

การบำบัดเบื้องต้นทางกายภาพและเคมีของผู้ตกขาวเพื่อการผลิตก๊าซชีวภาพ

นางสาวพิมพ์นรินทร์ สังขสุทธิ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2559

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Physical and chemical pretreatment of water hyacinth for biogas production

Miss Pimnarin Sungkasudi



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 2016

Copyright of Chulalongkorn University

พิมพ์นรินทร์ สังขสิทธิ์ : การบำบัดเบื้องต้นทางกายภาพและเคมีของผักตบชวาเพื่อการผลิตก๊าซชีวภาพ (Physical and chemical pretreatment of water hyacinth for biogas production) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ. ดร.พิชญ รัชฎาวงศ์, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: รศ. น.สพ. ดร.จักรกริศน์ เนื่องจำนงค์, 260 หน้า.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลการบำบัดเบื้องต้นของผักตบชวาทางกายภาพโดยการลดขนาดและเคมีโดยการใช้กรดน้ำส้มเพื่อนำไปผลิตก๊าซชีวภาพด้วยกรรมวิธีบีเอ็มพี (Biochemical Methane Potential; BMP) และเพื่อศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพด้วยถังปฏิกรณ์ไร้อากาศแบบขั้นตอนเดียวโดยคัดเลือกสภาวะการทดลองของการบำบัดเบื้องต้นทางกายภาพและเคมีซึ่งมีปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมสูงที่สุด จากการศึกษาขององค์ประกอบของผักตบชวาพบว่า ผักตบชวามีปริมาณลิกนินต่ำ แต่มีปริมาณเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสสูง โดยมีเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลสและลิกนินเท่ากับร้อยละ 19.88-20.21 32.78-33.91 และ 4.22-4.42 ตามลำดับ การบำบัดเบื้องต้นทางกายภาพและนำไปผลิตก๊าซชีวภาพด้วยวิธีบีเอ็มพีเป็นเวลา 39 วัน พบว่า ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมของผักตบชวาขนาดน้อยกว่า 5 มิลลิเมตรซึ่งมีขนาดเล็กที่สุดในงานวิจัยนี้ มีค่าสูงสุดเท่ากับ 0.258 ลิตร/กรัมของแข็งระเหย ในการบำบัดเบื้องต้นทางเคมีและนำไปผลิตก๊าซชีวภาพด้วยวิธีบีเอ็มพีเป็นเวลา 40 วัน พบว่า ผักตบชวาขนาดน้อยกว่า 5 มิลลิเมตร ระยะเวลาสัมผัสเบื้องต้น 24 ชั่วโมง และความเข้มข้นน้ำส้มร้อยละ 80 โดยปริมาตร ให้ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมสูงสุดเท่ากับ 0.124 ลิตร/กรัมของแข็งระเหย สำหรับการผลิตก๊าซชีวภาพด้วยถังปฏิกรณ์ไร้อากาศแบบขั้นตอนเดียว โดยถังมีปริมาตร 2.5 ลิตร เป็นเวลา 38-46 พบว่า ผักตบชวาที่มีการบำบัดเบื้องต้นทางกายภาพมีปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมสูงกว่า ผักตบชวาที่มีบำบัดเบื้องต้นทางเคมี 1.82-1.96 เท่า เนื่องจากค่าความเป็นกรดต่างภายในถังปฏิกรณ์ไร้อากาศที่มีการบำบัดเบื้องต้นทางเคมีไม่เหมาะสมกับจุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทน โดยถังปฏิกรณ์ไร้อากาศที่มีผักตบชวาผ่านการบำบัดเบื้องต้นทางกายภาพและเคมีมีค่าความเข้มข้นของก๊าซมีเทนสูงสุดที่ร้อยละ 61.50 และ 43.69 ตามลำดับ ดังนั้น การบำบัดเบื้องต้นของผักตบชวาทดด้วยวิธีทางกายภาพโดยการลดขนาดมีความเหมาะสมมากกว่าการบำบัดเบื้องต้นทางเคมีที่ใช้น้ำส้มเพื่อการผลิตก๊าซชีวภาพ

ภาควิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ปีการศึกษา 2559

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม

5670315121 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEYWORDS:

PIMNARIN SUNGKASUDI: Physical and chemical pretreatment of water hyacinth for biogas production. ADVISOR: ASST. PROF.PICHAYA RACHDAWONG, Ph.D., CO-ADVISOR: ASSOC. PROF.CHACKRIT NUENGJAMNONG, Ph.D., 260 pp.

This objective of this work was to study the effect of physical and chemical pretreatment of water hyacinth by size reduction and black liquor on biogas production. Biogas production was estimated by biochemical methane potential (BMP). The condition for the reactor experiment was selected from the condition with the highest biogas yield from the BMP assays. Water hyacinth was low in lignin, and was high in cellulose and hemicellulose. The ranges of cellulose, hemicellulose and lignin of water hyacinth were in 19.88-20.21%, 32.78-33.91% and 4.22-4.42%, respectively. The results of physical pretreatment by size reduction for 39 days showed that the biogas yield of water hyacinth with the size of less than 5 mm, was the highest at 0.258 L/g VS. The result of chemical pretreatment by black liquor for 40 days showed that the biogas yield of water hyacinth with the size of less than 5 mm, 24-h retention time and 80% black liquor was the highest at 0.124 L/g VS. For the single stage anaerobic experiment, using two 2.5-L reactors and 38-46 day incubation period, the water hyacinth with size reduction had 1.82-1.96 times more biogas yields than those with chemical pretreatment. Because the pH in the chemical pretreatment reactor was not appropriate for methanogens. The percentage of methane was 61.50% and 43.69% for the size reduction reactor and the chemical pretreatment reactor, respectively. Thus, the physical pretreatment of water hyacinth by size reduction was more appropriate than the chemical pretreatment by black liquor for biogas production purpose.

Department: Environmental
Engineering

Field of Study: Environmental
Engineering

Academic Year: 2016

Student's Signature

Advisor's Signature

Co-Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยความอนุเคราะห์จากบุคคลหลายท่าน ผู้วิจัยจึงขอกราบขอพระคุณต่อผู้ที่มีส่วนให้ความอนุเคราะห์ ดังต่อไปนี้

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิชญ รัชฎาวงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และรองศาสตราจารย์ น.สพ. ดร.จักรกริศน์ เนื่องจำนงค์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ให้คำแนะนำ และข้อคิดเห็นต่างๆ รวมทั้งช่วยเหลือ และสนับสนุนในการวิจัยจนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร. สุธา ขาวเอียร (ประธานกรรมการ) รองศาสตราจารย์ ดร.ตะวัน ลิ้มปิยากร (กรรมการ) ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เบญจพร สุวรรณศิลป์ (กรรมการ) และ ดร.ณัฐสิทธิ์ เจียรวัฒน์ชัย (กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย) ที่ให้คำแนะนำอันเป็นแนวทางที่ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และคณาจารย์ทุกท่านที่ได้อบรมสั่งสอน ถ่ายทอดความรู้ ประสบการณ์ และมอบความปรารถนาดีให้แก่ผู้ทำวิทยานิพนธ์ตลอดมา

ขอขอบคุณทุนอุดหนุนวิทยานิพนธ์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์ทุนอุดหนุนวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้

ขอขอบคุณศูนย์ฝึกนิสิต คณะสัตวแพทยศาสตร์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จังหวัดนครปฐม ที่ให้ความอนุเคราะห์ฝึกตบขาและหัวเชื้อจุลินทรีย์ในการวิจัย

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความช่วยเหลือ และอำนวยความสะดวกตลอดมา

ขอขอบคุณพี่ๆ น้องๆ และเพื่อนๆ ที่ให้ความช่วยเหลือ คำแนะนำ และให้ให้ความรู้ในการทำวิทยานิพนธ์นี้ด้วยดีตลอดมา

สุดท้ายนี้ขอกราบขอพระคุณบิดา มารดา และสมาชิกทุกคนในครอบครัวที่ช่วยสนับสนุนส่งเสริมและเป็นกำลังใจที่ดีที่สุดแก่ผู้วิจัยตลอดมา

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญรูป	ฎ
สารบัญตาราง.....	ฅ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 ปัญหาจากผักตบชวา	4
2.1.1 อัตราการเจริญเติบโตของผักตบชวา	4
2.1.2 สภาพที่เหมาะสมในการเจริญเติบโตของผักตบชวา	5
2.2 ปริมาณผักตบชวาในประเทศไทย	6
2.3 องค์ประกอบทางกายภาพและทางเคมีของผักตบชวา	7
2.3.1 องค์ประกอบทางกายภาพ	7
2.3.2 องค์ประกอบทางเคมี	8
2.4 โครงสร้างของเซลลูโลส	9
2.4.1 เซลลูโลส (Cellulose).....	10
2.4.2 เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose).....	11

2.4.3 ลิกนิน (Lignin)	12
2.5 การใช้ประโยชน์จากผักตบชวา.....	13
2.6 การผลิตเยื่อกระดาษ	14
2.6.1 กระบวนการผลิตเยื่อโดยเชิงกล (Mechanical pulping process).....	14
2.6.2 กระบวนการผลิตเยื่อกึ่งเคมี (Semichemical pulping process)	14
2.6.3 การผลิตเยื่อกระดาษเชิงเคมี (Chemical pulping process).....	15
2.7 น้ำดำ (Black liquor)	15
2.7.1 ความเป็นพิษ.....	18
2.7.2 การกำจัด.....	19
2.8 การบำบัดเบื้องต้นเพื่อผลิตก๊าซชีวภาพ.....	19
2.8.1 การบำบัดเบื้องต้นทางกายภาพ	20
2.8.2 การบำบัดเบื้องต้นทางเคมี.....	20
2.9 ปฏิกริยาการบำบัดเบื้องต้นด้วยต่าง.....	21
2.10 กระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในระบบไร้อากาศ.....	23
2.10.1 การย่อยสลายสารอินทรีย์ (Hydrolysis).....	23
2.10.2 การสร้างกรดอินทรีย์ระเหย (Acidogenesis) และการเปลี่ยนกรดไขมันระเหย เป็นกรดอะซิติก (Acetogenesis).....	23
2.10.3 การสร้างก๊าซมีเทน (Methanogenesis).....	23
2.11 ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในระบบไร้อากาศ.....	24
2.11.1 ความเป็นกรดต่าง (pH)	24
2.11.2 กรดอินทรีย์ระเหยและความเป็นต่าง (volatile fatty acid and alkalinity)..	25
2.11.3 อุณหภูมิ (temperature).....	25
2.11.4 ปริมาณออกซิเจน	25

2.11.5 สารอาหาร (nutrient).....	26
2.11.6 การหมักร่วม (Co-digestion).....	26
2.11.7 สารพิษ.....	26
2.12 ศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนโดยวิธีบีเอ็มพี (BMP ; Biochemical Methane Potential)	27
2.13 การหมักไร้อากาศแบบขั้นตอนเดียว (Single stage digester).....	28
2.14 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	29
2.14.1 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการบำบัดเบื้องต้นทางกายภาพโดยการลดขนาด	29
2.14.2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการบำบัดเบื้องต้นทางเคมี.....	30
2.14.3 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการหมักร่วม (co-digestion).....	31
2.14.4 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการผลิตก๊าซชีวภาพด้วยถังปฏิกรณ์ไร้อากาศแบบขั้นตอนเดียว.....	31
2.15 สรุปผลการทบทวนเอกสารและแนวทางการวิจัย	33
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	35
3.1 แผนการทดลอง	35
3.2 เครื่องมือ อุปกรณ์ และสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย.....	37
3.3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	41
3.3.1 การเตรียมวัตถุดิบ	41
3.3.2 การทดลองที่ 1 การวิเคราะห์องค์ประกอบของผักตบชวาและมูลโค.....	42
3.3.3 การทดลองที่ 2 การบำบัดเบื้องต้นทางกายภาพโดยการลดขนาด.....	43
3.3.4 การทดลองที่ 3 การบำบัดเบื้องต้นทางเคมีโดยใช้น้ำด่างของผักตบชวาขนาดต่างๆ.....	45
3.3.5 การทดลองที่ 4 การผลิตก๊าซชีวภาพด้วยถังปฏิกรณ์ไร้อากาศแบบขั้นตอนเดียว .	48

บทที่ 4 ผลการทดลอง และการอภิปรายข้อมูล.....	51
4.1 การทดลองที่ 1 องค์ประกอบทางกายภาพและเคมีของผักตบชวาและมูลโค	51
4.2 การทดลองที่ 2 การศึกษาการบำบัดเบื้องต้นทางกายภาพโดยการลดขนาดและนำไปผลิต ก๊าซชีวภาพด้วยวิธีบีเอ็มพี	53
4.2.1 สมบัติทางเคมีของวัตถุดิบขนาดต่างๆ.....	53
4.2.2 การวิเคราะห์ส่วนที่เป็นน้ำ	55
4.2.3 ศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนจากผักตบชวา	62
4.2.4 การวิเคราะห์ทางสถิติ	65
4.2.5 เปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่น.....	65
4.2.6 บทสรุปของการทดลองที่ 2.....	66
4.2.7 การคัดเลือกขนาดผักตบชวาสำหรับการทดลองที่ 4.....	67
4.3 การทดลองที่ 3 การศึกษาการบำบัดเบื้องต้นทางเคมีโดยใช้น้ำดำของผักตบชวาที่ขนาด ต่างๆ และนำไปผลิตก๊าซชีวภาพด้วยวิธีบีเอ็มพี.....	68
4.3.1 สมบัติทางเคมีของวัตถุดิบในสภาวะการบำบัดเบื้องต้นต่างๆ.....	70
4.3.2 การวิเคราะห์ส่วนที่เป็นน้ำ	72
4.3.3 ศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนจากผักตบชวา.....	79
4.3.4 การวิเคราะห์ทางสถิติ	83
4.3.5 เปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่น.....	83
4.3.6 บทสรุปของการทดลองที่ 3.....	84
4.3.7 การคัดเลือกผักตบชวาสำหรับการทดลองที่ 4	86
4.3.8 บทสรุปของการทดลองบีเอ็มพี	87
4.4 การทดลองที่ 4 การผลิตก๊าซชีวภาพด้วยถังปฏิกรณ์ไร้อากาศแบบขึ้นตอนเดียว	90
4.4.1 การเติมของผสมที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นลงในถังปฏิกรณ์ไร้อากาศ	90

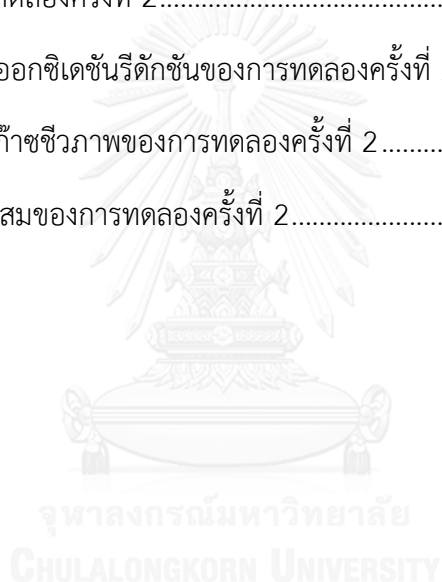
1. สมบัติทางเคมีของวัตถุดิบในสภาวะการทดลองที่มีการบำบัดเบื้องต้นที่แตกต่างกัน.....	91
2. การวิเคราะห์น้ำชะที่กักถังปฏิกรณ์	92
3. ศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนจากผักตบชวา.....	101
4.4.2 ไม่เต็มของผสมที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นลงในถังปฏิกรณ์ไร้อากาศ.....	106
1. สมบัติทางเคมีของวัตถุดิบในสภาวะการทดลองที่มีการบำบัดเบื้องต้นที่แตกต่างกัน.....	106
2. การวิเคราะห์น้ำชะที่กักถังปฏิกรณ์	108
3. ศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนจากผักตบชวา.....	117
4.4.3 บทสรุปของการทดลองที่ 4.....	122
4.4.4 เปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่น	123
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	125
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	125
5.2 ข้อเสนอแนะ	126
รายการอ้างอิง	128
ภาคผนวก.....	137
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	260

สารบัญรูป

รูปที่ 2.1 องค์ประกอบทางกายภาพของผักตบชวา.....	8
รูปที่ 2.2 โครงสร้างลิกโนเซลลูโลส.....	10
รูปที่ 2.3 โครงสร้างของเซลลูโลส.....	11
รูปที่ 2.4 โครงสร้างของเฮมิเซลลูโลสประเภทกลูโคแมนแนนและไซแลน	12
รูปที่ 2.5 โครงสร้างของลิกนิน	13
รูปที่ 2.6 กระบวนการผลิตเยื่อกระดาษ.....	16
รูปที่ 2.7 การกำจัดน้ำดำโดยการนำกลับมาใช้ใหม่	19
รูปที่ 2.8 โครงสร้างลิกโนเซลลูโลสแยกออกจากกัน.....	20
รูปที่ 2.9 ลิกนิน-คาร์โบไฮเดรตเชิงซ้อนจากการบำบัดเบื้องต้นด้วยต่าง	21
รูปที่ 2.10 ปฏิกริยาการปรับสภาพลิกนินด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์	22
รูปที่ 2.11 การแยกเมทอกซิลจากโครงสร้างลิกนิน.....	22
รูปที่ 2.12 การย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้อากาศ	24
รูปที่ 3.1 แผนผังขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	36
รูปที่ 3.2 ขวดซีรัมสีชาขนาด 125 มิลลิลิตร.....	37
รูปที่ 3.3 เครื่องวัดปริมาณก๊าซชีวภาพแบบท่อรูปตัวยู.....	37
รูปที่ 3.4 ถังปฏิกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย.....	39
รูปที่ 3.5 เครื่องวัดปริมาณก๊าซชีวภาพ.....	40
รูปที่ 3.6 การทดลองที่ 2 การบำบัดเบื้องต้นทางกายภาพของผักตบชวา	44
รูปที่ 3.7 การทดลองที่ 3 การบำบัดเบื้องต้นทางเคมี.....	46
รูปที่ 3.8 การทดลองที่ 5 การผลิตก๊าซชีวภาพด้วยถังปฏิกรณ์ไร้อากาศแบบขั้นตอนเดียว	49
รูปที่ 4.1 ซีโอดีละลายของการทดลองที่ 2.....	56
รูปที่ 4.2 กรดอินทรีย์ระเหยของการทดลองที่ 2.....	58

รูปที่ 4.3	ความเป็นต่างของการทดลองที่ 2.....	60
รูปที่ 4.4	พีเอชของการทดลองที่ 2	61
รูปที่ 4.5	ความต่างศักย์ออกซิเดชันรีดักชันของการทดลองที่ 2	62
รูปที่ 4.6	อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพของการทดลองที่ 2.....	62
รูปที่ 4.7	ก๊าซชีวภาพสะสมของการทดลองที่ 2	64
รูปที่ 4.8	ซีโอดีละลายสภาวะต่างๆ ที่ขนาดน้อยกว่า 5 มิลลิเมตร	69
รูปที่ 4.9	ซีโอดีละลายของสภาวะการทดลองที่ระยะเวลาสัมผัสเบื้องต้น 24 ชั่วโมง.....	72
รูปที่ 4.10	กรดอินทรีย์ระเหยของสภาวะการทดลองที่ระยะเวลาสัมผัสเบื้องต้น 24 ชั่วโมง	74
รูปที่ 4.11	กรดอินทรีย์ระเหยของสภาวะการทดลองที่ความเข้มข้นน้ำดำร้อยละ 80	74
รูปที่ 4.12	ความเป็นต่างของสภาวะการทดลองที่ระยะเวลาสัมผัสเบื้องต้น 24 ชั่วโมง.....	77
รูปที่ 4.13	พีเอชของสภาวะการทดลองที่ระยะเวลาสัมผัสเบื้องต้น 24 ชั่วโมง	78
รูปที่ 4.14	ความต่างศักย์ออกซิเดชันรีดักชันของสภาวะการทดลองที่ระยะเวลาสัมผัส	78
รูปที่ 4.15	อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพของสภาวะการทดลองที่ระยะเวลาสัมผัสเบื้องต้น 24 ชั่วโมง.....	79
รูปที่ 4.16	อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพของสภาวะการทดลองที่ความเข้มข้นน้ำดำร้อยละ 80	80
รูปที่ 4.17	ก๊าซชีวภาพสะสมของสภาวะการทดลองที่ระยะเวลาสัมผัสเบื้องต้น 24 ชั่วโมง	82
รูปที่ 4.18	ก๊าซชีวภาพสะสมของสภาวะการทดลองที่ความเข้มข้นน้ำดำร้อยละ 80.....	82
รูปที่ 4.19	ซีโอดีละลายของการทดลองปีเอ็มพี.....	88
รูปที่ 4.20	กรดอินทรีย์ระเหยของการทดลองปีเอ็มพี	88
รูปที่ 4.21	พีเอชของการทดลองปีเอ็มพี.....	89
รูปที่ 4.22	อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพของการทดลองปีเอ็มพี	89
รูปที่ 4.23	ซีโอดีละลายของการทดลองครั้งที่ 1.....	93
รูปที่ 4.24	กรดอินทรีย์ระเหยของการทดลองครั้งที่ 1.....	95
รูปที่ 4.25	ความเป็นต่างของการทดลองครั้งที่ 1	97

รูปที่ 4.26	พีเอชของการทดลองครั้งที่ 1.....	99
รูปที่ 4.27	ความต่างศักย์ออกซิเดชันรีดักชันของการทดลองครั้งที่ 1.....	101
รูปที่ 4.28	อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพของการทดลองครั้งที่ 1.....	102
รูปที่ 4.29	ก๊าซชีวภาพสะสมของการทดลองครั้งที่ 1.....	105
รูปที่ 4.30	ซีไอดีละลายของการทดลองครั้งที่ 2.....	110
รูปที่ 4.31	กรดอินทรีย์ระเหยของการทดลองครั้งที่ 2.....	112
รูปที่ 4.32	ความเป็นต่างของการทดลองครั้งที่ 2.....	114
รูปที่ 4.33	พีเอชของการทดลองครั้งที่ 2.....	116
รูปที่ 4.34	ความต่างศักย์ออกซิเดชันรีดักชันของการทดลองครั้งที่ 2.....	117
รูปที่ 4.35	อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพของการทดลองครั้งที่ 2.....	118
รูปที่ 4.36	ก๊าซชีวภาพสะสมของการทดลองครั้งที่ 2.....	120



สารบัญตาราง

ตารางที่ 2.1 ปริมาณผักตบชวาในแหล่งน้ำทั่วประเทศ	6
ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบในผักตบชวา	8
ตารางที่ 2.3 สัดส่วนลิแกนด์ของพืชประเภทต่างๆ	10
ตารางที่ 2.4 องค์ประกอบของทางเคมีในน้ำดำจากกระบวนการโชดา	16
ตารางที่ 2.5 องค์ประกอบธาตุพื้นฐานของน้ำดำจากกระบวนการโชดา.....	17
ตารางที่ 2.6 ลักษณะสมบัติทางเคมีและชีวเคมีของน้ำดำจากกระบวนการโชดา	17
ตารางที่ 2.7 ความเป็นพิษของน้ำดำต่อระบบนิเวศ	18
ตารางที่ 2.8 ความเป็นพิษของน้ำดำต่อสุขภาพ	18
ตารางที่ 2.9 ความเข้มข้นของไอออนบวกที่เหมาะสมและความเป็นพิษต่อจุลินทรีย์ในระบบไร้ อากาศ.....	27
ตารางที่ 2.10 การเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของระบบหมักแบบไร้อากาศชั้นตอนเดียวแบบ เปียกและแบบแห้ง	28
ตารางที่ 2.11 สรุปเหตุผลในการพิจารณาผักตบชวา และวิธีการบำบัดเบื้องต้นสำหรับผลิตก๊าซ ชีวภาพในงานวิจัยนี้.....	33
ตารางที่ 3.1 รายละเอียดถึงปฏิกรณ์.....	38
ตารางที่ 3.2 ลักษณะของน้ำดำ.....	42
ตารางที่ 3.3 ตัวแปรที่ใช้ในการวิเคราะห์องค์ประกอบของผักตบชวา	42
ตารางที่ 3.4 ตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในการวิเคราะห์องค์ประกอบของมูลโค	43
ตารางที่ 3.5 ตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในการทดลองที่ 2.....	45
ตารางที่ 3.6 ตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในการทดลองที่ 3	47
ตารางที่ 3.7 ตัวแปรที่ต้องการศึกษา.....	47
ตารางที่ 3.8 ตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในการทดลองที่ 4	49
ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบทางกายภาพและเคมีของผักตบชวาและมูลโค	51

ตารางที่ 4.2 องค์ประกอบทางเคมีของผักตบชวา	52
ตารางที่ 4.3 อุณหภูมิห้องตลอดการวิจัย	53
ตารางที่ 4.4 ค่าของแข็งทั้งหมดและของแข็งระเหยที่ลดลงของผักตบชวาขนาดต่างๆ และมูลโค	54
ตารางที่ 4.5 กรดอินทรีย์ระเหยเมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่น	59
ตารางที่ 4.6 เปรียบเทียบงานวิจัยนี้กับงานวิจัยที่ผ่านมา	65
ตารางที่ 4.7 ประสิทธิภาพการบำบัดเบื้องต้นทางกายภาพโดยการลดขนาด	66
ตารางที่ 4.8 ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม (ลิตร/กรัมของแข็งระเหย) ของการทดลองที่ 3 ในสภาวะการทดลองต่างๆ	69
ตารางที่ 4.9 ค่าของแข็งทั้งหมดและของแข็งระเหยที่ลดลงของผักตบชวาและมูลโคในสภาวะการทดลองที่มีการบำบัดเบื้องต้นต่างๆ ของขนาดน้อยกว่า 5 มิลลิเมตร	70
ตารางที่ 4.10 เปรียบเทียบร้อยละของแข็งระเหยที่ลดลงและก๊าซชีวภาพสะสมกับการทดลองที่ผ่านมา	71
ตารางที่ 4.11 เปรียบเทียบซีโอดีละลาย	73
ตารางที่ 4.12 เปรียบเทียบกรดอินทรีย์ระเหย	75
ตารางที่ 4.13 เปรียบเทียบอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ	80
ตารางที่ 4.14 เปรียบเทียบก๊าซชีวภาพสะสม	82
ตารางที่ 4.15 เปรียบเทียบงานวิจัยนี้กับงานวิจัยที่ผ่านมา	83
ตารางที่ 4.16 องค์ประกอบบลิโนเซลลูโลสของสารตั้งต้นต่างๆ	84
ตารางที่ 4.17 ประสิทธิภาพการบำบัดเบื้องต้นทางเคมีโดยใช้น้ำด่างของขนาดน้อยกว่า 5 มิลลิเมตร	85
ตารางที่ 4.18 ประสิทธิภาพการบำบัดเบื้องต้นทางเคมีโดยใช้น้ำด่างของขนาดอื่นๆ	86
ตารางที่ 4.19 องค์ประกอบเบื้องต้นของผักตบชวาและมูลโค	90
ตารางที่ 4.20 ค่าของแข็งทั้งหมดและของแข็งระเหยที่ลดลงของวัตถุดิบในถังปฏิกรณ์ไร้อากาศ 91	
ตารางที่ 4.21 เปรียบเทียบค่าของแข็งระเหยที่ลดลงของวัตถุดิบกับการทดลองที่ผ่านมา	91

ตารางที่ 4.22	เปรียบเทียบซีไอดีละลาย.....	93
ตารางที่ 4.23	เปรียบเทียบกรดอินทรีย์ระเหย	96
ตารางที่ 4.24	เปรียบเทียบความเป็นต่าง	97
ตารางที่ 4.25	เปรียบเทียบพีเอช.....	99
ตารางที่ 4.26	เปรียบเทียบอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ.....	103
ตารางที่ 4.27	เปรียบเทียบก๊าซชีวภาพสะสม.....	105
ตารางที่ 4.28	ของแข็งทั้งหมดและของแข็งระเหยที่ลดลงของวัตถุดิบในถังปฏิกรณ์ไร้อากาศ .	106
ตารางที่ 4.29	องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบเมื่อเริ่มต้นและสิ้นสุดการทดลอง	106
ตารางที่ 4.30	เปรียบเทียบการทดลองนี้กับการทดลองที่ผ่านมา	108
ตารางที่ 4.31	เปรียบเทียบซีไอดีละลาย.....	110
ตารางที่ 4.32	เปรียบเทียบกรดอินทรีย์ระเหย	112
ตารางที่ 4.33	เปรียบเทียบความเป็นต่าง	114
ตารางที่ 4.34	เปรียบเทียบอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ.....	118
ตารางที่ 4.35	เปรียบเทียบก๊าซชีวภาพสะสมกับการทดลองที่ผ่านมา.....	120
ตารางที่ 4.36	ก๊าซมีเทนสะสมของการทดลองครั้งที่ 2.....	121
ตารางที่ 4.37	ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพของถังปฏิกรณ์ไร้อากาศ.....	122
ตารางที่ 4.38	เปรียบเทียบงานวิจัยนี้กับงานวิจัยที่ผ่านมา (การบำบัดเบื้องต้นทางกายภาพ)..	123
ตารางที่ 4.39	เปรียบเทียบงานวิจัยนี้กับงานวิจัยที่ผ่านมา (การบำบัดเบื้องต้นทางเคมี).....	124
ตารางที่ 4.40	องค์ประกอบลิกโนเซลลูโลสของสารตั้งต้นต่างๆ	124



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันประเทศไทยมีแนวโน้มการใช้พลังงานเพิ่มสูงขึ้น ในขณะที่เดียวกันปริมาณพลังงานที่สามารถผลิตได้เองภายในประเทศลดลง พลังงานที่ใช้ส่วนใหญ่จึงมาจากการนำเข้าจากต่างประเทศ (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2558) โดยพลังงานส่วนใหญ่มาจากเชื้อเพลิงฟอสซิล(Fossil fuel) ซึ่งเป็นพลังงานที่ใช้แล้วหมดไปหรือที่เรียกว่าพลังงานสิ้นเปลือง เชื้อเพลิงฟอสซิลเกิดจากการทับถมของซากพืชและซากสัตว์เป็นระยะเวลาอันยาวนานใต้พื้นผิวโลก ดังนั้นหากมีการนำมาใช้งานในปริมาณมากย่อมส่งผลให้พลังงานประเภทนี้หมดไป และไม่สามารถเกิดทดแทนได้ทันกับความต้องการใช้งานของมนุษย์ นักวิจัยจึงได้พยายามศึกษาค้นคว้าเกี่ยวกับพลังงานทางเลือกอื่นๆ สำหรับผลิตเป็นพลังงานทดแทน สำหรับประเทศไทยภาครัฐได้มีการกำหนดนโยบายเพื่อส่งเสริมการใช้พลังงานทดแทนในประเทศเพิ่มมากขึ้น เช่น แผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก พ.ศ. 2558-2579 หรือ Alternative Energy Development Plan: AEDP 2015 ซึ่งกำหนดเป้าหมายการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานทดแทนประเภทก๊าซชีวภาพจากพืชพลังงานในปี พ.ศ. 2579 ไว้ 680 เมกะวัตต์ (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2558) สำหรับพืชพลังงานในประเทศไทยมีอยู่หลายชนิด เช่น อ้อย มันสำปะหลัง ฟางข้าว กระจับปี่ กล้วยเนเปียร์ และผักตบชวาจัดเป็นพืชชนิดหนึ่งที่มีศักยภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพ และสอดคล้องกับนโยบายสนับสนุนด้านพลังงานทางเลือกจากภาครัฐ

ผักตบชวา (Water hyacinth) เป็นวัชพืชที่มีถิ่นกำเนิดในแถบลุ่มน้ำอะเมซอนประเทศบราซิล ในทวีปอเมริกาใต้ สามารถอยู่ได้ทุกสภาพน้ำ ทนทานต่อสภาพแวดล้อม มีหุ่นลอย อยู่ได้ทั้งในน้ำนิ่งและน้ำไหล สามารถขยายพันธุ์ได้ทั้งเมล็ดและการแตกหน่อ เนื่องจากผักตบชวามีการขยายพันธุ์และแพร่กระจายอย่างรวดเร็ว จึงเกิดเป็นพรมหนา ทำให้แสงไม่สามารถส่องผ่านลงใต้น้ำได้ จึงส่งผลต่อพืชและสัตว์ใต้น้ำ ทำให้พืชน้ำไม่สามารถสังเคราะห์แสงได้ ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำจึงลดลง เกิดน้ำเน่าเสีย นอกจากนี้ยังกีดขวางการไหลของน้ำ บดบังทัศนียภาพ รวมถึงการทำให้แหล่งน้ำตื้นเขิน ผักตบชวาจึงเป็นปัญหาที่อยู่คู่ระบบนิเวศทางน้ำของไทยมายาวนาน รวมถึงในหลายประเทศทั่วโลก อย่างไรก็ตามหากมีการควบคุมการเจริญเติบโตของผักตบชวาให้อยู่ในระดับที่เหมาะสมก็จะไม่เป็นปัญหาต่อสิ่งแวดล้อม (สร้อยดาว ยวดยง, 2553) โดยในแต่ละปีรัฐบาลต้องสูญเสียงบประมาณในการกำจัดผักตบชวาถึง 50 ล้านบาท และพบว่าในบริเวณแม่น้ำท่าจีนมีผักตบชวาไหลลงสู่อ่าวไทย 2,000 ตันต่อวัน (สุทธิเจตน์ จันทรศิริ, 2544) แหล่งน้ำอื่นๆ 3,955 แห่ง

ซึ่งครอบคลุมพื้นที่ 60 จังหวัด พบว่ามีผักตบชวาประมาณ 6,240,000-6,256,560 ต้น ซึ่งเป็นปัญหาต่อการระบายน้ำและการคมนาคมทางน้ำ (สำนักนายกรัฐมนตรีนคร, 2557) จึงได้มีการนำผักตบชวามาใช้ให้เกิดประโยชน์ในด้านต่างๆ เช่น การบำบัดน้ำเสียโดยผักตบชวาจะดูดสารพิษและธาตุอาหารในน้ำไปใช้ในการเจริญเติบโต การทำปุ๋ยหมัก การนำไปเป็นอาหารสัตว์ และการผลิตก๊าซชีวภาพ เป็นต้น

แม้ผักตบชวาจะส่งผลกระทบต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อมมากมาย ในทางกลับกันสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้เช่นกัน โดยสามารถนำไปใช้ผลิตก๊าซชีวภาพเพื่อเป็นพลังงานทดแทน เนื่องจากผักตบชวาเป็นพืชชีวมวลที่มีสัดส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนเฉลี่ยเท่ากับ 25 (Karki และคณะ, 2005) ซึ่งเหมาะสมในการนำมาเป็นวัตถุดิบสำหรับการผลิตก๊าซชีวภาพ สอดคล้องกับงานวิจัยของ (อรุณศรีภักดีพิน, 2531) ซึ่งรายงานไว้ว่าวัตถุดิบในการผลิตก๊าซชีวภาพควรมีค่าสัดส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนอยู่ระหว่าง 20-30 แต่มีองค์ประกอบของมวลลิกโนเซลลูโลสในปริมาณที่สูง คือ มีปริมาณเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินเท่ากับร้อยละ 16 43 และ 7 ตามลำดับ ซึ่งเป็นสาเหตุให้ย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ในระบบไร้อากาศได้ช้า (Yang และคณะ, 2015) ดังนั้นเพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพให้สูงขึ้นจึงควรมีการลดขนาดผักตบชวาและการบำบัดเบื้องต้นด้วยการใช้สารเคมี เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เพื่อสลายโครงสร้างผนังเซลล์ส่งผลให้จุลินทรีย์สามารถย่อยสลายได้ง่ายขึ้น ดังนั้นงานวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาวิธีการการบำบัดเบื้องต้นของผักตบชวาสำหรับใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตก๊าซชีวภาพ โดยการเปรียบเทียบระหว่างการลดขนาดผักตบชวา และการสลายโครงสร้างผนังเซลล์โดยใช้น้ำดำ (Black liquor) จากกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษแบบโซดา ซึ่งมีองค์ประกอบคือ โซเดียมไฮดรอกไซด์เพื่อเป็นการลดปริมาณการใช้สารเคมี โดยมุ่งหวังว่างานวิจัยนี้จะสามารถเป็นแนวทางในการกำจัดผักตบชวาและเป็นแหล่งพลังงานทางเลือกที่ควรศึกษาต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดเบื้องต้นของผักตบชวาระหว่างวิธีการทางกายภาพและวิธีทางเคมี โดยพิจารณาจากปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมที่เกิดขึ้นจากการผลิตก๊าซชีวภาพด้วยวิธีบีเอ็มพี (BMP; Biochemical Methane Potential)

1.2.2 เพื่อศึกษาอิทธิพลของขนาดผักตบชวา ความเข้มข้นของน้ำดำ และระยะเวลาสัมผัสเบื้องต้นต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ โดยพิจารณาจากปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมที่เกิดขึ้นจากการผลิตก๊าซชีวภาพด้วยวิธีบีเอ็มพี

1.2.3 เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของถังปฏิกรณ์ไร้อากาศแบบขั้นตอนเดียวในการผลิตก๊าซชีวภาพจากผักตบชวาที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นทางกายภาพและเคมีที่ให้ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมสูงสุดในการผลิตก๊าซชีวภาพด้วยวิธีบีเอ็มพี

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

งานวิจัยนี้ทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ (Lab scale) ดำเนินการที่อุณหภูมิตั้งที่ห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ซึ่งมีขอบเขตของงานวิจัย ดังนี้

1.3.1 ศึกษาองค์ประกอบของผักตบชวาและมูลโค โดยตัวอย่างผักตบชวามาจากแหล่งน้ำในศูนย์ฝึกนิสิต คณะสัตวแพทยศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จังหวัดนครปฐม และนำมาวิเคราะห์องค์ประกอบเบื้องต้นของผักตบชวา สำหรับมูลโคในงานวิจัยนี้ใช้เป็นหัวเชื้อจุลินทรีย์ โดยนำมาจากฟาร์มวัวศูนย์ฝึกนิสิต คณะสัตวแพทยศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จังหวัดนครปฐม

1.3.2 การบำบัดเบื้องต้นทางกายภาพของผักตบชวาโดยการลดขนาดและนำไปผลิตก๊าซชีวภาพด้วยวิธีบีเอ็มพี และเลือกสภาพการบำบัดเบื้องต้นที่ให้ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมสูงสุดมาใช้ในการผลิตก๊าซชีวภาพด้วยถังปฏิกรณ์ไร้อากาศแบบขั้นตอนเดียว

1.3.3 การบำบัดเบื้องต้นทางเคมีโดยใช้น้ำด่างของผักตบชวาขนาดต่างๆ และนำไปผลิตก๊าซชีวภาพด้วยวิธีบีเอ็มพี และเลือกสภาพการบำบัดเบื้องต้นที่ให้ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมสูงสุดมาใช้ในการผลิตก๊าซชีวภาพด้วยถังปฏิกรณ์ไร้อากาศแบบขั้นตอนเดียว

1.3.4 การผลิตก๊าซชีวภาพด้วยถังปฏิกรณ์ไร้อากาศแบบขั้นตอนเดียวจากผักตบชวาที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นทางกายภาพและเคมีในสภาวะที่ให้ก๊าซชีวภาพสะสมสูงสุดของการผลิตก๊าซชีวภาพด้วยวิธีบีเอ็มพี

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ทราบศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพของผักตบชวาจากการบำบัดเบื้องต้นทางกายภาพและเคมี

1.4.2 ทราบวิธีการบำบัดผักตบชวาเบื้องต้นที่เหมาะสมสำหรับใช้ในการผลิตก๊าซชีวภาพ

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ปัญหาจากผักตบชวา

ผักตบชวาถือเป็นวัชพืชประเภทหนึ่ง เนื่องจากก่อให้เกิดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อม และต่อกิจกรรมต่างๆ ที่จำเป็นในการดำรงชีวิตของมนุษย์ เช่น ด้านการชลประทาน ด้านการประมง ด้านการสาธารณสุข ด้านการคมนาคมทางน้ำ ฯลฯ ซึ่งส่งผลกระทบต่อเศรษฐกิจและสังคมตามมา (อมรรัตน์ สีสุทอง, 2551) ด้านงานชลประทาน ผักตบชวาจะกีดขวางการไหลของน้ำ เป็นผลให้การไหลของน้ำลดลง และแหล่งน้ำตื้นเขินเร็วกว่าปกติ และส่งผลต่อการทำเกษตรกรรม เนื่องจากปริมาณน้ำไม่เพียงพอต่อการเพาะปลูก ด้านการประมง คือ เป็นอุปสรรคต่อการจับปลา ทำให้ที่อยู่อาศัยของปลาลดลงเนื่องจากทำให้แหล่งน้ำตื้นเขิน นอกจากนี้ทำให้การส่องผ่านของแสงลงสู่ใต้น้ำลดลงเป็นผลให้ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำลดลง ก่อให้เกิดน้ำเน่าเสีย สัตว์น้ำไม่สามารถอาศัยอยู่ได้ สำหรับปัญหาด้านการสาธารณสุข ผักตบชวาเป็นแหล่งเพาะพันธุ์ยุง และแหล่งกำเนิดของเชื้อโรคพยาธิใบไม้ในตับ เนื่องจากเป็นที่อาศัยของสัตว์น้ำบางชนิด เช่น หอยไบธินเนีย (Bithynia) รวมถึงเป็นที่อยู่อาศัยของสัตว์ร้าย เช่น งู นอกจากนี้ยังทำลายทัศนียภาพของแหล่งน้ำนั้นๆ ทำให้การพัฒนาแหล่งน้ำนั้นๆ เป็นสถานที่ท่องเที่ยวสามารถทำได้ยากขึ้น (กรมควบคุมมลพิษ, 2545)

2.1.1 อัตราการเจริญเติบโตของผักตบชวา

ประดิษฐา อินทรโสมิต (2522) รายงานว่าผักตบชวามีการขยายพันธุ์อย่างรวดเร็ว โดยการแตกไหลจากต้นเล็กๆ 1 ต้น ได้ถึง 77 ต้นภายในเวลา 42 วัน และโตเต็มที่ในเวลาประมาณ 105 วัน มีความสามารถในการใช้พลังงานจากดวงอาทิตย์ในการสร้างอินทรีย์สารโดยกระบวนการสังเคราะห์แสงได้ดีมาก โดยสามารถสร้างอินทรีย์สารได้สูง 20 กรัมต่อวันต่อตารางเมตร

กรมควบคุมมลพิษ (2550) รายงานว่าผักตบชวามีอัตราการเจริญเติบโตสูงสุด 639 กรัม/น้ำหนักสดต่อตารางเมตรต่อวัน โดยมีความหนาแน่นของผักตบชวา 6.7 กิโลกรัม/น้ำหนักสดต่อตารางเมตร

ณัฐพงศ์ ทรัพย์มณีนันท์ (2553) ได้ศึกษาปริมาณการใช้น้ำและอัตราการเจริญเติบโตของผักตบชวา โดยทดลองใช้น้ำจากแหล่งน้ำชลประทานแม่กลองใหญ่ อ.กำแพงแสน จ.นครปฐม เป็นระยะเวลา 150 วัน พบว่า ผักตบชวามีปริมาณการใช้น้ำเฉลี่ย 6.01 มิลลิเมตรและมีอัตราการเจริญเติบโตเฉลี่ย 6.65 ต้นต่อตารางเมตรต่อสัปดาห์

สร้อยดาว ยวดยง (2553) ได้ศึกษาอัตราการเจริญเติบโตของผักตบชวาที่มีความหนาแน่นเริ่มต้น 4 8 12 และ 16 กิโลกรัม (น้ำหนักเปียก) ต่อตารางเมตร โดยใช้น้ำเสียชุมชนหลัง

ผ่านการบำบัดขั้นที่สองของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรีเป็นน้ำเสียเข้าระบบบ่อกักตบชวา โดยให้น้ำเสียไหลผ่านบ่อกักตบชวาอย่างต่อเนื่อง และทำในสภาพแวดล้อมแปรผันตามธรรมชาติเป็นระยะเวลา 6 เดือน พบว่า เมื่อใช้ความหนาแน่นเริ่มต้นของผักตบชวาต่ำจะมีการเพิ่มขึ้นของน้ำหนักรสูงกว่าการใช้ความหนาแน่นเริ่มต้นของผักตบชวาสูง โดยมีการเพิ่มขึ้นของน้ำหนักผักตบชวาเท่ากับ 60.00 44.13 29.42 และ 23.63 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และอัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ (กิโลกรัม) ของผักตบชวาจะลดลงเมื่อความหนาแน่นเริ่มต้นของผักตบชวาสูงขึ้น

ผักตบชวาสืบพันธุ์โดยเมล็ดและการแตกไหล โดยการสืบพันธุ์โดยเมล็ดจะเริ่มต้นจากดอกของผักตบชวาซึ่งจะบานเพียง 1 ถึง 2 วัน ก่อนจะเหี่ยวเฉาลงในช่วงกลางถึงปลายฤดูร้อน เมื่อดอกเหี่ยวเฉาก้านดอกจะค่อยๆ โค้งจมลงในน้ำหลังจากนั้น 2 ถึง 3 สัปดาห์ เมล็ดที่จมลงในน้ำจะงอกเป็นต้นใหม่และเจริญเติบโตในไม่ช้า (NSW government, 2010) สำหรับการสืบพันธุ์ที่ดีที่สุดของผักตบชวา คือการแตกไหลแล้วกลายเป็นลำต้นติดกับต้นแม่ เมื่อต้นอ่อนเหล่านี้เกิดใบและรากภายในเวลาไม่กี่วันต้นใหม่นี้จะเริ่มสร้างต้นอ่อนต่อไป (บุญชัย งามวิทย์โรจน์, 2555)

2.1.2 สภาพที่เหมาะสมในการเจริญเติบโตของผักตบชวา

ผักตบชวามีการเจริญเติบโตได้ดีบริเวณที่น้ำนิ่ง (เจริญวิษณุ หาญแก้ว, 2555) โดยอัตราการเจริญเติบโตของผักตบชวาขึ้นอยู่กับปัจจัยที่สำคัญหลายประการ ดังนี้

1. อุณหภูมิ (Temperature) ผักตบชวาสามารถเจริญเติบโตได้ในช่วงอุณหภูมิ 1-40 องศาเซลเซียส (Malik, 2007) และเจริญเติบโตได้ดีที่อุณหภูมิ 26.7 องศาเซลเซียส แต่ที่อุณหภูมิ 4.4 องศาเซลเซียส ผักตบชวาจะเจริญเติบโตและเพิ่มมวลชีวภาพได้น้อยมาก (กรมควบคุมมลพิษ, 2545)

2. ความเข้มแสง (Light Intensity) ผักตบชวาจะสามารถเจริญเติบโตได้แตกต่างกันเมื่อความเข้มแสงช่วงต่างกัน โดยที่ระดับความเข้มแสงต่ำกว่า 130 ฟุต-เทียน ผักตบชวาจะตายหรือแห้ง แต่เมื่อความเข้มของแสงอยู่ในช่วง 130-500 ฟุต-เทียน ผักตบชวาจะสามารถสร้างใบที่ยาวเรียวยาว (elongate leaves) ได้ และที่ความเข้มของแสงมากกว่า 500 ฟุต-เทียน ผักตบชวาจะสามารถสร้างใบที่มีฟูนลอย (กรมควบคุมมลพิษ, 2545) ซึ่งแสงจากดวงอาทิตย์โดยตรงมีความเข้มแสงสูงถึง 7,500 ฟุต-เทียน (กระทรวงพลังงาน, 2553)

3. ความหนาแน่น (Density) หากผักตบชวามีความหนาแน่นเหมาะสมจะมีอัตราการเจริญเติบโตสูงสุดประมาณ 15-35 กิโลกรัม/น้ำหนักรต่อตารางเมตรซึ่งมีความเหมาะสมสำหรับใช้บำบัดน้ำเสีย และเมื่อมีความหนาแน่นสูงสุด คือ 40.58 กิโลกรัม/น้ำหนักรต่อตารางเมตรบางส่วนจะเริ่มตาย และความหนาแน่นจะลดลงจนเหลือเพียง 17.11 กิโลกรัม/น้ำหนักรต่อตารางเมตรในเวลา 60 วัน (กรมควบคุมมลพิษ, 2545)

4. ความเค็มของน้ำ (Salinity) ผักตบชวาเป็นพืชน้ำที่เจริญเติบโตได้ดีในน้ำจืด และจะเริ่มหยุดการเจริญเติบโตและตายในน้ำที่มีปริมาณเกลือละลายมากกว่า 2 กรัมต่อลิตร (กรมควบคุมมลพิษ, 2545) นอกจากนี้ Malik (2007) รายงานว่าในบริเวณชายฝั่งที่มีความเค็มร้อยละ 6-8 ผักตบชวาจะตาย

5. ความเป็นกรดด่าง (pH) โดยค่าที่เหมาะสมสำหรับการเจริญเติบโตของผักตบชวาอยู่ในช่วง 6-8 (Malik, 2007)

6. ธาตุอาหาร (Nutrient) ผักตบชวาจะมีอัตราการเจริญเติบโตสูงสุดในน้ำที่มีความเข้มข้นไนโตรเจนทั้งหมด 28 มิลลิกรัมต่อลิตร และฟอสฟอรัสทั้งหมด 7.7 มิลลิกรัมต่อลิตร คิดเป็นอัตราส่วนไนโตรเจนต่อฟอสฟอรัสเท่ากับ 3.6:1 (กรมควบคุมมลพิษ, 2550) และการเพิ่มขึ้นของฟอสฟอรัสในน้ำจะเป็นตัวยับยั้งการดูดซึมไนโตรเจนเข้าสู่เนื้อเยื่อของผักตบชวาด้วย (Jane และคณะ, 1981)

2.2 ปริมาณผักตบชวาในประเทศไทย

จากการสำรวจปริมาณผักตบชวาทั่วประเทศเมื่อวันที่ 15 กรกฎาคม 2559 พบว่า มีผักตบชวาปริมาณ 6.1 ล้านตัน และพบว่าพื้นที่ภาคกลางมีปริมาณผักตบชวามากที่สุดประมาณ 2.7 ล้านตัน (สำนักนายกรัฐมนตรี, 2557)

จากการสำรวจปริมาณผักตบชวาในแหล่งน้ำต่างๆ ทั่วประเทศ พบว่า แหล่งน้ำทั้งหมด 3,955 แห่ง มีผักตบชวาประมาณ 6,240,000-6,256,560 ตัน ครอบคลุมพื้นที่ 60 จังหวัด ซึ่งก่อให้เกิดปัญหาต่อการระบายน้ำและการคมนาคมทางน้ำ รวมถึงบดบังทัศนียภาพของแหล่งน้ำ (สำนักนายกรัฐมนตรี, 2557)

ปริมาณผักตบชวาสามารถจำแนกตามภูมิภาคได้ดังตารางที่ 2.1 โดยพบว่าในปี พ.ศ. 2553 ภาคเหนือมีปริมาณผักตบชวาในแหล่งน้ำมากที่สุด รองลงมาคือภาคกลาง ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ภาคใต้ ภาคตะวันตกและภาคตะวันออก (กรมโยธาธิการและผังเมือง, 2553) ตามลำดับ

ตารางที่ 2.1 ปริมาณผักตบชวาในแหล่งน้ำทั่วประเทศ (กรมโยธาธิการและผังเมือง, 2553)

ภาค	ปริมาณ (ตัน)
เหนือ	2,040,000
กลาง	1,350,000
ตะวันออกเฉียงเหนือ	842,000
ใต้	245,000

ตารางที่ 2.1 ปริมาณผักตบชวาในแหล่งน้ำทั่วประเทศ (กรมโยธาธิการและผังเมือง, 2553) (ต่อ)

ภาค	ปริมาณ (ตัน)
ตะวันตก	24,000
ตะวันออก	23,000
รวม	4,524,000

2.3 องค์ประกอบทางกายภาพและทางเคมีของผักตบชวา

2.3.1 องค์ประกอบทางกายภาพ

ต้น : ลำต้นของผักตบชวาจะสั้น มีลักษณะอวบน้ำ ภายในเป็นรูพรุนทำให้สามารถลอยอยู่บนผิวน้ำได้ มีผิวเรียบ สีเขียวอ่อนและเข้ม ก้านใบสูงประมาณ 30-90 เซนติเมตรขึ้นอยู่กับความอุดมสมบูรณ์ของแม่น้ำบริเวณที่เจริญเติบโต และรากจะแตกออกจากลำต้นบริเวณข้อ (กรมควบคุมมลพิษ, 2545)

ใบ : มีลักษณะเป็นใบเดี่ยว แตกจากลำต้นเป็นกอ โคนก้านใบแผ่เป็นกาบหุ้มประกบกันไว้ ใบมีสีเขียวสด มีลายเส้นโค้งทั้งใบ แผ่นใบคล้ายรูปหัวใจมีรูปร่างค่อนข้างกลม และฐานใบเว้าเข้าหาก้านใบ มีหูใบ ปลายใบมน ใบมีลักษณะเป็นมันและหนา ขนาดของใบจะแตกต่างกันออกไป (กรมควบคุมมลพิษ, 2545)

ดอก : ดอกของผักตบชวามีลักษณะเป็นช่อ โดยในช่อหนึ่งๆ จะมีจำนวนดอกแตกต่างกันไป เมื่อเจริญเต็มที่ดอกมักจะบานพร้อมกันทั้งช่อ โดยจะค่อยๆ บานตั้งแต่แสงอาทิตย์เริ่มส่องและบานเต็มที่เมื่อแสงแดดส่องจ้า และจะบานเพียง 1 วัน หลังจากนั้นกลีบดอกก็จะหุบเหี่ยวขดเป็นเกลียว แล้วก้านช่อดอกก็จะโค้งงอลงสู่พื้นน้ำ ผักตบชวาต้นหนึ่งๆ จะมีดอกได้หลายช่อ โดยจะทยอยกันออกดอก ดอกแต่ละดอกประกอบด้วยกลีบดอก (Perianth) 6 กลีบ กลีบดอกมีลักษณะบาง มีหลายสี เช่น ม่วง ขาว และม่วงอมฟ้า กลีบบนขนาดใหญ่ และมีแต้มสีเหลืองกลางกลีบ ออกดอกปลายฤดูหนาวถึงต้นฤดูร้อน ช่อดอกผักตบชวาคคล้ายกับดอกไฮยาซินท์จึงมีชื่อว่า Water Hyacinth (กรมควบคุมมลพิษ, 2545) ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 องค์ประกอบทางกายภาพของผักตบชวา (RPI, 2010)

2.3.2 องค์ประกอบทางเคมี

รายละเอียดองค์ประกอบของผักตบชวาแสดงดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบในผักตบชวา

องค์ประกอบ	สัดส่วน (ร้อยละ)		
	A (อรุณศรี ภักดีพิน, 2531)	B (Chynoweth และ คณะ, 1982)	C (Vaidyanathen และ คณะ, 1984)
ของแข็งทั้งหมด (w/w)	7.85*	4.78*	6.9*
ของแข็งระเหย (w/w)	68.10*	86.1	74
เถ้า	-	-	-
คาร์บอน	46.00	43.8	32.4
ไนโตรเจน	1.77	3.98	1.2
ฟอสฟอรัส	0.99	0.84	0.5
โพแทสเซียม	3.55	2.8	-
ไฮโดรเจน	-	5.7	-
โซเดียม	-	0.88	-
แคลเซียม	-	1.68	1.4

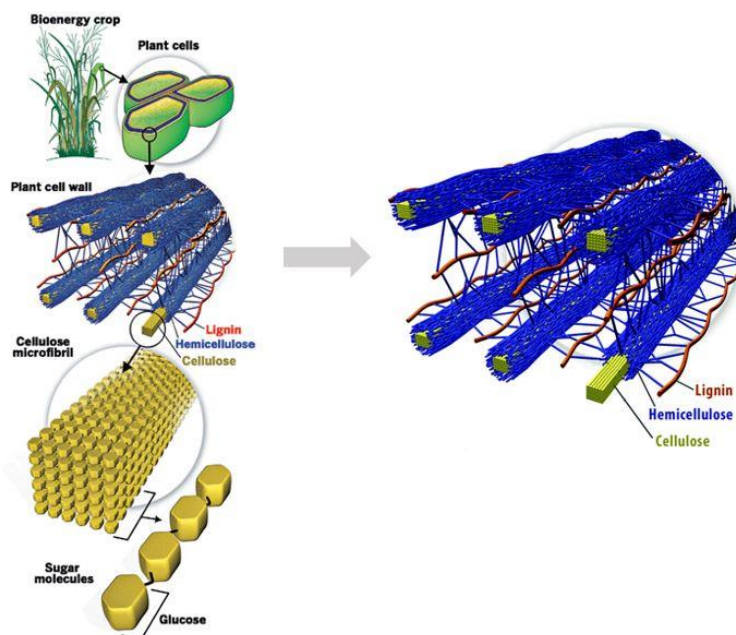
ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบในผักตบชวา (ต่อ)

องค์ประกอบ	สัดส่วน (ร้อยละ)		
	A (อรุณศรี ภักดีพิน, 2531)	B (Chynoweth และคณะ, 1982)	C (Vaidyanathen และคณะ, 1984)
น้ำตาลที่ละลายน้ำ	1.20	-	-
เซลลูโลส	16.00	-	-
เฮมิเซลลูโลส	43.00	-	-
ลิกนิน	6.80	-	-
คาร์บอน:ไนโตรเจน	26:1	11:1	27:1
คาร์บอน:ฟอสฟอรัส	46:1	52:1	65:1
แหล่งน้ำ	คุระบายน้ำทิ้งคณะ วิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน	ระบบบำบัดน้ำเสียของ Walt Disney World รัฐ ฟลอริดา สหรัฐอเมริกา	ระบบบำบัดน้ำเสียเมือง Goregaon และ Amboli ประเทศอินเดีย

หมายเหตุ * มีหน่วยเป็นร้อยละน้ำหนักเปียก

2.4 โครงสร้างของเซลล์พืช

เซลล์พืชจะประกอบด้วยผนังเซลล์ที่เรียกว่า ลิกโนเซลลูโลส (Lignocellulose) โดยสามารถจำแนกตามลักษณะการสักร้างพันธะของน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวประเภทต่างๆ ได้ดังรูปที่ 2.2 ซึ่งสามารถแบ่งได้ 3 ประเภท คือ เซลลูโลส (Cellulose) เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) และลิกนิน (Lignin) โดยสัดส่วนลิกโนเซลลูโลสจะแตกต่างกันไปตามประเภท (ตารางที่ 2.3) และอายุที่เพิ่มขึ้นของพืช นอกจากนี้ยังพบสารอื่นๆที่เป็นองค์ประกอบอยู่ภายในเซลล์ เช่น โปรตีน ไขมัน แร่ธาตุ และน้ำตาล เป็นต้น



รูปที่ 2.2 โครงสร้างลิกโนเซลลูโลส (Ritter, 2008)

ตารางที่ 2.3 สัดส่วนลิกโนเซลลูโลสของพืชประเภทต่างๆ (Shahzadi และคณะ, 2014)

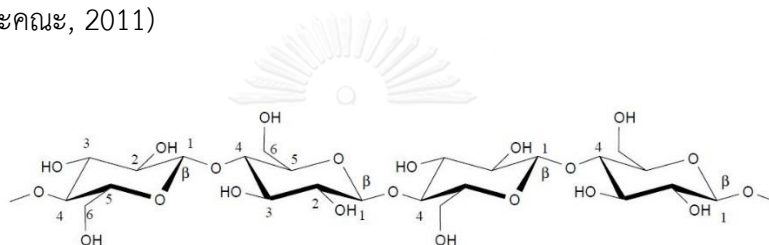
พืช	เซลลูโลส (ร้อยละ)	เฮมิเซลลูโลส (ร้อยละ)	ลิกนิน (ร้อยละ)
หญ้า	25-40	25-50	10-30
ไม้เนื้ออ่อน	45-50	25-35	25-35
ไม้เนื้อแข็ง	45-55	24-40	18-25

จากองค์ประกอบทางเคมีของผักตบชวาตารางที่ 2.2 พบว่า ผักตบชวามีสัดส่วนของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ร้อยละ 16 43 และ 6.8 ตามลำดับ และเมื่อเปรียบเทียบกับสัดส่วนของลิกโนเซลลูโลสในพืชประเภทต่างๆ จากตารางที่ 2.3 พบว่า ผักตบชวามีสัดส่วนลิกโนเซลลูโลสใกล้เคียงกับหญ้า

2.4.1 เซลลูโลส (Cellulose)

เซลลูโลสเป็นพอลิเมอร์สายยาว ไม่มีเกลียว ไม่มีการแตกกิ่งก้านสาขา ประกอบด้วยส่วนที่เป็นผลึก (Crystalline) และส่วนที่เป็นอสัณฐาน (Amorphous) ซึ่งลักษณะโครงสร้างของเซลลูโลสที่แตกต่างกัน ทำให้การจัดเรียงตัวเกิดช่องว่างขึ้นภายใน ส่งผลให้โมเลกุลของเซลลูโลสไม่ต่อเนื่องกัน โดยเซลลูโลสเป็นสารประกอบคาร์โบไฮเดรต ที่มีน้ำตาลดีกลูโคส (D-glucose) จำนวน

1,000-10,000 โมเลกุลเชื่อมต่อกันเป็นพอลิเมอร์ด้วยพันธะเบต้ากลูโคซิดิก (β -1, 4-glycosidic) ที่เกิดขึ้นระหว่างหมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl groups) ดังรูปที่ 2.3 ซึ่งภายในสายยาวของเซลลูโลสจะประกอบไปด้วยน้ำตาลกลูโคสจำนวน 2,000-15,000 โมเลกุล โดยสูตรเคมีของเซลลูโลสคือ $(C_6H_{10}O_5)_n$ เมื่อ n คือ จำนวนหน่วยของน้ำตาลกลูโคสทั้งหมดที่ประกอบกันเป็นโครงสร้างของเซลลูโลส โดยปกติทั่วไปจะพบเซลลูโลสที่ประกอบอยู่ในพืชประมาณ 45% โดยน้ำหนัก เซลลูโลสไม่ละลายน้ำและร่างกายของมนุษย์ไม่สามารถย่อยสลายได้แต่สำหรับกระเพาะของวัว ควาย ม้า และสัตว์เท้ากีบจะมีจุลินทรีย์ที่สามารถย่อยสลายเซลลูโลสให้เป็นกลูโคส (Pauly and Keegstra, 2010)(Pauly M. & Keegstra K., 2010) นอกจากนี้ยังพบว่าเซลลูโลสในธรรมชาติจะไม่อยู่เป็นอิสระ แต่มักจะรวมตัวกับสารอื่นๆ เช่น ลิกนิน เฮมิเซลลูโลส เพนโตแซน กัม แทนนิน เรซิน และไขมัน (Chandel และคณะ, 2011)

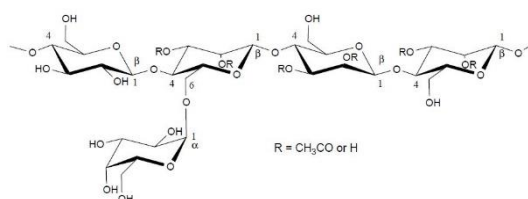


รูปที่ 2.3 โครงสร้างของเซลลูโลส (Laine, 2005)

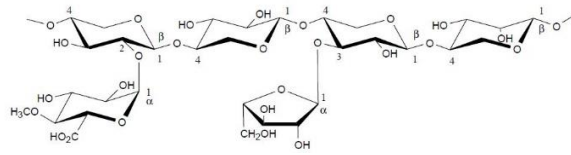
2.4.2 เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose)

เฮมิเซลลูโลสเป็นคาร์โบไฮเดรตประเภทพอลิแซ็กคาไรด์ (Polysaccharide) ในโมเลกุลของเฮมิเซลลูโลส เป็นเฮเทอโรพอลิแซ็กคาไรด์ (Heteropolysaccharide) ที่ประกอบด้วยน้ำตาลหลายชนิด มีน้ำตาลไซโลส (Xylose) เชื่อมต่อกันด้วยพันธะไกลโคไซด์ (Glycosidic bond) ที่ตำแหน่ง บีตา (1-4) เป็นโซ่หลัก อาจมีน้ำตาลแมนโนส (Mannose) กาแล็กโทส (Galactose) หรือกลูโคส (Glucose) มาต่อกันเป็นโซ่หลักด้วย และมีน้ำตาลชนิดอื่นมาต่อกันเป็นโซ่สาขา หรือโซ่แขนง ได้แก่ น้ำตาลอะราบินโนส (Arabinose) กรดกลูคูโรนิก (Glucuronic acid) (Chandel และคณะ, 2011) ดังแสดงในรูปที่ 2.4 โดยปกติเฮมิเซลลูโลสที่ประกอบอยู่ในพืชจะมีประมาณ ร้อยละ 20-40 โดยน้ำหนัก (Pauly และคณะ, 2010)

กลูโคแมนแนน



ไซแลน

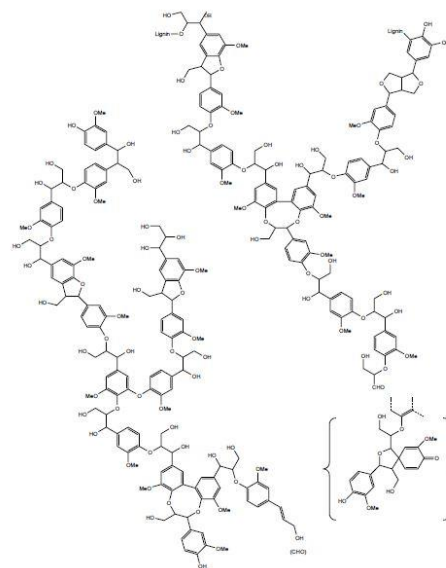


รูปที่ 2.4 โครงสร้างของเฮมิเซลลูโลสประเภทกลูโคแมนแนนและไซแลน (Laine, 2005)

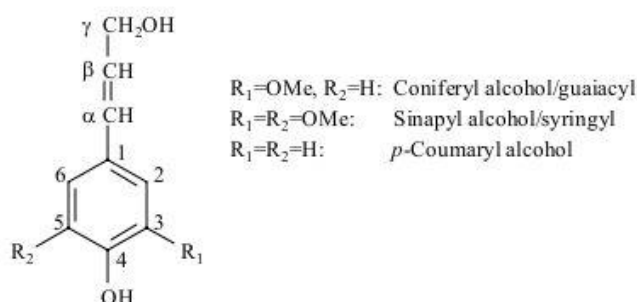
2.4.3 ลิกนิน (Lignin)

ลิกนินเป็นคาร์โบไฮเดรตประเภทใยอาหาร (Dietary fiber) ที่ไม่ให้พลังงาน โครงสร้างโมเลกุลของลิกนินเป็นพอลิแซ็กคาไรด์ที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่ เป็นสารอะโรมาติก ดังรูปที่ 2.5 ไม่ละลายน้ำ ยากแก่การสลายด้วยจุลินทรีย์และสารเคมี โดยลิกนินจะเป็นตัวขัดขวางในกระบวนการหมักแบบไร้อากาศส่งผลให้ศักยภาพของการผลิตก๊าซมีเทนมีค่าลดลง (Owens และ Chynoweth, 1993) ลิกนินเป็นส่วนประกอบที่สำคัญของเนื้อเยื่อพืช พบในส่วนของผนังเซลล์ ทำให้ผนังเซลล์พืชแข็งแรง อยู่ร่วมกับเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส โดยจะแทรกตัวเข้าไปในช่องว่างระหว่างเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส ลิกนินเป็นส่วนประกอบของเปลือก ชัง หรือส่วนที่เป็นเยื่อใยของราก ลำต้น และจะถูกสร้างจากส่วนโคนต้นไปสู่ยอด (Pauly และคณะ, 2010) เมื่อพืชมีอายุมากขึ้นปริมาณลิกนินจะเพิ่มมากขึ้นด้วย โดยปกติลิกนินที่ประกอบอยู่ในพืชมีประมาณร้อยละ 27-32 โดยน้ำหนัก (Chandel และคณะ, 2011)

a.



b.



รูปที่ 2.5 โครงสร้างของลิกนิน

a. (Laine, 2005) b. (IPST, 2012)

2.5 การใช้ประโยชน์จากผักตบชวา

แม้ว่าผักตบชวาจะส่งผลกระทบต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อมมากมาย แต่ในทางกลับกันสามารถนำมาใช้ให้เกิดประโยชน์หลายประการ (กรมควบคุมมลพิษ, 2545) ดังรายละเอียดต่อไปนี้

2.5.1 ใช้สำหรับกระบวนการบำบัดน้ำเสีย โดยผักตบชวาจะช่วยดูดสิ่งสกปรกและธาตุอาหารต่างๆ ในน้ำที่มาจากแหล่งกำเนิดประเภทต่างๆ เช่น สิ่งขับถ่ายจากมนุษย์และสัตว์ สิ่งสกปรกจากโรงงานอุตสาหกรรม ตัวอย่างโครงการที่ใช้ผักตบชวาในการบำบัดน้ำเสีย เช่น โครงการฟื้นฟูบึงมกกะสัน ซึ่งเป็นโครงการในพระราชดำริของสมเด็จพระเจ้าอยู่หัว โดยใช้การขุดลอกวัชพืชที่ขึ้นหนาแน่นในคลองทิ้งก่อนและนำผักตบชวาไว้ในคอกกั้นเป็นระยะ เพื่อให้ผักตบชวาทำหน้าที่ดูดซับโลหะหนักและสารพิษต่างๆ

2.5.2 ใช้สำหรับเป็นอาหารเลี้ยงสัตว์ เช่น โค กระบือ สุกร แกะ เป็นต้น

2.5.3 ใช้เป็นวัสดุคลุมดินเพื่อรักษาความชุ่มชื้นของดิน และเมื่อผักตบชวาจะย่อยสลายจะกลายเป็นปุ๋ยหมักที่มีธาตุโพแทสเซียมสูง นิยมนำไปใช้ร่วมกับดิน ปุ๋ยคอก ขยะและขี้เถ้า เพื่อใช้ทำแท่งเพาะชำ โดยการนำผักตบชวาทากแห้งมาผสมกับดินเพื่อช่วยให้ดินมีความอุดมสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

2.5.4 ใช้เป็นวัสดุติดตั้งต้นของเคมีภัณฑ์จากการสกัดส่วนต่างๆ ของผักตบชวา เช่น จิบเบอเรลลิน จากรากของผักตบชวา ซึ่งสามารถใช้กระตุ้นการเจริญเติบโตของพืชจำพวก ข้าว ข้าวสาลี ข้าวโพด ถั่วและปอกระเจาได้

2.5.5 ใช้เป็นวัสดุติดสำหรับทำวัสดุต่างๆ เช่น เยื่อกระดาษ เครื่องเรือน เครื่องถักสาน เสื้อ เปลญวน กระบุง ตะกร้า ชะลอม และเชือก เป็นต้น

2.5.6 ใช้เป็นสารตั้งต้นสำหรับการผลิตก๊าซชีวภาพ การผลิตก๊าซชีวภาพจากผักตบชวามีความเหมาะสมสำหรับครัวเรือน หรือชุมชนริมน้ำ เนื่องจากผักตบชวาเป็นวัชพืชที่ขึ้นที่

เจริญเติบโตและสามารถแพร่กระจายได้อย่างรวดเร็ว ซึ่งเป็นการนำผักตบชวามาใช้ประโยชน์อย่างคุ้มค่า หากมีการศึกษาค้นคว้าวิธีการที่เหมาะสม ดังนั้นการผลิตก๊าซชีวภาพจากผักตบชวาอาจไม่ใช่การนำผักตบชวามาใช้ประโยชน์ที่ดีที่สุด แต่ในบางสถานการณ์ เช่น ในแถบประเทศที่ต้องการพลังงานจากชีวมวลจึงนับว่าเป็นประโยชน์อย่างยิ่ง โดย Malik (2007) พบว่า การผลิตก๊าซชีวภาพจากผักตบชวาเป็นที่น่าสนใจโดยสามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้สูงถึง 0.4 ลิตร/กรัมของแข็งระเหย ซึ่งมีก๊าซมีเทนเป็นองค์ประกอบร้อยละ 60 และสามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้เพิ่มขึ้นหากมีการผสมมูลสัตว์หรือการบำบัดเบื้องต้น

2.6 การผลิตเยื่อกระดาษ

การผลิตเยื่อเป็นขั้นตอนการลดรูปไม้ให้กลายเป็นแผ่นเส้นใย โดยการแยกเซลลูโลสจากลิกนินและสารเคมีอื่นๆ ไม้ที่นิยมใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับผลิตเยื่อกระดาษ ได้แก่ สน ไม้ ยางพารา ชานอ้อย ยูคาลิปตัส เป็นต้น โดยสิ่งที่ได้จากกระบวนการนี้ประกอบด้วยวัตถุดิบที่เป็นของแข็งร้อยละ 40 และร้อยละ 60 เป็นกากของเหลวซึ่งจะต้องได้รับการบำบัดต่อไป โดยขั้นตอนการผลิตเยื่อกระดาษสามารถแบ่งเป็น 3 ประเภท (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2550) ได้แก่ การผลิตเยื่อเชิงกล การผลิตเยื่อกึ่งเคมี และการผลิตเยื่อเชิงเคมี

2.6.1 กระบวนการผลิตเยื่อโดยเชิงกล (Mechanical pulping process)

การผลิตเยื่อโดยวิธีนี้จะใช้พลังงานกลในการบดชิ้นไม้เพื่อให้เส้นใยออกมา อาจมีการใช้ความดัน พลังงานความร้อน และสารเคมีร่วมด้วย เยื่อที่ได้มีคุณสมบัติด้านความเหนียวไม่ดัดนัก เนื่องจากไม่ใช่เยื่อเซลลูโลสบริสุทธิ์ มีสิ่งเจือปนต่างๆ เช่น ลิกนิน ยางไม้ เกลือแร่ มีเนื้อค่อนข้างหยาบ กระด้าง เส้นใยที่ได้ส่วนใหญ่ไม่สมบูรณ์ มีการขาดและตัดเป็นท่อนๆ มีลิกนินตกค้างอยู่มาก ทำให้พันธะระหว่างเส้นใยต่ำ การกลับสีเร็ว จึงไม่เหมาะสำหรับการนำไปทำกระดาษที่ต้องรับแรงดึงสูงหรือเก็บไว้นานๆ แต่เหมาะสำหรับทำสิ่งพิมพ์ราคาถูก เช่น ทำกระดาษหนังสือพิมพ์ และผสมทำกระดาษพิมพ์เขียนเนื่องจากมีความทึบแสงสูง หรือใช้เป็นเยื่อชั้นในกระดาษแข็ง เป็นต้น

2.6.2 กระบวนการผลิตเยื่อกึ่งเคมี (Semichemical pulping process)

การผลิตเยื่อโดยวิธีนี้จะใช้กระบวนการทางกลและเคมีร่วมกัน ทำให้ได้เยื่อที่มีคุณสมบัติอยู่ระหว่างเยื่อไม้บดและเยื่อเคมี โดยนำชิ้นไม้สับมาต้มกับน้ำยาต้มเยื่อตามเวลา ปริมาณน้ำยาเคมี และอุณหภูมิต่อไม้ที่กำหนดไว้ จากนั้นนำไปผ่านกระบวนการทางกลเพื่อแยกเส้นใยออกมา เยื่อที่ได้นี้จะเรียกว่าเยื่อกึ่งเคมี มีความคงรูป (stiffness) ของกระดาษมากซึ่งเป็นคุณสมบัติของกระดาษทำลูกฟูก

2.6.3 การผลิตเยื่อกระดาษเชิงเคมี (Chemical pulping process)

กระบวนการผลิตเยื่อกระดาษโดยวิธีนี้จะใช้สารเคมีแยกเซลลูโลสจากลิกนิน ทำให้เกิดเยื่อที่มีคุณสมบัติแตกต่างกันที่สามารถนำไปใช้ผลิตกระดาษที่มีคุณภาพสูงได้ โดยจะนำวัตถุดิบ (เศษไม้) มาต้มกับสารเคมีความเข้มข้นสูงในหม้อต้มที่มีแรงดันและอุณหภูมิสูง ซึ่งสารเคมีที่ใช้ ได้แก่ ต่าง (คราฟท์) หรือกรด (ซัลไฟต์) ทำให้พันธะของลิกนินแตกตัวและละลายออกไป เหลือส่วนที่ไม่ละลายคือเยื่อ และเยื่อที่ได้จากกระบวนการนี้จะมีปริมาณเซลลูโลสสูง มีสารอินทรีย์และลิกนินอยู่น้อยมาก มีความเหนียวสูง กระบวนการผลิตเยื่อกระดาษโดยวิธีนี้แบ่งออกเป็น 2 กระบวนการ ได้แก่

1. กระบวนการซัลไฟต์ (Sulfite process)

กระบวนการซัลไฟต์เป็นขั้นตอนการผลิตเนื้อเยื่อด้วยสารเคมีที่เป็นกรด และเยื่อไม้ที่ได้เกือบเป็นเยื่อเซลลูโลสบริสุทธิ์โดยการใช้กรดซัลฟูรัส (H_2SO_3) หรือไบซัลไฟต์ไอออน (HSO_3^-) ในการละลายลิกนินที่จับระหว่างเยื่อไม้ให้หลุดออกมา การผลิตเยื่อด้วยซัลไฟต์เคยเป็นกระบวนการหลักในการผลิตเยื่อไม้จนกระทั่งในช่วงยุค 1940 มีกระบวนการคราฟท์เกิดขึ้น กระบวนการซัลไฟต์จึงไม่เป็นที่นิยม เยื่อที่ได้จากกระบวนการนี้จะมีสีอ่อนกว่าเยื่อที่ได้จากกระบวนการคราฟท์ และพอกสีได้ง่ายกว่า แต่มีคุณภาพต่ำกว่า เนื่องจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของเซลลูโลสจำนวนหนึ่งในสภาวะกรด ดังนั้นผลผลิตเยื่อจึงไม่แข็งแรงเท่ากับเยื่อที่ได้จากกระบวนการคราฟท์ นอกจากนี้ผลพลอยได้ที่สำคัญจากกระบวนการผลิตเยื่อซัลไฟต์นี้ คือ ลิกโนซัลโฟเนต (Lignosulfonates) ซึ่งใช้ในการทำคอนกรีต แผ่นฝ้าบุผนัง เป็นต้น

2. กระบวนการอัลคาไลน์ (Alkaline process)

ก. กระบวนการโซดา (Soda process)

เป็นกระบวนการที่ใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นสารละลายลิกนิน โดยจะถูกต้มในเครื่องย่อยเป็นเวลาประมาณ 10 ชั่วโมงภายใต้แรงดันและอุณหภูมิสูง ขั้นตอนการย่อยจะทำให้วัสดุยึดเหนี่ยวที่ไม่ใช่เซลลูโลส เช่น ลิกนิน และยางเรซินแยกออกจากเยื่อ

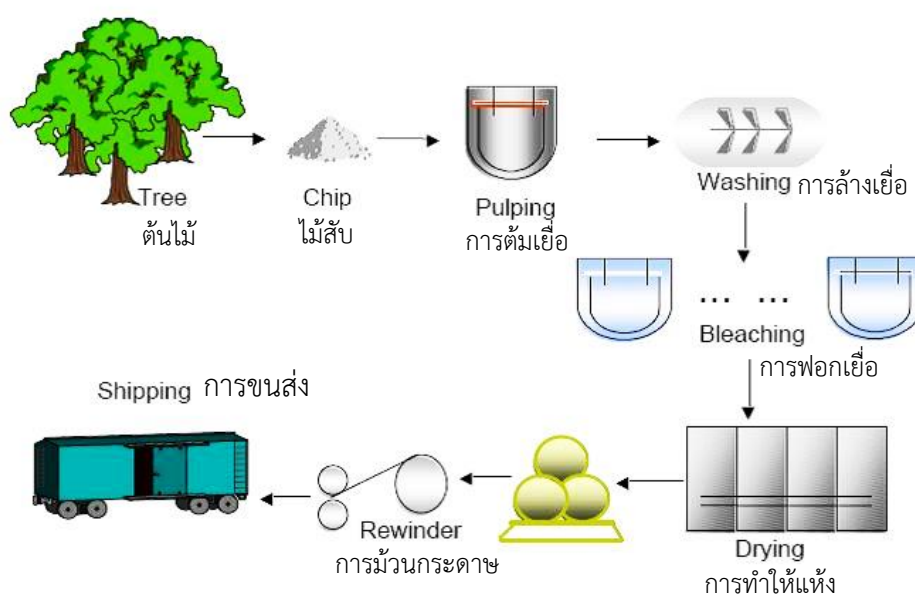
ข. กระบวนการคราฟท์หรือซัลเฟต (Kraft or Sulphate Process)

คล้ายกับกระบวนการโซดา แต่เติมโซเดียมซัลไฟด์ (Na_2S) เพื่อเป็นสารบัฟเฟอร์ ทำให้สามารถย่อยได้เมื่อมีค่าพีเอชต่ำ จึงลดความเสียหายต่อเยื่อ

2.7 น้ำดำ (Black liquor)

น้ำดำหรือน้ำยางดำเป็นของเสียที่ได้จากอุตสาหกรรมการผลิตเยื่อกระดาษ ดังรูปที่ 2.6 ในขั้นตอนการต้มเยื่อ เพื่อกำจัดลิกนินออกจากเส้นใยทำให้เยื่อมีความขาวขึ้น (พัชรินทร์ เพิ่มไพศาลสกุล, 2550) ซึ่งน้ำดำประกอบไปด้วยน้ำเป็นส่วนใหญ่ ที่เหลือเป็นของแข็ง ได้แก่ สารอินทรีย์ และ

รอนินทรีย์ที่มาจากคาร์บอนในน้ำดำ โดยสารอินทรีย์ที่ประกอบอยู่ในน้ำดำ เช่น ลิกนินที่ถูกย่อยสลาย เหมิเซลลูโลส และสารอนินทรีย์ เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ดังตารางที่ 2.4 นอกจากนี้ยังประกอบด้วยแคลเซียม (Ca) แมกนีเซียม (Mg) ซิลิกอน (Si) ในปริมาณเล็กน้อย เป็นต้น ดังตารางที่ 2.5 ที่แสดงธาตุพื้นฐานซึ่งขึ้นอยู่กับประเภท อายุ และฤดูกาลของไม้ โดยปกติแล้วน้ำดำจะมีสีน้ำตาลหรือดำ จึงเรียกว่าน้ำดำ ซึ่งมีพีเอช บีโอดี และของแข็งละลาย (TDS) สูง (Chao et al., 2007) ดังตารางที่ 2.6



รูปที่ 2.6 กระบวนการผลิตเยื่อกระดาษ (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2550)

ตารางที่ 2.4 องค์ประกอบของทางเคมีในน้ำดำจากกระบวนการโซดา (Annie, 2008)

องค์ประกอบ	ร้อยละ (โดยน้ำหนัก)
1. เหมิเซลลูโลสและเซลลูโลส	25-41
2. ลิกนิน	15-35

ตารางที่ 2.5 องค์ประกอบธาตุพื้นฐานของน้ำดำจากกระบวนการโซดา

วัตถุดิบ	แหล่งที่มา	องค์ประกอบทางเคมี (%mass per dry solids)							
		C	H	N	Na	K	S	Cl	Si
ฟางข้าว (Cardoso และ คณะ, 2009)	อเมริกาใต้	39.1	4.5	1.0	8.8	4.1	0.8	3.5	0.23
ไผ่ (Cardoso และ คณะ, 2009)	บราซิล	35.4	3.6	0.3	19.3	3.3	0.2	1.3	3.8
ฟางข้าว (Gea และคณะ, 2003)	สเปน	39.05	4.54	1.0	8.83	4.1	0.78	3.5	0.23
ยูคาลิปตัส (ไม้เนื้อแข็ง) (วารสารคัลกซ์ ฌ ศร, 2556)	SCG เปเปอร์	32.8	2.97	0.04	-	-	0.25	-	-

ตารางที่ 2.6 ลักษณะสมบัติทางเคมีและชีวเคมีของน้ำดำจากกระบวนการโซดา

พารามิเตอร์	ค่าที่ได้		
	A (Rastegarfar และคณะ, 2015)	B (Garg และคณะ, 2010)	C (El-Mekawiiและคณะ, 2011)
1. พีเอช	10.5	11.2	10.2
2. ซีโอดี (มก./ล)	70,150	700,000	151,200
3. บีโอดี (มก./ล)	20,383	140,000	39,900
4. ฟีนอล (มก./ล)	65	-	-
5. ของแข็งทั้งหมด (มก./ล)	200,694	724,000	93,700
6. ของแข็งละลาย (มก./ล)	180,234	-	-
7. ของแข็งแขวนลอย (มก./ล)	20,460	-	-
8. สี	น้ำตาลเข้ม	น้ำตาลเข้ม	น้ำตาลเข้ม

องค์ประกอบในน้ำดำที่สามารถส่งผลต่อการบำบัดผักตบชวาเบื้องต้น คือ สารเคมีในน้ำดำที่สามารถสลายโครงสร้างของผักตบชวา คือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยอยู่ในรูปของของแข็งละลาย (ตารางที่ 2.6) ทั้งนี้ความเข้มข้นของไอออนบวกและความเป็นพิษต่อจุลินทรีย์แสดงดังตารางที่ 2.9

2.7.1 ความเป็นพิษ

1. ความเป็นพิษต่อระบบนิเวศ

เมื่อนำไปทดสอบกับสิ่งมีชีวิตในน้ำ ได้แก่ ปลา ไรน้ำ และสาหร่าย มีค่าความเป็นพิษ ดังตารางที่ 2.7 เนื่องจากสิ่งมีชีวิตเหล่านี้สามารถมีชีวิตอยู่ได้ในช่วงพีเอช 6.5-8.5 แต่น้ำดำมีพีเอช 11 จึงต้องปรับพีเอชให้เป็นกลางก่อนนำมาทดสอบ นอกจากนี้ น้ำดำสามารถย่อยสลายร้อยละ 49.5 ในวันที่ 28 หากดูจากการละลายของสารอินทรีย์คาร์บอน (EPA, 2003)

ตารางที่ 2.7 ความเป็นพิษของน้ำดำต่อระบบนิเวศ

ชนิด	ความเป็นพิษ	ความเข้มข้นน้ำดำ (มก./ล)
ปลา	96 ชม. LL ₅₀	>1000
ไรน้ำ	48 ชม. EL ₅₀	>1000
สาหร่าย	72 ชม. NOEL _r	5

2. ความเป็นพิษต่อสุขภาพ

เนื่องจากพีเอชสูงจึงเป็นอันตรายต่อดวงตา ผิวหนัง และระบบทางเดินหายใจ ทำให้บริเวณที่ได้รับสัมผัสเกิดบาดแผล หรือเซลล์ตายได้ (Necrosis) ซึ่งค่าความเป็นพิษ (EPA, 2003) แสดงดังตารางที่ 2.8

ตารางที่ 2.8 ความเป็นพิษของน้ำดำต่อสุขภาพ

สาร	เส้นทางการได้รับสัมผัส	ความเป็นพิษ	ความเข้มข้นน้ำดำ
โซเดียมไฮดรอกไซด์	ทางเดินอาหาร	LDL ₀	500 มก./กก.
	ผิวหนัง	Standard draize test	500 มก./24 ชม.
	ตา	Standard draize test	1 มก./24 ชม.

หมายเหตุ LL₅₀ = lethal loading rate for 50% of experimental animals

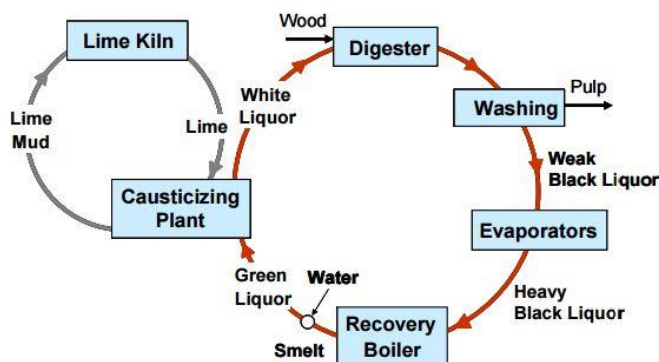
EL₅₀ = effective loading rate lethal to 50% of experimental animals

NOEL_r = No Observed Effect Loading Rate

LDL₀ = Lowest dose resulting in death

2.7.2 การกำจัด

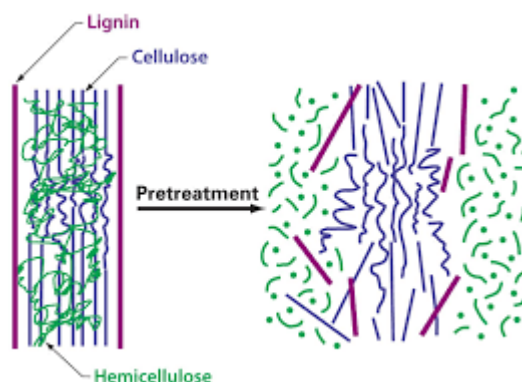
การกำจัดน้ำดำสามารถทำได้ผ่านการนำไปเผาเป็นเชื้อเพลิงที่หม้อไอน้ำนำความร้อนกลับคืน (Recovery Boiler) โดยการนำน้ำดำไประเหยน้ำออกที่หน่วยทำระเหย (Evaporator) ทำให้น้ำดำมีความเข้มข้นสูงมากขึ้นจากประมาณร้อยละ 15 ของของแข็งแห้ง (Dry solid) เป็นร้อยละ 80 ของของแข็งแห้ง ก่อนจะส่งไปเผาเป็นเชื้อเพลิงที่หม้อไอน้ำนำความร้อนกลับคืน ซึ่งการเผา น้ำดำในหม้อไอน้ำนำความร้อนกลับคืนภายใต้สภาวะความดัน อุณหภูมิที่เหมาะสม ทำให้ได้ไอน้ำแรงดันสูงที่สามารถนำไปผลิตกระแสไฟฟ้าได้ และเมื่อน้ำดำผ่านการเผาที่หม้อไอน้ำนำความร้อนกลับคืนแล้ว น้ำดำที่ได้จะมีสีค่อนข้างเขียวจึงเรียกว่า น้ำยางเขียว (green liquor) ต่อจากนั้นน้ำยางเขียวจะส่งต่อไปยัง causticizing plant ซึ่งจะมีการนำปูนขาว (CaO) มาทำปฏิกิริยากับน้ำยางเขียวได้เป็นน้ำยางขาว (white liquor) ที่พร้อมจะใช้ในการต้มเยื่ออีกครั้ง แต่ก่อนที่จะส่งไปใช้ในหม้อต้มจะต้องทำการแยกกากปูนขาวหรือแคลเซียมคาร์บอเนตออกก่อนโดยการตกตะกอนและการกรอง หลังจากนั้นจึงล้างกากปูนขาวและกำจัดน้ำออกก่อนจะส่งไปเผาที่เตาเผาปูน (Lime kiln) มีอุณหภูมิประมาณ 1,100-1,300 องศาเซลเซียสเพื่อผลิตปูนขาวกลับมาใช้อีกครั้ง (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2550) ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 การกำจัดน้ำดำโดยการนำกลับมาใช้ใหม่ (TAPPI, 2002)

2.8 การบำบัดเบื้องต้นเพื่อผลิตก๊าซชีวภาพ

การบำบัดเบื้องต้นด้วยวิธีต่างๆ มีวัตถุประสงค์เพื่อปรับสภาพโครงสร้างลิกโนเซลลูโลสให้แยกออกจากกัน ดังรูปที่ 2.8 ซึ่งเป็นการลดโครงสร้างผลึกของเซลลูโลส ระดับการเกิดโพลิเมอร์ลดลง (polymerization degree) การเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัส และการเพิ่มรูพรุน เป็นต้น ทำให้กระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์เกิดได้อย่างรวดเร็ว (Rodriquez และคณะ, 2016) โดยตัวอย่างการบำบัดเบื้องต้นมีดังนี้



รูปที่ 2.8 โครงสร้างลิกโนเซลลูโลสแยกออกจากกัน (Kumar และคณะ, 2009)

2.8.1 การบำบัดเบื้องต้นทางกายภาพ

เป็นการลดขนาดเพื่อลดอันดับการโพลีเมอร์และโครงสร้างผลึกของเซลลูโลส ทำให้พื้นที่ผิวเพิ่มขึ้น ทำให้อยู่สลายได้ง่ายยิ่งขึ้น ซึ่งการลดขนาดนี้ทำได้หลายวิธี เช่น การตัด การบด การโม่ เป็นต้น

2.8.2 การบำบัดเบื้องต้นทางเคมี

เป็นวิธีการบำบัดเบื้องต้นโดยใช้สารเคมี 2 ประเภท ได้แก่ สารละลายกรด และ สารละลายด่าง โดยการบำบัดเบื้องต้นด้วยสารละลายด่างมีผลต่อการสลายโครงสร้างเฮมิเซลลูโลส และลิกนินบางส่วน เป็นผลให้เฮมิเซลลูโลสและลิกนินบางส่วนสามารถละลายน้ำ แต่การบำบัดเบื้องต้นด้วยสารละลายกรดมีผลต่อการสลายโครงสร้างเฮมิเซลลูโลส การบำบัดเบื้องต้นโดยใช้สารเคมีมีรายละเอียดดังนี้

1. การบำบัดเบื้องต้นด้วยสารละลายกรด

การบำบัดเบื้องต้นโดยวิธีนี้ทำให้เกิดการสลายโครงสร้างของเฮมิเซลลูโลสโดยเอนไซม์จะเข้าทำปฏิกิริยากับเซลลูโลสได้ง่ายขึ้น แต่วิธีนี้มีข้อเสียคือ การเกิดสารประกอบที่เป็นพิษต่อจุลินทรีย์ เช่น เฟอร์ฟูรอล และเอชเอ็มเอฟ (HMF; hydroxymethyl furfural) โดยสารเคมีที่ใช้ในการบำบัดเบื้องต้นด้วยสารละลายกรด ได้แก่ กรดซัลฟิวริก กรดไนตริก และจะส่งผลต่อการย่อยสลายแบบไร้อากาศเพื่อผลิตก๊าซชีวภาพ กรดที่ใช้สามารถทำให้เกิดซัลเฟตและไนเตรทได้ และอาจเป็นผลให้สัดส่วนก๊าซมีเทนไม่เกิดหรือเกิดน้อย (Hendriks และ Zeeman, 2009)

2. การบำบัดเบื้องต้นด้วยสารละลายด่าง

การบำบัดเบื้องต้นโดยวิธีนี้ทำให้เกิดปฏิกิริยาซาปูนู (Saponification) และเกิดการสลายพันธะระหว่างลิกนินและคาร์โบไฮเดรต เป็นผลให้เกิดการลดลงของอันดับโพลีเมอร์และ

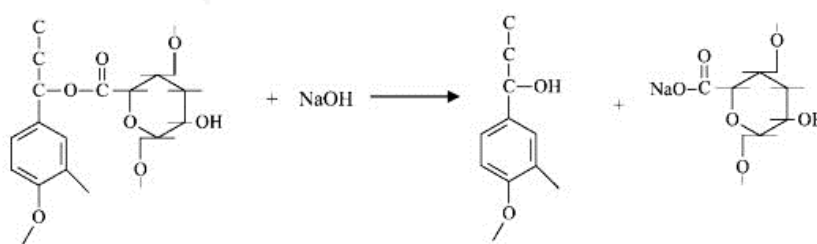
โครงสร้างผลึกของเซลลูโลส ซึ่งทำให้เอนไซม์เข้าทำปฏิกิริยาได้ง่ายขึ้น นอกจากนี้ยังช่วยรักษาความเป็นกรดต่างในขั้นตอนการหมักกรด โดยสารเคมีที่ใช้ในการบำบัดเบื้องต้นด้วยสารละลายต่าง ได้แก่ โซเดียมไฮดรอกไซด์ แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (Taherzadeh และ Karimi, 2008)

2.9 ปฏิบัติการบำบัดเบื้องต้นด้วยต่าง

ผลที่เกิดจากการบำบัดเบื้องต้นด้วยต่างที่สำคัญ คือ การสลายโครงสร้างเอมิเซลลูโลสและลิกนินบางส่วน เป็นผลทำให้การย่อยสลายเซลลูโลสเกิดได้ง่ายขึ้น ซึ่งช่วยเพิ่มความสามารถในการย่อยสลายลิกโนเซลลูโลส โดยที่การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมี เกิดขึ้นดังนี้

2.9.1 โครงสร้างลิกนิน-คาร์โบไฮเดรตเชิงซ้อน (Lignin-carbohydrate complexes)

ผนังเซลล์พืชลิกนินเชื่อมต่อกับคาร์โบไฮเดรต (เซลลูโลสและเอมิเซลลูโลส) ด้วยพันธะเคมี ดังเช่น พันธะอัลฟาอีเทอร์ พันธะเอสเทอร์ พันธะเชื่อมฟีนิลไกลโคซิดิก (phenyl glycosidic linkages) พันธะเชื่อมอะซีทัล (acetal linkages) เมื่อบำบัดเบื้องต้นด้วยต่างจะทำให้พันธะเอสเทอร์ขยายออกและจะเปลี่ยนรูปไปในที่สุด แสดงว่า เกิดปฏิกิริยาสะปอนนิฟิเคชัน (saponification reaction) ในระหว่างการบำบัดเบื้องต้น ดังรูปที่ 2.9 ส่งผลให้ทำลายการเชื่อมของพันธะเอสเทอร์ระหว่างลิกนินและคาร์โบไฮเดรต ทำให้จุลินทรีย์สามารถย่อยสลายเซลลูโลสที่ถูกห่อหุ้มด้วยลิกนินได้ (He และคณะ, 2008)

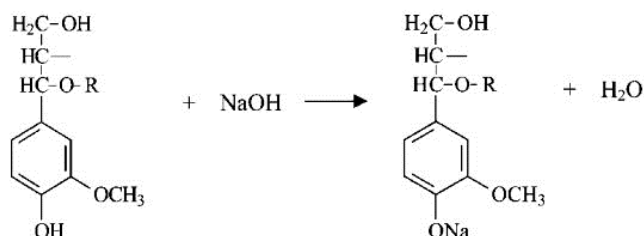


รูปที่ 2.9 ลิกนิน-คาร์โบไฮเดรตเชิงซ้อนจากการบำบัดเบื้องต้นด้วยต่าง (He และคณะ, 2008)

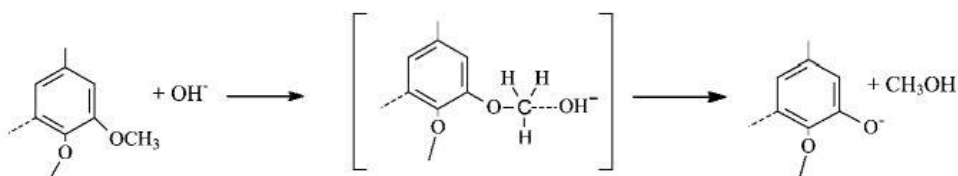
2.9.2 ลิกนิน

ในระหว่างการปรับสภาพด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ทำให้โซ่ข้างของลิกนินขาดออกและเปลี่ยนรูปหลังจากการปรับสภาพด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์เนื่องจากปฏิกิริยาของฟีนอลไฮดรอกซิลกับโซเดียมไฮดรอกไซด์ ดังรูปที่ 2.10 และการเกิดปฏิกิริยานิวคลีโอไฟล์ (nucleophilic reaction)

ของเมทอกซิล (methoxy) กับโซเดียมไฮดรอกไซด์ ทำให้เปลี่ยนแปลงหมู่ฟังก์ชันของลิกนิน ซึ่งจะส่งผลให้สามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้ง่ายขึ้น (He และคณะ, 2008) ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.10 ปฏิกิริยาการปรับสภาพลิกนินด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ (He และคณะ, 2008)



รูปที่ 2.11 การแยกเมทอกซิลจากโครงสร้างลิกนิน (He และคณะ, 2008)

2.9.3 เซลลูโลส

หลังการปรับสภาพด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ พันธะไฮโดรเจนบางส่วนของเซลลูโลส ถูกทำลาย นอกจากนี้เมทิลและเมทิลีนของเซลลูโลสมีการแตกออก ทำให้เอนไซม์เข้าทำปฏิกิริยาได้ง่ายขึ้น แสดงว่าโซเดียมไฮดรอกไซด์สามารถทำให้พันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลแตกออกได้ ซึ่งจะนำไปสู่การย่อยสลายเซลลูโลส และทำให้จุลินทรีย์สามารถย่อยสลายเซลลูโลสได้ง่ายขึ้น ส่งผลให้ความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพเพิ่มขึ้น (He และคณะ, 2008)

2.9.4 เฮมิเซลลูโลส

หลังจากการปรับสภาพด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์มีการแตกตัวและการแตกออกของพันธะไฮโดรเจนเป็นผลให้หมู่คาร์บอนิลละลายน้ำ และไซเลน เช่น กลูคูโรนออกซิเลน และอะราบิโนมีปริมาณลดลง นอกจากนี้พันธะไกลโคไซด์เบตาระหว่างหมู่น้ำตาลลดลง แสดงให้เห็นว่าพันธะเชื่อมระหว่างหมู่น้ำตาลถูกเปลี่ยนแปลงและมีการย่อยสลายระหว่างโมเลกุลเกิดขึ้นในโครงสร้างเฮมิเซลลูโลส (He และคณะ, 2008) แต่อย่างไรก็ตามเฮมิเซลลูโลสมีมวลโมเลกุลต่ำกว่าเซลลูโลสและลิกนิน และมีโครงสร้างที่ละลายน้ำจึงสามารถถูกย่อยสลายได้ง่ายกว่าลิกนินและเซลลูโลส (Galbe และ Zacchi, 2012; Hendriks และ Zeeman, 2009)

2.10 กระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในระบบไร้อากาศ

กระบวนการย่อยสลายในระบบไร้อากาศเพื่อผลิตก๊าซชีวภาพเป็นการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไม่มีออกซิเจน โดยสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ขั้นตอน (กรมควบคุมมลพิษ, 2546) แสดงดังรูปที่ 2.12 และมีขั้นตอนดังนี้

2.10.1 การย่อยสลายสารอินทรีย์ (Hydrolysis)

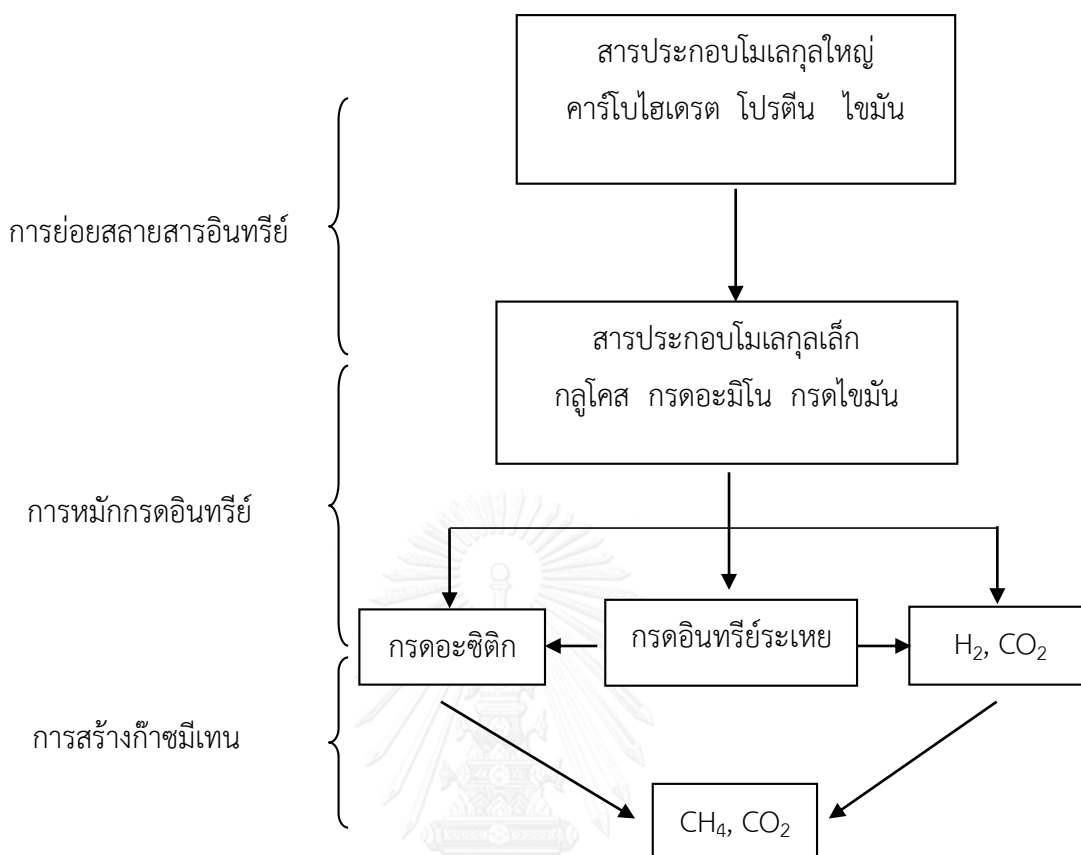
เป็นปฏิกิริยาที่ย่อยสลายสารประกอบโมเลกุลใหญ่ เช่น คาร์โบไฮเดรต โปรตีน และไขมันให้เป็นสารประกอบโมเลกุลเล็ก เช่น น้ำตาลกลูโคส กรดอะมิโน กรดไขมัน และกลีเซอรอล เพื่อให้ง่ายต่อการลำเลียงเข้าสู่เยื่อเซลล์ โดยเอนไซม์ของจุลินทรีย์พวกไฮโดรไลติกแบคทีเรีย (hydrolytic bacteria)

2.10.2 การสร้างกรดอินทรีย์ระเหย (Acidogenesis) และการเปลี่ยนกรดไขมันระเหยเป็นกรดอะซิติก (Acetogenesis)

สารอินทรีย์โมเลกุลเดี่ยว และละลายน้ำได้ในขั้นตอนการย่อยสลายสารอินทรีย์จะถูกเปลี่ยนเป็นกรดอินทรีย์ระเหย ได้แก่ กรดอะซิติก (acetic acid) กรดฟอร์มิก (formic acid) กรดโพรพิโอนิก (propionic acid) กรดบิวทีริก (butyric acid) กรดไอโซบิวทีริก (isobutyric acid) กรดวาเลอริก (valeric acid) และกรดไอโซวาเลอริก (isovaleric acid) เป็นต้น โดยจุลินทรีย์กลุ่มสร้างกรด (Acidogenic bacteria) นอกจากนี้ยังได้แอลกอฮอล์ ก๊าซไฮโดรเจน และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ต่อมากรดอินทรีย์ระเหยจะถูกเปลี่ยนเป็นอะซิเตต (acetate) ฟอร์มेट (formate) ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และก๊าซไฮโดรเจน โดยจุลินทรีย์กลุ่มอะซิเตเจนิก (acetogenic bacteria)

2.10.3 การสร้างก๊าซมีเทน (Methanogenesis)

เป็นขั้นตอนที่กรดอะซิติก กรดฟอร์มิก ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และก๊าซไฮโดรเจนจากขั้นตอนข้างต้น จะถูกนำไปใช้ในการสร้างก๊าซมีเทน โดยจุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทน (methanogen) ซึ่งจุลินทรีย์กลุ่มนี้สามารถดำรงอยู่ได้ภายใต้สภาวะไร้อากาศเท่านั้นและทนต่อการเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อมได้ต่ำกว่าจุลินทรีย์กลุ่มสร้างกรด



รูปที่ 2.12 การย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้อากาศ (InTech, 2011)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.11 ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในระบบไร้อากาศ

ในกระบวนการย่อยสลายในระบบไร้อากาศต้องอาศัยจุลินทรีย์หลายกลุ่มทำงานร่วมกัน ซึ่งจุลินทรีย์แต่ละกลุ่มต้องการสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกัน โดยเฉพาะจุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทนมีความอ่อนไหวต่อสภาพแวดล้อม สามารถเจริญเติบโตได้ในเฉพาะสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมเท่านั้น ดังนั้นจึงต้องคำนึงถึงปัจจัยต่างๆ ในการเดินระบบไร้อากาศ ดังนี้

2.11.1 ความเป็นกรดต่าง (pH)

ความเป็นกรดต่างที่เหมาะสมต่อจุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทนอยู่ในช่วง 6.5-7.6 (Rittmann และ McCarty, 2000) ซึ่งค่าความเป็นกรดต่างนี้สามารถบ่งบอกถึงเสถียรภาพของระบบไร้อากาศได้ เช่น มีค่าเป็นกรด แสดงว่าในระบบอาจมีการสะสมของกรดอินทรีย์ระเหยส่งผลให้ไปยับยั้งการทำงานของจุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทนได้

2.11.2 กรดอินทรีย์ระเหยและความเป็นต่าง (volatile fatty acid and alkalinity)

ความเป็นต่าง คือความสามารถในการสะเทินกรด มีความสำคัญมากในกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศ เนื่องจากใช้ในการควบคุมค่าความเป็นกรดต่างของระบบให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสม โดยที่สภาพต่างที่เหมาะสมควรมีค่าอยู่ในช่วง 1,000 - 5,000 มิลลิกรัมต่อลิตรแคลเซียมคาร์บอเนต (Rittmann และ McCarty, 2000)

โดยปกติกรดอินทรีย์ระเหย (VFA) ควรมีค่าประมาณ 20-200 มิลลิกรัมต่อลิตรกรดอะซิติก หากมีกรดอินทรีย์ระเหยสะสมจนมีค่ามากกว่าระดับดังกล่าว แสดงว่า ระบบมีจุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทนน้อยเกินไป หรือจุลินทรีย์กลุ่มสร้างกรดผลิตกรดไขมันระเหยได้เร็วเกินไป กรดอินทรีย์ระเหยที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจะเป็นสัญญาณว่าระบบกำลังเสียสมดุลเนื่องจากค่าความเป็นกรดต่างลดลงจนไม่อยู่ในช่วงที่เหมาะสม นอกจากนี้ยังต้องพิจารณาสัดส่วนของกรดอินทรีย์ระเหยในรูปกรดอะซิติกต่อความเป็นต่าง (VFA:alk) หากมีค่าน้อยกว่า 0.4 แสดงว่าระบบยังทำงานได้ดี แต่หากมากกว่า 0.8 แสดงว่าระบบมีบัฟเฟอร์ต่ำ ควรทำการแก้ไขเช่นนั้นอาจทำให้ระบบล้มเหลวได้ (กรมควบคุมมลพิษ, 2546)

2.11.3 อุณหภูมิ (temperature)

ช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในกระบวนการไร้อากาศมีอยู่ 2 ช่วง คือ

- ช่วง 8 – 45 องศาเซลเซียส เรียกว่า เมโซฟิลิก (mesophilic)
- ช่วง 40-70 องศาเซลเซียส เรียกว่า เทอร์โมฟิลิก (thermophilic)

โดยปกติเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น อัตราการเกิดปฏิกิริยาและการทำงานของเอนไซม์ภายในเซลล์จะเพิ่มขึ้น ทำให้อัตราการเจริญเติบโตเพิ่มขึ้น หากอุณหภูมิสูงเกินกว่าที่จุลินทรีย์ทำงานได้จะทำให้โปรตีน กรดนิวคลีอิก และส่วนประกอบของเซลล์หลายๆ ส่วนถูกทำลายจนไม่สามารถกลับคืนสภาพได้ ดังนั้นการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิจึงเป็นการเพิ่มอัตราการเจริญเติบโตและการทำงานของเซลล์ได้จนถึงอุณหภูมิหนึ่ง และเมื่ออุณหภูมิสูงกว่านั้นจะทำให้การทำงานและการเจริญเติบโตลดลงเป็นศูนย์อย่างรวดเร็ว สำหรับช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมในภูมิอากาศเขตร้อนแบบประเทศไทยคือช่วงอุณหภูมิ 25-37 องศาเซลเซียส (mesophilic temperature) (กรมควบคุมมลพิษ, 2546)

2.11.4 ปริมาณออกซิเจน

ออกซิเจนจะเป็นพิษอย่างมากต่อระบบไร้อากาศแม้จะมีปริมาณเพียงเล็กน้อย เพราะจะทำให้เกิดการแตกตัวของโมเลกุลเอนไซม์ในตัวจุลินทรีย์ของระบบไร้อากาศ และทำให้เกิดการยับยั้งกระบวนการผลิตมีเทนได้ (กรมควบคุมมลพิษ, 2546)

2.11.5 สารอาหาร (nutrient)

เนื่องจากปริมาณเซลล์ของจุลินทรีย์ที่สร้างขึ้นมากในกระบวนการไม่ใช้ออกซิเจนจะน้อยกว่าแบบใช้ออกซิเจน ซึ่งจากอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนต่อฟอสฟอรัสต่อซัลเฟอร์ (C:N:P:S) ในเซลล์มีค่าประมาณ 100:10:1:1 ดังนั้นจึงจำเป็นต้องรักษาอัตราส่วนนี้ไว้ไม่น้อยไปกว่านี้ ทำให้จุลินทรีย์ต้องการอาหารเสริมนอกเหนือจากคาร์บอน เช่น ไนโตรเจนและฟอสฟอรัส ซึ่งมีอัตราส่วนระหว่าง บีโอดีต่อไนโตรเจนต่อฟอสฟอรัส (BOD:N:P) อย่างน้อยควรมีค่าเท่ากับ 100:1:0.2 (Metcalf และ Eddy, 2003) และยังมีธาตุอาหารบางอย่างที่จุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทนต้องการในปริมาณน้อยแต่ขาดไม่ได้ คือ เหล็ก โคบอลต์ นิกเกิล และซัลเฟอร์ นอกจากนี้อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N ration) มีความสำคัญต่อจุลินทรีย์ในกระบวนการย่อยสลายในระบบไร้อากาศ โดยค่าสัดส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N) ที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 20:1 – 30:1 (Verma, 2002) หากมีสัดส่วน C/N ต่ำ ทำให้เกิดการสะสมของแอมโมเนียซึ่งเป็นพิษต่อจุลินทรีย์ และสัดส่วน C/N สูงส่งผลให้ไนโตรเจนไม่เพียงพอต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์

2.11.6 การหมักร่วม (Co-digestion)

เป็นการนำสารตั้งต้นชนิดอื่นมาหมักร่วมเพื่อปรับปรุงให้สารอาหารมีค่าอยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อจุลินทรีย์ในระบบไร้อากาศ เช่น การหมักร่วมของขยะประเภทกระดาษและสาหร่ายสามารถผลิตก๊าซมีเทนได้สูงขึ้น เนื่องจากสาหร่ายมีไนโตรเจนสูงแต่กระดาษมีไนโตรเจนต่ำส่งผลให้ค่าสัดส่วน C/N อยู่ในช่วงที่เหมาะสม (Ajeer และคณะ, 2015) และการหมักร่วมของกากมันสำปะหลังและมูลหมูสามารถผลิตก๊าซมีเทนได้สูงขึ้นเมื่อใช้สัดส่วน C/N ที่เหมาะสม (Panichnumsin และคณะ, 2010)

2.11.7 สารพิษ

การมีไอออนบวก (cations) เช่น โซเดียม แคลเซียม แมกนีเซียม ซัลเฟอร์ หรือโลหะหนักบางชนิด เช่น สังกะสี ทองแดง นิกเกิล อยู่ในระบบไร้อากาศในปริมาณน้อยจะมีส่วนช่วยในการเจริญเติบโต และกระตุ้นการทำงานของจุลินทรีย์ในระบบไร้อากาศ แต่ถ้ามีไอออนพวกโลหะหนัก ยาฆ่าแมลง หรือสารพิษชนิดอื่นภายในระบบไร้อากาศมีความเข้มข้นมากจะเป็นพิษต่อจุลินทรีย์ภายในระบบโดยเฉพาะจุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทน และมีผลยับยั้งการทำงานของจุลินทรีย์กลุ่มต่างๆ ภายในระบบ ดังแสดงในตารางที่ 2.9

ตารางที่ 2.9 ความเข้มข้นของไอออนบวกที่เหมาะสมและความเป็นพิษต่อจุลินทรีย์ในระบบไร้อากาศ (Speece, 1996)

ไอออน	ความเข้มข้น (มิลลิกรัม/ลิตร)		
	เหมาะสม	พิษปานกลาง	พิษฉับพลัน
Na ⁺	100-200	3,500-5,500	8,000
K ⁺	200-400	2,500-4,500	12,000
Ca ²⁺	100-200	2,500-4500	8,000
Mg ²⁺	75-150	1,000-1,500	3,000
NH ⁴⁺		1,500-3,000	3,000
S ²⁻		200	200
Cu ²⁺			0.5
Cr ⁶⁺			3.0
Cr ³⁺			-
Ni ²⁺			2.0
Zn ²⁺			1.0

2.12 ศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนโดยวิธีบีเอ็มพี (BMP ; Biochemical Methane Potential)

วิธีบีเอ็มพีเป็นการศึกษาก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายทางชีวภาพของสารตั้งต้นที่สนใจศึกษา ซึ่งเป็นวิธีที่ง่าย ราคาไม่แพง และสามารถทำซ้ำเพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของการย่อยสลายและศักยภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพของสารตั้งต้นที่แตกต่างกันได้ เพื่อนำไปใช้ในการออกแบบและเดินระบบไร้อากาศต่อไป (Moody และคณะ, 2009)

วิธีบีเอ็มพีสามารถทำได้โดยการนำสารต้นต้นผสมเชื้อจุลินทรีย์ใส่ลงในขวดแก้ว และใส่ก๊าซออกซิเจนออกให้หมดจึงปิดฝาขวดและนำไปเก็บไว้ในที่มืด และวัดปริมาณก๊าซชีวภาพและก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้น ซึ่งมีหน่วย คือ ปริมาตรของก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นทั้งหมดต่อกรัมของแข็งระเหยที่ใส่เข้าระบบ และสามารถคำนวณค่าบีเอ็มพี แสดงดังสมการ (Bank, 2007)

$$\text{บีเอ็มพี} = \frac{\text{ปริมาตรของก๊าซมีเทนชุดทดลอง (ลิตร)} - \text{ปริมาตรของก๊าซมีเทนชุดควบคุม (ลิตร)}}{\text{ปริมาณของแข็งระเหยที่ใส่เข้าระบบ (กรัม)}}$$

2.13 การหมักไร้อากาศแบบขั้นตอนเดียว (Single stage digester)

เป็นระบบการหมักที่มีถังปฏิกรณ์เพียงถังเดียว ทำให้จุลินทรีย์ทุกสายพันธุ์ต้องอยู่ร่วมกันในระบบและการทำงานของจุลินทรีย์แต่ละกลุ่มจะต้องสัมพันธ์กัน ซึ่งการหมักแบบขั้นตอนเดียวนี้นี้เป็นที่แพร่หลายในระดับอุตสาหกรรม เนื่องจากมีต้นทุนต่ำ สำหรับการหมักไร้อากาศแบบขั้นตอนเดียวสามารถแบ่งออกเป็น 2 ระบบ (Nazami และคณะ, 2009) ได้แก่

2.13.1 ระบบหมักแบบไร้อากาศขั้นตอนเดียวแบบเปียก

ระบบนี้มีค่าความเข้มข้นของของแข็งทั้งหมดในระบบต่ำกว่าร้อยละ 15 จึงทำให้สารอินทรีย์ที่เข้าระบบและภายในถังมีลักษณะสภาพเหลวจนถึงขั้น รูปแบบถังที่นิยมใช้เป็นแบบกวนสมบูรณ์ ปัญหาที่สำคัญของระบบนี้ คือ มีการแยกชั้นของสารอินทรีย์ในถังปฏิกรณ์ นอกจากนี้ระบบยังมีแนวโน้มที่จะเกิดการไหลลัดวงจรเป็นผลให้การรับภาระบรรทุกสารอินทรีย์ของระบบมีประสิทธิภาพต่ำลง และการเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของระบบไร้อากาศแบบขั้นตอนเดียวแบบเปียกนี้แสดงดังตารางที่ 2.10

2.13.2 ระบบหมักแบบไร้อากาศขั้นตอนเดียวแบบแห้ง

ระบบนี้มีค่าความเข้มข้นของของแข็งทั้งหมดที่เข้าระบบอยู่ระหว่างร้อยละ 15-40 ทำให้ความเข้มข้นของของแข็งสูง และสารอินทรีย์ที่เข้าระบบมีลักษณะค่อนข้างแห้ง จึงต้องมีการหมุนเวียนน้ำในระบบ เพื่อเพิ่มปริมาณก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้ นอกจากนี้ ระบบถังที่มีการไหลแบบต่อเนื่อง (plug flow) มีความเหมาะสมสำหรับลักษณะสารอินทรีย์ที่ค่อนข้างข้น ซึ่งการเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของระบบไร้อากาศแบบขั้นตอนเดียวแบบเปียกนี้แสดงดังตารางที่ 2.10

ตารางที่ 2.10 การเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของระบบหมักแบบไร้อากาศขั้นตอนเดียวแบบเปียกและแบบแห้ง (Nazami และคณะ, 2009)

ระบบ	ข้อดี	ข้อเสีย
ระบบหมักแบบไร้อากาศขั้นตอนเดียวแบบเปียก	1. เครื่องจักรที่ใช้ในระบบมีต้นทุนต่ำ	1. เกิดการแยกชั้นของสารอินทรีย์ภายในถังปฏิกรณ์ 2. สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายในการกำจัดฟองที่เกิดจากการแยกชั้น 3. เกิดปัญหาการไหลลัดวงจรภายในถังปฏิกรณ์

ตารางที่ 2.10 การเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของระบบหมักแบบไร้อากาศขั้นตอนเดียวแบบเปียกและแบบแห้ง (ต่อ) (Nazami และคณะ, 2009)

ระบบ	ข้อดี	ข้อเสีย
ระบบหมักแบบไร้อากาศขั้นตอนเดียวแบบเปียก	1. เครื่องจักรที่ใช้ในระบบมีต้นทุนต่ำ	4. เกิดปัญหาต่อระบบการกวนและสร้างความเสียหายต่อเครื่องจักรและอุปกรณ์ในการกวน 5. ใช้น้ำปริมาณมากเพื่อผสมสารอินทรีย์ก่อนเข้าระบบ
ระบบหมักแบบไร้อากาศขั้นตอนเดียวแบบแห้ง	1. รับภาระบรรทุกสารอินทรีย์ได้สูงและคงที่ตลอดการเดินระบบ 2. ประสิทธิภาพการลดของแข็งระเหยของระบบสูง	1. การกวนผสมค่อนข้างยาก และสารอินทรีย์ในระบบมีลักษณะค่อนข้างแห้ง จึงต้องมีการหมุนเวียนน้ำภายในระบบ

2.14 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.14.1 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการบำบัดเบื้องต้นทางกายภาพโดยการลดขนาด

Mshandete และคณะ (2006) ศึกษาผลของขนาดใยป่านศรนารายณ์ (sisal fibre waste) ต่อการผลิตก๊าซชีวภาพโดยขนาดที่ทำการศึกษามีได้แก่ 2 5 10 30 50 70 และ 100 มิลลิเมตร และใช้ตะกอนจากบ่อปรับเสถียรที่มีต้นป่านศรนารายณ์เป็นหัวเชื้อ ผสมกันในอัตราส่วนวัตถุแห้ง (dry matter) ต่อหัวเชื้อเท่ากับ 2.8 (ใยป่านศรนารายณ์ 15 กรัมและหัวเชื้อ 585 มิลลิลิตร) ทำการทดลองที่อุณหภูมิห้อง พบว่า ใยป่านศรนารายณ์ที่มีขนาด 2 มิลลิเมตรมีปริมาณก๊าซมีเทนสูงที่สุดเท่ากับ 0.22 ลูกบาศก์เมตรต่อกิโลกรัมของแข็งระเหยและปริมาณก๊าซมีเทนที่ได้จะลดลงตามขนาดที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าขนาด 2 มิลลิเมตรมีอัตราการผลิตก๊าซมีเทนเพิ่มขึ้น 23% เมื่อเปรียบเทียบกับใยป่านศรนารายณ์ที่ไม่ได้ลดขนาดซึ่งมีก๊าซมีเทน 0.18 ลูกบาศก์เมตรต่อกิโลกรัมของแข็งระเหย แสดงให้เห็นว่าชีวมวลที่มีขนาดเล็กจะสามารถผลิตก๊าซมีเทนได้สูงและลดลงเมื่อมีขนาดเพิ่มขึ้น

Hajji และ Rhachi (2013) ศึกษาผลของขนาดขยะชุมชนต่อการย่อยสลายในระบบไร้อากาศ โดยขนาดที่ทำการศึกษามีได้แก่ 10 20 30 และ 100 มิลลิเมตร ในถังหมักขนาด 14 ลิตร ภายใต้สภาวะ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 21 วัน พบว่า ตลอดการทดลองขนาด 10 มิลลิเมตรมีปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมสูงสุด โดยมีค่าสูงกว่าขนาด 100 มิลลิเมตร 20 เปอร์เซ็นต์

มาลินี ศรีอริยนันท์ (2555) ศึกษากระบวนการปรับสภาพมวลชีวภาพเบื้องต้นของ ผักตบชวาในการย่อยสลายแบบไร้อากาศ เพื่อเพิ่มอัตราการไฮโดรไลซิสของมวลชีวภาพโดยการศึกษา ขนาดของผักตบชวาที่เหมาะสม ซึ่งขนาดที่ทำการศึกษา ได้แก่ 2-3 7-8 12-13 และ 17-18 มิลลิเมตร พบว่า ชีวมวลขนาด 2-3 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นขนาดที่เล็กที่สุดในช่วงของการทดลอง จะสามารถผลิตน้ำตาลรีดิวซ์ได้มากที่สุด เมื่อเทียบกับช่วงขนาดอื่นที่มีขนาดใหญ่กว่า และเมื่อขนาด ใหญ่ขึ้นก็จะผลิตน้ำตาลรีดิวซ์ได้น้อยลงตามลำดับ เนื่องจากน้ำตาลรีดิวซ์ซึ่งเป็นสารตั้งต้นในการผลิต ก๊าซชีวภาพ

2.14.2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการบำบัดเบื้องต้นทางเคมี

Zhu และคณะ (2010) ศึกษาการบำบัดเบื้องต้นของซังข้าวโพดด้วยต่าง โดยความ เข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับร้อยละ 1 2.5 5 และ 7.5 (โดยน้ำหนัก) ตามลำดับ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง พบว่า การบำบัดเบื้องต้นซังข้าวโพดโดยโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 5 มี ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมสูงสุด 0.372 ลิตร/กรัมของแข็งระเหยซึ่งสูงกว่าซังข้าวโพดที่ไม่ผ่านการ บำบัดเบื้องต้นร้อยละ 37 แต่การบำบัดเบื้องต้นโดยโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 7.5 ทำให้การเกิดและการสะสมของกรดอินทรีย์ระเหยในขั้นตอนการย่อยสลายสารอินทรีย์และการหมักกรด เป็นผลให้เกิดการยับยั้งการทำงานของจุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทน

Xu และคณะ (2012) ได้ศึกษาการเปลี่ยนชีวมวลเป็นน้ำตาลโดยการบำบัดเบื้องต้น เปลือกข้าวโพดด้วยน้ำดำที่ได้จากการการบำบัดเบื้องต้นหญ้าสวิตซ์ โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 2 (น้ำหนัก/ปริมาตร) เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง (21 องศาเซลเซียส) นำมารองด้วยกระดาษ กรอง จากนั้นนำน้ำดำที่ได้มาใช้ในการบำบัดเบื้องต้นเปลือกข้าวโพดต่อไป และเปรียบเทียบกับ การบำบัดเบื้องต้นด้วยน้ำปราศจากไอออน (deionized water; DI) โซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 1 และ 2 ตามลำดับ โดยใช้เวลาในการบำบัดเบื้องต้น 3 6 12 24 และ 48 ชั่วโมง ผลการศึกษาพบว่า เปลือกข้าวโพดที่บำบัดเบื้องต้นด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 1 โซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 2 และ น้ำดำ มีปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์สูงสุดเท่ากับ 488.3 432.2 และ 478.5 มิลลิกรัม/กรัมชีวมวล เมื่อใช้ เวลาในการบำบัดเบื้องต้น 24 12 และ 24 ชั่วโมง ตามลำดับ

มาลินี ศรีอริยนันท์ (2555) ศึกษากระบวนการบำบัดเบื้องต้นของผักตบชวาด้วย สารละลายกรดไฮโดรคลอริกและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 0.5 1.0 1.5 2.0 และ 2.5 (น้ำหนัก/ปริมาตร) พบว่า ประสิทธิภาพของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์สูงกว่า สารละลายกรดไฮโดรคลอริกที่ความเข้มข้นเดียวกัน แสดงว่าโซเดียมไฮดรอกไซด์มีความเหมาะสมใน การบำบัดเบื้องต้นผักตบชวามากกว่าสารละลายกรดไฮโดรคลอริก

2.14.3 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการหมักร่วม (co-digestion)

Uzodinma และ Ofoefule (2009) ศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วมของหญ้ากินนีและมูลสัตว์ ได้แก่ มูลโค มูลไก่ มูลสุกร และมูลกระต่าย ในสัดส่วน 1:1 (ของแข็งระเหย) ในถังปฏิกรณ์แบบแบตช์ขนาด 50 ลิตร เป็นเวลา 30 วัน ที่อุณหภูมิ 26-32.8 องศาเซลเซียส พบว่าหญ้ากินนีผสมมูลกระต่าย มูลโค มูลสุกร และมูลไก่มีปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมเท่ากับ 7.73 7.53 5.66 5.07 ลิตร/ของแข็งรวม ในขณะที่การหมักหญ้ากินนีเพียงอย่างเดียวมีปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมเท่ากับ 2.46 ลิตร/ของแข็งรวม เนื่องจากหญ้ากินนีมีปริมาณคาร์บอนสูงแต่มีปริมาณไนโตรเจนต่ำเป็นผลให้สัดส่วน C/N มีค่าสูง ดังนั้น การนำหญ้ากินนีหมักร่วมกับมูลสัตว์เป็นการเพิ่มปริมาณไนโตรเจนเป็นผลให้สัดส่วน C/N มีค่าอยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ

Ahn และคณะ (2010) ศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วมของหญ้าสวิตช์กราส (switch grass) และมูลสัตว์ ได้แก่ มูลสุกร มูลไก่ และมูลโค โดยย่อยสลายในถังปฏิกรณ์ไร้อากาศขั้นตอนเดียวแบบแห้ง (ของแข็งทั้งหมดร้อยละ 15) ขนาด 1 ลิตร ที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 62 วัน พบว่า การหมักร่วมของหญ้าสวิตช์กราสและมูลสุกรมีปริมาณก๊าซมีเทนสะสมสูงสุดเท่ากับ 0.337 ลิตร/กรัมของแข็งระเหย ในขณะที่ปริมาณก๊าซมีเทนสะสมของหญ้าสวิตช์ผสมมูลไก่และมูลโคเท่ากับ 0.002 และ 0.028 ลิตร/กรัมของแข็งระเหย ตามลำดับ เนื่องจากการหมักร่วมของหญ้าสวิตช์กราสและมูลสุกรสามารถเพิ่มค่าอัตราส่วน C/N ให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ

Yong และคณะ (2015) ศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วมของฟางข้าวและเศษอาหารด้วยวิธีบีเอ็มพี ในขวดซีรัมขนาด 1 ลิตร ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส และเขย่า 50 รอบ/นาที โดยมีสัดส่วนเศษอาหาร:ฟางข้าว (กรัมของแข็งระเหย) เท่ากับ 5:0 0:5 1:4 1:1 3:2 4:1 5:1 6:1 7:1 และ 8:1 ตามลำดับ พบว่า สัดส่วนเศษอาหารและฟางข้าวเท่ากับ 5:1 สามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้สูงสุด 0.392 ลิตร/กรัมของแข็งระเหย เนื่องจากสัดส่วน C/N ของฟางข้าวมีค่าสูงกว่าช่วงที่เหมาะสมต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ จึงนำเศษอาหารมาหมักร่วมเพื่อให้สัดส่วน C/N มีค่าที่เหมาะสม

2.14.4 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการผลิตก๊าซชีวภาพด้วยถังปฏิกรณ์ไร้อากาศแบบขั้นตอนเดียว

O'Sullivan และคณะ (2010) ศึกษาการย่อยสลายแบบไร้อากาศของวัชพืชชนิด 3 ชนิด ได้แก่ ผักตบชวา บัวสาหร่าย (cabomba) และจอกหูหนูยักษ์ (salvinia) ร่วมกับมูลโค ซึ่งทำการทดลองในระดับภาคสนาม (pilot-scale) โดยการย่อยสลายแบบทีละเท (batch) พบว่า

ผักตบชวา บัวสาหร่าย และจอกหูหนูยักษ์ผลิตก๊าซชีวภาพ 0.267 0.221 0.155 ลิตรต่อกรัม ของแข็งระเหย ตามลำดับ ซึ่งมีปริมาณก๊าซมีเทน 0.140 0.109 และ 0.084 ลิตรต่อกรัมของแข็ง ระเหย ตามลำดับ และมีค่าคงที่ของการย่อยสลายเท่ากับ 0.052 0.050 และ 0.047 วัน⁻¹ ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าผักตบชวามีร่วมกับมูลวัวสามารถผลิตก๊าซชีวภาพ ก๊าซมีเทน และมีการย่อยสลาย มากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับวัชพืชอื่นๆ

Shahriari และคณะ (2012) ศึกษาผลของการเวียนน้ำชะของการย่อยสลาย สารอินทรีย์ในระบบไร้อากาศจากเศษอาหาร โดยสัดส่วนหัวเชื้อต่อเศษอาหาร (กรัมของแข็งระเหย) เท่ากับ 0.75 และเจือจางน้ำชะให้มีความเข้มข้นซีโอดีเท่ากับร้อยละ 0 (R_0) 30 (R_{30}) 60 (R_{60}) และ 100 (R_{100}) มีทำการทดลองในขวดซีรัมขนาด 250 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส พบว่า การเวียนน้ำครั้งที่ 1 ในวันที่ 21 ของการเริ่มเดินระบบ พบว่า ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมเพิ่มขึ้น ตามความเข้มข้นของน้ำชะ เนื่องจากการเวียนน้ำชะเป็นการกระตุ้นการทำงานของจุลินทรีย์กลุ่มสร้าง มีเทนและเพิ่มการผลิตก๊าซชีวภาพ สำหรับการเวียนน้ำชะครั้งที่ 2 หลังจากการเวียนน้ำชะครั้งที่ 1 เป็นเวลา 15 วัน พบว่า ความเข้มข้นน้ำชะร้อยละ 60 และ 100 มีปริมาณก๊าซชีวภาพสูงสุด โดยสูง กว่า R_0 เท่ากับร้อยละ 21 และ 20 ตามลำดับ แต่ช่วงสุดท้ายของการเวียนน้ำครั้งนี้มีความเป็นต่าง และความเป็นกรดต่างสูง สำหรับการเวียนน้ำชะครั้งที่ 3 พบว่า R_{60} มีปริมาณก๊าซชีวภาพสูงสุด สามารถกำจัดซีโอดีได้ร้อยละ 80 แต่ R_{100} มีความเข้มข้นของแอมโมเนียเท่ากับ 1,200 มิลลิกรัม/ลิตร ความเป็นต่างเท่ากับ 13,275 มิลลิกรัม/ลิตรแคลเซียมคาร์บอเนต และค่าความเป็นกรดต่างเท่ากับ 8.44 ซึ่งไม่เหมาะสมต่อจุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทน และเป็นผลทำให้เกิดการยับยั้งการทำงานของ จุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทน และการเวียนน้ำครั้งที่ 4 หลังจากการเวียนน้ำชะครั้งที่ 3 เป็นเวลา 15 วัน พบว่า R_{100} ระบบล้มเหลวเนื่องจากไม่สามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ และ R_{60} มีความเข้มข้นแอมโมเนีย สูงที่สุดเท่ากับ 875 มิลลิกรัม/ลิตร ซึ่งอยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อจุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทน ดังนั้น การ เวียนน้ำชะเป็นการกระตุ้นการทำงานของจุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทนและเพิ่มการผลิตก๊าซชีวภาพ แต่ อย่างไรก็ตามควรพิจารณาค่าความเป็นกรดต่าง ความเป็นต่าง ความเข้มข้นของแอมโมเนียด้วย

ณัฐกาญจน์ ชราพ (2554) ศึกษาประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพด้วยถังหมัก ไร้อากาศแบบขั้นตอนเดียวของหญ้ากินนีสีม่วงผสมมูลโค โดยใช้ถังปฏิกรณ์จำลองขนาด 2.5 ลิตร จำนวน 2 ถัง ซึ่งถังที่ 1 มีอัตราการเวียนน้ำกลับร้อยละ 100 และถังที่ 2 มีอัตราการเวียนน้ำกลับร้อยละ 25 และเวียนน้ำกลับสัปดาห์ละ 2 ครั้ง พบว่าถังที่ 1 มีปริมาณก๊าซชีวภาพและก๊าซมีเทนสูงกว่า ถังที่ 2 เนื่องจากเป็นการเพิ่มปริมาณการกระจายตัวของความชื้นของถังปฏิกรณ์และเป็นการเพิ่ม โอกาสให้จุลินทรีย์ได้สัมผัสกับสารอินทรีย์ได้ดียิ่งขึ้น นอกจากนี้ยังทำให้หญ้าและมูลวัวมีความเป็นเนื้อ เดียวกันมากขึ้นส่งผลให้เกิดการย่อยสลายได้อย่างรวดเร็ว

2.15 สรุปผลการทบทวนเอกสารและแนวทางการวิจัย

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องทั้งหมดพบว่า ผักตบชวามีศักยภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพ เช่นเดียวกับพืชชนิดอื่นๆ แต่มีองค์ประกอบของมวลลิกโนเซลลูโลสในปริมาณสูง คือ มีปริมาณ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินเท่ากับร้อยละ 16 43 และ 7 ตามลำดับ (อรุณศรี ภัคตีพิน, 2531) ทำให้เกิดการย่อยสลายในระบบไร้อากาศได้ช้า (Yang และคณะ, 2015) จึงต้องมีการบำบัด เบื้องต้นก่อนนำมาเป็นสารตั้งต้นในการผลิตก๊าซชีวภาพ โดยงานวิจัยนี้ นำผักตบชวามาบำบัดเบื้องต้น โดยการลดขนาดเพื่อลดอันดับโพลีเมอร์ และโครงสร้างผลึกของเซลลูโลส ทำให้พื้นที่ผิวเพิ่มขึ้น เป็นผลให้เกิดการย่อยสลายได้ง่ายยิ่งขึ้น และการบำบัดเบื้องต้นทางเคมีโดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ซึ่งเป็น องค์ประกอบในน้ำดำจากกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษแบบโซดา เนื่องจากโซเดียมไฮดรอกไซด์จะ เกิดปฏิกิริยาสบู่ของพันธะเอสเทอร์ระหว่างลิกนินและคาร์โบไฮเดรต (เซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส) ทำให้ลิกนินหลุดออกจากโครงสร้าง เป็นผลทำให้เฮมิเซลลูโลสละลายน้ำ ส่งผลให้เกิดการย่อยสลายโดย จุลินทรีย์ได้ง่ายขึ้น

งานวิจัยนี้จึงเลือกผักตบชวาเป็นสารตั้งต้นในการผลิตก๊าซชีวภาพโดยบำบัดเบื้องต้น ผักตบชวาด้วยการลดขนาดและการใช้น้ำดำเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพให้สูงขึ้น และใช้มูลสัตว์ (มูลโค) เป็นเพียงหัวเชื้อในการย่อยสลายผักตบชวาเพื่อผลิตก๊าซชีวภาพ ดังสรุปใน ตารางที่ 2.11

ตารางที่ 2.11 สรุปเหตุผลในการพิจารณาผักตบชวา และวิธีการบำบัดเบื้องต้นสำหรับผลิตก๊าซชีวภาพในงานวิจัยนี้

การพิจารณา	เหตุผล
1. ผักตบชวา (วัตถุดิบ)	<ul style="list-style-type: none"> - มีการขยายพันธุ์และเจริญเติบโตอย่างรวดเร็วซึ่งเป็นปัญหาสิ่งแวดล้อมในปัจจุบัน - มีศักยภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพ เนื่องจากมีสัดส่วน C/N อยู่ในช่วงที่เหมาะสมสำหรับการผลิตก๊าซชีวภาพ - เพิ่มทางเลือกในการจัดการของเสียและลดปริมาณขยะที่เกิดขึ้น
2. มูลโค (หัวเชื้อจุลินทรีย์)	<ul style="list-style-type: none"> - มีจุลินทรีย์ที่สามารถย่อยสลายพืช เนื่องจากเป็นสัตว์กินพืช - มีกลิ่นเหม็นน้อยกว่ามูลจากสัตว์กินพืชชนิดอื่น
3. น้ำดำ (สารเคมีที่ใช้ในการบำบัดเบื้องต้น)	<ul style="list-style-type: none"> - เป็นของเสียจากอุตสาหกรรมการผลิตเยื่อกระดาษ ซึ่งมีโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นองค์ประกอบ

ตารางที่ 2.11 สรุปเหตุผลในการพิจารณาผักตบชวา และวิธีการบำบัดเบื้องต้นสำหรับผลิตก๊าซชีวภาพในงานวิจัยนี้ (ต่อ)

การพิจารณา	เหตุผล
3.น้ำดำ (สารเคมีที่ใช้ในการบำบัดเบื้องต้น)	- เป็นการลดปริมาณการใช้สารเคมี
4.การบำบัดเบื้องต้นทางกายภาพ(การลดขนาด)	- ลดอันดับการโพลีเมอร์และโครงสร้างผลึกของเซลลูโลส - พื้นที่ผิวเพิ่มขึ้นเป็นผลให้เกิดการย่อยสลายได้ง่ายขึ้น
5.การบำบัดเบื้องต้นทางเคมี (สารละลายต่าง)	- เกิดปฏิกิริยาสบู่ (Saponification) ของพันธะเอสเทอร์ระหว่าง ลิกนินและคาร์โบไฮเดรต (เซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส) ทำให้ ลิกนินหลุดออกจากโครงสร้าง เป็นผลทำให้เฮมิเซลลูโลสละลาย น้ำ - ผักตบชวามีองค์ประกอบของเฮมิเซลลูโลสสูงและลิกนินต่ำ จึงเหมาะสมในการบำบัดเบื้องต้นด้วยต่าง

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 แผนการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการบำบัดเบื้องต้นทางกายภาพโดยการลดขนาดและการบำบัดเบื้องต้นทางเคมีโดยใช้น้ำดำเพื่อเพิ่มการผลิตก๊าซชีวภาพ โดยแบ่งออกเป็น 4 การทดลองย่อยๆ ดังนี้

การทดลองที่ 1 การวิเคราะห์องค์ประกอบของผักตบชวาและองค์ประกอบของมูลโค เพื่อนำไปเป็นข้อมูลพื้นฐาน

การทดลองที่ 2 การบำบัดเบื้องต้นทางกายภาพของผักตบชวาโดยการลดขนาดและนำไปผลิตก๊าซชีวภาพด้วยวิธีบีเอ็มพี และเลือกสภาพการทดลองที่ให้ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมสูงสุดมาใช้ในการทดลองที่ 4 ซึ่งการทดลองนี้มีการแปรค่าของขนาดเป็นปัจจัยเพียงอย่างเดียว

การทดลองที่ 3 การบำบัดเบื้องต้นทางเคมีโดยใช้น้ำดำของผักตบชวาที่ขนาดต่างๆ และนำไปผลิตก๊าซชีวภาพด้วยวิธีบีเอ็มพี และเลือกสภาพการทดลองที่ให้ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมสูงสุดมาใช้ในการทดลองที่ 4 โดยการทดลองนี้ได้เพิ่มเติมปัจจัยทางเคมีซึ่งเพิ่มจากปัจจัยขนาด ได้แก่ ระยะเวลาสัมผัสเบื้องต้น และความเข้มข้นของน้ำดำ

การทดลองที่ 4 การผลิตก๊าซชีวภาพด้วยถังปฏิกรณ์ไร้อากาศแบบชั้นตอนเดียว เป็นการศึกษาประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพของผักตบชวาที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นในสภาวะที่ดีที่สุดของการทดลองที่ 2 และ 3 ในสภาวะถังปฏิกรณ์ไร้อากาศเปรียบเทียบกัน โดยมีแผนผังขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนผังขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3.2 เครื่องมือ อุปกรณ์ และสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

3.2.1 เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับการทดลองที่ 2 การบำบัดเบื้องต้นทางกายภาพ และการทดลองที่ 3 การบำบัดเบื้องต้นทางเคมี

1. ขวดซีรัมสีชาขนาด 125 มิลลิลิตร ดังรูปที่ 3.2
2. เครื่องวัดปริมาณก๊าซชีวภาพแบบท่อรูปตัวยู ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.2 ขวดซีรัมสีชาขนาด 125 มิลลิลิตร



รูปที่ 3.3 เครื่องวัดปริมาณก๊าซชีวภาพแบบท่อรูปตัวยู

3.2.2 เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับการทดลองที่ 4 การผลิตก๊าซชีวภาพด้วยถังปฏิกรณ์ไร้อากาศแบบขึ้นตอนเดียว

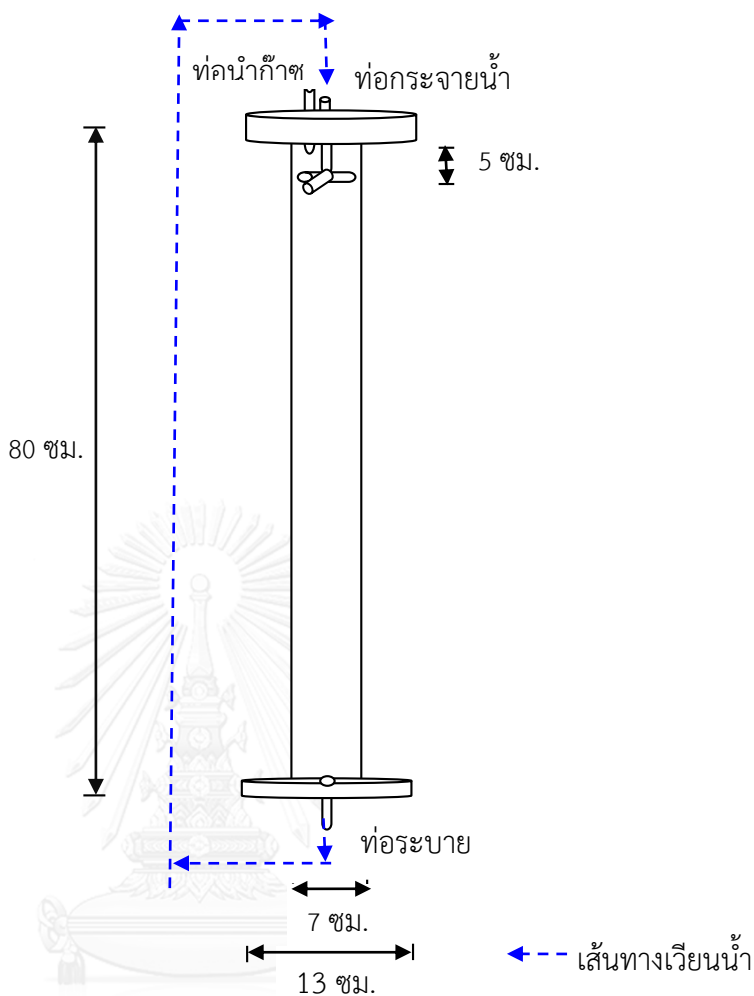
1. ถังปฏิกรณ์

ถังปฏิกรณ์ทำจากอะคริลิกจำนวน 2 ถัง ปริมาตร 2.5 ลิตร จำนวน 2 ถัง โดยออกแบบให้มีอัตราส่วนความสูงต่อเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 12.5:1 เพื่อให้เกิดการไหลของน้ำชะขยะแบบไหลตามยาว ซึ่งทฤษฎีการย่อยสลายแบบไหลตามยาวนั้นถังปฏิกรณ์จะมีอัตราส่วนความสูง

ต่อเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า 5:1 (Singh และ Prerna, 2009; Broughton, 2009) และด้านบนถึงปฏิกรณ์ติดตั้งชั้นกระจายน้ำรูปกากบาทเพื่อเวียนน้ำกลับเข้าระบบ และติดตั้งระบบท่อเพื่อต่อเข้ากับเครื่องวัดปริมาตรก๊าซชีวภาพ และด้านก้นถึงปฏิกรณ์มีการติดตั้งวาล์วเพื่อใช้ในการระบายและเก็บตัวอย่างน้ำชะ นอกจากนี้ก้นถึงปฏิกรณ์จะปูด้วยตะแกรงพลาสติกและหินกรวดเพื่อป้องกันการอุดตันที่ก้นถึงปฏิกรณ์ โดยขนาดของถังปฏิกรณ์แสดงดังตารางที่ 3.1 และรูปที่ 3.4

ตารางที่ 3.1 รายละเอียดถังปฏิกรณ์

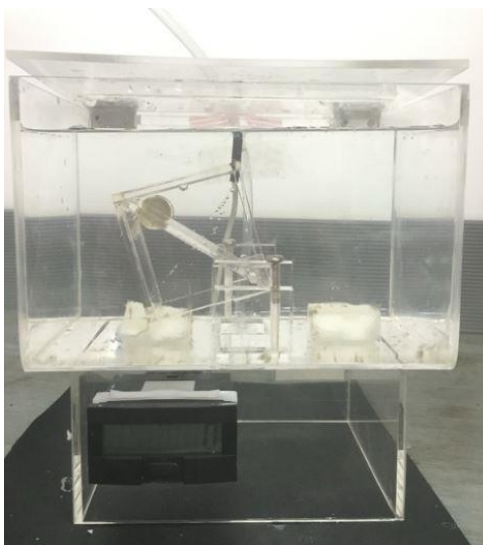
ถังปฏิกรณ์	ขนาด (เซนติเมตร)
เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของถัง	7.0
เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของถัง	6.4
ความหนาของถัง	0.3
ความสูงของถัง	80
อัตราส่วนความสูงต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง	12.5 (ไม่มีหน่วย)
เส้นผ่านศูนย์กลางฝาปิดถังบน/ล่าง	13.0
ชั้นกระจายน้ำห่างจากฝาปิด	5.0



รูปที่ 3.4 ถังปฏิกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

2. เครื่องวัดปริมาตรก๊าซชีวภาพ

การวัดปริมาตรก๊าซชีวภาพอาศัยหลักการแทนที่ก๊าซด้วยของเหลว ซึ่งเครื่องวัดปริมาตรก๊าซชีวภาพ (Gas counter) ทำจากวัสดุอะคริลิกใสภายในติดตั้งเครื่องนับจำนวนเข้ากับระบบเซนเซอร์โดยนับจำนวนรอบการพลิกตัวของอุปกรณ์ตามปริมาตรก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้น ซึ่งจำนวนครั้งการพลิกตัวของอุปกรณ์สามารถนำมาคำนวณปริมาตรก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นได้ โดยภายในบรรจุสารละลายที่มีค่าความเป็นกรดต่างเท่ากับ 2 โดยใช้กรดซัลฟิวริกความเข้มข้นร้อยละ 2 โดยปริมาตร ผสมกับโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยปริมาตร (Sponza และ Agdag, 2004) เพื่อป้องกันการละลายน้ำของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 เครื่องวัดปริมาณก๊าซชีวภาพ

3.2.3 เครื่องมือและอุปกรณ์อื่นๆ

1. เทอร์โมมิเตอร์
2. เครื่องชั่งละเอียดทศนิยม 4 ตำแหน่ง
3. ตู้ควบคุมอุณหภูมิได้ที่ 103-105 องศาเซลเซียส
4. ตู้บซีโอตีควบคุมอุณหภูมิที่ 150-180 องศาเซลเซียส
5. เตาเผาควบคุมอุณหภูมิได้ที่ 550 ± 50 องศาเซลเซียส
6. เครื่องให้ความร้อน (Hot plate)
6. อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ (Water bath)
7. เครื่องปั่นกวน (Magnetic stirrer)
8. ถ้วยกระเบื้องและเครื่องแก้วต่างๆ
9. กระดาษกรอง GF/C

3.2.4 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

1. โซเดียมไบคาร์บอเนต (NaHCO_3)
2. กรดซัลฟิวริก (H_2SO_4)
3. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)
4. โพแทสเซียมไดโครเมต ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$)
5. เฟอรัสแอมโมเนียซัลเฟต ($\text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)
6. 1, 10-ฟีนานโทโรลีนโมโนไฮเดรต ($\text{C}_{12}\text{H}_8\text{N}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$)
7. เฟอรัสซัลเฟต ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$)

8. เมอคิวริกซัลเฟต (HgSO_4)
9. ซิลเวอร์ซัลเฟต (Ag_2SO_4)
10. โซเดียมคลอไรด์ (NaCl)
11. ก๊าซไนโตรเจน (N_2)

3.3 วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.3.1 การเตรียมวัตถุดิบ

1. ผักตบชวา

ผักตบชวาที่นำมาใช้ในการทดลองเป็นผักตบชวาที่เก็บมาจากแหล่งน้ำในศูนย์ฝึกนิสิต คณะสัตวแพทยศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จังหวัดนครปฐม ซึ่งมีอายุประมาณ 1 เดือน และความยาวประมาณ 60 เซนติเมตร โดยทำการเก็บตัวอย่าง นำมาล้างให้สะอาดด้วยน้ำประปา แล้วตัดให้มีขนาด ดังนี้ เล็กกว่า 5 5-10 10-15 15-20 20-25 และ 25-30 มิลลิเมตร ตามลำดับ และผักตบชวาที่มีขนาดใหญ่ที่สุดที่สามารถใส่ในขวดซีรัมและขอใช้เป็นตัวแทนของผักตบชวาที่ไม่ผ่านการบำบัดเบื้องต้น (40-50 มิลลิเมตร) สำหรับการทดลองที่ 2 และ การทดลองที่ 3 ได้แก่ ขนาดเล็กกว่า 5 5-10 10-15 15-20 20-25 และ 25-30 มิลลิเมตร ตามลำดับ โดยแยกส่วนใบและก้านใบออกจากกัน และนำไปร่อนด้วยตะแกรงร่อนให้มีขนาดต่างๆ ตามที่กำหนด จากนั้นนำมาเก็บที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เพื่อรอทำการทดลองต่อไป

ในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลของการบำบัดเบื้องต้นทางกายภาพและทางเคมีโดยการผลิตก๊าซด้วยวิธีบีเอ็มพี ซึ่งใช้ขวดซีรัมสีขาขนาด 125 มิลลิลิตร ทำให้ไม่สามารถนำผักตบชวาทั้งต้นใส่ในขวดบีเอ็มพีหนึ่งขวดได้เพียงพอ และการใช้สัดส่วนใบต่อก้านใบของผักตบชวาในแต่ละขวดซีรัมไม่เท่ากันส่งผลให้ผลการศึกษาไม่สามารถวิเคราะห์และสรุปผลได้เนื่องจากไม่มีการควบคุมปริมาณวัตถุดิบเริ่มต้นสำหรับการศึกษา ดังนั้น จึงต้องมีการคัดเลือกตัวอย่างผักตบชวาเพื่อให้เป็นตัวแทนที่ดีที่สุด (representative) ในการทำบีเอ็มพี ซึ่งพิจารณาสัดส่วนโดยน้ำหนักเปียกของต้นผักตบชวา 1 ต้นจากการวัดค่าผักตบชวาจำนวน 10 ตัวอย่าง พบว่า สัดส่วนใบต่อก้านใบ เท่ากับ 1 : 2.5

2. เชื้อจุลินทรีย์ที่ใช้ในงานวิจัย

เชื้อจุลินทรีย์ที่ใช้ในการทดลอง คือ มูลโคนมแห้ง ซึ่งรวบรวมจากท้ายคอกของฟาร์มวัวศูนย์ฝึกนิสิต คณะสัตวแพทยศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จังหวัดนครปฐม โดยนำมูลวัวที่เก็บรวบรวมมาทำการคัดส่วนที่มีขนาดใหญ่ออกก่อนให้เหลือเฉพาะส่วนที่มีขนาดเล็กๆ เท่านั้น

3. น้ำดำ

น้ำดำที่นำมาใช้ในการบำบัดเบื้องต้นผักตบชวานำมาจากกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษแบบโซดาของบริษัท SCG paper จากนั้นนำมาเก็บที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เพื่อรอทำการทดลองต่อไป ซึ่งลักษณะเบื้องต้นของน้ำดำที่ใช้ในงานวิจัย แสดงดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ลักษณะของน้ำดำ

พารามิเตอร์	ค่าที่ได้
ซีไอดีละลาย (มก./ล.)	280,000 ± 56,528
ความเป็นกรดต่าง	12.8
ความเป็นต่าง (มก./ล.แคลเซียมคาร์บอเนต)	83,750 ± 8,838
ของแข็งละลายน้ำ (มก./ล.)	84,000 ± 25,455
ความต่างศักย์ออกซิเดชันรีดักชัน (มิลลิโวลต์)	-243

3.3.2 การทดลองที่ 1 การวิเคราะห์องค์ประกอบของผักตบชวาและมูลโค

1. องค์ประกอบของผักตบชวา

สำหรับการวิเคราะห์องค์ประกอบของผักตบชวานั้นใช้ผักตบชวาขนาดน้อยกว่า 2 มิลลิเมตร (Fernandez และคณะ, 2008) มาวิเคราะห์ตัวแปรต่างๆ ดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 ตัวแปรที่ใช้ในการวิเคราะห์องค์ประกอบของผักตบชวา

ตัวแปร	วิธีวิเคราะห์
ของแข็งทั้งหมด (Total Solids, TS)	(AOAC, 1991) (Dried 105°C)
ความชื้น (Moisture content)	(AOAC, 1991) (Dried 105°C)
ของแข็งระเหย (Volatile Solids, VS)	(AOAC, 1991) (Dried 550-600°C)
เถ้า (Ash)	(AOAC, 1991) (Dried 550-600°C)
เซลลูโลส (Cellulose content)	Van. Soest's method (Van soest,1960)
เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose content)	Van. Soest's method (Van soest,1960)

ตารางที่ 3.3 ตัวแปรที่ใช้ในการวิเคราะห์องค์ประกอบของผักตบชวา (ต่อ)

ตัวแปร	วิธีวิเคราะห์
ความเป็นกรดต่าง (pH)	Electronic pH Meter

2. องค์ประกอบของมูลโค

นำหัวเชื้อจุลินทรีย์ (มูลโค) ในหัวข้อ 3.3.1 มาวิเคราะห์ตัวแปรต่างๆ ดังตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 ตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในการวิเคราะห์องค์ประกอบของมูลโค

ตัวแปร	วิธีวิเคราะห์
ของแข็งทั้งหมด (Total Solids, TS)	(AOAC, 1991) Dried 105°C
ความชื้น (Moisture content)	(AOAC, 1991) Dried 105°C
ของแข็งระเหย (Volatile Solids, VS)	(AOAC, 1991) Dried 550-600°C
เถ้า (Ash)	(AOAC, 1991) Dried 550-600°C
ความเป็นกรดต่าง (pH)	Electronic pH Meter
ความต่างศักย์ออกซิเดชันรีดักชัน (ORP)	Electronic ORP Meter

3.3.3 การทดลองที่ 2 การบำบัดเบื้องต้นทางกายภาพโดยการลดขนาด

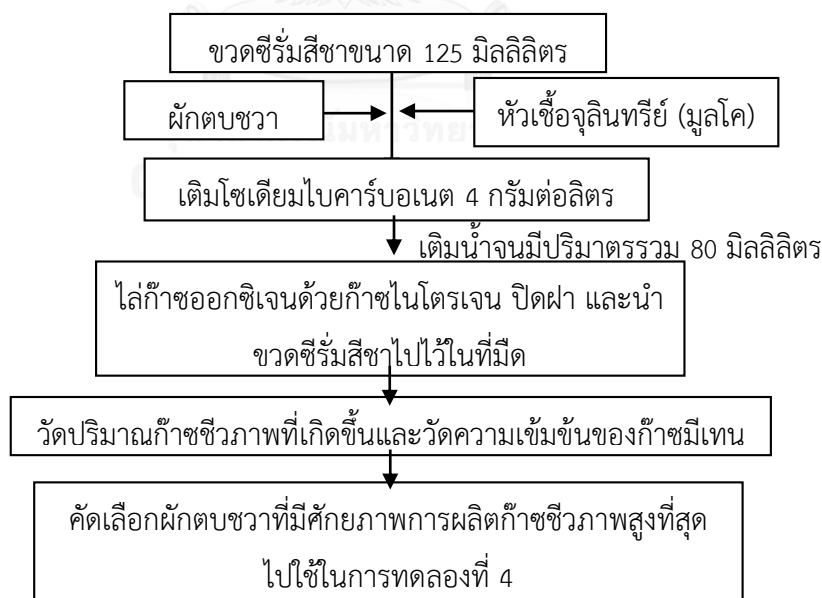
การลดขนาดทำให้เกิดการลดอันดับโพลิเมอร์ (degree of polymerization) และโครงสร้างผลึกของเซลลูโลส เป็นผลให้พื้นที่ผิวเพิ่มขึ้น ทำให้จุลินทรีย์สามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ได้ง่ายขึ้น โดยพิจารณาจากศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพด้วยวิธีบีเอ็มพี แสดงดังรูปที่ 3.6 ตารางที่ 3.5 และมีขั้นตอนดังนี้

- นำผักตบชวาและมูลโคที่เตรียมไว้ในข้อ 3.3.1 ในสัดส่วนของแข็งระเหยของผักตบชวา:ของแข็งระเหยของมูลโคเท่ากับ 2:1 ลงในขวดซีรัมสีชา
- เติมโซเดียมไบคาร์บอเนต (NaHCO_3) 4 กรัม/ลิตร เพื่อทำหน้าที่เป็นบัฟเฟอร์ จากนั้นเติมน้ำจมนีปริมาณรวม 80 มิลลิลิตร

3. ใส่ก๊าซออกซิเจนด้วยก๊าซไนโตรเจน ปิดฝา และนำขวดซีรัมสีชาไปไว้ในที่มืด (Deublein และ Steinhauser, 2008)
4. วัดปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นด้วยการแทนที่ของเหลว พร้อมกับบันทึกค่าปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้น และวัดความเข้มข้นของก๊าซมีเทนด้วยวิธีก๊าซโครมาโตกราฟี (Gas Chromatography) โดยทำการทดลอง 3 ซ้ำ
5. นำค่าปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นในหน่วยมิลลิลิตร/กรัมของแข็งระเหยที่ใส่เข้าระบบ มาพล็อตกราฟแสดงก๊าซชีวภาพสะสม โดยปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นคำนวณได้ดังสมการ

ก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้น = $\frac{\text{ปริมาณก๊าซชีวภาพชุดทดลอง (ลิตร)} - \text{ปริมาณก๊าซชีวภาพชุดควบคุม (ลิตร)}}{\text{น้ำหนักของแข็งระเหยที่ใส่เข้าระบบ}}$

6. ทำตัวอย่างควบคุมจำนวน 3 ชุด โดยจะใส่เฉพาะหัวเชื้อจุลินทรีย์เพียงอย่างเดียวและควบคุมปริมาณให้เท่ากับตัวอย่างที่ใส่ร่วมกับผักตบชวาในข้างต้น
7. คัดเลือกขนาดผักตบชวาที่มีศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพสูงที่สุดไปใช้ในการทดลองที่ 4



รูปที่ 3.6 การทดลองที่ 2 การบำบัดเบื้องต้นทางกายภาพของผักตบชวา

ตารางที่ 3.5 ตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในการทดลองที่ 2

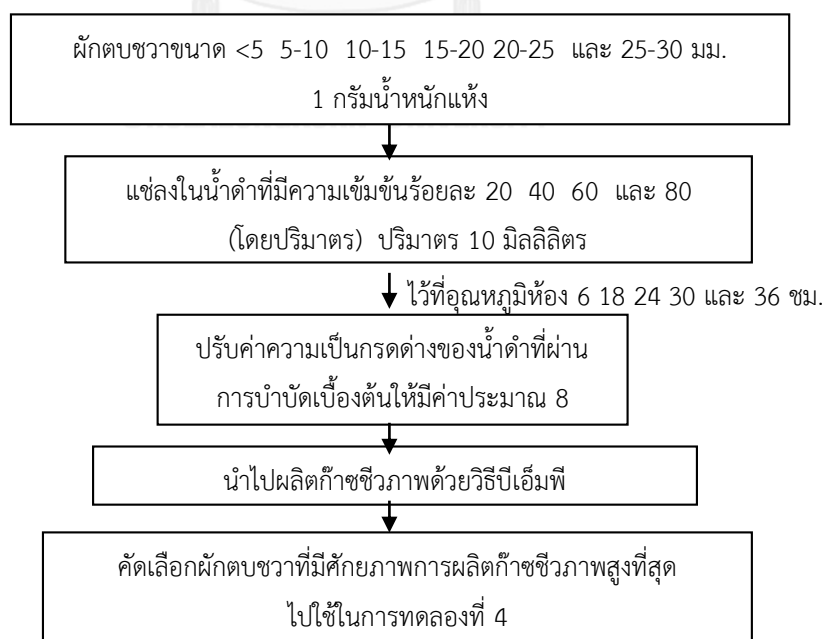
ตัวแปรควบคุม	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
1. สัดส่วนผักตบชวาต่อหัวเชื้อจุลินทรีย์	VSผักตบชวา:VSมูลโคเท่ากับ 2:1
2. ปริมาตรรวม	80 มิลลิลิตร
3. อุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง	อุณหภูมิห้อง
4. เวลาที่ใช้ในการทดลอง	39 วัน
ตัวแปรที่ต้องการศึกษา	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
1. ขนาดผักตบชวา (มิลลิเมตร)	น้อยกว่า 5 5-10 10-15 15-20 20-25 25-30 และผักตบชวาที่ไม่ผ่านการบำบัดเบื้องต้น (40-50)
ตัวแปรตาม	วิธีวิเคราะห์
1. ปริมาณก๊าซชีวภาพ	Inverted glass cylinder method
2. ความเข้มข้นของก๊าซมีเทน	Gas Chromatography
พารามิเตอร์ที่วิเคราะห์	วิธีวิเคราะห์
1. ของแข็งทั้งหมด (Total Solids, TS)	Standard Method#2540B (Dried 103-105°C)
2. ของแข็งระเหย (Volatile Solids, VS)	Standard Method#2540B (Dried 500-600°C)
3. ซีโอดีละลาย (Soluble COD)	Standard Method #5220C (Closed Reflux)
4. กรดอินทรีย์ระเหย (VFA)	Standard Method#5560
5. ความเป็นด่าง (Alkalinity)	Standard Method#2320B (Titration Method)
6. ความเป็นกรดต่าง (pH)	Electronic pH meter
7. ความต่างศักย์ออกซิเดชันรีดักชัน (ORP)	ORP meter

3.3.4 การทดลองที่ 3 การบำบัดเบื้องต้นทางเคมีโดยใช้น้ำดำของผักตบชวาขนาดต่างๆ

เนื่องจากผักตบชวามีโครงสร้างของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลสและลิกนินที่แข็งแรง จึงต้องการสลายโครงสร้างเหล่านี้ให้แยกออกจากกันเพื่อเพิ่มความสามารถในการย่อยสลายสารอินทรีย์ของผักตบชวา โดยการบำบัดเบื้องต้นซึ่งใช้น้ำดำ (black liquor) ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 20 40 60 และ 80 (โดยปริมาตร) และกำหนดระยะเวลาในการบำบัดเบื้องต้น 6 18 24 30 และ 36 ชั่วโมง จากนั้นนำตัวอย่างที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นไปศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพด้วยวิธี

บีเอ็มพี (Biochemical methane potential; BMP) มีขั้นตอนการทดลองแสดงดังรูปที่ 3.7 ตารางที่ 3.6 ตารางที่ 3.7 และมีรายละเอียดดังนี้

1. นำผักตบชวาที่เตรียมไว้ในข้อ 3.3.1 ได้แก่ ขนาดน้อยกว่า 5 5-10 10-15 15-20 20-25 และ 25-30 มิลลิเมตร ใส่ลงในบีกเกอร์ขนาด 200 มิลลิลิตร
2. เจือจางน้ำดำให้มีความเข้มข้นเท่ากับร้อยละ 20 40 60 และ 80 (โดยปริมาตร) และเติมน้ำดำที่เจือจางข้างต้นปริมาตร 10 มิลลิลิตร/ผักตบชวา 1 กรัม น้ำหนักแห้ง (Xu และคณะ, 2012) ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 6 18 24 30 และ 36 ชั่วโมง ตามลำดับ
3. นำไปผลิตก๊าซชีวภาพด้วยวิธีบีเอ็มพีเช่นเดียวกับการทดลองที่ 2 และปรับค่าความเป็นกรดต่างของน้ำดำที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นให้มีค่าประมาณ 8 เพื่อให้ค่าความเป็นกรดต่างใกล้เคียงกับการทดลองที่ 2 เมื่อเริ่มต้นการทดลอง จากนั้นใส่ลงในขวดซีรัมปริมาตรร้อยละ 10
4. ทำการทดลองตัวอย่างละ 3 ซ้ำ และทำตัวอย่างควบคุมจำนวน 3 ขวด โดยใส่เฉพาะหัวเชื้อจุลินทรีย์ปริมาณเท่ากับหัวเชื้อจุลินทรีย์ในตัวอย่างข้างต้น
5. คัดเลือกสภาวะของผักตบชวาที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นโดยพิจารณาจากศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพสูงที่สุดไปใช้ในการทดลองที่ 4



รูปที่ 3.7 การทดลองที่ 3 การบำบัดเบื้องต้นทางเคมี

ตารางที่ 3.6 ตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในการทดลองที่ 3

ตัวแปรควบคุม	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
1. สัดส่วนผักตบชวาต่อหัวเชื้อจุลินทรีย์	VS _{ผักตบชวา} :VS _{มูลโค} เท่ากับ 2:1
2. ปริมาตรรวม	80 มิลลิลิตร
3. อุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง	อุณหภูมิห้อง
4. เวลาที่ใช้ในการทดลอง	40 วัน
ตัวแปรตาม	วิธีวิเคราะห์
1. ปริมาณก๊าซชีวภาพ	Inverted glass cylinder method
2. ความเข้มข้นของก๊าซมีเทน	Gas Chromatography
พารามิเตอร์ที่วิเคราะห์	วิธีวิเคราะห์
1. ของแข็งทั้งหมด (Total Solids, TS)	Standard Method#2540B (Dried 103-105°C)
2. ของแข็งระเหย (Volatile Solids, VS)	Standard Method#2540B (Dried 500-600°C)
3. ซีโอดีละลาย (Soluble COD)	Standard Method #5220C (Closed Reflux)
4. กรดอินทรีย์ระเหย (VFA)	Standard Method#5560
5. ความเป็นด่าง (Alkalinity)	Standard Method#2320B (Titration)
6. ความเป็นกรดต่าง (pH)	Electronic pH meter
ความต่างศักย์ออกซิเดชันรีดักชัน (ORP)	ORP meter

การทดลองนี้สรุปตัวแปรที่ต้องการศึกษา ดังตารางที่ 3.7

ตารางที่ 3.7 ตัวแปรที่ต้องการศึกษา

ขนาดผักตบชวา (มม.)	ความเข้มข้นน้ำดำ (ร้อยละ)	ระยะเวลาสัมผัสเบื้องต้น (ชม.)	ชุดการทดลองที่
น้อยกว่า 5	20	6	1
		18	2
		24	3
		30	4
		36	5
	40	6	6
		18	7
		24	8

ตารางที่ 3.7 ตัวแปรที่ต้องการศึกษา (ต่อ)

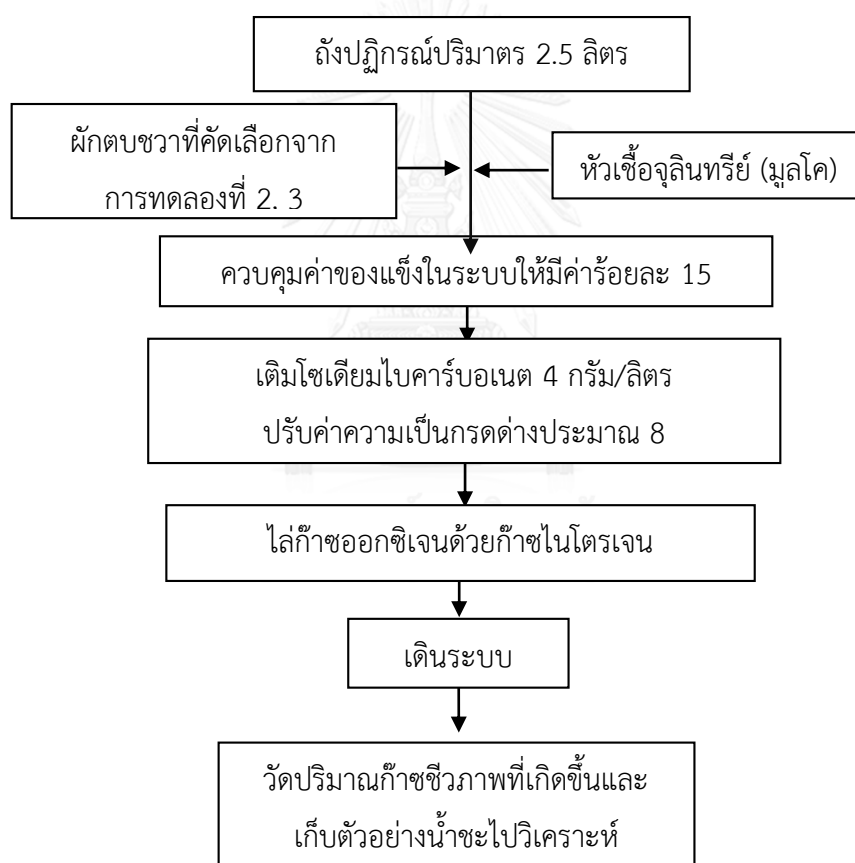
ขนาดผักตบชวา (มม.)	ความเข้มข้นน้ำดำ (ร้อยละ)	ระยะเวลาสัมผัสเบื้องต้น (ชม.)	ชุดการทดลองที่
น้อยกว่า 5	40	30	9
		36	10
	60	6	11
		18	12
		24	13
		30	14
		36	15
	80	6	16
		18	17
		24	18
		30	19
		36	20
.	.	.	.
.	.	.	.
.	.	.	.
25-30	80	6	116
		18	117
		24	118
		30	119
		36	120

3.3.5 การทดลองที่ 4 การผลิตก๊าซชีวภาพด้วยถังปฏิกรณ์ไร้อากาศแบบชั้นตอนเดียว

การทดลองนี้เป็นการศึกษาปริมาณก๊าซชีวภาพและความเข้มข้นของก๊าซมีเทน จากการคัดเลือกผักตบชวาที่มีศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพสูงที่สุดของการทดลองที่ 2 และ 3 โดยใช้ถังปฏิกรณ์จำนวน 2 ถัง มีขั้นตอนการทดลองแสดงดังรูปที่ 3.8 ตารางที่ 3.8 และมีรายละเอียดดังนี้

1. เลือกชุดการทดลองที่มีศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพสูงที่สุดจากการทดลองที่ 2 และ 3 และมูลโค ในสัดส่วนของแข็งระเหยของผักตบชวาต่อของแข็งระเหยของมูลโคเท่ากับ 2:1 ใส่ลงในถังปฏิกรณ์ทั้ง 2 และควบคุมค่าของแข็งในระบบให้มีค่าร้อยละ 15 (Ahn และคณะ, 2010)

2. เติมโซเดียมไบคาร์บอเนต (NaHCO_3) 4 กรัม/ลิตร เพื่อทำหน้าที่เป็นบัฟเฟอร์ และปรับค่าความเป็นกรดต่างประมาณ 8 จากนั้นผสมให้เข้ากัน
3. ใส่ก๊าซออกซิเจนออกด้วยก๊าซไนโตรเจน และเก็บถังปฏิกรณ์ทั้งสองในที่มีด
4. วัดปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจนกระทั่งไม่มีก๊าซชีวภาพเกิดเพิ่มขึ้น และวัดความเข้มข้นของก๊าซมีเทนด้วยวิธีก๊าซโครมาโตกราฟี
5. เก็บตัวอย่างน้ำชะจากจุดเก็บน้ำชะที่กั้นถังปฏิกรณ์ทั้งสองเพื่อวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ
6. ดำเนินการทดลองแบบทีละเท (batch) พร้อมกันทั้ง 2 ถังปฏิกรณ์



รูปที่ 3.8 การทดลองที่ 5 การผลิตก๊าซชีวภาพด้วยถังปฏิกรณ์ไร้อากาศแบบขึ้นตอนเดียว

ตารางที่ 3.8 ตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในการทดลองที่ 4

ตัวแปรควบคุม	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
1. สัดส่วนผักตบชวาต่อมูลโค	$\text{VS}_{\text{ผักตบชวา}}:\text{VS}_{\text{มูลโค}}$ เท่ากับ 2:1

ตารางที่ 3.8 ตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในการทดลองที่ 4 (ต่อ)

ตัวแปรควบคุม	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
2. ปริมาณผักตบชวาและมูลโค	ของแข็งทั้งหมดร้อยละ 15
3. อุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง	อุณหภูมิห้อง
4. ระยะเวลาที่ใช้ในการทดลอง	ประมาณ 40 วัน
ตัวแปรตาม	วิธีวิเคราะห์
1. ปริมาณก๊าซชีวภาพ	Inverted glass cylinder method
2. ความเข้มข้นของก๊าซมีเทน	Gas Chromatography
พารามิเตอร์ที่วิเคราะห์	วิธีวิเคราะห์
1. ของแข็งทั้งหมด (Total Solids, TS)	Standard Method#2540B (Dried 103-105°C)
2. ของแข็งระเหย (Volatile Solids, VS)	Standard Method#2540B (Dried 500-600°C)
3. ซีโอดีละลาย (Soluble COD)	Standard Method #5220C (Closed Reflux)
4. กรดอินทรีย์ระเหย (VFA)	Standard Method#5560
5. ความเป็นด่าง (Alkalinity)	Standard Method#2320B (Titration)
6. ความเป็นกรดต่าง (pH)	Electronic pH meter
7. ความต่างศักย์ออกซิเดชันรีดักชัน (ORP)	ORP meter

บทที่ 4

ผลการทดลอง และการอภิปรายข้อมูล

งานวิจัยนี้ศึกษาผลการบำบัดเบื้องต้นทางกายภาพโดยการลดขนาดและผลการบำบัดเบื้องต้นทางเคมีโดยใช้น้ำด่างของผักตบชวาเพื่อการผลิตก๊าซชีวภาพ ซึ่งใช้มูลโคเป็นหัวเชื้อจุลินทรีย์ โดยสามารถเสนอผลการทดลองได้ตามลำดับ ดังนี้

1. องค์ประกอบทางกายภาพและเคมีของผักตบชวาและมูลโค
2. ผลของการบำบัดเบื้องต้นทางกายภาพโดยการลดขนาดและนำไปผลิตก๊าซชีวภาพด้วยวิธีบีเอ็มพี
3. ผลของการบำบัดเบื้องต้นทางเคมีโดยใช้น้ำด่างของผักตบชวาที่ขนาดต่างๆ และนำไปผลิตก๊าซชีวภาพด้วยวิธีบีเอ็มพี
4. การผลิตก๊าซชีวภาพด้วยถังปฏิกรณ์ไร้อากาศแบบขั้นตอนเดียว

4.1 การทดลองที่ 1 องค์ประกอบทางกายภาพและเคมีของผักตบชวาและมูลโค

การวิเคราะห์องค์ประกอบทางกายภาพและเคมีของผักตบชวาและมูลโค ได้แก่ ปริมาณของแข็งทั้งหมด ปริมาณของแข็งระเหย ปริมาณความชื้น ปริมาณเถ้า ความเป็นกรดต่าง ความต่างศักย์ออกซิเดชันรีดักชัน ปริมาณเซลลูโลส ปริมาณเฮมิเซลลูโลส ปริมาณลิกนิน และสัดส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน โดยใช้ผักตบชวาขนาดน้อยกว่า 2 มิลลิเมตร (Fernandez และคณะ, 2008) ในสัดส่วนใบต่อก้านใบ เท่ากับ 1 : 2.5 (น้ำหนักเปียก) และมูลโคที่เตรียมในหัวข้อ 3.3.1 ซึ่งผลของการวิเคราะห์องค์ประกอบแต่ละประเภทได้แสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบทางกายภาพและเคมีของผักตบชวาและมูลโค

องค์ประกอบ	ผักตบชวา	มูลโค
องค์ประกอบเบื้องต้น (ร้อยละน้ำหนักเปียก)		
ของแข็งทั้งหมด (ร้อยละ)	17.02±6.98	48.84 ±11.77
ความชื้น (ร้อยละ)	82.98	51.47
ของแข็งระเหย (ร้อยละน้ำหนักเปียก)	10.96±0.92	20.83±0.86
เถ้า (ร้อยละน้ำหนักเปียก)	6.06	38.01
ความเป็นกรดต่าง	6.11	8.66
ความต่างศักย์ออกซิเดชันรีดักชัน (mV)	198±4.24	-82.83±0.96

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบทางกายภาพและเคมีของผักตบชวาและมูลโค (ต่อ)

องค์ประกอบ	ผักตบชวา	มูลโค
องค์ประกอบลิกโนเซลลูโลส (ร้อยละน้ำหนักแห้ง)		-
เซลลูโลส	19.88	-
เฮมิเซลลูโลส	33.91	-
ลิกนิน	4.22	-
อื่นๆ เช่น น้ำตาล โปรตีน และไขมัน	41.99	-
สัดส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน	21.11	-

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบลิกโนเซลลูโลส (เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน) ของผักตบชวา พบว่า ผักตบชวาที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีปริมาณร้อยละเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลสและลิกนินเท่ากับ 19.88 33.99 และ 4.22 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงงานวิจัยอื่นๆ ที่มีปริมาณร้อยละเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินอยู่ในช่วงระหว่าง 16-18 43-48 และ 3-7 ตามลำดับ (Nigam, 2002; อรุณศรี ภัคดีพิน, 2531) ดังตารางที่ 4.2 โดยหลักการแล้วเฮมิเซลลูโลสสามารถถูกย่อยสลายในขั้นตอนไฮโดรไลซิสได้ง่ายกว่าเซลลูโลสและลิกนิน เนื่องจากมีโครงสร้างที่สามารถละลายน้ำได้จึงทำให้เกิดการย่อยสลายได้เร็วและง่ายกว่า (Charles และคณะ, 2005) แต่ลิกโนเซลลูโลสเกิดการย่อยสลายในระบบไร้อากาศได้ช้า เนื่องจากองค์ประกอบลิกโนเซลลูโลสเป็นโครงสร้างที่ซับซ้อนและเป็นส่วนที่สร้างความแข็งแรงให้แก่พืชเป็นผลให้จุลินทรีย์ย่อยสลายได้ยากหรือไม่สามารถย่อยสลายได้ (Yang และคณะ, 2015; Seppala และคณะ, 2008) จึงต้องมีการบำบัดเบื้องต้นเพื่อทำลายโครงสร้างลิกโนเซลลูโลส และเพิ่มพื้นที่ผิวเพื่อให้จุลินทรีย์สามารถย่อยสลายได้ง่ายขึ้นซึ่งจะส่งผลให้ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพสูงขึ้น

ตารางที่ 4.2 องค์ประกอบทางเคมีของผักตบชวา

องค์ประกอบ	สัดส่วน (ร้อยละ)		
	ผักตบชวาในงานวิจัยนี้	Nigam (2002)	อรุณศรี ภัคดีพิน (2531)
เซลลูโลส	19.88	18.20	16.00
เฮมิเซลลูโลส	33.91	48.70	43.00
ลิกนิน	4.22	3.50	6.80
สัดส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน	21.11	-	30.10

ผักตบชวา (*Eichloria crassipes*) ที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีอายุประมาณ 35 วัน และอุณหภูมิภายในห้องปฏิบัติการตลอดการวิจัยนี้มีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 26.3-33.9 องศาเซลเซียสซึ่งสามารถจำแนกตามเดือนได้ดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 อุณหภูมิห้องตลอดการวิจัย

เดือน	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	อุณหภูมิเฉลี่ย (องศาเซลเซียส)
กันยายน – ตุลาคม	28.1-32.0	30.3±1.28
พฤศจิกายน – ธันวาคม	28.3-32.0	30.4±1.05
ธันวาคม – มกราคม	26.3-31.3	30.1±1.20
กุมภาพันธ์ – มีนาคม	28.9-32.0	30.6±0.79
เมษายน – พฤษภาคม	30.9-33.9	32.4±0.89
มิถุนายน – กรกฎาคม	28.9-32.1	30.3±0.93

4.2 การทดลองที่ 2 การศึกษาการบำบัดเบื้องต้นทางกายภาพโดยการลดขนาดและนำไปผลิตก๊าซชีวภาพด้วยวิธีบีเอ็มพี

การบำบัดเบื้องต้นทางกายภาพโดยการลดขนาดทำให้เกิดการลดอันดับโพลิเมอร์ (degree of polymerization) และโครงสร้างผลึกของเซลลูโลส (crystallinity) เป็นผลให้พื้นที่ผิวเพิ่มขึ้น ทำให้จุลินทรีย์สามารถย่อยสลายสารอินทรีย์เป็นก๊าซชีวภาพได้ง่ายขึ้น (Hendriks และ Zeeman, 2009)

การทดลองนี้ศึกษาผลของการบำบัดเบื้องต้นทางกายภาพโดยการลดขนาดและนำไปผลิตก๊าซชีวภาพด้วยวิธีบีเอ็มพี โดยขนาดที่ศึกษา ได้แก่ ขนาดน้อยกว่า 5 5-10 10-15 15-20 20-25 และ 25-30 มิลลิเมตร และผักตบชวาที่มีขนาดใหญ่ที่สุดที่สามารถใส่ในขวดซีรัมได้และขอใช้เป็นตัวแทนของผักตบชวาที่ไม่ผ่านการบำบัดเบื้องต้น โดยกำหนดให้มีขนาด 40-50 มิลลิเมตร

4.2.1 สมบัติทางเคมีของวัตถุดิบขนาดต่างๆ

การทดลองรวมระยะเวลา 39 วัน ของแข็งและของแข็งระเหยของผักตบชวาขนาดต่างๆ และมูลโคมีการเปลี่ยนแปลง แสดงในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ค่าของแข็งทั้งหมดและของแข็งระเหยที่ลดลงของผักตบชวาขนาดต่างๆ และมูลโค

ขนาด (มม.)	Δ ของแข็งทั้งหมดที่ลดลง (ร้อยละ)	Δ ของแข็งระเหยที่ลดลง (ร้อยละน้ำหนักแห้ง)
<5	7.68	38.52
5-10	7.55	35.43
10-15	7.32	34.30
15-20	7.42	31.62
20-25	7.15	30.70
25-30	7.24	27.77
ไม่ผ่านการบำบัดเบื้องต้น	7.13	29.30
ชุดควบคุม (มูลโค)	4.65	34.51

จากตารางที่ 4.4 พบว่า ผักตบชวาทุกๆ ขนาดมีปริมาณของแข็งทั้งหมดและของแข็งระเหยลดลงเป็นผลมาจากสารอินทรีย์ถูกย่อยสลายเปลี่ยนไปเป็นก๊าซชีวภาพโดยเริ่มจากขั้นตอนการย่อยสลายของสารอินทรีย์โมเลกุลใหญ่ให้มีโมเลกุลขนาดเล็ก และสารอินทรีย์ที่มีโมเลกุลขนาดเล็กถูกย่อยสลายเป็นกรดอินทรีย์ระเหยโดยจุลินทรีย์กลุ่มสร้างกรดซึ่งจะถูกย่อยสลายต่อไปเป็นก๊าซมีเทนโดยจุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทน โดยที่ปริมาณของแข็งระเหยมีค่าลดลงมากแสดงว่ามีการแปรรูปเกิดขึ้นมาก ซึ่งผักตบชวาที่มีขนาดน้อยกว่า 5 มิลลิเมตร มีปริมาณของแข็งระเหยลดลงสูงสุดเท่ากับร้อยละ 38.52 แสดงว่า จุลินทรีย์สามารถเปลี่ยนของแข็งระเหยได้มากที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม (รูปที่ 4.7) โดยมีปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมสูงสุดเท่ากับ 0.258 ลิตร/กรัมของแข็งระเหยซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมจากการย่อยสลายในระบบไร้อากาศ (anaerobic digestion) จากการหมักร่วมระหว่างผักตบชวาและมูลสุกรในสัดส่วนผักตบชวาต่อมูลสุกรเท่ากับ 1:1 (ของแข็งระเหย) โดยมีปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมเท่ากับ 0.220-0.228 ลิตร/กรัมของแข็งระเหย (Moorhead และคณะ, 1993) และรองลงมาคือ ขนาด 5-10 15-20 10-15 15-20 และ 20-25 มิลลิเมตร และผักตบชวาที่ไม่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นมีค่าปริมาณของแข็งระเหยลดลง 35.43 34.30 31.62 30.70 27.77 และ 26.42 ตามลำดับ ในขณะที่ชุดควบคุมมีปริมาณของแข็งระเหยลดลงร้อยละ 34.51 ซึ่งปริมาณของแข็งระเหยที่ลดลงของชุดควบคุมนี้ไม่สอดคล้องกับก๊าซชีวภาพสะสมซึ่งมีค่าต่ำสุด (0.092 ลิตร/กรัมของแข็งระเหย) อาจแสดงว่า จุลินทรีย์ไม่สามารถนำสารอินทรีย์ไปใช้ในการผลิตก๊าซชีวภาพได้

4.2.2 การวิเคราะห์ส่วนที่เป็นน้ำ

การวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ จากส่วนที่เป็นน้ำในขวดซีรัม แสดงถึงเสถียรภาพของระบบรวมไปถึงระดับการย่อยสลายของวัตถุคิบ โดยมีการจัดกลุ่มของขนาดซึ่งแบ่งเป็น 4 กลุ่ม ดังนี้ กลุ่มที่ 1 (ขนาดเล็ก) ได้แก่ ผักตบชวาขนาดน้อยกว่า 5-5-10 และ 10-15 มิลลิเมตร กลุ่มที่ 2 (ขนาดกลาง) ได้แก่ ผักตบชวาขนาด 15-20 และ 20-25 มิลลิเมตร และกลุ่มที่ 3 (ขนาดใหญ่) ได้แก่ ผักตบชวาขนาด 25-30 มิลลิเมตร และกลุ่มที่ 4 ได้แก่ ผักตบชวาที่มีขนาดใหญ่ที่สุดที่สามารถใส่ในขวดซีรัมและขอใช้เป็นตัวแทนของผักตบชวาที่ไม่ผ่านการบำบัดเบื้องต้น (40-50 มิลลิเมตร)

1. ซีโอดีละลาย

ตลอดการทดลองเป็นเวลา 39 วัน พบว่า ทุกกลุ่มของขนาดมีค่าซีโอดีละลายสูง 2 ครั้ง ได้แก่ วันที่ 7 และวันที่ 12 โดยที่ซีโอดีละลายของ 12 วันแรกมีแนวโน้มสูงขึ้น ซึ่งกลุ่มที่ 1 กลุ่มที่ 2 กลุ่มที่ 3 กลุ่มที่ 4 และชุดควบคุม มีค่าซีโอดีละลายเฉลี่ยของ 12 วันแรกเท่ากับ $6,050 \pm 2,025$ $5,125 \pm 1,866$ $4,350 \pm 1,280$ $4,300 \pm 1,446$ และ $4,350 \pm 1,482$ มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ ในขณะที่ตั้งแต่วันที่ 12 จนกระทั่งสิ้นสุดการทดลองค่าซีโอดีละลายมีแนวโน้มลดลง ซึ่งกลุ่มที่ 1 กลุ่มที่ 2 กลุ่มที่ 3 กลุ่มที่ 4 และชุดควบคุม มีค่าซีโอดีละลายเฉลี่ยของวันที่ 12 ถึงสิ้นสุดการทดลองเท่ากับ $5,307 \pm 1,861$ $4,522 \pm 1,635$ $3,946 \pm 1,279$ $3,822 \pm 1,477$ และ $3,377 \pm 1,591$ มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ ทั้งนี้ซีโอดีละลายที่วิเคราะห์ได้นี้เป็นผลจากการผลิตและการใช้ของจุลินทรีย์

กลุ่มที่ 1 ซีโอดีละลายของวันที่ 1 มีค่าอยู่ระหว่าง 2,400-4,800 มิลลิกรัม/ลิตร และมีค่าสูงสุดในวันที่ 12 โดยมีค่าซีโอดีละลายอยู่ระหว่าง 8,000-8,600 มิลลิกรัม/ลิตร ซึ่งขนาดน้อยกว่า 5 มิลลิเมตรมีค่าซีโอดีละลายสูงสุดเท่ากับ 8,600 มิลลิกรัม/ลิตร ในขณะที่ขนาด 5-10 และ 10-15 มิลลิเมตรมีค่าซีโอดีละลายเท่ากัน (8,000 มิลลิกรัม/ลิตร) และเมื่อสิ้นสุดการทดลองค่าซีโอดีละลายของกลุ่มที่ 1 ลดลงเหลือ 2,000-3,100 มิลลิกรัม/ลิตร

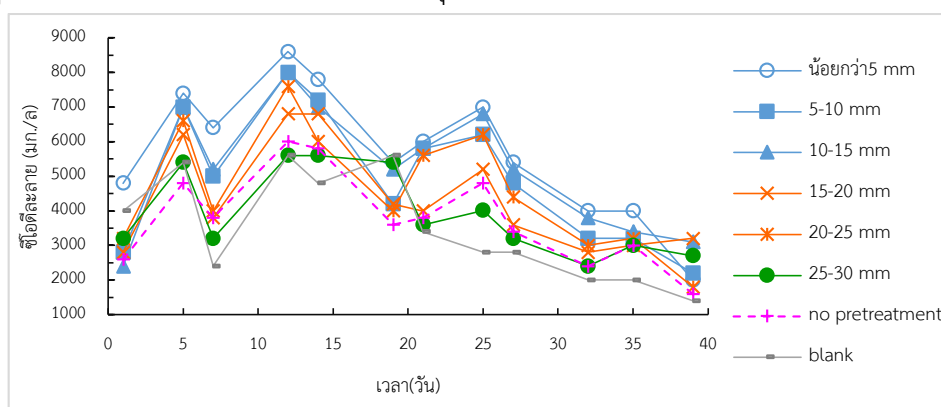
กลุ่มที่ 2 ซีโอดีละลายของวันที่ 1 มีค่าอยู่ระหว่าง 2,800-3,200 มิลลิกรัม/ลิตร และมีค่าสูงสุดเท่ากับ 6,800-7,600 มิลลิกรัม/ลิตรในวันที่ 12 จากนั้นค่าซีโอดีละลายมีแนวโน้มลดลงจนกระทั่งสิ้นสุดการทดลองซีโอดีละลายของกลุ่มที่ 2 มีค่าเท่ากับ 1,800-3,200 มิลลิกรัม/ลิตร

กลุ่มที่ 3 ซีโอดีละลายของวันที่ 1 มีค่าเท่ากับ 3,200 มิลลิกรัม/ลิตร และมีแนวโน้มสูงขึ้นจนกระทั่งวันที่ 12 มีค่าซีโอดีละลายสูงสุดเท่ากับ 5,600 มิลลิกรัม/ลิตร และเมื่อสิ้นสุดการทดลองค่าซีโอดีละลายของกลุ่มที่ 3 ลดลงเหลือ 2,700 มิลลิกรัม/ลิตร

กลุ่มที่ 4 (ผักตบชวาที่ไม่ผ่านการบำบัดเบื้องต้น) ซีไอดีละลายของวันที่ 1 มีค่าเท่ากับ 2,600 มิลลิกรัม/ลิตร และมีค่าสูงสุดเท่ากับ 6,000 มิลลิกรัม/ลิตรในวันที่ 12 จากนั้นค่า ซีไอดีละลายมีแนวโน้มลดลงจนกระทั่งสิ้นสุดการทดลองซีไอดีละลายมีค่าเท่ากับ 1,600 มิลลิกรัม/ลิตร

การทดลองชุดควบคุม (มูลโค) ซีไอดีละลายของวันที่ 1 มีค่าเท่ากับ 4,000 มิลลิกรัม/ลิตร และมีแนวโน้มสูงขึ้นจนวันที่ 12 มีค่าซีไอดีละลายสูงสุดเท่ากับ 5,600 มิลลิกรัม/ลิตร ในขณะที่ซีไอดีละลายเมื่อสิ้นสุดการทดลองของชุดควบคุมมีค่า 1,400 มิลลิกรัม/ลิตร

เมื่อพิจารณาจากกลุ่มของขนาดจะเห็นได้ว่าตลอดการทดลองขนาดมีผลต่อความเข้มข้นซีไอดีละลายสูงสุด แสดงว่า การลดขนาดเป็นผลทำให้ค่าซีไอดีละลายสูงสุดเพิ่มขึ้นในเวลาเท่ากัน ทั้งนี้การลดขนาดเป็นการทำให้พื้นที่ผิวเพิ่มขึ้นส่งผลให้เกิดการลดอันดับการโพลีเมอร์และโครงสร้างผลึกเซลลูโลส จึงทำให้สารอินทรีย์เกิดการละลายน้ำมากขึ้น เป็นผลให้ความเข้มข้นซีไอดีละลายสูงขึ้น (Hendriks และ Zeeman, 2009) แสดงดังรูปที่ 4.1 นอกจากนี้ยังพบว่าค่าซีไอดีละลายของของผสมระหว่างผักตบชวาและมูลโคทุกกลุ่มในช่วง 12 วันแรกมีแนวโน้มสูงขึ้นโดยกลุ่มขนาดเล็ก (กลุ่มที่ 1) มีค่าสูงสุดและกลุ่มที่ไม่ผ่านการบำบัดเบื้องต้น (กลุ่มที่ 4) มีค่าต่ำสุด แต่ค่าซีไอดีละลายของทุกกลุ่มในช่วงตั้งแต่วันที่ 12 จนกระทั่งสิ้นสุดการทดลองมีแนวโน้มลดลงโดยทุกกลุ่มอยู่ในระดับใกล้เคียงกัน อาจมีสาเหตุมาจากค่าซีไอดีของ 12 วันแรกมาจากการย่อยสลายของสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายง่าย เช่น น้ำตาล และองค์ประกอบของเซลล์ที่ละลายน้ำได้จึงทำให้ซีไอดีละลายของช่วง 12 วันแรกมีค่าสูง แต่ต่อมาเป็นการย่อยสลายของสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้ยากกว่าจึงทำให้ซีไอดีละลายตั้งแต่วันที่ 12 จนกระทั่งสิ้นสุดการทดลองมีแนวโน้มลดลง (Ahn และคณะ, 2009 ; Rodriguez และคณะ, 2016) ซึ่งสอดคล้องกับอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพรายวันที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นของช่วง 14 วันแรกและมีแนวโน้มลดลงจนกระทั่งสิ้นสุดการทดลอง (รูปที่ 4.6) ทั้งนี้ซีไอดีละลายต่ำสุดยังสูงกว่าค่ามาตรฐานน้ำทิ้ง 120 มิลลิกรัม/ลิตร (กรมควบคุมมลพิษ, 2539)



รูปที่ 4.1 ซีไอดีละลายของการทดลองที่ 2

2. กรดอินทรีย์ระเหย

กรดอินทรีย์ระเหยทุกกลุ่มของ 7 วันแรกมีแนวโน้มสูงขึ้น ซึ่งกลุ่มที่ 1 กลุ่มที่ 2 กลุ่มที่ 3 กลุ่มที่ 4 และชุดควบคุม มีค่ากรดอินทรีย์ระเหยเฉลี่ยของ 7 วันแรกเท่ากับ $2,029.86 \pm 867$ $1,741.67 \pm 709$ $1,370.83 \pm 557$ $1,391.67 \pm 571$ และ $1,054.17 \pm 518$ มิลลิกรัม/ลิตร กรดอะซิติก ตามลำดับ แต่กรดอินทรีย์ระเหยมีแนวโน้มลดลงในวันที่ 7 จนกระทั่งสิ้นสุดการทดลอง ซึ่งกลุ่มที่ 1 กลุ่มที่ 2 กลุ่มที่ 3 กลุ่มที่ 4 และชุดควบคุม มีค่ากรดอินทรีย์ระเหยเฉลี่ยเท่ากับ $1,261.88 \pm 730$ $1,050.31 \pm 573$ 829.38 ± 548 913.13 ± 479 และ 690 ± 404 มิลลิกรัม/ลิตร กรดอะซิติก ตามลำดับ (รูปที่ 4.2) ทั้งนี้แนวโน้มการเพิ่มขึ้นและลดลงเหมือนกับซีโอดีละลาย นอกจากนี้กรดอินทรีย์ระเหยที่วิเคราะห์ได้นี้เป็นผลจากการผลิตและการใช้ของจุลินทรีย์

กลุ่มที่ 1 กรดอินทรีย์ระเหยของวันที่ 1 มีค่าอยู่ระหว่าง 681.25-1,081.25 มิลลิกรัม/ลิตร กรดอะซิติก และมีค่าสูงสุดในวันที่ 7 ซึ่งมีกรดอินทรีย์ระเหยอยู่ระหว่าง 2,437.50-3,006.25 มิลลิกรัม/ลิตร กรดอะซิติก โดยที่ขนาดน้อยกว่า 5 มิลลิเมตรมีกรดอินทรีย์ระเหยสูงสุดเท่ากับ 3,006.25 มิลลิกรัม/ลิตร กรดอะซิติก ในขณะที่กรดอินทรีย์ระเหยของขนาด 5-10 และ 10-15 มิลลิเมตรเท่ากับ 2,768.75 และ 2,437.50 มิลลิกรัม/ลิตร กรดอะซิติก ตามลำดับ และเมื่อสิ้นสุดการทดลองกรดอินทรีย์ระเหยของกลุ่มที่ 1 ลดลงเหลือ 462.50-718.75 มิลลิกรัม/ลิตร กรดอะซิติก

กลุ่มที่ 2 กรดอินทรีย์ระเหยของวันที่ 1 มีค่าอยู่ระหว่าง 725.00-1,043.75 มิลลิกรัม/ลิตร กรดอะซิติก และในวันที่ 7 กรดอินทรีย์ระเหยมีค่าสูงสุดเท่ากับ 2,406.25-2,437.50 มิลลิกรัม/ลิตร กรดอะซิติก จากนั้นกรดอินทรีย์ระเหยมีแนวโน้มลดลงจนกระทั่งสิ้นสุดการทดลองมีค่ากรดอินทรีย์ระเหยเท่ากับ 587.50-693.75 มิลลิกรัม/ลิตร กรดอะซิติก

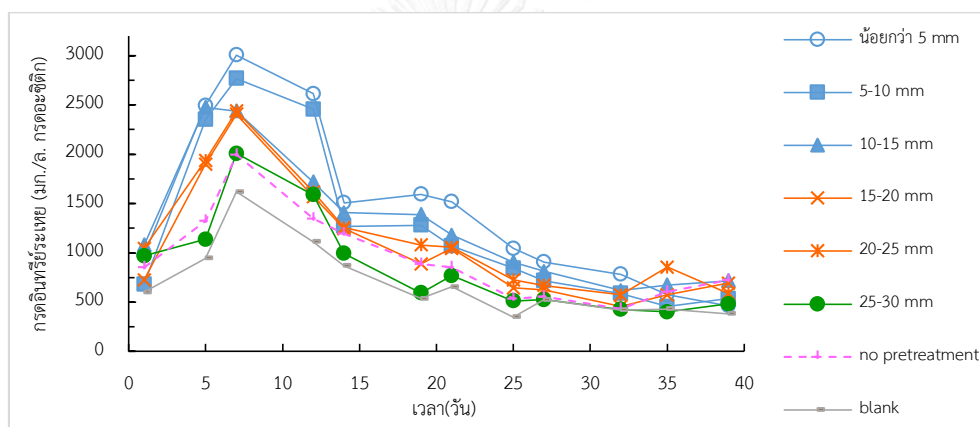
กลุ่มที่ 3 กรดอินทรีย์ระเหยของวันที่ 1 มีค่าเท่ากับ 968.75 มิลลิกรัม/ลิตร กรดอะซิติก และมีแนวโน้มสูงขึ้นจนกระทั่งวันที่ 7 มีค่ากรดอินทรีย์ระเหยสูงสุดเท่ากับ 2,006.25 มิลลิกรัม/ลิตร กรดอะซิติก และกรดอินทรีย์ระเหยเมื่อสิ้นสุดการทดลองลดลงเหลือ 481.25 มิลลิกรัม/ลิตร กรดอะซิติก

กลุ่มที่ 4 กรดอินทรีย์ระเหยของวันที่ 1 มีค่าเท่ากับ 856.25 มิลลิกรัม/ลิตร กรดอะซิติก และในวันที่ 7 กรดอินทรีย์ระเหยมีค่าสูงสุดเท่ากับ 1,993.75 มิลลิกรัม/ลิตร กรดอะซิติก จากนั้นกรดอินทรีย์ระเหยมีแนวโน้มลดลงจนกระทั่งสิ้นสุดการทดลองมีค่ากรดอินทรีย์ระเหยเท่ากับ 725.00 มิลลิกรัม/ลิตร กรดอะซิติก

การทดลองชุดควบคุม (มูโค) มีค่ากรดอินทรีย์ระเหยของวันที่ 1 เท่ากับ 600 มิลลิกรัม/ลิตร กรดอะซิติก และมีแนวโน้มสูงขึ้นจนวันที่ 7 มีค่ากรดอินทรีย์ระเหยสูงสุดเท่ากับ

1,618.75 มิลลิกรัม/ลิตร กรดอะซิติก และกรดอินทรีย์ระเหยมีแนวโน้มลดลงจนกระทั่งสิ้นสุดการทดลอง โดยมีกรดอินทรีย์ระเหยเหลือ 381.25 มิลลิกรัม/ลิตร

จากการจัดกลุ่มของขนาดแสดงให้เห็นว่าการลดขนาดมีผลต่อความเข้มข้นกรดอินทรีย์ระเหยเนื่องจากจุลินทรีย์กลุ่มสร้างกรดสามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ละลายน้ำและเปลี่ยนเป็นกรดอินทรีย์ระเหยได้มากขึ้น (วันที่ 1 ถึงวันที่ 7) เมื่อขนาดเล็กลง และเมื่อเวลาผ่านไปกรดอินทรีย์ระเหยมีค่าลดลง (วันที่ 7 ถึงสิ้นสุดการทดลอง) เนื่องจากถูกนำไปใช้โดยจุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทน แสดงดังรูปที่ 4.2 ซึ่งสอดคล้องกับอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพรายวันตั้งแต่วันที่ 1 ถึงวันที่ 14 ที่มีแนวโน้มสูงขึ้นและสูงสุดในวันที่ 14 ในขณะที่วันที่ 14 ถึงสิ้นสุดการทดลองอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพมีแนวโน้มลดลง (รูปที่ 4.6)



รูปที่ 4.2 กรดอินทรีย์ระเหยของการทดลองที่ 2

- การเปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่น

การเปรียบเทียบปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยของการทดลองนี้กับการหมักร่วมของหญ้าเนเปียร์ยักษ์และมูลโคในสัดส่วน 1:1 (ของแข็งระเหย) แสดงดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 กรดอินทรีย์ระเหยเมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่น

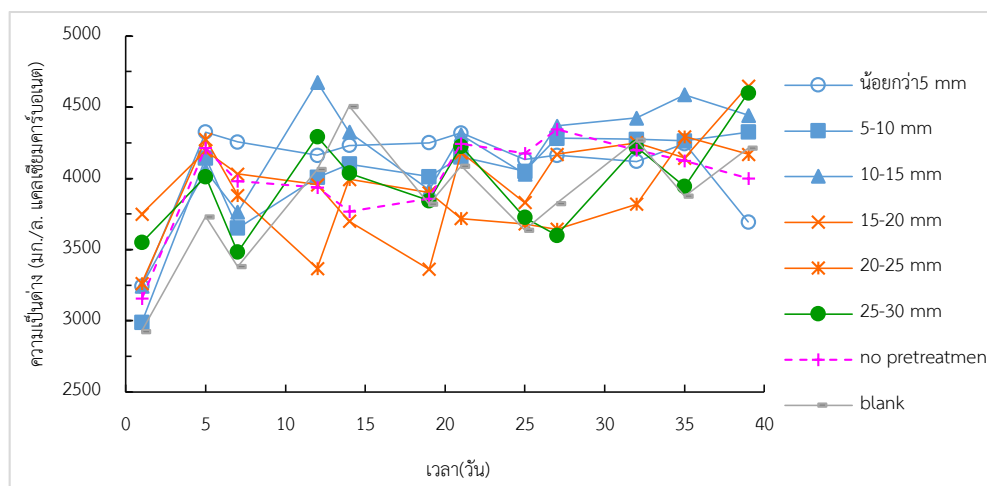
งานวิจัย	ขนาด (มิลลิเมตร)	กรดอินทรีย์ ระเหยสูงสุด (วันที่)	กรดอินทรีย์ระเหย สูงสุด (มก./ล. กรดอะซิติก)	สัดส่วน (ร้อยละน้ำหนักแห้ง)		
				เซลลูโลส	เฮมิ เซลลูโลส	ลิกนิน
1. ญัฐกาญจน์ ชราพก (2554)	2	7	2,134	72.4	13.91	13.69
2. งานวิจัยนี้ (การทดลองที่ 2)	น้อยกว่า 5	7	3,006	19.88	33.91	4.22

จากตารางที่ 4.5 พบว่า ค่ากรดอินทรีย์ระเหยสูงสุดของการทดลองนี้ที่ขนาดน้อยกว่า 5 มิลลิเมตรมีค่าสูงกว่ากรดอินทรีย์สูงสุดจากการหมักร่วมของหญ้าเนเปียร์ยักษ์และมูลโค (ญัฐกาญจน์ ชราพก, 2554) อาจเกิดจากองค์ประกอบที่ย่อยสลายได้ยาก ได้แก่ เซลลูโลส และลิกนินของผักตบชวามีปริมาณน้อยกว่าหญ้าเนเปียร์ยักษ์ จึงทำให้ผักตบชวาถูกย่อยสลายได้ง่ายกว่าและเปลี่ยนเป็นกรดอินทรีย์ระเหยได้มากกว่าหญ้าเนเปียร์ยักษ์

3. ความแตกต่าง

การทดลองในวันที่ 1 มีค่าความแตกต่างเฉลี่ยของกลุ่มที่ 1 กลุ่มที่ 2 กลุ่มที่ 3 กลุ่มที่ 4 และชุดควบคุมเท่ากับ $3,158.33 \pm 147$ $3,506.25 \pm 344$ $3,550.00 \pm 0$ $3,156.25 \pm 0$ และ $2,925.00 \pm 0$ มิลลิกรัม/ลิตร แคลเซียมคาร์บอเนต ตามลำดับ และความแตกต่างเมื่อสิ้นสุดการทดลองมีค่าเพิ่มขึ้นอาจเกิดจากการสะสมของไบคาร์บอเนตที่เกิดจากการเติมสารละลายบัฟเฟอร์ และอะซิเตตไอออนจากการแตกตัวของกรดอะซิติก รวมถึงการย่อยสลายกรดอินทรีย์ระเหยโดยจุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทนทำให้เกิดคาร์บอนไดออกไซด์และมีเทน ซึ่งคาร์บอนไดออกไซด์บางส่วนที่ละลายน้ำจะเกิดเป็นกรดคาร์บอนิกและแตกตัวได้ไฮโดรเจนไอออนและไบคาร์บอเนต (Appels และคณะ, 2008) ส่งผลให้ความแตกต่างในระบบมีค่าสูงขึ้น โดยเมื่อสิ้นสุดการทดลองกลุ่มที่ 1 กลุ่มที่ 2 กลุ่มที่ 3 กลุ่มที่ 4 และชุดควบคุมมีค่าความแตกต่างเฉลี่ยเท่ากับ $4,154.17 \pm 403$ $4,409.38 \pm 340$ $4,600.00 \pm 0$ $4,000.00 \pm 0$ และ $4,212.50 \pm 0$ มิลลิกรัม/ลิตร แคลเซียมคาร์บอเนต ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.3 เป็นผลให้ความเป็นกรดต่างในช่วงสุดท้ายของการทดลองมีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย (รูปที่ 4.4) อย่างไรก็ตามค่าความแตกต่างของทุกกลุ่มตลอดการทดลองมีความเหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของ

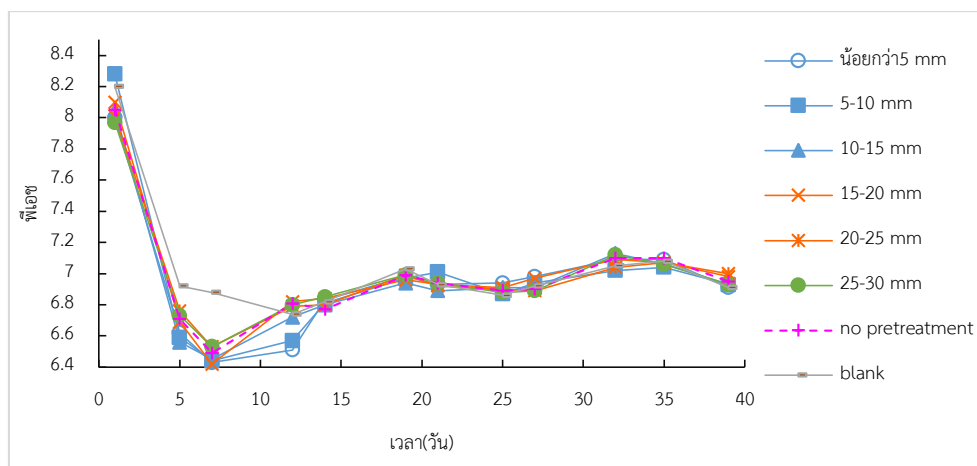
จุลินทรีย์ในระบบไร้อากาศ ทั้งนี้ความเป็นต่างที่เหมาะสมในกระบวนการย่อยสลายในระบบไร้อากาศควรมีค่าอยู่ในช่วง 1,000 - 5,000 มิลลิกรัม/ลิตร แคลเซียมคาร์บอเนต (Rittmann และ McCarty, 2000)



รูปที่ 4.3 ความเป็นต่างของการทดลองที่ 2

4. ความเป็นกรดต่าง (พีเอช)

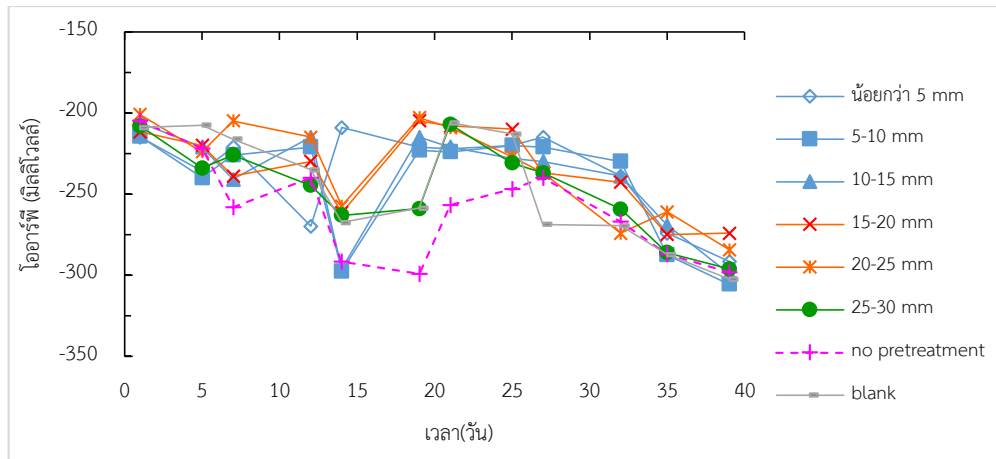
เมื่อเริ่มต้นการทดลองไม่มีการปรับค่าพีเอชของน้ำผสมสารละลายบัฟเฟอร์ที่เติมลงในขวดซีรัมโดยมีค่าพีเอชเฉลี่ยของทุกกลุ่มเท่ากับ 8.07 ± 0.1 และพีเอชของน้ำผสมสารละลายบัฟเฟอร์มีค่าลดลงต่ำสุดในวันที่ 7 เนื่องจากกรดอินทรีย์ระเหยมีค่าสูงขึ้น โดยพีเอชของกลุ่มที่ 1 กลุ่มที่ 2 กลุ่มที่ 3 กลุ่มที่ 4 และชุดควบคุมมีค่าเฉลี่ยของวันที่ 7 เท่ากับ 6.44 ± 0.01 6.48 ± 0.08 $6.53 \pm 0.649 \pm 0$ และ 6.74 ± 0 ตามลำดับ และช่วงสุดท้ายของการทดลองซึ่งเป็นช่วงที่เข้าสู่สมดุลเนื่องจากค่าพีเอชมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากคือตั้งแต่วันที่ 14 จนกระทั่งสิ้นสุดการทดลอง ซึ่งพีเอชของกลุ่มที่ 1 กลุ่มที่ 2 กลุ่มที่ 3 กลุ่มที่ 4 และชุดควบคุมมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 6.95 ± 0.09 6.96 ± 0.08 6.96 ± 0.09 6.96 ± 0.11 และ 6.95 ± 0.09 ตามลำดับ ทำให้มีความเหมาะสมต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ โดยที่พีเอชที่เหมาะสมต่อการทำงานของจุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทนมีค่าอยู่ระหว่าง 6.5-7.6 (Rittmann และ McCarty, 2000) นอกจากนี้ยังพบว่าตลอดการทดลองค่าพีเอชของทุกกลุ่มมีค่าใกล้เคียงกัน แสดงดังรูปที่ 4.4 โดยค่าความเป็นกรดต่างของ 7 วันแรกในทุกกลุ่มมีแนวโน้มลดลงซึ่งสอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นของกรดอินทรีย์ระเหยของ 7 วันแรก (รูปที่ 4.2) และอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพรายวันที่เพิ่มขึ้นของช่วง 14 วันแรก (รูปที่ 4.6)



รูปที่ 4.4 พีเอชของการทดลองที่ 2

5. ความต่างศักย์ออกซิเดชันรีดักชัน

การทดลองกลุ่มที่ 1 กลุ่มที่ 2 กลุ่มที่ 3 กลุ่มที่ 4 และชุดควบคุมมีค่าความต่างศักย์ออกซิเดชันรีดักชันเฉลี่ยของวันที่ 1 เท่ากับ -211.83 ± 5.06 -206.30 ± 2.83 -208.00 ± 0 -205.00 ± 0 และ -209.00 ± 0 มิลลิโวลต์ ตามลำดับ แสดงว่าระบบอยู่ในสภาพไร้อากาศ (anaerobic) ตั้งแต่เริ่มต้นการทดลอง ในขณะที่ค่าความต่างศักย์ออกซิเดชันรีดักชันที่เหมาะสมของสภาพแอนอนอกซิกมีค่าแตกต่างกันในแต่ละระบบ (Patrick และคณะ, 1964 ; ธงชัย พรรณสวัสดิ์, 2544 ; มั่นสิน ตัณกุลเวศม์, 2544) และเมื่อเวลาผ่านไปความต่างศักย์ออกซิเดชันรีดักชันของการทดลองนี้มีค่าติดลบมากขึ้นอาจมีสาเหตุมาจากออกซิเจนภายในอากาศไม่สามารถแพร่ลงไปในระบบได้หรือไม่มีออกซิเจนละลายน้ำ (มั่นสิน ตัณกุลเวศม์, 2544) จนกระทั่งสิ้นสุดการทดลองกลุ่มที่ 1 กลุ่มที่ 2 กลุ่มที่ 3 กลุ่มที่ 4 และชุดควบคุมมีค่าความต่างศักย์ออกซิเดชันรีดักชันเฉลี่ยเท่ากับ -298.83 ± 6.96 -279.30 ± 7.21 -296.20 ± 0 -298.40 ± 0 และ -302.50 ± 0 มิลลิโวลต์ ตามลำดับ ทั้งนี้ความต่างศักย์ออกซิเดชันรีดักชันตลอดการทดลองเหมาะสมสำหรับขั้นตอนการผลิตก๊าซมีเทน โดยที่ความต่างศักย์ออกซิเดชันรีดักชันที่เหมาะสมสำหรับขั้นตอนการผลิตก๊าซมีเทนมีค่าอยู่ระหว่าง -100 ถึง -300 มิลลิโวลต์ (Bilgili และคณะ, 2007) ดังรูปที่ 4.5

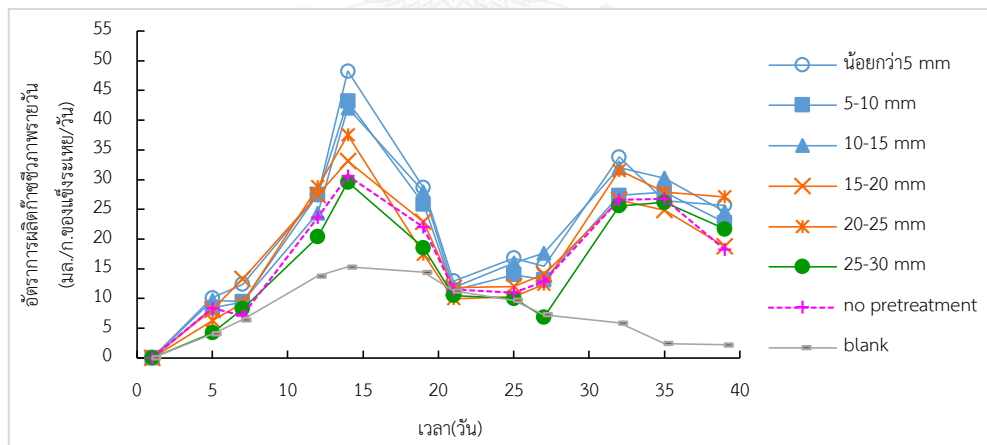


รูปที่ 4.5 ความต่างศักย์ออกซิเดชันรีดักชันของการทดลองที่ 2

4.2.3 ศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนจากผักตบชวา

1. การผลิตก๊าซชีวภาพรายวันต่อของแข็งระเหย

การผลิตก๊าซชีวภาพรายวันแสดงถึงอัตราเร็วของการย่อยสลายสารอินทรีย์ในหน่วยของแข็งระเหยที่ใส่เข้าสู่ระบบกลายเป็นก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นในแต่ละวัน ดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพของการทดลองที่ 2

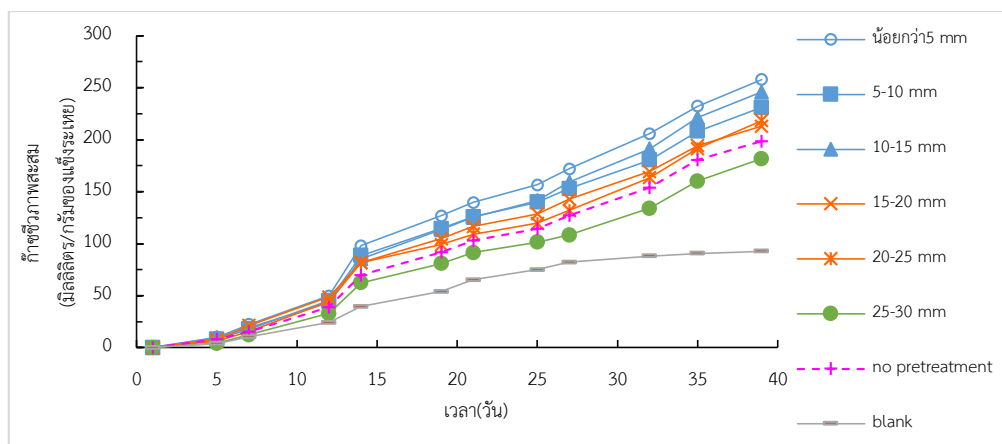
จากรูปที่ 4.6 ตลอดช่วงเวลา 39 วัน พบว่า ทุกกลุ่มของขนาดมีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพสูงอยู่ 2 ครั้ง คือ วันที่ 14 และวันที่ 32 จึงแบ่งอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพออกเป็น 2 ช่วง คือ ช่วงที่ 1 ระหว่างวันที่ 1 ถึงวันที่ 25 โดยกลุ่มที่ 1 กลุ่มที่ 2 กลุ่มที่ 3 และกลุ่มที่ 4 มีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพเฉลี่ยเท่ากับ 20.85 ± 12.20 17.73 ± 10.27 14.50 ± 8.74 และ 16.33 ± 9.04

มิลลิลิตร/กรัมของแข็งระเหย/วัน ตามลำดับ ในขณะที่ช่วงที่ 2 ระหว่างวันที่ 25 ถึง 39 ซึ่งกลุ่มที่ 1 กลุ่มที่ 2 กลุ่มที่ 3 และกลุ่มที่ 4 มีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพเฉลี่ยตั้งแต่วันที่ 25 ถึง 39 เท่ากับ 22.92 ± 6.89 20.56 ± 7.90 18.07 ± 9.01 และ 19.09 ± 7.44 มิลลิลิตร/กรัมของแข็งระเหย/วัน ตามลำดับ ทั้งนี้อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพสูงสุด (วันที่ 14) ในช่วงที่ 1 ของทุกกลุ่มมากกว่าอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพสูงสุด (วันที่ 32) ในช่วงที่ 2 เนื่องจากปริมาณสารอินทรีย์ที่เป็นอาหารของจุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทนของช่วงที่ 1 สูงกว่าช่วงที่ 2 โดยพิจารณาจากกรดอินทรีย์ระเหยเฉลี่ยของช่วง 25 วันแรกที่มีค่ากรดอินทรีย์ระเหยเฉลี่ยเท่ากับ $1,414.29 \pm 644$ มิลลิกรัม/ลิตร กรดอะซิติก ซึ่งมีค่าสูงสุดในวันที่ 7 และตั้งแต่วันที่ 7 ถึงสิ้นสุดการทดลองกรดอินทรีย์ระเหยมีแนวโน้มลดลง (รูปที่ 4.2) ส่งผลให้จุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทนสามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้มากในช่วงที่ 1

เมื่อพิจารณาในกลุ่มที่ 1 ซึ่งมีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพเฉลี่ยสูงที่สุดทั้ง 2 ช่วง (20.85 ± 12.20 และ 22.92 ± 6.89 มิลลิลิตร/กรัมของแข็งระเหย/วัน ตามลำดับ) พบว่า วันที่ 14 และวันที่ 32 ขนาดน้อยกว่า 5 มิลลิเมตรมีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพสูงสุดเท่ากับ 48.25 และ 33.77 มิลลิลิตร/กรัมของแข็งระเหย/วัน ตามลำดับ ในขณะที่อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพของขนาด 5-10 เท่ากับ 43.19 และ 27.34 มิลลิลิตร/กรัมของแข็งระเหย/วัน ตามลำดับ และขนาด 10-15 มิลลิเมตรมีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพเท่ากับ 42.05 และ 32.01 มิลลิลิตร/กรัมของแข็งระเหย/วัน ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าขนาดมีผลต่ออัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ และคาดว่า การผลิตก๊าซชีวภาพสูงสุดของช่วงที่ 1 เป็นการย่อยสลายของสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายง่าย เช่น น้ำตาล และองค์ประกอบของเซลล์ที่ละลายน้ำได้ แต่ในช่วงที่ 2 เป็นการย่อยสลายของสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้ยากกว่าจึงทำให้ก๊าซชีวภาพมีค่าสูงขึ้นอีกครั้ง (Ahn และคณะ, 2009 ; Rodriguez และคณะ, 2016) โดยสามารถพิจารณาได้จากซีไอเอสละลายของวันที่ 12 มีค่าสูงสุดและซีไอเอสละลายของวันที่ 25 มีค่าสูงอีกครั้ง (รูปที่ 4.1)

2. ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม

ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมแสดงถึงศักยภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพ โดยปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมของผักตบชวา 4 กลุ่ม แสดงดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 ก๊าซชีวภาพสะสมของการทดลองที่ 2

จากรูปที่ 4.7 พบว่า ระยะเวลาที่ทำการทดลอง 39 วัน ผักตบชวา กลุ่มที่ 1 กลุ่มที่ 2 กลุ่มที่ 3 และกลุ่มที่ 4 มีปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมเฉลี่ยเท่ากับ 244.94 ± 13.48 215.74 ± 3.89 181.81 ± 0 และ 198.75 ± 0 มิลลิลิตร/กรัมของแข็งระเหย ตามลำดับ จะเห็นได้ว่า เมื่อขนาดเพิ่มขึ้น (กลุ่มที่ 1 ถึงกลุ่มที่ 3) ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมเฉลี่ยมีค่าลดลง แสดงว่า ขนาดมีผลต่อปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมเฉลี่ย แต่กลุ่มที่ 4 มีปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมสูงกว่ากลุ่มที่ 3 ทั้งนี้ผลนี้ได้สอดคล้องกับการผลิตก๊าซชีวภาพจากพืชทางการเกษตร ได้แก่ หลู่ฟ่า พางข้าวสาลี และพางข้าว โดยพบว่าก๊าซชีวภาพสะสมมีค่าไม่แตกต่างกันเมื่อมีขนาดใหญ่อขึ้น (Sharma และคณะ, 1988)

กลุ่มที่ 1 ขนาดน้อยกว่า 5 มิลลิเมตรมีปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมสูงที่สุดเท่ากับ 257.89 มิลลิลิตร/กรัมของแข็งระเหย รองลงมาคือ 10-15 และ 5-10 มิลลิเมตร ซึ่งมีปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมเท่ากับ 245.95 และ 230.98 มิลลิลิตร/กรัมของแข็งระเหย ตามลำดับ

กลุ่มที่ 2 ขนาด 20-25 มิลลิเมตรมีปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม (218.49 มล./ก. ของแข็งระเหย) สูงกว่า 15-20 มิลลิเมตร (212.95 มิลลิลิตร/กรัมของแข็งระเหย)

กลุ่มที่ 3 ขนาด 25-30 มิลลิเมตร มีปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม 181.81 มล./ก. ของแข็งระเหย

กลุ่มที่ 4 ผักตบชวาที่ไม่ผ่านการบำบัดเบื้องต้น มีปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม 198.75 มิลลิลิตร/กรัมของแข็งระเหย

ชุดควบคุมมีปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมต่ำสุด (92.82 มล./ก.ของแข็งระเหย) ซึ่ง ก๊าซชีวภาพสะสมของชุดควบคุมนี้ไม่สอดคล้องกับของแข็งระเหยที่ลดลง (ตารางที่ 4.4) แสดงว่า จุลินทรีย์ไม่สามารถนำสารอินทรีย์ไปใช้ในการผลิตก๊าซชีวภาพได้

ดังนั้น การลดขนาดมีผลต่อปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมเนื่องจากการลดขนาดเป็นผลให้อันดับการโพลิเมอร์ (degree of polymerization) และโครงสร้างผลึกของเซลลูโลสลดลง พื้นที่ผิวเพิ่มขึ้น (Krathy และ Jirout, 2011) ทำให้ขนาดที่เล็กลงเกิดการย่อยสลายสารอินทรีย์ได้ง่ายยิ่งขึ้น ส่งผลให้ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมสูงขึ้น โดยสามารถเพิ่มปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมได้ถึง 0.92-1.30 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับผักตบชวาที่ไม่ผ่านการบำบัดเบื้องต้น

4.2.4 การวิเคราะห์ทางสถิติ

เมื่อนำข้อมูลไปวิเคราะห์ทางสถิติของขนาดของผักตบชวากับปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม พบว่า ขนาดมีผลต่อปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) ดังรายละเอียดในภาคผนวก จ

4.2.5 เปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่น

การเปรียบเทียบศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพของการทดลองนี้กับงานวิจัยอื่นๆ แสดงดังตารางที่ 4.6 และงานวิจัยนี้หากคิดที่ก๊าซชีวภาพประกอบด้วยก๊าซมีเทนร้อยละ 50 ดังนั้น การทดลองนี้จึงมีปริมาณก๊าซมีเทนสะสมเท่ากับ 0.091-0.129 ลิตร/กรัมของแข็งระเหย ตารางที่ 4.6 เปรียบเทียบงานวิจัยนี้กับงานวิจัยที่ผ่านมา

สารตั้งต้น	อุณหภูมิ (°C)	ระยะเวลา (วัน)	ความชื้น (ร้อยละ)	ศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ (ล./ก.ของแข็งระเหย)	
				ก๊าซชีวภาพ	มีเทน
1. ชังข้าวโพดหมักร่วมกับมูลไก่ (Li และคณะ, 2013)					
ชังข้าวโพด:มูลไก่ =1:1 (ของแข็งระเหย)	37	30	94.6	-	0.148
2. ผักตบชวามักร่วมกับมูลไก่ (Jagadish และคณะ, 2012)					
ผักตบชวา:มูลไก่ =1:12.5 (ของแข็งระเหย)	30-35	40	92.8	-	0.390
3. งานวิจัยนี้ (การทดลองที่ 2)					
ผักตบชวา: มูลโค =2:1 (ของแข็งระเหย)	28-32	39	98.55	0.182-0.258 0.275-0.351 ^a	0.091-0.129 0.138-0.176 ^a

หมายเหตุ a = ปริมาณก๊าซชีวภาพของงานวิจัยนี้ร่วมกับชุดควบคุม*

* = ชุดควบคุมจากมูลโค

จากตารางที่ 4.6 เมื่อนำศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพมาเปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่นๆ โดยที่อุณหภูมิ ระยะเวลา และความชื้นมีค่าใกล้เคียงกับงานวิจัยนี้ พบว่า งานวิจัยนี้มีศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพต่ำกว่างานวิจัยอื่นๆ อาจเป็นผลมาจากมูลสัตว์ของงานวิจัยอื่นๆ มีปริมาณสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายง่ายในปริมาณมากกว่าจึงทำให้จุลินทรีย์สามารถย่อยสลายสารอินทรีย์เป็นก๊าซชีวภาพได้มากกว่า และปริมาณก๊าซชีวภาพของงานวิจัยอื่นนั้นไม่มีการหักค่าจากชุดควบคุมออก

เมื่อนำปริมาณก๊าซชีวภาพของงานวิจัยนี้รวมกับชุดควบคุม พบว่า งานวิจัยนี้มีปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมเท่ากับ 0.275-0.351 ลิตร/กรัมของแข็งระเหย และหากคิดที่ก๊าซชีวภาพประกอบด้วยก๊าซมีเทนร้อยละ 50 ดังนั้น การทดลองนี้จึงมีปริมาณก๊าซมีเทนสะสมเท่ากับ 0.138-0.176 ลิตร/กรัมของแข็งระเหย ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Li และคณะ (2013)

4.2.6 บทสรุปของการทดลองที่ 2

ประสิทธิภาพการบำบัดเบื้องต้นทางกายภาพโดยการลดขนาดเมื่อพิจารณาจากปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมและของแข็งระเหยที่ลดลง แสดงดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 ประสิทธิภาพการบำบัดเบื้องต้นทางกายภาพโดยการลดขนาด

ขนาด	ก๊าซชีวภาพสะสม (ล./ก.ของแข็งระเหย)	Δของแข็งระเหยที่ลดลง (ร้อยละน้ำหนักแห้ง)
<ul style="list-style-type: none"> • กลุ่มที่ 1 <ol style="list-style-type: none"> 1. น้อยกว่า 5 มิลลิเมตร 2. 5-10 มิลลิเมตร 3. 10-15 มิลลิเมตร 	0.258 0.231 0.246 0.245±13.48	38.52 35.43 34.30 36.08±2.18
<ul style="list-style-type: none"> • กลุ่มที่ 2 <ol style="list-style-type: none"> 1. 15-20 มิลลิเมตร 2. 20-25 มิลลิเมตร 	0.213 0.219 0.216±3.89	31.62 30.70 31.16±0.65
<ul style="list-style-type: none"> • กลุ่มที่ 3 	0.182	27.77

ตารางที่ 4.7 ประสิทธิภาพการบำบัดเบื้องต้นทางกายภาพโดยการลดขนาด (ต่อ)

ขนาด	ก๊าซชีวภาพสะสม (ล./ก.ของแข็งระเหย)	Δ ของแข็งระเหยที่ลดลง (ร้อยละน้ำหนักแห้ง)
1. 25-30 มิลลิเมตร	0.182	27.77
• กลุ่มที่ 4		
1. ไม่ผ่านการบำบัดเบื้องต้น	0.198	29.30

จากตารางที่ 4.7 สามารถสรุปได้ว่า ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม และของแข็งระเหยที่ลดลงของขนาดเล็กมีผลตอบสนองต่อการบำบัดเบื้องต้นมากที่สุดและตอบสนองลดลงเมื่อมีขนาดใหญ่ขึ้น โดยสามารถเพิ่มปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมได้ถึง 0.92-1.30 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับผักตบชวาที่ไม่ผ่านการบำบัดเบื้องต้น

4.2.7 การคัดเลือกขนาดผักตบชวาสำหรับการทดลองที่ 4

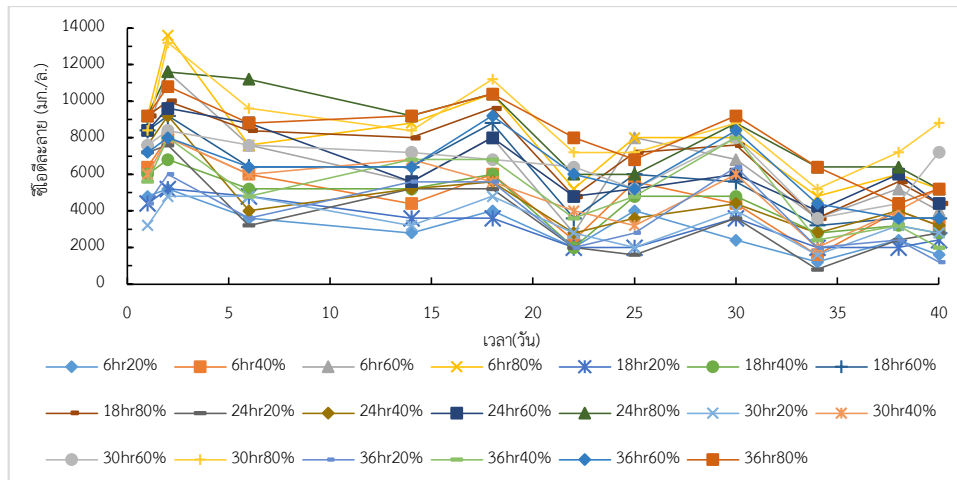
จากการทดลองที่ 2 พบว่าผักตบชวาขนาดน้อยกว่า 5 มิลลิเมตรมีศักยภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพสูงที่สุด โดยมีปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมเท่ากับ 0.258 ลิตร/กรัมของแข็งระเหย ดังนั้น จึงใช้ผักตบชวาขนาดน้อยกว่า 5 มิลลิเมตรสำหรับการทดลองที่ 4

4.3 การทดลองที่ 3 การศึกษาการบำบัดเบื้องต้นทางเคมีโดยใช้น้ำดำของผักตบชวาที่ขนาดต่างๆ และนำไปผลิตก๊าซชีวภาพด้วยวิธีบีเอ็มพี

การบำบัดเบื้องต้นทางเคมีด้วยน้ำดำ ซึ่งโซเดียมไฮดรอกไซด์ในน้ำดำทำให้เกิดการสลายโครงสร้างเฮมิเซลลูโลสและลิกนินบางส่วนของผักตบชวา เป็นผลทำให้การย่อยสลายเซลลูโลสเกิดได้ง่ายขึ้น ซึ่งช่วยเพิ่มความสามารถของจุลินทรีย์ในการย่อยสลายสารอินทรีย์เป็นก๊าซชีวภาพได้ง่ายขึ้น (He และคณะ, 2008)

การทดลองนี้ศึกษาผลของการบำบัดเบื้องต้นทางเคมีโดยใช้น้ำดำของผักตบชวาที่ขนาดต่างๆ กันและนำไปผลิตก๊าซชีวภาพด้วยวิธีบีเอ็มพี โดยศึกษาอิทธิพลของขนาด ระยะเวลาสัมผัสเบื้องต้น และความเข้มข้นน้ำดำต่อปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม โดยขนาดที่ศึกษา คือ ขนาดน้อยกว่า 5 5-10 10-15 15-20 20-25 และ 25-30 มิลลิเมตร ระยะเวลาสัมผัสเบื้องต้น ได้แก่ 6 18 24 30 และ 36 ชั่วโมง และความเข้มข้นน้ำดำ ได้แก่ ร้อยละ 20 40 60 และ 80 (โดยปริมาตร) และมีการเติมน้ำดำที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นลงในขวดซีรัม เนื่องจากในน้ำดำมีสารอินทรีย์จากการบำบัดผักตบชวาเบื้องต้นที่จุลินทรีย์สามารถใช้เป็นอาหารเพื่อผลิตก๊าซชีวภาพได้

หากแสดงผลการวิเคราะห์ทุกสภาวะการทดลองภายในกราฟเพียง 1 รูป ทำให้การวิเคราะห์ผลเป็นไปได้ยาก เนื่องจากมีการซ้อนทับของข้อมูลตัวอย่าง ดังเช่นรูปที่ 4.8 ซึ่งเป็นการนำเสนอค่าซีไอดีละลายของผักตบชวาที่ 1 ขนาดเท่านั้น ดังนั้น เพื่อให้เห็นความแตกต่างของข้อมูลที่ชัดเจนจึงมีการจัดกลุ่มของข้อมูลเช่นเดียวกับการทดลองที่ 2 โดยการจัดกลุ่มตามขนาด ดังนี้ กลุ่มที่ 1 (ขนาดเล็ก) ได้แก่ ขนาดน้อยกว่า 5 5-10 และ 10-15 มิลลิเมตร กลุ่มที่ 2 (ขนาดกลาง) ได้แก่ ขนาด 15-20 และ 20-25 มิลลิเมตร และกลุ่มที่ 3 (ขนาดใหญ่) ได้แก่ ขนาด 25-30 มิลลิเมตร เมื่อพิจารณาก๊าซชีวภาพสะสม พบว่า กลุ่มที่ 1 มีปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมสูงสุด โดยในกลุ่มที่ 1 พบว่าขนาดน้อยกว่า 5 มิลลิเมตรมีปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมสูงสุด (ตารางที่ 4.8) จึงขอเลือกนำเสนอผลการทดลองเพียง 1 ขนาด คือ ขนาดน้อยกว่า 5 มิลลิเมตรที่ได้ผลดีที่สุดในช่วง 6 18 24 30 และ 36 ชั่วโมงของเวลาสัมผัสเบื้องต้น ในขณะที่ผลการทดลองของสภาวะอื่นๆ แสดงในภาคผนวก ข โดยทดลองเป็นระยะเวลา 40 วัน ให้ผลการทดลอง ดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.8 ซีโอดีละลายสถานะต่างๆ ที่ขนาดน้อยกว่า 5 มิลลิเมตร

ตารางที่ 4.8 ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม (ลิตร/กรัมของแข็งระเหย) ของการทดลองที่ 3 ในสภาวะการทดลองต่างๆ

ระยะเวลา สัมผัส (ชั่วโมง)	ความเข้มข้น น้ำดำ (ร้อยละ)	ขนาด (มิลลิเมตร)					
		<5	5-10	10-15	15-20	20-25	25-30
6	20	0.0731	0.052	0.054	0.048	0.032	0.032
	40	0.0828	0.060	0.058	0.049	0.038	0.042
	60	0.0960	0.073	0.065	0.068	0.042	0.052
	80	0.1045	0.099	0.073	0.072	0.048	0.055
18	20	0.0779	0.059	0.058	0.041	0.033	0.036
	40	0.0852	0.084	0.061	0.060	0.038	0.053
	60	0.0990	0.093	0.069	0.067	0.045	0.057
	80	0.1119	0.109	0.086	0.074	0.059	0.057
24	20	0.0805	0.063	0.062	0.036	0.034	0.039
	40	0.0879	0.087	0.063	0.059	0.044	0.054
	60	0.1077	0.106	0.082	0.068	0.056	0.068
	80	0.1238	0.119	0.097	0.078	0.071	0.072
30	20	0.0751	0.076	0.053	0.042	0.027	0.034
	40	0.0869	0.093	0.062	0.057	0.031	0.047
	60	0.0974	0.101	0.070	0.059	0.037	0.048
	80	0.1132	0.110	0.071	0.080	0.043	0.068
36	20	0.0462	0.044	0.031	0.036	0.020	0.031
	40	0.0621	0.059	0.038	0.041	0.024	0.040
	60	0.0756	0.071	0.047	0.048	0.028	0.045
	80	0.0911	0.081	0.064	0.064	0.037	0.055

4.3.1 สมบัติทางเคมีของวัตถุบิในสภาวะการบำบัดเบื้องต้นต่างๆ

การเปลี่ยนแปลงของวัตถุบิในสภาวะการทดลองเป็นระยะเวลา 40 วันที่มีสภาวะการบำบัดเบื้องต้นต่างๆ แสดงดังตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 ค่าของแข็งทั้งหมดและของแข็งระเหยที่ลดลงของผักตบชวาและมูลโคในสภาวะการทดลองที่มีการบำบัดเบื้องต้นต่างๆ ของขนาดน้อยกว่า 5 มิลลิเมตร

ระยะเวลาสัมผัส เบื้องต้น (ชม.)	ความเข้มข้นน้ำดำ (ร้อยละ)	Δ ของแข็งทั้งหมดที่ลดลง (ร้อยละ)	Δ ของแข็งระเหยที่ลดลง (ร้อยละน้ำหนักแห้ง)
6	20	7.82	23.75
	40	7.79	24.10
	60	7.44	27.37
	80	6.75	29.95
18	20	7.54	20.87
	40	8.02	22.45
	60	7.31	25.48
	80	6.77	27.92
24	20	7.00	24.11
	40	6.94	36.81
	60	6.33	37.88
	80	6.98	40.01
30	20	8.37	22.78
	40	6.62	29.00
	60	6.32	31.88
	80	6.14	33.79
36	20	5.93	25.11
	40	7.49	26.54
	60	7.52	29.72
	80	6.94	32.06

จากตารางที่ 4.9 พบว่า ของแข็งทั้งหมดและของแข็งระเหยของขนาดน้อยกว่า 5 มิลลิเมตร มีค่าของแข็งทั้งหมดและของแข็งระเหยลดลงร้อยละ 6.95 ± 1.06 และ 28.58 ± 5.43 ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาตามความเข้มข้นน้ำดำพบว่า ร้อยละของแข็งระเหยที่ลดลงมีค่าสูงขึ้น เมื่อความเข้มข้นน้ำดำมีค่าสูงขึ้น ซึ่งทุกสภาวะการทดลองที่มีสภาวะการบำบัดเบื้องต้นด้วยน้ำดำ ความเข้มข้นร้อยละ 20 40 60 และ 80 โดยปริมาตร มีร้อยละของแข็งระเหยที่ลดลงเท่ากับ 23.32 ± 1.60 27.78 ± 5.62 30.47 ± 4.79 และ 32.75 ± 4.62 ตามลำดับ โดยของแข็งระเหยใน สภาวะการทดลองที่มีระยะเวลาสัมผัสเบื้องต้น 24 ชั่วโมงและความเข้มข้นน้ำดำร้อยละ 80 โดย ปริมาตร มีค่าร้อยละของแข็งระเหยที่ลดลงสูงที่สุดเท่ากับ 40.01 เป็นผลมาจากความเข้มข้นโซเดียม ไฮดรอกไซด์ในน้ำดำทำให้เกิดการสลายโครงสร้างระหว่างเฮมิเซลลูโลสและลิกนินบางส่วน และการ ปรับเปลี่ยนอันดับโพลิเมอร์ (degree of polymerization) ขององค์ประกอบลิกโนเซลลูโลสนำไปสู่ การเปลี่ยนแปลงลักษณะโครงสร้างผักตบชวา เช่น พื้นที่ผิว ความพรุน และ โครงสร้างผลึกเซลลูโลส (Kim และคณะ, 2016) ส่งผลให้จุลินทรีย์สามารถย่อยสลายสารอินทรีย์และเปลี่ยนเป็นก๊าซชีวภาพได้ง่าย ขึ้น

ทั้งนี้สภาวะการทดลองที่มีสภาวะการบำบัดเบื้องต้นด้วยระยะเวลาสัมผัสเบื้องต้น 24 ชั่วโมงและความเข้มข้นน้ำดำร้อยละ 80 โดยปริมาตร มีความสอดคล้องกับปริมาณก๊าซชีวภาพ สะสมสูงสุดเท่ากับ 0.124 ลิตร/กรัมของแข็งระเหย

- การเปรียบเทียบกับ การทดลองที่ผ่านมา

การเปรียบเทียบของแข็งระเหยที่ลดลงและก๊าซชีวภาพสะสมของการทดลองนี้และ การทดลองที่ผ่านมา แสดงดังตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.10 เปรียบเทียบร้อยละของแข็งระเหยที่ลดลงและก๊าซชีวภาพสะสมกับการทดลองที่ผ่าน มา

การทดลอง	สภาวะการทดลอง	Δ ของแข็งระเหยที่ลดลง (ร้อยละน้ำหนักแห้ง)	ก๊าซชีวภาพสะสม (ล./ก.ของแข็งระเหย)
2	ขนาดน้อยกว่า 5 มม.	38.52	0.258
3	ขนาดน้อยกว่า 5 มม., ระยะเวลาสัมผัสเบื้องต้น 24 ชั่วโมง และความเข้มข้นน้ำดำร้อยละ 80 โดยปริมาตร	40.01	0.124

จากตารางที่ 4.10 เมื่อนำสภาวะการทดลองที่มีปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมสูงสุดของ การทดลองนี้ (0.124 ล./ก.ของแข็งระเหย) เปรียบเทียบกับการทดลองที่ 2 (0.258 ล./ก.ของแข็ง ระเหย) พบว่า การทดลองนี้มีค่าร้อยละของแข็งระเหยที่ลดลง (ร้อยละ 40.01) มากกว่าขนาดน้อย

กว่า 5 มิลลิเมตรของการทดลองที่ 2 (ร้อยละ 38.52) ซึ่งไม่สอดคล้องกับปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมที่เกิดขึ้น อาจแสดงว่าการทดลองนี้ไม่สามารถนำสารอินทรีย์ไปใช้ในการผลิตก๊าซชีวภาพได้ทั้งหมด โดยพิจารณาจากร้อยละของแข็งระเหยที่ลดลง

4.3.2 การวิเคราะห์ส่วนที่เป็นน้ำ

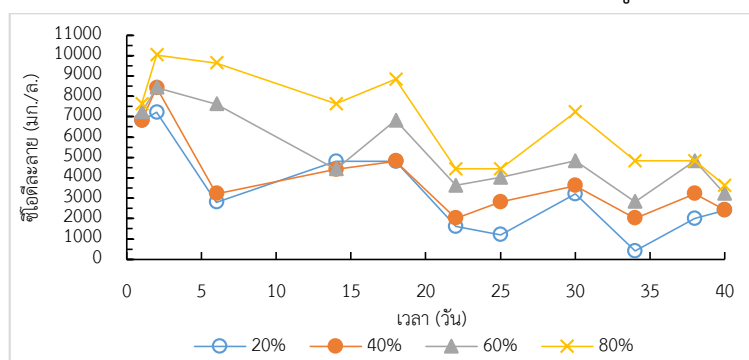
สำหรับการวิเคราะห์น้ำที่ผ่านการหมักในขวดซีรัมแสดงถึงเสถียรภาพของระบบ รวมถึงระดับการย่อยสลายของผักตบชวา รวมระยะเวลา 40 วัน ให้ผลการทดลอง ดังนี้

1. ซีโอดีละลาย

เนื่องจากน้ำค้ำมีซีโอดีละลาย 280,000 มิลลิกรัม/ลิตร (ตารางที่ 3.2) ดังนั้น ในการนำเสนอผลการวิเคราะห์ซีโอดีละลายนี้จึงได้หักลบออกจากสัดส่วนค่าซีโอดีละลายของน้ำค้ำที่มีความเข้มข้นร้อยละ 20 40 60 และ 80 โดยปริมาตรและจากการเจือจางน้ำค้ำก่อนเติมลงในขวดซีรัมเพื่อแสดงผลของค่าซีโอดีละลายที่เกิดขึ้นจากสารอินทรีย์ขององค์ประกอบในวัตถุดิบ (ผักตบชวา และมูลโค) เพียงอย่างเดียว

เมื่อพิจารณาระยะเวลาสัมผัสเบื้องต้น 24 ชั่วโมง ที่มีการแปรค่าความเข้มข้นน้ำค้ำ ตลอดการทดลองพบว่า เมื่อความเข้มข้นน้ำค้ำสูงขึ้นส่งผลให้ค่าซีโอดีละลายสูงขึ้นตามไปด้วย โดยที่ระยะเวลาสัมผัสเบื้องต้น 24 ชั่วโมง ที่มีการแปรค่าความเข้มข้นน้ำค้ำร้อยละ 20 40 60 และ 80 โดยปริมาตรมีค่าซีโอดีละลายเฉลี่ยเท่ากับ $3,389.82 \pm 1,982$ $3,979.63 \pm 2,039$ $5,260.36 \pm 1,930$ และ $6,650.18 \pm 2,300$ มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ อาจเกิดจากการบำบัดเบื้องต้นผักตบชวาด้วยน้ำค้ำที่มีความเข้มข้นสูงช่วยให้สารอินทรีย์ละลายน้ำได้มากขึ้น ซีโอดีละลายจึงมีค่าสูงขึ้น

สภาวะการทดลองที่ให้ก๊าซชีวภาพสะสมสูงสุด คือ สภาวะที่มีการบำบัดเบื้องต้นที่ระยะเวลาสัมผัสเบื้องต้น 24 ชั่วโมง และความเข้มข้นน้ำค้ำร้อยละ 80 โดยปริมาตร ซึ่งมีค่าซีโอดีละลายตลอดการทดลองเท่ากับ 3,632-10,032 มิลลิกรัม/ลิตร ดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 ซีโอดีละลายของสภาวะการทดลองที่ระยะเวลาสัมผัสเบื้องต้น 24 ชั่วโมง และมีการแปรค่าความเข้มข้นน้ำค้ำที่ร้อยละ 20 40 60 และ 80

- การเปรียบเทียบกับ การทดลองที่ผ่านมา

การเปรียบเทียบค่าซีไอที่ละลายของการทดลองนี้กับสถานะที่มีปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมสูงสุดของการทดลองที่ผ่านมา แสดงดังตารางที่ 4.11

ตารางที่ 4.11 เปรียบเทียบซีไอที่ละลาย

การทดลอง	สถานะการทดลอง	ซีไอที่ละลาย		
		ค่าสูงสุด (วันที่)	ความเข้มข้น (มก./ล.)	ตลอดการทดลอง (มก./ล.)
2	ขนาด <5 มม.	12	8,600	2,000-8,600
3	ขนาด < 5 มม. , ระยะเวลาสัมผัสเบื้องต้น 24 ชั่วโมง และ 80% น้ำดำ	2	10,032	3,632-10,032

จากตารางที่ 4.11 พบว่า ค่าซีไอที่ละลายสูงสุดในการทดลองนี้ของการทดลองที่ 3 (10,032 มิลลิกรัม/ลิตร) มีค่าสูงกว่าซีไอที่ละลายสูงสุดของการทดลองที่ 2 (8,600 มิลลิกรัม/ลิตร) และวันที่ซีไอที่ละลายมีค่าสูงสุดของการทดลองที่ 3 (วันที่ 2) เกิดเร็วกว่าการทดลองที่ 2 (วันที่ 12) แสดงว่า น้ำดำน่าจะช่วยให้สารอินทรีย์ละลายน้ำได้มากขึ้นและเร็วขึ้น

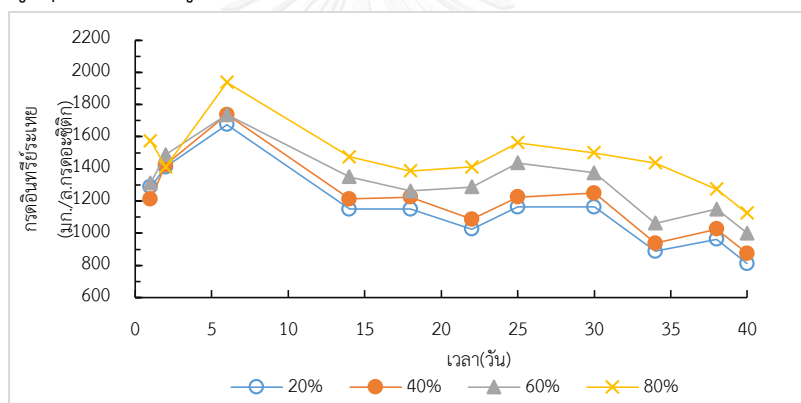
2. กรดอินทรีย์ระเหย

ตลอดการทดลองกรดอินทรีย์ระเหยทุกสถานะการทดลองที่มีสถานะการบำบัดเบื้องต้นต่างๆ ของขนาดน้อยกว่า 5 มิลลิเมตร มีค่ากรดอินทรีย์ระเหยเฉลี่ยเท่ากับ $1,103 \pm 261$ มิลลิกรัม/ลิตร กรดอะซิติก

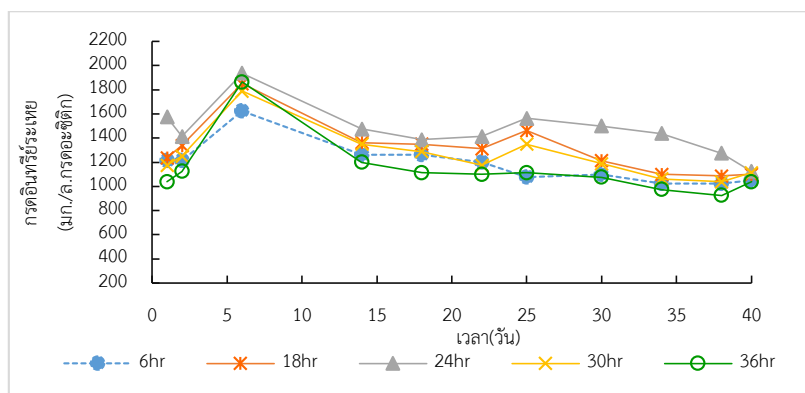
เมื่อพิจารณาระยะเวลาสัมผัสเบื้องต้น 24 ชั่วโมง ที่มีการแปรค่าความเข้มข้นน้ำดำ ตลอดการทดลองพบว่า กรดอินทรีย์ระเหยมีค่าสูงขึ้นเมื่อความเข้มข้นน้ำดำมีค่าสูงขึ้น โดยที่ระยะเวลาสัมผัสเบื้องต้น 24 ชั่วโมงที่มีการแปรค่าความเข้มข้นน้ำดำร้อยละ 20 40 60 และ 80 โดยปริมาตรมีกรดอินทรีย์ระเหยเฉลี่ยเท่ากับ $1,153.41 \pm 244$ $1,201.14 \pm 236$ $1,314.77 \pm 205$ และ $1,463.64 \pm 202$ มิลลิกรัม/ลิตร กรดอะซิติก ตามลำดับ (รูปที่ 4.10) ซึ่งสอดคล้องกับค่าซีไอที่ละลายที่สูงขึ้นเมื่อความเข้มข้นน้ำดำสูงขึ้น (รูปที่ 4.9) และปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม (รูปที่ 4.17)

เมื่อพิจารณาความเข้มข้นน้ำดำร้อยละ 80 โดยปริมาตร ที่มีการแปรค่าระยะเวลาสัมผัสเบื้องต้น พบว่า กรดอินทรีย์ระเหยมีค่าสูงขึ้นเมื่อมีระยะเวลาสัมผัสเบื้องต้น 6 18 และ 24 ชั่วโมง และกรดอินทรีย์ระเหยมีค่าสูงสุดเมื่อมีระยะเวลาสัมผัสเบื้องต้นเท่ากับ 24 ชั่วโมง แต่

กรดอินทรีย์ระเหยมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มระยะเวลาสัมผัสเบื้องต้นเป็น 30 และ 36 ชั่วโมง โดยที่ความเข้มข้นน้ำดำร้อยละ 80 โดยปริมาตรที่มีการแปรค่าระยะเวลาสัมผัสเบื้องต้น 6 18 24 30 และ 36 ชั่วโมง มีค่ากรดอินทรีย์ระเหยเฉลี่ยเท่ากับ $1,186.36 \pm 172$ $1,310.23 \pm 217$ $1,463.64 \pm 202$ $1,252.27 \pm 206$ และ $1,142.05 \pm 250$ มิลลิกรัม/ลิตร กรดอะซิติก ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.11 ทั้งนี้การเพิ่มขึ้นและลดลงของกรดอินทรีย์ระเหยนี้อาจเกิดจากการสัมผัสและการสลายโครงสร้างลิกโนเซลลูโลสทำให้จุลินทรีย์กลุ่มไฮโดรไลซิสสามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ได้ง่ายขึ้น และถูกเปลี่ยนเป็นกรดอินทรีย์ระเหย ซึ่งการสลายโครงสร้างลิกโนเซลลูโลสนี้ทำให้สารอินทรีย์สามารถละลายน้ำได้สูงสุด ณ ระยะเวลาสัมผัสเบื้องต้นที่ 24 ชั่วโมง (Xu และคณะ, 2012) ส่งผลต่อเนื้อให้จุลินทรีย์กลุ่มสร้างกรดเปลี่ยนสารอินทรีย์เป็นกรดอินทรีย์ระเหยได้สูงสุดเมื่อระยะเวลาสัมผัสเบื้องต้นเท่ากับ 24 ชั่วโมง ซึ่งสอดคล้องกับสภาวะที่ให้ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมสูงสุด คือ สภาวะการทดลองที่มีระยะเวลาสัมผัสเบื้องต้น 24 ชั่วโมงและความเข้มข้นน้ำดำร้อยละ 80 พบว่า ตลอดการทดลองมีกรดอินทรีย์ระเหยสูงสุดโดยมีค่าอยู่ระหว่าง 1,125.00-1,937.50 มิลลิกรัม/ลิตร กรดอะซิติก



รูปที่ 4.10 กรดอินทรีย์ระเหยของสภาวะการทดลองที่ระยะเวลาสัมผัสเบื้องต้น 24 ชั่วโมง และมีการแปรค่าความเข้มข้นน้ำดำที่ร้อยละ 20 40 60 และ 80 โดยปริมาตร



รูปที่ 4.11 กรดอินทรีย์ระเหยของสภาวะการทดลองที่ความเข้มข้นน้ำดำร้อยละ 80 และมีการแปรค่าระยะเวลาสัมผัสที่ 6 18 24 30 และ 36 ชั่วโมง

- การเปรียบเทียบกับ การทดลองที่ผ่านมา

การเปรียบเทียบกรดอินทรีย์ระเหยของการทดลองนี้กับสภาวะที่มีก๊าซชีวภาพ
สะสมสูงสุดของการทดลองที่ 2 แสดงดังตารางที่ 4.12

ตารางที่ 4.12 เปรียบเทียบกรดอินทรีย์ระเหย

การทดลอง	สภาวะการทดลอง	กรดอินทรีย์ระเหย			ซีโอดีละลาย วันที่ 1-10 (มก./ล.)	อัตราการผลิตก๊าซ ชีวภาพของ วันที่ 1-10 (มล./ก.ของแข็ง ระเหย)
		ค่าสูงสุด (วันที่)	ความเข้มข้น (มก./ล. กรดอะซิ ติก)	วันที่ 1-10 (มก./ล.กรดอะ ติก)		
2	ขนาด <5 มม.	7	3,006.25	2,185.33±1065	6,200±1311	11.26±1.62
3	ขนาด < 5 มม. , ระยะเวลา สัมผัส 24 เป็องตัน ชั่วโมง และ 80% น้ำดำ	6	1,937.50	1641.67±268	9,098±1,285	15.05±14.46

จากตารางที่ 4.12 พบว่า ในช่วง 10 วันแรกซีโอดีละลายของการทดลองที่ 3 มีค่าสูงกว่าการทดลองที่ 2 แต่กรดอินทรีย์ระเหยของการทดลองที่ 3 มีค่าน้อยกว่าการทดลองที่ 2 และหากพิจารณาอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพในช่วง 10 วันแรก พบว่า การทดลองที่ 3 มีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพสูงกว่าการทดลองที่ 2 แสดงว่า การบำบัดเป็องตันด้วยน้ำดำของการทดลองที่ 3 ส่งผลให้สารอินทรีย์ละลายน้ำได้มากกว่าการทดลองที่ 2 แต่กรดอินทรีย์ระเหยที่เกิดขึ้นของการทดลองที่ 3 น่าจะถูกนำไปใช้ในการผลิตก๊าซชีวภาพทำให้กรดอินทรีย์ระเหยคงเหลือของการทดลองที่ 3 มีค่าน้อยกว่าการทดลองที่ 2

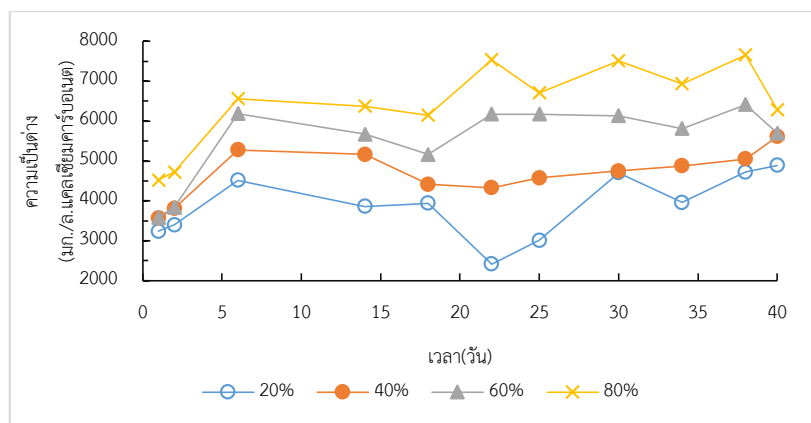
อย่างไรก็ตามยังพบว่ากรดอินทรีย์ระเหยของช่วง 7 วันแรกในการทดลองนี้มีแนวโน้มสูงขึ้นและมีแนวโน้มลดลงตั้งแต่วันที่ 7 จนกระทั่งสิ้นสุดการทดลองเช่นเดียวกับการทดลองที่ 2 (รูปที่ 4.2) รวมถึงวันที่ของการเกิดกรดอินทรีย์ระเหยสูงสุดของการทดลองนี้ (วันที่ 6) ใกล้เคียงกับการทดลองที่ 2 (วันที่ 7)

3. ความเป็นต่าง

วันที่ 1 ของทุกสภาวะการทดลองที่มีสภาวะการบำบัดเบื้องต้นต่างๆ ความเป็นต่างมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ $3,685.63 \pm 595$ มิลลิกรัม/ลิตร แคลเซียมคาร์บอเนต โดยมีค่าสูงกว่าการทดลองที่ 2 ($3,313 \pm 254$ มิลลิกรัม/ลิตร แคลเซียมคาร์บอเนต) อาจเป็นผลมาจากไฮดรอกไซด์ไอออน (OH⁻) ที่เป็นองค์ประกอบในน้ำดำ (Modenbach, 2013)

เมื่อพิจารณาระยะเวลาสัมผัสเบื้องต้น 24 ชั่วโมงที่มีการแปรค่าความเข้มข้นน้ำดำ พบว่า เมื่อความเข้มข้นน้ำดำสูงขึ้นส่งผลให้ความเป็นต่างมีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย โดยที่ระยะเวลาสัมผัสเบื้องต้น 24 ชั่วโมงที่มีการแปรค่าความเข้มข้นน้ำดำร้อยละ 20 40 60 และ 80 โดยปริมาตร มีค่าความเป็นต่างของวันที่ 1 เท่ากับ 3,237.5 3,562.5 3,587.5 และ 4,525.0 มิลลิกรัม/ลิตร แคลเซียมคาร์บอเนต ตามลำดับ โดยตลอดการทดลองความเป็นต่างของทุกสภาวะการทดลองที่มีสภาวะการบำบัดเบื้องต้นต่างๆ มีแนวโน้มสูงขึ้น เนื่องจากจุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทนย่อยสลายกรดอินทรีย์ระเหยเป็นอาหารและเกิดความเป็นต่างในรูปไฮดรอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ และไบคาร์บอเนต (Appels และคณะ, 2008) ส่งผลให้ค่าความเป็นต่างสูงขึ้น และในวันสุดท้ายของการทดลองความเป็นต่างของสภาวะการทดลองที่มีระยะเวลาสัมผัสเบื้องต้น 24 ชั่วโมงที่มีการแปรค่าความเข้มข้นน้ำดำร้อยละ 20 40 60 และ 80 โดยปริมาตร มีค่าความเป็นต่างเท่ากับ 4,887.5 5,612.5 5,700.0 และ 6,287.5 มิลลิกรัม/ลิตร แคลเซียมคาร์บอเนต ดังรูปที่ 4.12 ซึ่งสภาวะที่ให้ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมสูงสุด คือ สภาวะการทดลองที่มีระยะเวลาสัมผัสเบื้องต้น 24 ชั่วโมงและความเข้มข้นน้ำดำร้อยละ 80 โดยปริมาตร พบว่า ตลอดการทดลองความเป็นต่างมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ $6,453.41 \pm 1,1044$ มิลลิกรัม/ลิตร แคลเซียมคาร์บอเนต นอกจากนี้ยังเห็นได้ว่าความเป็นต่างของความเข้มข้นน้ำดำร้อยละ 80 โดยปริมาตรมีค่าสูงสุดตลอดการทดลองส่งผลให้มีกำลังบำบัดสูงสุด

อย่างไรก็ตามความเป็นต่างนี้ไม่เป็นพิษต่อจุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทน เนื่องจากการบำบัดเบื้องต้นด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ของซังข้าวโพดสามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้สูงถึง 0.372 ลิตร/กรัมของแข็งระเหย โดยที่น้ำชะมีค่าความเป็นต่าง 20,200 มิลลิกรัม/ลิตร แคลเซียมคาร์บอเนต (Zhu และคณะ, 2010)

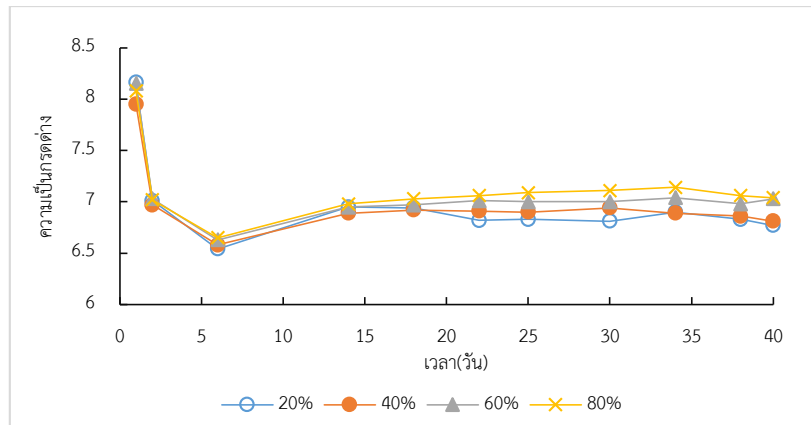


รูปที่ 4.12 ความเป็นต่างของสภาวะการทดลองที่ระยะเวลาสัมพัทธ์เบื้องต้น 24 ชั่วโมง และมีการแปรค่าความเข้มข้นน้ำดำที่ร้อยละ 20 40 60 และ 80

4. ความเป็นกรดต่าง (พีเอช)

การทดลองนี้มีการปรับค่าพีเอชของน้ำดำที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นก่อนเติมเข้าสู่ระบบเพื่อให้มีค่าใกล้เคียงกับการทดลองที่ 2 (8.07 ± 0.1) และไม่มีการปรับพีเอชตลอดการทดลอง ซึ่งการทดลองนี้มีค่าพีเอชของวันที่ 1 ในทุกสภาวะการทดลองของขนาดน้อยกว่า 5 มิลลิเมตรเท่ากับ 8.08 ± 0.12 โดยพีเอชมีแนวโน้มลดลงและมีค่าต่ำสุดในวันที่ 6 ซึ่งสอดคล้องกับกรดอินทรีย์ระเหยที่เพิ่มขึ้นของ 6 วันแรก (รูปที่ 4.11 และรูปที่ 4.12) เมื่อพิจารณาระยะเวลาสัมพัทธ์เบื้องต้น 24 ชั่วโมงที่มีการแปรค่าความเข้มข้นน้ำดำร้อยละ 20 40 60 และ 80 โดยปริมาตร มีค่าพีเอชของวันที่ 6 เท่ากับ 6.54 6.58 6.63 และ 6.65 ตามลำดับ และเมื่อเวลาผ่านไปค่าพีเอชมีแนวโน้มสูงขึ้น จนกระทั่งสิ้นสุดการทดลอง อาจมีสาเหตุมาจากกรดอินทรีย์ระเหยถูกนำไปใช้โดยจุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทน ซึ่งในวันสุดท้ายของการทดลองสภาวะการทดลองที่มีการบำบัดเบื้องต้นที่ระยะเวลาสัมพัทธ์เบื้องต้น 24 ชั่วโมงและมีการแปรค่าความเข้มข้นน้ำดำร้อยละ 20 40 60 และ 80 โดยปริมาตร มีค่าพีเอชเท่ากับ 6.77 6.81 7.03 และ 7.04 ตามลำดับ โดยที่พีเอชมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีความเข้มข้นน้ำดำสูงขึ้น ดังรูปที่ 4.13

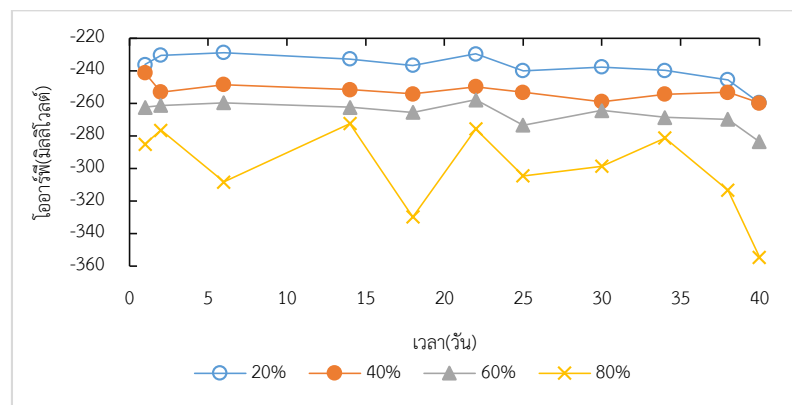
อย่างไรก็ตามยังพบว่าพีเอชในช่วง 6 วันแรกในการทดลองนี้มีค่าลดลงและมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตั้งแต่วันที่ 6 ถึงวันที่ 18 จนกระทั่งช่วงสุดท้ายของการทดลองตั้งแต่วันที่ 18 ถึงสิ้นสุดการทดลองพีเอชมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากเช่นเดียวกับการทดลองที่ 2 (รูปที่ 4.4)



รูปที่ 4.13 พีเอชของสภาวะการทดลองที่ระยะเวลาสัมพัทธ์เบื้องต้น 24 ชั่วโมง และมีการแปรค่าความเข้มข้นน้ำดำที่ร้อยละ 20 40 60 และ 80

5. ความต่างศักย์ออกซิเดชันรีดักชัน

ค่าความต่างศักย์ออกซิเดชันรีดักชันของทุกสภาวะการทดลองมีค่าติดลบตั้งแต่เริ่มต้นการทดลอง แสดงว่าอยู่ในสภาพไร้อากาศตั้งแต่เริ่มการทดลอง เมื่อพิจารณาระยะเวลาสัมพัทธ์เบื้องต้น 24 ชั่วโมง ที่มีการแปรค่าความเข้มข้นน้ำดำร้อยละ 20 40 60 และ 80 โดยปริมาตร มีค่าความต่างศักย์ออกซิเดชันรีดักชันของวันที่ 1 เท่ากับ -236.1 -241.3 -262.4 และ -285.0 มิลลิโวลต์ ตามลำดับ และอยู่ในสภาพไร้อากาศมากขึ้นเรื่อยๆ เป็นผลให้มีค่าติดลบมากขึ้นจนกระทั่งวันสุดท้ายของการทดลอง ซึ่งสภาวะการทดลองที่มีระยะเวลาสัมพัทธ์เบื้องต้น 24 ชั่วโมง และมีการแปรค่าความเข้มข้นน้ำดำร้อยละ 20 40 60 และ 80 โดยปริมาตร มีค่าความต่างศักย์ออกซิเดชันรีดักชันของวันสุดท้ายเท่ากับ -259.6 -260.0 -283.5 และ -354.4 มิลลิโวลต์ ตามลำดับ โดยที่ความเข้มข้นน้ำดำสูงขึ้นส่งผลให้ค่าความต่างศักย์ออกซิเดชันรีดักชันติดลบมากขึ้นตามไปด้วย ดังรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 ความต่างศักย์ออกซิเดชันรีดักชันของสภาวะการทดลองที่ระยะเวลาสัมพัทธ์เบื้องต้น 24 ชั่วโมงและมีการแปรค่าความเข้มข้นน้ำดำที่ร้อยละ 20 40 60 และ 80

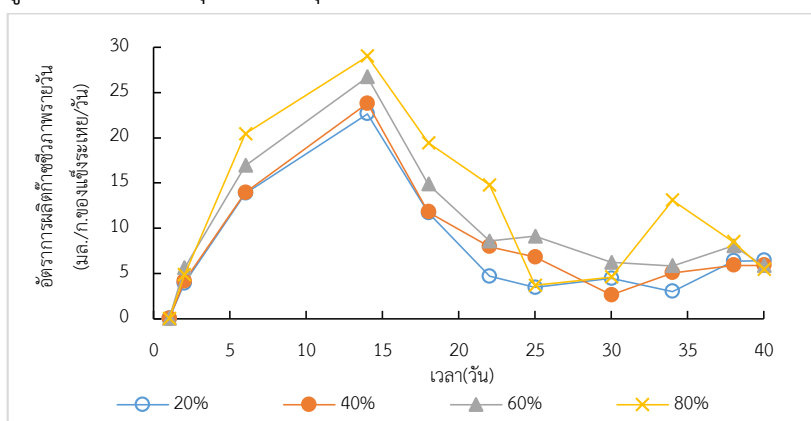
4.3.3 ศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนจากผักตบชวา

1. การผลิตก๊าซชีวภาพรายวันต่อของแข็งระเหย

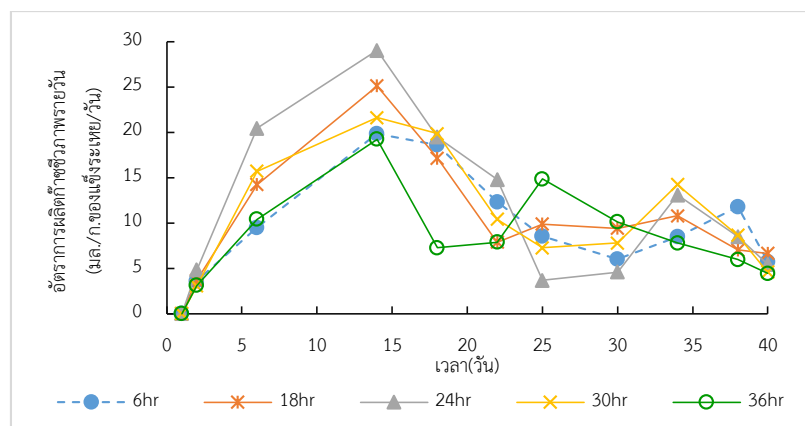
ตลอดช่วงการทดลองเป็นเวลา 40 วัน พบว่า อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพรายวันในทุกสภาวะการทดลองของขนาดน้อยกว่า 5 มิลลิเมตร มีค่าสูงสุดในวันที่ 14 โดยอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพในช่วงของ 14 วันแรกมีแนวโน้มสูงขึ้นและมีแนวโน้มลดลงตั้งแต่วันที่ 14 ถึงสิ้นสุดการทดลอง

เมื่อพิจารณาระยะเวลาสัมผัสเบื้องต้น 24 ชั่วโมงที่มีการแปรค่าความเข้มข้นน้ำดำร้อยละ 20 40 60 และ 80 โดยปริมาตร มีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพสูงสุดของวันที่ 14 เท่ากับ 22.67 23.82 26.73 และ 29.03 มิลลิลิตร/กรัมของแข็งระเหย/วัน ตามลำดับ ซึ่งจะพบว่าเมื่อความเข้มข้นน้ำดำสูงขึ้นทำให้อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพของวันที่ 14 มีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย ดังรูปที่ 4.15 ซึ่งสอดคล้องกับซีโอดีละลาย และกรดอินทรีย์ระเหยที่ลดลงในช่วง 14 วันแรกของการทดลอง (รูปที่ 4.10 และรูปที่ 4.11)

เมื่อพิจารณาความเข้มข้นน้ำดำร้อยละ 80 โดยปริมาตรที่มีการแปรค่าระยะเวลาสัมผัสเบื้องต้น 6 18 24 30 และ 36 ชั่วโมง พบว่า อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพมีค่าสูงขึ้นเมื่อมีระยะเวลาสัมผัสเบื้องต้นเพิ่มขึ้นเป็น 6 18 และ 24 ชั่วโมง ซึ่งมีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพสูงสุด 24 ชั่วโมง แต่มีค่าลดลงเมื่อเพิ่มระยะเวลาสัมผัสเบื้องต้นเป็น 30 และ 36 ชั่วโมง โดยที่สภาวะการทดลองที่มีระยะเวลาสัมผัสเบื้องต้น 6 18 24 30 และ 36 ชั่วโมง และมีความเข้มข้นน้ำดำร้อยละ 80 มีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพสูงสุดของวันที่ 14 เท่ากับ 19.84 25.12 29.03 21.61 และ 19.22 มิลลิลิตร/กรัมของแข็งระเหย/วัน ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.16 ซึ่งการเพิ่มขึ้นและลดลงของอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพรายวันนี้สอดคล้องกับปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยที่เกิดขึ้น โดยกรดอินทรีย์ระเหยที่ผลิตขึ้นมาจะถูกย่อยสลายโดยจุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทน



รูปที่ 4.15 อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพของสภาวะการทดลองที่ระยะเวลาสัมผัสเบื้องต้น 24 ชั่วโมง และมีการแปรค่าความเข้มข้นน้ำดำที่ร้อยละ 20 40 60 และ 80



รูปที่ 4.16 อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพของสภาวะการทดลองที่ความเข้มข้นน้ำดำร้อยละ 80 และมีการแปรค่าระยะเวลาสัมผัสเบื้องต้นที่ 6 18 24 30 และ 36 ชั่วโมง

- การเปรียบเทียบกับ การทดลองที่ผ่านมา

การเปรียบเทียบอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพของการทดลองนี้กับสภาวะที่มีปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมสูงสุดของการทดลองที่ผ่านมา แสดงดังตารางที่ 4.13

ตารางที่ 4.13 เปรียบเทียบอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ

การทดลอง	สภาวะการทดลอง	อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพสูงสุด	
		ค่าสูงสุด (วันที่)	ปริมาณ (มล./ก.ของแข็งระเหย/วัน)
2	ขนาด <5 มม.	14	48.25
		32	33.77
3	ขนาด < 5 มม. , ระยะเวลาสัมผัสเบื้องต้น 24 ชั่วโมง และ 80% น้ำดำ	14	29.03

จากตารางที่ 4.13 พบว่า การทดลองที่ 2 มีการผลิตก๊าซชีวภาพสูง 2 ครั้ง คือ วันที่ 14 และวันที่ 32 โดยที่ขนาดน้อยกว่า 5 มิลลิเมตรมีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพของวันที่ 14 และ 32 เท่ากับ 48.25 และ 33.77 มิลลิลิตร/กรัมของแข็งระเหย/วัน ตามลำดับ ในขณะที่การทดลองนี้มีการผลิตก๊าซชีวภาพสูงสุด 1 ครั้งเท่านั้น คือวันที่ 14 โดยมีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพของวันที่ 14 เท่ากับ 29.03 มิลลิลิตร/กรัมของแข็งระเหย/วัน อาจแสดงว่าการบำบัดเบื้องต้นด้วยน้ำดำทำให้เกิดการสลายโครงสร้างเฮมิเซลลูโลสและลิกนินบางส่วนของผักตบชวาโดยโซเดียมไฮดรอกไซด์ในน้ำดำทำให้จุลินทรีย์สามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายยาก เช่น เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินได้

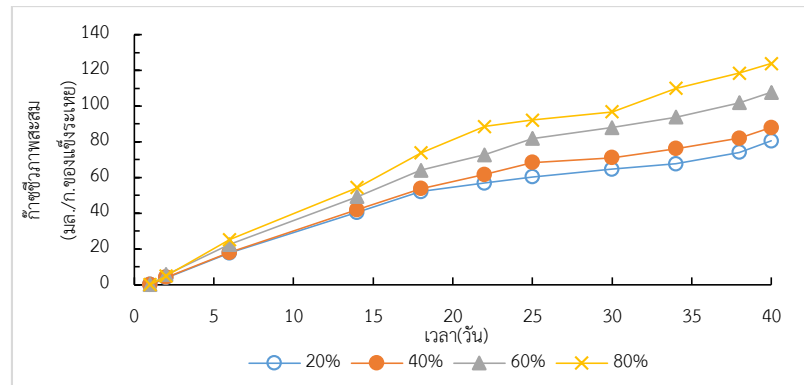
ง่ายขึ้นเป็นผลให้ขั้นตอนการย่อยสลายสารอินทรีย์เกิดเร็วขึ้น (He และคณะ, 2008 ; Rodriguez และคณะ, 2016) และเกิดเพียงครั้งเดียว อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพจึงพบค่าสูงสุดเพียง 1 ค่า ซึ่งแตกต่างไปจากการทดลองที่ 2 ที่เป็นการย่อยสลายของสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายง่าย และสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายยากส่งผลให้เกิดอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพสูงสุดถึง 2 ค่า อย่างไรก็ตามอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพสูงสุดของการทดลองนี้มีค่าน้อยกว่าขนาดน้อยกว่า 5 มิลลิเมตรของการทดลองที่ 2 อาจมีสาเหตุมาจากการทดลองนี้ไม่สามารถเปลี่ยนสารอินทรีย์ที่ละลายน้ำเป็นก๊าซชีวภาพได้ทั้งหมด จึงส่งผลให้อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพสูงสุดของการทดลองที่ 3 น้อยกว่าการทดลองที่ 2

2. ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม

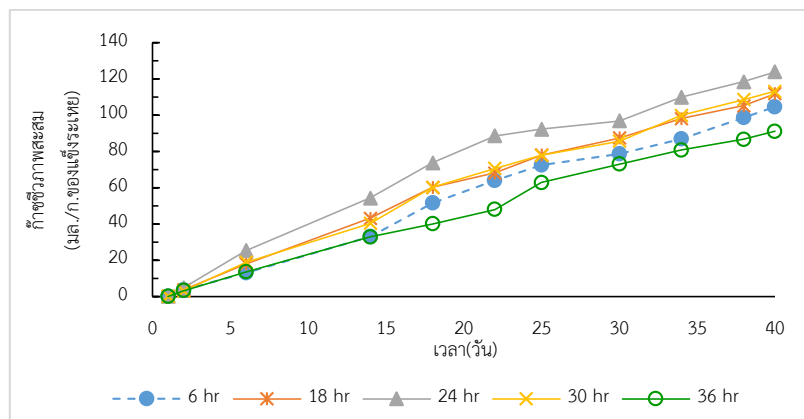
การทดลองเป็นเวลา 40 วัน พบว่า ทุกสภาวะการทดลองของขนาดน้อยกว่า 5 มิลลิเมตร มีปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมเท่ากับ 88.90 ± 18.60 มิลลิลิตร/กรัมของแข็งระเหย

เมื่อพิจารณาระยะเวลาสัมผัสเบื้องต้น 24 ชั่วโมงที่มีการแปรค่าความเข้มข้นน้ำดำ พบว่า ก๊าซชีวภาพสะสมมีค่าสูงขึ้นเมื่อความเข้มข้นน้ำดำสูงขึ้น โดยปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมของสภาวะการทดลองที่มีระยะเวลาสัมผัสเบื้องต้น 24 ชั่วโมง และมีความเข้มข้นน้ำดำ 20 40 60 และ 80 โดยปริมาตร มีก๊าซชีวภาพสะสมเท่ากับ 80.49 87.92 107.68 และ 123.84 มิลลิลิตร/กรัมของแข็งระเหย ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.17 อาจเกิดจากการสลายโครงสร้างระหว่างเฮมิเซลลูโลสและลิกนิน ส่งผลให้เฮมิเซลลูโลสและลิกนินบางส่วนละลายน้ำ โครงสร้างลิกโนเซลลูโลสเกิดการพองตัว อันตบโพลิเมอร์ และโครงสร้างผลึกเซลลูโลสลดลง ในขณะที่พื้นที่ผิว และความพรุนเพิ่มขึ้น (Zheng และคณะ, 2014) จุลินทรีย์จึงสามารถย่อยสลายสารอินทรีย์เป็นก๊าซชีวภาพได้ง่ายขึ้น เป็นผลให้ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมสูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับซีโอดีละลาย และกรดอินทรีย์ระเหยที่เพิ่มขึ้นเมื่อมีความเข้มข้นน้ำดำเพิ่มขึ้น

เมื่อพิจารณาความเข้มข้นน้ำดำร้อยละ 80 โดยปริมาตรที่มีการแปรค่าระยะเวลาสัมผัสเบื้องต้น พบว่า ก๊าซชีวภาพสะสมมีค่าสูงขึ้นเมื่อมีระยะเวลาสัมผัสเบื้องต้นเพิ่มขึ้นเป็น 6 18 และ 24 ชั่วโมง และมีปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมสูงสุดเมื่อมีระยะเวลาสัมผัสเบื้องต้น 24 ชั่วโมง แต่เมื่อเพิ่มระยะเวลาสัมผัสเบื้องต้นเป็น 30 และ 36 ชั่วโมง ก๊าซชีวภาพสะสมมีค่าลดลง โดยสภาวะการทดลองที่มีความเข้มข้นน้ำดำร้อยละ 80 โดยปริมาตรและมีการแปรค่าระยะเวลาสัมผัสเบื้องต้น 6 18 24 30 และ 36 ชั่วโมง มีก๊าซชีวภาพสะสมเท่ากับ 104.54 111.89 123.84 113.19 และ 91.14 มิลลิลิตร/กรัมของแข็งระเหย ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.18 ซึ่งการเพิ่มขึ้นและลดลงของก๊าซชีวภาพสะสมนี้สอดคล้องกับกรดอินทรีย์ระเหยที่เกิดขึ้น (รูปที่ 4.10 และรูปที่ 4.11)



รูปที่ 4.17 ก๊าซชีวภาพสะสมของสภาวะการทดลองที่ระยะเวลาสัมผัสเบื้องต้น 24 ชั่วโมง
และมีการแปรค่าความเข้มข้นน้ำดำที่ร้อยละ 20 40 60 และ 80



รูปที่ 4.18 ก๊าซชีวภาพสะสมของสภาวะการทดลองที่ความเข้มข้นน้ำดำร้อยละ 80
และมีการแปรค่าระยะเวลาสัมผัสเบื้องต้นที่ 6 18 24 30 และ 36 ชั่วโมง

- การเปรียบเทียบกับ การทดลองที่ผ่านมา

การเปรียบเทียบปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมของการทดลองนี้กับสภาวะที่มีปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมสูงสุดของการทดลองที่ผ่านมา แสดงดังตารางที่ 4.14

ตารางที่ 4.14 เปรียบเทียบก๊าซชีวภาพสะสม

การทดลอง	สภาวะการทดลอง	ก๊าซชีวภาพสะสม (มิลลิกรัม/กรัมของแข็งระเหย)
2	ขนาด <5 มม.	257.89
3	ขนาด < 5 มม. , ระยะเวลาสัมผัสเบื้องต้น 24 ชั่วโมง และ 80% น้ำดำ	123.84

จากตารางที่ 4.14 พบว่า ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมของการทดลองที่ 3 มีค่าน้อยกว่าการทดลองที่ 2 (257.89 มล./ก.ของแข็งระเหย) อาจเป็นผลมาจากการทดลองนี้ไม่สามารถเปลี่ยนสารอินทรีย์มาใช้ในการผลิตก๊าซชีวภาพได้

4.3.4 การวิเคราะห์ทางสถิติ

การบำบัดเบื้องต้นทางเคมีของผักตบชวา พบว่า ขนาด ความเข้มข้นน้ำดำ และระยะเวลาสัมผัสเบื้องต้นมีผลต่อปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) ดังรายละเอียดในภาคผนวก จ

4.3.5 เปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่น

การเปรียบเทียบศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพของการทดลองนี้กับงานวิจัยอื่นๆ แสดงดังตารางที่ 4.15 และหากคิดที่ก๊าซชีวภาพประกอบด้วยก๊าซมีเทนร้อยละ 50 ดังนั้น การทดลองนี้จึงมีปริมาณก๊าซมีเทนสะสมเท่ากับ 0.062 ลิตร/กรัมของแข็งระเหย

ตารางที่ 4.15 เปรียบเทียบงานวิจัยนี้กับงานวิจัยที่ผ่านมา

สารตั้งต้น	การบำบัดเบื้องต้น	อุณหภูมิ (°C)	ระยะเวลา (วัน)	ศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ (ล./ก.ของแข็งระเหย)	
				ก๊าซชีวภาพ	มีเทน
1. ไบโกระถินเทพนคร (Chaiyapong และคณะ, 2016)					
สารตั้งต้น 2% (VS) 3L + หัวเชื้อจุลินทรีย์ 2.5% 2L	3% NaOH เวลา 48 ชั่วโมง	28.6-32.0	45	0.200	0.117
2. ลำต้นข้าวฟ่างและหัวเชื้อจุลินทรีย์ (Purwoko และคณะ, 2015)					
ข้าวฟ่าง 8-10% (TS) + หัวเชื้อจุลินทรีย์ 10%	0.5% NaOH เวลา 48 ชั่วโมง	35	60	0.250	-
3. ไบประดู่อังสนาและน้ำเสียจากอุตสาหกรรมผลไม้กระป๋อง (Juntasiri และคณะ, 2011)					
ไบประดู่อังสนา 10% (TS) + น้ำเสีย 0.061L	2% NaOH เวลา 24 ชั่วโมง	30	54	0.275	-
4. งานวิจัยนี้ (การทดลองที่ 3)					
ผักตบชวา: หัวเชื้อจุลินทรีย์ =2:1 (VS)	80% น้ำดำ (=0.4% NaOH) เวลา 24 ชั่วโมง	26-31	40	0.124 0.216 ^a	0.062 0.108 ^a

หมายเหตุ a = ปริมาณก๊าซชีวภาพของงานวิจัยนี้รวมกับชุดควบคุม*

* = ชุดควบคุมจากมูลโค

จากตารางที่ 4.15 พบว่า ศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพของงานวิจัยนี้มีค่าต่ำกว่างานวิจัยอื่นๆ อาจเป็นเพราะวัตถุดิบตั้งต้นของงานวิจัยอื่นๆ มีปริมาณลิกนินสูงกว่างานวิจัยนี้ (ตารางที่ 4.16) ดังนั้น ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่สูงกว่างานวิจัยนี้จะทำให้เกิดการสลายโครงสร้างลิกนินได้มากทำให้จุลินทรีย์สามารถใช้ประโยชน์จากสิ่งที่ถูกละลายลงมาได้มากกว่าก่อให้เกิดก๊าซชีวภาพได้สูงกว่า อีกประการหนึ่งปริมาณก๊าซชีวภาพของงานวิจัยอื่นๆ นั้นไม่มีการหักค่าจากชุดควบคุมออกไป

เมื่อนำปริมาณก๊าซชีวภาพของงานวิจัยนี้รวมกับชุดควบคุม พบว่า งานวิจัยนี้มีปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมเท่ากับ 0.216 ลิตร/กรัมของแข็งระเหย และหากคิดที่ก๊าซชีวภาพประกอบด้วยก๊าซมีเทนร้อยละ 50 ดังนั้น การทดลองนี้จึงมีปริมาณก๊าซมีเทนสะสมเท่ากับ 0.108 ลิตร/กรัมของแข็งระเหย ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Chaiyapong และคณะ (2016)

ตารางที่ 4.16 องค์ประกอบลิกโนเซลลูโลสของสารตั้งต้นต่างๆ

สารตั้งต้น	สัดส่วน (ร้อยละ)		
	เซลลูโลส	เฮมิเซลลูโลส	ลิกนิน
ใบกระถินเทพนรงค์ ^a	18.80	14.30	17.40
ข้าวฟ่าง ^b	40.56	10.18	15.07
ใบประดู่อังสนา ^c	_*	_*	_*
ผักตบชวา (งานวิจัยนี้)	19.88	33.91	4.22

หมายเหตุ a = Chaiyapong และคณะ (2016),

b = Purwoko และคณะ (2015),

c = Juntarasiri และคณะ (2011),

_* = ไม่ระบุ

4.3.6 บทสรุปของการทดลองที่ 3

ประสิทธิภาพการบำบัดเบื้องต้นทางเคมีโดยใช้น้ำด่างของผักตบชวาที่มีขนาดน้อยกว่า 5 มิลลิเมตร เมื่อพิจารณาจากปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมและของแข็งระเหยที่ลดลง แสดงดังตารางที่ 4.17

ตารางที่ 4.17 ประสิทธิภาพการบำบัดเบื้องต้นทางเคมีโดยใช้น้ำด่างของขนาดน้อยกว่า 5 มิลลิเมตร

สภาวะการทดลอง		ก๊าซชีวภาพสะสม (ล./ก.ของแข็งระเหย)	ของแข็งระเหยที่ลดลง (ร้อยละน้ำหนักแห้ง)
ระยะเวลาสัมผัส (ชม.)	ความเข้มข้นน้ำด่าง (ร้อยละ)		
6	20	0.073	57.04
	40	0.083	67.35
	60	0.096	76.87
	80	0.105	76.02
18	20	0.078	62.16
	40	0.085	68.48
	60	0.099	73.78
	80	0.112	77.75
24	20	0.080	68.96
	40	0.088	68.59
	60	0.108	79.72
	80	0.124	86.27
30	20	0.075	66.86
	40	0.087	69.48
	60	0.097	70.37
	80	0.113	71.14
36	20	0.046	70.83
	40	0.062	69.23
	60	0.076	79.77
	80	0.091	79.79

จากตารางที่ 4.17 พบว่า ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมและของแข็งระเหยที่ลดลงของสภาวะการทดลองที่มีระยะเวลาสัมผัสเบื้องต้น 24 ชั่วโมง และความเข้มข้นน้ำด่างร้อยละ 80 โดยปริมาตร ของขนาดน้อยกว่า 5 มิลลิเมตร มีผลตอบสนองต่อการบำบัดเบื้องต้นมากที่สุด

เมื่อเปรียบเทียบกับตารางทดลองที่ 2 พบว่า ของแข็งระเหยที่ลดลงของการบำบัดเบื้องต้นทางเคมีไม่สอดคล้องกับปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมที่เกิดขึ้น โดยที่การบำบัดเบื้องต้นทางเคมีก่อให้เกิดประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพที่น้อยกว่าการบำบัดเบื้องต้นทางกายภาพร้อยละ 51.94

นอกจากนี้ประสิทธิภาพการบำบัดเบื้องต้นของผักตบชวาในแต่ละขนาดในสภาวะการทดลองที่มีระยะเวลาสัมผัสเบื้องต้น 24 ชั่วโมง และความเข้มข้นน้ำดำร้อยละ 80 โดยปริมาตร มีผลตอบสนองต่อการบำบัดเบื้องต้นมากที่สุดเช่นเดียวกับขนาดน้อยกว่า 5 มิลลิเมตร ดังตารางที่ 4.18

ตารางที่ 4.18 ประสิทธิภาพการบำบัดเบื้องต้นทางเคมีโดยใช้น้ำดำของขนาดอื่นๆ

ระยะเวลาสัมผัส เบื้องต้น (ชม.)	ความเข้มข้นน้ำ ดำ (ร้อยละ)	ก๊าซชีวภาพสะสม (ล./ก.ของแข็งระเหย)				
		5-10 มม.	10-15 มม.	15-20 มม.	20-25 มม.	25-30 มม.
6	20	0.052	0.054	0.048	0.032	0.032
	40	0.060	0.058	0.049	0.038	0.042
	60	0.073	0.065	0.068	0.042	0.052
	80	0.099	0.073	0.072	0.048	0.055
18	20	0.059	0.058	0.041	0.033	0.036
	40	0.084	0.061	0.060	0.038	0.053
	60	0.093	0.069	0.067	0.045	0.057
	80	0.109	0.086	0.074	0.059	0.057
24	20	0.063	0.062	0.036	0.034	0.039
	40	0.087	0.063	0.059	0.044	0.054
	60	0.106	0.082	0.068	0.056	0.068
	80	0.119	0.097	0.078	0.071	0.072
30	20	0.076	0.053	0.042	0.027	0.034
	40	0.093	0.062	0.057	0.031	0.047
	60	0.101	0.070	0.059	0.037	0.048
	80	0.110	0.071	0.080	0.043	0.068
36	20	0.044	0.031	0.036	0.020	0.031
	40	0.059	0.038	0.041	0.024	0.040
	60	0.071	0.047	0.048	0.028	0.045
	80	0.081	0.064	0.064	0.037	0.055

4.3.7 การคัดเลือกผักตบชวาสำหรับการทดลองที่ 4

จากการทดลองที่ 3 พบว่าผักตบชวาขนาดน้อยกว่า 5 มิลลิเมตร ระยะเวลาสัมผัสเบื้องต้น 24 ชั่วโมง และความเข้มข้นน้ำดำร้อยละ 80 โดยปริมาตรมีศักยภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพสูงที่สุด โดยมีปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม 0.124 ลิตร/กรัมของแข็งระเหย ดังนั้น จึงใช้ผักตบชวาขนาด

น้อยกว่า 5 มิลลิเมตร ระยะเวลาสัมผัส 24 ชั่วโมง และความเข้มข้นน้ำดำร้อยละ 80 โดยปริมาตร สำหรับการทดลองที่ 4

4.3.8 บทสรุปของการทดลองปีเอ็มพี

จากสภาวะการทดลองที่ให้ก๊าซชีวภาพสะสมสูงสุดของการทดลองที่ 2 การบำบัดเบื้องต้นทางกายภาพของขนาดน้อยกว่า 5 มิลลิเมตร และการทดลองที่ 3 การบำบัดเบื้องต้นทางเคมีด้วยการใช้น้ำดำของขนาดน้อยกว่า 5 มิลลิเมตร ระยะเวลาสัมผัสเบื้องต้น 24 ชั่วโมง และความเข้มข้นน้ำดำร้อยละ 80 สามารถสรุปความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ต่างๆ ได้ดังนี้

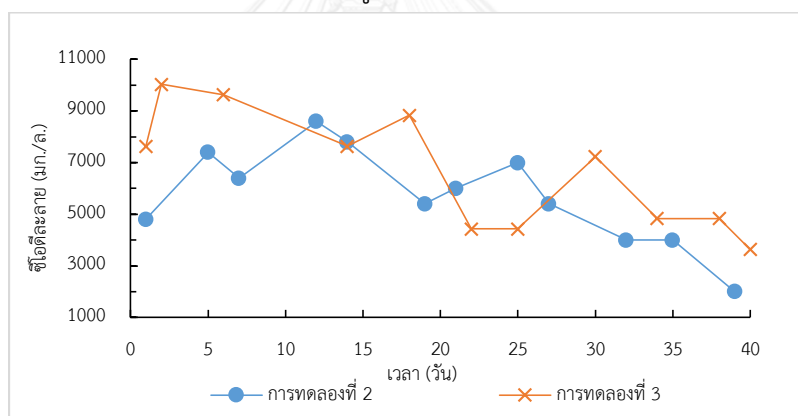
การทดลองปีเอ็มพีมีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพสูงขึ้นเมื่อกรดอินทรีย์ระเหยมีค่าลดลง โดยที่การทดลองที่ 2 เมื่อกรดอินทรีย์ระเหยมีค่าลดลงในวันที่ 7-14 (รูปที่ 4.20) ทำให้อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพมีค่าเพิ่มขึ้นในวันที่ 7-14 (รูปที่ 4.22) ในขณะที่พีเอชมีค่าสูงขึ้น (รูปที่ 4.21) เนื่องจากกรดอินทรีย์ระเหยมีปริมาณลดลง และการทดลองที่ 3 เมื่อกรดอินทรีย์ระเหยมีค่าลดลงในวันที่ 6-18 (รูปที่ 4.20) ทำให้อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพมีค่าเพิ่มขึ้นในวันที่ 6-14 (รูปที่ 4.22) และพีเอชมีค่าสูงขึ้น (รูปที่ 4.21) เนื่องจากกรดอินทรีย์ระเหยมีปริมาณลดลง แสดงว่า จุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทนใช้กรดอินทรีย์ระเหยเป็นอาหารในการผลิตก๊าซชีวภาพ

อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพรายวันของการทดลองปีเอ็มพี มีค่าสูง 2 ครั้ง โดยที่อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพสูงสุดของการทดลองที่ 2 เกิดขึ้นในวันที่ 14 (รูปที่ 4.22) จากการย่อยสลายกรดอินทรีย์ระเหยสูงสุดของวันที่ 7 (รูปที่ 4.20) และอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพสูงครั้งที่ 2 ของวันที่ 32 ไม่ปรากฏกรดอินทรีย์ระเหยสูงสุดครั้งที่ 2 แต่พบในซีไอดีละลายของวันที่ 25 มีค่าสูงครั้งที่ 2 (รูปที่ 4.19) แสดงว่า อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพของวันที่ 32 อาจมาจากซีไอดีละลายที่อยู่ในระบบแต่การลดกรดอินทรีย์ระเหยสูงสุดไม่พบเนื่องจากการนำไปใช้โดยจุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทน

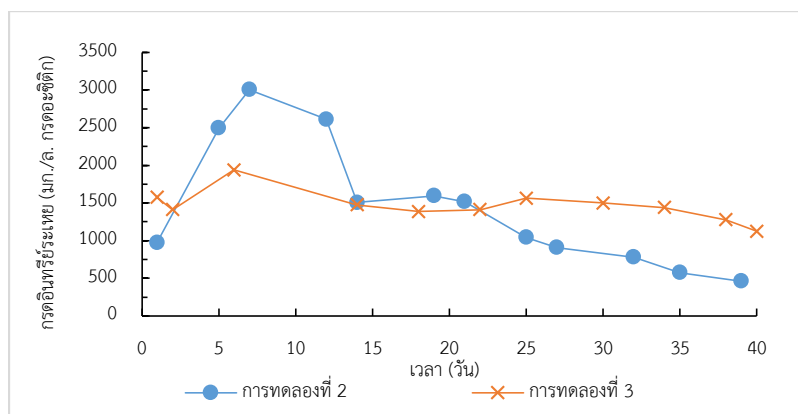
ซีไอดีละลายในช่วง 10 วันแรกของการทดลองที่ 3 มีค่าสูงกว่าการทดลองที่ 2 (รูปที่ 4.19) แต่กรดอินทรีย์ระเหยของการทดลองที่ 3 มีค่าน้อยกว่าการทดลองที่ 2 (รูปที่ 4.20) และหากพิจารณาอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพในช่วง 10 วันแรก (รูปที่ 4.22) พบว่า การทดลองที่ 3 มีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพสูงกว่าการทดลองที่ 2 แสดงว่า การบำบัดเบื้องต้นด้วยน้ำดำของการทดลองที่ 3 ส่งผลให้สารอินทรีย์ละลายน้ำได้มากกว่าการทดลองที่ 2 แต่กรดอินทรีย์ระเหยที่เกิดขึ้นของการทดลองที่ 3 ถูกนำไปใช้ในการผลิตก๊าซชีวภาพจึงส่งผลให้กรดอินทรีย์ระเหยที่วิเคราะห์ได้ของการทดลองที่ 3 มีค่าน้อยกว่าการทดลองที่ 2 ในขณะที่ซีไอดีละลายตั้งแต่วันที่ 22 ถึงสิ้นสุดการทดลองของการทดลองที่ 3 มีค่าสูงกว่าการทดลองที่ 2 (รูปที่ 4.19) แต่มีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพตั้งแต่วันที่ 22 ถึงสิ้นสุดการทดลองของการทดลองที่ 3 น้อยกว่าการทดลองที่ 2 (รูปที่ 4.22) อาจแสดงว่าการลด

อินทรีย์ระเหยไม่สามารถถูกนำไปใช้ในการผลิตก๊าซชีวภาพจึงส่งผลให้อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพของการทดลองที่ 3 น้อยกว่าการทดลองที่ 2

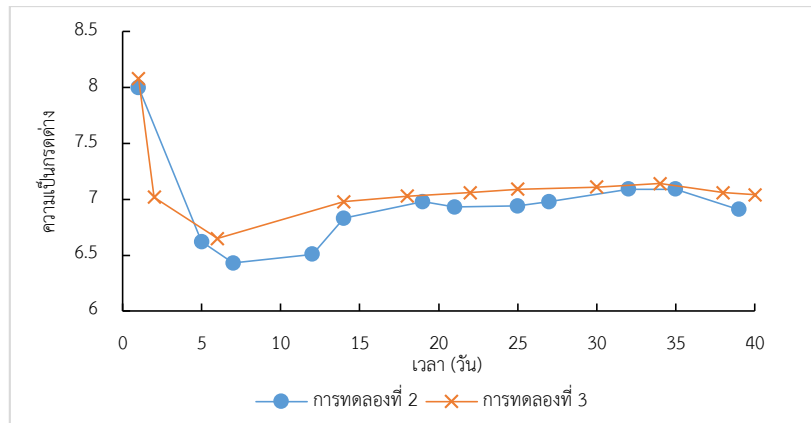
นอกจากนี้การทดลองที่ 2 มีการผลิตก๊าซชีวภาพสูง 2 ครั้ง คือ วันที่ 14 (48.25 มล./ก.ของแข็งระเหย/วัน) และวันที่ 32 (33.77 มล./ก.ของแข็งระเหย/วัน) ในขณะที่การทดลองที่ 3 มีการผลิตก๊าซชีวภาพสูงสุด 1 ครั้งเท่านั้น คือวันที่ 14 (29.03 มล./ก.ของแข็งระเหย/วัน) อาจแสดงว่าการทดลองที่ 3 การบำบัดเบื้องต้นด้วยน้ำดำสามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายยาก เช่น เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินได้ง่ายขึ้นเป็นผลให้ขั้นตอนการย่อยสลายสารอินทรีย์เกิดเร็วขึ้น และเกิดเพียงครั้งเดียว อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพจึงพบค่าสูงสุดเพียง 1 ค่า ซึ่งแตกต่างไปจากการทดลองที่ 2 ที่เป็นการย่อยสลายของสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายง่าย และสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายยาก ตามลำดับ ส่งผลให้เกิดอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพสูงสุดถึง 2 ค่า แต่อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพสูงสุดของการทดลองที่ 3 มีค่าน้อยกว่าการทดลองที่ 2 อาจมีสาเหตุมาจากการทดลองที่ 3 ไม่สามารถเปลี่ยนสารอินทรีย์ที่ละลายน้ำเป็นก๊าซชีวภาพได้ทั้งหมด จึงส่งผลให้อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพสูงสุดของการทดลองที่ 3 น้อยกว่าการทดลองที่ 2 (รูปที่ 4.22)



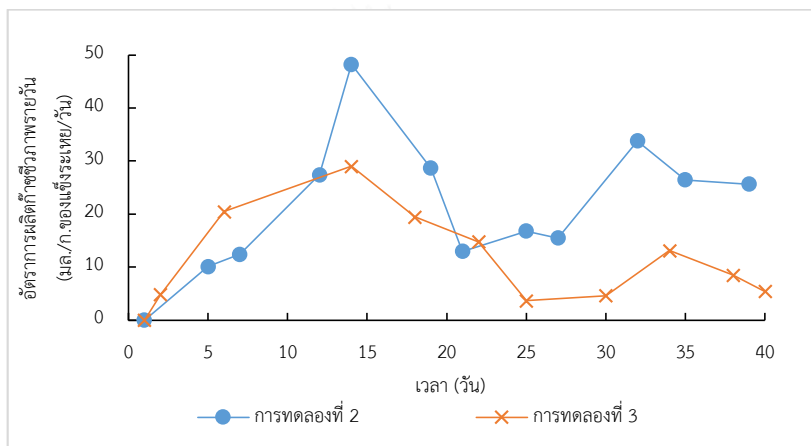
รูปที่ 4.19 ซีไออดีละลายของการทดลองบีเอ็มพี



รูปที่ 4.20 กรดอินทรีย์ระเหยของการทดลองบีเอ็มพี



รูปที่ 4.21 พีเอชของการทดลองบีเอ็มพี



รูปที่ 4.22 อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพของการทดลองบีเอ็มพี

4.4 การทดลองที่ 4 การผลิตก๊าซชีวภาพด้วยถังปฏิกรณ์ไร้อากาศแบบขั้นตอนเดียว

การทดลองนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพด้วยถังปฏิกรณ์ไร้อากาศแบบขั้นตอนเดียวจากสภาวะการผลิตก๊าซชีวภาพที่ดีที่สุดในการทดลองที่ 2 คือ ถังปฏิกรณ์ไร้อากาศที่ 1 (R1 : ขนาดน้อยกว่า 5 มิลลิเมตร) และการทดลองที่ 3 คือ ถังปฏิกรณ์ไร้อากาศที่ 2 (R2 : ขนาดน้อยกว่า 5 มิลลิเมตร ระยะเวลาสัมผัสเบื้องต้น 24 ชั่วโมง และความเข้มข้นน้ำดำร้อยละ 80 โดยปริมาตร) โดยมีสัดส่วนผักตบชวาต่อหัวเชื้อจุลินทรีย์ (มูลโค) เท่ากับ 2 : 1 และควบคุมปริมาณของแข็งทั้งหมดภายในระบบเท่ากับร้อยละ 15 ซึ่งการคำนวณปริมาณผักตบชวาและมูลโคที่ใส่เข้าไปในถังปฏิกรณ์ไร้อากาศแสดงดังรายละเอียดภาคผนวก จ โดยการทดลองนี้ได้ทำการเดินระบบ 2 ครั้ง ดังนี้

4.4.1 การเติมของผสมที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นลงในถังปฏิกรณ์ไร้อากาศ

ของผสมที่ใส่ใน R1 คือ ผักตบชวาที่มีการลดขนาดผสมมูลโคในสัดส่วนดังกล่าวข้างต้น, ของผสมที่ใส่ใน R2 คือ ผักตบชวาที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นด้วยน้ำดำผสมมูลโคในสัดส่วนดังกล่าวข้างต้นและน้ำที่เกิดจากการแช่ผักตบชวาในน้ำดำตามสภาวะข้างต้น สำหรับการทดลองครั้งนี้ R1 และ R2 คือ R1.1 และ R2.1 ตามลำดับ

ผักตบชวาและมูลโคที่ใช้ในการทดลองมีรายละเอียดองค์ประกอบเบื้องต้นแสดงดังตารางที่ 4.19

ตารางที่ 4.19 องค์ประกอบเบื้องต้นของผักตบชวาและมูลโค

องค์ประกอบ	ผักตบชวา	มูลโค
ของแข็งทั้งหมด (ร้อยละ)	17.24±7.36	48.53 ±13.14
ความชื้น (ร้อยละ)	82.76	51.47
ของแข็งระเหย (ร้อยละน้ำหนักเปียก)	10.54±2.92	20.67±2.87
เถ้า (ร้อยละ)	6.70	27.86
ความเป็นกรดต่าง	6.64	8.52
ความต่างศักย์ออกซิเดชันรีดักชัน (mV)	192±5.46	-83.57±1.75

1. สมบัติทางเคมีของวัตถุดิบในสภาวะการทดลองที่มีการบำบัดเบื้องต้นที่แตกต่างกัน

การทดลอง 46 วัน ของแข็งทั้งหมดและของแข็งระเหยของวัตถุดิบมีการเปลี่ยนแปลง ดังตารางที่ 4.20

ตารางที่ 4.20 ค่าของแข็งทั้งหมดและของแข็งระเหยที่ลดลงของวัตถุดิบในถังปฏิกรณ์ไร้อากาศ

ถังปฏิกรณ์	Δ ของแข็งทั้งหมดที่ลดลง (ร้อยละ)	Δ ของแข็งระเหยที่ลดลง (ร้อยละน้ำหนักแห้ง)
R1.1	6.71	32.29
R2.1	6.92	39.84

หมายเหตุ R1.1 = ถังปฏิกรณ์ไร้อากาศที่ 1 ของการทดลองครั้งที่ 1

R1.2 = ถังปฏิกรณ์ไร้อากาศที่ 2 ของการทดลองครั้งที่ 1

จากตารางที่ 4.20 พบว่า เมื่อสิ้นสุดการทดลองถังปฏิกรณ์ไร้อากาศที่ 1 มีร้อยละของแข็งระเหยที่ลดลงน้อยกว่าถังปฏิกรณ์ไร้อากาศที่ 2 เท่ากับ 1.32 เท่า แต่ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมของถังปฏิกรณ์ไร้อากาศที่ 1 และถังปฏิกรณ์ไร้อากาศที่ 2 มีค่าแตกต่างกัน 1.82 เท่า (0.215 และ 0.118 ลิตร/กรัมของแข็งระเหย ตามลำดับ อาจแสดงว่า ปัจจัยของสภาพแวดล้อมของถังปฏิกรณ์ไร้อากาศที่ 2 ไม่เหมาะสมต่อจุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทน เช่น พีเอช ส่งผลให้จุลินทรีย์ไม่สามารถนำกรดอินทรีย์ระเหยที่ผลิตขึ้นโดยจุลินทรีย์กลุ่มสร้างกรดไปใช้ในการผลิตก๊าซชีวภาพได้

- การเปรียบเทียบกับ การทดลองที่ผ่านมา

การเปรียบเทียบของแข็งระเหยที่ลดลงและปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมของการทดลองนี้กับสภาวะที่มีปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมสูงสุดของการทดลองที่ผ่านมา แสดงดังตารางที่ 4.21

ตารางที่ 4.21 เปรียบเทียบค่าของแข็งระเหยที่ลดลงของวัตถุดิบกับการทดลองที่ผ่านมา

การทดลอง	Δ ของแข็งระเหยที่ลดลง (ร้อยละน้ำหนักแห้ง)	ก๊าซชีวภาพสะสม (ล./ก.ของแข็งระเหย)	ความชื้น (ร้อยละ)
2	38.52	0.258	98.55
3	40.01	0.124	98.55
R1.1	32.29	0.215	82.69-87.73
R2.1	39.84	0.118	82.69-87.73

จากตารางที่ 4.21 สามารถเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ผ่านมาได้ ดังนี้

1. การเปรียบเทียบการทดลองที่ 2 และ R1.1 พบว่า ค่าของแข็งระเหยที่ลดลงสอดคล้องกับก๊าซชีวภาพสะสม อาจแสดงว่าความชื้นภายในระบบมีผลต่อการละลายน้ำของสารอินทรีย์และการแปรรูปสารอินทรีย์ที่ละลายน้ำเป็นกรดอินทรีย์ระเหยและก๊าซชีวภาพ ทั้งนี้ความชื้นที่เหมาะสมต่อการย่อยสลายในระบบไร้อากาศสำหรับผักตบชวามีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 91-93 (Chan และคณะ, 2002; Jagadish และคณะ, 2012)

2. การเปรียบเทียบการทดลองที่ 3 และ R2.1 พบว่า ค่าของแข็งระเหยที่ลดลงของการทดลองที่ 3 และถึงปฏิกรณ์ไร้อากาศที่ 2 มีค่าใกล้เคียงกัน และสอดคล้องกับก๊าซชีวภาพสะสมที่เกิดขึ้น

2. การวิเคราะห์น้ำชะที่กักถังปฏิกรณ์

การวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ ในน้ำชะที่กักถังปฏิกรณ์แสดงถึงเสถียรภาพของระบบและระดับการย่อยสลายของวัตถุดิบที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นทางกายภาพและเคมี โดยเดินระบบเป็นเวลา 46 วัน

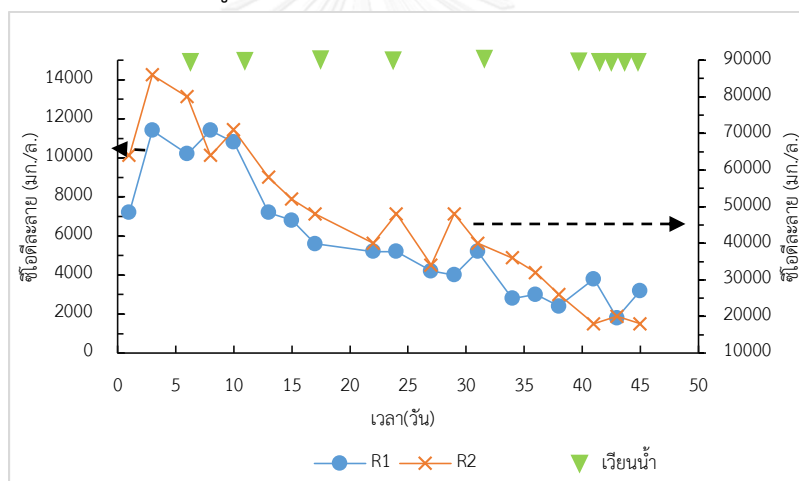
2.1 ซีไอดีละลาย

- ถังปฏิกรณ์ไร้อากาศที่ 1 (R1.1)

ค่าซีไอดีละลายในน้ำชะตลอดการทดลองเป็นเวลา 46 วัน อยู่ระหว่าง 1,800-11,400 มิลลิกรัม/ลิตร ซึ่งค่าซีไอดีละลายในน้ำชะเมื่อเริ่มต้นการทดลองมีค่าเท่ากับ 7,200 มิลลิกรัม/ลิตร และการเติมน้ำปริมาตร 350 มิลลิลิตรเข้าสู่ระบบในวันที่ 9 เป็นผลให้ความชื้นภายในระบบมีค่าสูงขึ้นเท่ากับร้อยละ 87.73 เนื่องจากการย่อยสลายในระบบไร้อากาศจะเกิดขึ้นได้ดีเมื่อมีความชื้นเพียงพอ ซึ่งความชื้นที่เหมาะสมต่อการย่อยสลายในระบบไร้อากาศสำหรับผักตบชวามีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 91-93 (Chan และคณะ, 2002; Jagadish และคณะ, 2012) ส่งผลให้น้ำชะมีค่าซีไอดีละลายในวันที่ 10 ของการเดินระบบลดลงโดยมีค่าเท่ากับ 10,800 มิลลิกรัม/ลิตร โดยมีการเปลี่ยนไปเป็นก๊าซชีวภาพ ดังรูปที่ 4.28 จนกระทั่งสิ้นสุดการทดลองซึ่งมีค่าซีไอดีละลายในน้ำชะเท่ากับ 3,200 มิลลิกรัม/ลิตร ดังรูปที่ 4.23

- ถังปฏิกรณ์ไร้อากาศที่ 2 (R2.1)

ตลอดการทดลองซีไอดีละลายในน้ำจะมีค่าอยู่ระหว่าง 18,000-86,000 มิลลิกรัม/ลิตร โดยเริ่มต้นการทดลองน้ำจะมีค่าซีไอดีละลายเท่ากับ 64,000 มิลลิกรัม/ลิตร อาจเป็นผลมาจากการเติมน้ำที่เกิดจากการแช่ผักตบชวาในน้ำดำลงในถังปฏิกรณ์ไร้อากาศที่ 2 ปริมาตร 30 มิลลิตร ซึ่งซีไอดีละลายของน้ำดำมีค่าสูงถึง 280,000 มิลลิกรัม/ลิตร (ตารางที่ 3.2) และน้ำจะมีค่าซีไอดีละลายสูงสุดเท่ากับ 86,000 มิลลิกรัม/ลิตร ในวันที่ 3 และซีไอดีละลายในน้ำจะมีแนวโน้มลดลงตั้งแต่วันที่ 7 ซึ่งสอดคล้องกับการลดลงของพีเอชที่อยู่ในช่วงเอื้อต่อการเติบโตของจุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทน (รูปที่ 4.26) จนกระทั่งสิ้นสุดการทดลองซึ่งมีค่าซีไอดีละลายในน้ำเท่ากับ 18,000 มิลลิกรัม/ลิตร อย่างไรก็ตามการเติมน้ำปริมาตร 350 มิลลิตร เข้าสู่ระบบในวันที่ 17 เพื่อให้ความชื้นเท่ากับถังปฏิกรณ์ไร้อากาศที่ 1 (ร้อยละ 87.73) และการเวียนน้ำจะทำให้น้ำภายในถังปฏิกรณ์ไร้อากาศผสมกันอย่างทั่วถึงส่งผลให้ซีไอดีละลายถูกใช้ได้เป็นผลให้ค่าซีไอดีละลายมีแนวโน้มลดลง ดังรูปที่ 4.23 ทั้งนี้สอดคล้องกับอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพรายวันมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตั้งแต่วันที่ 17 จนถึงวันที่ 37 ของการเดินระบบโดยอยู่ในช่วง 2.8-6.3 มิลลิตร/กรัมของแข็งระเหย/วัน



รูปที่ 4.23 ซีไอดีละลายของการทดลองครั้งที่ 1

- การเปรียบเทียบกับ การทดลองที่ผ่านมา

การเปรียบเทียบค่าซีไอดีละลายของการทดลองนี้กับสถานะที่มีปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมสูงสุดของการทดลองที่ผ่านมา แสดงดังตารางที่ 4.22

ตารางที่ 4.22 เปรียบเทียบซีไอดีละลาย

การทดลองที่	ซีไอดีละลาย (มก./ล.)			ตลอดการทดลอง
	เริ่มต้นการทดลอง	ค่าสูงสุด		
		วันที่	ความเข้มข้น	
2	4,800	12	8,600	2,000-8,600

ตารางที่ 4.22 เปรียบเทียบซีโอดีละลาย (ต่อ)

การทดลอง	ซีโอดีละลาย (มก./ล.)			
	เริ่มต้นการทดลอง	ค่าสูงสุด		ตลอดการทดลอง
		วันที่	ความเข้มข้น	
3	9,200	2	11,600	5,200-11,600
R1.1	7,200	3, 8	11,400	1,800-11,400
R2.1	64,000	3	86,000	18,000-86,000

จากตารางที่ 4.22 สามารถเปรียบเทียบกับการทดลองที่ผ่านมาได้ดังนี้

1. การเปรียบเทียบการทดลองที่ 2 และ R1.1 พบว่า ซีโอดีละลายในน้ำชะของ R1.1 ตลอดการทดลองมีค่าใกล้เคียงกับการทดลองที่ 2 (2,000-8,600 มิลลิกรัม/ลิตร) แต่ซีโอดีละลายในน้ำชะเมื่อเริ่มต้นการทดลองของ R1.1 (7,200 มิลลิกรัม/ลิตร) มีค่ามากกว่าการทดลองที่ 2 (4,800 มิลลิกรัม/ลิตร) และ R1.1 มีค่าซีโอดีละลายในน้ำชะสูงสุดของวันที่ 3 และวันที่ 8 เท่ากับ 11,400 มิลลิกรัม/ลิตร แต่การทดลองที่ 2 มีค่าซีโอดีละลายสูงสุดของวันที่ 12 เท่ากับ 8,600 มิลลิกรัม/ลิตร อาจเป็นผลมาจากปริมาณความชื้นในระบบของ R1.1 (ร้อยละ 82.69-87.73) น้อยกว่าการทดลองที่ 2 (ร้อยละ 98.55) ทำให้มีการแปรรูปสารอินทรีย์ได้ช้าและน้อยกว่า

2. การเปรียบเทียบการทดลองที่ 3 และ R2.1 พบว่า ซีโอดีละลายในน้ำชะตลอดการทดลองของ R2.1 (18,000-86,000 มก./ล.) มากกว่าการทดลองที่ 3 (5,200-11,600 มก./ล.) อาจเป็นผลมาจากปริมาณความชื้นในระบบของ R2.1 (ร้อยละ 82.69-87.73) น้อยกว่าการทดลองที่ 3 (ร้อยละ 98.55) ทำให้มีการแปรรูปสารอินทรีย์ได้ช้าและน้อยกว่าโดยพิจารณาได้จากอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ (รูปที่ 4.15 และ รูปที่ 4.28)

3. การเปรียบเทียบ R1.1 และ R2.1 พบว่า ซีโอดีละลายตลอดการทดลองของ R2.1 สูงกว่า R1.1 แสดงว่าการบำบัดเบื้องต้นด้วยน้ำดำทำให้สารอินทรีย์สามารถละลายน้ำได้มากขึ้น

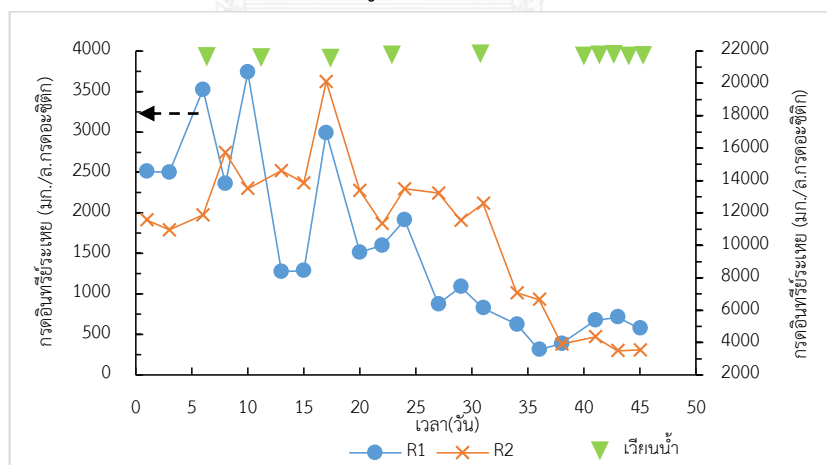
2.2 กรดอินทรีย์ระเหย

- ถึงปฏิกรณ์ไร้อากาศที่ 1

ค่ากรดอินทรีย์ระเหยตลอดการทดลองอยู่ระหว่าง 312.5-3,737.5 มิลลิกรัม/ลิตร กรดอะซิติก โดยเริ่มต้นการทดลองมีค่ากรดอินทรีย์ระเหยเท่ากับ 2,521.5 มิลลิกรัม/ลิตร กรดอะซิติก และกรดอินทรีย์ระเหยมีค่าสูงสุดในวันที่ 10 เท่ากับ 3,737.5 มิลลิกรัม/ลิตร กรดอะซิติก ซึ่งสอดคล้องกับซีไอดีละลายของ 10 วันแรกที่มีแวนโน้มสูงขึ้น (10,800 มก./ล.) ดังรูปที่ 4.23 และอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพของ 14 วันแรกที่มีแวนโน้มสูงขึ้น (13.83 มล./ก.ของแข็งระเหย/วัน) ดังรูปที่ 4.28 และกรดอินทรีย์ระเหยมีแวนโน้มลดลงตั้งแต่วันที่ 10 จนกระทั่งสิ้นสุดการทดลอง โดยที่กรดอินทรีย์ระเหยเมื่อสิ้นสุดการทดลองมีค่าเท่ากับ 575 มิลลิกรัม/ลิตร กรดอะซิติก เนื่องจากกรดอินทรีย์ระเหยถูกนำไปใช้ ดังรูปที่ 4.24

- ถึงปฏิกรณ์ไร้อากาศที่ 2

ค่ากรดอินทรีย์ระเหยตลอดการทดลองอยู่ระหว่าง 3,500-20,100 มิลลิกรัม/ลิตร โดยเริ่มต้นการทดลองมีค่ากรดอินทรีย์ระเหยเท่ากับ 11,562.5 มิลลิกรัม/ลิตร กรดอะซิติก และในวันที่ 17 กรดอินทรีย์ระเหยมีค่าสูงสุดเท่ากับ 20,100 มิลลิกรัม/ลิตร กรดอะซิติก ซึ่งสอดคล้องกับอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพของ 25 วันแรกที่มีแวนโน้มสูงขึ้น (6.22 มล./ก.ของแข็งระเหย/วัน) และการเวียนน้ำทำให้กรดอินทรีย์ระเหยมีแวนโน้มลดลงจนกระทั่งสิ้นสุดการทดลองกรดอินทรีย์ระเหยมีค่าเท่ากับ 3,500 มิลลิกรัม/ลิตร กรดอะซิติก อาจแสดงว่ากรดอินทรีย์ระเหยถูกใช้ได้น้อยกว่า โดยพิจารณาได้จากอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ ดังรูปที่ 4.24



รูปที่ 4.24 กรดอินทรีย์ระเหยของการทดลองครั้งที่ 1

- การเปรียบเทียบกับกรทดลองที่ผ่านมา

การเปรียบเทียบกรดอินทรีย์ระเหยของการทดลองนี้กับสถานะที่มีปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมสูงสุดของการทดลองที่ผ่านมา แสดงดังตารางที่ 4.23

ตารางที่ 4.23 เปรียบเทียบกรดอินทรีย์ระเหย

การทดลอง	กรดอินทรีย์ระเหย (มก./ล.กรดอะซิติก)		
	เริ่มต้นการทดลอง	สิ้นสุดการทดลอง	ตลอดการทดลอง
2	975.00	462.50	462.50-3,006.25
3	1,575.00	1,125.50	1,125.00-1,937.50
R1.1	2,512.50	575.00	312.50-3,737.50
R2.1	11,562.50	3,537.00	3,500.00-20,100.00

จากตารางที่ 4.23 สามารถเปรียบเทียบกับค่าการทดลองที่ผ่านมาได้ดังนี้

1. การเปรียบเทียบ R1.1 และการทดลองที่ 2 พบว่า ตลอดการทดลองกรดอินทรีย์ระเหยของ R1.1 (312.50-3,737.50 มก./ล.กรดอะซิติก) มีค่าใกล้เคียงกับการทดลองที่ 2 (462.50-3,600.25 มก./ล.กรดอะซิติก)

2. การเปรียบเทียบ R2.1 และการทดลองที่ 3 พบว่า ตลอดการทดลองกรดอินทรีย์ระเหยของ R2.1 (3,500.00-20,100.00 มก./ล.กรดอะซิติก) มีค่าสูงกว่าการทดลองที่ 3 (1,125.0-1,937.5 มก./ล. กรดอะซิติก) อาจเป็นผลมาจาก R2.1 มีการแปรรูปของกรดอินทรีย์ระเหยได้น้อยกว่า เป็นผลให้กรดอินทรีย์ระเหยของ R2.1 มีค่ามากกว่าการทดลองที่ 3 โดยพิจารณาได้จากอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ (รูปที่ 4.28 และรูปที่ 4.15)

3. การเปรียบเทียบ R1.1 และ R2.1 พบว่า กรดอินทรีย์ระเหยตลอดการทดลองของ R2.1 สูงกว่า R1.1 อาจแสดงว่า R2.1 มีการแปรรูปกรดอินทรีย์ระเหยได้น้อยกว่า R1.1

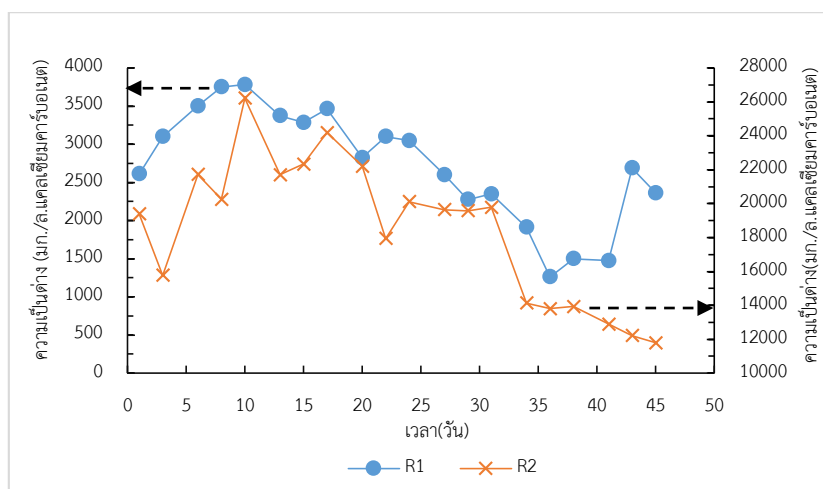
2.3 ความเป็นต่าง

- ถึงปฏิกรณ์ไร้อากาศที่ 1

ตลอดการทดลองมีความเป็นต่างอยู่ระหว่าง 1,262.5-3,783.3 มิลลิกรัม/ลิตร แคลเซียมคาร์บอเนต โดยเริ่มต้นการทดลองความเป็นต่างมีค่าเท่ากับ 2,612.5 มิลลิกรัม/ลิตร แคลเซียมคาร์บอเนต และมีค่าความเป็นต่างสูงสุดเท่ากับ 3,783.3 ในวันที่ 10 และมีแนวโน้มลดลงเนื่องจากการเวียนน้ำทำให้น้ำภายในระบบเกิดการผสมกันจนสิ้นสุดการทดลองมีความเป็นต่างเท่ากับ 2,362.5 มิลลิกรัม/ลิตร แคลเซียมคาร์บอเนต ดังรูปที่ 4.25

- ถึงปฏิบัติการไร่อากาศที่ 2

ตลอดการทดลองความเป็นต่างมีค่าอยู่ระหว่าง 22,800-26,225 มิลลิกรัม/ลิตร แคลเซียมคาร์บอเนต โดยเริ่มต้นการทดลองความเป็นต่างมีค่าเท่ากับ 19,387.5 มิลลิกรัม/ลิตร แคลเซียมคาร์บอเนต และวันที่ 10 มีค่าความเป็นต่างสูงสุดเท่ากับ 26,225 มิลลิกรัม/ลิตร แคลเซียมคาร์บอเนต แต่ความเป็นต่างมีแนวโน้มลดลงจนสิ้นสุดการทดลอง โดยมีค่าความเป็นต่างเมื่อสิ้นสุดการทดลองเท่ากับ 11,800 มิลลิกรัม/ลิตร แคลเซียมคาร์บอเนต ดังรูปที่ 4.25



รูปที่ 4.25 ความเป็นต่างของการทดลองครั้งที่ 1

- การเปรียบเทียบกับกรทดลองที่ผ่านมา

การเปรียบเทียบความเป็นต่างของการทดลองนี้กับสถานะที่มีปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมสูงสุดของการทดลองที่ผ่านมา แสดงดังตารางที่ 4.24

ตารางที่ 4.24 เปรียบเทียบความเป็นต่าง

การทดลอง	ความเป็นต่าง (มก./ล.แคลเซียมคาร์บอเนต)			กรดอินทรีย์ระเหยตลอดการทดลอง (มก./ล. กรดอะซิติก)
	เริ่มต้นการทดลอง	สิ้นสุดการทดลอง	ตลอดการทดลอง	
2	3,243.75	3,693.75	3,750.00-4,325.00	462.50-3,006.25
3	4,525.00	6,287.50	4,525.00-7,662.00	1,125.00-1,937.50
R1.1	2,612.50	2,362.50	1,262.50-3,783.33	312.50-3,737.50
R2.1	19,387.50	11,800.00	11,800.00-26,225.00	3,500.00-20,100.00

จากตารางที่ 4.24 สามารถเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ผ่านมาได้ดังนี้

1. การเปรียบเทียบ R1.1 และการทดลองที่ 2 พบว่า ตลอดการทดลองความเป็นต่างของ R1.1 (1,262.50-3,783.33 มก./ล. แคลเซียมคาร์บอเนต) มีค่าน้อยกว่าการทดลองที่ 2 (3,750.00-4,325.00 มก./ล. แคลเซียมคาร์บอเนต) อาจเป็นผลมาจาก R1.1 ไม่มีการเติมโซเดียมไบคาร์บอเนต (บัฟเฟอร์) เมื่อเติมน้ำเข้าสู่ระบบในวันที่ 9

2. การเปรียบเทียบ R2.1 และการทดลองที่ 3 พบว่า ตลอดการทดลองความเป็นต่างของ R2.1 (11,800.00-26,225.00 มก./ล. แคลเซียมคาร์บอเนต) มีค่าสูงกว่าการทดลองที่ 3 (4,525.00-7,662.00 มก./ล. แคลเซียมคาร์บอเนต) อาจเป็นผลมาจากกรดอินทรีย์ระเหยตลอดการทดลองของ R2.1 มีค่าสูงกว่าการทดลองที่ 3 ซึ่งกรดอะซิติกจะแตกตัวได้อะซิเตดไอออนเป็นผลให้ค่าความเป็นต่างของ R2.1 สูงกว่าการทดลองที่ 3

3. การเปรียบเทียบ R1.1 และ R2.1 พบว่า ความเป็นต่างตลอดการทดลองของ R2.1 (15,775.00-26,225.00 มก./ล. แคลเซียมคาร์บอเนต) สูงกว่า R1.1 (2,612.50-3,504.17 มก./ล. แคลเซียมคาร์บอเนต) อาจเป็นผลมาจากกรดอินทรีย์ระเหยตลอดการทดลองของ R2.1 มีค่าสูงกว่า R1.1 ซึ่งกรดอะซิติกจะแตกตัวได้อะซิเตดไอออนเป็นผลให้ค่าความเป็นต่างของ R2.1 สูงกว่า R1.1

2.4 ความเป็นกรดต่าง (พีเอช)

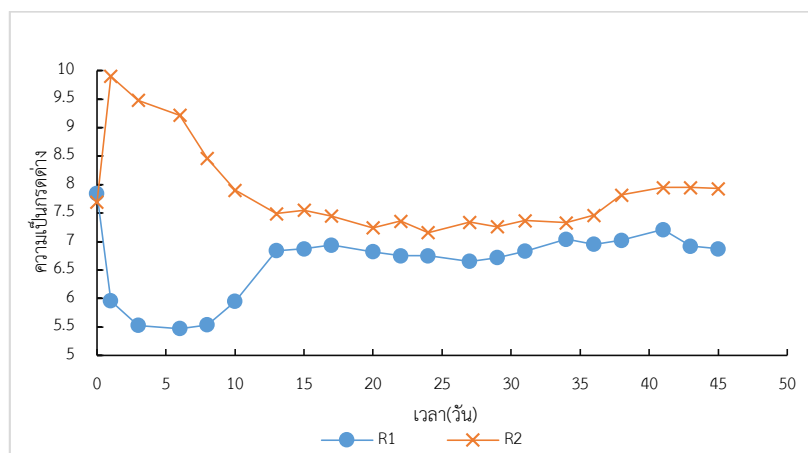
- ถังปฏิกรณ์ไร้อากาศที่ 1

ค่าพีเอชตลอดการทดลองอยู่ระหว่าง 5.47-7.84 เมื่อเริ่มต้นการทดลองไม่มีการปรับค่าพีเอช ซึ่งมีค่าเท่ากับ 7.84 โดยพีเอชมีค่าลดลงต่ำสุดในวันที่ 6 (5.47) และมีแนวโน้มสูงขึ้นในวันที่ 13 จนกระทั่งสิ้นสุดการทดลองพีเอชมีค่าอยู่ระหว่าง 6.84-7.21 ซึ่งเหมาะสมต่อจุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทน ดังรูปที่ 4.26

- ถังปฏิกรณ์ไร้อากาศที่ 2

ค่าพีเอชตลอดการทดลองอยู่ระหว่าง 7.16-9.90 เมื่อเริ่มต้นการทดลองได้ปรับพีเอชของน้ำดำที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นก่อนเติมลงในถังปฏิกรณ์ที่ 2 จนมีค่าพีเอชเท่ากับ 7.69 และพีเอชมีค่าสูงขึ้นในวันที่ 1 มีค่าเท่ากับ 9.9 ซึ่งจุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทนไม่สามารถมีชีวิตอยู่ได้เมื่อพีเอชมีค่าสูงกว่า 8 หรือน้อยกว่า 6 (Gerardi, 2003) และพีเอชมีค่าลดลงจนกระทั่งวันที่ 13 มีพีเอชเท่ากับ 7.49 ในวันที่ 15 ถึงวันที่ 38 พีเอชมีค่าคงที่โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 7.16-7.82 และมีแนวโน้มสูงขึ้นจนสิ้นสุดการทดลองพีเอชมีค่าเท่ากับ 7.92 ซึ่งไม่เหมาะสมต่อจุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทน โดย

พีเอชที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทนมีค่าอยู่ระหว่าง 6.5-7.6 (Rittmann และ McCarty, 2000) ดังรูปที่ 4.26 และสอดคล้องกับการลดลงของอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพตั้งแต่วันที่ 37 ถึงสิ้นสุดการทดลอง (รูปที่ 4.28) อย่างไรก็ตามการลดลงของพีเอชนี้เป็นผลมาจากกรดอินทรีย์ภายในระบบมีค่าสูงขึ้น (รูปที่ 4.24) และความเป็นด่างมีค่าลดลงเนื่องจากถูกใช้เป็นบัฟเฟอร์และการเจือจางเนื่องจากการเวียนน้ำชะ



รูปที่ 4.26 พีเอชของการทดลองครั้งที่ 1

- การเปรียบเทียบกับ การทดลองที่ผ่านมา

การเปรียบเทียบค่าพีเอชของการทดลองนี้กับสภาวะที่มีปริมาณก๊าซชีวภาพ

สะสมสูงสุดของการทดลองที่ผ่านมา แสดงดังตารางที่ 4.25

ตารางที่ 4.25 เปรียบเทียบพีเอช

การทดลอง	พีเอช			ความเป็นด่าง ตั้งแต่เริ่มการทดลอง ถึงวันที่ พีเอชต่ำสุด (มก./ล.แคลเซียม คาร์บอเนต)	กรดอินทรีย์ระเหย ตั้งแต่เริ่มการทดลองถึง วันที่พีเอชต่ำสุด (มก./ล.กรดอะซิติก)
	ค่า ต่ำสุด (วันที่)	ค่า ต่ำสุด	ตลอดการ ทดลอง		
2	7	6.43	6.43-8.00	3,243.75-4,325.00	975.00-3,006.25
3	6	6.65	6.65-8.08	4,525.00-6,562.50	1,412.50-1,937.50

ตารางที่ 4.25 เปรียบเทียบพีเอช (ต่อ)

การทดลอง	พีเอช			ความเป็นต่าง ตั้งแต่เริ่มการทดลอง ถึงวันที่ พีเอชต่ำสุด (มก./ล.แคลเซียม คาร์บอเนต)	กรดอินทรีย์ระเหย ตั้งแต่เริ่มการทดลองถึง วันที่พีเอชต่ำสุด (มก./ล.กรดอะซิติก)
	ค่า ต่ำสุด (วันที่)	ค่า ต่ำสุด	ตลอดการ ทดลอง		
R1.1	6	5.47	5.47-7.84	2,612.50-3,504.17	2,500.00-3,520.00
R2.1	13	7.49	7.16-9.90	15,775.00-26,225.00	10,950.00-15,717.90

จากตารางที่ 4.25 สามารถเปรียบเทียบกับการทดลองที่ผ่านมาได้ดังนี้

1. การเปรียบเทียบ R1.1 และการทดลองที่ 2 พบว่า ค่าพีเอชต่ำสุดของ R1.1 (วันที่ 6) และการทดลองที่ 2 (วันที่ 7) เกิดขึ้นในเวลาใกล้เคียงกัน แต่ R1.1 (5.47) มีค่าพีเอชต่ำสุดน้อยกว่าการทดลองที่ 2 (6.43) อาจมาจากกรดอินทรีย์ระเหยภายในระบบของ R1.1 ถูกใช้ได้น้อยกว่าการทดลองที่ 2
2. การเปรียบเทียบ R2.1 และการทดลองที่ 3 พบว่า ค่าพีเอชต่ำสุดของ R2.1 เกิดขึ้นในวันที่ 13 ในขณะที่การทดลองที่ 3 เกิดขึ้นในวันที่ 6 อาจมีสาเหตุมาจากความเป็นต่างของ R2.1 มีค่าสูง ซึ่งความเป็นต่างที่มีค่าสูงนี้จะช่วยควบคุมไม่ให้พีเอชลดลงอย่างรวดเร็ว
3. การเปรียบเทียบ R1.1 และ R2.1 พบว่า ค่าพีเอชตลอดการทดลองของ R2.1 (7.16-9.90) สูงกว่า R1.1 (5.47-7.84) อาจมาจากกรดอินทรีย์ระเหยและความเป็นต่างของ R2.1 ถูกใช้ได้น้อยกว่า R1.1

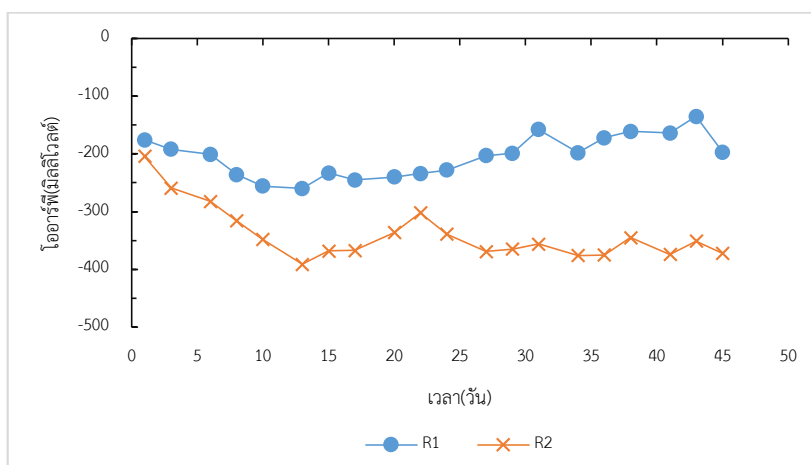
2.5 ความต่างศักย์ออกซิเดชันรีดักชัน

- ถึงปฏิกรณ์ไร้อากาศที่ 1

เมื่อเริ่มต้นการทดลองมีค่าความต่างศักย์ออกซิเดชันรีดักชันเท่ากับ -176 มิลลิโวลต์ และมีค่าเป็นลบมากขึ้นเท่ากับ -245 ในวันที่ 17 จนกระทั่งสิ้นสุดการทดลองมีแนวโน้มมีค่าเป็นลบน้อยลง ซึ่งมีค่าความต่างศักย์ออกซิเดชันรีดักชันเมื่อสิ้นสุดการทดลองเท่ากับ -197 มิลลิโวลต์ เนื่องจากการเติมน้ำเมื่อเก็บตัวอย่างน้ำชะที่กั้นถึงปฏิกรณ์เพื่อวิเคราะห์ และการเวียนน้ำอาจทำให้ออกซิเจนในอากาศละลายน้ำเป็นผลให้ค่าเป็นลบน้อยลงในช่วงนี้ ดังรูปที่ 4.27

- ถึงปฏิกรณ์ไร้อากาศที่ 2

เมื่อเริ่มต้นการทดลองมีค่าความต่างศักย์ออกซิเดชันรีดักชันเท่ากับ -204 มิลลิโวลต์ และมีค่าเป็นลบมากขึ้นเท่ากับ -391 ในวันที่ 13 และมีแนวโน้มมีค่าเป็นลบน้อยลง จนกระทั่งสิ้นสุดการทดลอง โดยมีค่าความต่างศักย์ออกซิเดชันรีดักชันเท่ากับ -372 มิลลิโวลต์ เป็นผลมาจากการเติมน้ำจากการเก็บตัวอย่างน้ำชะไปวิเคราะห์และการเวียนน้ำชะทำให้ค่าเป็นลบน้อยลง ดังรูปที่ 4.27



รูปที่ 4.27 ความต่างศักย์ออกซิเดชันรีดักชันของการทดลองครั้งที่ 1

3. ศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนจากผักตบชวา

3.1 การผลิตก๊าซชีวภาพรายวันต่อของแข็งระเหย

- ถึงปฏิกรณ์ไร้อากาศที่ 1

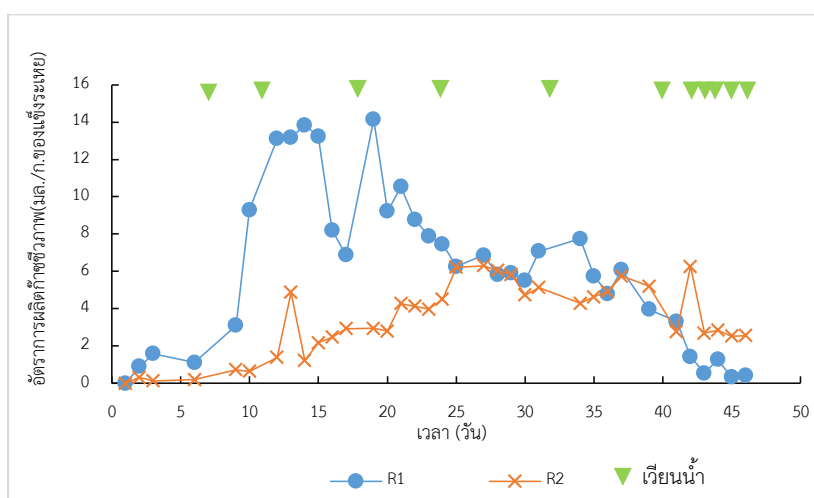
เริ่มผลิตก๊าซชีวภาพในวันที่ 2 ของการเดินระบบ ซึ่งวันที่ 2 มีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพเท่ากับ 0.9 มิลลิลิตร/กรัมของแข็งระเหย โดยการผลิตก๊าซชีวภาพระหว่างวันที่ 2 ถึงวันที่ 6 ที่เกิดขึ้นเป็นผลจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายง่ายของวัตถุดิบ (Sponza และคณะ, 2004) และเริ่มเวียนน้ำในวันที่ 7 ของการเดินระบบส่งผลให้วันที่ 9 มีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพสูงขึ้นเท่ากับ 3.1 มิลลิลิตร/กรัมของแข็งระเหย เนื่องจากการเวียนน้ำทำให้สารอินทรีย์ด้านล่างถึงปฏิกรณ์กลับเข้าสู่ถังปฏิกรณ์อีกครั้ง (Sanphoti และคณะ, 2006) ส่งผลให้จุลินทรีย์ด้านบนและตรงกลางถึงปฏิกรณ์สามารถใช้เป็นสารตั้งต้นสำหรับการผลิตก๊าซชีวภาพ นอกจากนี้ยังช่วยควบคุมความเป็นต่างและพีเอชเพื่อให้ระบบมีเสถียรภาพดีขึ้น (Fischer และ Krieg, 2001)

เมื่อเติมน้ำลงในถังปฏิกรณ์ที่ 1 ในวันที่ 9 เนื่องจากความชื้นไม่เพียงพอสำหรับการย่อยสลายของผักตบชวา เป็นผลให้ความชื้นของระบบมีค่าเท่ากับร้อยละ 87.73 โดยที่ความชื้นที่เหมาะสมต่อการย่อยสลายในระบบไร้อากาศสำหรับผักตบชวามีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 91-93 (Chan และคณะ, 2002; Jagadish และคณะ, 2012) ส่งผลให้อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพของวันที่ 14 มีค่าสูงเท่ากับ 13.83 มิลลิลิตร/กรัมของแข็งระเหย/วัน และมีค่าลดลงจนกระทั่งการเวียนน้ำในวันที่ 18 ทำให้อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพวันที่ 19 มีค่าสูงขึ้นอีกครั้ง ซึ่งมีค่าเท่ากับ 14.14 มิลลิลิตร/กรัมของแข็งระเหย/วัน และมีการผลิตก๊าซชีวภาพลดลงจนกระทั่งสิ้นสุดการทดลองซึ่งมีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพเท่ากับ 0.42 มิลลิลิตร/กรัมของแข็งระเหย/วัน ดังรูปที่ 4.28

ทั้งนี้ อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพของถังปฏิกรณ์ไร้อากาศที่ 1 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในช่วง 14 วันแรก และมีแนวโน้มลดลงจนสิ้นสุดการทดลอง ซึ่งสอดคล้องกับกรดอินทรีย์ระเหยที่เพิ่มขึ้นในช่วง 10 วันแรกและกรดอินทรีย์ระเหยมีแนวโน้มลดลงจนสิ้นสุดการทดลอง

- ถังปฏิกรณ์ไร้อากาศที่ 2

เริ่มผลิตก๊าซชีวภาพวันที่ 2 โดยวันที่ 2 มีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพเท่ากับ 0.3 มิลลิลิตร/กรัมของแข็งระเหย และการเวียนน้ำในวันที่ 7 และวันที่ 11 เป็นผลให้อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพมีแนวโน้มสูงขึ้น นอกจากนี้การเติมน้ำลงในถังปฏิกรณ์ที่ 2 ในวันที่ 17 เพื่อให้ความชื้นในถังปฏิกรณ์ไร้อากาศที่ 2 เท่ากับถังปฏิกรณ์ไร้อากาศที่ 1 โดยมีความชื้นเท่ากับร้อยละ 87.73 ส่งผลให้อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพมีแนวโน้มสูงขึ้นและสูงสุดในวันที่ 27 โดยมีค่าเท่ากับ 6.3 มิลลิลิตร/กรัมของแข็งระเหย/วัน และอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพมีแนวโน้มลดลงจนกระทั่งสิ้นสุดการทดลองซึ่งมีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพเท่ากับ 2.56 มิลลิลิตร/กรัมของแข็งระเหย/วัน ดังรูปที่ 4.28



รูปที่ 4.28 อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพของการทดลองครั้งที่ 1

- การเปรียบเทียบกับ การทดลองที่ผ่านมา
 การเปรียบเทียบอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพของการทดลองนี้กับสภาวะที่มี ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมสูงสุดของการทดลองที่ผ่านมา แสดงดังตารางที่ 4.26

ตารางที่ 4.26 เปรียบเทียบอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ

การทดลอง	อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ		ช่วงสูงสุด (วันที่)	กรดอินทรีย์ ระเหยลดลง (วันที่)
	ค่าสูงสุด (วันที่)	ค่าสูงสุด (มล./ก.ของแข็งระเหย/วัน)		
2	14	48.25	7-21	7-14
3	14	29.03	5-18	6-18
R1.1	19	14.14	10-19	10-15
R2.1	27	6.30	21-37	17-30

จากตารางที่ 4.26 สามารถเปรียบเทียบกับ การทดลองที่ผ่านมาได้ดังนี้

1. การเปรียบเทียบ R1.1 และการทดลองที่ 2 พบว่า อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพสูงสุดของ R1.1 (วันที่ 19 เท่ากับ 14.14 มล./ก.ของแข็งระเหย/วัน) ช้ากว่าการทดลองที่ 2 (วันที่ 14 เท่ากับ 48.25 มล./ก.ของแข็งระเหย/วัน) อาจเกิดจากความชื้นและการกระจายตัวของน้ำภายในระบบของ R1.1 เป็นผลให้อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพสูงสุดของ R1.1 ช้ากว่าการทดลองที่ 2 อย่างไรก็ตามอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพของ R1.1 มีค่าสูงในช่วงวันที่ 7-21 ซึ่งใกล้เคียงกับการทดลองที่ 2 ทั้งนี้ความชื้นของ R1.1 และการทดลองที่ 2 เท่ากับร้อยละ 82.68-87.73 และ 98.55 ตามลำดับ
2. การเปรียบเทียบ R2.1 และการทดลองที่ 3 พบว่า อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพสูงสุดของ R2.1 (วันที่ 27 เท่ากับ 6.30 มล./ก.ของแข็งระเหย/วัน) ช้ากว่าการทดลองที่ 3 (วันที่ 14 เท่ากับ 29.03 มล./ก.ของแข็งระเหย/วัน) อาจเกิดจากความชื้นและการกระจายตัวของน้ำภายในระบบของการทดลองที่ 3 เป็นผลให้อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพสูงสุดของ R2.1 ช้ากว่าการทดลองที่ 3 อย่างไรก็ตามการทดลองที่ 3 มีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพสูงสุดในช่วงวันที่ 5-18 ซึ่งเกิดขึ้นเร็วกว่า R2.1 ทั้งนี้สอดคล้องกับกรดอินทรีย์ระเหยที่ลดลง โดยที่ความชื้นของ R2.1 และการทดลองที่ 2 เท่ากับร้อยละ 82.68-87.73 และ 98.55 ตามลำดับ

3. การเปรียบเทียบ R1.1 และ R2.1 พบว่า อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพของ R1.1 มีค่าสูงในช่วงวันที่ 10-19 ซึ่งสอดคล้องกับกรดอินทรีย์ระเหยที่ลดลงตั้งแต่วันที่ 10 ในขณะที่ R2.1 มีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพสูงในช่วงวันที่ 21-37 ซึ่งสอดคล้องกับกรดอินทรีย์ระเหยที่ลดลงตั้งแต่วันที่ 17 ทั้งนี้ R2.1 มีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพช้ากว่า R1.1 อาจเกิดจากค่าพีเอชของ R2.1 ไม่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทน และการเติมน้ำเข้าสู่ระบบไม่พร้อมกัน โดยที่ R1.1 และ R2.1 เติมน้ำวันที่ 9 และ 17 ตามลำดับ

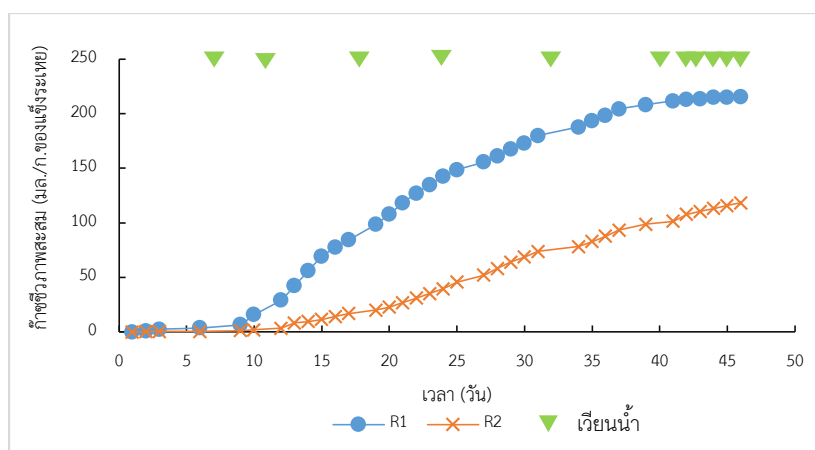
3.2 ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม

- ถังปฏิกรณ์ไร้อากาศที่ 1

เมื่อเริ่มต้นการทดลองมีปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมค่อนข้างคงที่ (0-3.59 มล./ก. ของแข็งระเหย) จนกระทั่งการเติมน้ำลงในถังปฏิกรณ์ในวันที่ 9 ของการเดินระบบทำให้ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมในวันที่ 10 มีค่าสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งมีก๊าซชีวภาพสะสมเท่ากับ 15.97 มิลลิลิตร/กรัมของแข็งระเหย และในช่วงสุดท้ายของการทดลองตั้งแต่วันที่ 42 ถึงวันที่ 46 ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมมีแนวโน้มคงที่ เนื่องจากอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพมีค่าลดลง (รูปที่ 4.28) โดยการทดลองเป็นเวลา 46 วัน ถังปฏิกรณ์ไร้อากาศที่ 1 มีปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมเท่ากับ 215.46 มิลลิลิตร/กรัมของแข็งระเหย ดังรูปที่ 4.29

- ถังปฏิกรณ์ไร้อากาศที่ 2

เมื่อเริ่มต้นการทดลองระหว่างวันที่ 1 ถึงวันที่ 16 มีปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมค่อยๆ สูงขึ้น โดยวันที่ 16 มีปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมเท่ากับ 14.09 มิลลิลิตร/กรัมของแข็งระเหย และเมื่อเติมน้ำ ในวันที่ 17 ทำให้ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมสูงขึ้นเท่ากับ 27.03 มิลลิลิตร/กรัมของแข็งระเหยในวันที่ 21 โดยในช่วงสุดท้ายของการทดลองระหว่างวันที่ 42 ถึงวันที่ 46 มีก๊าซชีวภาพสะสมค่อนข้างคงที่ (107.70-118.30 มล./ก.ของแข็งระเหย) และเมื่อสิ้นสุดการทดลองถังปฏิกรณ์ไร้อากาศที่ 2 มีก๊าซชีวภาพสะสม 118.30 มิลลิลิตร/กรัมของแข็งระเหย ดังรูปที่ 4.29



รูปที่ 4.29 ก๊าซชีวภาพสะสมของการทดลองครั้งที่ 1

- การเปรียบเทียบกับ การทดลองที่ผ่านมา
 การเปรียบเทียบปริมาณก๊าซมีเทนสะสมของการทดลองนี้กับสถานะที่มีปริมาณ
 ก๊าซชีวภาพสะสมสูงสุดของการทดลองที่ผ่านมา แสดงดังตารางที่ 4.27

ตารางที่ 4.27 เปรียบเทียบก๊าซชีวภาพสะสม

การทดลอง	ความชื้น (ร้อยละ)	ก๊าซชีวภาพสะสม (มล./ก.ของแข็งระเหย)
2	98.55	257.89
3	98.55	123.84
R1.1	82.69-87.73	215.46
R2.1	82.69-87.73	118.30

จากตารางที่ 4.27 สามารถเปรียบเทียบกับ การทดลองที่ผ่านมาได้ดังนี้

1. การเปรียบเทียบ R1.1 และการทดลองที่ 2 พบว่า ปริมาณก๊าซชีวภาพ
 สะสมของ R1.1 (215.46 มล./ก.ของแข็งระเหย) น้อยกว่าการทดลองที่ 2 (257.89 มล./ก.ของแข็ง
 ระเหย) เป็นผลมาจากความชื้นภายในระบบของถังปฏิกรณ์ไร้อากาศที่ 1 (ร้อยละ 82.96-87.73) น้อย
 กว่า การทดลองที่ 2 (ร้อยละ 98.55)

2. การเปรียบเทียบ R2.1 และการทดลองที่ 3 พบว่า ก๊าซชีวภาพสะสมของ R2.1 (118.3 มล./ก.ของแข็งระเหย) มีค่าน้อยกว่าการทดลองที่ 3 (213.84 มิลลิลิตร/กรัมของแข็งระเหย) เป็นผลมาจากความชื้นภายในระบบของ R2.1 (ร้อยละ 82.96-87.73) น้อยกว่าการทดลองที่ 3 (ร้อยละ 98.55)

3. การเปรียบเทียบ R1.1 และ R2.1 พบว่า ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมของ R2.1 (118.3 มล./ก.ของแข็งระเหย) มีค่าน้อยกว่า R1.1 (215.46 มล./ก.ของแข็งระเหย) เนื่องจากค่าพีเอชของ R2.1 ในช่วงแรกไม่เหมาะสมต่อจุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทน (รูปที่ 4.26) ทำให้ปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นในช่วงแรกมีค่าน้อย เป็นผลให้ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมของ R2.1 มีค่าน้อยกว่า R1.1

4.4.2 ไม่เต็มของผสมที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นลงในถังปฏิกรณ์ไร้อากาศ

ของผสมที่ใสใน R1 คือ ผักตบชวาที่มีการลดขนาดผสมมูลโคในสัดส่วนผักตบชวา : มูลโคเท่ากับ 2:1 (ของแข็งระเหย) ของผสมที่ใสใน R2 คือ ผักตบชวาที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นด้วยน้ำดำผสมมูลโคในสัดส่วนดังกล่าวข้างต้น แต่ไม่มีการเติมน้ำที่เกิดจากการแช่ผักตบชวาในน้ำดำ สำหรับการทดลองครั้งนี้ R1 และ R2 คือ R1.2 และ R2.2 ตามลำดับ ซึ่งผลการวิเคราะห์แสดงดังต่อไปนี้

1. สมบัติทางเคมีของวัตถุดิบในสภาวะการทดลองที่มีการบำบัดเบื้องต้นที่แตกต่างกัน

ของแข็งทั้งหมด ของแข็งระเหย และองค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบเมื่อเริ่มต้นและสิ้นสุดการทดลองรวมระยะเวลา 38 วัน มีการเปลี่ยนแปลง ดังตารางที่ 4.28 และตารางที่ 4.29

ตารางที่ 4.28 ของแข็งทั้งหมดและของแข็งระเหยที่ลดลงของวัตถุดิบในถังปฏิกรณ์ไร้อากาศ

ถังปฏิกรณ์	Δ ของแข็งทั้งหมดที่ลดลง (ร้อยละ)	Δ ของแข็งระเหยที่ลดลง (ร้อยละน้ำหนักแห้ง)
R1	6.89	30.52
R2	6.25	39.92

ตารางที่ 4.29 องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบเมื่อเริ่มต้นและสิ้นสุดการทดลอง

องค์ประกอบ	เริ่มต้น (ร้อยละน้ำหนักแห้ง)	สิ้นสุด (ร้อยละน้ำหนักแห้ง)	
		R1	R2
เซลลูโลส	20.21	15.11	12.59

ตารางที่ 4.29 องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบเมื่อเริ่มต้นและสิ้นสุดการทดลอง (ต่อ)

องค์ประกอบ	เริ่มต้น (ร้อยละน้ำหนักแห้ง)	สิ้นสุด (ร้อยละน้ำหนักแห้ง)	
		R1	R2
เซลลูโลส	20.21	15.11	12.59
เฮมิเซลลูโลส	32.78	28.82	17.85
ลิกนิน	4.43	2.58	2.03
น้ำตาลที่ละลายน้ำ	48.87	41.12	39.93
โปรตีน	5.32	3.27	1.12
ไขมัน	15.23	5.21	4.25

จากตารางที่ 4.28 พบว่า เมื่อสิ้นสุดการทดลองของแข็งระเหยของถังปฏิกรณ์ไร้อากาศที่ 1 และถังปฏิกรณ์ไร้อากาศที่ 2 มีค่าลดลงเท่ากับร้อยละ 30.52 และ 39.92 ตามลำดับ แสดงว่า สภาวะการทดลองของถังปฏิกรณ์ไร้อากาศที่ 2 จุลินทรีย์สามารถละลายสารอินทรีย์ออกจากของแข็งได้มากกว่าถังปฏิกรณ์ไร้อากาศที่ 1 ซึ่งสอดคล้องกับตารางที่ 4.29 ที่มีปริมาณร้อยละเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส ลิกนิน น้ำตาลที่ละลายน้ำ โปรตีน และไขมันลดลงมากกว่าถังปฏิกรณ์ไร้อากาศที่ 1 อาจเกิดจากถังปฏิกรณ์ไร้อากาศที่ 2 เป็นวัตถุดิบที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นด้วยน้ำดำซึ่งโซเดียมไฮดรอกไซด์ในน้ำดำทำให้เกิดการสลายโครงสร้างเฮมิเซลลูโลสและลิกนินบางส่วนของผู้ตกขาว และเกิดการเปลี่ยนแปลงลักษณะโครงสร้างของวัตถุดิบ เช่น พื้นที่ผิว ความพรุน และ โครงสร้างผลึกเซลลูโลส (Kim และคณะ, 2016) ดังนั้น การบำบัดเบื้องต้นทางเคมีจึงทำให้เกิดการสลายโครงสร้างลิกโนเซลลูโลสมากกว่าการบำบัดเบื้องต้นทางกายภาพ ส่งผลให้จุลินทรีย์สามารถละลายสารอินทรีย์ได้ง่ายขึ้นจึงทำให้ปริมาณน้ำตาลที่ละลายน้ำ โปรตีน และไขมันในวัตถุดิบมีค่าลดลงมากกว่า ทั้งนี้ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมของถังปฏิกรณ์ไร้อากาศที่ 1 และถังปฏิกรณ์ไร้อากาศที่ 2 ไม่สอดคล้องตามปริมาณเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส ลิกนิน น้ำตาลที่ละลายน้ำ โปรตีน และไขมันที่ลดลง อาจเป็นผลมาจากปัจจัยของสภาพแวดล้อมของถังปฏิกรณ์ไร้อากาศที่ 2 ไม่เหมาะสมต่อจุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทน เช่น พีเอช ส่งผลให้จุลินทรีย์ไม่สามารถนำกรดอินทรีย์ระเหยที่ผลิตขึ้นโดยจุลินทรีย์กลุ่มสร้างกรดไปใช้ในการผลิตก๊าซชีวภาพได้ ซึ่งก๊าซชีวภาพสะสมของถังปฏิกรณ์ไร้อากาศที่ 1 และถังปฏิกรณ์ไร้อากาศที่ 2 มีค่าเท่ากับ 0.210 และ 0.107 ลิตร/กรัมของแข็งระเหย ตามลำดับ

- การเปรียบเทียบกับ การทดลองที่ผ่านมา

การเปรียบเทียบของแข็งระเหยที่ลดลงและปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมของการทดลองนี้กับสถานะที่มีปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมสูงสุดของการทดลองที่ผ่านมา แสดงดังตารางที่ 4.30

ตารางที่ 4.30 เปรียบเทียบการทดลองนี้กับการทดลองที่ผ่านมา

การทดลอง	Δ ของแข็งระเหยที่ลดลง (ร้อยละน้ำหนักแห้ง)	ก๊าซชีวภาพสะสม (ล./ก.ของแข็ง ระเหย)	ความชื้น (ร้อยละ)
2	38.52	0.258	98.55
3	40.01	0.124	98.55
R1.1	32.29	0.215	82.69-87.73
R2.1	39.83	0.118	82.69-87.73
R1.2	30.52	0.210	87.73-91.75
R2.2	39.92	0.106	87.73-91.75

จากตารางที่ 4.30 สามารถเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ผ่านมาได้ดังนี้

1. การเปรียบเทียบ R1.2 และ R1.1 พบว่า ค่าของแข็งระเหยที่ลดลงสอดคล้องกับก๊าซชีวภาพสะสมที่เกิดขึ้น แสดงว่าของแข็งระเหยมีการแปรรูปไปเป็นก๊าซชีวภาพ ทั้งนี้สอดคล้องกับการทดลองที่ 2

2. การเปรียบเทียบ R2.2 และ R2.1 พบว่า ค่าของแข็งระเหยที่ลดลงมีค่าใกล้เคียงกัน แต่ไม่สอดคล้องกับก๊าซชีวภาพสะสมที่เกิดขึ้น แสดงว่าของแข็งระเหยไม่มีการแปรรูปไปเป็นก๊าซชีวภาพ แต่เมื่อเปรียบเทียบ R2.2 กับการทดลองที่ 3 พบว่า ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมที่เกิดขึ้นของ R2.2 น้อยกว่าการทดลองที่ 3 เท่ากับ 1.17 เท่า อาจเกิดจากการทิ้งน้ำชะที่จุดเก็บตัวอย่างน้ำชะออกจากระบบในวันที่ 15 ถึงวันที่ 17

2. การวิเคราะห์น้ำชะที่ก้นถังปฏิกรณ์

การวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ ของน้ำชะที่ก้นถังปฏิกรณ์แสดงถึงเสถียรภาพของระบบและระดับการย่อยสลายของวัตถุดิบ โดยเดินระบบเป็นเวลา 38 วัน ให้ผลการวิเคราะห์น้ำชะดังนี้

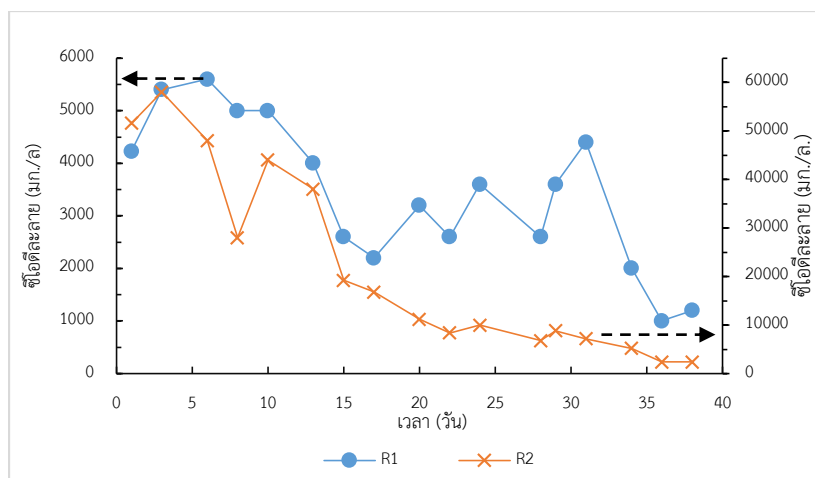
2.1 ซีไอดีละลาย

- ถังปฏิกรณ์ไร้อากาศที่ 1 (R1)

ตลอดการทดลองมีค่าซีไอดีละลายในน้ำชะอยู่ระหว่าง 1,000-5,600 มิลลิกรัม/ลิตร ซึ่งค่าซีไอดีละลายในน้ำชะเมื่อเริ่มต้นการทดลองมีค่าเท่ากับ 4,230 มิลลิกรัม/ลิตร โดยมีค่าสูงสุดเท่ากับ 5,600 มิลลิกรัม/ลิตรในวันที่ 6 (รูปที่ 4.30) ซึ่งสอดคล้องกับกรดอินทรีย์ระเหย โดยมีค่ากรดอินทรีย์ระเหยสูงสุดเท่ากับ 1,375 มิลลิกรัม/ลิตร กรดอะซิติกในวันที่ 8 (รูปที่ 4.31) แต่ถึงปฏิกรณ์ที่ 2 ไม่มีก๊าซชีวภาพเกิดขึ้นเป็นผลมาจากสภาพแวดล้อมภายในระบบไม่เหมาะสมต่อการทำงานและการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทน ซึ่งทราบได้จากค่าพีเอช จึงเติมน้ำเพื่อให้ความชื้นของทั้งสองถังปฏิกรณ์ไร้อากาศมีปริมาณเท่ากันและง่ายต่อการวิเคราะห์ผลการทดลอง ซึ่งการเติมน้ำในวันที่ 7 และวันที่ 10 ปริมาตร 200 มิลลิลิตร ส่งผลให้ความชื้นในระบบของถัง 2 ถึงปฏิกรณ์มีค่าเท่ากับร้อยละ 91.75 ซึ่งค่าซีไอดีละลายในน้ำชะหลังจากการเติมน้ำในวันที่ 10 จนกระทั่งสิ้นสุดการทดลองมีแนวโน้มลดลง โดยวันสุดท้ายของการทดลองมีค่าซีไอดีละลายในน้ำชะเท่ากับ 1,200 มิลลิกรัม/ลิตร ดังรูปที่ 4.30

- ถังปฏิกรณ์ไร้อากาศที่ 2 (R2)

ตลอดการทดลองมีค่าซีไอดีละลายในน้ำชะอยู่ระหว่าง 2,400-58,000 มิลลิกรัม/ลิตร ซึ่งค่าซีไอดีละลายในน้ำชะเมื่อเริ่มต้นการทดลองมีค่าเท่ากับ 51,606 มิลลิกรัม/ลิตร โดยมีค่าสูงสุดเท่ากับ 58,000 มิลลิกรัม/ลิตรในวันที่ 3 ซึ่งสอดคล้องกับกรดอินทรีย์ระเหย โดยมีค่ากรดอินทรีย์ระเหยสูงสุดเท่ากับ 9,787.5 มิลลิกรัม/ลิตร กรดอะซิติกในวันที่ 3 (รูปที่ 4.31) ซึ่งค่าซีไอดีละลายในน้ำชะของช่วง 10 วันแรกในการเดินระบบไม่เหมาะสมต่อการทำงานการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทนจึงเติมน้ำในวันที่ 7 และวันที่ 10 ปริมาตรวันละ 200 มิลลิลิตรเพื่อเพิ่มความชื้นให้แก่ระบบทำให้ระบบมีความชื้นเท่ากับร้อยละ 91.75 ส่งผลให้ซีไอดีละลายของถังปฏิกรณ์ไร้อากาศที่ 2 ของวันที่ 13 มีค่าลดลง (38,000 มก./ล.) และค่าซีไอดีละลายในน้ำชะมีแนวโน้มลดลงจนกระทั่งวันสุดท้ายของการเดินระบบมีค่าเท่ากับ 2,400 มิลลิกรัม/ลิตรเป็นผลมาจากการเพิ่มความชื้นโดยการเติมน้ำปริมาตร 100 มิลลิลิตรและการทิ้งน้ำชะปริมาตร 80 มิลลิลิตรที่จุดเก็บตัวอย่างน้ำชะในวันที่ 15 ถึงวันที่ 17 เพื่อเจือจางสารพิษ ดังรูปที่ 4.30



รูปที่ 4.30 ซีโอดีละลายของการทดลองครั้งที่ 2

- การเปรียบเทียบกับ การทดลองที่ผ่านมา
 การเปรียบเทียบซีโอดีละลายของการทดลองนี้กับสภาวะที่มีปริมาณก๊าซ
 ชีวภาพสะสมสูงสุดของการทดลองที่ผ่านมา แสดงดังตารางที่ 4.31

ตารางที่ 4.31 เปรียบเทียบซีโอดีละลาย

การทดลอง	ซีโอดีละลาย (มก./ล.)	ก๊าซชีวภาพสะสม (ล./ก.ของแข็งระเหย)	ความชื้นสูงสุด (ร้อยละ)
2	2,000-8,600	0.258	98.55
3	5,200-11,600	0.124	98.55
R1.1	1,800-11,400	0.215	87.73
R2.1	18,000-86,000	0.118	87.73
R1.2	1,000-5,600	0.210	91.75
R2.2	2,400-58,000	0.106	91.75

จากตารางที่ 4.31 สามารถเปรียบเทียบกับ การทดลองที่ผ่านมาได้ดังนี้

1. การเปรียบเทียบ R1.2 และ R1.1 พบว่า ตลอดการทดลองซีโอดีละลายใน
 น้ำชะของ R1.2 (1,000-5,600 มก./ล.) มีค่าน้อยกว่า R1.1 (1,800-11,400 มก./ล.) อาจเกิดจาก
 ความชื้นของ R1.2 (ร้อยละ 91.75) มากกว่า R1.1 (ร้อยละ 87.73) จึงทำให้เกิดการเจือจางของ
 สารอินทรีย์ที่ละลายน้ำ แต่เมื่อเปรียบเทียบ R1.2 และการทดลองที่ 2 พบว่า ซีโอดีละลายของ R1.2

น้อยกว่าการทดลองที่ 2 อาจเกิดจากความชื้นของการทดลองที่ 2 ทำให้สารอินทรีย์เกิดการชะละลายออกมาได้ดีกว่า R1.2

3. การเปรียบเทียบ R2.2 และ R2.1 พบว่า ตลอดการทดลองค่าซีไอดีละลายในน้ำชะของ R2.2 (2,400-58,000 มก./ล.) น้อยกว่า R2.1 (18,000-86,000 มก./ล.) อาจเกิดจากการทิ้งน้ำชะที่จุดเก็บตัวอย่างน้ำชะออกจากระบบในวันที่ 15 ถึงวันที่ 17 แต่เมื่อเปรียบเทียบ R2.2 กับการทดลองที่ 3 พบว่า ซีไอดีละลายในน้ำชะของ R2.2 มากกว่าการทดลองที่ 3 (5,200-11,600 มก./ล.) ซึ่งไม่สอดคล้องกับก๊าซชีวภาพสะสมที่เกิดขึ้น อาจแสดงว่า R2.2 ไม่เกิดการแปรรูปของสารอินทรีย์ไปเป็นก๊าซชีวภาพ (รูปที่ 4.39)

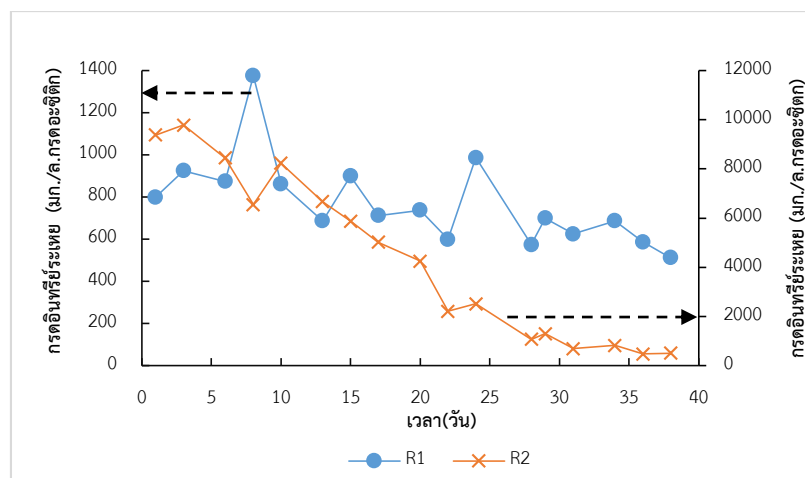
2.2 กรดอินทรีย์ระเหย

- ถึงปฏิกรณ์ไร้อากาศที่ 1

ตลอดการทดลองกรดอินทรีย์ระเหยมีค่าอยู่ระหว่าง 512.5-1,375.0 มิลลิกรัม/ลิตร กรดอะซิติก เมื่อเริ่มต้นการทดลองมีค่ากรดอินทรีย์ระเหยเท่ากับ 800 มิลลิกรัม/ลิตร กรดอะซิติก และมีค่าสูงสุดเท่ากับ 1,375 มิลลิกรัม/ลิตร กรดอะซิติกในวันที่ 10 และมีค่าสูงขึ้นอีกครั้งในวันที่ 15 (900 มก./ล.กรดอะซิติก) และวันที่ 24 (987.5 มก./ล.กรดอะซิติก) อาจเป็นผลมาจากเมื่อระยะเวลาผ่านไปสารอินทรีย์บางส่วนถูกย่อยสลายเป็นกรดอินทรีย์ระเหยได้มากขึ้นจึงทำให้กรดอินทรีย์มีค่าสูงขึ้นอีกครั้ง และมีค่าแนวโน้มลดลงจนกระทั่งสิ้นสุดการทดลอง โดยมีกรดอินทรีย์ระเหยเท่ากับ 512.5 มิลลิกรัม/ลิตร กรดอะซิติก ดังรูปที่ 4.31 ทั้งนี้แนวโน้มการเพิ่มขึ้นและลดลงเหมือนกับซีไอดีละลาย

- ถึงปฏิกรณ์ไร้อากาศที่ 2

ตลอดการทดลองกรดอินทรีย์ระเหยมีค่าอยู่ระหว่าง 475-9,787.5 มิลลิกรัม/ลิตร เมื่อเริ่มต้นการทดลองมีค่ากรดอินทรีย์ระเหยเท่ากับ 9,387.5 มิลลิกรัม/ลิตร กรดอะซิติก และมีค่าสูงสุดเท่ากับ 9,787.5 มิลลิกรัม/ลิตร กรดอะซิติกของวันที่ 3 ซึ่งสอดคล้องกับซีไอดีละลายสูงสุดในวันที่ 3 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 58,000 มิลลิกรัม/ลิตร และกรดอินทรีย์ระเหยของถึงปฏิกรณ์ไร้อากาศที่ 2 มีแนวโน้มลดลงจนสิ้นสุดการทดลอง ซึ่งสอดคล้องกับอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพที่ลดลง (รูปที่ 4.35) โดยวันสุดท้ายของการทดลองมีค่ากรดอินทรีย์ระเหยเท่ากับ 2,400 มิลลิกรัม/ลิตร กรดอะซิติก อาจเป็นผลมาจากการเจือจางสารพิษภายในระบบ ดังรูปที่ 4.31 ทั้งนี้แนวโน้มการเพิ่มขึ้นและลดลงเหมือนกับซีไอดีละลาย



รูปที่ 4.31 กรดอินทรีย์ระเหยของการทดลองครั้งที่ 2

- เปรียบเทียบกับการทดลองที่ผ่านมา

การเปรียบเทียบกรดอินทรีย์ระเหยของการทดลองนี้กับสถานะที่มีปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมสูงสุดของการทดลองที่ผ่านมา แสดงดังตารางที่ 4.32

ตารางที่ 4.32 เปรียบเทียบกรดอินทรีย์ระเหย

การทดลอง	กรดอินทรีย์ระเหยตลอดการทดลอง (มก./ล.กรดอะซิติค)	ซีโอดีละลายตลอดการทดลอง (มก./ล.)
2	462.50-3,006.25	2,000-8,600
3	1,125.00-1,937.50	5,200-11,600
R1.1	312.50-3,737.50	1,800-11,400
R2.1	3,500.00-20,100.00	18,000-86,000
R1.2	512.50-1,375.00	1,000-5,600
R2.2	475.00-9,787.50	2,400-58,000

จากตารางที่ 4.32 สามารถเปรียบเทียบกับ การทดลองที่ผ่านมาได้ดังนี้

1. การเปรียบเทียบ R1.2 และ R1.1 พบว่า ตลอดการทดลอง R1.2 (512.50-1,375.00 มก./ล. กรดอะซิติค) มีค่ากรดอินทรีย์ระเหยน้อยกว่า R1.1 (312.5-3,737.5 มก./ล. กรดอะซิติค) ซึ่งสอดคล้องกับซีโอดีละลาย และเมื่อเปรียบเทียบ R1.2 และการทดลองที่ 2 พบว่า R1.2 มีค่ากรดอินทรีย์ระเหยน้อยกว่าการทดลองที่ 2 (462.5-3,006.25 มก./ล. กรดอะซิติค) ซึ่งสอดคล้องกับซีโอดีละลาย

2. การเปรียบเทียบ R2.2 และ R2.1 พบว่า ตลอดการทดลองกรดอินทรีย์ระเหยของ R2.2 น้อยกว่า R2.1 ซึ่งสอดคล้องกับซีไอที่ละลาย แต่เมื่อเปรียบเทียบ R2.2 และการทดลองที่ 3 พบว่าตลอดการทดลองกรดอินทรีย์ระเหยของ R2.2 มากกว่าการทดลองที่ 3 แสดงว่ากรดอินทรีย์ระเหยของ R2.2 ไม่เกิดการแปรรูปเป็นก๊าซชีวภาพ

2.3 ความเป็นต่าง

- ถึงปฏิกรณ์ไร้อากาศที่ 1

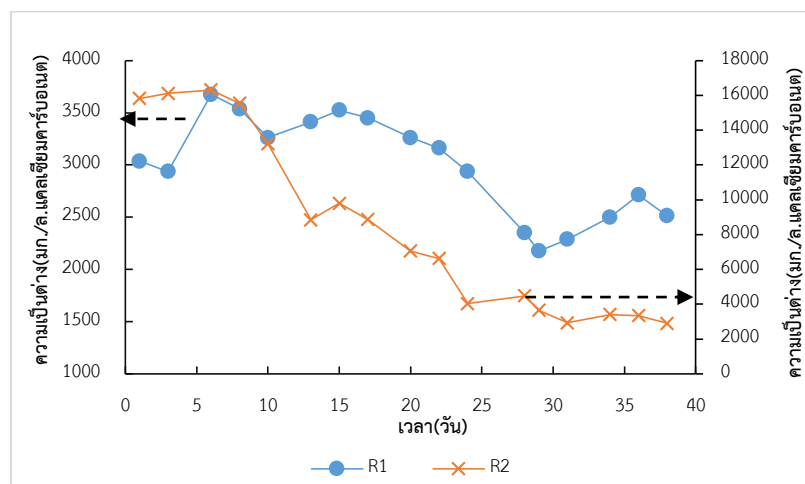
ตลอดการทดลองมีค่าอยู่ระหว่าง 2,175-3,675 มิลลิกรัม/ลิตร แคลเซียมคาร์บอเนต เมื่อเริ่มต้นการทดลองมีค่าความเป็นต่างเท่ากับ 3,037.5 มิลลิกรัม/ลิตร แคลเซียมคาร์บอเนต และมีค่าสูงสุดเท่ากับ 3,675 มิลลิกรัม/ลิตร แคลเซียมคาร์บอเนตในวันที่ 6 และมีแนวโน้มลดลงจนกระทั่งวันที่ 29 ค่าความเป็นต่างมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น อาจมีสาเหตุมาจากการเกิดความเป็นต่างในรูปไบคาร์บอเนตจากการเติมบัฟเฟอร์และการย่อยสลายกรดอินทรีย์ระเหยโดยจุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทนทำให้เกิดคาร์บอนไดออกไซด์และมีเทน โดยที่คาร์บอนไดออกไซด์บางส่วนจะอยู่ในรูปของก๊าซและบางส่วนละลายในน้ำเกิดเป็นกรดคาร์บอนิกซึ่งจะแตกตัวได้ไฮโดรเจนไอออนและไบคาร์บอเนตไอออน (Appels และคณะ, 2008) ส่งผลให้ความเป็นต่างในรูปของไบคาร์บอเนตมีค่าสูงขึ้น โดยสิ้นสุดการทดลองมีค่าความเป็นต่างเท่ากับ 2,512.5 มิลลิกรัม/ลิตร แคลเซียมคาร์บอเนต ดังรูปที่ 4.32

- ถึงปฏิกรณ์ไร้อากาศที่ 2

ตลอดการทดลองมีค่าอยู่ระหว่าง 2,900-16,312.5 มิลลิกรัม/ลิตร แคลเซียมคาร์บอเนต เมื่อเริ่มต้นการทดลองมีค่าความเป็นต่างเท่ากับ 15,825 มิลลิกรัม/ลิตร แคลเซียมคาร์บอเนต และมีค่าสูงสุดเท่ากับ 16,312.5 มิลลิกรัม/ลิตร แคลเซียมคาร์บอเนตในวันที่ 6 ซึ่งความเป็นต่างของถึงปฏิกรณ์ไร้อากาศที่ 2 ตลอดการทดลองมีแนวโน้มลดลง โดยวันสิ้นสุดการทดลองมีค่าความเป็นต่างเท่ากับ 2,900 มิลลิกรัม/ลิตร แคลเซียมคาร์บอเนต ดังรูปที่ 4.32

Farquhar และ Rovers (1973) รายงานว่า ควรรักษาความเป็นต่างในระบบให้มีค่าน้อย 2,000 มิลลิกรัม/ลิตร ซึ่งเป็นค่าที่เหมาะสมสำหรับขั้นตอนการผลิตก๊าซมีเทน นอกจากนี้ความเป็นต่างยังช่วยให้เกิดการย่อยสลายสารอินทรีย์ได้เร็วขึ้นและลดระยะเวลาในการย่อยสลายสารอินทรีย์เป็นผลให้จุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทนสามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้สูงเมื่อความเป็นต่างเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 6,000 มิลลิกรัม/ลิตร แคลเซียมคาร์บอเนต (Sponza และ Agdad, 2004) ซึ่ง

ความเป็นต่างของการทดลองนี้มีค่าเท่ากับ 6,631 มิลลิกรัม/ลิตร แคลเซียมคาร์บอเนตในวันที่ 22 และสอดคล้องกับปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมที่สูงขึ้นอย่างชัดเจน (รูปที่ 4.36)



รูปที่ 4.32 ความเป็นต่างของการทดลองครั้งที่ 2

- การเปรียบเทียบกับ การทดลองที่ผ่านมา
การเปรียบเทียบความเป็นต่างของการทดลองนี้กับสภาวะที่มีปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมสูงสุดของการทดลองที่ผ่านมา แสดงดังตารางที่ 4.33

ตารางที่ 4.33 เปรียบเทียบความเป็นต่าง

การทดลอง	ความเป็นต่างตลอดการทดลอง (มก./ล.แคลเซียมคาร์บอเนต)
2	3,243.75-4,325.00
3	4,525.00-7,662.50
R1.1	1,262.50-3,783.33
R2.1	11,800.00-26,225.00
R1.2	2,175.00-3,675.00
R2.2	2,900.00-16,312.50

จากตารางที่ 4.33 สามารถเปรียบเทียบกับ การทดลองที่ผ่านมาได้ดังนี้

1. การเปรียบเทียบ R1.2 และ R1.1 พบว่า ตลอดการทดลองความเป็นต่างของ R1.2 (2,175.00-3,675.00 มก./ล. แคลเซียมคาร์บอเนต) มีค่าใกล้เคียงกับ R1.1 (1,262.5-3,783.3 มก./ล. แคลเซียมคาร์บอเนต) แต่เมื่อเปรียบเทียบ R1.2 และการทดลองที่ 2 พบว่า ความเป็นต่างของ R1.2 มีค่าน้อยกว่าการทดลองที่ 2 (3,243.75-4,325.0 มก./ล. แคลเซียมคาร์บอเนต)

2. การเปรียบเทียบ R2.2 และ R2.1 พบว่า ตลอดการทดลองความเป็นต่างของ R2.2 น้อยกว่า R2.1 อาจเกิดจาก R2.2 มีการทิ้งน้ำชะที่กั้นถึงปฏิกรณ์ออกจากระบบเพื่อเจือจางสารพิษภายในระบบ แต่เมื่อเปรียบเทียบ R2.2 และการทดลองที่ 3 พบว่า ตลอดการทดลองความเป็นต่างของ R2.2 น้อยกว่าการทดลองที่ 3 อาจเกิดจาก R2.2 มีความชื้นน้อยกว่าและมีการกระจายความชื้นภายในระบบไม่เท่ากันโดยที่กั้นถึงปฏิกรณ์มีน้ำอยู่มากที่สุดเป็นผลให้ความเป็นต่างมีค่าสูงหากไม่มีการเวียนน้ำ ในขณะที่ภายในระบบของการทดลองที่ 3 มีความชื้นอยู่มากกว่าทำให้ความเป็นต่างเกิดการเจือจางเป็นผลให้ความเป็นต่างของ R2.2 มากกว่าการทดลองที่ 3

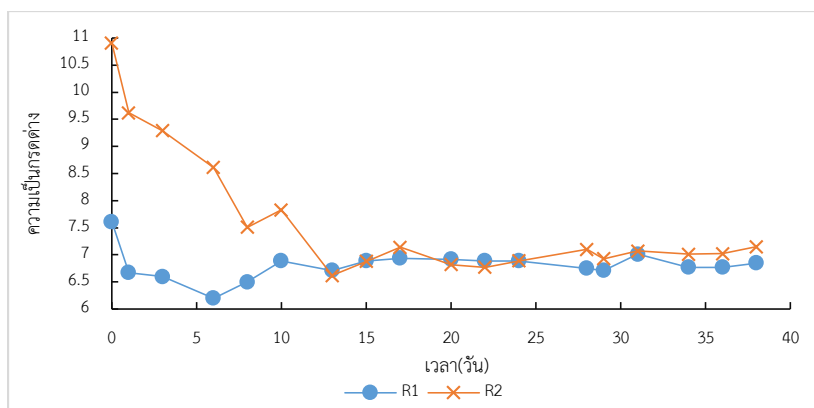
2.4 ความเป็นกรดต่าง (พีเอช)

- ถึงปฏิกรณ์ไร้อากาศที่ 1

ตลอดการทดลองมีพีเอชอยู่ระหว่าง 6.20-7.61 โดยเริ่มต้นการทดลองไม่มีการปรับพีเอช ซึ่งมีพีเอชเท่ากับ 7.61 และพีเอชมีค่าต่ำสุดเท่ากับ 6.20 ในวันที่ 6 และมีแนวโน้มสูงขึ้นจนกระทั่งวันที่ 10 ถึงวันสุดท้ายของการเดินระบบค่าพีเอชมีแนวโน้มคงที่ (6.71-7.01) ดังรูปที่ 4.33 ซึ่งมีความเหมาะสมต่อจุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทน

- ถึงปฏิกรณ์ไร้อากาศที่ 2

ตลอดการทดลองพีเอชมีค่าอยู่ระหว่าง 6.62-10.91 โดยการทดลองครั้งนี้ไม่มีการเติมของผสมที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นลงในระบบและไม่มีการปรับค่าพีเอชเมื่อเริ่มต้นการทดลอง ซึ่งมีพีเอชเท่ากับ 10.91 ในวันเริ่มต้นการทดลอง โดยในช่วง 10 วันแรกของการทดลองพีเอชมีค่าอยู่ระหว่าง 7.51-10.91 ซึ่งไม่เหมาะสมต่อจุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทน (Rittmann และ McCarty, 2000) ส่งผลให้ไม่มีก๊าซชีวภาพเกิดขึ้น แต่การเติมน้ำเข้าสู่ระบบในวันที่ 7 และวันที่ 10 เป็นผลให้ค่าพีเอชมีแนวโน้มลดลง จนมีค่าเหมาะสมต่อจุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทนโดยมีค่าพีเอชเท่ากับ 7.2 ในวันที่ 10 ส่งผลให้เริ่มมีก๊าซชีวภาพเกิดขึ้น และมีค่าพีเอชต่ำสุดเท่ากับ 6.62 ในวันที่ 13 และมีแนวโน้มสูงขึ้นจนสิ้นสุดการทดลองโดยมีพีเอชอยู่ระหว่าง 6.77-7.15 ดังรูปที่ 4.33 ซึ่งเหมาะสมต่อจุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทนและสอดคล้องกับอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ (รูปที่ 4.35)



รูปที่ 4.33 พิเศษของการทดลองครั้งที่ 2

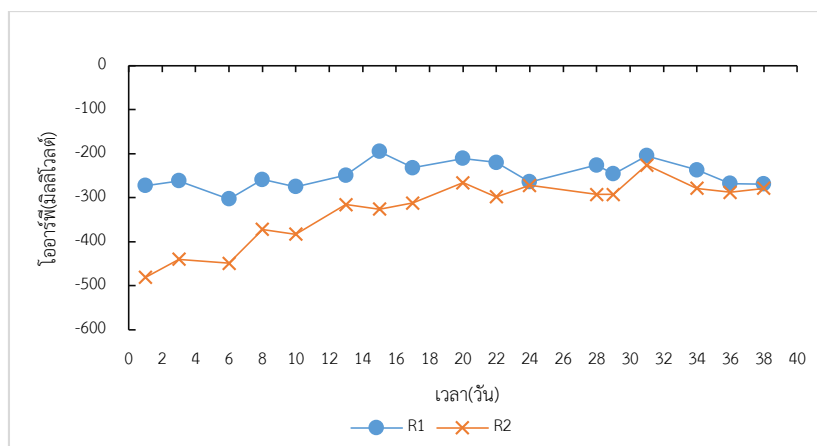
2.5 ความต่างศักย์ออกซิเดชันรีดักชัน

- ถึงปฏิกรณ์ไร้อากาศที่ 1

ตลอดการทดลองความต่างศักย์ออกซิเดชันรีดักชันมีค่าอยู่ระหว่าง -195 ถึง -303 มิลลิโวลต์ เมื่อเริ่มต้นการทดลองมีค่าความต่างศักย์ออกซิเดชันรีดักชันเท่ากับ -273 มิลลิโวลต์ และมีค่าเป็นลบมากที่สุดเท่ากับ -303 มิลลิโวลต์ในวันที่ 6 และค่าความต่างศักย์ออกซิเดชันรีดักชันมีแนวโน้มลดลงจนถึงที่สุดการทดลอง ซึ่งมีค่าความต่างศักย์ออกซิเดชันรีดักชันเมื่อสิ้นสุดการทดลองเท่ากับ -269 มิลลิโวลต์ แต่ในระหว่างการทดลองมีค่าความต่างศักย์ออกซิเดชันรีดักชันเป็นลบน้อยลงเป็นผลมาจากการเติมน้ำเมื่อเก็บตัวอย่างน้ำชะไปวิเคราะห์และการเวียนน้ำชะเข้าสู่ระบบ ดังรูปที่ 4.34

- ถึงปฏิกรณ์ไร้อากาศที่ 2

เมื่อเริ่มต้นการทดลองความต่างศักย์ออกซิเดชันรีดักชันมีค่าเท่ากับ -481 มิลลิโวลต์ และมีแนวโน้มเป็นลบน้อยลง ซึ่งมีค่าเท่ากับ -279 มิลลิโวลต์เมื่อสิ้นสุดการทดลอง ซึ่งการเติมน้ำจากการเก็บตัวอย่างน้ำชะไปวิเคราะห์และการเวียนน้ำชะส่งผลให้ค่าเป็นลบน้อยลง ดังรูปที่ 4.34 โดยความต่างศักย์ออกซิเดชันรีดักชันที่เหมาะสมสำหรับขั้นตอนการผลิตก๊าซมีเทนมีค่าอยู่ระหว่าง -100 ถึง -300 มิลลิโวลต์ (Bilgili และคณะ, 2007)



รูปที่ 4.34 ความต่างศักย์ออกซิเดชันรีดักชันของการทดลองครั้งที่ 2

3. ศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนจากผักตบชวา

3.1 การผลิตก๊าซชีวภาพรายวันต่อของแข็งระเหย

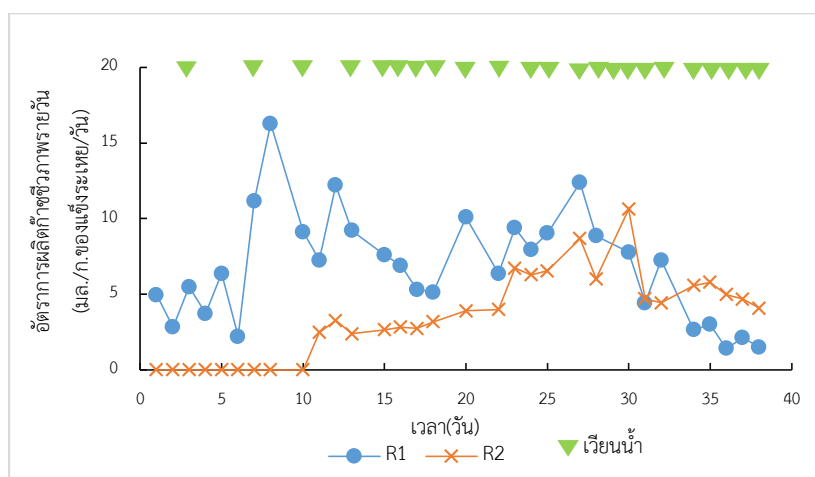
- ถังปฏิกรณ์ไร้อากาศที่ 1

เนื่องจากถังปฏิกรณ์ที่ 2 ไม่มีก๊าซชีวภาพเกิดขึ้น จึงเติมน้ำเข้าสู่ระบบของถังปฏิกรณ์ไร้อากาศทั้ง 2 ถังเพื่อให้ความชื้นภายในระบบเท่ากันและง่ายต่อการวิเคราะห์ผลการทดลอง ซึ่งการเติมน้ำเข้าสู่ระบบในวันที่ 7 ปริมาตร 200 มิลลิลิตร เป็นผลให้ภายในระบบมีความชื้นเท่ากับร้อยละ 90.73 ส่งผลให้มีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพสูงสุดเท่ากับ 16.29 มิลลิลิตร/กรัมของแข็งระเหย ในวันที่ 8 และการเติมน้ำปริมาตร 200 มิลลิลิตรในวันที่ 10 ทำให้ระบบมีความชื้นเท่ากับร้อยละ 91.75 ส่งผลให้อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพสูงขึ้นเท่ากับ 12.21 มิลลิลิตร/กรัมของแข็งระเหยในวันที่ 12 และอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพมีค่าลดลงจนถึงวันที่ 20 แต่อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพมีค่าสูงขึ้นอีกครั้งในวันที่ 27 ซึ่งมีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพเท่ากับ 12.39 มิลลิลิตร/กรัมของแข็งระเหย/วัน และมีแนวโน้มลดลงจนกระทั่งสิ้นสุดการทดลองโดยในวันสุดท้ายของการทดลองมีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพเท่ากับ 1.50 มิลลิลิตร/กรัมของแข็งระเหย/วัน ดังรูปที่ 4.35 ซึ่งสอดคล้องกับกรดอินทรีย์ระเหยที่ลดลงตั้งแต่วันที่ 25 จนสิ้นสุดการทดลอง ดังรูปที่ 4.31

- ถังปฏิกรณ์ไร้อากาศที่ 2

การเดินระบบในช่วง 10 วันแรกไม่มีก๊าซชีวภาพเกิดขึ้นจึงเติมน้ำปริมาตร 200 มิลลิลิตรในวันที่ 7 และวันที่ 10 เพื่อเพิ่มความชื้นให้แก่ระบบ (Sanphoti และคณะ, 2006) ทำให้วันที่ 11 ถังปฏิกรณ์ไร้อากาศที่ 2 เริ่มมีก๊าซชีวภาพเกิดขึ้นโดยมีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพเท่ากับ 2.48

มิลลิลิตร/กรัมของแข็งระเหย/วัน เนื่องจากพีเอชมีค่าที่เหมาะสมต่อจุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทน (7.2) แต่อย่างไรก็ตามอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพมีค่าต่ำ ซึ่งมีค่าประมาณ 2.39-3.27 มิลลิลิตร/กรัมของแข็งระเหย ดังนั้นจึงเจือจางน้ำภายในถังปฏิกรณ์ไร้อากาศที่ 2 โดยการเติมน้ำปริมาตร 100 มิลลิลิตรและปล่อยน้ำภายในระบบทิ้งไป 80 มิลลิลิตรที่จุดเก็บตัวอย่างน้ำชะในวันที่ 15 ถึงวันที่ 17 เป็นผลให้อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพมีแนวโน้มสูงขึ้นจนกระทั่งวันที่ 30 อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพของถังปฏิกรณ์ไร้อากาศที่ 2 มีค่าสูงสุดเท่ากับ 10.62 มิลลิลิตร/กรัมของแข็งระเหย/วัน และอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพมีแนวโน้มลดลงจนกระทั่งสิ้นสุดการทดลองซึ่งมีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพเท่ากับ 4.08 มิลลิลิตร/กรัมของแข็งระเหย/วัน ดังรูปที่ 4.35



รูปที่ 4.35 อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพของการทดลองครั้งที่ 2

- การเปรียบเทียบกับ การทดลองที่ผ่านมา

การเปรียบเทียบอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพของการทดลองนี้กับสถานะที่มีปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมสูงสุดของการทดลองที่ผ่านมา แสดงดังตารางที่ 4.34

ตารางที่ 4.34 เปรียบเทียบอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ

การทดลอง	อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพที่มีค่าสูง	
	วันที่	ปริมาณ (มล./ก.ของแข็งระเหย)
2	7-21	12.41-48.25
3	5-18	19.45-29.03
R1.1	10-19	6.88-14.14
R2.1	21-37	3.97-6.30
R1.2	7-15	7.26-16.29
R2.2	22-30	3.98-10.62

จากตารางที่ 4.34 สามารถเปรียบเทียบกับการทดลองที่ผ่านมาได้ดังนี้

1. การเปรียบเทียบ R1.2 และ R1.1 พบว่า อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพของ R1.2 และ R1.1 มีค่าสูงในปริมาณและช่วงวันใกล้เคียงกัน แต่เมื่อเปรียบเทียบ R1.2 และการทดลองที่ 2 พบว่า อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพของ R1.2 และการทดลองที่ 2 มีค่าสูงในช่วงวันใกล้เคียงกัน แต่ปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นในช่วงวันดังกล่าวของ R1.2 น้อยกว่าการทดลองที่ 2 อาจมีสาเหตุมาจากความชื้นภายในระบบ โดยที่ความชื้นสูงสุดของ R1.2 และการทดลองที่ 2 เท่ากับร้อยละ 91.75 และ 98.55 ตามลำดับ

2. การเปรียบเทียบ R2.2 และ R2.1 พบว่า อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพของ R2.2 และ R2.1 มีค่าสูงในช่วงวันใกล้เคียงกัน แสดงว่าค่าพีเอชน่าจะมีความเหมาะสมต่อจุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทนในช่วงวันใกล้เคียงกัน แต่เมื่อเปรียบเทียบ R2.2 และการทดลองที่ 3 พบว่า อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพที่มีค่าสูงของ R2.2 เกิดช้ากว่าการทดลองที่ 3 อาจมีสาเหตุมาจาก R2.2 มีค่าพีเอชไม่เหมาะสมต่อจุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทนในช่วงแรกของการเดินระบบ

3. การเปรียบเทียบ R1.2 และ R2.2 พบว่า R2.2 มีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพช้ากว่า R1.2 เนื่องจากค่าพีเอชของ R2.2 ในช่วงเริ่มต้นของการเดินระบบอยู่ในช่วงที่ไม่เหมาะสมต่อจุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทน

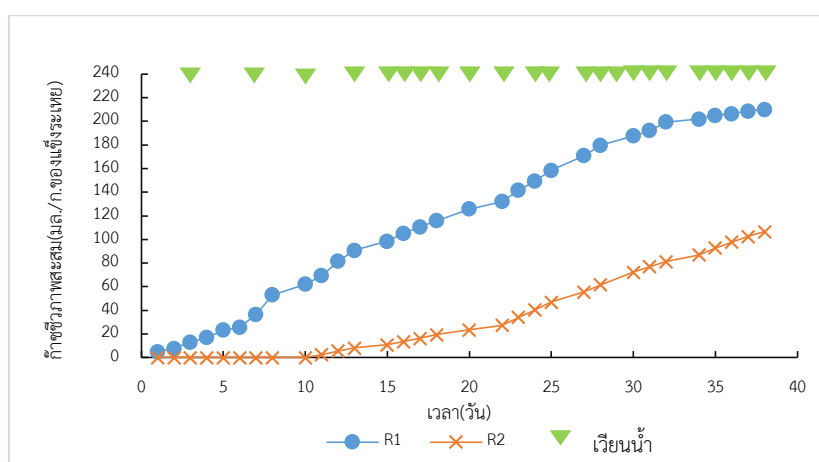
3.2 ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม

- ถึงปฏิกรณ์ไร้อากาศที่ 1

ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมเมื่อเริ่มต้นการทดลองมีแนวโน้มค่อยๆ สูงขึ้น แต่เมื่อเติมน้ำเข้าสู่ระบบในวันที่ 7 ทำให้ความชื้นในระบบมีค่าเท่ากับร้อยละ 90.73 ส่งผลให้ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัด โดยมีปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมของวันที่ 7 เท่ากับ 36.72 มิลลิลิตร/กรัมของแข็งระเหย และในวันที่ 8 มีปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมสูงขึ้นเป็น 53.00 มิลลิลิตร/กรัมของแข็งระเหย และปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมมีแนวโน้มสูงขึ้นจนกระทั่งช่วงสุดท้ายของการทดลองตั้งแต่วันที่ 32 ถึงวันที่ 38 ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมมีค่าคงที่ เนื่องจากอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพมีค่าลดลง (รูปที่ 4.35) โดยสิ้นสุดการทดลองถึงปฏิกรณ์ไร้อากาศที่ 1 มีปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมเท่ากับ 210.01 มิลลิลิตร/กรัมของแข็งระเหย ดังรูปที่ 4.36

- ถึงปฏิกรณ์ไร้อากาศที่ 2

การทดลองในช่วง 10 วันแรกไม่มีก๊าซชีวภาพเกิดขึ้นจึงเติมน้ำปริมาตร 200 มิลลิลิตรในวันที่ 7 และวันที่ 10 เพื่อเพิ่มความชื้นให้แก่ระบบส่งผลให้วันที่ 11 เริ่มมีก๊าซชีวภาพเกิดขึ้นเนื่องจากพีเอชมีความเหมาะสมต่อจุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทน จนกระทั่งวันที่ 22 สภาพแวดล้อมในระบบมีความเหมาะสมต่อจุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทน ได้แก่ ซีโอดีละลาย (8,400 มก./ล.) กรดอินทรีย์ระเหย (2,212.5 มก./ล.กรดอะซิติก) และความเป็นต่าง (6,631.62 มก./ล.แคลเซียมคาร์บอเนต) ส่งผลให้ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมมีค่าสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัดและในวันสุดท้ายของการเดินระบบมีปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมเท่ากับ 106.54 มิลลิลิตร/กรัมของแข็งระเหย ดังรูปที่ 4.36



รูปที่ 4.36 ก๊าซชีวภาพสะสมของการทดลองครั้งที่ 2

- การเปรียบเทียบกับ การทดลองที่ผ่านมา

การเปรียบเทียบปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมของการทดลองนี้กับสภาวะที่มีปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมสูงสุดของการทดลองที่ผ่านมา แสดงดังตารางที่ 4.35

ตารางที่ 4.35 เปรียบเทียบก๊าซชีวภาพสะสมกับการทดลองที่ผ่านมา

การทดลอง	ความชื้นสูงสุด (ร้อยละ)	ซีโอดีละลาย ตลอดการทดลอง (มก./ล.)	กรดอินทรีย์ระเหย ตลอดการทดลอง (มก./ล.กรดอะซิติก)	ก๊าซชีวภาพสะสม (มล./ก.ของแข็งระเหย)
2	98.55	4,000-8,600	462.5-3006.3	257.89
3	98.55	5,200-11,600	1,125.0-1,937.5	123.84
R1.1	87.73	1,800-11,400	312.5-3737.5	215.46
R2.1	87.73	18,000-86,000	3,500.0-20,100.0	118.30
R1.2	91.75	1,000-5,600	512.5-1375.0	210.01
R2.2	91.75	2,400-58,000	475.0-9,787.5	106.54

จากตารางที่ 4.35 สามารถเปรียบเทียบกับการทดลองที่ผ่านมาได้ดังนี้

1. การเปรียบเทียบ R1.2 และ R1.1 พบว่า ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมของ R1.2 และ R1.1 มีค่าใกล้เคียงกัน โดยมีค่าต่างกันเพียง 1.02 เท่า แต่การเปรียบเทียบ R1.2 และการทดลองที่ 2 พบว่า ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมของ R1.2 น้อยกว่าการทดลองที่ 2 เท่ากับ 1.23 เท่า แสดงว่า R1.2 แปรรูปสารอินทรีย์เป็นก๊าซชีวภาพได้น้อยกว่าการทดลองที่ 2 อาจเป็นผลมาจากความชื้นภายในระบบ

2. การเปรียบเทียบ R2.2 และ R2.1 พบว่าปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมที่เกิดขึ้นของ R2.2 และ R2.1 มีค่าใกล้เคียงกัน โดยมีค่าต่างกันเท่ากับ 1.11 เท่า แต่เมื่อเปรียบเทียบ R2.2 และการทดลองที่ 3 พบว่า ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมของ R2.2 น้อยกว่าการทดลองที่ 3 เท่ากับ 1.17 เท่า แสดงว่า R2.2 ไม่เกิดการแปรรูปของสารอินทรีย์เป็นก๊าซชีวภาพ อาจเป็นผลมาจากความชื้นภายในระบบ

หากคำนวณปริมาณก๊าซชีวภาพทางทฤษฎี (ภาคผนวก จ) ที่อาจเกิดขึ้นได้จากสารอินทรีย์ที่ทิ้งไปของ R2.2 เนื่องจากการปล่อยน้ำชะปริมาตร 80 มิลลิลิตรในวันที่ 15 ถึงวันที่ 17 ซึ่งสารอินทรีย์ที่ทิ้งไปสามารถเปลี่ยนเป็นก๊าซชีวภาพได้ 2.323 ลิตร/กรัมของแข็งระเหย เมื่อนำไปรวมกับก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้ของการทดลองนี้ (ตารางที่ 4.35) ทำให้ก๊าซชีวภาพสะสมมีค่าเท่ากับ 2.430 ลิตร/กรัมของแข็งระเหย ซึ่งก๊าซชีวภาพสะสมนี้มีค่าสูงกว่า R2.1 และการทดลองที่ 3

3.3 ปริมาณก๊าซมีเทนสะสม

สำหรับการทดลองที่ผ่านมา นั้นความเข้มข้นของก๊าซมีเทนที่ผลิตได้ไม่สามารถเปรียบเทียบกับความเข้มข้นของก๊าซมีเทนมาตรฐานได้ เนื่องจากโครมาโทแกรมของวัตถุบิขนาดต่างๆ มีพื้นที่ใต้กราฟมากกว่าพื้นที่ใต้กราฟของก๊าซมีเทนมาตรฐาน ด้วยเหตุนี้จึงไม่สามารถนำผลการวิเคราะห์ความเข้มข้นของก๊าซมีเทนมาใช้สำหรับการคำนวณปริมาณก๊าซมีเทนสะสม แต่สำหรับการทดลองนี้ปริมาณก๊าซมีเทนสะสมของถังปฏิกรณ์ไร้อากาศที่ 1 และถังปฏิกรณ์ไร้อากาศที่ 2 แสดงดังตารางที่ 4.36

ตารางที่ 4.36 ก๊าซมีเทนสะสมของการทดลองครั้งที่ 2

ถังปฏิกรณ์	ก๊าซชีวภาพสะสม (มล./ก.ของแข็งระเหย)	ร้อยละมีเทน	ก๊าซมีเทนสะสม (มล./ก.ของแข็งระเหย)
R1.2	210.01	48.12-61.50	115.97
R2.2	106.54	25.84-43.69	36.42

จากตารางที่ 4.36 ปริมาณก๊าซมีเทนสะสมของถังปฏิกรณ์ไร้อากาศที่ 1 และถังปฏิกรณ์ไร้อากาศที่ 2 พบว่า

- ถังปฏิกรณ์ไร้อากาศที่ 1

การวิเคราะห์ความเข้มข้นมีเทนตลอดการทดลองสัปดาห์ละ 1 ครั้ง พบว่าตลอดการทดลองความเข้มข้นมีเทนมีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 48.12-61.50 เมื่อนำมาคำนวณก๊าซมีเทนสะสม พบว่า ก๊าซมีเทนสะสมของถังปฏิกรณ์ไร้อากาศที่ 1 มีค่าเท่ากับ 115.97 มิลลิลิตร/กรัมของแข็งระเหย

- ถังปฏิกรณ์ไร้อากาศที่ 2

การวิเคราะห์ความเข้มข้นมีเทนตลอดการทดลองสัปดาห์ละ 1 ครั้ง (ยกเว้นสัปดาห์ที่ 1 เนื่องจากไม่มีก๊าซชีวภาพเกิดขึ้น) พบว่า ตลอดการทดลองความเข้มข้นมีเทนมีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 25.84-43.69 เมื่อนำมาคำนวณก๊าซมีเทนสะสม พบว่า ก๊าซมีเทนสะสมของถังปฏิกรณ์ไร้อากาศที่ 2 มีค่าเท่ากับ 36.42 มิลลิลิตร/กรัมของแข็งระเหย

4.4.3 บทสรุปของการทดลองที่ 4

ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพของถังปฏิกรณ์ไร้อากาศแสดงดังตารางที่ 4.37

ตารางที่ 4.37 ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพของถังปฏิกรณ์ไร้อากาศ

การทดลองที่ 4	ความชื้นสูงสุด (ร้อยละ)	ก๊าซชีวภาพสะสม (ล./ก.ของแข็งระเหย)	ร้อยละมีเทน	ก๊าซมีเทนสะสม (ล./ก.ของแข็งระเหย)
R1.1	87.73	0.215	-	-
R2.1		0.118	-	-
R1.2	91.75	0.210	48.12-61.50	0.130
R2.2		0.107	25.84-43.69	0.050

จากตารางที่ 4.37 สามารถสรุปได้ว่าปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมของ R2.2 ใกล้เคียงกับ R2.1 โดยมีปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมต่างกันเพียง 1.1 เท่า แสดงว่าการเติมน้ำที่เกิดจากการแช่ผักตบชวาในน้ำดำไม่มีผลต่อปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม และปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมของ R1.2 และ R1.1 มีค่าใกล้เคียงกัน โดยมีปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมต่างกันเพียง 1.02 เท่า

4.4.4 เปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่น

การเปรียบเทียบศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพของผักตบชวาในงานวิจัยนี้กับงานวิจัยอื่นๆ แสดงดังตารางที่ 4.38 และตารางที่ 4.39

- การบำบัดเบื้องต้นทางกายภาพ

ตารางที่ 4.38 เปรียบเทียบงานวิจัยนี้กับงานวิจัยที่ผ่านมา (การบำบัดเบื้องต้นทางกายภาพ)

สารตั้งต้น	การบำบัดเบื้องต้น	อุณหภูมิ (°C)	ระยะเวลา (วัน)	ความชื้น (ร้อยละ)	ศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ (ล./ก.ของแข็งระเหย)	
					ก๊าซชีวภาพ	มีเทน
1. ซังข้าวโพดหมักร่วมกับเศษมะเขือเทศและมูลโค (Li และคณะ, 2016)						
ซังข้าวโพด: มะเขือเทศ:มูลโค=25:1:6	ขนาด <0.5 ซม.	35	45	80	-	0.415
2. หญ้าสวิตช์กราซหมักร่วมกับมูลโค (Ahn และคณะ, 2010)						
หญ้า:มูลโค=1:5	ขนาด 2 ซม.	55	62	85	-	0.028
3. งานวิจัยนี้ (การทดลองที่ 4)						
ผักตบชวา:มูลโค=2:1	ขนาด <0.5 ซม.	28.9- 33.9	38-46	82.69- 91.75	0.210-0.215	0.130

จากตารางที่ 4.38 การผลิตก๊าซชีวภาพของผักตบชวาที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นทางกายภาพโดยการลดขนาดของงานวิจัยนี้สามารถผลิตก๊าซมีเทนสะสมได้ 0.130 ล./ก.ของแข็งระเหย ซึ่งมีค่าสูงกว่างานวิจัยของ Ahn และคณะ (2010) แสดงว่าผักตบชวาของงานวิจัยนี้สามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้สูงกว่าหญ้าสวิตช์กราซ

เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Li และคณะ (2016) พบว่า ผักตบชวาของงานวิจัยนี้ผลิตก๊าซมีเทนได้ต่ำกว่างานวิจัยของ Li และคณะ (2016) อาจเป็นเพราะเป็นการหมักร่วมของซังข้าวโพด มะเขือเทศและมูลโคมีสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายง่ายในปริมาณมากกว่า นอกจากนี้งานวิจัยของ Li และคณะ (2016) มีรูปแบบถึงปฏิกรณ์เป็นแบบกวนสมบูรณ์ซึ่งภายในถึงปฏิกรณ์มีสารอินทรีย์เท่ากันทุกตำแหน่งส่งผลให้เกิดการย่อยสลายในระบบไร้อากาศได้ดี

- การบำบัดเบื้องต้นทางเคมี

ตารางที่ 4.39 เปรียบเทียบงานวิจัยนี้กับงานวิจัยที่ผ่านมา (การบำบัดเบื้องต้นทางเคมี)

สารตั้งต้น	การบำบัดเบื้องต้น	อุณหภูมิ (°ซ)	ระยะเวลา (วัน)	ความชื้น (ร้อยละ)	ศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ (ล./ก.ของแข็งระเหย)	
					ก๊าซชีวภาพ	มีเทน
1. ผักตบชวาหมักร่วมกับมูลแกะ (Patil และคณะ, 2014)						
ผักตบชวา:มูล แกะ =1:5	ขนาด 2 ซม.+ 1% NaOH 48 ชม.	30-37	60	92	0.360	0.219
2. ชั่งข้าวโพด (Zhu และคณะ, 2010)						
ชั่งข้าวโพด:หัว เชื้อจุลินทรีย์ = ไม่ระบุ	ขนาด 5 ซม.+ 5% NaOH 24 ชั่วโมง	37	40	78	-	0.372
3. งานวิจัยนี้ (การทดลองที่ 4)						
ผักตบชวา:มูลโค =2:1	ขนาด <0.5 ซม.+ 80% น้ำดำ (=0.4%NaOH) + 24 ชม.	28.9- 33.9	38-46	82.69- 91.75	0.107-0.118	0.050

จากตารางที่ 4.39 พบว่า การผลิตก๊าซชีวภาพของผักตบชวาที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นทางเคมีโดยใช้น้ำดำของงานวิจัยนี้สามารถผลิตก๊าซมีเทนสะสมได้ 0.050 ล./ก.ของแข็งระเหย ซึ่งมีค่าต่ำกว่างานวิจัยของ Patil และคณะ (2014) และ Zhu และคณะ (2010) อาจเป็นผลมาจากงานวิจัยของ Zhu และคณะ (2010) ใช้ความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์และระยะเวลาสัมผัสเบื้องต้นมากกว่างานวิจัยนี้เป็นผลมาจากองค์ประกอบลิกโนเซลลูโลสของชั่งข้าวโพดมีลิกนินปริมาณสูงกว่าผักตบชวา (ตารางที่ 4.40) ซึ่งโซเดียมไฮดรอกไซด์ทำให้เกิดการสลายโครงสร้างลิกนินได้มาก ส่งผลให้จุลินทรีย์สามารถใช้ประโยชน์จากสิ่งที่ถูกละลายลงมาได้มากกว่าก่อให้เกิดก๊าซชีวภาพได้สูงกว่า เป็นผลให้ปริมาณก๊าซมีเทนสูงขึ้นตามไปด้วย รวมถึงมูลสัตว์ของงานวิจัยอื่นๆ มีปริมาณสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายง่ายในปริมาณมากกว่าจึงทำให้จุลินทรีย์สามารถย่อยสลายสารอินทรีย์เป็นก๊าซชีวภาพได้มากกว่า

ตารางที่ 4.40 องค์ประกอบลิกโนเซลลูโลสของสารตั้งต้นต่างๆ

องค์ประกอบลิกโนเซลลูโลส	ผักตบชวา ^a	หญ้าสวิตช์กราช ^b	ชั่งข้าวโพด ^c
เซลลูโลส (ร้อยละ)	19.88	25-40	20.4-40.7
เฮมิเซลลูโลส (ร้อยละ)	33.91	15-50	31.8-22.5
ลิกนิน (ร้อยละ)	4.22	10-30	20.0-21.7

หมายเหตุ a = งานวิจัยนี้, b = Nazami และคณะ (2009), c = Li และคณะ (2016) ; Zhu และคณะ (2010)

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาผลการบำบัดเบื้องต้นทางกายภาพโดยการลดขนาดและการบำบัดเบื้องต้นทางเคมีโดยใช้น้ำดำของผักตบชวาที่ขนาดต่างๆ เพื่อผลิตก๊าซชีวภาพ ซึ่งใช้มูลโคเป็นหัวเชื้อจุลินทรีย์ และผลการดำเนินงานวิจัยสามารถสรุปได้ตามลำดับ ดังนี้

1. การทดลองที่ 2 การบำบัดเบื้องต้นทางกายภาพโดยการลดขนาดและนำไปผลิตก๊าซชีวภาพด้วยวิธีบีเอ็มพี พบว่า เมื่อจัดกลุ่มขนาดผักตบชวาขนาดน้อยกว่า 5 มิลลิเมตร มีผลตอบสนองต่อการบำบัดเบื้องต้นมากที่สุด โดยพิจารณาจากปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมเท่ากับ 0.258 ลิตร/กรัมของแข็งระเหย ทั้งนี้สามารถเพิ่มปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมได้ถึง 0.92-1.30 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับผักตบชวาที่ไม่ผ่านการบำบัดเบื้องต้น

2. การทดลองที่ 3 การบำบัดเบื้องต้นทางเคมีโดยใช้น้ำดำของผักตบชวาขนาดต่างๆ และนำไปผลิตก๊าซชีวภาพด้วยวิธีบีเอ็มพี พบว่า ขนาดน้อยกว่า 5 มิลลิเมตร ระยะเวลาสัมผัสเบื้องต้น 24 ชั่วโมง และความเข้มข้นน้ำดำร้อยละ 80 โดยปริมาตร มีผลตอบสนองต่อการบำบัดเบื้องต้นมากที่สุด โดยมีปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมเท่ากับ 0.124 ลิตร/กรัมของแข็งระเหย ทั้งนี้ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมของการทดลองที่ 3 น้อยกว่าการทดลองที่ 2 เท่ากับ 0.48 เท่า

2.2 เมื่อพิจารณาขนาด พบว่า ขนาดเล็กมีผลตอบสนองต่อการบำบัดเบื้องต้นมากที่สุดและตอบสนองลดลงเมื่อมีขนาดใหญ่ขึ้น

2.3 เมื่อพิจารณาระยะเวลาสัมผัสเบื้องต้น พบว่า การเพิ่มระยะเวลาสัมผัสเบื้องต้นทำให้ผลตอบสนองต่อการบำบัดเบื้องต้นมากขึ้น และมีผลตอบสนองต่อการบำบัดเบื้องต้นมากที่สุด ณ ระยะเวลาสัมผัสเบื้องต้น 24 ชั่วโมง แต่เมื่อเพิ่มระยะเวลาสัมผัสมากกว่านี้ส่งผลให้ผลตอบสนองต่อการบำบัดเบื้องต้นน้อยลง

2.4 เมื่อพิจารณาความเข้มข้นน้ำดำ พบว่า การเพิ่มความเข้มข้นน้ำดำมีผลตอบสนองต่อการบำบัดเบื้องต้นมากขึ้น

3. การทดลองที่ 4 การผลิตก๊าซชีวภาพด้วยถังปฏิกรณ์ไร้อากาศแบบขึ้นตอนเดียว พบว่า ผักตบชวาที่มีการบำบัดเบื้องต้นทางกายภาพมีปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมสูงกว่าผักตบชวาที่มีการบำบัดเบื้องต้นทางเคมี 1.82-1.96 เท่า โดยที่ผักตบชวาที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นทางกายภาพมีปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม 0.215 และ 0.210 ลิตร/กรัมของแข็งระเหย และผักตบชวาที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นทางเคมีมีปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม 0.118 และ 0.107 ลิตร/กรัมของแข็งระเหย

4. การเปรียบเทียบการทดลองที่ 2 , R1.1 และ R1.2 พบว่า ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมของการทดลองที่ 2 มีค่าสูงสุด คาดว่าความชื้นภายในระบบมีผลต่อการแปรรูปสารอินทรีย์เป็นก๊าซชีวภาพ

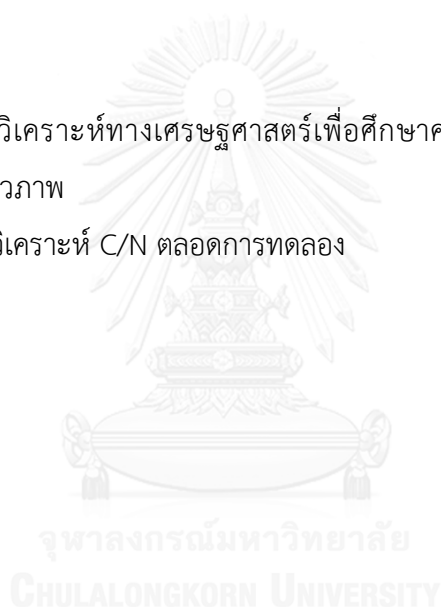
5. การเปรียบเทียบการทดลองที่ 3 , R2.1 และ R2.2 พบว่า ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมของการทดลองที่ 3 มีค่าสูงสุด คาดว่าความชื้นภายในระบบมีผลต่อการแปรรูปสารอินทรีย์เป็นก๊าซชีวภาพ

6. การบำบัดเบื้องต้นของผักตบชวาด้วยวิธีทางกายภาพโดยการลดขนาดมีความเหมาะสมมากกว่าการบำบัดเบื้องต้นทางเคมีโดยน้ำด่างเพื่อการผลิตก๊าซชีวภาพ

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ควรมีการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการนำมาใช้เป็นวัตถุดิบเพื่อการผลิตก๊าซชีวภาพ

5.2.2 ควรมีการวิเคราะห์ C/N ตลอดการทดลอง



รายการอ้างอิง

- Ahn, H. K., Smith, M. C., Kondrad, S. L., and White, J. W. (2010). Evaluation of Biogas Production Potential by Dry Anaerobic Digestion of Switchgrass–Animal Manure Mixtures. Applied Biochemistry and Biotechnology. 160(4): 965-975.
- Ajeej, A., Thanikal, J. V., Narayanan, C. M., and Senthil Kumar, R. (2015). An overview of bio augmentation of methane by anaerobic co-digestion of municipal sludge along with microalgae and waste paper. Renewable and Sustainable Energy Review. 50: 270-276.
- Ali, M., and Sreekrishnan, T. R. (2001). Aquatic toxicity from pulp and paper mill effluents: a review. Advances in Environmental Research 5(2): 175-196.
- Annie, N. S. (2008). Characterization of recovered black liquor and isolated lignin from lil palm empty fruit bunch soda pulping for semichemical and chemical pulps. (Master degree of Technology).
- AOAC. (1991). Association of analytical communities. Maryland, USA.
- APHA. (1998). American public health association standard methods for the examination of water and wastewater (20th ed.). Washington DC: APHA and American water works association and water environment federation.
- Appels, L., Baeyens, J., Degreve, J., and Dewil, R. (2008). Principles and potential of the anaerobic digestion of waste-activated sludge. Progress in Energy and Combustion Science. 34(6): 755-781.
- Bank, C. (2007). Kinetic data from a modified BMP test with uncoupling of solids and liquid retention times, Renewable energy from crops and agrowastes. University of Southampton, UK.
- Bilgili, M. S., Demir, A., and Özkaya, B. (2007). Influence of leachate recirculation on aerobic and anaerobic decomposition of solid wastes. Journal of Hazardous Materials. 143(1-2): 177-183.
- Cardoso, M., de Oliveira Éder Domingos, and Passos, M. L. (2009). Chemical composition and physical properties of black liquors and their effects on liquor recovery operation in Brazilian pulp mills. Fuel. 88(4): 756-763.

- Chaiyapong, P., and Chavalparit, O. (2016). Enhancement of biogas production potential from Acacia leaf waste using alkaline pre-treatment and co-digestion. Journal of Material Cycles and Waste Management. 18(3): 427-436.
- Chan, G. Y. S., Chu, L. M., and Wong, M. H. (2002). Effects of leachate recirculation on biogas production from landfill co-disposal of municipal solid waste, sewage sludge and marine sediment. Environmental Pollution. 118(3): 393-399.
- Chandel A. K., and Singh O. V. (2011). Weedy lignocellulosic feedstock and microbial metabolic engineering: advancing the generation of 'Biofuel'. Applied Microbiology and Biotechnology. 89(5): 1289-1303.
- Chao, S. H., Vermeire, L., and Laxen, T. (2007). Understanding the foaming and dynamic behaviour of black liquor component. [online]. Available from: http://www.tappsa.co.za/archive3/Journal_papers/Understanding_Foam/understanding_foam.html.
- Technical Association of the Pulp and Paper Industry of Southern Africa. Technical article.
- Charles, E. W., Stephen, R. D., Michael, E. H., Brady, J. W. Skopec, E. C. and Liisa, V. (2005). Hydrolysis of Cellulose and Hemicellulose. New York: Marcel Dekker.
- Chynoweth D. P., Dolenc D.A., Ghosh S., Henry M. P., Jerger D. E., and Srivastava V. J. (1982). Kinetics and advanced digester design for anaerobic digestion of water hyacinth and primary sludge. Biotechnology and bioengineering symp. 12: 381-398.
- Deublein D., and Steinhauser A. (2008). Biogas from waste and renewable resources. Hong Kong, Wiley-VCH.
- El-Mekkawi, S. A., Ismail, I. M., El-Attar, M. M., Fahmy, A. A., and Mohammed, S. S. (2011). Utilization of black liquor as concrete admixture and set retarder aid. Journal of Advanced Research. 2(2): 163-169.
- EPA. (2003). Final data summary for spent pulping liquor. [online]. Available from: <http://www.epa.gov/HPV/pubs/summaries/afpa/c12936fds.pdf>.
- Farquhar, G. J., and Rovers, F. A. (1973). Gas production during refuse decomposition. Water, Air, and Soil Pollution. 2(4): 483-495.

- Gea, G., Murillo, M. B., and Arauzo, J. (2003). Swelling behavior of black liquor from soda pulping of wheat straw. Energy and Fuels. 17: 46-53.
- Gerardi, M. H. (2003). The microbiology of anaerobic digesters. USA.: John Wiley & Sons, Inc.
- Grady, C. P., Glen, T. D., and Henry, C. L. (1999). Biological wastewater treatment (2nd ed.). New York: Marcel Dekker.
- Hajji, A., and Rhachi, M. (2013). The Influence of Particle Size on the Performance of Anaerobic Digestion of Municipal Solid Waste. Energy Procedia. 36: 515-520.
- He, Y., Pang, Y., Liu, Y., Li, X., and Wang, K. (2008). Physicochemical characterization of rice straw pretreated with sodium hydroxide in the solid state for enhancing biogas production. Energy and Fuel. 22: 2775-2781.
- Hendriks, A. T. W. M., and Zeeman, G. (2009). Pretreatments to enhance the digestibility of lignocellulosic biomass. Bioresource Technology. 100(1): 10-18.
- InTech. (2011). Anaerobic Processes for Waste Treatment and Energy Generation. [online]. Available from : <http://www.intechopen.com/books/integrated-waste-management>.
- IPST. (2012). Lignin. [online]. Available from: http://www.ipst.gatech.edu/faculty/ragauskas_art/technical_reviews/basics%20of%20kraft%20pulping.pdf.
- Jagadish, H. P., Malourdu, A. R., Muralidhara, P. L., Desai, S. M., and Mahadeva, G. K. R. (2012). Kinetics of anaerobic digestion of water hyacinth using poultry litter as inoculum. International Journal of Environmental Science and Development. 3(2): 94-98.
- Jane O., Cresswell C. F., and Bate G. C. (1981). The effects of varying culture nitrogen and phosphorus levels on nutrient uptake and storage by the waterhyacinth *Eichhornia crassipes* (Mart) Solms. Hydrobiologia. 85(1): 17-22.
- Juntarasiri, P., Nijunkij, S., Buatick, T., Jamkrajang, E., Wacharawichanant, S., Seadan, M., and Suttiruengwong, S. (2011). Enhancing Biogas Production from Padauk Angsana Leave and Wastewater Feedstock through Alkaline and Enzyme Pretreatment. Energy Procedia. 9: 207-215.
- Karki, A. B., Shrestha, J. N., and Bajgain, S. (2005). Biogas as renewable source of energy in Nepal theory and development. Kathamandu, BSP-Nepal.

- Kim, J. S., Lee, Y. Y., and Kim, T. H. (2016). A review on alkaline pretreatment technology for bioconversion of lignocellulosic biomass. Bioresource Technology. 199: 42-48.
- Krathy, L., and Jirout, T. (2011). Biomass size reduction machines for enhancing biogas production. Chemical Engineering and Technology. 34(3): 391-399.
- Laine, C. (2005). Structures of hemicellulose and pectins in wood and pulp. [online]. Available from: <http://lib.tkk.fi/Diss/2005/isbn9512276909/isbn9512276909.pdf>.
- Li, Y., Li, Y., Zhang, D., Li, G., Lu, J., and Li, S. (2016). Solid state anaerobic co-digestion of tomato residues with dairy manure and corn stover for biogas production. Bioresource Technology. 217: 50-55.
- Li, Y., Zhang, R., Chen, C., Liu, G., He, Y., and Liu, X. (2013). Biogas production from co-digestion of corn stover and chicken manure under anaerobic wet, hemi-solid, and solid state conditions. Bioresource Technology. 149: 406-412.
- Malik, A. (2007). Environmental challenge vis a vis opportunity: The case of water hyacinth. Environment International. 33(1): 122-138.
- Metcalf and Eddy. (2003). wastewater engineering (Fourth edition ed.): New York, The McGraw-Hill companies.
- Modenbach, A. (2013). Sodium hydroxide pretreatment of corn stover and subsequent enzymatic hydrolysis: An investigation of yield, Kinetic modeling and glucose recovery. (Ph.D.), University of Kentucky.
- Moody, L., Burns, R., Wu-Haan, W., and Spajie, R. (2009). Use of Biochemical Methane Potential (BMP) Assays for Predicting and Enhancing Anaerobic Digester Performance. Agricultural and Biosystems Engineering.
- Mshandete A., Björnsson L., Kivaisi A. K., Rubindamayugi M. S. T., and Mattiasson B. (2006). Effect of particle size on biogas yield from sisal fibre waste. Renewable Energy. 31(14): 2385-2392.
- Nazami, A. S., Korres, N. E., and Murphy, J. D. (2009). Review of the integrated process for the production of grass biomethane. Environmental Science & Technology. 43: 8496-8508.

- Nielfa, A., Cano, R., and Fdz-Polanco, M. (2015). Theoretical methane production generated by the co-digestion of organic fraction municipal solid waste and biological sludge. Biotechnology Reports. 5: 14-21.
- Nigam, J. N. (2002). Bioconversion of water-hyacinth (*Eichhornia crassipes*) hemicellulose acid hydrolysate to motor fuel ethanol by xylose-fermenting yeast. Journal of Biotechnology. 97(2): 107-116.
- NSWgovernment. (2010). water hyacinth-weed of national significance. [online]. Available from : <http://www.dpi.nsw.gov.au/agriculture/pests-weeds/weeds/profiles/water-hyacinth>.
- O'Sullivan C., Rounsefell Beth., Grinham Alistair., Clarke W., and Udy James. (2010). Anaerobic digestion of harvested aquatic weeds: water hyacinth (*Eichhornia crassipes*), cabomba (*Cabomba Caroliniana*) and salvinia (*Salvinia molesta*). Ecological Engineering. 36(10): 1459-1468.
- Ogata, Y., Ishigaki, T., Nakagawa, M., and Yamada, M. (2016). Effect of increasing salinity on biogas production in waste landfills with leachate recirculation: A lab-scale model study. Biotechnology Reports. 10: 111-116.
- Owens, J. M., and Chynoweth, D. P. (1993). Biochemical methane potential of municipal solid waste (MSW) components. Water Science and Technology. 24(2): 1-14.
- Panichnumsin, P., Nopharatana, A., Ahring, B., and Chaiprasert, P. (2010). Production of methane by co-digestion of cassava pulp with various concentrations of pig manure. Biomass and Bioenergy. 34(8): 1117-1124.
- Patil, J. H., AntonyRaj, M. A. L., Shankar, B. B., Shetty, M. K., and Kumar, B. P. P. (2014). Anaerobic Co-digestion of Water Hyacinth and Sheep Waste. Energy Procedia. 52: 572-578.
- Patrick, W. H., and Wyatt, R. (1964). Soil nitrogen loss as a result of alternate submergence and drying. Soil Science Society of America. 28(5): 647-653.
- Pauly M., and Keegstra K. (2010). Plant cell wall polymers as precursors for biofuels. Current Opinion in Plant Biology. 13(3): 304-311.
- Purwoko, R. M., and Suprihatin, H. L. (2015). Alkaline Pretreatment of sorghum stalk and co-digestion with sludge for biogas production. International Journal of Sciences:Basic and Applied Research. 24(1): 15-23.

- Rastegarfar, N., Behrooz, R., and Bahramifar, N. (2015). Electrocoagulation treatment of black liquor from soda-AQ pulping of wheat straw. Environ Monit Assess. 187(45): 1-9.
- Ritter, S. K. (2008). lignocellulose: A complex biomaterial. Plant Biochemistry, 86: 15.
- Rittmann, B. E., and McCarty, P. L. (2000). Environmental biotechnology: Principles and applications (1st ed.). New York: McGraw-Hill.
- Rodriguez, C., Alaswad, A., Benyounis, K. Y., and Olabi, A. G. Pretreatment techniques used in biogas production from grass. Renewable and Sustainable Energy Reviews.
- RPI. (2010). water hyacinth. [online]. available from : http://www.rpi.edu/dept/chem-eng/Biotech-Environ/Water_hyacinth/hyacinthtitle.htm.
- Sanphoti, N., Towprayoon, S., Chaiprawert, P., and Nopharatnan, A. (2006). The effects of leachate recirculation with supplemental water addition on methane production and waste decomposition in a simulated tropical landfill. Journal of Environmental Management. 81(1): 27-35.
- Shahzadi, T., Mehmood, S., Irshad, M., Anwar, Z., Afroz, A., Zeeshan, N., and Sughra, K. (2014). Advances in lignocellulosic biotechnology: A brief review on lignocellulosic biomass and cellulases. Advances in Bioscience and Biotechnology. 5(3): 246-251.
- Shahriari, H., Warith, M., Hamoda, M., and Kennedy, K. J. (2012). Effect of leachate recirculation on mesophilic anaerobic digestion of food waste. Waste Management. 32(3): 400-403.
- Sharma, S. K., Mishra, I. M., Sharma, M. P., and Saini, J. S. (1988). Effect of particle size on biogas generation from biomass residues. Biomass. 17(4): 251-263.
- Song, Z., Yang, G., Liu, X., Yan, Z., Yuan, Y., and Liao, Y. (2014). Comparison of Seven Chemical Pretreatments of Corn Straw for Improving Methane Yield by Anaerobic Digestion. Plos One. 9(4): e93801.
- Speece, R. E. (1996). Anaerobic biotechnology for industrial wastewater. Nashville, Tennessee: Archae press.

- Sponza, D. T., and Ağdağ, O. N. (2004). Impact of leachate recirculation and recirculation volume on stabilization of municipal solid wastes in simulated anaerobic bioreactors. Process Biochemistry. 39(12): 2157-2165.
- Taherzadeh, M. J., and Karimi, K. (2008). Pretreatment of lignocellulosic wastes to improve ethanol and biogas production: a review. International Journal of Molecular Sciences. 9(9): 1621-1651.
- TAPPI. (2002). The kraft chemical recovery process. [online]. Available from: <http://www.tappi.org/content/events/2008kros/manuscripts/2001-2001.pdf>.
- Uzodinma, E. O., and Ofoefule, A. U. (2009). Biogas production from blends of field grass (*Panicum maximum*) with some animal wastes. International Journal of Physical Sciences. 4(2): 91-95.
- Vaidyanathan S., Kavadia K. M., Shroff K. C., and Mahajan S.P. (1984). Biogas production in batch and semicontinuous digester using water hyacinth. biotechnology and bioengineering. 27: 905-908.
- Verma, S. (2002). Anaerobic digestion of biodegradable organics in municipal solid wastes. Columbia university.
- Xu, J., Zhang, X., and Cheng, J. J. (2012). Pretreatment of corn stover for sugar production with switchgrass-derived black liquor. Bioresource Technology. 111(0): 255-260.
- Yang, L., Xu, F., Ge, X., and Li, Y. (2015). Challenges and strategies for solid-state anaerobic digestion of lignocellulosic biomass. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 44: 824-834.
- Yong, Z., Dong, Y., Zhang, X., and Tan, T. (2015). Anaerobic co-digestion of food waste and straw for biogas production. Renewable Energy. 78: 527-530.
- Zheng, Y., Zhao, J., Xu, F., and Li, Y. (2014). Pretreatment of lignocellulosic biomass for enhanced biogas production. Progress in Energy and Combustion Science. 42: 35-53.
- Zhu, J., Wan, C., and Li, Y. (2010). Enhanced solid-state anaerobic digestion of corn stover by alkaline pretreatment. Bioresource Technology. 101(19): 7523-7528.
- กรมควบคุมมลพิษ. (2539). มาตรฐานน้ำทิ้ง [ออนไลน์] (แหล่งที่มา : http://www.pcd.go.th/info_serv/reg_std_water04.html). (31 ตุลาคม 2559).

- กรมควบคุมมลพิษ. (2545). คู่มือการนำผักตบชวามาใช้ประโยชน์อย่างยั่งยืนและครบวงจรโดยให้เกิดประโยชน์สูงสุด. กรุงเทพมหานคร: กรมควบคุมมลพิษ.
- กรมควบคุมมลพิษ. (2546). คู่มือวิชาการระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้อากาศ. กรุงเทพมหานคร: กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม.
- กรมควบคุมมลพิษ. (2550). ข้อมูลผักตบชวา. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: http://ptech.pcd.go.th/pcd/document/001467/001467_chp001463.pdf.
- กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. (2550). กระบวนการผลิตเยื่อกระดาษ. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <http://www.dede.go.th/>.
- กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. (2558). แผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก พ.ศ.2558-2579. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา : <http://www.dede.go.th/main.php?filename=index>. (22 กรกฎาคม 2559).
- กรมโยธาธิการและผังเมือง. (2553). การกำจัดผักตบชวา. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <http://www.dpt.go.th/gtop/download>.
- กรมโรงงานอุตสาหกรรม. (2550). คู่มือการกำกับดูแลโรงงานอุตสาหกรรมเยื่อกระดาษ. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา:http://www2552.diw.go.th/I_Standard/Web/pane_files/Industry2556.asp#2555.
- กระทรวงพลังงาน. (2553). ระบบแสงสว่าง. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: [http://www2552.dede.go.th/bhrd/old/web_display/websemple/Commercial\(PDF\)/](http://www2552.dede.go.th/bhrd/old/web_display/websemple/Commercial(PDF)/).
- เจริญวิษณุ หาญแก้ว. (2555). ผักตบชวาวัชชีชรัยคู่สายน้ำ, หนังสือพิมพ์รังสิต 66, p. 14.
- ณัฐกาญจน์ ชราพก. (2554). การผลิตก๊าซชีวภาพจากหญ้าในระบบหมักไร้อากาศแบบขั้นตอนเดียว. (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต), จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ณัฐพงศ์ ทรัพย์มณีนันท์. (2553). การศึกษาปริมาณการใช้น้ำของผักตบชวา จอกและแหน. มหาวิทยาลัยมหิดล.
- ธงชัย พรรณสวัสดิ์. (2544). การกำจัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสทางชีวภาพ. กรุงเทพมหานคร: สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย.
- บุญชัย งามวิทย์โรจน์. (2555). การบริหารจัดการผักตบชวาในระบบลุ่มน้ำ. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา : www.dwr.go.th/contents/files/article_th-27012012-27162516-27058177.pdf.
- ประดิษฐา อินทรโฆสิต. (2522). กำลังผลิตของผักตบชวา. วารสารวิทยาศาสตร์. 33(12): 39-47.
- ปัทมวรรณ ไชยพงศ์. (2557). การเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพของไบโกระถินโดยการปรับสภาพขั้นต้นด้วยต่างและการหมักร่วมด้วยชีวมวล. (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต), จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

- พัชรินทร์ เพิ่มไพศาลสกุล. (2550). การเพิ่มความเข้มข้นลิแกนด์ที่ได้จากของเหลวดำด้วยกระบวนการอัลตราฟิเตรชัน. กรุงเทพมหานคร.
- มันสิน ตัณฑุลเวศน์. (2544). โครงการอบรมเรื่องการดูแลระบบบำบัดน้ำเสียของโรงพยาบาล. กรุงเทพมหานคร: แชนอี68แลบ จำกัด.
- มาลินี ศรีอริยพันธ์. (2555). การศึกษาเปรียบเทียบกระบวนการปรับสภาพชีวมวลเพื่อการผลิตก๊าซชีวภาพจากผักตบชวา. กรุงเทพมหานคร.
- วราภรณ์ วัฒนศิริ. (2556). การแปรสภาพทางความร้อนของผงน้ำยางดำอบแห้งโดยการเหนี่ยวนำด้วยไมโครเวฟ. (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ), จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สร้อยดาว ยวดยง. (2553). อัตราการเจริญเติบโตของผักตบชวาที่ใช้ในบ่อบำบัดน้ำเสีย. ศูนย์ส่งเสริมวิจัยและทรัพยากรสิ่งแวดล้อม(มิถุนายน 2553): 94-108.
- สำนักนายกรัฐมนตรี. (2557). ปริมาณผักตบชวา. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา : <http://region2553.prd.go.th/prphayao/news>.
- สุทธิเจตน์ จันทศิริ. (2544). ผักตบชวา มหันตภัยสีเขียวของแหล่งน้ำ ชีวิตกับสิ่งแวดล้อม1 (pp. 76). กรุงเทพฯ: บริษัทซีเอ็ดยูเคชั่น จำกัด.
- อมรรัตน์ สีสุทอง. (2551). การสกัดสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพจากท้องถิ่นในจังหวัดนนทบุรี. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <https://research.dusit.ac.th/>.
- อรุณศรี รักดีพิน. (2531). การใช้วิธีทางจุลชีววิทยาและเคมีปรับคุณภาพของผักตบชวาเพื่อใช้เป็นวัตถุดิบในการหมักแก๊สชีวภาพ. (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ), มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.



ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก

ผลการทดลองที่ 2 การบำบัดเบื้องต้นทางกายภาพโดยการลดขนาด

ตารางที่ ก-1 ของแข็งทั้งหมดและของแข็งระเหยของวัตถุบขนาดต่างๆ

ขนาด(มม.)	ของแข็งทั้งหมด (ร้อยละ)		ของแข็งระเหย (ร้อยละ)	
	เริ่มต้น	สุดท้าย	เริ่มต้น	สุดท้าย
<5 มม.	17.06±2.77	9.38±0.43	11.95±0.16	2.96±0.18
5-10 มม.	17.42±1.55	9.87±0.38	11.88±0.00	3.23±0.52
10-15 มม.	16.07±1.72	8.75±1.08	10.88±1.55	2.92±3.43
15-20 มม.	17.13±0.64	9.71±1.75	11.92±0.15	3.68±4.25
20-25 มม.	17.43±4.52	10.28±1.56	13.23±3.93	4.65±2.92
25-30 มม.	18.12±1.42	10.88±1.01	12.05±0.44	4.22±1.35
ไม่ผ่านการ บำบัด	18.35±0.62	11.22±0.06	16.10±5.15	6.88±1.77
ชุดควบคุม (มูลวัว)	22.96±5.89	18.32±7.48	16.92±8.19	7.18±4.71

ตารางที่ ก-2 ซีโอดีละลายของวัตถุบขนาดต่างๆ

วันที่	ซีโอดีละลาย (มก./ล.)			
	<5 มม.	5-10 มม	10-15 มม	15-20 มม.
1	4800±282.84	2800±282.84	2400±282.8427	2800±282.84
5	7400.00±282.84	7000.00±282.84	7000.00±282.84	6200.00±282.84
7	6400.00±565.69	5000.00±282.84	5200.00±0.00	3800.00±282.84
12	8600.00±282.84	8000.00±565.69	8000.00±0.00	6800.00±565.69
14	7800.00±1131.37	7200.00±282.84	7000.00±565.69	6800.00±282.84
19	5400.00±0.00	4200.00±0.00	5200.00±282.84	4200.00±565.69
21	6000.00±565.69	5800.00±848.53	5800.00±848.53	4000.00±565.69
25	7000.00±282.84	6200.00±848.53	6800.00±565.69	5200.00±565.69
27	5400.00±565.69	4800.00±282.84	5200.00±282.84	3600.00±1414.21
32	4000.00±282.84	3200.00±282.84	3800.00±282.84	2800.00±282.84
35	4000.00±282.84	3200.00±282.84	3400.00±0.00	3000.00±0.00
39	2000.00±565.69	2200.00±565.69	3100.00±424.26	1800.00±565.69

ตารางที่ ก-2 ซีโอดีละลายของวัตถุบิขนาดต่างๆ (ต่อ)

วันที่	ซีโอดีละลาย (มก./ล.)			
	20-25 มม.	25-30 มม.	ไม่ผ่านการบำบัด	ชุดควบคุม (มูลโค)
1	3200±282.84	3200±282.84	2600±565.68	4000±282.84
5	6600.00±282.84	5400.00±282.84	4800.00±282.84	5600.00±0.00
7	4000.00±565.69	3200.00±0.00	3800.00±282.84	2400.00±565.69
12	7600.00±565.69	5600.00±565.69	6000.00±282.84	5400.00±282.84
14	6000.00±282.84	5600.00±282.84	5800.00±282.84	4800.00±282.84
19	4000.00±282.84	5400.00±0.00	3600.00±282.84	5600.00±282.84
21	5600.00±565.69	3600.00±565.69	3800.00±282.84	3400.00±282.84
25	6200.00±848.53	4016.18±0.00	4800.00±565.69	2800.00±0.00
27	4400.00±282.84	3200.00±282.84	3400.00±565.69	2800.00±282.84
32	3000.00±0.00	2400.00±282.84	2400.00±282.84	2000.00±282.84
35	3200.00±282.84	3000.00±0.00	3000.00±1131.37	2000.00±282.84
39	1800.00±282.84	2700.00±424.26	1600.00±565.69	1400.00±0.00

ตารางที่ ก-3 กรดอินทรีย์ระเหยของวัตถุบิขนาดต่างๆ

วันที่	กรดอินทรีย์ระเหย (มก./ล.)			
	<5 มม.	5-10 มม.	10-15 มม.	15-20 มม.
1	975.00±35.35	681.25±44.19	1081.25±61.87	725.00±70.71
5	2493.75±26.52	2350.00±70.71	2475.00±70.71	1900.00±35.36
7	3006.25±26.52	2768.75±44.19	2437.50±17.68	2406.25±26.52
12	2612.50±17.68	2456.25±8.84	1718.75±44.19	1568.75±44.19
14	1506.25±61.87	1268.75±61.87	1406.25±44.19	1243.75±44.19
19	1593.75±44.19	1281.25±8.84	1387.50±70.71	887.50±53.03
21	1518.75±8.84	1068.75±44.19	1181.25±44.19	1043.75±44.19
25	1043.75±61.87	843.75±44.19	906.25±79.55	643.75±61.87
27	906.25±79.55	718.75±97.23	812.50±35.36	625.00±106.07
32	781.25±61.87	587.50±53.03	618.75±44.19	456.25±44.19
35	575.00±35.36	456.25±26.52	675.00±35.36	575.00±70.71
39	462.50±88.39	537.50±53.03	718.75±44.19	693.75±61.87

ตารางที่ ก-3 กรดอินทรีย์ระเหยของวัตถุดิบขนาดต่างๆ (ต่อ)

วันที่	กรดอินทรีย์ระเหย (มก./ล.)			
	20-25 มม.	25-30 มม.	ไม่ผ่านการบำบัด	ชุดควบคุม(มูลโค)
1	1043.75±44.19	968.75±61.87	856±61.87	600.00±53.03
5	1937.50±53.03	1137.50±53.03	1325.00±70.71	943.75±61.87
7	2437.50±53.03	2006.25±61.87	1993.75±8.84	1618.75±44.19
12	1618.75±61.87	1587.50±53.03	1343.75±26.52	1112.50±53.03
14	1256.25±44.19	993.75±61.87	1193.75±79.55	868.75±61.87
19	1081.25±26.52	593.75±44.19	887.50±53.03	537.50±53.03
21	1056.25±26.52	768.75±44.19	856.25±26.52	656.25±79.55
25	725.00±17.68	512.50±53.03	537.50±53.03	350.00±70.71
27	668.75±26.52	525.00±70.71	556.25±61.87	525.00±35.36
32	575.00±35.36	425.00±35.36	431.25±26.52	418.75±61.87
35	856.25±61.87	400.00±35.36	606.25±79.55	431.25±26.52
39	587.50±53.03	481.25±79.55	725.00±70.71	381.25±44.19

ตารางที่ ก-4 ความเป็นต่างของวัตถุดิบขนาดต่างๆ

วันที่	ความเป็นต่าง (มก./ล.แคลเซียมคาร์บอเนต)			
	<5 มม.	5-10 มม.	10-15 มม.	15-20 มม.
1	3243.75±61.87	2987.50±53.03	3243.75±44.19	3750±70.71
5	4325.00±70.71	4143.75±44.19	4056.25±61.87	4193.75±61.87
7	4256.25±26.52	3650.00±35.36	3762.50±53.03	4031.25±79.55
12	4162.50±53.03	4006.25±44.19	4675.00±70.71	3956.25±44.19
14	4231.25±44.19	4100.00±70.71	4325.00±35.36	3700.00±35.36
19	4250.00±35.36	4012.50±53.03	3918.75±61.87	3362.50±53.03
21	4318.75±44.19	4150.00±70.71	4306.25±61.87	4181.25±61.87
25	4131.25±61.87	4050.00±70.71	4031.25±44.19	3831.25±26.52
27	4162.50±53.03	4281.25±61.87	4368.75±79.55	4168.75±44.19
32	4118.75±61.87	4275.00±70.71	4425.00±70.71	4250.00±70.71
35	4243.75±26.52	4262.50±53.03	4262.50±53.03	4143.75±61.87
39	3693.75±44.19	4325.00±70.71	4443.75±44.19	4650.00±70.71

ตารางที่ ก-4 ความเป็นต่างของวัตถุบิขนาดต่าง ๆ (ต่อ)

วันที่	ความเป็นต่าง (มก./ล.แคลเซียมคาร์บอเนต)			
	20-25 มม.	25-30มม.	ไม่ผ่านการบ้ำบด	ชุดควบคุม(มูลโค)
1	3262.5±0	3550±0	3156.25±26.52	2925.00±424.26
5	4275.00±35.36	4012.50±53.03	4212.50±35.36	3731.25±44.19
7	3881.25±61.87	3481.25±79.55	3981.25±44.19	3381.25±79.55
12	3368.75±220.97	4293.75±61.87	3937.50±53.03	4062.50±53.03
14	3993.75±79.55	4037.50±35.36	3768.75±44.19	4506.25±61.87
19	3900.00±70.71	3843.75±44.19	3856.25±79.55	3818.75±44.19
21	3718.75±61.87	4225.00±35.36	4243.75±97.23	4087.50±88.39
25	3681.25±44.19	3725.00±35.36	4175.00±70.71	3637.50±53.03
27	3643.75±44.19	3600.00±17.68	4343.75±44.19	3825.00±35.36
32	3818.75±26.52	4218.75±26.52	4200.00±53.03	4268.75±44.19
35	4293.75±44.19	3943.75±61.87	4125.00±70.71	3875.00±70.71
39	4168.75±61.87	4600.00±35.36	4000.00±53.03	4212.50±53.03

ตารางที่ ก-5 ความเป็นกรดต่างของวัตถุบิขนาดต่าง ๆ

วันที่	ความเป็นกรดต่าง							
	<5 มม.	5-10 มม.	10-15 มม.	15-20 มม.	20-25 มม.	25-30 มม.	ไม่ผ่านการบ้ำบด	ชุดควบคุม (มูลโค)
1	8.00	8.28	8.05	8.10	8.01	7.97	8.05	8.20
5	6.62	6.59	6.56	6.69	6.76	6.73	6.71	6.92
7	6.43	6.44	6.45	6.42	6.53	6.53	6.49	6.88
12	6.51	6.57	6.72	6.82	6.79	6.80	6.81	6.74
14	6.83	6.81	6.80	6.84	6.80	6.85	6.77	6.82
19	6.98	6.97	6.94	6.96	6.99	6.99	6.99	7.03
21	6.93	7.01	6.89	6.93	6.92	6.94	6.94	6.93
25	6.94	6.87	6.91	6.91	6.90	6.88	6.89	6.86
27	6.98	6.94	6.91	6.97	6.89	6.89	6.90	6.92
32	7.09	7.02	7.13	7.09	7.04	7.12	7.10	7.05
35	7.09	7.04	7.06	7.07	7.07	7.06	7.10	7.08
39	6.91	6.93	6.93	6.98	7.00	6.93	6.95	6.91

ตารางที่ ก-6 ความต่างศักย์ออกซิเดชันรีดักชันของวัตถุบขนาดต่างๆ

วันที่	<5 มม.	5-10 มม.	10-15 มม.	15-20 มม.	20-25 มม.	25-30 มม.	ไม่ผ่าน การ บำบัด	ชุด ควบคุม (มูลโค)
1	-215	-214.5	-206	-211.6	-201	-208	-205	-209
5	-236	-240	-221	-220	-224	-234	-222	-207.5
7	-221	-226	-241	-239	-205	-226	-258.3	-216.1
12	-270	-221	-215	-230	-215	-244.7	-240	-235
14	-209	-297.5	-296	-261.6	-257.4	-263.2	-291.7	-267.6
19	-221	-223	-215	-205	-203	-259.1	-299.2	-258.8
21	-222	-224	-221	-208	-209	-207	-257	-206
25	-220	-220	-228	-210	-227	-231	-247	-213
27	-215	-221	-230	-237	-237	-237	-240	-268.7
32	-239	-230	-239	-242.8	-274.2	-259.4	-267.2	-269.6
35	-274.2	-287.5	-269.2	-275	-261	-286.2	-287	-287.4
39	-291.7	-305.6	-299.2	-274.2	-284.4	-296.2	-298.4	-302.5



ตารางที่ ก-7 อุณหภูมิสภาพแวดล้อม

วันที่	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)
1	28.7
2	29.1
5	31.2
7	30.2
8	31.2
12	31.8
14	31.1
20	28.1
21	28.9
25	29.1
28	31.7
33	30.7
36	29.5
39	32.0
40	31.1

ตารางที่ ก-8 อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพของวัตถุดิบขนาดต่างๆ

วันที่	อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ (มล./ก.ของแข็งระเหย)					
	<5 มม.	5-10 มม.	10-15 มม.	15-20 มม.	20-25 มม.	25-30 มม.
1	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0
5	10.11 ± 0.62	8.42 ± 1.33	9.73 ± 0.89	8.12 ± 1.15	6.28 ± 0.09	4.21 ± 1.07
7	12.41 ± 0.53	9.42 ± 0.53	9.49 ± 0.45	13.28 ± 0.75	9.19 ± 0.80	8.27 ± 1.07
12	27.42 ± 0.18	27.49 ± 0.09	24.35 ± 0.53	27.42 ± 1.07	28.81 ± 1.69	20.37 ± 0.36
14	48.25 ± 10.48	43.19 ± 0.36	42.05 ± 0.80	33.13 ± 0.65	37.50 ± 0.70	29.56 ± 4.09
19	28.64 ± 0.18	25.89 ± 0.36	27.95 ± 0.44	22.90 ± 5.60	17.46 ± 3.55	18.53 ± 3.20
21	12.94 ± 0.18	11.41 ± 0.18	11.87 ± 0.00	11.79 ± 0.27	9.96 ± 2.04	10.49 ± 2.84
25	16.77 ± 0.53	14.02 ± 0.53	16.01 ± 0.36	12.02 ± 1.42	10.34 ± 0.71	10.03 ± 0.89
27	15.47 ± 0.27	13.17 ± 0.27	17.66 ± 0.50	14.09 ± 0.27	12.41 ± 0.80	6.89 ± 0.62
32	33.77 ± 0.18	27.34 ± 0.53	32.01 ± 2.93	26.58 ± 0.53	31.55 ± 3.64	25.58 ± 0.98
35	26.45 ± 0.59	27.88 ± 0.53	30.25 ± 0.27	24.89 ± 4.71	27.88 ± 0.36	26.19 ± 1.24
39	25.66 ± 0.36	22.75 ± 0.36	24.58 ± 0.71	18.76 ± 2.31	27.11 ± 2.75	21.67 ± 0.89



ตารางที่ ก-8 อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพของวัตถุดิบขนาดต่างๆ (ต่อ)

วันที่	อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ (มล./ก.ของแข็งระเหย)	
	ไม่ผ่านการบำบัดเบื้องต้น	ชุดควบคุม (มูลโค)
1	0.00±0.00	0.00±0.00
5	8.35±0.00	4.06±0.44
7	7.17±0.05	6.43±0.27
12	23.63±6.16	13.79±0.53
14	30.63±0.36	15.32±0.18
19	22.06±0.36	14.40±0.36
21	11.49±0.44	11.26±0.62
25	10.95±0.00	9.73±0.09
27	12.87±0.27	7.28±0.62
32	26.58±1.42	5.90±1.33
35	26.80±1.24	2.45±0.18
39	18.23±1.69	2.22±1.15

ตารางที่ ก-9 ก๊าซชีวภาพสะสมในแต่ละชุดการทดลอง

วันที่	ก๊าซชีวภาพสะสม (มล./ก.ของแข็งระเหย)							
	<5 มม.	5-10 มม.	10-15 มม.	15-20 มม.	20-25 มม.	25-30 มม.	ไม่ผ่าน การ บำบัด	ชุด ควบคุม (มูลโค)
1	0	0	0	0	0	0	0	0
5	10.11	8.42	9.73	8.12	6.28	4.21	8.35	4.06
7	22.52	17.84	19.22	21.40	15.47	12.48	15.52	10.49
12	49.93	45.34	43.57	48.82	44.28	32.86	39.15	24.28
14	98.18	88.53	85.61	81.95	81.79	62.42	69.78	39.59
19	126.83	114.42	113.57	104.85	99.25	80.95	91.84	53.99
21	139.77	125.83	125.44	116.64	109.20	91.44	103.33	65.25
25	156.54	139.84	141.45	128.66	119.54	101.48	114.28	74.98
27	172.01	153.02	159.11	142.76	131.95	108.37	127.15	82.25
32	205.78	180.36	191.12	169.33	163.50	133.95	153.72	88.15
35	232.24	208.24	221.37	194.22	191.38	160.14	180.53	90.60
39	257.89	230.98	245.95	212.99	218.49	181.81	198.75	92.82

ภาคผนวก ข
ผลการทดลองที่ 3 การบำบัดเบื้องต้นทางเคมีโดยใช้น้ำดำ

1. วัตถุประสงค์ขนาดน้อยกว่า 5 มิลลิเมตร

ตารางที่ ข-1 ของแข็งทั้งหมดและของแข็งระเหยในสภาวะการทดลองต่างๆ

สภาวะการทดลอง	ของแข็งทั้งหมด (ร้อยละ)		ของแข็งระเหย (ร้อยละ)	
	เริ่มต้น	สุดท้าย	เริ่มต้น	สุดท้าย
6h20%	28.88±9.96	21.06±13.61	13.76±4.36	5.03±1.38
6hr40%	15.41±3.74	7.62±0.75	11.01±4.03	3.61±2.23
6hr60%	18.71±6.27	11.26±3.49	11.97±1.85	4.12±0.64
6hr80%	14.52±2.80	7.77±1.50	9.75±3.00	2.89±0.71
18hr20%	22.99±1.76	15.44±5.89	12.25±0.72	5.01±1.01
18hr40%	25.96±5.53	17.94±6.88	16.74±0.27	17.54±0.47
18hr60%	15.64±0.14	8.33±4.00	12.47±1.86	4.52±3.18
18hr80%	22.63±5.10	15.86±2.39	10.36±4.29	2.83±0.66
24hr20%	23.48±0.04	16.47±0.58	10.72±0.39	3.55±5.30
24hr40%	18.20±0.85	11.26±0.73	12.20±0.53	3.40±0.26
24hr60%	22.45±9.66	16.13±7.42	16.68±4.18	5.88±1.41
24hr80%	26.85±4.29	19.87±1.47	11.53±1.10	0.58±0.34
30hr20%	21.75±2.17	13.38±1.04	13.68±4.58	5.37±1.32
30hr40%	16.32±2.78	9.70±1.27	12.25±0.91	4.47±2.25
30hr60%	17.41±5.59	14.09±2.18	12.29±0.16	5.46±3.40
30hr80%	18.90±5.04	12.75±2.52	11.91±0.70	3.73±1.54
36hr20%	21.75±5.20	15.82±7.49	13.21±0.73	5.63±3.48
36hr40%	24.88±0.58	17.39±3.10	11.29±1.53	3.27±0.01
36hr60%	17.91±3.19	10.39±3.04	11.83±0.56	3.77±1.08
36hr80%	19.59±2.31	12.65±2.64	10.80±0.74	2.92±0.09
ชุดควบคุม (มูลโค)	20.24±4.63	14.77±5.31	13.84±5.70	7.91±5.20

ตารางที่ ข-2 ซีโอดีละลายในสภาวะการทดลองต่าง ๆ

วันที่	ซีโอดีละลาย (มก./ล.)			
	6hr20%	6hr40%	6hr60%	6hr80%
1	4800±0	6400±1131.37	8400±565.69	9200±565.69
2	5200±565.69	8000±1131.37	11600±565.69	13600±1131.37
6	3600±1131.37	6000±1131.37	7600±0	7600±1131.37
14	2800±565.69	4400±565.69	5600±1131.37	8800±0
18	4000±1131.37	6000±565.69	8000±1131.37	10400±1131.37
22	2000±565.69	2400±0	2800±565.69	5200±565.69
25	4000±0	5600±0	8000±0	8000±0
30	2400±1131.37	4400±1131.37	6800±565.69	8000±0
34	1200±565.69	1600±565.69	3600±565.69	4800±0
38	2400±0	4000±0	5200±565.69	6000±565.69
40	1600±565.69	3200±565.69	4000±565.69	5200±1131.37
วันที่	18hr20%	18hr40%	18hr60%	18hr80%
1	4400±565.69	6000±565.69	8400±565.69	9200±565.69
2	5200±565.69	6800±565.69	9200±565.69	10000±565.69
6	4800±565.69	5200±0	6400±565.69	8400±0
14	3600±565.69	5200±565.69	6400±1131.37	8000±1131.37
18	3600±565.69	6000±565.69	8800±0	9600±0
22	2000±565.69	2000±565.69	3600±565.69	4800±0
25	2000±565.69	4800±0	6000±565.69	7200±0
30	3600±565.69	4800±1131.37	5600±1131.37	7600±565.69
34	2000±565.69	2800±565.69	3200±0	3600±565.69
38	2000±565.69	3200±0	3600±565.69	5600±1131.37
40	2400±565.69	2800±0	3600±0	4400±1131.37

ตารางที่ ข-2 ซีโอดีละลายในสภาวะการทดลองต่าง ๆ (ต่อ)

วันที่	ซีโอดีละลาย (มก./ล.)			
	24hr20%	24hr40%	24hr60%	24hr80%
1	7200±0	7600±565.69	8400±565.69	9200±565.69
2	7600±565.69	9200±565.69	9600±0	11600±565.69
6	2400±565.69	4000±565.69	8800±565.69	11200±565.69
14	4000±0	5200±1697.06	5200±565.69	9200±565.69
18	5200±565.69	5600±1131.37	8000±0	10400±0
22	2000±565.69	2800±565.69	4800±0	6000±565.69
25	1600±0	3600±565.69	5200±565.69	6000±565.69
30	3600±565.69	4400±565.69	6000±565.69	8800±1131.37
34	800±1131.37	2800±565.69	4000±0	6400±0
38	2400±0	4000±1131.37	6000±565.69	6400±1131.37
40	2800±1131.37	3200±565.69	4400±1131.37	5200±0
วันที่	30hr20%	30hr40%	30hr60%	30hr80%
1	3200±0	6000±565.69	7600±565.69	8400±565.69
2	4800±0	8000±1131.37	8400±565.69	13200±565.69
6	4800±565.69	6000±0	7600±0	9600±565.69
14	3200±1131.37	6800±565.69	7200±0	8400±565.69
18	4800±0	5600±1131.37	6800±1697.06	11200±1131.37
22	2800±565.69	4000±0	6400±1131.37	7200±0
25	2000±565.69	3200±0	5200±565.69	7200±0
30	4000±0	6000±565.69	8000±0	8800±0
34	1600±0	2000±565.69	3600±565.69	5200±565.69
38	3200±0	4000±1131.37	4400±565.69	7200±0
40	2800±0	5200±1131.37	7200±565.69	8800±565.69

ตารางที่ ข-2 ซีโอดีละลายในสภาวะการทดลองต่าง ๆ (ต่อ)

วันที่	ซีโอดีละลาย (มก./ล.)			
	36hr20%	36hr40%	36hr60%	36hr80%
1	4400±565.69	5600±1131.37	7200±0	9200±565.69
2	6000±565.69	8000±1131.37	8000±0	10800±565.69
6	3600±1131.37	4800±1697.06	6400±565.69	8800±1697.06
14	5600±0	6800±565.69	6400±1131.37	9200±565.69
18	5600±0	6800±565.69	9200±565.69	10400±0
22	2000±565.69	3600±565.69	6000±565.69	8000±0
25	2800±565.69	4800±0	5200±565.69	6800±565.69
30	6400±1131.37	8000±1131.37	8400±565.69	9200±565.69
34	2000±565.69	2400±0	4400±565.69	6400±1131.37
38	2400±0	3200±0	3600±565.69	4400±565.69
40	1200±0	2000±0	3600±0	5200±0
วันที่	ชุดควบคุม(มูลโค)			
1	4000±1131.37			
2	6000±565.69			
6	2800±1131.37			
14	8400±565.69			
18	7600±565.69			
22	6800±565.69			
25	10000±565.69			
30	8800±1131.37			
34	6800±565.69			
38	10400±0			
40	5600±565.69			

ตารางที่ ข-3 กรดอินทรีย์ระเหยในสภาวะการทดลองต่าง ๆ

วันที่	กรดอินทรีย์ระเหย (มก./ล.กรดอะซิติก)			
	6hr20%	6hr40%	6hr60%	6hr80%
1	862.5±53.03	925.0±35.36	1050.0±35.36	1237.5±88.39
2	937.5±53.03	1000.0±35.36	1087.5±17.68	1337.5±17.68
6	1325.0±35.36	1387.5±53.03	1487.5±17.68	1850.0±35.36
14	975.0±35.36	1037.5±53.03	1137.5±17.68	1362.5±17.68
18	975.0±35.36	1037.5±53.03	1137.5±17.68	1350.0±17.68
22	862.5±53.03	925.0±35.36	1075.0±70.71	1312.5±70.71
25	762.5±53.03	825.0±35.36	950.0±35.36	1462.5±35.36
30	750.0±70.71	937.5±194.45	975.0±35.36	1212.5±35.36
34	712.5±17.68	775.0±70.71	900.0±70.71	1100.0±70.71
38	712.5±53.03	775.0±35.36	900.0±35.36	1087.5±35.36
40	750.0±35.36	812.5±53.03	925.0±70.71	1100.0±70.71
วันที่	18hr20%	18hr40%	18hr60%	18hr80%
1	950.0±70.71	1012.5±159.10	1112.5±123.74	1237.5±123.74
2	1050.0±35.36	1112.5±53.03	1212.5±17.68	1337.5±17.68
6	1550.0±35.36	1650.0±106.07	1725.0±35.36	1850.0±247.49
14	1050.0±0	1112.5±88.39	1237.5±88.39	1362.5±88.39
18	1050.0±0	1125.0±70.71	1225.0±35.36	1350.0±35.36
22	987.5±53.03	1050.0±35.36	1187.5±53.03	1312.5±53.03
25	1150.0±70.71	1212.5±17.68	1337.5±53.03	1462.5±53.03
30	850.0±35.36	912.5±53.03	1087.5±88.39	1212.5±88.39
34	787.5±53.03	850.0±35.36	975.0±35.36	1100.0±35.36
38	787.5±17.68	850.0±70.71	962.5±88.39	1087.5±88.39
40	775.0±70.71	850.0±35.36	975.0±35.36	1100.0±35.36

ตารางที่ ข-3 กรดอินทรีย์ระเหยในสภาวะการทดลองต่าง ๆ (ต่อ)

วันที่	กรดอินทรีย์ระเหย (มก./ล.กรดอะซิติก)			
	24hr20%	24hr40%	24hr60%	24hr80%
1	1287.5±53.03	1212.5±53.03	1312.5±88.39	1575.0±459.62
2	1412.5±88.39	1425.0±70.71	1487.5±17.68	1412.5±35.36
6	1675.0±35.36	1737.5±53.03	1737.5±53.03	1937.5±53.03
14	1150.0±70.71	1212.5±17.68	1350.0±35.36	1475.0±35.36
18	1150.0±70.71	1225.0±35.36	1262.5±88.39	1387.5±88.39
22	1025.0±70.71	1087.5±17.68	1287.5±123.74	1412.5±123.74
25	1162.5±53.03	1225.0±141.42	1437.5±53.03	1562.5±53.03
30	1162.5±88.39	1250.0±35.36	1375.0±35.36	1500.0±35.36
34	887.5±88.39	937.5±17.68	1062.5±17.68	1437.5±17.68
38	962.5±53.03	1025.0±35.36	1150.0±35.36	1275.0±35.36
40	812.5±53.03	875.0±35.36	1000.0±35.36	1125.0±35.36
วันที่	30hr20%	30hr40%	30hr60%	30hr80%
1	900.0±35.36	962.5±53.03	1050.0±35.36	1175.0±35.36
2	962.5±17.68	1025.0±70.71	1000.0±141.42	1250.0±35.36
6	1462.5±53.03	1525.0±35.36	1662.5±53.03	1787.5±53.03
14	1000.0±35.36	1125.0±35.36	1225.0±70.71	1350.0±70.71
18	1000.0±35.36	1062.5±53.03	1162.5±17.68	1287.5±17.68
22	887.5±17.68	950.0±70.71	1050.0±35.36	1175.0±35.36
25	1037.5±17.68	1100.0±106.07	1225.0±106.07	1350.0±106.07
30	837.5±88.39	887.5±17.68	1062.5±53.03	1187.5±53.03
34	775.0±70.71	837.5±17.68	937.5±53.03	1062.5±53.03
38	725.0±35.36	787.5±53.03	912.5±53.03	1037.5±53.03
40	762.5±53.03	812.5±17.68	975.0±35.36	1112.5±17.68

ตารางที่ ข-3 กรดอินทรีย์ระเหยในสภาวะการทดลองต่าง ๆ (ต่อ)

วันที่	กรดอินทรีย์ระเหย (มก./ล.กรดอะซิติก)			
	36hr20%	36hr40%	36hr60%	36hr80%
1	850.0±35.36	912.5±35.36	1037.5±53.03	1037.5±88.39
2	912.5±53.03	975.0±123.74	1062.5±17.68	1125.0±70.71
6	1325.0±35.36	1387.5±70.71	1512.5±17.68	1862.5±88.39
14	912.5±17.68	975.0±53.03	1075.0±35.36	1200.0±35.36
18	825.0±35.36	887.5±35.36	987.5±17.68	1112.5±17.68
22	812.5±123.74	875.0±159.10	975.0±70.71	1100.0±70.71
25	700.0±70.71	762.5±212.13	987.5±53.03	1112.5±53.03
30	712.5±88.39	675.0±70.71	950.0±70.71	1075.0±70.71
34	687.5±17.68	750.0±53.03	850.0±106.07	975.0±106.07
38	675.0±35.36	737.5±88.39	800.0±141.42	925.0±141.42
40	712.5±17.68	787.5±88.39	912.5±88.39	1037.5±88.39
วันที่	ชุดควบคุม(มูลโค)			
1	587.5±17.68			
2	637.5±17.68			
6	612.5±17.68			
14	1662.5±53.03			
18	487.5±53.03			
22	375±35.36			
25	287.5±53.03			
30	350±70.71			
34	212.5±88.39			
38	187.5±88.39			
40	350±70.71			

ตารางที่ ข-4 ความเป็นต่างในสภาวะการทดลองต่าง ๆ

วันที่	ความเป็นต่าง (มก./ล.แคลเซียมคาร์บอเนต)			
	6hr20%	6hr40%	6hr60%	6hr80%
1	2912.5±53.03	3550.0±70.71	4037.5±53.03	4475.0±35.36
2	3012.5±17.68	3675.0±35.36	4312.5±88.39	4637.5±17.68
6	3800.0±35.36	5287.5±53.03	6162.5±53.03	6562.5±88.39
14	4287.5±53.03	4812.5±88.39	6362.5±53.03	6612.5±17.68
18	3512.5±53.03	4962.5±88.39	5950.0±70.71	7075.0±35.36
22	3662.5±88.39	5325.0±70.71	5325.0±35.36	5812.5±53.03
25	2962.5±17.68	4662.5±53.03	6450.0±35.36	5812.5±53.03
30	3462.5±17.68	5137.5±88.39	6250.0±70.71	7350.0±35.36
34	3887.5±88.39	4275.0±70.71	4662.5±53.03	7587.5±17.68
38	3800.0±35.36	5137.5±88.39	6625.0±35.36	7787.5±53.03
40	3062.5±53.03	4950.0±0	5350.0±70.71	7325.0±70.71
วันที่	18hr20%	18hr40%	18hr60%	18hr80%
1	3087.5±88.39	3200.0±35.36	4125.0±35.36	4612.5±17.68
2	3300.0±70.71	3450.0±35.36	4350.0±70.71	4812.5±53.03
6	4750.0±35.36	5187.5±17.68	5612.5±17.68	6637.5±53.03
14	4287.5±53.03	5100.0±70.71	5425.0±70.71	6637.5±53.03
18	3675.0±70.71	4875.0±35.36	5837.5±53.03	6400.0±70.71
22	4687.5±53.03	4825.0±70.71	5637.5±53.03	5925.0±35.36
25	3700.0±35.36	4112.5±88.39	4175.0±70.71	5725.0±35.36
30	4712.5±17.68	5112.5±88.39	5437.5±53.03	6162.5±53.03
34	4225.0±35.36	5112.5±53.03	5925.0±35.36	6437.5±17.68
38	4100.0±70.71	4875.0±35.36	5662.5±53.03	7662.5±53.03
40	4187.5±88.39	4587.5±53.03	5125.0±70.71	6362.5±88.39

ตารางที่ ข-4 ความเป็นต่างในสภาวะการทดลองต่าง ๆ (ต่อ)

วันที่	ความเป็นต่าง (มก./ล.แคลเซียมคาร์บอเนต)			
	24hr20%	24hr40%	24hr60%	24hr80%
1	3237.5±53.03	3562.5±88.39	3587.5±53.03	4525.0±70.71
2	3400.0±70.71	3812.5±17.68	3837.5±53.03	4725.0±35.36
6	4512.5±53.03	5275.0±70.71	5912.5±17.68	6562.5±53.03
14	3862.5±53.03	5162.5±17.68	5675.0±35.36	6375.0±35.36
18	3937.5±17.68	4412.5±53.03	5837.5±17.68	6150.0±35.36
22	2412.5±53.03	4325.0±70.71	5637.5±35.36	7537.5±53.03
25	3012.5±53.03	4575.0±35.36	6175.0±70.71	6712.5±53.03
30	4700.0±35.36	4750.0±70.71	6137.5±88.39	7512.5±88.39
34	3962.5±53.03	4875.0±35.36	5812.5±53.03	6937.5±53.03
38	4725.0±35.36	5050.0±70.71	6412.5±88.39	7662.5±53.03
40	4887.5±17.68	5612.5±53.03	5700.0±70.71	6287.5±1007.63
วันที่	30hr20%	30hr40%	30hr60%	30hr80%
1	3162.5±53.03	3550.0±35.36	3775.0±70.71	4512.5±17.68
2	3300.0±70.71	3662.5±53.03	3887.5±17.68	4600.0±35.36
6	4625.0±70.71	5312.5±53.03	5912.5±88.39	6675.0±35.36
14	4150.0±35.36	5050.0±70.71	5537.5±53.03	5887.5±17.68
18	3850.0±35.36	4700.0±70.71	5900.0±35.36	7300.0±70.71
22	4462.5±17.68	4487.5±53.03	4925.0±70.71	6812.5±53.03
25	3862.5±88.39	5287.5±88.39	6137.5±53.03	7025.0±70.71
30	4012.5±53.03	5162.5±53.03	6325.0±70.71	6862.5±17.68
34	3725.0±35.36	4675.0±70.71	5312.5±53.03	5950.0±35.36
38	4075.0±70.71	5000.0±35.36	5937.5±53.03	7812.5±53.03
40	4350.0±70.71	4475.0±35.36	5612.5±17.68	7550.0±70.71

ตารางที่ ข-4 ความเป็นต่างในสภาวะการทดลองต่าง ๆ (ต่อ)

วันที่	ความเป็นต่าง (มก./ล.แคลเซียมคาร์บอเนต)			
	36hr20%	36hr40%	36hr60%	36hr80%
1	2550.0±35.36	3437.5±53.03	3475.0±35.36	4337.5±53.03
2	2787.5±17.68	3625.0±70.71	3675.0±35.36	4562.5±17.68
6	4687.5±17.68	5087.5±53.03	5750.0±35.36	6175.0±70.71
14	4587.5±53.03	4650.0±70.71	4875.0±70.71	5650.0±35.36
18	3412.5±53.03	3887.5±53.03	4612.5±53.03	6462.5±17.68
22	4200.0±35.36	4262.5±53.03	4400.0±70.71	6337.5±53.03
25	4600.0±35.36	5000.0±35.36	5437.5±53.03	6900.0±70.71
30	4200.0±70.71	4700.0±70.71	5325.0±70.71	5912.5±53.03
34	4175.0±35.36	4362.5±17.68	5587.5±53.03	6800.0±70.71
38	4200.0±35.36	4875.0±70.71	5287.5±17.68	6150.0±35.36
40	4000.0±70.71	4712.5±88.39	5487.5±53.03	6425.0±70.71
วันที่	ชุดควบคุม (มูลโค)			
1	1712.5±53.03			
2	1850.0±35.36			
6	3337.5±53.03			
14	4325.0±70.71			
18	6300.0±35.36			
22	7325.0±70.71			
25	4500.0±70.71			
30	3837.5±53.03			
34	3900.0±70.71			
38	4325.0±35.36			
40	4150.0±35.36			

ตารางที่ ข-5 ความเป็นกรดต่างในสภาวะการทดลองต่าง ๆ

สภาวะ การ ทดลอง	วันที่										
	1	2	6	14	18	22	25	30	34	38	40
6hr20%	8.14	7.51	6.5	6.82	6.81	6.68	6.72	6.69	6.69	6.70	6.77
6hr40%	7.94	7.47	6.58	6.77	6.89	6.83	6.89	6.93	6.9	6.82	6.81
6hr60%	8.13	7.38	6.62	6.88	6.90	6.95	7.00	6.99	6.96	6.94	6.91
6hr80%	8.1	7.17	6.66	6.93	6.98	7.08	7.06	7.05	7.03	7.11	7.09
18hr20%	8.06	7.46	6.52	6.97	6.85	6.83	6.83	6.82	6.9	6.78	6.8
18hr40%	7.86	7.45	6.56	6.88	6.88	6.84	6.87	6.95	6.91	6.78	6.86
18hr60%	7.78	7.48	6.62	6.9	6.94	6.93	6.95	7.02	6.96	7.01	6.86
18hr80%	8.21	7.32	6.64	6.98	6.91	7.04	7.05	7.04	6.99	7.07	7.01
24hr20%	8.16	7.01	6.54	6.95	6.94	6.82	6.83	6.81	6.9	6.83	6.77
24hr40%	7.95	6.97	6.58	6.89	6.92	6.91	6.9	6.94	6.89	6.86	6.81
24hr60%	8.15	7.03	6.63	6.95	6.97	7.01	7.00	7.00	7.04	6.98	7.03
24hr80%	8.08	7.02	6.65	6.98	7.03	7.06	7.09	7.11	7.14	7.06	7.04
30hr20%	8.12	7.08	6.56	6.78	6.75	6.85	6.84	6.82	6.76	6.71	6.83
30hr40%	7.99	6.95	6.59	6.77	6.84	6.93	6.88	6.9	6.86	6.87	6.83
30hr60%	8.09	6.93	6.63	6.93	6.98	6.98	7.01	7.02	7.04	6.95	6.99
30hr80%	8.06	7.2	6.66	6.97	6.92	7.08	7.12	7.05	7.09	7.14	7.07
36hr20%	8.24	7.15	6.58	6.95	6.91	6.88	6.82	6.83	6.82	6.81	6.78
36hr40%	8.16	7.5	6.57	6.84	6.89	6.87	6.88	6.87	6.82	6.82	6.77
36hr60%	8.19	7.4	6.62	6.93	6.93	6.93	6.91	6.93	6.86	6.81	6.81
36hr80%	8.11	7.38	6.67	6.96	6.98	7.03	6.99	7.07	7.02	7.06	6.92
ชุด ควบคุม (มุลโค)	7.76	6.67	6.61	6.66	6.76	6.92	6.95	7.05	7.11	7.06	7.04

ตารางที่ ข-6 ความต่างศักย์ออกซิเดชันรีดักชันในสภาวะการทดลองต่าง ๆ

สภาวะการทดลอง	วันที่										
	1	2	6	14	18	22	25	30	34	38	40
6hr20%	-238	-242	-246	-242	-250	-249	-247	-252	-244	-250	-258
6hr40%	-241	-243	-239	-246	-249	-244	-249	-256	-259	-257	-261
6hr60%	-250	-252	-246	-255	-259	-261	-258	-255	-262	-259	-260
6hr80%	-256	-260	-262	-269	-271	-270	-272	-267	-265	-288	-277
18hr20%	-232	-230	-232	-231	-240	-243	-249	-244	-246	-249	-261
18hr40%	-243	-239	-236	-245	-250	-239	-253	-247	-252	-248	-265
18hr60%	-251	-258	-270	-264	-260	-278	-270	-265	-270	-263	-289
18hr80%	-277	-265	-279	-266	-272	-280	-282	-275	-280	-316	-320
24hr20%	-236	-231	-229	-233	-237	-230	-240	-238	-240	-246	-260
24hr40%	-241	-253	-249	-252	-254	-250	-253	-259	-254	-253	-260
24hr60%	-262	-261	-260	-262	-266	-258	-273	-264	-269	-270	-284
24hr80%	-285	-277	-308	-272	-330	-276	-305	-299	-281	-313	-354
30hr20%	-240	-230	-232	-244	-257	-235	-228	-239	-240	-246	-259
30hr40%	-249	-242	-249	-255	-260	-258	-250	-251	-246	-259	-260
30hr60%	-262	-247	-256	-284	-270	-284	-279	-284	-268	-272	-288
30hr80%	-277	-275	-282	-313	-287	-343	-299	-322	-326	-319	-308
36hr20%	-228	-224	-236	-237	-230	-238	-241	-239	-244	-240	-258
36hr40%	-249	-248	-254	-258	-259	-266	-251	-270	-253	-253	-258
36hr60%	-250	-259	-267	-253	-281	-275	-280	-289	-275	-268	-264
36hr80%	-269	-275	-264	-289	-305	-310	-299	-303	-308	-314	-333
ชุดควบคุม (มูลโค)	-210	-218	-235	-234	-226	-208	-215	-227	-237	-220	-227

ตารางที่ ข-7 อุณหภูมิสภาพแวดล้อม

วันที่	อุณหภูมิ(องศาเซลเซียส)
2	31.5
4	30.6
6	28.9
8	26.3
14	30.9
16	30.7
18	30.9
22	29.2
24	29.9
26	29.9
25	29.8
30	30
32	30.3
34	30.8
36	30.9
38	31.2
40	30.4

ตารางที่ ข-8 อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพในสภาวะการทดลองต่างๆ

วันที่	อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ (มล./ก.ของแข็งระเหย)			
	6hr20%	6hr40%	6hr60%	6hr80%
1	0±0	0±0	0±0	0±0
2	2.76±0.27	3.37±0.09	3.91±0.36	3.60±0.18
6	3.60±0.62	5.36±0.71	9.34±0.18	9.50±0.36
14	15.47±0.18	18.15±0.80	19.15±0.53	19.84±0.62
18	10.26±0.36	11.87±0.62	13.56±0.44	18.61±0.44
22	4.67±0.09	7.58±0.09	9.34±0.18	12.33±0.44
25	8.73±1.07	13.48±0.36	9.65±0.53	8.58±0.36
30	8.65±0.18	6.43±0.44	7.12±0.89	6.05±0.89
34	5.28±0.44	3.68±1.07	7.43±0.98	8.50±0.09
38	6.36±0.44	7.81±0.36	9.96±0.18	11.79±0.36
40	7.35±1.33	5.05±0.27	6.59±0.27	5.74±0.36
วันที่	18hr20%	18hr40%	18hr60%	18hr80%
1	0±0	0±0.00	0±0	0±0
2	1.23±0.09	1.30±0.18	4.98±0.18	3.68±0.27
6	3.68±0.53	3.29±1.15	10.65±0.44	14.24±0.44
14	17.08±0.62	19.22±0.27	22.06±0.71	25.12±0.18
18	11.33±0.71	12.41±0.89	14.70±1.78	17.16±0.62
22	8.04±0.44	8.73±0.18	6.43±0.71	7.89±0.44
25	6.82±0.44	8.50±0.09	10.34±0.09	9.88±0.36
30	7.20±0.98	7.81±0.44	6.28±0.80	9.42±0.36
34	6.20±0.09	6.66±0.62	6.43±0.36	10.80±1.15
38	7.96±0.18	9.88±0.27	9.04±0.36	7.05±0
40	8.35±0.18	7.35±0.09	8.12±0.27	6.66±0.18

ตารางที่ ข-8 อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพในสภาวะการทดลองต่างๆ (ต่อ)

วันที่	อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ (มล./ก.ของแข็งระเหย)			
	24hr20%	24hr40%	24hr60%	24hr80%
1	0±0	0±0	0±0	0±0
2	3.91±0.18	4.14±0.09	5.59±0.71	4.82±0
6	13.86±0.62	13.94±0.71	16.93±0.09	20.45±0.62
14	22.67±0.71	23.82±0.62	26.73±0.44	29.03±0.62
18	11.72±0.09	11.79±0.53	14.86±0.71	19.45±0.36
22	4.67±0.27	7.96±1.07	8.58±0.53	14.78±0.09
25	3.45±0.62	6.82±0.62	9.11±0.80	3.68±1.42
30	4.44±0.98	2.60±0.27	6.20±0.36	4.60±0.27
34	2.99±0.09	5.05±0.71	5.82±0.71	13.10±0.44
38	6.36±0.44	5.90±0.09	8.04±0.09	8.50±2.22
40	6.43±0.62	5.90±0.36	5.82±0.44	5.44±0.18
วันที่	30hr20%	30hr40%	30hr60%	30hr80%
1	0±0	0±0	0±0	0±0
2	1.91±0.18	2.22±0.36	2.37±0.53	3.06±0.09
6	1.15±0.44	11.87±0.44	13.57±0.28	15.70±0.98
14	16.47±0.09	16.62±0.44	17.77±0.71	21.60±0.18
18	12.71±0.71	13.25±0.27	14.40±0.18	19.84±1.51
22	6.13±0.18	6.89±0.18	8.65±0.09	10.42±0.36
25	9.42±0.62	4.75±0.36	11.72±0.62	7.28±0.44
30	4.67±0.36	9.19±0.80	6.97±0.18	7.81±0.09
34	2.30±0.53	12.56±0.18	10.26±0.53	14.24±0.53
38	5.67±0.36	4.98±0.27	5.59±0.09	8.65±0.09
40	5.74±0.36	4.60±0.09	6.97±0.09	4.60±0.09

ตารางที่ ข-8 อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพในสภาวะการทดลองต่าง ๆ (ต่อ)

วันที่	อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ (มล./ก.ของแข็งระเหย)			
	36hr20%	36hr40%	36hr60%	36hr80%
1	0±0	0±0	0±0	0±0
2	0.84±0.18	1.30±0	1.46±0	3.14±0
6	1.15±0.09	1.15±0.62	10.49±0.27	10.42±0.89
14	5.97±0.53	16.24±0.36	16.08±0.89	19.22±0.09
18	1.99±0.36	8.04±0.62	7.12±0.44	7.28±0.62
22	6.51±0.09	7.96±0.71	4.67±0.80	7.89±0.09
25	6.28±0.44	5.59±0.62	8.96±0.09	14.86±0.18
30	4.98±0.18	4.67±0.53	8.81±0.36	10.11±0.44
34	5.51±0.36	6.28±0.36	5.44±0.09	7.81±0
38	6.82±0.62	3.83±0.36	5.59±0.62	5.97±0.71
40	6.13±0.09	7.05±0.44	6.97±0.18	4.44±0.27
วันที่	ชุดควบคุม (มูลโค)			
1	0±0			
2	1.15±0.27			
6	4.44±0.53			
14	11.95±0.53			
18	14.55±0.89			
22	11.33±0.18			
25	11.03±0.71			
30	11.56±0.27			
34	11.03±0			
38	8.73±0.53			
40	6.20±0.09			

ตารางที่ ข-9 ก๊าซชีวภาพสะสมในสภาวะการทดลองต่าง ๆ

วันที่	ก๊าซชีวภาพสะสม (มล./ก.ของแข็งระเหย)							
	6hr20%	6hr40%	6hr60%	6hr80%	18hr20%	18hr40%	18hr60%	18hr80%
1	0	0	0	0	0	0	0	0
2	2.76	3.37	3.91	3.60	1.23	1.30	4.98	3.68
6	6.36	8.73	13.25	13.10	4.90	4.60	15.62	17.92
14	21.83	26.88	32.40	32.93	21.98	23.82	37.68	43.04
18	32.09	38.75	45.95	51.54	33.31	36.22	52.38	60.20
22	36.76	46.33	55.29	63.87	41.36	44.96	58.82	68.08
25	45.49	59.81	64.94	72.45	48.17	53.46	69.16	77.96
30	54.15	66.25	72.07	78.50	55.37	61.27	75.44	87.38
34	59.43	69.92	79.50	87.00	61.57	67.93	81.87	98.18
38	65.79	77.73	89.45	98.80	69.54	77.81	90.91	105.23
40	73.14	82.79	96.04	104.54	77.89	85.16	99.02	111.89
วันที่	24hr2%	24hr20%	24hr20%	24hr20%	30hr20%	30hr20%	30hr20%	30hr20%
1	0	0	0	0	0	0	0	0
2	3.91	4.14	5.59	4.82	1.91	2.22	2.37	3.06
6	17.77	18.07	22.52	25.27	3.06	14.09	15.95	18.76
14	40.44	41.89	49.24	54.30	19.53	30.71	33.71	40.36
18	52.15	53.69	64.10	73.75	32.24	43.96	48.11	60.20
22	56.83	61.65	72.68	88.53	38.37	50.85	56.77	70.61
25	60.27	68.47	81.79	92.21	47.79	55.60	68.48	77.89
30	64.71	71.07	88.00	96.80	52.46	64.79	75.45	85.70
34	67.70	76.13	93.82	109.90	54.76	77.35	85.71	99.94
38	74.06	82.02	101.86	118.40	60.43	82.33	91.31	108.60
40	80.49	87.92	107.68	123.84	66.17	86.92	98.27	113.19

ตารางที่ ข-9 ก๊าซชีวภาพสะสมในสภาวะการทดลองต่าง ๆ (ต่อ)

วันที่	ก๊าซชีวภาพสะสม (มล./ก.ของแข็งระเหย)				ชุดควบคุม (มูลโค)
	36hr20%	36hr40%	36hr60%	36hr80%	
1	0	0	0	0	0
2	0.84	1.30	1.46	3.14	1.15
6	1.99	2.45	11.95	13.56	5.59
14	7.96	18.69	28.03	32.78	17.54
18	9.96	26.73	35.15	40.05	32.09
22	16.47	34.69	39.82	47.94	43.42
25	22.75	40.28	48.78	62.80	54.45
30	27.72	44.96	57.59	72.91	66.02
34	33.24	51.24	63.03	80.72	77.04
38	40.05	55.06	68.62	86.69	85.78
40	46.18	62.11	75.59	91.14	91.98

2. วัตถุประสงค์ขนาด 5-10 มิลลิเมตร

ตารางที่ ข-11 ของแข็งทั้งหมดและของแข็งระเหยในสภาวะการทดลองต่างๆ

สภาวะการทดลอง	ของแข็งทั้งหมด (ร้อยละ)		ของแข็งระเหย(ร้อยละ)	
	เริ่มต้น	สิ้นสุด	เริ่มต้น	สิ้นสุด
6h20%	19.30±8.89	10.62±4.86	12.66±2.69	8.53±7.65
6hr40%	13.39±0.02	9.33±2.28	10.44±1.80	6.25±1.76
6hr60%	16.13±5.83	11.41±5.70	14.32±5.81	9.74±5.01
6hr80%	15.13±1.54	12.43±1.71	12.23±0	6.31±5.55
18hr20%	14.88±5.46	9.73±2.62	10.55±2.96	6.38±6.58
18hr40%	29.74±6.64	9.25±2.81	12.67±1.14	8.14±2.40
18hr60%	18.56±8.86	9.70±2.09	13.12±3.81	7.22±1.27
18hr80%	14.64±0.46	11.76±6.69	10.61±2.36	4.54±2.50
24hr20%	25.39±14.89	15.18±10.18	12.91±5.56	7.82±8.78
24hr40%	22.85±16.30	14.27±4.99	11.01±3.36	5.29±6.19
24hr60%	21.02±11.69	13.41±5.00	14.78±6.87	8.25±1.52
24hr80%	19.55±1.43	10.60±0.21	13.23±0.83	6.56±2.05
30hr20%	21.11±7.76	18.18±4.39	17.60±10.07	12.58±4.84
30hr40%	21.06±0.43	16.56±1.31	15.40±4.39	9.45±2.82
30hr60%	18.94±7.47	16.26±3.54	15.40±6.26	9.02±0.71
30hr80%	15.17±1.13	9.07±1.86	11.43±1.03	4.57±1.24
36hr20%	17.18±1.54	13.56±0.10	11.98±1.25	7.22±3.53
36hr40%	18.34±4.19	14.61±1.87	11.93±2.27	6.40±1.11
36hr60%	15.37±0.84	10.41±1.30	11.82±1.00	6.25±0.66
36hr80%	20.29±7.20	14.26±5.51	13.47±2.71	7.21±3.09

ตารางที่ ข-12 ซีโอดีละลายในสภาวะการทดลองต่าง ๆ

วันที่	ซีโอดีละลาย (มก./ล.)			
	6hr20%	6hr40%	6hr60%	6hr80%
1	960±113.14	1080±56.57	1120±113.14	1240±56.57
4	4800±565.69	5400±282.84	5600±0	5000±282.84
8	5000±282.84	5600±0	7200±565.69	8000±1131.37
11	2600±282.84	3600±565.69	4600±282.84	8800±0
14	2000±565.69	3600±565.69	4400±565.69	5600±1131.37
18	2400±565.69	3800±282.84	4200±282.84	9200±565.69
22	800±0	1200±565.69	2000±565.69	3600±565.69
25	2000±565.69	3600±565.69	4400±565.69	5600±1131.37
29	1800±282.84	2800±565.69	2600±282.84	8000±0
33	2200±282.84	3200±565.69	3800±282.84	5600±0
36	1800±282.84	2800±565.69	3800±282.84	7600±565.69
40	1600±565.69	2800±1131.37	3200±565.69	4400±1131.37
วันที่	18hr20%	18hr40%	18hr60%	18hr80%
1	1240±56.57	1120±0	1320±56.57	1600±113.14
4	5200±565.69	5400±282.84	6200±282.84	9600±565.69
8	4200±282.84	5400±282.84	7200±565.69	12400±2828.43
11	2200±282.84	3800±282.84	4800±0	8400±565.69
14	2000±565.69	4400±565.69	4800±1131.37	6000±565.69
18	3800±282.84	3600±565.69	4200±282.84	10800±565.69
22	1600±1131.37	2000±565.69	2800±1697.06	3600±565.69
25	1600±0	3600±565.69	5200±565.69	5600±0
29	2200±282.84	3600±565.69	4000±565.69	8800±0
33	2600±282.84	3400±282.84	4200±282.84	8400±565.69
36	2600±282.84	3200±0	2600±282.84	7600±565.69
40	1600±565.69	2400±565.69	3200±565.69	3600±1131.37

ตารางที่ ข-12 ซีโอดีละลายในสภาวะการทดลองต่าง ๆ (ต่อ)

วันที่	ซีโอดีละลาย (มก./ล.)			
	24hr20%	24hr40%	24hr60%	24hr80%
1	1240±56.57	1480±56.57	1640±56.57	1720±56.57
4	5000±282.84	5400±282.84	6800±282.84	8400±565.69
8	5200±0	6400±565.69	7400±282.84	12800±1131.37
11	3000±282.84	4200±282.84	5800±282.84	10400±1131.37
14	3600±565.69	4400±1697.06	4800±0	6000±1697.06
18	4000±0	4600±282.84	6000±565.69	10000±565.69
22	1600±1131.37	2400±1131.37	3600±565.69	4400±565.69
25	2400±1131.37	3200±0	4400±565.69	4800±1131.37
29	2600±282.84	3600±565.69	5000±282.84	8800±1131.37
33	2000±0	2800±565.69	3800±282.84	8800±0
36	3000±282.84	3200±565.69	3000±282.84	7200±1131.37
40	2400±565.69	2400±565.69	3600±565.69	4000±565.69
วันที่	30hr20%	30hr40%	30hr60%	30hr80%
1	1480±169.71	1680±0	1800±56.57	2080±113.14
4	5000±282.84	5800±282.84	6200±282.84	9000±282.84
8	5400±282.84	6800±565.69	7800±282.84	8800±1131.37
11	2400±565.69	4600±282.84	6000±565.69	9200±565.69
14	2000±565.69	5200±565.69	5600±1131.37	6400±1131.37
18	4800±0	5400±282.84	4800±0	12400±565.69
22	2400±1131.37	2800±565.69	4800±1131.37	5200±565.69
25	1600±0	2800±565.69	3600±565.69	5200±565.69
29	2000±0	4200±282.84	5400±282.84	8400±565.69
33	2600±282.84	3200±565.69	4000±565.69	7600±565.69
36	2200±282.84	3000±282.84	3800±282.84	6800±565.69
40	2400±565.69	3200±565.69	4800±565.69	5200±1131.37

ตารางที่ ข-12 ซีไอดีละลายในสภาวะการทดลองต่าง ๆ (ต่อ)

วันที่	ซีไอดีละลาย (มก./ล.)			
	36hr20%	36hr40%	36hr60%	36hr80%
1	1480±56.57	1680±0	1720±56.57	1760±113.14
4	5000±282.84	5800±848.53	6600±282.84	8000±565.69
8	5600±565.69	6200±282.84	7200±565.69	12400±565.69
11	4200±282.84	5600±0	4200±282.84	12000±1131.37
14	3600±565.69	5200±565.69	4400±565.69	6800±565.69
18	5000±282.84	6000±565.69	6000±565.69	8800±1131.37
22	1200±565.69	2800±565.69	4800±1131.37	5200±565.69
25	2000±565.69	2800±565.69	3200±1131.37	5600±1131.37
29	2800±565.69	3800±282.84	5200±565.69	8800±1131.37
33	3000±282.84	4000±565.69	4200±282.84	9200±565.69
36	2400±565.69	3200±565.69	4000±0	9600±1131.37
40	1200±0	1600±565.69	2800±0	4000±565.69

ตารางที่ ข-13 กรดอินทรีย์ระเหยในสภาวะการทดลองต่าง ๆ

วันที่	กรดอินทรีย์ระเหย (มก./ล. กรดอะซิติก)			
	6hr20%	6hr40%	6hr60%	6hr80%
1	787.5±17.68	837.5±17.68	962.5±53.03	1125.0±70.71
4	850.0±35.36	900.0±35.36	1025.0±35.36	1112.5±17.68
8	1125.0±212.13	1037.5±53.03	1150.0±35.36	1275.0±35.36
11	1050.0±282.84	1000.0±0	1050.0±35.36	1237.5±17.68
14	912.5±17.68	962.5±53.03	1062.5±53.03	1175.0±35.36
18	887.5±88.39	962.5±53.03	1037.5±17.68	1187.5±17.68
22	787.5±53.03	825.0±0	987.5±53.03	1125.0±106.07
25	700.0±70.71	775.0±35.36	850.0±0	987.5±17.68
29	700.0±70.71	750.0±70.71	887.5±53.03	1025.0±35.36
33	687.5±17.68	712.5±53.03	825.0±70.71	975.0±0
36	662.5±53.03	737.5±17.68	837.5±53.03	975.0±35.36
40	687.5±53.03	750.0±35.36	850.0±70.71	987.5±17.68

ตารางที่ ข-13 กรดอินทรีย์ระเหยในสภาวะการทดลองต่าง ๆ (ต่อ)

วันที่	กรดอินทรีย์ระเหย (มก./ล. กรดอะซิติก)			
	18hr20%	18hr40%	18hr60%	18hr80%
1	850.0±70.71	925.0±141.42	1012.5±123.74	1150.0±141.42
4	975.0±35.36	1037.5±53.03	1150.0±70.71	1262.5±17.68
8	1212.5±53.03	1312.5±88.39	1362.5±123.74	1475.0±141.42
11	1012.5±53.03	1050.0±70.71	1162.5±123.74	1287.5±53.03
14	937.5±17.68	1012.5±88.39	1150.0±106.07	1225.0±35.36
18	937.5±17.68	1037.5±53.03	1125.0±35.36	1262.5±17.68
22	887.5±88.39	962.5±53.03	1087.5±53.03	1225.0±70.71
25	1087.5±53.03	1150.0±0	1250.0±70.71	1387.5±53.03
29	812.5±17.68	850.0±35.36	1000.0±106.07	1125.0±70.71
33	737.5±53.03	787.5±17.68	900.0±35.36	1037.5±17.68
36	725.0±35.36	787.5±53.03	900.0±70.71	1000.0±70.71
40	712.5±53.03	787.5±53.03	900.0±35.36	1025.0±35.36
วันที่	24hr20%	24hr40%	24hr60%	24hr80%
1	1075.0±35.36	1037.5±53.03	1225.0±106.07	1450.0±70.71
4	1287.5±17.68	1312.5±17.68	1387.5±17.68	1562.5±229.81
8	1337.5±53.03	1400.0±35.36	1512.5±123.74	1600.0±35.36
11	1087.5±53.03	1125.0±35.36	1287.5±17.68	1325.0±106.07
14	1062.5±88.39	1100.0±35.36	1300.0±35.36	1362.5±53.03
18	1062.5±17.68	1137.5±53.03	1175.0±106.07	1312.5±88.39
22	950.0±70.71	1012.5±17.68	1200.0±141.42	1337.5±123.74
25	1100.0±35.36	1162.5±159.10	1362.5±53.03	1475.0±35.36
29	1087.5±88.39	1175.0±35.36	1300.0±53.03	1425.0±35.36
33	825.0±70.71	862.5±17.68	1012.5±17.68	1125.0±0
36	887.5±53.03	962.5±53.03	1075.0±35.36	1212.5±53.03
40	762.5±53.03	800.0±0	912.5±53.03	1050.0±35.36

ตารางที่ ข-14 กรดอินทรีย์ระเหยในสภาวะการทดลองต่าง ๆ (ต่อ)

วันที่	กรดอินทรีย์ระเหย (มก./ล. กรดอะซิติก)			
	30hr20%	30hr40%	30hr60%	30hr80%
1	850.0±106.07	887.5±53.03	962.5±53.03	1112.5±17.68
4	862.5±17.68	925.0±106.07	1025.0±35.36	1150.0±35.36
8	1125.0±35.36	1200.0±35.36	1325.0±106.07	1462.5±53.03
11	950.0±70.71	1037.5±17.68	1137.5±53.03	1250.0±106.07
14	912.5±17.68	1025.0±35.36	1125.0±35.36	1212.5±88.39
18	912.5±17.68	1025.0±35.36	1075.0±35.36	1200.0±35.36
22	812.5±17.68	875.0±70.71	975.0±70.71	1112.5±53.03
25	937.5±17.68	1012.5±88.39	1125.0±53.03	1275.0±106.07
29	775.0±35.36	812.5±17.68	987.5±70.71	1087.5±53.03
33	725.0±70.71	787.5±17.68	875.0±35.36	1012.5±53.03
36	700.0±70.71	737.5±17.68	825.0±0	975.0±35.36
40	700.0±35.36	737.5±17.68	900.0±35.36	1037.5±17.68
วันที่	36hr20%	36hr40%	36hr60%	36hr80%
1	787.5±17.68	800.0±0	962.5±53.03	950.0±70.71
4	812.5±53.03	875.0±35.36	975.0±35.36	1050.0±70.71
8	1000.0±35.36	1037.5±123.74	1187.5±17.68	1262.5±88.39
11	837.5±17.68	887.5±53.03	1025.0±35.36	1087.5±53.03
14	837.5±17.68	900.0±70.71	987.5±53.03	1125.0±35.36
18	775.0±35.36	800.0±35.36	987.5±17.68	1037.5±17.68
22	737.5±123.74	787.5±17.68	887.5±53.03	1012.5±53.03
25	662.5±53.03	737.5±123.74	912.5±53.03	1037.5±53.03
29	662.5±53.03	737.5±17.68	875.0±70.71	1012.5±88.39
33	650.0±35.36	700.0±70.71	812.5±88.39	950.0±70.71
36	662.5±53.03	700.0±70.71	737.5±123.74	850.0±141.42
40	637.5±17.68	725.0±70.71	837.5±53.03	975.0±70.71

ตารางที่ ข-15 ความเป็นต่างในสภาวะการทดลองต่าง ๆ

วันที่	ความเป็นต่าง (มก./ล.แคลเซียมคาร์บอเนต)			
	6hr20%	6hr40%	6hr60%	6hr80%
1	2625.0±35.36	3412.5±53.03	3850.0±70.71	3862.5±88.39
4	2937.5±53.03	3525.0±35.36	3975.0±70.71	4662.5±17.68
8	4325.0±35.36	5100.0±70.71	5837.5±88.39	6375.0±70.71
11	3975.0±35.36	4625.0±35.36	5662.5±53.03	6575.0±70.71
14	3887.5±88.39	4350.0±0	5787.5±17.68	6125.0±106.07
18	3112.5±88.39	4537.5±17.68	5375.0±106.07	6275.0±70.71
22	3125.0±35.36	4687.5±88.39	4850.0±70.71	5087.5±53.03
25	2662.5±53.03	4050.0±0	5637.5±17.68	6850.0±35.36
29	4450.0±35.36	5112.5±53.03	5600.0±70.71	6987.5±53.03
33	4137.5±53.03	5387.5±53.03	5600.0±35.36	6100.0±35.36
36	3525.0±35.36	4875.0±35.36	5087.5±53.03	6012.5±53.03
40	2837.5±17.68	4525.0±176.78	5262.5±88.39	6900.0±70.71
วันที่	18hr20%	18hr40%	18hr60%	18hr80%
1	2950.0±70.71	3100.0±35.36	4000.0±106.07	4412.5±53.03
4	3337.5±53.03	3900.0±35.36	4412.5±17.68	5012.5±17.68
8	3812.5±17.68	4612.5±88.39	5300.0±35.36	5837.5±88.39
11	3975.0±0	4875.0±70.71	5912.5±88.39	6825.0±70.71
14	3812.5±53.03	4575.0±70.71	4900.0±106.07	6112.5±88.39
18	3375.0±106.07	4337.5±88.39	5537.5±88.39	5925.0±35.36
22	4112.5±17.68	4337.5±53.03	5150.0±35.36	5350.0±70.71
25	3587.5±53.03	3625.0±70.71	3887.5±123.74	5050.0±0
29	4275.0±35.36	5312.5±53.03	6675.0±35.36	7112.5±53.03
33	4025.0±35.36	6100.0±35.36	5312.5±53.03	6650.0±70.71
36	3650.0±35.36	5550.0±35.36	4912.5±53.03	6687.5±17.68
40	3887.5±88.39	4287.5±53.03	4575.0±35.36	5337.5±17.68

ตารางที่ ข-15 ความเป็นต่างในสภาวะการทดลองต่าง ๆ (ต่อ)

วันที่	ความเป็นต่าง (มก./ล.แคลเซียมคาร์บอเนต)			
	24hr20%	24hr40%	24hr60%	24hr80%
1	2825.0±35.36	3175.0±106.07	3475.0±176.78	4112.5±53.03
4	3425.0±35.36	3825.0±35.36	4087.5±17.68	4637.5±88.39
8	3987.5±17.68	4962.5±53.03	5350.0±35.36	5687.5±17.68
11	4075.0±35.36	4837.5±53.03	5887.5±53.03	7062.5±53.03
14	3312.5±53.03	4837.5±17.68	5062.5±17.68	6100.0±70.71
18	3737.5±88.39	3962.5±17.68	4612.5±88.39	5612.5±17.68
22	2175.0±35.36	4100.0±35.36	5612.5±17.68	7137.5±88.39
25	2587.5±88.39	4175.0±70.71	5687.5±53.03	6350.0±35.36
29	4100.0±70.71	5012.5±53.03	6150.0±53.03	7250.0±35.36
33	3862.5±53.03	3950.0±70.71	4950.0±35.36	6950.0±70.71
36	3400.0±35.36	3737.5±17.68	4387.5±53.03	7375.0±35.36
40	4600.0±70.71	5100.0±70.71	5300.0±35.36	5825.0±0
วันที่	30hr20%	30hr40%	30hr60%	30hr80%
1	3075.0±141.42	3300.0±35.36	3612.5±53.03	3825.0±35.36
4	3425.0±35.36	3700.0±35.36	4237.5±53.03	4362.5±53.03
8	3987.5±53.03	4575.0±35.36	5637.5±53.03	6412.5±17.68
11	4212.5±17.68	5062.5±53.03	5900.0±35.36	7062.5±17.68
14	3612.5±88.39	4862.5±53.03	5137.5±53.03	5375.0±0
18	3650.0±35.36	4112.5±88.39	5312.5±70.71	6825.0±35.36
22	4112.5±88.39	4300.0±35.36	4600.0±17.68	6625.0±70.71
25	3575.0±35.36	4887.5±123.74	5612.5±53.03	6475.0±70.71
29	4212.5±17.68	5100.0±35.36	6062.5±53.03	7587.5±53.03
33	4225.0±70.71	4900.0±35.36	5437.5±35.36	6362.5±53.03
36	3812.5±88.39	4612.5±88.39	5025.0±35.36	7700.0±35.36
40	4087.5±88.39	3825.0±35.36	5100.0±35.36	7150.0±70.71

ตารางที่ ข-16 ความเป็นต่างในสภาวะการทดลองต่าง ๆ (ต่อ)

วันที่	ความเป็นต่าง (มก./ล.แคลเซียมคาร์บอเนต)			
	36hr20%	36hr40%	36hr60%	36hr80%
1	2425.0±70.71	3362.5±17.68	3462.5±17.68	4187.5±53.03
4	3475.0±35.36	3912.5±53.03	4337.5±53.03	4637.5±53.03
8	4062.5±53.03	4625.0±70.71	5625.0±35.36	5712.5±17.68
11	4312.5±53.03	5337.5±17.68	6375.0±70.71	7137.5±88.39
14	4312.5±17.68	4487.5±17.68	4575.0±70.71	5062.5±53.03
18	2850.0±35.36	3137.5±53.03	4387.5±17.68	5125.0±70.71
22	3675.0±70.71	3862.5±88.39	4075.0±70.71	5837.5±17.68
25	4125.0±106.07	4700.0±70.71	5137.5±123.74	6550.0±0
29	4400.0±70.71	5675.0±35.36	5887.5±88.39	7925.0±35.36
33	4625.0±35.36	4875.0±35.36	4587.5±53.03	5562.5±53.03
36	3812.5±53.03	4387.5±88.39	4875.0±35.36	7650.0±106.07
40	3600.0±70.71	4300.0±0	5087.5±53.03	5937.5±53.03

ตารางที่ ข-17 ความเป็นกรดต่างในสภาวะการทดลองต่าง ๆ

สภาวะการทดลอง	วันที่											
	1	4	8	11	14	18	22	25	29	33	36	40
6hr20%	8.15	6.53	6.78	6.72	6.70	6.74	6.84	6.74	6.76	6.79	6.88	6.75
6hr40%	8.04	6.56	6.84	6.83	6.87	6.89	6.86	6.81	6.83	6.88	6.91	6.90
6hr60%	8.03	6.52	6.89	6.81	6.94	6.92	6.98	6.94	6.96	6.98	6.95	6.98
6hr80%	8.23	6.55	6.90	6.99	7.00	7.07	7.02	7.03	7.01	7.04	7.07	7.09
18hr20%	8.10	6.52	6.77	6.72	6.83	6.77	6.80	6.78	6.83	6.90	6.81	6.88
18hr40%	8.19	6.52	6.83	6.89	6.77	6.83	6.87	6.82	6.84	6.92	6.91	6.92
18hr60%	8.16	6.58	6.84	6.91	6.88	6.95	6.91	6.97	6.92	6.99	7.01	7.00
18hr80%	8.25	6.60	6.81	6.95	6.92	7.06	7.02	7.03	7.05	7.06	7.09	7.06
24hr20%	8.17	6.48	6.71	6.84	6.81	6.81	6.83	6.76	6.76	6.85	6.88	6.85
24hr40%	8.23	6.54	6.79	6.89	6.85	6.97	6.92	6.82	6.88	6.93	6.92	6.91
24hr60%	8.21	6.57	6.87	6.92	6.93	7.05	7.04	6.95	6.96	7.01	6.98	7.00
24hr80%	8.25	6.59	6.91	6.98	7.01	7.02	7.08	7.03	7.05	7.12	7.09	7.05
30hr20%	8.03	6.54	6.74	6.81	6.75	6.78	6.79	6.82	6.76	6.80	6.87	6.81
30hr40%	8.27	6.58	6.80	6.92	6.88	6.82	6.84	6.97	6.88	6.94	6.92	6.93

ตารางที่ ข-17 ความเป็นกรดต่างในสภาวะการทดลองต่าง ๆ (ต่อ)

สภาวะการทดลอง	วันที่											
	1	4	8	11	14	18	22	25	29	33	36	40
30hr60%	8.22	6.59	6.87	6.98	6.92	6.98	6.97	6.93	6.96	7.08	7.02	7.05
30hr80%	8.11	6.55	6.91	6.92	7.06	7.02	6.99	7.03	7.07	7.01	7.08	7.11
36hr20%	8.27	6.45	6.87	6.82	6.74	6.84	6.81	6.86	6.86	6.86	6.84	6.88
36hr40%	8.01	6.49	6.78	6.88	6.87	6.85	6.88	6.86	6.82	6.84	6.98	6.94
36hr60%	8.04	6.51	6.85	6.92	6.92	6.97	7.00	7.03	6.98	7.07	7.03	7.01
36hr80%	8.17	6.53	6.84	6.99	7.06	7.00	7.02	7.02	7.04	7.05	7.09	7.06

ตารางที่ ข-18 ความต่างศักย์ออกซิเดชันรีดักชันในสภาวะการทดลองต่าง ๆ

สภาวะการทดลอง	วันที่											
	1	4	8	11	14	18	22	25	29	33	36	40
6hr20%	-237	-244	-245	-243	-252	-248	-247	-256	-247	-253	-258	-250
6hr40%	-246	-242	-247	-244	-251	-248	-253	-258	-256	-257	-261	-259
6hr60%	-251	-250	-243	-259	-260	-261	-266	-261	-262	-255	-261	-277
6hr80%	-259	-259	-261	-258	-266	-270	-271	-263	-277	-284	-274	-285
18hr20%	-238	-232	-236	-231	-240	-250	-248	-243	-246	-249	-251	-244
18hr40%	-242	-239	-236	-245	-250	-262	-253	-243	-250	-252	-259	-255
18hr60%	-254	-260	-262	-258	-262	-277	-266	-264	-258	-262	-267	-284
18hr80%	-258	-262	-262	-265	-283	-277	-281	-280	-277	-286	-286	-304
24hr20%	-248	-233	-251	-248	-241	-252	-264	-257	-239	-242	-251	-257
24hr40%	-253	-254	-254	-257	-253	-275	-279	-263	-251	-254	-261	-266
24hr60%	-257	-264	-299	-264	-268	-285	-286	-273	-264	-278	-294	-307
24hr80%	-271	-287	-304	-284	-298	-304	-316	-296	-301	-304	-312	-317
30hr20%	-232	-232	-237	-247	-258	-237	-240	-236	-243	-249	-242	-267
30hr40%	-245	-246	-242	-257	-257	-247	-254	-256	-259	-257	-261	-272
30hr60%	-252	-249	-252	-263	-277	-262	-266	-268	-263	-260	-269	-279
30hr80%	-257	-275	-282	-279	-287	-293	-308	-285	-286	-289	-281	-309
36hr20%	-241	-229	-235	-238	-233	-243	-243	-239	-242	-237	-240	-240
36hr40%	-257	-243	-257	-259	-257	-259	-255	-259	-257	-251	-248	-250
36hr60%	-260	-256	-256	-270	-282	-272	-287	-264	-275	-291	-296	-280
36hr80%	-261	-254	-283	-287	-302	-322	-297	-320	-304	-311	-298	-306

ตารางที่ ข-19 อุณหภูมิสภาพแวดล้อม

วันที่	อุณหภูมิ(องศาเซลเซียส)
1	28.4
2	28.6
4	28.3
6	30.2
8	31.0
10	30.8
11	31.0
14	30.6
15	30.8
18	29.8
22	30.3
25	30.7
26	30.8
29	31.4
30	31.1
33	31.5
35	30.9
36	32.0
40	29.5

ตารางที่ ข-20 อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพในสภาวะการทดลองต่างๆ

วันที่	อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ (มล./ก.ของแข็งระเหย)			
	6hr20%	6hr40%	6hr60%	6hr80%
1	0±0	0±0	0±0	0±0
4	3.83±0.53	3.98±0.36	4.21±0.09	2.76±0.36
8	1.53±0.53	4.90±0.18	7.96±0.18	8.79±0.53
11	12.10±0.71	11.33±0.53	12.94±0.62	15.64±0.27
14	13.02±0.71	13.94±0.71	17.31±0.71	17.90±0.09
18	3.91±0.36	7.89±0.71	3.91±0.36	6.66±0.09
22	2.37±0.36	3.75±0.53	9.88±0.53	10.99±0.18
25	0.31±0.53	1.99±0.36	2.53±0.44	1.76±0.27
29	4.21±0.09	2.60±0.53	3.37±0.71	7.66±0.36
33	3.98±0.53	3.68±0.53	3.37±0.44	7.51±0.71
36	4.44±0.53	2.37±0.44	4.37±0.44	3.22±0.53
40	2.37±0.53	3.22±0.80	3.29±0.53	2.83±0.36
วันที่	18hr20%	18hr40%	18hr60%	18hr80%
1	0±0	0±0	0±0	0±0
4	4.52±0.09	4.82±0.27	4.21±0.44	3.52±0.53
8	5.28±0.27	4.29±0.53	13.02±0.36	14.93±0.44
11	12.02±0.27	13.94±0.71	15.85±0.27	18.69±0.18
14	12.94±0.44	16.16±0.53	18.99±0.09	20.07±0.36
18	3.06±0.44	4.75±0.27	7.12±0.36	7.81±0.27
22	5.28±0.71	6.89±0.27	9.27±0.36	12.79±0
25	5.13±0.09	6.66±0.09	6.05±0.27	7.05±0.89
29	1.76±0.62	8.65±0.62	5.59±0.27	7.96±0.36
33	3.45±0.62	8.96±0.62	6.43±0.53	8.35±0.44
36	3.14±0.44	5.59±0.27	3.22±0.18	4.37±0.44
40	2.45±0.09	3.06±1.15	2.76±0.44	3.75±0.53

ตารางที่ ข-20 อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพในสภาวะการทดลองต่างๆ (ต่อ)

วันที่	อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ (มล./ก.ของแข็งระเหย)			
	24hr20%	24hr40%	24hr60%	24hr80%
1	0±0	0±0	0±0	0±0
4	2.07±0.09	3.45±0.27	2.83±0.27	1.76±0.27
8	11.79±0.71	17.46±0.53	14.17±0.27	13.86±0.62
11	11.56±0.09	14.09±0.53	15.39±0.09	17.16±0.53
14	16.54±0.18	20.52±0.18	23.21±0.44	24.35±0.36
18	6.05±0.71	8.19±0.36	9.88±0.89	12.02±0.53
22	0.15±0.44	7.35±0.62	15.93±0.27	19.30±0.09
25	1.68±0.53	4.60±0.36	6.20±0.44	7.43±0.09
29	1.68±0.18	4.52±0.62	6.43±0.71	8.73±0.53
33	2.60±0.36	4.60±0.53	6.66±0.44	8.81±0.44
36	4.52±0.09	1.61±0.09	3.22±0.53	5.74±0.44
40	4.52±0.18	0.46±0.27	2.07±0.53	1.53±0.27
วันที่	30hr20%	30hr40%	30hr60%	30hr80%
1	0±0	0±0	0±0	0±0
4	0.08±0.09	4.06±0.09	4.21±0.09	4.75±0.53
8	6.43±0.36	4.52±0.80	12.02±1.51	10.19±0.80
11	5.51±0.53	9.50±0.53	17.46±0.53	18.00±0.27
14	9.73±0.62	16.47±0.44	21.83±1.69	21.98±0.62
18	7.20±0.18	7.20±0.09	10.19±0.36	14.93±0.36
22	3.75±0.18	8.65±0.53	10.80±0.18	15.01±0.80
25	5.51±0.18	5.74±0.09	6.43±0.53	6.43±0.18
29	6.74±0.36	6.89±0.53	6.82±0.62	9.73±0.62
33	6.36±0.44	7.51±0.53	7.66±0.53	7.74±0.09
36	5.36±0.53	5.28±0.27	2.30±0.53	1.15±0.09
40	1.30±0.36	4.44±0.62	1.38±0.27	0.08±0.18

ตารางที่ ข-20 อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพในสภาวะการทดลองต่างๆ (ต่อ)

วันที่	อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ (มล./ก.ของแข็งระเหย)			
	36hr20%	36hr40%	36hr60%	36hr80%
1	0±0	0±0	0±0	0±0
4	0.08±0.27	4.06±0.09	5.82±0.36	3.29±0.62
8	5.05±0.36	4.60±0.53	3.83±0.71	5.05±0.18
11	6.82±0.44	7.51±1.24	15.24±0.44	14.40±0.36
14	5.13±1.69	9.27±0.27	12.18±0.44	17.16±0.53
18	7.81±0.44	8.12±0.09	10.72±0.27	13.33±0.44
22	7.20±0.44	4.44±0.80	4.14±0.44	5.28±1.42
25	4.29±0.53	4.67±0.27	6.13±0.53	7.96±0.18
29	2.76±0	5.67±0.53	4.67±0.62	6.74±1.07
33	3.22±0.53	6.13±0.53	3.60±0.27	3.14±0.62
36	0.38±1.33	2.53±0.27	3.22±0.18	2.76±0.53
40	0.77±0.27	1.84±0.62	1.46±0.53	1.84±0.27

ตารางที่ ข-21 ก๊าซชีวภาพสะสมในสภาวะการทดลองต่างๆ

วันที่	ก๊าซชีวภาพสะสม (มล./ก.ของแข็งระเหย)							
	6hr20%	6hr40%	6hr60%	6hr80%	18hr20%	18hr40%	18hr60%	18hr80%
1	0	0	0	0	0	0	0	0
4	3.83	3.98	4.21	2.76	4.52	4.82	4.21	3.52
8	5.36	8.88	12.18	11.56	9.80	9.11	17.23	18.46
11	17.46	20.22	25.12	27.19	21.83	23.05	33.08	37.14
14	30.48	34.16	42.43	45.09	34.77	39.21	52.08	57.21
18	34.39	42.05	46.33	51.75	37.83	43.96	59.20	65.02
22	36.76	45.80	56.21	62.74	43.12	50.85	68.47	77.81
25	37.07	47.79	58.74	64.50	48.25	57.52	74.52	84.86
29	41.28	50.39	62.11	72.16	50.01	66.17	80.11	92.82
33	45.26	54.07	65.48	79.66	53.46	75.13	86.54	101.17
36	49.70	56.44	69.85	82.88	56.60	80.72	89.76	105.53
40	52.08	59.66	73.14	85.71	59.05	83.78	92.52	109.29

ตารางที่ ข-21 ก๊าซชีวภาพสะสมในสภาวะการทดลองต่างๆ (ต่อ)

วันที่	ก๊าซชีวภาพสะสม (มล./ก.ของแข็งระเหย)							
	24hr20%	24hr40%	24hr60%	24hr80%	30hr20%	30hr40%	30hr60%	30hr80%
1	0	0	0	0	0	0	0	0
4	2.07	3.45	2.83	1.76	0.08	4.06	4.21	4.75
8	13.86	20.91	17.00	15.62	6.51	8.58	16.24	14.93
11	25.43	35.00	32.40	32.78	12.02	18.07	33.70	32.93
14	41.97	55.52	55.60	57.13	21.75	34.54	55.52	54.91
18	48.02	63.72	65.48	69.16	28.95	41.74	65.71	69.85
22	48.17	71.07	81.41	88.46	32.70	50.39	76.51	84.86
25	49.86	75.67	87.61	95.88	38.22	56.14	82.94	91.29
29	51.54	80.18	94.05	104.62	44.96	63.03	89.76	101.02
33	54.15	84.78	100.71	113.42	51.31	70.54	97.42	108.75
36	58.66	86.39	103.93	119.17	56.67	75.82	99.71	109.90
40	63.18	86.85	105.99	120.70	57.98	80.26	101.09	109.98
วันที่	36hr20%	36hr40%	36hr60%	36hr80%				
1	0	0	0	0				
4	0.08	4.06	5.82	3.29				
8	5.13	8.65	9.65	8.35				
11	11.95	16.16	24.89	22.75				
14	17.08	25.43	37.07	39.90				
18	24.89	33.54	47.79	53.23				
22	32.09	37.99	51.92	58.51				
25	36.38	42.66	58.05	66.48				
29	39.14	48.33	62.72	73.22				
33	42.35	54.45	66.32	76.36				
36	42.73	56.98	69.54	79.11				
40	43.50	58.82	70.99	80.95				

3. วัตถุประสงค์ขนาด 10-15 มิลลิเมตร

ตารางที่ ข-23 ของแข็งทั้งหมดและของแข็งระเหยในสภาวะการทดลองต่างๆ

สภาวะการทดลอง	ของแข็งทั้งหมด (ร้อยละ)		ของแข็งระเหย(ร้อยละ)	
	เริ่มต้น	สิ้นสุด	เริ่มต้น	สิ้นสุด
6hr20%	15.03±4.29	10.95±0.75	11.08±3.93	5.93±4.90
6hr40%	17.40±8.11	12.10±2.32	11.22±2.92	6.21±2.46
6hr60%	14.78±2.44	12.48±1.69±	10.91±4.18	5.63±1.76
6hr80%	29.83±10.68	21.93±9.17	13.51±3.70	7.31±5.04
18hr20%	24.97±1.71	17.63±7.33	15.60±7.50	9.94±0.40
18hr40%	24.74±6.62	18.65±1.35	11.67±2.34	5.57±3.56
18hr60%	20.36±2.45	15.77±2.27	11.98±1.60	5.95±2.85
18hr80%	15.80±0.36	10.83±0.09	12.68±1.56	6.47±1.18
24hr20%	22.61±1.19	16.85±2.80	11.74±1.82	6.12±4.72
24hr40%	19.63±9.10	15.57±1.15	16.54±4.39	10.11±4.93
24hr60%	22.05±5.27	15.80±2.38	13.65±0.99	7.20±1.73
24hr80%	17.03±2.50	12.76±2.84	13.08±0.71	6.47±3.12
30hr20%	18.20±4.50	14.73±2.49	12.90±0.78	6.97±2.11
30hr40%	16.22±1.26	12.75±2.52	11.10±0.45	4.75±2.66
30hr60%	17.58±0.99	15.04±5.26	15.48±3.65	8.79±2.70
30hr80%	16.44±6.97	14.09±2.18	11.30±1.23	4.53±0.43
36hr20%	20.68±0.77	14.35±6.49	13.72±4.88	8.15±3.45
36hr40%	23.93±0.77	16.25±2.76	13.98±5.34	8.28±5.58
36hr60%	18.92±1.76	12.27±0.37	13.60±1.95	7.53±0.54
36hr80%	21.03±4.17	15.02±5.09	13.33±0.56	6.85±1.77

ตารางที่ ข-24 ซีโอดีละลายในสภาวะการทดลองต่างๆ

วันที่	ซีโอดีละลาย (มก./ล.)			
	6hr20%	6hr40%	6hr60%	6hr80%
1	4000±1131.37	4800±1131.37	6800±565.69	8400±565.69
2	4400±565.69	6000±565.69	8800±1131.37	9200±565.69
6	2800±1131.37	4800±565.69	5200±1131.37	5200±0
14	2400±0	2800±565.69	4400±565.69	6400±1131.37
18	2000±565.69	4400±565.69	6800±565.69	8400±565.69
22	1600±1131.37	2000±565.69	2400±1131.37	3200±1131.37
25	2800±565.69	4400±565.69	4800±1131.37	5200±565.69
30	2000±565.69	4000±565.69	5200±565.69	6800±565.69
34	1200±565.69	1600±565.69	3200±0	4400±565.69
38	2000±565.69	3200±0	3600±565.69	4800±1131.37
40	800±565.69	1200±1131.37	3200±565.69	3600±0
วันที่	18hr20%	18hr40%	18hr60%	18hr80%
1	4400±565.69	4800±1131.37	5600±1131.37	6800±1697.06
2	4000±1131.37	5200±565.69	6400±1131.37	6800±565.69
6	3200±565.69	3600±1131.37	5600±565.69	5600±1697.06
14	2000±565.69	3600±565.69	5200±565.69	6400±1131.37
18	2000±565.69	4000±1131.37	6800±565.69	7600±565.69
22	2000±565.69	2400±0	2800±565.69	3200±0
25	1600±0	3600±565.69	4400±565.69	5600±0
30	2800±565.69	4400±565.69	5200±1697.06	6800±565.69
34	1600±0	2000±565.69	2400±0	3200±1131.37
38	1600±0	2800±565.69	3200±1131.37	4400±565.69
40	1600±0	2400±565.69	3200±565.69	3600±1131.37

ตารางที่ ข-24 ซีโอดีละลายในสภาวะการทดลองต่างๆ (ต่อ)

วันที่	ซีโอดีละลาย (มก./ล.)			
	24hr20%	24hr40%	24hr60%	24hr80%
1	6000±565.69	6400±0	7200±1131.37	7600±565.69
2	5600±1131.37	8400±565.69	8800±1131.37	9600±1131.37
6	2000±1131.37	3600±1131.37	6000±1131.37	7600±1131.37
14	2800±565.69	3600±565.69	4000±0	8400±1697.06
18	3600±565.69	4800±1131.37	6000±565.69	8000±1131.37
22	2000±565.69	2400±565.69	4400±565.69	4800±1131.37
25	1600±0	3200±1131.37	3600±565.69	4000±0
30	3200±0	4000±0	5200±565.69	7600±565.69
34	1200±565.69	1600±0	2800±565.69	4000±1131.37
38	2000±565.69	3200±0	3600±565.69	4000±0
40	2400±565.69	2800±1131.37	4000±565.69	4400±1131.37
วันที่	30hr20%	30hr40%	30hr60%	30hr80%
1	2800±565.69	6000±565.69	6800±565.6854	7600±565.69
2	3200±1131.37	6400±0	6800±565.69	9600±0
6	3200±565.69	4800±565.69	5200±1131.37	6800±1131.37
14	2400±0	5200±565.69	5600±0	7200±1131.37
18	4400±565.69	4800±1131.37	5200±1697.06	7600±565.69
22	2000±565.69	3600±565.69	5200±565.69	6000±565.69
25	1600±0	2800±565.69	4000±1131.37	4400±565.69
30	2400±1131.37	4000±1131.37	5600±1131.37	6400±1131.37
34	1600±0	1600±0	2800±565.69	3200±1131.37
38	1600±0	2000±565.69	3200±1131.37	4800±1131.37
40	2400±0	4400±1131.37	4800±565.69	5200±1131.37

ตารางที่ ข-24 ซีโอดีละลายในสภาวะการทดลองต่างๆ (ต่อ)

วันที่	ซีโอดีละลาย (มก./ล.)			
	36hr20%	36hr40%	36hr60%	36hr80%
1	2800±565.69	4800±1131.37	5200±565.6854	7200±1131.37
2	4800±1131.37	6000±565.69	6400±0	7600±565.69
6	3200±1697.06	4000±565.69	4400±0	7200±1697.06
14	4400±565.69	5200±565.69	6000±565.69	6400±1131.37
18	5200±565.69	5600±0	8000±0	8800±0
22	1200±565.69	2000±565.69	5200±565.69	6400±1131.37
25	1600±0	2800±565.69	3600±565.69	4400±565.69
30	4800±2262.74	5600±0	6000±565.69	6400±1131.37
34	1200±565.69	2000±565.69	3600±565.69	4800±1131.37
38	2000±565.69	2800±565.69	3200±0	4000±0
40	1200±0	1600±565.69	3200±565.69	4000±565.69

ตารางที่ ข-25 กรดอินทรีย์ระเหยในสภาวะการทดลองต่างๆ

วันที่	กรดอินทรีย์ระเหย (มก./ล.กรดอะซิติก)			
	6hr20%	6hr40%	6hr60%	6hr80%
1	737.5±53.03	800.0±35.36	925.0±35.36	1087.5±70.71
2	800.0±70.71	862.5±53.03	975.0±35.36	1225.0±17.68
6	962.5±53.03	1000.0±35.36	1112.5±17.68	1450.0±17.68
14	862.5±53.03	900.0±35.36	1012.5±17.68	1250.0±70.71
18	837.5±53.03	912.5±88.39	1012.5±17.68	1087.5±17.68
22	725.0±35.36	787.5±53.03	950.0±70.71	1175.0±53.03
25	637.5±53.03	725.0±35.36	825.0±35.36	1200.0±17.68
30	650.0±70.71	700.0±70.71	850.0±35.36	1087.5±70.71
34	662.5±53.03	675.0±70.71	825.0±35.36	1012.5±35.36
38	687.5±17.68	700.0±35.36	800.0±0	1000.0±35.36
40	662.5±17.68	725.0±35.36	850.0±70.71	1025.0±53.03

ตารางที่ ข-25 กรดอินทรีย์ระเหยในสภาวะการทดลองต่างๆ (ต่อ)

วันที่	กรดอินทรีย์ระเหย (มก./ล.กรดอะซิติก)			
	18hr20%	18hr40%	18hr60%	18hr80%
1	862.5±53.03	900.0±176.78	987.5±123.74	1087.5±123.74
2	900.0±0	962.5±53.03	1062.5±17.68	1225.0±35.36
6	1187.5±53.03	1250.0±106.07	1337.5±123.74	1450.0±141.42
14	900.0±35.36	987.5±88.39	1100.0±70.71	1250.0±70.71
18	962.5±53.03	987.5±88.39	1062.5±88.39	1087.5±123.74
22	862.5±53.03	900.0±35.36	1050.0±70.71	1175.0±106.07
25	1037.5±53.03	1075.0±35.36	1212.5±53.03	1200.0±212.13
30	712.5±53.03	850.0±0	987.5±53.03	1087.5±88.39
34	725.0±35.36	737.5±17.68	862.5±53.03	1012.5±17.68
38	712.5±53.03	675.0±106.07	900.0±70.71	1000.0±70.71
40	700.0±70.71	775.0±35.36	887.5±35.36	1025.0±35.36
วันที่	24hr20%	24hr40%	24hr60%	24hr80%
1	1112.5±53.03	1112.5±88.39	1200.0±70.71	1337.5±88.39
2	1287.5±88.39	1300.0±70.71	1375.0±35.36	1425.0±35.36
6	1225.0±106.07	1337.5±53.03	1450.0±106.07	1537.5±53.03
14	1037.5±53.03	1062.5±17.68	1225.0±35.36	1350.0±35.36
18	1025.0±35.36	1100.0±35.36	1125.0±70.71	1275.0±106.07
22	912.5±123.74	975.0±35.36	1150.0±141.42	1275.0±176.78
25	1037.5±53.03	1100.0±141.42	1312.5±53.03	1450.0±70.71
30	1050.0±70.71	1125.0±35.36	1262.5±17.68	1375.0±0
34	787.5±53.03	812.5±17.68	962.5±17.68	1062.5±17.68
38	862.5±53.03	950.0±0	1050.0±35.36	1175.0±35.36
40	725.0±35.36	675.0±141.42	925.0±35.36	1037.5±53.03

ตารางที่ ข-25 กรดอินทรีย์ระเหยในสภาวะการทดลองต่างๆ (ต่อ)

วันที่	กรดอินทรีย์ระเหย (มก./ล.กรดอะซิติก)			
	30hr20%	30hr40%	30hr60%	30hr80%
1	800.0±35.36	850.0±70.71	962.5±88.39	1050.0±35.36
2	837.5±17.68	925.0±106.07	1000.0±35.36	1125.0±35.36
6	1075.0±70.71	1162.5±17.68	1275.0±70.71	1412.5±17.68
14	887.5±53.03	1012.5±17.68	1112.5±88.39	1225.0±70.71
18	875.0±35.36	950.0±70.71	1037.5±17.68	1162.5±17.68
22	750.0±0	837.5±88.39	937.5±53.03	1050.0±35.36
25	912.5±17.68	987.5±88.39	1100.0±106.07	1225.0±106.07
30	725.0±35.36	762.5±17.68	950.0±70.71	1050.0±70.71
34	687.5±88.39	750.0±0	875.0±35.36	1012.5±17.68
38	650.0±35.36	725.0±35.36	812.5±53.03	837.5±123.74
40	700.0±70.71	737.5±17.68	912.5±53.03	1012.5±53.03
วันที่	36hr20%	36hr40%	36hr60%	36hr80%
1	750.0±35.36	800.0±70.71	950.0±70.71	925.0±106.07
2	800.0±35.36	825.0±106.07	950.0±35.36	1062.5±159.10
6	962.5±53.03	1000.0±70.71	1087.5±17.68	1237.5±53.03
14	787.5±17.68	850.0±35.36	950.0±35.36	1062.5±53.03
18	712.5±53.03	775.0±17.68	862.5±17.68	975.0±35.36
22	700.0±70.71	762.5±88.39	850.0±70.71	962.5±88.39
25	700.0±70.71	687.5±53.03	862.5±53.03	987.5±17.68
30	687.5±53.03	712.5±70.71	825.0±70.71	950.0±70.71
34	675.0±35.36	650.0±88.39	662.5±123.74	825.0±106.07
38	600.0±35.36	687.5±106.07	750.0±141.42	850.0±141.42
40	637.5±17.68	725.0±106.07	812.5±88.39	987.5±88.39

ตารางที่ ข-26 ความเป็นต่างในสภาวะการทดลองต่างๆ

วันที่	ความเป็นต่าง (มก./ล.แคลเซียมคาร์บอเนต)			
	6hr20%	6hr40%	6hr60%	6hr80%
1	2812.5±88.39	3450.0±70.71	3975.0±35.36	4350.0±70.71
2	2937.5±17.68	3550.0±35.36	4212.5±88.39	4525.0±35.36
6	3712.5±53.03	5187.5±88.39	6137.5±53.03	6400.0±141.42
14	4237.5±17.68	4712.5±88.39	6225.0±35.36	6562.5±53.03
18	3400.0±141.42	4875.0±106.07	5850.0±106.07	6975.0±35.36
22	3537.5±53.03	5187.5±88.39	5262.5±53.03	5712.5±53.03
25	2775.0±35.36	4575.0±106.07	6287.5±17.68	5712.5±35.36
30	3125.0±0	4837.5±88.39	5950.0±70.71	6850.0±35.36
34	3575.0±70.71	3925.0±141.42	4350.0±141.42	7312.5±17.68
38	3375.0±70.71	4637.5±88.39	6062.5±53.03	7262.5±88.39
40	2612.5±17.68	4637.5±441.94	4962.5±88.39	6912.5±53.03
วันที่	18hr20%	18hr40%	18hr60%	18hr80%
1	3025.0±0	3100.0±35.36	4025.0±35.36	4525.0±106.07
2	3250.0±141.42	3387.5±53.03	4200.0±141.42	4725.0±70.71
6	4712.5±53.03	5075.0±35.36	5537.5±17.68	6525.0±35.36
14	4212.5±53.03	4987.5±88.39	5312.5±53.03	6537.5±53.03
18	3600.0±70.71	4775.0±35.36	5725.0±70.71	6275.0±35.36
22	4587.5±17.68	4712.5±53.03	5525.0±35.36	5862.5±88.39
25	3550.0±70.71	4000.0±70.71	4062.5±88.39	5612.5±88.39
30	4137.5±88.39	4912.5±17.68	5050.0±0	5837.5±17.68
34	3787.5±53.03	4837.5±88.39	5425.0±35.36	5925.0±0
38	3825.0±35.36	4350.0±70.71	5100.0±106.07	7012.5±0
40	3775.0±35.36	4112.5±53.03	4650.0±70.71	5850.0±70.71

ตารางที่ ข-26 ความเป็นต่างในสภาวะการทดลองต่างๆ (ต่อ)

วันที่	ความเป็นต่าง (มก./ล.แคลเซียมคาร์บอเนต)			
	24hr20%	24hr40%	24hr60%	24hr80%
1	3137.5±88.39	3475.0±35.36	3487.5±17.68	4450.0±106.07
2	3287.5±17.68	3712.5±17.68	3725.0±70.71	4575.0±35.36
6	4425.0±70.71	5150.0±141.42	5812.5±35.36	6500.0±70.71
14	3775.0±106.07	5087.5±53.03	5575.0±35.36	6300.0±35.36
18	3800.0±35.36	4300.0±70.71	5725.0±17.68	6000.0±35.36
22	2287.5±53.03	4175.0±106.07	5525.0±17.68	7312.5±88.39
25	2612.5±17.68	2912.5±123.74	5900.0±35.36	6425.0±141.42
30	4362.5±159.10	4400.0±141.42	5837.5±53.03	7150.0±141.42
34	3687.5±88.39	4625.0±35.36	5512.5±17.68	6612.5±53.03
38	3875.0±106.07	4862.5±88.39	5862.5±123.74	7012.5±159.10
40	4462.5±229.81	5012.5±88.39	5112.5±17.68	5212.5±123.74
วันที่	30hr20%	30hr40%	30hr60%	30hr80%
1	3037.5±17.68	3462.5±53.03	3650.0±35.36	4462.5±88.39
2	3237.5±88.39	3587.5±53.03	3787.5±17.68	4475.0±35.36
6	4525.0±106.07	5200.0±70.71	5812.5±88.39	6537.5±17.68
14	4050.0±35.36	4950.0±70.71	5462.5±88.39	5762.5±17.68
18	3737.5±53.03	4612.5±123.74	5775.0±35.36	7225.0±70.71
22	4325.0±35.36	4362.5±88.39	4800.0±70.71	6700.0±70.71
25	3575.0±70.71	4987.5±88.39	5850.0±70.71	6687.5±123.74
30	3550.0±70.71	4837.5±17.68	6025.0±35.36	6550.0±35.36
34	3050.0±70.71	4112.5±159.10	5050.0±70.71	5662.5±88.39
38	3600.0±106.07	4612.5±159.10	5662.5±88.39	7150.0±70.71
40	3825.0±35.36	4175.0±35.36	5087.5±53.03	7100.0±35.36

ตารางที่ ข-26 ความเป็นต่างในสภาวะการทดลองต่างๆ (ต่อ)

วันที่	ความเป็นต่าง (มก./ล.แคลเซียมคาร์บอเนต)			
	36hr20%	36hr40%	36hr60%	36hr80%
1	2475.0±35.36	3387.5±17.68	3425.0±35.36	4275.0±70.71
2	2687.5±17.68	3525.0±35.36	3537.5±17.68	4487.5±53.03
6	4550.0±0	4962.5±53.03	5650.0±141.42	6162.5±88.39
14	4487.5±88.39	4550.0±35.36	4737.5±53.03	5537.5±17.68
18	3262.5±17.68	3775.0±35.36	4537.5±53.03	6312.5±17.68
22	4050.0±35.36	4175.0±106.07	4262.5±53.03	6212.5±53.03
25	4312.5±88.39	4462.5±88.39	5137.5±123.74	6612.5±17.68
30	3787.5±17.68	4600.0±141.42	5062.5±88.39	5600.0±70.71
34	3562.5±17.68	3850.0±35.36	5087.5±53.03	6312.5±53.03
38	3912.5±441.94	4575.0±70.71	4825.0±70.71	5625.0±70.71
40	3487.5±88.39	3900.0±35.36	5025.0±106.07	5675.0±70.71

ตารางที่ ข-27 ความเป็นกรดต่างในสภาวะการทดลองต่างๆ

สภาวะการทดลอง	วันที่										
	1	2	6	14	18	22	25	30	34	38	40
6hr20%	8.10	6.58	6.57	6.81	6.74	6.89	6.76	6.71	6.89	6.84	6.95
6hr40%	7.96	6.61	6.58	6.75	6.84	6.86	6.89	6.90	6.92	6.97	6.94
6hr60%	8.12	6.79	6.58	6.81	6.93	6.97	7.01	6.95	6.94	6.98	6.97
6hr80%	8.10	7.15	6.66	6.93	6.99	7.06	7.05	7.08	7.06	6.92	7.09
18hr20%	8.05	7.25	6.58	6.94	6.88	6.81	6.86	6.80	6.96	6.82	6.94
18hr40%	7.85	7.15	6.61	6.83	6.88	6.85	6.81	6.92	6.92	6.87	6.98
18hr60%	7.82	7.38	6.61	6.97	6.91	6.95	6.98	7.02	6.94	7.00	6.95
18hr80%	8.23	7.22	6.62	6.98	6.97	6.99	7.02	7.03	6.98	7.04	7.04
24hr20%	8.15	7.01	6.53	6.94	6.97	6.86	6.88	6.85	6.92	6.97	6.94
24hr40%	7.93	6.93	6.57	6.86	6.94	6.95	6.90	6.97	6.89	6.95	6.94
24hr60%	8.17	7.06	6.59	6.98	6.92	7.03	7.01	7.01	7.06	6.94	6.99
24hr80%	8.05	7.00	6.56	6.99	6.94	7.10	7.08	7.02	7.02	7.05	7.06
30hr20%	8.13	7.09	6.51	6.79	6.74	6.88	6.82	6.86	6.78	6.84	6.86
30hr40%	7.92	6.93	6.55	6.94	6.81	6.92	6.86	6.92	6.89	6.95	6.96

ตารางที่ ข-27 ความเป็นกรดต่างในสภาวะการทดลองต่างๆ (ต่อ)

สภาวะการทดลอง	วันที่										
	1	2	6	14	18	22	25	30	34	38	40
30hr60%	8.04	6.90	6.57	6.96	6.81	6.99	7.01	7.02	7.04	6.98	6.93
30hr80%	8.01	7.23	6.59	6.95	6.95	7.04	7.05	7.05	7.09	7.04	7.07
36hr20%	8.20	7.15	6.51	6.95	6.91	6.84	6.86	6.82	6.85	6.87	6.95
36hr40%	8.17	7.56	6.55	6.87	6.87	6.85	6.88	6.89	6.82	6.80	6.98
36hr60%	8.13	7.44	6.55	6.97	6.98	6.95	6.94	6.96	6.88	6.85	6.96
36hr80%	8.01	7.34	6.59	6.92	6.95	7.01	6.95	7.09	7.01	7.04	7.08

ตารางที่ ข-28 ความต่างศักย์ออกซิเดชันรีดักชันในสภาวะการทดลองต่างๆ

สภาวะการทดลอง	วันที่										
	1	2	6	14	18	22	25	30	34	38	40
6hr20%	-248	-253	-242	-242	-250	-249	-247	-252	-244	-250	-253
6hr40%	-242	-253	-253	-246	-249	-244	-249	-256	-259	-257	-261
6hr60%	-253	-264	-245	-255	-259	-261	-258	-255	-262	-259	-260
6hr80%	-266	-260	-272	-269	-271	-270	-272	-267	-265	-287	-277
18hr20%	-242	-252	-254	-231	-240	-243	-249	-244	-246	-249	-264
18hr40%	-248	-249	-247	-245	-250	-248	-253	-257	-252	-263	-267
18hr60%	-253	-258	-266	-264	-260	-278	-270	-265	-270	-263	-289
18hr80%	-279	-261	-278	-266	-272	-280	-292	-282	-280	-316	-320
24hr20%	-246	-255	-246	-233	-237	-250	-251	-238	-240	-246	-260
24hr40%	-243	-263	-257	-252	-254	-250	-253	-259	-254	-253	-260
24hr60%	-260	-264	-264	-262	-266	-258	-273	-264	-269	-270	-284
24hr80%	-284	-277	-317	-292	-317	-305	-305	-299	-311	-313	-355
30hr20%	-239	-234	-232	-244	-257	-235	-228	-239	-240	-246	-259
30hr40%	-248	-247	-249	-255	-260	-258	-250	-251	-246	-259	-260
30hr60%	-262	-257	-256	-284	-272	-284	-279	-284	-268	-272	-288
30hr80%	-276	-280	-282	-313	-287	-343	-299	-322	-326	-319	-308
36hr20%	-249	-254	-266	-247	-270	-258	-250	-261	-254	-250	-268
36hr40%	-251	-268	-254	-258	-263	-264	-251	-270	-253	-253	-258
36hr60%	-247	-264	-267	-253	-281	-275	-280	-289	-275	-270	-254
36hr80%	-265	-284	-264	-289	-305	-310	-299	-303	-308	-304	-312

ตารางที่ ข-29 อุณหภูมิสภาพแวดล้อม

วันที่	อุณหภูมิ(องศาเซลเซียส)
2	31.5
4	30.6
6	28.9
8	31.0
14	30.9
16	30.7
18	29.8
22	30.3
24	30.7
26	29.9
29	31.5
30	30.0
32	30.3
34	30.8
36	32.0
38	31.2
40	29.5

ตารางที่ ข-30 อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพในสภาวะการทดลองต่างๆ

วันที่	อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ(มล./ก.ของแข็งระเหย)			
	6hr20%	6hr40%	6hr60%	6hr80%
1	0±0	0±0	0±0	0±0
2	1.15±0.36	1.23±0.09	1.00±0.18	2.07±0.18
6	2.37±0.27	3.06±0.18	3.22±1.60	4.90±0.36
14	13.02±0.89	15.09±0.80	16.16±0.62	16.77±0.62
18	8.42±0.36	10.65±0.09	11.33±1.42	13.71±0.44
22	3.68±0	7.12±0.27	8.50±0.09	11.26±0.62
25	5.67±1.07	4.44±0.18	6.59±0.53	5.51±0.36
30	5.59±0.18	6.43±0.44	4.06±0.89	2.91±0.80
34	1.23±0.36	2.30±0.53	2.76±1.07	3.75±0.27
38	6.97±0.09	4.82±0.44	6.82±0.27	8.73±0.36
40	6.36±0.36	2.91±0.27	4.14±0.27	3.37±0.27
วันที่	18hr20%	18hr40%	18hr60%	18hr80%
1	0±0	0±0	0±0	0±0
2	1.07±0.44	0.69±0.18	0.23±0	2.14±0.27
6	2.14±0.53	1.46±0.80	9.11±0.44	12.56±0.44
14	16.01±0.62	16.16±0.27	17.38±0.98	21.98±0.09
18	9.65±0.53	10.57±0.89	12.87±1.78	15.32±0.53
22	6.74±0.71	7.81±0.18	5.59±0.62	6.89±0.44
25	3.75±0.44	5.44±0.09	7.20±0.18	6.82±0.36
30	6.13±0.27	4.75±0.44	3.22±0.80	6.36±0.36
34	1.68±0	2.07±0.62	2.07±0.09	6.13±1.07
38	4.90±0.18	6.82±0.27	5.97±0.36	3.91±0.09
40	6.05±0.18	4.82±0	5.59±0.18	3.98±0.09

ตารางที่ ข-30 อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพในสภาวะการทดลองต่างๆ (ต่อ)

วันที่	อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ(มล./ก.ของแข็งระเหย)			
	24hr20%	24hr40%	24hr60%	24hr80%
1	0±0	0±0	0±0	0±0
2	1.30±0.71	2.60±0.09	4.06±0.71	3.29±0
6	6.05±0.44	11.87±0.27	15.01±0.18	18.00±0.44
14	19.61±0.71	20.68±0.53	23.51±0.62	25.58±0.18
18	11.41±0.44	9.96±0.53	13.02±0.71	17.61±0.36
22	5.21±1.42	7.05±0.89	7.43±0.27	13.79±0
25	5.59±0.44	3.75±0.62	6.05±0.80	0.38±1.15
30	4.44±0.27	0.15±0.44	3.14±0.36	1.53±0.27
34	0.69±0.80	0.38±0.62	1.23±0.71	8.58±0.53
38	3.29±0.44	2.83±0.09	4.98±0.09	5.44±2.22
40	4.06±0.71	3.37±0.44	3.37±0.27	2.83±0.18
วันที่	30hr20%	30hr40%	30hr60%	30hr80%
1	0.00±0	0±0	0±0	0±0
2	0.38±0.18	0.69±0.36	0.08±0.36	1.84±0.27
6	0.08±0.44	10.49±0.44	11.27±0.46	9.96±0.18
14	13.40±0.09	13.56±0.44	14.78±0.62	18.61±0.27
18	10.88±0.71	12.33±0.98	12.56±0.18	14.93±0.27
22	5.13±0.09	5.97±0.18	7.66±0	9.19±0.36
25	6.36±0.62	1.68±0.36	8.65±0.62	4.21±0.44
30	1.61±0.36	6.13±0.98	3.91±0.18	4.75±0.09
34	0.92±0.36	0.61±0.53	4.60±1.78	0.31±0.36
38	2.60±0.36	8.04±0.27	2.53±0.18	5.59±0.09
40	3.29±0.36	2.07±0	3.22±0.18	1.84±0.27

ตารางที่ ข-30 อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพในสภาวะการทดลองต่างๆ (ต่อ)

วันที่	อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ(มล./ก.ของแข็งระเหย)			
	36hr20%	36hr40%	36hr60%	36hr80%
1	0±0	0±0	0±0	0±0
2	0.08±0.36	0.69±0.18	0.54±0.18	1.61±0
6	0.08±0.09	0.46±0.18	9.04±0.18	9.11±0.98
14	9.11±0.44	11.56±0.44	13.02±0.89	17.77±1.60
18	0.15±0.36	6.20±0.62	5.28±0.44	5.44±0.62
22	5.44±0.27	8.27±1.07	2.14±1.07	6.43±0.36
25	3.22±0.44	2.53±0.62	4.82±0.44	7.20±0.18
30	1.91±0.18	1.61±0.53	5.74±0.36	5.67±0.62
34	0.92±0.36	1.53±0.36	0.84±0.09	5.51±2.66
38	3.75±0.62	0.77±0.36	2.53±0.62	2.91±0.71
40	5.90±0.18	4.44±0.27	3.22±1.15	2.14±0.44

ตารางที่ ข-31 ก๊าซชีวภาพสะสมในสภาวะการทดลองต่างๆ

วันที่	ก๊าซชีวภาพสะสม (มล./ก.ของแข็งระเหย)							
	6hr20%	6hr40%	6hr60%	6hr80%	18hr20%	18hr40%	18hr60%	18hr80%
1	0	0	0	0	0	0	0	0
2	1.15	1.23	1.00	2.07	1.07	0.69	0.23	2.14
6	3.52	4.29	4.21	6.97	3.22	2.14	9.34	14.70
14	16.54	19.38	20.37	23.74	19.22	18.30	26.73	36.68
18	24.97	30.02	31.71	37.45	28.87	28.87	39.59	52.00
22	28.64	37.14	40.21	48.71	35.61	36.68	45.19	58.89
25	34.31	41.59	46.79	54.22	39.36	42.12	52.38	65.71
30	39.90	48.02	50.85	57.13	45.49	46.87	55.60	72.07
34	41.13	50.32	53.61	60.89	47.18	48.94	57.67	78.19
38	48.10	55.14	60.43	69.62	52.08	55.75	63.64	82.10
40	54.45	58.05	64.56	72.99	58.13	60.58	69.23	86.08

ตารางที่ ข-31 ก๊าซชีวภาพสะสมในสภาวะการทดลองต่างๆ (ต่อ)

วันที่	ก๊าซชีวภาพสะสม (มล./ก.ของแฉ่งระเหย)							
	24hr20%	24hr40%	24hr60%	24hr80%	30hr20%	30hr40%	30hr60%	30hr80%
1	0	0	0	0	0	0	0	0
2	1.30	2.60	4.06	3.29	0.38	0.69	0.08	1.84
6	7.35	14.47	19.07	21.29	0.46	11.18	11.35	11.79
14	26.96	35.15	42.58	46.87	13.86	24.74	26.13	30.40
18	38.37	45.11	55.60	64.48	24.74	37.07	38.69	45.34
22	43.58	52.15	63.03	78.27	29.87	43.04	46.35	54.53
25	49.17	55.91	69.08	78.65	36.22	44.73	55.00	58.74
30	53.61	56.06	72.22	80.18	37.83	50.85	58.91	63.49
34	54.30	56.44	73.45	88.76	38.75	51.47	63.50	63.80
38	57.59	59.28	78.42	94.20	41.36	59.51	66.03	69.39
40	61.65	62.65	81.79	97.03	44.65	61.57	69.25	71.22
วันที่	36hr20%	36hr40%	36hr60%	36hr80%				
1	0	0	0	0				
2	0.08	0.69	0.54	1.61				
6	0.15	1.15	9.57	10.72				
14	9.27	12.71	22.59	28.49				
18	9.42	18.92	27.88	33.93				
22	14.86	27.19	30.02	40.36				
25	18.07	29.72	34.85	47.56				
30	19.99	31.32	40.59	53.23				
34	20.91	32.86	41.43	58.74				
38	24.66	33.62	43.96	61.65				
40	30.56	38.06	47.18	63.80				

4. วัตถุประสงค์ขนาด 15-20 มิลลิเมตร

ตารางที่ ข-33 ของแข็งทั้งหมดและของแข็งระเหยในสภาวะการทดลองต่างๆ

สภาวะการทดลอง	ของแข็งทั้งหมด (ร้อยละ)		ของแข็งระเหย(ร้อยละ)	
	เริ่มต้น	สิ้นสุด	เริ่มต้น	สิ้นสุด
6h20%	19.04±6.25	23.06±0.14	12.17±1.79	7.55±3.38
6hr40%	24.30±0.82	11.44±3.81	15.24±2.25	10.52±3.91
6hr60%	18.21±7.70	11.26±4.86	14.19±8.54	9.17±3.16
6hr80%	22.49±7.60	9.22±2.16	12.67±0.72	5.86±1.53
18hr20%	21.31±0.94	16.51±4.07	14.37±0.58	9.53±2.46
18hr40%	17.10±1.92	17.94±3.05	12.18±1.45	6.64±2.09
18hr60%	17.79±1.53	12.90±2.68	12.82±0.68	6.66±2.51
18hr80%	17.51±0.77	18.78±4.29	13.28±2.65	6.80±0.58
24hr20%	22.69±10.17	11.80±3.73	13.14±1.18	7.73±2.74
24hr40%	18.68±0.17	11.26±2.52	13.69±4.53	7.99±1.93
24hr60%	18.78±0.34	17.74±1.03	15.00±2.28	8.66±3.11
24hr80%	19.61±2.75	18.31±4.23	13.43±4.23	6.98±0.26
30hr20%	21.65±0.41	17.12±2.17	11.33±1.20	6.05±1.71
30hr40%	20.13±4.45	13.78±0.93	12.28±2.59	6.69±2.19
30hr60%	16.43±2.63	14.09±3.06	12.40±0.70	6.64±1.69
30hr80%	17.35±2.86	12.75±3.11	12.67±1.77	6.61±1.01
36hr20%	21.13±0.13	15.82±5.05	11.49±1.71	6.41±1.66
36hr40%	22.30±3.07	13.42±2.42	10.96±1.07	5.53±0.56
36hr60%	16.93±1.62	10.39±1.20	13.49±0.34	7.59±2.55
36hr80%	17.82±3.31	10.27±3.75	12.48±0.37	6.08±0.98

ตารางที่ ข-34 ซีโอดีละลายในสภาวะการทดลองต่างๆ

วันที่	ซีโอดีละลาย (มก./ล.)			
	6hr20%	6hr40%	6hr60%	6hr80%
1	920±395.98	1040±113.14	1080±56.57	1200±0
4	3000±848.53	4200±282.84	4800±0	5000±282.84
8	3800±282.84	4800±0	8800±0	11600±565.69
11	1800±282.84	2600±282.84	3200±565.69	5600±1131.37
14	1600±0	2800±565.69	3200±1131.37	4000±1131.37
20	1600±0	4600±282.84	5000±282.84	5200±1697.06
24	3200±0	3600±565.69	4000±0	5600±0
25	1600±0	2000±1131.37	3600±565.69	4400±1697.06
32	2000±565.69	3200±1131.37	3600±565.69	6000±565.69
36	1600±565.69	2200±282.84	3000±282.84	5600±1131.37
40	1200±1131.37	2000±0	2400±565.69	3600±1131.37
วันที่	18hr20%	18hr40%	18hr60%	18hr80%
1	1000±56.57	1080±56.57	1240±56.57	1400±56.57
4	4800±0	5200±0	5400±282.84	7000±848.53
8	3400±282.84	4800±565.69	5600±565.69	9200±565.69
11	1400±282.84	2600±282.84	4000±565.69	6000±565.69
14	2000±565.69	2800±565.69	3200±1131.37	4800±0
20	1600±0	5200±565.69	6000±565.69	7200±0
24	1200±565.69	3200±0	4400±565.69	6000±565.69
25	1200±565.69	2400±1131.37	3600±565.69	4000±1131.37
32	1600±1131.37	3200±1131.37	4400±565.69	4800±0
36	2400±0	2600±282.84	2800±565.69	5200±565.69
40	1600±0	2000±0	2400±565.69	2800±0

ตารางที่ ข-34 ซีโอดีละลายในสภาวะการทดลองต่างๆ (ต่อ)

วันที่	ซีโอดีละลาย (มก./ล.)			
	24hr20%	24hr40%	24hr60%	24hr80%
1	1160±56.57	1240±56.57	1560±169.71	1400±169.71
4	4600±282.84	4800±565.69	6400±0	8000±565.69
8	4800±0	5400±282.84	6200±282.84	9200±565.69
11	2000±565.69	3200±565.69	5000±282.84	5600±1131.37
14	2800±565.69	3200±1131.37	4000±1131.37	4400±1697.06
20	4000±0	4800±0	6000±565.69	6800±565.69
24	3600±565.69	4400±565.69	4800±0	5600±0
25	2000±565.69	2400±0	3200±0	4000±2262.74
32	3200±1131.37	3200±0	5200±565.69	7200±0
36	2000±0	2400±565.69	3000±282.84	5200±565.69
40	2000±0	2000±1131.37	2400±565.69	3200±565.69
วันที่	30hr20%	30hr40%	30hr60%	30hr80%
1	1360±226.27	1200±113.14	1600±113.14	1880±395.98
4	4600±282.84	5400±282.84	5800±282.84	7400±282.84
8	4000±565.69	4600±282.84	4800±0	8000±1131.37
11	1800±282.84	3400±282.84	4400±565.69	6400±1131.37
14	1600±0	3600±565.69	4400±565.69	5200±565.69
20	1200±565.69	2800±565.69	4400±565.69	6000±565.69
24	2000±565.69	4000±1131.37	6000±565.69	6400±1131.37
25	1600±0	2400±1131.37	2800±565.69	3200±0
32	2800±0	4400±565.69	5600±0	6800±565.69
36	1800±0	2600±282.84	3000±282.84	4800±1131.37
40	2000±0	2800±1131.37	4000±565.69	4400±1131.37

ตารางที่ ข-34 ซีไอทีละลายในสภาวะการทดลองต่างๆ (ต่อ)

วันที่	36hr20%	36hr40%	36hr60%	36hr80%
1	1400±56.57	1520±0	1640±169.71	1720±169.71
4	2800±565.69	3200±565.69	4800±0	7200±565.69
8	4000±1131.37	4600±282.84	5800±282.84	6400±1131.37
11	2800±565.69	3400±282.84	3600±565.69	8800±1131.37
14	2000±565.69	3600±565.69	4000±0	5200±565.69
20	2400±0	3600±565.69	4400±565.69	6800±565.69
24	3200±0	4000±0	5600±1131.37	6800±1697.06
25	1600±0	2000±565.69	2800±565.69	4000±1131.37
32	4000±1131.37	4800±0	5200±565.69	7200±1131.37
36	2200±848.53	2600±848.53	3600±565.69	6000±565.69
40	1200±0	1600±565.69	2400±565.69	3200±565.69

ตารางที่ ข-35 กรดอินทรีย์ระเหยในสภาวะการทดลองต่างๆ

วันที่	กรดอินทรีย์ระเหย (มก./ล.กรดอะซิติก)			
	6hr20%	6hr40%	6hr60%	6hr80%
1	725.0±35.36	762.5±17.68	900.0±70.71	1050.0±70.71
4	787.5±17.68	837.5±17.68	962.5±53.03	1025.0±35.36
8	912.5±53.03	962.5±53.03	1050.0±35.36	1212.5±53.03
11	862.5±88.39	925.0±35.36	962.5±53.03	1137.5±17.68
14	837.5±17.68	862.5±88.39	1000.0±35.36	1087.5±17.68
20	812.5±53.03	887.5±53.03	975.0±35.36	1087.5±17.68
24	712.5±53.03	762.5±17.68	912.5±53.03	1050.0±141.42
25	637.5±53.03	850.0±141.42	775.0±35.36	925.0±35.36
32	637.5±17.68	650.0±35.36	750.0±70.71	900.0±35.36
36	600.0±35.36	662.5±53.03	775.0±35.36	887.5±53.03
40	612.5±17.68	700.0±35.36	787.5±53.03	837.5±53.03

ตารางที่ ข-35 กรดอินทรีย์ระเหยในสภาวะการทดลองต่างๆ (ต่อ)

วันที่	กรดอินทรีย์ระเหย (มก./ล.กรดอะซิติก)			
	18hr20%	18hr40%	18hr60%	18hr80%
1	762.5±53.03	850.0±141.42	937.5±123.74	1087.5±123.74
4	875.0±35.36	962.5±53.03	1075.0±70.71	1175.0±35.36
8	1125.0±35.36	1212.5±88.39	1275.0±141.42	1337.5±123.74
11	937.5±88.39	987.5±88.39	1075.0±106.07	1200.0±70.71
14	862.5±17.68	950.0±70.71	1075.0±106.07	1150.0±35.36
20	850.0±0	975.0±35.36	1087.5±17.68	1162.5±17.68
24	812.5±88.39	875.0±35.36	987.5±88.39	1137.5±53.03
25	1000.0±70.71	1025.0±35.36	1162.5±53.03	1312.5±53.03
32	650.0±70.71	712.5±53.03	825.0±35.36	962.5±17.68
36	612.5±53.03	700.0±70.71	825.0±35.36	937.5±88.39
40	662.5±17.68	712.5±53.03	825.0±88.39	887.5±88.39
วันที่	24hr20%	24hr40%	24hr60%	24hr80%
1	962.5±17.68	975.0±35.36	1137.5±123.74	1375.0±35.36
4	1200.0±35.36	1237.5±17.68	1312.5±17.68	1450.0±35.36
8	1237.5±53.03	1300.0±35.36	1437.5±123.74	1512.5±17.68
11	975.0±35.36	1050.0±35.36	1162.5±17.68	1237.5±88.39
14	975.0±70.71	1025.0±35.36	1237.5±53.03	1275.0±35.36
20	962.5±53.03	1062.5±53.03	1112.5±53.03	1225.0±70.71
24	875.0±35.36	925.0±0	1100.0±106.07	1275.0±106.07
25	1037.5±53.03	1062.5±17.68	1275.0±35.36	1375.0±35.36
32	775.0±35.36	800.0±35.36	912.5±17.68	1012.5±17.68
36	812.5±53.03	887.5±17.68	1012.5±17.68	1137.5±53.03
40	700.0±35.36	725.0±35.36	837.5±17.68	962.5±53.03

ตารางที่ ข-35 กรดอินทรีย์ระเหยในสภาวะการทดลองต่างๆ (ต่อ)

วันที่	กรดอินทรีย์ระเหย (มก./ล.กรดอะซิติก)			
	30hr20%	30hr40%	30hr60%	30hr80%
1	787.5±88.39	837.5±17.68	900.0±35.36	1037.5±17.68
4	787.5±17.68	837.5±88.39	937.5±17.68	1050.0±35.36
8	1037.5±17.68	1100.0±0	1250.0±106.07	1375.0±70.71
11	875.0±70.71	900.0±35.36	1050.0±35.36	1162.5±123.74
14	812.5±17.68	975.0±35.36	1050.0±35.36	1150.0±70.71
20	837.5±17.68	962.5±53.03	987.5±53.03	1125.0±35.36
24	725.0±35.36	812.5±88.39	900.0±35.36	1050.0±70.71
25	837.5±17.68	925.0±106.07	1037.5±53.03	1225.0±70.71
32	662.5±88.39	700.0±35.36	825.0±106.07	912.5±123.74
36	637.5±53.03	650.0±35.36	775.0±35.36	900.0±70.71
40	625.0±0	662.5±17.68	825.0±35.36	937.5±17.68
วันที่	36hr20%	36hr40%	36hr60%	36hr80%
1	725.0±35.36	737.5±17.68	850.0±35.36	900.0±70.71
4	737.5±53.03	787.5±159.10	925.0±70.71	962.5±53.03
8	950.0±0	962.5±17.68	1112.5±17.68	1200.0±70.71
11	775.0±35.36	812.5±35.36	962.5±53.03	1012.5±17.68
14	775.0±35.36	850.0±35.36	887.5±88.39	1075.0±35.36
20	700.0±35.36	725.0±17.68	912.5±53.03	962.5±53.03
24	675.0±106.07	737.5±141.42	800.0±35.36	937.5±88.39
25	625.0±35.36	700.0±0	862.5±17.68	962.5±53.03
32	650.0±0	675.0±17.68	737.5±17.68	862.5±53.03
36	625.0±0	637.5±35.36	662.5±53.03	850.0±35.36
40	587.5±17.68	625.0±35.36	775.0±35.36	900.0±70.71

ตารางที่ ข-36 ความเป็นต่างในสภาวะการทดลองต่างๆ

วันที่	ความเป็นต่าง (มก./ล.แคลเซียมคาร์บอเนต)			
	6hr20%	6hr40%	6hr60%	6hr80%
1	2400.0±70.71	3200.0±0	3587.5±88.39	3812.5±123.74
4	2700.0±35.36	3337.5±88.39	3850.0±35.36	4387.5±53.03
8	4050.0±70.71	4587.5±53.03	5662.5±17.68	6112.5±88.39
11	3600.0±35.36	4300.0±35.36	5100.0±35.36	6425.0±0
14	3575.0±70.71	4062.5±53.03	5625.0±0	5900.0±70.71
20	4325.0±35.36	4950.0±70.71	5637.5±53.03	6637.5±88.39
24	4875.0±35.36	5337.5±53.03	5812.5±88.39	6637.5±35.36
25	2462.5±53.03	3600.0±70.71	5062.5±53.03	6587.5±53.03
32	4512.5±53.03	5375.0±35.36	5675.0±70.71	6687.5±53.03
36	3437.5±88.39	4812.5±53.03	4900.0±35.36	5375.0±70.71
40	2562.5±53.03	4125.0±70.71	5150.0±70.71	6575.0±35.36
วันที่	18hr20%	18hr40%	18hr60%	18hr80%
1	2750.0±70.71	2837.5±53.03	3912.5±88.39	4087.5±53.03
4	2937.5±17.68	3675.0±70.71	3887.5±53.03	4950.0±70.71
8	3287.5±53.03	4200.0±35.36	5075.0±35.36	5625.0±35.36
11	3687.5±53.03	4612.5±88.39	5475.0±0	6600.0±35.36
14	3675.0±35.36	4337.5±53.03	4562.5±88.39	5900.0±35.36
20	4650.0±35.36	5337.5±53.03	5900.0±70.71	6750.0±70.71
24	3950.0±35.36	5575.0±70.71	6087.5±88.39	6550.0±35.36
25	3100.0±35.36	3387.5±17.68	3687.5±53.03	4775.0±35.36
32	4662.5±17.68	5537.5±88.39	6300.0±35.36	7575.0±70.71
36	3437.5±17.68	4662.5±53.03	5012.5±17.68	7087.5±53.03
40	3587.5±88.39	4075.0±70.71	4312.5±17.68	5075.0±35.36

ตารางที่ ข-36 ความเป็นต่างในสภาวะการทดลองต่างๆ (ต่อ)

วันที่	ความเป็นต่าง (มก./ล.แคลเซียมคาร์บอเนต)			
	24hr20%	24hr40%	24hr60%	24hr80%
1	2562.5±53.03	2875.0±106.07	3387.5±17.68	3662.5±88.39
4	3137.5±53.03	3662.5±53.03	3800.0±35.36	4362.5±123.74
8	3675.0±70.71	4612.5±53.03	5112.5±17.68	5162.5±88.39
11	3350.0±35.36	4325.0±70.71	5687.5±17.68	6325.0±35.36
14	3050.0±70.71	4625.0±70.71	4562.5±53.03	5687.5±35.36
20	4437.5±53.03	6137.5±88.39	5900.0±53.03	6737.5±88.39
24	4500.0±35.36	5075.0±35.36	5700.0±70.71	5850.0±70.71
25	2437.5±53.03	3612.5±88.39	5412.5±88.39	5800.0±70.71
32	4687.5±53.03	5600.0±70.71	6237.5±53.03	6850.0±35.36
36	3137.5±17.68	3487.5±88.39	4062.5±88.39	7087.5±17.68
40	4325.0±35.36	4875.0±0	5050.0±35.36	5662.5±53.03
วันที่	30hr20%	30hr40%	30hr60%	30hr80%
1	2775.0±70.71	3025.0±0	3375.0±35.36	3662.5±88.39
4	3137.5±17.68	3200.0±35.36	3875.0±70.71	4087.5±88.39
8	3637.5±88.39	4312.5±53.03	5112.5±88.39	6112.5±53.03
11	3850.0±70.71	4612.5±53.03	5412.5±17.68	6612.5±17.68
14	3187.5±53.03	4587.5±88.39	4900.0±35.36	5162.5±53.03
20	4262.5±88.39	4862.5±53.03	6000.0±35.36	7187.5±53.03
24	4125.0±35.36	4900.0±35.36	6137.5±88.39	7237.5±17.68
25	3187.5±53.03	4562.5±88.39	5337.5±17.68	6112.5±53.03
32	4487.5±17.68	5187.5±53.03	5925.0±35.36	7175.0±70.71
36	3600.0±35.36	4325.0±106.07	4812.5±88.39	7062.5±53.03
40	3675.0±106.07	3862.5±53.03	4850.0±106.07	6575.0±35.36

ตารางที่ ข-36 ความเป็นต่างในสภาวะการทดลองต่างๆ (ต่อ)

วันที่	ความเป็นต่าง (มก./ล.แคลเซียมคาร์บอเนต)			
	36hr20%	36hr40%	36hr60%	36hr80%
1	2287.5±265.17	3150.0±282.84	3200.0±35.36	3850.0±70.71
4	3187.5±88.39	3700.0±35.36	4150.0±70.71	4500.0±70.71
8	3550.0±70.71	4400.0±35.36	5112.5±53.03	5450.0±35.36
11	4100.0±0	5112.5±17.68	5887.5±123.74	6600.0±106.07
14	4025.0±35.36	4200.0±70.71	4350.0±35.36	4900.0±70.71
20	4150.0±35.36	5325.0±70.71	6437.5±53.03	6712.5±88.39
24	3650.0±35.36	5062.5±53.03	6437.5±53.03	6675.0±70.71
25	3650.0±70.71	4587.5±53.03	4912.5±88.39	6062.5±88.39
32	3887.5±88.39	4125.0±70.71	4350.0±35.36	6862.5±88.39
36	3662.5±88.39	4125.0±106.07	4650.0±70.71	6837.5±53.03
40	3775.0±70.71	4187.5±17.68	4862.5±53.03	5400.0±0

ตารางที่ ข-37 ความเป็นกรดต่างในสภาวะการทดลองต่างๆ

สภาวะการทดลอง	วันที่										
	1	4	8	11	14	20	24	25	32	36	40
6hr20%	7.81	6.45	6.64	6.76	6.73	6.79	6.83	6.79	6.88	6.84	6.82
6hr40%	7.89	6.56	6.61	6.81	6.87	6.88	6.89	6.91	6.92	6.90	6.91
6hr60%	8.05	6.57	6.64	6.92	6.92	6.96	7.05	6.93	6.95	6.94	6.98
6hr80%	8.17	6.55	6.68	6.88	7.05	7.03	7.03	7.06	7.07	7.04	7.06
18hr20%	7.86	6.47	6.56	6.83	6.86	6.79	6.80	6.87	6.81	6.81	6.92
18hr40%	8.30	6.53	6.58	6.88	6.91	6.93	6.89	6.96	6.91	6.89	7.01
18hr60%	8.05	6.57	6.59	6.72	6.98	6.99	7.01	7.01	7.01	6.94	7.09
18hr80%	7.91	6.59	6.64	6.86	7.07	7.08	7.01	7.05	7.10	7.04	7.13
24hr20%	7.97	6.45	6.54	6.77	6.84	6.79	6.82	6.80	6.80	6.87	6.82
24hr40%	7.85	6.52	6.53	6.88	6.92	6.88	6.90	6.89	6.92	6.85	6.90
24hr60%	8.11	6.55	6.61	6.89	7.03	6.98	7.08	7.01	6.98	6.95	6.97
24hr80%	8.07	6.56	6.68	6.91	7.07	7.07	7.03	7.01	7.09	7.08	7.07
30hr20%	7.87	6.49	6.57	6.73	6.81	6.79	6.81	6.76	6.87	6.85	6.86
30hr40%	7.85	6.56	6.61	6.70	6.86	6.89	6.92	6.89	6.92	6.84	6.95

ตารางที่ ข-37 ความเป็นกรดต่างในสภาวะการทดลองต่างๆ (ต่อ)

สภาวะการทดลอง	วันที่										
	1	4	8	11	14	20	24	25	32	36	40
30hr60%	8.11	6.54	6.65	6.89	6.92	7.01	7.00	7.03	7.02	7.04	7.02
30hr80%	8.27	6.57	6.72	6.86	7.05	7.05	7.09	7.02	7.08	7.07	7.06
36hr20%	8.12	6.53	6.68	6.68	6.79	6.82	6.78	6.86	6.83	6.81	6.85
36hr40%	8.07	6.57	6.68	6.74	6.87	6.96	7.06	7.02	6.98	6.87	6.94
36hr60%	8.04	6.59	6.71	6.76	6.98	7.01	7.04	7.04	7.03	6.99	7.03
36hr80%	7.82	6.58	6.67	6.88	7.04	7.02	7.03	7.02	7.01	7.09	7.08

ตารางที่ ข-38 ความต่างศักย์ออกซิเดชันรีดักชันในสภาวะการทดลองต่างๆ

สภาวะการทดลอง	วันที่										
	1	4	8	11	14	20	24	25	32	36	40
6hr20%	-244	-248	-245	-243	-252	-248	-247	-256	-247	-253	-267
6hr40%	-251	-246	-247	-244	-251	-248	-253	-268	-256	-257	-270
6hr60%	-256	-260	-243	-259	-260	-261	-266	-270	-262	-255	-283
6hr80%	-265	-262	-261	-258	-266	-270	-281	-274	-277	-284	-293
18hr20%	-245	-252	-236	-231	-240	-250	-248	-243	-246	-249	-261
18hr40%	-253	-261	-236	-245	-250	-262	-253	-243	-250	-252	-279
18hr60%	-263	-262	-262	-258	-262	-277	-266	-264	-258	-262	-283
18hr80%	-269	-272	-281	-304	-293	-297	-291	-310	-286	-286	-301
24hr20%	-245	-253	-251	-248	-241	-252	-264	-257	-239	-242	-251
24hr40%	-256	-259	-254	-257	-253	-275	-279	-263	-261	-254	-261
24hr60%	-267	-268	-299	-264	-268	-285	-286	-273	-284	-298	-294
24hr80%	-274	-282	-304	-294	-308	-300	-306	-319	-299	-311	-307
30hr20%	-244	-251	-246	-247	-258	-237	-240	-236	-243	-249	-242
30hr40%	-255	-260	-242	-267	-262	-247	-254	-256	-259	-257	-261
30hr60%	-260	-268	-252	-272	-277	-262	-266	-268	-263	-260	-269
30hr80%	-262	-272	-282	-298	-287	-293	-308	-285	-286	-289	-281
36hr20%	-251	-236	-235	-238	-233	-243	-243	-239	-242	-237	-240
36hr40%	-262	-253	-257	-259	-257	-259	-255	-259	-257	-251	-248
36hr60%	-269	-266	-256	-270	-282	-272	-287	-264	-275	-291	-296
36hr80%	-271	-274	-283	-287	-302	-312	-297	-300	-304	-311	-298

ตารางที่ ข-39 อุณหภูมิสภาพแวดล้อม

วันที่	อุณหภูมิ(องศาเซลเซียส)
2	31.5
4	30.6
6	28.9
8	31.0
14	30.9
16	30.7
18	29.8
22	30.3
24	30.7
26	29.9
29	31.5
30	30.0
32	30.3
34	30.8
36	32.0
38	31.2
40	29.5

ตารางที่ ข-40 อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพในสภาวะการทดลองต่างๆ

วันที่	อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ (มล./ก.ของแข็งระเหย)			
	6hr20%	6hr40%	6hr60%	6hr80%
1	0±0	0±0	0±0	0±0
4	1.68±0	3.14±0.27	2.83±0.27	3.64±0.36
8	5.21±0.44	5.51±0.62	5.82±0.98	7.66±0.09
11	2.22±0.09	1.23±0.89	10.57±0.53	9.92±0.18
14	7.35±0.53	11.33±0.53	12.64±0.09	14.38±0.09
20	5.44±0.09	6.59±0.36	7.20±0.53	9.92±0.53
24	6.89±0.36	7.51±0.53	8.19±0.09	5.09±0.27
25	5.13±0.53	4.90±0.44	5.51±0.09	1.30±0.36
32	5.74±0.62	3.29±0.62	2.91±0.18	4.60±0.36
36	5.36±0.18	2.91±0.36	2.91±0.98	4.14±0.36
40	1.53±0.80	2.22±0.53	4.37±0.09	0.54±0.36
วันที่	18hr20%	18hr40%	18hr60%	18hr80%
1	0±0	0±0	0±0	0±0
4	1.46±0.44	1.07±0.71	4.06±0.09	6.66±0.44
8	5.97±0.27	5.36±0.44	5.97±0.80	8.96±0.36
11	2.91±0.53	8.73±0.53	13.40±0.44	15.39±0.27
14	11.03±0.53	12.25±0.18	16.31±0.44	18.07±0.18
20	6.28±0.18	9.80±0.36	11.03±0.53	4.67±0.44
24	6.74±0.36	9.04±0.53	7.20±0.18	7.89±0.27
25	5.51±0.62	3.29±0.18	1.99±0.09	1.99±0.27
32	2.99±0.62	0.15±0	0.08±0.09	2.99±0.09
36	1.99±0	2.22±0.80	4.82±0.27	2.37±0.44
40	4.37±0.36	2.83±0.71	2.07±0	5.21±0.09

ตารางที่ ข-40 อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพในสภาวะการทดลองต่างๆ (ต่อ)

วันที่	อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ (มล./ก.ของแข็งระเหย)			
	24hr20%	24hr40%	24hr60%	24hr80%
1	0±0	0±0	0±0	0±0
4	2.99±0.44	1.84±0.18	2.83±0.09	4.82±0.09
8	7.28±0.36	7.20±0.27	7.58±0.18	7.66±0.27
11	5.36±0.53	6.43±0.18	14.70±0.71	15.55±0.27
14	12.25±0.71	14.55±0.53	17.61±0.71	19.53±0.27
20	8.65±0.62	11.03±0.36	8.19±0.44	11.49±0.53
24	4.29±0.36	5.97±0.53	9.11±0.09	10.34±0.44
25	3.29±0.89	4.52±0.18	6.51±0.18	2.76±0.80
32	3.52±0.71	4.67±0.44	0.46±0.53	0.08±0.09
36	3.06±0.18	2.76±0.36	2.53±0.62	1.61±0.62
40	0.38±0.18	0.15±0.44	0.61±0.44	4.44±0.44
วันที่	30hr20%	30hr40%	30hr60%	30hr80%
1	0±0	0±0	0±0	0±0
4	1.61±0.62	4.52±0.44	2.91±0.71	2.60±0.36
8	5.90±0.53	8.81±0.71	8.42±0.27	8.42±0.44
11	6.59±0.71	8.42±0.53	12.64±0.62	8.88±0.53
14	9.80±0.36	12.48±0.09	14.78±0.44	18.61±0.09
20	8.58±0.27	8.58±0.36	4.75±0.53	8.50±0.27
24	4.90±0	5.67±0.53	8.04±0.27	8.50±0.44
25	1.76±0.89	4.06±0.36	2.07±0.53	5.82±0.27
32	0.54±0.44	0.15±0.18	2.37±0.09	6.36±0.27
36	0.84±0.44	0.08±0.09	1.61±0.62	3.83±0.36
40	3.29±2.13	3.14±0.53	2.14±0.44	2.30±0.44

ตารางที่ ข-40 อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพในสภาวะการทดลองต่างๆ (ต่อ)

วันที่	อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ (มล./ก.ของแข็งระเหย)			
	36hr20%	36hr40%	36hr60%	36hr80%
1	0±0	0±0	0±0	0±0
4	3.14±0.62	1.53±0.53	2.68±0.27	0.08±0.44
8	4.67±0	6.66±0.18	7.89±0	9.19±1.15
11	7.05±0.71	7.81±0.18	10.49±0.27	8.50±0.09
14	9.42±0.09	10.80±0.09	11.79±0	16.77±0.44
20	0.08±1.15	7.20±0.36	7.28±0.09	9.27±0.62
24	5.44±0.62	5.36±0.53	5.90±0.44	6.74±0
25	2.07±0.18	1.30±0.53	0.08±0	6.13±0.27
32	2.22±0.44	1.00±0.18	0.08±0.44	0.54±0.27
36	5.13±0.62	0.61±0.53	1.84±0.36	4.75±0.36
40	1.76±0.71	0.23±0.18	0.31±0.09	2.07±0.71

ตารางที่ ข-41 ก๊าซชีวภาพสะสมในสภาวะการทดลองต่างๆ

วันที่	ก๊าซชีวภาพสะสม (มล./ก.ของแข็งระเหย)							
	6hr20%	6hr40%	6hr60%	6hr80%	18hr20%	18hr40%	18hr60%	18hr80%
1	0	0	0	0	0	0	0	0
4	1.68	3.14	2.83	3.64	1.46	1.07	4.06	6.66
8	6.89	8.65	8.65	11.30	7.43	6.43	10.03	15.62
11	9.11	9.88	19.22	21.23	10.34	15.16	23.44	31.02
14	16.47	21.21	31.86	35.61	21.37	27.42	39.75	49.09
20	21.90	27.80	39.06	45.53	27.65	37.22	50.78	53.76
24	28.80	35.31	47.25	50.62	34.39	46.26	57.98	61.65
25	33.93	40.21	52.77	51.92	39.90	49.55	59.97	63.64
32	39.67	43.50	55.68	56.51	42.89	49.70	60.04	66.63
36	45.03	46.41	58.59	60.65	44.88	51.92	64.87	69.00
40	46.56	48.63	62.95	61.19	49.24	54.76	66.94	74.21

ตารางที่ ข-41 ก๊าซชีวภาพสะสมในสภาวะการทดลองต่างๆ (ต่อ)

วันที่	ก๊าซชีวภาพสะสม (มล./ก.ของแฉ่งระเหย)							
	24hr20%	24hr40%	24hr60%	24hr80%	30hr20%	30hr40%	30hr60%	30hr80%
1	0	0	0	0	0	0	0	0
4	2.99	1.84	2.83	4.82	1.61	4.52	2.91	2.60
8	10.26	9.04	10.42	12.48	7.51	13.33	11.33	11.03
11	15.62	15.47	25.12	28.03	14.09	21.75	23.97	19.91
14	27.88	30.02	42.73	47.56	23.89	34.23	38.75	38.52
20	36.53	41.05	50.93	59.05	32.47	42.81	43.50	47.02
24	40.82	47.02	60.04	69.39	37.37	48.48	51.54	55.52
25	44.11	51.54	66.55	72.14	39.14	52.54	53.61	61.34
32	47.64	56.21	67.01	72.22	39.67	52.69	55.98	67.70
36	50.70	58.97	69.54	73.83	40.51	52.77	57.59	71.53
40	51.08	59.12	70.15	78.27	43.81	55.91	59.74	73.83
วันที่	36hr20%	36hr40%	36hr60%	36hr80%				
1	0	0	0	0				
4	3.14	1.53	2.68	0.08				
8	7.81	8.19	10.57	9.27				
11	14.86	16.01	21.06	17.77				
14	24.28	26.80	32.86	34.54				
20	24.35	34.00	40.13	43.81				
24	29.79	39.36	46.03	50.55				
25	31.86	40.67	46.10	56.67				
32	34.08	41.66	46.18	57.21				
36	39.21	42.28	48.02	61.96				
40	40.97	42.50	48.33	64.03				

5. วัตถุประสงค์ขนาด 20-25 มิลลิเมตร

ตารางที่ ข-43 ของแข็งทั้งหมดและของแข็งระเหยในสภาวะการทดลองต่างๆ

สภาวะการทดลอง	ของแข็งทั้งหมด (ร้อยละ)		ของแข็งระเหย(ร้อยละ)	
	เริ่มต้น	สิ้นสุด	เริ่มต้น	สิ้นสุด
6h20%	21.42±10.10	17.41±2.78	15.22±2.99	10.92±10.14
6hr40%	15.54±3.56	11.12±4.20	13.19±0.94	8.32±1.99
6hr60%	17.85±1.61	13.08±1.26	14.66±3.92	9.11±1.77
6hr80%	15.67±1.19	9.96±0.09	11.86±0.01	6.21±1.35
18hr20%	21.29±0.64	16.88±1.39	12.81±0.07	7.68±1.57
18hr40%	15.67±0.09	11.97±1.52	11.50±0.49	6.13±2.81
18hr60%	19.83±1.15	14.89±1.02	13.15±0.34	7.17±1.28
18hr80%	20.29±2.49	14.93±2.62	15.90±2.73	9.65±2.52
24hr20%	18.77±1.44	14.13±0.56	12.73±0.54	7.40±0.14
24hr40%	20.65±1.04	16.30±2.12	12.91±2.46	7.19±0.91
24hr60%	19.77±3.37	14.88±5.65	14.57±1.59	8.17±2.19
24hr80%	16.95±0.35	11.26±0.73	13.02±0.62	6.52±2.72
30hr20%	17.20±5.29	13.55±2.75	13.16±1.06	8.90±0.89
30hr40%	21.47±1.77	15.59±1.27	13.43±0.64	7.95±1.28
30hr60%	19.07±2.02	12.75±2.52	13.00±1.94	7.37±0.06
30hr80%	17.40±1.25	12.60±1.80	12.79±0.15	6.88±0.67
36hr20%	19.69±0.82	12.60±1.36	12.04±2.60	7.37±0.91
36hr40%	17.77±0.26	13.47±1.49	13.86±2.50	8.39±2.27
36hr60%	17.93±0.20	12.59±2.92	12.25±2.08	6.66±1.17
36hr80%	16.56±1.29	11.33±1.71	13.61±0.04	6.94±1.03

ตารางที่ ข-44 ซีโอดีละลายในสภาวะการทดลองต่างๆ

วันที่	ซีโอดีละลาย (มก./ล.)			
	6hr20%	6hr40%	6hr60%	6hr80%
1	2800±565.69	4400±565.69	6000±565.69	8000±1131.37
2	3200±0	5200±565.69	7200±1131.37	8400±1697.06
6	2400±565.69	3200±565.69	4400±0	4800±565.69
14	1600±0	2400±0	3600±565.69	4800±1131.37
18	1200±565.69	3600±565.69	5600±1131.37	6400±1131.37
22	1200±565.69	1600±0	1600±1131.37	2000±565.69
25	2000±565.69	3600±565.69	4000±1131.37	4400±565.69
30	1600±0	2800±565.69	4400±565.69	6000±565.69
34	800±0	1600±565.69	2000±565.69	3600±565.69
38	1600±0	2400±0	2800±565.69	3200±0
40	400±0	800±565.69	2400±565.69	2800±1131.37
วันที่	18hr20%	18hr40%	18hr60%	18hr80%
1	3200±0	4000±1131.37	4800±1131.37	6000±565.69
2	3200±1131.37	4400±565.69	5600±1131.37	6000±565.69
6	2800±0	3200±565.69	5200±1131.37	5600±565.69
14	1600±0	2800±565.69	4400±565.69	6000±565.69
18	1200±565.69	2800±1697.06	4400±565.69	6400±1131.37
22	1600±1131.37	2000±565.69	2400±0	2800±565.69
25	1200±565.69	3200±0	3600±565.69	4400±565.69
30	2000±565.69	3600±565.69	4000±1131.37	4800±0
34	800±0	1200±565.69	2000±565.69	2800±565.69
38	1200±565.69	2000±565.69	2800±1697.06	3600±565.69
40	1200±565.69	2000±0	2800±1131.37	3200±1697.06

ตารางที่ ข-44 ซีโอดีละลายในสภาวะการทดลองต่างๆ (ต่อ)

วันที่	ซีโอดีละลาย (มก./ล.)			
	24hr20%	24hr40%	24hr60%	24hr80%
1	4400±565.69	5600±0	6400±1131.37	6800±565.69
2	4400±565.69	6800±565.69	8000±1131.37	8400±565.69
6	2800±0	3200±565.69	4800±565.69	6800±0
14	2000±565.69	2400±0	3600±565.69	6000±565.69
18	2400±1131.37	3600±1697.06	4800±1131.37	6400±1131.37
22	1600±1131.37	2000±1131.37	3600±565.69	4000±1131.37
25	1200±565.69	2400±1131.37	2800±565.69	3200±0
30	2000±565.69	3200±0	4400±565.69	5600±1131.37
34	1600±0	1600±0	2000±565.69	2800±565.69
38	1600±1131.37	2400±0	2800±565.69	3200±1131.37
40	2000±1131.37	2400±565.69	3200±565.69	3600±1131.37
วันที่	30hr20%	30hr40%	30hr60%	30hr80%
1	2400±1131.37	4000±1131.37	4400±1697.06	5200±565.69
2	2400±1131.37	2800±565.69	3600±565.69	5600±1131.37
6	2400±565.69	4000±565.69	4400±1131.37	6000±0
14	1200±565.69	3600±565.69	4800±1131.37	5200±1697.06
18	3200±1131.37	4000±1131.37	4400±1697.06	6000±565.69
22	1600±1131.37	3200±1131.37	3600±565.69	4000±1131.37
25	1600±0	2400±1131.37	3200±0	4000±1131.37
30	1600±1131.37	2800±565.69	4800±1131.37	5200±565.69
34	1200±0	1200±565.69	2000±565.69	2400±0
38	1200±0	1600±0	2000±565.69	2800±565.69
40	1600±0	3200±565.69	4000±565.69	4400±0

ตารางที่ ข-44 ซีโอดีละลายในสภาวะการทดลองต่างๆ (ต่อ)

วันที่	ซีโอดีละลาย (มก./ล.)			
	36hr20%	36hr40%	36hr60%	36hr80%
1	1600±1131.37	4000±1131.37	4800±0	6000±565.69
2	3200±1131.37	4400±1697.06	4800±2262.74	5200±565.69
6	2400±565.69	3200±1697.06	4000±565.69	6400±565.69
14	2800±565.69	3600±565.69	4000±1131.37	5600±1131.37
18	4400±565.69	4800±0	6000±1697.06	6800±565.69
22	1200±565.69	1600±0	3600±565.69	4000±1131.37
25	1200±565.69	2400±0	3200±0	4000±0
30	2800±1697.06	3200±1131.37	4000±0	4800±0
34	1200±565.69	2000±565.69	2800±565.69	3600±1697.06
38	1600±0	2400±0	2800±565.69	3200±1131.37
40	1200±0	1200±0	2400±565.69	3200±565.69

ตารางที่ ข-45 กรดอินทรีย์ระเหยในสภาวะการทดลองต่างๆ

วันที่	กรดอินทรีย์ระเหย (มก./ล.กรดอะซิติก)			
	6hr20%	6hr40%	6hr60%	6hr80%
1	637.5±88.39	737.5±17.68	862.5±53.03	975.0±88.39
2	700.0±70.71	775.0±35.36	887.5±17.68	1137.5±35.36
6	837.5±17.68	912.5±53.03	1012.5±17.68	1350.0±35.36
14	775.0±35.36	837.5±17.68	925.0±35.36	1100.0±88.39
18	675.0±35.36	800.0±70.71	937.5±17.68	1125.0±17.68
22	625.0±35.36	687.5±53.03	862.5±88.39	987.5±35.36
25	587.5±88.39	675.0±35.36	775.0±35.36	1237.5±17.68
30	600.0±35.36	625.0±70.71	775.0±35.36	1000.0±53.03
34	562.5±17.68	587.5±17.68	737.5±17.68	912.5±35.36
38	587.5±17.68	600.0±35.36	725.0±0	887.5±17.68
40	587.5±17.68	637.5±17.68	737.5±17.68	950.0±70.71

ตารางที่ ข-45 กรดอินทรีย์ระเหยในสภาวะการทดลองต่างๆ (ต่อ)

วันที่	กรดอินทรีย์ระเหย (มก./ล.กรดอะซิติก)			
	18hr20%	18hr40%	18hr60%	18hr80%
1	787.5±53.03	862.5±159.10	925.0±106.07	975.0±106.07
2	812.5±17.68	850.0±70.71	962.5±53.03	1137.5±53.03
6	1087.5±53.03	1175.0±106.07	1250.0±106.07	1350.0±106.07
14	825.0±35.36	937.5±53.03	1000.0±106.07	1100.0±35.36
18	875.0±35.36	900.0±70.71	975.0±106.07	1125.0±35.36
22	775.0±35.36	825.0±35.36	962.5±53.03	987.5±17.68
25	887.5±17.68	962.5±53.03	1125.0±70.71	1237.5±53.03
30	637.5±53.03	775.0±35.36	900.0±70.71	1000.0±106.07
34	612.5±17.68	637.5±53.03	787.5±53.03	912.5±17.68
38	625.0±35.36	712.5±53.03	787.5±53.03	887.5±88.39
40	612.5±53.03	687.5±17.68	787.5±35.36	950.0±35.36
วันที่	24hr20%	24hr40%	24hr60%	24hr80%
1	1037.5±53.03	1050.0±70.71	1112.5±88.39	1262.5±88.39
2	1187.5±88.39	1200.0±70.71	1275.0±35.36	1312.5±17.68
6	1100.0±70.71	1262.5±17.68	1262.5±123.74	1462.5±53.03
14	925.0±0	962.5±53.03	1125.0±35.36	1275.0±35.36
18	975.0±35.36	1012.5±53.03	1025.0±35.36	1175.0±106.07
22	825.0±106.07	887.5±53.03	1050.0±141.42	1187.5±159.10
25	925.0±35.36	1012.5±123.74	1200.0±70.71	1337.5±88.39
30	975.0±70.71	1037.5±17.68	1187.5±17.68	1250.0±35.36
34	700.0±70.71	737.5±17.68	837.5±17.68	975.0±35.36
38	787.5±53.03	825.0±35.36	962.5±53.03	1062.5±17.68
40	650.0±35.36	700.0±35.36	837.5±17.68	975.0±35.36

ตารางที่ ข-45 กรดอินทรีย์ระเหยในสภาวะการทดลองต่างๆ (ต่อ)

วันที่	กรดอินทรีย์ระเหย (มก./ล.กรดอะซิติก)			
	30hr20%	30hr40%	30hr60%	30hr80%
1	712.5±53.03	775.0±106.07	900.0±70.71	962.5±53.03
2	775.0±35.36	850.0±106.07	912.5±53.03	1037.5±17.68
6	962.5±53.03	1062.5±17.68	1187.5±88.39	1287.5±17.68
14	800.0±35.36	925.0±35.36	1012.5±88.39	1137.5±53.03
18	800.0±35.36	887.5±53.03	962.5±53.03	1075.0±0
22	675.0±35.36	800.0±35.36	825.0±35.36	975.0±35.36
25	812.5±17.68	912.5±123.74	1025.0±70.71	1125.0±106.07
30	637.5±17.68	650.0±35.36	862.5±88.39	962.5±53.03
34	612.5±53.03	662.5±17.68	787.5±53.03	912.5±17.68
38	562.5±17.68	625.0±35.36	725.0±35.36	887.5±53.03
40	637.5±88.39	650.0±35.36	800.0±70.71	900.0±35.36
วันที่	36hr20%	36hr40%	36hr60%	36hr80%
1	675.0±0	712.5±88.39	862.5±53.03	837.5±123.74
2	712.5±53.03	737.5±106.07	825.0±35.36	962.5±159.10
6	875.0±70.71	925.0±0	987.5±17.68	1200.0±0
14	650.0±35.36	650.0±35.36	687.5±53.03	912.5±17.68
18	625.0±70.71	700.0±35.36	762.5±17.68	875.0±70.71
22	625.0±35.36	650.0±70.71	750.0±70.71	875.0±70.71
25	612.5±17.68	625.0±70.71	775.0±35.36	887.5±17.68
30	600.0±35.36	625.0±17.68	762.5±53.03	862.5±53.03
34	562.5±17.68	612.5±88.39	700.0±70.71	725.0±106.07
38	550.0±0	612.5±17.68	662.5±159.10	725.0±141.42
40	575.0±0	587.5±17.68	700.0±70.71	837.5±17.68

ตารางที่ ข-46 ความเป็นต่างในสภาวะการทดลองต่างๆ

วันที่	ความเป็นต่าง (มก./ล.แคลเซียมคาร์บอเนต)			
	6hr20%	6hr40%	6hr60%	6hr80%
1	2412.5±123.74	2862.5±53.03	3350.0±35.36	3887.5±53.03
2	2625.0±70.71	3075.0±106.07	3575.0±70.71	4112.5±123.74
6	3412.5±123.74	4925.0±141.42	5875.0±70.71	6100.0±282.84
14	3650.0±141.42	4175.0±106.07	5850.0±565.69	6400.0±282.84
18	2887.5±159.10	3937.5±17.68	5475.0±212.13	6400.0±70.71
22	3400.0±70.71	4750.0±70.71	4900.0±35.36	5337.5±123.74
25	2550.0±70.71	4350.0±70.71	5825.0±35.36	5337.5±265.17
30	2762.5±123.74	4162.5±17.68	5162.5±123.74	6175.0±35.36
34	3150.0±0	3362.5±88.39	3887.5±88.39	6562.5±53.03
38	2850.0±35.36	3975.0±176.78	5887.5±123.74	6700.0±106.07
40	2337.5±17.68	3762.5±88.39	4562.5±88.39	6312.5±17.68
วันที่	18hr20%	18hr40%	18hr60%	18hr80%
1	2562.5±17.68	2825.0±70.71	3612.5±53.03	3725.0±106.07
2	2662.5±88.39	3000.0±176.78	3562.5±17.68	4025.0±70.71
6	4175.0±106.07	4862.5±53.03	5100.0±0	6062.5±17.68
14	3562.5±88.39	4550.0±282.84	5050.0±424.26	6037.5±53.03
18	3125.0±35.36	4050.0±0	5375.0±70.71	5825.0±35.36
22	4337.5±17.68	4462.5±53.03	5350.0±70.71	5612.5±17.68
25	3337.5±53.03	3450.0±70.71	3800.0±70.71	5150.0±35.36
30	3800.0±70.71	4175.0±35.36	4650.0±35.36	5212.5±265.17
34	3450.0±106.07	4350.0±70.71	4900.0±70.71	5150.0±35.36
38	3300.0±70.71	3837.5±88.39	4625.0±35.36	6337.5±70.71
40	3587.5±88.39	3637.5±88.39	4125.0±106.07	5375.0±35.36

ตารางที่ ข-46 ความเป็นต่างในสภาวะการทดลองต่างๆ (ต่อ)

วันที่	ความเป็นต่าง (มก./ล.แคลเซียมคาร์บอเนต)			
	24hr20%	24hr40%	24hr60%	24hr80%
1	2600.0±35.36	3237.5±53.03	3287.5±88.39	4137.5±53.03
2	2850.0±141.42	3350.0±70.71	3537.5±53.03	3950.0±35.36
6	3912.5±88.39	4587.5±123.74	5575.0±35.36	5850.0±70.71
14	3150.0±35.36	4862.5±53.03	5162.5±194.45	6050.0±35.36
18	3537.5±53.03	3825.0±35.36	5375.0±17.68	5637.5±35.36
22	2100.0±35.36	3700.0±70.71	5350.0±35.36	6637.5±159.10
25	2337.5±17.68	2712.5±194.45	4962.5±300.52	5275.0±353.55
30	3950.0±35.36	4175.0±106.07	5350.0±70.71	6662.5±88.39
34	3350.0±70.71	4050.0±35.36	5150.0±141.42	6112.5±17.68
38	3662.5±53.03	4362.5±159.10	5537.5±53.03	6337.5±53.03
40	3912.5±53.03	4375.0±106.07	4600.0±70.71	4687.5±53.03
วันที่	30hr20%	30hr40%	30hr60%	30hr80%
1	2662.5±17.68	3225.0±141.42	3250.0±70.71	3887.5±88.39
2	2900.0±35.36	3325.0±70.71	3600.0±282.84	4050.0±70.71
6	3937.5±159.10	4800.0±282.84	5575.0±70.71	5775.0±141.42
14	3287.5±53.03	4175.0±106.07	5287.5±194.45	5562.5±88.39
18	3587.5±618.72	4325.0±70.71	5575.0±35.36	6350.0±0
22	3837.5±53.03	4037.5±17.68	4325.0±35.36	6350.0±70.71
25	3300.0±70.71	4300.0±35.36	5325.0±106.07	6087.5±17.68
30	3275.0±35.36	4287.5±17.68	5637.5±53.03	6087.5±88.39
34	2875.0±70.71	3650.0±106.07	4825.0±35.36	5200.0±176.78
38	3125.0±35.36	4062.5±88.39	5075.0±35.36	6662.5±88.39
40	3412.5±123.74	3837.5±17.68	4662.5±53.03	6537.5±17.68

ตารางที่ ข-46 ความเป็นต่างในสภาวะการทดลองต่างๆ (ต่อ)

วันที่	ความเป็นต่าง (มก./ล.แคลเซียมคาร์บอเนต)			
	36hr20%	36hr40%	36hr60%	36hr80%
1	2250.0±70.71	2675.0±35.36	2937.5±17.68	3675.0±35.36
2	2462.5±17.68	3112.5±88.39	3500.0±35.36	3750.0±106.07
6	4275.0±35.36	4550.0±70.71	5262.5±335.88	5712.5±17.68
14	3812.5±17.68	4350.0±70.71	4475.0±141.42	5062.5±17.68
18	3112.5±53.03	3550.0±353.55	4087.5±17.68	5912.5±17.68
22	3587.5±17.68	3937.5±88.39	4225.0±106.07	5687.5±88.39
25	3837.5±53.03	4250.0±35.36	4937.5±53.03	6162.5±17.68
30	3387.5±17.68	4075.0±35.36	4662.5±53.03	5125.0±35.36
34	3375.0±176.78	3412.5±53.03	4662.5±17.68	5087.5±17.68
38	3550.0±282.84	4087.5±53.03	4312.5±17.68	5087.5±88.39
40	2987.5±159.10	3600.0±106.07	4437.5±88.39	5125.0±70.71

ตารางที่ ข-47 ความเป็นกรดต่างในสภาวะการทดลองต่างๆ

สภาวะการทดลอง	วันที่										
	1	2	6	14	18	22	25	30	34	38	40
6hr20%	8.12	6.55	6.47	6.76	6.87	6.79	6.74	6.88	6.81	6.79	6.98
6hr40%	7.82	6.65	6.52	6.74	6.82	6.83	6.89	6.93	6.90	6.82	6.81
6hr60%	8.26	6.78	6.57	6.68	6.92	6.97	7.02	6.94	6.91	6.93	6.93
6hr80%	8.15	7.17	6.60	6.73	6.98	6.98	7.06	7.05	7.03	7.01	7.09
18hr20%	8.04	7.43	6.51	6.76	6.82	6.85	6.87	6.88	6.91	6.82	6.83
18hr40%	7.80	7.17	6.52	6.77	6.84	6.89	6.95	6.91	6.94	6.85	6.88
18hr60%	7.98	7.23	6.57	6.74	6.94	6.96	6.92	7.00	6.94	7.01	6.92
18hr80%	8.06	7.35	6.59	6.77	6.95	6.97	7.04	7.06	6.98	7.02	7.02
24hr20%	8.14	7.05	6.54	6.67	6.95	6.86	6.87	6.82	6.91	6.84	6.85
24hr40%	7.98	6.94	6.52	6.66	6.94	6.97	6.92	6.98	6.85	6.84	6.86
24hr60%	8.11	7.01	6.58	6.72	6.95	7.03	7.08	7.08	7.04	6.91	7.02
24hr80%	8.05	7.01	6.57	6.75	7.00	7.04	7.06	7.08	7.01	7.04	7.06
30hr20%	8.10	7.10	6.49	6.68	6.72	6.78	6.82	6.82	6.85	6.87	6.88
30hr40%	7.96	6.94	6.56	6.62	6.86	6.97	6.85	6.94	6.84	6.88	6.96

ตารางที่ ข-47 ความเป็นกรดต่างในสภาวะการทดลองต่างๆ (ต่อ)

สภาวะการทดลอง	วันที่										
	1	2	6	14	18	22	25	30	34	38	40
30hr60%	8.04	6.92	6.57	6.67	6.91	6.94	7.04	6.96	7.01	6.95	6.99
30hr80%	8.08	7.20	6.56	6.67	6.92	7.08	7.02	7.05	7.09	7.02	7.00
36hr20%	8.18	7.13	6.47	6.63	6.79	6.85	6.88	6.88	6.86	6.86	6.93
36hr40%	8.13	7.55	6.54	6.58	6.97	6.86	6.89	6.94	6.82	6.88	6.89
36hr60%	8.15	7.44	6.57	6.65	6.98	6.95	6.94	6.90	6.84	6.86	6.97
36hr80%	8.10	7.23	6.54	6.68	6.92	7.02	6.99	7.01	7.05	7.08	7.05

ตารางที่ ข-48 ความต่างศักย์ออกซิเดชันรีดักชันในสภาวะการทดลองต่างๆ

สภาวะการทดลอง	วันที่										
	1	2	6	14	18	22	25	30	34	38	40
6hr20%	-248	-242	-246	-242	-250	-249	-247	-252	-245	-250	-258
6hr40%	-261	-243	-239	-246	-249	-244	-249	-256	-259	-257	-261
6hr60%	-259	-252	-246	-255	-259	-261	-258	-255	-262	-259	-272
6hr80%	-265	-260	-262	-269	-271	-270	-272	-297	-302	-308	-307
18hr20%	-243	-250	-243	-231	-240	-243	-249	-244	-246	-249	-261
18hr40%	-251	-256	-236	-245	-250	-269	-253	-247	-252	-258	-273
18hr60%	-261	-258	-270	-264	-260	-288	-270	-275	-270	-273	-299
18hr80%	-279	-266	-289	-266	-272	-310	-282	-305	-300	-316	-320
24hr20%	-246	-250	-249	-233	-237	-230	-240	-238	-240	-246	-260
24hr40%	-253	-260	-253	-252	-254	-250	-253	-259	-254	-253	-263
24hr60%	-263	-263	-260	-262	-266	-258	-273	-284	-269	-270	-281
24hr80%	-271	-277	-308	-272	-330	-276	-305	-299	-281	-313	-344
30hr20%	-250	-230	-232	-244	-257	-235	-228	-239	-240	-246	-259
30hr40%	-246	-242	-249	-255	-260	-258	-250	-251	-246	-259	-260
30hr60%	-261	-267	-256	-284	-270	-284	-279	-284	-268	-272	-288
30hr80%	-274	-272	-282	-313	-287	-343	-299	-322	-326	-319	-308
36hr20%	-248	-251	-248	-258	-250	-245	-262	-257	-249	-240	-258
36hr40%	-252	-248	-254	-261	-259	-266	-271	-263	-253	-253	-267
36hr60%	-257	-259	-261	-272	-281	-279	-280	-288	-275	-268	-283
36hr80%	-264	-283	-285	-289	-305	-310	-300	-303	-318	-304	-322

ตารางที่ ข-49 อุณหภูมิสภาพแวดล้อม

วันที่	อุณหภูมิ(องศาเซลเซียส)
1	28.4
2	28.6
4	28.3
6	30.2
8	31.0
10	30.8
11	31.0
14	30.6
15	30.8
18	29.8
22	30.3
25	30.7
26	30.8
29	31.4
30	31.1
33	31.5
35	30.9
36	32.0
40	29.5

ตารางที่ ข-50 อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพในสภาวะการทดลองต่างๆ

วันที่	อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ (มล./ก.ของแข็งระเหย)			
	6hr20%	6hr40%	6hr60%	6hr80%
1	0±0	0±0	0±0	0±0
2	0.54±0.18	0.54±0.53	0.38±0.18	0.54±0.18
6	0.84±0.44	1.61±0.09	1.68±1.60	3.37±0.36
14	8.42±0.89	10.49±0.80	11.56±0.62	12.18±0.62
18	4.75±0.36	7.58±0.09	6.74±0.36	9.04±0.36
22	1.99±0.18	4.75±0	6.97±0.09	9.73±0.62
25	4.14±1.07	4.60±0.36	5.21±0.36	3.98±0.36
30	2.53±0.53	4.06±0.53	1.61±0.89	0.46±0.80
34	1.38±0.53	1.15±0.27	0.77±0.53	2.68±0.80
38	3.91±0.09	1.76±0.44	3.75±0.27	3.68±0.18
40	3.29±0.36	1.23±0.62	3.06±0.62	2.30±0.27
วันที่	18hr20%	18hr40%	18hr60%	18hr80%
1	0±0	0±0	0±0	0±0
2	0.31±0.62	0.46±0.27	0.15±0.09	0.61±0.27
6	0.61±0.53	0.38±0.27	7.58±0.44	9.34±0.44
14	10.95±0.09	11.18±0.36	12.87±0.89	17.38±0.09
18	4.44±0.53	7.51±0.89	7.96±0.36	12.25±0.53
22	5.21±0.71	6.28±0.18	4.06±0.62	5.36±0.27
25	2.22±0.44	3.91±0.09	5.67±0.18	5.13±0.27
30	3.37±0.27	2.22±0.36	0.77±0.80	3.83±0.27
34	0.61±0.53	0.46±0.53	0.54±0.09	3.06±0.71
38	1.84±0.18	3.75±0.27	2.91±0.36	0.84±0.09
40	2.99±0.18	1.76±0	2.53±0.18	1.38±0.44

ตารางที่ ข-50 อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพในสภาวะการทดลองต่างๆ (ต่อ)

วันที่	อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ (มล./ก.ของแข็งระเหย)			
	24hr20%	24hr40%	24hr60%	24hr80%
1	0±0	0±0	0±0	0±0
2	0.15±0.27	0.84±0.18	2.30±0.62	1.53±0.27
6	4.52±0.44	7.20±0.36	9.11±0.44	10.80±0.09
14	15.01±0.71	16.08±0.53	18.69±0.18	20.68±0.18
18	6.20±0.62	6.89±0.53	8.42±1.07	14.55±0.36
22	3.68±1.42	5.51±0.89	5.90±0.27	11.79±0.53
25	1.76±0.09	2.22±0.62	4.29±0.89	1.91±0.44
30	0.31±0.27	0.77±0.44	0.69±0.36	1.23±0.62
34	1.15±0.09	1.00±0.80	0.61±0.36	2.45±1.24
38	0.23±0.44	1.30±0.09	3.60±0.27	3.91±2.22
40	1.00±0.71	1.68±0.09	2.14±0.09	1.91±0.53
วันที่	30hr20%	30hr40%	30hr60%	30hr80%
1	0±0	0±0	0±0	0±0
2	0.54±0.36	0.77±0.44	0.61±0.09	0.38±0.18
6	0.69±0.36	6.20±0.27	6.28±0.36	5.82±0.36
14	8.19±0.09	8.81±0.62	10.19±0.62	14.02±0.27
18	1.68±0.71	1.61±0.80	3.37±0.18	5.74±0.27
22	3.45±0.09	4.60±0	4.44±1.60	7.66±0.36
25	5.13±0.27	1.07±0.36	5.74±0.80	2.68±0.44
30	0.08±0.71	3.06±0.98	1.46±0.18	2.30±0.09
34	0.77±0.18	1.38±0.71	2.76±0.36	1.07±0.18
38	1.07±0.36	2.83±0.44	2.30±0.18	2.22±0.09
40	2.22±0.18	0.84±0.36	1.68±0.18	1.07±0.27

ตารางที่ ข-50 อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพในสภาวะการทดลองต่างๆ (ต่อ)

วันที่	อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ (มล./ก.ของแข็งระเหย)			
	36hr20%	36hr40%	36hr60%	36hr80%
1	0±0	0±0	0±0	0±0
2	0.46±0.09	1.00±0.18	1.07±0.09	0.31±0.27
6	0.69±0.44	1.38±0.18	3.83±0.89	4.14±0.36
14	6.05±0.44	6.97±0.44	8.42±0.89	11.33±0.18
18	0.84±0.80	3.14±0.62	2.22±0.44	2.37±0.62
22	3.75±0.44	5.21±0.71	0.61±1.07	4.90±0.36
25	1.68±0.44	1.30±0.27	3.14±0.27	3.98±0.36
30	0.92±0.27	0.54±0.18	3.45±0.18	3.22±0.62
34	1.23±0.71	1.30±0.44	0.84±0.09	2.91±1.07
38	2.22±0.62	0.77±0.36	2.30±0.18	1.38±0.71
40	2.30±0.09	2.14±0.27	1.68±0.27	2.22±0.36

ตารางที่ ข-51 ก๊าซชีวภาพสะสมในสภาวะการทดลองต่างๆ

วันที่	ก๊าซชีวภาพสะสม (มล./ก.ของแข็งระเหย)							
	6hr20%	6hr40%	6hr60%	6hr80%	18hr20%	18hr40%	18hr60%	18hr80%
1	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0.54	0.54	0.38	0.54	0.31	0.46	0.15	0.61
6	1.38	2.14	2.07	3.91	0.92	0.84	7.74	9.96
14	9.80	12.64	13.63	16.08	11.87	12.02	20.60	27.34
18	14.55	20.22	20.37	25.12	16.31	19.53	28.57	39.59
22	16.54	24.97	27.34	34.85	21.52	25.81	32.63	44.96
25	20.68	29.56	32.55	38.83	23.74	29.72	38.29	50.09
30	23.21	33.62	34.16	39.29	27.11	31.94	39.06	53.92
34	24.58	34.77	34.92	41.97	27.72	32.40	39.59	56.98
38	28.49	36.53	38.68	45.64	29.56	36.15	42.50	57.82
40	31.78	37.76	41.74	47.94	32.55	37.91	45.03	59.20

ตารางที่ ข-51 ก๊าซชีวภาพสะสมในสภาวะการทดลองต่างๆ (ต่อ)

วันที่	ก๊าซชีวภาพสะสม (มล./ก.ของแข็งระเหย)							
	24hr20%	24hr40%	24hr60%	24hr80%	30hr20%	30hr40%	30hr60%	30hr80%
1	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0.15	0.84	2.30	1.53	0.54	0.77	0.61	0.38
6	4.67	8.04	11.41	12.33	1.23	6.97	6.89	6.20
14	19.68	24.12	30.10	33.01	9.42	15.78	17.08	20.22
18	25.89	31.02	38.52	47.56	11.10	17.38	20.45	25.96
22	29.56	36.53	44.42	59.35	14.55	21.98	24.89	33.62
25	31.32	38.75	48.71	61.27	19.68	23.05	30.63	36.30
30	31.63	39.52	49.40	62.49	19.76	26.12	32.09	38.60
34	32.78	40.51	50.01	64.94	20.52	27.49	34.85	39.67
38	33.01	41.82	53.61	68.85	21.60	30.33	37.14	41.89
40	34.00	43.50	55.75	70.76	23.82	31.17	38.83	42.96
วันที่	36hr20%	36hr40%	36hr60%	36hr80%				
1	0	0	0	0				
2	0.46	1.00	1.07	0.31				
6	1.15	2.37	4.90	4.44				
14	7.20	9.34	13.33	15.78				
18	8.04	12.48	15.55	18.15				
22	11.79	17.69	16.16	23.05				
25	13.48	18.99	19.30	27.03				
30	14.40	19.53	22.75	30.25				
34	15.62	20.83	23.59	33.16				
38	17.84	21.60	25.89	34.54				
40	20.14	23.74	27.57	36.76				

6. วัตถุบขนาด 25-30 มิลลิเมตร

ตารางที่ ข-53 ของแข็งทั้งหมดและของแข็งระเหยในสภาวะการทดลองต่างๆ

สภาวะ การ ทดลอง	ของแข็งทั้งหมด (ร้อยละ)		ของแข็งระเหย(ร้อยละ)	
	เริ่มต้น	สิ้นสุด	เริ่มต้น	สิ้นสุด
6h20%	16.39±2.36	23.06±0.07	11.99±2.64	7.31±2.49
6hr40%	22.87±1.27	11.44±2.78	14.79±2.91	9.26±1.69
6hr60%	17.31±1.14	11.26±2.97	12.54±0.95	6.81±0.51
6hr80%	17.55±2.28	9.22±3.49	12.02±1.67	5.71±1.77
18hr20%	22.03±5.94	16.51±4.65	15.12±4.79	9.67±4.55
18hr40%	16.43±2.63	17.94±1.32	12.40±0.70	6.34±2.12
18hr60%	19.80±1.20	12.90±0.77	11.77±2.36	5.51±0.08
18hr80%	17.67±2.73	18.78±5.51	13.49±3.31	6.67±0.91
24hr20%	19.61±5.64	11.80±3.37	13.73±0	8.17±2.19
24hr40%	22.75±1.51	11.26±2.93	13.58±4.00	6.64±2.96
24hr60%	17.36±2.04	17.74±0.73	12.40±0.26	5.49±2.69
24hr80%	21.06±1.85	18.31±3.86	13.09±1.78	5.88±2.00
30hr20%	21.75±2.17	17.12±0.89	13.62±1.80	8.63±8.28
30hr40%	17.41±5.59	13.78±1.13	11.23±1.63	6.00±3.73
30hr60%	16.93±2.26	14.09±2.52	11.93±2.10	6.27±4.81
30hr80%	16.25±2.88	12.75±0.93	12.10±1.12	5.63±1.76
36hr20%	18.68±1.03	15.82±0.72	11.14±0.25	6.55±1.86
36hr40%	22.07±5.65	13.42±7.49	13.37±0.51	8.54±5.31
36hr60%	19.56±0.85	10.39±3.04	13.14±1.31	7.32±3.44
36hr80%	21.89±3.65	10.27±2.51	13.25±4.31	7.03±1.07

ตารางที่ ข-54 ซีโอดีละลายในสภาวะการทดลองต่างๆ

วันที่	ซีโอดีละลาย (มก./ล.)			
	6hr20%	6hr40%	6hr60%	6hr80%
1	760±395.98	800±113.14	880±0	1080±56.57
4	2600±848.53	3000±282.84	4000±565.69	4200±282.84
8	2400±565.69	4000±565.69	4600±282.84	4800±1131.37
11	1000±282.84	2000±565.69	2800±565.69	4000±1131.37
14	1200±565.69	2000±565.69	2800±1131.37	3200±1131.37
20	1200±565.69	2800±565.69	3600±1697.06	4400±1697.06
24	2000±565.69	2800±565.69	3600±565.69	4400±565.69
25	1200±565.69	1600±1131.37	2800±565.69	3200±1131.37
32	1200±565.69	2000±1131.37	2400±0	4400±565.69
36	1000±282.84	1400±282.84	2200±282.84	4400±1697.06
40	800±565.69	1600±565.69	2000±0	3200±1697.06
วันที่	18hr20%	18hr40%	18hr60%	18hr80%
1	880±113.14	920±282.84	1080±56.57	1280±113.14
4	3200±565.69	4600±282.84	4600±282.84	4800±565.69
8	2600±282.84	4000±565.69	4800±0	5600±0
11	1000±282.84	1800±282.84	3200±565.69	4000±1131.37
14	1200±565.69	2400±0	2800±565.69	4000±0
20	1600±0	3200±1131.37	4000±1131.37	4800±1131.37
24	1200±565.69	2000±565.69	4000±1131.37	4400±565.69
25	1200±565.69	1600±1131.37	2800±565.69	2800±565.69
32	1200±565.69	2400±1131.37	2800±565.69	3200±0
36	1800±282.84	2200±282.84	2600±282.84	4000±0
40	1200±282.84	1600±565.69	2000±0	2400±565.69

ตารางที่ ข-54 ซีโอดีละลายในสภาวะการทดลองต่างๆ (ต่อ)

วันที่	ซีโอดีละลาย (มก./ล.)			
	24hr20%	24hr40%	24hr60%	24hr80%
1	1040±113.14	1120±113.14	1280±0	1320±169.71
4	4200±282.84	4000±1131.37	5200±565.69	6000±565.69
8	4200±282.84	5000±282.84	5200±565.69	5600±1131.37
11	1600±565.69	2400±565.69	3800±282.84	4400±565.69
14	1200±565.69	2800±565.69	3200±0	3600±565.69
20	2000±565.69	2400±565.69	3600±565.69	4000±1131.37
24	2800±565.69	3600±565.69	4000±0	5200±565.69
25	1600±1131.37	2000±565.69	2800±565.69	3200±2262.74
32	2400±1131.37	2800±565.69	3600±565.69	4800±1131.37
36	1600±565.69	2200±848.53	2400±0	4400±565.69
40	1600±565.69	2000±0	2400±565.69	2800±0
วันที่	30hr20%	30hr40%	30hr60%	30hr80%
1	1200±113.14	1240±169.71	1480±56.57	1840±452.55
4	3200±565.69	4600±282.84	5000±282.84	6000±565.69
8	2600±282.84	3200±565.69	4000±565.69	5600±1131.37
11	1400±282.84	2800±0	3400±282.84	5200±565.69
14	1200±565.69	2800±565.69	3600±565.69	4400±565.69
20	800±0	1600±1131.37	2800±565.69	4400±1697.06
24	1600±0	3200±1131.37	5200±565.69	5600±0
25	1200±565.69	2000±565.69	2400±1131.37	2400±1131.37
32	1600±0	3200±1131.37	4000±1131.37	4400±565.69
36	1400±0	2400±565.69	2600±282.84	3200±1131.37
40	1600±0	2000±0	3200±565.69	3200±565.69

ตารางที่ ข-54 ซีโอดีละลายในสภาวะการทดลองต่างๆ (ต่อ)

วันที่	ซีโอดีละลาย (มก./ล.)			
	3hr20%	3hr40%	3hr60%	3hr80%
1	1240±56.57	1400±56.57	1480±56.57	1640±282.84
4	2400±565.69	2800±565.69	4200±282.84	6400±565.69
8	2400±565.69	4000±565.69	4600±282.84	4800±1131.37
11	2200±282.84	3000±282.84	3200±0	5200±565.69
14	1200±565.69	2800±565.69	3200±0	4400±565.69
20	1200±565.69	2400±0	2800±565.69	3600±565.69
24	1200±565.69	3200±0	3600±565.69	4400±565.69
25	1200±565.69	1600±0	2000±565.69	3200±1131.37
32	1600±0	2000±565.69	3600±565.69	4400±565.69
36	1000±282.84	2000±565.69	3200±565.69	4000±1131.37
40	1200±0	1200±0	2000±0	2800±0

ตารางที่ ข-55 กรดอินทรีย์ระเหยในสภาวะการทดลองต่างๆ

วันที่	กรดอินทรีย์ระเหย (มก./ล.กรดอะซิติก)			
	6hr20%	6hr40%	6hr60%	6hr80%
1	650.0±35.36	712.5±17.68	825.0±70.71	975.0±70.71
4	687.5±17.68	762.5±17.68	750.0±106.07	887.5±88.39
8	775.0±35.36	887.5±53.03	925.0±70.71	1125.0±35.36
11	737.5±53.03	812.5±17.68	887.5±53.03	1050.0±35.36
14	762.5±17.68	787.5±88.39	912.5±53.03	1025.0±35.36
20	600.0±141.42	800.0±35.36	875.0±70.71	1012.5±17.68
24	637.5±53.03	700.0±70.71	812.5±17.68	950.0±141.42
25	587.5±53.03	637.5±53.03	700.0±35.36	812.5±17.68
32	575.0±0	587.5±17.68	662.5±53.03	800.0±35.36
36	575.0±35.36	600.0±0	700.0±35.36	800.0±70.71
40	562.5±17.68	612.5±17.68	712.5±53.03	750.0±35.36

ตารางที่ ข-55 กรดอินทรีย์ระเหยในสภาวะการทดลองต่างๆ (ต่อ)

วันที่	กรดอินทรีย์ระเหย (มก./ล.กรดอะซิติก)			
	18hr20%	18hr40%	18hr60%	18hr80%
1	700.0±70.71	750.0±141.42	862.5±88.39	987.5±123.74
4	787.5±17.68	887.5±53.03	1000.0±35.36	1087.5±17.68
8	1050.0±35.36	1125.0±35.36	1200.0±141.42	1237.5±123.74
11	825.0±35.36	900.0±35.36	987.5±88.39	1112.5±53.03
14	812.5±17.68	875.0±70.71	987.5±88.39	1075.0±35.36
20	750.0±35.36	925.0±35.36	987.5±53.03	1062.5±17.68
24	750.0±70.71	812.5±17.68	875.0±106.07	900.0±212.13
25	887.5±53.03	912.5±17.68	1075.0±106.07	1162.5±17.68
32	587.5±53.03	662.5±53.03	750.0±35.36	887.5±17.68
36	600.0±35.36	650.0±70.71	737.5±53.03	837.5±88.39
40	612.5±17.68	637.5±53.03	775.0±88.39	812.5±88.39
วันที่	24hr20%	24hr40%	24hr60%	24hr80%
1	862.5±17.68	875.0±70.71	1037.5±159.10	1300.0±35.36
4	1087.5±53.03	1125.0±35.36	1212.5±53.03	1262.5±53.03
8	1125.0±35.36	1225.0±0	1337.5±123.74	1412.5±17.68
11	837.5±17.68	962.5±53.03	1062.5±17.68	1125.0±70.71
14	887.5±53.03	937.5±17.68	1137.5±53.03	1187.5±17.68
20	862.5±53.03	975.0±70.71	1025.0±35.36	1137.5±53.03
24	775.0±35.36	825.0±0	1000.0±70.71	1162.5±159.10
25	950.0±70.71	962.5±53.03	1175.0±0	1287.5±17.68
32	687.5±17.68	762.5±17.68	837.5±53.03	937.5±53.03
36	737.5±88.39	800.0±35.36	925.0±35.36	1075.0±35.36
40	625.0±0	650.0±35.36	787.5±17.68	875.0±70.71

ตารางที่ ข-55 กรดอินทรีย์ระเหยในสภาวะการทดลองต่างๆ (ต่อ)

วันที่	กรดอินทรีย์ระเหย (มก./ล.กรดอะซิติก)			
	30hr20%	30hr40%	30hr60%	30hr80%
1	712.5±88.39	762.5±17.68	812.5±53.03	962.5±17.68
4	675.0±35.36	762.5±88.39	837.5±17.68	962.5±53.03
8	925.0±35.36	1012.5±17.68	1162.5±123.74	1287.5±53.03
11	775.0±35.36	800.0±35.36	962.5±53.03	1062.5±123.74
14	712.5±53.03	900.0±35.36	975.0±35.36	1050.0±70.71
20	762.5±17.68	887.5±53.03	912.5±17.68	1062.5±53.03
24	662.5±17.68	762.5±88.39	800.0±70.71	962.5±53.03
25	762.5±17.68	862.5±88.39	962.5±53.03	1112.5±88.39
32	600.0±35.36	625.0±35.36	737.5±88.39	837.5±123.74
36	600.0±70.71	612.5±53.03	725.0±35.36	812.5±53.03
40	575.0±35.36	612.5±17.68	762.5±17.68	850.0±0
วันที่	36hr20%	36hr40%	36hr60%	36hr80%
1	612.5±17.68	662.5±17.68	787.5±17.68	825.0±35.36
4	662.5±53.03	712.5±159.10	875.0±70.71	862.5±53.03
8	837.5±17.68	887.5±17.68	1037.5±17.68	625.0±70.71
11	700.0±35.36	737.5±35.36	887.5±53.03	687.5±300.52
14	687.5±17.68	775.0±70.71	812.5±53.03	987.5±53.03
20	612.5±17.68	650.0±35.36	800.0±35.36	875.0±106.07
24	625.0±70.71	650.0±106.07	712.5±53.03	850.0±106.07
25	587.5±17.68	650.0±17.68	762.5±17.68	862.5±53.03
32	575.0±35.36	587.5±17.68	662.5±17.68	675.0±106.07
36	587.5±17.68	562.5±35.36	587.5±53.03	762.5±17.68
40	562.5±17.68	600.0±35.36	712.5±53.03	825.0±70.71

ตารางที่ ข-56 ความเป็นต่างในสภาวะการทดลองต่างๆ

วันที่	ความเป็นต่าง (มก./ล.แคลเซียมคาร์บอเนต)			
	6hr20%	6hr40%	6hr60%	6hr80%
1	2337.5±88.39	3025.0±141.42	3475.0±106.07	3625.0±70.71
4	2587.5±53.03	3175.0±35.36	3675.0±35.36	4150.0±35.36
8	3900.0±70.71	4387.5±17.68	5375.0±35.36	5912.5±17.68
11	3400.0±35.36	4112.5±53.03	4900.0±35.36	6087.5±53.03
14	3437.5±88.39	3575.0±70.71	5550.0±70.71	5837.5±53.03
20	3887.5±53.03	4387.5±53.03	4900.0±35.36	5837.5±88.39
24	4350.0±70.71	5112.5±17.68	5625.0±35.36	5837.5±53.03
25	2362.5±88.39	3075.0±35.36	4637.5±17.68	6150.0±35.36
32	3862.5±88.39	5087.5±88.39	5375.0±35.36	6162.5±88.39
36	2912.5±88.39	4300.0±35.36	4450.0±35.36	4875.0±35.36
40	2387.5±53.03	3387.5±88.39	4875.0±106.07	6225.0±35.36
วันที่	18hr20%	18hr40%	18hr60%	18hr80%
1	2562.5±88.39	2662.5±123.74	3637.5±123.74	3837.5±123.74
4	2750.0±282.84	3437.5±53.03	3600.0±35.36	4662.5±88.39
8	3150.0±0	3837.5±17.68	4950.0±35.36	5275.0±70.71
11	3512.5±53.03	4537.5±53.03	5175.0±70.71	6362.5±88.39
14	3337.5±88.39	4137.5±17.68	4337.5±53.03	5625.0±70.71
20	4312.5±53.03	4900.0±70.71	5425.0±35.36	6375.0±70.71
24	3512.5±53.03	5400.0±70.71	5637.5±17.68	6075.0±0
25	2787.5±53.03	3125.0±35.36	3362.5±88.39	4312.5±53.03
32	4337.5±229.81	5075.0±35.36	5762.5±17.68	6625.0±35.36
36	2600.0±106.07	4075.0±70.71	4737.5±53.03	6537.5±88.39
40	3175.0±35.36	3650.0±70.71	3825.0±70.71	4537.5±53.03

ตารางที่ ข-56 ความเป็นต่างในสภาวะการทดลองต่างๆ (ต่อ)

วันที่	ความเป็นต่าง (มก./ล.แคลเซียมคาร์บอเนต)			
	24hr20%	24hr40%	24hr60%	24hr80%
1	2400.0±70.71	2600.0±141.42	3112.5±17.68	3425.0±70.71
4	2912.5±17.68	3387.5±88.39	3612.5±88.39	4137.5±88.39
8	3187.5±53.03	4312.5±53.03	4887.5±17.68	4887.5±53.03
11	3250.0±70.71	4237.5±53.03	5625.0±35.36	6062.5±53.03
14	2837.5±17.68	4350.0±35.36	4337.5±70.71	5400.0±53.03
20	4187.5±17.68	5700.0±70.71	5425.0±70.71	6100.0±35.36
24	3862.5±88.39	4637.5±53.03	5175.0±70.71	5625.0±35.36
25	2412.5±88.39	3162.5±17.68	4887.5±123.74	5337.5±17.68
32	3837.5±123.74	5375.0±35.36	5625.0±35.36	6325.0±70.71
36	2862.5±53.03	3137.5±17.68	3625.0±70.71	6537.5±17.68
40	3687.5±88.39	4337.5±53.03	4750.0±70.71	5050.0±35.36
วันที่	30hr20%	30hr40%	30hr60%	30hr80%
1	2625.0±70.71	2887.5±53.03	3112.5±53.03	3350.0±70.71
4	2925.0±35.36	3037.5±159.10	3700.0±35.36	3850.0±70.71
8	3337.5±88.39	4050.0±70.71	4887.5±53.03	5837.5±88.39
11	3700.0±35.36	4450.0±35.36	5250.0±70.71	6337.5±53.03
14	2887.5±53.03	4100.0±70.71	4562.5±17.68	4837.5±53.03
20	3637.5±53.03	4487.5±17.68	5687.5±88.39	6837.5±53.03
24	3675.0±35.36	4350.0±35.36	5837.5±53.03	6912.5±88.39
25	2625.0±70.71	4100.0±35.36	4937.5±88.39	5825.0±70.71
32	3775.0±35.36	4887.5±53.03	5362.5±17.68	6800.0±35.36
36	3162.5±88.39	4125.0±106.07	4225.0±106.07	6775.0±35.36
40	3175.0±35.36	3362.5±88.39	4137.5±53.03	6050.0±70.71

ตารางที่ ข-56 ความเป็นต่างในสภาวะการทดลองต่างๆ (ต่อ)

วันที่	ความเป็นต่าง (มก./ล.แคลเซียมคาร์บอเนต)			
	36hr20%	36hr40%	36hr60%	36hr80%
1	2087.5±123.74	2825.0±35.36	3075.0±35.36	3550.0±70.71
4	2900.0±35.36	3400.0±35.36	3850.0±70.71	4075.0±35.36
8	3375.0±35.36	4212.5±53.03	4975.0±70.71	5275.0±70.71
11	3325.0±35.36	3825.0±35.36	5362.5±17.68	6400.0±35.36
14	3762.5±17.68	3875.0±106.07	4075.0±70.71	4687.5±17.68
20	3625.0±70.71	5062.5±88.39	6075.0±70.71	6450.0±141.42
24	3087.5±123.74	4625.0±35.36	5662.5±53.03	6375.0±106.07
25	3125.0±106.07	4037.5±17.68	4637.5±123.74	5825.0±70.71
32	3375.0±106.07	3600.0±106.07	3837.5±53.03	5900.0±35.36
36	3412.5±17.68	3875.0±106.07	4162.5±88.39	6087.5±88.39
40	3437.5±53.03	3575.0±35.36	4337.5±88.39	4887.5±17.68

ตารางที่ ข-57 ความเป็นกรดต่างในสภาวะการทดลองต่างๆ

สภาวะการทดลอง	วันที่										
	1	4	8	11	14	20	24	25	32	36	40
6hr20%	7.84	6.49	6.54	6.66	6.73	6.79	6.73	6.75	6.78	6.80	6.85
6hr40%	7.87	6.51	6.55	6.73	6.88	6.81	6.87	6.93	6.90	6.90	6.98
6hr60%	8.16	6.54	6.47	6.80	6.81	6.84	7.02	7.04	6.92	6.97	7.01
6hr80%	8.23	6.54	6.48	6.86	6.82	6.96	7.08	7.02	7.08	7.05	7.05
18hr20%	7.75	6.49	6.42	6.67	6.78	6.77	6.83	6.85	6.86	6.83	6.88
18hr40%	8.24	6.56	6.47	6.76	6.84	6.87	6.88	6.91	6.89	6.87	6.93
18hr60%	8.17	6.52	6.58	6.80	6.82	6.90	7.02	7.04	7.00	6.97	7.03
18hr80%	7.94	6.50	6.55	6.76	6.94	6.96	7.13	7.08	7.05	7.06	7.08
24hr20%	7.94	6.43	6.46	6.69	6.76	6.81	6.88	6.79	6.84	6.76	6.83
24hr40%	7.86	6.48	6.52	6.76	6.81	6.86	6.93	6.85	6.97	6.88	6.91
24hr60%	8.02	6.56	6.64	6.88	6.91	6.99	7.00	7.02	6.94	6.96	7.03
24hr80%	8.09	6.63	6.75	6.94	6.93	6.96	7.05	6.99	6.95	6.98	7.08
30hr20%	7.93	6.44	6.39	6.66	6.77	6.75	6.84	6.74	6.88	6.74	6.83
30hr40%	7.88	6.56	6.60	6.87	6.78	6.83	7.00	6.87	6.95	6.88	6.94

ตารางที่ ข-57 ความเป็นกรดต่างในสภาวะการทดลองต่างๆ (ต่อ)

สภาวะการทดลอง	วันที่										
	1	4	8	11	14	20	24	25	32	36	40
30hr60%	8.01	6.56	6.61	6.82	6.90	6.96	7.01	6.93	6.98	6.92	7.04
30hr80%	8.14	6.60	6.75	6.93	6.86	7.04	6.99	7.00	7.01	7.07	7.05
36hr20%	8.10	6.52	6.61	6.64	6.82	6.87	6.82	6.79	6.80	6.86	6.91
36hr40%	8.05	6.54	6.63	6.89	6.87	6.90	6.93	6.87	6.92	6.97	7.03
36hr60%	8.08	6.54	6.54	6.85	6.87	6.92	7.05	6.99	6.99	6.94	7.04
36hr80%	7.82	6.56	6.63	6.96	6.91	7.02	7.10	7.11	7.04	7.07	7.09

ตารางที่ ข-58 ความต่างศักย์ออกซิเดชันรีดักชันในสภาวะการทดลองต่างๆ

สภาวะการทดลอง	วันที่										
	1	4	8	11	14	20	24	25	32	36	40
6hr20%	-244	-244	-245	-243	-252	-248	-247	-256	-247	-253	-250
6hr40%	-249	-242	-247	-244	-251	-258	-253	-258	-256	-256	-259
6hr60%	-254	-250	-243	-259	-260	-261	-266	-261	-262	-264	-277
6hr80%	-259	-259	-261	-269	-266	-270	-271	-263	-277	-284	-285
18hr20%	-245	-241	-236	-231	-240	-250	-248	-243	-246	-249	-244
18hr40%	-252	-253	-236	-245	-250	-262	-253	-243	-250	-252	-255
18hr60%	-258	-260	-262	-258	-262	-277	-266	-264	-258	-262	-284
18hr80%	-262	-271	-262	-265	-283	-277	-281	-280	-277	-286	-304
24hr20%	-248	-244	-251	-248	-241	-252	-264	-257	-239	-242	-257
24hr40%	-253	-254	-263	-257	-253	-275	-279	-263	-251	-254	-266
24hr60%	-267	-264	-299	-264	-268	-285	-286	-273	-264	-278	-307
24hr80%	-271	-287	-304	-284	-298	-304	-316	-296	-301	-304	-317
30hr20%	-239	-241	-246	-257	-258	-246	-240	-236	-243	-249	-267
30hr40%	-240	-246	-242	-261	-257	-247	-254	-256	-259	-257	-272
30hr60%	-249	-249	-252	-272	-277	-262	-266	-268	-263	-260	-279
30hr80%	-252	-275	-282	-298	-287	-293	-308	-285	-286	-289	-309
36hr20%	-245	-238	-244	-238	-242	-243	-243	-239	-242	-237	-240
36hr40%	-252	-247	-257	-259	-257	-259	-255	-259	-257	-251	-250
36hr60%	-265	-262	-257	-275	-290	-278	-287	-272	-278	-291	-287
36hr80%	-271	-274	-293	-307	-303	-297	-300	-310	-306	-308	-302

ตารางที่ ข-59 อุณหภูมิสภาพแวดล้อม

วันที่	อุณหภูมิ(องศาเซลเซียส)
2	31.5
4	30.6
6	28.9
8	26.3
14	30.9
16	30.7
18	30.9
22	29.2
24	29.9
26	29.9
25	29.8
30	30
32	30.3
34	30.8
36	30.9
38	31.2
40	30.4

ตารางที่ ข-60 อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพในสภาวะการทดลองต่างๆ

วันที่	อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ (มล./ก.ของแข็งระเหย)			
	6hr20%	6hr40%	6hr60%	6hr80%
1	0±0	0±0	0±0	0±0
4	1.68±0	3.14±0.27	3.52±0.36	3.91±0.27
8	0.61±0.44	0.84±0.53	5.97±0.98	4.60±0.09
11	3.68±0.53	6.74±0.53	7.28±0.09	9.11±0.27
14	6.43±0.89	7.43±0.09	8.12±0.53	9.65±0.18
20	5.44±0.09	6.59±0.36	7.20±0.53	9.04±0.53
24	3.37±0.71	5.82±0.53	6.51±0.09	6.05±0.27
25	3.60±0.18	4.60±0.44	5.21±0.09	5.13±0.18
32	3.83±0.27	2.60±0.62	2.22±0.18	3.91±0.36
36	2.45±0.18	1.23±0.36	2.68±0.98	2.45±0.36
40	1.07±0.80	2.68±0.53	2.91±0.53	1.00±0.36
วันที่	18hr20%	18hr40%	18hr60%	18hr80%
1	0±0	0±0	0±0	0±0
4	0.08±0.44	4.60±0.53	4.06±0.09	4.37±0.09
8	0.61±1.33	1.76±0.36	1.30±0.71	0.38±0.71
11	2.76±0.53	8.58±0.53	9.88±0.62	10.57±0.71
14	8.88±0.71	10.88±0.18	12.18±0.44	13.25±0.44
20	6.28±0.18	9.80±0.36	7.96±0.53	4.67±0.27
24	4.60±0.18	7.51±0.36	8.58±0.18	9.27±0.27
25	5.05±0.89	4.67±0.36	4.75±0.09	4.75±0.27
32	2.30±0.62	1.23±0.27	2.14±0.27	2.30±0.09
36	0.38±0.09	0.54±0.80	3.14±0.27	2.99±0.62
40	4.82±0.36	3.29±0.71	2.60±0.09	4.75±0.09

ตารางที่ ข-60 อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพในสภาวะการทดลองต่างๆ (ต่อ)

วันที่	อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ (มล./ก.ของแข็งระเหย)			
	24hr20%	24hr40%	24hr60%	24hr80%
1	0±0	0±0	0±0	0±0
4	2.99±0.44	1.84±0.18	2.22±0.27	4.82±0.09
8	2.68±0.36	2.60±0.27	2.68±0.18	2.99±0.18
11	5.05±0.18	11.49±0.53	13.48±0.53	16.47±0.27
14	11.33±0.36	12.41±0.36	17.77±0.71	18.61±0.27
20	4.21±0.27	7.96±0.36	8.19±0.44	11.49±0.53
24	5.05±0.36	7.35±0.53	9.57±0.44	8.65±0.62
25	3.91±0.89	4.21±0.18	6.20±0.18	3.98±0.98
32	2.22±0.71	3.98±0.44	5.90±0.53	1.99±0.62
36	0.61±0.71	1.07±0.36	0.84±0.62	0.38±0.09
40	0.69±0.36	0.61±0.44	1.07±0.44	2.30±0.44
วันที่	30hr20%	30hr40%	30hr60%	30hr80%
1	0±0	0±0	0±0	0±0
4	1.61±0.62	1.46±0.44	1.68±0.36	2.60±0.36
8	0.15±0.62	2.53±0.36	2.30±1.33	3.83±0.44
11	7.20±0.53	9.42±0.09	10.19±0.44	12.48±0.09
14	9.65±0.71	11.49±0.53	12.64±0.62	15.16±0.36
20	4.37±0.44	6.59±0.53	4.75±0.53	8.50±0.27
24	3.37±0.53	7.05±0.53	8.04±0.09	9.11±0.62
25	4.06±0.36	3.75±0.36	3.91±0.53	4.90±0.44
32	0.46±0.27	0.84±0.36	1.68±0.09	5.67±0.27
36	0.23±0.27	1.00±0.80	0.15±0.71	2.14±0.36
40	1.91±0.36	2.99±0.18	0.46±0.44	3.37±0.44

ตารางที่ ข-60 อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพในสภาวะการทดลองต่างๆ (ต่อ)

วันที่	อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ (มล./ก.ของแข็งระเหย)			
	36hr20%	36hr40%	36hr60%	36hr80%
1	0±0	0±0	0±0	0±0
4	1.91±0.62	1.53±0.53	2.68±0.27	0.08±0.44
8	0.15±0.09	0.69±0.36	3.22±0.09	2.30±0.27
11	4.29±0.53	7.58±0.62	8.73±0	11.10±0.62
14	6.51±0.80	10.26±0.89	11.56±0.09	13.56±0.27
20	2.83±0.44	7.20±0.36	7.28±0.09	7.74±1.15
24	4.37±0.62	6.74±0.53	6.97±0.44	8.88±0.89
25	3.75±0	3.91±0.36	4.06±0.36	5.82±0.27
32	1.53±0.44	0.31±0.27	0.15±0.09	0.15±0.09
36	3.45±0.62	0.15±0.18	0.15±0.36	3.06±0.36
40	1.91±0.71	1.91±0.18	0.46±0.09	2.22±0.71

ตารางที่ ข-61 ก๊าซชีวภาพสะสมในสภาวะการทดลองต่างๆ

วันที่	ก๊าซชีวภาพสะสม (มล./ก.ของแข็งระเหย)							
	6hr20%	6hr40%	6hr60%	6hr80%	18hr20%	18hr40%	18hr60%	18hr80%
1	0	0	0	0	0	0	0	0
2	2.76	3.14	3.52	3.91	0.08	4.60	4.06	4.37
6	6.36	3.98	9.50	8.50	0.69	6.36	5.36	4.75
14	21.83	10.72	16.77	17.61	3.45	14.93	15.24	15.32
18	32.09	18.15	24.89	27.26	12.33	25.81	27.42	28.57
22	36.76	24.74	32.09	36.30	18.61	35.61	35.38	33.24
25	45.49	30.56	38.60	42.35	23.21	43.12	43.96	42.50
30	54.15	35.15	43.81	47.48	28.26	47.79	48.71	47.25
34	59.43	37.76	46.03	51.39	30.56	49.01	50.85	49.55
38	65.79	38.98	48.71	53.84	30.94	49.55	53.99	52.54
40	73.14	41.66	51.62	54.84	35.77	52.84	56.60	57.29

ตารางที่ ข-62 ก๊าซชีวภาพสะสมในสภาวะการทดลองต่างๆ (ต่อ)

วันที่	ก๊าซชีวภาพสะสม (มล./ก.ของแข็งระเหย)							
	24hr20%	24hr40%	24hr60%	24hr80%	30hr20%	30hr40%	30hr60%	30hr80%
1	0	0	0	0	0	0	0	0
2	2.99	1.84	2.22	4.82	1.61	1.46	1.68	2.60
6	5.67	4.44	4.90	7.81	1.76	3.98	3.98	6.43
14	10.72	15.93	18.38	24.28	8.96	13.40	14.17	18.92
18	22.06	28.34	36.15	42.89	18.61	24.89	26.80	34.08
22	26.27	36.30	44.34	54.38	22.98	31.48	31.55	42.58
25	31.32	43.65	53.92	63.03	26.35	38.52	39.59	51.70
30	35.23	47.87	60.12	67.01	30.40	42.28	43.50	56.60
34	37.45	51.85	66.02	69.00	30.86	43.12	45.19	62.26
38	38.06	52.92	66.86	69.39	31.09	44.11	45.34	64.41
40	38.75	53.53	67.93	71.68	33.01	47.10	45.80	67.78
วันที่	36hr20%	36hr40%	36hr60%	36hr80%				
1	0	0	0	0				
2	1.91	1.53	2.68	0.08				
6	2.07	2.22	5.90	2.37				
14	6.36	9.80	14.63	13.48				
18	12.87	20.07	26.19	27.03				
22	15.70	27.26	33.47	34.77				
25	20.07	34.00	40.44	43.65				
30	23.82	37.91	44.50	49.47				
34	25.35	38.22	44.65	49.63				
38	28.80	38.37	44.80	52.69				
40	30.71	40.28	45.26	54.91				

ภาคผนวก ค

ผลการทดลองที่ 4 การผลิตก๊าซชีวภาพด้วยถังปฏิกรณ์ไร้อากาศแบบขั้นตอนเดียว

ตารางที่ ค-1 ของแข็งทั้งหมดและของแข็งระเหยของการทดลองที่ 4 ครั้งที่ 1

ถัง ปฏิกรณ์	ของแข็งทั้งหมด (ร้อยละ)		ของแข็งระเหย (ร้อยละน้ำหนักเปียก)	
	เริ่มต้น	สิ้นสุด	เริ่มต้น	สิ้นสุด
R1	20.65±4.55	9.98±0.19	14.71±3.47	5.43±1.89
R2	21.08±1.50	15.04±2.63	17.72±0.02	6.26±1.02

ตารางที่ ค-2 ซีโอดีละลายและกรดอินทรีย์ระเหยของการทดลองที่ 4 ครั้งที่ 1

วันที่	ซีโอดีละลาย(มก./ล.)		วันที่	กรดอินทรีย์ระเหย (มก./ล.กรดอะซิติก)	
	R1	R2		R1	R2
1	7200±565.69	64000±5656.85	1	2512.5±441.94	11562.5±654.07
3	11400±282.84	86000±2828.43	3	2500.0±247.49	10950.0±318.20
6	10200±282.84	80000±0	6	3520.8±206.24	11875.0±176.78
8	11400±282.84	64000±0	8	2358.3±789.60	15717.9±3985.05
10	10800±0	71000±4242.64	10	3737.5±689.43	13500.0±601.04
13	7200±1131.37	58000±2828.43	13	1275.0±70.71	14604.2±1090.12
15	6800±565.69	52000±0	15	1287.5±53.03	13850.0±141.42
17	5600±1131.37	48000±0	17	2987.5±53.03	20100.0±282.84
22	5200±565.69	40000±0	20	1512.5±17.68	13375.0±106.07
24	5200±0	48000±0	22	1600.0±106.07	11337.5±159.10
27	4200±282.84	34000±2828.43	24	1912.5±88.39	13487.5±53.03
29	4000±0	48000±0	27	875.0±106.07	13225.0±70.71
31	5200±0	40000±0	29	1087.5±53.03	11550.0±70.71
34	2800±565.69	36000±5656.85	31	825.0±70.71	12587.5±53.03
36	3000±282.84	32000±0	34	625.0±70.71	7062.5±53.03
38	2400±565.69	26000±2828.43	36	312.5±88.39	6650.0±35.36
41	3800±282.84	18000±2828.43	38	387.5±88.39	3912.5±88.39
43	1800±282.84	20000±0	41	675.0±70.71	4350.0±106.07
45	3200±565.69	18000±2828.43	43	712.5±123.74	3500.0±141.42
			45	575.0±70.71	3537.5±123.74

ตารางที่ ค-3 ความเป็นต่างและความเป็นกรดต่างของการทดลองที่ 4 ครั้งที่ 1

วันที่	ความเป็นต่าง (มก./ล.แคลเซียมคาร์บอเนต)		วันที่	ความเป็นกรดต่าง	
	R1	R2		R1	R2
			0	7.84	7.69
1	2613±123.74	19388±300.52	1	5.96	9.90
3	3100±106.07	15775±565.69	3	5.53	9.48
6	3504±111.96	21718±803.07	6	5.47	9.22
8	3750±282.84	20250±848.53	8	5.54	8.46
10	3783±164.99	26225±742.46	10	5.95	7.90
13	3375±35.36	21701±2720.40	13	6.84	7.49
15	3288±53.03	22338±265.17	15	6.87	7.55
17	3463±88.39	24188±88.39	17	6.94	7.45
20	2825±0	22200±70.71	20	6.82	7.24
22	3100±35.36	17937±88.39	22	6.75	7.36
24	3050±106.07	20113±123.74	24	6.75	7.16
27	2600±106.07	19650±141.42	27	6.65	7.34
29	2275±70.71	19575±106.07	29	6.72	7.26
31	2350±35.36	19788±88.39	31	6.83	7.37
34	1913±53.03	14138±53.03	34	7.04	7.33
36	1263±53.03	13800±70.71	36	6.95	7.46
38	1500±70.71	13938±123.74	38	7.02	7.82
41	1475±106.07	12888±123.74	41	7.21	7.95
43	2688±53.03	12225±106.07	43	6.92	7.95
45	2362.5±123.74	11800±106.07	45	6.87	7.93

ตารางที่ ค-4 โออาร์พีและอุณหภูมิสภาพแวดล้อมของการทดลองที่ 4 ครั้งที่ 1

วันที่	โออาร์พี (มิลลิโวลต์)	
	R1	R2
1	-176	-204
3	-192	-259
6	-201	-282
8	-236	-316
10	-256	-348
13	-260	-391
15	-233	-368
17	-245	-367
20	-240	-336
22	-234	-302
24	-228	-339
27	-203	-369
29	-199	-365
31	-158	-356
34	-198	-376
36	-172	-375
38	-161	-345
41	-164	-374
43	-135	-351
45	-197	-372

วันที่	อุณหภูมิ(°ซ)
1	33.3
2	33.4
3	33.1
6	33.5
8	32.6
9	33.6
10	33.4
11	33.2
13	32.5
14	33.1
15	33.9
16	33.1
17	32.5
18	32.4
19	31.5
20	31.8
22	32.2
24	32.8
27	32.8
29	32.8
31	32.9
34	31.5
36	30.9
38	32
39	31
41	31.3
43	31.3
44	31.3
45	31.5
46	31.2

ตารางที่ ค-5 อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพและก๊าซชีวภาพสะสมของการทดลองที่ 4 ครั้งที่ 1

วันที่	อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ (มล./ก.ของแข็งระเหย)		วันที่	ก๊าซชีวภาพสะสม (มล./ก.ของแข็งระเหย)	
	R1	R2		R1	R2
1	0	0	1	0	0
2	0.90	0.30	2	0.90	0.30
3	1.58	0.12	3	2.48	0.43
6	1.11	0.20	6	3.59	0.62
9	3.10	0.72	9	6.68	1.35
10	9.29	0.64	10	15.97	1.99
12	13.11	1.39	12	29.08	3.37
13	13.17	4.87	13	42.25	8.24
14	13.83	1.22	14	56.09	9.46
15	13.23	2.16	15	69.32	11.62
16	8.21	2.47	16	77.53	14.09
17	6.88	2.92	17	84.41	17.01
19	14.14	2.94	19	98.55	19.95
20	9.21	2.80	20	107.77	22.75
21	10.54	4.28	21	118.31	27.03
22	8.77	4.13	22	127.08	31.15
23	7.89	3.97	23	134.97	35.12
24	7.46	4.50	24	142.43	39.62
25	6.25	6.22	25	148.68	45.84
27	6.86	6.30	27	155.54	52.14
28	5.82	6.04	28	161.36	58.18
29	5.91	5.84	29	167.27	64.02
30	5.50	4.73	30	172.77	68.75

ตารางที่ ค-5 อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพและก๊าซชีวภาพสะสมของการทดลองที่ 4 ครั้งที่ 1 (ต่อ)

วันที่	อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ (มล./ก.ของแข็งระเหย)		วันที่	ก๊าซชีวภาพสะสม (มล./ก.ของแข็งระเหย)	
	R1	R2		R1	R2
31	7.08	5.14	31	179.85	73.89
34	7.74	4.29	34	187.59	78.17
35	5.75	4.63	35	193.34	82.81
36	4.80	4.91	36	198.14	87.72
37	6.07	5.74	37	204.21	93.46
39	3.96	5.20	39	208.17	98.66
41	3.32	2.78	41	211.49	101.43
42	1.43	6.27	42	212.91	107.70
43	0.54	2.68	43	213.45	110.38
44	1.27	2.84	44	214.72	113.22
45	0.32	2.53	45	215.04	115.75
46	0.42	2.56	46	215.46	118.30

ตารางที่ ค-6 ของแข็งทั้งหมดและของแข็งระเหยของการทดลองที่ 4 ครั้งที่ 2

ถึง ปฏิกรณ์	ของแข็งทั้งหมด (ร้อยละ)		ของแข็งระเหย (ร้อยละน้ำหนักเปียก)	
	เริ่มต้น	สิ้นสุด	เริ่มต้น	สิ้นสุด
R1	16.08±0.50	9.19±0.36	9.43±0.81	2.59±1.70
R2	16.08±1.03	9.83±0.14	9.43±0.21	1.84±1.95

ตารางที่ ค-7 ซีไอดีละลายและกรดอินทรีย์ระเหยของการทดลองที่ 4 ครั้งที่ 2

วันที่	ซีไอดีละลาย(มก./ล.)		วันที่	กรดอินทรีย์ระเหย (มก./ล.กรดอะซิติก)	
	R1	R2		R1	R2
1	4230±239.28	51606±1196.42	1	800.0±35.36	9387.5±123.74
3	5400±0	58000±0	3	925.0±106.07	9787.5±88.39
6	5600±282.84	48000±2828.43	6	875.0±106.07	8450.0±141.42
8	5000±282.84	28000±0	8	1375.0±106.07	6550.0±212.13
10	5000±282.84	44000±0	10	862.5±88.39	8232.1±75.76
13	4000±0	38000±8485.28	13	687.5±159.10	6666.7±78.57
15	2600±282.84	19200±0	15	900.0±70.71	5875.0±106.07
17	2200±282.84	16800±0	17	712.5±88.39	5025.0±70.71
20	3200±0	11200±1131.37	20	737.5±53.03	4249.3±105.03
22	2600±282.84	8400±565.69	22	600.0±70.71	2212.5±88.39
24	3600±565.69	10000±565.69	24	987.5±53.03	2512.5±123.74
28	2600±565.69	6800±0	28	575.0±70.71	1075.0±106.07
29	3600±0	8800±0	29	700.0±141.42	1304.2±394.80
31	4400±0	7200±0	31	625.0±70.71	700.0±70.71
34	2000±565.69	5200±565.69	34	687.5±53.03	825.0±106.07
36	1000±282.84	2400±0	36	587.5±53.03	475.0±106.07
38	1200±565.69	2400±565.69	38	512.5±17.67	512.5±88.39

ตารางที่ ค-8 ความเป็นต่างและความเป็นกรดต่างของการทดลองที่ 4 ครั้งที่ 2

วันที่	ความเป็นต่าง (มก./ล.แคลเซียมคาร์บอเนต)		วันที่	ความเป็นกรดต่าง	
	R1	R2		R1	R2
1	3037.5±88.39	15825.0±212.13	1	6.67	9.62
3	2937.5±53.03	16112.5±88.39	3	6.60	9.29
6	3675.0±141.42	16312.5±194.45	6	6.20	8.61
8	3537.5±88.39	15550.0±282.84	8	6.50	7.51
10	3262.5±88.39	13232.1±75.76	10	6.89	7.83
13	3412.5±159.10	8847.2±98.21	13	6.71	6.62
15	3525.0±106.07	9800.0±106.07	15	6.89	6.88
17	3450.0±106.07	8862.5±88.39	17	6.94	7.14
20	3262.5±159.10	7049.3±319.24	20	6.92	6.82
22	3162.5±194.45	6631.6±645.75	22	6.89	6.77
24	2937.5±123.74	4037.5±53.03	24	6.89	6.89
28	2350.0±70.71	4487.5±194.45	28	6.75	7.10
29	2175.0±70.71	3650.0±70.71	29	6.71	6.93
31	2287.5±88.39	2937.5±123.74	31	7.01	7.07
34	2500.0±141.42	3412.5±88.39	34	6.77	7.01
36	2712.5±88.39	3350.0±141.42	36	6.77	7.02
38	2512.5±88.39	2900.0±106.07	38	6.85	7.15

ตารางที่ ค-9 โออาร์พีและอุณหภูมิสภาพแวดล้อมของการทดลองที่ 4 ครั้งที่ 2

วันที่	โออาร์พี(มิลลิโวลต์)		วันที่	อุณหภูมิ(องศาเซลเซียส)
	R1	R2		
1	-273	-481	1	31.3
3	-262	-440	3	30.7
6	-303	-449	6	32.0
8	-259	-372	8	32.1
10	-275	-383	10	29.1
13	-249	-316	11	28.9
15	-195	-326	13	31.1
17	-232	-312	15	29.0
20	-211	-266	17	29.2
22	-220	-298	20	29.8
24	-264	-272	22	30.0
28	-226	-293	24	30.1
29	-246	-293	28	31.1
31	-205	-226	29	29.3
34	-237	-279	31	30.2
36	-268	-288	32	30.3
38	-269	-279	34	30.5
			35	30.7
			36	30.5
			37	29.4
			38	30.1

ตารางที่ ค-10 อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพและก๊าซชีวภาพสะสมของการทดลองที่ 4 ครั้งที่ 2

วันที่	อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ (มล./ก.ของแข็งระเหย)		วันที่	ก๊าซชีวภาพสะสม (มล./ก.ของแข็งระเหย)	
	R1	R2		R1	R2
1	4.96	0	1	4.96	0
2	2.83	0	2	7.79	0
3	5.49	0	3	13.28	0
4	3.72	0	4	16.99	0
5	6.37	0	5	23.37	0
6	2.20	0	6	25.57	0
7	11.15	0	7	36.72	0
8	16.29	0	8	53.00	0
10	9.12	0	10	62.12	0
11	7.26	2.48	11	69.38	2.48
12	12.21	3.27	12	81.59	5.75
13	9.20	2.39	13	90.80	8.14
15	7.61	2.66	15	98.41	10.80
16	6.90	2.83	16	105.31	13.63
17	5.31	2.74	17	110.62	16.37
18	5.13	3.19	18	115.75	19.56
20	10.09	3.89	20	125.84	23.45
22	6.37	3.98	22	132.22	27.44
23	9.38	6.73	23	141.60	34.16
24	7.97	6.28	24	149.56	40.45
25	9.03	6.55	25	158.59	47.00
27	12.39	8.67	27	170.98	55.67
28	8.85	6.02	28	179.83	61.69
30	7.79	10.62	30	187.62	72.31
31	4.43	4.69	31	192.05	77.00
32	7.26	4.43	32	199.30	81.43
34	2.66	5.58	34	201.96	87.00
35	3.01	5.79	35	204.97	92.79
36	1.42	4.98	36	206.39	97.77

ตารางที่ ค-10 อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพและก๊าซชีวภาพสะสมของการทดลองที่ 4 ครั้งที่ 2 (ต่อ)

วันที่	อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ (มล./ก.ของแข็งระเหย)		วันที่	ก๊าซชีวภาพสะสม (มล./ก.ของแข็งระเหย)	
	R1	R2		R1	R2
37	2.12	4.68	37	208.51	102.45
38	1.50	4.08	38	210.01	106.54



ภาคผนวก ง

ตัวอย่างรายงานผลวิเคราะห์ตัวอย่างที่เป็นของแข็งและก๊าซ

ตารางที่ ง-1 ผลวิเคราะห์ปริมาณธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน และไนโตรเจน

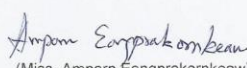
Page 1 / 1


CHN Analysis Result

Request Code No. S 584659
 Sample Owner Pimnarin Sungkasudi
 Objective To quantitate percentages of C, H, and N elements.
 Instrument CHNS/O Analyzer (Thermo Scientific™ FLASH 2000)
 Method Gaseous products freed by pyrolysis in high-purity oxygen and were chromatographically separated by elution development with quantitatively detected by thermal conductivity detector.
 Analysis Date January 13, 2016

Result

Sample Name		%Carbon	%Hydrogen	%Nitrogen
S584659_1	(1)	33.91	5.33	1.55
	(2)	33.63	5.29	1.65
	average	33.77	5.31	1.60
S584659_2	(1)	14.28	2.18	0.99
	(2)	15.00	2.28	1.03
	average	14.64	2.23	1.01


 (Miss. Amporn Eongprakornkeaw)
 Analyst


 (Mrs. Sunan Rangseekansong)
 Chief Scientist

Remark : The results are good only for those samples analysed.

หมายเหตุ S585659_1 คือ ผักตบชวาตัวอย่าง

S585659_2 คือ หัวเชื้อจุลินทรีย์ (มูลโค)

ตารางที่ ง-2 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบในตัวอย่างก๊าซชีวภาพของการทดลองที่ 4

ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	เอกสาร: ScFM-CT-06-002-A	FM โทร 0-2218-7523-5 โทรสาร 0-2255-5831
	แบบรายงานผลการวิเคราะห์และทดสอบ	ลำดับการแก้ไข 0 หน้าที่ 1

วันที่ 13 กรกฎาคม 2559

รายงานผลการวิเคราะห์และทดสอบ

เรื่อง รายงานผลการวิเคราะห์ Gas Chromatography

ผู้ส่งตัวอย่าง : นางสาวพิมพ์นรินทร์ สังขสุทธิ

ใบเสนอราคาเลขที่ : CT068/59

หน่วยงาน : ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ชนิดตัวอย่าง : ก๊าซชีวภาพ

วันที่รับตัวอย่าง : 29 มิถุนายน 2559

เครื่องมือวิเคราะห์/ทดสอบ : Gas Chromatography

สภาวะการวิเคราะห์ :

- Carrier Gas : Argon
- Injection : Temperature 150.0 °C
Flow Rate 30 mL/min
- Column name : MS-5A
Temperature 80.0 °C
Equilibration Time 3 min
- Detector : Temperature 200.0 °C
Sampling Rate 40 msec
Stop Time 5 min
Current 50 mA

มาตรฐานอ้างอิงสำหรับการทดสอบ :-

ตารางที่ ง-2 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบในตัวอย่างก๊าซชีวภาพของการทดลองที่ 4 (ต่อ)

ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	เอกสาร: ScFM-CT-06-002-A	โทร 0-2218-7523-5 โทรสาร 0-2255-5831
	แบบรายงานผลการวิเคราะห์และทดสอบ	ลำดับการแก้ไข 0 หน้าที่ 2

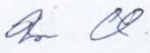
ผลการวิเคราะห์และทดสอบ

Standard Metane (%v/v)	Retention Time (min)	Area
25	3.04	375777.5
40	3.02	482895.4
60	3.00	585831.5
100	2.88	1237768.5

Sample	Retention Time (min)	Area	Metane (%v/v)	ก๊าซอื่นๆ
P1	2.94	713007.0	59.91	40.09
P2	2.95	641247.1	53.72	46.28
P3	2.96	576250.0	48.12	51.88
P4	2.94	620911.4	51.97	48.03
P5	2.90	731465.9	61.50	38.50
N1	3.01	347933.0	28.44	71.56
N2	3.00	393495.2	32.36	67.64
N3	3.01	317824.0	25.84	74.16
N4	2.95	524934.3	43.69	56.31

รับรองผลการวิเคราะห์ถูกต้อง

จินตนา สวงใจ
(นางสาวจินตนา สวงใจ)
นักวิทยาศาสตร์
วันที่ 13 กรกฎาคม 2559


(รศ.ดร. นิตา หิวยิระนันท์)
หัวหน้าห้องปฏิบัติการเครื่องมือวิเคราะห์
วันที่ 13 กรกฎาคม 2559

หมายเหตุ : 1. ผลการวิเคราะห์ในรายงานฉบับนี้ใช้อ้างอิงสำหรับตัวอย่างที่ส่งมาเท่านั้น
2. ห้ามทำสำเนารายงานฉบับนี้เพียงบางส่วนโดยไม่ได้รับอนุญาตอย่างเป็นทางการ

หมายเหตุ P1 ถึง P5 คือ ถังปฏิกรณ์ไร้อากาศที่ 1

N1 ถึง N4 คือ ถังปฏิกรณ์ไร้อากาศที่ 2

ภาคผนวก จ

การคำนวณ

1. วิเคราะห์ร้อยละมีเทนด้วยเครื่องก๊าซโครมาโตกราฟี

การวิเคราะห์ปริมาณก๊าซมีเทนในตัวอย่างจากก๊าซชีวภาพเพื่อวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพของการทดลองที่ 2 และการทดลองที่ 3 ณ ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยมีรายละเอียดของเครื่องอุปกรณ์ก๊าซโครมาโตกราฟีและสภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์ ดังนี้

- เครื่อง : Gas Chromatography
- ยี่ห้อ : Shimadzu รุ่น GC-2010
- Detector : TCD Detector
- Column : PQS
- Carrier Gas : He Flow Rate 10 mL/min
- Temperature Program Set : 80-150°C
- Inject Volume : 1 mL
-

2. ปริมาณเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลสและลิกนิน (P.J. Van Soest, 1960)

2.1 วิธีวิเคราะห์หา Neutral Detergent Fiber (NDF)

1. นำครุชชีเบล ขนาด 50 มิลลิลิตร ซึ่งผ่านการอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมง มาชั่งน้ำหนักแล้วบันทึกค่า
2. ชั่งตัวอย่างผักตบชวาที่แห้งและบดละเอียด 1 กรัม ใส่ขวดย่อยขนาด 500 มิลลิลิตร เติมน้ำละลาย NDF ปริมาตร 100 มิลลิลิตร นำไปย่อยเป็นเวลา 60 นาที
3. นำตัวอย่างมาล้างในครุชชีเบลที่ชั่งน้ำหนักแล้วข้างต้น และต่อกับเครื่องดูดสุญญากาศ ล้างด้วยน้ำร้อนจนกระทั่งตัวอย่างทั้งหมดอยู่ในครุชชีเบล หรือจนกว่าฟองจะหมด
4. จากนั้นล้างตัวอย่างด้วยอะซิโตน 3-5 ครั้ง หรือจนกระทั่งน้ำล้างไม่มีสี
5. นำครุชชีเบลที่มีตัวอย่าง ไปอบในตู้อบแห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง หรือตลอดคืน
6. นำครุชชีเบลที่มีตัวอย่างออกจากตู้อบแห้งเอาใส่ในโถดูดความชื้นปล่อยให้เย็น แล้วชั่งน้ำหนัก เพื่อคำนวณหาค่า ร้อยละ NDF
7. นำครุชชีเบลเผาในเตาเผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส นาน 2 ชั่วโมง เอาออกใส่ในโถดูดความชื้นปล่อยให้เย็น ชั่งน้ำหนักหาค่า

วิธีการคำนวณ

$$\text{ร้อยละ NDF} = \frac{[(W1 - W2) \times 100]}{W3} - \text{ร้อยละ Acid insoluble ash}$$

เมื่อ W1 คือ น้ำหนักครุชชีเบล + น้ำหนักตัวอย่าง

W2 คือ น้ำหนักครุชชีเบล

W3 คือ น้ำหนักตัวอย่าง

ร้อยละ Acid insoluble ash คือ ร้อยละเถ้าที่ได้จากขั้นตอนการเผาในการวิเคราะห์หาลิกนิน

2.2 การวิเคราะห์หา acid detergent fiber (ADF)

- นำครุชชีเบล ขนาด 50 มิลลิลิตร ที่แห้งและเย็นจากโถดูดความชื้น โดยผ่านการอบมาแล้วที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง มาชั่งน้ำหนักแล้วบันทึกค่า
- ชั่งตัวอย่างผักตบชวาที่แห้งและบดละเอียด 1 กรัม ใส่ขวดย่อยขนาด 500 มิลลิลิตร เติมน้ำละลาย ADF ปริมาตร 100 มิลลิลิตร นำไปย่อยเป็นเวลา 60 นาที
- ล้างตัวอย่างในครุชชีเบลที่ชั่งน้ำหนักแล้วและต่อกับเครื่องดูดสุญญากาศ ล้างด้วยน้ำร้อนจนกระทั่งตัวอย่างทั้งหมดอยู่ในครุชชีเบล หรือจนกว่าฟองหมด
- จากนั้นล้างตัวอย่างด้วยอะซิโตนประมาณ 3-5 ครั้ง หรือจนกระทั่งน้ำล้างตัวอย่างไม่มีสี
- ครุชชีเบลที่มีตัวอย่าง ไปอบในตู้อบแห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง หรือตลอดคืน
- นำครุชชีเบลที่มีตัวอย่างออกจากตู้อบแห้งเอาใส่ในโถดูดความชื้นปล่อยให้เย็น แล้วชั่งน้ำหนัก เพื่อคำนวณหาค่า ร้อยละ NDF
- นำครุชชีเบลเผาในเตาเผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส นาน 2 ชั่วโมง เอาออกใส่ในโถดูดความชื้นปล่อยให้เย็น ชั่งน้ำหนักหาเถ้า

วิธีการคำนวณ

$$\text{ร้อยละ ADF} = \frac{[(W1 - W2) \times 100]}{W3} - \text{ร้อยละ Acid insoluble ash}$$

เมื่อ W1 คือ น้ำหนักครุชชีเบล + น้ำหนักตัวอย่าง

W2 คือ น้ำหนักครุชชีเบล

W3 คือ น้ำหนักตัวอย่าง

ร้อยละ Acid insoluble ash คือร้อยละเถ้าที่ได้จากขั้นตอนการเผาในการวิเคราะห์หาลิกนิน

วิธีคำนวณปริมาณเฮมิเซลลูโลส

$$\text{ร้อยละเฮมิเซลลูโลส} = \text{ร้อยละ NDF} - \text{ร้อยละ ADF}$$

2.3 วิเคราะห์หา Acid Detergent Lignin (ADL)

1. นำครุชชีเบลที่มีตัวอย่างจากการวิเคราะห์หา ADF แล้วมาเติมสารละลาย ADL 30 มิลลิลิตร จากนั้นนำไปวางลงในภาตสแตนเลส ใช้แท่งแก้วคนให้ทั่วเพื่อให้ตัวอย่างแยกจากกันไม่จับกันเป็นก้อน ควบคุมอุณหภูมิของครุชชีเบลในภาตสแตนเลสที่ 20 องศาเซลเซียส
2. เติมสารละลาย ADL เมื่อสารละลายในครุชชีเบลแห้ง คนเป็นระยะๆ ใช้เวลาอย่างน้อย 3 ชั่วโมง
3. ล้างสารละลายออกจากตัวอย่างที่อยู่ในครุชชีเบลที่ต่อกับเครื่องดูดสุญญากาศ ล้างด้วยน้ำร้อนจนหมดกรด หรือประมาณ 1,000 มิลลิลิตร
4. นำครุชชีเบลที่มีตัวอย่าง ไปอบในตู้อบแห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง หรือตลอดคืน ใส่นิโตรเจนความชื้น ปล่องให้เย็น ชั่งน้ำหนัก

วิธีการคำนวณ

$$\text{ร้อยละเซลลูโลส} = \frac{[(W1 - W4) \times 100]}{W3}$$

เมื่อ W1 คือ น้ำหนักครุชชีเบล + น้ำหนักตัวอย่างจากการวิเคราะห์ ADF

W3 คือ น้ำหนักตัวอย่าง

W4 คือ น้ำหนักครุชชีเบล + น้ำหนักตัวอย่างจากที่อบ

2.4 วิเคราะห์หาลิกนิน

1. นำครุชชีเบลที่มีตัวอย่างซึ่งวิเคราะห์หาเซลลูโลสไปเผาในเตาเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส นาน 2 ชั่วโมง
2. เอาออกใส่นิโตรเจนความชื้น ปล่องให้เย็น ชั่งน้ำหนัก

วิธีคำนวณ

$$\text{ร้อยละลิกนิน} = \frac{(W4 - W5) \times 100}{W3}$$

เมื่อ W4 = น้ำหนักครุชชีเบล + น้ำหนักตัวอย่างหลังที่อบ

W5 = น้ำหนักครุชชีเบล + น้ำหนักตัวอย่างหลังการวิเคราะห์เซลลูโลส

W3 = น้ำหนักตัวอย่าง

3. ปริมาณผักตบชวาและมูลโคที่ใส่ในถังปฏิกรณ์ไร้อากาศ

ควบคุมค่าของแข็งรวมในระบบให้มีค่าร้อยละ 15 (ณัฐกาญจน์ ชราพก, 2554) ในอัตราส่วนของแข็งระเหยของผักตบชวาต่อของแข็งระเหยของมูลโคเท่ากับ 2:1 กำหนดให้มีปริมาตรรวม 1 ลิตร

1. ปริมาณผักตบชวา

ปริมาณความชื้นและของแข็งทั้งหมดของผักตบชวาเท่ากับร้อยละ 82.76 และ 17.24 ตามลำดับ

ปริมาณของแข็งทั้งหมด 15 กรัม ต้องเติมน้ำ 85 มิลลิลิตร

ถ้าปริมาณของแข็งทั้งหมด 17.24 กรัม ต้องเติมน้ำ = $85 \times 17.24 / 15 = 97.69$ มิลลิลิตร

ผักตบชวา 100 กรัม ต้องเติมน้ำเพิ่มอีก $97.69 - 82.76 = 14.93$ มิลลิลิตร

น้ำหนักรวมทั้งหมด (ผักตบชวา+น้ำ) = $100 + 14.93 = 114.93$ มิลลิลิตร

เนื่องจาก ต้องการปริมาตรผักตบชวาทั้งหมด 666.67 มิลลิลิตร

ดังนั้น ต้องใช้ผักตบชวา $666.67 \times 100 / 114.93 = 580.07$ กรัม

ต้องเติมน้ำ $666.67 \times 14.93 / 114.93 = 86.60$ มิลลิลิตร

2. ปริมาณมูลโค

ปริมาณความชื้นและของแข็งทั้งหมดของมูลโคเท่ากับร้อยละ 51.47 และ 48.53 ตามลำดับ

ปริมาณของแข็งทั้งหมด 15 กรัม ต้องเติมน้ำ 85 มิลลิลิตร

ถ้าปริมาณของแข็งทั้งหมด 48.53 กรัม ต้องเติมน้ำ = $85 \times 48.53 / 15 = 275.00$ มิลลิลิตร

มูลโค 100 กรัม ต้องเติมน้ำเพิ่มอีก $275.00 - 51.47 = 223.53$ มิลลิลิตร

น้ำหนักรวมทั้งหมด (มูลโค+น้ำ) = $100 + 223.53 = 323.53$ มิลลิลิตร

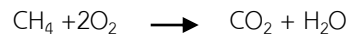
เนื่องจาก ต้องการปริมาตรมูลวัวทั้งหมด 333.33 มิลลิลิตร

ดังนั้น ต้องใช้มูลโค $333.33 \times 100 / 323.53 = 103.03$ กรัม

ต้องเติมน้ำ $333.33 \times 223.53 / 323.53 = 230.30$ มิลลิลิตร

4. ก๊าซชีวภาพทางทฤษฎี

ก๊าซมีเทนทางทฤษฎีคือปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นต่อซีโอดีที่ถูกกำจัด โดยหาได้จากปฏิกิริยาการย่อยสลายของก๊าซมีเทนดังสมการ



จากปฏิกิริยาการย่อยสลายปริมาณก๊าซมีเทนที่ผลิตได้เท่ากับปริมาณออกซิเจนที่ใช้ในการออกซิไดซ์ก๊าซมีเทนเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำ โดยจากปฏิกิริยาข้างต้นจะเห็นว่า 1 โมล ของก๊าซมีเทน ใช้ออกซิเจน 2 โมล ในการออกซิไดซ์

$$\begin{aligned} \text{โดย} & \quad \text{O}_2 & 1 \text{ โมล} & = & 32 \text{ กรัม} \\ \text{ดังนั้น} & \quad \text{O}_2 & 2 \text{ โมล} & = & 32 \times 2 = 64 \text{ กรัม} \end{aligned}$$

จากสาร 1 โมล มีปริมาตรเท่ากับ 22.4 ลิตร ที่อุณหภูมิ และความดันมาตรฐาน (standard temperature and pressure; STP)

$$\text{ดังนั้น} \quad \text{CH}_4 \quad 1 \text{ โมล} = 22.4 \text{ ลิตร ที่ STP}$$

โดยปริมาณออกซิเจนที่ใช้ในการย่อยสลายคือ ปริมาณซีโอดีที่วัดได้ เพราะจากนิยามของค่าซีโอดีหมายถึง ปริมาณออกซิเจนที่ถูกใช้ในการสลายสารอินทรีย์ในน้ำตัวอย่าง แล้วจึงได้คาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำเป็นผลิตภัณฑ์

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น} \quad \text{COD} \quad 1 \text{ กรัม} & = \text{ปริมาณมีเทน} / \text{มวลโมเลกุลของออกซิเจน} \\ & = 22.4 / 64 \\ & = 0.35 \text{ ลิตร} / \text{กรัมของซีโอดีที่ถูกกำจัด ณ STP} \end{aligned}$$

และโดยทั่วไปสัดส่วนของมีเทนในก๊าซชีวภาพจากกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศมีค่าเท่ากับร้อยละ 50 โดยปริมาตร

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น} \quad \text{ปริมาตรก๊าซชีวภาพ} & = 0.7 \text{ ลิตร} / \text{กรัมของซีโอดีที่ถูกกำจัด ณ STP} \\ \text{แสดงว่า} \quad 1 \text{ กรัมซีโอดีสามารถเปลี่ยนเป็นก๊าซชีวภาพได้} & 0.7 \text{ ลิตร} \end{aligned}$$

ดังนั้น สารอินทรีย์ที่ทิ้งไปของถังปฏิกรณ์ไร้อากาศที่ 2 ของการทดลองที่ 4.2 สามารถเปลี่ยนเป็นก๊าซชีวภาพ 2.323 ลิตร/กรัมของแข็งระเหย ดังตารางที่ จ-1

ตารางที่ จ-1 ก๊าซชีวภาพที่อาจเกิดขึ้นจากสารอินทรีย์ที่ทิ้ง

วันที่	อุณหภูมิ (°C)	ซีโอดีละลาย (มก./ล.)	ปริมาตรน้ำชะที่ทิ้ง (ล.)	ซีโอดีละลายที่ทิ้ง (ก.)	ก๊าซชีวภาพที่ผลิตขึ้นจากซีโอดีละลายที่ทิ้ง (ล.)
15	29	19,200	0.08	1.536	0.7744
16	29	19,200	0.08	1.536	0.7744
17	29.2	16,800	0.08	1.344	0.7749

5. การวิเคราะห์ทางสถิติ

การทดลองที่ 2 การบำบัดเบื้องต้นทางกายภาพโดยการลดขนาด (จากหัวข้อ 4.2.4)

Variables Entered/Removed^b

Model	Variables Entered	Variables Removed	Method
1	size ^a		Enter

a. All requested variables entered.

b. Dependent Variable: biogas

Model Summary

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	.886 ^a	.785	.742	13.42159

a. Predictors: (Constant), size

ANOVA^b

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	3283.656	1	3283.656	18.228	.008 ^a
	Residual	900.695	5	180.139		
	Total	4184.351	6			

a. Predictors: (Constant), size

b. Dependent Variable: biogas

Coefficients^a

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
		B	Std. Error	Beta		
1	(Constant)	264.297	11.343		23.300	.000
	size	-10.829	2.536	-.886	-4.269	.008

a. Dependent Variable: biogas

การทดลองที่ 3 การบำบัดเบื้องต้นทางเคมีโดยใช้น้ำดำ (จากหัวข้อ 4.3.4)

Correlations

		size	time	concentration	biogas
size	Pearson Correlation	1	.000	.000	-.693**
	Sig. (2-tailed)		1.000	1.000	.000
	N	120	120	120	120
time	Pearson Correlation	.000	1	.000	-.116
	Sig. (2-tailed)	1.000		1.000	.208
	N	120	120	120	120
concentration	Pearson Correlation	.000	.000	1	.507**
	Sig. (2-tailed)	1.000	1.000		.000
	N	120	120	120	120
biogas	Pearson Correlation	-.693**	-.116	.507**	1
	Sig. (2-tailed)	.000	.208	.000	
	N	120	120	120	120

** . Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

Variables Entered/Removed

Model	Variables Entered	Variables Removed	Method
1	concentration, time, size ^a		Enter

a. All requested variables entered.

Model Summary

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	.867 ^a	.751	.744	.011857

a. Predictors: (Constant), concentration, time, size

ANOVA^b

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	.049	3	.016	116.544	.000 ^a
	Residual	.016	116	.000		
	Total	.065	119			

a. Predictors: (Constant), concentration, time, size

b. Dependent Variable: biogas

Coefficients^a

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
		B	Std. Error	Beta		
1	(Constant)	.076	.004		18.089	.000
	size	-.009	.001	-.693	-14.961	.000
	time	.000	.000	-.116	-2.500	.014
	concentration	.001	.000	.507	10.935	.000

a. Dependent Variable: biogas



ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวพิมพ์นรินทร์ สังข์สุทธิ เกิดเมื่อวันที่ 4 เมษายน พ.ศ. 2534 ที่จังหวัดนครปฐม สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนสาธิตมหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม จ.นครปฐม ปีการศึกษา 2551 สำเร็จการศึกษาในระดับปริญญาตรี หลักสูตรวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ในปีการศึกษา 2555 และเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2556

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอด้วยวาจาในหัวข้อเรื่อง การบำบัดเบื้องต้นทางกายภาพของ ผักตบชวาเพื่อการผลิตก๊าซชีวภาพ ในงานประชุมวิชาการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ครั้งที่ 15 ระหว่างวันที่ 11-13 พฤษภาคม พ.ศ. 2559

