โครงการ

การเรียนการสอนเพื่อเสริมประสบการณ์

ชื่อโครงการ การศึกษาความเป็นไปได้ในการนำมูลวัวมาใช้เป็นเชื้อเพลิงแข็ง

Possibly of using cow manure as a solid fuel

ชื่อนิสิต นางสาวธัญสมร ธรรมศิริ **เลขประจำตัว** 5932931823

นางสาวนพณัช สุฐมานนท์ **เลขประจำตัว** 5932932423

ภาควิชา เคมีเทคนิค

ปีการศึกษา 2562

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ชื่อโครงการ การศึกษาความเป็นไปได้ในการนำมูลวัวมาใช้เป็นเชื้อเพลิงแข็ง
ชื่อนิสิตผู้ทำโครงการ นางสาว ธัญสมร ธรรมศิริ รหัสนิสิต 5932931823
นางสาว นพณัช สุฐมานนท์ รหัสนิสิต 5932932423
อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุชญา นิติวัฒนานนท์
ภาควิชา เคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2562

บทคัดย่อ

กากของเสียประเภทมูลสัตว์จากการทำปศุสัตว์ในการผลิตของภาคเกษตรกรรมที่นอกจากจะนำมูลสัตว์ไปใช้ประโยชน์ต่อในลักษณะของปุ๋ยแล้ว มูลสัตว์ยังสามารถนำมาแปรรูปเป็นเชื้อเพลิงได้ งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษากระบวนการการผลิตเชื้อเพลิงแข็งจากมูลวัวนม โดยตัวแปรที่ศึกษาคือ อัตราส่วนของผงถ่านมูลวัวนมต่อผงถ่านจากไม้ไผ่ สัดส่วนปริมาณของตัวประสานที่ส่งผลต่อองค์ประกอบและค่าความร้อนของเชื้อเพลิงแข็ง และความดันที่ใช้ในการอัดถ่านมูลวัวที่ส่งผลต่อค่าความร้อนของเชื้อเพลิงแข็ง ในการทดลองนำถ่านมูลวัวที่ผ่านการคาร์บอไนเซชันมาผสมกับผงถ่านจากไม้ไผ่และใช้สัดส่วนของตัวประสานในอัตราที่กำหนดไว้ หลังจากนั้นนำมาอัดแท่งด้วยกรรมวิธีอัดร้อน จากนั้นนำถ่านมูลวัวนมที่ผ่านการอัดแท่งมาทำการวิเคราะห์องค์ประกอบและหาค่าความร้อนของมูลวัวนม ผลการทดลองพบว่า ค่าความร้อนของมูลวัวนมแห้งอยู่ที่ 10899.57 กิโลจูลต่อกิโลกรัม เมื่ออัตราส่วนผงถ่านจากไม้ไผ่เพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ค่าความร้อนของถ่านมูลวัวเพิ่มมากขึ้น จาก 12547.02 กิโลจูลต่อกิโลกรัมเป็น 15962.45 กิโลจูลต่อกิโลกรัม เมื่อสัดส่วนของตัวประสานเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ค่าความร้อนของถ่านมูลวัวมีค่าลดลงจากเดิมที่ตัวประสานร้อยละ 3 มีค่าความร้อน 15962.45 กิโลจูลต่อกิโลกรัมและที่ตัวประสานร้อยละ 12 มีค่าความร้อน 14669.94 กิโลจูลต่อกิโลกรัม และความดันในการอัดถ่านมูลวัวไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความร้อนที่มีค่าเฉลี่ย 16953.12 กิโลจูลต่อกิโลกรัม สามารถสรุปได้ว่า ถ่านมูลวัวที่สัดส่วนตัวประสานร้อยละ 9 เป็นตัวเลือกที่ดีที่สุดสำหรับค่าความร้อนและลักษณะทางกายภาพ มีค่าความร้อน 15142.41 กิโลจูลต่อกิโลกรัมและมูลวัวสามารถนำมาเป็นเชื้อเพลิงแข็งได้

คำสำคัญ: เชื้อเพลิงชีวภาพ, มูลวัว, คาร์บอไนเซชัน, ถ่านมูลวัว, เชื้อเพลิงแข็ง

ภาควิชา เคมีเทคนิค ลายมือชื่อนิสิต .....ธัญสมร ธรรมศิริ.....
ลายมือชื่อนิสิต .....นพณัช สุฐมานนท์.....
สาขาวิชา เคมีวิศวกรรม ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก.....

Title Possibly of using cow manure as a solid fuel

Student name Miss Thansamorn Thammasiri

Miss Noppanut Sutamanon

Advisor Asst. Prof. Dr. Suchaya Nitivattananon

Department of Chemical Technology, Faculty of Science, Chulalongkorn University, Academic Year 2019

ABSTRACT

A cow manure from livestock production in agricultural production can be used as a fertilizer and also can be transformed into a fuel. The objective for this study is to study the process to transform the cow manure into solid fuel. The carbonization process, the ratio of charcoal from cow manure to charcoal from bamboo, the percentage of binder and the pressure of compression were studied. In the experiment, the carbonized cow manure charcoal was mixed with bamboo charcoal then compressed into briquettes using hot compression. The briquettes were analyzed for the proximate analysis and the heating value. The results showed that the heating value of the raw cow manure was 10899.57 kJ/kg. When the ratio of charcoal from bamboo increased, the heating value increased from 12547.02 kJ/kg to 15962.45 kJ/kg. The percentage of binder increased from 3 to 12, the heating value of cow manure charcoal decreased from 15962.45 kJ/kg to 14669.94 kJ/kg. The pressure of the compression does not affect the heating value which had the average of 16953.12 kJ/kg. It can be concluded that the briquettes with 9% of binder is the best choice for heating value and physical appearance with 15142.41 kJ/kg and the cow manure can be utilized as solid fuel.

Keywords: Biofuels, Cow manure, Carbonization, Cow manure charcoal, Solid fuel

Department of Chemical Technology Student's signature Thansamorn Thammasiri .....

Student's signature Noppanut S. .....

Major: Chemical Engineering Advisor's signature Suchaya N. .....

กิตติกรรมประกาศ

โครงการการเรียนการสอนเพื่อเสริมประสบการณ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความกรุณาของอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุชญา นิติวัฒนานนท์ ที่คอยสนับสนุน ให้ความช่วยเหลือและให้คำแนะนำเกี่ยวกับแนวทางการทำโครงงานวิจัย ซึ่งทำให้คณะผู้ทำโครงการได้รับข้อมูลที่ครบถ้วน และเป็นประโยชน์ สามารถนำมาวิเคราะห์ผลการวิจัยได้อย่างสมบูรณ์ ผู้จัดทำโครงการจึงขอกราบขอบพระคุณในความกรุณา ความเอาใจใส่ของอาจารย์เป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร.ธราพงษ์ วิทิตศานต์ อาจารย์ประจำภาควิชาเคมีเทคนิค จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ให้คำแนะนำเกี่ยวกับโครงการวิจัยและถ่ายทอดความรู้เกี่ยวกับกระบวนการทำถ่านอัดแท่งจากชีวมวล เพื่อเป็นพื้นฐานสำหรับการนำมาต่อยอดในโครงการวิจัยฉบับนี้

ขอขอบคุณองค์การส่งเสริมกิจการโคนมแห่งประเทศไทย อำเภอมวกเหล็ก จังหวัดสระบุรี ที่อนุเคราะห์มูลวัวนมแห้งมาเพื่อใช้ในการศึกษาโครงการวิจัยครั้งนี้

ขอขอบคุณจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่อนุญาตให้ใช้ศูนย์การเรียนรู้และบริการวิชาการเครือข่ายแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จังหวัดสระบุรี ในการทำวิจัย

ขอขอบคุณคุณสิริชัย รัตนวราหะ (ผู้จัดการศูนย์ฯ) และนักวิทยาศาสตร์ผู้ดูแลและควบคุมห้องเครื่องมือ รวมถึงช่างเทคนิคของศูนย์เชื้อเพลิงและพลังงานจากชีวมวล คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จังหวัดสระบุรีทุกคน ที่คอยให้ความช่วยเหลือ ให้คำแนะนำและคำปรึกษาโครงการวิจัยฉบับนี้จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

คณะผู้จัดทำโครงการ
ธัญสมร ธรรมศิริ
นพณัช สุฐมานนท์

สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	จ
สารบัญภาพ	ช
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ที่มาและมูลเหตุจูงใจ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	1
1.3 ขอบเขตงานวิจัย	1
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
1.5 วิธีดำเนินงานวิจัย	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย	3
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	13
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย	
3.1 วัสดุและเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง	16
3.2 การวางแผนการทดลอง	24
3.3 วิธีการทดลอง	24
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์การทดลอง	30
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลการวิจัย	42
5.2 ข้อเสนอแนะ	42
บรรณานุกรม	43

สารบัญตาราง

ตาราง **หน้า**

- ตารางที่ 2.1 การเปรียบเทียบคุณสมบัติระหว่างไม้ฟืนสดและถ่านไม้ 5
- ตารางที่ 3.1 แสดงขั้นตอนการวางแผนการทดลอง 24
- ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบและค่าความร้อนของมูลวัวนมแห้งที่ใช้ในการทดลอง 30
- ตารางที่ 4.2 องค์ประกอบของมูลวัวนมแห้งที่ใช้ในการทดลอง 32
- ตารางที่ 4.3 องค์ประกอบและค่าความร้อนของมูลวัวนมอัดแท่งที่ไม่ผ่านและผ่านการคาร์บอไนเซชัน 33
- ตารางที่ 4.4 ลักษณะทางกายภาพของถ่านมูลวัวนมอัดแท่งที่ไม่ผ่านและผ่านกระบวนการคาร์บอไนเซชัน 35
- ตารางที่ 4.5 องค์ประกอบและค่าความร้อนของถ่านมูลวัวนมที่อัตราส่วนผสมของมูลวัวนมแห้งและผงถ่านไม้ไผ่ต่าง ๆ 36
- ตารางที่ 4.6 องค์ประกอบและค่าความร้อนของผงถ่านไม้ไผ่ 37
- ตารางที่ 4.7 องค์ประกอบและค่าความร้อนของถ่านมูลวัวนมที่ปริมาณของตัวประสานแตกต่างกัน 38
- ตารางที่ 4.8 ลักษณะทางกางภาพของถ่านมูลวัวนมอัดแท่งที่มีสัดส่วนของตัวประสานแตกต่างกัน 40
- ตารางที่ 4.9 ค่าความร้อนจากการอัดเม็ดมูลวัวด้วยค่าความดันที่แตกต่างกัน 41
- ตารางที่ A. 1 ร้อยละของความชื้นในตัวอย่าง 47
- ตารางที่ A. 2 ร้อยละของเถ้าในตัวอย่าง 47
- ตารางที่ A. 3 ร้อยละของสารระเหยในตัวอย่าง 48
- ตารางที่ A. 4 ค่าความร้อนในตัวอย่าง 48
- ตารางที่ A. 5 ร้อยละผลผลิตที่ได้จากการทำคาร์บอไนเซชัน 48
- ตารางที่ A. 6 ร้อยละของความชื้นในตัวอย่าง 49
- ตารางที่ A. 7 ร้อยละของเถ้าในตัวอย่าง 50
- ตารางที่ A. 8 ร้อยละของสารระเหยในตัวอย่าง 51
- ตารางที่ A. 9 ร้อยละของคาร์บอนคงตัวในตัวอย่าง 52
- ตารางที่ A. 10 ค่าความร้อนในตัวอย่าง 52
- ตารางที่ A. 11 ร้อยละของความชื้นในตัวอย่าง 53

สารบัญตาราง

ตาราง **หน้า**

- ตารางที่ A. 12 ร้อยละของเถ้าในตัวอย่าง 54
- ตารางที่ A. 13 ร้อยละของสารระเหยในตัวอย่าง 55
- ตารางที่ A. 14 ร้อยละของคาร์บอนคงตัวในตัวอย่าง 55
- ตารางที่ A. 15 ค่าความร้อนในตัวอย่าง 55
- ตารางที่ A. 16 ร้อยละของความชื้นในตัวอย่าง 56
- ตารางที่ A. 17 ร้อยละของเถ้าในสารตัวอย่าง 57
- ตารางที่ A. 18 ร้อยละของสารระเหยในตัวอย่าง 58
- ตารางที่ A. 19 ร้อยละของคาร์บอนคงตัวในตัวอย่าง 58
- ตารางที่ A. 20 ค่าความร้อนในตัวอย่าง 59

สารบัญภาพ

ภาพประกอบที่ **หน้า**

- รูปที่ 1 กระบวนการในการทำถ่านอัดแท่ง 7
- รูปที่ 2 กระบวนการทำให้แห้งของถ่านอัดแท่งโดยใช้เครื่องอบแห้ง 8
- รูปที่ 3 เตาเผาถ่านขนาด 200 ลิตร 9
- รูปที่ 4 ภาชนะที่ใช้ในการตากแห้ง 16
- รูปที่ 5 เตาเผาถ่านไร้ควันของศูนย์เชื้อเพลิงและพลังงานจากชีวมวล 17
- รูปที่ 6 เครื่องจักรอัดแท่งแบบสกรูพร้อมระบบฮีตเตอร์ขนาด 25 แรงม้า 17
- รูปที่ 7 เครื่องจักรอัดแท่งแบบสกรู ขนาด 10 แรงม้า 18
- รูปที่ 8 เครื่องอัดไฮดรอลิคแบบมือโยกพร้อมแท่นอัดขนาด 70 เมกะปาสคาล 18
- รูปที่ 9 เครื่องอบแห้งขนาด 2300 ลิตร อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส 19
- รูปที่ 10 เครื่องวัดค่าความชื้นแบบดิจิทัล 19
- รูปที่ 11 เครื่อง MATTLER TOLEDO Moisture Analyzer HX204 20
- รูปที่ 12 เตาอบแบบตั้งอุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส 20
- รูปที่ 13 เตาเผาแบบปิดอุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส 21
- รูปที่ 14 เครื่อง Oxygen Bomb Calorimeter 21
- รูปที่ 15 เตาอบอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส 22
- รูปที่ 16 ถ้วยพร้อมฝาสำหรับเผาที่อุณหภูมิสูง 22
- รูปที่ 17 โถดูดความชื้น 23
- รูปที่ 18 บล็อกสำหรับอัดเม็ด 23
- รูปที่ 19 ขั้นตอนการผลิตถ่านอัดแท่งจากมูลวัวนม 25
- รูปที่ 20 คุณสมบัติทางกายภาพของมูลวัว 31
- รูปที่ 21 ค่าความร้อนของมูลวัวนมในการทำวิจัยและจากงานวิจัยอื่น ๆ 32
- รูปที่ 22 องค์ประกอบของมูลวัวนมที่ไม่ผ่านและผ่านกระบวนการคาร์บอไนเซชัน 34
- รูปที่ 23 ค่าความร้อนของมูลวัวนมแห้ง มูลวัวนมที่ไม่ผ่านและผ่านกระบวนการคาร์บอไนเซชัน 34
- รูปที่ 24 คุณสมบัติของถ่านมูลวัวนมที่อัตราส่วนผสมของผงถ่านมูลวัวนมแห้งและผงถ่านจากไม้ไผ่ต่าง ๆ 36

สารบัญภาพ

ภาพประกอบที่ **หน้า**

- รูปที่ 25 ค่าความร้อนในมูลวัวนมที่อัตราส่วนผสมของผงถ่านมูลวัวนมแห้งและผงถ่านจากไม้ไผ่ต่าง ๆ 37
- รูปที่ 26 คุณสมบัติของถ่านมูลวัวนมที่สัดส่วนตัวประสานแตกต่างกัน 39
- รูปที่ 27 ค่าความร้อนของถ่านมูลวัวนมที่สัดส่วนตัวประสานแตกต่างกัน 39
- รูปที่ 28 ค่าความร้อนของมูลวัวนมอัดเม็ดที่ความดันแตกต่างกัน 41
- รูปที่ 29 มูลวัวนมแห้งที่ได้รับการอนุเคราะห์จากองค์การส่งเสริมกิจการโคนมแห่งประเทศไทย อำเภอมวกเหล็ก จังหวัดสระบุรี 59
- รูปที่ 30 วิธีการอัดแท่งมูลวัวนมแห้งก่อนการทำคาร์บอไนเซชัน 59
- รูปที่ 31 วิธีการทำคาร์บอไนเซชัน โดยการเผาในเตา 60
- รูปที่ 32 ถ่านที่ผ่านการบดเพื่อนำไปใช้ในการวิเคราะห์ 60
- รูปที่ 33 เครื่องมือในการวัดปริมาณความชื้นด้วย MATTLER TOLEDO Moisture Analyzer 61

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและมูลเหตุจูงใจ [1, 2]

จากการคาดการณ์ขององค์การสหประชาชาติ จำนวนประชากรบนโลกจะเพิ่มขึ้นเป็น 9.8 พันล้านคน ในปี 2050 ซึ่งส่งผลให้ปริมาณการใช้พลังงานมีเพิ่มมากขึ้นและต้องมีการเพิ่มแหล่งพลังงานให้มากขึ้น การพัฒนาและผลิตแหล่งพลังงานทดแทนขึ้นมาเพื่อใช้งานจึงมีความสำคัญ

ในประเทศไทยเป็นประเทศที่มีการทำเกษตรกรรมมาก โดยผลสำรวจจากแผนยุทธศาสตร์กรมปศุสัตว์ พบว่าภาคปศุสัตว์มีสัดส่วนในการผลิตถึงร้อยละ 12.6 ของมวลรวมภาคเกษตร จากการทำปศุสัตว์ทำให้มีกากของเสียประเภทมูลและปัสสาวะสัตว์เกิดขึ้น ซึ่งมูลสัตว์เป็นสิ่งที่สัตว์ขับถ่ายออกมาและเป็นส่วนของกากอาหารหรืออาหารที่ร่างกายของสัตว์ไม่สามารถดูดซึมไปใช้ได้ โดยวัวจะกินอาหารประเภทที่มีเส้นใยสูง ทำให้ในมูลของวัวมีเส้นใยสูงด้วยเช่นกัน วัวเนื้อที่มีน้ำหนักเฉลี่ย 520 กิโลกรัมต่อตัวจะถ่ายมูลสดราว 29 กิโลกรัมต่อวัน และวัวนมที่มีน้ำหนักเฉลี่ย 640 กิโลกรัมต่อตัวจะถ่ายมูลสดราว 30 กิโลกรัมต่อวัน

ปกติแล้วของเสียจากสัตว์จะถูกนำไปจัดการต่อ โดยหนึ่งในวิธีจัดการของเสียจากสัตว์คือ การนำไปเพิ่มมูลค่า ยกตัวอย่างเช่น เกษตรกรจะนำมูลสัตว์ไปทำเป็นปุ๋ยเพื่อใช้ในการเกษตรส่วนอื่น ซึ่งนอกจากการนำมูลสัตว์ดังกล่าวไปทำปุ๋ยแล้ว ยังสามารถนำมาทำเชื้อเพลิงจากธรรมชาติได้ เนื่องจากวัวเป็นสัตว์ที่กินอาหารหลากหลายชนิด เช่น หญ้า, ใบไม้, ถั่ว, ข้าวสาลี, ฟางข้าว ฯลฯ และย่อยอาหารอย่างละเอียด ดังนั้น มูลวัวจึงประกอบด้วยเส้นใยที่เผาไหม้ได้เป็นจำนวนมาก ทำให้สามารถนำมาแปรรูปทำเป็นเชื้อเพลิงเพื่อนำไปใช้ประโยชน์อื่นต่อได้

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษากระบวนการการผลิตเชื้อเพลิงแข็งจากมูลวัวนม โดยตัวแปรที่ทำการศึกษาคือ ความดันที่ใช้ในการอัดเม็ด อัตราส่วนของผงถ่านมูลวัวนมต่อผงถ่านไม้ไผ่ และสัดส่วนของตัวประสานที่ส่งผลต่อองค์ประกอบและค่าความร้อน
2. เพื่อเปรียบเทียบค่าความร้อนของเชื้อเพลิงแข็งที่ได้จากมูลวัวนม

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ในงานวิจัยนี้ นำมูลวัวนมมาผลิตเป็นเชื้อเพลิงแข็งโดยมีตัวแปรคือ ความดันที่ใช้ในการอัดเม็ด อัตราส่วนผงถ่านจากมูลวัวนมต่อผงถ่านจากไม้ไผ่ และสัดส่วนของตัวประสานที่ส่งผลต่อองค์ประกอบและค่าความร้อน และเปรียบเทียบกับค่าความร้อนจากเชื้อเพลิงแข็ง

2. มูลวัวนมที่ใช้ในการศึกษาเป็นมูลวัวนมแห้งจากองค์การส่งเสริมกิจการโคนมแห่งประเทศไทย อำเภอมวกเหล็ก จังหวัดสระบุรี
3. ทำการวิจัยที่ ศูนย์เชื้อเพลิงและพลังงานจากชีวมวล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อำเภอแก่งคอย จังหวัดสระบุรี

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

การปรับปรุงคุณภาพของการผลิตเชื้อเพลิงแข็งจากมูลวัว โดยใช้ผลจากการทดลองมาวิเคราะห์เพื่อเลือกสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตเชื้อเพลิงแข็ง

1.5 วิธีดำเนินงานวิจัย

ก. แผนการศึกษา

1. ค้นคว้าข้อมูลและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องจากแหล่งข้อมูลต่าง ๆ เช่น
   - การทำถ่านอัดแท่งจากชีวมวล
2. เตรียมเครื่องมือ และอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย พร้อมศึกษาการใช้เครื่องมือ
3. เตรียมมูลวัวนมในปริมาณที่เพียงพอเพื่อใช้เป็นตัวอย่างที่จะศึกษาในงานวิจัย
4. ศึกษาสมบัติทางกายภาพของมูลวัวนม โดยการทำ Proximate analysis และ ultimate analysis
5. ทำการอัดเม็ด และ อัดแท่งมูลวัวตามสภาวะต่าง ๆ ที่ทำการศึกษา (แรงอัด ปริมาณของตัวประสาน และ การทำคาร์บอไนเซชัน)
6. นำตัวอย่างมูลวัวที่ทำการอัดแล้ว ไปหาค่าความร้อนโดยวิธีบอมบ์แคลอริมิเตอร์
7. นำตัวอย่างที่ได้ไปวิเคราะห์ส่วนประกอบของแก๊สที่เกิดจากการเผาไหม้
8. วิเคราะห์และสรุปผลจากการทดลอง

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

2.1.1 ชีวมวล (Biomass) [3]

ชีวมวล คือ สารอินทรีย์ที่เป็นแหล่งกักเก็บพลังงานจากธรรมชาติและสามารถนำมาใช้ผลิตพลังงานได้ สารอินทรีย์เหล่านี้ได้มาจากพืชและสัตว์ต่าง ๆ เช่น เศษไม้ ขยะ วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร การใช้งานชีวมวลเพื่อทำให้ได้พลังงานอาจจะทำโดยนำมาเผาไหม้เพื่อนำพลังงานความร้อนที่ได้ไปใช้ ในกระบวนการผลิตไฟฟ้าทดแทนพลังงานจากฟอสซิล (เช่น น้ำมัน) ซึ่งมีอยู่อย่างจำกัดและอาจหมดลงได้ ชีวมวลเล่านี้มีแหล่งที่มาต่าง ๆ กัน อาทิ พืชผลทางการเกษตร (agricultural crops) เศษวัสดุเหลือทิ้งการเกษตร (agricultural residues) ไม้และเศษไม้ (wood and wood residues) หรือของเหลือจากจากอุตสาหกรรมและชุมชน ตัวอย่างเช่น

- แกลบ ได้จากการสีข้าวเปลือก
- ชานอ้อย ได้จากการผลิตน้ำตาลทราย
- กากปาล์ม ได้จากการสกัดน้ำมันปาล์มดิบออกจากผลปาล์มสด
- กากมันสำปะหลัง ได้จากการผลิตแป้งมันสำปะหลัง
- ซังข้าวโพด ได้จากการสีข้าวโพดเพื่อนำเมล็ดออก
- กาบและกะลามะพร้าว ได้จากการนำมะพร้าวมาปลอกเปลือกออกเพื่อนำเนื้อ มะพร้าวไปผลิตกะทิและน้ำมันมะพร้าว
- มูลสัตว์

2.1.2 กระบวนการแปรรูปชีวมวลไปเป็นพลังงานรูปแบบต่าง ๆ

1. การเผาไหม้โดยตรง (combustion) เมื่อนำชีวมวลมาเผา จะได้ความร้อนออกมาตามค่าความร้อนของชนิดชีวมวล ความร้อนที่ได้จากการเผาสามารถนำไปใช้ในการผลิตไอน้ำที่มีอุณหภูมิและความดันสูง ไอน้ำนี้จะถูกนำไปขับกังหันไอน้ำเพื่อผลิตไฟฟ้าต่อไป ตัวอย่าง ชีวมวลประเภทนี้ คือ เศษวัสดุทางการเกษตร และเศษไม้

2. การผลิตก๊าซ (gasification) เป็นกระบวนการเปลี่ยนเชื้อเพลิงแข็งหรือชีวมวลให้เป็นแก๊สเชื้อเพลิง เรียกว่า แก๊สชีวภาพ (biogas) มีองค์ประกอบของแก๊สมีเทน ไฮโดรเจน และ คาร์บอนมอนอกไซด์ สามารถนำไปใช้กับกังหันแก๊ส (gas turbine)

3. การหมัก (fermentation) เป็นการนำชีวมวลมาหมักด้วยแบคทีเรียในสภาวะไร้อากาศ ชีวมวลจะถูกย่อยสลายและแตกตัว เกิดแก๊สชีวภาพ (biogas) ที่มีองค์ประกอบของแก๊สมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์ แก๊สมีเทนใช้เป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์สำหรับผลิตไฟฟ้า

4. การผลิตเชื้อเพลิงเหลวจากพืช มีกระบวนการที่ใช้ผลิตดังนี้

4.1 กระบวนการทางชีวภาพ ทำการย่อยสลายแป้ง น้ำตาล และเซลลูโลสจากพืชทางการเกษตร เช่น อ้อย มันสำปะหลังให้เป็นเอทานอล เพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงเหลวในเครื่องยนต์เบนซิน

4.2 กระบวนการทางฟิสิกส์และเคมี โดยสกัดน้ำมันออกจากพืชน้ำมัน จากนั้นนำน้ำมันที่ได้ไปผ่านกระบวนการ transesterification เพื่อผลิตเป็นไบโอดีเซล

4.3 กระบวนการใช้ความร้อนสูง เช่น กระบวนการไพโรไลซิส เมื่อวัสดุทางการเกษตรได้ความร้อนสูงในสภาพไร้ออกซิเจน จะเกิดการสลายตัว เกิดเป็นเชื้อเพลิงในรูปของเหลวและแก๊สผสมกัน

2.1.3 มูลวัว [4]

มูลวัวเป็นของเสียจากสัตว์จำพวกวัว สายพันธุ์เหล่านี้รวมถึงวัว วัวกระทิง จามรีและควายน้ำ มูลวัวเป็นซากพืชที่ไม่ได้ย่อยซึ่งผ่านลำไส้ของสัตว์ มูลที่เกิดขึ้นนั้นอุดมไปด้วยแร่ธาตุ ช่วงสีจากสีเขียวถึงดำมักจะมีสีเข้มขึ้นหลังจากที่สัมผัสกับอากาศ มูลวัวซึ่งมักจะมีสีน้ำตาลเข้มมักใช้เป็นปุ๋ยพืชสด

ในหลายส่วนของโลกที่กำลังพัฒนาและในอดีตในพื้นที่ภูเขาของยุโรปมูลวัวที่แห้งและใช้แล้วจะถูกนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิง มูลอาจถูกรวบรวมและนำไปใช้ผลิตก๊าซชีวภาพเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าและความร้อน ก๊าซนี้อุดมไปด้วยมีเทนและถูกใช้ในพื้นที่ชนบทของอินเดียและปากีสถานและที่อื่น ๆ เพื่อจัดหาแหล่งพลังงานไฟฟ้าที่หมุนเวียนได้และมีเสถียรภาพ ในภาคกลางของแอฟริกาหมู่บ้านมาไซเผามูลวัวเพื่อขับไล่ยุง ในที่เย็น ๆ มูลวัวถูกนำมาใช้เป็นแนวกำแพงบ้านชนบทเพื่อเป็นฉนวนกันความร้อนราคาถูก ชาวบ้านส่วนใหญ่ในอินเดียพ่นมูลวัวสดผสมกับน้ำหน้าบ้านเพื่อขับไล่แมลง มันแห้งเป็นเค้กเหมือนรูปทรงและใช้แทนฟืน มูลวัวยังเป็นส่วนประกอบทางเลือกในการผลิตที่อยู่อาศัยอิฐโคลนอะโดบีขึ้นอยู่กับความพร้อมของวัสดุในมือ

มูลวัวสามารถนิยามได้ว่าเป็นสิ่งตกค้างที่ไม่ได้ย่อยของวัสดุอาหารที่ถูกบริโภคโดยสัตว์จำพวกวัวที่กินพืชเป็นอาหาร เป็นส่วนผสมของอุจจาระและปัสสาวะในอัตราส่วน 3: 1 ส่วนใหญ่ประกอบด้วยลิกนิน เซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลส นอกจากนี้ยังมีแร่ธาตุต่าง ๆ 24 ชนิด เช่น ไนโตรเจน โพแทสเซียม พร้อมกับปริมาณกำมะถัน เหล็ก แมกนีเซียม ทองแดง โคบอลต์ และแมงกานีส และมูลวัวมีความหลากหลายของจุลินทรีย์ที่อุดมไปด้วยแบคทีเรียชนิดต่าง ๆ

2.1.4 กระบวนการในการผลิตถ่านอัดแท่ง

กระบวนการในการผลิตถ่านอัดแท่งสามารถแบ่งได้ 5 ขั้นตอน ได้แก่ การผลิตถ่าน การบดถ่าน การผสม การอัดเป็นแท่ง และการทำให้แห้ง

1. การผลิตถ่าน [5, 6]

คุณสมบัติ	ไม้ฟืนสด	ถ่านไม้
น้ำหนัก	1 กิโลกรัม	0.25 กิโลกรัม
ค่าความร้อน	3,600 กิโลแคลอรี่/กิโลกรัม	7,400 กิโลแคลอรี่/กิโลกรัม
ปัญหาจากการเก็บรักษา	ผุพังจากเชื้อราและแมลง	ไม่มีการสูญเสีย หรือเสียหาย
ระยะเวลาการเผาไม้	เร็ว	ช้า
มลพิษจากการเผาไหม้	สูงมาก	ต่ำกว่า

ตารางที่ 2.1 การเปรียบเทียบคุณสมบัติระหว่างไม้ฟืนสดและถ่านไม้

ถ่าน คือ ไม้ที่นำมาผ่านกระบวนการให้ความร้อนโดยอาศัยความร้อนจากเปลวไฟ ในสภาวะที่ปราศจากก๊าซออกซิเจนที่เป็นตัวทำให้เกิดการเผาไหม้หรือการลุกติดไฟ โดยไม้จะมีองค์ประกอบสำคัญ เช่น เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส น้ำมันดินและสารประกอบอื่น ๆ เมื่อไม้ได้รับความร้อน น้ำมันดินและสารประกอบเหล่านี้จะเกิดการระเหยและสลายตัวออกไปจากเนื้อไม้ ทำให้เหลือแต่ส่วนของคาร์บอน ซึ่งจะเก็บไว้ใช้ได้นาน และไม่มีปัญหาจากปลวกและมอดที่มากินไม้เนื่องจากอาหารของปลวกถูกสลายไป ส่วนสิ่งที่เหลือสามารถถูกใช้งานเป็นเชื้อเพลิงในด้านต่าง ๆ รวมทั้งมีคุณสมบัติพิเศษในการใช้งานอื่น ๆ โดยถ่านที่ได้หลังการผลิตจะมีปริมาณคาร์บอนสูง โดยมีค่าเป็นสองเท่าของปริมาณพลังงานในไม้แห้งดังแสดงในตารางที่ 2.1 สำหรับกระบวนการที่ทำให้สารอินทรีย์ในเนื้อไม้เปลี่ยนรูปเป็นถ่านเรียกว่า “คาร์บอไนเซชัน (Carbonization)” สามารถแบ่งได้ 4 ขั้นตอนดังนี้

1.1 การไล่ความชื้น (Dehydration) เกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมิ 20 – 270 องศาเซลเซียส แบ่งออกเป็น 2 ช่วง โดยช่วงที่ 1 คืออุณหภูมิ 20 – 180 องศาเซลเซียสเป็นช่วงที่มีการให้ความร้อนเพื่อไล่

ความชื้น ลักษณะควันที่เกิดในช่วงนี้จะเป็นสีขาวปนสีน้ำเงินอ่อน ส่วนช่วงที่ 2 คืออุณหภูมิ 180 – 270 องศาเซลเซียส เป็นช่วงที่มีการสลายตัวของเฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) โดยจะสลายตัวจนหมดที่อุณหภูมิ 260 องศาเซลเซียส โดยลักษณะควันที่เกิดขึ้นในช่วงนี้จะเป็นสีเหลืองจางๆ

1.2 การเปลี่ยนจากไม้เป็นถ่าน (Carbonization) เกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมิ 270 – 400 องศาเซลเซียส โดยจะแบ่งออกเป็น 2 ช่วง ช่วงที่ 1 อุณหภูมิ 270 – 300 องศาเซลเซียส เป็นช่วงที่เซลลูโลส (Cellulose) เกิดการสลายตัว ลักษณะควันที่เกิดในช่วงนี้จะเป็นสีขาวอมเหลืองและกลิ่นฉุน ส่วนในช่วงที่ 2 อุณหภูมิที่ 300 – 400 องศาเซลเซียส ในช่วงนี้ลิกนินจะเริ่มสลายตัว พร้อมกับเซลลูโลสที่ยังมีการสลายตัวอย่างต่อเนื่อง

1.3 การทำให้ถ่านบริสุทธิ์ (Refinement) ถ่านจะสามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงได้ เมื่อเผาเสร็จที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสแล้ว แต่ถ่านในตอนนี้ยังคงมีน้ำมันดิน (Tar) ซึ่งเป็นสารก่อมะเร็งอยู่ รวมถึงปริมาณคาร์บอนคงตัวของถ่านยังคงต่ำอยู่ ดังนั้นในช่วงนี้กระบวนการที่เกิดขึ้นจะเป็นกระบวนการประเภทคายความร้อน โดยน้ำมันดินที่ยังคงอยู่ในกระบวนการจะถูกขับออก ซึ่งจะส่งผลให้ปริมาคาร์บอนของถ่านเพิ่มขึ้น ลักษณะควันจะเริ่มมีสีใสซึ่งจะต้องทำการปิดช่องอากาศเข้า

1.4 การทำให้เย็น (Cooling) ก่อนจะนำถ่านไม้มาใช้งานต้องปิดปล่องเตา แล้วปล่อยให้ถ่านเย็นจนอุณหภูมิต่ำกว่า 50 องศาเซลเซียส

2. การบดย่อย [7]

ผงถ่านที่นำมาใช้ในการอัดแท่งจะต้องละเอียดพอที่จะนำไปขึ้นรูปได้ ขนาดของผงถ่านที่ใช้นั้นจะขึ้นอยู่กับชนิดของถ่านและวิธีการทำผงถ่านให้เป็นแท่ง วิธีการบดย่อยสามารถทำได้หลายวิธีไม่ว่าจะเป็นการใช้เครื่องบด เครื่องสับและเครื่องป่นวัสดุ หรือวิธีที่ง่ายที่สุดก็คือการบดด้วยมือ โดยอาจใช้ครกและสากเป็นอุปกรณ์ช่วยซึ่งวิธีนี้ต้องใช้แรงงานมากและใช้เวลานาน ถ้าถ่านที่จะนำมาอัดแท่งไม่ผ่านการบดหรือมีขนาดใหญ่จะส่งผลให้ตอนอัดแท่งถ่านจะทำยากและเกิดช่องว่างภายในก้อนถ่านขึ้น เมื่อนำถ่านอัดแท่งไปใช้งานจะมีการแตกปะทุ เพราะมีรูอากาศภายในก้อนถ่าน

3. การผสม [8]

การผสมถ่านเป็นการผสมวัสดุที่ถูกบดย่อยตามขนาดที่ต้องการกับสารที่จะช่วยประสานวัสดุให้ติดกันง่ายขึ้นก่อนนำไปอัดแท่ง ลักษณะของตัวประสานที่ดีจะต้องมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคสูง โดยทั่วไปอาจใช้

กากน้ำตาลหรือแป้งเปียกเป็นตัวประสาน ถ่านอัดแท่งที่ใช้กากน้ำตาลเป็นตัวเชื่อมประสานนั้นมีค่าความร้อนสูงกว่า และมีปริมาณเถ้าต่ำกว่าถ่านอัดแท่งที่ใช้แป้งเปียกเป็นตัวเชื่อมประสาน แต่ข้อเสียของการใช้กากน้ำตาล คือ ต้องใช้ปริมาณมากกว่าและเมื่อทิ้งไว้ในสภาพอากาศชื้น จะดูดความชื้นจากในอากาศเข้าไปทำให้อ่อนตัวลง อย่างไรก็ตามยังมีวัสดุอีกมากมายสามารถนำมาใช้เป็นตัวประสานได้ ซึ่งในแต่ละท้องถิ่นก็จะมีการใช้วัสดุที่แตกต่างกันออกไป ดังนั้นในการที่จะเลือกวัสดุใดเป็นตัวประสานนั้นก็ควรพิจารณาถึงคุณสมบัติดังต่อไปนี้ คือ ราคาถูก มีแรงยึดเกาะที่ดี ไม่ก่อให้เกิดกลิ่นเหม็นขณะเผาไหม้ และสามารถหาได้ง่าย สำหรับเชื้อเพลิงอัดแท่งที่ไม่ได้ใช้ตัวเชื่อมประมาณใด ๆ เมื่ออัดเสร็จแล้วต้องนำไปใช้ทันที เพราะมีความเปราะมากทำให้หักเป็นท่อนๆ และป่นกระจายได้ง่าย จึงไม่สามารถเก็บไว้ได้นาน ๆ

4. การอัดแท่งตามรูปทรงที่กำหนด [9]

การอัดส่วนผสมเป็นแท่ง เป็นขั้นตอนในการกำหนดรูปร่างและความหนาแน่นของเนื้อถ่านอัดแท่งดังแสดงในรูปที่ 1 โดยที่ขนาดและรูปร่างนั้นจะขึ้นอยู่กับจุดประสงค์ในการใช้งานและความต้องการของผู้ใช้ โดยเชื้อเพลิงที่มีความหนาแน่นเหมาะสม จะช่วยให้เกิดการลุกไหม้ ให้ความร้อนได้นาน ส่วนเชื้อเพลิงที่มีความหนาแน่นน้อยเกินไปจะทำให้เกิดการลุกไหม้และมอดเร็ว ไม่สะดวกต่อการใช้งานเพราะต้องเติมเชื้อเพลิงบ่อย ๆ แต่เชื้อเพลิงที่มีความหนาแน่นมากเกินไปจะทำให้การลุกไหม้เกิดไม่สะดวกและบางครั้งอาจทำให้เชื้อเพลิงดับได้

รูปที่ 1 กระบวนการในการทำถ่านอัดแท่ง

5. การทำให้แห้ง [10]

เนื่องจากถ่านที่ผ่านการอัดแท่งยังมีปริมาณความชื้นสูง ดังนั้นจึงต้องนำถ่านอัดแท่งไปอบเพื่อทำการลดความชื้นให้เหลือไม่เกินร้อยละ 8 โดยน้ำหนัก เพื่อทำให้ถ่านอัดแท่งแข็งตัว เกาะกันแน่น ซึ่งวิธีที่ง่ายและถูกที่สุด สำหรับการทำให้แห้งคือการนำไปผึ่งแดดประมาณ 3 - 4 วัน หากใช้เตาอบก็จะช่วยลดระยะเวลาในการอบเพื่อลดความชื้นจากแท่งไม้แห้งให้สั้นลงดังแสดงในรูปที่ 2 แต่มีข้อควรระวังคือต้องรักษาอุณหภูมิภายในเตาอบไม่ให้สูงเกินกว่าที่ทำให้ถ่านลุกไหม้ สำหรับเวลาที่ใช้ในการอบเพื่อลดความชื้นจะขึ้นอยู่กับปริมาณความชื้นของส่วนผสมและชนิดของเตาอบที่ใช้ โดยถ่านที่ผ่านการลดความชื้นจนอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดแล้วก็จะทำการบรรจุเพื่อส่งจำหน่าย

รูปที่ 2 กระบวนการทำให้แห้งของถ่านอัดแท่งโดยใช้เครื่องอบแห้ง

2.1.5 เตาเผาถ่าน [11]

เตาเผาถ่านที่ใช้ในโครงการวิจัยนี้คือ เตาเผาถ่านขนาด 200 ลิตร ซึ่งได้รับความอนุเคราะห์จากศูนย์เชื้อเพลิงและพลังงานจากชีวมวล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อำเภอแก่งคอย จังหวัดสระบุรี ดังแสดงในรูปที่ 3 โดยเตาประเภทนี้อาศัยความร้อนเพื่อไล่ความชื้นในเนื้อไม้ที่อยู่ในเตา ทำให้ไม้กลายเป็นถ่าน เรียกว่ากระบวนการคาร์บอไนเซชั่น (Carbonization) โครงสร้างของเตาจะเป็นระบบปิด สามารถควบคุมอากาศได้จึงไม่มีการลุกติดไฟของเนื้อไม้ ดังนั้นถ่านที่ได้จึงมีคุณภาพสูง เกิดขี้เถ้าน้อย และผลพลอยได้จากกระบวนการเผาถ่านอีกอย่างหนึ่งคือ น้ำส้มควันไม้ (Wood Vinegar)

รูปที่ 3 เตาเผาถ่านขนาด 200 ลิตร

2.1.6 การทดสอบคุณภาพถ่านหิน [12]

การทดสอบคุณภาพถ่านหิน เป็นการตรวจสอบว่าถ่านหินนั้นมีสมบัติเป็นอย่างไร สามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงได้ดีหรือไม่ หรือนำไปใช้ประโยชน์อื่นตามคุณภาพของถ่านหินนั้น ๆ การวิเคราะห์ทดสอบคุณภาพตามข้อกำหนดของผู้ใช้ในด้านต่าง ๆ จะทำให้ทราบถึงคุณภาพของถ่านหินนั้น ๆ

การทดสอบคุณภาพถ่านหิน มีการวิเคราะห์หาค่าต่าง ๆ ดังนี้

1. Proximate analysis ได้แก่ การหาปริมาณความชื้น เถ้า สารระเหย และคาร์บอนคงตัว

2. Ultimate analysis ได้แก่ การหาปริมาณ คาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน ออกซิเจน กำมะถัน และเถ้า

3. วิเคราะห์หาค่าความร้อน (Calorific value)

การวิเคราะห์ทดสอบเรื่องถ่านหินจะมีวิธีทดสอบตามมาตรฐาน เช่น ASTM (American Society for Testing and Material) มาตรฐาน ASTM นี้จะมีการปรับปรุงหรือเพิ่มวิธีใหม่ ๆ อยู่เสมอโดยมีการจัดพิมพ์ใหม่ทุกปีในมาตรฐานจะกำหนดเรื่องเครื่องมือการเตรียมตัวอย่าง สารเคมีวิธีวิเคราะห์ทดสอบ และการคำนวณไว้อย่างละเอียด นอกจากนี้มาตรฐานยังมีการกำหนดเกณฑ์ที่ยอมรับได้ของผลการวิเคราะห์ทดสอบ กรณีที่ทดสอบโดยห้องปฏิบัติการเดียวกัน หรือต่างหองปฏิบัติการไว้เป็น 2 แบบ ดังนี้

1. Repeatability เป็นค่ากำหนดของความแตกต่างที่เกิดขึ้นเมื่อทำการทดลองซ้ำสองครั้งโดยใช้ตัวอย่างเดียวกันเครื่องมือเดียวกันโดยบุคคลเดียวกัน

2. Reproducibility เป็นค่ากำหนดของความแตกต่างที่เกิดขึ้นเมื่อทำการทดลองซ้ำสองครั้งโดยใช้ตัวอย่างเดียวกันแต่ใช้เครื่องมือ หองปฏิบัติการและบุคคลที่ทดสอบต่างกัน

ในการบ่งชี้คุณภาพของถ่านหิน จะต้องมีการวิเคราะห์คุณภาพในรายการต่าง ๆ มาประกอบกัน การวิเคราะห์เพียงบางรายการบางครั้งก็ไม่สามารถบ่งชี้คุณภาพได้นอกจากนี้ในการรายงานผลจำเป็นต้องกำหนดสภาพตัวอย่างของถ่านหินขณะวิเคราะห์ทดสอบด้วยและการเปรียบเทียบคุณภาพจำเป็นต้องเปรียบเทียบผลจากการทดสอบในสภาพตัวอย่างที่เหมือนกัน

ตาม ASTM D3180 ได้กำหนดสภาพของตัวอย่างพรอมวิธีการคำนวณโดยรายงานคาตามสภาพต่าง ๆ ดังนี้

1. As-received basis เป็นค่าที่คำนวณจากตัวอย่างที่มีความชื้นตามสภาพของตัวอย่างที่ห้องปฏิบัติการได้รับ โดยไม่ผ่านกระบวนการเตรียมตัวอย่างหรือกระบวนการอื่น
2. As-determined basis เป็นค่าที่คำนวณได้จากการวิเคราะห์ตัวอย่างที่ผ่านการเตรียมตัวอย่างและมีความชื้นเหลืออยู่เท่ากับขณะที่ทดสอบ
3. Dry basis เป็นค่าที่คำนวณได้จากตัวอย่างที่ปราศจากความชื้น โดยการนำค่าความชื้นที่วิเคราะห์ตามASTM D3173 มาแปลงคาจาก as-determined basis ไปเป็น dry basis
4. Dry, ash-free basis เป็นค่าที่คำนวณจากตัวอย่างที่ปราศจากความชื้นและขี้เถ้าโดยการนำค่าความชื้นที่วิเคราะห์ตาม ASTM D3173 และเถ้าตาม ASTM D3174 มาแปลงค่าจาก as-determined basis ไปเป็นสภาพdry, ash-free basis

2.1.7 Proximate Analysis [12]

เป็นการหาปริมาณของความชื้น เถ้า สารระเหยและคาร์บอนคงตัวค่าที่ได้สามารถนำไปใชในการจัดกลุ่มของถ่านหินโดยอาศัยอัตราสวนของสารที่เผาไหม้ได้ กับสารที่ไม่สามารถเผาไหม้ได้ซึ่งเป็นข้อมูลที่นำมาพิจารณาในการซื้อขายและประเมินคุณภาพของถ่านหิน

1. ความชื้น ASTM D3173

ค่าความชื้นของถ่านหินวิเคราะห์ตาม ASTM D3173 ให้ความร้อนกับถ่านหิน 1 กรัม ที่อุณหภูมิ 105 - 110 องศาเซลเซียส และคำนวณเป็นร้อยละของน้ำหนักที่หายไป ค่านี้ถือว่าสำคัญมากโดยเฉพาะในด้านการซื้อขายเพราะส่วนใหญ่ จะทำการซื้อขายโดยเปรียบเทียบคุณภาพจากถ่านหินที่แห่ง ฉะนั้นจึงจำเป็นต้องใช้ค่าความชื้นนี้ไปคำนวณค่าอื่น ๆ ของถ่านหินให้อยู่ในสภาพตัวอย่างที่แห้ง (dry basis)

2. เถ้า ASTM D3174

เถ้าเป็นปริมาณสารอนินทรีย์ที่อยู่หลังจากการเผาไหม้ถ่านหิน แต่เถ้าที่ได้นี้จะต่างจากองค์ประกอบของสารอนินทรีย์ที่ปรากฏอยู่ในสารตั้งต้น ซึ่งมีสาเหตุมาจากการเปลี่ยนแปลงสารเคมีที่เกิดขึ้นภายในตัวแร่ธาตุ ได้แก่การสูญเสียน้ำเนื่องจากการเกิดผลึกของแร่ธาตุที่มีน้ำอยู่ในองค์ประกอบ การสูญเสียคาร์บอนไดออกไซด์คาร์บอเนต การเกิดออกซิเดชันของไพไรต์ (FeS_2) เป็นเหล็กออกไซด (Ferric oxide) ปริมาณเถ้ามีความสำคัญเนื่องจากมีผลในการลดค่าความร้อนของถ่านหิน และยังเกี่ยวข้องกับค่าการเผาไหม้ของถ่านหินอีกด้วยวิธีวิเคราะห์ปริมาณเถ้าตาม ASTM D3174 ทำโดยการเผาตัวอย่างถ่านหิน 1 กรัม ที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส และคำนวณหาร้อยละของน้ำหนักที่ยังคงเหลืออยู่

3. สารระเหย ASTM D3175

สารระเหยเป็นองค์ประกอบของถ่านหินที่มีสถานะเป็นก๊าซเมื่อนำถ่านหินมาเผาที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 - 7 นาที (ขึ้นอยู่กับลักษณะของถ่านหิน) และคำนวณร้อยละของน้ำหนักที่หายไปลบด้วยความชื้น สารระเหยที่ถูกปลดปล่อยออกมาโดยมากจะเป็น คาร์บอนไดออกไซด์ มีเทน ไฮโดรเจน น้ำและสารระเหยจากทาร์ (Tar) ซึ่งขึ้นกับโครงสรางทางอินทรียของถ่านหินนั้น ๆ

4. คาร์บอนคงตัว ASTM D3172

เป็นค่าที่แสดงถึงส่วนที่เผาไหม้ได้ของถ่านหินหลังจากที่กำจัดความชื้น สารระเหยและเถ้าออกแล้ว ซึ่งหาได้โดยนำปริมาณความชื้น เถ้า สารระเหยลบออกจาก 100 และทุกค่าต้องอยู่ในสภาวะความชื้นเดียวกัน ปริมาณคาร์บอนคงตัวนี้มีความสำคัญมากต่อการแบงระดับชั้นของถ่านหิน ถ้ามีค่ามากขึ้นความเป็นถ่านหินก็จะเพิ่มขึ้นด้วย

2.1.8 Ultimate analysis [13]

การวิเคราะห์โดยละเอียดของถ่านหินคือการหาเปอร์เซ็นต์ของคาร์บอนรวมถึงไฮโดรเจน ซัลเฟอร์ ไนโตรเจนและออกซิเจน การวิเคราะห์นี้วัดโดยใช้อุปกรณ์ห้องปฏิบัติการเฉพาะ เช่น เครื่องวิเคราะห์คาร์บอนไฮโดรเจน ไนโตรเจน ซัลเฟอร์ (CHNS) การวัดคาร์บอนรวมถึงคาร์บอนอินทรีย์และคาร์บอนใด ๆ ที่เป็นแร่คาร์บอเนต การวัดไฮโดรเจนรวมไฮโดรเจนในวัสดุอินทรีย์เช่นเดียวกับไฮโดรเจนในน้ำที่เกี่ยวข้องกับถ่านหิน ส่วนกำมะถันในถ่านหินสามารถพบได้ในสามรูปแบบที่แตกต่างกัน:

- เป็นสารประกอบกำมะถันอินทรีย์
- เป็นอนินทรีย์ซัลไฟด์ที่ส่วนใหญ่ส่วนใหญ่เป็นเหล็กซัลไฟด์ไพไรต์และแมกกาไซด์ (FeS_2)
- เป็นอนินทรีย์ซัลเฟต (เช่น Na_2SO_4, $CaSO_4$)

ในการวัดค่ากำมะถันในการวิเคราะห์โดยละเอียดควรรวมวิธีการทำความสะอาดถ่านหิน, กำมะถันในสารอินทรีย์และในสารอนินทรีย์ด้วย ควรกำหนดความชื้นและเถ้าเนื่องจากค่าการวิเคราะห์ของการวิเคราะห์โดยละเอียดควรรายงานตามเกณฑ์ที่เหมาะสม

ธาตุองค์ประกอบของวัสดุอินทรีย์สำหรับถ่านหินในการวิเคราะห์แบบละเอียดสามารถแสดงได้เมื่อทำการแก้ไขสำหรับคาร์บอนไฮโดรเจนและซัลเฟอร์ใด ๆ ที่ได้จากสารอนินทรีย์และการเปลี่ยนเถ้าเป็นสสาร วิธีการมาตรฐานสำหรับการวิเคราะห์ขั้นสูงสุดของถ่านหินและถ่านโค้ก (ASTM D3176) รวมถึงการกำหนดปริมาณธาตุคาร์บอนไฮโดรเจนซัลเฟอร์และไนโตรเจนรวมถึงปริมาณเถ้าในวัสดุโดยรวม ออกซิเจนคำนวณโดยความแตกต่าง วิธีทดสอบสำหรับกำหนดคาร์บอนและไฮโดรเจนคือ ASTM D3178 และ ASTM D3179 สำหรับกำมะถันคือ ASTM D3177 ISO 334 และ ISO 351

การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate analysis) เป็นการวิเคราะห์เพื่อหาปริมาณธาตุต่าง ๆ ที่เป็นองค์ประกอบเชื้อเพลิง โดยระบุในหลักอ้างอิงแห้งและไม่คิดเถ้า (Dry ash free basis) โดยปริมาณ คาร์บอน (C) ไฮโดรเจน (H) ไนโตรเจน (N) กำมะถัน (S) จะวิเคราะห์โดยวิธีการทางเคมี ส่วนออกซิเจนจะหาโดยค่า 100 – (%C+%H+%N+%S) [14]

2.1.9 Gross Calorific Value ASTM D1989 [12]

การหาค่าความร้อนตามวิธี ASTM D1989 เป็นการหาค่าปริมาณความร้อนของถ่านหินโดยการเผาไหม้ถ่านหินใน Oxygen bomb calorimeter ภายใต้สภาวะควบคุม (เครื่องไอโซเพอรีบอล แคลอรีมิเตอร์) ซึ่งคำนวณเป็น แคลอรีต่อกรัม กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม บีทียูต่อปอนด์ หรือจูลต่อกรัม

ค่าความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ถ่านหินมี 2 แบบ คือ

1. Gross Calorific Value เป็นค่าความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ถ่านหินปริมาณ 1 หน่วยที่ปริมาตรคงที่ใน Oxygen bomb calorimeter ซึ่งภายใต้สภาวะนี้น้ำที่เกิดจากปฏิกิริยาจะควบแน่นอยู่ในสภาวะของเหลว
2. Net Calorific Value เป็นค่าความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ถ่านหินปริมาณ 1 หน่วยที่ความดันคงที่คือ 1 ความดันบรรยากาศ (0.1 เมกะปาสคาล) ซึ่งภายภายใต้สภาวะเช่นนี้ปริมาณน้ำทั้งหมดยังอยู่ในสภาวะของไอ ซึ่งค่า Net calorific value นี้เรียกอีกอย่างหนึ่งว่า Low heating value ซึ่งสามารถคำนวณมาจาก Gross calorific value (High heating value) โดยใช้สูตร

$$Q_p\,(net)_{ar} = Q_v\,(gross)_{ar} - 5.72\,(H_{ar} \times 9)$$

เมื่อ Q_p $(net)_{ar}$ เป็นค่าความร้อนที่ความดันคงที่, แคลอรีต่อกรัม

Q_v $(gross)_{ar}$ เป็นค่าความร้อนที่ปริมาตรคงที่, แคลอรีต่อกรัม

H_{ar} เป็นปริมาณไฮโดรเจนทั้งหมดในสภาวะที่ได้รับมาโดยรวมปริมาณไฮโดรเจนจากความชื้นของตัวอย่าง

ค่าความร้อนมีความสำคัญในการแบงระดับชั้นของถ่านหิน ซึ่งถ้ามีค่าสูงก็เป็นถ่านหินคุณภาพดีหรือใช้เป็นเกณฑ์กำหนดในการซื้อขายรวมทั้งใช้ในการประเมินคุณภาพถ่านหินที่ใช้ในอุตสาหกรรมและงานวิจัย

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

[15] **Maira Iftikhar และคณะ (2019)** ได้ทำการศึกษาการใช้ประโยชน์จากมูลวัวในการเป็นองค์ประกอบสำหรับผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่มีส่วนประกอบพื้นฐานเป็นฟางข้าวสาลีและแกลบเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ มีการศึกษาเกี่ยวกับผลกระทบจากตัวแปร เช่น ปริมาณของมูลวัว ความเข้มข้นของกากน้ำตาล และ เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง โดยหลังจากการทำการอัดเม็ดจะมีการวิเคราะห์เบื้องต้นและการวิเคราะห์แบบละเอียด การหาความหนาแน่นของเชื้อเพลิงอัดเม็ด ค่าความร้อนและความคงทน ผลการทดลองชี้ให้เห็นว่าการเติมมูลวัวลงในส่วนประกอบพื้นฐานสำหรับอัดเม็ดทำให้ปริมาณสารระเหยปริมาณเถ้าความหนาแน่นรวมและความคงทนของเม็ดฐานเพิ่มขึ้นเป็นผลให้ค่าความร้อนสูงสุด 14.98 เมกะจูลต่อกิโลกรัม ความชื้นร้อยละ 3.37 สารระเหยร้อยละ 45.49 ปริมาณเถ้าร้อยละ 31.38 ความหนาแน่นรวม 108,990 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และความทนทานร้อยละ 95 อย่างไรก็ตามการปรับพารามิเตอร์การทำงานให้เหมาะสมเพื่อปรับปริมาณเถ้าด้วยองค์ประกอบมูลวัวของเชื้อเพลิงอัดเม็ดร้อยละ 8.5 (องค์ประกอบเม็ดฐานของฟางข้าวสาลีร้อยละ 90 และแกลบร้อยละ 10) ความเข้มข้นของกากน้ำตาลร้อยละ 50 และเวลาในการอบแห้งที่ 12 ชั่วโมงส่งผลให้ลดปริมาณเถ้าลงถึงร้อยละ 52 และเพิ่มค่าความร้อนได้ร้อยละ 2.3 โดยที่ต้นทุนลดลงร้อยละ 38 ดังนั้นการใช้วัสดุเหลือใช้ เช่น มูลวัวเป็นตัวประสานจึงเป็นแนวทางที่ยั่งยืนในการปรับปรุงคุณสมบัติทางเคมีกายภาพโดยเฉพาะอย่างยิ่งความทนทานของเม็ดชีวมวล

[16] **Michael L. และคณะ (2017)** ได้ทำการวิจัยถ่านอัดแท่งจากเปลือกถั่วลิสงและชานอ้อยซึ่งเป็นของเสียจากภาคเกษตรกรรม โดยใช้แป้งมันสำปะหลังและแป้งสาลีเป็นตัวประสานที่การอัดแบบความดันต่ำและความดันสูง ในสภาวะความดันต่ำ เปลือกถั่วลิสงและชานอ้อยผ่านกระบวนการคาร์บอไนเซชันจนได้ถ่านชีวภาพ จากนั้นผสมถ่านชีวภาพ 1000 กรัมกับแป้งมันสำปะหลังและแป้งสาลีปริมาณ 30 50 70 และ 90 กรัม

และอัดแท่งที่ความดันต่ำ ส่วนในสภาวะความดันสูง (230 เมกะปาสคาล) ถ่านอัดแท่งถูกผลิตจากเปลือกถั่วลิสง 1000 กรัมโดยการอัดแบบ 1. ไม่มีตัวประสาน 2. ใช้แป้งมันสำปะหลัง 250 กรัมเป็นตัวประสาน และ 3. ใช้แป้งสาลี 250 กรัมเป็นตัวประสาน หลังจากนั้นทำการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ โดยใช้เครื่องวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยอาศัยคุณสมบัติทางความร้อน (TGA) และทำการหาค่าความร้อนโดยใช้เครื่องบอมบ์แคลอริมิเตอร์ ลักษณะทางความร้อนของถ่านอัดแท่งสังเกตจากอุณหภูมิของเปลวไฟขณะทำการเผาไหม้ และสมบัติเชิงกลของถ่านอัดแท่งทดสอบด้วยวิธีทดสอบการตก (Drop Test) ผลการทดลองพบว่าค่าความร้อนของถ่านอัดแท่งจากเปลือกถั่วลิสงและชานอ้อยโดยมีแป้งมันสำปะหลังและแป้งสาลีเป็นตัวประสานที่ความดันต่ำ มีค่า 21 - 23 เมกะจูลต่อกิโลกรัม ซึ่งมีค่าสูงกว่าถ่านอัดแท่งที่ได้จากการอัดแท่งเปลือกถั่วลิสงที่ไม่ผ่านกระบวนการคาร์บอไนเซชันที่ความดันสูงซึ่งมีค่าเพียง 16 เมกะจูลต่อกิโลกรัม

[17] **Supattra Budsaereechai และคณะ (2018)** ทำการศึกษาและปรับปรุงคุณสมบัติของถ่านอัดเม็ดจากมูลวัว เพื่อนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงแข็ง โดยการศึกษาผลของขนาดและความดันในการอัดเม็ดมูลวัว อุณหภูมิและเวลาในกระบวรการไพโรไลซีสถ่านอัดเม็ดจากมูลวัว ซึ่งวัตถุดิบเหล่านี้จะถูกอัดเม็ดโดยไม่ใช่ตัวประสานด้วยแบบอัดเม็ดสามขนาด คือ เส้นผ่านศูนย์กลาง 1 1.5 และ 2 เซนติเมตร ที่ความยาว 1 เซนติเมตร ด้วยระบบไฮดรอลิก พบว่า เวลาและอุณหภูมิที่เหมาะสมในการศึกษาครั้งนี้ คือ 30 นาที อุณหภูมิในกระบวนการไพโรไลซีส 400 องศาเซลเซียส และยังพบว่าความดันในการอัดเม็ดมูลวัว มีผลต่อค่าความร้อนของถ่านอัดเม็ด โดยเมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 เซนติเมตร ที่ความดันในการอัดเม็ดมูลวัวที่ 30 40 50 60 และ 70 บาร์ ถ่านอัดเม็ดมูลวัวมีค่าความร้อนคือ 9,750 9,820 10,430 10,520 และ 10,782 กิโลจูลต่อกิโลกรัม ตามลำดับ และเมื่อความดันในการอัดเม็ดมูลวัว 70 บาร์ ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 1.5 และ 2 เซนติเมตร ถ่านอัดเม็ดมูลวัวมีค่าความร้อน 10,782 11,279 และ 11,682 กิโลจูลต่อกิโลกรัม ตามลำดับ โดยที่ความดันในการอัดเม็ดมูลวัวที่เหมาะสมเพื่อใช้งานในกระบวนการไพโรไลซีส คือ 70 บาร์ โดยที่ไม่ใช่ตัวประสาน ทำให้ประหยัดพลังงานและค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นได้ และค่าความร้อนของชีวมวลและถ่านอัดเม็ดที่ได้ดับเชื้อเพลิงแข็งจากงานวิจัยอื่น ๆ พบว่ามีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้น มูลวัวที่ความเหมาะสมที่สามารถนำมาเป็นแหล่งพลังงานเนื่องจากหาได้ง่ายและราคาถูก

[18] **Laksamee Sutthiwilairatana และคณะ (2011)** ได้ทำการศึกษาการนำเศษวัสดุชีวมวลมาใช้ประโยชน์ทางด้านพลังงาน คือ เปลือกกล้วยน้ำว้ามาเผาเป็นถ่าน ทำฟืนอัดแท่ง และทำถ่านอัดแท่ง พบว่าเปลือกกล้วยเมื่อนำมาเผาเป็นถ่านด้วยเตาถังเดี่ยว มีเปอร์เซ็นต์ผลผลิตถ่านเฉลี่ยร้อยละ 17.13 และมีพลังงานความร้อนเฉลี่ย 6,771.16 แคลอรีต่อกรัม แต่ถ่านที่ได้มีลักษณะเป็นแผ่นบางไม่สะดวกต่อการนำไปใช้งาน ใน

ส่วนการทำฟืนอัดแท่งจากเปลือกกล้วย ใช้เปลือกกล้วยสับ 2,000 กรัม ผสมกับแป้งมันสำปะหลังในอัตราส่วน 50 100 200 และ 300 กรัม สามารถอัดเป็นแท่งเชื้อเพลิงได้ แต่แท่งเชื้อเพลิงที่ได้มีความหนาแน่นน้อย เมื่อแห้งไม่เกาะติดกัน จึงไม่เหมาะต่อการนำไปใช้งานเช่นกัน การทำถ่านอัดแท่งจากเปลือกกล้วย โดยใช้ถ่านเปลือกกล้วยบด 2,000 กรัม ผสมกับกาวแป้งมันสำปะหลังที่มีความเข้มข้นของแป้งต่อน้ำร้อยละ 3 5 8 และ 10 โดยน้ำหนัก พบว่า ทุกระดับความเข้มข้นของกาวสามารถอัดเป็นแท่งถ่านได้ จากการศึกษาพบว่าอัตราส่วนที่ให้ถ่านอัดแท่งที่มีคุณสมบัติดีที่สุดคือ อัตราส่วนที่มีส่วนผสมระหว่างถ่านเปลือกกล้วยบด 2,000 กรัม กับกาวแป้งมันสำปะหลังร้อยละ10 โดยน้ำหนักซึ่งถ่านอัดแท่งมีค่างานที่ได้ 1.85 ประสิทธิภาพการใช้งานร้อยละ 24.76 อัตราการเผาไหม้ 6.64 กรัมต่อนาที และพลังงานความร้อนเฉลี่ย 5,718.25 แคลอรีต่อกรัม

[19] **G. Pahla และคณะ (2017)** ได้ทำการวิจัยตัวอย่างมูลวัว ซังข้าวโพดและไม้สนถูกทอร์รีแฟกชันโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบคุณภาพของชีวเคมีต่าง ๆ โดยจุดสนใจหลักคือการเปรียบเทียบขอบเขตของการเพิ่มความหนาแน่นของพลังงานระหว่างลิกโนเซลลูโลสจากของเสียจากสัตว์และชีวมวล ผลลัพธ์ที่ได้ถูกวิเคราะห์โดยการวัดค่าความร้อนและคำนวณมวลและผลได้พลังงานรวมทั้งความหนาแน่นของพลังงาน วิเคราะห์องค์ประกอบของชีวมวลดิบและชีวมวลที่ผ่านกระบวนการทอร์รีแฟกชัน ซังข้าวโพดและไม้สนมีการตอบสนองเชิงบวก ค่าความร้อนเพิ่มขึ้นเป็น 25.98 เมกะจูลต่อกิโลกรัมและ 20.90 เมกะจูลต่อกิโลกรัมตามลำดับ โดยค่าเหล่านี้เปรียบได้กับของแองโกลมาเฟียบิทูมินัสที่มีค่าความร้อน 25.20 เมกะจูลต่อกิโลกรัม ซึ่งใช้สำหรับการเปรียบเทียบ ซังข้าวโพดและไม้สนที่ผ่านกระบวนการทอร์รีแฟกชันจึงได้รับการพิจารณาสำหรับการทำถ่าน อย่างไรก็ตามมูลวัวไม่ตอบสนองต่อการทำทอร์รีแฟกชันเนื่องจาก ค่าความร้อนเพิ่มขึ้นสูงสุดที่ 18.60 เมกะจูลต่อกิโลกรัมซึ่งค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับถ่านหินบิทูมินัส การผสมมูลวัว ที่ผ่านการทอร์รีแฟกชันกับถ่านหินจะช่วยลดการใช้พลังงานและลดประสิทธิภาพกระบวนการเผาไหม้ การเพิ่มขึ้นของค่าความร้อนสำหรับซังข้าวโพดมีสาเหตุมาจากปริมาณออกซิเจนลดลงเนื่องจากการปล่อยสารระเหยพลังงานต่ำพร้อมกับน้ำ ดังนั้นจึงไม่ควรใช้เป็นวัตถุดิบในการทอร์ริฟิเคชั่น

บทที่ 3

วิธีดำเนินงานวิจัย

การพัฒนาความเป็นไปได้ในการผลิตเชื้อเพลิงแข็งจากมูลวัวนม มีรายละเอียดเกี่ยวกับการดำเนินงานวิจัย ดังนี้

1. วัสดุและเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

2. การวางแผนการทดลอง

3. ขั้นตอนในการผลิตเชื้อเพลิงแข็งจากมูลวัวนม

1. วัสดุและเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

1.1 วัสดุ

1.1.1 มูลวัวนมแห้งปริมาณ 150 กิโลกรัม ขอความอนุเคราะห์จากองค์การส่งเสริมกิจการโคนมแห่งประเทศไทย อำเภอมวกเหล็ก จังหวัดสระบุรี

1.1.2 ผงถ่านจากไม้ไผ่ปริมาณ 9 กิโลกรัม ขอความอนุเคราะห์จากศูนย์เชื้อเพลิงและพลังงานจากชีวมวล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อำเภอแก่งคอย จังหวัดสระบุรี

1.1.3 แป้งมันสำปะหลังปริมาณ 2 กิโลกรัม

1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1.2.1 อุปกรณ์การชั่ง ตวง วัด ประกอบด้วย เครื่องชั่งน้ำหนักดิจิทัล กระบอกตวง บีกเกอร์

1.2.2 ภาชนะที่ใช้ในการตากแห้ง ประกอบด้วย ถาดเหล็กขนาดใหญ่ ตะแกรง ผ้าใบ ดังแสดงในรูปที่ 4

รูปที่ 4 ภาชนะที่ใช้ในการตากแห้ง

1.2.3 เตาเผาถ่านระบบปิดขนาด 200 ลิตร ขอความอนุเคราะห์จาก ศูนย์เชื้อเพลิงและพลังงานจากชีวมวล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อำเภอแก่งคอย จังหวัดสระบุรี ดังแสดงในรูปที่ 5

รูปที่ 5 เตาเผาถ่านไร้ควันของศูนย์เชื้อเพลิงและพลังงานจากชีวมวล

1.2.4 เครื่องบด

1.2.5 เครื่องจักรอัดแท่งแบบสกรูพร้อมระบบฮีตเตอร์ขนาด 25 แรงม้า สำหรับขึ้นรูปมูลวัว ดังแสดงในรูปที่ 6

รูปที่ 6 เครื่องจักรอัดแท่งแบบสกรูพร้อมระบบฮีตเตอร์ขนาด 25 แรงม้า

1.2.6 เครื่องจักรอัดแท่งแบบสกรู ขนาด 10 แรงม้า สำหรับขึ้นรูปถ่านดังแสดงในรูปที่ 7

รูปที่ 7 เครื่องจักรอัดแท่งแบบสกรู ขนาด 10 แรงม้า

1.2.7 เครื่องอัดไฮดรอลิคแบบมือโยกพร้อมแท่นอัดขนาด 70 เมกะปาสคาล สำหรับขึ้นรูปถ่านอัดเม็ดดังแสดงในรูปที่ 8

รูปที่ 8 เครื่องอัดไฮดรอลิคแบบมือโยกพร้อมแท่นอัดขนาด 70 เมกะปาสคาล

1.2.8 เครื่องอบแห้งขนาด 2300 ลิตร อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ 9

รูปที่ 9 เครื่องอบแห้งขนาด 2300 ลิตร อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส

1.2.9 เครื่องวัดค่าความชื้นแบบดิจิทัล ดังแสดงในรูปที่ 10

รูปที่ 10 เครื่องวัดค่าความชื้นแบบดิจิทัล [20]

1.2.10 เครื่อง MATTLER TOLEDO Moisture Analyzer HX204 สำหรับวัดปริมาณร้อยละความชื้น ดังแสดงในรูปที่ 11

รูปที่ 11 เครื่อง MATTLER TOLEDO Moisture Analyzer HX204

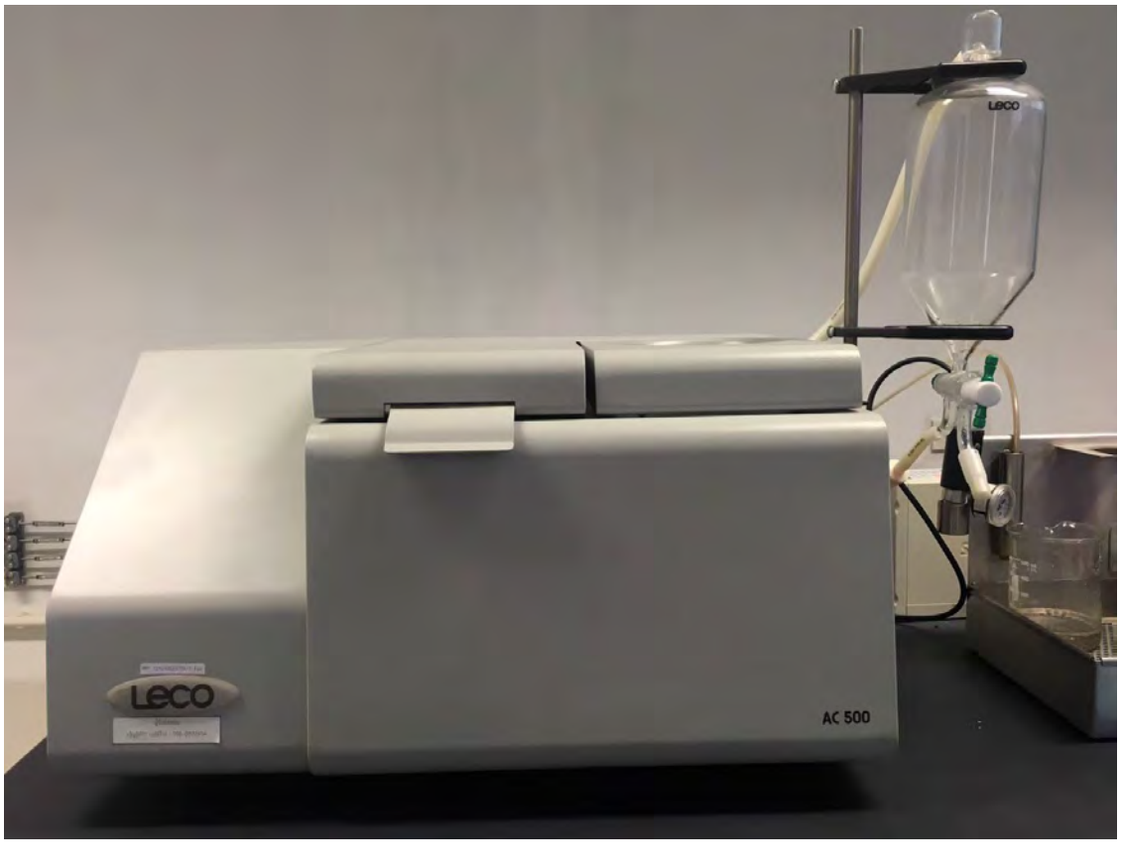
1.2.11 เตาอบแบบตั้งอุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ 12

รูปที่ 12 เตาอบแบบตั้งอุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส [21]

1.2.12 เตาเผาแบบปิดอุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ 13

รูปที่ 13 เตาเผาแบบปิดอุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส [22]

1.2.13 เครื่อง Oxygen Bomb Calorimeter ดังแสดงในรูปที่ 14



รูปที่ 14 เครื่อง Oxygen Bomb Calorimeter

1.2.14 เตาอบอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ 15

รูปที่ 15 เตาอบอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส [23]

1.2.15 ถ้วยพร้อมฝาสำหรับเผาที่อุณหภูมิสูง ดังแสดงในรูปที่ 16

รูปที่ 16 ถ้วยพร้อมฝาสำหรับเผาที่อุณหภูมิสูง

1.2.16 โถดูดความชื้น ดังแสดงในรูปที่ 17

รูปที่ 17 โถดูดความชื้น [24]

1.2.17 บล็อกสำหรับอัดเม็ด ดังแสดงในรูปที่ 18

รูปที่ 18 บล็อกสำหรับอัดเม็ด

2. การวางแผนการทดลอง

ตารางที่ 3.1 แสดงขั้นตอนการวางแผนการทดลอง

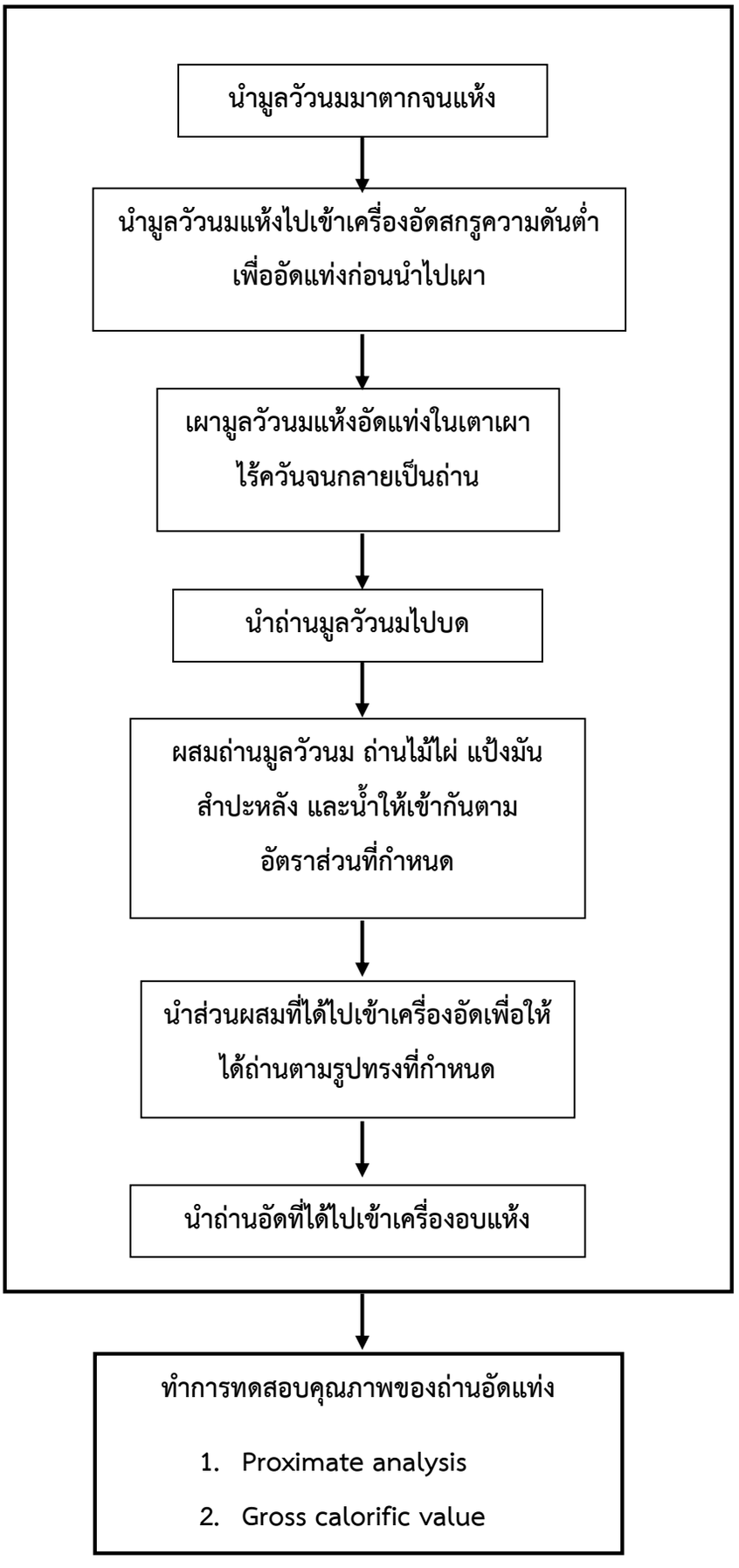
ขั้นตอน	ระยะเวลา
1. เตรียมอุปกรณ์และสถานที่ในการทดลอง	1 วัน
2. นำมูลวัวนมที่ได้รับความอนุเคราะห์มา ไปแผ่บนถาดเหล็ก ทำการตากแห้ง	2 วัน
3. นำมูลวัวนมที่แห้งแล้วไปผสมน้ำ จนมีความชื้นประมาณร้อยละ 30 (ทำการวัดโดยใช้ Humidity meter) แล้วนำไปเข้าเครื่องจักรอัดแท่งพร้อมระบบฮีตเตอร์ขนาด 25 แรงม้า	1 อัตราส่วน / 20 นาที
4. นำมูลวัวอัดแท่งไปตาก เพื่อระเหยความชื้นออกจนน้อยกว่าร้อยละ 15	1 วัน
5. นำลงเตาเผาถ่านระบบปิด เพื่อทำการคาร์บอไนเซชัน	7 ชั่วโมงครึ่ง
6. ลดอุณหภูมิถ่านมูลวัว จนเหลือ ณ อุณหภูมิห้อง	16 ชั่วโมง
7. ทำการคัดแยกเอาส่วนที่เป็นผงและส่วนที่เผาไหม้ไม่ดีออก หลังจากนั้นนำถ่านมูลวัวไปบดจนละเอียดพอประมาณ	1 ชั้วโมง
8. นำผงถ่านจากมูลวัวที่บดแล้วมาทำการผสมกับผงถ่านจากไม้ไผ่ และ ตัวประสานตามอัตราส่วนที่กำหนดไว้ ก่อนไปทำการอัดแท่งที่เครื่องจักรอัดแท่งแบบสกรูขนาด 10 แรงม้า เส้นผ่านศูนย์กลาง 4.8 เซนติเมตร ความยาว 8 เซนติเมตร	1 อัตราส่วน / 20 นาที
9. นำถ่านอัดแท่งไปเข้าเครื่องอบแห้งที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส	15 ชั่วโมง
10. นำถ่านที่ได้ไปทดสอบองค์ประกอบและประสิทธิภาพ	5 วัน

วางแผนการทดลองโดยประกอบด้วยปัจจัย คือ

1. ความดันที่ใช้ในการอัดเม็ด ที่ความดัน 10 20 และ 30 บาร์
2. อัตราส่วนระหว่างถ่านจากมูลวัวกับถ่านจากไม้ไผ่ ในอัตราส่วน 3:1 1:1 และ 1:3
3. อัตราส่วนของแป้งมันสำปะหลังที่ใช้เป็นตัวประสานที่ร้อยละ 3 6 9 และ 12 โดยน้ำหนัก

3.ขั้นตอนในการทดลองการผลิตเชื้อเพลิงแข็งจากมูลวัวนม

ขั้นตอนในการทดลองแบ่งออกเป็น 2 ตอน ได้แก่ ตอนที่ 1 วิธีการทำเชื้อเพลิงแข็งจากมูลวัวนมแห้ง และตอนที่ 2 การวิเคราะห์คุณสมบัติของเชื้อเพลิงแข็ง ดังแสดงในรูปที่ 19



รูปที่ 19 ขั้นตอนการผลิตถ่านอัดแท่งจากมูลวัวนม

ตอนที่ 1 วิธีการทำเชื้อเพลิงแข็งจากมูลวัวนมแห้ง

1. นำมูลวัวไปตากแดดจนแห้ง
2. นำมูลวัวที่ตากแดดจนแห้งไปทำการอัดแท่ง โดยใช้เครื่องอัดแบบสกรู
3. นำมูลวัวที่ผ่านการอัดแท่งไปเผาให้กลายเป็นถ่าน
4. ทำการคัดแยกเอาส่วนที่เป็นผงและส่วนที่เผาไหม้ไม่ดีออก
5. ทำการบดถ่านมูลวัวและผสมแป้งมันสำปะหลัง ผงถ่านจากไม้ไผ่ในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน เพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสม
6. นำถ่านที่ผสมเสร็จแล้วเข้าสู่กระบวนการอัดแท่งด้วยเครื่องอัดสกรูแบบแรงดันสูง
7. นำถ่านอัดแท่งเข้าเครื่องอบแห้ง ที่ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และวัดความชื้นไม่เกินร้อยละ 8 (ทำการวัดโดยใช้ Humidity meter)

ตอนที่ 2 การวิเคราะห์คุณสมบัติของเชื้อเพลิงแข็ง

1. วิเคราะห์สมบัติทางด้านเชื้อเพลิงตามมาตรฐาน ASTM ดังนี้
   1.1 การหาปริมาณความชื้น (Moisture) ตาม ASTM D3173
      1.1.1 เครื่องมือ
         - ตู้อบ
         - ถาดอะลูมิเนียม
         - MATTLER TOLEDO Moisture Analyzer HX204
      1.1.2 วิธีการทดลอง
         - เตรียมถาดอะลูมิเนียมวางลงในเครื่องวัดค่าความชื้น MATTLER TOLEDO Moisture Analyzer HX204 และปรับค่าเริ่มต้นให้เป็นศูนย์
         - เตรียมตัวอย่างสารปริมาณ 3 กรัมลงบนถาดอะลูมิเนียมสำหรับทำการทดสอบ
         - ทำการทดสอบโดยเครื่องจนถึงอุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส จากนั้นเครื่องจะทำการคำนวณค่าความชื้นจากสารตัวอย่าง
   1.2 การหาปริมาณสารระเหย (Volatile matter) ในสารตัวอย่าง ตาม ASTM D 3175
      1.2.1 เครื่องมือ
         1. เตาอบแบบตั้ง
         2. ถ้วยพร้อมฝา
         3. โถดูดความชื้น

1.2.2 วิธีการทดลอง

1. เผาถ้วยพรอมฝาที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียสประมาณ 30 นาที แล้วนำไปทำใหเย็นโดยใสในโถดูดความชื้น (Desiccator) ก่อนนำไปชั่งน้ำหนัก
2. ชั่งตัวอยางประมาณ 1 กรัม ใสลงไปในถ้วยแลวปดฝา
3. จากนั้นนำถ้วยพร้อมฝาใสลงในเตาเผา โดยไว้บริเวณปากเตา 3 นาที นำลงไปในเตา 7 นาที
4. นำออกจากเตาเผา ทิ้งใหเย็นในโถดูดความชื้นแล้วนำไปชั่งน้ำหนัก และคำนวณปริมาณสารระเหยในตัวอย่าง

1.2.3 การคำนวณ

ร้อยละของน้ำหนักที่หายไป = [(A – B) / A] x 100

โดยที่ A คือ น้ำหนักของสารตัวอย่างที่ใช้ (กรัม)

B คือ น้ำหนักของสารตัวอย่างหลังจากผ่านความร้อน (กรัม)

ร้อยละของสารระเหย = C – D

โดยที่ C คือ น้ำหนักที่หายไป (ร้อยละ)

D คือ ความชื้น (ร้อยละ)

1.3 การหาปริมาณเถ้า (Ash) ตาม ASTM D3174

1.3.1 เครื่องมือ

1. เตาอบ
2. ถ้วย
3. เตาอบอุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส
4. โถดูดความชื้น

1.3.2 วิธีการทดลอง

1. นำถ้วยที่สะอาดไปอบ 30 นาทีที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส แล้วนำไปพักในโถดูดความชื้น 15 นาที แล้วนำไปชั่งน้ำหนัก
2. ใส่ตัวอย่าง 1 กรัม แล้วนำไปชั่งน้ำหนัก
3. นำไปอบในเตาอบที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง แล้วทำให้เย็นในโถดูดความชื้น แล้วทำการชั่งน้ำหนัก

1.3.3 การคำนวณ

ร้อยละของเถ้าในตัวอย่าง = [(A – B)/C] x 100

โดยที่ A คือ น้ำหนักรวมของภาชนะพร้อมฝาและเถ้าที่เหลือ (กรัม)

B คือ น้ำหนักของภาชนะเปล่าและฝา (กรัม)

C คือ น้ำหนักของสารตัวอย่างที่ใช้ (กรัม)

1.4 การหาปริมาณคาร์บอนคงตัว (Fixed Carbon) ตาม ASTM D 3172

ร้อยละของคาร์บอนคงตัว = 100 – (ร้อยละของความชื้น + ร้อยละของเถ้า + ร้อยละของสารระเหย)

1.5 การหาความร้อน (Heating Value) ตาม ASTM D 5865

1.5.1 เครื่องมือ

1. Oxygen Bomb Calorimeter
2. บีกเกอร์
3. บิวเรต

1.5.2 วิธีการทดลอง

1. ตัดลวด (Fuse Wire) ประมาณ 10 เซนติเมตร ผูกที่ปลายด้านล่างทั้งสองของแท่งเหล็ก
2. ใส่ตัวอย่างลงไปในถ้วยประมาณ 1 กรัม
3. วางถ้วยลงบนแกน แล้วดัดลวดให้สัมผัสตัวอย่างที่อยู่ในถ้วย และเติมน้ำกลั่น 1 มิลลิลิตรลงในตัวบอมบ์
4. ประกอบฝาบอมบ์กับตัวบอมบ์ นำไปอัดออกซิเจนให้ได้ความดันประมาณ 30 บรรยากาศ นำไปวางในถังบรรจุบอมบ์
5. ใส่น้ำกลั่นที่อุณหภูมิห้องลงในถัง (Bucker) ปริมาณ 2 ลิตร แล้วเสียบสายไฟที่ใช้ในการจุดระเบิด 2 เส้น เข้ากับตัวบอมบ์แล้วปิดฝาเครื่อง

6. เปิดสวิตช์ อุ่นอุณหภูมิของน้ำในถังบรรจุบอมบ์ (Bucket) กับน้ำที่อยู่ในตัวหุ้ม (Jacket) เมื่ออุณหภูมิทั้งสองมีค่าใกล้เคียงกัน กดปุ่มจุดระเบิด บันทึกค่าอุณหภูมิ เริ่มต้น อุณหภูมิเพิ่มขึ้นจนกระทั่งคงที่ จึงยุติการทดลอง
7. นำตัวบอมบ์ออก มาปล่อยก๊าซออกอย่างช้า ๆ
8. ล้างฝาตัวบอมบ์และถ้วยที่บรรจุตัวอย่าง ด้วยน้ำกลั่น
9. ทำการวัดความยาวลวด ที่เหลือ แล้วป้อนค่าเข้าสู่เครื่อง เครื่องจะทำการคำนวณแล้วพิมพ์ค่าความร้อนของตัวอย่างออกมาทางเครื่องพิมพ์

บทที่ 4

ผลการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาทดสอบคุณสมบัติของมูลวัวและทดลองทำการผลิตตัวอย่างถ่านอัดแท่งจากมูลวัวนมแห้งตามวิธีการและอัตราส่วนที่กำหนดไว้ จากนั้นนำตัวอย่างถ่านอัดแท่งไปทำการทดสอบเก็บข้อมูลเพื่อเปรียบเทียบองค์ประกอบและค่าความร้อน โดยในการศึกษาวิจัยแบ่งเป็น 5 ตอน คือ การวิเคราะห์คุณสมบัติของวัตถุดิบ การวิเคราะห์คุณสมบัติของมูลวัวนมอัดแท่งที่ไม่ผ่านและผ่านกระบวนการคาร์บอไนเซชัน การวิเคราะห์คุณสมบัติหลังการทำมูลวัวนมอัดแท่งที่อัตราส่วนผสมของผงถ่านมูลวัวนมแห้งและผงถ่านไม้ไผ่แตกต่างกัน การวิเคราะห์คุณสมบัติหลังการทำถ่านมูลวัวนมอัดแท่งที่ปริมาณของตัวประสานแตกต่างกัน และการวิเคราะห์ค่าความร้อนจากการอัดเม็ดมูลวัวด้วยค่าความดันที่แตกต่างกัน

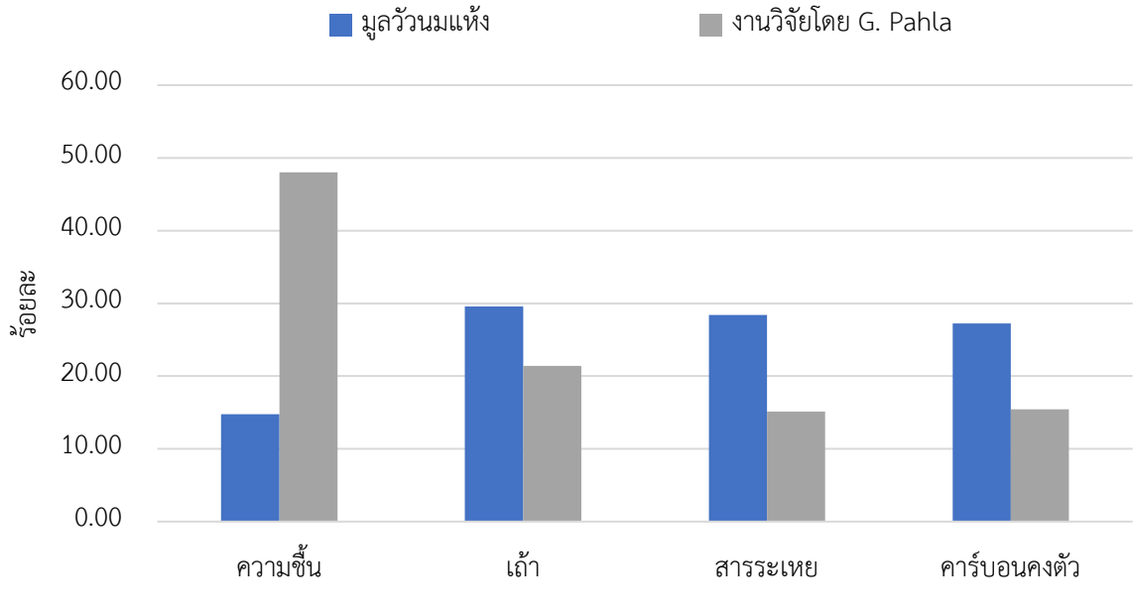
ตอนที่ 1 การวิเคราะห์คุณสมบัติของวัตถุดิบ

มูลวัวนมแห้งถูกวิเคราะห์ทั้ง 2 แบบ คือ การวิเคราะห์โดยประมาณ (Proximate analysis) และการวิเคราะห์โดยละเอียด (Ultimate analysis) เพื่อหาองค์ประกอบของความชื้น เถ้า สารระเหย และปริมาณคาร์บอนคงตัว และค่าความร้อน

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบและค่าความร้อนของมูลวัวนมแห้งที่ใช้ในการทดลอง

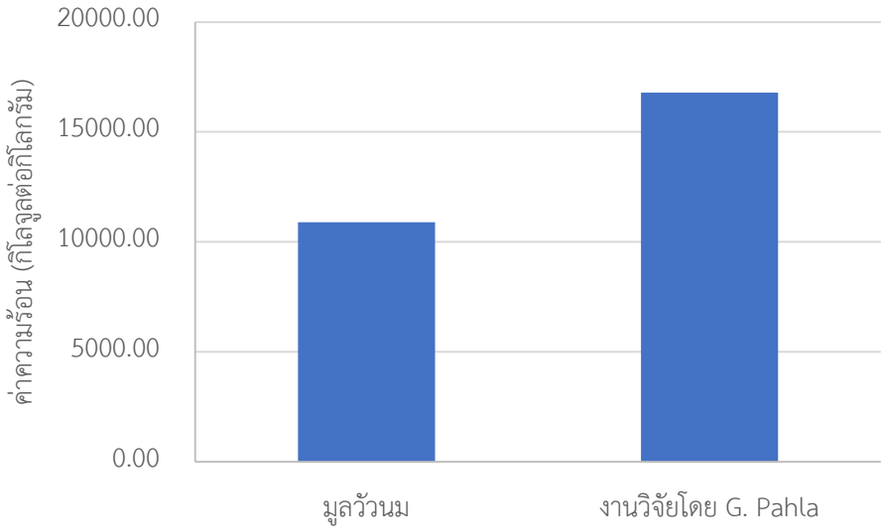
ตัวอย่าง	**Proximate analysis (ร้อยละ)**				**ค่าความร้อน (กิโลจูลต่อกิโลกรัม)**	**อ้างอิง**
	ความชื้น	**เถ้า**	**สารระเหย**	**คาร์บอนคงตัว**		
มูลวัวนมแห้ง	14.75	29.59	28.42	27.24	10899.56	งานวิจัยนี้
มูลวัว	48.00	21.41	15.13	15.46	16780.00	G. Pahla (2017)

จากตารางที่ 4.1 แสดงคุณสมบัติของมูลวัวนมที่ได้รับการอนุเคราะห์จากองค์การส่งเสริมกิจการโคนมแห่งประเทศไทย อำเภอมวกเหล็ก จังหวัดสระบุรี พบว่า มีความชื้น เถ้า สารระเหย และปริมาณคาร์บอนคงตัวในปริมาณร้อยละ 14.75 29.59 28.42 และ 27.24 ตามลำดับ และมีค่าความร้อนประมาณ 10899.56 กิโลจูลต่อกิโลกรัม เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับคุณสมบัติของมูลวัวแห้งจากงานวิจัยของ G. Pahla [19] พบว่ามูลวัวนมที่ใช้ในการทำวิจัยมีความชื้นต่ำกว่างานวิจัยมาก ในขณะที่มีเถ้า สารระเหย และคาร์บอนคงตัวมากกว่างานวิจัย โดยนำมาสร้างแผนภูมิแสดงค่าคุณสมบัติทางกายภาพของมูลวัวได้ดังรูปที่ 20



รูปที่ 20 คุณสมบัติทางกายภาพของมูลวัว

รูปที่ 20 แสดงคุณสมบัติทางกายภาพของมูลวัวนมที่ได้รับการอนุเคราะห์จากองค์การส่งเสริมกิจการโคนมแห่งประเทศไทย อำเภอมวกเหล็ก จังหวัดสระบุรี พบว่า มีความชื้น เถ้า สารระเหย และปริมาณคาร์บอนคงตัวในปริมาณร้อยละ 14.75 29.59 28.42 และ 27.24 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับคุณสมบัติของมูลวัวแห้งจากงานวิจัยของ G. Pahla [19] พบว่ามูลวัวนมที่ใช้ในการทำวิจัยมีความชื้นต่ำกว่างานวิจัย ในขณะที่มีเถ้า สารระเหย และคาร์บอนคงตัวมากกว่างานวิจัย



รูปที่ 21 ค่าความร้อนของมูลวัวนมในการทำวิจัยและจากงานวิจัยอื่น ๆ

จากรูปที่ 21 จะเห็นได้ว่าค่าความร้อนของมูลวัวนมที่ใช้ในการทำวิจัยมีค่าความร้อน 10899.56 กิโลจูลต่อกิโลกรัมมีค่าน้อยกว่าผลจากงานวิจัยของ G. Pahla [19] ที่มีค่าความร้อนของมูลวัวนมอยู่ที่ 16780.00 กิโลจูลต่อกิโลกรัม

ตารางที่ 4.2 องค์ประกอบของมูลวัวนมแห้งที่ใช้ในการทดลอง

ตัวอย่าง	**Ultimate analysis (ร้อยละ)**					**อ้างอิง**
	คาร์บอน	**ไฮโดรเจน**	**ไนโตรเจน**	**ซัลเฟอร์**	**ออกซิเจน**	
มูลวัวนมแห้ง	27.09	4.75	2.01	0.42	65.73	งานวิจัยนี้
มูลวัว	38.00	3.94	1.21	0.00	56.85	G. Pahla (2017)

จากตารางที่ 4.2 แสดงปริมาณของธาตุองค์ประกอบของมูลวัวนมที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง CHNS analyzer พบว่ามีปริมาณคาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน และ ซัลเฟอร์ ในปริมาณร้อยละ 27.09 4.75 2.01 และ 0.42 ตามลำดับ และสามารถนำมาคำนวณหาร้อยละของออกซิเจนได้เท่ากับร้อยละ 65.73 ผลที่ได้จากการวิเคราะห์นำไปเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ G. Pahla [19] พบว่ามูลวัวในงานวิจัยมีปริมาณคาร์บอนมากกว่ามูลวัวที่ใช้ในการทำวิจัย และมูลวัวในงานวิจัยมีปริมาณออกซิเจนน้อยกว่ามูลวัวที่ใช้ในการทำวิจัย

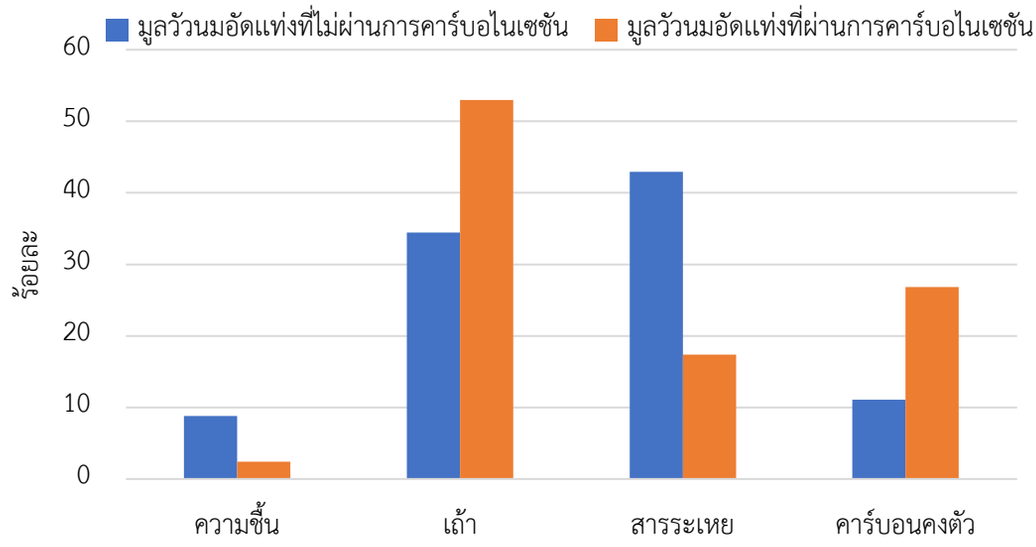
ตอนที่ 2 การวิเคราะห์คุณสมบัติของมูลวัวนมอัดแท่งที่ไม่ผ่านและผ่านการคาร์บอไนเซชัน

ผลการวิเคราะห์โดยประมาณ (Proximate analysis) และค่าความร้อนที่ได้จากมูลวัวนมอัดแท่งที่นำมาใช้ในการวิจัย มีการเปรียบเทียบระหว่างมูลวัวนมอัดแท่งที่ไม่ผ่านและผ่านกระบวนการคาร์บอไนเซชัน โดยผลผลิตที่ได้จากการทำคาร์บอไนเซชันคำนวณได้จากน้ำหนักของมูลวัวนมอัดแท่งเท่ากับร้อยละ 42.74

ตารางที่ 4.3 องค์ประกอบและค่าความร้อนของมูลวัวนมอัดแท่งที่ไม่ผ่านและผ่านการคาร์บอไนเซชัน

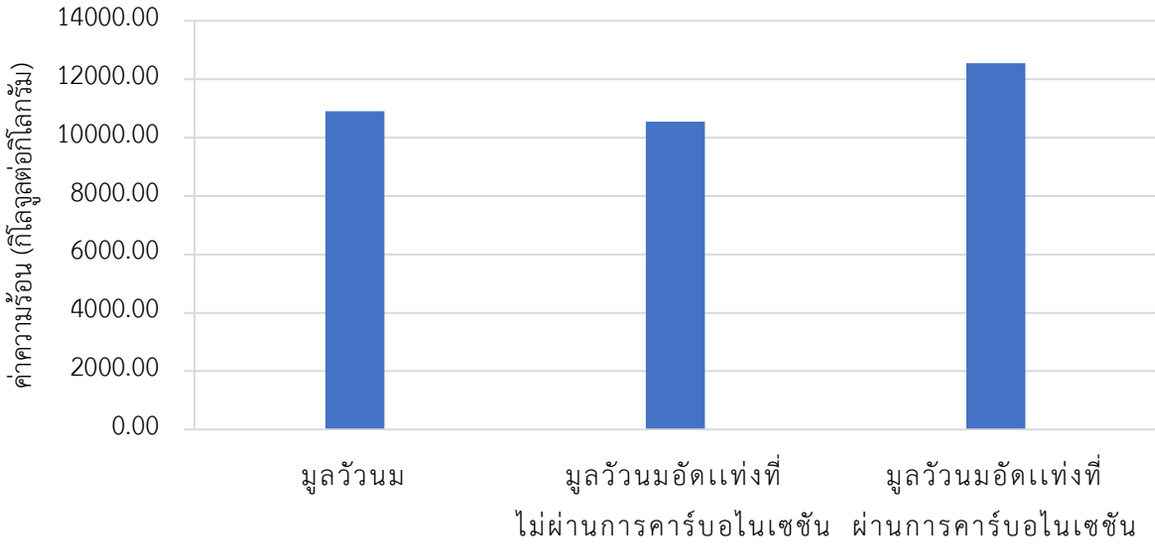
ตัวอย่าง	Proximate analysis (ร้อยละ)				ค่าความร้อน (กิโลจูลต่อกิโลกรัม)
	ความชื้น	เถ้า	สารระเหย	คาร์บอนคงตัว	
มูลวัวอัดแท่งที่ไม่ผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชัน	11.55	34.45	42.92	11.07	10549.16
มูลวัวอัดแท่งที่ผ่านกระบวนการคาร์บอไนเซชัน	2.85	52.95	17.40	26.81	12547.02

จากตารางที่ 4.3 แสดงคุณสมบัติทางกายภาพของมูลวัวนมอัดแท่งที่ไม่ผ่านและผ่านกระบวนการคาร์บอไนเซชัน พบว่า หลังจากการผ่านกระบวนการคาร์บอไนเซชันมีปริมาณความชื้นและสารระเหยลดลง ในขณะที่ปริมาณเถ้าและคาร์บอนคงตัวมีปริมาณเพิ่มขึ้น รวมถึงค่าความร้อนมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งค่าความร้อนที่เพิ่มมากขึ้น โดยนำผลมาสร้างแผนภูมิแสดงองค์ประกอบทางกายภาพของมูลวัวนมอัดแท่งที่ผ่านและไม่ผ่านกระบวนการคาร์บอไนเซชันได้ดังรูปที่ 22 และสามารถแสดงค่าความร้อนในรูปที่ 23



รูปที่ 22 องค์ประกอบของมูลวัวนมที่ไม่ผ่านและผ่านกระบวนการคาร์บอไนเซชัน

รูปที่ 22 แสดงการเปรียบเทียบองค์ประกอบของมูลวัวนมอัดแท่งที่ไม่ผ่านและผ่านกระบวนการคาร์บอไนเซชัน พบว่า เมื่อผ่านกระบวนการคาร์บอไนเซชัน มูลวัวนมอัดแท่งมีปริมาณความชื้นและสารระเหยลดลงหลังจากการผ่านความร้อน ในขณะที่ปริมาณเถ้าและคาร์บอนคงตัวมีปริมาณเพิ่มขึ้น



รูปที่ 23 ค่าความร้อนของมูลวัวนมแห้ง มูลวัวนมที่ไม่ผ่านและผ่านกระบวนการคาร์บอไนเซชัน

รูปที่ 23 แสดงการเปรียบเทียบค่าความร้อนของมูลวัวนมแห้ง มูลวัวนมที่ไม่ผ่านและผ่านกระบวนการคาร์บอไนเซชัน พบว่า หลังจากผ่านกระบวนการคาร์บอไนเซชัน ค่าความร้อนของมูลวัวนมมีค่าเพิ่มมากขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยของ Michael Lubwama [16]

จะเห็นได้ว่าค่าความชื้นและสารระเหยของมูลวัวนมอัดแท่งที่ไม่ผ่านกระบวนการคาร์บอไนเซชันมีมากกว่า ส่งผลให้ค่าความร้อนมีค่าน้อยกว่า โดยเมื่อความชื้นมากจะมีการสูญเสียความร้อนระหว่างการเผาไหม้ และในกรณีของสารระเหยก็เช่นกัน

ตารางที่ 4.4 ลักษณะทางกายภาพของถ่านมูลวัวนมอัดแท่งที่ไม่ผ่านและผ่านกระบวนการคาร์บอไนเซชัน

มูลวัวนมอัดแท่งที่ไม่ผ่านกระบวนการคาร์บอไนเซชัน	**มูลวัวนมอัดแท่งที่ผ่านกระบวนการคาร์บอไนเซชัน**

จากตารางที่ 4.4 แสดงลักษณะทางกายภาพของถ่านมูลวัวนมอัดแท่งที่ไม่ผ่านและผ่านกระบวนการคาร์บอไนเซชัน โดยจากลักษณะภายนอก สีของมูลวัวนมอัดแท่งทั้งสองมีความแตกต่างกัน มูลวัวนมอัดแท่งที่ไม่ผ่านกระบวนการคาร์บอไนเซชันมีสีน้ำตาล ในขณะที่มูลวัวนมอัดแท่งที่ผ่านกระบวนการคาร์บอไนเซชันหลังจากผ่านกระบวนการจะส่งผลให้มีลักษณะเป็นถ่านมูลวัวนมและมีสีดำ

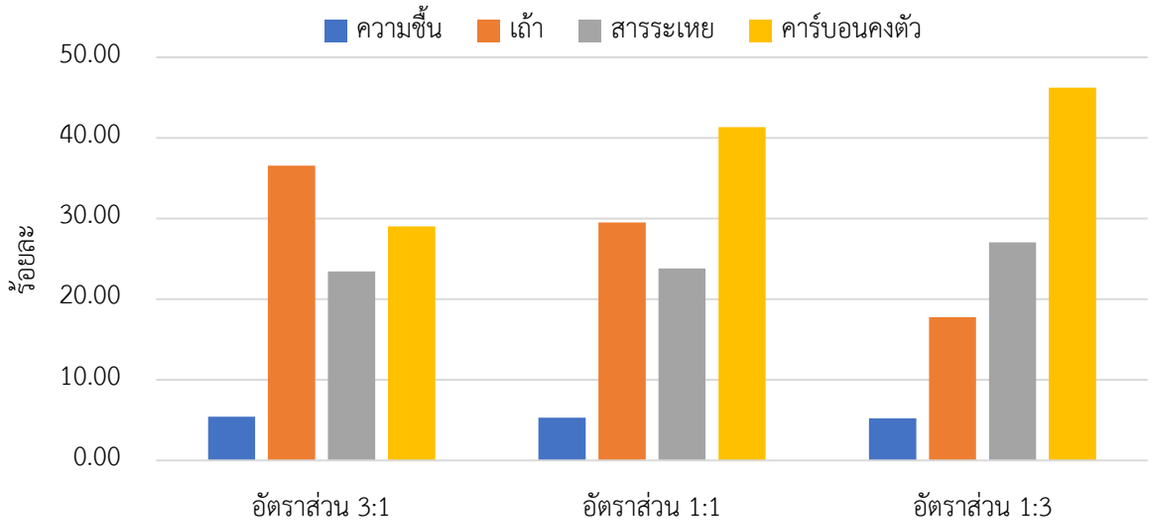
ตอนที่ 3 การวิเคราะห์คุณสมบัติหลังการทำมูลวัวนมอัดแท่ง ที่อัตราส่วนผสมของผงถ่านมูลวัวนมและผงถ่านไม้ไผ่แตกต่างกัน

ในการอัดแท่งเพื่อทำถ่านมูลวัวนม ทำการผสมผงถ่านมูลวัวนมและผงถ่านจากไม้ไผ่เพื่อช่วยในการขึ้นรูปอัดแท่งถ่านมูลวัว โดยทำการอัดที่อัตราส่วนผงถ่านมูลวัวนมต่อผงถ่านไม้ไผ่ เป็น 3:1 1:1 และ 1:3 ที่ปริมาณของตัวประสานเท่ากัน คือ ร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก

ตารางที่ 4.5 องค์ประกอบและค่าความร้อนของถ่านมูลวัวนมที่อัตราส่วนผสมของมูลวัวนมแห้งและผงถ่านไม้ไผ่ต่าง ๆ

ตัวอย่าง	Proximate analysis (ร้อยละ)				ค่าความร้อน (กิโลจูลต่อกิโลกรัม)
	ความชื้น	เถ้า	สารระเหย	คาร์บอนคงตัว	
อัตราส่วน 3:1	5.43	36.58	23.44	29.05	15962.45
อัตราส่วน 1:1	5.32	29.53	23.83	41.32	18442.04
อัตราส่วน 1:3	5.25	17.79	27.04	46.23	21978.52

จากตารางที่ 4.5 แสดงคุณสมบัติทางกายภาพของถ่านมูลวัวนมอัดแท่งที่มีอัตราส่วนของผงถ่านมูลวัวนมและผงถ่านจากไม้ไผ่แตกต่างกันโดยอัตราส่วน 3:1 1:1 และ 1:3 พบว่า เมื่อมีอัตราส่วนของผงถ่านไม้ไผ่เพิ่มมากขึ้นมีปริมาณเถ้าลดลงอย่างชัดเจน และปริมาณสารระเหยและคาร์บอนคงตัวรวมถึงค่าความร้อนมีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่ปริมาณความชื้นไม่มีความแตกต่างอย่างเป็นนัยสำคัญ และสามารถนำมาแสดงเป็นแผนภูมิได้ดังรูปที่ 24 และ 25



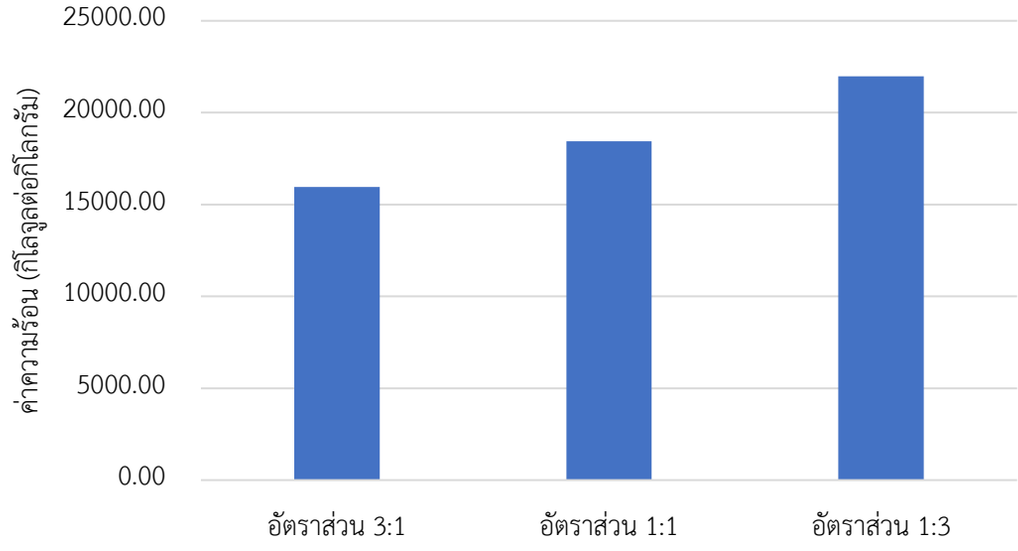
รูปที่ 24 คุณสมบัติของถ่านมูลวัวนมที่อัตราส่วนผสมของผงถ่านมูลวัวนมแห้งและผงถ่านจากไม้ไผ่ต่าง ๆ

รูปที่ 24 แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติของถ่านมูลวัวนมที่อัตราส่วนผสมของผงถ่านมูลวัวนมแห้งและผงถ่านจากไม้ไผ่ 3:1 1:1 และ 1:3 พบว่า เมื่อปริมาณผงถ่านไม้ไผ่มีเพิ่มมากขึ้นมีปริมาณเถ้าลดลงอย่างชัดเจน และปริมาณสารระเหยและคาร์บอนคงตัวรวมถึงค่าความร้อนมีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่ปริมาณความชื้นไม่มีความแตกต่างอย่างเป็นนัยสำคัญ

ตารางที่ 4.6 องค์ประกอบและค่าความร้อนของผงถ่านไม้ไผ่จากศูนย์เชื้อเพลิง อำเภอแก่งคอย จังหวัดสระบุรี

ตัวอย่าง	**Proximate analysis (ร้อยละ)**				**ค่าความร้อน**
	ความชื้น	เถ้า	สารระเหย	คาร์บอนคงตัว	**(กิโลจูลต่อกิโลกรัม)**
ผงถ่านไม้ไผ่	7.11	14.24	24.12	54.53	22838.99

โดยอัตราส่วนผสมของผงถ่านไม้ไผ่แสดงในตารางที่ 4.6 ส่งผลต่อปริมาณเถ้าในถ่าน เมื่ออัตราส่วนของผงถ่านไม้ไผ่เพิ่มขึ้น ทำให้เถ้าลดลง สอดคล้องกับสมบัติเบื้องต้นของถ่านไม้ไผ่ที่มีปริมาณเถ้าน้อยกว่าปริมาณเถ้าของมูลวัว และปริมาณคาร์บอนคงตัวของถ่านไม้ไผ่มากกว่าปริมาณคาร์บอนคงตัวของมูลวัว ดังนั้นเมื่อมีอัตราส่วนผงถ่านไม้ไผ่เพิ่มมากขึ้นจึงส่งผลให้ปริมาณคาร์บอนคงตัวเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย



รูปที่ 25 ค่าความร้อนในมูลวัวนมที่อัตราส่วนผสมของผงถ่านมูลวัวนมแห้งและผงถ่านจากไม้ไผ่ต่าง ๆ

รูปที่ 25 แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติของถ่านมูลวัวนมที่อัตราส่วนผสมของผงถ่านมูลวัวนมแห้งและผงถ่านจากไม้ไผ่ 3:1 1:1 และ 1:3 พบว่า เมื่อมีปริมาณของผงถ่านจากไม้ไผ่เพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ค่าความร้อนจากถ่านมูลวัวนมที่ได้เพิ่มมากขึ้น สอดคล้องกับค่าความร้อนของถ่านไม้ไผ่ที่มีมากกว่าถ่านมูลวัว

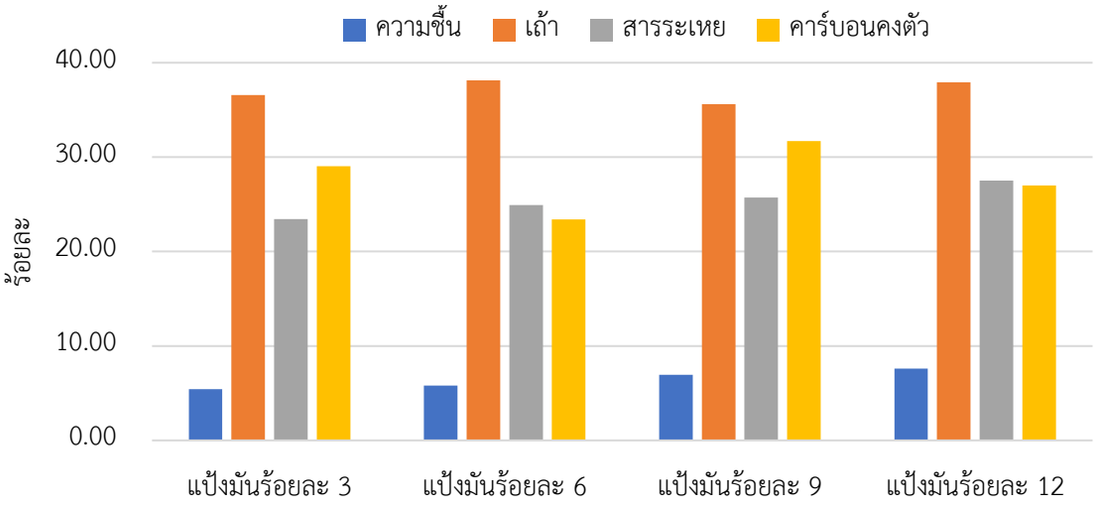
ตอนที่ 4 การวิเคราะห์คุณสมบัติหลังการทำมูลวัวนมอัดแท่ง ที่ปริมาณของตัวประสานแตกต่างกัน

มูลวัวนมที่ผ่านการคาร์บอไนเซชันถูกนำมาผสมกับผงถ่านไม้ไผ่เพื่อช่วยในการขึ้นรูปอัดแท่ง โดยใช้อัตราส่วนของผงถ่านมูลวัวนมต่อผงถ่านไม้ไผ่ 3:1 และวิเคราะห์ปริมาณของตัวประสานที่แตกต่างกันที่สัดส่วนของแป้งมันร้อยละ 3 6 9 และ 12 โดยน้ำหนัก ซึ่งอ้างอิงจากงานวิจัยของลักษมี สุทธิวิไลรัตน์ [18] ซึ่งทำการวิจัยการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งจากเปลือกกล้วย

ตารางที่ 4.7 องค์ประกอบและค่าความร้อนของถ่านมูลวัวนมที่ปริมาณของตัวประสานแตกต่างกัน

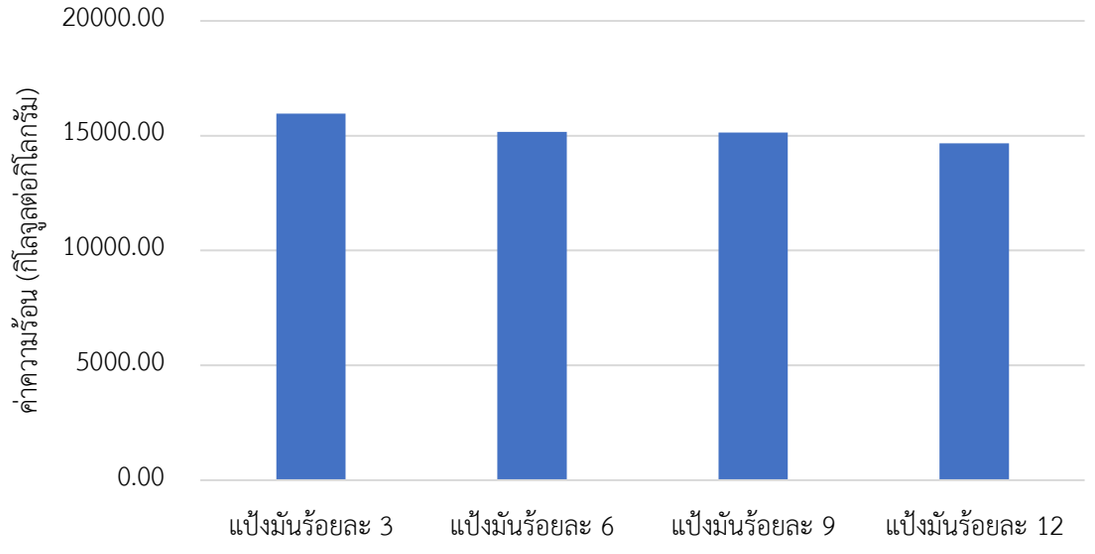
ตัวอย่าง	**Proximate analysis (ร้อยละ)**				**ค่าความร้อน**
	ความชื้น	เถ้า	สารระเหย	คาร์บอนคงตัว	**(กิโลจูลต่อกิโลกรัม)**
แป้งมันร้อยละ 3	5.43	36.58	23.44	29.05	15962.45
แป้งมันร้อยละ 6	5.81	38.12	24.91	23.40	15169.61
แป้งมันร้อยละ 9	6.96	35.60	25.73	31.71	15142.41
แป้งมันร้อยละ 12	7.59	37.92	27.50	27.00	14669.94

จากตารางที่ 4.7 แสดงคุณสมบัติของถ่านมูลวัวนมอัดแท่งที่ปริมาณของตัวประสานแตกต่างกันคือร้อยละ 3 6 9 และ 12 โดยน้ำหนัก พบว่าการเปรียบเทียบองค์ประกอบส่งผลให้ปริมาณความชื้นและสารระเหยในถ่านอัดแท่งเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของแป้งมันเพิ่มขึ้น แต่องค์ประกอบของเถ้าและปริมาณคาร์บอนคงตัวไม่มีการเปลี่ยนแปลงเป็นแนวโน้ม สำหรับการเปรียบเทียบค่าความร้อน ในกรณีที่มีสัดส่วนของแป้งมันร้อยละ 3 มีค่าความร้อนที่สูงกว่าถ่านมูลวัวนมที่ใช้แป้งมันร้อยละ 12 เป็นตัวประสาน สอดคล้องกับงานวิจัยของลักษมี สุทธิวิไลรัตน์ [18] ซึ่งเมื่อตัวประสานเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้มีค่าความร้อนลดลง ดังแสดงในรูปที่ 26 และ 27 สำหรับลักษณะทางกายภาพภายนอกของถ่านมูลวัวที่ถูกอัดแท่งถูกแสดงไว้ตามตารางที่ 4.8



รูปที่ 26 คุณสมบัติของถ่านมูลวัวนมที่สัดส่วนตัวประสานแตกต่างกัน

รูปที่ 26 แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติของถ่านมูลวัวนมที่สัดส่วนตัวประสานแตกต่างกัน พบว่าเมื่อมีสัดส่วนของตัวประสานที่แตกต่างกันในถ่านมูลวัวนมอัดแท่ง ส่งผลให้ปริมาณความชื้นและสารระเหยในถ่านอัดแท่งเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อปริมาณแป้งมันเพิ่มขึ้น แต่เถ้าและคาร์บอนคงตัวไม่มีการเปลี่ยนแปลงเป็นแนวโน้ม



รูปที่ 27 ค่าความร้อนของถ่านมูลวัวนมที่สัดส่วนตัวประสานแตกต่างกัน

รูปที่ 27 แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติของถ่านมูลวัวนมที่สัดส่วนตัวประสานแตกต่างกัน พบว่าเมื่อมีปริมาณของสัดส่วนตัวประสานเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ค่าความร้อนจากถ่านมูลวัวนมที่ลดลง สอดคล้องกับงานวิจัยของลักษมี สุทธิวิไลรัตน์ [18] ซึ่งเมื่อตัวประสานเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้มีค่าความร้อนลดลง จากแผนภูมิจะเห็นว่าสัดส่วนของตัวประสานร้อยละ 3 ให้ค่าความร้อนมากที่สุด รองมาเป็นร้อยละ 6 9 และ 12 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.8 ลักษณะทางกางภาพของถ่านมูลวัวนมอัดแท่งที่มีสัดส่วนของตัวประสานแตกต่างกัน

	ร้อยละ 3	ร้อยละ 6	ร้อยละ 9	ร้อยละ 12
ด้านข้าง				
หน้าตัด				

จากตารางที่ 4.8 พบว่าในการอัดแท่งถ่านมูลวัวนม ที่ตัวประสานร้อยละ 3 จะมีพื้นผิวภายนอกที่หยาบมากที่สุด รองมาเป็นร้อยละ 6 9 และ 12 โดยที่ปริมาณตัวประสานร้อยละ 12 จะมีพื้นผิวภายนอกที่เรียบลื่นมากที่สุด เมื่อเพิ่มปริมาณของแป้งมันที่เป็นตัวประสานให้มากขึ้นจะส่งผลให้พื้นผิวภายนอกของถ่านอัดแท่งมีลักษณะเรียบมากขึ้น

จากค่าความร้อนของถ่านอัดแท่งและลักษณะทางกายภาพของพื้นผิวถ่านอัดแท่งสำหรับถ่านมูลวัวนมที่ปริมาณของตัวประสานแตกต่างกัน ถ่านมูลวัวนมที่อัตราส่วนของผงถ่านมูลวัวนมต่อผงถ่านไม้ไผ่ 3:1 และมีแป้งมัน ร้อยละ 9 โดยน้ำหนักเป็นตัวเลือกที่ดีในการผลิตถ่านมูลวัว เนื่องจากค่าความร้อนของถ่านไม่ต่ำมากเกินไปและพื้นผิวของถ่านอัดแท่งมีลักษณะเรียบเนียน เหมาะสมกับการนำไปใช้งานในอนาคต

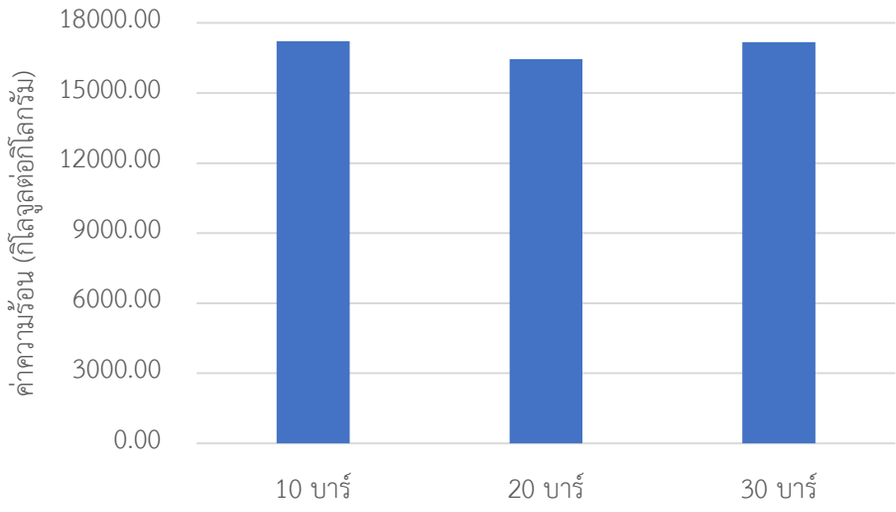
ตอนที่ 5 การวิเคราะห์ค่าความร้อนจากการอัดเม็ดมูลวัวด้วยค่าความดันที่แตกต่างกัน

ผงถ่านมูลวัวนมถูกอัดเป็นเม็ดที่ความดันที่แตกต่างกัน โดยความดันที่ใช้ในการอัดเม็ดคือ 10 20 และ 30 บาร์ โดยสามารถคำนวณหาความหนาแน่นของมูลวัวอัดเม็ดได้จากน้ำหนักหารด้วยปริมาตร [17] หลังจากนั้นทำการหาค่าความร้อนด้วยบอมบ์แคลอริมิเตอร์

ตารางที่ 4.9 ค่าความร้อนจากการอัดเม็ดมูลวัวด้วยค่าความดันที่แตกต่างกัน

ความดัน (บาร์)	น้ำหนัก (กรัม)	ปริมาตร (ลูกบาศก์เซนติเมตร)	ความหนาแน่น (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)	ค่าความร้อน (กิโลจูลต่อกิโลกรัม)
10	0.9398	0.6786	1.38	17216.11
20	0.9984	0.5655	1.77	16455.68
30	0.9720	0.5429	1.79	17187.58

จากตารางที่ 4.9 แสดงค่าความร้อนจากการอัดเม็ดมูลวัวด้วยค่าความดันแตกต่างกัน พบว่าเมื่อหาค่าความร้อนจากมูลวัวอัดเม็ด ค่าความร้อนจากการอัดเม็ดไม่ได้มีการเพิ่มขึ้นหรือลดลงเป็นแนวโน้ม แต่จากการอัดเม็ดมูลวัวด้วยความดันที่เพิ่มมากขึ้นส่งผลให้ความหนาของเม็ดมูลวัวลดลงเล็กน้อยเมื่อมีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากัน จากการคำนวณพบว่า เมื่อความดันที่ใช้ในการอัดเม็ดมูลวัวเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ความหนาแน่นของถ่านอัดเม็ดจากมูลวัวเพิ่มมากขึ้น



รูปที่ 28 ค่าความร้อนของมูลวัวนมอัดเม็ดที่ความดันแตกต่างกัน

จากรูปที่ 28 แสดงค่าความร้อนจากการอัดเม็ดมูลวัวด้วยค่าความดันแตกต่างกัน พบว่าค่าความร้อนจากมูลวัวอัดเม็ด ค่าความร้อนจากการอัดเม็ดไม่ได้มีการเพิ่มขึ้นหรือลดลงเป็นแนวโน้ม

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาความเป็นไปได้ในการนำมูลวัวมาทำเป็นเชื้อเพลิงแข็ง เพื่อเพิ่มมูลค่าให้กับของเสียจากทางปศุสัตว์ และเป็นหนึ่งในพลังงานทางเลือกที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ โดยงานวิจัยนี้ใช้มูลวัวนมมาผ่านกระบวนการคาร์บอไนเซชัน เพื่อเปลี่ยนให้กลายเป็นถ่าน แล้วนำมาทำการอัดแท่งโดยใช้แป้งมันสำปะหลังเป็นตัวประสาน จากการศึกษาพบว่า มูลวัวนมที่ผ่านกระบวนการคาร์บอไนเซชันจะมีค่าความร้อนสูงกว่ามูลวัวนมที่ยังไม่ผ่านกระบวนการคาร์บอไนเซชัน ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Michael Lubwama และคณะที่พบว่า ค่าความร้อนของถ่านอัดแท่งจากเปลือกถั่วลิสงและชานอ้อยมีค่าสูงกว่าถ่านอัดแท่งที่ได้จากการอัดแท่งเปลือกถั่วลิสงที่ไม่ผ่านกระบวนการคาร์บอไนเซชัน และจากการศึกษาตัวแปรทั้งหมดที่มีผลต่อการนำมูลวัวมาทำเป็นเชื้อเพลิงแข็ง พบว่า สภาวะที่ดีที่สุด คือ การนำมูลวัวนมที่ผ่านกระบวนการคาร์บอไนซัน (ถ่านมูลวัวนม) มาผสมกับถ่านไม้ไผ่ในอัตราส่วน 3 : 1 โดยใช้แป้งมันสำปะหลังเป็นตัวประสานในอัตราส่วนร้อยละ 9 ซึ่งลักษณะทางกายภาพของถ่านมูลวัวอัดแท่งที่สภาวะนี้ มีผิวด้านนอกที่เรียบ มีความแข็ง เมื่อตกกระทบพื้นไม่แตก และมีค่าความร้อนอยู่ที่ 15142.41 กิโลจูลต่อกิโลกรัม โดยความดันในการผลิตถ่านมูลวัวอัดเม็ดไม่มีผลต่อค่าความร้อน และค่าความร้อนเฉลี่ยของถ่านมูลวัวอัดเม็ดอยู่ที่ 16953.12 กิโลจูลต่อกิโลกรัม

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ศึกษาชนิดของถ่านจากวัตถุดิบที่เหลือใช้ทางการเกษตรที่ใช้ในการผสมกับถ่านมูลวัว เพื่อพัฒนาประสิทธิภาพทางความร้อนของถ่านมูลวัวนมให้มีค่าใกล้เคียงกับมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน (มผช.) ซึ่งมีค่าความร้อน 5,000 แคลอรีต่อกรัม [25]
2. ศึกษาวิจัยมลภาวะทางด้านสิ่งแวดล้อมของถ่านอัดแท่งจากมูลวัวนมว่าก่อให้เกิดก๊าซชนิดใด ปริมาณมากน้อยเพียงใด รวมถึงผลกระทบที่ส่งผลต่อผู้บริโภคและสิ่งแวดล้อม
3. ศึกษาทำการทดลองระยะเวลาในการใช้งานของถ่านอัดแท่งจากมูลวัวนม
4. ศึกษาการอัดเม็ดมูลวัวนมด้วยความดันที่แตกต่างกันในขั้นตอนก่อนการทำคาร์บอไนเซชัน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของถ่านมูลวัวอัดเม็ด

บรรณานุกรม

[1] G. Zabel, “PEAK PEOPLE: THE INTERRELATIONSHIP BETWEEN POPULATION GROWTH AND ENERGY RESOURCES,” [Online]. Available: https://www.resilience.org/stories/2009-04-20/peak-people-interrelationship-between-population-growth-and-energy-resources/#_Toc227469805. [Accessed 1 February 2019].

[2] ก. กรมปศุสัตว์, “แผนยุทธศาสตร์กรมปศุสัตว์ พ.ศ.๒๕๕๖ - ๒๕๖๐,” [Online]. Available: http://planning.dld.go.th/th/images/stories/section-5/2556/policy_04.pdf. [Accessed 1 February 2019].

[3] Energy Vision, “พลังงานชีวมวล”, [Online]. Available: http://www.energyvision.co.th/14424507/พลังงานชีวมวล . [Accessed 15 March 2020].

[4] Wikipedia., “Cow dung”, [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Cow_dung. [Accessed 15 March 2020].

[5] สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.), ““ไม้” กลายเป็น “ถ่าน””, [Online]. Available: http://nstda.or.th/rural/public/100%20articles-stkc/53.pdf . [Accessed 23 December 2019].

[6] Ketphetcharcoal, “วิธีการเผาถ่านทำอย่างไร”, [Online]. Available: http://www.ketphetcharcoal.com/th/ถ่าน-อัดแท่ง-เผา/. [Accessed 23 December 2019].

[7] Ketphetcharcoal, “วิธีการบดถ่านทำอย่างไร”, [Online]. Available: http://www.ketphetcharcoal.com/th/ถ่าน-อัดแท่ง-บด/. [Accessed 15 March 2020].

[8] Ketphetcharcoal, “วิธีการผสมถ่านทำอย่างไร”, [Online]. Available: http://www.ketphetcharcoal.com/th/ถ่าน-อัดแท่ง-ผสม/. [Accessed 15 March 2020].

[9] Ketphetcharcoal, “วิธีการอัดแท่งถ่านทำอย่างไร”, [Online]. Available: http://www.ketphetcharcoal.com/th/ถ่าน-วิธีอัดแท่ง/. [Accessed 15 March 2020].

[10] Ketphetcharcoal, “การลดปริมาณความชื้น ใน ถ่าน อัดแท่ง ทำอย่างไร”, [Online]. Available: http://www.ketphetcharcoal.com/th/ถ่าน-อัดแท่ง-อบ/. [Accessed 15 March 2020].

[11] อาจารย์ธเนศ ชัยชนะ ศูนย์วิจัยพลังงาน มหาวิทยาลัยแม่โจ้. “เตาเผาถ่าน 200 ลิตร”, [Online]. Available: https://engineer.mju.ac.th/wtms_webpageDetail.aspx?wID=1260. [Accessed 10 March 2020]

[12] กองเคมี กรมวิทยาศาสตร์บริการ, “ถ่านหินและการทดสอบคุณภาพ”, [Online]. Available: http://www.dss.go.th/images/st-article/cp_3_2545_coal.pdf. [Accessed 18 March 2019].

[13] Sciencedirect, “Ultimate analysis”, [Online]. Available: https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/ultimate-analysis. [Accessed 28 March 2020].

[14] Mechanical System Design, “การวิเคราะห์และทดสอบเชื้อเพลิง”, [Online]. Available: http://www.mechdesign.info/2019/08/05/การวิเคราะห์และทดสอบเช/. [Accessed 28 March 2020].

[15] M. Iftikhar, A. Asghar, N. Ramzan, B. Sajjadi and W.-y. Chen, "Biomass densification: Effect of cow dung on the physicochemical properties of wheat straw and rice husk based biomass pellets," vol. 122, pp. 1 - 16, 2019.

[16] M. Lubwama and V. A. Yiga, "Development of groundnut shells and bagasse briquettes as sustainable fuel sources for domestic cooking applications in Uganda," Renewable Energy, vol. 111, pp. 532 - 542, 2017.

[17] ส. บุตรเสรีชัย, ว. จันทร์เวียง and ฐ. คล่องวาจา, "การศึกษาและปรับปรุงคุณสมบัติของถ่านอัดเม็ดจากมูลวัวเพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงแข็ง," วิศวกรรมสารเกษมบัณฑิต, pp. 135 -147, 2561.

[18] ล. สุทธิวิไลรัตน์, ป. ภาคอรรถ, and ข. สิทตรีสอาด, "การผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งจากเศษวัสดุชีวมวล".

[19] G. Pahla, T. Mumvura, F. Ntuli and E. Muzenda, "Energy densification of animal waste lignocellulose biomass and raw biomass," South African Journal of Chemical Engineering, vol. 24, pp. 168-175, 2017.

[20] Indiamart, “Acutek Black Grain Moisture Meter, Warranty: 1 Year, Model Name/Number: Md-7822”, [Online]. Available: https://www.indiamart.com/proddetail/grain-moisture-meter-21688385055.html. [Accessed 2 May 2020].

[21] ProLab Systems, “Modular Vertical Tube Furnace – GVA / GVC”, [Online]. Available: https://prolabsystems.com/wp/product/modular-vertical-tube-furnace-gva-gvc/. [Accessed 2 May 2020].

[22] Indiamart, “Silicon Carbide Electric Muffle Furnace, Material Loading Capacity (T): 200 to 500 Kg”, [Online]. Available: https://www.indiamart.com/proddetail/muffle-furnace-2473923562.html. [Accessed 2 May 2020].

[23] บริษัท มอร์ แดน เซลส์ แอนด์ เซอร์วิส จำกัด, “Hot Air Oven ED115”, [Online]. Available: https://www.morethansale.com/17311476/ed115. [Accessed 2 May 2020].

[24] myskinrecipes, “โถดูดความชื้นแก้ว Desiccator 240mm”, [Online]. Available: https://www.myskinrecipes.com/shop/th/โถดูดความชื้นแก้ว-desiccator/6284-โถดูดความชื้นแก้ว-desiccator.html. [Accessed 2 May 2020].

[25] มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน, “ถ่านอัดแท่ง”, [Online]. Available: http://tcps.tisi.go.th/pub/tcps238_47.pdf. [Accessed 2 April 2020].

ภาคผนวก

1. ตัวอย่างการคำนวณ

1.1 การคำนวณร้อยละของสารระเหย สามารถคำนวณได้จาก

ร้อยละของน้ำหนักที่หายไป = [(A – B) / A] x 100

โดยที่ A คือ น้ำหนักของสารตัวอย่างที่ใช้ (กรัม)

B คือ น้ำหนักของสารตัวอย่างหลังจากผ่านความร้อน (กรัม)

ร้อยละของสารระเหย = C – D

โดยที่ C คือ น้ำหนักที่หายไป (ร้อยละ)

D คือ ความชื้น (ร้อยละ)

ดังนั้น ร้อยละน้ำหนักที่หายไป = [(1.005 - 0.419)/1.005] x 100

= 58.26

ร้อยละสารระเหย = 58.26 – 15.06

= 43.20

1.2 การคำนวณร้อยละของเถ้า สามารถคำนวณได้จาก

ร้อยละของเถ้าในตัวอย่าง = [(A – B)/C] x 100

โดยที่ A คือ น้ำหนักรวมของภาชนะพร้อมฝาและเถ้าที่เหลือ (กรัม)

B คือ น้ำหนักของภาชนะเปล่าและฝา (กรัม)

C คือ น้ำหนักของสารตัวอย่างที่ใช้ (กรัม)

ดังนั้น ร้อยละเถ้า = [(30.101 - 29.803)/1.000] x 100

= 29.80

1.3 การคำนวณร้อยละของคาร์บอนคงตัว สามารถคำนวณได้จาก

ร้อยละของคาร์บอนคงตัว = 100 – (ร้อยละของความชื้น + ร้อยละของเถ้า + ร้อยละของสารระเหย)

ดังนั้น ร้อยละคาร์บอนคงตัว = 100 – (15.06 + 29.80 +43.20)

= 11.94

ตอนที่ 1 การวิเคราะห์คุณสมบัติของวัตถุดิบ

ตาราง A. 1 ร้อยละของความชื้นในตัวอย่าง

ตัวอย่าง	น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบ	ร้อยละความชื้น
ครั้งที่ 1	3.003	15.06
ครั้งที่ 2	3.005	14.88
ครั้งที่ 3	3.006	14.41
ครั้งที่ 4	3.000	14.70
ครั้งที่ 5	3.002	14.69
ค่าเฉลี่ย		**14.75**

ตาราง A. 2 ร้อยละของเถ้าในตัวอย่าง

ตัวอย่าง	น้ำหนักภาชนะเปล่า	น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบ	น้ำหนักตัวอย่างหลังอบ+ภาชนะ	น้ำหนักตัวอย่างหลังอบ	ร้อยละเถ้า
ครั้งที่ 1	29.803	1.000	30.101	0.298	29.80
ครั้งที่ 2	29.423	1.001	29.719	0.297	29.64
ครั้งที่ 3	30.277	1.001	30.570	0.294	29.34
ครั้งที่ 4	27.092	1.001	27.391	0.299	29.84
ครั้งที่ 5	29.723	1.001	30.025	0.302	30.23
ค่าเฉลี่ย					**29.59**

ตาราง A. 3 ร้อยละของสารระเหยในตัวอย่าง

ตัวอย่าง	น้ำหนักภาชนะเปล่า	น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบ	น้ำหนักตัวอย่างหลังอบ+ภาชนะ	น้ำหนักตัวอย่างหลังอบ	ร้อยละน้ำหนักที่หายไป	ร้อยละสารระเหย
ครั้งที่ 1	38.257	1.005	38.677	0.419	58.26	43.20
ครั้งที่ 2	39.358	1.003	39.776	0.419	58.26	43.38
ครั้งที่ 3	39.573	1.005	40.002	0.429	57.33	42.92
			ค่าเฉลี่ย			**28.42**

ตาราง A. 4 ค่าความร้อนในตัวอย่าง

ตัวอย่าง	ค่าความร้อน				
	ครั้งที่ 1	**ครั้งที่ 2**	**ครั้งที่ 3**	**ค่าเฉลี่ย**	**หน่วย**
มูลวัว(ก่อนเผา)	2613.98	2607.86	2593.33	2605.06	แคลอรีต่อกรัม
	10936.89	10911.29	10850.49	10899.56	กิโลจูลต่อกิโลกรัม

ตอนที่ 2 การวิเคราะห์คุณสมบัติของมูลวัวนมอัดแท่งที่ไม่ผ่านและผ่านการคาร์บอไนเซชัน

ตาราง A. 5 ร้อยละผลผลิตที่ได้จากการทำคาร์บอไนเซชัน

ตัวอย่าง	น้ำหนักตัวอย่างก่อนเผา	น้ำหนักตัวอย่างหลังเผา	ผลผลิต
เตา 1	26.93	12.76	47.38
เตา 2	33.62	12.64	37.60
เตา 3	26.75	11.57	43.25
	ค่าเฉลี่ย		**42.74**

ตาราง A. 6 ร้อยละของความชื้นในตัวอย่าง

ตัวอย่าง			**น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบ**	**ร้อยละความชื้น**
ก่อนเผา	**เตา 2**	ครั้งที่ 1	3.002	8.80
		ครั้งที่ 2	3.000	8.70
		ครั้งที่ 3	3.001	8.86
		ครั้งที่ 4	3.000	8.83
		ครั้งที่ 5	3.001	8.82
	ค่าเฉลี่ย			**8.80**
	เตา 3	ครั้งที่ 1	3.004	14.82
		ครั้งที่ 2	2.992	14.41
		ครั้งที่ 3	3.005	14.18
		ครั้งที่ 4	2.997	13.91
		ครั้งที่ 5	3.002	14.20
	ค่าเฉลี่ย			**14.30**
หลังเผา	**เตา 1**	ครั้งที่ 1	3.005	2.50
		ครั้งที่ 2	3.001	2.47
		ครั้งที่ 3	3.002	2.40
		ครั้งที่ 4	3.005	2.43
		ครั้งที่ 5	3.003	2.43
	ค่าเฉลี่ย			**2.46**
	เตา 2	ครั้งที่ 1	3.008	2.56
		ครั้งที่ 2	3.005	2.33
		ครั้งที่ 3	3.005	2.40
		ครั้งที่ 4	3.008	2.26
		ครั้งที่ 5	3.003	2.33
	ค่าเฉลี่ย			**2.38**
	เตา 3	ครั้งที่ 1	3.013	3.85
		ครั้งที่ 2	3.006	3.76
		ครั้งที่ 3	3.002	3.67
		ครั้งที่ 4	3.000	3.63
		ครั้งที่ 5	3.005	3.63
	ค่าเฉลี่ย			**3.71**

ตาราง A. 7 ร้อยละของเถ้าในตัวอย่าง

ตัวอย่าง			น้ำหนักภาชนะเปล่า	น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบ	น้ำหนักตัวอย่างหลังอบ+ภาชนะ	น้ำหนักตัวอย่างหลังอบ	ร้อยละเถ้า
ก่อนเผา	เตา 2	ครั้งที่ 1	29.802	1.000	30.168	0.366	36.60
		ครั้งที่ 2	29.422	1.000	29.786	0.363	36.35
		ครั้งที่ 3	30.275	1.000	30.638	0.363	36.25
		ครั้งที่ 4	27.091	1.001	27.455	0.364	36.38
		ครั้งที่ 5	29.724	1.001	30.085	0.361	36.08
				ค่าเฉลี่ย			**36.33**
	เตา 3	ครั้งที่ 1	29.801	1.000	30.133	0.332	33.20
		ครั้งที่ 2	29.420	1.000	29.743	0.323	32.30
		ครั้งที่ 3	30.713	1.001	31.040	0.327	32.68
		ครั้งที่ 4	27.090	1.000	27.411	0.322	32.15
		ครั้งที่ 5	29.722	1.000	30.047	0.326	32.55
				ค่าเฉลี่ย			**32.58**
หลังเผา	เตา 1	ครั้งที่ 1	19.766	1.000	20.288	0.522	52.20
		ครั้งที่ 2	20.420	1.000	20.946	0.526	52.60
		ครั้งที่ 3	19.025	1.001	19.547	0.522	52.17
		ครั้งที่ 4	20.667	1.000	21.187	0.520	52.00
		ครั้งที่ 5	21.349	1.000	21.871	0.522	52.15
				ค่าเฉลี่ย			**52.22**
	เตา 2	ครั้งที่ 1	19.766	1.001	20.297	0.531	53.07
		ครั้งที่ 2	20.421	1.001	20.953	0.532	53.17
		ครั้งที่ 3	19.026	1.001	19.558	0.532	53.12
		ครั้งที่ 4	20.668	1.000	21.202	0.534	53.40
		ครั้งที่ 5	21.349	1.000	21.883	0.534	53.35
				ค่าเฉลี่ย			**53.22**

ตัวอย่าง			น้ำหนักภาชนะเปล่า	น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบ	น้ำหนักตัวอย่างหลังอบ+ภาชนะ	น้ำหนักตัวอย่างหลังอบ	ร้อยละเถ้า
หลังเผา	เตา 3	ครั้งที่ 1	19.767	1.000	20.304	0.537	53.65
		ครั้งที่ 2	20.421	1.001	20.957	0.535	53.52
		ครั้งที่ 3	19.026	1.000	19.556	0.529	52.95
		ครั้งที่ 4	20.667	1.001	21.201	0.534	53.37
		ครั้งที่ 5	21.351	1.000	21.885	0.535	53.45
				ค่าเฉลี่ย			**53.39**

ตาราง A. 8 ร้อยละของสารระเหยในตัวอย่าง

ตัวอย่าง			น้ำหนักภาชนะเปล่า	น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบ	น้ำหนักตัวอย่างหลังอบ+ภาชนะ	น้ำหนักตัวอย่างหลังอบ	ร้อยละน้ำหนักที่หายไป	ร้อยละสารระเหย
ก่อนเผา	เตา 2	ครั้งที่ 1	40.886	1.006	41.366	0.479	52.35	
		ครั้งที่ 2	38.394	1.000	38.865	0.472	52.84	
		ครั้งที่ 3	41.375	1.001	41.854	0.479	52.14	
	ค่าเฉลี่ย						**52.44**	**43.64**
	เตา 3	ครั้งที่ 1	41.810	1.006	42.253	0.443	55.95	
		ครั้งที่ 2	40.661	1.003	41.092	0.431	56.99	
		ครั้งที่ 3	39.933	1.003	40.369	0.436	56.57	
	ค่าเฉลี่ย						**56.50**	**42.20**
หลังเผา	เตา 1	ครั้งที่ 1	39.969	1.007	40.763	0.794	21.13	
		ครั้งที่ 2	39.575	1.006	40.372	0.797	20.75	
		ครั้งที่ 3	41.198	1.005	41.986	0.788	21.60	
	ค่าเฉลี่ย						**21.16**	**18.72**
	เตา 2	ครั้งที่ 1	41.806	1.008	42.614	0.809	19.82	
		ครั้งที่ 2	39.797	1.003	40.613	0.816	18.61	
		ครั้งที่ 3	39.584	1.003	40.403	0.819	18.37	
	ค่าเฉลี่ย						**18.93**	**16.56**

ตัวอย่าง			น้ำหนักภาชนะเปล่า	น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบ	น้ำหนักตัวอย่างหลังอบ+ภาชนะ	น้ำหนักตัวอย่างหลังอบ	ร้อยละน้ำหนักที่หายไป	ร้อยละสารระเหย
หลังเผา	**เตา 3**	ครั้งที่ 1	42.583	1.001	43.380	0.797	20.43	
		ครั้งที่ 2	41.299	1.003	42.095	0.795	20.72	
		ครั้งที่ 3	39.586	1.003	40.381	0.794	20.77	
	ค่าเฉลี่ย						**20.64**	**16.93**

ตาราง A. 9 ร้อยละของคาร์บอนคงตัว

ตัวอย่าง	ก่อนเผา				หลังเผา			
	ครั้งที่ 1	**ครั้งที่ 2**	**ครั้งที่ 3**	**ค่าเฉลี่ย**	**ครั้งที่ 1**	**ครั้งที่ 2**	**ครั้งที่ 3**	**ค่าเฉลี่ย**
ร้อยละคาร์บอนคงตัว	-	11.22	10.92	11.07	26.61	27.84	25.97	26.81

ตาราง A. 10 ค่าความร้อนในตัวอย่าง

ตัวอย่าง		ค่าความร้อน (แคลอรีต่อกรัม)				ค่าเฉลี่ย
		ครั้งที่ 1	**ครั้งที่ 2**	**ครั้งที่ 3**	**ค่าเฉลี่ย**	**(กิโลจูลต่อกิโลกรัม)**
ก่อนเผา	**เตา1**	-	-	-	-	-
	เตา2	2496.99	2557.05	2505.28	2519.77	10542.73
	เตา3	2493.47	2533.12	2541.95	2522.85	10555.59
หลังเผา	**เตา1**	3074.25	3023.25	3041.80	3046.43	12746.28
	เตา2	3092.09	3075.10	3098.75	3088.65	12922.90
	เตา3	2918.63	2823.47	2841.95	2861.35	11971.89

ตอนที่ 3 การวิเคราะห์คุณสมบัติหลังการทำมูลวัวนมอัดแท่ง ที่อัตราส่วนผสมของผงถ่านมูลวัวนมและผงถ่านไม้ไผ่แตกต่างกัน

ตาราง A. 11 ร้อยละของความชื้นในตัวอย่าง

ตัวอย่าง		น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบ	ร้อยละความชื้น
ถ่านมูลวัวนม	ครั้งที่ 1	3.005	5.46
อัตราส่วน 3:1	ครั้งที่ 2	3.004	5.46
	ครั้งที่ 3	3.005	5.49
	ครั้งที่ 4	3.003	5.36
	ครั้งที่ 5	3.003	5.36
		ค่าเฉลี่ย	**5.43**
ถ่านมูลวัวนม	ครั้งที่ 1	3.004	5.39
อัตราส่วน 1:1	ครั้งที่ 2	3.002	5.20
	ครั้งที่ 3	3.008	5.22
	ครั้งที่ 4	3.013	5.48
	ครั้งที่ 5	3.005	5.32
		ค่าเฉลี่ย	**5.32**
ถ่านมูลวัวนม	ครั้งที่ 1	3.005	5.29
อัตราส่วน 1:3	ครั้งที่ 2	3.001	5.26
	ครั้งที่ 3	3.008	5.32
	ครั้งที่ 4	3.003	5.16
	ครั้งที่ 5	3.002	5.20
		ค่าเฉลี่ย	**5.25**

ตาราง A. 12 ร้อยละของเถ้าในตัวอย่าง

ตัวอย่าง		น้ำหนักภาชนะเปล่า	น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบ	น้ำหนักตัวอย่างหลังอบ+ภาชนะ	น้ำหนักตัวอย่างหลังอบ	ร้อยละเถ้า
ถ่านมูลวัวนม	ครั้งที่ 1	19.770	1.001	20.135	0.365	36.48
อัตราส่วน 3:1	ครั้งที่ 2	19.999	1.001	20.367	0.368	36.78
	ครั้งที่ 3	19.450	1.001	19.815	0.365	36.48
	ครั้งที่ 4	21.623	1.001	21.989	0.367	36.63
	ครั้งที่ 5	20.399	1.001	20.764	0.366	36.53
				ค่าเฉลี่ย		**36.58**
ถ่านมูลวัวนม	ครั้งที่ 1	29.804	1.000	30.099	0.295	29.50
อัตราส่วน 1:1	ครั้งที่ 2	29.424	1.000	29.719	0.296	29.55
	ครั้งที่ 3	30.716	1.000	31.012	0.296	29.55
	ครั้งที่ 4	26.330	1.001	26.621	0.291	29.14
	ครั้งที่ 5	29.724	1.000	30.017	0.293	29.35
				ค่าเฉลี่ย		**29.53**
ถ่านมูลวัวนม	ครั้งที่ 1	29.802	1.001	29.978	0.176	17.59
อัตราส่วน 1:3	ครั้งที่ 2	29.421	1.001	29.599	0.178	17.79
	ครั้งที่ 3	30.714	1.001	30.894	0.180	17.99
	ครั้งที่ 4	27.090	1.001	27.266	0.176	17.59
	ครั้งที่ 5	29.721	1.001	29.900	0.179	17.89
				ค่าเฉลี่ย		**17.79**

ตาราง A. 13 ร้อยละของสารระเหยในตัวอย่าง

ตัวอย่าง		น้ำหนักภาชนะเปล่า	น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบ	น้ำหนักตัวอย่างหลังอบ+ภาชนะ	น้ำหนักตัวอย่างหลังอบ	ร้อยละน้ำหนักที่หายไป	ร้อยละสารระเหย
ถ่านมูลวัวนมอัตราส่วน 3:1	ครั้งที่ 1	39.799	1.002	40.512	0.713	28.77	23.31
	ครั้งที่ 2	39.935	1.009	40.654	0.720	28.65	23.19
	ครั้งที่ 3	39.968	1.002	40.678	0.710	29.17	23.68
	ค่าเฉลี่ย					**28.87**	**23.44**
ถ่านมูลวัวนมอัตราส่วน 1:1	ครั้งที่ 1	36.505	1.002	37.210	0.706	29.55	24.16
	ครั้งที่ 2	39.970	1.002	40.681	0.711	29.07	23.87
	ครั้งที่ 3	39.801	1.001	40.513	0.712	28.83	23.61
	ค่าเฉลี่ย					**29.15**	**23.83**
ถ่านมูลวัวนมอัตราส่วน 1:3	ครั้งที่ 1	39.937	1.002	40.614	0.678	32.33	27.04
	ครั้งที่ 2	42.586	1.002	43.264	0.678	32.35	27.09
	ครั้งที่ 3	41.302	1.002	41.981	0.679	32.19	26.87
	ค่าเฉลี่ย					**32.29**	**27.04**

ตาราง A. 14 ร้อยละของคาร์บอนคงตัวในตัวอย่าง

ตัวอย่าง	ถ่านมูลวัวนมอัตราส่วน 3:1	ถ่านมูลวัวนมอัตราส่วน 1:1	ถ่านมูลวัวนมอัตราส่วน 1:3
ครั้งที่ 1	29.13	32.78	46.45
ครั้งที่ 2	28.69	32.90	46.34
ครั้งที่ 3	29.33	32.94	45.91
ค่าเฉลี่ย	29.05	41.32	46.23

ตาราง A. 15 ค่าความร้อนในตัวอย่าง

ตัวอย่าง	ค่าความร้อน (แคลอรีต่อกรัม)				ค่าเฉลี่ย
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	(กิโลจูลต่อกิโลกรัม)
ถ่านมูลวัวนมอัตราส่วน 3:1	3811.64	3839.70	3786.36	3812.57	15962.45
ถ่านมูลวัวนมอัตราส่วน 1:1	4439.94	4394.78	4379.70	4404.81	18442.04
ถ่านมูลวัวนมอัตราส่วน 1:3	5261.71	5244.82	5241.91	5249.48	21978.52

ตอนที่ 4 การวิเคราะห์คุณสมบัติหลังการทำมูลวัวนมอัดแท่ง ที่ปริมาณของตัวประสานแตกต่างกัน

ตาราง A. 16 ร้อยละของความชื้นในตัวอย่าง

ตัวอย่าง		น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบ	ร้อยละความชื้น
แป้งมันร้อยละ 3	ครั้งที่ 1	3.005	5.46
	ครั้งที่ 2	3.004	5.46
	ครั้งที่ 3	3.005	5.49
	ครั้งที่ 4	3.003	5.36
	ครั้งที่ 5	3.003	5.36
	ค่าเฉลี่ย		5.43
แป้งมันร้อยละ 6	ครั้งที่ 1	3.003	5.83
	ครั้งที่ 2	3.005	5.79
	ครั้งที่ 3	3.000	5.90
	ครั้งที่ 4	3.000	5.80
	ครั้งที่ 5	3.002	5.75
	ค่าเฉลี่ย		**5.81**
แป้งมันร้อยละ 9	ครั้งที่ 1	3.003	6.96
	ครั้งที่ 2	3.005	6.93
	ครั้งที่ 3	3.003	6.99
	ครั้งที่ 4	3.003	6.96
	ครั้งที่ 5	3.000	6.94
	ค่าเฉลี่ย		**6.96**
แป้งมันร้อยละ 12	ครั้งที่ 1	3.000	7.67
	ครั้งที่ 2	3.000	7.54
	ครั้งที่ 3	3.002	7.53
	ครั้งที่ 4	2.998	7.61
	ครั้งที่ 5	3.000	7.58
	ค่าเฉลี่ย		**7.59**

ตาราง A. 17 ร้อยละของเถ้าในสารตัวอย่าง

ตัวอย่าง		น้ำหนักภาชนะเปล่า	น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบ	น้ำหนักตัวอย่างหลังอบ+ภาชนะ	น้ำหนักตัวอย่างหลังอบ	ร้อยละเถ้า
แป้งมันร้อยละ 3	ครั้งที่ 1	19.770	1.001	20.135	0.365	36.48
	ครั้งที่ 2	19.999	1.001	20.367	0.368	36.78
	ครั้งที่ 3	19.450	1.001	19.815	0.365	36.48
	ครั้งที่ 4	21.623	1.001	21.989	0.367	36.63
	ครั้งที่ 5	20.399	1.001	20.764	0.366	36.53
			ค่าเฉลี่ย			**36.58**
แป้งมันร้อยละ 6	ครั้งที่ 1	19.768	1.001	20.149	0.382	38.13
	ครั้งที่ 2	20.423	1.000	20.804	0.381	38.15
	ครั้งที่ 3	19.027	1.001	19.408	0.381	38.08
	ครั้งที่ 4	20.667	1.000	21.049	0.381	38.15
	ครั้งที่ 5	21.350	1.001	21.732	0.381	38.13
			ค่าเฉลี่ย			**38.12**
แป้งมันร้อยละ 9	ครั้งที่ 1	19.768	1.000	20.125	0.357	35.70
	ครั้งที่ 2	20.423	1.000	20.778	0.355	35.50
	ครั้งที่ 3	19.027	1.000	19.383	0.356	35.60
	ครั้งที่ 4	20.668	1.000	20.870	0.202	20.20
	ครั้งที่ 5	21.351	1.001	21.710	0.359	35.88
			ค่าเฉลี่ย			**35.60**
แป้งมันร้อยละ 12	ครั้งที่ 1	29.801	1.000	30.156	0.355	35.50
	ครั้งที่ 2	29.420	1.001	29.774	0.354	35.38
	ครั้งที่ 3	30.713	1.000	31.066	0.354	35.35
	ครั้งที่ 4	27.089	1.001	27.443	0.355	35.43
	ครั้งที่ 5	29.721	1.001	30.200	0.479	47.93
			ค่าเฉลี่ย			**37.92**

ตาราง A. 18 ร้อยละของสารระเหยในตัวอย่าง

ตัวอย่าง		น้ำหนักภาชนะเปล่า	น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบ	น้ำหนักตัวอย่างหลังอบ+ภาชนะ	น้ำหนักตัวอย่างหลังอบ	ร้อยละน้ำหนักที่หายไป	ร้อยละสารระเหย
แป้งมันร้อยละ 3	ครั้งที่ 1	39.799	1.002	40.512	0.713	28.77	23.31
	ครั้งที่ 2	39.935	1.009	40.654	0.720	28.65	23.19
	ครั้งที่ 3	39.968	1.002	40.678	0.710	29.17	23.68
			ค่าเฉลี่ย			**28.87**	**23.44**
แป้งมันร้อยละ 6	ครั้งที่ 1	39.588	1.002	40.283	0.695	30.67	24.84
	ครั้งที่ 2	36.508	1.000	37.202	0.694	30.61	24.82
	ครั้งที่ 3	39.971	1.002	40.663	0.692	30.90	25.00
			ค่าเฉลี่ย			**30.73**	**24.91**
แป้งมันร้อยละ 9	ครั้งที่ 1	42.586	1.001	43.261	0.675	32.54	25.58
	ครั้งที่ 2	39.143	1.003	39.819	0.676	32.63	25.70
	ครั้งที่ 3	41.814	1.002	42.486	0.672	32.90	25.91
			ค่าเฉลี่ย			**32.69**	**25.73**
แป้งมันร้อยละ 12	ครั้งที่ 1	40.383	1.005	41.034	0.652	35.13	27.46
	ครั้งที่ 2	38.402	1.003	39.051	0.649	35.31	27.77
	ครั้งที่ 3	37.906	1.001	38.559	0.653	34.80	27.27
			ค่าเฉลี่ย			**35.08**	**27.50**

ตาราง A. 19 ร้อยละของคาร์บอนคงตัวในตัวอย่าง

ตัวอย่าง	แป้งมันร้อยละ 3	แป้งมันร้อยละ 6	แป้งมันร้อยละ 9	แป้งมันร้อยละ 12
ครั้งที่ 1	29.13	23.49	31.79	29.37
ครั้งที่ 2	28.69	23.43	31.60	29.30
ครั้งที่ 3	29.33	23.27	31.53	17.13
ค่าเฉลี่ย	29.05	23.40	31.71	27.00

ตาราง A. 20 ค่าความร้อนในตัวอย่าง

ตัวอย่าง	ค่าความร้อน (แคลอรีต่อกรัม)				ค่าเฉลี่ย (กิโลจูลต่อกิโลกรัม)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	
แป้งมันร้อยละ 3	3811.64	3839.70	3786.36	3812.57	15962.45
แป้งมันร้อยละ 6	3656.60	3549.01	3663.99	3623.20	15169.61
แป้งมันร้อยละ 9	3594.43	3642.18	3613.50	3616.70	15142.41
แป้งมันร้อยละ 12	3534.91	3472.80		3503.86	14669.94

2. รูปประกอบงานวิจัยเพิ่มเติม

รูปที่ 29 มูลวัวนมแห้งที่ได้รับการอนุเคราะห์จากองค์การส่งเสริมกิจการโคนมแห่งประเทศไทย อำเภอมวกเหล็ก จังหวัดสระบุรี

รูปที่ 30 วิธีการอัดแท่งมูลวัวนมแห้งก่อนการทำคาร์บอไนเซชัน

รูปที่ 31 วิธีการทำคาร์บอไนเซชัน โดยการเผาในเตา

รูปที่ 32 ถ่านที่ผ่านการบดเพื่อนำไปใช้ในการวิเคราะห์

รูปที่ 33 เครื่องมือในการวัดปริมาณความชื้นด้วย MATTLER TOLEDO Moisture Analyzer