การศึกษาเทคนิคการผลิตแก๊สชีวภาพจากฟางข้าวโดยการบำบัดขั้นต้นด้วยคลื่นอัลตราโซนิค

นายศรัณย์ ปานศรีพงษ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2556

A TECHNICAL STUDY ON ULTRASONIC PRETREATMENT FOR BIOGAS PRODUCTION FROM RICE STRAW

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

Saran Pansripong

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the

Degree of Doctor of Philosophy in Environmental Engineering

Suranaree University of Technology

Academic Year 2013

การศึกษาเทคนิคการผลิตแก๊สชีวภาพจากฟางข้าวโดยการบำบัดขั้นต้น
ด้วยคลื่นอัลตราโซนิค

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาดุษฎีบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

____

(ผศ. ดร.จรียา ยิ้มรัตนบวร)
ประธานกรรมการ

____

(ผศ. ดร.วีรชัย อาจหาญ)
กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

____

(ผศ. ดร.บุญชัย วิจิตรเสถียร)
กรรมการ

____

(รศ. ดร.สุเมธ ไชยประพัทธ์)
กรรมการ

____

(ผศ. ดร.สุดจิต ครุจิต)
กรรมการ

____

(อ. ดร.ฉัตรเพชร ยศพล)
กรรมการ

____

(ศ. ดร.ชูกิจ ลิมปิจำนงค์)
รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและนวัตกรรม

____

(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)
คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ศรัลย์ ปานศรีพงษ์ : การศึกษาเทคนิคการผลิตแก๊สชีวภาพจากฟางข้าวโดยการบำบัดขั้นต้นด้วยคลื่นอัลตราโซนิค (A TECHNICAL STUDY ON ULTRASONIC PRETREATMENT FOR BIOGAS PRODUCTION FROM RICE STRAW) อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วีรชัย อาจหาญ, 192 หน้า.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษากระบวนการย่อยสลายฟางข้าวขั้นต้น (Pretreatment) โดยประยุกต์ใช้คลื่นอัลตราโซนิคซึ่งเป็นคลื่นเสียงที่มีช่วงความถี่มากกว่า 20 kHz ขึ้นไป ผ่านตัวกลางที่เป็นของเหลวจะเกิดคาวิเตชันจากการบีบอัดของคลื่นความถี่สูง ส่งผลให้สารแขวนลอยในตัวกลางมีโครงสร้างเล็กลง งานวิจัยนี้จะทำการศึกษาลักษณะของโครงสร้าง องค์ประกอบ และศักยภาพในการผลิตแก๊สชีวภาพของฟางข้าวที่เปลี่ยนแปลงไป โดยทำการทดสอบการย่อยสลายฟางข้าวขั้นต้นด้วยคลื่นอัลตราโซนิคควบคู่กับความร้อนโดยใช้วิธีการต้ม เปรียบเทียบกับการย่อยสลายฟางข้าวขั้นต้นด้วยคลื่นอัลตราโซนิคเพียงอย่างเดียว และการย่อยสลายฟางข้าวขั้นต้นด้วยความร้อนจากการต้มและการนึ่งเพียงอย่างเดียว

ผลการศึกษาพบว่าการประยุกต์ใช้คลื่นอัลตราโซนิคควบคู่กับความร้อนโดยวิธีการต้มทำให้โครงสร้างของฟางข้าวมีขนาดเล็กลงและมีความพรุนเพิ่มขึ้นเมื่อส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (FE-SEM) และทำการวิเคราะห์องค์ประกอบของเฮมิเซลลูโลสที่คงเหลือ กล่าวคือ ฟางข้าวมีองค์ประกอบเฮมิเซลลูโลส ร้อยละ 41.70 เมื่อผ่านการย่อยสลายขั้นต้นด้วยความร้อนโดยการต้ม 10 นาที ต้ม 20 นาที การย่อยสลายขั้นต้นด้วยไอน้ำ 15 นาที การใช้คลื่นอัลตราโซนิคความถี่ 37 kHz 102 kHz การใช้คลื่นอัลตราโซนิคร่วมกับการต้ม 10 นาที ที่ความถี่ 37 kHz และ 102 kHz มีค่าองค์ประกอบเฮมิเซลลูโลสที่ ร้อยละ 35.13 34.95 34.67 30.95 33.02 32.72 และ 33.80 ตามลำดับ โดยมีค่าเฮมิเซลลูโลสลดลง ร้อยละ 15.76 16.19 16.86 25.78 20.82 21.53 และ 18.94 ตามลำดับ ทั้งนี้จะเห็นว่าการย่อยสลายขั้นต้นด้วยคลื่นอัลตราโซนิค จะสามารถทำให้องค์ประกอบของเฮมิเซลลูโลสลดลง และจะมีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้น เมื่อทำการย่อยสลายขั้นต้นด้วยคลื่นอัลตราโซนิคร่วมกับการต้ม และสามารถนำมาใช้ในการย่อยสลายขั้นต้นฟางข้าวได้ดี

เมื่อนำไปทดสอบศักยภาพการผลิตแก๊สมีเทนพบว่า การประยุกต์ใช้คลื่นอัลตราโซนิคร่วมกับความร้อนโดยวิธีการต้ม ทำให้ศักยภาพการผลิตแก๊สมีเทนของฟางข้าวดีขึ้น กล่าวคือ เมื่อทำการย่อยสลายขั้นต้นด้วยวิธีการต้ม 10 นาที ต้ม 20 นาที การย่อยสลายขั้นต้นด้วยไอน้ำ การใช้คลื่นอัลตราโซนิคเพียงอย่างเดียวความถี่ 37 kHz และ 102 kHz และการใช้คลื่นอัลตราโซนิคร่วมกับการต้ม 10 นาที ที่ความถี่ดังกล่าว ศักยภาพการผลิตแก๊สมีเทนมีค่า 248.83 255.27 256.13 250.36 243.79 266.03 และ 258.07 mL CH_4 g VS^{-1}_{added} ที่สภาวะมาตรฐาน (STP) ในช่วงระยะเวลา 45 วัน

ตามลำดับ โดยมีค่าเพิ่มขึ้นจากชุดควบคุม (205.30 mL CH_4 g VS^{-1}_{added}) ร้อยละ 21.20 24.34 24.76 21.95 18.75 29.58 และ 24.76 ตามลำดับ ซึ่งการย่อยสลายขั้นต้นด้วยคลื่น อัลตราโซนิคร่วมกับการต้ม 10 นาที จะมีประสิทธิภาพในการเพิ่มปริมาณการเกิดแก๊สมีเทนสะสมได้สูงสุดร้อยละ 29.58

การศึกษาปริมาณการเกิดแก๊สมีเทนสะสม ที่การย่อยสลายขั้นต้นที่สภาวะต่าง ๆ ดังกล่าว ถูกนำมาวิเคราะห์เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังของคลื่นอัลตราโซนิคและระยะเวลาที่ใช้ในการย่อยสลายขั้นต้น โดยการสร้างแบบจำลองพื้นผิวตอบ (Response Surface Model : RSM) และวางแผนการทดลองแบบ Central Composite Design (CCD) โดยผลของการทดสอบแบบจำลองพื้นผิวผลตอบมีค่า adj. R^2 เท่ากับ 0.96 และ 0.90 สำหรับแบบจำลองความสัมพันธ์ของปริมาณการเกิดแก๊สมีเทนสะสมที่ได้จากการทดสอบการย่อยสลายขั้นต้นด้วยคลื่นอัลตราโซนิคเพียงอย่างเดียวที่ความถี่ 37 kHz และ 102 kHz ตามลำดับ และมีค่า adj. R^2 เท่ากับ 0.96 และ 0.94 สำหรับการย่อยสลายขั้นต้นแบบด้วยคลื่นอัลตราโซนิคร่วมกับการต้ม ตามลำดับ ผลการทดลองพบว่า ปัจจัยที่ทำให้เกิดการผลิตแก๊สมีเทนมาจากกำลังส่งที่มีค่าสูงกว่า 160 W ขึ้นไป และระยะเวลาในการส่งคลื่นที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้อัตราการเกิดแก๊สมีเทนเพิ่มขึ้นเช่นกัน

จากการทดสอบการเดินระบบผลิตแก๊สชีวภาพโดยใช้คลื่นอัลตราโซนิคร่วมกับการต้มในการย่อยสลายขั้นต้น ที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 0.9 1.20 1.81 และ 3.61 $kgVS_{added}m^{-3}d^{-1}$ มีประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งระเหยง่าย (VS) อยู่ในช่วงร้อยละ 24.54 – 37.22 มีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดี อยู่ในช่วงร้อยละ 36.08 – 44.37 และมีประสิทธิภาพในการผลิตแก๊สมีเทนอยู่ในช่วง 181.75 – 244.06 $LCH_4/kgVS_{added}$ ซึ่งมีค่าสูงสุดที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 1.2 $kgVS_{added}m^{-3}d^{-1}$ โดยมีค่าจลศาสตร์การย่อยสลายทางชีวภาพของระบบ (k) เท่ากับ 0.1435 d^{-1}

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ลายมือชื่อนักศึกษา ____________________

ปีการศึกษา 2556 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา____________________

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม______________

SARAN PANSRIPONG : A TECHNICAL STUDY ON ULTRASONIC PRETREATMENT FOR BIOGAS PRODUCTION FROM RICE STRAW. THESIS ADVISOR : ASST. PROF. WEERACHAI ARJHARN, Ph.D., 192 PP.

PRETREATMENT / ULTRASONIC / BIOGAS / RICE STRAW / BIOCHEMICAL POTENTIAL ASSAY / ANAEROBIC DIGESTION

The objective of this research was to study pretreatment process for rice straw degradation by applying ultrasonic with frequencies greater than 20 kHz. In this research, structural and compositional alterations and biochemical methane potential (BMP) of rice straw were studied when pretreated with ultrasonic combined with boiling. Corresponding results were compared with those of ultrasonic pretreatment, boiling and steam treatments.

Results showed that an application of ultrasonic coupled with heat by boiling reduced structural size of rice straw and increased its porosity obviously indicated by FE-SEM and remaining hemicellulose analysis. Initially, rice straw contained hemicellulose 41.70% but pretreating it with boiling for 10 and 20 min, steaming for 15 min, ultrasonic at 37 and 102 kHz and combination of ultrasonic at 37 and 102 kHz and boiling for 10 min resulted in hemicellulose reduction to 35.13%, 34.95%, 34.67%, 30.95%, 33.02%, 32.72% and 33.80%, respectively, which correspond to percentage reduction of 15.76%, 16.19%, 16.86%, 25.78%, 20.82%, 21.53% and 18.94%, respectively. Obviously, use of ultrasonic reduce hemicellulose content in rice straw and the efficiency increased when combined with boiling, showing a potential for rice straw pretreatment.

Tested with BMP, rice straw pretreated with ultrasonic wave combined with boiling had greater BMP values than those of untreated one. Pretreatment with boiling for 10 and 20 min, steaming for 15 min, ultrasonic wave at 37 and 102 kHz and ultrasonic wave at 37 and 102 kHz combined boiling for 10 min resulted in BMP values of 248.83, 255.27, 256.13, 250.36, 243.79, 266.03 and 258.07 mL CH_4 g VS^{-1}_{added} at STP during 45 days, respectively. These increased from untreated sample (205.30 mL CH_4 g VS^{-1}_{added}) by 21.20%, 24.34%, 24.76%, 21.95%, 18.75%, 29.58% and 24.76%, respectively. Among them, ultrasonic wave combined with boiling for 10 min showed the greatest BMP value with percentage increase of 29.58%.

Results on methane accumulation at various conditions (power: 120-200W; treatment time: 10-30 min; frequency: 37 and 102 kHz) were used for analysis of relationship between ultrasonic wave power and pretreatment duration using response surface model (RSM) with central composite design (CCD). Results showed that adj. R^2 values were 0.96 and 0.90 for methane accumulation obtained from an ultrasonic wave pretreatment at 37 and 102 kHz, respectively.

Test of biogas system operation using ultrasonic wave coupled with boiling as pretreatments at organic loads of 0.9, 1.20, 1.81 and 3.61 $kgVS_{added}$ $m^{-3}d^{-1}$ had efficiencies in eliminating volatile solid ranging from 24.54 to 37.22% and COD in the range of 36.08-44.37. The efficiencies of methane production ranged from 181.75 to 244.06 $LCH_4/kgVS_{added}$, with the highest value found at an organic load of 1.2 $kgVS_{added}$ $m^{-3}d^{-1}$. The corresponding system biodegradation kinetic (k) value was 0.1435 d^{-1}.

School of Environmental Engineering — Student's Signature____________________

Academic Year 2013 — Advisor's Signature____________________

Co-advisor's Signature_________________

กิตติกรรมประกาศ

ดุษฎีนิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องมาจากความใส่ใจและเมตตาของคณาจารย์ รวมทั้งกำลังใจจากบุคคลหลายท่าน ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วีรชัย อาจหาญ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ เป็นอย่างสูง ที่ท่านได้ให้โอกาสทางการศึกษา ให้คำแนะนำปรึกษาด้านวิชาการ คอยให้การช่วยเหลือและช่วยแก้ไขปัญหาต่าง ๆ ให้กับผู้วิจัยมาโดยตลอด จนดุษฎีนิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลงได้อย่างสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุญชัย วิจิตรเสถียร (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม) รองศาสตราจารย์ ดร.สุเมธ ไชยประพัทธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จรียา ยิ้มรัตบวร ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุดจิต ครุจิต และอาจารย์ ดร.ฉัตรเพชร ยศพล คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ทุกท่าน ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษาด้านวิชาการอันเป็นประโยชน์ ตลอดจนช่วยตรวจสอบและแก้ไขดุษฎีนิพนธ์เล่มนี้ให้สำเร็จลงได้โดยสมบูรณ์

ขอขอบคุณบุคลากร ศูนย์ความเป็นเลิศทางด้านชีวมวล บัณฑิตศึกษา และบุคลากร สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ทุกท่าน ที่คอยช่วยเหลือ สนับสนุนให้การทำวิจัย สำเร็จลุล่วง ขอกราบระลึกถึงบุญคุณของครูบาอาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้กับศิษย์ และขอขอบคุณกำลังใจจากทุกท่านในครอบครัวอันเป็นส่วนสำคัญยิ่งให้สามารถต่อสู้และผ่านปัญหาอุปสรรคต่าง ๆ มาได้

สำคัญที่สุด ขอกราบขอบพระคุณบิดาและมารดา ผู้ให้กำเนิด ให้การเลี้ยงดู ส่งเสริมการศึกษาให้การสนับสนุนในทุก ๆ ด้าน อย่างดีที่สุดเสมอมา ทำให้ผู้วิจัยมีความรู้และมีหลักธรรมในการดำเนินชีวิตที่ดี จนทำให้ประสบความสำเร็จในชีวิต

ศรัลย์ ปานศรีพงษ์

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย) .... ก
บทคัดย่อ (อังกฤษ) .... ค
กิตติกรรมประกาศ .... จ
สารบัญ .... ฉ
สารบัญตาราง .... ฏ
สารบัญรูป .... ฒ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ .... ต
บทที่
1 บทนำ 1
1.1 ที่มา และความสำคัญของปัญหา 1
1.2 วัตถุประสงค์ 3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย 3
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ 3
2 ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 4
2.1 ข้อมูลเกี่ยวกับฟางข้าว 4
2.1.1 สถานภาพฟางข้าวของประเทศไทย 4
2.1.2 องค์ประกอบลิกโนเซลลูโลสในฟางข้าว 7
2.2 เทคโนโลยีการแปรรูปชีวมวลไปเป็นพลังงาน 9
2.2.1 กระบวนการแปรรูปทางเคมีความร้อน (Thermochemical Conversion) 9
2.2.1.1 กระบวนการเผาโดยตรง (Direct Combustion) 9
2.2.1.2 กระบวนไพโรไลซีส (Pyrolysis) 10
2.2.1.3 กระบวนการผลิตแก๊สชีวมวล (Gasification Process) 10
2.2.2 กระบวนการแปรรูปทางชีวเคมี (Biochemical Conversion) 10
2.2.2.1 การผลิตแก๊สชีวภาพแบบไร้อากาศ 10

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.2.2.2 ประเภทของระบบผลิตแก๊สชีวภาพแบบไร้อากาศ 11

2.3 กระบวนการย่อยสลายขั้นต้น (Pretreatment) 14

2.3.1 กระบวนการทางกล 17

2.3.2 กระบวนการทางความร้อน 18

2.3.2.1 การระเบิดด้วยไอน้ำ (Steam Explosion) 18

2.3.2.2 การต้ม (Hot water) 19

2.3.3 กระบวนการทางเคมี 22

2.3.4 กระบวนการแบบอื่น ๆ 24

2.4 การเพิ่มผลผลิตแก๊สชีวภาพด้วยกระบวนการย่อยสลายขั้นต้น 26

2.5 คลื่นอัลตราโซนิคและการประยุกต์ใช้ในการย่อยสลายขั้นต้น 28

2.5.1 คาวิเตชัน (Cavitation) (Mason, 1991) 28

2.5.2 ปัจจัยที่ส่งผลต่อการเกิดคาวิเตชัน (Timothy, 2003) 29

2.5.2.1 ความถี่ (frequency) 29

2.5.2.2 ความหนืดของสารละลาย (solvent viscosity) 29

2.5.2.3 ความตึงผิวของสารละลาย (solvent surface tension) 30

2.5.2.4 แรงดันไอของสารละลาย (solvent vapor pressure) 30

2.5.2.5 อุณหภูมิ (temperature) 30

2.5.2.6 ฟองอากาศ (bubbled gas) 30

2.5.2.7 ความดัน (External pressure) 30

2.5.2.8 ความเข้ม (intensity) 31

2.5.2.9 การลดความแรงของพลังงาน (attenuation of sound) 31

2.6 การย่อยสลายขั้นต้นด้วยคลื่นอัลตราโซนิค 31

3 เครื่องมือและวิธีการดำเนินการวิจัย 37

3.1 ขั้นตอนการวิจัย 37

3.2 วิธีดำเนินการวิจัย 40

3.2.1 การเตรียมฟางข้าว 40

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.2.2 ศึกษาสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางเคมีของฟางข้าว 42
3.2.2.1 การวิเคราะห์สมบัติแบบประมาณ (Proximate Analysis) 42
3.2.2.2 การวิเคราะห์สมบัติทางเคมี (Chemical Composition) 42
3.2.2.3 การวิเคราะห์องค์ประกอบ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน 42
3.2.2.4 การวิเคราะห์ความมีเสถียรภาพทางความร้อนของฟางข้าว 42
3.2.2.5 การวิเคราะห์โครงสร้างทางกายภาพของฟางข้าว............................42
3.2.2.6 การวิเคราะห์ COD 42
3.2.3 การศึกษาผลกระทบของคลื่นอัลตราโซนิคต่อโครงสร้างและองค์ประกอบของฟางข้าว..43
3.2.3.1 การย่อยสลายขั้นต้นด้วยความร้อน 43
3.2.3.2 การย่อยสลายขั้นต้นด้วยคลื่นอัลตราโซนิค 45
3.2.3.3 การย่อยสลายขั้นต้นด้วยความร้อนควบคู่กับคลื่นอัลตราโซนิค 46
3.3 ศึกษาศักยภาพการผลิตแก๊สมีเทนด้วยวิธีทางชีวเคมีจากฟางข้าวที่ผ่านการย่อยสลายขั้นต้น 46
3.3.1 การออกแบบการทดลอง 46
3.3.1.1 กรณีย่อยสลายขั้นต้นด้วยความร้อน 47
3.3.1.2 กรณีย่อยสลายขั้นต้นด้วยคลื่นอัลตราโซนิค และคลื่นอัลตราโซนิคร่วมกับความร้อน 47
3.3.2 การเตรียมเชื้อ 49
3.3.3 ขั้นตอนการทดลอง 50
3.3.4 ศักยภาพภาพการผลิตแก๊สชีวภาพด้วยวิธี BMP 50
3.3.5 การหาอัตราการผลิตแก๊สมีเทนจำเพาะสูงสุด (maximum specific methane production rate, Rm)...51
3.4 การพัฒนาต้นแบบระบบผลิตแก๊สชีวภาพจากฟางข้าว โดยใช้ถังปฏิกรณ์แบบกวนสมบูรณ์ ควบคู่กับระบบการย่อยสลายขั้นต้นโดยใช้คลื่นอัลตราโซนิค 52
3.4.1 การออกแบบวงจรระบบผลิตคลื่นอัลตราโซนิค 52

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.4.1.1 วงจรเรียงกระแสไฟฟ้าและกรองกระแสไฟฟ้าทางด้านอินพุต 53
3.4.1.2 วงจรสร้างและขยายความถี่ 53
3.4.1.3 วงจรขยายกำลัง 55
3.4.1.4 วงจรรีโซแนนและขดลวดหม้อแปลง 56
3.4.2 การพัฒนาต้นแบบระบบผลิตคลื่นอัลตราโซนิค 57
3.4.2.1 ลักษณะทั่วไปของเครื่องต้นแบบระบบผลิตคลื่นอัลตราโซนิค 57
3.4.2.2 การทดสอบประสิทธิภาพระบบผลิตคลื่นอัลตราโซนิค 59
3.4.3 การออกแบบถังปฏิกิริยาแบบกวนสมบูรณ์ 65
3.4.3.1 การออกแบบใบกวน 65
3.4.3.2 การออกแบบถังปฏิกิริยา 66
3.4.4 การทดสอบการเดินระบบ 69
3.4.5 การหาจลศาสตร์การย่อยสลายทางชีวภาพของระบบผลิตแก๊สชีวภาพ 69
4 ผลการศึกษาและการอภิปรายผล 71
4.1 คุณสมบัติของฟางข้าวที่ใช้ในการทดลอง 71
4.1.1 องค์ประกอบแบบประมาณ (Proximate Value) 71
4.1.2 องค์ประกอบแบบแยกธาตุ (Ultimate Value) 72
4.2 ผลกระทบของการย่อยสลายขั้นต้นด้วยความร้อนและคลื่นอัลตราโซนิคที่มีต่อองค์ประกอบของฟางข้าว 72
4.2.1 ผลกระทบต่อการย่อยสลายด้วยความร้อน 72
4.2.1.1 องค์ประกอบลิกโนเซลลูโลส 72
4.2.1.2 ความมีเสถียรภาพทางความร้อน 75
4.2.1.3 โครงสร้างทางกายภาพ 76
4.2.2 ผลกระทบต่อการย่อยสลายด้วยคลื่นอัลตราโซนิค 76
4.2.2.1 องค์ประกอบลิกโนเซลลูโลส 76
4.2.2.2 ความมีเสถียรภาพทางความร้อน 79
4.2.2.3 โครงสร้างทางกายภาพ 79

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.2.3 ผลกระทบต่อการย่อยสลายด้วยคลื่นอัลตราโซนิคร่วมกับความร้อน 80
4.2.3.1 องค์ประกอบลิกโนเซลลูโลส 80
4.2.3.2 ความมีเสถียรภาพทางความร้อน 83
4.2.3.3 โครงสร้างทางกายภาพ 84
4.2.4 สรุปผลการทดสอบการย่อยสลายขั้นต้น 86
4.2.4.1 ผลกระทบต่อองค์ประกอบลิกโนเซลลูโลส 86
4.2.4.2 ผลกระทบต่อความมีเสถียรภาพทางความร้อน 91
4.2.4.3 ผลกระทบต่อโครงสร้างทางกายภาพ 91
4.3 ศักยภาพในการผลิตแก๊สมีเทนด้วยวิธีทางชีวเคมีของฟางข้าวที่ผ่านการย่อยสลายขั้นต้น 92
4.3.1 ศักยภาพการผลิตแก๊สมีเทนด้วยวิธี BMP ของฟางข้าวที่ผ่านการย่อยสลายขั้นต้นด้วยความร้อน 92
4.3.2 ศักยภาพการผลิตแก๊สมีเทนด้วยวิธี BMP ของฟางข้าวที่ผ่านการย่อยสลายขั้นต้นด้วยคลื่นอัลตราโซนิค 94
4.3.3 ศักยภาพการผลิตแก๊สมีเทนด้วยวิธี BMP ของฟางข้าวที่ผ่านการย่อยสลายขั้นต้นด้วยคลื่นอัลตราโซนิคร่วมกับความร้อน 98
4.3.4 สรุปศักยภาพการผลิตแก๊สมีเทนด้วยวิธีทางชีวเคมีของฟางข้าวที่ผ่านการย่อยสลายขั้นต้น 102
4.4 แบบจำลองพื้นผิวตอบ (Response Surface Model) 105
4.4.1 ตัวอย่างการสร้างแบบจำลอง 107
4.4.2 แบบจำลองพื้นผิวผลตอบที่เหมาะสม 109
4.5 การศึกษาการเดินระบบ 118
4.5.1 สภาพด่างทั้งหมด (Alalinity) และกรดอินทรีย์ระเหย (VFA) 118
4.5.2 ประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งทั้งหมด (TS) และของแข็งระเหยทั้งหมด (VS) 120

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.5.3 ประสิทธิภาพในการกำจัด COD....121
4.5.4 ประสิทธิภาพในการผลิตแก๊สชีวภาพ 122
4.5.5 จลศาสตร์การย่อยสลายทางชีวภาพของระบบผลิตแก๊สชีวภาพ 124
4.5.6 สรุปผลการเดินระบบ....127
5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ....128
5.1 สรุปผลการทดลอง 128
5.1.1 สมบัติของฟางข้าว 128
5.1.2 ผลกระทบของการย่อยสลายขั้นต้นด้วยความร้อนและคลื่นอัลตราโซนิคที่มีต่อองค์ประกอบของฟางข้าว....128
5.1.2.1 ผลกระทบต่อองค์ประกอบลิกเซลลูโลส 128
5.1.2.2 ผลกระทบต่อความมีเสถียรภาพทางความร้อน 128
5.1.2.3 ผลกระทบต่อโครงสร้างทางกายภาพ....129
5.1.3 ศักยภาพการผลิตแก๊สมีเทนด้วยวิธีทางชีวเคมีของฟางข้าวที่ผ่านการย่อยสลายขั้นต้น 129
5.1.4 แบบจำลองสภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการย่อยสลายขั้นต้นด้วยคลื่นอัลตราโซนิค....129
5.1.5 การพัฒนาต้นแบบระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากฟางข้าวโดยใช้ถังปฏิกรณ์แบบกวนสมบูรณ์ควบคู่กับการย่อยสลายขั้นต้นโดยใช้คลื่นอัลตราโซนิค....130
5.2 ข้อเสนอแนะ....130
รายการอ้างอิง 131
ภาคผนวก
ภาคผนวก ก. วิธีการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่าง ๆ....142
ภาคผนวก ข. ผลการทดสอบทางสถิติของพื้นผิวผลตอบ 156
ภาคผนวก ค. แบบรายละเอียดการจัดสร้างระบบอัลตราโซนิคและถังปฏิกิริยา 173
ประวัติผู้เขียน 193

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญตาราง

ตารางที่ **หน้า**

2.1 ศักยภาพฟางข้าวในการเป็นชีวมวล 5
2.2 ศักยภาพฟางข้าวในการผลิตพลังงาน 7
2.3 องค์ประกอบและคุณสมบัติที่สำคัญในฟางข้าว 9
2.4 สรุปเปรียบเทียบเทคโนโลยีระบบผลิตแก๊สชีวภาพแบบไม่ใช้ออกซิเจน 13
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องการย่อยสลายขั้นต้นทางกล 21
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องการย่อยสลายขั้นต้นทางเคมี 23
2.7 ข้อดีและข้อเสียจากการย่อยสลายขั้นต้นวัสดุจำพวก ลิกโนเซลลูโลสด้วยวิธีต่างๆ 25
2.8 การใช้คลื่นอัลตราโซนิคช่วยในการย่อยสลายขั้นต้น 35
3.1 พารามิเตอร์การตรวจวัดในขั้นตอนการย่อยสลายขั้นต้น 44
3.2 รายระเอียดเครื่องอัลตราโซนิค 46
3.3 ชุดการทดสอบการย่อยสลายขั้นต้นด้วยความร้อน 47
3.4 พารามิเตอร์การตรวจวัดในขั้นตอนการวิเคราะห์พื้นผิวตอบ 48
3.5 หน่วยการทดลองในแต่ละรูปแบบการศึกษา 48
3.6 การเตรียมสารอาหารเลี้ยงเชื้อลินทรีย์ Stock Solution (เข้มข้น 5 เท่า) 49
3.7 การเตรียมสารอาหารเลี้ยงเชื้อลินทรีย์ Trace element solution 50
3.8 พารามิเตอร์การตรวจวัดในขั้นตอนการวัดศักยภาพภาพ
การผลิตแก๊สชีวภาพด้วยวิธี BMP 51
3.9 คุณสมบัติของเครื่องต้นแบบระบบอัลตราโซนิค 56
3.10 อัตราส่วนการออกแบบใบกวนมาตรฐาน 65
3.11 พารามิเตอร์การตรวจวัดในขั้นตอนการเดินระบบผลิตแก๊สชีวภาพต่อเนื่อง 69
4.1 องค์ประกอบแบบประมาณ (Proximate Value) ของฟางข้าว 71
4.2 องค์ประกอบแบบแยกธาตุ (Ultimate Value) ของฟางข้าว 72
4.3 องค์ประกอบของลิกโนเซลลูโลสในฟางข้าวที่ผ่านการย่อยสลายขั้นต้นด้วยความร้อน 73
4.4 องค์ประกอบของลิกโนเซลลูโลสในฟางข้าวที่ผ่านการย่อยสลายขั้นต้นด้วยคลื่น
อัลตราโซนิคที่ความถี่ 37 kHz และ 102 kHz 78

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ หน้า

4.5 องค์ประกอบของลิกโนเซลลูโลสในฟางข้าวที่ผ่านการย่อยสลายขั้นต้นด้วยคลื่นอัลตราโซนิคที่ความถี่ 37 kHz และ 102 kHz ร่วมกับการต้ม 81

4.6 องค์ประกอบของลิกโนเซลลูโลสในฟางข้าวที่ผ่านการย่อยสลายขั้นต้นด้วยคลื่นอัลตราโซนิคที่ความถี่ 37 kHz และ 102 kHz ร่วมกับไอน้ำ 83

4.7 ค่าอัตราการเกิดแก๊สมีเทนสะสม และปริมาณมีเทนที่เกิดขึ้นจากการทดสอบศักยภาพในการผลิตแก๊สมีเทนด้วยวิธีทางชีวเคมี ของฟางข้าวที่ย่อยสลายขั้นต้นด้วยความร้อน 93

4.8 ค่าอัตราการเกิดแก๊สมีเทนสะสม และปริมาณมีเทนที่เกิดขึ้นจากการทดสอบศักยภาพในการผลิตแก๊สมีเทนด้วยวิธีทางชีวเคมี ของฟางข้าวที่ย่อยสลายขั้นต้นด้วยคลื่นอัลตราโซนิค 37 kHz 95

4.9 ค่าอัตราการเกิดแก๊สมีเทนสะสม และปริมาณมีเทนที่เกิดขึ้นจากการทดสอบศักยภาพในการผลิตแก๊สมีเทนด้วยวิธีทางชีวเคมี ของฟางข้าวที่ย่อยสลายขั้นต้นด้วยคลื่นอัลตราโซนิค 102 kHz 96

4.10 ค่าอัตราการเกิดแก๊สมีเทนสะสม และปริมาณมีเทนที่เกิดขึ้นจากการทดสอบศักยภาพในการผลิตแก๊สมีเทนด้วยวิธีทางชีวเคมี ของฟางข้าวที่ย่อยสลายขั้นต้นด้วยคลื่นอัลตราโซนิค 37 kHz ร่วมกับความร้อนโดยการต้ม 10 นาที 99

4.11 ค่าอัตราการเกิดแก๊สมีเทนสะสม และปริมาณมีเทนที่เกิดขึ้นจากการทดสอบศักยภาพในการผลิตแก๊สมีเทนด้วยวิธีทางชีวเคมี ของฟางข้าวที่ย่อยสลายขั้นต้นด้วยคลื่นอัลตราโซนิค 102 kHz ร่วมกับความร้อนโดยการต้ม 10 นาที 100

4.12 การผลิตแก๊สมีเทนด้วยวิธีย่อยสลายขั้นต้นแบบต่าง ๆ 104

4.13 การเข้ารหัสพารามิเตอร์เพื่อสร้างแบบจำลอง 106

4.14 การเข้ารหัสพารามิเตอร์การตรวจวัดในขั้นตอนการวิเคราะห์พื้นผิวตอบ 106

4.15 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของแบบจำลองพื้นผิวผลตอบ 108

4.16 ผลสรุปความสัมพันธ์ของแบบจำลองพื้นผิวผลตอบ 108

4.17 ตัวอย่างผลการวิเคราะห์ค่าคลาดเคลื่อน (Residual analysis) 109

4.18 สัมประสิทธิ์แบบจำลองพื้นผิวผลตอบของปริมาณการเกิดแก๊สมีเทนสะสม (H) 111

4.19 สัมประสิทธิ์แบบจำลองพื้นผิวผลตอบของอัตราการผลิตแก๊สมีเทนจำเพาะสูงสุด (Rm). 111

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ **หน้า**

4.20 สภาพด่างทั้งหมด (Alalinity) และกรดอินทรีย์ระเหย (VFA) ที่อัตราบรรทุกสารอินทรีย์ต่าง ๆ 119

4.21 ปริมาณของแข็งทั้งหมดและของแข็งระเหยทั้งหมดที่อัตราบรรทุกสารอินทรีย์ต่าง ๆ 120

4.22 ปริมาณ COD ในถังปฏิกิริยา ที่อัตราบรรทุกสารอินทรีย์ต่าง ๆ 122

4.23 ปริมาณแก๊สชีวภาพที่เกิดขึ้นเฉลี่ยต่อวัน ค่าความเข้มข้นแก๊สมีเทน และประสิทธิภาพในการเกิดแก๊สมีเทนต่อของแข็งระเหย ที่ภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆ 123

สารบัญรูป

รูปที่ **หน้า**

2.1 ลักษณะฟางข้าวที่หลงเหลืออยู่ในนา จากการเก็บเกี่ยวด้วยรถเกี่ยวนวดข้าว........................6
2.2 โครงสร้างของวัสดุลิกโนเซลลูโลส (Perez et al., 2002)..15
2.3 การย่อยสลายขั้นต้นวัสดุลิกโนเซลลูโลส (Haghighi Mood et al., 2013)...........................17
2.4 ระบบย่อยสลายขั้นต้นด้วยเทคนิค Hydrothermal treatment (Nakhshiniev et al., 2012) ...19
2.5 หลักการเกิดคาวิเตชัน (Timothy, 2003)..29
2.6 ผลกระทบของการใช้คลื่นอัลตราโซนิคในการย่อยสลายขั้นต้นวัสดุลิกโนเซลลูโลส (Luo et al., 2014) 33
3.1 ภาพรวมขั้นตอนการศึกษา...38
3.2 การศึกษาประสิทธิภาพการย่อยสลายฟางข้าวขั้นต้น 39
3.3 การพัฒนาต้นแบบระบบผลิตแก๊สชีวภาพจากฟางข้าวขนาด 500 ลิตร 40
3.4 ขั้นตอนการเตรียมฟางข้าว..41
3.5 ฟางข้าวที่ใช้ในการทดลอง..41
3.6 เครื่องกำเนิดคลื่นอัลตราโซนิคและอัลตราโซนิคทรานดิวเซอร์ 45
3.7 การออกแบบแผนการทดลองแบบส่วนประผสมกลาง 48
3.8 บล็อกไดอะแกรมเครื่องต้นแบบระบบอัลตราโซนิค 52
3.9 ลักษณะวงจรเรียงกระแสไฟฟ้าและกรองกระแสไฟฟ้าทางด้านอินพุต 53
3.10 ลักษณะวงจรกำเนิดความถี่ 54
3.11 วงจรขับกำลังสัญญาณ 54
3.12 ลักษณะวงจรขยายกำลัง 55
3.13 ลักษณะวงจรรีโซแนนและขดลวดหม้อแปลง 56
3.14 เครื่องต้นแบบระบบผลิตคลื่นอัลตราโซนิค...57
3.15 รายละเอียดของส่วนกำเนิดคลื่น 58
3.16 ขนาดแผ่นฟอยล์อะลูมิเนียม..59
3.17 ลักษณะแผ่นฟอยล์อะลูมิเนียม 60
3.18 ตำแหน่งวางแผ่นฟอยล์อะลูมิเนียม 60

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

3.19 การแบ่งพื้นที่พิจารณารูพรุนบนแผ่นฟอยล์อะลูมิเนียมหลังได้รับคลื่น.....61
3.20 ลักษณะรูพรุนบนแผ่นฟอยล์อะลูมิเนียม.....61
3.21 เปอร์เซ็นต์รูพรุนของแผ่นฟอยล์อะลูมิเนียม กำลัง 450 W.....62
3.22 เปอร์เซ็นต์รูพรุนของแผ่นฟอยล์อะลูมิเนียม กำลัง 600 W.....63
3.23 เปอร์เซ็นต์รูพรุนของแผ่นฟอยล์อะลูมิเนียม กำลัง 750 W.....64
3.24 เกณฑ์การออกแบบใบกวนมาตรฐาน.....65
3.25 ใบกวนจากการออกแบบ.....66
3.26 ถังปฏิกิริยาแบบกวนสมบูรณ์.....67
3.27 ภาพรวมระบบกวนสมบูรณ์ขนาด 500 ลิตร.....68
4.1 ความมีเสถียรภาพทางความร้อน.....75
4.2 โครงสร้างทางกายภาพโดยการส่องกล้อง FE-SEM (ก) ฟางข้าว (Untreated).....77
4.3 ความมีเสถียรภาพทางความร้อน (ก) การย่อยสลายขั้นต้นด้วยคลื่นอัลตราโซนิค 37 kHz (ข) การย่อยสลายขั้นต้นด้วยคลื่นอัลตราโซนิค 102 kHz.....79
4.4 โครงสร้างทางกายภาพโดยการส่องกล้อง FE-SEM (ก) การย่อยสลายขั้นต้นด้วยคลื่นอัลตราโซนิค 37 kHz (ข) การย่อยสลายขั้นต้นด้วยคลื่นอัลตราโซนิค 102 kHz.....80
4.5 ความมีเสถียรภาพทางความร้อน.....84
4.6 โครงสร้างทางกายภาพโดยการส่องกล้อง FE-SEM.....85
4.7 โครงสร้างหลักของเฮมิเซลลูโลสจากฟางข้าว (L-arabino-4-O-methyl-D-glucurono-D-xylan; AGX).....86
4.8 Ester linkage ระหว่าง Phenolic acid, p-Coumaryl และ Ferulyl group.....87
4.9 Hemicellulose-ester-FA-ether-lignin bridges.....88
4.10 Ester linkage ของ p-coumeric acid และ เฮมิเซลลูโลส.....88
4.11 รูปแบบอย่างง่ายของ benzyl ether linkage.....89
4.12 ภาพรวมการย่อยสลายขั้นต้นองค์ประกอบของฟางข้าว.....90
4.13 การเกิดแก๊สมีเทนสะสมจากการย่อยสลายขั้นต้นด้วยความร้อน.....93
4.14 แบบจำลองการเกิดแก๊สมีเทนสะสมจากการย่อยสลายขั้นต้นด้วยคลื่นอัลตราโซนิค.....97

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

4.15 ปริมาณการเกิดแก๊สมีเทนสะสมที่ระดับการย่อยสลายขั้นต้นด้วยคลื่นอัลตราโซนิค.........98
4.16 แบบจำลองการเกิดแก๊สมีเทนสะสมจากการย่อยสลายขั้นต้นด้วยคลื่นอัลตราโซนิคร่วมกับการต้ม.......101
4.17 ปริมาณการเกิดแก๊สมีเทนสะสมที่การย่อยสลายขั้นต้นด้วยคลื่นอัลตราโซนิค ร่วมกับการต้ม.......102
4.18 กราฟพลอตระหว่างปริมาณการเกิดแก๊สมีเทนสะสมและค่าที่ได้จากแบบจำลอง...........105
4.13 กราฟพื้นผิวผลตอบของปริมาณการเกิดแก็สมีเทนสะสม.......106
4.14 กราฟปฏิสัมพันธ์ของเวลาและกำลังส่งต่อปริมาณการเกิดแก๊สมีเทนสะสม.......107
4.15 กราฟพลอตระหว่างอัตราการผลิตแก๊สมีเทนจำเพาะสูงสุดและค่าที่ได้จากแบบจำลอง...108
4.16 กราฟพื้นผิวผลตอบของอัตราการผลิตแก๊สมีเทนจำเพาะสูงสุด.......109
4.17 กราฟปฏิสัมพันธ์ระหว่างเวลาและกำลังส่งต่ออัตราการผลิตแก๊สมีเทนจำเพาะสูงสุด.....110
4.18 ระบบผลิตแก๊สชีวภาพจากฟางข้าวโดยใช้คลื่นอัลตราโซนิค.......118
4.19 สภาพด่างทั้งหมด (Alkalinity) และกรดอินทรีย์ระเหย (VFA) ที่ภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆ.......119
4.20 ปริมาณของแข็งทั้งหมดและของแข็งระเหยทั้งหมด ที่ภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆ.....121
4.21 ปริมาณความเข้มข้น COD ที่ภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆ.......122
4.22 ประสิทธิภาพในการผลิตแก๊สชีวภาพ ที่ภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆ.......123
4.23 ประสิทธิภาพการเกิดแก๊สมีเทนที่ภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่าง ๆ.......126
4.24 กราฟความสัมพันธ์ของ ๆ y/(ym-y) และ 1/OLR.......126

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

C_0	=	VS concentration of the input ($g.L^{-1}$)
y_m	=	maximum methane yield ($ml.gVS^{-1}$)
y	=	methane yield ($ml.gVS^{-1}$)
k	=	first order reaction rate of constant (d^{-1})
OLR	=	Organic (VS) loading rate ($g.l^{-1}.d^{-1}$)
%DD	=	Disintegration Degree
TGA	=	Thermogravimetric Analysis
$H_{(t)}$	=	cumulative methane production (mL) at time t, e
exp(1)	=	2.71828
Rm	=	maximum specific methane production rate (mL/day)
H	=	methane production potential (ml),
λ	=	lag phase time (days)
FE-SEM	=	Field Emission Scanning Electron Microscope
RSM	=	Response Surface Methogoloy
US	=	Ultrasonic
TS	=	Total solids
VS	=	Volatile solid
COD	=	Chemical oxygen demand
CH_4	=	Methane
g	=	gram
mL	=	milliliter
R0	=	ค่าระดับความรุนแรง
t	=	ระยะเวลาในการคงอุณหภูมิ (นาที)
T	=	อุณหภูมิของไอน้ำ (ºC)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ที่มา และความสำคัญของปัญหา

ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรมที่มีการผลิตทางการเกษตรที่หลากหลาย มีวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรจำนวนมากที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เป็นภาระต่อโรงงานอุตสาหกรรม และเกษตรกร เนื่องจากโรงงานอุตสาหกรรมและ เกษตรกรจำเป็นต้องนำวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรดังกล่าวไปกำจัดหรือเผาทำลายเพื่อให้มีพื้นที่รองรับการผลิตและเป็นการเตรียมพื้นที่ปลูกในฤดูเพาะปลูกถัดไปตามลำดับ อย่างไรก็ดีวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรดังกล่าว เป็นวัสดุชีวมวลที่มีศักยภาพในการผลิตเป็นพลังงานทดแทน จากผลการประเมินศักยภาพการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากเศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรพบว่า ประเทศไทยมีปริมาณชีวมวลคงเหลือกว่า 34 ล้านตัน คิดเป็นพลังงานเทียบเท่าน้ำมันดิบ 7,200 ตัน (มูลนิธิพลังงานเพื่อสิ่งแวดล้อม,2549)โดยพบว่าฟางข้าว เป็นเชื้อเพลิงชีวมวลที่มีปริมาณมากเป็นอันดับ 1 ที่มีศักยภาพที่จะนำมาใช้ประโยชน์ในการนำมาผลิตเป็นพลังงานทดแทน โดยคิดเป็นพลังงานเทียบเท่าน้ำมันดิบ 3,350.95 ktoe/ปี

จากข้อมูลสำนักงานเศรษฐกิจการเกษตรพบว่าประเทศไทย มีพื้นที่เพาะปลูกข้าวทั่วประเทศประมาณ 57 ล้านไร่ (18% ของพื้นที่ประเทศ) โดยมีผลผลิตในรูปข้าวเปลือก 28.5-30.2 ล้านตัน/ปี (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2548-2550) เศษวัสดุเหลือใช้ คือ ฟางข้าวที่คงเหลือในนาข้าวคิดเป็นสัดส่วนต่อผลผลิตอยู่ที่ 0.45-1.19 และมีค่าความร้อนประมาณ 10 MJ/kg

ฟางข้าวที่คงเหลืออยู่ในนาข้าวปริมาณมากดังกล่าว ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เช่น การเผาฟางข้าวในแปลงเพื่อให้ง่ายต่อการเตรียมดินส่งผลต่อปัญหา ฝุ่นปกคลุมบริเวณรอบข้าง หรือ การปล่อยฟางข้าวให้ย่อยสลายในนาข้าว ส่งผลให้ประเทศไทยเป็นแหล่งปล่อยแก๊สมีเทนขนาดใหญ่ จากการศึกษาการปลูกข้าวในเขตชลประทานพบว่ามีการปล่อยแก๊สมีเทนสู่บรรยากาศ ประมาณ 15-20% ของการปล่อยแก๊สมีเทนทั้งหมดในโลกต่อปี (Sass and Fisher, 1992) อีกทั้ง IPCC (1992) ทำการประเมินการปลดปล่อยแก๊สมีเทน พบว่า อัตราการปลดปล่อยแก๊สมีเทนจากนาข้าวทั้งโลกอยู่ในช่วง 20 ถึง 150 ล้านตันต่อปี หรือเฉลี่ยประมาณ 60 ล้านตันต่อปี ส่วนประเทศไทยมีการประเมินการปล่อยแก๊สมีเทนจากนาข้าวของประเทศไทย มีค่าประมาณ 1.81-4.03 ล้านตันต่อปี (อรวรรณ ศิริรัตน์พิริยะ, 2541) ซึ่งแก๊สมีเทนถือเป็นแก๊สเรือนกระจกชนิดหนึ่งและมีผลกระทบต่อชั้นบรรยากาศมากกว่าแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ถึง 21 เท่า และมีอันตรายต่อมนุษย์

การนำฟางข้าวกลับมาใช้เพื่อให้เกิดประโยชน์โดยการนำมาผลิตเป็นพลังงานทดแทน สามารถทำได้ โดยใช้เทคโนโลยีการแปรรูปไปเป็นพลังงาน อาทิ เทคโนโลยีทางเคมีความร้อน เทคโนโลยีทางชีวเคมี เป็นต้น โดยเทคโนโลยีทางชีวเคมีที่ได้รับความนิยม คือ เทคโนโลยีการผลิตแก๊สชีวภาพ ซึ่งเป็นผลพลอยได้ที่มาจากกระบวนการย่อยสลายชีวมวลแบบไร้อากาศ อย่างไรก็ดี คุณสมบัติของฟางข้าวส่วนใหญ่จะเป็นของแข็ง ประเภทลิกนิลเซลลูโลส โดยมีส่วนประกอบหลักเป็นไบโอพอลิเมอร์ อาทิ ลิกนิน เซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลส (Li et al., 2008) ซึ่งยากต่อการย่อยสลายทางชีวภาพโดยจุลินทรีย์ ดังนั้น การย่อยสลายขั้นต้น (Pretreatment) เพื่อให้ไบโอพอลิเมอร์เปลี่ยนสภาพเป็นสารอินทรีย์โมเลกุลเล็กที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ จึงเป็นกระบวนการหนึ่งที่สำคัญในการผลิตแก๊สชีวภาพ

เทคนิคการย่อยสลายขั้นต้นสามารถจำแนกได้เป็น 3 วิธี คือ วิธีทางกล วิธีทางเคมี และวิธีทางชีวภาพ หรือใช้วิธีการผสมผสาน สามารถทำให้องค์ประกอบภายในชีวมวลแยกตัวออกมา หรือทำให้มีพื้นที่ผิวของวัสดุเพิ่มขึ้น ทำให้สามารถย่อยสลายได้ง่ายโดยจุลินทรีย์ เมื่อพิจารณาเทคนิคการย่อยสลายขั้นต้นทางกล อาทิ การสับ การบดละเอียด พบว่าสามารถทำให้ฟางข้าวมีขนาดเล็กลงได้ แต่โครงสร้างของผนังเซลล์ยังมีความแข็งแรงเหมือนเดิม ทำให้จำเป็นต้องใช้วิธีผสมผสาน จากการศึกษาของ Pinjari and Pandit (2010) พบว่าการประยุกต์ใช้คลื่นอัลตราโซนิค สามารถเกิดคาวิเตชั่น ซึ่งเกิดจากการบีบอัดผนังเซลล์ด้วยความถี่สูงทำให้โครงสร้างของผนังเซลล์แตกตัวลงและองค์ประกอบของฟางข้าวเปลี่ยนแปลงไป ทำให้เกิดการย่อยสลายทางชีวภาพได้ง่ายขึ้น อย่างไรก็ดี การประยุกต์ใช้คลื่นอัลตราโซนิคสำหรับการย่อยสลายขั้นต้นในกระบวนการผลิตแก๊สชีวภาพยังไม่เป็นที่แพร่หลายและยังขาดความรู้ความเข้าใจและเทคนิคการใช้คลื่นอัลตราโซนิคเพื่อทำลายโครงสร้างผนังเซลล์ที่มีความแข็งแรง เช่น ฟางข้าว รวมถึงองค์ประกอบของฟางข้าวที่เปลี่ยนแปลงไป อันมีผลต่อกระบวนการผลิตแก๊สชีวภาพจากฟางข้าวได้

ในการศึกษาครั้งนี้ผู้วิจัยจะทำการศึกษาถึงขั้นตอนและกระบวนการผลิตแก๊สชีวภาพจากฟางข้าวที่มีประสิทธิภาพ โดยเน้นกระบวนการย่อยสลายฟางข้าวขั้นต้น (Pretreatment)โดยใช้คลื่นอัลตราโซนิค ในการผลิตแก๊สชีวภาพจากฟางข้าว อันเป็นการสร้างพลังงานหมุนเวียนจากเศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร ลดปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อมของประเทศ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อศึกษาผลกระทบของคลื่นอัลตราโซนิคที่มีต่อโครงสร้างและองค์ประกอบของฟางข้าวในกระบวนการย่อยสลายขั้นต้น

1.2.2 เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการย่อยสลายขั้นต้นโดยใช้คลื่นอัลตราโซนิค

1.2.3 เพื่อศึกษาศักยภาพการผลิตแก๊สชีวภาพจากฟางข้าวโดยการประยุกต์ใช้คลื่นอัลตราโซนิค ในขั้นตอนการย่อยสลายขั้นต้น

1.2.4 เพื่อทำการพัฒนาต้นแบบระบบผลิตแก๊สชีวภาพจากฟางข้าว โดยใช้ถังปฏิกรณ์แบบกวนสมบูรณ์ ควบคู่กับระบบการย่อยสลายขั้นต้นโดยใช้คลื่นอัลตราโซนิค

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

การศึกษาครั้งนี้เป็นการศึกษากระบวนการย่อยสลายฟางข้าวขั้นต้น เพื่อนำไปผลิตเป็นแก๊สชีวภาพ โดยมีขอบเขตการศึกษาดังนี้

1.3.1 ฟางข้าวที่ใช้เป็นฟางข้าวหลังการเก็บเกี่ยวในพื้นที่จังหวัดนครราชสีมาที่ถูกบดและร่อนผ่านตะแกรงที่มีขนาด 2 มิลลิเมตร

1.3.2 สภาวะที่ใช้ในการเดินระบบผลิตแก๊สชีวภาพเป็นแบบเปียก (Wet Digestion Process) และควบคุมอุณหภูมิอยู่ในช่วงปานกลาง (Mesophilic: 25-40 ºC)

1.3.3 ต้นแบบถังปฏิกรณ์ผลิตแก๊สชีวภาพเป็นแบบกวนสมบูรณ์ขนาด 500 ลิตร

1.3.4 ศึกษาผลกระทบของโครงสร้างของฟางข้าวโดยวิธี การตรวจวัดรูปสัณฐานด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด

1.3.5 การศึกษาองค์ประกอบของฟางข้าวได้แก่ เฮมิเซลลูโลส เซลลูโลส และลิกนิน

1.3.6 คลื่นอัลตราโซนิคในการศึกษาใช้ 2 ช่วงความถี่ ได้แก่ ช่วงความถี่ต่ำ 37 kHz และช่วงความถี่สูง 102 kHz

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ

1.4.1 ทำให้ทราบสภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการย่อยสลายขั้นต้นโดยใช้คลื่นอัลตราโซนิค

1.4.2 ทำให้ทราบศักยภาพการผลิตแก๊สชีวภาพจากฟางข้าว หลังจากที่ใช้คลื่นอัลตราโซนิค ในขั้นตอนการย่อยสลายขั้นต้น

1.4.3 สามารถนำผลจากการศึกษาไปประยุกต์ใช้กับกระบวนการผลิตแก๊สชีวภาพจากชีวมวลประเภทลิกโนเซลลูโลส เช่น หญ้า ต้นข้าวโพด และอื่น ๆ ได้

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 2
ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ข้อมูลเกี่ยวกับฟางข้าว

2.1.1 สถานภาพฟางข้าวของประเทศไทย

การประเมินศักยภาพเชื้อเพลิงชีวมวลของประเทศไทยโดยทั่วไปจะใช้หลักเกณฑ์และขั้นตอนการประเมินที่คล้ายคลึงกัน ดังนี้ 1) ทำการศึกษาข้อมูลสถิติทางการเกษตร เพื่อจะทำให้ทราบถึง พื้นที่เพาะปลูก พื้นที่เก็บเกี่ยว ผลผลิตเฉลี่ยต่อไร่ ของพืชเศรษฐกิจที่สำคัญ จากแหล่งข้อมูลต่าง ๆ เช่น ศูนย์สารสนเทศการเกษตร สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร กรมส่งเสริมการเกษตร สำนักงานคณะกรรมการอ้อยและน้ำตาลทราย สำนักงานกองทุนสงเคราะห์การทำ สวนยาง ฯลฯ 2) ทำการศึกษาสัดส่วนเศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรต่อผลผลิตเฉลี่ยในแต่ละพืช (Crop Residue Ration; CRR) โดยการสำรวจ เก็บตัวอย่าง และวิเคราะห์ 3) ทำการวิเคราะห์สัดส่วนการนำไปใช้ประโยชน์ เพื่อนำไปสู่ 4) การวิเคราะห์หาปริมาณวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรคงเหลือ ที่สามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในการความร้อนและ/หรือ ผลิตกระแสไฟฟ้าได้

ผลที่ได้จากการประเมินศักยภาพ ของแต่ละหน่วยงานมีความแตกต่างกันบ้าง ขึ้นอยู่กับ ข้อกำหนด (Assumption) และความละเอียดของข้อมูลที่ได้จากการสำรวจ อย่างไรก็ดี ผลการประเมินศักยภาพที่ได้นั้น สามารถนำมาใช้ในการบริหารหรือกำหนดนโยบายด้านพลังงาน ชีวมวลในระดับมหภาคของประเทศได้ อย่างไรก็ดี ข้อกำหนดต่าง ๆ ที่ใช้ในการประเมินวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรแต่ละพื้นที่ มีความซับซ้อนและมีความแปรปรวนค่อนข้างสูง เช่น มีการเปลี่ยนแปลงปริมาณพื้นที่เพาะปลูก ชนิดและสายพันธุ์ที่ใช้ปลูก สำหรับการประเมินสถานภาพฟางข้าวของประเทศไทยในการศึกษานี้ อ้างอิงจากรายงานการวิจัยโครงการศึกษาแนวทางบริหารจัดการเชื้อเพลิงชีวมวลเพื่อใช้เป็นพลังงานทดแทน (ระดับชุมชน) (วีรชัย และคณะ, 2550) พบว่า ข้าว มีพื้นที่เพาะปลูกทั่วประเทศทั้งสิ้นประมาณ 57 ล้านไร่ (18% ของพื้นที่ประเทศ) โดยมีผลผลิต ในรูปข้าวเปลือก 28.5 - 30.2 ล้านตัน/ปี (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2548 - 2550) เศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร คือ แกลบ ฟางข้าว/ตอซัง ซึ่งเป็นเศษวัสดุเหลือทิ้งที่ได้จากการสีข้าว และการเก็บเกี่ยวตามลำดับ

แกลบ จะเกิดขึ้นจากกระบวนการสีข้าวในโรงสี มีสัดส่วนต่อผลผลิตที่ 0.16 - 0.23 และ มีค่าความร้อนประมาณ 14 MJ/kg (ความชื้น 12%) ปัจจุบันถูกจำหน่ายเพื่อใช้ประโยชน์ เช่น เป็นเชื้อเพลิงและ ปูพื้นฟาร์มเลี้ยงไก่ ในราคา 800-1,000 บาท/ตัน หรือใช้เป็นเชื้อเพลิงเพื่อผลิตพลังงานความร้อนและไฟฟ้าในโรงสีเอง จึงสรุปได้ว่าปริมาณคงเหลือที่นำมาใช้ได้นั้นมีน้อยมาก

ฟางข้าว ซึ่งเป็นเศษวัสดุเหลือใช้ในนาข้าวนั้นมีสัดส่วนฟางข้าวต่อผลผลิตอยู่ที่ 0.45-1.19 และมีค่าความร้อนประมาณ 10 MJ/kg (ความชื้น 41%) การใช้ประโยชน์จากฟางข้าวนั้นมีหลากหลาย เช่น ใช้เป็นอาหารสัตว์ ใช้ทำปุ๋ย คลุมดิน เพาะเห็ด ฯลฯ นอกจากนี้พื้นที่เพาะปลูกข้าวประมาณ 60% จะมีการเผาฟางข้าว เนื่องจากปัญหาทางด้านการเตรียมพื้นที่ในฤดูกาลปลูกต่อไป ทำให้มีฟางข้าวเหลือทิ้ง ประมาณ 40% นอกจากนี้พบว่า ตอซัง ส่วนใหญ่จะไม่มีการขนย้ายออกนอกแปลงปลูกเนื่องจากเป็นการคืนความอุดมสมบูรณ์ให้แก่ดิน ซึ่งมีความจำเป็นมากสำหรับเกษตรกร อย่างไรก็ดีพบว่าในส่วนของตอซังที่อยู่เหนือพื้นดิน ประมาณ 60% จะถูกเผาไปพร้อมกับการเผาฟางข้าว รูปที่ 2.1 แสดงลักษณะฟางข้าวที่หลงเหลืออยู่ในนา จากการเก็บเกี่ยวด้วยรถเกี่ยวนวดข้าว

จากการวิเคราะห์ข้อมูลพบว่า ศักยภาพฟางข้าวคงเหลือในปี 2550/2551 มีฟางข้าว 9.06 ล้านตัน/ปี ดังแสดงใน ตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ศักยภาพฟางข้าวในการเป็นชีวมวล (วีรชัย และคณะ, 2550)

ประเภท	ผลผลิตปี 2548 – 50 [1] (ล้านตัน/ปี)	เศษวัสดุ	สัดส่วนเศษวัสดุต่อผลผลิต	ปริมาณเศษวัสดุชีวมวล [2] (ล้านตัน/ปี)	สัดส่วนเศษวัสดุที่คงเหลือ	ปริมาณชีวมวลคงเหลือ (ล้านตัน/ปี)
ข้าว	29.6- 30.2	ฟาง	0.75 [3]	22.20-22.65	0.40 [4]	8.88-9.06

หมายเหตุ

[1] ข้อมูลจากสำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร ปีเพาะปลูก 2550/2551

[2] ปริมาณเศษวัสดุชีวมวล = ผลผลิตต่อปี x สัดส่วนเศษวัสดุต่อผลผลิต

[3] สัดส่วนเศษวัสดุต่อผลผลิตที่ได้จากการสำรวจข้อมูลภาคสนามของ มทส.

[4] สัดส่วนฟางข้าวที่คงเหลือจาก ฟางข้าวถูกเผา 50 % ใช้ เป็นอาหารสัตว์ 20% ของที่เหลือ (10% ของทั้งหมด)

รูปที่ 2.1 ลักษณะฟางข้าวที่หลงเหลืออยู่ในนา จากการเก็บเกี่ยวด้วยรถเกี่ยวนวดข้าว

(วีรชัย และคณะ, 2550)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

โดยฟางข้าวจะมีลักษณะเป็นเส้น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.5 เซนติเมตร มีความยาว 15-20 เซนติเมตรขึ้นอยู่กับวิธีการเก็บเกี่ยว ความชื้นหลังการเก็บเกี่ยวอยู่ในช่วง 40-70% น้ำหนักเบา มีความหนาแน่น 110-120 kg/m^3 ทำให้ไม่คุ้มค่าต่อการขนส่ง ค่าความร้อนของฟางข้าว ณ ความชื้น 41.34% มีค่า 10.09 MJ/kg เมื่อทำการประเมินศักยภาพการผลิตพลังงานของฟางข้าวในประเทศไทย 9.06 ล้านตัน/ปี คิดเป็นพลังงาน 91,415. GJ เทียบเท่าน้ำมันดิบ 2,164.19 ktoe สามารถนำมาผลิตไฟฟ้าได้ 5,078.63 GWh หรือป้อนเข้าสู่โรงไฟฟ้าขนาด 725 MW ดังแสดงใน ตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ศักยภาพฟางข้าวในการผลิตพลังงาน (วีรชัย และคณะ, 2550)

ประเภทชีวมวล	ปริมาณคงเหลือ (ล้านตัน/ปี)	ความชื้น (%wb)	ค่าความร้อน MJ /kg	พลังงานทั้งสิ้น (GJ)	พลังงานเทียบเท่าน้ำมันดิบ (ktoe)$^{1)}$	ศักยภาพผลิตกระแสไฟฟ้า (GWh)$^{2)}$/ ขนาดโรงไฟฟ้า (MW)$^{3)}$
ฟางข้าว	9.06	41.34	10.09	91,415.40	2,164.19	5,078.63 / 725.00

หมายเหตุ

$^{1)}$ พลังงานเทียบเท่าน้ำมันดิบ 1 ktoe เท่ากับ 42.24 x 10^6 MJ

$^{2)}$ ค่า Net Plant Heat Rate เฉลี่ยสำหรับโรงไฟฟ้า 18 MJ/kWh หรือประสิทธิภาพโรงไฟฟ้า 20%

$^{3)}$ โรงไฟฟ้าผลิตไฟฟ้า 7,008 ชั่วโมง/ปี หรือ Plant Factor 0.8

2.1.2 องค์ประกอบลิกโนเซลลูโลสในฟางข้าว

ฟางข้าวจัดเป็นวัสดุกลุ่มลิกโนเซลลูโลสที่มีองค์ประกอบของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน เป็นสำคัญ โครงสร้างของวัสดุกลุ่มลิกโนเซลลูโลสสามารถแบ่งได้เป็น 3 ส่วน คือ 1) องค์ประกอบภายนอก 2) พอลิแซ็กคาไรด์ และ 3) ลิกนิน ดังรายละเอียดต่อไปนี้

1) องค์ประกอบภายนอก หมายถึง องค์ประกอบที่ไม่มีผนังเซลล์ทั้งหมด ได้แก่สารเคมีภายในเซลล์ที่สามารถละลายได้ในน้ำและในตัวทำละลายอินทรีย์ โดยจำแนกเป็นกลุ่มย่อยที่สามารถสกัดได้และไม่ได้ ซึ่งในส่วนที่สกัดได้ ได้แก่ เทอร์ปีน (terpene) เรซิน (resin) และฟีนอล (phenol) โดยในกลุ่มเทอร์ปีนประกอบด้วยสายโซ่ของไอโซปรีน (isoprene) และส่วนที่คล้ายเทอร์ปีน ได้แก่ เทอร์ปีนแอลกอฮอล์ (terpene alcohol) และคีโตน ส่วนในกลุ่มของเรซิน จะรวมองค์ประกอบที่ระเหยไม่ได้ ได้แก่ ไขมัน กรดไขมัน ไฟโตสเตอรอล (phytosterol) และสารอื่นๆ ที่พบในปริมาณน้อย นอกจากนี้ ในกลุ่มของฟีนอลจะพบองค์ประกอบที่หลากหลาย โดยสารที่สำคัญคือ แทนนิน (tannin) ฟีนอล และอนุพันธ์ของสารทั้งสอง สำหรับสารที่สกัดและละลายน้ำ

ไม่ได้ที่มีองค์ประกอบหลักคือ สารอนินทรีย์ในรูปของแร่ธาตุที่อยู่ในหมู่ที่ 1 และ 2 เช่น สารที่อยู่ในรูปของคาร์บอเนตและออกซาเลตจะมีหน้าที่สำคัญคือ ทำให้เซลลูโลสมีความทนทานต่อการย่อยสลาย ป้องกันการทำลายจากแมลง และป้องกันเซลล์พืชจากการถูกชะล้าง

2) พอลิแซ็กคาไรด์ องค์ประกอบในกลุ่มนี้เป็นคาร์โบไฮเดรตที่มีมวลโมเลกุลสูง เช่น เซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลส ที่มีอยู่ถึง 60-80% ของเนื้อวัสดุทั้งหมด โดยเซลลูโลสจัดเป็นองค์ประกอบหลักของผนังเซลล์ และมีโครงสร้างที่ทนทานต่อการย่อยสลายด้วยเอนไซม์และกรด และไม่สลายตัวเมื่ออยู่ในน้ำ สำหรับเฮมิเซลลูโลสเป็นพอลิแซ็กคาไรด์สายสั้น มีหน้าที่เชื่อมโยงระหว่างลิกนินและเซลลูโลส ในธรรมชาติเฮมิเซลลูโลสจะอยู่ในลักษณะที่ไม่มีรูปร่างแน่นอน (amorphous form)

- เซลลูโลส เป็นพอลิเมอร์สายยาวและมีมวลโมเลกุลสูง ประกอบด้วยกลูโคสเชื่อมต่อกันเป็นสายยาวด้วยพันธะเบตา (1,4) (β-(1,4) glucosidic linkage) ประมาณ 10,000 หน่วย พบทั่วไปในธรรมชาติ โดยเป็นส่วนประกอบที่สำคัญของผนังเซลล์พืชและมีการเรียงตัวอยู่ในรูปของผลึก

-เฮมิเซลลูโลส เป็นพอลิเมอร์ที่มีมวลโมเลกุลต่ำและมีปริมาณการเกิดเป็นพอลิเมอร์ (degree of polymerization, DP) ประมาณ 200 โดยมีน้ำตาลเป็นองค์ประกอบในเฮมิเซลลูโลสหลายชนิด กล่าวคือ มีไซโลสมากที่สุดถึง 85-90% และส่วนที่เหลือเป็นน้ำตาลที่มีคาร์บอน 5 และ 6 อะตอม กรดแมนนูโรนิก (mannuronic acid) และกรดกาแลกตูโรนิก (galacturonic acid) เป็นองค์ประกอบ เฮมิเซลลูโลสจะถูกย่อยสลายได้ง่ายด้วยกรดหรือเบสเจือจางหรือเอนไซม์ เพราะเฮมิเซลลูโลสไม่มีรูปร่างแน่นอน ไม่เป็นเส้นตรง และมีลำดับของหน่วยย่อยน้ำตาลที่เรียงตัวแบบสุ่ม จึงทำให้พันธะที่เชื่อมระหว่างไซโลสถูกทำลายด้วยกรดหรือเอนไซม์ได้ง่าย

3) ลิกนิน เป็นพอลิเมอร์ของสารประกอบที่โมเลกุลเป็นวงแหวนที่เหมือนกันซ้ำ ๆ ประกอบเป็นโมเลกุลที่ใหญ่มีการเชื่อมต่อกันของหน่วยย่อยคือ ฟีนิลโพรพานอยด์ (phenyl propanoid) ที่มีหมู่เมธิลอยู่บนโมเลกุล จัดเป็นสารประกอบที่มีความซับซ้อนมากที่สุด ในวัสดุแต่ละชนิดมักพบลิกนินเป็นองค์ประกอบอยู่ 20-35% โดยทำหน้าที่รวมมัดของเส้นใยของ พอลิแซ็กคาไรด์ไว้ด้วยกัน

ตารางที่ 2.3 องค์ประกอบและคุณสมบัติที่สำคัญในฟางข้าว

องค์ประกอบฟางข้าว						Ref.
Hemicellulose (%dry basis)	Cellulose (%dry basis)	Lignin (%dry basis)	COD (g/kg dry)	TOC (g/kg dry)	TKN (g/kg dry)	
25.00-32.30	30.40-38.30	5.70-12.00	1,011	395	7.35	1,2,3, 4,5

อ้างอิง : [1]วีรชัย และคณะ, 2550 [2] Sun et al., 2000 [3] Jin and Chen (2006) [4] Zhang and Cai (2008) [5] Paepatung et al., 2009

2.2 เทคโนโลยีการแปรรูปชีวมวลไปเป็นพลังงาน

การแปรรูปชีวมวลเพื่อผลิตพลังงาน คือ กระบวนการที่จะนำพลังงานจากชีวมวลมาใช้ประโยชน์ โดยทำให้เกิดการแตกตัวของอินทรียสารที่มีอยู่ในชีวมวล และผลิตพลังงานออกมา เทคโนโลยีที่ใช้เพื่อผลิตพลังงานสามารถแบ่งออกเป็น 2 กระบวนการ คือ กระบวนการแปรรูปทางเคมีความร้อน และกระบวนการแปรรูปทางชีวเคมี โดยแต่ละกระบวนการจะมีวิธีการหลายรูปแบบและให้ผลผลิตออกมาในแบบที่แตกต่างกัน

2.2.1 กระบวนการแปรรูปทางเคมีความร้อน (Thermochemical Conversion)

เป็นกระบวนการเปลี่ยนรูปชีวมวลเพื่อให้ได้เชื้อเพลิงชีวมวลที่มีคุณภาพสูงขึ้นโดยมีวิธีอยู่ด้วยกันหลายแบบ คือ การเผาไหม้โดยตรง การย่อยสลายด้วยความร้อน การแปรรูปเป็นแก๊สชีวมวล โดยผลิตภัณฑ์ที่ออกมาจะมีทั้ง ของแข็ง ของเหลว และแก๊ส ซึ่งขึ้นอยู่กับกระบวนการแปรรูป

2.2.1.1 กระบวนการเผาโดยตรง (Direct Combustion)

ระบบการเผาไหม้โดยตรงได้รับการพัฒนามาเป็นเวลานานกว่า 100 ปี และในปัจจุบันระบบการเผาไหม้โดยตรงเพื่อทำงานร่วมกับเทคโนโลยีกังหันไอน้ำ หรือนำเอา แก๊สร้อนไปใช้ในการอบแห้ง ในการผลิตพลังงานจากชีวมวลเป็นระบบที่มีการใช้มากที่สุดในโลก ระบบการเผาไหม้โดยตรงมีอยู่ 3 รูปแบบ คือ การเผาไหม้ในเตาเผาแบบตะกรับ (Stoker Firing) การเผาไหม้ในเตาเผาฟลูอิไดซ์เบด (Fluidized Bed Combustion) และการเผาไหม้ในแบบลอยตัว (Suspension Firing)

2.2.1.2 กระบวนไพโรไลซีส (Pyrolysis)

เป็นการเกิดปฏิกิริยาเคมีแบบไม่ผันกลับ (Irreversible Chemical) โดยการกระทำของความร้อนในที่ไม่มีแก๊สออกซิเจนแยกสลายชีวมวล ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการนี้ได้แก่ไฮโดรเจน (H_2) คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) มีเทน (CH_4) และเกิดสารประกอบไฮโดรคาร์บอนอื่น ๆ อีกเล็กน้อยนอกจากนี้ยังมีผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลว เช่น น้ำมัน (Oil) น้ำ (H_2O) และน้ำมันดิน (Tar) ของแข็งที่เหลือจากกระบวนการ ได้แก่ ถ่าน (Coal) และ ขี้เถ้า (Ash) ตามกระบวนการย่อยสลายด้วยความร้อนตามระดับอุณหภูมิในการเผาไหม้

2.2.1.3 กระบวนการผลิตแก๊สชีวมวล (Gasification Process)

กระบวนการแก๊สชีวมวล เป็นกระบวนการที่ทำให้องค์ประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีอยู่ในเชื้อเพลิงชีวมวล เปลี่ยนรูปไปเป็นแก๊สเชื้อเพลิงที่จุดไฟติดและมีค่าความร้อนสูง โดยอาศัยปฏิกิริยาอุณหเคมี (Thermo-chemical Reaction) ซึ่งแก๊สเชื้อเพลิงดังกล่าวนี้ประกอบด้วย แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) แก๊สไฮโดรเจน (H_2) และแก๊สมีเทน (CH_4) ซึ่งสภาวะที่ทำให้เกิดแก๊สดังกล่าวก็คือ สภาวะการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ กล่าวคือ เป็นสภาวะที่มีการจำกัดปริมาณอากาศหรือแก๊สออกซิเจน เพราะหากมีแก๊สออกซิเจนเพียงพอ หรือมากเกินพอจะกลายเป็นกระบวนการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ (Combustion) และมีการปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ไอน้ำออกมาซึ่งไม่ติดไฟ

2.2.2 กระบวนการแปรรูปทางชีวเคมี (Biochemical Conversion)

เป็นกระบวนการแปรรูปชีวมวลให้เป็นแก๊สเชื้อเพลิงโดยใช้จุลินทรีย์ย่อยสลาย เช่น การใช้เอนไซม์ย่อยสลายชีวมวลให้เป็นน้ำตาลและทำการหมักน้ำตาลด้วยยีสต์ให้เป็นไบโอเอทานอล หรือ การนำชีวมวลไปย่อยสลายในสภาวะไร้อากาศเพื่อผลิตเป็นแก๊สชีวภาพ ในบทนี้จะกล่าวถึงการผลิตแก๊สชีวภาพแบบไร้อากาศ (Anaerobic Digestion, AD) เท่านั้น

2.2.2.1 การผลิตแก๊สชีวภาพแบบไร้อากาศ

เป็นกระบวนการผลิตแก๊สชีวภาพจากน้ำเสียหรือชีวมวลโดยมีขั้นตอนของปฏิกิริยา ดังนี้

1) Hydrolysis เป็นขั้นตอนการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่ (Polymer) เช่น คาร์โบไฮเดรต โปรตีนและไขมัน ให้กลายเป็นสารอินทรีย์ที่มีขนาดโมเลกุลเล็กหรือสารอินทรีย์โมเลกุลเดี่ยว (Monomer) เช่น น้ำตาล กรดอะมิโน และกรดไขมัน เพื่อให้แบคทีเรียสามารถนำเข้าไปใช้ภายในเซลล์ได้ ขั้นตอนนี้เกิดขึ้นภายนอกเซลล์แบคทีเรีย โดยอาศัยเอนไซม์ที่

แบคทีเรียสร้างกรด (Acidogens) ปล่อยออกมา ทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสละลายอนุภาคสารอินทรีย์และลดขนาดสารอินทรีย์ที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่ให้เล็กลง

2) Acidogenesis ขั้นตอนนี้จะเปลี่ยนสารอินทรีย์โมเลกุลเล็กให้กลายเป็นกรดอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile fatty acid) โดยจุลินทรีย์ในกลุ่ม Fermentative bacteria หรือ Acid forming bacteria ซึ่งเป็นแบคทีเรียสร้างกรดที่ทำหน้าที่ในการดูดซึมสารอินทรีย์โมเลกุลเล็กที่สามารถละลายน้ำได้จากการไฮโดรไลซิสในขั้นที่ 1 เข้าสู่เซลล์ เพื่อใช้เป็นแหล่งคาร์บอนและพลังงานในการผลิตพวกกรดระเหยง่ายที่มีสายโซ่โมเลกุลสั้น เช่น กรดอะซิติก (Acetic acid) กรดโพรไพโอนิก (Propionic acid) กรดบิวไทริก (Butyric acid) เป็นต้น

3) Acetogenesis เป็นขั้นตอนการเปลี่ยนกรดอินทรีย์เป็นกรดอะซิติก โดยแบคทีเรียสร้างกรดอะซิติก (Acetogenic) จะทำการย่อยสลายกรดระเหยที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่หรือมีคาร์บอนมากกว่า 2 อะตอม และสารประกอบที่เป็นกลางซึ่งมีขนาดโมเลกุลใหญ่กว่าเมธานอล ได้แก่ แอลกอฮอล์ กรดโพรไพโอนิก กรดบิวไทริก กรดไอโซบิวไทริก (Isobutyric acid) กรดแลคติก (Lactic acid) เป็นต้น ให้กลายเป็นกรดอะซิติก คาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจน โดยแบคทีเรียกลุ่ม Homogenic bacteria ซึ่งเป็นแบคทีเรียในกลุ่มของ Facultative bacteria

4) Methanogenesis เป็นขั้นตอนการเปลี่ยนกรดอะซิติกให้กลายเป็นมีเทน โดยแบคทีเรียกลุ่ม Methanogenic bacteria ซึ่งเป็นแบคทีเรียที่ไม่ใช้อากาศ โดยจะสามารถเจริญเติบโตได้ดีและเปลี่ยนกรดอะซิติกไปเป็นมีเทนได้ในสภาวะไร้อากาศเท่านั้น

2.2.2.2 ประเภทของระบบผลิตแก๊สชีวภาพแบบไร้อากาศ

ระบบผลิตแก๊สชีวภาพแบบไร้อากาศสามารถแบ่งประเภทในเชิงวิศวกรรมได้เป็น 2 แบบ คือ Dry Continuous Digestion Process และ Wet Digestion Process ซึ่งมีรายละเอียดแต่ละระบบดังนี้

1) Dry Continuous Digestion Process

ระบบการหมักแบบนี้เป็นระบบที่มีการป้อนสารอินทรีย์ที่มีความเข้มข้นสูงประมาณ 20-40% เข้าสู่ถังหมัก (Digester) อย่างต่อเนื่องและมีการเติมน้ำเข้าสู่ระบบน้อยมากโดยถังหมักอาจมีลักษณะเป็นแบบถังกวนสมบูรณ์ (Completely Mixed Digester) หรือเป็นแบบ Plug-flow Digester ก็ได้ ในการหมักจะมีการหมุนเวียนเอาตะกอนเหลวที่ย่อยสลายแล้ว (Digestate) มาใช้เป็นกล้าเชื้อ (Inoculum/Seed) สำหรับเติมเชื้อจุลินทรีย์ให้กับสารอินทรีย์ที่ถูกป้อนเข้าไปใหม่ และเนื่องจากระบบนี้ต้องการใช้น้ำน้อยมากทำให้ได้สมดุลของ พลังงานความร้อนที่เกิดจากการย่อยสลายสารอินทรีย์เหมาะสมสำหรับการเดินระบบที่อุณหภูมิระดับสูง (Thermophilic Digestion Temperature)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

2) Dry Batch Digestion Process

เป็นระบบหมักที่ออกแบบโดยใช้หลักการระบบฝังกลบแบบถูกหลักสุขาภิบาล นั่นคือการป้อนสารอินทรีย์เข้าสู่ถังหมักจะเป็นแบบกะ (Batch) แล้วทำการเติมกล้าเชื้อซึ่งก็คือวัสดุอินทรีย์ที่ย่อยสลายแล้วจากการหมักครั้งก่อนเข้าไปในถังหมักจากนั้นจะปิดถังหมักให้สนิทแล้วปล่อยให้กระบวนการย่อยสลายเกิดขึ้นตามธรรมชาติซึ่งทำให้เกิดน้ำชะสารอินทรีย์ที่ไหลลงสู่ก้นถังซึ่งจะถูกระบบหมุนเวียนกลับขึ้นไปฉีดพ้นสารอินทรีย์ที่อยู่ส่วนบนเพื่อรักษาความชุ่มชื้นให้ทั่วถึงและเป็นการแพร่กระจายกรดไขมันระเหยง่าย (Volatile Fatty Acid) รวมทั้งเป็นการกระจายแบคทีเรียที่ผลิตมีเทนให้ได้สัมผัสกับสารอินทรีย์ที่อยู่ในถังหมักอย่างทั่วถึง เมื่อการย่อยสลายเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์แล้วก็จะเป็นถังเพื่อเอาวัสดุอินทรีย์ที่ย่อยสลายแล้วออกไป และเติมสารอินทรีย์ระบบการหมักแบบนี้จะมีข้อดีในการลดขั้นตอนการเตรียมสารอินทรีย์และลดจำนวนเครื่องจักรกลที่ใช้ในการเดินระบบแต่จะมีข้อเสียคือปริมาณแก๊สมีเทนที่ได้จะไม่คงที่และจะต้องมีการบำบัดครั้งหลัง (Post Treatment/Back-end Treatment) สำหรับปรับปรุงคุณภาพของวัสดุปรับปรุงดิน

3) Leach-bed Digestion Process

เป็นระบบการหมักที่มีหลักในการออกแบบโดยทั่วไปคล้ายคลึงกับ Dry Batch Digestion Process แต่จะมีข้อแตกต่างกันคือ มีการแลกเปลี่ยนน้ำจากถังหมักถังแรกที่เกิดกระบวนการย่อยสายแล้วไปยังถังหมักใหม่เพื่อกระตุ้นให้เกิดการย่อยสลายและเป็นการเติมกล้าเชื้อในถังหมักใหม่ รวมทั้งเป็นการกำจัดกรดไขมันระเหยง่ายบางส่วนจากถังหมักใบแรกเพื่อป้องกันการเกิดสภาวะเปรี้ยว (Sour Condition) ซึ่งอาจยับยั้งการทำงานของจุลินทรีย์ที่สร้างมีเทน ซึ่งการดำเนินระบบจะดำเนินไปเช่นนี้จนกระทั่งในถังหมักใหม่เริ่มมีแก๊สมีเทน จึงเกิดการหยุดหมุนเวียนน้ำชะสารอินทรีย์จากถังหมักใบแรก แต่จะหมุนเวียนน้ำชะสารอินทรีย์จากถังหมักใบที่สองไปยังถังหมักต่อไปอีก ซึ่งหลักการดังกล่าวอาจจะเรียกว่า การหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจนแบบต่อเนื่อง (Sequential batch Anaerobic Composting)

4) Single-stage Wet Digestion Process

เป็นระบบการหมักที่มีการเติมน้ำปริมาณมากเข้าสู่ระบบ โดยจะป้อนสารอินทรีย์ที่มีลักษณะเป็นตะกอนเหลว (Slurry) ซึ่งมีปริมาณของแข็ง (Solid Content) อยู่ประมาณ 10% เข้าสู่ถังหมักซึ่งส่วนใหญ่เป็นแบบถังกวนแบบสมบูรณ์ (Completely Mixed Digester) โดยการหมักแบบนี้จะต้องมีขั้นตอนการเตรียมสารอินทรีย์ที่มีประสิทธิภาพ เมื่อของเหลวผ่านการย่อยสลายแบบสมบูรณ์จะต้องมีการแยกส่วนที่มีน้ำออกไป (Dewatering) โดยใช้อุปกรณ์ประเภท Filter Press หรือ Screw Press แล้วทำการหมุนเวียนน้ำในระบบต่อไป เพื่อลดภาระการกำจัดน้ำส่วนเกินเป็นปริมาณมาก

ตารางที่ 2.4 สรุปเปรียบเทียบเทคโนโลยีระบบผลิตแก๊สชีวภาพแบบไม่ใช้ออกซิเจน

พารามิเตอร์	การออกแบบระบบ	
	Dry Digestion Process	Wet Digestion Process
ปริมาณสารอินทรีย์ (ในรูปปริมาณของแข็งทั้งหมด)	15-40%	$\leq$ 15%
ลักษณะของสารอินทรีย์ที่ป้อนเข้าสู่ถังหมัก	ตะกอนเหลวความชื้น 60-85%	ของเหลว, สารแขวนลอย
ขนาดของถังปฏิกิริยา	เล็กกว่า	ใหญ่กว่า
ปริมาณน้ำเสีย	น้อยกว่า	มากกว่า
พารามิเตอร์	ผลของอุณหภูมิในการเดินระบบ	
	Mesophilic Temperature	ThermophilicTemperature
อุณหภูมิในการหมัก	36 $\pm$ 2 °C	55 $\pm$ 2 °C
การควบคุมการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์	ง่ายกว่า	ยากกว่า
ปัญหาการกัดกร่อนถัง,ระบบท่อ	น้อยกว่า	มากกว่า
คุณภาพของวัสดุปรับปรุงดิน	ไม่แตกต่าง	ไม่แตกต่าง
อัตราการผลิตแก๊สมีเทน	น้อยกว่า	มากกว่า
ความต้องการพลังงานของระบบ	น้อยกว่า	มากกว่า
สมดุลพลังงานสุทธิ	ได้พลังงานสุทธิมากกว่า	ได้พลังงานสุทธิน้อยกว่า

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

5) Multi-stage Wet Digestion Process

เป็นระบบการหมักซึ่งสารอินทรีย์ที่ผ่านกระบวนการเตรียมสภาพเรียบร้อยแล้วถูกป้อนเข้าสู่ถังหมักกรด ที่ซึ่งมีจุลินทรีย์พวก Hydrolytic Bacteria และ Fermentative Bacteria คอยทำหน้าที่ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ และเปลี่ยนให้เป็นกรดไขมันระเหยง่าย ก่อนที่จะถูกส่งไปยังถังหมักแก๊ส (Methanogenic Fermenter) ซึ่งมีแบคทีเรียที่ผลิตมีเทน (Methanogenic Bacteria) คอยทำหน้าที่ในการเปลี่ยนกรดไขมันระเหยง่ายให้กลายเป็นแก๊สมีเทนโดยถังหมักแก๊สในระบบนี้อาจจะแบบ Anaerobic Filter หรือ Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB) ก็ได้ ซึ่งการออกแบบระบบแบบนี้จะทำให้เกิดสภาวะที่เหมาะสมต่อการทำงานของจุลินทรีย์แต่ละประเภท ซึ่ง

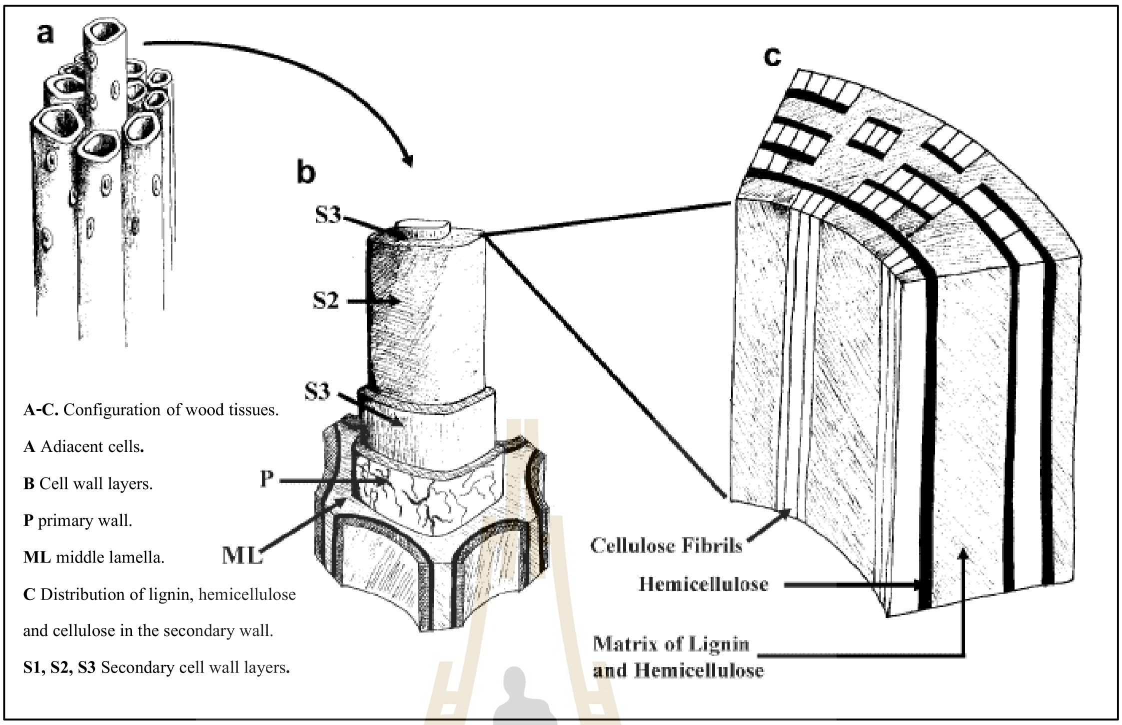
จะทำให้ได้ผลผลิตแก๊สมีเทนสูงขึ้นแต่อย่างไรก็ตาม Multi-stage Wet Digestion Process มักจะมีความยุ่งยากซับซ้อนในการดำเนินการระบบมากกว่า Single-stage Anaerobic Digestion Process

2.3 กระบวนการย่อยสลายขั้นต้น (Pretreatment)

โดยทั่วไปแล้ววัสดุชีวมวลประเภทลิกโนเซลลูโลสที่นำมาใช้ประโยชน์ในเชิงผลิตพลังงานส่วนใหญ่จะเป็นชีวมวลที่หลงเหลือจากการเกษตรที่มีอยู่มากมายมหาศาล อาทิ ฟางข้าว ซังข้าวโพด เหง้ามันสำปะหลัง ทะลายปาล์ม เป็นต้น โดยองค์ประกอบหลัก ๆ ของวัสดุ ลิกโนเซลลูโลสประกอบไปด้วยโพลิเมอร์ทางชีวภาพอยู่ 3 ประเภท ได้แก่ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ซึ่งองค์ประกอบในส่วนที่เป็นคาร์โบไฮเดรท (เซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลส) นี้ จะเป็นส่วนที่สามารถหมักได้และย่อยสลายทางชีวภาพได้ นำไปสู่ความ มีศักยภาพในการเป็นแหล่งผลิตพลังงานได้ (Y. Zheng et al., 2014) แต่อย่างไรก็ดีคุณสมบัติที่เป็นสารที่ย่อยสลายได้ยากทางชีวภาพทั้งในส่วนของโครงสร้างและองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุลิกโนเซลลูโลสยังคงต้องมีการพัฒนากระบวนการย่อยสลายขั้นต้น เพื่อเพิ่มศักยภาพในการผลิตพลังงานให้กับวัสดุลิกโนเซลลูโลสเหล่านี้ต่อไป

ในกระบวนการแปรรูปทางชีวเคมี ที่อาศัยจุลินทรีย์ในการย่อยสลายวัสดุชีวมวลให้เป็นแก๊สมีเทนหรือแก๊สชีวภาพ หรือที่เราเรียกว่ากระบวนการผลิตแก๊สชีวภาพแบบไร้อากาศนั้น จำเป็นต้องใช้จุลินทรีย์ในการย่อยสลายองค์ประกอบต่าง ๆ ให้มีขนาดเล็กลงทั้งสิ้น แต่เนื่องจากวัสดุชีมวลที่ส่วนใหญ่เป็นวัสดุลิกโนเซลลูโลสนั้น เป็นวัสดุที่ย่อยสลายทางชีวภาพได้ยากมาก จึงจำเป็นต้องมีการย่อยสลายขั้นต้นก่อน เพื่อทำลายความแข็งแรงของโครงสร้าง และองค์ประกอบภายใน

องค์ประกอบของเซลลูโลส ประกอบด้วยกลูโคสเชื่อมต่อกันเป็นสายยาวด้วยพันธะเบตา (1,4) (β-(1,4) Glycosidic linkages) ซึ่งมีหมู่ Hydroxylic ที่เรียงตัวกันอยู่ในสายโพลิเมอร์ของเซลลูโลสที่เชื่อมโยงกันด้วยพันธะไฮโดรเจน ทำให้สายไมโครไฟบริลนี้มีความแข็งแรงทนทาน ต่อการดึงมาก (Ha, Marie-Ann et al., 1998) การเรียงตัวกันโมเลกุลของเซลลูโลสที่หลากหลาย ทำให้เกิดความเป็นผลึกที่หลากหลายระดับ โดยทั่วไปแบ่งออกเป็น 2 ระดับ คือ อะมอร์ฟัส (Amorphous) มีระดับความเป็นผลึกต่ำ และ แบบมีความเป็นผลึกผลึกสูง (Crystalline) (Atalla and VanDerHart, 1984) ระดับความเป็นผลึกนี้สามารถบอกได้จากค่า Crystallinity index (CI) โดยวัสดุลิกโนเซลลูโลสที่มีระดับความเป็นผลึกสูง จะมีความสามารถในการทนทานต่อการย่อยสลายทางชีวภาพได้สูง อีกทั้งโครงสร้างเซลลูโลสนี้ยังถูกยึดเกาะให้มีความแข็งแรงยิ่งขึ้นจากเฮมิเซลลูโลสและลิกนินทำให้มีความต้านทานต่อการย่อยสลายทางเคมีและชีวภาพ



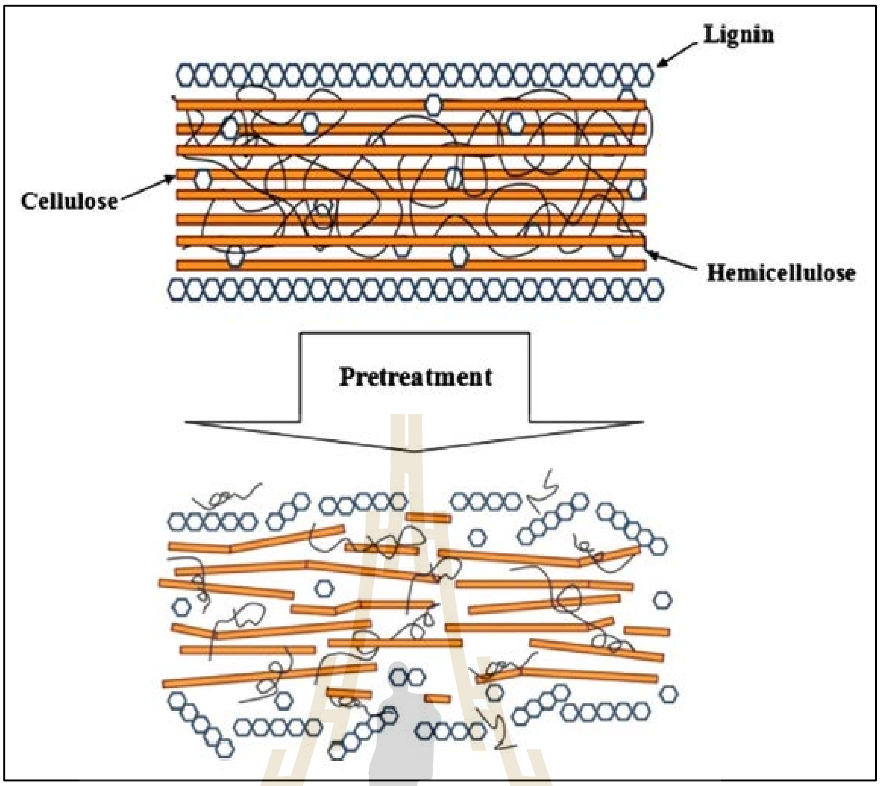
รูปที่ 2.2 โครงสร้างของวัสดุลิกโนเซลลูโลส (Perez et al., 2002)

ในส่วนโครงสร้างของเฮมิเซลลูโลสนั้นจะประกอบไปด้วยโพลีแซคคาไรด์ที่มีความหลากหลายมากกว่าเซลลูโลสและมีความเป็นอะมอฟัส (มีค่าระดับความเป็นผลึกต่ำ) โดยประกอบไปด้วยน้ำตาลเพนโตส (ไซโลสและอะราบิโนส) น้ำตาลเฮกโซส (กลูโคส, กาแลคโตส, แมนโนส และแรมโนส) และกรดต่าง ๆ (กรดกลูคูโรนิค, กรดเมทิลกลูคูโรนิค และกรดกาแลคตูโรนิค) ซึ่งเรียงตัวกันเป็นกิ่งก้านสาขาแบบสั้น ๆ เชื่อมโยงกับเซลลูโลสและลิกนินเป็นโครงข่ายโพลิเมอร์ที่แข็งแรง การเรียงตัวกันอย่างสั้น ๆ และหลากหลายของเฮมิเซลลูโลสนี้จะทำให้เกิดการย่อยสลายทางชีวภาพได้ง่าย รวมทั้งสามารถสลายตัวได้ง่ายด้วยความร้อน และการไฮโดรไลซิสด้วยสารเคมี (Ademark et al., 1998, Morohoshi et al., 1991) ปัจจัยทางด้านความชื้น ความเป็นกรดด่าง และอุณหภูมิ จะเป็นปัจจัยหลักในการย่อยสลายขั้นต้นเฮมิเซลลูโลสด้วยวิธีทางความร้อนและเคมี (Garrote , Domínguez and Parajó., 1999, Bobleter, 1994, Fengel and Wegener, 1984) ดังนั้นการที่จะดึงศักยภาพในการใช้วัสดุลิกโนเซลลูโลสจำเป็นต้องทำลาย Physiochemical barrier ที่ขัดขวางการเข้าทำปฏิกิริยาของเอนไซม์จากแบคทีเรีย โดย Agbor et al. (2011) ได้เสนอแนะว่าควรย่อยสลายเฮมิเซลลูโลสขั้นต้นให้ได้ร้อยละ 50 จะทำให้เพิ่มความสามารถในการย่อยเซลลูโลสทางชีวภาพได้ดียิ่งขึ้น

ลิกนินเป็นโครงสร้างที่มีความทนทานต่อการย่อยสลายได้สูงเช่นกัน โดยองค์ประกอบส่วนใหญ่ของลิกนินประกอบไปด้วยโครงสร้างขนาดใหญ่และซับซ้อนของหมู่อะโรมาติก รวมทั้งโพลิเมอร์แบบอะมอร์ฟัสที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) มีน้ำหนักโมเลกุลระหว่าง 1,000 - 4,500 ดาลตัน ซึ่งประกอบไปด้วย กลุ่มของฟีนิลโพรเพน อาทิ โคนิเฟอริลแอลกอฮอล์ ไซนาพิลแอลกอฮอล์และมีหมู่ฟังก์ชันของ ไฮดรอกซิล เมทอกซิล และ คาร์บอนิล หน้าที่ของลิกนินจะกระทำเสมือนเป็นซีเมนต์ที่เชื่อมระหว่างเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส ทำให้โครงสร้างของผนังเซลล์แข็งแรงยิ่งขึ้นและไม่สามารถละลายในน้ำได้ ยากต่อการทำปฏิกิริยากับสารใด ๆ ในสภาวะปกติ (Palmqvist and Hahn-Hägerdal, 2000) แต่ถ้าอยู่ในสภาวะที่เหมาะสมแล้ว ลิกนินสามารถละลายน้ำได้ที่อุณหภูมิสูง (มากกว่า 180 ºC) ในสภาวะเป็นกลาง แต่ในบางกรณีอาจต้องให้อยู่ในสภาวะกรดหรือด่าง โดยขึ้นอยู่กับองค์ประกอบหลักของลิกนิน (Grabber, 2005) ซึ่งคุณสมบัติที่สำคัญเหล่านี้ทำให้ลิกนินเป็นหนึ่งในองค์ประกอบหลักของผนังเซลล์ที่ทำให้วัสดุลิกโนเซลลูโลสยากที่จะย่อยสลายได้ง่ายทางเคมีและทางชีวภาพ (Y. Zheng et al., 2014) หากในวัสดุลิกโนเซลลูโลสยิ่งมีสัดส่วนของลิกนินสูง ยิ่งมีความแข็งแรงทนทานต่อการย่อยสลายได้สูง โดยส่วนใหญ่แล้วในไม้เนื้ออ่อน อาทิ ไม้ตระกูลไม้สน เป็นต้น จะมีสัดส่วนของลิกนิน มากกว่าไม้เนื้อแข็งและวัสดุชีวมวลจากการเกษตร

ด้วยคุณสมบัติของวัสดุลิกโนเซลลูโลสที่มีความหลายหลายทั้งทางโครงสร้างและสัดส่วนขององค์ประกอบที่แตกต่างกัน อาทิ ปริมาณพื้นที่ผิว ความเป็นผลึกของเซลลูโลส ปริมาณเฮมิเซลลูโลสและลิกนิน เป็นต้น ซึ่งมีความต้านทานการย่อยสลายทางเคมีและทางชีวภาพได้ดีนั้น กระบวนการในการย่อยสลายขั้นต้น ที่เหมาะสมกับทั้งโครงสร้างและองค์ประกอบของวัสดุลิกโนเซลลูโลสนั้น ๆ จะเป็นหนึ่งในวิธีที่จะนำประโยชน์จากวัสดุลิกโนเซลลูโลสมาใช้งานได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.3 โดยกระบวนการย่อยสลายขั้นต้นที่สำคัญในระดับใหญ่จะประกอบด้วย 1)กระบวนการทางกล 2)กระบวนการทางความร้อน 3)กระบวนการทางเคมี และ 4)กระบวนการแบบอื่น ๆ ดังนี้

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 2.3 การย่อยสลายขั้นต้นวัสดุลิกโนเซลลูโลส (Haghighi Mood et al., 2013)

2.3.1 กระบวนการทางกล

ในการย่อยสลายขั้นต้นทางกลนั้นมีจุดมุ่งหมายเพื่อทำการลดขนาดของวัสดุลิกโนเซลลูโลสและลดความเป็นผลึก เพื่อเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวและลดระดับความเป็นพอลิเมอร์ลง (Sun and Cheng, 2002; Alvera et al., 2010) ทั้งนี้กระบวนการย่อยสลายขั้นต้นทางกลประกอบด้วย การสับ (chipping) การบด (grinding) หรือการโม่ (milling) โดยปกติขนาดของวัสดุที่ถูกย่อยขั้นต้นแล้วจะมีขนาดแตกต่างกันตามกระบวนการ อาทิ ขนาด 10-30 มิลลิเมตร (การสับ) 0.2-2 มิลลิเมตร (การโม่หรือการบด) (Sun and Cheng, 2002) การลดขนาดนี้จะทำให้ความสามารถในการนำไปใช้ประโยชน์ในรูปแบบอื่นเป็นไปได้ง่าย ซึ่งพบว่าการสับย่อยให้มีขนาดเล็กลงจะช่วยให้สามารถเพิ่มอัตราการย่อยสลายทางชีวภาพ (biodegradability) ได้อย่างมีนัยสำคัญ (Sarnklong et al., 2010.; Shen et al., 1998; Abou-El-Enin et al., 1999; Vadiveloo, 2000; 2003) Taherzadeh and Karimi (2008) ได้ทดสอบการย่อยสลายขั้นต้นวัสดุจำพวก lignocelluloses ด้วยวิธีการโม่ในรูปแบบต่าง ๆ อาทิ ball milling, two-roll milling, hammer milling, colloid milling และ vibro energy milling พบว่าสามารถทำให้เอนไซม์เข้าทำการไฮโดรไลซิสได้ดีขึ้น Mshandete et al. (2006) ได้ทำการทดสอบ ถึงขนาดของ

วัสดุที่เล็กลงและการเพิ่มพื้นที่ผิว ซึ่งผลการทดสอบแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพได้สูงขึ้น โดยพบว่าขนาดของวัสดุที่เล็กลงจะให้กระบวนการไฮโดรไลซิสได้ง่ายขึ้นและทำให้ขั้นตอนการสร้างกรดเกิดสารลายละลายอินทรีย์ระเหยง่าย (VFAs) ได้สูงขึ้นทำให้สามารถผลิตแก๊สชีวภาพได้สูงยิ่งขึ้น Izumi et al., (2010) ได้ทำการศึกษาผลของการลดขนาดและความสามารถในการละลายน้ำในการผลิตแก๊สชีวภาพ โดยใช้กระบวนการ bead milling พบว่าสามารถเพิ่มความสามารถในการละลายได้สูงถึงร้อยละ 30 ซึ่งการการย่อยสลายขั้นต้นทางกลมีข้อดีอย่างเห็นได้ชัดคือ ไม่เกิดกลิ่นรบกวนจากการทำปฏิกิริยาของสารเคมีต่าง ๆ ง่ายต่อการนำไปใช้งานจริง และความสิ้นเปลืองการใช้พลังงานอยู่ในระดับที่เหมาะสม (Toreci et al., 2009; Perez-Elvira et al., 2006)โดยการย่อยสลายขั้นต้นทางกลนี้จะใช้พลังงานมากน้อยขึ้นอยู่กับขนาดสุดท้ายของวัสดุที่จะนำมาลดขนาดและองค์ประกอบของวัสดุนั้น ๆ (Cesaro and Belgiorno, 2014)

2.3.2 กระบวนการทางความร้อน

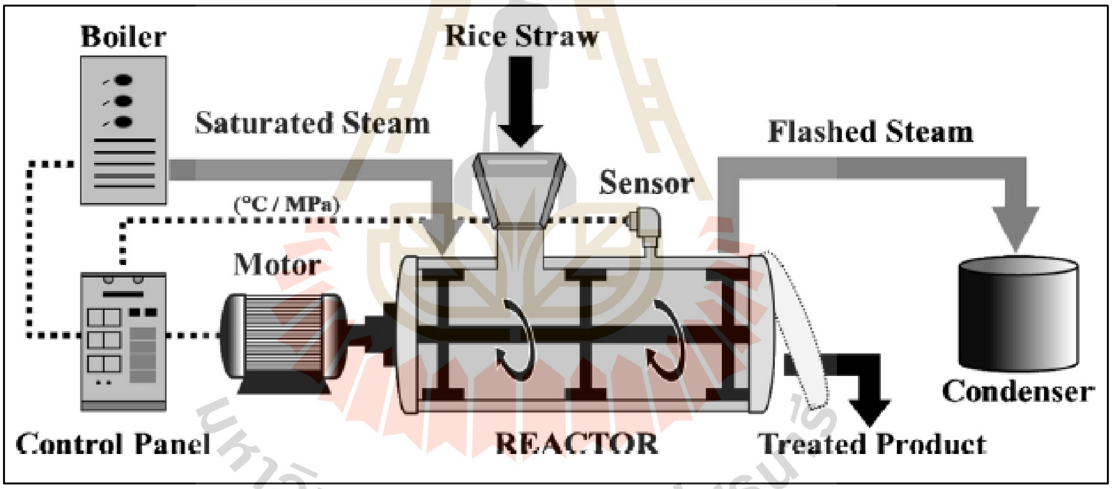
2.3.2.1 การระเบิดด้วยไอน้ำ (steam explosion)

การใช้ความร้อนในรูปแบบทั้งน้ำร้อนและไอน้ำจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีกายภาพของวัสดุกลุ่ม lignocelluloses ได้เป็นอย่างดี เทคนิคการระเบิดด้วยไอน้ำ (steam explosion) เป็นการใช้ไอน้ำที่มีอุณหภูมิและแรงดันสูงในช่วงระยะเวลาสั้น ๆ ทำให้เกิดการย่อยสลายขั้นต้นด้วยแรงทางกลและทางเคมีในการไฮโดรไลซิสจากการสลายตัวของเฮมิเซลลูโลส เรียกกระบวนการนี้ว่า autohydrolysis ซึ่งเป็นกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับความร้อน ที่ทำให้เกิดสร้างกรดอะซิติกที่มาจากกลุ่ม acetyl ของเฮมิเซลลูโลสมาทำการย่อยตัวมันเอง ส่วนการย่อยทางกายภาพจากการที่ไอน้ำมีแรงดันสูงทำให้เกิดการสลายตัวของกลุ่มไฟเบอร์โดยเฉียบพลันซึ่งการผสมผสานทางกายภาพและเคมีของการใช้ไอน้ำจะทำให้เฮมิเซลลูโลสย่อยสลายและละลายออกมาได้บางส่วน และง่ายต่อการไฮโดรไลซิสเซลลูโลสในระดับไมโครไฟบริล การย่อยสลายขั้นต้นด้วยไอน้ำนั้นสามารถบอกถึงความรุนแรงในการย่อยสลายได้ด้วย severity factor, log R_0 ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและอุณหภูมิ ดังสมการ 2.1 (Tomas-Pejo et al., 2008)

$$R_0 = t.\ \exp\,[T\text{-}100/14.75] \qquad (2.1)$$

เมื่อ	R0	คือ	ค่าระดับความรุนแรง
	t	คือ	ระยะเวลาในการคงอุณหภูมิ (นาที)
	T	คือ	อุณหภูมิของไอน้ำ (°C)

การใช้ไอน้ำแรงดันสูงโดยมีค่าในช่วง 5-15 atm ในการย่อยสลาย จะสามารถทำให้การย่อยสลายทางชีวเคมีสูงขึ้น (Abe et al.,1999; Weimer et al.,2003; Liu et al.,1999) โดยไอน้ำแรงดันสูงนี้จะแพร่เข้าไปในชั้นของเนื้อเยื่อพืช เพื่อไปทำลายพันธะและช่วย ในการไฮโดรไลซิสเซลลูโลส ทำให้เฮมิเซลลูโลสและลิกนินมีความสามารถในการละลายได้ดีขึ้น โดยจากงานวิจัยของ Guoce Yu ในปี 2009 ได้ใช้ไอน้ำแรงดันสูงในการย่อยสลายขั้นต้น เมื่อส่องดูด้วยกล้อง SEM พบว่าโครงสร้างของเนื้อเยื่อพืชได้ถูกทำลายลงและทำให้เอนไซม์สามารถเข้าไปทำการไฮโดรไลซิสได้มีประสิทธิภาพดีขึ้น ข้อดีของการใช้ไอน้ำ คือ มีประสิทธิภาพในด้านการใช้พลังงาน มลภาวะต่อสิ่งแวดล้อมต่ำ และมีต้นทุนที่ต่ำ (Avellar and Glasser, 1998) Nakhshiniev et al. (2012) ทำการย่อยสลายฟางข้าวขั้นต้นด้วยเทคนิค Hydrothermal treatment (HTT) ดังแสดงในรูปที่ 2.4 โดยมีสภาวะไม่รุนแรงมากที่ 180 ºC 1.0 MPa 30 นาที เพื่อทำการละลายเฮมิเซลลูโลสพบว่าที่อุณหภูมิดังกล่าวจะทำให้องค์ประกอบที่เป็น hemicellulose polysaccharides ละลายออกมามากที่สุด



รูปที่ 2.4 ระบบย่อยสลายขั้นต้นด้วยเทคนิค Hydrothermal treatment (Nakhshiniev et al., 2012)

2.3.2.2 การต้ม (hot water)

กระบวนการทางความร้อนโดยการใช้น้ำที่อุณหภูมิสูง ทำให้เกิดการเปลี่ยนโครงสร้างของวัสดุในกลุ่ม lignocelluloses (Alvera et al., 2010) โดยการทำให้เกิดการย่อยสลายเฮมิเซลลูโลสในน้ำร้อน เพื่อให้สามารถไฮโดรไลซิสเซลลูโลสได้ดีขึ้น และไม่ทำให้เกิดการก่อตัวของสารพิษ Cesaro and Belgiorno (2014) ได้กล่าวว่าการย่อยสลายขั้นต้นด้วยความร้อนนั้นจะทำ

ให้เกิดการเปลี่ยนโครงสร้างวัสดุลิกโนเซลลูโลสในส่วนที่ไม่ละลายในน้ำด้วยเช่นกันและสามารถทำให้ย่อยสลายทางชีวภาพได้ง่ายขึ้น

Mosier et al. (2005) ได้ทำการต้มลำต้นข้าวโพด; Laser et al. (2002) ต้มซังข้าวโพด; และ Perez et al. (2008) ต้มฟางข้าวสาลี พบว่าสามารถย่อยเฮมิเซลลูโลสจากลำต้นได้ถึงร้อยละ 80 และช่วยให้เอนไซม์ย่อยสลายเซลลูโลสได้มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น โดยระบบที่ใช้น้ำร้อนแบบไหลผ่านเมื่อเปรียบเทียบกับระบบแบบกะ สามารถกำจัดเฮมิเซลลูโลสและลิกนินได้มีประสิทธิภาพที่สูงกว่า โดยประสิทธิภาพการกำจัดจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อทำการเจือจางกรดลงไปในระบบเพียงเล็กน้อย (Wyman et al., 2005) วัตถุประสงค์หลักของการย่อยสลายด้วยความร้อนนี้คือการทำให้เฮมิเซลลูโลสละลายได้ในน้ำเพิ่มมากขึ้น ซึ่งจะทำให้เกิดการย่อยสลายเซลลูโลสได้ดีขึ้นเป็นลำดับต่อมาโดยที่ยังคงสภาวะไม่ให้เกิดการก่อตัวของสารพิษจำพวก hydroxymethyl furfural (HMF) โดยหลังจากทำการย่อยสลายเบื้องต้นด้วยความร้อนแล้วนั้นจะสามารถจำแนกลักษณะของสารได้เป็น 2 ประเภท คือ liquid fraction ที่ซึ่งองค์ประกอบส่วนใหญ่จะเป็นเฮมิเซลลูโลสและน้ำตาลอนุพันธ์ต่าง ๆ ส่วน solid fraction จะมีองค์ประกอบส่วนใหญ่ที่เป็นเซลลูโลส แต่มีข้อจำกัดที่ควรมีการป้องกันการก่อตัวของ HMF โดยการควบคุม pH ให้อยู่ในช่วง 4-7 เพราะจะทำให้น้ำตาลจากเฮมิเซลลูโลสคงอยู่ในรูปของโอลิโกเมอริก ซึ่งอัตราการก่อตัวของสารพิษจะมีค่าต่ำ ในกระบวนการย่อยสลายขั้นต้นด้วยการต้มมีต้นทุนต่ำเช่นเดียวกันกับการระเบิดด้วยไอน้ำ ซึ่งนับเป็นข้อดีของกระบวนการ pretreatment ด้วยความร้อน รวมถึงการสร้างถังปฏิกิริยาที่ง่ายและการไม่ต้องเติมสารเคมีช่วยในการย่อยสลายเพิ่มเติม ซึ่งกระบวนการนี้สามารถละลายเฮมิเซลลูโลสออกมาได้ดี แต่ละลายลิกนินออกมาได้น้อยซึ่งทำให้ปริมาณการเกิดสารพิษมีค่าต่ำ แต่อย่างไรก็ดีเมื่อเปรียบเทียบในเชิงอุตสาหกรรมแล้วแล้วพบว่าการระเบิดด้วยไอน้ำจะมีความคุ้มค่ามากกว่าในแง่ของความต้องการปริมาณการใช้น้ำในระบบและพลังงานที่ใช้มีค่าต่ำกว่ามาก

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องการย่อยสลายขั้นต้นทางกล

Pretreatment	Feedstock	Conditions	Results	Ref.
Comminution	Agricultural biomass : wheat straw, rice straw, oat, clover, bagasse, coconut fiber, hemp, banana peelings, cauliflower leaves, and digested biofibers Forest residuals: mirabilis leaves Grass: dump grass and grass hay Municipal solid waste (MSW): organic fraction of MSW (OFMSW)	Size reduction 0.003 – 30 mm	เพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตแก๊สมีเทนมากกว่า 30% ซึ่งเป็นผลมาจากการลดขนาดวัสดุนั้น ๆ	Bruni et al., (2010) Delgenés et al., (2002) Kaparaju et al., (2002) Kreuger et al., (2011)
Steam-explosion	Agricultural residuals: wheat straw, corn stalks, corn straw, citrus waste, potato pulp, rape straw, and digested biofibers Hardwood: Japanese cedar, willow, and birch Grass: bulrush, Miscanthus, and seaweed MSW: OFMSW and paper tube residuals Softwood: bamboo	160-260 ºC, 0.7-4.8 Mpa	เพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตแก๊สมีเทนมากกว่า 40% มีข้อด้อย คือ ถ้าใช้อุณหภูมิสูงกว่า 250 ºC เป็นต้นไปจะทำเกิดการก่อตัวของสาร HFM	Bruni et al., (2010) Kobayashi et al., (2004) Teghammar et al., (2010)
Liquid hot water (LHW)	Agricultural residuals: Wheat straw, rice straw,oil palm empty fruit bunches (OPEFB), sunflower stalks, and sugarcane bagasse Grass: Miscanthus and hybrid grass MSW: OFMSW and paper tube residuals	100-230 ºC 5 min – 3 hrs	สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการเกิดแก๊สมีเทนได้ตั้งแต่ 7% ไปจนถึง 220% ซึ่งเป็นผลมาจากการทำให้ hemicellulose สามารถละลายน้ำได้มากขึ้น	Chandra et al., (2012) O-Thong, Boe and Angelidaki., (2012)

2.3.3 กระบวนการทางเคมี

การเปลี่ยนองค์ประกอบของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินที่มีในชีวมวลเหล่านี้ให้อยู่ในรูปน้ำตาล สามารถทำได้โดยการย่อยสลายด้วยสารเคมีภายใต้ภาวะที่เหมาะสม ซึ่งจะทำให้ระดับการเกิดเป็นพอลิเมอร์นั้นลดลง การย่อยสลายเซลลูโลสด้วยกรดจะทำให้พันธะเบตา (1,4) ของกลูโคสในโครงสร้างแตกออกแล้วเกิดเป็นน้ำตาล โดยเกิดเป็นสายโซ่สั้น ๆ ที่มีโครงสร้างพื้นฐานเหมือนเดิมแต่ปลายของสายโซ่เซลลูโลสจะเป็นหมู่อัลดีไฮด์ที่มีสมบัติรีดิวซิ่ง (reducing) ซึ่งพันธะของเซลลูโลสนี้จะไวต่อกรดและมีการตัดแบบสุ่ม ในภาวะของการย่อยสลายเซลลูโลสด้วยกรดเจือจางที่ร้อน จะทำให้เซลลูโลสที่อยู่ในลักษณะที่มีน้ำเป็นองค์ประกอบ (hydrocellulose) กลายเป็นพอลิแซ็กคาไรด์ที่ละลายน้ำได้ และจะถูกย่อยสลายต่อไปเป็นน้ำตาลกลูโคส

การใช้กรดเจือจางเป็นที่นิยมในระดับอุตสาหกรรมสำหรับการย่อยสลายขั้นต้นของวัสดุจำพวกลิกโนเซลลูโลส ซึ่งได้มีการออกแบบเป็นหลายรูปแบบ อาทิ plug flow , batch, shrink-bed เป็นต้น (Taherzadeh and Karimi, 2008) ซึ่งสามารถใช้อุณหภูมิสูง (180°C) และอุณภูมิต่ำ (120°C) เข้าช่วยเสริมการทำงานได้ เพื่อทำให้ใช้เวลาในการย่อยได้ต่ำ (30-90 นาที) แต่การใช้กรดในการย่อยสลายก็มีข้อเสียเช่นเดียวกัน กล่าวคือ จะทำให้เกิดการก่อตัวของสารพิษจำพวก Furfural และ hydroxymethyl furfural (HMF) ได้ง่าย ซึ่งสารพวกนี้จะไปยับยั้งการทำงานของจุลินทรีย์ (Saha et al., 2005) ประเภทของกรดที่มีการใช้มากที่สุด คือ sulfuric acid และรองลงมาได้แก่ hydrochloric acid, phosphoric acid และ nitric acid ตามลำดับ (Mosier et al., 2005)

สำหรับการใช้ด่างในการย่อยสลายขั้นต้น พบว่ามีข้อดีคือ ทำให้เอนไซม์สามารถเข้าไปย่อยกลูโคสได้ง่ายขึ้น และช่วยละลายลิกนินออกมาจากผนังเซลล์ได้ แต่ก็ขึ้นอยู่กับประเภทของวัสดุลิกโนเซลลูโลสนั้นๆ (Carvalheiro et al., 2008) นอกจากนี้ การย่อยด้วยด่างไม่จำเป็นต้องใช้อุณหภูมิที่สูงมากนัก และใช้ระยะเวลาที่ทำการย่อยตั้งแต่ในระดับนาทีจนถึงมากกว่า 1 วัน ขึ้นอยู่กับวัสดุเช่นกัน แต่พบว่าวัสดุจำพวกไม้หรือวัสดุจากการเกษตรสามารถย่อยสลายได้ดีในด่าง (Kumar et al., 2009) สารเคมีที่ใช้ในการย่อยสลายได้แก่สารจำพวก sodium, potassium, calcium และ ammonium hydroxide โดย sodium hydroxide สามารถทำให้พื้นที่ผิวของวัสดุเพิ่มขึ้นและสามารถลดระดับของความเป็นพอลิเมอร์และผลึกลงได้ รวมถึงทำให้โครงสร้างของลิกนินแตกตัวออกมา (Taherzadeh and Karimi, 2008)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องการย่อยสลายขั้นต้นทางเคมี

Pretreatment	Feedstock	Conditions	Results	Ref.
Alkaline	Agricultural residuals: Wheat straw, rice straw, corn stover, sugar beet leaves, maize, ensiled hay, sugarcane bagasse, rapeseed, sunflower stalks, grape pomace, and OPEFB Forest residuals: fallen leaves Hardwood: birch; Softwood: spruce and pine Grass: switchgrass, smooth cordgrass and jose tall wheatgrass MSW: OFMSW and paper pulp/sludge	NaOH, $Ca(OH)_2$, CaO, KOH and $NH_3.H_2O$ Chemical loading 1-10% (g/g dm) Temp: -15-170 ºC Time: 1 hr – 10 days	ให้ผลผลิตแก๊สมีเทนสูงขึ้นตั้งแต่ 3.2% ไปจน 2.3 เท่า แต่หากวัสดุลิกโนเซลลูโลส มีลิกนินสูงจะให้ผลผลิตต่ำ เนื่องมา จากเป็นตัวต้านทานประสิทธิภาพการย่อยสลายด้วยด่าง	1, 2, 3, 4, 5, 6
Acid	Agricultural residuals: sunflower oil cakes, greenhouse residues, sugarcane bagasse, herbal-extraction process residue (HPR), sunflower stalks, coconut fiber, OPEFB, rapeseed, sunflower meals, straws, and bracken Grass: hay ; MSW: newsprint	H_2SO_4, HCl, HNO_3, H_3PO_4, acetic acid and maleric acid Chemical loading 1-4% (g/g dm) Temp: ambient -170 ºC Time: 5min - 30 days	ให้ผลผลิตแก๊สมีเทนสูงขึ้นตั้งแต่ 20% ไปจนถึง 2.2 เท่าหรือ 220% ซึ่งในบางงานวิจัยจะให้ผลผลิตต่ำ อาทิ การย่อยด้วย 2% H_2SO_4 ในผล rapeseed เนื่องจากสภาวะกรด	7, 8, 9, 10, 11
Oxidation	Agricultural residuals: rice straw and sunflower stalks, sorghum, sida hermaphrodita MSW: OFMSW and paper tube residuals Grass: Miscanthus	H_2O_2 1-4% (g/g dm) with NaOH (0-2%) Temp: 25-220 ºC Time: 5min – 7 days	เกิดการละลายเฮมิเซลลูโลสเพิ่มสูงขึ้น ทำให้ผลผลิตแก๊สมีเทนเพิ่มสูงขึ้น ตั้งแต่ 34 – 136%	12, 13, 8, 14

1) Liew et al., (2011), 2) Mirahmadi et al., (2010), 3) Azzam and Nasr (1993) 4) Himmelsbach et al., (2010), 5) Wang and Wang (2010), 6) Zhu, Wan and Li (2010), 7) Xio and Clarkson (1997), 8) Monlau et al., (2012), 9) Badshah et al., (2012), 10) Antonopoulou, Stamatelatou and Lyberatos (2010), 11) Monlau et al., (2013), 12) Michalska et al., (2012), 13) Song et al., (2012), 14) Teghammar et al., (2010)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

2.3.4 กระบวนการแบบอื่น ๆ

สำหรับการย่อยสลายขั้นต้นในกระบวนการอื่น ๆ นอกเหนือจากที่กล่าวมาก็ยังมีการวิจัยต่อเนื่องในการย่อยสลายวัสดุกลุ่มลิกโนเซลลูโลสหรือชีวมวลเพื่อนำมาใช้เป็นพลังงานอีกหลายวิธี ได้แก่ การ oxidation ด้วยออกซิเจนหรือโอโซนเพื่อกำจัดลิกนินในเนื้อไม้ (Sun and Cheng, 2002) การใช้ไมโครเวฟช่วยในการย่อยโดยการแช่วัสดุลงในสารเคมี และกระตุ้นด้วยไมโครเวฟเป็นระยะเวลา 5-10 นาที (Keshwani, 2009; Zhu et al, 2006)

การใช้ CO_2 ในการระเบิดในของเหลวช่วง super critical ซึ่งทำให้สามารถกำจัดลิกนินออกจากเนื้อไม้ได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้ยังได้มีการเติม co-solvent เข้าช่วยในการย่อยสลายนี้ทำให้มีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้น (Schacht et al., 2008) Cuissinat and Navard (2006) ได้ใช้เทคนิคการย่อยสลายขั้นต้นด้วย organic solvent, N-methylmorpholine-N-oxide (NMMO) โดยพบว่าด้วยวิธีนี้จะช่วยให้เซลลูโลสละลายได้มากขึ้นและลดความเป็นผลึกของเซลลูโลส โดยไม่ก่อให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อมเนื่องจากสามารถที่จะ recovery ได้มากกว่าร้อยละ 98 (Hall et al., 1999; Adorjan et al., 2004) Teghammar et al. (2012) ได้ทดสอบการย่อยสลายขั้นต้นด้วยวิธี NMMO โดยใช้วัตถุดิบคือฟางข้าวและฟางข้าวทริทิเคลี่ พบว่าจะเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตแก๊สมีเทนได้ถึง 7 เท่าจากฟางข้าวที่ไม่ได้ทำการย่อยสลายขั้นต้น โดยผลิตได้สูงสุดร้อยละ 87 จากค่าตามทฤษฎี ซึ่งมีค่าสูงอันเนื่องมาจากการ breakdown โครงสร้างและลดความเป็นผลึกของวัสดุลิกโนเซลลูโลส

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 2.7 ข้อดีและข้อเสียจากการย่อยสลายขั้นต้นวัสดุจำพวกลิกโนเซลลูโลสด้วยวิธีต่างๆ

การย่อยสลายขั้นต้น	ข้อดี	ข้อเสีย	อ้างอิง
- ทางกล	- ลดความเป็นผลึกของเซลลูโลส	- ใช้พลังงานที่สูง	1, 2, 3
- ทางความร้อน (น้ำร้อนและไอน้ำ)	- ละลายเฮมิเซลลูโลสและเปลี่ยนโครงสร้างของลิกนิน - ประสิทธิภาพสูงต่อการลงทุนต่ำ - เพิ่มความพรุน และพื้นที่ผิว	- ทำให้เกิดสารพิษที่ช่วงอุณภูมิสูง - ทำให้เฮมิเซลลูโลสบางส่วนสลายตัวไป	4, 5, 6, 7, 8, 9, 10
- ทางเคมี (กรดและด่าง)	- แตกตัวได้กลูโคสสูง - ช่วงอุณหภูมิทำงานไม่สูง - ทำให้เอนไซม์สามารถย่อยสลายกลูโคสได้ง่าย	- ค่าใช้จ่ายสารเคมีที่สูง ต้องมีวิธีการนำกลับมาใช้ใหม่ - ปัญหาการกัดกร่อนของถังปฏิกิริยา - เกิดการก่อตัวของสารพิษ - ทำลายผลิตภัณฑ์บางส่วน	3, 9, 11, 12, 13, 14
- อื่น ๆ Oxidation, ozonolysis	- สามารถกำจัดลิกนินได้สูง และลดปริมาณลิกนินได้ - ไม่ก่อให้เกิดสารพิษ	- ค่าใช้จ่ายทั้ง oxygen, alkaline และ โอโซนที่สูง	15, 16, 17, 18

อ้างอิง : 1) Alvera et al., (2010) 2) Sanklong et al., (2010) 3) Taherzadeh and Karimi (2008) 4) Weimer et al. (2003) 5) Guoce Yu (2009) 6) Avellar and Glasser (1998) 7) Liu et al. (1999) 8) Alvera et al. (2010) 9) Mosier et al. (2005) 10) Perez et al. (2008) 11) Taherzadeh and Karimi, (2008) 12) Saha et al. (2005) 13) Carvalheiro et al. (2008) 14) Kumar et al. (2009) 15) Sun and Cheng (2002) 16) Keshwani (2009) 17) Zhu et al (2006) 18) Schacht et al. (2008)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

2.4 การเพิ่มผลผลิตแก๊สชีวภาพด้วยกระบวนการย่อยสลายขั้นต้น

การใช้ประโยชน์จากชีวมวลเพื่อนำมาใช้เป็นพลังงานทดแทนมีหลายรูปแบบทั้งทางด้านความร้อนโดยการเผาตรง การผลิตไปเป็นน้ำมัน เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีอีกวิธีหนึ่งคือการนำผลิตเป็นแก๊สชีวภาพจากกระบวนการไม่ใช้ออกซิเจน แต่อย่างไรก็ดี คุณสมบัติของชีวมวลที่ ส่วนมากจะเป็นของแข็ง โดยมีส่วนประกอบหลักเป็นไบโอพอลิเมอร์ อาทิ ลิกนิน เซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลส (Li et al., 2008) ซึ่งยากต่อการย่อยสลายทางชีวภาพโดยจุลินทรีย์ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นในการย่อยสลายขั้นต้น อาทิ การสับหรือโม่ การใช้สารเคมี และการใช้ความร้อน ก่อนที่จะนำไปสู่กระบวนการผลิตแก๊สชีวภาพในขั้นต่อไป

โดยตามหลักการผลิตแก๊สมีเทนทางทฤษฎีจากแป้ง เซลลูโลส ไขมัน และโปรตีน จะมีค่า 415 415 636 และ 397 L/kg ตามลำดับ (Buffiere, 2006) การนำชีวมวลมาผลิตเป็นแก๊สชีวภาพ อาทิ พืชจำพวกหญ้า ฟางข้าว และส่วนต่าง ๆ ของต้นไม้ ที่มีคุณสมบัติแตกต่างกันจะมีศักยภาพในการผลิตแก๊สมีเทนต่างกัน Shiralipour and Smith (1984) ได้นำหญ้าเนเปียร์มาหมักเพื่อผลิตแก๊สชีวภาพ พบว่า ด้วยการทดสอบศักยภาพการผลิตแก๊สชีวภาพทางชีวเคมี (Biochemical Methane Potential, BMP) สามารถผลิตแก๊สมีเทนได้อยู่ในช่วง 0.24-0.31 $m^3CH_4.kg^{-1}VS_{added}$ และในปี 1986 Wilkie et al. ได้นำหญ้าเนเปียร์มาผลิตแก๊สชีวภาพในระบบ CSTR ขนาด 4 ลิตร ที่ระยะเวลาเก็บกัก 20 วัน OLR = 1.23 $kgVSm^{-3}d^{-1}$ พบว่าเมื่อเติมสารอาหารเพิ่มเติมเข้าไปในระบบจะทำให้การผลิตแก๊สมีเทนเพิ่มสูงขึ้นจาก 0.113 ไปเป็น 0.158 $m^3CH_4.kg^{-1}VS_{added}$

Chynoweth et al. (1993) ได้ทำการเพิ่มศักยภาพการผลิตแก๊สมีเทนจากอ้อยพลังงาน ด้วยการย่อยสลายขั้นต้นด้วยการลดสับลดขนาดที่ 8 และ 0.8 มม. พบว่า การลดขนาดของชีวมวลลงในระดับต่ำกว่า 1 มิลลิเมตร ไม่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการผลิตแก๊สมีเทนอย่างมีนัยสำคัญ รวมทั้งค่าคงที่ทางจลนศาสตร์ยังมีค่าใกล้เคียงกัน โดยมีค่าการผลิตแก๊สมีเทนอยู่ในช่วง 0.24-0.29 $m^3CH_4.kg^{-1}VS_{added}$ Sharma et al. (1988) ได้ศึกษาถึงขนาดของวัตถุดิบที่มีผลต่อการผลิตแก๊สชีวภาพ โดยให้สมมติฐานว่าเมื่อทำการลดขนาดลงแล้ว จะทำให้พื้นที่ผิวของวัสดุเพิ่มขึ้น โดยทำการทดสอบกับฟางข้าว และฟางข้าวสาลี พบว่าในการทดสอบแบบ batch ขนาดถัง 5 ลิตร โดยการสับย่อยลดขนาดจะทำให้ประสิทธิภาพในการผลิตแก๊สชีวภาพเพิ่มสูงขึ้น แต่เมื่อทำการทดสอบที่ระดับเล็กลงมาอีกที่ขนาดวัสดุ 0.40 และ 0.088 มิลลิเมตร พบว่าไม่ส่งผลให้เกิดความแตกต่างของการผลิตแก๊สชีวภาพ และให้ข้อสังเกตว่าการลดขนาดลงให้น้อยกว่า 0.4 มิลลิเมตร นั้นไม่มีความคุ้มค่าในเชิงเศรษฐศาสตร์ โดยให้ผลผลิตที่ 0.205-0.226 $m^3CH_4.kg^{-1}VS_{added}$ จากผลงานวิจัยของ Zhang et al. (1999) ได้นำฟางข้าวมาผลิตแก๊สชีวภาพโดยสับให้มีขนาด 10-25 มิลลิเมตร ความเข้มข้นของฟางข้าวในน้ำประมาณ 50-100 กรัมต่อลิตร ปรับสภาพด้วยการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ

60 90 และ 110 องศาเซลเซียส ตามลำดับ พบว่าการสับฟางข้าวให้มีขนาดเล็กและการใช้อุณหภูมิสูงในการปรับสภาพจะทำให้อัตราการเกิดแก๊สชีวภาพสูงถึง 75-80 % ของ 14 วันแรก และทำให้สามารถลดระยะเวลากักเก็บจาก 24 วันเป็น 14 วัน เนื่องจากสภาวะดังกล่าวช่วยเร่งปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสเกิดเร็วขึ้น Kuo and Cheng. (2007) ทำการศึกษาการย่อยสลายขั้นต้นเศษอาหารด้วยความร้อน 37 50 และ 60 °C โดยมีประสิทธิภาพการ hydrolytic ได้สูงถึงร้อยละ 27.3 และสามารถกำจัดไขมันได้ถึงร้อยละ 3.77 อย่างไรก็ดีในการนำวัสดุจากการย่อยสลายขั้นต้นนี้ไปใช้ในการผลิตแก๊สชีวภาพจะทำให้มีประสิทธิภาพในการผลิตแก๊สมีเทนเพิ่มสูงขึ้นและระบบมีเสถียรภาพมากขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยของ Komemoto et al. (2009) ได้ทำการศึกษาผลของอุณหภูมิระดับต่าง ๆ ในการย่อยสลายขั้นต้นที่ส่งผลต่อการเกิดแก๊สชีวภาพ โดยช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมในการทำให้วัสดุมีความสามารถในการละลายได้ดีขึ้นคือ 55 และ 65 °C แต่ถ้าใช้อุณหภูมิที่ต่ำกว่านี้จะไม่เห็นผลที่แตกต่างชัดเจน

นอกจากการ pretreatment ด้วยวิธีทางกลจะช่วยให้ผลผลิตแก๊สมีเทนสูงขึ้นแล้วนั้น การใช้สารเคมีจำพวกด่างก็เป็นอีกวิธีที่สำคัญในการที่จะช่วยเพิ่มศักยภาพในการผลิตแก๊สมีเทนจากวัสดุชีวมวล โดย Pavlostathis and Gossett (1985) ได้ใช้ NaOH 500 g ต่อฟางข้าวสาลี 1 kgTS และทดสอบเปรียบเทียบกับการที่ไม่ทำการ pretreatment พบว่าสามารถเพิ่มผลผลิตได้สูงขึ้นถึง 100% Hashimoto (1986) ได้ใช้รังสีแกมมาในการ pretreatment เปรียบเทียบกับการใช้ NH_4OH และ NaOH โดยพบว่าที่ประสิทธิภาพการผลิตแก๊สมีเทนสูงสุดด้วยการ pretreatment ด้วย NaOH, NH_4OH และรังสีแกมมา มีค่า 0.383, 0.362 และ 0.318 $m^3CH_4.kg^{-1}VS_{added}$ ตามลำดับ Li et al. (2008) ใช้ NaOH ความเข้มข้นร้อยละ 6 ในการปรับสภาพน้ำฟางข้าวความเข้มข้น 35 50 65 และ 80 กรัมต่อลิตร พบว่า NaOH ช่วยในการย่อยสลาย เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ซึ่งมีผลให้ปริมาณการเกิดแก๊สชีวภาพเพิ่มขึ้นร้อยละ 64.5 44.4 27.3 และ42.9 ตามลำดับ

จะเห็นได้ว่ามีความเป็นไปได้ในการนำชีวมวลมาใช้ในการผลิตแก๊สชีวภาพ ทั้งนี้จำเป็นต้องมีการย่อยสลายขั้นต้นก่อน เพื่อที่จะเพิ่มพื้นที่ผิว หรือการทำให้องค์ประกอบภายในที่ส่วนใหญ่ประกอบไปด้วยเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ที่รวมตัวกันเป็นพอลิเมอร์ที่แข็งแรง แยกตัวออกจากกัน เพื่อให้เอนไซม์สามารถเข้าไปทำปฏิกิริยาได้ง่ายขึ้น และยังมีอีกแนวทางที่สำคัญในการที่จะเพิ่มพื้นที่ผิวของวัสดุหรือแยกองค์ประกอบภายในผนังเซลล์ได้ ก็คือการใช้คลื่นอัลตราโซนิคในการย่อยสลายขั้นต้น มาช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตแก๊สชีวภาพ เพื่อใช้ประโยชน์จากฟางข้าวที่มีเหลืออยู่มากมายและยังไม่ได้ถูกนำมาใช้ประโยชน์อย่างจริงจัง

2.5 คลื่นอัลตราโซนิคและการประยุกต์ใช้ในการย่อยสลายขั้นต้น

คลื่นอัลตราโซนิคเป็นคลื่นเสียงที่มีความถี่สูงเกินกว่าที่หูมนุษย์จะได้ยิน โดยทั่วไปแล้วหูของมนุษย์โดยเฉลี่ยจะได้ยินเสียงสูงถึงเพียงแค่ประมาณ 15 kHz เท่านั้น โดยปกติอัลตราโซนิคมักจะหมายถึงคลื่นเสียงที่มีความถี่สูงกว่า 20 KHz ขึ้นไป สาเหตุที่มีการนำเอาคลื่นย่านอัลตราโซนิคมาใช้ก็เพราะว่าเป็นคลื่นทีมีทิศทางทำให้เราสามารถเล็งคลื่นเสียงไปยังเป้าหมายที่ต้องการได้โดยเจาะจง ซึ่งเป็นคุณสมบัติของคลื่นอย่างหนึ่ง โดยอุปกรณ์ที่สามารถแปลงพลังงานในรูปอื่นให้มาเป็นพลังงานทางกลโดยการสั่นไปมา ซึ่งทำให้เกิดคลื่นเสียงย่านอัลตราโซนิคกระจายไปได้หรือแปลงพลังงานทางกลให้มาเป็นพลังงานในรูปอื่นได้นั้น มีชื่อเรียกว่า อัลตราโซนิคทรานสดิวเซอร์ (Ultrasonic Transducer) โดยคลื่นที่มีความถี่สูงขึ้นความยาวคลื่นก็จะยิ่งสั้นลง ถ้าความยาวคลื่นยาวกว่าช่องเปิดของตัวกำเนิดเสียงความถี่นั้น (เช่น คลื่นความถี่ 300 Hz ในอากาศจะมีความยาวถึงประมาณ 1 เมตร) ซึ่งจะยาวกว่าช่องที่ให้คลื่นเสียงออกมาจากตัวกำเนิดเสียงโดยทั่วไปมาก ซึ่งจะทำให้คลื่นเกิดการหักเบนที่ขอบด้านนอกของตัวกำเนิดเสียงทำให้เกิดการกระจายทิศทางคลื่นแต่ถ้าความถี่สูงขึ้นมาอยู่ในย่านอัลตราโซนิค เช่น 40 kHz จะมีความยาวคลื่นในอากาศเพียงประมาณ 8 มม. เท่านั้นซึ่งเล็กกว่ารูเปิดของตัวที่ให้กำเนิดเสียงความถี่นี้มากคลื่นเสียงจะไม่มีการเลี้ยวเบนที่ขอบจึงพุ่งออกมาเป็นลำแคบ ๆ มีทิศทางแน่นอน ซึ่งการมีทิศทางของคลื่นเสียงย่านอัลตราโซนิคทำให้เรานำไปใช้งานได้หลายอย่าง เช่น นำไปใช้ในเครื่องควบคุมระยะไกล (Ultrasonic remote control) เครื่องวัดความหนาของวัตถุโดยสังเกตระยะเวลาที่คลื่นสะท้อนกลับมา เครื่องวัดความลึกและทำแผนที่ใต้ท้องทะเล ใช้ในเครื่องหาตำแหน่งอวัยวะบางส่วนในร่างกาย ใช้ทดสอบการรั่วไหลของท่อ เครื่องล้างอุปกรณ์ (Ultrasonic cleaner) โดยให้เกิดการยุบตัวของฟองอากาศขนาดเล็ก ๆ ที่มีพลังงานสูง เป็นต้น

2.5.1 คาวิเตชัน (Cavitation) (Mason, 1991)

การใช้ประโยชน์จากคลื่นอัลตราโซนิคโดยผ่านตัวกลางที่เป็นของเหลวนั้น พลังงานจากคลื่นเสียง (20-100 kHz) ที่ใส่ลงไปไม่ได้ส่งผลกระทบโดยตรงต่อโมเลกุลของสารที่ละลายอยู่ในของเหลวนั้น ๆ แต่เกิดจากการยุบตัว (Collapse) ของฟองอากาศขนาดเล็ก ๆ (Micro bubbles) ในของเหลว ซึ่งเกิดจากสภาวะแรงดันที่เป็นลบ (Negative pressure) ที่ถูกส่งผ่านมาทางคลื่นเสียง การเกิดคาวิเตชันมาจากการที่เสียงอัลตราโซนิคที่ส่งออกมาในรูปแบบของคลื่นที่มีการอัดและขยายผ่านตัวกลางของเหลวเกิดสภาวะแรงดันที่เป็นลบภายในตัวกลาง ซึ่งถ้ามีแรงดันที่เป็นลบที่เกิดจากการส่งผ่านคลื่นเสียงนี้มากเพียงพอที่ทำให้ระยะห่างระหว่างโมเลกุลของตัวกลางมากกว่าระยะวิกฤติ จะส่งผลให้เกิดการยุบตัว ของโมเลกุลตัวกลาง เกิดเป็นฟองอากาศขนาดเล็ก ๆ ซึ่งเราเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า การเกิดคาวิเตชัน (Cavitation) แสดงในรูปที่ 2.5 ความรุนแรงจากการ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ยุบตัวนี้ จะทำให้เกิดการปลดปล่อยพลังงานรอบ ๆ ฟองอากาศขนาดเล็ก ซึ่งพบว่าอุณหภูมิที่เกิดขึ้นมีค่าประมาณ 5,000 เคลวิน และมีแรงดันที่สูงถึง 1,000 atm (Suslick, 1989)

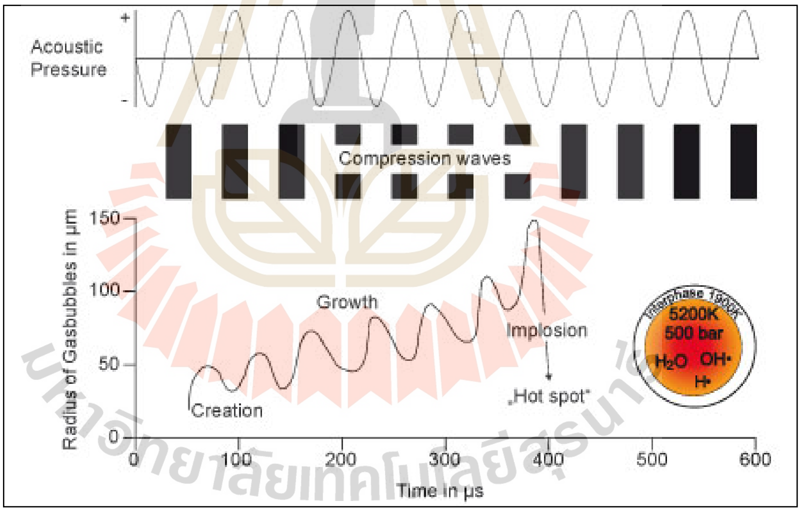
2.5.2 ปัจจัยที่ส่งผลต่อการเกิดคาวิเตชัน (Timothy, 2003)

2.5.2.1 ความถี่ (frequency)

ที่ความถี่ต่าง ๆ กันจะทำให้การเกิดคาวิเตชันต่างกัน โดยพบว่าเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงความถี่จาก 10 kHz ไปเป็น 400 kHz จะต้องเพิ่มกำลังส่งสูงถึง 10 เท่า เพื่อทำให้ผลของการเกิดคาวิเตชันออกมาเท่า ๆ กัน

2.5.2.2 ความหนืดของสารละลาย (solvent viscosity)

เมื่อความหนืดของของเหลวที่เป็นตัวกลางการส่งพลังงานมีค่าสูงขึ้น ส่งผลให้แรงยึดเหนี่ยวภายในสูงขึ้น ปริมาณการเกิดฟองอากาศขนาดเล็ก ๆ (micro bubbles) ย่อมเกิดได้ยากกว่าสารละลายที่มีความหนืดน้อย



รูปที่ 2.5 หลักการเกิดคาวิเตชัน (Timothy, 2003)

2.5.2.3 ความตึงผิวของสารละลาย (Solvent surface tension)

สารละลายที่เป็นตัวกลางที่มีความตึงผิวต่ำนั้นส่งผลกระทบโดยตรงต่อการเกิดคาวิเตชัน กล่าวคือเมื่อเมื่อความตึงผิวมีค่าต่ำมากความรุนแรงในการระเบิดของฟองอากาศย่อมมีค่าน้อย เมื่อเปรียบเทียบกับสารที่มีความตึงผิวสูง แต่ต้องแลกกับการที่ต้องใส่พลังงานเพิ่มขึ้น

2.5.2.4 แรงดันไอของสารละลาย (Solvent vapor pressure)

ความสัมพันธ์ของแรงดันไอของสารละลายที่มีค่าต่ำต่อการเกิดคาวิเตชันย่อมมีค่าต่ำเช่นเดียวกัน เพราะฉะนั้นพบว่าเมื่อความดันไอของสารตัวกลางมีค่าสูงขึ้น ย่อมมีการเกิดคาวิเตชันเพิ่มขึ้นสูงตามไปด้วย แต่พบว่าเมื่อความดันไอมีค่าสูงเกินไปจะทำให้ความรุนแรงในการระเบิดของฟองอากาศมีค่าลดต่ำลงตามลำดับ

2.5.2.5 อุณหภูมิ (Temperature)

เมื่อเพิ่มอุณหภูมิภายนอกให้กับตัวกลางของเหลวจะทำให้แรงดันไอของของเหลวนั้น ๆ มีค่าเพิ่มสูงขึ้น ทำให้มีโอกาสในการเกิดคาวิเตชันสูงขึ้น แต่จะทำให้ความรุนแรงในการระเบิดลดต่ำลง ซึ่งพบว่าเมื่อให้ความร้อนกับสารละลายจนถึงจุดเดือดจะทำให้ผลของการเกิดคาวิเตชันลดลงอย่างเห็นได้ชัด

2.5.2.6 ฟองอากาศ (Bubbled gas)

ปริมาณแก๊สที่ละลายอยู่ในของเหลวตัวกลางที่มีค่าอยู่ในระดับหนึ่งจะเป็นตัวช่วยทำให้เกิดคาวิเตชันได้ง่ายขึ้น เนื่องจากแก๊สเหล่านั้นจะเป็นเสมือน Nuclei ทำให้เกิดเป็นฟองอากาศขนาดเล็กได้ง่าย แต่ถ้ามีปริมาณที่มากเกินไปจะทำให้เกิดการแพร่เข้าไปในฟองอากาศซึ่งจะทำให้ลดความรุนแรงของการเกิดคาวิเตชัน

2.5.2.7 ความดัน (External pressure)

เมื่อทำการเพิ่มความดันภายนอกให้กับระบบจะส่งผลให้การเกิดคาวิเตชันมีค่าสูงขึ้น และส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของปฏิกิริยาทางเคมีของเสียงด้วย ซึ่งจากการทดลองของ Cum et al., 1988 ได้ข้อสรุปว่าที่ความถี่ใด ๆ เมื่อเพิ่มความดันจนถึงค่าที่เหมาะสมจะทำให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมีของเสียงสูงที่สุด

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

2.5.2.8 ความเข้ม (Intensity)

ความเข้มของพลังงานที่ส่งผ่านเป็นสัดส่วนโดยตรงต่อแอมปลิจูด (Amplitude) ของสัญญาณคลื่นเสียง ซึ่งเมื่อเพิ่มความเข้มของสัญญาณให้สูงขึ้นจะทำให้เกิดผลของปฏิกิริยาทางเคมีของเสียงเพิ่มขึ้นตามไปด้วย แต่การเพิ่มความเข้มของสัญญาณที่สูงขึ้นจะส่งผลถึง 1) การผุกร่อนของตัวกระจายสัญญาณ 2) ความเข้มที่สูงขึ้นส่งผลให้เกิดการ Decoupling ระหว่างผิวของตัวส่งสัญญาณและตัวกลางของเหลวทำให้ประสิทธิภาพของการเกิดคาวิเตชันลดลง 3) เมื่อเพิ่มความเข้มจะทำให้มีโอกาสเกิดคาวิเตชันสูงขึ้นมีฟองขนาดเล็กมากขึ้น จนทำให้เมื่อมีฟองอากาศมากเกินไปเกิดการรวมตัวกันเป็นฟองอากาศที่ใหญ่ขึ้นและไปลดทอนความเข้มของสัญญาณ (Benes et al., 2008)

2.5.2.9 การลดความแรงของพลังงาน (Attenuation of sound)

เมื่อคลื่นเสียงผ่านตัวกลางที่เป็นของเหลวจะเกิดการสูญเสียความเข้มของสัญญาณหรือพลังงานลดลงอยู่ในรูปของความร้อน ดังนั้นหากต้องการให้พลังงานส่งออกไปอย่างทั่วถึงในตัวกลางจึงจำเป็นต้องเพิ่มความเข้มของสัญญาณให้เหมาะสม ยกตัวอย่างเช่น พลังงานคลื่นเสียงความถี่ 118 kHz ที่ส่งผ่านตัวกลางที่เป็นน้ำจะมีค่าลดลงถึงร้อยละ 50 ที่ระยะทาง 1 กิโลเมตร

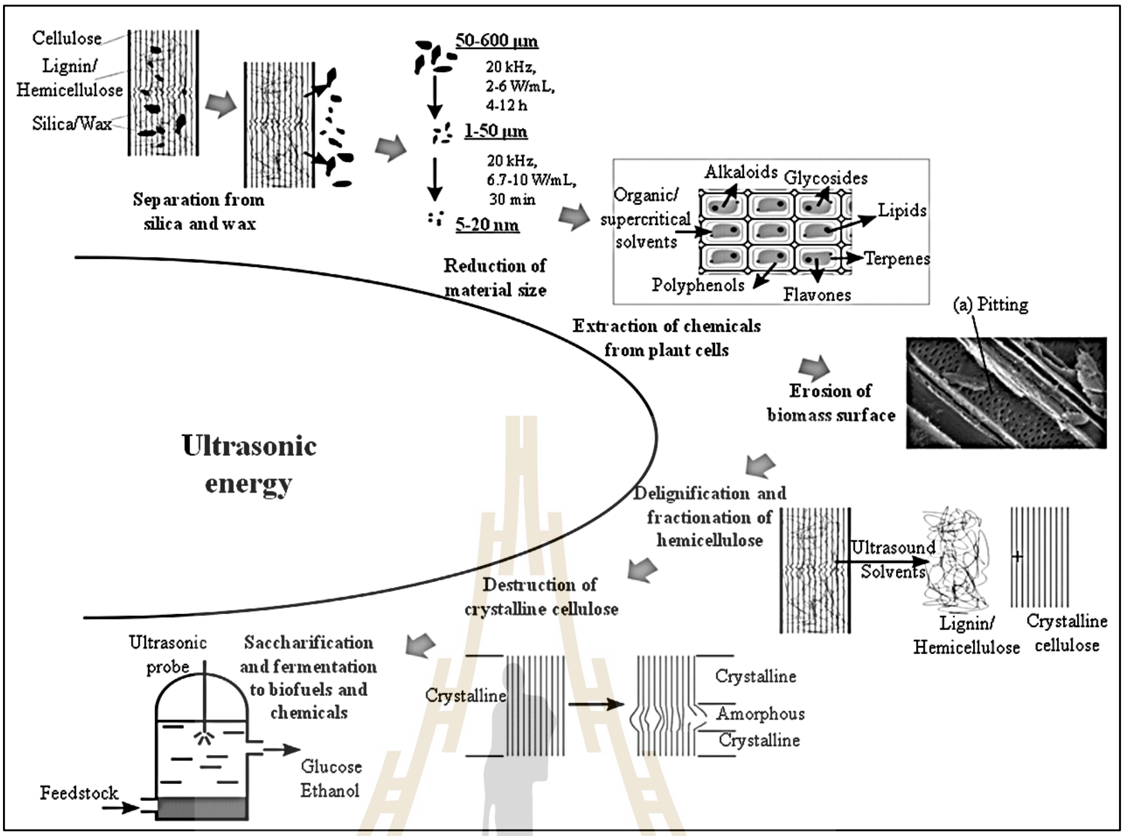
2.6 การย่อยสลายขั้นต้นด้วยคลื่นอัลตราโซนิค

Ariunbaatar et al. (2014) ได้กล่าวถึงการย่อยสลายขั้นต้นทางกลด้วยอื่น ๆ นอกจากการบดย่อย โม่ สับ อาทิ lysis-centrifuge, liquid shear, collision, high pressure homogenizer, maceration, liquefaction และ ultrasonic ส่งผลให้วัสดุลิกโนเซลลูโลสมีขนาดเล็กลงได้ดีเช่นกัน Hartmann et al. (2000) ได้ทำการศึกษาการทำให้วัสดุมีขนาดเล็กลงและเปื่อยยุ่ยในกระบวนการผลิตแก๊สชีวภาพ จะทำให้เกิดการเฉือน (Shearing) ในพื้นผิววัสดุมากกว่าการตัด (Cutting) กระบวนการย่อยสลายด้วยคลื่นอัลตราโซนิคจะทำให้เกิดการทำลายโครงสร้างของเซลล์เยื่อกระดาษได้ (Elliot and Mamood, 2007) โดยผลกระทบหลักที่เกิดขึ้นจากการใช้คลื่นอัลตราโซนิคในการย่อยสลายคือการทำให้วัสดุลิกโนเซลลูโลสมีขนาดที่เล็กลงและเพิ่มพื้นที่ผิวมากขึ้น โดยการใช้ความถี่คลื่นต่ำในช่วง 20-40 kHz (Chua et al., 2002) ซึ่งผลจากการเกิดคาวิเตชั่นจากกระบวนการย่อยสลายเบื้องต้นด้วยคลื่นอัลตราโซนิคจะทำให้เกิดพลังงานภายใน (Internal energy) ซึ่งจะทำให้เซลล์เมมเบรนถูกทำลายลงได้ (Barjenbruch and Kopplow, 2003) จุดมุ่งหมายของการย่อยสลายขั้นต้นนี้เพื่อให้เอนไซม์สามารถเข้าไปย่อยซับเสตรทได้ง่ายขึ้น การทำให้โครงสร้างเกิดการเปลี่ยนแปลงนั้นจะทำให้เอนไซม์ของแบคทีเรียสามารถ Adsorp เซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสได้ง่ายขึ้นย่อมหมายถึงสามารถที่จะนำไปสู่การผลิตแก๊สมีเทนได้สูงขึ้น (Taherzadeh and Karimi, 2008) กระบวนการย่อยสลายทางกลที่กระทำต่อโครงสร้างของวัสดุลิกโนเซลลูโลส โดยสรุป ประกอบด้วย 1)การทำลายชั้น Wax ซึ่งทำให้ Silica

ที่ผนังเซลล์หลุดออกมา 2)การลดขนาดของอนุภาคของแข็งให้มีขนาดเล็กลง 3)การสกัดองค์ประกอบเคมีบางอย่างจากเซลล์พืช 4)การกัดกร่อนผิวของผนังเซลล์ การย่อยสลายเฮมิเซลลูโลสหรือลิกนิล 5)การลดการเป็นผลึกของเซลลูโลส (Luo et al., 2014) ดังแสดงในรูปที่ 2.6

การใช้เทคนิคในการใช้คลื่นอัลตราโซนิคเข้ามาช่วยในการย่อยสลายขั้นต้น เพื่อให้เอ็นไซม์สามารถเข้าทำปฏิกิริยาได้ง่ายขึ้นเริ่มมีบทบาทสำคัญในการนำวัสดุจำพวกลิกโนเซลลูโลสมาใช้ประโยชน์ โดย Hepher and Aliyu (2000) ใช้คลื่นอัลตราโซนิคความถี่ 38 kHz ช่วยในการ ไฮโดรไลซิสเซลลูโลสและทำการสร้างแบบจำลองการย่อยสลาย พบว่าปริมาณการผลิตเซลลูโลสจะสูงขึ้นเมื่อระยะเวลาในการ ultrasound เพิ่มขึ้นในช่วง 0-100 นาที มีค่า R^2 0.93-0.99 ส่วนงานวิจัยของ Polissiou et al. (2002) ได้สกัดเซลลูโลสจาก kenaf และ eucalyptus โดยเมื่อเปรียบเทียบสเปกตรัมของ FT-IR ของตัวอย่างที่ได้จากการสกัดเมื่อเทียบกับเซลลูโลสมาตรฐานพบว่าสามารถสกัดเซลลูโลสออกมาได้ แสดงให้เห็นว่าการใช้คลื่นอัลตราโซนิคช่วยในการย่อยสลายจะทำให้ได้เซลลูโลสที่มีโครงสร้างสมบูรณ์ (สามารถแยกเฮมิเซลลูโลสและลิกนินออกจากเนื้อวัสดุได้ดี) และช่วยลดระยะเวลาในการสกัดลงถึง 2 วัน โดยปริมาณเซลลูโลสที่ได้มีความใกล้เคียงกันกับวิธีปกติ สำหรับการสกัดเฮมิเซลลูโลสจากการทดลองของ Vinatoro et al. (2001) ศึกษาผลของการใช้อัลตราโซนิคในการสกัดสารจากเนื้อเยื่อของพืช 7 ชนิด จากทั้งใบ เมล็ด ราก ดอก และหัว โดยใช้คลื่นความถี่ 33 kHz พบว่าสามารถสกัดสารที่ต้องการออกมาได้สูงกว่าแบบปกติ เนื่องจากเนื้อเยื่อของพืชถูกทำลายลงด้วยกระบวนการ cavitation เมื่อส่องดูด้วยกล้อง SEM

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 2.6 ผลกระทบของการใช้คลื่นอัลตราโซนิคในการย่อยสลายขั้นต้นวัสดุลิกโนเซลลูโลส (Luo et al., 2014)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

Sun et al. (2002) พบว่าการใช้คลื่นอัลตราโซนิคความถี่ 20 kHz ช่วยในการสกัดฟางข้าวสาลีที่ระยะเวลา 5-35 นาที พบว่าได้ปริมาณเฮมิเซลลูโลสเพิ่มขึ้นจากวิธีปกติอยู่ในช่วง ร้อยละ 2.9-9.2 และให้ผลในการสกัดดีขึ้นเช่นเดียวกับการสกัดเฮมิเซลลูโลสจากซังข้างโพด และสามารถลดระยะเวลาในการสกัดลงได้ (Ebringerova et al., 1998) ส่วนในปี 2002 Sun และ Tomkinson ได้ทำการสกัดลิกนินด้วย alkali และใช้อัลตราโซนิคช่วยในการสกัด พบว่าการใช้คลื่นอัลตราโซนิคที่ความถี่ 20 kHz เป็นระยะเวลา 5-35 นาที และใช้ 0.5 M KOH ที่อุณหภูมิในการ dewax ปกติ พบว่าสามารถสกัดลิกนินได้ 43.9-49.1% ในปี 2004 Schinor et al. ได้นำอัลตราโซนิคมาช่วยในการสกัด triterpenoids และ steroids จากต้น chresta ที่คลื่นความถี่ 60 kHz พบว่าสามารถช่วยลดระยะเวลาในการสกัดลงได้อย่างมีนัยสำคัญ โดยสรุปการใช้คลื่นอัลตราโซนิคช่วยในการย่อยสลายขั้นต้นวัสดุลิกโนเซลลูโลสจำพวกฟางข้าวดังแสดงในตารางที่ 2.8

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 2.8 การใช้คลื่นอัลตราโซนิคช่วยในการย่อยสลายขั้นต้น

Feedstocks	Coditions	Mediums	Results	Ref.
Wheat straw	Horn type reactor 0–35 min at 35 °C	0.5 M KOH pre-treatment and 2% H_2O_2 – 0.2% TAED post- treatment	ละลายเฮมิเซลลูโลส 27.1–28.1% และลิกนิน 43.3–46.2%	1
Wheat straw	100 W horn type reactor, 20 kHz, 0–35 min at 35 °C	0.5 M KOH pre-treatment	1)[*2] ละลายเฮมิเซลลูโลส 24.8–25.5% และลิกนิน 7.5–8.4% 2)[*3] ละลายลิกนิน 43.9–49.1% ไม่พบการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างและองค์ประกอบของลิกนิน 3)[*4] ละลายเฮมิเซลลูโลสและลิกนินเพิ่มมากขึ้นตามระยะเวลาการอัลตราโซนิค และเพิ่ม MW ในส่วนของ lignin fraction 4)[*5] เพิ่มประสิทธิภาพการสกัดและแยกเซลลูโลสได้สูงขึ้	2,3, 4, 5
Rice straw	400 W, 30 kHz, 60 min	2% NaOH for 24 h	เพิ่มประสิทธิภาพการผลิตแก๊สชีวภาพ 41.8% ด้วยการใช้คลื่นอัลตราโซนิค	6
Wheat straw	100 W, 20 kHz, 0–35 min at 60 °C	0.5 M NaOH methanol:H_2O (60/40 v/v)	1)[*7] ละลายลิกนิน 67.4–78.5% 2)[*8] ละลายเฮมิเซลลูโลส 32.2–41.4% และลิกนิน 61.0–78.5%	7,8
Wood wastes and wheat straw	400 W, 20–100% amplitude, 24 kHz	Diethylene glycol/glycerol Mixtures	ลดระยะเวลาการทำปฏิกิริยา liquefaction ของวัสดุลิกโนเซลลูโลส	9
Corn meal	1.58 W/mL, 40 kHz, 0.5-30 min	1:3 corn meal and water	1) กลูโคส yield สูงขึ้นจากกระบวนการ liquefaction จากไม่มีการ pretreatment 29.6 wt.% ถึง 31.6 wt.% 2) ความเข้มข้นของ Bio-ethanol หลังจากการหมักเพิ่มขึ้นจาก 0.45 g/g ถึง 0.5 g/g	10

ตารางที่ 2.8 การใช้คลื่นอัลตราโซนิคช่วยในการย่อยสลายขั้นต้น (ต่อ)

Feedstocks	Coditions	Mediums	Results	Ref.
Triticale meal	Bath, 40 kHz, about 0.05 W/mL, 40-60 ºC, 5 min,	Sample concentration 25 wt.%	1) กลูโคสและมอลโทสเพิ่มขึ้น จากกระบวนการ liquefaction 12.3-15.7% and 46.7-52.6% 2) ระยะเวลาในการหมักเพื่อผลิตเอทานอลลดลงจาก 72 h ถึง 48 h	11
Sugarcane bagasse	24 kHz, 20 min at 50 ºC	Aqueous soda solution	1) Hydrolysate ที่ได้จากกระบวนการ hydrolysis ด้วยกรดร่วมกับคลื่นอัลตราโซนิค สามารถให้ผลผลิตเอทานอลได้ง่ายขึ้น	12
Sawdust	22 kHz ultrasonic bath 120W	Aqueous soda solution	1) เพิ่มประสิทธิภาพการ delignification ให้สูงขึ้น และเมื่อใช้คลื่นอัลตราโซนิคร่วมกับระบบย่อยสลายแบบไฮโดรไดนามิคจะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพขึ้นไปอีก 4-5 เท่า	13
coconut	25 kHz ultrasonic bath 150W	Water, Aqueous soda solution, Aqueous acetic acid	1) สามารถสกัด cellulose ได้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น	14
poplar	20 kHz 30 min 25 ºC 570W	สารสกัด95% ethanol, methanol, dioxane, dimethyl sulfoxide	1) สามารถสกัด hemicellulosenออกมาได้อย่างมีประสิทธิภาพสูง	15
Sugarcane bagasse	20 kHz, 30 min at 60 ºC 100W	water	1) มีประสิทธิภาพในการสกัด cellulose จากวัสดุลิกโนเซลลูโลสเพิ่มสูงขึ้น	16
Tobacco dust	30 kHz, 50W, 0-120 min	0.5M NaoH	1) องค์ประกอบที่เป็นกรดฮิวมิคถูกย่อยสลายและอยู่ในรูป volatile มากขึ้น, โครงสร้างที่เป็นไฟเบอร์ลดลง	17
Sunflower hust	30 kHz, 0-35 min, 230-460W	Water	1) Polysaccharides ถูกย่อยสลายมากขึ้นหลังจากใช้คลื่นอัลตราโซนิคจาก 24% - 38%	18

อ้างอิง : 1) Sun and Tomkinson (2003: 1), 2) Sun and Tomkinson (2002: 2), 3) Sun and Tomkinson (2002: 1), 4) Sun et al., (2003: 2), 5) Sun and Tomkinson (2005), 6) Yong-ze et al. (2012), 7) Sun et al., (2002: 1), 8) Sun et al., (2002: 2), 9) Kunaver et al., (2012), 10) Nikolic´ et al., (2010), 11) Pejin et al., (2012), 12) Velmurugan and Muthukumar (2011), 13) Baxi and Pandi (2012), 14) Rodrigues and Pinto (2007), 15) Yuan et al., (2010), 16) Liu et al. (2006), 17) Qi et al., (2004), 18) Sul'man et. al., (2011)

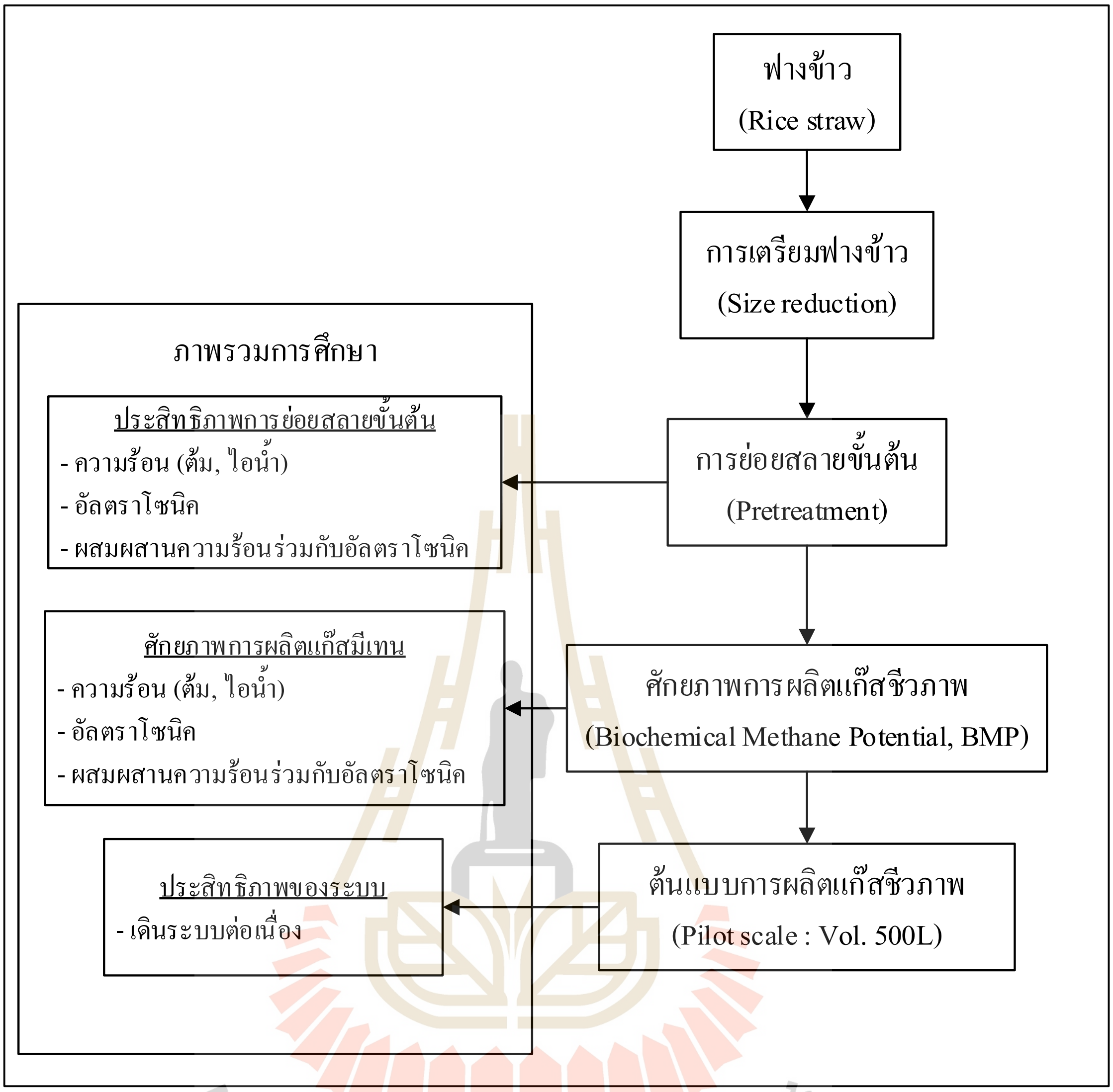
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 3
เครื่องมือและวิธีดำเนินการวิจัย

3.1 ขั้นตอนการวิจัย

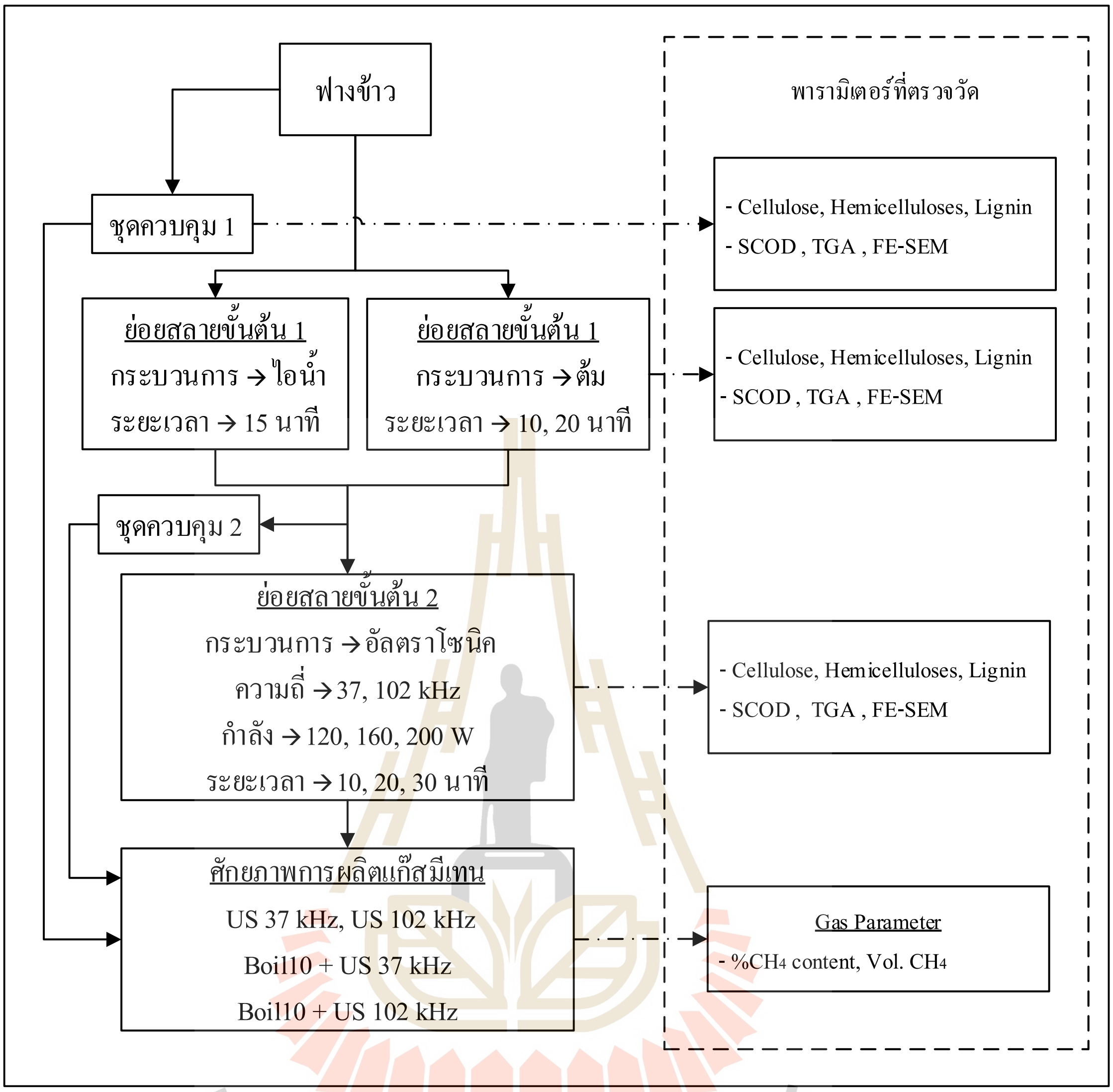
งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาความสามารถในการย่อยสลายฟางข้าวขั้นต้นด้วยคลื่นอัลตราโซนิค เพื่อนำไปผลิตเป็นแก๊สชีวภาพ โดยมีขั้นตอนการวิจัยโดยสรุปดังนี้ 1) การเตรียมตัวอย่างฟางข้าว 2) การศึกษาสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางเคมีของฟางข้าว 3) การศึกษาผลกระทบของคลื่นอัลตราโซนิค ต่อโครงสร้างและองค์ประกอบของฟางข้าว 4) การศึกษาศักยภาพการผลิตแก๊สมีเทนด้วยวิธีทางชีวเคมี 5) การพัฒนาต้นแบบระบบผลิตแก๊สชีวภาพจากฟางข้าวโดยใช้ถังปฏิกรณ์แบบกวนสมบูรณ์ ดังแสดงในรูปที่ 3.1 ถึง 3.3

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



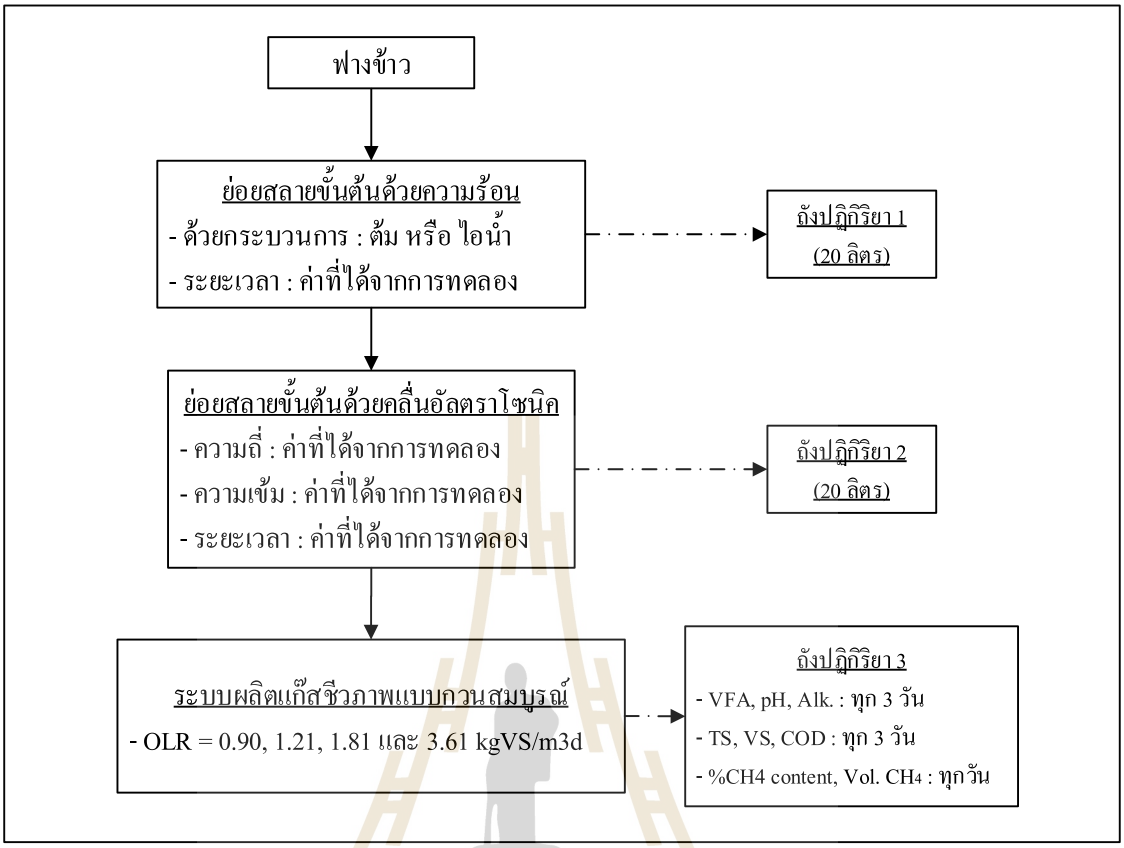
รูปที่ 3.1 ภาพรวมขั้นตอนการศึกษา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 3.2 การศึกษาประสิทธิภาพการย่อยสลายฟางข้าวขั้นต้น

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

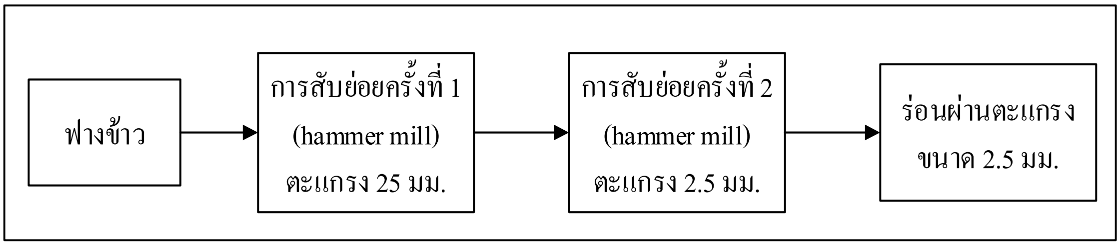


รูปที่ 3.3 การพัฒนาต้นแบบระบบผลิตแก๊สชีวภาพจากฟางข้าวขนาด 500 ลิตร

3.2 วิธีดำเนินการวิจัย

3.2.1 การเตรียมฟางข้าว

ในงานวิจัยนี้ฟางข้าวหลังการเก็บเกี่ยวในพื้นที่จังหวัดนครราชสีมา โดยการนำฟางข้าวมาตากแดดจนแห้ง ให้มีความชื้นประมาณ 12% (wb) และนำฟางข้าวมาบดโดยใช้เครื่องบดย่อยแบบแฮมเมอร์มิลล์ 2 ครั้ง ที่ขนาดรูตะแกรง 25 มิลลิเมตร และ 2.5 มิลลิเมตร ตามลำดับ แล้วนำมาร่อนด้วยตะแกรงเพื่อให้ได้ขนาด 2 มิลลิเมตร โดยทำการเตรียมไว้ปริมาณ 1,000 กิโลกรัม เก็บรักษาไว้ในห้องเก็บที่มีอากาศถ่ายเท (ศูนย์ความเป็นเลิศทางด้านชีวมวล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี) และมีการตรวจสอบคุณภาพ คุณสมบัติก่อนการใช้งานทุกครั้ง ดังแสดงในรูปที่ 3.4 และรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.4 ขั้นตอนการเตรียมฟางข้าว

ก) ขนาดของฟางข้าวที่ผ่านการสับย่อยครั้งที่ 1 และ ครั้งที่ 2

ข) ขนาดของฟางข้าวที่ร่อนผ่านตะแกรง

รูปที่ 3.5 ฟางข้าวที่ใช้ในการทดลอง

3.2.2 ศึกษาสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางเคมีของฟางข้าว

3.2.2.1 การวิเคราะห์สมบัติแบบประมาณ (Proximate Analysis)

เป็นสมบัติเฉพาะตัวของฟางข้าว ที่แสดงถึงสัดส่วนของ ปริมาณความชื้น (Moisture Content) ปริมาณสารที่ระเหยได้ (Volatile Matter) ปริมาณคาร์บอนคงตัว (Fixed Carbon) และ ปริมาณเถ้า (Ash Content) ใช้วิธีการวิเคราะห์ตามมาตรฐาน ASTM D1762-84 ดังแสดงในภาคผนวก ก เป็นสมบัติที่นิยมใช้ประกอบการพิจารณาในการเลือกใช้วัสดุชีวมวลในโรงงานอุตสาหกรรม

3.2.2.2 การวิเคราะห์สมบัติทางเคมี (Chemical Composition)

เป็นสมบัติที่แสดงถึงธาตุองค์ประกอบของฟางข้าว อันประกอบไปด้วย คาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน ไนโตรเจน และซัลเฟอร์ สามารถทำการวิเคราะห์ได้โดยใช้เครื่อง Carbon Hydrogen Nitrogen and Sulfur Analyzer; CHNS-932) ซึ่งองค์ประกอบของธาตุต่างๆ จะมีความแตกต่างกันโดยขึ้นอยู่กับสายพันธุ์ของฟางข้าวแต่ละชนิด

3.2.2.3 การวิเคราะห์องค์ประกอบ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน

การศึกษาองค์ประกอบของปริมาณองค์ประกอบ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน โดยใช้วิธี Detergent analysis (Goering and Van Soest, 1970)

3.2.2.4 การวิเคราะห์ความมีเสถียรภาพทางความร้อนของฟางข้าว

เพื่อศึกษาการสลายตัวของฟางข้าวด้วยการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักที่อุณหภูมิต่าง ๆ ด้วยเครื่อง Thermogravimetric analysis NETZSCH STA 449 F3 ที่สภาวะอุณหภูมิห้องถึง 600 °C ด้วยอัตราการให้ความร้อน 10 °C/min ภายใต้อัตราการไหลของไนโตรเจน 10 mL/min.

3.2.2.5 การวิเคราะห์โครงสร้างทางกายภาพของฟางข้าว

การศึกษาโครงสร้างทางกายภาพของฟางข้าวเพื่อวิเคราะห์รูปสัณฐาน โดยใช้เทคนิคการส่องกราดด้วยกล้องกำลังขยายสูง (Field Emission Scanning Electron Microscope, FE-SEM) (JEOL JSM-7800F, Japan)

3.2.2.6 การวิเคราะห์ COD

เพื่อศึกษาความต้องการออกซิเจนทางเคมี ประกอบด้วย Total COD (TCOD) และ Soluble COD (SCOD) โดยมีขั้นตอนดังนี้

1) TCOD ทำการวิเคราะห์โดยนำตัวอย่างฟางข้าวมาลดขนาดและร่อนผ่านตะแกรง 325 mesh (44 micron) จากนั้นนำมาปรับสัดส่วนของแข็งในน้ำกลั่น 2 มิลลกรัมต่อ 20

มิลลิลิตร และทำการวิเคราะห์ค่า COD ตามวิธี APHA-AWWA-WPCF method (1995) (Bullock et al., 1996; Zhang et al., 2014; Yadvika et al., 2006; Najafpour et al., 2008)

2) SCOD ทำการวิเคราะห์โดยการนำตัวอย่างฟางข้าวที่ได้เตรียมไว้ มาทำการเหวี่ยงแยกด้วยเครื่อง centrifuge Hitachi CR22GIII ที่ความเร็วรอบ 4,500 rpm เป็นระยะเวลา 20 นาที จากนั้นนำน้ำส่วนใสมากรองด้วยกระดาษกรอง whatman 934-AH นำน้ำตัวอย่างที่ผ่านกระดาษกรองมาวิเคราะห์ค่า COD ตามวิธี APHA-AWWA-WPCF method (1995)

3.2.3 การศึกษาผลกระทบของคลื่นอัลตราโซนิคต่อโครงสร้างและองค์ประกอบของฟางข้าว

วัตถุประสงค์เพื่อทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการย่อยสลายขั้นต้นของฟางข้าวด้วยวิธีต่าง ๆ คือ วิธีทางความร้อน โดยวิธีการต้ม และใช้ไอน้ำ วิธีทางความร้อนร่วมกับคลื่นอัลตราโซนิค (การต้มร่วมกับคลื่นอัลตราโซนิค) โดยทำการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของ 1) องค์ประกอบเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินของฟางข้าว (หัวข้อ 3.2.2.3) 2) ความมีเสถียรภาพทางความร้อนของฟางข้าว (หัวข้อ 3.2.2.4) 3) โครงสร้างทางกายภาพของฟางข้าว (หัวข้อ 3.2.2.5) และ 4) ทำการวิเคราะห์ SCOD ของสารละลายที่เปลี่ยนแปลงไปหลังจากผ่านการย่อยสลายขั้นต้น พารามิเตอร์การตรวจสอบแสดงไว้ในตารางที่ 3.1 ถึง ตารางที่ 3.2 และ มีรายละเอียดการทดลอง ดังนี้

3.2.3.1 การย่อยสลายขั้นต้นด้วยความร้อน

จุดมุ่งหมายของการย่อยสลายขั้นต้นในขั้นตอนนี้เพื่อทำให้ฟางข้าวเปื่อยยุ่ยด้วยความร้อน ในช่วงระยะเวลาที่กำหนดขึ้น โดยทำการทดสอบ 2 วิธี คือ การนึ่งด้วยไอน้ำ และการต้มด้วยความร้อน มีขั้นตอนการศึกษา ดังนี้

1) นำฟางข้าวที่สับย่อยแล้วจากขั้นตอนที่ 3.2.1 มาปรับสัดส่วนของแข็ง (TS) ต่อน้ำที่ร้อยละ 5 ให้ได้ปริมาตร 500 มิลลิลิตร

2) นำไปทำการย่อยสลายด้วยความร้อน ด้วยวิธีการดังนี้

ก. นึ่งด้วยไอน้ำโดยควบคุมอุณหภูมิที่ 121°C และความดัน 15 psi ระยะเวลาการนึ่ง 15 นาที (สภาวะ sterilization) เพื่อกำจัด wax ที่เคลือบผิวฟางข้าว ทำให้ฟางข้าวอ่อนนุ่มและพองตัว (Taniguchi et al., 2005)

ข. ต้มด้วยความร้อน โดยนำมาต้มที่อุณหภูมิ 90 °C ระยะเวลาในการต้ม 10 นาที และ 20 นาที เพื่อกำจัด wax ที่เคลือบผิว และทำให้ฟางข้าวอิ่มตัวด้วยน้ำ (saturated) (Komemoto et al., 2009)

ตารางที่ 3.1 พารามิเตอร์การตรวจวัดในขั้นตอนการย่อยสลายขั้นต้น

Pretreatment Type				การตรวจวัด	ตัวชี้วัด
Heat	Ultrasonic Freq. (Hz)	Ultrasonic Power (W)	Time (min)		
Boil[1]	-	-	10	Hemicellulose Cellulose Lignin SCOD TGA FE-SEM	1) การเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบ - Hemicellulose - Cellulose - Lignin 2) การเปลี่ยนแปลงของสารละลาย - SCOD 3) ความมีเสถียรภาพทางความร้อน - TGA 4) การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ - FE-SEM
	-	-	20		
Steam[2]	-	-	15		
-	37kHz และ 102kHz	120	10		
			20		
			30		
		160	10		
			20		
			30		
		200	10		
			20		
			30		
Boil 10[3] และ Steam	37kHz และ 102kHz	120	10		
			20		
			30		
		160	10		
			20		
			30		
		200	10		
			20		
			30		

หมายเหตุ : [1] ต้ม [2] ไอน้ำ [3] ต้ม 10 นาที

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

3.2.3.2 การย่อยสลายขั้นต้นด้วยคลื่นอัลตราโซนิค

ทำการย่อยสลายขั้นต้นด้วยคลื่นอัลตราโซนิค โดยใช้เครื่องกำเนิดคลื่นอัลตราโซนิคและอัลตราโซนิคทรานดิวเซอร์ ดังแสดงในรูปที่ 3.6 และมีพิกัดข้อกำหนดดังแสดงไว้ในตารางที่ 3.2 ขั้นตอนการย่อยสลายขั้นต้นด้วยคลื่นอัลตราโซนิค มีดังนี้

1) นำฟางข้าวที่สับย่อยแล้วจากขั้นตอนที่ 3.2.1 มาปรับสัดส่วนของแข็ง (TS) ต่อน้ำที่ร้อยละ 5 ให้ได้ปริมาตร 500 มิลลิลิตร

2) ทดสอบการย่อยสลายด้วยเครื่องอัลตราโซนิคที่คลื่นความถี่ในเขตให้พลังงาน (power region, 20-100 kHz) (Timothy, 2003) โดยใช้ค่า 37 kHz และ 102 kHz จากนั้นเริ่มทำการเดินเครื่องอัลตราโซนิคโดยใช้เวลา 10 20 และ 30 นาที ตามลำดับ ทำการปรับความเข้มโดยกำหนดที่ 120 160 และ 200 Watt ตามลำดับ (0.302 0.402 และ 0.503 W/cm)

ก) Ultrasonic transducer

Model : HNC-8SH-3840 และ HNC-4SS-38100

ข) Ultrasonic generator

Model : AG1007

ค) ชุดทดสอบระดับห้องปฏิบัติการ

รูปที่ 3.6 เครื่องกำเนิดคลื่นอัลตราโซนิคและอัลตราโซนิคทรานดิวเซอร์

ตารางที่ 3.2 รายระเอียดเครื่องอัลตราโซนิค

Technical data	Specification	
Ultrasonic Generator	Model : AG1007	
Power	Max 300 W	
Operating frequency	20 kHz – 1 MHz	
Dimensions	135mm x 254 mm x 385 mm	
Weight	12 kg	
Power supply	200 - 240 Vac, 50 - 60 Hz, 4.5 A	
Ultrasonic Transducer	Model : HNC-8SH-3840	Model : HNC-4SS-38100
Frequency	37 kHz	102 kHz
Static capacitance	3800 ± 10%	5100 ± 10%
Resonance impedance	20 ohm	25 ohm
Size (dia * hight)	48*51	40*57
Power	60W	60W

3.2.3.3 การย่อยสลายขั้นต้นด้วยความร้อนควบคู่กับคลื่นอัลตราโซนิค

หลังจากที่ย่อยสลายขั้นต้นด้วยวิธีทางความร้อนทั้ง 2 ประเภทแล้ว จะถูกนำมาทดสอบการย่อยสลายซ้ำด้วยเครื่องอัลตราโซนิคที่คลื่นความถี่ 37 kHz และ 102 kHz ทำการเดินเครื่องอัลตราโซนิคเป็นเวลา 10 20 และ 30 นาที ตามลำดับ ทำการปรับความเข้มโดยกำหนดที่โดยกำหนดที่ 120 160 และ 200 Watt ตามลำดับ (0.302 0.402 และ 0.503 W/cm^2)

3.3 ศึกษาศักยภาพการผลิตแก๊สมีเทนด้วยวิธีทางชีวเคมีจากฟางข้าวที่ผ่านการย่อยสลายขั้นต้น

เพื่อศึกษาศักยภาพการผลิตแก๊สชีวภาพจากฟางข้าว โดยวัดศักยภาพการผลิตแก๊สชีวภาพด้วยวิธีทางชีวเคมี (Biochemical Methane Potential, BMP) จากฟางข้าวจากการประยุกต์ใช้คลื่นอัลตราโซนิคในขั้นตอนการย่อยสลายขั้นต้น โดยมีขั้นตอนการดำเนินการวิจัยดังนี้

3.3.1 การออกแบบการทดลอง

ในการศึกษาศักยภาพการผลิตแก๊สมีเทนจากฟางข้าวที่ผ่านการย่อยสลายขั้นต้นนี้ มีการทดลองแบ่งออกเป็น 2 กรณี คือ

3.3.1.1 กรณีการย่อยสลายขั้นต้นด้วยความร้อน

ใช้ตัวแปรต้นที่กำหนดเงื่อนไข ตามหัวข้อ 3.2.3 โดยชุดการทดสอบ แสดงดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 ชุดการทดสอบการย่อยสลายขั้นต้นด้วยความร้อน

Pretreatment Type	Time (min)	การตรวจวัด	ตัวชี้วัด
Untreated	-	Vol.CH_4 %CH_4 content	- methane yield (H) (mL.CH_4gVS^{-1}$_{added}$) - *Rm* (mL.CH_4gVS^{-1}$_{added}$)
Boil	10		
	20		
Steam	15		

3.3.1.2 กรณีการย่อยสลายขั้นต้นด้วยคลื่นอัลตราโซนิค และคลื่นอัลตราโซนิคร่วมกับความร้อน

กรณีการย่อยสลายขั้นต้นด้วยคลื่นอัลตราโซนิคและคลื่นอัลตราโซนิคร่วมกับความร้อนนั้น ใช้แนวคิดในการออกแบบการทดลอง ด้วยวิธีพื้นที่ผิวตอบ (Response surface methodology, RSM) ซึ่งสามารถลดจำนวนชุดการทดลองลงได้ เมื่อเทียบกับการวางแผนการทดลองแบบแฟคทอเรียล นอกจากนั้นยังสามารถหาความสัมพันธ์ของตัวแปรต้น (Parameters) ที่มีผลต่อตัวแปรตาม (Response) ซึ่งในที่นี้ตัวแปรต้นคือ พลังงานที่ใช้และระยะเวลา ส่วนตัวแปรตาม คือ ปริมาณการเกิดแก๊สมีเทนสะสม (H) และอัตราการผลิตแก๊สมีเทนจำเพาะสูงสุด (Rm) นอกจากนั้นยังสามารถนำมาใช้ในการทำนายความสัมพันธ์ของตัวแปรต้นที่มีผลต่อตัวแปรตามได้อีกด้วย

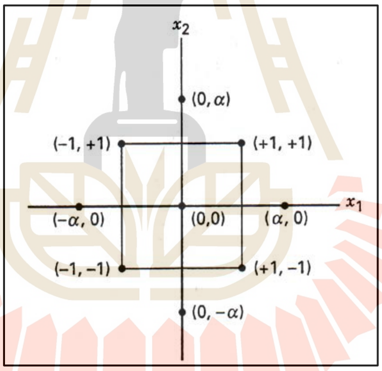
ในการศึกษาในหัวข้อนี้จะออกแบบการทดลอง โดยใช้วิธีพื้นที่ผิวตอบ (RSM) โดยวางแผนการทดลองแบบส่วนประสมกลาง central composite design (CCD) (Rodigues, 2008) แสดงดังรูปที่ 3.7 ซึ่งกำหนดช่วงของปัจจัยที่ศึกษาดังตารางที่ 3.4 ทำให้ได้การทดลองทั้งหมด 12 design points ประกอบด้วย จุดกึ่งกลาง (Center point) จำนวน 4 จุด เพื่อลดแปรปรวนของแบบจำลอง (Myers and Montgomery, 2002) จุดขอบ (Axial point) จำนวน 4 จุด และ Factorial point จำนวน 4 จุด มีหน่วยการทดลองจำนวน 12 หน่วยการทดลอง โดยแยกประเภทของตัวแปรออกเป็นกำลังส่ง (Power, P) และเวลา (time, t) และให้ปริมาณการเกิดแก๊สมีเทนสะสม (H) และอัตราการผลิตแก๊สมีเทนจำเพาะสูงสุด (R_m) เป็นผลตอบ (response) ดังแสดงในตารางที่ 3.5 และใช้

วิธีพื้นผิวตอบ (response surface methodology, RSM) เพื่อหารูปแบบความสัมพันธ์ของตัวแปรโดยใช้แบบจำลองอันดับสอง (Myers and Montgomery, 2002) ดังสมการที่ 3.1 ทั้งนี้ จะทำการ Normalize ข้อมูลของพารามิเตอร์ที่สนใจให้อยู่ในขอบเขต -1 ถึง 1 เพื่อแปลงข้อมูลให้อยู่ในรูปอย่างง่าย

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_{11} X_1^2 + \beta_{22} X_2^2 + \beta_{12} X_1 X_2 \qquad (3.1)$$

ตารางที่ 3.4 พารามิเตอร์การตรวจวัดในขั้นตอนการวิเคราะห์พื้นผิวตอบ

Parameters		Code			Response
		-1	0	1	
พลังงานที่ใช้ (W)	Power	120	160	200	H, Rm
ระยะเวลา (minute)	Time	10	20	30	



รูปที่ 3.7 การออกแบบแผนการทดลองแบบส่วนประสมกลาง (Myers and Montgomery, 2002)

ตารางที่ 3.5 หน่วยการทดลองในแต่ละรูปแบบการศึกษา

Center points					
run	Power	Time	run	Power	Time
1	0	0	3	0	0
2	0	0	4	0	0

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 3.5 หน่วยการทดลองในแต่ละรูปแบบการศึกษา (ต่อ)

Axial points					
run	Power	Time	run	Power	Time
5	0	-1	7	0	1
6	-1	0	8	1	0
Factorial points					
9	-1	1	11	1	1
10	1	-1	12	-1	-1

3.3.2 การเตรียมเชื้อ

ใช้หัวเชื้อจากระบบบำบัดแบบไร้อากาศ ณ ฟาร์มสุกร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และเตรียมสารอาหารที่จำเป็นสำหรับเลี้ยงเชื้อจุลินทรีย์ เพื่อปรับสมดุลการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์แบบไม่ใช้อากาศ (Demirel and Scherer, 2011) ดังแสดงในตารางที่ 3.6 และ ตารางที่ 3.7 (Raposo et al, 2006)

ตารางที่ 3.6 การเตรียมสารอาหารเลี้ยงเชื้อจุลินทรีย์ stock solution (ความเข้มข้น 5 เท่า)

สารเคมี	ปริมาณสาร (g/L)
NH_4Cl	1.4
K_2HPO_4	1.25
$MgSO_4.H_2O$	0.5
หรือ $MgSO_4.7H_2O$	0.8906
$CaCl_2.2H_2O$	0.05
Yeast extract	0.5
Trace element	5 (mL/L)

ตารางที่ 3.7 การเตรียมสารอาหารเลี้ยงเชื้อจุลินทรีย์ Trace element solution

สารเคมี	ปริมาณสาร (mg/L)
$FeCl_2.6H_2O$	2,000
H_3BO_3	50
$ZnCl_2$	50
$CuCl_2.2H_2O$	38
$MnCl_2.4H_2O$	500
$(NH_4)_6MO_7O_{24}.4H_2O$	50
$AlCl_3.6H_2O$	90
$CoCl_2.6H_2O$	2,000

3.3.3 ขั้นตอนการทดลอง

โดยเริ่มต้นบรรจุหัวเชื้อ 20 มิลลิลิตร ลงในขวดทดลอง (Serum bottle) ขนาด 120 มิลลิลิตร จากนั้นเติมผลิตภัณฑ์ที่ได้จากหัวข้อ 3.4 ปริมาตร 20 มิลลิลิตร (Inoculum : Substrate ~ 1 : 1) ลงในขวดทดลอง เติมสารอาหาร Stock nutrient ที่เตรียมไว้จากตารางที่ 3.6 ปริมาตร 0.6 มิลลิลิตร ปรับสภาพความเป็นด่างด้วย $NaHCO_3$ (ความเข้มข้น 50 g/L) ปริมาตร 6 มิลลิลิตร จากนั้นปรับ pH ด้วย NaOH 0.1 M ให้ได้ประมาณ 7 แล้วจากนั้นทำการปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้ได้ 60 มิลลิลิตร ทำการไล่แก๊สออกซิเจนออกด้วยแก๊สไนโตรเจนเป็นระยะเวลา 2 นาที ปิดฝาขวดด้วยจุกยาง (Rubber septum) แล้วแคปด้วยฝาอะลูมิเนียม นำไปเก็บไว้ที่ incubator shaker เพื่อรักษาอุณหภูมิที่ 35°C และเขย่าเพื่อให้มีการผสมกันอย่างสมบูรณ์ที่ 120 rpm จากนั้นเตรียมวัดปริมาณแก๊สชีวภาพที่เกิดขึ้นทุก ๆ วัน เป็นระยะเวลา 45 วัน

3.3.4 ศักยภาพภาพการผลิตแก๊สชีวภาพด้วยวิธี BMP

วิเคราะห์ศักยภาพในการผลิตแก๊สมีเทนด้วยวิธีทางชีวเคมี (Biochemical Methane Potential, BMP) โดยทำการวัดค่า TS VS และ COD ก่อนและหลังการดำเนินการ ทำการวัดปริมาณแก๊สชีวภาพด้วยหลอดฉีดยา (Syringe) ขนาดต่าง ๆ และนำแก๊สที่ได้มาวิเคราะห์หาความเข้มข้นของแก๊สมีเทน ด้วย Gas Chromatograph รุ่น SHIMADZU GC-14B ด้วยตัวตรวจวัดแบบ thermal conductivity detector (TCD) โดยใช้คอลัมน์ Stainless steel column packed with Molecular sieve-5A ขนาด mesh 30/60, 2 m × 3 mm ปรับอุณหภูมิของ injection, column และ TCD detector ที่ 100 80 และ 100 °C ตามลำดับ ใช้ He เป็น carrier gas ที่อัตราการไหล 50 mL/min ซึ่งจะทำการวัดปริมาณแก๊สชีวภาพ และสัดส่วนของแก๊สมีเทนที่เกิดขึ้น ตลอดระยะเวลาดำเนินการทดลองเป็นเวลา

45 วัน และทำการวิเคราะห์ศักยภาพในการผลิตแก๊สมีเทน ($mLCH_4$ $gVS^{-1}{}_{added}$), Rm : maximum specific methane production rate ($mLCH_4$ $gVS^{-1}{}_{added}$) และร้อยละการกำจัด ดังตารางที่ 3.8

ตารางที่ 3.8 พารามิเตอร์การตรวจวัดในขั้นตอนการวัดศักยภาพภาพการผลิตแก๊สชีวภาพด้วยวิธี BMP

ขั้นตอนการทดลอง	การตรวจวัด	ตัวชี้วัด
วิเคราะห์ศักยภาพในการผลิตแก๊สมีเทนด้วยวิธีทางชีวเคมี (BMP) จากฟางข้าวที่ผ่านการย่อยสลายขั้นต้น ด้วยวิธีการทางความร้อน ด้วยคลื่นอัลตราโซนิค และวิธีแบบผสมผสาน	Vol.CH_4 %CH_4 content	- methane yield ($mLCH_4$ $gVS^{-1}{}_{added}$) - *Rm*, ($mLCH_4$ $gVS^{-1}{}_{added}$)

3.3.5 การหาอัตราการผลิตแก๊สมีเทนจำเพาะสูงสุด (maximum specific methane production rate, *Rm*) (Dechrugsa et al., 2013)

การอธิบายอัตราการผลิตแก๊สมีเทนจากการทดลองเพื่อหาศักยภาพในการผลิตแก๊สมีเทนด้วยวิธีทางชีวเคมี สามารถอธิบายได้ด้วยเส้นโค้งการเกิดแก๊สมีเทนสะสม โดยใช้สมการ Modified Gompertz ดังแสดงในสมการ 3.2 ซึ่งจะทำให้ทราบถึงอัตราการผลิตแก๊สมีเทนจำเพาะสูงสุด (*Rm*)

$$H_{(t)} = H \times exp\left\{-exp\left[\frac{Rm \times e}{H}(\lambda - t) + 1\right]\right\} \tag{3.2}$$

โดยที่ $H_{(t)}$ = cumulative methane production (mL) at time t

e = exp(1) = 2.71828

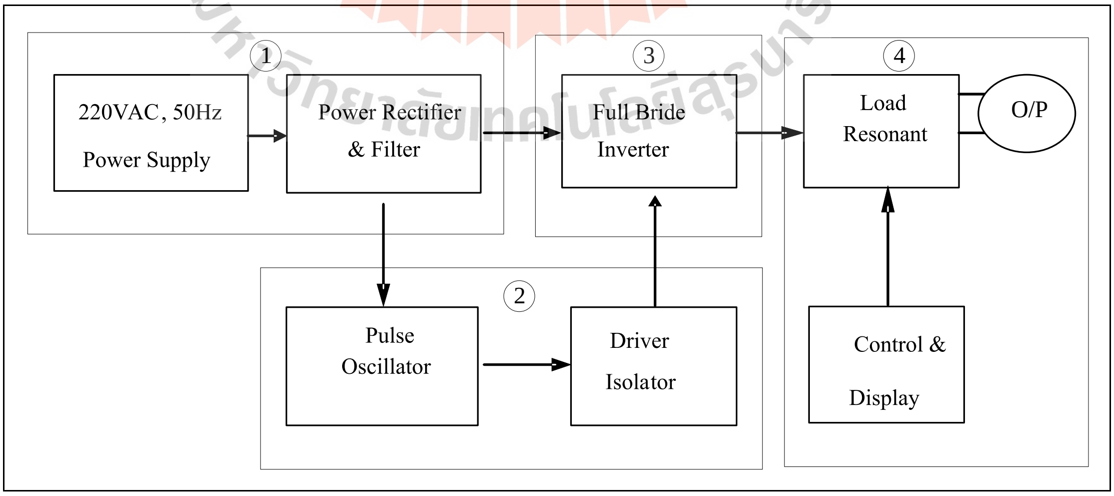
Rm = maximum specific methane production rate ($mL\ d^{-1}$)

H = methane production potential (mL) λ = lag phase time (days)

3.4 การพัฒนาต้นแบบระบบผลิตแก๊สชีวภาพจากฟางข้าว โดยใช้ถังปฏิกรณ์แบบกวนสมบูรณ์ ควบคู่กับระบบการย่อยสลายขั้นต้นโดยใช้คลื่นอัลตราโซนิค

3.4.1 การออกแบบวงจรระบบผลิตคลื่นอัลตราโซนิค

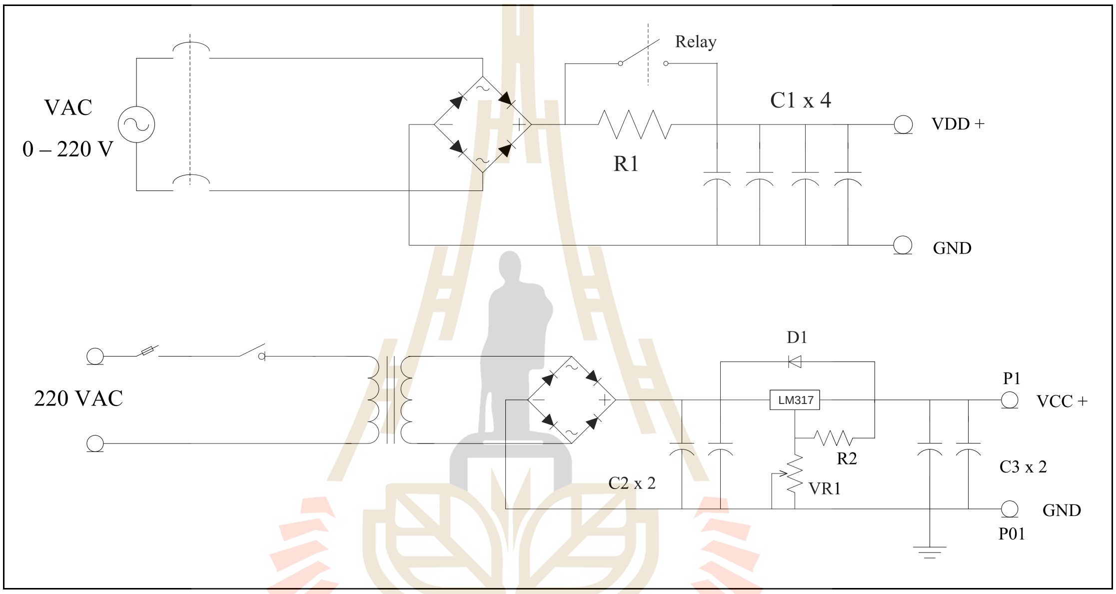
การออกแบบเครื่องต้นแบบระบบอัลตราโซนิค ประกอบด้วย 4 ภาคส่วนหลัก ๆ คือ ภาควงจรเรียงกระแสไฟฟ้าและกรองกระแสไฟฟ้าทางด้านอินพุต ภาควงจรขยายกำลัง ภาควงจรสร้างและขยายความถี่และวงจรรีโซแนนและขดลวดหม้อแปลง โดยลักษณะของวงจรแสดงดังบล็อกไดอะแกรมดังรูปที่ 3.8 โดยประกอบไปด้วยภาคที่ (1) ภาควงจรเรียงกระแสไฟฟ้าและกรองกระแสไฟฟ้าทางด้านอินพุตกำลังสูง (Power Rectifier & Filter) (2) ภาควงจรสร้างและขยายความถี่ (Pulse Oscillator &Driver Isolator) (3) ภาควงจรขยายกำลัง อินเวอร์เตอร์แบบฟลูบริดจ์ (Full Bridge Inverter) และ (4) ภาควงจรรีโซแนนและขดลวดหมอแปลง (Load Resonant & coil) โดยมีการทำงานของภาควงจรพอสังเขป คือ จากแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับทางด้านอินพุต 220 VAC 50Hz ผ่านวงจรเรียงกระแสไฟฟ้าและกรองกระแสไฟฟ้ากำลังสูงให้ได้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ประมาณ 310 VDC กระแสไฟฟ้าที่ 5A ไปเป็นแหล่งจ่ายที่ภาคของวงจรอินเวอร์เตอร์แบบฟลูบริดจ์โดยใช้มอสเฟต จะทำหน้าที่เป็นวงจรสวิตซ์ตามความถี่ที่ออกแบบมาให้เหมาะกับลักษณะงานที่ต้องการ และกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการสวิตซ์โดยภาคอินเวอร์เตอร์จะส่งต่อไปยังภาควงจรรีโซแนน เพื่อปรับวงจรให้เหมาะสมกับความถี่ที่สวิทซ์และกำลังงานเอาต์พุท หลังจากนั้นผ่านกำลังงานทั้งหมดไปยังหัวอัลตราโซนิค ในส่วนของภาควงจรควบคุมและแสดงผล จะทำการตรวจสอบสถานการณ์ทำงาน และแสดงผลการทำงานของระบบทั้งหมดของวงจร



รูปที่ 3.8 บล็อกไดอะแกรมเครื่องต้นแบบระบบอัลตราโซนิค

3.4.1.1 วงจรเรียงกระแสไฟฟ้าและกรองกระแสไฟฟ้าทางด้านอินพุต

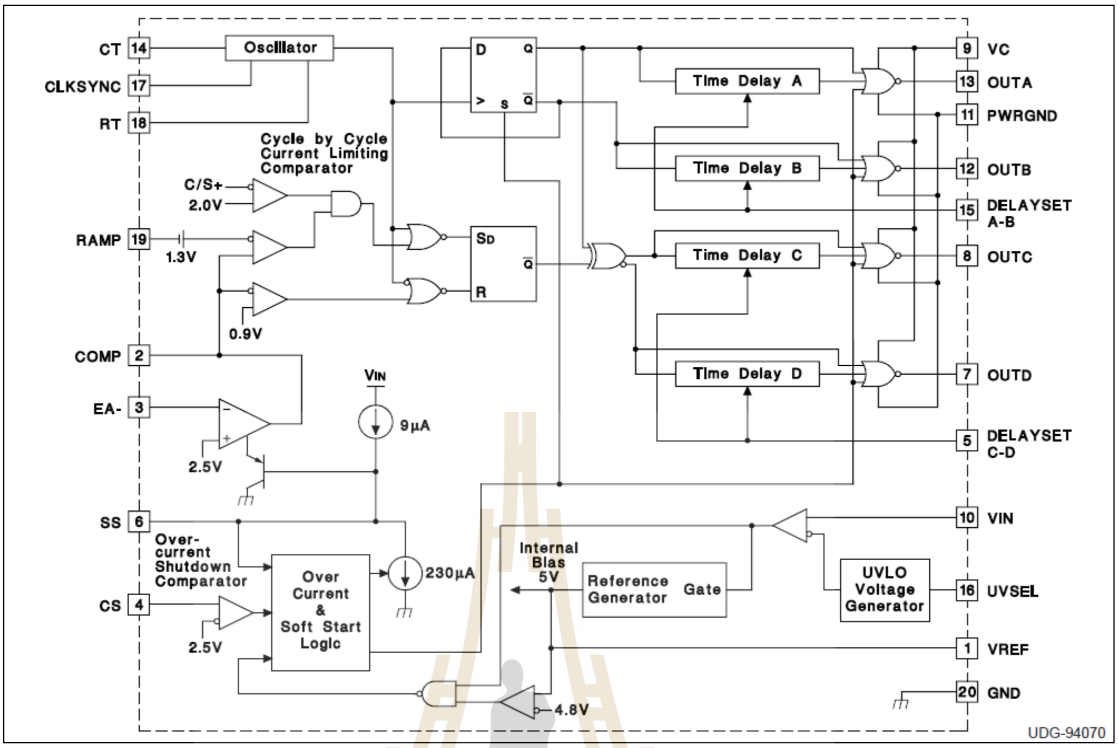
สำหรับวงจรเรียงกระแสไฟฟ้าและกรองกระแสไฟฟ้าทางด้านอินพุตเป็นส่วนของวงจรที่ออกแบบเพื่อเป็นแหล่งจ่ายให้กับภาควงจรต่างๆ ประกอบด้วยภาควงจรขยายกำลังซึ่งต้องการแหล่งจ่ายที่ 220 VAC หรือ ประมาณ 310 VDC และภาควงจรสร้างและขยายความถี่ซึ่งต้องการแหล่งจ่ายประมาณ 12 โวลต์ สำหรับวงจรสร้างความถี่ และ 15 โวลต์ สำหรับวงจรขยาย ลักษณะของวงจรที่ออกแบบ แสดงดังรูปที่ 3.9



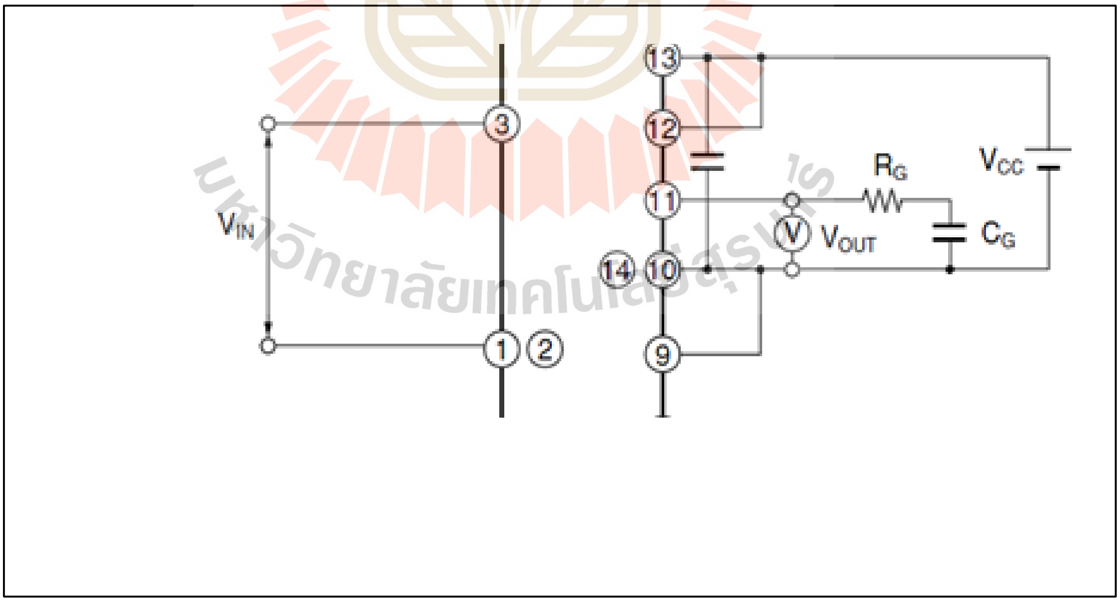
รูปที่ 3.9 ลักษณะวงจรเรียงกระแสไฟฟ้าและกรองกระแสไฟฟ้าทางด้านอินพุต

3.4.1.2 วงจรสร้างและขยายความถี่

สำหรับวงจรสร้างและขยายความถี่เป็นส่วนของวงจรซึ่งออกแบบสำหรับความคุมการทำงานของภาควงจรขยายกำลัง ในส่วนของวงจรจะใช้ IC เบอร์ UC 3879 ซึ่งมีเอาต์พุตทั้งหมด 4 เอาต์พุต ได้แก่ OUT A OUT B OUT C และ OUT D สามารถปรับความถี่ตามต้องการโดยการปรับค่า RT และ CT ซึ่งบล็อกไดอะแกรมการทำงาน แสดงดังรูปที่ 3.10 สัญญาณเอาต์พุตที่ได้ทั้ง 4 สัญญาณจะเป็นสัญญาณ อินพุตให้ภาควงจรขับกำลังสัญญาณเพื่อขับนำกระแสก่อนที่จะเข้าควบคุมการทำงานของภาควงจรขยายกำลังในส่วนต่อไป โดยลักษณะของวงจรขับกำลังสัญญาณแสดงดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.10 ลักษณะวงจรกำเนิดความถี่

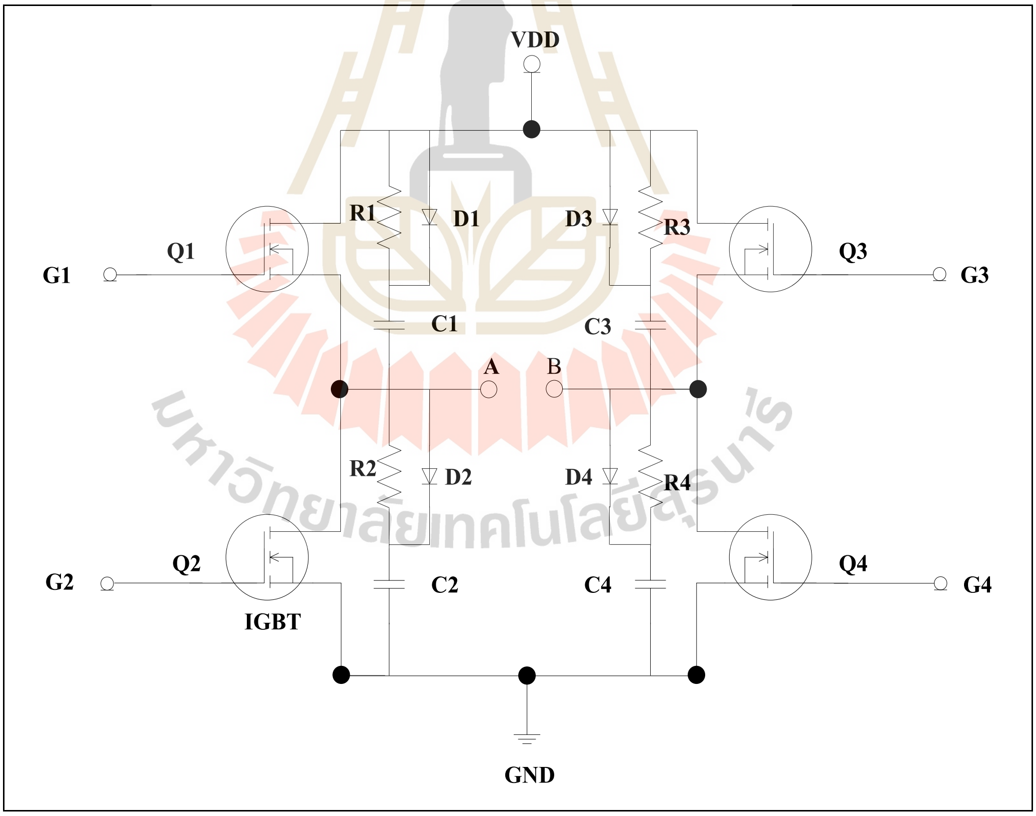


รูปที่ 3.11 วงจรขับกำลังสัญญาณ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

3.4.1.3 วงจรขยายกำลัง

สำหรับวงจรขยายกำลังเป็นวงจรที่ออกแบบเพื่อขยายกำลังสัญญาณให้มีกำลังที่สูง และเหมาะสมสำหรับการทำงานของระบบ โดยในภาควงจรนี้ออกแบบเป็นลักษณะของวงจรฟูลบริจด์คอนเวอร์เตอร์ โดยลักษณะวงจร แสดงดังรูปที่ 3.12 โดยใช้แรงดันไฟฟ้าจากภาควงจรเรียงกระแสไฟฟ้าและกรองกระแสไฟฟ้าทางด้านอินพุต 220 VAC หรือ ประมาณ 310 VDC ซึ่งลักษณะการทำงานในส่วนของวงจรแบบฟูลบริดจ์ เพาเวอร์มอสเฟท ทั้ง 4 ตัวจะทำงานโดยการนำกระแสและหยุดนำกระแสสลับกันเป็นคู่ๆ ในแต่ละครึ่งคาบเวลา โดยถูกควบคุมจากวงจรสร้างและขยายความถี่ (PWM) Q1 และ Q4 จะนำกระแสในครึ่งคาบเวลาพร้อมกัน และเมื่อหยุดนำกระแส Q2 และ Q3 จะนำกระแสในครึ่งคาบเวลาพร้อมกันในเวลาที่เหลือ สลับกันไปเช่นนี้เรื่อยๆ ในส่วนของจุดเชื่อมต่อ A และ B เป็นจุดที่เชื่อมต่อกับภาควงจรวงจรรีโซแนนและขดลวดหม้อแปลงในส่วนต่อไป



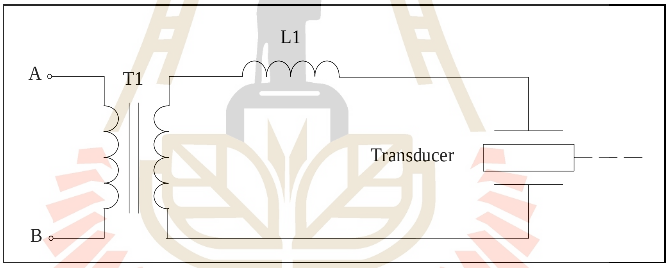
รูปที่ 3.12 ลักษณะวงจรขยายกำลัง

3.4.1.4 วงจรรีโซแนนและขดลวดหม้อแปลง

สำหรับวงจรรีโซแนนและขดลวดหม้อแปลงเป็นภาคส่วนสำหรับแมตชิ่งเพื่อปรับระบบการทำงานให้เหมาะสมกับระบบของวงจร ลักษณะของวงจรแสดงดังรูปที่ 3.13 ซึ่งจะรับกำลังงานจากภาควงจรขยายกำลังที่จุด A และ จุด B หลังจากนั้นผ่านหม้อแปลง T1 เพื่อแปลงแรงดัน และชุดแมตชิ่งที่ L1 กับ Transducer เพื่อให้ได้กำลังงานสูงสุดและเหมาะสมที่สุด ซึ่ง Transducer จะมีค่าของตัวเก็บประจุ (C) อยู่ภายใน โดยสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 3.3 และแสดงคุณสมบัติของเครื่องต้นแบบระบบอัลตราโซนิคดังตารางที่ 3.9

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \tag{3.3}$$

โดยที่ f คือ ความถี่, L คือ ค่าความเหนี่ยวนำ และ C คือ ค่าตัวเก็บประจุ



รูปที่ 3.13 ลักษณะวงจรรีโซแนนและขดลวดหม้อแปลง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

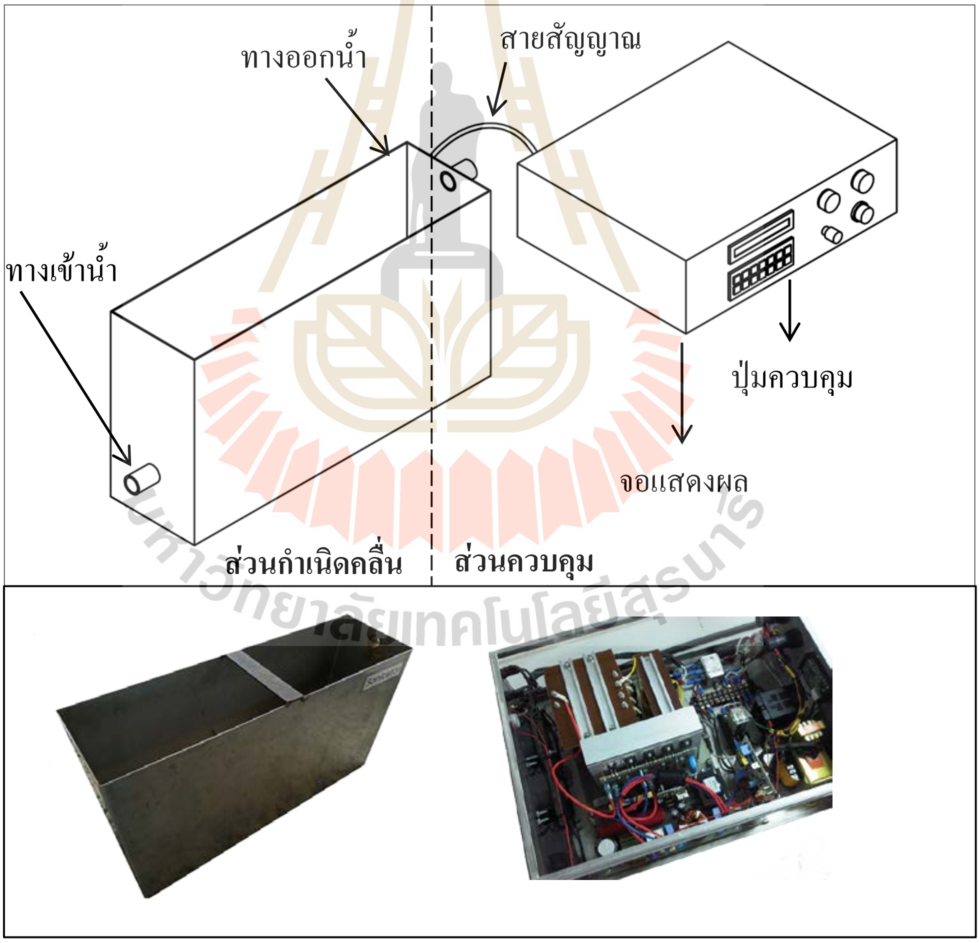
ตารางที่ 3.9 คุณสมบัติของเครื่องต้นแบบระบบอัลตราโซนิค

Specifications		Unit
Heating Power	1000	W
Operating Frequency	20-200	kHz
Number of Transducers	30	PCS.
Tank Capacity	40	L
Internal Tank Size (W x L x D)	20 x 70 x 25	cm.
Power Source	AC 220-230 /50-60	V/Hz

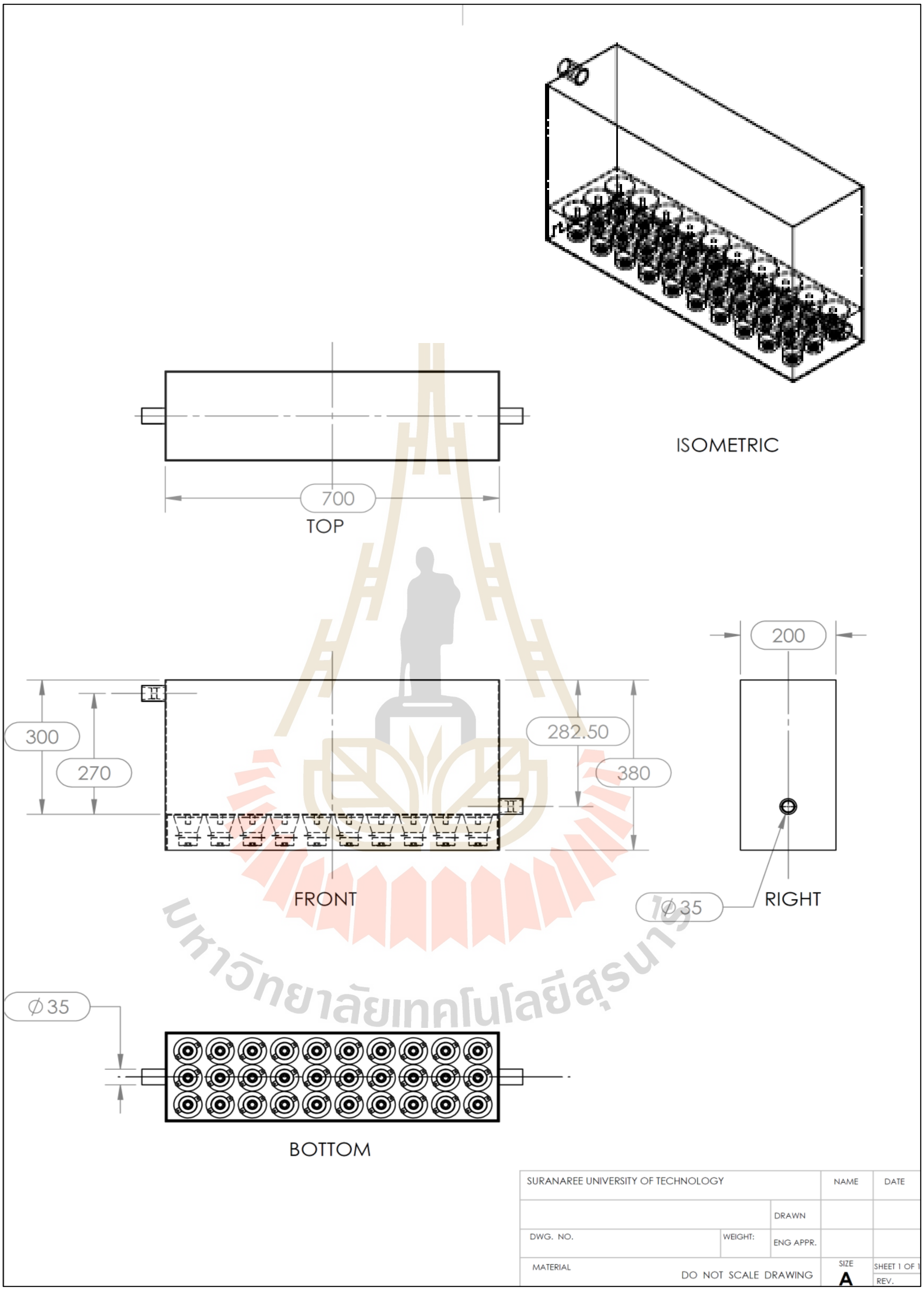
3.4.2 การพัฒนาต้นแบบระบบผลิตคลื่นอัลตราโซนิค

3.4.2.1 ลักษณะทั่วไปของเครื่องต้นแบบระบบผลิตคลื่นอัลตราโซนิค

ต้นแบบระบบผลิตคลื่นอัลตราโซนิคในงานศึกษานี้ ประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก ได้แก่ ส่วนกำเนิดคลื่น และส่วนควบคุม ดังแสดงในรูปที่ 3.14 ชุดกำเนิดคลื่นมีลักษณะเป็นถังสี่เหลี่ยม ขนาดความกว้าง 20 เซนติเมตร ยาว 70 เซนติเมตร และสูง 30 เซนติเมตร มีความจุ 42 ลิตร วัสดุทำจากสแตนเลสสตีล มีทางเข้าของน้ำที่ระดับความสูง 7.5 เซนติเมตร และทางออกของน้ำที่ความสูง 27 เซนติเมตร ด้านล่างของถังติดหัวอัลตราโซนิค จำนวน 30 หัว โดยแบ่งออกเป็น 3 แถว แถวละ 10 หัว แต่ละหัวมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 เซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.15 ส่วนควบคุมสามารถควบคุมกำลังของคลื่นอัลตราโซนิคได้สูงสุด 750 W และปรับความถี่ได้ 20-200 kHz



รูปที่ 3.14 เครื่องต้นแบบระบบผลิตคลื่นอัลตราโซนิค



รูปที่ 3.15 รายละเอียดของส่วนกำเนิดคลื่น

3.4.2.2 การทดสอบประสิทธิภาพระบบผลิตคลื่นอัลตราโซนิค

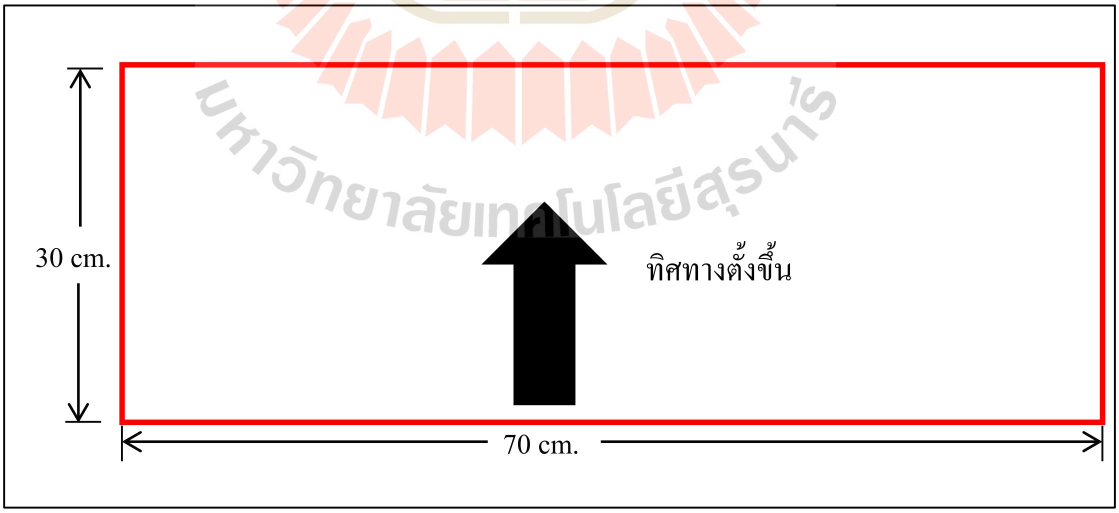
สำหรับการทดสอบประสิทธิภาพการผลิตคลื่นอัลตราโซนิค ในการศึกษานี้ใช้แผ่นฟอยล์ยอะลูมิเนียมเป็นอุปกรณ์ทดสอบ (Timothy, 2003) โดยแผ่นฟอยล์อะลูมิเนียม มีขนาด กว้าง 30 เซนติเมตร ยาว 70 เซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.16 ถึง 3.19 ในการทดสอบประสิทธิภาพของระบบผลิตคลื่นได้ทำการวางแผ่นฟอยล์ยอะลูมิเนียม 5 ตำแหน่ง ในลักษณะตั้งขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 3.16 และทำการทดสอบเปิดเครื่องต้นแบบอัลตราโซนิคที่กำลัง 450 600 และ 750 W ที่ความถี่ 37 kHz ที่เวลา 5 นาที (Timothy, 2003) แล้วพิจารณารูพรุนที่เกิดขึ้นบนแผ่นฟอยล์จากการคำนวณพื้นที่ และนำมาเทียบเป็นเปอร์เซ็นต์รูพรุน โดยแบ่งพื้นที่พิจารณาออกเป็นช่องสี่เหลี่ยมตามขนาดของพื้นที่กำเนิดคลื่น ที่ความกว้าง 6 เซนติเมตร ตามพื้นที่ปล่อยคลื่นของหัวอัลตราโซนิค แต่ละตัว และสูง 2 เซนติเมตร ($\lambda/2$) ดังแสดงในสมการที่ 3.4 รูปที่ 3.19

$$\lambda = f \,/\, v \tag{3.4}$$

โดยที่ f = ความถี่ของหัว transducer = 37 kHz

v = ความเร็วของเสียงผ่านตัวกลางเป็นน้ำ = 1,500 m/s

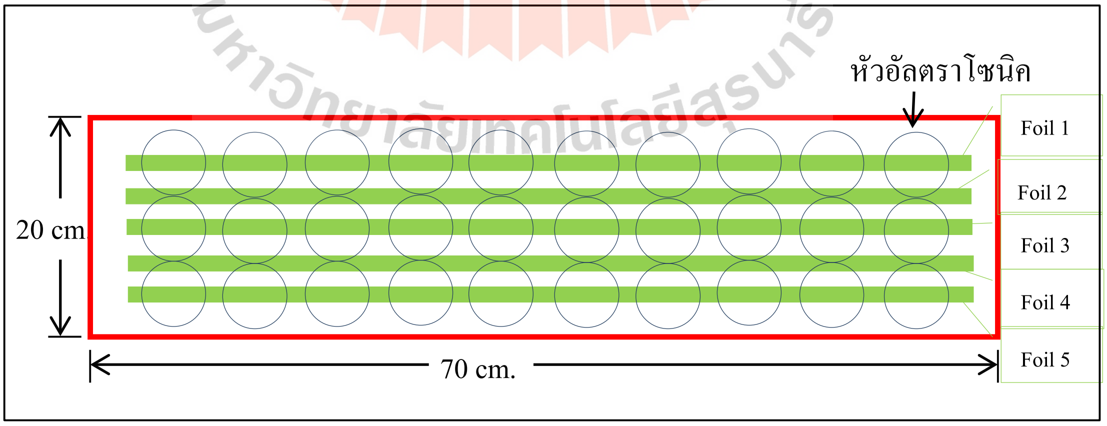
λ = ความยาวคลื่น (m) = 0.0405 m (จากการคำนวณตามสมการ 3.4)



รูปที่ 3.16 ขนาดแผ่นฟอยล์อะลูมิเนียม (Front view)

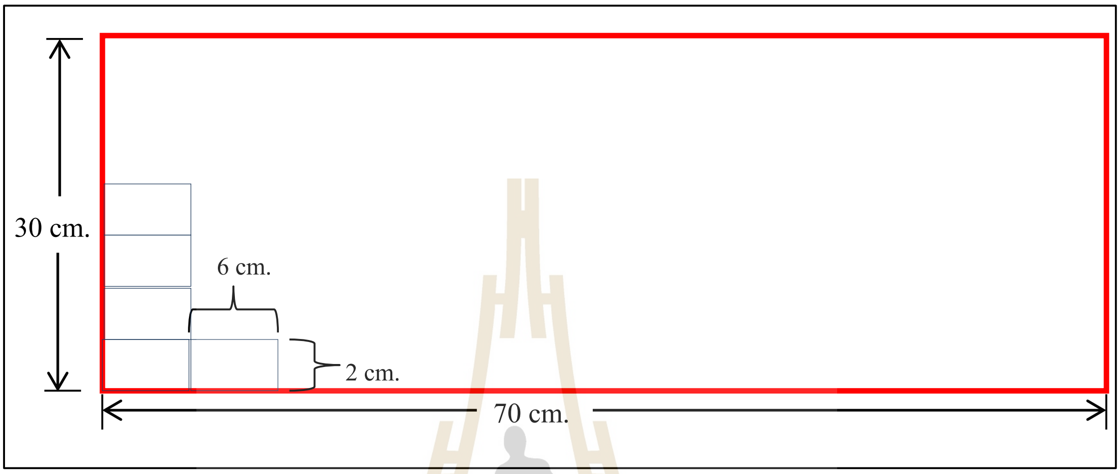
ผลการพิจารณารูพรุนที่เกิดขึ้นบนแผ่นฟอยล์อะลูมิเนียมดังแสดงในรูปที่ 3.20 แล้วนำมาเทียบเป็นเปอร์เซ็นต์พบว่า ที่กำลัง 450 600 และ 750 W รูพรุนบนแผ่นฟอยล์อะลูมิเนียมสูงสุดร้อยละ 50 75 และ 95 ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 3.21 ถึง 3.23 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงหลักการเกิดและกระจายตัวของคลื่นภายในถังที่บรรจุน้ำ ที่มีความสม่ำเสมอทั่วทุกพื้นที่ของถัง โดยรูพรุนที่เกิดขึ้นแปรผันตามกำลัง ทั้งนี้ความระดับแรงและความสูงของคลื่นจะขึ้นอยู่กับประเภทของวัสดุรับคลื่นที่อยู่ในน้ำภายในถังและความเข้มข้นซึ่งต้องพิจารณาเฉพาะแต่ละวัสดุ

รูปที่ 3.17 ลักษณะแผ่นฟอยล์อะลูมิเนียม (Front view)



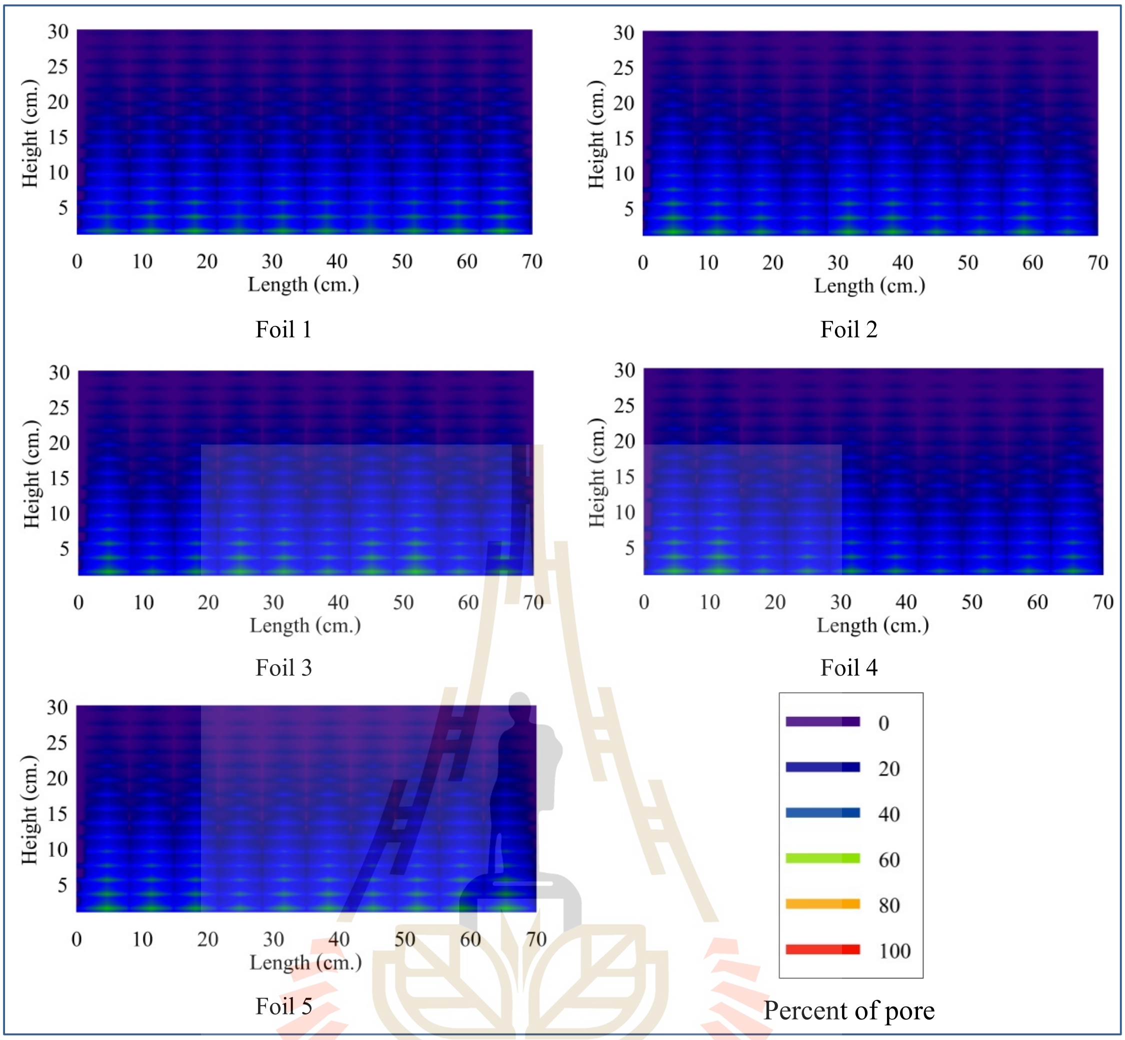
รูปที่ 3.18 ตำแหน่งวางแผ่นฟอยล์อะลูมิเนียม (Top view)

โดยจากการทดสอบเครื่องต้นแบบระบบผลิตคลื่นอัลตราโซนิคนี้สามารถเดินระบบผลิตคลื่นได้ดีและมีคลื่นกระจายอย่างสม่ำเสมอที่ความถี่ 37 kHz และสามารถขยายกำลังการส่งคลื่นได้ถึง 750W



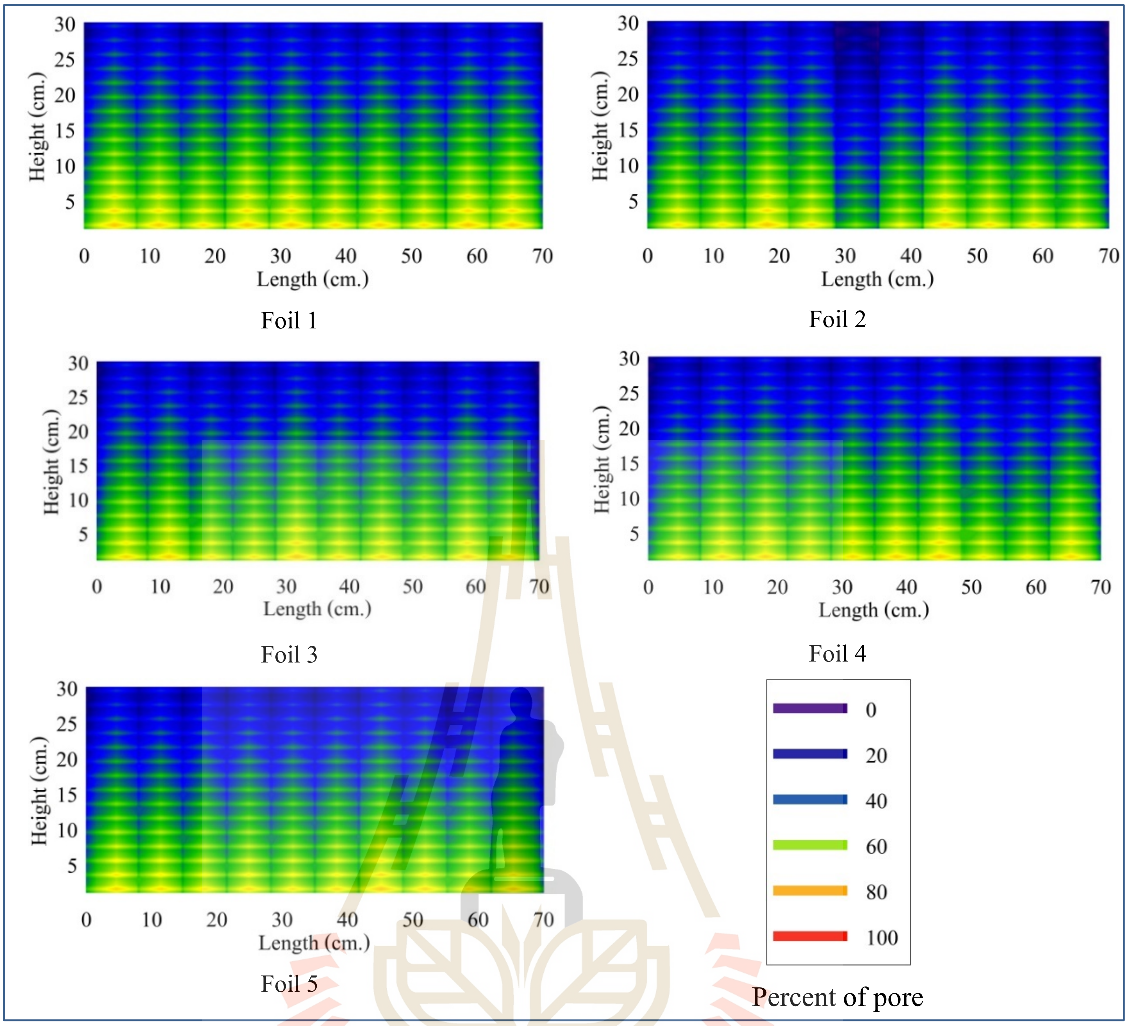
รูปที่ 3.19 การแบ่งพื้นที่พิจารณารูพรุนบนแผ่นฟอยล์อะลูมิเนียมหลังได้รับคลื่น (Front view)

รูปที่ 3.20 ลักษณะรูพรุนบนแผ่นฟอยล์อะลูมิเนียม (Front view)



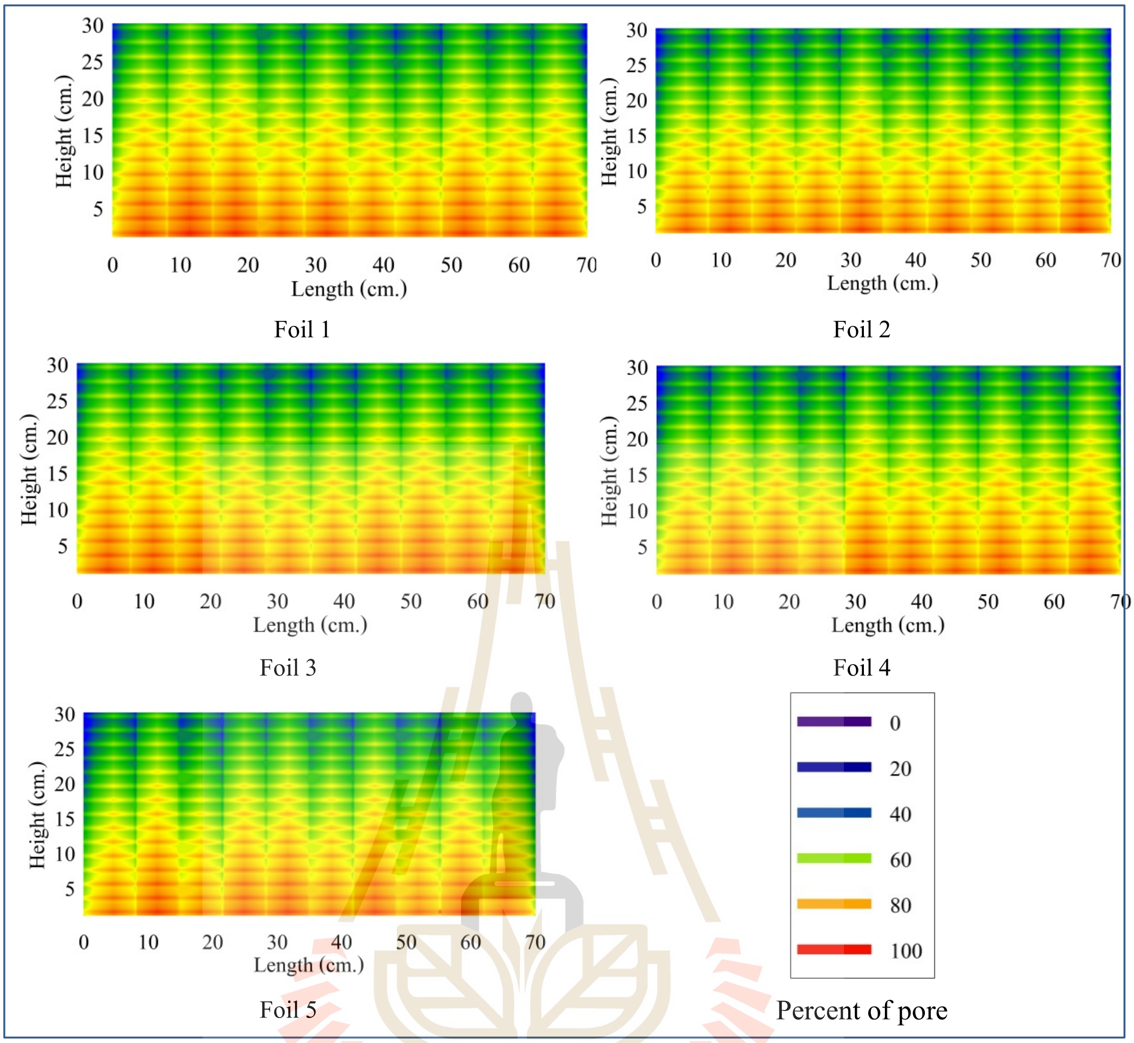
รูปที่ 3.21 เปอร์เซ็นต์รูพรุนของแผ่นฟอยล์อะลูมิเนียม กำลัง 450W

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 3.22 เปอร์เซ็นต์รูพรุนของแผ่นฟอยล์อะลูมิเนียม กำลัง 600 W

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 3.23 เปอร์เซ็นต์รูพรุนของแผ่นฟอยล์อะลูมิเนียม กำลัง 750 W

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

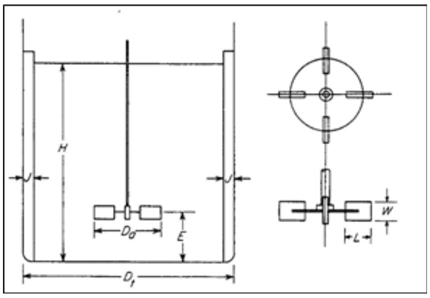
3.4.3 การออกแบบถังปฏิกิริยาแบบกวนสมบูรณ์

3.4.3.1 การออกแบบใบกวน

การกำหนดสัดส่วนและรูปร่างของถังมีความสำคัญกับการกวนมาก สิ่งแรกที่ต้องคำนึงถึงคือประเภทการกวน (Mixing categories) (McCabe, 1993) โดยเป็นแบบ Blending คือการผสมของเหลวให้เข้ากัน หรือแบบ Suspension คือ การผสมของแข็งให้เข้ากับของเหลว โดยในแต่ละประเภทการกวนต้องเลือกแบบใบกวนให้เหมาะสมด้วนเช่นกัน การกวนแบบ Blending ต้องใช้ใบกวนที่ให้ Axial flow คือ ของเหลวจะถูกดูดและไหลในแนวแกนขนานกับเพลา ทำการผสมของเหลว (Emulsion) ที่ไม่เข้ากัน โดยการเฉือนให้ Droplet ของของเหลวชนิดหนึ่งแขวนลอยในอีกชนิดหนึ่ง และอีกแบบหนึ่ง คือแบบ Dispersion การเฉือนให้ของแข็งมีขนาดเล็กลงและแขวนลอยอยู่ในของเหลว ซึ่งต้องใช้ใบกวนแบบ Radial flow คือ ของเหลวจะถูกผลักออกในแนวรัศมีหรือในแนวตั้งฉากกับแกนเพลา ใบกวนกลุ่มนี้ใช้เพิ่มแรงเฉือนหรืออัตราการเฉือน (Shear rate) ให้กับของเหลว เหมาะสำหรับการผสมของเหลวที่ไม่สามารถละลายเข้าด้วยกันเป็นเนื้อเดียว (Immiscible liquid) โดยในการศึกษาครั้งนี้ของเหลวที่จะทำการกวนเป็นของแข็งแขวนลอยซึ่งจะใช้ใบกวนแบบ Radial flow โดยมีเกณฑ์การออกแบบใบกวนมาตรฐานตามตารางที่ 3.10 และรูปที่ 3.24 โดยจะได้ใบกวนจากการออกแบบดังรูปที่ 3.25

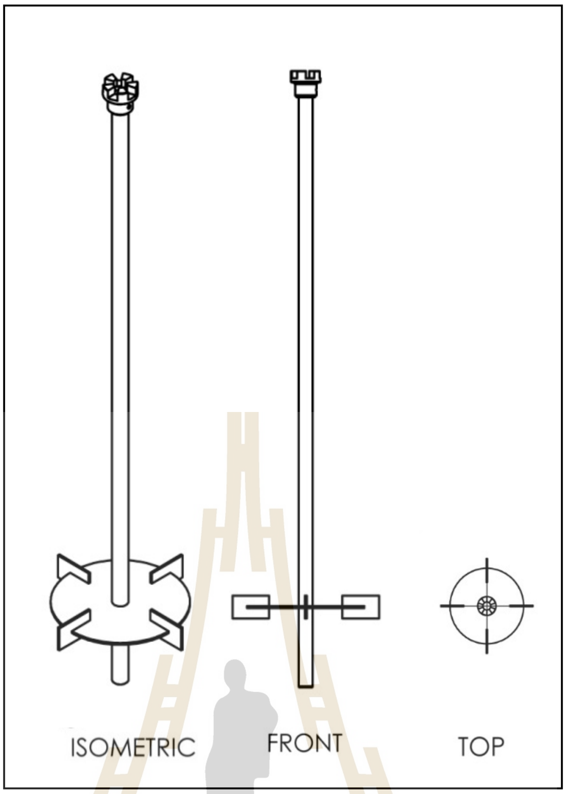
ตารางที่ 3.10 อัตราส่วนการออกแบบใบกวนมาตรฐาน

Ratio			
Da/Dt	1 : 2	E/Da	1
H/Dt	1	W/Da	1 : 5
J/Dt	1 : 12	L/Da	1 : 4



รูปที่ 3.24 เกณฑ์การออกแบบใบกวนมาตรฐาน (McCabe, 1993)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

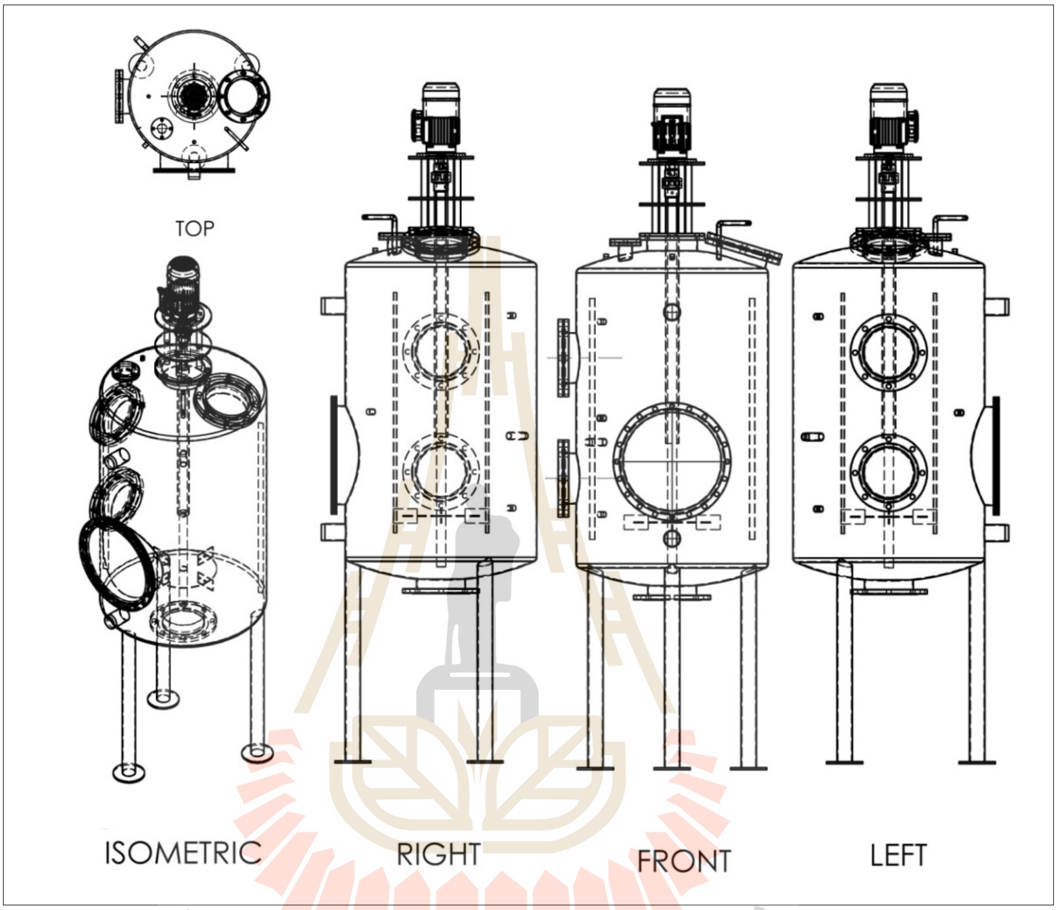


รูปที่ 3.25 ใบกวนจากการออกแบบ

3.4.3.2 การออกแบบถังปฏิกิริยา

โดยถังสำหรับใบกวนแบบ Radial flow ควรกำหนดให้สัดส่วนความสูงของของเหลวในถังน้อยกว่าเส้นผ่านศูนย์กลางถังราว 20% หรือ 0.8 : 1.0 ทั้งนี้เพราะใบแบบ Radial flow จะผลักของเหลวออกในแนวรัศมีทำให้ของเหลวถูกดันขึ้นในแนวสูงได้น้อย ส่วนถังสำหรับใบกวนแบบ axial flow ควรมีสัดส่วนความสูงของของเหลวให้มากกว่าเส้นผ่านศูนย์กลางถังราว 20% หรือ 1.2 : 1.0 ทั้งนี้เพราะใบแบบ Axial flow สามารถดันของเหลวให้ขึ้นสูงในแนวดิ่งได้มากกว่าแนวนอน หากสัดส่วนของของเหลวในถังมากกว่านี้ก็จะต้องเพิ่มจำนวนชั้นของใบให้มากขึ้น ถ้าเรากำหนดสัดส่วนถังไม่ถูกต้อง ของเหลวอาจไม่สามารถดันขึ้นไปบนผิวหน้าของของเหลวได้ ทำให้การกวนไม่ทั่วถึง จากการศึกษาในครั้งนี้ซึ่งต้องมีการกวนให้เกิดการกระจายตัวของวัตถุดิบอย่างสม่ำเสมอโดยที่วัตถุดิบมีลักษณะเป็นของแข็งแขวนลอย จึงใช้จุดเด่นของลักษณะการไหลของของเหลวทั้งสองแบบ โดยการใช้การกวนแบบ radial flow ในถังทรงสูง พร้อมติดตั้ง Baffle เพื่อให้เกิดการกวนแบบ Axial flow ไปพร้อมกัน ดังแสดงในรูปที่ 3.26 และภาพรวมของ

ระบบกวนสมบูรณ์ ดังแสดงในรูปที่ 3.27 โดยรายละเอียด และขนาดมิติของถัง จะแสดงในภาคผนวก ค



รูปที่ 3.26 ถังปฏิกิริยาแบบกวนสมบูรณ์

ในการออกแบบความหนาของถังเพื่อให้สามารถรับแรงดันและน้ำหนักจากปริมาณน้ำในถังปฏิกิริยาต้องคำนึงถึงปัจจัยในการรออกแบบได้แก่ ความดันออกแบบ ค่าความเค้นของวัสดุ รัศมีภายในของถัง และประสิทธิภาพรอยต่อ (Megyesy, 1995) ดังสมการที่ 3.5

$$t=\frac{PR}{SE-0.4P} \tag{3.5}$$

โดยกำหนดให้ P = ความดันออกแบบหรือความดันที่ทำงานได้สูงสุด (kg/cm^3)

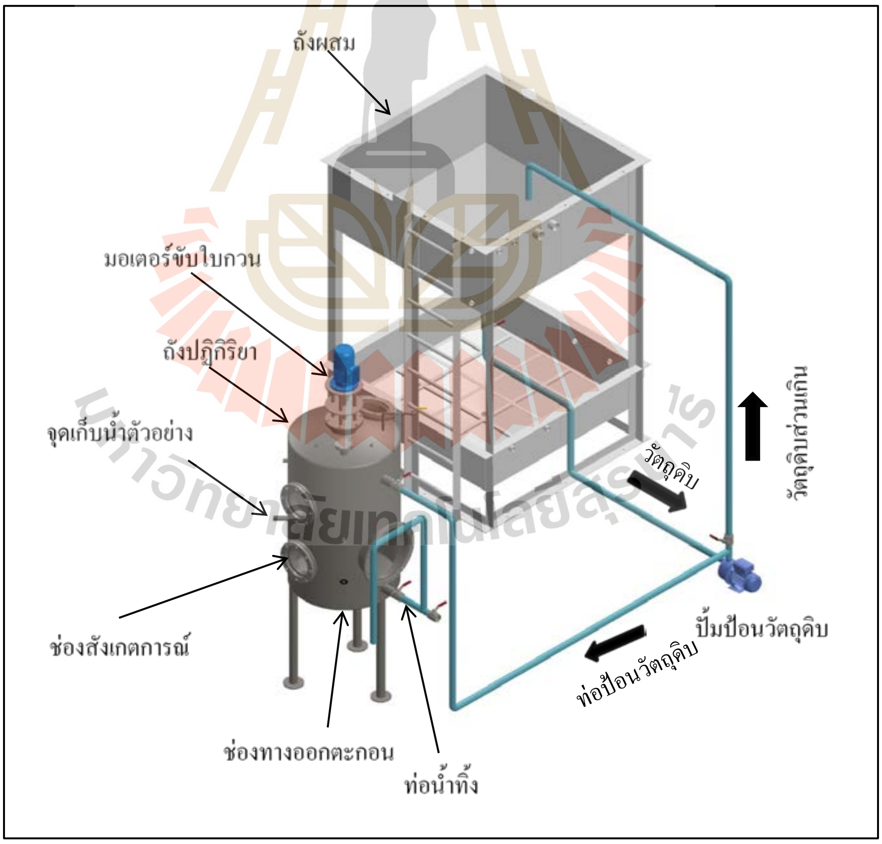
R = รัศมีภายนอก (mm)

S = ค่าความเค้นของวัสดุ (kg/cm^2)

E = ประสิทธิภาพรอยต่อ

t = ความหนาผนัง (mm)

จากการออกแบบกำหนดให้ระบบสามารถรับแรงดันรวมสูงสุดที่ 3 kg/cm^3 โดยจะใช้วัสดุเป็น stainless steel SUS 304 @90ºC ซึ่งมีค่าความเค้นของวัสดุ 1,252 kg/cm^3 มีประสิทธิภาพรอยต่อเชื่อมเท่ากับ 0.6 (รอยต่อชนที่เชื่อมเดี่ยวโดยไม่ใช้แผ่นประกบหลัง) และมีรัศมีภายนอกจากการออกแบบขนาดของถังเท่ากับ 760 mm จะได้ความหนาของถังจากการคำนวณมีค่า 1.52 mm และกำหนดให้มีค่า factor of safety เท่ากับ 2 จะได้ความหนาของถังที่ต้องการ คือ 3 mm



รูปที่ 3.27 ภาพรวมระบบกวนสมบูรณ์ขนาด 500 ลิตร

3.4.4 การทดสอบการเดินระบบ

ทำการทดลองและเดินระบบโดยควบคุมระยะเวลาเก็บกัก (HRT) ที่ 10 วัน 20 วัน 30 วันและ 40 วัน และทดสอบการเดินระบบต่อเนื่องที่สภาวะการเดินระบบในแต่ละระยะเวลาการเก็บกักและต่อเนื่องไปอีก 20 วัน สำหรับแต่ละระยะเวลาเก็บกัก ในระหว่างการเดินระบบจะทำการตรวจวัดค่า pH TS VS COD VFA และ Alkalinity รวมทั้งปริมาณแก๊สชีวภาพและสัดส่วนของแก๊สมีเทนที่เกิดขึ้นที่ระยะเวลาเก็บกัก (HRT) เพื่อศึกษาถึงปัจจัยที่มีผลต่อการเดินระบบ และการควบคุมการเดินระบบ รวมทั้ง ศึกษาถึงจลนศาสตร์การย่อยสลาย ดังตารางที่ 3.11

ตารางที่ 3.11 พารามิเตอร์การตรวจวัดในขั้นตอนการเดินระบบผลิตแก๊สชีวภาพต่อเนื่อง

ขั้นตอนการทดลอง	พารามิเตอร์การตรวจวัด	ความถี่
เดินระบบผลิตแก๊สชีวภาพจากฟางข้าวด้วยถังปฏิกิริยาแบบ CSTR ขนาด 500 ลิตร ที่มีระบบการย่อยสลายขั้นต้นด้วยเครื่องอัลตราโซนิคด้วยระยะเวลาเก็บกัก 10 20 30 และ 40 วัน	pH VFA Alk TS VS COD Vol.CH_4 และ %CH_4 content	ทุก 3 วัน

3.4.5 การหาจลศาสตร์การย่อยสลายทางชีวภาพของระบบผลิตแก๊สชีวภาพ

ทำการหาค่าคงที่ของระบบผลิตแก๊สชีวภาพแบบ CSTR 500L โดยใช้สมการสมดุลมวล อัตราการย่อยสลาย และระยะเวลาเก็บกัก (Linke, 2006) ดังสมการ 3.6 ถึง 3.11

$$Vr\frac{dc}{dt} = m_0 \cdot c_0 - m_0 \cdot c + Vr \cdot r(c_0) \qquad (3.6)$$

$$-\frac{dc}{dt} = r(c) = -k \cdot c \qquad (3.7)$$

$$HRT = \frac{1}{k} \cdot \left[\frac{c_0}{c} - 1 \right] \qquad (3.8)$$

จากนั้นทำการหาความสัมพันธ์โดยการพลอตกราฟระหว่าง Substrate concentration (c) และ Biogas yield (y) ที่เวลา t จะได้

$$\frac{c_0 - c(t)}{c_0} = \frac{y(t)}{y_m} \tag{3.9}$$

$$\frac{c_0}{c} = \frac{y_m}{y_m - y} \tag{3.10}$$

$$OLR = \frac{k.c_0}{y / (y_m - y)} \tag{3.11}$$

โดยที่ c_0 = VS concentration of the input (g.L^{-1})

y_m = maximum methane yield (ml.gVS^{-1})

y = methane yield (ml.gVS^{-1})

k = first order reaction rate of constant (d^{-1})

OLR = Organic (VS) loading rate (g.l^{-1}.d^{-1})

c = VS concentration in the reactor (g/L)

HRT = hydraulic retention time (d)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 4
ผลการศึกษาและการอภิปรายผล

4.1 คุณสมบัติของฟางข้าวที่ใช้ในการทดลอง

ในหัวข้อนี้จะแสดงถึงสมบัติ องค์ประกอบแบบประมาณ และองค์ประกอบแบบแยกธาตุ ของฟางข้าวที่ได้เตรียมไว้ในหัวข้อ 3.2.1 ซึ่งสมบัติต่าง ๆ แสดงไว้ในตารางที่ 4.1 ถึง 4.3

4.1.1 องค์ประกอบแบบประมาณ (Proximate Value)

เป็นสมบัติเฉพาะตัวของวัสดุลิกโนเซลลูโลส ที่แสดงถึงสัดส่วนของ ปริมาณความชื้น (Moisture Content) ปริมาณสารที่ระเหยได้ (Volatile Matter) ปริมาณคาร์บอนคงตัว (Fixed Carbon) และ ปริมาณเถ้า (Ash Content) ใช้วิธีการวิเคราะห์ตามมาตรฐาน ASTM D1762-84 เป็นสมบัติที่นิยมใช้ประกอบการพิจารณาในการเลือกใช้ในการนำมาผลิตเป็นพลังงาน แสดงไว้ในตารางที่ 4.1 จะเห็นว่าฟางข้าวมีปริมาณสารที่ระเหยได้ร้อยละ 77.09 ซึ่งจะเป็นส่วนที่ถูกเปลี่ยนเป็นแก๊สชีวภาพโดยกระบวนการทางชีวเคมีได้ง่าย

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบแบบประมาณ (Proximate Value) ของฟางข้าว

วัสดุลิกโนเซลลูโลส	Moisture Content (%)	Proximate Value			High Heating Value, HHV (kJ/kg)
		Volatile Matter (%)	Ash Content (%)	Fixed Carbon (%)	
ฟางข้าว	5.91	77.09	13.82	12.24	17,844

4.1.2 องค์ประกอบแบบแยกธาตุ (Ultimate Value)

องค์ประกอบแบบแยกธาตุแสดงไว้ในตารางที่ 4.2 เป็นสมบัติที่แสดงถึงธาตุองค์ประกอบของวัสดุลิกโนเซลลูโลส อันประกอบไปด้วย คาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน ไนโตรเจน และซัลเฟอร์ ซึ่งองค์ประกอบของธาตุต่างๆ จะมีความแตกต่างกันโดยขึ้นอยู่กับสายพันธุ์ของพืชแต่ละชนิด ทั้งนี้ธาตุองค์ประกอบที่สำคัญ และมีผลต่อการนำไปผลิตเป็นพลังงานทางชีวภาพ คือ คาร์บอนและไนโตรเจน เนื่องจากคาร์บอนและไนโตรเจน เป็นองค์ประกอบสำคัญที่จุลินทรีย์จะนำไปใช้ในการเจริญเติบโต อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N ratio) ของฟางข้าวที่ใช้ทดลอง

มีค่า 100:1 ซึ่งถือได้ว่ามีสัดส่วนไนโตรเจนต่ำมากไม่เหมาะสมในกระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพ อย่างไรก็ดี ในหัวข้อการศึกษาการเดินระบบจะมีการเติมไนโตรเจนเข้าไปในสัดส่วนที่เหมาะสมคือ อยู่ที่ประมาณ 20:1

ตารางที่ 4.2 องค์ประกอบแบบแยกธาตุ (Ultimate Value) ของฟางข้าว

ชนิดชีวมวล	สัดส่วนของธาตุ (ร้อยละ)				
	C	H	N	S	O
ฟางข้าว	49.46	6.24	0.50	0.17	43.63

4.2 ผลกระทบของการย่อยสลายขั้นต้นด้วยความร้อนและคลื่นอัลตราโซนิค ที่มีต่อองค์ประกอบของฟางข้าว

4.2.1 ผลกระทบต่อการย่อยสลายด้วยความร้อน

4.2.1.1 องค์ประกอบลิกโนเซลลูโลส

การศึกษาผลของการย่อยสลายฟางข้าวขั้นต้นด้วยความร้อนจะทำการวิเคราะห์ถึงสัดส่วนขององค์ประกอบ ดังนี้ คือ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน รวมทั้ง เถ้าที่ไม่ละลายในกรด จากตารางที่ 4.3 แสดงผลการทดสอบที่การย่อยสลายโดยการต้มที่ระยะเวลา 10 นาที และ 20 นาที การย่อยสลายขั้นต้นด้วยไอน้ำที่ระยะเวลา 15 นาที เทียบกับองค์ประกอบของฟางข้าวที่ไม่มีการย่อยสลายขั้นต้นใดๆ พบว่าฟางข้าวที่ผ่านการย่อยสลายขั้นต้นด้วยความร้อนมีค่าสัดส่วนของเฮมิเซลลูโลสอยู่ในช่วงที่ร้อยละ (ของแข็ง) 34.67 – 35.13 เทียบกับฟางข้าวที่ไม่ได้ทำการย่อยสลายขั้นต้นโดยมีค่าอยู่ที่ร้อยละ 41.70 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงผลของการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนของเฮมิเซลลูโลสที่มีค่าลดลงร้อยละ 15.76 และ 16.19 สำหรับการย่อยสลายด้วยการต้มที่ 10 และ 20 นาที ตามลำดับ และมีค่าลดลงถึงร้อยละ 16.85 สำหรับการย่อยสลายขั้นต้นด้วยไอน้ำเป็นระยะเวลา 15 นาที

โดยการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบของเฮมิเซลลูโลสที่มีค่าลดลงนี้ เนื่องมาจากการสลายตัวเมื่อเพิ่มอุณหภูมิของน้ำให้สูงขึ้น ทำให้องค์ประกอบของฟางข้าวอาทิ องค์ประกอบของคาร์โบไฮเดรท ไขมัน และโปรตีน สลายตัวออกมารวมทั้งองค์ประกอบในรูปของเฮมิเซลลูโลสด้วย ซึ่งจากงานวิจัยของ Laser et al., (2002) พบว่าในการย่อยสลายวัสดุชีวมวลประเภทลิกโนเซลลูโลสด้วยความร้อนโดยการต้มน้ำที่อุณหภูมิ 170-230 °C นั้น ทำให้เฮมิเซลลูโลสมีความสามารถละลายน้ำได้มากถึงร้อยละ 80 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Mosier et al. (2005) ที่ทำการย่อยสลายด้วยน้ำร้อน ผลที่ได้ทำให้สัดส่วนของของแข็ง (Solid fraction) ถูกย่อยสลายและ

ละลายในน้ำได้ดีขึ้น โดยกลไกการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพทางความร้อนนั้น จะส่งผลให้ความแรงของ dielectric และ ionic product มีค่าลดลงจากผลของอุณหภูมิและความดัน ทำให้ไบโอพอลิเมอร์ของลิกโนเซลลูโลสเกิดการคลายตัวในระยะเวลาอันสั้น (Shaw et al., 1991)

ช่วงอุณหภูมิที่ทำให้เฮมิเซลลูโลสย่อยสลายออกมาได้มากที่สุดมีค่าอยู่ในช่วง 160-220 ºC โดยทำให้น้ำหนักโมเลกุลและการกระจายตัวของมวลวัสดุลิกโนเซลลูโลสเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากพันธะอีเทอร์ในลิกนินถูกย่อยสลายและแยกออกมาจากเซลลูโลสในรูปของอนุภาคเล็ก ๆ ทำให้ลิกนินมีโครงสร้างที่เปราะบางลง (Kaparaju and Felby, 2010) ซึ่งเมื่อพิจารณาสัดส่วนของเถ้าที่ไม่ละลายในกรด (Acid insoluble ash, AIA) ดังแสดงในตารางที่ 4.4 พบว่ามีค่าเพิ่มสูงขึ้นจากร้อยละ 1.97 อยู่ในช่วงร้อยละ 2.88 – 3.04 จากการย่อยสลายด้วยความร้อน สอดคล้องกับ Mosier et al. (2005) เนื่องมาจากการ decomposition ของลิกนินในวัสดุ

ตารางที่ 4.3 องค์ประกอบของลิกโนเซลลูโลสในฟางข้าวที่ผ่านการย่อยสลายขั้นต้นด้วยความร้อน

Pretreatment Type	Time (min)	% Dry matter				Disintegration Degree (%)
		Hemicellulose	Cellulose	Lignin	AIA	
Untreated	-	41.70	37.52	3.09	1.97	-
Boil	10	35.13	37.38	2.97	2.88	4.02
	20	34.95	34.69	3.86	2.75	4.91
Steam	15	34.67	36.17	7.56	3.40	5.22

อย่างไรก็ตามจากงานวิจัยของ Garcia-Aparicio et al. (2006) พบว่าเมื่อทำการย่อยสลายขั้นต้นด้วยความร้อนที่แรงดันและอุณหภูมิสูงกว่า 20-50 bar 160-270 ºC จะทำให้เกิดองค์ประกอบที่ไปยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์เมื่อนำผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการย่อยสลายขั้นต้นนี้ไปย่อยสลายต่อทางชีวภาพ โดยสารยับยั้งนี้ เกิดจากสภาวะการย่อยสลายด้วยความร้อนที่อุณหภูมิสูงทำให้เกิดสภาวะเป็นกรดจากการย่อยสลายน้ำตาลเพนโทสและเฮกโซส (Palmqvist and Hahn-Hagerdal, 2000) เกิดเป็นสารฟูเฟอรัลและ 5-Hydroxymethylfurfual (5-HMF)

สำหรับการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบของลิกโนเซลลูโลสเมื่อทำการย่อยสลายขั้นต้นด้วยไอน้ำนั้น จากงานวิจัยของ Kabel et al. (2007) พบว่าวัสดุลิกโนเซลลูโลสเมื่อได้รับความร้อนสูงจากไอน้ำในช่วง 180 – 210 ºC ภายในช่วงระยะเวลาอย่างรวดเร็ว 1-10 นาทีนั้น จะทำให้เฮมิเซลลูโลสในกลุ่ม Acetyl ถูกย่อยสลายออกมาเกิดเป็นกรดอ่อน และกระตุ้นให้เกิดการไฮโดรไลซิสเฮมิเซลลูโลสเป็นโมโนและโอลิโกแซคคาไรด์ การย่อยสลายวัสดุลิกโนเซลลูโลสด้วย

ไอน้ำแรงดันสูงพบว่าทำให้เฮมิเซลูโลสย่อยสลายออกมาได้ถึงร้อยละ 70-80 ที่แรงดันไอน้ำ 20-35 บาร์ และควบคุมให้มีอุณหภูมิที่มากกว่า 150 ºC ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Reczey and Zacchi (2004) โดยการย่อยสลายขั้นต้นด้วยไอน้ำนั้นจะใช้แรงดันและอุณหภูมิที่สูงพบว่าค่าสัดส่วนองค์ประกอบของเฮมิเซลลูโลสลดลง โดยพิจารณาจากค่า Severity factor (R_0) (Tomas-Pejo et al., 2008) อยู่ในช่วง 3.0 -4.5 (ตัวแปร คือ แรงดันและเวลา)

ปัจจัยหนึ่งที่สามารถวัดผลจากการย่อยสลายขั้นต้นได้คือ ร้อยละการย่อยสลาย (Disintegration Degree, %DD) โดยวิเคราะห์จากปริมาณ SCOD ที่เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับ TCOD ของฟางข้าวเริ่มต้นดังสมการที่ 4.1

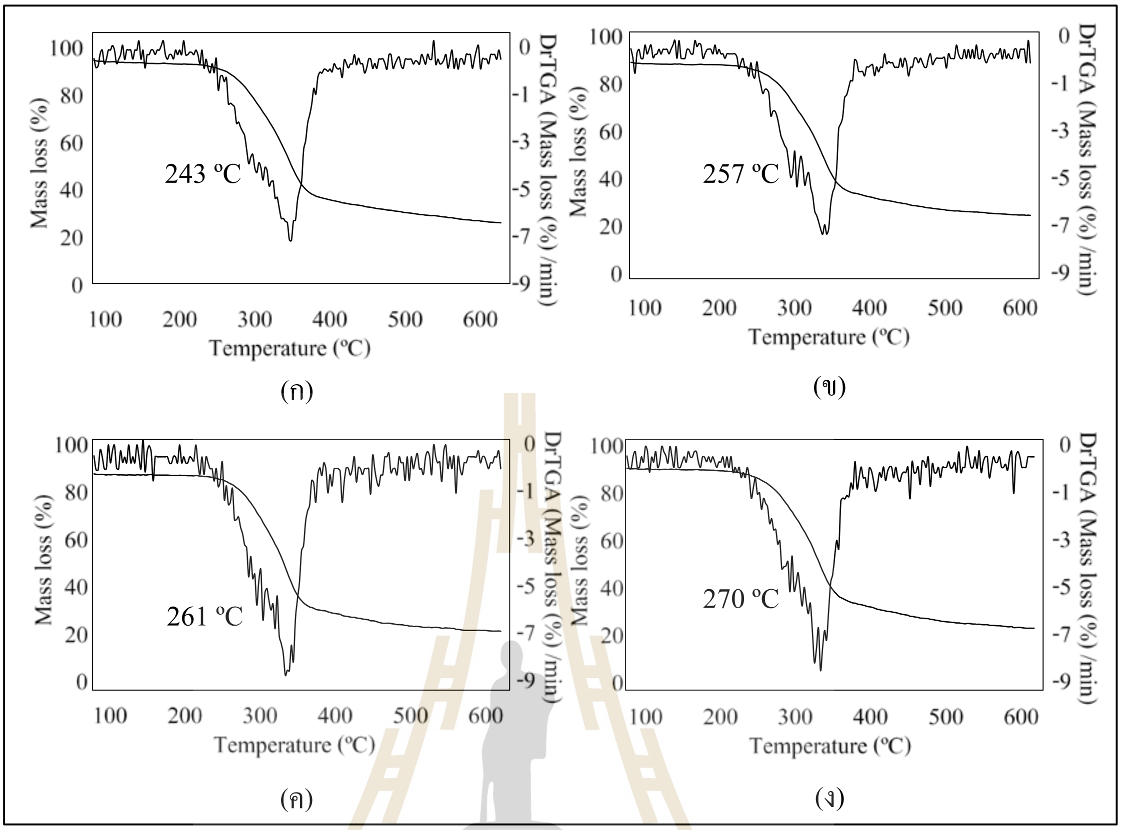
$$\text{Disintegration degree (\%DD)} = \frac{(\text{SCODf-SCODi})}{(\text{TCODi-SCODi})} \times 100 \qquad (4.1)$$

โดย SCODi = SCOD เริ่มต้น, SCODf = SCOD ที่เพิ่มขึ้นหลังจากการย่อยสลายขั้นต้น และ TCODi คือ TCOD ทั้งหมด

โดยจากตารางที่ 4.4 พบว่ามีค่า % DD สูงขึ้นร้อยละ 4.02 – 5.22 เมื่อเทียบกับฟางข้าวที่ไม่ได้มีการย่อยสลายขั้นต้น โดยงานวิจัยของ Pérez et al. (2008) พบว่าร้อยละ 14.3 - 45.7 ของของแข็งจะถูกย่อยสลายออกไปจากฟางข้าวเมื่อต้มน้ำให้สูงขึ้นจาก 170 – 220 ºC ที่ระยะเวลา 0-40 นาที และพบว่าองค์ประกอบของเซลลูโลสเปลี่ยนแปลงจากเริ่มต้นร้อยละ 37.8 เพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 47 – 64 ตามระยะเวลาและอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นดังกล่าว โดยเมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Jackowiak et al., (2011) พบว่าสัดส่วนของ SCOD/TCOD จากการย่อยสลายขั้นต้นด้วยไมโครเวฟมีค่าเพิ่มขึ้นร้อยละ 8.5 – 12.9 ที่ระยะเวลา 10-32 นาที โดยทดสอบในสภาวะแรงดันสูงถึง 33 bar ที่อุณหภูมิ 260 ºC

4.2.1.2 ความมีเสถียรภาพทางความร้อน

การวัดความเปลี่ยนแปลงของวัสดุลิกโนเซลลูโลสด้วยความมีเสถียรภาพทางความร้อน (Thermogravimetric Analysis, TGA) จะแสดงให้เห็นถึงความยากง่ายในการย่อยสลายโดยพิจารณาจากน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไปที่ช่วงความร้อนและระยะเวลาใด ๆ จากหัวข้อที่ผ่านมานั้นการย่อยสลายด้วยความร้อนจะทำให้องค์ประกอบลิกโนเซลลูโลสมีการเปลี่ยนแปลง อาทิ โดยการย่อยสลายออกมาจากผนังเซลล์ (Duff and Murray, 1996) และอีกประการหนึ่งคือความสามารถในการยึดเกาะกันของพันธะต่าง ๆ ระหว่างองค์ประกอบจะมีเสถียรภาพเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับวัสดุที่ไม่มีการย่อยสลายขั้นต้น (Zang et al., 2008)



รูปที่ 4.1 ความมีเสถียรภาพทางความร้อน (ก) ฟางข้าว (Untreated)
(ข) การย่อยสลายขั้นต้นด้วยการต้มที่ 10 °C (ค) การย่อยสลายขั้นต้นด้วยการต้มที่ 20 °C
(ง) การย่อยสลายขั้นต้นด้วยไอน้ำ

ในการศึกษานี้ดังแสดงในรูปที่ 4.1 การย่อยสลายขั้นต้นด้วยความร้อนจะทำให้องค์ประกอบที่ยึดกันอย่างง่ายหลุดออกไปก่อน โดยพบว่าเฮมิเซลลูโลสจะเริ่มมีการย่อยสลายที่ช่วงอุณหภูมิต่ำกว่า 100 °C เป็นต้นไป และมีช่วงอัตราการย่อยสลายสูงสุดในช่วง อุณหภูมิ 230 - 350 °C และพบว่าที่อุณหภูมิ 243 257 261 และ 270 °C ฟางข้าวจะสลายตัวมากกว่าร้อยละ 30 สำหรับ ฟางข้าวที่ไม่ได้ทำการย่อยสลายขั้นต้น การย่อยสลายโดยการต้มที่ระยะเวลา 10 และ 20 นาที, การย่อยสลายขั้นต้นด้วยไอน้ำที่ระยะเวลา 15 นาที ตามลำดับ และที่อุณหภูมิตั้งแต่ 338 343 349 และ 353 °C พบว่าน้ำหนักที่สูญเสียไปมีค่ามากกว่าร้อยละ 50 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการย่อยสลายขั้นต้นด้วยความร้อนนั้นจะทำให้ความมีเสถียรภาพทางความร้อนของวัสดุลิกโนเซลลูโลสเพิ่มสูงขึ้น (Wormeyer et al., 2011) อันเนื่องมาจากเฮมิเซลลูโลสบางส่วนหลุดออกไปแล้วจากการย่อยสลายขั้นต้น

4.2.1.3 โครงสร้างทางกายภาพ

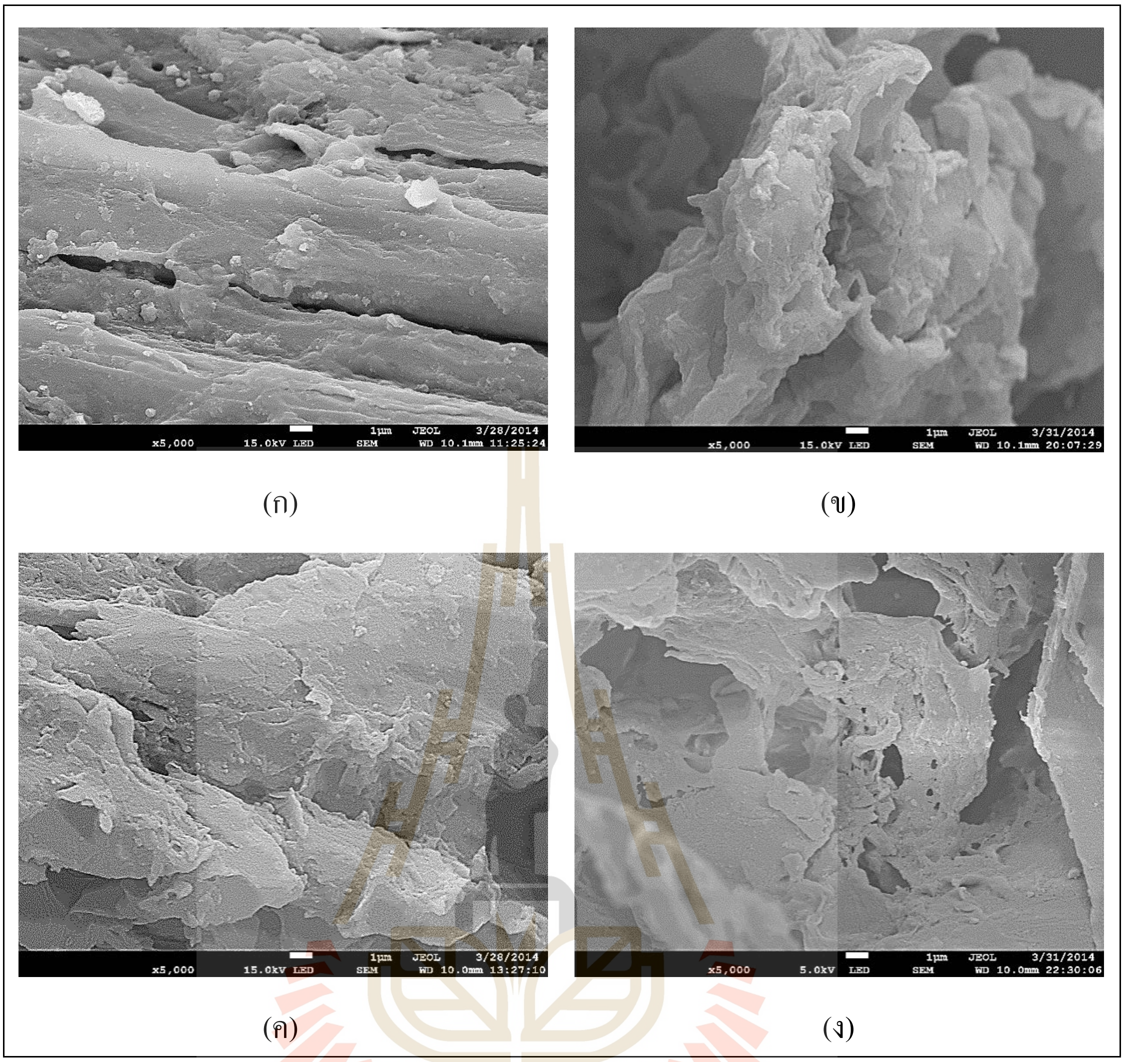
จากรูปที่ 4.2 แสดงถึงโครงสร้างทางกายภาพของฟางข้าวก่อนทำการย่อยสลายขั้นต้น และย่อยสลายขั้นต้นด้วยความร้อน ที่กำลังขยาย 5,000 เท่าโดยปกติพื้นผิวของฟางข้าวนั้น ส่วนใหญ่ที่ผนังเซลล์จะมีความทนทานต่อการย่อยสลายมาก เนื่องจากโครงสร้างที่ซับซ้อนของผนังเซลล์ ซึ่งจะทำให้ยากต่อการย่อยสลายทางชีวภาพด้วยเช่นกัน โดยความแข็งแรงของผนังเซลล์เกิดจากการยึดเกาะกันของพอลิเมอร์จำพวกลิกโนเซลลูโลส และขึ้นอยู่กับสัดส่วนขององค์ประกอบต่าง ๆ อาทิ เฮมิเซลลูโลส เซลลูโลส และลิกนิน (Gírio et al., 2010) โดยเมื่อทำการย่อยสลายขั้นต้นด้วยความร้อนแล้ว จะเห็นได้ชัดว่าโครงสร้างของผนังเซลล์มีความโปร่งตัวมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบการสลายตัวของเฮมิเซลลูโลสในหัวข้อที่ผ่านมา โดยพบว่าองค์ประกอบส่วนใหญ่ที่ย่อยสลายออกมาจากผนังเซลล์จะเป็นกลุ่มเฮมิเซลลูโลส ทำให้เกิดโครงสร้างของฟางข้าวที่มีเซลลูโลสเพิ่มมากขึ้น และมีความแข็งแรงขึ้นแต่ก็มีสภาพที่โปร่ง เปื่อยยุ่ยอยู่พอสมควร

4.2.2 ผลกระทบต่อการย่อยสลายด้วยคลื่นอัลตราโซนิค

4.2.2.1 องค์ประกอบลิกโนเซลลูโลส

ในส่วนการทดลองนี้จะทำการย่อยสลายฟางข้าวขั้นต้นด้วยคลื่นอัลตราโซนิคเพียงอย่างเดียวโดยเฉพาะ โดยจะศึกษาถึงปัจจัยของความถี่ 2 ค่า คือที่ช่วงความถี่ต่ำและช่วงความที่สูงที่ 37 kHz และ 102 kHz ตามลำดับ โดยควบคุมสภาวะการทดสอบที่เปลี่ยนแปลงไปของกำลัง (Power) ที่ส่งไปในรูปคลื่นอัลตราโซนิคตั้งแต่ 120 – 200 W และระยะเวลาส่งคลื่นอัลตราโซนิคที่ 10-30 นาที ผลการทดสอบดังแสดงในตารางที่ 4.5 พบว่า สัดส่วนของเฮมิเซลลูโลสคงเหลืออยู่ในช่วงร้อยละ 30.00-36.00 ลดลงจากเริ่มต้นที่ไม่ได้ทำการย่อยสลายขั้นต้น (ชุดควบคุม) ร้อยละ 12.28 – 25.78

โดยพบว่า ที่ความถี่คลื่นอัลตราโซนิค 37 kHz เพิ่มกำลังส่งที่ 200 W และระยะเวลาย่อยสลาย 30 นาที จะทำให้อัตราส่วนของเฮมิเซลลูโลสลดลงถึงร้อยละ 30.95 และจะมีค่าอัตราการย่อยสลายต่ำลงเมื่อกำลังส่งลดลงตามลำดับ ซึ่งเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับการส่งคลื่นที่ความถี่ 102 kHz แต่พบว่าสัดส่วนขององค์ประกอบเฮมิเซลลูโลสที่ลดลงมีค่าต่ำกว่าร้อยละ 12.28-20.82



รูปที่ 4.2 โครงสร้างทางกายภาพโดยการส่องกล้อง FE-SEM (ก) ฟางข้าว (Untreated)
(ข) การย่อยสลายขั้นต้นด้วยการต้มที่ 10 ºC (ค) การย่อยสลายขั้นต้นด้วยการต้มที่ 20 ºC
(ง) การย่อยสลายขั้นต้นด้วยไอน้ำ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 4.4 องค์ประกอบของลิกโนเซลลูโลสในฟางข้าวที่ผ่านการย่อยสลายขั้นต้นด้วยคลื่นอัลตราโซนิคที่ความถี่ 37 kHz และ 102 kHz

Freq. (Hz)	Power (W)	Time (min)	% Dry matter				Disintegration Degree (%)
			Hemicellulose	Cellulose	Lignin	AIA	
37	120	10	34.04	36.63	3.68	2.50	1.86
		20	33.89	35.55	3.02	2.43	2.02
		30	33.51	36.76	2.91	2.65	2.73
	160	10	33.46	36.09	3.45	2.43	3.01
		20	33.08	36.63	3.50	3.09	3.53
		30	33.99	36.02	3.56	3.56	3.99
	200	10	32.63	37.34	3.35	3.01	3.39
		20	32.70	37.59	3.78	3.77	4.11
		30	30.95	37.64	4.01	4.41	5.43
102	120	10	37.23	35.01	2.32	2.55	0.67
		20	36.58	35.99	2.67	2.64	0.87
		30	34.62	35.02	3.33	2.36	1.93
	160	10	33.04	36.82	3.09	2.09	2.29
		20	33.24	36.80	3.14	3.94	2.54
		30	33.73	37.95	3.27	3.26	3.02
	200	10	34.88	35.64	3.07	2.41	2.48
		20	34.21	36.03	3.89	2.54	3.11
		30	33.02	36.28	3.54	2.93	4.23

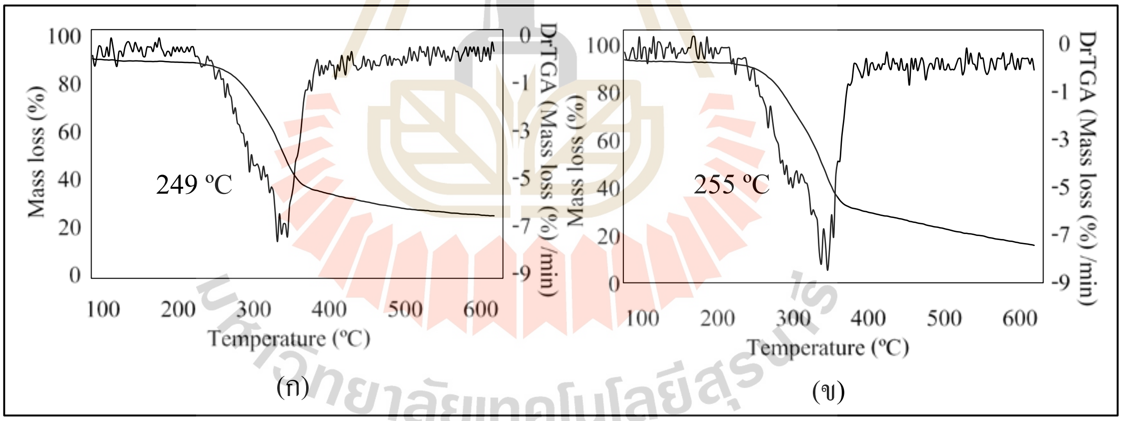
ซึ่งเมื่อพิจารณาผลของระยะเวลาที่ส่งคลื่นอัลตราโซนิคนั้นพบว่าเมื่อเพิ่มระยะเวลาให้สูงขึ้นสัดส่วนของเฮมิเซลลูโลสในฟางข้าวมีค่าลดลงเช่นกัน ผลที่ได้ชี้ให้เห็นว่าการที่เฮมิเซลลูโลสที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำย่อยสลายออกไปได้มากขึ้น องค์ประกอบที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงที่เหลืออยู่เพิ่มสูงขึ้นเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการอัลตราโซนิคออกไปในช่วง 25-35 นาที (Sun and Tomkinson, 2002) โดย Ebringerova et al., (1998) ได้กล่าวว่าข้อดีของการใช้คลื่นอัลตราโซนิคจะช่วยให้ประสิทธิภาพในการสกัดเฮมิเซลลูโลสเพิ่มสูงขึ้นด้วยการย่อยสลายทางกลของผนังเซลล์และ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

พันธะ α-benzyl ether ระหว่างลิกนินและโพลีแซคคาไรด์ เมื่อพิจารณาองค์ประกอบที่มีความสามารถในการละลายน้ำเพิ่มขึ้น (%DD) มีค่าเพิ่มขึ้นอยู่ในช่วงร้อยละ 1.86-5.43 และ 0.87 – 4.23 สำหรับความถี่ 37kHz และ 102 kHz ตามลำดับ ผลที่ได้สอดคล้องกับสัดส่วนของเฮมิเซลลูโลสที่ลดลงเช่นกัน กล่าวคือ เมื่อเพิ่มระยะเวลาในการอัลตราโซนิคเพิ่มขึ้นจาก 10 – 30 นาที พบว่า %DD มีค่าเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 3.39 – 5.43 และพบว่าที่ช่วงความถี่ต่ำจะมีประสิทธิภาพการย่อยสลายสูงกว่าความถี่สูงในทุก ๆ กรณี เนื่องจากอยู่ในช่วงคลื่นที่ให้พลังงานคาวิเตชันสูง (power region) ทำให้ย่อยสลายเฮมิเซลลูโลสออกมาได้มากขึ้น (Timothy, 2003; Sun and Tomkinson, 2005)

4.2.2.2 ความมีเสถียรภาพทางความร้อน

จากรูปที่ 4.3 โดยหลักการเผาไหม้จะเกิดโซนของการคายความร้อนขึ้น โดยโซนแรกที่อุณหภูมิ 250 – 380 ºC เกิดจากการระเหยของสารอินทรีย์ระเหยง่ายโมเลกุลเบา และโซนที่สองในช่วงอุณหภูมิ 380 – 525 ºC เกิดกระบวนการเผาไหม้ของคาร์บอนคงตัวในวัสดุ (Kok and Ozgur, 2013) ซึ่งจากผลการทดสอบพบว่าอุณหภูมิเริ่มต้นที่เกิดการสลายตัวสูงสุดเริ่มที่ 249 และ 255 ºC ที่ความถี่คลื่นอัลตราโซนิค 102 และ 37 kHz ตามลำดับ มีค่าสูงกว่าชุดควบคุมที่ 243 ºC

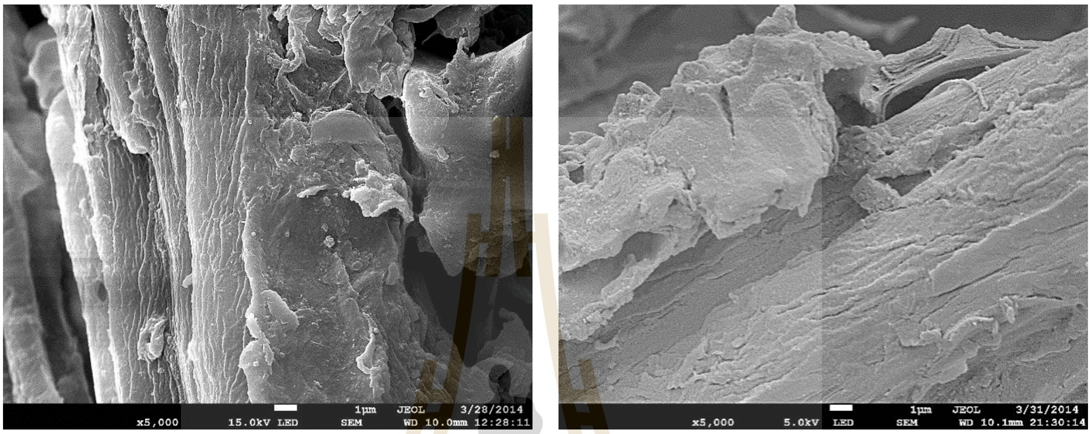


รูปที่ 4.3 ความมีเสถียรภาพทางความร้อน (ก) การย่อยสลายขั้นต้นด้วยคลื่นอัลตราโซนิค 37 kHz (ข) การย่อยสลายขั้นต้นด้วยคลื่นอัลตราโซนิค 102 kHz

4.2.2.3 โครงสร้างทางกายภาพ

การย่อยสลายขั้นต้นด้วยคลื่นอัลตราโซนิคทำให้ผนังเซลล์โดยทั่วไปถูกย่อยสลายออก อาทิ ในรูปของเฮมิเซลลูโลส โครงสร้างทางกายภาพในรูปที่ 4.4 แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพในการย่อยสลายด้วยคลื่นอัลตราโซนิคทำให้วัสดุลิกโนเซลลูโลสมีปริมาตรพอร์สูงขึ้น

หรือมีสภาพเป็นโพรงเพิ่มขึ้นส่งผลให้พื้นที่ผิวสัมผัสเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากการย่อยสลายออกมาของเฮมิเซลลูโลสที่จับอยู่กับเซลลูโลส (Grethlein, 1985) และบางส่วนที่หลุดออกมาเป็นอนุภาคเล็ก ๆ ยังสามารถที่จะเพิ่มโอกาสให้เอนไซม์เข้าย่อยสลายได้มากขึ้นทำให้อัตราการย่อยสลายทางชีวภาพมีค่าสูงขึ้น



(ก) (ข)

รูปที่ 4.4 โครงสร้างทางกายภาพโดยการส่องกล้อง FE-SEM (ก) การย่อยสลายขั้นต้นด้วยคลื่นอัลตราโซนิค 37 kHz (ข) การย่อยสลายขั้นต้นด้วยคลื่นอัลตราโซนิค 102 kHz

โดยพบว่าที่ความถี่ 37 kHz โครงสร้างของฟางข้าวจะมีความเป็นโพรงสูงกว่าที่ 102 kHz เนื่องมาจากการการกระจายตัวของพลังงานจากกระบวนการคาวิเตชันที่สูงโดย Pinjari and Pandit, (2010) ได้ทดสอบเปรียบเทียบการย่อยสลายเซลลูโลสด้วยคลื่นอัลตราโซนิคและไฮโดรไดนามิค พบว่าคลื่นอัลตราโซนิคที่ความถี่ 20 kHz จะปล่อยพลังงานการคาวิเตชันภายในที่สูงกว่า ทำให้พื้นผิวของเซลลูโลสถูกย่อยสลายในระดับที่ทำให้การยึดติดระหว่างเส้นใยแยกออกจากกันได้

4.2.3 ผลกระทบต่อการย่อยสลายด้วยคลื่นอัลตราโซนิคร่วมกับความร้อน

4.2.3.1 องค์ประกอบลิกโนเซลลูโลส

จากการทดสอบในหัวข้อที่ผ่านมาพบว่าทั้งการย่อยสลายขั้นต้นด้วยความร้อนและการย่อยสลายขั้นต้นด้วยคลื่นอัลตราโซนิคต่างก็ให้ผลไปในทิศทางเดียวกัน กล่าวคือเกิดการย่อยสลายเฮมิเซลลูโลสออกมาจากฟางข้าว ทำให้สัดส่วนขององค์ประกอบเซลลูโลสและลิกนินในฟางข้าวเพิ่มขึ้น รวมทั้งเถ้าที่ไม่ละลายในกรด ซึ่งการสลายตัวนี้ทำให้เกิดสารที่ย่อยสลายได้ง่าย

ละลายน้ำออกมา ส่งผลให้เกิดการย่อยสลายทางชีวภาพได้ดียิ่งขึ้น ในการทดสอบในหัวข้อนี้จะทำการย่อยสลายแบบผสมผสานระหว่างความร้อนจากการต้มและจากไอน้ำร่วมกับคลื่นอัลตราโซนิคที่ความถี่ 37 และ 102 kHz เพื่อหาประสิทธิภาพการย่อยสลายสูงสุด จากตารางที่ 4.5 แสดงผลของการย่อยสลายขั้นต้นแบบผสมผสานด้วยการต้มและคลื่นอัลตราโซนิค โดยพบว่าเมื่อเทียบกับการย่อยสลายด้วยการต้มเพียงอย่างเดียวนั้นมีการย่อยสลายเฮมิเซลลูโลสออกมาเพิ่มขึ้นสูงสุดเพียงร้อยละ 6.86 และ 3.79 ที่ความถี่ 37 และ 102 kHz ตามลำดับ โดยทำให้สัดส่วนของเซลลูโลสในฟางข้าวเปลี่ยนแปลงไปในทางที่สูงขึ้นอีกสูงสุดร้อยละ 8.21 และ 1.82 ที่ความถี่ 37 และ 102 kHz ตามลำดับ

ตารางที่ 4.5 องค์ประกอบของลิกโนเซลลูโลสในฟางข้าวที่ผ่านการย่อยสลายขั้นด้วยคลื่นอัลตราโซนิค ที่ความถี่ 37 kHz และ 102 kHz ร่วมกับการต้ม

Freq. (Hz)	Power (W)	Time (min)	% Dry matter				Disintegration Degree (%)
			Hemicellulose	Cellulose	Lignin	AIA	
37	120	10	35.87	37.94	3.81	2.51	4.11
		20	35.76	38.11	3.99	2.52	4.23
		30	35.72	40.47	3.09	2.23	4.53
	160	10	35.03	38.87	3.22	2.23	4.11
		20	34.72	39.89	3.25	2.08	5.26
		30	34.21	39.87	3.53	2.12	5.05
	200	10	33.40	38.38	4.69	2.40	4.39
		20	33.09	38.34	3.98	2.34	4.44
		30	32.72	40.45	3.71	1.25	5.55
102	120	10	36.55	37.52	2.47	2.21	4.13
		20	36.12	37.00	2.55	2.22	4.11
		30	35.42	36.99	3.22	3.29	4.22
	160	10	36.13	36.86	2.11	2.67	4.33
		20	35.11	37.19	2.15	2.63	4.78
		30	35.12	37.76	2.45	3.33	4.98
	200	10	35.15	35.64	3.05	2.67	4.55
		20	34.11	37.77	3.82	2.78	4.81
		30	33.80	38.06	4.56	2.96	5.11

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

โดยพบว่าเมื่อเทียบกับฟางข้าวที่ไม่ได้ทำการย่อยสลายขั้นต้นแล้วนั้น ทำให้สัดส่วนของเฮมิเซลลูโลสในฟางข้าวลดลงสูงสุดถึงร้อยละ 21.53 ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าการใช้คลื่นอัลตราโซนิคร่วมกับความร้อน จะทำให้เกิดกลไลทางความร้อนก่อนที่จะทำให้กลไลทางกลจากคาวิเตชันกระทำที่ผนังเซลล์ของฟางข้าวได้ดียิ่งขึ้น

โดยผลการทดสอบชี้ให้เห็นว่าการใช้คลื่นอัลตราโซนิคช่วยในการย่อยสลายนั้น จะทำให้ได้เฮมิเซลลูโลสจากผนังเซลล์ เพิ่มออกมามากที่สุด เมื่อเทียบกับชุดควบคุมซึ่งแสดงให้เห็นว่าคลื่นอัลตราโซนิคจะไปทำให้เฮมิเซลลูโลสในหน่วยที่ลึกลงไป ยากต่อการเข้าถึง ให้มีโอกาสย่อยสลายออกมาได้มากขึ้น (Sun and Tomkinson, 2002 ; Ebringerova et al., 1998) ซึ่งจากงานวิจัยที่ใช้กลไลแบบผสมผสานในการสกัดเฮมิเซลลูโลสจากฟางข้าวด้วยด่าง KOH ร่วมกับการใช้คลื่นอัลตราโซนิคที่ระยะเวลา 20-35 นาที พบว่าได้ผลผลิตเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเทียบกับการสกัดด้วยด่างเพียงอย่างเดียว แต่ที่ระยะเวลาอัลตราโซนิคในระดับต่ำ 5-15 นาที ไม่พบการเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัด (Sun and Tomkinson, 2002) จากตารางที่ 4.6 แสดงผลของการย่อยสลายขั้นต้นด้วยคลื่นอัลตราโซนิคร่วมกับไอน้ำ พบว่ามีค่าสัดส่วนของเฮมิเซลลูโลสลดลงสูงสุดร้อยละ 4.33 และ 1.01 ความถี่ 37 และ 102 kHz ตามลำดับ และทำให้สัดส่วนของเซลลูโลสเพิ่มขึ้นจากการย่อยสลายด้วยไอน้ำเพียงอย่างเดียวสูงสุดที่ร้อยละ 10.53 และ 6.08 ความถี่ 37 และ 102 kHz ตามลำดับ โดยเมื่อเทียบกับฟางข้าวที่ไม่ได้ทำการย่อยสลายขั้นต้นแล้วพบว่าทำให้มีค่าสัดส่วนขององค์ประกอบเฮมิเซลลูโลสลดลงสูงสุดถึงร้อยละ 20.46 โดยพบว่าในกระบวนการย่อยสลายขั้นต้นด้วยไอน้ำนั้นจะทำให้เกิดการก่อตัวของกรดอินทรีย์ระหว่างการย่อยสลายทำให้เกิดการไฮโดรไลซิสบางส่วนของพันธะ glycosidic ในเฮมิเซลลูโลสย่อยสลายเป็นโมโนและโอลิโกแซคคาไรด์ซึ่งทำให้สัดส่วนของปริมาณเซลลูโลสในฟางข้าวเพิ่มสูงขึ้น (Kabel et al., 2007) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ (Mosier et al. (2005) ที่ได้ให้ความเห็นว่าการย่อยสลายขั้นต้นทางความร้อนจะช่วยให้ย่อยสลายเฮมิเซลลูโลสออกมาได้มากขึ้น และเผยถึงโครงสร้างที่ยึดจับกันกับลิกนินได้มากขึ้น (Donohoe et al., 2007) ซึ่งการย่อยสลายให้เฮมิเซลลูโลสออกไปนั้นจะทำให้โครงสร้างภายในของเซลลูโลสย่อยสลายต่อไปอีกได้ง่ายขึ้นและมีส่วนที่ทำให้ pore volume เพิ่มขึ้น (Grethlein, 1985) อย่างไรก็ตาม การย่อยสลายขั้นต้นนั้นจะทำองค์ประกอบน้ำตาลในฟางข้าวลดลง และทำให้สัดส่วนของเถ้าเพิ่มสูงตามไปด้วย (Kaparaju and Felby, 2010)

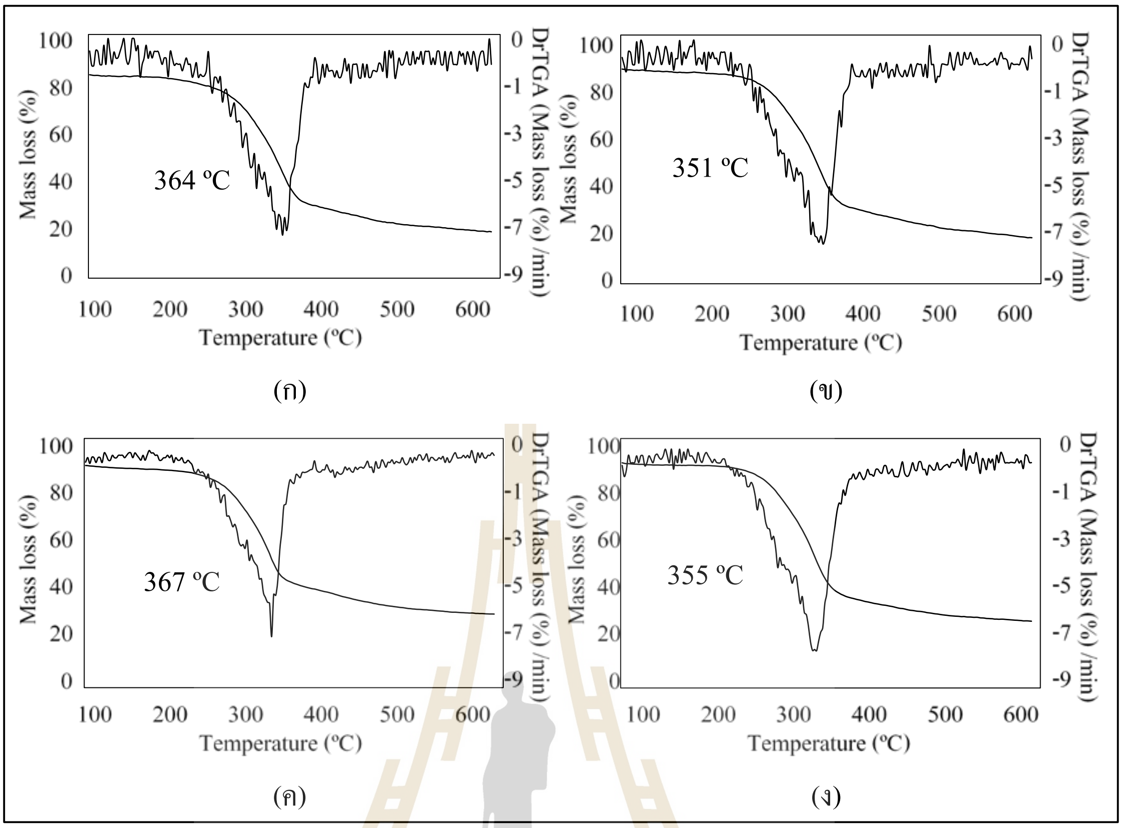
ตารางที่ 4.6 องค์ประกอบของลิกโนเซลลูโลสในฟางข้าวที่ผ่านการย่อยสลายขั้นต้นด้วยคลื่นอัลตราโซนิคที่ความถี่ 37 kHz และ 102 kHz ร่วมกับไอน้ำ

Freq. (Hz)	Power (W)	Time (min)	% Dry matter				Disintegration Degree (%)
			Hemicellulose	Cellulose	Lignin	AIA	
37	120	10	34.58	39.41	4.47	3.78	5.25
		20	34.55	39.00	4.44	3.11	5.23
		30	34.54	39.99	4.97	2.04	5.24
	160	10	34.12	39.01	4.34	2.58	5.12
		20	34.30	39.23	4.16	3.45	5.66
		30	33.10	40.21	4.12	3.33	5.77
	200	10	33.27	39.03	4.21	3.54	5.21
		20	33.23	39.21	6.31	3.21	5.98
		30	33.17	39.98	4.98	3.84	6.71
102	120	10	34.21	38.48	3.51	2.50	5.17
		20	34.56	38.33	3.56	3.22	5.22
		30	34.44	38.79	3.35	2.54	5.20
	160	10	34.87	37.19	3.37	3.45	5.34
		20	34.90	37.84	3.77	2.29	5.51
		30	34.56	37.85	3.87	4.33	5.64
	200	10	34.77	37.13	4.47	3.08	5.09
		20	34.52	38.22	3.64	3.47	5.38
		30	34.32	38.37	3.17	3.09	5.64

4.2.3.2 ความมีเสถียรภาพทางความร้อน

จากรูปที่ 4.5 แสดงกราฟ TGA และ DrTGA พบว่าที่อุณภูมิต่ำกว่า 100 ºC จะเกิดการย่อยสลายของเฮมิเซลลูโลสที่อุณหภูมิต่ำ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Sun et al., (2002) ที่ทำการย่อยสลายขั้นต้นด้วยวิธีผสมผสานระหว่างด่าง NaOH ร่วมกับอัลตราโซนิคที่ระยะเวลา 15 – 30 นาที โดยระยะเวลาในการส่งคลื่นอัลตราโซนิคที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ช่วงอุณหภูมิในการย่อยสลายสูงสุดมีค่าสูงขึ้น

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



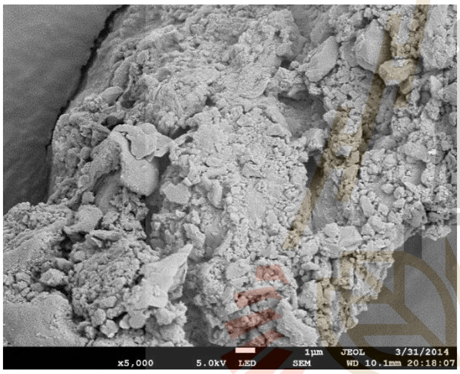
รูปที่ 4.5 ความมีเสถียรภาพทางความร้อน (ก) การต้ม + คลื่นอัลตราโซนิค 37 kHz (ข) การต้ม + คลื่นอัลตราโซนิค 102 kHz (ค) ไอน้ำ + คลื่นอัลตราโซนิค 37 kHz (ง) ไอน้ำ + คลื่นอัลตราโซนิค 102 kHz

ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าอุณหภูมิที่เกิดการสลายตัวสูงสุดเริ่มจาก ไอน้ำ + คลื่นอัลตราโซนิค 37 kHz < การต้ม + คลื่นอัลตราโซนิค 37 kHz < ไอน้ำ + คลื่นอัลตราโซนิค 102 kHz < การต้ม + คลื่นอัลตราโซนิค 102 kHz ที่อุณภูมิ 367 364 355 และ 351 °C ตามลำดับ โดยพบว่าหากมีการย่อยสลายขั้นต้น จะทำให้เฮมิเซลลูโลสที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำย่อยสลายออกมาก่อน จะทำให้ฟางข้าวที่ผ่านกระบวนการย่อยสลายนี้เหลือแต่องค์ประกอบที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงซึ่งมีความทนทานต่อการสลายตัวด้วยความร้อน (Zang et al.,2008) และพบว่าสาเหตุที่ทำให้อุณหภูมิการสลายตัวเพิ่มสูงขึ้นซึ่งเกิดจากสัดส่วนของเถ้าที่มีค่าสูงมากขึ้น (Kok and Ozgur, 2013)

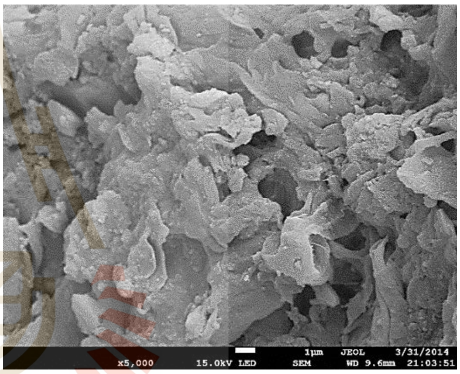
4.2.3.3 โครงสร้างทางกายภาพ

ผลของการย่อยสลายขั้นต้นแบบผสมผสานทำให้เกิดการย่อยสลายของผนังเซลล์ เผยให้เห็นถึงโครงสร้างของไฟเบอร์ระหว่างเซลล์ต่าง ๆ ในฟางข้าวที่ชัดเจนขึ้น ส่วน

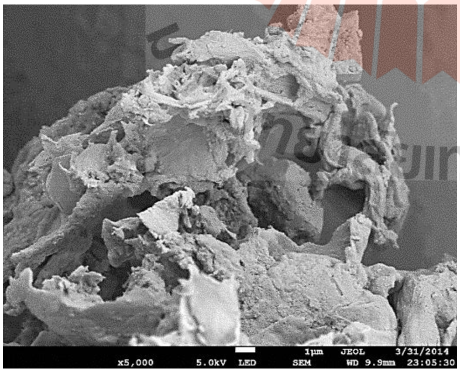
ใหญ่ประกอบไปด้วยโครงสร้างไฟเบอร์ โดยเมื่อทำการย่อยสลายขั้นต้นด้วยไอน้ำแล้วพบว่าทำให้เกิดการย่อยสลายผนังเซลล์ใหญ่ ๆ ให้มีขนาดเล็กลงและเพิ่มปริมาตรโพรงทำให้พื้นที่ผิวเพิ่มมากขึ้น โดยเมื่อทำการย่อยสลายขั้นต้นร่วมกับการใช้คลื่นอัลตราโซนิคเพื่อให้การเกิดคาวิเตชันในสภาวะปั่นป่วนนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Duff and Murray (1996) ซึ่งกล่าวว่าจะเกิดการกระจายตัวออกของผนังเซลล์และเพิ่มพื้นที่ผิวมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.6 โดยพบว่า โครงสร้างของฟางข้าวที่ถูกกระตุ้นด้วยคลื่นอัลตราโซนิคความถี่ 37 kHz จะมีความพรุนมากกว่าที่ความถี่ 102 kHz ทั้งจากการย่อยสลายก่อนด้วยการต้มและด้วยไอน้ำ เนื่องมาจากเป็นความถี่ในย่านที่ให้กำลังสูง ซึ่งการย่อยสลายของเฮมิเซลลูโลสออกจากไมโครไฟบริลจะทำให้ง่ายต่อการย่อยสลายของลิกนินในไมโครไฟบริลต่อไป (Lund et al., 2003) และง่ายต่อการย่อยสลายทางชีวภาพและทำให้ได้ผลผลิตเพิ่มสูงขึ้น (Zhang et al., 2008)



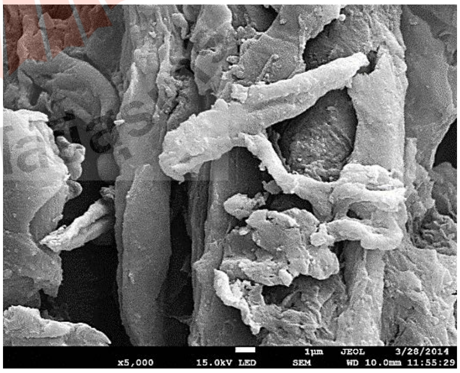
(ก)



(ข)



(ค)



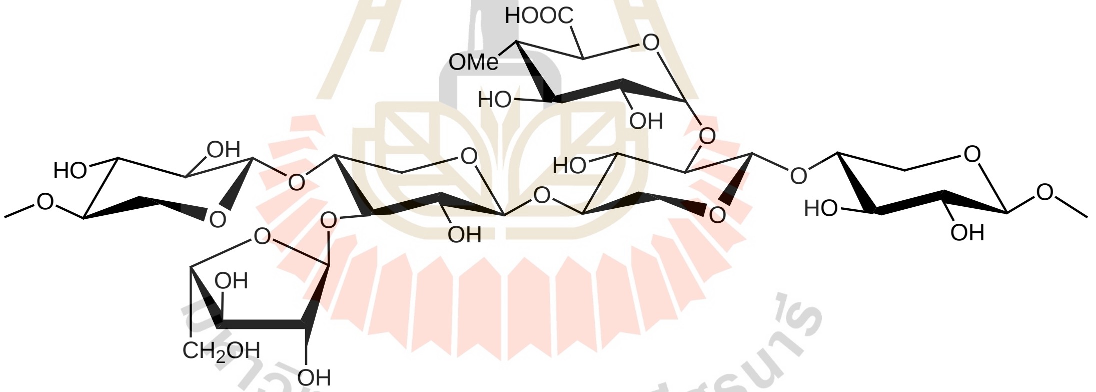
(ง)

รูปที่ 4.6 โครงสร้างทางกายภาพโดยการส่องกล้อง FE-SEM
(ก) การต้ม + คลื่นอัลตราโซนิค 37 kHz (ข) การต้ม + คลื่นอัลตราโซนิค 102 kHz
(ค) ไอน้ำ + คลื่นอัลตราโซนิค 37 kHz (ง) ไอน้ำ + คลื่นอัลตราโซนิค 102 kHz

4.2.4 สรุปผลการทดสอบการย่อยสลายขั้นต้น

4.2.4.1 ผลกระทบต่อองค์ประกอบลิกโนเซลลูโลส

การศึกษาการย่อยสลายขั้นต้นฟางข้าวด้วยคลื่นอัลตราโซนิค พบว่า องค์ประกอบเฮมิเซลลูโลสในฟางข้าวมีค่าลดลง จากผลกระทบของคลื่นอัลตราโซนิคโดยการเกิดปรากฏการณ์คาวิเตชันซึ่งทำให้เกิดการระเบิดอย่างรุนแรงของฟองอากาศขนาดเล็กผ่านตัวกลางที่เป็นน้ำ ส่งผลให้อุณหภูมิและแรงดันขณะนั้นมีค่าสูงถึง 10^4 K และ 10^3 bar ตามลำดับ (Iskalieva et al., 2012) กระบวนการดังกล่าว ส่งผลกระทบทางกายภาพและทางเคมีต่อฟางข้าว โดยจากผลการทดสอบฟางข้าวซึ่งเป็นวัสดุลิกโนเซลลูโลสประกอบไปด้วย เฮมิเซลลูโลส เซลลูโลส และลิกนิน ที่ประสานกันด้วยพันธะไฮโดรเจนและโควาเลนซ์กันอย่างเหนียวแน่น ประกอบด้วย ester linkage ที่จับกับหมู่ acetyl และ hydroxycinnamic acid ซึ่งเฮมิเซลลูโลสในฟางข้าวจะประกอบไปด้วยโพลิเมอร์ของสายโซ่หลักที่เป็น β(1-4)-D-xylopyranose และ side chain ที่ประกอบไปด้วยหมู่ของคาร์โบไฮเดรตที่ตำแหน่ง 2- หรือ 3- โดยส่วนใหญ่ คือ D-glucuronic acid และหมู่ 4-O-methyl ether หรือ L-arabinose ดังรูปที่ 4.7 แสดงโครงสร้างหลักของเฮมิเซลลูโลสจากฟางข้าว

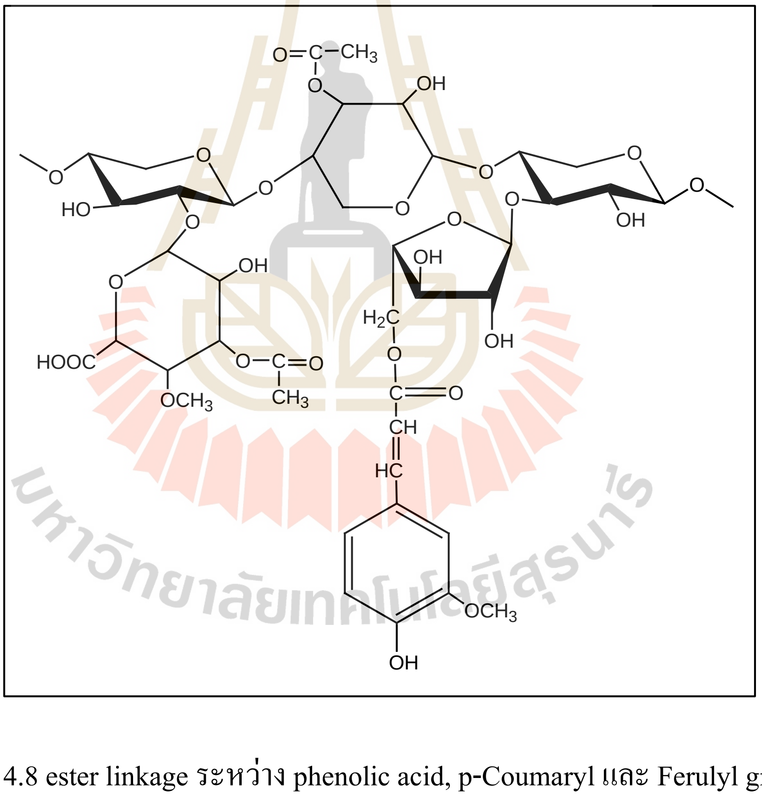


รูปที่ 4.7 โครงสร้างหลักของเฮมิเซลลูโลสจากฟางข้าว (L-arabino-4-O-methyl-D-glucurono-D-xylan; AGX)

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบของเฮมิเซลลูโลสที่คงเหลือ พบว่า ฟางข้าวมีองค์ประกอบเฮมิเซลลูโลสร้อยละ 41.70 เมื่อผ่านการย่อยสลายขั้นต้นด้วยความร้อน โดยการต้ม 10 นาที ต้ม 20 นาที การย่อยสลายด้วยไอน้ำ 15 นาที การใช้คลื่นอัตราโซนิคที่ความถี่ 37 kHz และ102 kHz การใช้คลื่นอัลตราโซนิคร่วมกับการต้ม 10 นาที ความถี่ 37 37 kHz และ 102 37 kHz มีค่าองค์ประกอบเฮมิเซลลูโลสร้อยละ 35.13 34.95 34.67 30.95 32.72 และ 33.80 ตามลำดับ โดยมีค่าเฮมิเซลลูโลสลดลงร้อยละ 15.76 16.19 16.86 25.78 20.82 21.53 และ 18.94 ตามลำดับ ทั้งนี้จะ

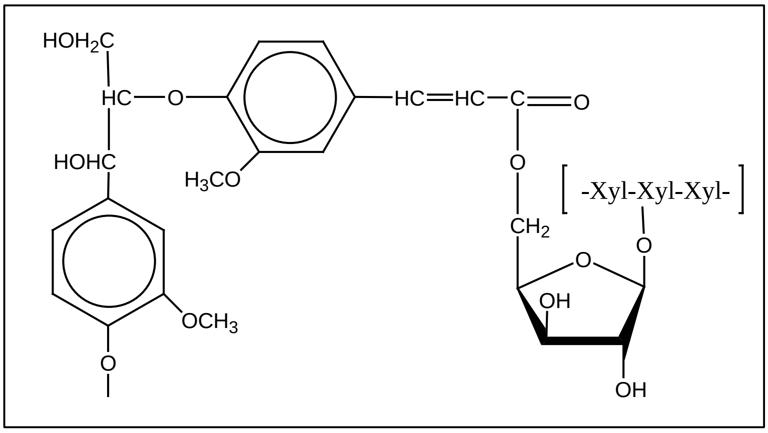
เห็นว่าการย่อยสลายขั้นต้นด้วยคลื่นอัลตราโซนิค จะสามารถทำให้องค์ประกอบของเฮมิเซลลูโลสลดลง และจะมีประสิทธิภาพ เพิ่มมากขึ้นเมื่อทำการย่อยสลายด้วยคลื่นอัลตราโซนิคร่วมกับการต้ม เนื่องจากคลื่นความถี่ที่ทำให้เกิดฟองอากาศขนาดเล็กจากปรากฏการณ์คาวิเตชั่น ทำให้เกิดการคลายตัวของพันธะทางเคมีของโครงสร้างโดยเฉพาะเฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ทำให้เห็นถึงโครงสร้างของไมโครไฟบริลเซลลูโลส (Moholkar el al., 2004) และจากปฏิกิริยาต่อเนื่องของปรากฏการณ์คาวิเตชั่นทำให้น้ำหนักโมเลกุลของลิกนินและเฮมิเซลลูโลสต่ำลง และง่ายต่อการย่อยสลายทางชีวภาพในการนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป (Velmurugan and Muthukumar, 2011)

โดยปรากฏการณ์คาวิเตชันอย่างรุนแรงจะเข้าไปทำการแตกพันธะ ester ที่จับกันอยู่ระหว่างเฮมิเซลลูโลสและลิกนิน โดยจากรูปที่ 4.8 แสดง ester linkage ระหว่าง phenolic acid, p-Coumaryl และ Ferulyl group ที่จับกันอยู่กับสายโซ่ของ xylan ที่มี side chain เป็น arabinose ที่ตำแหน่ง C5 (Hartley, 1973)



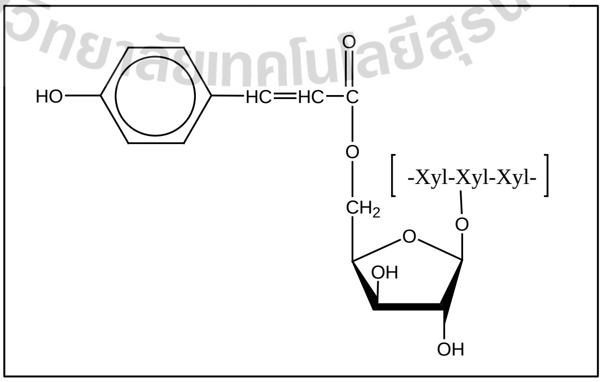
รูปที่ 4.8 ester linkage ระหว่าง phenolic acid, p-Coumaryl และ Ferulyl group

โดย Ferulic acid จากองค์ประกอบของลิกนินที่จับอยู่กับเฮมิเซลลูโลสนี้สามารถเกิดเป็น linkages ได้ทั้ง ether และ esther อยู่บนผนังเซลล์ของฟางข้าว จากงานวิจัยของ Ren and Sun (2010) พบว่า ether linkage ระหว่างลิกนินและ Ferulic acid จะยึดเหนี่ยวกับเฮมิเซลลูโลสด้วย ester linkage (hemicellulose-ester-FA-ether-lignin bridges) ดังแสดงในรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 hemicellulose-ester-FA-ether-lignin bridges

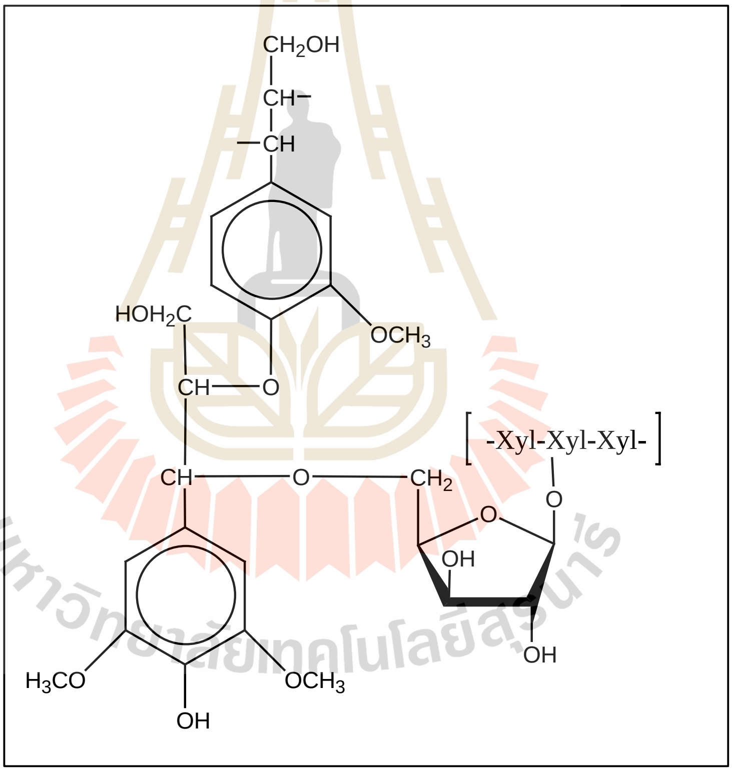
จากผลการทดสอบการใช้คลื่นอัลตราโซนิคในการย่อยสลายขั้นต้น พบว่าสัดส่วนของเฮมิเซลลูโลสในฟางข้าวลดลงแสดงถึงการย่อยสลายพันธะที่ยึดเหนี่ยวกันระหว่างเฮมิเซลลูโลสและลิกนินดังกล่าว สอดคล้องกับงานวิจัยของ Iskalieva et al. (2012) ได้ใช้คลื่นอัลตราโซนิคในการย่อยสลายขั้นต้นเยื่อฟางข้าวพบว่าหลังจากการย่อยสลายแล้วนั้นเมื่อนำ wheat starw ไปวิเคราะห์ทางโครงสร้างด้วยวิธี Fourier transforms infrared (FTIR) spectroscopy เมื่อเปรียบเทียบกับฟางข้าวที่ไม่ได้ทำการย่อยสลายด้วยคลื่นอัลตราโซนิค พบว่าค่าการดูดกลืนแสงที่ช่วงคลื่น IR 1737 cm^{-1} มีค่าลดลงเนื่องมาจากเกิดการย่อยสลายในส่วนของ ester linkage ของหมู่ carboxyl กับ Ferulic acid และ p-coumeric acid ระหว่างเฮมิเซลลูโลสและลิกนิน (Sain and Panthapulakkal, 2006; Sun et al., 2005) โดยส่วนใหญ่ p-coumeric acid จะยึดเหนี่ยวกับเฮมิเซลลูโลส (AGX) ในส่วนของ side chain ที่เป็น arabinose ดังแสดงในรูปที่ 4.10



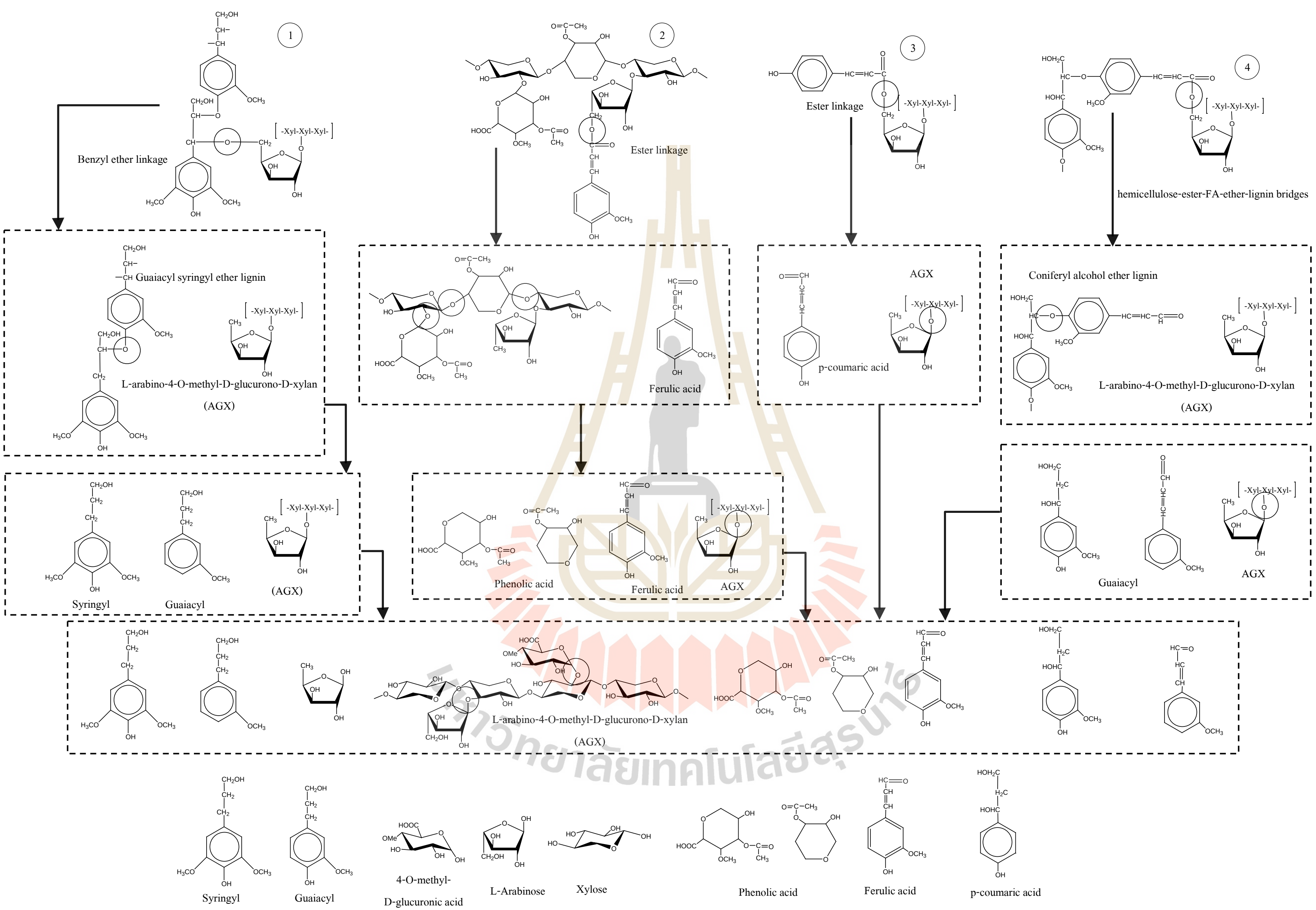
รูปที่ 4.10 ester linkage ของ p-coumeric acid และ เฮมิเซลลูโลส

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

จากงานวิจัยของ Chesson et al., (1983) พบว่าแรงโควาเลนซ์ที่ยึดเหนี่ยวที่ผนังเซลล์ระหว่าง arabinose side chain ของเฮมิเซลลูโลสและองค์ประกอบ phenolic ของลิกนิน โดยส่วนใหญ่คือ benzyl ether linkage ดังแสดงในรูปที่ 4.11 ether linkage ระหว่าง guaiacyl และ syringyl กับเฮมิเซลลูโลส จากงานวิจัยของ Iskalieva et al. (2012) หลังจากการย่อยสลายด้วยคลื่นอัลตราโซนิคแล้ว โดยพบว่าที่ช่วงคลื่น 1595-1510 cm^{-1} มีค่าดูดกลืนแสง IR ลดลง แสดงถึง aromatic ring stretch (Sun et al., 2011) ซึ่งสามารถบ่งชี้ได้ว่าเกิด aromatic skeleton vibration ของ guaiacyl และ syringyl lignin ส่งผลให้ syringyl ring breathing ด้วย C-O stretching ทำให้ค่าการดูดกลืนที่ช่วงคลื่น 1325 cm^{-1} ลดต่ำลงเช่นเดียวกัน แสดงให้เห็นได้ว่าเกิดการ cleavage ของ ether linkage ดังกล่าว (Ruiz et al., 2011)



รูปที่ 4.11 รูปแบบอย่างง่ายของ benzyl ether linkage



รูปที่ 4.12 ภาพรวมการย่อยสลายขั้นต้นองค์ประกอบของฟางข้าว

โดยภาพรวมของการย่อยสลายขั้นต้นด้วยคลื่นอัลตราโซนิคดังแสดงในรูปที่ 4.12 ซึ่งส่วนใหญ่ประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชันของการยึดเหนี่ยวระหว่างลิกโนเซลลูโลส ได้แก่ ester linkage, ether linakge และ benzyl ether linkage ในกระบวนการย่อยสลายขั้นต้นด้วยคลื่นอัลตราโซนิคนั้นจะทำให้เกิดการคาวิเตชันอย่างรุนแรงและทำให้พันธะดังกล่าวแตกออกเป็นองค์ประกอบที่มีขนาดเล็กลงทำให้สามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้ดีขึ้น กล่าวคือ ในกลุ่มที่ 1 benzyl ether linkage ระหว่าง guaiacyl และ syringyl กับเฮมิเซลลูโลส โดยจะแตกพันธะ ether ได้เป็นเฮมิเซลลูโลสในกลุ่ม L-arabino-4-O-methyl-D-glucurono-D-xylan (AGX) และลิกนิน จากนั้นเฮมิเซลลูโลสจะถูกย่อยสลายให้มีโมเลกุลที่เล็กลง ได้แก่ ไซโลส และอะราบิโนส ในส่วนของลิกนินจะถูกย่อยสลายได้เป็น guaiacyl และ syringyl ตามลำดับ ในกลุ่มที่ 2 ester linkage ระหว่าง phenolic acid, p-Coumaryl และ Ferulyl group โดยปรากฏการณ์คาวิเตชันจะไปแตกพันธะ ester ได้สารประกอบของกลุ่มฟีนอล และ Feruric acid ซึ่งเป็นองค์ประกอบเชิงซ้อนของลิกนิน โดยแยกออกจากเฮมิเซลลูโลสและย่อยสลายเป็นน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวต่อไป ในกลุ่มที่ 3 และกลุ่มที่ 4 ester linkage ของ p-coumeric acid และ FA-ether-lignin bridges กับเฮมิเซลลูโลส พบว่าจะเกิดการแตกพันธะ ester ทำให้ได้เฮมิเซลลูโลสและองค์ประกอบลิกนินต่าง ๆ ได้แก่ p-coumeric acid และ ferulic acid จากนั้นเฮมิเซลลูโลสจะถูกย่อยสลายเป็นไซโลสและอะราบิโนสต่อไป

4.2.4.2 ผลกระทบต่อความมีเสถียรภาพทางความร้อน

การย่อยสลายขั้นต้นของฟางข้าวมี 3 วิธีข้างต้น พบว่า ฟางข้าวที่ผ่านการย่อยสลายขั้นต้นและมีความเสถียรภาพทางความร้อนเพิ่มขึ้น เนื่องมาจากเฮมิเซลลูโลส ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่ย่อยสลายได้ง่ายด้วยความร้อน (ต่ำกว่า 100 °C) ถูกย่อยสลายออกจากฟางข้าวในกระบวนการย่อยสลายขั้นต้นไปแล้ว ทั้งนี้ยืนยันได้ว่า ณ ขั้นตอนการย่อยสลายขั้นต้นด้วยคลื่นอัลตราโซนิคร่วมกับความร้อนจะมีการย่อยสลายเฮมิเซลลูโลสออกไปมากที่สุด

4.2.4.3 ผลกระทบต่อโครงสร้างทางกายภาพ

การย่อยสลายขั้นต้นของฟางข้าวทั้ง 3 วิธี ข้างต้น ทำให้โครงสร้างทางกายภาพของฟางข้าวมีขนาดเล็กลง และมีความพรุนเพิ่มขึ้น เมื่อทำการตรวจสอบโดยการส่องกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (FE-SEM) โดยผลของปรากฏการคาวิเตชั่นจากคลื่นความถี่สูงจากฟองอากาศที่มีแรงดันและอุณหภูมิสูงที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วจะไปลดความเป็นผลึกของเซลลูโลสเหลือร้อยละ 66.3 ส่งผลให้ขนาดของอนุภาคเซลลูโลสลดลงอย่างรวดเร็วในระยะเวลาอันสั้นจาก 38 μm ถึง 0.4 μm (Zhang et al., 2013) ซึ่งอนุภาคขนาดเล็กที่เกิดขึ้นจากคลื่นอัลตราโซนิคนี้ส่งผลให้เกิดส่วนที่ชอบน้ำเพิ่มมากขึ้น ทำให้พันธะไฮโดรเจนบางส่วนถูกทำลายลง ซึ่งเป็นปัจจัยหลักที่ทำให้เกิดการย่อยสลายทางชีวภาพต่อไปได้ง่ายขึ้น

4.3 ศักยภาพในการผลิตแก๊สมีเทนด้วยวิธีทางชีวเคมีของฟางข้าวที่ผ่านการย่อยสลายขั้นต้น

4.3.1 ศักยภาพการผลิตแก๊สมีเทนด้วยวิธี BMP ของฟางข้าวที่ผ่านการย่อยสลายขั้นต้นด้วยความร้อน

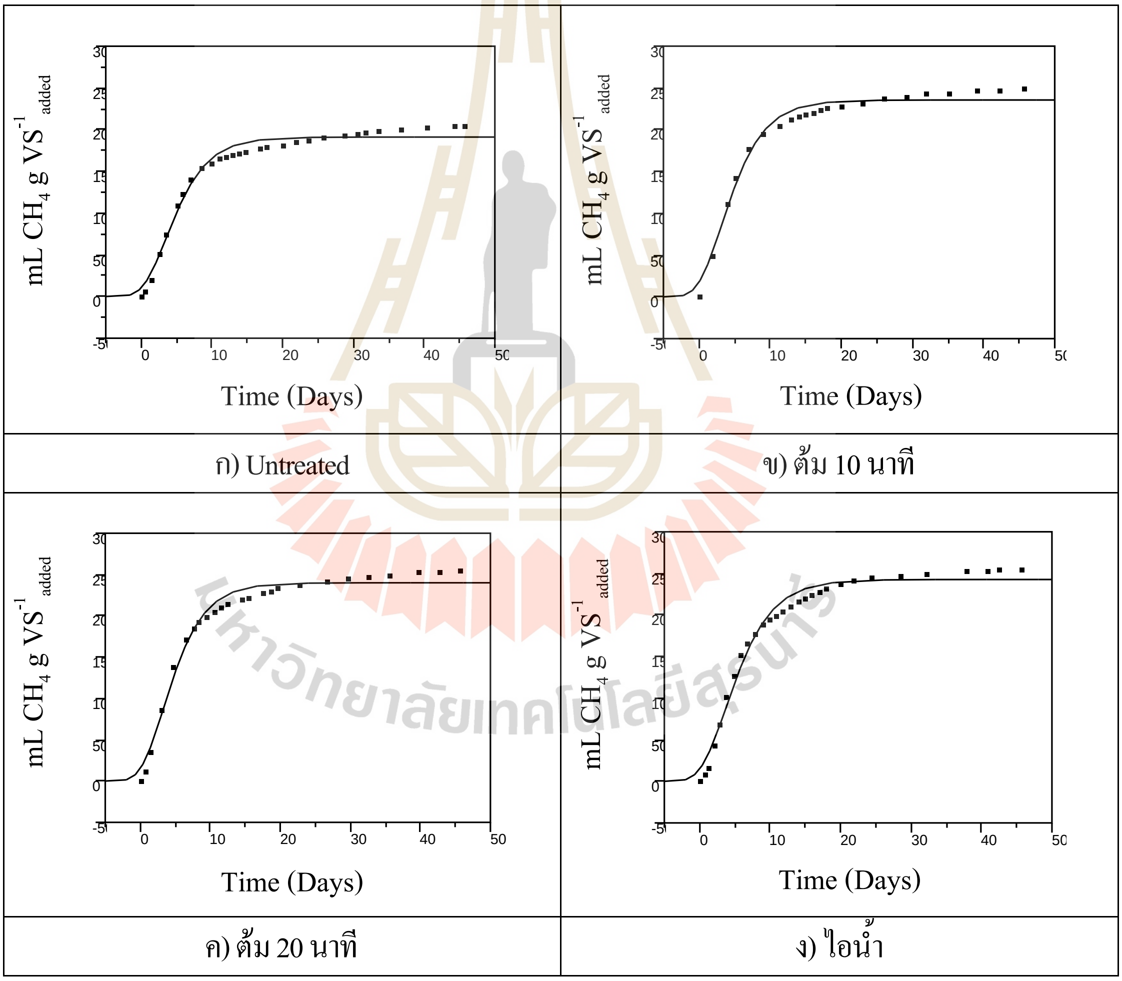
จากผลการทดสอบการย่อยสลายขั้นต้นในหัวข้อที่ผ่านมาพบว่าเกิดการสลายตัวของเฮมิเซลลูโลสจากกระบวนการต่าง ๆ ประกอบกับผลจากการส่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนเพื่อศึกษาถึงโครงสร้างของฟางข้าวที่เปลี่ยนแปลงไป หลังจากจากย่อยสลายขั้นต้นซึ่งเห็นได้ชัดว่าลักษณะของพื้นผิวของฟางข้าวมีความพรุนและโปร่งทำให้ง่ายต่อการย่อยสลายทางชีวภาพได้ดียิ่งขึ้น (Jackowiak et al., 2011)

การทดสอบในหัวข้อนี้จะทำการศึกษาผลของวิธีการย่อยสลายขั้นต้นประเภทต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อศักยภาพในการผลิตเป็นแก๊สมีเทน การอธิบายอัตราการผลิตแก๊สมีเทนจากการทดลองเพื่อหาศักยภาพในการผลิตแก๊สมีเทนด้วยวิธีทางชีวเคมีนั้น สามารถอธิบายได้ด้วยเส้นโค้งการเกิดแก๊สมีเทนสะสม โดยสมการ Modifided Gompertz ดังแสดงในหัวข้อ 3.3.5 ซึ่งจะทำให้ทราบถึงอัตราการผลิตแก๊สมีเทนจำเพาะสูงสุด (*Rm*) และสามารถทำนายศักยภาพในการเกิดแก๊สมีเทนสูงสุดได้

โดยผลการศึกษาพบว่าที่กระบวนการย่อยสลายขั้นต้นด้วยการต้มที่ 10 และ 20 นาที และการย่อยสลายขั้นต้นด้วยไอน้ำมีศักยภาพในการเกิดแก๊สมีเทนสะสม มีค่า 248.83 255.27 และ 256.13 mL CH_4 g VS^{-1}_{added} ที่สภาวะมาตรฐาน (STP) ในช่วงระยะเวลา 45 วัน ตามลำดับ โดยมีค่าสูงกว่าฟางข้าวที่ไม่มีการย่อยสลายขั้นต้นที่ร้อยละ 21.2 24.34 และ 24.76 ตามลำดับ จากค่าปริมาณมีเทนสะสมของฟางข้าว (ชุดควบคุม) 205.30 mL CH_4 g VS^{-1}_{added} ดังแสดงในตารางที่ 4.7 โดยจากผลการทดลองพบว่าในช่วงระยะเวลา 10 วันจะสามารถผลิตแก๊สมีเทนได้มากกว่า 150 mL CH_4 g VS^{-1}_{added} ดังแสดงในรูปที่ 4.13 ซึ่งจากผลการทดลองสามารถอธิบายลักษณะการเกิดแก๊สมีเทนได้ด้วยแบบจำลอง modifided Gompertz พบว่า อัตราการผลิตแก๊สมีเทนจำเพาะสูงสุด (Rm) มีค่า 27.08, 27.09 และ 24.47 mL CH4 g VS^{-1}_{added} ตามลำดับ และปริมาณแก๊สมีเทนสะสม (H) มีค่า 191.11 234.93, 240.00 และ 242.65 mL CH4 g VS^{-1}_{added} ตามลำดับ โดยมีค่า RMSE ของแบบจำลองอยู่ในช่วง 8.6-10.76 mL CH4 g VS^{-1}_{added}

ตารางที่ 4.7 ค่าอัตราการเกิดแก๊สมีเทนสะสม และปริมาณมีเทนที่เกิดขึ้นจากการทดสอบศักยภาพในการผลิตแก๊สมีเทนด้วยวิธีทางชีวเคมี ของฟางข้าวที่ย่อยสลายขั้นต้นด้วยความร้อน

ชุดทดสอบ	H (mL CH_4 g $VS^{-1}{}_{added}$)	R_m (mL CH_4 g $VS^{-1}{}_{added}$)	λ (hrs)	Cum. Methane yeild (mL CH_4 g $VS^{-1}{}_{added}$)
Untreated	191.11	21.34	0.25	205.30
Boil 10	234.93	27.08	0.07	248.83
Boil 20	240.00	27.09	0.06	255.27
Steam	242.65	24.47	0.12	256.13



รูปที่ 4.13 การเกิดแก๊สมีเทนสะสมจากการย่อยสลายขั้นต้นด้วยความร้อน

4.3.2 ศักยภาพการผลิตแก๊สมีเทนด้วยวิธี BMP ของฟางข้าวที่ผ่านการย่อยสลายขั้นต้นด้วยคลื่นอัลตราโซนิค

จากตารางที่ 4.8 แสดงให้เห็นถึงผลของการเปลี่ยนแปลงกำลัง (Power) และระยะ (Time) ต่าง ๆ ที่ความถี่ 37 kHz ในการย่อยสลายขั้นต้นด้วยคลื่นอัลตราโซนิคเพียงอย่างเดียวต่อปริมาณการเกิดแก๊สมีเทนสะสม และอัตราการเกิดแก๊สมีเทนสูงสุด พบว่าที่ระยะเวลาที่เพิ่มขึ้นในทุก ๆ กำลังของคลื่นอัลตราโซนิคที่ใส่เข้าไปในระบบ จะทำให้เกิดแก๊สมีเทนสะสมเพิ่มมากขึ้นอยู่ในช่วง 225.23 – 250.36 mL CH_4 g VS^{-1}_{added} โดยที่ระยะเวลาในการส่งคลื่นสูงสุด 30 นาที จะมีประสิทธิภาพในการผลิตแก๊สมีเทนที่เพิ่มขึ้นมีค่า 231.05 244.41 และ 250.36 mL CH_4 g VS^{-1}_{added} สำหรับกำลังของคลื่นอัลตราโซนิคที่ 120 160 และ 200 W ซึ่งแสดงให้เห็นว่าในการเพิ่มกำลังที่ใส่เข้าไปร้อยละ 33 (120->160) และร้อยละ 25 (160->200) จะมีปริมาณแก๊สมีเทนสะสมเพิ่มขึ้นร้อยละ 5.6 และร้อยละ 2.4 โดยมีค่าเพิ่มขึ้นจากชุดที่ไม่มีการย่อยสลายขั้นต้นร้อยละ 12.76 ที่กำลังส่ง 120 W ระยะเวลา 30 นาที ในส่วนของอัตราการผลิตแก๊สมีเทนสูงสุดมีค่าสูงสุด (Rm) เพิ่มขึ้นจากชุดควบคุมที่ 21.34 เป็น 27.67 mL CH_4 g VS^{-1}_{added}

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 4.8 ค่าอัตราการเกิดแก๊สมีเทนสะสม และปริมาณมีเทนที่เกิดขึ้นจากการทดสอบศักยภาพในการผลิตแก๊สมีเทนด้วยวิธีทางชีวเคมี ของฟางข้าวที่ย่อยสลายขั้นต้นด้วยคลื่นอัลตราโซนิค 37 kHz

Power (W)	Time (min)	H (mL CH_4 g VS^{-1}_{added})	R_m (mL CH_4 g VS^{-1}_{added})	λ (hrs)	Cum. Methane yeild (mL CH_4 g VS^{-1}_{added})
120	10	211.95	20.62	0.01	225.23
	20	214.87	20.89	0.36	230.63
	30	213.61	21.08	0.38	231.05
160	10	214.50	22.07	0.20	231.51
	20[1)]	229.97	24.10	0.13	241.40
	30	227.98	24.68	0.47	244.41
200	10	228.40	22.59	0.10	240.36
	20	228.28	24.96	0.04	247.68
	30	232.82	27.67	0.37	250.36

หมายเหตุ : 1) เป็นค่าเฉลี่ยจากชุดการทดลอง (n=4) ที่ออกแบบโดย RSM

2) ทุก ๆ ชุดการทดลองถูกหักจากชุดควบคุม (แก๊สที่เกิดขึ้นจาก seed)

3) ปริมาณมีเทนปรับค่าที่สภาวะมาตรฐาน (STP)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 4.9 ค่าอัตราการเกิดแก๊สมีเทนสะสม และปริมาณมีเทนที่เกิดขึ้นจากการทดสอบศักยภาพในการผลิตแก๊สมีเทนด้วยวิธีทางชีวเคมี ของฟางข้าวที่ย่อยสลายขั้นต้นด้วยคลื่นอัลตราโซนิค 102 kHz

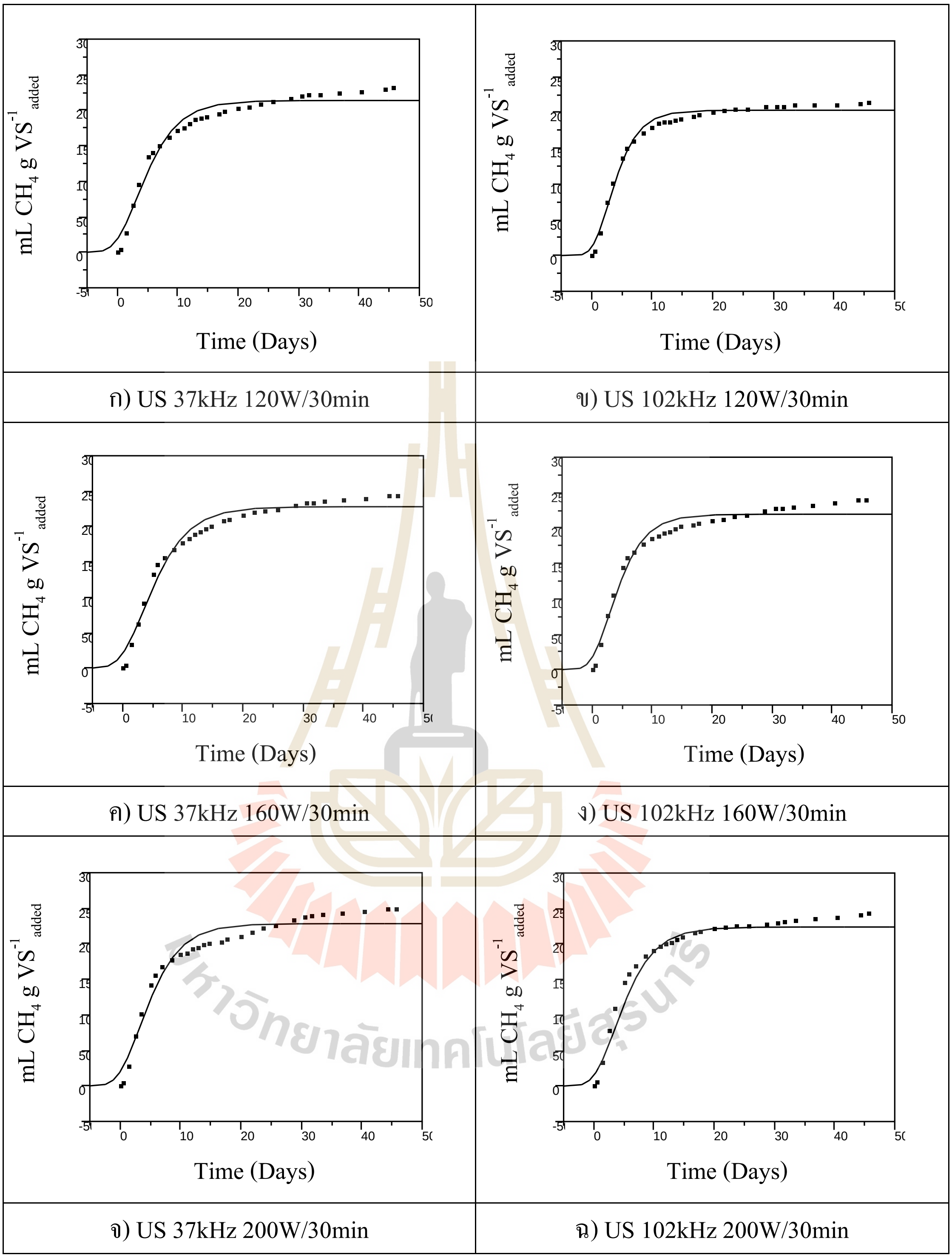
Power (W)	Time (min)	H (mL CH_4 g VS^{-1}_{added})	R_m (mL CH_4 g VS^{-1}_{added})	λ (hrs)	Cum. Methane yeild (mL CH_4 g VS^{-1}_{added})
120	10	202.02	21.95	0.15	209.28
	20	202.42	22.83	0.16	213.04
	30	203.09	22.91	0.17	213.58
160	10	199.81	23.09	0.26	214.24
	20[1)]	225.66	25.18	0.17	238.04
	30	219.46	27.10	0.18	239.20
200	10	215.27	23.39	0.39	224.86
	20	226.21	27.69	0.12	243.56
	30	233.53	29.25	0.08	243.79

หมายเหตุ : 1) เป็นค่าเฉลี่ยจากชุดการทดลอง (n=4) ที่ออกแบบโดย RSM

2) ทุก ๆ ชุดการทดลองถูกหักจากชุดควบคุม (แก๊สที่เกิดขึ้นจาก seed)

3) ปริมาณมีเทนปรับค่าที่สภาวะมาตรฐาน (STP)

จากตารางที่ 4.9 เป็นชุดทดสอสอบการย่อยสลายขั้นต้นด้วยวิธีอัลตราโซนิค เพียงอย่างเดียว เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงความถี่จาก 37 kHz เป็น 102 kHz พบว่าในทุก ๆ กรณีของการเปลี่ยนแปลงกำลังการส่งคลื่นและระยะเวลาเมื่อเปรียบเทียบกับการส่งคลื่นที่ 37 kHz นั้นพบว่า มีค่าลดลงร้อยละ 1.15 – 7.63 โดยพบว่ากำลังที่ใช้ในการส่งคลื่นเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อการลดลงหรือเพิ่มขึ้นของปริมาณการเกิดแก๊สมีเทนสะสม กล่าวคือที่กำลังส่งต่ำ (120 W) คลื่นอัลตราโซนิคที่ 37 kHz จะให้ผลการทดสอบแตกต่างจากความถี่ 102 kHz สูง ที่กำลังการส่งคลื่นที่สูง (200 W) พบว่าการเปลี่ยนแปลงของการผลิตแก๊สมีเทนสะสมมีค่าน้อยที่สุด ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 4.15



ก) US 37kHz 120W/30min

ข) US 102kHz 120W/30min

ค) US 37kHz 160W/30min

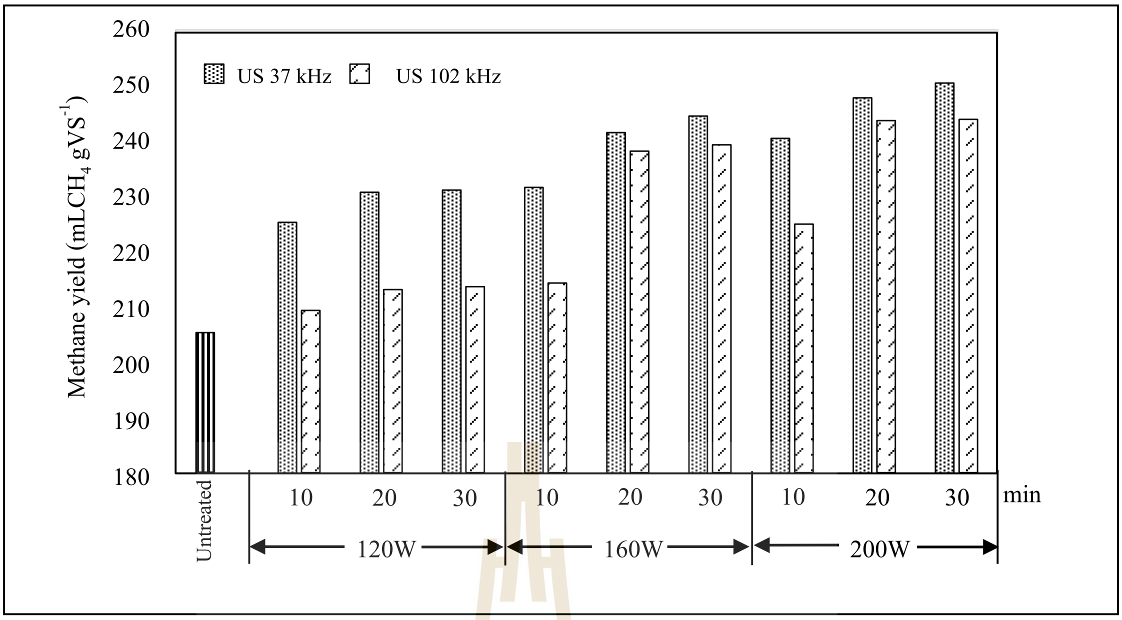
ง) US 102kHz 160W/30min

จ) US 37kHz 200W/30min

ฉ) US 102kHz 200W/30min

รูปที่ 4.14 แบบจำลองการเกิดแก๊สมีเทนสะสมจากการย่อยสลายขั้นต้นด้วยคลื่นอัลตราโซนิค

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 4.15 ปริมาณการเกิดแก๊สมีเทนสะสมที่ระดับการย่อยสลายขั้นต้นด้วยคลื่นอัลตราโซนิค

4.3.3 ศักยภาพการผลิตแก๊สมีเทนด้วยวิธี BMP ของฟางข้าวที่ผ่านการย่อยสลายขั้นต้นด้วยคลื่นอัลตร้าโซนิคร่วมกับความร้อน

จากตารางที่ 4.10 และ 4.11 เป็นการเปรียบเทียบผลของการย่อยสลายขั้นต้นด้วยคลื่นอัลตราโซนิคร่วมกับความร้อน โดยเมื่อทำการเพิ่มในส่วนของการส่งคลื่นอัลตราโซนิคที่กำลังและระยะเวลาต่าง ๆ มีค่าการผลิตแก๊สมีเทนสะสมเพิ่มขึ้นสูงสุดร้อยละ 14.98 สอดคล้องกับ Kaparaju and Felby (2010) โดยพบว่าการย่อยสลายขั้นต้นจะทำให้เอนไซม์ในจุลินทรีย์ย่อยสลายได้ง่ายขึ้น โดยการย่อยสลายขั้นต้นนี้จะทำให้หมู่คาร์บอกซิลในเฮมิเซลลูโลสถูกย่อยสลายออกมาได้มากขึ้น และเผยถึงพื้นที่ผิวของลิกนินที่เพิ่มมากขึ้นด้วย (Himmelsbach et al., 2002) (Li et al., 2007) ซึ่งการย่อยสลายขั้นต้นนี้จะไม่ได้ทำให้ลินินย่อยสลายออกมาได้มากนัก แต่ด้วยกระบวนการไฮโดรไลซิสด้วยความร้อนและคลื่นอัลตราโซนิกจะทำให้เกิดการย่อยสลายเฮมิเซลลูโลสออกมาได้และเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของลิกโนเซลลูโลสบางส่วน ซึ่งจุดนี้จะทำให้เอนไซม์เข้าไปย่อยลิกนินและเซลลูโลสได้ง่ายขึ้นจากการมีพื้นผิวที่ง่ายต่อการเข้าถึงเพิ่มสูงขึ้น

ตารางที่ 4.10 ค่าอัตราการเกิดแก๊สมีเทนสะสม และปริมาณมีเทนที่เกิดขึ้นจากการทดสอบศักยภาพในการผลิตแก๊สมีเทนด้วยวิธีทางชีวเคมี ของฟางข้าวที่ย่อยสลายขั้นต้นด้วยคลื่นอัลตราโซนิค 37 kHz ร่วมกับความร้อนโดยการต้ม 10 นาที

Power (W)	Time (min)	H (mL CH_4 g $VS^{-1}{}_{added}$)	R_m (mL CH_4 g $VS^{-1}{}_{added}$)	λ (hrs)	Cum. Methane yeild (mL CH_4 g $VS^{-1}{}_{added}$)
120	10	238.97	24.40	0.13	258.96
	20	238.29	25.08	0.09	255.68
	30	241.65	25.47	0.04	256.13
160	10	243.79	25.87	0.32	259.23
	20[1)]	244.25	26.28	0.31	258.41
	30	245.45	27.14	0.07	260.84
200	10	240.58	27.06	0.08	254.96
	20	246.24	27.38	0.37	262.46
	30	248.73	28.84	0.20	266.03

หมายเหตุ : 1) เป็นค่าเฉลี่ยจากชุดการทดลอง (n=4) ที่ออกแบบโดย RSM

2) ทุก ๆ ชุดการทดลองถูกหักจากชุดควบคุม (แก๊สที่เกิดขึ้นจาก seed)

3) ปริมาณมีเทนปรับค่าที่สภาวะมาตรฐาน (STP)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 4.11 ค่าอัตราการเกิดแก๊สมีเทนสะสม และปริมาณมีเทนที่เกิดขึ้นจากการทดสอบศักยภาพในการผลิตแก๊สมีเทนด้วยวิธีทางชีวเคมี ของฟางข้าวที่ย่อยสลายขั้นด้วยคลื่นอัลตราโซนิค 102 kHz ร่วมกับความร้อนโดยการต้ม 10 นาที

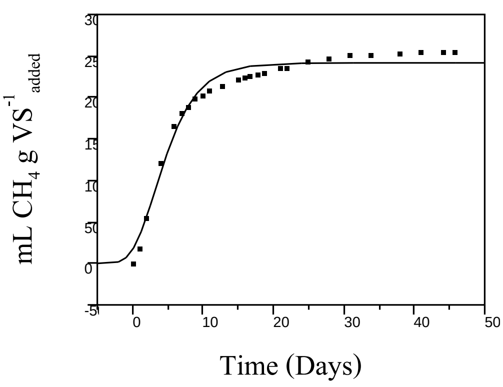
Power (W)	Time (min)	H (mL CH_4 g VS^{-1}_{added})	R_m (mL CH_4 g VS^{-1}_{added})	λ (hrs)	Cum. Methane yeild (mL CH_4 g VS^{-1}_{added})
120	10	234.39	23.54	0.23	253.28
	20	236.13	24.28	0.41	252.32
	30	238.69	24.38	0.26	252.71
160	10	238.18	24.89	0.10	253.73
	20[1)]	238.96	25.81	0.23	253.12
	30	244.28	26.56	0.27	254.21
200	10	237.60	25.14	0.20	258.07
	20	242.53	26.63	0.01	250.79
	30	243.13	26.84	0.53	256.13

หมายเหตุ : 1) เป็นค่าเฉลี่ยจากชุดการทดลอง (n=4) ที่ออกแบบโดย RSM

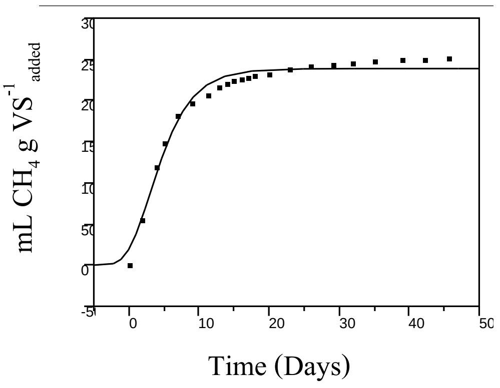
2) ทุก ๆ ชุดการทดลองถูกหักจากชุดควบคุม (แก๊สที่เกิดขึ้นจาก seed)

3) ปริมาณมีเทนปรับค่าที่สภาวะมาตรฐาน (STP)

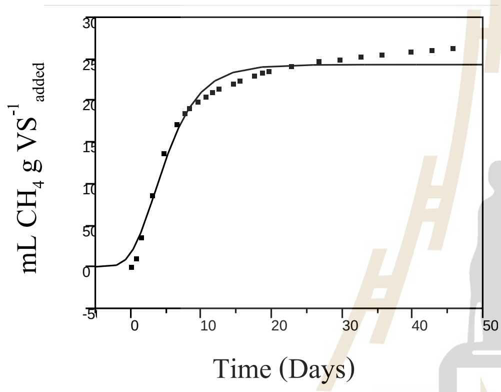
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



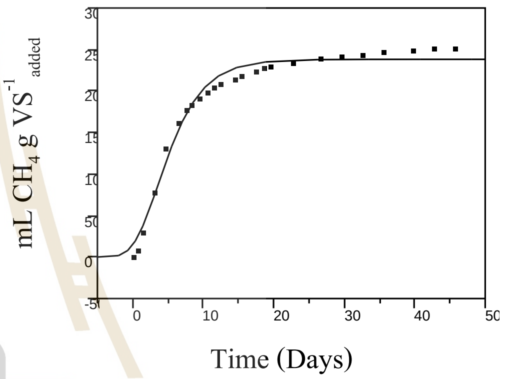
ก) US 37kHz 120W/30min + Boil 10



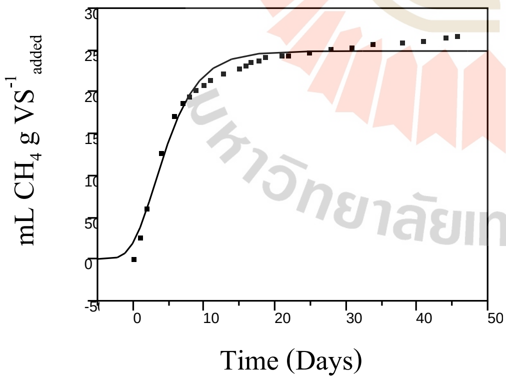
ข) US 102kHz 120W/30min + Boil 10



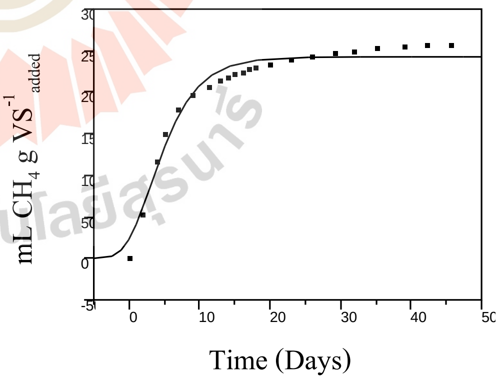
ค) US 37kHz 200W/30min + Boil 10



ง) US 102kHz 160W/30min + Boil 10



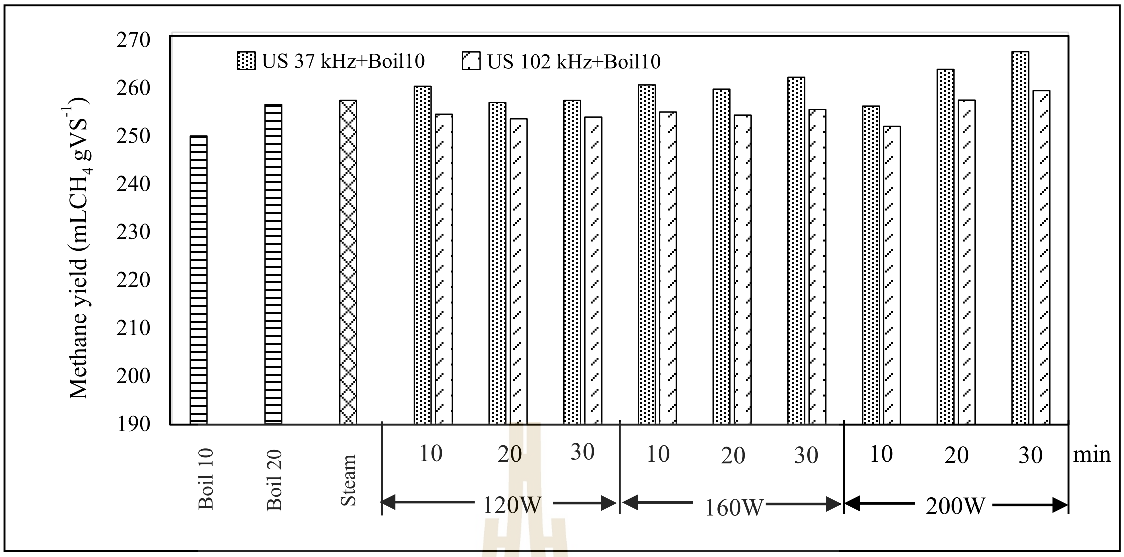
จ) US 37kHz 200W/30min + Boil 10



ฉ) US 102kHz 200W/30min + Boil 10

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รูปที่ 4.16 แบบจำลองการเกิดแก๊สมีเทนสะสมจากการย่อยสลายขั้นต้นด้วยคลื่นอัลตราโซนิคร่วมกับการต้ม



รูปที่ 4.17 ปริมาณการเกิดแก๊สมีเทนสะสมที่การย่อยสลายขั้นต้นด้วยคลื่นอัลตราโซนิคร่วมกับการต้ม

เมื่อเปรียบเทียบในส่วนของความถี่ที่เปลี่ยนแปลงไป พบว่าจากผลการทดสอบที่ผ่านมาดังรูปที่ 4.16 จะเห็นได้ชัดว่าเมื่อทำการย่อยสลายขั้นต้นด้วยความร้อนก่อน ช่วงของผลของการเปลี่ยนการผลิตแก๊สมีเทนจะมีค่าแคบลงอย่างเห็นได้ชัด ดังแสดงในรูปที่ 4.17 โดยพบว่ามีการเพิ่มขึ้นของการผลิตแก๊สมีเทนสะสมสูงสุดที่ 262.46 mL CH_4 g $VS^{-1}{}_{added}$ เพิ่มขึ้นจากชุดควบคุม และชุดที่มีการใช้ความร้อนเพียงอย่างเดียวร้อยละ 27.84 และ 5.48 ตามลำดับ

4.3.4 สรุปศักยภาพการผลิตแก๊สมีเทนด้วยวิธีทางชีวเคมีของฟางข้าวที่ผ่านการย่อยสลายขั้นต้น

การประยุกต์ใช้คลื่นอัลตราโซนิคร่วมกับความร้อนโดยวิธีการต้ม ทำให้ศักยภาพการผลิตแก๊สมีเทนของฟางข้าวดีขึ้น กล่าวคือ เมื่อทำการย่อยสลายขั้นต้นด้วยวิธีการต้ม 10 นาที ต้ม20 นาที การย่อยสลายขั้นต้นด้วยไอน้ำ การใช้คลื่นอัตราโซนิคที่ความถี่ 37 kHz และ 102 kHz มีศักยภาพในการผลิตแก๊สมีเทนสะสม 248.83 255.27 256.13 250.36 243.79 266.03 และ 258.07 mL CH_4 g $VS^{-1}{}_{added}$ ที่สภาวะมาตรฐาน (STP) ในช่วงระยะเวลา 45 วัน ตามลำดับ โดยมีค่าเพิ่มจากชุดควบคุม (205.30 mL CH_4 g $VS^{-1}{}_{added}$) ร้อยละ 21.20 24.34 24.76 21.95 18.75 29.58 และ 24.76 ตามลำดับ ซึ่งการย่อยสลายขั้นต้นด้วยคลื่นอัลตราโซนิคร่วมกับการต้ม 10 นาที จะมีประสิทธิภาพในการเพิ่มปริมาณการเกิดแก๊สมีเทนสะสมได้มากถึง ร้อยละ 29.58 ซึ่งจากผลการศึกษาพบว่ามีค่าน้อยกว่าค่ามีเทนตามทฤษฎี (Stoichiometry) ที่ 471.67 mL CH_4 g $VS^{-1}{}_{added}$ อยู่ร้อยละ 43.60-48.31 และเมื่อเทียบกับฟาง

ข้าวที่ไม่ได้ทำการย่อยสลายซึ่งมีค่าต่ำกว่าทางทฤษฎีร้อยละ 56.47 เนื่องมาจากเป็นการทดสอบในระยะเวลา 45 วัน โดยมีค่าการกำจัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายอยู่ในช่วงร้อยละ 43.37 – 49.52 เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าการย่อยสลายขั้นต้นด้วยคลื่นอัลตราโซนิคมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นร้อยละ 29.58 ดังแสดงในตารางที่ 4.12 โดยเมื่อเปรียบเทียบกับการย่อยสลายทางกลของ Energycane พบว่ามีค่าเพิ่มขึ้นร้อยละ 10.34 ซึ่งจากผลการศึกษาพบว่าการย่อยสลายทางกลจะไปทำลายโครงสร้าง ลดความเป็นผลึกของเซลลูโลส และทำให้วัสดุมีขนาดที่เล็กลง เพิ่มพื้นที่ผิวของวัสดุ ง่ายต่อเอนไซม์เข้าไปย่อยสลายส่งผลให้การย่อยสลายทางชีวภาพมีประสิทธิภาพดีขึ้น (Mosier et al., 2005) การ pre-hydrolysis ด้วยความร้อน 55°C ของ OFMSW สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการเกิดแก๊สมีเทนได้ร้อยละ 39.79 การย่อยสลายขั้นต้นด้วยด่าง NaOH ของ water hyacinth มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นร้อยละ 14.55 การย่อยสลายด้วยด่าง KOH ร่วมกับความร้อน 70°C ของ Household waste มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น 60.25 ในส่วนของการย่อยสลายด้วยความร้อนนั้นอุณหภูมิของ ๆ เหลวจะสามารถไฮโดรไลซิสเฮมิเซลลูโลสได้ดีขึ้นจากการ cleavage ของหมู่ฟังก์ชันหลักในเฮมิเซลลูโลสได้แก่ O-acetyl และ Uronic acid ที่เป็น side chain ของ xylan โดยส่วนใหญ่จะเป็น (4-O-methyl-D-glucuronopyranosyl) -D-xylans ซึ่งจากผลการศึกษาของ Pérez et al. 2008 ทำการย่อยสลาย wheat straw ด้วยความร้อนพบว่าที่อุณหภูมิ 170 °C เมื่อเพิ่มระยะเวลาการย่อยสลายจาก 0-40 นาที จะทำให้หมู่ฟังก์ชัน O-acetyl group มีค่าลดลงจากร้อยละ 1.5 (dwb) ลงมาที่ร้อยละ0.9 (dwb) แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการย่อยสลายเฮมิเซลลูโลสได้มากกว่าร้อยละ 40 โดยการย่อยสลายด้วยความร้อนนี้จะต่อเนื่องด้วยสภาวะของระบบจะมีความเป็นกรดเพิ่มขึ้น ซึ่งจะช่วยให้เกิดการ catalyze ในกลุ่มของน้ำตาล oligosaccharides กลายเป็น monomeric sugars โดยพบว่าลิกนินบางส่วนจะมีความสามารถละลายน้ำเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นถึง 200°C ในส่วนของการย่อยสลายทางเคมีนั้นพบว่าจะมีประสิทธิภาพในการย่อยสลายเพิ่มขึ้นเช่นกันโดยส่วนใหญ่หมู่ –OH จะเข้าไปแตกพันธะหมู่ acetyl group ซึ่งสามารถไฮโดรไลซ์ได้ง่าย โดยเฉพาะลิกนินนั้นจะสามารถย่อยสลายออกจากวัสดุลิกโนเซลลูโลสได้ง่ายในสภาวะด่างโดยจะเข้าไป cleavage พันธะ Ester ระหว่าง hydroxycinnamic acid อาทิ p-coumaric และ ferulic acid หรือเข้าไป breakdown พันธะของ α-benzyl ether linkages ของลิกนินและเฮมิเซลลูโลสที่มีอยู่มากในผนังเซลล์ (Sun et al., 2010) การย่อยสลายเบื้องต้นฟางข้าวด้วยวิธี NMNO (Teghammar et al., 2012) มีกลไกในการย่อยสลายคือประจุของ N-O จะเข้าไปแตกพันธะไฮโดรเจนและแรงแวนเดอร์วาลของโครงสร้างเซลลูโลส และเปลี่ยนโครงสร้างผลึกของเซลลูโลสที่ละลายน้ำจาก Type I เป็น Type II ทำให้สามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้ง่ายขึ้น

ตารางที่ 4.12 การผลิตแก๊สมีเทนด้วยวิธีย่อยสลายขั้นต้นแบบต่าง ๆ

Substrate	Pretreatment condition	Type of AD	HRT (days)	Methane yeild ($mLCH_4.gVS^{-1}$)	References
Raye straw Wheat straw	Size reduction 1-3 cm 0.5 mm	CSTR semi Continuous 20L	20	136 259	Stewart et al., 1984
Wheat straw	Ball mill + Gamma ray 0- 100 M rad NH_4OH + NaOH	Batch 4L	30 30	211-318 300-383	Hashimoto, 1986
Paddy straw	Size reduction 0.088-6.0 mm	Batch 5L	30	241-367	Sharma et al., 1988
Rice straw	Untreated Lime NaOH KOH	BMP assay	23	240 322 317 323	Yang, 2009
Rice straw	Untreated N-methy lmorpholine-N- oxide (NMNO)	BMP assay	6 weeks	32.67 238.18	Teghammar et al., 2012
Rice straw	Untreated Boil 10 min + US 37kHz 100W Holding time 30 min	BMP assay	45	205.30 266.03	งานวิจัยนี้

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

4.4 แบบจำลองพื้นผิวตอบ (Response Surface Model)

จากผลการทดสอบศักยภาพในการผลิตเป็นแก๊สมีเทนจะได้ปริมาณการเกิดแก๊สมีเทนสะสม (H) และอัตราการเกิดแก๊สมีเทนจำเพาะสูงสุด (Rm) ที่การย่อยสลายขั้นต้นที่สภาวะต่าง ๆ โดยวางแผนการทดลองแบบ central composite design (CCD) โดยให้ กำลังส่ง (P) อยู่ในช่วง 120 – 200 W และ ระยะเวลา (T) ในการส่งคลื่น 10 - 30 นาที โดยทำการเข้ารหัส (Coded) ค่าพารา มิเตอร์ต่าง ๆ ให้อยู่ในช่วงที่ได้กำหนดขึ้น ดังแสดงในสมการที่ 4.3 โดยกำหนดให้ค่าสูงสุดในช่วงมีค่าเท่ากับ 1 ค่าต่ำสุดเท่ากับ -1 และกำหนดให้ค่ากลางของการทดลองมีค่าเป็น 0

$$xi = \left[\frac{2x_i' - x_{ilow} - x_{ihigh}}{x_{ihigh} - x_{ilow}} \right] \quad (4.3)$$

เมื่อ xi = ค่าพารามิเตอร์ที่เข้ารหัส

x_i' = ค่าพารามิเตอร์ใด ๆ

x_{ilow} = ค่าพารามิเตอร์ช่วงต่ำ

x_{ihigh} = ค่าพารามิเตอร์ช่วงสูง

โดยเมื่อพิจารณาจากการศึกษาครั้งนี้จะได้รูปแบบการเข้ารหัสค่า P และ T ดังสมการ 4.4

$$p = \left[\frac{P-160}{40} \right] \quad \text{และ} \quad t = \left[\frac{T-20}{10} \right] \quad (4.4)$$

เมื่อ p = ค่ากำลังส่งที่เข้ารหัส

P = ค่ากำลังส่งใด ๆ ในช่วง 120-200 W

t = ค่าระยะเวลาที่เข้ารหัส

T = ค่าระยะเวลาใด ๆ ในช่วง 10-30 min

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 4.13 การเข้ารหัสพารามิเตอร์เพื่อสร้างแบบจำลอง

Parameters	Coded			Response
	-1	0	1	
กำลังส่ง (Power, P)	120	160	200	H, Rm
ระยะเวลา (Time, T)	10	20	30	

จากการออกแบบการทดลองนี้จะได้ชุดทดสอบเพื่อหาความสัมพันธ์ของ กำลังส่ง (P) และระยะเวลา (T) ในการส่งคลื่น ที่ส่งผลต่อค่าผลตอบ (response) y คือ ปริมาณการเกิดแก๊สมีเทนสะสม (H) และอัตราการเกิดแก๊สมีเทนจำเพาะสูงสุด (Rm) ความสัมพันธ์ละ 12 ชุดทดสอบ ดังแสดงในตารางที่ 4.13

ตารางที่ 4.14 การเข้ารหัสพารามิเตอร์การตรวจวัดในขั้นตอนการวิเคราะห์พื้นผิวตอบ

Run	Power	Time	Coded	
			p	t
1	160	20	0	0
2	160	10	0	-1
3	200	10	1	-1
4	160	20	0	0
5	120	10	-1	-1
6	200	20	1	0
7	160	20	0	0
8	120	30	-1	1
9	160	20	0	0
10	200	30	1	1
11	120	20	-1	0
12	160	30	0	1

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ในการศึกษาครั้งนี้จะทำการหาความสัมพันธ์ที่ความถี่ในการส่งคลื่น 2 ความถี่ คือ ช่วงความถี่ต่ำ (37 kHz) และช่วงความถี่สูง (102 kHz) และในกรณีเมื่อมีการย่อยสลายขั้นด้วยคลื่นอัลตราโซนิคร่วมกับการต้มที่ความถี่ดังข้างต้น ทำให้มีชุดการทดสอบความสัมพันธ์ 8 กรณี คือ

1. ความสัมพันธ์ของปริมาณการเกิดแก๊สมีเทนสะสม (H)
   1.1) การย่อยสลายขั้นต้นด้วยคลื่นอัลตราโซนิคที่ความถี่ 37 kHz 12 ชุดทดสอบ (H: US 37 kHz)
   1.2) การย่อยสลายขั้นต้นด้วยคลื่นอัลตราโซนิคที่ความถี่ 102 kHz 12 ชุดทดสอบ (H: US 102 kHz)
   1.3) การย่อยสลายขั้นต้นด้วยคลื่นอัลตราโซนิคที่ความถี่ 37 kHz ร่วมกับการต้ม 12 ชุดทดสอบ (H: Boil10+37 kHz)
   1.4) การย่อยสลายขั้นต้นด้วยคลื่นอัลตราโซนิคที่ความถี่ 102 kHz ร่วมกับการต้ม 12 ชุดทดสอบ (H: Boil10+102 kHz)
2. ความสัมพันธ์ของอัตราการเกิดแก๊สมีเทนจำเพาะสูงสุด (Rm)
   2.1) การย่อยสลายขั้นต้นด้วยคลื่นอัลตราโซนิคที่ความถี่ 37 kHz 12 ชุดทดสอบ (Rm: US 37 kHz)
   2.2) การย่อยสลายขั้นต้นด้วยคลื่นอัลตราโซนิคที่ความถี่ 102 kHz 12 ชุดทดสอบ (Rm: US 102kHz)
   2.3) การย่อยสลายขั้นด้วยคลื่นอัลตราโซนิคที่ความถี่ 37 kHz ร่วมกับการต้ม 12 ชุดทดสอบ (Rm: Boil10+37kHz)
   2.4) การย่อยสลายขั้นต้นด้วยคลื่นอัลตราโซนิคที่ความถี่ 102 kHz ร่วมกับการต้ม12 ชุดทดสอบ (Rm: Boil 10+102 kHz)

4.4.1 ตัวอย่างการสร้างแบบจำลอง

ในที่นี้จะทำการยกตัวอย่างการสร้างแบบจำลองพื้นผิวผลตอบของปริมาณการเกิดแก๊สมีเทนสะสม (H) จากความสัมพันธ์ระหว่างกำลังส่ง (P) และ ระยะเวลา (T) ในการส่งคลื่นที่ความถี่ 37 kHz มาอภิปราย ส่วนการสร้างแบบจำลองพื้นผิวผลตอบในกรณีอื่น ๆ จะเป็นวิธีการเดียวกัน โดยสร้างแบบจำลองเพื่อหาจุดที่เหมาะสม (Optimization) ที่มากที่สุด (หรือน้อยที่สุด) ซึ่งสามารถอธิบายด้วยแบบจำลองอันดับที่ 2 (Second-degree model) (Khuri and Mukhopadhyay, 2010) ดังสมการที่ 4.5 และทำการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ดังแสดงในตารางที่ 4.14

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนของแบบจำลองพื้นผิวผลตอบมีค่า F= 60.3899 ซึ่งมีค่ามากกว่า $F_{0.05;5,6}$ = 4.39 จึงปฏิเสธ $H_0 : \beta_1 = \beta_2 = ... = \beta_k = 0$ หรือพิจารณาจาก Prob>F (p-value) ที่มีค่าน้อยกว่า $\alpha = 0.05$ แสดงให้เห็นว่าตัวแปรอิสระจากแบบจำลองพื้นผิวผลตอบสามารถประมาณค่าผลตอบได้ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจปรับแก้ (adj. R^2) เท่ากับ 0.96 มีค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) เท่ากับ 1.44 โดยสรุปความสัมพันธ์ของแบบจำลอง ดังแสดงในตารางที่ 4.15

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_{11} x_1^2 + \beta_{22} x_2^2 + \beta_{12} x_1 x_2 \quad (4.5)$$

ตารางที่ 4.15 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของแบบจำลองพื้นผิวผลตอบ

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Ratio
Model (Regression)	5	628.31198	125.662	60.3899
Error	6	12.48511	2.081	Prob > F
C. Total	11	640.79709		<.0001*

ตารางที่ 4.16 ผลสรุปความสัมพันธ์ของแบบจำลองพื้นผิวผลตอบ

R^2	Adj. R^2	RMSE	Mean	N
0.98	0.96	1.44	238.90	12

จากนั้นทำการวิเคราะห์ความเหมาะสมของแบบจำลองโดยพิจารณาจากการวิเคราะห์ค่าคลาดเคลื่อน (Residual analysis) โดยแบบจำลองที่เหมาะสม (Montgomery and Peck, 2006) ควรมีค่าเฉลี่ยของคลาดเคลื่อนเท่ากับศูนย์ มีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเข้าใกล้ 1 ซึ่งจากการวิเคราะห์ค่าคลาดเคลื่อนพบว่ามีค่าเท่ากับศูนย์และมีค่า 0.739 ตามลำดับ จากนั้นทำการทดสอบการแจกแจงปกติของค่าคลาดเคลื่อนด้วยสถิติทดสอบ Shapiro – Wilk (n<50) และค่าคลาดเคลื่อนมีความเป็นอิสระต่อกัน Durbin-Watson พบว่าค่าเคลื่อนมีการแจกแจงแบบปกติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 (p-value = 0.311 ยอมรับ H_0 : ค่าคลาดเคลื่อนมีการแจกแจงแบบปกติ) และผลทดสอบ Durbin-Watson มีค่า 2.456 (มีค่าเข้าใกล้ 2 อยู่ในช่วงยอมรับ H_0 : ค่าคลาดเคลื่อนมีความเป็นอิสระต่อกัน) ดังแสดงในตารางที่ 4.16

ตารางที่ 4.4.17 ตัวอย่างผลการวิเคราะห์ค่าคลาดเคลื่อน (Residual analysis)

Std. Residual		Shapiro – Wilk		Durbin-Watson	
Mean	S.D.				
0.000	0.739	p-value = 0.311	✓	2.456	✓

4.4.2 แบบจำลองพื้นผิวผลตอบที่เหมาะสม

จากผลการทดสอบทางสถิติทำให้ได้ผลค่าสัมประสิทธิ์ตามสมการที่ 4.5 ดังแสดงในตารางที่ 4.17 โดยผลของการทดสอบแบบจำลองพื้นผิวผลตอบได้ค่า adj. R^2 เท่ากับ 0.96 และ 0.90 สำหรับแบบจำลองความสัมพันธ์ของปริมาณการเกิดแก๊สมีเทนสะสม (H) ที่ได้จากการทดสอบการย่อยสลายขั้นต้นด้วยคลื่นอัลตราโซนิคเพียงอย่างเดียวที่ความถี่ 37 kHz และ 102 kHz ตามลำดับ และมีค่า adj. R^2 ของแบบจำลองพื้นผิวผลตอบมีค่าเท่ากับ 0.94 และ 0.95 สำหรับการย่อยสลายขั้นต้น ด้วยคลื่นอัลตราโซนิคที่ความถี่ต่างๆ ร่วมกับความร้อน ดังแสดงในรูปที่ 4.10 ซึ่งเมื่อนำรูปแบบความสัมพันธ์มาพลอตกราฟพื้นผิวผลตอบได้ดังรูปที่ 4.11 โดยสมการความสัมพันธ์ของการย่อยสลายแบบต่าง ๆ ได้ดังสมการที่ 4.6 – 4.9

$$Y = 241.23 + 8.58x_1 + 4.79x_2 - 1.73x_1^2 - 2.92x_2^2 + 1.05x_1x_2 \quad (4.6)$$

$$Y = 237.05 + 12.72x_1 + 8.03x_2 - 6.79x_1^2 - 8.37x_2^2 + 3.66x_1x_2 \quad (4.7)$$

$$Y = 259.95 + 3.30x_1 + 2.93x_2 - 1.07x_1^2 - 0.84x_2^2 + 2.24x_1x_2 \quad (4.8)$$

$$Y = 235.95 + 2.44x_1 + 1.70x_2 - 0.57x_1^2 - 0.04x_2^2 + 1.08x_1x_2 \quad (4.9)$$

โดยที่ Y = ปริมาณการเกิดแก๊สมีเทนสะสม (mL CH_4 g VS^{-1})

x_1 = กำลังส่งอยู่ในช่วง 120 – 200 W = [(Power-160)/40]

x_2 = ระยะเวลาการส่งคลื่นอยู่ในช่วง 10 – 20 นาที = [(Time-20)/10]

โดยจากผลการสร้างแบบจำลองพื้นผิวผลตอบสำหรับอัตราการผลิตแก๊สมีเทนจำเพาะสูงสุด (Rm) ได้ค่าสัมประสิทธ์ความสัมพันธ์ดังแสดงในตารางที่ 4.18 และสมการ

ความสัมพันธ์ดังแสดงในสมการที่ 4.10-4.13 โดยการทดสอบการย่อยสลายขั้นต้นด้วยคลื่นอัลตราโซนิคเพียงอย่างเดียวที่ความถี่ 37 kHz และ 102 kHz มีค่า adj. R^2 เท่ากับ 0.88 และสำหรับการย่อยสลายขั้นด้วยคลื่นอัลตราโซนิคร่วมกับการต้ม มีค่า adj. R^2 เท่ากับ 0.92 และ 0.90 ดังรูปที่ 4.13 ซึ่งแสดงในกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าจากแบบจำลองและค่าจริง และรูปที่ 4.14 แสดงความสัมพันธ์ของกราฟพื้นผิวผลตอบ

$$Y = 23.97 + 2.11x_1 + 1.36x_2 - 0.78x_1^2 - 0.33x_2^2 + 1.16x_1x_2 \tag{4.10}$$

$$Y = 25.32 + 2.11x_1 + 1.81x_2 - 0.32x_1^2 - 0.49x_2^2 + 1.23x_1x_2 \tag{4.11}$$

$$Y = 26.28 + 1.39x_1 + 0.69x_2 - 0.06x_1^2 + 0.22x_2^2 + 0.18x_1x_2 \tag{4.12}$$

$$Y = 25.88 + 1.07x_1 + 0.70x_2 - 0.55x_1^2 - 0.28x_2^2 + 0.22x_1x_2 \tag{4.13}$$

โดยที่ Y = อัตราการผลิตแก๊สมีเทนจำเพาะสูงสุด (mL CH_4 g VS^{-1})

x_1 = กำลังส่งอยู่ในช่วง 120 – 200 W = [(Power-160)/40]

x_2 = ระยะเวลาการส่งคลื่นอยู่ในช่วง 10 – 20 นาที = [(Time-20)/10]

โดยจากรูปแบบความสัมพันธ์แสดงให้เห็นถึงปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อค่าผลตอบ (Response) ได้แก่ ระยะเวลา และกำลังส่ง โดยเมื่อพิจารณาค่าปริมาณการเกิดแก๊สมีเทนสะสม (H) พบว่า การย่อยสลายขั้นต้นด้วยอัลตราโซนิคเพียงอย่างเดียวปัจจัยด้านเวลาและกำลังส่งคลื่นมีส่วนช่วยในการเพิ่มประสิทธิภาพการเกิดแก๊สมีเทนสะสม แต่พบว่าที่ความถี่ 102 kHz หากมีกำลังส่งในระดับต่ำ ถึงแม้ว่าจะเพิ่มระยะเวลาในการส่งคลื่นออกไปอีก ประสิทธิภาพจะไม่ได้เพิ่มสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Gallipoli and Braguglia, (2012) ได้ให้ความเห็นว่าช่วงที่ทำให้เกิด Cavitation threshold ควรมีกำลังส่งที่สูงกว่า 0.33 W/cm^3 ในงานวิจัยนี้มีค่า 0.302 0.402 และ 0.503 W/cm^2 สำหรับที่กำลังส่ง 120 160 และ 200 W ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.12 ซึ่งจะเห็นได้ชัดเจนสำหรับอัตราการเกิดแก๊สมีเทนสะสม (H) ดังแสดงในรูปที่ 4.15 และเมื่อทำการย่อยสลายขั้นต้นแบบผสมผสานทั้งปัจจัยด้านเวลาและกำลังส่งจะมีความสันพันธ์โดยตรงกับประสิทธิภาพในการผลิตแก๊สมีเทนจำเพาะสูงสุด (Rm)

ตารางที่ 4.18 สัมประสิทธิ์แบบจำลองพื้นผิวผลตอบของปริมาณการเกิดแก๊สมีเทนสะสม (H)

ค่าคงที่ตัวแปร		ชุดการทดลอง			
		US37	US102	Boil10 + US37	Boil10 + US102
Intercept		241.23	237.05	259.95	253.95
Power (120,200)		8.58	12.72	3.30	2.44
Time (10,30)		4.79	8.03	2.93	1.70
Power*Power		-1.73	-6.79	-1.07	-0.57
Power*Time		1.05	3.66	2.24	1.08
Time*Time		-2.92	-8.37	-0.84	-0.04
ค่าสถิติ[1)]	R^2 / Adj. R^2	0.98 / 0.96	0.95 / 0.90	0.97 / 0.94	0.97 / 0.95
	RMSE	1.44	4.14	0.88	0.55

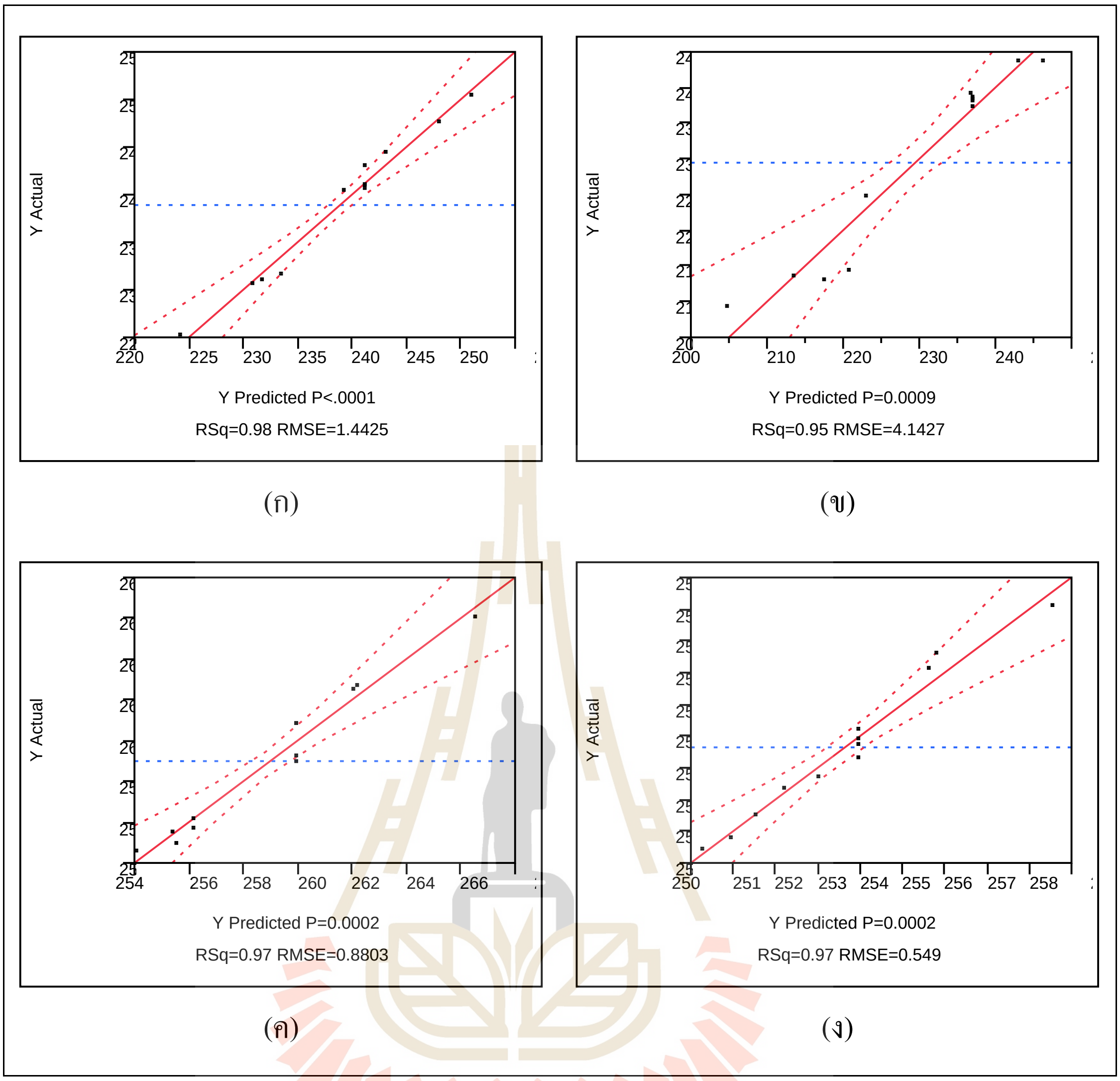
หมายเหตุ [1)] ผลทดสอบทางสถิติแสดงในภาคผนวก ข

ตารางที่ 4.19 สัมประสิทธิ์แบบจำลองพื้นผิวผลตอบของอัตราการผลิตแก๊สมีเทนจำเพาะสูงสุด (Rm)

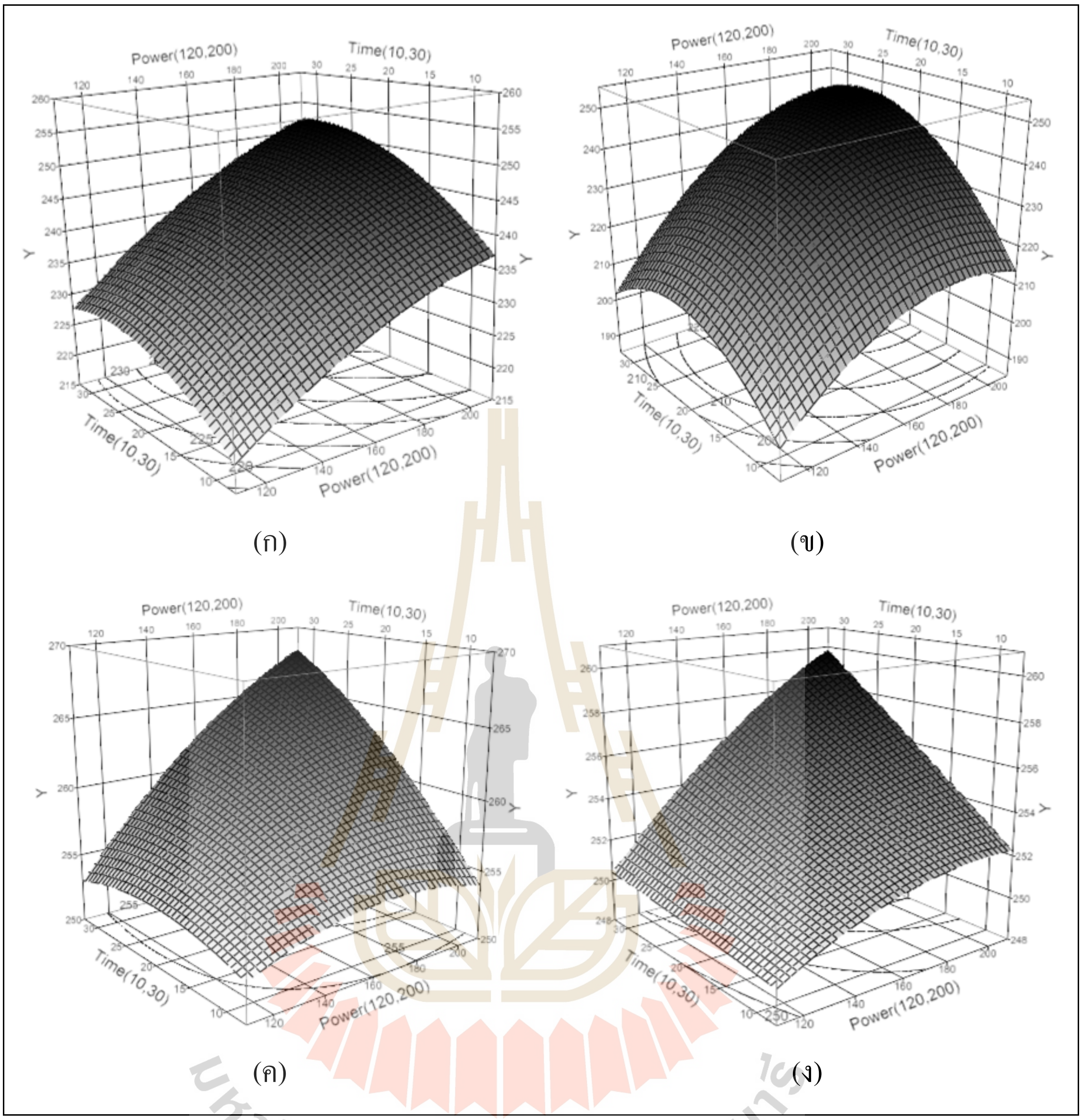
ค่าคงที่ตัวแปร		ชุดการทดลอง			
		US37	US102	Boil10 + US37	Boil10 + US102
Intercept		23.97	25.32	26.28	25.88
Power (120,200)		2.11	2.11	1.39	1.07
Time (10,30)		1.36	1.81	0.69	0.70
Power*Power		-0.78	-0.32	-0.06	-0.55
Power*Time		1.16	1.23	0.18	0.22
Time*Time		-0.33	-0.49	0.22	-0.28
ค่าสถิติ[1)]	R^2 / Adj. R^2	0.94 / 0.88	0.91 / 0.88	0.96 / 0.92	0.94 / 0.90
	RMSE	0.72	0.93	0.34	0.34

หมายเหตุ [1)] ผลทดสอบทางสถิติแสดงในภาคผนวก ข

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



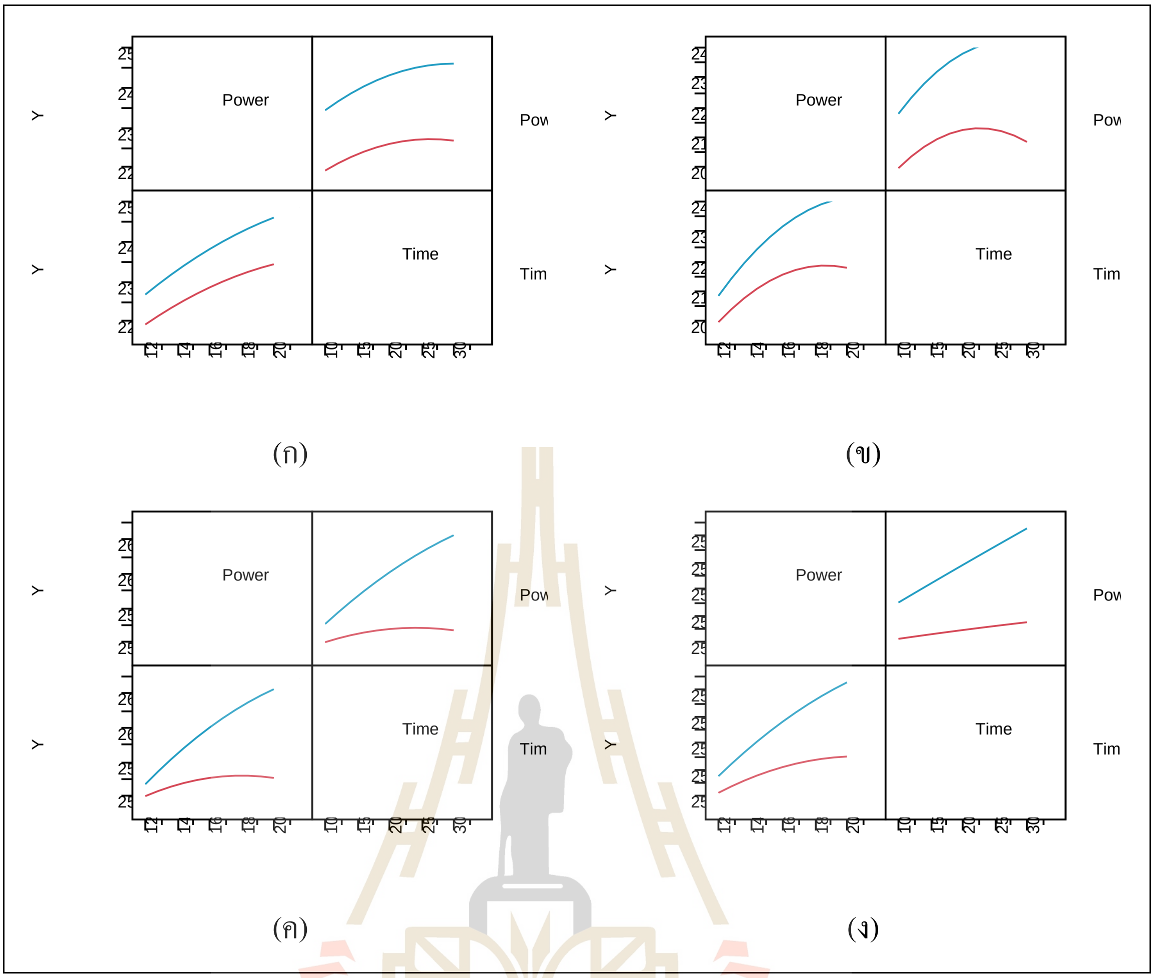
รูปที่ 4.12 กราฟพลอตระหว่างปริมาณการเกิดแก๊สมีเทนสะสมและค่าที่ได้จากแบบจำลอง (ก) US37 (ข) US102 (ค) Boil10+US37 (ง) Boil10+US102



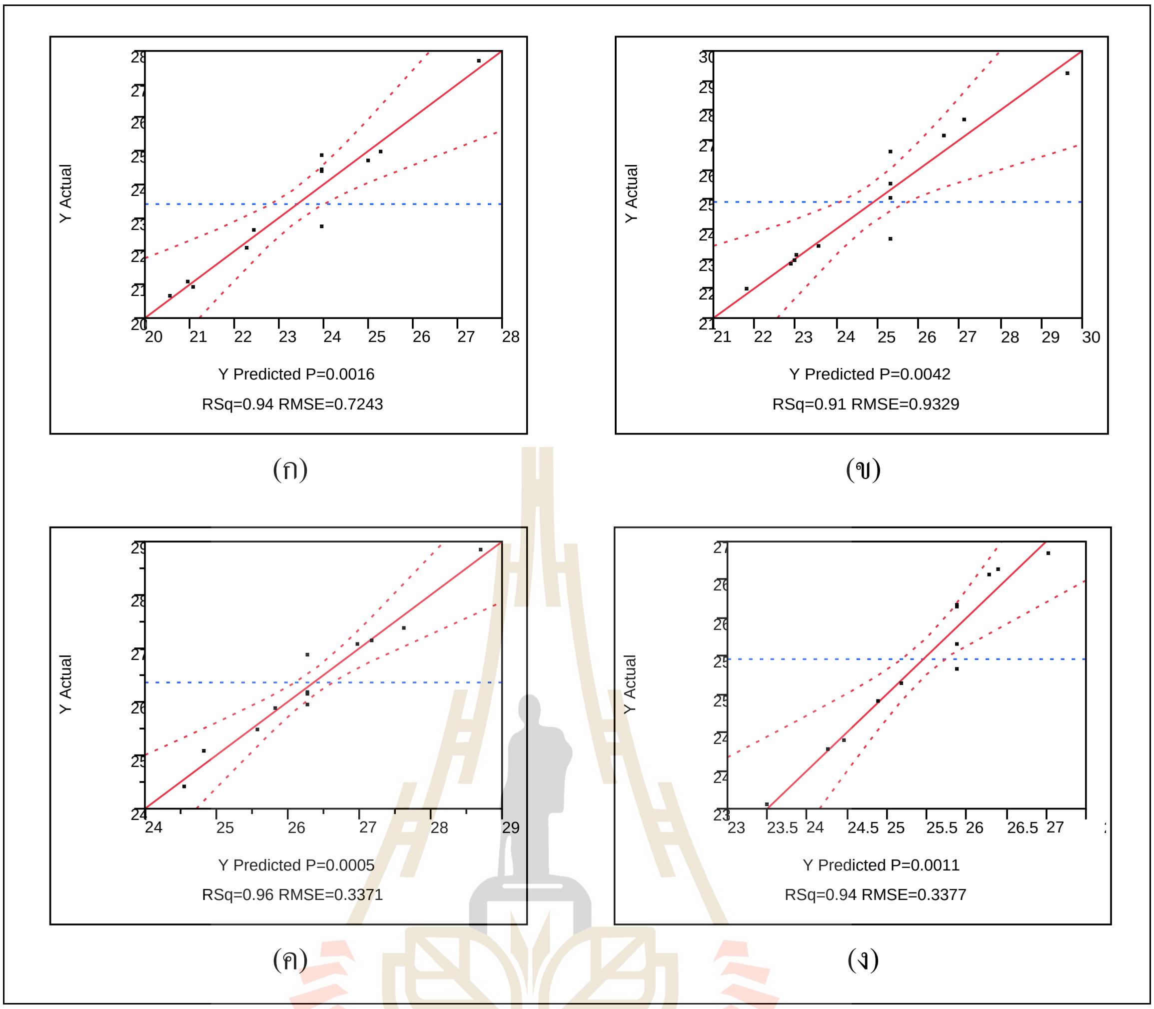
รูปที่ 4.13 กราฟพื้นผิวผลตอบของปริมาณการเกิดแก๊สมีเทนสะสม

(ก) US37 (ข) US102 (ค) Boil10+US37 (ง) Boil10+US102

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

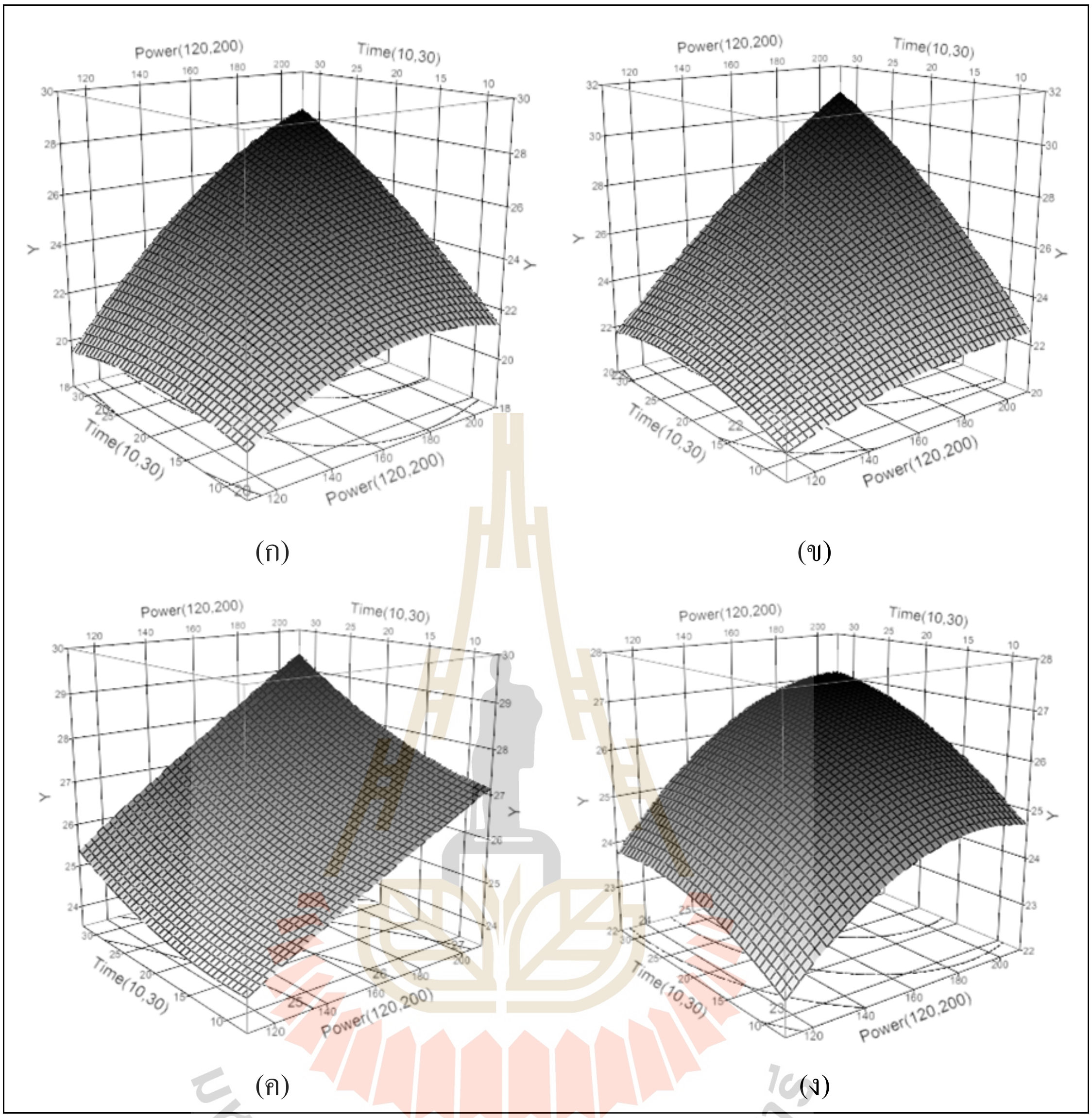


รูปที่ 4.14 กราฟปฏิสัมพันธ์ของเวลาและกำลังส่งต่อปริมาณการเกิดแก๊สมีเทนสะสม (ก) US37 (ข) US102 (ค) Boil10+US37 (ง) Boil10+US102



รูปที่ 4.15 กราฟพลอตระหว่างอัตราการผลิตแก๊สมีเทนจำเพาะสูงสุดและค่าที่ได้จากแบบจำลอง (ก) US37 (ข) US102 (ค) Boil10+US37 (ง) Boil10+US102

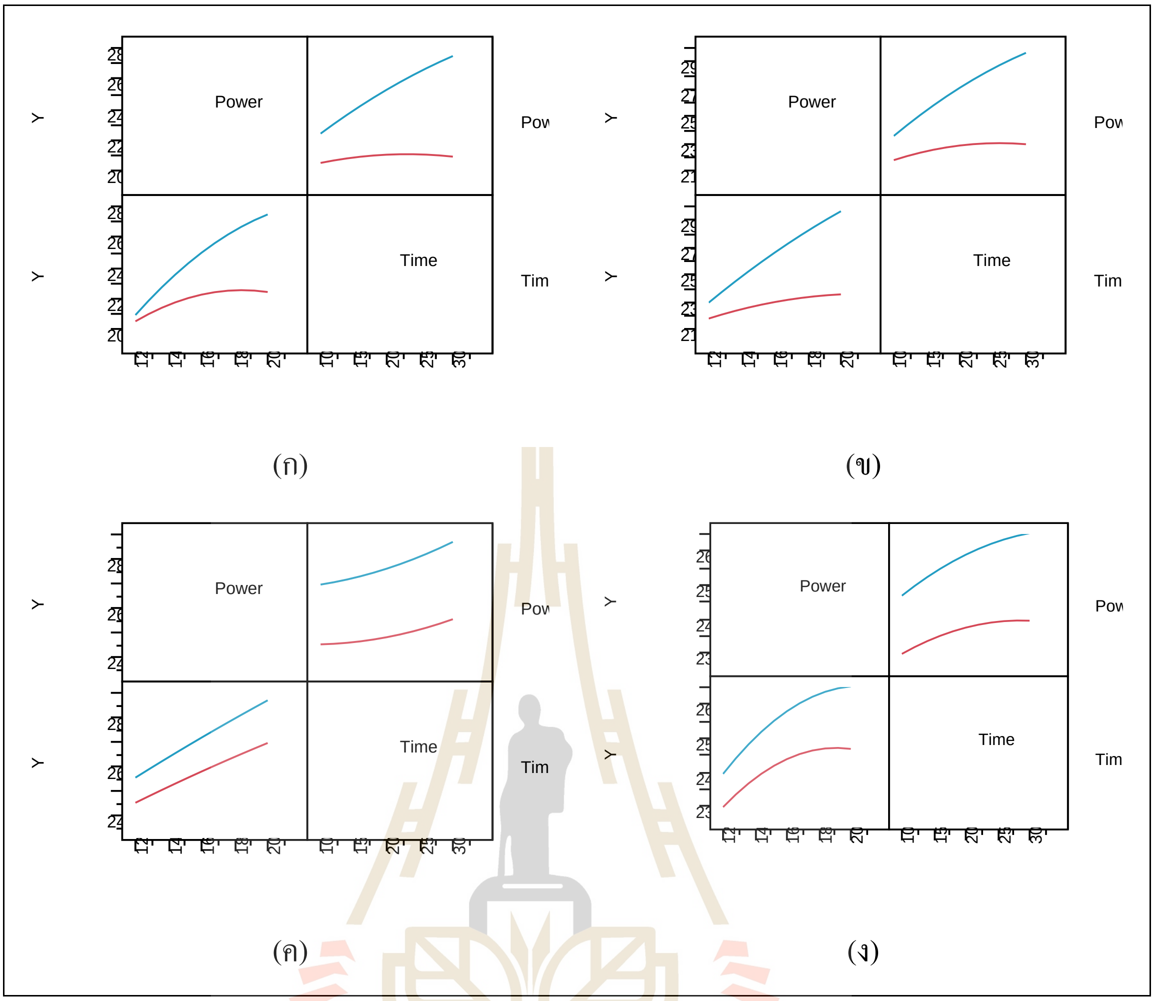
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รูปที่ 4.16 กราฟพื้นผิวผลตอบของอัตราการผลิตแก๊สมีเทนจำเพาะสูงสุด

(ก) US37 (ข) US102 (ค) Boil10+US37 (ง) Boil10+US102

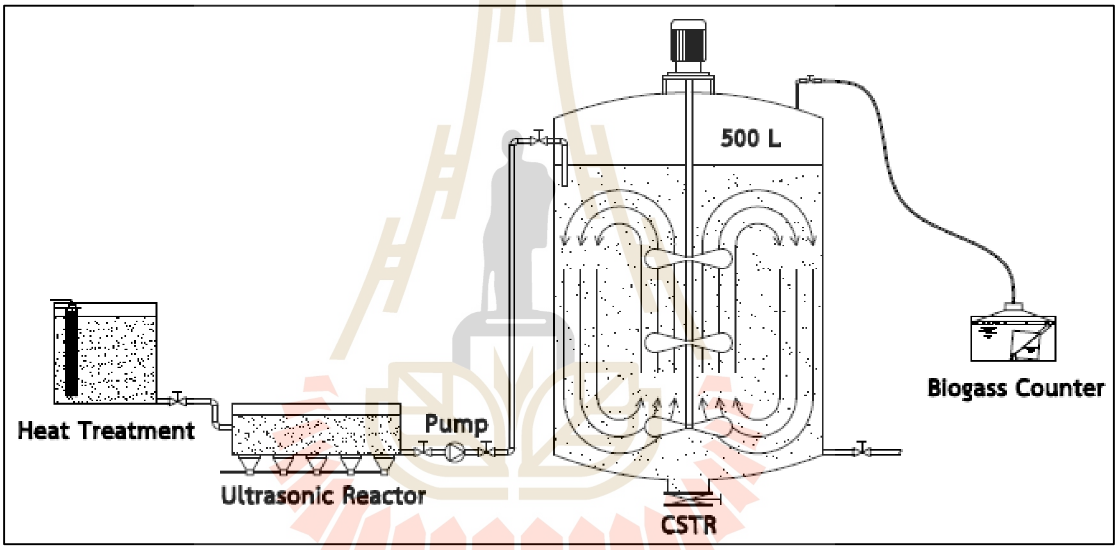


รูปที่ 4.17 กราฟปฏิสัมพันธ์ระหว่างเวลาและกำลังส่งต่ออัตราการผลิตแก๊สมีเทนจำเพาะสูงสุด (ก) US37 (ข) US102 (ค) Boil10+US37 (ง) Boil10+US102

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

4.5 การศึกษาการเดินระบบ

การศึกษาในหัวข้อนี้จะทำการเดินระบบผลิตแก๊สชีวภาพจากฟางข้าวโดยร่วมกับการใช้ระบบย่อยสลายขั้นต้นด้วยคลื่นอัลตราโซนิคร่วมกับการต้ม ที่ได้พัฒนาขึ้นมาจากหัวข้อที่ผ่านมา ดังแสดงในรูปที่ 4.18 โดยจะทำการศึกษาผลของอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ (OLR) ที่มีต่ออัตราการผลิตแก๊สชีวภาพ โดยดำเนินการเดินระบบที่ OLR เท่ากับ 0.90, 1.20, 1.81 และ 3.61 $kgVS_{added}\ m^{-3}d^{-1}$ หรือที่ระยะเวลาเก็บกักที่ HRT เท่ากับ 40 30 20 และ 10 วันตามลำดับ โดยจะทำการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการเดินระบบ ได้แก่ COD TS VS pH Alkalinity และ VFA รวมอัตราการเกิดแก๊สชีวภาพต่อวันและความเข้มข้นของแก๊สมีเทนที่เกิดขึ้น



รูปที่ 4.18 ระบบผลิตแก๊สชีวภาพจากฟางข้าวโดยใช้คลื่นอัลตราโซนิค

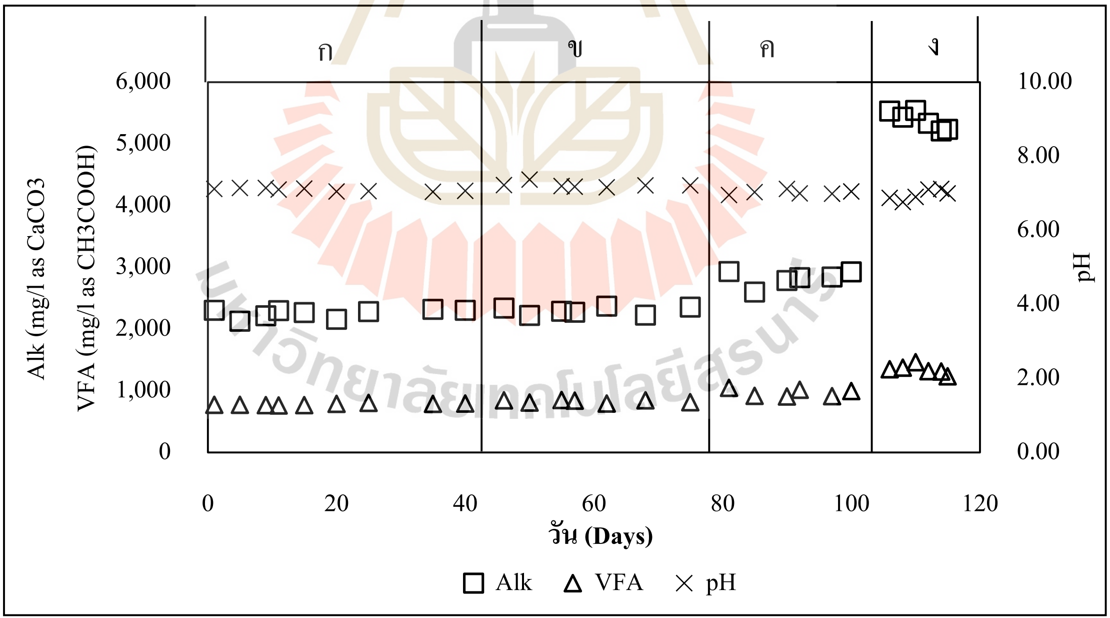
4.5.1 สภาพด่างทั้งหมด (Alalinity) และกรดอินทรีย์ระเหย (VFA)

จากรูปที่ 4.19 และตารางที่ 4.19 แสดงถึงสภาพด่างทั้งหมด (Alalinity) และกรดอินทรีย์ระเหย (VFA) ที่ภาระบรรทุกสารอินทรีย์ (OLR) ดังนี้ 0.90 1.20 1.81 และ 3.61 $kgVS_{added}\ m^{-3}d^{-1}$ พบว่า สภาพด่างทั้งหมด (Alalinity) มีค่าแตกต่างกันอย่างน้อย 2 OLR อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 (p-value < 0.05) โดยมีค่าเฉลี่ยที่ 2,252 2,297 2,821 และ 5,383 mg/L as $CaCO_3$ ตามลำดับ โดยที่ OLR 0.90 และ 1.20 $kgVS_{added}\ m^{-3}d^{-1}$ มีค่าเฉลี่ยไม่แตกต่างกัน ส่วนค่าความเข้มข้นค่ากรดอินทรีย์ระเหย (VFA) ในแต่ละ OLR มีค่าแตกต่างกันอย่างนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 (p-value < 0.05) เช่นเดียวกัน โดยมีค่าเฉลี่ยที่ 780 828 966 และ1,342 mg/L as HAc ตามลำดับ และมีค่าไม่แตกต่าง

กันที่ OLR เท่ากับ 0.90 และ 1.20 kgVS$_{added}$ m^{-3}d^{-1} เนื่องมาจากภาระบรรทุกสารอินทรีย์ไม่ต่างกันมากนัก โดยที่ OLR เท่ากับ 3.61 kgVS$_{added}$ m^{-3}d^{-1} มีค่า Alk และVFA สูงที่สุดที่ 5,545 mg/L as $CaCO_3$ และ 1,461 mg/L as HAc ตามลำดับ แต่พบว่ามีค่า VFA/Alk ที่ 0.25 ซึ่งอยู่ในสภาวะที่ระบบยังสามารถรักษาเสถียรภาพไว้ได้อยู่ (Lossie and Pütz, 2008)

ตารางที่ 4.20 สภาพด่างทั้งหมด (Alalinity) และกรดอินทรีย์ระเหย (VFA) ที่อัตราบรรทุกสารอินทรีย์ต่าง ๆ

OLR (kgVS$_{added}$ m^{-3}d^{-1})	Alk (mg/L as C_aCO_3)					VFA (mg/L as as HAc)					VFA /Alk
	n	เฉลี่ย	ต่ำสุด	สูงสุด	s.d.	n	เฉลี่ย	ต่ำสุด	สูงสุด	s.d.	
0.90	9	2,252	2,125	2,319	70	9	780	761	805	15	0.35
1.20	7	2,297	2,221	2,371	60	7	828	792	853	23	0.36
1.81	6	2,821	2,601	2,932	121	6	966	905	1,050	62	0.34
3.61	6	5,383	5,212	5,545	144	6	1,342	1,236	1,461	75	0.25



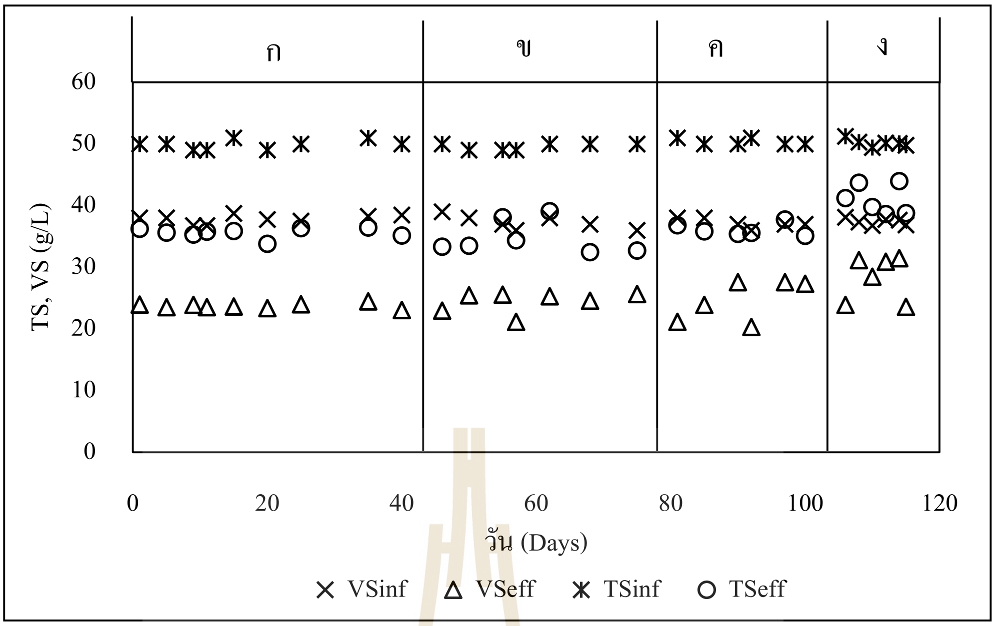
รูปที่ 4.19 สภาพด่างทั้งหมด (Alkalinity) และกรดอินทรีย์ระเหย (VFA) ที่ภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆ (ก) 0.90 (ข) 1.20 (ค) 1.81 และ (ง) 3.61 kgVS$_{added}$ m^{-3}d^{-1}

4.5.2 ประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งทั้งหมด (TS) และของแข็งระเหยทั้งหมด (VS)

จากผลการทดลองดังรูปที่ 4.20 และตารางที่ 4.20 แสดงปริมาณของแข็งระเหย (VS) ในถังปฏิกิริยาที่ภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่าง ๆ พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัด VS มีความแตกต่างกันอย่างน้อย 2 OLR อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 (p-value = 0.011) โดยพบว่าที่ OLR สูงสุด 3.61 $kgVS_{added}$ $m^{-3}d^{-1}$ มีค่า VS ค่อนข้างผันผวนซึ่งมีค่าประสิทธิภาพในการกำจัดแตกต่างกันจากทุก ๆ OLR โดยมีค่าเฉลี่ยที่ร้อยละ 24.54 ±9.69 ส่วนใน OLR อื่น ๆ จะมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ร้อยละ 37.22±1.64, 34.56±4.81 และ 33.66±9.12 ตามลำดับ ซึ่งเห็นชัดได้ว่าเมื่อเพิ่มให้ OLR มีค่าสูงที่สุด ประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งระเหยมีค่าลดต่ำลงร้อยละ 10 จากค่าเฉลี่ย ซึ่งสอดคล้องกับค่า VFA ที่เกิดขึ้นสะสมในระบบมากขึ้นดังหัวข้อที่ผ่านมา ส่วนประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งทั้งหมด มีค่าประสิทธิภาพการกำจัดเฉลี่ยแตกต่างกัน 2 OLR (p-value < 0.05) มีค่าเฉลี่ยที่ร้อยละ 28.59±1.33, 29.78±5.69, 28.30±2.08 และ18.24±4.55 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.21 ปริมาณของแข็งทั้งหมดและของแข็งระเหยทั้งหมดที่อัตราบรรทุกสารอินทรีย์ต่าง ๆ

OLR ($kgVS_{added}$ $m^{-3}d^{-1}$)	TSinf (g/L)					TSeff (g/L)					Eff. (%)
	n	เฉลี่ย	ต่ำสุด	สูงสุด	s.d.	n	เฉลี่ย	ต่ำสุด	สูงสุด	s.d.	
0.90	9	49.89	49.29	50.49	0.78	9	35.63	35.00	36.25	0.82	28.59
1.20	7	49.57	49.08	50.07	0.53	7	34.80	32.31	37.29	2.69	29.78
1.81	6	50.33	49.79	50.88	0.52	6	31.38	30.46	32.30	1.01	28.29
3.61	6	50.17	49.53	50.81	0.61	6	36.47	34.56	38.37	2.38	18.24
OLR	VSinf (g/L)					VSeff (g/L)					Eff. (%)
	n	เฉลี่ย	ต่ำสุด	สูงสุด	s.d.	n	เฉลี่ย	ต่ำสุด	สูงสุด	s.d.	
0.90	9	37.80	37.26	38.35	0.71	9	23.72	23.41	24.03	0.40	37.22
1.20	7	37.29	36.26	38.31	1.11	7	24.38	22.81	25.96	1.70	34.56
1.81	6	37.17	36.38	37.96	0.75	6	24.65	21.13	28.16	3.35	33.66
3.61	6	37.42	36.87	37.97	0.52	6	28.24	24.41	32.07	3.65	24.54



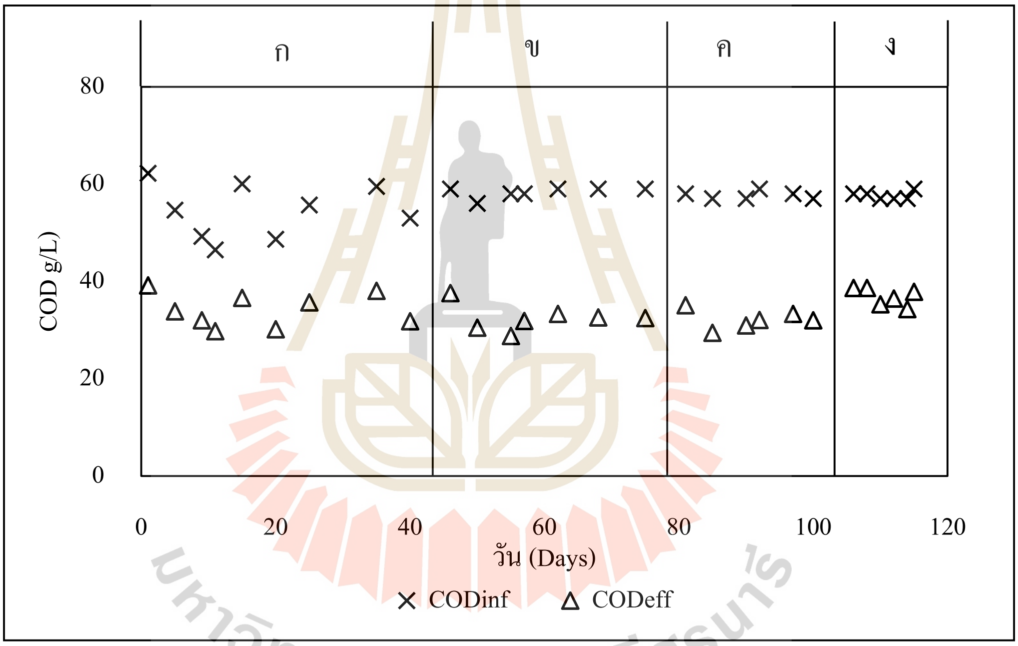
รูปที่ 4.20 ปริมาณของแข็งทั้งหมดและของแข็งระเหยทั้งหมด ที่ภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆ (ก) 0.90 (ข) 1.20 (ค) 1.81 และ (ง) 3.61 kgVS$_{added}$ m^{-3}d^{-1}

4.5.3 ประสิทธิภาพในการกำจัด COD

จากรูปที่ 4.21 และตารางที่ 4.21 แสดงค่าความเข้มข้นของ COD ในถังปฏิกิริยา ที่อัตราบรรทุกสารอินทรีย์ต่าง ๆ พบว่ามีค่าเฉลี่ยที่ 34.12 32.44 32.14 และ 36.87 g/L และมีประสิทธิภาพการกำจัดที่ร้อยละ 37.22±1.64 44.37±4.19 44.28±3.07 และ 36.09±2.54 g/L ตามลำดับ โดยมีค่าสูงที่สุดที่ 44.37 g/L และมีประสิทธิภาพในการผลิตแก๊สมีเทนสูงสุดด้วยเช่นกัน

ตารางที่ 4.22 ปริมาณ COD ในถังปฏิกิริยา ที่อัตราบรรทุกสารอินทรีย์ต่าง ๆ

OLR ($kgVS_{added}$ $m^{-3}d^{-1}$)	CODinf (g/L)					CODeff (g/L)					Eff. (%)
	n	เฉลี่ย	ต่ำสุด	สูงสุด	s.d.	n	เฉลี่ย	ต่ำสุด	สูงสุด	s.d.	
0.90	9	54.38	50.13	58.62	5.52	9	34.12	31.48	36.76	3.43	37.22
1.20	7	58.29	57.26	59.31	1.11	7	32.44	29.91	34.97	2.74	44.37
1.81	6	57.67	56.81	58.52	0.82	6	32.14	30.09	34.19	1.95	44.28
3.61	6	57.67	56.81	58.52	0.82	6	36.87	34.97	38.77	1.81	36.08



รูปที่ 4.21 ปริมาณความเข้มข้น COD ที่ภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆ

(ก) 0.90 (ข) 1.20 (ค) 1.81 และ (ง) 3.61 kgVS $m^{-3}d^{-1}$

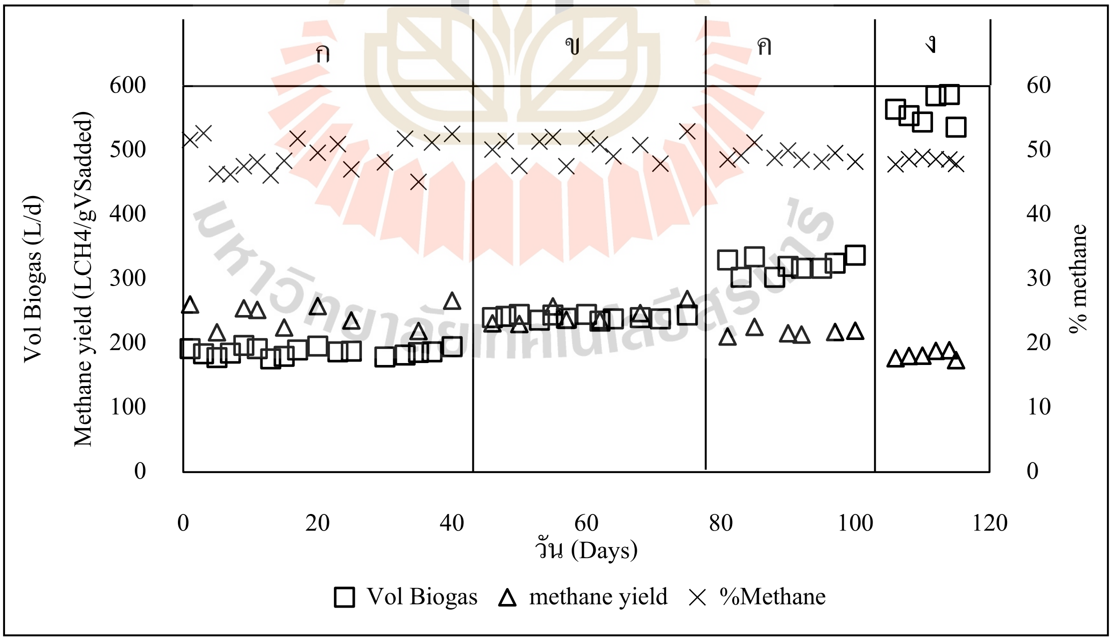
4.5.4 ประสิทธิภาพในการผลิตแก๊สชีวภาพ

จากตารางที่ 4.26 และ รูปที่ 4.20 แสดงความสัมพันธ์ของปริมาณการเกิดแก๊สมีเทนในระบบต่อวันที่ภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่าง ๆ โดยพบว่ามีปริมาณแก๊สชีวภาพที่เกิดขึ้น 189.33 241.00 327.33 และ 561.67 L/d ที่ OLR เท่ากับ 0.90 1.20 1.81 และ 3.61 $kgVS_{added}$ $m^{-3}d^{-1}$

ตามลำดับ โดยมีค่าความเข้มข้นของมีเทนอยู่ในช่วงร้อยละ 48.44 – 50.29 เมื่อพิจารณาถึงประสิทธิภาพในการผลิตแก๊สมีเทน (methane yield, $LCH_4/kgVS_{added}$)พบว่ามีค่าลดต่ำลงเมื่อภาระบรรทุกสารอินทรีย์เพิ่มมากขึ้นโดยมีค่า 243.24 244.06 217.40 และ 181.75 ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพในการผลิตแก๊สมีเทนมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มภาระสารอินทรีย์มากขึ้น (Linke, 2006)

ตารางที่ 4.23 ปริมาณแก๊สชีวภาพที่เกิดขึ้นเฉลี่ยต่อวัน ค่าความเข้มข้นแก๊สมีเทน และประสิทธิภาพในการเกิดแก๊สมีเทนต่อของแข็งระเหย ที่ภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆ

OLR ($kgVS_{added}$ $m^{-3}d^{-1}$)	Biogas Production (L/d)	Methane Production (L/d)	Methane Content (%)	Methane yield ($LCH_4/kgVS_{added}$)	Methane yield ($LCH_4/kgVS_{destroyed}$)
0.90	189.33	91.92	48.51	243.24	495.90
1.20	241.00	121.21	50.29	244.06	541.16
1.81	327.33	161.62	49.37	217.40	508.16
3.61	561.67	272.11	48.44	181.75	626.68



รูปที่ 4.22 ประสิทธิภาพในการผลิตแก๊สชีวภาพ ที่ภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆ (ก) 0.90 (ข) 1.20 (ค) 1.81 และ (ง) 3.61 $kgVS_{added}$ $m^{-3}d^{-1}$

4.5.5 จลศาสตร์การย่อยสลายทางชีวภาพของระบบผลิตแก๊สชีวภาพ

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงจลศาสตร์การย่อยสลายทางชีวภาพของระบบผลิตแก๊สชีวภาพจากฟางข้าวโดยใช้ระบบอัลตราโซนิคช่วยในการย่อยสลายขั้นต้น โดยใช้แบบจำลองจลศาสตร์อันดับที่ 1 หาความสัมพันธ์ของการผลิตแก๊สมีเทนที่เกิดขึ้นในระบบที่ภาระบรรทุกสารอินทรีย์ ต่าง ๆ (Chynoweth et al., 1993; Jewell et al., 1993; Linke, 2006; Angelidaki et al., 2009; Brown et al. 2012) ดังแสดงในสมการที่ 4.16 – 4.21 (Linke, 2006)

$$Vr\frac{dc}{dt} = m_0 \cdot c_0 - m_0 \cdot c + Vr \cdot r(c_0) \tag{4.16}$$

$$-\frac{dc}{dt} = r(c) = -k \cdot c \tag{4.17}$$

$$HRT = \frac{1}{k} \cdot \left[\frac{c_0}{c} - 1\right] \tag{4.18}$$

จากนั้นทำการหาความสัมพันธ์โดยการพลอตกราฟระหว่าง Substrate concentration (c) และ Biogas yield (y) ที่เวลา t จะได้

$$\frac{c_0 - c(t)}{c_0} = \frac{y(t)}{y_m} \tag{4.19}$$

$$\frac{c_0}{c} = \frac{y_m}{y_m - y} \tag{4.20}$$

$$OLR = \frac{k.c_0}{y / (y_m - y)} \tag{4.21}$$

โดยที่ c_0 = VS concentration of the input ($g.L^{-1}$)

y_m = maximum methane yield ($ml.gVS^{-1}$)

y = methane yield ($ml.gVS^{-1}$)

k = first order reaction rate of constant (d^{-1})

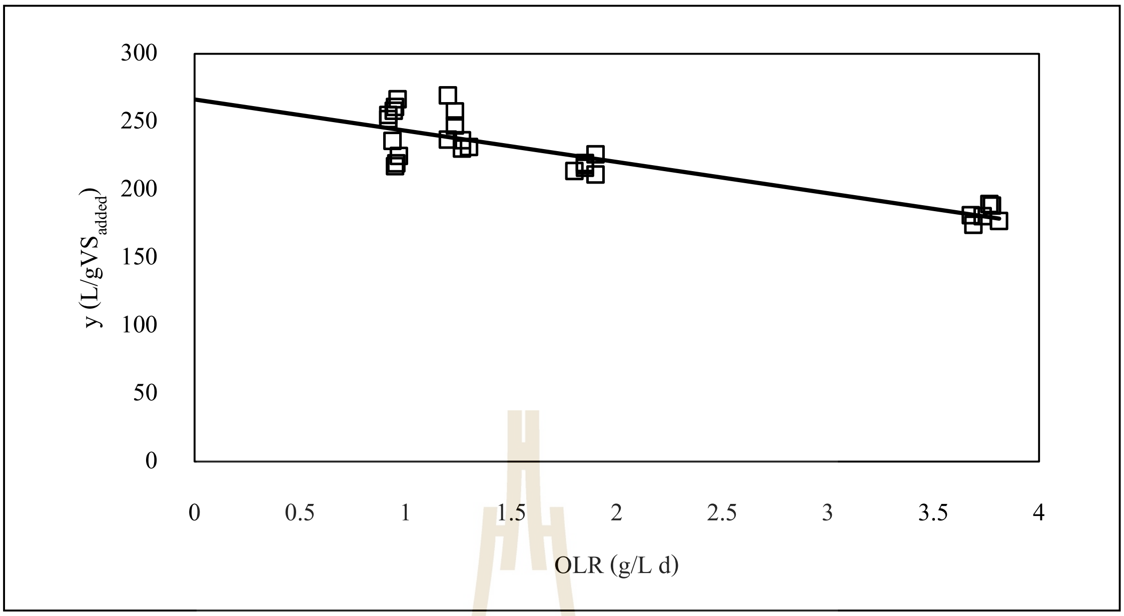
OLR = Organic (VS) loading rate ($g.l^{-1}.d^{-1}$)

c = VS concentration in the reactor (g/L)

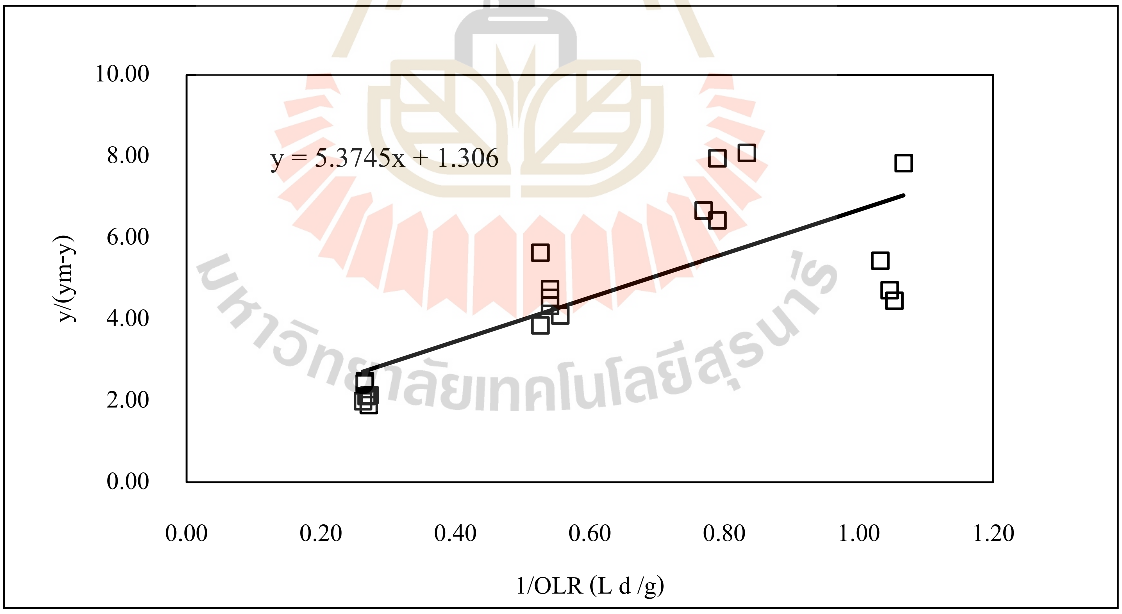
HRT = hydraulic retention time (d)

พลอตกราฟระหว่าง $y/(y_m-y)$ และ HRT หรือ 1/OLR เพื่อหาความชันของกราฟจะได้ค่า $k.c_0$ หรือ k ของระบบโดยจากรูปที่ 4.23 เป็นกราฟที่แสดงถึงความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพการเกิดแก๊สมีเทนต่อของแข็งระเหยในถังปฏิกิริยาที่ภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่าง ๆ ทำให้ทราบถึงประสิทธิภาพในการเกิดแก๊สมีเทนจะมีค่าลดต่ำลงเมื่อภาระบรรทุกสารอินทรีย์เพิ่มมากขึ้นโดยในเส้นกราฟความสัมพันธ์นี้จะตัดแกน y ที่ OLR มีค่าน้อยมาก ๆ (มีค่าเข้าใกล้ศูนย์) แสดงถึงจุดที่มีประสิทธิภาพในการผลิตแก๊สมีเทนสูงที่สุด Maximum VS Methane yield (y_m) โดยในงานวิจัยนี้กำหนดให้มีค่าเท่ากับผลจากการทดสอบ BMP ของชุดทดสอบที่ใช้การย่อยสลายขั้นต้นแบบผสมผสานระหว่างความร้อนและคลื่นอัลตราโซนิค โดยมีค่า 266.03 $mLCH_4/gVS_{added}$ และกำหนดให้ค่าความเข้มข้นของวัตถุดิบเป็นค่าเฉลี่ยของ VS ที่ป้อนเข้าสู่ระบบ (c_0) มีค่าเฉลี่ย 37.46±0.8 g/L

เมื่อทำการพลอตค่าความสัมพันธ์ของค่าประสิทธิภาพการเกิดแก๊สมีเทนที่ภาระบรรทุกสารอินทรีย์ใด ๆ $y/(y_m-y)$ และ 1/OLR ดังรูปที่ 4.24 จะได้สมการความสัมพันธ์ y = 5.3745x + 1.306 และเส้นกราฟความชันของ $k.c_0$ มีค่า 5.3745 จากนั้นแทนที่ c_0 ด้วย 37.46±0.8 g/L จะได้ค่าคงที่ k = 0.1435 d^{-1} ซึ่งมีค่าสูงเมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Brown et al. (2012) ที่ทำการศึกษาเปรียบเทียบระบบหมักแบบไร้อากาศแบบเปียกและแบบแห้งในถังปฏิกิริยาขนาด 2 ลิตรโดยใช้วัสดุชีวมวลหลายประเภท โดยเมื่อเทียบกับ Wheat straw มีค่า k เท่ากับ 0.0822 และ 0.0854 d^{-1} สำหรับระบบแบบเปียกและแบบแห้ง ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Zhang ea al., (2014) มีค่า k อยู่ในช่วง 0.1-0.19 d^{-1} ในการทดสอบการผลิตแก๊สชีวภาพจาก Food waste ด้วยระบบแบบ High-rate ขนาดถังปฏิกิริยา 5.8 m^3โดยให้ความเห็นว่าปัจจัยที่ควบคุมได้ยากสำหรับระบบขนาด Pilot scale คือ การควบคุมสภาวะการ กวนผสมและอุณหภูมิภายนอก



รูปที่ 4.23 ประสิทธิภาพการเกิดแก๊สมีเทนที่ภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่าง ๆ



รูปที่ 4.24 กราฟความสัมพันธ์ของ $y/(y_m\text{-}y)$ และ 1/OLR

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

4.5.6 สรุปผลการเดินระบบ

ถังปฏิกรณ์แบบกวนสมบูรณ์ที่พัฒนาเป็นต้นแบบระบบผลิตแก๊สชีวภาพจากฟางข้าวนี้ ประกอบด้วย ใบกวนแบบ Radial flow ในถังทรงสูง พร้อมติดตั้ง Baffle เพื่อให้เกิดการกวนแบบ Axial flow ไปพร้อมกัน โดยออกแบบให้ระบบสามารถรับแรงดันรวมสูงสุดที่ 3 kg/cm^3 ใช้วัสดุเป็น Stainless steel SUS 304 @90ºC และมีรัศมีภายนอกจากการออกแบบขนาดของถังเท่ากับ 760 mm มีความหนาของถัง 3 mm โดยมีระบบย่อยสลายขั้นต้นด้วยคลื่นอัลตราโซนิค ที่เป็นถังปฏิกิริยาทรงสี่เหลี่ยมขนาด 20x70x25 cm ปริมาตร 40 ลิตร ประกอบด้วยหัว Transducer จำนวน 30 หัว มีกำลังส่งรวม 1000 W ที่ความถี่ 37 kHz

การทดสอบการเดินระบบผลิตแก๊สชีวภาพโดยใช้คลื่นอัลตราโซนิคร่วมกับการต้มในการย่อยสลายขั้นต้น ที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 0.9, 1.20, 1.81 และ 3.61 $kgVS_{added}m^{-3}d^{-1}$ มีประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งระเหยง่าย (VS) อยู่ในช่วงร้อยละ 24.54 – 37.22 มีประสิทธิภาพในการกำจัด COD อยู่ในช่วงร้อยละ 36.08 – 44.37 และมีประสิทธิภาพในการผลิตแก๊สมีเทนอยู่ในช่วง 181.75 – 244.06 $LCH_4/kgVS_{added}$ ซึ่งมีค่าสูงสุดที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์1.2 $kgVS_{added}m^{-3}d^{-1}$ โดยมีค่าจลศาสตร์การย่อยสลายทางชีวภาพของระบบ (k) เท่ากับ 0.1435 d^{-1}

บทที่ 5
สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

5.1.1 สมบัติของฟางข้าว

ฟางข้าวเป็นวัสดุลิกโนเซลลูโลสที่มีโครงสร้างผนังเซลล์ที่แข็งแรง การนำฟางข้าวไปใช้เป็นวัตถุดิบในการแปรรูปให้เป็นพลังงานด้วยกระบวนการทางชีวเคมีที่อาศัยจุลินทรีย์ไปย่อยสลายนั้น จำเป็นต้องมีกระบวนการบำบัดขั้นต้นก่อน นอกจากนั้น พบว่า ฟางข้าวมีองค์ประกอบที่ระเหยได้ อยู่ในสัดส่วนร้อยละ 71 ที่สามารถเปลี่ยนรูปไปเป็นแก๊สชีวภาพได้ง่าย แต่เมื่อพิจารณาค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N ratio) พบว่า มีไนโตรเจนไม่เพียงพอในการนำฟางข้าวไปใช้ นอกจากจะต้องทำการบำบัดขั้นต้นแล้ว ยังจำเป็นต้องเติมไนโตรเจนเข้าไปในระบบให้เพียงพอต่อความต้องการของจุลินทรีย์ด้วย ส่วนใหญ่แหล่งไนโตรเจนจะนิยมใช้ปุ๋ยยูเรีย

5.1.2 ผลกระทบของการย่อยสลายขั้นต้นด้วยความร้อน คลื่นอัลตราโซนิค และคลื่นอัลตราโซนิคร่วมกับความร้อนต่อฟางข้าว

5.1.2.1 ผลกระทบต่อองค์ประกอบลิกโนเซลลูโลส

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบของเฮมิเซลลูโลสที่คงเหลือ พบว่า ฟางข้าวมีองค์ประกอบเฮมิเซลลูโลสร้อยละ 71.70 เมื่อผ่านการย่อยสลายขั้นต้นด้วยความร้อน โดยการต้ม 10 นาที ต้ม 20 นาที การย่อยสลายด้วยไอน้ำ 15 นาที การใช้คลื่นอัตราโซนิคที่ความถี่ 37 kHz และ102 kHz การใช้คลื่นอัลตราโซนิคร่วมกับการต้ม 10 นาที ความถี่ 37 kHz และ 102 kHz มีค่าองค์ประกอบเฮมิเซลลูโลส ร้อยละ 35.13 34.95 34.67 30.95 33.02 32.72 และ 33.80 ตามลำดับ โดยมีค่าเฮมิเซลลูโลสลดลงร้อยละ 15.76 16.19 16.86 25.78 20.82 21.53 และ 18.94 ตามลำดับ ทั้งนี้จะเห็นว่าการย่อยสลายขั้นต้นด้วยคลื่นอัลตราโซนิค จะสามารถทำให้องค์ประกอบของเฮมิเซลลูโลสลดลง และจะมีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้นเมื่อทำการย่อยสลายด้วยคลื่นอัลตราโซนิค ร่วมกับการต้ม

5.1.2.2 ผลกระทบต่อความมีเสถียรภาพทางความร้อน

การย่อยสลายขั้นต้นของฟางข้าวมี 3 วิธีข้างต้น พบว่า ฟางข้าวที่ผ่านการย่อยสลายขั้นต้นจะมีความเสถียรภาพทางความร้อนเพิ่มขึ้น เนื่องมาจากเฮมิเซลลูโลส ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่ย่อยสลายได้ง่ายด้วยความร้อน (ต่ำกว่า 100 °C) ถูกย่อยสลายออกจากฟางข้าวใน

กระบวนการย่อยสลายขั้นต้นไปแล้ว ทั้งนี้ยืนยันได้ว่า ณ ขั้นตอนการย่อยสลายขั้นต้นด้วยคลื่นอัลตราโซนิคร่วมกับความร้อนจะมีการย่อยสลายเฮมิเซลลูโลสออกไปมากที่สุด

5.1.2.3 ผลกระทบต่อโครงสร้างทางกายภาพ

การย่อยสลายขั้นต้นของฟางข้าวทั้ง 3 วิธี ข้างต้น ทำให้โครงสร้างทางกายภาพของฟางข้าวมีขนาดเล็กลง และมีความพรุนเพิ่มขึ้น เมื่อทำการตรวจสอบโดยการส่องกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (FE-SEM)

5.1.3 ศักยภาพการผลิตแก๊สมีเทนด้วยวิธีทางชีวเคมีของฟางข้าวที่ผ่านการย่อยสลายขั้นต้น

การประยุกต์ใช้คลื่นอัลตราโซนิคร่วมกับความร้อนโดยวิธีการต้ม ทำให้ศักยภาพการผลิตแก๊สมีเทนของฟางข้าวดีขึ้น กล่าวคือ เมื่อทำการย่อยสลายขั้นต้นด้วยวิธีการต้ม 10 นาที ต้ม 20 นาที การย่อยสลายขั้นต้นด้วยไอน้ำ การใช้คลื่นอัลตราโซนิคที่ความถี่ 37 kHz และ 102 kHz มีศักยภาพในการผลิตแก๊สมีเทนสะสม 248.83 255.27 256.13 250.36 243.79 266.30 และ 258.07 $mLCH_4\ gVS^{-1}_{added}$ ที่สภาวะมาตรฐาน (STP) ในช่วงระยะเวลา 45 วัน ตามลำดับ โดยมีค่าเพิ่มจากชุดควบคุม (205.30 $mLCH_4\ gVS^{-1}_{added}$) ร้อยละ 21.20 24.34 24.76 21.95 18.75 29.58 และ 24.76 ตามลำดับ ซึ่งการย่อยสลายขั้นต้นด้วยคลื่นอัลตราโซนิคร่วมกับการต้ม 10 นาที จะมีประสิทธิภาพในการเพิ่มปริมาณการเกิดแก๊สมีเทนสะสมได้มากถึง ร้อยละ 29.58

5.1.4 แบบจำลองสภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการย่อยสลายขั้นต้นด้วยคลื่นอัลตราโซนิค

แบบจำลองสภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการย่อยสลายขั้นต้นด้วยคลื่นอัลตราโซนิคนั้น เป็นการศึกษาปริมาณการเกิดแก๊สมีเทนสะสมที่การย่อยสลายขั้นต้นที่สภาวะต่าง ๆ แล้วนำมาวิเคราะห์เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังของคลื่นอัลตราโซนิคและระยะเวลาที่ใช้ในการย่อยสลายขั้นต้น โดยการสร้างแบบจำลองพื้นผิวตอบ (Response surface model : RSM) และวางแผนการทดลองแบบ central composite design (CCD) โดยผลของการทดสอบแบบจำลองพื้นผิวผลตอบมีค่า adj. R^2 เท่ากับ 0.96 และ 0.90 สำหรับแบบจำลองความสัมพันธ์ของปริมาณการเกิดแก๊สมีเทนสะสมที่ได้จากการทดสอบการย่อยสลายขั้นต้นด้วยคลื่นอัลตราโซนิคเพียงอย่างเดียวที่ความถี่ 37 kHz และ 102 kHz ตามลำดับ และมีค่า adj. R^2 เท่ากับ 0.96 และ 0.94 สำหรับการย่อยสลายขั้นต้นด้วยคลื่นอัลตราโซนิคร่วมกับการต้ม ตามลำดับ ผลการทดลองพบว่าปัจจัยที่ทำให้เกิดการผลิตแก๊สมีเทนมาจากกำลังส่งที่มีค่าสูงกว่า 160 W ขึ้นไป และระยะเวลาในการส่งคลื่นที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้อัตราการเกิดแก๊สมีเทนเพิ่มขึ้นเช่นกัน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

5.1.5 การพัฒนาต้นแบบระบบผลิตแก๊สชีวภาพจากฟางข้าว โดยใช้ถังปฏิกรณ์แบบกวนสมบูรณ์ควบคู่กับการย่อยสลายขั้นต้น โดยใช้คลื่นอัลตราโซนิค

ถังปฏิกรณ์แบบกวนสมบูรณ์ที่พัฒนาเป็นต้นแบบระบบผลิตแก๊สชีวภาพจากฟางข้าวนี้ ประกอบด้วย ใบกวนแบบ radial flow ในถังทรงสูง พร้อมติดตั้ง Baffle เพื่อให้เกิดการกวนแบบ axial flow ไปพร้อมกัน โดยจะใช้วัสดุเป็น stainless steel SUS 304 @90ºC ซึ่งมีรัศมีภายนอกจากการออกแบบขนาดของถังเท่ากับ 760 mm

การทดสอบการเดินระบบผลิตแก๊สชีวภาพโดยใช้คลื่นอัลตราโซนิคร่วมกับการต้มในการย่อยสลายขั้นต้น ที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 0.9, 1.20, 1.81 และ 3.61 $kgVS_{added}m^{-3}d^{-1}$ มีประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งระเหยง่าย (VS) อยู่ในช่วงร้อยละ 24.54 – 37.22 มีประสิทธิภาพในการกำจัด COD อยู่ในช่วงร้อยละ 36.08 – 44.37 และมีประสิทธิภาพในการผลิตแก๊สมีเทนอยู่ในช่วง 181.75 – 244.06 $LCH_4/kgVS_{added}$ ซึ่งมีค่าสูงสุดที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 1.2 $kgVS_{added}m^{-3}d^{-1}$ โดยมีค่าจลศาสตร์การย่อยสลายทางชีวภาพของระบบ (k) เท่ากับ 0.1435 d^{-1}

5.2 ข้อเสนอแนะ

1) ระบบย่อยสลายขั้นต้น โดยใช้คลื่นอัลตราโซนิคที่ใช้ในการศึกษาในครั้งนี้ มีการทำงานแบบกะและมีถังปฏิกิริยาทรงสี่เหลี่ยม ทำให้การส่งคลื่นอัลตราโซนิคตลอดหน้าตัดถังปฏิกรณ์การย่อยสลายขั้นต้นดังกล่าวไม่ทั่วถึง ในการพัฒนาถังปฏิกรณ์การย่อยสลายขั้นต้นด้วยคลื่นอัลตราโซนิคครั้งต่อไป ควรเลือกใช้ถังปฏิกรณ์แบบ CSTR และเลือกใช้ชุด ULTRASONIC TRANSDUCER แบบแท่ง ซึ่งการกระจายคลื่นจะมีสถานการณ์กระจายรอบแกน ทำให้คลื่นอัลตราโซนิคส่งผ่านไปได้ทั่วถึง อีกทั้งถังปฏิกรณ์แบบ CSTR จะมีการกวนผสม ทำให้ฟางข้าวสัมผัสกับคลื่นได้เต็มที่และทั่วถึง และไม่ทำให้วัตถุดิบตกตะกอน

2) งานวิจัยนี้ยังขาดการวิเคราะห์ทางด้านเศรษฐศาสตร์ ซึ่งรวมถึงเศรษฐศาสตร์สิ่งแวดล้อมที่ประเมินมูลค่าได้เป็นตัวเลข เพื่อสร้างแรงจูงใจในการลงทุน

3) การประยุกต์ใช้คลื่นอัลตราโซนิค ในการย่อยสลายขั้นต้นของฟางข้าว ซึ่งเป็นวัสดุ ลิกโนเซลลูโลส สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับการสกัดเฮมิเซลลูโลสออกจากชีวมวล เพื่อนำไปใช้เป็นวัตถุดิบตั้งต้นในการแปรรูปไปใช้ประโยชน์ที่เพิ่มมูลค่าต่อไปได้

รายการอ้างอิง

สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.2549. **สถิติการเกษตรของประเทศไทย ปีเพาะปลูก 2548/2549** กรุงเทพฯ: ศูนย์สารสนเทศการเกษตร, กระทรวงเกษตรและสหกรณ์

สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.2550. **ผลพยากรณ์การผลิตพืชเศรษฐกิจที่สำคัญปีเพาะปลูก 2550/51** แหล่งที่มา: http://www.oae.go.th/mis/Forecast/thai/all/wh_01.htm. 10 ธันวาคม 2550.

สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. 2551. **สถิติผลผลิตข้าวโลก**. กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, ศูนย์สารสนเทศการเกษตร. เอกสารสถิติการเกษตร

อรวรรณ ศิริรัตน์พิริยะ. 2541. **ผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศและสิ่งแวดล้อมโลกจากก๊าซปฏิกิริยาเรือนกระจกต่อการทำนาข้าว**, สถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม, กรุงเทพมหานคร : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

Abou-El-Enin, O. H., Fadel, J. G., & Mackill, D. J. (1999). Differences in chemical composition and fibre digestion of rice straw with, and without, anhydrous ammonia from 53 rice varieties. **Animal Feed Science and Technology**, 79(1–2), 129-136.

Ademark, P., Varga, A., Medve, J., Harjunpää, V., Torbjörn, D., Tjerneld, F., & Stålbrand, H. (1998). Softwood hemicellulose-degrading enzymes from Aspergillus niger: Purification and properties of a β-mannanase. **Journal of Biotechnology**, 63(3), 199-210.

Adorjan, I., Sjoberg, J., Rosenau, T., Hofinger, A., & Kosma, P. (2004). Kinetic and chemical studies on the isomerization of monosaccharides in N-methylmorpholine-N-oxide (NMMO) under Lyocell conditions. **Carbohydr Res**, 339(11), 1899-1906.

Agbor, V. B., Cicek, N., Sparling, R., Berlin, A., & Levin, D. B. (2011). Biomass pretreatment: Fundamentals toward application. **Biotechnology Advances**, 29(6), 675-685.

Aliyu, M., & Hepher, M. J. (2000). Effects of ultrasound energy on degradation of cellulose material. **Ultrason Sonochem**, 7(4), 265-268.

Alvira, P., Tomás-Pejó, E., Ballesteros, M., & Negro, M. J. (2010). Pretreatment technologies for an efficient bioethanol production process based on enzymatic hydrolysis: A review.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

Bioresour Technol, 101(13), 4851-4861.

Angelidaki, I., Alves, M., Bolzonella, D., Borzacconi, L., Campos, J. L., Guwy, A. J., . . . van Lier, J. B. (2009). Defining the biomethane potential (BMP) of solid organic wastes and energy crops: a proposed protocol for batch assays. **Water Sci Technol**, 59(5), 927-934.

Ariunbaatar, J., Panico, A., Esposito, G., Pirozzi, F., & Lens, P. N. L. (2014). Pretreatment methods to enhance anaerobic digestion of organic solid waste. **Applied Energy**, 123(0), 143-156.

Avellar, B. K., & Glasser, W. G. (1998). Steam-assisted biomass fractionation. I. Process considerations and economic evaluation. **Biomass and Bioenergy**, 14(3), 205-218.

Azzam, A. M., & Nasr, M. I. (1993). Physicothermochemical Pretreatments of Food Processing Waste for Enhancing Anaerobic Digestion and Biogas Generation. **Journal of Environmental Science and Health . Part A: Environmental Science and Engineering and Toxicology**, 28(8), 1629-1649.

Badshah, M., Lam, D. M., Liu, J., & Mattiasson, B. (2012). Use of an Automatic Methane Potential Test System for evaluating the biomethane potential of sugarcane bagasse after different treatments. **Bioresour Technol**, 114, 262-269.

Barjenbruch, M., & Kopplow, O. (2003). Enzymatic, mechanical and thermal pre-treatment of surplus sludge. **Advances in Environmental Research**, 7(3), 715-720.

Baxi, P. B., & Pandit, A. B. (2012). Using cavitation for delignification of wood. **Bioresour Technol**, 110(0), 697-700.

Bobleter, O. (1994). Hydrothermal degradation of polymers derived from plants. **Progress in Polymer Science**, 19(5), 797-841.

Brown, D., Shi, J., & Li, Y. (2012). Comparison of solid-state to liquid anaerobic digestion of lignocellulosic feedstocks for biogas production. **Bioresour Technol**, 124(0), 379-386.

Bruni, E., Jensen, A. P., & Angelidaki, I. (2010). Comparative study of mechanical, hydrothermal, chemical and enzymatic treatments of digested biofibers to improve biogas production. **Bioresour Technol**, 101(22), 8713-8717.

Buffiere, P., Loisel, D., Bernet, N., & Delgenes, J. P. (2006). Towards new indicators for the prediction of solid waste anaerobic digestion properties. **Water Sci Technol**, 53(8), 233-241.

Bussemaker, M. J., & Zhang, D. (2013). Effect of Ultrasound on Lignocellulosic Biomass as a Pretreatment for Biorefinery and Biofuel Applications. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, 52(10), 3563-3580.

Cao, X. Q., Chen, J., Cao, Y. L., Zhu, J. Y., & Hao, X. D. (2006). Experimental study on sludge reduction by ultrasound. **Water Sci Technol**, 54(9), 87-93.

Cesaro, A., & Belgiorno, V. (2014). Pretreatment methods to improve anaerobic biodegradability of organic municipal solid waste fractions. **Chemical Engineering Journal**, 240(0), 24-37.

Chandra, R., Takeuchi, H., Hasegawa, T., & Kumar, R. (2012). Improving biodegradability and biogas production of wheat straw substrates using sodium hydroxide and hydrothermal pretreatments. **Energy**, 43(1), 273-282.

Chu, C. P., Lee, D. J., Chang, B.-V., You, C. S., & Tay, J. H. (2002). "Weak" ultrasonic pre-treatment on anaerobic digestion of flocculated activated biosolids. **Water Research**, 36(11), 2681-2688.

Chynoweth, D. P., Turick, C. E., Owens, J. M., Jerger, D. E., & Peck, M. W. (1993). Biochemical methane potential of biomass and waste feedstocks. **Biomass and Bioenergy**, 5(1), 95-111.

Cuissinat, C., & Navard, P. (2006). Swelling and Dissolution of Cellulose Part 1: Free Floating Cotton and Wood Fibres in N-Methylmorpholine-N-oxide–Water Mixtures. **Macromolecular Symposia**, 244(1), 1-18.

Dechrugsa, S., Kantachote, D., & Chaiprapat, S. (2013). Effects of inoculum to substrate ratio, substrate mix ratio and inoculum source on batch co-digestion of grass and pig manure. **Bioresour Technol**, 146(0), 101-108.

Donohoe, B. S., Tucker, M. P., Davis, M., & Stephen R. Decker1, M. E. H., and Todd B. Vinzant1. (2007). *Tracking lignin coalescence and migration through plant cell walls during pretreatment.* Paper presented at the The 29th Symposium on Biotechnology for Fuels and Chemicals (April 29 - May 2, 2007).

Duff, S. J. B., & Murray, W. D. (1996). Bioconversion of forest products industry waste cellulosics to fuel ethanol: A review. **Bioresour Technol**, 55(1), 1-33.

Elliott, A., & Mahmood, T. (2007). Pretreatment technologies for advancing anaerobic digestion

of pulp and paper biotreatment residues. **Water Research**, 41(19), 4273-4286.

Fengel, D., & Wegener, G. (1984). *Wood: chemistry, ultrastructure, reactions*: W. de Gruyter.

Gallipoli, A., & Braguglia, C. M. (2012). High-frequency ultrasound treatment of sludge: combined effect of surfactants removal and floc disintegration. **Ultrason Sonochem**, 19(4), 864-871.

Garcia-Aparicio, M. P., Ballesteros, I., Gonzalez, A., Oliva, J. M., Ballesteros, M., & Negro, M. J. (2006). Effect of inhibitors released during steam-explosion pretreatment of barley straw on enzymatic hydrolysis. **Appl Biochem Biotechnol**, 129-132, 278-288.

Garrote, G., Domínguez, H., & Parajó, J. C. (1999). Hydrothermal processing of lignocellulosic materials. **Holz als Roh- und Werkstoff**, 57(3), 191-202.

Gírio, F. M., Fonseca, C., Carvalheiro, F., Duarte, L. C., Marques, S., & Bogel-Łukasik, R. (2010). Hemicelluloses for fuel ethanol: A review. **Bioresour Technol**, 101(13), 4775-4800.

Goering, H. K., & Van Soest, P. J. (1970). *Forage Fiber Analyses (apparatus, Reagents, Procedures, and Some Applications)*: U.S. Agricultural Research Service.

Grabber, J. H. (2005). How Do Lignin Composition, Structure, and Cross-Linking Affect Degradability? A Review of Cell Wall Model Studies This paper was originally presented at the Lignin and Forage Digestibility Symposium, 2003 CSSA Annual Meeting, Denver, CO. **Crop Sci.**, 45(3), 820-831.

Grethlein, H. E. (1985). The Effect of Pore Size Distribution on the Rate of Enzymatic Hydrolysis of Cellulosic Substrates. **Nat Biotech**, 3(2), 155-160.

Hartmann, H., Angelidaki, I., & Ahring, B. K. (2000). Increase of anaerobic degradation of particulate organic matter in full-scale biogas plants by mechanical maceration. **Water Sci Technol**, 41(3), 145-153.

HAshimoto, A. G. (1986). Pretreatment of wheat straw for fermentation to methane. **Biotechnol Bioeng**, 28(12), 1857-1866.

Hatakeyama, H., Hirose, S., Hatakeyama, T., Nakamura, K., KobAshigawa, K., & Morohoshi, N. (1995). Biodegradable Polyurethanes from Plant Components. **Journal of Macromolecular Science, Part A**, 32(4), 743-750.

Himmelsbach, D. S., Khalili, S., & Akin, D. E. (2002). The use of FT-IR microspectroscopic

mapping to study the effects of enzymatic retting of flax (Linum usitatissimum L) stems. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, 82(7), 685-696.

Hong, Y.-S. T., Rosen, M. R., & Bhamidimarri, R. (2003). Analysis of a municipal wastewater treatment plant using a neural network-based pattern analysis. **Water Research**, 37(7), 1608-1618.

Hromadkova, Z., Kost'alova, Z., & Ebringerova, A. (2008). Comparison of conventional and ultrasound-assisted extraction of phenolics-rich heteroxylans from wheat bran. **Ultrason Sonochem**, 15(6), 1062-1068.

Izumi, K., Okishio, Y.-k., Nagao, N., Niwa, C., Yamamoto, S., & Toda, T. (2010). Effects of particle size on anaerobic digestion of food waste. **International Biodeterioration & Biodegradation**, 64(7), 601-608.

Jackowiak, D., Frigon, J. C., Ribeiro, T., Pauss, A., & Guiot, S. (2011). Enhancing solubilisation and methane production kinetic of switchgrass by microwave pretreatment. **Bioresour Technol**, 102(3), 3535-3540.

Jewell, W. J., Cummings, R. J., & Richards, B. K. (1993). Methane fermentation of energy crops: Maximum conversion kinetics and in situ biogas purification. **Biomass and Bioenergy**, 5(3–4), 261-278.

Kabel, M. A., Bos, G., Zeevalking, J., Voragen, A. G. J., & Schols, H. A. (2007). Effect of pretreatment severity on xylan solubility and enzymatic breakdown of the remaining cellulose from wheat straw. **Bioresour Technol**, 98(10), 2034-2042.

KaČuráková, M., Belton, P. S., Wilson, R. H., Hirsch, J., & Ebringerová, A. (1998). Hydration properties of xylan-type structures: an FTIR study of xylooligosaccharides. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, 77(1), 38-44.

Kaparaju, P., & Felby, C. (2010). Characterization of lignin during oxidative and hydrothermal pre-treatment processes of wheat straw and corn stover. **Bioresour Technol**, 101(9), 3175-3181.

Kaparaju, P., Luostarinen, S., Kalmari, E., Kalmari, J., & Rintala, J. (2002). Co-digestion of energy crops and industrial confectionery by-products with cow manure: batch-scale and farm-scale evaluation. **Water Sci Technol**, 45(10), 275-280.

Keshwani, D. R., & Cheng, J. J. (2009). Switchgrass for bioethanol and other value-added

applications: A review. **Bioresour Technol**, 100(4), 1515-1523.

KobayAshi, F., Take, H., Asada, C., & Nakamura, Y. (2004). Methane production from steam-exploded bamboo. **J Biosci Bioeng**, 97(6), 426-428.

Kok, M. V., & Özgür, E. (2013). Thermal analysis and kinetics of biomass samples. **Fuel Processing Technology**, 106(0), 739-743.

Komemoto, K., Lim, Y. G., Nagao, N., Onoue, Y., Niwa, C., & Toda, T. (2009). Effect of temperature on VFA's and biogas production in anaerobic solubilization of food waste. **Waste Management**, 29(12), 2950-2955.

Kreuger, E., Sipos, B., Zacchi, G., Svensson, S.-E., & Björnsson, L. (2011). Bioconversion of industrial hemp to ethanol and methane: The benefits of steam pretreatment and co-production. **Bioresour Technol**, 102(3), 3457-3465.

Kumar, R., & Wyman, C. E. (2009). Effects of cellulase and xylanase enzymes on the deconstruction of solids from pretreatment of poplar by leading technologies. **Biotechnol Prog**, 25(2), 302-314.

Kunaver, M., Jasiukaitytė, E., & Čuk, N. (2012). Ultrasonically assisted liquefaction of lignocellulosic materials. **Bioresour Technol**, 103(1), 360-366.

Laser, M., Schulman, D., Allen, S. G., Lichwa, J., Antal, M. J., Jr., & Lynd, L. R. (2002). A comparison of liquid hot water and steam pretreatments of sugar cane bagasse for bioconversion to ethanol. **Bioresour Technol**, 81(1), 33-44.

Liew, L. N., Shi, J., & Li, Y. (2011). Enhancing the solid-state anaerobic digestion of fallen leaves through simultaneous alkaline treatment. **Bioresour Technol**, 102(19), 8828-8834.

Linke, B. (2006). Kinetic study of thermophilic anaerobic digestion of solid wastes from potato processing. **Biomass and Bioenergy**, 30(10), 892-896.

Liu, C. F., Ren, J. L., Xu, F., Liu, J. J., Sun, J. X., & Sun, R. C. (2006). Isolation and characterization of cellulose obtained from ultrasonic irradiated sugarcane bagasse. **J Agric Food Chem**, 54(16), 5742-5748.

Liu, J.-X., Orskov, E. R., & Chen, X. B. (1999). Optimization of steam treatment as a method for upgrading rice straw as feeds. **Animal Feed Science and Technology**, 76(3–4), 345-357.

Lund, M., Eriksson, M., & Felby, C. (2003). Reactivity of a Fungal Laccase Towards Lignin in

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

Softwood Kraft Pulp *Holzforschung* (Vol. 57, pp. 21).

Luo, J., Fang, Z., & Smith Jr, R. L. (2014). Ultrasound-enhanced conversion of biomass to biofuels. **Progress in Energy and Combustion Science**, 41(0), 56-93.

Michalska, K., Miazek, K., Krzystek, L., & Ledakowicz, S. (2012). Influence of pretreatment with Fenton's reagent on biogas production and methane yield from lignocellulosic biomass. **Bioresour Technol**, 119, 72-78.

Mohammad, J. T., & Keikhosro, K. (2008). Pretreatment of Lignocellulosic Wastes to Improve Ethanol and Biogas Production: A Review. **International Journal of Molecular Sciences**, 9(9).

Monlau, F., Barakat, A., Steyer, J. P., & Carrere, H. (2012). Comparison of seven types of thermo-chemical pretreatments on the structural features and anaerobic digestion of sunflower stalks. **Bioresour Technol**, 120, 241-247.

Monlau, F., Latrille, E., Da Costa, A. C., Steyer, J.-P., & Carrère, H. (2013). Enhancement of methane production from sunflower oil cakes by dilute acid pretreatment. **Applied Energy**, 102(0), 1105-1113.

Mosier, N., Wyman, C., Dale, B., Elander, R., Lee, Y. Y., Holtzapple, M., & Ladisch, M. (2005). Features of promising technologies for pretreatment of lignocellulosic biomass. **Bioresour Technol**, 96(6), 673-686.

Mshandete, A., Björnsson, L., Kivaisi, A. K., Rubindamayugi, M. S. T., & Mattiasson, B. (2006). Effect of particle size on biogas yield from sisal fibre waste. **Renewable Energy**, 31(14), 2385-2392.

Nakhshiniev, B., Gonzales, H. B., & Yoshikawa, K. (2012). Hydrothermal Treatment of Date Palm Lignocellulose Residue for Organic Fertilizer Conversion: Effect on Cell Wall and Aerobic Degradation Rate. **Compost Science & Utilization**, 20(4), 245-253.

NikoliĆ, S., MojoviĆ, L., Rakin, M., Pejin, D., & Pejin, J. (2010). Ultrasound-assisted production of bioethanol by simultaneous saccharification and fermentation of corn meal. **Food Chemistry**, 122(1), 216-222.

O-Thong, S., Boe, K., & Angelidaki, I. (2012). Thermophilic anaerobic co-digestion of oil palm empty fruit bunches with palm oil mill effluent for efficient biogas production. **Applied Energy**, 93(0), 648-654.

Palmqvist, E., & Hahn-Hägerdal, B. (2000). Fermentation of lignocellulosic hydrolysates. I: inhibition and detoxification. **Bioresour Technol**, 74(1), 17-24.

Pappas, C., Tarantilis, P. A., Daliani, I., Mavromoustakos, T., & Polissiou, M. (2002). Comparison of classical and ultrasound-assisted isolation procedures of cellulose from kenaf (Hibiscus cannabinus L.) and eucalyptus (Eucalyptus rodustrus Sm.). **Ultrason Sonochem**, 9(1), 19-23.

Pavlostathis, S. G., & Gossett, J. M. (1985). Alkaline treatment of wheat straw for increasing anaerobic biodegradability. **Biotechnol Bioeng**, 27(3), 334-344.

Pejin, D. J., Mojović, L. V., Pejin, J. D., Grujić, O. S., Markov, S. L., Nikolić, S. B., & Marković, M. N. (2012). Increase in bioethanol production yield from triticale by simultaneous saccharification and fermentation with application of ultrasound. **Journal of Chemical Technology & Biotechnology**, 87(2), 170-176.

Pérez, J. A., Ballesteros, I., Ballesteros, M., Sáez, F., Negro, M. J., & Manzanares, P. (2008). Optimizing Liquid Hot Water pretreatment conditions to enhance sugar recovery from wheat straw for fuel-ethanol production. **Fuel**, 87(17–18), 3640-3647.

Pérez-Elvira, S. I., Nieto Diez, P., & Fdz-Polanco, F. (2006). Sludge minimisation technologies. **Reviews in Environmental Science and Bio/Technology**, 5(4), 375-398.

Pinjari, D. V., & Pandit, A. B. (2010). Cavitation milling of natural cellulose to nanofibrils. **Ultrason Sonochem**, 17(5), 845-852.

Qi, B. C., Aldrich, C., & Lorenzen, L. (2004). Effect of ultrasonication on the humic acids extracted from lignocellulose substrate decomposed by anaerobic digestion. **Chemical Engineering Journal**, 98(1–2), 153-163.

Raposo, F., Banks, C. J., Siegert, I., Heaven, S., & Borja, R. (2006). Influence of inoculum to substrate ratio on the biochemical methane potential of maize in batch tests. **Process Biochemistry**, 41(6), 1444-1450.

Rodrigues, S., & Pinto, G. A. S. (2007). Ultrasound extraction of phenolic compounds from coconut (Cocos nucifera) shell powder. **Journal of Food Engineering**, 80(3), 869-872.

Saha, B. C., & Cotta, M. A. (2006). Ethanol production from alkaline peroxide pretreated enzymatically saccharified wheat straw. **Biotechnol Prog**, 22(2), 449-453.

Sarnklong, C., Cone, J. W., Pellikaan, W. F., & Hendriks, W. H. (2010). Utilization of rice straw

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

and different treatments to improve its feed value for ruminants: A review. **Asian-Australasian Journal of Animal Sciences**, 23(5), 680-692.

Sass, R. L., Fisher, F. M., Wang, Y. B., Turner, F. T., & Jund, M. F. (1992). Methane emission from rice fields: The effect of floodwater management. **Global Biogeochemical Cycles**, 6(3), 249-262.

Schacht, C., Zetzl, C., & Brunner, G. (2008). From plant materials to ethanol by means of supercritical fluid technology. **The Journal of Supercritical Fluids**, 46(3), 299-321.

Sharma, S. K., Mishra, I. M., Sharma, M. P., & Saini, J. S. (1988). Effect of particle size on biogas generation from biomass residues. **Biomass**, 17(4), 251-263.

Shen, H. S., Sundstøl, F., & Ni, D. B. (1998). Studies on untreated and urea-treated rice straw from three cultivation seasons: 2. Evaluation of straw quality through in vitro gas production and in sacco degradation measurements. **Animal Feed Science and Technology**, 74(3), 193-212.

Shiralipour, A., & Smith, P. H. (1984). Conversion of biomass into methane gas. **Biomass**, 6(1–2), 85-92.

Sul'man, E. M., Sul'man, M. G., & Prutenskaya, E. A. (2011). Effect of ultrasonic pretreatment on the composition of lignocellulosic material in biotechnological processes. **Catalysis in Industry**, 3(1), 28-33.

Sun, R., & Tomkinson, J. (2002). Comparative study of lignins isolated by alkali and ultrasound-assisted alkali extractions from wheat straw. **Ultrason Sonochem**, 9(2), 85-93.

Sun, R., & Tomkinson, J. (2003). Characterization of hemicelluloses isolated with tetraacetylethylenediamine activated peroxide from ultrasound irradiated and alkali pre-treated wheat straw. **European Polymer Journal**, 39(4), 751-759.

Sun, R., & Tomkinson, J. (2005). Separation and Characterization of Cellulose from Wheat Straw. **Separation Science and Technology**, 39(2), 391-411.

Sun, Y., & Cheng, J. (2002). Hydrolysis of lignocellulosic materials for ethanol production: a review. **Bioresour Technol**, 83(1), 1-11.

Teghammar, A., Yngvesson, J., Lundin, M., Taherzadeh, M. J., & Horváth, I. S. (2010). Pretreatment of paper tube residuals for improved biogas production. **Bioresour Technol**, 101(4), 1206-1212.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

Tomas-Pejo, E., Oliva, J. M., Ballesteros, M., & Olsson, L. (2008). Comparison of SHF and SSF processes from steam-exploded wheat straw for ethanol production by xylose-fermenting and robust glucose-fermenting Saccharomyces cerevisiae strains. **Biotechnol Bioeng**, 100(6), 1122-1131.

Toreci, I., Kennedy, K. J., & Droste, R. L. (2009). Evaluation of continuous mesophilic anaerobic sludge digestion after high temperature microwave pretreatment. **Water Research**, 43(5), 1273-1284.

Vadiveloo, J. (2000). Nutritional properties of the leaf and stem of rice straw. **Animal Feed Science and Technology**, 83(1), 57-65.

Vadiveloo, J. (2003). The effect of agronomic improvement and urea treatment on the nutritional value of Malaysian rice straw varieties. **Animal Feed Science and Technology**, 108(1–4), 133-146.

van Iersel, M. M., Benes, N. E., & Keurentjes, J. T. (2008). Importance of acoustic shielding in sonochemistry. **Ultrason Sonochem**, 15(4), 294-300.

Van Soest, P. J. (2006). Rice straw, the role of silica and treatments to improve quality. **Animal Feed Science and Technology**, 130(3–4), 137-171.

Varga, E., Reczey, K., & Zacchi, G. (2004). Optimization of steam pretreatment of corn stover to enhance enzymatic digestibility. **Appl Biochem Biotechnol**, 113-116, 509-523.

Velmurugan, R., & Muthukumar, K. (2011). Utilization of sugarcane bagasse for bioethanol production: sono-assisted acid hydrolysis approach. **Bioresour Technol**, 102(14), 7119-7123.

Wang, C.-H., & Chang, J.-S. (2007). Continuous Biohydrogen Production from Starch with Granulated Mixed Bacterial Microflora†. **Energy & Fuels**, 22(1), 93-97.

Wang, J., Yue, Z. B., Chen, T. H., Peng, S. C., Yu, H. Q., & Chen, H. Z. (2010). Anaerobic digestibility and fiber composition of bulrush in response to steam explosion. **Bioresour Technol**, 101(17), 6610-6614.

Weimer, P. J., Mertens, D. R., Ponnampalam, E., Severin, B. F., & Dale, B. E. (2003). FIBEX-treated rice straw as a feed ingredient for lactating dairy cows. **Animal Feed Science and Technology**, 103(1–4), 41-50.

Wilkie, A., & Colleran, E. (1986). Pilot-scale digestion of pig slurry supernatant using an upflow

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

anaerobic filter. **Environmental Technology Letters**, 7(1-12), 65-76.

Wörmeyer, K., Ingram, T., Saake, B., Brunner, G., & Smirnova, I. (2011). Comparison of different pretreatment methods for lignocellulosic materials. Part II: Influence of pretreatment on the properties of rye straw lignin. **Bioresour Technol**, 102(5), 4157-4164.

Xiao, W., & Clarkson, W. (1997). Acid solubilization of lignin and bioconversion of treated newsprint to methane. **Biodegradation**, 8(1), 61-66.

Yu, G., Yano, S., Inoue, H., Inoue, S., Endo, T., & Sawayama, S. (2010). Pretreatment of rice straw by a hot-compressed water process for enzymatic hydrolysis. **Appl Biochem Biotechnol**, 160(2), 539-551.

Yuan, T.-Q., Xu, F., He, J., & Sun, R.-C. (2010). Structural and physico-chemical characterization of hemicelluloses from ultrasound-assisted extractions of partially delignified fast-growing poplar wood through organic solvent and alkaline solutions. **Biotechnology Advances**, 28(5), 583-593.

Zhang, J., Dong, W., Li, J., Qiao, L., Zheng, J., & Sheng, J. (2007). Utilization of coal fly Ash in the glass–ceramic production. **Journal of Hazardous Materials**, 149(2), 523-526.

Zhang, L., Yin, J., & Liu, L. (2008). Mesophilic, two-phase anaerobic digestion of activated sludge pretreated with ultrasound and lime. **International Journal of Sustainable Development & World Ecology**, 15(sup1), 51S-55S.

Zhang, P., Lin, C.-J., Liu, J., Pongprueksa, P., Evers, S. A., & Hart, P. (2014). Biogas production from brown grease using a pilot-scale high-rate anaerobic digester. **Renewable Energy**, 68(0), 304-313.

Zhang, R., & Zhang, Z. (1999). Biogasification of rice straw with an anaerobic-phased solids digester system. **Bioresour Technol**, 68(3), 235-245.

Zheng, Y., Zhao, J., Xu, F., & Li, Y. (2014). Pretreatment of lignocellulosic biomass for enhanced biogas production. **Progress in Energy and Combustion Science**, 42(0), 35-53.

Zhu, J., Wan, C., & Li, Y. (2010). Enhanced solid-state anaerobic digestion of corn stover by alkaline pretreatment. **Bioresour Technol**, 101(19), 7523-7528.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ภาคผนวก ก

วิธีการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่าง ๆ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ก 1. วิธีการวิเคราะห์คุณสมบัติแบบประมาณ (Proximate Analysis)

โดยทั่วไปแล้วการหาคุณสมบัติของวัตถุดิบที่ใช้เป็นเชื้อเพลิงนั้นจะทำการหาคุณสมบัติต่าง ๆ คือ เถ้า (Ash) ปริมาณสารระเหย (Volatile Mater) และปริมาณคาร์บอนคงตัว (Fixed Carbon) โดยการใช้วิธีการหาคุณสมบัติแบบประมาณตามมาตรฐานของ ASTM D1762-84 ซึ่งรายละเอียดดังกล่าวมีขั้นตอนและวิธีการดังนี้

ก 1.1 วิธีการวิเคราะห์ความชื้น (ASTM D1762-84)

คือเปอร์เซ็นต์ของน้ำต่อน้ำหนักวัสดุ มีผลโดยตรงต่อคุณภาพของแก๊ส เชื้อเพลิงที่มีขนาดความชื้นต่ำยิ่งจะเพิ่มประสิทธิภาพให้กับระบบผลิตแก๊สได้มากขึ้นเท่านั้น ซึ่งมีขั้นตอนการวิเคราะห์ดังนี้

- อบถาดอลูมิเนียมพร้อมฝาในเตาอบ (Drying Oven) ที่อุณหภูมิ 103-110°C เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นนำเข้าเดสิเกเตอร์ (Desicator) ทิ้งไว้ประมาณ 15 นาที จากนั้นนำไปชั่งและบันทึกน้ำหนัก
- ชั่งตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองประมาณ 1 กรัม ลงในถาดอลูมิเนียมพร้อมฝาที่ทราบน้ำหนัก จากนั้นบันทึกน้ำหนักตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง
- นำตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองไปเข้าเตาอบที่อุณหภูมิ 104-110 $^{\circ}$C เป็นเวลา 1-2 ชั่วโมงหรือจนกว่าน้ำหนักตัวอย่างของตัวอย่างคงที่
- นำถาดอลูมิเนียมมาทิ้งไว้ให้เย็นแล้วนำเข้าเดสิเกเตอร์ จากนั้นทิ้งไว้ประมาณ 1 นาที จึงทำการชั่งน้ำหนักถาดอลูมิเนียมพร้อมฝาที่มีตัวอย่าง ที่ทำการอบแล้วอยู่ภายในและทำการบันทึกผล

สูตรที่ใช้ในการคำนวณ

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

เมื่อ M = ร้อยละของความชื้น

W_1 = น้ำหนักของถาดอลูมิเนียมพร้อมฝารวมกับน้ำหนักของตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองก่อนทำการอบ (กรัม)

W_2 = น้ำหนักของถ่านอลูมิเนียมพร้อมฝารวมกับน้ำหนักของตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองหลังทำการอบ (กรัม)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

W = น้ำหนักของตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง (กรัม)

ก 1.2 วิธีการวิเคราะห์เถ้า (ASTM D1762-84)

- เผาครูซิเบลพอร์ซเลน (Porcelain Crucible) พร้อมฝาในเตาเผา (Muffle Furnace) ที่อุณหภูมิ 750 °C เป็นเวลาประมาณ 1 ชั่วโมง จากนั้นนำออกมาทำให้เย็นในเดสิเกเตอร์แล้วทำการชั่งน้ำหนักครูซิเบลพอร์ซเลนพร้อมฝา
- ชั่งน้ำหนักของตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองใส่ครูซิเบลพอร์ซเลนประมาณ 1 กรัม
- ใส่ครูซิเบลพอร์ซเลนในเตาเผาที่อุณหภูมิ 750 °C ทิ้งไว้เป็นเวลา 4 ชั่วโมงหรือรอจนน้ำหนักเถ้าคงที่ (เปิดฝาถ้วยกระเบื้องขณะเผา)
- นำครูซิเบลพอร์ซเลนออกจากเตาเผาแล้วนำทิ้งไว้ให้เย็นลง จากนั้นนำไปใส่ในเดสิเกเตอร์ ทำการชั่งน้ำหนักและบันทึกผล

สูตรที่ใช้ในการคำนวณ

$$A = 100\frac{(W_3 - W_4)}{W}$$

เมื่อ A = ร้อยละของเถ้า

W_3 = น้ำหนักของครูซิเบลพอร์ซเลนพร้อมฝาที่มีเถ้า (กรัม)

W_4 = น้ำหนักของครูซิเบลพอร์ซเลนพร้อมฝา (กรัม)

W = น้ำหนักของตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง (กรัม)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ก 1.3 วิธีการวิเคราะห์ปริมาณสารระเหย (ASTM D1762-84)

- เผาครูซิเบิลพร้อมฝาในเตาเผาที่อุณหภูมิ 950°C ทิ้งไว้ประมาณ 30 นาที จากนั้นนำออกจากเตาเผา ทิ้งไว้ให้เย็นในเดสิเกเตอร์ หลังจากนั้นทำการชั่งน้ำหนักของครูซิเบิลพร้อมฝาและทำการบันทึกผล
- ชั่งตัวอย่างตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองใส่ในครูซิเบิลประมาณ 1 กรัม
- หย่อนครูซิเบิลให้อยู่กึ่งกลางเตาเผา อุณหภูมิประมาณ 950°C เป็นเวลาประมาณ 7 นาที
- นำครูซิเบิลออกมาทิ้งไว้ให้เย็นลง จากนั้นนำไปใส่ไว้ในเดสิเกเตอร์ประมาณ 15 นาที จากนั้นจึงนำไปชั่งน้ำหนักและทำการบันทึกผล

สูตรที่ใช้ในการคำนวณ

$$V = 100\left(\frac{W_5 - W_6}{W}\right) - M$$

เมื่อ V = ร้อยละของสารระเหย

W_5 = น้ำหนักของครูซิเบิลพร้อมฝารวมกับน้ำหนักของตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองก่อนการทำการอบ (กรัม)

W_6 = น้ำหนักของครูซิเบิลพร้อมฝารวมกับน้ำหนักของตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองหลังทำการอบ (กรัม)

W = น้ำหนักของตัวอย่างตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง (กรัม)

M = ร้อยละของความชื้น

ก 1.4 วิธีการวิเคราะห์ปริมาณคาร์บอนคงตัว

สูตรที่ใช้ในการคำนวณ

ร้อยละของคาร์บอนคงตัว = 100 – ร้อยละของความชื้น – ร้อยละของเถ้า – ร้อยละของสารระเหย

ก 2. วิธีการวิเคราะห์คุณสมบัติแบบละเอียด (Ultimate Analysis)

ก 3.1 องค์ประกอบของธาตุ คาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน และ ซัลเฟอร์

สามารถทำได้โดยใช้เครื่องวิเคราะห์ปริมาณธาตุ C H N S Elemental Analyzer นำตัวอย่างตัวอย่างบดให้ละเอียด ชั่งปริมาณที่แน่นอนประมาณ 1-2 mg. ใส่ภาชนะ นำไปเผาที่อุณหภูมิประมาณ 925 ^{o}C ภายใต้ออกซิเจนบริสุทธิ์ ผ่านเข้าไปใน Reagion CO_2, H_2O, N_2 ความคุมความดัน อุณหภูมิ ปริมาตรให้คงที่

ก 3.2 วิธีการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุออกซิเจน

ปริมาณออกซิเจนของชีวมวล หาได้จากการคำนวณดังนี้

ปริมาณออกซิเจน (%) = 100 - (%คาร์บอน - %ไฮโดรเจน -%ไนโตรเจน -%ซัลเฟอร์-% ความชื้น -% เถ้า)

ก 3. วิธีวิเคราะห์ Neutral Detergent Fiber (NDF) (Goering and Van Soest, 1970**)**

อุปกรณ์

1. ครูซิเบิ้ล (fritted glass Crucible) ขนาด 50 ml.
2. ตู้อบแห้ง (hot air oven)
3. โถดูดความชื้น (Dessicator)
4. เครื่องชั่งชนิดทศนิยม 4 ตำแหน่ง
5. บีกเกอร์ (Beaker) ขนาด 600 ml.
6. เครื่องวิเคราะห์เยื่อใย แบบ manual
7. ขวดฉีดน้ำ (wAsh bottle)
8. ขวดต้มน้ำร้อน (boiling flask)
9. เครื่องต้มน้ำร้อน
10. เครื่องดูดสุญญากาศ

สารเคมี

1. Sodium lauryl sulphate (USP หรือ purified grade)
2. Disodium ethylenediaminetetraacetate (EDTA) dihydrate, crystal, reagent grade
3. Sodium borate decahydrate (Na2B4O7.10H2O, reagent grate)
4. Disodium hydrogen phosphate anhydrous (Na2HPO4), reagent grade
5. Triethylene glycol, reagent grade
6. Sodium sulphite anhydrous, reagent grade
7. Acetone (AR grade) ชนิดที่ปราศจากสี และสามารถระเหยได้หมด ไม่มีสิ่งตกค้างเหลืออยู่
8. α – Amylase EC number 3.2.1.1 ชนิด heat – stable
9. Distiled or deionized water

วิธีเตรียมสารละลาย Neutral Detergent Fiber 2 ลิตร

- Sodium lauryl sulphate (USP หรือ purified grade)

- Disodium ethylenediaminetetraacetate (EDTA) dihydrate, crystal, reagent grade
- Sodium borate decahydrate ($Na_2B_4O_7.10H_2O$, reagent grate)
- Disodium hydrogen phosphate anhydrous (Na_2HPO_4), reagent grade
- Triethylene glycol , reagent grade
- Distiled or deionized water

วิธีหาเตรียม

1. ชั่ง Sodium lauryl sulphate 60 กรัม ใส่ใน Beaker ขนาด 400 มิลลิลิตร แล้วนำมาใส่ใน Volumetric flask ขนาด 2 ลิตรโดยใช้กรวยกรองและแท่งคนสารละลายช่วย เสร็จแล้วล้าง Sodium lauryl sulphate ที่ติดค้างอยู่ใน Beaker ด้วยน้ำร้อน โดยใช้ขวดฉีดน้ำร้อน ฉีดแล้วเทรวมใส่ใน Volumetric flask เดิมเขย่าเบา ๆ
2. เติม Triethylene glycol 20 มิลลิลิตร ใส่ลงใน Volumetric flask ในข้อ (1) เขย่าให้เข้ากัน
3. ละลาย Disodium hydrogen phosphate anhydrous (Na_2HPO_4) 9.12 กรัม , Sodium borate decahydrate ($Na_2B_4O_7.10H_2O$) 13.62 กรัม และ Disodium ethylenediaminetetraacetate (EDTA) dehydrate 37.22 กรัม ด้วยน้ำกลั่นที่ร้อนแล้วนำมาผสมกับสารละลาย ในข้อ (2) เทใส่ Volumetric flask เขย่าให้เข้ากัน แล้วเติมน้ำกลั่นจนถึงขีดปริมาตรปล่อยให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง แล้วปรับ ปริมาตรพอดีขีดด้วยน้ำกลั่นและปรับ pH ให้ได้ 6.9-7.1

คำเตือนในความปลอดภัย

1. Acetone เป็นสารระเหยและติดไฟง่าย ไม่ให้ระเหยสะสมอยู่ในพื้นที่ทำงาน ใช้อุปกรณ์กำจัดกลิ่น ไอและหลีกเลี่ยงการสูดดมหรือสัมผัสกับผิว ทำการระเหย Acetone ในตัวอย่างที่บรรจุใน Crucible ก่อนเข้าตู้อบแห้ง
2. Sodium lauryl sulphate เป็นสารระคายเคืองที่เยื่อบุผิว ควรสวมหน้ากากกันฝุ่นและสวมถุงมือ ในขณะปฏิบัติการเตรียมสารละลาย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

วิธีการ

1. นำ Crucible ขนาด 50 ml. ไปอบในตู้อบ ที่อุณหภูมิ 105 ^{0}C นาน 2 ชั่วโมง เอาออกใส่ใน โถดูดความชื้น (Dessicator) ทิ้งให้เย็น แล้วชั่งน้ำหนักบันทึกไว้
2. ชั่งตัวอย่างที่แห้งและบดละเอียด ขนาด 1 มิลลิเมตร 0.5-1.0 กรัม ใส่ใน Beaker ปาก กลมเรียบ ขนาด 600 มิลลิลิตร (ใส่ Na_2SO_3 0.5 กรัม ในตัวอย่างที่มี cutin) สูงลงไปใน Beaker ที่มีตัวอย่างใบเดิม
3. นำสารละลาย Neutral Detergent Fiber ไปต้มให้ร้อน ประมาณ 5 นาที แล้วตวงใส่ลง ใน Beaker ที่มีตัวอย่างอยู่ 50 มิลลิลิตรโดยใช้กระบอกตวง นำไปทำการย่อย หลัง 5 นาที เขย่า Beaker แล้วยกลง ในตัวอย่างที่กรองยากจะเติม 0.1 ml. สารละลายมาตรฐาน α-amylase เขย่าให้สารละลายมาตรฐาน α-amylase กับสารละลาย Neutral Detergent Fiber ผสมกัน แล้วยกขึ้นวางบนเครื่องวิเคราะห์เยื่อใย ทำการ Reflux ต่อ 60 นาที
4. ทำการกรอง โดยเทสารละลายใน Beaker ลงใน Crucible ที่ชั่งน้ำหนักแล้วที่ต่อติดกับเครื่องดูดสุญญากาศ ล้างตัวอย่างที่อยู่ใน Beaker ด้วยน้ำร้อน จนกระทั่งตัวอย่างส่วนที่เหลือทั้งหมดลงใน Crucible จนหมด
5. ล้างตัวอย่างใน Crucible ด้วยน้ำร้อนอีกจนหมดฟอง แล้วใช้ขวดฉีดน้ำร้อนล้างตัวอย่างที่ ติดอยู่ข้าง Crucible ลงให้หมดแล้วดูดน้ำใน Crucible ออก
6. จากนั้นล้างตัวอย่างด้วย Acetone 3-5 ครั้ง หรือจนกระทั่งสารละลายล้างออกจาก Crucible ไม่มีสี
7. นำ Crucible ที่มีตัวอย่าง ไปอบในตู้อบแห้ง (Hot air oven) ที่อุณหภูมิ 105 ^{0}C นาน 8 ชั่วโมง หรือตลอดคืน
8. นำ Crucible ที่มีตัวอย่างออกจากตู้อบแห้ง (Hot air oven) เอาใส่ในโถดูดความชื้น (Dessicator) ปล่อยให้เย็น แล้วชั่งน้ำหนัก เพื่อคำนวณหาค่า NDF
9. นำ Crucible เผา (Ignite) ในเตาเผา ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส นาน 2 ชั่วโมง
10. เอาออกใส่ในโถดูดความชื้น ปล่อยให้เย็น ชั่งน้ำหนักหา Ash

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

วิธีคำนวณ

1. ในกรณีที่ตัวอย่างนั้นวิเคราะห์หาเฉพาะค่า NDF

%NDF = [(W1- W2 x 100] - % nuetral insoluble Ash W3

เมื่อ W1= น้ำหนัก Crucible + น้ำหนักตัวอย่าง

W2= น้ำหนัก Crucible

W3= น้ำหนักตัวอย่าง

%NDF insoluble Ash คือ % Ash ที่ได้จากขั้นตอนการเผาในการวิเคราะห์หา NDF

2. ในกรณีที่ตัวอย่างนั้นวิเคราะห์หาค่า Lignin ด้วย

%NDF = ([(W1- W2 x 100] - % Acid insoluble Ash)/W3

เมื่อ W1= น้ำหนัก Crucible + น้ำหนักตัวอย่าง

W2= น้ำหนัก Crucible

W3= น้ำหนักตัวอย่าง

%Acid insoluble Ash คือ % Ash ที่ได้จากขั้นตอนการเผาในการวิเคราะห์หา lignin

%NDS = 100 - (%Moisture) - (%NDF)

ก 4. วิธีวิเคราะห์ Acid Detergent Fiber (ADF) (Goering and Van Soest, 1970)

อุปกรณ์

1. ครูซิเบิ้ล (Fritted glass Crucible) ขนาด 50 ml.
2. ตู้อบแห้ง (Hot air oven)
3. โถดูดความชื้น (Dessicator)
4. เครื่องชั่ง (Balance) ชนิดทศนิยม 4 ตำแหน่ง
5. บีกเกอร์ (Beaker) ขนาด 600 ml.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

6. เครื่องวิเคราะห์เยื่อใย แบบ manual
7. ขวดฉีดน้ำ (WAsh bottle)
8. ขวดต้มน้ำร้อน (Boiling flask)
9. เครื่องต้มน้ำร้อน
10. เครื่องดูดสุญญากาศ

สารเคมี

1. Sulfuric acid (H_2SO_4), reagent grade
2. Cetyl triethyl ammonium bromide (CTAB), reagent grade
3. Acetone, reagent grade
4. Distilled or deionized water

วิธีเตรียมสารละลาย Acid Detergent Fiber

1. ชั่งซัลฟุริกเข้มข้น (H_2SO_4 conc, AR grade) 51.08 กรัม ใส่ใน Beaker ขนาด 250 มิลลิลิตร แล้วเทใส่ volumetric flask ขนาด 1 ลิตร ที่มีน้ำกลั่นอยู่ประมาณ 200 มิลลิลิตร
2. ล้างกรดที่อยู่ใน Beaker ด้วยน้ำกลั่น 2 ครั้ง แล้วเทลงใน Volumetric flask เดิม แล้วเขย่าให้ เข้ากัน
3. เติมน้ำกลั่นให้พอดีขีด ปิดฝา เขย่า 3 ครั้งให้เข้ากัน ปล่อยทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง
4. ปรับปริมาตรพอดีขีด Volumetric flask ขนาด 1 ลิตร ด้วยน้ำกลั่น เขย่า 2-3 ครั้ง ให้เข้ากัน
5. หาความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลาย H2SO4 ด้วยการไทเทรตกับ NaOH
   - ปิเปตสารละลายที่เตรียมได้มา 20 ml. ใส่ลงใน flask ขนาด 250 ml. หยดฟี-นอลพทาลีน 3 หยด ไทเทรตสารละลายด้วยสารละลาย NaOH ที่ทราบความ เข้มข้นแล้ว จนกระทั่งสารละลายเปลี่ยนเป็นสีชมพูอ่อน
   - ทำการทดลองซ้ำอีก 1 ครั้ง บันทึกผลการทดลองและคำนวณผลที่ได้ หาความ เข้มข้นเฉลี่ยของสารละลาย H2SO4
6. ชั่ง CTAB 20 กรัม ลงใน Beaker ขนาด 250 มิลลิลิตร เทใส่ลงในขวดสำหรับเก็บสารละลาย Acid Detergent Fiberโดยใช้กรวยกรองและแท่งคนสารละลายช่วย ล้าง CTAB ที่ติดค้างใน Beaker ด้วยสารละลาย Sulfuric acid ความเข้มข้น 1 นอร์มอล แล้วใส่ลงในขวดเก็บ สารละลาย Acid Detergent Fiber ที่มี CTAB

อยู่แล้ว 3 ครั้ง เขย่าให้เข้ากัน แล้วเทกรดซัลฟุริกที่ เหลือใส่ในขวดสารละลาย Acid Detergent Fiber และเขย่าให้เข้ากัน

วิธีการ

1. นำ Crucible ขนาด 50 ml.ไปอบในตู้อบ ที่อุณหภูมิ 105 °C นาน 2 ชั่วโมง เอาออกใส่ในโถดูดความชื้น (Desiccator) ทิ้งให้เย็น แล้วชั่งน้ำหนักและบันทึกไว้
2. ชั่งตัวอย่างที่แห้งและบดละเอียด ขนาด 1 มิลลิเมตร 1 กรัม ใส่ใน Beaker ปากกลมเรียบ ขนาด 600 มิลลิลิตร
3. นำสารละลาย Acid Detergent ไปต้มให้ร้อน ตวงใส่ลงใน Beaker ที่มีตัวอย่างอยู่ 100 มิลลิลิตร โดยใช้กระบอกตวง นำไปทำการย่อย หรือ Reflux นาน 1 ชั่วโมง โดยใช้เครื่อง วิเคราะห์เยื่อใยชนิด Manual
4. ทำการกรอง โดยเทสารละลายใน Beaker ลง Crucible ที่ชั่งน้ำหนักแล้วที่ต่อติดกับเครื่อง กรองดูดสุญญากาศ ล้างตัวอย่างที่อยู่ใน Beaker ด้วยขวดฉีดน้ำร้อน จนกระทั่งตัวอย่างส่วนที่ เหลือทั้งหมดลงใน Crucible จนหมด ล้างตัวอย่างที่อยู่ใน Crucible 1,200 ml. หรือจนหมด ฟอง
5. ล้างตัวอย่างที่ติดอยู่ข้าง Crucible ด้วยน้ำร้อนอีก 1-2 ครั้ง โดยใช้ขวดฉีดน้ำ แล้วดูดน้ำออก ด้วย Vacuum pump
6. จากนั้นล้างตัวอย่างด้วย Acetone 3 ครั้ง หรือจนกระทั่งสารละลายที่ไหลออกจาก Crucible ไม่มีสี
7. นำ Crucible ที่มีตัวอย่างไปอบในตู้อบ ที่อุณหภูมิ 105 ^{0}C นาน 8 ชั่วโมง หรือตลอดคืน
8. นำ Crucible ที่มีตัวอย่างออกจากตู้อบ เอาใส่ในโถดูดความชื้น (Dessicator) ปล่อยให้เย็น แล้วชั่งน้ำหนัก เพื่อคำนวณหาค่า ADF
9. นำ Crucible เผา (Ignite) ในเตาเผา ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส นาน 2 ชั่วโมง
10. เอาออกใส่ในโถดูดความชื้น ปล่อยให้เย็น ชั่งน้ำหนักหา Ash

วิธีคำนวณ

1. ในกรณีที่ตัวอย่างวิเคราะห์เฉพาะค่า ADF

%ADF =[[(W1 – W2) x 100] - %Acid Insoluble Ash] /W3

เมื่อ

W1 = น้ำหนัก Crucible + น้ำหนักตัวอย่าง

W2 = น้ำหนัก Crucible

W3 = น้ำหนักตัวอย่าง

%Acid insoluble Ash คือ % Ash ที่ได้จากขั้นตอนการเผาในการวิเคราะห์หา ADF

2. ในกรณีที่ตัวอย่างนั้นวิเคราะห์หาค่า Lignin ด้วย

%ADF =[[(W1- W2 x 100] - % Acid insoluble Ash/W3]

เมื่อ

W1= น้ำหนัก Crucible + น้ำหนักตัวอย่าง

W2= น้ำหนัก Crucible W3= น้ำหนักตัวอย่าง

%Acid insoluble Ash คือ % Ash ที่ได้จากขั้นตอนการเผาในการวิเคราะห์หา lignin

การคำนวณหาปริมาณเยื่อใย Hemicellulose

% Hemicellulose = %NDF - %ADF

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ก 5. วิธีวิเคราะห์ Acid Detergent Lignin (ADL) (Goering and Van Soest, 1970)

อุปกรณ์

1. ถาดที่ทำด้วยโลหะสเตนเลส
2. Beaker ขนาด 250 มิลลิลิตร
3. แท่งแก้วคนสารละลาย
4. ขวดต้มน้ำร้อน
5. ขวดฉีดน้ำ
6. เครื่องต้มน้ำร้อน
7. Vacuum pump
8. ตู้อบแห้ง
9. โถดูดความชื้น
10. เครื่องชั่ง (balance) ชนิดทศนิยม 4 ตำแหน่ง

สารเคมี

1. Sulfuric acid conc, AR grade
2. Distilled or Deionized water

วิธีเตรียมสารละลาย 72% H_2SO_4

1. ตวง H_2SO_4 conc. 670 มิลลิลิตร ค่อยๆเทอย่างช้าๆ ลงใน Beaker ขนาด 1,000 มิลลิลิตร ที่มีน้ำกลั่นอยู่แล้ว 100 มิลลิลิตร พร้อมกับใช้แท่งแก้วคนให้สารละลายเข้ากันเป็นระยะ ในขณะที่เตรียมสารละลายนี้ต้องให้ Beaker อยู่ในอ่างน้ำเย็นตลอดเวลา
2. นำกระจกนาฬิกามาปิดไว้รอจนสารละลายเย็นที่อุณหภูมิ 20 ^{0}C
3. เมื่อสารละลายเย็นลงเติมน้ำกลั่นลงไปให้ได้ปริมาตร 1 ลิตร คนสารละลายให้เข้ากันอีกครั้ง เอากระจกนาฬิกามาปิด ทิ้งให้เย็นที่อุณหภูมิ 20 ^{0}C
4. เมื่อสารละลายเย็นลง เทใส่ลงในขวดสำหรับเก็บสารละลาย 72 %H_2SO_4 ก่อนนำสารละลาย 72 %H_2SO_4 มาใช้จะต้องวัดความถ่วงจำเพาะของสารละลายนี้ให้ได้ 1.643 ที่อุณหภูมิ 20 ^{0}Cในการวัดเพื่อหาความถ่วงจำเพาะ 1.643 ที่อุณหภูมิ 20^{0}C นั้น เริ่มจาก วางขวดสารละลาย 72%H_2SO_4 ลงในอ่างน้ำเย็น ใช้ปรอทวัดอุณหภูมิพออุณหภูมิ 20^{0}C ยกขึ้นจากอ่างน้ำเย็นเขย่าสารละลายกรดซัลฟุริกเข้มข้น 72% ในขวดเก็บสารละลายให้เข้ากันแล้วเทลงในกระบอก ตวงขนาด 500 มิลลิลิตร ใช้

เครื่องวัดความถ่วงจำเพาะวัดให้ได้เท่ากับ 1.643 ที่อุณหภูมิ 20 ^{0}Cถ้าค่าที่วัดได้สูงกว่า 1.643 ให้ค่อยๆเติมน้ำกลั่นลงไป แต่ถ้าต่ำกว่า 1.643 ให้เติมกรดซัลฟุริกเข้มข้นลงไปจนกว่าจะวัดได้ค่าความถ่วงจำเพาะ เท่ากับ 1.643 ที่อุณหภูมิ 20 ^{0}C จึงจะ นำไปใช้ได้

วิธีการ

1. นำ Crucible ที่มีตัวอย่างซึ่งวิเคราะห์หา ADF แล้วมาเติมสารละลาย 72% H_2SO_4 ที่เย็น (20^{0}C) ลงไป ประมาณครึ่ง Crucible จากนั้นนำไปวางลงในถาดสเตนเลส ใช้แท่งแก้วคนให้ ทั่วเพื่อให้ตัวอย่างแยกจากกัน ไม่จับกันเป็นก้อน โดยมีน้ำกลั่นที่อยู่ในถาดสเตนเลสระดับที่ต่ำ กว่าระดับของแผ่น fritted glass รักษาอุณหภูมิของ Crucible ในถาดสเตนเลสที่ 20 ^{0}C - 23 ^{0}C
2. คอยเติมสารละลาย 72% H_2SO_4 เมื่อสารละลายใน Crucible แห้ง คนเป็นระยะๆ ใช้เวลา ย่อยนาน 3 ชั่วโมง
3. จากนั้นนำไป suction เพื่อล้างสารละลายกรดออก แล้วล้างด้วยน้ำร้อน โดยใช้น้ำร้อนปริมาณ 1,400 มิลลิลิตร หรือจนหมดกรด จากนั้นใช้ขวดฉีดน้ำร้อน ไล่ตัวอย่างที่ติดอยู่ข้าง Crucible ให้ลงไปใน Crucible ให้หมด แล้วฉีดล้าง Crucible อีกหนึ่งครั้ง
4. นำ Crucible พร้อมตัวอย่างที่ย่อยแล้ว ไปอบในตู้อบแห้ง (Hot air oven) ที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส นาน 8 ชั่วโมง จากนั้นนำออกใส่โถดูดความชื้น (Dessicator) ปล่อยให้เย็น แล้วชั่ง น้ำหนักและบันทึกไว้

% Cellulose = (W1 - W4 x 100)/W3

เมื่อ

W1 = น้ำหนัก Crucible + น้ำหนัก ADF

W4 = น้ำหนัก Crucible + น้ำหนักเยื่อใยหลังการอบ

W3 = น้ำหนักตัวอย่าง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ก 6. วิธีวิเคราะห์ Lignin (Goering and Van Soest, 1970)

อุปกรณ์

1. เตาเผา (Muffle furnace)
2. โถดูดความชื้น (Dessicator)
3. เครื่องชั่ง (Balance) ชนิดทศนิยม 4 ตำแหน่ง

วิธีการ

1. นำ Crucible ที่มีตัวอย่างซึ่งวิเคราะห์หา Cellulose แล้วนำไปเผา (Ignite) ในเตาเผา ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส นาน 2 ชั่วโมง
2. เอาออกใส่ในโถดูดความชื้น ปล่อยให้เย็น ชั่งน้ำหนักหา Lignin

วิธีคำนวณ

% Lignin = (W4 - W5 x 100)/W3

เมื่อ W4 = น้ำหนัก Crucible + น้ำหนักเยื่อใยหลังการอบ
W5 = น้ำหนัก Crucible + น้ำหนัก เยื่อใยหลังการเผา (Ignite)
W3 = น้ำหนักตัวอย่าง

% เถ้าที่ไม่ละลายในกรด = (W5 - W2 x 100) / W3

เมื่อ W5 = น้ำหนัก Crucible + น้ำหนักเยื่อใยหลังการเผา (Ignite)
W2 = น้ำหนัก Crucible เปล่า ก่อนนำมาใช้วิเคราะห์หา ADF
W3 = น้ำหนักตัวอย่าง (Sample)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

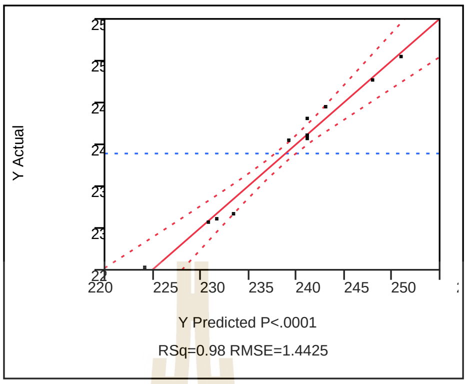
ภาคผนวก ข

ผลการทดสอบทางสถิติของพื้นผิวผลตอบ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

1. ผลทดสอบสถิติพื้นผิวผลตอบของปริมาณการเกิดแก๊สมีเทนสะสม

- การทดสอบการย่อยสลายด้วยคลื่นอัลตราโซนิค 37 kHz



Summary of Fit

RSquare	0.980516
RSquare Adj	0.96428
Root Mean Square Error	1.442516
Mean of Response	238.9034
Observations (or Sum Wgts)	12

Analysis of Variance

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Ratio
Model	5	628.31198	125.662	60.3899
Error	6	12.48511	2.081	**Prob > F**
C. Total	11	640.79709		<.0001*

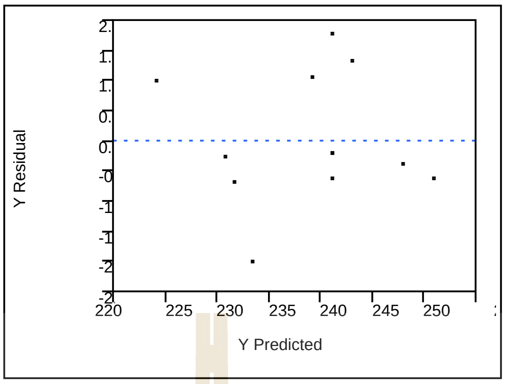
Lack of Fit

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Ratio
Lack Of Fit	3	9.005967	3.00199	2.5886
Pure Error	3	3.479146	1.15972	**Prob > F**
Total Error	6	12.485113		0.2277
				Max RSq

Parameter Estimates

Term	Estimate	Std Error	t Ratio	Prob>|t|
Intercept	241.22903	0.658415	366.38	<.0001*
Power(120,200)	8.58085	0.588905	14.57	<.0001*
Time(10,30)	4.7863833	0.588905	8.13	0.0002*
Power*Power	-1.727388	0.883357	-1.96	0.0983
Power*Time	1.0451	0.721258	1.45	0.1975
Time*Time	-2.923887	0.883357	-3.31	0.0162*

Residual by Predicted Plot



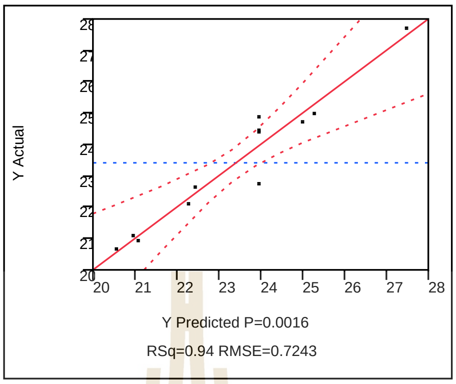
Prediction Expression

$$
\begin{aligned}
&241.229029166667 \\
&+ 8.58085 * \left[\frac{(\text{Power} - 160)}{40}\right] \\
&+ 4.78638333333334 * \left[\frac{(\text{Time} - 20)}{10}\right] \\
&+ \left[\frac{(\text{Power} - 160)}{40}\right] * \left[\left[\frac{(\text{Power} - 160)}{40}\right] * -1.7273875\right] \\
&+ \left[\frac{(\text{Power} - 160)}{40}\right] * \left[\left[\frac{(\text{Time} - 20)}{10}\right] * 1.04510000000001\right] \\
&+ \left[\frac{(\text{Time} - 20)}{10}\right] * \left[\left[\frac{(\text{Time} - 20)}{10}\right] * -2.9238875\right]
\end{aligned}
$$

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

2. ผลทดสอบสถิติพื้นผิวผลตอบของอัตราการเกิดแก๊สมีเทนจำเพาะสูงสุด

- การทดสอบการย่อยสลายด้วยคลื่นอัลตราโซนิค 37 kHz



Summary of Fit

RSquare	0.935503
RSquare Adj	0.881756
Root Mean Square Error	0.724327
Mean of Response	23.41333
Observations (or Sum Wgts)	12

Analysis of Variance

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Ratio
Model	5	45.659367	9.13187	17.4056
Error	6	3.147900	0.52465	**Prob > F**
C. Total	11	48.807267		0.0016*

Lack Of Fit

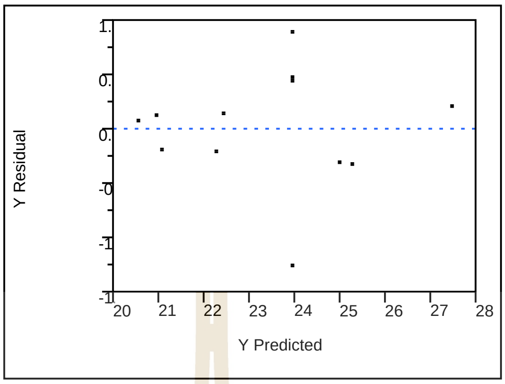
Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Ratio
Lack Of Fit	3	0.4393000	0.146433	0.1622
Pure Error	3	2.7086000	0.902867	**Prob > F**
Total Error	6	3.1479000		0.9153
				Max RSq

Parameter Estimates

Term	Estimate	Std Error	t Ratio	Prob>|t|
Intercept	23.968333	0.330609	72.50	<.0001*
Power(120,200)	2.105	0.295705	7.12	0.0004*
Time(10,30)	1.3583333	0.295705	4.59	0.0037*
Power*Power	-0.78	0.443558	-1.76	0.1292
Power*Time	1.155	0.362164	3.19	0.0189*
Time*Time	-0.33	0.443558	-0.74	0.4850

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

Residual by Predicted Plot



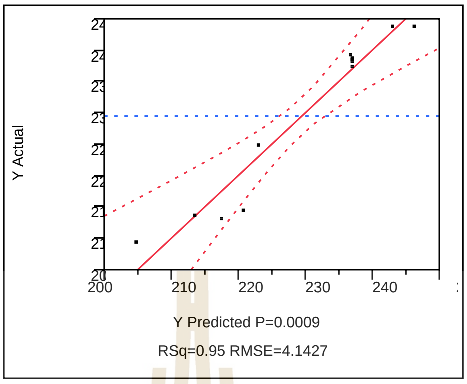
Prediction Expression

$$
\begin{aligned}
&23.9683333333333 \\
&+ 2.105 * \left(\frac{(\text{Power} - 160)}{40}\right) \\
&+ 1.35833333333333 * \left(\frac{(\text{Time} - 20)}{10}\right) \\
&+ \left(\frac{(\text{Power} - 160)}{40}\right) * \left(\left(\frac{(\text{Power} - 160)}{40}\right) * -0.78\right) \\
&+ \left(\frac{(\text{Power} - 160)}{40}\right) * \left(\left(\frac{(\text{Time} - 20)}{10}\right) * 1.155\right) \\
&+ \left(\frac{(\text{Time} - 20)}{10}\right) * \left(\left(\frac{(\text{Time} - 20)}{10}\right) * -0.33\right)
\end{aligned}
$$

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

3. ผลทดสอบสถิติพื้นผิวผลตอบของปริมาณการเกิดแก๊สมีเทนสะสม

- การทดสอบการย่อยสลายด้วยคลื่นอัลตราโซนิค 102 kHz



Summary of Fit

RSquare	0.947899
RSquare Adj	0.904481
Root Mean Square Error	4.142727
Mean of Response	229.473
Observations (or Sum Wgts)	12

Analysis of Variance

Source	**DF**	**Sum of Squares**	**Mean Square**	**F Ratio**
Model	5	1873.4364	374.687	21.8321
Error	6	102.9731	17.162	**Prob > F**
C. Total	11	1976.4095		0.0009*

Lack of Fit

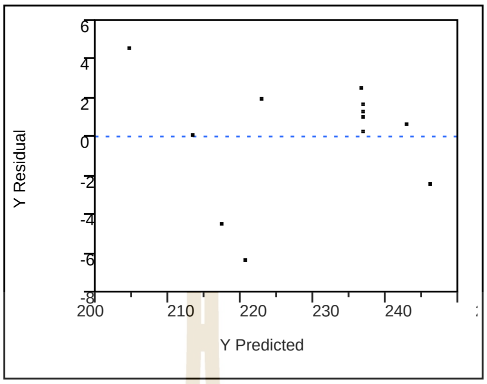
Source	**DF**	**Sum of Squares**	**Mean Square**	**F Ratio**
Lack Of Fit	3	101.90428	33.9681	95.3391
Pure Error	3	1.06886	0.3563	**Prob > F**
Total Error	6	102.97314		0.0018*
				Max RSq

Parameter Estimates

Term	**Estimate**	**Std Error**	**t Ratio**	**Prob>|t|**
Intercept	237.05137	1.890888	125.37	<.0001*
Power(120,200)	12.72	1.691261	7.52	0.0003*
Time(10,30)	8.0330833	1.691261	4.75	0.0032*
Power*Power	-6.7871	2.536892	-2.68	0.0368*
Power*Time	3.65735	2.071364	1.77	0.1279
Time*Time	-8.36965	2.536892	-3.30	0.0164*

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

Residual by Predicted Plot



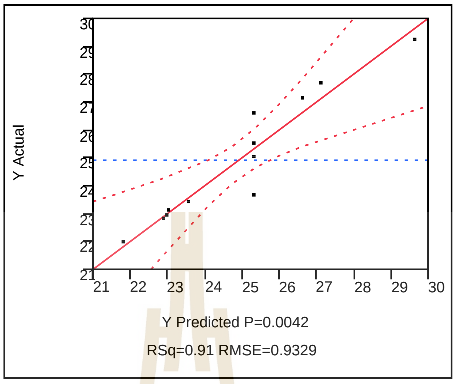
Prediction Expression

$$237.051366666667 + 12.72 * \left(\frac{Power - 160}{40}\right) + 8.03308333333333 * \left(\frac{Time - 20}{10}\right) + \left(\frac{Power - 160}{40}\right) * \left(\left(\frac{Power - 160}{40}\right) * -6.7871\right) + \left(\frac{Power - 160}{40}\right) * \left(\left(\frac{Time - 20}{10}\right) * 3.65735\right) + \left(\frac{Time - 20}{10}\right) * \left(\left(\frac{Time - 20}{10}\right) * -8.36965\right)$$

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

4. ผลทดสอบสถิติพื้นผิวผลตอบของอัตราการเกิดแก๊สมีเทนจำเพาะสูงสุด

- การทดสอบการย่อยสลายด้วยคลื่นอัลตราโซนิค 102 kHz



Summary of Fit

RSquare	0.911096
RSquare Adj	0.837009
Root Mean Square Error	0.932873
Mean of Response	24.91167
Observations (or Sum Wgts)	12

Analysis of Variance

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Ratio
Model	5	53.510254	10.7021	12.2976
Error	6	5.221513	0.8703	**Prob > F**
C. Total	11	58.731767		0.0042*

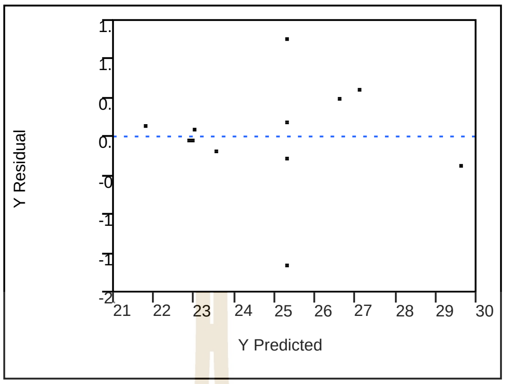
Lack of Fit

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Ratio
Lack Of Fit	3	0.8576375	0.28588	0.1965
Pure Error	3	4.3638750	1.45463	**Prob > F**
Total Error	6	5.2215125		0.8927
				Max RSq

Parameter Estimates

Term	Estimate	Std Error	t Ratio	Prob>|t|
Intercept	25.315417	0.425796	59.45	<.0001*
Power(120,200)	2.1066667	0.380844	5.53	0.0015*
Time(10,30)	1.805	0.380844	4.74	0.0032*
Power*Power	-0.32125	0.571266	-0.56	0.5942
Power*Time	1.225	0.466437	2.63	0.0393*
Time*Time	-0.48625	0.571266	-0.85	0.4273

Residual by Predicted Plot



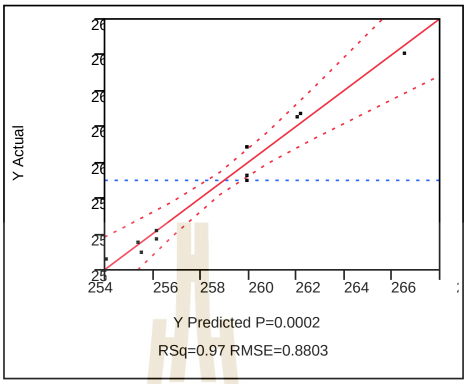
Prediction Expression

$$
\begin{aligned}
&25.3154166666667 \\
&+ 2.10666666666667 * \left(\frac{(Power - 160)}{40}\right) \\
&+ 1.805 * \left(\frac{(Time - 20)}{10}\right) \\
&+ \left(\frac{(Power - 160)}{40}\right) * \left(\left(\frac{(Power - 160)}{40}\right) * -0.32125\right) \\
&+ \left(\frac{(Power - 160)}{40}\right) * \left(\left(\frac{(Time - 20)}{10}\right) * 1.225\right) \\
&+ \left(\frac{(Time - 20)}{10}\right) * \left(\left(\frac{(Time - 20)}{10}\right) * -0.48625\right)
\end{aligned}
$$

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

5. ผลทดสอบสถิติพื้นผิวผลตอบของปริมาณการเกิดแก๊สมีเทนสะสม

- การทดสอบการย่อยสลายแบบผสมผสานความร้อนร่วมกับคลื่นอัลตราโซนิค 37 kHz



Summary of Fit

RSquare	0.96885
RSquare Adj	0.942893
Root Mean Square Error	0.8803
Mean of Response	258.9924
Observations (or Sum Wgts)	12

Analysis of Variance

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Ratio
Model	5	144.61659	28.9233	37.3239
Error	6	4.64957	0.7749	**Prob > F**
C. Total	11	149.26616		0.0002*

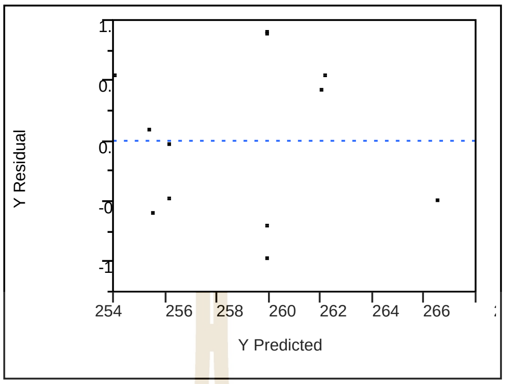
Lack of Fit

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Ratio
Lack Of Fit	3	1.6115188	0.53717	0.5304
Pure Error	3	3.0380505	1.01268	**Prob > F**
Total Error	6	4.6495693		0.6922
				Max RSq

Parameter Estimates

Term	Estimate	Std Error	t Ratio	Prob>|t|
Intercept	259.94512	0.4018	646.95	<.0001*
Power(120,200)	3.3046333	0.359381	9.20	<.0001*
Time(10,30)	2.93495	0.359381	8.17	0.0002*
Power*Power	-1.066513	0.539071	-1.98	0.0952
Power*Time	2.241425	0.44015	5.09	0.0022*
Time*Time	-0.838963	0.539071	-1.56	0.1706

Residual by Predicted Plot



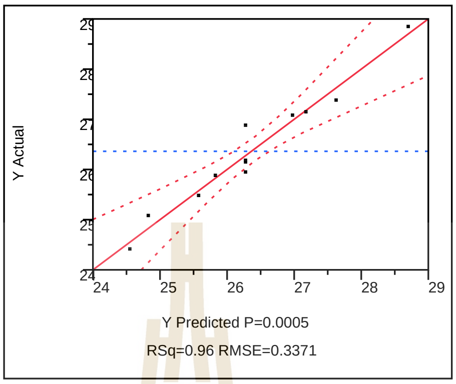
Prediction Expression

$$
\begin{aligned}
&259.945120833333 \\
&+ 3.30463333333332 * \left(\frac{(Power - 160)}{40}\right) \\
&+ 2.93495 * \left(\frac{(Time - 20)}{10}\right) \\
&+ \left(\frac{(Power - 160)}{40}\right) * \left(\left(\frac{(Power - 160)}{40}\right) * -1.0665125\right) \\
&+ \left(\frac{(Power - 160)}{40}\right) * \left(\left(\frac{(Time - 20)}{10}\right) * 2.24142499999999\right) \\
&+ \left(\frac{(Time - 20)}{10}\right) * \left(\left(\frac{(Time - 20)}{10}\right) * -0.8389625\right)
\end{aligned}
$$

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

6. ผลทดสอบสถิติพื้นผิวผลตอบของอัตราการเกิดแก๊สมีสูงสุด

- การทดสอบการย่อยสลายแบบผสมผสานความร้อนร่วมกับคลื่นอัลตราโซนิค 37 kHz



Summary of Fit

RSquare	0.95554
RSquare Adj	0.91849
Root Mean Square Error	0.337056
Mean of Response	26.3625
Observations (or Sum Wgts)	12

Analysis of Variance

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Ratio
Model	5	14.649983	2.93000	25.7906
Error	6	0.681642	0.11361	**Prob > F**
C. Total	11	15.331625		0.0005*

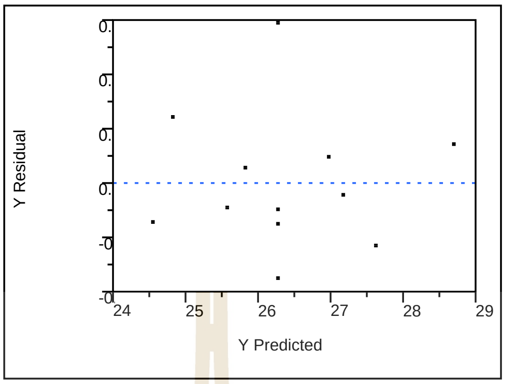
Lack Of Fit

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Ratio
Lack Of Fit	3	0.17856667	0.059522	0.3550
Pure Error	3	0.50307500	0.167692	**Prob > F**
Total Error	6	0.68164167		0.7912
				Max RSq

Parameter Estimates

Term	Estimate	Std Error	t Ratio	Prob>|t|
Intercept	26.28	0.153844	170.82	<.0001*
Power(120,200)	1.3883333	0.137603	10.09	<.0001*
Time(10,30)	0.6866667	0.137603	4.99	0.0025*
Power*Power	-0.055	0.206404	-0.27	0.7988
Power*Time	0.1775	0.168528	1.05	0.3328
Time*Time	0.22	0.206404	1.07	0.3275

Residual by Predicted Plot



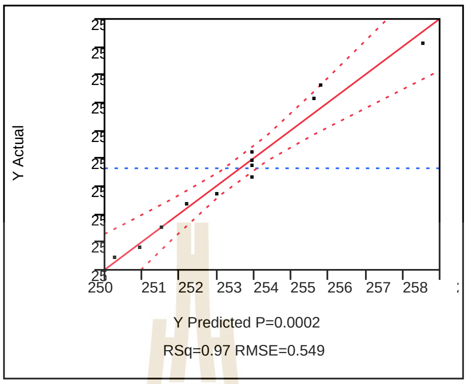
Prediction Expression

$$26.28 + 1.38833333333333 * \left(\frac{(Power - 160)}{40}\right) + 0.68666666666667 * \left(\frac{(Time - 20)}{10}\right) + \left(\frac{(Power - 160)}{40}\right) * \left(\left(\frac{(Power - 160)}{40}\right) * -0.055\right) + \left(\frac{(Power - 160)}{40}\right) * \left(\left(\frac{(Time - 20)}{10}\right) * 0.1775\right) + \left(\frac{(Time - 20)}{10}\right) * \left(\left(\frac{(Time - 20)}{10}\right) * 0.22\right)$$

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

7. ผลทดสอบสถิติพื้นผิวผลตอบของปริมาณการเกิดแก๊สมีเทนสะสม

- การทดสอบการย่อยสลายแบบผสมผสานความร้อนร่วมกับคลื่นอัลตราโซนิค 102 kHz



Summary of Fit

RSquare	0.970163
RSquare Adj	0.9453
Root Mean Square Error	0.548986
Mean of Response	253.6434
Observations (or Sum Wgts)	12

Analysis of Variance

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Ratio
Model	5	58.799062	11.7598	39.0192
Error	6	1.808314	0.3014	**Prob > F**
C. Total	11	60.607376		0.0002*

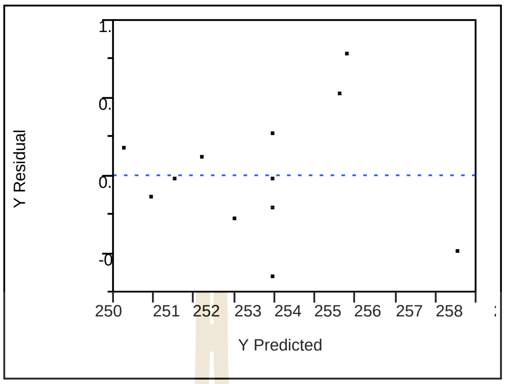
Lack Of Fit

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Ratio
Lack Of Fit	3	1.3545700	0.451523	2.9853
Pure Error	3	0.4537438	0.151248	**Prob > F**
Total Error	6	1.8083138		0.1965
				Max RSq

Parameter Estimates

Term	Estimate	Std Error	t Ratio	Prob>|t|
Intercept	253.94728	0.250577	1013.5	<.0001*
Power(120,200)	2.4399333	0.224123	10.89	<.0001*
Time(10,30)	1.7027833	0.224123	7.60	0.0003*
Power*Power	-0.571925	0.336184	-1.70	0.1398
Power*Time	1.07895	0.274493	3.93	0.0077*
Time*Time	-0.035775	0.336184	-0.11	0.9187

Residual by Predicted Plot



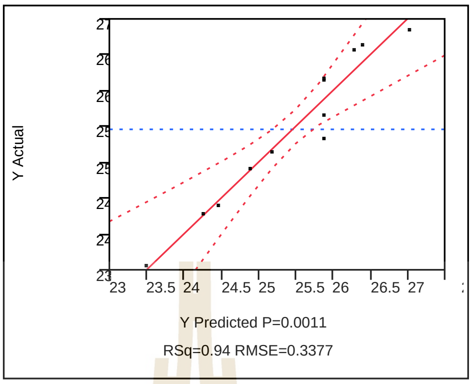
Prediction Expression

$$
\begin{aligned}
&253.947275 \\
&+ 2.43993333333334 * \left(\frac{(Power - 160)}{40}\right) \\
&+ 1.70278333333334 * \left(\frac{(Time - 20)}{10}\right) \\
&+ \left(\frac{(Power - 160)}{40}\right) * \left(\left(\frac{(Power - 160)}{40}\right) * -0.571925\right) \\
&+ \left(\frac{(Power - 160)}{40}\right) * \left(\left(\frac{(Time - 20)}{10}\right) * 1.07895000000001\right) \\
&+ \left(\frac{(Time - 20)}{10}\right) * \left(\left(\frac{(Time - 20)}{10}\right) * -0.035775\right)
\end{aligned}
$$

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

7. ผลทดสอบสถิติพื้นผิวผลตอบของอัตราการเกิดแก๊สมีสูงสุด

- การทดสอบการย่อยสลายแบบผสมผสานความร้อนร่วมกับคลื่นอัลตราโซนิค 102 kHz



Summary of Fit

RSquare	0.943685
RSquare Adj	0.896755
Root Mean Square Error	0.33765
Mean of Response	25.45917
Observations (or Sum Wgts)	12

Analysis of Variance

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Ratio
Model	5	11.462646	2.29253	20.1086
Error	6	0.684046	0.11401	**Prob > F**
C. Total	11	12.146692		0.0011*

Lack of Fit

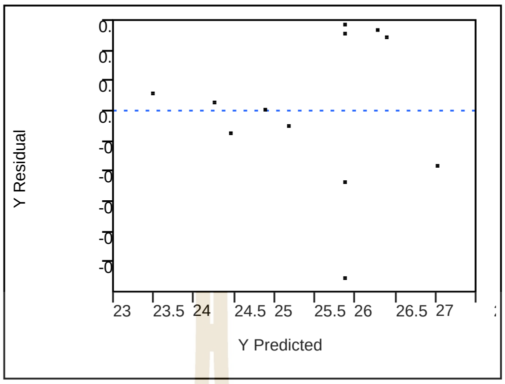
Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Ratio
Lack Of Fit	3	0.19017083	0.063390	0.3851
Pure Error	3	0.49387500	0.164625	**Prob > F**
Total Error	6	0.68404583		0.7731
				Max RSq

Parameter Estimates

Term	Estimate	Std Error	t Ratio	Prob>|t|
Intercept	25.877917	0.154116	167.91	<.0001*
Power(120,200)	1.0683333	0.137845	7.75	0.0002*
Time(10,30)	0.7016667	0.137845	5.09	0.0022*
Power*Power	-0.55375	0.206768	-2.68	0.0366*
Power*Time	0.215	0.168825	1.27	0.2499
Time*Time	-0.28375	0.206768	-1.37	0.2191

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

Residual by Predicted Plot



Prediction Expression

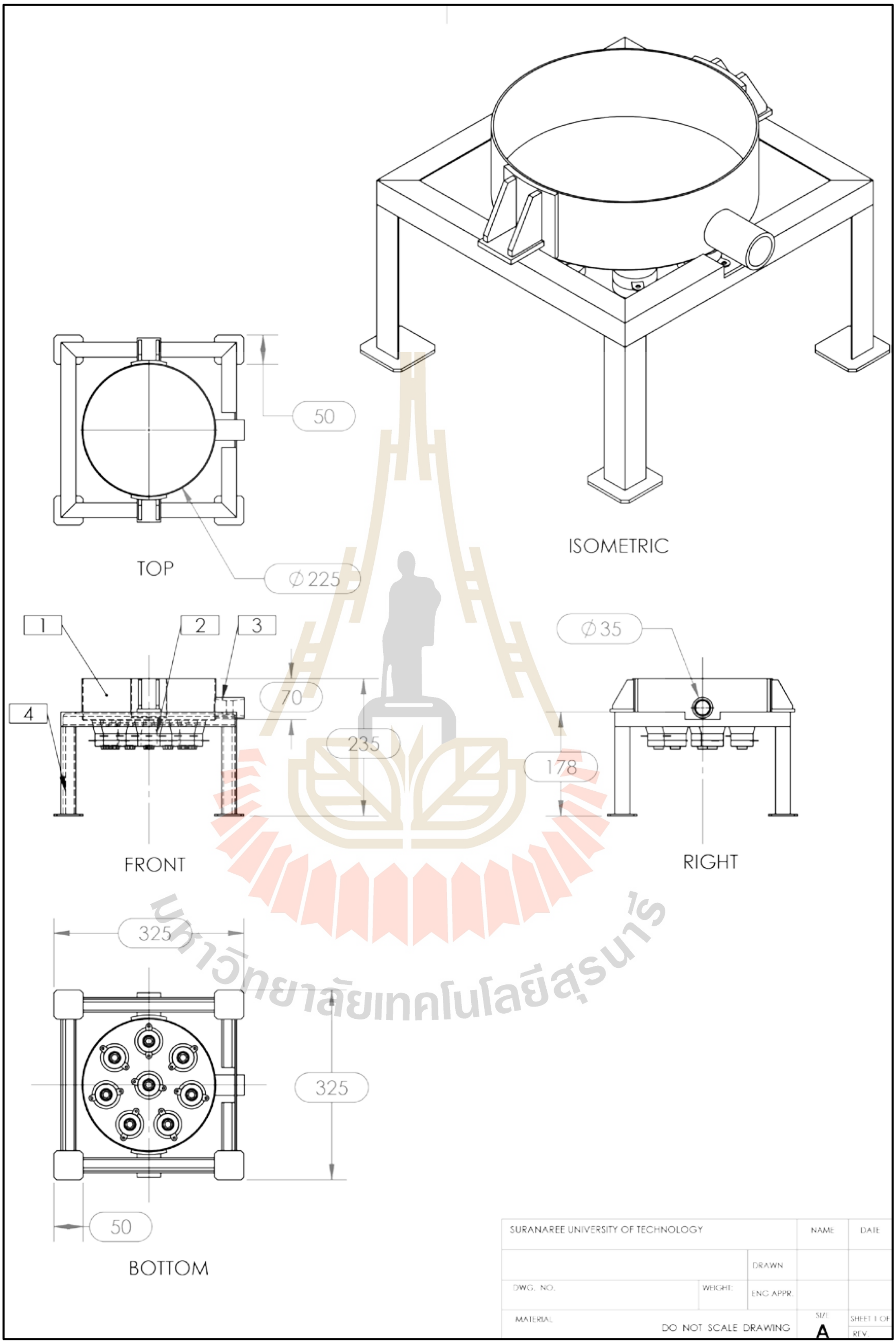
$$
\begin{aligned}
&25.8779166666667 \\
&+ 1.06833333333333 * \left(\frac{(\text{Power} - 160)}{40}\right) \\
&+ 0.70166666666667 * \left(\frac{(\text{Time} - 20)}{10}\right) \\
&+ \left(\frac{(\text{Power} - 160)}{40}\right) * \left(\left(\frac{(\text{Power} - 160)}{40}\right) * -0.55375\right) \\
&+ \left(\frac{(\text{Power} - 160)}{40}\right) * \left(\left(\frac{(\text{Time} - 20)}{10}\right) * 0.215\right) \\
&+ \left(\frac{(\text{Time} - 20)}{10}\right) * \left(\left(\frac{(\text{Time} - 20)}{10}\right) * -0.28375\right)
\end{aligned}
$$

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

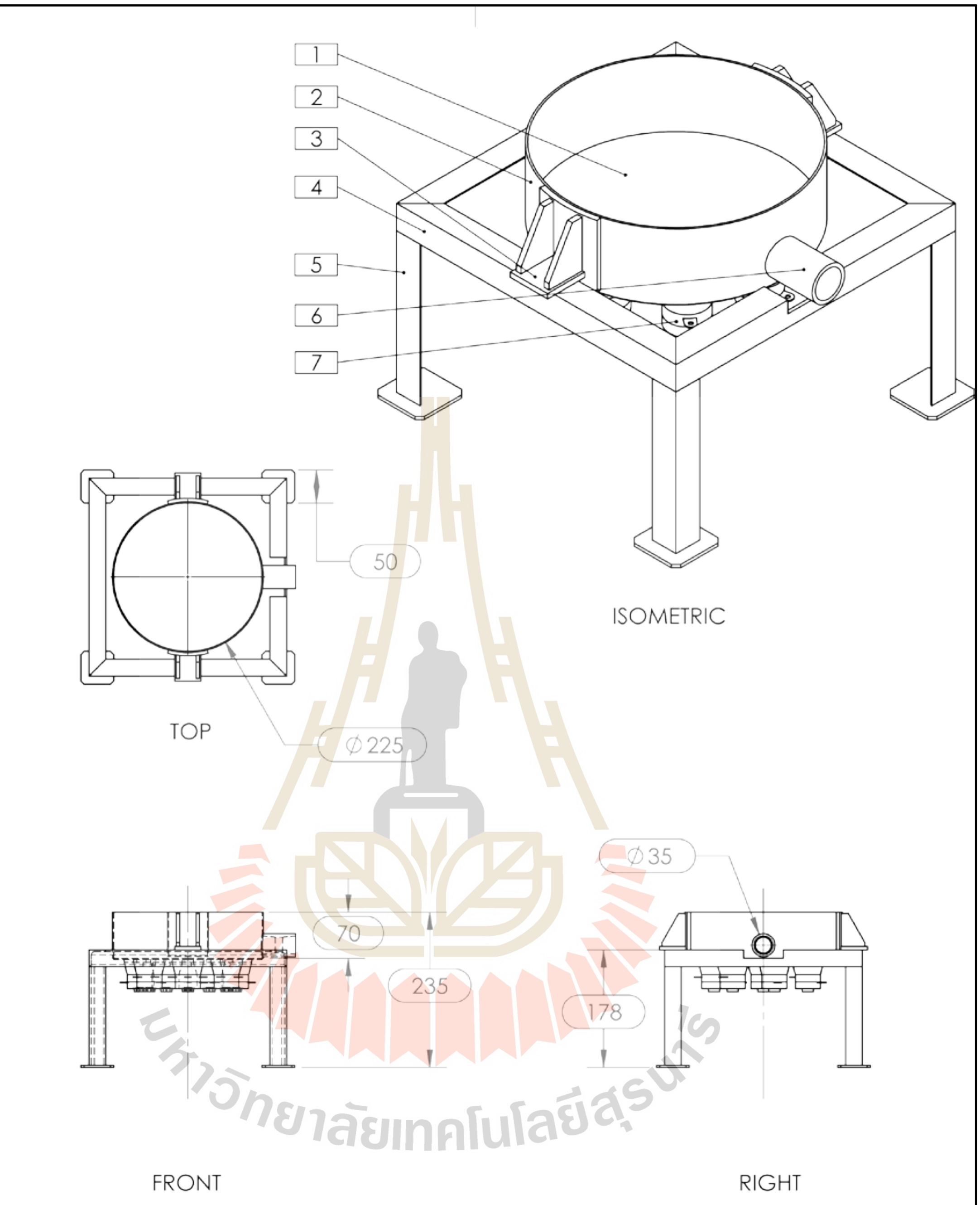
ภาคผนวก ค

แบบรายละเอียดการจัดสร้างระบบอัลตราโซนิคและถังปฏิกิริยา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

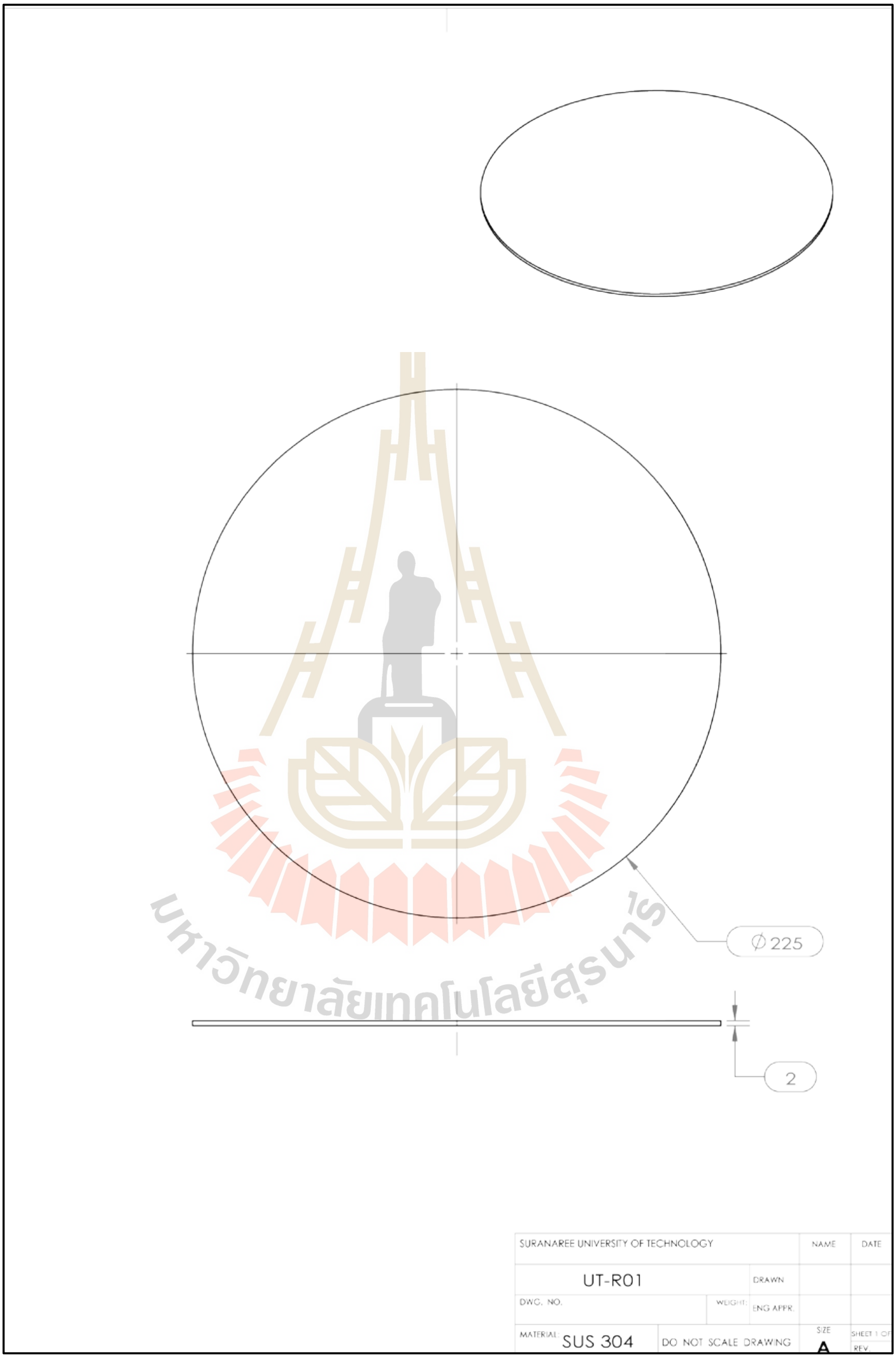
ITEM NO.	PART NUMBER	DESCRIPTION	QTY.
1	UT-R01		1
2	UT-R02		1
3	UT-R04		2
4	UT-R05		1
5	UT-R06		4
6	UT-R07		1
7	TSPN 002		8

SURANAREE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY | NAME | DATE

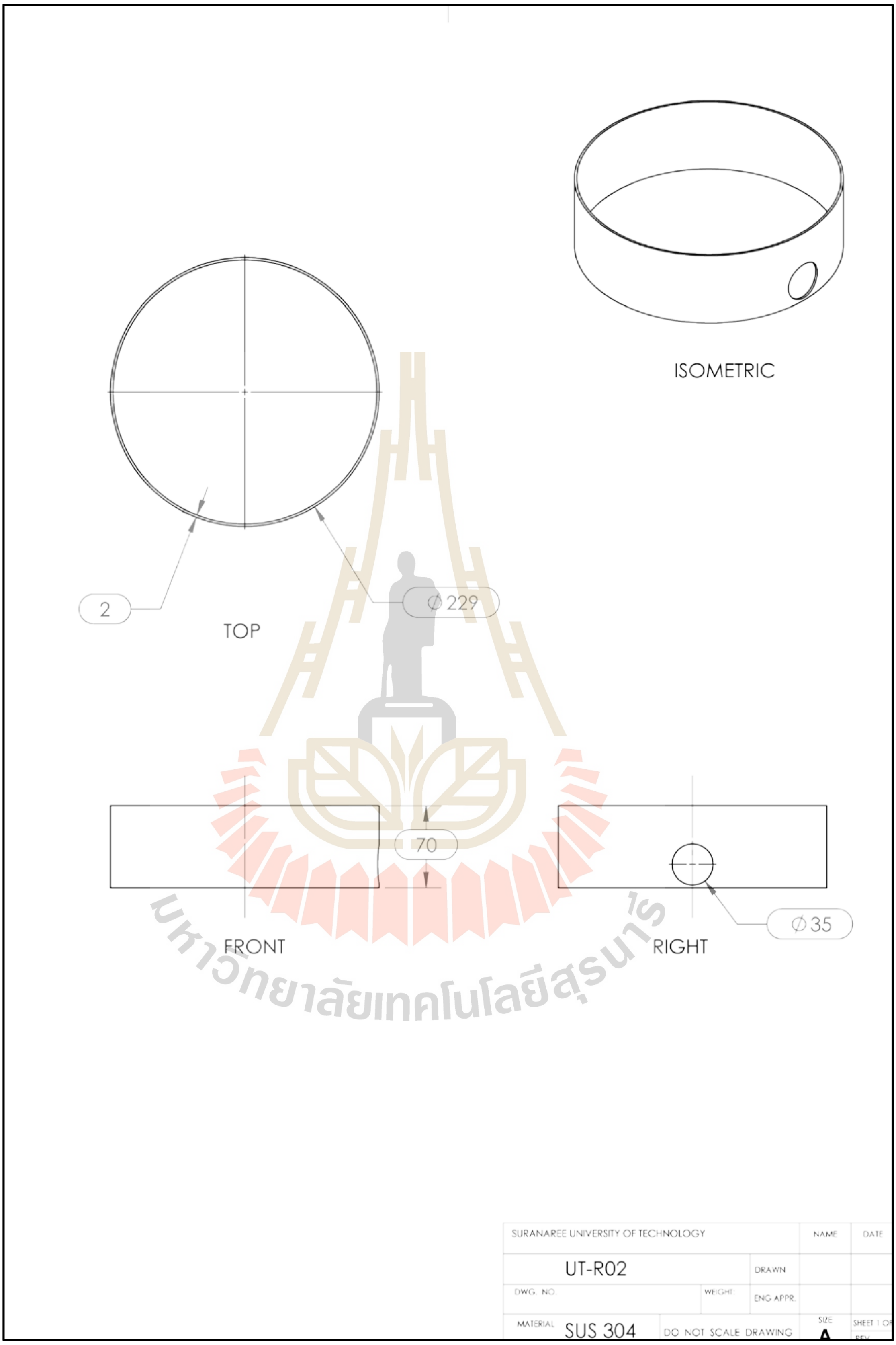
TSPN-CDRW-01-001 | DRAWN

DWG. NO. | WEIGHT: | ENG APPR.

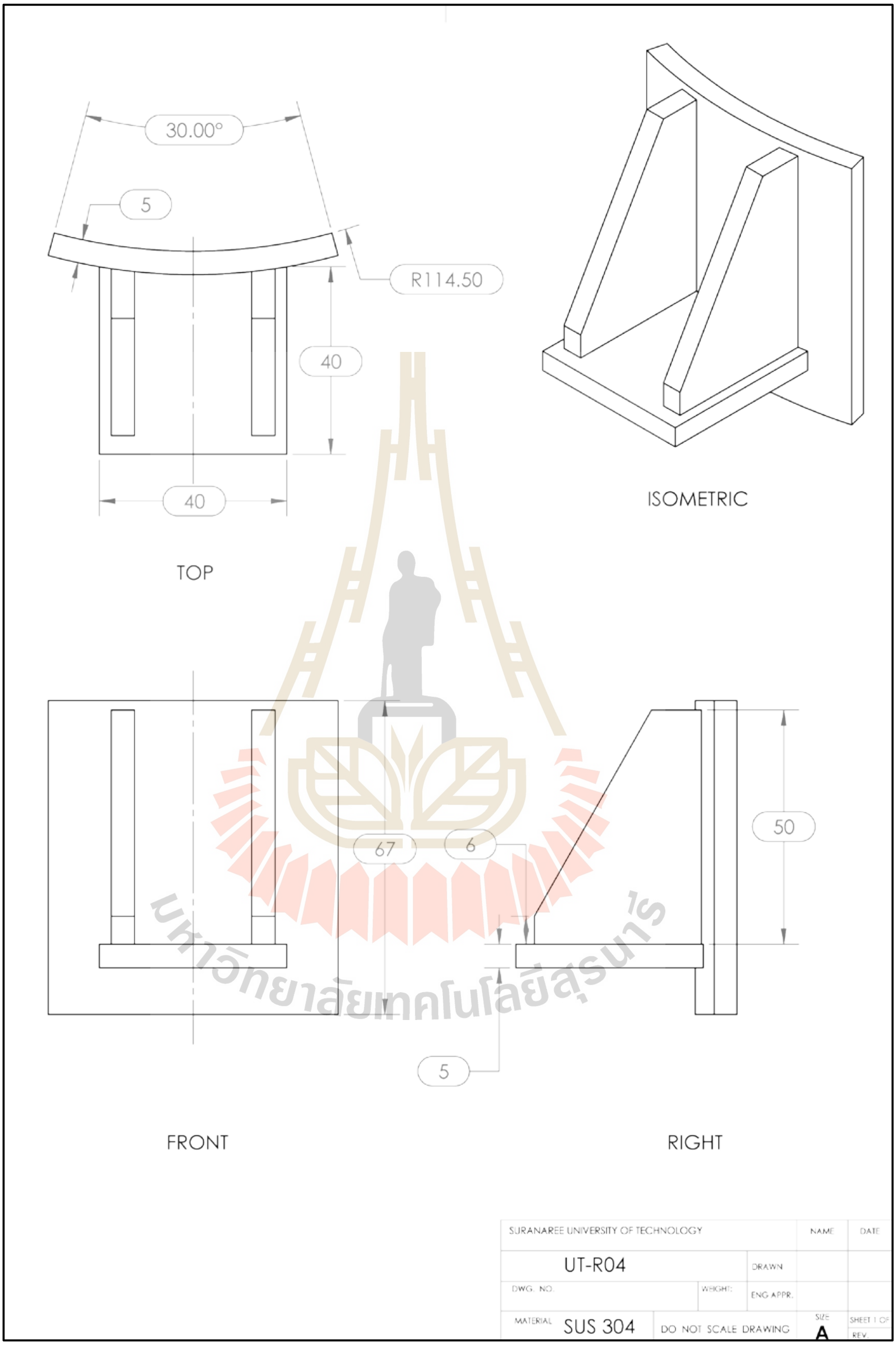
MATERIAL | DO NOT SCALE DRAWING | SIZE A | SHEET 1 OF | REV



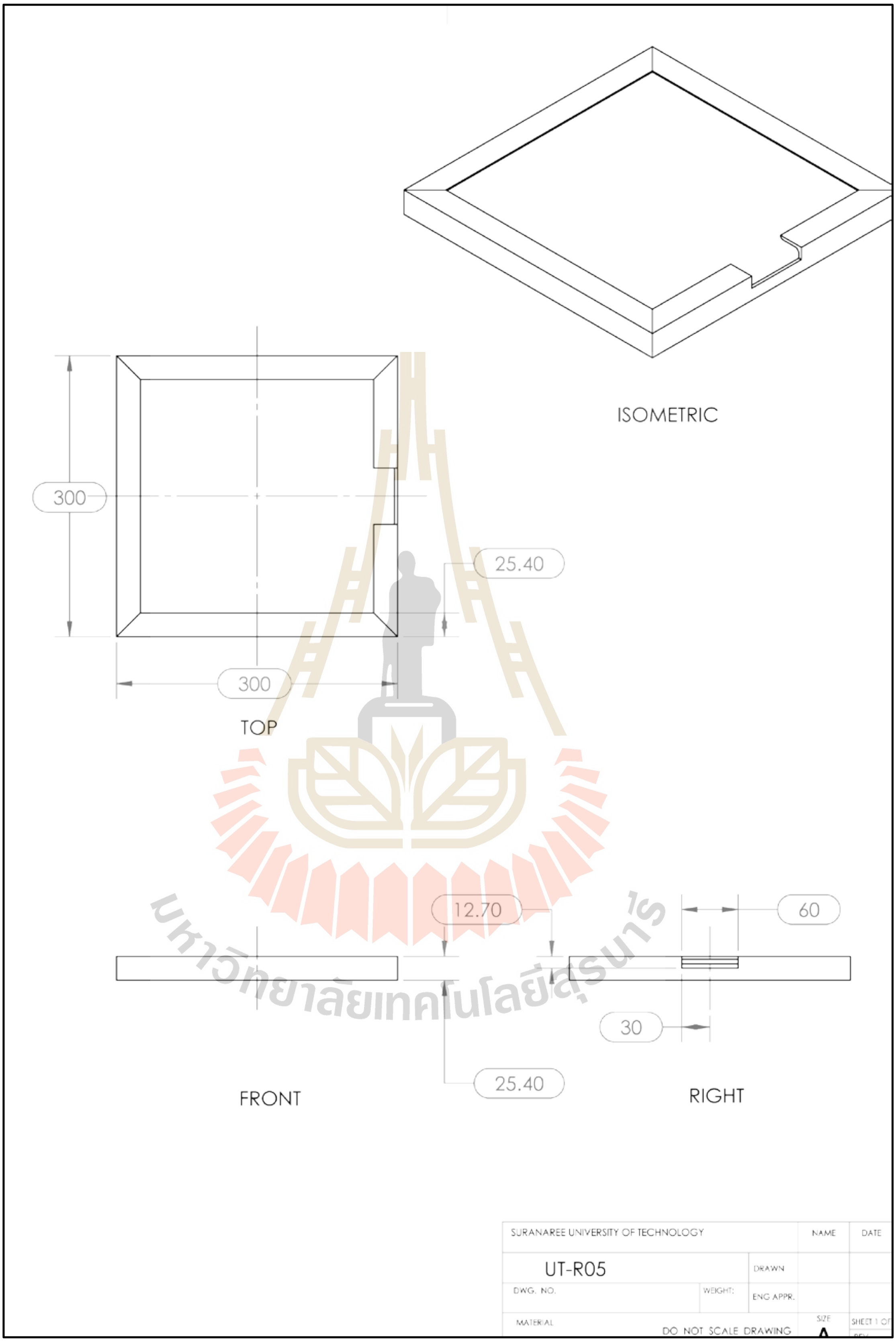
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



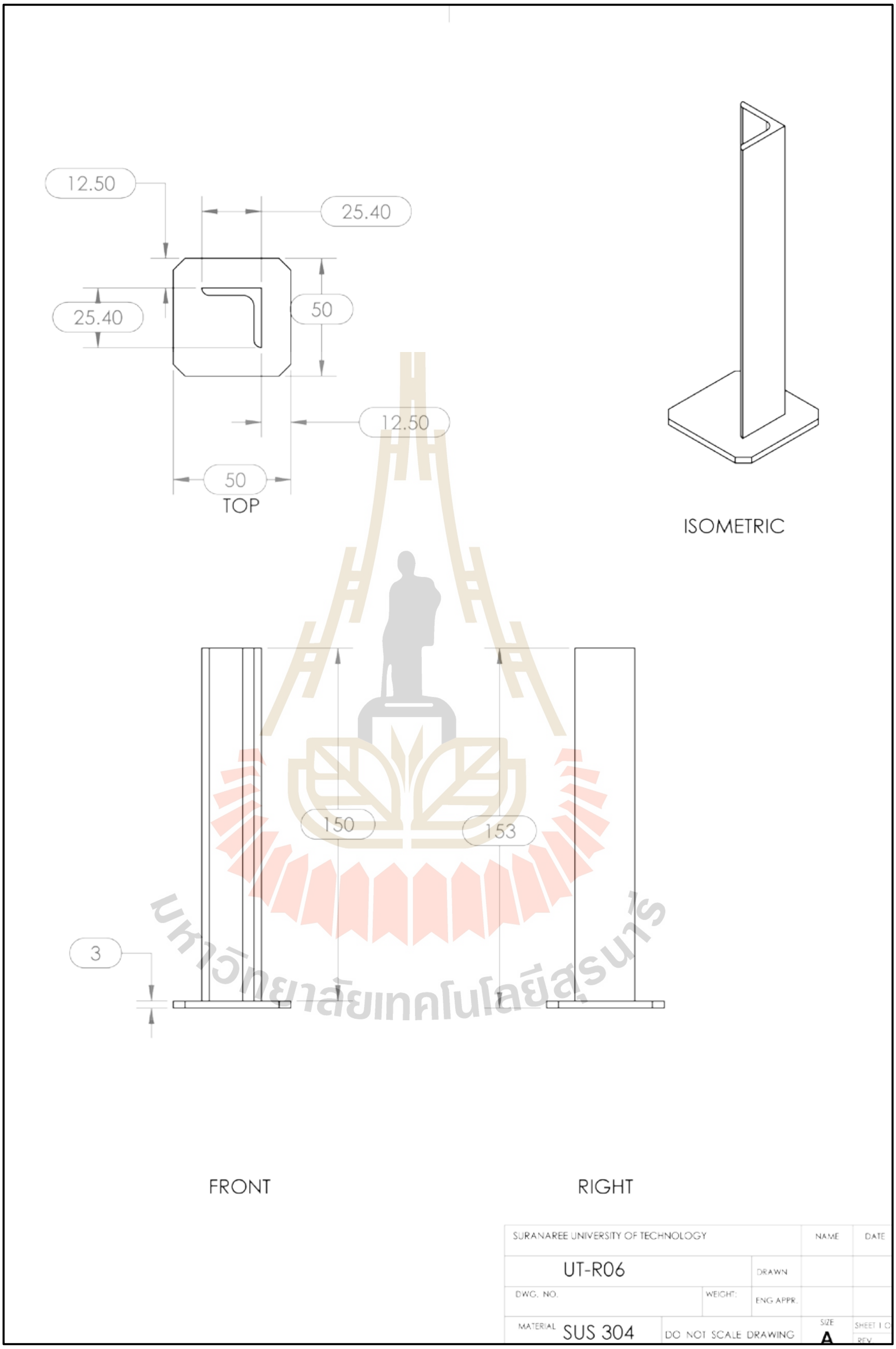
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



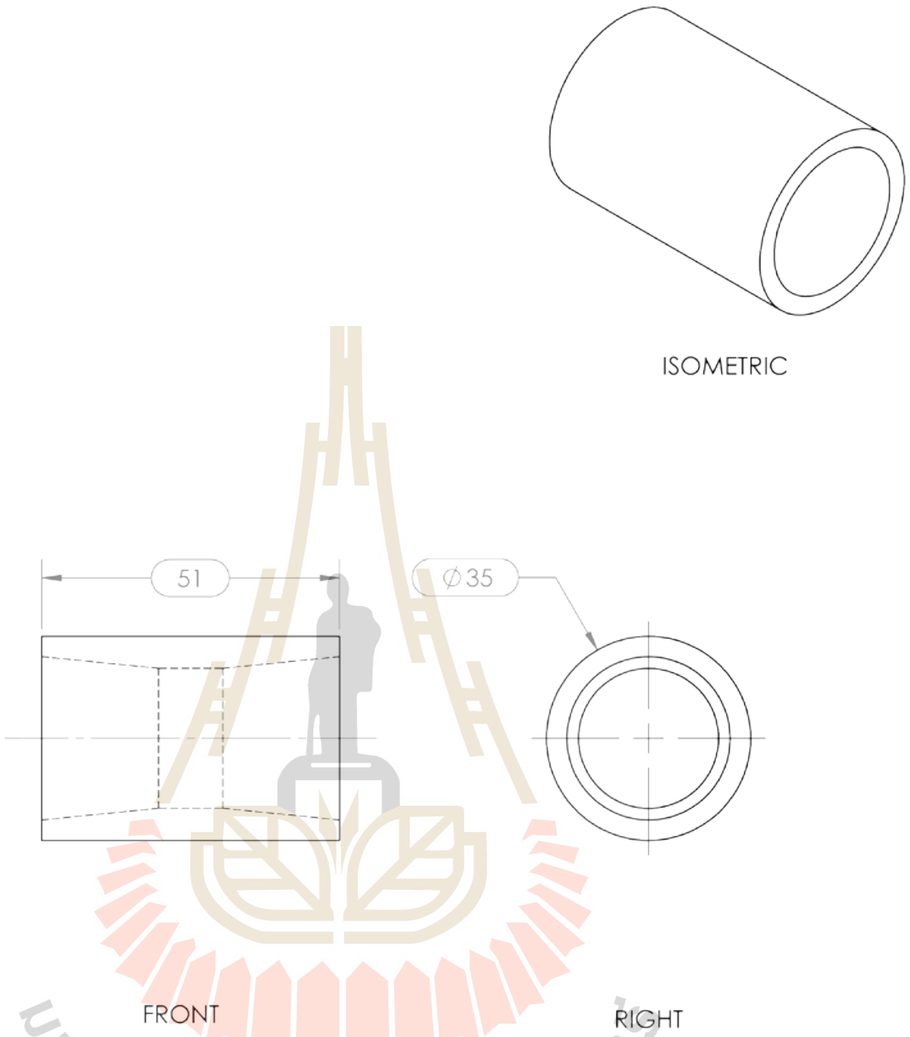
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

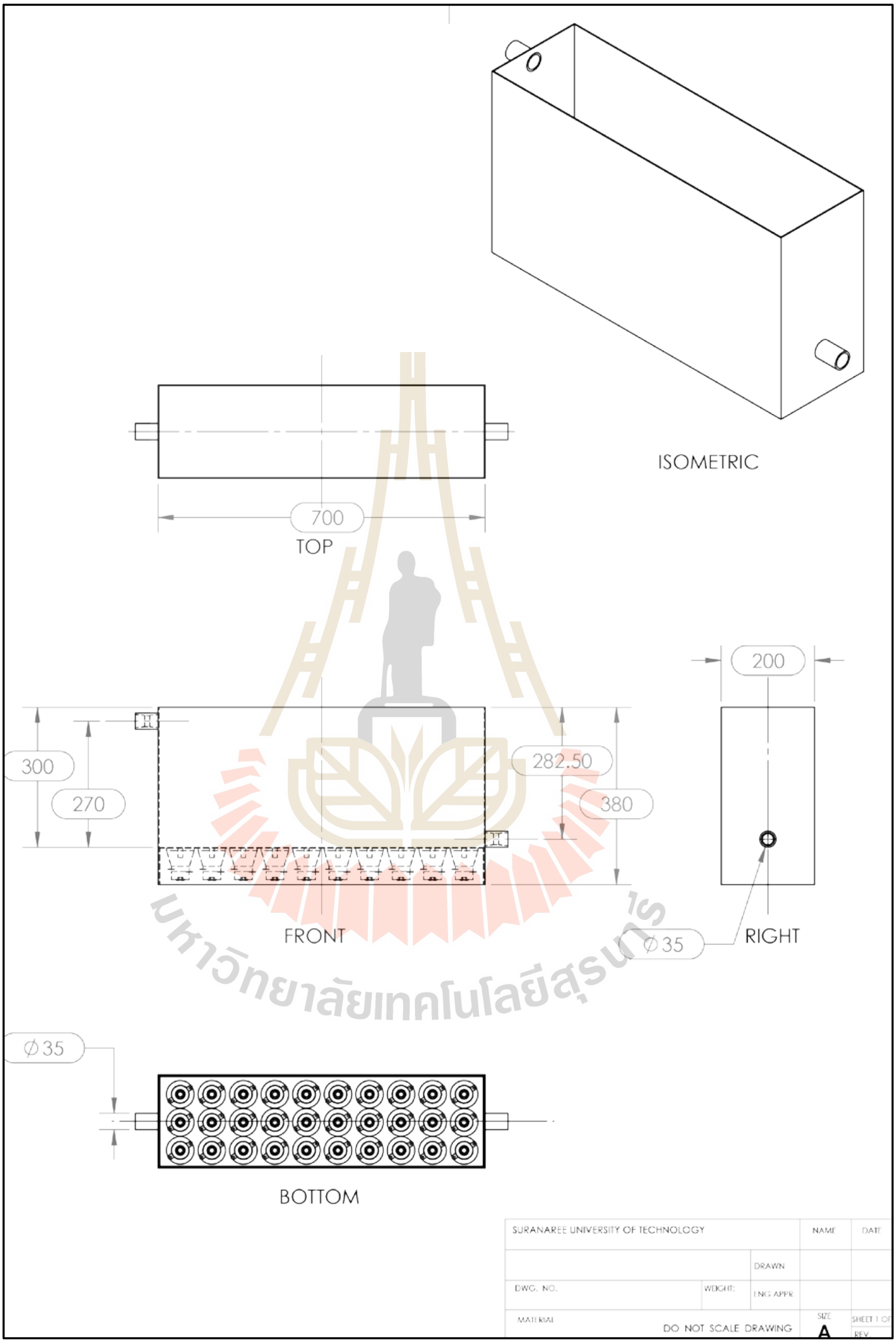


มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

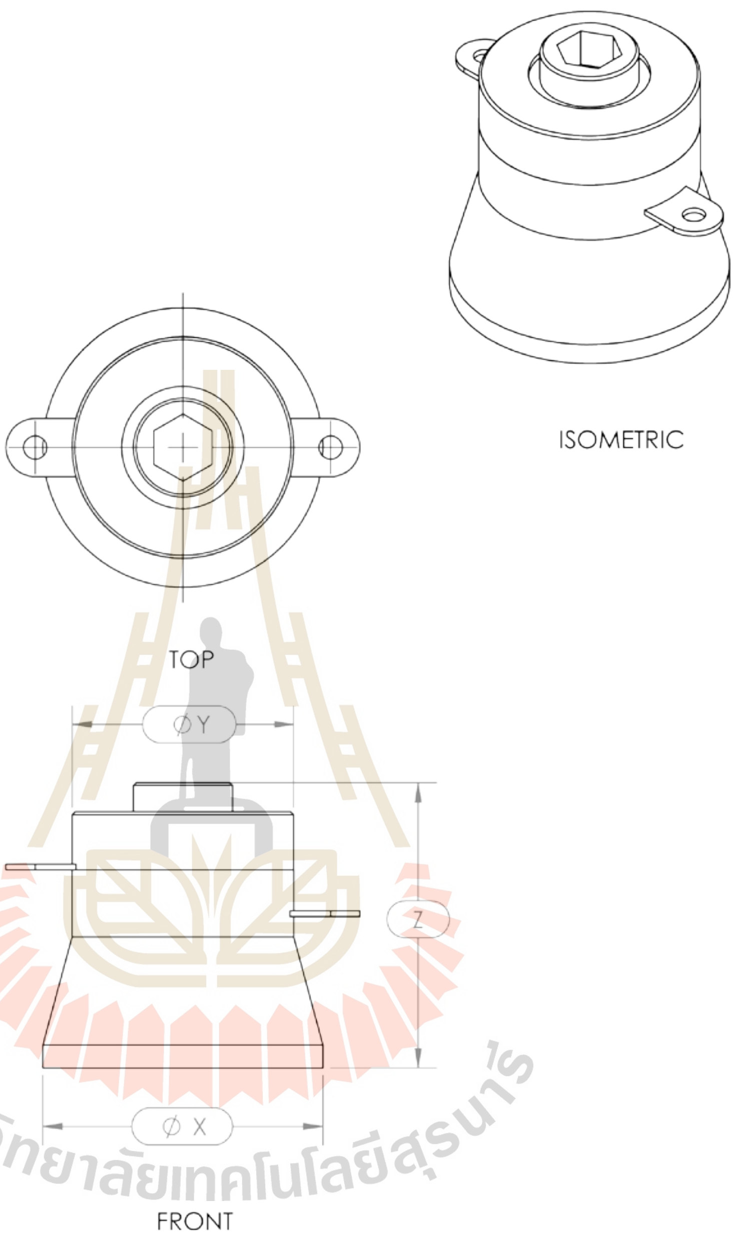


มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

SURANAREE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY			NAME	DATE
UT-R07		DRAWN		
DWG. NO.	WEIGHT:	ENG APPR.		
MATERIAL SUS 304	DO NOT SCALE DRAWING		SIZE A	SHEET 1 OF / REV



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

Note: Medium-high frequency (60-200Khz)

Type : HNC-4SS-38100

Resonance Frequency (KHz): 100 ± 1.5

Static capacitance (pF): 5100 ± 10%

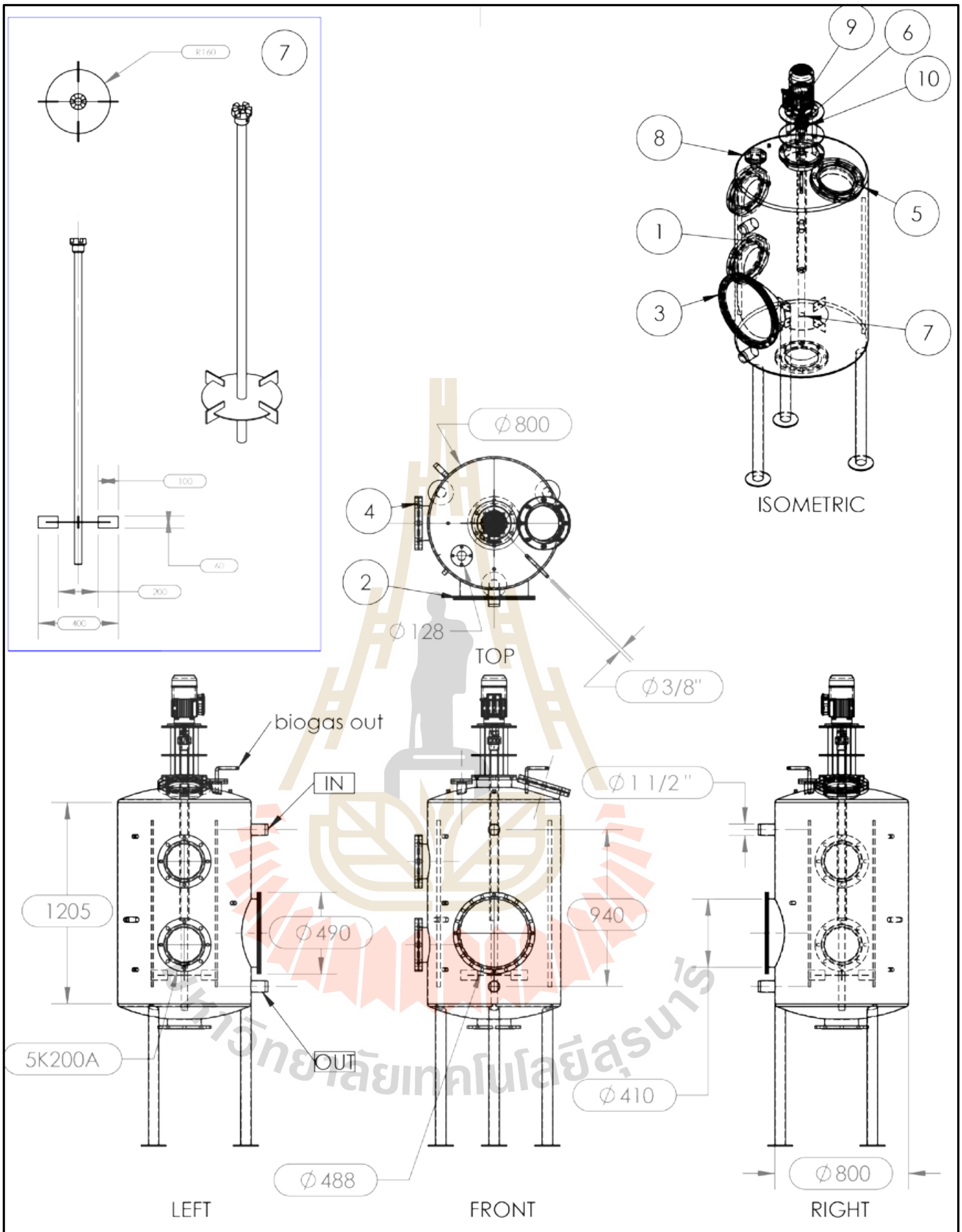
Resonance impedance(Ohm) : 25 Ohm

Size Diameter * Hight : 40*57

Power(W) : 60W

Insulation impedance(250VDC):100 MOhm

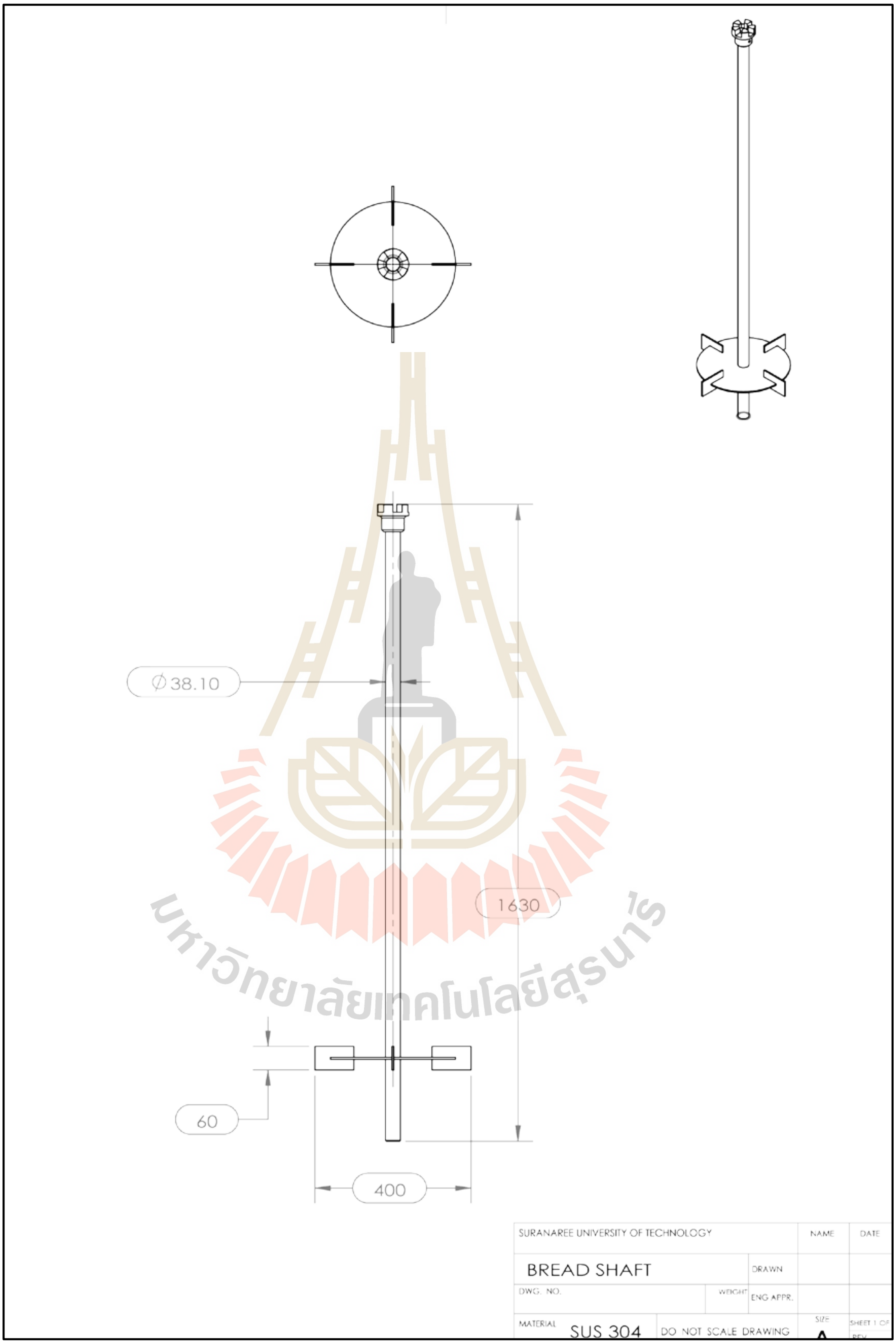
SURANAREE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY			NAME	DATE
Ultrasonic power transducer		DRAWN		
DWG. NO. TSPN 001	WEIGHT:	ENG APPR.		
MATERIAL	DO NOT SCALE DRAWING		SIZE A	SHEET 1 OF REV



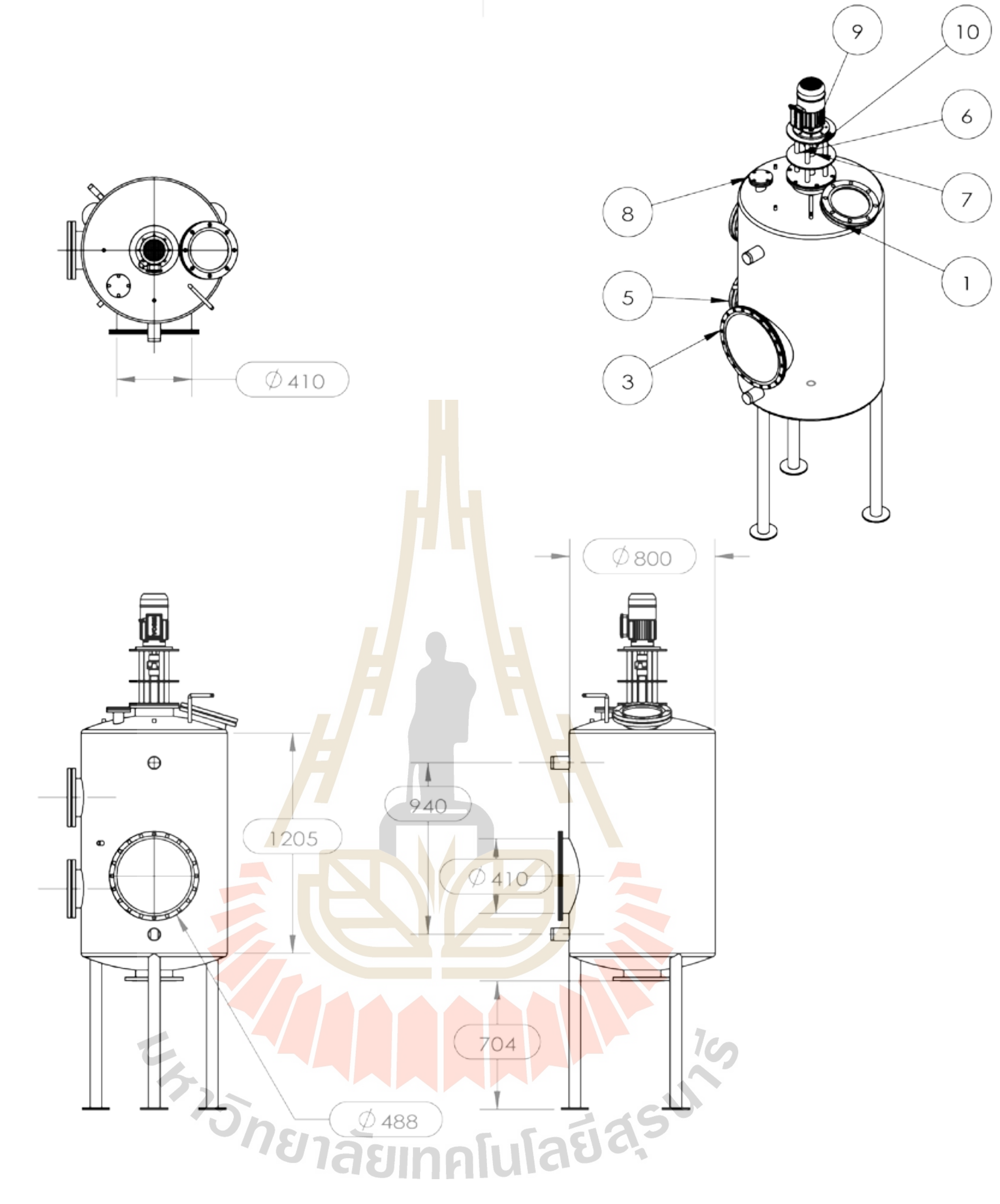
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

NO.	PART NUMBER	DESCRIPTION	QTY.
1	CSTR REACTOR		1
2	SIDE GLASS 430		1
3	FLANG D410		1
4	SIDE GLASS 240		3
5	FLANG D8incs		3
6	MORTOR SUPPORT		1
7	BREAD SHAFT		1
8	FLANG 2		1
9	Motor Driver		1
10	BREAD SHAFT ED		1

SURANAREE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY			NAME	DATE
		DRAWN		
DWG. NO.	WEIGHT:	ENG APPR.		
MATERIAL	DO NOT SCALE DRAWING		SIZE A	SHEET 1 OF REV



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

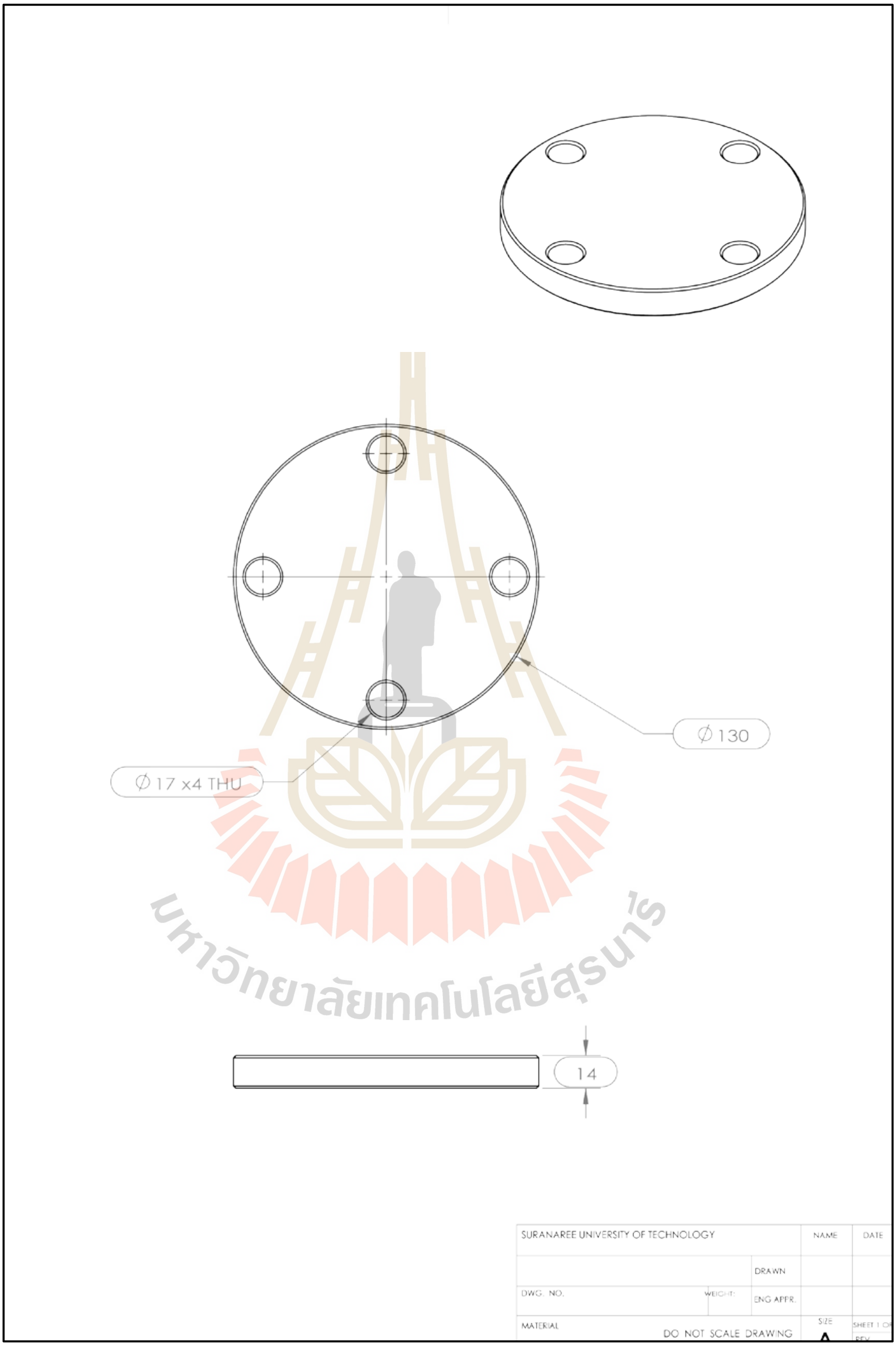
ITEM NO.	PART NUMBER	DESCRIPTION	QTY.
1	CSTR REACTOR 01		1
2	SIDE GLASS 430		1
3	FLANG D410		1
4	SIDE GLASS 240		3
5	FLANG D8incs		3
6	MORTOR SUPPORT		1
7	BREAD SHAFT		1
8	FLANG 2		1
9	Motor Driver		1
10	BREAD SHAFT ED		1

SURANAREE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY | NAME | DATE

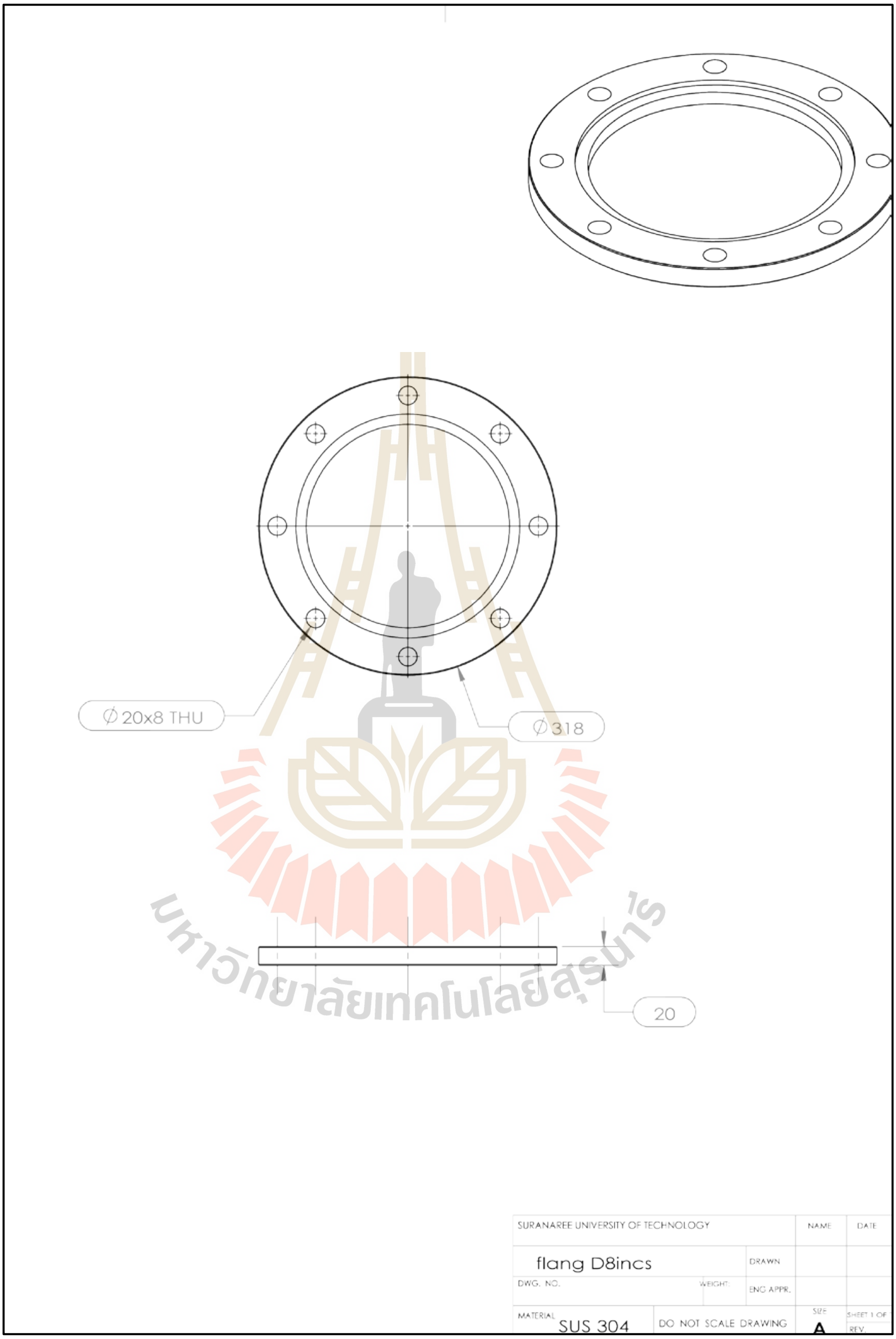
CSTR Reactor 01 | DRAWN

DWG. NO. | WEIGHT: | ENG APPR.

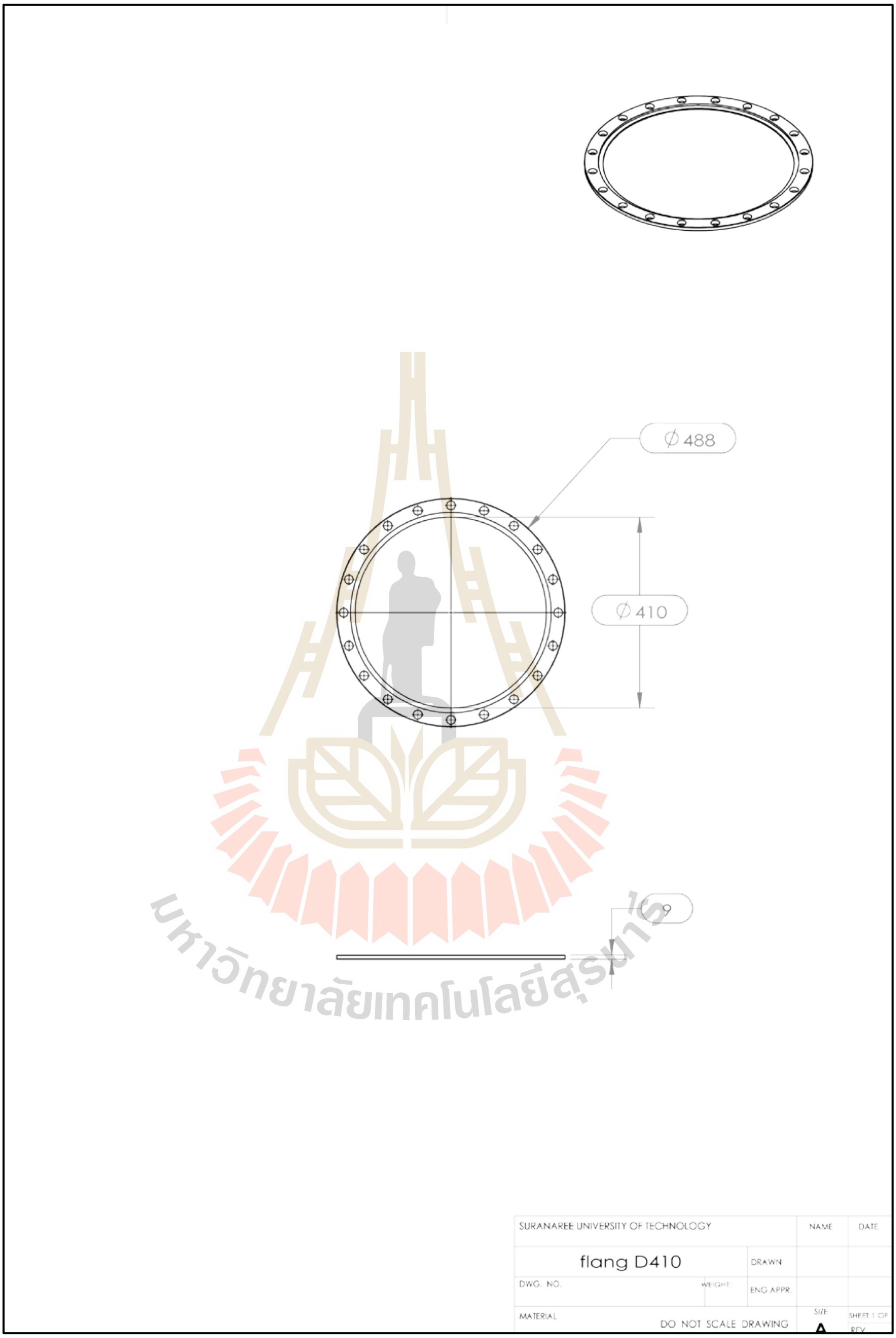
MATERIAL | DO NOT SCALE DRAWING | SIZE A | SHEET 1 OF



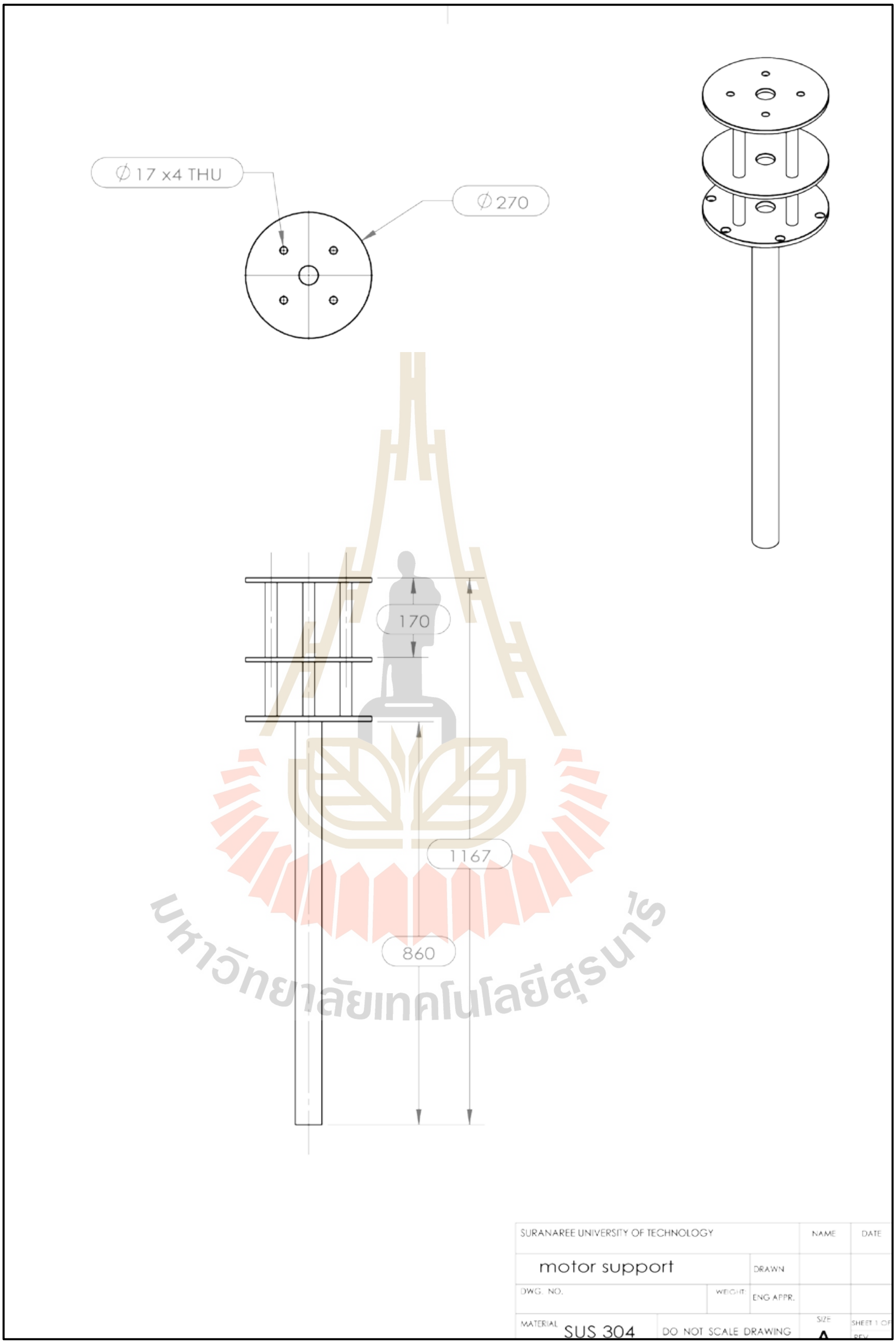
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



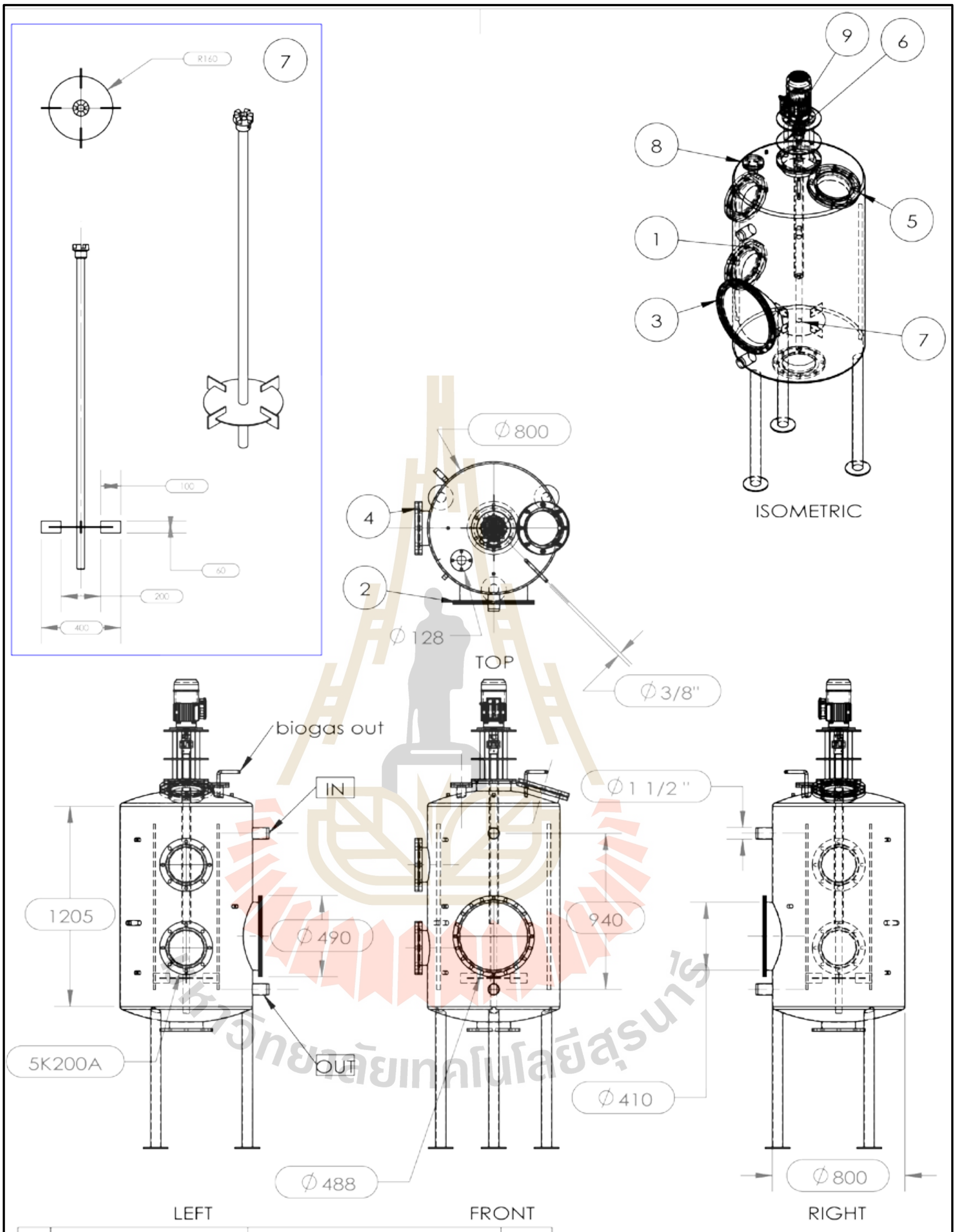
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



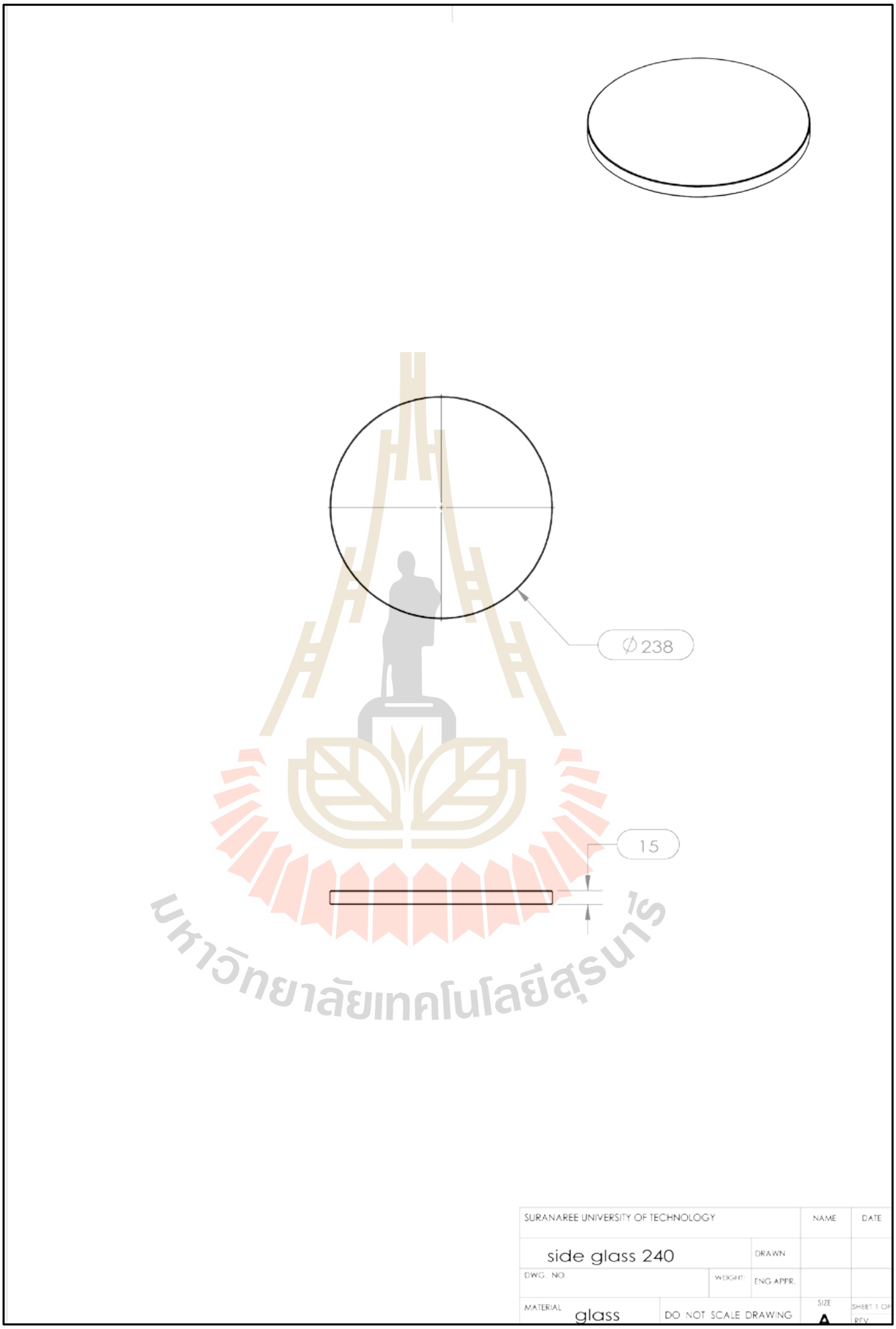
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

NO	PART NUMBER	DESCRIPTION	QTY.
1	CSTR REACTOR 01		1
2	SIDE GLASS 430		1
3	FLANG D410		1
4	SIDE GLASS 240		3
5	FLANG D8incs		3
6	MORTOR SUPPORT		1
7	BREAD SHAFT		1
8	FLANG 2		1
9	Motor Driver		1

SURANAREE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY		NAME	DATE
TSPN-CSTR R01	DRAWN		
DWG. NO. WEIGHT:	ENG APPR.		
MATERIAL DO NOT SCALE DRAWING		SIZE A	SHEET 1 OF REV.



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ประวัติผู้เขียน

นายศรัลย์ ปานศรีพงษ์ เกิดเมื่อวันที่ 12 มีนาคม พ.ศ. 2523 เริ่มศึกษาชั้นประถมศึกษาปีที่1-4 ที่โรงเรียนอนุบาลมหาสารคาม ชั้นประถมศึกษาปีที่ 5-6 ที่โรงเรียนประชารัฐสามัคคี จังหวัดนครราชสีมา ชั้นมัธยมศึกษาตอนต้นที่โรงเรียนเพ็ญสมิทธ์ และชั้นมัธยมศึกษาตอนปลายที่โรงเรียนนวมินทราชินูทิศ สตรีวิทยา พุทธมณฑล กรุงเทพมหานคร และสำเร็จการศึกษา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมเกษตร) สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อปี พ.ศ.2546 และได้เข้าศึกษาต่อในระดับวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และได้สำเร็จการศึกษาเมื่อปี พ.ศ.2551 จากนั้นเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาเอก สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปัจจุบันทำงานในตำแหน่ง นักวิจัย ประจำศูนย์ความเป็นเลิศทางด้านชีวมวล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี