

ผลกระทบของอุณหภูมิและเวลาในการขึ้นรูปต่อสมบัติของถ่านชีวภาพจากกากมะพร้าว

ณัฐกรณ สุวรรณาคี

TNII

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

บัณฑิตวิทยาลัย สาขาเทคโนโลยีวิศวกรรม

สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น

ปีการศึกษา 2558

EFFECT OF FORMING TEMPERATURE AND FORMING TIME ON PROPERTIES OF  
BIOCOKE FROM COPRA MEAL

Natthaporn Suwunnakee

TNI

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of Requirements  
for The Degree of Master of Engineering Program in Engineering Technology

Graduate School

Thai-Nichi Institute of Technology

Academic Year 2015

หัวข้อวิทยานิพนธ์

ผลกระทบของอุณหภูมิและเวลาในการขึ้นรูปต่อสมบัติ  
ของถ่านชีวภาพจากกากมะพร้าว

โดย

ณัฐกรณ์ สุวรรณาคี

สาขาวิชา

เทคโนโลยีวิศวกรรม

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จินตวัฒน์ ไชยชนะวงศ์

บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยนี้เป็น  
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(รองศาสตราจารย์ ดร. พิชิต สุขเจริญพงษ์)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.....

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุรัตน์ อารีรัตน์)

.....กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิภาวดี วงษ์สุวรรณ)

.....กรรมการ  
(ดร. กรกฎ เหมสถาปัตย์)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จินตวัฒน์ ไชยชนะวงศ์)

ณัฐภรณ์ สุวรรณนาคี : ผลกระทบของอุณหภูมิและเวลาในการขึ้นรูปต่อสมบัติของถ่านชีวภาพ จากกากมะพร้าว. อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จินตวัฒน์ ไชยชนะวงศ์, 53 หน้า.

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาการขึ้นรูปถ่านชีวภาพ จากกากมะพร้าวด้วยกระบวนการอัดร้อน โดยศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิและเวลาในการขึ้นรูปต่อสมบัติของถ่านชีวภาพที่ผลิตได้ โดยถ่านชีวภาพที่เตรียมขึ้นจะถูกนำไปตรวจสอบสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ ความหนาแน่นรวม และค่าความร้อน จากการศึกษพบว่าค่าความหนาแน่นของถ่านชีวภาพแปรผันตรงกับอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการขึ้นรูป โดยมีค่าความหนาแน่นของถ่านชีวภาพที่ผลิตได้อยู่ในช่วง  $0.65-1.2 \text{ g/cm}^3$  ค่าความร้อนพบว่ามีค่าความร้อนสูงที่สุด  $5,566 \text{ kcal/kg}$  เมื่อทำการอัดถ่านชีวภาพที่อุณหภูมิ  $170^\circ\text{C}$  ใช้เวลาในการอัด 20 นาที นอกจากนี้ผลการวิเคราะห์เชิงสถิติด้วยวิธี One Way ANOVA โดยใช้โปรแกรม Minitab ยังยืนยันว่าการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการขึ้นรูปมีผลกระทบต่อการเพิ่มขึ้นของความหนาแน่นรวมและค่าความร้อนของถ่านชีวภาพที่ผลิตได้อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

บัณฑิตวิทยาลัย

สาขาวิชา เทคโนโลยีวิศวกรรม

ปีการศึกษา 2558

ลายมือชื่อนักศึกษา .....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....

NATTTHAPORN SUWUNNAKEE : EFFECT OF FORMING TEMPERATURE AND FORMING TIME ON PROPERTIES OF BIOCOKE FROM COPRA MEAL. ADVISOR : ASST. PROF. JINTAWAT CHAICHANAWONG (D.ENG.), 53 PP.

In this research, biocoke was produced from copra meal by hot-pressing process. The effect of forming temperature and forming time on properties of the produced biocoke was investigated. The properties of biocoke is characterized in terms of calorific value and bulk density. The experimental results showed that the bulk density increased with an increasing forming temperature and forming time. The bulk density of produced biocoke was in the range of 0.65-1.2 g/cm<sup>3</sup>. The biocoke produced under forming temperature at 170°C and forming time at 20 minutes has the highest calorific value at 5,566 kcal/kg. In addition, the result of statistical analysis by One Way ANOVA using Minitab was also confirmed that the increases of forming temperature and forming time have significant effect on the increases of bulk density and calorific value of produced biocoke at the statistical significance level ( $\alpha$ ) < 0.05.

TNI

Graduate School

Field of Engineering of Technology

Academic Year 2015

Student's Signature.....

Advisor's Signature.....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้กระทำให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดีอันเนื่องมาจากความกรุณาของผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จินตวัฒน์ ไชยชนะวงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ กรุณาสละเวลาอันมีค่าของท่าน มาให้คำแนะนำและให้คำปรึกษาแนวทางและการพัฒนาในการทำวิจัย ตลอดจนสอนขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยตลอดการทำงานวิจัยนี้

ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุรัตน์ อารีรัตน์ (สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง) ที่กรุณาเสียสละให้คำปรึกษา และเป็นประธานในการสอบวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิภาวดี วงษ์สุวรรณ (สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น) ที่กรุณาเสียสละเวลาเป็นคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้

ขอขอบพระคุณ ดร. กรกฎ เหมสถาปัตย์ (สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น) ที่กรุณาเสียสละเวลาเป็นคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้

ขอขอบพระคุณ น้องสุพิชญา เชิดเกียรติกุล นักศึกษาปริญญาตรี-โท (สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น) ที่คอยอำนวยความสะดวกในทุกๆ เรื่องจนวิทยานิพนธ์นี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณบริษัท ผลิตภัณฑ์อาหารเซฟซ้อยส์ จำกัด ที่ให้ความกรุณาสับสนุนวัตถุดิบสำหรับวิทยานิพนธ์นี้

และท้ายสุดขอขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และครอบครัวที่ให้โอกาสในการศึกษาและขอบคุณเพื่อนๆ อาจารย์ และผู้มีพระคุณทุกท่านทั้งผู้ที่กล่าวนามและไม่ได้กล่าวนามใน ณ ที่นี้ผู้เขียนมีความซาบซึ้งในความกรุณาอันดีจากทุกท่านและขอกราบขอบพระคุณมา ณ โอกาสนี้

ณัฐภรณ์ สุวรรณาคี

TNI

## สารบัญ

|                                                                | หน้า |
|----------------------------------------------------------------|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย.....                                           | ง    |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....                                        | จ    |
| กิตติกรรมประกาศ.....                                           | ฉ    |
| สารบัญ.....                                                    | ช    |
| สารบัญตาราง.....                                               | ณ    |
| สารบัญรูป.....                                                 | ญ    |
| <b>บทที่</b>                                                   |      |
| 1 บทนำ.....                                                    | 1    |
| 1.1 สภาวะความเป็นมา แนวทางเหตุผล และปัญหา.....                 | 1    |
| 1.2 ความมุ่งหมายของการวิจัย.....                               | 3    |
| 1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....                                     | 3    |
| 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....                             | 3    |
| 1.5 แผนงานและระยะเวลาในการดำเนินงาน.....                       | 3    |
| 2 หลักการพื้นฐาน เอกสาร และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....          | 5    |
| 2.1 หลักการพื้นฐานและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....                   | 5    |
| 2.2 หลักการวิเคราะห์ที่เกี่ยวข้อง.....                         | 12   |
| 2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....                                 | 15   |
| 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....                                      | 19   |
| 3.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....                                   | 19   |
| 4 การวิเคราะห์ผลการวิจัย.....                                  | 23   |
| 4.1 สมบัติทางกายภาพของถ่านชีวภาพที่ผลิตจากกากมะพร้าว.....      | 23   |
| 4.2 ค่าความร้อน (Calorific Value) ของถ่านชีวภาพ.....           | 25   |
| 4.3 โครงสร้างระดับจุลภาคของถ่านชีวภาพที่ผลิตจากกากมะพร้าว..... | 29   |
| 4.4 การวิเคราะห์ผลเชิงสถิติด้วยโปรแกรม Minitab.....            | 31   |

## สารบัญ (ต่อ)

| บทที่                                                                                | หน้า |
|--------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 5 บทสรุป และข้อเสนอแนะ .....                                                         | 34   |
| 5.1 สรุปผลการวิจัย.....                                                              | 34   |
| 5.2 ข้อเสนอแนะ .....                                                                 | 35   |
| บรรณานุกรม .....                                                                     | 36   |
| ภาคผนวก .....                                                                        | 40   |
| ภาคผนวก ก. การหาค่าความร้อน (Calorific Value) โดยใช้เครื่อง Bomb<br>Calorimeter..... | 41   |
| ภาคผนวก ข. การวิเคราะห์ผลเชิงสถิติด้วยโปรแกรม Minitab .....                          | 46   |
| ประวัติย่อผู้วิจัย .....                                                             | 53   |

## สารบัญตาราง

| ตาราง                                                                                                            | หน้า |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 1.1 ระยะเวลาในการเนืงงานวิจัย .....                                                                              | 4    |
| 2.1 ค่าความร้อนจากการเผาไหม้วัสดุชีวมวลบางชนิดที่นิยมใช้เป็นเชื้อเพลิง.....                                      | 6    |
| 2.2 สัดส่วนองค์ประกอบทางเคมีที่แตกต่างกันในชีวมวลประเภทต่างๆ (wt%) .....                                         | 7    |
| 2.3 องค์ประกอบทางเคมีของกากมะพร้าว .....                                                                         | 11   |
| 2.4 ระดับความสัมพันธ์ของตัวแปร .....                                                                             | 14   |
| 2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยถ่านชีวภาพ.....                                                              | 17   |
| 3.1 การทดลองที่สภาวะต่างๆ.....                                                                                   | 22   |
| 4.1 องค์ประกอบทางเคมีของกากมะพร้าว .....                                                                         | 23   |
| 4.2 สรุปผลการทดลองค่าความหนาแน่นและค่าความร้อนที่สภาวะต่างๆ .....                                                | 25   |
| ข.1 ค่าความหนาแน่นรวมจากการขึ้นรูปถ่านชีวภาพ ที่อุณหภูมิห้อง 100°C และ 170°C<br>ใช้เวลาในการขึ้นรูป 20 นาที..... | 47   |
| ข.2 ค่า Descriptive Statistics : CM/Pure, CM/Room, CM/100 และ CM/170.....                                        | 47   |
| ข.3 ค่า One-Way ANOVA : CM/Pure, CM/Room, CM/100, CM/170.....                                                    | 48   |
| ข.4 ค่าความหนาแน่นรวมจากการขึ้นรูปถ่านชีวภาพ ที่เวลา 10 15 และ 20 นาที<br>ให้อุณหภูมิคงที่ที่ 170°C.....         | 48   |
| ข.5 ค่า Descriptive Statistics : CM/Pure, CM/10, CM/15 และ CM/20 .....                                           | 49   |
| ข.6 ค่า One-Way ANOVA : CM/Pure, CM/10, CM/15 และ CM/20.....                                                     | 49   |
| ข.7 ค่าความร้อนจากการขึ้นรูปถ่านชีวภาพ ที่อุณหภูมิห้อง 100°C และ 170°C<br>ใช้เวลาในการขึ้นรูป 20 นาที.....       | 50   |
| ข.8 ค่า Descriptive Statistics : CM/Pure, CM/Room, CM/100 และ CM/170.....                                        | 50   |
| ข.9 ค่า One-Way ANOVA : CM/Pure, CM/10, CM/15 และ CM/20.....                                                     | 51   |
| ข.10 ค่าความร้อนจากการขึ้นรูปถ่านชีวภาพ ที่เวลา 10 15 และ 20 นาที ให้อุณหภูมิ<br>คงที่ที่ 170°C.....             | 51   |
| ข.11 ค่า Descriptive Statistics : CM/Pure, CM/10, CM/15 และ CM/20 .....                                          | 52   |
| ข.12 ค่า One-Way ANOVA : CM/Pure, CM/10, CM/15 และ CM/20.....                                                    | 52   |

## สารบัญรูป

| รูป                                                                                                                                                                                                                        | หน้า |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 2.1 โครงสร้างทางเคมีของสารประกอบหลักของสารชีวมวล .....                                                                                                                                                                     | 7    |
| 2.2 เครื่องอัดถ่านชีวภาพโดยการอัดในแนวตั้ง .....                                                                                                                                                                           | 9    |
| 2.3 ภาพจำลองเครื่องผลิตถ่านชีวภาพโดยการอัดแนวตั้งและอุปกรณ์ต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง .....                                                                                                                                       | 9    |
| 2.4 เครื่องอัดถ่านชีวภาพโดยการอัดในแนวนอน .....                                                                                                                                                                            | 10   |
| 2.5 ลักษณะของกากมะพร้าว .....                                                                                                                                                                                              | 11   |
| 2.6 ภาพจำลองบอมบ์แคลอรีมิเตอร์ .....                                                                                                                                                                                       | 13   |
| 3.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน .....                                                                                                                                                                                              | 19   |
| 3.2 กากมะพร้าว .....                                                                                                                                                                                                       | 20   |
| 3.3 เครื่องวัดความชื้น .....                                                                                                                                                                                               | 20   |
| 3.4 เครื่องอัดถ่านชีวภาพในแนวตั้ง .....                                                                                                                                                                                    | 21   |
| 4.1 ลักษณะถ่านชีวภาพที่ทำการขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 100°C (a) ลักษณะถ่านชีวภาพที่ทำการขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 170°C (b) บนสภาวะการขึ้นรูปที่เวลา 20 นาที ความดันคงที่ที่ 14 Bar .....                                                | 26   |
| 4.2 ผลกระทบของอุณหภูมิในการขึ้นรูปต่อค่าความหนาแน่นรวมของถ่านชีวภาพจากกากมะพร้าว .....                                                                                                                                     | 27   |
| 4.3 ผลกระทบของเวลาในการขึ้นรูปต่อค่าความหนาแน่นรวมของถ่านชีวภาพจากกากมะพร้าว .....                                                                                                                                         | 27   |
| 4.4 ผลกระทบของอุณหภูมิในการขึ้นรูปต่อค่าความร้อนของถ่านชีวภาพจากกากมะพร้าว .....                                                                                                                                           | 28   |
| 4.5 ผลกระทบของเวลาในการขึ้นรูปต่อค่าความร้อนของถ่านชีวภาพจากกากมะพร้าว .....                                                                                                                                               | 28   |
| 4.6 ลักษณะพื้นผิวของถ่านชีวภาพที่ผลิตจากกากมะพร้าวกำลังขยาย 200 เท่า (a) ลักษณะพื้นผิวของถ่านชีวภาพที่ผลิตจากกากมะพร้าวกำลังขยาย 500 เท่า (b) บนสภาวะการขึ้นรูปที่อุณหภูมิห้องเวลา 20 นาที ความดันคงที่ที่ 14 Bar .....    | 29   |
| 4.7 ลักษณะพื้นผิวของถ่านชีวภาพที่ผลิตจากกากมะพร้าวกำลังขยาย 200 เท่า (a) ลักษณะพื้นผิวของถ่านชีวภาพที่ผลิตจากกากมะพร้าวกำลังขยาย 500 เท่า (b) บนสภาวะการขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 100°C เวลา 20 นาที ความดันคงที่ที่ 14 Bar ..... | 30   |

## สารบัญรูป (ต่อ)

| รูป  | หน้า                                                                                                                                                                                                                      |
|------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 4.8  | ลักษณะพื้นผิวของถ่านชีวภาพที่ผลิตจากกากมะพร้าวกำลังขยาย 200 เท่า (a) ลักษณะพื้นผิวของถ่านชีวภาพที่ผลิตจากกากมะพร้าวกำลังขยาย 500 เท่า (b) บนสถานะการขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 170°C เวลา 20 นาที ความดันคงที่ที่ 14 Bar ..... 30 |
| 4.9  | กราฟ Residual Plot แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิในการขึ้นรูปต่อค่าความหนาแน่นรวมของถ่านชีวภาพจากกากมะพร้าว ..... 32                                                                                                     |
| 4.10 | กราฟ Residual Plot แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการขึ้นรูปต่อค่าความหนาแน่นรวมของถ่านชีวภาพจากกากมะพร้าว ..... 32                                                                                                         |
| 4.11 | กราฟ Residual Plot แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิในการขึ้นรูปต่อค่าความร้อนของถ่านชีวภาพจากกากมะพร้าว ..... 33                                                                                                           |
| 4.12 | กราฟ Residual Plot แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการขึ้นรูปต่อค่าความร้อนของถ่านชีวภาพจากกากมะพร้าว ..... 33                                                                                                               |
| ก.1  | เครื่อง Bomb Calorimeter พร้อมชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ ..... 42                                                                                                                                                         |
| ก.2  | ถังถ่านชีวภาพให้น้ำหนักประมาณ 1 g. ใส่ลงในถ้วยโลหะ ..... 43                                                                                                                                                               |
| ก.3  | ลักษณะของ Bomb ที่ใช้ในการทดสอบ ..... 43                                                                                                                                                                                  |
| ก.4  | ลักษณะของเทอร์โมมิเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบ ..... 44                                                                                                                                                                          |

TNI

THAI - NICHI INSTITUTE OF TECHNOLOGY

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 สภาวะความเป็นมา แนวทางเหตุผล และปัญหา

จากปัญหาวิกฤตการณ์โลกร้อนสถานการณ์พลังงานเชื้อเพลิงที่ขาดแคลนและราคาพุ่งขึ้นสูงอย่างต่อเนื่อง จึงมีความจำเป็นที่ต้องมีการพัฒนาแหล่งพลังงานทดแทนที่หมุนเวียนและมิตรกับสิ่งแวดล้อมซึ่งเชื้อเพลิงหนึ่งที่น่าสนใจคือเชื้อเพลิงจากชีวมวลเนื่องจากชีวมวลเป็นเชื้อเพลิงที่สามารถหาได้ง่ายภายในประเทศประกอบกับประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรมที่มีแหล่งชีวมวลจากภาคการเกษตรมากมายดังนั้นจึงมีสิ่งสูญเสีย (Waste) และสิ่งเหลือใช้ (Residues) จากการเกษตร และอุตสาหกรรมเกษตรต่างๆ เช่น ชานอ้อย กะลามะพร้าว กะลาปาล์ม กะลาตาล เปลือกผลไม้ซึ่งมีปริมาณมากและราคาถูก [1] จึงถือว่าเป็นข้อได้เปรียบทางด้านวัตถุดิบ

มะพร้าวเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญที่สุดชนิดหนึ่งของโลกและของประเทศไทย จากการสำรวจผลผลิตมะพร้าวของโลกในภาพรวมปี 2011 มีจำนวนผลผลิตเท่ากับ 59.19 ล้านตัน สำหรับประเทศไทยมีผลผลิตโดยรวมเท่ากับ 1.06 ล้านตันคิดเป็นร้อยละ 2 ของผลผลิตรวมทั้งหมด [2] มะพร้าวเป็นพืชที่มีความผูกพันกับวัฒนธรรมความเป็นอยู่ของประเทศไทยมาตั้งแต่สมัยโบราณตั้งแต่ใบ ก้าน ลำต้น ผลกะลา รกมะพร้าว กาบมะพร้าวและราก โดยสามารถนำมาแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ได้อย่างหลากหลาย ผลิตภัณฑ์ที่สำคัญ เช่น เนื้อมะพร้าวฝอยทำให้แห้ง (Desiccated Coconut) เนื้อมะพร้าวแห้ง (Copra) กะทิ (Coconut Milk) และน้ำมันมะพร้าว (Coconut Oil) นอกจากนี้ส่วนที่เหลือของผลมะพร้าวยังสามารถนำไปใช้ในอุตสาหกรรมอื่นๆ เช่น กากมะพร้าวสามารถนำไปผลิตอาหารสัตว์ทำปุ๋ยหมัก เส้นใยมะพร้าวนำไปใช้เป็นไส้โซฟาเบาะทำแท่งเพาะชำและแปรรูปไม้ [3] โดยเฉพาะกะลามะพร้าวและกากมะพร้าวถูกนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทนซึ่งให้ค่าความร้อนสูงถึง 4,285 kcal/kg และ 3,878 kcal/kg ตามลำดับ แต่ในปัจจุบันเนื่องจากกะลามะพร้าวและกากมะพร้าวนิยมถูกนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงมากขึ้นทำให้เกิดสภาวะขาดตลาด ปริมาณที่มีไม่เพียงพอต่อความต้องการที่จะใช้ ส่งผลให้ราคาค้นทุนเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมองหาวัสดุทดแทนที่มีราคาถูกและมีคุณสมบัติเทียบเคียง ในขณะที่กากมะพร้าวซึ่งเป็นวัสดุที่เหลือทิ้งจากกระบวนการคั้นกะทิจากอุตสาหกรรมกะทิสำเร็จรูปที่เมื่อเก็บไว้ระยะหนึ่งจะเกิดการกระบวนการหมักทำให้เกิดกลิ่นเน่าเหม็น จำเป็นต้องมีการขนย้ายไปทิ้งหรือเผาทำลายซึ่งจะเกิดค่าใช้จ่ายตามมา เพื่อเป็นการลดภาระในการกำจัดทิ้งและเป็นการสร้างมูลค่าเพิ่มให้กับกากมะพร้าวจึงมีการนำเอากากมะพร้าวไปใช้ประโยชน์ด้านอื่นๆ แต่ก็ยังมีการนำไปใช้ประโยชน์ได้น้อยเมื่อเทียบกับผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมการแปรรูปมะพร้าว โดยทั่วไปแล้วกากมะพร้าวจะถูกขายในราคาถูกเพื่อนำไปใช้ใน

อุตสาหกรรมการผลิตอาหารสัตว์เป็นหลัก เนื่องจากมีสารอาหารจำพวกคาร์โบไฮเดรต ไขมัน โปรตีน แร่ธาตุ ไฟเบอร์และลิกนิน [4] สำหรับการนำกากมะพร้าวไปใช้ประโยชน์ด้านเชื้อเพลิงมีข้อจำกัดเนื่องจากกากมะพร้าวมีความหนาแน่นต่ำประมาณ  $0.49 \text{ g/cm}^3$  [5] และความชื้นสูง ทางเลือกหนึ่งที่จะทำให้กากมะพร้าวมีความเป็นไปได้ในการนำมาใช้งานเป็นเชื้อเพลิง คือ การนำกากมะพร้าวมาอัดเป็นเชื้อเพลิงแท่ง โดยทั่วไปสารชีวมวลจะเพิ่มค่าความหนาแน่นของวัตถุดิบ โดยการให้ความดันเพื่อกดวัตถุดิบให้แน่นวัสดุเมื่อถูกอัดทำให้มีค่าความหนาแน่นสูงขึ้น และมีปริมาณของความชื้นลดลง ซึ่งวิธีนี้เหมาะกับการแปรรูปชีวมวลเป็นเชื้อเพลิงอย่างยิ่ง เนื่องจากชีวมวลมวลส่วนใหญ่เป็นวัสดุที่มีความหนาแน่นต่ำและความชื้นสูง ทำให้มีข้อจำกัดในการนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิง อีกทั้งกระบวนการอัดเป็นแท่งยังมีข้อดีในด้านการจัดเก็บและขนส่งได้ง่ายและสะดวก ทำให้เป็นการลดค่าใช้จ่ายอีกด้วย [6]

จากความเป็นไปในการพัฒนาแหล่งพลังงานทดแทนที่หมุนเวียน เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม และสามารถผลิตได้เองภายในประเทศ รวมทั้งสามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงร่วมกับถ่านหินเพื่อลดปริมาณการใช้ถ่านหิน ซึ่งเป็นเชื้อเพลิงที่ให้พลังงานความร้อนในโรงงานอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัย Kinki ประเทศญี่ปุ่นได้เล็งเห็นถึงความจำเป็นดังกล่าว จึงมีการพัฒนาเทคโนโลยีเชื้อเพลิงแข็งหรือที่เรียกว่า ไบโอโค้ก (BioCoke) หรือถ่านชีวภาพโดยการนำเอาวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรหรือวัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมมาใช้เป็นวัตถุดิบ เช่น กากใบจากจากโรงงานอุตสาหกรรมเครื่องดื่ม เป็นต้น ผ่านกระบวนการอัดร้อนที่ความดันสูง [7] เมื่อสารลิกนิน ซึ่งเป็นหนึ่งในองค์ประกอบสารประกอบลิกโนเซลลูโลส (Lignocellulose) ที่พบมากในผนังเซลล์ของพืช ได้รับความร้อนจากกระบวนการอัดจะสลายตัวออกมาทำหน้าที่เป็นตัวประสานทำให้ถ่านชีวภาพที่ได้มีความแข็งแรงขึ้นไม่เปราะหรือแตกได้ง่าย มีค่าความร้อนและความทนทานสูงประมาณ  $1.3 \text{ Mpa}$  รวมทั้งเป็นการลดการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติของถ่านชีวภาพที่ผลิตได้ เช่น อุณหภูมิ เวลาและความดันในการผลิต นอกจากนี้จากงานวิจัยของ Van Dam J. E. G et al. [8] ยังพบว่าความชื้นเริ่มต้นของวัตถุดิบที่นำมาใช้ผลิตถ่านชีวภาพมีผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางกลของถ่านชีวภาพด้วยเช่นกัน โดยในงานวิจัยนี้กากมะพร้าวซึ่งเป็นวัสดุชีวมวลที่เหลือทิ้งจากกระบวนการคั้นกะทิในอุตสาหกรรมกะทิสำเร็จรูป มาใช้เป็นวัตถุดิบเพื่อเป็นการเพิ่มมูลค่าของชีวมวลเหลือทิ้งโดยนำมาผ่านกระบวนการอัดร้อนที่ความดันสูง ทำการปรับเปลี่ยนปัจจัยในการผลิตและตรวจสอบสมบัติทางกายภาพ เช่น ค่าความร้อน และค่าความหนาแน่น เพื่อประเมินระดับความสามารถในการเป็นเชื้อเพลิงทดแทน

## 1.2 ความมุ่งหมายของการวิจัย

เพื่อศึกษาผลกระทบจากปัจจัยในแปรรูปกากมะพร้าวซึ่งเป็นวัสดุชีวมวลเหลือใช้ ให้เป็นถ่านชีวภาพโดยใช้กระบวนการอัดด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิกในแนวตั้งพร้อมทั้งให้ความร้อน โดยปัจจัยที่ทำการศึกษา ได้แก่ อุณหภูมิ และระยะเวลาในการขึ้นรูป และทำการยืนยันผลของปัจจัยที่ศึกษาด้วยโปรแกรม Minitab Version 16

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 ศึกษาผลกระทบต่อสภาวะ ของกระบวนการขึ้นรูปถ่านชีวภาพ ได้แก่ อุณหภูมิ และเวลา

1.3.2 กำหนดสภาวะการศึกษาดังนี้

- ปริมาณกากมะพร้าว 80 g ( $\pm 0.01$ ) ต่อการขึ้นรูป 1 ครั้ง
- อุณหภูมิในการทดลองอัดที่ทำการศึกษาระหว่างอุณหภูมิห้อง -170°C
- เวลาในการอัดที่ทำการศึกษา 10-20 นาที
- ความชื้นเริ่มต้นของวัตถุดิบเท่ากับ 8-12%
- แรงดันที่ใช้ในการอัดคงที่เท่ากับ 14 Bar

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ทราบสภาวะที่เหมาะสมในการขึ้นรูปกากมะพร้าวซึ่งเป็นวัสดุชีวมวลเหลือใช้เป็นถ่านชีวภาพ โดยใช้กระบวนการอัดร้อนความดันสูง

## 1.5 แผนงานและระยะเวลาในการดำเนินงาน (สิงหาคม 2556-ตุลาคม 2558)

ระยะเวลาและแผนการดำเนินงานวิจัยแสดงดังตารางที่ 1.1



## บทที่ 2

### หลักการพื้นฐาน เอกสาร และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 หลักการพื้นฐานและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

##### 2.1.1 ชีวมวล (Biomass) [9, 10]

ชีวมวลเป็นแหล่งพลังงานหมุนเวียนที่กักเก็บพลังงานจากดวงอาทิตย์ซึ่งมาจากการสังเคราะห์ด้วยแสงและเกิดการหมุนเวียนซ้ำแล้วซ้ำอีกในธรรมชาติ ดังนั้นจึงเป็นพลังงานที่ไม่มีวันหมดไปสามารถนำมาใช้ผลิตพลังงานเพื่อใช้ทดแทนพลังงานที่ได้จากแหล่งพลังงานฟอสซิลซึ่งมีอยู่อย่างจำกัดและอาจหมดลงได้ ชีวมวลอาจมองว่าเป็นสารอินทรีย์ที่ได้จากสิ่งมีชีวิต พืช และสัตว์ หรือกระบวนการทางชีวภาพที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ มีความหลากหลายของรูปแบบและลักษณะเฉพาะแหล่งตามความหลากหลายและซับซ้อนทางชีววิทยาและสภาพสิ่งแวดล้อม วงจรการผลิตชีวมวลเป็นวงจรของพืชที่มีระยะเวลาสั้น ต่างจากน้ำมันหรือถ่านหินที่ต้องอาศัยการทับถมกันเป็นเวลาหลายล้านปี นอกจากนี้ ชีวมวลสามารถผลิตได้ภายในประเทศ เกษตรกรจึงมีรายได้เพิ่มขึ้นจากการจำหน่ายชีวมวลสู่ผู้ใช้ และยังลดการนำเข้าพลังงานจากต่างประเทศอีกด้วย ข้อดีต่อสิ่งแวดล้อมที่สำคัญ คือ การใช้ชีวมวลในการผลิตความร้อนหรือไฟฟ้าจะไม่เพิ่มปริมาณสุทธิของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศโลก ในกรณีที่เรามีการผลิตชีวมวลขึ้นมาเพื่อทดแทนชีวมวลที่ได้ใช้ไป เพราะก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะถูกหมุนเวียนมาใช้ในชีวมวลที่ผลิตใหม่เท่ากับปริมาณก๊าซที่ถูกผลิตจากการเผาไหม้ชีวมวลนั้นๆ เนื่องจากพืชต้องหายใจเพื่อเอาก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เข้าไปใช้ในการเจริญเติบโต อีกทั้งชีวมวลยังมีปริมาณกำมะถันต่ำกว่าเชื้อเพลิงฟอสซิลมาก นั่นหมายถึง การใช้ชีวมวลจะลดโอกาสในการเกิดปรากฏการณ์เรือนกระจก (Greenhouse Effect) ซึ่งตรงกันข้ามกับการใช้น้ำมันในภาคขนส่งหรือการใช้ถ่านหินในโรงไฟฟ้า

อย่างไรก็ตาม การเก็บรักษาและการขนส่งชีวมวลมีความยาก รวมถึงมีความเสี่ยงสูงในการจัดหาหรือรวบรวมปริมาณชีวมวลที่ต้องการใช้ให้คงที่ ตลอดปี เพราะชีวมวลบางประเภท เช่น กากอ้อย จะมีจำกัดเพียงบางเดือน อีกทั้งชีวมวลทุกประเภทต้องการพื้นที่ ในการเก็บรักษาขนาดใหญ่กว่าเชื้อเพลิงฟอสซิล เช่น หากต้องการปริมาณความร้อนที่เท่ากัน จะต้องใช้แกลบในปริมาณที่มากกว่าน้ำมันเตา เป็นต้น ดังนั้นการพัฒนาระบบและวิธีการจัดเก็บและขนส่งจึงมีความสำคัญและจำเป็นอย่างมาก

ชีวมวลประกอบด้วยธาตุหลักๆ คือ คาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน รวมทั้งมีปริมาณของไนโตรเจนและธาตุอื่นๆ อีกเล็กน้อยในรูปแบบของคาร์โบไฮเดรตหรือเซลลูโลส ชีวมวลนั้นมีอยู่มากมาย ทั้งที่ได้จากสิ่งมีชีวิตและยังรวมไปถึงสิ่งต่างๆ ที่มีธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจนเป็น

องค์ประกอบหลักในรูปแบบอื่นๆ อาทิเช่น ผลผลิตจากป่า ไร่สวน ต้นไม้ และวัชพืชต่างๆ ทั้งบนบกและในน้ำ เช่น ไม้เนื้อแข็ง ไม้เนื้ออ่อน ไม้โตเร็ว ใบไม้ กิ่งไม้ หญ้า พืชล้มลุก จากส่วนของเมล็ด เปลือก ผล และจากมวลสหาร่าย พืชน้ำเป็นต้นผลผลิตจากพืชเศรษฐกิจ เศษวัสดุเหลือทิ้งจากการเกษตร เช่น ข้าว อ้อย มันสำปะหลัง ข้าวโพด ปาล์มน้ำมัน แกลบ ฟาง เป็นต้น เศษวัสดุและของเสียจากกระบวนการและการประกอบการของภาคอุตสาหกรรม เช่น ขี้เลื่อย กลีเซอร์ริน สำเหล้า กากอาหาร รวมไปถึงของเสียจากโรงงานแปรรูปของเสียจากพลาสติก และกากตะกอนจากโรงบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรมของเสียจากแหล่งชุมชน เช่น ขยะชุมชน กากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชน ผลิตภัณฑ์และของเสียจากสัตว์ เช่น ไขมัน มูลสัตว์ เป็นต้น

ตารางที่ 2.1 ค่าความร้อนจากการเผาไหม้วัสดุชีวมวลบางชนิดที่นิยมใช้เป็นเชื้อเพลิง [11]

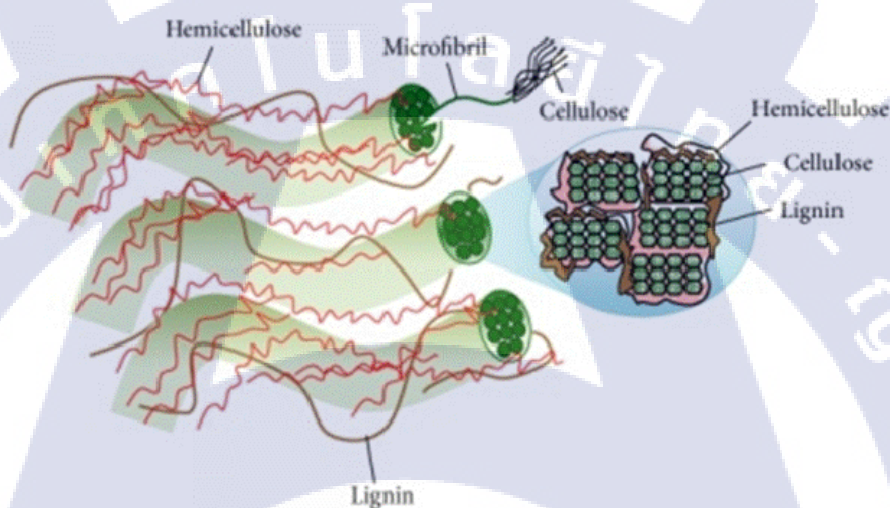
| เชื้อเพลิง      | หน่วย | ปริมาณความร้อน<br>(kcal/Unit) |
|-----------------|-------|-------------------------------|
| ไม้ยางพารา      | kg    | 4,500                         |
| ถ่านไม้ยางพารา  | kg    | 7,650                         |
| กะลามะพร้าว     | kg    | 4,830                         |
| ถ่านกะลามะพร้าว | kg    | 7,760                         |
| ถ่านกะลาปาล์ม   | kg    | 7,460                         |
| เส้นใยปาล์ม     | kg    | 4,820                         |
| ซังข้าวโพด      | kg    | 4,540                         |
| ขี้เลื่อย       | kg    | 4,990                         |
| ผักตบชวา        | kg    | 3,010                         |

### 2.1.2 ลิกโนเซลลูโลส (Lignocellulose)

ลิกโนเซลลูโลส หมายถึงชีวมวลอินทรีย์ที่ประกอบด้วยเซลลูโลส (Cellulose) เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) และลิกนิน (Lignin) โดยโครงสร้างของลิกโนเซลลูโลสแสดงตามรูปที่ 2.1 และตารางที่ 2.2 แสดงสัดส่วนองค์ประกอบทางเคมีที่แตกต่างกันในชีวมวลประเภทต่างๆ

ลิกโนเซลลูโลสจะพบมากในผนังเซลล์ของพืช ได้แก่ เศษวัสดุเหลือทิ้งจากไม้ทั้งไม้เนื้อแข็งและไม้เนื้ออ่อน เศษวัสดุจากการเกษตร เช่น ซังข้าวโพด เส้นใย ข้าวโพด ชานอ้อย แกลบ ฟางข้าว ขยะจากกระบวนการแปรรูปอาหาร และจากบ้านเรือนรวมถึงมูลสัตว์ต่างๆ ซึ่งในกระบวนการผลิตเชื้อเพลิงแข็ง องค์ประกอบทางเคมีเหล่านี้มีส่วนสำคัญต่อคุณภาพของเชื้อเพลิงแข็งที่ผลิตได้ ยกตัวอย่างเช่น

ลิกนินซึ่งเป็นองค์ประกอบสำคัญของชีวมวลส่วนใหญ่ทำหน้าที่ยึดเกาะเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสเข้าด้วยกันโดยปกติจะเกิดการอ่อนตัวที่อุณหภูมิระหว่าง  $130^{\circ}\text{C}$ - $190^{\circ}\text{C}$  หากมีผลกระทบจากความชื้นในเนื้อชีวมวลจะทำให้ช่วงอุณหภูมิในการอ่อนตัวของลิกนินลดลงไปที่อุณหภูมิต่ำกว่า  $100^{\circ}\text{C}$  ได้ [12] ซึ่งลิกนินที่อ่อนตัวนั้นจะเป็นตัวสร้างการยึดเกาะขึ้นภายในเนื้อวัสดุระหว่างการอัดแน่นชีวมวลแล้วนำไปสู่การเกาะตัวกันของเนื้อเชื้อเพลิง [13] จากงานวิจัยของ Mobarak et al ยังได้กล่าวไว้ว่า การเกาะตัวกันของเนื้อวัสดุที่ถูกบีบอัดอาจเกิดมาจากแรงยึดติดของผลิตภัณฑ์จากเฮมิเซลลูโลสที่สลายตัวแปรสภาพระหว่างกระบวนการ [14]



รูปที่ 2.1 โครงสร้างทางเคมีของสารประกอบหลักของสารชีวมวล [15]

ตารางที่ 2.2 สัดส่วนองค์ประกอบทางเคมีที่แตกต่างกันในชีวมวลประเภทต่างๆ (wt%)

| ประเภทสารชีวมวล | น้ำทะเล                   | น้ำจืด   | เฮอร์บาเซียส    | ไม้               | ของเสีย             |
|-----------------|---------------------------|----------|-----------------|-------------------|---------------------|
|                 | สาหร่ายเคลป์ยักษ์สีน้ำตาล | ผักตบชวา | หญ้าเบอร์มิวด้า | ต้นไอบริดป็อปลาร์ | เชื้อเพลิงขยะ (RDF) |
| เซลลูโลส        | 4.8                       | 16.2     | 31.7            | 41.3              | 65.6                |
| เฮมิเซลลูโลส    | -                         | 55.5     | 40.2            | 32.9              | 11.2                |
| ลิกนิน          | -                         | 6.1      | 4.1             | 25.6              | 3.1                 |
| แมนนิทอล        | 18.7                      | -        | -               | -                 | -                   |

ตารางที่ 2.2 สัดส่วนองค์ประกอบทางเคมีที่แตกต่างกันในชีวมวลประเภทต่างๆ (wt%) (ต่อ)

| ประเภทสาร<br>ชีวมวล | น้ำทะเล | น้ำจืด | เฮอร์บาเซียส | ไม้   | ของเสีย |
|---------------------|---------|--------|--------------|-------|---------|
| อัลจินิน            | 14.2    | -      | -            | -     | -       |
| โพรตีนดิบ           | 15.9    | 12.3   | 12.3         | 2.1   | 3.5     |
| เถ้า                | 45.8    | 22.4   | 5.0          | 1.0   | 16.7    |
| อื่นๆ               | -       | 112.5  | 93.3         | 102.9 | 100.1   |

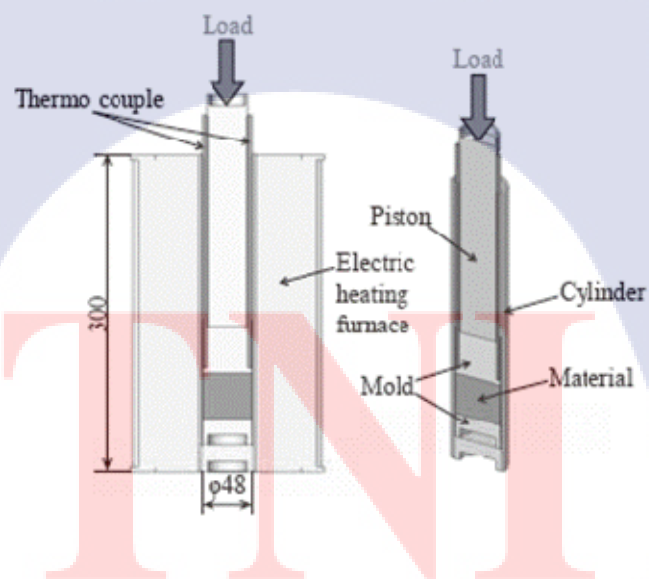
หมายเหตุ : ผลรวมทั้งหมดนั้นไม่จำเป็นต้องเท่ากับ 100 เนื่องจากแต่ละองค์ประกอบถูกวัดจากวิธีที่แตกต่างกัน

### 2.1.3 ถ่านชีวภาพ (Bio-Coke)

Bio-Coke หรือ ถ่านชีวภาพ เป็นเทคโนโลยีเชื้อเพลิงแข็งที่ได้รับการพัฒนาจากมหาวิทยาลัย Kinki ประเทศญี่ปุ่นโดยมีวัตถุประสงค์หลัก เพื่อนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงร่วมกับถ่านหิน เพื่อลดปริมาณการใช้ถ่านหิน ที่เป็นตัวการสำคัญของปัญหาโลกร้อนในงานวิจัยเริ่มแรกจะใช้กากใบชา เป็นวัตถุดิบ โดยนำมาผ่านกระบวนการอัดร้อนที่ความดันสูง จากผลการทดลองพบว่า Bio-Coke ที่ได้ มีความหนาแน่นสูง มีค่าความหนาแน่นอยู่ที่ประมาณ  $1.1\text{--}1.3\text{ g/cm}^3$  และให้ความร้อนสูงถึง  $6000\text{ kcal/kg}$  [16] สำหรับเครื่องผลิตถ่านชีวภาพที่ใช้ในห้องปฏิบัติการจะเป็นเครื่องขนาดเล็กสำหรับการใช้ในการทดลอง แสดงดังรูปที่ 2.2 แสดงเครื่องผลิตถ่านชีวภาพด้วยการอัดแนวตั้ง และรูปที่ 2.3 แสดงภาพจำลองเครื่องผลิตถ่านชีวภาพโดยการอัดแนวตั้งและอุปกรณ์ต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง สำหรับเครื่องผลิตถ่านชีวภาพที่ใช้ในการกระบวนการผลิตจริงจะมีขนาดใหญ่กว่ามาก แสดงดังรูปที่ 2.4 แสดงเครื่องผลิตถ่านชีวภาพโดยการอัดในแนวนอน



รูปที่ 2.2 เครื่องอัดผ่านชีวภาพโดยการอัดในแนวตั้ง



รูปที่ 2.3 ภาพจำลองเครื่องผลิตผ่านชีวภาพโดยการอัดแนวตั้งและอุปกรณ์ต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง [17]



รูปที่ 2.4 เครื่องอัดถ่านชีวภาพโดยการอัดในแนวนอน

#### 2.1.4 การอัดร้อนที่ความดันสูง

กระบวนการอัดร้อนที่ความดันสูงเป็นการอัดวัสดุโดยให้ความร้อนตลอดเวลาที่ทำการอัดเมื่อวัสดุได้รับความร้อนจะเกิดสารเคมีอินทรีย์ที่ช่วยยึดเนื้อวัสดุเข้าหากันจึงทำให้สามารถยึดเกาะขึ้นรูปเป็นแท่งได้โดยไม่ต้องใช้ตัวประสานตัวอย่างวัสดุที่สามารถนำมาทำเชื้อเพลิงอัดแท่งด้วยกระบวนการอัดร้อนคือวัสดุเศษเหลือทางการเกษตร (แกลบ ชี้เลื้อย ยอดอ้อย ฟางข้าว เปลือกผลไม้ ชังข้าวโพด ชานอ้อย ฯลฯ) วัสดุพืชบกและน้ำและผลผลิตทางการเกษตรโดยเฉพาะพืชที่มีแป้งและน้ำตาล (ข้าวโพด มันสำปะหลังอ้อย ข้าวฟ่าง ฯลฯ) เป็นต้น โดยปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อกระบวนการอัดมีอยู่หลายปัจจัย อาทิเช่น ปริมาณความชื้นของวัตถุดิบที่ใช้ เนื่องจากความชื้นมีส่วนช่วยในการถ่ายเทความร้อน หากปริมาณความชื้นต่ำเกินไป กระบวนการบีบอัดจะทำได้ยากเนื่องจากไม่เกิดการถ่ายเทความร้อนที่เหมาะสม นอกจากนี้ความชื้นยังมีส่วนช่วยในการสร้างพันธะระหว่างเนื้อชีวมวลขณะการอัดและมีผลช่วยในการเพิ่มความสามารถในการเคลื่อนตัวของลิกนินแต่หากมีปริมาณความชื้นมากเกินไปก็จะทำให้เกิดไอน้ำขึ้นระหว่างกระบวนการและส่งผลให้เกิดการปะทุระเบิดดันออกมาได้ ปริมาณความชื้นสูงสุดที่ให้มีได้จะขึ้นอยู่กับกระบวนการซึ่งสูงสุดไม่ควรเกิน 10-20% ส่วนช่วงความชื้นที่เหมาะสมในการทำงานควรอยู่ที่ประมาณ 8-12% สำหรับขนาดของชีวมวลก็พบว่าส่งผลต่อกระบวนการผลิตและคุณภาพของผลิตภัณฑ์เช่นเดียวกัน โดยขนาดชีวมวลยิ่งเล็กก็จะยิ่งง่ายต่อการอัดแท่งและเพิ่มความหนาแน่นให้มากขึ้นได้ง่ายยิ่งขนาดชีวมวลยิ่งเล็ก จะมีพื้นที่ผิวสัมผัสสำหรับการสร้างพันธะเกาะยึดได้มาก และทำให้กระบวนการอัดทำได้เร็วนอกจากนี้ยังพบว่าอุณหภูมิก็เป็นปัจจัยสำคัญเช่นกัน เมื่อมีการให้ความร้อนเริ่มต้นแก่วัตถุดิบงานและความดันในการอัดสามารถลดลงได้เกือบ 2 เท่า ทั้งยังพบว่าชีวมวลอัดแท่งที่อุณหภูมิสูงจะมีความหนาแน่นเชิงพลังงานสูงกว่า

### 2.1.5 กากมะพร้าว (Copra Meal)



รูปที่ 2.5 ลักษณะของกากมะพร้าว

กากมะพร้าวเป็นผลพลอยได้จากกระบวนการคั้นกะทิที่โดยปกติแล้วจะถูกขายเพื่อนำไปใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตอาหารสัตว์เป็นหลักเนื่องจากมีสารอาหารจำพวกคาร์โบไฮเดรต ไขมัน โปรตีน แร่ธาตุ ไฟเบอร์และลิกนินเป็นส่วนใหญ่ จากตารางที่ 2.3 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของกากมะพร้าว นอกจากนำกากมะพร้าวไปใช้ทำเป็นอาหารสัตว์แล้ว ยังมีงานวิจัยที่นำเอากากมะพร้าวไปประยุกต์ใช้ประโยชน์ในด้านอื่นๆ อีก เช่น เป็นวัสดุประกอบในแผ่นใยชีวภาพ [17] การนำมาผลิตเป็นเชื้อเพลิง เป็นต้น

ตารางที่ 2.3 องค์ประกอบทางเคมีของกากมะพร้าว

| ส่วนประกอบ             | %   |
|------------------------|-----|
| ความชื้น               | 10  |
| โปรตีน                 | 21  |
| ไขมัน                  | 6   |
| เยื่อใย                | 12  |
| เถ้า                   | 7   |
| แคลเซียม               | 0.2 |
| ฟอสฟอรัสใช้ประโยชน์ได้ | 0.2 |

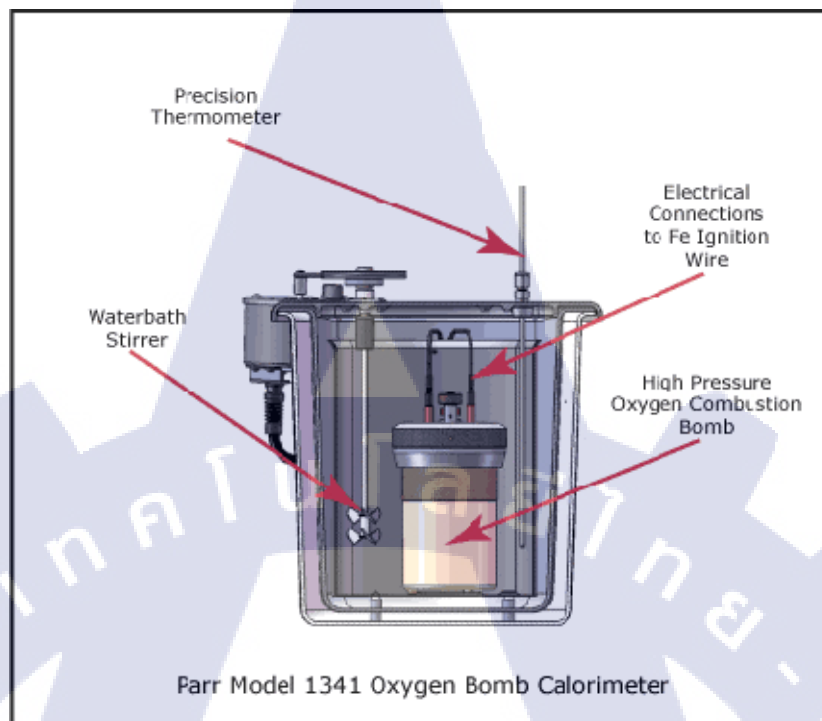
ตารางที่ 2.3 องค์ประกอบทางเคมีของกากมะพร้าว (ต่อ)

| ส่วนประกอบ           | %    |
|----------------------|------|
| ไลซีน                | 0.59 |
| เมทไธโอนีน           | 0.37 |
| เมทไธโอนีน+ซิสตีน    | 0.5  |
| ทริปโตเฟน            | 0.16 |
| ทรีโอนีน             | 0.65 |
| ไอโซลูซีน            | 0.73 |
| อาร์จินีน            | 2.08 |
| ลูซีน                | 1.3  |
| เฟนิลอะลานีน+ไทโรซีน | 1.4  |
| ฮิสติดีน             | 0.39 |
| เวอรีน               | 1.14 |
| ไกลซีน               | 0.88 |

## 2.2 หลักการวิเคราะห์ที่เกี่ยวข้อง

### 2.2.1 บอมบ์แคลอริมิเตอร์ (Bomb Calorimeter)

เครื่องมือที่ใช้วัดค่าความร้อนจากเชื้อเพลิง หรือวัสดุใดๆ ที่สามารถให้ค่าความร้อนได้เรียกว่า บอมบ์แคลอริมิเตอร์ (Bomb Calorimeter) บอมบ์แคลอริมิเตอร์ เป็นภาชนะปิดสนิท มีเทอร์มอมิเตอร์วัดอุณหภูมิภายใน โดยวัสดุตัวอย่างที่ต้องการวัดค่าความร้อนจะถูกบรรจุไว้ในภาชนะที่มีก๊าซออกซิเจนหุ้มด้วยถังน้ำ ใช้ไฟฟ้าในการจุดไฟเผาวัสดุตัวอย่างที่ต้องการวัดค่าความร้อน จากนั้นทำการวัดอุณหภูมิของน้ำที่เพิ่มขึ้น ส่วนประกอบของ Bomb Calorimeter แสดงดังรูปที่ 2.6 หน่วยของค่าพลังงานความร้อนที่นิยมใช้คือ หน่วยแคลอรี/กรัม (Cal/g) หรือกิโลแคลอรี/กรัม (Kcal/g) [18]



รูปที่ 2.6 ภาพจำลองบอมบ์แคลอรีมิเตอร์ [18]

### 2.2.2 ค่าความร้อน (Calorific Value) ของเชื้อเพลิง

ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงคือ พลังงานความร้อนต่อหน่วยน้ำหนักที่ปล่อยออกมาจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่มีจุดเริ่มอยู่ที่อุณหภูมิอ้างอิง แล้วผลิตภัณฑ์จากการเผาไหม้มีอุณหภูมิสุดท้ายเท่ากับอุณหภูมินี้ ผลที่ได้จะได้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำ

ในการหาค่าความร้อนมักจะหาจากการทดลองโดยใช้บอมบ์แคลอรีมิเตอร์ ค่าความร้อนของชีวมวลมีค่าประมาณกลางๆ คือ 2,390-4,780 kcal/kg โดยค่าความร้อนของชีวมวลกลุ่มไม้จะมีค่าสูงกว่ากลุ่มไม้ไผ่เล็กน้อย ค่าความร้อนขึ้นอยู่กับองค์ประกอบและคุณสมบัติของเชื้อเพลิงในรูปของสัดส่วนคาร์บอน (C) ไฮโดรเจน (H) ออกซิเจน (O) ไนโตรเจน (N) และกำมะถัน (S) หรือในรูปของสัดส่วนคาร์บอนคงตัว (FC) สารระเหย (VM) ความชื้น ( $MC_c$ ) และเศษเถ้า

### 2.2.3 ความหนาแน่นของของแข็ง

การคำนวณหาความหนาแน่นของถ่านชีวภาพทำได้โดยการหาค่าความหนาแน่นรวม (Bulk Density) ของวัตถุ ซึ่งหมายถึงความหนาแน่นที่รวมช่องว่างที่เกิดขึ้นทั้งหมดในวัตถุ สามารถหาได้จากสมการที่ 2.1

$$\text{ความหนาแน่นรวมของวัตถุ} = \frac{\text{มวลของวัตถุ}}{\text{ปริมาตรของวัตถุ}} \quad (2.1)$$

### 2.2.4 การวิเคราะห์ผิวของถ่านชีวภาพโดยใช้กล้องจุลทรรศน์ (Microscope)

กล้องจุลทรรศน์คือเครื่องมือที่ขยายภาพ สามารถใช้ร่วมในการวิเคราะห์ทดสอบลักษณะของวัสดุทางกายภาพที่ไม่สามารถสังเกตได้ด้วยตาเปล่า เช่น ลักษณะพื้นผิว โครงสร้างจุลภาค เป็นต้น [19]

### 2.2.5 Hypothesis Testing

Hypothesis Testing คือการทดสอบสมมติฐาน หรือการทดสอบเพื่อพิสูจน์ข้อมูล ซึ่งเป็นข้อสมมติเกี่ยวกับเรื่องที่น่าสนใจศึกษาว่าเป็นไปตามที่คาดคะเนหรือไม่ โดยที่จะต้องทำการกำหนดสมมติฐานหลัก (Null Hypothesis,  $H_0$ ) และสมมติฐานแย้ง (Alternative Hypothesis,  $H_1$ ) ซึ่งเป็นข้อมูลที่ตรงข้ามกับ  $H_0$  โดยทั่วไป การสรุปผลการทดสอบสมมติฐานนั้นจะต้องกำหนดระดับความสำคัญ เพื่อที่จะบอกยอมรับหรือปฏิเสธ สมมติฐานหลัก ( $H_0$ ) ซึ่งเรียกว่า Probability Value หรือค่า P-Value นี้จะอ้างอิงอยู่กับ ค่า  $\alpha$  โดยที่ P-Value คือค่าจริง ของ Probability ซึ่งได้จากการคำนวณ ส่วน  $\alpha$  คือ เส้นกำหนด หรือจุดแบ่งระหว่างการยอมรับ หรือปฏิเสธสมมติฐานหลัก ซึ่งก็คือ Probability เหมือนกัน การยอมรับสมมติฐานหลัก ถ้า P-Value มากกว่า  $\alpha$  และปฏิเสธ ถ้า P-Value เท่าหรือน้อยกว่า [20]

ตารางที่ 2.4 ระดับความสัมพันธ์ของตัวแปร [20]

| P Value       | ระดับความสัมพันธ์  |
|---------------|--------------------|
| P Value > .10 | ไม่มีนัยสำคัญ      |
| P Value ≤ .10 | ค่อนข้างมีนัยสำคัญ |
| P Value ≤ .05 | มีนัยสำคัญ         |
| P Value ≤ .01 | มีนัยสำคัญอย่างมาก |

### 2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Ida et al. [21] ได้ทำการศึกษาเพื่อยืนยันผลการพิสูจน์เอกลักษณ์ของถ่านชีวภาพที่ผลิตจากกากใบชา โดยทำการศึกษาปัจจัยต่างๆ เช่น อุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการ ขนาดของอนุภาควัตถุดิบ ความดัน ความชื้นเริ่มต้น จากผลการวิเคราะห์ทางความร้อนพบว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมที่ใช้ในกระบวนการแล้วไม่ทำให้น้ำหนักของวัตถุดิบเปลี่ยนแปลง เท่ากับ  $180^{\circ}\text{C}$  และความดันที่เหมาะสม ที่มีผลให้ได้ค่า Specific Gravity สูง คือการให้ความดันในกระบวนการคงที่เท่ากับ 20 MPa

Mizuno et al. [22] ทำการศึกษาค่าความหนาแน่นของถ่านชีวภาพจาก บล็อกเคอร์รี่ ใบไม้ของต้นเคอร์รี่ที่ตายแล้ว และเม็ดมะม่วง พบว่า ค่า Compressive Strength ที่ได้ ขึ้นอยู่กับปริมาณคาร์บอน ของวัตถุดิบแต่ละชนิด

Mizuno et al. [23] ทำการศึกษปัจจัยของขนาดอนุภาควัตถุดิบที่มีผลต่อการขึ้นรูปถ่านชีวภาพจากแกลบ จากผลการทดลองพบว่า ยิ่งขนาดอนุภาคของแกลบมีขนาดเล็กจะส่งผลต่อการทำปฏิกิริยาของลิกนิน มากกว่าขนาดอนุภาคขนาดใหญ่

Torii et al. [24] ทำการศึกษาค่าความหนาแน่น และความต้านทานแรงอัดสูงสุดที่อุณหภูมิสูง ของถ่านชีวภาพที่ผสมระหว่างไม้ไผ่และถ่านซีตาร์ญี่ปุ่น พบว่าค่าความหนาแน่นของถ่านชีวภาพจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิและความดันของการผลิตเพิ่มขึ้น และค่าความต้านทานแรงอัดสูงสุดที่อุณหภูมิสูงจะมากขึ้นเมื่อปริมาณคาร์บอนจากถ่านซีตาร์สูงขึ้น โดยที่มีค่าความต้านทานแรงอัดสูงสุดประมาณ  $32.6\text{ MPa}$

Murata et al. [25] ทำการทดลองผลิตถ่านชีวภาพ จากผงไม้ที่มีส่วนผสมของรำข้าว พบว่าความหนาแน่นมีค่าเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนของรำข้าวที่เพิ่มขึ้นซึ่งมีผลทำให้ค่าความร้อนและค่าความต้านทานแรงอัดสูงสุดมีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย

Seo et al. [26] ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติของถ่านชีวภาพที่สังเคราะห์จากไม้ป๊อปล่า (Yellow Poplar) ผสมกับถ่านหินที่อัตราส่วน 10, 15, 20 และ 30% ที่ผ่านกระบวนการคาร์บอนในเซชันใน Reactor ที่อุณหภูมิแตกต่างกันที่ 500 ถึง  $800^{\circ}\text{C}$  พบว่า เมื่ออัตราส่วนของชีวมวลเพิ่มขึ้นขนาดของก้อนอนุภาคจะเล็กลงแต่ได้พลังงานความร้อนเพิ่มขึ้นพร้อมกับพื้นที่ผิวสัมผัสที่เพิ่มขึ้นด้วย ในขณะที่การคาร์บอนเซชันที่อุณหภูมิสูงพบว่าเป็นผลเสียต่อถ่านชาร์ แม้ว่าพวก Volatile Gas จะสลายตัวที่อุณหภูมิสูงก็ตาม

I.E.Smith et al. [27] ทำการศึกษปัจจัยของอุณหภูมิในการอัดที่ส่งผลต่อความเสถียรของเชื้อเพลิงอัดแท่งที่ผลิตจากฟางข้าว พบว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการอัดและความชื้นเริ่มต้นของวัตถุดิบมีผลต่อความเสถียรของเชื้อเพลิงอัดแท่งเป็นอย่างมาก โดยเมื่อให้ความร้อนที่ช่วงอุณหภูมิ  $80^{\circ}\text{C}$  ถึง  $140^{\circ}\text{C}$  ได้ค่าความหนาแน่นอยู่ในช่วง 1.2 ถึง  $1.3\text{ g/cm}^3$  ใช้เวลาในการอัด 40 นาที และที่อุณหภูมิสูงกว่า  $110^{\circ}\text{C}$  พบว่า ความชื้นเริ่มต้นของวัตถุดิบมีผลน้อยมากต่อความเสถียรของเชื้อเพลิงอัดแท่ง

นอกจากนี้สังเกตว่า ที่อุณหภูมิสูง เชื้อเพลิงอัดแท่งจะมีสีที่เปลี่ยนแปลงไปจากเดิมเนื่องจากองค์ประกอบทางเคมีภายในของวัตถุดิบเกิดการสลายตัว

W.C. Edwards et al. [28] ทำการศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิที่มีต่อค่า Specific Gravity ของเชื้อเพลิงอัดแท่งจากซีลีเยอของต้นสน พบว่า ค่า Specific Gravity มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิในการอัดเพิ่มมากขึ้น โดยพบว่า ค่า Specific Gravity มีค่าสูงสุดเมื่อให้อุณหภูมิในการอัดที่  $190^{\circ}\text{C}$  และเมื่อให้อุณหภูมิสูงเกินไป ค่า Specific Gravity จะมีค่าลดลง เนื่องจากเชื้อเพลิงแข็งเกิดการสลายตัวนอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อให้อุณหภูมิมากกว่า  $120^{\circ}\text{C}$  อิทธิพลของความดันจะส่งผลน้อยลง

Faborode et al. [29] ทำการศึกษาผลของอุณหภูมิของเครื่องเอ็กทราชั้น พบว่า เมื่ออุณหภูมิในการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งเพิ่มมากขึ้นจะเป็นการเพิ่มความหนาแน่นและความทนทานของผลผลิต ในขณะที่เดียวกันพบว่าพลังงานที่ใช้ในกระบวนการจะลดลงเมื่อให้อุณหภูมิการอัดตั้งแต่  $20$  ถึง  $100^{\circ}\text{C}$

B. Hill et al. [30] ทำการศึกษาผลของอุณหภูมิการผลิตที่มีต่อความทนทานของเชื้อเพลิงอัดแท่งจากต้นอัลฟัลฟา พบว่า เมื่อให้อุณหภูมิสูงในการผลิตจะเป็นการเพิ่มความทนทานแก่เชื้อเพลิงอัดแท่ง โดยในรายการศึกษากล่าวว่า ความทนทานของเชื้อเพลิงแข็งจะเพิ่มขึ้น 30-50% เมื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก  $60^{\circ}\text{C}$  ถึง  $104^{\circ}\text{C}$

S. Mani et al. [31] ได้ให้ข้อสังเกตเกี่ยวกับอิทธิพลของอุณหภูมิที่มีผลต่อความแข็งแรงของเชื้อเพลิงอัดเม็ด พบว่าเมื่อให้อุณหภูมิสูงขึ้นจะช่วยลดความต้านทานของวัตถุดิบที่ต่อต้านโหลดในการในกระบวนการอัดให้ต่ำลง มีผลให้ได้เชื้อเพลิงอัดเม็ดที่มีสมบัติดีขึ้น

ศิริชัย ต่อสกุล และคณะ [32] ได้ทำการศึกษการผลิตถ่านอัดแท่งจากกากมะพร้าวโดยมีแนวคิดจากคุณสมบัติของกากมะพร้าวที่เนื้อมะพร้าวมีน้ำมัน สำหรับวัตถุดิบ คือถ่านกากมะพร้าวที่เป็นส่วนผสมหลักมาผสมกับกะลามะพร้าวซีลีเยอถ่านไม้เบญจพรรณในอัตราส่วนผสมต่างๆ ที่โดยใช้แป้งมันสำปะหลังเป็นตัวประสาน ผลการทดสอบพบว่าถ่านอัดแท่งกากมะพร้าวผสมกะลามะพร้าว กับถ่านอัดแท่งกากมะพร้าวผสมซีลีเยอมีค่าความร้อนใกล้เคียงกันและมีค่าความร้อนสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐาน มผช. ที่กำหนดไว้ว่าถ่านอัดแท่งจะต้องมีค่าความร้อนไม่ต่ำกว่า  $5,000\text{ kcal/kg}$  โดยได้ค่าความร้อนอยู่ที่ประมาณ  $3,800\text{--}6,000\text{ kcal/kg}$

มาลี กลิ่นกุหลาบ และนิชาภา ให้ศิริกุล [33] ได้ทำการศึกษการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งจากกะลามะพร้าวโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อหาความเหมาะสมและความเป็นไปได้ที่จะนำกากมะพร้าวมาผลิต และใช้ประโยชน์ในรูปของเชื้อเพลิงอัดแท่งแต่พบว่าการใช้กากมะพร้าวเพียงอย่างเดียวไม่สามารถอัดเป็นแท่งได้จึงต้องใช้ผักตบชวาเป็นตัวเชื่อมประสานตาม จากผลการทดสอบ พบว่า ได้ค่าความร้อนอยู่ระหว่าง  $3,532\text{--}4,882\text{ kcal/kg}$  เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่าความร้อนของเชื้อเพลิงที่ได้จากไม้ไมยราบมีค่าเท่ากับ  $4,071\text{ kcal/kg}$  พบว่ามีค่าสูงกว่า

โดยสรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้องแสดงดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยถ่านชีวภาพ

| ผู้วิจัย/ปี              | วัตถุดิบที่ใช้ผลิตถ่านชีวภาพ                              | ประเด็นสำคัญ                                                                                                             | ผลสรุป                                                                                                                                                                       |
|--------------------------|-----------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Ida et al. [21]          | กากใบชา                                                   | ปัจจัยต่างๆ ที่ส่งผลต่อคุณภาพของถ่านชีวภาพ เช่น อุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการ ขนาดของอนุภาควัตถุดิบ ความดัน ความชื้นเริ่มต้น | อุณหภูมิที่เหมาะสมที่ใช้ในกระบวนการแล้วเท่ากับ 180 °C และความดันที่เหมาะสม คือ การให้ความดันในกระบวนการคงที่เท่ากับ 20 MPA                                                   |
| Mizuno et al. [22]       | บล็อกเคอร์รี่ ใบไม้ของต้นเชอร์รี่ที่ตายแล้ว และเม็ดมะม่วง | ศึกษาค่าความหนาแน่นของถ่านชีวภาพ                                                                                         | ค่า Compressive Strength ขึ้นอยู่กับปริมาณคาร์บอน ของวัตถุดิบแต่ละชนิด                                                                                                       |
| Mizuno et al. [23]       | กลาบ                                                      | ศึกษาปัจจัยของขนาดอนุภาควัตถุดิบและอุณหภูมิในการขึ้นรูปถ่านชีวภาพ                                                        | ขนาดอนุภาคขนาดเล็กจะส่งผลต่อการทำปฏิกิริยาของลิกนินมากกว่าขนาดอนุภาคขนาดใหญ่                                                                                                 |
| I.E. Smith et al. [27]   | ฟางข้าว                                                   | ปัจจัยการผลิต(อุณหภูมิในการอัดขึ้นรูปและความชื้นเริ่มต้นของวัตถุดิบ) ที่มีผลต่อความเสถียรของเชื้อเพลิงอัดแท่ง            | อุณหภูมิในการอัดขึ้นรูปและความชื้นเริ่มต้นของวัตถุดิบมีผลต่อค่าความเสถียรของเชื้อเพลิงแท่งเป็นอย่างมาก                                                                       |
| W.C. Edwards et al. [28] | ขี้เลื่อยของต้นสน                                         | อุณหภูมิในการอัดขึ้นรูปที่มีผลต่อค่า Specific Gravity ของเชื้อเพลิงอัดแท่ง                                               | ค่า Specific Gravity มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิในการอัดเพิ่มมากขึ้น โดยพบว่าค่า Specific Gravity มีค่าสูงสุดเมื่อให้อุณหภูมิในการอัดที่ 190°C และ เมื่อให้อุณหภูมิสูงเกินไป |

ตารางที่ 2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยถ่านชีวภาพ (ต่อ)

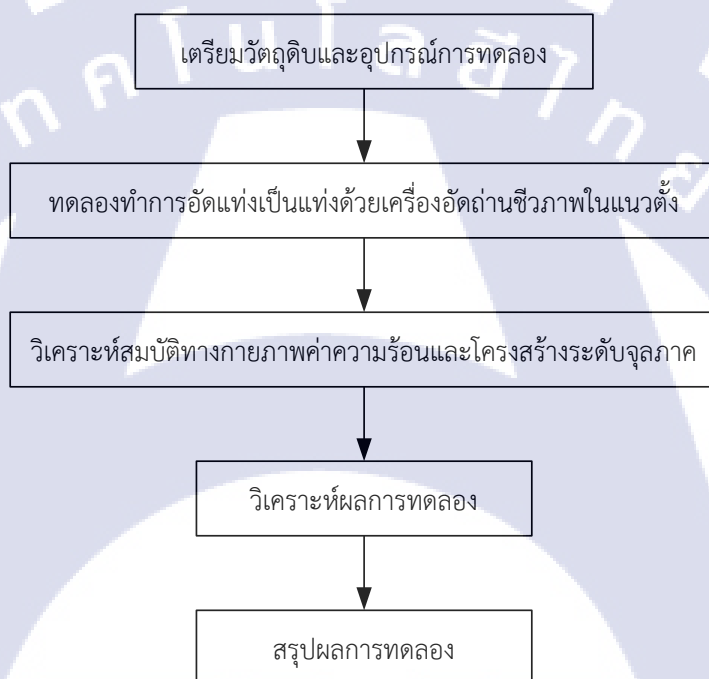
| ผู้วิจัย/ปี         | วัตถุดิบที่ใช้ผลิตถ่านชีวภาพ | ประเด็นสำคัญ                                                   | ผลสรุป                                                                                                                                                      |
|---------------------|------------------------------|----------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                     |                              |                                                                | ค่า Specific Gravity จะมีค่าลดลง เนื่องจาก เชื้อเพลิงแข็งเกิดการ สลายตัว                                                                                    |
| B. Hill et al. [30] | ต้นอัลฟาฟา                   | อุณหภูมิการผลิตที่มีต่อ ความทนทานของเชื้อเพลิงอัดแท่ง          | เมื่อใช้อุณหภูมิสูงในการผลิตจะเป็นการเพิ่มความทนทานแก่เชื้อเพลิงอัดแท่งและความทนทานของเชื้อเพลิงแข็งจะเพิ่มขึ้น 30-50% เมื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 60°C ถึง 104°C |
| S. Mani et al. [31] | ขี้เลื่อยของต้นไผ่           | ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและความดันที่ต่อสมบัติของเชื้อเพลิงแท่ง | เวลาที่ใช้จะมีผลที่ความดันต่ำมากกว่าความดันสูง และที่ความดันสูงที่สุด 1380 Bar พบว่าเวลาไม่มีผลต่อสมบัติของเชื้อเพลิงแท่ง                                   |

### บทที่ 3

#### วิธีดำเนินการวิจัย

##### 3.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน

การดำเนินงานวิจัยจะเริ่มจากการเตรียมวัตถุดิบ จากนั้นนำมาทดลองโดยการอัดแท่งด้วยเครื่องอัดถ่านชีวภาพในแนวตั้งเพื่อที่จะนำผลิตภัณฑ์ที่ได้ไปวิเคราะห์คุณสมบัติทางด้านเชื้อเพลิง เช่น ค่าความร้อนและค่าความหนาแน่นรวม โดยมีขั้นตอนการทำงานเป็นแผนภาพดังรูปที่ 3.1

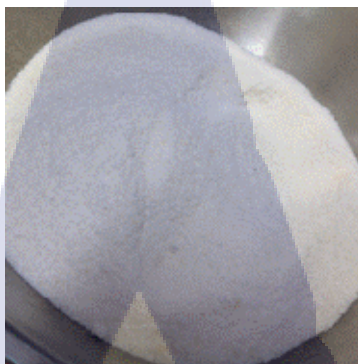


รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน

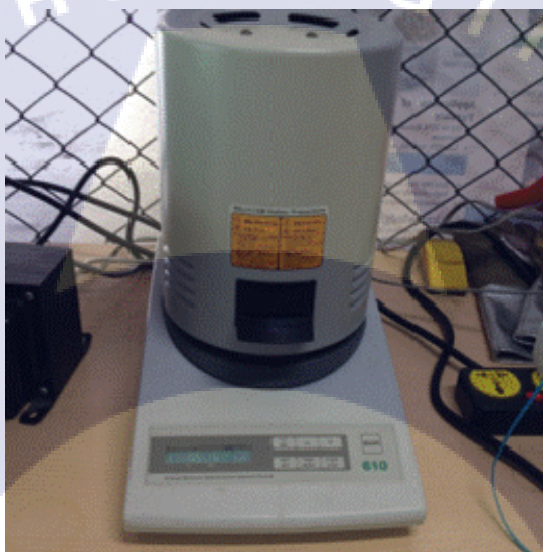
##### 3.1.1 เตรียมวัตถุดิบและอุปกรณ์การทดลอง

วัตถุดิบและอุปกรณ์การทดลอง

- กากมะพร้าว (โรงงานอุตสาหกรรมผลิตกะทิสำเร็จรูปเซฟซี้อย) แสดงดังรูปที่ 3.2
- ตู้อบ ยี่ห้อ Redline รุ่น RF115
- เครื่องวัดความชื้นแสดงดังรูปที่ 3.3
- เครื่องชั่ง
- เครื่องอัดถ่านชีวภาพในแนวตั้งแสดงดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.2 กากมะพร้าว



รูปที่ 3.3 เครื่องวัดความชื้น



รูปที่ 3.4 เครื่องอัดถ่านชีวภาพในแนวตั้ง

### 3.1.2 เตรียมตัวอย่างการทดลอง

- นำกากมะพร้าวตัวอย่างมาไล่ความชื้น จากนั้นวัดความชื้นให้ได้ประมาณ 8-12%
- หากเมื่อวัดความชื้นแล้วยังสูงกว่า 8-12% ให้ทำการอบต่อเพื่อไล่ความชื้นออก
- เตรียมตัวอย่างโดยการชั่งน้ำหนัก 80 g

### 3.1.3 ทำการทดลอง

- นำตัวอย่างใส่ลงเครื่องอัดถ่านชีวภาพในแนวตั้ง
- ทำการอัดที่ช่วงอุณหภูมิห้อง ถึง  $170^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 10-20 นาที โดยใช้ความดันในการอัดคงที่เท่ากับ 14 Bar
- ทำการทดลองที่สภาวะต่างๆ ในขั้นต้นทำการศึกษาปัจจัยด้านอุณหภูมิและระยะเวลา โดยเลือกใช้อุณหภูมิการอัดที่อุณหภูมิห้องจากนั้นศึกษาในช่วงอุณหภูมิที่มากขึ้นที่  $100^{\circ}\text{C}$  และ  $170^{\circ}\text{C}$  ตามลำดับ สำหรับปัจจัยด้านระยะเวลา ทำการศึกษาที่ระยะเวลาในการอัด 10 15 และ 20 นาที ตามลำดับ โดยการทดลองทั้งหมดแสดงดังตารางที่ 3.1

### 3.2 การตรวจสอบสมบัติของถ่านชีวภาพ

ทำการตรวจสอบสมบัติของถ่านชีวภาพที่ผลิตจากกากมะพร้าว โดยมีรายละเอียดดังนี้

#### 3.2.1 วิเคราะห์สมบัติทางด้านกายภาพ

- วิเคราะห์ค่าความหนาแน่นรวม (Bulk Density) โดยคำนวณจากสมการที่ 4.1

#### 3.2.2 วิเคราะห์สมบัติทางด้านความร้อน

- วิเคราะห์หาค่าความร้อนของถ่านชีวภาพด้วย Bomb Calorimeter Parr รุ่น Model 1341 Plain Jacket

#### 3.2.3 วิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของถ่านชีวภาพ

- วิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของถ่านชีวภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์ (Compact Inverted Metallurgical Microscope, รุ่น CK40M)

#### 3.2.4 การวิเคราะห์ผลเชิงสถิติด้วยโปรแกรม Minitab

- ทำการยืนยันผลการทดลองด้วยการวิเคราะห์เชิงสถิติด้วยวิธี One Way ANOVA โดยใช้โปรแกรม Minitab

ตารางที่ 3.1 การทดลองที่สภาวะต่างๆ

| ตัวอย่าง | อุณหภูมิ (°C) | เวลาที่ใช้ในการทดลอง (Min) |
|----------|---------------|----------------------------|
| A        | ห้อง          | 10                         |
| B        | ห้อง          | 15                         |
| C        | ห้อง          | 20                         |
| D        | 100           | 10                         |
| E        | 100           | 15                         |
| F        | 100           | 20                         |
| G        | 170           | 10                         |
| H        | 170           | 15                         |
| I        | 170           | 20                         |

## บทที่ 4

### การวิเคราะห์ผลการวิจัย

วัตถุดิบที่ใช้ในการทดลองคือกากมะพร้าวที่ได้หลังจากขั้นตอนการคั้นน้ำกะทิจากอุตสาหกรรมกะทิสำเร็จรูปโดยค่าความร้อนที่วัดได้ขณะที่ยังไม่ได้อัดเป็นถ่านชีวภาพเท่ากับ 4,250 kcal/kg และองค์ประกอบทางเคมีของกากมะพร้าวแสดงดังตารางที่ 4.1 โดยพบว่ามีส่วนประกอบของสารประกอบลิกโนเซลลูโลสซึ่งเป็นองค์ประกอบสำคัญที่มีผลต่อการผลิตถ่านชีวภาพ

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบทางเคมีของกากมะพร้าว

|               | ค่าเฉลี่ย | ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน |
|---------------|-----------|---------------------|
| %ลิกนิน       | 23.832    | 0.121               |
| %เฮมิเซลลูโลส | 60.450    | 0.129               |
| %เซลลูโลส     | 9.940     | 0.249               |

#### 4.1 สมบัติทางกายภาพของถ่านชีวภาพที่ผลิตจากกากมะพร้าว

การตรวจสอบสมบัติทางกายภาพของถ่านชีวภาพสามารถทำได้โดยการหาค่าความหนาแน่นรวม (Bulk Density) โดยการนำน้ำหนักและความสูงของผลิตภัณฑ์มาคำนวณโดยใช้สมการที่ 4.1 ซึ่งจะทำให้การทดลองหาปริมาณผลผลิตในสภาวะที่แตกต่างกันดังนี้ อุณหภูมิในการอัดที่อุณหภูมิห้อง 100°C และ 170°C และระยะเวลาในการอัดขึ้นรูป 10 15 และ 20 นาที โดยใช้ความดันในการอัดคงที่เท่ากับ 14 Bar

$$\text{Bulk Density} = \frac{m}{V} \quad (4.1)$$

โดย Bulk Density คือ ค่าความหนาแน่นรวม (g/cm<sup>3</sup>)

m คือ มวลของถ่านชีวภาพ (g)

V คือ ปริมาตรของถ่านชีวภาพ (cm<sup>3</sup>)

โดยค่าความหนาแน่นรวมที่ได้จากการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.2

จากการศึกษาถึงผลกระทบของอุณหภูมิในการขึ้นรูปต่อค่าความหนาแน่นรวมของผลผลิตพบว่า ที่อุณหภูมิการขึ้นรูปสูงขึ้น ค่าความหนาแน่นรวมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 4.2 เมื่อทำการทดลองอัดที่อุณหภูมิห้อง หลังกระบวนการอัดพบว่า สามารถขึ้นรูปเป็นถ่านชีวภาพได้ และมีความแข็งแรงระดับหนึ่ง เนื่องจากมีความชื้นทำหน้าที่เป็นตัวประสานเบื้องต้นในการยึดติดอนุภาคของวัตถุดิบ [31] แต่เมื่อเวลาผ่านไป ความชื้นเกิดการระเหย มีผลให้เกิดรูพรุนในถ่านชีวภาพ ทำให้น้ำหนักถ่านชีวภาพลดลงเล็กน้อย ในขณะที่ปริมาตรเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากถ่านชีวภาพเกิดการขยายตัว เพราะไม่มีตัวช่วยประสาน มีผลให้ความหนาแน่นรวมลดลง มีค่าอยู่ในช่วง  $0.53-0.65 \text{ g/cm}^3$  ซึ่งลักษณะถ่านชีวภาพที่ได้ยังคงรูปเป็นแท่งแต่มีความเปราะ แตกหักได้ง่าย สำหรับการทดลองขึ้นรูปที่อุณหภูมิ  $100^\circ\text{C}$  พบว่าถ่านชีวภาพที่ได้มีความคงรูปมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับถ่านชีวภาพที่ทำการทดลองที่อุณหภูมิห้องดังรูปที่ 4.1 (a) แสดงลักษณะถ่านชีวภาพที่ทำการขึ้นรูปที่อุณหภูมิ  $100^\circ\text{C}$  และเมื่อเวลาผ่านไปพบว่า ถ่านชีวภาพที่ได้ไม่เกิดการขยายตัว เนื่องจากองค์ประกอบทางเคมีภายในกากมะพร้าว เช่น ลิกนิน และโปรตีนเกิดการอ่อนตัวลงโดยทำการเชื่อมต่อ (Crosslink) กับแป้งและไขมัน [27] ช่วยให้เกิดการยึดติดกันระหว่างอนุภาควัตถุดิบทำให้ถ่านชีวภาพมีความหนาแน่นรวมและความแข็งแรงมากขึ้น ไม่แตกหักได้ง่าย ค่าความหนาแน่นรวมที่ได้อยู่ในช่วง  $0.88-0.97 \text{ g/cm}^3$  โดยในงานวิจัยนี้จะใช้ความชื้นเริ่มต้นของวัตถุดิบอยู่ระหว่าง 8-12% ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Van Dam J. E. G. et al. [8] ที่กล่าวว่าความชื้นจะช่วยให้ลิกนินเกิดการอ่อนตัวลงที่อุณหภูมิต่ำประมาณ  $90^\circ\text{C}$  จากปกติจะเริ่มอ่อนตัวที่อุณหภูมิประมาณ  $140^\circ\text{C}$  สำหรับการทดลองขึ้นรูปถ่านชีวภาพที่อุณหภูมิ  $170^\circ\text{C}$  พบว่า ระหว่างกระบวนการขึ้นรูปมีควันเกิดขึ้นสามารถสังเกตเห็นได้อย่างชัดเจน แสดงให้เห็นว่าบริเวณพื้นผิวของถ่านชีวภาพถูกไฟโรซิส์ไปบางส่วน รวมทั้งถ่านชีวภาพที่ได้มีลักษณะสีที่เปลี่ยนไปจากเดิมค่อนข้างชัดเจน ดังรูปที่ 4.1 (b) แสดงลักษณะถ่านชีวภาพที่ทำการขึ้นรูปที่อุณหภูมิ  $170^\circ\text{C}$  เป็นการพิสูจน์ว่ามีองค์ประกอบทางเคมีบางชนิดของกากมะพร้าวเกิดการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้าง[16] โดยถ่านชีวภาพที่ขึ้นรูปที่อุณหภูมิ  $170^\circ\text{C}$  ให้ค่าความหนาแน่นรวมสูงสุดเท่ากับ  $1.18 \text{ g/cm}^3$  เนื่องจากอนุภาคของถ่านชีวภาพเกิดการยึดติดกันโดยสมบูรณ์มากขึ้น สำหรับผลกระทบของเวลาในการขึ้นรูปต่อค่าความหนาแน่นรวมของผลผลิตพบว่า เมื่อให้เวลาในการขึ้นรูปเพิ่มมากขึ้น ค่าความหนาแน่นรวมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกันเป็นไปตามผลของงานวิจัยของ H. V. Lee et al. [15] และ Faborode et al. [29] ที่ได้กล่าวว่าเมื่อให้เวลาในกระบวนการเพิ่มมากขึ้น จะมีผลให้ช่องว่างระหว่างวัตถุดิบลดน้อยลง รวมทั้งเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการยึดเกาะตัวกันของอนุภาควัตถุดิบ ส่งผลให้ความหนาแน่นเพิ่มมากขึ้น โดยผลกระทบของเวลาในการขึ้นรูปต่อค่าความหนาแน่นรวมของถ่านชีวภาพแสดงดังรูปที่ 4.3

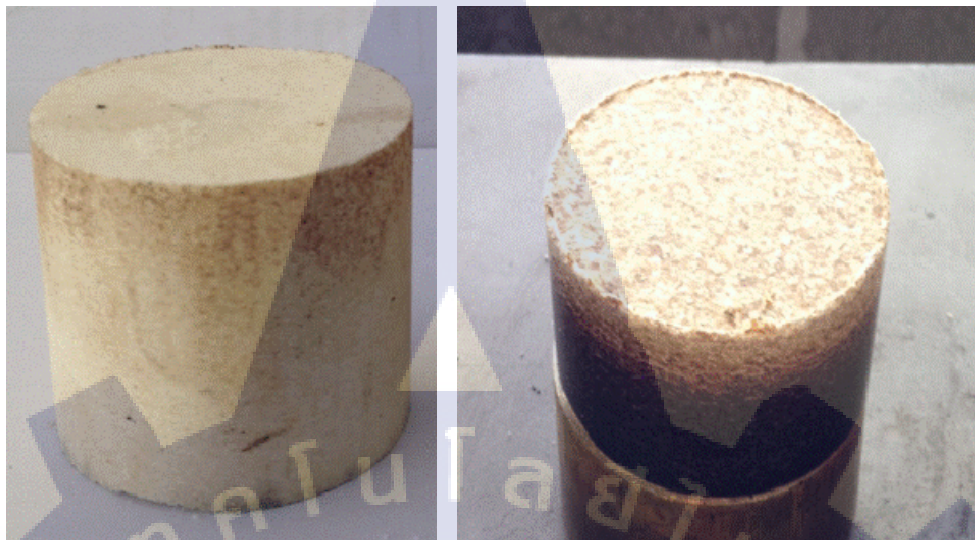
ตารางที่ 4.2 สรุปผลการทดลองค่าความหนาแน่นและค่าความร้อนที่สภาวะต่างๆ

| ตัวอย่าง | อุณหภูมิ<br>(°C) | เวลาที่ใช้ในการทดลอง<br>(min) | ค่าความหนาแน่นรวม<br>(g/cm <sup>3</sup> ) | ค่าความร้อน<br>(kcal/kg) |
|----------|------------------|-------------------------------|-------------------------------------------|--------------------------|
| A        | ห้อง             | 10                            | 0.53                                      | 4,944                    |
| B        | ห้อง             | 15                            | 0.56                                      | 5,051                    |
| C        | ห้อง             | 20                            | 0.65                                      | 5,121                    |
| D        | 100              | 10                            | 0.88                                      | 5,038                    |
| E        | 100              | 15                            | 0.89                                      | 5,180                    |
| F        | 100              | 20                            | 0.97                                      | 5,566                    |
| G        | 170              | 10                            | 1.05                                      | 4,350                    |
| H        | 170              | 15                            | 1.09                                      | 4,410                    |
| I        | 170              | 20                            | 1.18                                      | 4,668                    |

#### 4.2 ค่าความร้อน (Calorific Value) ของถ่านชีวภาพ

การตรวจสอบคุณสมบัติทางความร้อนของถ่านชีวภาพที่ผลิตจากกะพรวัว ทำได้โดยการหาค่าความร้อน (Calorific Value) ในงานวิจัยนี้ใช้เครื่องบอมบ์แคลอรีมิเตอร์ (Bomb Calorimeter, Parr รุ่น Model 1341 Plain Jacket)

จากการศึกษาถึงผลกระทบของอุณหภูมิในการขึ้นรูปต่อค่าความร้อนของผลผลิตพบว่าเมื่อให้อุณหภูมิในการอัดถ่านชีวภาพเพิ่มขึ้นจากอุณหภูมิห้องเป็น 100°C ค่าความร้อนมีแนวโน้มสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัด โดยได้ค่าความร้อนสูงสุดเท่ากับ 5,566 kcal/kg แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิจนถึง 170°C กลับพบว่าค่าความร้อนที่ได้มีค่าลดลง อาจเนื่องมาจากคุณสมบัติของตัววัตถุดิบเองที่เป็นวัสดุที่มีน้ำมันเป็นองค์ประกอบ ซึ่งน้ำมันในวัตถุดิบก็เป็นปัจจัยหนึ่งที่ทำให้ผลผลิตที่ได้มีค่าความร้อนสูง เมื่อทำการทดลองที่ความร้อนสูงน้ำมันที่มีอยู่ในวัตถุดิบจะถูกบีบอัดออกมามากกว่าการอัดที่ความร้อนต่ำ ทำให้ปริมาณน้ำมันที่หลงเหลืออยู่ในวัตถุดิบมีปริมาณน้อยกว่า มีผลให้ค่าความร้อนที่ได้มีค่าลดลงโดยความสัมพันธ์ของอุณหภูมิในการขึ้นรูปต่อค่าความร้อนของถ่านชีวภาพแสดงดังรูปที่ 4.4

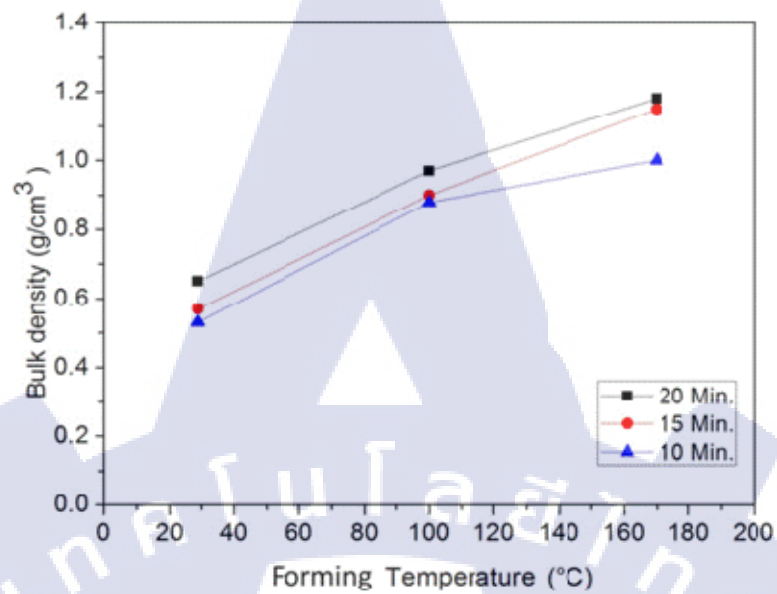


(a)

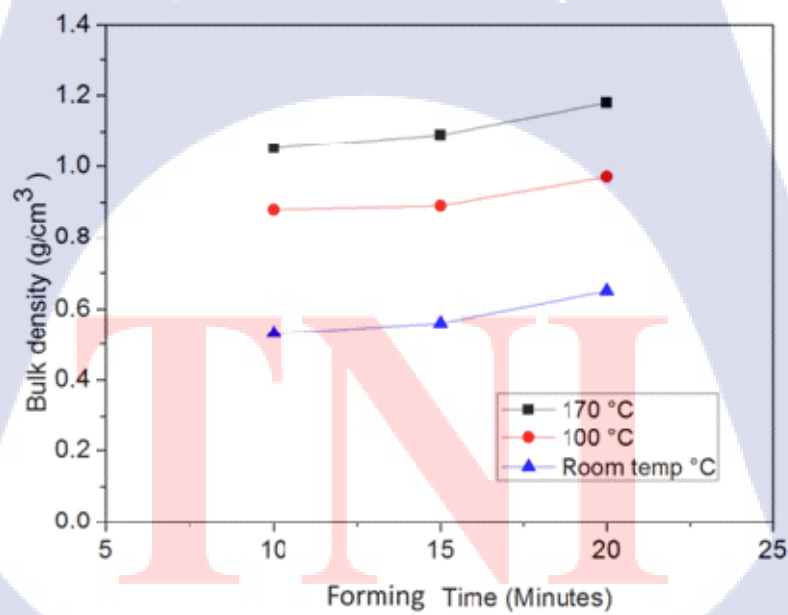
(b)

รูปที่ 4.1 ลักษณะถ่านชีวภาพที่ทำการขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 100°C (a) ลักษณะถ่านชีวภาพที่ทำการขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 170°C (b) บนสภาวะการขึ้นรูปเป็นเวลา 20 นาที ความดันคงที่ที่ 14 Bar

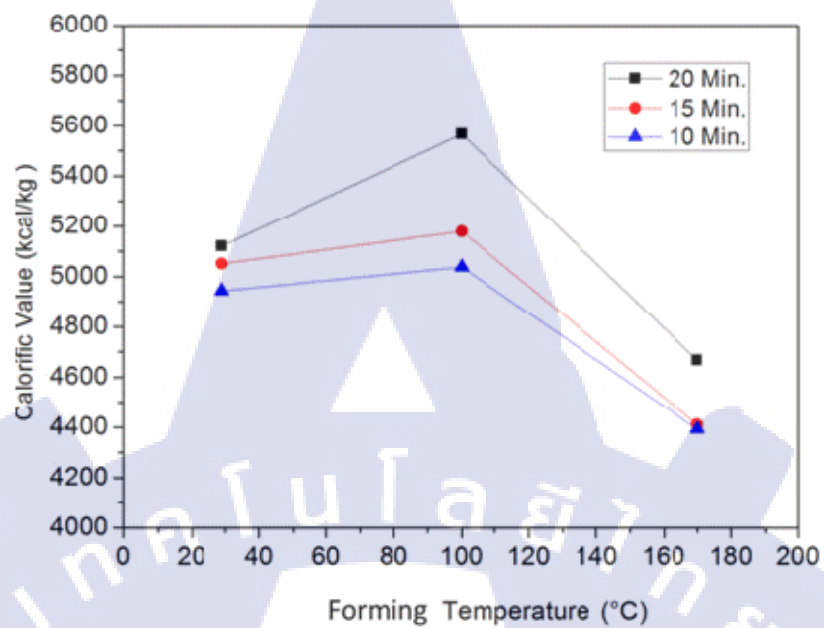
สำหรับผลกระทบของเวลาในการขึ้นรูปต่อค่าความร้อนของผลผลิตพบว่า เมื่อให้เวลาในการขึ้นรูปเพิ่มมากขึ้น ค่าความร้อนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามลำดับ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Murata et al. [25] ที่ได้รายงานไว้ที่ความดันต่ำ เวลาที่ให้ในกระบวนการจะแปรผันตรงกับค่าความร้อนที่ได้ เมื่อให้เวลาในกระบวนการเพิ่มมากขึ้นจะเป็นการเพิ่มความหนาแน่นรวมของถ่านชีวภาพ เมื่อความหนาแน่นรวมของถ่านชีวภาพเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ค่าความร้อนที่ได้รับสูงขึ้นตามไปด้วยโดยผลกระทบของเวลาต่อค่าความร้อนของถ่านชีวภาพแสดงดังรูปที่ 4.5



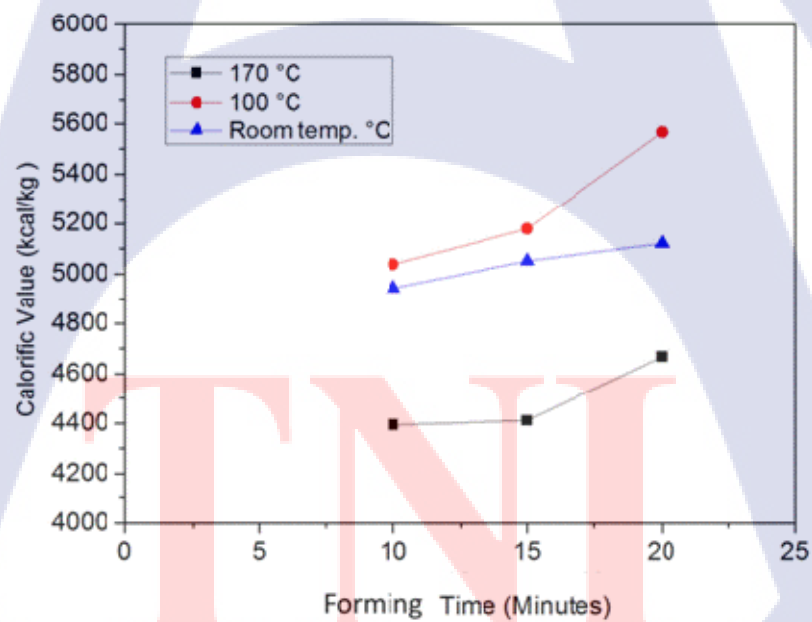
รูปที่ 4.2 ผลกระทบของอุณหภูมิในการขึ้นรูปต่อค่าความหนาแน่นรวมของถ่านชีวภาพจากกากมะพร้าว



รูปที่ 4.3 ผลกระทบของเวลาในการขึ้นรูปต่อค่าความหนาแน่นรวมของถ่านชีวภาพจากกากมะพร้าว



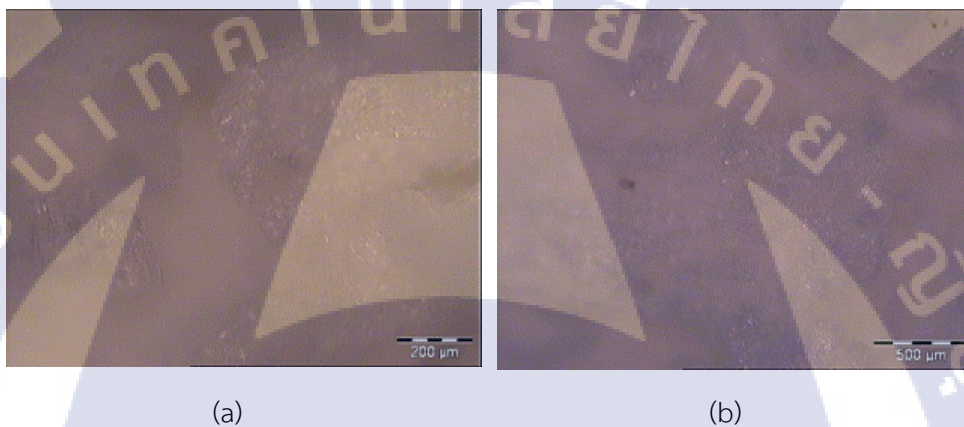
รูปที่ 4.4 ผลกระทบของอุณหภูมิในการขึ้นรูปต่อค่าความร้อนของถ่านชีวภาพจากกากมะพร้าว



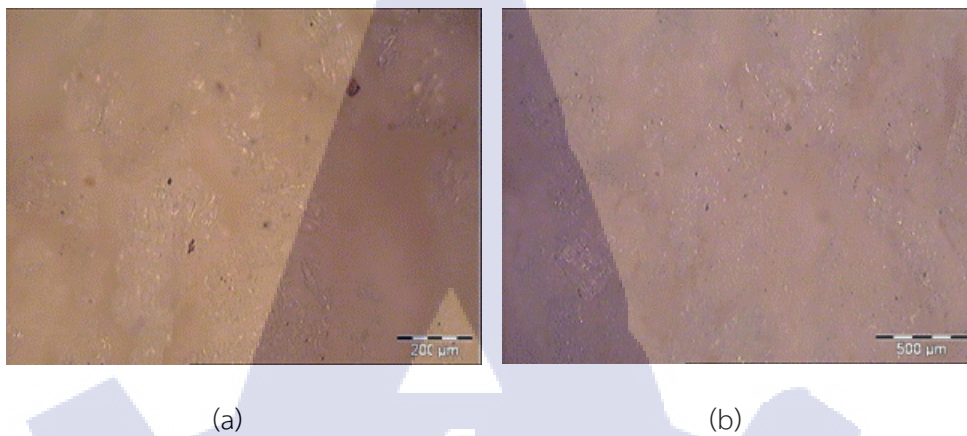
รูปที่ 4.5 ผลกระทบของเวลาในการขึ้นรูปต่อค่าความร้อนของถ่านชีวภาพจากกากมะพร้าว

### 4.3 โครงสร้างระดับจุลภาคของถ่านชีวภาพที่ผลิตจากกากมะพร้าว

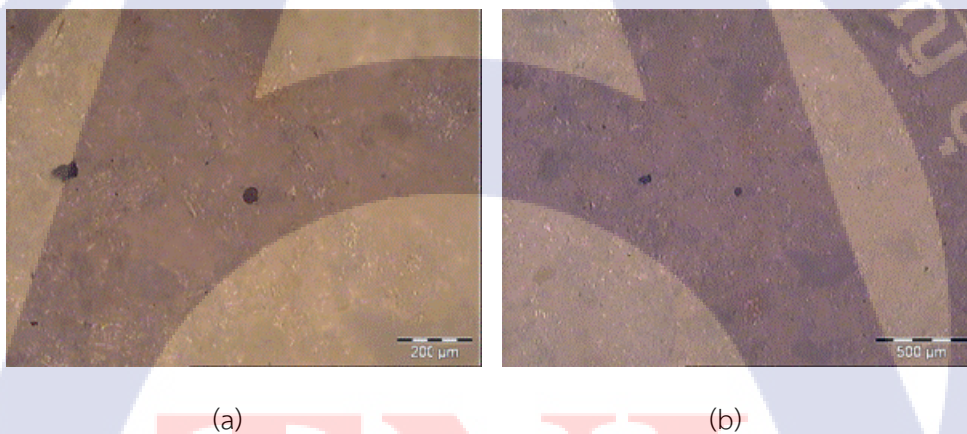
รูปที่ 4.6 รูปที่ 4.7 และรูปที่ 4.8 แสดงลักษณะพื้นผิวด้านในของถ่านชีวภาพจากกากมะพร้าวจากกล้องจุลทรรศน์ (Compact Inverted Metallurgical Microscope, รุ่น CK40M) ที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดถ่านชีวภาพโดยการอัดในแนวตั้ง บนสภาวะการอัดขึ้นรูปที่อุณหภูมิห้อง  $100^{\circ}\text{C}$  และ  $170^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 20 นาที และใช้ความดันคงที่ 14 Bar จากรูปจะเห็นได้ว่าเมื่อทำการอัดที่อุณหภูมิที่สูงมากขึ้นช่องว่างระหว่างอนุภาควัตถุดิบจะเล็กลงอย่างเห็นได้ชัดเจนและเรียงตัวกันเป็นระเบียบมากขึ้น เป็นผลมาจากอิทธิพลของความร้อนและความดัน ที่ทำให้ถ่านชีวภาพ ยึดเกาะตัวกันมากขึ้น ทำให้มีความหนาแน่นสูงขึ้น [24]



รูปที่ 4.6 ลักษณะพื้นผิวของถ่านชีวภาพที่ผลิตจากกากมะพร้าวกำลังขยาย 200 เท่า (a) ลักษณะพื้นผิวของถ่านชีวภาพที่ผลิตจากกากมะพร้าวกำลังขยาย 500 เท่า (b) บนสภาวะการขึ้นรูปที่อุณหภูมิห้องเวลา 20 นาที ความดันคงที่ 14 Bar



รูปที่ 4.7 ลักษณะพื้นผิวของถ่านชีวภาพที่ผลิตจากกากมะพร้าวกำลังขยาย 200 เท่า (a) ลักษณะพื้นผิวของถ่านชีวภาพที่ผลิตจากกากมะพร้าวกำลังขยาย 500 เท่า (b) บนสภาวะการขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 100°C เวลา 20 นาที ความดันคงที่ที่ 14 Bar



รูปที่ 4.8 ลักษณะพื้นผิวของถ่านชีวภาพที่ผลิตจากกากมะพร้าวกำลังขยาย 200 เท่า (a) ลักษณะพื้นผิวของถ่านชีวภาพที่ผลิตจากกากมะพร้าวกำลังขยาย 500 เท่า (b) บนสภาวะการขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 170°C เวลา 20 นาที ความดันคงที่ที่ 14 Bar

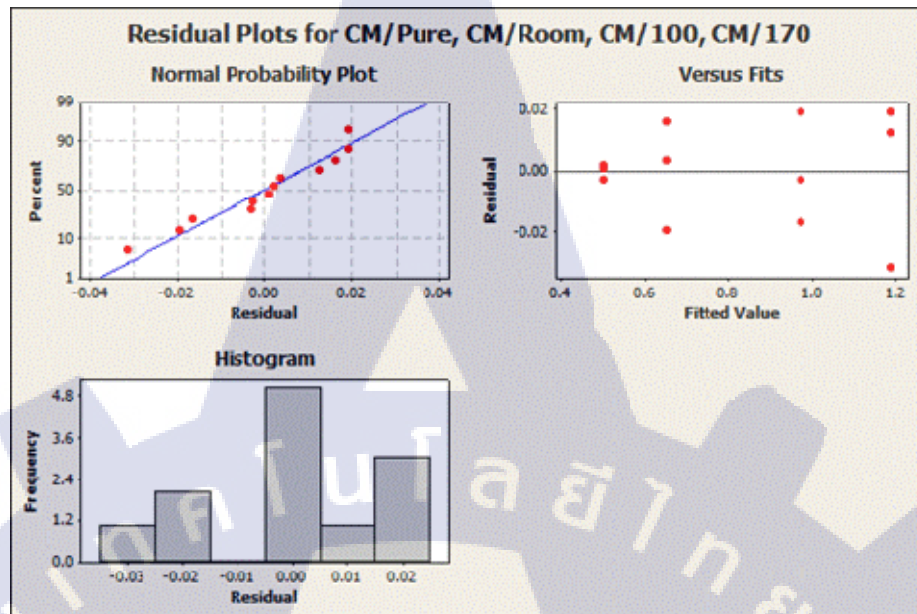
#### 4.4 การวิเคราะห์ผลเชิงสถิติด้วยโปรแกรม Minitab

จากการศึกษาผลของอุณหภูมิและเวลาในการขึ้นรูปถ่านชีวภาพจะส่งผลต่อค่าความหนาแน่นรวมและค่าความร้อนของถ่านชีวภาพหรือไม่ ตารางที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการขึ้นรูป อุณหภูมิที่ใช้ในการผลิต ค่าความหนาแน่นรวม และค่าความร้อน ที่ได้จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบมีปัจจัยเดียวด้วย ANOVA โดยใช้ One-Way (Unstacked) ด้วยโปรแกรม Minitab โดยที่หากค่า P-Value  $< \alpha$  (0.05) หมายความว่าตัวแปรสัมพันธ์กันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 95% พบว่า ANOVA อ่านค่า P-Value ได้ค่าน้อยมาก คือ  $0.000 < \alpha$  (0.05) จึงสรุปได้ว่า การเพิ่มอุณหภูมิและเวลาในการขึ้นรูป ส่งผลให้ค่าความหนาแน่นรวมและค่าความร้อนของถ่านชีวภาพสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองที่ได้

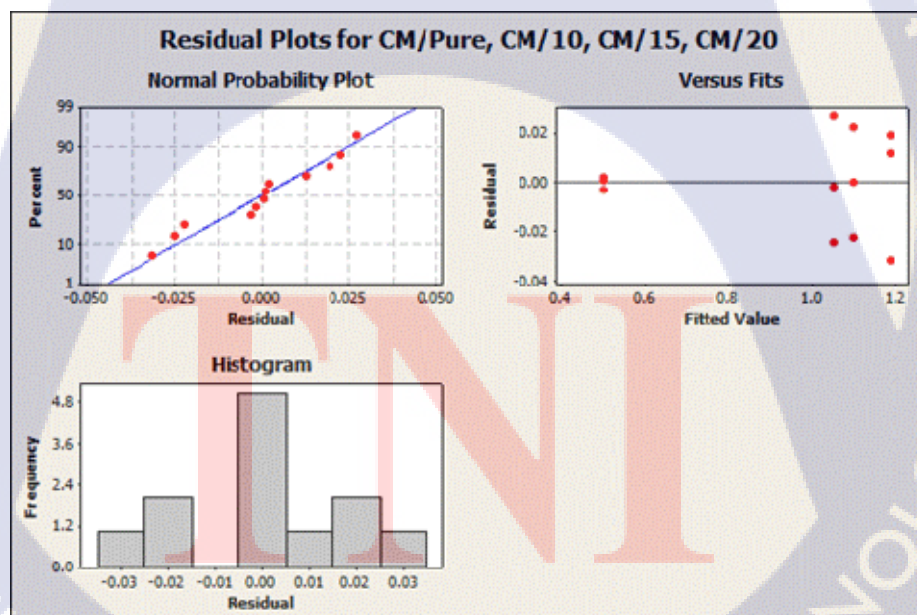
ตารางที่ 4.3 ค่า P-Value ที่คำนวณได้จากโปรแกรม Minitab

| P-Value         | Temperature | Time  |
|-----------------|-------------|-------|
| Calorific Value | 0.000       | 0.000 |
| Density         | 0.000       | 0.000 |

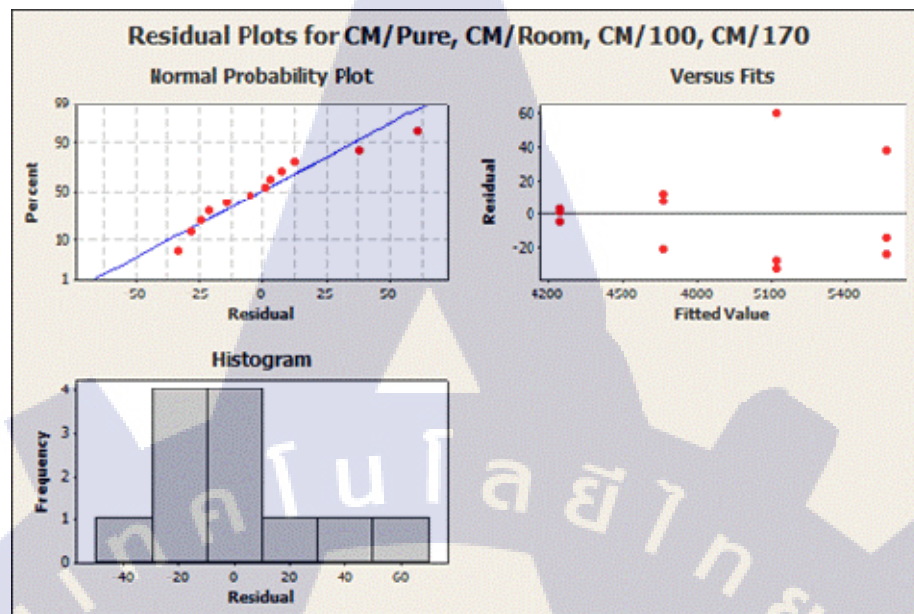
จากรูปที่ 4.9 รูปที่ 4.10 รูปที่ 4.11 และรูปที่ 4.12 กราฟ Residual Plot แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาในการขึ้นรูปต่อค่าความหนาแน่นรวมและค่าความร้อนของถ่านชีวภาพจากภาพรวมแล้วจากกราฟ Normal Probability Plot พบว่า มีการเกาะกลุ่มกันของข้อมูลเป็นแนวเส้นตรงในทุกกลุ่มข้อมูล แสดงให้เห็นว่าข้อมูลมีการกระจายตัวเป็นแบบปกติในทุกกลุ่มข้อมูลกราฟ Versus Fits แสดงความคลาดเคลื่อนของกลุ่มข้อมูลและดูความเสถียรของความแปรปรวนของข้อมูล โดยพบว่า ความคลาดเคลื่อนของทุกกลุ่มข้อมูลมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอทั้งในด้านบวกและลบ แสดงให้เห็นว่าทุกกลุ่มข้อมูลมีความแปรปรวนคงที่เป็นการยืนยันว่าข้อมูลที่ได้จากการทดลองสามารถเชื่อถือได้ในขณะที่กราฟ Histogram แสดงให้เห็นว่า นอกจากปัจจัยด้านเวลาและอุณหภูมิจะส่งผลต่อค่าความหนาแน่นรวมและค่าความร้อนของถ่านชีวภาพแล้ว ยังมีปัจจัยอื่นๆ ที่ส่งผลร่วมด้วย อาทิ เช่น ความชื้นเริ่มต้นของวัตถุดิบ [27] ขนาดอนุภาคของวัตถุดิบ [23] เป็นต้น



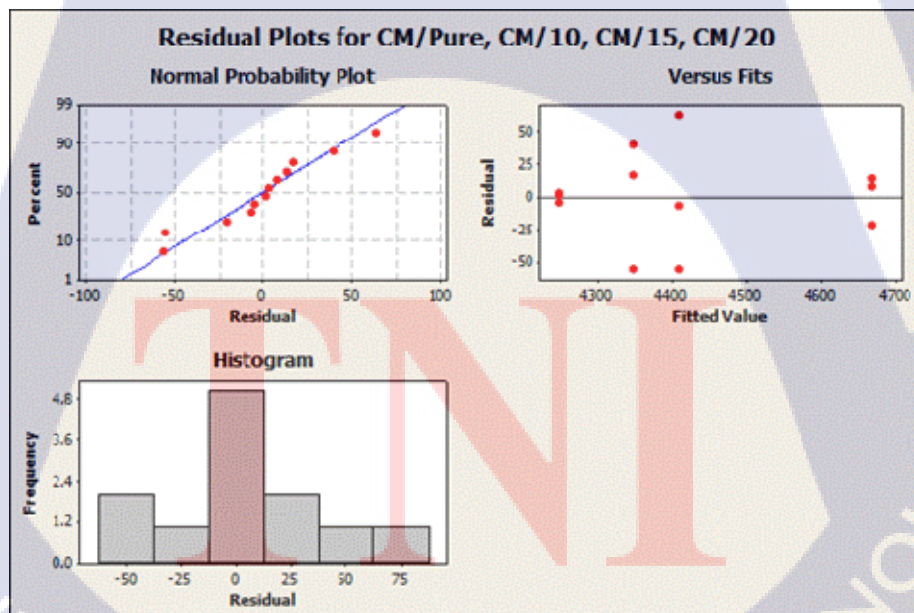
รูปที่ 4.9 กราฟ Residual Plot แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิในการขึ้นรูปต่อค่าความหนาแน่นรวมของถ่านชีวภาพจากกากมะพร้าว



รูปที่ 4.10 กราฟ Residual Plot แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการขึ้นรูปต่อค่าความหนาแน่นรวมของถ่านชีวภาพจากกากมะพร้าว



รูปที่ 4.11 กราฟ Residual Plot แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิในการขึ้นรูปต่อค่าความร้อนของถ่านชีวภาพจากกากมะพร้าว



รูปที่ 4.12 กราฟ Residual Plot แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการขึ้นรูปต่อค่าความร้อนของถ่านชีวภาพจากกากมะพร้าว

## บทที่ 5

### บทสรุป และข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ทำการศึกษาผลกระทบของสภาวะการขึ้นรูปของถ่านชีวภาพจากกากมะพร้าว ที่มีต่อสมบัติทางกายภาพ (Physical Property) และสมบัติทางความร้อน (Calorific Property) โดยกำหนดเวลาที่ใช้ในการขึ้นรูปแบ่งเป็น 3 เวลา คือ 10 นาที 15 นาที และ 20 นาที และอุณหภูมิที่ใช้ในการขึ้นรูป คือ ที่อุณหภูมิห้อง  $100^{\circ}\text{C}$  และ  $170^{\circ}\text{C}$  และใช้การวิเคราะห์ผลเชิงสถิติด้วยโปรแกรม Minitab ร่วมวิเคราะห์ผลทดลอง โดยสรุปดังนี้

##### 5.1.1 ปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติทางกายภาพ (Physical Property)

จากการทดลองพบว่าทั้งปัจจัยด้านอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการขึ้นรูป ส่งผลต่อค่าความหนาแน่นรวมของถ่านชีวภาพจากกากมะพร้าวอย่างมีนัยสำคัญกล่าวคือ ถ่านชีวภาพจะมีความหนาแน่นรวมสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิและเวลาในการขึ้นรูปเพิ่มขึ้น โดยพบว่าเมื่อให้อุณหภูมิสูงสุดในการทดลองที่  $170^{\circ}\text{C}$  และใช้เวลาในการขึ้นรูปมากที่สุดที่ 20 นาที จะให้ค่าความหนาแน่นรวมสูงสุดเท่ากับ  $1.18 \text{ g/cm}^3$

##### 5.1.2 ปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติทางความร้อน (Calorific Property)

สำหรับปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อค่าความร้อนของถ่านชีวภาพจากกากมะพร้าว พบว่าทั้งอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการขึ้นรูปต่างส่งผลต่อค่าความร้อนของถ่านชีวภาพอย่างมีนัยสำคัญ โดยพบว่าที่สภาวะการขึ้นรูปที่ให้ค่าความร้อนสูงที่สุดคือ อุณหภูมิการขึ้นรูปที่  $100^{\circ}\text{C}$  และใช้เวลาในการขึ้นรูป 20 นาที โดยให้ค่าความร้อนอยู่ที่  $5,566 \text{ kcal/kg}$

นอกจากนี้ จากผลการวิเคราะห์ผลเชิงสถิติด้วยโปรแกรม Minitab ยังพบว่านอกเหนือจากปัจจัยด้านอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการขึ้นรูปถ่านชีวภาพแล้ว ยังคงมีปัจจัยอื่นๆ ที่ส่งผลต่อความความร้อนและความหนาแน่นรวมเช่นเดียวกัน เช่น ความชื้นของวัตถุดิบ ขนาดของอนุภาค วัตถุดิบ เป็นต้น

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ทำการศึกษาสมบัติทางกลโดยการทดสอบหาค่าความต้านทานแรงอัดสูงสุด (Compressive Strength) เพื่อประเมินค่าความแข็งแรงของถ่านชีวภาพ
2. ทำการวิเคราะห์ผิวของถ่านชีวภาพโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scan Electron Microscope) เพื่อตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของถ่านชีวภาพก่อนขึ้นรูปและหลังการขึ้นรูปถ่านชีวภาพ รวมทั้งดูลักษณะของการเชื่อมต่อกันภายในโครงสร้างของถ่านชีวภาพ
3. ทำการศึกษาคูณสมบัติของเชื้อเพลิงของถ่านชีวภาพโดยใช้ การวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate Analysis) เพื่อดูปริมาณความชื้น สารระเหย คาร์บอนคงตัว เศษขี้เถ้าและค่าความร้อน
4. ทำการทดลองเพิ่มเติมที่อุณหภูมิระหว่าง 100-170°C และมากกว่า 170°C เพื่อตรวจสอบแนวโน้มของค่าความร้อนของถ่านชีวภาพ พร้อมทั้งหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการขึ้นรูป



บรรณานุกรม

## บรรณานุกรม

- [1] Department of Alternative Energy Development and Efficiency, “*Research and development in the field of energy conservation and renewable energy in Thailand,*” [Online]. Available : <http://weben.dede.go.th/webmax/artall-eng3.pdf> [Accessed : January 3, 2015].
- [2] กาญจนา พานแก้ว, “การผลิตไบโอเอทานอลจากกากมะพร้าว,” *รายงานการประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทยครั้งที่ 18, TICHe18*, กรุงเทพฯ, 20-21 ตุลาคม 2551, หน้า 18.
- [3] พุทธิธร แสงรุ่งเรือง, *การพัฒนาเตาผลิตก๊าซชีววมวลจากมูลฝอยจากภาคเกษตรพื้นที่จังหวัดนนทบุรี*, กรุงเทพฯ : ห้องสมุดศูนย์สิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนดุสิต, 2551.
- [4] กุมุทกานต์ หวัดสนิท, “*การไฮโดรไลซิสกากมะพร้าวด้วยน้ำกึ่งวิกฤต,*” *วิทยานิพนธ์ วท.ม. (เทคโนโลยีอาหาร)*, มหาวิทยาลัยศิลปากร, กรุงเทพฯ, 2553.
- [5] N. K. Rastogi et al. “Optimization of enzymatic degradation of coconut residue,” *Journal of the Science of Food and Agriculture*, vol. 76, no.1, pp. 129-134, January 1998.
- [6] นคร ทิพย์วงศ์, *เทคโนโลยีการแปลงสภาพชีวมวล*, พิมพ์ครั้งที่ 1, กรุงเทพฯ : สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), 2553.
- [7] I. Kazuyoshi et al. “Combustion simulation and quick-freeze observation of a cupola-furnace process using a bio-coke fuel based on tea scum,” *Journal of High Temperature Society*, vol. 35, no.2, pp. 91-96, May 2009.
- [8] D. Vamet et al. “Process for production of high density/high performance binder less boards from whole coconut husk-part 1 : lignin as intrinsic thermosetting binder resin,” *Industrial Crops and Products*, vol. 19, no.3, pp. 207-216, May 2004.
- [9] กลุ่มพลังงานชีวมวล สำนักวิจัย ค้นคว้าพลังงาน กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, “*คู่มือพลังงานชีวมวล,*” [Online]. Available : <http://www.eppo.go.th/engy/Load/ET08.pdf>. [Accessed : 3 มกราคม 2558].
- [10] สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน, “*วารสารนโยบายพลังงานฉบับที่ 102,*” [Online]. Available : <http://www.eppo.go.th/vrs/VRS102.pdf>. [Accessed : 10 มกราคม 2558].

- [11] กรมโรงงานอุตสาหกรรม, “คู่มือแนวทางและเกณฑ์คุณสมบัติของเสียเพื่อการแปรรูปเป็นแท่งเชื้อเพลิงและบล็อกประสาน,” [Online]. Available : [www2.diw.go.th/iwmb/form/iwd040\\_ผนวก%20คู่มือนำร่อง.pdf](http://www2.diw.go.th/iwmb/form/iwd040_ผนวก%20คู่มือนำร่อง.pdf). [Accessed : 3มกราคม 2558].
- [12] J. K. Köseret et al. “Densification of water hyacinth-basic data,” *Fuel*, vol. 61, no.9, pp. 791-798, February 1982.
- [13] S. C. Bhattacharya, *Biocoal Technology and Economics*, Bangkok : Asian Institute of Technology, 1990.
- [14] M. Fardous et al. “Binderless lignocellulose composite from bagasse and mechanism of self-bonding,” *Holzforschung*, vol. 36, no.3, pp. 131-135, February 1982.
- [15] H. V. Lee et al. “Conversion of lignocellulosic biomass to nanocellulose : structure and chemical process,” *The Scientific World Journal*, vol. 59, no.8, pp. 187-193, August 2014.
- [16] Y. Kawami et al. “The technical development compounded of high density solid fuel under 180°C-20MPa conditions by a tea scum,” *Journal of High Temperature Society*, vol. 35, no.2, pp. 97-101, May 2010.
- [17] ปราโมทย์ วีรานุกูล, “การใช้กากมะพร้าว ต้นข้าวโพดและเปลือกทุเรียนเป็นวัสดุประกอบชีวภาพทดแทนไม้ในแผ่นใยอัดความหนาแน่นปานกลาง,” รายงานผลการวิจัยทุนสนับสนุนจากงบประมาณประจำปี 2554, กรุงเทพฯ : คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล, 2554.
- [18] ฐานิตย์ เมธิยานนท์, *ทฤษฎีและเทคโนโลยีการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งและชีวมวล*, พิมพ์ครั้งที่ 1, กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2558.
- [19] อิทธิพล เตียววณิชย์, *กล้องจุลทรรศน์ชนิดสะท้อนแสงสำหรับการตรวจวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคโลหะ (OPTICAL MICROSCOPE)*, พิมพ์ครั้งที่ 1, กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2550.
- [20] กิตติศักดิ์ พลอยพานิชเจริญ, *สถิติสำหรับงานวิศวกรรมเล่ม 1*, พิมพ์ครั้งที่ 9, กรุงเทพฯ : สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), 2551.
- [21] I. Tamioet et al. “The technical production development of advanced alternative coke fuel, bio-coke, by non-carbonized transfer technology,” *Japan Institute of Energy*, vol. 90, no.1, pp. 2-9, August 2011.

- [22] M. Satoru et al. "A study of physical properties of high-density solid biomass, bio-coke, with unutilized biomass," *Journal of JSEM*, vol. 11, no.Special\_Issue, pp. 19-24, June 2011.
- [23] M. Satoru et al. "Effect of crushing particle size on cold/hot compressive strength of high-density and high-hardness solid fuel produced from raw rice husk," *Journal of Smart Processing*, vol. 5, no.5, pp. 269-275, August 2014.
- [24] Y. Torii et al. "Forming characteristics of bio-coke with a mixture of bamboo and carbonized japanese cedar," *Journal of Smart Processing*, vol. 1, no.2, pp. 63-70, July 2012.
- [25] H. Murata et al. "An experimental study for functional improvement of woody bio-coke by the addition of rice bran," *Journal of Smart Processing*, vol. 3, no.5, pp. 283-288, July 2014.
- [26] M. Seo et al. "Carbonization characteristics of biomass/coal blend for bio-coke," *The 14<sup>th</sup> International Conference on Fluidization-From Fundamentals to Products*, ECI14, Seoul, Korea, May 26-31, 2013, pp. 187-194.
- [27] I.E. Smith et al. "The briquetting of wheat straw," *Journal of Agricultural Engineering Research*, vol. 22, no.2, pp. 105-111, June 1977.
- [28] W. C. Edwards et al. "Equipment for production of a water resistant densified fuel from forest biomass," *Proceedings of the Sixth Canadian Bioenergy R & D Seminar*, CBS6, British Columbia, Canada, February 16-18, 1987, pp. 214-218.
- [29] M. O. Faborode et al. "Analysis of extrusion compaction of fibrous agricultural residues for fuel applications," *Biomass*, vol. 21, no.2, pp. 115-128, May 1990.
- [30] B. Hill and D.A. Pulkinen, *A study of factors affecting pellet durability and pelleting efficiency in the production of dehydrated alfalfa pellets. A special report*, Tisdale, SK, Canada : Saskatchewan Dehydrators Association, 1988.
- [31] S. Mani et al., "An overview of compaction of biomass grinds," *Powder Handling & Processing*, vol. 15, no.3, pp. 160-16, May 2003.
- [32] ศิริชัย ต่อสกุล และคณะ, "การพัฒนาถ่านอัดแท่งจากกากมะพร้าวเป็นพลังงานทดแทน," *รายงานการประชุมวิชาการข่ายงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม*, 17-19 ตุลาคม 2555, หน้า 1381-1386.
- [33] มาลี กลั่นกุลหาลาบ และณิชาภา ไห้ศิริกุล. "การผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งจากกากมะพร้าว," *วารสารวิจัยราชภัฏพระนคร ปีที่ 5 ฉบับที่ 13*, หน้า 13-25, 2551.



ภาคผนวก

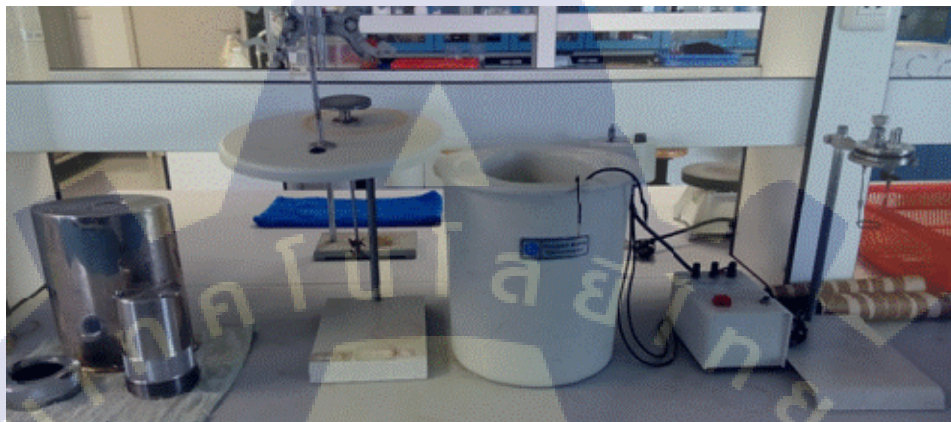
ภาคผนวก ก.

การหาค่าความร้อน (Calorific Value) โดยใช้เครื่อง Bomb Calorimeter

TNI

### การหาค่าความร้อน (Calorific Value) โดยใช้เครื่อง Bomb Calorimeter

สมบัติทางความร้อนสามารถหาได้จากการวิเคราะห์ค่าความร้อนด้วย Bomb Calorimeter แสดงใน รูปที่ ก.1 โดยจะทำการวิเคราะห์เงื่อนไขละ 1 ตัวอย่าง ตัวอย่างละ 3 ครั้ง มีวิธีการดังต่อไปนี้



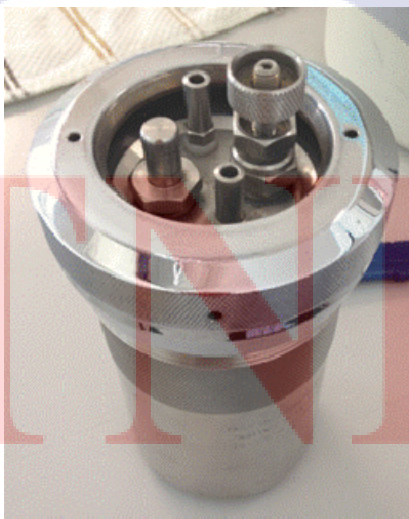
รูปที่ ก.1 เครื่อง Bomb Calorimeter พร้อมชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

1. ชั่งถ่านชีวภาพให้มีน้ำหนักประมาณ 1 g. ใส่ลงในถ้วยโลหะ แสดงดังรูปที่ ก.2 จากนั้นนำถ้วยโลหะวางลงในตำแหน่งขั้วไฟฟ้าของ Bomb โดยลักษณะของ Bomb แสดงดังรูปที่ ก.3
2. ใส่น้ำลงในลูก Bomb ประมาณ 1 มิลลิลิตร เพื่อให้เกิดการเผาไหม้ในบรรยากาศอ้อมตัวด้วยไอน้ำ
3. ตัดเส้นลวด Fuse Wire ความยาว 10 mm. ต่อเข้ากับขั้วจุดระเบิด และงอเส้นลวดให้สัมผัสกับถ่านชีวภาพ
4. ประกอบฝาเข้ากับ Bomb โดยปิดฝาลูก Bomb ให้แน่นพอดี



รูปที่ ก.2 ชั่งถ่านชีวภาพให้มีน้ำหนักประมาณ 1 g. ใส่ลงในถ้วยโลหะ

5. อัดก๊าซออกซิเจนบริสุทธิ์เข้าในลูก Bomb อย่างช้าๆ โดยให้ความดันประมาณ 25 บาร์ แล้วปลด Release Valve เพื่อถ่ายก๊าซออกซิเจนส่วนเกินทิ้ง
6. ตวงน้ำกลั่นจำนวน 2,000 cc โดยใช้กระบอกตวงใส่ลงในภาชนะสเตนเลส (Calorimeter Bucket) แล้วนำภาชนะดังกล่าวใส่ลงในถัง (Insulated Jacket) โดยวางภาชนะตามจุดล็อก



รูปที่ ก.3 ลักษณะของ Bomb ที่ใช้ในการทดสอบ

7. ต่อสายไฟฟ้า 2 เส้นที่ออกจากถังเข้ากับขั้วจุดระเบิดของ Bomb ซึ่งขั้วดังกล่าวจะต่อกับเส้นลวดจุดระเบิด (Ignition Wire)

8. ต่อสายพานจากมอเตอร์เข้ากับแกนเพลลาของใบกวน (Stirrer) แล้วเปิดเครื่องเพื่อให้ใบกวนทำงานประมาณ 3 นาที รอจนอุณหภูมิของน้ำคงที่ สังเกตอุณหภูมิของน้ำจากเทอร์โมมิเตอร์ เทอร์โมมิเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบแสดงดังรูปที่ ก.4



รูปที่ ก.4 ลักษณะของเทอร์โมมิเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบ

9. กดปุ่มจุดระเบิด ทำการบันทึกอุณหภูมิ ทุก 0.5 วินาที จนเมื่อพบว่าอุณหภูมิคงที่มากกว่า 5 นาที

10. ถอดอุปกรณ์ออก ทำการวัดขนาดความยาวของลวดที่เหลือหลังการสันดาป (cm.)  
คำนวณหาค่าความร้อนของสารตัวอย่างจาก สมการที่ ก.1

$$H_g = \frac{tW - e_1 - e_2 - e_3}{m} \quad (\text{ก.1})$$

โดย  $H_g$  คือ ค่าความร้อนของถ่านชีวภาพ (kcal/kg)

$t$  คือ อุณหภูมิของน้ำที่เพิ่มขึ้น ( $^{\circ}\text{C}$ )

$W$  คือ ค่าน้ำสมมูลของบอมบ์แคลอรีมิเตอร์

$m$  คือ มวลของถ่านชีวภาพที่ใช้ในการทดสอบ (g)

- $e_1$  คือ ค่าแก้ความร้อนที่เกิดจากกรดไนตริกในกระบวนการเผาไหม้ มีค่าเท่ากับ 23.9
- $e_2$  คือ ค่าแก้ความร้อนที่เกิดจากกรดซัลฟูริกที่เกิดในกระบวนการเผาไหม้ มีค่าเท่ากับ  $13.7 \times 1.02 \times$  มวลของสารตัวอย่าง
- $e_3$  คือ ค่าแก้จากความร้อนที่เกิดจากการลุกไหม้ของขดลวดตัวนำ มีค่าเท่ากับ  $2.3 \times$  ความยาวของลวดที่ใช้จุดระเบิดในหน่วยเซนติเมตร



TNIT

ภาคผนวก ข.

การวิเคราะห์ผลเชิงสถิติด้วยโปรแกรม Minitab

TNI

### ศึกษาผลของอุณหภูมิในการขึ้นรูปต่อค่าความหนาแน่นรวมของถ่านชีวภาพ

ตารางที่ ข.1 ค่าความหนาแน่นรวมจากการขึ้นรูปถ่านชีวภาพ ที่อุณหภูมิห้อง 100°C และ 170°C ใช้เวลาในการขึ้นรูป 20 นาที

| ตัวอย่าง | ค่าความหนาแน่นรวม (g/cm <sup>3</sup> ) |                                    |                              |                              |
|----------|----------------------------------------|------------------------------------|------------------------------|------------------------------|
|          | Copra Meal Pure (CM/Pure)              | Copra Meal at Room Temp. (CM/Room) | Copra Meal at 100°C (CM/100) | Copra Meal at 170°C (CM/170) |
| 1        | 0.498                                  | 0.655                              | 0.991                        | 1.122                        |
| 2        | 0.497                                  | 0.632                              | 0.955                        | 1.117                        |
| 3        | 0.493                                  | 0.668                              | 0.969                        | 1.069                        |

ผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Minitab

ตั้งสมมุติฐาน

H<sub>0</sub> : การเพิ่มอุณหภูมิในการขึ้นรูป ไม่มีผลต่อ ค่าความหนาแน่นรวมของถ่านชีวภาพ

H<sub>1</sub> : การเพิ่มอุณหภูมิในการขึ้นรูป มีผลต่อ ค่าความหนาแน่นรวมของถ่านชีวภาพ

ใช้ Display Descriptive Statistics ในการแสดงผลทางสถิติแสดงข้อมูลดังตารางที่ ข.2

ตารางที่ ข.2 ค่า Descriptive Statistics : CM/Pure, CM/Room, CM/100 และ CM/170

| Variable | Mean    | SE Mean | StDev   | Minimum | Maximum |
|----------|---------|---------|---------|---------|---------|
| CM/Pure  | 0.49600 | 0.00153 | 0.00265 | 0.49300 | 0.49800 |
| CM/Room  | 0.6517  | 0.0105  | 0.0182  | 0.6320  | 0.6680  |
| CM/100   | 0.9717  | 0.0105  | 0.0181  | 0.9550  | 0.9910  |
| CM/170   | 1.1857  | 0.0160  | 0.0276  | 1.1540  | 1.2050  |

การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบมีปัจจัยเดียวด้วย ANOVA โดยใช้ One-Way (Unstacked) โดยค่าที่ได้แสดงดังตารางที่ ข.3

ตารางที่ ข.3 ค่า One-Way ANOVA : CM/Pure, CM/Room, CM/100, CM/170

| Source                                       | DF | SS       | MS       | F      | P     |
|----------------------------------------------|----|----------|----------|--------|-------|
| Factor                                       | 3  | 0.869612 | 0.289871 | 809.13 | 0.000 |
| Error                                        | 8  | 0.002866 | 0.000358 |        |       |
| Total                                        | 11 | 0.872478 |          |        |       |
| S = 0.01893 R-Sq = 99.67% R-Sq(adj) = 99.55% |    |          |          |        |       |

จากตารางที่ ข.3 ANOVA อ่านค่า P-Value พบว่าได้ค่าน้อยมาก คือ  $0.000 < \alpha (0.05)$  จึงปฏิเสธสมมุติฐานหลัก และสรุปได้ว่า การเพิ่มอุณหภูมิในการขึ้นรูป ส่งผลให้ค่าความหนาแน่นรวมของถ่านชีวภาพสูงขึ้น อย่างมีนัยสำคัญ

#### ศึกษาผลของเวลาในการขึ้นรูปต่อค่าความหนาแน่นรวมของถ่านชีวภาพ

ตารางที่ ข.4 ค่าความหนาแน่นรวมจากการขึ้นรูปถ่านชีวภาพ ที่เวลา 10 15 และ 20 นาที ให้อุณหภูมิคงที่ที่  $170^{\circ}\text{C}$

| ตัวอย่าง | ค่าความหนาแน่นรวม ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ) |                               |                               |                               |
|----------|----------------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
|          | Copra Meal Pure (CM/Pure)                    | Copra Meal at 10 min. (CM/10) | Copra Meal at 15 min. (CM/15) | Copra Meal at 20 min. (CM/20) |
| 1        | 0.498                                        | 1.078                         | 1.076                         | 1.205                         |
| 2        | 0.497                                        | 1.049                         | 1.099                         | 1.154                         |
| 3        | 0.493                                        | 1.026                         | 1.121                         | 1.198                         |

ผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Minitab

ตั้งสมมุติฐาน

$H_0$  : การเพิ่มเวลาในการขึ้นรูป ไม่มีผลต่อ ค่าความหนาแน่นรวมของถ่านชีวภาพ

$H_1$  : การเพิ่มเวลาในการขึ้นรูป มีผลต่อ ค่าความหนาแน่นรวมของถ่านชีวภาพ

ใช้ Display Descriptive Statistics ในการแสดงผลทางสถิติแสดงข้อมูลดังตารางที่ ข.5

ตารางที่ ข.5 ค่า Descriptive Statistics : CM/Pure, CM/10, CM/15 และ CM/20

| Variable | Mean   | SE Mean | StDev   | Minimum | Maximum |
|----------|--------|---------|---------|---------|---------|
| CM/Pure  | 0.4960 | 0.00153 | 0.00265 | 0.49300 | 0.49800 |
| CM/10    | 1.0510 | 0.0150  | 0.0261  | 1.0260  | 1.0780  |
| CM/15    | 1.0987 | 0.0130  | 0.0225  | 1.0760  | 1.1210  |
| CM/20    | 1.1857 | 0.0160  | 0.0276  | 1.1540  | 1.2050  |

การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบมีปัจจัยเดียวด้วย ANOVA โดยใช้ One-Way (Unstacked) โดยค่าที่ได้แสดงดังตารางที่ ข.6

ตารางที่ ข.6 ค่า One-Way ANOVA : CM/Pure, CM/10, CM/15 และ CM/20

| Source                                       | DF | SS       | MS       | F      | P     |
|----------------------------------------------|----|----------|----------|--------|-------|
| Factor                                       | 3  | 0.881136 | 0.293712 | 600.43 | 0.000 |
| Error                                        | 8  | 0.003913 | 0.000489 |        |       |
| Total                                        | 11 | 0.885050 |          |        |       |
| S = 0.02212 R-Sq = 99.56% R-Sq(adj) = 99.39% |    |          |          |        |       |

จากตารางที่ ข.6 ANOVA อ่านค่า P-Value พบว่าได้ค่าน้อยมาก คือ  $0.000 < \alpha (0.05)$  จึงปฏิเสธสมมุติฐานหลัก และสรุปได้ว่า การเพิ่มเวลาในการขึ้นรูป ส่งผลให้ค่าความหนาแน่นรวมของ ถ่านชีวภาพสูงขึ้น อย่างมีนัยสำคัญ

### ศึกษาผลของอุณหภูมิในการขึ้นรูปต่อค่าความร้อนของถ่านชีวภาพ

ตารางที่ ข.7 ค่าความร้อนจากการขึ้นรูปถ่านชีวภาพ ที่อุณหภูมิห้อง 100°C และ 170°C ใช้เวลาในการขึ้นรูป 20 นาที

| ตัวอย่าง | ค่าความร้อน (kcal/kg)     |                                    |                              |                              |
|----------|---------------------------|------------------------------------|------------------------------|------------------------------|
|          | Copra Meal Pure (CM/Pure) | Copra Meal at Room Temp. (CM/Room) | Copra Meal at 100°C (CM/100) | Copra Meal at 170°C (CM/170) |
| 1        | 4,251                     | 5,088                              | 5,604                        | 4,647                        |
| 2        | 4,245                     | 5,093                              | 5,541                        | 4,676                        |
| 3        | 4,253                     | 5,182                              | 5,551                        | 4,681                        |

ผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Minitab

ตั้งสมมุติฐาน

$H_0$  : การเพิ่มอุณหภูมิในการขึ้นรูป ไม่มีผลต่อ ค่าความร้อนของถ่านชีวภาพ

$H_1$  : การเพิ่มอุณหภูมิในการขึ้นรูป มีผลต่อ ค่าความร้อนของถ่านชีวภาพ

ใช้ Display Descriptive Statistics ในการแสดงผลทางสถิติแสดงข้อมูลดังตารางที่ ข.8

ตารางที่ ข.8 ค่า Descriptive Statistics : CM/Pure, CM/Room, CM/100 และ CM/170

| Variable | Mean   | SE Mean | StDev | Minimum | Maximum |
|----------|--------|---------|-------|---------|---------|
| CM/Pure  | 4249.7 | 2.40    | 4.16  | 4245.0  | 4253.0  |
| CM/Room  | 5121.0 | 30.5    | 52.9  | 5088.0  | 5182.0  |
| CM/100   | 5565.3 | 19.5    | 33.9  | 5541.0  | 5604.0  |
| CM/170   | 4668.0 | 10.6    | 18.4  | 4647.0  | 4681.0  |

การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบมีปัจจัยเดียวด้วย ANOVA โดยใช้ One-Way (Unstacked) โดยค่าที่ได้แสดงดังตารางที่ ข.9

ตารางที่ ข.9 ค่า One-Way ANOVA : CM/Pure, CM/10, CM/15 และ CM/20

| Source                                     | DF | SS      | MS     | F      | P     |
|--------------------------------------------|----|---------|--------|--------|-------|
| Factor                                     | 3  | 2904789 | 968263 | 901.20 | 0.000 |
| Error                                      | 8  | 8595    | 1074   |        |       |
| Total                                      | 11 | 2913384 |        |        |       |
| S = 32.78 R-Sq = 99.70% R-Sq(adj) = 99.59% |    |         |        |        |       |

จากตารางที่ ข.9 ANOVA อ่านค่า P-Value พบว่าได้ค่าน้อยมาก คือ  $0.000 < \alpha (0.05)$  จึงปฏิเสธสมมุติฐานหลัก และสรุปได้ว่า การเพิ่มเวลาในการขึ้นรูป ส่งผลต่อค่าความร้อนของถ่านชีวภาพ อย่างมีนัยสำคัญ

#### ศึกษาผลของเวลาในการขึ้นรูปต่อค่าความร้อนของถ่านชีวภาพ

ตารางที่ ข.10 ค่าความร้อนจากการขึ้นรูปถ่านชีวภาพ ที่เวลา 10 15 และ 20 นาที ให้อุณหภูมิคงที่ที่  $170^{\circ}\text{C}$

| ตัวอย่าง | ค่าความร้อน (kcal/kg)     |                               |                               |                               |
|----------|---------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
|          | Copra Meal Pure (CM/Pure) | Copra Meal at 10 min. (CM/10) | Copra Meal at 15 min. (CM/15) | Copra Meal at 20 min. (CM/20) |
| 1        | 4,251                     | 4,294.65                      | 4,473.43                      | 4,647.02                      |
| 2        | 4,245                     | 4,367.25                      | 4,354.29                      | 4,676.38                      |
| 3        | 4,253                     | 4,389.58                      | 4,403.24                      | 4,681.71                      |

ผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Minitab

ตั้งสมมุติฐาน

$H_0$  : การเพิ่มเวลาในการขึ้นรูป ไม่มีผลต่อ ค่าความร้อนของถ่านชีวภาพ

$H_1$  : การเพิ่มเวลาในการขึ้นรูป มีผลต่อ ค่าความร้อนของถ่านชีวภาพ

ใช้ Display Descriptive Statistics ในการแสดงผลทางสถิติแสดงข้อมูลดังตารางที่ ข.11

ตารางที่ ข.11 ค่า Descriptive Statistics : CM/Pure, CM/10, CM/15 และ CM/20

| Variable | Mean    | SE Mean | StDev | Minimum | Maximum |
|----------|---------|---------|-------|---------|---------|
| CM/Pure  | 4,249.7 | 2.40    | 4.16  | 4,245.0 | 4,253.0 |
| CM/10    | 4,350.5 | 28.7    | 49.6  | 4,294.6 | 4,389.6 |
| CM/15    | 4,410.3 | 34.6    | 59.9  | 4,354.3 | 4,473.3 |
| CM/20    | 4,668.4 | 10.8    | 18.7  | 4,647.0 | 4,681.7 |

การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบมีปัจจัยเดียวด้วย ANOVA โดยใช้ One-Way (Unstacked) โดยค่าที่ได้แสดงดังตารางที่ ข.12

ตารางที่ ข.12 ค่า One-Way ANOVA : CM/Pure, CM/10, CM/15 และ CM/20

| Source                                     | DF | SS     | MS    | F     | P     |
|--------------------------------------------|----|--------|-------|-------|-------|
| Factor                                     | 3  | 286877 | 95626 | 59.62 | 0.000 |
| Error                                      | 8  | 12832  | 1604  |       |       |
| Total                                      | 11 | 299709 |       |       |       |
| S = 40.05 R-Sq = 95.72% R-Sq(adj) = 94.11% |    |        |       |       |       |

จากตารางที่ ข.12 ANOVA อ่านค่า P-Value พบว่าได้ค่าน้อยมาก คือ  $0.000 < \alpha (0.05)$  จึงปฏิเสธสมมุติฐานหลัก และสรุปได้ว่า การเพิ่มเวลาในการขึ้นรูป ส่งผลให้ค่าร้อนของถ่านชีวภาพ สูงขึ้น อย่างมีนัยสำคัญ