

การเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพของไบโกระถินโดยการปรับสภาพขี้ต้นด้วยต่างและการ
หมักร่วมด้วยชีวมวล

นางสาวปัทมวรรณ ไชยพงศ์



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

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.

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2557

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ENHANCEMENT OF BIOGAS PRODUCTION FROM ACACIA LEAVE USING ALKALINE
PRETREATMENT AND CO-DIGESTION WITH BIOMASS

Miss Pattawan Chaiyapong



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 2014

Copyright of Chulalongkorn University

ปัทม์วรรณ ไชยพงศ์ : การเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพของไบโกระถินโดยการปรับสภาพขั้นต้นด้วยด่างและการหมักร่วมด้วยชีวมวล (ENHANCEMENT OF BIOGAS PRODUCTION FROM ACACIA LEAVE USING ALKALINE PRETREATMENT AND CO-DIGESTION WITH BIOMASS) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร.อรทัย ขวาลภาฤทธิ์, 181 หน้า.

งานวิจัยนี้ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากไบโกระถินเทพนรงค์โดยหาสภาวะที่เหมาะสมในการปรับสภาพเบื้องต้นด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และการหมักร่วม (co-digestion) กับหญ้าเนเปียร์และตะกอนสลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสียโรงงานผลิตเยื่อกระดาษ โดยใช้โมเดลออกแบบการทดลองแบบประสมส่วนกลาง (Central Composite Design: CCD) และใช้หลักการพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology: RSM) เพื่อเลือกสภาวะที่เหมาะสมในการปรับสภาพไบโกระถิน จากการศึกษาองค์ประกอบของไบโกระถินเทพนรงค์พบว่า ไบโกระถินเทพนรงค์ มีปริมาณเซลลูโลสค่อนข้างต่ำ แต่มีปริมาณเฮมิเซลลูโลสและลิกนินสูงเท่ากับร้อยละ 14.26 และ 17.43 ตามลำดับ เมื่อทดลองศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพด้วยวิธีบีเอ็มพี (Biochemical Methane Potential: BMP) เป็นระยะเวลา 60 วัน ร่วมกับการใช้ Design Expert (Trial version 9) และโมเดล RSM พบว่า ไบโกระถินเทพนรงค์ที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 3 เป็นเวลา 48 ชั่วโมง มีศักยภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพสูงสุด ให้ปริมาณก๊าซชีวภาพเท่ากับ 182.19 ลิตรต่อกิโลกรัมของแข็งระเหย ซึ่งปริมาณก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้มีค่าเพิ่มขึ้น 1.2 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับการผลิตก๊าซชีวภาพจากไบโกระถินเทพนรงค์ไม่ผ่านการปรับสภาพ การทดลองหมักร่วมไบโกระถินกับหญ้าเนเปียร์และตะกอนสลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสียโรงงานผลิตเยื่อกระดาษ พบว่าการหมักร่วมไบโกระถินกับชีวมวลชนิดอื่น ได้แก่ หญ้าเนเปียร์หรือกากตะกอนเยื่อกระดาษ ให้ผลผลิตก๊าซชีวภาพสูงกว่าการหมักไบโกระถินเพียงชนิดเดียว การหมักร่วมไบโกระถินสดกับหญ้าเนเปียร์พบว่าการใช้ไบโกระถินสดต่อหญ้าเนเปียร์ในอัตราส่วน 1:3 จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตหญ้าเนเปียร์สูงขึ้น โดยให้ปริมาณก๊าซชีวภาพสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับค่าคำนวณ ดังนั้นการใช้ไบโกระถินเป็นสารเติมแต่ง (additive) สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพโดยทำให้สามารถใช้ทดแทนหญ้าเนเปียร์สดและลดการใช้หญ้าในการหมักได้ร้อยละ 25 โดยได้ปริมาณก๊าซชีวภาพเท่าเดิม

ภาควิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ปีการศึกษา 2557

5570284221 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEYWORDS: BIOGAS PRODUCTION / ACACIA LEAVE / CO-DIGESTION / NAPIER GRASS / PULP SLUDGE

PATTAWAN CHAIYAPONG: ENHANCEMENT OF BIOGAS PRODUCTION FROM ACACIA LEAVE USING ALKALINE PRETREATMENT AND CO-DIGESTION WITH BIOMASS.
ADVISOR: ASSOC. PROF. ORATHAI CHAVALPARIT, Ph.D., 181 pp.

With the objective of increasing biogas production from Acacia hybrid leave, codigestion with Napier grass was studied and the application of sodium hydroxide (NaOH) pre-treatment was evaluated. In this study the combined with Response surface methodology of Central composite design (CCD) was employed to optimize sodium hydroxide pretreatment condition of Acacia hybrid leaves for maximizing the biogas production. The result showed that the cellulose in Acacia hybrid leave was low whereas the hemicellulose and lignin were 14.26 and 17.43, respectively. Biogas production from pretreated Acacia hybrid leave was estimated by Biochemical Methane Potential (BMP) for 60 days. The result showed that the conditions gave highest biogas production (182.19 L/KgVS) was 3% NaOH 48 h reaction time. These results were higher than un-pretreated Acacia hybrid leave that 1.2 fold. The result of studying on RSM showed that when NaOH concentration and reaction time increased, biogas production was increased. The co-digestion Acacia hybrid leave with Napier grass and pulp sludge from wastewater treatment, pulp and paper industry. Results showed that the biogas yield of co-digestion of Acacia hybrid leave with Napier grass or pulp sludge was only higher than Acacia hybrid leaves. In addition, co-digestion of Acacia hybrid leave with Napier grass (1:3) improved biogas production of Napier grass which provided the higher amount of biogas when comparing with the amount from calculation. Thus, using Acacia hybrid leave as additive can enhance the efficiency of biogas production by being an alternative from Napier grass and reducing grass for fermentation by 25 % with the same amount of biogas.

Department: Environmental Engineering Student's Signature

Field of Study: Environmental Engineering Advisor's Signature

Academic Year: 2014

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยความอนุเคราะห์จากบุคคลหลายท่าน ผู้วิจัยจึงขอกราบขอบพระคุณต่อผู้ที่มีส่วนให้ความอนุเคราะห์ ดังต่อไปนี้

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. อรทัย ชวาลภาฤทธิ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ให้คำปรึกษา ช่วยเหลือ ชี้แนะ และถ่ายทอดวิชาความรู้ที่เป็นประโยชน์ต่อการทำวิทยานิพนธ์ทุกขั้นตอน ตลอดระยะเวลาการทำวิจัย ซึ่งมีส่วนสำคัญยิ่งที่ทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร. เพ็ชรพร เขาวกิจเจริญ (ประธานกรรมการ) รองศาสตราจารย์ ดร. วิบูลย์ลักษณะ พิ้งรัมย์ (กรรมการ) รองศาสตราจารย์ ดร. ตะวัน ลิ้มปิยากร (กรรมการ) และ รองศาสตราจารย์ ดร. มณีรัตน์ องค์กรธรณี (กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย)

ขอขอบคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยทุกท่านที่ได้อบรมสั่งสอน ถ่ายทอดความรู้ ประสบการณ์ และมอบความปรารถนาดีให้แก่ผู้ทำวิทยานิพนธ์ตลอดมา

ขอขอบคุณกองทุนรัชดาภิเษกสมโภช 90 ปี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์ทุนอุดหนุนวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้

ขอขอบคุณบริษัทเสริมสุข จำกัด มหาชน ที่อนุเคราะห์หิ้วเชื้อจุลินทรีย์จากระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความช่วยเหลือ และอำนวยความสะดวกตลอดมา

ขอขอบคุณพี่ๆ น้องๆ และเพื่อนๆ ที่ได้ให้ความช่วยเหลือ แนะนำและให้ความรู้ในการทำวิทยานิพนธ์นี้ด้วยดีตลอดมา

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และสมาชิกทุกคนในครอบครัวที่ช่วยสนับสนุน ส่งเสริมและเป็นกำลังใจที่ดีที่สุดแก่ผู้วิจัย จนทำให้การศึกษาครั้งนี้ประสบผลสำเร็จได้ตามที่ตั้งใจ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	1
สารบัญภาพ	1
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 ก๊าซชีวภาพ.....	5
2.2 การนำก๊าซชีวภาพไปใช้ประโยชน์	6
2.2.1 ข้อดีของการนำก๊าซชีวภาพมาใช้งาน	6
2.2.2 การนำก๊าซชีวภาพไปใช้ประโยชน์เป็นพลังงานทดแทน	6
2.3 สารชีวมวล.....	7
2.3.1 การใช้พลังงานจากสารชีวมวล.....	7
2.3.2 การแปรรูปชีวมวลไปเป็นพลังงานรูปแบบต่างๆ	8
2.4 กระบวนการหมัก (Fermentation).....	9
2.4.1 โฮโมเฟอร์เมนเตชัน (Homofermentation).....	10
2.4.2 เฮเทอโรเฟอร์เมนเตชัน (Heterofermentation).....	10

2.5 องค์ประกอบสำคัญของชีวมวลหรือมวลชีวภาพ (Biomass).....	11
2.5.1 เซลลูโลส (Cellulose).....	13
2.5.2 เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose).....	14
2.5.3 ลิกนิน (Lignin).....	15
2.6 พืชชีวมวล	16
2.6.1 กระถินเทพณรงค์.....	16
2.6.2 หญ้าเนเปียร์พันธุ์ปากช่อง 1	18
2.7 การปรับสภาพเบื้องต้น (Pretreatment).....	20
2.7.1 การปรับสภาพเชิงกล (Mechanical pretreatment).....	21
2.7.2 การปรับสภาพทางความร้อน (Thermal pretreatment).....	21
2.7.3 การปรับสภาพโดยใช้กรด (Acid pretreatment)	22
2.7.4 การปรับสภาพโดยใช้ด่าง (Alkaline pretreatment).....	22
2.7.5 การปรับสภาพด้วยออกซิเดนต์ (Oxidative pretreatment).....	23
2.7.6 การปรับสภาพรวม (Combinations pretreatment)	23
2.7.7 การปรับสภาพทางชีวภาพ (Biological pretreatment).....	24
2.8 ชีววิทยาเคมีและจุลชีววิทยาของระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้ออกซิเจน	25
2.8.1 ขั้นตอนในการย่อยสลายสารอินทรีย์.....	26
2.8.2 กระบวนการทางชีวเคมีในการสร้างก๊าซมีเทน.....	28
2.9 จลศาสตร์ของการบำบัดน้ำเสียแบบไร้ออกซิเจน	30
2.10 ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพของระบบบำบัดแบบไร้ออกซิเจน	31
2.11 การป้อนน้ำเสียหรือสารอินทรีย์เข้าสู่ระบบบำบัดแบบไร้ออกซิเจน	36
2.11.1 การป้อนน้ำเสียแบบครั้งเดียว (Batch type feeding).....	36
2.11.2 การป้อนน้ำเสียแบบต่อเนื่อง (Continuous type feeding).....	36

2.11.3 การป้อนน้ำเสียแบบกึ่งต่อเนื่อง (Semi-continuous feeding).....	36
2.12 เทคโนโลยีการผลิตก๊าซชีวภาพด้วยระบบถังปฏิกริยา.....	37
2.12.1 อัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์ต่ำ (Low Rate)	37
2.12.2 อัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์สูง (High Rate)	37
2.13 อุตสาหกรรมผลิตเยื่อกระดาษ.....	38
2.13.1 กระบวนการผลิตเยื่อกระดาษ.....	38
2.13.2 กระบวนการบำบัดน้ำเสียของอุตสาหกรรมผลิตเยื่อกระดาษ	39
2.13.3 การจัดการของเสียจากกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษ.....	40
2.14 การประเมินศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพด้วยวิธีบีเอ็มพี (Biochemical Methane Potential: BMP).....	42
2.14.1 หลักการพื้นฐานของวิธีบีเอ็มพี.....	42
2.14.2 ขั้นตอนการทำบีเอ็มพี	43
2.15 การออกแบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Design: CCD).....	44
2.16 การแสดงผลตอบสนองแบบโครงสร้างพื้นผิว (Response Surface Methodology: RSM).....	45
2.16.1 ตัวแปร	46
2.16.2 หลักการที่สำคัญของการทำพื้นที่ผิวผลตอบเพื่อนำเสนอผลการวิจัย	46
2.17 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	48
2.17.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการผลิตก๊าซชีวภาพพีชีวมวล ของเสียชนิดต่างๆ และการ หมักร่วม (Co-digestion).....	48
2.17.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการผลิตก๊าซชีวภาพการปรับสภาพเบื้องต้น.....	54
2.17.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการผลิตก๊าซชีวภาพจากกากตะกอนเยื่อกระดาษ.....	59
2.18 สรุปผลการทบทวนเอกสารและแนวทางการวิจัย	61
บทที่ 3 แผนการทดลองและการดำเนินงานวิจัย.....	65

3.1 แผนการดำเนินงานวิจัย	65
3.2 เครื่องมือ และอุปกรณ์ ที่ใช้ในงานวิจัย.....	67
3.2.1 เครื่องมือและวัสดุอุปกรณ์	67
3.2.2 ถังปฏิกรณ์	67
3.2.3 เครื่องวัดปริมาณก๊าซชีวภาพ	68
3.3 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	69
3.3.1 การเตรียมวัตถุดิบ.....	69
3.3.2 การศึกษาความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และระยะเวลาที่ เหมาะสมในการปรับสภาพเบื้องต้นในไบโกระถิน	69
3.3.3 การศึกษาประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพโดยวิธีบีเอ็มพี (Biochemical Methane Potential)	72
3.3.4 ศึกษาประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วมของไบโกระถินกับชีวมวล ชนิดต่างๆ ในถังปฏิกรณ์กวนสมบูรณ์แบบแบตช์ (Batch Completely Stirred Tank Reactor)	75
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผล	80
4.1 การวิเคราะห์ห้องค์ประกอบไบโกระถินเทพณรงค์สด	81
4.2 ผลการศึกษาการปรับสภาพขั้นต้นโดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์	82
4.3 ผลการประเมินศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากไบโกระถินเทพณรงค์ด้วยวิธีบีเอ็มพี (BMP).....	86
4.3.1 ผลการผลิตก๊าซชีวภาพจากชุดทดลองต่างๆ.....	86
4.3.2 ประสิทธิภาพการกำจัดมลสารในรูปซีไอดี	89
4.3.3 การศึกษาสถานะที่เหมาะสมในการปรับสภาพไบโกระถินเทพณรงค์โดยหลักการ พื้นผิวตอบสนอง.....	92
4.3.4 การสร้างสมการทำนายปริมาณก๊าซชีวภาพจากการปรับสภาพไบโกระถินเทพณรงค์ ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์.....	97

4.3.5 การสร้างพื้นผิวดตอบสนองของปริมาณก๊าซชีวภาพ	97
4.3.6 การเลือกสภาวะที่เหมาะสมในการปรับสภาพ (Optimization).....	99
4.4 การศึกษาการหมักร่วม ไบโกระถินเทพณรงค์ กับชีวมวลชนิดต่างๆ	99
4.4.1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของชีวมวลหมักร่วม.....	100
4.4.2 การผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วมของไบโกระถินเทพณรงค์กับชีวมวลอื่น	102
4.4.2.1 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพในชุดทดลองต่างๆ	102
4.4.2.2 การใช้ไบโกระถินเทพณรงค์เป็นสารเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ ..	106
4.3.3 องค์ประกอบก๊าซชีวภาพของชุดทดลองต่างๆ	109
4.5.4 สภาวะการทำงานของระบบ.....	115
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	122
5.2 ข้อเสนอแนะ	124
รายการอ้างอิง	125
ภาคผนวก ก วิธีการคำนวณ	134
ภาคผนวก ข วิธีการวิเคราะห์	135
ภาคผนวก ค ผลการวิเคราะห์ ANOVA	138
ภาคผนวก ง ผลการวิเคราะห์ข้อมูล.....	142
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	181

สารบัญตาราง

ตารางที่ 1	คุณสมบัติของก๊าซชีวภาพ	5
ตารางที่ 2	ส่วนประกอบของลิแกนด์เซลลูโลส ในวัสดุเหลือใช้หรือกากทางการเกษตร	12
ตารางที่ 3	องค์ประกอบของหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 กับหญ้าอื่นๆ.....	20
ตารางที่ 4	ระดับความเข้มข้นของสารพิษชนิดต่างๆที่มีผลต่อแบคทีเรียในระบบบำบัดแบบไร้ออกซิเจนหรือออกซิเจนอิสระ	34
ตารางที่ 5	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งการทดลองกับสัญลักษณ์	45
ตารางที่ 6	สรุปเหตุผลของการพิจารณาเลือกชนิดชีวมวลวิธีการปรับสภาพเบื้องต้นและวิธีการวิเคราะห์ผลการทดลอง	63
ตารางที่ 7	ความสัมพันธ์ของตัวแปรและรหัสตัวแปร.....	70
ตารางที่ 8	ความสัมพันธ์ของชุดการทดลองและรหัสตัวแปร.....	71
ตารางที่ 9	ตัวแปรและค่าที่ใช้ในการทดลอง.....	78
ตารางที่ 10	วิธีการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการทดลอง	79
ตารางที่ 11	องค์ประกอบทางเคมีของไบโกระถินเทพณรงค์	81
ตารางที่ 12	องค์ประกอบของไบโกระถินหลังการปรับสภาพขั้นต้น	83
ตารางที่ 13	การวิเคราะห์ค่าความแปรปรวน ของตัวแปรต่อปริมาณก๊าซชีวภาพ	88
ตารางที่ 14	การวิเคราะห์ค่าความแปรปรวน ของตัวแปรต่อประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดี	91
ตารางที่ 15	ข้อมูลที่ใช้ในการหาสถานะที่เหมาะสมในการปรับสภาพไบโกระถินเทพณรงค์ (ค่าเฉลี่ย) ซึ่งได้จากการประเมินศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ ในหัวข้อ 4.3.....	92
ตารางที่ 16	การวิเคราะห์ความแปรปรวนของปริมาณก๊าซชีวภาพ.....	96
ตารางที่ 17	สมการและค่าทางสถิติที่ได้จากโปรแกรม.....	97
ตารางที่ 18	เปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากสมการ.....	98
ตารางที่ 19	สถานะที่เหมาะสมจากโปรแกรม Design Expert.....	99
ตารางที่ 20	องค์ประกอบทางเคมีเบื้องต้นหญ้าเนเปียร์ พันธุ์ปากช่อง 1	101

ตารางที่ 21 องค์ประกอบทางเคมีกากตะกอนเยื่อกระดาษ	101
ตารางที่ 22 ปริมาณก๊าซชีวภาพของชุดการทดลองที่ใช้ไบโกระถินสดและไบโกระถินที่ผ่านการ ปรับสภาพขั้นต้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์	103
ตารางที่ 23 เปรียบเทียบผลผลิตก๊าซชีวภาพของไบโกระถินที่ผ่านการปรับสภาพโดยใช้วีบีเอ็มพี และถังปฏิกรณ์กวนสมบูรณ์.....	104
ตารางที่ 24 เปรียบเทียบปริมาณก๊าซชีวภาพจากการคำนวณกับการทดลองหมักไบโกระถินสด ร่วมกับหญ้าเนเปียร์.....	107
ตารางที่ 25 เปรียบเทียบปริมาณก๊าซชีวภาพจากการคำนวณทางทฤษฎีกับชุดการทดลองหมักไบ โกระถินปรับสภาพร่วมกับหญ้าเนเปียร์.....	108
ตารางที่ 26 องค์ประกอบก๊าซชีวภาพของชุดทดลอง.....	110
ตารางที่ 27 ค่าพีเอชและอุณหภูมิในถังปฏิกรณ์ของชุดการทดลอง	115
ตารางที่ 28 สภาพต่างและอัตราส่วนระหว่างกรดไขมันระเหยได้ต่อสภาพต่างในถังปฏิกรณ์.....	120
ตารางที่ 29 เปรียบเทียบศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ โดยการปรับสภาพ (Pretreatment) และการหมักร่วม (Co-digestion).....	121
ตารางที่ 30 สมการแสดงความสัมพันธ์ของปัจจัยต่อค่าตอบสนองด้วยค่าทางสถิติ	123

สารบัญภาพ

ภาพที่ 1 พลังงานและผลิตภัณฑ์เพิ่มมูลค่า (value-added products) ที่ได้จากชีวมวลที่มี เซลลูโลสสูง (SSF=simultaneous fermentation and saccharification, VFAs = volatile fatty acids).....	9
ภาพที่ 2 วิธีการหมักกลูโคสแบบโฮโมเฟอร์เมนเตชัน (Homofermentation).....	10
ภาพที่ 3 วิธีการหมักกลูโคสแบบเฮเทอโรเฟอร์เมนเตชัน (Heterofermentation).....	10
ภาพที่ 4 ส่วนประกอบของลิกโนเซลลูโลสในผนังเซลล์พืช	11
ภาพที่ 5 โครงสร้างของลิกโนเซลลูโลสในผนังเซลล์พืช	12
ภาพที่ 6 โครงสร้างของเซลลูโลส.....	13
ภาพที่ 7 หน่วยของเซลโลไบโอสซึ่งเป็นน้ำตาลโมเลกุลคู่เกิดจากน้ำตาลกลูโคส (D-glucose) ต่อ กันด้วยพันธะ β -(1,4) glucosidic แสดงความเสถียรของพันธะไฮโดรเจนภายในโมเลกุลในแต่ละ สาย	13
ภาพที่ 8 โครงสร้างของเฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose structure).....	15
ภาพที่ 9 สารตั้งต้นของการสังเคราะห์ลิกนิน	16
ภาพที่ 10 ลักษณะใบและดอกของกระถินเทพณรงค์.....	17
ภาพที่ 11 ลักษณะหญ้าเนเปียร์พันธุ์ปากช่อง 1.....	19
ภาพที่ 12 โครงสร้างลิกโนเซลลูโลสหลังการปรับสภาพเบื้องต้น.....	25
ภาพที่ 13 กระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไร้ออกซิเจน	27
ภาพที่ 14 ขั้นตอนการย่อยสลายสารอินทรีย์ไปเป็นก๊าซมีเทนในสภาวะไร้อากาศ.....	29
ภาพที่ 15 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของสารอินทรีย์และจำนวนแบคทีเรียในระบบบำบัดแบบ กะ	30
ภาพที่ 16 ขั้นตอนการบำบัดน้ำเสียของอุตสาหกรรมเยื่อกระดาษ.....	40
ภาพที่ 17 ขวดเซรัมที่ใช้ในการทดสอบด้วยวิธีบีเอ็มพีประกอบด้วย หัวเชื้อจุลชีพ สารตั้งต้น และ พื้นที่ว่าง (Headspace) ซึ่งถูกแทนที่ด้วย CO_2 และ N_2 (30:70%).....	43
ภาพที่ 18 ตำแหน่งชุดการทดลองแบบประสมส่วนกลาง.....	44

ภาพที่ 19	พื้นผิวผลตอบ (Response Surface)	47
ภาพที่ 20	ผังการไหลขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	66
ภาพที่ 21	ถังปฏิกรณ์กวนสมบูรณ์ทดลองแบบแบทช์ (Batch Completely Stirred Tank Reactor).....	68
ภาพที่ 22	เครื่องวัดปริมาณก๊าซชีวภาพ (Gas counter).....	68
ภาพที่ 23	ก.ไบอกระถินเทพณรงค์ที่ใช้ในงานวิจัย ข.ไบอกระถินเทพณรงค์หลังบด.....	69
ภาพที่ 24	ขวดเซรัมส์ีชาสำหรับการทดลองชุดบีเอ็มพี (BMP)	72
ภาพที่ 25	ชุดการทดลองบีเอ็มพีในการศึกษาปริมาณก๊าซชีวภาพ	73
ภาพที่ 26	ขั้นตอนการศึกษาหาความเข้มข้นและระยะเวลาการทำปฏิกิริยาที่เหมาะสมในการปรับสภาพเบื้องต้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์	74
ภาพที่ 27	ชุดการทดลองในถังปฏิกรณ์กวนสมบูรณ์แบบแบทช์สำหรับการศึกษาประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพโดยการหมักร่วม (co-digestion).....	76
ภาพที่ 28	เครื่องวัดองค์ประกอบก๊าซชีวภาพ BIOGAS 5000 ของบริษัท Geotech	76
ภาพที่ 29	การศึกษาประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วมไบอกระถิน	77
ภาพที่ 30	ลักษณะพื้นผิวไบอกระถินเทพณรงค์หลังการปรับสภาพเมื่อทำการส่องดูด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) กำลังขยาย 1,000 เท่า.....	84
ภาพที่ 31	ปริมาณซีโอดีกรองในชุดการทดลองที่ได้หลังการปรับสภาพด้วยความเข้มข้นและระยะเวลาที่ออกแบบได้จากโปรแกรม	86
ภาพที่ 32	ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม (L/KgVS) จากชุดทดลองบีเอ็มพี ซึ่งใช้สภาวะต่างๆ ในการปรับสภาพขั้นต้นไบอกระถินด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์	87
ภาพที่ 33	ความสัมพันธ์ของตัวแปรในรูปแบบจำลอง 3 มิติ	89
ภาพที่ 34	เปรียบเทียบประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพและประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี ของชุดการทดลองบีเอ็มพี	90
ภาพที่ 35	ความสัมพันธ์ของตัวแปรในรูปแบบจำลอง 3 มิติ	91
ภาพที่ 36	กราฟการกระจายแบบแจกแจงปกติ	93
ภาพที่ 37	การกระจายส่วนตกค้างในแต่ละชุดการทดลอง.....	94

ภาพที่ 38 การกระจายของส่วนตกค้างกับลำดับชุดการทดลอง	95
ภาพที่ 39 พื้นผิวผลตอบแทน (ก) และกราฟโครงร่าง (ข) ของปริมาณก๊าซชีวภาพ	97
ภาพที่ 40 เปรียบเทียบค่าที่ได้จากทดลอง (Actual) และค่าที่ได้จากสมการ (Predicted).....	98
ภาพที่ 41 ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมของชุดการทดลองปรับสภาพ	103
ภาพที่ 42 ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมของชุดการทดลองหมักไบโกระถินร่วมกับหญ้าเนเปียร์ หรือ กากตะกอนเยื่อกระดาษ เปรียบเทียบกับชุดควบคุม	105
ภาพที่ 43 เปรียบเทียบปริมาณก๊าซชีวภาพในชุดการหมักไบโกระถินร่วมกับหญ้าเนเปียร์หรือกาก ตะกอนเยื่อกระดาษ ในอัตราส่วนต่างๆ	108
ภาพที่ 44 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพกับมีเทน ในแต่ละชุดการทดลอง.....	111
ภาพที่ 45 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีในแต่ละชุดการทดลอง.....	112
ภาพที่ 46 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีและซีโอดีกรอง	113
ภาพที่ 47 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีกรองและปริมาณก๊าซชีวภาพ.....	114
ภาพที่ 48 ค่าพีเอชในถังปฏิกรณ์ของชุดการทดลองการหมักร่วมแบบแบดซ์	116
ภาพที่ 49 ปริมาณกรดไขมันระเหย (VFA) ค่าความเป็นด่าง (Alk) และอัตราส่วนกรดไขมัน ระเหยต่อค่าความเป็นด่าง (VFA/Alk)	119

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

พลังงานเป็นปัจจัยพื้นฐานที่สำคัญสำหรับการดำรงชีวิตประจำวัน และการผลิตในภาคอุตสาหกรรม ปัจจุบันพบว่าประเทศไทยมีแนวโน้มในการใช้พลังงานเพิ่มขึ้น ในขณะที่การผลิตพลังงานภายในประเทศมีปริมาณลดลง ส่งผลให้การนำเข้พลังงานจากต่างประเทศเพิ่มสูงขึ้นด้วย (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2556) จึงเกิดแนวคิดในการพัฒนาพลังงานทดแทนจากพืชพลังงาน หรือที่เรียกว่าพลังงานชีวมวล เพื่อมาทดแทนพลังงานที่ใช้แล้วหมดไปเช่น น้ำมัน ก๊าซธรรมชาติ และถ่านหิน ซึ่งการใช้พลังงานจากพืชเป็นพลังงานสะอาดและมีการหมุนเวียนเกิดขึ้นใหม่ตลอดเวลา การใช้ประโยชน์จากชีวมวลมีทั้งการนำไปเผาเพื่อให้ได้พลังงาน หรือการหมักเพื่อให้เกิดก๊าซชีวภาพ ซึ่งรูปแบบหลังเป็นผลดีต่อสิ่งแวดล้อมมากกว่า ก๊าซชีวภาพสามารถผลิตได้จากพืชหลายชนิด มูลสัตว์ รวมไปถึงของเสียอินทรีย์ ก๊าซชีวภาพมีก๊าซมีเทนเป็นส่วนประกอบหลักจึงทำให้มีคุณสมบัติจุดติดไฟได้ดี และสามารถนำไปใช้เป็นพลังงานทดแทนในรูปแบบต่างๆได้ (Klimiuk และคณะ, 2010)

ไม้อะเคเซีย (Acacia) หรือ ไม้กระถิน เป็นพันธุ์ไม้ตระกูลถั่ว (Leguminosae) จัดเป็นไม้โตเร็ว มีการส่งเสริมให้ปลูกในหลายประเทศ โดยเฉพาะประเทศเขตร้อนในแถบภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ เช่น การปลูกเพื่อฟื้นฟูป่าพื้นดินเสื่อมโทรมในประเทศไทย นอกจากนี้ยังใช้ไม้กระถินเป็นเชื้อเพลิง และประโยชน์อื่นอีก เช่น เผาถ่าน ทำเฟอร์นิเจอร์ และเป็นวัตถุดิบสำหรับอุตสาหกรรมเยื่อกระดาษ ซึ่งให้ผลผลิตเยื่อสูงกว่าร้อยละ 3.5 และฟอกขาวได้ง่ายกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับไม้ยูคาลิปตัส (สาวิตรี พิสุทธิพิเชษฐ์, 2548) ในอุตสาหกรรมการผลิตเยื่อกระดาษพบว่าใบกระถิน เป็นวัสดุเหลือทิ้งเป็นจำนวนมาก และเป็นของเสียพวกลิกโนเซลลูโลส จึงมีศักยภาพในการนำมาผลิตเป็นก๊าซชีวภาพซึ่งใช้เป็นพลังงานทดแทนได้ นอกจากนี้ยังพบว่ากากตะกอนเยื่อกระดาษ (Pulp sludge) ที่ได้จากการกระบวนการบำบัดน้ำเสียในอุตสาหกรรมการผลิตกระดาษมีปริมาณประมาณ 3,676 ตันต่อปี ซึ่งส่วนใหญ่นำไปกำจัดด้วยวิธีฝังกลบ โดยมีค่าใช้จ่ายสูงถึง 5,514,000 ต่อปี (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2550) จึงเกิดแนวความคิดในการนำกากตะกอนมาใช้ให้เกิดประโยชน์แทนการฝังกลบ และจากงานวิจัยต่างๆพบว่ากากตะกอนกระดาษ มีศักยภาพในการนำมาผลิตก๊าซชีวภาพได้

ปัจจุบันประเทศไทยมีการส่งเสริมการผลิตพลังงานจากหญ้าเนเปียร์ เนื่องจากหญ้าเนเปียร์เติบโตเร็ว ให้ผลผลิตต่อไร่สูง มีปริมาณน้ำตาลและโปรตีนสูง เก็บเกี่ยวได้นาน จากงานวิจัยของวิรรอง กาญจนะ (2556) ศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากหญ้าเนเปียร์ พบว่า การปรับสภาพเบื้องต้น

ด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที มีประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพได้มากที่สุด 89.8 ลบ.ม./ตันหญ้าแห้งเข้าระบบ และมีมีเทนเป็นองค์ประกอบร้อยละ 59.75 แสดงให้เห็นว่าหญ้าเนเปียร์มีศักยภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพ จึงเหมาะกับการนำมาพัฒนาเพื่อใช้เป็นพลังงานทางเลือก เนื่องจากพืชชีวมวลมีลิกโนเซลลูโลส (Lignocellulose) ที่เป็นองค์ประกอบสำคัญที่สร้างความแข็งแรงให้กับผนังเซลล์พืช โดยเฉพาะเฮมิเซลลูโลสและลิกนิน ซึ่งเป็นโครงสร้างที่ย่อยสลายได้ยาก หรือไม่ได้ โดยแบคทีเรีย จึงเป็นข้อจำกัดในการเกิดปฏิกิริยาการย่อยสลาย (Seppala และคณะ, 2008) ทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาขึ้นกับกระบวนการไฮโดรไลซิส (Lu และคณะ, 2007) ดังนั้นจึงต้องมีการปรับสภาพชีวมวลเบื้องต้น เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพ การปรับสภาพเบื้องต้นมีหลายวิธี เช่น การปรับสภาพเบื้องต้นทางกายภาพ (การลดขนาด) ทางเคมี (กรดหรือด่าง) ทางชีวภาพโดยใช้จุลินทรีย์ หรือการใช้วิธีต่างๆ ดังกล่าวร่วมกัน ทั้งนี้การเลือกใช้วิธีใด ต้องคำนึงถึงสารพิษที่อาจเกิดในระหว่างหรือหลังการปรับสภาพ เช่น เพอฟูรอล ไฮโดรเมทิลเพอฟูรอล เป็นต้น (Nizami และคณะ, 2009) สำหรับการปรับสภาพเบื้องต้นทางเคมีโดยใช้ด่าง เป็นวิธีที่นิยมใช้ในการเพิ่มผลผลิตของก๊าซชีวภาพ (Tahezadeh และ Karimi, 2008)

งานวิจัยที่ผ่านมา พบว่า การปรับสภาพเบื้องต้นของซังข้าวโพดโดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ร้อยละ 2 ให้ปริมาณก๊าซชีวภาพสูงขึ้นถึงร้อยละ 72.9 (Zheng และคณะ, 2009) Liew และคณะ (2011) ทำการปรับสภาพใบไม้ร่วงโดยใช้ NaOH ร้อยละ 3.5 พบว่าให้ผลผลิตมีเทนที่สูงกว่าใบไม้ที่ไม่ผ่านการปรับสภาพถึง 24 เท่า การเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพยังสามารถทำได้โดยการหมักร่วม (Co-digestion) ซึ่งนอกจากจะผลิตก๊าซชีวภาพเป็นพลังงานทดแทนได้มากขึ้นแล้วยังสามารถแก้ไขปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมของสารอินทรีย์ที่ไม่สามารถหมักย่อยด้วยตัวเองได้ การเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ ยังสามารถทำได้โดยการใช้สารเติมแต่ง (additives) โดย (Kumar และคณะ, 2013) ได้รายงานว่ ใบกระถินณรงค์สามารถใช้เป็นสารเติมแต่งในการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพให้สูงขึ้นถึงร้อยละ 18 - 40 และทำให้สภาพแวดล้อมเอื้ออำนวยต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรียประจำถิ่น นอกจากนี้สารเติมแต่งยังช่วยปรับสภาพแวดล้อมในถังปฏิกิริยาให้เหมาะสมเพื่อให้ผลิตก๊าซชีวภาพได้เร็วขึ้นโดยกระตุ้นการทำงานของแบคทีเรียชนิดสร้างกรดและสร้างก๊าซด้วย และเพื่อให้สอดคล้องกับแผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก 25 % ใน 10 ปี (พ.ศ. 2555 - 2564) ของกระทรวงพลังงาน ที่มุ่งให้ประเทศไทยใช้พลังงานทดแทนเป็นพลังงานหลักแทนการนำเข้าน้ำมัน งานวิจัยนี้จึงเป็นการนำของเสียมาทำให้เกิดมูลค่าในด้านพลังงาน โดยศึกษาศักยภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพจากใบกระถินเทพณรงค์ซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมกระดาษ และศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ ด้วยการปรับสภาพเบื้องต้นใบกระถินด้วยวิธีทางเคมีโดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และการหมักร่วม (co-digestion) กับ

ชีวมวลประเภทต่างๆ ได้แก่ หญ้าเนเปียร์หรือกากตะกอนเยื่อกระดาษ เพื่อเป็นข้อมูลและแนวทางในการผลิตก๊าซชีวภาพเพื่อใช้เป็นพลังงานทดแทนในประเทศต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 ศึกษาประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากใบกระถินที่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)
- 1.2.2 ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพด้วยกระบวนการหมักร่วมใบกระถินกับชีวมวล 2 ชนิด ได้แก่ หญ้าเนเปียร์ หรือกากตะกอนเยื่อกระดาษ

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ (Lab-scale) ที่อุณหภูมิตั้งที่ห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยกำหนดขอบเขตการวิจัยดังนี้

- 1.3.1 ใบกระถินที่ใช้ในงานวิจัย คือ กระถินเทพณรงค์ [*Acacia spp. (mangium x auriculaeformis)*] ซึ่งเป็นส่วนเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมผลิตเยื่อกระดาษ นำมาบดให้มีขนาดเล็กกว่า 2 มิลลิเมตร วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของใบกระถิน
- 1.3.2 ชีวมวลที่ใช้ในการหมักร่วมกับใบกระถิน ได้แก่ หญ้าเนเปียร์ที่ใช้ในการทดลอง เป็นหญ้าเนเปียร์สดพันธุ์ปากช่อง 1 (*Pennisetum purpureum* cv. Pakchong1 อายุเก็บเกี่ยว 45 วัน และกากตะกอนเยื่อกระดาษ (Pulp sludge) ที่ได้จากการรวมตะกอนจากถังตกตะกอนขั้นต้น (Primary Clarifier) และขั้นที่สอง (Secondary Clarifier) ของระบบบำบัดน้ำเสีย จากโรงงานผลิตเยื่อกระดาษ
- 1.3.3 หัวเชื้อจุลินทรีย์ที่ใช้ในงานวิจัย ได้จากระบบบำบัดไร้ออกซิเจนจากบริษัท เสริมสุข จำกัด (มหาชน) นำมาเลี้ยงกระตุ้นการเจริญโดยใช้ใบกระถินเทพณรงค์เป็นอาหารเป็นเวลา 2 เดือน
- 1.3.4 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการปรับสภาพเบื้องต้นใบกระถิน ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยออกแบบการทดลองแบบประสมส่วนกลาง (Central Composite Design: CCD) ทำการปรับเปลี่ยนความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ ตั้งแต่ร้อยละ 0 ถึง 3.62 และหาระยะเวลาที่เหมาะสมในการปรับสภาพโดยปรับเปลี่ยนระยะเวลาแตกต่างกันตั้งแต่ 0 ถึง 58 ชั่วโมง เปรียบเทียบกับชุดควบคุมที่ไม่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้น

- 1.3.5 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการปรับสภาพเบื้องต้นใบบะถิน จากการผลิตก๊าซชีวภาพด้วยวิธีบีเอ็มพี (Biochemical Methane Potential: BMP) และใช้หลักการพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology: RSM) เลือกชุดการทดลองที่ปรับสภาพเบื้องต้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์โดยใช้ความเข้มข้นและเวลาที่เหมาะสม
- 1.3.6 ศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากใบบะถินที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ในสภาวะที่เหมาะสม โดยหมักร่วมกับหญ้าเนเปียร์และกากตะกอนเยื่อกระดาษ ในถังปฏิกรณ์กวนสมบูรณ์แบบแบตช์ ขนาด 6 ลิตร ระยะเวลา 90 วัน
- 1.3.7 พารามิเตอร์ที่ทำการวิเคราะห์ ได้แก่ คุณสมบัติทางเคมี คือ ปริมาณของแข็งทั้งหมด (TS) ปริมาณของแข็งระเหยทั้งหมด (TVS) สัดส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน ปริมาณความชื้น ปริมาณเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลสและลิกนิน ปริมาณก๊าซชีวภาพ และองค์ประกอบก๊าซชีวภาพ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 รู้ศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากใบบะถินที่เป็นของเสียจากอุตสาหกรรมการผลิตเยื่อกระดาษ
- 1.4.2 รู้ศักยภาพของการใช้ใบบะถินเป็นวัสดุหมักร่วมกับชีวมวลชนิดอื่นๆ ได้แก่ หญ้าเนเปียร์และกากตะกอนเยื่อกระดาษ
- 1.4.3 นำข้อมูลที่ได้มาเป็นแนวทางในการผลิตก๊าซชีวภาพจากใบบะถินในระดับอุตสาหกรรม เพื่อพัฒนาเป็นทางเลือกใหม่ ในแง่ของพลังงานทดแทนจากพืชพลังงาน

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ก๊าซชีวภาพ

ก๊าซชีวภาพ (Biogas หรือ Digester gas) คือก๊าซที่ได้จากการย่อยสลายสารอินทรีย์โดยจุลินทรีย์ ภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน (Anaerobic digestion) ซึ่งโดยทั่วไปหมายถึงก๊าซมีเทน (CH_4) เนื่องจากเป็นองค์ประกอบหลัก ประมาณ 50-70 % ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) 28-38 % และก๊าซอื่นซึ่งเป็นองค์ประกอบในปริมาณน้อย ประมาณ 2 % เช่นไฮโดรเจน (H_2) ไนโตรเจน (N_2) ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) แอมโมเนีย (NH_3) เป็นต้น เนื่องจากก๊าซมีเทนเป็นก๊าซที่ให้พลังงานความร้อนสูง (ประมาณ 21,000 กิโลจูล / ลบ.ม.) จึงสามารถนำมาใช้เป็นพลังงานทดแทนได้ สำหรับการใช้งานจริงอาจต้องมีการบำบัดก๊าซชีวภาพเพื่อกำจัดก๊าซชนิดอื่นออกก่อน เพื่อความเหมาะสมในการใช้งาน (ทงนศักดิ์ วัฒนา, 2555) ทั้งนี้ปริมาณและองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพขึ้นกับวัตถุดิบหรือสารตั้งต้น และสภาวะที่ใช้ในการหมัก และการนำก๊าซชีวภาพมาใช้เป็นพลังงานเชื้อเพลิงได้ ต้องมีองค์ประกอบของก๊าซมีเทนมากกว่า 50% (ชนกพร วงษ์วัน, 2555)

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของก๊าซชีวภาพ

ค่าความร้อนโดยประมาณ	21 เมกะจูล / ลบ.ม. หรือ 5.96 กิโลวัตต์ / ลบ.ม.
ความเร็วเปลวไฟ	25 ซม. / วินาที
อัตราส่วน อากาศ : เชื้อเพลิง (A:F)	6.19 ลบ.ม.อากาศ / ลบ.ม. ก๊าซ
อุณหภูมิเผาไหม้ในอากาศ	650 °ซ
อุณหภูมิติดไฟมีเทน	600 °ซ
ค่าความจุความร้อน	16 กิโลจูล / ลบ.ม. °ซ
ความหนาแน่น	1.15 กก. / ลบ.ม.

(ทงนศักดิ์ วัฒนา, 2555)

2.2 การนำก๊าซชีวภาพไปใช้ประโยชน์

2.2.1 ข้อดีของการนำก๊าซชีวภาพมาใช้งาน มีดังต่อไปนี้

- 1) ก๊าซชีวภาพเป็นพลังงานสะอาด ลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกสู่บรรยากาศ
- 2) ก๊าซชีวภาพเป็นพลังงานหมุนเวียนที่สามารถทดแทนการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิล ซึ่งเป็นการเพิ่มเสถียรภาพในการจัดหาพลังงาน
- 3) การผลิตก๊าซชีวภาพเป็นการหมุนเวียนสารอาหารมาใช้ใหม่ เมื่อเปรียบเทียบกับ การกำจัดขยะรูปแบบอื่น นับเป็นแนวทางในการจัดการด้านเศรษฐศาสตร์ และสิ่งแวดล้อมอย่างยั่งยืน
- 4) การผลิตก๊าซชีวภาพสามารถนำมาใช้แทนพลังงานประเภทอื่น จึงเป็นการลดค่าใช้จ่ายในการจัดซื้อพลังงาน โดยก๊าซชีวภาพ 1 ลูกบาศก์เมตร สามารถทดแทนพลังงานในรูปแบบต่าง เช่น ก๊าซหุงต้ม (LPG) 0.46 กิโลกรัม น้ำมันเบนซิน 0.67 ลิตร น้ำมันเตา 0.55 ลิตร และพลังงานไฟฟ้า 1.20 กิโลวัตต์-ชั่วโมง
- 5) ลดปัญหามลภาวะทางกลิ่น และค่าใช้จ่ายในด้านพลังงาน ของการบำบัดน้ำเสีย

2.2.2 การนำก๊าซชีวภาพไปใช้ประโยชน์เป็นพลังงานทดแทน มี 3 รูปแบบ คือ

1) การนำก๊าซชีวภาพไปใช้เป็นแหล่งเชื้อเพลิงเพื่อผลิตพลังงานความร้อน หรือใช้ในการให้ความร้อนโดยตรง

การนำก๊าซชีวภาพไปเผาให้ความร้อนโดยตรง เช่น การใช้ในครัวเรือน ใช้สำหรับหม้อต้มไอน้ำในโรงงาน ใช้เป็นเชื้อเพลิงในการอบแห้ง เป็นต้น จะให้ประสิทธิภาพในเชิงความร้อนสูง เหมาะสำหรับฟาร์มที่มีรูปแบบการใช้พลังงานความร้อนอยู่แล้ว และปริมาณก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้ต้องสูงพอต่อการนำไปเป็นเชื้อเพลิง และควรคำนึงถึงปัญหาการอุดตันและการถูกกัดกร่อนของอุปกรณ์จากก๊าซ H_2S

2) การใช้ก๊าซชีวภาพเป็นเชื้อเพลิงกับเครื่องยนต์สันดาปภายใน เพื่อผลิตพลังงานกล / ไฟฟ้า

เป็นการนำไปใช้ประโยชน์ที่นิยมอย่างมากในฟาร์มสุกร ซึ่งเมื่อผลิตเป็นไฟฟ้าแล้ว สามารถใช้งานได้สะดวก รูปแบบของการใช้ก๊าซชีวภาพในการผลิตพลังงานกล/ไฟฟ้า กับเครื่องยนต์นั้นมีหลายรูปแบบ สามารถสรุปได้ดังนี้ (สำนักวิชาการพลังงานภาค 4, 2553)

(2.1) เครื่องยนต์ดีเซลดัดแปลงให้ใช้ก๊าซชีวภาพร่วมกับน้ำมันดีเซล สามารถทดแทนการใช้น้ำมันดีเซลได้ 60-70 % เป็นวิธีที่ง่ายต่อการดัดแปลงและเสียค่าใช้จ่ายในการดัดแปลงน้อยสุด แต่ต้องมีการใช้น้ำมันดีเซลด้วยส่วนหนึ่ง

(2.2) เครื่องยนต์ดีเซลดัดแปลงให้ใช้ก๊าซชีวภาพได้ 100 % ใช้ค่าใช้จ่ายในการดัดแปลงเครื่องยนต์สูง เหมาะกับเครื่องยนต์ใหญ่ คือมีกำลังผลิตมากกว่า 30 กิโลวัตต์ ซึ่งจะดัดแปลงจากเครื่องยนต์ดีเซลให้มีการทำงานเหมือนเครื่องยนต์เบนซิน โดยใช้ก๊าซชีวภาพได้ทั้งหมด

(2.3) เครื่องยนต์เบนซินดัดแปลงให้ใช้ก๊าซชีวภาพได้ 100% ใช้ค่าใช้จ่ายการดัดแปลงน้อย เหมาะกับเครื่องยนต์ขนาด 10-25 กิโลวัตต์ ดัดแปลงระบบผสมอากาศกับเชื้อเพลิงให้สามารถใช้ก๊าซชีวภาพได้ทั้งหมด

(2.4) เครื่องยนต์ที่ใช้ก๊าซชีวภาพโดยเฉพาะ (นำเข้าจากต่างประเทศ) ซึ่งสร้างสำหรับการใช้ก๊าซชีวภาพโดยเฉพาะ ราคาสูงมาก เป็นเครื่องยนต์ขนาดใหญ่กำลังการผลิตมากกว่า 200 กิโลวัตต์

3) การผลิตพลังงานร่วม (Cogeneration System)

เป็นการผลิตพลังงานกล ไฟฟ้า และความร้อนร่วม ซึ่งสามารถใช้เชื้อเพลิงให้มีค่ากว่าการใช้ผลิตพลังงานไฟฟ้า หรือความร้อนเพียงอย่างเดียว (สำนักวิชาการพลังงานภาค 4, 2553)

2.3 สารชีวมวล

ชีวมวลหรือมวลชีวภาพ (Biomass) หมายถึง แหล่งกักเก็บพลังงานในรูปสารอินทรีย์ ซึ่งเป็นพลังงานจากธรรมชาติ และสามารถนำพลังงานธรรมชาติที่เก็บไว้เหล่านั้นมาใช้ผลิตพลังงานทดแทนได้ โดยสารอินทรีย์ที่เป็นแหล่งเก็บพลังงานได้แก่ พืชเกษตรกรรม ขยะอินทรีย์ มูลสัตว์ เศษไม้ วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร (เช่น แกลบ ชานอ้อย กากมัน ชังข้าวโพด เป็นต้น) ซึ่งมีการหมุนเวียนเกิดขึ้นใหม่ตลอดเวลา ทั้งนี้การใช้พลังงานจากชีวมวลนับเป็นพลังงานสะอาด มีการปลดปล่อยมลพิษทางอากาศน้อยกว่าการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิล (อรุณี ศุภสินสาธิต, 2555)

2.3.1 การใช้พลังงานจากสารชีวมวล

พลังงานสารชีวมวลเป็นหนึ่งในพลังงานหมุนเวียน การนำสารชีวมวลมาผลิตเป็นพลังงานนั้นเป็นที่น่าสนใจอย่างมาก ซึ่งเป็นวิธีการแก้ปัญหาการลดปัญหาการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ จึงไม่ก่อให้เกิดการเพิ่มปริมาณก๊าซเรือนกระจก เพราะสารชีวมวลนั้นทำให้เกิดสถานะคาร์บอนไดออกไซด์

สุทธิเท่ากับศูนย์ กล่าวคือ การเผาไหม้ของสารชีวมวลนั้นก่อให้เกิดคาร์บอนไดออกไซด์ที่จริง แต่ปริมาณคาร์บอนเกือบทั้งหมดในเชื้อเพลิงที่ถูกเปลี่ยนเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ เท่ากับปริมาณคาร์บอนที่เชื้อเพลิงนั้นได้รับ โดยคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกปล่อยออกมานั้นจะถูกพืชนำไปใช้แทน ซึ่งข้อพิสูจน์นี้จะใช้ได้เมื่อพืชนั้นๆ ต้องปลูกขึ้นอีกครั้งหนึ่ง และอาจไม่เหมาะสมกับประเทศที่พัฒนาแล้ว เนื่องจากป่าไม้ที่ผลิตสารชีวมวลนั้นไม่ได้รับการปลูกทดแทนเท่ากับปริมาณที่ถูกใช้ไป (สถาบันวิจัยด้านพลังงานประเทศญี่ปุ่น, 2552)

สารชีวมวลที่มาจากพื้นดินส่วนใหญ่มาจากพืชผลทางการเกษตร ไม้จากป่า และซากพืชตลอดจนสัตว์และสารอินทรีย์ของจุลชีพ พืชหลายชนิดถูกใช้เพื่อเป็นสารชีวมวลเพื่อใช้ประโยชน์ สำหรับสารชีวมวลที่มาจากพืชน้ำสามารถเพาะปลูกได้ เช่น สาหร่ายเคลป์ สารชีวมวลที่มาจากการเพาะปลูกและป่าไม้เรียกว่าสารชีวมวลบริสุทธิ์ ในขณะที่วัตถุดิบของเสียชีวภาพเรียกว่าของเสียชีวมวล การใช้ของเสียชีวมวลนั้นมีความสำคัญเนื่องจากลดความขัดแย้งระหว่างอาหารและการผลิตพลังงานชีวมวล

2.3.2 การแปรรูปชีวมวลไปเป็นพลังงานรูปแบบต่างๆ

สารชีวมวลมีคุณสมบัติทางกายภาพ ทางเคมี ความชื้น และคุณสมบัติอื่นๆ ที่แตกต่างกัน จึงทำให้การเปลี่ยนสารชีวมวลไปเป็นพลังงานนั้น ต้องใช้วิธีต่างกัน (ภาพที่ 1) จึงจำเป็นต้องพัฒนาเทคโนโลยีที่ลดต้นทุนและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ตลอดจนกระตุ้นเศรษฐกิจทางการเกษตรด้วยสำหรับการแปรรูปชีวมวลไปเป็นพลังงานรูปแบบต่างๆ อาจทำได้ดังนี้ (อรุณี ศุภสินสาธิต, 2555)

1) การเผาไหม้โดยตรง (combustion) เป็นการนำชีวมวล เช่น เศษวัสดุทางการเกษตร และเศษไม้มาเผา ซึ่งได้ความร้อนตามค่าความร้อนของชนิดชีวมวล ความร้อนที่ได้จากการเผาสามารถนำไปใช้ในการผลิตไอน้ำที่มีอุณหภูมิและความดันสูง โดยไอน้ำนี้ถูกนำไปขับเคลื่อนเพื่อผลิตไฟฟ้าต่อไป

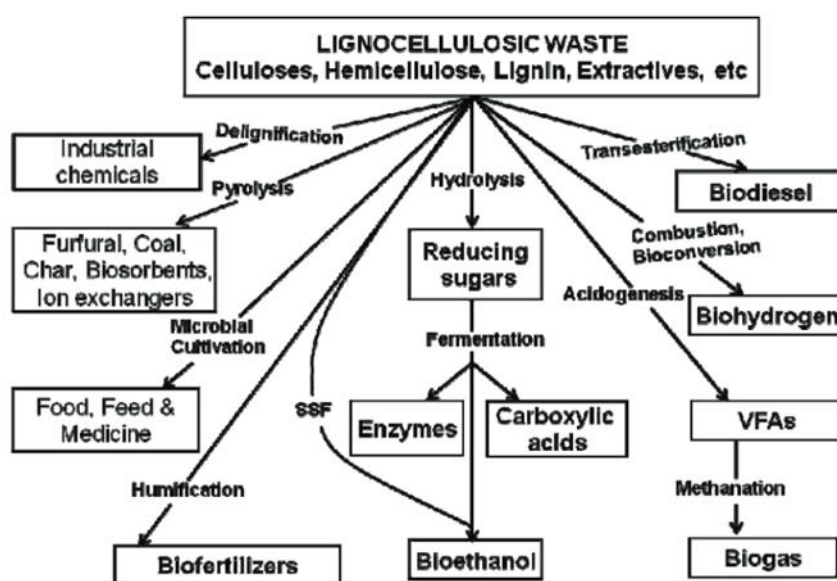
2) การหมัก (fermentation) เป็นการนำชีวมวลมาผ่านการหมักด้วยแบคทีเรียในสภาวะไร้อากาศ ชีวมวลจะถูกย่อยสลายและแตกตัว เกิดก๊าซชีวภาพ (biogas) ที่มีองค์ประกอบของก๊าซมีเทนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซมีเทนใช้เป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์สำหรับผลิตไฟฟ้า

3) การผลิตเชื้อเพลิงเหลวจากพืช แบ่งตามกระบวนการผลิต คือ

(3.1) กระบวนการทางชีวภาพ ทำการย่อยสลายแป้ง น้ำตาล และเซลลูโลสจากพืช เช่น อ้อย มันสำปะหลัง เปลี่ยนให้เป็นเอทานอล สามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงเหลวในเครื่องยนต์เบนซิน

(3.2) กระบวนการทางฟิสิกส์และเคมี ทำการสกัดน้ำมันออกจากพืชที่ให้น้ำมัน จากนั้นนำน้ำมันที่ได้ไปผ่านกระบวนการ transesterification เพื่อผลิตเป็นไบโอดีเซล

(3.3) กระบวนการใช้ความร้อนสูง เป็นกระบวนการให้ความร้อนสูงแก่วัสดุทางการเกษตรในสภาพไร้ออกซิเจน เช่นกระบวนการไพโรไลซิส จะเกิดการสลายตัว เกิดเป็นเชื้อเพลิงในรูปแบบของเหลวและก๊าซผสมกัน



ภาพที่ 1 พลังงานและผลิตภัณฑ์เพิ่มมูลค่า (value-added products) ที่ได้จากชีวมวลที่มีเซลลูโลสสูง (SSF=simultaneous fermentation and saccharification, VFAs = volatile fatty acids)

(อรุณี ศุภสินสาธิต, 2555)

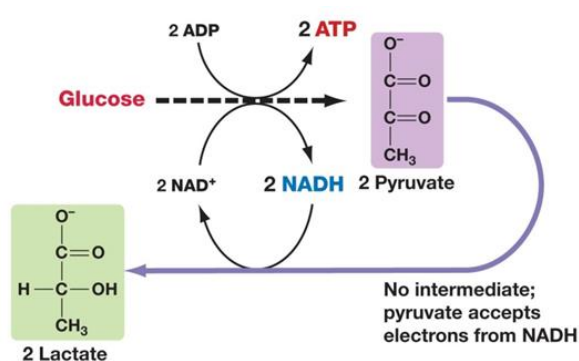
ในกระบวนการแปรรูปชีวมวลไปเป็นพลังงาน กระบวนการหมัก (fermentation) เป็นกระบวนการที่ถือว่าให้ประสิทธิภาพดีที่สุดในแง่ของให้ผลพลอยได้ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีคุณค่าสูง เช่น เอ็นไซม์ และ กรดอินทรีย์ชนิดต่างดังภาพที่ 1

2.4 กระบวนการหมัก (Fermentation)

เป็นการเปลี่ยนแปลงสารอินทรีย์ให้เกิดพลังงานโดยไม่ใช้ตัวรับอิเล็กตรอน และเกิดในสภาพที่ไม่มีออกซิเจน ในสภาวะนี้จะเกิดการออกซิเดชันบางส่วนของคาร์บอนอะตอมของสารอินทรีย์ที่เป็นสารตั้งต้น และเกิดพลังงานขึ้นเพียงเล็กน้อย พลังงานส่วนใหญ่ยังอยู่ในรูปสารอินทรีย์ที่เป็นผลผลิตของปฏิกิริยา เนื่องจากไม่มีตัวรับอิเล็กตรอนจึงต้องใช้สารอินทรีย์ต่างๆ เช่น กรดไพรูวิก เป็นตัวรับอิเล็กตรอนในช่วงสุดท้ายแทน ผลผลิตจากการหมักมีหลายชนิดขึ้นกับชนิดแบคทีเรียและ

สารตั้งต้นในการย่อยสลาย กระบวนการหมักแบ่งย่อยเป็น 2 แบบตามชนิดของผลผลิตที่ได้ (นงลักษณ์ และปรีชา สุวรรณพินิจ, 2548)

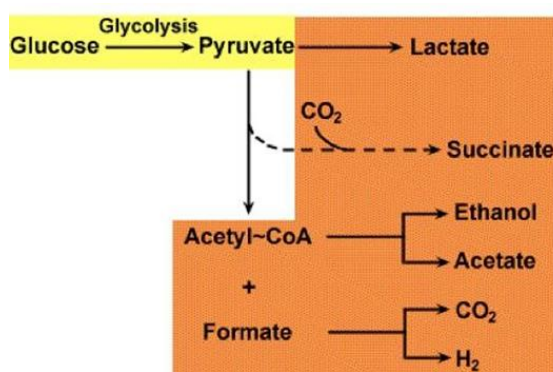
2.4.1 โฮโมเฟอร์เมนเตชัน (Homofermentation) เป็นการหมักที่ได้ผลผลิตชนิดเดียวเป็นส่วนใหญ่ และเรียกแบคทีเรียที่ให้ผลผลิตนั้นว่า โฮโมเฟอร์เมนเตตีฟแบคทีเรีย (Homofermentative bacteria) เช่น *Streptococcus lactis* ให้ผลผลิตส่วนใหญ่ คือ กรดแล็กติกซึ่งได้จากการหมักกลูโคส (ภาพที่ 2)



ภาพที่ 2 วิธีการหมักกลูโคสแบบโฮโมเฟอร์เมนเตชัน (Homofermentation)

(Bengelsdorf และคณะ, 2013)

2.4.2 เฮเทอโรเฟอร์เมนเตชัน (Heterofermentation) หรือ มิกซ์แอซิดเฟอร์เมนเตชัน (Mixed acid fermentation) เป็นการหมักที่ได้ผลผลิตหลายชนิด เช่น กรดแล็กติก กรดฟอร์มิก กรดอะซิติก เอทานอล เป็นต้น และเรียกแบคทีเรียที่ให้ผลผลิตนั้นว่าเฮเทอโรเฟอร์เมนเตตีฟแบคทีเรีย (Heterofermentative bacteria) เช่น *Echerichia coli* ซึ่งกรดฟอร์มิกจะถูก oxidize ต่อไปได้ H₂ และ CO₂ ดังแสดงในภาพที่ 3

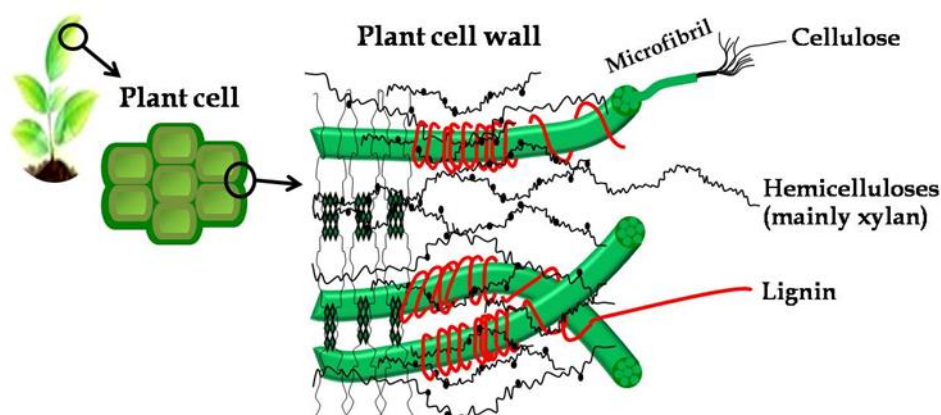


ภาพที่ 3 วิธีการหมักกลูโคสแบบเฮเทอโรเฟอร์เมนเตชัน (Heterofermentation)

(Bengelsdorf และคณะ, 2013)

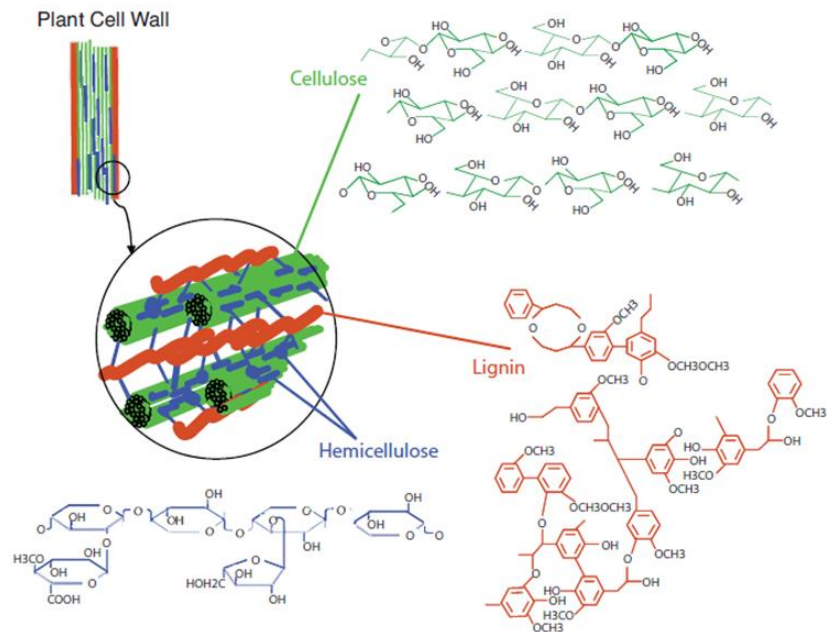
2.5 องค์ประกอบสำคัญของชีวมวลหรือมวลชีวภาพ (Biomass)

สารชีวมวลนั้นมีหลายชนิดซึ่งมีองค์ประกอบต่างกัน องค์ประกอบข้างต้นได้แก่ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส ลิกนิน แป้ง และโปรตีน สารชีวมวลชนิดต่างกันอย่างย่อมีองค์ประกอบต่างกัน การใช้พลังงานจากสารชีวมวล เช่น ต้นไม้ ซึ่งมีจำนวนมากมีศักยภาพมาก (สถาบันวิจัยด้านพลังงานประเทศญี่ปุ่น, 2552) ผนังเซลล์ของพืชที่มีเยื่อระบบท่อลำเลียง มีองค์ประกอบสำคัญคือ ลิกโนเซลลูโลส (Lignocellulose) (ภาพที่ 4 และ 5) ซึ่งเกิดจากโพลิเมอร์ทั้ง 3 ชนิด คือ เซลลูโลส (Cellulose) เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) และลิกนิน (Lignin) ยึดกันด้วยแรงของพันธะไฮโดรเจนและแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals) ซึ่งทำให้ผนังเซลล์พืชมีความแข็งแรง โดยปริมาณของโพลิเมอร์แต่ละชนิดจะขึ้นอยู่กับ ชนิด อายุ และส่วนต่างๆของพืช ลิกโนเซลลูโลสพบมากในผนังเซลล์พืช ได้แก่ วัสดุเหลือทิ้งจากไม้เนื้ออ่อนและไม้เนื้อแข็ง เศษวัสดุการเกษตร เช่น ชังข้าวโพด เส้นใยข้าวโพด ชานอ้อย แกลบ และฟางข้าว มูลสัตว์ต่างๆ รวมถึง ขยะจากบ้านเรือนและกระบวนการแปรรูปอาหาร โดยทั่วไป ใบไม้มีองค์ประกอบของเฮมิเซลลูโลส ในปริมาณสูงสุด ขณะที่พืชไม้เนื้ออ่อน (Softwood) มีลิกนินเป็นองค์ประกอบมากกว่าไม้เนื้อแข็ง (Hardwood) ดังแสดงในตารางที่ 2 (สุขใจ ชูจันทร์, 2554)



ภาพที่ 4 ส่วนประกอบของลิกโนเซลลูโลสในผนังเซลล์พืช

(Ratanakhanokchai และคณะ, 2013)



ภาพที่ 5 โครงสร้างของลิกโนเซลลูโลสในผนังเซลล์พืช

(Ratanakhanokchai และคณะ, 2013)

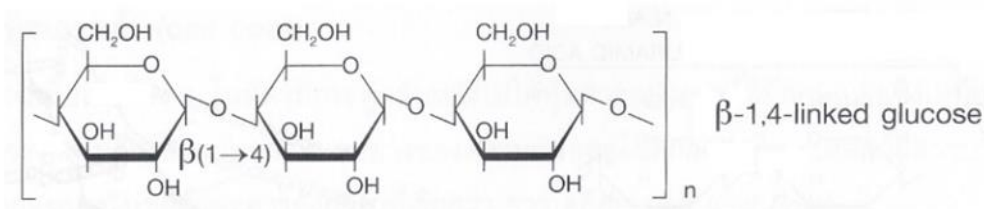
ตารางที่ 2 ส่วนประกอบของลิกโนเซลลูโลส ในวัสดุเหลือใช้หรือกากทางการเกษตร

แหล่งลิกโนเซลลูโลส	เซลลูโลส (%)	เฮมิเซลลูโลส (%)	ลิกนิน (%)
หญ้า (Grasses)	25 - 40	25 - 50	10 - 30
ไม้เนื้ออ่อน (Softwoods)	45 - 50	25 - 35	25 - 35
ไม้เนื้อแข็ง (Hardwoods)	45 - 55	24 - 40	18 - 25
เปลือกถั่ว	25 - 30	25 - 30	30 - 40
แกนฝักข้าวโพด	45	35	15
กระดาศ	85 - 99	0	0 - 15
ฟางข้าวสาลี	30	50	15
ใบไม้	15 - 20	80 - 85	0
ใบเมล็ดฝ้าย	80 - 95	5 - 20	0
ใยเมล็ดฝ้าย	40 - 55	25 - 40	18 - 30
กระดาศหนังสือพิมพ์	6	28	0
ของเสียจากโรงเลี้ยงหมู (มูลหมู) มูลวัว ควาย ปศุสัตว์	1.6 - 4.7	1.4 - 3.3	2.7 - 5.7

(ดัดแปลงจาก สุขใจ ชูจันทร์, 2554)

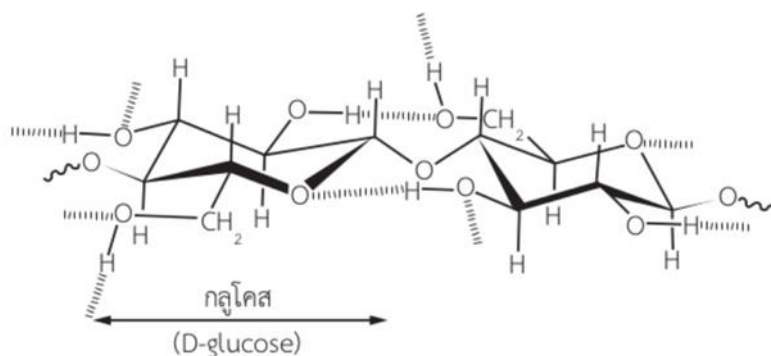
2.5.1 เซลลูโลส (Cellulose)

เซลลูโลส $[C_6(H_2O)_5]_n$ เป็นพอลิเมอร์สายยาวและมีมวลโมเลกุลสูง เซลลูโลสเป็นส่วนประกอบสำคัญของผนังเซลล์พืช ซึ่งเกิดจากโมเลกุลของกลูโคสที่ยึดจับกันด้วยพันธะเบตา (1,4) (β -(1,4) glucosidic linkage) ต่อกันเป็นสายยาวตรง มีระดับการเกิดโพลิเมอร์ (Degree of polymerization ; DP) ประมาณ 500 - 10,000 หน่วยขึ้นกับชนิดของพืช และมีเซลโลไบโอส (Cellobiose) ทำหน้าที่เป็นหน่วยโครงสร้าง (Building block) (ภาพที่ 6) และทุกๆหน่วยที่สองของกลูโคสที่ต่อกันหมุนได้ 180 องศา ทำให้เกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลในโมเลกุลของกลูโคส (ภาพที่ 7)



ภาพที่ 6 โครงสร้างของเซลลูโลส

(อรุณี ศุภสินสาธิต, 2555)



ภาพที่ 7 หน่วยของเซลโลไบโอสซึ่งเป็นน้ำตาลโมเลกุลคู่เกิดจากน้ำตาลกลูโคส (D-glucose) ต่อกันด้วยพันธะ β -(1,4) glucosidic แสดงความเสถียรของพันธะไฮโดรเจนภายในโมเลกุลในแต่ละสาย

(สุขใจ ชูจันทร์, 2554)

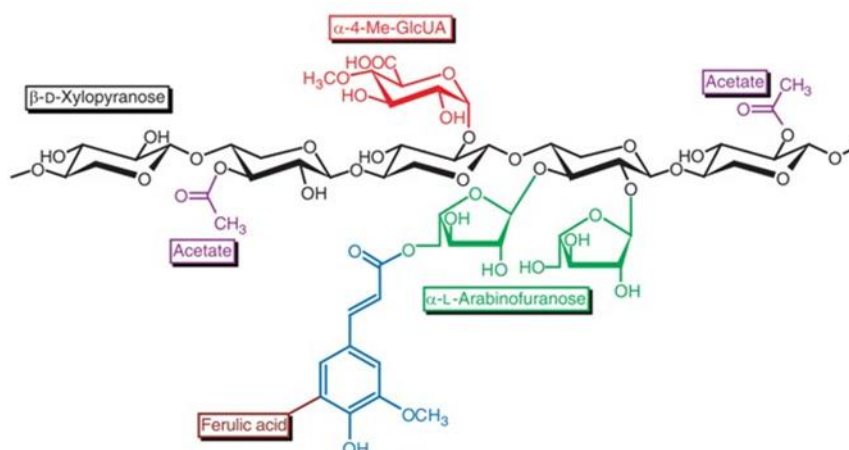
เซลลูโลสมีโครงสร้างเส้นใยเล็กๆ ที่เรียกว่าไฟบริล (Fibril) มีลักษณะเป็นมัดยาวรวมกันอย่างแข็งแรงด้วยพันธะไฮโดรเจนระหว่างหมู่ไฮดรอกซิล การจัดเรียงตัวของโมเลกุลไฟบริลทำให้เซลลูโลสมีโครงสร้างหลายรูปแบบ ซึ่งโดยทั่วไปเซลลูโลสจะมีลักษณะราบ ไม่มีกึ่งก้าน รูปร่างคล้ายริบบิ้น

(Ribbon type) เซลลูโลสไฟบริล (Cellulose fibrils) จะพบส่วนที่เป็นโครงสร้างผลึก ที่มีการจับกันด้วยพันธะไฮโดรเจนเรียงตัวขนานกันไป ประกอบด้วย micelles ซึ่งเป็นบริเวณที่มีโครงสร้างที่เป็นระเบียบ (region of high order) และส่วนที่เป็น amorphous region เป็นบริเวณที่ไม่มีระเบียบ (region of less order) เนื่องจากความไม่เป็นระเบียบและขีดจำกัดของความยืดหยุ่นไม่โครไฟบริล ทำให้บริเวณนี้ของเซลลูโลส สลายตัวและแยกออกจากกันง่ายโดยการเข้าทำปฏิกิริยากับของเหลว เช่น กรด เบส หรือเอนไซม์

ถึงแม้ว่าเซลลูโลสจะประกอบด้วยหน่วยกลูโคสเหมือนกับแป้ง แต่เซลลูโลสเชื่อมกันด้วยพันธะไกลโคซิดิกชนิดบีต้า (β -1,4 glucosidic bond) เอนไซม์อะไมเลสจึงไม่สามารถย่อยเซลลูโลสได้ และไม่สามารถย่อยได้โดยเอนไซม์ในกระเพาะอาหารหรือลำไส้ของสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม แต่เซลลูโลสสามารถย่อยได้โดยสัตว์กินพืชเท่านั้น เพราะสัตว์กลุ่มนี้มีจุลินทรีย์ประจำถิ่น (Normal flora) ในกระเพาะอาหารซึ่งเป็นจุลินทรีย์ชนิดไม่ใช้ออกซิเจนและสามารถผลิตเอนไซม์เซลลูเลสมาย่อยเซลลูโลสให้เป็นกลูโคส และใช้เป็นพลังงานได้ (อรุณี ศุภสินสาธิต, 2555)

2.5.2 เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose)

เฮมิเซลลูโลส $[C_5(H_2O)_4]_n$ หรือ $[C_6(H_2O)_5]_n$ เป็นส่วนหนึ่งของผนังเซลล์ของพืชเช่นกัน แต่เป็นสารโพลีเมอร์ของพวก D-ไซโลส เฮมิเซลลูโลสเป็นพอลิเมอร์ที่มีมวลโมเลกุลต่ำ ประกอบด้วยพอลิแซ็กคาไรด์ที่มีความซับซ้อน มีสายโซ่หลักต่อกันด้วยหน่วยของ 1,4- β -D-pyranosyl มีโครงสร้างที่เป็นสายกิ่งมากในขณะที่เซลลูโลสเป็นเส้นตรง เฮมิเซลลูโลสมีระดับการเกิดโพลีเมอร์ (Degree of polymerization ; DP) ต่ำกว่าเซลลูโลส คือ มีประมาณ 50-300 และมีน้ำตาลที่เป็นองค์ประกอบหลายชนิด โดยมีไซโลสมากที่สุด 85-90 % ส่วนที่เหลือเป็นน้ำตาลคาร์บอน 5 อะตอม (เช่น อะราบิโนส) และ 6 อะตอม (เช่น กลูโคส แมนโนส กาแลกโตส) กรดแมนนูโรนิก (Mannuronic acid) และกรดกาแลกตูโรนิก (Galacturonic acid) (ภาพที่ 8) เฮมิเซลลูโลสไม่มีรูปร่างแน่นอน และมีลำดับของน้ำตาลที่เป็นหน่วยย่อยเรียงตัวแบบสุ่ม จึงทำให้พันธะที่เชื่อมระหว่างไซโลสถูกทำลายได้ง่าย เฮมิเซลลูโลสจึงถูกย่อยสลายได้ง่ายด้วยกรด เบส เจือจางหรือเอนไซม์ (อังคณา ทองคำ, 2552)



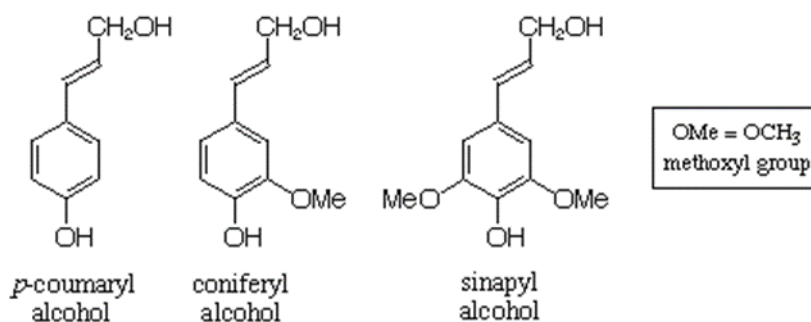
ภาพที่ 8 โครงสร้างของเฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose structure)

(Ratanakhanokchai และคณะ, 2013)

เฮมิเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบของพืชประมาณ 1 ใน 3 ของน้ำหนักแห้ง โดยอยู่ร่วมกับ เซลลูโลสและมีส่วนของลิกนินที่จับตัวอย่างหนาแน่นด้วยพันธะโควาเลนต์ ทำให้ผนังเซลล์พืชมีความ แข็งแรง และพบในไม้เนื้อแข็งมากกว่าไม้เนื้ออ่อน โดยทั่วไปเฮมิเซลลูโลสมีความเป็นกรด เนื่องจากมี หมู่ 4-เมธิล-แอลฟา-ดี-กลูโคส (4-methyl- α -D-glucose) จับอยู่กับออกซิเจนตำแหน่งที่ 2 ซึ่งการ มีหมู่แทนที่ในตำแหน่งที่ 2 และ 3 ส่งผลให้สามารถสกัดเฮมิเซลลูโลสออกได้ง่ายโดยเบส ซึ่งอาจต้องมีการกำจัดลิกนินร่วมด้วย (อังคณา ทองคำ, 2552)

2.5.3 ลิกนิน (Lignin)

ลิกนิน ($C_{10}H_{12}O_4$)_n เป็นโพลิเมอร์ที่พบในผนังเซลล์พืช มีความสัมพันธ์เชิงโครงสร้างร่วมกับ เซลลูโลสและพอลิแซ็กคาไรด์อื่นๆ ลิกนินประกอบด้วยโครงสร้างที่เป็นวงแหวนต่อกันเป็นโครงสร้าง 3 มิติ โดยภายในโครงสร้างจะเชื่อมกันด้วยพันธะอีเธอร์หรือคาร์บอนระหว่าง 2 โมเลกุล ทำให้ลิกนินทน ต่อการย่อยสลายด้วยสารเคมีมากกว่าโพลิเมอร์ชนิดอื่น กระบวนการเพิ่มลิกนิน (Lignifications) เพื่อ เติมเต็มช่องว่างระหว่างเส้นใยเซลลูโลสและสายเฮมิเซลลูโลส ทำให้เยื่อไม้มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น



ภาพที่ 9 สารตั้งต้นของการสังเคราะห์ลิกนิน
(อรุณี ศุภสินสาธิต, 2555)

โครงสร้างของลิกนินเป็น aromatic polymer ซึ่งเกิดจากหน่วยซ้ำๆ ประกอบขึ้นเป็น โมเลกุลใหญ่ มีการเชื่อมต่อกันของหน่วยย่อยคือ ฟีนิลโพรพานอยด์ (Phenyl propanoid) ซึ่งมีหมู่ เมธิลอยู่บนโมเลกุล (ภาพที่ 9) ลิกนินไม่ละลายน้ำและตัวทำละลายที่ไม่มีขั้ว ดังนั้นจึงสามารถสกัด ลิกนินได้โดยใช้ตัวทำละลายอินทรีย์ที่มีขั้วสูง การที่ลิกนินอยู่รวมกับเซลลูโลสในเนื้อไม้ นอกจากจะทำให้ โครงสร้างพืชแข็งแรงแล้ว ยังทำให้พืชไม่สามารถถูกทำลายได้ง่ายโดยจุลินทรีย์และเอนไซม์ ลิกนินเชื่อมอยู่กับเฮมิเซลลูโลสโดยพันธะโควาเลนต์ ดังนั้นการใช้ประโยชน์จากลิกนินเซลลูโลสให้เกิด ประโยชน์มากขึ้น จึงต้องมีการปรับสภาพวัสดุเหล่านี้ก่อน เพื่อให้เซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสอยู่ใน สภาพที่เหมาะสมต่อการใช้ประโยชน์ (อังคณา ทองคำ, 2552)

2.6 พืชชีวมวล

2.6.1 กระถินเทพณรงค์

ชื่อวิทยาศาสตร์: *Acacia spp. (mangium x auriculiformis)*

กระถินเทพณรงค์ เป็นกระถินสายพันธุ์ผสมระหว่างกระถินเทพา (*Acacia mangium* Willd) กับกระถินณรงค์ (*Acacia auriculiformis* Cunn.) มีผลผลิต 8-10 ตันต่อ 2 ปี

กระถินเทพณรงค์จัดเป็นไม้บุกเบิกชนิดหนึ่ง ที่สามารถปรับตัวเจริญเติบโตได้ดีในพื้นที่ซึ่ง สภาพแวดล้อมถูกทำลาย จึงนิยมนำไปปลูกเป็นสวนป่าในหลายประเทศ เนื่องจากกระถินเทพณรงค์มี คุณสมบัติที่เหมาะสมดังนี้ คือ

1) เป็นไม้โตเร็ว ลำตัวตรง ปราศจากกิ่งก้าน มีอัตราการเจริญเติบโตดีกว่าไม้ซ้อและ ยูคาลิปตัส ซึ่งไม้ทั้งสองชนิดนี้จัดเป็นไม้โตเร็วมากที่สุดจำพวกหนึ่งที่เขตร้อนชื้น

2) สามารถเจริญเติบโตได้ดีกว่าไม้อื่นๆในสภาพดินไม่ค่อยอุดมสมบูรณ์ เช่น ดินลูกรัง ดินซึ่งผ่านการทำไร่เลื่อนลอย และดินตามบริเวณพื้นที่ลาดชัน เป็นต้น

3) ขึ้นได้ในสภาพดินที่มีความเป็นกรดสูง (pH 4.2) ซึ่งนับว่าเป็นคุณสมบัติที่ดีมากประการหนึ่งทั้งนี้เนื่องจากสภาพดินส่วนใหญ่ในภูมิภาคเขตร้อนซึ่งรวมทั้งประเทศไทยด้วย มักจะมีสภาพความเป็นกรดอยู่โดยทั่วไป

4) เป็นพืชบำรุงดิน เนื่องจากมีเชื้อแบคทีเรียสกุลไรโซเบียมอาศัยอยู่ที่ปมราก ช่วยตรึงธาตุไนโตรเจนจากอากาศใน และเนื้อไม้มีคุณสมบัติดี สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้อย่างกว้างขวาง

2.6.1.1 ลักษณะทั่วไป

- **ลำต้น** กระจกนเทพนรงค์เป็นไม้ที่มีลักษณะลำต้นตรงและไม่ค่อยแตกกิ่งแขนง ทรงพุ่มของต้นกระจกนเทพนรงค์จะเปลี่ยนแปลงไปตามสภาพแวดล้อมโดยจะมีพุ่มกว้าง ถ้าหากปลูกเป็นระยะห่างกันหรือขึ้นอยู่ในบริเวณที่โล่ง และจะสูงโปร่งถ้าปลูกชิดกัน

- **ใบ** กระจกนเทพนรงค์มีลักษณะใบที่โค้งเป็นเสี้ยวพระจันทร์คล้ายลักษณะใบของกระจกนณรงค์ ผสมกับมีช่วงใบที่กว้างคล้ายลักษณะใบกระจกนเทพา (ภาพที่ 10)

- **เนื้อไม้** มีส่วนกระพี้บาง แกนสีน้ำตาล มีคุณสมบัติแข็งและทนทาน



ภาพที่ 10 ลักษณะใบและดอกของกระจกนเทพนรงค์

(Van Bueren, 2004)

2.6.1.2 การใช้ประโยชน์

- **เนื้อไม้** สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลายอย่าง เช่น ทำไม้แปรรูปเฟอร์นิเจอร์ ไม้โครงสร้างต่างๆ หรือใช้ในงานก่อสร้างที่ไม่ต้องรับน้ำหนักมากและไม่เป็นชิ้นส่วนที่ฝังลงในดิน นอกจากนี้ไม้กระถินเทพณรงค์ ยังสามารถนำมาแปรรูปทำไม้อัด หรือเยื่อกระดาษที่มีคุณภาพดีได้อีกด้วย

- **ใบ** สามารถใช้เป็นอาหารสัตว์ได้ในยามขาดแคลน และใช้เป็นแหล่งให้น้ำหวานสำหรับการเลี้ยงผึ้งได้เป็นอย่างดี เนื่องจากบริเวณโคนใบของกระถินเทพณรงค์มีต่อมน้ำหวาน ซึ่งมักพบแมลงต่าง ๆ มารุมตอมหาอาหารอยู่เป็นประจำ

- **ดอกและเกสร** เป็นแหล่งอาหารของผึ้งได้เป็นอย่างดี เช่นเดียวกับใบ

- **การปรับปรุงดิน** เนื่องจากกระถินเทพณรงค์เป็นพืชตระกูลถั่ว มีปมรากที่ตรึงธาตุไนโตรเจนมาใช้ประโยชน์ได้ ดังนั้นจึงมีความสามารถในการปรับปรุงบำรุงดินให้ดีขึ้นได้

- **ประโยชน์อื่น ๆ** นอกจากประโยชน์ที่กล่าวมาข้างต้นแล้ว ต้นกระถินเทพณรงค์ยังสามารถปลูกเพื่อใช้เป็นร่มเงา เป็นไม้ประดับ เป็นพืชคลุมดิน และแนวกันลมได้อีกด้วย (สถาบันวิจัยด้านพลังงานประเทศญี่ปุ่น, 2552)

2.6.2 หญ้าเนเปียร์พันธุ์ปากช่อง 1 (ไกรลาศ เขียวทอง, 2554)

ชื่อวิทยาศาสตร์ : *Pennisetum purpureum x Pennisetum americanum*

หญ้าเนเปียร์พันธุ์ปากช่อง 1 เป็นหญ้าลูกผสม ซึ่งเกิดจากการผสมข้ามพันธุ์ระหว่างหญ้าเนเปียร์ยักษ์และหญ้าไข่มุก เป็นพืชอาหารสัตว์ที่มีศักยภาพสูง ทั้งในแง่การให้ผลผลิต และคุณค่าทางอาหารสัตว์ และเนื่องจากหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 นั้นให้ผลผลิตต่อไร่สูง สามารถเก็บเกี่ยวได้ตลอดทั้งปี ปริมาณน้ำตาลในใบและลำต้นสูง รัฐบาลจึงสนับสนุนให้เกษตรกรหันมาปลูกหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 เพื่อป้อนเข้าโรงงานไฟฟ้าเชื้อเพลิงก๊าซชีวภาพ เพื่อให้สอดคล้องกับแผนพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก ของกระทรวงพลังงาน

2.6.2.1 ลักษณะทั่วไป

เติบโตเร็ว ให้ผลผลิตต่อไร่สูง โปรงสูง มีความน่ากินสูง สัตว์ชอบกิน ตอบสนองต่อการให้น้ำและปุ๋ยดี แดกกอดี แก่ช้า ทนแล้ง ในฤดูหนาวยังเติบโตได้ดีไม่ชงก ไม่มีระยะพักตัว ใบและลำต้นอ่อนนุ่ม ขอบใบไม่คมไม่มีขน ระยะออกดอกสั้น ไม่ติดเมล็ด ให้ผลผลิตตลอดทั้งปี มีปริมาณน้ำตาลในใบและลำต้นสูง ทำเป็นหญ้าหมักโดยไม่จำเป็นต้องเติมสารเสริมใดๆ ปรับตัวได้ดีในดิน

หลายสภาพ ไม่มีโรคและแมลงรบกวน เก็บเกี่ยวง่าย ปลูกครั้งเดียวสามารถเก็บเกี่ยวได้นานถึง 6-7 ปี (ภาพที่ 11)

2.6.2.2 ข้อเปรียบเทียบับหญ้าเนเปียร์สายพันธุ์อื่นๆ

ปัจจุบันในประเทศไทยมีการปลูกหญ้าเนเปียร์หลายสายพันธุ์ เช่น หญ้าบาน่า หญ้าอาลาฟิล หญ้าเนเปียร์ยักษ์ ซึ่งลักษณะประจำพันธุ์ดังนี้

- หญ้าบาน่า เติบโตเร็ว ให้ผลผลิตสูง ลำต้นใหญ่อวบ แต่การตอบสนองต่อการให้น้ำในหน้าหนาวไม่ดีนัก จึงให้ผลผลิตต่ำในหน้าหนาว และมีขนที่ใบมากทำให้เกิดการคันคายเมื่อสัมผัส
- หญ้าอาลาฟิล เติบโตเร็ว ให้ผลผลิตสูง และใบดกนุ่ม แต่ถ้ากระทบอากาศหนาว ก็ออกดอกทันที ถึงแม้จะตัดแล้วให้น้ำให้ปุ๋ย ต้นที่เกิดออกมาใหม่ก็จะออกดอก จึงให้ผลผลิตต่ำในหน้าหนาว
- หญ้าเนเปียร์ยักษ์ เติบโตเร็ว ให้ผลผลิตสูง ลำต้นใหญ่อวบ มีขนที่ใบมาก ทำให้เกิดการคันเมื่อสัมผัส แก่เร็ว ลำต้นและใบแข็งเมื่ออายุมาก



ภาพที่ 11 ลักษณะหญ้าเนเปียร์พันธุ์ปากช่อง 1

(ไกรลาศ เขียวทอง, 2554)

ตารางที่ 3 องค์ประกอบของหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 กับหญ้าอื่นๆ

พันธุ์หญ้า	วัตถุแห้ง (%)	% วัตถุแห้ง				
		โปรตีน	ไขมัน	เยื่อใยรวม	เถ้า	คาร์โบไฮเดรตที่ละลายน้ำได้
เนเปียร์ปากช่อง 1						
ตัดที่อายุ 45 วัน	14.9	15.9	1.3	35.8	14.5	36.5
ตัดที่อายุ 60 วัน	18.3	12.6	1.2	42.6	12.3	33.3
สุ่ม						
ตัดที่อายุ 45 วัน	21.2	8.6	1.8	30.0	8.8	50.8
ตัดที่อายุ 60 วัน	25.6	6.6	1.4	31.9	9.0	51.1
กินนีสีม่วง						
ตัดที่อายุ 45 วัน	22.6	7.9	1.2	35.5	10.7	44.7
ตัดที่อายุ 60 วัน	24.6	7.1	1.2	33.4	10.0	48.3
แพงโกล่า						
ตัดที่อายุ 45 วัน	25.2	7.8	1.6	32.3	8.1	50.2
ตัดที่อายุ 60 วัน	27.9	7.5	1.6	35.1	8.8	47.0

(ไกรลาส เขียวทอง, 2554)

2.7 การปรับสภาพเบื้องต้น (Pretreatment)

การปรับสภาพเบื้องต้นของพืชชีวมวล เป็นกระบวนการกำจัดสารประกอบลิกนินซึ่งเป็นตัวห่อหุ้มเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสให้หลุดออก (ภาพที่ 12) ซึ่งสารประกอบดังกล่าวจะเป็นตัวขัดขวางการเกิดปฏิกิริยาการย่อยสลาย (Hydrolysis) นอกจากลิกโนเซลลูโลสแล้ว ยังมีปัจจัยอื่น ที่เป็นตัวจำกัดในการเกิดปฏิกิริยาการย่อยสลาย เช่น ระดับการเกิดโพลีเมอร์ (Degree of polymerization ; DP) พื้นที่ผิวที่เข้าทำปฏิกิริยา ความชื้น เป็นต้น (Hendriks และ Zeeman, 2009) การปรับสภาพพืชชีวมวลเบื้องต้นก่อนนำมาเข้ากระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ ทำให้สามารถใช้ประโยชน์จากพืชชีวมวลได้เหมาะสม ในการผลิตก๊าซมีเทน (Nizami และคณะ, 2009) ทั้งนี้การเลือกใช้วิธีใด ต้องคำนึงถึงสารพิษ หรือสารยับยั้ง ที่อาจเกิดขึ้นได้ เช่น เฟอฟูรอล (Furfural) ไฮโดรเมทิลเฟอฟูรอล (Hydroxymethylfurfural: HMF) เป็นต้น (Nizami และคณะ, 2009) การปรับสภาพเบื้องต้นของพืชชีวมวล สามารถทำได้หลายวิธี ดังนี้

2.7.1 การปรับสภาพเชิงกล (Mechanical pretreatment)

เป็นการตัด บด หรือลดขนาดของชีวมวลให้มีขนาดเล็กลง การปรับสภาพด้วยวิธีนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาการย่อยสลาย และลดระดับการเกิดโพลีเมอร์ (DP) ส่งผลต่อปฏิกิริยาการย่อยสลาย (Hydrolysis) ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์จากขั้นตอนนี้เพิ่มขึ้น จึงสามารถผลิตก๊าซมีเทนได้สูงขึ้น 5-25 % ซึ่งขึ้นกับชนิดของชีวมวล นอกจากนี้ยังไม่พบการผลิตสารยับยั้งเช่น ฟอฟูรอล และไฮดรอกซีเมทิลฟอฟูรอล (Hendriks และ Zeeman, 2009)

2.7.2 การปรับสภาพทางความร้อน (Thermal pretreatment)

การปรับสภาพโดยใช้ความร้อน นอกจากทำให้เอมิเซลลูโลสละลายแล้ว ยังมีผลให้ลิกนินเกิดการละลายได้ ซึ่งในระหว่างกระบวนการให้ความร้อน เอมิเซลลูโลสจะถูกตัด และอยู่ในรูปกรด ซึ่งจะเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาการย่อยสลายต่อไป (Hendriks และ Zeeman, 2009) แต่ทั้งนี้การปรับสภาพในสภาวะที่รุนแรง จะส่งเสริมให้เกิดการรวมตัวและตกตะกอน จนเกิดเป็นสารยับยั้ง เช่น ฟอฟูรอล และ HMF ซึ่งเป็นสารพิษต่อจุลินทรีย์ในระบบได้ การปรับสภาพโดยใช้ความร้อน แบ่งเป็น 2 ประเภท คือ การปรับสภาพโดยใช้น้ำร้อน และการปรับสภาพโดยใช้ไอน้ำ

1) การปรับสภาพโดยใช้น้ำร้อน (Liquid hot water : LHW)

วัตถุประสงค์หลักของการใช้วิธีนี้ คือ ละลายเอมิเซลลูโลส เพื่อให้การเข้าทำปฏิกิริยาการย่อยสลายเซลลูโลสเป็นไปได้ง่าย และหลีกเลี่ยงการเกิดสารประกอบที่ยับยั้งการทำงานของจุลินทรีย์ ควรควบคุม pH ในกระบวนการปรับสภาพให้อยู่ในช่วง 4-7 (Hendriks และ Zeeman, 2009) การปรับสภาพทำโดยการใช้ น้ำร้อนที่อุณหภูมิ 170-230 °ซ ความดัน 5 เมกะปาสกาล นานหลายนาที จึงปรับตัวสู่ความดันปกติ (อรุณี ศุภสินสาธิต, 2555)

การย่อยสลายไซแลน (Xylan) ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของเอมิเซลลูโลสด้วยวิธีนี้ เกิดประโยชน์มากกว่าการปรับสภาพโดยใช้ไอน้ำ และหลังการปรับสภาพด้วยวิธีนี้ พบว่าการย่อยสลายด้วยเอนไซม์ของวัสดุลิกโนเซลลูโลส มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นถึง 6 เท่า (Nizami และคณะ, 2009) และเนื่องจากวิธีนี้มีการใช้น้ำในปริมาณมาก ทำให้ความเข้มข้นของสารที่เกิดจากการละลายของเอมิเซลลูโลสและลิกนิน มีความเข้มข้นต่ำ (เจือจาง) ลดความเสี่ยงต่อการเกิดการรวมตัวของสารยับยั้ง ส่งผลดีต่อการผลิตก๊าซมีเทน (Hendriks และ Zeeman, 2009)

2) การปรับสภาพโดยใช้ไอน้ำ / การระเบิดด้วยไอน้ำ (Steam pretreatment/Steam explosion: ST/SE)

การปรับสภาพด้วยวิธีนี้มีวัตถุประสงค์เช่นเดียวกับการปรับสภาพโดยใช้ไอน้ำร้อน คือ การละลายเฮมิเซลลูโลส เพื่อให้เกิดการเข้าถึงเซลลูโลสง่ายขึ้น ความแตกต่างระหว่างการใช้น้ำกับการระเบิดด้วยไอน้ำ คือ การลดความดันของชีวมวลลงอย่างรวดเร็ว ทำให้เกิดการระเบิดของน้ำที่อยู่ภายในชีวมวล หลังการปรับสภาพโดยการระเบิดด้วยไอน้ำ ในขณะที่การปรับสภาพด้วยไอน้ำทำให้โครงสร้างของชีวมวลเกิดการเปลี่ยนแปลง (Hendriks และ Zeeman, 2009)

การระเบิดด้วยไอน้ำส่วนใหญ่แล้วจะทำที่อุณหภูมิช่วง 160-260 °ซ ความดัน 0.69-4.82 เมกะปาสกาล โดยวัตถุประสงค์จะถูกผสมกับไอน้ำอิ่มตัวที่ความดันสูง แล้วทำการลดความดันอย่างรวดเร็วเป็นผลทำให้เกิดการแยกเอาเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลสและลิกนินออกจากกันที่อุณหภูมิสูง โดยส่วนของเฮมิเซลลูโลสจะละลายในน้ำที่ควบแน่นจากไอน้ำ (อรุณี ศุภสินสาธิต, 2555)

การปรับสภาพด้วยวิธีนี้มีความเสี่ยงต่อการเกิดสารยับยั้ง เช่น ฟอฟูรอล และ HMF ซึ่งเป็นสารยับยั้งการทำงานของจุลินทรีย์ในกระบวนการผลิตก๊าซมีเทน จึงอาจทำให้ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพลดลง (Hendriks และ Zeeman, 2009)

2.7.3 การปรับสภาพโดยใช้กรด (Acid pretreatment)

การปรับสภาพพีชลิกโนเซลลูโลส โดยใช้กรดที่อุณหภูมิห้อง เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจน โดยกรดมีผลให้เฮมิเซลลูโลสละลาย จึงทำให้การเข้าทำปฏิกิริยาของเอนไซม์กับเซลลูโลสง่ายขึ้น ส่งผลให้ได้น้ำตาลในปริมาณที่สูงขึ้นตาม โดยการปรับสภาพสามารถใช้ได้ทั้งกรดอ่อน และกรดแก่ กรดที่นำมาใช้โดยทั่วไปมีหลายประเภท เช่น กรดซัลฟิวริก กรดไฮโดรคลอริก กรดไนตริก และกรดฟอสฟอริก เป็นต้น

การปรับสภาพเบื้องต้นโดยใช้กรด ในกระบวนการผลิตก๊าซมีเทน แบคทีเรียที่เป็นตัวสร้างก๊าซมีเทนสามารถควบคุม และปรับตัวให้อยู่รอด ในสภาวะที่มีปริมาณสารยับยั้ง เช่น ฟอฟูรอลในปริมาณต่ำได้ แต่การใช้กรดซัลฟิวริก หรือ ไนตริก ทำให้การผลิตก๊าซมีเทนลดต่ำลง เนื่องจากเกิดปฏิกิริยารีดักชันของซัลเฟตไปเป็น H_2S และ ไนเตรท เป็น N_2 ในสภาวะไร้ออกซิเจน (Hendriks และ Zeeman, 2009)

2.7.4 การปรับสภาพโดยใช้ด่าง (Alkaline pretreatment)

การใช้ด่างในการปรับสภาพวัสดุเซลลูโลส ด่างทำให้เกิดปฏิกิริยาซาปอนิฟิเคชัน (Saponification) ของพันธะเอสเทอร์ระหว่างโมเลกุลของเฮมิเซลลูโลสกับสารอื่น เช่น ลิกนิน ส่งผลให้ลิกนินซึ่งเป็นตัว

ขัดขวางหลุดออกจากโครงสร้าง และทำให้การเข้าทำปฏิกิริยาของเอนไซม์กับเซลลูโลสเป็นไปได้ง่าย การปรับสภาพด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์เจือจางทำให้วัสดุเกิดการพองตัวส่งผลให้พื้นที่ผิวภายในเพิ่มขึ้น ความเป็นผลึก และระดับการเกิดโพลีเมอร์ (DP) ลดลง เกิดการแยกตัวของโครงสร้างลิกนิน และเฮมิเซลลูโลส การใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เจือจางนี้สามารถลดเปอร์เซ็นต์ของลิกนินลงได้ในไม้เนื้อแข็ง และส่งผลดีต่อสารจำพวกฟางที่มีปริมาณลิกนินต่ำ แต่ไม่เหมาะกับวัสดุที่มีลิกนินสูง (ฐิตินา คำไชยใหญ่, 2554)

2.7.5 การปรับสภาพด้วยออกซิแดนซ์ (Oxidative pretreatment)

เป็นการปรับสภาพชีวมวลโดยการเติมสารประกอบที่เป็นตัวออกซิแดนซ์ (Oxidizing agents) เช่น ไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide: H_2O_2) และ Peracetic acid (PAA) โดยมีวัตถุประสงค์ที่จะกำจัดเฮมิเซลลูโลสและลิกนินออก เพื่อเพิ่มโอกาสในการเข้าถึงเซลลูโลส แต่พบว่าการเลือกใช้ตัวออกซิแดนซ์ที่ไม่จำเพาะ เป็นเหตุให้เกิดการสูญเสียของเซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลสได้ และยังเป็นต้นเหตุของการเกิดสารประกอบยับยั้ง เช่น เมื่อลิกนินถูกออกซิไดซ์และละลาย จะเกิดสารประกอบอะโรมาติกขึ้น (Hendriks และ Zeeman, 2009)

Teixeira และคณะ (1999) ทำการปรับสภาพขานอ้อยด้วย Peracetic acid (PAA) ที่อุณหภูมิห้อง พบว่า Peracetic acid มีความจำเพาะต่อลิกนิน คือสามารถกำจัดลิกนินได้ดีและไม่พบการสูญเสียของคาร์โบไฮเดรต นอกจากนี้เอนไซม์ยังสามารถเข้าทำปฏิกิริยาและเกิดการย่อยสลายเซลลูโลสได้มากถึง 98 % ในขณะที่ขานอ้อยที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ เซลลูโลสถูกย่อยเพียง 6.8 %

2.7.6 การปรับสภาพร่วม (Combinations pretreatment)

- 1) ปรับสภาพร่วมโดยใช้ความร้อนและกรด (Thermal pretreatment in combination with acid pretreatment)

การปรับสภาพโดยใช้ความร้อนร่วมกับกรด เป็นอีกทางเลือก เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพหรือผล การปรับสภาพจากการใช้ความร้อนเพียงอย่างเดียว โดยทั่วไปจะทำการเขย่าพีชลิกโนเซลลูโลสร่วมกับ SO_2 หรือ H_2SO_4 ในระหว่างการปรับสภาพด้วยไอน้ำ โดยมีวัตถุประสงค์ที่จะกำจัดเฮมิเซลลูโลสและลิกนิน Söderström และคณะ (2002) ทำการปรับสภาพเบื้องต้นไม้เนื้ออ่อน (Softwood) โดยการใช้น้ำร่วมกับ SO_2 พบว่า สามารถย่อยสลายเซลลูโลสได้เพิ่มขึ้น เนื่องจากเฮมิเซลลูโลสและลิกนินซึ่งเป็นตัวขัดขวางการย่อยเซลลูโลส ถูกกำจัดออกไป

2) ปรับสภาพร่วมโดยใช้ความร้อนและด่าง (Thermal pretreatment in combination with alkaline pretreatment)

การปรับสภาพโดยใช้ความร้อนร่วมกับด่าง เป็นอีกทางเลือกในการเพิ่มประสิทธิภาพหรือผลการปรับสภาพจากการใช้ความร้อนเพียงอย่างเดียว เช่นเดียวกับการปรับสภาพโดยใช้ความร้อนร่วมกับกรด แต่เป็นการใช้ต่างแทนการใส่กรดในระหว่างการปรับสภาพด้วยความร้อน การปรับสภาพด้วยวิธีนี้ จะเกิดประสิทธิภาพดีกับพืชที่มีองค์ประกอบของลิกนินต่ำ (Hendriks และ Zeeman, 2009) โดยทั่วไปมักใช้ปูนขาว $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ในการปรับสภาพร่วมกับการใช้อุณหภูมิระหว่าง 100-150 °ซ (Chang และคณะ, 2001)

3) ปรับสภาพร่วมโดยใช้ความร้อนและออกซิเดนต์ (Thermal pretreatment in combination with oxidative pretreatment)

วิธี Wet-Oxidation เป็นหนึ่งในการปรับสภาพร่วม โดยใช้ความร้อนและออกซิเดนต์ปรับสภาพโดยใช้น้ำ อากาศ หรือออกซิเจนที่อุณหภูมิระหว่าง 200 - 210 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา ประมาณ 30 นาที และมีการเติมด่าง หรือ Na_2CO_3 ร่วมด้วยซึ่งจะนำไปสู่การละลายที่ดีขึ้นของสารพวกลิกโนเซลลูโลส และยังทำให้การผลิตผลิตภัณฑ์เพิ่มมูลค่า (value-added products) โดยการใช้น้ำมันต่างๆ ให้ผลดีขึ้น (อรุณี ศุภสินสาธิต, 2555)

4) ปรับสภาพด้วยแอมโมเนียและคาร์บอนไดออกไซด์ (Ammonia and carbon dioxide pretreatment)

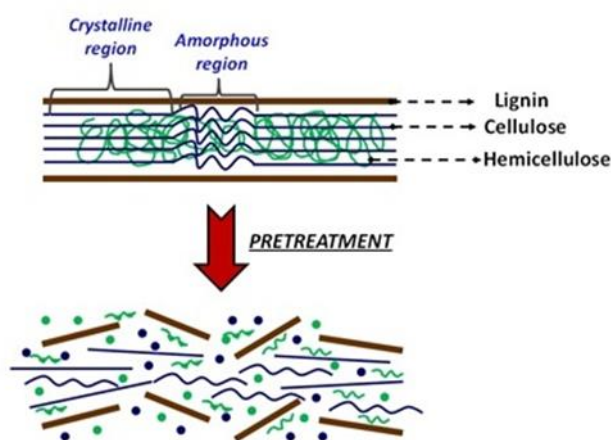
Ammonia Fiber Explosion (APEX) เป็นการปรับสภาพด้วยแอมโมเนียเหลว ที่อุณหภูมิระหว่าง 60-100 °ซ ภายใต้ความดัน เป็นเวลาประมาณ 30 นาที แล้วลดความดันลงอย่างรวดเร็ว ลักษณะคล้ายกับกระบวนการ Steam explosion โดยปริมาณของแอมโมเนียเหลวที่ใช้ประมาณ 1 ถึง 2 กิโลกรัมต่อสารชีวมวล 1 กิโลกรัม โดยวิธีนี้สามารถเปลี่ยนโครงสร้างของเซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลส เป็นน้ำตาลได้สูงขึ้น (Hendriks และ Zeeman, 2009)

2.7.7 การปรับสภาพทางชีวภาพ (Biological pretreatment)

เป็นการปรับสภาพชีวมวลโดยจุลินทรีย์ชนิดต่างๆ ทั้งที่เป็นแบคทีเรียและเชื้อรา รวมทั้งเอนไซม์ที่ผลิตจากจุลินทรีย์เหล่านี้ เชื้อราทั้งชนิดที่เป็น white-rot, brown-rod และชนิดที่เป็น soft-rot สามารถย่อยสลายเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลสและลิกนินได้ โดย brown-rod จะมีบทบาทสำคัญใน

การย่อยพวกเซลลูโลส ในขณะที่ white-rot และ soft-rot จะย่อยสลายพวกลิกนินและเฮมิเซลลูโลส พบว่า เมื่อนำลิกโนเซลลูโลสมาหมักกับเชื้อราเหล่านี้ที่อุณหภูมิ 25-35 °ซ เป็นเวลา 3-22 วันพบว่า เฮมิเซลลูโลส และ ลิกนิน ถูกย่อยสลายไปได้มากถึง 45-75 % และ 65-80 % ตามลำดับ

เชื้อราและแบคทีเรียเหล่านี้ได้แก่ *Aspergillus terreus*, *Trichoderma* spp., *Cyathus stercoreus*, *Penicillium camemberti*, *Phanerochaete chrysosporium*, *Streptomyces griseus* เป็นต้น ส่วนเอนไซม์ที่ใช้ย่อยลิกโนเซลลูโลส เช่น cellulases, glucuronidase, acetyesterase, feruloyl esterase, xylanase, β -xylosidase, lignin peroxidase, manganese peroxidase และ laccase เป็นต้น (อรุณี ศุภสินสาธิต, 2555)



ภาพที่ 12 โครงสร้างลิกโนเซลลูโลสหลังการปรับปรุงเบื้องต้น

(อรุณี ศุภสินสาธิต, 2555)

2.8 ชีววิทยาเคมีและจุลชีววิทยาของระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้ออกซิเจน (Biochemistry and biological of anaerobic treatment process)

กระบวนการบำบัดทางชีววิทยาแบบไร้ออกซิเจน เป็นกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ ภายใต้สภาวะที่ไม่เติมออกซิเจนอิสระ หรือให้อากาศกับระบบบำบัด โดยอาศัยจุลินทรีย์หลายกลุ่มทำงานร่วมกัน ซึ่งจะเกิดผลพลอยได้คือก๊าซมีเทน (CH_4) ที่ใช้เป็นแหล่งพลังงานได้ โดยสามารถแบ่งขั้นตอนการย่อยสลายออกเป็น 3 ขั้นตอนหลักๆ คือ ขั้นตอนการย่อยสลายสารอินทรีย์จากโมเลกุลใหญ่เป็นโมเลกุลเล็ก จากนั้นจะเปลี่ยนสารอินทรีย์โมเลกุลเล็กที่ได้เป็นกรดอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile fatty acid : VFA) ขั้นตอนสุดท้ายจะเปลี่ยนกรดอินทรีย์ที่ได้เป็นก๊าซมีเทน (CH_4) ซึ่งแต่ละขั้นตอนการทำงานของจุลินทรีย์ที่แตกต่างกันดังนี้ (สันทัด ศิริอนันต์ไพบูลย์, 2552)

2.8.1 ขั้นตอนในการย่อยสลายสารอินทรีย์ (Step of organic decomposition)

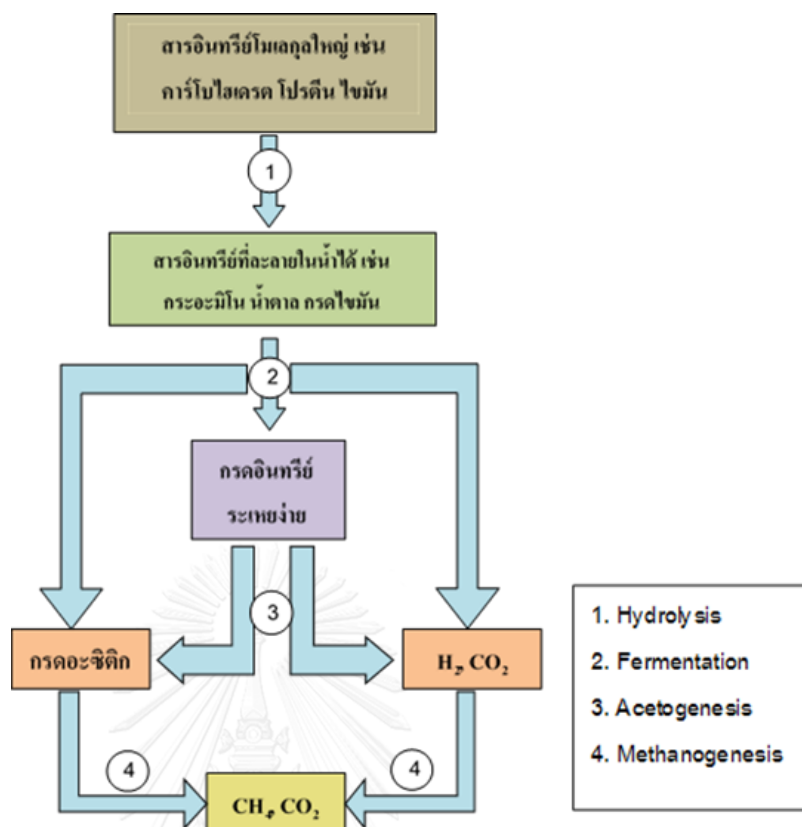
การย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไร้ออกซิเจน ประกอบด้วย 4 ขั้นตอน ดังแสดงในภาพที่ 13 แต่ละขั้นตอนมีแบคทีเรียที่เกี่ยวข้อง และการทำงานแตกต่างกันออกไปดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 กระบวนการไฮโดรไลซิส (Hydrolysis)

เป็นกระบวนการแตกสลายโพลีเมอร์ (Polymer Break-down) โดยสารประกอบอินทรีย์โมเลกุลใหญ่ที่ซับซ้อน ทั้งที่ละลายน้ำและไม่ละลายน้ำ เช่น คาร์โบไฮเดรต โปรตีน และไขมัน ถูกย่อยสลายโดยเอนไซม์ที่แบคทีเรียกลุ่มหนึ่งผลิตและปล่อยออกมาภายนอกเซลล์ (Cell) เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสเกิดเป็นสารอินทรีย์ที่ไม่ซับซ้อนและละลายน้ำได้ เช่น น้ำตาลกลูโคส กรดอะมิโน และกรดไขมัน เป็นต้น ในขั้นตอนนี้เป็นเพียงการเปลี่ยนสารอินทรีย์ที่มีโมเลกุลซับซ้อนไปเป็นสารอินทรีย์ที่มีโมเลกุลอย่างง่าย

ขั้นตอนที่ 2 กระบวนการอะซิโดเจเนซิส (Acidogenesis)

แบคทีเรียสร้างกรด (Acid Former หรือ Non-methanogenic Bacteria) ที่สามารถดำรงชีพได้ทั้งสภาวะที่มีและไม่มีออกซิเจน (Facultative Bacteria) จะใช้สารประกอบอินทรีย์อย่างง่ายที่ละลายน้ำ ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส เป็นแหล่งคาร์บอนและพลังงานในกระบวนการหมัก (Fermentation) โดยสารอินทรีย์โมเลกุลอย่างง่ายจะถูกเปลี่ยนไปเป็นกรดอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile fatty acid) ที่มีคาร์บอนไม่เกิน 5 ตัว เช่น กรดอะซิติก (Acetic acid) กรดโพรไพโอนิก (Propionic acid) กรดบิวไทริก (Butyric acid) เป็นต้น แบคทีเรียกลุ่มที่มีความสำคัญและเป็นกลุ่มหลักอาจเรียกรวมๆว่า Acid forming bacteria หรือ Acidogen



ภาพที่ 13 กระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไร้ออกซิเจน
(ดัดแปลงจาก สันตศิริ อนันต์ไพบูลย์, 2552)

ขั้นตอนที่ 3 กระบวนการอะซิโตเจเนซิส (Acetogenesis)

กรดอินทรีย์ระเหยง่ายที่เกิดขึ้นจากกระบวนการอะซิโตเจเนซิส (Acidogenesis) จะถูกเปลี่ยนให้เป็นอะซิเตท (Acetate) ฟอर्मेट (Formate) ไฮโดรเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ โดยแบคทีเรียโฮโมอะซิโตเจนิค (Homoacetogenic Bacteria) ซึ่งสารเหล่านี้เป็นสารประกอบตั้งต้นที่สำคัญในการสร้างมีเทน และยังเป็นปฏิกิริยาสำคัญเพื่อไม่ให้เกิดการสะสมของกรดอินทรีย์ระเหยง่ายและไฮโดรเจนในปริมาณสูง ซึ่งจะสามารถยับยั้งการเกิดมีเทนได้

ขั้นตอนที่ 4 กระบวนการสร้างมีเทน (Methanogenesis)

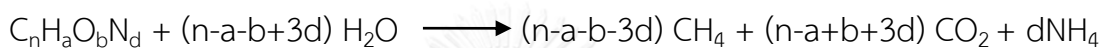
แบคทีเรียสร้างมีเทน (Methanogenic bacteria) ซึ่งดำรงชีพได้ในสภาวะไร้ออกซิเจนเท่านั้น (Strictly anaerobic bacteria) จะใช้กรดอะซิติก กรดฟอर्मิก ไฮโดรเจน และคาร์บอนไดออกไซด์ ที่ได้จากปฏิกิริยาสร้างกรดและไฮโดรเจน ถูกเปลี่ยนเป็นก๊าซมีเทน

ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ และก๊าซอื่นๆ หากมีออกซิเจนในระบบหรือถึงปฏิกิริยาเพียงเล็กน้อย จะส่งผลให้การเจริญของแบคทีเรียในกลุ่มนี้ต่ำลงทำให้ปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นต่ำลงด้วย

2.8.2 กระบวนการทางชีวเคมีในการสร้างก๊าซมีเทน

สารอินทรีย์ในระบบบำบัดจะถูกแบคทีเรียหลายๆกลุ่มในระบบบำบัดแบบไร้อากาศ ทำการย่อยสลายให้เป็นก๊าซมีเทนกับคาร์บอนไดออกไซด์ โดยมีขั้นตอนดังแสดงในภาพที่ 14

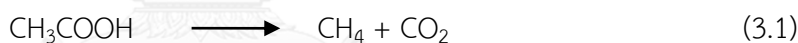
การเปลี่ยนแปลงสารอินทรีย์ไปเป็นก๊าซมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้



แบคทีเรียที่เกี่ยวข้องกับการสร้างก๊าซมีเทนประกอบด้วย 2 กลุ่มใหญ่ คือ

1) แบคทีเรียในกลุ่มที่เจริญเติบโตในสภาวะไร้อากาศ (Obligate anaerobic bacteria)

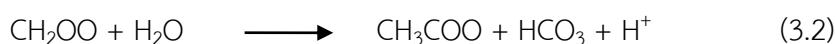
แบคทีเรียกลุ่มนี้จะเปลี่ยนกรดอินทรีย์โดยเฉพาะกรดอะซิติก (Acetic acid) ไปเป็นก๊าซมีเทน ดังสมการ 3.1



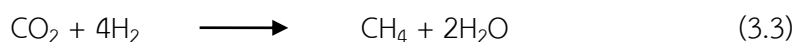
แบคทีเรียกลุ่มนี้เรียกว่า Methanogenic bacteria โดยจะเจริญเติบโตและผลิตก๊าซมีเทนภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน และหากมีออกซิเจนแบคทีเรียกลุ่มนี้จะตาย นอกจากนี้ แบคทีเรียกลุ่มนี้ยังมีอัตราการเจริญเติบโตต่ำมาก เมื่อเทียบกับแบคทีเรียในกลุ่มที่เจริญโดยใช้ออกซิเจน โดยอัตราการเพิ่มจำนวนจะต่ำกว่าแบคทีเรียในกลุ่มสร้างกรด (Acid forming bacteria) 5-8 เท่า

2) แบคทีเรียกลุ่มที่สร้างไฮโดรเจน (Hydrogen producing bacteria)

แบคทีเรียกลุ่มนี้จะสร้างก๊าซไฮโดรเจนและพลังงานจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ ดังสมการ 3.2

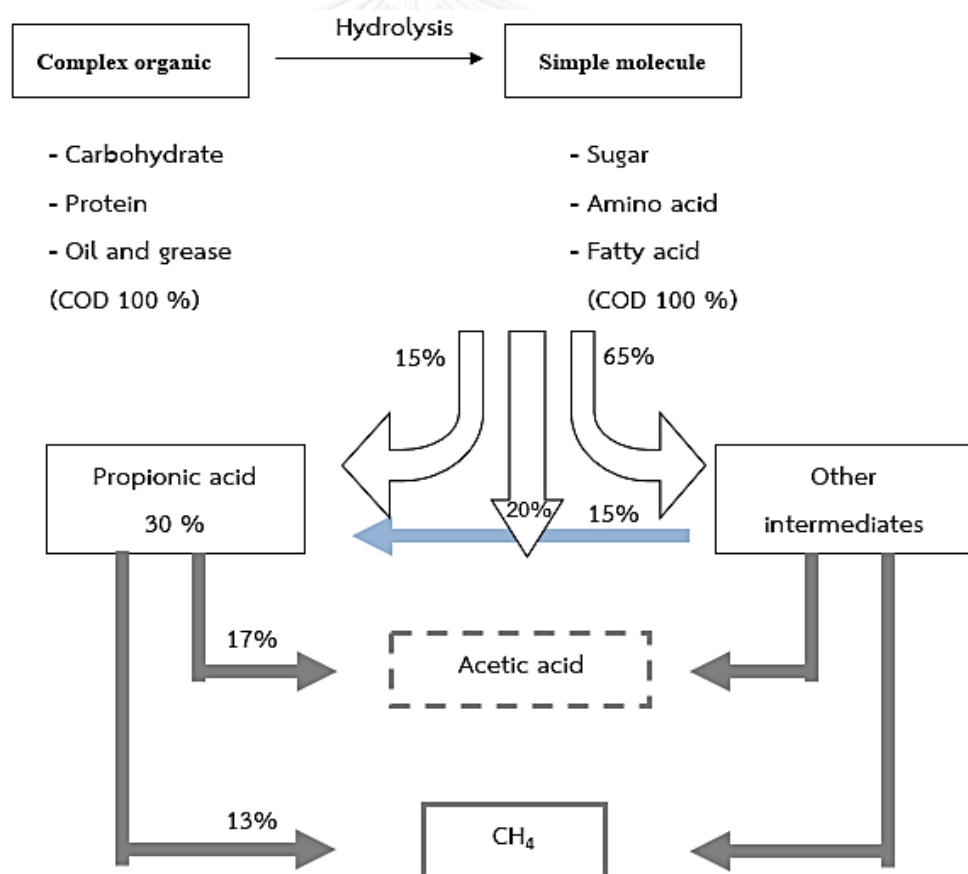


ก๊าซไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นจากสมการข้างต้น แบคทีเรียในกลุ่มนี้ จะใช้เป็นแหล่งพลังงานสำหรับการดำรงชีวิต ดังสมการ 3.3



ปฏิกิริยาการรวมตัวของคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจน ไปเป็นก๊าซมีเทน ได้พลังงานสูงกว่าการเปลี่ยนกรดอินทรีย์ไปเป็นก๊าซมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์ แบคทีเรียจึงชอบใช้ก๊าซไฮโดรเจนกับคาร์บอนไดออกไซด์มากกว่า จึงไม่พบก๊าซไฮโดรเจนในถังปฏิกิริยา พบเพียงก๊าซมีเทนโดยประมาณร้อยละ 60-70 และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และหากพบว่าปริมาณก๊าซมีเทนในก๊าซผสมต่ำกว่าร้อยละ 50 แสดงว่าภายในถังปฏิกิริยาน่าจะเกิดปัญหากับแบคทีเรียในกลุ่มสร้างมีเทนดังกล่าว

นอกจากนี้ยังสามารถพบแบคทีเรียชนิดอื่นเติบโตในระยะสร้างก๊าซมีเทน (Methane producing step) คือ แบคทีเรียในกลุ่ม Sulfur reducing bacteria โดยแบคทีเรียกลุ่มนี้จะใช้ซัลเฟตเป็นแหล่งพลังงานในการดำรงชีวิตและผลิตก๊าซ H_2S ทำให้ภายในถังปฏิกิริยาหรือระบบบำบัดมีกลิ่นเหม็น และแบคทีเรียในกลุ่ม Denitrification bacteria โดยจะพบในระบบที่มีสารประกอบไนเตรตสูง



ภาพที่ 14 ขั้นตอนการย่อยสลายสารอินทรีย์ไปเป็นก๊าซมีเทนในสภาวะไร้อากาศ

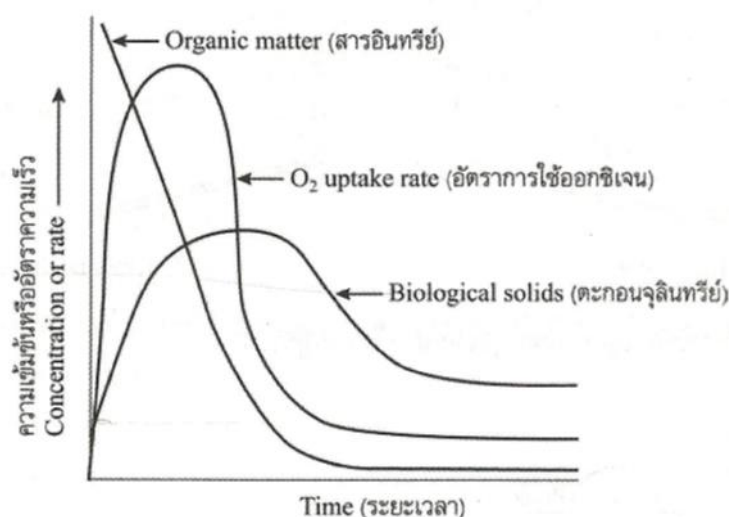
(ดัดแปลงจาก สันทัต ศิริอนันต์ไพบูลย์, 2552)

2.9 จลศาสตร์ของการบำบัดน้ำเสียแบบไร้ออกซิเจน

การเจริญเติบโตของจุลินทรีย์หรือแบคทีเรียในสภาวะที่มีน้ำเสียหรือสารอินทรีย์ (อาหารสำหรับจุลินทรีย์) ที่มีจำกัด โดยการนำน้ำเสียหรือสารอินทรีย์เข้าสู่ถังปฏิกรณ์เพียงครั้งเดียว (Batch type) พบว่าจุลินทรีย์หรือแบคทีเรียมีการใช้ออกซิเจนที่ละลายในน้ำไป และมีการใช้อาหารหรือสารอินทรีย์ไปเรื่อยๆ ทำให้ปริมาณจุลินทรีย์หรือแบคทีเรียในระบบเพิ่มจำนวนขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 15 และอัตราการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์หรือแบคทีเรียในระบบ มีการเจริญเติบโตเป็นช่วง ดังนี้ (สันทัด ศิริอนันต์ไพบูลย์, 2552)

1) ช่วง Lag phase

เป็นช่วงที่จุลินทรีย์ปรับตัวให้เข้ากับสารอินทรีย์ในระบบ จึงไม่มีการเปลี่ยนแปลงทั้งจำนวนจุลินทรีย์และความเข้มข้นของสารอินทรีย์ ในระยะนี้เป็นระยะเวลาของการคัดเลือกจุลินทรีย์ที่เหมาะสมกับระบบ กล่าวคือ อาหารหรือสารอินทรีย์และสภาพแวดล้อมภายในระบบจะเป็นตัวคัดเลือกจุลินทรีย์ โดยจะกระตุ้นการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ที่สามารถเจริญในสภาวะนั้นได้ ในขณะที่จุลินทรีย์หรือแบคทีเรียที่ไม่ชอบสภาวะนั้นก็จะมีจำนวนลดลงเรื่อยๆ จนเหลือแต่จุลินทรีย์หรือแบคทีเรียที่สามารถดำรงชีวิตอยู่ในน้ำเสียหรือสารอินทรีย์ชนิดนั้นเท่านั้น และหากเป็นสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายยากและมีสารพิษอยู่มาก ช่วง Lag phase จะยาวนาน เนื่องจากจุลินทรีย์ต้องใช้เวลาในการปรับตัวนาน



ภาพที่ 15 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของสารอินทรีย์และจำนวนแบคทีเรียในระบบบำบัดแบบกะ

(สันทัด ศิริอนันต์ไพบูลย์, 2552)

2) ช่วง Log phase

เป็นช่วงที่จุลินทรีย์หรือแบคทีเรียเริ่มคุ้นเคยกับสารอินทรีย์หรืออาหารในระบบบำบัดแล้ว ทำให้อัตราส่วนระหว่างอาหาร (สารอินทรีย์) กับปริมาณจุลินทรีย์ในถัง (F/M ratio) มีค่าสูง ทำให้อัตราการเพิ่มขึ้นของจุลินทรีย์หรือแบคทีเรียและอัตราการลดลงของสารอินทรีย์สูงขึ้นตลอดเวลา กล่าวคืออัตราการเพิ่มขึ้นของจุลินทรีย์แปรผันโดยตรงกับการลดลงของสารอินทรีย์

3) ช่วง Declining phase

เป็นช่วงหลังจาก Log phase ในช่วงนี้อัตราการเพิ่มจำนวนหรือการเติบโตของแบคทีเรียและอัตราการลดลงของสารอินทรีย์จะลดต่ำลง จุลินทรีย์จึงย่อยสลายสารอินทรีย์ได้ช้าลง เนื่องจากปริมาณสารอินทรีย์ที่มีในระบบมีปริมาณน้อยลงเรื่อยๆ โดยระยะนี้จะมีปริมาณจุลินทรีย์ในระบบบำบัดหรือถึงปฏิกิริยาสูงสุดและมีอัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์ได้สูงสุด (High removal efficiency) ทั้งยังมีก๊าซมีเทนที่เป็นผลพลอยได้จากปฏิกิริยาสูงสุดด้วย (High CH₄ production rate) ดังนั้น จึงเป็นระยะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับใช้ควบคุมจุลินทรีย์ในระบบบำบัดแบบไร้ออกซิเจน

4) ช่วง Endogenous phase

เป็นช่วงสุดท้ายของการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์หรือแบคทีเรีย สารอินทรีย์ในระบบจะถูกย่อยสลายจนเกือบหมด ทำให้เกิดสภาวะที่ขาดแคลนอาหารสำหรับจุลินทรีย์ ทำให้จุลินทรีย์บางส่วนตายและเกิดการย่อยสลายตัวเอง (Cell lysis) เกิดเป็นสารอินทรีย์ ซึ่งจะเป็อาหารสำหรับจุลินทรีย์ตัวอื่นต่อไป ถึงแม้ว่าจะเป็นช่วงที่มีประสิทธิภาพในการบำบัดสูงสุดก็ตาม แต่มักไม่เป็นที่นิยมในการออกแบบระบบให้มีการควบคุมจุลินทรีย์ให้อยู่ในช่วงนี้ เนื่องจากถังปฏิกิริยาต้องมีขนาดใหญ่มาก เพราะต้องควบคุมน้ำเสียหรือสารอินทรีย์ให้เก็บกักในระบบเป็นระยะเวลานาน

2.10 ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพของระบบบำบัดแบบไร้ออกซิเจน (สันทัด ศิริอนันต์ไพบูลย์, 2552)

ระบบบำบัดแบบไร้ออกซิเจนประกอบด้วยจุลชีพ 2 กลุ่ม คือ กลุ่มแบคทีเรียที่ไม่สร้างมีเทน (Non-methanogenic Bacteria) และกลุ่มแบคทีเรียที่สร้างมีเทน (Methanogenic Bacteria) เนื่องจากแบคทีเรียทั้ง 2 กลุ่มทำงานต่อเนื่องกัน จึงจำเป็นต้องรักษาสภาพแวดล้อมให้เหมาะสมกับการเจริญร่วมกันของแบคทีเรีย

1) อุณหภูมิ

การย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไร้ออกซิเจน มีอุณหภูมิที่เหมาะสมอยู่ 2 ช่วง คือ 35-37 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นแบคทีเรียที่สามารถเจริญได้ที่อุณหภูมิปานกลาง (Mesophilic Bacteria) และแบคทีเรียที่สามารถเจริญได้ที่อุณหภูมิสูง (Thermophilic Bacteria) ซึ่งสามารถเจริญได้ที่อุณหภูมิ 50-55 องศาเซลเซียส ซึ่งการทำงานของแบคทีเรียในช่วงอุณหภูมิสูงจะดีกว่าช่วงอุณหภูมิปานกลาง ประสิทธิภาพการบำบัดที่ 55 องศาเซลเซียส จะสูงขึ้น 1 เท่าตัวเมื่อเทียบกับอุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส ทั้งนี้แบคทีเรียในกลุ่มเทอร์โมฟิลิก ทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิได้ไม่ดีเมื่อเทียบกับแบคทีเรียกลุ่มมีโซฟิลิก จึงมีความเสี่ยงต่อการล้มเหลวของระบบสูงและการเดินระบบที่อุณหภูมิสูงยังเป็นการสิ้นเปลืองพลังงานในการควบคุมระบบด้วย

สำหรับประเทศไทยและประเทศในแถบเอเชียที่อุณหภูมิน้ำเสียเฉลี่ยในธรรมชาติสภาวะปกติ ประมาณ 25-30 องศาเซลเซียส อุณหภูมิในถังปฏิกริยาจะสูงขึ้นจากปกติ 3-5 องศาเซลเซียส ซึ่งเหมาะสมกับการเจริญของแบคทีเรียกลุ่มมีโซฟิลิก จึงไม่มีความจำเป็นในการควบคุมอุณหภูมิในถังปฏิกริยา

2) พีเอช

แบคทีเรียที่เกี่ยวข้องในระบบบำบัดแบบไร้ออกซิเจน มีทั้งกลุ่มสร้างกรด (Acid forming bacteria) และกลุ่มสร้างก๊าซมีเทน (Methane producing bacteria) ซึ่งทั้ง 2 กลุ่มมีความต้องการพีเอชในการเจริญที่ต่างกัน แบคทีเรียกลุ่มสร้างกรดเจริญเติบโตได้ดีในสภาวะที่ค่อนข้างกรด โดยสามารถทนพีเอชได้ถึง 4.5 ขณะที่แบคทีเรียในกลุ่มสร้างก๊าซมีเทนเจริญเติบโตได้ดีในสภาวะเป็นกลางไปจนถึงค่อนข้างด่าง และหากพีเอชต่ำกว่า 5 จะส่งผลต่อแบคทีเรียในกลุ่มสร้างมีเทนอย่างมาก ดังนั้นในระบบบำบัดแบบไร้อากาศต้องมีการควบคุมพีเอชให้เหมาะสมเพื่อให้แบคทีเรียทั้งสองกลุ่มเจริญเติบโตได้ดี โดยควบคุมพีเอชให้อยู่ในช่วง 6.5-7.8 ถึงแม้จะเป็นช่วงที่ไม่สามารถทำให้แบคทีเรียในแต่ละกลุ่มทำงานอย่างเกิดประสิทธิภาพได้ร้อยเปอร์เซ็นต์ แต่ก็ในช่วงพีเอชที่ทำให้แบคทีเรียทั้งสองกลุ่มเจริญเติบโตและเกิดการดำเนินงานร่วมกันในการบำบัดสารอินทรีย์เพื่อให้เกิดก๊าซมีเทน หากค่าพีเอชสูงหรือต่ำกว่า 6.5-7.8 ประสิทธิภาพในการบำบัดจะลดลง และลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อพีเอชต่ำกว่า 6.2 เนื่องจากสภาวะกรดเป็นอันตรายต่อแบคทีเรียกลุ่มสร้างก๊าซมีเทน

นอกจากนี้การควบคุมพีเอชให้เหมาะสมกับการเจริญของแบคทีเรียทั้งสองกลุ่มและเกิดประสิทธิภาพการบำบัดอย่างเต็มที่ สามารถทำได้โดยแยกแบคทีเรียทั้งสองกลุ่มออกจากกัน คือ ถังสร้างกรด (Acid forming tank) และถังสร้างก๊าซมีเทน (Methane producing tank) ทำให้การควบคุมค่าพีเอชให้เหมาะสมกับแบคทีเรียในแต่ละกลุ่มได้ง่ายขึ้น

3) ความเป็นต่าง

ในระบบบำบัดแบบไร้อากาศ เมื่อน้ำเสียหรือสารอินทรีย์เข้าสู่ระบบจะถูกเปลี่ยนไปเป็นกรดอินทรีย์โดยกิจกรรมของแบคทีเรีย มีผลให้ความเป็นกรด-ต่างในระบบลดลง ซึ่งส่งผลต่อการเจริญเติบโตของทั้งแบคทีเรียสร้างกรด (Acid forming bacteria) และกลุ่มที่สร้างก๊าซมีเทน (Methane producing bacteria) โดยความเป็นต่าง (Alkalinity) คือความสามารถในการต้านการเปลี่ยนแปลงพีเอช (pH) เมื่อปริมาณกรดในถังปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น ซึ่งมีความสำคัญอย่างมากต่อการลดลงของความเป็นกรด -ต่าง เมื่อปริมาณกรดอินทรีย์ในระบบเพิ่มขึ้น โดยความเป็นต่าง (Alkalinity) ที่เหมาะสมในถังปฏิกิริยาอยู่ในช่วง 1,000-3,000 มก./ล. ของ CaCO_3

4) กรดอินทรีย์ระเหยง่าย

กรดอินทรีย์ที่เกิดขึ้นจากกิจกรรมของแบคทีเรียในกลุ่มสร้างกรด (Acid forming bacteria) เป็นสารตั้งต้นที่สำคัญของแบคทีเรียในกลุ่มสร้างก๊าซมีเทน (Methane producing bacteria) ดังนั้น อัตราการเจริญของแบคทีเรียทั้งสองกลุ่มจึงต้องมีความสัมพันธ์กัน เนื่องจากกรดอินทรีย์ระเหยง่ายที่สร้างขึ้นโดยกลุ่มแบคทีเรียสร้างกรดเป็นอาหารสำหรับแบคทีเรียในกลุ่มสร้างก๊าซมีเทน แต่หากมีการสะสมกรดอินทรีย์ในระบบปริมาณมาก จะส่งผลให้ค่าความเป็นกรด-ต่าง (pH) ของระบบลดลง และค่าความเป็นต่าง (Alkalinity) ลดลงด้วย ซึ่งจะส่งผลกระทบต่ออัตราการเจริญของแบคทีเรียในกลุ่มสร้างกรด (Acid forming bacteria) และกลุ่มสร้างก๊าซมีเทน (Methane producing bacteria) ด้วย ทำให้ประสิทธิภาพและอัตราการเจริญของแบคทีเรียทั้งสองกลุ่มในระบบบำบัดลดลง โดยค่าความเข้มข้นของกรดอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile fatty acid : VFA) ในระบบไม่ควรเกิน 2,000 มก./ล.

5) ธาตุอาหารเสริมสร้าง

ธาตุอาหารเสริมสร้าง (Nutrients) ที่มีความสำคัญคือ ธาตุไนโตรเจนและฟอสฟอรัส โดยมีอัตราส่วนของ ซีโอดี : ไนโตรเจน : ฟอสฟอรัส เท่ากับ 100 : 2.2 : 0.4 หรือ 100 : 1.1 : 0.2 หากอาหารเสริมไม่เพียงพอจะมีผลให้การเจริญเติบโตของแบคทีเรียในระบบบำบัดไม่สมบูรณ์ นอกจากนี้ยังมีธาตุอาหารอื่น ๆ ที่มีความต้องการในปริมาณต่ำ โดยทั่วไปจะมีปนเปื้อนในน้ำเสียอยู่แล้วจึงไม่ต้องเติมเพิ่ม เช่น Ca, Mg, Mo, Co, และ Fe เป็นต้น อัตราการเจริญของแบคทีเรียในระบบบำบัดแบบไร้ออกซิเจนต่ำมาก จึงให้ปริมาณจุลินทรีย์ส่วนเกินน้อยกว่าระบบที่ใช้ออกซิเจนมาก จึงมีปัญหาในการจัดการตะกอนส่วนเกินน้อยกว่า

6) สารพิษ

สารประกอบบางชนิดที่ปนเปื้อนในน้ำเสีย หรือสารอินทรีย์ที่เข้าสู่ระบบจะเป็นอันตรายต่อการเจริญเติบโต และกิจกรรมในการย่อยสลายสารอินทรีย์ของจุลินทรีย์หรือแบคทีเรียที่สำคัญในระบบบำบัดแบบไร้ออกซิเจน โดยสารพิษที่จะส่งผลกระทบต่อจุลินทรีย์หรือแบคทีเรีย อาทิเช่น สารประกอบของโลหะ เช่น โซเดียม โปแทสเซียม แมกนีเซียม แคลเซียม เป็นต้น นอกจากนี้ยังมี เกลืออนินทรีย์ แอมโมเนีย และซัลไฟด์ ทั้งนี้ความรุนแรงของสารพิษยังขึ้นกับชนิดและความเข้มข้นของสารนั้นด้วย ตัวอย่างสารพิษที่มีผลต่อจุลินทรีย์และประสิทธิภาพของระบบบำบัด ดังแสดงในตารางที่ 4 สารพิษบางชนิดอาจมีการสะสมในถังปฏิกรณ์จนมีปริมาณมากพอที่จะส่งผลเสียได้ จึงมีความจำเป็นต้องมีการกำจัดออกเป็นระยะๆ หรือบางชนิดมีการปนเปื้อนในปริมาณสูงตั้งแต่เข้าระบบ ก็เกิดผลกระทบต่อจุลินทรีย์ในระบบทันที

ตารางที่ 4 ระดับความเข้มข้นของสารพิษชนิดต่างๆที่มีผลต่อแบคทีเรียในระบบบำบัดแบบไร้ออกซิเจนหรือออกซิเจนอิสระ

สารพิษ	ความเข้มข้นสูงสุดที่จะไม่เป็นอันตรายต่อแบคทีเรีย (มก./ล.)	สารพิษ	ความเข้มข้นสูงสุดที่จะไม่เป็นอันตรายต่อแบคทีเรีย (มก./ล.)
Cu	1.0	Na ⁺	3500
Zn	5.0	K ⁺	2500
Cr ⁺⁶	5.0	Ca ⁺²	2500
Chloride	15000	Mg ⁺²	1000
Cr ⁺³	2000	Averylonitrite	5.0
Total chromium	5.0	Benzene	50
Ni	2.0	CCl ₄	10
Cd	0.02	Chloroform	0.1
S ⁻²	100	Pentachlorophenol	0.4
SO ₄ ⁻²	500	Cyanide	1.0
Ammonia	1500		

(สันทนต์ ศิริอนันต์ไพบูลย์, 2552)

7) การกวนผสม

การกวนผสมทำให้สารอินทรีย์ (อาหาร) และจุลินทรีย์ในระบบบำบัดหรือถังปฏิริยาสามารถสัมผัส และผสมกันอย่างทั่วถึง ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญมาก เพื่อให้ปฏิริยาชีวเคมีในระบบบำบัดเกิดสมบูรณ์มากที่สุดทำให้ประสิทธิภาพของระบบบำบัดสูงขึ้น การกวนผสมมี 3 วิธีที่นิยมใช้กัน คือ การกวนผสมโดยใช้เครื่องมือกล (ใช้ใบพัด) การกวนผสมโดยใช้การสูบน้ำในถังปฏิริยาให้เกิดการหมุนเวียน และการกวนผสมโดยการนำก๊าซที่เกิดขึ้นจากการบำบัดมาใช้ในการกวนผสม ทั้งนี้ไม่ว่าจะเลือกใช้วิธีใด ข้อจำกัดของการกวนผสม คือจะต้องไม่ก่อให้เกิดสภาวะที่มีการเติมออกซิเจนเข้าสู่ระบบ

8) เวลาพักพักผลศาสตร์

ระยะเวลาพักพักผลศาสตร์เป็นปัจจัยที่ใช้ในการควบคุมประสิทธิภาพของระบบการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไร้ออกซิเจน โดยอัตราการย่อยสลายจะเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาพักพักผลศาสตร์จนถึงค่าสูงสุดค่าหนึ่ง จากนั้นจะลดลงจนกระทั่งถึงขั้นหนึ่งที่จุลินทรีย์จะหลุดออกจากระบบ (wash out) ในอัตราที่เร็วกว่าซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งในการทำให้ระบบล้มเหลว (Nizami และคณะ, 2009) จากการศึกษาการย่อยสลายของของเสียทางการเกษตรโดย Demirbas และ Ozturk (2005) รายงานว่าร้อยละ 80-85 ของก๊าซชีวภาพที่ได้จากการย่อยสลายเกิดขึ้นในช่วง 18 วันแรก จากระยะเวลาพักพักทั้งหมด 30 วัน และผลการศึกษาในลักษณะเดียวกันของ Qi และคณะ (2005) พบว่า HRT ที่เหมาะสมของการย่อยสลายพีเซลลูโลสเพื่อผลิตก๊าซชีวภาพ อยู่ในช่วง 2-3 สัปดาห์

9) การหมักร่วม

การนำสารอินทรีย์ชนิดอื่นมาทำการหมักย่อยร่วม (Co-digestion) นอกจากจะสามารถผลิตก๊าซชีวภาพเป็นได้มากขึ้นแล้ว ยังเป็นการจัดการปัญหาเกี่ยวกับสารอินทรีย์ที่ไม่สามารถหมักย่อยด้วยตัวเองได้ จากการศึกษางานวิจัยการหมักร่วมที่ผ่านมา จึงเป็นอีกปัจจัยที่ได้รับความสนใจในการผลิตก๊าซชีวภาพ เช่น งานวิจัยของ Romano และ Zhang (2008) พบว่าสามารถผลิตก๊าซมีเทนเพิ่มขึ้นจากการหมักร่วมของหญ้าหมักและมูลวัว เมื่อใช้อัตราส่วน C:N ที่เหมาะสม และ Macias-Corral และคณะ (2008) พบว่า เอนไซม์เซลลูเลสและแบคทีเรียกลุ่มผลิตมีเทนที่ปรากฏในมูลวัว มีบทบาทในเชิงบวกต่อกระบวนการย่อยสลาย และการหมักร่วมกับมูลวัวเป็นการเพิ่มไนโตรเจนให้กับระบบ

2.11 การป้อนน้ำเสียหรือสารอินทรีย์เข้าสู่ระบบบำบัดแบบไร้ออกซิเจน (Feeding system) (สันตต์ ศิริอนันต์ไพบุลย์, 2552)

การป้อนน้ำเสียหรือสารอินทรีย์เข้าสู่ระบบบำบัดหรือถังปฏิกริยา ขึ้นกับลักษณะการทำงานของโรงงาน รวมถึงลักษณะของน้ำเสียในเชิงปริมาณและคุณภาพ และระบบบำบัดน้ำเสียที่ออกแบบไว้ โดยลักษณะการป้อนน้ำเสียหรือสารอินทรีย์เข้าสู่ระบบบำบัด ดังนี้

2.11.1 การป้อนน้ำเสียแบบครั้งเดียว (Batch type feeding)

เป็นการป้อนน้ำเสียหรือสารอินทรีย์เข้าสู่ถังปฏิกริยาหรือระบบบำบัดน้ำเสีย เพียงครั้งเดียว ในหนึ่งวัน แล้วปล่อยให้จุลินทรีย์หรือแบคทีเรียย่อยสลายสารอินทรีย์ จากนั้นทำการถ่ายน้ำเสียหรือสารอินทรีย์ที่ผ่านการย่อยสลายออกจากระบบ และมีการเติมน้ำเสียหรือสารอินทรีย์ใหม่เข้าสู่ระบบทีเดียว และดำเนินไปตามขบวนการข้างต้น การป้อนน้ำเสียหรือสารอินทรีย์เข้าสู่ระบบแบบครั้งเดียว เหมาะกับน้ำเสียหรือสารอินทรีย์ที่มีปริมาณไม่มากนัก หรือน้ำเสียเกิดขึ้นเป็นช่วงๆและไม่ต่อเนื่อง ทั้งนี้อาจต้องมีการคำนึงถึงการสร้างถังพักน้ำเสีย เพื่อกักน้ำเสียหรือสารอินทรีย์ที่ออกจากโรงงาน และวัดอัตราการป้อนน้ำเสียที่เข้าสู่ถังปฏิกริยาหรือระบบบำบัด ให้สม่ำเสมอทั้งในเชิงคุณภาพและปริมาณ

2.11.2 การป้อนน้ำเสียแบบต่อเนื่อง (Continuous type feeding)

เป็นการป้อนน้ำเสียหรือสารอินทรีย์เข้าสู่ถังปฏิกริยาหรือระบบบำบัดน้ำเสียแบบต่อเนื่อง ตลอด 24 ชั่วโมง คือจะมีน้ำเสียหรือสารอินทรีย์เข้าและออกจากถังปฏิกริยาตลอดเวลา ทั้งนี้เพื่อต้องการให้ระบบบำบัดดำเนินไปอย่างต่อเนื่อง การป้อนน้ำเสียหรือสารอินทรีย์แบบนี้เหมาะกับโรงงานที่มีการผลิตทั้งวันและมีน้ำเสียเกิดขึ้นตลอดเวลา อย่างไรก็ตามยังมีข้อจำกัดในเรื่องของความไม่สม่ำเสมอทั้งปริมาณและความเข้มข้นของมลพิษในน้ำเสียหรือสารอินทรีย์ที่เข้าสู่ระบบ ซึ่งทำให้อาจไม่สามารถป้อนน้ำเสียเข้าสู่ถังปฏิกริยาได้โดยตรง จึงต้องมีการปรับสภาพทั้งในเชิงปริมาณและคุณภาพของน้ำเสียหรือสารอินทรีย์ก่อนเข้าถังปฏิกริยา

2.11.3 การป้อนน้ำเสียแบบกึ่งต่อเนื่อง (Semi-continuous feeding)

เป็นการป้อนน้ำเสียหรือสารอินทรีย์เข้าสู่ถังปฏิกริยาหรือระบบบำบัดน้ำเสียแบบกึ่งต่อเนื่อง คือจะมีการหยุดป้อนน้ำเสียเป็นช่วงๆ ซึ่งการป้อนน้ำเสียหรือสารอินทรีย์เข้าสู่ระบบจะพิจารณาจากลักษณะการทำงานของโรงงาน คุณภาพและปริมาณของน้ำเสียที่มีความแตกต่างกันมาก

2.12 เทคโนโลยีการผลิตก๊าซชีวภาพด้วยระบบถังปฏิกริยา

เทคโนโลยีการผลิตก๊าซชีวภาพด้วยกระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพแบบไม่ใช้ออกซิเจน (Anaerobic Process) มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ ซึ่งแบ่งตามอัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์ ได้เป็น 2 ชนิดใหญ่ คืออัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์ต่ำ (Low Rate) และอัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์สูง (High Rate) (ทงศ์ศักดิ์ วัฒนา, 2555)

2.12.1 อัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์ต่ำ (Low Rate) มี 3 รูปแบบ คือ แบบยอดโดมคงที่ (Fixed Dome Digester) แบบฝาครอบลอย (Floating Drum Digester) และแบบรางขนาน (Plug Flow Digester) ซึ่งแบบรางขนาน แบ่งได้อีก 2 รูปแบบ คือ แบบพลาสติกคลุมบ่อดิน (Cover Lagoon) และแบบพลาสติกคลุมราง ซึ่งการผลิตก๊าซชีวภาพแบบระบบถังปฏิกริยาย่อยสลายช้า ใช้พื้นที่ในการก่อสร้างค่อนข้างมาก เนื่องจากต้องใช้เวลาในการกักเก็บน้ำสูง

2.12.2 อัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์สูง (High Rate) เป็นระบบที่มีการอัตราการย่อยสลายเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว มีประสิทธิภาพการบำบัดสูง ภายในระบบจะมีการกวนผสม การกักเก็บและรักษาตะกอนแบคทีเรียที่มีคุณภาพให้อยู่ในระบบเป็นเวลานาน โดยออกแบบให้ตะกอนถูกยึดตรึงไว้กับตัวกลาง หรือการทำให้ตะกอนรวมตัวกันเป็นก้อน และมีการเวียนตะกอนที่หลุดไปกับน้ำล้นกลับเข้าสู่ระบบ ซึ่งสามารถแบ่งรูปแบบตามลักษณะการเลี้ยงแบคทีเรียภายในถัง ได้เป็น 3 รูปแบบ คือ แบบเชื้อแขวนลอย (Suspended Growth) ระบบเลี้ยงเชื้อแบบเกาะติด (Attached Growth) และระบบเลี้ยงเชื้อแบบผสม (Hybrid Growth)

1) แบบเชื้อแขวนลอย (Suspended Growth) เป็นระบบบำบัดที่ภายในถังปฏิกริยา มีการกวนผสม ทำให้ตะกอนจุลินทรีย์กับน้ำเสียสัมผัสกันทั่วถึง ซึ่งเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัด การกวนผสมอาจใช้ใบกวน หรือกวนด้วยระบบไหลวน การบำบัดด้วยเชื้อแขวนลอย (Suspended Growth) จะต้องมีถังตกตะกอน เพื่อแยกตะกอนออกจากน้ำเสีย และเวียนตะกอนกลับไปยังถังปฏิกริยา ระบบบำบัดแบบจะมีระยะเวลาในการกักเก็บตะกอนแบคทีเรียเท่ากับระยะเวลาที่กักเก็บน้ำในระบบ ระบบบำบัดแบบนี้ที่นิยมใช้กัน เช่น Complete mix digester และ Anaerobic Contact

2) ระบบเลี้ยงเชื้อแบบเกาะติด (Attached Growth) เป็นระบบบำบัดแบบไร้อากาศเพื่อผลิตก๊าซชีวภาพ ที่พัฒนามาเพื่อให้จุลินทรีย์อยู่ในระบบได้นานขึ้น โดยให้จุลินทรีย์เกาะติดอยู่บนตัวกลาง ชนิดตัวกลาง เช่น ไม้ พลาสติก อย่างไรก็ตามการเลือกใช้วัสดุ ต้องคำนึงถึงงบประมาณในการก่อสร้างระบบเป็นหลัก ระบบเลี้ยงเชื้อแบบเกาะติด (Attached Growth) นิยมใช้ 2 รูปแบบ คือ แบบถังกรองไม่ใช้ออกซิเจน (Anaerobic Filter, AF) และแบบฟลูอิดไดซ์เบด (Fluidized Bed)

3) ระบบเลี้ยงเชื้อแบบผสม (Hybrid Growth) เป็นระบบบำบัดที่ถูกพัฒนาขึ้นมา เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดของระบบให้สูงขึ้นโดยนำส่วนดีของระบบบำบัดแบบต่าง ๆ มาไว้ด้วยกัน ระบบแบบนี้ เช่น ระบบยูเอเอสบี (Upflow Anaerobic Sludge Blanket, UASB) และระบบแบบ Anaerobic Hybrid Rector

2.13 อุตสาหกรรมผลิตเยื่อกระดาษ

อุตสาหกรรมผลิตเยื่อกระดาษในประเทศไทยเป็นอุตสาหกรรมหนักจากภาคเกษตรกรรม ที่สำคัญต่อระบบเศรษฐกิจของประเทศอย่างมาก มีศักยภาพการผลิต และสามารถผลิตเพื่อการส่งออกได้ ในขณะเดียวกันอุตสาหกรรมการผลิตเยื่อกระดาษต้องใช้ทรัพยากรและมีกากที่เกิดจากกระบวนการผลิตเป็นจำนวนมาก (กนิษฐา วิมลรัตน์, 2552)

2.13.1 กระบวนการผลิตเยื่อกระดาษ (กนิษฐา วิมลรัตน์, 2552)

กระบวนการผลิตเยื่อกระดาษประกอบด้วย 5 ขั้นตอนโดยมีรายละเอียดดังนี้

1) การเตรียมวัตถุดิบ (Raw Material Preparation) โดยเริ่มจากการลอกเปลือกไม้ (Debarking) เพื่อนำเปลือกไม้และสิ่งสกปรกปนเปื้อนออก ซึ่งหากปนเปื้อนเข้าสู่กระบวนการอื่นจะทำให้เปลืองสารเคมีและไอน้ำมาก จากนั้นเป็นการสับชิ้นไม้ (Chipping) ควรมีความยาวและความหนาสม่ำเสมอ ซึ่งหนาประมาณ 6-10 มิลลิเมตร และความกว้างประมาณ 20-30 มิลลิเมตร และทำการคัดขนาด (Screening) ด้วยเครื่องคัดขนาด เพื่อเข้าสู่กระบวนการต่อไป

2) การต้มเยื่อ (Cooking) ชิ้นไม้จะเข้าสู่หม้อต้มเยื่อ (Digester) ทางสายพานพร้อมกับการเติมเคมีที่เรียกว่าน้ำขาว (White Liquor) ซึ่งประกอบด้วยโซดาไฟ (NaOH) และโซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) การต้มเยื่อกระทำภายใต้อุณหภูมิ 165 องศาเซลเซียส ความดัน 7 บาร์ น้ำต้มเยื่อจะเข้าสู่ชิ้นไม้เพื่อละลายลิกนินและส่วนประกอบอื่นๆ ที่ไม่ใช่เยื่อออก ส่วนการต้มเยื่อใช้เวลาประมาณ 60-70 นาที จะได้เยื่อซึ่งแขวนลอยอยู่ในสารละลายที่เรียกว่าน้ำดำ (Black Liquor) ในน้ำดำ จะประกอบไปด้วยสารเคมีและลิกนินละลายอยู่ น้ำดำ จากขั้นตอนนี้จะนำไปเข้าสู่ กระบวนการผลิตน้ำยากลับคืน (Chemical Recovery) ส่วนเยื่อจะถูกส่งเข้ากระบวนการต่อไป

3) การบดเยื่อ (Refiner) และการแยกเยื่อ (Screening) เยื่อที่ได้จากการต้มเยื่อจะถูกส่งเข้าเครื่องบดเยื่อ (Refiner) เพื่อให้เยื่อแตกตัวจากชิ้นไม้มากยิ่งขึ้นและเพิ่มความแข็งแรงให้กับเยื่อ จากนั้นจะถูกส่งเข้ากระบวนการต่อไป ส่วนเยื่อที่ยังติดกับชิ้นไม้จะถูกส่งไปยัง Reject Refiner เพื่อบดเยื่อใหม่แล้วจึงส่งกลับมาเพื่อแยกเยื่ออีกครั้ง

4) การล้างเยื่อ (Washing) เยื่อที่ได้จากการแยกเยื่อจะถูกส่งเข้าสู่เครื่องล้างเยื่อ Washer เพื่อล้างสารเคมีที่ติดมากับเยื่อออก แล้ว จึงส่งเยื่อไปล้างอีกครั้ง น้ำล้างเยื่อครั้งที่สองนี้ส่งกลับไปใช้ในการต้มเยื่อ ส่วนเยื่อจะถูกส่งเข้าไปรีด น้ำออกจนมีความชื้นประมาณร้อยละ 10 ก่อนส่งไปยังโรงงานผลิตกระดาษต่อไป

5) การฟอกเยื่อ (Bleaching) เป็นวิธีทำให้เยื่อกระดาษมีความขาวสว่างสูง ปัจจุบันยังไม่มีวิธีใดที่สามารถฟอกเยื่อให้ขาวในขั้นตอนเดียว จำเป็นต้องใช้สารเคมีหลายตัวและหลายขั้นตอนในการฟอก อาจมีมากถึง 5-6 ขั้นตอน

2.13.2 กระบวนการบำบัดน้ำเสียของอุตสาหกรรมผลิตเยื่อกระดาษ (กนิษฐา วิมลรัตน์, 2552)

1) การบำบัดขั้นต้นทางกายภาพ (Physical Treatment)

น้ำทิ้งจากกระบวนการผลิตจะผ่านตะแกรงหยาบ (Bar screen) เพื่อนำเศษสิ่งสกปรกขนาดใหญ่ออก จากนั้นถูกส่งต่อไปยังบ่อตกตะกอนขั้นต้น (Primary Clarifier) เพื่อแยกเศษกระดาษ ตะกอนสารแขวนลอย หรือความสกปรกในรูปที่ไม่ละลายน้ำออก

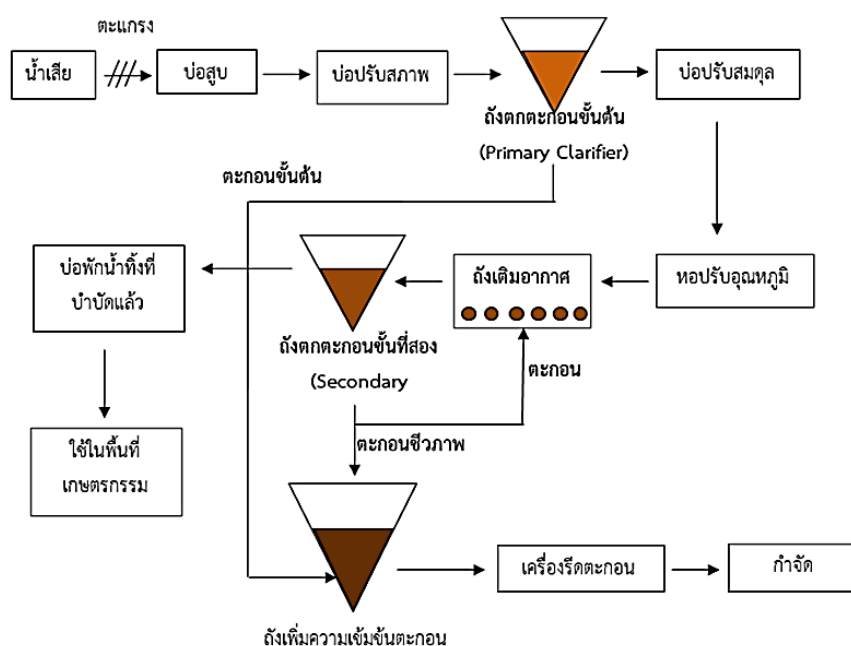
2) การบำบัดทางชีวภาพ (Biological Treatment)

สารแขวนลอยขนาดเล็กที่ไม่สามารถตกตะกอนในขั้นต้นได้ จะถูกบำบัดต่อโดยใช้วิธีทางชีวภาพ ด้วยระบบตะกอนเร่ง 2 ขั้นตอน (Two stage activated sludge) โดยเริ่มจากการปรับสภาพแวดล้อมของน้ำ ให้เหมาะกับการเจริญของจุลินทรีย์ เช่น pH อยู่ในช่วง 6-8 และเติมธาตุอาหารที่จำเป็นสำหรับการเจริญ คือ ไนโตรเจน และฟอสฟอรัส จากนั้นจะส่งน้ำมายังบ่อจุลินทรีย์ในถังเติมอากาศ (Aeration tank) ควบคุมปริมาณออกซิเจน 1-2 มิลลิกรัมต่อลิตร จากนั้นจุลินทรีย์ในน้ำก็จะย่อยสลาย จนความสกปรกในน้ำหมดไป จากนั้นจึงทำการแยกจุลินทรีย์ออกจากน้ำโดยส่งไปยังถังตกตะกอน (Secondary Clarifier) จุลินทรีย์จะตกสู่ก้นบ่อ โดยจุลินทรีย์ส่วนหนึ่งถูกส่งไปยังถังเติมอากาศ (Return sludge) จุลินทรีย์ส่วนเกินทำการแยกออกจากระบบ (Excess sludge) โดยถูกส่งไปยังถังเพิ่มความเข้มข้น (Thicker tank) เพื่อส่งไประบบกำจัดตะกอน

3) การกำจัดตะกอน

ตะกอนที่ได้จากถังตกตะกอนขั้นที่หนึ่งและขั้นที่สองจะถูกสูบไปยังถังพักตะกอน (Sludge Tank) แล้วจึงสูบตะกอนไปยังเครื่องบีบตะกอน (Belt Filter Press) เพื่อกำจัดน้ำออกจากตะกอน ตะกอนที่ได้จะนำไปฝังกลบหรือจำหน่ายให้กับเกษตรกรเพื่อนำไปทำปุ๋ย

ขั้นตอนในการบำบัดน้ำเสียทั้งหมด ของอุตสาหกรรมผลิตเยื่อกระดาษ แสดงดังภาพที่ 16



ภาพที่ 16 ขั้นตอนการบำบัดน้ำเสียของอุตสาหกรรมเยื่อกระดาษ

(ดัดแปลงจาก กนิษฐา วิมลรัตน์, 2552)

2.13.3 การจัดการของเสียจากกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษ (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2552)

1) ไบโกระถิน

อุตสาหกรรมการผลิตเยื่อกระดาษนิยมใช้ไม้อะเคเซีย (Acacia) หรือ ไม้กระถินซึ่งเป็นพันธุ์ไม้ตระกูลถั่ว (Leguminosae) จัดเป็นไม้โตเร็ว นอกจากนี้ยังใช้ไม้กระถินเป็นเชื้อเพลิง และเป็นวัตถุดิบสำหรับอุตสาหกรรมเยื่อกระดาษ ซึ่งให้ผลผลิตเยื่อสูงกว่าร้อยละ 3.5 และฟอกขาวได้ง่ายกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับไม้ยูคาลิปตัส (สาวิตรี พิสุทธิพิเชษฐ์, 2548) ซึ่งจากกรณีศึกษาอุตสาหกรรมผลิตเยื่อกระดาษของบริษัทผลิตเยื่อกระดาษแห่งหนึ่ง พบว่าไบโกระถิน เป็นวัสดุเหลือทิ้ง เป็นจำนวนมาก ซึ่งมีปริมาณไบโกระถินประมาณ 2-3 ตันต่อปี โดยจะปล่อยทิ้งไว้ใต้ต้นเพื่อให้เกิดการย่อยสลายเป็นปุ๋ย หรือนำไปเผาเพื่อเป็นพลังงานความร้อน

2) น้ำเสียจากกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษ

อุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษ มีการใช้น้ำมากที่สุดในกระบวนการผลิต มีการใช้สารเคมีที่มีความเป็นพิษสูง และใช้ในปริมาณมาก ปล่อยน้ำทิ้งและน้ำเสียที่มีสารเจือปนสูง และมีสีค้ำซึ่งเป็นสารประกอบของลิกนินที่มีอยู่ในเนื้อไม้ โดยน้ำทิ้งทั้งหมดมาจาก การแช่ การต้ม การล้างเยื่อ การฟอก

การตีเยื่อ การขย้อมสี และการทำแผ่น ล้วนแล้วแต่เป็นปัญหากับสิ่งแวดล้อมและชุมชนทั้ง สี กลิ่น และคุณภาพของน้ำทิ้ง

เนื่องจากใช้ไม้เป็นวัตถุดิบในการผลิตเยื่อกระดาษ ดังนั้นของเสียส่วนใหญ่ที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตจึงเป็นประเภทสารอินทรีย์ปริมาณของน้ำทิ้งส่วนใหญ่เกิดจากหน่วยฟอกเยื่อให้ขาว โดยมีน้ำทิ้งส่วนน้อยมาจากหน่วยงานทำแผ่นเยื่อและจากหน่วยหมุนเวียนผลิตสารเคมีต้มเยื่อ โดยทั่วไปการจัดการน้ำเสียจะประกอบด้วย

- 2.1) การรวบรวมน้ำเสีย (collection)
- 2.2) การบำบัดน้ำเสีย (treatment)
- 2.3) การนำกลับมาใช้ประโยชน์ (reuse and reclamation)

น้ำทิ้งจากสายผลิต ผ่านการปรับค่าความเป็นกรดต่างให้เป็นกลางแล้ว เข้าสู่กระบวนการบำบัดน้ำเสียของอุตสาหกรรมการผลิตเยื่อกระดาษ เมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการบำบัดน้ำเสีย จะได้น้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดที่ได้มาตรฐานตามประกาศของกระทรวงอุตสาหกรรม โดยสามารถสูบน้ำทิ้งทั้งหมดส่งไปใช้ในแปลงปลูกพืช รอบโรงงาน หรือโครงการนำน้ำทิ้งไปใช้เพื่อการเกษตร โดยใช้รดน้ำต้นไม้ในโรงงาน หรือส่งให้เกษตรกรในพื้นที่ใกล้เคียงใช้ในการเพาะปลูก

3) กากตะกอนเส้นใยและตะกอนเยื่อกระดาษ

กากตะกอนเส้นใยหรือตะกอนเยื่อกระดาษ เป็นเศษเส้นใยหรือเยื่อกระดาษที่ปนมากับน้ำเสีย เป็นเยื่อขนาดสั้น และอาจจะมีสิ่งเจือปนอื่นๆ เช่น สารฟีนอลหรือสารเคลือบผิวกระดาษ ไม่เหมาะที่จะนำไปใช้ใหม่ในกระบวนการผลิต ตามปกติโรงงานอุตสาหกรรมจะนำไปกำจัดโดยการฝังกลบ โดยปัจจุบันมีการนำไปใช้ประโยชน์ดังนี้

- ใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทนในเตาเผาปูนซีเมนต์
- ใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทนถ่านหินในโรงไฟฟ้า
- ส่วนที่เป็นเศษเส้นใยสามารถใช้ประโยชน์เป็นวัตถุดิบทดแทนในการผลิตกระดาษของโรงงานผลิตกระดาษบางประเภท เช่น กระดาษคราฟท์ กระดาษกล่อง
- ใช้เป็นวัตถุดิบทดแทนสำหรับผลิตวัสดุก่อสร้าง เช่น วัสดุก่อสร้างทดแทนไม้ เป็นต้น

ศักยภาพการใช้ประโยชน์

นอกจากกากตะกอนเส้นใยและตะกอนเยื่อกระดาษจะสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในลักษณะต่างๆ ดังกล่าวข้างต้นแล้ว ยังมีการศึกษาที่พบว่า กากตะกอนเส้นใยและตะกอนเยื่อกระดาษมีศักยภาพในการนำไปใช้ประโยชน์ในลักษณะอื่นๆ ได้อีกด้วย โดยสรุปได้ดังนี้

- ใช้เป็นวัตถุดิบทดแทนซีเมนต์ มีการนำกากตะกอนจากการผลิตกระดาษซึ่งมีส่วนผสมของ Kaolinite (ดินขาวสำหรับทำถ้วยชาม) และ Talc (แร่จำพวกแป้ง) มาใช้เป็นวัตถุดิบทดแทนซีเมนต์พบว่า กากตะกอนที่ถูกเผาที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง มีคุณสมบัติเหมาะสมในการใช้เป็นวัตถุดิบทดแทนซีเมนต์ในอุตสาหกรรมการผลิตซีเมนต์

- ใช้ผลิตเชื้อเพลิงเอทานอล การผลิตเชื้อเพลิงเอทานอลจากวัสดุประเภทเซลลูโลส มี 2 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนการเปลี่ยนเซลลูโลสเป็นน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวโดยใช้เอนไซม์เซลลูเลส และขั้นตอนการเปลี่ยนน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวเป็นเอทานอลโดยใช้กระบวนการหมัก (Fermentation) กากตะกอนเยื่อกระดาษจัดเป็นชีวมวลที่มีเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบ (Cellulosic Biomass)

- ใช้ผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งและวัสดุฉนวนความร้อน

- ใช้เป็นวัสดุทดแทนดินฝังกลบ

- ใช้ปรับปรุงสภาพดินให้มีความร่วนซุย

2.14 การประเมินศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพด้วยวิธีบีเอ็มพี (Biochemical Methane Potential: BMP)

การนำชีวมวล น้ำเสีย หรือวัสดุเหลือทิ้ง มาใช้ในระบบบำบัดแบบไร้อากาศ ควรทำการทดสอบ เพื่อประเมินความเป็นไปได้ หรือศักยภาพ รวมทั้งประสิทธิภาพของการย่อยสลายสารอินทรีย์ในระบบก่อน ซึ่งวิธีบีเอ็มพี (Biochemical Methane Potential: BMP) เป็นวิธีทางชีวภาพที่นิยมใช้ในการศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพและก๊าซมีเทน ของวัตถุดิบที่จะใช้เป็นสารตั้งต้นในระบบผลิตก๊าซชีวภาพ วิธีบีเอ็มพีได้ริเริ่มโดย Owen และคณะในปี 1979 แต่เนื่องจากคุณสมบัติที่หลากหลายของสารตั้งต้น หัวเชื้อจุลินทรีย์ และสภาวะที่ใช้ จึงไม่มีการจัดทำวิธีมาตรฐานจนถึงปัจจุบัน (Guwy, 2004)

2.14.1 หลักการพื้นฐานของวิธีบีเอ็มพี

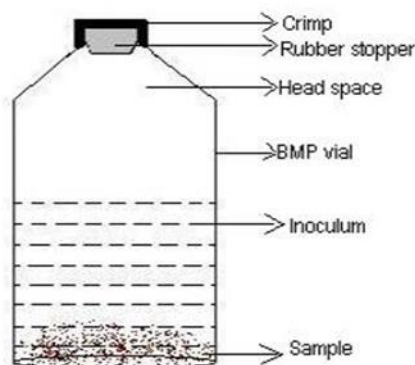
วิธีบีเอ็มพีเป็นวิธีการประเมินเพื่อพัฒนาระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากระดับห้องปฏิบัติการสู่ระบบผลิตก๊าซชีวภาพเต็มรูปแบบ ซึ่งสามารถวัดศักยภาพทั้งก๊าซชีวภาพและก๊าซมีเทนได้ วิธีบีเอ็มพีเป็นวิธีทางชีวภาพที่ทำการศึกษากายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน โดยมีสารตั้งต้น หัวเชื้อจุลินทรีย์ และสภาวะ

ที่เหมาะสมกับการผลิตก๊าซชีวภาพ นอกจากนี้วิธีบีเอ็มพียังสามารถใช้ในการทดสอบหาสถานะที่เหมาะสมของการใช้สารตั้งต้นและหัวเชื้อจุลินทรีย์ได้

2.14.2 ขั้นตอนการทำบีเอ็มพี

1) ขั้นตอนการทดลอง

การทำบีเอ็มพีสามารถทำในขวดแก้วขนาด 100 มิลลิลิตร ไปจนถึงถังปฏิกรณ์ขนาด 2 ลิตร กำหนดพื้นที่ว่าง (Headspace) 10-20 % ของปริมาตรทั้งหมด และกำหนดปริมาณของสารตั้งต้นและหัวเชื้อจุลินทรีย์ที่ใช้ อาจกำหนดในรูปของซีโอดีเริ่มต้น หรือค่าของแข็งระเหยง่าย ต่อพื้นที่การทำงาน จากนั้นแทนที่ออกซิเจนโดยการอัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซไนโตรเจนที่ผสมกันในอัตราส่วน ร้อยละ 30:70 ปิดด้วยจุกยางบิวไทล์และฝาจีบอะลูมิเนียม (ภาพที่ 17) เก็บที่อุณหภูมิที่ใช้ในการผลิตก๊าซชีวภาพ จากนั้นทำการวัดปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมที่เกิดขึ้นโดยวิธีแทนที่น้ำ หรือวัดในเชิงปริมาตรก๊าซทั้งหมด วัดองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ จนกว่าปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมจะคงที่ หรือไม่มีก๊าซเกิดขึ้นในระบบ



ภาพที่ 17 ขวดเซรัมที่ใช้ในการทดสอบด้วยวิธีบีเอ็มพีประกอบด้วย หัวเชื้อจุลินทรีย์ สารตั้งต้น และพื้นที่ว่าง (Headspace) ซึ่งถูกแทนที่ด้วย CO_2 และ N_2 (30:70%)
(Guwy, 2004)

2) ขั้นตอนการเก็บข้อมูล

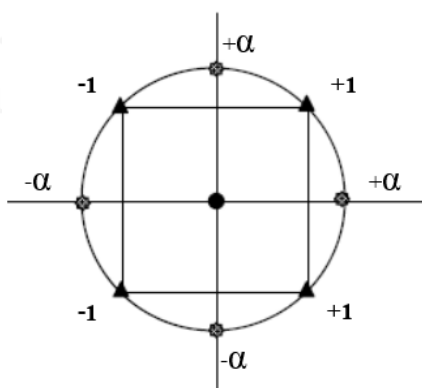
การรายงานปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมที่เกิดขึ้นในวิธีบีเอ็มพี มักรายงานในเชิงปริมาตรก๊าซต่อชีวมวลหรือต่อซีโอดีเริ่มต้น เช่น มิลลิลิตรมีเทนต่อกรัมซีโอดี ($\text{ml-CH}_4/\text{g-COD}$) มิลลิลิตรมีเทนต่อกรัมของแข็งระเหยง่าย ($\text{ml-CH}_4/\text{g-VS}$)

2.15 การออกแบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Design: CCD)

เนื่องจากการทดลองนี้เป็นการออกแบบ 2 ปัจจัย จึงนำการออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Design : CCD) มาใช้ในการออกแบบการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นและเวลาที่ใช้ในการปรับสภาพเบื้องต้น (กัลยาณี เต็งพงศธร, 2554)

CCD เป็นการออกแบบที่ทุกระดับของแต่ละปัจจัย ห่างจากจุดศูนย์กลางของการออกแบบเท่ากัน และทำซ้ำที่จุดกึ่งกลาง ประกอบด้วยแผนการทดลอง ดังนี้ (ภาพที่ 18)

- 1) ตำแหน่งการทดลอง ของ 2^n Factorial Design (ถ้า n ในที่นี้คือตัวแปรอิสระ 2 ตัว ดังนั้น 2^2 จะมีตำแหน่งการทดลองทั้งหมด 4 ตำแหน่ง คือ $(-1,-1)$ $(+1,-1)$ $(+1, +1)$ $(-1, +1)$
- 2) ตำแหน่งการทดลอง ที่เพิ่มขึ้นมาอีก 4 ตำแหน่งคือ ตำแหน่งที่เป็น แนว $+\alpha$ หรือ $-\alpha$ ในแนวแกน คือ $(+\alpha, 0)$ $(-\alpha, 0)$ $(0, +\alpha)$ $(0, -\alpha)$
- 3) ตำแหน่งตรงกลางของพื้นที่การทดลองอีก 1 ตำแหน่ง คือ Central Point (ตำแหน่ง $0,0$)
- 4) เพราะฉะนั้นการทดลองแบบ CCD ในกรณีที่มีตัวแปรอิสระ 2 ตัว จะมีตำแหน่งเพิ่มขึ้นจาก 2^2 Factorial Design อีก 5 ตำแหน่ง คือ $(+\alpha, 0)$ $(-\alpha, 0)$ $(0, +\alpha)$ $(0, -\alpha)$ และ $(0,0)$ ทำให้การทดลองแบบนี้ จึงสามารถครอบคลุมพื้นที่ที่ต้องการศึกษาได้มากกว่า 2^2 Factorial Design



ภาพที่ 18 ตำแหน่งชุดการทดลองแบบประสมส่วนกลาง

(กัลยาณี เต็งพงศธร, 2554)

สำหรับการทดลอง แบบ CCD นั้น สามารถกำหนดตำแหน่งของการทดลองได้ดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งการทดลองกับสัญลักษณ์

สัญลักษณ์	ลำดับ	ปัจจัยที่ 1	ปัจจัยที่ 2
▲	1	-1	-1
	2	1	-1
	3	-1	1
	4	1	1
● (Grid)	5	-1.414	0
	6	1.414	0
	7	0	-1.414
	8	0	1.414
● (Center) ทำการทดลองทดลองซ้ำที่จุด ศูนย์กลาง	9	0	0
	10	0	0
	11	0	0
	12	0	0
	13	0	0

2.16 การแสดงผลตอบสนองแบบโครงร่างพื้นผิว (Response Surface Methodology: RSM)

วิธีการพื้นผิวผลตอบ (Response Surface Methodology: RSM) เป็นการรวบรวมเอาเทคนิคทั้งทางคณิตศาสตร์และทางสถิติที่มีประโยชน์ต่อการสร้างแบบจำลองและการวิเคราะห์ปัญหา โดยที่ผลตอบที่สนใจขึ้นอยู่กับหลายตัวแปร และมีวัตถุประสงค์ที่จะหาจุดที่เหมาะสม Optimization จากความสัมพันธ์ของตัวแปรเหล่านั้นได้ (กัลยาณี เต็งพงศธร, 2554) การใช้เทคนิค RSM มีประโยชน์ ดังนี้ คือ

- 1) สามารถอธิบายความสัมพันธ์ระหว่าง ตัวแปรต้น กับค่าการตอบสนอง สามารถแสดงให้เห็นแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของผลตอบสนอง เมื่อระดับของปัจจัยเชิงปริมาณเปลี่ยนแปลง
- 2) การหาระดับของปัจจัยเชิงปริมาณที่เหมาะสม (optimum value) ที่จะทำให้เกิดผลตอบสนองที่ดีที่สุด หรือสามารถเลือกจุดที่เหมาะสมได้จาก ผลตอบสนองหลาย ๆ ค่าได้

2.16.1 ตัวแปร

Independent Variable เป็นตัวแปรต้น หรือปัจจัยเชิงปริมาณ เช่น อุณหภูมิ ความดัน ความเข้มข้น เวลา ปริมาณสาร เป็นต้น

Dependent Variable ค่าผลตอบสนอง เป็นค่าคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ เช่น ผลผลิต (yield) ความหนืด ระดับความเข้มข้น ปริมาณก๊าซทั้งหมด ปริมาณซีโอดี ปริมาณน้ำตาล เป็นต้น

2.16.2 หลักการที่สำคัญของการทำพื้นที่ผิวผลตอบเพื่อนำเสนอผลการวิจัย มีหลักการดังนี้

1) การที่จะนำเสนอแบบพื้นที่ผิวผลตอบ ต้องมีแผนการทดลองที่เหมาะสม อย่างน้อยต้องมีตัวแปรอิสระ 2 ตัวขึ้นไป และต้องเป็นตัวแปรเชิงปริมาณ ต้องมีตัวแปรตามอย่างน้อย 1 ตัวขึ้นไปและต้องเป็นตัวแปรเชิงปริมาณด้วย ดังนั้นแผนการทดลองที่จะสามารถสร้างพื้นที่ผิวผลตอบได้ คือ Factorial Design, Mixture Design, Central Composite Design (CCD), Plackett & Burman Design

2) ระดับของตัวแปรอิสระที่ต้องผันแปรไปนั้น จำเป็นต้องครอบคลุมพื้นที่ที่ต้องการศึกษา

3) จากนั้นนำข้อมูลของตัวแปรอิสระแต่ละตัว (X_i) มีสัมพันธ์กับข้อมูลของตัวแปรตาม (Y_i) เพื่อสร้างเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Model) ซึ่งอาจจะมีทั้งความสัมพันธ์กันในเชิงเส้นตรง (Linear Model) ความสัมพันธ์ในเชิง Interaction (Interactin model) ความสัมพันธ์กันในเชิง Quadratic (Quadratic Model)

4) เอาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้ไปสร้างเป็นภาพสามมิติ หรือที่เรียกว่าสร้างพื้นที่ผิวผลตอบนั่นเอง

โดยกำหนดให้ปัจจัยนั้นแทนค่าด้วย x และ ϵ คือ ค่าความผิดพลาดของผลตอบ y ที่เป็นผลมาจากการทดลอง

$$y = f(x_1, x_2) + \epsilon \quad (3.4)$$

ถ้ากำหนดว่า $E(y) = f(x_1, x_2) = \eta$ ดังนั้น สามารถเขียนสมการของพื้นที่ผิวได้คือ

$$\eta = f(x_1, x_2) \quad (3.5)$$

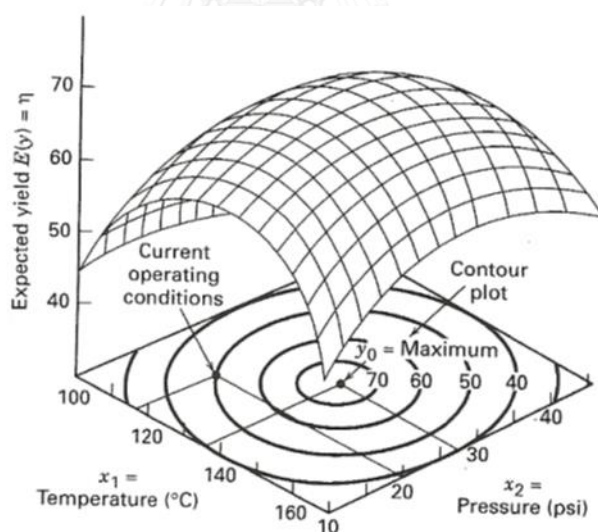
ซึ่งจะเรียกว่า พื้นที่ผิวผลตอบ (Response Surface) โดยส่วนใหญ่จะแสดงพื้นที่ผิวผลตอบในรูปของกราฟิก โดยที่ η จะถูกพล็อตกับระดับของ x_1 และ x_2 เพื่อที่จะช่วยให้มองเห็นรูปร่างของพื้นที่ผิวผล

ตอบได้ดียิ่งขึ้น ซึ่งอาจจะพล็อตเส้นโครงร่าง (Contour Plot) ของพื้นผิวผลตอบ (ภาพที่ 19) โดยที่ปัญหาในส่วนใหญ่จะไม่ทราบความสัมพันธ์ระหว่างผลตอบและตัวแปรอิสระ โดยในขั้นแรก จะต้องหาตัวประมาณที่เหมาะสมที่ใช้เป็นตัวแทนสำหรับแสดงความสัมพันธ์ที่แท้จริงระหว่าง y และเซตของตัวแปรอิสระอาจจะเป็น แบบจำลองของผลตอบมีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นกับตัวแปรอิสระ ฟังก์ชันที่ใช้เป็นแบบจำลองกำลังหนึ่ง ดังสมการที่ 3.6

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \epsilon \quad (3.6)$$

แต่ถ้ามีส่วนโค้งเกี่ยวข้องกับระบบ จะใช้ฟังก์ชันพหุนามที่มีกำลังสูงขึ้น เช่น พหุนามกำลังสอง ดังสมการที่ 3.7

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j}^k \beta_{ji} x_i x_j + \epsilon \quad (3.7)$$



ภาพที่ 19 พื้นผิวผลตอบ (Response Surface)

(Zuorro และคณะ, 2013)

2.17 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.17.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการผลิตก๊าซชีวภาพพืชชีวมวล ของเสียนชนิดต่างๆ และการหมักร่วม (Co-digestion)

สุพินดา ชูระเจน (2544) ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษขยะผัก และผลไม้สด โดยการหมวนเวียนน้ำชะขยะที่ต่างกัน เปรียบเทียบการผลิตก๊าซชีวภาพที่ไม่มีการหมวนเวียนน้ำชะขยะ เป็นระยะเวลา 200 วัน ในถังหมักไร้อากาศแบบแห้งขนาด 125 ลิตร พบว่าการหมวนเวียนน้ำชะขยะที่ร้อยละ 10 25 และ 50 ผลิตก๊าซชีวภาพได้เท่ากับ 25.74 156.2 และ 129.14 ลิตร ตามลำดับ และมีก๊าซมีเทนเป็นองค์ประกอบร้อยละ 40.88 48.61 และ 52.45 ตามลำดับ การเพิ่มอัตราการหมวนเวียนน้ำชะขยะ ทำให้กระบวนการเปลี่ยนสภาพสารอินทรีย์ให้เป็นก๊าซมีเทนเกิดสมบูรณ์กว่าในระบบที่ไม่มีการหมวนเวียนน้ำชะขยะ

อาริยา วิรัชวรกุล (2546) ศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษอาหารในสภาวะไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน ที่มีการกวนผสมอย่างสมบูรณ์ โดยนำเศษอาหารมาบดละเอียดเตรียมให้มีค่าของแข็งทั้งหมดประมาณร้อยละ 4 กำหนดเวลากักพักทางจุลศาสตร์ที่ 35 30 25 และ 20 วัน อัตราการบดสารอินทรีย์เป็น 5.77 6.39 8.30 และ 10.27 กรัมซีโอดีต่อลิตรต่อวัน เมื่อนำสารละลายเศษอาหารมาวิเคราะห์พบว่าอัตราส่วน BOD : N : P ประมาณ 100 : 4.54 : 0.71 จากการทดลองพบว่าเมื่อระยะเวลาการกักพักทางจุลศาสตร์เพิ่มขึ้นประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี ของแข็งทั้งหมด ของแข็งระเหย และของแข็งแขวนลอย มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ในขณะที่ปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นมีแนวโน้มลดลง โดยที่เวลากักพักทางจุลศาสตร์ที่ 20 วัน มีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพสูงสุดเท่ากับ 54.35 ลิตรต่อวัน และมีก๊าซมีเทนเป็นองค์ประกอบร้อยละ 61.26

Mähnert และคณะ (2005) ศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากหญ้า 3 ชนิดคือ meadow foxtail หญ้า perennial และ ryegrass cockfoot โดยนำมาหมักร่วมกันในถังปฏิกรณ์กวนสมบูรณ์แบบกึ่งกะ มีอัตราส่วนผสม 100 รอบต่อนาที ระยะเวลาการกวน 15 นาทีต่อชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส เปรียบเทียบกับการหมักหญ้าร่วมกับมูลวัวในอัตราส่วน 2:1 ทำการศึกษาที่อัตราส่วนของแข็งระเหยง่ายเท่ากับ 0.71 และ 1.42 กิโลกรัมของแข็งระเหยได้ต่อลูกบาศก์เมตร-วัน พบว่าการหมักหญ้า 3 ชนิดร่วมกันสามารถผลิตก๊าซชีวภาพเท่ากับ 0.6 และ 0.56 ลูกบาศก์เมตรต่อกิโลกรัมของแข็งระเหยง่าย ตามลำดับ ในขณะที่การหมักหญ้าร่วมกับมูลวัว สามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้เท่ากับ 0.51 และ 0.49 ลูกบาศก์เมตรต่อกิโลกรัมของแข็งระเหยง่าย ตามลำดับ ดังนั้นอัตราส่วนของแข็งระเหยได้ที่เหมาะสมคือ 0.71 กิโลกรัมของแข็งระเหยได้ต่อลูกบาศก์เมตร-วัน และการเพิ่มอัตราส่วนของหญ้าต่อมูลวัวที่มากขึ้น มีผลทำให้องค์ประกอบของก๊าซมีเทนลดลง

Elango และคณะ (2007) ศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากขยะมูลฝอยชุมชนร่วมกับน้ำเสียชุมชน ในถังปฏิกรณ์แบบแบดซ์ปริมาตร 5 ลิตร ที่อุณหภูมิ 26-36 องศาเซลเซียส มีระยะเวลาพัก 25 วัน โดยคัดแยกเฉพาะขยะอินทรีย์และปรับสภาพขยะเบื้องต้นโดยวิธีทางกายภาพให้มีขนาด 2-4 มิลลิเมตร ผสมกับน้ำเสียให้มีลักษณะของเหลวข้น โดยใช้หัวเชื้อจากจากบ่อเกรอะ ทำการปรับเปลี่ยนอัตรารับภาระสารอินทรีย์ คือ 0.5 1.0 2.3 2.9 3.5 และ 4.3 กิโลกรัมของแข็งระเหยง่ายต่อลูกบาศก์เมตร-วัน พบว่าที่อัตรารับภาระสารอินทรีย์ที่ 2.9 กิโลกรัมของแข็งระเหยง่ายต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน มีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพมากที่สุดเท่ากับ 0.36 ลูกบาศก์เมตรต่อกิโลกรัมของแข็งระเหยง่าย-วัน สามารถลดปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ร้อยละ 87.6 และลดปริมาณซีไอดีที่ร้อยละ 89.3 โดยสามารถผลิตก๊าซมีเทนได้ร้อยละ 68-72

Macias-Corral และคณะ (2008) ศึกษากระบวนการย่อยแบบไร้อากาศของขยะชุมชน ของเสียจากการเกษตร และผลกระทบจากการหมักร่วมกับมูลวัวนม ทำการทดลองในระดับภาคสนามโดยใช้ถังหมักไร้อากาศแบบสองขั้นตอน พบว่าสามารถผลิตก๊าซมีเทนได้อยู่ระหว่างร้อยละ 72.3 – 73.1 ในขณะที่การหมักโดยใช้ถังหมักแบบขั้นตอนเดียวให้ผลผลิตมีเทนอยู่ระหว่างร้อยละ 40 – 60 การศึกษาแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ชุด คือ ทำการหมักโดยใช้วัตถุดิบเพียงชนิดเดียว และการหมักขยะร่วมกับมูลวัวนม พบว่า การหมักโดยใช้วัตถุดิบเพียงชนิดเดียว คือ ขยะอินทรีย์ชุมชน และมูลวัวนม ให้ผลผลิตก๊าซมีเทนเท่ากับ 30.5 และ 77.4 ลูกบาศก์เมตรต่อตันของแข็งระเหยง่าย ตามลำดับ และจากการย่อยสลายสามารถลดน้ำหนักของวัตถุดิบไปร้อยละ 9 และ 16 ตามลำดับ สำหรับชุดการหมักร่วมโดยใช้ขยะอินทรีย์ร่วมกับมูลวัวนม และของเสียจากการป่นฝ้ายร่วมกับมูลวัวนม พบว่าให้ผลผลิตก๊าซมีเทนเท่ากับ 194 และ 99.6 ลูกบาศก์เมตรต่อตันของแข็งระเหยง่าย ตามลำดับ และน้ำหนักของวัตถุดิบหลังการหมักลดลงไปได้ถึงร้อยละ 78 และ 52 ตามลำดับ ดังนั้นการย่อยขยะแบบไร้อากาศโดยการหมักร่วม แบบสองขั้นตอน จะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพได้ดีกว่าการใช้ถังหมักแบบขั้นตอนเดียวและวัตถุดิบเพียงชนิดเดียว ซึ่งจุลินทรีย์ประจำถิ่นที่อยู่ในมูลวัวมีความสามารถในการย่อยเซลลูโลส จึงสามารถช่วยย่อยเส้นใยในของเสียที่ได้จากการป่นฝ้าย และขยะประเภทกระดาษได้ จึงทำให้การย่อยร่วมกับมูลวัวนั้นมีปริมาณก๊าซมีเทนที่เพิ่มขึ้น

Fountoulakis และ Manios (2009) ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซมีเทนและก๊าซไฮโดรเจนจากขยะชุมชนและน้ำเสียจากอุตสาหกรรมกระดาษโดยการหมักร่วมกับกลีเซอรอลดิบ ในถังปฏิกรณ์แบบไร้อากาศ ที่มีการกวนสมบูรณ์ขนาด 4 ลิตร เป็นเวลา 23-25 วัน พบว่า การใช้กลีเซอรอลดิบ 1 % (ปริมาตร/ปริมาตร) หมักร่วมกับขยะชุมชน และน้ำเสียการเกษตรผสมน้ำเสียโรงฆ่าสัตว์ สามารถเพิ่มผลผลิตก๊าซมีเทนได้เท่ากับ 694 และ 731 มิลลิลิตรต่อวัน ตามลำดับ

Nizami และคณะ (2009) ศึกษาองค์ประกอบของหญ้าแห้ง พบว่ามีองค์ประกอบหลัก 3 ชนิดได้แก่ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน โดยเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสนั้นสามารถใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตก๊าซชีวภาพได้ และจากสูตรโครงสร้างพบว่าแบคทีเรียสามารถเข้าทำปฏิกิริยากับเฮมิเซลลูโลสได้ง่ายกว่าเซลลูโลส แต่ลิกนินไม่สามารถย่อยสลายได้โดยแบคทีเรีย นอกจากนี้ยังศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างของแข็งระเหยง่ายกับก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้น พบว่าแบคทีเรียสามารถเปลี่ยนของแข็งระเหยง่ายไปเป็นซีโอดีมีค่าเท่ากับ 1.42 กิโลกรัมซีโอดีต่อกิโลกรัมของแข็งระเหยง่าย ซึ่งตามทฤษฎีนั้น 1 กิโลกรัมซีโอดี สามารถเกิดก๊าซมีเทนได้เท่ากับ 0.35 ลูกบาศก์เมตรที่ความดันบรรยากาศ ซึ่งจากการทดลองคำนวณหญ้าแห้งมีปริมาณของแข็งระเหยร้อยละ 92 ถ้าหญ้าแห้งหนัก 1 ตัน จะสามารถผลิตก๊าซมีเทนได้เท่ากับ 114 ลูกบาศก์เมตร

Koch และคณะ (2009) ศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากหญ้าหมัก (grass silage) ด้วยถังปฏิกรณ์วนเวียนแนวตั้ง (Loop reactor) ปริมาตร 50 ลิตร อุณหภูมิ 38 องศาเซลเซียส พบว่าอัตรารับภาระสารอินทรีย์ที่ 3.5 กิโลกรัมของแข็งระเหยง่ายต่อลูกบาศก์เมตร - วัน การผลิตก๊าซชีวภาพที่ 0.5 ลูกบาศก์เมตรต่อกิโลกรัมของแข็งระเหยง่ายและมีการเกิดก๊าซมีเทนร้อยละ 52 ประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งระเหยง่ายและซีโอดีที่ร้อยละ 60 และ 75 ตามลำดับ และต้องควบคุมปริมาณของแข็งทั้งหมดไม่ให้เกินร้อยละ 12 เพื่อรักษาสมดุลภายในระบบ

Ahn และคณะ (2010) ศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพของหญ้าสวิตช์กราส (Switchgrass) ร่วมกับมูลสัตว์ (หมู เป็ดไก่ และวัวนม) ในถังปฏิกรณ์ขนาด 1 ลิตร โดยมีปริมาณของแข็งทั้งหมดร้อยละ 15 ที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส ทำการทดลองเป็นเวลา 62 วัน พบว่าการผสมหญ้าสวิตช์กราสร่วมกับมูลหมู มูลเป็ดไก่ และมูลวัวนม มีปริมาณมีเทนเท่ากับ 0.337 0.028 และ 0.002 ลิตรมีเทนต่อกิโลกรัมของแข็งระเหย ตามลำดับ และมีการกำจัดของแข็งระเหยได้ร้อยละ 52.9 9.3 และ 20.2 ตามลำดับ ดังนั้นการผสมหญ้าสวิตช์กราสร่วมกับมูลหมูสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพได้

Chen และคณะ (2010) ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพจากหญ้ามอดกราส (*Spartina alterniflora*) ที่หมักร่วมกับมูลวัวที่อัตราส่วนของแข็งระเหยง่าย ร้อยละ 12.5 ถึง 87.5 เปรียบเทียบกับการหมักหญ้ามอดกราสเพียงอย่างเดียว ที่อัตราส่วนของแข็งระเหยง่าย ร้อยละ 4 6 และ 8 ตามลำดับ ทำการทดลองโดยใช้ถังปฏิกรณ์แบบแบตช์ ปริมาตร 1 ลิตร อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส พบว่าการหมักหญ้ามอดกราสเพียงอย่างเดียวที่อัตราส่วนของแข็งระเหยง่ายร้อยละ 6 ให้ผลผลิตก๊าซมีเทนสูงสุดคือ 0.19 ลูกบาศก์เมตรต่อกิโลกรัมของแข็งระเหยง่าย ร้อยละการเกิดมีเทน 63.29 ส่วนการหมักหญ้ามอดกราสร่วมกับมูลวัวจะเริ่มทดลองที่อัตราส่วนของแข็งระเหยง่ายที่ร้อยละ 7 โดยพบว่าอัตราส่วนระหว่างหญ้ามอดกราสที่เหมาะสมที่สุดคือ 75 : 25 ของของแข็งระเหยง่าย ให้ผลผลิตก๊าซมีเทน 0.177 ลูกบาศก์เมตรต่อกิโลกรัมของแข็งระเหยง่าย ร้อยละการเกิดมีเทนเท่ากับ

64.33 การหมักร่วม (Co – digestion) เป็นการเพิ่มความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพซึ่งการใส่มูลวัวลงไปนั้นเป็นการลดอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N ratio) จาก 21.82 ไปจนถึง 14.19 ซึ่งการหมักร่วมนี้เป็นการเพิ่มผลผลิตทางชีวภาพได้สูงขึ้น ร้อยละ 7.09 ถึง 44.26 เมื่อเปรียบเทียบกับหมักหญ้าคอกดกราสเพียงอย่างเดียว

Klimiuk และคณะ (2010) ศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากหญ้าหมักของพืช 4 ชนิด ได้แก่ ข้าวโพด ข้าวฟ่าง หญ้าสกุลมิสแคนทัส (มิสแคนทัสยักษ์ และหญ้าเงินอามิยูร์) ในถังปฏิกรณ์กวนสมบูรณ์ ปริมาตร 6 ลิตร ที่ต่อขนานกันจำนวน 4 ถัง (CSTRs) ที่อุณหภูมิ 39 องศาเซลเซียส มีระยะเวลาพัก 60 วัน โดยมีอัตรารับภาระสารอินทรีย์เปลี่ยนแปลงจาก 1.30 กรัมของแข็งระเหยต่อลิตร – วัน (ข้าวโพด ข้าวฟ่าง และหญ้ามิสแคนทัสยักษ์) ไปจนถึง 1.42 กรัมของแข็งระเหยต่อลิตร – วัน (หญ้าเงินอามิยูร์) พบว่า ข้าวโพด ข้าวฟ่าง หญ้ามิสแคนทัสยักษ์ และหญ้าเงินอามิยูร์ มีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพเท่ากับ 0.82 0.79 0.31 และ 0.45 ลิตรต่อลิตร – วัน ตามลำดับ และมีอัตราการผลิตมีเทนเท่ากับ 0.47 0.44 0.13 และ 0.27 ลิตรต่อลิตร – วัน ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่าอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพของข้าวโพดและข้าวฟ่างที่มากกว่าหญ้าในสกุลมิสแคนทัสถึงสองเท่า นั้น มีความสัมพันธ์กับองค์ประกอบของลิกโนเซลลูโลสที่เปลี่ยนแปลงไปในกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพมีปริมาณที่ต่างกัน และเนื่องจากหญ้ามิสแคนทัสมีองค์ประกอบของลิกนินที่มากกว่าจึงทำให้มีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพที่น้อยกว่า จึงจำเป็นต้องมีการเพิ่มระยะเวลาพักให้มากกว่า 60 วัน หรือควรได้รับการปรับสภาพเบื้องต้น ก่อนจะนำหญ้าในสกุลมิสแคนทัสมาเข้าสู่กระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ

El-Mashad และ Zhang (2010) ศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากกระบวนการย่อยร่วม (co-digestion) ของมูลวัวและเศษอาหาร ในถังปฏิกรณ์แบบแบตช์ ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 วัน โดยมีวัตถุประสงค์ในการทดลองทั้งหมด 6 ชนิด ประกอบด้วย 1. มูลวัวละเอียด (ผ่านการแยกด้วยตะแกรง 2 มิลลิเมตร) 2. มูลวัวหยาบ (ติดค้างบนตะแกรง 2 มิลลิเมตร) 3. มูลวัว (ไม่ผ่านการแยก) 4. เศษอาหาร 5. เศษอาหารผสมกับมูลวัว (ร้อยละ 32 : 68) 6. เศษอาหารผสมกับมูลวัว (ร้อยละ 48 : 52) พบว่า การใช้วัตถุดิบเศษอาหารผสมกับมูลวัว (ร้อยละ 48 : 52) ผลิตก๊าซชีวภาพได้สูงสุดเท่ากับ 531 ลิตรต่อกิโลกรัมของแข็งระเหย มีก๊าซมีเทนเป็นองค์ประกอบร้อยละ 59 และสามารถลดปริมาณของแข็งระเหยได้สูงสุดถึงร้อยละ 68 ในขณะที่การใช้มูลวัวละเอียดมาเป็นวัตถุดิบผลิตก๊าซชีวภาพได้เป็นอันดับ 4 แต่มีก๊าซมีเทนเป็นองค์ประกอบมากที่สุดร้อยละ 69

Lei และคณะ (2010) ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซมีเทนจากฟางข้าวร่วมกับกากตะกอน โดยมีการปรับเปลี่ยนความเข้มข้นฟอสเฟต ในถังปฏิกรณ์แบบแบตช์ ปริมาตร 5 ลิตร เป็นเวลาทั้งหมด 120 วัน การทดลองเริ่มจากปรับสภาพฟางข้าวเบื้องต้นโดยวิธีทางกายภาพให้มีขนาด 3 – 5 มิลลิเมตร และผสมกับกากตะกอน ควบคุมอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N ratio) แต่ละถังให้มีค่า 22.24 ปรับเปลี่ยนความเข้มข้นฟอสเฟตคือ 155 465 และ 775 มิลลิกรัมฟอสเฟตต่อลิตร

เปรียบเทียบกับชุดควบคุมที่ไม่มีการเติมฟอสเฟต พบว่า สามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ระหว่าง 0.33 – 0.35 ลูกบาศก์เมตรต่อกิโลกรัมของแข็งระเหย มีก๊าซมีเทนเป็นองค์ประกอบ 0.27 – 0.29 ลูกบาศก์เมตรต่อกิโลกรัมของแข็งระเหย มีเทนโดยเฉลี่ยที่ร้อยละ 75.9 – 78.2 โดยสามารถลดปริมาณของแข็งทั้งหมดและปริมาณของแข็งระเหย ได้ร้อยละ 61.5 – 65.4 และ 63.4 – 66.9 ตามลำดับ นอกจากนี้การเติมฟอสเฟตที่ความเข้มข้น 465 มิลลิกรัมต่อลิตร เพียงพอต่อการช่วยเร่งการเจริญของจุลินทรีย์ในกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพให้เกิดได้อย่างสมบูรณ์ ทำให้สามารถผลิตก๊าซชีวภาพในเวลาที่สั้นลง 7-13 วัน

อรรวรรณ วัฒนยมนาพร (2553) ศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพโดยการหมักร่วมของขยะเศษอาหารกับกากตะกอนน้ำเสียชุมชน ในถังหมักไร้อากาศแบบสองขั้นตอน ในระดับห้องปฏิบัติการ โดยเริ่มจากการศึกษาอัตราส่วนของขยะเศษอาหารกับกากตะกอนน้ำเสียชุมชน ที่อัตราส่วน 1:1 3:1 5:1 7:1 และขยะเศษอาหารเพียงอย่างเดียว พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีมีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 87.99 – 90.37 ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งทั้งหมดมีค่าระหว่างร้อยละ 71.27-74.83 โดยที่อัตราส่วน 7:1 มีประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีสูงสุดที่ร้อยละ 90.37 และมีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพเท่ากับ 1,504 มิลลิตรต่อวัน มีก๊าซมีเทนเป็นองค์ประกอบร้อยละ 60.4 จากนั้นใช้อัตราส่วนของขยะเศษอาหารกับกากตะกอนน้ำเสียชุมชนที่อัตราส่วน 7:1 ปรับเปลี่ยนระยะเวลาที่กักทางชลศาสตร์ 24 19 และ 16 วันพบว่าที่ระยะเวลาที่กักทางชลศาสตร์ที่ 24 วัน มีประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีสูงสุดที่ร้อยละ 88.67 มีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพเท่ากับ 1,029.17 มิลลิตรต่อวัน มีก๊าซมีเทนเป็นองค์ประกอบร้อยละ 64.3 ขณะที่ระยะเวลาที่กักทางชลศาสตร์ที่ 12 วัน มีประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีที่ร้อยละ 87.40 แต่มีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพสูงสุดเท่ากับ 1,704.59 มิลลิตรต่อวัน มีก๊าซมีเทนเป็นองค์ประกอบร้อยละ 48.4

ทวิพันธ์ สเลอาด (2554) ศึกษาหาค่าเวลาการกวนและการเวินตะกอนที่เหมาะสมต่อการผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษอาหาร ในถังหมักไร้อากาศแบบแห้ง ปริมาตร 12 ลูกบาศก์เมตร พบว่าที่อัตราการกวน 30 60 และ 90 นาทีต่อวัน มีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีร้อยละ 85.07 87.35 และ 83.58 ตามลำดับ และการผลิตก๊าซชีวภาพมีค่าเท่ากับ 0.53 0.69 และ 0.52 ลูกบาศก์เมตรต่อกิโลกรัมซีโอดีที่ถูกกำจัด ตามลำดับ โดยมีก๊าซมีเทนเป็นองค์ประกอบร้อยละ 58.4 61.6 และ 55.9 ตามลำดับ และจากการหาค่าการเวินตะกอนที่เหมาะสม พบว่า ที่การเวินตะกอนร้อยละ 50 และ 100 (ปริมาตรต่อปริมาตร) มีประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งทั้งหมดร้อยละ 69.87 และ 71.92 ตามลำดับ และสามารถผลิตก๊าซชีวภาพเท่ากับ 0.69 และ 0.71 ลูกบาศก์เมตรต่อกิโลกรัมซีโอดีที่ถูกกำจัด ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าที่อัตราการกวน 60 นาทีต่อวัน และการเวินตะกอนที่ร้อยละ 100 เป็นค่าที่เหมาะสมและสามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้มากที่สุด

Kymäläinen และคณะ (2012) ศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากกระบวนการย่อยร่วม (Co – digestion) โดยใช้ขยะชุมชนร่วมกับกากตะกอน ในอัตราส่วนร้อยละ 30 : 70 โดยใช้ถังปฏิกรณ์แบบ กิ่งต่อเนื้อขนาด 200 ลิตร ทำการบ้อนสารอินทรีย์เข้าสู่ระบบวันละ 1 ครั้ง ที่อุณหภูมิ 35 – 37 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลาทั้งหมด 150 วัน นอกจากนี้ยังศึกษาถึงการเปลี่ยนแปลงของระบบใน ขณะที่มีการเพิ่มภาระสารอินทรีย์เข้าสู่ระบบจาก 1 ไปจนถึง 10 กิโลกรัมของแข็งระเหยต่อลูกบาศก์ เมตร – วัน พบว่า สามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้สูงสุดร้อยละ 90 – 95 มีก๊าซมีเทนเป็นองค์ประกอบ ร้อยละ 62 – 65 และสามารถลดปริมาณของแข็งทั้งหมดได้ถึงร้อยละ 61 – 64 นอกจากนี้การเพิ่มขึ้น ของภาระสารอินทรีย์ไม่ส่งผลกระทบต่อระบบ และพบว่าประชากรของจุลินทรีย์ส่วนใหญ่เป็นสาย พันธุ์ Methanosarcina ซึ่งเป็นข้อดีเนื่องจากสามารถใช้สารตั้งต้นได้หลากหลาย และจุดที่มีการเพิ่ม ภาระสารอินทรีย์ ไม่ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของ Siloxane โดยพบปริมาณ Siloxane ในปริมาณต่ำเพียง 0.2 – 0.7 ส่วนในล้านส่วน

ณัฐกาญจน์ ชราพ (2555) ศึกษาศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนของหญ้า 7 ชนิด ในประเทศ ไทยด้วยวิธีบีเอ็มพี (BMP) และศึกษาประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพของถังปฏิกรณ์ไร้อากาศ แบบขั้นตอนเดียว จากการศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนของหญ้าชนิดต่าง โดยการหมักร่วมกับ มูลวัว ด้วยวิธี BMP พบว่า หญ้ากินนีสีม่วงมีศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนสูงสุดมีค่า 0.170 ลูกบาศก์ เมตรต่อกิโลกรัมของแข็งระเหย และมีความเข้มข้นของก๊าซมีเทนระหว่างร้อยละ 35.78 – 63.54 และ ศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนของหญ้าแต่ละชนิดดังนี้ หญ้าไรต์ หญ้าแพงโกล่า หญ้าพลิกแคทุ้ม หญ้าอะตราดัม หญ้ารูซี่ และหญ้าเนเปียร์ยักษ์ มีศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนที่ 0.144 0.140 0.131 0.127 0.115 และ 0.110 ลูกบาศก์เมตรต่อกิโลกรัมของแข็งระเหย ตามลำดับ และนำหญ้ากินนีสีม่วง ซึ่งมีอัตราการผลิตก๊าซมีเทนที่ดีที่สุดจาก BMP มาศึกษาประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพใน ปฏิกรณ์ไร้อากาศเป็นแบบแบตช์มีปริมาตร 2.5 ลิตร ระยะเวลาหมักรวมทั้งสิ้น 120 วัน โดยศึกษา ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพของถังปฏิกรณ์ที่มีอัตราการเวียนน้ำกลับที่แตกต่างกันคือ อัตรา เวียนน้ำกลับร้อยละ 25 และร้อยละ 100 ถังปฏิกรณ์ทั้งสองมีหญ้ากินนีสีม่วง 101.77 ± 0.76 กรัมของ ของแข็งระเหย และมูลวัวสด 31.81 ± 0.17 กรัมของของแข็งระเหย พบว่า การเวียนน้ำกลับที่ร้อยละ 100 มีปริมาณการผลิตก๊าซชีวภาพมากกว่าถึง ร้อยละ 10.81 และศักยภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพ ของถังปฏิกรณ์ที่ 1 และถังปฏิกรณ์ที่ 2 มีค่า 0.317 และ 0.353 ลูกบาศก์เมตรต่อกิโลกรัมของแข็ง ระเหย ตามลำดับ และ หญ้าสามารถนำมาใช้ประโยชน์เป็นพืชพลังงานสำหรับการผลิตก๊าซชีวภาพได้ ดีเนื่องจากหญ้ามีปริมาณผลผลิตต่อไร่สูง เจริญเติบโตและขยายพันธุ์ได้รวดเร็ว และทนต่อความแห้ง แล้ง

Mussoline และคณะ (2013) ศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากฟางข้าวร่วมกับน้ำเสียฟาร์มสุกรในถังปฏิกรณ์ขนาด 1 ลูกบาศก์เมตร โดยแบ่งการทดลองเป็น 2 ชุด คือ ถังปฏิกรณ์ A ทดลองในระดับภาคสนาม ออกแบบเพื่อให้สามารถผลิตก๊าซมีเทนได้สูงสุด ใช้ฟางข้าว 50 กิโลกรัมผสมกับน้ำเสียฟาร์มสุกร 150 ลิตร ที่อุณหภูมิ 30-40 องศาเซลเซียส และถังปฏิกรณ์ B ทดลองในสภาพจริง ออกแบบให้มีพลังงานเข้าระบบต่ำสุด ใช้ฟางข้าว 50 กิโลกรัมผสมกับน้ำเสียฟาร์มสุกร 60 ลิตร ทำการทดลองที่อุณหภูมิแวดล้อม โดยทั้งสองถังมีของแข็งทั้งหมดร้อยละ 20 เวลาย่อยสลาย 189 วัน พบว่าถังปฏิกรณ์ A และถังปฏิกรณ์ B ผลิตก๊าซชีวภาพได้ 22,859 และ 1,420 ลิตร มีก๊าซมีเทนเป็นองค์ประกอบ 231 และ 12 ลิตรต่อกิโลกรัมของแข็งระเหย ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองของ Lianhua และคณะ (2010) ซึ่งทำการปรับสภาพฟางข้าวเบื้องต้นโดยตัดให้มีขนาด 7-8 เซนติเมตร ร่วมกับเชื้อรากลุ่ม white rot ร้อยละ 5 ตลอดจนการใช้โซเดียมไบคาร์บอเนตร้อยละ 2.5 ในการผลิตก๊าซชีวภาพร่วมกับน้ำเสียจากคอกหมูในถังปฏิกรณ์ขนาด 1 ลูกบาศก์เมตร ที่อุณหภูมิแวดล้อม ระยะเวลาย่อยสลาย 89 วัน โดยสามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ 22,586 ลิตร มีก๊าซมีเทน 240 ลิตรต่อกิโลกรัมของแข็งระเหย ซึ่งพบว่าจากการทดลองในครั้งนี้ ถังปฏิกรณ์ A ให้ผลผลิตก๊าซที่ใกล้เคียงกันมากที่สุด

Yong และคณะ (2015) ศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพเบื้องต้น (BMP) จากเศษอาหารร่วมกับฟางข้าวจากทางเหนือของประเทศไทย ทำการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส โดยทำการหมักเศษอาหาร และฟางข้าวเพียงอย่างเดียว พบว่าสามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ 0.26 และ 0.16 ตามลำดับ และทำการหมักเศษอาหารร่วมกับฟางข้าวในอัตราส่วนต่างๆ ในขวดทดลองขนาด 1 ลิตร และมีค่า OLR เท่ากับกับ 5 กรัมของแข็งระเหย/ลิตร พบว่าอัตราส่วนเศษอาหารต่อฟางข้าวที่เหมาะสมคือ 5:1 ซึ่งสามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้สูงสุด 0.392 ลบ.ม./กก.ของแข็งระเหย และงานวิจัยนี้ยังพบว่าขนาดฟางข้าวที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซชีวภาพคือ 0.3-1 มิลลิเมตร

2.17.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการผลิตก๊าซชีวภาพการปรับสภาพเบื้องต้น

Juntarasiri และคณะ (2011) ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากใบประดู่อังสนา โดยการปรับสภาพเบื้องต้นด้วยสารละลายต่าง เอนไซม์เซลลูเลส และสารละลายต่างร่วมกับเอนไซม์ ทำการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ ถังปฏิกรณ์แบบแบตช์ ปริมาตร 1 ลิตร อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 54 วัน โดยนำใบประดู่ มาลดขนาด 1-2 มิลลิเมตร จากนั้นปรับสภาพเบื้องต้นไปไม้ โดยใช้ 2 % NaOH และเอนไซม์เซลลูเลส 3.5 FPU โดยทำการปรับเปลี่ยนปริมาณของแข็งทั้งหมดคือร้อยละ 2 5 และ 10 พบว่า การปรับสภาพเบื้องต้นแบบขั้นตอนเดียวของใบประดู่ อังสนา ที่ปริมาณของแข็ง

ทั้งหมดร้อยละ 10 โดยใช้ 2 % NaOH เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ให้ผลผลิตก๊าซชีวภาพที่มากที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับ การปรับสภาพ โดยใช้ 2 % NaOH ในชุดการทดลองอื่น ในขณะที่การปรับสภาพ เบื้องต้นที่เหมาะสมที่สุดของใบประดู่ อังสนา คือ ที่ปริมาณของแข็งทั้งหมดร้อยละ 5 ปรับสภาพ เบื้องต้นโดยใช้ 2 % NaOH เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ตามด้วยการใช้เอนไซม์เซลลูเลส 24 ชั่วโมง

Liew และคณะ (2011) ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการย่อยสลายแบบไร้อากาศของใบไม้ ร่วงไปพร้อมกับการปรับสภาพด้วยสารละลายต่าง ในถังปฏิกรณ์ขนาด 1 ลิตร ที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 วัน โดยแบ่งการทดลองเป็น 3 ชุด ที่มีการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนของใบไม้ต่อ หัวเชื้อ (substrate inoculum ratio : S/I) คือ 4.1 6.2 และ 8.2 ในแต่ละชุดการทดลองทำการ ปรับเปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลายต่าง (NaOH) ที่ร้อยละ 2 3.5 และ 5 ตามลำดับ รวมการ ทดลองทั้งหมด 9 ชุด พบว่าการปรับสภาพใบไม้โดยใช้ NaOH เข้มข้นร้อยละ 3.5 ที่อัตราส่วน S/I 4.1 ให้ก๊าซมีเทนสูงที่สุด เท่ากับ 82 ลิตรต่อกิโลกรัมของแข็งระเหย ในขณะที่การใช้ NaOH เข้มข้นร้อยละ 3.5 ที่อัตราส่วน S/I 6.2 สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากใบไม้ร่วงได้มากที่สุด ซึ่ง สามารถผลิตก๊าซมีเทนได้มากกว่าชุดควบคุมที่ไม่ผ่านการปรับสภาพถึง 24 เท่า

Redding และคณะ (2011) ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพของหญ้า เบอร์มิวด้าชายฝั่ง โดยการปรับสภาพเบื้องต้นโดยใช้กรดเจือจางและอุณหภูมิ ก่อนเข้าสู่กระบวนการ ไฮโดรไลซิส และทำการหาปริมาณสารยับยั้ง (ฟูเฟอร์อล และ hydroxymethylfurfural: HMF) ที่ เกิดขึ้นในสารละลายที่ได้จากการปรับสภาพ หลังการปรับสภาพทั้งสองวิธีพบว่า ผลผลิตของน้ำตาล (ไซโลสและกลูโคส) เกิดขึ้นสูงสุดร้อยละ 97 เมื่อเปรียบเทียบกับค่าทางทฤษฎี นอกจากนี้ยังพบว่าสาร ยับยั้ง (ฟูเฟอร์อล และ HMF) ที่เกิดจากการปรับสภาพโดยใช้กรดซัลฟูริกเข้มข้นร้อยละ 1.2 ที่ อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ไม่ส่งผลต่อการผลิตน้ำตาล ซึ่งเป็นสภาวะที่เหมาะสม ที่สุดในกระบวนการหมัก

Xie และคณะ (2011) ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพจากหญ้าแห้งหมัก โดยการปรับสภาพเบื้องต้นด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ (ปรับเปลี่ยนความเข้มข้นร้อยละ 1 2.5 5 และ 7.5) ร่วมกับความร้อน (ปรับเปลี่ยนอุณหภูมิ 20 60 100 และ 150 องศาเซลเซียส) พบว่าที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 4 ค่า สามารถเพิ่มค่าซีไอดีละลายได้ มากขึ้นถึงร้อยละ 45 นอกจากนี้ก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นหลังมีการปรับสภาพหญ้าแห้ง หมักคือ 359.5 401.8 449.5 และ 452.5 มิลลิลิตรต่อกรัมของแข็งระเหยง่ายที่เติมเข้าไป การปรับ สภาพเบื้องต้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ร่วมกับความร้อนสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการผลิต ก๊าซมีเทนได้ร้อยละ 10 – 38.9 เมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุมที่ไม่ได้รับการปรับสภาพเบื้องต้น

Zhong และคณะ (2013) ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพจากฟางข้าวโพดด้วยกระบวนการหมักแบบไร้ออกซิเจน (แบบเฟสเดียวและต่อเนื่อง) โดยทำการเปรียบเทียบผลการปรับสภาพเบื้องต้นด้วยวิธีทางชีวภาพ (ใช้เชื้อรา *Pleurotus florida*) และวิธีทางเคมี (ใช้โซดาไฟ แอมโมเนีย และยูเรีย) พบว่าจากการปรับสภาพด้วยวิธีต่างกันทำให้ลิกโนเซลลูโลสในสารละลายที่ได้จากการปรับสภาพมีโครงสร้างและปริมาณที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ และจากการปรับสภาพเบื้องต้นโดยวิธีทางเคมี (ใช้โซดาไฟ) ให้ผลผลิตก๊าซมีเทนมากกว่าการปรับสภาพด้วยวิธีทางชีวภาพถึงร้อยละ 16.58 และมากกว่าฟางข้าวโพดที่ไม่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นถึงร้อยละ 20.07

Badshah และคณะ (2012) ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพจากขานอ้อย โดยการปรับสภาพเบื้องต้นที่แตกต่างกันโดยใช้กรดซัลฟูริกเข้มข้นร้อยละ 2 และกรดซัลฟูริกเข้มข้นร้อยละ 2 ร่วมกับเอนไซม์ไฮโดรไลซ์ ก่อนเข้าถังหมักเพื่อผลิตก๊าซชีวภาพด้วยวิธี multi - channel ซึ่งประกอบด้วยชุดตรวจวัดประสิทธิภาพมีเทนแบบอัตโนมัติจำนวน 15 ชุด ที่เรียงขนานกัน และมีมิเตอร์วัดอัตราการไหลของก๊าซในแต่ละชุดของเครื่องปฏิกรณ์ พบว่าการปรับสภาพขานอ้อยเบื้องต้นโดยใช้กรดซัลฟูริกเข้มข้นร้อยละ 2 ร่วมกับเอนไซม์ไฮโดรไลซ์ ทำให้เกิดน้ำตาลเชิงเดี่ยวที่มีโมเลกุลของคาร์บอนไม่เกิน 8 อะตอมถึงร้อยละ 79 ซึ่งจะสามารถเปลี่ยนไปเป็นก๊าซมีเทนได้ 200 ลิตรต่อกิโลกรัมของแข็งระเหยง่าย จึงสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซมีเทนได้มากกว่าร้อยละ 16 ± 5 เมื่อเปรียบเทียบกับ การปรับสภาพโดยใช้กรดซัลฟูริกเพียงอย่างเดียว

Lagerkvist และ Morgan-Sagastume (2012) ศึกษาผลกระทบของการปรับสภาพเบื้องต้นของสารตั้งต้นในกระบวนการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจน จากงานวิจัยต่างๆ พบว่าการปรับสภาพเบื้องต้นของสารตั้งต้นที่เป็นชีวมวลซึ่งมีลิกโนเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบ โดยส่วนใหญ่ใช้การปรับสภาพทางเคมี หรือการใช้สารเคมีร่วมกับการใช้ความร้อนสูง อุณหภูมิที่ทำให้เอมิเซลลูโลสและลิกนินเริ่มละลายอยู่ในช่วง 150-180 องศาเซลเซียส ซึ่งสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการปรับสภาพได้โดยการเติมกรด หรือต่างร่วมด้วย ทั้งนี้การปรับสภาพทางกายภาพโดยการลดขนาดของสารตั้งต้น ช่วยลดการเกิดสารยับยั้งที่เกิดขึ้นระหว่างการใช้อุณหภูมิสูงเพื่อสลายลิกนิน

Gomez-Tovar และคณะ (2012) ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพจากฟางข้าวโอ๊ตในระดับห้องปฏิบัติการโดยใช้ถังปฏิกรณ์แบบยูเอเอสบี โดยการปรับสภาพฟางข้าวโอ๊ตเบื้องต้นด้วยเอนไซม์ (เอนไซม์เซลลูเลส pH 4.5 ที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส) และกรด (กรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นร้อยละ 2 ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส) เพื่อเปลี่ยนเป็นลิกโนเซลลูโลสในรูปของน้ำตาลละลายน้ำ พบว่าสารละลายที่ได้จากการปรับสภาพด้วยกรดและเอนไซม์ ให้ผลผลิตมีเทนสูงสุดเท่ากับ 0.34 ลิตรมีเทนต่อกรัมซีโอดี โดยมีอัตราการับภาระสารอินทรีย์เท่ากับ 2.5 กรัมซีโอดีต่อลิตร - วัน ส่วนสารละลายที่ได้จากการปรับสภาพด้วยเอนไซม์ให้ผลผลิตมีเทนสูงสุด 0.36 ลิตรมีเทนต่อกรัม

ซีโอดี และมีอัตราการบำบัดสารอินทรีย์มากกว่า 8.8 กรัมซีโอดีต่อลิตร – วัน นอกจากนี้การปรับสภาพ ฟางข้าวไอน้ำทำให้ได้เฮมิเซลลูโลสร้อยละ 96.8 เซลลูโลสร้อยละ 77.2 และลิกนินร้อยละ 42.2

Teghammar และคณะ (2012) ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพจากฟางข้าว ฟางข้าวไตรติเคิล (ข้าวผสมระหว่างข้าวสาลีและข้าวไรย์) สนไม้เนื้ออ่อนส่วนที่เป็นชิ้น (10 มม.) และสนไม้เนื้ออ่อนส่วนที่บดละเอียด (น้อยกว่า 1 มม.) ทำการปรับสภาพเบื้องต้นโดยใช้ N – methyl – morpholine – N – oxide (NMMO หรือ NMO) ที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 ชั่วโมง จากนั้นเข้าถังหมักต่อเนื่องเพื่อผลิตก๊าซชีวภาพ เป็นเวลา 6 สัปดาห์ พบว่าฟางข้าว ฟางข้าว ไตรติเคิล สนไม้เนื้ออ่อนแบบชิ้นและแบบละเอียด ให้ผลผลิตก๊าซมีเทนเท่ากับ 22 30 และ 60 มิลลิตรต่อกรัมของสารตั้งต้น ตามลำดับ

ชนกพร วงษ์วัน (2555) ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพของต้นข้าวโพดที่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นโดยหมักร่วมกับของเสียกลีเซอรอลการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ ที่ อุณหภูมิห้อง (25-35 องศาเซลเซียส) เป็นการทดลองแบบแบตช์ (Batch) โดยใช้ระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบกวนสมบูรณ์ เริ่มจากการปรับสภาพเบื้องต้นต้นข้าวโพดด้วยวิธีต่างกันคือ ปรับสภาพเบื้องต้นทางเคมี (2% NaOH เป็นเวลา 48 ชั่วโมง) ปรับสภาพเบื้องต้นด้วยความร้อน (180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที) และปรับสภาพเบื้องต้นร่วมกับมูลสุกรในอัตราส่วน 95 : 5 พบว่าการปรับสภาพเบื้องต้นโดยใช้สารละลายต่าง ให้ก๊าซชีวภาพสูงสุด เมื่อเปรียบเทียบกับชุดการปรับสภาพด้วยวิธีอื่น โดยสามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ทั้งหมด 0.2 m³/kg VS removed จากนั้นนำต้นข้าวโพดที่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นทางเคมี (NaOH 2% เป็นเวลา 48 ชั่วโมง) หมักร่วมกับของเสียกลีเซอรอลในสัดส่วนที่แตกต่างกันได้แก่ 0.5 % 1 % 2 % และ 3 % (ปริมาตร/ปริมาตร) ตามลำดับ พบว่า เมื่อเติมกลีเซอรอลจำนวน 1 % (ปริมาตร/ปริมาตร) สามารถเพิ่มประสิทธิภาพได้ดีที่สุด โดยสามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ถึง 0.24 m³/kg VS removed

Sambusiti และคณะ (2013) ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซมีเทนจากข้าวฟ่าง เลี้ยงสัตว์ ทำการปรับสภาพเบื้องต้นโดยใช้อุณหภูมิ (100 และ 160 องศาเซลเซียส) ต่าง (โซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 1 และ 10) และอุณหภูมิร่วมกับต่าง พบว่าการปรับสภาพเบื้องต้นโดยใช้อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส สามารถย่อยสลายเฮมิเซลลูโลสได้สูงสุดซึ่งคิดเป็นร้อยละ 59 และ 72 ของข้าวฟ่าง และฟางข้าวสาลี ตามลำดับ สำหรับการปรับสภาพเบื้องต้นโดยใช้อุณหภูมิร่วมกับต่าง (100 องศาเซลเซียส ร่วมกับโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 10) สามารถย่อยสลายลิกนินได้มากที่สุด คิดเป็นร้อยละ 72 และ 58 ของข้าวฟ่าง และฟางข้าวสาลี ตามลำดับ และสามารถย่อยสลายเฮมิเซลลูโลสได้ร้อยละ 63 ของพืชทั้งสองชนิด นอกจากนี้ยังพบว่าการปรับสภาพเบื้องต้นที่ดีที่สุดสำหรับข้าวฟ่างคือ การใช้ต่าง (40 องศาเซลเซียสร่วมกับโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 10) สามารถผลิตก๊าซมีเทนได้มากกว่าร้อยละ 32 ปริมาณก๊าซไม่เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิเป็น 100 องศาเซลเซียส และสามารถย่อย

สลายวัตถุคิบได้ถึงร้อยละ 84 สำหรับการปรับสภาพที่ดีที่สุดของฟางข้าวสาลีคือการใช้อุณหภูมิร่วมกับต่าง (100 องศาเซลเซียสร่วมกับโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 10) สามารถผลิตก๊าซมีเทนได้มากกว่าร้อยละ 67 และสามารถย่อยสลายวัตถุคิบได้ถึงร้อยละ 85

วิรงรอง กาญจนะ (2556) ศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากหญ้าเนเปียร์โดยการปรับสภาพเบื้องต้นด้วยวิธีทางเคมี (2 % NaOH เป็นเวลา 48 ชั่วโมง) และความร้อน (180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที) และศึกษาประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากหญ้าเนเปียร์โดยการหมักร่วมกับมูลสุกร (มูลสุกรความเข้มข้นร้อยละ 1 2 และ 3 ตามลำดับ) การทดลองใช้หญ้าเนเปียร์พันธุ์ปากช่อง 1 (*Pennisetum purpureum* cv. pakchong1) ถึงกวนสมบูรณ์แบบไร้อากาศ เป็นเวลา 30 วัน พบว่าการปรับสภาพเบื้องต้นด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที มีประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพได้มากที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับชุดการปรับสภาพเบื้องต้นด้วยวิธีอื่น โดยให้ก๊าซชีวภาพทั้งหมดที่ 89.8 ลบ.ม./ตันหญ้าแห้งเข้าระบบ และมีก๊าซมีเทนเป็นองค์ประกอบร้อยละ 59.75 ใช้เวลาการผลิตก๊าซ 30 วัน สำหรับการศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วมกับมูลสุกร พบว่า การใช้มูลสุกรที่ร้อยละ 20 ของปริมาณของแข็งระเหยได้ มีประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพได้มากที่สุด 169.21 ลบ.ม./ตันหญ้าแห้งเข้าระบบ และมีก๊าซมีเทนเป็นองค์ประกอบร้อยละ 66.22 ใช้เวลาการผลิตก๊าซ 20 วัน ดังนั้นการหมักหญ้าเนเปียร์ร่วมกับมูลสุกรสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ โดยให้ปริมาณก๊าซที่เพิ่มขึ้นในเวลาสั้นลง

Michalska และคณะ (2015) ศึกษาการปรับสภาพหญ้ามิสแคนตัสยักษ์ (*Miscanthus giganteus*) ด้วยสารละลายต่าง พบว่า การปรับสภาพด้วยสารละลายต่างเป็นขั้นตอนสำคัญในการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ โดยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 5 มีผลให้ปริมาณลิกนินลดลง ทำให้สัดส่วนของเซลลูโลสเพิ่มขึ้นร้อยละ 22.5 และปริมาณน้ำตาลกลูโคสละลายออกมาจากหญ้าเพิ่มขึ้น นอกจากนี้การปรับสภาพเบื้องต้นด้วยสารละลาย (Priadi และคณะ, 2014) โซเดียมไฮดรอกไซด์ ทำให้ปริมาณมีเทนซึ่งเป็นองค์ประกอบสำคัญในก๊าซชีวภาพเพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 61

2.17.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการผลิตก๊าซชีวภาพจากกากตะกอนเยื่อกระดาษ

กนิษฐา วิมลรัตน์ (2552) ศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากกากตะกอนเยื่อกระดาษจากระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานผลิตกระดาษกล่องชาวเคลือบมัน ในระบบหมักแบบแบคทีเรียที่มีการกวนอย่างสมบูรณ์ โดยเปรียบเทียบกับการผลิตก๊าซชีวภาพที่ใช้กากตะกอนกระดาษที่ผ่านการปรับสภาพ (NaOH เข้มข้นร้อยละ 2 ร่วมกับความร้อน 125 °C) และการหมักร่วมกับเศษอาหารโดยปรับเปลี่ยนอัตราส่วนต่างๆ (1:1 1:2 1:3 1:4) พบว่า การผลิตก๊าซชีวภาพโดยใช้กากตะกอนเพียงอย่างเดียวให้ผลผลิตก๊าซชีวภาพเท่ากับ 0.09 ลบ.ม.ต่อ กก.ของแข็งระเหยทั้งหมด และมีก๊าซมีเทนเป็นองค์ประกอบร้อยละ 65 ใช้เวลา 31 วัน และเมื่อนำกากตะกอนที่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 2 ร่วมกับความร้อนที่ 125 องศาเซลเซียส พบว่าสามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ เท่ากับ 0.18 ลบ.ม.ต่อ กก.ของแข็งระเหยทั้งหมด และมีก๊าซมีเทนเป็นองค์ประกอบร้อยละ 39.4 ใช้เวลา 23 วัน และจากการศึกษาการหมักร่วมกับเศษอาหาร พบว่าเมื่อใช้อัตราส่วนกากตะกอนเยื่อกระดาษต่อเศษอาหาร ที่ 1:1 ให้การผลิตก๊าซชีวภาพสูงสุดที่ 0.12 ลบ.ม.ต่อ กก.ของแข็งระเหยทั้งหมด และมีก๊าซมีเทนเป็นองค์ประกอบร้อยละ 70 ใช้เวลา 23 วัน ดังนั้น จึงเลือกทำการปรับสภาพกากตะกอนกระดาษที่สภาวะดังกล่าวและนำมาหมักร่วมกับเศษอาหารโดยใช้อัตราส่วน 1:1 พบว่า ให้ก๊าซชีวภาพสูงสุดที่ 0.19 ลบ.ม.ต่อ กก.ของแข็งระเหยทั้งหมด และมีก๊าซมีเทนเป็นองค์ประกอบร้อยละ 63 ใช้เวลา 25 วัน

Lin และคณะ (2011) ศึกษาการผลิตก๊าซมีเทนจากกากตะกอนเยื่อกระดาษโดยการหมักร่วมกับน้ำเสียจากการผลิตโมโนโซเดียมกลูตาเมต แบบแบคทีเรีย ในถังปฏิกรณ์ไร้อากาศ ขนาด 10 ลิตร โดยปรับอัตราส่วน C:N เท่ากับ 20 และกำหนดค่าของแข็งทั้งหมดเริ่มต้นที่ร้อยละ 8 ทำการทดลองที่ 37 องศาเซลเซียส พบว่า ในการผลิตก๊าซมีเทนให้ปริมาณก๊าซมีเทนสูงสุดที่วันที่ 15 ของการทดลอง และมีก๊าซมีเทนสะสมเมื่อสิ้นสุดการทดลองวันที่ 33 เท่ากับ 0.2 ลบ.ม.ต่อ กก.ของแข็งระเหยทั้งหมด สามารถกำจัดของแข็งระเหยทั้งหมดได้ร้อยละ 35.2

Parameswaran และ Rittmann (2012) ศึกษาการผลิตก๊าซมีเทนโดยการหมักร่วมระหว่างของเสียจากฟาร์มหมูและกากตะกอนเยื่อกระดาษ ที่อัตราส่วนต่างๆ ทดลองแบบแบคทีเรียด้วยวิธี BMP ในขวดเชอร์รี่ขนาด 160 มิลลิลิตร เปรียบเทียบกับการผลิตก๊าซมีเทนโดยใช้ของเสียจากฟาร์มหมู หรือกากตะกอนเพียงอย่างเดียว เป็นเวลา 60 วัน พบว่าปริมาณก๊าซมีเทนสะสมของชุดการทดลองที่ใช้ของเสียจากฟาร์มหมูต่อกากตะกอนกระดาษที่ 1:1 ให้ปริมาณก๊าซมีเทนสะสมสูงสุด โดยมีปริมาณสูงกว่า 700 มิลลิลิตร และพบว่าการหมักร่วมสามารถลดระยะเวลาในช่วงการปรับตัวของแบคทีเรียได้ โดยสามารถลดไปได้ถึง 6 วันเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ของเสียฟาร์มหมูเพียงอย่างเดียว และประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีร้อยละ 47

Lin และคณะ (2013) ศึกษาการผลิตก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซมีเทนแบบสองขั้นตอน โดยใช้ การหมักร่วมระหว่าง กากตะกอนเยื่อกระดาษ (ถึงตกตะกอนขั้นต้นรวมกับถึงตกตะกอนขั้นที่สอง) และเศษอาหาร ปรับเปลี่ยนอัตราส่วนต่าง ในถังปฏิกรณ์ขนาด 1 ลิตร โดยทำการผลิตก๊าซไฮโดรเจนที่ 37 องศาเซลเซียส และก๊าซมีเทนที่ 55 องศาเซลเซียส พบว่า การผลิตก๊าซไฮโดรเจน และก๊าซมีเทน ให้ปริมาณก๊าซสูงสุด เมื่อใช้อัตราส่วนของกากตะกอนกระดาษและเศษอาหารที่ 1:1 โดยมีปริมาณ ก๊าซไฮโดรเจนสูงสุดที่ 0.064 ลบ.ม.ต่อ กก.ของแข็งระเหยทั้งหมด และปริมาณก๊าซมีเทนเท่ากับ 0.432 ลบ.ม.ต่อ กก.ของแข็งระเหยทั้งหมด และสามารถกำจัดซีไอดีไปได้ถึงร้อยละ 71-87

Mussoline และคณะ (2013) ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซมีเทนจากฟางข้าว โดยการหมักร่วมกับกากตะกอนเยื่อกระดาษ ด้วยวิธีบีเอ็มพี (BMP) ในขวดขนาด 1 ลิตร ที่ อุณหภูมิห้อง เป็นระยะเวลา 92 วัน โดยทำการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนระหว่างฟางข้าว น้ำเสียจาก ฟาร์มหมู และกากตะกอนเยื่อกระดาษ พบว่า การใช้ฟางข้าว 5 กรัมร่วมกับกากตะกอนเยื่อกระดาษ 10 กรัมให้ปริมาณก๊าซมีเทนสูงสุด 0.34 ลบ.ม.ต่อ กก.ของแข็งระเหยทั้งหมด ในขณะที่การใช้ฟาง- ข้าวเพียงอย่างเดียวให้ผลผลิตก๊าซมีเทนเพียง 0.046 ลบ.ม.ต่อ กก.ของแข็งระเหยทั้งหมด นอกจากนี้ ยังพบว่า ชุดการทดลองที่มีการหมักร่วมกับกากตะกอนเยื่อกระดาษ ในทุกอัตราส่วน สามารถให้ ผลผลิตก๊าซมีเทนมากกว่า 0.30 ลบ.ม.ต่อ กก.ของแข็งระเหยทั้งหมด

Priadi และคณะ (2014) ศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากตะกอนกระดาษ (paper sludge) ที่ได้จากถึงตกตะกอนขั้นที่ 1 และ 2 และทำการศึกษาผลกระทบเมื่อทำการหมักร่วม (co-digestion) กับมูลวัว พบว่าการผลิตก๊าซชีวภาพโดยใช้กากตะกอนกระดาษเพียงชนิดเดียว ให้ผลผลิต มีเทนเท่ากับ 14.7 มล./ก.ของแข็งระเหย ในขณะที่การหมักร่วมกากตะกอนกับมูลวัว ให้ปริมาณมีเทน สะสมเท่ากับ 269 มล./ก.ของแข็งระเหย ที่ระยะเวลาการทดลอง 28 วัน ผลการทดลองแสดงให้เห็น ว่าการหมักร่วมกับมูลวัว ทำให้อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนเหมาะสมต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ และ การหมักร่วมกับมูลวัวเป็นการเพิ่มปริมาณของแข็งระเหยให้กับระบบ

2.18 สรุปผลการทบทวนเอกสารและแนวทางการวิจัย

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องทั้งหมด พบว่า พืชชีวมวลชนิดต่างๆ มีศักยภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพ เนื่องจากมีลิกโนเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบ ซึ่งสามารถย่อยสลายได้โดยจุลินทรีย์ และเปลี่ยนเป็นก๊าซมีเทนในสภาวะไร้ออกซิเจนอิสระ งานวิจัยนี้จึงสนใจนำไบโกระถินมาผลิตก๊าซชีวภาพ เนื่องจากไบโกระถินจัดเป็นพืชชีวมวล และเป็นวัสดุเหลือทิ้งในอุตสาหกรรมการผลิตเยื่อกระดาษ นอกจากนี้ยังพบว่ามีการใช้ไบโกระถินเป็นสารเติมแต่ง (additives) ในการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ โดย Kumar และคณะ (2013) ได้รายงานว่ ไบโกระถินธรงค์สามารถใช้เป็นสารเติมแต่งในการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพให้สูงขึ้นถึงร้อยละ 18-40 โดยสารเติมแต่งยังช่วยปรับสภาพแวดล้อมในถังปฏิกรณ์ให้เหมาะสมเพื่อให้ผลิตก๊าซชีวภาพได้เร็วขึ้นโดยกระตุ้นการทำงานของแบคทีเรียชนิดสร้างกรดและสร้างก๊าซด้วย

เนื่องจากไบโกระถินมีลิกโนเซลลูโลสที่เป็นองค์ประกอบสำคัญในการสร้างความแข็งแรงให้กับเซลล์พืช โดยเฉพาะเฮมิเซลลูโลสและลิกนิน ซึ่งเป็นข้อจำกัดในปฏิกรณ์การย่อยสลาย จึงจำเป็นต้องมีการปรับสภาพเบื้องต้นไบโกระถิน ก่อนนำมาใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตก๊าซชีวภาพ โดยในงานวิจัยนี้ นำไบโกระถินมาปรับสภาพเบื้องต้นด้วยสารละลายต่างโดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ เนื่องจากสารละลายต่างจะเกิดปฏิกิริยาสะปุน (Saponification) ของพันธะเอสเทอร์ระหว่างโมเลกุลของเฮมิเซลลูโลสกับลิกนิน ทำให้ลิกนินหลุดออกจากโครงสร้าง และไบโกระถินมีองค์ประกอบของลิกนินในปริมาณต่ำ จึงเหมาะกับการปรับสภาพโดยใช้สารละลายต่าง นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยต่างๆ ที่สนับสนุนการเลือกใช้สารละลายต่างในการปรับสภาพเบื้องต้น เช่น Liew และคณะ (2011) ทำการปรับสภาพไปไม้โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ พบว่า ให้ก๊าซมีเทนมากกว่าการชุดควบคุม ที่ใช้ไปไม้ที่ไม่ผ่านการปรับสภาพถึง 24 เท่า

งานวิจัยนี้ยังสนใจการหมักร่วม (Co-digestion) เนื่องจากการหมักร่วมสามารถเพิ่มประสิทธิภาพทั้งในแง่ของปริมาณก๊าซมีเทน และลดระยะเวลาในการย่อยสลาย จากงานวิจัยของ Macias-Corral และคณะ (2008) ทำการผลิตก๊าซชีวภาพจากของเสียการเกษตรร่วมกับมูลวัว พบว่า ให้ปริมาณก๊าซมีเทนสูงกว่าการหมักโดยใช้สารตั้งต้นเพียงชนิดเดียว นอกจากนี้จุลินทรีย์ประจำถิ่นในมูลวัวสามารถย่อยเซลลูโลสทำให้เกิดปฏิกิริยาการย่อยสลายได้เร็วขึ้น แสดงให้เห็นว่าการหมักร่วมโดยใช้ชีวมวลหลายชนิดร่วมกัน สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพได้ งานวิจัยนี้จึงนำไบโกระถินที่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นแล้ว มาหมักร่วมกับชีวมวลชนิดต่างๆ ได้แก่ หล้าเนเปียร์ กากตะกอนเยื่อกระดาษขั้นต้น และกากตะกอนชีวภาพ

หญ้าเนเปียร์เป็นพืชที่ให้ผลผลิตสูง เติบโตเร็ว ไม่มีระยะพัก เก็บเกี่ยวได้นาน มีปริมาณน้ำตาลและโปรตีนสูง จึงเป็นพืชชีวมวลที่เหมาะสมกับการนำมาพัฒนาเพื่อใช้เป็นพลังงานทางเลือกต่อไป นอกจากนี้ กระทรวงพลังงานยังสนับสนุนให้มีการปลูกหญ้าเนเปียร์เพื่อเป็นพลังงานทางเลือกตามแผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก 25 % ใน 10 ปี (พ.ศ. 2555 - 2564) และหญ้าเนเปียร์ก็มีศักยภาพในการนำมาผลิตก๊าซชีวภาพ จากงานวิจัยของ วิริงรอง กาญจนะ (2556) ศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากหญ้าเนเปียร์ โดยปรับสภาพเบื้องต้นด้วยวิธีทางความร้อน พบว่า ให้ปริมาณก๊าซชีวภาพสูงสุดถึง 89.8 ลบ.ม.ต่อตันหญ้าแห้งเข้าระบบ มีก๊าซมีเทนเป็นองค์ประกอบร้อยละ 59.75

อุตสาหกรรมการผลิตเยื่อกระดาษนอกจากใบกระถินที่เป็นวัสดุเหลือทิ้งแล้ว ยังมีกากตะกอนที่เกิดขึ้นในกระบวนการบำบัดน้ำเสีย โดยกากตะกอนที่ได้จากถังตกตะกอนชั้นต้นซึ่งมีเยื่อกระดาษในปริมาณมาก จะถูกนำมารวมกับกากตะกอนชีวภาพที่เกิดขึ้นในถังตกตะกอนชั้นที่สอง แล้วนำกากตะกอนทั้งหมดไปกำจัดด้วยวิธีการฝังกลบโดยมีค่าใช้จ่ายสูงถึง 5,514,000 ต่อปี (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2550) จึงเกิดแนวความคิดในการนำกากตะกอนมาใช้ให้เกิดประโยชน์แทนการฝังกลบ จากตัวอย่างงานวิจัยของ กนิษฐา วิมลรัตน์ (2552) ทำการผลิตก๊าซชีวภาพจากกากตะกอนเยื่อกระดาษ พบว่า สามารถผลิตก๊าซชีวภาพ เท่ากับ 0.09 ลบ.ม.ต่อกก.ของแข็งระเหย และมีก๊าซมีเทนเป็นองค์ประกอบ ร้อยละ 65 ใช้เวลา 31 วัน ในขณะที่เมื่อทำการหมักกากตะกอนเยื่อกระดาษที่ผ่านการปรับสภาพร่วมกับเศษอาหาร พบว่า เมื่อใช้ อัตราส่วน 1:1 ให้ก๊าซชีวภาพสูงสุดที่ 0.19 ลบ.ม.ต่อกก.ของแข็งระเหยทั้งหมด และมีก๊าซมีเทนเป็นองค์ประกอบร้อยละ 63 ใช้เวลา 25 วัน นอกจากนี้ งานวิจัยของ Mussoline และคณะ (2013) ศึกษาการผลิตก๊าซมีเทนจากฟางข้าวโดยการหมักร่วมกับกากตะกอนเยื่อกระดาษและน้ำเสียจากฟาร์มสุกร พบว่า ทุกชุดการทดลองที่มีกากตะกอนกระดาษเป็นวัสดุหมักร่วม ให้ปริมาณก๊าซมีเทนสูงกว่า 0.3 ลบ.ม ต่อ กก.ของแข็งระเหยง่าย

งานวิจัยนี้จึงเลือกใบกระถินมาเป็นสารตั้งต้นในการผลิตก๊าซชีวภาพโดยปรับสภาพเบื้องต้น ใบกระถินด้วยสารละลายต่างโซเดียมไฮดรอกไซด์ จากนั้นศึกษาประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพโดยการหมักร่วมกับชีวมวลชนิดต่างๆ ได้แก่ หญ้าเนเปียร์ กากตะกอนเยื่อกระดาษ กากตะกอนชีวภาพ โดยใช้อัตราส่วนของใบกระถินต่อชีวมวลชนิดอื่นที่ 1:1 ดังสรุปในตารางที่ 6

ตารางที่ 6 สรุปเหตุผลของการพิจารณาเลือกชนิดชีวมวลวิธีการปรับสภาพเบื้องต้นและวิธีการวิเคราะห์ผลการทดลอง

สารชีวมวล	เหตุผล
ใบกระถินเทพนรงค์	<ul style="list-style-type: none"> - เพื่อจัดการกับวัสดุเหลือใช้จากอุตสาหกรรมการผลิตเยื่อกระดาษ - เป็นการใช้ของเสียให้เกิดประโยชน์ ลดปริมาณขยะที่จะเกิดขึ้น - มีศักยภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพเนื่องจากมีลิกโนเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบ - ปลุกง่ายและเจริญเติบโตได้ดีในพื้นที่ที่สภาพแวดล้อมถูกทำลาย - เป็นพันธุ์ไม้ตระกูลถั่ว (Leguminosae) เพิ่มธาตุไนโตรเจนให้กับดิน - เพื่อพัฒนาให้เป็นอีกทางเลือกของการผลิตก๊าซชีวภาพจากชีวมวล
หญ้าเนเปียร์พันธุ์ปากช่อง 1	<ul style="list-style-type: none"> - มีผลผลิตต่อไร่สูงต่อไร่สูงสุดโดยมีผลผลิต 70-80 ตันสดต่อไร่ต่อปี - ไม่มีระยะพัก ปลูกครั้งเดียวเก็บเกี่ยวได้นาน 6-7 ปี - มีอัตราการผลิตก๊าซมีเทนสูงกว่าหญ้าชนิดอื่นโดยมีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพประมาณ 6,860-7,840 ลบ.ม.ต่อไร่ต่อปี - ไม่มีโรคและแมลงรบกวน - เหมาะสมต่อการนำมาผลิตเป็นพลังงานทางเลือกมากกว่าหญ้าชนิดอื่นๆ - เพื่อสอดคล้องกับแผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก ของกระทรวงพลังงาน
กากตะกอนเยื่อกระดาษ และกากตะกอนชีวภาพ	<ul style="list-style-type: none"> - เป็นของเสียที่เกิดจากกระบวนการบำบัดน้ำเสียในอุตสาหกรรมผลิตเยื่อกระดาษ - มีศักยภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพ - นำมาใช้ให้เกิดประโยชน์แทนการฝังกลบ

ตารางที่ 6 สรุปเหตุผลของการพิจารณาเลือกชนิดชีวมวลวิธีการปรับปรุงสภาพเบื้องต้นและวิธีการวิเคราะห์ผลการทดลอง (ต่อ)

การหมักร่วม	เหตุผล
ใบกระถินและหญ้าเนเปียร์	<ul style="list-style-type: none"> - ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพโดยการหมักร่วม - เป็นพืชชีวมวลที่มีศักยภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพ
ใบกระถินและกากตะกอนเยื่อกระดาษ	<ul style="list-style-type: none"> - ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพโดยการหมักร่วม - นำกากตะกอนมาใช้ให้เกิดประโยชน์แทนการฝังกลบ - กากตะกอนเยื่อกระดาษมีศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ
การปรับปรุงสภาพเบื้องต้น	เหตุผล
วิธีทางกายภาพ (บดลดขนาด < 2 มม.)	<ul style="list-style-type: none"> - เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาการย่อยสลาย และลดระดับการเกิดโพลีเมอร์ (DP)
วิธีทางเคมี (สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ : NaOH)	<ul style="list-style-type: none"> - เกิดปฏิกิริยาสบู่ (Saponification) ของพันธะเอสเตอรัระหว่างโมเลกุลของเอมิเซลลูโลสกับลิกนิน ทำให้ลิกนินหลุดออกจากโครงสร้าง - ทำให้การเข้าทำปฏิกิริยาของเอนไซม์กับเซลลูโลสเป็นไปได้ง่าย - ทำให้วัสดุเกิดการพองตัวส่งผลให้พื้นที่ผิวภายในเพิ่มขึ้น ความเป็นผลึก และระดับการเกิดโพลีเมอร์ (DP) ลดลง - เนื่องจากชีวมวลที่ใช้มีองค์ประกอบของลิกนินต่ำ จึงเหมาะกับการปรับปรุงสภาพโดยใช้สารละลายต่าง - เป็นของเสียจากอุตสาหกรรมเยื่อกระดาษ

บทที่ 3

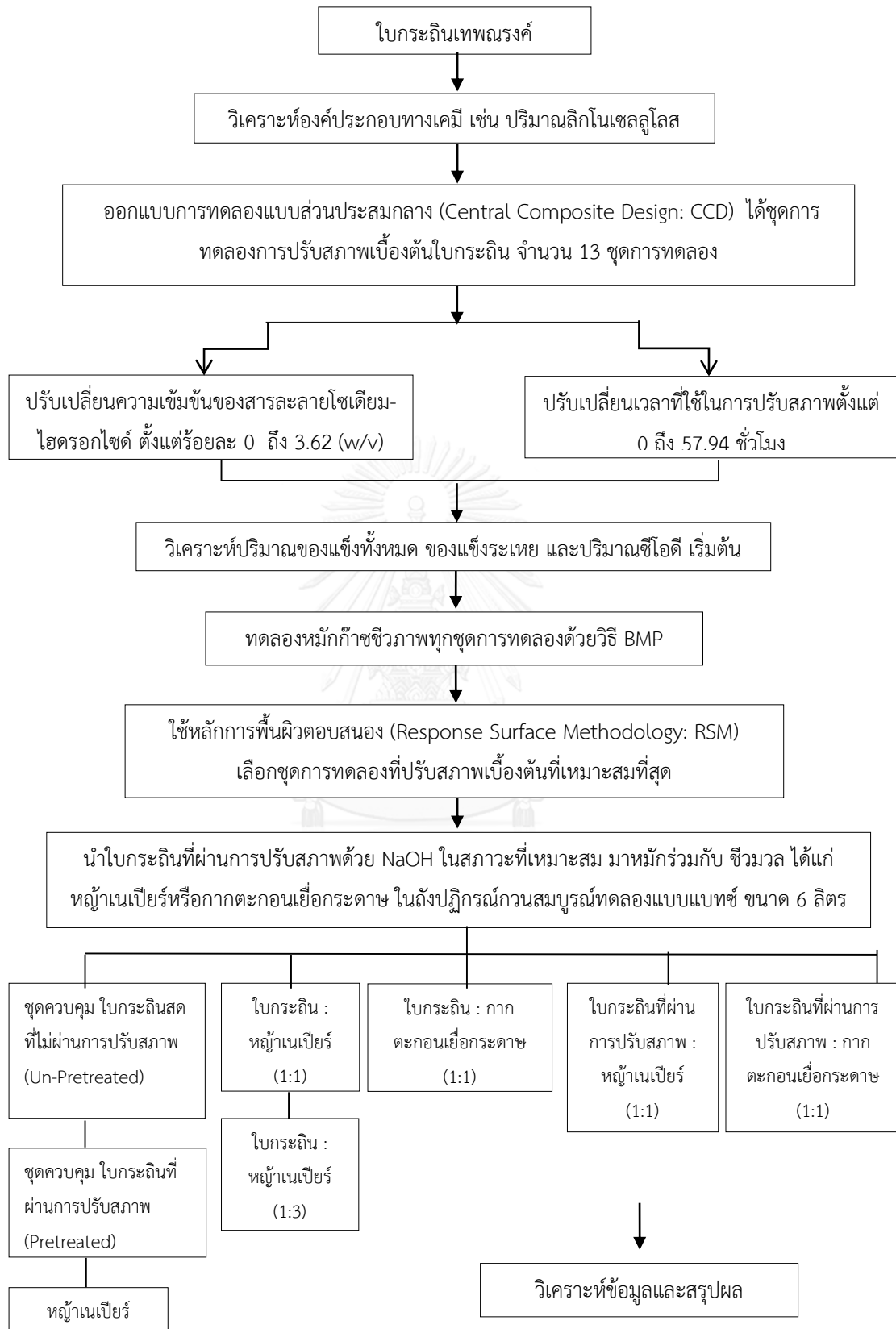
แผนการทดลองและการดำเนินงานวิจัย

3.1 แผนการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากไบโกระถินซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมกระดาษ โดยนำไบโกระถินมาปรับสภาพเบื้องต้นทางเคมีด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ จากนั้นใช้ไบโกระถินที่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นแล้ว เป็นสารตั้งต้นในการผลิตก๊าซชีวภาพ และทำการหมักร่วม (co-digestion) กับหญ้าเนเปียร์หรือกากตะกอนเยื่อกระดาษ โดยมีขั้นตอนในการทดลองดังนี้

1. ศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของไบโกระถิน เช่น ปริมาณความชื้น ของแข็งทั้งหมด ของแข็งระเหย เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน
2. ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการปรับสภาพเบื้องต้นไบโกระถิน โดยเปรียบเทียบผลผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักไบโกระถินที่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่ความเข้มข้นและเวลาในการทำปฏิกิริยาต่างๆ ด้วยวิธีบีเอ็มพี (Biochemical Methane Potential: BMP)
3. ศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากไบโกระถินที่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นโดยหมักร่วมกับหญ้าเนเปียร์หรือกากตะกอนเยื่อกระดาษ ในถังปฏิกรณ์กวนสมบูรณ์ (CSTR) ขนาด 6 ลิตร ทำการทดลองแบบแบตช์ ระยะเวลา 90 วัน
4. ทำการวิเคราะห์ข้อมูลและสรุปผลการวิจัยเพื่อหารูปแบบการปรับสภาพไบโกระถินที่เหมาะสมที่สุดในการผลิตก๊าซชีวภาพ

โดยการศึกษาครั้งนี้เป็นการศึกษาระดับห้องปฏิบัติการ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยมีแผนผังขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยแสดงดังนี้



ภาพที่ 20 ผังการไหลขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

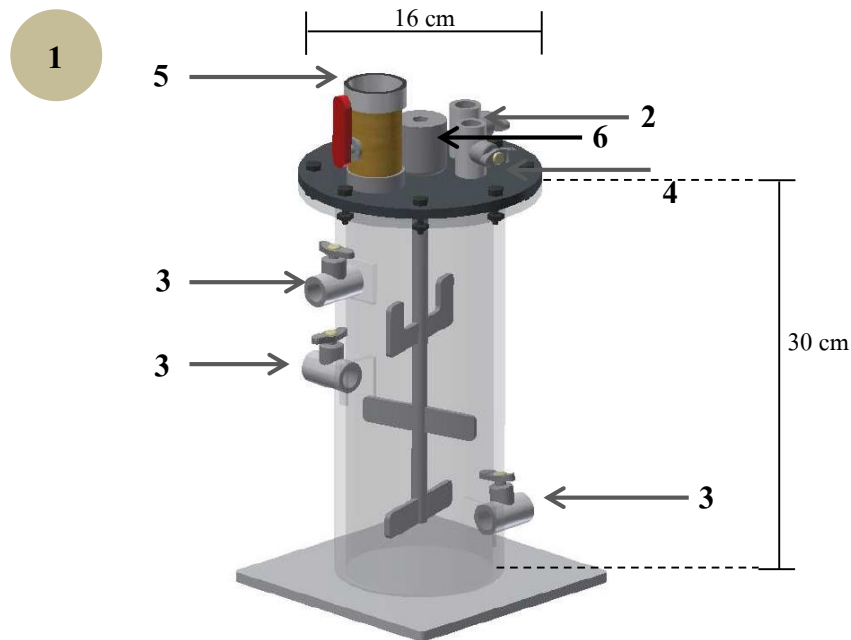
3.2 เครื่องมือ และอุปกรณ์ ที่ใช้ในงานวิจัย

3.2.1 เครื่องมือและวัสดุอุปกรณ์

1. เครื่องวัดพีเอช (pH-meter)
2. เครื่องวัดอุณหภูมิ (Thermometer)
3. เครื่องบด (Grinder)
4. เครื่องชั่งละเอียด (Analytical balance)
5. ตู้อบควบคุมอุณหภูมิ (Hot air oven) ที่ 103 ถึง 105 องศาเซลเซียส
6. ตู้อบควบคุมอุณหภูมิ (Hot air oven) ที่ 150 องศาเซลเซียส
7. เตาเผาควบคุมอุณหภูมิ (Hot air oven) ที่ 550 ± 50 องศาเซลเซียส
8. เตาแผ่น (hot plate)
9. เครื่องปั่นกวน (Magnetic stirrer)
10. เครื่องเขย่าสาร (Shaker)
11. ขวดเซรามิกส์ขนาด 100 มิลลิลิตรและจุกยาง
12. เครื่องแก้วต่างๆ
13. กระดาษกรอง GF/C
14. เครื่องวัดองค์ประกอบก๊าซชีวภาพ Biogas 5000

3.2.2 ถังปฏิกรณ์

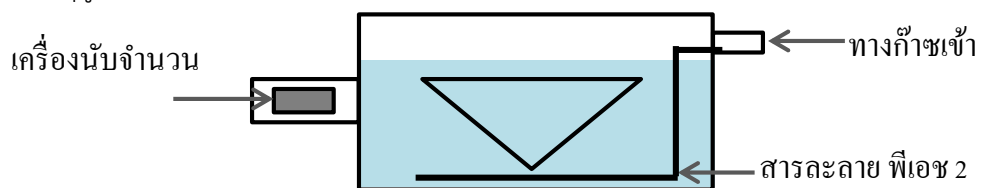
ถังปฏิกรณ์กวนสมบูรณ์ (Continuously Stirred Tank Reactor; CSTR) ทำจากอะคริลิกใส ลักษณะทรงกระบอก ปริมาตร 6 ลิตร (เส้นผ่านศูนย์กลางภายในถังเท่ากับ 16 เซนติเมตร ความลึกเท่ากับ 30 เซนติเมตร) ติดตั้งชุดอุปกรณ์กวนผสม มีการกวนอย่างสมบูรณ์ด้วยใบพัด ด้านบนตัวถังมีมิเตอร์ควบคุมความเร็วของใบพัดให้ทำงานสม่ำเสมอด้วยความเร็ว 70 รอบต่อนาที เพื่อให้จุลินทรีย์สัมผัสกับอาหารด้วยอัตราเร็วคงที่และทั่วถึง มีท่อนำก๊าซชีวภาพที่ได้จากการหมักเพื่อไปวัดปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นด้วยเครื่องวัดปริมาตรก๊าซชีวภาพ (Gas counter) และมีท่อนำก๊าซเพื่อเก็บก๊าซไปศึกษาองค์ประกอบก๊าซชีวภาพ มีท่อสำหรับไล่ก๊าซออกซิเจน มีตำแหน่งติดตั้งตัววัดอุณหภูมิภายในถัง และท่อเติมสารเคมีเพื่อปรับสภาพกรด-ด่างในถังปฏิกรณ์ มีฝาปิดที่ครอบไว้ไม่มีอากาศจากภายนอกเข้าไปในถังปฏิกรณ์ได้ ด้านข้างของถังปฏิกรณ์มีท่อเก็บตัวอย่างน้ำ มาทำการวิเคราะห์ ดังภาพที่ 21



ภาพที่ 21 ถังปฏิกรณ์กวนสมบูรณ์ทดลองแบบแบตช์ (Batch Completely Stirred Tank Reactor)
 (1) ถังปฏิกรณ์กวนสมบูรณ์ (2) จุดวัดอุณหภูมิ (3) จุดเก็บตัวอย่างเพื่อการวิเคราะห์ (4) ฝาปิดป้องกัน
 อากาศเข้าออก (5) ท่อนำก๊าซชีวภาพ (6) มิเตอร์ควบคุมความเร็วของใบพัดกวน

3.2.3 เครื่องวัดปริมาณก๊าซชีวภาพ

งานวิจัยนี้ทำการตรวจวัดปริมาณก๊าซชีวภาพทั้งหมดที่เกิดขึ้นภายในถังกวนสมบูรณ์แบบไร้อากาศ จึงมีการติดตั้งชุดอุปกรณ์ตรวจวัดปริมาณก๊าซโดยใช้หลักการแบบแทนที่น้ำ ประกอบด้วยเครื่องวัดปริมาณก๊าซชีวภาพ (Gas counter) (ภาพที่ 22) ซึ่งทำจากวัสดุอะคลีริกใส ภายในติดตั้งระบบเซ็นเซอร์เพื่อตรวจวัดปริมาณของก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นโดยตรวจวัดจากการนับจำนวนรอบการพลิกตัวของอุปกรณ์ ซึ่งภายในมีสารละลายที่ควบคุมค่าพีเอชเท่ากับ 2 เพื่อป้องกันการย้อนกลับของก๊าซลงสู่น้ำ เมื่อปริมาตรก๊าซเต็มในช่องเก็บก๊าซ จึงเกิดการพลิกตัว โดย 1 รอบสามารถวัดได้ 40 - 60 มิลลิลิตร ขึ้นกับขนาดเครื่อง โดยสามารถนำมาคำนวณหาปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นทั้งหมดได้ (ธิภาพร ศิริบุญวัฒนา, 2555)



ภาพที่ 22 เครื่องวัดปริมาณก๊าซชีวภาพ (Gas counter)

3.3 วิธีการดำเนินการวิจัย

3.3.1 การเตรียมวัตถุดิบ

1) เตรียมใบกระถินและหญ้าเนเปียร์ โดยนำมาบดให้มีขนาดเล็กกว่า 2 มิลลิเมตร จากนั้นนำมาวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมี ได้แก่ ปริมาณของแข็งทั้งหมด ปริมาณของแข็งระเหยง่าย ทั้งหมด ปริมาณเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลสและลิกนิน ปริมาณคาร์บอนต่อไนโตรเจน และปริมาณความชื้น



ก.



ข.

ภาพที่ 23 ก. ใบกระถินเทพณรงค์ที่ใช้ในงานวิจัย ข. ใบกระถินเทพณรงค์หลังบด

2) เตรียมหัวเชื้อจุลชีพ ที่ใช้ในระบบโดยนำมาวิเคราะห์คุณสมบัติ ได้แก่ ค่าพีเอช ปริมาณของแข็งทั้งหมด ปริมาณของแข็งระเหยง่ายทั้งหมด และปริมาณความชื้น

3) เตรียมกากตะกอนเยื่อกระดาษที่ได้จากถังตกตะกอนขั้นต้น และขั้นที่สอง ของระบบบำบัดน้ำเสีย อุตสาหกรรมการผลิตเยื่อกระดาษ โดยนำมาวิเคราะห์ปริมาณความชื้น ปริมาณของแข็งทั้งหมด ปริมาณของแข็งระเหยง่ายทั้งหมด และปริมาณของแข็งแขวนลอย

3.3.2 การศึกษาความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และระยะเวลาที่เหมาะสมในการปรับสภาพเบื้องต้นใบกระถิน

1) ออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Design: CCD) ออกแบบชุดการทดลองการปรับสภาพเบื้องต้นใบกระถิน จำนวน 13 ชุด แต่ละชุดปรับเปลี่ยนความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 0-3 และระยะเวลาการปรับสภาพ 0-48 ชั่วโมง (Taherzadeh และ Karimi, 2008) โดยมีหลักการในการออกแบบดังนี้

การทดลองแบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Design : CCD) เป็นการออกแบบที่ทุกระดับของแต่ละปัจจัยห่างจากจุดศูนย์กลางของการออกแบบเท่ากัน และทำซ้ำที่จุดกึ่งกลางดังประกอบด้วยชุดการทดลองทั้งหมด 13 ชุด

แผนการทดลองแบบประสมส่วนกลาง (CCD) ประกอบด้วยตำแหน่งการทดลองของ 2^n Factorial Design ถ้า n คือตัวแปรอิสระ 2 ตัว จึงมีตำแหน่งการทดลองทั้งหมด 4 ตำแหน่ง ได้แก่ $(+1, +1)$ $(-1, +1)$ $(-1, -1)$ และ $(+1, -1)$ ตำแหน่งการทดลอง ที่เพิ่มขึ้นมาอีก 4 ตำแหน่งเป็น (Axial Point) แนว $+\alpha$ หรือ $-\alpha$ ในแนวแกน ได้แก่ $(+\alpha, 0)$ $(-\alpha, 0)$ $(0, +\alpha)$ และ $(0, -\alpha)$ ตำแหน่งศูนย์กลางของพื้นที่การทดลอง (Central Point) ตำแหน่ง $(0,0)$ อีก 1 ตำแหน่ง เพราะฉะนั้นการทดลองแบบประสมส่วนกลาง กรณีที่มีตัวแปรอิสระ 2 ตัว จึงมีตำแหน่งเพิ่มขึ้นจาก 4 ตำแหน่ง ของ Factorial Design มาอีก 5 ตำแหน่งคือ $(+\alpha, 0)$ $(-\alpha, 0)$ $(0, +\alpha)$ $(0, -\alpha)$ และ $(0,0)$ การทดลองแบบนี้จึงสามารถครอบคลุมพื้นที่ที่ต้องการ ดังนั้นการออกแบบการทดลองในครั้งนี้ จากการแปรผลของโปรแกรม จึงมีชุดการทดลองทั้งหมด 13 ชุดการทดลอง และ α เท่ากับ 1.414 จึงสามารถกำหนดรหัสตำแหน่งของแต่ละชุดการทดลอง และค่าตัวแปรจริงได้ดังตารางที่ 7 และความสัมพันธ์ของชุดการทดลองและรหัสตัวแปร (ตารางที่ 8)

ตารางที่ 7 ความสัมพันธ์ของตัวแปรจริงและรหัสตัวแปร

ตัวแปรจริง	ระดับตัวแปร	รหัสตัวแปร				
		-1.414	-1	0	+1	+1.414
ความเข้มข้น NaOH (ร้อยละ, w/v)	X_1	0*	0	1.5	3	3.62
ระยะเวลา (ชั่วโมง)	X_2	0*	0	24	48	57.94

*หมายเหตุ เนื่องจากค่าที่คำนวณได้เป็นค่าติดลบซึ่งไม่สามารถเตรียมสารได้ จึงกำหนดให้เป็นศูนย์

ตารางที่ 8 ความสัมพันธ์ของชุดการทดลองและรหัสตัวแปร

ชุดทดลอง	ตัวแปร		รหัสตำแหน่ง	
	X ₁	X ₂	ปัจจัยที่ 1	ปัจจัยที่ 2
1	0	0	-1	-1
2	3	0	1	-1
3	0	48	-1	1
4	3	48	1	1
5	0	24	-1.414	0
6	3.62	24	1.414	0
7	1.5	0	0	-1.414
8	1.5	57.94	0	1.414
9	1.5 A	24	0	0
10	1.5 B	24	0	0
11	1.5 C	24	0	0
12	1.5 D	24	0	0
13	1.5 E	24	0	0

2) ปรับสภาพเบื้องต้นไบโกระถินโดยปรับเปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และเวลาที่ใช้ในการปรับสภาพของชุดทดลอง ทั้ง 13 ชุด ดังตาราง 8 โดยนำไบโกระถินที่ผ่านการเตรียมจาก 3.3.1 มาแช่ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น ตั้งแต่ร้อยละ 0 ถึง 3.62 (น้ำหนัก/ปริมาตร) ในอัตราส่วนไบโกระถิน 1 กรัมต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 5 มิลลิลิตร และปรับเปลี่ยนเวลาตั้งแต่ 0 ถึง 58 ชั่วโมง

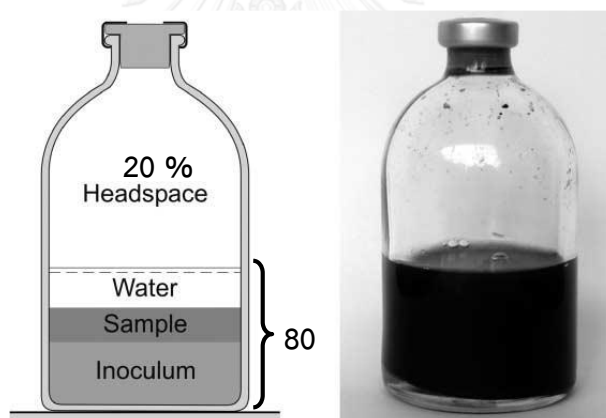
3) วิเคราะห์ปริมาณซีโอดี ของแข็งทั้งหมด ของแข็งระเหยง่าย และองค์ประกอบต่างๆ ได้แก่ ปริมาณ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส ลิกนินในชุดทดลองทั้ง 13 ชุดที่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้น

4) นำไบโกระถินที่ผ่านการปรับสภาพทั้ง 13 ชุด มาศึกษาประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพโดยวิธีบีเอ็มพี (Biochemical Methane Potential)

3.3.3 การศึกษาประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพโดยวิธีบีเอ็มพี (Biochemical Methane Potential)

นำไบโกระถินที่ผ่านการปรับสภาพทั้ง 13 ชุด มาศึกษาประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ ในขวดเซรัมส์ซีขนาด 100 มิลลิลิตร วัดปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นทุกชุดการทดลอง โดยมีขั้นตอนการทดลองดังนี้

1) กำหนดความเข้มข้นของแข็งระเหยทั้งหมดเริ่มต้นร้อยละ 2 และกำหนดหัวเชื้อจุลินทรีย์ในระบบมีค่าของแข็งแขวนลอยระเหยได้เริ่มต้นเท่ากับ (VSS) ร้อยละ 2.5 ขวดเซรัมส์ซีที่ใช้ขนาด 100 มิลลิลิตร โดยมีปริมาตรการทำงาน 80 มิลลิลิตร จากนั้นใส่ไบโกระถินที่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นโดยมีอัตราส่วนต่อหัวเชื้อจุลินทรีย์เท่ากับ 60:40 (ปริมาตร/ปริมาตร) โดยมีชุดควบคุมคือหัวเชื้อจุลินทรีย์ความเข้มข้นของแข็งแขวนลอยระเหยร้อยละ 2.5 (ภาพที่ 24) ปรับค่าพีเอชให้อยู่ในช่วง 6.8 - 7.2 โดยใช้กรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) หรือโซเดียมไบคาร์บอเนต ($NaHCO_3$)



ภาพที่ 24 ขวดเซรัมส์ซีสำหรับการทดลองชุดบีเอ็มพี (BMP)

2) ใส่ก๊าซออกซิเจนที่อยู่ภายในขวดด้วยก๊าซไนโตรเจน จากนั้นนำขวดเซรัมส์ซีไปเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส พร้อมทั้งเขย่าด้วยอัตราเร็ว 165 รอบต่อนาที และวัดปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมทุกวัน โดยใช้กระบอกฉีดยาวัดปริมาณก๊าซทั้งหมด (มิลลิลิตร) เป็นระยะเวลา 60 วัน

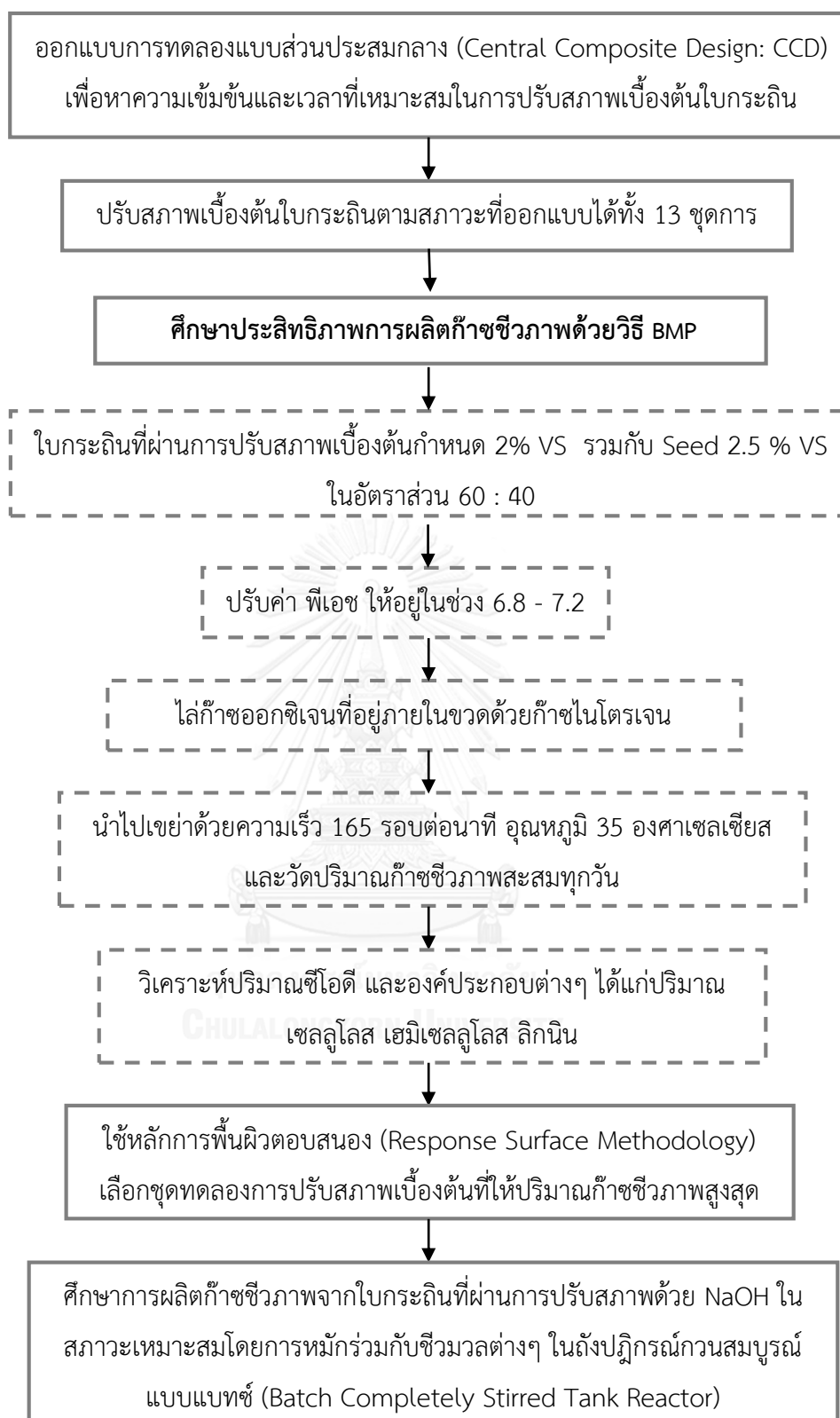
3) บันทึกปริมาณก๊าซชีวภาพ และวิเคราะห์ประสิทธิภาพในการกำจัดมลสารของแต่ละชุดการทดลอง โดยปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมที่เกิดขึ้น คำนวณในหน่วยลิตรของปริมาณก๊าซชีวภาพทั้งหมดต่อกิโลกรัมของแข็งระเหย ดังสมการ

$$\text{ก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้น} = \frac{\text{ปริมาณก๊าซชีวภาพของชุดทดลอง (ลิตร)} - \text{ปริมาณก๊าซชีวภาพชุดควบคุม (ลิตร)}}{\text{น้ำหนักของแข็งระเหยได้เริ่มต้น (กิโลกรัม)}}$$

4) ใช้หลักการพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology) เลือกชุดทดลองการปรับสภาพเบื้องต้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์โดยใช้ความเข้มข้นและเวลาที่เหมาะสมที่สุด โดยกำหนดตัวแปรต้น (Input variable) คือ ความเข้มข้นและเวลาที่ใช้ในการปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และค่าตอบสนอง (Response variable) คือ ปริมาณก๊าซชีวภาพและซีโอดีที่ถูกกำจัด โดยนำสมการมาหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (Optimization) จากการสร้างสมการความสัมพันธ์ภายใต้เงื่อนไขของผลตอบสนอง เพื่อให้เกิดค่าผลตอบสนองที่สูงที่สุด จากนั้นทำการปรับสภาพไบโกระถินโดยใช้ความเข้มข้นและเวลาที่ได้ เพื่อทำการศึกษการหมักร่วมในถังปฏิกรณ์กวนสมบูรณ์แบบแบตช์ (Batch Completely Stirred Tank Reactor)



ภาพที่ 25 ชุดการทดลองบีเอ็มพีในการศึกษาปริมาณก๊าซชีวภาพ



ภาพที่ 26 ขั้นตอนการศึกษาหาความเข้มข้นและระยะเวลาการทำปฏิกิริยาที่เหมาะสมในการปรับสภาพเบื้องต้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

3.3.4 ศึกษาประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วมของใบกระถินกับชีวมวลชนิดต่างๆ ในถังปฏิกรณ์กวนสมบูรณ์แบบแบตช์ (Batch Completely Stirred Tank Reactor)

1) จากการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการปรับสภาพใบกระถินด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เมื่อได้ชุดการทดลองที่ใช้ความเข้มข้นและเวลาในการปรับสภาพเบื้องต้นที่เหมาะสมจากการใช้หลักการพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology) แล้ว จึงทำการปรับสภาพเบื้องต้นใบกระถินด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์โดยใช้ความเข้มข้น และเวลาในการทำปฏิกิริยาที่เหมาะสมดังกล่าว จากนั้นนำมาผลิตก๊าซชีวภาพ โดยทำการหมักร่วม (co-digestion) กับชีวมวลชนิดต่างๆ ได้แก่ หญ้าเนเปียร์ กากตะกอนเยื่อกระดาษ ในถังปฏิกรณ์กวนสมบูรณ์แบบแบตช์ (Batch Completely Stirred Tank Reactor) ขนาด 6 ลิตรโดยมีปริมาตรการทำงานเท่ากับ 5 ลิตร ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 90 วัน เก็บก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นด้วยวิธีการแทนที่น้ำ และวัดองค์ประกอบก๊าซชีวภาพด้วยเครื่องวัดองค์ประกอบก๊าซ BIOGAS 5000 ของบริษัท Geotech (ภาพที่ 28) และทำการวิเคราะห์ตัวแปรต่างๆ โดย แบ่งการทดลองออกเป็น 8 ชุด ในแต่ละชุดกำหนดความเข้มข้นของของแข็งระเหยง่ายทั้งหมดร้อยละ 2 และกำหนดหัวเชื้อจุลินทรีย์ในระบบมีค่าของแข็งแขวนลอยระเหยได้เริ่มต้นร้อยละ 2.5 แต่ละชุดมีรายละเอียดดังนี้

ชุดที่ 1 ชุดควบคุม ใบกระถินเทพณรงค์สด (ไม่ผ่านการปรับสภาพ)

ชุดที่ 2 ชุดควบคุม ใบกระถินเทพณรงค์ที่ผ่านการปรับสภาพตามสภาวะที่เหมาะสม จากการทดลอง 3.3.2 (NaOH ร้อยละ 3 เวลา 48 ชั่วโมง)

ชุดที่ 3 ชุดควบคุม หญ้าเนเปียร์

ชุดที่ 4 ใบกระถินเทพณรงค์สด หมักร่วมกับหญ้าเนเปียร์ อัตราส่วน (1:1)

ชุดที่ 5 ใบกระถินเทพณรงค์สด หมักร่วมกับหญ้าเนเปียร์ อัตราส่วน (1:3)

ชุดที่ 6 ใบกระถินเทพณรงค์ ผ่านการปรับสภาพ (NaOH ร้อยละ 3 เวลา 48 ชั่วโมง หมักร่วมกับหญ้าเนเปียร์ ในอัตราส่วน 1:1)

ชุดที่ 7 ใบกระถินเทพณรงค์สด หมักร่วมกับกากตะกอนเยื่อกระดาษอัตราส่วน 1:1

ชุดที่ 8 ใบกระถินเทพณรงค์ ผ่านการปรับสภาพ (NaOH ร้อยละ 3 เวลา 48 ชั่วโมง หมักร่วมกับกากตะกอนเยื่อกระดาษ ในอัตราส่วน 1:1)

2) เมื่อทำการเตรียมวัตถุดิบเริ่มต้นในการผลิตก๊าซชีวภาพ สำหรับการทดลองทั้ง 8 ชุดแล้ว จากนั้นปรับให้ค่าความเป็นกรดต่างให้อยู่ประมาณ 8 เพื่อรักษาสมดุลพีเอชไม่ให้ต่ำลงเมื่อเกิดการผลิตกรดไขมันระเหยในช่วงแรก จากนั้นไล่ก๊าซออกซิเจนภายในถังด้วยก๊าซไนโตรเจน เก็บและบันทึก

ข้อมูลของปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้น ระยะเวลา 90 วัน พร้อมทั้งวิเคราะห์องค์ประกอบก๊าซมีเทนเปรียบเทียบกับชุดควบคุมที่ใช้ใบกระถินที่ผ่านการปรับสภาพ เพียงอย่างเดียวในการผลิตก๊าซชีวภาพ

3) นำตัวอย่างไปวิเคราะห์ค่าพีเอช อุณหภูมิ ซีไอดี กรดไขมันระเหยง่าย สภาพความเป็นต่างของแข็งทั้งหมด ของแข็งระเหยง่ายทั้งหมด ปริมาณก๊าซชีวภาพทั้งหมด และร้อยละการผลิตก๊าซมีเทน ตลอดช่วงการทดลอง

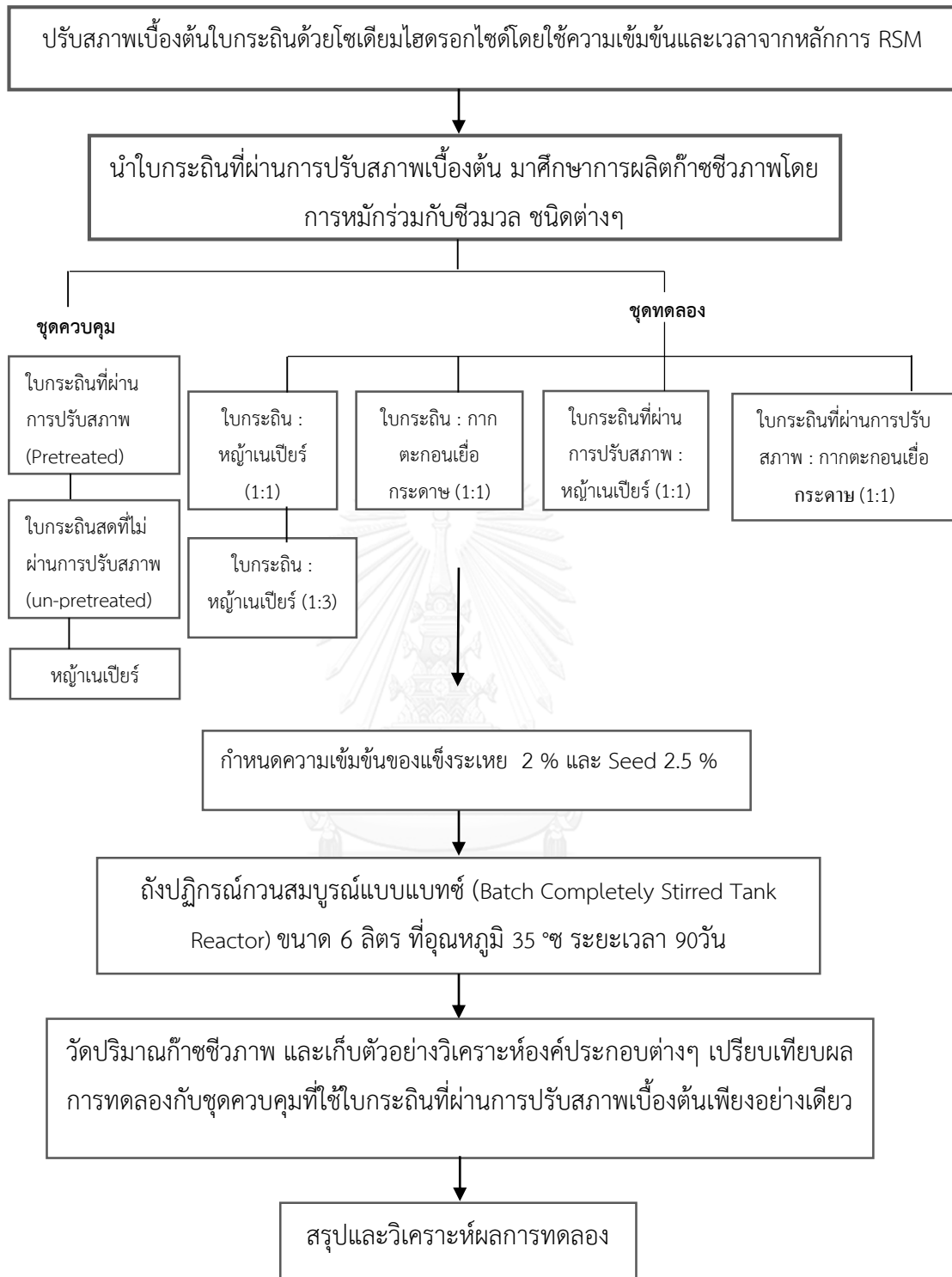
4) สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลองการศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพโดยการหมักร่วมกับชีวมวลชนิดต่างๆ โดยวิเคราะห์ปริมาณ และองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ



ภาพที่ 27 ชุดการทดลองในถังปฏิกรณ์กวนสมบูรณ์แบบแบตช์สำหรับการศึกษาประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพโดยการหมักร่วม (co-digestion)



ภาพที่ 28 เครื่องวัดองค์ประกอบก๊าซชีวภาพ BIOGAS 5000 ของบริษัท Geotech (Geotech., 2014)



ภาพที่ 29 การศึกษาประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วมไบโกระถิน

ตารางที่ 9 ตัวแปรและค่าที่ใช้ในการทดลอง

ชนิดตัวแปร	รายละเอียด	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
ตัวแปรอิสระ	<ul style="list-style-type: none"> - ความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ในการปรับสภาพเบื้องต้นในกระถิน - เวลาที่ใช้ในการปรับสภาพเบื้องต้นในกระถิน 	<ul style="list-style-type: none"> - NaOH ร้อยละ 0 1.5 3 และ 3.62 (น้ำหนักต่อปริมาตร) - 0 24 48 และ 57.94 ชั่วโมง
ตัวแปรควบคุม	<ul style="list-style-type: none"> - ระยะเวลาการทดลอง - อัตราส่วนในกระถินต่อชีวมวลหมักรวม - ความเข้มข้นสารตั้งต้น (substrate) - ความเข้มข้นหัวเชื้อจุลินทรีย์ (seed) 	<ul style="list-style-type: none"> - 90 วัน - 1:1 (ปริมาตร/ปริมาตร) - 2 ร้อยละของแข็งระเหย - 2.5% ร้อยละของแข็งระเหย
ตัวแปรที่ไม่ได้ควบคุม	<ul style="list-style-type: none"> - อุณหภูมิ 	<ul style="list-style-type: none"> - อุณหภูมิห้อง
ตัวแปรตาม	<ul style="list-style-type: none"> - ปริมาณก๊าซชีวภาพ - องค์ประกอบก๊าซชีวภาพ - ปริมาณซีโอดีที่ถูกกำจัด - องค์ประกอบลิกโนเซลลูโลส - กรดไขมันระเหย - สภาพต่าง - ของแข็งทั้งหมด - ของแข็งระเหย 	

ตารางที่ 10 วิธีการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการทดลอง

ตัวแปร	วิธีวิเคราะห์	ความถี่/ช่วงเวลาการวัด
ความชื้น (moisture content)	มาตรฐานวิธีวิเคราะห์ # 2540 B (เผา 103-105 °ซ)	ก่อนการทดลอง
ของแข็งทั้งหมด (total solids)	มาตรฐานวิธีวิเคราะห์ # 2540 B (เผา 103-105 °ซ)	ก่อนและหลังการทดลอง
ของแข็งระเหย (volatile solids)	มาตรฐานวิธีวิเคราะห์ # 2540B (เผา 500-600 °ซ)	ก่อนและหลังการทดลอง
ซีโอดีละลาย (soluble COD)	มาตรฐานวิธีวิเคราะห์ # 5220 C (รีฟลักซ์แบบปิด)	ก่อนและหลังการทดลอง
กรดไขมันระเหย (VFA)	มาตรฐานวิธีวิเคราะห์ # 5560 (วิธีการไทเทรต)	3 ครั้งต่อสัปดาห์
สภาพด่าง (Alkalinity)	มาตรฐานวิธีวิเคราะห์ # 2320B (วิธีการไทเทรต)	3 ครั้งต่อสัปดาห์
พีเอช	pH meter	3 ครั้งต่อสัปดาห์
ปริมาณเซลล์โลส เฮมิ-เซลล์โลส ลิกนิน	Van. Soest's method (P.J. Van soest, 1960)	ก่อนและหลังการปรับสภาพ
ปริมาณก๊าซชีวภาพ	แทนที่น้ำโดยใช้เครื่องวัดปริมาณก๊าซ (Gas counter)	ทุกวัน
องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ	เครื่องวัดองค์ประกอบก๊าซ BIOGAS 5000 บริษัท Geotech	หลังการทดลอง
คาร์บอนต่อไนโตรเจน	CHNS/O Analyser mode ธาตุ	ก่อนการทดลอง

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

งานวิจัยนี้ทำการศึกษการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากไบโกระถินเทพนรงค์ ที่เหลือทิ้งจากโรงงานผลิตกระดาษ โดยทำการปรับสภาพเบื้องต้นไบโกระถินเทพนรงค์ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และการหมักร่วม (co-digestion) กับหญ้าเนเปียร์หรือกากตะกอนเยื่อกระดาษ สามารถสรุปขั้นตอนการทดลองได้ดังนี้

- 1) ศึกษาองค์ประกอบไบโกระถินเทพนรงค์โดยวิเคราะห์ของแข็งทั้งหมด (TS) ของแข็งระเหย (VS) เถ้า (Ash) เซลลูโลส (Cellulose) เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) และลิกนิน (Lignin)
- 2) ปรับสภาพไบโกระถินเทพนรงค์ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ออกแบบการทดลองโดยใช้หลักการประสมส่วนกลาง (Central Composite Design: CCD) ปรับเปลี่ยนความเข้มข้นร้อยละ 0 ถึง 3.62 เป็นระยะเวลา 0 ถึง 57.94 ชั่วโมง
- 3) ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการปรับสภาพไบโกระถินเทพนรงค์ จากผลการศึกษาคักภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพด้วยวิธีบีเอ็มพี (Biochemical Methane Potential: BMP) โดยอาศัยหลักการพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology: RSM) พิจารณาจากปริมาณก๊าซชีวภาพ และประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดี
- 4) ศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากไบโกระถินเทพนรงค์ที่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นโดยใช้สภาวะที่ได้จากข้อ 3 นำมาหมักร่วม (co-digestion) กับหญ้าเนเปียร์หรือกากตะกอนเยื่อกระดาษ ในถังปฏิกรณ์กวนสมบูรณ์ (CSTR) ขนาด 6 ลิตร ทำการทดลองแบบแบตช์ ระยะเวลา 90 วัน

4.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบใบกระถินเทพณรงค์สด

ใบกระถินเทพณรงค์ที่ใช้ในงานวิจัย เป็นส่วนเหลือทิ้งจากต้นกระถินเทพณรงค์ [*Acacia spp. (mangium x auriculaeformis)*] ในอุตสาหกรรมการผลิตกระดาษ นำมาบดให้มีขนาดเล็กกว่า 2 มิลลิเมตร วิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมี ได้แก่ ปริมาณของแข็งทั้งหมด ปริมาณของแข็งระเหยได้ ปริมาณเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส ลิกนิน ปริมาณคาร์บอนต่อไนโตรเจน และปริมาณความชื้น ผลการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 11

ตารางที่ 11 องค์ประกอบทางเคมีของใบกระถินเทพณรงค์

องค์ประกอบ	ค่าเฉลี่ย \pm S.D.
องค์ประกอบชีวมวล (ร้อยละใบกระถินสด)	
ของแข็งทั้งหมด (TS)	47.03 \pm 0.06
ความชื้น (Moister)	52.97 \pm 0.06
องค์ประกอบของแข็งทั้งหมด (ร้อยละของแข็งทั้งหมด)	
ของแข็งระเหยได้ (VS)	95.13 \pm 0.06
เถ้า (Ash)	4.87 \pm 0.06
องค์ประกอบลิกโนเซลลูโลส (ร้อยละของแข็งทั้งหมด)	
เซลลูโลส (Cellulose)	18.75 \pm 0.09
เฮมิเซลลูโลส (Hemicelluloses)	14.26 \pm 0.17
ลิกนิน (Lignin)	17.43 \pm 0.64
อื่นๆ	49.56 \pm 0.52
C/N (ร้อยละใบกระถินสด)	20.50 \pm 0.79

จากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบเบื้องต้นใบกระถินพบว่า มีองค์ประกอบของสารอินทรีย์สูง ร้อยละ 95.13 มีปริมาณเซลลูโลสค่อนข้างต่ำ (18.75 %) เมื่อเปรียบเทียบกับพืชพลังงานอื่นๆซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง ร้อยละ 25-45 (Sun และ Cheng, 2002) เฮมิเซลลูโลส และลิกนินเป็นองค์ประกอบสูงมาก ร้อยละ 14.26 และ 17.43 ตามลำดับ ซึ่งลิกนินเป็นโครงสร้างที่ย่อยสลายโดยแบคทีเรีย ได้ยากหรือไม่ได้เลย จึงเป็นข้อจำกัดในการเกิดปฏิกิริยาการย่อยสลาย (Seppala และคณะ, 2008) ดังนั้นกระบวนการปรับสภาพขั้นต้นใบกระถินเทพณรงค์จึงมีความจำเป็น เพื่อกำจัดลิกนิน ทำให้การเข้าถึงของเอนไซม์กับเซลลูโลสเป็นไปได้ง่าย

4.2 ผลการศึกษาการปรับสภาพขั้นต้นโดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

การปรับสภาพขั้นต้นใบกระถินเทพณรงค์ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ออกแบบชุดการทดลองโดยใช้หลักการประสมส่วนกลาง (Central Composite Design: CCD) งานวิจัยใช้โปรแกรม Design Expert (Trial version 9) ปรับเปลี่ยนความเข้มข้นร้อยละ 0 ถึง 3 ระยะเวลา 0 ถึง 48 ชั่วโมง (วิธีการทดลองหัวข้อ 3.3.2) จากการแปรผลของโปรแกรม ได้ชุดการทดลองที่ใช้สภาวะการปรับสภาพต่างๆ โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ตั้งแต่ร้อยละ 0 ถึง 3.62 ระยะเวลา 0 ถึง 57.94 ชั่วโมง และเมื่อทำการปรับสภาพขั้นต้นใบกระถินที่ใช้สภาวะการปรับสภาพต่างๆ ตามที่โปรแกรมกำหนด แล้วนำใบกระถินที่ผ่านการปรับสภาพขั้นต้นมาศึกษาทดลอง ให้ผลการศึกษา ดังนี้

1) องค์ประกอบทางเคมีของใบกระถินเทพณรงค์หลังการปรับสภาพขั้นต้น

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของใบกระถินเทพณรงค์หลังการปรับสภาพขั้นต้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นและระยะเวลาในการปรับสภาพต่างๆกัน (ตารางที่ 12) จากผลการทดลองพบว่า เมื่อเพิ่มความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์และระยะเวลาการแช่ใบกระถินในสารละลายมีผลต่อองค์ประกอบของใบกระถิน โดยมีปริมาณของแข็งทั้งหมด ของแข็งระเหย เหมิเซลลูโลส และลิกนินลดลง เนื่องจากการใช้สารละลายต่างในการปรับสภาพลิกโนเซลลูโลส ต่างในสารละลายทำให้เกิดปฏิกิริยาสบู่ (Saponification) ของพันธะเอสเตอร์ระหว่างโมเลกุลของเหมิเซลลูโลสและ ลิกนิน นอกจากนี้การปรับสภาพด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์เจือจางทำให้วัสดุเกิดการพองตัวส่งผลให้พื้นที่ผิวภายในเพิ่มขึ้น ความเป็นผลึก และระดับการเกิดโพลิเมอร์ (DP) ลดลง เกิดการแยกตัวของโครงสร้างลิกนินและเหมิเซลลูโลส จึงส่งผลให้เหมิเซลลูโลสและลิกนินหลุดออกจากโครงสร้างผนังเซลล์ ส่งผลให้สัดส่วนของเซลลูโลสในใบกระถินเทพณรงค์เพิ่มขึ้น (ตารางที่ 12) อย่างไรก็ตามการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนสารประกอบลิกโนเซลลูโลสหลังการปรับสภาพจะขึ้นกับชนิดของสารตั้งต้น (Rollini และคณะ, 2014; ฐิติมา คำไชยใหญ่, 2554)

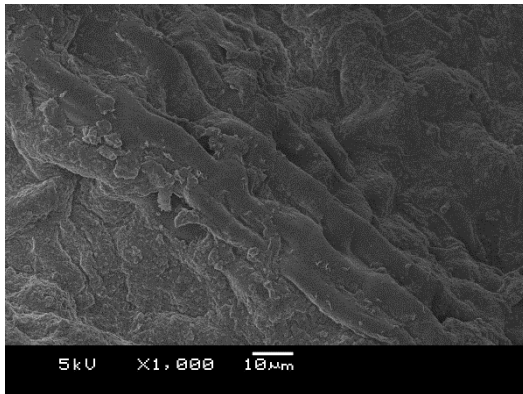
ตารางที่ 12 องค์ประกอบของไบocerดินหลังการปรับสภาพขั้นต้น

สภาวะการปรับสภาพ		องค์ประกอบหลังปรับสภาพขั้นต้น (ค่าเฉลี่ย \pm S.D.)					
NaOH (ร้อยละ)	ระยะเวลา (ชั่วโมง)	ของแข็งทั้งหมด (ร้อยละ โดยน้ำหนัก)	ของแข็งระเหย (ร้อยละ โดยน้ำหนัก)	เซลลูโลส (ร้อยละของแข็ง ทั้งหมด)	เฮมิเซลลูโลส (ร้อยละของแข็ง ทั้งหมด)	ลิกนิน (ร้อยละของแข็ง ทั้งหมด)	อื่นๆ (ร้อยละของแข็ง ทั้งหมด)
ชุดควบคุม	ไม่ปรับสภาพ	47.03 \pm 0.06	44.74 \pm 0.06	18.75 \pm 0.09	14.26 \pm 0.17	17.43 \pm 0.64	49.56 \pm 0.52
	น้ำกลั่น 24	46.45 \pm 0.15	42.91 \pm 0.10	20.09 \pm 0.01	14.05 \pm 0.04	17.12 \pm 0.05	48.74 \pm 0.10
	น้ำกลั่น 48	46.21 \pm 0.01	42.73 \pm 0.04	21.85 \pm 0.13	13.72 \pm 0.02	16.98 \pm 0.17	47.45 \pm 0.05
	1.5 0	44.14 \pm 0.04	38.56 \pm 0.02	25.68 \pm 0.12	11.55 \pm 0.05	15.03 \pm 0.17	47.74 \pm 0.00
	1.5 24	40.57 \pm 0.07	36.20 \pm 0.26	34.41 \pm 0.12	9.67 \pm 0.07	11.7 \pm 0.02	44.22 \pm 0.04
	1.5 57.94	38.44 \pm 0.01	34.41 \pm 0.28	40.08 \pm 0.03	8.24 \pm 0.03	9.12 \pm 0.02	42.56 \pm 0.04
	3 0	36.12 \pm 0.03	31.85 \pm 0.15	31.19 \pm 0.02	10.12 \pm 0.03	13.8 \pm 0.06	44.89 \pm 0.08
	3 48	34.67 \pm 0.19	30.75 \pm 0.13	44.3 \pm 0.19	7.21 \pm 0.03	7.93 \pm 0.04	40.56 \pm 0.15
	3.62 24	33.03 \pm 0.01	29.84 \pm 0.15	45.22 \pm 0.02	7.13 \pm 0.03	7.53 \pm 0.03	40.12 \pm 0.05

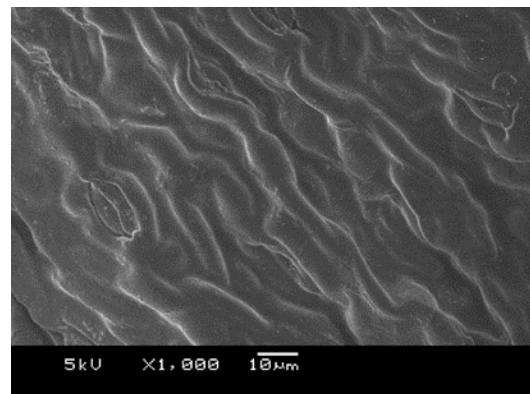
จากผลการวิเคราะห์สามารถสรุปได้ว่าไบocerดินที่ผ่านการปรับสภาพโดยแช่ในสารละลายไฮเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 3.62 เป็นเวลา 24 ชั่วโมง มีปริมาณลิกนินลดลงมากที่สุดเท่ากับ ร้อยละ 56.8 เมื่อเปรียบเทียบกับไบocerดินที่ไม่ปรับสภาพ

2.) ลักษณะพื้นผิวไบocerดินเทพณรงค์หลังการปรับสภาพ

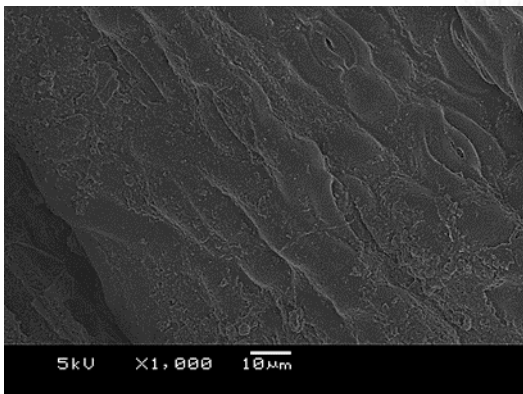
จากการศึกษาลักษณะพื้นผิวไบocerดินเทพณรงค์ในชุดทดลองต่างๆ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่า ไocerดินเทพณรงค์ที่ผ่านการปรับสภาพโดยใช้ความเข้มข้นสารละลายไฮเดียมไฮดรอกไซด์และระยะเวลาปรับสภาพสูงขึ้น จะมีผิวด้านนอกของเสียใยใบ ยุ่ย และแตก สังกัดได้ชัดเจนจากชุดการทดลองที่แช่ในสารละลายไฮเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 3 และ 3.62 เป็นเวลา 48 และ 24 ชั่วโมง ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับไบocerดินสด (ไม่ผ่านการปรับสภาพ) และไบocerดินที่แช่ในน้ำกลั่นที่มีลักษณะผิวนอกของใบไม่ถูกทำลาย (ภาพที่ 30)



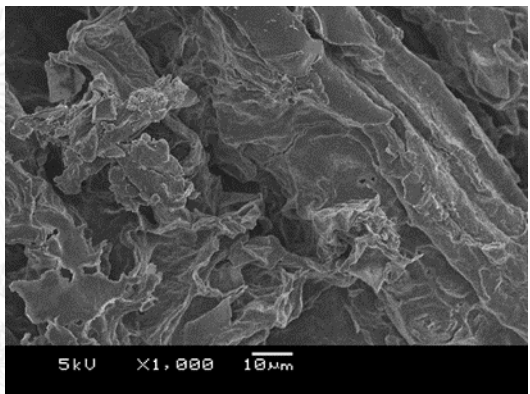
ก) ใบกระถินสด (ไม่ปรับสภาพ)



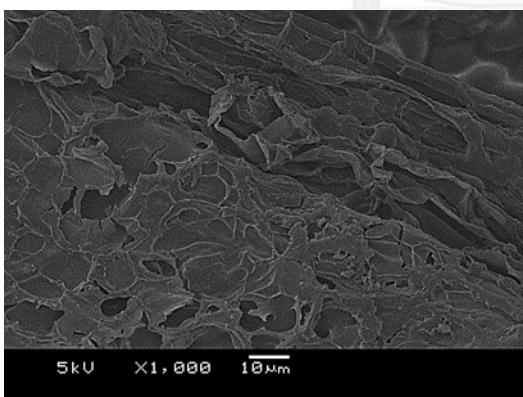
ข) น้ำกลั่น (NaOH=0) ระยะเวลา 24 ชั่วโมง



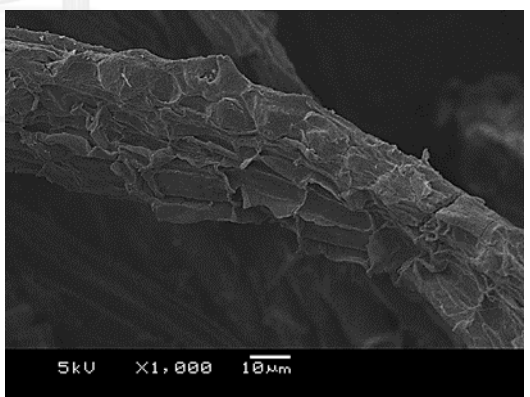
ค) น้ำกลั่น (NaOH=0) ระยะเวลา 48 ชั่วโมง



ง) NaOH ร้อยละ 1.5 ระยะเวลา 0 ชั่วโมง

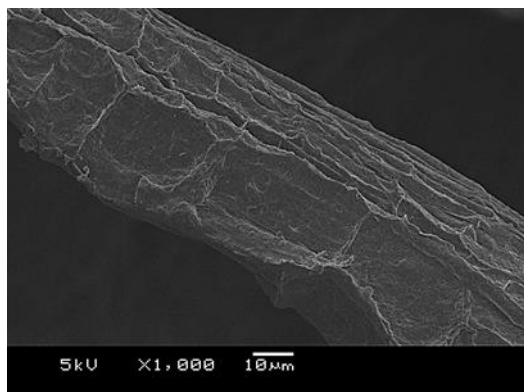


จ) NaOH ร้อยละ 1.5 ระยะเวลา 24 ชั่วโมง

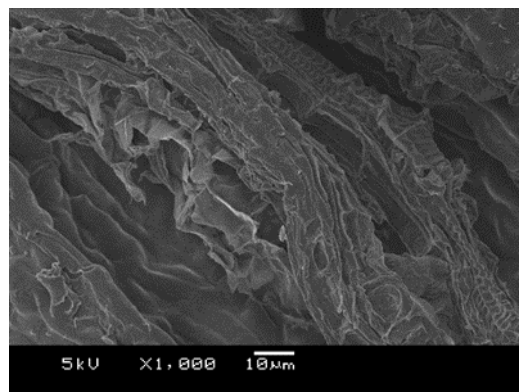


ฉ) NaOH ร้อยละ 1.5 ระยะเวลา 57.94 ชั่วโมง

ภาพที่ 30 ลักษณะพื้นผิวใบกระถินเทพนรงค์หลังการปรับสภาพเมื่อทำการส่องดูด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) กำลังขยาย 1,000 เท่า



ข) NaOH ร้อยละ 3 ระยะเวลา 0 ชั่วโมง



ช) NaOH ร้อยละ 3 ระยะเวลา 48 ชั่วโมง

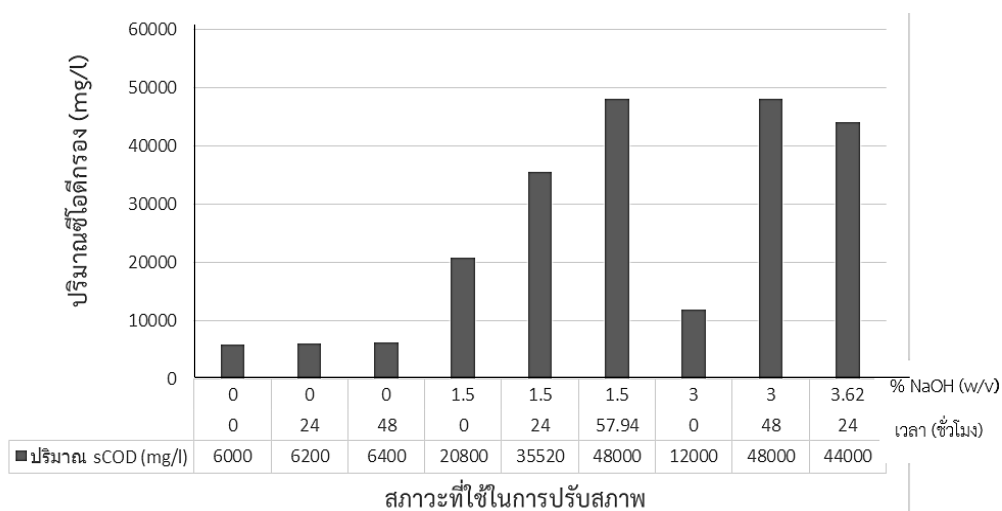


ฉ) NaOH ร้อยละ 3.62 ระยะเวลา 24 ชั่วโมง

ภาพที่ 30 ลักษณะพื้นผิวไบocerดินเทพณรงค์หลังการปรับสภาพเมื่อทำการส่องดูด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) กำลังขยาย 1,000 เท่า (ต่อ)

3) ปริมาณซีโอติกรองที่ได้หลังการปรับสภาพ

จากการปรับสภาพไบocerดินเทพณรงค์โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ในสภาวะต่างๆกัน พบว่า เมื่อใช้เวลาในการปรับสภาพนานขึ้น ปริมาณซีโอติกรองจะเพิ่มขึ้น (ภาพที่ 31) โดยในชุดการทดลองปรับสภาพที่ใช้ความเข้มข้น NaOH ร้อยละ 1.5 ขึ้นไปและใช้ระยะเวลาการปรับสภาพนาน 48 ชั่วโมงขึ้นไปจะมีปริมาณซีโอติกรองสูงสุดเท่ากับ 48,000 มิลลิกรัมต่อลิตร การใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นมากขึ้นและระยะเวลาในการปรับสภาพนานขึ้นทำให้เกิดปฏิกิริยา Saponification มากขึ้น เกิดการแยกตัวของโครงสร้างลิกนินและเฮมิเซลลูโลส จึงส่งผลให้เฮมิเซลลูโลสและลิกนินหลุดออกจากโครงสร้างผนังเซลล์มาละลายในสารละลายต่างมากขึ้น เป็นการเพิ่มความสามารถในการย่อยสลายอินทรีย์สาร จึงทำให้ปริมาณซีโอติในสารละลายเพิ่มขึ้น (Hendriks และ Zeeman, 2009)



ภาพที่ 31 ปริมาณซีโอดีกรองในชุดการทดลองที่ได้หลังการปรับสภาพด้วยความเข้มข้นและระยะเวลาที่ออกแบบได้จากโปรแกรม

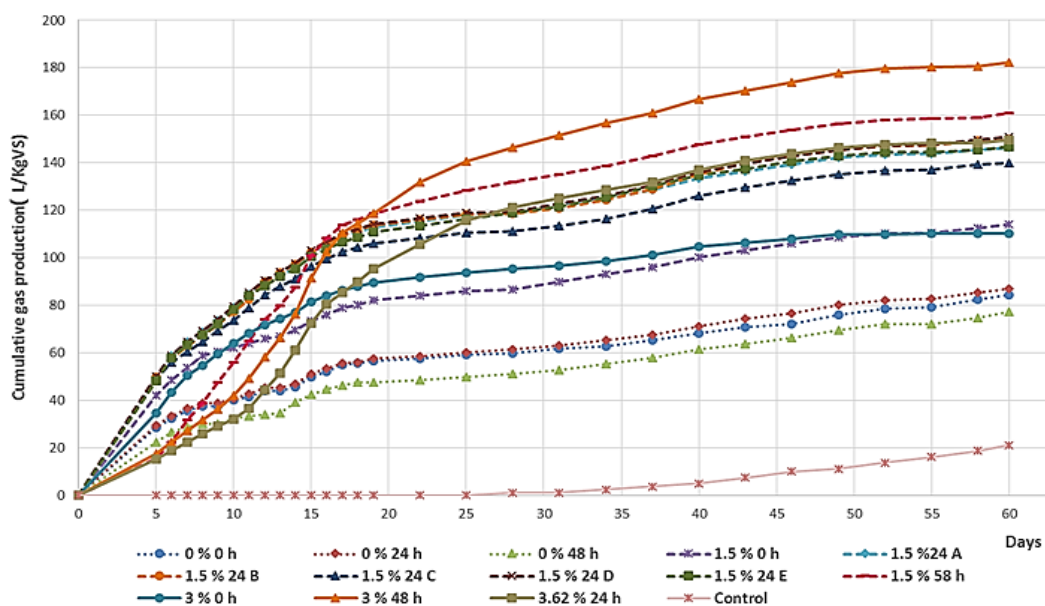
4.3 ผลการประเมินศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากไบโกระถินเทพณรงค์ด้วยวิธีบีเอ็มพี (BMP)

การศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพด้วยวิธีบีเอ็มพี ในชุดการทดลอง 13 ชุด ซึ่งได้ออกแบบไว้โดยใช้หลักการประสมส่วนกลาง (Central Composite Design: CCD) เพื่อศึกษาประสิทธิภาพและผลของการปรับสภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพของไบโกระถินเทพณรงค์ที่ผ่านการปรับสภาพขั้นต้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) โดยทำการทดลองที่อุณหภูมิห้องเป็นระยะเวลา 60 วัน ให้ผลการทดลองดังนี้

4.3.1 ผลการผลิตก๊าซชีวภาพจากชุดทดลองต่างๆ

จากผลการทดลองพบว่าชุดการทดลอง BMP ที่มีปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม เมื่อสิ้นสุดการทดลอง ในวันที่ 60 สูงสุดเท่ากับ 182.2 ลิตรต่อกิโลกรัมของแข็งระเหยเริ่มต้น (L/kgVSadded) คือการปรับสภาพไบโกระถินโดยใช้ความเข้มข้น NaOH ร้อยละ 3.0 เป็นเวลา 48 ชั่วโมง ปริมาณก๊าซชีวภาพที่ได้สูงรองลงมาเท่ากับ 160.9 และ 149.7 L/kgVS ได้แก่การปรับสภาพไบโกระถินโดยใช้ความเข้มข้น NaOH ร้อยละ 1.5 เป็นเวลา 58 ชั่วโมง และร้อยละ 3.62 เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ตามลำดับ เนื่องจาก สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ มีผลให้ลิกนินถูกทำลายหลุดจากโครงสร้าง จึงทำให้การเข้าถึงของเอนไซม์และเซลล์โลส ซึ่งเป็นสารตั้งต้นในการผลิตก๊าซชีวภาพ เป็นไปได้ง่ายขึ้น (อังคณา ทองคำ, 2552) อย่างไรก็ตามการใช้ NaOH ที่ความเข้มข้นสูงเกินไปก็อาจมีผลยับยั้งแบคทีเรียกลุ่ม

สร้างมีเทน ทำให้ปริมาณก๊าซชีวภาพที่ได้ลดลง (Zheng และคณะ, 2014) ซึ่งสังเกตได้จากชุดการทดลองที่มีการปรับสภาพโดยใช้ NaOH ความเข้มข้นร้อยละ 3.62 เป็นเวลา 24 ชั่วโมง มีปริมาณก๊าซชีวภาพต่ำกว่าชุดการทดลองที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 3 ดังภาพที่ 32 และตารางที่ 15



ภาพที่ 32 ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม (L/KgVS) จากชุดทดลองบีเอ็มพี ซึ่งใช้สภาวะต่างๆ ในการปรับสภาพขั้นต้นไบโกระถินด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

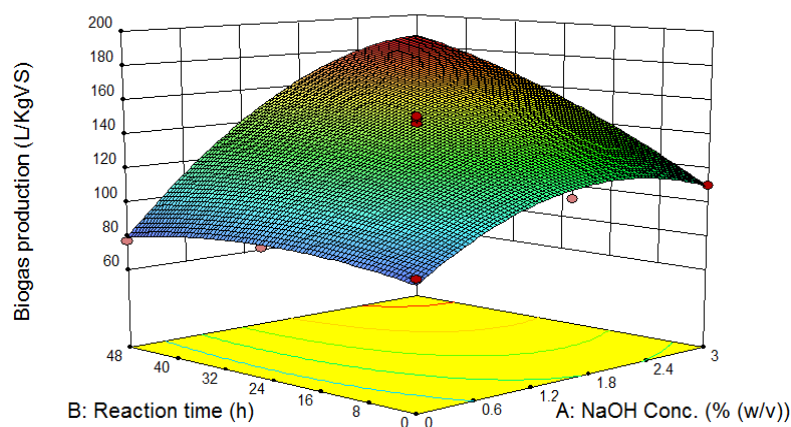
ดังนั้นการศึกษานี้จึงศึกษาความสัมพันธ์ของระดับความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาที่มีผลต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ โดยใช้หลักการทางสถิติ (ANOVA) เพื่อหาความสัมพันธ์ของปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ ดังตารางที่ 13

ตารางที่ 13 การวิเคราะห์ค่าความแปรปรวน ของตัวแปรต่อปริมาณก๊าซชีวภาพ

Source	Sum of Squares (SS)	df	Mean Square	F - Value	p-value Prob > F
Model	12726.94	5	2545.39	105.78	< 0.0001
A-NaOH Conc.	7481.41	1	7481.41	310.91	< 0.0001
B-Reaction time	2323.97	1	2323.97	96.58	< 0.0001
AB	1566.97	1	1566.97	65.12	< 0.0001
A ²	2682.08	1	2682.08	111.46	< 0.0001
B ²	321.65	1	321.65	13.37	0.0081
Residual	168.44	7	24.06		
A-NaOH Conc.	7481.41	1	7481.41	310.91	< 0.0001
Lack of Fit	94.81	3	31.60	1.72	0.3008
Pure Error	73.63	4	18.41		
Cor Total	12895.38	12			

จากตาราง ANOVA ที่ได้จากโปรแกรม Design Expert (Trial version 9) ค่า p-value ของระดับความเข้มข้นและระยะเวลาการแช่สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในการปรับสภาพ มีค่าน้อยกว่า 0.05 ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 และค่า Regression coefficients (R^2) เท่ากับ 0.9869 แสดงให้เห็นว่า ปัจจัยทั้งสองมีผลต่อการเพิ่มผลผลิตก๊าซชีวภาพ และเมื่อพิจารณาค่า Sum of Squares (SS) พบว่าปัจจัยของระดับความเข้มข้นของสารละลายต่าง มีค่ามากกว่าระยะเวลา ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์จึงส่งผลต่อการผลิตก๊าซชีวภาพมากกว่า การเปลี่ยนแปลงระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา

การทดลองให้ผลในแนวเดียวกันเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของระดับความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และระยะเวลาที่ใช้ในการปรับสภาพ ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยมีความสัมพันธ์แบบเส้นโค้ง แสดงให้เห็นว่าการใช้ความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ และระยะเวลาในการปรับสภาพเพิ่มขึ้น ปริมาณก๊าซชีวภาพเพิ่มสูงขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 33 โดยมีความสัมพันธ์เชิงสมการ ดังสมการที่ 4.1

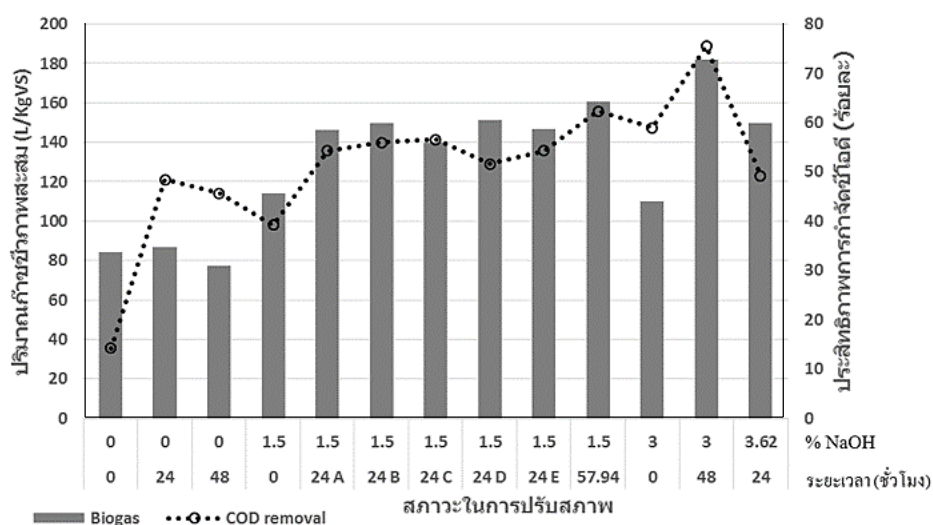


ภาพที่ 33 ความสัมพันธ์ของตัวแปรในรูปแบบจำลอง 3 มิติ

$$\begin{aligned} \text{Biogas production} = & + 81.28 + 40.88 * \text{NaOH Conc.} + 0.645 * \text{Reaction time} \\ & + 0.550 * \text{NaOH Conc.} * \text{Reaction time} - 10.47 * \text{NaOH Conc.}^2 \\ & - 0.0142 * \text{Reaction time}^2 \end{aligned} \quad (4.1)$$

4.3.2 ประสิทธิภาพการกำจัดมลสารในรูปซีโอติ

จากการทดลองการผลิตก๊าซชีวภาพจากไบโอมวลในเตาหมักแบบต่อเนื่องด้วยวิธีเปียกของชุดการทดลองต่างๆ ดังแสดงผลการศึกษาระสิทธิภาพการกำจัดซีโอติในภาพที่ 34 พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดซีโอติและการผลิตก๊าซชีวภาพมีแนวโน้มแปรผันตามกัน โดยพบว่า ชุดการทดลองที่มีศักยภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพสูงสุดจะมีประสิทธิภาพการกำจัดซีโอติสูงสุดด้วย โดยชุดการทดลองที่ปรับสภาพโดยใช้ NaOH ร้อยละ 3 เป็นเวลา 48 ชั่วโมง มีประสิทธิภาพการกำจัดซีโอติสูงสุดเท่ากับร้อยละ 75.51 ในขณะที่ชุดควบคุมที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ กำจัดซีโอติได้เพียงร้อยละ 14.29

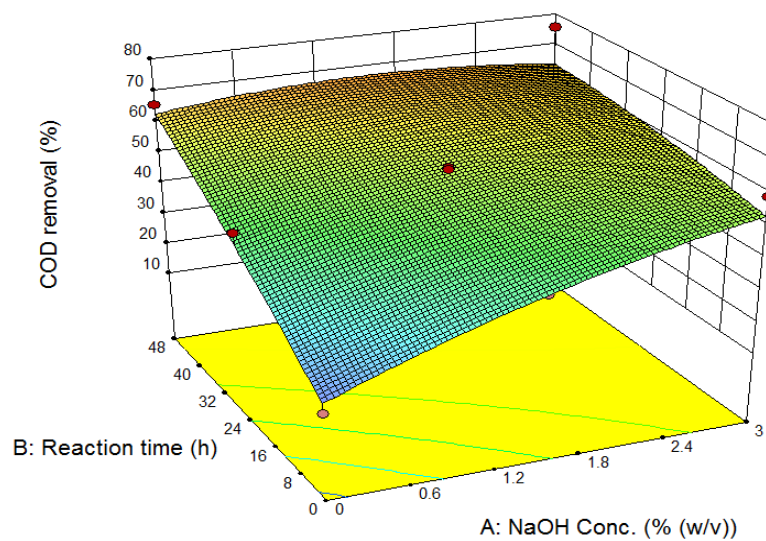


ภาพที่ 34 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพและประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีของชุดการทดลองบีเอ็มพี

จากตาราง ANOVA (ตารางที่ 14) ที่ได้จากโปรแกรม Design Expert (Trial version 9) ค่า p-value ของระดับความเข้มข้นและระยะเวลาการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในการปรับสภาพ มีค่าน้อยกว่า 0.05 ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 และค่า Regression coefficients (R^2) เท่ากับ 0.8381 แสดงให้เห็นว่า ปัจจัยทั้งสองมีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของระดับความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และระยะเวลาที่ใช้ในการปรับสภาพ ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยมีความสัมพันธ์แบบเส้นโค้ง แสดงให้เห็นว่าการใช้ความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ และระยะเวลาในการปรับสภาพเพิ่มขึ้น มีแนวโน้มในการกำจัดซีโอดีเพิ่มสูงขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 35 โดยมีความสัมพันธ์เชิงสมการ ดังสมการที่ 4.2

$$\begin{aligned} \text{COD removal} = & + 17.59 + 17.08 * \text{NaOH Conc.} + 1.087 * \text{Reaction time} \\ & - 0.24 * \text{NaOH Conc.} * \text{Reaction time} - 1.75 * \text{NaOH Conc.}^2 \\ & - 0.003 * \text{Reaction time}^2 \end{aligned} \quad (4.2)$$



ภาพที่ 35 ความสัมพันธ์ของตัวแปรในรูปแบบจำลอง 3 มิติ

ตารางที่ 14 การวิเคราะห์ค่าความแปรปรวน ของตัวแปรต่อประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี

Source	Sum of Squares (SS)	df	Mean Square	F - Value	p-value Prob > F
Model	2157.18	5	431.44	7.25	0.0108
A-NaOH Conc.	526.03	1	526.03	8.83	0.0207
B-Reaction time	1249.65	1	1249.65	20.99	0.0025
AB	304.15	1	304.15	5.11	0.0583
A ²	75.29	1	75.29	1.26	0.2979
B ²	14.66	1	14.66	0.25	0.6350
Residual	416.82	7	59.55		
Lack of Fit	402.03	3	134.01	36.24	0.0023
Pure Error	14.79	4	3.70		
Cor Total	2574.00	12			

4.3.3 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการปรับสภาพไบโกระถินเทพณรงค์โดยหลักการ พื้นผิวตอบสนอง

การหาสภาวะที่เหมาะสมในการปรับสภาพ โดยใช้หลักการพื้นผิวตอบสนอง (RSM) ที่มี การวางแผนการทดลองแบบประสมส่วนกลาง (Central Composite Design: CCD) เพื่อศึกษาผลของ ปัจจัย 2 ปัจจัย คือ ความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และระยะเวลา งานวิจัยนี้ได้ใช้ โปรแกรม Design Expert (Trial version 9) ซึ่งเป็นโปรแกรมสำเร็จรูปในการศึกษา โดยนำผล การศึกษาที่ได้จากการผลิตก๊าซชีวภาพด้วยวิธีบีเอ็มพีในหัวข้อ 4.3 มาใช้ในโปรแกรม (ตารางที่ 15)

ตารางที่ 15 ข้อมูลที่ใช้ในการหาสภาวะที่เหมาะสมในการปรับสภาพไบโกระถินเทพณรงค์ (ค่าเฉลี่ย) ซึ่งได้จากการประเมินศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ ในหัวข้อ 4.3

ชุดการ ทดลอง	ร้อยละ NaOH (นน./ปริมาตร)	ระยะเวลา (ชั่วโมง)	ปริมาณก๊าซชีวภาพ (L/KgVSadded)	ประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดี (ร้อยละ)
1	0	0	84.47	14.29
2	3	0	110.20	48.45
3	0	48	77.29	45.71
4	3	48	182.19	75.51
5	0	24	86.95	45.45
6	3.62	24	149.72	49.21
7	1.5	0	114.10	39.24
8	1.5	57.94	160.89	62.29
9	1.5	24	146.32	54.29
10	1.5	24	149.91	55.98
11	1.5	24	140.03	56.60
12	1.5	24	151.03	51.65
13	1.5	24	146.76	54.29

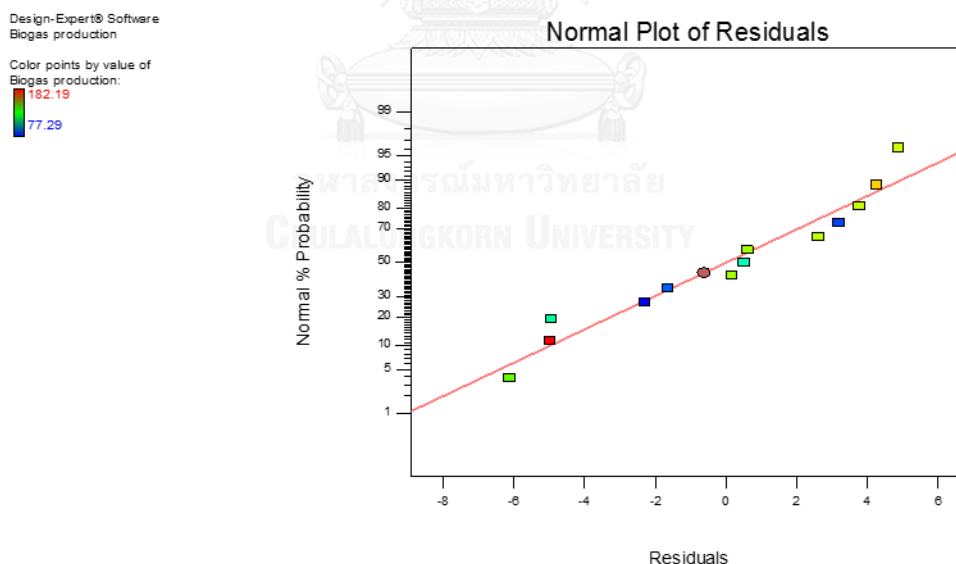
จากนั้นนำผลการทดลองไปวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของปัจจัยทั้งสอง ต่อค่าตอบสนอง ด้วย สมการถดถอยกำลังสอง (Quadratic model) เนื่องจากเป็นสมการที่สามารถอธิบายความสัมพันธ์ได้ ละเอียด เพราะเป็นสมการที่สามารถอธิบายด้วยสมการกำลังหนึ่ง (First order) และสมการกำลังสอง (Second order) (เนตรชนก ศรีแสง, 2556)

1) การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

การตรวจสอบคุณภาพข้อมูลมี 3 ขั้นตอน คือ (1) การตรวจสอบการกระจายแบบแจกแจงปกติ (2) การตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวน และ (3) การตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล เมื่อทำการศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากชุดการทดลองทั้งหมด 13 ชุด จึงนำผลการทดลองที่ได้มาตรวจสอบคุณภาพของข้อมูลว่ามีความเหมาะสมหรือไม่ ด้วยการวิเคราะห์ความถูกต้องของแบบจำลอง หากข้อมูลมีความเหมาะสม จึงจะทำการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) และค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (R-Square: R^2) ต่อไปได้

(1) การตรวจสอบการกระจายแบบแจกแจงปกติ (Normal plot)

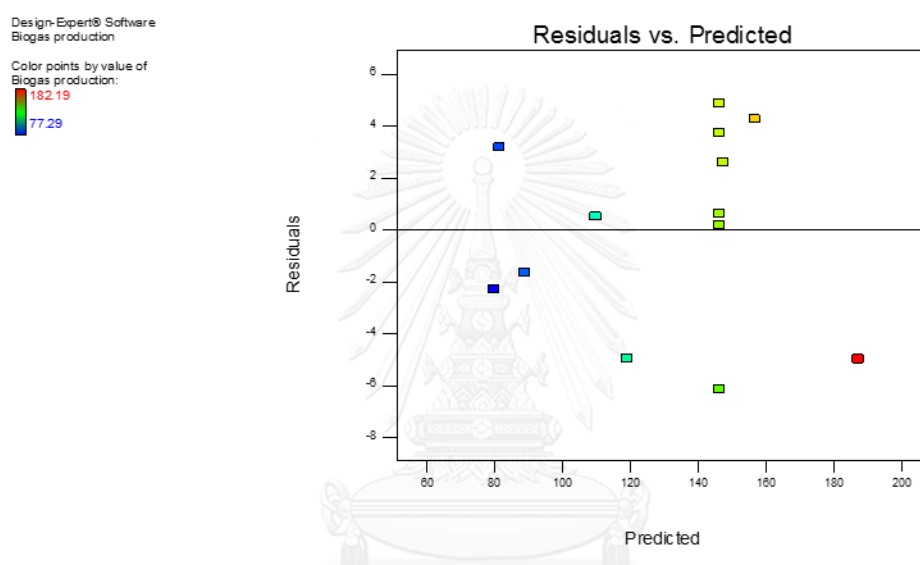
การตรวจสอบการกระจายแบบแจกแจงปกติ เป็นการตรวจสอบส่วนตกค้างของข้อมูล (Residuals) ว่ามีการกระจายแบบแจกแจงปกติหรือไม่ จากภาพที่ 36 เมื่อพิจารณาการกระจายของค่าส่วนตกค้าง พบว่า มีการกระจายตัวตามแนวเส้นตรง แสดงให้เห็นว่า ส่วนตกค้างจากผลการทดลองการผลิตก๊าซชีวภาพ ไม่แสดงสิ่งผิดปกติให้เห็น จึงสรุปได้ว่าค่าส่วนตกค้างมีการแจกแจงแบบปกติ



ภาพที่ 36 กราฟการกระจายแบบแจกแจงปกติ

(2) การตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวน

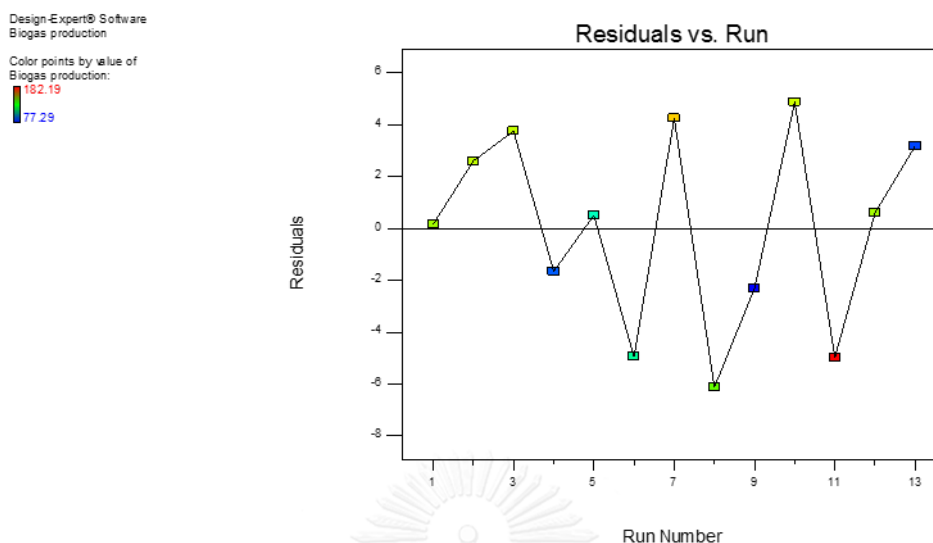
การตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวนโดยใช้ภาพการกระจายของส่วนตกค้างในแต่ละระดับของปัจจัย จากภาพที่ 37 พบว่า ส่วนตกค้างของผลการผลิตก๊าซชีวภาพจากไบโกระถินเทพณรงค์ที่ผ่านการปรับสภาพด้วย NaOH มีการกระจายอย่างสม่ำเสมอทั้งแนวแกนบวกและแกนลบ แสดงว่าข้อมูลมีความเสถียรของความแปรปรวน



ภาพที่ 37 การกระจายส่วนตกค้างในแต่ละชุดการทดลอง

(3) การตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล

การตรวจสอบความเป็นอิสระของค่าส่วนตกค้างโดยใช้ภาพการกระจายเพื่อสังเกตลักษณะการกระจายของจุดที่แทนข้อมูลบนภาพว่ามีรูปแบบ อิสระหรือไม่ จากภาพที่ 38 พบว่า ส่วนตกค้างของการผลิตก๊าซชีวภาพจากไบโกระถินเทพณรงค์ที่ผ่านการปรับสภาพด้วย NaOH ลักษณะที่ไม่แน่นอนคือไม่สามารถประเมินรูปแบบที่แน่นอนได้ แสดงว่ามีความเป็นอิสระของข้อมูล



ภาพที่ 38 การกระจายของส่วนตกค้างกับลำดับชุดการทดลอง

จากการตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบ การทดลอง พบว่า ค่าส่วนตกค้างของข้อมูลที่ได้จากการทดลองเป็นไปตามสมมติฐานทั้ง 3 ข้อ จึงสรุปว่า ข้อมูลที่ได้จากการทดลองการผลิตก๊าซชีวภาพด้วยวิธีบีเอ็มพีชุดนี้ มีความถูกต้องและเหมาะสมสำหรับการนำไปวิเคราะห์ความแปรปรวนและค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา และ พงศ์ชนัน เหลืองไพบูลย์, 2551)

(4) ค่าความแปรปรวน (Analysis of Variance)

การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance) หรือ ANOVA เป็นการตรวจสอบแหล่งผันแปรของแบบจำลอง จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนของของการผลิตก๊าซชีวภาพจากไบโกระถินเทพณรงค์ที่ผ่านการปรับสภาพด้วย NaOH ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ในตารางที่ 16 พบว่า ค่า P-value ของเทอม ความเข้มข้นและเวลา มีค่าต่ำกว่า 0.0001 และเทอมกำลังสองมีค่ามีค่าน้อยกว่า 0.05 ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ซึ่งเป็นค่านัยสำคัญทางสถิติที่กำหนด แสดงว่ามีส่วนโค้งเกิดขึ้นที่พื้นผิวตอบสนอง (ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา และ พงศ์ชนัน เหลืองไพบูลย์, 2551) ดังนั้นจึงสามารถใช้สมการแบบจำลองกำลังสองสำหรับทำนายปริมาณก๊าซชีวภาพได้

ตารางที่ 16 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของปริมาณก๊าซชีวภาพ

Source	Sum of Squares (SS)	df	Mean Square	F - Value	p-value Prob > F
Model	12726.94	5	2545.39	105.78	< 0.0001
A-NaOH Conc.	7481.41	1	7481.41	310.91	< 0.0001
B-Reaction time	2323.97	1	2323.97	96.58	< 0.0001
AB	1566.97	1	1566.97	65.12	< 0.0001
A ²	2682.08	1	2682.08	111.46	< 0.0001
B ²	321.65	1	321.65	13.37	0.0081
Residual	168.44	7	24.06		
A-NaOH Conc.	7481.41	1	7481.41	310.91	< 0.0001
Lack of Fit	94.81	3	31.60	1.72	0.3008
Pure Error	73.63	4	18.41		
Cor Total	12895.38	12			

(5) ค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ

การตรวจสอบตัวแบบหรือสมการพยากรณ์ว่าสามารถพยากรณ์ได้ถูกต้องใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากที่สุด สามารถพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (R^2) ซึ่งเป็นค่าที่บ่งบอกว่าตัวแปรอิสระมีผลให้ตัวแปรตามเปลี่ยนแปลงมากน้อยเพียงใด นอกจากนี้เพื่อลดความผิดพลาดของข้อมูลที่เกิดขึ้นอาจพิจารณาจากค่า Adjusted regression ($Adj R^2$) ซึ่งเกิดจาก R^2 ที่ปรับด้วยขนาดของข้อมูล (สุวดี นำพาเจริญ และ ชลธิชา จำรัสพร, 2557)

จากผลการวิเคราะห์ ในตารางที่ 17 จะเห็นว่า ค่า R^2 มี ค่าเท่ากับ 0.9869 หมายความว่า ตัวแปรอิสระ (ความเข้มข้นต่าง และระยะเวลา) สามารถอธิบาย ความผันแปรหรือการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรตาม (ปริมาณก๊าซชีวภาพ) ได้ร้อยละ 98.69 แสดงว่าแบบจำลองสามารถนำไปสร้างสมการทำนาย เพื่อหาค่าผลตอบได้อย่างถูกต้องและเหมาะสม

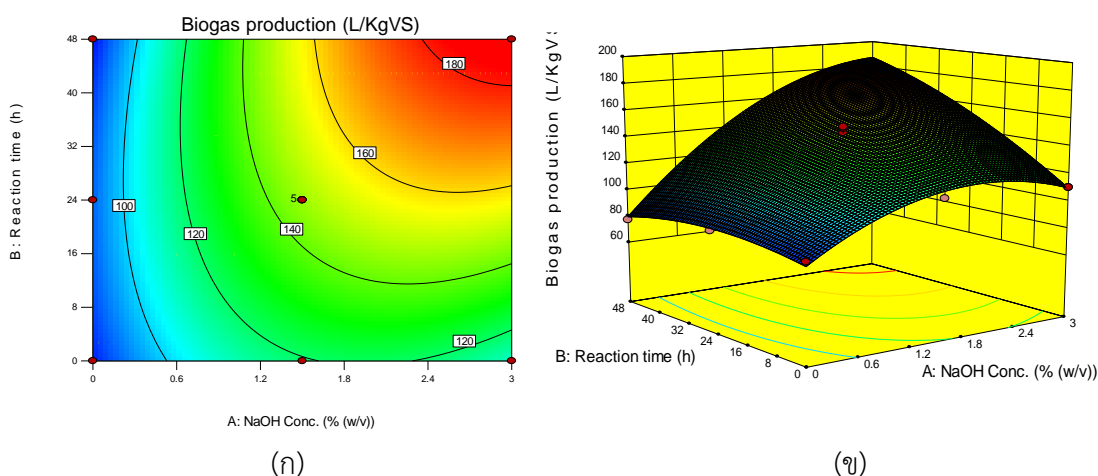
4.3.4 การสร้างสมการทำนายปริมาณก๊าซชีวภาพจากการปรับสภาพใบกระถินเทพนรงค์ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

การสร้างสมการทำนายปริมาณก๊าซชีวภาพโดยนำค่าปัจจัยที่ได้จากการวิเคราะห์สัมประสิทธิ์ของสมการถดถอยของปริมาณก๊าซชีวภาพ ในตารางที่ 16 มาเขียนให้อยู่ในรูปของสมการ แสดงดังตารางที่ 17 เมื่อพิจารณาการขาดความเหมาะสมของสมการ (lack of fit) ในตารางที่ 17 พบว่าค่า P-value ของ lack of fit มีค่ามากกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 ทำให้สามารถสรุปได้ว่าแบบจำลองนี้มีความพอเพียงของตัวแปรในสมการ สมการถดถอยที่ได้จึงมีความเหมาะสม ตารางที่ 17 สมการและค่าทางสถิติที่ได้จากโปรแกรม

	Model Equations	R ²	Adj R ²	p-value
ปริมาณก๊าซชีวภาพ (L/KgVSadded)	+ 81.28 + 40.88 * NaOH Conc. + 0.645 * Reaction time + 0.550 * NaOH Conc. * Reaction time - 10.47 * NaOH Conc. ² - 0.0142 * Reaction time ²	0.9869	0.9776	< 0.0001

4.3.5 การสร้างพื้นผิวตอบสนองของปริมาณก๊าซชีวภาพ

เมื่อได้สมการทำนายปริมาณก๊าซชีวภาพ จึงนำมาสร้างกราฟพื้นผิวผลตอบปริมาณก๊าซชีวภาพที่ได้ และกราฟโครงร่าง จากภาพที่ 39 (ก) พบว่า เมื่อเพิ่มความเข้มข้นและระยะเวลาการใช้ NaOH ในการปรับสภาพ ปริมาณก๊าซชีวภาพมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น โดยปริมาณก๊าซชีวภาพจะสูงสุดเมื่อใช้ NaOH ความเข้มข้นร้อยละ 3 เป็นเวลา 48 ชั่วโมง เพื่อให้มองเห็นภาพได้ง่ายขึ้นจึงแสดงเป็นกราฟโครงร่าง 3 มิติ ดังแสดงในภาพที่ภาพที่ 39 (ข)



ภาพที่ 39 พื้นผิวผลตอบ (ก) และกราฟโครงร่าง (ข) ของปริมาณก๊าซชีวภาพ

เมื่อเปรียบเทียบค่าที่ได้จากทดลอง (Actual) และค่าที่ได้จากสมการทำนาย (Predicted) พบว่ามีค่าใกล้เคียงกัน ดังแสดงในภาพที่ 40 และ ตารางที่ 18

ตารางที่ 18 เปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากสมการ

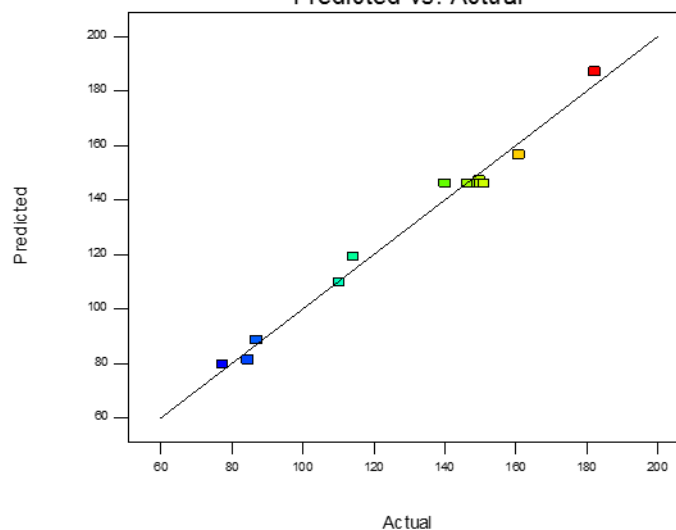
สภาวะการปรับสภาพ		ค่าตอบสนองต่อปัจจัย			
%NaOH (นน./ ปริมาตร)	ระยะเวลา (ชั่วโมง)	Biogas (L/KgVSadded)		COD removal (%)	
		ค่าเฉลี่ยจากการ ทดลอง	สมการทำนาย (S.D.=4.91)	ค่าเฉลี่ยจากการ ทดลอง	สมการทำนาย (S.D.=7.72)
0	0	84.47	81.29	14.29	17.59
3	0	110.20	109.69	58.97	53.06
0	48	77.29	79.59	45.71	62.82
3	48	182.19	187.17	75.51	63.41
0	24	86.95	88.60	45.45	41.95
3.62	24	149.72	147.11	49.21	59.79
1.5	0	114.10	119.05	39.24	39.27
1.5	57.94	160.89	156.63	62.29	71.06
1.5	24	146.32	146.15	54.29	54.91
1.5	24	149.91	146.15	55.98	54.91
1.5	24	140.03	146.15	56.60	54.91
1.5	24	151.03	146.15	51.65	54.91
1.5	24	146.76	146.15	54.29	54.91

Design-Expert® Software
Biogas production

Color points by value of
Biogas production:
182.19
77.29

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

Predicted vs. Actual



ภาพที่ 40 เปรียบเทียบค่าที่ได้จากทดลอง (Actual) และค่าที่ได้จากสมการ (Predicted)

4.3.6 การเลือกสถานะที่เหมาะสมในการปรับสภาพ (Optimization)

การหาค่าที่เหมาะสมของปัจจัยต่อค่าตอบสนอง ด้วยหลักการพันผิวตอบสนองโดยใช้ฟังก์ชัน Optimization ในโปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ Design Expert ซึ่งเป็นฟังก์ชันที่ใช้หาค่าที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยและใช้วัดความพึงพอใจโดยรวมของผลตอบ (Desirability) เนื่องจากในงานวิจัยในส่วนนี้เป็นการทดสอบเพื่อหาสถานะที่เหมาะสม (Optimal condition) ในการปรับสภาพไบโกระถินเทพนรงค์ เพื่อใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตก๊าซชีวภาพในส่วนการทดลองถัดไป จึงสนใจค่าตอบสนอง (ปริมาณก๊าซชีวภาพ) สูงสุด โดยมีปัจจัย (ความเข้มข้น และระยะเวลา) ที่อยู่ในช่วงการทดลอง โดยโปรแกรมจะประมวลผลจากสมการก๊าซชีวภาพ (ตาราง 17) ได้ผลการหาค่าที่เหมาะสม แสดงดังตารางที่ 19

ตารางที่ 19 สถานะที่เหมาะสมจากโปรแกรม Design Expert

ร้อยละ NaOH (นน./ปริมาตร)	ระยะเวลา (ชั่วโมง)	ปริมาณก๊าซชีวภาพ (L/KgVSadded)	ค่าความพึงพอใจ (Desirability)
3	48	187.2	1.00

ผลการทดสอบพบว่า ค่าของปัจจัย (ความเข้มข้น และระยะเวลา) ที่ทำให้ค่าตอบสนอง (ปริมาณก๊าซชีวภาพ) สูงสุด คือการปรับสภาพไบโกระถินเทพนรงค์ ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 3 (นน./ปริมาตร) เป็นระยะเวลา 48 ชั่วโมง มีศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพเท่ากับ 187.2 L/KgVSadded มีค่าความพึงพอใจ (Desirability) เท่ากับ 1.00 แสดงว่า ผลตอบนั้นได้รับความพึงพอใจอย่างสมบูรณ์ (ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา และ พงศ์ชนัน เหลืองไพบูลย์, 2551)

4.4 การศึกษาการหมักร่วม ไบโกระถินเทพนรงค์ กับชีวมวลชนิดต่างๆ

การศึกษการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพโดยการหมักร่วม (Co-digestion) ไบโกระถินเทพนรงค์กับชีวมวลชนิดต่างๆ ได้แก่ หญ้าเนเปียร์ หรือกากตะกอนเยื่อกระดาษ ซึ่งในการศึกษานี้ได้ใช้ไบโกระถินเทพนรงค์สด และไบโกระถินที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความเข้มข้นร้อยละ 3 เป็นเวลา 48 ชั่วโมง (เป็นสถานะเหมาะสมที่ได้จากการศึกษาในข้อ 4.3) เป็นวัสดุหมักร่วม ในถังปฏิกรณ์กวนสมบูรณ์แบบแบตช์ (Batch Completely

Stirred Tank Reactor) ขนาด 6 ลิตรโดยมีปริมาตรการทำงานเท่ากับ 5 ลิตร ที่อุณหภูมิห้อง เป็นระยะเวลา 90 วัน โดยมีรายละเอียดของชุดการทดลอง และผลการทดลอง ดังนี้

ชุดที่ 1 ชุดควบคุม ไบโกระถินเทพณรงค์สด (ไม่ผ่านการปรับสภาพ)

ชุดที่ 2 ชุดควบคุม ไบโกระถินเทพณรงค์ที่ผ่านการปรับสภาพด้วย NaOH ร้อยละ 3 เป็นเวลา 48 ชั่วโมง (ไบโกระถินที่ผ่านการปรับสภาพ)

ชุดที่ 3 ชุดควบคุม หล้าเนเปียร์

ชุดที่ 4 ไบโกระถินเทพณรงค์สด หมักร่วมกับหล้าเนเปียร์ อัตราส่วน (1:1)

ชุดที่ 5 ไบโกระถินเทพณรงค์สด หมักร่วมกับหล้าเนเปียร์ อัตราส่วน (1:3)

ชุดที่ 6 ไบโกระถินเทพณรงค์ ผ่านการปรับสภาพด้วย NaOH ร้อยละ 3 เป็นเวลา 48 ชั่วโมง หมักร่วมกับหล้าเนเปียร์ อัตราส่วน (1:1)

ชุดที่ 7 ไบโกระถินเทพณรงค์สด หมักร่วมกับกากตะกอนเยื่อกระดาษอัตราส่วน (1:1)

ชุดที่ 8 ไบโกระถินเทพณรงค์ ผ่านการปรับสภาพด้วย NaOH ร้อยละ 3 เป็นเวลา 48 ชั่วโมง หมักร่วมกับกากตะกอนเยื่อกระดาษอัตราส่วน (1:1)

4.4.1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของชีวมวลหมักร่วม

1) หล้าเนเปียร์

หล้าเนเปียร์ที่ใช้ในการทดลอง เป็นหล้าเนเปียร์สดพันธุ์ปากช่อง 1 (*Pennisetum purpureum* cv. Pakchong1) จากแปลงสวนจิตรลดา อายุเก็บเกี่ยว 45 วัน นำมาวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีเบื้องต้น พบว่า มีปริมาณของแข็งทั้งหมดและของแข็งระเหย เท่ากับร้อยละ 17.71 และ 15.06 ต่อแห้งสด ตามลำดับ นอกจากนี้หล้าเนเปียร์มีเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบสูงถึงร้อยละ 38.18 เมื่อเปรียบเทียบกับไบโกระถิน (ร้อยละ 18.75) โดยเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบที่แบคทีเรียสามารถใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตก๊าซชีวภาพได้ (อรุณี ศุภสินสาธิต, 2555) ในขณะที่หล้าเนเปียร์มีลิกนินเป็นองค์ประกอบเท่ากับร้อยละ 4.3 เมื่อเปรียบเทียบกับไบโกระถิน (ร้อยละ 17.43) ซึ่งเป็นโครงสร้างที่ทำให้การเข้าถึงของเอนไซม์ในการย่อยสลายเป็นไปได้ยาก (Seppala และคณะ, 2008) ดังแสดงในตารางที่ 20

ตารางที่ 20 องค์ประกอบทางเคมีเบื้องต้นหญ้าเนเปียร์ พันธุ์ปากช่อง 1

องค์ประกอบ	ค่าเฉลี่ย \pm S.D.
องค์ประกอบชีวมวล (ร้อยละหญ้าสด)	
ของแข็งทั้งหมด (TS)	17.71 \pm 0.16
ความชื้น (Moister)	82.29 \pm 0.16
องค์ประกอบของแข็งทั้งหมด (ร้อยละของแข็งทั้งหมด)	
ของแข็งระเหยได้ (VS)	85.04 \pm 0.04
เถ้า (Ash)	14.96 \pm 0.04
องค์ประกอบลิกโนเซลลูโลส (ร้อยละของแข็งทั้งหมด)	
เซลลูโลส (Cellulose)	38.18 \pm 0.17
เฮมิเซลลูโลส (Hemicelluloses)	18.72 \pm 0.02
ลิกนิน (Lignin)	4.30 \pm 0.53
อื่นๆ	38.80 \pm 0.68
C/N (ร้อยละหญ้าสด)	26.83 \pm 0.03

2) กากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียโรงงานผลิตเยื่อกระดาษ

กากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียโรงงานผลิตเยื่อกระดาษที่ใช้ในการทดลอง เป็นการรวมตะกอนจากถังตกตะกอนชั้นที่ 1 และ 2 (อัตราส่วนร้อยละ 70 : 30) ซึ่งได้จากระบบบำบัดน้ำเสียแบบใช้อากาศ ของโรงงานผลิตเยื่อกระดาษแห่งหนึ่ง นำมาวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีเบื้องต้น (ตารางที่ 21) พบว่า ค่าพีเอชของถังตกตะกอนที่ 1 และ 2 เฉลี่ยเท่ากับ 7.32 และ 7.12 ตามลำดับ มีปริมาณสารอินทรีย์ เท่ากับ 13,000 และ 4,500 มก./ล. ตามลำดับ

ตารางที่ 21 องค์ประกอบทางเคมีกากตะกอนเยื่อกระดาษ

ชนิดตะกอน	พีเอช (pH)	ของแข็งทั้งหมด (TS) (มก./ล.)	ของแข็งระเหยได้ (VS) (มก./ล.)	ของแข็งแขวนลอย (SS) (มก./ล.)	ซีไอที (มก./ล.)	
					ซีไอทีทั้งหมด (tCOD)	ซีไอทีกรอง (sCOD)
ถังตกตะกอนชั้นที่ 1	7.37 \pm 0.04	20,024 \pm 21.63	13,000 \pm 26.46	24,695 \pm 21.79	19,192 \pm 16.09	13,010 \pm 13.23
ถังตกตะกอนชั้นที่ 2	7.12 \pm 0.02	7,475 \pm 21.79	4,500 \pm 17.32	5,832 \pm 19.16	9,120 \pm 13.23	4,020 \pm 10.00

4.4.2 การผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วมของใบกระถินเทพณรงค์กับชีวมวลอื่น

การศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วมใบกระถินเทพณรงค์สดและใบกระถินที่ผ่านการปรับสภาพขั้นต้นด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) โดยหมักร่วมกับหญ้าเนเปียร์หรือกากตะกอนเยื่อกระดาษ โดยใช้ถังปฏิกรณ์กวนสมบูรณ์แบบแบตช์ ระยะเวลาการหมัก 90 วัน ผลการศึกษาปริมาณก๊าซชีวภาพในชุดทดลองต่างๆมีดังนี้

4.4.2.1 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพในชุดทดลองต่างๆ

(1) ชุดควบคุมที่ใช้ใบกระถินอย่างเดียว

ชุดการทดลองที่หมักใบกระถินสด (ชุดควบคุม) ให้ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมเท่ากับ 98.04 ลิตรต่อกิโลกรัมของแข็งระเหย (L/KgVSadded) ในขณะที่ใบกระถินที่ผ่านการปรับสภาพด้วย NaOH ร้อยละ 3 เป็นเวลา 48 ชั่วโมง สามารถเพิ่มผลผลิตก๊าซชีวภาพได้สูงกว่าชุดควบคุม ถึง 1.04 เท่า (199.59 L/KgVSadded) แสดงดังตารางที่ 22 และภาพที่ 41 แสดงให้เห็นว่าการปรับสภาพใบกระถินด้วย NaOH สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพได้

(2) ชุดหมักร่วม

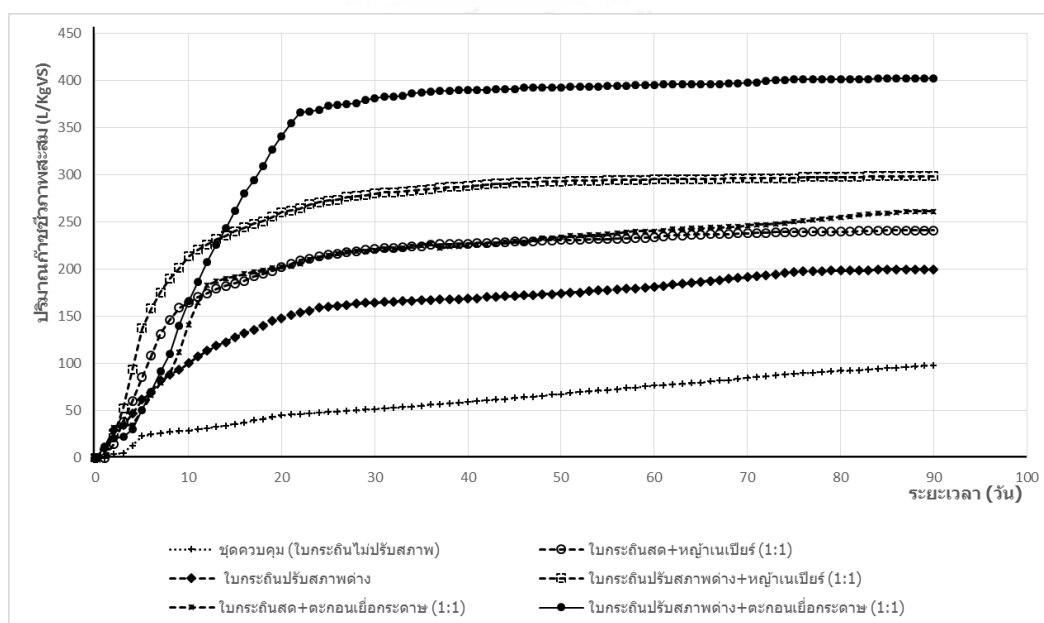
จากผลการทดลองผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วมพบว่าให้ผลการทดลองเช่นเดียวกับชุดควบคุม คือ ชุดการทดลองหมักร่วมที่ใช้ใบกระถินที่ผ่านการปรับสภาพจะให้ผลผลิตก๊าซชีวภาพสูงกว่าชุดการทดลองหมักร่วมที่ใช้ใบกระถินสด โดยชุดการทดลองหมักร่วมใบกระถินที่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นกับหญ้าเนเปียร์ที่อัตราส่วน (1:1) มีปริมาณก๊าซชีวภาพสูงกว่าชุดการทดลองที่ใช้ใบกระถินสดหมักร่วมกับหญ้าเนเปียร์ (1:1) ร้อยละ 23.79 และการหมักร่วมใบกระถินที่ผ่านการปรับสภาพร่วมกับกากตะกอนเยื่อกระดาษ อัตราส่วน (1:1) ให้ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมสูงกว่าชุดการทดลองที่ใช้ใบกระถินสดหมักร่วมกับกากตะกอนเยื่อกระดาษอัตราส่วน (1:1) ร้อยละ 54 แสดงดังตารางที่ 22 และภาพที่ 41

ผลการทดลองสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา โดย Juntarasiri และคณะ (2011) ทำการผลิตก๊าซชีวภาพจากใบประดู่อังสนา พบว่าชุดที่ผ่านการปรับสภาพใบไม้ด้วย 2 % NaOH เวลา 24 ชั่วโมง ให้ปริมาณก๊าซชีวภาพสูงกว่าชุดทดลองใบไม้สดถึง 2 เท่า นอกจากนี้ Liew และคณะ (2011) ทำการปรับสภาพใบไม้ร่วงด้วย 3.5 % NaOH พบว่าสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพได้ถึง 24 เท่า

ตารางที่ 22 ปริมาณก๊าซชีวภาพของชุดการทดลองที่ใช้ไบโกระถินสดและไบโกระถินที่ผ่านการปรับสภาพขึ้นต้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

ชุดการทดลอง	ปริมาณก๊าซชีวภาพ (L/KgVSadded)	
	ไบโกระถินสด	ไบโกระถินปรับสภาพ 3% NaOH เวลา 48 ชั่วโมง
ชุดหมักสารตั้งต้นชนิดเดียว	98.04	199.59
ชุดหมักร่วมหญ้าเนเปียร์ (1:1)	240.92	290.71
ชุดหมักร่วมกากตะกอนเยื่อกระดาษ (1:1)	261.00	402.00

จากการทดลองผลการผลิตก๊าซชีวภาพด้วยถังปฏิกรณ์กวนสมบูรณ์แบบแบตช์ ของไบโกระถินที่ผ่านการปรับสภาพด้วย NaOH ร้อยละ 3 เป็นเวลา 48 ชั่วโมง ซึ่งเป็นสภาวะที่เหมาะสมในการปรับสภาพ จากหลักการ RSM พบว่าในการทดลองนี้ให้ผลผลิตก๊าซชีวภาพสะสม เท่ากับ 199.59 L/KgVSadded ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับชุดการทดลองจากบีเอ็มพี และค่าที่ได้จากสมการ ดังนั้นการใช้หลักการ RSM ภายใต้การออกแบบการทดลองแบบประสมส่วนกลาง ที่มีปัจจัย 2 ระดับ จึงมีความเหมาะสมในการหาสภาวะที่เหมาะสมในการปรับสภาพขึ้นต้น



ภาพที่ 41 ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมของชุดการทดลองปรับสภาพ

ตารางที่ 23 เปรียบเทียบผลผลิตก๊าซชีวภาพของไบโกระถินที่ผ่านการปรับสภาพโดยใช้วีบีเอ็มพี และถึงปฏิกรณ์กวนสมบูรณ์

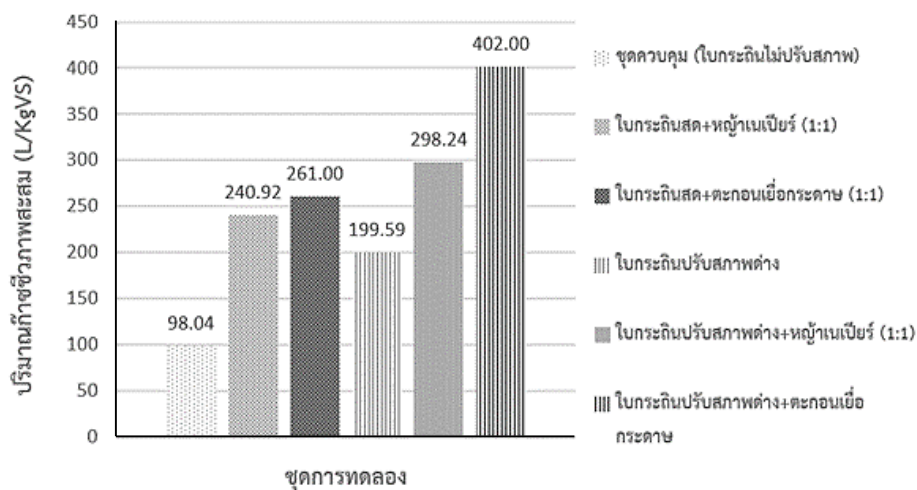
ชุดการทดลอง		ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม (L/KgVSadded)		
ความเข้มข้น NaOH (ร้อยละ)	ระยะเวลา (ชั่วโมง)	บีเอ็มพี	สมการ (Predicted)	ถึงปฏิกรณ์กวนสมบูรณ์ (แบทช์)
3	48 (วันที่ 30)	182.2	187.2	181.4
3	48 (วันที่ 90)	-	-	199.6

หมายเหตุ (-) หมายถึง ไม่ได้ทำการทดลอง

(3) เปรียบเทียบชุดควบคุมที่ใช้ไบโกระถินอย่างเดียวและชุดหมักรวม

ผลการศึกษาการหมักร่วมพบว่า การหมักร่วมไบโกระถินกับหญ้าเนเปียร์หรือกากตะกอนเยื่อกระดาษ มีผลช่วยเพิ่มผลผลิตก๊าซชีวภาพได้สูงขึ้นกว่าการหมักไบโกระถินอย่างเดียว โดยพบว่าการหมักไบโกระถินสดร่วมกับหญ้าเนเปียร์ในอัตราส่วน (1:1) มีปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมเท่ากับ 240.92 L/KgVSadded ซึ่งได้ผลผลิตก๊าซชีวภาพเพิ่มมากขึ้นถึง 1.46 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับ การหมักโดยใช้ไบโกระถินสดเพียงชนิดเดียว การทดลองให้ผลสอดคล้องกันในชุดการหมักร่วมไบโกระถินที่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นด้วย NaOH กับหญ้าเนเปียร์ในอัตราส่วน (1:1) ให้ปริมาณก๊าซชีวภาพเท่ากับ 298.24 L/KgVSadded ซึ่งมากกว่าการใช้ไบโกระถินปรับสภาพด้วย NaOH เพียงชนิดเดียวถึงร้อยละ 49.42 ในขณะที่การหมักไบโกระถินสดร่วมกับหญ้าเนเปียร์ในอัตราส่วน (1:1) สามารถเพิ่มผลผลิตก๊าซชีวภาพจากการใช้ไบโกระถินปรับสภาพด้วย NaOH เพียงอย่างเดียว ถึงร้อยละ 20.71

สำหรับชุดการทดลองที่ให้ปริมาณก๊าซชีวภาพสูงสุดคือ การหมักร่วมไบโกระถินที่ผ่านการปรับสภาพด้วย NaOH ร่วมกับกากตะกอนเยื่อกระดาษ อัตราส่วน (1:1) โดยมีปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมสูงถึง 402 L/KgVSadded ซึ่งมากกว่าการใช้ไบโกระถินที่ผ่านการปรับสภาพด้วย NaOH เพียงชนิดเดียว 1.1 เท่า การทดลองให้ผลสอดคล้องกันเมื่อผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักไบโกระถินสดร่วมกับกากตะกอนเยื่อกระดาษ อัตราส่วน (1:1) สามารถเพิ่มผลผลิตก๊าซชีวภาพได้ถึง 1.66 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับ การหมักไบโกระถินสดเพียงชนิดเดียว ดังภาพที่ 42



ภาพที่ 42 ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมของชุดการทดลองหมักไบโกระถินร่วมกับหญ้าเนเปียร์ หรือกากตะกอนเยื่อกระดาษ เปรียบเทียบกับชุดควบคุม

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการปรับสภาพขั้นต้นโดยใช้สารละลายต่าง และการหมักร่วมกับหญ้าเนเปียร์ หรือกากตะกอนเยื่อกระดาษ สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากไบโกระถินเทพณรงค์ได้ โดย NaOH ที่ใช้ในการปรับสภาพไบโกระถินเทพณรงค์ ไปทำปฏิกิริยากับพันธะของลิกนินที่ยึดกับโครงสร้างองค์ประกอบอื่น เช่น เฮมิเซลลูโลส และเซลลูโลส ทำให้ลิกนินหลุดออกจากโครงสร้าง การเข้าทำปฏิกิริยาของเอนไซม์จากจุลินทรีย์ในขั้นตอนย่อยสลาย (Hydrolysis) จึงเป็นไปได้ง่ายและเร็วขึ้น ส่งผลให้มีสารตั้งต้นซึ่งสามารถเปลี่ยนไปเป็นก๊าซชีวภาพได้มากขึ้น (ฐิติมา คำไชยใหญ่, 2554) ดังแสดงในชุดการทดลองที่มีการปรับสภาพด้วย NaOH (ภาพที่ 41) มีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพที่สูงในช่วงแรกของการทดลอง เมื่อเปรียบเทียบกับชุดที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ (ไบโกระถินสด) สังเกตจากกราฟมีความชันมากในช่วงการทดลองแรก และคงที่ในเวลาต่อมา

จากการทดลองพบว่าการหมักร่วมไบโกระถินเทพณรงค์กับกากตะกอนเยื่อกระดาษ สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพของเยื่อกระดาษได้เนื่องจากไบโกระถินมีปริมาณไนโตรเจนสูงจึงไปเพิ่มอัตราส่วน C/N ของเยื่อกระดาษได้ จากงานวิจัยของ กนิษฐา วิมลรัตน์ (2552) ทำการศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากกากตะกอนเยื่อกระดาษที่ได้จากเครื่องรีดตะกอนของโรงงานผลิตกระดาษกล่องขาวเคลือบมัน พบว่า การผลิตก๊าซชีวภาพจากกากตะกอนเยื่อกระดาษ ที่เวลา 31 วันให้ผลผลิตก๊าซชีวภาพเท่ากับ 91 L/KgVSadded ในขณะที่งานวิจัยนี้ นำกากตะกอนจากถังตกตะกอนจาก

โรงงานผลิตเยื่อกระดาษ มาหมักร่วมกับใบกระถินสด และใบกระถินที่ผ่านการปรับสภาพพบว่าให้ผลผลิตก๊าซชีวภาพสะสมที่เวลา 31 วัน เท่ากับ 221 และ 383 L/KgVSadded ตามลำดับ โดยสามารถเพิ่มผลผลิตก๊าซชีวภาพได้ 1.44 และ 3.2 เท่า ตามลำดับ การใช้วัสดุหมักร่วมนอกจากจะสามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้มากขึ้นแล้ว ยังเป็นการจัดการปัญหาเกี่ยวกับสารอินทรีย์ที่ไม่สามารถหมักย่อยสลายด้วยตัวเองได้ (Romano และ Zhang, 2008)

4.4.2.2 การใช้ใบกระถินเทพนรงค์เป็นสารเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซ

ชีวภาพ

การศึกษานี้เป็นการเปรียบเทียบผลผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วมใบกระถินสดกับหญ้าเนเปียร์ และใบกระถินที่ผ่านการปรับสภาพด้วย NaOH กับหญ้าเนเปียร์ ที่อัตราส่วนต่างๆ โดยมีผลการทดลองดังนี้

1) การหมักร่วมใบกระถินสดกับหญ้าเนเปียร์ที่อัตราส่วนแตกต่างกัน (4:0 1:1 1:3 และ 0:4)

จากผลการทดลองพบว่าการหมักใบกระถินสดเพียงอย่างเดียว มีปริมาณก๊าซชีวภาพเท่ากับ 98.04 L/KgVSadded) ในขณะที่การหมักหญ้าเนเปียร์เพียงชนิดเดียวให้ปริมาณก๊าซชีวภาพเท่ากับ 435.09 L/KgVSadded ดังนั้นหากคำนวณประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพต่อน้ำหนักชีวมวลตามอัตราส่วนผสมชีวมวลแล้วการหมักใบกระถินสดร่วมกับหญ้าเนเปียร์ในอัตราส่วน 1:1 จะสามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้เท่ากับ 264.68 L/KgVSadded ซึ่งในการทดลองหมักร่วมจริงครั้งนี้ได้ปริมาณก๊าซชีวภาพเท่ากับ 240.92 L/KgVSadded ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกันเมื่อเปรียบเทียบกับการคำนวณตามอัตราส่วนผสม (ตารางที่ 24) ในขณะที่ การหมักใบกระถินสดร่วมกับหญ้าเนเปียร์ในอัตราส่วน 1:3 หากคำนวณตามอัตราส่วนผสมแล้ว ปริมาณก๊าซชีวภาพจะเท่ากับ 349.41 L/KgVSadded แต่จากการทดลองได้ปริมาณก๊าซชีวภาพเท่ากับ 425.94 L/KgVSadded ซึ่งค่าที่ได้มากกว่าค่าทางทฤษฎีเท่ากับร้อยละ 22 แสดงให้เห็นว่าการใช้ใบกระถินหมักร่วมกับหญ้าเนเปียร์ในอัตราส่วน 1:3 ใบกระถินเทพนรงค์สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพของหญ้าเนเปียร์ได้ ผลการเปรียบเทียบปริมาณก๊าซชีวภาพจากการคำนวณตามอัตราส่วนผสมกับการทดลองดังตารางที่

ตารางที่ 24 เปรียบเทียบปริมาณก๊าซชีวภาพจากการคำนวณกับการทดลองหมักไบโกระถินสดร่วมกับหญ้าเนเปียร์

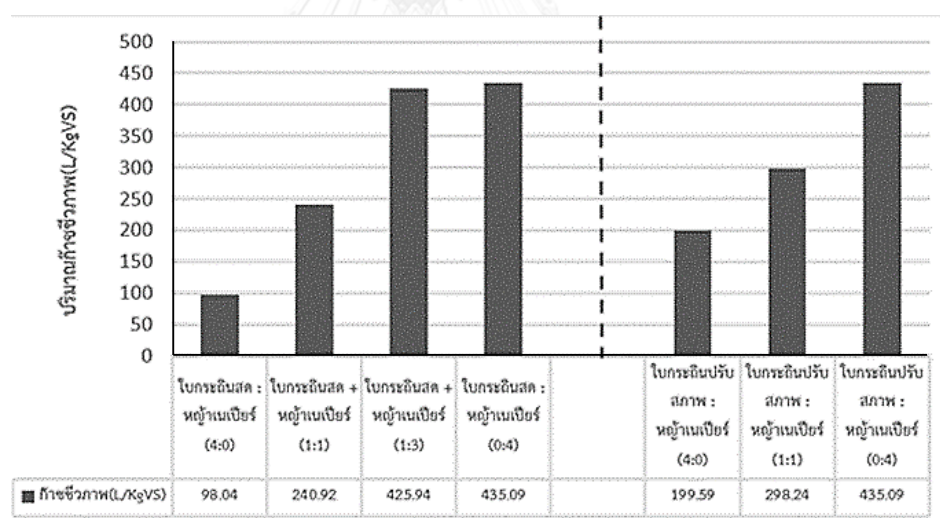
ปริมาณก๊าซชีวภาพ	ไบโกระถินสด : หญ้าเนเปียร์ (4:0)	ไบโกระถินสด : หญ้าเนเปียร์ (0:4)	ไบโกระถินสด : หญ้าเนเปียร์ (1:1)	ไบโกระถินสด : หญ้าเนเปียร์ (1:3)
การคำนวณ (L/KgVSadded)	98.04	435.09	264.68	349.41
จากทดลองหมัก (L/KgVSadded)	98.04	435.09	240.92	425.94

2) การหมักร่วมไบโกระถินที่ผ่านการปรับสภาพร่วมกับหญ้าเนเปียร์ (4:0 1:1 และ 0:4)

จากการศึกษาปริมาณก๊าซชีวภาพจากการหมักไบโกระถินที่ผ่านการปรับสภาพด้วย NaOH ร่วมกับหญ้าเนเปียร์ที่อัตราส่วนต่างๆ พบว่า ปริมาณก๊าซชีวภาพที่ได้จากชุดทดลองหมักไบโกระถินที่ผ่านการปรับสภาพเพียงชนิดเดียว ให้ปริมาณก๊าซชีวภาพเท่ากับ 199.59 L/KgVSadded ในขณะที่การหมักหญ้าเนเปียร์เพียงชนิดเดียวให้ปริมาณก๊าซชีวภาพเท่ากับ 435.09 L/KgVSadded ดังนั้นการหมักไบโกระถินปรับสภาพร่วมกับหญ้าเนเปียร์ในอัตราส่วน 1:1 หากคำนวณตามอัตราส่วนผสมแล้ว จะได้ปริมาณก๊าซชีวภาพเท่ากับ 317.96 L/KgVSadded แต่ปริมาณก๊าซชีวภาพที่ได้จากการทดลองหมักร่วมจริงที่อัตราส่วน 1:1 มีค่าเท่ากับ 298.24 L/KgVSadded ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับการคำนวณตามอัตราส่วนผสม (ตารางที่ 25) แสดงให้เห็นว่าการใช้ไบโกระถินที่ผ่านการปรับสภาพหมักร่วมกับหญ้าเนเปียร์ที่อัตราส่วน 1:1 ไบโกระถินปรับสภาพไม่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพได้ ดังตารางที่ 25

ตารางที่ 25 เปรียบเทียบปริมาณก๊าซชีวภาพจากการคำนวณทางทฤษฎีกับชุดการทดลองหมักไบโกระถินปรับสภาพร่วมกับหญ้าเนเปียร์

ปริมาณก๊าซชีวภาพ	ไบโกระถินปรับสภาพ : หญ้าเนเปียร์ (4:0)	ไบโกระถินปรับสภาพ : หญ้าเนเปียร์ (0:4)	ไบโกระถินปรับสภาพ : หญ้าเนเปียร์ (1:1)
การคำนวณตามอัตราส่วน (L/KgVSadded)	199.59	435.09	317.96
การทดลองจริง (L/KgVSadded)	199.59	435.09	298.24



ภาพที่ 43 เปรียบเทียบปริมาณก๊าซชีวภาพในชุดการหมักไบโกระถินร่วมกับหญ้าเนเปียร์หรือกากตะกอนเยื่อกระดาษ ในอัตราส่วนต่างๆ

ผลการทดลองในส่วนนี้แสดงให้เห็นว่าการหมักร่วมของไบโกระถินเทพณรงค์และหญ้าเนเปียร์ที่อัตราส่วน 1:1 ได้ปริมาณก๊าซชีวภาพจากชุดทดลองมีค่าใกล้เคียงกับการคำนวณที่ได้ตามอัตราส่วนผสม ในขณะที่การใช้ไบโกระถินเทพณรงค์ที่อัตราส่วน 1:3 สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการผลิต

ก๊าซชีวภาพได้ จากชุดการทดลองหมักไบโกระถินร่วมกับหญ้าเนเปียร์ในอัตราส่วน 1:3 จึงสามารถสรุปได้ว่าการใช้ไบโกระถินสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพได้ ผลการทดลองสอดคล้องกับการรายงานของ Kumar และคณะ ในปี 2013 รายงานว่า ไบโกระถินณรงค์สามารถใช้เป็นสารเติมแต่ง (additives) ในการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพให้สูงขึ้นถึงร้อยละ 18-40 นอกจากนี้ไบโกระถินยังช่วยปรับสภาพแวดล้อมในถังปฏิกิริยาให้เหมาะสมเพื่อให้ผลิตก๊าซชีวภาพได้เร็วขึ้นโดยกระตุ้นการทำงานของแบคทีเรียชนิดสร้างกรดและสร้างก๊าซด้วย

ในการผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กมาก (Very Small Power Producer; VSPP) จากหญ้าเนเปียร์ ต้องใช้พื้นที่ในการปลูกหญ้าประมาณ 1,000 ไร่ โดยต้องมีปริมาณหญ้าเนเปียร์ป้อนเข้าระบบประมาณ 130 ตันต่อวัน (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน) ในขณะที่ผลผลิตหญ้าเนเปียร์มีปริมาณต่ำในช่วงหน้าแล้ง และน้ำขัง จากผลการทดลอง แสดงให้เห็นว่า การผลิตก๊าซชีวภาพโดยใช้ไบโกระถินร่วมกับหญ้าเนเปียร์ในอัตราส่วน 1:3 สามารถลดปริมาณการใช้หญ้าเนเปียร์ลงร้อยละ 25 (ประมาณ 97 ตันต่อวัน) ในขณะที่ศักยภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพใกล้เคียงกับการใช้หญ้าเนเปียร์

4.3.3 องค์ประกอบก๊าซชีวภาพของชุดทดลองต่างๆ

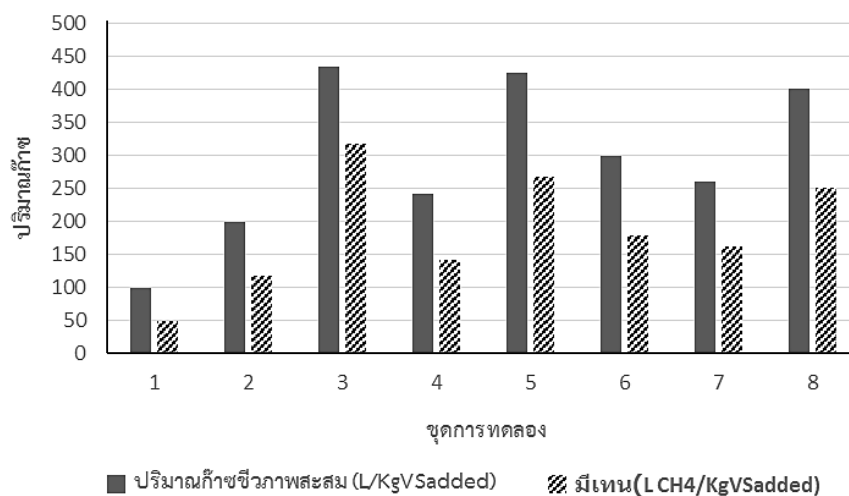
การศึกษาองค์ประกอบก๊าซชีวภาพในชุดทดลองต่างๆ วิเคราะห์องค์ประกอบก๊าซชีวภาพด้วยเครื่องตรวจวัดองค์ประกอบก๊าซ BIOGAS 5000 บริษัท Geotech โดยทำการวิเคราะห์ในวันที่ 15 20 และ 30 ของการทดลอง ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบก๊าซเฉลี่ยจาก 3 ชุดข้อมูล แสดงดังตารางที่ 26 พบว่า ชุดการทดลองหมักไบโกระถินสดมีก๊าซมีเทนเป็นองค์ประกอบร้อยละ 48.8 เมื่อปรับสภาพไบโกระถินด้วย NaOH พบว่าให้ก๊าซมีเทนสูงขึ้นเป็นร้อยละ 58.4 ในขณะที่การหมักหญ้าเนเปียร์ให้ก๊าซมีเทนสูงสุดเท่ากับร้อยละ 73 ซึ่งก๊าซชีวภาพที่เหมาะสมกับการนำไปใช้ประโยชน์เป็นพลังงานเชื้อเพลิงจะต้องมีก๊าซมีเทนเป็นองค์ประกอบ ไม่น้อยกว่าร้อยละ 50 (กนิษฐา วิมลรัตน์, 2552)

ตารางที่ 26 องค์ประกอบก๊าซชีวภาพของชุดทดลอง

ชุดทดลอง	*องค์ประกอบก๊าซชีวภาพ (ร้อยละ)		
	มีเทน (CH ₄)	คาร์บอนไดออกไซด์ (CO ₂)	**อื่นๆ
ชุดที่ 1 ชุดควบคุม ไบโกระถินเทพนรงค์สด	48.8	29.6	21.6
ชุดที่ 2 ไบโกระถินเทพนรงค์ ผ่านการปรับสภาพ (NaOH ร้อยละ 3 เป็นเวลา 48 ชั่วโมง)	58.4	32.6	9.0
ชุดที่ 3 หญ้าเนเปียร์	73.0	23.3	3.7
ชุดที่ 4 ไบโกระถินเทพนรงค์สด หมักร่วมกับหญ้าเนเปียร์ อัตราส่วน (1:1)	58.7	33.1	8.2
ชุดที่ 5 ไบโกระถินเทพนรงค์ หมักร่วมกับหญ้าเนเปียร์ อัตราส่วน (1:3)	62.9	34.3	2.8
ชุดที่ 6 ไบโกระถินเทพนรงค์ ผ่านการปรับสภาพ หมักร่วมกับหญ้าเนเปียร์ อัตราส่วน (1:1)	59.6	32.4	8.0
ชุดที่ 7 ไบโกระถินเทพนรงค์ หมักร่วมกับกากตะกอนเยื่อกระดาษอัตราส่วน (1:1)	62.3	26.9	10.8
ชุดที่ 8 ไบโกระถินเทพนรงค์ ผ่านการปรับสภาพ หมักร่วมกับกากตะกอนเยื่อกระดาษอัตราส่วน (1:1)	62.6	27.1	10.3

หมายเหตุ * องค์ประกอบก๊าซชีวภาพแสดงเป็นค่าเฉลี่ย (ร้อยละ) ของข้อมูลการวัดก๊าซในวันที่ 15 20 และ 30 ของการทดลอง

** ค่าอื่นๆ คือค่าที่หน้าจอแสดงผลเป็นค่า Bal หมายถึงค่า Balance residual คือสัดส่วนก๊าซอื่น ที่เครื่องไม่สามารถวัดได้



ภาพที่ 44 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพกับมีเทน ในแต่ละชุดการทดลอง

หมายเหตุ ชุดที่ 1 ชุดควบคุม ไบโกระถินเทพณรงค์สด (ไม่ผ่านการปรับสภาพ)

ชุดที่ 2 ชุดควบคุม ไบโกระถินเทพณรงค์ที่ผ่านการปรับสภาพด้วย NaOH ร้อยละ 3 เป็นเวลา 48 ชั่วโมง (ไบโกระถินที่ผ่านการปรับสภาพ)

ชุดที่ 3 หล้าเนเปียร์

ชุดที่ 4 ไบโกระถินเทพณรงค์สด หมักร่วมกับหล้าเนเปียร์ อัตราส่วน (1:1)

ชุดที่ 5 ไบโกระถินเทพณรงค์สด หมักร่วมกับหล้าเนเปียร์ อัตราส่วน (1:3)

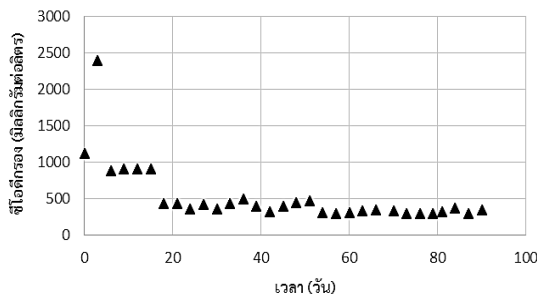
ชุดที่ 6 ไบโกระถินเทพณรงค์ ผ่านการปรับสภาพด้วย NaOH ร้อยละ 3 เป็นเวลา 48 ชั่วโมง หมักร่วมกับหล้าเนเปียร์ อัตราส่วน (1:1)

ชุดที่ 7 ไบโกระถินเทพณรงค์สด หมักร่วมกับกากตะกอนเยื่อกระดาษอัตราส่วน (1:1)

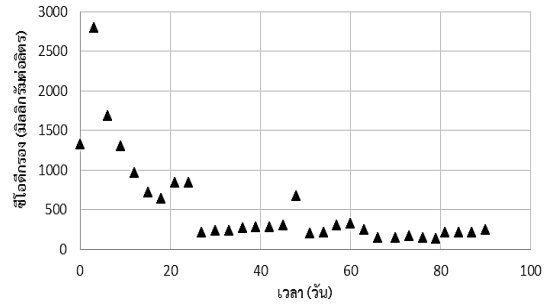
ชุดที่ 8 ไบโกระถินเทพณรงค์ ผ่านการปรับสภาพด้วย NaOH ร้อยละ 3 เป็นเวลา 48 ชั่วโมง หมักร่วมกับกากตะกอนเยื่อกระดาษอัตราส่วน (1:1)

4.3.4 ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีของชุดการทดลอง

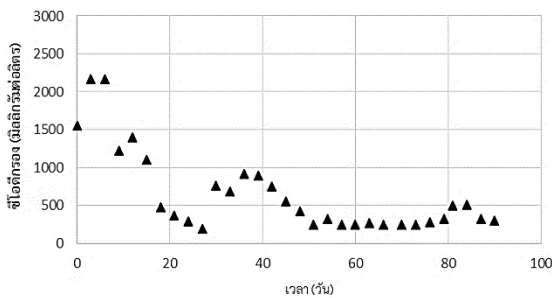
ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีกรอง (sCOD) ของชุดการทดลองต่าง พบว่า ชุดควบคุมไบโกระถินสด มีซีโอดีกรองเริ่มต้นเท่ากับ 1,120 มิลลิกรัมต่อลิตร (มก./ล.) และมีค่าสูงสุดในวันที่ 3 เท่ากับ 2,400 มก./ล. จากนั้น sCOD ลดลงจนสิ้นสุดการทดลองมีค่าเท่ากับ 345 มก./ล. มีประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีเท่ากับร้อยละ 69.2 ในขณะที่ชุดการทดลองไบโกระถินปรับสภาพด้วย NaOH มีค่า sCOD สูงสุดในวันที่ 3 เท่ากับ 2,800 มก./ล. และมีประสิทธิภาพการกำจัด sCOD เมื่อ



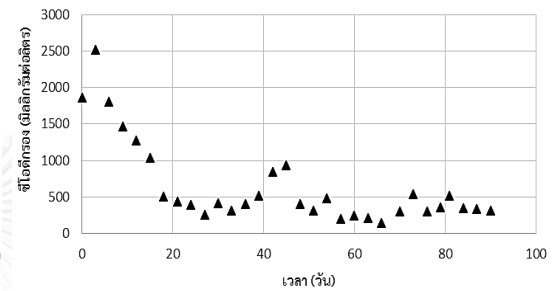
ก) ชุดควบคุมไบโกระถินสด



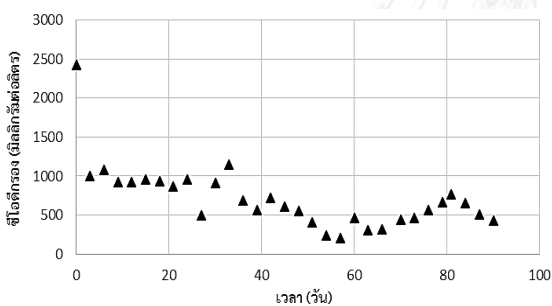
ข) ชุดควบคุมไบโกระถินปรับสภาพด้วย NaOH



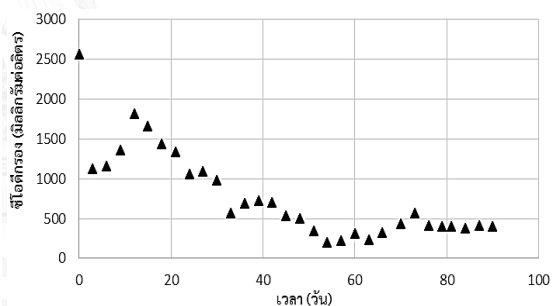
ค) ไบโกระถินสดหมักร่วมหญ้าเนเปียร์ (1:1)



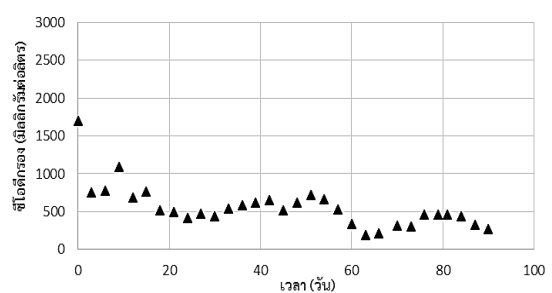
ง) ไบโกระถินปรับสภาพต่างหมักร่วมหญ้าเนเปียร์ (1:1)



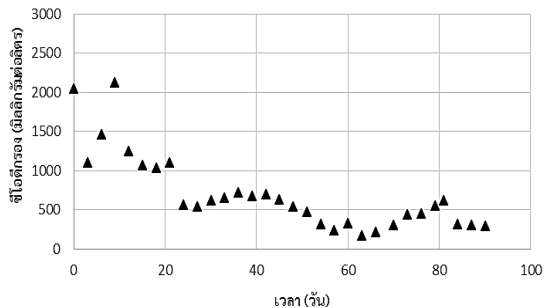
จ) ไบโกระถินสดหมักร่วมกากตะกอนเยื่อกระดาษ (1:1)



ฉ) ไบโกระถินปรับสภาพต่างหมักร่วมกากตะกอนเยื่อกระดาษ (1:1)



ช) ไบโกระถินสดหมักร่วมหญ้าเนเปียร์ (1:3)

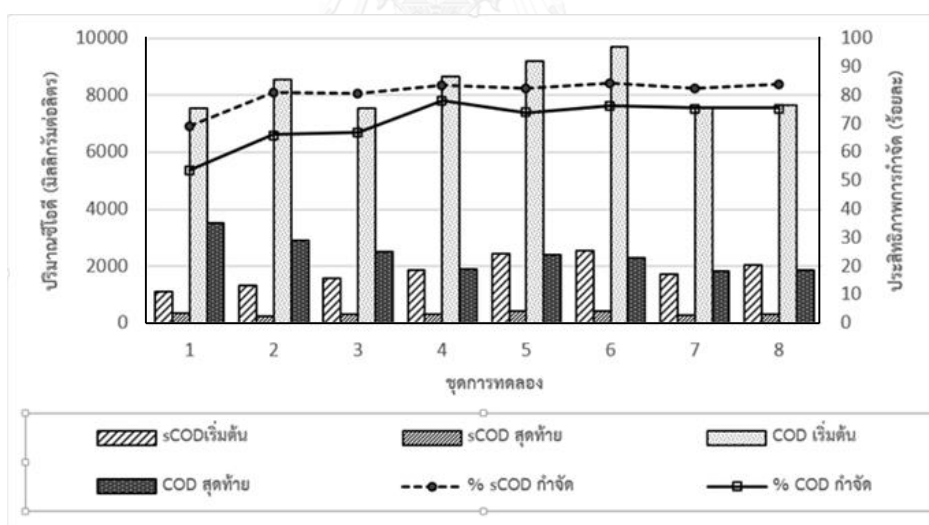


ซ) หญ้าเนเปียร์

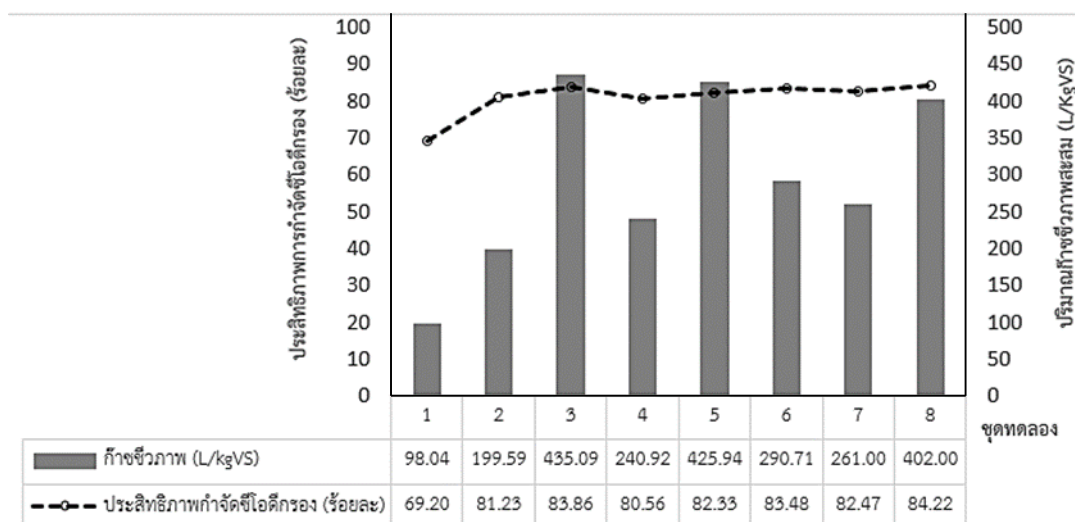
ภาพที่ 45 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดซีโอทีในแต่ละชุดการทดลอง

สิ้นสุดการทดลองเท่ากับร้อยละ 81.23 โดยในชุดทดลองที่มีการปรับสภาพจะมีค่า sCOD ในช่วงวันแรกของการทดลองสูงกว่า เนื่องจากการผลิตก๊าซชีวภาพในช่วงแรกเป็นช่วงการย่อยสลายสารอินทรีย์ (Hydrolysis) โดยเอนไซม์จากจุลินทรีย์จะย่อยสลายสารตั้งต้น ได้เป็นสารอินทรีย์ที่ไม่ซับซ้อนและละลายน้ำได้ เช่น น้ำตาลกลูโคส กรดอะมิโน และกรดไขมัน จึงทำให้ค่า sCOD สูงขึ้นจากตอนเริ่มต้น ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการปรับสภาพไบโกระถินเทพณรงค์ด้วย NaOH เป็นการเพิ่มโอกาสการเข้าทำปฏิกิริยาย่อยสลายโดยเอนไซม์ของจุลินทรีย์กับไบโกระถิน จึงสามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ได้มากขึ้น ปริมาณ sCOD จึงสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับชุดทดลองที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ ผลการทดลองการวิเคราะห์ sCOD แสดงดังภาพที่ 45

ชุดการทดลองหมักไบโกระถินปรับสภาพด้วย NaOH ร่วมกับกากตะกอนเยื่อกระดาษ (1:1) มีประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีกรองสูงสุดเท่ากับร้อยละ 84.22 รองลงมาคือชุดการทดลองหมักหญ้าเนเปียร์ มีประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีกรองร้อยละ 83.86 ซึ่งประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีจะมีแนวโน้มสอดคล้องกับประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ



ภาพที่ 46 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีและซีโอดีกรอง



ภาพที่ 47 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีกรองและปริมาณก๊าซชีวภาพ

หมายเหตุ ชุดที่ 1 ชุดควบคุม ไบโกระถินเทพณรงค์สด (ไม่ผ่านการปรับสภาพ)

ชุดที่ 2 ชุดควบคุม ไบโกระถินเทพณรงค์ที่ผ่านการปรับสภาพด้วย NaOH ร้อยละ 3 เป็นเวลา 48 ชั่วโมง (ไบโกระถินที่ผ่านการปรับสภาพ)

ชุดที่ 3 หล้าเนเปียร์

ชุดที่ 4 ไบโกระถินเทพณรงค์สด หมักร่วมกับหล้าเนเปียร์ อัตราส่วน (1:1)

ชุดที่ 5 ไบโกระถินเทพณรงค์สด หมักร่วมกับหล้าเนเปียร์ อัตราส่วน (1:3)

ชุดที่ 6 ไบโกระถินเทพณรงค์ ผ่านการปรับสภาพด้วย NaOH ร้อยละ 3 เป็นเวลา 48 ชั่วโมง หมักร่วมกับหล้าเนเปียร์ อัตราส่วน (1:1)

ชุดที่ 7 ไบโกระถินเทพณรงค์สด หมักร่วมกับกากตะกอนเยื่อกระดาษอัตราส่วน (1:1)

ชุดที่ 8 ไบโกระถินเทพณรงค์ ผ่านการปรับสภาพด้วย NaOH ร้อยละ 3 เป็นเวลา 48 ชั่วโมง หมักร่วมกับกากตะกอนเยื่อกระดาษอัตราส่วน (1:1)

เมื่อเปรียบเทียบผลการผลิตก๊าซชีวภาพและประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีกรอง แสดงดังภาพที่ 47 พบว่า ให้ผลการทดลองไปในแนวเดียวกัน คือชุดที่มีการผลิตก๊าซชีวภาพสูง มีประสิทธิภาพการกำจัดสูงเช่นกัน

4.5.4 สภาวะการทำงานของระบบ

ระบบผลิตก๊าซชีวภาพ อาศัยการทำงานของจุลชีพ 2 กลุ่ม คือ กลุ่มแบคทีเรียสร้างกรด (Acid forming bacteria) และแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทน (Methanogenic bacteria) โดยแบคทีเรียทั้ง 2 กลุ่มจะทำงานต่อเนื่องกัน จึงจำเป็นต้องรักษาสภาพแวดล้อมให้เหมาะสมกับการเจริญร่วมกันของแบคทีเรีย

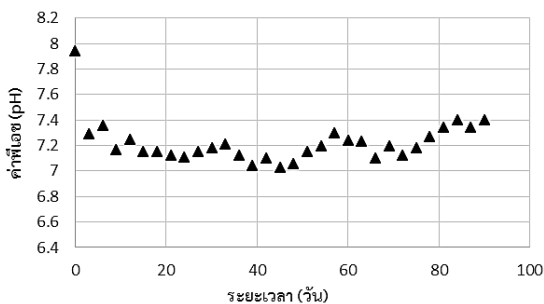
1) พีเอช และอุณหภูมิ

การทดลองนี้เดินระบบผลิตก๊าซชีวภาพที่อุณหภูมิห้อง (30 – 35 °ซ) และปรับพีเอชเริ่มต้นในแต่ละชุดการทดลองให้มีค่าอยู่ประมาณ 7.5 – 8 เพื่อรักษาสมดุลพีเอชไม่ให้ต่ำลงเมื่อเกิดการผลิตกรดไขมันระเหยในช่วงแรก จากการทดลองพบว่าการผลิตก๊าซชีวภาพทุกชุดการทดลองสามารถควบคุมพีเอช และอุณหภูมิ ตลอดการทดลองให้อยู่ในช่วง 6.8 – 7.7 และ 28 – 32 องศาเซลเซียส ตามลำดับ (ตารางที่ 27 และภาพที่ 48)

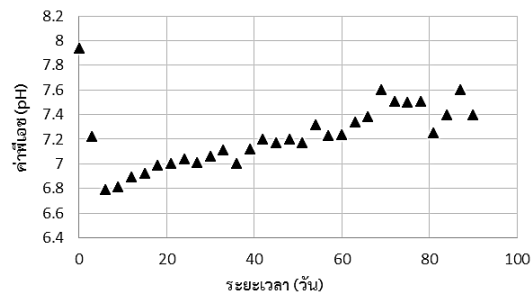
ในระบบผลิตก๊าซชีวภาพมีแบคทีเรียที่เกี่ยวข้อง 2 กลุ่ม คือ กลุ่มสร้างกรด (Acid forming bacteria) และกลุ่มสร้างก๊าซมีเทน (Methane producing bacteria) จึงต้องควบคุมพีเอชให้อยู่ในช่วง 6.5-7.8 ซึ่งเป็นช่วงพีเอชที่ทำให้แบคทีเรียทั้งสองกลุ่มเจริญเติบโตและเกิดการทำงานร่วมกันโดยประสิทธิภาพจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อพีเอชต่ำกว่า 6.2 เนื่องจากสภาวะกรดเป็นอันตรายต่อแบคทีเรียกลุ่มสร้างก๊าซมีเทน นอกจากนี้ อุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรียที่สามารถเจริญได้ที่อุณหภูมิปานกลาง (Mesophilic Bacteria) ในกระบวนการไร้อากาศ คือ 20-45 องศาเซลเซียส (สันทัต ศิริอนันต์ไพบูลย์, 2552)

ตารางที่ 27 ค่าพีเอชและอุณหภูมิในถังปฏิกรณ์ของชุดการทดลอง

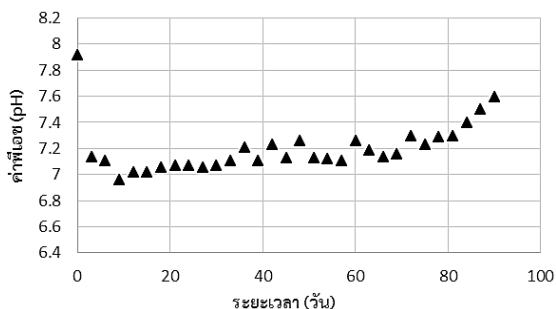
ชุดการทดลอง	พีเอช	อุณหภูมิถังปฏิกรณ์ (°ซ)
ไบโกระถินสด (ชุดควบคุม)	7.11 - 7.4	29.4 - 31.9
(ไบโกระถินไม่ผ่านการปรับสภาพ)		
ไบโกระถิน 3 % NaOH 48 ชั่วโมง	6.79 - 7.60	28.6 - 32.0
ไบโกระถินสด + หล้าเนเปียร์ (1:1)	6.96 - 7.60	28.9 - 31.9
ไบโกระถิน 3 % NaOH 48 ชั่วโมง + หล้าเนเปียร์ (1:1)	6.84 - 7.67	30.1 - 31.9
ไบโกระถินสด + ตะกอนเยื่อกระดาษ (1:1)	7.02 - 7.60	28.1 - 31.4
ไบโกระถิน 3 % NaOH 48 ชั่วโมง + ตะกอนเยื่อกระดาษ (1:1)	7.02 - 7.67	28.3 - 31.6
ไบโกระถินสด + หล้าเนเปียร์ (1:3)	6.80 - 7.51	27.5 - 31.6
หล้าเนเปียร์	6.75 - 7.68	29.0 - 31.9



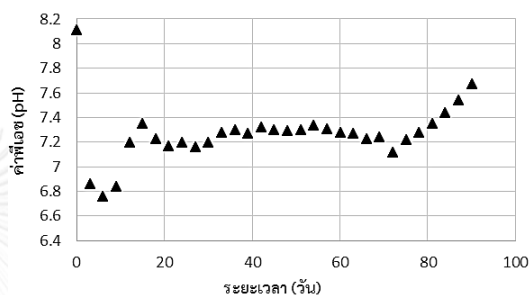
ก) ชุดควบคุมใบกระถินสด



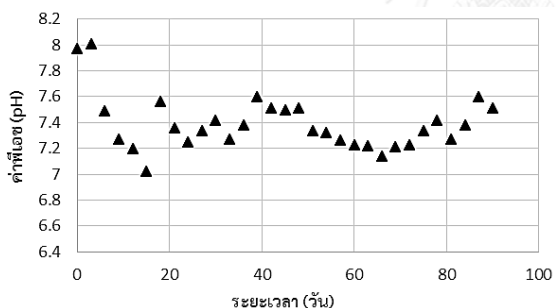
ข) ชุดควบคุมใบกระถินปรับสภาพด้วย NaOH



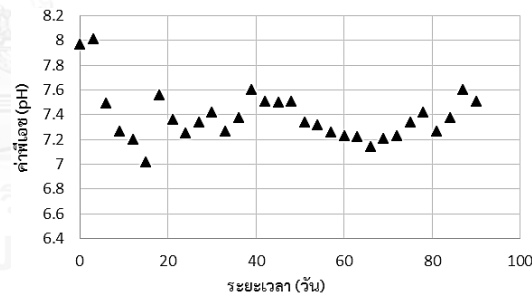
ค) ใบกระถินสดหมักร่วมกับหญ้าเนเปียร์ (1:1)



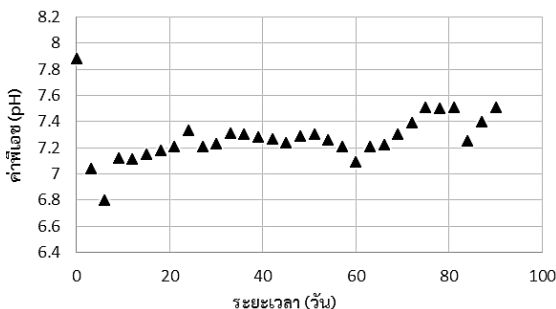
ง) ใบกระถินปรับสภาพต่างหมักร่วมกับหญ้าเนเปียร์ (1:1)



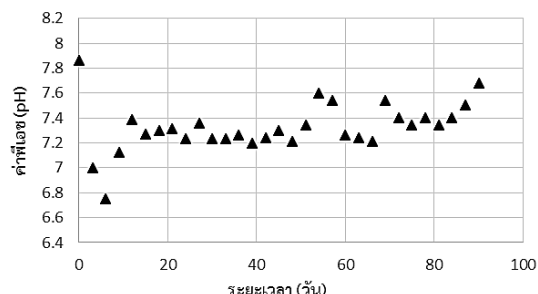
จ) ใบกระถินสดหมักร่วมกับกากตะกอนเชื้อกระดาศ (1:1)



ฉ) ใบกระถินปรับสภาพต่างหมักร่วมกับกากตะกอนเชื้อกระดาศ (1:1)



ช) ใบกระถินสดหมักร่วมกับหญ้าเนเปียร์ (1:3)



ซ) หญ้าเนเปียร์

ภาพที่ 48 ค่าพีเอชในถังปฏิกรณ์ของชุดการทดลองการหมักร่วมแบบแบดซ์

2) กรดไขมันระเหย (Volatile fatty acid)

ผลการศึกษาปริมาณกรดไขมันระเหย ในถังปฏิกรณ์ของชุดการทดลองต่างๆ ดังแสดงในภาพที่ 49 ให้ผลการทดลองดังนี้

2.1) ผลการปรับสภาพเบื้องต้น

ไบโกระถินที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ (ชุดควบคุม) มีปริมาณกรดไขมันระเหยสูงสุดในวันที่ 21 มีค่าเท่ากับ 263 มิลลิกรัมต่อลิตรอะซิติก ในขณะที่ชุดไบโกระถินปรับสภาพด้วย NaOH มีปริมาณกรดไขมันระเหยสูงสุดในวันที่ 12 การทดลองให้ผลสอดคล้องกันในชุดการหมักร่วมไบโกระถินที่ผ่านการปรับสภาพด้วย NaOH ร่วมกับหญ้าเนเปียร์ (1:1) พบว่ามีปริมาณกรดไขมันระเหยสูงสุดในวันที่ 6 ในขณะที่การหมักร่วมไบโกระถินสดร่วมกับหญ้าเนเปียร์ (1:1) มีปริมาณกรดไขมันระเหยสูงสุดในวันที่ 12 จากผลการทดลอง แสดงให้เห็นว่าการปรับสภาพเบื้องต้นไปไม้ด้วย NaOH ทำให้เอนไซม์ของจุลินทรีย์สามารถย่อยสลายไปไม้ได้เร็วกว่า ส่งผลให้แบคทีเรียที่ทำหน้าที่ผลิตกรดเปลี่ยนสารอินทรีย์โมเลกุลเล็ก ไปเป็นกรดไขมันระเหยได้เร็วกว่าชุดควบคุมที่ใช้ไบโกระถินสด (Hendriks และ Zeeman, 2009)

2.2) ผลการหมักร่วม

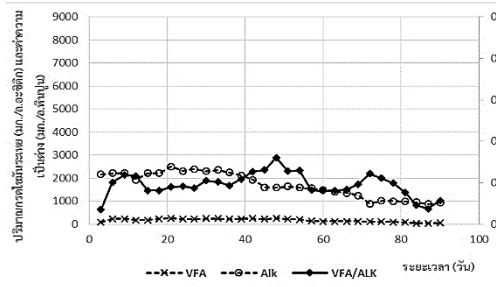
การหมักร่วมไบโกระถินสดร่วมกับหญ้าเนเปียร์ (1:1) พบว่ามีปริมาณกรดไขมันระเหยสูงสุดในวันที่ 12 มีค่าเท่ากับ 375 มิลลิกรัมต่อลิตรอะซิติก ในขณะที่การหมักไบโกระถินสดเพียงอย่างเดียว มีปริมาณกรดไขมันระเหยสูงสุดเท่ากับ 263 มิลลิกรัมต่อลิตรอะซิติก ในวันที่ 21 นอกจากนี้ การหมักร่วมไบโกระถินที่ผ่านการปรับสภาพด้วย NaOH ร่วมกับหญ้าเนเปียร์ (1:1) พบว่ามีปริมาณกรดไขมันระเหยสูงสุดในวันที่ 6 มีค่าเท่ากับ 300 มิลลิกรัมต่อลิตรอะซิติก ขณะที่การหมักไบโกระถินปรับสภาพด้วย NaOH เพียงชนิดเดียวมีปริมาณกรดไขมันระเหยสูงสุดเท่ากับ 245 ในวันที่ 12 ผลการทดลอง แสดงให้เห็นว่าการหมักร่วมสามารถผลิตกรดไขมันระเหยในปริมาณที่สูงและรวดเร็วกว่าการหมักโดยใช้สารตั้งต้นเพียงชนิดเดียว นอกจากนี้การหมักร่วมยังเป็นการเพิ่มโอกาสในการเลือกใช้สารตั้งต้น โดยจุลินทรีย์จะเลือกย่อยสลายโครงสร้างที่ใช้ง่ายกว่าก่อน จึงสามารถผลิตกรดระเหยได้เร็วกว่า สังเกตจากชุดการหมักไบโกระถินสดร่วมกับตะกอนเยื่อกระดาษ (1:1) และไบโกระถินปรับสภาพด้วย NaOH ร่วมกับกากตะกอนเยื่อกระดาษ (1:1) มีปริมาณกรดไขมันระเหยสูงสุดในวันที่ 3 และ 6 โดยมีปริมาณสูงสุดเท่ากับ 2,310 และ 2,685 มิลลิกรัมต่อลิตรอะซิติก ตามลำดับ ซึ่งมีปริมาณกรดระเหยสูงเมื่อเปรียบเทียบกับชุดทดลองที่ใช้ไบโกระถินสด และไบโกระถินที่ผ่านการปรับสภาพเพียงชนิดเดียว เนื่องจากแบคทีเรียเลือกใช้ของเหลวส่วนกากตะกอนก่อนจึงทำให้สามารถผลิต

กรดระเหยได้เร็วกว่า โดยกรดไขมันระเหยมีแนวโน้มการเพิ่มสูงขึ้นก่อนการสร้างมีเทน และลดต่ำลงในช่วงเวลาต่อมาจนสิ้นสุดการเดินระบบ

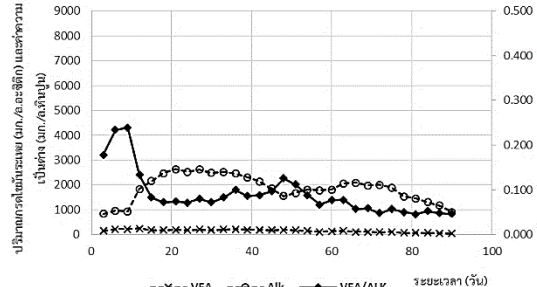
3) สภาพต่าง (Alkalinity) และอัตราส่วนกรดไขมันระเหยต่อสภาพต่าง (Volatile fatty acid / Alkalinity: VFA/ALK)

จากการศึกษาสภาพต่างทั้งหมด และอัตราส่วนระหว่างกรดไขมันระเหยต่อสภาพต่าง (VFA/ALK) ในถังปฏิกรณ์ของชุดการทดลองต่างๆ ดังแสดงในภาพที่ 49 และ ตารางที่ 28 พบว่าอัตราส่วนระหว่างกรดไขมันระเหยได้ต่อสภาพต่าง (VFA/ALK) มีค่าอยู่ในช่วง 0.03 – 0.40 ซึ่งทุกชุดการทดลองมีค่าไม่เกิน 0.4 ซึ่งเป็นสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซชีวภาพ บ่งชี้ว่าระบบมีเสถียรภาพดี นอกจากนี้ยังพบว่าระบบสามารถรักษาค่าความเป็นต่าง (Alkalinity) หรือความสามารถในการต้านการเปลี่ยนแปลงพีเอช (pH) โดยในชุดการทดลองที่มีปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยสูง จะมีค่าความเป็นต่างสูงขึ้นเช่นกัน ซึ่งหากปล่อยให้ระบบมีปริมาณกรดอินทรีย์ในปริมาณมากจนพีเอชลดต่ำลง จะส่งผลยับยั้งแบคทีเรียกลุ่มที่สร้างก๊าซมีเทน (Methane producing bacteria) โดยความเป็นต่าง (Alkalinity) ที่เหมาะสมในถังปฏิกรณ์ควรอยู่ในช่วง 1,000-3,000 มก./ล. หินปูน (Nizami และคณะ, 2009)

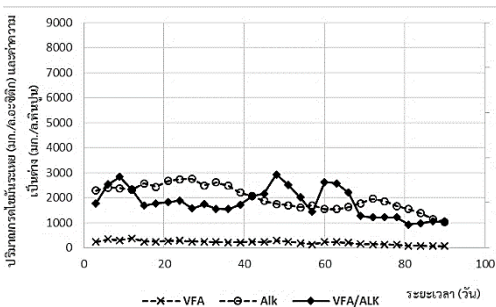




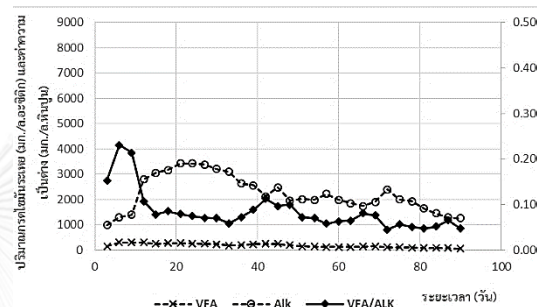
ก) ชุดควบคุมไบโกระถินสด



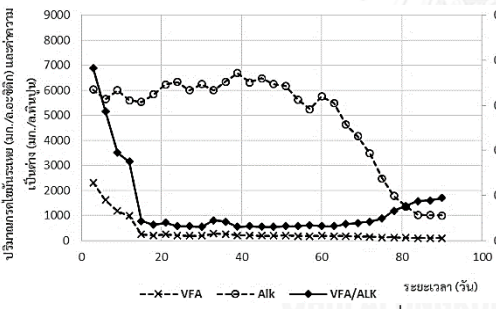
ข) ชุดควบคุมไบโกระถินปรับสภาพด้วย NaOH



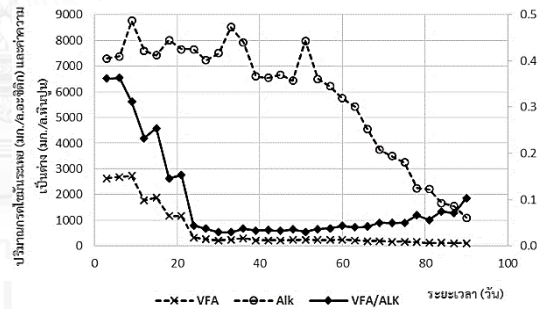
ค) ไบโกระถินสดหมักร่วมหญ้าเนเปียร์ (1:1)



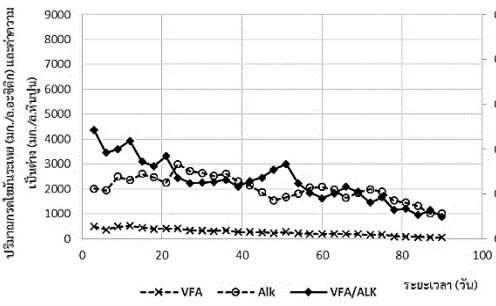
ง) ไบโกระถินปรับสภาพต่างหมักร่วมหญ้าเนเปียร์ (1:1)



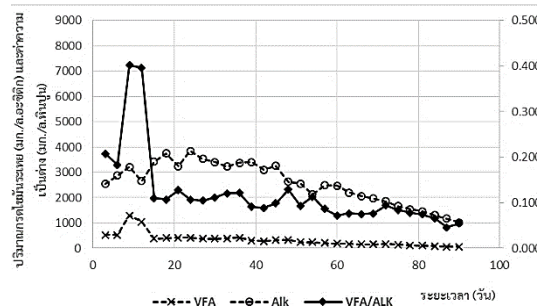
จ) ไบโกระถินสดหมักร่วมกากตะกอนเยื่อกระดาษ (1:1)



ฉ) ไบโกระถินปรับสภาพต่างหมักร่วมกากตะกอนเยื่อกระดาษ (1:1)



ช) ไบโกระถินสดหมักร่วมหญ้าเนเปียร์ (1:3)



ซ) หญ้าเนเปียร์

ภาพที่ 49 ปริมาณกรดไขมันระเหย (VFA) ค่าความเป็นด่าง (Alk) และอัตราส่วนกรดไขมันระเหยต่อค่าความเป็นด่าง (VFA/Alk)

ตารางที่ 28 สภาพต่างและอัตราส่วนระหว่างกรดไขมันระเหยได้ต่อสภาพต่างในถังปฏิกรณ์

ชุดการทดลอง	สภาพต่าง (Alk) (มก./ล. CaCO ₃)	กรดไขมันระเหย/ สภาพต่าง (VFA/Alk)
ไบโกระถินสด (ชุดควบคุม) (ไบโกระถินไม่ผ่านการปรับสภาพ)	900 - 2,400	0.03 - 0.13
ไบโกระถิน 3 % NaOH 48 ชั่วโมง	850 - 2,700	0.04 - 0.23
ไบโกระถินสด + หญ้าเนเปียร์ (1:1)	1000 - 2,800	0.05 - 0.16
ไบโกระถิน 3 % NaOH 48 ชั่วโมง + หญ้าเนเปียร์ (1:1)	950 - 3,500	0.04 - 0.23
ไบโกระถินสด + ตะกอนเยื่อกระดาษ (1:1)	950 - 6,700	0.03 - 0.40
ไบโกระถิน 3 % NaOH 48 ชั่วโมง + ตะกอนเยื่อกระดาษ (1:1)	1,000 - 8,000	0.03 - 0.37
ไบโกระถินสด + หญ้าเนเปียร์ (1:3)	1,000 - 2,800	0.04 - 0.24
หญ้าเนเปียร์	1,000 - 3,900	0.04 - 0.40

จากการเปรียบเทียบศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพของไบโกระถินเทพณรงค์ในชุดการทดลองต่างๆ (ตารางที่ 29) พบว่า การผลิตก๊าซชีวภาพจากไบโกระถินสด มีศักยภาพในการผลิตต่ำ เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่ใช้ชีวมวลอื่นๆ ในขณะที่การใช้ไบโกระถินปรับสภาพ หรือการหมักร่วมกับชีวมวลอื่นๆ สามารถเพิ่มศักยภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพ ทั้งปริมาณก๊าซชีวภาพและผลผลิตมีเทน เมื่อเปรียบเทียบกับการผลิตก๊าซชีวภาพโดยใช้สารตั้งต้นชนิดเดียวกัน จากในงานวิจัยอื่นๆ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า การปรับสภาพไบโกระถินด้วย NaOH ร้อยละ 3 เป็นเวลา 48 ชั่วโมง และการหมักร่วมกับหญ้าเนเปียร์ หรือ กากตะกอนเยื่อกระดาษ สามารถเพิ่มศักยภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพได้

ตารางที่ 29 เปรียบเทียบศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ โดยการปรับสภาพ (Pretreatment) และการหมักร่วม (Co-digestion)

งานวิจัย	สารตั้งต้น	การปรับสภาพเบื้องต้น / การหมักร่วม	ผลผลิตก๊าซชีวภาพ (L/KgVS)	
			ก๊าซชีวภาพ	มีเทน
Brown และคณะ (2012)	- ใบไม้	-	-	75.3
	- เศษใบไม้	-	-	49.3
Juntarasiri และคณะ , 2011	ใบประตู อังสนา	2 % NaOH เวลา 24 ชั่วโมง	275	-
Liew และคณะ , 2011	ใบไม้ร่วง	3.5 % NaOH		82
กนิษฐา วิมลรัตน์, 2552	กากตะกอนเยื่อกระดาษ จากเครื่องรีดตะกอน	-	91	59.14
		2 % NaOH + ความร้อน 125 °ซ	180	70.88
		เศษอาหาร (1:1)	120	84
Zainab, 2014	ก้านใบและใบต้นปาล์ม	น้ำกลั่น	59.10	36.49
		Ca(OH) ₂ 121 °ซ 20 นาที + มูลวัว	141.67	90.38
อภิวัฒน์ เจนจัดการ (2556)	หญ้าเนเปียร์ (2 % VS)	-	529	242
งานวิจัยนี้	ใบกระถินเทพนรงค์สด	-	98.04	47.84
		หญ้าเนเปียร์ (1:1)	240.92	141.42
		กากตะกอนเยื่อกระดาษ (1:1)	261	162.6
		หญ้าเนเปียร์ (1:3)	425.94	267.91
	ใบกระถินเทพนรงค์ปรับสภาพ	3% NaOH เวลา 48	199.59	116.56
		3% NaOH เวลา 48/หญ้าเนเปียร์ (1:1)	298.24	177.75
		3% NaOH เวลา 48/ กากตะกอนเยื่อกระดาษ (1:1)	402	251.65
	หญ้าเนเปียร์	-	435.09	317.62

หมายเหตุ (-) หมายถึง ไม่ได้ทำการทดลอง

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ นำไบโกระถินเทพนรงค์ซึ่งเป็นส่วนเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมผลิตเยื่อและกระดาษ มาทำให้เกิดมูลค่าเพิ่มในด้านพลังงาน โดยนำมาเป็นสารตั้งต้นในการผลิตก๊าซชีวภาพ ดังนั้นจึงทดลองหาศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากไบโกระถินและศึกษาแนวทางการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพโดยการปรับสภาพไบโกระถินเทพนรงค์ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และหมักร่วม (Co-digestion) กับชีวมวล ได้แก่ หญ้าเนเปียร์ หรือกากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียโรงงานผลิตเยื่อ-กระดาษ งานวิจัยนี้ดำเนินงานในระดับห้องปฏิบัติการ ผลการดำเนินงานวิจัยสามารถสรุปได้ดังนี้

1) ผลการศึกษาการปรับสภาพขั้นต้นโดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)

ไบโกระถินเทพนรงค์มีปริมาณของแข็งทั้งหมดร้อยละ 47.03 มีค่าของแข็งระเหยร้อยละ 95.13 ของของแข็งทั้งหมด มีปริมาณเซลลูโลสค่อนข้างต่ำเท่ากับร้อยละ 18.75 เมื่อเปรียบเทียบกับพืชพลังงานอื่นๆ มีปริมาณเฮมิเซลลูโลส และลิกนินเป็นองค์ประกอบสูงมากร้อยละ 14.26 และ 17.43 ตามลำดับ ดังนั้นจึงทดลองปรับสภาพไบโกระถินเทพนรงค์โดยใช้ NaOH เพื่อกำจัดลิกนิน

ผลการทดลองพบว่าการเพิ่มความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์และระยะเวลาในการแช่ในสารละลายมีผลต่อองค์ประกอบของไบโกระถิน โดยการปรับสภาพไบโกระถินเทพนรงค์ โดยใช้ความเข้มข้น NaOH ร้อยละ 3.62 เป็นเวลา 24 ชั่วโมง มีปริมาณลิกนินลดลงมากที่สุดเท่ากับ ร้อยละ 56.8 โดยสารละลายต่างจะไปทำลายโครงสร้างลิกนินซึ่งเป็นองค์ประกอบของผนังเซลล์พืช นอกจากนี้ลักษณะพื้นผิวไบโกระถินเทพนรงค์ที่ผ่านการปรับสภาพโดยใช้ความเข้มข้น NaOH และระยะเวลาปรับสภาพสูงขึ้น มีลักษณะแตกและยุ่ยเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ปริมาณซีโอติกรองในสารละลายเพิ่มขึ้นด้วย

2) การประเมินศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากไบโกระถินเทพนรงค์สดและไบโกระถินที่ผ่านการปรับสภาพด้วย NaOH ด้วยวิธีบีเอ็มพี (BMP)

จากผลการทดลองบีเอ็มพีระยะเวลา 60 วันพบว่าไบโกระถินสดสามารถผลิตก๊าซชีวภาพสะสมได้เท่ากับ 84.47 L/KgVSadded และสภาวะที่เหมาะสมในการปรับสภาพ คือ การแช่ไบโกระถินด้วย NaOH ร้อยละ 3 (นน./ปริมาตร) เป็นเวลา 48 ชั่วโมง สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพได้สูงสุดเท่ากับ 182.2 L/KgVSadded คิดเป็นผลผลิตก๊าซชีวภาพเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับไบโกระถินสด 1.2 เท่า นอกจากนี้ยังมีประสิทธิภาพการกำจัดซีโอติสูงสุดเท่ากับร้อยละ 75.15 นอกจากนี้

ยังพบว่าการใช้ NaOH ที่ความเข้มข้นสูงกว่า ร้อยละ 3 (นน./ปริมาตร) มีผลยับยั้งแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทน ทำให้ปริมาณก๊าซชีวภาพที่ได้น้อยลง

3) การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการปรับสภาพไบโกระถินเทพณรงค์โดยหลักการพื้นผิวตอบสนอง

ผลการวิเคราะห์เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการปรับสภาพขั้นต้นไบโกระถินเทพณรงค์ด้วย NaOH โดยอาศัยหลักการพื้นผิวตอบสนอง (RSM) พบว่าข้อมูลที่ได้จากการทดลองการผลิตก๊าซชีวภาพด้วยวิธีบีเอ็มพี มีความถูกต้องและเหมาะสมสำหรับการนำไปวิเคราะห์ ANOVA และสมการความสัมพันธ์ของปัจจัย (ความเข้มข้น NaOH และระยะเวลา) กับค่าตอบสนอง (ปริมาณก๊าซชีวภาพ) ซึ่งสมการความสัมพันธ์ที่ได้สามารถนำมาใช้ทำนายค่าผลตอบสนองหรือปริมาณก๊าซชีวภาพได้อย่างถูกต้องและเหมาะสม เมื่อใช้สมการพิจารณาอันดับของปัจจัยที่ให้ค่าตอบสนองที่มากที่สุดคือการใช้ความเข้มข้น NaOH ร้อยละ 3 ระยะเวลา 48 ชั่วโมง ให้ปริมาณก๊าซชีวภาพเท่ากับ 187.2 L/KgVSadded ซึ่งค่าจริงที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากการใช้สมการทำนายปริมาณก๊าซชีวภาพมีค่าใกล้เคียงกันเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของระดับความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และระยะเวลาที่ใช้ในการปรับสภาพ ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยมีความสัมพันธ์แบบเส้นโค้ง แสดงให้เห็นว่าการใช้ความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ และระยะเวลาในการปรับสภาพเพิ่มขึ้น ปริมาณก๊าซชีวภาพเพิ่มสูงขึ้น

ตารางที่ 30 สมการแสดงความสัมพันธ์ของปัจจัยต่อค่าตอบสนองด้วยค่าทางสถิติ

	Model Equations	R ²	Adj R ²	p-value
ปริมาณก๊าซชีวภาพ (L/KgVS)	+ 81.28 + 40.88 * NaOH Conc. + 0.645 * Reaction time+ 0.550 * NaOH Conc. * Reaction time - 10.47 * NaOH Conc. ² - 0.0142 * Reaction time ²	0.9869	0.9776	< 0.0001

4) การศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพของไบโกระถินเทพณรงค์โดยการหมักร่วมกับชีวมวลชนิดต่างๆ

การศึกษากการผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วมไบโกระถินเทพณรงค์สดและไบโกระถินที่ผ่านการปรับสภาพขั้นต้นด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่ความเข้มข้นร้อยละ 3 เป็นเวลา 48 ชั่วโมง (สภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากหลักการ RSM) โดยหมักร่วมกับหญ้าเนเปียร์หรือกากตะกอนเยื่อกระดาษ โดยใช้ถังปฏิกรณ์กวนสมบูรณ์แบบแบตช์ ระยะเวลาการหมัก 90 วัน สามารถสรุปผลได้ดังนี้

- ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากไบโกระถินที่ผ่านการปรับสภาพด้วย NaOH มีสูงกว่าไบโกระถินสดถึง 1.04 เท่า นอกจากนี้การใช้ไบโกระถินที่ปรับสภาพด้วย NaOH หมักร่วมกับหญ้าเนเปียร์หรือกากตะกอนเยื่อกระดาษก็สามารถเพิ่มประสิทธิภาพ การผลิตก๊าซชีวภาพเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ไบโกระถินสดในการหมักร่วมเช่นกัน
- การหมักร่วมไบโกระถินสดกับหญ้าเนเปียร์หรือกากตะกอนเยื่อกระดาษ มีผลช่วยเพิ่มผลผลิตก๊าซชีวภาพได้สูงขึ้นกว่าการหมักไบโกระถินอย่างเดียว การใช้ไบโกระถินต่อวัสดุหมักร่วมในอัตราส่วน 1:1 พบว่าการหมักร่วมไบโกระถินกับกากตะกอนเยื่อกระดาษให้ปริมาณก๊าซชีวภาพที่สูงกว่าการใช้หญ้าเนเปียร์เป็นวัสดุหมักร่วม
- การหมักร่วมไบโกระถินสดกับหญ้าเนเปียร์พบว่าการใช้ไบโกระถินสดต่อหญ้าเนเปียร์ในอัตราส่วน 1:3 จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตหญ้าเนเปียร์สูงขึ้น โดยให้ปริมาณก๊าซชีวภาพสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับการคำนวณ ดังนั้นการใช้ไบโกระถินเป็นสารเติมแต่ง (additive) สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพโดยทำให้สามารถใช้ทดแทนหญ้าเนเปียร์สดและลดการใช้หญ้าในการหมักได้ร้อยละ 25 โดยได้ปริมาณก๊าซชีวภาพเท่าเดิม

5.2 ข้อเสนอแนะ

ควรทดลองขยายระบบผลิตก๊าซชีวภาพเป็นการทดลองระดับโรงทดลองนาร่องและศึกษาความคุ้มค่าในการผลิตพลังงานชีวภาพจากหมักร่วมไบโกระถินและหญ้าเนเปียร์

1) เป็นที่น่าสนใจว่าทำไมการใช้ไบโกระถินเพียงเล็กน้อยสามารถเพิ่มปริมาณก๊าซชีวภาพได้ในขณะที่การใช้ไบโกระถินในอัตราส่วน 1:1 ปริมาณก๊าซชีวภาพที่ได้จากการทดลองได้ใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการคำนวณ จึงควรศึกษาว่าไบโกระถินมีองค์ประกอบหรืออนุพันธ์ใด ที่ช่วยเพิ่มให้ปริมาณก๊าซชีวภาพสูงขึ้น

2) ควรมีการศึกษาการเวียนกลับ NaOH ที่เหลือจากการปรับสภาพไบโกระถินกลับมาใช้ในการปรับสภาพครั้งต่อไป และทดลองนำส่วนน้ำดำ (Black Liquor) เป็นส่วนเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมกระดาษ ในขั้นตอนการต้มเยื่อ ซึ่งมี NaOH เป็นส่วนผสม มาใช้ในการปรับสภาพเพื่อลดค่าใช้จ่ายในการใช้สารเคมี

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

- เนตรชนก ศรีแสง. 2556. การเพิ่มผลผลิตก๊าซชีวภาพจากขาน้อยด้วยการปรับสภาพเบื้องต้นโดยการใช้กรดอะซิติก ร่วมกับการระเบิดด้วยไอน้ำ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ไกรลาศ เขียวทอง. คู่มือการปลูกหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 [ออนไลน์]. 2554. แหล่งที่มา: http://extension.dld.go.th/th1/images/stories/cattle_buff_bord/napiagrass.pdf [5 กุมภาพันธ์ 2557]
- กนิษฐา วิมลรัตน์. 2552. การผลิตก๊าซชีวภาพจากกากตะกอนน้ำเสียโรงงานผลิตกล่องกระดาษเคลือบมัน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- กรมโรงงานอุตสาหกรรม. โครงการส่งเสริมการใช้ประโยชน์กากอุตสาหกรรมและลดปริมาณกากที่ต่อฝังกลบ [ออนไลน์]. 2550. แหล่งที่มา: <http://csic.diw.go.th:82/tccdiw/index.php#3>. [2 มกราคม 2557]
- กรมโรงงานอุตสาหกรรม. แนวทางและขั้นตอนการจัดการของเสียที่มีศักยภาพ [ออนไลน์]. 2552. แหล่งที่มา: <http://csic.diw.go.th:82/tccdiw/ref/downloadDocument/final%20report/chapter5.pdf>. [2 มกราคม 2557]
- กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. สถานการณ์พลังงานของประเทศไทย [ออนไลน์]. 2556. แหล่งที่มา: http://www.dede.go.th/dede/images/stories/stat_dede/sit_56/sit_aug.pdf. [10 มกราคม 2557]
- กัลยาณี เต็งพงศธร. พื้นที่ผิวผลตอบ [ออนไลน์]. 2554. แหล่งที่มา: <http://www.kmitl.ac.th/~skallay/pdf/RSMCCD%28BSC%29.pdf>. [25 ธันวาคม 2556]
- ชนกพร วงษ์วัน. 2555. การผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วมของต้นข้าวโพดที่ปรับสภาพเบื้องต้นร่วมกับของเสียกลีเซอรอล. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม (สหสาขาวิชา) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ฐิติมา คำไชยใหญ่. การปรับสภาพต้นข้าวโพดด้วยไอน้ำ และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เพื่อผลิตเอทานอล [ออนไลน์]. 2554. แหล่งที่มา: <http://www.chem.eng.psu.ac.th/tiche2011/TCHE/data/paper/thai/tee/oral/tee016.pdf>. [27 ธันวาคม 2556]
- ณัฐกาญจน์ ชราพก. 2555. การผลิตก๊าซชีวภาพจากหญ้าในระบบหมักไร้อากาศแบบขั้นตอนเดียว. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

- ทงศักดิ์ วัฒนา. เทคโนโลยีการผลิตพลังงานจากน้ำเสีย และการนำก๊าซชีวภาพไปใช้ประโยชน์ในปัจจุบัน [ออนไลน์]. 2555. แหล่งที่มา: <http://www.thailandindustry.com/guru/view.php?id=18252§ion=9>. [23 ธันวาคม 2556]
- ทวิพันธ์ สเลอาด. 2554. ผลของเวลาการกวนและการเวียนตะกอนต่อการผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษอาหารโดยระบบหมักไร้อากาศแบบแห้งในขนาดใช้งานจริง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม (สหสาขาวิชา) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ธิภาพร ศิริบุญกุลวัฒนา. 2555. การบำบัดน้ำเสียซีโอไซด์ด้วยระบบแอนแอโรบิกฟลูอิดไดซ์เบดที่ใช้เม็ดยางเป็นวัสดุตัวกลางโดยไม่มีการหมุนเวียนน้ำภายใน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- นงลักษณ์ สุวรรณพินิจ และ ปรีชา สุวรรณพินิจ. (2548). จุลชีววิทยาทั่วไป. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา และ พงศ์ชนัน เหลืองไพบูลย์. (2551). การออกแบบและการวิเคราะห์การทดลอง. สำนักพิมพ์ท็อป จำกัด.
- วิรงรอง กาญจนะ. 2556. การเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากเนเปียร์โดยการหมักร่วมหรือการปรับสภาพเบื้องต้น. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สถาบันวิจัยด้านพลังงานประเทศญี่ปุ่น. คู่มือสารชีวมวลเอเชีย: แนวทางสำหรับการผลิตและการใช้สารชีวมวล [ออนไลน์]. 2552. แหล่งที่มา: http://www.jie.or.jp/biomass/AsiaBiomassHandbook/Thai/All_T.pdf. [17 ตุลาคม 2556]
- สันหัต ศิริอนันต์ไพบูลย์. (2552). การเลือกใช้ การออกแบบ การควบคุม และการแก้ไขปัญหา (พิมพ์ครั้งที่ 1.). กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์ท็อป.
- สาวิตรี พิสุทธ์พิเชษฐ์. โครงการศึกษาศักยภาพไม้กระถิน เพื่อการผลิตเยื่อกระดาษในประเทศไทย [ออนไลน์]. 2548. แหล่งที่มา: <http://www.ku.ac.th/e-magazine/nov48/agri/three.htm> [7 มกราคม 2557]
- สำนักวิชาการพลังงานภาค 4. การนำก๊าซชีวภาพไปใช้ประโยชน์ [ออนไลน์]. 2553. แหล่งที่มา: http://www.area3.energy.go.th/pdf/biogas_03.pdf [10 มกราคม 2557]
- สุขใจ ชูจันทร์. (2554). การผลิตกรดอินทรีย์จากวัสดุเหลือใช้มูลชีวภาพ (พิมพ์ครั้งที่ 1). กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

- สุพินดา ชูระเจน. 2544. การเพิ่มผลผลิตก๊าซมีเทนจากการหมักเศษผักและผลไม้ไร้อากาศแบบแห้งที่มีการหมุนเวียนน้ำชะขยะ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, สาขาวิชาเทคโนโลยี สิ่งแวดล้อม คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- สุวดี นำพาเจริญ และ ชลธิชา จำรัสพร. ความเชื่อถือได้และความอยู่รอด: หลักสำคัญของสมรรถภาพของผลิตภัณฑ์ [ออนไลน์]. 2557. แหล่งที่มา: <http://www.tpa.or.th/nitctool/writer.php?bookID=3096&pageid=1&read=true&count=true>. [2 มกราคม 2558]
- อภิวัฒน์ เจนจัดการ. 2556. การผลิตก๊าซชีวภาพจากหญ้าเนเปียร์ด้วยระบบถังหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- อรรวรรณ วัฒนยมนาพร. 2553. การหมักร่วมของขยะเศษอาหารกับกากตะกอนน้ำเสียชุมชนโดยใช้ถังหมักไร้อากาศแบบสองขั้นตอนสำหรับผลิตก๊าซชีวภาพ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม (สหสาขาวิชา) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- อรุณี ศุภสินสาธิต. พลังงานจากชีวมวลที่มีลิกโนเซลลูโลสสูง [ออนไลน์]. 2555. แหล่งที่มา: <http://www.eric.chula.ac.th/journal/ej/v16y2555/no2/article6.pdf> [10 ธันวาคม 2556]
- อังคณา ทองคำ. 2552. การผลิตโซลิตอลจากผลพลอยได้อุตสาหกรรมโดยการหมัก. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, สาขาวิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- อาริยา วีรชวรกุล. 2546. การผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษอาหารโดยกระบวนการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, สาขาวิชาจุลชีววิทยา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ภาษาอังกฤษ

- Ahn, H. K., Smith, M., Kondrad, S., and White, J. 2010. Evaluation of biogas production potential by dry anaerobic digestion of switchgrass–animal manure mixtures. Applied biochemistry and biotechnology. 160(4): 965-975.
- Badshah, M., Lam, D. M., Liu, J., and Mattiasson, B. 2012. Use of an automatic methane potential test system for evaluating the biomethane potential of sugarcane bagasse after different treatments. Bioresource technology. 114: 262-269.
- Bengelsdorf, F. R., Straub, M., and Dürre, P. 2013. Bacterial synthesis gas (syngas) fermentation. Environmental technology. 34(13-14): 1639-1651.
- Brown, D., Shi, J., and Li, Y. 2012. Comparison of solid-state to liquid anaerobic digestion of lignocellulosic feedstocks for biogas production. Bioresource technology. 124: 379-386.
- Chang, V. S., Kaar, W. E., Burr, B., and Holtzapple, M. T. 2001. Simultaneous saccharification and fermentation of lime-treated biomass. Biotechnology Letters. 23(16): 1327-1333.
- Chen, G., Zheng, Z., Yang, S., Fang, C., Zou, X., and Zhang, J. 2010. Improving conversion of *Spartina alterniflora* into biogas by co-digestion with cow feces. Fuel Processing Technology. 91(11): 1416-1421.
- Demirbas, A., and Ozturk, T. 2005. Anaerobic digestion of agricultural solid residues. International journal of green energy. 1(4): 483-494.
- El-Mashad, H. M., and Zhang, R. 2010. Biogas production from co-digestion of dairy manure and food waste. Bioresource technology. 101(11): 4021-4028.
- Elango, D., Pulikesi, M., Baskaralingam, P., Ramamurthi, V., and Sivanesan, S. 2007. Production of biogas from municipal solid waste with domestic sewage. Journal of hazardous materials. 141(1): 301-304.
- Fountoulakis, M., and Manios, T. 2009. Enhanced methane and hydrogen production from municipal solid waste and agro-industrial by-products co-digested with crude glycerol. Bioresource technology. 100(12): 3043-3047.

- Geotech. BIOGAS 5000 Gas Analyser Operating Manual. [online]. 2014. Available from: http://www.geotechuk.com/media/133315/biogas_5000_operating_manual.pdf [4 July 2015]
- Gomez-Tovar, F., Celis, L. B., Razo-Flores, E., and Alatrliste-Mondragón, F. 2012. Chemical and enzymatic sequential pretreatment of oat straw for methane production. Bioresource technology. 116: 372-378.
- Guwy, A. 2004. Equipment used for testing anaerobic biodegradability and activity. Re/Views in Environmental Science & Bio/Technology. 3(2): 131-139.
- Hendriks, A., and Zeeman, G. 2009. Pretreatments to enhance the digestibility of lignocellulosic biomass. Bioresource technology. 100(1): 10-18.
- Juntarasiri, P., Nijsunkij, S., Buatick, T., Jamkrajang, E., Wacharawichanant, S., Seadan, M., Wasantakorn, A., and Suttiruengwong, S. 2011. Enhancing biogas production from padauk angšana leave and wastewater feedstock through alkaline and enzyme pretreatment. Energy Procedia. 9: 207-215.
- Klimiuk, E., Pokoj, T., Budzynski, W., and Dubis, B. 2010. Theoretical and observed biogas production from plant biomass of different fibre contents. Bioresource technology. 101(24): 9527-9535.
- Koch, K., Wichern, M., Lübken, M., and Horn, H. 2009. Mono fermentation of grass silage by means of loop reactors. Bioresource technology. 100(23): 5934-5940.
- Kumar, K. V., Sridevi, V., Rani, K., Sakunthala, M., and Kumar, C. S. 2013. A review on production of biogas, fundamentals, applications & its recent enhancing techniques.
- Kymäläinen, M., Lähde, K., Arnold, M., Kurolo, J., Romantschuk, M., and Kautola, H. 2012. Biogasification of biowaste and sewage sludge—Measurement of biogas quality. Journal of environmental management. 95: S122-S127.
- Lagerkvist, A., and Morgan-Sagastume, F. 2012. The effects of substrate pre-treatment on anaerobic digestion systems: a review. Waste Management. 32(9): 1634-1650.
- Lei, Z., Chen, J., Zhang, Z., and Sugiura, N. 2010. Methane production from rice straw with acclimated anaerobic sludge: Effect of phosphate supplementation. Bioresource Technology. 101(12): 4343-4348.

- Lianhua, L., Dong, L., Yongming, S., Longlong, M., Zhenhong, Y., and Xiaoying, K. 2010. Effect of temperature and solid concentration on anaerobic digestion of rice straw in South China. International Journal of Hydrogen Energy. 35(13): 7261-7266.
- Liew, L. N., Shi, J., and Li, Y. 2011. Enhancing the solid-state anaerobic digestion of fallen leaves through simultaneous alkaline treatment. Bioresource technology. 102(19): 8828-8834.
- Lin, Y., Wang, D., Li, Q., and Xiao, M. 2011. Mesophilic batch anaerobic co-digestion of pulp and paper sludge and monosodium glutamate waste liquor for methane production in a bench-scale digester. Bioresource technology. 102(4): 3673-3678.
- Lin, Y., Wu, S., and Wang, D. 2013. Hydrogen-methane production from pulp & paper sludge and food waste by mesophilic-thermophilic anaerobic co-digestion. International Journal of Hydrogen Energy. 38(35): 15055-15062.
- Lu, S.-g., Tsuyoshi, I., Ukita, M., and Sekine, M. 2007. Start-up performances of dry anaerobic mesophilic and thermophilic digestions of organic solid wastes. Journal of environmental Sciences. 19(4): 416-420.
- Macias-Corral, M., Samani, Z., Hanson, A., Smith, G., Funk, P., Yu, H., and Longworth, J. 2008. Anaerobic digestion of municipal solid waste and agricultural waste and the effect of co-digestion with dairy cow manure. Bioresource Technology. 99(17): 8288-8293.
- Mähnert, P., Heiermann, M., and Linke, B. 2005. Batch-and semi-continuous biogas production from different grass species. Agricultural Engineering International: CIGR Journal.
- Michalska, K., Bizukojć, M., and Ledakowicz, S. 2015. Pretreatment of energy crops with sodium hydroxide and cellulolytic enzymes to increase biogas production. Biomass and Bioenergy. 80: 213-221.
- Mussoline, W., Esposito, G., Lens, P., Spagni, A., and Giordano, A. 2013. Enhanced methane production from rice straw co-digested with anaerobic sludge from pulp and paper mill treatment process. Bioresource technology. 148: 135-143.

- Nizami, 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(22): 8496-8508.
- Owen, W., Stuckey, D., Healy, J., Young, L., and McCarty, P. 1979. Bioassay for monitoring biochemical methane potential and anaerobic toxicity. Water research. 13(6): 485-492.
- Parameswaran, P., and Rittmann, B. E. 2012. Feasibility of anaerobic co-digestion of pig waste and paper sludge. Bioresource technology. 124: 163-168.
- Priadi, C., Wulandari, D., Rahmatika, I., and Moersidik, S. S. 2014. Biogas Production in the Anaerobic Digestion of Paper Sludge. APCBEE Procedia. 9: 65-69.
- Qi, B., Aldrich, C., Lorenzen, L., and Wolfaardt, G. 2005. Acidogenic fermentation of lignocellulosic substrate with activated sludge. Chemical Engineering Communications. 192(9): 1221-1242.
- Ratanakhanokchai, K., Waeonukul, R., Pason, P., Aachaapaikoon, C., Kyu, K. L., Sakka, K., Kosugi, A., and Mori, Y. 2013. Paenibacillus curdlanolyticus strain B-6 multienzyme complex: A novel system for biomass utilization. Biomass Now: Cultivation and Utilization.
- Redding, A. P., Wang, Z., Keshwani, D. R., and Cheng, J. J. 2011. High temperature dilute acid pretreatment of coastal Bermuda grass for enzymatic hydrolysis. Bioresource technology. 102(2): 1415-1424.
- Rollini, M., Sambusiti, C., Musatti, A., Ficara, E., Retinò, I., and Malpei, F. 2014. Comparative performance of enzymatic and combined alkaline-enzymatic pretreatments on methane production from ensiled sorghum forage. Bioprocess and biosystems engineering. 37(12): 2587-2595.
- Romano, R. T., and Zhang, R. 2008. Co-digestion of onion juice and wastewater sludge using an anaerobic mixed biofilm reactor. Bioresource technology. 99(3): 631-637.
- Sambusiti, C., Monlau, F., Ficara, E., Carrère, H., and Malpei, F. 2013. A comparison of different pre-treatments to increase methane production from two agricultural substrates. Applied Energy. 104: 62-70.

- Seppala, M., Paavola, T., Lehtomaki, A., Pakarinen, O., and Rintala, J. 2008. Biogas from energy crops-optimal pre-treatments and storage, co-digestion and energy balance in boreal conditions.
- Söderström, J., Pilcher, L., Galbe, M., and Zacchi, G. 2002. Two-step steam pretreatment of softwood with SO₂ impregnation for ethanol production. Applied biochemistry and biotechnology. 98(1-9): 5-21.
- Sun, Y., and Cheng, J. 2002. Hydrolysis of lignocellulosic materials for ethanol production: a review. Bioresource technology. 83(1): 1-11.
- 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.
- Teghammar, A., Karimi, K., Horváth, I. S., and Taherzadeh, M. J. 2012. Enhanced biogas production from rice straw, triticale straw and softwood spruce by NMMO pretreatment. Biomass and Bioenergy. 36: 116-120.
- Teixeira, L. C., Linden, J. C., and Schroeder, H. A. 1999. Alkaline and peracetic acid pretreatments of biomass for ethanol production. Applied Biochemistry and biotechnology. 77(1-3): 19-34.
- Van Bueren, M. (2004). Acacia hybrids in Vietnam: Australian Centre for International Agricultural Research.
- Xie, S., Frost, J., Lawlor, P., Wu, G., and Zhan, X. 2011. Effects of thermo-chemical pretreatment of grass silage on methane production by anaerobic digestion. Bioresource technology. 102(19): 8748-8755.
- 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.
- Zainab, Z., Ismail, A., and Raad, T. 2014. Assessment of anaerobic co-digestion of agro wastes for biogas recovery: A bench scale application to date palm wastes. ENERGY AND ENVIRONMENT. 5(5): 591-600.
- Zheng, M., Li, X., Li, L., Yang, X., and He, Y. 2009. Enhancing anaerobic biogasification of corn stover through wet state NaOH pretreatment. Bioresource Technology. 100(21): 5140-5145.

- 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.
- Zhong, W., Zhang, Z., Qiao, W., Fu, P., and Liu, M. 2013. Comparison of Chemical and Biological Pretreatment of Corn Straw for Biogas Production by Anaerobic Digestion (Retraction of vol 36, pg 1875, 2011). Renewable Energy. 51: 518-518.
- Zuorro, A., Fidaleo, M., and Lavecchia, R. 2013. Response surface methodology (RSM) analysis of photodegradation of sulfonated diazo dye Reactive Green 19 by UV/H₂O₂ process. Journal of environmental management. 127: 28-35.



ภาคผนวก ก

วิธีการคำนวณ

1. การคำนวณประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพตามอัตราส่วนผสมชีวมวล

1.1 จากการทดลองผลิตก๊าซชีวภาพจากใบกระถินเทพนรงค์สดเพียงชนิดเดียว

ให้ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมเท่ากับ 6,000 มิลลิลิตร

น้ำหนักของแข็งระเหย เท่ากับ 61.2 กรัมของแข็งระเหย

1.2 จากการทดลองผลิตก๊าซชีวภาพจากหญ้าเนเปียร์เพียงชนิดเดียว

ให้ปริมาณก๊าซชีวภาพเท่ากับ 26,040 มิลลิลิตร

น้ำหนักของแข็งระเหย เท่ากับ 59.85 กรัมของแข็งระเหย

ดังนั้น การหมักใบกระถินสดร่วมกับหญ้าเนเปียร์ ในอัตราส่วน 1:1 ปริมาณก๊าซชีวภาพที่ได้จากการคำนวณ เท่ากับ

$$\frac{6,000 + 26,040 \text{ มิลลิลิตร (ml)}}{61.2 + 59.85 \text{ กรัมของแข็งระเหย (gVS)}} = 0.265 \text{ ลิตรต่อกรัมของแข็งระเหย (L/gVS)}$$

เนื่องจากปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมที่ได้จากการทดลองการหมักใบกระถินสดร่วมกับหญ้าเนเปียร์ ในอัตราส่วน 1:1 เท่ากับ 0.237 L/gVS ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกัน การหมักร่วมโดยใช้อัตราส่วน 1:1 จึงไม่สามารถเพิ่มปริมาณก๊าซชีวภาพได้

การหมักใบกระถินสดร่วมกับหญ้าเนเปียร์ ในอัตราส่วน 1:3 ปริมาณก๊าซชีวภาพที่ได้จากการคำนวณ เท่ากับ

$$\frac{6,000 + 78,120 \text{ มิลลิลิตร (ml)}}{61.2 + 179.55 \text{ กรัมของแข็งระเหย (gVS)}} = 0.349 \text{ ลิตรต่อกรัมของแข็งระเหย (L/gVS)}$$

ในขณะที่ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมที่ได้จากการทดลองการหมักใบกระถินสดร่วมกับหญ้าเนเปียร์ ในอัตราส่วน 1:3 เท่ากับ 0.426 L/gVS ดังนั้น จากการทดลองหมักร่วมโดยใช้อัตราส่วน 1:3 จึงสามารถเพิ่มปริมาณก๊าซชีวภาพได้

ภาคผนวก ข วิธีการวิเคราะห์

1. หาปริมาณองค์ประกอบมวลชีวภาพ (P.J. Van Soest, 1960)

1.1 วิธีวิเคราะห์หา Neutral Detergent Fiber (NDF)

1.1.1 นำครุชิวเบล ขนาด 50 มิลลิลิตร ซึ่งผ่านการอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง มาชั่งน้ำหนักแล้วบันทึกค่า

1.1.2 ชั่งตัวอย่างใบกระถินแห้งมา 1 กรัม ใส่ขวดย่อยขนาด 500 มิลลิลิตร เติมน้ำสารละลาย NDF ปริมาตร 100 มิลลิลิตร นำไปย่อยเป็นเวลา 60 นาที

1.1.3 นำตัวอย่างมาล้างในครุชิวเบลที่ชั่งน้ำหนักแล้วข้างต้น และต่อกับเครื่องดูดสุญญากาศ ล้างด้วยน้ำร้อนจนกระทั่งตัวอย่างทั้งหมดอยู่ในครุชิวเบล หรือจนกว่าฟองจะหมด

1.1.4 จากนั้นล้างตัวอย่างด้วยอะซิโตน 3-5 ครั้ง หรือจนกระทั่งน้ำล้างไม่มีสี

1.1.5 นำครุชิวเบลที่มีตัวอย่าง ไปอบในตู้อบแห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง หรือตลอดคืน

1.1.6 นำครุชิวเบลที่มีตัวอย่างออกจากตู้อบแห้งเอาใส่ในโถดูดความชื้นปล่อยให้เย็น แล้วชั่งน้ำหนัก เพื่อคำนวณหาค่า ร้อยละ NDF

1.1.7 นำครุชิวเบลเผาในเตาเผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส นาน 2 ชั่วโมง เอาออกใส่ในโถดูดความชื้น ปล่อยให้เย็น ชั่งน้ำหนักหาค่า

วิธีการคำนวณ

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

เมื่อ W1 คือ น้ำหนักครุชิวเบล + น้ำหนักตัวอย่าง

W2 คือ น้ำหนักครุชิวเบล

W3 คือ น้ำหนักตัวอย่าง

ร้อยละ Acid insoluble ash คือ ร้อยละเถ้าที่ได้จากขั้นตอนการเผาในการวิเคราะห์หา

ลิกนิน

1.2 การวิเคราะห์หา acid detergent fiber (ADF)

1.2.1 นำครุชิวเบิล ขนาด 50 มิลลิลิตร ที่แห้งและเย็นจากโถดูดความชื้น โดยผ่านการอบมาแล้วที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง มาชั่งน้ำหนักแล้วบันทึกค่า

1.2.2 ชั่งตัวอย่างใบกระถินแห้งมา 1 กรัม ใส่ขวดย่อยขนาด 500 มิลลิลิตร เติมน้ำสารละลาย ADF ปริมาตร 100 มิลลิลิตร นำไปย่อยเป็นเวลา 60 นาที

1.2.3 ล้างตัวอย่างในครุชิวเบิลที่ชั่งน้ำหนักแล้วและต่อกับเครื่องดูดสุญญากาศ ล้างด้วยน้ำร้อนจนกระทั่งตัวอย่างทั้งหมดอยู่ในครุชิวเบิล หรือจนกว่าฟองหมด

1.2.4 จากนั้นล้างตัวอย่างด้วยอะซิโตนประมาณ 3-5 ครั้ง หรือจนกระทั่งน้ำล้างตัวอย่างไม่มีสี

1.2.5 ครุชิวเบิลที่มีตัวอย่าง ไปอบในตู้อบแห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง หรือตลอดคืน

1.2.6 นำครุชิวเบิลที่มีตัวอย่างออกจากตู้อบแห้งเอาใส่ในโถดูดความชื้นปล่อยให้เย็น แล้วชั่งน้ำหนัก เพื่อคำนวณหาค่า ร้อยละ NDF

1.2.7 นำครุชิวเบิลเผาในเตาเผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส นาน 2 ชั่วโมง เอาออกใส่ในโถดูดความชื้น ปล่อยให้เย็น ชั่งน้ำหนักหาค่า

วิธีการคำนวณ

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

เมื่อ W1 คือ น้ำหนักครุชิวเบิล + น้ำหนักตัวอย่าง

W2 คือ น้ำหนักครุชิวเบิล

W3 คือ น้ำหนักตัวอย่าง

ร้อยละ Acid insoluble ash คือร้อยละเถ้าที่ได้จากขั้นตอนการเผาในการวิเคราะห์หาลิกนิน

วิธีคำนวณปริมาณเฮมิเซลลูโลส

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

1.3 วิเคราะห์หา Acid Detergent Lignin (ADL)

1.3.1 นำครุชชีเบลที่มีตัวอย่างจากการวิเคราะห์หา ADF แล้วมาเติมสารละลาย ADL 30 มิลลิลิตร จากนั้นนำไปวางลงในภาตสแตนเลส ใช้แท่งแก้วคนให้ทั่วเพื่อให้ตัวอย่างแยกจากกันไม่จับกันเป็นก้อน ควบคุมอุณหภูมิของครุชชีเบลในภาตสแตนเลสที่ 20 องศาเซลเซียส

1.3.2 เติมสารละลาย ADL เมื่อสารละลายในครุชชีเบลแห้ง คนเป็นระยะๆ ใช้เวลาช้อยนาน 3 ชั่วโมง

1.3.3 ล้างสารละลายกรดออกจากตัวอย่างที่อยู่ในครุชชีเบลที่ต่อกับเครื่องดูดสุญญากาศ ล้างด้วยน้ำร้อนจนหมดกรด หรือประมาณ 1,000 มิลลิลิตร

1.3.4 นำครุชชีเบลที่มีตัวอย่าง ไปอบในตู้อบแห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง หรือตลอดคืน ใส่ในโถดูดความชื้น ปล่อยให้เย็น ชั่งน้ำหนัก

วิธีการคำนวณ

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

เมื่อ W1 คือ น้ำหนักครุชชีเบล + น้ำหนักตัวอย่างจากการวิเคราะห์ ADF

W3 คือ น้ำหนักตัวอย่าง

W4 คือ น้ำหนักครุชชีเบล + น้ำหนักตัวอย่างจากที่อบ

1.4 วิเคราะห์หาลิกนิน

1.4.1 นำครุชชีเบลที่มีตัวอย่างซึ่งวิเคราะห์หาเซลลูโลสไปเผาในเตาเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส นาน 2 ชั่วโมง

1.4.2 เอาออกใส่ในโถดูดความชื้น ปล่อยให้เย็น ชั่งน้ำหนัก

วิธีคำนวณ

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

เมื่อ W4 = น้ำหนักครุชชีเบล + น้ำหนักตัวอย่างหลังที่อบ

W5 = น้ำหนักครุชชีเบล + น้ำหนักตัวอย่างหลังการวิเคราะห์เซลลูโลส

W3 = น้ำหนักตัวอย่าง

ภาคผนวก ค
ผลการวิเคราะห์ ANOVA

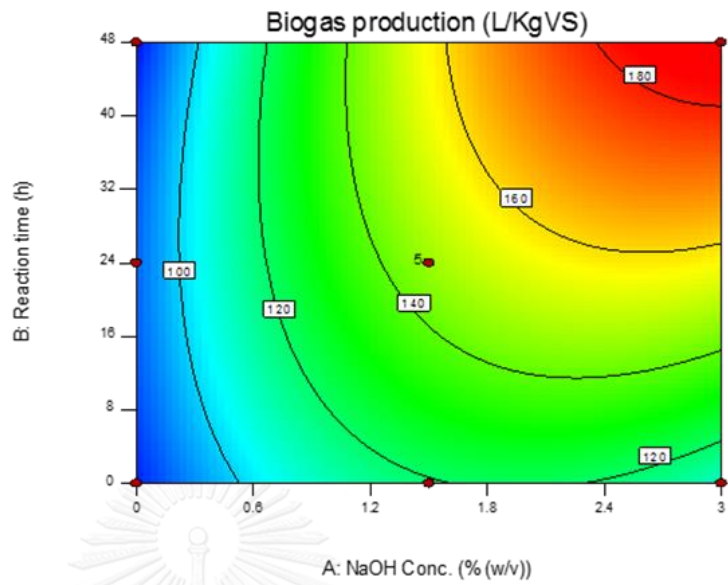
ตารางที่ ค - 1 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของตัวแปรต่อปริมาณก๊าซชีวภาพ

Source	Sum of Squares (SS)	df	Mean Square	F - Value	p-value Prob > F
Model	12726.94	5	2545.39	105.78	< 0.0001
A-NaOH Conc.	7481.41	1	7481.41	310.91	< 0.0001
B-Reaction time	2323.97	1	2323.97	96.58	< 0.0001
AB	1566.97	1	1566.97	65.12	< 0.0001
A ²	2682.08	1	2682.08	111.46	< 0.0001
B ²	321.65	1	321.65	13.37	0.0081
Residual	168.44	7	24.06		
A-NaOH Conc.	7481.41	1	7481.41	310.91	< 0.0001
Lack of Fit	94.81	3	31.60	1.72	0.3008
Pure Error	73.63	4	18.41		
Cor Total	12895.38	12			

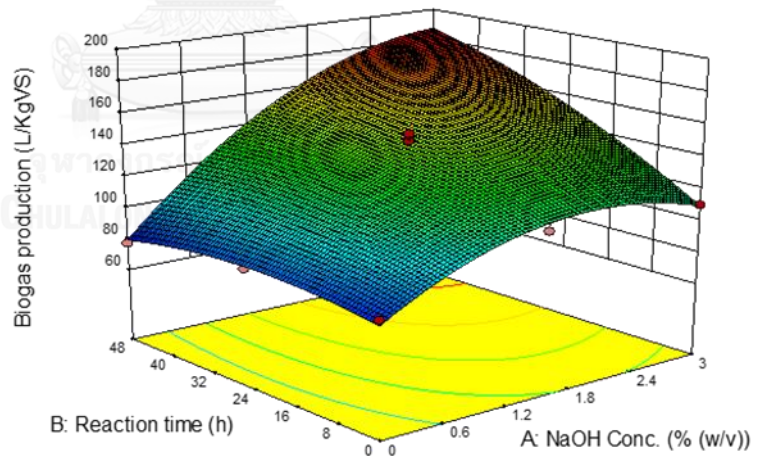
ตารางที่ ค - 2 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของตัวแปรต่อประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี

Source	Sum of Squares (SS)	df	Mean Square	F - Value	p-value Prob > F
Model	2157.18	5	431.44	7.25	0.0108
A-NaOH Conc.	526.03	1	526.03	8.83	0.0207
B-Reaction time	1249.65	1	1249.65	20.99	0.0025
AB	304.15	1	304.15	5.11	0.0583
A ²	75.29	1	75.29	1.26	0.2979
B ²	14.66	1	14.66	0.25	0.6350
Residual	416.82	7	59.55		
Lack of Fit	402.03	3	134.01	36.24	0.0023
Pure Error	14.79	4	3.70		
Cor Total	2574.00	12			

Design-Expert® Software
 Factor Coding: Actual
 Biogas production (L/KgVS)
 ● Design Points
 182.19
 77.29
 X1 = A: NaOH Conc.
 X2 = B: Reaction time

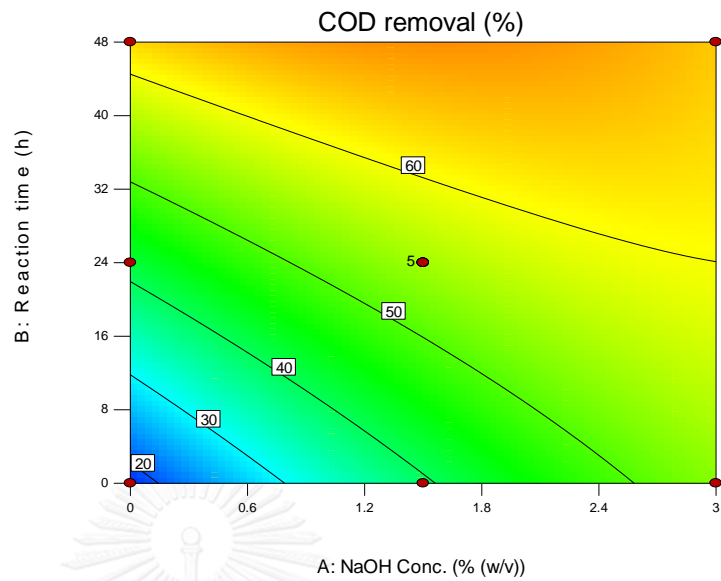


Design-Expert® Software
 Factor Coding: Actual
 Biogas production (L/KgVS)
 ● Design points above predicted value
 ● Design points below predicted value
 182.19
 77.29
 X1 = A: NaOH Conc.
 X2 = B: Reaction time

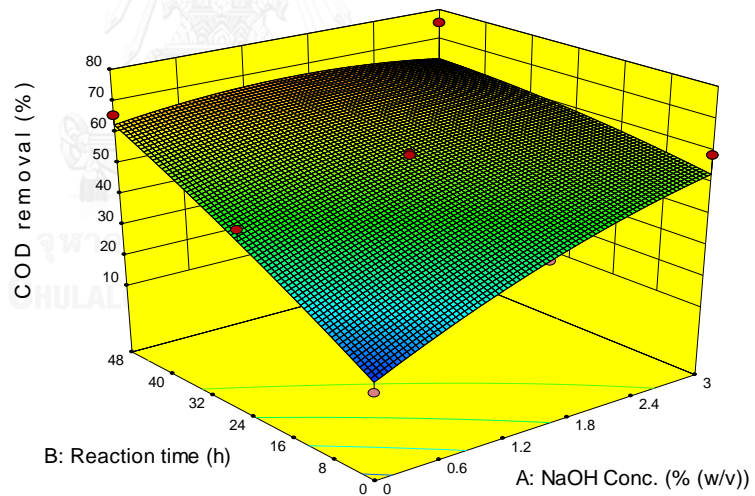


ภาพที่ ค - 1 Contour plot และภาพ 3 มิติ ของผลตอบสนองแบบโครงสร้างพื้นผิวปริมาณ
 ก๊าซชีวภาพ

Design-Expert® Software
 Factor Coding: Actual
 COD removal (%)
 ● Design Points
 75.51
 14.29
 X1 = A: NaOH Conc.
 X2 = B: Reaction time



Design-Expert® Software
 Factor Coding: Actual
 COD removal (%)
 ● Design points above predicted value
 ● Design points below predicted value
 75.51
 14.29
 X1 = A: NaOH Conc.
 X2 = B: Reaction time



ภาพที่ ค - 2 Contour plot และภาพ 3 มิติ ของผลตอบสนองแบบโครงสร้างพื้นผิว ต่อประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี

ตารางที่ ค - 3 สมการและค่าทางสถิติที่ได้จากโปรแกรม

	Model Equations	R ²	Adj R ²	p-value
ก๊าซชีวภาพ (L/KgVSadded)	+ 81.28 + 40.88 * NaOH Conc. + 0.645 * Reaction time+ 0.550 * NaOH Conc. * Reaction time - 10.47 * NaOH Conc. ² - 0.0142 * Reaction time ²	0.9869	0.9776	< 0.0001
ประสิทธิภาพการ กำจัดซีโอดี (ร้อยละ)	+17.59 + 17.08* NaOH Conc.+ 1.09* Reaction time - 0.24* NaOH Conc. * Reaction time - 1.75* NaOH Conc. ² -0.003 * Reaction time ²	0.8381	0.7224	0.0108

ภาคผนวก ง
ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

ตารางที่ ง - 1 ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม (มล.) ตลอดช่วงการทดลองปีเอ็มพี (n=2)

วันที่	ชุดการทดลองปรับสภาพ*											
	ชุดที่ 1			ชุดที่ 2			ชุดที่ 3			ชุดที่ 4		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	\bar{x}	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	\bar{x}	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	\bar{x}	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	\bar{x}
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5	26.50	28.50	27.50	29.00	27.50	28.25	16.00	27.00	21.50	41.50	39.50	40.50
6	30.00	32.50	31.25	32.50	31.50	32.00	20.00	31.00	25.50	47.50	46.00	46.75
7	33.00	35.50	34.25	35.50	34.50	35.00	22.00	33.00	27.50	52.50	51.00	51.75
8	35.00	37.50	36.25	38.00	36.50	37.25	23.00	34.50	28.75	57.50	56.00	56.75
9	35.00	37.50	36.25	38.00	36.50	37.25	23.00	34.50	28.75	60.50	56.00	58.25
10	36.50	40.50	38.50	39.50	38.50	39.00	26.00	36.00	31.00	60.50	59.00	59.75
11	38.00	42.00	40.00	41.50	40.50	41.00	27.00	37.00	32.00	61.50	62.00	61.75
12	40.50	44.50	42.50	44.00	43.00	43.50	27.00	38.00	32.50	63.50	63.50	63.50
13	40.50	44.50	42.50	44.00	43.00	43.50	27.50	39.00	33.25	63.50	65.50	64.50
14	41.50	46.50	44.00	45.50	44.50	45.00	32.00	43.00	37.50	66.50	67.50	67.00
15	45.50	50.50	48.00	49.50	48.50	49.00	34.50	46.50	40.50	70.50	71.00	70.75
16	47.50	53.00	50.25	52.00	50.50	51.25	37.00	48.50	42.75	73.00	73.50	73.25
17	50.00	56.00	53.00	54.00	52.50	53.25	38.50	50.00	44.25	75.50	76.00	75.75
18	50.00	57.00	53.50	54.00	53.50	53.75	40.00	51.00	45.50	76.50	77.50	77.00
19	51.00	58.00	54.50	55.50	54.50	55.00	40.00	51.00	45.50	78.50	79.50	79.00
22	52.00	59.00	55.50	56.50	55.50	56.00	41.00	52.00	46.50	80.00	81.50	80.75
25	52.50	61.50	57.00	57.50	57.50	57.50	43.00	52.50	47.75	82.00	83.50	82.75
28	53.00	62.00	57.50	59.50	58.00	58.75	43.50	54.50	49.00	82.50	84.00	83.25
31	55.00	64.00	59.50	61.00	60.00	60.50	45.50	55.50	50.50	86.00	87.00	86.50
34	55.00	66.00	60.50	63.00	62.00	62.50	47.50	58.50	53.00	89.00	90.00	89.50
37	57.50	68.00	62.75	65.50	64.00	64.75	49.50	61.50	55.50	92.00	93.00	92.50
40	60.50	71.00	65.75	69.50	67.00	68.25	52.50	65.50	59.00	96.00	97.00	96.50
43	63.00	73.50	68.25	73.50	69.00	71.25	54.50	67.50	61.00	98.50	100.00	99.25
46	64.00	74.50	69.25	74.50	72.00	73.25	57.50	69.50	63.50	101.00	103.00	102.00
49	68.00	78.50	73.25	78.50	75.00	76.75	60.50	72.50	66.50	103.00	106.00	104.50
52	70.00	81.00	75.50	80.50	77.00	78.75	63.00	75.00	69.00	104.00	108.00	106.00
55	70.00	82.50	76.25	80.50	78.00	79.25	63.00	75.00	69.00	104.00	108.50	106.25
58	73.00	85.50	79.25	82.50	81.00	81.75	64.00	79.00	71.50	105.00	111.50	108.25
60	75.00	87.50	81.25	84.00	82.50	83.25	67.00	81.00	74.00	107.00	112.50	109.75

หมายเหตุ * สภาวะที่ใช้ในการปรับสภาพไบโกระถินเทพนรงค์

ชุดที่ 1 ไบโกระถินสด (0% NaOH 0 ชั่วโมง)

ชุดที่ 3 แชน้ำกัลัน 48 ชั่วโมง (0% NaOH 48 ชั่วโมง)

ชุดที่ 2 แชน้ำกัลัน 24 ชั่วโมง (0% NaOH 24 ชั่วโมง) ชุดที่ 4 แชน้ำ 1.5 % NaOH 0 ชั่วโมง

ตารางที่ ง - 1 ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม (มล.) ตลอดช่วงการทดลองปีเอ็มพี (n=2) (ต่อ)

วันที่	ชุดการทดลองปรับสภาพ*											
	ชุดที่ 5			ชุดที่ 6			ชุดที่ 7			ชุดที่ 8		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	\bar{x}	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	\bar{x}	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	\bar{x}	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	\bar{x}
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5	53.00	58.00	55.50	57.00	54.00	55.50	55.50	54.00	54.75	54.00	57.50	55.75
6	64.50	67.00	65.75	65.50	63.00	64.25	64.00	60.50	62.25	64.00	67.50	65.75
7	70.50	73.50	72.00	71.00	69.00	70.00	69.00	65.50	67.25	70.00	74.00	72.00
8	75.00	78.50	76.75	76.00	74.00	75.00	74.00	70.50	72.25	75.00	79.00	77.00
9	80.00	84.50	82.25	81.00	79.00	80.00	79.00	75.50	77.25	80.00	85.00	82.50
10	85.50	91.00	88.25	86.50	85.50	86.00	84.00	80.50	82.25	86.50	90.50	88.50
11	91.50	97.50	94.50	92.50	91.50	92.00	90.00	85.50	87.75	91.50	98.50	95.00
12	97.50	103.50	100.50	100.50	99.50	100.00	96.00	92.00	94.00	97.50	104.50	101.00
13	100.50	104.50	102.50	105.50	103.50	104.50	100.00	96.00	98.00	101.00	108.50	104.75
14	104.50	109.50	107.00	109.00	107.50	108.25	103.50	99.50	101.50	105.00	112.50	108.75
15	110.50	116.50	113.50	115.00	113.00	114.00	109.50	105.00	107.25	111.00	119.00	115.00
16	114.50	121.00	117.75	119.00	117.50	118.25	113.50	108.50	111.00	114.50	123.50	119.00
17	118.00	125.50	121.75	122.50	121.50	122.00	117.00	111.50	114.25	118.00	127.50	122.75
18	119.50	127.50	123.50	124.50	124.00	124.25	119.00	113.50	116.25	120.50	129.50	125.00
19	121.50	130.00	125.75	126.50	127.00	126.75	121.00	115.50	118.25	122.50	132.00	127.25
22	124.50	132.50	128.50	129.00	129.50	129.25	123.50	118.00	120.75	125.00	135.00	130.00
25	127.50	135.50	131.50	131.50	132.00	131.75	126.50	120.00	123.25	127.50	137.50	132.50
28	128.00	136.00	132.00	132.00	132.50	132.25	127.00	120.50	123.75	128.00	138.00	133.00
31	132.00	140.00	136.00	134.00	135.00	134.50	129.00	123.50	126.25	131.50	142.00	136.75
34	135.00	144.00	139.50	137.00	140.00	138.50	133.00	126.50	129.75	135.00	146.00	140.50
37	138.50	148.00	143.25	141.50	145.50	143.50	138.50	130.00	134.25	140.50	150.50	145.50
40	143.50	154.00	148.75	148.50	152.50	150.50	144.50	136.00	140.25	146.50	156.50	151.50
43	146.50	157.50	152.00	153.50	158.00	155.75	148.50	140.50	144.50	150.50	160.50	155.50
46	149.50	161.00	155.25	156.50	161.50	159.00	151.50	143.50	147.50	154.00	164.00	159.00
49	152.50	164.00	158.25	159.50	164.50	162.00	154.50	146.50	150.50	157.00	167.00	162.00
52	154.00	165.50	159.75	161.00	166.50	163.75	156.00	148.50	152.25	159.00	169.00	164.00
55	154.00	166.50	160.25	161.50	167.00	164.25	156.50	148.50	152.50	159.50	169.50	164.50
58	156.00	168.00	162.00	163.00	169.50	166.25	159.00	151.00	155.00	162.00	171.50	166.75
60	156.00	170.00	163.00	165.00	169.00	167.00	160.00	152.00	156.00	164.00	172.50	168.25

หมายเหตุ * สภาวะที่ใช้ในการปรับสภาพไบโกระถินเทพนรงค์

ชุดที่ 5 - 8 แช่ 1.5 % NaOH 24 ชั่วโมง (A-D)

ตารางที่ ง - 1 ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม (มล.) ตลอดช่วงการทดลองปีเอ็มพี (n=2) (ต่อ)

วันที่	ชุดการทดลองปรับสภาพ*											
	ชุดที่ 9			ชุดที่ 10			ชุดที่ 11			ชุดที่ 12		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	\bar{x}	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	\bar{x}	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	\bar{x}	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	\bar{x}
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5	56.50	51.00	53.75	27.00	26.50	26.75	28.50	38.50	33.50	25.00	32.50	28.75
6	64.00	65.00	64.50	38.50	36.50	37.50	35.50	48.00	41.75	27.50	42.50	35.00
7	70.00	71.50	70.75	49.00	43.50	46.25	44.00	53.00	48.50	30.00	51.50	40.75
8	75.00	75.50	75.25	60.00	52.50	56.25	47.50	58.00	52.75	32.00	61.50	46.75
9	80.00	80.50	80.25	70.00	62.50	66.25	52.00	62.50	57.25	36.00	72.50	54.25
10	88.00	86.50	87.25	80.00	74.50	77.25	57.00	66.50	61.75	41.00	85.50	63.25
11	93.00	94.50	93.75	89.00	86.50	87.75	62.00	69.50	65.75	51.00	99.50	75.25
12	97.00	99.50	98.25	96.00	93.50	94.75	66.50	71.50	69.00	62.00	108.50	85.25
13	102.00	103.50	102.75	105.00	103.00	104.00	69.50	73.50	71.50	77.00	120.00	98.50
14	105.00	107.50	106.25	121.00	118.50	119.75	72.50	75.50	74.00	100.00	136.00	118.00
15	110.50	113.50	112.00	129.50	127.00	128.25	77.50	79.50	78.50	116.50	147.50	132.00
16	114.00	117.00	115.50	135.50	134.00	134.75	80.50	81.50	81.00	128.00	156.50	142.25
17	117.00	121.00	119.00	138.50	137.00	137.75	82.50	83.50	83.00	133.50	161.50	147.50
18	119.00	123.00	121.00	141.50	140.00	140.75	84.50	85.00	84.75	139.50	166.50	153.00
19	120.50	126.50	123.50	141.50	140.00	140.75	86.00	86.00	86.00	139.50	166.50	153.00
22	122.50	130.00	126.25	147.50	146.00	146.75	88.50	88.00	88.25	157.50	182.50	170.00
25	126.50	133.00	129.75	153.50	151.00	152.25	90.50	90.00	90.25	173.00	189.00	181.00
28	129.50	135.50	132.50	158.50	154.00	156.25	92.00	91.50	91.75	182.50	195.00	188.75
31	132.50	138.00	135.25	162.50	157.50	160.00	93.50	92.50	93.00	190.50	200.00	195.25
34	137.50	142.00	139.75	167.50	161.50	164.50	95.50	94.50	95.00	197.50	206.00	201.75
37	142.50	147.50	145.00	172.50	166.00	169.25	97.50	97.00	97.25	204.00	211.00	207.50
40	147.50	152.50	150.00	178.50	172.00	175.25	100.50	101.00	100.75	212.00	218.00	215.00
43	150.50	155.50	153.00	181.50	176.00	178.75	101.50	103.00	102.25	216.00	223.00	219.50
46	154.50	158.50	156.50	186.00	179.00	182.50	102.50	105.00	103.75	220.50	227.50	224.00
49	157.00	161.50	159.25	189.00	182.00	185.50	104.50	107.00	105.75	224.50	233.50	229.00
52	158.50	163.00	160.75	191.00	184.00	187.50	104.50	107.00	105.75	226.50	236.50	231.50
55	158.50	163.50	161.00	191.50	185.00	188.25	105.00	107.00	106.00	227.50	237.50	232.50
58	160.00	164.00	162.00	191.50	185.50	188.50	105.00	107.00	106.00	227.50	238.00	232.75
60	162.00	165.00	163.50	193.50	188.00	190.75	105.00	107.00	106.00	228.00	241.50	234.75

หมายเหตุ * สภาวะที่ใช้ในการปรับสภาพไบโกระถินเทพนรงค์

ชุดที่ 9 แสง 1.5 % NaOH 24 ชั่วโมง (E) ชุดที่ 11 แสง 3 % NaOH 0 ชั่วโมง

ชุดที่ 10 แสง 1.5 % NaOH 57.94 ชั่วโมง ชุดที่ 12 แสง 3 % NaOH 48 ชั่วโมง

ตารางที่ ง - 1 ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม (มล.) ตลอดช่วงการทดลองปีเอ็มพี (n=2) (ต่อ)

วันที่	ชุดการทดลองปรับสภาพ*			วันที่	ชุดการทดลองปรับสภาพ*		
	ชุดที่ 13				ชุดที่ 13		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	\bar{x}		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	\bar{x}
0	0.00	0.00	0.00	19	104.50	119.00	111.75
5	17.00	19.00	18.00	22	117.00	131.00	124.00
6	19.50	25.00	22.25	25	129.00	142.50	135.75
7	21.50	31.00	26.25	28	134.00	150.50	142.25
8	24.50	36.00	30.25	31	138.00	155.50	146.75
9	27.50	41.00	34.25	34	141.00	160.50	150.75
10	29.00	46.50	37.75	37	145.00	164.50	154.75
11	34.00	52.00	43.00	40	152.00	169.50	160.75
12	44.00	60.00	52.00	43	156.00	174.50	165.25
13	53.00	68.00	60.50	46	159.00	178.50	168.75
14	64.50	78.50	71.50	49	162.00	181.50	171.75
15	78.50	91.50	85.00	52	163.50	183.00	173.25
16	88.00	101.00	94.50	55	164.00	183.50	173.75
17	94.00	106.50	100.25	58	164.00	183.50	173.75
18	98.50	112.00	105.25	60	166.00	185.00	175.50

หมายเหตุ * สภาวะที่ใช้ในการปรับสภาพไบโกระถินเทพนรงค์

ชุดที่ 13 แซ่ 3.62 % NaOH 24 ชั่วโมง

ตารางที่ ง - 2 ค่าที่เฉลี่ยที่ได้จากการทดลองบีเอ็มพีและค่าที่ได้จากสมการทำนาย

สภาวะการปรับสภาพ		ค่าตอบสนองต่อปัจจัย			
% NaOH (นน./ ปริมาตร)	ระยะเวลา (ชั่วโมง)	Biogas (L/KgVSadded)		COD removal (%)	
		ค่าเฉลี่ยจากการ ทดลอง	สมการทำนาย (S.D.=4.91)	ค่าเฉลี่ยจากการ ทดลอง	สมการทำนาย (S.D.=7.72)
0	0	84.47	81.29	14.29	17.59
3	0	110.20	109.69	58.97	53.06
0	48	77.29	79.59	45.71	62.82
3	48	182.19	187.17	75.51	63.41
0	24	86.95	88.60	45.45	41.95
3.62	24	149.72	147.11	49.21	59.79
1.5	0	114.10	119.05	39.24	39.27
1.5	57.94	160.89	156.63	62.29	71.06
1.5	24	146.32	146.15	54.29	54.91
1.5	24	149.91	146.15	55.98	54.91
1.5	24	140.03	146.15	56.60	54.91
1.5	24	151.03	146.15	51.65	54.91
1.5	24	146.76	146.15	54.29	54.91

ตารางที่ ง - 3 ปริมาณของแข็งทั้งหมดในชุดการทดลองการปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่สภาวะต่างๆ (n=3)

สภาวะการปรับสภาพ		ปริมาณของแข็งทั้งหมด (ร้อยละไปไม่สด)				
% NaOH (นน./ ปริมาตร)	ระยะเวลา (ชั่วโมง)	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	\bar{x}	S.D.
		0*	0	47.04	47.08	46.97
0*	24	46.46	46.3	46.59	46.45	0.15
0*	48	46.21	46.2	46.22	46.21	0.01
1.5	0	44.14	44.1	44.18	44.14	0.04
1.5	24	40.5	40.57	40.64	40.57	0.07
1.5	57.94	38.44	38.45	38.43	38.44	0.01
3	0	36.1	36.15	36.11	36.12	0.03
3	48	34.86	34.67	34.48	34.67	0.19
3.62	24	33.02	33.04	33.03	33.03	0.01

หมายเหตุ * ความเข้มข้น 0 % NaOH คือ แชนในน้ำกลั่น

ตารางที่ ง – 4 ปริมาณของแข็งระเหยทั้งหมดในชุดการปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่สภาวะต่างๆ (n=3)

สภาวะการปรับสภาพ		ปริมาณของแข็งทั้งหมด (ร้อยละไปไม่สด)				
% NaOH (นน./ ปริมาตร)	ระยะเวลา (ชั่วโมง)	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	\bar{x}	S.D.
0*	0	44.78	44.77	44.67	44.74	0.06
0*	24	42.9	43.01	42.82	42.91	0.10
0*	48	42.7	42.72	42.77	42.73	0.04
1.5	0	38.54	38.58	38.56	38.56	0.02
1.5	24	36.3	36.4	35.9	36.2	0.26
1.5	57.94	34.2	34.3	34.73	34.41	0.28
3	0	31.7	31.86	31.99	31.85	0.15
3	48	30.85	30.6	30.8	30.75	0.13
3.62	24	29.8	30.01	29.71	29.84	0.15

หมายเหตุ * ความเข้มข้น 0 % NaOH คือ แขนในน้ำกลั่น

ตารางที่ ง – 5 ปริมาณเซลลูโลส (Cellulose) ในชุดการทดลองการปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่สภาวะต่างๆ (n=3)

สภาวะการปรับสภาพ		ปริมาณของแข็งทั้งหมด (ร้อยละของแข็งทั้งหมด)				
% NaOH (นน./ ปริมาตร)	ระยะเวลา (ชั่วโมง)	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	\bar{x}	S.D.
0*	0	18.65	18.80	18.80	18.75	0.09
0*	24	20.09	20.10	20.08	20.09	0.01
0*	48	21.80	21.75	22.00	21.85	0.13
1.5	0	25.62	25.60	25.82	25.68	0.12
1.5	24	34.45	34.51	34.27	34.41	0.12
1.5	57.94	40.10	40.09	40.05	40.08	0.03
3	0	31.20	31.17	31.20	31.19	0.02
3	48	44.32	44.48	44.10	44.30	0.19
3.62	24	45.22	45.20	45.24	45.22	0.02

หมายเหตุ * ความเข้มข้น 0 % NaOH คือ แขนในน้ำกลั่น

ตารางที่ 6 ปริมาณเฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) ในชุดการทดลองการปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่สภาวะต่างๆ (n=3)

สภาวะการปรับสภาพ		ปริมาณของแข็งทั้งหมด (ร้อยละของแข็งทั้งหมด)				
% NaOH (นน./ ปริมาตร)	ระยะเวลา (ชั่วโมง)	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	\bar{x}	S.D.
0*	0	14.20	14.45	14.13	14.26	0.17
0*	24	14.08	14.06	14.01	14.05	0.04
0*	48	13.74	13.70	13.72	13.72	0.02
1.5	0	11.55	11.50	11.60	11.55	0.05
1.5	24	9.67	9.60	9.74	9.67	0.07
1.5	57.94	8.20	8.26	8.26	8.24	0.03
3	0	10.15	10.10	10.11	10.12	0.03
3	48	7.19	7.20	7.24	7.21	0.03
3.62	24	7.10	7.15	7.14	7.13	0.03

หมายเหตุ * ความเข้มข้น 0 % NaOH คือ แขนในน้ำกลั่น

ตารางที่ 7 ปริมาณลิกนิน (Lignin) ในชุดการทดลองการปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่สภาวะต่างๆ (n=3)

สภาวะการปรับสภาพ		ปริมาณของแข็งทั้งหมด (ร้อยละของแข็งทั้งหมด)				
% NaOH (นน./ ปริมาตร)	ระยะเวลา (ชั่วโมง)	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	\bar{x}	S.D.
0*	0	18.17	17.02	17.10	17.43	0.64
0*	24	17.16	17.14	17.06	17.12	0.05
0*	48	17.06	17.10	16.78	16.98	0.17
1.5	0	15.09	15.16	14.84	15.03	0.17
1.5	24	11.68	11.70	11.72	11.70	0.02
1.5	57.94	9.10	9.13	9.13	9.12	0.02
3	0	13.85	13.82	13.73	13.80	0.06
3	48	7.90	7.92	7.97	7.93	0.04
3.62	24	7.50	7.53	7.56	7.53	0.03

หมายเหตุ * ความเข้มข้น 0 % NaOH คือ แขนในน้ำกลั่น

ตารางที่ ๘ – ปริมาณองค์ประกอบอื่นๆ ในชุดการทดลองการปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่สภาวะต่างๆ (n=3)

สภาวะการปรับสภาพ		ปริมาณของแข็งทั้งหมด (ร้อยละของแข็งทั้งหมด)				
% NaOH (นน./ ปริมาตร)	ระยะเวลา (ชั่วโมง)	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	\bar{x}	S.D.
0*	0	48.98	49.73	49.97	49.56	0.52
0*	24	48.67	48.70	48.85	48.74	0.10
0*	48	47.40	47.45	47.50	47.45	0.05
1.5	0	47.74	47.74	47.74	47.74	0.00
1.5	24	44.20	44.19	44.27	44.22	0.04
1.5	57.94	42.60	42.52	42.56	42.56	0.04
3	0	44.80	44.91	44.96	44.89	0.08
3	48	40.59	40.40	40.69	40.56	0.15
3.62	24	40.18	40.09	40.09	40.12	0.05

หมายเหตุ * ความเข้มข้น 0 % NaOH คือ แขนในน้ำกลั่น

ตารางที่ ๙ – องค์ประกอบทางเคมีของใบกระถินเทพณรงค์ ที่นำมาใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตก๊าซชีวภาพ (n=3)

องค์ประกอบ	หญ้าเนเปียร์ พันธุ์ปากช่อง 1				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	\bar{x}	S.D.
ของแข็งทั้งหมด (TS) (ร้อยละไปไม้สด)	47.04	47.08	46.97	47.03	0.06
ความชื้น (ร้อยละไปไม้สด)	52.96	52.92	53.03	52.97	0.06
ของแข็งระเหย (VS) (ร้อยละของแข็งทั้งหมด)	95.20	95.09	95.10	95.13	0.06
เถ้า (Ash) (ร้อยละของแข็งทั้งหมด)	4.80	4.91	4.90	4.87	0.06
ลิกโนเซลลูโลส (ร้อยละของแข็งทั้งหมด)	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	\bar{x}	S.D.
เซลลูโลส (Cellulose)	18.65	18.80	18.80	18.75	0.09
เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose)	14.20	14.45	14.13	14.26	0.17
ลิกนิน (Lignin)	18.17	17.02	17.10	17.43	0.64
อื่นๆ (Other)	48.98	49.73	49.97	49.56	0.52
C/N (ร้อยละไปไม้สด)	19.65	21.20	20.71	20.50	0.79

ตารางที่ ง – 10 องค์ประกอบทางเคมีของหญ้าเนเปียร์ พันธุ์ปากช่อง 1 ที่ใช้ในชุดการทดลองการหมักร่วม (co-digestion) (n=3)

องค์ประกอบ	หญ้าเนเปียร์ พันธุ์ปากช่อง 1				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	\bar{x}	S.D.
ของแข็งทั้งหมด (TS) (ร้อยละหญ้าสด)	17.74	17.54	17.85	17.71	0.16
ความชื้น (ร้อยละหญ้าสด)	82.26	82.46	82.15	82.29	0.16
ของแข็งระเหย (VS) (ร้อยละของแข็งทั้งหมด)	85.00	85.08	85.04	85.04	0.04
เถ้า (Ash) (ร้อยละของแข็งทั้งหมด)	15.00	14.92	14.96	14.96	0.04
ลิกโนเซลลูโลส (ร้อยละของแข็งทั้งหมด)	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	\bar{x}	S.D.
เซลลูโลส (Cellulose)	38.20	38.34	38.00	38.18	0.17
เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose)	18.74	18.70	18.72	18.72	0.02
ลิกนิน (Lignin)	4.70	4.50	3.70	4.30	0.53
อื่นๆ (Other)	38.36	38.46	39.58	38.80	0.68
C/N (ร้อยละหญ้าสด)	26.80	26.84	26.85	26.83	0.03

ตารางที่ ง – 11 องค์ประกอบทางเคมีของกากตะกอนเยื่อกระดาษ (pulp sludge) ที่ใช้ในชุดการทดลองการหมักร่วม (co-digestion) ซึ่งได้จากถังตกตะกอนชั้นที่ 1 (ตะกอนเยื่อกระดาษ) ของระบบบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษ (n=3)

องค์ประกอบทางเคมี	ถังตกตะกอนชั้นที่ 1 (ตะกอนเยื่อกระดาษ)				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	\bar{x}	S.D.
พีเอช (pH)	7.34	7.36	7.41	7.37	0.04
ของแข็งทั้งหมด (มก./ล.)	20,000	20,030	20,042	20,024	21.63
ของแข็งระเหย (มก./ล.)	12,990	13,030	12,980	13,000	26.46
ของแข็งแขวนลอย (มก./ล.)	24,670	24,710	24,705	24,695	21.79
ปริมาณซีโอดีทั้งหมด (มก./ล.)	19,187	19,210	19,179	19,192	16.09
ปริมาณซีโอดีละลาย (มก./ล.)	13,020	13,015	12,995	13,010	13.23

ตารางที่ ง – 12 องค์ประกอบทางเคมีของกากตะกอนเยื่อกระดาษ (pulp sludge) ที่ใช้ในชุดการทดลองการหมักร่วม (co-digestion) ซึ่งได้จากถังตกตะกอนชั้นที่ 2 (ตะกอนจุลินทรีย์) ของระบบบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษ (n=3)

องค์ประกอบทางเคมี	ถังตกตะกอนชั้นที่ 2 (ตะกอนจุลินทรีย์)				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	\bar{X}	S.D.
พีเอช (pH)	7.1	7.13	7.13	7.12	0.02
ของแข็งทั้งหมด (มก./ล.)	7,490	7,485	7,450	7,475	21.79
ของแข็งระเหย (มก./ล.)	4,490	4,520	4,490	4,500	17.32
ของแข็งแขวนลอย (มก./ล.)	5,810	5,845	5,841	5,832	19.16
ปริมาณซีโอดีทั้งหมด (มก./ล.)	9,130	9,125	9,105	9,120	13.23
ปริมาณซีโอดีละลาย (มก./ล.)	4,010	4,020	4,030	4,020	10.00

ตารางที่ ง -13 ผลการศึกษาปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม ในถังปฏิกรณ์กวนสมบูรณ์แบบแบดจ์

วันที่	ชุดที่ 1 ชุดควบคุมไบโกระถินสด (ไม่ปรับสภาพ)			ชุดที่ 2 ไบโกระถินปรับสภาพ 3 % NaOH 48 ชั่วโมง		
	จำนวนนับจาก เครื่องวัดก๊าซ*	ปริมาณก๊าซ ชีวภาพสะสม (มล)	ปริมาณก๊าซชีวภาพ สะสม (ลิตรต่อกก. ของแข็งระเหย)	จำนวนนับจาก เครื่องวัดก๊าซ**	ปริมาณก๊าซ ชีวภาพสะสม (มล)	ปริมาณก๊าซชีวภาพ สะสม (ลิตรต่อกก. ของแข็งระเหย)
0	0	-	0.00	0	-	0.00
1	0	-	0.00	10	600	10.13
2	6	240	3.92	29	1,740	29.38
3	8	320	5.23	34	2,040	34.45
4	20	800	13.07	46	2,760	46.61
5	35	1,400	22.88	61	3,660	61.80
6	38	1,520	24.84	68	4,080	68.90
7	40	1,600	26.14	81	4,860	82.07
8	42	1,680	27.45	87	5,220	88.15
9	43	1,720	28.10	92	5,520	93.21
10	44	1,760	28.76	99	5,940	100.30
11	46	1,840	30.07	106	6,360	107.40
12	48	1,920	31.37	112	6,720	113.48
13	50	2,000	32.68	117	7,020	118.54
14	52	2,080	33.99	121	7,260	122.59
15	55	2,200	35.95	126	7,560	127.66
16	57	2,280	37.25	130	7,800	131.71
17	61	2,440	39.87	134	8,040	135.76
18	63	2,520	41.18	138	8,280	139.82
19	66	2,640	43.14	143	8,580	144.88
20	69	2,760	45.10	146	8,760	147.92
21	70	2,800	45.75	149	8,940	150.96
22	71	2,840	46.41	152	9,120	154.00
23	72	2,880	47.06	154	9,240	156.03
24	73	2,920	47.71	157	9,420	159.07
25	74	2,960	48.37	158	9,480	160.08
26	75	3,000	49.02	159	9,540	161.09
27	76	3,040	49.67	160	9,600	162.11
28	77	3,080	50.33	161	9,660	163.12

ตารางที่ ง - 13 ผลการศึกษาปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม ในถังปฏิกรณ์กวนผสมแบบแบดซ์ (ต่อ)

วันที่	ชุดที่ 1 ชุดควบคุมไบโกระถินสด (ไม่ปรับสภาพ)			ชุดที่ 2 ไบโกระถินปรับสภาพ 3 % NaOH 48 ชั่วโมง		
	จำนวนนับ จากเครื่องวัด ก๊าซ*	ปริมาณก๊าซ ชีวภาพสะสม (มล)	ปริมาณก๊าซชีวภาพ สะสม (ลิตรต่อกก. ของแข็งระเหย)	จำนวนนับ จากเครื่องวัด ก๊าซ**	ปริมาณก๊าซ ชีวภาพสะสม (มล)	ปริมาณก๊าซชีวภาพ สะสม (ลิตรต่อกก. ของแข็งระเหย)
29	78	3,120	50.98	162	9,720	164.13
30	79	3,160	51.63	162	9,720	164.13
31	80	3,200	52.29	163	9,780	165.15
32	81	3,240	52.94	163	9,780	165.15
33	82	3,280	53.59	164	9,840	166.16
34	83	3,320	54.25	164	9,840	166.16
35	84	3,360	54.90	165	9,900	167.17
36	86	3,440	56.21	165	9,900	167.17
37	87	3,480	56.86	166	9,960	168.19
38	88	3,520	57.52	166	9,960	168.19
39	89	3,560	58.17	166	9,960	168.19
40	90	3,600	58.82	167	10,020	169.20
41	92	3,680	60.13	167	10,020	169.20
42	93	3,720	60.78	168	10,080	170.21
43	94	3,760	61.44	168	10,080	170.21
44	95	3,800	62.09	169	10,140	171.23
45	97	3,880	63.40	169	10,140	171.23
46	98	3,920	64.05	170	10,200	172.24
47	99	3,960	64.71	170	10,200	172.24
48	100	4,000	65.36	171	10,260	173.25
49	102	4,080	66.67	171	10,260	173.25
50	103	4,120	67.32	172	10,320	174.27
51	105	4,200	68.63	173	10,380	175.28
52	107	4,280	69.93	173	10,380	175.28
53	108	4,320	70.59	174	10,440	176.29
54	109	4,360	71.24	175	10,500	177.30
55	110	4,400	71.90	175	10,500	177.30
56	111	4,440	72.55	176	10,560	178.32
57	113	4,520	73.86	177	10,620	179.33
58	114	4,560	74.51	177	10,620	179.33
59	116	4,640	75.82	178	10,680	180.34
60	117	4,680	76.47	179	10,740	181.36

ตารางที่ ง -13 ผลการศึกษาปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม ในถังปฏิกรณ์กวนสมบูรณ์แบบแบดซ์ (ต่อ)

วันที่	ชุดที่ 1 ชุดควบคุมไบโกระถินสด (ไม่ปรับสภาพ)			ชุดที่ 2 ไบโกระถินปรับสภาพ 3 % NaOH 48 ชั่วโมง		
	จำนวนนับจาก เครื่องวัดก๊าซ*	ปริมาณก๊าซ ชีวภาพสะสม (มล)	ปริมาณก๊าซชีวภาพ สะสม (ลิตรต่อกก. ของแข็งระเหย)	จำนวนนับจาก เครื่องวัดก๊าซ**	ปริมาณก๊าซ ชีวภาพสะสม (มล)	ปริมาณก๊าซชีวภาพ สะสม (ลิตรต่อกก. ของแข็งระเหย)
61	118	4,720	77.12	180	10,800	182.37
62	119	4,760	77.78	181	10,860	183.38
63	120	4,800	78.43	182	10,920	184.40
64	121	4,840	79.08	183	10,980	185.41
65	122	4,880	79.74	184	11,040	186.42
66	124	4,960	81.05	185	11,100	187.44
67	125	5,000	81.70	186	11,160	188.45
68	126	5,040	82.35	187	11,220	189.46
69	128	5,120	83.66	188	11,280	190.48
70	130	5,200	84.97	189	11,340	191.49
71	131	5,240	85.62	190	11,400	192.50
72	132	5,280	86.27	191	11,460	193.52
73	134	5,360	87.58	192	11,520	194.53
74	135	5,400	88.24	193	11,580	195.54
75	136	5,440	88.89	194	11,640	196.56
76	137	5,480	89.54	195	11,700	197.57
77	138	5,520	90.20	195	11,700	197.57
78	139	5,560	90.85	195	11,700	197.57
79	140	5,600	91.50	196	11,760	198.58
80	141	5,640	92.16	196	11,760	198.58
81	141	5,640	92.16	196	11,760	198.58
82	142	5,680	92.81	196	11,760	198.58
83	143	5,720	93.46	196	11,760	198.58
84	144	5,760	94.12	197	11,820	199.59
85	145	5,800	94.77	197	11,820	199.59
86	146	5,840	95.42	197	11,820	199.59
87	147	5,880	96.08	197	11,820	199.59
88	148	5,920	96.73	197	11,820	199.59
89	149	5,960	97.39	197	11,820	199.59
90	150	6,000	98.04	197	11,820	199.59

หมายเหตุ * เครื่องตรวจวัดปริมาณก๊าซนับ 1 ครั้ง เท่ากับ 40 มิลลิลิตร

** เครื่องตรวจวัดปริมาณก๊าซนับ 1 ครั้ง เท่ากับ 60 มิลลิลิตร

ตารางที่ ง - 13 ผลการศึกษาปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม ในถังปฏิกรณ์กวนผสมแบบแบตช์ (ต่อ)

วันที่	จุดที่ 3 ไบโกระถินสดหมักร่วมหญ้าเนเปียร์ (1:1)			จุดที่ 4 ไบโกระถินปรับสภาพหมักร่วมหญ้าเนเปียร์ (1:1)		
	จำนวนนับจาก เครื่องวัดก๊าซ*	ปริมาณก๊าซ ชีวภาพสะสม (มล)	ปริมาณก๊าซชีวภาพ สะสม (ลิตรต่อกก. ของแข็งระเหย)	จำนวนนับจาก เครื่องวัดก๊าซ**	ปริมาณก๊าซ ชีวภาพสะสม (มล)	ปริมาณก๊าซชีวภาพ สะสม (ลิตรต่อกก. ของแข็งระเหย)
0	0	-	0.00	0	-	0.00
1	0	-	0.00	5	300	4.76
2	22	880	14.52	26	1,560	24.77
3	58	2,320	38.28	55	3,300	52.41
4	91	3,640	60.07	98	5,880	93.38
5	129	5,160	85.15	144	8,640	137.21
6	164	6,560	108.25	166	9,960	158.17
7	199	7,960	131.35	184	11,040	175.32
8	221	8,840	145.87	199	11,940	189.61
9	241	9,640	159.08	211	12,660	201.05
10	249	9,960	164.36	224	13,440	213.43
11	258	10,320	170.30	231	13,860	220.10
12	264	10,560	174.26	237	14,220	225.82
13	271	10,840	178.88	243	14,580	231.54
14	276	11,040	182.18	247	14,820	235.35
15	280	11,200	184.82	252	15,120	240.11
16	284	11,360	187.46	256	15,360	243.93
17	291	11,640	192.08	260	15,600	247.74
18	295	11,800	194.72	263	15,780	250.60
19	300	12,000	198.02	268	16,080	255.36
20	306	12,240	201.98	273	16,380	260.12
21	311	12,440	205.28	275	16,500	262.03
22	317	12,680	209.24	277	16,620	263.94
23	320	12,800	211.22	282	16,920	268.70
24	323	12,920	213.20	284	17,040	270.61
25	326	13,040	215.18	286	17,160	272.51
26	328	13,120	216.50	287	17,220	273.46
27	330	13,200	217.82	290	17,400	276.32

ตารางที่ ง - 13 ผลการศึกษาปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม ในถังปฏิกรณ์กวนผสมแบบแบตซ์ (ต่อ)

วันที่	จุดที่ 3 ไบโกลินสหมักร่วมหญ้าเนเปียร์ (1:1)			จุดที่ 4 ไบโกลินปรับสภาพหมักร่วมหญ้าเนเปียร์ (1:1)		
	จำนวนนับ จากเครื่องวัด ก๊าซ*	ปริมาณก๊าซ ชีวภาพสะสม (มล)	ปริมาณก๊าซชีวภาพ สะสม (ลิตรตอกก. ของแข็งระเหย)	จำนวนนับจาก เครื่องวัด ก๊าซ**	ปริมาณก๊าซ ชีวภาพสะสม (มล)	ปริมาณก๊าซชีวภาพ สะสม (ลิตรตอกก. ของแข็งระเหย)
28	332	13,280	219.14	291	17,460	277.27
29	334	13,360	220.46	292	17,520	278.23
30	336	13,440	221.78	294	17,640	280.13
31	337	13,480	222.44	295	17,700	281.09
32	337	13,480	222.44	295	17,700	281.09
33	338	13,520	223.10	296	17,760	282.04
34	339	13,560	223.76	297	17,820	282.99
35	340	13,600	224.42	298	17,880	283.94
36	342	13,680	225.74	299	17,940	284.90
37	343	13,720	226.40	300	18,000	285.85
38	343	13,720	226.40	301	18,060	286.80
39	344	13,760	227.06	301	18,060	286.80
40	344	13,760	227.06	302	18,120	287.76
41	345	13,800	227.72	303	18,180	288.71
42	345	13,800	227.72	304	18,240	289.66
43	346	13,840	228.38	305	18,300	290.61
44	346	13,840	228.38	305	18,300	290.61
45	347	13,880	229.04	306	18,360	291.57
46	347	13,880	229.04	306	18,360	291.57
47	348	13,920	229.70	306	18,360	291.57
48	349	13,960	230.36	307	18,420	292.52
49	349	13,960	230.36	307	18,420	292.52
50	350	14,000	231.02	307	18,420	292.52
51	350	14,000	231.02	308	18,480	293.47
52	350	14,000	231.02	308	18,480	293.47
53	351	14,040	231.68	308	18,480	293.47
54	351	14,040	231.68	308	18,480	293.47
55	351	14,040	231.68	309	18,540	294.43
56	352	14,080	232.34	309	18,540	294.43
57	352	14,080	232.34	309	18,540	294.43

ตารางที่ ง - 13 ผลการศึกษาปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม ในถังปฏิกรณ์กวนผสมแบบแบตซ์ (ต่อ)

วันที่	ชุดที่ 3 ไบโกระถินสดหมักร่วมหญ้าเนเปียร์ (1:1)			ชุดที่ 4 ไบโกระถินปรับสภาพหมักร่วมหญ้าเนเปียร์ (1:1)		
	จำนวนนับจาก เครื่องวัดก๊าซ*	ปริมาณก๊าซ ชีวภาพสะสม (มล)	ปริมาณก๊าซชีวภาพ สะสม (ลิตรต่อกก. ของแข็งระเหย)	จำนวนนับจาก เครื่องวัดก๊าซ**	ปริมาณก๊าซ ชีวภาพสะสม (มล)	ปริมาณก๊าซชีวภาพ สะสม (ลิตรต่อกก. ของแข็งระเหย)
58	353	14,120	233.00	309	18,540	294.43
59	353	14,120	233.00	309	18,540	294.43
60	354	14,160	233.66	310	18,600	295.38
61	356	14,240	234.98	310	18,600	295.38
62	357	14,280	235.64	310	18,600	295.38
63	357	14,280	235.64	310	18,600	295.38
64	358	14,320	236.30	310	18,600	295.38
65	358	14,320	236.30	310	18,600	295.38
66	359	14,360	236.96	310	18,600	295.38
67	359	14,360	236.96	310	18,600	295.38
68	359	14,360	236.96	311	18,660	296.33
69	360	14,400	237.62	311	18,660	296.33
70	360	14,400	237.62	311	18,660	296.33
71	361	14,440	238.28	311	18,660	296.33
72	361	14,440	238.28	311	18,660	296.33
73	362	14,480	238.94	311	18,660	296.33
74	362	14,480	238.94	311	18,660	296.33
75	362	14,480	238.94	311	18,660	296.33
76	362	14,480	238.94	312	18,720	297.28
77	363	14,520	239.60	312	18,720	297.28
78	363	14,520	239.60	312	18,720	297.28
79	363	14,520	239.60	312	18,720	297.28
80	363	14,520	239.60	312	18,720	297.28
81	363	14,520	239.60	312	18,720	297.28
82	364	14,560	240.26	312	18,720	297.28
83	364	14,560	240.26	313	18,780	298.24
84	364	14,560	240.26	313	18,780	298.24
85	365	14,600	240.92	313	18,780	298.24
86	365	14,600	240.92	313	18,780	298.24
87	365	14,600	240.92	313	18,780	298.24
88	365	14,600	240.92	313	18,780	298.24

ตารางที่ ง - 13 ผลการศึกษาปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม ในถังปฏิกรณ์กวนสมบูรณ์แบบแบตซ์ (ต่อ)

วันที่	ชุดที่ 3 ไบโกระถินสดหมักร่วมหญ้าเนเปียร์ (1:1)			ชุดที่ 4 ไบโกระถินปรับสภาพหมักร่วมหญ้าเนเปียร์ (1:1)		
	จำนวนนับ จากเครื่องวัด ก๊าซ*	ปริมาณก๊าซ ชีวภาพสะสม (มล)	ปริมาณก๊าซชีวภาพ สะสม (ลิตรต่อกก. ของแข็งระเหย)	จำนวนนับจาก เครื่องวัด ก๊าซ**	ปริมาณก๊าซ ชีวภาพสะสม (มล)	ปริมาณก๊าซชีวภาพ สะสม (ลิตรต่อกก. ของแข็งระเหย)
89	365	14,600	240.92	313	18,780	298.24
90	365	14,600	240.92	313	18,780	298.24

หมายเหตุ * เครื่องตรวจวัดปริมาณก๊าซนับ 1 ครั้ง เท่ากับ 40 มิลลิลิตร

** เครื่องตรวจวัดปริมาณก๊าซนับ 1 ครั้ง เท่ากับ 60 มิลลิลิตร



ตารางที่ ง - 13 ผลการศึกษาปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม ในถังปฏิกรณ์กวนสมบูรณ์แบบแบตช์ (ต่อ)

วันที่	ชุดที่ 5 ไบโกระถินสดหมักร่วมกากตะกอนเยื่อกระดาษ (1:1)			ชุดที่ 6 ไบโกระถินปรับสภาพหมักร่วมกากตะกอนเยื่อกระดาษ (1:1)		
	จำนวนนับจากเครื่องวัดก๊าซ*	ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม (มล)	ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม (ลิตรต่อกก. ของแห้งระเหย)	จำนวนนับจากเครื่องวัดก๊าซ*	ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม (มล)	ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม (ลิตรต่อกก. ของแห้งระเหย)
0	0	-	-	0	-	-
1	10	600	10	12	720	12
2	32	1,920	32	21	1,260	21
3	34	2,040	34	22	1,320	22
4	35	2,100	35	30	1,800	30
5	50	3,000	50	50	3,000	50
6	66	3,960	66	70	4,200	70
7	79	4,740	79	92	5,520	92
8	89	5,340	89	110	6,600	110
9	112	6,720	112	140	8,400	140
10	141	8,460	141	166	9,960	166
11	164	9,840	164	186	11,160	186
12	183	10,980	183	207	12,420	207
13	187	11,220	187	226	13,560	226
14	190	11,400	190	243	14,580	243
15	192	11,520	192	262	15,720	262
16	195	11,700	195	280	16,800	280
17	197	11,820	197	294	17,640	294
18	199	11,940	199	309	18,540	309
19	201	12,060	201	327	19,620	327
20	202	12,120	202	341	20,460	341
21	203	12,180	203	355	21,300	355
22	206	12,360	206	366	21,960	366
23	210	12,600	210	367	22,020	367
24	212	12,720	212	369	22,140	369
25	214	12,840	214	373	22,380	373
26	216	12,960	216	374	22,440	374
27	218	13,080	218	375	22,500	375

ตารางที่ ง - 13 ผลการศึกษาปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม ในถังปฏิกรณ์กวนสมบูรณ์แบบแบตช์ (ต่อ)

วันที่	ชุดที่ 5 ไบโกระถินสดหมักร่วมกากตะกอนเยื่อกระดาษ (1:1)			ชุดที่ 6 ไบโกระถินปรับสภาพหมักร่วมกากตะกอนเยื่อกระดาษ (1:1)		
	จำนวนนับจากเครื่องวัดก๊าซ*	ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม (มล)	ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม (ลิตรต่อกก. ของแข็งระเหย)	จำนวนนับจากเครื่องวัดก๊าซ*	ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม (มล)	ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม (ลิตรต่อกก. ของแข็งระเหย)
28	219	13,140	219	376	22,560	376
29	219	13,140	219	379	22,740	379
30	220	13,200	220	381	22,860	381
31	221	13,260	221	383	22,980	383
32	221	13,260	221	383	22,980	383
33	222	13,320	222	384	23,040	384
34	224	13,440	224	386	23,160	386
35	225	13,500	225	387	23,220	387
36	227	13,620	227	388	23,280	388
37	222	13,320	222	389	23,340	389
38	224	13,440	224	389	23,340	389
39	224	13,440	224	390	23,400	390
40	225	13,500	225	390	23,400	390
41	226	13,560	226	390	23,400	390
42	226	13,560	226	390	23,400	390
43	227	13,620	227	391	23,460	391
44	228	13,680	228	391	23,460	391
45	229	13,740	229	391	23,460	391
46	228	13,680	228	392	23,520	392
47	231	13,860	231	392	23,520	392
48	233	13,980	233	392	23,520	392
49	233	13,980	233	392	23,520	392
50	234	14,040	234	392	23,520	392
51	235	14,100	235	393	23,580	393
52	235	14,100	235	393	23,580	393
53	236	14,160	236	393	23,580	393
54	236	14,160	236	393	23,580	393
55	237	14,220	237	394	23,640	394

ตารางที่ ง - 13 ผลการศึกษาปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม ในถังปฏิกรณ์กวนสมบูรณ์แบบแบตช์ (ต่อ)

วันที่	ชุดที่ 5 ไบโกลินสดหมักร่วมกากตะกอนเยื่อกระดาษ (1:1)			ชุดที่ 6 ไบโกลินปรับสภาพหมักร่วมกากตะกอนเยื่อกระดาษ (1:1)		
	จำนวนนับจากเครื่องวัดก๊าซ*	ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม (มล)	ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม (ลิตรต่อกก. ของแข็งระเหย)	จำนวนนับจากเครื่องวัดก๊าซ*	ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม (มล)	ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม (ลิตรต่อกก. ของแข็งระเหย)
56	238	14,280	238	394	23,640	394
57	239	14,340	239	394	23,640	394
58	240	14,400	240	395	23,700	395
59	240	14,400	240	395	23,700	395
60	240	14,400	240	395	23,700	395
61	241	14,460	241	396	23,760	396
62	242	14,520	242	396	23,760	396
63	242	14,520	242	396	23,760	396
64	243	14,580	243	396	23,760	396
65	243	14,580	243	396	23,760	396
66	244	14,640	244	396	23,760	396
67	244	14,640	244	396	23,760	396
68	245	14,700	245	397	23,820	397
69	245	14,700	245	397	23,820	397
70	246	14,760	246	398	23,880	398
71	247	14,820	247	398	23,880	398
72	247	14,820	247	399	23,940	399
73	248	14,880	248	400	24,000	400
74	249	14,940	249	400	24,000	400
75	250	15,000	250	401	24,060	401
76	251	15,060	251	401	24,060	401
77	252	15,120	252	401	24,060	401
78	253	15,180	253	401	24,060	401
79	254	15,240	254	401	24,060	401
80	255	15,300	255	401	24,060	401
81	256	15,360	256	401	24,060	401
82	257	15,420	257	401	24,060	401
83	258	15,480	258	401	24,060	401
84	259	15,540	259	402	24,120	402
85	259	15,540	259	402	24,120	402

ตารางที่ ง - 13 ผลการศึกษาปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม ในถังปฏิกรณ์กวนสมบูรณ์แบบแบตซ์ (ต่อ)

วันที่	ชุดที่ 5 ใบกระถินสดหมักร่วมกากตะกอนเยื่อกระดาษ (1:1)			ชุดที่ 6 ใบกระถินปรับสภาพหมักร่วมกากตะกอนเยื่อกระดาษ (1:1)		
	จำนวนนับจากเครื่องวัดก๊าซ*	ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม (มล)	ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม (ลิตรต่อกก. ของแข็งระเหย)	จำนวนนับจากเครื่องวัดก๊าซ*	ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม (มล)	ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม (ลิตรต่อกก. ของแข็งระเหย)
86	260	15,600	260	402	24,120	402
87	261	15,660	261	402	24,120	402
88	261	15,660	261	402	24,120	402
89	261	15,660	261	402	24,120	402
90	261	15,660	261	402	24,120	402

หมายเหตุ * เครื่องตรวจวัดปริมาณก๊าซนับ 1 ครั้ง เท่ากับ 60 มิลลิลิตร



ตารางที่ ง - 13 ผลการศึกษาปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม ในถังปฏิกรณ์กวนผสมแบบแบตช์ (ต่อ)

วันที่	ชุดที่ 7 ไบโกระถินสดหมักร่วมหญ้าเนเปียร์ (1:3)			ชุดที่ 8 หญ้าเนเปียร์		
	จำนวนนับจาก เครื่องวัดก๊าซ*	ปริมาณก๊าซ ชีวภาพสะสม (มล)	ปริมาณก๊าซชีวภาพ สะสม (ลิตรต่อกก. ของแข็งระเหย)	จำนวนนับจาก เครื่องวัดก๊าซ*	ปริมาณก๊าซ ชีวภาพสะสม (มล)	ปริมาณก๊าซชีวภาพ สะสม (ลิตรต่อกก. ของแข็งระเหย)
0	0	-	0	0	-	0.00
1	28	1,680	27.93	30	1,800	30.08
2	45	2,700	44.89	50	3,000	50.13
3	67	4,020	66.83	79	4,740	79.20
4	79	4,740	78.80	107	6,420	107.27
5	119	7,140	118.70	132	7,920	132.33
6	154	9,240	153.62	154	9,240	154.39
7	190	11,400	189.53	178	10,680	178.45
8	205	12,300	204.49	198	11,880	198.50
9	220	13,200	219.45	226	13,560	226.57
10	230	13,800	229.43	254	15,240	254.64
11	261	15,660	260.35	282	16,920	282.71
12	288	17,280	287.28	312	18,720	312.78
13	301	18,060	300.25	329	19,740	329.82
14	319	19,140	318.20	343	20,580	343.86
15	329	19,740	328.18	344	20,640	344.86
16	333	19,980	332.17	345	20,700	345.86
17	336	20,160	335.16	347	20,820	347.87
18	339	20,340	338.15	349	20,940	349.87
19	345	20,700	344.14	370	22,200	370.93
20	351	21,060	350.12	374	22,440	374.94
21	354	21,240	353.12	377	22,620	377.94
22	362	21,720	361.10	383	22,980	383.96
23	369	22,140	368.08	388	23,280	388.97
24	374	22,440	373.07	392	23,520	392.98
25	378	22,680	377.06	396	23,760	396.99
26	381	22,860	380.05	400	24,000	401.00
27	393	23,580	392.02	403	24,180	404.01
28	398	23,880	397.01	406	24,360	407.02
29	399	23,940	398.00	409	24,540	410.03
30	400	24,000	399.00	412	24,720	413.03

ตารางที่ ง - 13 ผลการศึกษาปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม ในถังปฏิกรณ์กวนสมบูรณ์แบบแบตช์ (ต่อ)

วันที่	ชุดที่ 7 ไบโกระถินสดหมักร่วมหญ้าเนเปียร์ (1:3)			ชุดที่ 8 หญ้าเนเปียร์		
	จำนวนนับจาก เครื่องวัดก๊าซ*	ปริมาณก๊าซ ชีวภาพสะสม (มล)	ปริมาณก๊าซชีวภาพ สะสม (ลิตรต่อกก. ของแข็งระเหย)	จำนวนนับจาก เครื่องวัดก๊าซ*	ปริมาณก๊าซ ชีวภาพสะสม (มล)	ปริมาณก๊าซชีวภาพ สะสม (ลิตรต่อกก. ของแข็งระเหย)
31	402	24,120	401.00	415	24,900	416.04
32	405	24,300	403.99	417	25,020	418.05
33	407	24,420	405.99	419	25,140	420.05
34	408	24,480	406.98	421	25,260	422.06
35	412	24,720	410.97	422	25,320	423.06
36	414	24,840	412.97	423	25,380	424.06
37	416	24,960	414.96	425	25,500	426.07
38	417	25,020	415.96	427	25,620	428.07
39	419	25,140	417.96	427	25,620	428.07
40	420	25,200	418.95	428	25,680	429.07
41	420	25,200	418.95	428	25,680	429.07
42	420	25,200	418.95	428	25,680	429.07
43	421	25,260	419.95	429	25,740	430.08
44	421	25,260	419.95	429	25,740	430.08
45	421	25,260	419.95	430	25,800	431.08
46	423	25,380	421.95	430	25,800	431.08
47	423	25,380	421.95	430	25,800	431.08
48	423	25,380	421.95	431	25,860	432.08
49	423	25,380	421.95	431	25,860	432.08
50	423	25,380	421.95	431	25,860	432.08
51	423	25,380	421.95	431	25,860	432.08
52	423	25,380	421.95	431	25,860	432.08
53	424	25,440	422.94	431	25,860	432.08
54	424	25,440	422.94	431	25,860	432.08
55	424	25,440	422.94	431	25,860	432.08
56	424	25,440	422.94	431	25,860	432.08
57	424	25,440	422.94	432	25,920	433.08
58	425	25,500	423.94	432	25,920	433.08
59	425	25,500	423.94	432	25,920	433.08
60	425	25,500	423.94	432	25,920	433.08

ตารางที่ ง - 13 ผลการศึกษาปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม ในถังปฏิกรณ์กวนผสมแบบแบตช์ (ต่อ)

วันที่	ชุดที่ 7 ไบโกระถินสดหมักร่วมหญ้าเนเปียร์ (1:3)			ชุดที่ 8 หญ้าเนเปียร์		
	จำนวนนับจาก เครื่องวัดก๊าซ*	ปริมาณก๊าซ ชีวภาพสะสม (มล)	ปริมาณก๊าซชีวภาพ สะสม (ลิตรต่อกก. ของแข็งระเหย)	จำนวนนับจาก เครื่องวัดก๊าซ*	ปริมาณก๊าซ ชีวภาพสะสม (มล)	ปริมาณก๊าซชีวภาพ สะสม (ลิตรต่อกก. ของแข็งระเหย)
61	425	25,500	423.94	432	25,920	433.08
62	425	25,500	423.94	432	25,920	433.08
63	425	25,500	423.94	432	25,920	433.08
64	425	25,500	423.94	432	25,920	433.08
65	425	25,500	423.94	432	25,920	433.08
66	425	25,500	423.94	432	25,920	433.08
67	425	25,500	423.94	433	25,980	434.09
68	425	25,500	423.94	433	25,980	434.09
69	425	25,500	423.94	433	25,980	434.09
70	426	25,560	424.94	433	25,980	434.09
71	426	25,560	424.94	433	25,980	434.09
72	426	25,560	424.94	433	25,980	434.09
73	426	25,560	424.94	433	25,980	434.09
74	426	25,560	424.94	433	25,980	434.09
75	426	25,560	424.94	433	25,980	434.09
76	426	25,560	424.94	433	25,980	434.09
77	426	25,560	424.94	433	25,980	434.09
78	426	25,560	424.94	434	26,040	435.09
79	426	25,560	424.94	434	26,040	435.09
80	427	25,620	425.94	434	26,040	435.09
81	427	25,620	425.94	434	26,040	435.09
82	427	25,620	425.94	434	26,040	435.09
83	427	25,620	425.94	434	26,040	435.09
84	427	25,620	425.94	434	26,040	435.09
85	427	25,620	425.94	434	26,040	435.09
86	427	25,620	425.94	434	26,040	435.09
87	427	25,620	425.94	434	26,040	435.09
88	427	25,620	425.94	434	26,040	435.09
89	427	25,620	425.94	434	26,040	435.09
90	427	25,620	425.94	434	26,040	435.09

หมายเหตุ * เครื่องตรวจวัดปริมาณก๊าซนับ 1 ครั้ง เท่ากับ 60 มิลลิลิตร

ตารางที่ ง - 14 อุณหภูมิในถังปฏิกรณ์กวนสมบูรณ์แบบแบดซ์

วัน	อุณหภูมิในถังปฏิกรณ์ (องศาเซลเซียส)							
	ชุดที่ 1	ชุดที่ 2	ชุดที่ 3	ชุดที่ 4	ชุดที่ 5	ชุดที่ 6	ชุดที่ 7	ชุดที่ 8
0	31	30.9	30.9	31.6	31.3	31.5	30.1	30
1	31.1	31	30.9	31.9	30.4	30.6	29.9	30.3
2	31	29.6	31	31.9	31.4	31.6	28.9	29.5
3	31.1	31	30.8	31.7	30.3	30.5	29.7	30.3
4	30.9	30.9	31	31.7	31	31.2	29.4	30.1
5	30.6	30.5	30.8	31.9	31.4	31.6	30.1	29.8
6	30.9	30.9	31	31.7	30.7	30.9	28.1	29.9
7	30.9	31	31	31.9	29.6	29.8	27.5	29.7
8	29.5	28.6	28.9	30	29.7	29.9	29.8	29.8
9	29.6	29.6	29.6	30.3	30.3	30.5	29.9	29.8
10	29.9	29.9	29.4	30.6	29.6	29.8	30	29.8
11	29.4	29.4	29	30.1	29.7	29.9	30	29.4
12	30.2	30.2	30	30.8	29.9	30.1	30.1	29
13	30.4	30	30.3	30.6	29.3	29.5	30.3	30
14	30.6	30.6	30.1	30.8	29.9	30.1	30.4	30.1
15	30.2	30	30.4	31	29.3	29.5	30.5	30.4
16	30.6	30.6	30.4	31.1	28.1	28.3	29.6	30.8
17	30.5	30.5	30	31	30	30.2	29.8	30.6
18	30.4	30.4	30	31.1	29.6	29.8	30	31
19	30.2	30.5	30.3	31	30.1	30.3	30.1	31.1
20	31.1	31	31	30.8	30.2	30.4	30	29.9
21	30.2	31.3	31.1	31	29.4	29.6	30	30.2
22	30.5	30.5	30	31	28.9	29.1	30.2	30.3
23	30.2	30.4	30.4	31.1	29.3	29.5	30.4	30.2
24	30.6	30.5	30.1	31.2	30.1	30.3	30.5	30.3
25	29.9	30.1	30.2	30.8	29.8	30	30.8	31.1
26	29.8	29.9	29.1	30.5	30	30.2	31.5	30.2
27	30.2	30.4	30.4	30.6	30.1	30.3	31	31
28	30.2	30.2	30	30.8	29.9	30.1	31.1	30.5
29	30.2	30.6	30.4	30.7	29.8	30	30.7	30
30	30.3	30.7	30.5	30.5	31.1	31.3	30.5	30.4
31	30.3	30.3	30.1	30.9	30.7	30.9	30.4	30
32	29.9	29.9	30.1	31	30.7	30.9	30.4	29.8

ตารางที่ ง - 14 อุณหภูมิในถังปฏิกรณ์กวนสมบูรณ์แบบแบดซ์ (ต่อ)

วัน	อุณหภูมิในถังปฏิกรณ์ (องศาเซลเซียส)							
	ชุดที่ 1	ชุดที่ 2	ชุดที่ 3	ชุดที่ 4	ชุดที่ 5	ชุดที่ 6	ชุดที่ 7	ชุดที่ 8
33	30.2	30	30.2	31.4	31	31.2	30.4	31.9
34	30.3	30.1	30.5	31.1	30.4	30.6	31	31.4
35	30.2	30.2	30.4	30.8	29.5	29.7	31.1	31.9
36	30.3	30.6	30.8	30.4	29.9	30.1	30.9	30.9
37	31.1	31.1	31.5	31	30	30.2	31.1	31.1
38	30.2	31	31	30.8	30.1	30.3	30.5	30.1
39	31.1	31	31.1	31.1	30	30.2	30.4	30.1
40	30.2	30.2	30	30.8	30.2	30.4	30.6	31.2
41	30.3	30.5	29.9	30.6	30.3	30.5	30.7	30.8
42	30.3	31.1	29.8	30.4	30.4	30.6	30.8	31.3
43	31.4	31.4	31.7	30.1	30.6	30.8	31	31.2
44	31.9	31	31.4	30.5	30.5	30.7	30.9	30.8
45	31.4	31.4	31.1	31.1	30	30.2	30.4	30.5
46	31.9	31.9	31.9	32.4	30.1	30.3	30.5	31.7
47	30.9	30.9	31.4	31.8	29.8	30	30.2	31.7
48	31.1	30.5	31.3	31.9	29.9	30.1	30.2	31.9
49	30.8	30.9	31.6	31.6	30	30.2	30.4	31.7
50	30.4	30.3	30.1	31.1	29.7	29.9	30.5	31.9
51	31.1	31.2	31.9	31.9	30.1	30.3	30.8	30
52	30.4	30.8	30.6	31	31	31.2	31.5	30.3
53	29.7	29.5	29.6	30.2	29.9	30.1	31	30.6
54	31.9	30.6	30.4	30.8	30.1	30.3	31.1	30.1
55	30.2	30.2	30	30.8	30.1	30.3	30.7	30.9
56	31.4	30.9	31.9	31.1	31.2	31.4	30.6	31
57	30.5	30.6	31	31.3	30.8	31	30.5	32
58	30.8	30.8	31.7	31.3	31.3	31.5	30.7	31
59	31.6	31.6	31.4	32.2	31.2	31.4	31.1	32
60	31.8	30.4	31.9	30.6	30.8	31	30.2	31
61	31.3	31.4	31.9	31.9	30.5	30.7	30.2	30.9
62	30.8	31.1	31.8	31.3	31.2	31.4	31.6	30.8
63	30.2	30.2	30	30.8	30.6	30.8	31	30.9
64	31.2	30.2	31.4	30.8	30.4	30.6	30.8	30.6
65	31.6	31.6	31.4	32.2	31	31.2	31.3	30.4

ตารางที่ ง - 14 อุณหภูมิในถังปฏิกรณ์กวนผสมบูรณ์แบบแบตช์ (ต่อ)

วัน	อุณหภูมิในถังปฏิกรณ์ (องศาเซลเซียส)							
	ชุดที่ 1	ชุดที่ 2	ชุดที่ 3	ชุดที่ 4	ชุดที่ 5	ชุดที่ 6	ชุดที่ 7	ชุดที่ 8
66	31.4	31.3	31.7	31.9	31.2	31.4	31.6	30.8
67	30.8	30.8	31.2	31.4	31.3	31.5	31.7	30.8
68	30.9	30.8	31.6	31.8	30.6	30.8	31	30.4
69	30.5	30.4	31.1	31.1	31.2	31.4	30.2	30.8
70	30.9	30.8	31.6	31.8	31.1	31.3	30.4	31.4
71	31.5	31.4	31.7	31.9	30.9	31.1	30.5	31.3
72	31.4	31.3	31.7	31.9	30.8	31	30.8	31.2
73	31.4	31.2	31.4	31.6	30.7	30.9	31.5	31.8
74	30.5	31.8	29.6	31.9	30.4	30.6	31	30.2
75	30.4	30.2	31	31.5	30.9	31.1	31.1	30.9
76	31.1	30.9	31.8	31.9	31	31.2	30.7	30.9
77	31.1	30.9	31.8	31.9	31.1	31.3	31.3	30.2
78	29.6	29.6	30.5	30.9	31.2	31.4	30.9	30.5
79	30.6	31.3	30.8	30.5	32.1	32.3	31	30.5
80	31.9	32	31.9	32.4	31.3	31.5	31.1	31.5
81	31.3	31.4	31.9	31.9	31.4	31.6	31.2	31.4
82	30.6	31.3	30.8	30.5	31.5	31.7	32.1	31.4
83	29.6	29.6	30.5	30.9	30.6	30.8	31.3	30.5
84	29.9	31.5	30.1	31.1	31.2	31.4	31.4	30.4
85	30.9	30.9	31	31.7	29.9	30.1	31.5	31.1
86	30.8	31.1	31.8	31.3	30.5	30.7	30.6	31.1
87	31.1	30.4	31.3	31.4	30.1	30.3	31.2	31.4
88	31.6	30.9	30.7	31.5	30.2	30.4	29.9	30.1
89	29.9	31.5	30.1	31.1	30.4	30.6	30.8	31.4
90	31.1	31	30.8	31.7	30.3	30.5	31.1	31

หมายเหตุ ชุดที่ 1 ชุดควบคุม ไบโกระถินสด (ไม่ผ่านการปรับสภาพ)

ชุดที่ 2 ชุดไบโกระถินปรับสภาพด้วย 3 % NaOH เป็นเวลา 48 ชั่วโมง

ชุดที่ 3 ชุดไบโกระถินสดร่วมกับหญ้าเนเปียร์ (1:1)

ชุดที่ 4 ชุดไบโกระถินปรับสภาพด้วย NaOH ร่วมกับหญ้าเนเปียร์ (1:1)

ชุดที่ 5 ชุดไบโกระถินสดร่วมกับกากตะกอนเยื่อกระดาษ (1:1)

ชุดที่ 6 ชุดไบโกระถินปรับสภาพด้วย NaOH ร่วมกับกากตะกอนเยื่อกระดาษ (1:1)

ชุดที่ 7 ชุดไบโกระถินสดร่วมกับหญ้าเนเปียร์ (1:3)

ชุดที่ 8 หญ้าเนเปียร์

ตารางที่ ง - 15 ค่าพีเอช (pH) ในถังปฏิกรณ์กวนผสมแบบแบดซ์

วัน	พีเอช (pH) ชุดการทดลอง*							
	ชุดที่ 1	ชุดที่ 2	ชุดที่ 3	ชุดที่ 4	ชุดที่ 5	ชุดที่ 6	ชุดที่ 7	ชุดที่ 8
0	7.94	7.94	7.92	8.11	7.97	7.93	7.88	7.86
3	7.29	7.22	7.14	6.86	8.01	7.94	7.04	7.00
6	7.36	6.79	7.11	6.76	7.49	7.50	6.80	6.75
9	7.17	6.81	6.96	6.84	7.27	7.27	7.12	7.12
12	7.25	6.89	7.02	7.20	7.20	7.30	7.11	7.39
15	7.15	6.92	7.02	7.35	7.02	7.02	7.15	7.27
18	7.15	6.99	7.06	7.23	7.56	7.48	7.18	7.30
21	7.12	7.00	7.07	7.17	7.36	7.55	7.21	7.31
24	7.11	7.04	7.07	7.20	7.25	7.34	7.33	7.23
27	7.15	7.01	7.06	7.16	7.34	7.40	7.21	7.36
30	7.18	7.06	7.07	7.20	7.42	7.40	7.23	7.23
33	7.21	7.11	7.11	7.28	7.27	7.25	7.31	7.23
36	7.12	7.00	7.21	7.30	7.38	7.40	7.30	7.26
39	7.04	7.12	7.11	7.27	7.60	7.34	7.28	7.20
42	7.10	7.20	7.23	7.32	7.51	7.60	7.27	7.24
45	7.03	7.17	7.13	7.3	7.50	7.54	7.24	7.30
48	7.06	7.20	7.26	7.29	7.51	7.26	7.29	7.21
51	7.15	7.17	7.13	7.30	7.34	7.30	7.30	7.34
54	7.20	7.32	7.12	7.34	7.32	7.34	7.26	7.60
57	7.30	7.23	7.11	7.31	7.26	7.23	7.21	7.54
60	7.24	7.24	7.26	7.28	7.23	7.30	7.09	7.26
63	7.23	7.34	7.19	7.27	7.22	7.25	7.21	7.24
66	7.10	7.38	7.14	7.23	7.14	7.28	7.22	7.21
69	7.20	7.60	7.16	7.24	7.21	7.30	7.3	7.54
72	7.12	7.51	7.30	7.12	7.23	7.31	7.39	7.40
75	7.18	7.50	7.23	7.22	7.34	7.35	7.51	7.34
78	7.27	7.51	7.29	7.28	7.42	7.35	7.50	7.40
81	7.34	7.25	7.30	7.35	7.27	7.44	7.51	7.34
84	7.40	7.40	7.40	7.44	7.38	7.54	7.25	7.40
87	7.34	7.60	7.50	7.54	7.60	7.67	7.40	7.50
90	7.40	7.40	7.60	7.67	7.51	7.60	7.51	7.68

หมายเหตุ* ชุดที่ 1 ชุดควบคุม ไบโกระณินสด (ไม่ผ่านการปรับสภาพ)

ชุดที่ 2 ชุดไบโกระณินปรับสภาพด้วย 3 % NaOH เป็นเวลา 48 ชั่วโมง

ชุดที่ 3 ชุดไบโกระณินสดร่วมกับหญ้าเนเปียร์ (1:1)

หมายเหตุ* (ต่อ)

ชุดที่ 4 ชุดโบริกระถินปรับสภาพด้วย NaOH ร่วมกับหญ้าเนเปียร์ (1:1)

ชุดที่ 5 ชุดโบริกระถินสดร่วมกับกากตะกอนเยื่อกระดาษ (1:1)

ชุดที่ 6 ชุดโบริกระถินปรับสภาพด้วย NaOH ร่วมกับกากตะกอนเยื่อกระดาษ (1:1)

ชุดที่ 7 ชุดโบริกระถินสดร่วมกับหญ้าเนเปียร์ (1:3)

ชุดที่ 8 หญ้าเนเปียร์



ตารางที่ ง - 16 ความเป็นต่างและปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายในถังปฏิกรณ์กวนสมบูรณ์แบบแบตช์
(n = 3)

ชุดที่ 1 ชุดควบคุม ไบโกระณินสด (ไม่ปรับสภาพ)

วัน	ค่ากรดไขมันระเหยง่าย (มก./ล.กรดอะซิติก)					ค่าความเป็นต่าง (มก./ล. หินปูน)				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	\bar{x}	S.D.	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	\bar{x}	S.D.
3	73	76	76	75	1.73	2,200	2,160	2,120	2,160	40.00
6	225	250	200	225	25.00	2,220	2,230	2,210	2,220	10.00
9	220	240	215	225	13.23	2,210	2,267	2,183	2,220	42.88
12	175	183	182	180	4.36	1,874	1,940	1,976	1,930	51.73
15	180	180	180	180	0.00	2,200	2,200	2,260	2,220	34.64
18	224	223	228	225	2.65	2,198	2,200	2,262	2,220	36.39
21	250	262	275	263	12.76	2,505	2,500	2,510	2,505	5.00
24	200	200	230	210	17.32	2,304	2,298	2,328	2,310	15.87
27	210	210	210	210	0.00	2,410	2,400	2,390	2,400	10.00
30	235	224	261	240	19.00	2,300	2,310	2,275	2,295	18.03
33	230	255	235	240	13.23	2,400	2,370	2,295	2,355	54.08
36	210	210	210	210	0.00	2,240	2,289	2,206	2,245	41.73
39	221	250	219	230	17.35	2,090	2,125	2,145	2,120	27.84
42	225	210	300	245	48.22	1,920	1,910	1,960	1,930	26.46
45	210	220	200	210	10.00	1,640	1,598	1,580	1,606	30.79
48	245	278	242	255	19.97	1,498	1,590	1,682	1,590	92.00
51	210	199	221	210	11.00	1,600	1,630	1,690	1,640	45.83
54	200	205	216	207	8.19	1,545	1,654	1,571	1,590	56.93
57	130	154	98.5	128	27.83	1,560	1,560	1,560	1,560	0.00
60	110	129	121	120	9.54	1,450	1,499	1,521	1,490	36.35
63	110	120	115	115	5.00	1,415	1,420	1,395	1,410	13.23
66	134	112	96	114	19.08	1,400	1,300	1,380	1,360	52.92
69	124	122	117	121	3.61	1,290	1,198	1,262	1,250	47.16
72	98	110	116	108	9.17	870	890	910	890	20.00
75	123	114	99	112	12.12	1,015	995	1,020	1,010	13.23
78	96	116	82	98	17.09	1,010	990	970	990	20.00
81	117	54	54	75	36.37	968	990	982	980	11.14
84	32	45	55	44	11.53	980	965	935	960	22.91
87	32	29	35	32	3.00	850	875	885	870	18.03
90	45	65	52	54	10.15	940	964	939	948	14.31

ตารางที่ ง - 16 ความเป็นต่างและปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายในถังปฏิกรณ์กวนสมบูรณ์แบบแบตช์
(n = 3) (ต่อ)

ชุดที่ 2 ชุดไบโกระถินปรับสภาพ 3 % NaOH 48 ชั่วโมง

วัน	ค่ากรดไขมันระเหยง่าย (มก./ล.กรดอะซิติก)					ค่าความเป็นต่าง (มก./ล. หินปูน)				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	\bar{X}	S.D.	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	\bar{X}	S.D.
3	155	145	150	150	5.00	850	830	840	840	10.00
6	225	220	230	225	5.00	960	950	970	960	10.00
9	221	224	230	225	4.58	934	956	930	940	14.00
12	210	250	275	245	32.79	1,798	1,850	1,872	1,840	38.00
15	165	185	190	180	13.23	2,150	2,190	2,140	2,160	26.46
18	182	178	180	180	2.00	2,480	2,504	2,441	2,475	31.80
21	205	185	195	195	10.00	2,630	2,640	2,650	2,640	10.00
24	178	177	185	180	4.36	2,500	2,545	2,515	2,520	22.91
27	195	220	215	210	13.23	2,654	2,600	2,621	2,625	27.22
30	173	189	178	180	8.19	2,450	2,510	2,510	2,490	34.64
33	205	210	215	210	5.00	2,498	2,540	2,522	2,520	21.07
36	210	240	225	225	15.00	2,470	2,450	2,460	2,460	10.00
39	203	198	199	200	2.65	2,298	2,315	2,317	2,310	10.44
42	169	204	197	190	18.52	2,130	2,120	2,170	2,140	26.46
45	180	180	180	180	0.00	1,890	1,870	1,820	1,860	36.06
48	203	195	187	195	8.00	1,575	1,498	1,577	1,550	45.04
51	191	180	190	187	6.08	1,660	1,704	1,646	1,670	30.27
54	163	157	160	160	3.00	1,780	1,830	1,820	1,810	26.46
57	150	100	110	120	26.46	1,740	1,820	1,780	1,780	40.00
60	125	145	150	140	13.23	1,800	1,825	1,805	1,810	13.23
63	157	154	169	160	7.94	2,030	2,056	2,079	2,055	24.52
66	115	120	125	120	5.00	2,090	2,100	2,080	2,090	10.00
69	116	134	98	116	18.00	1,995	1,900	2,045	1,980	73.65
72	78	100	110	96	16.37	2,020	1,998	1,982	2,000	19.08
75	97	110	120	109	11.53	1,895	1,904	1,871	1,890	17.06
78	77	79	78	78	1.00	1,520	1,530	1,570	1,540	26.46
81	62	60	79	67	10.44	1,460	1,465	1,455	1,460	5.00
84	66	70	71	69	2.65	1,310	1,314	1,306	1,310	4.00
87	66	40	62	56	14.00	1,190	1,170	1,150	1,170	20.00
90	37	40	49	42	6.24	898	900	910	903	6.14

ตารางที่ ง - 16 ความเป็นต่างและปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายในถังปฏิกรณ์กวนสมบูรณ์แบบแบดซ์
(n = 3) (ต่อ)

ชุดที่ 3 ชุดไบกระถินสดหมักร่วมหญ้าเนเปียร์ (1:1)

วัน	ค่ากรดไขมันระเหยง่าย (มก./ล.กรดอะซิติก)					ค่าความเป็นต่าง (มก./ล. หินปูน)				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	\bar{X}	S.D.	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	\bar{X}	S.D.
3	240	230	205	225	18.03	2,270	2,280	2,290	2,280	10.00
6	330	332	350.5	337.5	11.30	2,397	2,420	2,383	2,400	18.68
9	298	300	302	300	2.00	2,400	2,390	2,350	2,380	26.46
12	360	375	390	375	15.00	2,350	2,300	2,280	2,310	36.06
15	239	240	241	240	1.00	2,550	2,590	2,555	2,565	21.79
18	220	250	250	240	17.32	2,390	2,460	2,440	2,430	36.06
21	296	268	246	270	25.06	2,660	2,640	2,710	2,670	36.06
24	280	293	282	285	7.00	2,690	2,750	2,750	2,730	34.64
27	230	240	250	240	10.00	2,740	2,742	2,753	2,745	7.00
30	245	255	220	240	18.03	2,450	2,490	2,530	2,490	40.00
33	230	224	221	225	4.58	2,610	2,600	2,630	2,610	15.28
36	212	219	205	212	7.00	2,450	2,498	2,477	2,475	24.06
39	198	220	212	210	11.14	2,210	2,200	2,190	2,200	10.00
42	240	226	239	235	7.81	2,040	2,056	2,084	2,060	22.27
45	225	224	226	225	1.00	1,900	1,890	1,820	1,870	43.59
48	280	290	285	285	5.00	1,760	1,780	1,710	1,750	36.06
51	240	250	215	235	18.03	1,680	1,670	1,720	1,690	26.46
54	175	180	185	180	5.00	1,580	1,630	1,620	1,610	26.46
57	135	144	126	135	9.00	1,690	1,680	1,700	1,690	10.00
60	225	220	230	225	5.00	1,540	1,540	1,540	1,540	0.00
63	220	219	221	220	1.00	1,520	1,550	1,550	1,540	17.32
66	219	220	155	198	37.24	1,589	1,640	1,631	1,620	27.22
69	135	145	140	140	5.00	1,800	1,790	1,750	1,780	26.46
72	129	130	137	132	4.36	1,970	2,010	2,000	1,960	45.83
75	129	130	116	125	7.81	1,830	1,850	1,885	1,855	27.84
78	112	120	107	113	6.56	1,640	1,645	1,725	1,670	47.70
81	77	88	75	80	7.00	1,560	1,500	1,575	1,545	39.69
84	70	74	81	75	5.57	1,400	1,410	1,330	1,380	43.59
87	65	81	55	67	13.11	1,110	1,150	1,175	1,145	32.79
90	56	71	53	60	9.64	1,025	1,030	1,035	1,030	5.00

ตารางที่ ง - 16 ความเป็นต่างและปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายในถังปฏิกรณ์กวนสมบูรณ์แบบแบดซ์
(n = 3) (ต่อ)

ชุดที่ 4 ชุดไบโกระถินปรับสภาพหมักร่วมหญ้าเนเปียร์ (1:1)

วัน	ค่ากรดไขมันระเหยง่าย (มก./ล.กรดอะซิติก)					ค่าความเป็นต่าง (มก./ล. หินปูน)				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	\bar{X}	S.D.	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	\bar{X}	S.D.
3	145	150	155	150	5.00	1,010	990	940	980	36.06
6	300	310	290	300	10.00	1,310	1,290	1,300	1,300	10.00
9	300	300	300	300	0.00	1,430	1,380	1,390	1,400	26.46
12	290	310	300	300	10.00	2,780	2,790	2,800	2,790	10.00
15	230	235	255	240	13.23	3,090	3,010	3,080	3,060	43.59
18	265	270	275	270	5.00	3,170	3,179	3,146	3,165	17.06
21	267	278	265	270	7.00	3,400	3,440	3,420	3,420	20.00
24	240	245	280	255	21.79	3,410	3,390	3,460	3,420	36.06
27	239	245	236	240	4.58	3,420	3,390	3,360	3,390	30.00
30	230	214	231	225	9.54	3,215	3,210	3,205	3,210	5.00
33	180	180	180	180	0.00	3,100	3,090	3,080	3,090	10.00
36	160	210	200	190	26.46	2,590	2,640	2,660	2,630	36.06
39	225	223	227	225	2.00	2,540	2,570	2,570	2,560	17.32
42	210	250	260	240	26.46	2,130	2,100	2,160	2,130	30.00
45	245	250	225	240	13.23	2,510	2,490	2,440	2,480	36.06
48	210	200	175	195	18.03	1,970	1,990	1,920	1,960	36.06
51	139	140	156	145	9.54	2,000	2,020	2,010	2,010	10.00
54	130	140	144	138	7.21	1,988	1,990	1,962	1,980	15.62
57	130	143	109.5	128	16.89	2,215	2,220	2,225	2,220	5.00
60	123	125	127	125	2.00	1,990	1,970	2,010	1,990	20.00
63	110	120	130	120	10.00	1,870	1,810	1,885	1,855	39.69
66	156	138	126	140	15.10	1,700	1,760	1,760	1,740	34.64
69	150	145	140	145	5.00	1,950	1,900	1,865	1,905	42.72
72	100	108	116	108	8.00	2,390	2,400	2,410	2,400	10.00
75	110	111	115	112	2.65	2,010	1,990	2,000	2,000	10.00
78	114	97	83	98	15.52	1,920	1,930	1,940	1,930	10.00
81	75	76	83	78	4.36	1,659	1,655	1,621	1,645	20.88
84	74	81	70	75	5.57	1,460	1,445	1,460	1,455	8.66
87	80	88	84	84	4.00	1,275	1,280	1,315	1,290	21.79
90	65	68	47	60	11.36	1,270	1,280	1,245	1,265	18.03

ตารางที่ ง - 16 ความเป็นต่างและปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายในถังปฏิกรณ์กวนสมบูรณ์แบบแบดช์
(n = 3) (ต่อ)

ชุดที่ 5 ชุดไบโกระถินสดหมักร่วมกากตะกอนเยื่อกระดาษ (1:1)

วัน	ค่ากรดไขมันระเหยง่าย (มก./ล.กรดอะซิติก)					ค่าความเป็นต่าง (มก./ล. หินปูน)				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	\bar{X}	S.D.	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	\bar{X}	S.D.
3	2,300	2,350	2,280	2,310	36.06	6,020	6,055	6,015	6,030	21.79
6	1,640	1,630	1,590	1,620	26.46	5,600	5,650	5,670	5,640	36.06
9	1,200	1,160	1,150	1,170	26.46	6,000	6,020	5,980	6,000	20.00
12	1,010	970	960	980	26.46	5,610	5,590	5,600	5,600	10.00
15	250	240	230	240	10.00	5,500	5,575	5,530	5,535	37.75
18	203	207	197	203	4.77	5,850	5,800	5,855	5,835	30.41
21	250	247	245	247	2.29	6,250	6,240	6,230	6,240	10.00
24	203	205	209	203	3.06	6,290	6,370	6,330	6,330	40.00
27	200	180	190	190	10.00	6,020	6,010	5,970	6,000	26.46
30	210	190	163	188	23.85	6,300	6,240	6,210	6,250	45.83
33	250	275	285	270	18.03	5,990	6,000	6,010	6,000	10.00
36	259	270	258	263	6.50	6,340	6,350	6,360	6,350	10.00
39	210	199	199	203	6.50	6,700	6,650	6,720	6,690	36.06
42	199	197	207	201	5.29	6,350	6,310	6,300	6,320	26.46
45	209	195	181	195	14.00	6,500	6,439	6,501	6,480	35.51
48	210	190	170	190	20.00	6,240	6,270	6,219	6,243	25.63
51	200	210	184	198	13.11	6,200	6,170	6,170	6,180	17.32
54	180	175	185	180	5.00	5,640	5,600	5,635	5,625	21.79
57	175	184	181	180	4.58	5,250	5,255	5,245	5,250	5.00
60	190	189	176	185	7.81	5,700	5,780	5,770	5,750	43.59
63	190	160	175	175	15.00	5,510	5,490	5,500	5,500	10.00
66	165	170	175	170	5.00	4,650	4,650	4,575	4,625	43.30
69	160	162	158	160	2.00	4,200	4,175	4,135	4,170	32.79
72	144	150	141	145	4.58	3,450	3,480	3,510	3,480	30.00
75	130	108	125	121	11.53	2,510	2,460	2,470	2,480	26.46
78	120	115	116	117	2.65	1,775	1,776	1,786	1,779	6.08
81	110	102	100	104	5.29	1,340	1,350	1,378	1,356	19.70
84	98	89	83	90	7.55	1,020	1,010	1,060	1,030	26.46
87	90	99	81	90	9.00	1,012	1,010	1,011	1,011	1.00
90	95	92	95	94	1.73	1,000	990	1,010	1,000	10.00

ตารางที่ ง - 16 ความเป็นต่างและปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายในถังปฏิกรณ์กวนสมบูรณ์แบบแบดซ์
(n = 3) (ต่อ)

ชุดที่ 6 ชุดไบโกระถินปรับสภาพหมักร่วมกากตะกอนเยื่อกระดาษ (1:1)

วัน	ค่ากรดไขมันระเหยง่าย (มก./ล.กรดอะซิติก)					ค่าความเป็นต่าง (มก./ล. หินปูน)				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	\bar{X}	S.D.	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	\bar{X}	S.D.
3	2,650	2,630	2,640	2,640	10.00	7,310	7,275	7,285	7,290	18.03
6	2,675	2,685	2,695	2,685	10.00	7,400	7,400	7,340	7,380	34.64
9	2,740	2,700	2,750	2,730	26.46	8,790	8,730	8,760	8,760	30.00
12	1,780	1,765	1,765	1,770	8.66	7,550	7,610	7,640	7,600	45.83
15	1,900	1,875	1,895	1,890	13.23	7,450	7,400	7,425	7,425	25.00
18	1,200	1,165	1,145	1,170	27.84	8,000	8,020	8,010	8,010	10.00
21	1,169	1,172	1,169	1,170	1.73	7,640	7,645	7,665	7,650	13.23
24	340	345	328	338	9.01	7,639	7,649	7,662	7,650	11.53
27	265	270	275	270	5.00	7,200	7,240	7,262	7,234	31.43
30	225	230	220	225	5.00	7,450	7,550	7,500	7,500	50.00
33	254	253	252	253	0.82	8,500	8,550	8,488	8,513	33.07
36	310	309	281	300	16.46	7,940	7,930	7,905	7,925	18.03
39	225	220	230	225	5.00	6,650	6,590	6,560	6,600	45.83
42	222	225	228	225	3.00	6,500	6,590	6,539	6,543	45.13
45	218	225	217	220	4.36	6,640	6,690	6,680	6,670	26.46
48	232	237	224	231	6.56	6,430	6,420	6,440	6,430	10.00
51	250	238	255	248	8.53	7,945	7,980	8,015	7,980	35.00
54	235	240	245	240	5.00	6,550	6,450	6,500	6,500	50.00
57	235	238	247	240	6.24	6,220	6,240	6,200	6,220	20.00
60	245	248	257	250	6.24	5,760	5,740	5,735	5,745	13.23
63	220	218	222	220	2.00	5,400	5,450	5,410	5,420	26.46
66	195	189	186	190	4.58	4,600	4,510	4,540	4,550	45.83
69	188	200	182	190	9.17	3,740	3,745	3,744	3,743	2.65
72	170	175	180	175	5.00	3,500	3,520	3,480	3,500	20.00
75	164	165	166	165	1.00	3,250	3,280	3,220	3,250	30.00
78	145	148	157	150	6.24	2,240	2,280	2,230	2,250	26.46
81	120	130	125	125	5.00	2,215	2,220	2,210	2,215	5.00
84	140	112	123	125	14.11	1,680	1,690	1,640	1,670	26.46
87	110	112	108	110	2.00	1,540	1,550	1,560	1,550	10.00
90	114	109	119	114	5.00	1,090	1,110	1,100	1,100	10.00

ตารางที่ ง - 16 ความเป็นต่างและปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายในถังปฏิกรณ์กวนสมบูรณ์แบบแบดซ์
(n = 3) (ต่อ)

ชุดที่ 7 ชุดไบกระถินสดหมักร่วมหญ้าเนเปียร์ (1:3)

วัน	ค่ากรดไขมันระเหยง่าย (มก./ล.กรดอะซิติก)					ค่าความเป็นต่าง (มก./ล. หินปูน)				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	\bar{X}	S.D.	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	\bar{X}	S.D.
3	490	480	493	488	6.61	2,015	2,017	1,998	2,010	10.44
6	378	370	377	375	4.36	2,000	1,920	1,930	1,950	43.59
9	510	490	500	500	10.00	2,510	2,490	2,500	2,500	10.00
12	520	519	508	516	6.73	2,365	2,360	2,363	2,363	2.50
15	445	459	446	450	7.81	2,600	2,640	2,590	2,610	26.46
18	410	400	390	400	10.00	2,480	2,490	2,440	2,470	26.46
21	419	415	408	414	5.57	2,250	2,200	2,279	2,243	39.96
24	405	409	416	410	5.57	2,980	3,010	3,010	3,000	17.32
27	335	330	346	337	8.19	2,750	2,720	2,686	2,719	31.89
30	330	337	323	330	7.00	2,600	2,660	2,660	2,640	34.64
33	320	310	330	320	10.00	2,510	2,500	2,550	2,520	26.46
36	355	350	330	345	13.23	2,590	2,660	2,625	2,625	35.00
39	275	280	255	270	13.23	2,340	2,300	2,290	2,310	26.46
42	280	265	280	275	8.66	2,100	2,160	2,160	2,140	34.64
45	255	249	258	254	4.58	1,840	1,890	1,850	1,860	26.46
48	245	240	235	240	5.00	1,550	1,559	1,541	1,550	9.00
51	275	279	280	278	2.65	1,650	1,645	1,715	1,670	39.05
54	225	225	225	225	0.00	1,845	1,800	1,785	1,810	31.22
57	210	220	206	212	7.21	2,050	2,032	2,083	2,055	25.87
60	180	190	197	189	8.54	2,075	2,078	2,117	2,090	23.43
63	190	210	200	200	10.00	1,980	1,975	1,985	1,980	5.00
66	189	195	186	190	4.58	1,630	1,640	1,665	1,645	18.03
69	199	189	197	195	5.29	1,900	1,825	1,840	1,855	39.69
72	164	165	151	160	7.81	2,010	1,980	1,980	1,990	17.32
75	179	173	173	175	3.46	1,870	1,910	1,890	1,890	20.00
78	98	110	92	100	9.17	1,540	1,565	1,515	1,540	25.00
81	95	100	99	98	2.65	1,490	1,470	1,420	1,460	36.06
84	70	75	65	70	5.00	1,320	1,290	1,320	1,310	17.32
87	67	63	65	65	2.00	1,050	1,010	1,000	1,020	26.46
90	54	45	51	50	4.58	990	1,020	1,020	1,010	17.32

ตารางที่ ง - 16 ความเป็นต่างและปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายในถังปฏิกรณ์กวนสมบูรณ์แบบแบดซ์
(n = 3) (ต่อ)

ชุดที่ 8 ชุดหญ้าเนเปียร์

วัน	ค่ากรดไขมันระเหยง่าย (มก./ล.กรดอะซิติก)					ค่าความเป็นต่าง (มก./ล. หินปูน)				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	\bar{X}	S.D.	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	\bar{X}	S.D.
3	530	540	505	525	18.03	2,545	2,539	2,521	2,535	12.49
6	525	530	520	525	5.00	2,870	2,890	2,835	2,865	27.84
9	1280	1300	1290	1290	10.00	3,220	3,220	3,190	3,210	17.32
12	1050	1040	1060	1050	10.00	2,650	2,645	2,655	2,650	5.00
15	374	370	381	375	5.57	3,400	3,420	3,418	3,413	10.90
18	410	398	392	400	9.17	3,770	3,700	3,780	3,750	43.59
21	414	415	408	412	3.50	3,220	3,239	3,272	3,244	26.45
24	410	405	415	410	5.00	3,800	3,865	3,855	3,840	35.00
27	365	370	375	370	5.00	3,500	3,535	3,540	3,525	21.79
30	385	380	375	380	5.00	3,390	3,420	3,390	3,400	17.32
33	390	394	386	390	4.00	3,200	3,230	3,245	3,225	22.91
36	400	419	411	410	9.54	3,365	3,350	3,410	3,375	31.22
39	300	305	325	310	13.23	3,400	3,420	3,380	3,400	20.00
42	285	260	280	275	13.23	3,100	3,108	3,095	3,101	6.56
45	325	330	305	320	13.23	3,240	3,245	3,265	3,250	13.23
48	345	355	320	340	18.03	2,660	2,645	2,585	2,630	39.69
51	238	240	236	238	2.00	2,560	2,530	2,590	2,560	30.00
54	260	230	230	240	17.32	2,145	2,110	2,135	2,130	18.03
57	215	220	207	214	6.56	2,485	2,500	2,455	2,480	22.91
60	175	180	179	178	2.65	2,460	2,475	2,490	2,475	15.00
63	180	165	162	169	9.64	2,190	2,195	2,215	2,200	13.23
66	154	150	158	154	4.00	2,070	2,055	2,055	2,060	8.66
69	151	150	149	150	1.00	1,970	1,960	1,950	1,960	10.00
72	169	170	186	175	9.54	1,840	1,850	1,875	1,855	18.03
75	145	140	135	140	5.00	1,630	1,690	1,690	1,670	34.64
78	120	131	112	121	9.54	1,550	1,555	1,530	1,545	13.23
81	106	100	118	108	9.17	1,458	1,460	1,462	1,460	2.00
84	84	85	89	86	2.65	1,310	1,309	1,311	1,310	1.00
87	58	50	54	54	4.00	1,165	1,178	1,167	1,170	7.00
90	55	53	57	55	2.00	1,019	1,010	1,013	1,014	4.58

ตารางที่ ง - 17 องค์ประกอบก๊าซชีวภาพของชุดการทดลองต่าง ๆ ในถังปฏิกรณ์กวนผสมแบบแบตช์ ทำการวัดก๊าซในวันที่ 15 20 และ 30 ด้วยเครื่องวัดองค์ประกอบก๊าซ BIOGAS 5000 บริษัท Geotech

วันที่ 15 ของการทดลอง

องค์ประกอบก๊าซ ชีวภาพ	ชุดการทดลอง*							
	ชุดที่ 1	ชุดที่ 2	ชุดที่ 3	ชุดที่ 4	ชุดที่ 5	ชุดที่ 6	ชุดที่ 7	ชุดที่ 8
มีเทน (CH ₄)	48.9	57.5	72.8	56.0	61.0	58.7	62.0	62.2
คาร์บอนไดออกไซด์ (CO ₂)	29.3	33.0	23.3	35.1	34.6	32.0	25.9	27.2
อื่นๆ	21.8	9.5	3.9	8.9	4.4	9.3	12.1	10.6

วันที่ 20 ของการทดลอง

องค์ประกอบก๊าซ ชีวภาพ	ชุดการทดลอง*							
	ชุดที่ 1	ชุดที่ 2	ชุดที่ 3	ชุดที่ 4	ชุดที่ 5	ชุดที่ 6	ชุดที่ 7	ชุดที่ 8
มีเทน (CH ₄)	51.1	59.2	73.5	59.0	66.0	60.4	63.0	64.0
คาร์บอนไดออกไซด์ (CO ₂)	28.9	31.5	21.5	34.2	33.2	31.2	25.3	24.8
อื่นๆ	20.0	9.3	5.0	6.8	0.8	8.4	11.7	11.2

วันที่ 30 ของการทดลอง

องค์ประกอบก๊าซ ชีวภาพ	ชุดการทดลอง*							
	ชุดที่ 1	ชุดที่ 2	ชุดที่ 3	ชุดที่ 4	ชุดที่ 5	ชุดที่ 6	ชุดที่ 7	ชุดที่ 8
มีเทน (CH ₄)	46.4	58.5	72.7	61.1	61.7	59.7	61.9	61.6
คาร์บอนไดออกไซด์ (CO ₂)	30.6	33.3	25.1	30.0	35.1	34.0	29.5	29.3
อื่นๆ	23.0	8.2	2.2	8.9	3.2	6.3	8.6	9.1

หมายเหตุ * ชุดการทดลอง ต่างๆ มีรายละเอียดของชุดการทดลอง ดังนี้

ชุดที่ 1 ชุดควบคุม ไบโกระณินเทพณรงค์สด

ชุดที่ 2 ไบโกระณินเทพณรงค์ปรับสภาพ (NaOH ร้อยละ 3 เวลา 48 ชั่วโมง)

ชุดที่ 3 หนุ้าเนเปียร์

ชุดที่ 4 ไบโกระณินเทพณรงค์สดหมักร่วมกับหนุ้าเนเปียร์ อัตราส่วน (1:1)

หมายเหตุ *ชุดการทดลอง ต่างๆ มีรายละเอียดของชุดการทดลอง ดังนี้ (ต่อ)

ชุดที่ 5 ใบกระถินเทพนรงค์หมักร่วมกับหญ้าเนเปียร์ อัตราส่วน (1:3)

ชุดที่ 6 ใบกระถินเทพนรงค์ปรับสภาพหมักร่วมกับหญ้าเนเปียร์ อัตราส่วน (1:1)

ชุดที่ 7 ใบกระถินเทพนรงค์หมักร่วมกับกากตะกอนเยื่อกระดาษอัตราส่วน (1:1)

ชุดที่ 8 ใบกระถินเทพนรงค์ปรับสภาพหมักร่วมกับกากตะกอนเยื่อกระดาษอัตราส่วน (1:1)



ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวปัทมวรรณ ไชยพงศ์ เกิดเมื่อวันที่ 4 เมษายน พ.ศ. 2531 ที่จังหวัดสงขลา สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนศรีอยุธยา ในพระอุปถัมภ์ฯ จ.กรุงเทพมหานคร ในปีการศึกษา 2548 สำเร็จการศึกษาในระดับปริญญาตรี หลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาจุลชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2553 และเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2555

การเผยแพร่วิทยานิพนธ์แบบบรรยายในที่ประชุมระดับนานาชาติ

Pattawan Chaiyapong and Orathai Chavalparit. "Enhancement of Biogas Production from Acacia hybrid Leave Using Alkaline Pretreatment" The proceedings of the 2rd 3R International Conference on Material Cycles and Waste Management, Daejeon Convention Center, Daejeon, Korea. 21-23 May, 2015.

การเผยแพร่วิทยานิพนธ์แบบบรรยายในที่ประชุมระดับนานาชาติ

ปัทมวรรณ ไชยพงศ์ และ อรทัยชวาลภาฤทธิ์. "การใช้ไมเดลออกแบบการทดลองผลิตก๊าซชีวภาพจากชีวมวลที่มีการปรับสภาพขั้นต้น" เอกสารประกอบการประชุมวิชาการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติครั้งที่ 14, โรงแรมโลตัส ปางสวนแก้ว จังหวัดเชียงใหม่. วันที่ 27-29 พฤษภาคม 2558.