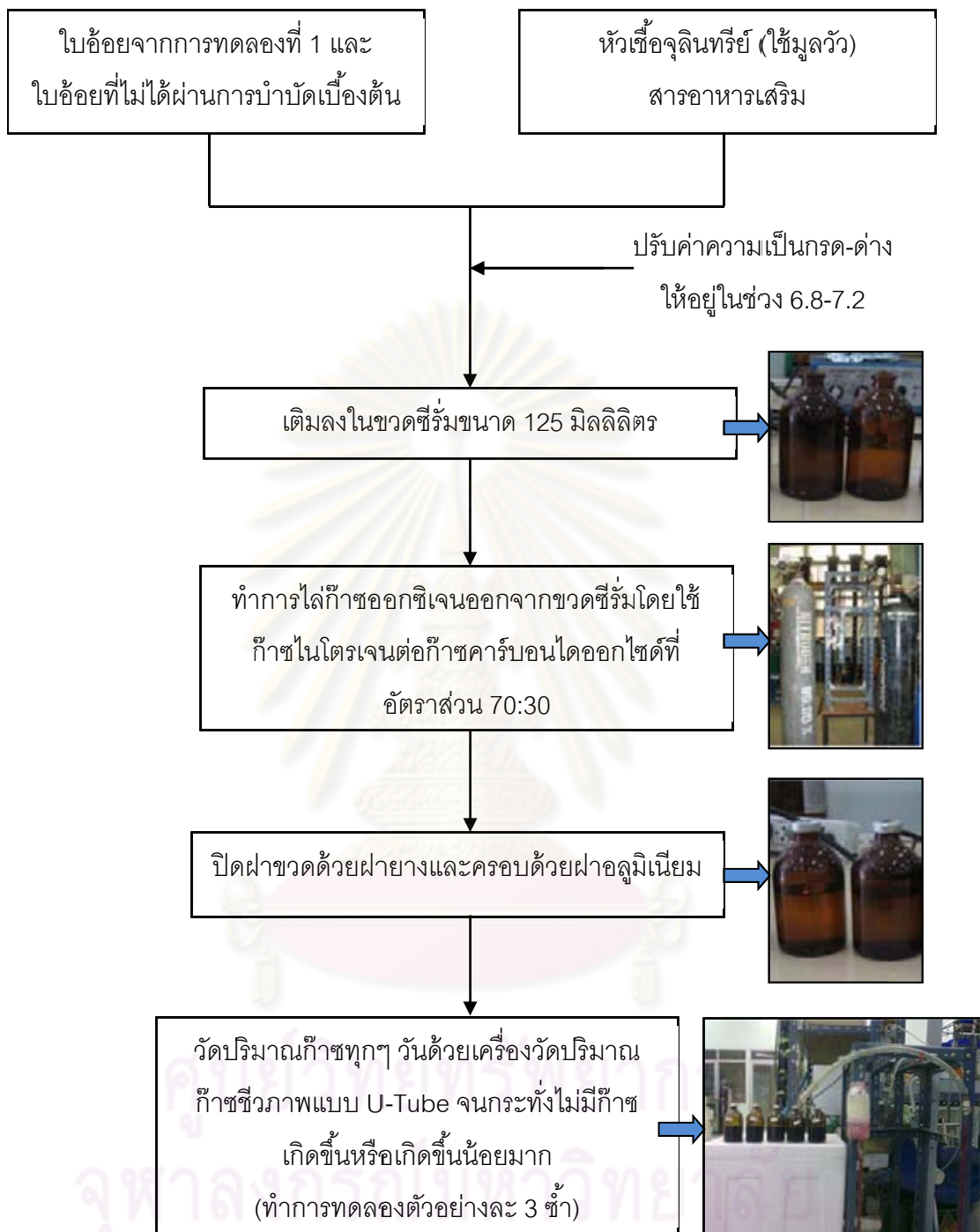
ตารางที่ 3.5.1-3 ตัวแปรในการทดลองที่ 1 ชุดการทดลองที่ 3

ตัวแปรควบคุม	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
1. วัสดุดิบ	ใบอ้อยแห้งแบบหยาบขนาด 0.5-1.0 เซนติเมตร
2. ปริมาณของใบอ้อย	500 กรัมต่อ 1 ชุดการทดลอง
3. อุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง	29±2 องศาเซลเซียส
4. ความดัน	ความดันบรรยากาศ (1.013 บาร์)
ตัวแปรที่ต้องการศึกษา	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
1. อัตราส่วนผสมมูลวัวต่อใบอ้อย	1:6, 1:3 และ 1:2
2. ระยะเวลาการบำบัดเบื้องต้น	1, 3, 5 และ 7 วัน
ตัวแปรตามที่ต้องการศึกษา	พารามิเตอร์ที่วิเคราะห์
1. ประสิทธิภาพในการบำบัดเบื้องต้น	ซีโอดีละลาย ของแข็งระเหย
พารามิเตอร์ที่วิเคราะห์	วิธีวิเคราะห์
1. ซีโอดีละลาย (soluble COD)	Standard method#5220 (close reflux)
2. ปริมาณของแข็งระเหย	Standard method#2540 (Dried 500-600 ⁰ C)

3.5.2 การทดลองที่ 2

เป็นการทดลองหาอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพของไบโอดีปที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นทางความร้อนและทางชีวภาพจากการทดลองที่ 1 โดยวิธีการทำ Biochemical Methane Potential: BMP (วิธีการวิเคราะห์อ้างอิงจาก Owen และคณะ, 1979; Speece, 1996) มีวิธีการทดลอง คือ นำตัวอย่างจากการทดลองที่ 1 มาหมักแบบไร้อากาศในขวดซีรัมขนาด 125 มิลลิลิตร เพื่อวัดหาปริมาณการผลิตก๊าซชีวภาพ โดยจะทำการเปรียบเทียบกับไบโอดีปที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการบำบัดเบื้องต้น มีขั้นตอนการทดลองแสดงดังรูปที่ 3.5.2-1 และตารางที่ 3.5.2-1 มีรายละเอียดดังนี้

1. นำตัวอย่างจากการทดลองที่ 1 ที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นทางความร้อนและทางชีวภาพ และไบโอดีปที่ไม่ได้ผ่านการบำบัดเบื้องต้น ปริมาณ 2 กรัมของแข็งระเหยต่อลิตร หัวเชื้อจุลินทรีย์ (ใช้มูลวัว) 1 กรัมของแข็งระเหยต่อลิตร (Owen และคณะ, 1979) และสารอาหารเสริม (อ้างถึงตารางที่ 3.4.8-1) เติมลงในขวดซีรัม
2. ปรับค่าความเป็นกรด-ด่างให้อยู่ในช่วง 6.8-7.2
3. ทำการไล่ก๊าซออกซิเจนออกจากขวดซีรัมโดยใช้ก๊าซไนโตรเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อัตราส่วน 70:30
4. ปิดฝาขวดด้วยฝายางและครอบด้วยฝาลูมิเนียมให้สนิทเพื่อป้องกันอากาศเข้าไป โดยต้องมีช่องเจาะสำหรับวัดก๊าซ ทำการวัดปริมาณก๊าซทุกๆ วันด้วยเครื่องวัดปริมาณก๊าซชีวภาพแบบ U-Tube จนกระทั่งไม่มีก๊าซเกิดขึ้นหรือเกิดขึ้นน้อยมาก โดยทำการทดลองตัวอย่างละ 3 ขวด
5. ทำชุดการทดลองควบคุมกันในข้างต้น จำนวน 5 ขวด เพื่อใช้สำหรับการวิเคราะห์ค่ากรดไขมันระเหย สภาพต่าง และค่าความเป็นกรด-ด่าง
6. ทำตัวอย่างควบคุมสำหรับหัวเชื้อจุลินทรีย์ที่ใช้ในการทดลองจำนวน 3 ขวด โดยตัวอย่างควบคุมใส่เฉพาะหัวเชื้อจุลินทรีย์เพียงอย่างเดียว โดยควบคุมปริมาณให้เท่ากับตัวอย่างที่ใส่ร่วมกับไบโอดีปในข้างต้น



ทำชุดการทดลองควบคู่กันในข้างต้น จำนวน 5 ชุด เพื่อใช้สำหรับการ
วิเคราะห์ค่ากรดไขมันระเหย สภาพต่าง และค่าความเป็นกรด-ด่าง
ทำการตรวจวัดในวันที่ 5, 10, 20, 30 และ 40 ของการหมัก

รูปที่ 3.5.2-1 ขั้นตอนการทดลองที่ 2

ตารางที่ 3.5.2-1 ตัวแปรในการทดลองที่ 2

ตัวแปรควบคุม	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
1. วัสดุดิบ	ไบอ้อยที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นทางความร้อนและทางชีวภาพ และไบอ้อยที่ไม่ผ่านการบำบัดเบื้องต้น
2. ปริมาณของไบอ้อย	2 กรัมของแข็งระเหยต่อลิตร ต่อ 1 ชุดการทดลอง (Owen และคณะ, 1979)
3. หัวเชื้อจุลินทรีย์	มูลวัว 1 กรัมของแข็งระเหยต่อลิตร ต่อ 1 ชุดการทดลอง (Owen และคณะ, 1979)
4. เวลาที่ใช้ในการทดลอง	ทำการทดลองจนกว่าไม่เกิดก๊าซชีวภาพ หรือเกิดในปริมาณที่น้อยมาก โดยใช้เวลาประมาณ 45 วัน
5. อุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง	ทำที่อุณหภูมิห้อง
ตัวแปรที่ต้องการศึกษา	วิธีวิเคราะห์
1. ปริมาณก๊าซชีวภาพ	Inverted glass cylinder method
2. ความเข้มข้นของก๊าซมีเทน	Gas Chromatography (GC)
ตัวแปรตามที่ต้องการศึกษา	วิธีวิเคราะห์
1. กรดไขมันระเหย	Standard method # 5560
2. ค่าสภาพต่าง	Standard method # 2320 (titration method)
3. ค่าความเป็นกรด-ต่าง	Electronic pH meter with glass electrode method
4. ค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน	ORP meter

3.5.3 การทดลองที่ 3

การทดลองนี้เป็นการศึกษาปริมาณก๊าซชีวภาพ และความเข้มข้นของก๊าซมีเทนที่เกิดจากการย่อยสลายใบอ้อยที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นทางความร้อน และการบำบัดเบื้องต้นทางชีวภาพ โดยผู้วิจัยทำการเลือกตัวอย่างใบอ้อยที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นจากการทดลองที่ 2 ที่มีปริมาณการผลิตก๊าซชีวภาพที่มากที่สุด จากตัวอย่างใบอ้อยที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นด้วยไอน้ำจำนวน 1 ตัวอย่าง จากตัวอย่างใบอ้อยที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นด้วยน้ำร้อนจำนวน 1 ตัวอย่าง จากตัวอย่างใบอ้อยที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นทางชีวภาพจำนวน 2 ตัวอย่าง มาใช้การทดลองที่ 3 ซึ่งใช้ถังหมักไร้อากาศจำนวน 2 ถัง (รายละเอียดของถังหมักดังหัวข้อที่ 3.4.5) มีขั้นตอนการทดลองแสดงดังรูปที่ 3.5.3-1 และตารางที่ 3.5.3-1 มีรายละเอียดดังนี้

1. นำใบอ้อยที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้น ซึ่งจะทำการเลือกตัวอย่างจากการทดลองที่ 2 ที่มีปริมาณการผลิตก๊าซชีวภาพที่มากที่สุด ประกอบด้วย ตัวอย่างจากการบำบัดเบื้องต้นด้วยไอน้ำและน้ำร้อนอย่างละ 1 ตัวอย่าง และการบำบัดเบื้องต้นทางชีวภาพจำนวน 2 ตัวอย่าง ใส่ลงในถังหมักไร้อากาศ โดยควบคุมค่าของแข็งในระบบให้มีค่าร้อยละ 6

2. เติมหัวเชื้อจุลินทรีย์ (ใช้มูลวัว) ลงในถังหมักไร้อากาศ โดยควบคุมค่าของแข็งในระบบให้มีค่าร้อยละ 2

หมายเหตุ: ปริมาณใบอ้อยและหัวเชื้อจุลินทรีย์ในการทดลองนี้ได้ควบคุมค่าของแข็งในระบบให้มีค่าไม่เกินร้อยละ 8 (Shyman และSharma, 1993) โดยควบคุมปริมาตรตัวอย่างในถังหมักให้เท่ากับ 20 ลิตร

3. เติมสารอาหารและทำการปรับค่าความเป็นกรด-ด่างให้อยู่ในช่วง 6.8-7.2 (ชนิดและปริมาณสารอาหารอ้างถึงตารางที่ 3.4.8-1) ลงในถังหมัก

4. จากนั้นทำการปิดฝาถังหมัก และทำการไล่ก๊าซออกซิเจนออกจากถังหมักโดยใช้ก๊าซไนโตรเจนต่อก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อัตราส่วน 70:30 แล้วกวนผสมตัวอย่างกับหัวเชื้อจุลินทรีย์โดยใบกวนที่ติดตั้งอยู่บนถังหมัก (ควบคุมความเร็วรอบใบกวนของถังหมักไว้ที่ 50 รอบต่อนาที)

5. ทำการวัดปริมาณก๊าซชีวภาพทุกๆ วันด้วยเครื่องวัดปริมาณก๊าซชีวภาพด้วย
กระบอกเก็บก๊าซ (inverted glass cylinder อ้างถึงรูปที่ 3.4.5-3) จนกว่าจะไม่มีก๊าซเกิดขึ้นหรือ
เกิดขึ้นน้อยมาก

6. ทำการเก็บตัวอย่างแล้วนำไปวิเคราะห์ผลทั้งในส่วนที่เป็นก๊าซและของเหลว

7. ดำเนินการทดลองเป็นแบบทีละเท (batch) ครั้งละ 2 ตัวอย่าง

ทั้งนี้ในการทดลองที่ 3 ได้กำหนดค่าของแข็งในระบบเท่ากับร้อยละ 8 เพื่อ
ต้องการดูผลของอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพในถังหมักมีค่าสูงสุด ณ ช่วงเวลาใด และอัตราการผลิต
ก๊าซชีวภาพเริ่มลด ณ ช่วงเวลาใด เพื่อนำข้อมูลดังกล่าวไปใช้ในการออกแบบการเติมสารอาหาร
ให้กับระบบต่อไป



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.5.3-1 ขั้นตอนการทดลองที่ 3

ตารางที่ 3.5.3-1 ตัวแปรในการทดลองที่ 3

ตัวแปรควบคุม	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
1. วัตถุประสงค์ (อ้างอิงจากผลการที่ 2)	1) ใบอ้อยที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นด้วยไอน้ำที่ระยะเวลา 60 นาที 2) ใบอ้อยที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นด้วยน้ำร้อนที่ระยะเวลา 60 นาที 3) ใบอ้อยที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นทางชีวภาพที่อัตราส่วน 1:3 ที่ระยะเวลา 7 วัน 4) ใบอ้อยที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นทางชีวภาพที่อัตราส่วน 1:2 ที่ระยะเวลา 7 วัน
2. ปริมาณของใบอ้อย	ควบคุมค่าของแข็งในระบบให้มีค่าร้อยละ 6
3. หัวเชื้อจุลินทรีย์	ควบคุมค่าของแข็งในระบบให้มีค่าร้อยละ 2
4. เวลาที่ใช้ในการทดลอง	ทำการทดลองจนกว่าไม่เกิดก๊าซชีวภาพ หรือเกิดในปริมาณที่น้อยมาก ใช้เวลาประมาณ 45 วัน
5. อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	ทำที่อุณหภูมิห้อง
ตัวแปรที่ต้องการศึกษา	วิธีวิเคราะห์
1. ปริมาณก๊าซชีวภาพ	Inverted glass cylinder method
2. ความเข้มข้นของก๊าซมีเทน	Gas Chromatography (GC)
3. ซีไอดีละลาย	Standard method #5220 (close reflux)

ตารางที่ 3.5.3-1 (ต่อ)

ตัวแปรตามที่ต้องการศึกษา	วิธีวิเคราะห์
1. ของแข็งทั้งหมด	Standard method # 2540 (Dried 103-105 ⁰ C)
2. ของแข็งระเหย	Standard method # 2540 (Dried 500-600 ⁰ C)
3. กรดไขมันระเหย	Standard method # 5560
4. ค่าสภาพด่าง	Standard method # 2320 (Titration method)
5. ค่าความเป็นกรด-ด่าง	Electronic pH meter with glass electrode method
6. ค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน	ORP meter

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.6 วิธีการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในงานวิจัยนี้

พารามิเตอร์ และวิธีการวิเคราะห์ที่ใช้ตลอดการทดลอง แสดงดังตารางที่ 3.7-1 สำหรับรายละเอียดวิธีการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ แสดงดังภาคผนวก จ

ตารางที่ 3.6-1 แสดงวิธีการวิเคราะห์พารามิเตอร์

พารามิเตอร์	วิธีการวิเคราะห์
- ความชื้น (moisture content)	Standard method # 2540 (dried 103-105 ⁰ C)
- ของแข็งทั้งหมด (total solids)	Standard method # 2540 (dried 103-105 ⁰ C)
- ของแข็งระเหย (volatile solids)	Standard method # 2540 (dried 500-600 ⁰ C)
- ซีโอดีละลาย (soluble COD)	Standard method # 5220 (close reflux)
- ความเป็นกรด-ด่าง (pH)	Electronic pH meter with Glass electrode method
- กรดไขมันระเหย (VFA)	Standard method # 5560 (titration method)
- สภาพด่าง (Alkalinity)	Standard method # 2320 (titration method)
- ปริมาณก๊าซชีวภาพ	Inverted glass cylinder method
- ความเข้มข้นของก๊าซมีเทน	Gas Chromatography

3.7 ผลจากการทดลองวิธีการทำ BMP ในเบื้องต้นก่อนดำเนินงานวิจัย

ผู้วิจัยได้ดำเนินการทดลองเบื้องต้นเพื่อหาปริมาณก๊าซมีเทนด้วยวิธี BMP โดยใช้ตัวอย่างจากหญ้าเลี้ยงวัว ไขมันสัตว์ปะหลัง ชั่งข้าวโพด และใบต้นทานตะวัน โดยใช้เชื้อจุลินทรีย์ (inoculums) คือ มูลวัว และหัวเชื้อจุลินทรีย์ (seed) จากโรงงานแปรรูป ดังนั้นตัวอย่างจะ

ประกอบด้วย สารตัวอย่างรวมกับมูลวัว และสารตัวอย่างรวมกับหัวเชื้อจุลินทรีย์ โดยมีปริมาณที่ใส่สารตั้งต้น (substrate) แต่ละตัวอย่าง 0.15 กรัม มีผลการทดลอง ดังนี้

1) หญ้าหมักร่วมกับหัวเชื้อจุลินทรีย์มีปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นเฉลี่ย 82.22 มิลลิลิตรต่อกรัมของแข็งระเหย และหญ้าหมักร่วมกับมูลวัวมีปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นเฉลี่ย 180.44 มิลลิลิตรต่อกรัมของแข็งระเหย โดยค่าของแข็งระเหยของหญ้าเลี้ยงวัวมีค่าเท่ากับ 0.04 กรัม

2) ไขมันสำปะหลังหมักร่วมกับหัวเชื้อจุลินทรีย์มีปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นเฉลี่ย 45.95 มิลลิลิตรต่อกรัมของแข็งระเหย และไขมันสำปะหลังหมักร่วมกับมูลวัวมีปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นเฉลี่ย 276.07 มิลลิลิตรต่อกรัมของแข็งระเหย โดยค่าของแข็งระเหยของไขมันสำปะหลังมีค่าเท่ากับ 0.03 กรัม

3) ชั่งข้าวโพดหมักร่วมกับหัวเชื้อจุลินทรีย์มีปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นเฉลี่ย 45.12 มิลลิลิตรต่อกรัมของแข็งระเหย ชั่งข้าวโพดหมักร่วมกับมูลวัวมีปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นเฉลี่ย 20.09 มิลลิลิตรต่อกรัมของแข็งระเหย โดยค่าของแข็งระเหยของชั่งข้าวโพดมีค่าเท่ากับ 0.07 กรัม

4) ใต้นทานตะวันหมักร่วมกับหัวเชื้อจุลินทรีย์มีปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นเฉลี่ย 32.05 มิลลิลิตรต่อกรัมของแข็งระเหย ใต้นทานตะวันหมักร่วมกับมูลวัวมีปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นเฉลี่ย 290.66 มิลลิลิตรต่อกรัมของแข็งระเหย โดยค่าของแข็งระเหยของใต้นทานตะวันมีค่าเท่ากับ 0.03 กรัม

บทที่ 4

ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

4.1 ผลการวิเคราะห์เบื้องต้นของใบอ้อย

ใบอ้อยที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นใบอ้อยพันธุ์คูทอง 9 ซึ่งปรับปรุงและพัฒนาสายพันธุ์โดยนักวิจัยของศูนย์วิจัยและพัฒนาการเกษตรสุพรรณบุรี โดยเก็บรวบรวมมาจากไร่อ้อยที่จังหวัดกาญจนบุรี จากนั้นนำมาหั่นแบบหยาบ และทำการวิเคราะห์พารามิเตอร์เบื้องต้น แสดงดังตารางที่ 4.1-1 ทั้งนี้เพื่อนำมาใช้เปรียบเทียบกับค่าวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ ของใบอ้อยที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นทางความร้อนและทางชีวภาพ

ตารางที่ 4.1-1 ผลการวิเคราะห์เบื้องต้นของใบอ้อยที่ใช้ในการทดลอง

พารามิเตอร์	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
- ความชื้น (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	74.10	2.06
- ของแข็งทั้งหมด (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	25.90	2.06
- ของแข็งระเหย (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	23.67	6.09

องค์ประกอบทางเคมีของใบอ้อย

ในพืชต่างๆ ไปมีองค์ประกอบหลักทางเคมีที่สำคัญคือ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน โดยที่เซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส รวมกันเรียกว่า ไฮโดรเซลลูโลส สำหรับใบอ้อยที่ใช้ในงานวิจัยนี้ มีองค์ประกอบทางเคมีของใบอ้อยซึ่งทำการวิเคราะห์โดยกรมวิทยาศาสตร์บริการ แสดงดังตารางที่ 4.1-2

ตารางที่ 4.1-2 องค์ประกอบทางเคมีของใบอ้อย

องค์ประกอบทางเคมี	ร้อยละของน้ำหนักใบอ้อยอบแห้ง
ปริมาณไฮโดรเซลลูโลส	(65)
- อัลฟ่าเซลลูโลส	36.6
- เบต้าเซลลูโลส	12.4
- แกมมาเซลลูโลส	15.9
- เฮมิเซลลูโลส	0.1
ปริมาณลิกนิน	14.4
ปริมาณเถ้า	7.3
ปริมาณอื่นๆ เช่น สารแทรก เป็นต้น	13.3

ผลจากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของใบอ้อยซึ่งวิเคราะห์โดยกรมวิทยาศาสตร์บริการ พ.ศ.2553 พบว่าใบอ้อยที่ใช้ในงานวิจัยในครั้งนี้มีองค์ประกอบทางเคมีประกอบด้วย ปริมาณเซลลูโลสร้อยละ 64.9 ปริมาณเฮมิเซลลูโลสร้อยละ 0.1 ปริมาณลิกนินร้อยละ 14.4 ปริมาณเถ้าร้อยละ 7.3 และปริมาณสารอื่นๆ ร้อยละ 13.3 เห็นได้ว่าใบอ้อยมีปริมาณเซลลูโลสสูงที่สุด โดยหลักการแล้วพืชจะสะสมพลังงานจากดวงอาทิตย์ในรูปพลังงานเคมีของสารประกอบไฮโดรคาร์บอน ในเนื้อเยื่อพืชนั้นประกอบด้วยส่วนสำคัญ 3 ส่วน คือ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ซึ่ง “เซลลูโลส” นั้นคือพอลิเมอร์ของน้ำตาล ซึ่งต่อกันเป็นสายยาว ถ้าแยกเซลลูโลสออกเป็นส่วนๆ จะได้น้ำตาล จากนั้นนำมาหมักต่อก็สามารถใช้ผลิตเป็นก๊าซชีวภาพหรือเอทานอลได้ จากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของใบอ้อย พบว่า ใบอ้อยมีปริมาณเซลลูโลสที่สูง สามารถดึงออกมาใช้เป็นสารอาหารในระบบการหมักไร้อากาศได้

4.2 ผลการวิเคราะห์เบื้องต้นของหัวเชื้อจุลินทรีย์

ในงานวิจัยนี้ใช้มูลวัวเป็นหัวเชื้อจุลินทรีย์ โดยนำไปใช้ในการทดลองการบำบัดเบื้องต้นทางชีวภาพ (การทดลองที่ 1) การเติมให้แก่ระบบในการทดลองการหาคักยภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพ (การทดลองที่ 2) และใช้ในการทดลองการย่อยสลายแบบไร้อากาศในถังหมักไร้อากาศ (การทดลองที่ 3) มูลวัวที่ใช้ในงานวิจัยนี้ นำมาจากคณะสัตวแพทยศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยมีค่าพารามิเตอร์เบื้องต้นแสดงดังตารางที่ 4.2-1

ตารางที่ 4.2-1 ผลการวิเคราะห์เบื้องต้นของมูลวัวที่ใช้ในการทดลอง

พารามิเตอร์	ค่าที่วิเคราะห์ได้
- ความชื้น (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	47.73±6.80
- ของแข็งทั้งหมด (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	52.27±6.80
- ของแข็งระเหย (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	33.35±7.43
- ซีไอดี (มิลลิกรัมต่อลิตร)	1,670.67±655.90
- สภาพด่าง (มิลลิกรัมต่อลิตรแคลเซียมคาร์บอเนต)	532.00±58.21
- ความเป็นกรด-ด่าง	7.5
- ความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน (มิลลิโวลต์)	-294.80

สำหรับค่าซีไอดีของมูลวัวที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีค่าที่ค่อนข้างต่ำเนื่องจากว่า ทางผู้วิจัยได้เก็บตัวอย่างเฉพาะส่วนที่เป็นน้ำมาวิเคราะห์ อีกทั้งมูลวัวที่นำมาใช้มีลักษณะการผสมไม่เป็นเนื้อเดียวกัน จึงทำให้การเก็บตัวอย่างมาวิเคราะห์จึงมีค่าความแปรปรวนสูง โดยผู้วิจัยมีข้อเสนอแนะสำหรับผู้ที่จะนำมูลวัวไปใช้เป็นหัวเชื้อจุลินทรีย์ควรมีการทำให้มูลวัวเป็นเนื้อเดียวกัน และควรมีการเก็บตัวอย่างนำมาวิเคราะห์หลายๆ ค่าเพื่อป้องกันความแปรปรวนของค่าที่วิเคราะห์ได้

4.3 ผลการทดลองที่ 1 การบำบัดเบื้องต้นทางความร้อนและทางชีวภาพของใบอ้อย

การทดลองที่ 1 เป็นการทดลองการบำบัดเบื้องต้นทางความร้อนและทางชีวภาพของใบอ้อย เพื่อศึกษาผลการบำบัดเบื้องต้นดังกล่าว โดยพิจารณาจากความสามารถในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในใบอ้อยที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้น ซึ่งทำการวิเคราะห์ค่าซีไอดีละลายของตัวอย่างน้ำย่อยใบอ้อยที่ได้จากการบำบัดเบื้องต้น ประกอบด้วย 3 ชุดการทดลอง มีรายละเอียดดังนี้

ชุดที่ 1: การบำบัดเบื้องต้นทางความร้อนด้วยไอน้ำ ซึ่งใช้หม้อไอน้ำความดัน โดยนำใบอ้อยที่หั่นแบบหยาบขนาด 0.5-1.0 เซนติเมตร ใส่ลงในหม้อไอน้ำความดันที่ 1.5 บาร์ (22 psi) อุณหภูมิ 127 องศาเซลเซียส และกำหนดระยะเวลาในการบำบัดเบื้องต้นของตัวอย่างที่เวลา 15, 30 และ 60 นาที จากนั้นนำใบอ้อยและน้ำย่อยที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นดังกล่าวมาวิเคราะห์ค่าซีไอดีละลาย

ชุดที่ 2 : การบำบัดเบื้องต้นทางความร้อนด้วยน้ำร้อน ซึ่งใช้อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ โดยนำใบอ้อยที่หั่นแบบหยาบขนาด 0.5-1.0 เซนติเมตร ใส่ลงในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิที่อุณหภูมิประมาณ 90 องศาเซลเซียส และกำหนดระยะเวลาในการบำบัดเบื้องต้นของตัวอย่างที่เวลา 15, 30 และ 60 นาที จากนั้นนำใบอ้อยและน้ำย่อยที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นดังกล่าวมาวิเคราะห์ค่าซีไอดีละลาย

ชุดที่ 3: การบำบัดเบื้องต้นทางชีวภาพ ในการทดลองนี้ใช้มูลวัวเป็นหัวเชื้อในการบำบัดเบื้องต้นทางชีวภาพ โดยทำการผสมมูลวัวกับใบอ้อยในขวดทดลองรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร ที่อัตราส่วนผสมโดยน้ำหนักเปียก (wet weight) ของปริมาณมูลวัวต่อใบอ้อย 1:6, 1:3 และ 1:2 จากนั้นนำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าและกำหนดระยะเวลาในการบำบัดเบื้องต้นไว้ที่ 1, 3, 5 และ 7 วัน จากนั้นนำใบอ้อยที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นดังกล่าวมาวิเคราะห์ค่าซีไอดีละลาย

4.3.1 ผลการวิเคราะห์ค่าซีไอดีละลายของตัวอย่างในการทดลองที่ 1

ค่าซีไอดีละลายของน้ำย่อยใบอ้อยที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นทางความร้อนและทางชีวภาพ (เป็นของเหลวผสมที่ออกมาจากใบอ้อยหลังจากการบำบัดเบื้องต้น) ที่วิเคราะห์ได้แสดงดังตารางที่ 4.3.1-1 และรูปที่ 4.3.1-1 มีรายละเอียดดังนี้

คำอธิบายความหมายของตัวอักษรที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ประกอบด้วย

(1) SL 1 = Sugarcane Leaves ใบอ้อยที่ไม่ได้ผ่านการบำบัดเบื้องต้นที่ใช้การเปรียบเทียบกับวิธีการบำบัดเบื้องต้นทางความร้อน

(2) SL 2 = Sugarcane Leaves ใบอ้อยที่ไม่ได้ผ่านการบำบัดเบื้องต้นที่ใช้ในการเปรียบเทียบกับวิธีการบำบัดเบื้องต้นทางชีวภาพ

(3) SP = Steam Pretreatment (การบำบัดเบื้องต้นด้วยไอน้ำ)

(4) HP = Hot water Pretreatment (การบำบัดเบื้องต้นด้วยน้ำร้อน)

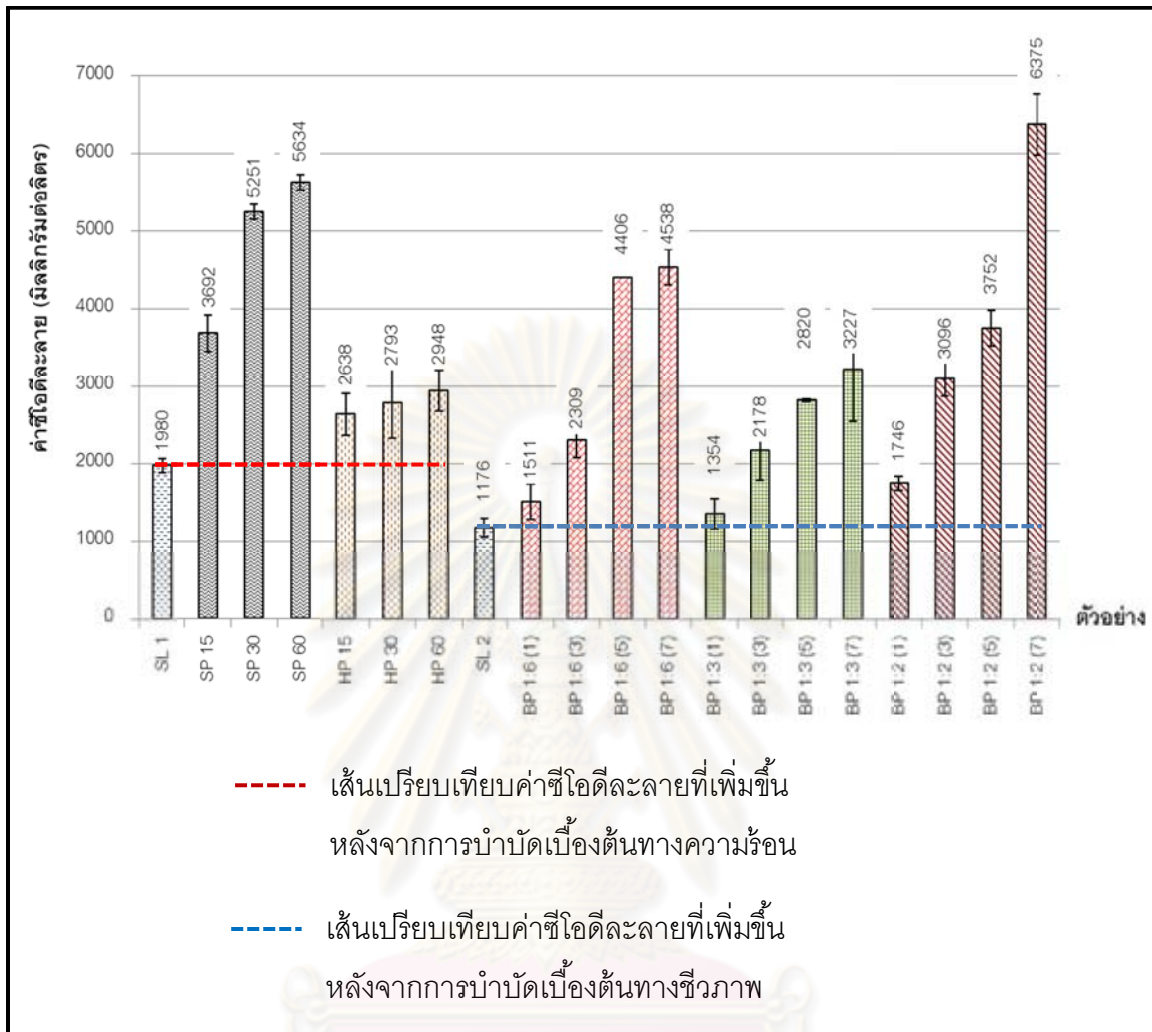
(5) BP = Biological Pretreatment (การบำบัดเบื้องต้นทางชีวภาพ)

ตารางที่ 4.3.1-1 ผลการวิเคราะห์ค่าซีไอที่ละลายของน้ำย่อยจากตัวอย่างใบอ้อยที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นทางความร้อนและทางชีวภาพ และใบอ้อยที่ไม่ได้ผ่านการบำบัดเบื้องต้น

ตัวอย่าง	ค่าพิสัยซีไอที่ละลาย (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ค่าซีไอที่ละลายเฉลี่ย (มิลลิกรัมต่อลิตร)
- SL 1	1,915 – 2,085	1,980±92
- SL 2	1,071 – 1,306	1,176±120
<u>การบำบัดเบื้องต้นทางความร้อน</u>		
- SP (15 นาที)	3,556 – 3,966	3,692±237
- SP (30 นาที)	5,197 – 5,361	5,251±95
- SP (60 นาที)	5,525 – 5,689	5,634±95
- HP (15 นาที)	2,327 – 2,793	2,638±269
- HP (30 นาที)	2,327 – 3,258	2,793±465
- HP (60 นาที)	2,793 – 3,258	2,948±269

ตารางที่ 4.3.1-1 (ต่อ)

ตัวอย่าง	ค่าพิสัยซีไอละลาย (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ค่าซีไอละลายเฉลี่ย (มิลลิกรัมต่อลิตร)
<u>การบำบัดเบื้องต้นทางชีวภาพที่อัตราส่วนมูลวัวต่อใบอ้อย 1:6</u>		
- BP 1:6 (วันที่ 1)	1,306 – 1,697	1,511±226
- BP 1:6 (วันที่ 3)	2,234 – 2,627	2,309±227
- BP 1:6 (วันที่ 5)	4,459 – 4,463	4,406±2
- BP 1:6 (วันที่ 7)	4,463 – 4,857	4,538±227
<u>การบำบัดเบื้องต้นทางชีวภาพที่อัตราส่วนมูลวัวต่อใบอ้อย 1:3</u>		
- BP 1:3 (วันที่ 1)	1,227 – 1,619	1,354±197
- BP 1:3 (วันที่ 3)	1,840 – 2,627	2,178±393
- BP 1:3 (วันที่ 5)	2,850 – 2,890	2,820±23
- BP 1:3 (วันที่ 7)	2,890 – 4,070	3,227±681
<u>การบำบัดเบื้องต้นทางชีวภาพที่อัตราส่วนมูลวัวต่อใบอ้อย 1:2</u>		
- BP 1:2 (วันที่ 1)	1,697 – 1,854	1,746±90
- BP 1:2 (วันที่ 3)	3,021 – 3,414	3,096±227
- BP 1:2 (วันที่ 5)	3,676 – 4,070	3,752±227
- BP 1:2 (วันที่ 7)	6,037 – 6,824	6,375±393



รูปที่ 4.3.1-1 ค่าซีโอดีละลายในอ้อยที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นทางความร้อนและทางชีวภาพ
 เปรียบเทียบกับในอ้อยที่ไม่ได้ผ่านการบำบัดเบื้องต้นของการทดลองที่ 1

ค่าซีโอดีละลายของในอ้อยที่ไม่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นมีค่าที่แตกต่างกัน เนื่องจาก ผู้วิจัยได้แบ่งการทดลองการบำบัดเบื้องต้นเป็น 2 ช่วง โดยในช่วงแรกเป็นการบำบัดเบื้องต้นทางความร้อน ซึ่งทำการวิเคราะห์ค่าซีโอดีละลายของในอ้อยที่ไม่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นในช่วงแรกมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ $1,980 \pm 92$ มิลลิกรัมต่อลิตร สำหรับในช่วงที่ 2 เป็นการทดลองการบำบัดเบื้องต้นทางชีวภาพ โดยทำการวิเคราะห์ค่าซีโอดีละลายของในอ้อยที่ไม่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นอีกครั้งเพื่อใช้สำหรับตัวอย่างในอ้อยที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นทางชีวภาพพบว่ามีค่าเฉลี่ยเท่ากับ $1,176 \pm 120$ มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งการทดลองที่ 1 เป็นในอ้อยที่นำมาใช้ชุดเดียวกันตลอดการทดลอง

การบำบัดเบื้องต้นทางความร้อน

- ค่าซีไอดีละลายของน้ำย่อยไบอ้อยที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นด้วยไอน้ำที่ระยะเวลาการบำบัดเบื้องต้น 15, 30 และ 60 นาที มีค่าซีไอดีละลายเฉลี่ยเท่ากับ $3,692 \pm 237$ มิลลิกรัมต่อลิตร $5,251 \pm 95$ มิลลิกรัมต่อลิตร และ $5,634 \pm 269$ มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ
- ค่าซีไอดีละลายของน้ำย่อยไบอ้อยที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นด้วยน้ำร้อนที่ระยะเวลาการบำบัดเบื้องต้น 15, 30 และ 60 นาที มีค่าซีไอดีละลายเฉลี่ยเท่ากับ $2,638 \pm 269$ มิลลิกรัมต่อลิตร $2,793 \pm 465$ มิลลิกรัมต่อลิตร และ $2,948 \pm 95$ มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ

จากผลการวิเคราะห์ค่าซีไอดีละลายของการบำบัดเบื้องต้นทางความร้อน พบว่าการบำบัดเบื้องต้นด้วยไอน้ำมีค่าซีไอดีละลายสูงกว่าการบำบัดเบื้องต้นด้วยน้ำร้อน เนื่องจากการบำบัดเบื้องต้นด้วยไอน้ำสามารถสลายโครงสร้างลิกโนเซลลูโลสได้ดีกว่าการบำบัดเบื้องต้นด้วยน้ำร้อน ซึ่งดูจากสารอินทรีย์ในไบอ้อยที่สลายออกมาในรูปของเหลวและทำการวัดค่าซีไอดีละลายของน้ำย่อยแล้วนำมาเปรียบเทียบ นอกจากนี้เมื่อวิเคราะห์ปัจจัยในเรื่องของระยะเวลาที่แตกต่างกันในการบำบัดเบื้องต้นเห็นได้ว่า ระยะเวลาในการบำบัดเบื้องต้นส่งผลต่อการสลายโครงสร้างลิกโนเซลลูโลสได้ดี (Sánchez และ Cardona, 2008) ในกระบวนการนี้จะใช้ไอน้ำที่ความดันสูงทำให้เกิดปฏิกิริยา autohydrolysis วิธีนี้จะทำในอุณหภูมิ 127 องศาเซลเซียส ภายใต้ระบบที่มีความดัน 1.5 บาร์ (22 psi) เป็นเวลา 15, 30 และ 60 นาที ก่อนที่วัตถุดิบจะกลับสู่ความดันบรรยากาศ เมื่อความดันลดลงอย่างรวดเร็วจะทำให้วัตถุดิบนั้นแตกออกเป็นชิ้นเล็กๆ ซึ่งเป็นการทำลายโครงสร้างลิกโนเซลลูโลส (Sun และ Cheng, 2002) ทำให้เฮมิเซลลูโลสเกิดการย่อยสลาย สามารถแยกเซลลูโลสออกจากเฮมิเซลลูโลสและลิกนินได้ ดังนั้นจึงเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของการย่อยสลายเซลลูโลส โดยปัจจัยที่ส่งผลต่อการปรับสภาพด้วยวิธี steam explosion คือ ระยะเวลาที่ใช้ อุณหภูมิ ขนาดของวัตถุดิบ และปริมาณความชื้น วิธีนี้เป็นหนึ่งในวิธีที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดสำหรับการปรับสภาพไม้เนื้อแข็งและวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร แต่มีประสิทธิภพน้อยในไม้เนื้ออ่อน (Sánchez และ Cardona, 2008)

สำหรับการบำบัดเบื้องต้นทางความร้อนด้วยน้ำร้อนมีค่าซีไอดีละลายที่น้อย เนื่องจากการบำบัดด้วยน้ำร้อนเป็นปฏิกิริยาการชะละลาย ซึ่งจะใช้น้ำร้อนทำหน้าที่เป็นตัวทำละลายและชะล้างสารละลายน้ำตาลที่เกิดจากการสลายตัวของเซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลส เนื่องจากความร้อน ซึ่งอาจเกิดปฏิกิริยาการชะละลายที่ยังไม่ทั่วถึง และ/หรือปฏิกิริยาการชะละลายมีประสิทธิภพในการสลายโครงสร้างลิกโนเซลลูโลสที่ยังไม่ดีพอ

การบำบัดเบื้องต้นทางชีวภาพ

- ค่าซีไอดีละลายของน้ำย่อยจากใบอ้อยที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นทางชีวภาพที่อัตราส่วนผสมปริมาณมูลวัวต่อใบอ้อย 1:6 ที่ระยะเวลาการบำบัดเบื้องต้น 1, 3, 5 และ 7 วัน พบว่ามีค่าซีไอดีละลายเฉลี่ยเท่ากับ $1,511 \pm 226$ มิลลิกรัมต่อลิตร $2,309 \pm 227$ มิลลิกรัมต่อลิตร $4,406 \pm 2$ มิลลิกรัมต่อลิตร และ $4,538 \pm 227$ มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ

- ค่าซีไอดีละลายของน้ำย่อยจากใบอ้อยที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นทางชีวภาพที่อัตราส่วนผสมปริมาณมูลวัวต่อใบอ้อย 1:3 ที่ระยะเวลาการบำบัดเบื้องต้น 1, 3, 5 และ 7 วัน พบว่ามีค่าซีไอดีละลายเฉลี่ยเท่ากับ $1,345 \pm 197$ มิลลิกรัมต่อลิตร $2,178 \pm 393$ มิลลิกรัมต่อลิตร $2,820 \pm 23$ มิลลิกรัมต่อลิตร และ $3,227 \pm 681$ มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ

- ค่าซีไอดีละลายของน้ำย่อยจากใบอ้อยที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นทางชีวภาพที่อัตราส่วนผสมปริมาณมูลวัวต่อใบอ้อย 1:2 ที่ระยะเวลาการบำบัดเบื้องต้น 1, 3, 5 และ 7 วัน พบว่ามีค่าซีไอดีละลายเฉลี่ยเท่ากับ $1,746 \pm 90$ มิลลิกรัมต่อลิตร $3,096 \pm 227$ มิลลิกรัมต่อลิตร $3,752 \pm 227$ มิลลิกรัมต่อลิตร และ $6,375 \pm 393$ มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ

จากผลการวิเคราะห์ค่าซีไอดีละลายของการบำบัดเบื้องต้นทางชีวภาพพบว่า ที่อัตราส่วนปริมาณมูลวัวต่อใบอ้อย 1:2 มีค่าซีไอดีละลายมากกว่าที่อัตราส่วน 1:3 และ 1:6 เนื่องจากปริมาณสัดส่วนระหว่างใบอ้อยกับมูลวัวที่ใส่ลงไป ที่อัตราส่วน 1:2 จะมีโอกาสการสัมผัสระหว่างใบอ้อยและหัวเชื้อได้ดีกว่า จึงทำให้จุลินทรีย์ในหัวเชื้อสามารถเข้าไปย่อยสลายสารอินทรีย์ในใบอ้อยได้อย่างมีประสิทธิภาพ (ค่าซีไอดีละลายที่วิเคราะห์ได้จากการทดลองการบำบัดเบื้องต้นทางชีวภาพได้นำค่าซีไอดีละลายของน้ำย่อยจากใบอ้อยที่ผ่านกระบวนการบำบัดเบื้องต้นลบกับค่าซีไอดีละลายของมูลวัว ทั้งนี้เพื่อต้องการดูค่าซีไอดีละลายจริงที่ได้จากการบำบัดเบื้องต้นทางชีวภาพที่อัตราส่วนต่างๆ) อย่างไรก็ตาม ที่อัตราส่วนที่มีปริมาณมูลวัวที่ใส่ลงไปมากขึ้นควรที่จะมีค่าซีไอดีละลายที่เพิ่มมากขึ้น แต่เมื่อนำค่าซีไอดีละลายที่วิเคราะห์ได้จากการทดลองที่ 1 ของแต่ละอัตราส่วนที่ระยะเวลาการบำบัดเบื้องต้นที่เท่ากันมาทำการเปรียบเทียบ พบว่า ที่อัตราส่วน 1:6 มากกว่าอัตราส่วน 1:3 และมากกว่าอัตราส่วน 1:2 ในบางค่า (ดังตารางที่ 4.3.1-1 และรูปที่ 4.3.1-1) เพราะว่าในขั้นตอนการเก็บตัวอย่างเพื่อนำมาใช้วิเคราะห์ซีไอดีละลายนั้นจะมีมูลวัวติดผสมกับใบอ้อยมาด้วย เพราะในระหว่างขั้นตอนการบำบัดเบื้องต้นทางชีวภาพใบอ้อยกับมูลวัวมีการสัมผัสกันตลอดเวลา จึงทำให้การวิเคราะห์ค่าซีไอดีละลายสูงกว่าความเป็นจริงได้

จากผลการวิเคราะห์ในข้างต้นเมื่อนำค่าซีไอดีละลายของน้ำย่อยไบอ้อยที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นมาเปรียบเทียบกับค่าซีไอดีละลายของน้ำย่อยไบอ้อยที่ไม่ได้ผ่านการบำบัดเบื้องต้นพบว่าไบอ้อยที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นแล้วจะมีค่าซีไอดีละลายที่มากกว่าไบอ้อยที่ไม่ได้ผ่านการบำบัดเบื้องต้น โดยวิธีการบำบัดเบื้องต้นทางความร้อนด้วยไอน้ำที่ระยะเวลาการบำบัดเบื้องต้น 60 นาที มีค่าซีไอดีละลายสูงที่สุดคือ $5,634 \pm 95$ มิลลิกรัมต่อลิตร และวิธีการบำบัดเบื้องต้นทางชีวภาพที่อัตราส่วน 1:2 ระยะเวลาการบำบัดเบื้องต้น 7 วัน มีค่าซีไอดีละลายสูงที่สุดคือ $6,375 \pm 393$ มิลลิกรัมต่อลิตร เห็นได้ว่าเวลาที่ใช้ในการบำบัดเบื้องต้นมีผลต่อการย่อยสลายสารอินทรีย์ในไบอ้อยที่ออกมาในรูปแบบของเหลว ทั้งการบำบัดเบื้องต้นทางความร้อนและทางชีวภาพ สำหรับค่าซีไอดีละลายที่อัตราส่วนผสมต่างๆ ระหว่างมูลวัวต่อไบอ้อยในการบำบัดเบื้องต้นทางชีวภาพนั้น อาจเป็นตัวชี้วัดถึงประสิทธิภาพในการบำบัดเบื้องต้นที่ยังไม่ดีพอ เนื่องจากมีปัจจัยในขั้นตอนการเก็บตัวอย่างดังที่กล่าวในข้างต้น ดังนั้นจึงควรดูค่าปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจากการทดลองที่ 2 ดังที่จะกล่าวต่อไป เพื่อใช้เป็นตัวชี้วัดถึงผลของการบำบัดเบื้องต้นทั้งทางความร้อนและทางชีวภาพที่มีผลต่อการย่อยสลายในระบบไร้อากาศ อย่างไรก็ตามค่าซีไอดีละลายของน้ำย่อยไบอ้อยที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นทางชีวภาพที่แต่ละอัตราส่วนนั้น ยังมีค่าที่มากกว่าค่าซีไอดีละลายของน้ำย่อยไบอ้อยที่ไม่ได้ผ่านการบำบัดเบื้องต้น

4.3.2 ค่าของแข็งทั้งหมด ค่าความชื้น และของแข็งระเหยในไบอ้อยที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้น

ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางด้านเคมีของไบอ้อยที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นทางความร้อนและทางชีวภาพ มีรายละเอียดดังนี้

- ไบอ้อยที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นด้วยไอน้ำมีค่าของแข็งทั้งหมดอยู่ในช่วงร้อยละ 37.84-38.45 ความชื้นมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 61.55-62.16 และค่าของแข็งระเหยมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 35.30-36.34

- ไบอ้อยที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นด้วยน้ำร้อนมีค่าของแข็งทั้งหมดอยู่ในช่วงร้อยละ 20.09-20.42 ความชื้นมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 79.58-79.91 และค่าของแข็งระเหยมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 18.70-19.25

- ไบโอดีที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นทางชีวภาพที่อัตราส่วนต่างๆ มีค่าของแข็งทั้งหมดอยู่ในช่วงร้อยละ 14.70-21.86 ความชื้นมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 78.14-85.30 และค่าของแข็งระเหยมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 13.31-20.58

สำหรับไบโอดีที่ไม่ได้ผ่านการบำบัดเบื้องต้นมีค่าของแข็งทั้งหมดเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 25.90 ± 2.06 ความชื้นมีค่าเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 74.10 ± 2.06 สำหรับ ค่าของแข็งระเหยของไบโอดีที่ไม่ได้ผ่านการบำบัดเบื้องต้นมีค่าเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 23.67 ± 6.09 จากผลการวิเคราะห์ดังกล่าว เห็นได้ว่าค่าของแข็งระเหยของไบโอดีที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นทางความร้อนและทางชีวภาพแล้วมีค่าที่เพิ่มขึ้น ซึ่งสามารถทำให้ย่อยสลายได้ดีขึ้นด้วย (ค่าที่วิเคราะห์ได้แสดงดังตารางที่ ข-1 ในภาคผนวก ข)



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.4 ผลการทดลองที่ 2 การทดลองหาศักยภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพของใบอ้อยที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นทางความร้อนและทางชีวภาพ

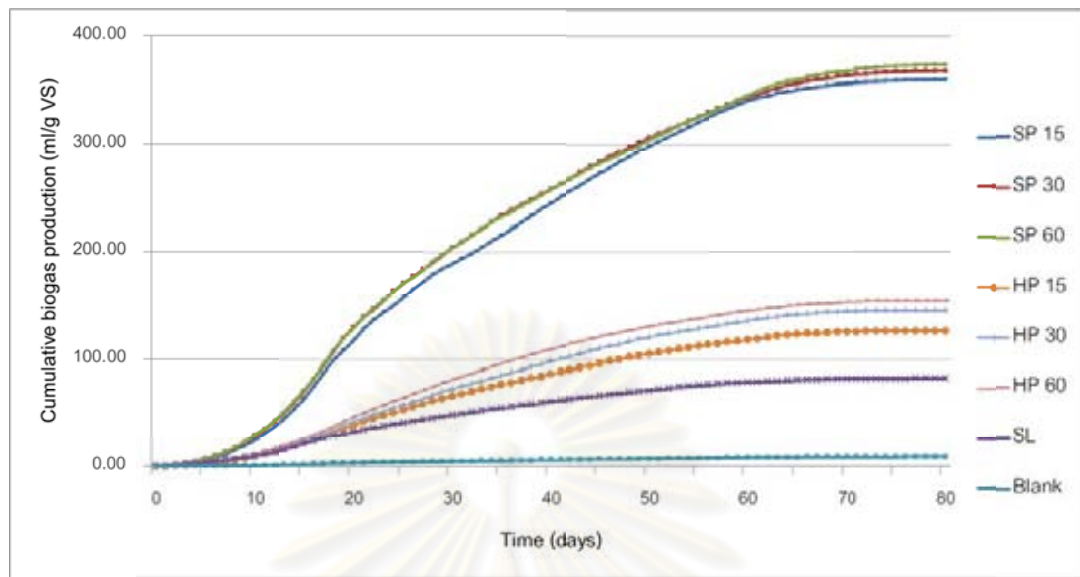
เป็นการทดลองเพื่อหาศักยภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพของใบอ้อยที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นทางความร้อนและทางชีวภาพ และใบอ้อยที่ไม่ผ่านการบำบัดเบื้องต้น โดยใช้วิธีแบบไร้อากาศแสดงในรูปของปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นทั้งหมดต่อกรัมของแข็งระเหย (มิลลิลิตรต่อกรัมของแข็งระเหย)

4.4.1 ผลการวัดปริมาณก๊าซชีวภาพในการทดลองที่ 2

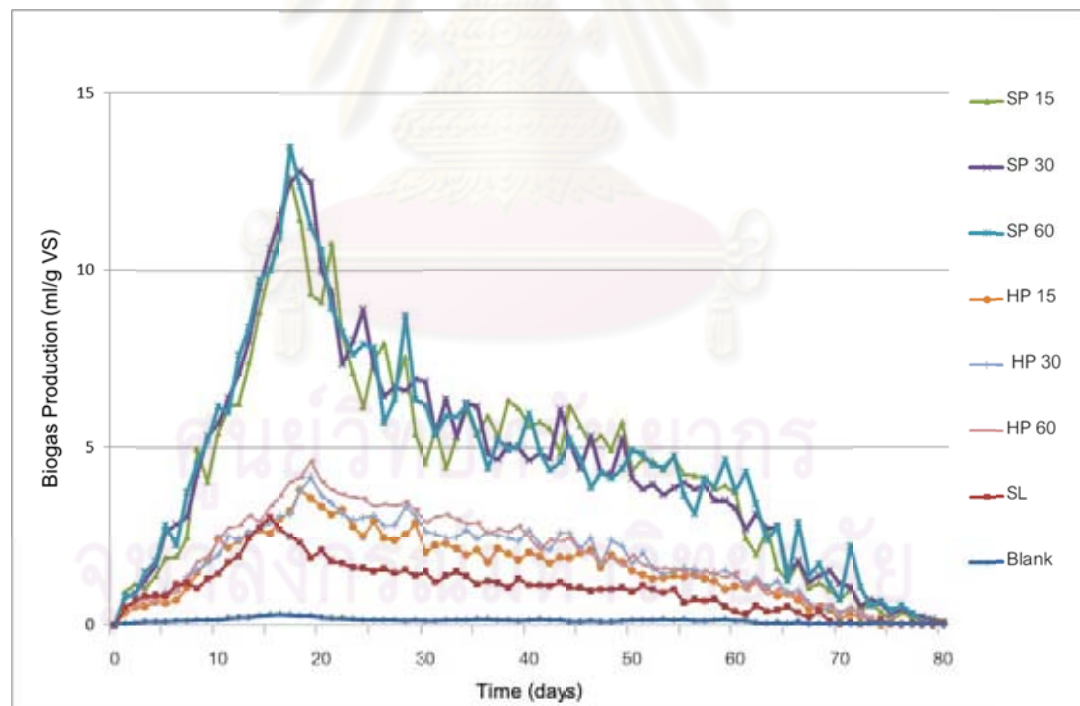
ในการทดลองนี้ได้ทำการวัดปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นของใบอ้อยที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นด้วยวิธีการทำ Biochemical Methane Potential (BMP) โดยนำตัวอย่างจากการทดลองที่ 1 มาหมักแบบไร้อากาศในขวดซีรัมขนาด 125 มิลลิลิตร เพื่อวัดหาปริมาณการผลิตก๊าซชีวภาพ ประกอบด้วยตัวอย่างจากการบำบัดเบื้องต้นทางความร้อน และการบำบัดเบื้องต้นทางชีวภาพ โดยจะทำการวัดปริมาณก๊าซชีวภาพจนกว่าไม่เกิดก๊าซชีวภาพหรือเกิดน้อยมาก รวมแล้วเป็นระยะเวลาประมาณ 80 วัน โดยปริมาณก๊าซชีวภาพของใบอ้อยที่ไม่ได้ผ่านการบำบัดเบื้องต้นมีปริมาณก๊าซชีวภาพรวมสูงสุดเท่ากับ 82.57 มิลลิลิตรต่อกรัมของแข็งระเหย ทั้งนี้เพื่อนำไปเปรียบเทียบกับปริมาณก๊าซชีวภาพจากใบอ้อยที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้น สำหรับปริมาณก๊าซชีวภาพของใบอ้อยที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นที่วัดได้มีรายละเอียดดังนี้ (ปริมาณก๊าซชีวภาพที่วัดได้แสดงดังตารางที่ ข-3 ในภาคผนวก ข)

การบำบัดเบื้องต้นทางความร้อน

ปริมาณก๊าซชีวภาพของใบอ้อยและน้ำอ้อยใบอ้อยที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นด้วยไอน้ำ ที่ระยะเวลา 15, 30 และ 60 นาที พบว่า มีปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมรวมเท่ากับ 359.63, 367.98 และ 373.46 มิลลิลิตรต่อกรัมของแข็งระเหย ตามลำดับ (แสดงดังรูปที่ 4.4.1-1) ซึ่งมีปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพที่ใกล้เคียงกัน โดยการบำบัดเบื้องต้นที่ระยะเวลา 60 นาที มีปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพรวมสูงสุด สำหรับปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดรายวันสูงสุดของใบอ้อยและน้ำอ้อยใบอ้อยที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นด้วยไอน้ำ ที่ระยะเวลา 15, 30 และ 60 นาที เท่ากับ 12.64, 12.81 และ 13.49 มิลลิลิตรต่อกรัมของแข็งระเหยต่อวัน ตามลำดับ (แสดงดังรูปที่ 4.4.1-2)



รูปที่ 4.4.1-1 ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมของการหมักไบอ้อยที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นด้วยไอน้ำ และน้ำร้อนในการทดลองที่ 2



รูปที่ 4.4.1-2 ปริมาณก๊าซชีวภาพรายวันของการหมักไบอ้อยที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นด้วยไอน้ำ และน้ำร้อนในการทดลองที่ 2

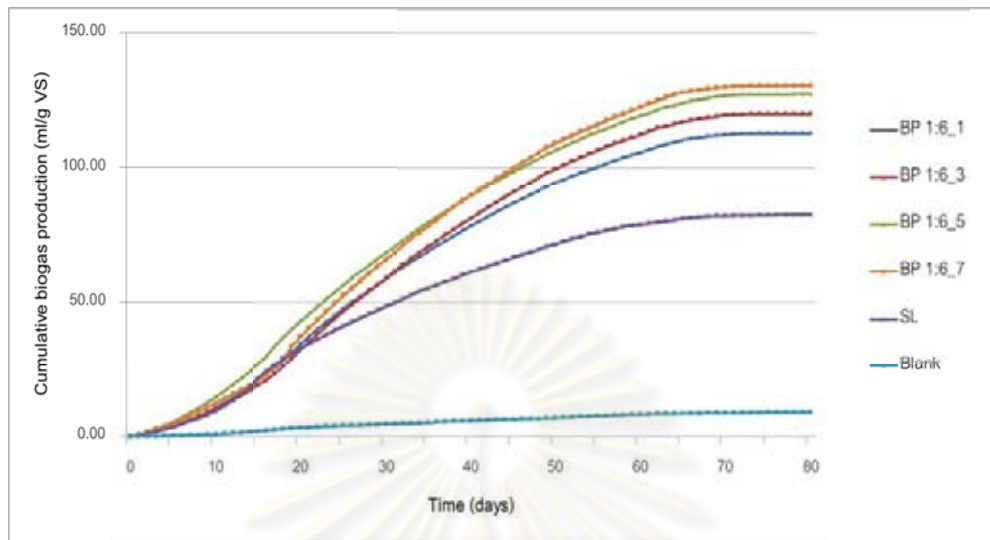
ปริมาณก๊าซชีวภาพของไบอ้อยและน้ำย่อยไบอ้อยที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นด้วยน้ำร้อน ที่ระยะเวลา 15, 30 และ 60 นาที พบว่า มีปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมรวมเท่ากับ 125.85, 144.98 และ 154.05 มิลลิลิตรต่อกรัมของแข็งระเหย ตามลำดับ (ดังรูปที่ 4.4.1-1) โดยการบำบัดเบื้องต้นที่ระยะเวลา 60 นาที มีปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพสูงสุด สำหรับปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดรายวันสูงสุดของไบอ้อยและน้ำย่อยไบอ้อยที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นด้วยน้ำร้อน ที่ระยะเวลา 15, 30 และ 60 นาที เท่ากับ 3.83, 4.16 และ 4.64 มิลลิลิตรต่อกรัมของแข็งระเหยต่อวัน ตามลำดับ (ดังรูปที่ 4.4.1-2)

จากผลการวัดปริมาณก๊าซชีวภาพของไบอ้อยและน้ำย่อยไบอ้อยที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นด้วยไอน้ำ และน้ำร้อนพบว่า ระยะเวลาในการบำบัดเบื้องต้น ที่ 15, 30 และ 60 นาที มีผลทำให้ปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาที่ทำการบำบัดเบื้องต้นด้วย และเมื่อทำการเปรียบเทียบกับปริมาณก๊าซชีวภาพระหว่างไบอ้อยที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นกับไบอ้อยที่ไม่ได้ผ่านการบำบัดเบื้องต้น พบว่า ไบอ้อยที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นด้วยไอน้ำและน้ำร้อนจะมีปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมที่มากกว่าไบอ้อยที่ไม่ได้ผ่านการบำบัดเบื้องต้น

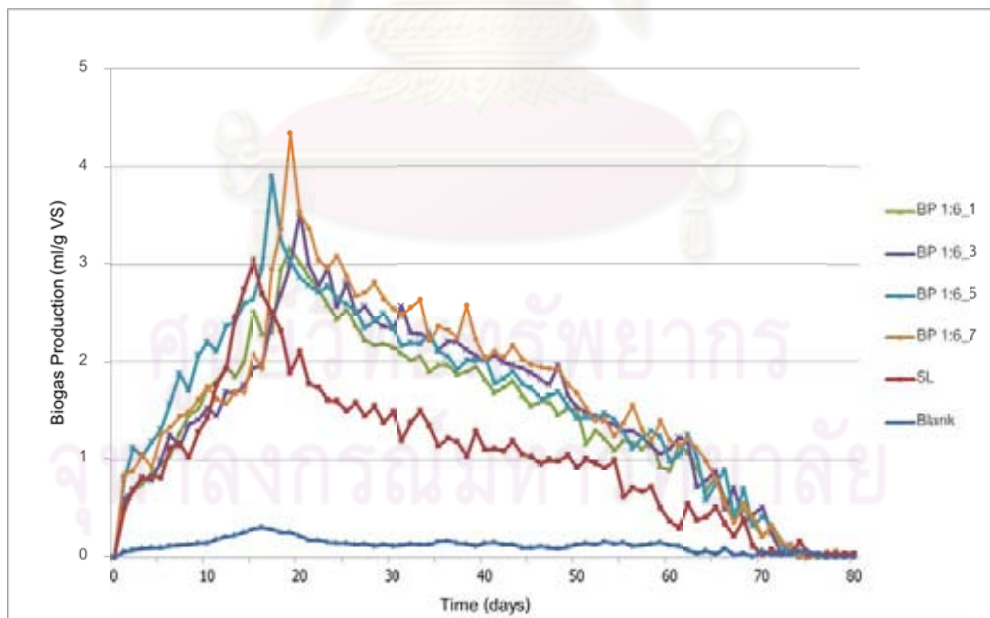
การบำบัดเบื้องต้นทางชีวภาพ

การบำบัดเบื้องต้นทางชีวภาพในงานวิจัยนี้ ทำโดยการนำมูลวัวผสมกับไบอ้อยที่อัตราส่วนที่กำหนด คือ 1:6, 1:3 และ 1:2 โดยการกำหนดอัตราส่วนดังกล่าวเพื่อต้องการวิเคราะห์ผลของปริมาณมูลวัวที่มีต่อการบำบัดเบื้องต้นทางชีวภาพในเชิงของปริมาณ เช่น การใส่มูลวัวลงไป 1 ส่วนต่อไบอ้อย 6 ส่วน จะใช้ปริมาณมูลวัวที่น้อยกว่าอัตราส่วนมูลวัวต่อไบอ้อย 1:3 และ 1:2 ตามลำดับ จากนั้นนำมาเขย่าผสมกันด้วยเครื่องเขย่า ซึ่งจะแบ่งตัวอย่างตามระยะเวลาในการเขย่าผสมเป็นจำนวน 4 ตัวอย่าง ประกอบด้วยที่ระยะเวลา 1, 3, 5 และ 7 วัน ทั้งนี้เพื่อต้องการวิเคราะห์ผลของเวลาที่มีผลต่อการบำบัดเบื้องต้นในเชิงของระยะเวลาที่ใช้ สำหรับปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพทั้งที่เกิดแบบสะสมและเกิดต่อวันในการทดลองที่ 2 มีรายละเอียดดังนี้

- ปริมาณก๊าซชีวภาพของไบอ้อยและน้ำย่อยไบอ้อยที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นทางชีวภาพที่อัตราส่วนผสมปริมาณมูลวัวต่อไบอ้อย 1:6 โดยมีระยะเวลาการบำบัดเบื้องต้นที่ 1, 3, 5 และ 7 วัน พบว่า มีปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมรวมเท่ากับ 112.99, 120.11, 127.31 และ 130.65 มิลลิลิตรต่อกรัมของแข็งระเหย ตามลำดับ (แสดงดังรูปที่ 4.4.1-3) สำหรับปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดรายวันสูงสุดของไบอ้อยและน้ำย่อยไบอ้อยที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นทางชีวภาพที่อัตราส่วนผสมปริมาณมูลวัวต่อไบอ้อย 1:6 เท่ากับ 3.17, 3.52, 3.90 และ 4.34 มิลลิลิตรต่อกรัมของแข็งระเหยต่อวัน ตามลำดับ (แสดงดังรูปที่ 4.4.1-4)

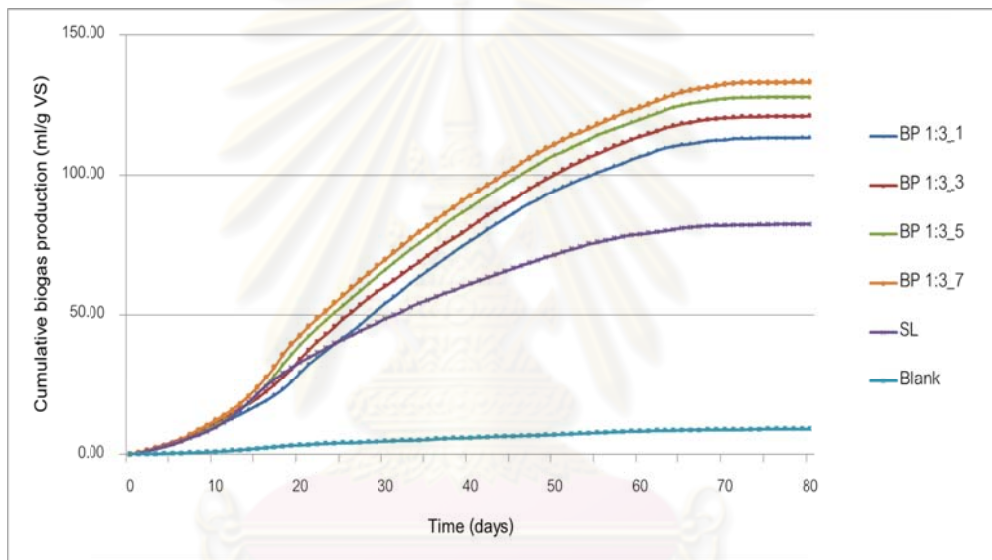


รูปที่ 4.4.1-3 ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมของไบโอดีที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นทางชีวภาพที่อัตราส่วนผสมปริมาณมูลวัวต่อไบโอดี 1:6



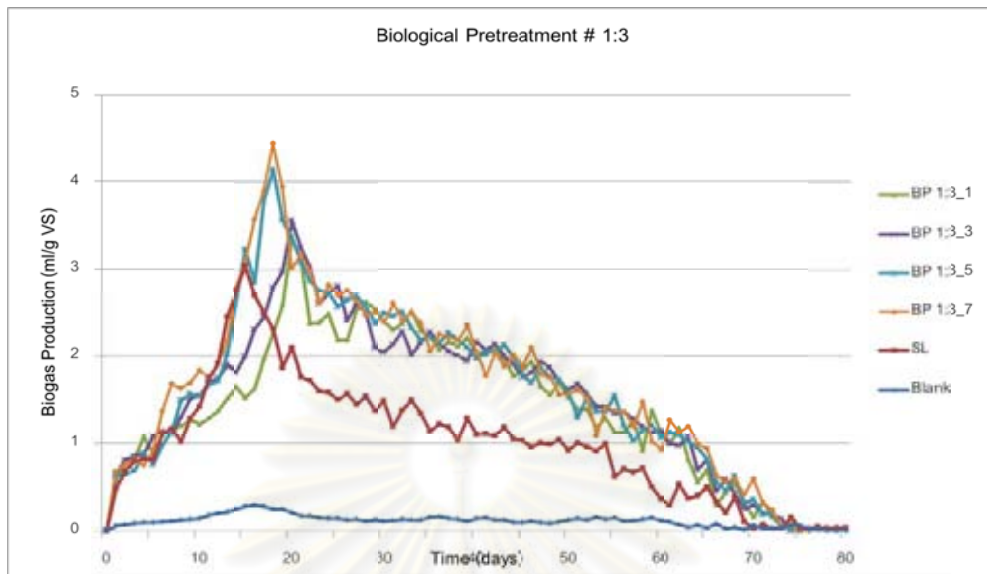
รูปที่ 4.4.1-4 ปริมาณก๊าซชีวภาพรายวันของไบโอดีที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นทางชีวภาพที่อัตราส่วนผสมปริมาณมูลวัวต่อไบโอดี 1:6

- ปริมาณก๊าซชีวภาพของไบโอดีปและน้ำย่อยไบโอดีปที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นที่อัตราส่วนผสมปริมาณมูลวัวต่อไบโอดีป 1:3 โดยมีระยะเวลาการบำบัดเบื้องต้นที่ 1, 3, 5 และ 7 วัน พบว่า มีปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมรวมเท่ากับ 113.45, 121.09, 127.93 และ 133.20 มิลลิลิตรต่อกรัมของแข็งระเหย ตามลำดับ (แสดงดังรูปที่ 4.4.1-5) สำหรับปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดรายวันสูงสุดของไบโอดีปและน้ำย่อยไบโอดีปที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นทางชีวภาพที่อัตราส่วนผสมปริมาณมูลวัวต่อไบโอดีป 1:3 เท่ากับ 3.37, 3.56, 4.41 และ 4.44 มิลลิลิตรต่อกรัมของแข็งระเหยต่อวัน ตามลำดับ (แสดงดังรูปที่ 4.4.1-6)



รูปที่ 4.4.1-5 ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมของไบโอดีปที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นทางชีวภาพที่อัตราส่วนผสมปริมาณมูลวัวต่อไบโอดีป 1:3

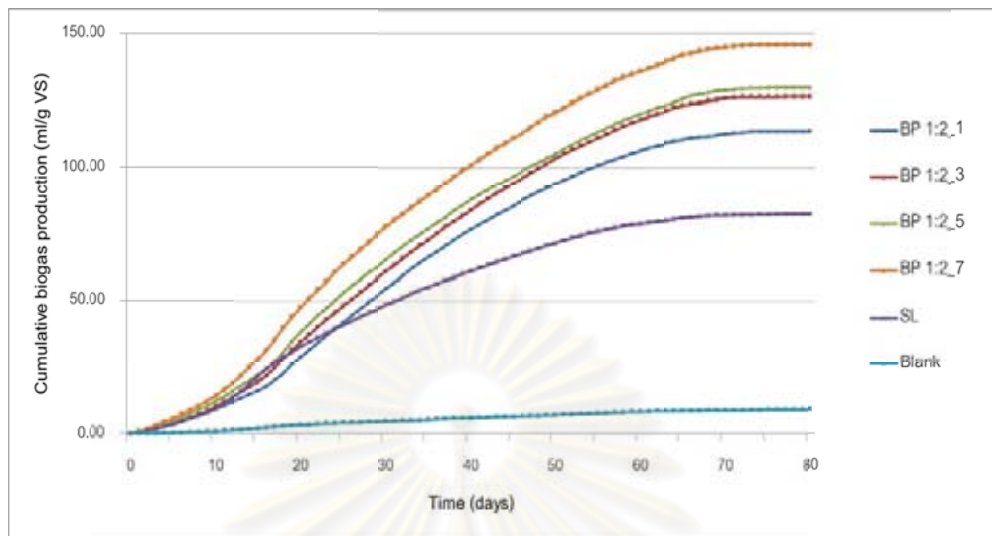
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



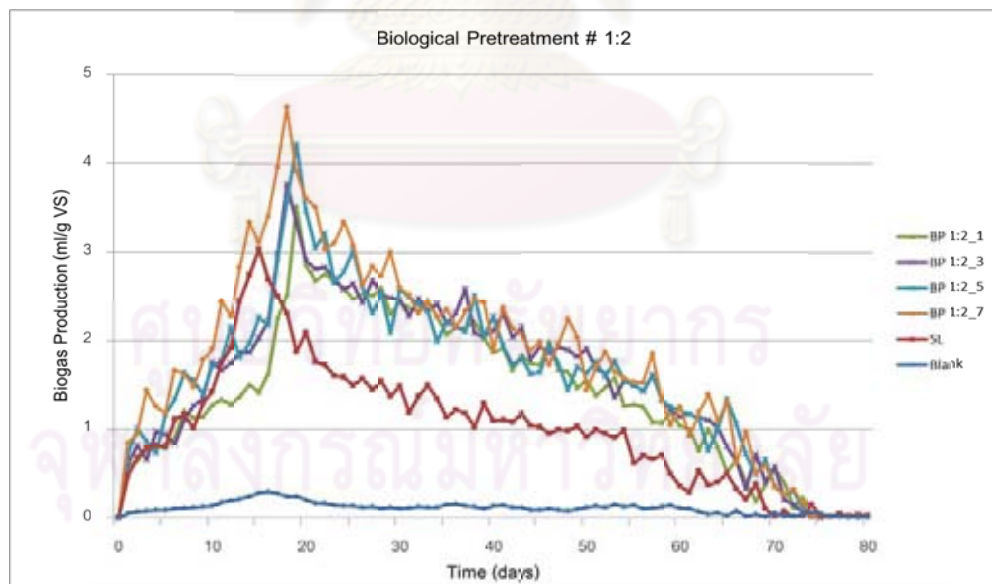
รูปที่ 4.4.1-6 ปริมาณก๊าซชีวภาพรายวันของไบโอดีปที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นทางชีวภาพที่อัตราส่วนผสมปริมาณมูลวัวต่อไบโอดีป 1:3

ปริมาณก๊าซชีวภาพของไบโอดีปและน้ำย่อยไบโอดีปที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นที่อัตราส่วนผสมปริมาณมูลวัวต่อไบโอดีป 1:2 โดยมีระยะเวลาการบำบัดเบื้องต้นที่ 1, 3, 5 และ 7 วัน พบว่า มีปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมรวมเท่ากับ 113.70, 126.56, 129.86 และ 146.03 มิลลิลิตรต่อกรัมของแข็งระเหย ตามลำดับ (แสดงดังรูปที่ 4.4.1-7) สำหรับปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดรายวันสูงสุดของไบโอดีปและน้ำย่อยไบโอดีปที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นทางชีวภาพที่อัตราส่วนผสมปริมาณมูลวัวต่อไบโอดีป 1:2 เท่ากับ 3.52, 3.77, 4.22 และ 4.64 มิลลิลิตรต่อกรัมของแข็งระเหยต่อวัน ตามลำดับ (แสดงดังรูปที่ 4.4.1-8)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



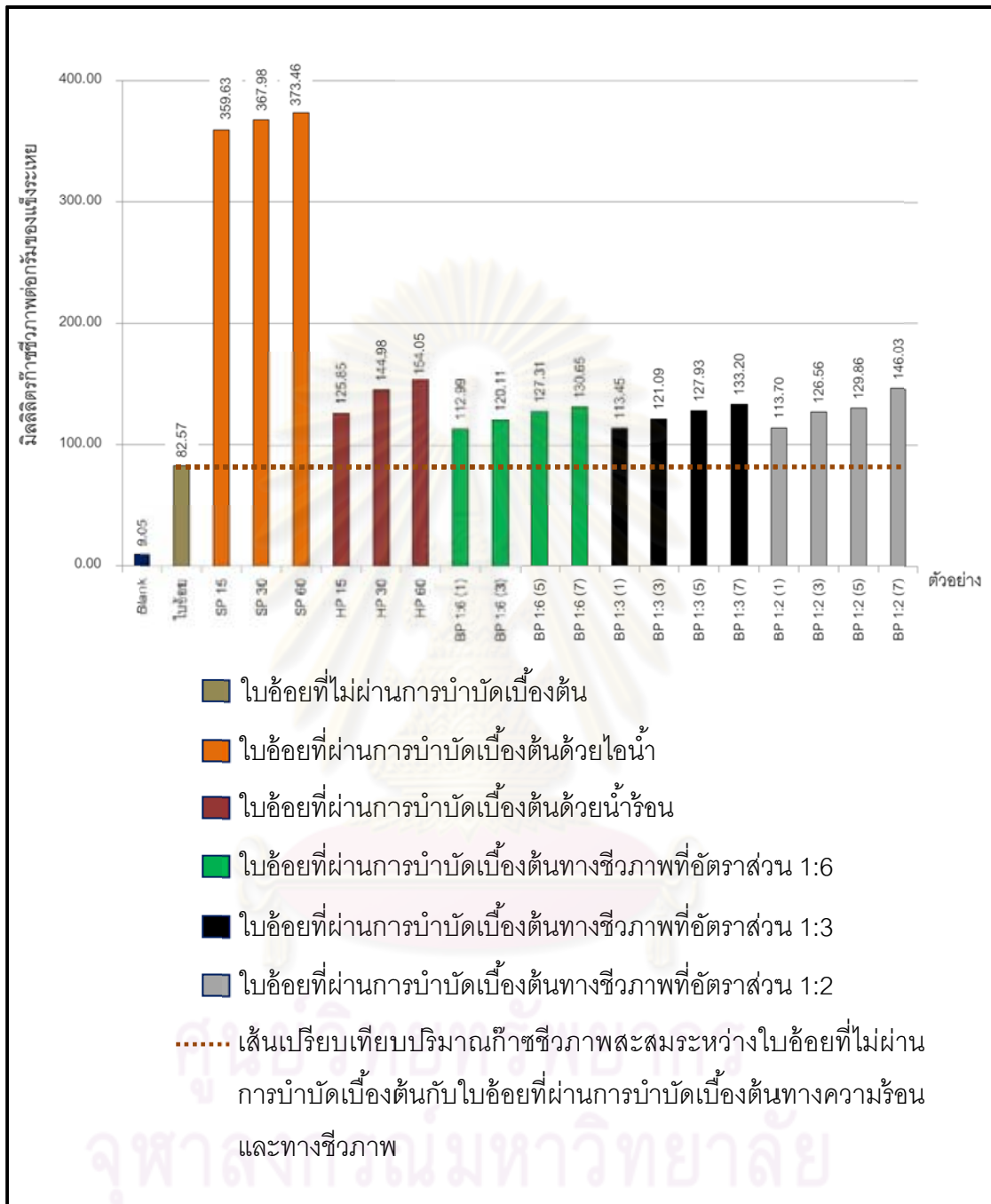
รูปที่ 4.4.1-7 ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมของไบโอดีที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นทางชีวภาพที่อัตราส่วนผสมปริมาณมูลวัวต่อไบโอดี 1:2



รูปที่ 4.4.1-8 ปริมาณก๊าซชีวภาพรายวันของไบโอดีที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นทางชีวภาพที่อัตราส่วนผสมปริมาณมูลวัวต่อไบโอดี 1:2

จากผลการวัดปริมาณก๊าซชีวภาพของไบโอดีปและน้ำย่อยไบโอดีปที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นทางชีวภาพของตัวอย่างต่างๆ มีปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพที่ใกล้เคียงกัน โดยที่อัตราส่วนมูลวัวต่อไบโอดีป 1:2 มีปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพสูงที่สุด คือ 146.03 มิลลิลิตรต่อกรัมของแข็งระเหย โดยที่ระยะเวลาในการบำบัดเบื้องต้นมากขึ้น จะทำให้ปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพเพิ่มมากขึ้นด้วย

เมื่อทำการเปรียบเทียบปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมที่เกิดจากการทดลองที่ 2 แสดงดังรูปที่ 4.4.1-9 พบว่าไบโอดีปที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นทางความร้อนด้วยไอน้ำมีประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพได้ดีกว่าการบำบัดเบื้องต้นทางความร้อนด้วยน้ำร้อน และการบำบัดเบื้องต้นทางชีวภาพ โดยการบำบัดเบื้องต้นด้วยไอน้ำมีปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมสูงสุดเท่ากับ 373.56 มิลลิลิตรต่อกรัมของแข็งระเหย การบำบัดเบื้องต้นด้วยน้ำร้อนมีปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมสูงสุดเท่ากับ 154.05 มิลลิลิตรต่อกรัมของแข็งระเหย และการบำบัดเบื้องต้นทางชีวภาพมีปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมเท่ากับ 146.03 มิลลิลิตรต่อกรัมของแข็งระเหย จะเห็นว่าปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจากการบำบัดเบื้องต้นทางชีวภาพจะมีประสิทธิภาพน้อยกว่าการบำบัดเบื้องต้นทางความร้อน เนื่องจากว่าการบำบัดเบื้องต้นทางชีวภาพต้องใช้ระยะเวลาในการย่อยสลายลิกนินที่ยาวนาน (Silverstein, 2004) อาจทำให้โครงสร้างของลิกนินเซลล์ลูโลสยังไม่แตกสลาย จึงทำให้ไม่สามารถเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างเซลล์ลูโลสซึ่งเป็นแหล่งพลังงานกับจุลินทรีย์ได้ดีพอ จึงส่งผลให้ผลิตก๊าซชีวภาพออกมาได้น้อย ถึงแม้ว่าในวิธีการบำบัดเบื้องต้นทางชีวภาพจะให้ค่าซีไอดีละลายที่สูงกว่าการบำบัดเบื้องต้นทางความร้อน ทั้งนี้อาจเป็นเพราะในขั้นตอนการวิเคราะห์ซีไอดีละลายนั้นจะมีปริมาณมูลวัวติดผลกับไบโอดีปมาด้วย เพราะในระหว่างขั้นตอนการบำบัดเบื้องต้นไบโอดีปกับมูลวัวมีการสัมผัสกันตลอดเวลา จึงทำให้การวิเคราะห์ค่าซีไอดีละลายสูงกว่าความเป็นจริงได้

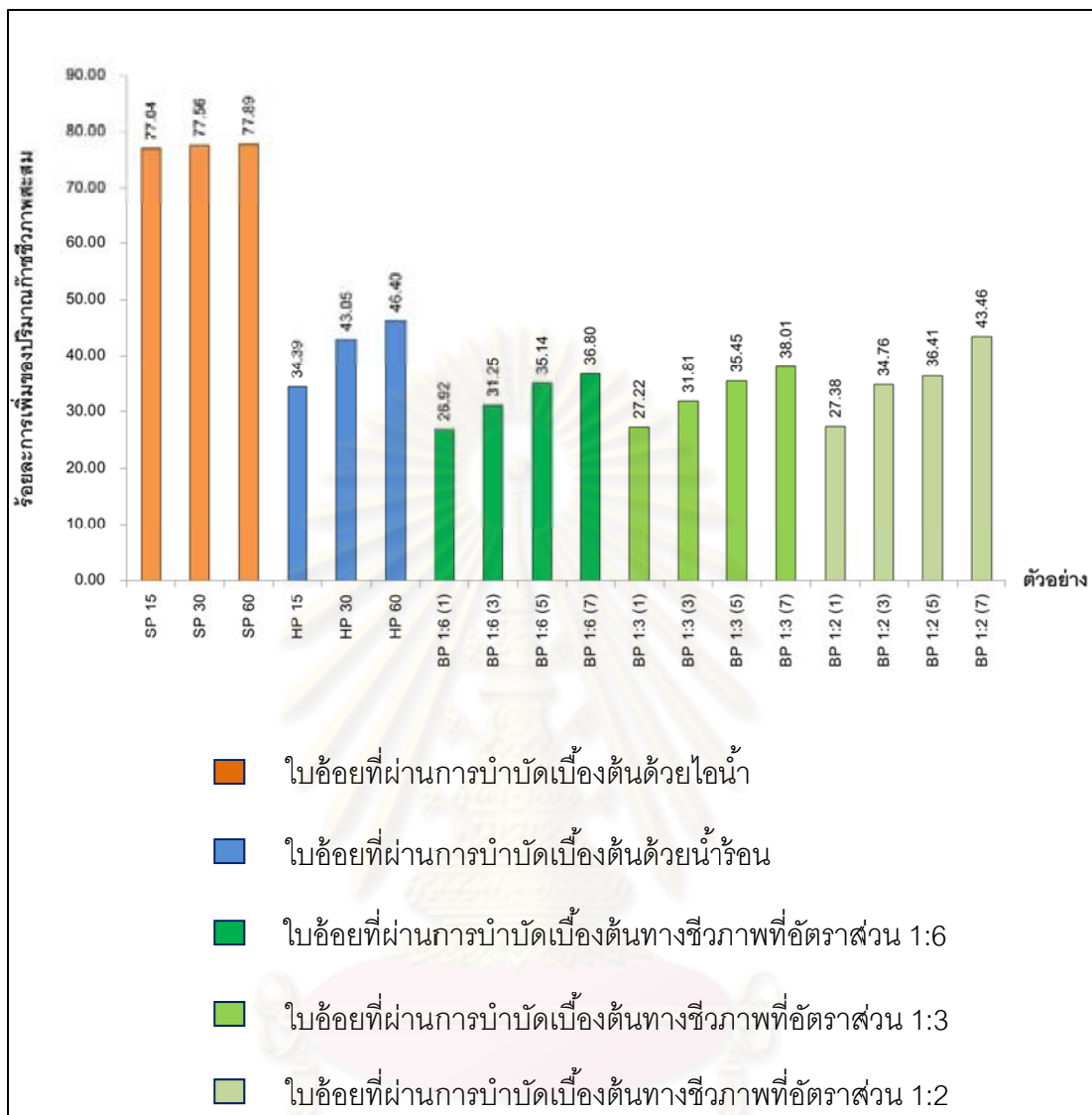


รูปที่ 4.4.1-9 กราฟเปรียบเทียบปริมาณก๊าศชีวภาพที่เกิดสะสมระหว่างไบโอดีที่ไม่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นและไบโอดีที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นทางความร้อนและทางชีวภาพ

จากรูปที่ 4.4.1-9 พบว่าก๊าซชีวภาพสะสมของไบอ้อยที่ไม่ผ่านการบำบัดเบื้องต้น มีปริมาณเท่ากับ 82.57 มิลลิลิตรต่อกรัมของแข็งระเหย สำหรับปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมของตัวอย่างไบอ้อยที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นด้วยไอน้ำมีปริมาณสูงสุด โดยที่ตัวอย่าง SP 15, SP 30 และ SP 60 มีปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมเท่ากับ 359.63, 367.98 และ 373.46 มิลลิลิตรต่อกรัมของแข็งระเหย ตามลำดับ มีร้อยละการเพิ่มของปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมเท่ากับร้อยละ 77.04, 77.56 และ 77.89 ตามลำดับ (โดยเปรียบเทียบกับปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมของตัวอย่างไบอ้อยที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้น) แสดงดังรูปที่ 4.4.1-10 เห็นได้ว่าปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมที่ระยะเวลาการหมัก 80 วัน ของตัวอย่างที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นด้วยไอน้ำมีค่าที่ใกล้เคียงกัน สำหรับการบำบัดเบื้องต้นด้วยน้ำร้อนตัวอย่าง HP 15, HP 30 และ HP 60 มีปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมเท่ากับ 125.85 144.98 และ 154.05 มิลลิลิตรต่อกรัมของแข็งระเหย ตามลำดับ มีร้อยละการเพิ่มของปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมเท่ากับร้อยละ 34.49, 43.05 และ 46.40 ตามลำดับ

ตัวอย่างไบอ้อยที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นทางชีวภาพ ตัวอย่าง BP 1:6 (1), BP 1:6 (3), BP 1:6 (5) และ BP 1:6 (7) มีปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมเท่ากับ 112.99, 120.11, 127.31 และ 130.65 มิลลิลิตรต่อกรัมของแข็งระเหย ตามลำดับ มีร้อยละการเพิ่มของปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมเท่ากับร้อยละ 26.92 31.25 35.14 และ 36.80 ตามลำดับ ตัวอย่าง BP 1:3 (1), BP 1:3 (3), BP 1:3 (5) และ BP 1:3 (7) มีปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมเท่ากับ 113.45, 121.09, 127.93 และ 133.20 มิลลิลิตรต่อกรัมของแข็งระเหย ตามลำดับ มีร้อยละการเพิ่มของปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมเท่ากับร้อยละ 27.22, 31.81, 35.45 และ 38.01 ตามลำดับ และตัวอย่าง BP 1:2 (1), BP 1:2 (3), BP 1:2 (5) และ BP 1:2 (7) มีปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมเท่ากับ 113.70, 126.56, 129.86 และ 146.03 มิลลิลิตรต่อกรัมของแข็งระเหย ตามลำดับ มีร้อยละการเพิ่มของปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมเท่ากับร้อยละ 27.38, 34.76, 36.41 และ 43.36 ตามลำดับ

สำหรับค่าร้อยละการเพิ่มของปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมดังกล่าวได้มาจากการเปรียบเทียบระหว่างปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมของไบอ้อยที่ไม่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นกับปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมของตัวอย่างไบอ้อยที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นทางความร้อนและทางชีวภาพ



รูปที่ 4.4.1-10 ร้อยละการเพิ่มของปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมของตัวอย่างใบอ้อยที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นทางความร้อนและทางชีวภาพ

จากผลการเปรียบเทียบร้อยละการเพิ่มของปริมาณก๊าซชีวภาพ (ดังรูปที่ 4.4.1-10) เห็นได้ว่าใบอ้อยที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นด้วยไอน้ำที่ระยะเวลา 15, 30 และ 60 นาที มีร้อยละการเพิ่มของปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมใกล้เคียงกันในแต่ละระยะเวลาการบำบัดเบื้องต้นและมีปริมาณสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับ การบำบัดเบื้องต้นทางความร้อนด้วยน้ำร้อนและการบำบัดเบื้องต้นทางชีวภาพ จากผลการวิเคราะห์ดังกล่าว พบว่าการบำบัดเบื้องต้นทางความร้อนด้วยไอน้ำที่ระยะเวลา 15, 30 และ 60 นาที มีผลต่อการย่อยสลายในระบบไร้อากาศที่สามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ดีที่สุด

เมื่อเปรียบเทียบกับ การบำบัดเบื้องต้นทางความร้อนด้วยน้ำร้อนและการบำบัดเบื้องต้นทางชีวภาพ ในเชิงของปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพสะสมที่ระยะเวลาการหมัก 80 วัน

4.4.2 ผลการวิเคราะห์กรดไขมันระเหย สภาพต่าง และความเป็นกรดต่าง

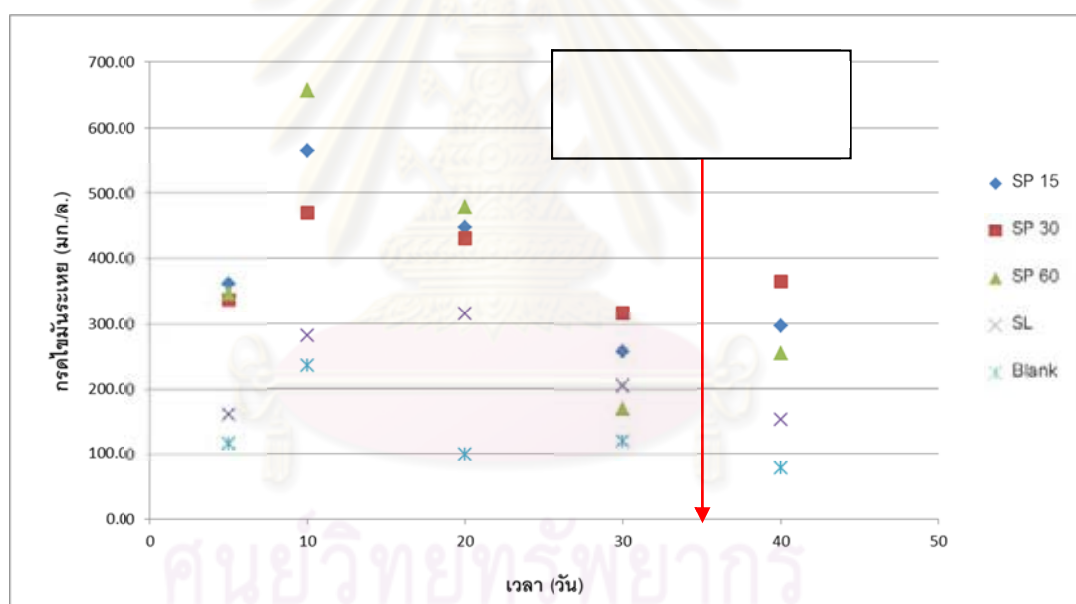
กรดไขมันระเหย

ในขั้นตอนการสร้างกรดไขมันระเหยของกระบวนการไร้อากาศ จะเกิดกรดที่ผลิตขึ้นโดยจุลินทรีย์ชนิดที่ไม่ใช้อากาศ ซึ่งมีผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาการย่อยสลายดังกล่าวที่ได้หลายชนิด เช่น กรดบิวทิริก กรดอะซิติก (acetic acid) กรดโพรพิโอนิก และกรดบิวทิริก เป็นต้น โดยจุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทน (methanogenic microorganism) มีการแลกเปลี่ยนสารเหล่านั้นให้กลายเป็นสารอาหารที่ง่ายสำหรับดูดซึมเข้าไปใช้ในเซลล์เพื่อใช้ในการผลิตก๊าซมีเทนได้ ซึ่งการผลิตก๊าซมีเทนของจุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทนนั้น จะต้องมีปริมาณการเกิดกรดไขมันระเหยและอัตราการผลิตก๊าซมีเทนที่สมดุลกัน ถ้าปฏิกิริยาเกิดขึ้นอย่างไม่สมดุล เช่น เกิดกรดไขมันระเหยมากเกินไป จะทำให้ไปยับยั้งการทำงานของจุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทนได้

สำหรับการวิเคราะห์กรดไขมันระเหยในน้ำย่อยของไบอ้ออยที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นทางความร้อนและทางชีวภาพจากการหมักในขวดซีรัมของการทดลองที่ 2 ทางผู้วิจัยได้แบ่งการวิเคราะห์กรดไขมันระเหยออกเป็น 5 ครั้ง โดยทำการเก็บตัวอย่างในวันที่ 5, 10, 20, 30 และ 40 ของระยะเวลาในการหมัก (ทำการหมักเป็นระยะเวลา 80 วัน) ทั้งนี้เป็นการดูแนวโน้มของปริมาณกรดไขมันระเหยที่เกิดขึ้นจากการหมักในขวดซีรัม เพื่อนำไปประเมินในการเก็บตัวอย่างก๊าซชีวภาพไปวิเคราะห์หาปริมาณร้อยละของก๊าซมีเทนต่อไป (ผลการวิเคราะห์กรดไขมันระเหยแสดงดังตารางที่ ข-4 ในภาคผนวก ข) พบว่าปริมาณกรดไขมันระเหยในช่วง 5 วันแรกเกิดขึ้นไม่มาก และจะเกิดขึ้นสูงสุดในช่วงวันที่ 10-20 ของการหมัก จากนั้นก็จะเริ่มลดลงประมาณวันที่ 30 จนถึงวันที่ 40 ของการทดลอง โดยทางผู้วิจัยได้เลือกเก็บตัวอย่างก๊าซชีวภาพในวันที่ 35 ของการหมักโดยเป็นช่วงที่ปริมาณกรดไขมันระเหยลดลง ซึ่งกรดไขมันระเหยดังกล่าวที่ลดลงเนื่องจากถูกใช้เป็นอาหารสำหรับจุลินทรีย์ในกลุ่มสร้างมีเทน จากนั้นจึงนำไปทำการตรวจวัดความเข้มข้นของก๊าซมีเทนต่อไป กล่าวโดยสรุปคือ ขั้นตอนการสร้างกรดไขมันระเหย (acidogenesis) จะอยู่ในช่วงวันที่ 10-20 และขั้นตอนการสร้างมีเทน (methanogenesis) จะอยู่ในช่วงวันที่ 30 เป็นต้นไป

การบำบัดเบื้องต้นทางความร้อน

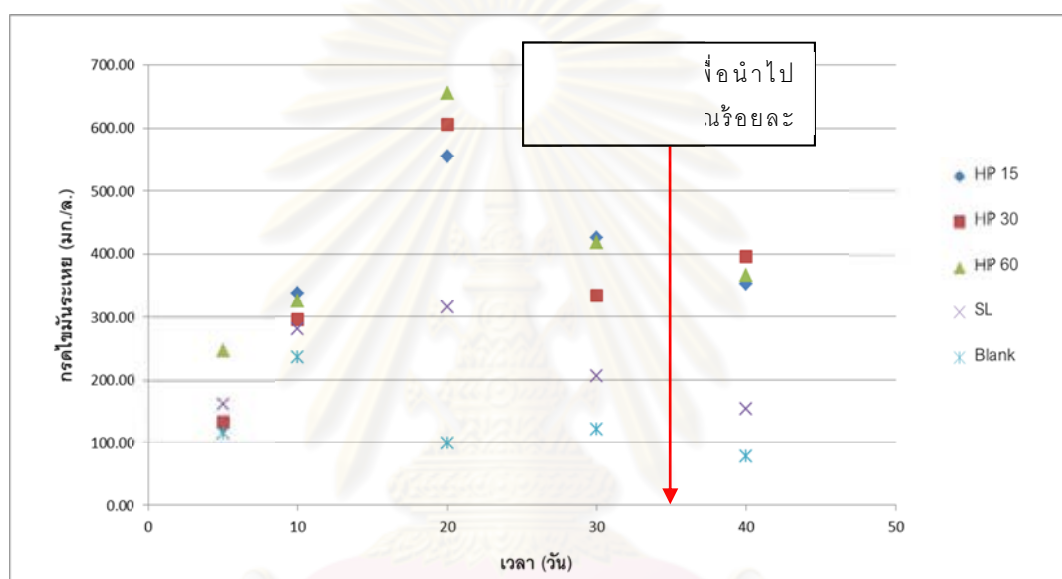
ผลการวิเคราะห์กรดไขมันระเหยในน้ำย่อยของใบอ้อยที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นทางความร้อนด้วยไอน้ำที่ระยะเวลาการหมัก 15, 30 และ 60 นาที จากการหมักในขวด ซีรัมของการทดลองที่ 2 แสดงดังรูปที่ 4.4.2-1 พบว่า ในช่วง 5 วันแรกของการหมักมีปริมาณกรดไขมันระเหยอยู่ในช่วง 336.50 3.34 ถึง 362.00±9.32 มิลลิกรัมต่อลิตร จากนั้นปริมาณกรดไขมันระเหยจะเกิดเพิ่มขึ้นสูงสุดประมาณช่วงวันที่ 10 ของการหมัก มีค่าอยู่ในช่วง 469.05±7.98 ถึง 656.50±14.13 มิลลิกรัมต่อลิตร จากนั้นในช่วงวันที่ 20 ปริมาณกรดไขมันระเหยเริ่มลดลงจนถึงวันที่ 40 โดยในช่วงวันที่ 20-40 มีค่าปริมาณกรดไขมันระเหยอยู่ในช่วง 170.30±4.09 ถึง 478.20±2.01 มิลลิกรัมต่อลิตร จากแนวโน้มของปริมาณกรดไขมันระเหยดังกล่าว ทางผู้วิจัยจึงเลือกเก็บตัวอย่างในวันที่ 35 ของการหมัก ซึ่งเป็นช่วงที่ปริมาณกรดไขมันระเหยลดลง



รูปที่ 4.4.2-1 ปริมาณกรดไขมันระเหยในน้ำย่อยของใบอ้อยที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นทางความร้อนด้วยไอน้ำจากการหมักในขวดซีรัมของการทดลองที่ 2

ผลการวิเคราะห์กรดไขมันระเหยในน้ำย่อยของใบอ้อยที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นทางความร้อนด้วยน้ำร้อนที่ระยะเวลาการหมัก 15, 30 และ 60 นาที จากการหมักในขวด ซีรัมของการทดลองที่ 2 แสดงดังรูปที่ 4.4.2-2 พบว่า ในช่วงวันที่ 5 ถึงวันที่ 10 ของการหมัก ปริมาณกรดไขมันระเหยมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนถึงวันที่ 20 ของการหมัก มีค่าอยู่ในช่วง 125.00±4.521 ถึง

337.50±8.36 มิลลิกรัมต่อลิตร จากนั้นปริมาณกรดไขมันระเหยจะเกิดขึ้นสูงสุดประมาณช่วงวันที่ 20 ของการหมัก มีค่าอยู่ในช่วง 554.60±1.46 ถึง 655.30±13.75 มิลลิกรัมต่อลิตร จากนั้นในช่วงวันที่ 30 ปริมาณกรดไขมันระเหยเริ่มลดลงจนถึงวันที่ 40 โดยในช่วงวันที่ 30-40 มีค่าปริมาณกรดไขมันระเหยอยู่ในช่วง 334.30±3.52 ถึง 425.40±5.06 มิลลิกรัมต่อลิตร จากแนวโน้มของปริมาณกรดไขมันระเหยดังกล่าว ทางผู้วิจัยจึงเลือกเก็บตัวอย่างในวันที่ 35 ของการหมัก ซึ่งเป็นช่วงที่ปริมาณกรดไขมันระเหยลดลง



รูปที่ 4.4.2-2 ปริมาณกรดไขมันระเหยในน้ำย่อยของไบโอดีที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นทางความร้อนด้วยน้ำร้อนจากการหมักในขวดซีรัมของการทดลองที่ 2

การบำบัดเบื้องต้นทางชีวภาพ

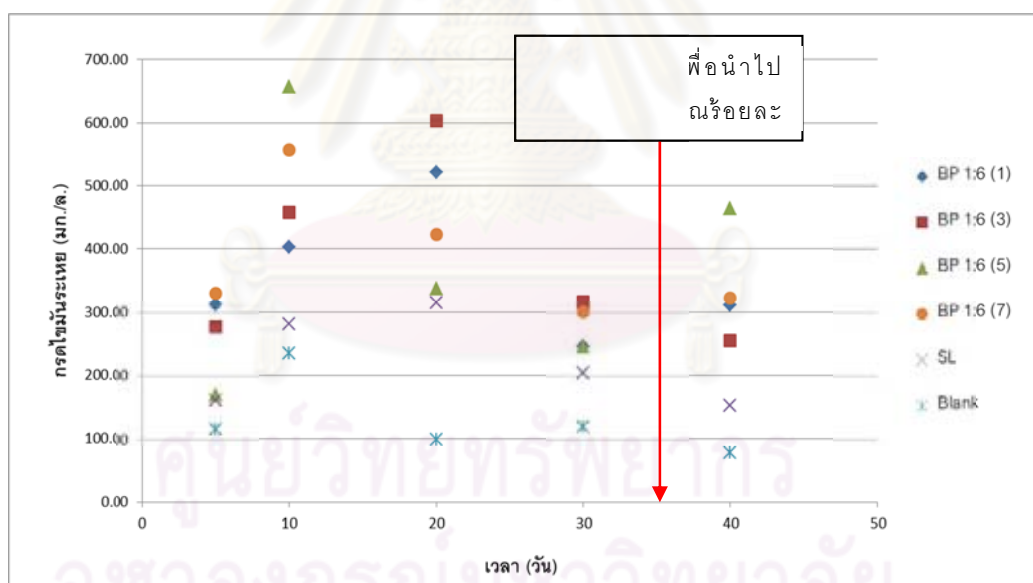
ผลการวิเคราะห์กรดไขมันระเหยในน้ำย่อยของไบโอดีที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นทางชีวภาพที่อัตราส่วนผสมปริมาณมูลวัวต่อไบโอดี 1:6 ที่ระยะเวลาการบำบัดเบื้องต้น 1, 3, 5 และ 7 วัน จากการหมักในขวดซีรัมของการทดลองที่ 2 แสดงดังรูปที่ 4.4.2-3 มีรายละเอียดดังนี้

- ตัวอย่างที่ระยะเวลาการบำบัดเบื้องต้นวันที่ 5 และ 7 (BP 1:6 (5) และ BP 1:6 (7)) ในช่วง 5 วันแรกของการหมักในขวดซีรัม มีปริมาณกรดไขมันระเหยอยู่ในช่วง 170.30±2.21 ถึง 329.70±2.43 มิลลิกรัมต่อลิตร จากนั้นปริมาณกรดไขมันระเหยจะเกิดขึ้นสูงสุดประมาณช่วงวันที่ 10 ของการหมัก มีค่าอยู่ในช่วง 557.60±11.66 ถึง 657.04±2.03 มิลลิกรัมต่อลิตร จากนั้น

ในช่วงวันที่ 20 ปริมาณกรดไขมันระเหยเริ่มลดลงจนถึงวันที่ 40 โดยในช่วงวันที่ 20-40 มีค่าปริมาณกรดไขมันระเหยอยู่ในช่วง 246.10 ± 5.13 ถึง 464.00 ± 8.62 มิลลิกรัมต่อลิตร

- ตัวอย่างที่ระยะเวลาการบำบัดเบื้องต้นวันที่ 1 และ 3 (BP 1:6 (1) และ BP 1:6 (3)) ในช่วงวันที่ 5 ถึงวันที่ 10 ของการหมัก ปริมาณกรดไขมันระเหยมีค่าเพิ่มขึ้นจนถึงวันที่ 20 ของการหมัก มีค่าอยู่ในช่วง 277.08 ± 3.11 ถึง 457.20 ± 6.40 มิลลิกรัมต่อลิตร จากนั้นปริมาณกรดไขมันระเหยจะเกิดขึ้นสูงสุดประมาณช่วงวันที่ 20 ของการหมัก มีค่าอยู่ในช่วง 521.40 ± 8.43 ถึง 602.80 ± 2.62 มิลลิกรัมต่อลิตร จากนั้นในช่วงวันที่ 30 ปริมาณกรดไขมันระเหยเริ่มลดลงจนถึงวันที่ 40 โดยในช่วงวันที่ 30-40 มีค่าปริมาณกรดไขมันระเหยอยู่ในช่วง 247.20 ± 1.95 ถึง 315.40 ± 10.75 มิลลิกรัมต่อลิตร

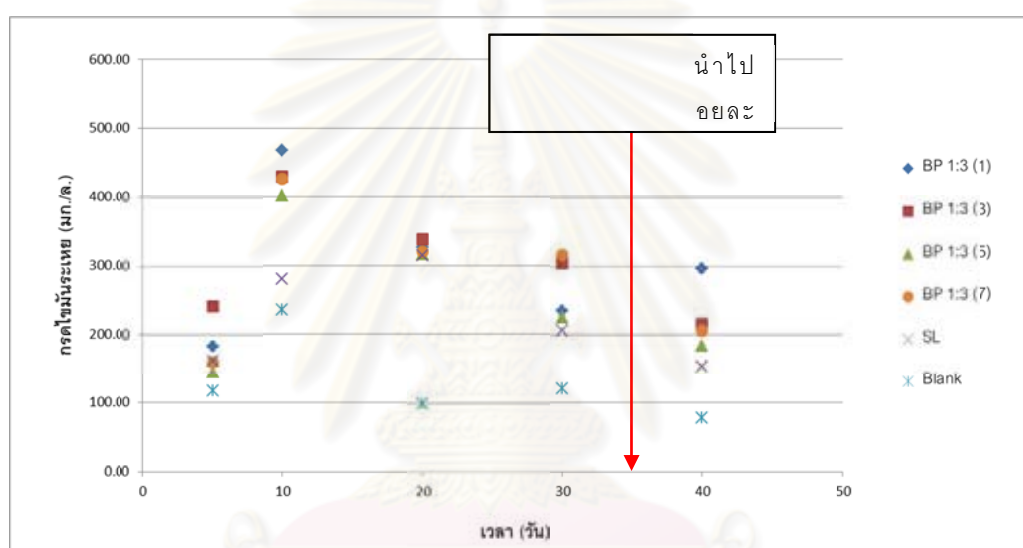
จากแนวโน้มของปริมาณกรดไขมันระเหยดังกล่าว ทางผู้วิจัยจึงเลือกเก็บตัวอย่างในวันที่ 35 ของการหมัก ซึ่งเป็นช่วงที่ปริมาณกรดไขมันระเหยลดลง



รูปที่ 4.4.2-3 ปริมาณกรดไขมันระเหยในน้ำย่อยของไบโอดีที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นทางชีวภาพที่อัตราส่วนผสมปริมาณมูลวัวต่อไบโอดี 1:6 จากการหมักในขวดซีรัมของการทดลองที่ 2

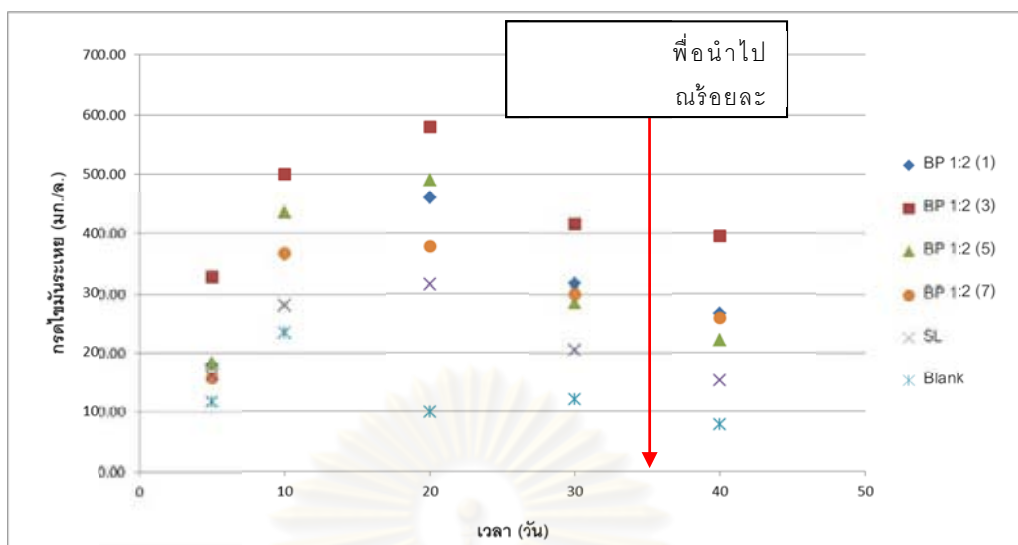
ผลการวิเคราะห์กรดไขมันระเหยในน้ำย่อยของไบโอดีที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นทางชีวภาพที่อัตราส่วนผสมปริมาณมูลวัวต่อไบโอดี 1:3 ที่ระยะเวลาการบำบัดเบื้องต้น 1, 3, 5

และ 7 วัน จากการหมักในขวดซีรัมของการทดลองที่ 2 แสดงดังรูปที่ 4.4.2-4 พบว่า ในช่วง 5 วันแรกของการหมักมีปริมาณกรดไขมันระเหยอยู่ในช่วง 145.30 ± 4.95 ถึง 241.20 ± 4.20 มิลลิกรัมต่อลิตร จากนั้นปริมาณกรดไขมันระเหยจะเกิดเพิ่มขึ้นสูงสุดประมาณช่วงวันที่ 10 ของการหมัก มีค่าอยู่ในช่วง 402.05 ± 1.96 ถึง 467.80 ± 3.02 มิลลิกรัมต่อลิตร จากนั้นในช่วงวันที่ 20 ปริมาณกรดไขมันระเหยเริ่มลดลงจนถึงวันที่ 40 โดยในช่วงวันที่ 20-40 มีค่าปริมาณกรดไขมันระเหยอยู่ในช่วง 184.20 ± 5.20 ถึง 337.60 ± 2.64 มิลลิกรัมต่อลิตร จากแนวโน้มของปริมาณกรดไขมันระเหยดังกล่าว ทางผู้วิจัยจึงเลือกเก็บตัวอย่างในวันที่ 35 ของการหมัก ซึ่งเป็นช่วงที่ปริมาณกรดไขมันระเหยลดลง



รูปที่ 4.4.2-4 ปริมาณกรดไขมันระเหยในน้ำย่อยของไบโอดีที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นทางชีวภาพที่อัตราส่วนผสมปริมาณมูลวัวต่อไบโอดี 1:3 จากการหมักในขวดซีรัมของการทดลองที่ 2

ผลการวิเคราะห์กรดไขมันระเหยในน้ำย่อยของไบโอดีที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นทางชีวภาพที่อัตราส่วนผสมปริมาณมูลวัวต่อไบโอดี 1:2 ที่ระยะเวลาการบำบัดเบื้องต้น 1, 3, 5 และ 7 วัน จากการหมักในขวดซีรัมของการทดลองที่ 2 แสดงดังรูปที่ 4.4.2-5 พบว่า ในช่วงวันที่ 5 ถึงวันที่ 10 ของการหมัก ปริมาณกรดไขมันระเหยมีค่าเพิ่มขึ้นจนถึงวันที่ 20 ของการหมัก มีค่าอยู่ในช่วง 158.30 ± 1.62 ถึง 500.20 ± 9.12 มิลลิกรัมต่อลิตร จากนั้นปริมาณกรดไขมันระเหยจะเกิดขึ้นสูงสุดประมาณช่วงวันที่ 20 ของการหมัก มีค่าอยู่ในช่วง 378.10 ± 6.47 ถึง 579.20 ± 2.16 มิลลิกรัมต่อลิตร จากนั้นในช่วงวันที่ 30 ปริมาณกรดไขมันระเหยเริ่มลดลงจนถึงวันที่ 40 โดยในช่วงวันที่ 30-40 มีค่าปริมาณกรดไขมันระเหยอยู่ในช่วง 220.60 ± 6.51 ถึง 416.70 ± 6.00 มิลลิกรัมต่อลิตร ทางผู้วิจัยจึงเลือกเก็บตัวอย่างในวันที่ 35 ของการหมัก ซึ่งเป็นช่วงที่ปริมาณกรดไขมันระเหยลดลง



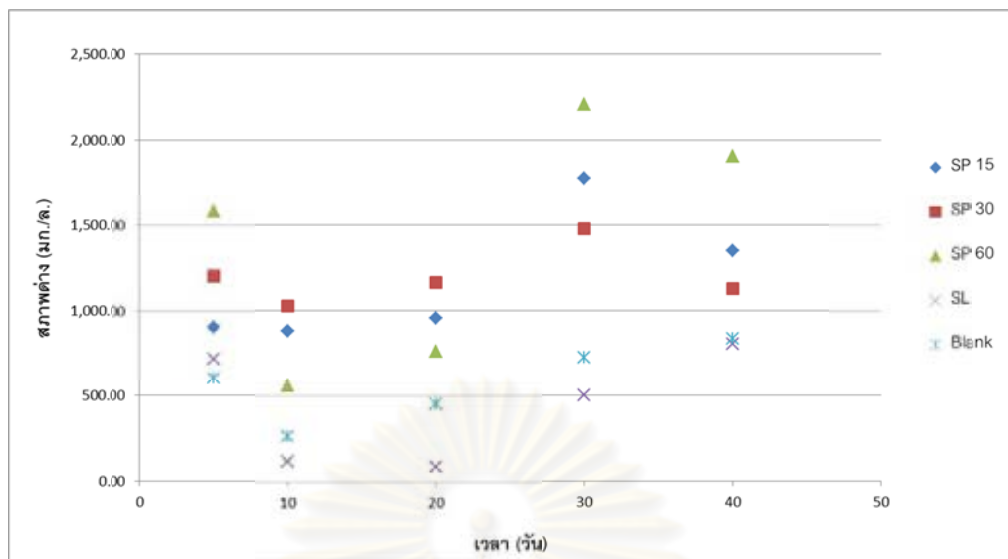
รูปที่ 4.4.2-5 ปริมาณกรดไขมันระเหยในน้ำย่อยของไบอ้อยที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นทางชีวภาพที่ อัตราส่วนผสมปริมาณมูลวัวต่อไบอ้อย 1:2 จากการหมักในขวดซีรัมของการทดลองที่ 2

สภาพต่าง และความเป็นกรดต่าง

สภาพต่างเป็นความสามารถในการสะท้อนกรด เพื่อใช้ในการควบคุมความเป็นกรด-ต่างในระบบไร้อากาศให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสม และป้องกันไม่ให้เกิดค่าความเป็นกรด-ต่างลดลงอย่างรวดเร็ว (ผลการวิเคราะห์กรดไขมันระเหยแสดงดังตารางที่ ข-5 ในภาคผนวก ข)

การบำบัดเบื้องต้นทางความร้อน

ค่าสภาพต่างในน้ำย่อยของไบอ้อยที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นด้วยไอน้ำในการทดลองที่ 2 (แสดงดังรูปที่ 4.4.2-6) พบว่า ในช่วง 5 วันแรกของระบบมีค่าอยู่ในช่วง 905.22 ± 10.83 ถึง $1,587 \pm 16.49$ มิลลิกรัมต่อลิตร จากนั้นค่าความเป็นต่างจะเริ่มลดลงต่ำสุดประมาณวันที่ 10 ของการเดินระบบ มีค่าอยู่ในช่วง 560.10 ± 11.72 ถึง $1,027.31 \pm 53.95$ มิลลิกรัมต่อลิตร และจะเริ่มเพิ่มสูงขึ้นประมาณวันที่ 20 ถึงวันที่ 40 ของการเดินระบบ มีค่าอยู่ในช่วง 759.42 ± 13.23 ถึง $2,207.48 \pm 9.36$ มิลลิกรัมต่อลิตร



รูปที่ 4.4.2-6 ปริมาณสภาพต่างในน้ำย่อยของใบอ้อยที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นทางความร้อนด้วยไอน้ำจากการหมักในขวดซีรัมของการทดลองที่ 2

ค่าสภาพต่างในน้ำย่อยของใบอ้อยที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นด้วยน้ำร้อนในการทดลองที่ 2 (แสดงดังรูปที่ 4.4.2-7) พบว่า ในช่วงวันที่ 5 ถึงวันที่ 10 ของระบบจะมีค่าลดลง มีค่าอยู่ในช่วง $1,227.66 \pm 13.83$ ถึง $2,309.40 \pm 10.81$ มิลลิกรัมต่อลิตร จากนั้นค่าความเป็นต่างมีค่าต่ำสุดประมาณวันที่ 20 ของการเดินระบบ มีค่าอยู่ในช่วง 352.00 ± 9.74 ถึง 839.00 ± 2.36 มิลลิกรัมต่อลิตร และเริ่มเพิ่มขึ้นประมาณวันที่ 30 ถึงวันที่ 40 ของการเดินระบบ มีค่าอยู่ในช่วง 826.52 ± 11.59 ถึง $1,375.42 \pm 33.58$ มิลลิกรัมต่อลิตร

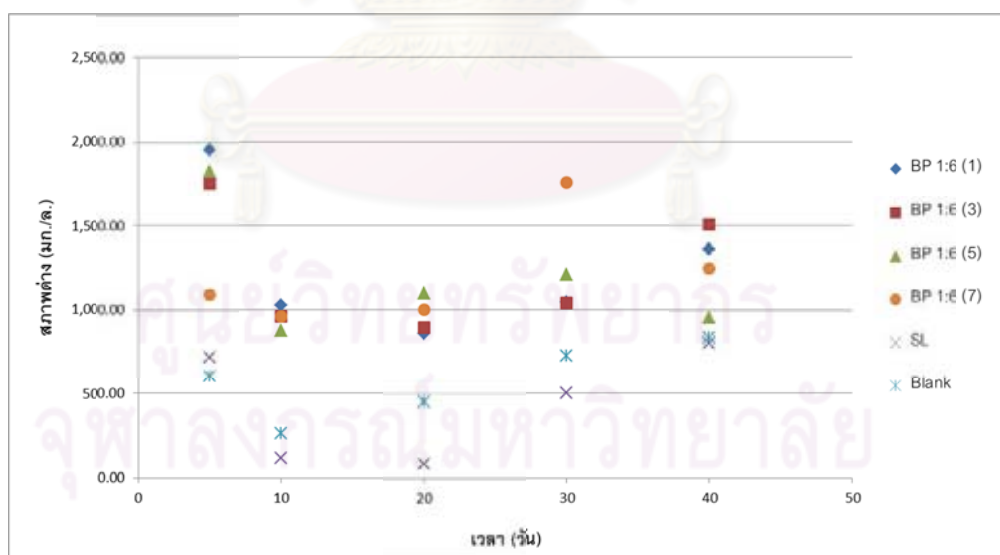


รูปที่ 4.4.2-7 ปริมาณสภาพต่างในน้ำย่อยของใบอ้อยที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นทางความร้อนด้วยน้ำร้อนจากการหมักในขวดซีรัมของการทดลองที่ 2

การบำบัดเบื้องต้นทางชีวภาพ

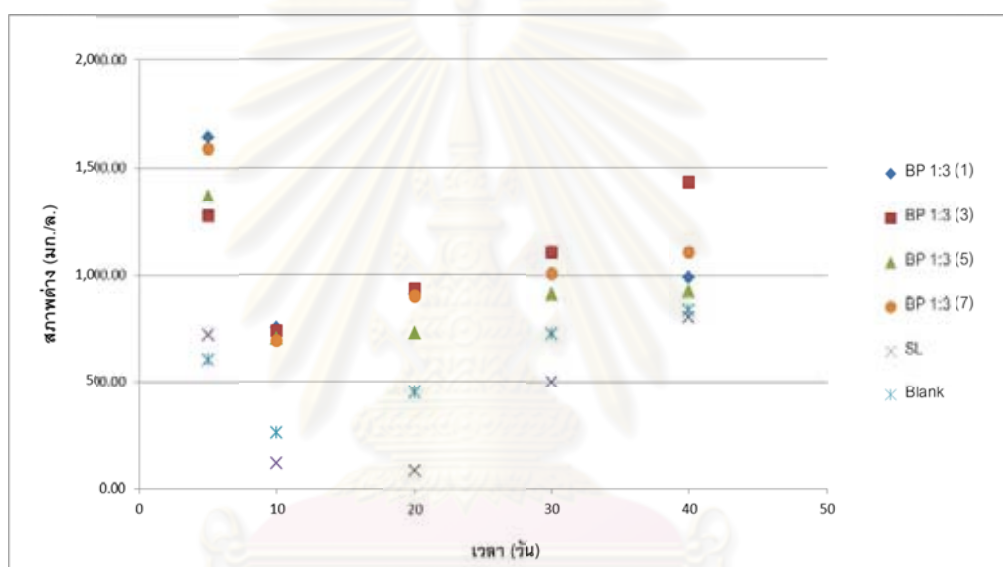
ค่าสภาพต่างในน้ำย่อยของไบอัสที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นทางชีวภาพที่อัตราส่วนผสมปริมาณมูลวัวต่อไบอัส 1:6 ที่ระยะเวลาการบำบัดเบื้องต้น 1, 3, 5 และ 7 วัน ในการทดลองที่ 2 (แสดงดังรูปที่ 4.4.2-8) พบว่า ที่ระยะเวลาการบำบัดเบื้องต้นวันที่ 5 และวันที่ 7 มีค่าสภาพต่างในช่วง 5 วันแรกของระบบจะมีค่าอยู่ในช่วง $1,094.36 \pm 24.86$ ถึง $1,828.50 \pm 16.96$ มิลลิกรัมต่อลิตร จากนั้นค่าสภาพต่างจะค่าต่ำสุดประมาณวันที่ 10 ของการเดินระบบ มีค่าอยู่ในช่วง 875.14 ± 4.79 ถึง 957.23 ± 30.82 มิลลิกรัมต่อลิตร และเริ่มเพิ่มขึ้นประมาณวันที่ 20 ถึงวันที่ 40 ของการเดินระบบ มีค่าอยู่ในช่วง 954.50 ± 23.34 ถึง $1,760.07 \pm 56.66$ มิลลิกรัมต่อลิตร

สำหรับที่ระยะเวลาการบำบัดเบื้องต้นวันที่ 1 และวันที่ 3 ในช่วงวันที่ 5 ถึงวันที่ 10 ของระบบจะมีค่าลดลง มีค่าอยู่ในช่วง 957.82 ± 10.10 ถึง $1,954.03 \pm 56.40$ มิลลิกรัมต่อลิตร จากนั้นค่าความเป็นต่างจะมีค่าต่ำสุดประมาณวันที่ 20 ของการเดินระบบ มีค่าอยู่ในช่วง 856.02 ± 16.12 ถึง 892.2 ± 31.25 มิลลิกรัมต่อลิตร และเริ่มเพิ่มขึ้นประมาณวันที่ 30 ถึงวันที่ 40 ของการเดินระบบ มีค่าอยู่ในช่วง $1,040.90 \pm 50.41$ ถึง $1,509.82 \pm 20.58$ ต่อลิตร



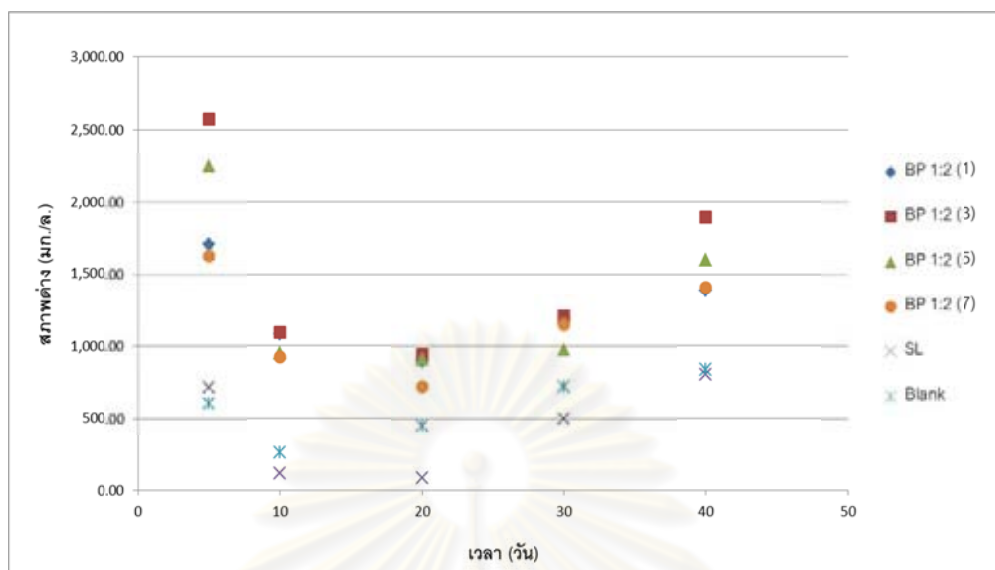
รูปที่ 4.4.2-8 ปริมาณสภาพต่างในน้ำย่อยของไบอัสที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นทางชีวภาพที่อัตราส่วนผสมปริมาณมูลวัวต่อไบอัส 1:6 จากการหมักในขวดซีรัมของการทดลองที่ 2

ค่าสภาพต่างในน้ำย่อยของใบอ้อยที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นทางชีวภาพที่อัตราส่วนผสมปริมาณมูลวัวต่อใบอ้อย 1:3 ที่ระยะเวลาการบำบัดเบื้องต้น 1, 3, 5 และ 7 วัน ในการทดลองที่ 2 (แสดงดังรูปที่ 4.4.2-9) พบว่า ค่าสภาพต่างในช่วง 5 วันแรกของระบบจะมีค่าลดลง มีค่าอยู่ในช่วง $1,276.05 \pm 28.16$ ถึง $1,642.07 \pm 47.78$ มิลลิกรัมต่อลิตร จากนั้นค่าความเป็นต่างจะมีค่าต่ำสุดประมาณวันที่ 10 ของการเดินระบบ มีค่าอยู่ในช่วง 691.75 ± 10.86 ถึง 753.00 ± 18.49 มิลลิกรัมต่อลิตร และเริ่มเพิ่มขึ้นประมาณวันที่ 20 ถึงวันที่ 40 ของการเดินระบบ มีค่าอยู่ในช่วง 729.50 ± 9.17 ถึง $1,430.65 \pm 34.16$ มิลลิกรัมต่อลิตร



รูปที่ 4.4.2-9 ปริมาณสภาพต่างในน้ำย่อยของใบอ้อยที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นทางชีวภาพที่อัตราส่วนผสมปริมาณมูลวัวต่อใบอ้อย 1:3 จากการหมักในขวดซีรั่มของการทดลองที่ 2

ค่าสภาพต่างในน้ำย่อยของใบอ้อยที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นทางชีวภาพที่อัตราส่วนผสมปริมาณมูลวัวต่อใบอ้อย 1:2 ที่ระยะเวลาการบำบัดเบื้องต้น 1, 3, 5 และ 7 วัน ในการทดลองที่ 2 (แสดงดังรูปที่ 4.4.2-10) พบว่า ค่าสภาพต่างในช่วงวันที่ 5 ถึงวันที่ 10 ของระบบจะมีค่าลดลง มีค่าอยู่ในช่วง 920.70 ± 14.75 ถึง $2,573.17 \pm 38.08$ มิลลิกรัมต่อลิตร จากนั้นค่าความเป็นต่างจะมีค่าต่ำสุดประมาณวันที่ 20 ของการเดินระบบ มีค่าอยู่ในช่วง 725.67 ± 18.89 ถึง 941.75 ± 9.76 มิลลิกรัมต่อลิตร และจะเริ่มเพิ่มขึ้นประมาณวันที่ 30 ถึงวันที่ 40 ของการเดินระบบ มีค่าอยู่ในช่วง 974.60 ± 12.12 ถึง $1,894.6 \pm 12.15$ มิลลิกรัมต่อลิตร

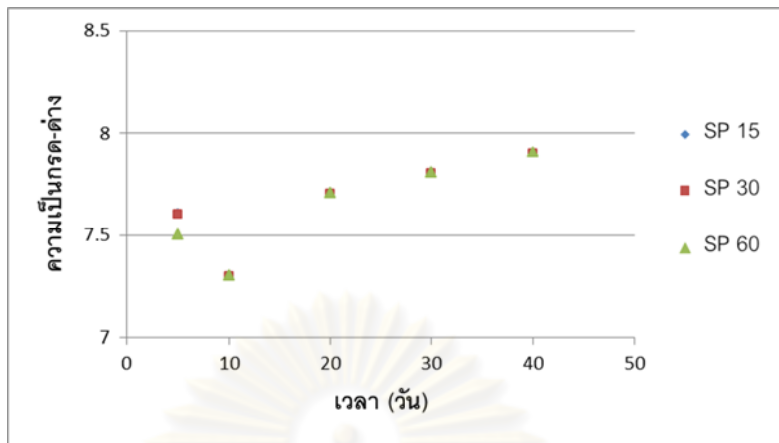


รูปที่ 4.4.2-10 ปริมาณสภาพต่างในน้ำย่อยของใบอ้อยที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นทางชีวภาพที่อัตราส่วนผสมปริมาณมูลวัวต่อใบอ้อย 1:2 จากการหมักในขวดซีรัมของการทดลองที่ 2

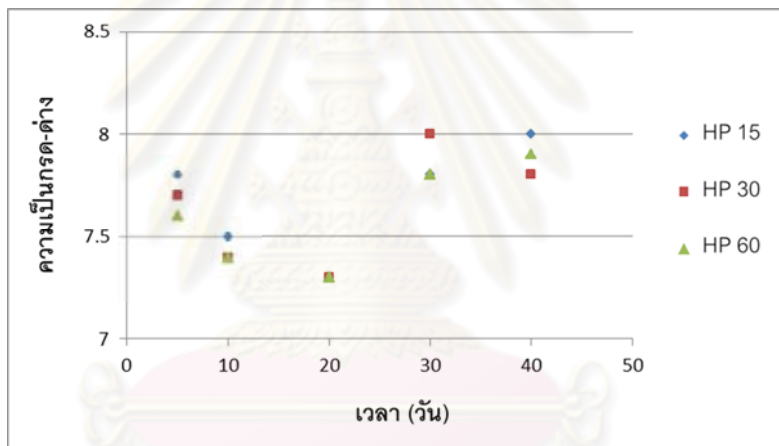
ความเป็นกรด-ด่าง

ค่าความเป็นกรด-ด่างของระบบไร้อากาศที่เหมาะสมควรอยู่ในช่วง 6.6-8.0 เพราะถ้าเมื่อค่าความเป็นกรด-ด่างต่ำกว่า 6.6 จะทำให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มากกว่าปกติ แต่ถ้ามีค่าความเป็นกรด-ด่างสูงกว่า 7.5-8.0 จะทำให้จุลินทรีย์ชนิดผลิตก๊าซมีเทนมีน้อยลง และถ้าค่าความเป็นกรด-ด่างมีค่าสูงขึ้นไปถึง 9.0 ระบบการย่อยสลายสารอินทรีย์ในระบบไร้อากาศจะไม่ทำงาน หรือไม่มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ ดังนั้นค่าความเป็นกรด-ด่างจึงเป็นตัวควบคุมที่สำคัญในระบบไร้อากาศ (เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์, 2543)

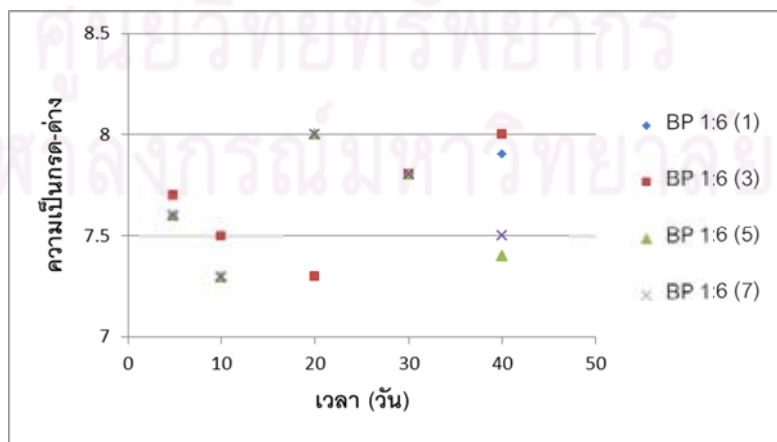
สำหรับความเป็นกรด-ด่างที่ตรวจวัดได้ในการทดลองที่ 2 จะแบ่งจำนวนครั้งการตรวจวัดพร้อมกับการวิเคราะห์ค่ากรดไขมันระเหยและค่าสภาพต่าง ซึ่งมีจำนวน 5 ครั้ง โดยมีผลการตรวจวัดดังนี้ แสดงดังรูปที่ 4.4.2-11 ถึงรูปที่ 4.4.2-15 และตารางที่ 4.4.2-1



รูปที่ 4.4.2-11 ค่าความชื้นเป็นกรด-ต่างของไบอ้อยที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นด้วยไอน้ำ

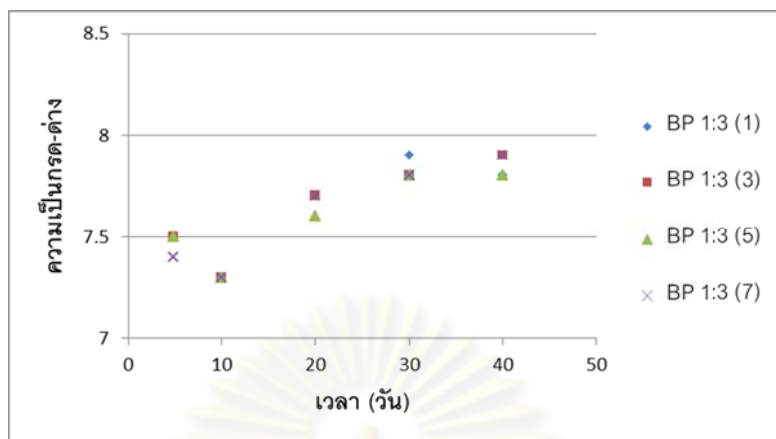


รูปที่ 4.4.2-12 ค่าความชื้นเป็นกรด-ต่างของไบอ้อยที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นด้วยน้ำร้อน

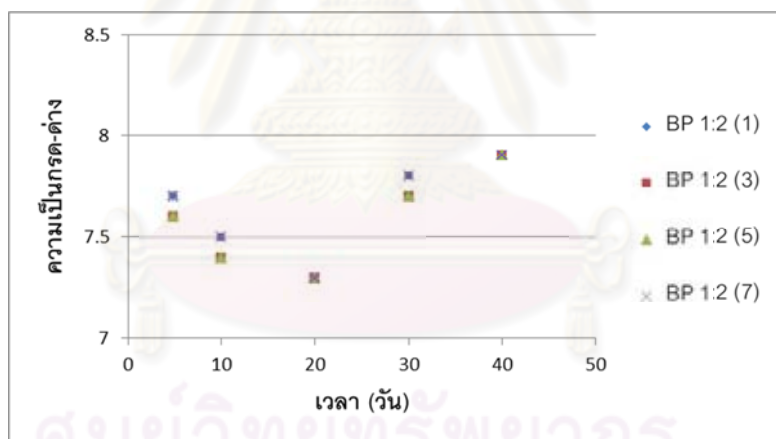


รูปที่ 4.4.2-13 ค่าความชื้นเป็นกรด-ต่างของไบอ้อยที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นทางชีวภาพที่อัตรา

ส่วนผสมมูลวัวต่อไบอ้อย 1:6



รูปที่ 4.4.2-14 ค่าความเป็นกรด-ด่างของใบอ้อยที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นทางชีวภาพที่อัตราส่วนผสมมูลวัวต่อใบอ้อย 1:3



รูปที่ 4.4.2-15 ค่าความเป็นกรด-ด่างของใบอ้อยที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นทางชีวภาพที่อัตราส่วนผสมมูลวัวต่อใบอ้อย 1:2

ตารางที่ 4.4.2-1 ผลการวิเคราะห์ค่าความเป็นกรด-ด่างในการทดลองที่ 2

ตัวอย่าง	ค่าความเป็นกรด-ด่าง				
	วันที่ 5	วันที่ 10	วันที่ 20	วันที่ 30	วันที่ 40
การบำบัดเบื้องต้นทางความร้อน					
- SP 15	7.6	7.3	7.7	7.8	7.9
- SP 30	7.6	7.3	7.7	7.8	7.9
- SP 60	7.5	7.3	7.7	7.8	7.9
- HP 15	7.8	7.5	7.3	7.8	8.0
- HP 30	7.7	7.4	7.3	8.0	7.8
- HP 60	7.6	7.4	7.3	7.8	7.9
BP 1:6 (1)	7.6	7.5	7.3	7.8	7.9
BP 1:6 (3)	7.7	7.5	7.3	7.8	8.0
BP 1:6 (5)	7.6	7.3	8.0	7.8	7.4
BP 1:6 (7)	7.6	7.3	8.0	7.8	7.5
BP 1:3 (1)	7.5	7.3	7.7	7.9	7.8
BP 1:3 (3)	7.5	7.3	7.7	7.8	7.9
BP 1:3 (5)	7.5	7.3	7.6	7.8	7.8
BP 1:3 (7)	7.4	7.3	7.7	7.8	7.9

ตารางที่ 4.4.2-1 (ต่อ)

ตัวอย่าง	ค่าความเป็นกรด-ด่าง				
	วันที่ 5	วันที่ 10	วันที่ 20	วันที่ 30	วันที่ 40
BP 1:2 (1)	7.7	7.5	7.3	7.8	7.9
BP 1:2 (3)	7.6	7.4	7.3	7.7	7.9
BP 1:2 (5)	7.6	7.4	7.3	7.7	7.9
BP 1:2 (7)	7.7	7.5	7.3	7.8	7.9

จากผลการวิเคราะห์ปริมาณกรดไขมันระเหยในข้างต้น พบว่า ค่ากรดไขมันระเหยของตัวอย่างที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นทางความร้อนมีค่าอยู่ในช่วง 125.00 ± 4.52 ถึง 656.50 ± 14.13 มิลลิกรัมต่อลิตร และค่ากรดไขมันระเหยของตัวอย่างที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นทางชีวภาพมีค่าอยู่ในช่วง 145.30 ± 4.95 ถึง 657.04 ± 2.03 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยค่ากรดไขมันระเหยที่เหมาะสมของระบบไร้อากาศมีค่าอยู่ในช่วง 50-500 มิลลิกรัมต่อลิตรของอะซิติก และมีค่าสูงสุดที่ยอมรับได้ในระบบเท่ากับ 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตรของอะซิติก (เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์, 2543) เห็นได้ว่าค่ากรดไขมันที่วิเคราะห์ได้จากการทดลองส่วนใหญ่มีค่าอยู่ในช่วงที่เหมาะสม และจากแนวโน้มของปริมาณกรดไขมันระเหยดังกล่าว ทางผู้วิจัยได้ทำการประเมินในการเลือกวันเก็บตัวอย่างก๊าซชีวภาพ โดยได้เลือกเก็บตัวอย่างในวันที่ 35 ของการหมัก เนื่องจากเป็นช่วงที่ปริมาณกรดไขมันระเหยลดลง สำหรับขั้นตอนการย่อยสลายในช่วงวันที่ 5 ถึงวันที่ 10 ของการหมักพบว่า มีปริมาณกรดไขมันระเหยที่สูงที่สุด โดยวิเคราะห์ร่วมกับค่าความเป็นกรด-ด่างในช่วงวันดังกล่าว พบว่ามีแนวโน้มของค่าความเป็นกรด-ด่างที่ลดลง ซึ่งในช่วงวันดังกล่าวเป็นช่วงของขั้นตอนการย่อยไฮโดรไลซิสจากนั้นค่าดังกล่าวจะเริ่มลดลงในวันที่ 20 จนถึงวันที่ 30 ของการหมัก โดยช่วงนี้จะเป็นขั้นตอนการใช้กรดไขมันระเหยโดยจุลินทรีย์สร้างมีเทนนำมาใช้เป็นอาหาร โดยค่าความเป็นกรด-ด่างในช่วงนี้มีแนวโน้มค่าที่เพิ่มขึ้น ซึ่งจะสอดคล้องกับค่ากรดไขมันระเหยที่ลดลง

สำหรับสภาพต่างเป็นความสามารถในการสะท้อนกรด เพื่อใช้ในการควบคุมความเป็นกรด-ด่างในระบบไร่อากาศให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสม และป้องกันไม่ให้เกิดความเป็นกรด-ด่างลดลงอย่างรวดเร็ว โดยจากผลการวิเคราะห์ค่าสภาพต่างในการทดลองที่ 2 สรุปว่า ในช่วง 5 ถึง 20 วันแรกของระบบจะมีค่าลดลง เนื่องจากในช่วงเวลาการหมักในช่วงแรกจะเกิดการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่สามารถย่อยสลายได้ง่ายได้ดี ทำให้ระบบผลิตกรดไขมันระเหยออกมากในช่วงแรก ดังนั้นสภาพต่าง (จากการเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่อยู่ในสารอาหาร) จึงถูกใช้เป็นตัวสะท้อนในระบบในช่วงเวลาดังกล่าวมาก จากนั้นค่าความเป็นต่างจะเริ่มเพิ่มขึ้นประมาณวันที่ 20 ถึงวันที่ 40 ของการเดินระบบ ซึ่งมีแนวโน้มการเพิ่มขึ้นและลดลงจะแปรผกผันกับปริมาณกรดไขมันระเหยที่เป็นไปตามขั้นตอนของการย่อยสลาย สำหรับค่าสภาพต่างที่เหมาะสมของระบบไร่อากาศมีค่าอยู่ในช่วง 2,000-3,000 มิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนต และมีค่าที่ยอมให้มีได้ในระบบอยู่ในช่วง 1,000-5,000 มิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนต (เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์, 2543) ซึ่งค่าสภาพต่างที่วิเคราะห์ได้จากการทดลองที่ 2 พบว่า ตัวอย่างการบำบัดเบื้องต้นทางความร้อนมีค่าสภาพต่างอยู่ในช่วง 352.00 ถึง 2,309.40 มิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนต และตัวอย่างการบำบัดเบื้องต้นทางชีวภาพมีค่าสภาพต่างอยู่ในช่วง 691.75 ถึง 2,573.17 มิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนต เห็นได้ว่าค่าสภาพต่างที่วิเคราะห์ได้มีค่าไม่เกินช่วงที่เหมาะสมแต่ส่วนใหญ่จะมีค่าน้อยกว่าค่าที่แนะนำ เนื่องจากสภาพต่างถูกสะท้อนในระบบมาก ซึ่งจะเข้าไปช่วยด้านทานการเปลี่ยนแปลงของค่าความเป็นกรด-ด่างในระบบให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสม

ค่าความเป็นกรด-ด่างของระบบไร่อากาศที่เหมาะสมควรอยู่ในช่วง 6.6-8.0 เพราะว่าเมื่อค่าความเป็นกรด-ด่างต่ำกว่า 6.6 จะทำให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มากกว่าปกติ แต่ถ้ามีค่าความเป็นกรด-ด่างสูงกว่า 7.5-8.0 จะทำให้จุลินทรีย์ชนิดผลิตก๊าซมีเทนมีน้อยลง และถ้าค่าความเป็นกรด-ด่างมีค่าสูงขึ้นไปถึง 9.0 ระบบการย่อยสลายสารอินทรีย์ในระบบไร่อากาศจะไม่ทำงาน หรือไม่มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ ดังนั้นค่าความเป็นกรด-ด่างจึงเป็นตัวควบคุมที่สำคัญในระบบไร่อากาศ (เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์, 2543) สำหรับผลการวัดค่าความเป็นกรด-ด่างของตัวอย่างไบอ้อยที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้น โดยในช่วงวันที่ 10-20 ของการเดินระบบ ค่าความเป็นกรด-ด่างในน้ำย่อยจากไบอ้อยที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นมีแนวโน้มค่าความเป็นกรด-ด่างลดลง เนื่องจากในช่วงวันดังกล่าวมีปริมาณกรดไขมันระเหยเกิดขึ้นมาก จึงส่งผลให้สภาพต่างในน้ำย่อยไบอ้อยที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นมีค่าลดลง โดยสภาพต่างเป็นตัวควบคุม

ความเป็นกรด-ด่างในระบบ และความเป็นกรด-ด่างจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณกรดไขมันระเหยที่ลดลง สำหรับค่าความเป็นกรด-ด่างที่ได้จากการทดลองมีค่าอยู่ในช่วง 7.3-8.0 เห็นได้ว่าค่าความเป็นกรด-ด่างยังมีค่าอยู่ในช่วงที่แนะนำไว้สำหรับระบบไร้อากาศ 6.6-8.0 แต่เมื่อพิจารณาค่าความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสมต่อระบบที่มีจุลินทรีย์สร้างมีเทนควรมีค่าอยู่ในช่วง 6.5-7.5 และที่เหมาะสมต่อจุลินทรีย์สร้างกรดมีค่าอยู่ในช่วง 3.5-6.5 (เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์, 2543) พบว่าค่าที่วัดได้จากการทดลองส่วนใหญ่มีค่าสูงกว่าค่าที่แนะนำสำหรับจุลินทรีย์สร้างมีเทน เนื่องจากในระบบมีปริมาณบัฟเฟอร์เพื่อรองรับการเกิดขึ้นของกรดระเหยง่ายและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งมีค่าสภาพด่างที่มีมากเกินไป ซึ่งจะป้องกันการเกิดการสะสมของกรดระเหยง่าย ทำให้ค่าความเป็นกรด-ด่างที่วัดได้จากการทดลองมีค่าค่อนข้างสูงกว่าค่าความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสมต่อจุลินทรีย์ที่สร้างมีเทน

4.4.3 ผลการวิเคราะห์ความเข้มข้นของก๊าซมีเทนในการทดลองที่ 2

ปริมาณความเข้มข้นของก๊าซมีเทนจากก๊าซชีวภาพในการทดลองที่ 2 ที่วิเคราะห์ได้แสดงดังตารางที่ 4.4.3-1 มีรายละเอียดดังนี้

ตารางที่ 4.4.3-1 ความเข้มข้นของก๊าซมีเทนที่วิเคราะห์ได้จากก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้น

ตัวอย่าง	ความเข้มข้นของก๊าซมีเทน (ร้อยละ)
- ใบอ้อยไม่ผ่านการบำบัดเบื้องต้น	16.50
การบำบัดเบื้องต้นทางความร้อนด้วยไอน้ำ	
- SP 15	18.90
- SP 30	13.70
- SP 60	30.40

ตารางที่ 4.4.3-1 (ต่อ)

ตัวอย่าง	ความเข้มข้นของก๊าซมีเทน (ร้อยละ)
การบำบัดเบื้องต้นทางความร้อนด้วยน้ำร้อน	
- HP 15	14.80
- HP 30	10.00
- HP 60	14.40
การบำบัดเบื้องต้นทางชีวภาพ	
- BP 1:6 (1)	16.20
- BP 1:6 (3)	18.70
- BP 1:6 (5)	9.40
- BP 1:6 (7)	13.00
- BP 1:3 (1)	14.40
- BP 1:3 (3)	17.60
- BP 1:3 (5)	20.90
- BP 1:3 (7)	18.30
- BP 1:2 (1)	14.40
- BP 1:2 (3)	7.60
- BP 1:2 (5)	17.50
- BP 1:2 (7)	15.70
- BP 1:2 (1)	14.40

การวิเคราะห์ปริมาณความเข้มข้นของก๊าซมีเทนในก๊าซชีวภาพของการทดลองที่ 2 ซึ่งได้ทำการเก็บตัวอย่างในวันที่ 35 ของการหมัก ซึ่งใช้ค่าปริมาณกรดไขมันระเหยที่วิเคราะห์ (ในหัวข้อที่ 4.4.2) เป็นตัวชี้วัดในการเลือกวันเก็บตัวอย่างก๊าซชีวภาพ เนื่องจากในช่วงวันดังกล่าวเป็นช่วงที่ปริมาณกรดไขมันระเหยเริ่มลดต่ำลง (ปริมาณกรดไขมันระเหยจะเริ่มเพิ่มขึ้นประมาณวันที่ 5 ถึงวันที่ 20 ของการหมัก และจะเริ่มลดลงประมาณวันที่ 20 ถึงวันที่ 30 ของการหมัก) โดยผลการวิเคราะห์ความเข้มข้นของก๊าซมีเทนมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 7.60-30.40 จะเห็นได้ว่าค่าความเข้มข้นของก๊าซมีเทนมีค่าต่ำ ซึ่งมีหลายสาเหตุ เช่น เนื่องมาจากไบอัสย่อยสลายในสภาพไร้อากาศได้ยาก และช่วงที่ทำการวิเคราะห์ก๊าซชีวภาพอาจอยู่ในช่วงที่จุลินทรีย์ที่สร้างมีเทนทำงานได้ไม่ดี เนื่องจากค่าความเป็นกรด-ด่างมีค่าสูงกว่าช่วงที่เหมาะสมดังที่กล่าวในหัวข้อ 4.4.2 หรืออาจเกิดจากการเก็บตัวอย่างมาวิเคราะห์ เนื่องทางผู้วิจัยได้จัดทำชุดการทดลองที่ทำความสะอาดกับชุดการทดลองสำหรับวัดก๊าซชีวภาพอีกชุดหนึ่ง เพื่อใช้ในการวิเคราะห์พารามิเตอร์อื่นๆต่างหาก เช่น กรดไขมันระเหย สภาพต่าง และความเป็นกรด-ด่าง ที่เป็นคนละชุดกับการทดลองในการวัดก๊าซชีวภาพ ซึ่งอาจนำมาใช้เป็นตัวแทนได้ไม่ดีพอ และเนื่องจากความไม่พร้อมของอุปกรณ์ในการวิเคราะห์ความเข้มข้นของก๊าซมีเทน ซึ่งไม่สามารถกระทำการวัดได้อย่างต่อเนื่อง โดยการเก็บตัวอย่างเพียงครั้งเดียวนั้นไม่เพียงพอต่อการวิเคราะห์พารามิเตอร์ดังกล่าวให้มีความแม่นยำได้

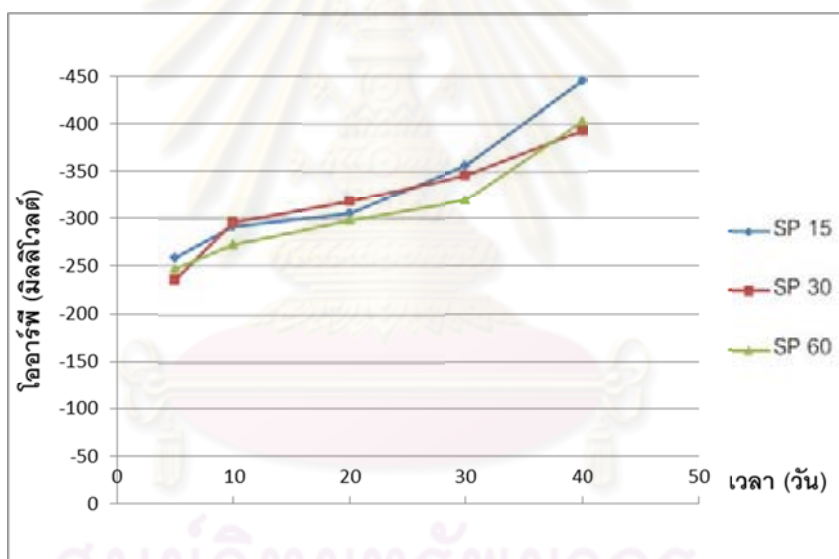
จากหัวข้อ 4.4.1 จะเห็นว่าปริมาณก๊าซชีวภาพจะเกิดขึ้นในอัตราที่ในช่วงวันที่ 15-20 ของการหมัก แต่ค่ากรดไขมันระเหยที่วิเคราะห์ได้ก็มีค่าสูงด้วย จากนั้นเข้าสู่ช่วงวันที่ 30 ของการหมัก ปริมาณก๊าซชีวภาพและค่ากรดไขมันระเหยมีแนวโน้มที่ลดลง และพิจารณาค่าความเป็นกรด-ด่างควบคู่กันพบว่าในช่วงวันดังกล่าวมีค่าลดลง แสดงว่าองค์ประกอบก๊าซชีวภาพที่เกิดในช่วงในวันแรกคาดว่าเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

4.4.4 ความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน

ค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันแสดงถึงแนวโน้มในการให้หรือรับอิเล็กตรอน ถ้ามีค่าเป็นบวกแสดงว่าระบบมีแนวโน้มในการรับอิเล็กตรอน หมายความว่าในระบบนั้นมีสารละลายที่อาจเป็นออกซิไดเซอร์หรือโมเลกุลที่แสดงแนวโน้มในการรับอิเล็กตรอน เช่น มีออกซิเจนในน้ำทำให้ค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันมีค่าเป็นบวก เนื่องจากออกซิเจนเป็นสารรับอิเล็กตรอนที่ดี สำหรับในกรณีที่ค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันที่เป็นลบแสดงว่าระบบมีสารละลายที่แสดงแนวโน้มในการให้อิเล็กตรอน เช่น ระบบไร้อากาศ ที่มักจะพบว่าความต่างศักย์

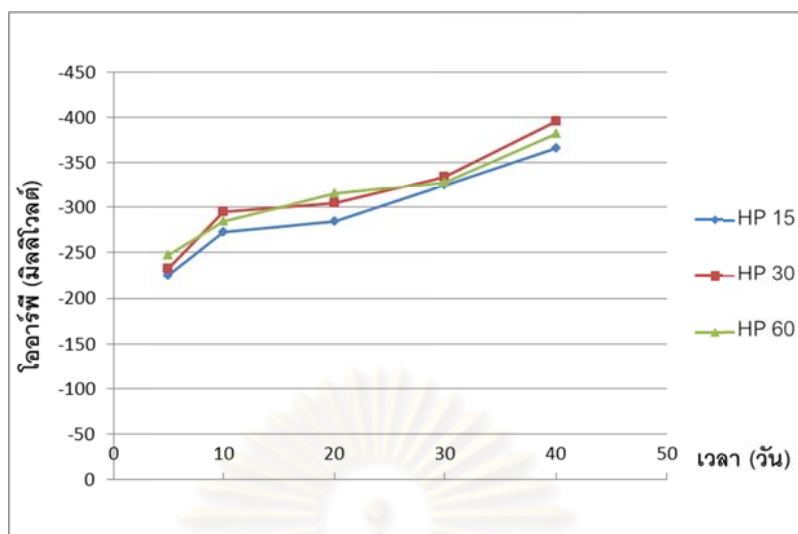
ออกซิเดชัน-รีดักชันมีค่าเป็นลบ เห็นได้ว่าค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันดังกล่าวไม่ได้หมายถึงความเข้มข้นของสารใดสารหนึ่ง แต่จะบอกกว้างๆ ว่าระบบมีสารให้หรือรับอิเล็กตรอน และไม่ได้แสดงค่าของสารให้หรือรับอิเล็กตรอนตัวใดตัวหนึ่ง หากแต่แสดงถึงผลรวมของสารที่ให้หรือรับอิเล็กตรอนทุกตัว

สำหรับค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันที่วัดได้จากการทดลองที่ 2 ได้ทำการเก็บตัวอย่างจำนวน 5 ครั้ง ซึ่งทำการวัดพร้อมกับการวิเคราะห์ค่ากรดไขมันระเหย ค่าสภาพต่าง และค่าความเป็นกรด-ด่าง จากผลการวัดค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันในช่วงวันที่ 5 ถึงวันที่ 40 ของการหมัก พบว่ามีค่าอยู่ในช่วง -225 ถึง -446 มิลลิโวลต์ ซึ่งมีค่าเป็นลบแสดงว่าในระบบการหมักอยู่ในสภาพไร้อากาศ สำหรับค่าที่วัดได้แต่ละตัวอย่างแสดงดังรูปที่ 4.4.4-1 ถึงรูปที่ 4.4.4-5

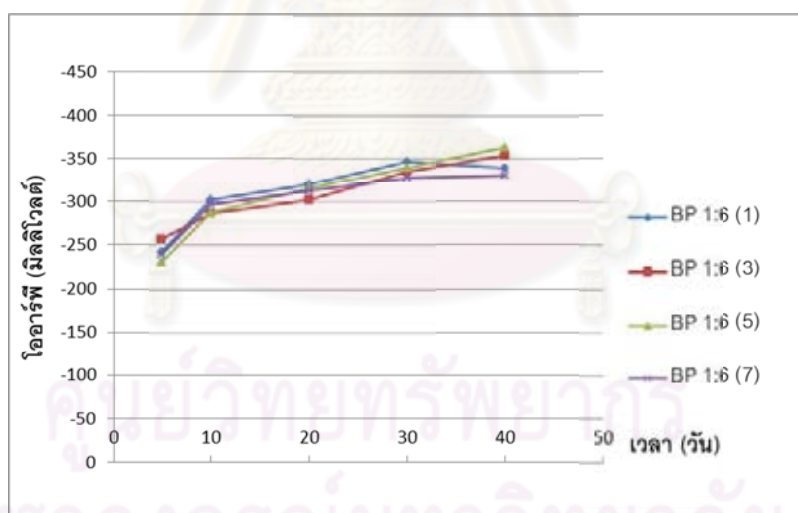


รูปที่ 4.4.4-1 ค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันของไบอัสอย

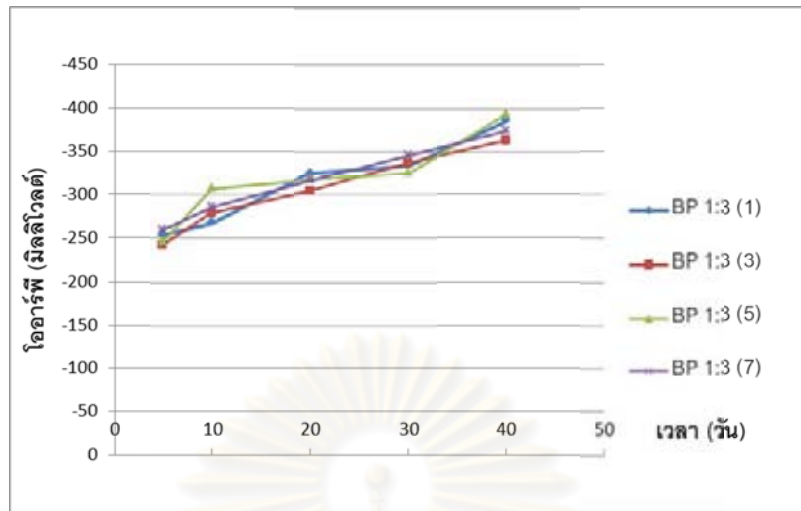
ที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นด้วยไอน้ำ



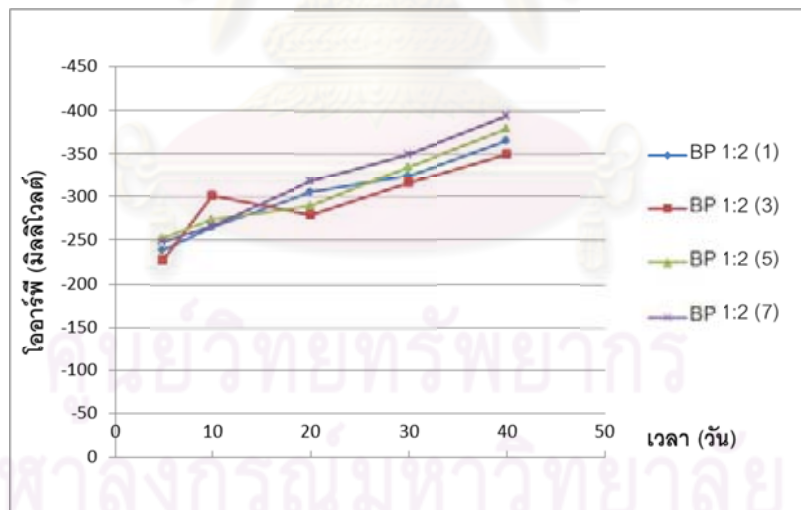
รูปที่ 4.4.4-2 ค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันของใบอ้อย
ที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นด้วยน้ำร้อน



รูปที่ 4.4.4-3 ค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันของใบอ้อยที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นทางชีวภาพ
ที่อัตราส่วนผสมมูลวัวต่อใบอ้อย 1:6



รูปที่ 4.4.4-4 ค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันของไบอ้อยที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นทางชีวภาพ
ที่อัตราส่วนผสมมูลวัวต่อไบอ้อย 1:3



รูปที่ 4.4.4-5 ค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันของไบอ้อยที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นทางชีวภาพ
ที่อัตราส่วนผสมมูลวัวต่อไบอ้อย 1:2

4.5 ผลการทดลองที่ 3 การทดลองผลิตก๊าซชีวภาพด้วยถังหมักไร้อากาศของไบโอดีเซลผ่านการบำบัดเบื้องต้นทางความร้อนและทางชีวภาพ

การทดลองนี้เป็นการศึกษาปริมาณการผลิตก๊าซชีวภาพที่เกิดจากการย่อยสลายไบโอดีเซลผ่านการบำบัดเบื้องต้นทางความร้อนและทางชีวภาพ โดยทำการเลือกตัวอย่างไบโอดีเซลที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นจากการทดลองที่ 2 ที่มีปริมาณการผลิตก๊าซชีวภาพที่มากที่สุด จากตัวอย่างไบโอดีเซลที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นด้วยไอน้ำจำนวน 1 ตัวอย่าง จากตัวอย่างไบโอดีเซลที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นด้วยน้ำร้อนจำนวน 1 ตัวอย่าง จากตัวอย่างไบโอดีเซลที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นทางชีวภาพจำนวน 2 ตัวอย่าง มาใช้การทดลองที่ 3

จากผลการทดลองที่ 2 (หัวข้อ 4.4) พบว่า ตัวอย่างไบโอดีเซลที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นทางความร้อนด้วยไอน้ำที่ระยะเวลา 60 นาที (SP 60) และตัวอย่างไบโอดีเซลที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นทางความร้อนด้วยน้ำร้อนที่ระยะเวลา 60 นาที (HP 60) มีปริมาณการผลิตก๊าซชีวภาพสะสมสูงสุดเท่ากับ 373.46 และ 154.05 มิลลิลิตรต่อกรัมของแข็งระเหย ตามลำดับ ส่วนการบำบัดเบื้องต้นทางชีวภาพนั้นพบว่า ตัวอย่างไบโอดีเซลที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นทางชีวภาพที่อัตราส่วนผสมปริมาณมูลวัวต่อไบโอดีเซล 1:3 และ 1:2 ที่ระยะเวลาการบำบัดเบื้องต้น 7 วัน (BP 1:3 วันที่ 7 และ BP 1:2 วันที่ 7) มีปริมาณการผลิตก๊าซชีวภาพสะสมสูงสุดเท่ากับ 133.20 และ 146.03 มิลลิลิตรต่อกรัมของแข็งระเหย ตามลำดับ โดยการทดลองนี้แบ่งเป็น 2 ช่วง คือ (ปริมาณก๊าซชีวภาพแสดงดังตารางที่ ค-1 ในภาคผนวก ค)

ช่วงที่ 1 เป็นการทดลองตัวอย่างที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นทางความร้อน

- ถังหมักที่ 1 ใช้สำหรับหมักตัวอย่างไบโอดีเซลที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นด้วยไอน้ำ ที่ระยะเวลาการบำบัดเบื้องต้น 60 นาที (SP 60)
- ถังหมักที่ 2 ใช้สำหรับหมักตัวอย่างไบโอดีเซลที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นด้วยน้ำร้อน ที่ระยะเวลาการบำบัดเบื้องต้น 60 นาที (HP 60)

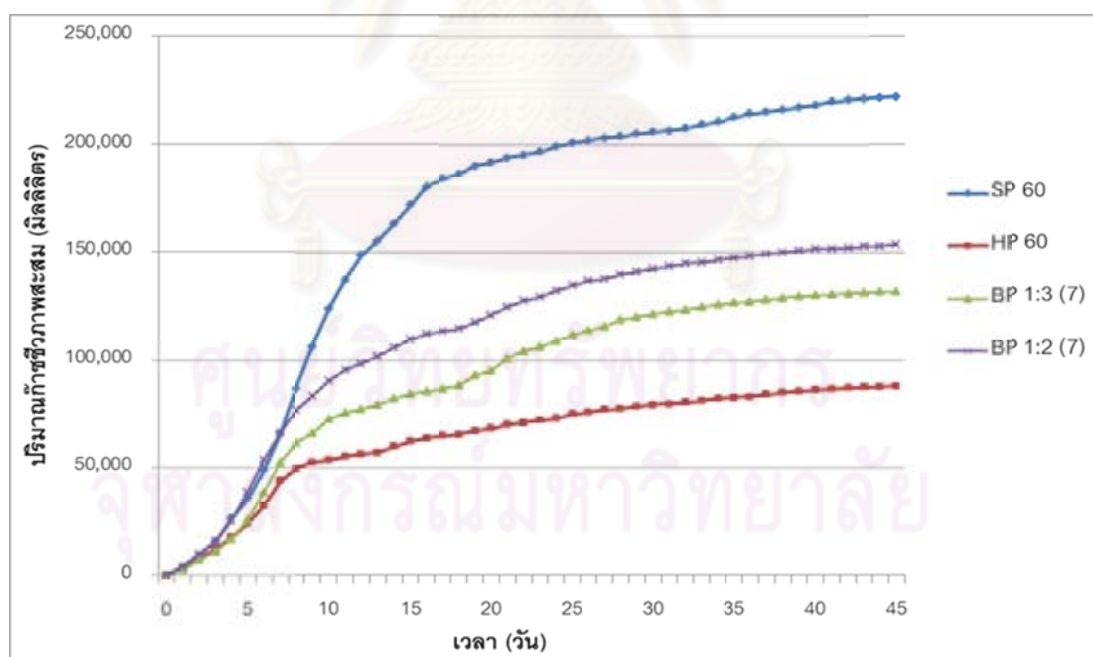
ช่วงที่ 2 เป็นการทดลองตัวอย่างที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นทางชีวภาพ

- ถังหมักที่ 1 ใช้สำหรับหมักตัวอย่างไบโอดีเซลที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นทางชีวภาพที่อัตราส่วนผสมมูลวัวต่อไบโอดีเซล 1:3 ที่ระยะเวลาทำการบำบัดเบื้องต้น 7 วัน (BP 1:3 (7))

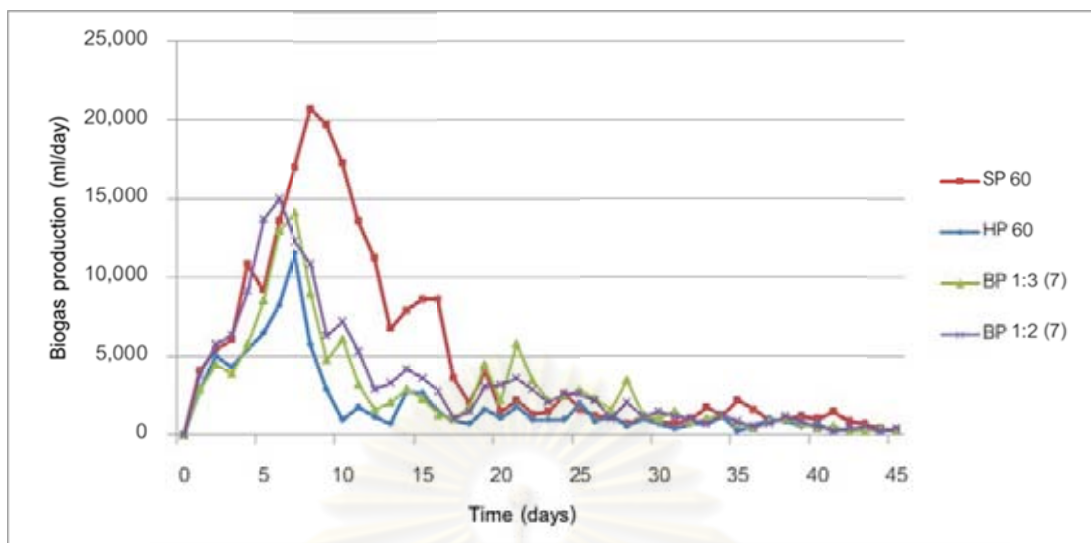
- ถังหมักที่ 2 ใช้สำหรับหมักตัวอย่างไบอ้อยที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นทางชีวภาพที่อัตราส่วนผสมมูลวัวต่อไบอ้อย 1:2 ที่ระยะเวลาทำการบำบัดเบื้องต้น 7 วัน (BP 1: 2 (7))

4.5.1 ผลการวัดปริมาณก๊าซชีวภาพในการทดลองที่ 3

ในการทดลองนี้ได้ทำการวัดปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจากถังหมักไร้อากาศขนาด 20 ลิตรจำนวน 2 ถัง ซึ่งการทดลองนี้ได้นำตัวอย่างไบอ้อยที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นทางความร้อนและทางชีวภาพที่มีปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพที่ดีที่สุดจากการทดลองที่ 2 มาใช้ในการทดลองดังที่กล่าวไว้แล้วในข้างต้น โดยจะทำการวัดปริมาณก๊าซชีวภาพทุกวันจนกว่าไม่เกิดก๊าซชีวภาพหรือเกิดขึ้นน้อยมาก รวมแล้วเป็นระยะเวลาประมาณ 45 วัน สำหรับปริมาณก๊าซชีวภาพที่วัดได้จากการทดลองที่ 3 ประกอบด้วยปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมและปริมาณก๊าซชีวภาพรายวันแสดงดังรูปที่ 4.5.1-1 และรูปที่ 4.5.1-2 มีรายละเอียดดังนี้



รูปที่ 4.5.1-1 ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมของตัวอย่าง SP 60, HP 60, BP 1:3 (7) และ BP 1:2 (7) ในการทดลองที่ 3



รูปที่ 4.5.1-2 ปริมาณก๊าซชีวภาพรายวันของของตัวอย่าง SP 60, HP 60, BP 1:3 (7) และ BP 1:2 (7) ในการทดลองที่ 3

การบำบัดเบื้องต้นทางความร้อน

- ถังหมักที่ 1 จากผลการวัดปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจากการหมักไบออสยที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นด้วยไอน้ำที่ระยะเวลา 60 นาที มีปริมาณสะสมรวมเท่ากับ 221,904 มิลลิลิตร (ดังรูปที่ 4.5.1-1) และมีปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพรายวันสูงสุดเท่ากับ 20,736 มิลลิลิตรต่อวัน ในวันที่ 8 ของการหมักด้วยถังหมักแบบไร้อากาศ (ดังรูปที่ 4.5.1-2)

- ถังหมักที่ 2 จากผลการวัดปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจากการหมักไบออสยที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นด้วยน้ำร้อนที่ระยะเวลา 60 นาที มีปริมาณสะสมรวมเท่ากับ 88,063 มิลลิลิตร (ดังรูปที่ 4.5.1-1) และมีปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพรายวันสูงสุดเท่ากับ 11,520 มิลลิลิตรต่อวัน ในวันที่ 7 ของการหมักด้วยถังหมักแบบไร้อากาศ (ดังรูปที่ 4.5.1-2)

จากผลการวัดปริมาณก๊าซชีวภาพของไบออสยและน้ำย่อยไบออสยที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นด้วยไอน้ำ และน้ำร้อน พบว่า ปริมาณก๊าซชีวภาพมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงวันที่ 4 ถึงวันที่ 8 และจะมีปริมาณก๊าซชีวภาพเกิดสูงสุดในวันที่ในวันที่ 7 และในวันที่ 8 จากนั้นปริมาณก๊าซชีวภาพจะเริ่มลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงวันที่ 9 ถึงประมาณวันที่ 13 ของการเดินระบบ จากนั้นปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพจะเกิดคงที่จนถึงวันที่ 45 ของการเดินระบบ

การบำบัดเบื้องต้นทางชีวภาพ

- ถังหมักที่ 1 จากผลการวัดปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจากการหมักไบโอดีปที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นทางชีวภาพที่อัตราส่วนมูลวัวต่อไบโอดีป 1:3 ที่ระยะเวลาการบำบัดเบื้องต้น 7 วัน มีปริมาณสะสมรวมเท่ากับ 132,017 มิลลิลิตร (ดังรูปที่ 4.5.1-1) และมีปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพรายวันสูงสุดเท่ากับ 14,112 มิลลิลิตรต่อวัน ในวันที่ 7 ของการหมักด้วยถังหมักแบบไร้อากาศ (ดังรูปที่ 4.5.1-2)

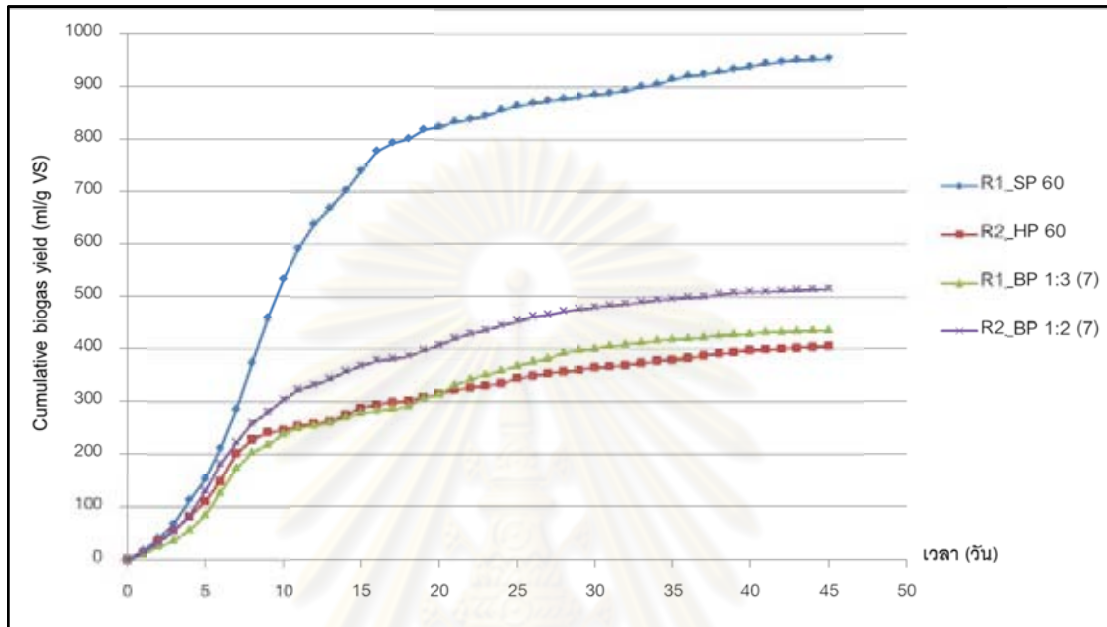
- ถังหมักที่ 2 จากผลการวัดปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจากการหมักไบโอดีปที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นทางชีวภาพที่อัตราส่วนมูลวัวต่อไบโอดีป 1:2 ที่ระยะเวลาการบำบัดเบื้องต้น 7 วัน มีปริมาณสะสมรวมเท่ากับ 153,461 มิลลิลิตร (ดังรูปที่ 4.5.1-1) และมีปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพรายวันสูงสุดเท่ากับ 14,976 มิลลิลิตรต่อวัน ในวันที่ 6 ของการหมักด้วยถังหมักแบบไร้อากาศ (ดังรูปที่ 4.5.1-2)

จากผลการวัดปริมาณก๊าซชีวภาพของไบโอดีปและน้ำย่อยไบโอดีปที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นทางชีวภาพ พบว่า ปริมาณก๊าซชีวภาพมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงวันที่ 1 ถึงวันที่ 4 และจะมีปริมาณก๊าซชีวภาพเกิดสูงสุดในวันที่ 5 และในวันที่ 6 จากนั้นปริมาณก๊าซชีวภาพจะเริ่มลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงวันที่ 7 จนถึงประมาณวันที่ 12 ของการเดินระบบ จากนั้นปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพจะเกิดคงที่จนถึงวันที่ 45 ของการเดินระบบ และเมื่อทำการเปรียบเทียบกับอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นของการบำบัดเบื้องต้นทางความร้อนด้วยไอน้ำ พบว่า มีปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมที่น้อยกว่า เนื่องจากว่าการบำบัดเบื้องต้นทางชีวภาพต้องใช้ระยะเวลาในการย่อยสลายลิกนินที่ยาวนาน (Silverstein, 2004) โดยเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินยังไม่แยกออกจากกัน ทำให้ไม่สามารถเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างเซลลูโลสซึ่งเป็นแหล่งพลังงานกับจุลินทรีย์ได้ดีพอ จึงส่งผลให้ผลิตก๊าซชีวภาพออกมาได้น้อย

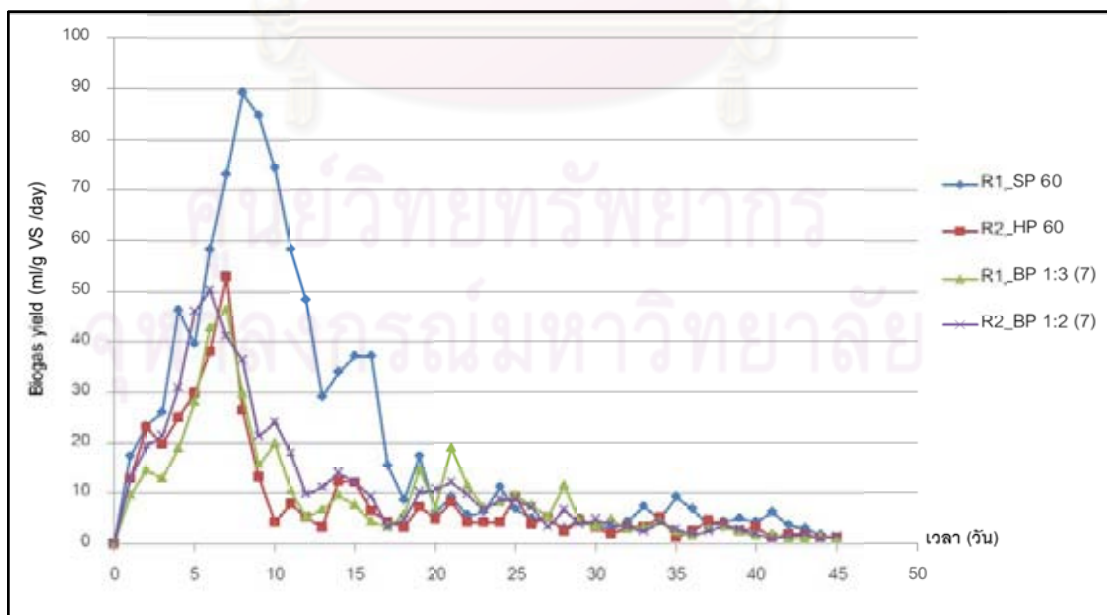
4.5.2 ผลการวิเคราะห์ปริมาณก๊าซชีวภาพต่อกรัมของแข็งระเหยในการทดลองที่ 3

จากผลการวิเคราะห์ปริมาณของแข็งระเหยของตัวอย่างไบโอดีปที่นำมาใช้ในการทดลองที่ 3 พบว่า ตัวอย่างไบโอดีป SP 60, HP 60, BP 1:3 (7) และ BP 1:2 (7) มีค่าของแข็งระเหยร้อยละ 19.38, 18.10, 17.82 และ 17.49 ตามลำดับ มีค่าของแข็งทั้งหมดร้อยละ 21.38, 20.09, 19.70 และ 19.30 ตามลำดับ จากนั้นนำค่าของแข็งระเหยไปเปรียบเทียบกับปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้น (ในหัวข้อ 4.5.1) จะได้ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมต่อกรัมของแข็งระเหยแสดงดัง

รูปที่ 4.5.2-1 และปริมาณก๊าซชีวภาพรายวันต่อกรัมของแข็งระเหยแสดงดังรูปที่ 4.5.2-2 มีรายละเอียดดังนี้



รูปที่ 4.5.2-1 ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมต่อปริมาณกรัมของแข็งระเหยของตัวอย่าง SP 60, HP 60, BP 1:3 (7) และ BP 1:2 (7) ในการทดลองที่ 3



รูปที่ 4.5.2-2 ปริมาณก๊าซชีวภาพรายวันต่อปริมาณกรัมของแข็งระเหยของตัวอย่าง SP 60, HP 60, BP 1:3 (7) และ BP 1:2 (7) ในการทดลองที่ 3

การบำบัดเบื้องต้นทางความร้อน

- ถังหมักที่ 1 (SP 60) มีปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมสูงสุดต่อปริมาณกรัมของแข็งระเหยในวันที่ 45 ของการหมัก มีค่าเท่ากับ 954 มิลลิลิตรต่อกรัมของแข็งระเหย (ดังรูปที่ 4.5.2-1) สำหรับปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นรายวันของตัวอย่าง SP 60 พบว่า มีปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพรายวันสูงสุดในวันที่ 8 ของการหมัก มีค่าเท่ากับ 89 มิลลิลิตรต่อกรัมของแข็งระเหยต่อวัน (ดังรูปที่ 4.5.2-2)

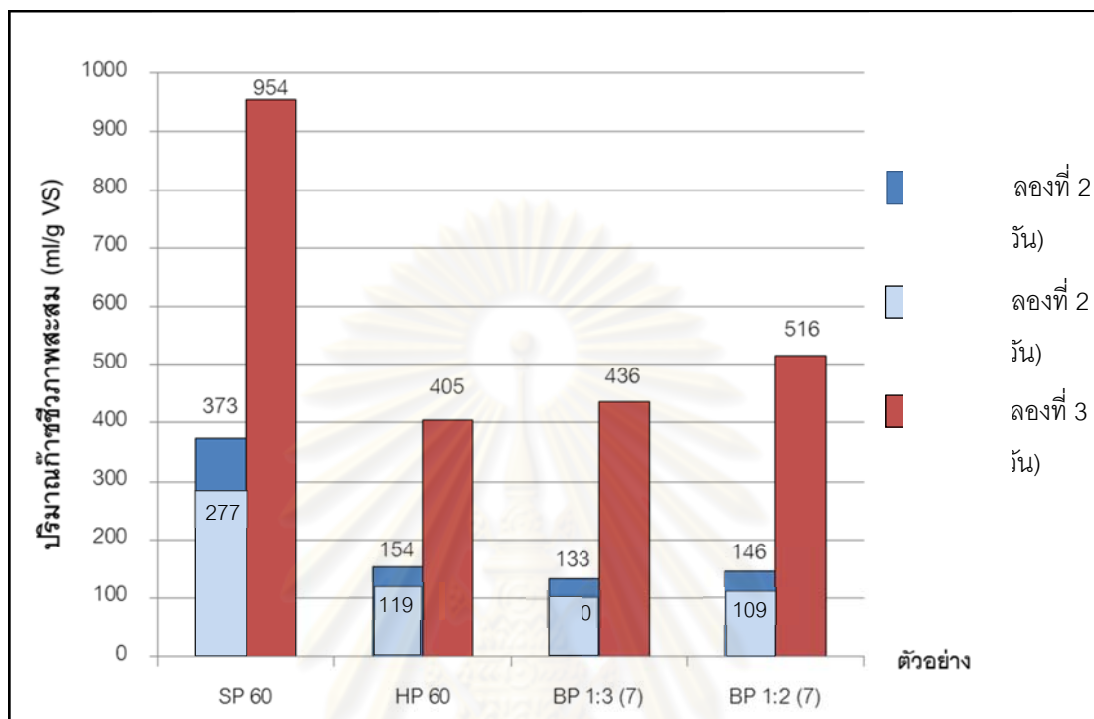
- ถังหมักที่ 2 (HP 60) มีปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมสูงสุดต่อปริมาณกรัมของแข็งระเหยในวันที่ 45 ของการหมัก มีค่าเท่ากับ 405 มิลลิลิตรต่อกรัมของแข็งระเหย (ดังรูปที่ 4.5.2-1) สำหรับปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นรายวันของตัวอย่าง HP 60 พบว่า มีปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพรายวันสูงสุดในวันที่ 7 ของการหมัก มีค่าเท่ากับ 53 มิลลิลิตรต่อกรัมของแข็งระเหยต่อวัน (ดังรูปที่ 4.5.2-2)

การบำบัดเบื้องต้นทางความร้อน

- ถังหมักที่ 1 (BP 1:3 (7)) มีปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมสูงสุดต่อปริมาณกรัมของแข็งระเหยในวันที่ 45 ของการหมัก มีค่าเท่ากับ 436 มิลลิลิตรต่อกรัมของแข็งระเหย (ดังรูปที่ 4.5.2-1) สำหรับปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นรายวันของตัวอย่าง BP 1:3 (7) พบว่ามีปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพรายวันสูงสุดในวันที่ 7 ของการหมัก มีค่าเท่ากับ 46.6 มิลลิลิตรต่อกรัมของแข็งระเหยต่อวัน (ดังรูปที่ 4.5.2-2)

- ถังหมักที่ 2 (BP 1:2 (7)) มีปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมสูงสุดต่อปริมาณกรัมของแข็งระเหยในวันที่ 45 ของการหมัก มีค่าเท่ากับ 516 มิลลิลิตรต่อกรัมของแข็งระเหย (ดังรูปที่ 4.5.2-1) สำหรับปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นรายวันของตัวอย่าง BP 1:2 (7) พบว่ามีปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพรายวันสูงสุดในวันที่ 6 ของการหมัก มีค่าเท่ากับ 50.4 มิลลิลิตรต่อกรัมของแข็งระเหยต่อวัน (ดังรูปที่ 4.5.2-2)

เปรียบเทียบปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมของการทดลองที่ 3 กับการทดลองที่ 2 (ในหัวข้อ 4.4.1) แสดงดังรูปที่ 4.5.2-3 มีรายละเอียดดังนี้



รูปที่ 4.5.2-3 กราฟเปรียบเทียบปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมต่อกรัมของแข็งระเหยของการทดลองที่ 2 และการทดลองที่ 3

เมื่อทำการเปรียบเทียบแนวโน้มของปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพสะสมต่อกรัมของแข็งระเหยที่เกิดขึ้นของตัวอย่างในการทดลองที่ 2 และการทดลองที่ 3 พบว่า ปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพสะสมต่อกรัมของแข็งระเหยของตัวอย่าง SP 60, BP 1:3 (7) และ BP 1:2 (7) มีแนวโน้มของปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมที่เกิดขึ้นสอดคล้องกันทั้งสองการทดลอง คือ ในการทดลองที่ 2 ตัวอย่าง SP 60, BP 1:3 (7) และ BP 1:2 (7) มีปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมสูงสุด เท่ากับ 373, 133 และ 146 มิลลิลิตรต่อกรัมของแข็งระเหย ตามลำดับ โดยในการทดลองที่ 3 ตัวอย่าง SP 60, BP 1:3 (7) และ BP 1:2 (7) มีปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมสูงสุด เท่ากับ 954, 436 และ 516 มิลลิลิตรต่อกรัมของแข็งระเหย ตามลำดับ

สำหรับปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมที่เกิดขึ้นของตัวอย่าง HP 60 ในการทดลองที่ 2 และการทดลองที่ 3 พบว่า มีแนวโน้มของปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพสะสมที่ไม่สอดคล้องกัน

กล่าวคือ ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมของตัวอย่าง HP 60 ที่เกิดในการทดลองที่ 3 ควรมียุทธศาสตร์ ปริมาณ ก๊าซชีวภาพสะสมที่มากกว่าตัวอย่าง BP 1:3 (7) และตัวอย่าง BP 1:2 (7) เมื่อเปรียบเทียบกับ การทดลองที่ 2 ซึ่งมีสาเหตุเนื่องมาจากว่าถังหมักในช่วงของวันที่ 8 ถึงวันที่ 10 เกิดการรั่วไหลของก๊าซ ชีวภาพในถังหมักบริเวณข้อต่อแกนหมุนใบกวนกับถังหมัก (ผู้วิจัยได้ดำเนินการอุดรอยรั่วในวันที่ 10 ของการหมัก) ดังนั้นจึงส่งผลให้ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมที่ตรวจวัดได้ของตัวอย่าง HP 60 มี คำน้อยกว่าตัวอย่าง BP 1:3 (7) และตัวอย่าง BP 1:2 (7)

เปรียบเทียบปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดรายวันของการทดลองที่ 3 กับการทดลองที่ 2 (ในหัวข้อ 4.4.1) พบว่า ปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพรายวันมีแนวโน้มที่สอดคล้องกัน (ในเชิงของ ปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้น) กล่าวคือ ในการทดลองที่ 2 สำหรับตัวอย่าง SP 60, HP 60, BP 1:3(7) และ BP 1:2(7) มีก๊าซชีวภาพรายวันที่เกิดขึ้นสูงสุดมีปริมาณเท่ากับ 13.5, 4.6, 4.44 และ 4.6 มิลลิลิตรต่อกรัมของแข็งระเหยต่อวัน ตามลำดับ โดยในการทดลองที่ 3 สำหรับตัวอย่าง SP 60, HP 60, BP 1:3(7) และ BP 1:2(7) มีก๊าซชีวภาพรายวันที่เกิดขึ้นสูงสุดมีปริมาณเท่ากับ 89.0, 53.0, 46.6 และ 50.4 มิลลิลิตรต่อกรัมของแข็งระเหยต่อวัน ตามลำดับ เห็นได้ว่ามีปริมาณ การเกิดก๊าซชีวภาพรายวันที่สอดคล้องกัน

สำหรับช่วงระยะเวลาในการเกิดก๊าซชีวภาพรายวันที่มีปริมาณสูงสุดของการ ทดลองที่ 2 และการทดลองที่ 3 พบว่า ช่วงเวลาการเกิดก๊าซชีวภาพสูงสุดของการทดลองที่ 2 มีค่า อยู่ในช่วงวันที่ 17 ถึงวันที่ 20 และในการทดลองที่ 3 ช่วงเวลาการเกิดก๊าซชีวภาพสูงสุดอยู่ในช่วง วันที่ 6 ถึงวันที่ 8 เห็นได้ว่าในการทดลองที่ 3 มีอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพสูงสุดที่เร็วกว่าการทดลอง ที่ 2 อาจมีปัจจัยในเรื่องของการกวนผสม โดยการกวนผสมเป็นการทำให้จุลินทรีย์ในระบบมีโอกาส สัมผัสกับอาหารมากขึ้น ซึ่งส่งผลให้ปฏิกิริยาการย่อยสลายเกิดได้เร็วเมื่อเปรียบเทียบกับ การตั้งทิ้ง ไว้แบบการทดลองที่ 2

4.5.3 ผลการวัดค่าซีไอดีละลายในการทดลองที่ 3

ค่าซีไอดีละลายเป็นค่าที่บ่งบอกถึงความสกปรก หรือปริมาณสารอินทรีย์ที่ ละลายอยู่ในน้ำที่ผ่านการกรอง สำหรับค่าซีไอดีละลายของการทดลองที่ 3 ผู้วิจัยได้ทำการเก็บ ตัวอย่างในถังหมักมาทำการวิเคราะห์ในวันที่ 7, 15, 22, 30, 38 และ 45 ของการหมัก หรือเก็บ ตัวอย่างอาทิตย์ละ 1 ครั้ง มีรายละเอียดดังนี้

การบำบัดเบื้องต้นทางความร้อน

- ค่าซีไอดีละลายของตัวอย่างของใบอ้อยที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นด้วยไอน้ำที่ระยะเวลาการบำบัดเบื้องต้น 60 นาที ในถังหมักที่ 1 พบว่า มีค่าซีไอดีละลายเฉลี่ยเริ่มต้นเท่ากับ $7,017 \pm 249$ มิลลิกรัมต่อลิตร จากนั้นค่าซีไอดีละลายจะเริ่มลดลงในวันที่ 7 ของการทดลอง จนถึงวันที่ 30 ซึ่งค่าซีไอดีละลายจะเริ่มมีค่าลดลงเล็กน้อยจนถึงวันที่ 45 ของการหมัก ซึ่งมีค่าซีไอดีละลายเท่ากับ $2,482 \pm 77$ มิลลิกรัมต่อลิตร แสดงดังตารางที่ 4.5.3-1

- ค่าซีไอดีละลายของตัวอย่างของใบอ้อยที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นด้วยน้ำร้อนที่ระยะเวลาการบำบัดเบื้องต้น 60 นาที ในถังหมักที่ 2 พบว่า มีค่าซีไอดีละลายเฉลี่ยเริ่มต้นเท่ากับ $5,530 \pm 113$ มิลลิกรัมต่อลิตร จากนั้นค่าซีไอดีละลายจะเริ่มลดลงในวันที่ 7 ของการทดลอง จนถึงวันที่ 30 ซึ่งค่าซีไอดีละลายจะเริ่มมีค่าลดลงเล็กน้อยจนถึงวันที่ 45 ของการหมัก ซึ่งมีค่าซีไอดีละลายเท่ากับ $1,780 \pm 19$ มิลลิกรัมต่อลิตร แสดงดังตารางที่ 4.5.3-1

จากผลการวิเคราะห์ค่าซีไอดีละลายของน้ำย่อยใบอ้อยที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นทางความร้อน พบว่า ค่าซีไอดีละลายของน้ำย่อยที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นด้วยไอน้ำ จะมีค่าซีไอดีละลายที่มากกว่าการบำบัดเบื้องต้นด้วยน้ำร้อน เนื่องจากการบำบัดด้วยไอน้ำเป็นการใช้ไอน้ำแรงดันสูงที่ทำให้เกิดปฏิกิริยา autohydrolysis จากนั้นปล่อยทิ้งไว้ภายใต้ความดันบรรยากาศ เมื่อความดันลดลงอย่างรวดเร็วจะส่งผลให้โครงสร้างลิกโนเซลลูโลสของวัตถุดิบแตกออก ซึ่งสามารถแยกเซลลูโลสออกจากเฮมิเซลลูโลสและลิกนิน ทำให้เกิดการย่อยสลายของเซลลูโลสได้ดี (Sun และ Cheng, 2002)

ตารางที่ 4.5.3-1 ผลการวิเคราะห์ค่าซีไอดีละลายของน้ำย่อยจากตัวอย่างไบอ้อยที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นทางความร้อน

วันที่เก็บตัวอย่าง	ค่าซีไอดีละลายเฉลี่ย (มิลลิกรัมต่อลิตร)		ค่าพิสัยซีไอดีละลาย (มิลลิกรัมต่อลิตร)	
	ถังหมักที่ 1 (SP 60)	ถังหมักที่ 2 (HP 60)	ถังหมักที่ 1 (SP 60)	ถังหมักที่ 2 (HP 60)
เริ่ม	7,017±249	5,530±113	6,736-7,210	5,432-5,654
7	5,902±31	4,220±41	5,871-5,933	4,172-4,247
15	4,837±25	3,314±43	4,810-4,860	3,275-3,360
22	3,961±46	2,400±70	3,922-4012	2,354-2,481
30	2,700±41	1,937±16	2,657-2,738	1,926-1,955
38	2,672±29	1,845±17	2,645-2,702	1,827-1,862
45	2,482±77	1,780±19	2,416-2,567	1,764-1,802

การบำบัดเบื้องต้นทางชีวภาพ

- ค่าซีไอดีละลายของตัวอย่างของไบอ้อยที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นทางชีวภาพที่อัตราส่วนผสมมูลวัวต่อไบอ้อย 1:3 ที่ระยะเวลาทำการบำบัดเบื้องต้น 7 วัน ในถังหมักที่ 1 พบว่ามีค่าซีไอดีละลายเฉลี่ยเริ่มต้นเท่ากับ 10,805±227 มิลลิกรัมต่อลิตร จากนั้นค่าซีไอดีละลายจะเริ่มลดลงในวันที่ 7 ของการทดลอง จนถึงวันที่ 30 ซึ่งค่าซีไอดีละลายจะเริ่มมีค่าลดลงเล็กน้อยจนถึงวันที่ 45 ของการหมัก ซึ่งมีค่าซีไอดีละลายเท่ากับ 6,012±26 มิลลิกรัมต่อลิตร แสดงดังตารางที่ 4.5.3-2

- ค่าซีไอดีละลายของตัวอย่างของไบอ้อยที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นทางชีวภาพที่อัตราส่วนผสมมูลวัวต่อไบอ้อย 1:2 ที่ระยะเวลาทำการบำบัดเบื้องต้น 7 วัน ในถังหมักที่ 1 พบว่ามีค่าซีไอดีละลายเฉลี่ยเริ่มต้นเท่ากับ 12,852±137 มิลลิกรัมต่อลิตร จากนั้นค่าซีไอดีละลายจะเริ่ม

ลดลงในวันที่ 7 ของการทดลอง จนถึงวันที่ 30 ซึ่งค่าซีไอดีละลายจะเริ่มมีค่าลดลงเล็กน้อยจนถึงวันที่ 45 ของการหมัก ซึ่งมีค่าซีไอดีละลายเท่ากับ $6,892 \pm 25$ มิลลิกรัมต่อลิตร แสดงดังตารางที่ 4.5.3-2

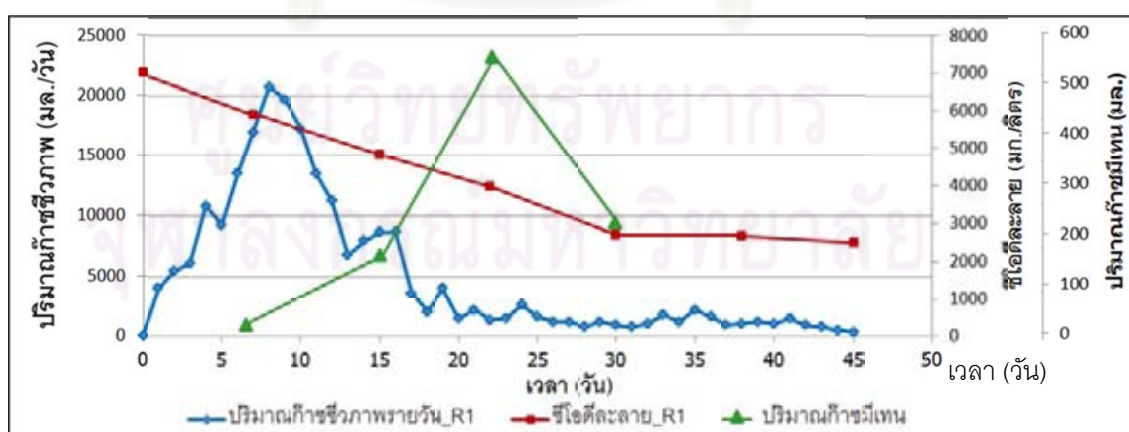
ตารางที่ 4.5.3-2 ผลการวิเคราะห์ค่าซีไอดีละลายของน้ำย่อยจากตัวอย่างไบอ้อยที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นทางชีวภาพ

วันที่เก็บ ตัวอย่าง	ค่าซีไอดีละลายเฉลี่ย (มิลลิกรัมต่อลิตร)		ค่าพิสัยซีไอดีละลาย (มิลลิกรัมต่อลิตร)	
	ถังหมักที่ 1 (BP 1:3_7)	ถังหมักที่ 2 (BP 1:2_7)	ถังหมักที่ 1 (BP 1:3_7)	ถังหมักที่ 2 (BP 1:2_7)
เริ่ม	10,805 \pm 227	12,852 \pm 137	10,572-11,026	12,732-13,002
7	8,800 \pm 50	9,852 \pm 82	8,751-8,852	9,762-9,921
15	8,057 \pm 85	8,867 \pm 47	7,962-8,125	8,826-8,918
22	7,313 \pm 17	8,006 \pm 86	7,295-7,328	7,948-8,105
30	6,577 \pm 22	7,396 \pm 106	6,552-6,592	7,278-7,483
38	6,230 \pm 67	7,104 \pm 12	6,175-6,304	7,095-7,118
45	6,012 \pm 26	6,892 \pm 25	5,982-6,028	6,872-6,920

จากผลการวิเคราะห์ค่าซีไอดีละลายของการบำบัดเบื้องต้นทางชีวภาพพบว่า ถังหมักที่ 2 ซึ่งเป็นตัวอย่างไบอ้อยที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นทางชีวภาพที่อัตราส่วนปริมาณมูลวัวต่อไบอ้อย 1:2 มีค่าซีไอดีละลายมากกว่าถังหมักที่ 1 ซึ่งเป็นตัวอย่างไบอ้อยที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นทางชีวภาพที่อัตราส่วนปริมาณมูลวัวต่อไบอ้อย 1:3 เห็นได้ว่าปริมาณอัตราส่วนมูลวัวต่อไบอ้อยที่ใส่ลงไปมีส่วนในการย่อยสลายโครงสร้างลิกโนเซลลูโลส กล่าวคือปริมาณสัดส่วนระหว่างไบอ้อยกับมูลวัวที่ใส่ลงไป อัตราส่วน 1:2 จะมีโอกาสการสัมผัสระหว่างไบอ้อยและหัวเชื้อได้ดีกว่า จึงทำให้

จุลินทรีย์ในหัวเชื้อสามารถเข้าไปย่อยสลายสารอินทรีย์ในไบโອอยได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทั้งนี้ค่าซีไอดีละลายที่วิเคราะห์ได้จากการทดลองการบำบัดเบื้องต้นทางชีวภาพมีค่าสูงกว่าการบำบัดเบื้องต้นทางความร้อน อาจเป็นเพราะในขั้นตอนการวิเคราะห์ซีไอดีละลายนั้นจะมีปริมาณมูลวัวติดผลกับไบโອอยมาด้วย เพราะว่าในระหว่างขั้นตอนการบำบัดเบื้องต้นทางชีวภาพ ไบโອอยกับมูลวัวมีการสัมผัสกันตลอดเวลา จึงส่งผลให้ค่าซีไอดีละลายที่ได้สูงกว่าความเป็นจริง (อย่างไรก็ตามค่าที่นำเสนอในตารางที่ 4.5.3-2 ได้นำค่าซีไอดีละลายของน้ำย่อยจากไบโອอยที่ผ่านกระบวนการบำบัดเบื้องต้นทางชีวภาพลบกับค่าซีไอดีละลายของมูลวัวแล้ว)

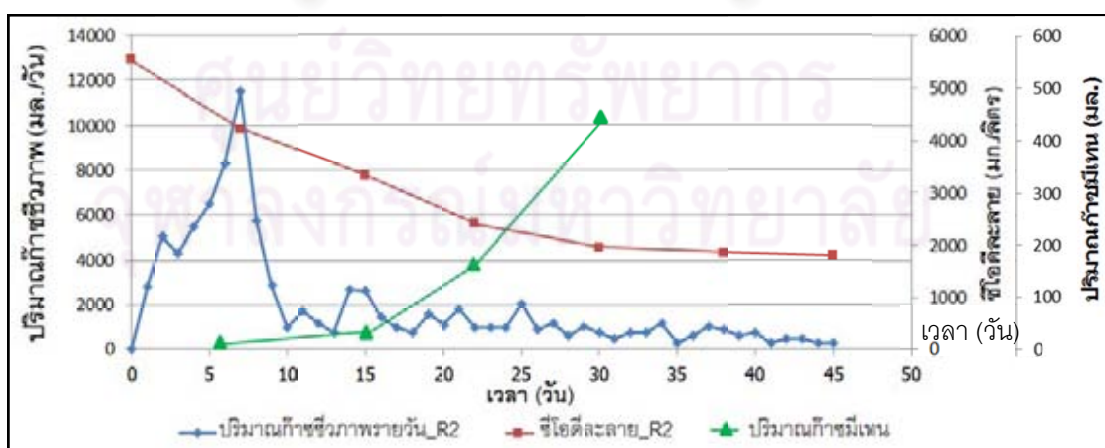
ความสัมพันธ์ระหว่างค่าซีไอดีละลาย ปริมาณก๊าซชีวภาพรายวัน และปริมาณก๊าซมีเทน ของถังหมักไร้อากาศถังที่ 1 สำหรับตัวอย่างที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นด้วยไอน้ำที่ระยะเวลา 60 นาที (แสดงดังรูปที่ 4.5.3-1) มีค่าซีไอดีละลายเริ่มต้นเท่ากับ $7,017 \pm 249$ มิลลิกรัมต่อลิตร และจะมีค่าลดลงในช่วงวันที่ 7 จนถึงวันที่ 45 ของการหมัก มีค่าอยู่ในช่วง $2,482 \pm 77$ ถึง $5,902 \pm 31$ มิลลิกรัมต่อลิตร สำหรับปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้น พบว่า ในช่วง 8 วันแรกของการเดินระบบ จะมีปริมาณก๊าซชีวภาพเกิดขึ้นมากที่สุด มีค่าอยู่ในช่วง 4,032-20,736 มิลลิลิตรต่อวัน จากนั้นปริมาณก๊าซชีวภาพจะเริ่มลดลงในช่วงวันที่ 9 ของเดินระบบ และปริมาณก๊าซชีวภาพเริ่มเกิดคงที่ในช่วงวันที่ 20 จนถึงวันที่ 45 ของการเดินระบบ ส่วนปริมาณก๊าซมีเทนเริ่มเพิ่มขึ้นในวันที่ 7 ของการเดินระบบจนถึงวันที่ 22 มีค่าอยู่ในช่วง 12-554 มิลลิลิตร และมีค่าลดลงในวันที่ 30 ของการเดินระบบ มีปริมาณเท่ากับ 212 มิลลิลิตร โดยมีความเข้มข้นของก๊าซมีเทนที่วิเคราะห์ได้ในช่วงวันที่ 7, 15, 22 และ 30 มีค่าร้อยละ 0.4, 21.6, 41.9 และ 50.2



รูปที่ 4.5.3-1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าซีไอดีละลาย ปริมาณก๊าซชีวภาพรายวัน และปริมาณก๊าซมีเทนของถังหมักไร้อากาศที่ 1 (SP 60)

จากรูปที่ 4.5.3-1 พบว่า ปริมาณก๊าซมีเทนมีค่าเพิ่มสูงขึ้นในวันที่ 7 ถึงวันที่ 15 จากนั้นจะเพิ่มสูงสุดในวันที่ 22 ของการหมัก เห็นได้ว่าในช่วงวันแรกจนถึงวันที่ 7 ของการหมักในระบบไร้อากาศจะเป็นขั้นตอนไฮโดรไลซิส จากนั้นจุลินทรีย์ในกลุ่มสร้างมีเทนเริ่มทำงานในช่วงวันที่ 15 ถึงวันที่ 22 ของการหมักไร้อากาศและในวันที่ 30 ของการหมักปริมาณก๊าซมีเทนเริ่มลดลง ซึ่งอาจเกิดจากอาหารในระบบไร้อากาศเริ่มหมด สำหรับปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดมากที่สุดในช่วงวันที่ 1 ถึงวันที่ 13 ของเดินระบบคาดว่าก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นดังกล่าวมีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นส่วนใหญ่

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าซีไอดีละลาย ปริมาณก๊าซชีวภาพรายวัน และปริมาณก๊าซมีเทน ของถังหมักไร้อากาศถังที่ 2 สำหรับตัวอย่างที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นด้วยน้ำร้อนที่ระยะเวลา 60 นาที (แสดงดังรูปที่ 4.5.3-2) มีค่าซีไอดีละลายเริ่มต้นเท่ากับ $5,530 \pm 113$ มิลลิกรัมต่อลิตร และจะมีค่าลดลงในช่วงวันที่ 7 จนถึงวันที่ 45 ของการหมัก มีค่าอยู่ในช่วง $1,780 \pm 19$ ถึง $4,220 \pm 41$ มิลลิกรัมต่อลิตร สำหรับปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้น พบว่าในช่วง 7 วันแรกของการเดินระบบ จะมีปริมาณก๊าซชีวภาพเกิดขึ้นมากที่สุด มีค่าอยู่ในช่วง 2,800-11,520 มิลลิตรต่อวัน จากนั้นปริมาณก๊าซชีวภาพจะเริ่มลดลงในช่วงวันที่ 8 ของเดินระบบ และเริ่มเกิดคั่งที่ในช่วงวันที่ 10 จนถึงวันที่ 45 ของการเดินระบบ ส่วนปริมาณก๊าซมีเทนเริ่มเพิ่มขึ้นในวันที่ 7 ของการเดินระบบจนถึงวันที่ 30 มีค่าอยู่ในช่วง 5-442 มิลลิตร โดยมีความเข้มข้นของก๊าซมีเทนที่วิเคราะห์ได้ในช่วงวันที่ 7, 15, 22 และ 30 มีค่าร้อยละ 0.3, 10.9, 36.7 และ 49.6 ตามลำดับ

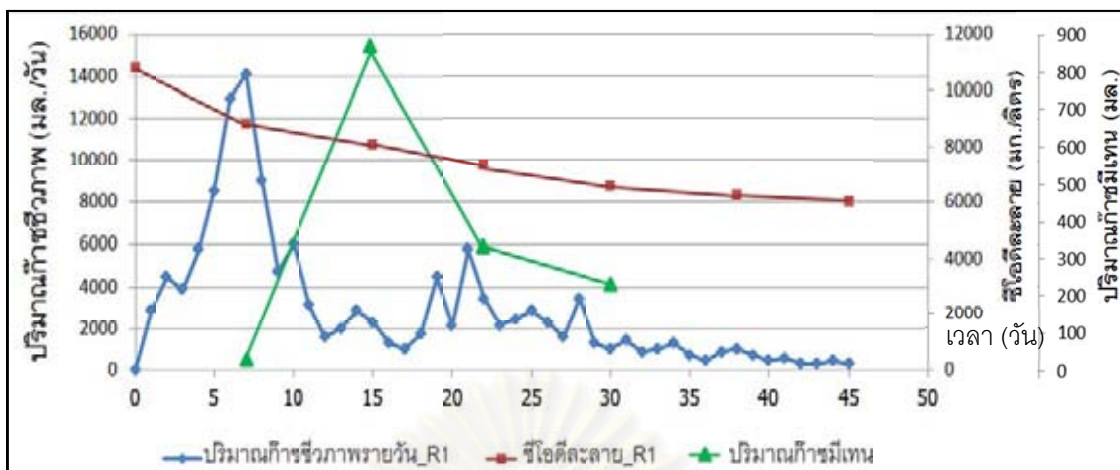


รูปที่ 4.5.3-2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าซีไอดีละลาย ปริมาณก๊าซชีวภาพรายวัน และปริมาณก๊าซมีเทนของถังหมักไร้อากาศที่ 2 (HP 60)

จากรูปที่ 4.5.3-2 พบว่า ปริมาณก๊าซมีเทนจะมีค่าค่อยๆ เพิ่มขึ้นจากวันที่ 7 ถึงวันที่ 45 ของการหมัก โดยในช่วงวันที่ 7 ถึงวันที่ 15 ของการหมักมีการสะสมของกรดไขมันระเหยภายในถังหมักไร้อากาศทำให้ผลิตภัณฑ์จากขั้นตอนการสร้างกรดซึ่งได้แก่ กรดไขมันระเหย ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และไฮโดรเจนไม่ถูกเปลี่ยนเป็นมีเทน และสะสมอยู่ภายในระบบ จากนั้นในช่วงวันที่ 22 จนถึงวันที่ 30 ของการหมัก พบว่ามีปริมาณก๊าซมีเทนที่เพิ่มสูงขึ้นเนื่องจากผลิตภัณฑ์ที่ได้จากในขั้นตอนการสร้างกรดดังกล่าวถูกเปลี่ยนเป็นก๊าซมีเทน โดยเปรียบเทียบกับ การบำบัดเบื้องต้นด้วยไอน้ำเป็นปฏิกิริยาที่สามารถทำให้เกิดไฮโดรไลซิสได้บางส่วน (Sun และ Cheng, 2002) ส่งผลให้ก๊าซมีเทนเกิดขึ้นเร็วกว่าการบำบัดเบื้องต้นด้วยน้ำร้อน โดยที่การบำบัดเบื้องต้นด้วยน้ำร้อนจะเกิดขึ้นตอนไฮโดรไลซิสและขั้นตอนการผลิตมีเทนที่ช้ากว่า เพราะในระหว่างการบำบัดเบื้องต้นด้วยน้ำร้อนเป็นปฏิกิริยาการชะละลาย สำหรับปฏิกิริยาในการบำบัดเบื้องต้นดังกล่าวเป็นปฏิกิริยาที่แตกต่างกัน ซึ่งอาจทำให้ได้สารละลายออกมาได้มีชนิดที่แตกต่างกัน

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าซีไอดีละลาย ปริมาณก๊าซชีวภาพรายวัน และปริมาณก๊าซมีเทน ของถังหมักไร้อากาศดังที่ 1 สำหรับตัวอย่างที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นทางชีวภาพที่อัตราส่วน 1:3 ที่ระยะเวลาการบำบัดเบื้องต้น 7 วัน (แสดงดังรูปที่ 4.5.3-3) มีค่าซีไอดีละลายเริ่มต้นเท่ากับ $10,805 \pm 227$ มิลลิกรัมต่อลิตร และจะมีค่าลดลงในช่วงวันที่ 7 จนถึงวันที่ 45 ของการหมัก มีค่าอยู่ในช่วง $6,012 \pm 26$ ถึง $8,800 \pm 50$ มิลลิกรัมต่อลิตร สำหรับปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้น พบว่าในช่วง 7 วันแรกของการเดินระบบ จะมีปริมาณก๊าซชีวภาพเกิดขึ้นมากที่สุด มีค่าอยู่ในช่วง 2,880-14,112 มิลลิตรต่อวัน จากนั้นปริมาณก๊าซชีวภาพจะเริ่มลดลงในช่วงวันที่ 8 ของเดินระบบ ส่วนปริมาณก๊าซมีเทนเริ่มเพิ่มขึ้นในวันที่ 7 ของการเดินระบบจนถึงวันที่ 15 มีค่าอยู่ในช่วง 5-442 มิลลิตร และมีค่าลดลงในวันที่ 22 จนถึงวันที่ 30 ของการเดินระบบ มีปริมาณอยู่ในช่วง 245-327 มิลลิตรโดยมีความเข้มข้นของก๊าซมีเทนที่วิเคราะห์ได้ในช่วงวันที่ 7, 15, 22 และ 30 มีค่าร้อยละ 3.0, 40.9, 24.5 และ 21.0 ตามลำดับ

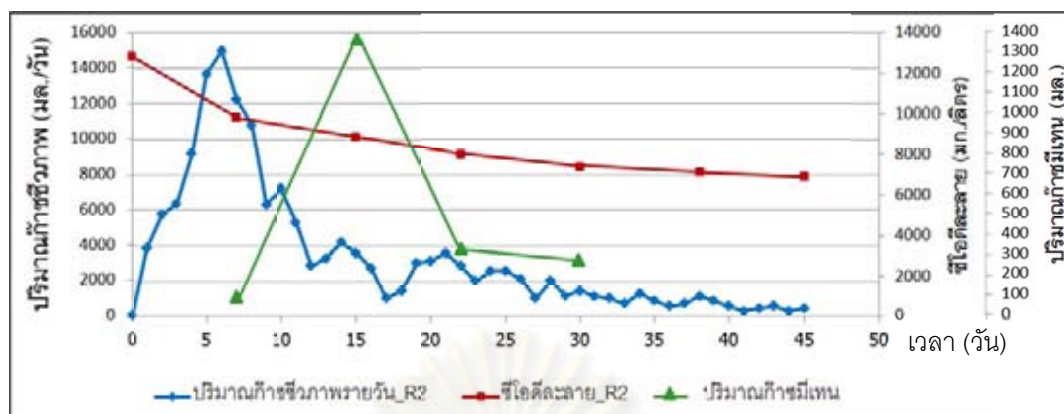
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.5.3-3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าชีโอดีละลาย ปริมาณก๊าซชีวภาพรายวัน และปริมาณก๊าซมีเทนของถังหมักไร้อากาศที่ 1 (BP 1:3_7)

จากรูปที่ 4.5.3-3 พบว่า ปริมาณก๊าซมีเทนมีค่าเพิ่มสูงขึ้นในวันที่ 7 และมีค่าสูงสุดในวันที่ 15 ของการหมัก และมีค่าเริ่มลดลงในช่วงวันที่ 22 ถึงวันที่ 30 ของการหมัก เห็นได้ว่าช่วงระยะเวลาในการเกิดก๊าซมีเทนของตัวอย่างที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นทางชีวภาพ เกิดขึ้นเร็วกว่าตัวอย่างการบำบัดเบื้องต้นทางความร้อน ซึ่งในระหว่างการบำบัดเบื้องต้นทางชีวภาพนั้นจะเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสบางส่วนในขั้นตอนการบำบัดเบื้องต้น เนื่องจากได้ทำการผสมมูลวัวกับไบโอดีในถังผสมเป็นเวลา 7 วัน ซึ่งในช่วงระยะเวลาดังกล่าวจะทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสได้บางส่วนในถังผสม ดังนั้นเมื่อนำตัวอย่างมาหมักในระบบไร้อากาศจะทำให้ก๊าซมีเทนเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วและปริมาณก๊าซมีเทนจะเริ่มเกิดขึ้นน้อยลงเนื่องจากมีปริมาณอาหารในระบบลดลง

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าชีโอดีละลาย ปริมาณก๊าซชีวภาพรายวัน และปริมาณก๊าซมีเทน ของถังหมักไร้อากาศถังที่ 2 สำหรับตัวอย่างที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นทางชีวภาพที่อัตราส่วน 1:2 ที่ระยะเวลาการบำบัดเบื้องต้น 7 วัน (แสดงดังรูปที่ 4.5.3-4) มีค่าชีโอดีละลายเริ่มต้นเท่ากับ $12,852 \pm 137$ มิลลิกรัมต่อลิตร และจะมีค่าลดลงในช่วงวันที่ 7 จนถึงวันที่ 45 ของการหมัก มีค่าอยู่ในช่วง $6,892 \pm 25$ ถึง $9,852 \pm 82$ มิลลิกรัมต่อลิตร สำหรับปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้น พบว่าในช่วง 6 วันแรกของการเดินระบบ จะมีปริมาณก๊าซชีวภาพเกิดขึ้นมากที่สุด มีค่าอยู่ในช่วง 3,840-14,976 มิลลิตรต่อวัน จากนั้นปริมาณก๊าซชีวภาพจะเริ่มลดลงในช่วงวันที่ 7 ของเดินระบบ ส่วนปริมาณก๊าซมีเทนเริ่มเพิ่มขึ้นในวันที่ 7 ของการเดินระบบจนถึงวันที่ 15 มีค่าอยู่ในช่วง 73-1,365 มิลลิตร และมีค่าลดลงในวันที่ 22 จนถึงวันที่ 30 ของการเดินระบบ มีปริมาณอยู่ในช่วง 296-316 มิลลิตรโดยมีความเข้มข้นของก๊าซมีเทนที่วิเคราะห์ได้ในช่วงวันที่ 7, 15, 22 และ 30 มีค่าร้อยละ 35.8, 61.6, 30.4 และ 24.1 ตามลำดับ



รูปที่ 4.5.3-4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าชีโอดีละลาย ปริมาณก๊าซชีวภาพรายวัน และปริมาณก๊าซมีเทนของถังหมักไร้อากาศที่ 2 (BP 1:2_7)

จากรูปที่ 4.5.3-4 พบว่า มีแนวโน้มที่เหมือนกับตัวอย่าง BP 1:2 (7) โดยปริมาณก๊าซมีเทนมีค่าเพิ่มสูงขึ้นในวันที่ 7 และมีค่าสูงสุดในวันที่ 15 ของการหมัก และมีค่าเริ่มลดลงในช่วงวันที่ 22 ถึงวันที่ 30 ของการหมัก โดยในระหว่างการบำบัดเบื้องต้นทางชีวภาพนั้นจะเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสไปแล้วบางส่วน ดังนั้นเมื่อนำตัวอย่างมาหมักในระบบไร้อากาศจะทำให้ก๊าซมีเทนเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วและปริมาณก๊าซมีเทนจะเริ่มเกิดขึ้นน้อยลงเนื่องจากมีปริมาณอาหารในระบบลดลง ซึ่งมีแนวโน้มการเกิดก๊าซมีเทนสอดคล้องกับถังหมักไร้อากาศที่ 1 (BP 1:3_7)

จากการวิเคราะห์กราฟแสดงความสัมพันธ์ค่าชีโอดีละลาย ปริมาณก๊าซชีวภาพ และปริมาณก๊าซมีเทนของถังหมักไร้อากาศ พบว่า ในช่วง 7 วันแรกปริมาณก๊าซชีวภาพจะมีปริมาณสูงที่สุด จากนั้นปริมาณกรดไขมันระเหยจะมีค่าเริ่มลดลงในช่วงวันที่ 7 และวันที่ 8 และจะเริ่มเกิดก๊าซชีวภาพคงที่ในช่วงวันที่ 10 และเมื่อพิจารณาปริมาณก๊าซมีเทน พบว่า มีปริมาณการเกิดก๊าซมีเทนต่ำสุดในช่วงวันที่ 7 โดยจะเริ่มเพิ่มขึ้น ในวันที่ 14 ของการเดินระบบ เมื่อพิจารณาร่วมกับปริมาณกรดไขมันระเหย (ในหัวข้อ 4.5.4) พบว่าในช่วง 7 วันแรกของการเดินระบบจะมีปริมาณกรดไขมันระเหยเกิดขึ้นมากที่สุด จากนั้นปริมาณกรดไขมันระเหยจะเริ่มลดลงในวันที่ 15 จนถึงวันที่ 45 ของการเดินระบบ ซึ่งจะสอดคล้องกับปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้น กล่าวคือ ค่าปริมาณก๊าซมีเทนจะแปรผกผันกับค่ากรดไขมันระเหย

4.5.4 ค่ากรดไขมันระเหย สภาพต่าง และความเป็นกรด-ด่าง ในการทดลองที่ 3

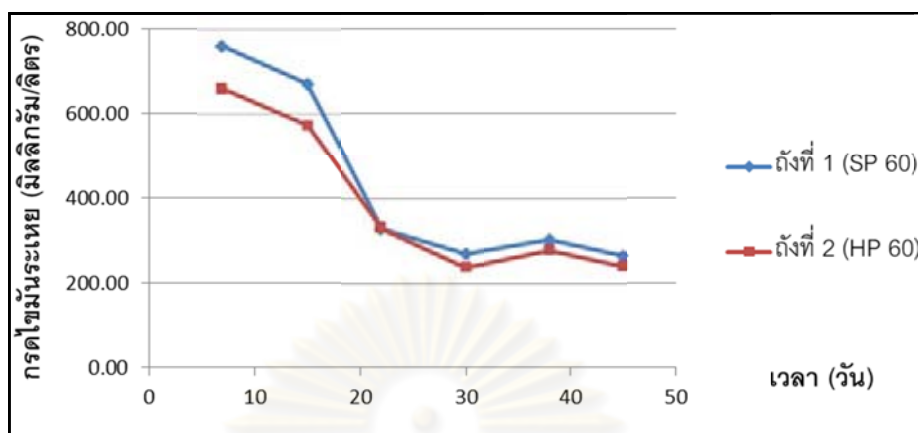
ผลการวิเคราะห์ปริมาณกรดไขมันระเหย

การวิเคราะห์ปริมาณกรดไขมันระเหยในการทดลองที่ 3 ได้ทำการเก็บตัวอย่างในถังหมักไร้อากาศทุกๆ 1 อาทิตย์ (วันที่ 7, 15, 22, 30, 38 และ 45 ของการหมัก) พบว่า ปริมาณกรดไขมันในช่วงอาทิตย์แรก (วันที่ 7 ของการหมัก) มีปริมาณกรดไขมันระเหยเกิดขึ้นสูงที่สุด จากนั้นปริมาณของกรดไขมันระเหยจะเริ่มลดลงเรื่อยๆ จนถึงวันที่ 45 ของการหมัก กรดไขมันระเหยที่ลดลงเนื่องจากถูกใช้เป็นอาหารสำหรับจุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทนในระบบไร้อากาศสำหรับปริมาณกรดไขมันระเหยที่วิเคราะห์ได้จากการทดลองที่ 3 มีรายละเอียดดังนี้

การบำบัดเบื้องต้นทางความร้อน

ผลการวิเคราะห์ปริมาณกรดไขมันระเหยของตัวอย่างในถังหมักที่ 1 ซึ่งเป็นตัวอย่างไบอ้อยที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นด้วยไอน้ำที่ระยะเวลา 60 นาที พบว่า ในช่วง 7 วันแรกของการเดินระบบมีปริมาณกรดไขมันระเหยเกิดขึ้นสูงสุดเท่ากับ 758.50 ± 14.13 มิลลิกรัมต่อลิตร จากนั้นปริมาณกรดไขมันระเหยจะเริ่มลดลงในอาทิตย์ที่ 2 ของการหมัก จนถึงวันที่ 45 ของการหมัก มีค่าอยู่ในช่วง 264.90-670.20 มิลลิกรัมต่อลิตร (แสดงดังรูปที่ 4.5.4-1)

ผลการวิเคราะห์ปริมาณกรดไขมันระเหยของตัวอย่างในถังหมักที่ 2 ซึ่งเป็นตัวอย่างไบอ้อยที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นด้วยน้ำร้อนที่ระยะเวลา 60 นาที พบว่ามีแนวโน้มเหมือนกับในถังแรก โดยในช่วง 7 วันแรกของการเดินระบบมีปริมาณกรดไขมันระเหยเกิดขึ้นสูงสุดเท่ากับ 659.30 ± 7.15 มิลลิกรัมต่อลิตร จากนั้นปริมาณกรดไขมันระเหยจะเริ่มลดลงในอาทิตย์ที่ 2 ของการหมัก จนถึงวันที่ 45 ของการหมัก มีค่าอยู่ในช่วง 240.59-572.60 มิลลิกรัมต่อลิตร (ดังรูปที่ 4.5.4-1)

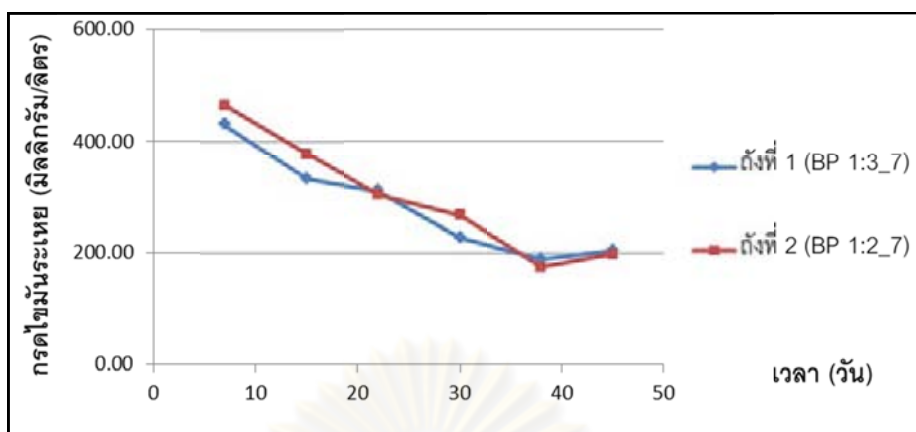


รูปที่ 4.5.4-1 ปริมาณกรดไขมันระเหยของถึงหมักที่ 1 (SP 60) และถึงหมักที่ 2 (HP 60)

การบำบัดเบื้องต้นทางชีวภาพ

ผลการวิเคราะห์ปริมาณกรดไขมันระเหยของตัวอย่างในถึงหมักที่ 1 ซึ่งเป็นตัวอย่างไบอัสที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นทางชีวภาพที่อัตราส่วนมูลวัวต่อไบอัส 1:3 ที่ระยะเวลา 7 วัน พบว่า ในช่วง 7 วันแรกของการเดินระบบมีปริมาณกรดไขมันระเหยเกิดขึ้นสูงสุดเท่ากับ 430.80 ± 9.71 มิลลิกรัมต่อลิตร จากนั้นปริมาณกรดไขมันระเหยจะเริ่มลดลงในอาทิตย์ที่ 2 ของการหมัก จนถึงวันที่ 45 ของการหมัก มีค่าอยู่ในช่วง 189.20-332.40 มิลลิกรัมต่อลิตร (แสดงดังรูปที่ 4.5.4-2)

ผลการวิเคราะห์ปริมาณกรดไขมันระเหยของตัวอย่างในถึงหมักที่ 2 ซึ่งเป็นตัวอย่างไบอัสที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นทางชีวภาพที่อัตราส่วนมูลวัวต่อไบอัส 1:2 ที่ระยะเวลา 7 วัน พบว่า ในช่วง 7 วันแรกของการเดินระบบมีปริมาณกรดไขมันระเหยเกิดขึ้นสูงสุดเท่ากับ 466.50 ± 10.90 มิลลิกรัมต่อลิตร จากนั้นปริมาณกรดไขมันระเหยจะเริ่มลดลงในอาทิตย์ที่ 2 ของการหมัก จนถึงวันที่ 45 ของการหมัก มีค่าอยู่ในช่วง 175.83-378.50 มิลลิกรัมต่อลิตร (แสดงดังรูปที่ 4.5.4-2)



รูปที่ 4.5.4-2 ปริมาณกรดไขมันระเหยของดั่งหมักที่ 1 (BP 1:3 (7)) และดั่งหมักที่ 2 (BP 1:2 (7))

ผลการวิเคราะห์ค่าสภาพต่าง

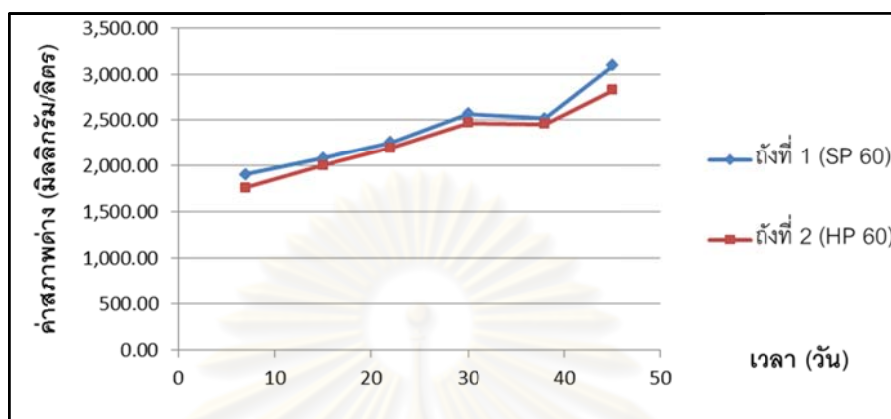
การวิเคราะห์ค่าสภาพต่างในการทดลองที่ 3 ซึ่งได้ทำการเก็บตัวอย่างในดั่งหมักไร้อากาศทุกๆ 1 อาทิตย์ (วันที่ 7, 15, 22, 30, 38 และ 45 ของการหมัก) พบว่าค่าสภาพต่างในช่วงอาทิตย์แรก (วันที่ 7 ของการหมัก) มีปริมาณกรดไขมันระเหยเกิดขึ้นน้อยที่สุด จากนั้นค่าสภาพต่างจะเริ่มเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนถึงวันที่ 45 ของการหมัก สำหรับค่าสภาพต่างที่วิเคราะห์ได้จากการทดลองที่ 3 มีรายละเอียดดังนี้

การบำบัดเบื้องต้นทางความร้อน

ค่าสภาพต่างของตัวอย่างในดั่งหมักที่ 1 ของตัวอย่างไบอ้อยที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นด้วยไอน้ำที่ระยะเวลา 60 นาที พบว่า ค่าสภาพต่างในช่วง 7 วันแรกของการหมักมีค่าต่ำสุดเท่ากับ $1,906.70 \pm 27.05$ มิลลิกรัมต่อลิตร จากนั้นค่าสภาพต่างจะเริ่มเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ในช่วงวันที่ 15 ถึงวันที่ 45 ของการหมัก มีค่าอยู่ในช่วง 2,085.30-3,094.30 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยจะมีค่าสูงสุดในวันที่ 45 ของการหมัก (แสดงดังรูปที่ 4.5.4-3)

สำหรับค่าสภาพต่างของตัวอย่างในดั่งหมักที่ 2 ของตัวอย่างไบอ้อยที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นด้วยน้ำร้อนที่ระยะเวลา 60 นาที พบว่า ค่าสภาพต่างในช่วง 7 วันแรกของการหมักมีค่าน้อยสุดเท่ากับ $1,759.2 \pm 39.54$ มิลลิกรัมต่อลิตร จากนั้นค่าสภาพต่างจะเริ่มเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ

ในช่วงวันที่ 15 ถึงวันที่ 45 ของการหมัก มีค่าอยู่ในช่วง 2,008.70-2,827.10 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยจะมีค่าสูงสุดในวันที่ 45 ของการหมัก (แสดงดังรูปที่ 4.5.4-3)

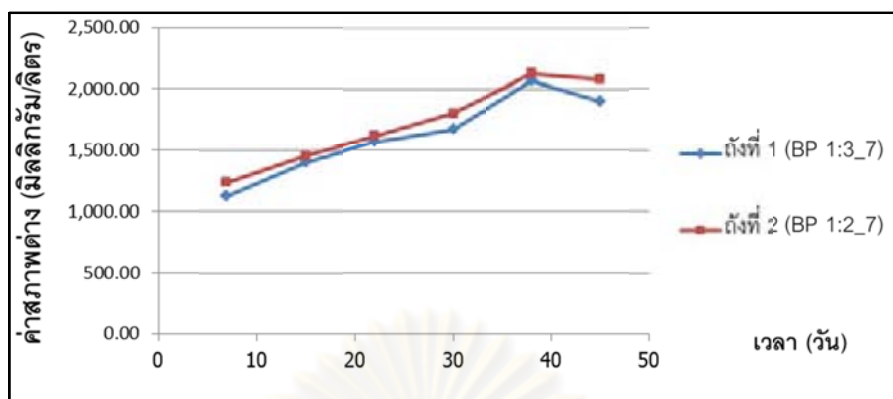


รูปที่ 4.5.4-3 ค่าสภาพต่างของถึงหมักที่ 1 (SP 60) และถึงหมักที่ 2 (HP 60)

การบำบัดเบื้องต้นทางชีวภาพ

ค่าสภาพต่างของตัวอย่างในถึงหมักที่ 1 ของตัวอย่างใบอ้อยที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นทางชีวภาพที่อัตราส่วนมูลวัวต่อใบอ้อย 1:3 ที่ระยะเวลาการบำบัดเบื้องต้นวันที่ 7 พบว่าค่าสภาพต่างในช่วง 7 วันแรกของการหมักมีค่าน้อยสุดเท่ากับ $1,125.60 \pm 29.69$ มิลลิกรัมต่อลิตร จากนั้นค่าสภาพต่างจะเริ่มเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ในช่วงวันที่ 15 ถึงวันที่ 45 ของการหมัก มีค่าอยู่ในช่วง 1,406.70-2,072.90 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยจะมีค่าสูงสุดในวันที่ 38 ของการหมัก (แสดงดังรูปที่ 4.5.4-4)

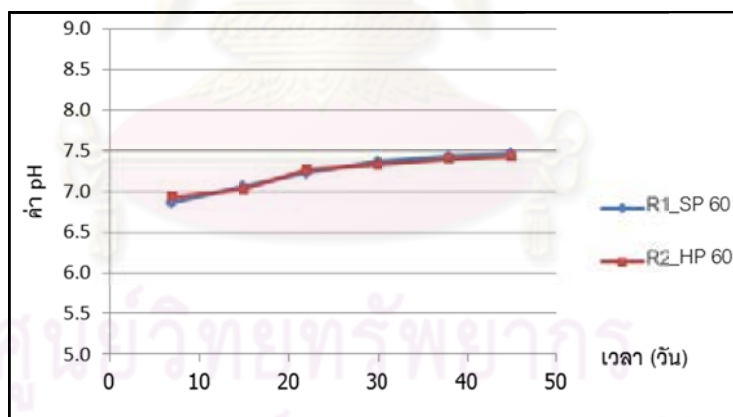
สำหรับค่าสภาพต่างของตัวอย่างในถึงหมักที่ 1 ของตัวอย่างใบอ้อยที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นทางชีวภาพที่อัตราส่วนมูลวัวต่อใบอ้อย 1:2 ที่ระยะเวลาการบำบัดเบื้องต้นวันที่ 7 พบว่าค่าสภาพต่างในช่วง 7 วันแรกของการหมักมีค่าน้อยสุดเท่ากับ $1,237.20 \pm 33.34$ มิลลิกรัมต่อลิตร จากนั้นค่าสภาพต่างจะเริ่มเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ในช่วงวันที่ 15 ถึงวันที่ 45 ของการหมัก มีค่าอยู่ในช่วง 1,455.90-2,130.50 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยจะมีค่าสูงสุดในวันที่ 38 ของการหมัก (แสดงดังรูปที่ 4.5.4-4)



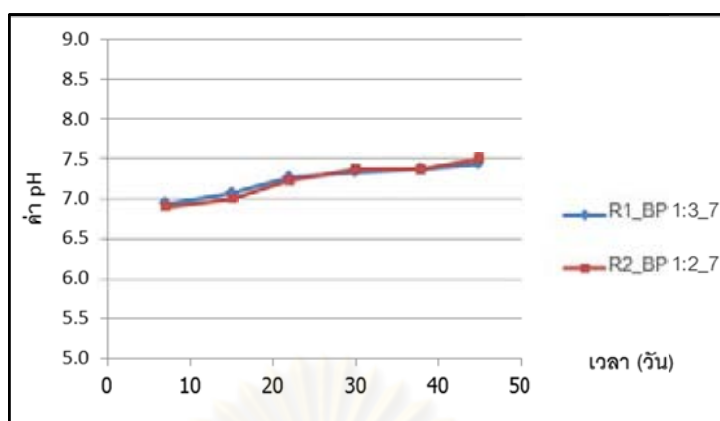
รูปที่ 4.5.4-4 ค่าสภาพต่างของถังหมักที่ 1 (BP 1:3 (7)) และถังหมักที่ 2 (BP 1:2 (7))

ค่าความเป็นกรด-ด่าง

ค่าความเป็นกรด-ด่างที่วัดได้ในการทดลองที่ 3 มีผลการตรวจวัดดังนี้ (แสดงดังรูปที่ 4.5.4-5 และรูปที่ 4.5.4-6)



รูปที่ 4.5.4-5 ค่าความเป็นกรด-ด่างในถังหมักที่ 1 (SP 60) และถังหมักที่ 2 (HP 60)



รูปที่ 4.5.4-6 ค่าความเป็นกรด-ด่างในถังหมักที่ 1 (BP 1:3 (7)) และถังหมักที่ 2 (BP 1:2 (7))

จากผลการวิเคราะห์ปริมาณกรดไขมันระเหยในถังหมักไร้อากาศในข้างต้น พบว่า ปริมาณกรดไขมันระเหยของถังหมักไร้อากาศถังที่ 1 และถังที่ 2 ทั้งช่วงการหมักตัวอย่างการบำบัด เบื้องต้นทางความร้อนและทางชีวภาพ พบว่า มีค่าอยู่ในช่วง 175.83-758.50 มิลลิกรัมต่อลิตร ของอะซิติก โดยค่ากรดไขมันระเหยที่เหมาะสมของระบบไร้อากาศมีค่าอยู่ในช่วง 50-500 มิลลิกรัมต่อลิตรของอะซิติก และมีค่าสูงสุดที่ยอมให้มีได้ในระบบเท่ากับ 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ของอะซิติก (เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์, 2543) เห็นได้ว่าค่ากรดไขมันระเหยที่วิเคราะห์ได้จากการ ทดลองที่ 3 ส่วนใหญ่มีค่าอยู่ในช่วงที่เหมาะสมกับการผลิตก๊าซชีวภาพ จากแนวโน้มดังกล่าวเห็น ได้ว่าปริมาณกรดไขมันระเหยของถังปฏิกรณ์ในช่วงวันที่ 7 ถึงวันที่ 45 ของการหมักด้วยถังไร้อากาศ มีแนวโน้มของปริมาณกรดไขมันระเหยที่ลดลง โดยที่ผลการวิเคราะห์ค่าสภาพต่างในการ ทดลองที่ 3 ในช่วง 7 วันแรก จะมีค่าสภาพต่างต่ำที่สุด เนื่องจากในช่วงเวลาการหมักในช่วงแรกๆจะ เกิดการย่อยสลายสารอินทรีย์ ซึ่งดูได้จากปริมาณกรดไขมันระเหยที่วิเคราะห์ได้ในข้างต้น จากนั้น ค่าสภาพต่างจะเริ่มเพิ่มขึ้นในช่วงวันที่ 15 จนถึงวันที่ 45 ของการหมัก โดยแนวโน้มดังกล่าว จะแปรผกผันกับค่ากรดไขมันระเหยที่เป็นไปตามขั้นตอนการย่อยสลาย

สำหรับผลการวัดค่าความเป็นกรด-ด่างของตัวอย่างในถังหมักที่ 1 และถังหมักที่ 2 พบว่า ในช่วง 7 วันแรกของการหมักไร้อากาศมีค่าเฉลี่ยประมาณ 7.0 เนื่องจากในช่วง 7 วันแรกของการ เติบระบบมีปริมาณกรดไขมันระเหยเกิดขึ้นมาก และค่าความเป็นกรด-ด่างจะมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนถึงวันที่ 45 ของการหมักมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 7.9 ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณกรดไขมันระเหยที่ ลดลง สำหรับค่าความเป็นกรด-ด่างในการทดลองที่ 3 มีค่าอยู่ในช่วง 6.9-7.5 เห็นได้ว่าค่าความเป็น กรดต่างยังมีค่าอยู่ในช่วงที่แนะนำไว้สำหรับระบบไร้อากาศคือ 6.6-8.0 และมีค่าอยู่ในช่วงที่

เหมาะสมต่อจุลินทรีย์ที่สร้างมีเทนที่มีค่าเท่ากับ 6.5-7.5 (เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์, 2543) พบว่าค่าที่วัดได้จากการทดลองมีค่าอยู่ในช่วงที่เหมาะสมในระบบไร้อากาศและขั้นตอนการผลิตก๊าซมีเทน โดยค่าความเป็นกรด-ด่างในช่วงแรกมีค่าต่ำที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับค่ากรดไขมันระเหยในช่วงแรกที่มีปริมาณที่สูง จากนั้นค่าความเป็นกรด-ด่างในระบบจะเริ่มมีค่าเพิ่มขึ้น ตามแนวโน้มของค่ากรดไขมันระเหยที่ลดลง

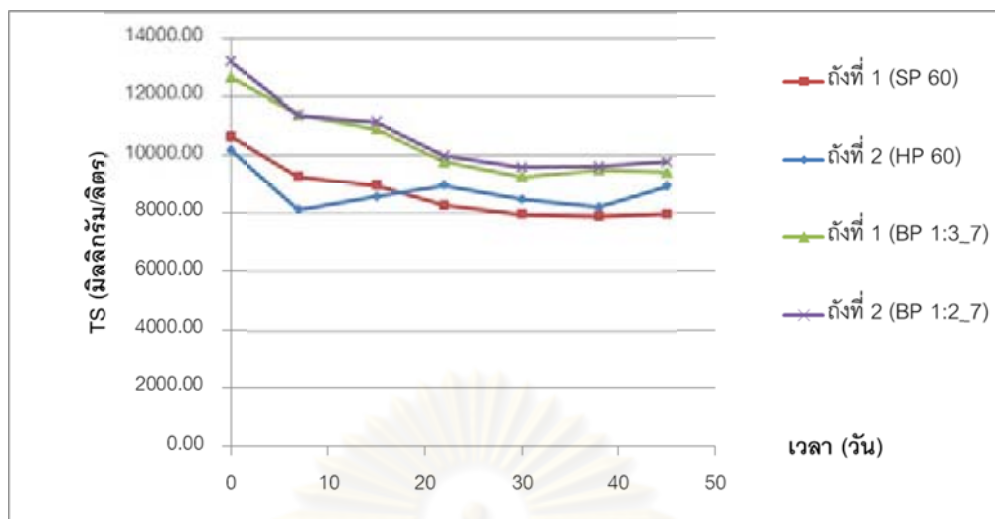
4.5.5 ผลการวิเคราะห์ความเข้มข้นของก๊าซมีเทนในการทดลองที่ 3

ความเข้มข้นของก๊าซมีเทนที่วิเคราะห์ได้จากการทดลองในระดับถังหมักของตัวอย่างไบโอดีที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นด้วยไอน้ำที่ระยะเวลา 60 นาที (ถังหมักที่ 1) และไบโอดีที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นด้วยน้ำร้อนที่ระยะเวลา 60 นาที (ถังหมักที่ 2) มีค่าความเข้มข้นของก๊าซมีเทนสูงสุดร้อยละ 50.2 และ 49.6 ตามลำดับ โดยมีอัตราการเกิดก๊าซมีเทนต่อกรัมของแข็งระเหยสูงสุดในถังหมักที่ 1 และถังหมักที่ 2 มีค่าเท่ากับ 12.29 และ 2.36 มิลลิลิตรต่อกรัมของแข็งระเหยตามลำดับ

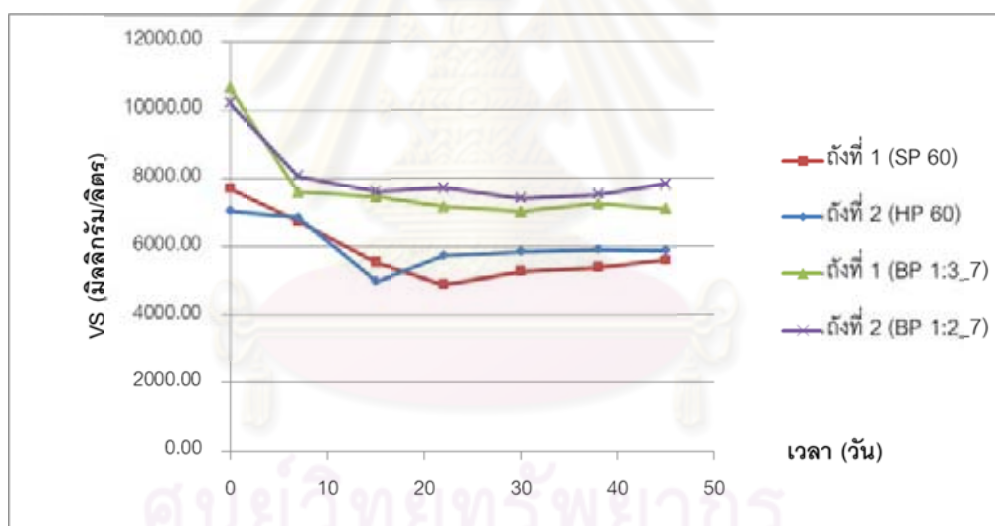
สำหรับความเข้มข้นของก๊าซมีเทนที่วิเคราะห์ได้ของตัวอย่างไบโอดีที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นทางชีวภาพที่อัตราส่วนมูลวัวต่อไบโอดี 1:3 ที่ระยะเวลาการบำบัดเบื้องต้นวันที่ 7 (ถังที่ 1) และไบโอดีที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นทางชีวภาพที่อัตราส่วนมูลวัวต่อไบโอดี 1:2 ที่ระยะเวลาการบำบัดเบื้องต้นวันที่ 7 (ถังที่ 2) มีค่าความเข้มข้นของก๊าซมีเทนสูงสุดร้อยละ 40.9 และ 61.6 ตามลำดับ โดยมีอัตราการเกิดก๊าซมีเทนต่อกรัมของแข็งระเหยสูงสุดในถังหมักที่ 1 และถังหมักที่ 2 มีค่าเท่ากับ 6.5 และ 14.8 มิลลิลิตรต่อกรัมของแข็งระเหยตามลำดับ

4.5.6 ผลการวิเคราะห์ค่าของแข็งทั้งหมดและของแข็งระเหยในการทดลองที่ 3

ค่าของแข็งทั้งหมดและของแข็งระเหยที่วิเคราะห์ได้จากการเดินระบบในช่วงวันที่ 7 ถึงวันที่ 45 ของการหมัก (แสดงดังรูปที่ 4.5.6-1 และ 4.5.6-2) พบว่า ค่าปริมาณของแข็งทั้งหมด (TS) ในระบบมีค่าอยู่ในช่วง 7,876-13,210 มิลลิกรัมต่อลิตร และมีค่าของแข็งระเหย (VS) ในระบบมีค่าอยู่ในช่วง 4,892-10,650 มิลลิกรัมต่อลิตร



รูปที่ 4.5.6-1 ค่าของแข็งทั้งหมดของถังหมักที่ 1 และถังหมักที่ 2

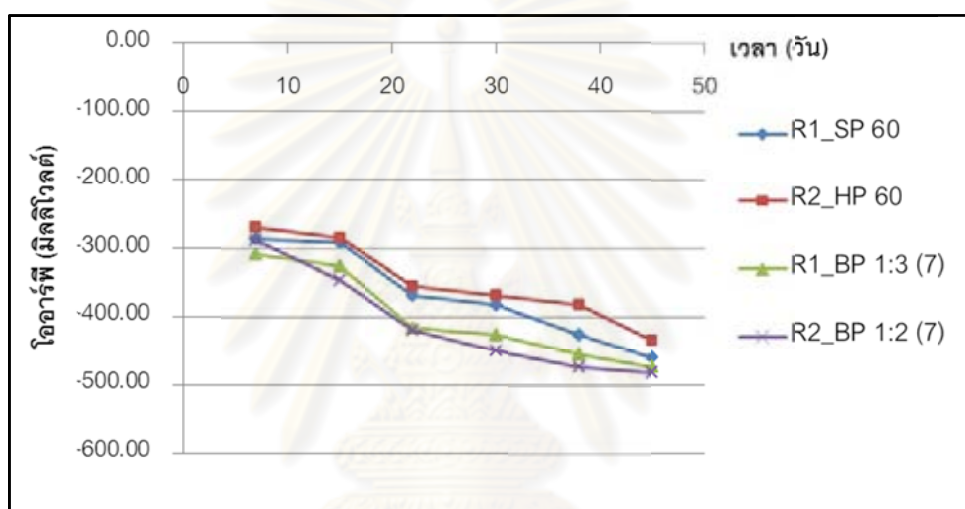


รูปที่ 4.5.6-2 ค่าของแข็งระเหยของถังหมักที่ 1 และถังหมักที่ 2

ผลการวิเคราะห์ของแข็งทั้งหมด และของแข็งแขวนลอย พบว่า มีแนวโน้มของปริมาณที่ลดลง เนื่องจากเนื้อของแข็งในส่วนของไบโอดีปมีการถูกย่อยสลายได้ในระบบไร้อากาศ ซึ่งจะถูกนำไปใช้เป็นสารอาหารสำหรับจุลินทรีย์ในระบบไร้อากาศต่อไป

4.5.7 ความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน

ดังที่กล่าวในหัวข้อ 4.4.4 ค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันแสดงถึงแนวโน้มในการให้หรือรับอิเล็กตรอน โดยค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันที่วัดได้จากการทดลองที่ 3 ได้ทำการเก็บตัวอย่างจำนวน 6 ครั้ง มีผลการวัดค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันในช่วงวันที่ 7 ถึงวันที่ 45 ของการหมัก พบว่า มีค่าอยู่ในช่วง -270 ถึง -481 มิลลิโวลต์ โดยมีค่าเป็นลบแสดงว่าในระบบการหมักอยู่ในสภาวะไร้อากาศ สำหรับค่าที่วัดได้แต่ละตัวอย่างแสดงดังรูปที่ 4.5.7-1



รูปที่ 4.5.7-1 ค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันของถังหมักไร้อากาศในการทดลองที่ 3

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ

สรุปผลการทดลอง

ผลของการบำบัดเบื้องต้นทางความร้อนและทางชีวภาพต่อความสามารถในการย่อยสลายใบอ้อย

1. การบำบัดเบื้องต้นทางความร้อนด้วยไอน้ำที่ระยะเวลาการบำบัดเบื้องต้น 60 นาที สามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ในใบอ้อยออกมาได้ดีที่สุด โดยดูจากค่าซีไอดีละลายที่วิเคราะห์ได้มีค่าเท่ากับ $5,634 \pm 95$ มิลลิกรัมต่อลิตร โดยที่การบำบัดเบื้องต้นด้วยน้ำร้อนมีค่าซีไอดีละลายอยู่ในช่วง 2,638-2,948 มิลลิกรัมต่อลิตร

สำหรับการบำบัดเบื้องต้นทางชีวภาพที่อัตราส่วนมูลวัวต่อใบอ้อย 1:2 มีผลต่อการย่อยสลายสารอินทรีย์ในใบอ้อยได้ดีกว่า มีค่าซีไอดีละลายสูงสุดเท่ากับ $6,375 \pm 393$ มิลลิกรัมต่อลิตร และที่อัตราส่วน 1:6 และ 1:3 พบว่า ค่าซีไอดีละลายที่วิเคราะห์ได้ มีค่าซีไอดีละลายสูงสุดเท่ากับ $4,538 \pm 227$ และ $3,227 \pm 681$ มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ

2. ระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัดเบื้องต้นมีผลต่อการย่อยสลายสารอินทรีย์ในใบอ้อยที่ออกมาในรูปของเหลว โดยการบำบัดเบื้องต้นทางความร้อนที่ระยะเวลา 60 นาที สามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ในใบอ้อยได้ดีกว่าระยะเวลา 15 และ 30 นาที ทั้งการบำบัดเบื้องต้นด้วยไอน้ำและน้ำร้อน สำหรับการบำบัดเบื้องต้นทางชีวภาพที่ระยะเวลาในการบำบัดเบื้องต้นวันที่ 7 สามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ในใบอ้อยได้ดีในทุกๆ อัตราส่วน กล่าวคือ ถ้าใช้เวลาในการบำบัดเบื้องต้นมากขึ้นส่งผลให้ย่อยสลายสารอินทรีย์ในใบอ้อยได้ดีขึ้นด้วย

ศักยภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพจากใบอ้อยที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้น

3. ใบอ้อยที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นทางความร้อนด้วยไอน้ำมีประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพได้ดีกว่าการบำบัดเบื้องต้นทางความร้อนด้วยน้ำร้อน และการบำบัดเบื้องต้นทางชีวภาพ โดยการบำบัดเบื้องต้นด้วยไอน้ำมีปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมสูงสุดเท่ากับ 373.56 มิลลิลิตรต่อกรัมของแห้งระเหย การบำบัดเบื้องต้นด้วยน้ำร้อนมีปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมสูงสุดเท่ากับ 154.05 มิลลิลิตรต่อกรัมของแห้งระเหย และการบำบัดเบื้องต้นทางชีวภาพมีปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมสูงสุดเท่ากับ 146.03 มิลลิลิตรต่อกรัมของแห้งระเหย จะเห็นว่าปริมาณก๊าซชีวภาพที่

เกิดขึ้นจากการบำบัดเบื้องต้นทางชีวภาพจะมีประสิทธิภาพน้อยกว่าการบำบัดเบื้องต้นทางความร้อน เนื่องจากว่าการบำบัดเบื้องต้นทางชีวภาพต้องใช้ระยะเวลาในการย่อยสลายลิกนินที่ยาวนาน (Silverstein, 2004) ทำให้เซลลูโลสแยกออกจากเฮมิเซลลูโลสและลิกนินได้ยาก จึงไม่สามารถเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างเซลลูโลสที่เป็นแหล่งพลังงานกับจุลินทรีย์ได้ดีพอ จึงส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ชีวภาพออกมาได้น้อย ถึงแม้ว่าในวิธีการบำบัดเบื้องต้นทางชีวภาพจะให้ค่าซีไอดีละลายที่สูงกว่าการบำบัดเบื้องต้นทางความร้อน ทั้งนี้อาจเป็นเพราะในขั้นตอนการวิเคราะห์ซีไอดีละลายนั้นจะมีปริมาณมูลวัวติดผสมกับไบโอดีด้วย เพราะในระหว่างขั้นตอนการบำบัดเบื้องต้นไบโอดีกับมูลวัวมีการสัมผัสกันตลอดเวลา จึงทำให้การวิเคราะห์ค่าซีไอดีละลายสูงกว่าความเป็นจริงได้

ปริมาณก๊าซชีวภาพและก๊าซมีเทนจากการทดลองในการปฏิบัติการจริงด้วยถังหมักไร้อากาศขนาด 40 ลิตร

4. ปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจากการทดลองที่ 3 พบว่า ตัวอย่างที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นด้วยไอน้ำที่ระยะเวลา 60 นาที มีปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมสูงสุดเท่ากับ 954 มิลลิลิตรต่อกรัมของแข็งระเหย และตัวอย่างที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นด้วยน้ำร้อนที่ระยะเวลา 60 นาที มีปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม เท่ากับ 405 มิลลิลิตรต่อกรัมของแข็งระเหย สำหรับการบำบัดเบื้องต้นทางชีวภาพที่อัตราส่วนมูลวัวต่อไบโอดี 1:3 ระยะเวลาการบำบัด 7 วัน มีปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม เท่ากับ 436 มิลลิลิตรต่อกรัมของแข็งระเหย และที่อัตราส่วนมูลวัวต่อไบโอดี 1:2 ระยะเวลาการบำบัด 7 วัน มีปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม เท่ากับ 516 มิลลิลิตรต่อกรัมของแข็งระเหย

5. ความเข้มข้นของก๊าซมีเทนของตัวอย่างไบโอดีที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นด้วยไอน้ำที่ระยะเวลา 60 นาที (ถังหมักที่ 1) และไบโอดีที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นด้วยน้ำร้อนที่ระยะเวลา 60 นาที (ถังหมักที่ 2) มีค่าความเข้มข้นของก๊าซมีเทนสูงสุดร้อยละ 50.2 และ 49.6 ตามลำดับ โดยมีอัตราการเกิดก๊าซมีเทนต่อกรัมของแข็งระเหยสูงสุดในถังหมักที่ 1 และถังหมักที่ 2 มีค่าเท่ากับ 12.29 และ 2.36 มิลลิลิตรต่อกรัมของแข็งระเหยตามลำดับ สำหรับความเข้มข้นของก๊าซมีเทนที่ของตัวอย่างไบโอดีที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นทางชีวภาพที่อัตราส่วนมูลวัวต่อไบโอดี 1:3 ที่ระยะเวลาการบำบัดเบื้องต้นวันที่ 7 (ถังที่ 1) และไบโอดีที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นทางชีวภาพที่อัตราส่วนมูลวัวต่อไบโอดี 1:2 ที่ระยะเวลาการบำบัดเบื้องต้นวันที่ 7 (ถังที่ 2) มีค่าความเข้มข้นของก๊าซมีเทนสูงสุดร้อยละ 40.9 และ 61.6 ตามลำดับ โดยมีอัตราการเกิดก๊าซมีเทนต่อกรัมของแข็งระเหยสูงสุดในถังหมักที่ 1 และถังหมักที่ 2 มีค่าเท่ากับ 6.5 และ 14.8 มิลลิลิตรต่อกรัมของแข็งระเหยตามลำดับ

ข้อเสนอแนะ

ในงานวิจัยนี้มีข้อเสนอแนะที่เป็นแนวทางในการพัฒนาต่อไปดังนี้

1. ศึกษาการบำบัดเบื้องต้นวิธีอื่นๆ ร่วมกับการบำบัดเบื้องต้นทางความร้อนด้วยไอน้ำ เช่น การนำสารละลายกรด หรือสารละลายต่างมาใช้ร่วมด้วย ทั้งนี้เพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดเบื้องต้นในการสลายโครงสร้างลิกโนเซลลูโลส เพื่อนำเซลลูโลสออกมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตก๊าซชีวภาพ หรือเอทานอลต่อไป
2. ศึกษาปริมาณน้ำตาลที่เกิดขึ้นจากการบำบัดเบื้องต้น เพื่อต้องการนำไปใช้ทดลองในการผลิตเป็นเอทานอล โดยใช้เซลลูโลสจากไบอ้อย
3. ศึกษาประเภทเชื้อจุลินทรีย์หรือเชื้อราที่มีความสามารถในการสลายโครงสร้างลิกโนเซลลูโลสของไบอ้อย เพื่อนำเซลลูโลสมาใช้ประโยชน์ต่อไป
4. ศึกษาวิธีการบำบัดเบื้องต้นเพื่อเพิ่มความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพของไบอ้อย หรือของเสียที่มีโครงสร้างลิกโนเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบ เช่น การย่อยสลายร่วม (co-digestion) การหมักแบบมีอากาศ (aerobic composting) เป็นต้น เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพก่อนนำไปหมักต่อดังหมักไร้อากาศต่อไป

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

- ควบคุมมลพิษ, กรม. 2546. คู่มือวิชาการระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้อากาศ. กรุงเทพมหานคร : กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม.
- เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์. 2543. วิศวกรรมกรรมการกำจัดน้ำเสีย. เล่มที่ 4. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยรังสิต.
- มันสิน ตันฑุลเวศม์. 2542. เทคโนโลยีบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรม. เล่มที่ 1 และ 2. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- วรรณดา ตูลยธัญ. 2549. เคมีอาหารของคาร์โบไฮเดรต. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- วิษณุพนธ์ ธรานนท์. 2551. การปรับปรุงความสามารถในการย่อยสลายของกากส้มในระบบไร้อากาศด้วยการบำบัดเบื้องต้นทางเคมี. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. 2551. หนังสือสถิติการเกษตรของประเทศไทย ปี 2551 [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <http://www.oae.go.th> [2551, สิงหาคม]

ภาษาอังกฤษ

- Alvarez, M.J., Viturtia, M.A., Luengo, L.P., and Cecchi, F. 1993. Kinetic and performance study of a batch two-phase anaerobic digestion of fruit and vegetable wastes. Biomass and Biotechnology. 5: 481-488.
- Balat, M., Balat, H., and Öz, C. 2008. Progress in bioethanol processing. Progress in Energy and Combustion Science. 34: 551-573.

- Bodig, J., and Jayne, B. A. 1993. Mechanics of wood and wood composites. Malabar, Finland: Krieger Publishing Company.
- Carmen, S., 2008. Lignocellulosic residues: Biodegradation and bioconversion by fungi. Biotechnology advances. 27: 185-194
- Chang, V.S., Nagwani, M., Kim, C., and Holtzapple, T. 2001. Oxidative lime pretreatment of high-lignin biomass. Bioresource technology. 94: 1-28.
- Chynoweth, D.P., and Isaacson, R. 1989. Anaerobic digestion of biomass. New York: Elsevier Applied Science.
- Eriksson, K.E.L., Blanchette, R.A., and Ander, P. 1990. Microbial and enzymatic degradation of wood component. Germany: Springer-Verlag.
- Fenchel, T., and Finlay, B.J. 1995. Ecology and Evolution in Anoxic Worlds. Oxford University.
- Fernandes, T.V., Klaasse Bos, G.J., Zeeman, G., Sanders J.P.M., and Van Lier, J.B. 2008. Effects of thermo-chemical pre-treatment on anaerobic biodegradability and hydrolysis of lignocellulosic biomass [online]. Available from: <http://elsevier.com/locate/biotech> [2009, December 20]
- Fort, R. 2006. Xylanases [Online]. Available from: <http://chemistry.umeche.maine.edu/CHY431/Wood14.html> [2010, March 10]
- Gerardi, M.H. 2003. The microbiology of anaerobic digesters. New Jersey: John Wiley & Son.
- Glazer, N.A., and Nikaido, N. 1995. Microbial biotechnology: Fundamental of applied microbiology. W.H. Freeman & Company.
- Gloh, B. 1975. Tropical feeds, animal production and health division, FAO of the United Nations, Rome: 441-445.

- Gregory, A.P. 2007. Green Energy [Online]. Available from: http://www.research.uky.edu/odyssey/winter07/green_energy.html [2010, March 10]
- Grohmann, K., Torget, R.G., and Himmel, M. 1985. Optimization of dilute acid pretreatment of biomass. Bioresource technology. 15: 59-80.
- Hamelinck, C. N., van Hooijdonk, G., and Faaij, A. PC. 2005. Ethanol from lignocellulosic biomass: techno-economic performance in short-, middle- and long-term. Biomass and Bioenergy. 28: 384-410.
- Hartmann, H., Angelidaki, I., and Ahring, B. K. 1999. Increase of anaerobic degradation of particulate organic matter in full-scale biogas plant by mechanical maceration: In Mata-Alvarez, J., Tilche, A., Cecchi, F. (Eds.), Proceedings of the second international symposium on anaerobic digestion of solid wastes, Barcelona. 1: 129-136.
- Hector, R., Hughes, S., and Liang-Li, X. 2008. Developing yeast strains for biomass-to-ethanol production [Online]. Available from: <http://www.biomassmagazine.com/> [2009, March 29]
- Hendriks, A.T.W.M., and Zeeman, G. 2008. Pretreatments to enhance the digestibility of lignocellulosic biomass. Bioresource technology. 100: 10-18.
- Jewell, W.J. 1980. Dry anaerobic fermentation. Biotechnology and bioengineering symposium. 10: 43-65.
- Kaar, W.E., and Holtzaple, M.T. 2000. Using lime pretreatment to facilitate the enzymatic hydrolysis of corn stover. Biomass bioenergy. 18: 189-199.
- Krishna, S.H., Reddy, T.J., and Chowdary, G.V. 2001. Simultaneous saccharification and fermentation of lignocellulosic wastes to ethanol using a thermotolerant yeast. Bioresource technology. 77: 193-196.

- Lane, A.G. 1984. Laboratory scale anaerobic digestion of fruit and vegetable solid waste. Biomass. 5: 245-259.
- Lee, D., Owens, V. N., Boe, A., and Jeranyama, P. 2007. Composition of herbaceous biomass feedstocks [Online]. Available from: <http://ncsungrant.sdstate.org/> [2010, March 10]
- Lee, J. H., Pagan, R. J., and Rogers, P. L. 1983. Continuous simultaneous saccharification and fermentation of starch using *Zymomonas mobilis*. Biotechnology and Bioengineering. 25: 659-69.
- Madigan, T.M., Martinko, J.M., and Parker, J. 1997. Brock Biology of Microorganisms. 8th ed. USA.:Prentice Hall International.
- Mielenz, J.R. 2001. Ethanol production from biomass: technology and commercialization status. Microbiology. 4: 324-329.
- Nallathambi, G.V. 2004. Biochemical methane potential of fruits and vegetable solid waste feedstocks. Biomass and bioenergy. 26: 389-399.
- Nand, K. 1992. Anaerobic digestion of fruit and vegetable processing wastes for biogas production. Bioresource technology. 40: 43-48.
- Owen, W.P., Stuckey, D.C., Healy, J.B., Young, L.Y., and McCarty, P.L. 1979. Bioassay for monitoring biochemical methane potential and anaerobic toxicity. Water Res. 13: 485-492.
- Patrick, W., and Philip, O. 2002. Bioreactor landfill design and operation. Waste age: 72-76.
- Purves, D., et al. 2008. Principles of cognitive neuro science [online]. Available from: www.emc.maricopa.edu/faculty/farabee/biobk/biobookchem2.html [2010, May 18]

- Purwadi, R. 2006. Continuous Ethanol Production from Dilute-acid Hydrolyzates: Detoxification and Fermentation Strategy. Doctoral dissertation, Department of Chemical and Biological, Faculty of Engineering Chalmers University of Technology.
- Ritter, S. K. 2008. Lignocellulose: A complex biomaterial. Plant Biochemistry. 86: 15.
- Rittmann, B.E., and McCarty, P.L. 2001. Environmental biotechnology: Principles and applications. McGraw-Hill International Editions.
- Saha, B. C., and Cotta, M. A. 2006. Ethanol production from alkaline peroxide pretreated enzymatically saccharified wheat straw. Biotechnology Progress. 22: 449-453.
- Sam-soon, P.A.L.N.S., Loewenthal, R.E., Wentzel, M.C., and Marais, G.V.R. 1990. Growth of biopellets on glucose in upflow anaerobic sludge bed (UASB) system. Water SA. 16: 151-164.
- Sánchez, O. J., and Cardona, C. A. 2008. Trends in biotechnological production of fuel ethanol from different feedstock. Bioresource Technology. 99: 5270-5295.
- Sawyer, C.N., and McCarty, P.L. 1993. Chemistry for environmental engineering. 3rd ed. Singapore: McGraw-Hill Book Co-Singapore.
- Shyman, M., and Sharma, P.K. 1993. Solid-state anaerobic digestion of cattle dung and agro-residues in small-capacity field digesters. Bioresource technology. 48: 203-207.
- Silverstein, R. A. 2004. A comparison of chemical pretreatment methods for converting cotton stalks to ethanol. Master's Thesis, Department of Biological and Agricultural, Faculty of Engineering North Carolina State University.
- Speece, R.E. 1996. Anaerobic biotechnology for industrial wastewater. Nashville, Tennessee: Archae Press.
- Sun, Y., and Cheng, J. 2002. Hydrolysis of lignocellulosic materials for ethanol production: A review. Bioresource Technology. 83: 1-11.

Van Der Reyden, D. 1992. Recent scientific research in paper conservation. Journal of the American Institute for Conservation. 31: 117-138.

Vidal, P.F., and Molinier, J., 1988. Ozonolysis of lignin–improvement of in vitro digestibility of poplar sawdust. Biomass. 16: 1-17.

Wang, Y.S., Byrd, C.S., and Barlaz, M.A. 1994. Anaerobic biodegradability of cellulose and hemicellulose in excavated refuse samples using a biochemical methane potential assay. Industrial Microbiology. 13:147-153.

Wheatley, A.D., Fisher, M.B., and Grobicki, A.M.W. 1997. Applications of anaerobic digestion for the treatment of industrial wastewaters in Europe. Inter Science. 11: 39-46.



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ก

ผลการทดลองที่ 1

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก-1 ผลการวิเคราะห์ค่าซีไอที่ละลายของน้ำย่อยจากตัวอย่างไบอ้อยที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นทางความร้อนและทางชีวภาพ และไบอ้อยที่ไม่ได้ผ่านการบำบัดเบื้องต้น

ตัวอย่าง	ค่าพิสัยซีไอที่ละลาย (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ค่าซีไอที่ละลายเฉลี่ย (มิลลิกรัมต่อลิตร)
- SL 1	1,915 – 2,085	1,980 ±92
- SL 2	1,071 – 1,306	1,176 ±120
<u>การบำบัดเบื้องต้นทางความร้อน</u>		
- SP (15 นาที)	3,556 – 3,966	3,692 ±237
- SP (30 นาที)	5,197 – 5,361	5,251 ±95
- SP (60 นาที)	5,525 – 5,689	5,634 ±95
- HP (15 นาที)	2,327 – 2,793	2,638 ±269
- HP (30 นาที)	2,327 – 3,258	2,793 ±465
- HP (60 นาที)	2,793 – 3,258	2,948 ±269
<u>การบำบัดเบื้องต้นทางชีวภาพที่อัตราส่วน มูลวัวต่อไบอ้อย 1:6</u>		
- BP 1:6 (วันที่ 1)	1,306 – 1,697	1,567 ±226
- BP 1:6 (วันที่ 3)	2,234 – 2,627	2,365 ±227
- BP 1:6 (วันที่ 5)	4,459 – 4,463	4,462 ±2
- BP 1:6 (วันที่ 7)	4,463 – 4,857	4,594 ±227

ตารางที่ ก-1 (ต่อ)

ตัวอย่าง	ค่าพิสัยซีไอละลาย (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ค่าซีไอละลายเฉลี่ย (มิลลิกรัมต่อลิตร)
<u>การบำบัดเบื้องต้นทางชีวภาพที่อัตราส่วน</u>		
<u>มูลวัวต่อใบอ้อย 1:3</u>		
- BP 1:3 (วันที่ 1)	1,227 – 1,619	1,410 ±197
- BP 1:3 (วันที่ 3)	1,840 – 2,627	2,234 ±393
- BP 1:3 (วันที่ 5)	2,850 – 2,890	2,876 ±23
- BP 1:3 (วันที่ 7)	2,890 – 4,070	3,283 ±681
<u>การบำบัดเบื้องต้นทางชีวภาพที่อัตราส่วน</u>		
<u>มูลวัวต่อใบอ้อย 1:2</u>		
- BP 1:2 (วันที่ 1)	1,697 – 1,854	1,802 ±90
- BP 1:2 (วันที่ 3)	3,021 – 3,414	3,152 ±227
- BP 1:2 (วันที่ 5)	3,676 – 4,070	3,808 ±227
- BP 1:2 (วันที่ 7)	6,037 – 6,824	6,431 ±393
- Blank ควบคุมสำหรับการบำบัดเบื้องต้นทางชีวภาพ	547-2,270	1,232 ±759



ภาคผนวก ข
ผลการทดลองที่ 2

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข-1 แสดงค่าของแข็งทั้งหมด ค่าความชื้น และค่าของแข็งระเหยในการทดลองที่ 2

ตัวอย่าง	%TS	พิสัย TS	%moisture	พิสัย moisture	SD	%VS	พิสัย VS	SD
SL	25.90	23.56 - 27.37	74.10	72.63 - 73.16	2.06	23.67	19.89-26.20	6.09
มูลวัว	52.27	45.68 - 59.30	47.73	40.70 - 54.32	6.80	33.35	25.51-41.83	7.43
SE-15	37.84	36.99 - 38.65	62.16	61.35 - 63.01	1.17	35.30	32.76-37.88	6.69
SE-30	38.45	35.34 - 41.69	61.55	58.31 - 64.66	4.49	35.89	30.82-41.46	8.67
SE-60	38.38	31.73 - 44.77	61.62	55.23 - 68.27	9.21	36.34	30.03-42.42	0.09
HW-15	20.42	19.98 - 20.88	79.58	79.12 - 80.02	0.64	19.16	17.06-21.36	11.96
HW-30	20.38	19.72 - 21.07	79.62	78.93 - 80.28	0.95	19.25	17.59-20.80	15.56
HW-60	20.09	19.07 - 20.93	79.91	79.07 - 80.93	1.32	18.70	16.62-20.72	8.34
BP 1:6_1	19.74	18.14 - 21.64	80.26	78.36 - 81.86	2.48	18.40	18.12-18.73	9.45
BP 1:6_3	19.37	19.10 - 19.65	80.63	80.35 - 80.90	0.39	17.85	17.50-18.21	0.74
BP 1:6_5	15.77	15.17 - 16.38	84.23	83.62 - 84.83	0.85	14.61	14.13-15.10	0.67
BP 1:6_7	16.11	15.10 - 17.17	83.89	82.83 - 84.90	1.46	15.07	13.62-16.64	4.77
BP 1:3_1	20.44	18.66 - 22.38	79.56	77.62 - 81.34	2.63	19.12	17.57-20.79	0.88
BP 1:3_3	18.40	17.16 - 19.52	81.60	80.48 - 82.84	1.67	17.00	14.77-19.27	8.93
BP 1:3_5	16.94	16.76 - 17.14	83.06	82.86 - 83.24	0.27	15.79	14.97-16.63	8.37
BP 1:3_7	14.70	12.77 - 16.68	85.30	83.32 - 87.23	2.76	13.31	10.36-16.70	13.45
BP 1:2_1	21.86	20.46 - 23.60	78.14	76.40 - 79.54	2.21	20.58	16.64-25.23	18.14
BP 1:2_3	19.24	18.97 - 19.53	80.76	80.47 - 81.03	0.40	17.89	15.42-20.31	19.89
BP 1:2_5	18.70	18.08 - 19.29	81.30	80.71 - 81.92	0.85	16.97	16.03-17.92	3.00
BP 1:2_7	15.97	15.53 - 16.41	84.03	83.59 - 84.47	0.62	14.45	13.52-15.43	4.92

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข-2 ปริมาณก๊าซชีวภาพรายวันของตัวอย่างที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นทางความร้อน

วันที่	ปริมาณก๊าซชีวภาพ (มล./กรัมของแข็งระเหย)							
	Blank	SL	SP15	SP30	SP60	HP15	HP30	HP60
1	0.05	0.48	0.92	0.78	0.80	0.33	0.53	0.49
2	0.07	0.68	1.16	0.90	0.86	0.49	0.68	0.51
3	0.08	0.80	1.03	1.27	1.49	0.51	0.84	0.70
4	0.09	0.82	1.37	1.67	1.78	0.63	0.79	0.63
5	0.09	0.81	1.88	2.64	2.82	0.60	0.90	0.81
6	0.10	1.12	1.91	2.85	2.24	0.69	1.05	0.92
7	0.11	1.17	2.44	3.05	3.76	1.03	1.33	1.31
8	0.12	1.02	4.95	4.27	4.56	1.45	1.54	1.77
9	0.13	1.29	4.03	5.33	5.22	1.80	1.75	1.92
10	0.14	1.43	5.40	5.68	6.16	2.43	1.96	2.39
11	0.17	1.76	6.15	6.40	5.98	2.18	2.50	2.74
12	0.20	1.92	6.23	7.09	7.63	2.37	2.40	2.80
13	0.21	2.45	7.40	8.04	8.42	2.57	2.60	3.10
14	0.24	2.75	8.83	9.53	9.74	2.68	2.72	2.91
15	0.28	3.04	10.04	10.61	9.98	2.57	2.89	3.34
16	0.29	2.70	11.14	11.55	10.94	2.99	3.10	3.64
17	0.27	2.50	12.64	12.49	13.49	3.23	3.12	4.06
18	0.24	2.31	11.42	12.81	12.35	3.83	3.80	4.17
19	0.24	1.88	9.34	12.50	11.23	3.60	4.16	4.64
20	0.20	2.10	9.12	9.96	10.55	3.36	3.65	4.05
21	0.17	1.77	10.75	9.40	8.95	3.12	3.44	3.81
22	0.17	1.73	8.23	7.35	8.28	3.26	3.15	3.67
23	0.14	1.61	7.10	8.05	7.64	2.78	2.96	3.61
24	0.14	1.59	6.13	8.92	7.91	2.49	3.04	3.55
25	0.14	1.50	7.47	7.26	7.82	2.93	3.11	3.34
26	0.12	1.58	7.95	6.45	5.71	2.45	2.79	3.42

ตารางที่ ข-2 (ต่อ)

วันที่	ปริมาณก๊าซชีวภาพ (มล./กรัมของแข็งระเหย)							
	Blank	SL	SP15	SP30	SP60	HP15	HP30	HP60
27	0.13	1.45	6.55	6.72	6.38	2.38	2.83	3.38
28	0.11	1.54	7.55	6.61	8.74	2.54	3.35	3.46
29	0.12	1.38	5.37	6.94	6.34	2.88	3.11	3.26
30	0.11	1.49	4.56	6.86	6.17	2.02	2.64	2.89
31	0.11	1.20	5.51	5.39	5.35	2.24	2.56	3.06
32	0.13	1.38	4.44	6.37	5.88	2.30	2.44	3.13
33	0.12	1.50	5.27	5.30	5.85	2.14	2.48	2.99
34	0.12	1.35	6.07	6.25	6.21	1.97	2.68	2.87
35	0.15	1.14	5.34	6.16	5.39	2.10	2.43	2.89
36	0.16	1.22	5.89	4.85	4.42	1.75	2.61	2.56
37	0.14	1.18	5.29	4.68	5.24	2.15	2.51	2.70
38	0.13	1.03	6.32	5.07	4.94	1.99	2.45	2.63
39	0.11	1.29	6.09	4.97	5.04	1.83	2.35	2.81
40	0.14	1.10	5.60	4.64	5.96	2.04	2.67	2.47
41	0.14	1.11	5.72	4.87	4.88	1.93	2.27	2.11
42	0.12	1.09	5.53	4.70	4.37	1.73	2.10	2.39
43	0.12	1.19	4.85	6.07	4.60	1.89	2.59	2.35
44	0.09	1.05	6.17	5.15	5.24	1.88	2.59	2.45
45	0.09	1.03	5.60	4.43	4.71	2.00	2.16	2.05
46	0.11	0.95	5.07	5.33	3.89	2.10	2.45	2.00
47	0.09	1.00	5.33	4.31	4.30	1.61	1.71	1.80
48	0.08	0.99	4.94	4.28	4.14	1.97	2.39	1.89
49	0.10	1.04	5.70	5.25	4.43	1.76	2.22	1.67
50	0.12	0.92	4.37	4.14	4.94	1.52	1.72	1.93
51	0.14	1.10	4.68	3.84	4.81	1.40	2.03	1.68
52	0.12	0.99	4.64	3.99	4.51	1.30	1.60	1.59
53	0.15	0.91	4.37	3.69	4.45	1.31	1.44	1.60

ตารางที่ ข-2 (ต่อ)

วันที่	ปริมาณก๊าซชีวภาพ (มล./กรัมของแข็งระเหย)							
	Blank	SL	SP15	SP30	SP60	HP15	HP30	HP60
54	0.13	0.99	4.73	3.89	4.78	1.39	1.53	1.56
55	0.14	0.62	4.25	4.03	3.67	1.35	1.59	1.51
56	0.11	0.70	4.21	3.85	3.15	1.46	1.54	1.32
57	0.11	0.67	4.16	3.97	4.15	1.29	1.51	1.51
58	0.13	0.71	3.84	3.52	3.90	1.22	1.46	1.43
59	0.14	0.50	3.93	3.51	4.67	1.00	1.52	1.35
60	0.11	0.36	3.75	3.31	3.79	1.09	1.36	1.49
61	0.10	0.29	2.43	2.70	4.33	1.05	1.15	0.95
62	0.07	0.53	1.97	3.14	3.43	1.25	1.32	1.19
63	0.04	0.37	2.74	2.72	2.37	1.03	1.07	0.85
64	0.06	0.40	1.59	2.78	2.79	0.81	1.21	0.99
65	0.03	0.50	1.24	1.43	1.21	0.88	0.90	0.84
66	0.08	0.33	1.74	1.80	2.88	0.68	0.97	0.85
67	0.02	0.21	1.03	1.20	1.40	0.41	0.62	0.52
68	0.04	0.38	1.17	1.39	1.70	0.48	0.31	0.58
69	0.01	0.10	0.97	1.52	1.12	0.40	0.50	0.54
70	0.06	0.02	0.71	1.15	0.68	0.16	0.30	0.36
71	0.02	0.07	0.99	1.05	2.21	0.32	0.46	0.49
72	0.03	0.02	0.41	0.53	1.05	0.23	0.30	0.35
73	0.04	0.03	0.58	0.70	0.52	0.10	0.13	0.21
74	0.06	0.15	0.37	0.60	0.67	0.00	0.02	0.01
75	0.05	0.02	0.13	0.30	0.41	0.08	0.01	0.10
76	0.02	0.02	0.34	0.44	0.56	0.02	0.00	0.05
77	0.01	0.04	0.21	0.30	0.31	0.02	0.02	0.01
78	0.00	0.02	0.07	0.22	0.10	0.01	0.00	0.05
79	0.00	0.03	0.12	0.15	0.08	0.00	0.02	0.02
80	0.00	0.03	0.08	0.06	0.05	0.01	0.00	0.01

ตารางที่ ข-3 ปริมาณก๊าซชีวภาพรายวันของตัวอย่างที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นทางชีวภาพ

วันที่	ปริมาณก๊าซชีวภาพ (มล./กรัมของแข็งระเหย)							
	BP1:6_1	BP1:6_3	BP1:6_5	BP1:6_7	BP1:3_1	BP1:3_3	BP1:3_5	BP1:3_7
1	0.57	0.59	0.79	0.83	0.59	0.64	0.63	0.67
2	0.68	0.68	1.12	0.88	0.76	0.81	0.64	0.76
3	0.74	0.82	1.04	1.05	0.83	0.86	0.69	0.82
4	0.86	0.78	1.18	0.92	1.08	0.88	0.88	0.75
5	0.95	0.99	1.31	1.26	0.87	1.08	0.76	0.91
6	1.04	1.26	1.58	1.33	1.10	1.14	0.98	1.37
7	1.27	1.13	1.87	1.44	1.15	1.11	1.14	1.69
8	1.46	1.36	1.70	1.49	1.20	1.31	1.50	1.64
9	1.52	1.41	2.06	1.61	1.28	1.52	1.58	1.70
10	1.72	1.53	2.19	1.73	1.22	1.56	1.54	1.84
11	1.79	1.45	2.11	1.62	1.30	1.70	1.69	1.78
12	1.94	1.69	2.37	1.57	1.38	1.76	1.72	1.90
13	1.84	1.67	2.41	1.69	1.52	1.91	2.03	2.17
14	2.00	1.75	2.60	1.68	1.66	1.82	2.63	2.78
15	2.53	1.93	2.65	2.07	1.53	2.00	3.24	3.09
16	2.28	1.97	2.98	1.93	1.64	2.31	2.86	3.57
17	2.30	2.46	3.90	2.95	1.97	2.45	3.79	3.89
18	2.95	2.70	3.24	3.35	2.27	2.80	4.14	4.44
19	3.17	2.99	3.04	4.34	2.59	2.99	3.56	3.94
20	3.02	3.52	2.87	3.52	3.37	3.56	3.38	3.02
21	2.87	2.98	2.78	3.35	3.09	3.24	3.09	3.17
22	2.74	2.78	2.71	3.04	2.38	3.03	2.87	2.98
23	2.59	2.97	2.78	2.97	2.39	2.61	2.76	2.61
24	2.43	2.56	2.65	3.08	2.48	2.72	2.73	2.82
25	2.53	2.81	2.59	2.88	2.18	2.81	2.57	2.70
26	2.37	2.49	2.52	2.68	2.18	2.41	2.65	2.76

ตารางที่ ข-3 (ต่อ)

วันที่	ปริมาณก๊าซชีวภาพ (มล./กรัมของแข็งระเหย)							
	BP1:6_1	BP1:6_3	BP1:6_5	BP1:6_7	BP1:3_1	BP1:3_3	BP1:3_5	BP1:3_7
27	2.22	2.57	2.34	2.71	2.54	2.61	2.69	2.63
28	2.16	2.41	2.41	2.81	2.62	2.49	2.57	2.47
29	2.18	2.36	2.49	2.65	2.54	2.09	2.38	2.51
30	2.14	2.34	2.33	2.54	2.40	2.04	2.49	2.39
31	2.08	2.57	2.16	2.47	2.31	2.14	2.47	2.61
32	2.01	2.29	2.19	2.55	2.38	2.29	2.51	2.41
33	2.05	2.28	2.18	2.63	2.52	2.01	2.33	2.50
34	1.89	2.25	2.29	2.21	2.30	2.16	2.18	2.38
35	1.96	2.12	2.10	2.36	2.22	2.28	2.22	2.05
36	1.96	2.20	2.05	2.32	2.07	2.14	2.16	2.25
37	1.86	2.19	1.91	2.24	2.16	2.05	2.26	2.21
38	1.89	2.11	2.01	2.57	2.11	2.00	2.19	2.18
39	1.94	2.05	2.00	2.22	2.21	1.94	2.09	2.35
40	1.81	2.00	2.04	2.02	2.04	2.16	1.97	2.03
41	1.68	2.06	1.78	2.10	2.03	2.07	2.04	1.79
42	1.73	1.99	1.82	2.04	2.09	2.14	2.05	2.03
43	1.80	1.96	1.90	2.16	1.97	2.00	2.13	1.89
44	1.65	1.93	1.77	2.02	1.78	1.91	1.98	2.01
45	1.55	1.88	1.72	1.96	1.85	1.77	1.79	1.89
46	1.59	1.81	1.61	1.94	1.93	1.82	1.70	2.09
47	1.59	1.76	1.65	1.92	1.66	1.94	1.88	1.81
48	1.47	1.96	1.69	1.92	1.57	1.88	1.77	1.77
49	1.52	1.65	1.55	1.76	1.70	1.72	1.74	1.57
50	1.52	1.54	1.43	1.67	1.54	1.62	1.60	1.58
51	1.16	1.48	1.43	1.53	1.40	1.69	1.30	1.62
52	1.30	1.45	1.43	1.40	1.40	1.58	1.54	1.52
53	1.21	1.40	1.47	1.42	1.19	1.43	1.37	1.09

ตารางที่ ข-3 (ต่อ)

วันที่	ปริมาณก๊าซชีวภาพ (มล./กรัมของแข็งระเหย)							
	BP1:6_1	BP1:6_3	BP1:6_5	BP1:6_7	BP1:3_1	BP1:3_3	BP1:3_5	BP1:3_7
54	1.09	1.36	1.41	1.24	1.29	1.42	1.37	1.42
55	1.20	1.30	1.29	1.38	1.13	1.35	1.56	1.38
56	1.17	1.29	1.11	1.55	1.12	1.36	1.20	1.36
57	1.11	1.24	1.23	1.31	1.27	1.29	1.03	1.20
58	1.19	1.13	1.29	1.20	0.92	1.19	1.15	1.48
59	0.93	1.06	1.24	1.40	1.39	1.13	1.21	1.02
60	0.89	1.12	0.99	1.20	1.11	1.14	1.07	0.93
61	1.15	1.23	1.04	1.15	0.99	1.00	1.12	1.26
62	1.07	1.17	1.26	1.21	1.17	0.97	1.10	1.12
63	0.91	0.71	1.03	1.12	0.81	1.07	1.02	1.19
64	0.67	0.78	0.58	0.98	0.55	0.70	0.95	0.99
65	0.83	0.88	0.75	0.79	0.70	0.81	0.82	0.93
66	0.60	0.48	0.89	0.53	0.29	0.45	0.56	0.63
67	0.41	0.70	0.40	0.34	0.44	0.59	0.46	0.56
68	0.48	0.33	0.69	0.54	0.54	0.42	0.62	0.59
69	0.34	0.43	0.31	0.40	0.31	0.25	0.31	0.41
70	0.20	0.50	0.41	0.21	0.15	0.29	0.35	0.59
71	0.32	0.23	0.31	0.31	0.33	0.20	0.18	0.31
72	0.17	0.04	0.11	0.13	0.15	0.18	0.20	0.24
73	0.04	0.12	0.05	0.10	0.04	0.13	0.04	0.04
74	0.05	0.02	0.00	0.01	0.14	0.00	0.03	0.05
75	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.01
76	0.00	0.02	0.03	0.02	0.00	0.02	0.01	0.00
77	0.02	0.00	0.01	0.02	0.02	0.04	0.03	0.03
78	0.01	0.02	0.04	0.05	0.01	0.02	0.03	0.01
79	0.02	0.03	0.01	0.02	0.02	0.01	0.01	0.02
80	0.02	0.02	0.03	0.02	0.01	0.02	0.03	0.02

ตารางที่ ข-3 (ต่อ)

วันที่	ปริมาณก๊าซชีวภาพ (มด./กรัมของแข็งระเหย)			
	BP1:2_1	BP1:2_3	BP1:2_5	BP1:2_7
1	0.59	0.62	0.72	0.85
2	0.65	0.82	1.02	0.95
3	0.77	0.66	0.87	1.45
4	0.82	0.98	0.73	1.26
5	0.79	0.95	1.18	1.19
6	0.92	0.83	1.35	1.67
7	1.22	1.12	1.64	1.62
8	1.13	1.27	1.55	1.48
9	1.15	1.35	1.40	1.79
10	1.28	1.76	1.72	1.90
11	1.34	1.67	1.78	2.45
12	1.28	1.75	2.15	2.28
13	1.37	1.87	1.82	2.84
14	1.51	1.87	1.98	3.34
15	1.42	2.04	2.27	3.11
16	1.64	2.23	2.18	3.41
17	2.26	2.99	2.94	3.96
18	2.53	3.77	3.58	4.64
19	3.52	3.33	4.22	3.91
20	2.86	2.92	3.47	3.62
21	2.68	2.81	3.05	3.50
22	2.76	2.83	3.21	3.03
23	2.68	2.71	2.66	3.11
24	2.60	2.58	2.78	3.34
25	2.47	2.65	3.02	3.08
26	2.54	2.43	2.62	2.64

ตารางที่ ข-3 (ต่อ)

วันที่	ปริมาณก๊าซชีวภาพ (มล./กรัมของแข็งระเหย)			
	BP1:2_1	BP1:2_3	BP1:2_5	BP1:2_7
27	2.51	2.69	2.31	2.84
28	2.60	2.52	2.54	2.73
29	2.31	2.49	2.09	3.01
30	2.44	2.46	2.59	2.60
31	2.38	2.29	2.50	2.53
32	2.34	2.48	2.41	2.31
33	2.46	2.35	2.34	2.43
34	2.28	2.42	1.99	2.27
35	2.08	2.20	2.22	2.36
36	2.15	2.31	2.17	2.16
37	2.14	2.59	2.10	2.33
38	2.22	2.08	2.51	2.47
39	2.03	2.05	2.05	2.43
40	1.87	2.11	2.27	1.89
41	1.92	2.32	1.94	2.38
42	1.68	2.04	1.73	2.15
43	1.85	2.16	1.82	2.07
44	1.75	1.79	1.63	1.89
45	1.73	1.94	1.65	1.99
46	1.99	1.86	1.94	1.73
47	1.68	1.93	1.75	1.96
48	1.66	1.90	1.45	2.25
49	1.47	1.82	1.71	2.04
50	1.56	1.92	1.64	1.45
51	1.38	1.68	1.76	1.71
52	1.48	1.64	1.60	1.88
53	1.59	1.36	1.77	1.65

ตารางที่ ข-3 (ต่อ)

วันที่	ปริมาณก๊าซชีวภาพ (มล./กรัมของแข็งระเหย)			
	BP1:2_1	BP1:2_3	BP1:2_5	BP1:2_7
54	1.27	1.55	1.55	1.58
55	1.29	1.51	1.50	1.54
56	1.25	1.43	1.44	1.53
57	1.09	1.63	1.61	1.86
58	1.08	1.33	1.34	1.35
59	1.19	1.23	1.26	1.06
60	1.05	1.15	1.23	1.26
61	1.01	1.18	1.17	0.93
62	0.76	1.13	1.13	1.20
63	1.01	1.11	0.76	1.40
64	0.80	1.03	1.01	1.10
65	0.52	0.80	1.34	1.32
66	0.66	0.64	1.06	0.62
67	0.40	0.33	0.72	0.98
68	0.19	0.72	0.49	0.50
69	0.37	0.40	0.66	0.59
70	0.55	0.58	0.35	0.36
71	0.40	0.20	0.26	0.26
72	0.12	0.15	0.30	0.32
73	0.23	0.06	0.10	0.17
74	0.01	0.02	0.04	0.03
75	0.00	0.00	0.02	0.01
76	0.01	0.02	0.02	0.01
77	0.03	0.05	0.04	0.04
78	0.02	0.02	0.03	0.02
79	0.03	0.04	0.01	0.03
80	0.02	0.03	0.02	0.02

ตารางที่ ข-4 แสดงค่ากรดไขมันระเหยในการทดลองที่ 2

ตัวอย่าง	VFA (มก./ลิตร)	ค่าพิสัย VFA	Sample	VFA (มก./ลิตร)	ค่าพิสัย VFA
Blank 1	1,16.67 \pm 8.64	109.86-126.38	HP 30_1	132.97 \pm 5.54	128.20-139.05
Blank 2	2,35.00 \pm 2.65	233.00-238.00	HP 30_2	295.33 \pm 7.21	288.30-302.70
Blank 3	98.67 \pm 0.82	97.79-99.42	HP 30_3	605.37 \pm 9.69	594.20-611.50
Blank 4	1,20.60 \pm 4.82	115.78-125.42	HP 30_4	334.30 \pm 3.52	330.35-337.10
Blank 5	77.80 \pm 2.50	75.80-80.60	HP 30_5	396.87 \pm 6.60	389.50-402.25
SL 1	162.33 \pm 9.01	152.00-168.55	HP 60_1	247.87 \pm 8.43	240.80-257.20
SL 2	280.40 \pm 7.90	272.61-288.41	HP 60_2	325.00 \pm 0.78	324.20-325.75
SL 3	314.47 \pm 5.18	310.40-320.30	HP 60_3	655.30 \pm 13.75	643.50-670.40
SL 4	205.30 \pm 2.55	202.40-207.20	HP 60_4	417.72 \pm 3.05	415.00-421.02
SL 5	152.87 \pm 6.63	147.30-160.20	HP 60_5	366.63 \pm 8.93	359.10-376.50
SP 15_1	362.00 \pm 9.32	352.10-370.60	BP 1:6 (1)_1	312.00 \pm 7.56	305.40-320.25
SP 15_2	564.70 \pm 9.01	554.32-570.52	BP 1:6 (1)_2	402.30 \pm 4.33	398.50-407.02
SP 15_3	446.20 \pm 3.87	442.33-450.06	BP 1:6 (1)_3	521.40 \pm 8.43	513.40-530.20
SP 15_4	257.30 \pm 2.39	255.72-260.05	BP 1:6 (1)_4	247.20 \pm 1.95	245.30-249.20
SP 15_5	296.10 \pm 9.26	287.43-305.85	BP 1:6 (1)_5	310.20 \pm 6.16	316.80-304.60
SP 30_1	336.50 \pm 3.34	334.02-340.29	BP 1:6 (3)_1	277.08 \pm 3.11	274.10-280.30
SP 30_2	469.05 \pm 7.98	463.05-478.10	BP 1:6 (3)_2	457.20 \pm 6.40	450.80-463.60
SP 30_3	430.40 \pm 1.95	428.34-432.23	BP 1:6 (3)_3	602.80 \pm 2.62	600.60-605.70
SP 30_4	316.07 \pm 4.04	312.08-320.16	BP 1:6 (3)_4	315.40 \pm 10.75	306.40-327.30
SP 30_5	364.20 \pm 5.92	359.20-370.74	BP 1:6 (3)_5	254.6 \pm 3.75	251.60-258.80
SP 60_1	347.06 \pm 3.22	344.48-350.67	BP 1:6 (5)_1	170.30 \pm 2.21	168.20-172.60
SP 60_2	656.50 \pm 14.13	645.14-672.33	BP 1:6 (5)_2	657.04 \pm 2.03	655.00-659.05
SP 60_3	478.20 \pm 2.01	476.20-480.22	BP 1:6 (5)_3	336.90 \pm 5.88	331.15-342.90
SP 60_4	170.30 \pm 4.09	166.10-174.26	BP 1:6 (5)_4	246.10 \pm 5.13	240.20-249.50
SP 60_5	253.40 \pm 7.09	245.33-258.66	BP 1:6 (5)_5	464.00 \pm 8.62	456.10-473.20
HP 15_1	125.00 \pm 4.52	121.50-130.10	BP 1:6 (7)_1	329.70 \pm 2.43	327.40-332.25
HP 15_2	337.50 \pm 8.36	330.10-346.57	BP 1:6 (7)_2	557.60 \pm 11.66	548.70-570.80
HP 15_3	554.60 \pm 1.46	553.25-556.15	BP 1:6 (7)_3	423.00 \pm 3.55	420.85-427.10
HP 15_4	425.40 \pm 5.06	420.40-430.52	BP 1:6 (7)_4	300.50 \pm 49.43	294.60-305.50
HP 15_5	352.03 \pm 2.07	349.70-353.64	BP 1:6 (7)_5	321.40 \pm 99.87	310.02-331.05

ตารางที่ ข-4 (ต่อ)

Sample	VFA (มก./ลิตร)	ค่าพิสัย VFA	Sample	VFA (มก./ลิตร)	ค่าพิสัย VFA
BP 1:3 (1)_1	183.00 +5.82	177.80-189.40	BP 1:2 (1)_1	179.70 ±1.09	178.52-180.67
BP 1:3 (1)_2	467.80 +3.02	464.60-470.60	BP 1:2 (1)_2	365.20 ±4.54	361.52-370.27
BP 1:3 (1)_3	325.70 +6.60	319.60-332.71	BP 1:2 (1)_3	460.40 ±6.84	455.58-468.23
BP 1:3 (1)_4	234.80 +8.99	226.42-244.3	BP 1:2 (1)_4	315.70 ±9.61	308.30-326.56
BP 1:3 (1)_5	296.20 +7.50	289.57-304.34	BP 1:2 (1)_5	266.20 ±3.52	263.14-270.05
BP 1:3 (3)_1	241.20 +4.20	237.466-245.74	BP 1:2 (3)_1	327.40 ±3.41	324.82-331.26
BP 1:3 (3)_2	429.70 +2.58	427.17-432.32	BP 1:2 (3)_2	500.20 ±9.12	492.34-510.20
BP 1:3 (3)_3	337.60 +2.64	335.20-340.42	BP 1:2 (3)_3	579.20 ±2.16	577.08-581.40
BP 1:3 (3)_4	305.20 +10.29	297.23-316.82	BP 1:2 (3)_4	416.70 ±6.00	410.08-421.79
BP 1:3 (3)_5	214.70 +1.91	212.84-216.65	BP 1:2 (3)_5	395.04 ±12.05	385.38-408.54
BP 1:3 (5)_1	145.30 +4.95	140.60-150.46	BP 1:2 (5)_1	183.30 ±3.39	180.52-187.08
BP 1:3 (5)_2	402.05 +1.96	400.35-404.20	BP 1:2 (5)_2	436.00 ±13.21	425.16-450.72
BP 1:3 (5)_3	317.00 +10.49	305.60-326.25	BP 1:2 (5)_3	490.05 ±6.76	482.40-495.24
BP 1:3 (5)_4	225.30 +9.46	215.92-234.83	BP 1:2 (5)_4	285.30 ±4.04	281.30-289.38
BP 1:3 (5)_5	184.20 +5.20	181.10-190.21	BP 1:2 (5)_5	220.60 ±6.51	215.32-227.87
BP 1:3 (7)_1	159.30 +14.93	157.26-161.10	BP 1:2 (7)_1	158.30 ±1.62	157.32-160.17
BP 1:3 (7)_2	426.50 + 3.92	422.42-430.24	BP 1:2 (7)_2	366.20 ±10.03	355.37-375.16
BP 1:3 (7)_3	320.20 +6.74	314.24-327.52	BP 1:2 (7)_3	378.10 ±6.47	372.82-385.31
BP 1:3 (7)_4	316.70 +3.06	314.52-320.20	BP 1:2 (7)_4	300.07 ±4.85	294.70-304.14
BP 1:3 (7)_5	205.60 +0.87	204.67-206.40	BP 1:2 (7)_5	258.30 ±5.58	253.40-264.37

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข-5 แสดงค่าสภาพต่างในการทดลองที่ 2

ตัวอย่าง	ALK (มก./ลิตร)	ค่าพิสัย	ตัวอย่าง	ALK (มก./ลิตร)	ค่าพิสัย
Blank 1	605.35 ±19.85	586.16-625.80	HP 30_1	1,973.16 ±25.19	1952.7-2001.3
Blank 2	259.26 ±20.72	236.10-276.04	HP 30_2	1,307.8 ±19.31	1,285.86-1,322.2
Blank 3	450.72 ±6.17	445.42-457.50	HP 30_3	526.5 ±4.29	521.80-530.20
Blank 4	724.52 ±11.84	712.41-736.08	HP 30_4	826.52 ±11.59	817.50-839.60
Blank 5	835.67 ±5.22	832.07-841.65	HP 30_5	1325.71 ±16.92	1,308.92-1,342.75
SL 1	720.30 ±12.21	706.23-728.05	HP 60_1	2,309.40 ±10.81	2,297.36-2,318.25
SL 2	115.29 ±12.28	102.60-127.12	HP 60_2	1,227.66 ±13.83	1,215.3-1,242.6
SL 3	84.92 ±5.13	81.53-90.82	HP 60_3	839.00 ±2.36	837.3-841.7
SL 4	501.67 ±23.62	475.35-521.02	HP 60_4	976.27 ±12.30	964.0-988.6
SL 5	802.68 ±25.03	774.04-820.40	HP 60_5	1375.42 ±33.58	1,348.65-1,413.1
SP 15_1	905.22 ±10.83	896.15-917.22	BP 1:6 (1)_1	1,954.03 ±56.40	1,907.1-2,016.6
SP 15_2	877.03 ±15.47	867.03-894.85	BP 1:6 (1)_2	1,025.7 ±38.82	985.6-1,063.1
SP 15_3	956.50 ±20.77	942.02-980.30	BP 1:6 (1)_3	856.02 ±16.12	840.4-872.6
SP 15_4	1,775.42 ±54.09	1,738.20-1,837.47	BP 1:6 (1)_4	1,041.67 ±32.39	1,005.2-1,067.1
SP 15_5	1,350.36 ±28.10	1,320.32-1,376.00	BP 1:6 (1)_5	1362.31 ±35.79	1,337.4-1,403.32
SP 30_1	1,204.21 ±30.58	1,172.3-1,233.27	BP 1:6 (3)_1	1,756.17 ±41.74	1,721.00-1,802.30
SP 30_2	1,027.31 ±53.95	978.3-1,085.12	BP 1:6 (3)_2	957.82 ±10.10	947.35-967.5
SP 30_3	1,162 ±26.99	1,132.3-1,185.02	BP 1:6 (3)_3	892.2 ±31.25	862-924.4
SP 30_4	1,479.50 ±19.52	1,457.1-1,492.9	BP 1:6 (3)_4	1040.9 ±50.41	1,007.6-1,098.9
SP 30_5	1,127.04 ±20.22	1,104.24-1,134.07	BP 1:6 (3)_5	1509.82 ±20.58	1,486.15-1,523.5
SP 60_1	1,587.00 ±16.49	1,572.8-1,605.09	BP 1:6 (5)_1	1,828.5 ±16.96	1,812.4-1,846.2
SP 60_2	5,60.10 ±11.72	547.45-570.6	BP 1:6 (5)_2	875.14 ±4.79	870.7-880.22
SP 60_3	759.42 ±13.23	744.2-768.16	BP 1:6 (5)_3	1,097.25 ±30.57	1,067.3-1,128.4
SP 60_4	2,207.48 ±9.36	2,197.7-2,216.35	BP 1:6 (5)_4	1207.93 ±9.66	1,198.1-1,217.4
SP 60_5	1,906.8 ±22.09	1,885.55-1,929.65	BP 1:6 (5)_5	954.5 ±23.34	930.4-977.0
HP 15_1	1,537.39 ±32.25	1,506.57-1,570.90	BP 1:6 (7)_1	1,094.36 ±24.86	1,065.65-1,112.92
HP 15_2	1,390.06 ±19.35	1,375.55-1,412.03	BP 1:6 (7)_2	957.23 ±30.82	922.30-980.60
HP 15_3	352 ±9.74	341.4-360.55	BP 1:6 (7)_3	997.33 ±49.77	956.3-1,052.7
HP 15_4	857.04 ±13.11	842.31-867.45	BP 1:6 (7)_4	1760.07 ±56.66	1,695.7-1,802.4
HP 15_5	1169.2 ±22.82	1,153.70-1,195.40	BP 1:6 (7)_5	1248.64 ±23.76	1,231.7-1,275.8

ตารางที่ ข-5 (ต่อ)

ตัวอย่าง	ALK (มก./ลิตร)	ค่าพิสัย	ตัวอย่าง	ALK (มก./ลิตร)	ค่าพิสัย
BP 1:3 (1)_1	1,642.07 ±47.78	1,605.4-1,696.1	BP 1:2 (3)_1	2,573.17 ±38.08	2,530.5-2,603.7
BP 1:3 (1)_2	753.00 ±18.49	739.6-774.1	BP 1:2 (3)_2	1,092.06 ±25.30	1,072.4-1,120.6
BP 1:3 (1)_3	904.6 ±26.52	874.8-925.6	BP 1:2 (3)_3	941.75 ±9.76	932.8-952.15
BP 1:3 (1)_4	1103.27 ±45.88	1,056.5-1,148.2	BP 1:2 (3)_4	1,209.76 ±29.81	1,182.2-1,241.4
BP 1:3 (1)_5	985.97 ±33.60	962.8-1024.5	BP 1:2 (3)_5	1,894.6 ±12.15	1,882.5-1,906.8
BP 1:3 (3)_1	1276.05 ±28.16	1,243.7-1,295.05	BP 1:2 (5)_1	2,247.01 ±53.67	2,185.4-2,283.62
BP 1:3 (3)_2	740.46 ±21.17	726.4-764.8	BP 1:2 (5)_2	950.2 ±14.60	935.6-964.8
BP 1:3 (3)_3	930.67 ±8.98	922.7-940.4	BP 1:2 (5)_3	911.0 ±9.4	901.5-920.3
BP 1:3 (3)_4	1,105.27 ±29.94	1,078.0-1,137.3	BP 1:2 (5)_4	974.6 ±12.12	962.1-986.3
BP 1:3 (3)_5	1,430.65 ±34.16	1,402.50-1,468.65	BP 1:2 (5)_5	1,600.5 ±15.35	1,582.8-1,610.2
BP 1:3 (5)_1	1,367.29 ±31.64	1,340.2-1,402.06	BP 1:2 (7)_1	1,629.0 ±28.87	1,605.7-1,661.3
BP 1:3 (5)_2	703.1 ±7.57	694.7-709.4	BP 1:2 (7)_2	920.7 ±14.75	905.8-935.3
BP 1:3 (5)_3	729.5 ±9.17	721.7-739.6	BP 1:2 (7)_3	725.67 ±18.89	705.3-742.6
BP 1:3 (5)_4	910.04 ±5.81	903.7-915.12	BP 1:2 (7)_4	1,148.07 ±44.78	1,104.2-1,193.7
BP 1:3 (5)_5	924.51 ±19.27	902.8-939.6	BP 1:2 (7)_5	1,408.23 ±26.91	1,381.8-1,435.6
BP 1:3 (7)_1	1,590 ±41.92	1,560.0-1,637.9			
BP 1:3 (7)_2	691.75 ±10.86	682.6-703.75			
BP 1:3 (7)_3	897.04 ±17.31	880.6-915.1			
BP 1:3 (7)_4	1,003.68 ±32.14	982.9-1040.7			
BP 1:3 (7)_5	1,105.41 ±22.62	1,087.1-1,130.7			
BP 1:2 (1)_1	1,709.7 ±65.61	1,667.6-1,785.3			
BP 1:2 (1)_2	1,080.17 ±27.27	1,051.8-1,106.2			
BP 1:2 (1)_3	895.5 ±24.74	867.1-912.4			
BP 1:2 (1)_4	1,163.08 ±35.77	1,135.15-1,203.4			
BP 1:2 (1)_5	1,384.03 ±24.36	1,358.2-1,406.6			



ภาคผนวก ค

ผลการทดลองที่ 3

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค-1 ปริมาณก๊าซชีวภาพของถังหมักที่ 1 และถังหมักที่ 2

วันที่	Cumulative Biogas Production		Cumulative Biogas Production	
	Reactor 1_SP 60	Reactor 2_HP 60	Reactor 1_BP1:3 (7)	Reactor 1_BP1:2 (7)
1	4032	2800	2880	3840
2	5472	5040	4464	5760
3	6048	4320	3888	6377
4	10800	5472	5760	9180
5	9216	6480	8537	13680
6	13536	8280	12960	14976
7	16992	11520	14112	12240
8	20736	5760	9000	10800
9	19728	2880	4752	6336
10	17280	960	6048	7200
11	13536	1728	3168	5328
12	11232	1152	1584	2880
13	6768	720	2016	3312
14	7920	2700	2880	4176
15	8640	2640	2304	3600
16	8640	1440	1296	2736
17	3600	960	1008	1008
18	2016	720	1728	1440
19	4032	1584	4464	3024
20	1440	1080	2160	3168
21	2160	1800	5760	3600
22	1296	960	3456	2880
23	1440	960	2160	2016
24	2592	960	2448	2592
25	1584	2016	2880	2592
26	1152	864	2304	2160
27	1152	1152	1584	1008
28	720	576	3456	2016
29	1152	1008	1296	1152
30	864	720	1008	1440

ตารางที่ ค-1 (ต่อ)

วันที่	Cumulative Biogas Production		Cumulative Biogas Production	
	Reactor 1_SP 60	Reactor 2_HP 60	Reactor 1_BP1:3 (7)	Reactor 1_BP1:2 (7)
31	720	432	1440	1152
32	1008	720	864	1008
33	1728	720	1008	720
34	1152	1152	1296	1296
35	2160	288	720	864
36	1584	576	432	576
37	864	1008	864	720
38	1008	864	1008	1152
39	1152	576	720	864
40	1008	720	432	576
41	1440	288	576	288
42	864	432	288	432
43	720	432	288	576
44	432	288	432	288
45	288	288	288	432

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค-2 แสดงค่า VFA ที่วิเคราะห์ได้ในการทดลองที่ 3

ตัวอย่าง	VFA (เฉลี่ย)	ค่าพิสัย
R1_SP 60_1	758.5 ±14.13	742.8-770.2
R1_SP 60_2	670.2 ±11.29	660.3-682.5
R1_SP 60_3	328.7 ±8.97	320.9-338.5
R1_SP 60_4	270.3 ±6.68	264.3-277.5
R1_SP 60_5	303.4 ±8.09	297.4-312.6
R1_SP 60_6	264.9 ±10.61	255.9-276.6
R2_HP 60_1	659.3 ±7.15	651.1-664.2
R2_HP 60_2	572.6 ±9.62	563.4-582.6
R2_HP 60_3	330.2 ±4.73	325.2-334.6
R2_HP 60_4	238.15 ±7.35	230.2-244.7
R2_HP 60_5	278.66 ±4.62	274.3-283.5
R2_HP 60_6	240.59 ±15.41	224.8-255.6
R1_BP 1:3_1	430.8 ±9.71	421.4-440.8
R1_BP 1:3_2	332.4 ±9.43	324.4-342.8
R1_BP 1:3_3	310.27 ±7.38	303.8-318.3
R1_BP 1:3_4	227.4 ±5.68	221.4-232.7
R1_BP 1:3_5	189.2 ±5.31	183.5-194
R1_BP 1:3_6	204.1 ±9.86	195.2-214.7
R1_BP 1:2_1	466.5 ±10.90	457.2-478.5
R1_BP 1:2_2	378.5 ±7.47	370.5-385.3
R1_BP 1:2_3	304.6 ±8.21	296.2-312.6
R1_BP 1:2_4	268.44 ±8.4	260.1-276.9
R1_BP 1:2_5	175.83 ±9.08	165.8-183.5
R1_BP 1:2_6	198.71 ±7.49	192.7-207.1

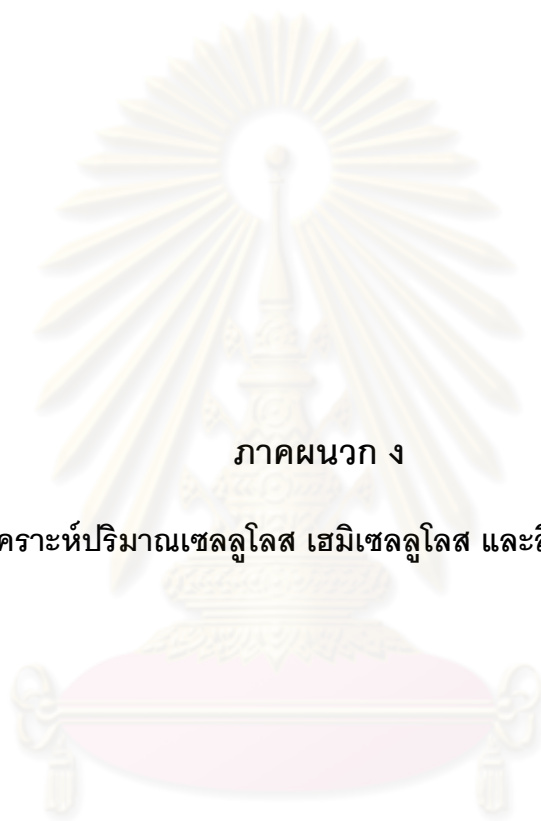
ตารางที่ ค-3 แสดงค่าสภาพต่างที่วิเคราะห์ได้ในการทดลองที่ 3

ตัวอย่าง	ALK (เฉลี่ย)	ค่าพิสัย
R1_SP 60_1	1,906.7 \pm 27.05	1,876.3-1,928.1
R1_SP 60_2	2,085.3 \pm 49.75	2,028.3-2,120.0
R1_SP 60_3	2,255.4 \pm 16.54	2,242.7-2,274.1
R1_SP 60_4	2,570.8 \pm 52.07	2,537.4-2,630.8
R1_SP 60_5	2,521.2 \pm 25.60	2,503.8-2,550.6
R1_SP 60_6	3,094.3 \pm 88.4	2,992.8-3,154.4
R2_HP 60_1	1,759.2 \pm 39.54	1,730.5-1,804.3
R2_HP 60_2	2,008.7 \pm 22.56	1,983.6-2,027.3
R2_HP 60_3	2,197.6 \pm 18.52	2,176.4-2,210.6
R2_HP 60_4	2,470.2 \pm 49.47	2,415.8-2,512.5
R2_HP 60_5	2,458.6 \pm 39.94	2,421.4-2,500.8
R2_HP 60_6	2,827.1 \pm 79.78	2,770.8-2,918.4
R1_BP 1:3_1	1,125.6 \pm 29.69	1,098.6-1,157.4
R1_BP 1:3_2	1,406.7 \pm 42.34	1,370.6-1,453.3
R1_BP 1:3_3	1,571.4 \pm 39.66	1,527.7-1,605.1
R1_BP 1:3_4	1,674.1 \pm 24.63	1,656.8-1,702.3
R1_BP 1:3_5	2,072.9 \pm 29.30	2,046.8-2,104.6
R1_BP 1:3_6	1,905.4 \pm 19.61	1,886.2-1,925.4
R1_BP 1:2_1	1,237.2 \pm 33.34	1,210.3-1,274.5
R1_BP 1:2_2	1,455.9 \pm 38.81	1,430.8-1,500.6
R1_BP 1:2_3	1,620.8 \pm 5.81	1,614.8-1,626.4
R1_BP 1:2_4	1,805.4 \pm 14.4	1,792.1-1,820.7
R1_BP 1:2_5	2,130.5 \pm 19.41	2,114.8-2,152.2
R1_BP 1:2_6	2,082.9 \pm 76.18	1,998.6-2,146.8

ตารางที่ ค-4 แสดงความเข้มข้นของก๊าซมีเทนที่วัดได้จากถังหมักที่ 1 และ 2

ตัวอย่าง	ความเข้มข้นของก๊าซมีเทน	ตัวอย่าง	ความเข้มข้นของก๊าซมีเทน
	(ร้อยละ)		(ร้อยละ)
R1_SP 60 (1)	0.4	R1_BP1:3_7 (1)	3.0
R1_SP 60 (2)	21.6	R1_BP1:3_7 (2)	40.9
R1_SP 60 (3)	41.9	R1_BP1:3_7 (3)	24.5
R1_SP 60 (4)	50.2	R1_BP1:3_7 (4)	21.0
R1_HP 60 (1)	0.3	R1_BP1:2_7 (1)	35.8
R1_HP 60 (2)	10.9	R1_BP1:2_7 (2)	61.6
R1_HP 60 (3)	36.7	R1_BP1:2_7 (3)	30.4
R1_HP 60 (4)	49.6	R1_BP1:2_7 (4)	24.1

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย




ภาคผนวก ง

ผลการวิเคราะห์ปริมาณเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินของใบอ้อย

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ ง-1 แสดงผลการวิเคราะห์ปริมาณเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน



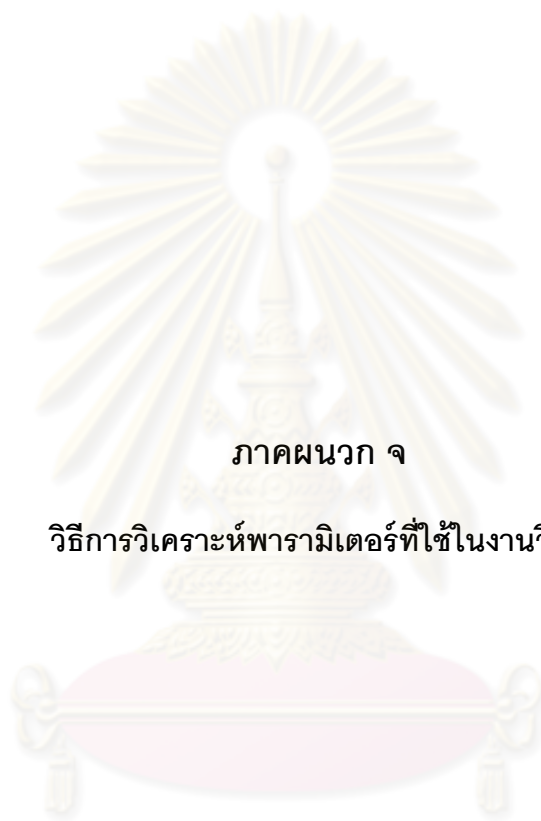
รายงานการทดสอบ

ชื่อวัตถุตัวอย่าง: ไบโอดีช เครื่องหมาย / ตรา: หมายเลขปฏิบัติการ: L53/08169.1

ผลการทดสอบ

	ร้อยละของน้ำหนักตัวอย่าง
การละลายในแอลกอฮอล์และเบนซีน	9.3
ไฮโดรเซลลูโลส	65.0
อัลฟาเซลลูโลส	36.6
เบต้าเซลลูโลส	12.4
แกมมาเซลลูโลส	15.9
เพนโตซาน	23.9
ลิกนิน	7.3
	14.4

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก จ

วิธีการวิเคราะห์พารามิเตอร์ที่ใช้ในงานวิจัย

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1. ความชื้น (moisture content) และปริมาณของแข็งทั้งหมด (total solid)

วิธีการ

การเตรียมถ้วยกระเบื้อง นำถ้วยกระเบื้องไปอบในเตาอบที่อุณหภูมิ 103-105 °ซ. เป็นเวลา 2-3 ชั่วโมง จากนั้นทิ้งให้เย็นในโถหรือตู้ดูดความชื้น ชั่งน้ำหนักและเก็บไว้ในโถหรือตู้ดูดความชื้น

การวิเคราะห์

นำตัวอย่างใส่ถ้วยกระเบื้องระเหยที่ทราบน้ำหนักแน่นอน

นำไปอบในเตาอบที่อุณหภูมิ 103-105 °ซ. เป็นเวลา 1 วัน

ทิ้งให้เย็นในโถหรือตู้ดูดความชื้น

ชั่งน้ำหนัก

การคำนวณ

$$W = \frac{(W_1 - W_2) \times 100}{W_1}$$

เมื่อ W = ความชื้นของตัวอย่าง (ร้อยละโดยน้ำหนัก)

W_1 = น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบ (กรัม)

W_2 = น้ำหนักตัวอย่างหลังจากอบแห้งแล้ว (กรัม)

นำความชื้นมาคำนวณหาปริมาณของแข็งทั้งหมดได้ดังสมการ

$$T = 100 - W$$

เมื่อ T = ปริมาณของแข็งทั้งหมด (ร้อยละโดยน้ำหนัก)

W = ความชื้น (ร้อยละโดยน้ำหนัก)

2. ปริมาณของแข็งระเหย (volatile solid)

การวิเคราะห์

นำถ้วยกระเบื้องระเหยที่ได้จากการหาความชื้นและของแข็งทั้งหมด

ไปเผาในเตาเผาที่อุณหภูมิ 550 ± 50 °ซ. เป็นเวลา 15-20 นาที

↓
ทิ้งให้เย็นในโถหรือตู้ดูดความชื้น

↓
ชั่งน้ำหนัก

การคำนวณ

$$V = \frac{(W_1 - W_2) \times 100}{W_1}$$

เมื่อ V = ปริมาณของแข็งระเหย (ร้อยละโดยน้ำหนักของแข็งทั้งหมด)

W_1 = น้ำหนักตัวอย่างก่อนเผา (กรัม)

W_2 = น้ำหนักตัวอย่างหลังจากการเผา (กรัม)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3. การวิเคราะห์ซีไอดีละลายโดยวิธีฟลักซ์แบบปิด

นำตัวอย่างไปกรองด้วยกระดาษกรองขนาด 0.47 ไมครอน



นำตัวอย่าง 5 มิลลิลิตร ลงในหลอดแก้วขนาด 20 x 150 มิลลิลิตร



เติม 0.1N $K_2Cr_2O_7$ ปริมาณ 3 มิลลิลิตร และ conc. H_2SO_4 ที่มี Ag_2SO_4) ปริมาณ 7 มิลลิลิตร



ปิดจุกให้แน่นพอดี และแกว่งขวดให้สารละลายผสมกัน



นำไปเข้าเตาอบที่อุณหภูมิ 150 °ซ. เป็นเวลา 2 ชั่วโมง



ทิ้งให้เย็น



ใส่เฟอร์โรอินอินดิเคเตอร์ 2-3 หยด



ไตเตรทด้วย 0.1N FAS จนถึงจุดยุติสีน้ำตาลแดง

(ทำแบลนค์ใช้น้ำกลั่น 5 มิลลิลิตร แทนตัวอย่างน้ำและทำทุกขั้นตอนเหมือนตัวอย่าง)

4. ความเป็นกรด-ด่าง

4.1 ใช้น้ำกลั่นฉีดล้างแท่งแกว่งอิเล็กโทรดให้สะอาด แล้วใช้กระดาษทิสซูนิดเนื้อละเอียดซับน้ำให้แห้ง

4.2 ปรับเปรียบเทียบเครื่องมือให้ได้มาตรฐานตามคำแนะนำในคู่มือของเครื่องมือนั้นๆ

4.3 ใช้น้ำกลั่นฉีดล้างอิเล็กโทรดอีกครั้ง แล้วซับน้ำให้แห้ง

4.4 วัดค่าความเป็นกรด-ด่างของตัวอย่างน้ำ โดยจุ่มอิเล็กโทรดในตัวอย่าง เปิดสวิทซ์ทิ้งไว้ 30 วินาที แกว่งอิเล็กโทรดหลายๆครั้ง อ่านค่าความเป็นกรด-ด่าง ปิดสวิทซ์ ล้างอิเล็กโทรดด้วยน้ำกลั่นแล้วเช็ดในสารละลายที่เหมาะสม



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5. กรดไขมันระเหย

วิธีวิเคราะห์

นำตัวอย่างใส่ลงในบีกเกอร์ 50 มิลลิลิตร



ไตเตรทด้วย 0.05N H₂SO₄ ให้ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 3.5-3.3



นำไปต้มให้เดือด 2-3 นาที



ทิ้งให้เย็น



ไตเตรทด้วย 0.05N NaOH ให้ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 7

(จดปริมาตร 0.05N NaOH ที่ใช้ไตเตรทตั้งแต่ค่าความเป็นกรด-ด่าง 4-7 เพื่อใช้คำนวณ)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

ข้าพเจ้า นายสุรพงศ์ นนทประเสริฐ ชื่อเล่น เอก เกิดเมื่อวันที่ 21 มิถุนายน 2527 ที่จังหวัด กรุงเทพมหานคร เป็นบุตรคนเดียวของนายสุวรรณ นนทประเสริฐ และนางสำราญ นนทประเสริฐ จบชั้นประถมศึกษาจากโรงเรียนสมิติโชติ จังหวัดกรุงเทพมหานคร จบชั้นมัธยมศึกษาจากโรงเรียน สีกัน (วัดนันทน์นทีอุปถัมภ์) จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัด นครราชสีมา ในปีการศึกษา 2549 จากนั้นเข้าทำงานในบริษัท แอร์เซฟ จำกัด ตั้งแต่ มิถุนายน 2549 ถึง พฤษภาคม 2550 และได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จังหวัดกรุงเทพมหานคร ในปีการศึกษา 2550



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย