เชื้อเพลิงชีวมวลจากกากเหลือใช้ทางการเกษตร : ลักษณะสมบัติและอัตราส่วนการใช้

นายเจตน์สิทธิ์ สำลีรัตน์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย
The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2559

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Agricultural Residues for Biomass Fuel Production : Characteristics and Use Proportion

s

Mr. Jetasit Samleeratana

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Engineering Program in Environmental Engineering

Department of Environmental Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2016

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	เชื้อเพลิงชีวมวลจากกากเหลือใช้ทางการเกษตร : ลักษณะสมบัติและอัตราส่วนการใช้
โดย	นายเจตน์สิทธิ์ สำลีรัตน์
สาขาวิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มนัสกร ราชากรกิจ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(รองศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

....ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.ศิริมา ปัญญาเมธีกุล)

....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มนัสกร ราชากรกิจ)

....กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.วิบูลย์ ศรีเจริญชัยกุล)

....กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.พิสุทธิ์ เพียรมนกุล)

....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(รองศาสตราจารย์ ดร.ชาติ เจียมไชยศรี)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

เจตน์สิทธิ์ สำลีรัตน์ : เชื้อเพลิงชีวมวลจากกากเหลือใช้ทางการเกษตร : ลักษณะสมบัติและอัตราส่วนการใช้ (Agricultural Residues for Biomass Fuel Production : Characteristics and Use Proportions) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ. ดร.มนัสกร ราชากรกิจ, 137 หน้า.

งานวิจัยนี้ศึกษาการนำกากเหลือใช้ทางการเกษตรมาประยุกต์ใช้ผลิตเป็นแท่งเชื้อเพลิงชีวมวลเพื่อใช้ผลิตพลังงานความร้อนโดยควบคุมลักษณะแท่งเชื้อเพลิงชีวมวลในการทดลองให้มีลักษณะเหมือนกับแท่งเชื้อเพลิงชีวมวลที่ใช้อยู่ทั่วไปในปัจจุบัน วัตถุดิบที่ใช้ในการทดลองนำมาจากกากเหลือใช้ทางการเกษตรที่เกิดจากกลุ่มพืชเศรษฐกิจ ได้แก่ ฟางข้าว ใบอ้อย และใบข้าวโพด ในงานวิจัยได้ทำการแบ่งขั้นตอนการอัดแท่งออกเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ กรรมวิธีอัดร้อน และกรรมวิธีอัดเย็น โดยในวิธีที่สองใช้กากน้ำตาลซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมประสานเพื่อให้แท่งเชื้อเพลิงที่ได้มีคุณภาพที่ดีขึ้น และแบ่งเชื้อเพลิงชีวมวลจากกากเหลือใช้ทางกการเกษตรทั้งหมด 3 สูตร ซึ่งเป็นการจับคู่วัตถุดิบจากกากเหลือใช้ทางการเกษตรสองชนิด คือ สูตรใบอ้อย:ใบข้าวโพด ฟางข้าว:ใบอ้อย และ ฟางข้าว:ใบข้าวโพด ผสมในอัตราส่วนที่ต่างกัน โดยในวิธีอัดร้อนและวิธีอัดเย็นนั้นได้ผสมกากน้ำตาลในอัตราส่วน 50% ของน้ำหนักวัตถุดิบ และจึงนำแท่งเชื้อเพลิงชีวมวลที่ได้ไปวิเคราะห์หาลักษณะสมบัติตามวิธีมาตรฐาน ASTM ได้แก่ ค่าความร้อน ปริมาณเถ้า ปริมาณความชื้น สารระเหย ปริมาณคาร์บอนคงตัว และธาตุองค์ประกอบของแท่งเชื้อเพลิง เพื่อนำไปเปรียบเทียบกับกลุ่มเชื้อเพลิงชีวมวลที่ใช้อยู่ทั่วไปในปัจจุบันและค่ามาตรฐานแท่งเชื้อเพลิงชีวมวลของต่างประเทศ โดยงานวิจัยนี้เลือกนำไปเปรียบเทียบกับมาตรฐาน EU standard (ENplus) และ US standard (PFI standard) ส่งผลให้สามารถสรุปได้ว่าอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดคือ กลุ่มแท่งเชื้อเพลิงชีวมวลที่ใช้ สูตรใบอ้อย:ใบข้าวโพดทั้งจากกรรมวิธีอัดร้อนและอัดเย็นเนื่องจากให้ค่าความร้อนสูงที่สุดอยู่ที่ประมาณ 16.50 MJ/kg ในสูตรอัดร้อน และ 17.33 MJ/kg ในสูตรอัดเย็น โดยการใส่กากน้ำตาลเพิ่มลงไปนั้นมีส่วนช่วยให้คุณภาพของแท่งเชื้อเพลิงดีขึ้น เช่น ค่าความร้อนที่เพิ่มขึ้น ปริมาณเถ้าที่ลดลง รวมถึงค่าความคงทนของแท่งเชื้อเพลิงยังเพิ่มขึ้นอีกด้วย และจากการนำแท่งเชื้อเพลิงจากงานวิจัยเปรียบเทียบกับกลุ่มเชื้อเพลิงชีวมวลที่มีอยู่ในประเทศทำให้สามารถสรุปได้ว่าสามารถใช้ทดแทนกลุ่มแท่งเชื้อเพลิงชีวมวลที่ใช้อยู่ในปัจจุบันได้หากเกิดปัญหาขาดแคลน เพราะมีลักษณะสมบัติที่อยู่ในเกณฑ์ที่ใกล้เคียงกับกลุ่มดังกล่าว และยังเป็นการช่วยจัดการปัญหากากของเสียทางการเกษตรที่เกิดขึ้นรวมทั้งปัญหาจากการเผาทำลายกากของเสียซึ่งเป็นวิธีที่ไม่ถูกวิธีอีกด้วย

ภาควิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม	ลายมือชื่อนิสิต ....
สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม	ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก ....
ปีการศึกษา 2559	

5770386821 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING
KEYWORDS: AGRICULTURAL RESIDUE / BIOMASS / WASTE TO ENERGY / BIOMASS TO ENERGY / RATIO

JETASIT SAMLEERATANA: Agricultural Residues for Biomass Fuel Production : Characteristics and Use Proportions. ADVISOR: ASST. PROF.MANASKORN RACHAKORNKIJ, Ph.D., 137 pp.

This research aims to study the transformation process of agricultural residues into biomass fuels for electricity generation. Biomass pellets in the experiments were produced in the shape and size that are used by the industry. Waste residues from agricultural crops; rice straws, sugarcane leaves, and corn leaves were chosen due to their abundance. The pellets were derived from combinations of two agricultural waste residues in specific ratios. Three major combinations of biomass fuels are sugarcane leaf : rice straw, corn leaf : sugarcane leaf and corn leaf : rice straw. There are two types of production methods; namely, hot compression and cold compression. For the cold compression method, materials were mixed with molasses in the ratio of 50% by weight. The prepared biomass pellets were analyzed for standard characteristics which include calorific value, ash content, moisture content, volatile matter, fixed carbon and the elemental composition. After the analyses, characteristics of the biomass pellets were compared with those biomass fuels that are either currently in use in the country or in international standards. In this research, the EU standards (ENplus) and the US standard (PFI standard) were chosen. By doing so, we can conclude that the most appropriate biomass combination is the corn leaf : sugarcane leaf recipe. With 50:50 ratio in both compression methods, maximum heating value of 16.50 MJ/kg was achieved in the hot compression method and 17.33 MJ/kg in the cold compression method. Molasses was found to enhance quality of the biomass pellets, for example, higher calorific value and lower ash content. It is evident that the pellets from this research can be a sustainable alternative resources for the industry due to their similar characteristics. and properties Not only this can help to alleviate agricultural waste management problems, but it can prevent the pollution from uncontrolled burning of the wastes as well.

Department: Environmental Engineering Student's Signature ....
Field of Study: Environmental Engineering Advisor's Signature ....
Academic Year: 2016

กิตติกรรมประกาศ

การทำวิจัยและวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วง ผู้วิจัยได้รับความอนุเคราะห์อย่างดียิ่งจากหน่วยงานหลายหน่วยงาน และบุคคลหลายท่าน ทั้งนี้ผู้วิจัยขอขอบพระคุณหน่วยงานและบุคคลดังต่อไปนี้

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มนัสกร ราชากรกิจ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำปรึกษาชี้แนะแนวทาง อีกทั้งช่วยแก้ไขสิ่งบกพร่องในการทำวิจัยและเล่มวิทยานิพนธ์ ซึ่งเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้สำเร็จไปด้วยดี

กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน ที่ให้ความอนุเคราะห์ข้อมูลแท่งเชื้อเพลิงชีวมวล รวมถึงตัวอย่างแท่งเชื้อเพลิงชีวมวล

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ พงษ์ศิริ จรุยนนท์ อาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร ในการให้แนะนำด้านเครื่องมือในการผลิตแท่งเชื้อเพลิงชีวมวล

รองศาสตราจารย์ ดร.ศิริมา ปัญญาเมธีกุล ประธานในการสอบวิทยานิพนธ์ ตลอดจนรองศาสตราจารย์ ดร.วิบูลย์ ศรีเจริญชัยกุล รองศาสตราจารย์ ดร.พิสุทธิ์ เพียรมนกุล และกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิภายนอกมหาวิทยาลัย รองศาสตราจารย์ ดร.ชาติ เจียมไชยศรี ที่ให้เกียรติและสละเวลามาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ อีกทั้งให้ความรู้ คำแนะนำอันเป็นประโยชน์ ทำให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

คณาจารย์ภาพวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยทุกท่าน ที่ให้ความรู้ในทุกๆ รายวิชาตลอดระยะเวลาที่ศึกษา

เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการห้องปฏิบัติการขยะ อาคารปฏิบัติการรวม

เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการภาควิชาธรณี

เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการภาควิชาเครื่องกล

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัว ที่คอบให้การสนับสนุน

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย .... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .... จ

กิตติกรรมประกาศ .... ฉ

สารบัญ .... ช

สารบัญตาราง .... ฎ

สารบัญภาพ .... ฑ

บทที่ 1 บทนำ 1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 1

1.2 วัตถุประสงค์ 2

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย 2

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 3

บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 4

2.1 กากเหลือใช้ทางการเกษตร (Agricultural waste) 4

2.2 พืชเศรษฐกิจในไทย 4

2.2.1 ข้าว 6

2.2.2 อ้อย 7

2.2.3 ข้าวโพด (เลี้ยงสัตว์) 8

2.3 การนำกากเหลือใช้ทางการเกษตรไปใช้ประโยชน์ 9

2.3.1 ใช้ประโยชน์ในภาคการเกษตร 9

2.3.2 ใช้ประโยชน์ในภาคการผลิต 9

2.4 ชีวมวล 10

2.4.1 การนำชีวมวลมาใช้เป็นแหล่งวัตถุดิบเพื่อให้พลังงาน 11

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

หน้า

2.4.1.1 การเผาไหม้โดยตรง (combustion) 11
2.4.1.2 การผลิตก๊าซ (gasification) 11
2.4.1.3 การหมัก (Fermentation) 11
2.5 วิธีการผลิตแท่งเชื้อเพลิงชีวมวล 11
2.5.1 การอัดร้อนที่ความดันสูง 12
2.5.1.1 การอัดแท่งด้วยกระบอกสูบ (Piston press) 12
2.5.1.2 การทัดแท่งด้วยสกรู (Screw press) 13
2.5.1.3 การอัดแบบกลิ้ง (Roll press) 13
2.5.1.4 การอัดเป็นเม็ด (Pelletizing) 14
2.5.2 การอัดเย็นที่ความดันต่ำ 15
2.5.2.1 การบีบอัดแบบใช้ตัวเชื่อมประสาน 15
2.5.2.2 การบีบอัดแบบไม่ใช่ตัวประสาน 15
2.6 เชื้อเพลิงชีวมวลที่มีอยู่ในไทย 16
2.7 สถานการณ์การใช้พลังงานทดแทน 17
2.7.1 เป้าหมายการพัฒนาพลังงานทดแทนของกระทรวงพลังงาน 17
2.8 ทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 18
2.8.1 การนำกากเหลือใช้ทางการเกษตรมาแปลงสภาพเป็นวัตถุดิบสำหรับเชื้อเพลิงในการให้พลังงาน 18
2.8.2 การผสมกากของเสียเพื่อผลิตเป็นแท่งเชื้อเพลิง 19
2.8.3 การเตรียมวัตถุดิบเบื่องต้นก่อนใช้ 20
2.8.4 การให้ความร้อนระหว่างกระบวนการ 20
2.8.5 ค่าลักษณะสมบัติของแท่งเชื้อเพลิง 21
2.8.6 มาตรฐานของ biomass และการนำมาเปรียบเทียบ 23

หน้า

บทที่ 3 แผนการทดลองและการดำเนินงานวิจัย 25
3.1 แผนการทดลอง 25
3.2 เครื่องมืออุปกรณ์และสารเคมี 27
3.2.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย 27
3.3 วิธีการวิเคราะห์ค่าลักษณะสมบัติ 28
3.3.1 ค่าความร้อน (Calorific value) 28
3.3.2 ปริมาณความชื้น (Moisture content) 28
3.3.3 ปริมาณเถ้า (Ash content) 28
3.3.4 ปริมาณสารระเหย (Volatile matter) 29
3.3.5 ปริมาณคาร์บอนคงตัว (Fixed carbon) 29
3.3.6 ค่าความทนทานของแท่งเชื้อเพลิง (Durability) 30
3.3.7 ความหนาแน่นของวัตถุดิบ (Bulk density) 30
3.3.8 องค์ประกอบของธาตุในแท่งเชื้อเพลิง 30
3.4 วิธีดำเนินงานวิจัย 31
3.4.1 การทดลองที่ 1 : เก็บตัวอย่างจากพื้นที่และเตรียมวัตถุดิบให้มีลักษณะเหมาะต่องานวิจัย 31
3.4.2 การทดลองที่ 2.1 : ทดสอบผลิตแท่งเชื้อเพลิงชีวมวลแบบผสมโดยใช้วิธีอัดร้อน .. 34
3.4.3 การทดลองที่ 2.2 : ทดสอบผลิตแท่งเชื้อเพลิงชีวมวลแบบผสมโดยใช้วิธีอัดเย็นควบคู่ไปกับการใช้กากน้ำตาลเป็นตัวเชื่อมประสาน 38
3.4.4 การทดลองที่ 3 : วิเคราะห์ค่าลักษณะสมบัติของเชื้อเพลิงที่มีอยู่ในปัจจุบันและนำมาเปรียบเทียบกับแท่งเชื้อเพลิงที่ได้จากงานวิจัยรวมถึงเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานของแท่งเชื้อเพลิง 42
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผล 44

หน้า

4.1 ผลการทดลองที่ 1 : เก็บตัวอย่างจากพื้นที่และเตรียมวัตถุดิบให้มีลักษณะเหมาะต่องานวิจัย 44
4.1.1 ลักษณะของวัตถุดิบ 44
4.1.1.1 ลักษณะทางกายภาพ 44
4.1.1.2 ขนาดอนุภาค 45
4.1.2 การทดสอบค่าลักษณะสมบัติของวัสดุ 47
4.1.3 เปรียบเทียบค่าความร้อนที่ได้จากการวิเคราะห์กับสูตร Dulong 48
4.2 ผลการทดลอง 2.1 : หาสัดส่วนที่เหมาะสมในการผลิตแท่งเชื้อเพลิงชีวมวลโดยใช้กรรมวิธีอัดร้อน 49
4.2.1 ผลเฉลี่ยค่าลักษณะสมบัติทางกายภาพของแท่งเชื้อเพลิง 50
4.2.2 ผลการวิเคราะห์ค่าความร้อน 50
4.2.3 ผลการวิเคราะห์ปริมาณเถ้า 52
4.2.4 ผลการวิเคราะห์ปริมาณสารระเหย 54
4.2.5 ผลการวิเคราะห์ปริมาณคาร์บอนคงตัว 56
4.2.6 ผลของการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุในแท่งเชื้อเพลิง 58
4.3 ผลการทดลองที่ 2.2 : หาสัดส่วนที่เหมาะสมในการผลิตแท่งเชื้อเพลิงชีวมวลโดยใช้กรรมวิธีอัดเย็น รวมถึงอัตราส่วนที่เหมาะสมของกากน้ำตาลซึ่งมีหน้าที่เป็นตัวเชื่อมประสาน 58
4.3.1 ผลการทดสอบค่าความทนทานของแท่งเชื้อเพลิงที่เปลี่ยนไป เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของกากน้ำตาล 59
4.3.2 ผลเฉลี่ยค่าลักษณะสมบัติทางกายภาพของแท่งเชื้อเพลิง 60
4.3.3 ผลการวิเคราะห์ค่าความร้อน 61
4.3.4 ผลการวิเคราะห์ปริมาณเถ้า 64
4.3.5 ผลการวิเคราะห์ปริมาณสาระเหย 67

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

หน้า

4.3.6 ผลการวิเคราะห์ปริมาณคาร์บอนคงตัว 71

4.3.7 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุในแท่งเชื้อเพลิง 74

4.4 สรุปอัตราส่วนที่ต้องการนำเสนอ 75

4.5 ผลการทดลองที่ 3 : วิเคราะห์ค่าลักษณะสมบัติของเชื้อเพลิงที่มีอยู่ในปัจจุบันและนำมาเปรียบเทียบกับแท่งเชื้อเพลิงที่ได้จากงานวิจัยรวมถึงเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานของแท่งเชื้อเพลิง 76

4.5.1 ลักษณะสมบัติจากมาตรฐานแท่งเชื้อเพลิงชีวมวล 76

4.5.2 ลักษณะสมบัติของแท่งเชื้อเพลิงชีวมวลที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน 77

4.5.3 ผลจากการเปรียบเทียบแท่งเชื้อเพลิงจากงานวิจัยกับแท่งเชื้อเพลิงที่ใช้อยู่ในปัจจุบันรวมทั้งมาตรฐานแท่งเชื้อเพลิงจากต่างประเทศ 81

บทที่ 5 สรุปผลวิจัย ข้อเสนอแนะ และความสำคัญกับงานวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม 90

5.1 สรุปผลวิจัย 90

5.2 ข้อเสนอแนะ 93

5.3 ความสำคัญกับงานวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม 94

รายการอ้างอิง 95

ภาคผนวก 98

ภาคผนวก ก. วัตถุดิบในงานวิจัย 99

ภาคผนวก ข. ผลการวิเคราะห์ค่าลักษณะสมบัติจากการทดลองที่ 1 106

ภาคผนวก ค. ผลการวิเคราะห์ค่าลักษณะสมบัติจากการทดลองที่ 2.1 109

ภาคผนวก ง. ผลการวิเคราะห์ค่าลักษณะสมบัติจากการทดลองที่ 2.2 120

ภาคผนวก จ. ผลการวิเคราะห์ค่าลักษณะสมบัติจากการทดลองที่ 3 131

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ 137

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญตาราง

ตารางที่ 2.1 ปริมาณกากเหลือใช้ที่เกิดขึ้นและปริมาณกากเหลือใช้ที่ตกค้าง 5

ตารางที่ 2.2 ปริมาณกากเหลือใช้ที่เหลือตกค้างและศักยภาพด้านพลังงาน 5

ตารางที่ 2.3 เป้าหมายการพัฒนาพลังงานทดแทนภายใต้แผน AEDP ในปี พ.ศ. 2579 17

ตารางที่ 2.4 สถานภาพและเป้าหมายการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานทดแทนของเชื้อเพลิงประเภท ชีวมวล 18

ตารางที่ 2.5 มาตรฐานของแท่งเชื้อเพลิงชีวมวล 24

ตารางที่ 3.1 ตัวแปรและพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองที่ 1 31

ตารางที่ 3.2 อัตราส่วนวัตถุของแท่งเชื้อเพลิงทั้ง 3 สูตร ที่ใช้ในการทดลองที่ 2.1 34

ตารางที่ 3.3 ตัวแปรและพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองที่ 2.1 35

ตารางที่ 3.4 อัตราส่วนวัตถุของแท่งเชื้อเพลิงทั้ง 3 สูตร ที่ใช้ในการทดลองที่ 2.2 38

ตารางที่ 3.5 ตัวแปรและพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองที่ 2.2 39

ตารางที่ 3.6 ตัวแปรและพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองที่ 3 42

ตารางที่ 4.1 การเปลี่ยนแปลงของปริมาณความชื้น ก่อน-หลัง อบ 45

ตารางที่ 4.2 ความทนทานของแท่งเชื้อเพลิงที่เปลี่ยนไปเนื่องจากขนาดของอนุภาค 45

ตารางที่ 4.3 ปริมาณเถ้าที่เปลี่ยนไปเนื่องจากขนาดของอนุภาค 46

ตารางที่ 4.4 สัดส่วนอนุภาคที่ค้างอยู่บนตะแกรงภายหลังจากผ่านขั้นตอนคัดแยกอนุภาค 46

ตารางที่ 4.5 ลักษณะสมบัติของเชื้อเพลิงแบบเดี่ยวที่ขนาดอนุภาค 180μm-300μm 48

ตารางที่ 4.6 องค์ประกอบธาตุของวัตถุดิบ 48

ตารางที่ 4.7 อัตราส่วนวัตถุของแท่งเชื้อเพลิงทั้ง 3 สูตร ที่ใช้ในการทดลองที่ 2.1 49

ตารางที่ 4.8 ลักษณะสมบัติทางกายภาพเฉลี่ยของแท่งเชื้อเพลิงที่ผ่านกระบวนการอัดร้อน 50

ตารางที่ 4.9 เฉลี่ยของค่าความทนทานของแท่งเชื้อเพลิงที่ผลิตจากวัตถุดิบแบบเดี่ยว 50

ตารางที่ 4.10 สรุปสูตรอัตราส่วนที่ให้ค่าความร้อนสูงที่สุด จากกระบวนการอัดร้อน 52

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ 4.11 สรุปสูตรอัตราส่วนที่ให้ค่าปริมาณเถ้าต่ำที่สุด จากกระบวนการอัดร้อน.............54

ตารางที่ 4.12 ปริมาณธาตุองค์ประกอบของแท่งเชื้อเพลิง..58

ตารางที่ 4.13 อัตราส่วนวัตถุของแท่งเชื้อเพลิงทั้ง 3 สูตร ที่ใช้ในการทดลองที่ 2.2 59

ตารางที่ 4.14 อัตราส่วนผสมระหว่างวัตถุดิบที่ใช้และกากน้ำตาลในแท่งเชื้อเพลิง 59

ตารางที่ 4.15 ลักษณะสมบัติทางกายภาพเฉลี่ยของแท่งเชื้อเพลิงที่ผ่านกระบวนการอัดเย็น 60

ตารางที่ 4.16 สรุปสูตรอัตราส่วนที่ให้ค่าความร้อนสูงที่สุด จากกระบวนการอัดร้อน...............63

ตารางที่ 4.17 สรุปสูตรอัตราส่วนที่ให้ค่าปริมาณเถ้าต่ำที่สุด จากกระบวนการอัดเย็น 67

ตารางที่ 4.18 ปริมาณธาตุองค์ประกอบของแท่งเชื้อเพลิง..74

ตารางที่ 4.19 ลักษณะสมบัติของแท่งเชื้อเพลิงที่กำหนดขึ้นช่วงโครงร่างวิทยานิพนธ์ 75

ตารางที่ 4.20 สูตรและอัตราส่วนผสมที่ต้องการนำเสนอจากกระบวนการอัดร้อน 75

ตารางที่ 4.21 สูตรและอัตราส่วนผสมที่ต้องการนำเสนอจากกระบวนการอัดเย็นโดยใช้กากน้ำตาลเป็นตัวเชื่อมประสาน 76

ตารางที่ 4.22 มาตรฐานของแท่งเชื้อเพลิงชีวมวล..77

ตารางที่ 4.23 ลักษณะสมบัติของชีวมวลในโรงไฟฟ้าชีวมวลขนาดใหญ่ 78

ตารางที่ 4.24 ลักษณะสมบัติของแท่งเชื้อเพลิงชีวมวลที่มีการใช้อยู่ในปัจจุบัน (ชนิดหลัก) 79

ตารางที่ 4.25 ลักษณะสมบัติของแท่งเชื้อเพลิงชีวมวลที่มีการใช้อยู่ในปัจจุบัน (ชนิดเสริม).......80

ตารางที่ 4.26 ลักษณะสมบัติของแท่งเชื้อเพลิงชีวมวลที่กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงานแนะนำ...81

สารบัญภาพ

รูปที่ 2.1 แผนผังการนำชีวมวลจากข้าวไปใช้งาน 6

รูปที่ 2.2 แผนผังการนำชีวมวลจากอ้อยไปใช้งาน........ 7

รูปที่ 2.3 แผนผังการนำชีวมวลจากข้าวโพดไปใช้งาน........ 8

รูปที่ 2.4 เครื่องอัดแท่งแบบกระบอกสูบ (Piston press) 12

รูปที่ 2.5 เครื่องอัดแท่งแบบสกรู (Screw press)........ 13

รูปที่ 2.6 เครื่องอัดแท่งแบบกลิ้ง (Roll press)........ 13

รูปที่ 2.7 เครื่องอัดเป็นเม็ด (Pelletiziing)........ 14

รูปที่ 2.8 เครื่องอัดและแม่แบบที่ใช้ในงานวิจัย 14

รูปที่ 2.9 สัดส่วนการนำกากเหลือใช้ทางการเกษตรมาใช้เป็นเชื้อเพลิงชีวมวลในโรงไฟฟ้าขนาดใหญ่ 16

รูปที่ 2.10 Bomb Calorimeter Diagram........ 22

รูปที่ 3.1 ภาพรวมการทำงานวิจัย........ 26

รูปที่ 3.2 แม่แบบสำหรับอัดแท่งเชื้อเพลิงชีวมวล 27

รูปที่ 3.3 ขั้นตอนการทำการทดลองที่ 1 33

รูปที่ 3.4 ขั้นตอนการทำการทดลองที่ 2.1........ 37

รูปที่ 3.5 ขั้นตอนการทำการทดลองที่ 2.2........ 41

รูปที่ 3.6 ขั้นตอนการทำการทดลองที่ 3 43

รูปที่ 4.1 อนุภาควัตถุดิบหลังจากกระบวนการคัดแยกขนาด (a) ขนาดอนุภาคตั้งแต่ 300µm – 1000µm, (b) ขนาดอนุภาคตั้งแต่ 180µm - 300µm, (c) ขนาดอนุภาคเล็กกว่า 180µm 46

รูปที่ 4.2 สัดส่วนอนุภาคภายหลังคัดแยกขนาดโดยใช้เครื่อง sieve shaker........ 47

รูปที่ 4.3 การเปลี่ยนไปของค่าความร้อนเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนในสูตรแท่งเชื้อเพลิง ใบอ้อย : ใบข้าวโพด จากกระบวนการอัดร้อน........ 51

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

รูปที่ 4.4 การเปลี่ยนไปของค่าความร้อนเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนในสูตรแท่งเชื้อเพลิง ฟางข้าว : ใบอ้อย จากกระบวนการอัดร้อน 51

รูปที่ 4.5 การเปลี่ยนไปของค่าความร้อนเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนในสูตรแท่งเชื้อเพลิง ฟางข้าว : ใบข้าวโพด จากกระบวนการอัดร้อน 51

รูปที่ 4.6 การเปลี่ยนไปของปริมาณเถ้าเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนในสูตรแท่งเชื้อเพลิง ใบอ้อย : ใบข้าวโพด จากกระบวนการอัดร้อน..53

รูปที่ 4.7 การเปลี่ยนไปของปริมาณเถ้าเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนในสูตรแท่งเชื้อเพลิง ฟางข้าว : ใบอ้อย จากกระบวนการอัดร้อน..53

รูปที่ 4.8 การเปลี่ยนไปของปริมาณเถ้าเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนในสูตรแท่งเชื้อเพลิง ฟางข้าว : ใบข้าวโพด จากกระบวนการอัดร้อน 53

รูปที่ 4.9 การเปลี่ยนไปของปริมาณสารระเหยเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนในสูตรแท่งเชื้อเพลิง ใบอ้อย : ใบข้าวโพด จากกระบวนการอัดร้อน..55

รูปที่ 4.10 การเปลี่ยนไปของปริมาณสารระเหยเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนในสูตรแท่งเชื้อเพลิง ฟางข้าว : ใบอ้อย จากกระบวนการอัดร้อน 55

รูปที่ 4.11 การเปลี่ยนไปของปริมาณสารระเหยเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนในสูตรแท่งเชื้อเพลิง ฟางข้าว : ใบข้าวโพด จากกระบวนการอัดร้อน 55

รูปที่ 4.12 การเปลี่ยนไปของปริมาณคาร์บอนคงตัวเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนในสูตรแท่งเชื้อเพลิง ใบอ้อย : ใบข้าวโพด จากกระบวนการอัดร้อน..57

รูปที่ 4.13 การเปลี่ยนไปของปริมาณคาร์บอนคงตัวเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนในสูตรแท่งเชื้อเพลิง ฟางข้าว : ใบอ้อย จากกระบวนการอัดร้อน 57

รูปที่ 4.14 การเปลี่ยนไปของปริมาณคาร์บอนคงตัวเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนในสูตรแท่งเชื้อเพลิง ฟางข้าว : ใบข้าวโพด จากกระบวนการอัดร้อน...57

รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความทนทานของแท่งเชื้อเพลิงต่ออัตราส่วนของกากน้ำตาลในแท่งเชื้อเพลิง 60

รูปที่ 4.16 การเปลี่ยนไปของค่าความร้อนเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนในสูตรแท่งเชื้อเพลิง ใบอ้อย : ใบข้าวโพด จากกระบวนการอัดเย็น...61

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

รูปที่ 4.17 การเปลี่ยนไปของค่าความร้อนเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนในสูตรแท่งเชื้อเพลิง ฟางข้าว : ใบอ้อย จากกระบวนการอัดเย็น 62

รูปที่ 4.18 การเปลี่ยนไปของค่าความร้อนเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนในสูตรแท่งเชื้อเพลิง ฟางข้าว : ใบข้าวโพด จากกระบวนการอัดเย็น 62

รูปที่ 4.19 เปรียบเทียบค่าความร้อนระหว่างวิธีอัดร้อนและวิธีอัดเย็นของแท่งเชื้อเพลิงสูตร ใบอ้อย : ใบข้าวโพด 62

รูปที่ 4.20 เปรียบเทียบค่าความร้อนระหว่างวิธีอัดร้อนและวิธีอัดเย็นของแท่งเชื้อเพลิงสูตร ฟางข้าว : ใบอ้อย 63

รูปที่ 4.21 เปรียบเทียบค่าความร้อนระหว่างวิธีอัดร้อนและวิธีอัดเย็นของแท่งเชื้อเพลิงสูตร ฟางข้าว : ใบข้าวโพด 63

รูปที่ 4.22 การเปลี่ยนไปของปริมาณเถ้าเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนในสูตรแท่งเชื้อเพลิง ใบอ้อย : ใบข้าวโพด จากกระบวนการอัดเย็น 64

รูปที่ 4.23 การเปลี่ยนไปของปริมาณเถ้าเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนในสูตรแท่งเชื้อเพลิง ฟางข้าว : ใบอ้อย จากกระบวนการอัดเย็น 65

รูปที่ 4.24 การเปลี่ยนไปของปริมาณเถ้าเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนในสูตรแท่งเชื้อเพลิง ฟางข้าว : ใบข้าวโพด จากกระบวนการอัดเย็น 65

รูปที่ 4.25 เปรียบเทียบปริมาณเถ้าระหว่างวิธีอัดร้อนและวิธีอัดเย็นของแท่งเชื้อเพลิงสูตร ใบอ้อย : ใบข้าวโพด 66

รูปที่ 4.26 เปรียบเทียบปริมาณเถ้าระหว่างวิธีอัดร้อนและวิธีอัดเย็นของแท่งเชื้อเพลิงสูตร ฟางข้าว : ใบข้าวโพด 66

รูปที่ 4.27 เปรียบเทียบปริมาณเถ้าระหว่างวิธีอัดร้อนและวิธีอัดเย็นของแท่งเชื้อเพลิงสูตร ฟางข้าว : ใบข้าวโพด 67

รูปที่ 4.28 การเปลี่ยนไปของปริมาณสารระเหยเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนในสูตรแท่งเชื้อเพลิง ใบอ้อย : ใบข้าวโพด จากกระบวนการอัดเย็น 68

รูปที่ 4.29 การเปลี่ยนไปของปริมาณสารระเหยเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนในสูตรแท่งเชื้อเพลิง ฟางข้าว : ใบอ้อย จากกระบวนการอัดเย็น 68

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

รูปที่ 4.30 การเปลี่ยนไปของปริมาณสารระเหยเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนในสูตรแท่งเชื้อเพลิง ฟางข้าว : ใบข้าวโพด จากกระบวนการอัดเย็น 69

รูปที่ 4.31 เปรียบเทียบปริมาณสารระเหยระหว่างวิธีอัดร้อนและวิธีอัดเย็นของแท่งเชื้อเพลิงสูตร ใบอ้อย : ใบข้าวโพด 69

รูปที่ 4.32 เปรียบเทียบปริมาณสารระเหยระหว่างวิธีอัดร้อนและวิธีอัดเย็นของแท่งเชื้อเพลิงสูตร ฟางข้าว : ใบอ้อย....70

รูปที่ 4.33 เปรียบเทียบปริมาณสารระเหยระหว่างวิธีอัดร้อนและวิธีอัดเย็นของแท่งเชื้อเพลิงสูตร ฟางข้าว : ใบข้าวโพด....70

รูปที่ 4.34 การเปลี่ยนไปของปริมาณคาร์บอนคงตัวเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนในสูตรแท่งเชื้อเพลิง ใบอ้อย : ใบข้าวโพด จากกระบวนการอัดเย็น 71

รูปที่ 4.35 การเปลี่ยนไปของปริมาณคาร์บอนคงตัวเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนในสูตรแท่งเชื้อเพลิง ฟางข้าว : ใบอ้อย จากกระบวนการอัดเย็น 72

รูปที่ 4.36 การเปลี่ยนไปของปริมาณคาร์บอนคงตัวเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนในสูตรแท่งเชื้อเพลิง ฟางข้าว : ใบข้าวโพด จากกระบวนการอัดเย็น 72

รูปที่ 4.37 เปรียบเทียบปริมาณคาร์บอนคงตัวระหว่างวิธีอัดร้อนและวิธีอัดเย็นของแท่งเชื้อเพลิงสูตร ใบอ้อย : ใบข้าวโพด 73

รูปที่ 4.38 เปรียบเทียบปริมาณคาร์บอนคงตัวระหว่างวิธีอัดร้อนและวิธีอัดเย็นของแท่งเชื้อเพลิงสูตร ฟางข้าว : ใบอ้อย....73

รูปที่ 4.39 เปรียบเทียบปริมาณคาร์บอนคงตัวระหว่างวิธีอัดร้อนและวิธีอัดเย็นของแท่งเชื้อเพลิงสูตร ฟางข้าว : ใบข้าวโพด....74

รูปที่ 4.40 เปรียบเทียบค่าความร้อนของแท่งเชื้อเพลิงสูตร ใบอ้อย : ใบข้าวโพด (ชนิดอัดร้อน) กับค่าที่ทางกรมพัฒนาพลังงานทดแทนแนะนำ....82

รูปที่ 4.41 เปรียบเทียบค่าความร้อนของแท่งเชื้อเพลิงสูตร ฟางข้าว : ใบอ้อย (ชนิดอัดร้อน) กับค่าที่ทางกรมพัฒนาพลังงานทดแทนแนะนำ....82

รูปที่ 4.42 เปรียบเทียบค่าความร้อนของแท่งเชื้อเพลิงสูตร ฟางข้าว : ใบข้าวโพด (ชนิดอัดร้อน) กับค่าที่ทางกรมพัฒนาพลังงานทดแทนแนะนำ....83

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

รูปที่ 4.43 เปรียบเทียบค่าปริมาณเถ้าของแท่งเชื้อเพลิงสูตร ใบอ้อย : ใบข้าวโพด (ชนิดอัดร้อน) กับค่าที่ทางกรมพัฒนาพลังงานทดแทนแนะนำ และมาตรฐานจากทางต่างประเทศ 83

รูปที่ 4.44 เปรียบเทียบค่าปริมาณเถ้าของแท่งเชื้อเพลิงสูตร ฟางข้าว : ใบอ้อย (ชนิดอัดร้อน) กับค่าที่ทางกรมพัฒนาพลังงานทดแทนแนะนำ และมาตรฐานจากทางต่างประเทศ........................84

รูปที่ 4.45 เปรียบเทียบค่าปริมาณเถ้าของแท่งเชื้อเพลิงสูตร ฟางข้าว : ใบข้าวโพด (ชนิดอัดร้อน) กับค่าที่ทางกรมพัฒนาพลังงานทดแทนแนะนำ และมาตรฐานจากทางต่างประเทศ 84

รูปที่ 4.46 เปรียบเทียบค่าความร้อนของแท่งเชื้อเพลิงสูตร ใบอ้อย : ใบข้าวโพด (ชนิดอัดเย็น) กับค่าที่ทางกรมพัฒนาพลังงานทดแทนแนะนำ..85

รูปที่ 4.47 เปรียบเทียบค่าความร้อนของแท่งเชื้อเพลิงสูตร ฟางข้าว : ใบอ้อย (ชนิดอัดเย็น) กับค่าที่ทางกรมพัฒนาพลังงานทดแทนแนะนำ..85

รูปที่ 4.48 เปรียบเทียบค่าความร้อนของแท่งเชื้อเพลิงสูตร ฟางข้าว : ใบข้าวโพด (ชนิดอัดเย็น) กับค่าที่ทางกรมพัฒนาพลังงานทดแทนแนะนำ..86

รูปที่ 4.49 เปรียบเทียบค่าปริมาณเถ้าของแท่งเชื้อเพลิงสูตร ใบอ้อย : ใบข้าวโพด (ชนิดอัดเย็น) กับค่าที่ทางกรมพัฒนาพลังงานทดแทนแนะนำ และมาตรฐานจากทางต่างประเทศ 86

รูปที่ 4.50 เปรียบเทียบค่าปริมาณเถ้าของแท่งเชื้อเพลิงสูตร ฟางข้าว : ใบอ้อย (ชนิดอัดเย็น) กับค่าที่ทางกรมพัฒนาพลังงานทดแทนแนะนำ และมาตรฐานจากทางต่างประเทศ........................87

รูปที่ 4.51 เปรียบเทียบค่าปริมาณเถ้าของแท่งเชื้อเพลิงสูตร ฟางข้าว : ใบข้าวโพด (ชนิดอัดเย็น) กับค่าที่ทางกรมพัฒนาพลังงานทดแทนแนะนำ และมาตรฐานจากทางต่างประเทศ 87

รูปที่ 4.52 กราฟเปรียบเทียบค่าความร้อนจากแท่งเชื้อเพลิงชีวมวล...88

รูปที่ 4.53 กราฟเปรียบเทียบปริมาณเถ้าจากแท่งเชื้อเพลิงชีวมวล 89

รูปที่ 5.1 แผนผังกรรมวิธีในการผลิตแท่งเชื้อเพลิงชีวมวลชนิดอัดร้อน.......................................91

รูปที่ 5.2 แผนผังกรรมวิธีในการผลิตแท่งเชื้อเพลิงชีวมวลชนิดอัดเย็น.......................................92

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัญหาปริมาณขยะที่เหลือตกค้างอยู่พบเห็นได้ทั่วไปในประเทศไทย อีกทั้งการจัดการอย่างไม่ถูกวิธีก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมอย่างมาก กากเหลือใช้ทางการเกษตรก็เป็นอีกหนึ่งกลุ่มที่มีปริมาณมากในประเทศไทยเนื่องจากการทำการเกษตรเป็นสิ่งที่นิยมทำกันอย่างแพร่หลายเรียกได้ว่าแทบทั่วทุกพื้นที่ ซึ่งถ้าพิจารณาจากปริมาณที่เหลือตกค้างแล้วยังมีปริมาณที่มากและการจัดการกากของเสียที่เหลือตกค้างนั้นเกษตรกรก็ยังนิยมที่จะเผาทำลายทั้งระหว่างและหลังฤดูกาลเก็บเกี่ยวส่งผลให้เกิดเป็นปัญหาหมอกควันเป็นบริเวณกว้างส่งผลกระทบต่อทั้งสภาพแวดล้อมและชุมชนโดยรอบแหล่งเพาะปลูกนั้น อีกทั้งยังมีกากเหลือใช้ทางการเกษตรที่เป็นของเสียซึ่งเกิดจากกระบวนการจากอุตสาหกรรมที่ต้องนำไปกำจัด ถ้าสามารถนำกากของเหลือกลุ่มนี้กลับไปใช้ประโยชน์ทางด้านพลังงานแล้วจะส่งผลให้ลดปัญหาความเสี่ยงที่จะเกิดการการขาดแคลนของพลังงานได้ในอนาคต

พลังงานชีวมวลเป็นทางเลือกที่กำลังเป็นที่สนใจกันอย่างมากเนื่องจากมีการเพาะปลูกพืชในประเทศเป็นจำนวนมากและกลุ่มพืชเศรษฐกิจในไทย เช่น อ้อย มันสำปะหลัง ข้าวโพด และข้าว ยังได้รับการส่งเสริมจากรัฐบาลทำให้มีแนวโน้มในการเพิ่มกำลังการผลิตที่สูงขึ้นทุกๆปี กลุ่มพืชเหล่านั้นยังคุณสมบัติในด้านการให้ค่าความร้อนสูง หาได้ง่ายและยังมีอยู่ทั่วไปเกือบทุกพื้นที่อีกทั้งมีปริมาณมาก เหมาะแก่การนำมาทำเป็นเชื้อเพลิงชีวมวล ซึ่งการประยุกต์ใช้จริงในปัจจุบันนั้น มีการนำชีวมวลที่ได้จากพืชมาใช้ผลิตพลังงานโดยแพร่หลายซึ่งชนิดที่นิยมมากที่สุดก็คือ แกลบ ชานอ้อย เศษไม้ แต่ของเสียที่เกิดจากกลุ่มพืชเศรษฐกิจ เช่น ฟางข้าว ใบอ้อย และใบหรือลำต้นข้าวโพด ซึ่งเป็นของกากเหลือใช้ทางการเกษตรที่กถูกทิ้งไว้ที่บริเวณเพาะปลูกกลับถูกมองข้ามไปทั้งที่มีปริมาณที่มากเป็นอันดับต้นๆ อาจจะเนื่องมาจากเป็นสิ่งที่เกษตรกรไม่ให้ความสนใจกันส่วนใหญ่มักจะเผาทิ้งซึ่งเป็นการจัดการอย่างที่ไม่ถูกวิธี และกลุ่มเหล่านั้นต้องนำมาแปลงสภาพให้วัตถุพร้อมที่จะใช้งานเสียก่อนส่งผลให้มีค่าใช้จ่ายในการดำเนินการมากกว่ากลุ่มที่นำมาใช้เลย ทั้งที่สิ่งเหล่านั้นมีศักยภาพเพียงพอที่จะนำมาผลิตเป็นเชื้อเพลิงชีวมวลเพื่อผลิตพลังงานก็ตาม

งานวิจัยนี้จะทำการพิจารณาความเป็นไปได้ในการนำวัสดุเหลือใช้จากการเกษตรกลุ่มที่ถูกละเลยมาผลิตเป็นแท่งเชื้อเพลิง (Chiang, Chien และ Lu, 2012) รวมไปถึงการนำกากเหลือใช้ทางการเกษตรมาผสมในอัตราส่วนที่ต่างกัน (Nunes, Matias และ Catalão, 2014) (Jittabut, 2015) เพื่อลดความเสี่ยงที่จะเกิดปัญหาความขาดแคลนเนื่องมาจากผลผลิตที่ขาดแคลนในบางฤดูการ อีกทั้ง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ช่วยให้เชื้อเพลิงง่ายต่อการจัดเก็บและขนส่ง ภายใต้สภาวะของตัวแปรต่างๆ ได้แก่ ชนิดของพืช อัตราส่วนของพืชแต่ละชนิด และความเป็นไปได้ในทางปฏิบัติ ซึ่งค่าลักษณะสมบัติที่จะใช้ในการพิจารณานั้นได้แก่ ค่าความร้อน ปริมาณความชื้น ปริมาณเถ้า ค่าความทนทานของแท่งเชื้อเพลิง รวมไปถึงองค์ประกอบของธาตุต่างๆ ในแท่งเชื้อเพลิง โดยจะวิเคราะห์โดยวิธีตามหลัก ASTM (Niedziółka และคณะ, 2015) ซึ่งในแต่ละหัวข้อนั้นจะทำการเทียบกับเชื้อเพลิงอื่นๆที่มีการใช้ในการผลิตพลังงานในประเทศไทย รวมถึงค่ามาตรฐานของแท่งเชื้อเพลิงที่มีอยู่ (Tumuluru และคณะ, 2010) เพื่อเพิ่มความน่าเชื่อถือในการนำไปใช้จริง ซึ่งการทดลองมีจุดมุ่งหมายเพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสมของแท่งเชื้อเพลิงชีวมวล เพื่อใช้เป็นพลังงานทางเลือกและยังเป็นการนำกากของเสียกลับมาใช้ให้เกิดประโยชน์ให้ได้มากที่สุด

1.2 วัตถุประสงค์

1. ศึกษาลักษณะสมบัติต่างๆ รวมไปถึงองค์ประกอบของวัสดุเหลือใช้จากการเกษตร เพื่อให้ทราบว่าวัสดุที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงชีวมวล
2. ศึกษาอัตราส่วนการผสมวัสดุเหลือใช้จากการเกษตรที่เหมาะสม ในการนำมาผลิตเป็นเชื้อเพลิงชีวมวล เพื่อใช้เป็นแนวทางสำหรับการนำวัสดุเหลือใช้จากการเกษตรมาผลิตเป็นเชื้อเพลิงชีวมวล เพื่อใช้ในการผลิตไฟฟ้า

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

การศึกษางานวิจัยนี้เป็นการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ (Lab scale) สถานที่ทำการทดลองคือ ห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ซึ่งมีขอบเขตการวิจัยดังนี้

1. พิจารณาวัสดุเหลือใช้จากการเกษตร ที่เกิดจากกลุ่มพืชเศรษฐกิจ ได้แก่ ฟางข้าว ใบอ้อย และใบหรือลำต้นข้าวโพด
2. กลุ่มพืชเศรษฐกิจนั้น เพาะปลูกภายในจังหวัด ลพบุรี
3. พารามิเตอร์ที่ใช้ในการเปรียบเทียบ ได้แก่ ค่าความร้อน และค่าProximate analysis
4. ขนาดของเชื้อเพลิงต้องมีความใกล้เคียงหรือเทียบเท่ากับแท่งเชื้อเพลิงชีวมวลที่ผลิตอยู่ในปัจจุบัน
5. ไม่ทำการวิเคราะห์พารามิเตอร์ด้านมลพิษที่ทางอากาศที่เกิดขึ้นจากกระบวนการ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ข้อมูลด้านลักษณะสมบัติ และองค์ประกอบของวัสดุเหลือใช้จากการเกษตร
2. อัตราส่วนผสมของวัสดุเหลือใช้จากการเกษตรที่มีความเหมาะสมในการนำมาใช้ผลิตพลังงานมากที่สุด
3. เป็นแนวทางการจัดการวัสดุเหลือใช้จากการเกษตรอย่างถูกต้อง เพื่อลดการเผาวัสดุเหลือใช้เหล่านั้น ทั้งก่อนและหลังจากการเก็บเกี่ยว

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 2
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 กากเหลือใช้ทางการเกษตร (Agricultural waste)

กากของเสียและวัสดุเหลือใช้จากกระบวนการทางการเกษตร ไม่ว่าจะเป็นระหว่างหรือหลังเพาะปลูก (ฟางข้าว ใบอ้อย ใบข้าวโพด) รวมถึงไปถึงกากของเสียที่ได้จากกระบวนการทางอุตสาหกรรมที่มีพืชเป็นวัตถุดิบตั้งต้น (ซังข้าวโพด ชานอ้อย) ซึ่งกากของเสียเหล่านี้ส่วนใหญ่จะย่อยสลายได้ง่ายตามธรรมชาติ เกษตรกรบางส่วนจึงนิยมนำไปทำปุ๋ย หรือบางพื้นที่นำของเหลือทางการเกษตรเหล่านั้นไปทำเป็นเชื้อเพลิงชีวมวลเพื่อเผาให้ความร้อนหรือเผาให้พลังงาน แต่ก็ยังมีเกษตรกรบางกลุ่มเลือกที่จะเผากากของเสียที่เหลือตกค้างหลังจากการเก็บเกี่ยวเพราะง่ายต่อการจัดการอีกทั้งยังประหยัดค่าใช้จ่ายส่งผลให้เกิดมลพิษทางอากาศเป็นอย่างมาก ก่อให้เกิดอันตรายต่อทั้งชุมชนบริเวณใกล้ๆแหล่งเพาะปลูกและสิ่งแวดล้อมโดยรอบ ซึ่งถ้าพิจารณาจากปริมาณแล้วกากเหลือใช้ทางการเกษตรส่วนใหญ่จะเกิดมาจากกลุ่มพืชเศรษฐกิจแล้วกากของเหลือใช้ทางการเกษตรกลุ่มดังกล่าวมีความเป็นไปได้ที่จะนำมาใช้ประโยชน์ เนื่องด้วยมีการเพาะปลูกกันอย่างแพร่หลายในทั่วทุกพื้นที่ส่งผลให้กากของเสียมีปริมาณที่มากและหาได้ง่าย (กระทรวงพลังงาน, 2549)

2.2 พืชเศรษฐกิจในไทย

ประเทศไทยเป็นประเทศที่มีพื้นที่เหมาะแก่ทำการเพาะปลูกมากส่งผลให้การปลูกพืชเป็นที่นิยมแพร่หลายและประชาชนส่วนใหญ่ยังประกอบอาชีพนี้ ซึ่งพืชแต่ละชนิดก็จะนิยมปลูกในพื้นที่บริเวณที่ต่างกันแบ่งออกเป็นหลายโซนและพืชเศรษฐกิจในไทยก็ได้แก่ ข้าว อ้อย ข้าวโพด เป็นต้น เนื่องจากเป็นพืชเศรษฐกิจทำให้มีผู้คนเพาะปลูกจำนวนมาก ปริมาณกากของเสียทางการเกษตรมากด้วยเช่นกันดั่งที่แสดงในตารางที่2.1 ซึ่งถ้ามีการจัดการอย่างมีประสิทธิภาพให้แก่กากของเสียกลุ่มนี้แล้ว นอกจากจะเพิ่มมูลค่าของกากของเสียแล้วยังส่งผลให้เกษตรกรมีรายได้เพิ่มจากการขายหรือใช้ประโยชน์ในกากของเสียเหล่าอีกด้วย ส่งผลให้ลดปริมาณการจัดการกากของเสียอย่างไม่ถูกวิธี ในที่นี้หมายถึงการเผากากเหลือใช้ทางการเกษตรที่ตกค้างอยู่บริเวณเพาะปลูกหลังจากฤดูกาลเก็บเกี่ยว ซึ่งสามารถเห็นได้จากตารางที่ 2.2 หากสามารถนำของกากเสียกลุ่มนี้กลับมาแปลงสภาพเป็นพลังงานได้มากถึง 3000 MW ซึ่งมีปริมาณเทียบเท่ากับโรงไฟฟ้าชีวมวลขนาดเล็กถึง 300 แห่ง

ตารางที่ 2.1 ปริมาณกากเหลือใช้ที่เกิดขึ้นและปริมาณกากเหลือใช้ที่ตกค้าง (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน, 2558)

ชนิดพืช	ชนิดกากเหลือใช้ทางการเกษตร	ปริมาณกากเหลือใช้ที่เกิด (ล้านตัน)	ปริมาณกากเหลือใช้ที่เหลือตกค้าง (ล้านตัน)
ข้าว	แกลบ	8.15	0.14
	ฟางข้าว	19.00	14.89
อ้อย	ชานอ้อย	28.03	0
	ใบ และ ยอด	17.02	16.17
ข้าวโพด (เลี้ยงสัตว์)	ซังข้าวโพด	1.22	0.12
	ยอด ใบ และลำต้น	9.31	8.85

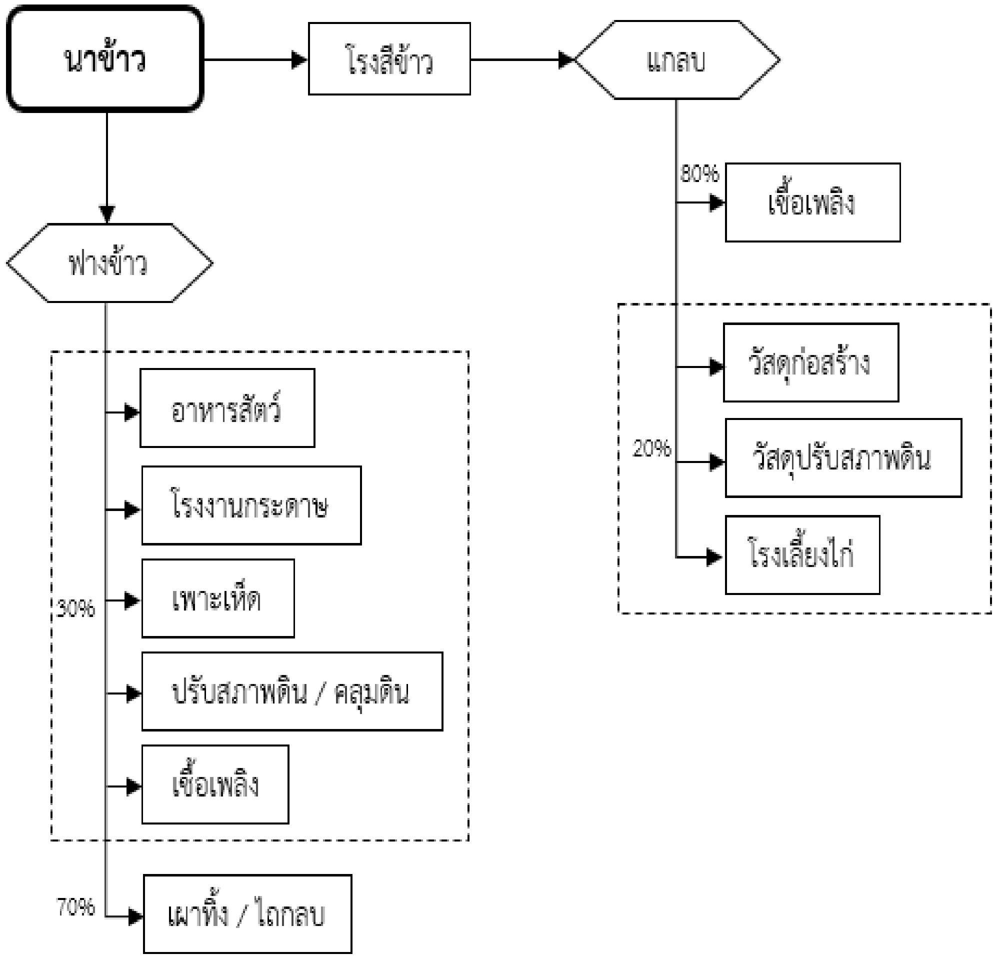
ตารางที่ 2.2 ปริมาณกากเหลือใช้ที่เหลือตกค้างและศักยภาพด้านพลังงาน (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน, 2558)

ชนิดกากเหลือใช้ทางการเกษตร	ปริมาณกากเหลือใช้ที่เหลือตกค้าง (ล้านตัน)	ค่าความร้อน (MJ/kg)	ศักยภาพพลังงาน (MW)
แกลบ	0.14	14.27	13.18
ฟางข้าว	14.89	15.67	942.12
ชานอ้อย	0	14.40	0
ใบ และ ยอด ของอ้อย	16.17	16.39	1647.33
ซังข้าวโพด	0.12	16.04	8.16
ยอด ใบ และลำต้นของข้าวโพด	8.85	16.32	610.23

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.2.1 ข้าว

ประเทศไทยเป็นประเทศผู้ผลิตและส่งออกข้าวรายใหญ่ของโลก ซึ่งข้าวเป็นพืชเศรษฐกิจของไทยเช่นกันสร้างรายได้มากมายให้กับประเทศ และยังสามารถนำไปแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์อื่นได้อีกหลายประเภท ทำให้มีความต้องการข้าวในปริมาณที่สูง แต่จากการที่มีปริมาณการปลูกที่สูงก็ส่งผลให้เกิดวัสดุเหลือใช้จากต้นข้าวเช่นกันดั่ง ตารางที่ สามารถทราบได้ถึงปริมาณจากเกิดชีวมวลโดยเทียบจากปริมาณผลผลิตของพืช และจากแผนผังการนำชีวมวลจากข้าวไปใช้งาน (รูปที่ 2.1) จะเห็นได้ว่าชีวมวลที่เกิดจากข้าวนั้นแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มได้แก่ กลุ่มแกลบ และกลุ่มฟางข้าว โดยฟางข้าวยังมีสัดส่วนการนำให้เกิดประสิทธิภาพภาพไม่มากนักและยังก่อให้เกิดมลพิษเป็นปริมาณมากทั้งที่มีศักยภาพเพียงพอที่จะนำมาใช้ผลิตพลังงาน

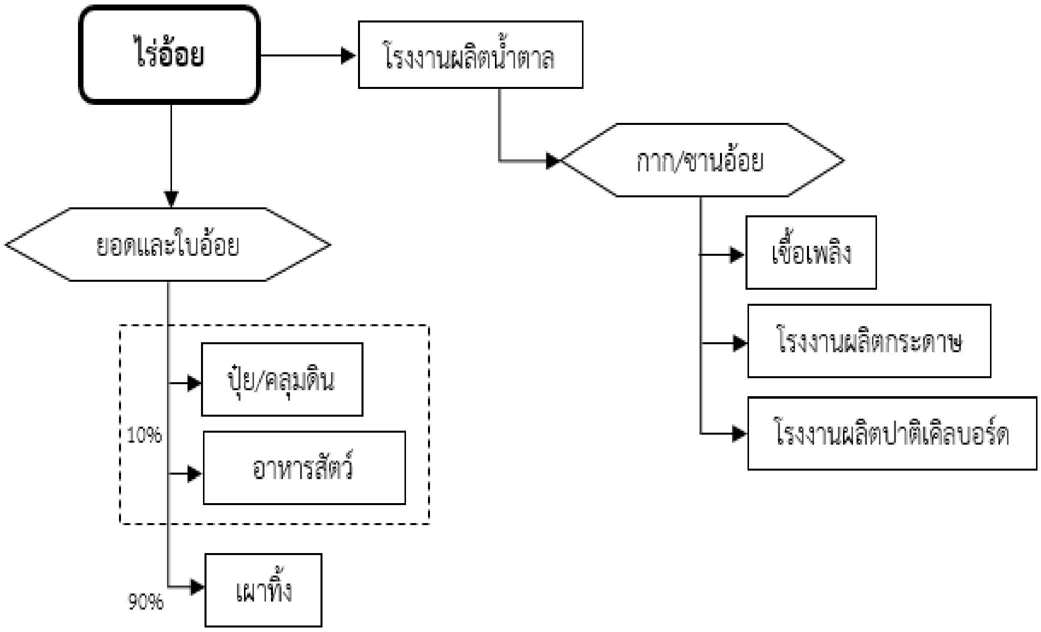


รูปที่ 2.1 แผนผังการนำชีวมวลจากข้าวไปใช้งาน

(กระทรวงพลังงาน, 2549)

2.2.2 อ้อย

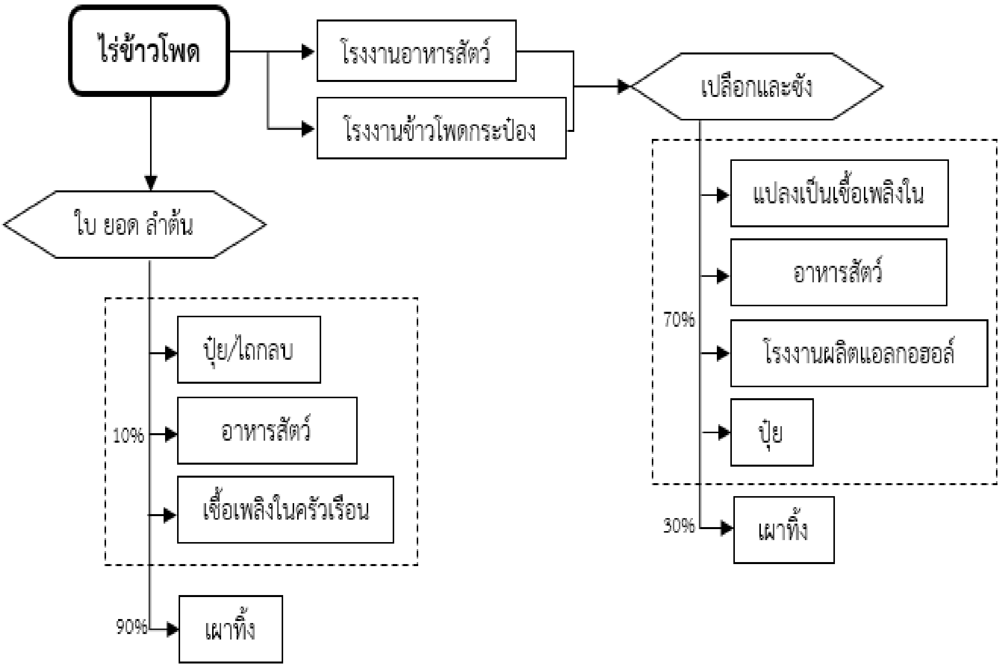
เป็นพืชที่มีปริมาณการปลูกมากที่สุดในประเทศไทยเพราะแนวโน้มราคาที่ขึ้นค่อนข้างดีส่งผลให้เกษตรกรหันมาปลูกอ้อยกันอย่างมาก แต่เมื่อนำมาแปรรูปเป็นน้ำตาลแล้วจำนวนการส่งออกมีมากถึง 70% ใช้บริโภคภายในประเทศเพียง 30% มีช่วงระยะเวลาการปลูกและเก็บเกี่ยวตายตัวเป็นช่วงเวลา ส่งผลให้การจัดการของเกษตรกรเลือกใช้วิธีที่รวดเร็วและง่ายต่อการจัดการ นั่นก็คือวิธีเผาเพื่อให้เหลือเพียงแต่ต้นอ้อยส่งโรงงาน ก่อให้เกิดมลพิษเป็นวงกว้างทั้งต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อม โดยชีวมวลที่เกิดจากอ้อยนั้นสามารถดูได้จาก ตาราง ซึ่งจะแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่มได้แก่ ชานอ้อย และใบอ้อยและจาก แผนผังการนำชีวมวลจากอ้อยไปใช้งาน (รูปที่2.2) จะเห็นได้ว่าชานอ้อยนั้นมีการนำไปใช้ประโยชน์ได้เกือบทั้งหมดแต่กลุ่มของยอดและใบอ้อยนั้นมีการนำมาใช้ประโยชน์เพียง 10% อีก 90% นั้นจะกำจัดอย่างไมถูกวิธีทั้งที่เป็นส่วนที่มีศักยภาพเพียงพอที่จะนำมาผลิตพลังงานก็ตาม



รูปที่ 2.2 แผนผังการนำชีวมวลจากอ้อยไปใช้งาน
(กระทรวงพลังงาน, 2549)

2.2.3 ข้าวโพด (เลี้ยงสัตว์)

มีความต้องการอย่างมากในท้องตลาดเนื่องจากเป็นวัตถุดิบหลักในอุตสาหกรรมการผลิตอาหารสัตว์ ซึ่งแนวโน้มความต้องการในตลาดยังคงสูงขึ้นเรื่อยๆ ที่มีความนิยมเพราะว่าบางพื้นที่อาจปลูกข้าวโพดแซมพืชใหญ่ชนิดอื่นได้เช่น ปลูกแซมภายในสวนยางทำให้เกษตรกรมีรายได้เพิ่มขึ้นอีกทางนึง โดยชีวมวลที่เกิดจากข้าวโพดนั้นสามารถดูได้จาก ตาราง ซึ่งจะแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่มได้แก่ กลุ่มเปลือก/ซัง และกลุ่มใบ/ลำต้นของข้าวโพด จากแผนผังการนำชีวมวลจากข้าวโพดไปใช้งาน (รูปที่ 2.3) จะเห็นได้ว่ากลุ่มเปลือกและซังนั้นมีการนำไปใช้ประโยชน์เสียส่วนใหญ่แต่กลุ่มของยอดและใบอ้อยนั้นมีการนำมาใช้ประโยชน์เพียง 10% อีก 90% นั้นจะกำจัดอย่างไมถูกวิธีทั้งที่เป็นส่วนที่มีศักยภาพเพียงพอที่จะนำมาผลิตพลังงานก็ตาม



รูปที่ 2.3 แผนผังการนำชีวมวลจากข้าวโพดไปใช้งาน

(กระทรวงพลังงาน, 2549)

2.3 การนำกากเหลือใช้ทางการเกษตรไปใช้ประโยชน์

ภายหลังจากการเก็บเกี่ยวนั้นก่อให้เกิดกากเหลือใช้ที่ไม่สามารถนำไปใช้ในอุตสหากรรมได้ บางส่วนจะเผาทำลายหลังจากการเก็บเกี่ยวทันที แต่ยังมีบางกลุ่มที่นำวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรเหล่านั้นไปใช้ประโยชน์ได้ โดยสามารถแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม

2.3.1 ใช้ประโยชน์ในภาคการเกษตร

เกษตรกรจะเน้นนำกากของเหลือจากการเกษตรมาใช้ภายในครัวเรือนหรือพืนที่ใกล้ๆ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของกิจการที่ทำอยู่ภายในพื้นที่ใกล้เคียง โดยจะเน้นไปทางเพาะปลูกและเลี้ยงสัตว์ (กระทรวงพลังงาน, 2549) เช่น

1) ใช้หมักปุ๋ย เกษตรกรจะรวบรวมวัสดุเหลือใช้จากการเกษตรมาผสมกันเพื่อทำเป็นปุ๋ยหมักเพื่อที่จะนำกลับไปเพิ่มประสิทธิภาพในการเพาะปลูก โดยจะอาศัยหลักการหมักและย่อยของพืช ใช้เวลาหมักประมาณ 2-3 เดือน จึงจะสามารถนำไปใช้ได้

2) นำมาเป็นวัสดุในการเพาะเห็ด บางพื้นที่ มีการนำฟาวข้าว และเปลือกข้าวโพดมาผสมวัสดุอื่นเพื่อนำมาใช้เพราะเห็น เนื้องจากเส้นใยเชื้อเห็นเจริญเติบโตได้ดีใน ฟางข้าวหมัก และตัวเปลือกข้าวโพดหมัก

3) นำมาเป็นอาหารสัตว์ มีของเหลือหลายชนิดที่ยังสามารถใช้เป็นอาหารให้สัตว์เคี้ยวเอื้องได้ เช่น ของเหลือจากข้าว ข้าวโพด และยังมีส่วนยอดของพืช

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.3.2 ใช้ประโยชน์ในภาคการผลิต

วัตถุดิบที่นำมาใช้ส่วนใหญ่มักจะเป็นกากของเสียที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตในโรงงานอุตสาหกรรมซึ่งทางโรงงานนิยมที่จะหาทางนำมาใช้ให้เกิดประโยชน์เพื่อลดค่าใช้จ่ายในการขนของเสียเหล่านั้นไปกำจัด (กระทรวงพลังงาน, 2549) เช่น

1) หมักเอธานอล ของเหลือที่นิยมนำมาใช้ต้องมีส่วนประกอบของแป้งหรือน้ำตาลอยู่ เช่น กากอ้อย เศษมันสำปะหลัง เนื่องจากอาศัยการหมักน้ำตาลให้เป็นแอลกอฮอล์โดยใช้เชื้อจุลินทรีย์ วิธีนี้แพร่หลายกันอย่างมากเพราะสามารถใช้เป็นพลังงานทางเลือกได้

2) เยื่อกระดาษ กลุ่มของเหลือที่นิยมนำมาทำคือกลุ่มที่มีเส้นใบสูงเหมาะแก่การมาทำเยื่อกระดาษ เช่น ชานอ้อย ฟางข้าว และลำต้นของข้าวโพด

3) ผนังมวลเบา ของเหลือจากการเกษตรที่นิยมมาทำคือกลุ่มที่มีเส้นใยสูง และมีปริมาณมาก เช่น ชานอ้อย

4) Biomass สารอินทรีย์ทั่วๆไปจากธรรมชาติ ที่จะสะสมพลังงานเก็บเอาไว้ในตัวของมันเอง และสามารถนำพลังงานของมันที่เก็บสะสมเอาไว้มาใช้ประโยชน์ได้ เช่น ชานอ้อย แกลบ ฟางข้าว เป็นต้น

2.4 ชีวมวล

เป็นแหล่งให้ความร้อนและแสงสว่างที่สำคัญที่มนุษย์ใช้มาตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันก็ยังมีความสำคัญเป็นลำดับต้นๆ ซึ่งจะนิยมมากในกลุ่มประเทศเกษตรกรรมและกลุ่มประเทศที่กำลังพัฒนา เพราะประเทศเหล่านี้ประกอบอาชีพเกษตรกรรมเป็นอาชีพหลักๆของประเทศ โดยจะใช้ตั้งแต่เป็นเชื้อเพลิงในการเผาไหม้ให้ความร้อนไปจนถึงการยกระดับแปลงสภาพให้เป็นเชื้อเพลิงที่มีคุณภาพที่ดีขึ้น ในปัจจุบันให้ความสนใจในเชื้อเพลิงชีวมวลมากขึ้นเพราะว่าสามารถใช้ทดแทนพลังงานที่ได้จากแหล่งพลังงานฟอสซิลซึ่งมีอยู่อย่างจำกัดได้ และยังเป็นสารอินทรีย์ซึ่งได้จากสิ่งมีชีวิต ทั้งพืช สัตว์ หรือกระบวนการทางชีวภาพที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ ชีวมวลเป็นแหล่งพลังงานที่ไม่มีวันหมดไปเพราะวงจรการผลิตของพืชมีวงจรที่สั้นแตกต่างจากเชื้อเพลิงฟอสซิลที่ต้องอาศัยการทับถมกันเป็นเวลานาน นอกจากนั้นชีวมวลยังผลิตได้ง่ายและยังเพิ่มมูลค่าของสินค้าจากเกษตรกรรมที่มีอยู่มากมายในโลก แถมยังช่วยลดภาระในการสร้างพลังงานในประเทศเหล่านั้นอีกด้วย

เชื้อเพลิงชีวมวลที่ให้อยู่ในนิยมใช้อยู่ในปัจจุบันคือกกลุ่มของกากของเสียที่เกิดจากโรงงานอุตสาหกรรมได้แก่ แกลบ ชานอ้อย ซังข้าวโพด เป็นต้น เนื่องจากเป็นการนำของเสียกลับมาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุดอีกทั้งยังสามารถนำพลังงานความร้อนที่เกิดจากเชื้อเพลิงเหล่านั้นกลับมาใช้ภายในโรงงานหรือส่งขายอีกด้วย แต่ในกลุ่มเหล่านั้นยังมีปัญหาด้านความหนาแน่นรวมของวัตถุดิบต่ำ ขนาดที่ไม่สม่ำเสมอ อีกทั้งมีสิ่งปนเปื้อนมากับวัตถุดิบส่งผลให้ปฏิกิริยาไม่สม่ำเสมอ ทำให้ประสิทธิภาพของระบบไม่เป็นไปอย่างที่คาดไว้ ในปัจจุบันนิยมลดขนาดอนุภาคของวัตถุดิบให้มีความคล้ายคลึงกันแล้วจึงอัดเป็นแท่งเชื้อเพลิง ส่งผลให้ควบคุมประสิทธิภาพของระบบได้ง่ายและยังง่ายต่อการขนส่งรวมทั้งควบคุมสภาวะในการจัดเก็บ แต่ก็ยังเกิดปัญหาด้านความไม่สม่ำเสมอเนื่องจากฤดูกาลเพาะปลูกส่งผลให้เดินระบบได้ไม่ต่อเนื่อง ต่อมาจึงแก้ไขโดยใช้วัตถุดิบชนิดอื่นเข้ามาเสริมในระบบเกิดเป็นชีวมวลอัดเม็ดผสมเพื่อช่วยลดปัญหาดังกล่าว อีกทั้งการผสมวัตถุดิบบางชนิดเช่า เศษขี้เลื่อย หรือผลิตภัณฑ์จากไม้ยังส่งผลให้ประสิทธิภาพของแท่งเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้นอีกด้วย

2.4.1 การนำชีวมวลมาใช้เป็นแหล่งวัตถุดิบเพื่อให้พลังงาน

มีด้วยกันหลายวิธี ดังนี้ (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2557b) (Chen, Xing และ Han, 2009)

2.4.1.1 การเผาไหม้โดยตรง (combustion)

เป็นการนำชีวมวลมาเผาให้มาได้ซึ่งความร้อนโดยสามารถบ่งบอกความสามารถได้โดยค่าความร้อนของชีวมวลชนิดนั้นๆ ซึ่งความร้อนที่ได้จากการเผาสามารถนำไปใช้ในการต้มน้ำในหม้อไอน้ำ และไอน้ำที่ผลิตได้นั้นจะมีอุณหภูมิและความดันที่สูงจะถูกนำไปใช้เพื่อขับกังหันไอน้ำเพื่อผลิตเป็นพลังงานไฟฟ้า

2.4.1.2 การผลิตก๊าซ (gasification)

เป็นกระบวนการที่เปลี่ยนเชื้อเพลิงแข็งหรือชีวมวลให้อยู่ในสภาวะของก๊าซเชื้อเพลิง เรียกก๊าซเหล่านั้นว่าก๊าซสังเคราะห์ (Synthesis gas) ซึ่งจะมีองค์ประกอบของก๊าซมีเทน ไฮโดรเจน และคาร์บอนมอนอกไซด์ ก๊าซเหล่านี้จะทำหน้าที่ขับกังหันก๊าซ (Gas turbine) และพลังงานความร้อนที่หลงเหลือยังสามารถนำกลับไปใช้ในกระบวนการอบผลิตภัณฑ์

2.4.1.3 การหมัก (Fermentation)

เป็นการนำชีวมวลมาหมักด้วยแบคทีเรียในสภาวะไร้อากาศ ส่งผลให้ชีวมวลจะถูกย่อยสลายให้มาได้ซึ่งก๊าซชีวภาพ (Biogas) ที่มีองค์ประกอบของก๊าซมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์ โดยก๊าซมีเทนนั้นสามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์สำหรับผลิตไฟฟ้า

2.5 วิธีการผลิตแท่งเชื้อเพลิงชีวมวล

การใช้ประโยชน์จากกากเหลือใช้ทางการเกษตรและจากป่าไม้ทำได้ค่อนข้างยากเนื่องจากลักษณะที่หลากหลายของชีวมวลไม่สม่ำเสมอซึ่งเป็นข้อด้อยของกากเหลือใช้กลุ่มนี้ แต่สามารถแก้ไขได้โดยการอัดเศษกากเหลือใช้เหล่านี้ให้อยู่ในรูปของเชื้อเพลิงแท่งเพื่อเพิ่มความหนาแน่นซึ่งกระบวนการนี้เป็นกระบวนการที่ใช้กันอย่างแพร่หลายทั่วโลกในปัจจุบัน โดยเฉพาะกลุ่มประเทศที่กำลังพัฒนา เพราะสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับเศษวัสดุได้ ส่งผลให้สามารถใช้ประโยชน์จากกากเหลือใช้กลุ่มให้ได้มากที่สุด ซึ่งประโยชน์ของการอัดเป็นแท่งนั้นมีมากมายดังนี้

- ช่วงเพิ่มค่าความร้อนของวัสดุต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร
- ได้ผลิตภัณฑ์ที่เก็บรักษาและขนส่งได้สะดวก

- ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพและขนาดรูปร่างที่สม่ำเสมอ

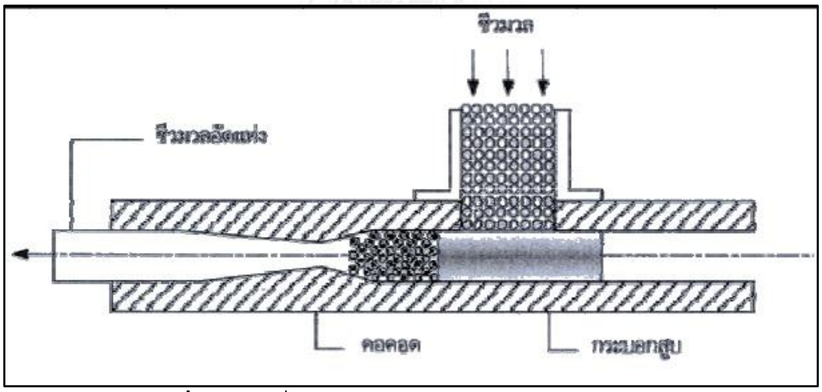
เทคนิคในการเพิ่มความหนาแน่นนั้นสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่มหลักๆตามสภาวะการปฏิบัติงานได้แก่ การอัดร้อนที่ความดันสูง และ การอัดเย็นที่ความดันต่ำ (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2557b)

2.5.1 การอัดร้อนที่ความดันสูง

นิยมใช้อย่างแพร่หลายเป็นเป็นเทคนิคที่ใช้ได้กับวัสดุแทบจะทุกชนิด ถ้าหากแบ่งวิธีย่อยออกไปจะขึ้นอยู่กับเครื่องมืออุปกรณ์ในการอัดเพื่อเพิ่มความหนาแน่นซึ่งมีทั้งหมด 4 ชนิดหลัก ได้แก่

2.5.1.1 การอัดแท่งด้วยกระบอกสูบ (Piston press)

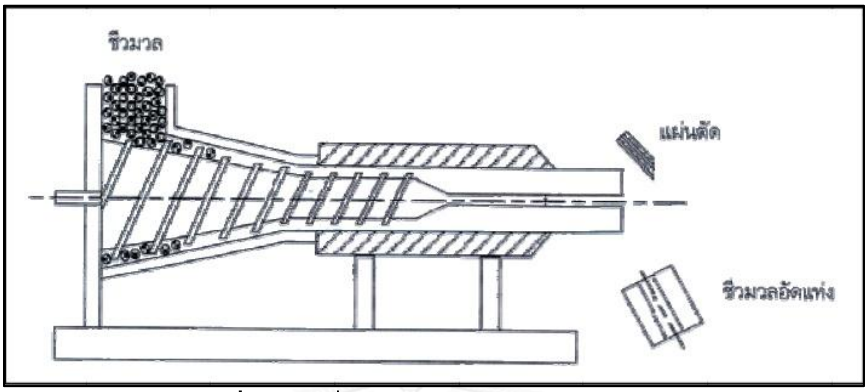
เครื่องจักรจะประกอบด้วยกลไกลูกสูบและกระบอกสูบที่ออกแรงกดวัสดุจากช่องป้อนลงในเบ้าที่มีความร้อน 150ºC – 300ºC และขับเคลื่อนด้วยระบบไฮดรอลิก เชื้อเพลิงอัดแท่งที่ได้จะมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 50 – 100 มิลลิเมตร



รูปที่ 2.4 เครื่องอัดแท่งแบบกระบอกสูบ (Piston press)
(กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2557b)

2.5.1.2 การทัดแท่งด้วยสกรู (Screw press)

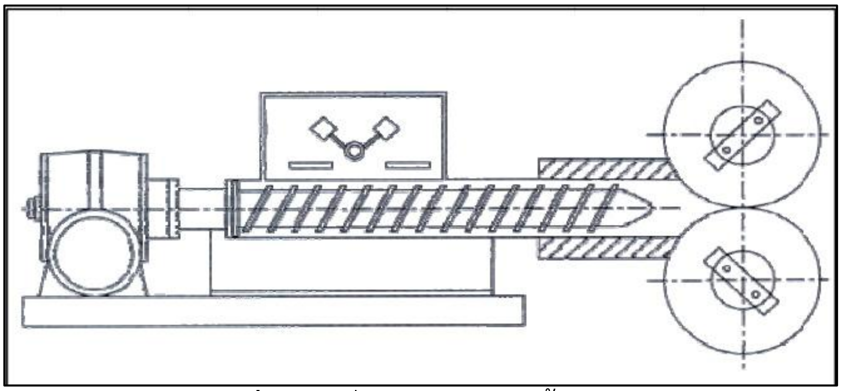
วัสดุจะถูกอัดด้วยสกรูโดยหัวอัดสกรูจะหมุนส่งวัสดุผ่านช่อง และให้ความร้อนโดยไฟฟ้าผ่านจากผิวนอกโดยวัสดุภายในจะมีอุณหภูมิอยู่ที่ประมาณ 200°C แท่งเชื้อเพลิงที่ได้จะมีขนาดประมาณ 50 – 100 มิลลิเมตร



รูปที่ 2.5 เครื่องอัดแท่งแบบสกรู (Screw press)
(กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2557b)

2.5.1.3 การอัดแบบกลิ้ง (Roll press)

วัสดุจะถูกบีบอัดระหว่างตัวหมุนสองตัวซึ่งจะหมุนในทิศตรงข้ามกันโดยจะมีช่องห่างระหว่างกันเล็กน้อยตามขนาดแท่ง วิธีนี้จะต้องการวัตถุดิบที่มีขนาดเล็กเป็นพิเศษมากกว่าอีกทั้งสองวิธีก่อนหน้า และให้ค่าความทนทานของแท่งเชื้อเพลิงได้น้อยกว่าอีกสองวิธีเช่นกันวิธีนี้จึงนิยมใช้ควบคู่กันการใส่ตัวเชื่อมประสานเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพด้านค่าความทนทานของแท่งเชื้อเพลิง

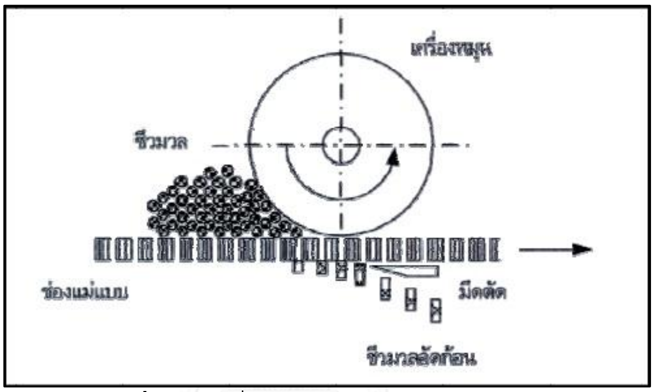


รูปที่ 2.6 เครื่องอัดแท่งแบบกลิ้ง (Roll press)
(กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2557b)

2.5.1.4 การอัดเป็นเม็ด (Pelletizing)

เครื่องอัดแท่งประเภทนี้ประกอบไปด้วยช่องแบบแม่พิมพ์และเครื่องหมุน ความดันที่ได้ส่งผลให้เกิดการบังคับวัสดุผ่านช่องแบบแม่พิมพ์และทำให้ความร้อนเนื่องจากเกิดแรงเสียดทาน แท่งเชื้อเพลิงที่ได้จากวิธีนี้จะมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 5 -15 มิลลิเมตรและความยาวไม่เกิน 30 มิลลิเมตร

โดยในงานวิจัยนี้เลือกใช้วิธี Pelletizing โดยเปลี่ยนจากการใช้เครื่องหมุนในการให้แรงดันที่เพียงพอเป็นการใช้เครื่องอัดไฮดรอลิคควบคู่ไปกับการให้ความร้อนวัตถุดิบเนื่องจากเป็นวิธีที่เหมาะสมที่สุดในการผลิตแท่งเชื้อเพลิงใน Lab scale อีกทั้งยังไม่สิ้นเปลืองวัตถุดิบในการเดินระบบ (Chen, Xing และ Han, 2009)



รูปที่ 2.7 เครื่องอัดเป็นเม็ด (Pelletiziing)
(กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2557b)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 2.8 เครื่องอัดและแม่แบบที่ใช้ในงานวิจัย

2.5.2 การอัดเย็นที่ความดันต่ำ

เป็นกระบวนการอัดแท่งเชื้อเพลิงที่มีความต้องการความดันและอุณหภูมิขณะเดินระบบที่ต่ำ โดยสามารถแบ่งวิธีย่อยได้เป็น 2 วิธี (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2557b)

2.5.2.1 การบีบอัดแบบใช้ตัวเชื่อมประสาน

เป็นกระบวนการที่ใช้อัดแท่งถ่านหินโดยระหว่างกระบวนการจะเติมตัวเชื่อมประสานเข้าไปทำหน้าที่เป็นกาวเกาะระหว่างเนื้อวัสดุ จึงไม่มีความจำเป็นต้องให้ความร้อนเพื่อให้ลิกนินอ่อนตัว โดยตัวเชื่อมประสานนั้นต้องมีคุณสมบัติที่ไม่ส่งผลให้ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงตก และปริมาณเถ้าต้องไม่มาก จึงจะเหมาะสมแก่การนำมาใช้เป็นตัวเชื่อมประสาน (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2557b) สามารถแบ่งตัวเชื่อมประสานออกเป็น 3 กลุ่มได้ดังนี้

1) ตัวประสานชนิดโครงข่าย (Matrix type) ใช้ผสมเนื้อวัสดุที่จะอัดให้เกาะตัวกับตัวประสานเป็นเนื้อเดียวโดยจะต้องใช้ตัวประสานประเภทนี้ในจำนวนมาก ได้แก่ พาราฟิต ดินเหนียว กากจากการกลั่นปิโตรเลียม เป็นต้น

2) ตัวประสานชนิดแผ่นฟิล์ม (Film type) ปกติตัวประสานชนิดนี้จะใช้ในรูปแบบของสารละลายในน้ำ ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์มีความแข็งแกร่งขึ้นเมื่อมีการซับน้ำออกให้แห้งแล้วหลังการอัดแท่ง ได้แก่ เบนโตไนท์ โมลาส กาว น้ำแป้งมันสำปะหลัง เป็นต้น

3) ตัวประสานเคมี (Chemical type) การทำงานของตัวประสานประเภทนี้จะขึ้นอยู่กับประสิทธิผลของปฏิกิริยาเคมีระหว่างส่วนประกอบของตัวประสานหรือปฏิกิริยาเคมีระหว่างตัวประสานกับวัสดุอัดแท่ง ได้แก่ สารผสมระหว่างแคลเซียมไฮดรอกไซด์กับโมลาส

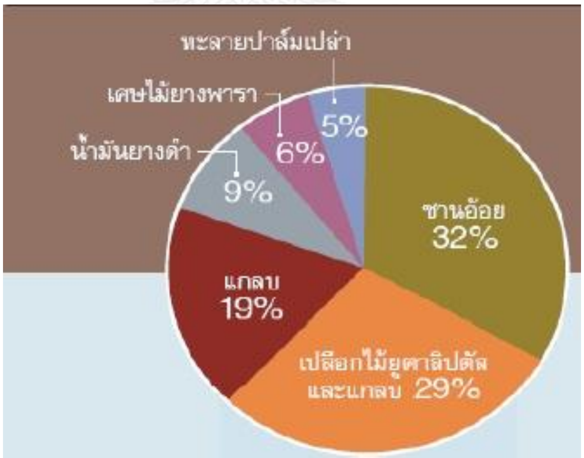
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

2.5.2.2 การบีบอัดแบบไม่ใช่ตัวประสาน

เป็นวิธีจำเพาะกับชีวมวลที่สลายตัวแล้ว (Decayed Biomass) เช่น เศษกากเหลือใช้ทางการเกษตรที่กองทิ้งไว้ข้ามปี (กองกากอ้อย กองเปลือกเมล็ดต่างๆ) ชีวมวลสดสามารถอัดแท่งโดยวิธีนี้ได้ต่อเมื่อผ่านกระบวนการหมักย่อยมาก่อนระดับหนึ่ง (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2557b)

2.6 เชื้อเพลิงชีวมวลที่มีอยู่ในไทย

โดยส่วนมากแล้วมักนิยมแบ่งเชื้อเพลิงชีวมวลออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ ได้แก่ (1) นำชีวมวลไปเผาให้พลังงานโดยตรง วัตถุดิบมักจะเป็นกากของเสียที่เกิดขึ้นในโรงงานใหญ่ เช่น ชานอ้อย แกลบ แปลกไม้ เป็นต้น กากของเสียเหล่านี้มีปริมาณที่มากสม่ำเสมอ เหมาะที่จะนำมาเป็นวัตถุดิบในการเผาให้พลังงานในโรงไฟฟ้าขนาดใหญ่ โดยส่วนมากมักจะตั้งอยู่ไม่ไกลจากโรงงานแปรรูปวัตถุดิบเหล่านั้น ซึ่งมักจะนิยมนำกากของเสียเหล่านั้นใส่เตาเผาโดยตรงโดยไม่มีการแปรรูปใดใดเลย จากรูปที่2.9 แสดงถึงสัดส่วนชีวมวลกลุ่มดังกล่าวซึ่งสามารถเห็นได้ว่าชานอ้อยมีปริมาณมากที่สุดเนื่องการปริมาณการปลูกที่มากที่สุดในประเทศ (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2557a) ส่งผลให้ปริมาณกากของเสียที่เกิดจากอ้อยนั้นก็คือชานอ้อยมากเช่นกัน แต่ในปัจจุบันเริ่มมีปัญหาการขาดแคลนชานอ้อยในการนำมาเผาในโรงไฟฟ้า ทางโรงไฟฟ้านิยมที่จะรับซื้อใบของต้นอ้อยมาผสมเพิ่มในกองชีวมวลเพื่อให้มีคุณภาพและปริมาณเพียงพอต่อระบบ และจากแผนภูมิจะสังเกตุได้ว่าปริมาณชีวมวลผสมระหว่างเปลือกไม้ยูคาลิปตัสและแกลบสูงเป็นอันดับสอง เนื่องมาจากในปัจจุบันราคาแกลบมีแนวโน้มที่จะสูงขึ้นเรื่อยๆผู้ประกอบการจึงนิยมมองหาทางเลือกใหม่เพื่อลดต้นทุนอีกทั้งวัตถุดิบจากไม้ยังมีคุณสมบัติเด่นในด้านการนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิง เช่น ค่าความร้อนที่สูง และปริมาณเถ้าที่ต่ำ ทางผู้ประกอบการจึงนิยมนำกากของเสียจากงานไม้มาใช้ประโยชน์



รูปที่ 2.9 สัดส่วนการนำกากเหลือใช้ทางการเกษตรมาใช้เป็นเชื้อเพลิงชีวมวลในโรงไฟฟ้าขนาดใหญ่ (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2557a)

(2) นำชีวมวลไปแปรรูปเป็นเชื้อเพลิงอัดแท่ง โดยส่วนมากวัตถุดิบที่เข้ามาในระบบค่อนข้างที่จะมีความไม่แน่นอน โดยทางโรงงานแปรรูปเชื้อเพลิงอัดแท่งมักจะทำการพิจารณาวัตถุดิบที่เข้ามาในระบบในแต่ละรอบและทำการสรุปผลในกระบวนการว่าต้องการที่จำผลิตเชื้อเพลิงสูตรใด โดย

ส่วนมากลักษณะทางกายภาพของแท่งเชื้อเพลิงจะมีความคล้ายคลึงกันตลอดแต่จะมีความแตกต่างในด้านวัตถุดิบที่นำมาเข้าระบบ ส่วนมากวัตถุดิบหลักมักจะเป็นกากของเสียจากงานไม้เนื่องจากมีลักษณะทางสมบัติที่ดีในการนำไปแปรรูปเป็นเชื้อเพลิง เช่น ค่าความร้อนที่สูง และปริมาณเถ้าที่ต่ำ แต่หากวัตถุดิบไม่เพียงพอต่อความต้องการของผู้ซื้อ ทางโรงงานแปรรูปมักนิยมนำกากเหลือใช้ทางการเกษตรมาแปรรูปเป็นเชื้อแพลิงแท่ง เช่น กะลาปาล์ม ทะลายปาล์ม เศษแกลบ ชานอ้อย และเปลือกไม้ยูคาลิปตัส ซึ่งเป็นกากเหลือใช้จากโรงงานบางแห่งที่ไม่ได้นำมาแปรรูปเป็นเชื้อเพลิงโดยตรง (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2557a)

2.7 สถานการณ์การใช้พลังงานทดแทน

จากสถานการณ์ราคาน้ำมันดิบที่ราคาเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วทำให้ประเทศไทยต้องจัดหาพลังงานทดแทนเพื่อใช้ทดแทนน้ำมัน ซึ่งภาครัฐมีมาตรการและนโยบายที่สนับสนุนให้มีการใช้พลังงานทดแทนเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องโดยเฉพาะการใช้พลังงานทดแทนที่สามารถผลิตได้ในประเทศซึ่งประกอบด้วย พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม พลังน้ำ ชีวมวล ก๊าซชีวภาพ ขยะ และเชื้อเพลิงชีวภาพ

2.7.1 เป้าหมายการพัฒนาพลังงานทดแทนของกระทรวงพลังงาน

การพัฒนาพลังงานทดแทนเป็นส่วนหนึ่งของการกำหนดนโยบายพลังงานในภาพรวมที่จำเป็นต้องบูรณาการร่วมกับแผนพลังงานอื่นๆ เพื่อให้การขับเคลื่อนสอดคล้างกัน ในกรณีที่สามารถบรรลุเป้าหมายลดความเข้มในการใช้พลังงานลงร้อยละ 30 ในปี 2579 ซึ่งน่าจะอยู่ที่ระดับ 131,000 พันตันเทียบเท่าน้ำมันดิบ (ktoe) โดยจะแบ่งออกเป็น 3 กลุ่มใหญ่ ได้แก่ ไฟฟ้า ความร้อน และเชื้อเพลิงชีวภาพดั่งตาราง (ตารางที่ 3.5) ซึ่งพลังงานไฟฟ้าและความร้อนนั้นก็มีส่วนของเชื้อเพลิงชีวมวลรวมอยู่ในนั้นด้วยโดยทางกระทรวงได้กำหนดเป้าหมายการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากประเภทเชื้อเพลิงต่างๆแล้ว ยังมีเป้าหมายการผลิตความร้อนจากพลังงานทดแทนประเภทเชื้อเพลิงชีวมวล

ตารางที่ 2.3 เป้าหมายการพัฒนาพลังงานทดแทนภายใต้แผน AEDP ในปี พ.ศ. 2579
(กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน, 2558)

พลังงาน	**สัดส่วนพลังงานทดแทนที่เพิ่มขึ้น (ร้อยละ)**		**การใช้พลังงานขั้นสุดท้าย ณ ปี 2579 (ktoe)**
	สถานภาพ ณ ปี 2557	**สถานภาพ ณ ปี 2579**	
ไฟฟ้า	9	15 - 20	27,789
ความร้อน	17	30 – 35	68,413
เชื้อเพลิงชีวภาพ	7	20 – 25	34,798
พลังงานทดแทน : การใช้พลังงานขั้นสุดท้าย	**12**	**30**	**131,000**

ตารางที่ 2.4 สถานภาพและเป้าหมายการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานทดแทนของเชื้อเพลิงประเภทชีวมวล (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน, 2558)

ประเภทเชื้อเพลิง	กระบวนการผลิต	สถานภาพ สิ้นปี 2557	สถานภาพ สิ้นปี 2579
ชีวมวล	ไฟฟ้า (เมกกะวัตต์)	2,451.82	5,570.00
	ความร้อน (ktoe)	5,144.00	22,100.00

*ktoe = kilo tons of oil equivalents (กิโลตันเทียบเท่าน้ำมันดิบ)

2.8 ทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.8.1 การนำกากเหลือใช้ทางการเกษตรมาแปลงสภาพเป็นวัตถุดิบสำหรับเชื้อเพลิงในการให้พลังงาน

กากเหลือใช้ทางการเกษตรเป็นกากของเสียกลุ่มหนึ่งที่มีปริมาณเหลือตกค้างเป็นจำนวนมาก อีกทั้งยังมีการจัดการอย่างไม่ถูกวิธีหนึ่งในนั้นก็คือการเผาทำลายส่งผลให้ก่อให้เกิดเป็นปัญหามลพิษทางอากาศ (Demirbas, 2004) ซึ่งการนำกากของเสียกลุ่มนี้มาใช้ประโยชน์นั้นมีปริมาณที่น้อยมาก ทั้งที่บางชนิดมีค่าความร้อนที่สูงและมีศักยภาพเพียงพอในการให้พลังงาน (Karkania, Fanara และ Zabaniotou, 2012) (Werther และคณะ, 2000) ในจีนนั้นบางมณฑลมีการทำการเกษตรเป็นบริเวณกว้าง ปริมาณกากเหลือใช้ทางการเกษตรก็มากเช่นกันทางผู้วิจัยจึงเก็บตัวอย่างกากเหลือใช้ทางการเกษตรที่เหลือตกค้างอยู่ ณ บริเวณเพาะปลูกมาวิเคราะห์หาค่าลักษณะสมบัติต่างๆที่บ่งบอกถึงความสามารถในการนำมาให้พลังงานได้แก่ ค่าความร้อน ปริมาณความชื้น ปริมาณเถ้า ค่าสารระเหย รวมถึงองค์ประกอบของธาตุที่ส่งผลต่อสารพิษที่จะเกิดขึ้นถ้านำมากากเหลือใช้เหล่านั้นมาผลิตเป็นเชื้อเพลิง (Chiang, Chien และ Lu, 2012) (Chen, Xing และ Han, 2009) จากนั้นจึงนำไปเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงถ่านหิน(Vassilev, Vassileva และ Vassilev, 2015) ที่ใช้อยู่ในประเทศรวมไปถึงเชื้อเพลิงชีวมวลที่ใช้อยู่(Chiang, Chien และ Lu, 2012) เพื่อให้เห็นถึงศักยภาพการนำกลุ่มกากเหลือใช้ทางการเกษตรมาประยุกต์ใช้เป็นเชื้อเพลิงชีวมวลแทนที่จะปล่อยทิ้งไว้บริเวณเพาะปลูก อีกทั้งยังช่วยลดปัญหาการเผาทำลายกากเหลือใช้ทางการเกษตรหลังเพาะปลูกซึ่งก่อให้เกิดปัญหามลพิษทางอากาศที่ประสบอยู่ในปัจจุบัน

ปัญหาการจัดการกากเหลือใช้ทางเกษตรหลังจากฤดูกาลเก็บเกี่ยวที่ไม่ถูกวิธีก็ถูกพบได้ทั่วไปในประเทศไทยเช่นกัน สังเหตุได้จากสถิติการนำกากเหลือใช้ทางการเกษตรกลับมาใช้ประโยชน์โดยจำแนกตามชนิดพืช (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน 2556) ทำให้

สามารถเห็นได้ว่าในพืชหนึ่งชนิดสามารถสร้างกากเหลือใช้ทางการเกษตรได้หลายชนิดและการนำกากเหลือใช้เหล่านั้นกลับไปใช้ประโยชน์นั้นบางชนิดมีการใช้ประโยชน์กันอย่างแพร่หลายทั้งให้ประโยชน์ทางด้านการเกษตร เช่น การใช้เป็นอาหารสัตว์ การช่วยปรับสภาพดินเป็นต้น (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน 2556) รวมไปถึงการนำกากเหลือใช้กลับมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตพลังงาน เช่น แกลบ ชานอ้อย ซังข้าวโพดเป็นต้น เนื่องจากกากของเสียกลุ่มนี้เป็นกากของเสียที่เหลือใช้จากโรงงานอุตสหกรรมส่งผลให้มีกระบวนการคัดแยกที่ง่ายและมีประสิทธิภาพและถ้าวิเคราะห์จากค่าลักษณะสมบัติมีศักยภาพเพียงพอในการนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงไม่ว่าจะทั้งด้านค่าความร้อน และปริมาณที่มีอยู่มากส่งผลให้กากของเสียทางการเกษตรกลุ่มนี้ได้รับความนิยมอย่างมากในไทย (Laohalidanond, Chaiyawong และ Kerdsuwan, 2015) (Sajjakulnukit และคณะ, 2005) (Prasertsan และ Sajjakulnukit, 2006) แต่ก็ยังมีกากเหลือใช้ทางการเกษตรกลุ่มที่ถูกปล่อยทิ้งไว้บริเวณพื้นที่เพาะปลูกอีกกลุ่มหนึ่งที่ยังไม่ได้รับการนำกลับมาใช้ประโยชน์ได้อย่างมีประสิทธิภาพนักและการจัดการกากของเสียกลุ่มนี้ยังนิยมการจัดการแบบไม่ถูกวิธีซึ่งก็คือการเผาทำลายทั้งที่จากการงานวิจัยบ่งบอกว่ากากเหลือใช้ทางการเกษตรกลุ่มนี้ได้แก่ ฟางข้าว ใบอ้อย ใบข้าวโพด เหง้ามันสำปะหลัง เป็นต้น ก็มีศักยภาพในการนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงชีวมวลเช่นกัน (Sajjakulnukit และคณะ, 2005) (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน 2556) แต่ยังพบปัญหาข้อแม้ในด้านเทคโนโลยีการเก็บเกี่ยวที่ทำให้คัดแยกกากของเสียกลุ่มนี้และนำกลับมาใช้ใหม่ได้ยากยังต้องใช้เทคโนโลยีขั้นสูงในการจัดเก็บส่งผลให้มีต้นทุนที่สูง ส่งผลให้ในปัจจุบันจึงอาจจะยังไม่คุ้มทุนที่จะนำมาทำเป็นเชื้อเพลิงมากนัก (Kerdsuwan และ Laohalidanond, 2015) ซึ่งจากงานวิจัยทั้งหมดที่กล่าวมาส่งผลให้ผู้วิจัยเลือกพิจารณาเลือกกากเหลือใช้ทางการเกษตรที่เกิดจากกลุ่มพืชเศรษฐกิจ ได้แก่ ฟางข้าว ใบอ้อย และใบข้าวโพด มาใช้เป็นวัตถุดิบเพื่อผลิตเป็นเชื้อเพลิงชีวมวล

2.8.2 การผสมกากของเสียเพื่อผลิตเป็นแท่งเชื้อเพลิง

เนื่องจากกลุ่มกากเหลือใช้ทางการเกษตรนั้นมีความเสี่ยงด้านการขาดแคลนของวัตถุดิบอันเนื่องมาจากสภาพดิน ฟ้า อากาศ หรือแม้กระทั่งฤดูกาลเก็บเกี่ยว ผู้วิจัยจึงหาทางที่จะลดความเสี่ยงเหล่านั้นโดยการพิจารณานำกากเหลือใช้ทางการเกษตรต่างชนิดกันแบ่งผสมตามอัตราส่วนเพื่อผลิตเป็นเชื้อเพลิงชีวมวล (มหาวิทยาลัยศิลปากร, 2555) (Jittabut, 2015) หรือแม้กระทั่งการนำของเสียจากกลุ่มอุตสหากรรมประเภทอื่นมาผสมกับกากเหลือใช้ทางการเกษตรเพื่อผลิตเป็นเชื้อเพลิงชีวมวล เช่น ผสมกากเหลือใช้ทางการเกษตรกับกากตะกอนน้ำเสีย (Calvo และคณะ, 2013) ผสมกากเหลือใช้ทางการเกษตรกับกลุ่มของเสียจากงานไม้ (Antwi-Boasiako และ Acheampong, 2016) โดย

ตัวอย่างนั้นถูกใช้กันอย่างแพร่หลายเพราะเศษขี้เลื่อยจากงานไม้นั้นมีประสิทธิภาพในการให้พลังงานที่สูง ในต่างประเทศแถบโซนยุโรปนิยมใช้เป็นเชื้อเพลิงทั่วไปตามครัวเรือน (Antwi-Boasiako และ Acheampong, 2016) จากแนวคิดงานวิจัยทั้งหมดที่กล่าวมาส่งผลให้ผู้วิจัยทำการจับคู่ผสมกากเหลือใช้ทางการเกษตรซึ่งเป็นวัตถุดิบในงานวิจัยเพื่อลดความเสี่ยงที่จะเกิดปัญหาการขาดแคลนวัตถุดิบอีกทั้งอาจจะยังช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของแท่งเชื้อเพลิงอีกด้วย

2.8.3 การเตรียมวัตถุดิบเบื้องต้นก่อนใช้

การเตรียมวัตถุดิบเบื้องต้นก่อนนำเข้ากระบวนการก็เป็นอีกหนึ่งขั้นตอนสำคัญ เนื่องจากวัตถุดิบที่เป็นกากเหลือใช้ทางการเกษตรนั้นมีความหลากหลายทางรูปร่างและลักษณะมาก อีกทั้งยังมีค่าความชื้นที่สูง ในงานวิจัยเกี่ยวกับการนำกากเหลือใช้ทางการเกษตรมาใช้เป็นเชื้อเพลิงชีวมวลจึงนิยมที่จำอบเพื่อไล่ความชื้นก่อนที่ 105°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง (Chen, Xing และ Han, 2009) เนื่องจากความชื้นมีส่วนช่วยให้เกิดการถ่ายเทความร้อน ถ้ามีปริมาณความชื้นในวัตถุดิบมากจะส่งผลต่อทั้งกระบวนการบีบอัดและไอน้ำที่ถูกระเหยออกระหว่างกระบวนการผลิตอาจส่งผลให้เกิดการประทุระเบิดเนื่องจากแรงดันได้ (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2557b) จึงควรควบคุมความชื้นของวัตถุให้ต่ำกว่า 10% ก่อนนำเข้าสู่กระบวนแปรสภาพเป็นเชื้อเพลิงแท่ง และนำวัตถุดิบเข้าสู่กระบวนการย่อยและคัดแยกขนาดวัตถุเนื่องจากดิบที่เก็บมาเป็นกากของเสียที่เหลือตกค้างอยู่ภายในบริเวณเพาะปลูกอาจจะมีการปนเปื้อนของวัตถุดิบรวมถึงสิ่งแปลกปลอมปนอยู่เช่น ฝุ่น หิน กรวด ดิน ทราย เป็นต้น และยังสามารถควบคุมให้วัสดุมีขนาดที่เหมาะสมก่อนนำเข้าสู่กระบวนการอีกทั้งยังง่ายต่อการควบคุมสภาวะในการจัดเก็บ

2.8.4 การให้ความร้อนระหว่างกระบวนการ

กรรมวิธีในการอัดแท่งเชื้อเพลิงนั้นมีหลายวิธีด้วยกันแต่วิธีที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายที่สุดคือวิธีการอัดแท่งโดยใช้แรงดันควบคู่ไปกับความร้อนหรือเรียกว่า วิธีการอัดร้อนซึ่งการใช้แรงดันนั้นขึ้นอยู่กับเทคโนโลยีของเครื่องจักร แต่การให้ความร้อนมักนิยมเริ่มต้นที่อุณหภูมิประมาณ 150°C ขึ้นไปเนื่องจากลิกนิน(Lignin)ที่เป็นองค์ประกอบสำคัญในชีวมวลจะเกิดการอ่อนตัว ส่งผลให้น้ำในเนื้อชีวมวลเกิดการอ่อนตัวและเป็นการสร้างการยึดเกาะขึ้นภายในเนื้อวัสดุส่งผลให้ค่าความทนทานของแท่งเชื้อเพลิงชีวมวลเพิ่มขึ้นเมื่อได้รับความร้อนระหว่างกระบวนการ (Bhattacharya, Sett และ Shrestha, 1990) (Kaliyan และ Morey, 2010)

2.8.5 ค่าลักษณะสมบัติของแท่งเชื้อเพลิง

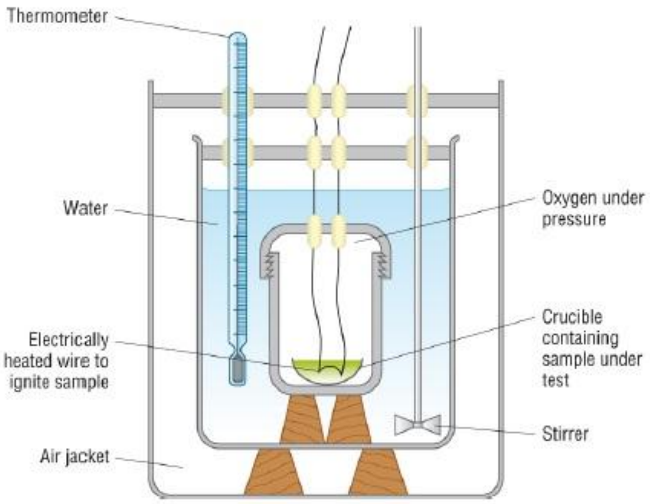
ในการบ่งบอกประสิทธิภาพของแท่งเชื้อเพลิงนิยมการพิจารณาจากค่าลักษณะสมบัติ ได้แก่ ค่าความร้อน ค่า Proximate analysis (ปริมาณความชื้น ปริมาณเถ้า ปริมาณสารระเหย และปริมาณคาร์บอนคงตัว) และค่า Ultimate analysis (องค์ประกอบธาตุต่างๆในแท่งเชื้อเพลิง เช่น C H O N S Cl) ซึ่งโดยทั่วไปนิยมทำตามวิธี ASTM (Niedziółka และคณะ, 2015) และจึงนำไปเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงชีวมวลชนิดอื่นหรือแม้กระทั่งเปรียบเทียบกับถ่านหิน (Vassilev, Vassileva และ Vassilev, 2015) (Chiang, Chien และ Lu, 2012)

1) ค่าความร้อน (Calorific value) ปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นเมื่อกากของเสียถูกเผาไหม้อย่างสมบูรณ์หรือเรียกว่าความร้อนของการเผาไหม้ ซึ่งจะแตกต่างกันตามประเภทของเชื้อเพลิง โดยเป็นค่าที่ให้ความสำคัญมากที่สุดในการเลือกพิจารณาเชื้อเพลิงเนื่องจากสามารถบ่งบอกประสิทธิภาพของระบบได้ชัดที่สุดรวมถึงสามารถประมาณปริมาณวัตถุดิบที่ต้องใช้ภายในระบบ นิยมคิดเป็นหน่วยพลังงานต่อน้ำหนัก วิเคราะห์โดยใช้เครื่องมือที่ชื่อว่า Bomb calorimeter

Bomb Calorimeter เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการหาพลังงานที่ใช้ในการเผาไหม้ ซึ่งเกิดจากการเผาไหม้สารในกลุ่มไฮโดรคาร์บอนดั่งในสมการที่ 1

$$C_XH_YO_{Z(S)} + [(2X+Y/2-Z)/2]O_{2(g)} \rightarrow XCO_{2(g)} + YH_2O_{(l)} \quad (1)$$

การทำงานของเครื่อง Bomb Calorimeter จะใช้หลักการของ Direct Calorimetry ซึ่งเป็นการวัดปริมาณความร้อนที่ปลดปล่อยออกมาเมื่อมีการเผาไหม้เชื้อเพลิงอย่างสมบูรณ์ โดยเชื้อเพลิงจะถูกบรรจุใน Chamber และ Charged ด้วยออกซิเจนภายใต้ความดันสูง (High Pressure) จากนั้นให้กระแสไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่าน Fuse และทำให้เกิดการจุดระเบิดโดย Calorimeter จะถูกห่อหุ้มด้วยฉนวนเพื่อป้องกันไม่ให้ความร้อนถ่ายเทออกไปสู่สภาวะแวดล้อมการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของน้ำทำให้ทราบถึงปริมาณความร้อนที่ปลดปล่อยจากแท่งเชื้อเพลิงแต่ละชนิดในปริมาณที่แตกต่าง (Melville, 2014)



รูปที่ 2.10 Bomb Calorimeter Diagram
(Melville, 2014)

2) ปริมาณความชื้น (Moisture content) ปริมาณน้ำที่คงเหลืออยู่ในตัววัสดุเชื้อเพลิงซึ่งมีผลต่อค่าความร้อน เนื่องจากการป้อนเชื้อเพลิงที่มีความชื้นสูงเข้าสูงระบบส่งผลให้โมเลกุลของน้ำเหล่านี้ดึกพลังงานจำนวนมากมาใช้ ทำให้ความร้อนของระบบไม่เพียงพอต่อการแตกตัวของก๊าซ โดยทั่วไปนิยมให้มีค่าต่ำกว่า 30% (Wolfgang Hiegl, Rainer Janssen และ Wilfried Pichler, 2009)

3) ปริมาณเถ้า (Ash content) เป็นสารอนินทรีย์ที่คงเหลือหลังจากการเผาไหม้ที่สมบูรณ์)Complete Combustion โดยเถ้านั้นส่งผลกระทบมากมายต่อระบบ (เชื้อเพลิงที่มีสัดส่วนเถ้าสูงทำให้ต้องใช้แรงงานเพิ่มมากขึ้นในการเดินระบบ เถ้านั้นถ้ามีสัดส่วนมากก่อให้เกิดปัญหาเถ้าหลอมในระบบซึ่งจะก่อให้เปิดผลเสียต่ออุปกรณ์ภายในเตาโดยทั่วไปแล้วมันจะคุมให้มีค่าต่ำกว่า 15%

4) ปริมาณสารระเหย (Volatile matter) เป็นองค์ประกอบในกากของเสียที่สามารถระเหยได้เมื่อได้รับความร้อน ปริมาณสารระเหยที่มากอาจจะมีแนวโน้มที่ทำให้ค่าความร้อนสูงตามอีกด้วย และยังเป็นปัจจัยสำคัญในการกำหนดปริมาตรและความสูงขั้นต่ำของระบบเนื่องจากต้องคำนึงถึงระยะเวลาที่ก๊าซเผาไหม้ภายในเตาอย่างสมบูรณ์ไม่ปะปนไปกับไอร้อนที่ถูกปล่อยออกไป

5) ปริมาณคาร์บอนคงตัว (Fixed carbon) ปริมาณคาร์บอนคงตัวซึ่งจะระเหยได้ยาก โดยจะคงเหลืออยู่ในรูปกากของเสียหลังจากสารระเหยออกไปแล้ว หรืออาจจะหมายความได้ว่าคาร์บอนคงตัวสูงจะส่งผลให้เชื้อเพลิงเผาไหม้หมดจากกระบวนการได้ช้า

6) ค่าความทนทานของแท่งเชื้อเพลิง (Durability) บ่งบอกถึงความทนทานของแท่งเชื้อเพลิงโดยเป็นการทดสอบเปอร์เซ็นการแตกหักหลังจากมีแรงกระทำต่อแท่งเชื้อเพลิง

7) Ultimate analysis (C H O N S Cl)

- คาร์บอน (C) ไฮโดรเจน (H) และ ออกซิเจน (O) จะเป็นส่วนประกอบหลักๆของเชื้อเพลิงแข็ง โดย C และ H จะถูก oxidized ระหว่างการเผา (แปลงไปอยู่ในรูป CO_2 และ H_2O) โดย H จะส่งผลต่อค่า net calorific value โดยตรงเนื่องจากแปลงไปอยู่ในรูปของน้ำ ส่วน C จะส่งผลในด้านของมลพิษที่ออกมาจากระบบ และถ้าเกิดการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์จะเปลี่ยนไปอยู่ในรูป CO ซึ่งเป็นปัญหาในด้านมลพิษอย่างมาก

- ไนโตรเจน (N) จะมียากอยู่ในกลุ่มเชื้อเพลิงที่เป็นวัสดุจากการเกษตร ในระหว่างกระบวนการเผาไหม้ N จะเปลี่ยนอยู่ในรูปของ Nitrous Oxide (N_2O) N_2 และ Nitric Oxides (NO_x > [NO NO_2]) ในปัจจุบันปัญหาเกี่ยวกับ Nitrous Oxide ลดลงมากเนื่องจากเทคโนโลยีของเตาสมัยใหม่ สามารถลดการเกิดของก๊าซ Nitrous Oxide ทำให้ NO_x เป็นปัญหาด้านมลพิษหลักจาก N แต่สามารถป้องกันได้โดยควบคุมอุณหภูมิในระบบให้ต่ำกว่า 1300°C (%wt ของ N ในแท่งเชื้อเพลิงที่แนะนำคือ <0.6% จะลดปัญหาเกี่ยวกับการเกิด NO_x ได้มาก) (Obernberger, Brunner และ Barnthaler, 2006)

- กำมะถัน (S) เป็นต้นเหตุที่ให้เกิด SO_2 ซึ่งเป็นก๊าซพิษส่วนใหญ่จะเกิดจากการสันดาปของเชื้อเพลิง ส่งผลต่อระบบทางเดินหายใจของมนุษย์ และยังเป็นต้นเหตุให้เกิดฝนกรด ทำให้บ้านเรือนที่อยู่โดยรอบเกิดการกัดกร่อน)%wt ของ S ในเชื้อเพลิงที่แนะนำคือ <0.1% สำหรับลดปัญหาการกัดกร่อน และ <0.2% สำหรับลดปัญหาการปล่อยก๊าซ SO_x((Obernberger, Brunner และ Barnthaler, 2006)

- คลอรีน (Cl) ส่งผลให้เกิดก๊าซต่างๆ HCl Cl_2 และ Alkali Chlorides ต่างๆ เช่น KCl ซึ่งจะไปเกาะตัวอยู่บริเวณ Heat Exchanger ส่งผลให้อายุการใช้งานของระบบลดลง และยังอยู่ใน Fly Ash ส่วนซึ่งแก้ปัญหาได้โดยการควบคุมอุณหภูมิในระบบเพื่อให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ และควบคุมการเกิด Fly Ash โดยการควบคุมคุณภาพและอัตราการอัดอากาศเข้าระบบระหว่างการเผาไหม้ที่อุณหภูมิต่ำ (<200°C) (%wt ของ Cl ในแท่งเชื้อเพลิงที่แนะนำคือ <0.1% จะทำให้ลดปัญหาการกัดกร่อน และการเกิด HCl ได้) (Obernberger, Brunner และ Barnthaler, 2006)

2.8.6 มาตรฐานของ biomass และการนำมาเปรียบเทียบ

มาตาฐานที่ใช้ในการควบคุมคุณภาพของเชื้อเพลิงชีวมวลมีอยู่หลายมาตรฐานมากแตกต่างไปตามแต่ละประเทศแต่ในงานวิจัยนิยมหยิบมาตรฐานของกลุ่มยุโรปซึ่งมีชื่อว่า ENplus และมาตรฐานของประเทศสหรัฐอเมริกาที่มีชื่อว่า PFI standard มาทำการเปรียบเทียบ (Tumuluru และคณะ, 2010) ซึ่งในงานวิจัยนี้ก็เช่นกันพิจารณาเลือกมาตรฐานจากทั้ง 2 แห่งมาเปรียบเทียบเชื้อเพลิงทั้งหมด

ในงานวิจัยไม่ว่าจะเป็นแท่งเชื้อเพลิงที่ผลิตขึ้น หรือแท่งเชื้อเพลิงที่นิยมใช้อยู่ในปัจจุบันเพื่อเพิ่มความน่าเชื่อถือในการเลือกนำแท่งเชื้อเพลิงชีวมวลไปใช้ในอนาคต

ตารางที่ 2.5 มาตรฐานของแท่งเชื้อเพลิงชีวมวล

(Tumuluru และคณะ, 2010)

	หน่วย	ENplus	PFI standard
Diameter	mm	6 - 10	5.84 – 7.25
Length	mm	≤ 40	≤ 40
Bulk density	kg/m^3*	≥ 550	≥ 600
Moisture content	%*	≤ 10	≤ 10
Durability	%*	≥ 95	≥ 95
Calorific value	MJ/kg*	-	-
Ash content	%*	≤ 3	≤ 2
N	%*	≤ 0.3	-
S	%*	≤ 0.03	-
Cl	%*	≤ 0.02	≤ 0.03

*Dry weight basis

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 3
แผนการทดลองและการดำเนินงานวิจัย

การดำเนินงานวิจัยนี้ดำเนินการทดลอง ณ ห้องปฏิบัติการชั้น 1 อาคารวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ห้องปฏิบัติการขยะชั้น 4 อาคารปฏิบัติการรวม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ห้องปฏิบัติการภาควิชาธรณี และห้องปฏิบัติการภาควิชาเครื่องกล

ในการดำเนินการทดลองค่าลักษณะสมบัติที่มิได้ส่งวิเคราะห์จะทำการวิเคราะห์อย่างละ 3 ซ้ำ ต่อ 1 ค่าลักษณะสมบัติโดยหากมีค่าใดที่ไม่ใกล้เคียงจะทำการทำซ้ำใหม่อีกครั้งจนว่าจะได้ค่าที่มีความใกล้เคียงค่าเฉลี่ย ส่วนค่าพารามิเตอร์ที่ทำการส่งวิเคราะห์จะทำการวิเคราะห์อย่างละ 2 ซ้ำ โดยค่าที่ทำการนำเสนอในรายงานเป็นค่าที่เกิดจากการเฉลี่ยทั้งหมด

ค่าลักษณะสมบัติทั้งหมดในงานวิจัยจะเป็นค่า Dry weight basis

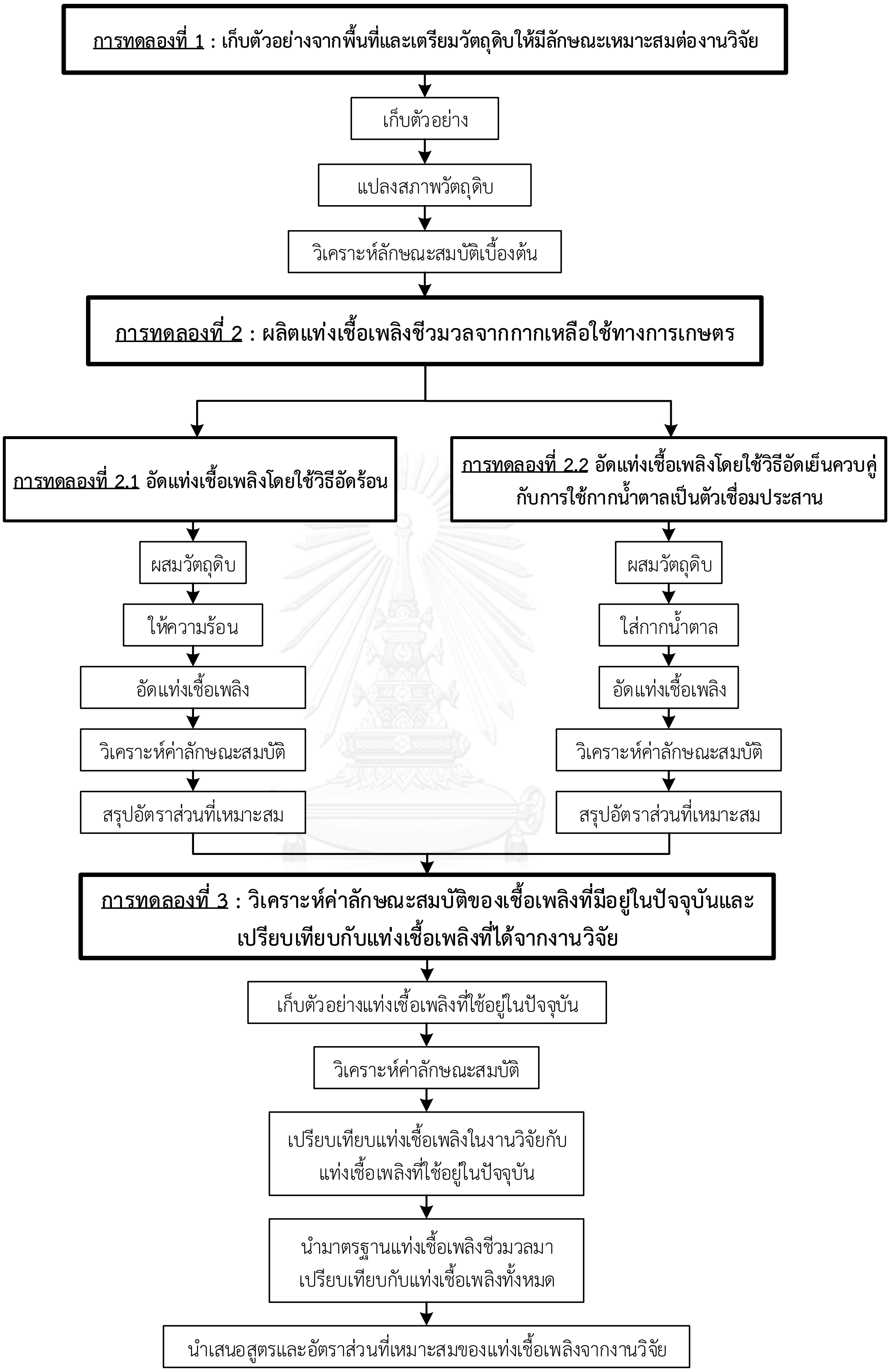
3.1 แผนการทดลอง

การทดลองที่ 1 การเก็บตัวอย่างวัตถุดิบที่เป็นกากเหลือใช้ทางการเกษตรที่เหลือตกค้างอยู่ ณ บริเวณเพาะปลูก และนำมาเข้ากระบวณการเตรียมวัตถุดิบเพื่อให้มีลักษณะเหมาะสมต่อการนำมาใช้ในการทดลอง

การทดลองที่ 2 หาสัดส่วนที่เหมาะสมในการผลิตแท่งเชื้อเพลิงชีวมวล และนำเชื้อแท่งเข้าสู่กระบวนการหาค่าลักษณะสมบัติตามวิธี ASTM โดยแบ่งออกเป็น 2 การทดลองย่อย

- **การทดลองที่ 2.1** หาสัดส่วนที่เหมาะสมในการผลิตแท่งเชื้อเพลิงชีวมวลโดยใช้กรรมวิธีอัดร้อน
- **การทดลองที่ 2.2** หาสัดส่วนที่เหมาะสมในการผลิตแท่งเชื้อเพลิงชีวมวลโดยใช้กรรมวิธีอัดเย็น รวมถึงอัตราส่วนที่เหมาะสมของกากน้ำตาลซึ่งมีหน้าที่เป็นตัวเชื่อมประสาน

การทดลองที่ 3 เปรียบเทียบค่าลักษณะสมบัติของแท่งเชื้อเพลิงที่ได้กับเชื้อเพลิงชีวมวลที่ใช้อยู่ในปัจจุบันรวมถึงมาตรฐานแท่งเชื้อเพลิงชีวมวล

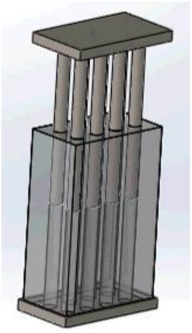


รูปที่ 3.1 ภาพรวมการทำงานวิจัย

3.2 เครื่องมืออุปกรณ์และสารเคมี

3.2.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

1. อุปกรณ์ปั่นสำหรับลดขนาดพืช ยี่ห้อ tefal รุ่น La Moulinette DPA1T
2. ภาชนะสำหรับรองรับตัวอย่างขณะนำไปอบ/เผา
3. เครื่องเขย่า (Sieve Shaker) ยี่ห้อ Endecotts รุ่น Octagon 200
4. ตะแกรงเบอร์ 18 เมซ (1000 ไมโครเมตร) ขนาดเส้นผ่าน ศูนย์กลาง 8 นิ้ว (203 มิลลิเมตร)
5. ตะแกรงเบอร์ 50 เมซ (300 ไมโครเมตร) ขนาดเส้นผ่าน ศูนย์กลาง 8 นิ้ว (203 มิลลิเมตร)
6. ตะแกรงเบอร์ 80 เมซ (180 ไมโครเมตร) ขนาดเส้นผ่าน ศูนย์กลาง 8 นิ้ว (203 มิลลิเมตร)
7. ถ้วยกระเบื้องสำหรับใส่ตัวอย่างในขั้นตอนเผา
8. แท่งกระเบื้องสำหรับผสม
9. เซลิ้งค์ความจุ 1cc
10. แม่แบบสำหรับอัดแท่งเชื้อเพลิงชีวมวล
11. เครื่องอัดไฮดรอลิค ยี่ห้อ TOYO รุ่น TYHY040
12. เตาอบที่ 105°C ยี่ห้อ Binder รุ่น F115
13. เตาอบที่ 1200°C ยี่ห้อ Lenton
14. เครื่องชั่งน้ำหนักทศนิยม 4 ตำแหน่ง ยี่ห้อ Sartorius รุ่น BSA224S-CW
15. ภาชนะสำหรับเก็บตัวอย่างแบบมิดชิดป้องกันการดูดความชื้นกลับ



รูปที่ 3.2 แม่แบบสำหรับอัดแท่งเชื้อเพลิงชีวมวล

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย CHULALONGKORN UNIVERSITY

3.3 วิธีการวิเคราะห์ค่าลักษณะสมบัติ

3.3.1 ค่าความร้อน (Calorific value)

ค่าความร้อน ทำการส่งวิเคราะห์โดยใช้เครื่อง Bomb Calorimeter โดยใช้วิธี ASTM D3286 ที่ ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.3.2 ปริมาณความชื้น (Moisture content)

ทำการวิเคราะห์ตามวิธีมาตรฐาน ASTM D3173 โดยการนำตัวอย่างมาวิเคราะห์โดยให้ความร้อนคงที่ในตู้อบ (Drying Over) ที่อุณหภูมิ 105°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อให้ไอน้ำระเหยออกจากตัวอย่าง ค่าความชื้นที่ได้สามารถคำนวณจากน้ำหนักของตัวอย่างที่ลดลง

<u>วิธีการทดสอบ</u>

1. ชั่งน้ำหนักของถ้วย
2. เตรียมตัวอย่างทดลองหรือวัตถุดิบ ใส่ในถ้วย
3. นำวัตถุดิบและถ้วย ชั่งน้ำหนัก
4. อบตัวอย่างเชื้อเพลิง ที่อุณหภูมิ 105°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นทิ้งไว้ให้เย็นภายในตู้
5. นำถ้วยที่ใส่ตัวอย่างเชื้อเพลิงที่เย็นแล้ว ออกจากตู้อบนำมาชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งดิจิตอล
6. คำนวณปริมาณความชื้นจากสูตร

<u>สูตรที่ใช้ในการคำนวณ</u>

$$\text{Moisture content}(\%) = \frac{\text{น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบ - น้ำหนักตัวอย่างหลังอบ}}{\text{น้ำหนักตัวอย่างหลังอบ}} \times 100$$

3.3.3 ปริมาณเถ้า (Ash content)

ทำการวิเคราะห์ตามวิธีมาตรฐาน ASTM D3174 โดยนำตัวอย่างไปเผาในเตาเผาแบบอุณหภูมิสูง ที่อุณหภูมิ 880°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นจึงนำมาชั่งน้ำหนัก และคำนวณค่า

<u>วิธีการทดสอบ</u>

1. ชั่งน้ำหนักของถ้วย
2. เตรียมตัวอย่างทดลองหรือวัตถุดิบ ใส่ในถ้วย
3. นำวัตถุดิบและถ้วย ชั่งน้ำหนัก
4. เผาตัวอย่างเชื้อเพลิง ที่อุณหภูมิ 880°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นทิ้งไว้ให้เย็นภายในตู้
5. นำถ้วยที่ใส่ตัวอย่างเชื้อเพลิงที่เย็นแล้ว ออกจากเตาเผานำมาชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งดิจิตอล

6. คำนวณปริมาณความชื้นจากสูตร

<u>สูตรที่ใช้ในการคำนวณ</u>

$$\% \text{ Ash content} = \frac{\text{น้ำหนักหลังเผา}}{\text{น้ำหนักก่อนเผา}} \times 100$$

3.3.4 ปริมาณสารระเหย (Volatile matter)

ทำการวิเคราะห์ตามมาตรฐาน ASTM D3175 โดยนำตัวอย่างมาเผาที่เตาเผาอุณหภูมิสูง โดยให้ความร้อนที่ 950°C เป็นเวลา 7 นาที จากนั้นทิ้งให้ตัวอย่างเย็นและจึงนำออกมาชั่งน้ำหนักของตัวอย่าง หาปริมาณสารระเหยจากการสูญเสียน้ำหนัก และนำไปคำนวณตามสูตร

<u>วิธีการทดสอบ</u>

1. ชั่งน้ำหนักของถ้วย
2. เตรียมตัวอย่างทดลองหรือวัตถุดิบ ใส่ในถ้วย
3. นำวัตถุดิบและถ้วย ชั่งน้ำหนัก
4. เผาตัวอย่างเชื้อเพลิง ที่อุณหภูมิ 950°C เป็นเวลา 7 นาที จากนั้นทิ้งไว้ให้เย็นภายในตู้
5. นำถ้วยที่ใส่ตัวอย่างเชื้อเพลิงที่เย็นแล้ว ออกจากเตาเผานำมาชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งดิจิตอล
6. คำนวณปริมาณความชื้นจากสูตร

<u>สูตรที่ใช้ในการคำนวณ</u>

$$\% \text{ Volatile matter} = \frac{\text{น้ำหนักก่อนเผา - น้ำหนักหลังเผา}}{\text{น้ำหนักก่อนเผา}} \times 100$$

3.3.5 ปริมาณคาร์บอนคงตัว (Fixed carbon)

ในการหาปริมาณคาร์บอนคงตัวทำการวิเคราะห์ตามมาตรฐาน ASTM D3172 สามารถหาได้จากการคำนวณดังนี้

<u>สูตรที่ใช้ในการคำนวณ</u>

Fixed carbon = 100% - (%Moisture content + %Ash content + %Volatile matter)

3.3.6 ค่าความทนทานของแท่งเชื้อเพลิง (Durability)

เป็นการทดสอบความทนทานของแท่งเชื้อเพลิง ทำการวิเคราะห์ตามมาตรฐาน ASAE S269.4 โดยทดสอบเปอร์เซนต์การแตกหัก ซึ่งมีผลต่อการเก็บรักษา ขนส่ง ทดสอบโดยการใส่วัสดุลงในเครื่องวิเคราะห์ซึ่ง แกนหมุนด้านข้าง ซึ่งจะหมุนด้วยความเร็วรอบ 50 รอบ/นาที เป็นเวลา 15 นาที จากนั้นนำไปร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 6 mesh (รูเปิด 3.15 มิลลิเมตร) จากนั้นคำนวณนำหนักที่หายไป

<u>วิธีการทดสอบ</u>

1. ชั่งน้ำหนักแท่งเชื้อเพลิง
2. ใส่วัสดุลงในเครื่องวิเคราะห์
3. เปิดเครื่องวิเคราะห์หมุนด้วยความเร็วรอบ 50 รอง/นาที เป็นเวลา 15 นาที
4. นำตัวอย่างหลังจากวิเคราะห์ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 6 mesh (รูเปิด 3.15 มิลลิเมตร)
5. ชั่งน้ำหนักตัวอย่างที่ค้างอยู่บนตะแกรง
6. คำนวณค่าความทนทานของแท่งเชื้อเพลิงจากสูตร

<u>สูตรที่ใช้ในการคำนวณ</u>

$$\text{Durability}\ (\%) = 100 - \left(\frac{\text{น้ำหนักก่อนทดสอบ-น้ำหนักหลังทดสอบ}}{\text{น้ำหนักก่อนทดสอบ}} \times 100\right)$$

3.3.7 ความหนาแน่นของวัตถุดิบ (Bulk density)

ทำการวิเคราะห์ตามมาตรฐาน ASTM E873 โดยคำนวณความหนาแน่นของแท่งเชื้อเพลิงได้จากการคำนวณดังนี้

<u>สูตรที่ใช้ในการคำนวณ</u>

$$\text{Bulk density (kg/m}^3\text{)} = \frac{\text{Mass of biomass sample, (kg)}}{\text{Volume of biomass sample, (m}^3\text{)}}$$

3.3.8 องค์ประกอบของธาตุในแท่งเชื้อเพลิง

วิเคราะห์ด้วยวิธี Ultimate analysis ทำวิเคราะห์ตามมาตรฐาน ASTM D3176 โดยทั่วไปในงานวิจัยเกี่ยวกับเชื้อเพลิงชีวมวลจะนิยมวิเคราะห์หาปริมาณของธาตุ C H O N S และ Cl เป็นหลัก โดยตัว N S และ Cl จะนำไปเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานที่กำหนด ซึ่งในงานวิจัยนี้ทำการส่งวิเคราะห์ที่ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

3.4 วิธีดำเนินงานวิจัย

3.4.1 การทดลองที่ 1 : เก็บตัวอย่างจากพื้นที่และเตรียมวัตถุดิบให้มีลักษณะเหมาะต่องานวิจัย

เก็บตัวอย่างวัตถุดิบที่เป็นกากเหลือใช้ทางการเกษตรที่เหลือตกค้างอยู่ ณ บริเวณเพาะปลูกและทำมาเข้ากระบวณการเตรียมวัตถุดิบเพื่อให้มีลักษณะเหมาะสมต่อการนำมาใช้ในการทดลองโดยอ้างอิงจากงานวิจัยที่ผ่านมาเกี่ยวกับเชื้อเพลิงชีวมวล (Chiang, Chien และ Lu, 2012) ผู้วิจัยแนะนำการนำตัวอย่างที่เก็บไปอบเพื่อไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 105°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และนำเข้ากระบวนการลดขนาดเพื่อให้ตัวอย่างวัตถุดิบมีขนาดอนุภาคที่สม่ำเสมอ โดยภายหลังจากขั้นตอนไล่ความชื้น ได้ทำการนำวัตถุดิบเข้าเครื่องลดขนาดเพื่อควบคุมขนาดอนุภาคของทุกวัตถุดิบให้มีขนาดใกล้เคียงกัน ซึ่งแยกขนาดของวัตถุดิบโดยใช้เครื่อง Sieve Shaker ควบคู่กับตะแกรงเบอร์ 18 เมซ 50 เมซ และ 80 เมซ โดยใช้เวลาในการดำเนินการประมาณรอบละ 30 นาที ภายหลังจากกระบวนการอัดแท่งนำแท่งเชื้อเพลิงที่ได้ทดสอบค่าความทนทานของแท่งเชื้อเพลิง และ ปริมาณเถ้าของแท่งเชื้อเพลิงเพื่อพิจารณาขนาดอนุภาคที่เหมาะสมในงานวิจัยมากที่สุด จากนั้นจึงสรุปผลให้ได้มาซึ่งตัวอย่างที่เหมาะสมต่อการนำเข้ากระบวนการอัดแท่งเชื้อเพลิง (การทดลองที่ 2)

ตารางที่ 3.1 ตัวแปรและพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองที่ 1

ชนิดตัวแปร	พารามิเตอร์
ตัวแปรต้น	- ชนิดของกากเหลือใช้ทางการเกษตร ได้แก่ ฟางข้าว ใบอ้อย และใบข้าวโพด - ขนาดอนุภาควัตถุดิบ ได้แก่ วัตถุดิบขนาด 300μm – 1000μm, วัตถุดิบขนาด 180μm - 300μm และวัตถุดิบที่มีขนาดเล็กกว่า 180μm
ตัวแปรตาม	- ค่าความทนทานของแท่งเชื้อเพลิง - ปริมาณเถ้า
ตัวแปรควบคุม	- อุณหภูมิในการอบที่ 105°C - เวลาที่ใช้ในการอบ 24 ชั่วโมง - แรงอัดจากเครื่องอัดไฮดรอลิก ที่ 0.25-0.5 ตัน - น้ำหนักของวัตถุดิบที่ใส่ลงในแท่นอัด 1 กรัม - วิเคราะห์ค่าลักษณะโดยอ้างอิงจาก ASTM

<u>วิธีทำการทดลอง</u>

1) เก็บตัวอย่างกากเหลือใช้ทางการเกษตรที่ตกค้างอยู่บริเวณพื้นที่เพาะปลูกทั้ง 3 ชนิด ได้แก่ ฟางข้าว ใบอ้อย และใบข้าวโพด(เลี้ยงสัตว์)

2) นำวัตถุดิบที่เก็บมาอบเพื่อไล่ความชื้นที่ 105°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมงเพื่อให้วัตถุดิบมีลักษณะเหมาะสมต่อการเข้ากระบวนการลดขนาด

3) นำวัตถุดิบเข้าเครื่องปั่นเพื่อลดขนาด โดยแยกปั่นลดขนาดอนุภาคของวัตถุดิบแต่ละชนิด

4) แยกขนาดของวัตถุดิบภายหลังจากการปั่นลดขนาดโดยใช้เครื่อง sieve shaker ผ่านตะแกรง 4 ขนาด ได้แก่ mesh No.12(รูเปิด 1.7 มิลลิเมตร), mesh No.18(รูเปิด 1 มิลลิเมตร), mesh No.50(รูเปิด 300 ไมโครเมตร)และ mesh No.80(รูเปิด 180 ไมโครเมตร)

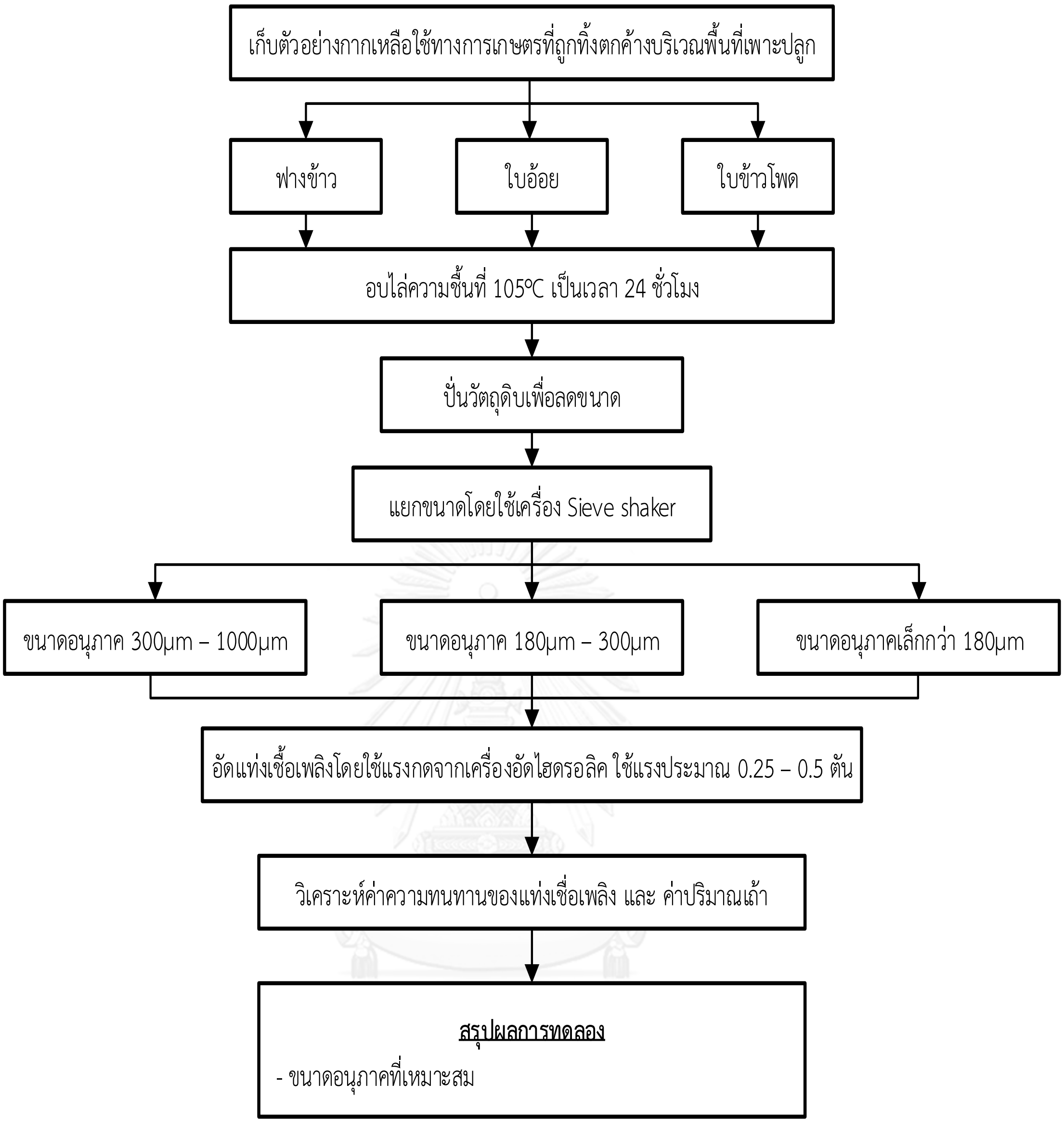
5) ทดสอบปริมาณความชื้นของวัตถุดิบหลังผ่านกระบวนการโดยใช้ เครื่องมือวัดความชื้นยี่ห้อ moisture meter รุ่น TK100

6) พิจารณาขนาดวัตถุดิบที่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ในงานวิจัย โดยหลังจากผ่านกระบวนการคัดแยกขนาดจะแบ่งวัตถุดิบออกไปเป็น 3 กลุ่ม ได้แก่ วัตถุดิบขนาด 300µm – 1000µm, วัตถุดิบขนาด 180µm - 300µm และวัตถุดิบที่มีขนาดเล็กกว่า 180µm และจึงนำวัตถุดิบทั้ง 3 ขนาดเข้าสู่กระบวนการอัดแท่งเชื้อเพลิง โดยใช้แรงอัดประมาณ 0.25 - 0.5 ตัน

7) นำแท่งเชื้อเพลิงจากวัตถุดิบทั้ง 3 ขนาดไปทดสอบค่าลักษณะสมบัติเบื้องต้นได้แก่ ค่าความทนทานของแท่งเชื้อเพลิง และค่าปริมาณเถ้าของแท่งเชื้อเพลิงเพื่อหาสรุปขนาดวัตถุดิบที่เหมาะสมที่จะใช้ในงานวิจัย

8) สรุปผลการทดลองโดยนำเสนอขนาดอนุภาคที่เหมาะสมที่สุด สำหรับใช้การทดลองช่วงต่อไป

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.3 ขั้นตอนการทำการทดลองที่ 1

3.4.2 การทดลองที่ 2.1 : ทดสอบผลิตแท่งเชื้อเพลิงชีวมวลแบบผสมโดยใช้วิธีอัดร้อน

เนื่องจากวิธีอัดร้อนเป็นกระบวนการผลิตแท่งเชื้อเพลิงชีวมวลที่นิยมใช้ทั่วไปในปัจจุบัน (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2557b) ผู้วิจัยจึงเลือกใช้วิธีดังกล่าวในการผลิตเพื่อให้แท่งเชื้อเพลิงชีวมวลที่ได้มีลักษณะใกล้เคียงกับแท่งเชื้อเพลิงที่มีอยู่ในปัจจุบันมากที่สุด โดยจากงานวิจัยได้เลือกพิจารณาจากอุณหภูมิขั้นต่ำที่สุดที่ทำให้ลิกนินในพืชเกิดการอ่อนตัวซึ่งเป็นกรรมวิธีที่ช่วยให้แท่งเชื้อเพลิงที่ผลิตความทนทานมากขึ้นซึ่งคือที่อุณหภูมิ 150°C จากนั้นทดสอบเพิ่มเป็น 170°C และ 190°C อ้างอิงการแบ่งอุณหภูมิจาก (Kaliyan และ Morey, 2010) ตามลำดับเพื่อหาอุณหภูมิที่ทำให้ค่าความทนทานของแท่งวัตถุดิบมีค่าเกินกว่า 95% (ENplus และ PFI standard) จากนั้นใช้อุณหภูมิที่เหมาะสมในกระบวนการอัดร้อนโดยแบ่งสูตรและอัตราส่วนของแท่งเชื้อเพลิงดั่งที่แสดงในตาราง และนำไปวิเคราะห์ค่าลักษณะสมบัติได้แก่ ค่าความร้อน (ASTM D3286) ปริมาณเถ้า (ASTM D3174) ปริมาณสารระเหย (ASTM D3175) ค่าคาร์บอนคงตัว (ASTM D3172) ปริมาณความชื้น (ASTM D3173) ค่าความทนทานของแท่งเชื้อเพลิง (ASAE S269.4) และองค์ประกอบของธาตุในแท่งเชื้อเพลิง (ASTM D3176)

ตารางที่ 3.2 อัตราส่วนวัตถุของแท่งเชื้อเพลิงทั้ง 3 สูตร ที่ใช้ในการทดลองที่ 2.1

ใบอ้อย	ใบข้าวโพด
10	90
20	80
30	70
40	60
50	50
60	40
70	30
80	20
90	10

ฟางข้าว	ใบอ้อย
10	90
20	80
30	70
40	60
50	50
60	40
70	30
80	20
90	10

ฟางข้าว	ใบข้าวโพด
10	90
20	80
30	70
40	60
50	50
60	40
70	30
80	20
90	10

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 3.3 ตัวแปรและพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองที่ 2.1

ชนิดตัวแปร	พารามิเตอร์
ตัวแปรต้น	- อุณหภูมิในการอบก่อนเข้ากระบวนการอัดแท่ง กำหนดที่ 150°C 170°C และ190°C - อัตราส่วนระหว่างวัตถุดิบในแท่งเชื้อเพลิง (ตารางที่3.2)
ตัวแปรตาม	- อุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการอัดร้อน - ค่าความร้อน - ปริมาณเถ้า - ปริมาณสารระเหย - ค่าคาร์บอนคงตัว - ปริมาณความชื้น - ค่าความทนทานของแท่งเชื้อเพลิง - องค์ประกอบของธาตุในแท่งเชื้อเพลิง - สูตรอัตราส่วนที่ให้ค่าความร้อนสูงที่สุด - สูตรอัตราส่วนที่ให้ปริมาณเถ้าน้อยที่สุด
ตัวแปรควบคุม	- ขนาดของวัตถุดิบ 180µm - 300µm - แรงอัดจากเครื่องอัดไฮดรอลิก ที่ 0.25-0.50 ตัน - น้ำหนักของวัตถุดิบที่ใส่ลงในแท่นอัด 1 กรัม - วิเคราะห์ค่าลักษณะโดยอ้างอิงจาก ASTM

CHULALONGKORN UNIVERSITY

<u>วิธีทำการทดลอง</u>

1) ทดสอบการให้ความร้อนก่อนเข้ากระบวนการอัดแท่งโดยแบ่งเป็น 3 ช่วงได้แก่ 150°C 170°C และ190°C (Kaliyan และ Morey, 2010) เพื่อหาอุณหภูมิต่ำสุดที่ทำให้ค่าความทนทานของแท่งเชื้อเพลิงผ่านค่ามาตรฐานที่ประมาณมากกว่าหรือเท่ากับ 95% (มหาวิทยาลัยศิลปากร, 2555)

- นำวัตถุดิบใส่ตัวแท่นสำหรับอัดช่องละประมาณ 1 กรัม
- นำตัวแท่นไปอบเพื่อให้ความร้อนในเตาอบที่อุณหภูมิ 150°C 170°C และ 190°C ตามลำดับ
- นำตัวแท่นออกจากเตาอบเมื่ออุณหภูมิของวัตถุดิบได้ตามที่เรากำหนดแล้ว ตรวจสอบอุณหภูมิโดยใช้เทอร์โมมิเตอร์วัด

- นำแท่นอัดไปเข้าสู่กระบวนการอัดแท่งโดยใช้แรงกดจากเครื่องอัดไฮดรอลิคประมาณ 0.25-0.5 ตัน

- กดทิ้งไว้ประมาณ 1 – 2 นาที

- นำตัวแท่งเชื้อเพลิงออกจากแท่นกด และเก็บไว้ในกล่องปิดมิดชิดเพื่อรอให้แท่งเชื้อเพลิงเย็นลง

- นำแท่งเชื้อเพลิงที่ผ่านการอัดจากทั้ง 3 อุณหภูมิไปวิเคราะห์ค่าความทนทานของแท่งเชื้อเพลิง

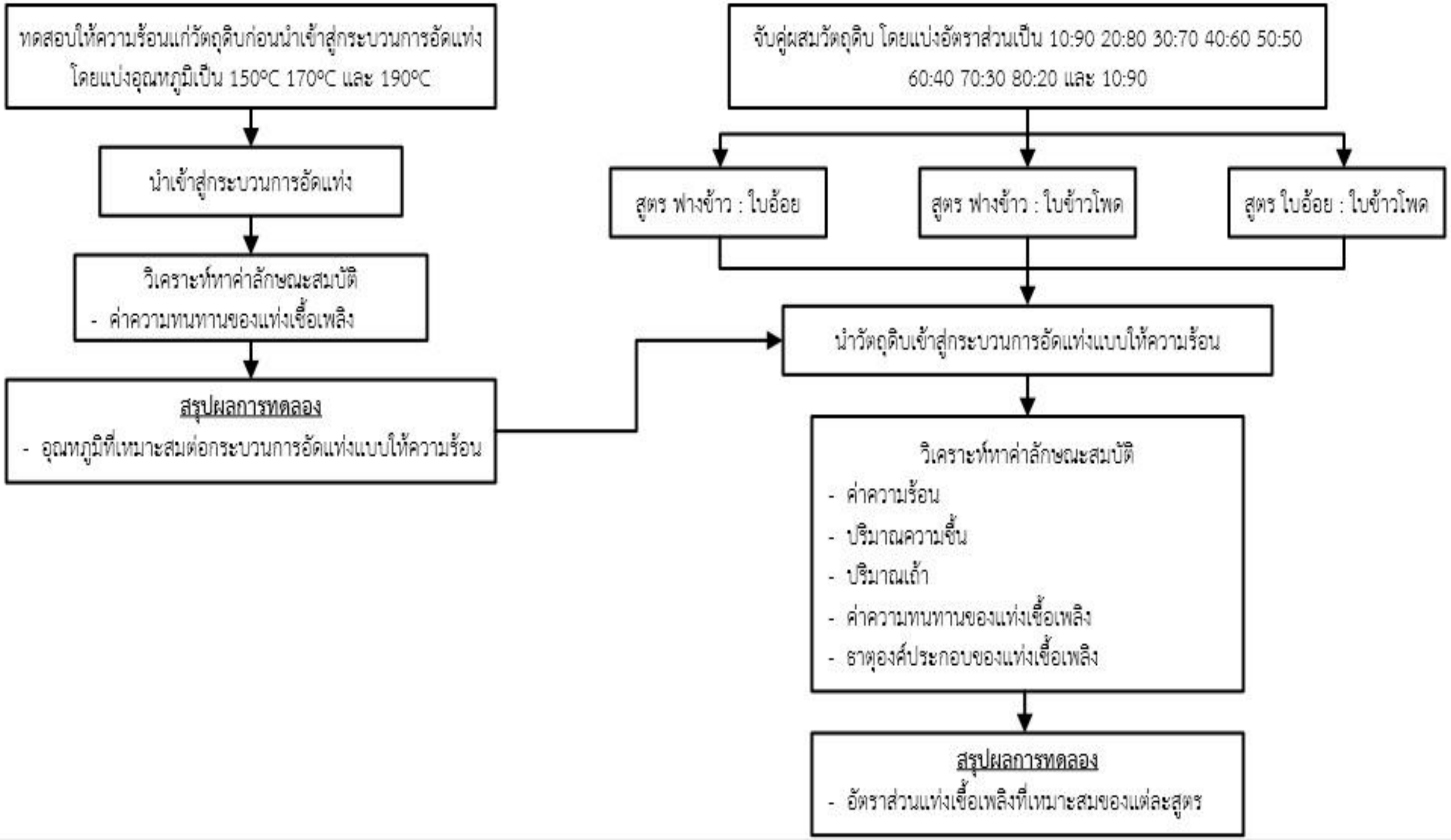
- สรุปผลการทดลองโดยนำเสนออุณหภูมิขั้นต่ำที่สุดที่ทำให้แท่งเชื้อเพลิงมีค่าความทนทานของแท่งเชื้อเพลิงผ่านค่ามาตรฐาน

2) นำวัตถุดิบแต่ละชนิดเข้าสู่กระบวนการอัดแท่งโดยใช้ขนาดวัตถุดิบจากผลการทดลองที่ 1 และอุณหภูมิที่ให้ก่อนนำเข้ากระบวนการอัดจากขั้นตอนก่อนหน้า จากนั้นนำแท่งเชื้อเพลิงที่ได้ไปวิเคราะห์หาค่าลักษณะสมบัติได้แก่

- ค่าความร้อน (ASTM D3286)
- ปริมาณเถ้า (ASTM D3174)
- ปริมาณสารระเหย (ASTM D3175)
- ค่าคาร์บอนคงตัว (ASTM D3172)
- ปริมาณความชื้น (ASTM D3173)
- ค่าความทนทานของแท่งเชื้อเพลิง (ASAE S269.4)
- องค์ประกอบของธาตุในแท่งเชื้อเพลิง (ASTM D3176)

3) จับคู่วัตถุดิบ 2 ชนิดโดยยึดขนาดอนุภาคและอุณหภูมิ รวมถึงแรงกดจากเครื่องอัดตามขั้นตอนที่ผ่านมา ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 3 สูตร ได้แก่ ฟางข้าว:ใบอ้อย ฟางข้าว:ใบข้าวโพด และใบอ้อย:ใบข้าวโพดโดยแบ่งอัตราส่วนของวัตถุดิบตารางที่3.2 จากนั้นนำแท่งเชื้อเพลิงที่ผลิตไปหาค่าลักษณะสมบัติตามขั้นตอนก่อนหน้า

4) นำผลการทดลองที่ได้ หาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณที่เปลี่ยนไปต่อค่าลักษณะสมบัติของแท่งเชื้อเพลิง รวมถึงสรุปผลอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดในแต่ละส่วนโดยนำเสนอเป็นสูตรที่มีค่าความร้อนมากที่สุด และสูตรที่มีปริมาณเถ้าน้อยที่สุด



รูปที่ 3.4 ขั้นตอนการทำการทดลองที่ 2.1

3.4.3 การทดลองที่ 2.2 : ทดสอบผลิตแท่งเชื้อเพลิงชีวมวลแบบผสมโดยใช้วิธีอัดเย็นควบคู่ไปกับการใช้กากน้ำตาลเป็นตัวเชื่อมประสาน

นอกจากกระบวนการอัดร้อนแล้วยังมีอีกวิธีหนึ่งที่นิยมใช้ในการผลิตแท่งเชื้อเพลิงชีวมวลรองลงมานั้นก็คือกระบวนการอัดเย็น (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2557b) และการใส่ตัวเชื่อมประสานควบคู่ลงไปส่งผลให้ค่าลักษณะสมบัติบางค่าดีขึ้นกว่าเดิม (Kaliyan และ Morey, 2010)ซึ่งในงานวิจัยนี้เลือกใช้กากน้ำตาลเป็นตัวเชื่อมประสานโดยจะยึดวัตถุดิบให้มีปริมาณเท่ากับการทดลองที่ 2.1 และผสมกากน้ำตาลในอัตราส่วนต่างๆเพิ่มลงไป ได้แก่ 10% 30% 50% 70% และ 90% ตามน้ำหนักวัตถุดิบ โดยในการทดลองนี้จะทำการลดอัตราส่วนวัตถุดิบในแต่ละสูตรเป็น 10:90 30:70 50:50 70:30 และ 90:10 ดั่งที่แสดงในตารางที่3.4 เนื่องการในการทดลองที่ 2.1 การเปลี่ยนแปลงของค่าลักษณะสมบัติที่ได้มีความแตกต่างน้อยการแบ่งอัตราส่วนที่มากเกินไปอาจจะส่งผลให้เสียเวลาในกระบวนการผลิต และค่าใช้จ่ายในการวิเคราะห์ ภายหลังจากกระบวนการผลิตแท่งเชื้อเพลิงโดนใช้วิธีอัดเย็นแล้ว นำเชื้อเพลิงที่ได้ไปวิเคราะห์หาค่าลักษณะสมบัติตามที่ได้วิเคราะห์ในการทดลองช่วงที่ 2.1 จากนั้นทำการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงไปของค่าลักษณะสมบัติเนื่องมาจากการเพิ่มกากน้ำตาลลงในส่วนผสม

ตารางที่ 3.4 อัตราส่วนวัตถุของแท่งเชื้อเพลิงทั้ง 3 สูตร ที่ใช้ในการทดลองที่ 2.2

ใบอ้อย	ใบข้าวโพด
10	90
30	70
50	50
70	30
90	10

ฟางข้าว	ใบอ้อย
10	90
30	70
50	50
70	30
90	10

ฟางข้าว	ใบข้าวโพด
10	90
30	70
50	50
70	30
90	10

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 3.5 ตัวแปรและพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองที่ 2.2

ชนิดตัวแปร	พารามิเตอร์
ตัวแปรต้น	- อัตราส่วนของกากน้ำตาลในแท่งเชื้อเพลิง ได้แก่ 10% 30% 50% 70% และ 90% โดยน้ำหนัก - อัตราส่วนระหว่างวัตถุดิบในแท่งเชื้อเพลิง (ตารางที่3.4)
ตัวแปรตาม	- อัตราส่วนของกากน้ำตาลที่เหมาะสมในการทดลอง - ค่าความร้อน - ปริมาณเถ้า - ปริมาณสารระเหย - ค่าคาร์บอนคงตัว - ปริมาณความชื้น - ค่าความทนทานของแท่งเชื้อเพลิง - สูตรอัตราส่วนที่ให้ค่าความร้อนสูงที่สุด - สูตรอัตราส่วนที่ให้ปริมาณเถ้าน้อยที่สุด
ตัวแปรควบคุม	- ขนาดของวัตถุดิบ 180µm - 300µm - แรงอัดจากเครื่องอัดไฮดรอลิก ที่ 0.25-0.5 ตัน - น้ำหนักของวัตถุดิบที่ใส่ลงในแท่นอัด 1 กรัม - อุณหภูมิที่ใช้ในการอบ 120°C - เวลาที่ใช้ในการอบ 48 ชั่วโมง - วิเคราะห์ค่าลักษณะโดยอ้างอิงจาก ASTM

<u>วิธีทำการทดลอง</u>

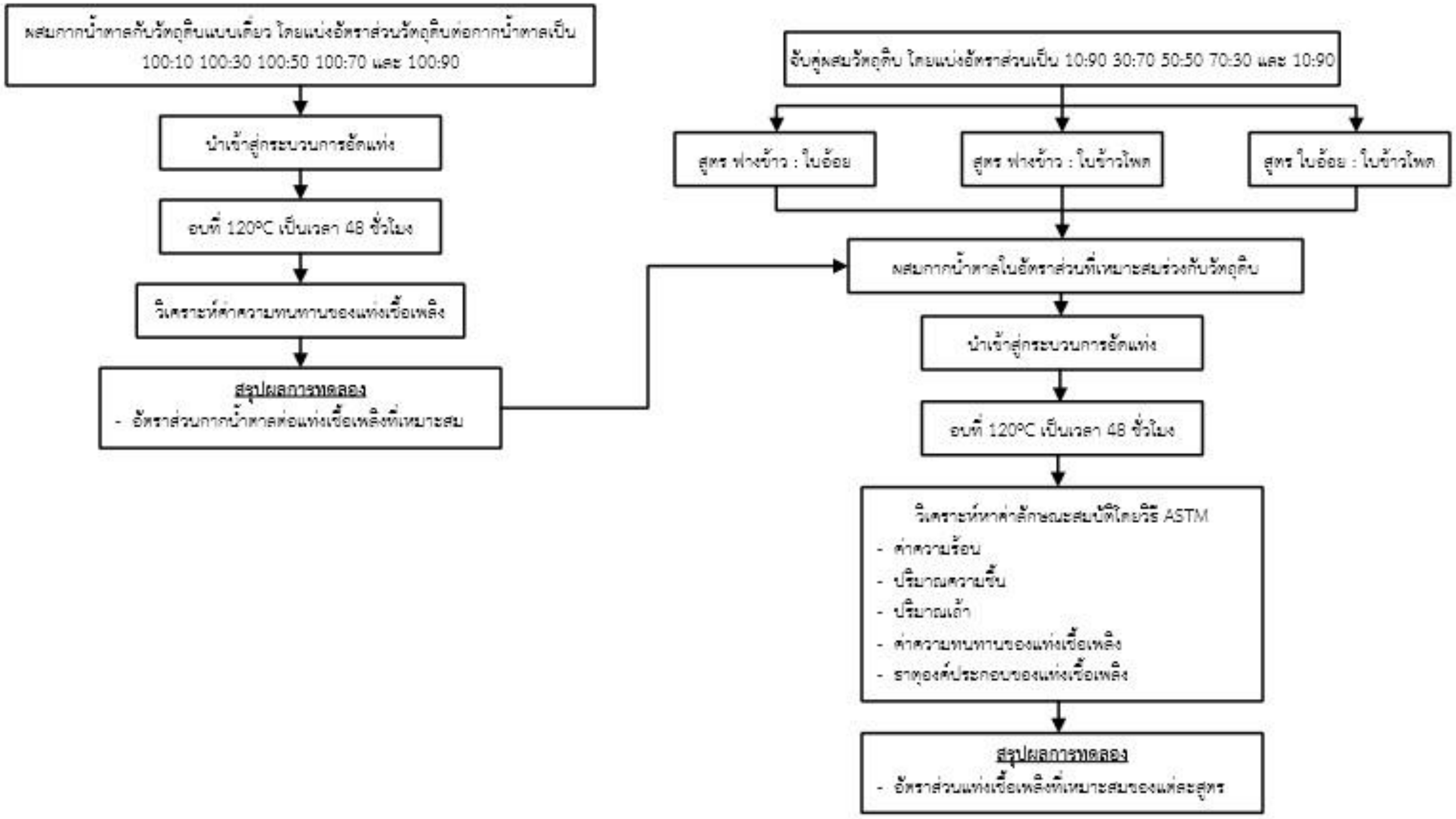
1) นำกากน้ำตาลซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมประสานของแท่งเชื้อเพลิงผสมลงไปในแท่งเชื้อเพลิงโดยยึดวัตถุดิบแบบเดี่ยว และควบคุมปริมาณวัตถุให้มีค่าคงเดิมและเพิ่มกากน้ำตาลในอัตราส่วน 10% 30% 50% 70% และ 90% โดยน้ำหนัก จากนั้นวิเคราะห์ค่าลักษณะสมบัติได้แก่ค่าความทนทานของแท่งเชื้อเพลิง ค่าความร้อน ปริมาณเถ้า เพื่อเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของค่าลักษณะสมบัติเนื่องจากการเปลี่ยนไปของอัตราส่วนกากน้ำตาลในแท่งเชื้อเพลิง และสรุปอัตราส่วนของกากน้ำตาลที่เหมาะสมที่ใช้ในการทดลอง

2) นำอัตราส่วนของกากน้ำตาลต่อแท่งเชื้อเพลิงที่เหมาะสมจากข้อที่ 1 มาใช้กับสูตรแท่งเชื้อเพลิงแบบจับคู่วัตถุดิบตามอัตราส่วนได้แก่ 10:90 30:70 50:50 70:30 และ 90:10 จากนั้นนำแท่งเชื้อเพลิงที่ผลิตได้ไปหาค่าลักษณะสมบัติซึ่งประกอบไปด้วย

- ค่าความร้อน (ASTM D3286)
- ปริมาณเถ้า (ASTM D3174)
- ปริมาณสารระเหย (ASTM D3175)
- ค่าคาร์บอนคงตัว (ASTM D3172)
- ปริมาณความชื้น (ASTM D3173)
- ค่าความทนทานของแท่งเชื้อเพลิง (ASAE S269.4)
- องค์ประกอบของธาตุในแท่งเชื้อเพลิง (ASTM D3176)

3) นำผลการทดลองที่ได้ เปรียบเทียบค่าลักษณะสมบัติที่เปลี่ยนไปต่อเมื่อใส่กากน้ำตาลเพิ่มลงไปในแท่งเชื้อเพลิงและสรุปผลอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดในแต่ละส่วนโดยนำเสนอเป็นสูตรที่มีค่าความร้อนมากที่สุด และสูตรที่มีปริมาณเถ้าน้อยที่สุด

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



รูปที่ 3.5 ขั้นตอนการทำการทดลองที่ 2.2

3.4.4 การทดลองที่ 3 : วิเคราะห์ค่าลักษณะสมบัติของเชื้อเพลิงที่มีอยู่ในปัจจุบันและนำมาเปรียบเทียบกับแท่งเชื้อเพลิงที่ได้จากงานวิจัยรวมถึงเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานของแท่งเชื้อเพลิง

ภายหลังจากที่ได้วิเคราะห์ค่าลักษณสมบัติของแท่งเชื้อเพลิงที่ได้จากการทดลองแล้วจึงจำเป็นต้องนำไปเปรียบเทียบกับกลุ่มเชื้อเพลิงที่ใช้อยู่ในปัจจุบันเพื่อให้เปรียบเทียบคุณสมบัติเชื้อเพลิงที่เราผลิต ซึ่งนิยมเปรียบเทียบในงานวิจัยที่ผ่านมา และยังเพิ่มความเป็นไปได้ในการนำกากเหลือใช้ในการเกษตรกลุ่มดังกล่าวมาใช้ รวมถึงนำแท่งเชื้อเพลิงที่ผลิตเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานแท่งเชื้อเพลิงชีวมวลที่มีอยู่ในต่างประเทศ (Tumuluru และคณะ, 2010) (มหาวิทยาลัยศิลปากร, 2555)

ตารางที่ 3.6 ตัวแปรและพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองที่ 3

ชนิดตัวแปร	พารามิเตอร์
ตัวแปรต้น	- ชนิดของแท่งเชื้อเพลิงชีวมวลที่ใช้ในประเทศ - มาตรฐานของแท่งเชื้อเพลิงชีวมวลที่ใช้ในต่างประเทศ ได้แก่ ENplus PFI standard
ตัวแปรตาม	- ค่าความร้อน - ปริมาณเถ้า - ปริมาณสารระเหย - ค่าคาร์บอนคงตัว - ปริมาณความชื้น - ค่าความทนทานของแท่งเชื้อเพลิง
ตัวแปรควบคุม	- วิเคราะห์ค่าลักษณะโดยอ้างอิงจาก ASTM

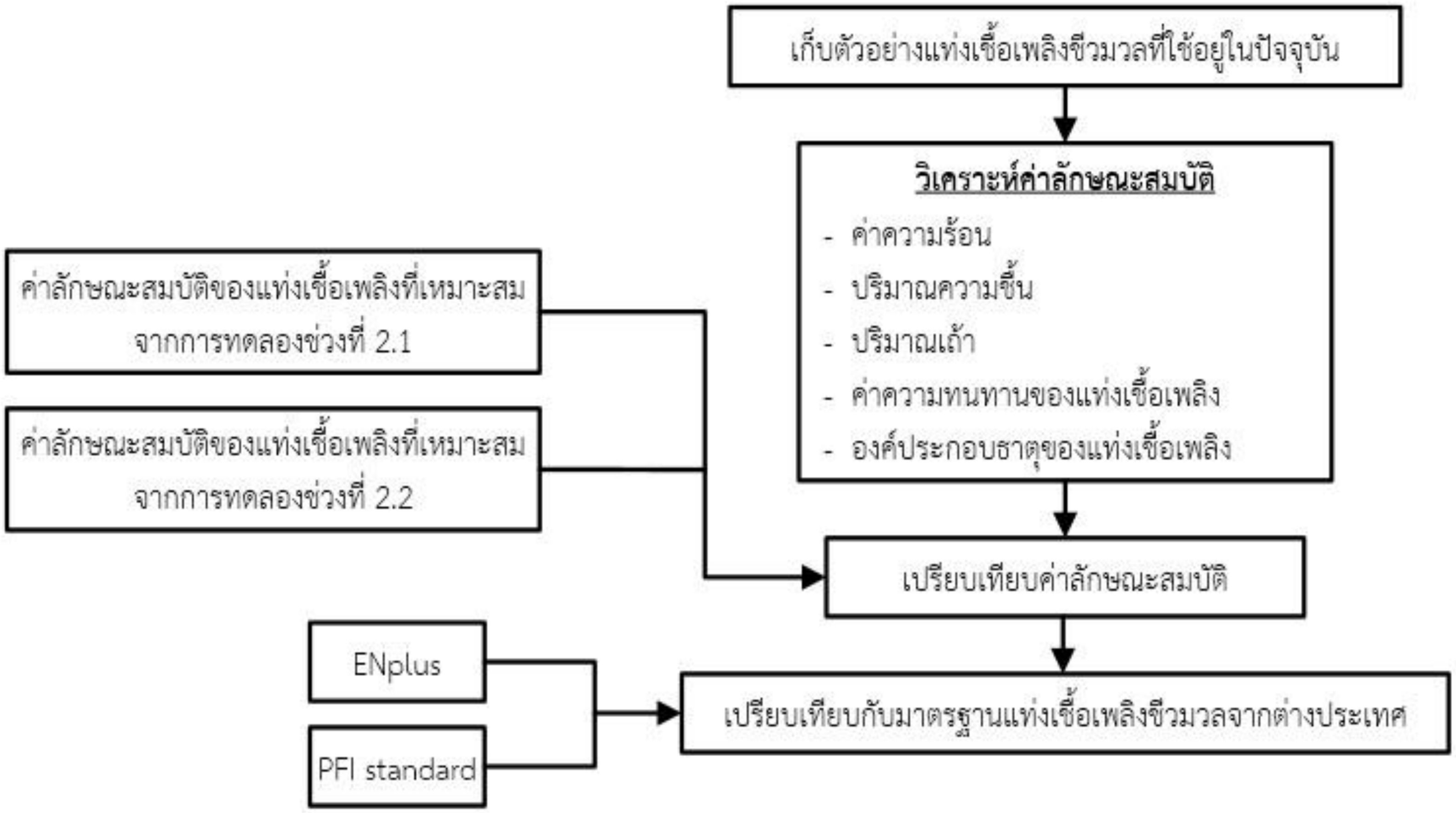
วิธีทำการทดลอง

1) นำตัวอย่างแท่งเชื้อเพลิงชีวมวลที่ใช้อยู่ในปัจจุบันมาวิเคราะห์หาค่าลักษณะสมบัติ ได้แก่ ค่าความร้อน ปริมาณเถ้า ปริมาณสารระเหย ค่าคาร์บอนคงตัว ปริมาณความชื้น และค่าความทนทานของแท่งเชื้อเพลิง

2) นำค่าลักษณะสมบัติของแท่งเชื้อเพลิงที่เหมาะสมซึ่งได้จากการทดลองช่วงที่ 2.1 และ 2.2 มาเปรียบเทียบ

3) นำค่าลักษณะสมบัติที่หมดเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานแท่งเชื้อเพลิงของต่างประเทศ

4) สรุปผลความเป็นไปได้ในการนำกากเหลือใช้ทางการเกษตรมาแปรรูปเป็นแท่งเชื้อเพลิงชีวมวลและสูตรอัตราส่วนที่แนะน



รูปที่ 3.6 ขั้นตอนการทำการทดลองที่ 3

บทที่ 4
ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

งานวิจัยนี้เป็นการทดลองศึกษาความเป็นไปได้ในการนำกากเหลือใช้ทางการเกษตรที่เกิดจากกลุ่มพืชเศรษฐกิจ ได้แก่ ฟางข้าว ใบอ้อย และใบข้าวโพด มาทดสอบผลิตเป็นแท่งเชื้อเพลิงชีวมวลผสมในอัตราส่วนที่ต่างกัน โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 3 ขั้นตอนดังนี้ (1) เก็บตัวอย่างจาพื้นที่และเตรียมวัตถุดิบให้มีลักษณะเหมาะสม (2) ทดสอบจับคู่ผสมแท่งเชื้อเพลิงขีวมวลทั้งแบบให้ความร้อนและแบบใช้ตัวเชื่อมประสาน เพื่อวิเคราะห์หาค่าลักษณะสมบัติที่ใช้บ่งบอกคุณภาพของแท่งเชื้อเพลิง (3) เปรียบเทียบเชื้อเพลิงจากงานวิจัยกับแท่งเชื้อเพลิงขีวมวลที่มีอยู่ในปัจจุบัน รวมถึงเปรียบเทียบกับมาตรฐานแท่งเชื้อเพลิงชีวมวลที่มีอยู่ในต่างประเทศ และสรุปเป็นสูตรเชื้อเพลิงชีวมวลที่เหมาะสมที่สุดในงานของเรา

4.1 ผลการทดลองที่ 1 : เก็บตัวอย่างจากพื้นที่และเตรียมวัตถุดิบให้มีลักษณะเหมาะต่องานวิจัย

4.1.1 ลักษณะของวัตถุดิบ

4.1.1.1 ลักษณะทางกายภาพ

จากการลงพื้นที่เพื่อเก็บตัวอย่างกากเหลือใช้ทางการเกษตรที่เหลือตกค้างอยู่ ณ บริเวณเพาะปลูกภายในจังหวัดลพบุรี พบว่าวัตถุดิบสดที่เก็บมามีความชื้นที่ค่อนข้างสูง เนื่องจากช่วงที่เก็บตัวอย่างเป็นฤดูฝน ส่งผลให้เราต้องนำวัตถุดิบมาเข้าสู่ขั้นตอนการเตรียมวัตถุดิบเพื่อให้มีความเหมาะสมต่อการทำงานวิจัยเสียก่อนซึ่งอ้างอิงจากงานวิจัยที่ผ่านมา (Chiang, Chien และ Lu, 2012) โดยเริ่มจากการนำตัวอย่างอบไล่ความชื้นที่ 105°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากตารางที่4.1 พบว่าภายหลังจากอบวัตถุดิบจะมีค่าความชื้นที่ต่ำกว่า 10% ทั้งหมดซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมา (Demirbas, 2004) (มหาวิทยาลัยศิลปากร, 2555) (Nunes, Matias และ Catalão, 2014) ได้แนะนำค่าความชื้นของวัตถุดิบที่ต่ำกว่า 10% จึงจะเหมาะสมต่อการนำไปเข้าสู่กระบวนการเปลี่ยนรูปเป็นแท่งเชื้อเพลิงชีวมวล

ตารางที่ 4.1 การเปลี่ยนแปลงของปริมาณความชื้น ก่อน-หลัง อบ

	ค่าความชื้นก่อนอบ	**ค่าความชื้นหลังอบ**
ฟางข้าว	60%	8%
ใบอ้อย	50%	8%
ใบข้าวโพด	30%	8%

4.1.1.2 ขนาดอนุภาค

ขนาดของวัตถุดิบที่ไม่มีความสม่ำเสมอก็เป็นอีกหนึ่งปัญหาของการทำการทดลอง จากงานวิจัย (Harun และ Afzal, 2016) ให้คำแนะนำว่าควรจะนำวัตถุดิบเข้าสู่กระบวนการลดขนาดเพื่อให้มีสภาพคล้ายคลึงกันหมดเพื่อให้ง่ายต่อกระบวนการอัดเชื้อเพลิงเป็นแท่งผู้วิจัยจึงเลือกที่จะแยกปั่นลดขนาดกากเหลือใช้ทางการเกษตรที่เก็บมา จากนั้นนำไปเข้าเครื่อง Shieve Shaker เพื่อแบ่งกลุ่มขนาดอนุภาค จากการทดลองสามารถแยกขนาดอนุภาคได้เป็น 3 กลุ่ม (1) กลุ่มที่มีขนาดอนุภาคตั้งแต่ 300 ไมโครเมตร ถึง 1 มิลลิเมตร (2) กลุ่มขนาดอนุภาคตั้งแต่ 180 ไมโครเมตร ถึง 300 ไมโครเมตร (3) กลุ่มที่มีขนาดอนุภาคเล็กกว่า 180 ไมโครเมตร (รูปที่4.1) จึงแยกทำการทดสอบนำไปอัดเป็นแท่งเชื้อเพลิงชีวมวลและวิเคราะห์ค่าลักษณะสมบัติพบว่าขนาดอนุภาคส่งผลต่อทั้ง ค่าความทนทานของแท่งเชื้อเพลิงตารางที่4.2 และปริมาณเถ้าตารางที่4.3 แต่จากงานวิจัย (Harun และ Afzal, 2016) แนะนำขนาดอนุภาคที่อยู่ในช่วง ตั้งแต่ 180 ไมโครเมตร ถึง 300 ไมโครเมตร ซึ่งก็สอดคล้องกับผลการทดสอบ ขนาดอนุภาคที่อยู่ในช่วงดังกล่าวสามารถให้ค่าความทนทานของแท่งเชื้อเพลิงที่เหมาะสม รวมทั้งปริมาณเถ้าที่ไม่มากจนเกินไป

CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ 4.2 ความทนทานของแท่งเชื้อเพลิงที่เปลี่ยนไปเนื่องจากขนาดของอนุภาค

Particle size (μm)	% Durability
300 - 1000	85.804
180 - 300	93.482
≤ 180	97.693

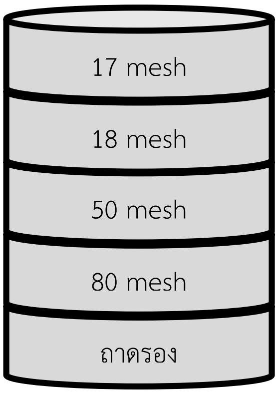
ตารางที่ 4.3 ปริมาณเถ้าที่เปลี่ยนไปเนื่องจากขนาดของอนุภาค

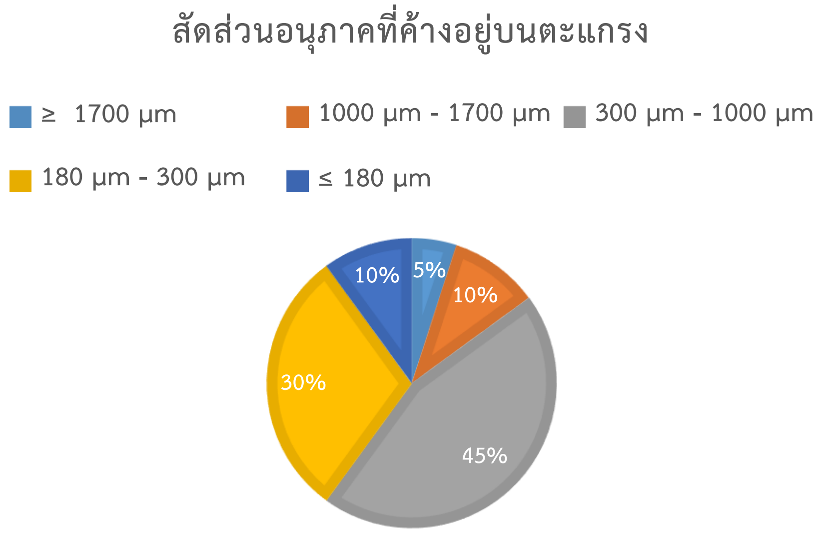
	Particle Size (µm)	≤ 180	180-300	300 - 1000
% Ash content	**ฟางข้าว**	15.07	8.68	7.55
	ใบอ้อย	16.29	6.44	3.42
	ใบข้าวโพด	16.14	6.54	4.74

รูปที่ 4.1 อนุภาควัตถุดิบหลังจากกระบวนการคัดแยกขนาด (a) ขนาดอนุภาคตั้งแต่ 300µm – 1000µm, (b) ขนาดอนุภาคตั้งแต่ 180µm - 300µm, (c) ขนาดอนุภาคเล็กกว่า 180µm

ตารางที่ 4.4 สัดส่วนอนุภาคที่ค้างอยู่บนตะแกรงภายหลังจากผ่านขั้นตอนคัดแยกอนุภาค

ชนิดตะแกรง	ขนาดรูเปิด	สัดส่วนอนุภาคที่ค้างบนตะแกรง
Mesh No.17	1700 µm	5%
Mesh No.18	1000 µm	10%
Mesh No.50	300 µm	45%
Mesh No.80	180 µm	30%
ถาดรอง	-	10%





รูปที่ 4.2 สัดส่วนอนุภาคภายหลังคัดแยกขนาดโดยใช้เครื่อง sieve shaker

ขนาดอนุภาคที่ส่งผลต่อค่าปริมาณเถ้าอาจจะเนื่องมาจากมีโอกาสพบสารอนินทรีย์ในอนุภาคขนาดเล็กมากกว่าอนุภาคขนาดใหญ่ส่งผลให้ปริมาณเถ้าของวัตถุดิบที่มีอนุภาคขนาดเล็กเยอะกว่าอนุภาคของวัตถุดิบขนาดใหญ่ (Bridgeman และคณะ, 2007) ดังที่แสดงในตารางที่ 4.3 หรือแม้กระทั่งขนาดอนุภาคขนาดเล็กมีการจับตัวระหว่างอนุภาคที่หนาแน่นส่งผลให้ช่องว่างระหว่างอนุภาคมีน้อยเป็นเหตุให้ออกซิเจนเข้าไปสัมผัสได้ยากทำให้เกิดการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์เป็นเหตุให้เกิดปริมาณเถ้าที่สูงกว่าอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ (Tokan และคณะ, 2012)

4.1.2 การทดสอบค่าลักษณะสมบัติของวัสดุ

ภายหลังจากขั้นตอนการเตรียมวัตถุดิบและทดสอบอัดแท่งโดยใช้วิธีอัดร้อนแล้วได้ทำการนำแท่งเชื้อเพลิงจากวัตถุดิบแบบเดี่ยวนำไปทดสอบค่าลักษณะสมบัติเบื้องต้นได้แก่ ค่าความร้อน และปริมาณเถ้าซึ่งได้ผลดัง ตารางที่4.5 จะเห็นได้ว่าค่าความร้อนของวัตถุดิบมีประสิทธิภาพเพียงพอที่จะแปลงสภาพเป็นแท่งเชื้อเพลิงชีวมวลโดยอ้างอิงจากงานวิจัย (Tumuluru และคณะ, 2010) (มหาวิทยาลัยศิลปากร, 2555) (Karkania, Fanara และ Zabaniotou, 2012) แท่งเชื้อเพลิงชีวมวลควรมีค่าความร้อนขั้นต่ำอยู่ที่ประมาณ 14.5 MJ/kg จึงจะเหมาะแก่การลงทุนและปริมาณเถ้าที่ต่ำกว่า 15%

ตารางที่ 4.5 ลักษณะสมบัติของเชื้อเพลิงแบบเดี่ยวที่ขนาดอนุภาค 180μm-300μm

	ค่าความร้อน	**ปริมาณเถ้า**	**ปริมาณสารระเหย**	**ปริมาณคาร์บอนคงตัว**
ฟางข้าว	15.67 MJ/kg	8.68 %wt	77.21 %wt	7.11 %wt
ใบอ้อย	16.39 MJ/kg	6.44 %wt	78.21 %wt	8.35 %wt
ใบข้าวโพด	16.32 MJ/kg	6.54 %wt	79.72 %wt	6.74 %wt

4.1.3 เปรียบเทียบค่าความร้อนที่ได้จากการวิเคราะห์กับสูตร Dulong

การหาค่าความร้อนของแท่งเชื้อเพลิงสามารถคาดคะเนเบื้องต้นโดนใช้ Dulong equation ซึ่งเป็นสูตรในการหาค่าความร้อนโดยพิจารณาจากองค์ประกอบธาตุได้แก่ องค์ประกอบของคาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน และซัลเฟอร์ดั่งที่แสดงในตารางที่ 4.6 ซึ่งแสดงถึงองค์ประกอบธาตุของวัตถุดิบแต่ละชนิดที่ใช้ในงานวิจัย ภายหลังจากการคำนวนค่าความร้อนที่ได้มีค่าที่ค่อนข้างต่ำกว่าค่าที่วิเคราะห์ได้จริง เนื่องจากวัตถุดิบที่อ้างอิงจากงานวิจัยไม่ใช่แหล่งเดียวกันส่งผลให้องค์ประกอบธาตุของวัตถุดิบอาจมีความคลาดเคลื่อนไม่ตรงกันมากนักส่งผลให้ค่าความร้อนที่ได้ลดลงจากที่วิเคาะห์ได้

$$\text{Dulong Equation} = 33.86C + 144.4\left(H - \frac{O}{8}\right) + 9.428S$$

ตารางที่ 4.6 องค์ประกอบธาตุของวัตถุดิบ
(Garivait และคณะ, 2006), (Turn, Keffer และ Staackmann, 2002)

	องค์ประกอบของธาตุ (%)				**ค่าความร้อน**
	คาร์บอน	**ไฮโดรเจน**	**ออกซิเจน**	**ซัลเฟอร์**	**จากการคำนวน**
ฟางข้าว	38.52	6.13	39.28	0.29	14.809 **MJ/kg**
ใบอ้อย	45.37	5.09	38.69	0.20	15.720 **MJ/kg**
ใบข้าวโพด	44.20	5.80	43.50	0.01	15.464 **MJ/kg**

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

4.2 ผลการทดลอง 2.1 : หาสัดส่วนที่เหมาะสมในการผลิตแท่งเชื้อเพลิงชีวมวลโดยใช้กรรมวิธีอัดร้อน

การทดลองจะเริ่มต้นโดยการหาอุณหภูมิต่ำสุดที่ทำให้ค่าความทนทานของแท่งเชื้อเพลิงมีค่าเกินกว่า 95% (ENplus และ PFI standard) (Tumuluru และคณะ, 2010)โดยเริ่มที่อุณหภูมิ 150℃ 170℃ และ 190℃ และให้แรงกดจากเครื่องไฮดรอลิคที่ประมาณ 0.25 – 0.5 ตัน จากนั้นนำแท่งเชื้อเพลิงที่ได้ไปวิเคราะห์ค่าความทนทานของแท่งเชื้อเพลิงเพื่อสรุปอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองที่ 2.1 จากนั้นจึงจับคู่วัตถุดิบเพื่อผลิตแท่งเชื้อเพลิงชีวมวลแบบผสมโดยแบ่งอัตราส่วนต่อน้ำหนักของแท่งดั่งที่แสดงในตารางที่ 4.9 โดยขนาดอนุภาคของวัตถุดิบจะต้องมีค่าตั้งแต่ 160 ไมโครเมตร ไม่เกินกว่า 300 ไมโครเมตร ตามที่สรุปได้จากการทดลองที่ 1 และนำแท่งเชื้อเพลิงแบบผสมที่ได้ไปวิเคราะห์เพื่อหาค่าลักษณะสมบัติ ได้แก่ ค่าความร้อน ปริมาณความชื้น ปริมาณเถ้า ปริมาณสาระเหย ปริมาณคาร์บอนคงตัว ค่าความทนทานของแท่งเชื้อเพลิง และองค์ประกอบธาตุภายในแท่งเชื้อเพลิง ตามวิธี ASTM โดยวิธีในการวิเคราะห์นั้นได้แสดงอยู่ในข้อที่3.3 ซึ่งเป็นค่าที่นิยมนำมาเปรียบเทียบในการเลือกใช้ประเภทของเชื้อเพลิง (Niedziółka และคณะ, 2015)

ตารางที่ 4.7 อัตราส่วนวัตถุของแท่งเชื้อเพลิงทั้ง 3 สูตร ที่ใช้ในการทดลองที่ 2.1

ใบอ้อย	ใบข้าวโพด
10	90
20	80
30	70
40	60
50	50
60	40
70	30
80	20
90	10

ฟางข้าว	ใบอ้อย
10	90
20	80
30	70
40	60
50	50
60	40
70	30
80	20
90	10

ฟางข้าว	ใบข้าวโพด
10	90
20	80
30	70
40	60
50	50
60	40
70	30
80	20
90	10

4.2.1 ผลเฉลี่ยค่าลักษณะสมบัติทางกายภาพของแท่งเชื้อเพลิง

จากตารางที่4.10 แสดงให้เห็นถึงค่าลักษณะทางกายภาพโดยเฉลี่ยของแท่งเชื้อเพลิงซึ่งประกอบไปด้วย ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ความยาวของแท่งเชื้อเพลิง ความหนาแน่นของแท่งเชื้อเพลิง ปริมาณความชื้นของแท่งเชื้อเพลิง และค่าความทนทานของแท่งเชื้อเพลิง ตารางที่4.11 แสดงถึงค่าความทนทานของแท่งเชื้อเพลิงของวัตถุดิบแต่ละชนิดสามารถเห็นได้ว่าฟางข้าวและใบอ้อยมีความใกล้เคียงกัน แต่ใบข้าวโพดจะให้ค่าความทนทานของแท่งเชื้อเพลิงที่มากกว่าอีกสองชนิด เนื่องจากลักษณะของอนุภาคของใบข้าวโพดค่อนข้างมีลักษณะที่ละเอียดกว่าส่งผลให้อนุภาคสามารถเข้าไปจับตัวกันได้แน่นมากยิ่งขึ้น

ตารางที่ 4.8 ลักษณะสมบัติทางกายภาพเฉลี่ยของแท่งเชื้อเพลิงที่ผ่านกระบวนการอัดร้อน

	หน่วย	**ค่าลักษณะทางกายภาพของแท่งเชื้อเพลิง**
Diameter	mm	7
Length	mm	30
Bulk density	kg/m^3	650
Moisture content	%wt	≤ 2
Durability	%	≈ 95.5

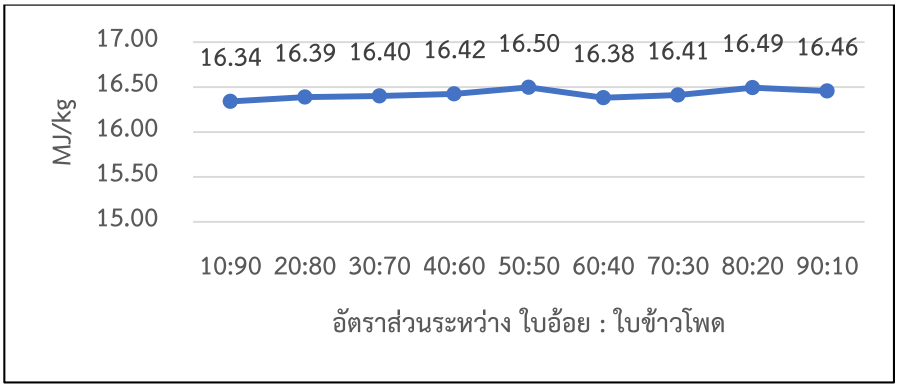
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ 4.9 เฉลี่ยของค่าความทนทานของแท่งเชื้อเพลิงที่ผลิตจากวัตถุดิบแบบเดี่ยว

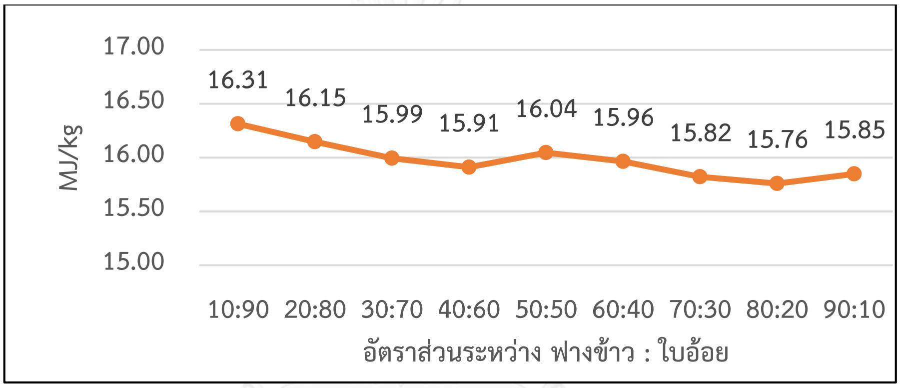
ประเภทของวัตถุดิบ	**ค่าความทนทานของแท่งเชื้อเพลิง**
ฟางข้าว	≥ 95 %
ใบอ้อย	≥ 95 %
ใบข้าวโพด	≥ 96 %

4.2.2 ผลการวิเคราะห์ค่าความร้อน

จากรูปที่ 4.3 – 4.5 แสดงกราฟค่าความร้อนของแท่งเชื้อเพลิงแต่ละสูตรจะเห็นได้ว่า ใบอ้อยและ ใบข้าวโพดมีค่าความร้อนที่ใกล้เคียงกันทำให้การเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนไม่ส่งผลต่อค่าความร้อนมากนัก แต่ฟางข้าวที่มีค่าความร้อนต่ำกว่าวัตถุดิบอีกสองชนิดส่งผลให้การเพิ่มอัตราส่วนของฟางข้าวที่เพิ่มขึ้นทั้งในสูตร ฟางข้าว:ใบอ้อย และ ฟางข้าว:ใบข้าวโพด มีผลให้ค่าความร้อนของแท่งเชื้อเพลิงลดลงเรื่อยๆ

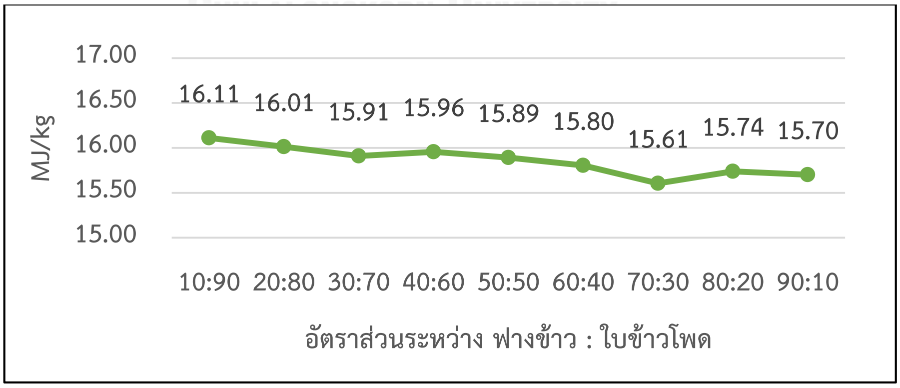


รูปที่ 4.3 การเปลี่ยนไปของค่าความร้อนเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนในสูตรแท่งเชื้อเพลิง ใบอ้อย : ใบข้าวโพด จากกระบวนการอัดร้อน



รูปที่ 4.4 การเปลี่ยนไปของค่าความร้อนเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนในสูตรแท่งเชื้อเพลิง ฟางข้าว : ใบอ้อย จากกระบวนการอัดร้อน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.5 การเปลี่ยนไปของค่าความร้อนเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนในสูตรแท่งเชื้อเพลิง ฟางข้าว : ใบข้าวโพด จากกระบวนการอัดร้อน

จาก ตารางที่4.12 ทำให้เราสามารถสรุปได้ว่าอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดโดยพิจารณาจากค่าความร้อนที่สูงที่สุดในสูตร เพื่อนำไปเปรียบเทียบกับการทดลองขั้นต่อๆไป ซึ่งถ้าพิจารณาค่าความ

ร้อนแล้วมีค่าใกล้เคียงกับสมมุติฐานที่ตั้งไว้ก่อนทำงานวิจัย และยังใกล้เคียงกับค่าความร้อนที่งานวิจัยอื่นแนะนำ (Tumuluru และคณะ, 2010) (มหาวิทยาลัยศิลปากร, 2555) (Karkania, Fanara และ Zabaniotou, 2012)

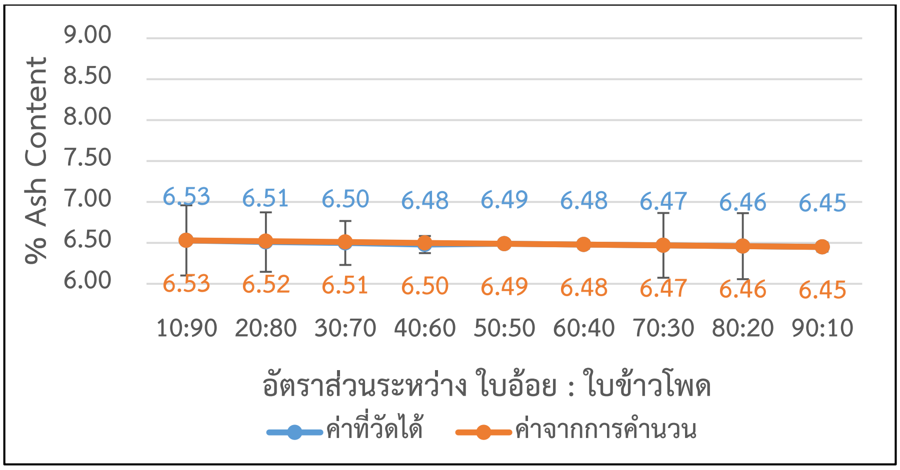
ตารางที่ 4.10 สรุปสูตรอัตราส่วนที่ให้ค่าความร้อนสูงที่สุด จากกระบวนการอัดร้อน

	ใบอ้อย : ใบข้าวโพด	**ฟางข้าว : ใบอ้อย**	**ฟางข้าว : ใบข้าวโพด**
อัตราส่วน	50 : 50	10 : 90	10 : 90
ค่าความร้อน*	16.50 MJ/kg	16.31 MJ/kg	16.11 MJ/kg

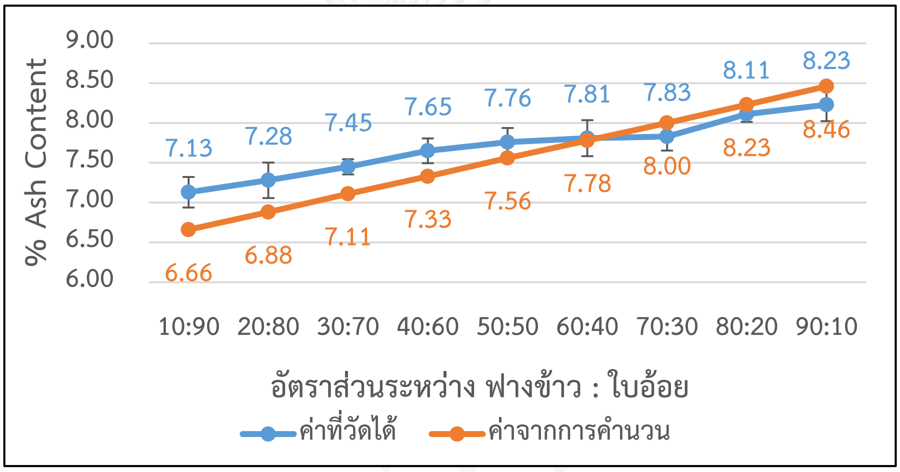
*Dry weight basis

4.2.3 ผลการวิเคราะห์ปริมาณเถ้า

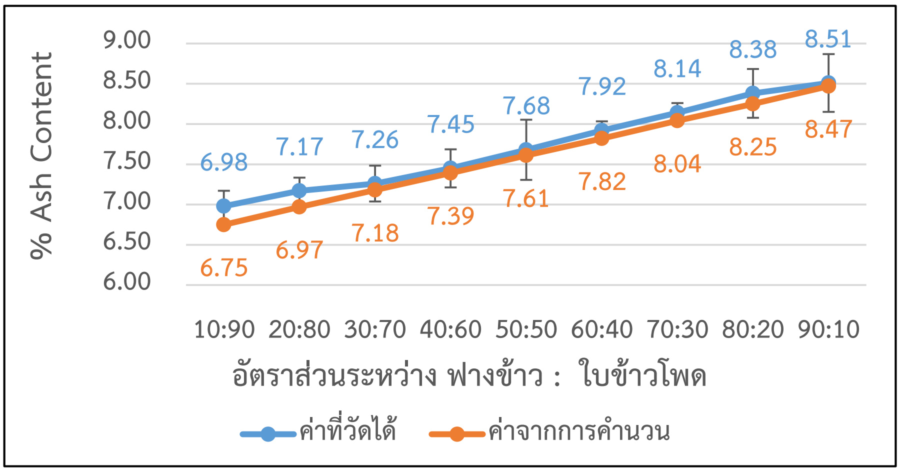
จากรูปที่4.6 – รูปที่4.8 เป็นกราฟแสดงให้เห็นถึงปริมาณเถ้าของแท่งเชื้อเพลิงจากงานวิจัย(เส้นสีน้ำเงิน)เปรียบเทียบกับการคาดคะเนโดยการคำนวนของแต่ละสูตร(เส้นสีส้ม) ซึ่งจะเห็นได้ว่ามีแนวโน้มของค่าปริมาณเถ้าที่ได้จากงานวิเคราะห์มีแนวทางที่ใกล้เคียงกับการคำนวณ โดยใบอ้อยและใบข้าวโพดมีปริมาณเถ้าที่ใกล้เคียงกันการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนจึงไม่ส่งผลต่อปริมาณเถ้ามากนัก ส่วนฟางข้าวจะมีปริมาณเถ้าที่สูงกว่าวัตถุดิบอีกสองชนิด การเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนของฟางข้าวในทั้งสูตร ฟางข้าว:ใบอ้อย และฟางข้าว:ใบข้าวโพด ส่งผลให้ปริมาณเถ้าเพิ่มขึ้นด้วย จากตารางที่4.13 ทำให้เราสามารถสรุปสูตรอัตราส่วนแท่งเชื้อเพลิงที่เหมาะสมในด้านการให้ปริมาณเถ้าที่น้อย และจากการทำการประมาณค่าเบื้องต้นจากการคำนวนจากปริมาณเถ้าจากวัตถุดิบเบื่องต้นพบว่าสูตรใบอ้อย:ใบข้าวโพดมีค่าที่วิเคราะห์ใกล้เคียงกับค่าที่ทำการคำนวนมากโดยค่าปริมาณเถ้าสูงสุดกับต่ำสุดที่สูตรเดียวกันและมีค่าแตกต่างที่เท่ากันคือ 0.08% ส่วนในสูตรฟางข้าว:ใบอ้อย และฟางข้าว:ใบข้าวโพดยังคงมีแนวโน้มของค่าที่วิเคราะห์ได้ใกล้เคียงกับค่าจากการคำนวนโดยในสูตรฟางข้าว:ใบอ้อยมีความแตกต่างของค่าสูงสุดกับต่ำสุดอยู่ที่ 1.10% ในค่าจากการวิเคราะห์และ 1.80% ในค่าจากการคำนวนในส่วนของสูตรฟางข้าว:ใบข้าวโพดมีความแตกต่างของค่าสูงสุดกับต่ำสุดอยู่ที่ 1.53% ในค่าจากการวิเคราะห์และ 1.72% ในค่าจากการคำนวน โดยค่าที่แตกต่างระหว่างการวิเคราะห์จริงกับการคำนวนนั้นอาจจะเนื่องมาจากการผสมวัตถุดิบในขั้นตอนเตรียมหรือปฏิกิริยาเพิ่มเติมที่เกิดจากการเผาวิเคราะห์ส่งผลให้ค่าปริมาณเถ้าที่วิเคราะห์ได้ไม่เท่ากับค่าที่ทำการคำนวนมา อย่างไรก็ตามค่าที่วิเคราะห์ได้ยังคงอยู่ในเกณฑ์ที่ใกล้เคียงกับค่าที่คำนวนเพื่อคาดการเบื้องต้น



รูปที่ 4.6 การเปลี่ยนไปของปริมาณเถ้าเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนในสูตรแท่งเชื้อเพลิง ใบอ้อย : ใบข้าวโพด จากกระบวนการอัดร้อน



รูปที่ 4.7 การเปลี่ยนไปของปริมาณเถ้าเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนในสูตรแท่งเชื้อเพลิง ฟางข้าว : ใบอ้อย จากกระบวนการอัดร้อน



รูปที่ 4.8 การเปลี่ยนไปของปริมาณเถ้าเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนในสูตรแท่งเชื้อเพลิง ฟางข้าว : ใบข้าวโพด จากกระบวนการอัดร้อน

จากตารางที่4.13 ทำให้เราสามารถสรุปสูตรอัตราส่วนแท่งเชื้อเพลิงที่เหมาะสมในด้านการให้ปริมาณเถ้าที่น้อยที่สุดในแต่ละสูตร แต่เมื่อได้นำไปเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานแท่งเชื้อเพลิงชีวมวลที่มีอยู่ในต่างประเทศทำให้ทราบว่าทุกสูตร อัตราส่วนที่ได้จากการทดลองที่ 2.1 มีปริมาณเถ้าที่เกินกว่ามาตรฐานขั้นต่ำซึ่งต้องมีค่าปริมาณเถ้าไม่เกินกว่า 2% (Tumuluru และคณะ, 2010)

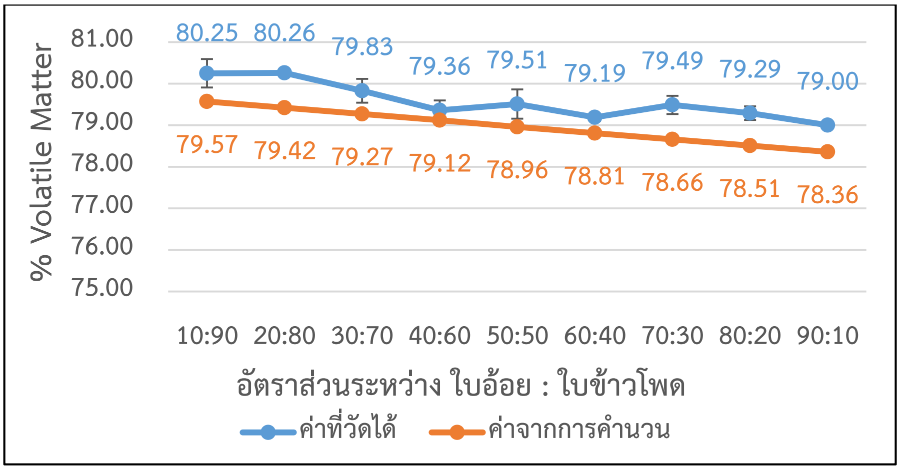
ตารางที่ 4.11 สรุปสูตรอัตราส่วนที่ให้ค่าปริมาณเถ้าต่ำที่สุด จากกระบวนการอัดร้อน

	สูตรใบอ้อย : ใบข้าวโพด	**สูตรฟางข้าว : ใบอ้อย**	**สูตรฟางข้าว : ใบข้าวโพด**
อัตราส่วน	50 : 50	10 : 90	10 : 90
ปริมาณเถ้า*	6.45 %	6.98 %	7.13 %

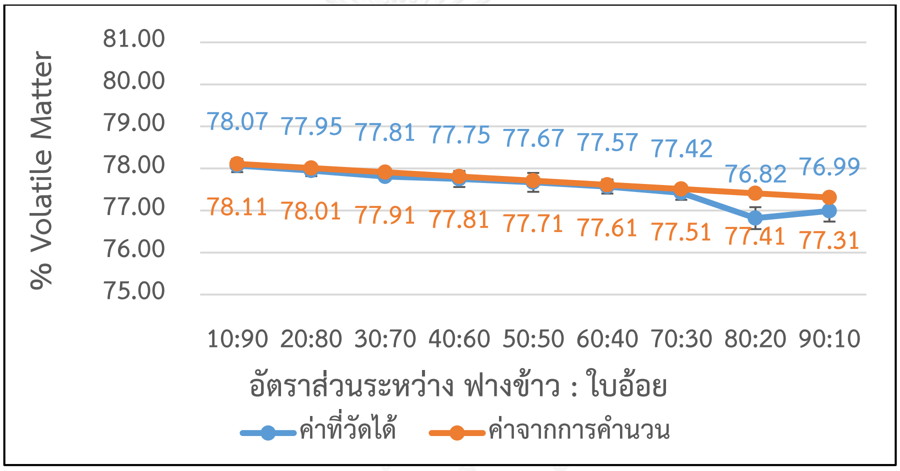
*Dry weight basis

4.2.4 ผลการวิเคราะห์ปริมาณสารระเหย

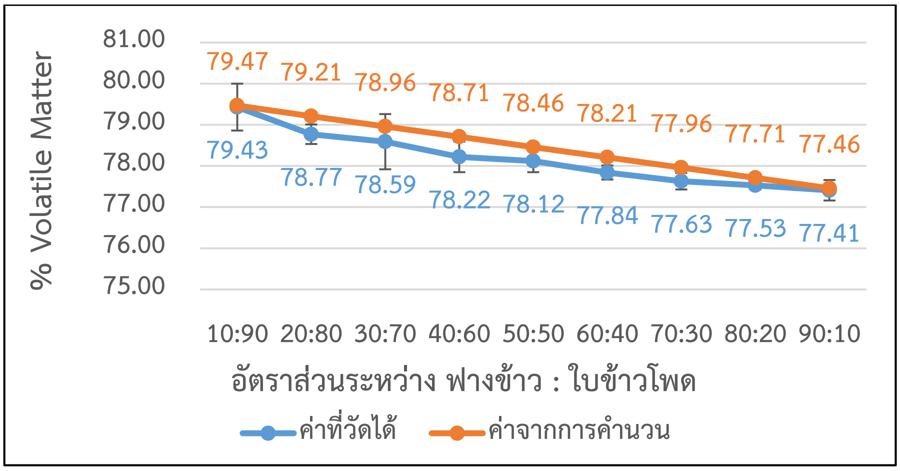
ปริมาณสารระเหยเป็นอีกหนึ่งพารามิเตอร์ที่นิยมหาสำหรับการวิเคราะห์แท่งเชื้อเพลิงชีวมวล เนื่องจากเป็นค่าที่ใช้สำหรับบ่งบอกขนาดของเตาเผาเพื่อให้การเผาไหม้ของก๊าซหมดไปก่อนที่จะถูกปล่อยจากรูปที่4.9 – รูปที่4.11 แสดงถึงกราฟของปริมาณสารระเหยของแท่งเชื้อเพลิงชีวมวล และจากการทำการประมาณค่าเบื้องต้นจากการคำนวนจากปริมาณสารระเหยจากวัตถุดิบเบื่องต้นพบว่าทุกสูตรมีแนวทางที่อยู่ในทางเดียวกับค่าจากการคำนวน โดยสูตรใบอ้อย:ใบข้าวโพดมีค่าค่าปริมาณสารระเหยสูงสุดกับต่ำสุดต่างกันเท่ากับ 1.25% ในค่าจากการวิเคราะห์และ 1.21% ในค่าจากการคำนวน ส่วนในสูตรฟางข้าว:ใบอ้อย และฟางข้าว:ใบข้าวโพดยังคงมีแนวโน้มของค่าที่วิเคราะห์ได้ใกล้เคียงกับค่าจากการคำนวนโดยในสูตรฟางข้าว:ใบอ้อยมีความแตกต่างของค่าสูงสุดกับต่ำสุดอยู่ที่ 1.25% ในค่าจากการวิเคราะห์และ 0.80% ในค่าจากการคำนวน ในส่วนของสูตรฟางข้าว:ใบข้าวโพดมีความแตกต่างของค่าสูงสุดกับต่ำสุดอยู่ที่ 2.02% ในค่าจากการวิเคราะห์และ 2.01% ในค่าจากการคำนวน โดยค่าที่แตกต่างระหว่างการวิเคราะห์จริงกับการคำนวนนั้นอาจจะเนื่องมาจากการผสมวัตถุดิบในขั้นตอนเตรียมหรือปฏิกิริยาเพิ่มเติมที่เกิดจากการเผาวิเคราะห์ส่งผลให้ค่าปริมาณเถ้าที่วิเคราะห์ได้ไม่เท่ากับค่าที่ทำการคำนวนมา อย่างไรก็ตามค่าที่วิเคราะห์ได้ก็ยังอยู่ในเกณฑ์ที่ใกล้เคียงกับค่าที่คำนวนเพื่อคาดการเบื้องต้น



รูปที่ 4.9 การเปลี่ยนไปของปริมาณสารระเหยเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนในสูตรแท่งเชื้อเพลิง ใบอ้อย : ใบข้าวโพด จากกระบวนการอัดร้อน



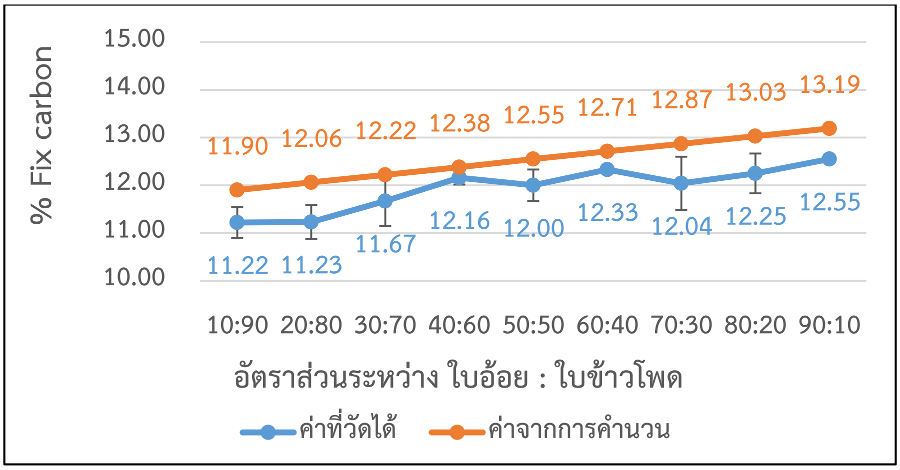
รูปที่ 4.10 การเปลี่ยนไปของปริมาณสารระเหยเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนในสูตรแท่งเชื้อเพลิง ฟางข้าว : ใบอ้อย จากกระบวนการอัดร้อน



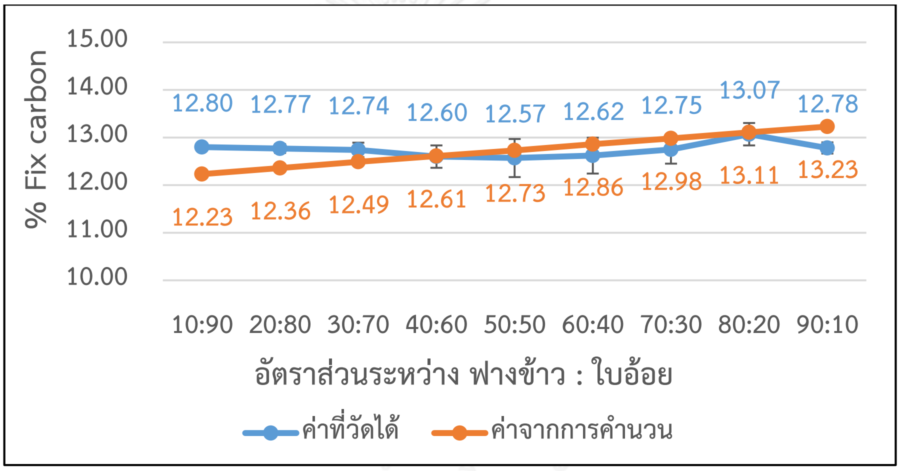
รูปที่ 4.11 การเปลี่ยนไปของปริมาณสารระเหยเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนในสูตรแท่งเชื้อเพลิง ฟางข้าว : ใบข้าวโพด จากกระบวนการอัดร้อน

4.2.5 ผลการวิเคราะห์ปริมาณคาร์บอนคงตัว

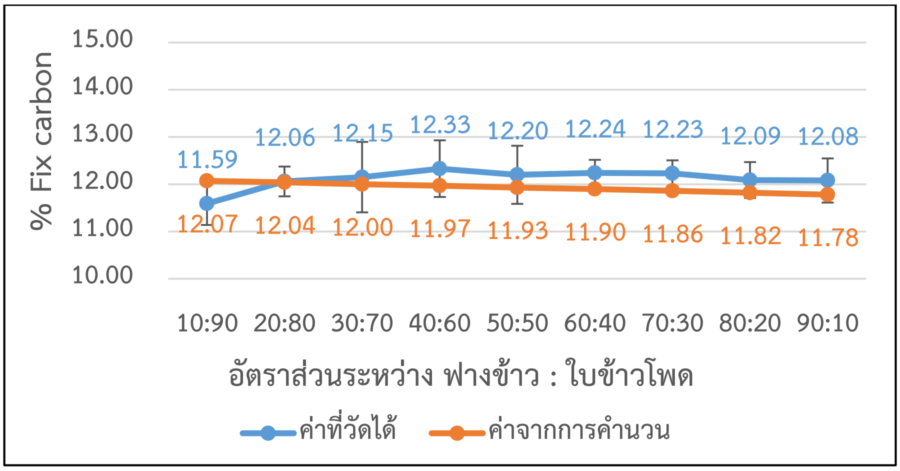
ปริมาณคาร์บอนคงตัวเป็นปริมาณที่คิดได้จะมีค่าความใกล้เคียงกัน การเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนมักจะไม่ส่งผลเนื่องจากวิเคราะห์ได้จากอัตราส่วนที่เหลือภายหลังจากลดค่า ปริมาณความชื้น ปริมาณเถ้า และปริมาณสารระเหยออกจาก 100% ดังที่แสดงในสูตรหัวข้อที่ 3.3.5 ซึ่งความแปรผันของค่าจะขึ้นอยู่กับลักษณะสมบัติกลุ่มที่กล่าวมา จากรูปที่ 4.12 – 4.14 สามารถสังเกตุได้ว่าสูตรใบอ้อย : ใบข้าวโพดมีแนวโน้มค่าที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากค่าของปริมาณสาระเหย (รูปที่4.9) มีแนวโน้มที่ลดลงทำให้ในกราฟนี้มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น อีกทั้งปริมาณเถ้าของสูตรนี้มีค่าที่ค่อนข้างคงที่ (รูปที่4.6) ปริมาณเถ้าจึงไม่ส่งผลต่อค่าคาร์บอนคงตัวในสูตรดังกล่าว แต่กลุ่มที่มีฟางเป็นองค์ประกอบปริมาณเถ้ากลับมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น (รูปที่4.7-4.8) และปริมาณสาระเหยมีแนวโน้มที่ลดลง (รูปที่4.10-4.11) ส่งผลให้กราฟคาร์บอนคงตัวของทั้งสองสูตรมีค่าที่ค่อนข้างคงที่ ซึ่งถ้าเปรียบเทียบกับค่าคาร์บอนคงตัวในชีวมวลชนิดอื่นๆที่มีอยู่ในปัจจุบันแล้ว ชีวมวลที่ผลิตขึ้นในการทดลองที่ 2.1 มีค่าที่ค่อนข้างใกล้เคียง (Karkania, Fanara และ Zabaniotou, 2012) (มหาวิทยาลัยศิลปากร, 2555) และจากการทำการประมาณค่าเบื้องต้นจากการคำนวนจากปริมาณคาร์บอนคงตัวจากวัตถุดิบเบื้องต้นพบว่าทุกสูตรมีแนวทางที่อยู่ในทางเดียวกับค่าจากการคำนวน โดยสูตรใบอ้อย:ใบข้าวโพดมีค่าค่าปริมาณคาร์บอนคงตัวสูงสุดกับต่ำสุดต่างกันที่ 1.33% ในค่าจากการวิเคราะห์และ 1.29% ในค่าจากการคำนวน ส่วนในสูตรฟางข้าว:ใบอ้อย และฟางข้าว:ใบข้าวโพดยังคงมีแนวโน้มของค่าที่วิเคราะห์ได้ใกล้เคียงกับค่าจากการคำนวนโดยในสูตรฟางข้าว:ใบอ้อยมีความแตกต่างของค่าสูงสุดกับต่ำสุดอยู่ที่ 0.50% ในค่าจากการวิเคราะห์และ 1.00% ในค่าจากการคำนวน ในส่วนของสูตรฟางข้าว:ใบข้าวโพดมีความแตกต่างของค่าสูงสุดกับต่ำสุดอยู่ที่ 0.74% ในค่าจากการวิเคราะห์และ 0.29% ในค่าจากการคำนวน โดยค่าที่แตกต่างระหว่างการวิเคราะห์จริงกับการคำนวนนั้นอาจจะเนื่องมาจากการผสมวัตถุดิบในขั้นตอนเตรียมหรือปฏิกิริยาเพิ่มเติมที่เกิดจากการเผาวิเคราะห์ส่งผลให้ค่าปริมาณเถ้าที่วิเคราะห์ได้ไม่เท่ากับค่าที่ทำการคำนวนมา อย่างไรก็ตามค่าที่วิเคราะห์ได้ก็ยังอยู่ในเกณฑ์ที่ใกล้เคียงกับค่าที่คำนวนเพื่อคาดการเบื้องต้น



รูปที่ 4.12 การเปลี่ยนไปของปริมาณคาร์บอนคงตัวเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนในสูตรแท่งเชื้อเพลิง ใบอ้อย : ใบข้าวโพด จากกระบวนการอัดร้อน



รูปที่ 4.13 การเปลี่ยนไปของปริมาณคาร์บอนคงตัวเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนในสูตรแท่งเชื้อเพลิง ฟางข้าว : ใบอ้อย จากกระบวนการอัดร้อน



รูปที่ 4.14 การเปลี่ยนไปของปริมาณคาร์บอนคงตัวเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนในสูตรแท่งเชื้อเพลิง ฟางข้าว : ใบข้าวโพด จากกระบวนการอัดร้อน

4.2.6 ผลของการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุในแท่งเชื้อเพลิง

ปริมาณธาตุก็เป็นอีกหนึ่งพารามิเตอร์ที่ให้ความสนใจโดยเฉพาะปริมาณของ N S และ Cl ซึ่งเป็นสาเหตุให้การเกิดมลพิษโดยจากตารางที่4.14 เป็นการแสดงปริมาณธาตุของแท่งเชื้อเพลิงสูตรผสมโดยพิจารณาเลือกวิเคราะห์จากอัตราส่วนที่ให้ค่าความร้อนสูงที่สุดในแต่ละสูตร ซึ่งภายหลังจากการนำค่าลักษณะสมบัติของธาตุองค์ประกอบไปเทียบกับกลุ่มมาตรฐานแล้วทำให้ทราบว่ามีเพียงปริมาณของ Cl เท่านั้นที่ผ่านมาตรฐานแท่งเชื้อเพลิงชีวมวลในต่างประเทศ แต่ค่าปริมาณของ N และ S ไม่ผ่านค่ามาตรฐานในทุกอัตราส่วน

ตารางที่ 4.12 ปริมาณธาตุองค์ประกอบของแท่งเชื้อเพลิง

	ใบอ้อย : ใบข้าวโพด	**ฟางข้าว : ใบอ้อย**	**ฟางข้าว : ใบข้าวโพด**
อัตราส่วน	50 : 50	10 : 90	10 : 90
C (%)	35.70	35.45	36.17
H (%)	5.45	5.36	5.63
N (%)	0.85	0.64	1.1
S (%)	0.13	0.13	0.12
Cl (%)	0.02	0.02	0.02

4.3 ผลการทดลองที่ 2.2 : หาสัดส่วนที่เหมาะสมในการผลิตแท่งเชื้อเพลิงชีวมวลโดยใช้กรรมวิธีอัดเย็น รวมถึงอัตราส่วนที่เหมาะสมของกากน้ำตาลซึ่งมีหน้าที่เป็นตัวเชื่อมประสาน

ในการทดลองที่ 2.2 นี้จึงพิจารณานำกากน้ำตาลมาให้เป็นตัวเชื่อมประสานโดยอ้างอิงจากงานวิจัยที่เคยมีมา (Kaliyan และ Morey, 2010) โดยจากการทดลองที่ 2.1 ทำให้เห็นได้ว่าค่าลักษณะสมบัติวิเคราะห์มามีค่าที่ใกล้เคียงกันในอัตราส่วนที่ใกล้เคียงกัน การทดลองที่ 2.2 จึงพิจารณาลดความถี่ของอัตราส่วนเพื่อเป็นการประหยัดต้นทุนและเวลาในการวิจัยโดยจะแบ่งอัตราส่วนใหม่ดั่งที่แสดงในตารางที่4.15 และทำการเพิ่มกากน้ำตาลซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมประสานลงไปในช่วงกระผสมวัตถุดิบในอัตราส่วนตามน้ำหนักดั่งที่แสดงในตารางที่ 4.16 และทำการวิเคราะห์ค่าลักษณะสมบัติตามเดิมที่ได้วิเคราะห์ในการทดลองที่ 2.1 ประกอบไปด้วย ค่าความร้อน ปริมาณความชื้น ปริมาณเถ้า ปริมาณสาระเหย ปริมาณคาร์บอนคงตัว ค่าความทนทานของแท่งเชื้อเพลิง และองค์ประกอบธาตุภายในแท่งเชื้อเพลิง แต่การใช้กากน้ำตาลเป็นตัวเชื่อมประสานมีข้อเสียที่ต้องนำแท่งเชื้อเพลิงไปอบเพื่อให้ตัวอย่างแห้งซึ่งจากการทดลองพบว่าต้องอบที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 48

ชั่วโมง ถึงจะทำให้แท่งเชื้อเพลิงอยู่ในสภาพพร้อมที่จะใช้งาน ซึ่งส่งผลให้มีความสิ้นเปลืองพลังงานในขั้นตอนนี้อย่างมาก ค่าปริมาณความชื้นของกากน้ำตาลที่ใช้ในงานวิจัยอยู่ที่ 12.50%

ตารางที่ 4.13 อัตราส่วนวัตถุของแท่งเชื้อเพลิงทั้ง 3 สูตร ที่ใช้ในการทดลองที่ 2.2

ใบอ้อย	ใบข้าวโพด
10	90
30	70
50	50
70	30
90	10

ฟางข้าว	ใบอ้อย
10	90
30	70
50	50
70	30
90	10

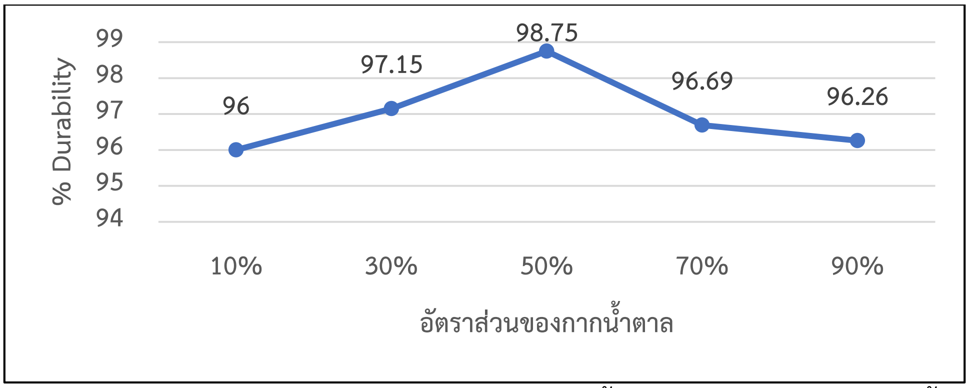
ฟางข้าว	ใบข้าวโพด
10	90
30	70
50	50
70	30
90	10

ตารางที่ 4.14 อัตราส่วนผสมระหว่างวัตถุดิบที่ใช้และกากน้ำตาลในแท่งเชื้อเพลิง

วัตถุดิบ (%wt)	กากน้ำตาล (%wt)
100	10
100	30
100	50
100	70
100	90

4.3.1 ผลการทดสอบค่าความทนทานของแท่งเชื้อเพลิงที่เปลี่ยนไป เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของกากน้ำตาล

จากการทดสอบจะเห็นได้จากรูปที่ 4.15 ซึ่งแสดงถึงกราฟการเปลี่ยนไปของค่าความทนทานของแท่งเชื้อเพลิงเนื่องการการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของกากน้ำตาล สามารถสรุปได้ว่าอัตราส่วนที่ให้ค่าความทนทานของแท่งเชื้อเพลิงมากที่สุดคืออัตราส่วนกากน้ำตาลที่ 50 % ซึ่งสอดคล้องกันงานวิจัยอื่น (Jittabut, 2015) ที่ใช้อัตราส่วนของกากน้ำตาล 50% ในการผสมทำแท่งเชื้อเพลิงชีวมวล ผู้วิจัยจึงพิจารณาเลือกใช้อัตราส่วนกากน้ำตาลที่ 50% ในการทดลองที่ 2.2 ต่อไป



รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความทนทานของแท่งเชื้อเพลิงต่ออัตราส่วนของกากน้ำตาลในแท่งเชื้อเพลิง

4.3.2 ผลเฉลี่ยค่าลักษณะสมบัติทางกายภาพของแท่งเชื้อเพลิง

จากกระบวนการผลิตแท่งเชื้อเพลิงแบบอัดเย็นโดยใช้กากน้ำตาลเป็นตัวเชื่อมประสานและให้แรงกดจากเครื่องไฮดรอลิกประมาณ 0.25 - 0.5 ตัน และนำแท่งเชื้อเพลิงที่ได้ไปอบเพื่อให้มีความแห้งจนมีลักษณะเสมือนแท่งเชื้อเพลิงชีวมวลทั่วไปโดยใช้อุณหภูมิประมาณ 120°C เป็นเวลา 48 ชั่วโมง จากนั้นนำตัวอย่างแท่งเชื้อเพลิงไปวิเคราะห์หาค่าลักษณะสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ความยาว ค่าความหนาแน่นของแท่งเชื้อเพลิง ปริมาณความชื้น และค่าความทนทานของแท่งเชื้อเพลิง ดั่งที่แสดงในตารางที่4.17 ทำให้สามารถสรุปได้ว่าการใส่กากน้ำตาลเป็นตัวเชื่อมประสานสามารถส่งผลให้ค่าความหนาแน่นและค่าความทนทานของแท่งเชื้อเพลิงมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยจากกรรมวิธีอัดร้อนในการทดลองที่ 2.1

ตารางที่ 4.15 ลักษณะสมบัติทางกายภาพเฉลี่ยของแท่งเชื้อเพลิงที่ผ่านกระบวนการอัดเย็น

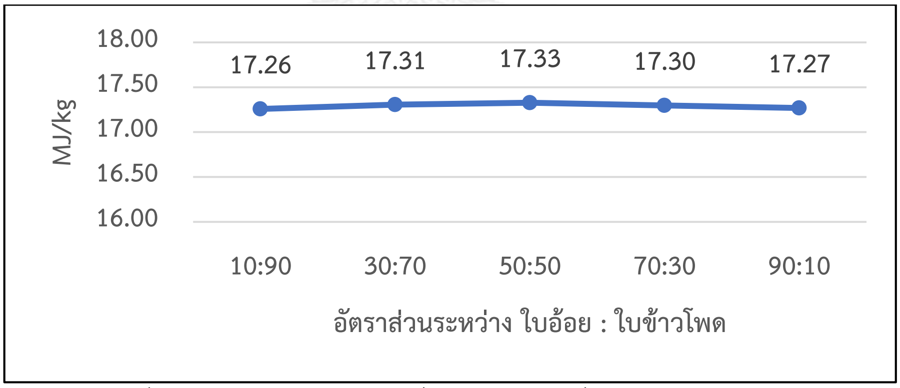
	หน่วย	**ค่าลักษณะทางกายภาพของแท่งเชื้อเพลิง**
Diameter	mm	7
Length	mm	30
Bulk density	kg/m^3*	700
Moisture content	%wt*	≤ 2
Durability	%*	≈ 98

*Dry weight basis

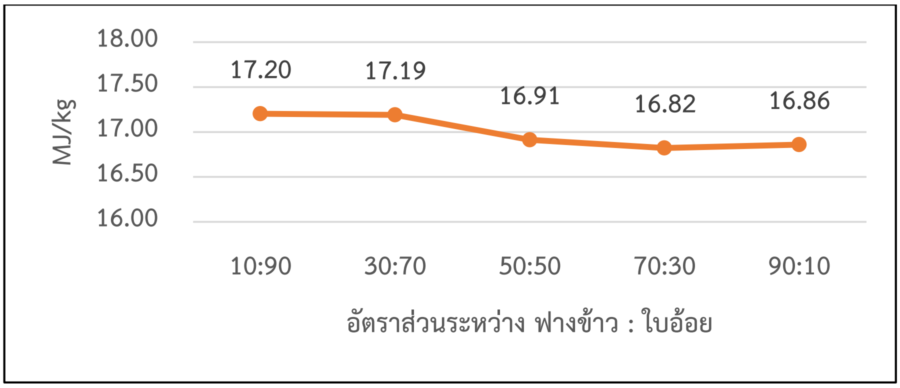
4.3.3 ผลการวิเคราะห์ค่าความร้อน

ค่าความร้อน จากการวิเคราะห์ตัวอย่างทดลองตามวิธี ASTM ทำให้ได้มาซึ่ง รูปที่ 4.16-4.18 แสดงถึงการเปลี่ยนไปของค่าความร้อนเนื่องจากเปลี่ยนอัตราส่วนของวัตถุดิบจะเห็นได้ว่ากราฟยังมีแนวโน้มที่ยังสอดคล้องกับการทดลองที่ 2.1 แต่จะมีการเพิ่มขึ้นของค่าความร้อนเนื่องจากตัวเชื่อมประสานที่ใส่ลงไปในส่วนผสม การใส่กากน้ำตาลที่อัตราส่วน 50% ต่อน้ำหนักส่งผลให้ค่าความร้อนของแท่งเชื้อเพลิงในงานวิจัยเพิ่มขึ้นทุกสูตรอัตราส่วนดั่งที่แสดงในรูปที่ 4.19-4.21 เนื่องจากในกากน้ำตาลมีน้ำตาลเป็นส่วนประกอบอยู่ในปริมาณที่มาก ส่งผลให้เพิ่มประสิทธิภาพในการเผาไหม้เป็นไปในทางเดียวกับงานวิจัย (Yohe, 1964) (Kaliyan และ Morey, 2010) (Jittabut, 2015) ซึ่งแนะนำให้ใส่กากน้ำตาลลงไปในส่วนผสมถ้าหากต้องการเพิ่มประสิทธิภาพในการเผาไหม้ของกลุ่มเชื้อเพลิงที่ให้ค่าความร้อนที่ต่ำ และจากตารางที่ 4.18 เป็นการแสดงอัตราส่วนที่ให้ค่าความร้อนสูงที่สุดในแต่ละสูตรเชื้อเพลิงเพื่อนำไปเปรียบเทียบในขั้นตอนต่อๆไป

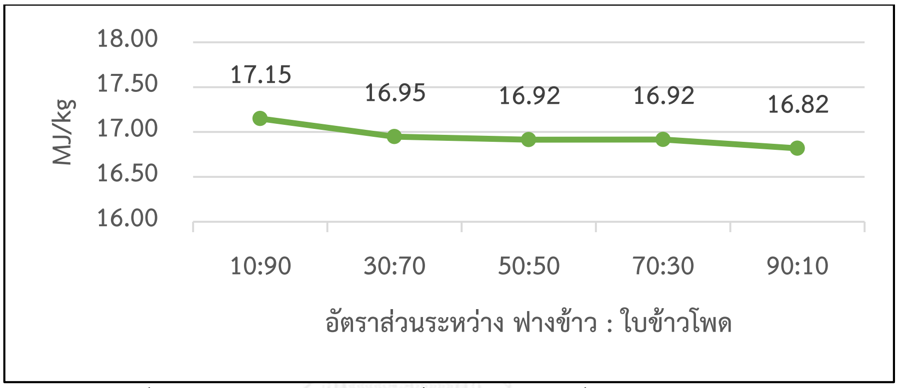
หมายเหตุ : ค่าพารามิเตอร์ที่ทำการเปรียบเทียบในกราฟระหว่าง 2.1 และ 2.2 เป็นการเทียบโดยยึดวัตถุดิบที่เป็นกากเหลือใช้ทางการเกษตรในน้ำหนักที่เท่ากัน ค่าพารามิเตอร์ที่เปลี่ยนไปเนื่องมาจากกากน้ำตาลที่ใส่เพิ่มลงในส่วนผสม



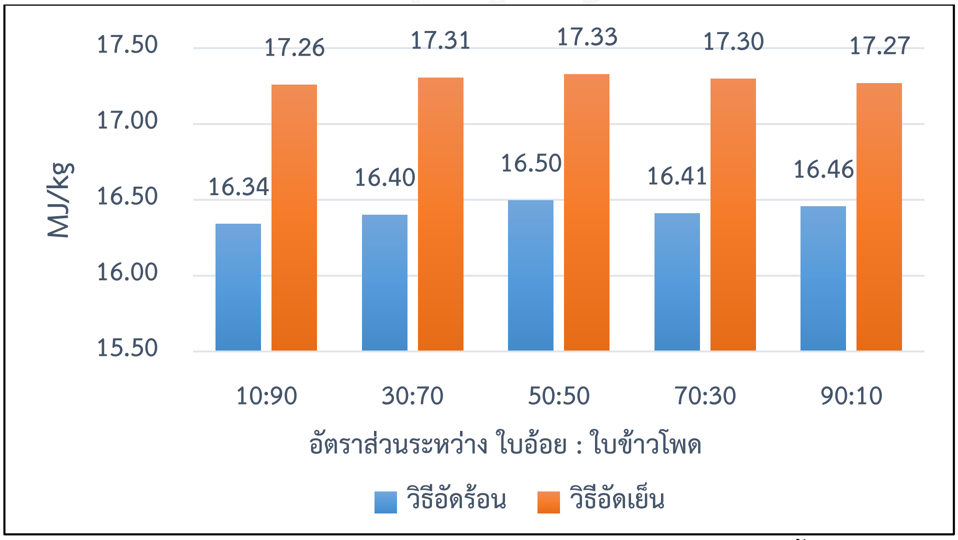
รูปที่ 4.16 การเปลี่ยนไปของค่าความร้อนเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนในสูตรแท่งเชื้อเพลิง ใบอ้อย : ใบข้าวโพด จากกระบวนการอัดเย็น



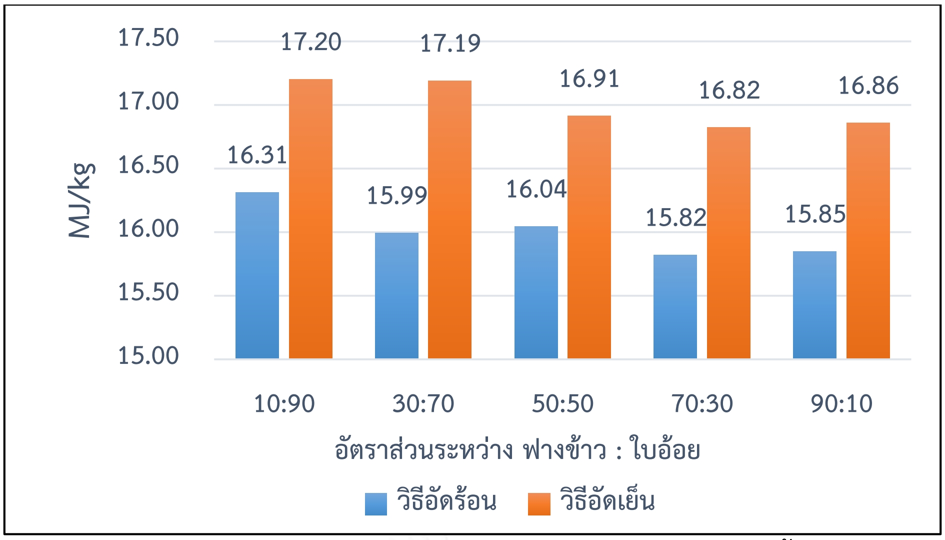
รูปที่ 4.17 การเปลี่ยนไปของค่าความร้อนเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนในสูตรแท่งเชื้อเพลิง ฟางข้าว : ใบอ้อย จากกระบวนการอัดเย็น



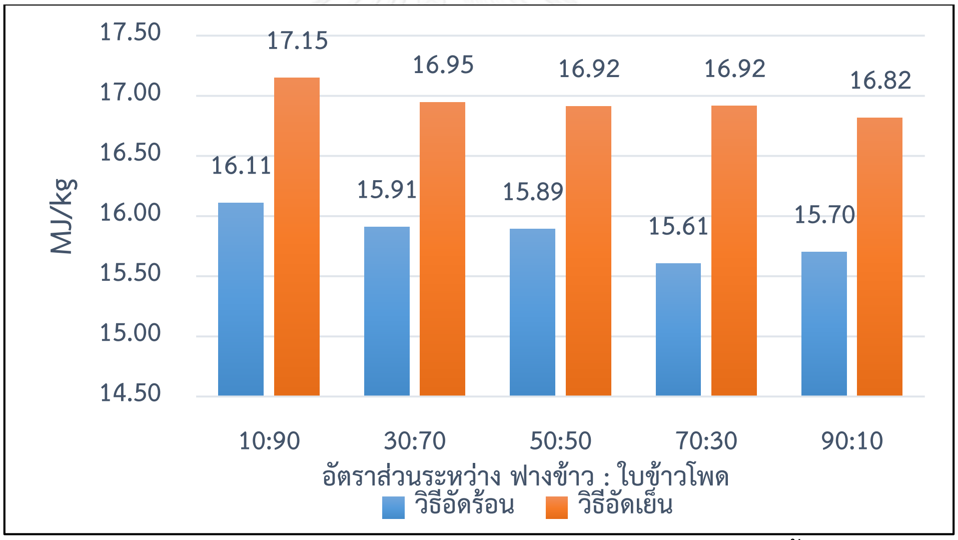
รูปที่ 4.18 การเปลี่ยนไปของค่าความร้อนเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนในสูตรแท่งเชื้อเพลิง ฟางข้าว : ใบข้าวโพด จากกระบวนการอัดเย็น



รูปที่ 4.19 เปรียบเทียบค่าความร้อนระหว่างวิธีอัดร้อนและวิธีอัดเย็นของแท่งเชื้อเพลิงสูตร ใบอ้อย : ใบข้าวโพด



รูปที่ 4.20 เปรียบเทียบค่าความร้อนระหว่างวิธีอัดร้อนและวิธีอัดเย็นของแท่งเชื้อเพลิงสูตร ฟางข้าว : ใบอ้อย



รูปที่ 4.21 เปรียบเทียบค่าความร้อนระหว่างวิธีอัดร้อนและวิธีอัดเย็นของแท่งเชื้อเพลิงสูตร ฟางข้าว : ใบข้าวโพด

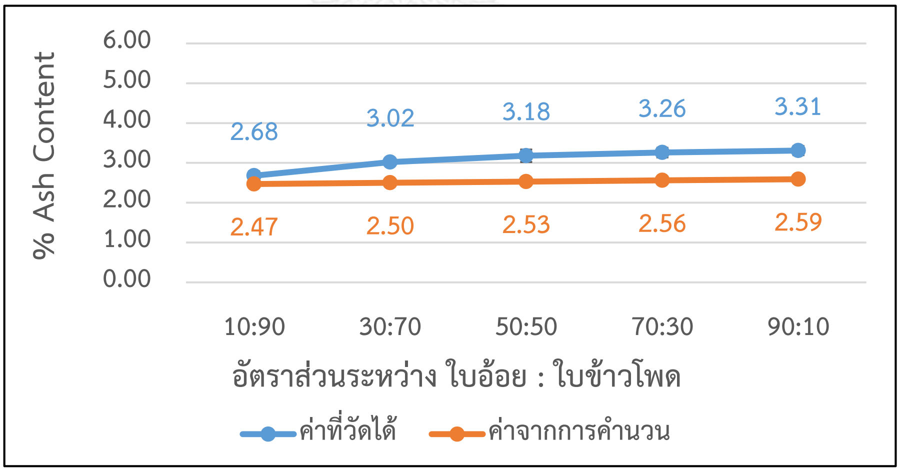
ตารางที่ 4.16 สรุปสูตรอัตราส่วนที่ให้ค่าความร้อนสูงที่สุด จากกระบวนการอัดร้อน

	ใบอ้อย : ใบข้าวโพด	**ฟางข้าว : ใบอ้อย**	**ฟางข้าว : ใบข้าวโพด**
อัตราส่วน	50 : 50	10 : 90	10 : 90
ค่าความร้อน*	17.33 MJ/kg	17.20 MJ/kg	17.15 MJ/kg

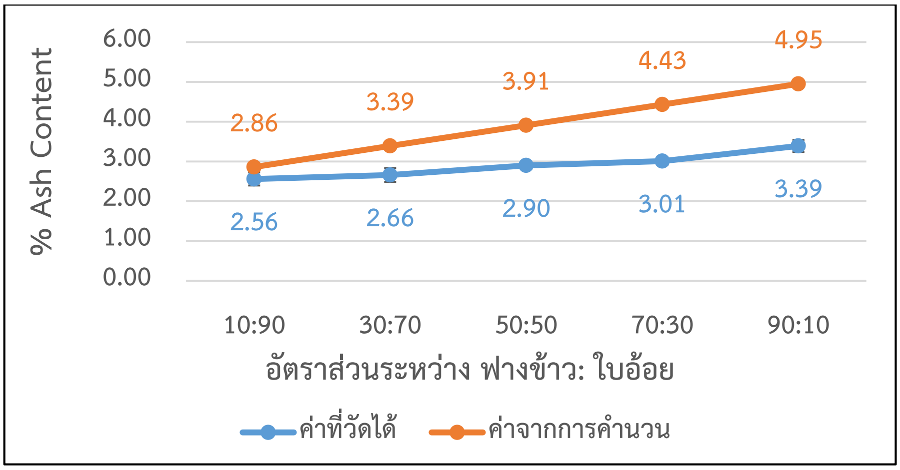
*Dry weight basis

4.3.4 ผลการวิเคราะห์ปริมาณเถ้า

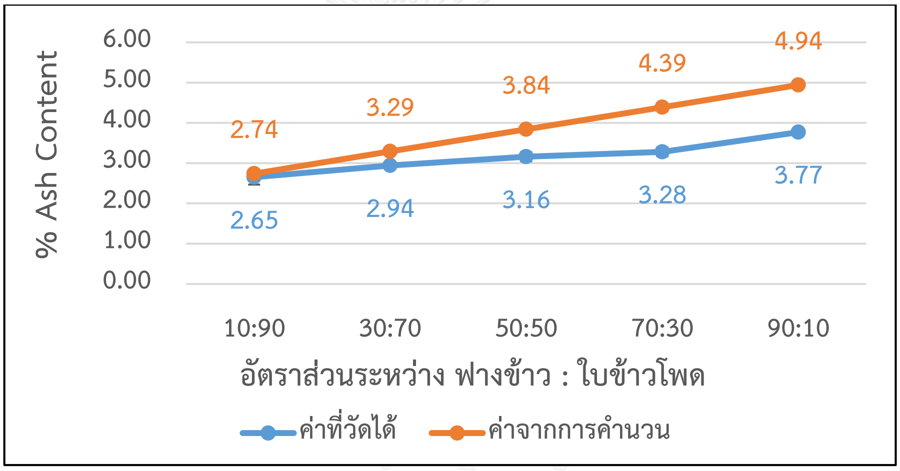
ภายหลังจากวิเคราะห์ปริมาณเถ้าของแท่งเชื้อเพลิงที่ได้จะมีแนวโน้มที่ต่ำลงจากการทดลองที่ 2.1 อยู่อย่างเห็นได้ชัด ดังที่แสดงในรูปที่ 4.25-4.27 แต่ยังมีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน ซึ่งสามารถทำให้ผู้วิจัยสรุปได้ว่าการใส่กากน้ำตาลซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมประสานลงไปช่วยให้คุณภาพของเชื้อเพลิงในด้านปริมาณเถ้าลดลง ภายหลังจากการเปรียบเทียบจากการคำนวนเบื้องต้นปริมาณเถ้าที่ได้จากการวิเคราะห์ยังคงมีแนวโน้มใกล้เคียงกับการคำนวน และจากการทำการประมาณค่าเบื้องต้นจากการคำนวนจากปริมาณเถ้าจากวัตถุดิบเบื่องต้นพบว่าทุกสูตรมีแนวทางที่อยู่ในทางเดียวกับค่าจากการคำนวน โดยสูตรใบอ้อย:ใบข้าวโพดมีค่าค่าปริมาณเถ้าสูงสุดกับต่ำสุดต่างกันเท่ากับ 0.63% ในค่าจากการวิเคราะห์และ 0.12% ในค่าจากการคำนวน ส่วนในสูตรฟางข้าว:ใบอ้อยมีความแตกต่างของค่าสูงสุดกับต่ำสุดอยู่ที่ 0.83% ในค่าจากการวิเคราะห์และ 2.09% ในค่าจากการคำนวน ในส่วนของสูตรฟางข้าว:ใบข้าวโพดมีความแตกต่างของค่าสูงสุดกับต่ำสุดอยู่ที่ 1.12% ในค่าจากการวิเคราะห์และ 2.20% ในค่าจากการคำนวน โดยค่าที่แตกต่างระหว่างการวิเคราะห์จริงกับการคำนวนนั้นอาจจะเนื่องมาจากการผสมวัตถุดิบในขั้นตอนเตรียมหรือปฏิกิริยาเพิ่มเติมที่เกิดจากการเผาวิเคราะห์ส่งผลให้ค่าปริมาณเถ้าที่วิเคราะห์ได้ไม่เท่ากับค่าที่ทำการคำนวนมา อย่างไรก็ตามค่าที่วิเคราะห์ได้ก็ยังอยู่ในเกณฑ์ที่ใกล้เคียงกับค่าที่คำนวนเพื่อคาดการเบื้องต้น



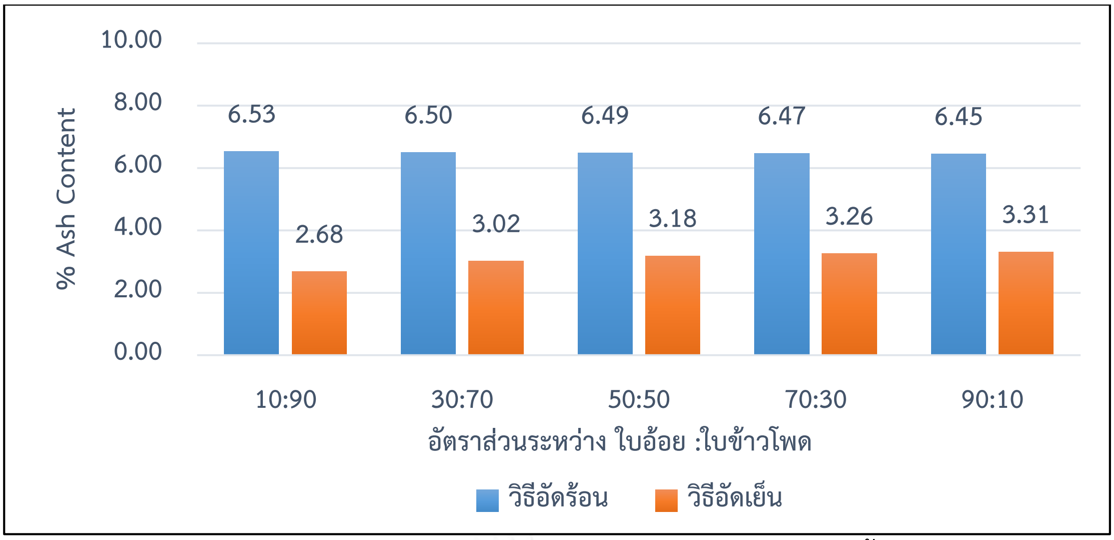
รูปที่ 4.22 การเปลี่ยนไปของปริมาณเถ้าเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนในสูตรแท่งเชื้อเพลิงใบอ้อย : ใบข้าวโพด จากกระบวนการอัดเย็น



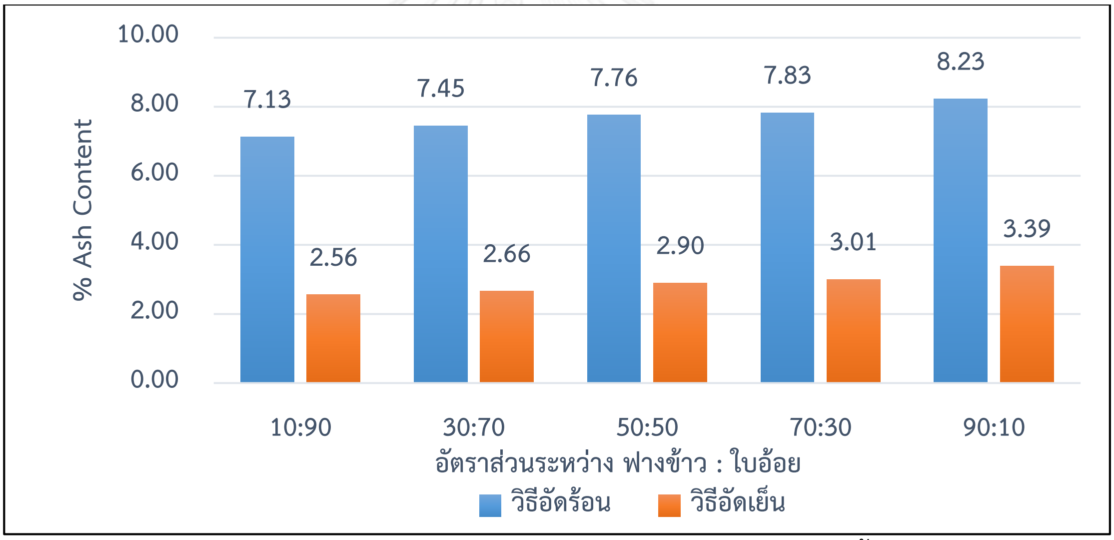
รูปที่ 4.23 การเปลี่ยนไปของปริมาณเถ้าเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนในสูตรแท่งเชื้อเพลิง ฟางข้าว : ใบอ้อย จากกระบวนการอัดเย็น



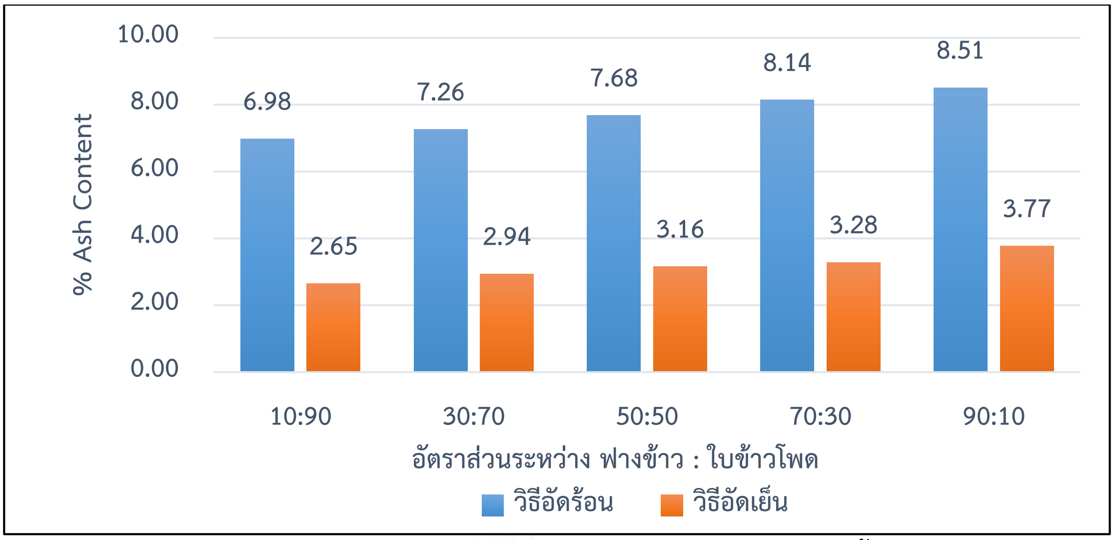
รูปที่ 4.24 การเปลี่ยนไปของปริมาณเถ้าเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนในสูตรแท่งเชื้อเพลิง ฟางข้าว : ใบข้าวโพด จากกระบวนการอัดเย็น



รูปที่ 4.25 เปรียบเทียบปริมาณเถ้าระหว่างวิธีอัดร้อนและวิธีอัดเย็นของแท่งเชื้อเพลิงสูตร ใบอ้อย : ใบข้าวโพด



รูปที่ 4.26 เปรียบเทียบปริมาณเถ้าระหว่างวิธีอัดร้อนและวิธีอัดเย็นของแท่งเชื้อเพลิงสูตร ฟางข้าว : ใบข้าวโพด



รูปที่ 4.27 เปรียบเทียบปริมาณเถ้าระหว่างวิธีอัดร้อนและวิธีอัดเย็นของแท่งเชื้อเพลิงสูตร ฟางข้าว : ใบข้าวโพด

ตารางที่ 4.17 สรุปสูตรอัตราส่วนที่ให้ค่าปริมาณเถ้าต่ำที่สุด จากกระบวนการอัดเย็น

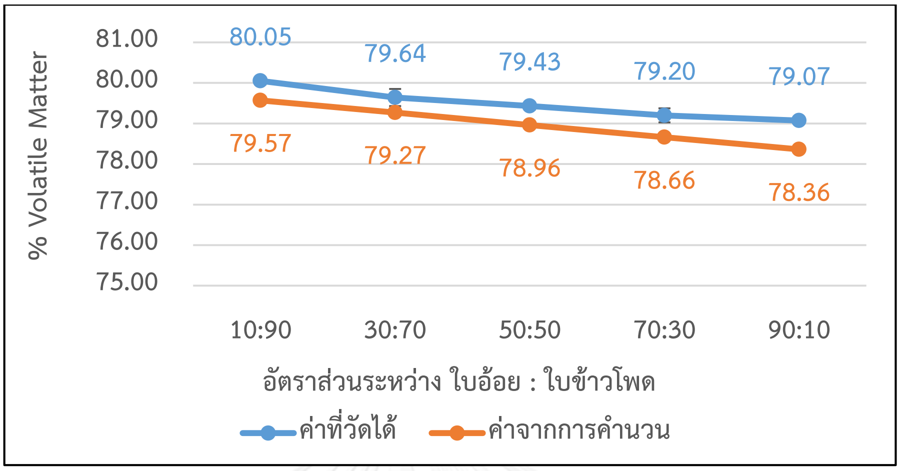
	สูตรใบอ้อย : ใบข้าวโพด	**สูตรฟางข้าว : ใบอ้อย**	**สูตรฟางข้าว : ใบข้าวโพด**
อัตราส่วน	50 : 50	10 : 90	10 : 90
ปริมาณเถ้า*	2.68 %	2.56 %	2.65 %

*Dry weight basis

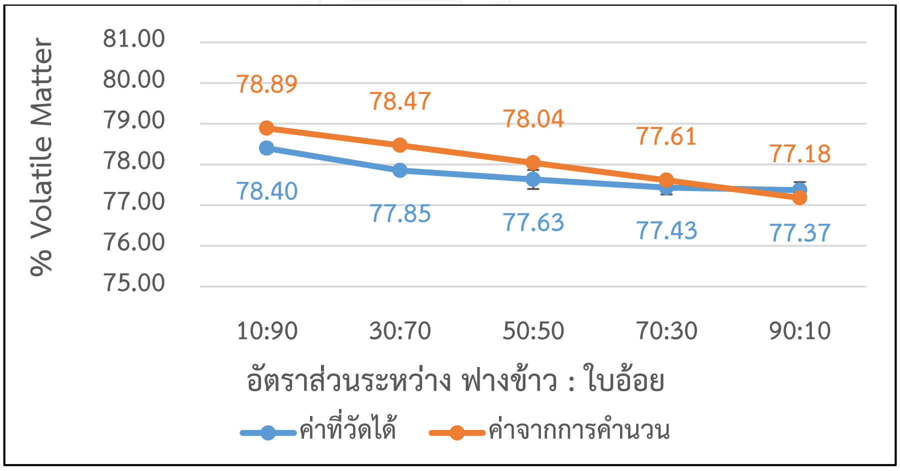
4.3.5 ผลการวิเคราะห์ปริมาณสาระเหย

จากการทดลองสามารถสรุปได้ว่าการใส่กากน้ำตาลเพิ่มลงในอัตราส่วนไม่ได้ส่งผลต่อค่าปริมาณสารระเหยจากรูปที่ 4.31-4.33 จะเห็นได้ว่าค่าปริมาณสารระเหยมีแนวโน้มไปในทางเดียวกันและมีค่าที่ใกล้เคียงกันทั้งแท่งเชื้อเพลิงที่ได้จากวิธีอัดร้อนและอัดเย็น ภายหลังจากการเปรียบเทียบจากการคำนวนเบื้องต้นปริมาณเถ้าที่ได้จากการวิเคราะห์ยังคงมีแนวโน้มใกล้เคียงกับการคำนวน และจากการทำการประมาณค่าเบื้องต้นจากการคำนวนจากปริมาณสารระเหยจากวัตถุดิบเบื่องต้นพบว่าทุกสูตรมีแนวทางที่อยู่ในทางเดียวกับค่าจากการคำนวน โดยสูตรใบอ้อย:ใบข้าวโพดมีค่าค่าปริมาณสารระเหยสูงสุดกับต่ำสุดต่างกันเท่ากับ 0.98% ในค่าจากการวิเคราะห์และ 1.21% ในค่าจากการคำนวน ส่วนในสูตรฟางข้าว:ใบอ้อยมีความแตกต่างของค่าสูงสุดกับต่ำสุดอยู่ที่ 1.03% ในค่าจากการวิเคราะห์และ 1.71% ในค่าจากการคำนวน ในส่วนของสูตรฟางข้าว:ใบข้าวโพดมีความแตกต่างของค่าสูงสุดกับต่ำสุดอยู่ที่ 1.27% ในค่าจากการวิเคราะห์และ 2.01% ในค่าจากการคำนวน โดยค่าที่แตกต่างระหว่างการวิเคราะห์จริงกับการคำนวนนั้นอาจจะเนื่องมาจากการผสมวัตถุดิบในขั้นตอน

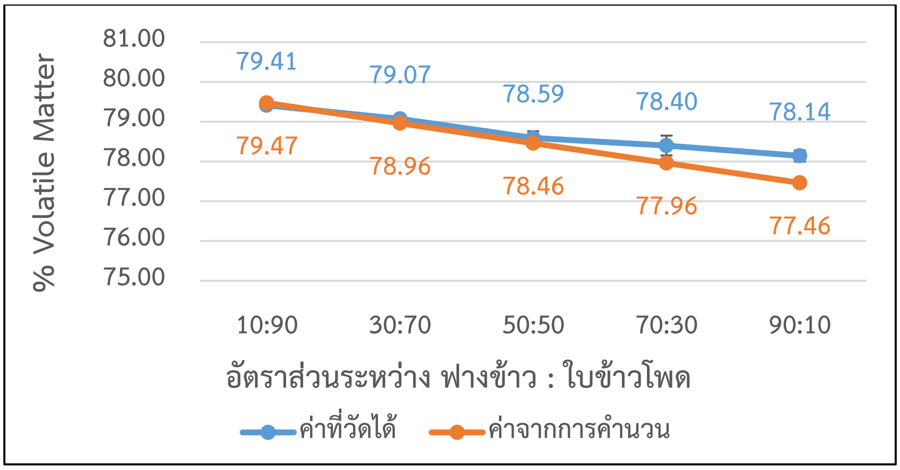
เตรียมหรือปฏิกิริยาเพิ่มเติมที่เกิดจากการเผาวิเคราะห์ส่งผลให้ค่าปริมาณเถ้าที่วิเคราะห์ได้ไม่เท่ากับค่าที่ทำการคำนวนมา อย่างไรก็ตามค่าที่วิเคราะห์ได้ก็ยังอยู่ในเกณฑ์ที่ใกล้เคียงกับค่าที่คำนวนเพื่อคาดการเบื้องต้น



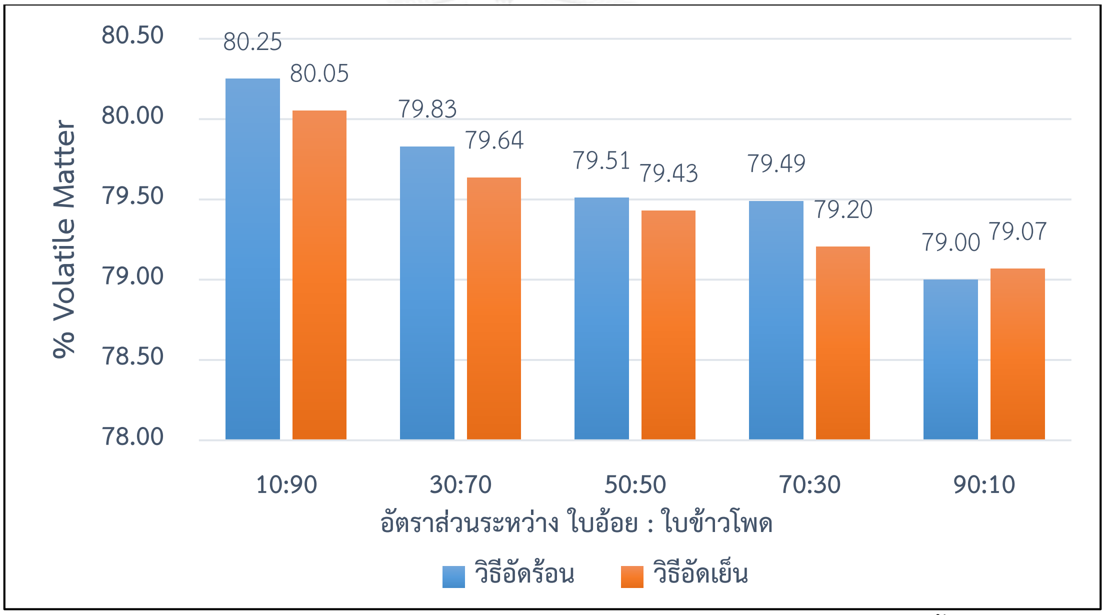
รูปที่ 4.28 การเปลี่ยนไปของปริมาณสารระเหยเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนในสูตรแท่งเชื้อเพลิง ใบอ้อย : ใบข้าวโพด จากกระบวนการอัดเย็น



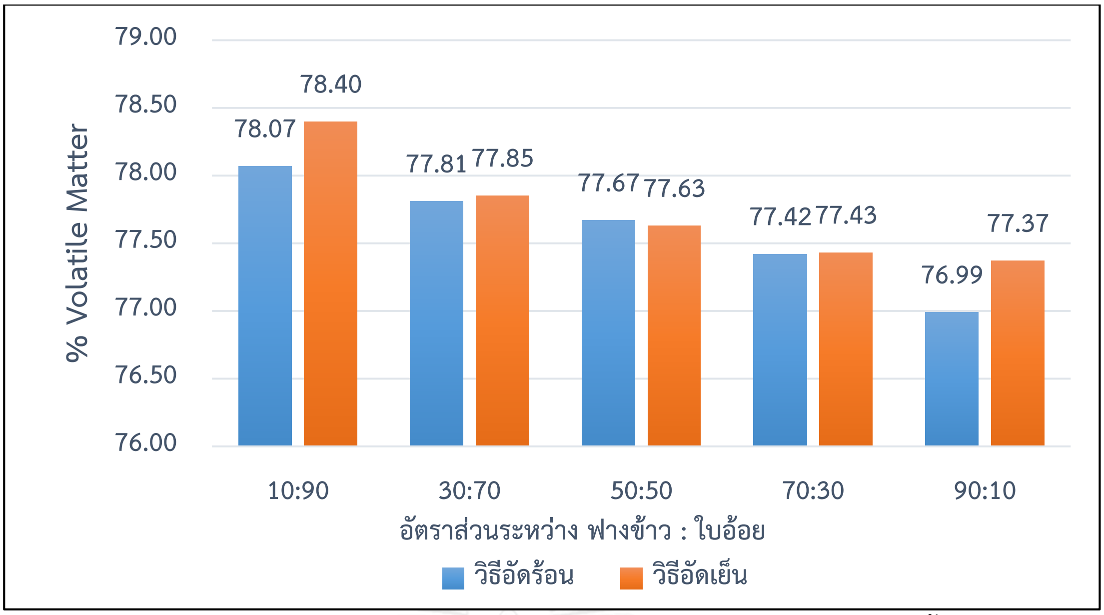
รูปที่ 4.29 การเปลี่ยนไปของปริมาณสารระเหยเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนในสูตรแท่งเชื้อเพลิง ฟางข้าว : ใบอ้อย จากกระบวนการอัดเย็น



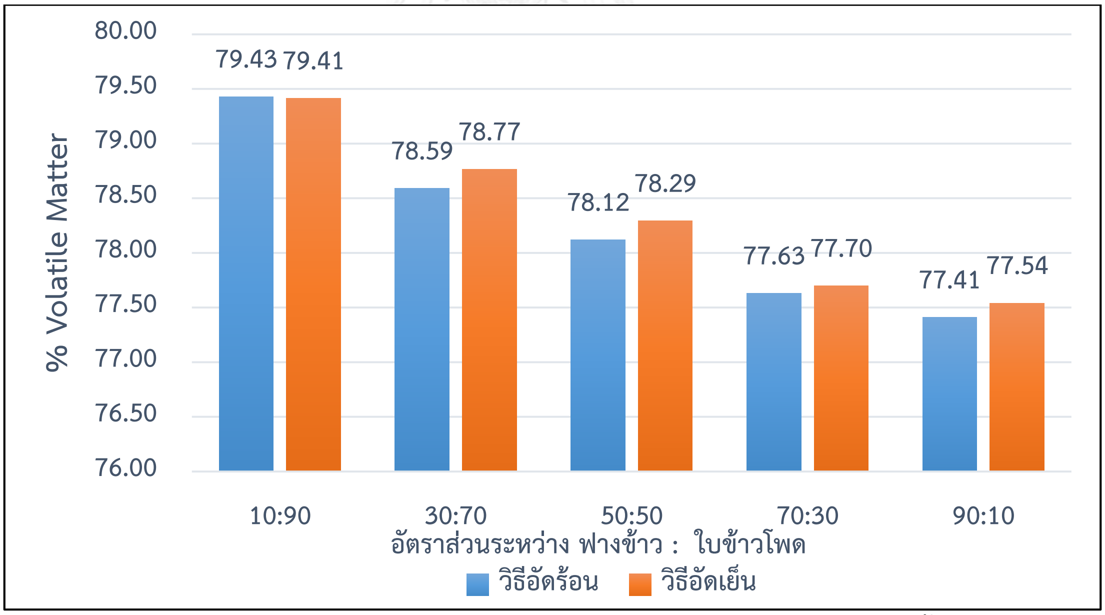
รูปที่ 4.30 การเปลี่ยนไปของปริมาณสารระเหยเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนในสูตรแท่งเชื้อเพลิง ฟางข้าว : ใบข้าวโพด จากกระบวนการอัดเย็น



รูปที่ 4.31 เปรียบเทียบปริมาณสารระเหยระหว่างวิธีอัดร้อนและวิธีอัดเย็นของแท่งเชื้อเพลิงสูตร ใบอ้อย : ใบข้าวโพด



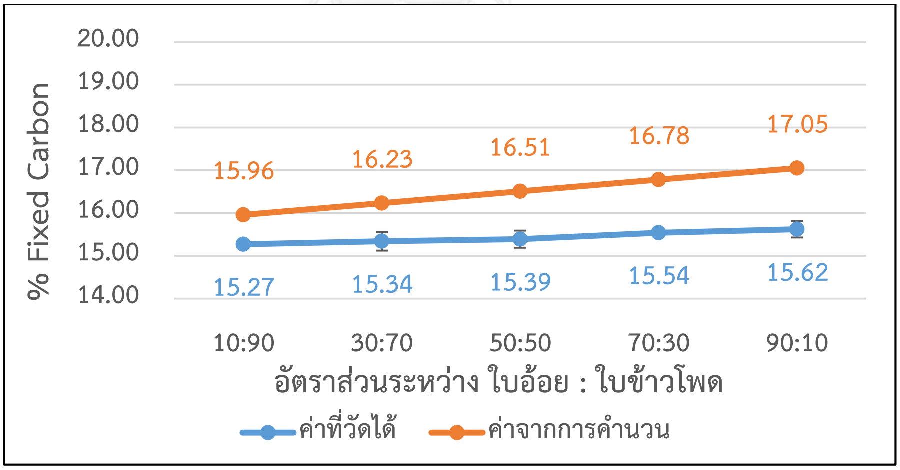
รูปที่ 4.32 เปรียบเทียบปริมาณสารระเหยระหว่างวิธีอัดร้อนและวิธีอัดเย็นของแท่งเชื้อเพลิงสูตร ฟางข้าว : ใบอ้อย



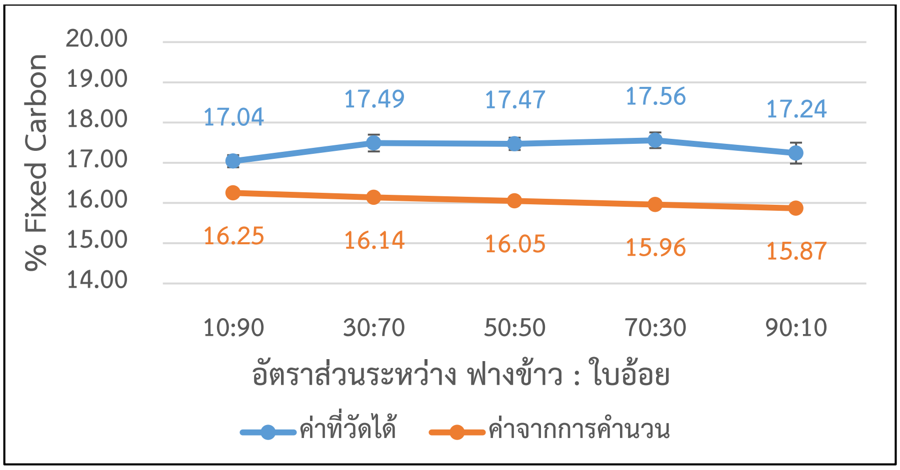
รูปที่ 4.33 เปรียบเทียบปริมาณสารระเหยระหว่างวิธีอัดร้อนและวิธีอัดเย็นของแท่งเชื้อเพลิงสูตร ฟางข้าว : ใบข้าวโพด

4.3.6 ผลการวิเคราะห์ปริมาณคาร์บอนคงตัว

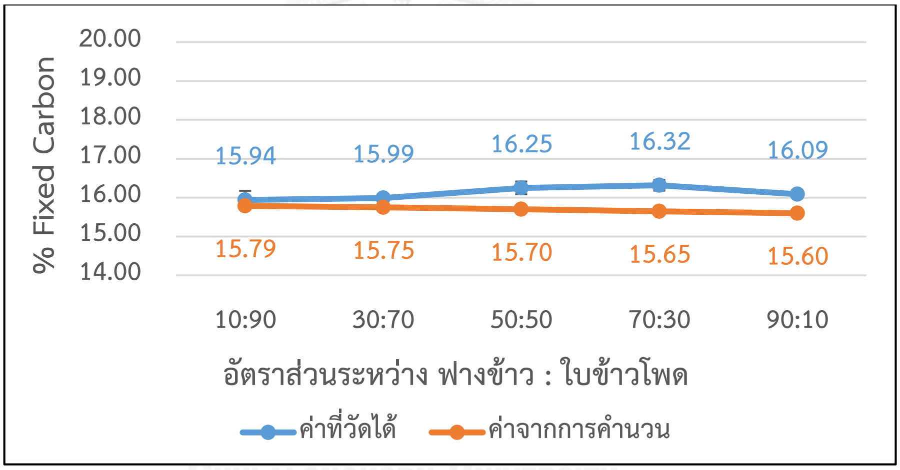
จากการวิเคราะห์ทำให้สามารถทราบว่าปริมาณคาร์บอนคงตัวของแท่งเชื้อเพลิงยังมีแนวโน้มไปในแนวทางเดียวกับการทดลองที่ 2.1 ดังที่แสดงในรูปที่ 4.37 - 4.39 จะเห็นได้ว่ามีค่าที่ต่างกันเนื่องมาจากปริมาณเถ้าที่ต่างกันซึ่งสามารถดูได้จากรูปที่ 4.25 - 4.27 ส่งผลให้ค่าปริมาณคาร์บอนคงตัวของวิธีอัดเย็นมีค่าที่สูงกว่าวิธีอัดร้อน และจากการทำการประมาณค่าเบื้องต้นจากการคำนวนจากปริมาณคาร์บอนคงตัวจากวัตถุดิบเบื่องต้นพบว่าทุกสูตรมีแนวทางที่อยู่ในทางเดียวกับค่าจากการคำนวน โดยสูตรใบอ้อย:ใบข้าวโพดมีค่าค่าปริมาณคาร์บอนคงตัวสูงสุดกับต่ำสุดต่างกันเท่ากับ 0.35% ในค่าจากการวิเคราะห์และ 1.09% ในค่าจากการคำนวน ส่วนในสูตรฟางข้าว:ใบอ้อยมีความแตกต่างของค่าสูงสุดกับต่ำสุดอยู่ที่ 0.52% ในค่าจากการวิเคราะห์และ 0.38% ในค่าจากการคำนวน ในส่วนของสูตรฟางข้าว:ใบข้าวโพดมีความแตกต่างของค่าสูงสุดกับต่ำสุดอยู่ที่ 0.38% ในค่าจากการวิเคราะห์และ 0.19% ในค่าจากการคำนวน โดยค่าที่แตกต่างระหว่างการวิเคราะห์จริงกับการคำนวนนั้นอาจจะเนื่องมาจากการผสมวัตถุดิบในขั้นตอนเตรียมหรือปฏิกิริยาเพิ่มเติมที่เกิดจากการเผาวิเคราะห์ส่งผลให้ค่าปริมาณเถ้าที่วิเคราะห์ได้ไม่เท่ากับค่าที่ทำการคำนวนมา อย่างไรก็ตามค่าที่วิเคราะห์ได้ก็ยังอยู่ในเกณฑ์ที่ใกล้เคียงกับค่าที่คำนวนเพื่อคาดการเบื้องต้น



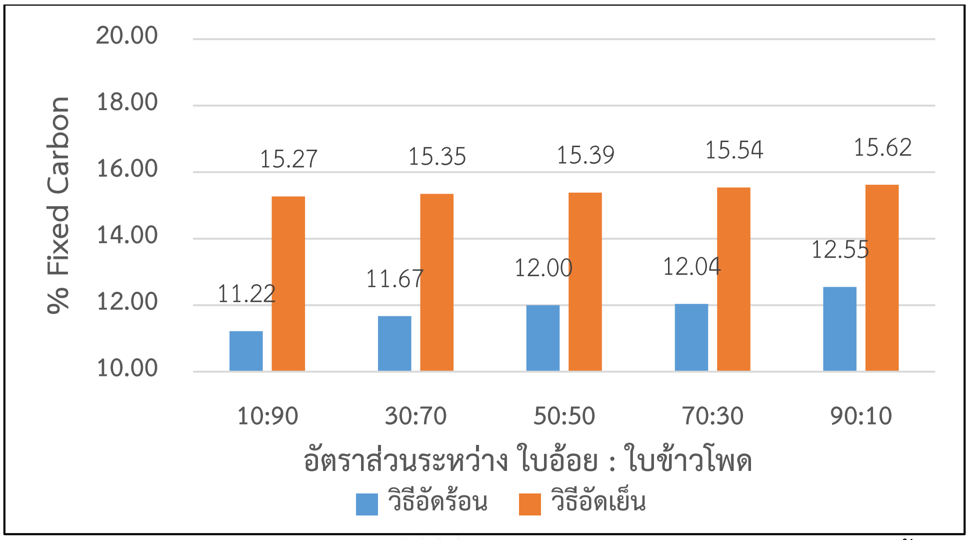
รูปที่ 4.34 การเปลี่ยนไปของปริมาณคาร์บอนคงตัวเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนในสูตรแท่งเชื้อเพลิง ใบอ้อย : ใบข้าวโพด จากกระบวนการอัดเย็น



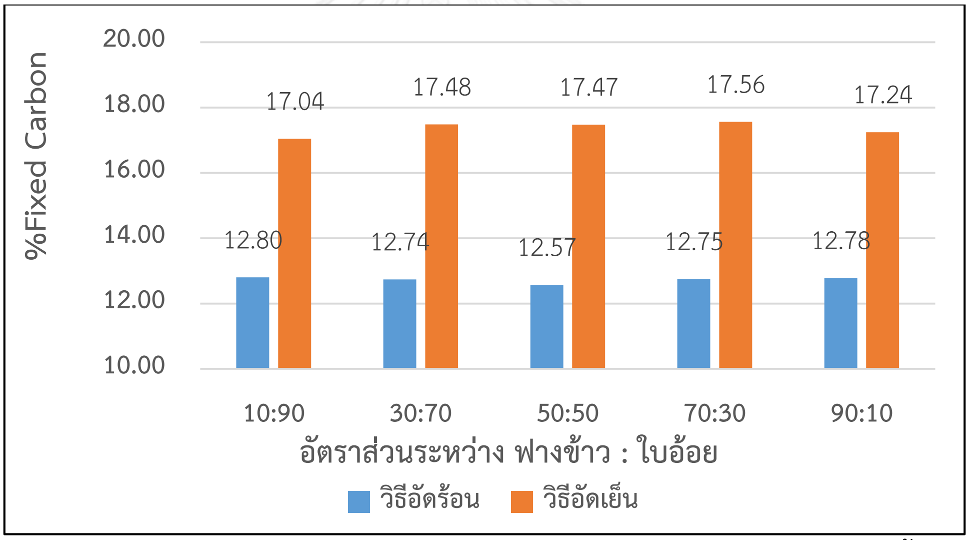
รูปที่ 4.35 การเปลี่ยนไปของปริมาณคาร์บอนคงตัวเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนในสูตรแท่งเชื้อเพลิง ฟางข้าว : ใบอ้อย จากกระบวนการอัดเย็น



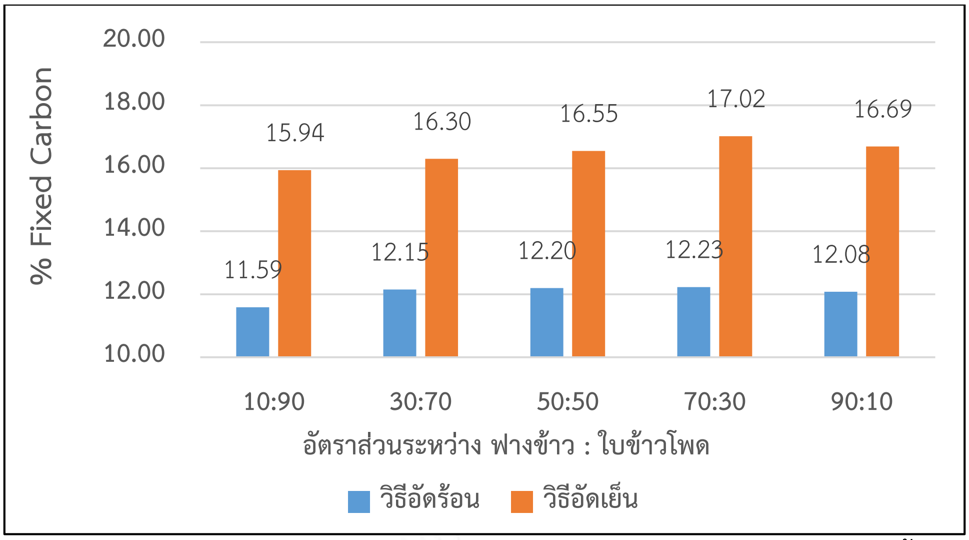
รูปที่ 4.36 การเปลี่ยนไปของปริมาณคาร์บอนคงตัวเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนในสูตรแท่งเชื้อเพลิง ฟางข้าว : ใบข้าวโพด จากกระบวนการอัดเย็น



รูปที่ 4.37 เปรียบเทียบปริมาณคาร์บอนคงตัวระหว่างวิธีอัดร้อนและวิธีอัดเย็นของแท่งเชื้อเพลิงสูตร ใบอ้อย : ใบข้าวโพด



รูปที่ 4.38 เปรียบเทียบปริมาณคาร์บอนคงตัวระหว่างวิธีอัดร้อนและวิธีอัดเย็นของแท่งเชื้อเพลิงสูตร ฟางข้าว : ใบอ้อย



รูปที่ 4.39 เปรียบเทียบปริมาณคาร์บอนคงตัวระหว่างวิธีอัดร้อนและวิธีอัดเย็นของแท่งเชื้อเพลิงสูตร ฟางข้าว : ใบข้าวโพด

4.3.7 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุในแท่งเชื้อเพลิง

ปริมาณธาตุก็เป็นอีกหนึ่งพารามิเตอร์ที่ให้ความสนใจโดยเฉพาะปริมาณของ N S และ Cl ซึ่งเป็นสาเหตุให้การเกิดมลพิษโดยจากตารางที่ 4.20 เป็นการแสดงปริมาณธาตุของแท่งเชื้อเพลิงสูตรผสมโดยพิจารณาเลือกวิเคราะห์จากอัตราส่วนที่ให้ค่าความร้อนสูงที่สุดในแต่ละสูตร ซึ่งภายหลังจากการนำค่าลักษณะสมบัติของธาตุองค์ประกอบไปเทียบกับกลุ่มมาตรฐานแล้วทำให้ทราบว่ามีเพียงปริมาณของ Cl เท่านั้นที่ผ่านมาตรฐานแท่งเชื้อเพลิงชีวมวลในต่างประเทศ แต่ค่าปริมาณของ N และ S ไม่ผ่านค่ามาตรฐานในทุกอัตราส่วน การใส่กากน้ำตาลมีผลต่อค่าปริมาณธาตุคาร์บอนและไฮโดรเจนเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4.18 ปริมาณธาตุองค์ประกอบของแท่งเชื้อเพลิง

	ใบอ้อย : ใบข้าวโพด	**ฟางข้าว : ใบอ้อย**	**ฟางข้าว : ใบข้าวโพด**
อัตราส่วน	50 : 50	10 : 90	10 : 90
C (%)	35.70	35.54	36.08
H (%)	4.07	4.00	4.20
N (%)	0.85	0.64	1.10
S (%)	0.13	0.13	0.20
Cl (%)	0.02	0.02	0.02

4.4 สรุปอัตราส่วนที่ต้องการนำเสนอ

จากโครงร่างงานวิจัยได้ทำการศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับค่าลักษณะสมบัติของแท่งเชื้อเพลิงชีวมวล และได้สรุปเป็นค่าขั้นต่ำที่ต้องการที่จะผลิตโดยอ้างอิงจากงานวิจัย (Tumuluru และคณะ, 2010) (Karkania, Fanara และ Zabaniotou, 2012) (มหาวิทยาลัยศิลปากร, 2555) ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบค่ามาตรฐานของแท่งเชื้อเพลิงและค่าลักษณะสมบัติที่แนะนำ ดั่งที่แสดงในตารางที่4.21 ผู้วิจัยจึงทำการสรุปกลุ่มอัตราส่วนเชื้อเพลิงชีวมวลทั้งหมดที่มีค่าเกินจากที่เรากำหนดตอนต้น โดยภายหลังจากการทดลองทำให้สามารถทราบได้ว่าปริมาณเถ้าของเชื้อเพลิงที่เราผลิตได้จากงานวิจัยมีค่าเกินกว่าที่เรากำหนดขั้นต่ำไว้ ทำให้ผู้วิจัยเลือกนำเสนอเพียงกลุ่มเชื้อเพลิงชีวมวลที่มีค่าความร้อนเกินกว่า 16 MJ/kg ดั่งที่แสดงในตารางที่4.22 โดยเป็นสูตรอัตราส่วนจากกระบวนการอัดร้อน แต่ในส่วนของปริมาณเถ้าไม่มีสูตรใดจากกระบวนการอัดร้อนที่ผ่านค่าปริมาณเถ้าที่กำหนดไว้เลย ซึ่งในตารางที่ 4.23 เป็นการแสดงสูตรอัตราส่วนจากการบวนการอัดเย็นที่มีค่าความร้อนเกินกว่า 16 MJ/kg ถ้าพิจารณาเปรียบเทียบปริมาณเถ้าของแท่งเชื้อเพลิงจะผ่านค่าปริมาณเถ้าที่เรากำหนดทุกอัตราส่วนที่ผลิต

ตารางที่ 4.19 ลักษณะสมบัติของแท่งเชื้อเพลิงที่กำหนดขึ้นช่วงโครงร่างวิทยานิพนธ์

	ค่าลักษณะสมบัติที่กำหนดไว้
Diameter	≤ 7 mm
Length	≤ 5 x D* mm
Bulk density	≥ 600 kg/m^3
Calorific value	≥ 16 MJ/kg
Moisture content	≤ 10 %
Ash content	≤ 6 %

*D คือ Diameter

ตารางที่ 4.20 สูตรและอัตราส่วนผสมที่ต้องการนำเสนอจากกระบวนการอัดร้อน

	ใบอ้อย : ใบข้าวโพด	**ฟางข้าว : ใบอ้อย**	**ฟางข้าว : ใบข้าวโพด**
ช่วงอัตราส่วน	ทุกอัตราส่วน	50:50, 20:80, 10:90	10:90, 20:80
Calorific value	16.34 – 16.50 MJ/kg	16.04 – 16.31 MJ/kg	16.01 – 16.11 MJ/kg
Moisture content*	≤ 2 %	≤ 2 %	≤ 2 %
Ash content*	6.45 – 6.53 %wt	7.13 – 7.76 %wt	6.98 – 7.17 %wt

*Dry weight basis

ตารางที่ 4.21 สูตรและอัตราส่วนผสมที่ต้องการนำเสนอจากกระบวนการอัดเย็นโดยใช้กากน้ำตาลเป็นตัวเชื่อมประสาน

	ใบอ้อย : ใบข้าวโพด	**ฟางข้าว : ใบอ้อย**	**ฟางข้าว : ใบข้าวโพด**
ช่วงอัตราส่วน	ทุกอัตราส่วน	ทุกอัตราส่วน	ทุกอัตราส่วน
Calorific value	17.26 – 17.33 MJ/kg	16.82 – 17.20 MJ/kg	16.82 – 17.20 MJ/kg
Moisture content*	≤ 2 %	≤ 2 %	≤ 2 %
Ash content*	2.68 – 3.31 %wt	2.56 – 3.39 %wt	2.65 – 3.77 %wt

*Dry weight basis

4.5 ผลการทดลองที่ 3 : วิเคราะห์ค่าลักษณะสมบัติของเชื้อเพลิงที่มีอยู่ในปัจจุบันและนำมาเปรียบเทียบกับแท่งเชื้อเพลิงที่ได้จากงานวิจัยรวมถึงเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานของแท่งเชื้อเพลิง

4.5.1 ลักษณะสมบัติจากมาตรฐานแท่งเชื้อเพลิงชีวมวล

ในแต่ละประเทศมักจะมีค่ามาตรฐานของแท่งเชื้อเพลิงชีวมวลเพื่อที่จะกำหนดให้เชื้อเพลิงชีวมวลที่ผลิตขึ้นมีมาตรฐานที่คงที่และยังไม่ก่อให้เกิดมลพิษซึ่งอาจจะเกิดจากกระบวนการผลิตพลังงาน ซึ่งโดยส่วนมากแล้วมักยึดตามมาตรฐานของ ENplus ซึ่งเป็นมาตรฐานแท่งเชื้อเพลิงชีวมวลที่ใช้ในยุโรป และ PFI standard ซึ่งเป็นมาตรฐานแท่งเชื้อเพลิงชีวมวลที่ใช้ในประเทศสหรัฐอเมริกา ส่วนมากแล้วงานวิจัยเกี่ยวกับการผลิตแท่งเชื้อเพลิงชีวมวลจะเลือกเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานทั้งสองค่าที่กล่าวมา (Tumuluru และคณะ, 2010) (W Hiegl, R Janssen และ W Pichler, 2009) จากตารางที่4.24 สามารถเห็นได้ว่าไม่มีมาตรฐานด้านค่าความร้อนเนื่องจากชีวมวลมีความหลายหลากของวัตถุดิบที่นำมาใช้ส่งผลให้ไม่สามารถกำหนดค่ามาตรฐานขั้นต่ำของค่าความร้อนได้ (Tumuluru และคณะ, 2010)

ตารางที่ 4.22 มาตรฐานของแท่งเชื้อเพลิงชีวมวล
(Tumuluru และคณะ, 2010)

	หน่วย	ENplus	PFI standard
Diameter	mm	6 - 10	5.84 – 7.25
Length	mm	≤ 40	≤ 40
Bulk density	kg/m^{3*}	≥ 550	≥ 600
Moisture content	%*	≤ 10	≤ 10
Durability	%*	≥ 95	≥ 95
Calorific value	MJ/kg*	-	-
Ash content	%*	≤ 3	≤ 2
N	%*	≤ 0.3	-
S	%*	≤ 0.03	-
Cl	%*	≤ 0.02	≤ 0.03

*Dry weight basis

4.5.2 ลักษณะสมบัติของแท่งเชื้อเพลิงชีวมวลที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน

จากการสำรวจและสอบถามสามารถทราบถึงชนิดชีวมวลที่ใช้ในปริมาณเยอะในปัจจุบัน ได้แก่ แกลบ ชาญอ้อย และเปลือกไม้ยูคาลิปตัส ซึ่งเป็นของเสียที่เกิดจากกระบวนการทางอุตสาหกรรม โดยการนำไปใช้เป็นวัตถุดิบโดยตรงจะไม่มีการแปรรูปให้เป็นเชื้อเพลิงแท่ง ซึ่งมีประสิทธิภาพที่ต่ำแต่ลดค่าใช้จ่ายในด้านการแปรรูปวัตถุดิบ โดยจะเป็นวัตถุดิบในการให้พลังงานในโรงไฟฟ้าซึ่งตั้งอยู่บริเวณใกล้เคียงและทำการจ่ายกระแสไฟฟ้ากลับมาใช้ภายในโรงงานอุตสาหกรรม หรือส่งขาย จากตาราง 4.25 สามารถสังเกตุได้ว่าวัตถุดิบจะมีขนาดที่ไม่แน่นอน และความชื้นที่สูง ส่งผลให้ค่าความร้อนที่ได้มีค่าที่ต่ำ แต่เนื่องจากขนาดเตาเผาที่ค่อนข้างใหญ่จึงมีการจัดการปัญหาด้านไอน้ำที่เกิดจากการระเหยน้ำในวัตถุดิบส่งผลให้ไม่จำเป็นต้องควบคุมค่าปริมาณความชื้นของวัตถุดิบก่อนเข้าระบบ

ตารางที่ 4.23 ลักษณะสมบัติของชีวมวลในโรงไฟฟ้าชีวมวลขนาดใหญ่
(กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2559)

ลักษณะสมบัติ	unit	แกลบ	ชานอ้อย	เปลือกไม้ยูคาฯ
Diameter	mm	-	-	-
Length	mm	-	-	-
Bulk density	kg/m^3	150.00	120.00	-
Moisture content	%	8.20	50.73	50.00
Calorific value	MJ/kg	15.40	0.92	0.85
Ash content	%	13.20	1.43	3.05
Volatile matter	%	58.90	41.98	35.00
Fixed carbon	%	19.70	5.86	11.95

ผู้วิจัยจึงทำการเก็บตัวอย่างเชื้อเพลิงชีวมวลแท่งที่มีลักษณะใกล้เคียงกับเชื้อเพลิงที่ได้จากงานวิจัยดั่งที่แสดงในตารางที่ 4.26-4.27 โดยเป็นการเก็บตัวอย่างของทางกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน แล้วจึงนำมาวิเคราะห์ค่าลักษณะสมบัติตามที่ได้หาในการทดลองที่ผ่านมา จากนั้นทำการสอบถามข้อมูลเกี่ยวกับการใช้งานแท่งเชื้อเพลิงชีวมวล จากโรงงานที่ใช้งานเชื้อเพลิงชีวมวลเป็นวัตถุดิบในการให้พลังงานความร้อน ซึ่งผู้ประกอบการให้คำแนะนำเกี่ยวกับการเลือกใช้แท่งเชื้อเพลิงชีวมวล โดยส่วนมากแล้วทางโรงงานจะเลือกพิจารณาจากค่าความร้อนและราคาเป็นสำคัญ จากนั้นจึงพิจารณาความแน่นนอนของวัตถุดิบว่ามีเพียงพอต่อความต้องการใน 1 รอบการผลิต โดยทั่วไปวัตถุดิบหลักที่ใช้จะเป็นแท่งชีวมวลจากกากของเสียงานไม้ และเพิ่มชีวมวลจากกากเหลือใช้ทางการเกษตรรูปแบบผสมอื่นๆเป็นวัตถุดิบเสริมในการเผาให้พลังงานความร้อน ผู้ประกอบการมักจะเลือกใช้ชีวมวลที่มีค่าใกล้เคียงกับกลุ่มที่ตนใช้เป็นวัตถุดิบหลักอยู่เนื่องจากง่ายต่อการดำเนินงานและการจัดการของเสีย

ตารางที่ 4.24 ลักษณะสมบัติของแท่งเชื้อเพลิงชีวมวลที่มีการใช้อยู่ในปัจจุบัน (ชนิดหลัก)

ลักษณะสมบัติ	unit	ขี้เลื่อย 1	ขี้เลื่อย 2	เปลือกไม้ยูคาฯ	ทะลายปาล์ม	แกลบ
Diameter	mm	8.45	9.61	8.23	10.40	8.23
Length	mm	16.45	18.05	14.03	19.98	16.11
Bulk density	kg/m^3*	654.54	834.26	856.61	547.83	744.22
Durability	%*	96.65	96.77	97.78	89.05	96.09
Moisture content	%*	9.10	2.80	4.80	13.20	7.70
Calorific value	MJ/kg*	17.23	18.10	15.73	15.82	14.62
Ash content	%*	2.50	5.30	8.90	7.60	17.80
Volatile matter	%*	74.70	74.70	66.00	63.90	59.60
Fixed carbon	%*	13.70	17.20	20.30	15.30	14.90
N	%*	0.24	0.28	0.36	0.66	0.59
S	%*	0.04	0.02	0.04	0.11	0.07
Cl	%*	< 0.01	0.05	0.16	0.51	0.02

*Dry weight basis

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 4.25 ลักษณะสมบัติของแท่งเชื้อเพลิงชีวมวลที่มีการใช้อยู่ในปัจจุบัน (ชนิดเสริม)

ลักษณะสมบัติ	unit	แกลบผสม**	ไม้+เปลือกไม้ยูคาฯ	ชานอ้อย+เปลือกไม้ยูคาฯ	ทะลาย+กะลาปาล์ม
Diameter	mm	8.06	8.27	8.09	9.80
Length	mm	16.00	15.98	16.15	17.89
Bulk density	kg/m^3*	717.29	664.87	727.86	757.73
Durability	%*	98.41	98.80	98.19	73.19
Moisture content	%*	6.90	10.40	9.30	8.70
Calorific value	MJ/kg*	16.45	16.38	17.15	16.56
Ash content	%*	10.50	4.70	4.80	9.80
Volatile matter	%*	66.50	67.50	69.90	66.90
Fixed carbon	%*	16.10	17.40	16.00	14.60
N	%*	0.53	0.36	0.37	1.70
S	%*	0.04	0.03	0.04	0.17
Cl	%*	0.02	0.06	-	0.24

*dry weight basis

**แกลบ 40%+ขี้เลื่อย 40%+เปลือกไม้ 20%

จากตารางที่ 4.28 เป็นค่าที่ทางกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงานแนะนำโดยพิจารณาจากมาตรฐานที่มีอยู่ในต่างประเทศ และเชื้อเพลิงชีวมวลที่ใช้อยู่ในประเทศไทยเพื่อหาค่าที่เหมาะสม เพื่อใช้กำหนดหรือให้คำแนะนำผู้ประกอบการที่ใช้เชื้อเพลิงชีวมวลในประเทศ จากตารางสามารถเห็นได้ว่ายึดอ้างอิงจากมาตรฐานจากต่างประเทศเสียเป็นส่วนใหญ่จะมีเพียงค่าปริมาณเถ้าที่เกิดกว่ามาตรฐานเนื่องจากชีวมวลที่ใช้ในต่างประเทศส่วนมากจะมีวัตถุดิบเป็นเศษไม้จากอุตสาหกรรมส่งผลให้มีปริมาณเถ้าที่ต่ำ และไม่นิยมนำกากเหลือใช้ทางการเกษตรมาทำเป็นแท่งเชื้อเพลิงชีวมวลมากนัก ทางกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงานจึงให้คำแนะนำในค่าดังกล่าวที่เหมาะสมกับลักษณะเชื้อเพลิงชีวมวลในประเทศ

ตารางที่ 4.26 ลักษณะสมบัติของแท่งเชื้อเพลิงชีวมวลที่กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงานแนะนำ
(มหาวิทยาลัยศิลปากร, 2555)

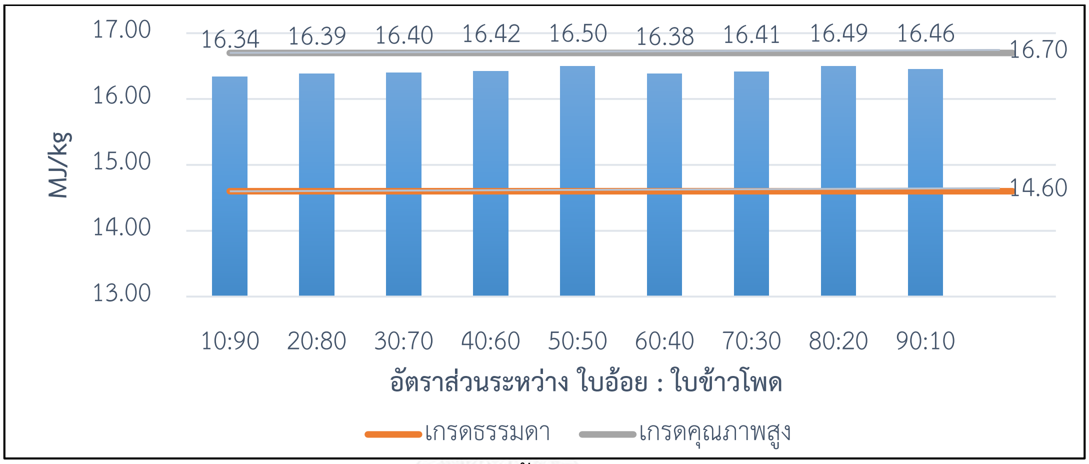
ลักษณะสมบัติ	unit	เกรด ธรรมดา	เกรด คุณภาพสูง
Diameter	mm	6-12	6-12
Length	mm	≥ 3.15	≥ 3.15
Bulk density	kg/m^3*	≥ 600	≥ 600
Durability	%*	≥ 95	≥ 95
Moisture content	%*	≤ 10	≤ 10
Calorific value	MJ/kg*	≥ 14.6	≥ 16.7
Ash content	%*	≤ 20	≤ 10
N	%*	≤ 0.3	≤ 0.3
S	%*	≤ 0.08	≤ 0.08
Cl	%*	≤ 0.02	≤ 0.02

*Dry weight basis

4.5.3 ผลจากการเปรียบเทียบแท่งเชื้อเพลิงจากงานวิจัยกับแท่งเชื้อเพลิงที่ใช้อยู่ในปัจจุบันรวมทั้งมาตรฐานแท่งเชื้อเพลิงจากต่างประเทศ

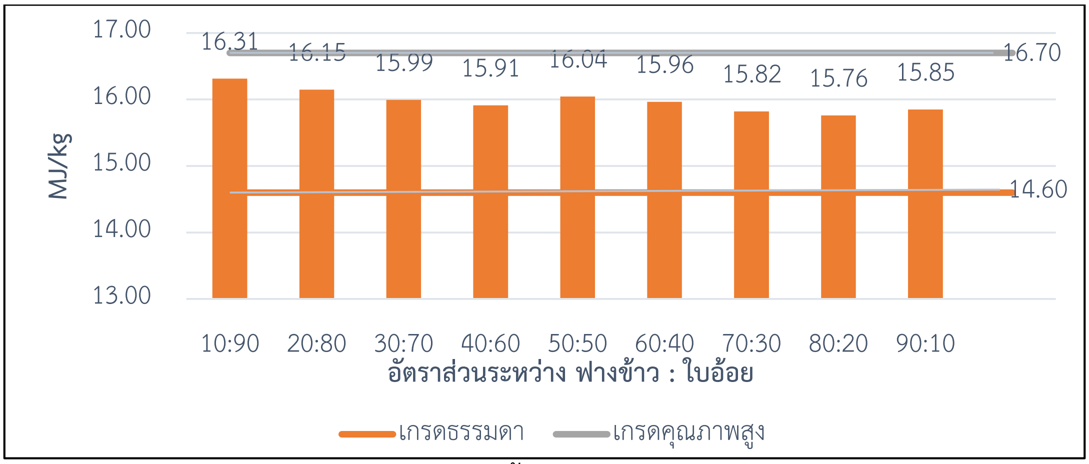
จากตารางที่ 4.28 สามารถสรุปได้ว่าแท่งเชื้อเพลิงชีวมวลชนิดอัดเย็นจากการทดลองที่ 2.2 มีค่าความร้อนที่ผ่านมาตรฐานแท่งเชื้อเพลิงชนิดคุณภาพสูงที่ทางกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงานกำหนด ดั่งที่แสดงในรูปที่ 4.46 - 4.48 แต่แท่งเชื้อเพลิงชีวมวลจากการทดลองที่ 2.1 มีค่าความร้อนที่ผ่านมาตรฐานแท่งเชื้อเพลิงชนิดคุณภาพธรรมดาดั่งที่แสดงในรูปที่ 4.40 - 4.42 แต่เมื่อนำแท่งเชื้อเพลิงจากงานวิจัยเปรียบเทียบกับมาตรฐานแท่งเชื้อเพลิงทั้ง ENplus และ PFI standard นั้นไม่มีสูตรอัตราส่วนใดที่ผ่านมาตรฐานปริมาณเถ้า ENplus ดั่งที่แสดงในรูป4.43-4.45 และ 4.49-4.51 เนื่องจากแท่งเชื้อเพลิงชีวมวลในต่างประเทศไม่นิยมนำกากเหลือใช้ทางการเกษตรมาแปรรูปเป็นแท่งเชื้อเพลิงชีวมวล แต่จะนิยมนำกากเหลือใช้จากอุตสหากรรมแปรรูปไม้มาผลิตซึ่งให้ค่าความร้อนที่สูงและมีปริมาณเถ้าที่ต่ำ ดังนั้นมาตรฐานกลุ่มดังกล่าวจึงมีค่าปริมาณเถ้าที่ต่ำ ทำให้สามารถสรุปได้ว่าแท่งเชื้อเพลิงจากงานวิจัยเหมาะกับการใช้เพียงในประเทศจากการเปรียบเทียบค่า

แล้วแท่งชีวมวลที่ได้ก็ยังมีค่าอยู่ในช่วงเดียวกับแท่งชีวมวลชนิดอื่นที่ใช้ในปัจจุบัน ดังที่แสดงในรูปที่ 4.52-4.53 ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบค่าความร้อน และปริมาณเถ้าของแท่งเชื้อเพลิงชีวมวล ทำให้สามารถสรุปได้ว่าแท่งเชื้อเพลิงส่วนใหญ่ที่ใช้ในประเทศมีค่าปริมาณเถ้าไม่ผ่านค่ามาตรฐานแท่งเชื้อเพลิงชีวมวล ภายหลังจากการสอบถามเพื่อเก็บข้อมูลจากผู้ประกอบการทำให้ทราบถึงค่าลักษณะสมบัติที่สนใจและความต้องการเชื้อเพลิงที่มีลักษณะใกล้เคียงหรือดีกว่าที่ใช้อยู่ ทำให้สามารถสรุปได้ว่าเชื้อเพลิงชีวมวลที่ผลิตจากกากเหลือใช้ทางการเกษตรมีคุณภาพใกล้เคียงและมีแนวโน้มดีกว่ากลุ่มแท่งเชื้อเพลิงที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน

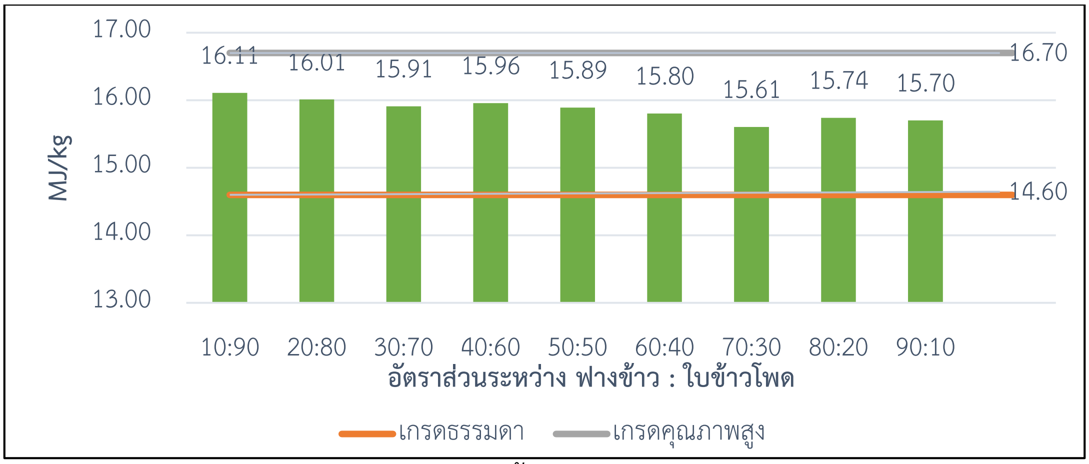


รูปที่ 4.40 เปรียบเทียบค่าความร้อนของแท่งเชื้อเพลิงสูตร ใบอ้อย : ใบข้าวโพด (ชนิดอัดร้อน) กับค่าที่ทางกรมพัฒนาพลังงานทดแทนแนะนำ

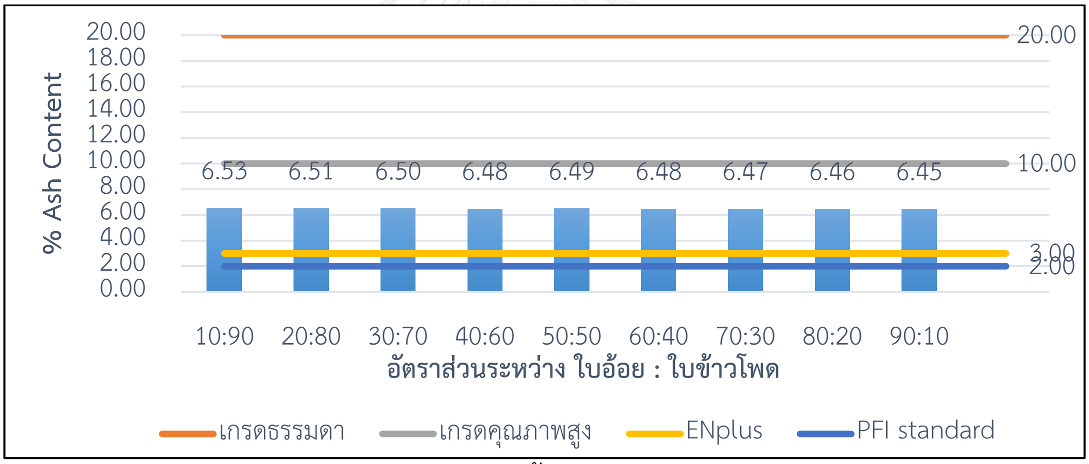
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



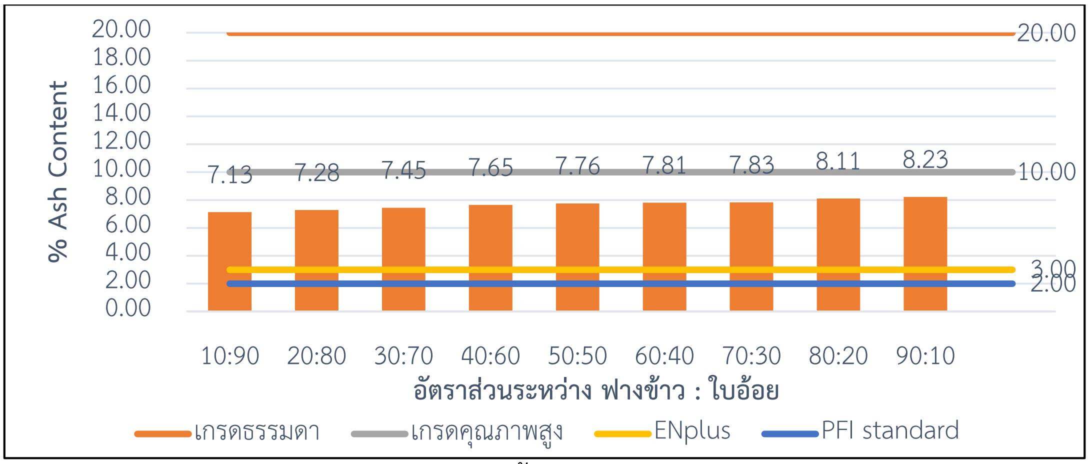
รูปที่ 4.41 เปรียบเทียบค่าความร้อนของแท่งเชื้อเพลิงสูตร ฟางข้าว : ใบอ้อย (ชนิดอัดร้อน) กับค่าที่ทางกรมพัฒนาพลังงานทดแทนแนะนำ



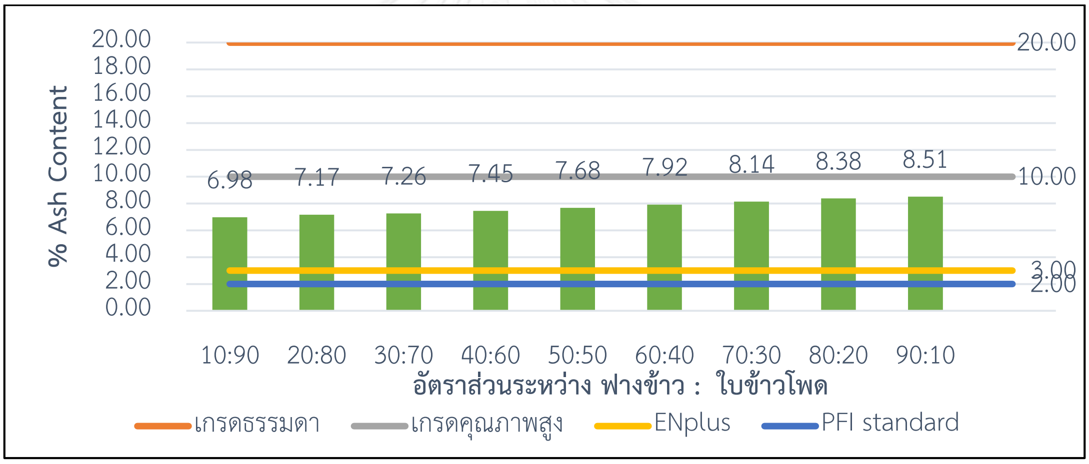
รูปที่ 4.42 เปรียบเทียบค่าความร้อนของแท่งเชื้อเพลิงสูตร ฟางข้าว : ใบข้าวโพด (ชนิดอัดร้อน) กับค่าที่ทางกรมพัฒนาพลังงานทดแทนแนะนำ



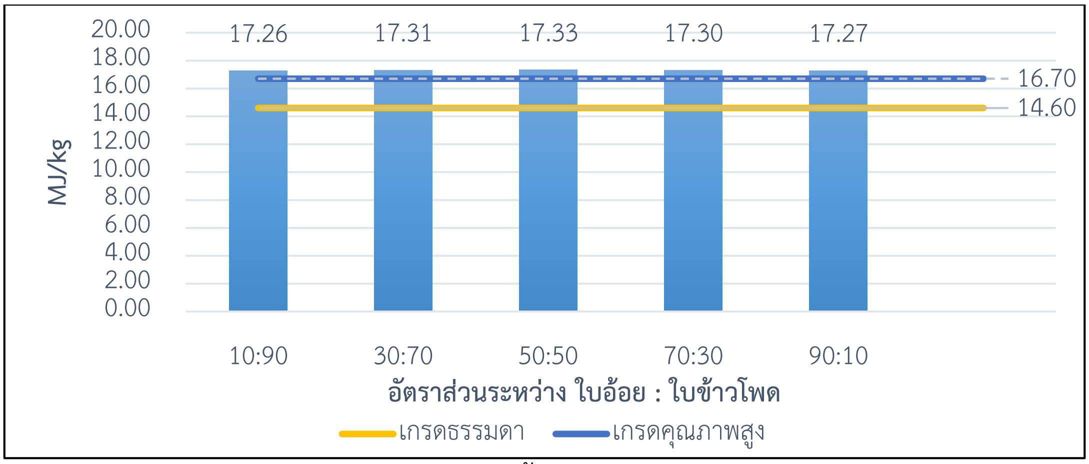
รูปที่ 4.43 เปรียบเทียบค่าปริมาณเถ้าของแท่งเชื้อเพลิงสูตร ใบอ้อย : ใบข้าวโพด (ชนิดอัดร้อน) กับค่าที่ทางกรมพัฒนาพลังงานทดแทนแนะนำ และมาตรฐานจากทางต่างประเทศ



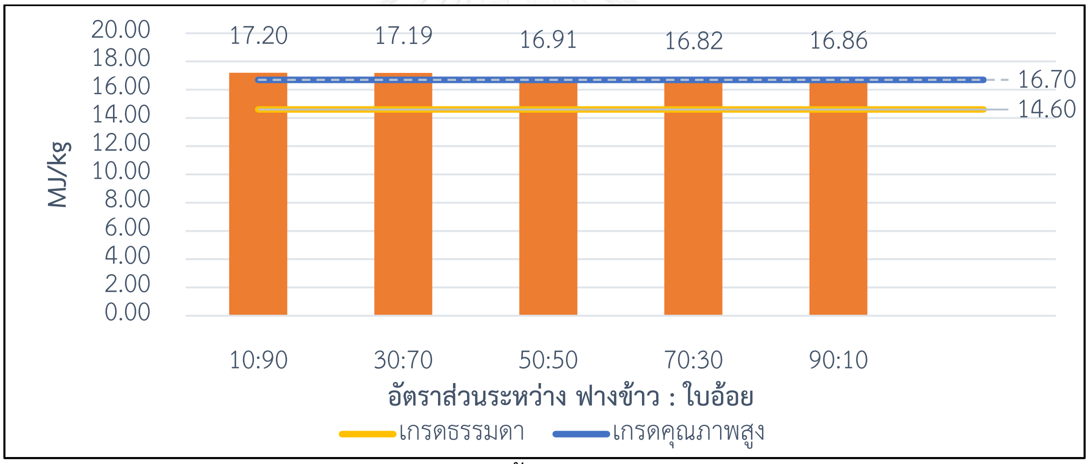
รูปที่ 4.44 เปรียบเทียบค่าปริมาณเถ้าของแท่งเชื้อเพลิงสูตร ฟางข้าว : ใบอ้อย (ชนิดอัดร้อน) กับค่าที่ทางกรมพัฒนาพลังงานทดแทนแนะนำ และมาตรฐานจากทางต่างประเทศ



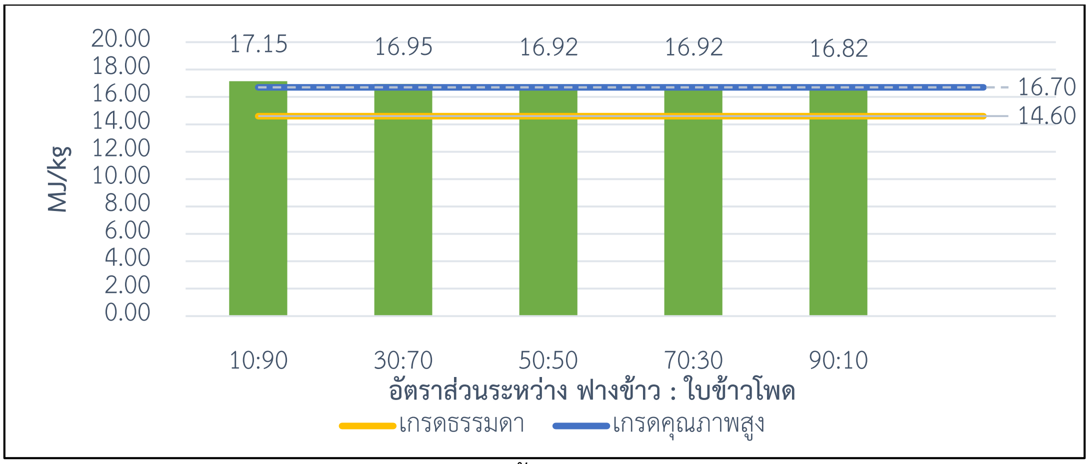
รูปที่ 4.45 เปรียบเทียบค่าปริมาณเถ้าของแท่งเชื้อเพลิงสูตร ฟางข้าว : ใบข้าวโพด (ชนิดอัดร้อน) กับค่าที่ทางกรมพัฒนาพลังงานทดแทนแนะนำ และมาตรฐานจากทางต่างประเทศ



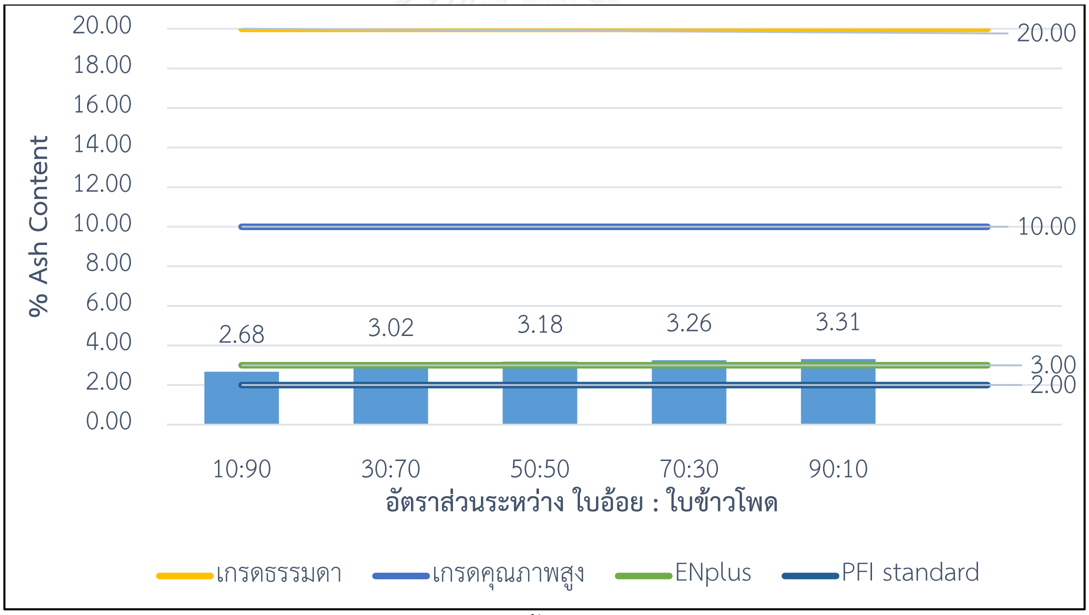
รูปที่ 4.46 เปรียบเทียบค่าความร้อนของแท่งเชื้อเพลิงสูตร ใบอ้อย : ใบข้าวโพด (ชนิดอัดเย็น) กับค่าที่ทางกรมพัฒนาพลังงานทดแทนแนะนำ



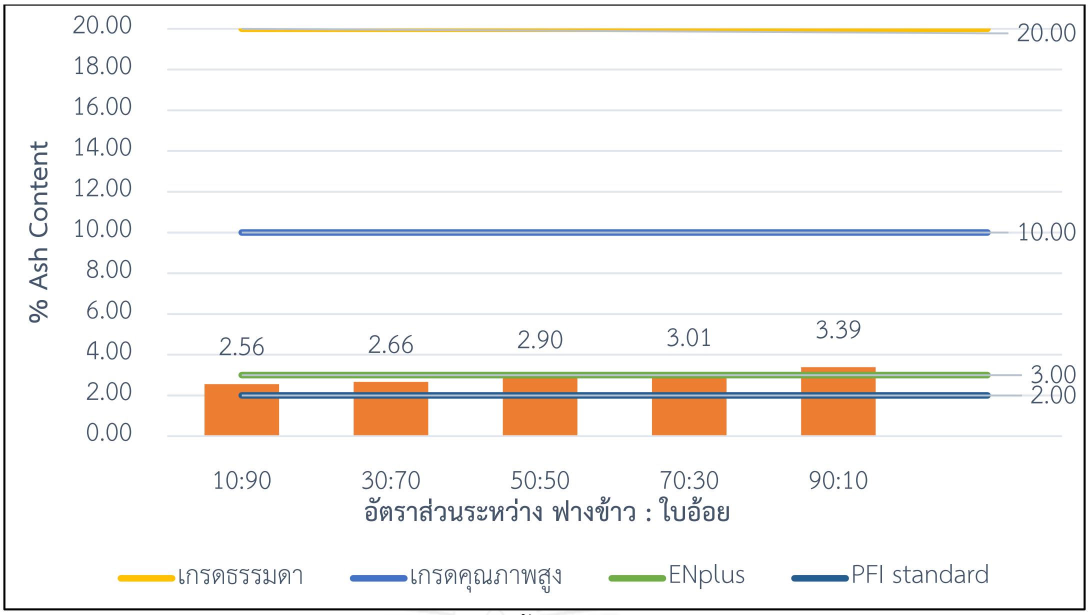
รูปที่ 4.47 เปรียบเทียบค่าความร้อนของแท่งเชื้อเพลิงสูตร ฟางข้าว : ใบอ้อย (ชนิดอัดเย็น) กับค่าที่ทางกรมพัฒนาพลังงานทดแทนแนะนำ



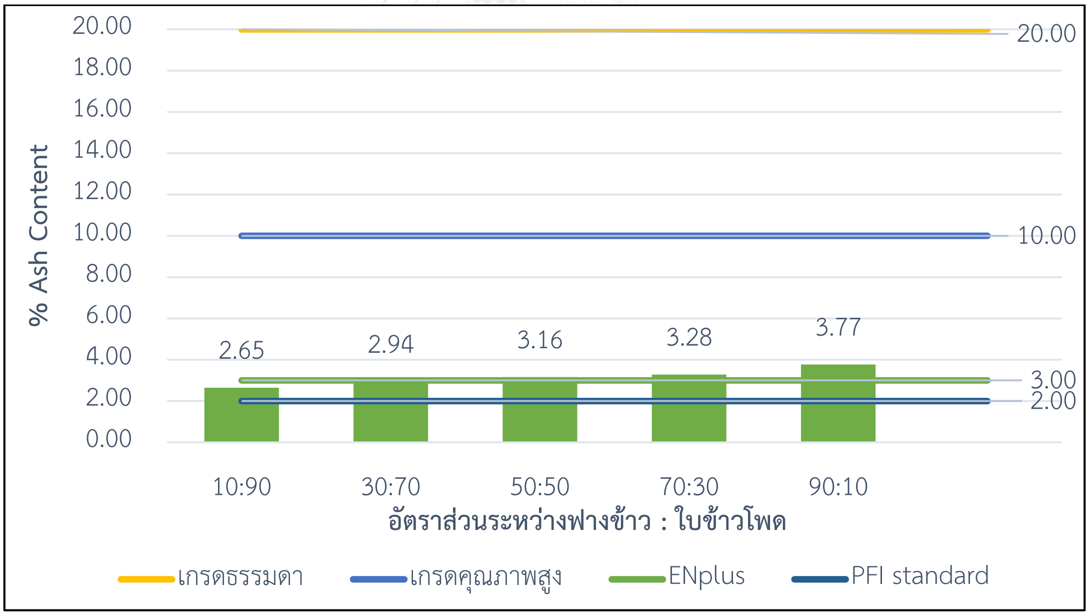
รูปที่ 4.48 เปรียบเทียบค่าความร้อนของแท่งเชื้อเพลิงสูตร ฟางข้าว : ใบข้าวโพด (ชนิดอัดเย็น) กับค่าที่ทางกรมพัฒนาพลังงานทดแทนแนะนำ



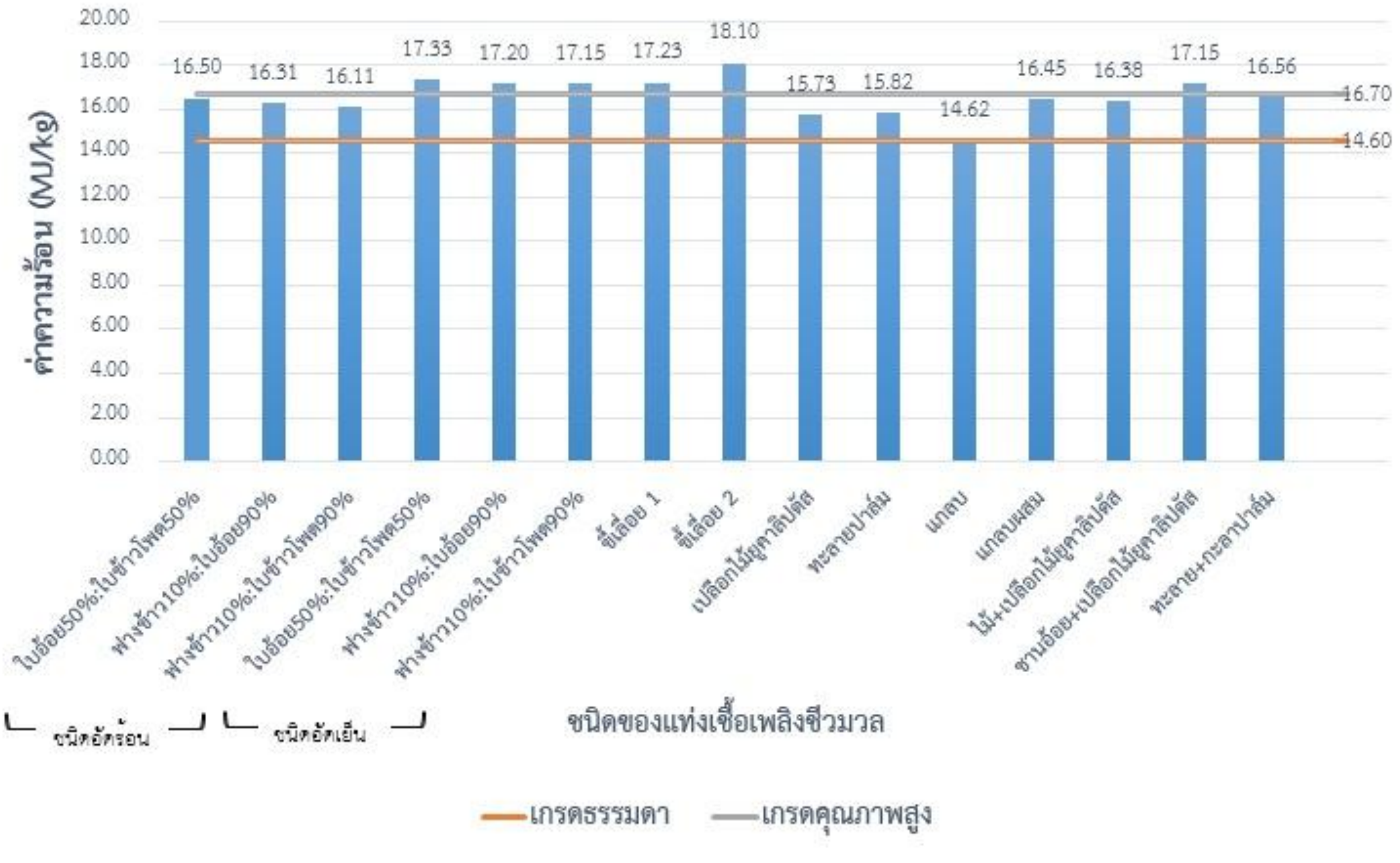
รูปที่ 4.49 เปรียบเทียบค่าปริมาณเถ้าของแท่งเชื้อเพลิงสูตร ใบอ้อย : ใบข้าวโพด (ชนิดอัดเย็น) กับค่าที่ทางกรมพัฒนาพลังงานทดแทนแนะนำ และมาตรฐานจากทางต่างประเทศ



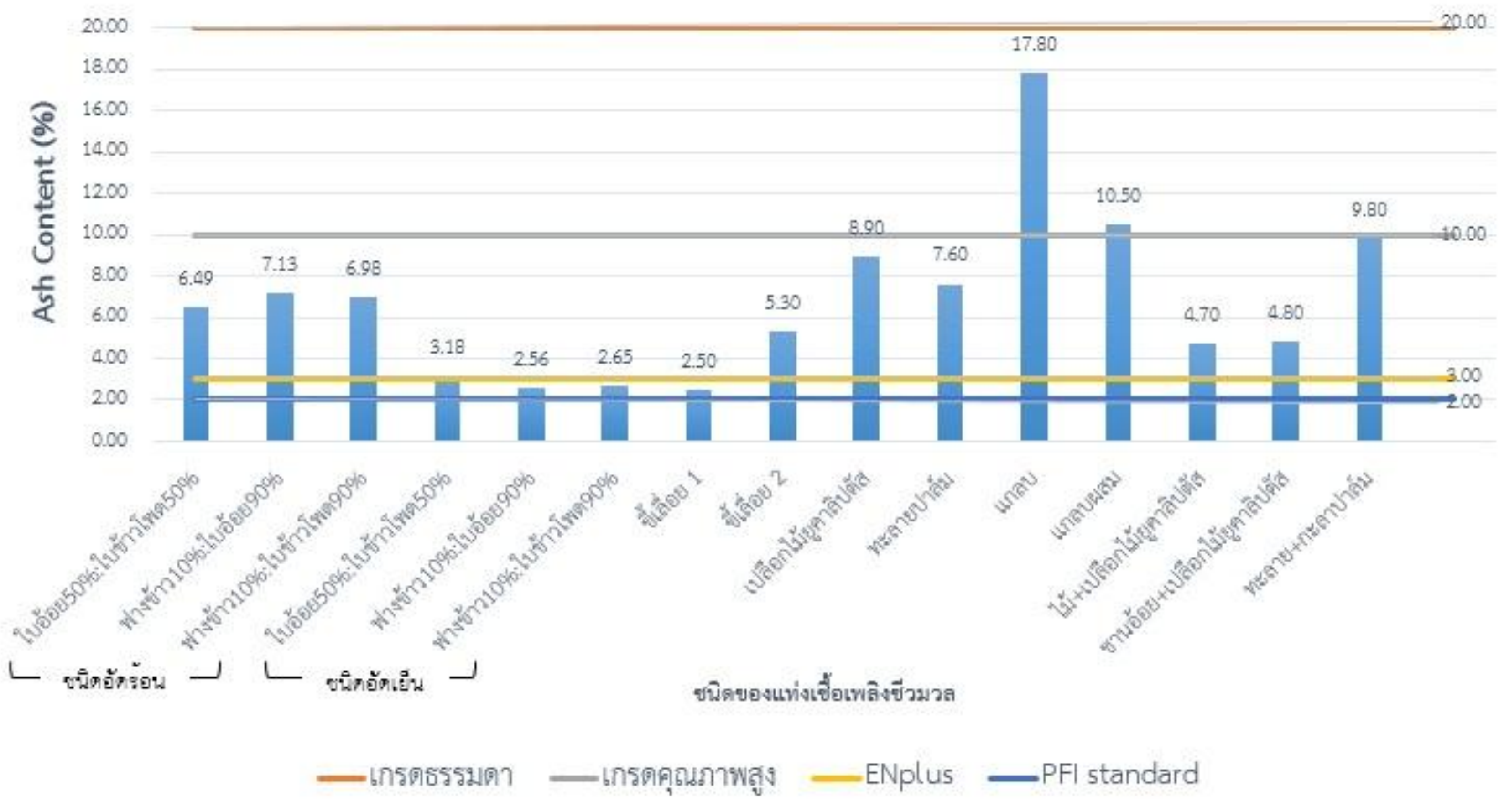
รูปที่ 4.50 เปรียบเทียบค่าปริมาณเถ้าของแท่งเชื้อเพลิงสูตร ฟางข้าว : ใบอ้อย (ชนิดอัดเย็น) กับค่าที่ทางกรมพัฒนาพลังงานทดแทนแนะนำ และมาตรฐานจากทางต่างประเทศ



รูปที่ 4.51 เปรียบเทียบค่าปริมาณเถ้าของแท่งเชื้อเพลิงสูตร ฟางข้าว : ใบข้าวโพด (ชนิดอัดเย็น) กับค่าที่ทางกรมพัฒนาพลังงานทดแทนแนะนำ และมาตรฐานจากทางต่างประเทศ



รูปที่ 4.52 กราฟเปรียบเทียบค่าความร้อนจากแท่งเชื้อเพลิงชีวมวล



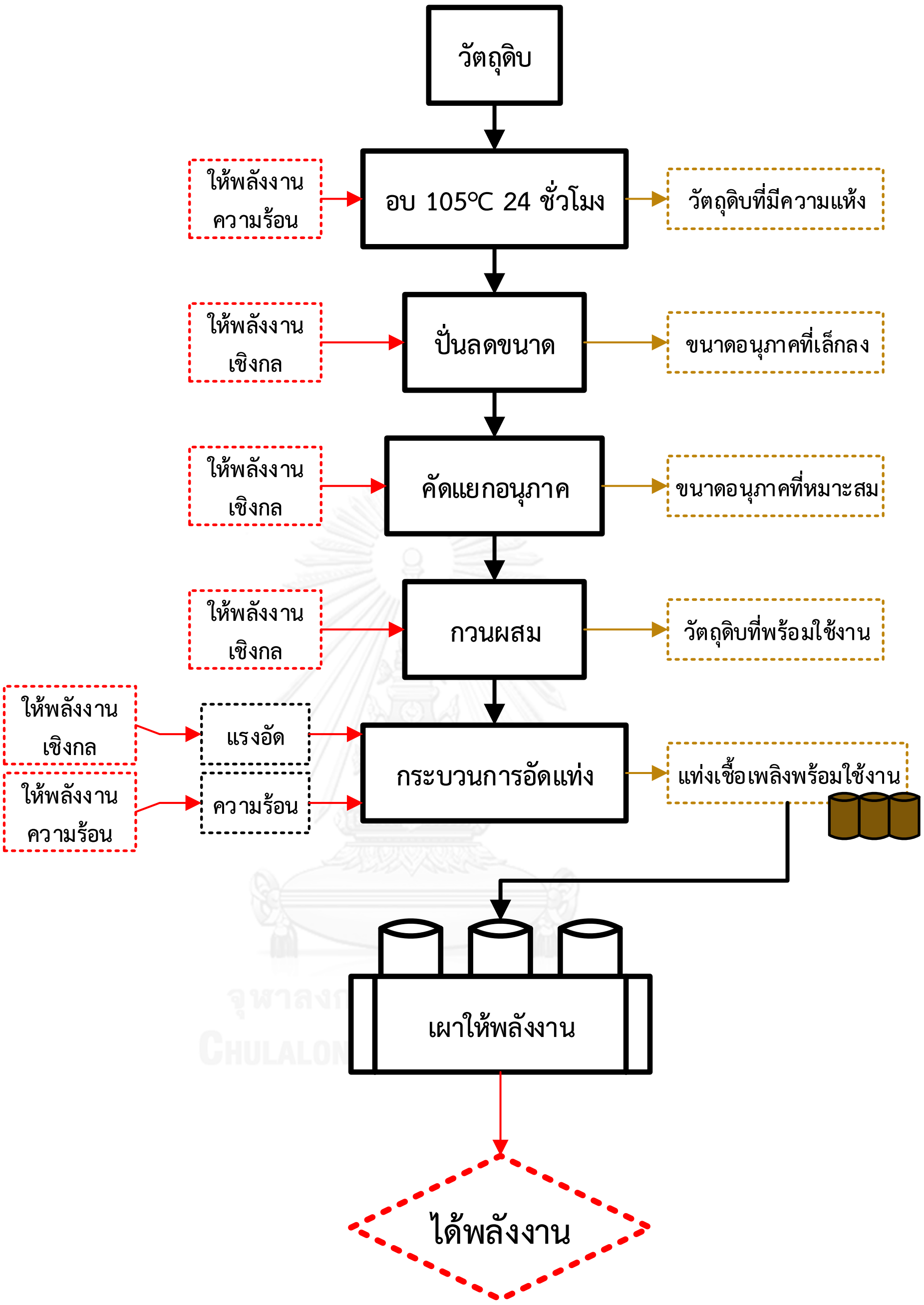
รูปที่ 4.53 กราฟเปรียบเทียบปริมาณเถ้าจากแท่งเชื้อเพลิงชีวมวล

บทที่ 5
สรุปผลวิจัย ข้อเสนอแนะ และความสำคัญกับงานวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

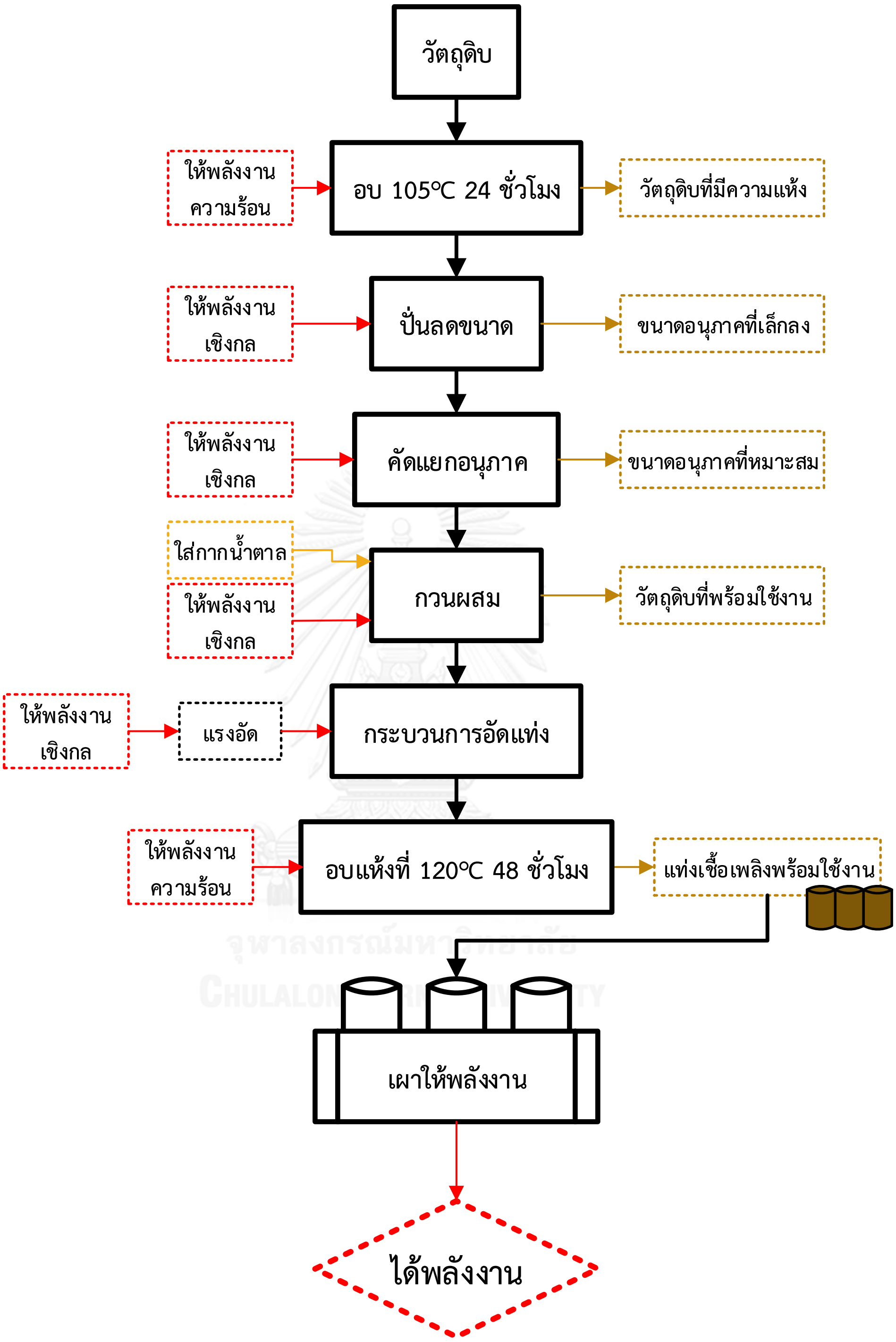
5.1 สรุปผลวิจัย

จากงานวิจัยนี้ทำการศึกษาการนำกากเหลือใช้ทางการเกษตรที่เหลือตกค้างอยู่ ณ บริเวณเพาะปลูกมาแปรรูปเป็นแท่งเชื้อเพลิงชีวมวลโดยการจับคู่แบ่งอัตราส่วน เพื่อลดปัญหาความเสี่ยงด้านการขาดแคลนวัตถุดิบ โดยแบ่งกรรมวิธีอัดเป็น 2 วิธีได้แก่กระบวนการอัดร้อน และอัดเย็นโดยใช้กากน้ำตาลเป็นตัวเชื่อมประสาน จากนั้นจึงนำไปวิเคราะห์ค่าลักษณะสมบัติที่บ่งบอกคุณภาพของแท่งเชื้อเพลิงโดยใช้วิธีตามหลัก ASTM ได้แก่ ค่าความร้อน ปริมาณความชื้น ปริมาณเถ้า ปริมาณสารระเหย ปริมาณคาร์บอนคงตัว และองค์ประกอบธาตุในแท่งเชื้อเพลิง รวมถึงลักษณะสมบัติทางกายภาพของแท่งเชื้อเพลิง ได้แก่ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ขนาดความยาว ค่าความทนทานของแท่งเชื้อเพลิง และความหนาแน่นของแท่งเชื้อเพลิง เพื่อนำไปเปรียบเทียบค่ามาตรฐานเชื้อเพลิงในต่างประเทศ ได้แก่ ENplus และ PFI standard รวมทั้งเปรียบเทียบกับแท่งเชื้อเพลิงที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน

จากการศึกษาและทดสอบพบว่าขนาดอนุภาคของวัตถุดิบที่เหมาะสมสำหรับนำมาทำเป็นแท่งเชื้อเพลิงมีค่าอยู่ระหว่าง 180 ไมโครเมตร ถึง 300 ไมโครเมตร จะส่งผลให้ค่าความทนทานของแท่งเชื้อเพลิงและปริมาณเถ้ามีค่าที่เหมาะสมแก่การใช้เป็นเชื้อเพลิงชีวมวล และแรงอัดที่ 0.25 ตันขึ้นไปส่งผลให้ค่าความทนทานของแท่งเชื้อเพลิงมีค่าเกินกว่า 95% ซึ่งผ่านค่ามาตรฐานของแท่งเชื้อเพลิงภายหลังจากกระบวนการผลิตแท่งเชื้อเพลิงและการวิเคราะห์ค่าลักษณะสมบัติแล้ว พบว่าสูตรใบอ้อย 50% : ใบข้าวโพด 50% สามารถให้ค่าความร้อนสูงที่สุดทั้งแบบกระบวนการอัดร้อน และกระบวนการอัดเย็น ที่ 16.50 MJ/kg และ 17.33 MJ/kg ซึ่งอัตราส่วนกากน้ำตาลที่เหมาะสมที่สุดคือ 50% เทียบจากน้ำหนักของวัตถุดิบ เนื่องจากให้ค่าความทนทานของแท่งเชื้อเพลิงมากที่สุด และเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับแท่งเชื้อเพลิงที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน แท่งเชื้อเพลิงจากงานวิจัยมีค่าลักษณะสมบัติอยู่ในเกณฑ์ที่ดีสามารถนำไปใช้ทดแทนเชื้อเพลิงชีวมวลในปัจจุบันได้ทุกอัตราส่วนหากประสบปัญหาการขาดแคลนวัตถุดิบ โดยเปรียบเทียบจากค่าความร้อนและปริมาณเถ้า ที่มีค่าใกล้เคียงกับกลุ่มที่ใช้อยู่ในปัจจุบันซึ่งเป็นไปตามที่กลุ่มผู้ประกอบการให้คำแนะนำ แต่อาจจะมีข้อด้อยด้านค่าใช้จ่ายที่สูงเพราะยังต้องอาศัยเทคโนโลยีที่ทันสมัยในการเก็บเกี่ยว



รูปที่ 5.1 แผนผังกรรมวิธีในการผลิตแท่งเชื้อเพลิงชีวมวลชนิดอัดร้อน



รูปที่ 5.2 แผนผังกรรมวิธีในการผลิตแท่งเชื้อเพลิงชีวมวลชนิดอัดเย็น

ปัญหาที่พบระหว่างทำงานวิจัย

1) การเก็บเกี่ยวผลผลิตในกลุ่มดังกล่าวไม่ได้ให้ความสำคัญกับกากเหลือใช้มากนัก มักจะให้ความสำคัญเพียงแค่ผลผลิตที่ต้องการ มีเพียงแค่ข้าว ซึ่งเครื่องจักรสามารถแยกฟางข้าวออกมาได้หลังจากการเก็บเกี่ยว แต่ในด้านข้าวโพด มีความปนเปื้อนของกากเหลือใช้ที่ถูกทิ้งไว้ ณ บริเวณเก็บเกี่ยวอยู่มากส่งผลให้เสียค่าใช้จ่ายในการแยก ส่วนในด้านของอ้อยเกษตรกรยังนิยมที่จะเผาเพื่อให้รถเก็บเกี่ยวสามารถเข้าไปได้โดยง่าย มีเพียงส่วนน้อยที่จะใช้เทคโนโลยีเครื่องจักรที่สามารถตัดแยกตัวลำต้นและใบออกจากกัน

2) แท่งเชื้อเพลิงจากกระบวนการอัดเย็นที่ใช้กากน้ำตาลเป็นตัวเชื่อมประสานยังมีลักษณะไม่เหมาะสมที่จะนำไปใช้งานเลยต้องผ่านกระบวนการอบที่ความร้อนต่ำ (120°C) เพื่อไม่ให้กากนำตาลเกิดการไหม้ เป็นเวลา 48 ชั่วโมง ส่งผลให้ต้นทุนในการผลิตสูงขึ้น และอาจจะเหมาะสมกับแค่กลุ่มกากเหลือใช้ทางการเกษตรเท่านั้น เนื่องจากกากเหลือใช้จากอุตสาหกรรมไม่มีค่าความร้อนที่สูงและปริมาณเถ้าที่ต่ำการใส่กากน้ำตาลเพิ่มลงไปในส่งผสมอาจจะส่งผลให้ค่าดังกล่าวต่ำลง และการใช้กากน้ำตาลอาจจะส่งผลให้อายุการใช้งานของเครื่องจักรลดลงอีกด้วย ซึ่งเป็นข้อเสนอแนะจากการสอบถามกลุ่มผู้ผลิตเชื้อเพลิงชีวมวล

3) มาตรฐานที่ใช้ในการเปรียบเทียบแท่งเชื้อเพลิงชีวมวลจากต่างประเทศมีค่าปริมาณเถ้าที่ต่ำเนื่องจากเชื้อเพลิงชีวมวลส่วนใหญ่ผลิตจากกากเหลือใช้ในอุตสาหกรรมแปรรูปไม้ แต่กากเหลือใช้ทางการเกษตรส่วนมากในประเทศไทยให้ค่าปริมาณเถ้าที่สูงส่งผลให้คุณสมบัติด้อยกว่า

4) เชื้อเพลิงจากงานวิจัยมีค่าปริมาณธาตุไนโตรเจน และซัลเฟอร์ ไม่ผ่านมาตรฐานแท่งเชื้อเพลิงชีวมวลจากต่างประเทศเนื่อจากวัตถุดิบที่นำมาใช้เป็นกากเหลือใช้ทางการเกษตรส่งผลให้มีกลุ่มธาตุดังกล่าวที่สูง แตกต่างจากในต่างประเทศที่นิยมใช้กากเหลือใช้จากอุตสาหกรรมแปรรูปไม้ แต่จากการสอบถามกลุ่มผู้ประกอบการไม่ให้ความสำคัญกับกลุ่มนี้มากนักเพราะค่าปริมาณมลพิษที่เกิดจากกระบวนการไม่เกินกว่ามาตรฐานที่ทางหน่วยงานรัฐกำหนด

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากการศึกษา มีข้อเสนอแนะดังนี้

1) กากเหลือใช้ทางการเกษตรที่ใช้ในงานวิจัย ได้แก่ ฟางข้าว ใบอ้อย และใบข้าวโพด มีประสิทธิภาพเพียงพอที่จะนำมาแปรรูปเป็นแท่งเชื้อเพลิงชีวมวล เพื่อลดปัญหาปริมาณขยะที่ประสบอยู่ในปัจจุบัน รวมทั้งลดปัญหาการเผากากเหลือใช้ทางการเกษตรที่ถูกปล่อยทิ้งไว้บริเวณเพาะปลูกภายหลังฤดูกาลเก็บเกี่ยว

2) กากน้ำตาลซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมประสานส่งผลให้ประสิทธิภาพของแท่งเชื้อเพลิงชีวมวลเพิ่มขึ้น โดยพิจารณาจากค่าความร้อนที่เพิ่มขึ้นและปริมาณเถ้าที่ลดลง สามารถใช้เป็นแนวทางในการเพิ่มคุณภาพของแท่งเชื้อเพลิงจากกากเหลือใช้ทางการเกษตรได้

3) แรงอัดจากเครื่องจักรที่ส่งผลให้ค่าความทนทานของแท่งเชื้อเพลิงเกินกว่ามาตรฐานมีค่าตั้งแต่ 0.25 ตัน ขึ้นไป

4) จากการศึกษาค่าลักษณะสมบัติของแท่งเชื้อเพลิง พบว่า ยังมีปริมาณเถ้าไม่ผ่านค่ามาตรฐานที่ใช้ในต่างประเทศ ดังนั้นควรปรับปรุงเชื้อเพลิงเพื่อให้สมบัติดังกล่าวอยู่ในเกณฑ์ที่มาตรฐานกำหนด

5.3 ความสำคัญกับงานวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

กากเหลือใช้ทางการเกษตรที่เหลือตกค้างอยู่ ณ บริเวณเพาะปลูกมีประสิทธิภาพเพียงพอที่จะแปรรูปเป็นแท่งเชื้อเพลิงชีวมวล โดยการเปรียบเทียบกับกลุ่มเชื้อเพลิงแท่งที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน ซึ่งถ้าสามารถโน้มน้าวให้เกษตรกรหันมาแยกเก็บตัวกากของเหลือเหล่านี้ได้นอกจากจะช่วยลดทั้งปัญหาปริมาณขยะทางการเกษตร ยังสามารถลดปัญหาการเผาทำลายกากเหล่านั้นอีกด้วย ส่งผลให้เป็นการพัฒนาแบบยั่งยืน อีกทั้งยังช่วยรักษาระบบสภาพแวดล้อมบริเวณใกล้เคียงแหล่งเพาะปลูกอีกด้วย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

รายการอ้างอิง

Antwi-Boasiako, C., & Acheampong, B. (2016). Strength properties and calorific values of sawdust-briquettes as wood-residue energy generation source from tropical hardwoods of different densities. *Biomass and Bioenergy, 85*, 144-152.

Bhattacharya, S., Sett, S., & Shrestha, R. M. (1990). Two approaches for producing briquetted charcoal from wastes and their comparison. *Energy, 15*(6), 499-506.

Bridgeman, T., Darvell, L., Jones, J., Williams, P., Fahmi, R., Bridgwater, A., . . . Thain, S. (2007). Influence of particle size on the analytical and chemical properties of two energy crops. *Fuel, 86*(1), 60-72.

Calvo, A., Tarelho, L., Teixeira, E., Alves, C., Nunes, T., Duarte, M., . . . Artinano, B. (2013). Particulate emissions from the co-combustion of forest biomass and sewage sludge in a bubbling fluidised bed reactor. *Fuel processing technology, 114*, 58-68.

Chen, L., Xing, L., & Han, L. (2009). Renewable energy from agro-residues in China: Solid biofuels and biomass briquetting technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 13*(9), 2689-2695.

Chiang, K.-Y., Chien, K.-L., & Lu, C.-H. (2012). Characterization and comparison of biomass produced from various sources: suggestions for selection of pretreatment technologies in biomass-to-energy. *Applied energy, 100*, 164-171.

Demirbas, A. (2004). Combustion characteristics of different biomass fuels. *Progress in energy and combustion science, 30*(2), 219-230.

Garivait, S., Chaiyo, U., Patumsawad, S., & Deakhuntod, J. (2006). *Physical and chemical properties of Thai biomass fuels from agricultural residues.* Paper presented at the Proceedings of the 2nd Joint International Conference on Sustainable Energy and Environment.

Harun, N. Y., & Afzal, M. T. (2016). Effect of Particle Size on Mechanical Properties of Pellets Made from Biomass Blends. *Procedia Engineering, 148*, 93-99.

Hiegl, W., Janssen, R., & Pichler, W. (2009). Advancement of pellets-related European standards. *WIP Renewable Energies*.

Hiegl, W., Janssen, R., & Pichler, W. (2009). European pellet standards.

Jittabut, P. (2015). Physical and Thermal Properties of Briquette Fuels from Rice Straw and Sugarcane Leaves by Mixing Molasses. *Energy Procedia, 79*, 2-9.

Kaliyan, N., & Morey, R. V. (2010). Natural binders and solid bridge type binding mechanisms in briquettes and pellets made from corn stover and switchgrass. *Bioresource technology, 101*(3), 1082-1090.

Karkania, V., Fanara, E., & Zabaniotou, A. (2012). Review of sustainable biomass pellets production–A study for agricultural residues pellets' market in Greece. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 16*(3), 1426-1436.

Kerdsuwan, S., & Laohalidanond, K. (2015). Approach of using Corn Residue as Alternative Energy Source for Power Production: A Case Study of the Northern Plain Area of Thailand. *Energy Procedia, 79*, 125-130.

Laohalidanond, K., Chaiyawong, P., & Kerdsuwan, S. (2015). Status of Using Biomass Gasification for Heat and Power in Thailand. *Energy Procedia, 79*, 385-390.

Melville, J. (2014). Bomb Calorimetry and Heat of Combustion.

Niedziółka, I., Szpryngiel, M., Kachel-Jakubowska, M., Kraszkiewicz, A., ZawiŚlak, K., Sobczak, P., & Nadulski, R. (2015). Assessment of the energetic and mechanical properties of pellets produced from agricultural biomass. *Renewable Energy, 76*, 312-317.

Nunes, L., Matias, J., & Catalão, J. (2014). Mixed biomass pellets for thermal energy production: A review of combustion models. *Applied energy, 127*, 135-140.

Obernberger, I., Brunner, T., & Barnthaler, G. (2006). Chemical properties of solid biofuels—significance and impact. *Biomass and Bioenergy, 30*(11), 973-982. doi: 10.1016/j.biombioe.2006.06.011

Prasertsan, S., & Sajjakulnukit, B. (2006). Biomass and biogas energy in Thailand: potential, opportunity and barriers. *Renewable Energy, 31*(5), 599-610.

Sajjakulnukit, B., Yingyuad, R., Maneekhao, V., Pongnarintasut, V., Bhattacharya, S., & Salam, P. A. (2005). Assessment of sustainable energy potential of non-

plantation biomass resources in Thailand. *Biomass and Bioenergy, 29*(3), 214-224.

Tokan, A., Sambo, A., Jatau, J., & Kyauta, E. (2012). Effects of Particle Size on the Thermal Properties of Sawdust, Corncobs and Prosopis Africana Charcoal Briquettes: Hydraulic Retention Time (Weeks) Temperature (o C).

Tumuluru, J. S., Wright, C. T., Kenny, K. L., & Hess, J. R. (2010). A review on biomass densification technologies for energy application. *Idaho National Laboratory*.

Turn, S. Q., Keffer, V., & Staackmann, M. (2002). Analysis of Hawaii biomass energy resources for distributed energy applications. *Honolulu: Hawaii Natural Energy Institute, University of Hawaii, 21*.

Vassilev, S. V., Vassileva, C. G., & Vassilev, V. S. (2015). Advantages and disadvantages of composition and properties of biomass in comparison with coal: an overview. *Fuel, 158*, 330-350.

Werther, J., Saenger, M., Hartge, E.-U., Ogada, T., & Siagi, Z. (2000). Combustion of agricultural residues. *Progress in energy and combustion science, 26*(1), 1-27.

Yohe, G. R. (1964). Binding materials used in making pellets and briquets. *Illinois minerals no. 019*.

กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. (2557a). **คู่มือการพัฒนาและการลงทุนผลิตพลังงานทดแทน ชุดที่ *4 :* พลังงานชีวมวล** กระทรวงพลังงาน.

กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. (2557b). รานงานฉบับสมบูรณ์ โครงการศึกษาห่วงโซ่อุปทานของการผลิตเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด: กระทรวงพลังงาน.

กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน. (2558). แผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก

พ.ศ. *2558 – 2579*. กรุงเทพมหานคร: ศูนย์สารสนเทศข้อมูลพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน.

กระทรวงพลังงาน, ก. (2549). การพัฒนาระบบติดตามผลข้อมูลการใช้เชื้อเพลิงชีวมวลในภาคอุตสาหกรรมต่างๆ: กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน.

มหาวิทยาลัยศิลปากร, ค. (2555). โครงการศึกษากำหนดมาตรฐานของ *Biomass pellet* เพื่อพัฒนาเป็นเชื้อเพลิงสำหรับอนาคต: กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน.

ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก ก.
วัตถุดิบในงานวิจัย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

รูปที่ ก-1 พื้นที่เพาะปลูกข้าว

รูปที่ ก-2 พื้นที่เพาะปลูกอ้อย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

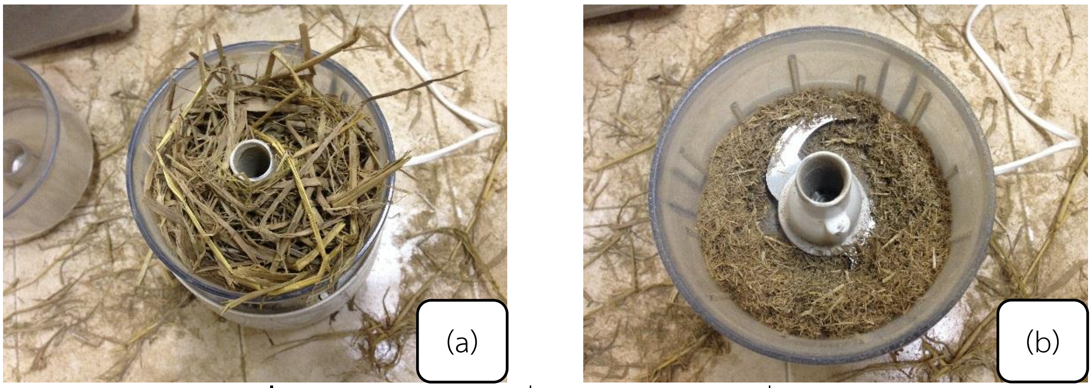
รูปที่ ก-3 พื้นที่เพาะปลูกข้าวโพด

รูปที่ ก-4 ลักษณะฟางข้าวก่อนเข้ากระบวนการเตรียมวัตถุดิบ

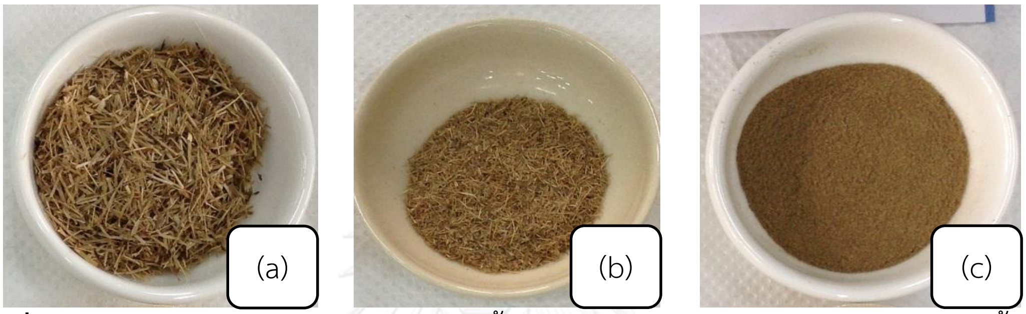
รูปที่ ก-5 ลักษณะใบอ้อยก่อนเข้ากระบวนการเตรียมวัตถุดิบ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

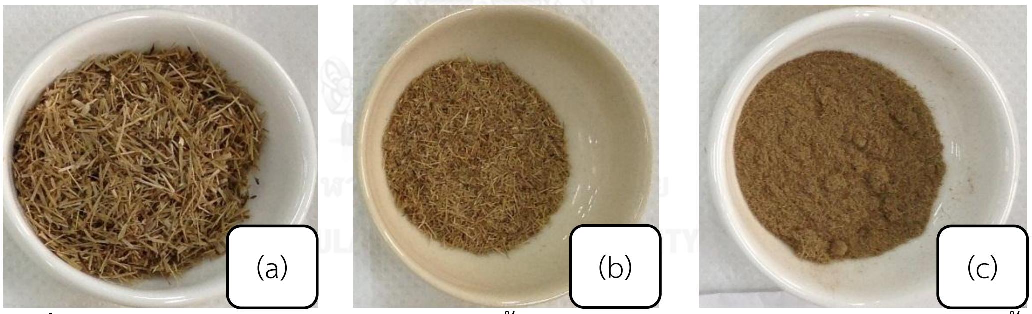
รูปที่ ก-6 ลักษณะใบข้าวโพดก่อนเข้ากระบวนการเตรียมวัตถุดิบ



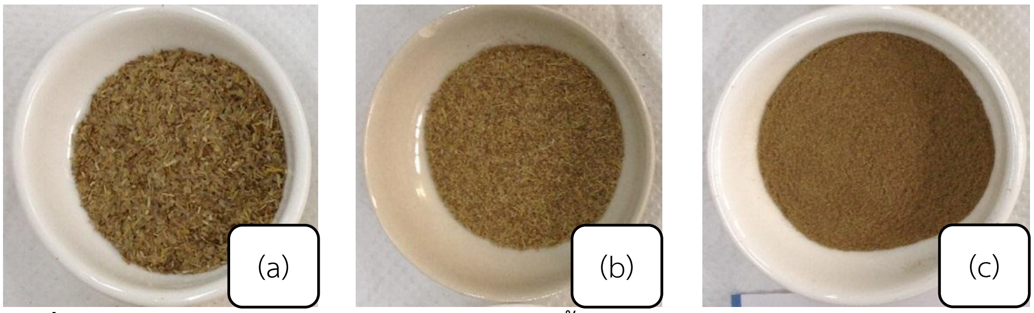
รูปที่ ก-7 วัตถุดิบ (a) ก่อนปั่นลดขนาด, (b) หลังปั่นลดขนาด



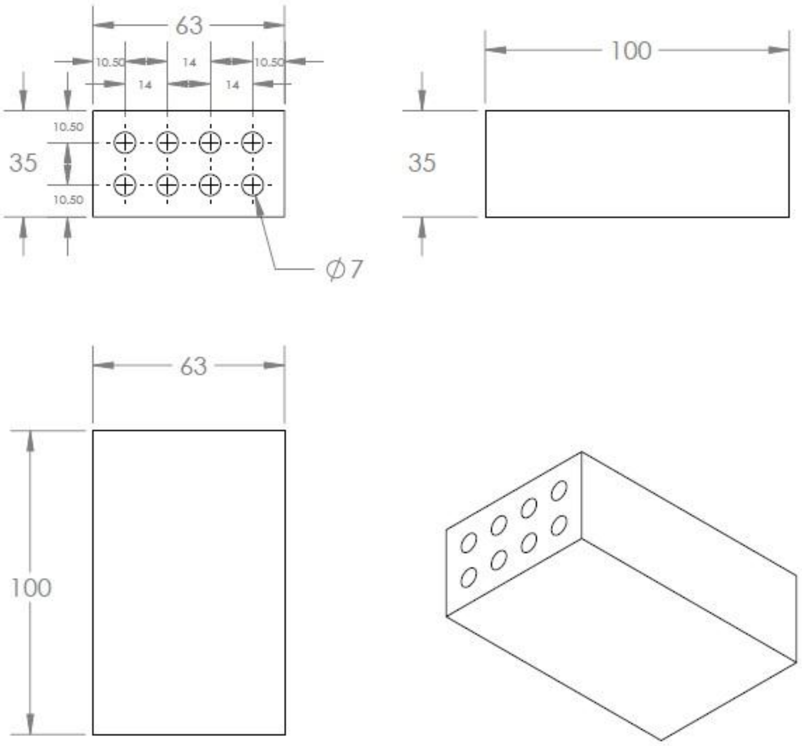
รูปที่ ก-8 วัตถุดิบ : ฟางข้าว (a) ขนาดอนุภาคตั้งแต่ 300μm – 1000μm, (b) ขนาดอนุภาคตั้งแต่ 180μm - 300μm, (c) ขนาดอนุภาคเล็กกว่า 180μm



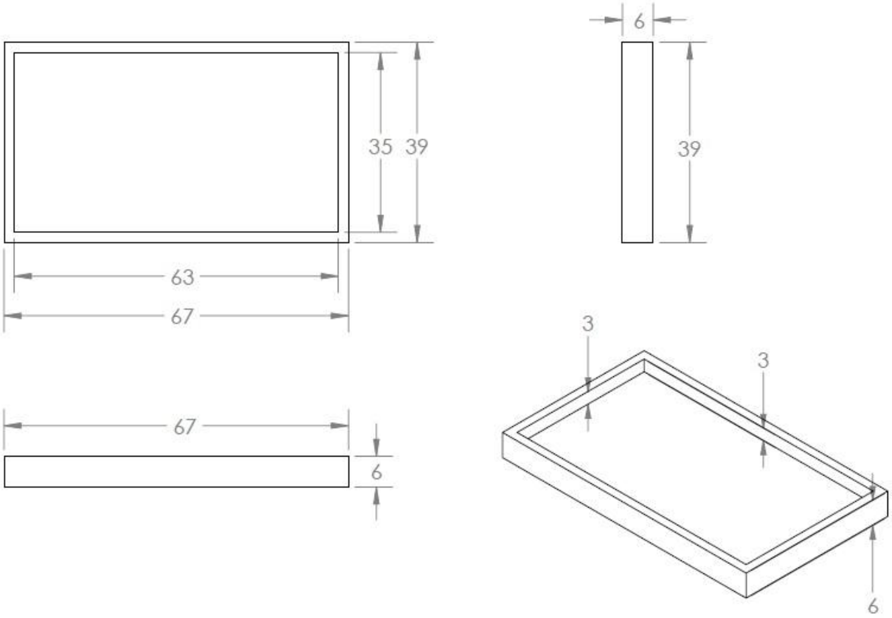
รูปที่ ก-9 วัตถุดิบ : ใบอ้อย (a) ขนาดอนุภาคตั้งแต่ 300μm – 1000μm, (b) ขนาดอนุภาคตั้งแต่ 180μm - 300μm, (c) ขนาดอนุภาคเล็กกว่า 180μm



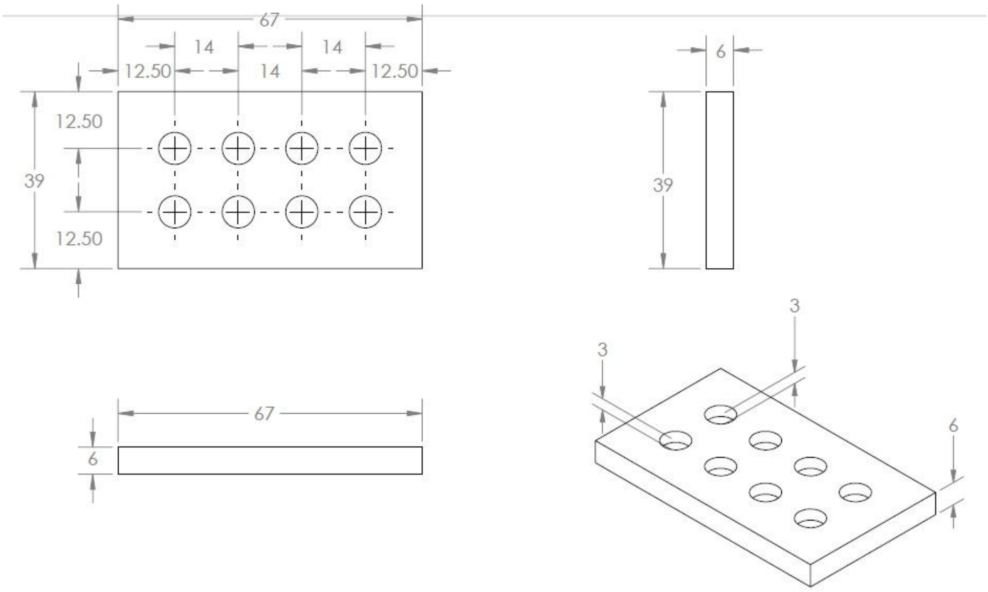
รูปที่ ก-10 วัตถุดิบ : ใบข้าวโพด (a) ขนาดอนุภาคตั้งแต่ 300μm – 1000μm, (b) ขนาดอนุภาคตั้งแต่ 180μm - 300μm, (c) ขนาดอนุภาคเล็กกว่า 180μm



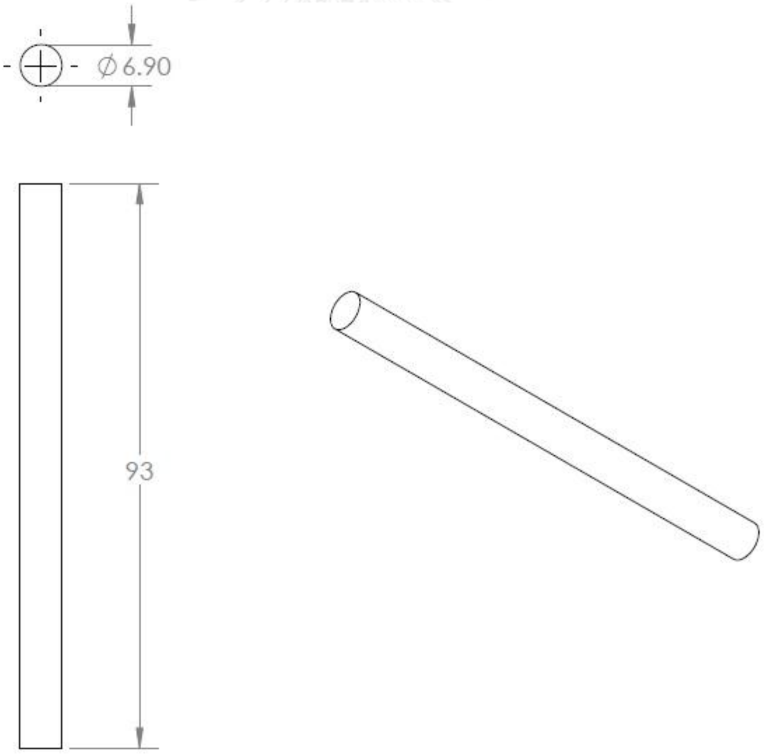
รูปที่ ก-11 drawing แท่งอัดชีวมวล



รูปที่ ก-12 drawing ฝาปิดส่วนล่าง



รูปที่ **ก-13** drawing ฝาปิดส่วนบน



รูปที่ **ก-14** drawing แท่งสำหรับอัด

รูปที่ ก-15 รูปแท่งผ่านกระบวนการอัดร้อน

รูปที่ ก-16 รูปแท่งผ่านกระบวนการอัดเย็น

Chulalongkorn University

ภาคผนวก ข.

ผลการวิเคราะห์ค่าลักษณะสมบัติจากการทดลองที่ 1

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ข-1 ขนาดของอนุภาคที่ส่งผลต่อค่าความทนทานของแท่งเชื้อเพลิง (Durability) ที่เปลี่ยนไป

ขนาดอนุภาค	วิเคราะห์ครั้งที่ 1	วิเคราะห์ครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย
300µm - 1000	86.50	85.11	85.80
180µm – 300µm	95.00	93.97	93.48
≤ 180µm	97.11	98.28	97.69

ข-2 ค่า Durability ของวัตถุดิบแบบเดี่ยวที่อนุภาค 180µm – 300µ และผ่านกระบวนการอัดร้อน

ชนิดวัตถุดิบ	วิเคราะห์ครั้งที่ 1	วิเคราะห์ครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย
ฟางข้าว	95.46	95.88	95.67
ใบอ้อย	95.57	95.33	95.45
ใบข้าวโพด	97.08	96.70	96.89

ข-3 ค่าความร้อน (Calorific value) ของวัตถุดิบ

ชนิดวัตถุดิบ	วิเคราะห์ครั้งที่ 1	วิเคราะห์ครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย	แปลงหน่วย
หน่วย	Kcal/kg	Kcal/kg	Kcal/kg	MJ/kg
ฟางข้าว	3844.1	3711.5	3777.8	15.67
ใบอ้อย	3900.2	4000.2	3950.2	16.39
ใบข้าวโพด	3899.4	3967.6	3933.5	16.32

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

<u>สูตรในการแปลงหน่วย</u>

1 Kcal/Kg = 0.004184 MJ/kg

ข-4 ปริมาณเถ้า (Ash content) ของวัตถุดิบ

ชนิดวัตถุดิบ	วิเคราะห์ครั้งที่ 1	วิเคราะห์ครั้งที่ 2	วิเคราะห์ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
ฟางข้าว	8.73	8.73	8.58	8.68
ใบอ้อย	6.49	6.30	6.51	6.44
ใบข้าวโพด	6.65	6.54	6.42	6.54

ข-5 ปริมาณสารระเหย (Volatile matter) ของวัตถุดิบ

ชนิดวัตถุดิบ	วิเคราะห์ครั้งที่ 1	วิเคราะห์ครั้งที่ 2	วิเคราะห์ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
ฟางข้าว	77.22	77.31	77.09	77.21
ใบอ้อย	78.23	78.22	78.19	78.21
ใบข้าวโพด	79.51	79.98	79.66	79.72

ข-6 ปริมาณคาร์บอนคงตัว (Fixed carbon) ของวัตถุดิบ

ชนิดวัตถุดิบ	วิเคราะห์ครั้งที่ 1	วิเคราะห์ครั้งที่ 2	วิเคราะห์ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
ฟางข้าว	7.06	6.95	7.33	7.11
ใบอ้อย	8.28	8.48	8.27	8.34
ใบข้าวโพด	6.84	6.48	6.92	6.75

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก ค.

ผลการวิเคราะห์ค่าลักษณะสมบัติจากการทดลองที่ 2.1

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ค-1 อุณหภูมิที่เปลี่ยนไปที่ส่งผลต่อค่าความทนทานของแท่งเชื้อเพลิง (Durability)

อุณหภูมิ	ทดสอบครั้งที่ 1	ทดสอบครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย
150 °C	95.45	95.78	95.62
170 °C	97.91	97.06	97.48
190 °C	98.93	98.96	98.95

ค-2 ปริมาณความชื้น (Moisture content) ของแท่งเชื้อเพลิงสูตร ใบอ้อย : ใบข้าวโพด

อัตราส่วนวัตถุดิบ	ทดสอบครั้งที่ 1	ทดสอบครั้งที่ 2	วิเคราะห์ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
10 : 90	1.380	1.330	1.728	1.48
20 : 80	1.036	1.268	1.261	1.19
30 : 70	1.174	1.419	1.202	1.27
40 : 60	1.167	1.471	1.438	1.36
50 : 50	1.11	1.20	1.58	1.30
60 : 40	1.356	1.557	1.445	1.45
70 : 30	1.104	1.699	1.706	1.50
80 : 20	1.606	1.640	1.086	1.44
90 : 10	1.022	1.214	1.199	1.15

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ค-3 ปริมาณความชื้น (Moisture content) ของแท่งเชื้อเพลิงสูตร ฟางข้าว : ใบอ้อย

อัตราส่วนวัตถุดิบ	**ทดสอบครั้งที่ 1**	**ทดสอบครั้งที่ 2**	**วิเคราะห์ครั้งที่ 3**	**ค่าเฉลี่ย**
10 : 90	1.53	1.50	1.54	1.52
20 : 80	1.22	1.90	2.02	1.71
30 : 70	1.87	2.02	1.69	1.86
40 : 60	1.75	1.88	2.24	1.95
50 : 50	2.72	0.69	1.13	1.51
60 : 40	1.75	1.88	2.24	1.95
70 : 30	1.29	2.80	1.56	1.88
80 : 20	1.17	1.30	1.34	1.27
90 : 10	1.33	1.11	0.97	1.13

ค-4 ปริมาณความชื้น (Moisture content) ของแท่งเชื้อเพลิงสูตร ฟางข้าว : ใบข้าวโพด

อัตราส่วนวัตถุดิบ	**ทดสอบครั้งที่ 1**	**ทดสอบครั้งที่ 2**	**วิเคราะห์ครั้งที่ 3**	**ค่าเฉลี่ย**
10 : 90	1.49	1.52	1.14	1.38
20 : 80	1.16	1.19	1.03	1.13
30 : 70	1.34	1.41	1.39	1.38
40 : 60	1.11	1.04	1.21	1.12
50 : 50	1.08	1.08	0.89	1.02
60 : 40	0.95	1.95	1.01	1.30
70 : 30	1.01	1.05	0.94	1.00
80 : 20	1.08	1.36	0.89	1.11
90 : 10	1.11	1.00	0.89	1.00

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ค-5 ค่าความทนทานของแท่งเชื้อเพลิง (Durability) ของแท่งเชื้อเพลิงสูตร ใบอ้อย : ใบข้าวโพด

อัตราส่วนวัตถุดิบ	ทดสอบครั้งที่ 1	ทดสอบครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย
10 : 90	94.30	94.00	94.15
20 : 80	95.00	94.90	94.95
30 : 70	93.84	93.78	93.81
40 : 60	95.98	96.22	96.10
50 : 50	94.80	94.54	94.67
60 : 40	96.33	96.03	96.18
70 : 30	94.31	94.71	94.51
80 : 20	95.78	95.80	95.79
90 : 10	95.02	95.22	95.12

ค-6 ค่าความทนทานของแท่งเชื้อเพลิง (Durability) ของแท่งเชื้อเพลิงสูตร ฟางข้าว : ใบอ้อย

อัตราส่วนวัตถุดิบ	ทดสอบครั้งที่ 1	ทดสอบครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย
10 : 90	94.77	94.45	94.61
20 : 80	96.63	96.77	96.70
30 : 70	94.46	94.56	94.51
40 : 60	96.55	95.29	95.92
50 : 50	94.21	94.45	94.33
60 : 40	94.45	94.19	94.32
70 : 30	95.74	95.90	95.82
80 : 20	94.99	94.67	94.83
90 : 10	96.88	96.66	96.77

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ค-7 ค่าความทนทานของแท่งเชื้อเพลิง (Durability) ของแท่งเชื้อเพลิงสูตร ฟางข้าว : ใบข้าวโพด

อัตราส่วนวัตถุดิบ	ทดสอบครั้งที่ 1	ทดสอบครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย
10 : 90	95.50	95.38	95.44
20 : 80	94.68	94.66	94.67
30 : 70	96.70	96.66	96.68
40 : 60	94.32	94.50	94.41
50 : 50	93.70	93.56	93.63
60 : 40	94.86	95.00	94.93
70 : 30	95.57	95.99	95.78
80 : 20	96.75	96.33	96.54
90 : 10	94.96	94.78	94.87

ค-8 ค่าความร้อน (Calorific value) ของแท่งเชื้อเพลิงสูตร ใบอ้อย : ใบข้าวโพด

อัตราส่วนวัตถุดิบ	ทดสอบครั้งที่ 1	ทดสอบครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย	แปลงหน่วย
หน่วย	Kcal/kg	Kcal/kg	Kcal/kg	MJ/kg
10 : 90	3922.6	3955.8	3939.2	16.34
20 : 80	3968.4	3933.0	3950.7	16.39
30 : 70	3946.3	3961.9	3954.1	16.40
40 : 60	3952.2	3967.0	3959.6	16.42
50 : 50	3954.7	3999.1	3976.9	16.50
60 : 40	3959.0	3939.2	3949.1	16.38
70 : 30	3946.7	3965.9	3956.3	16.41
80 : 20	3995.7	3957.1	3976.4	16.49
90 : 10	3978.9	3955.3	3967.1	16.46

ค-9 ค่าความร้อน (Calorific value) ของแท่งเชื้อเพลิงสูตร ฟางข้าว : ใบอ้อย

อัตราส่วนวัตถุดิบ	**ทดสอบครั้งที่ 1**	**ทดสอบครั้งที่ 2**	**ค่าเฉลี่ย**	**แปลงหน่วย**
หน่วย	Kcal/kg	Kcal/kg	Kcal/kg	MJ/kg
10 : 90	3953.4	3912.2	3932.8	16.31
20 : 80	3885.4	3900.0	3892.7	16.15
30 : 70	3877.9	3833.5	3855.7	15.99
40 : 60	3820.7	3850.7	3835.7	15.91
50 : 50	3885.4	3850.8	3868.1	16.04
60 : 40	3885.5	3811.9	3848.7	15.96
70 : 30	3827.3	3800.9	3814.1	15.82
80 : 20	3808.8	3789.6	3799.2	15.76
90 : 10	3838.6	3802.8	3820.7	15.85

ค-10 ค่าความร้อน (Calorific value) ของแท่งเชื้อเพลิงสูตร ฟางข้าว : ใบข้าวโพด

อัตราส่วนวัตถุดิบ	**ทดสอบครั้งที่ 1**	**ทดสอบครั้งที่ 2**	**ค่าเฉลี่ย**	**แปลงหน่วย**
หน่วย	Kcal/kg	Kcal/kg	Kcal/kg	MJ/kg
10 : 90	3868.0	3900.0	3884.0	16.11
20 : 80	3865.1	3855.9	3860.5	16.01
30 : 70	3850.6	3820.6	3835.6	15.91
40 : 60	3853.3	3840.7	3847.0	15.96
50 : 50	3840.3	3822.1	3831.2	15.89
60 : 40	3819.2	3801.0	3810.1	15.80
70 : 30	3788.3	3736.3	3762.3	15.61
80 : 20	3811.7	3777.3	3794.5	15.74
90 : 10	3773.4	3797.2	3785.3	15.70

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ค-11 ปริมาณเถ้า (Ash content) ของแท่งเชื้อเพลิงสูตร ใบอ้อย : ใบข้าวโพด

อัตราส่วนวัตถุดิบ	ทดสอบครั้งที่ 1	ทดสอบครั้งที่ 2	ทดสอบครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
10 : 90	6.46	6.99	6.14	6.53
20 : 80	6.57	6.84	6.12	6.51
30 : 70	6.45	6.79	6.26	6.50
40 : 60	6.53	6.55	6.36	6.48
50 : 50	6.47	6.49	6.51	6.49
60 : 40	6.53	6.43	6.48	6.48
70 : 30	6.44	6.88	6.09	6.47
80 : 20	6.37	6.90	6.11	6.46
90 : 10	6.51	6.40	6.44	6.45

ค-12 ปริมาณเถ้า (Ash content) ของแท่งเชื้อเพลิงสูตร ฟางข้าว : ใบอ้อย

อัตราส่วนวัตถุดิบ	ทดสอบครั้งที่ 1	ทดสอบครั้งที่ 2	ทดสอบครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
10 : 90	7.26	7.22	6.91	7.13
20 : 80	7.21	7.10	7.53	7.28
30 : 70	7.51	7.50	7.34	7.45
40 : 60	7.74	7.47	7.74	7.65
50 : 50	7.82	7.90	7.56	7.76
60 : 40	7.96	7.55	7.92	7.81
70 : 30	7.67	7.80	8.02	7.83
80 : 20	8.00	8.18	8.15	8.11
90 : 10	8.45	8.20	8.04	8.23

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ค-13 ปริมาณเถ้า (Ash content) ของแท่งเชื้อเพลิงสูตร ฟางข้าว : ใบข้าวโพด

อัตราส่วนวัตถุดิบ	ทดสอบครั้งที่ 1	ทดสอบครั้งที่ 2	ทดสอบครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
10 : 90	6.96	6.80	7.18	6.98
20 : 80	7.00	7.33	7.18	7.17
30 : 70	7.06	7.50	7.22	7.26
40 : 60	7.72	7.35	7.28	7.45
50 : 50	8.00	7.77	7.27	7.68
60 : 40	7.84	8.05	7.87	7.92
70 : 30	8.21	8.00	8.21	8.14
80 : 20	8.55	8.56	8.03	8.38
90 : 10	8.36	8.92	8.25	8.51

ค-14 ปริมาณสารระเหย (Volatile matter) ของแท่งเชื้อเพลิงสูตร ใบอ้อย : ใบข้าวโพด

อัตราส่วนวัตถุดิบ	ทดสอบครั้งที่ 1	ทดสอบครั้งที่ 2	ทดสอบครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
10 : 90	80.00	80.11	80.64	80.25
20 : 80	80.32	80.21	80.25	80.26
30 : 70	79.99	80.00	79.50	79.83
40 : 60	79.16	79.30	79.62	79.36
50 : 50	79.80	79.61	79.12	79.51
60 : 40	79.09	79.25	79.23	79.19
70 : 30	79.68	79.54	79.25	79.49
80 : 20	79.11	79.33	79.43	79.29
90 : 10	78.96	79.07	78.97	79.00

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ค-15 ปริมาณสารระเหย (Volatile matter) ของแท่งเชื้อเพลิงสูตร ฟางข้าว : ใบอ้อย

อัตราส่วนวัตถุดิบ	ทดสอบครั้งที่ 1	ทดสอบครั้งที่ 2	ทดสอบครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
10 : 90	77.97	77.99	78.25	78.07
20 : 80	78.00	78.05	77.80	77.95
30 : 70	77.77	77.90	77.76	77.81
40 : 60	77.55	77.77	77.93	77.75
50 : 50	77.80	77.80	77.41	77.67
60 : 40	77.75	77.42	77.54	77.57
70 : 30	77.24	77.57	77.45	77.42
80 : 20	76.99	76.95	76.52	76.82
90 : 10	76.80	76.89	77.28	76.99

ค-16 ปริมาณสารระเหย (Volatile matter) ของแท่งเชื้อเพลิงสูตร ฟางข้าว : ใบข้าวโพด

อัตราส่วนวัตถุดิบ	ทดสอบครั้งที่ 1	ทดสอบครั้งที่ 2	ทดสอบครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
10 : 90	79.93	79.55	78.81	79.43
20 : 80	78.60	78.67	79.04	78.77
30 : 70	78.00	78.45	79.32	78.59
40 : 60	78.60	78.20	77.86	78.22
50 : 50	78.43	78.00	77.93	78.12
60 : 40	77.66	78.00	77.86	77.84
70 : 30	77.86	77.53	77.50	77.63
80 : 20	77.50	77.64	77.45	77.53
90 : 10	77.13	77.50	77.60	77.41

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ค-17 ปริมาณคาร์บอนคงตัว (Fixed carbon) ของแท่งเชื้อเพลิงสูตร ใบอ้อย : ใบข้าวโพด

อัตราส่วนวัตถุดิบ	ทดสอบครั้งที่ 1	ทดสอบครั้งที่ 2	ทดสอบครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
10 : 90	11.54	10.90	11.22	11.22
20 : 80	11.11	10.95	11.63	11.23
30 : 70	11.56	11.21	12.24	11.67
40 : 60	12.31	12.15	12.02	12.16
50 : 50	11.73	11.90	12.37	12.00
60 : 40	12.38	12.32	12.29	12.33
70 : 30	11.88	11.58	12.66	12.04
80 : 20	12.52	11.77	12.46	12.25
90 : 10	12.53	12.53	12.59	12.55

ค-18 ปริมาณคาร์บอนคงตัว (Fixed carbon) ของแท่งเชื้อเพลิงสูตร ฟางข้าว : ใบอ้อย

อัตราส่วนวัตถุดิบ	ทดสอบครั้งที่ 1	ทดสอบครั้งที่ 2	ทดสอบครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
10 : 90	11.58	11.81	11.71	11.70
20 : 80	12.00	11.77	12.05	11.94
30 : 70	12.56	12.30	12.22	12.36
40 : 60	12.49	12.68	12.15	12.44
50 : 50	12.38	12.30	13.03	12.57
60 : 40	12.51	13.11	12.72	12.78
70 : 30	13.25	12.93	13.21	13.13
80 : 20	13.80	13.95	13.95	13.90
90 : 10	13.94	13.89	13.81	13.88

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ค-19 ปริมาณคาร์บอนคงตัว (Fixed carbon) ของแท่งเชื้อเพลิงสูตร ฟางข้าว : ใบข้าวโพด

อัตราส่วนวัตถุดิบ	ทดสอบครั้งที่ 1	ทดสอบครั้งที่ 2	ทดสอบครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
10 : 90	11.11	11.65	12.01	11.59
20 : 80	12.40	12.00	11.78	12.06
30 : 70	12.94	12.05	11.46	12.15
40 : 60	11.68	12.45	12.86	12.33
50 : 50	11.57	12.23	12.80	12.2
60 : 40	12.50	11.95	12.27	12.24
70 : 30	11.93	12.47	12.29	12.23
80 : 20	11.95	11.80	12.52	12.09
90 : 10	12.51	11.58	12.15	12.08

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก ง.

ผลการวิเคราะห์ค่าลักษณะสมบัติจากการทดลองที่ 2.2

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ง-1 อัตราส่วนกากน้ำตาลที่เปลี่ยนไปที่ส่งผลต่อค่าความทนทานของแท่งเชื้อเพลิง (Durability) : ฟาง

อุณหภูมิ	ทดสอบครั้งที่ 1	ทดสอบครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย
10%	96.89	97.09	96.99
30%	97.80	97.68	97.74
50%	98.77	98.73	98.75
70%	96.63	96.57	96.60
90%	96.15	96.37	96.26

ง-2 อัตราส่วนกากน้ำตาลที่เปลี่ยนไปที่ส่งผลต่อค่าความทนทานของแท่งเชื้อเพลิง (Durability) : อ้อย

อุณหภูมิ	ทดสอบครั้งที่ 1	ทดสอบครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย
10%	95.38	95.00	95.19
30%	95.87	96.01	95.94
50%	96.90	97.10	97.00
70%	96.63	96.55	96.59
90%	96.73	96.67	96.70

ง-3 อัตราส่วนกากน้ำตาลที่เปลี่ยนไปที่ส่งผลต่อค่าความทนทานของแท่งเชื้อเพลิง (Durability) : ข้าวโพด

อุณหภูมิ	ทดสอบครั้งที่ 1	ทดสอบครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย
10%	94.30	94.12	94.21
30%	94.66	94.60	94.63
50%	95.71	95.99	95.85
70%	93.80	95.46	94.63
90%	95.41	95.23	95.32

Chulalongkorn University

ง-4 อัตราส่วนกากน้ำตาลที่เปลี่ยนไปที่ส่งผลต่อปริมาณเถ้าของแท่งเชื้อเพลิง (Ash content) : ฟางข้าว

อัตราส่วนวัตถุดิบ	ทดสอบครั้งที่ 1	ทดสอบครั้งที่ 2	ทดสอบครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
10%	6.44	6.50	6.71	6.55
30%	6.16	5.98	6.10	6.08
50%	5.32	5.00	5.31	5.21
70%	4.22	4.00	4.11	4.11
90%	3.86	3.99	4.24	4.03

ง-5 อัตราส่วนกากน้ำตาลที่เปลี่ยนไปที่ส่งผลต่อปริมาณเถ้าของแท่งเชื้อเพลิง (Ash content) : ใบอ้อย

อัตราส่วนวัตถุดิบ	ทดสอบครั้งที่ 1	ทดสอบครั้งที่ 2	ทดสอบครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
10%	3.72	3.43	3.77	3.64
30%	3.05	3.00	3.01	3.02
50%	2.42	2.64	2.32	2.46
70%	2.44	2.10	2.45	2.33
90%	1.46	1.99	1.74	1.73

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ง-6 อัตราส่วนกากน้ำตาลที่เปลี่ยนไปที่ส่งผลต่อปริมาณเถ้าของแท่งเชื้อเพลิง (Ash content) : ใบข้าวโพด

อัตราส่วนวัตถุดิบ	ทดสอบครั้งที่ 1	ทดสอบครั้งที่ 2	ทดสอบครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
10%	3.56	3.39	3.55	3.50
30%	2.82	3.05	2.86	2.91
50%	2.55	2.77	2.48	2.60
70%	1.69	1.99	1.69	1.79
90%	1.30	1.25	0.90	1.15

ง-7 อัตราส่วนกากน้ำตาลที่เปลี่ยนไปที่ส่งผลต่อปริมาณสาระเหยของแท่งเชื้อเพลิง (Volatile matter) : ฟางข้าว

อัตราส่วนวัตถุดิบ	**ทดสอบครั้งที่ 1**	**ทดสอบครั้งที่ 2**	**ทดสอบครั้งที่ 3**	**ค่าเฉลี่ย**
10%	76.35	76.00	76.19	76.18
30%	76.91	76.50	76.63	76.68
50%	76.86	77.00	77.05	76.97
70%	77.69	77.99	77.84	77.84
90%	78.25	78.55	77.71	78.17

ง-8 อัตราส่วนกากน้ำตาลที่เปลี่ยนไปที่ส่งผลต่อปริมาณสาระเหยของแท่งเชื้อเพลิง (Volatile matter) : ใบอ้อย

อัตราส่วนวัตถุดิบ	**ทดสอบครั้งที่ 1**	**ทดสอบครั้งที่ 2**	**ทดสอบครั้งที่ 3**	**ค่าเฉลี่ย**
10%	79.11	78.99	78.90	79.00
30%	79.32	78.95	79.21	79.16
50%	78.99	79.10	79.24	79.11
70%	80.50	80.55	80.75	80.60
90%	80.18	79.95	80.14	80.09

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ง-9 อัตราส่วนกากน้ำตาลที่เปลี่ยนไปที่ส่งผลต่อปริมาณสาระเหยของแท่งเชื้อเพลิง (Volatile matter) : ใบข้าวโพด

อัตราส่วนวัตถุดิบ	**ทดสอบครั้งที่ 1**	**ทดสอบครั้งที่ 2**	**ทดสอบครั้งที่ 3**	**ค่าเฉลี่ย**
10%	79.01	79.00	78.66	78.89
30%	79.02	79.35	79.11	79.16
50%	80.61	80.99	80.53	80.71
70%	81.33	81.15	81.24	81.24
90%	81.16	81.43	81.40	81.33

ง-10 อัตราส่วนกากน้ำตาลที่เปลี่ยนไปที่ส่งผลต่อปริมาณคาร์บอนคงตัวของแท่งเชื้อเพลิง (Fixed carbon) : ฟางข้าว

อัตราส่วนวัตถุดิบ	ทดสอบครั้งที่ 1	ทดสอบครั้งที่ 2	ทดสอบครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
10%	15.21	15.50	15.10	15.27
30%	14.93	15.52	15.27	15.24
50%	15.82	16.00	15.64	15.82
70%	16.09	16.01	16.05	16.05
90%	15.89	15.46	16.05	15.80

ง-11 อัตราส่วนกากน้ำตาลที่เปลี่ยนไปที่ส่งผลต่อปริมาณคาร์บอนคงตัวของแท่งเชื้อเพลิง (Fixed carbon) : ใบอ้อย

อัตราส่วนวัตถุดิบ	ทดสอบครั้งที่ 1	ทดสอบครั้งที่ 2	ทดสอบครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
10%	15.17	15.58	15.33	15.36
30%	15.63	16.05	15.78	15.82
50%	16.59	16.26	16.44	16.43
70%	15.06	15.35	14.80	15.07
90%	16.36	16.06	16.12	16.18

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ง-12 อัตราส่วนกากน้ำตาลที่เปลี่ยนไปที่ส่งผลต่อปริมาณคาร์บอนคงตัวของแท่งเชื้อเพลิง (Fixed carbon) : ใบข้าวโพด

อัตราส่วนวัตถุดิบ	ทดสอบครั้งที่ 1	ทดสอบครั้งที่ 2	ทดสอบครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
10%	15.43	15.61	15.79	15.61
30%	16.16	15.60	16.03	15.93
50%	14.84	14.24	14.99	14.69
70%	14.98	14.86	15.07	14.97
90%	15.54	15.32	15.70	15.52

ง-13 ปริมาณความชื้น (Moisture content) ของแท่งเชื้อเพลิงสูตร ใบอ้อย : ใบข้าวโพด

อัตราส่วนวัตถุดิบ	ทดสอบครั้งที่ 1	ทดสอบครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย
10 : 90	1.61	1.25	1.43
30 : 70	1.89	1.65	1.77
50 : 50	1.41	1.89	1.65
70 : 30	1.60	1.50	1.55
90 : 10	1.84	1.90	1.87

ง-14 ปริมาณความชื้น (Moisture content) ของแท่งเชื้อเพลิงสูตร ใบฟางข้าว : ใบอ้อย

อัตราส่วนวัตถุดิบ	ทดสอบครั้งที่ 1	ทดสอบครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย
10 : 90	0.98	1.88	1.43
30 : 70	1.56	1.44	1.50
50 : 50	1.82	1.70	1.76
70 : 30	1.68	1.48	1.58
90 : 10	1.90	1.80	1.85

ง-15 ปริมาณความชื้น (Moisture content) ของแท่งเชื้อเพลิงสูตร ใบฟางข้าว : ใบข้าวโพด

อัตราส่วนวัตถุดิบ	ทดสอบครั้งที่ 1	ทดสอบครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย
10 : 90	1.23	1.77	1.50
30 : 70	1.76	1.98	1.87
50 : 50	2.38	1.54	1.96
70 : 30	1.54	1.76	1.65
90 : 10	1.84	1.44	1.64

ง-16 ค่าความทนทานของแท่งเชื้อเพลิง (Durability) ของแท่งเชื้อเพลิงสูตร ใบอ้อย : ใบข้าวโพด

อัตราส่วนวัตถุดิบ	ทดสอบครั้งที่ 1	ทดสอบครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย
10 : 90	98.30	99.00	98.65
30 : 70	99.31	98.67	98.99
50 : 50	98.57	98.33	98.45
70 : 30	99.62	98.56	99.09
90 : 10	98.56	98.76	98.66

ง-17 ค่าความทนทานของแท่งเชื้อเพลิง (Durability) ของแท่งเชื้อเพลิงสูตร ฟางข้าว : ใบอ้อย

อัตราส่วนวัตถุดิบ	ทดสอบครั้งที่ 1	ทดสอบครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย
10 : 90	98.04	99.10	98.57
30 : 70	98.67	98.43	98.55
50 : 50	99.25	98.75	99.00
70 : 30	99.48	98.48	98.98
90 : 10	97.77	99.15	98.46

ง-18 ค่าความทนทานของแท่งเชื้อเพลิง (Durability) ของแท่งเชื้อเพลิงสูตร ฟางข้าว : ใบข้าวโพด

อัตราส่วนวัตถุดิบ	ทดสอบครั้งที่ 1	ทดสอบครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย
10 : 90	98.14	98.00	98.07
30 : 70	99.41	98.89	99.15
50 : 50	98.45	98.89	98.67
70 : 30	98.42	99.00	98.71
90 : 10	98.46	98.50	98.48

ง-19 ค่าความร้อน (Calorific value) ของแท่งเชื้อเพลิงสูตร ใบอ้อย : ใบข้าวโพด

อัตราส่วนวัตถุดิบ	**ทดสอบครั้งที่ 1**	**ทดสอบครั้งที่ 2**	**ค่าเฉลี่ย**	**แปลงหน่วย**
หน่วย	Kcal/kg	Kcal/kg	Kcal/kg	MJ/kg
10 : 90	4164.2	4156.9	4160.6	17.26
30 : 70	4166.9	4177.0	4172.0	17.31
50 : 50	4175.0	4179.9	4177.5	17.33
70 : 30	4163.2	4177.2	4170.2	17.30
90 : 10	4169.9	4156.6	4163.3	17.27

ง-20 ค่าความร้อน (Calorific value) ของแท่งเชื้อเพลิงสูตร ฟางข้าว : ใบอ้อย

อัตราส่วนวัตถุดิบ	**ทดสอบครั้งที่ 1**	**ทดสอบครั้งที่ 2**	**ค่าเฉลี่ย**	**แปลงหน่วย**
หน่วย	Kcal/kg	Kcal/kg	Kcal/kg	MJ/kg
10 : 90	4135.5	4158.9	4147.2	17.20
30 : 70	4154.7	4133.7	4144.2	17.19
50 : 50	4087.8	4067.0	4077.4	16.91
70 : 30	4044.4	4066.6	4055.5	16.82
90 : 10	4072.7	4056.1	4064.4	16.86

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ง-21 ค่าความร้อน (Calorific value) ของแท่งเชื้อเพลิงสูตร ฟางข้าว : ใบข้าวโพด

อัตราส่วนวัตถุดิบ	**ทดสอบครั้งที่ 1**	**ทดสอบครั้งที่ 2**	**ค่าเฉลี่ย**	**แปลงหน่วย**
หน่วย	Kcal/kg	Kcal/kg	Kcal/kg	MJ/kg
10 : 90	4128.6	4140.0	4134.3	17.15
30 : 70	4093.4	4078.4	4085.9	16.95
50 : 50	4066.7	4089.1	4077.9	16.92
70 : 30	4070.2	4086.0	4078.1	16.92
90 : 10	4065.0	4044.4	4054.7	16.82

ง-22 ปริมาณเถ้า (Ash content) ของแท่งเชื้อเพลิงสูตร ใบอ้อย : ใบข้าวโพด

อัตราส่วนวัตถุดิบ	ทดสอบครั้งที่ 1	ทดสอบครั้งที่ 2	ทดสอบครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
10 : 90	2.56	2.77	2.71	2.68
30 : 70	3.04	2.99	3.03	3.02
50 : 50	3.25	3.00	3.29	3.18
70 : 30	3.12	3.33	3.33	3.26
90 : 10	3.43	3.20	3.30	3.31

ง-23 ปริมาณเถ้า (Ash content) ของแท่งเชื้อเพลิงสูตร ฟางข้าว : ใบอ้อย

อัตราส่วนวัตถุดิบ	ทดสอบครั้งที่ 1	ทดสอบครั้งที่ 2	ทดสอบครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
10 : 90	2.44	2.75	2.49	2.56
30 : 70	2.81	2.70	2.47	2.66
50 : 50	2.80	2.99	2.91	2.90
70 : 30	2.91	3.09	3.03	3.01
90 : 10	3.28	3.33	3.56	3.39

ง-24 ปริมาณเถ้า (Ash content) ของแท่งเชื้อเพลิงสูตร ฟางข้าว : ใบข้าวโพด

อัตราส่วนวัตถุดิบ	ทดสอบครั้งที่ 1	ทดสอบครั้งที่ 2	ทดสอบครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
10 : 90	2.86	2.56	2.53	2.65
30 : 70	2.87	3.00	2.95	2.94
50 : 50	3.09	3.10	3.29	3.16
70 : 30	3.26	3.40	3.18	3.28
90 : 10	3.67	3.81	3.83	3.77

ง-25 ปริมาณสารระเหย (Volatile matter) ของแท่งเชื้อเพลิงสูตร ใบอ้อย : ใบข้าวโพด

อัตราส่วนวัตถุดิบ	ทดสอบครั้งที่ 1	ทดสอบครั้งที่ 2	ทดสอบครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
10 : 90	80.10	79.95	80.10	80.05
30 : 70	79.49	79.55	79.88	79.64
50 : 50	79.53	79.39	79.37	79.43
70 : 30	79.40	79.11	79.09	79.20
90 : 10	79.15	79.00	79.06	79.07

ง-26 ปริมาณสารระเหย (Volatile matter) ของแท่งเชื้อเพลิงสูตร ฟางข้าว : ใบอ้อย

อัตราส่วนวัตถุดิบ	ทดสอบครั้งที่ 1	ทดสอบครั้งที่ 2	ทดสอบครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
10 : 90	78.35	78.33	78.52	78.40
30 : 70	77.80	77.95	77.80	77.85
50 : 50	77.90	77.50	77.49	77.63
70 : 30	77.36	77.31	77.62	77.43
90 : 10	77.53	77.15	77.43	77.37

ง-27 ปริมาณสารระเหย (Volatile matter) ของแท่งเชื้อเพลิงสูตร ฟางข้าว : ใบข้าวโพด

อัตราส่วนวัตถุดิบ	ทดสอบครั้งที่ 1	ทดสอบครั้งที่ 2	ทดสอบครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
10 : 90	79.47	79.33	79.43	79.41
30 : 70	79.14	79.00	79.07	79.07
50 : 50	78.48	78.79	78.50	78.59
70 : 30	78.48	78.12	78.60	78.40
90 : 10	78.28	78.00	78.14	78.14

ง-28 ปริมาณคาร์บอนคงตัว (Fixed carbon) ของแท่งเชื้อเพลิงสูตร ใบอ้อย : ใบข้าวโพด

อัตราส่วนวัตถุดิบ	ทดสอบครั้งที่ 1	ทดสอบครั้งที่ 2	ทดสอบครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
10 : 90	15.34	15.28	15.19	15.27
30 : 70	15.47	15.46	15.09	15.34
50 : 50	15.22	15.61	15.34	15.39
70 : 30	15.48	15.56	15.58	15.54
90 : 10	15.42	15.80	15.64	15.62

ง-29 ปริมาณคาร์บอนคงตัว (Fixed carbon) ของแท่งเชื้อเพลิงสูตร ฟางข้าว : ใบอ้อย

อัตราส่วนวัตถุดิบ	ทดสอบครั้งที่ 1	ทดสอบครั้งที่ 2	ทดสอบครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
10 : 90	16.21	16.92	17.99	17.04
30 : 70	16.39	17.35	18.73	17.49
50 : 50	16.30	17.51	18.60	17.47
70 : 30	16.73	17.60	18.35	17.56
90 : 10	16.19	17.52	18.01	17.24

ง-30 ปริมาณคาร์บอนคงตัว (Fixed carbon) ของแท่งเชื้อเพลิงสูตร ฟางข้าว : ใบข้าวโพด

อัตราส่วนวัตถุดิบ	ทดสอบครั้งที่ 1	ทดสอบครั้งที่ 2	ทดสอบครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
10 : 90	15.67	16.11	16.04	15.94
30 : 70	15.99	16.00	15.98	15.99
50 : 50	16.43	16.11	16.21	16.25
70 : 30	16.26	16.48	16.22	16.32
90 : 10	16.05	16.19	16.03	16.09

ภาคผนวก จ.

ผลการวิเคราะห์ค่าลักษณะสมบัติจากการทดลองที่ 3

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

กลุ่มตัวอย่างชีวมวลที่มีอยู่ในไทย

จ-1 ค่าลักษณะสมบัติของแท่งเชื้อเพลิงชีวมวล : ขี้เลื่อย 1

parameter	**unit**	**ทดสอบครั้งที่ 1**	**ทดสอบครั้งที่ 2**	**ค่าเฉลี่ย**
Diameter	mm	-	-	8.45
Length	mm	16.09	16.81	16.45
Bulk density	kg/m^3	654.58	655.50	654.54
Durability	%	-	-	96.65
Moisture content	%	9.40	8.80	9.10
Calorific value	MJ/kg	-	-	17.23
Ash content	%	2.54	2.46	2.50
Volatile matter	%	74.59	74.81	74.70
Fixed carbon	%	13.47	13.93	13.70

จ-2 ค่าลักษณะสมบัติของแท่งเชื้อเพลิงชีวมวล : ขี้เลื่อย 2

parameter	**unit**	**ทดสอบครั้งที่ 1**	**ทดสอบครั้งที่ 2**	**ค่าเฉลี่ย**
Diameter	mm	-	-	9.61
Length	mm	17.66	18.44	18.05
Bulk density	kg/m^3	837.75	830.77	834.26
Durability	%	-	-	96.77
Moisture content	%	2.71	2.89	2.80
Calorific value	MJ/kg	-	-	18.10
Ash content	%	5.35	5.25	5.30
Volatile matter	%	74.60	74.80	74.70
Fixed carbon	%	17.34	17.06	17.20

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

จ-3 ค่าลักษณะสมบัติของแท่งเชื้อเพลิงชีวมวล : เปลือกไม้ยูคาลิปตัส

parameter	unit	ทดสอบครั้งที่ 1	ทดสอบครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย
Diameter	mm	-	-	8.23
Length	mm	13.73	14.33	14.03
Bulk density	kg/m^3	858.22	855.00	856.61
Durability	%	-	-	97.78
Moisture content	%	4.83	4.77	4.80
Calorific value	MJ/kg	-	-	15.73
Ash content	%	8.75	9.05	8.90
Volatile matter	%	66.03	65.97	66.00
Fixed carbon	%	20.39	20.21	20.30

จ-4 ค่าลักษณะสมบัติของแท่งเชื้อเพลิงชีวมวล : ทะลายปาล์ม

parameter	unit	ทดสอบครั้งที่ 1	ทดสอบครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย
Diameter	mm	-	-	10.40
Length	mm	19.77	20.19	19.98
Bulk density	kg/m^3	544.68	550.98	547.83
Durability	%	-	-	89.05
Moisture content	%	13.40	13.00	13.20
Calorific value	MJ/kg	-	-	15.82
Ash content	%	7.66	7.54	7.60
Volatile matter	%	63.71	64.09	63.90
Fixed carbon	%	15.23	15.37	15.30

จ-5 ค่าลักษณะสมบัติของแท่งเชื้อเพลิงชีวมวล : แกลบ

parameter	unit	ทดสอบครั้งที่ 1	ทดสอบครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย
Diameter	mm	-	-	8.23
Length	mm	15.99	16.23	16.11
Bulk density	kg/m^3	743.03	745.41	744.22
Durability	%	-	-	96.09
Moisture content	%	7.73	7.67	7.70
Calorific value	MJ/kg	-	-	14.62
Ash content	%	17.91	17.69	17.80
Volatile matter	%	59.49	59.71	59.60
Fixed carbon	%	14.87	14.93	14.90

จ-6 ค่าลักษณะสมบัติของแท่งเชื้อเพลิงชีวมวล : แกลบผสม (แกลบ 40%+ขี้เลื่อย 40%+เปลือกไม้ 20%)

parameter	unit	ทดสอบครั้งที่ 1	ทดสอบครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย
Diameter	mm	-	-	8.06
Length	mm	16.11	15.89	16.00
Bulk density	kg/m^3	713.60	720.98	717.29
Durability	%	-	-	98.41
Moisture content	%	7.03	6.77	6.90
Calorific value	MJ/kg	-	-	16.45
Ash content	%	10.75	10.25	10.50
Volatile matter	%	66.59	66.41	66.50
Fixed carbon	%	15.63	16.57	16.10

จ-7 ค่าลักษณะสมบัติของแท่งเชื้อเพลิงชีวมวล : ไม้ผสมเปลือกไม้ยูคาลิปตัส

parameter	unit	ทดสอบครั้งที่ 1	ทดสอบครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย
Diameter	mm	-	-	8.27
Length	mm	15.75	16.21	15.98
Bulk density	kg/m^3	663.24	666.50	664.87
Durability	%	-	-	98.80
Moisture content	%	9.83	10.97	10.40
Calorific value	MJ/kg	-	-	16.38
Ash content	%	5.4	4.00	4.70
Volatile matter	%	67.62	67.38	67.50
Fixed carbon	%	17.15	17.65	17.40

จ-8 ค่าลักษณะสมบัติของแท่งเชื้อเพลิงชีวมวล : ชานอ้อย ผสม เปลือกไม้ยูคาลิปตัส

parameter	unit	ทดสอบครั้งที่ 1	ทดสอบครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย
Diameter	mm	-	-	8.09
Length	mm	16.31	15.99	16.15
Bulk density	kg/m^3	725.27	730.45	727.86
Durability	%	98.41	97.97	98.19
Moisture content	%	9.60	9.00	9.30
Calorific value	MJ/kg	-	-	17.15
Ash content	%	4.60	5.00	4.80
Volatile matter	%	69.80	70.00	69.90
Fixed carbon	%	16.00	16.00	16.00

จ-9 ค่าลักษณะสมบัติของแท่งเชื้อเพลิงชีวมวล : ทะลายปาล์มผสมกะลาปาล์ม

parameter	unit	ทดสอบครั้งที่ 1	ทดสอบครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย
Diameter	mm	-	-	9.80
Length	mm	17.57	18.21	17.89
Bulk density	kg/m^3	755.23	760.23	757.73
Durability	%	73.39	72.99	73.19
Moisture content	%	8.90	8.50	8.70
Calorific value	MJ/kg	-	-	16.56
Ash content	%	10.05	9.55	9.80
Volatile matter	%	67.14	66.66	66.90
Fixed carbon	%	13.91	15.29	14.60

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายเจตน์สิทธิ์ สำลีรัตน์ เกิดเมื่อวันที่ 24 สิงหาคม 2534 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (บางเขน) ในปีการศึกษา 2557 และ เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปี พ.ศ. 2557

ผลงานวิจัยส่วนหนึ่งจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้เผยแพร่ในงานการประชุมวิชาการงานประชุมวิชาการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติครั้งที่ 16 (16th National Environmental Conference และ 16th International Conference on Environmental Engineering, Science, and Management) ในหัวข้อ เชื้อเพลิงชีวมวลจากกากเหลือใช้ทางการเกษตร : ลักษณะสมบัติและอัตราส่วนการใช้ ณ โรงแรม เดอะ ทวิน ทาวเวอร์ รองเมือง กรุงเทพฯ ระหว่างวันที่ 17 - 18 พฤษภาคม พ.ศ. 2560

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY