



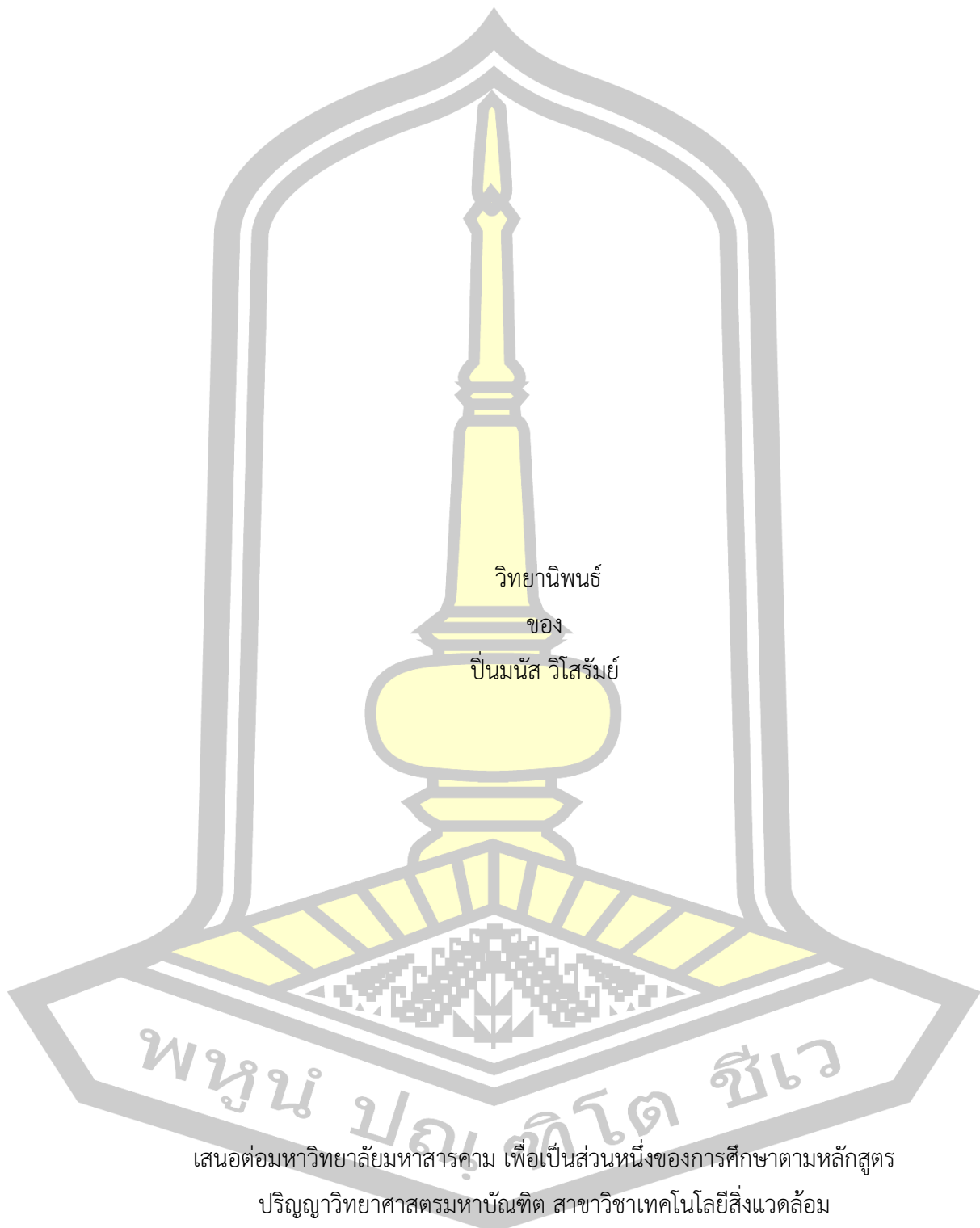
การปรับปรุงประสิทธิภาพทางพลังงานของเชื้อเพลิงจากหญ้าหลายฤดู

วิทยานิพนธ์  
ของ  
ปิ่นมณัส วิโสรัมย์

เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม  
ตุลาคม 2563

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

การปรับปรุงประสิทธิภาพทางพลังงานของเชื้อเพลิงจากหญ้าหลายฤดู



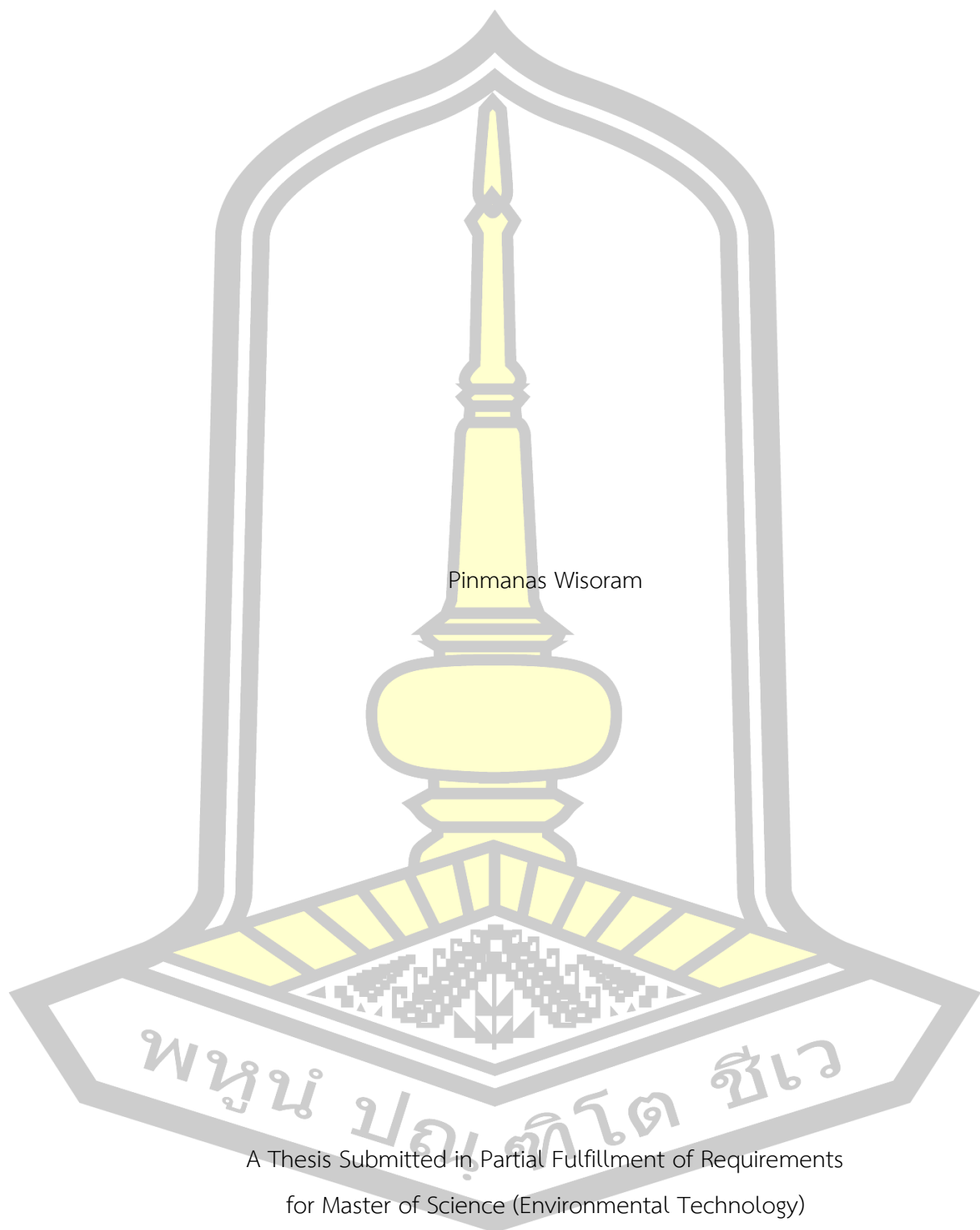
เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม

ตุลาคม 2563

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

Enhancing Energy Performance of Perennial-Grass Feedstock



Pinmanas Wisoram

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of Requirements  
for Master of Science (Environmental Technology)

October 2020

Copyright of Mahasarakham University



คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ได้พิจารณาวิทยานิพนธ์ของนางสาวปิ่นมณัส วิโสรัมย์  
แล้วเห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(ผศ. ดร. นิพนธ์ ตันไพบุลย์กุล )

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(อ. ดร. วิจิตรา สิงห์หิรัญสุนทรณ์ )

.....กรรมการ

(ผศ. ดร. พลกฤษณ์ จิตรโตะ )

.....กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก

(รศ. ดร. ชุติมาศ บุญไทย อีวาย )

มหาวิทยาลัยอนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญา วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

.....  
(รศ. ดร. อติศักดิ์ สิงห์สีโว )

คณบดีคณะสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรศาสตร์

.....  
(รศ. ดร. กริสน์ ชัยมูล )

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อเรื่อง การปรับปรุงประสิทธิภาพทางพลังงานของเชื้อเพลิงจากหญ้าหลายฤดู  
 ผู้วิจัย ปิ่นมณัส วิโสรัมย์  
 อาจารย์ที่ปรึกษา อาจารย์ ดร. วิจิตรา สิงห์หิรัญนุสรณ์  
 ปริญญา วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชา เทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม  
 มหาวิทยาลัย มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ปีที่พิมพ์ 2563

### บทคัดย่อ

การใช้หญ้าหลายฤดูเป็นวัสดุสำหรับโรงไฟฟ้าชีวมวลได้รับความสนใจมากขึ้น เนื่องจากต้นทุนวัสดุชีวมวลในปัจจุบันที่เพิ่มสูงขึ้นและการขาดแคลนของวัสดุ ถึงแม้ว่าจะมีปริมาณพลังงานและผลผลิตสูง แต่หญ้าหลายฤดูก็มีข้อเสียเปรียบ คือ ความหนาแน่นและความทนทานต่ำ อย่างไรก็ตาม การปรับปรุงความหนาแน่นพลังงานและประสิทธิภาพของเชื้อเพลิงสามารถทำได้โดยวิธีการอัดแข็งชีวมวล การศึกษาจึงมีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพ เคมี ชีวเคมี และด้านพลังงานของหญ้าหลายฤดู ศึกษากระบวนการผลิตเชื้อเพลิงอัดแข็ง ปัจจัยที่ส่งผลต่อความคงทน และประสิทธิภาพการให้พลังงาน ตลอดจนการใช้เชื้อเพลิงอัดแข็งจากหญ้าหลายฤดูเป็นวัสดุทางเลือกสำหรับโรงไฟฟ้าชีวมวล โดยหญ้าหลายฤดู 10 ชนิด ในพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย จะได้รับการวิเคราะห์ปริมาณความชื้น สารระเหย คาร์บอนคงที่ และเถ้า นอกจากนี้ยังวิเคราะห์ปริมาณเยื่อใย ค่าความร้อน และองค์ประกอบธาตุของหญ้า สำหรับกระบวนการเพิ่มความหนาแน่นของเชื้อเพลิงจะศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความหนาแน่นพลังงานและความทนทาน รวมถึงรูปทรง ปริมาณตัวประสาน และแรงอัด โดยการขึ้นรูป 2 แบบ ได้แก่ เชื้อเพลิงอัดเม็ดและเชื้อเพลิงอัดก้อน ด้วยการใส่แป้งมันสำปะหลังเป็นตัวประสาน ในอัตราส่วนปริมาณตัวประสาน 0 - 40 % (โดยน้ำหนัก) สำหรับเชื้อเพลิงอัดก้อนจะศึกษาแรงอัด คือ 1 - 3 MPa ในแง่ของความทนทานของเชื้อเพลิงอัดแข็ง เชื้อเพลิงจะได้รับการทดสอบดัชนีความทนทานทั้ง 4 แบบ ได้แก่ การต้านทานการขัดสี แตกร่วน ดูดซึมน้ำ และแรงกด สุดท้ายศึกษาพฤติกรรมการเผาไหม้เชื้อเพลิงด้วยเทคนิค Thermogravimetric Analysis เพื่อหาเชื้อเพลิงที่เหมาะสมสำหรับโรงไฟฟ้าชีวมวล

ผลการวิจัยพบว่า หญ้าหลายฤดูทั้ง 3 ชนิด ได้แก่ *Pennisetum purpureum* x *P. glaucum* (Pakchong 1) (PC), *Paspalum atratum* (PA), *Panicum maximum* (Mombaza) (MB) มีคุณสมบัติของชีวมวลที่ดีที่สุด มีปริมาณของสารระเหย คาร์บอนคงที่ และลิกนินสูง ในขณะที่มีปริมาณเถ้า ชัลเฟอร์ และไนโตรเจนต่ำ จากผลการศึกษา PA แสดงค่าความร้อนสูงที่สุด (16.67 MJ/kg) รองลงมาคือ PC (16.58 MJ/kg) และ MB (16.46 MJ/kg) ตามลำดับ ซึ่งมีค่าความร้อนสูง

กว่าวัสดุของแกลบผสมไม้ (MHW) (15.8 MJ/kg) ที่นิยมใช้เป็นวัสดุสำหรับโรงไฟฟ้าชีวมวล นอกจากนี้หญ้าทั้ง 3 ชนิดสามารถให้ผลผลิตชีวมวลได้ 3-8 ตัน/ไร่/ปี (18.75-50 ตัน/เฮกตาร์/ปี) จากการศึกษากระบวนการอัดเชื้อเพลิง พบว่า อัตราส่วนที่มีตัวประสาน 40% (โดยน้ำหนัก) จะแสดงดัชนีความทนทาน ค่าความร้อน และความหนาแน่นพลังงานสูงที่สุดอย่างมีนัยสำคัญ อย่างไรก็ตาม การศึกษาต้องพิจารณาปัจจัยอื่นๆ เพื่อเลือกกระบวนการขึ้นรูปที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการผลิตเชื้อเพลิง เช่น ต้นทุนตัวประสาน มาตรฐานความคงทน และการผลิตพลังงานเมื่อเทียบกับการใช้ MHW ดังนั้นจากผลการวิจัยนี้ชี้ให้เห็นว่า อัตราส่วนหญ้าต่อแกลบ 70:30 (wt.) ของทั้งเชื้อเพลิงอัดก้อน และเชื้อเพลิงอัดเม็ดแสดงให้เห็นถึงค่าความร้อนและความหนาแน่นพลังงานใกล้เคียงกับ MHW โดยเชื้อเพลิงอัดก้อนจาก PC (แรงอัด 1 MPa) มีค่าความร้อน 16.4 MJ/kg และความหนาแน่นพลังงาน 3,028 MJ/m<sup>3</sup> ในขณะที่เชื้อเพลิงอัดเม็ดจาก PC แสดงค่าความร้อนเท่ากัน (16.4 MJ/kg) และความหนาแน่นพลังงาน 4,717 MJ/m<sup>3</sup> และเมื่อประเมินศักยภาพการผลิตพลังงานไฟฟ้าของเชื้อเพลิงจากการ พบว่า เชื้อเพลิงอัดเม็ดจาก PC สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ 15.8 MW ตามด้วย เชื้อเพลิงอัดก้อนจาก PC (9.8 MW) และ MHW (8.8 MW) ตามลำดับ โดยเชื้อเพลิงจากหญ้าทั้ง 2 แบบ มีความทนทานเป็นไปตามมาตรฐานทุกตัวชี้วัดสูงกว่า 70% จากการศึกษาพฤติกรรมการเผาไหม้ พบว่า เชื้อเพลิงอัดก้อนและเชื้อเพลิงอัดเม็ดจาก PC แสดงอัตราการเผาไหม้ที่สูงที่สุด คือ 53.89 %/min และ 61.16 %/min ตามลำดับ เมื่อเทียบกับ MHW (23.47 %/min) โดยอัตราการสูญเสียน้ำหนักที่สูงขึ้นนี้สามารถส่งผลให้ความต้องการวัสดุต่ำลง และเพิ่มประสิทธิภาพการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าชีวมวลจากหญ้าหลายฤดูมีศักยภาพในการใช้เป็นวัสดุทางเลือกสำหรับการผลิตพลังงานชีวมวลในด้านคุณสมบัติทางพลังงานและผลผลิตชีวมวล กระบวนการอัดก้อนและอัดเม็ดสามารถเพิ่มคุณสมบัติทางกายภาพของชีวมวลจากหญ้า โดยเฉพาะอย่างยิ่งความหนาแน่นพลังงาน ซึ่งเป็นข้อดีของการผลิตพลังงานความร้อนและพลังงานไฟฟ้าที่เหนือกว่า MHW ที่ใช้กันทั่วไป นอกจากนี้การเพิ่มความหนาแน่นยังสามารถเพิ่มความทนทานของชีวมวลจากหญ้าและเป็นประโยชน์ต่อการจัดเก็บและการจัดการวัสดุสำหรับการใช้งานเป็นเชื้อเพลิง

คำสำคัญ : เชื้อเพลิงชีวมวล, หญ้าพลังงาน, ชีวมวลอัดแข็ง, ดัชนีความคงทน, พลังงานจากหญ้า

|                   |                                                           |              |                          |
|-------------------|-----------------------------------------------------------|--------------|--------------------------|
| <b>TITLE</b>      | Enhancing Energy Performance of Perennial-Grass Feedstock |              |                          |
| <b>AUTHOR</b>     | Pinmanas Wisoram                                          |              |                          |
| <b>ADVISORS</b>   | Wichitra Singhirunnusorn , Ph.D.                          |              |                          |
| <b>DEGREE</b>     | Master of Science                                         | <b>MAJOR</b> | Environmental Technology |
| <b>UNIVERSITY</b> | Maharakham University                                     | <b>YEAR</b>  | 2020                     |

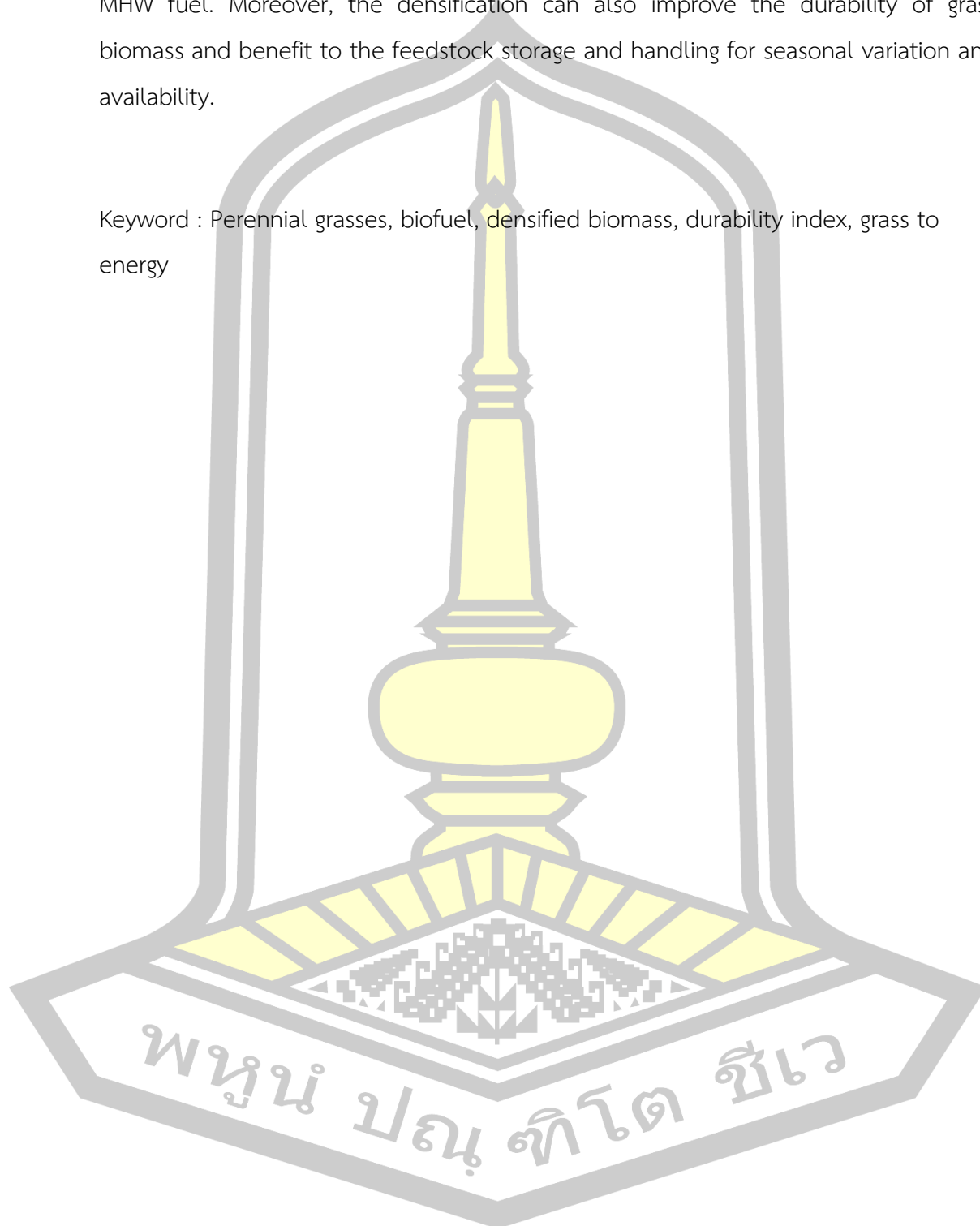
### ABSTRACT

Utilizing perennial grasses as feedstock for bio-power plants has gained more attention due to the rising costs of current biomass materials and their seasonal availability. Despite its high energy content and yield, perennial grasses have some disadvantages such as lower in density and durability. Nevertheless, the improvement of energy density and fuel efficiency can be achieved through the biomass densification approach. The objectives of this study, thus, aims to analyze the proximate compositions and energy contents of perennial grasses; to investigate the producing factors affecting the durability and energy efficiency of densified biomass; and to assess the potential of using perennial grasses as the alternative feedstock for bioenergy production. Using proximate analysis, 10 species of grasses in North-eastern Thailand were examined for moisture, volatile matter, fixed carbon, and ash contents. Fiber contents, High Heat Value (HHV), and elemental properties of grasses were also analyzed. For the biomass densification process, the factors influencing energy density and durability including fuel types, binding agent content, and compressive forces were investigated. Two types of densified biomass, pellet and briquette, were produced by using starch as binding agent with ratio of 0 to 40% (wt.). For briquette samples, the compressive force was varied from 1 to 3 MPa. In terms of densified biomass durability, the research examined four durability indexes including abrasive, impact, compressive, and water resistances. The combustion behaviour of selected fuel samples was examined using Thermogravimetric Analysis.

The research findings show that three species of perennial grasses including *Pennisetum purpureum* x *P. glaucum* (Pakchong 1) (PC), *Paspalum atratum* (PA), *Panicum maximum* (Mombaza) (MB) possess the best quality of biomass fuel in terms of the high contents in fixed carbon, volatile matter, and lignin and lower in ash, sulfur, and nitrogen components. As the results, PA demonstrates the highest HHV (16.67 MJ/kg), followed by PC (16.58 MJ/kg) and MB (16.46 MJ/kg), respectively. These heat values are higher than that of rice husk and wood chip mix (MHW) (15.8 MJ/kg) that is commonly used as feedstock for bio-power plants. In addition, these species can yield 3-8 T/rai/year (18.75-50 T/ha/year). For the densification process, although the briquette and pellet samples containing 40% (wt.) binding agent show the significantly high levels of durability indexes, heat values, and energy density, the study also considers other factors in order to select the most suitable conditions for fuel production such as binder cost, durability standard, and energy production compared to the use of MHW. Therefore, the results suggests that the 70:30 (wt.) grass dry mass to starch ratio of both briquettes and pellets demonstrate the comparable values of heat and energy density to MHW. The PC briquettes (compressed force 1 MPa) contain HHV of 16.4 MJ/kg and energy density of 3,028 MJ/m<sup>3</sup>, meanwhile PC pellets have the same HHV (16.4 MJ/kg) and higher energy density 4,717 MJ/m<sup>3</sup>. To evaluate the power generation from biomass feedstock, the study used estimating equations and found that PC pellet can used to generate 15.8 MW of electricity followed by PC briquettes (9.8 MW) and MHW (8.8 MW), respectively. The durability of these two products also meets the durability standards with all resistant indexes higher than 70%. In terms of combustion behavior, the study finds that PC briquettes and PC pellets provide the higher maximum combustion rate of 53.89 and 61.16 %/min compared to that of MHW (23.47 %/min.). This higher rate of weight loss can contribute to the lower requirement of feedstock and the enhancement of fuel combustion efficiency. In conclusion, the biomass from perennial grasses has the potential of being used as alternative feedstock for bioenergy production due to the energy properties and yields. The densification process of both briquette and pellet can enhance the physical properties of grass biomass, in particular energy density, which provides the

advantages of heat production and electricity generation over the commonly used MHW fuel. Moreover, the densification can also improve the durability of grass biomass and benefit to the feedstock storage and handling for seasonal variation and availability.

Keyword : Perennial grasses, biofuel, densified biomass, durability index, grass to energy



## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จสมบูรณ์ได้ด้วยความเมตตากรุณาบุคคลหลายฝ่าย ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณท่านอาจารย์ ดร.วิจิตรา สิงห์หิรัญสุนทรณ์ (อาจารย์ที่ปรึกษาการวิจัย) ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นิพนธ์ ต้นไพบูลย์กุล ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พลกฤษณ์ จิตรโธ รองศาสตราจารย์ ดร.ชูลีมาศ บุญไทย อิวาย และอาจารย์ ดร.วิญญา ดุงแก้ว กรรมการวิทยานิพนธ์ ที่เสียสละเวลาให้ข้อคิดเห็นและคำแนะนำ ตลอดจนแนะนำเอกสารอ้างอิงมาเสริมแนวทางการทำวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้ นอกจากนี้ยังขอขอบพระคุณอาจารย์ผู้สอนทุกท่านที่ได้ให้ความรู้ด้านวิชาการ และได้ตรวจสอบวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนเสร็จสมบูรณ์ ตลอดจนแนวคิดที่เป็นประโยชน์ต่อการทำการวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณมหาวิทยาลัยมหาสารคาม ที่สนับสนุนทุนวิจัยเพื่อพัฒนานิสิตระดับบัณฑิตศึกษา (ปริญญาโท) งบประมาณเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2562 มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

ขอขอบพระคุณสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ที่สนับสนุนทุนอุดหนุนกิจกรรมส่งเสริมและสนับสนุนการวิจัย แผนงานเสริมสร้างศักยภาพและพัฒนานักวิจัยรุ่นใหม่ ตามทิศทางยุทธศาสตร์การวิจัยและนวัตกรรม: ประเทบัณฑิตศึกษา ปีงบประมาณ 2562

ขอขอบพระคุณบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ที่ให้ทุนสนับสนุนการนำเสนอผลงานวิจัยในต่างประเทศ ในการประชุมวิชาการและนำเสนอผลงานวิจัยระดับนานาชาติ (STISWB 2019) ครั้งที่ 11 ณ ประเทศมาเลเซีย

ขอขอบพระคุณ คุณอรณี สำราญรื่น (เจ้าของหยกฟาร์ม จังหวัดกาฬสินธุ์), ศูนย์วิจัยและพัฒนามาตรฐานอาหารสัตว์เคี้ยวเอื้อง จังหวัดขอนแก่น, หน่วยผลิตพันธุ์พืชอาหารสัตว์ อำเภอกุดรัง และสถานีวิจัยและพัฒนาอาหารสัตว์มหาสารคาม จังหวัดมหาสารคาม ที่สนับสนุนและให้ความช่วยเหลือเกี่ยวกับข้อมูลและเก็บตัวอย่างหญ้าหลายฤดูทั้ง 10 ชนิดที่นำมาศึกษาในครั้งนี้

ขอขอบพระคุณศูนย์วิทยาการการวิจัยเพื่อความยั่งยืนทางสิ่งแวดล้อม (MRCES) ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำปรึกษาพร้อมทั้งสนับสนุนการวิจัยตลอดระยะเวลาการดำเนินการวิจัย

ขอขอบพระคุณคณะสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรศาสตร์และขอขอบพระคุณบุคลากรจากห้องปฏิบัติการที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือและห้องปฏิบัติการ

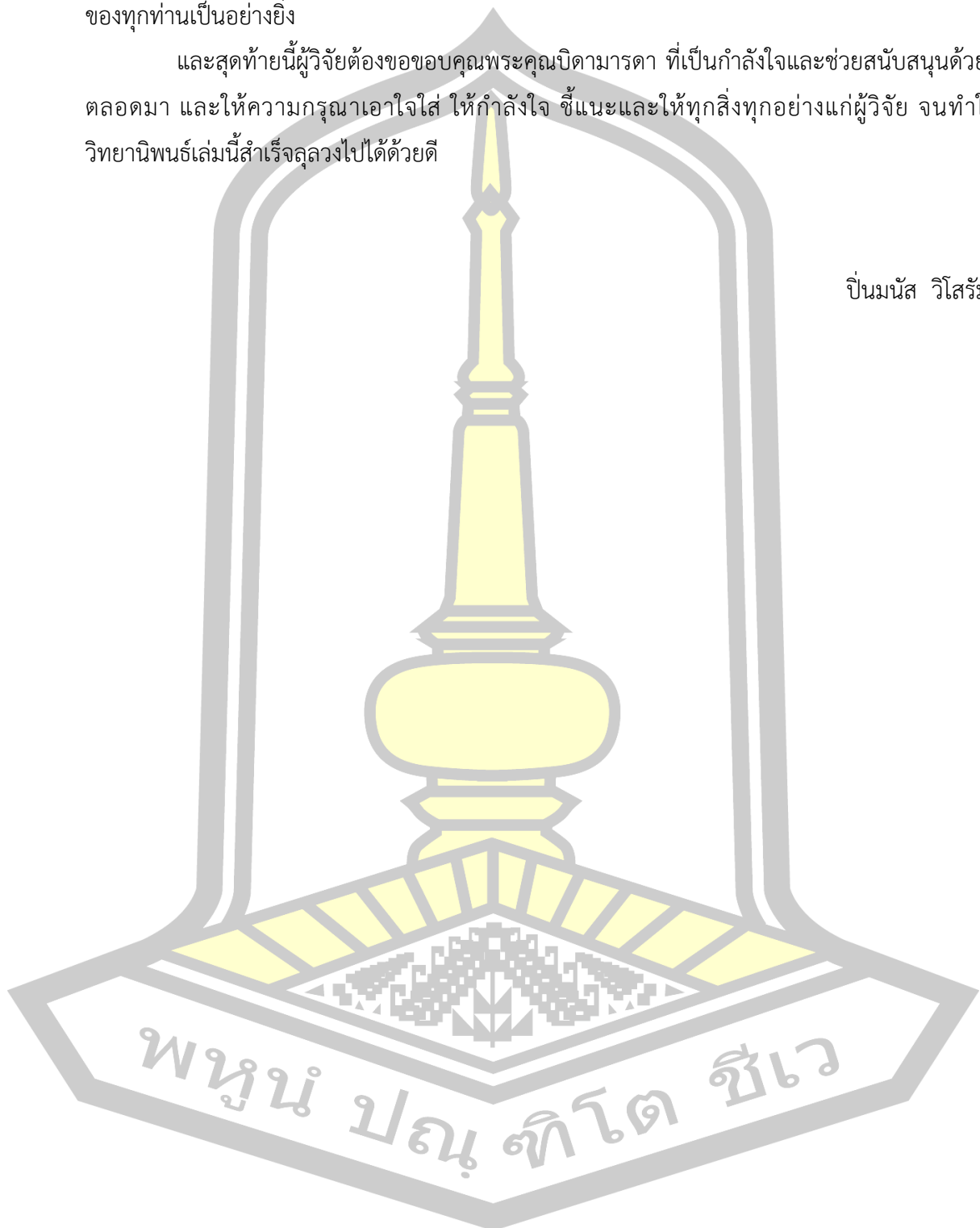
ขอขอบพระคุณ ผู้ที่เป็นเจ้าของแนวคิด และทฤษฎีต่างๆของวิทยานิพนธ์งานวิจัย วารสารและบทความ ที่ผู้ศึกษาได้นำมาอ้างอิงในงานวิทยานิพนธ์ครั้งนี้

ขอขอบพระคุณเพื่อน พี่ และน้อง ที่มีส่วนให้ความช่วยเหลือ ให้คำปรึกษา กำลังใจ ข้อเสนอแนะทุกอย่างแก่ผู้วิจัย จนทำให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จไปได้ด้วยดี ตลอดจนบุคคลต่างๆที่ให้ความช่วยเหลือ

อีกมาก ที่ผู้วิจัยไม่สามารถกล่าวนามได้หมดในที่นี้ ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความกรุณาและความปรารถนาดี  
ของทุกท่านเป็นอย่างยิ่ง

และสุดท้ายนี้ผู้วิจัยต้องขอขอบคุณพระคุณบิดามารดา ที่เป็นกำลังใจและช่วยสนับสนุนด้วยดี  
ตลอดมา และให้ความกรุณาเอาใจใส่ ให้กำลังใจ ชี้แนะและให้ทุกสิ่งทุกอย่างแก่ผู้วิจัย จนทำให้  
วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

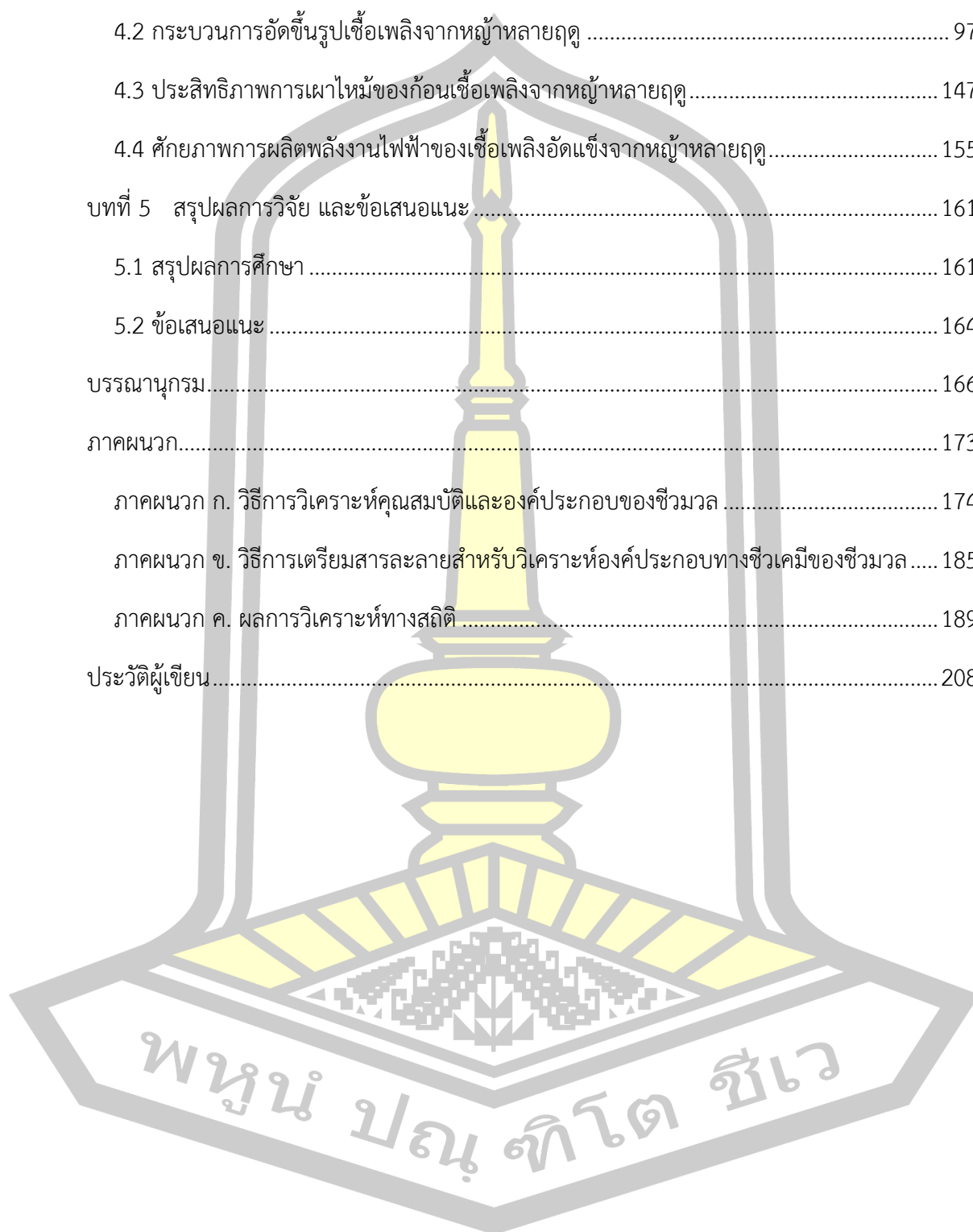
ปิ่นมณัส วิโสรัมย์



## สารบัญ

|                                                | หน้า |
|------------------------------------------------|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย.....                           | ง    |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....                        | ฉ    |
| กิตติกรรมประกาศ.....                           | ฌ    |
| สารบัญ.....                                    | ฎ    |
| สารบัญภาพประกอบ.....                           | ฐ    |
| สารบัญตาราง.....                               | ด    |
| บทที่ 1 บทนำ.....                              | 1    |
| 1.1 ที่มาและความสำคัญ .....                    | 1    |
| 1.2 วัตถุประสงค์ในการศึกษา.....                | 2    |
| 1.3 ขอบเขตการศึกษา.....                        | 2    |
| 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....             | 4    |
| 1.5 กรอบแนวคิดในการศึกษาวิจัย .....            | 4    |
| บทที่ 2 ปริทัศน์เอกสารข้อมูล.....              | 5    |
| 2.1 แหล่งพลังงานชีวมวล.....                    | 5    |
| 2.2 กระบวนการแปรรูปชีวมวลเพื่อผลิตพลังงาน..... | 33   |
| 2.3 เทคโนโลยีการผลิตเชื้อเพลิง.....            | 34   |
| 2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....                 | 44   |
| บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....                | 46   |
| 3.1 การเตรียมวัสดุและอุปกรณ์การทดลอง.....      | 47   |
| 3.2 วิธีการวิเคราะห์และการทดลอง .....          | 54   |
| บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปราย .....          | 71   |

|                                                                                    |     |
|------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 4.1 คุณสมบัติและองค์ประกอบเบื้องต้นของหญ้าหลายฤดู.....                             | 71  |
| 4.2 กระบวนการอัดขึ้นรูปเชื้อเพลิงจากหญ้าหลายฤดู .....                              | 97  |
| 4.3 ประสิทธิภาพการเผาไหม้ของก้อนเชื้อเพลิงจากหญ้าหลายฤดู.....                      | 147 |
| 4.4 ศักยภาพการผลิตพลังงานไฟฟ้าของเชื้อเพลิงอัดแข็งจากหญ้าหลายฤดู.....              | 155 |
| บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ .....                                         | 161 |
| 5.1 สรุปผลการศึกษา .....                                                           | 161 |
| 5.2 ข้อเสนอแนะ .....                                                               | 164 |
| บรรณานุกรม.....                                                                    | 166 |
| ภาคผนวก.....                                                                       | 173 |
| ภาคผนวก ก. วิธีการวิเคราะห์คุณสมบัติและองค์ประกอบของชีวมวล .....                   | 174 |
| ภาคผนวก ข. วิธีการเตรียมสารละลายสำหรับวิเคราะห์องค์ประกอบทางชีวเคมีของชีวมวล ..... | 185 |
| ภาคผนวก ค. ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ .....                                            | 189 |
| ประวัติผู้เขียน.....                                                               | 208 |



## สารบัญภาพประกอบ

|                                                                                               |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ภาพประกอบ 1 กรอบแนวคิดในการวิจัย .....                                                        | 4  |
| ภาพประกอบ 2 วัสดุที่ใช้เป็นพลังงานชีวมวล .....                                                | 6  |
| ภาพประกอบ 3 วงจรของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในกระบวนการผลิตพลังงานจากชีวมวล.....                   | 7  |
| ภาพประกอบ 4 องค์ประกอบทางชีวเคมีของพืช .....                                                  | 9  |
| ภาพประกอบ 5 องค์ประกอบธาตุหลักของเชื้อเพลิงชีวมวล .....                                       | 12 |
| ภาพประกอบ 6 สัดส่วนองค์ประกอบทางพลังงานของชีวมวล .....                                        | 13 |
| ภาพประกอบ 7 ปริมาณที่ใช้ในการวิเคราะห์หองค์ประกอบของเชื้อเพลิงแข็งโดยการประมาณค่า....         | 17 |
| ภาพประกอบ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนต่ำและค่าความร้อนสูง.....                           | 19 |
| ภาพประกอบ 9 หลักการทำงานของ Thermo gravimetric Analysis (TGA).....                            | 22 |
| ภาพประกอบ 10 การวิเคราะห์หองค์ประกอบเชิงประมาณของชีวมวล โดยใช้เครื่อง TGA .....               | 22 |
| ภาพประกอบ 11 เทคโนโลยีที่ใช้ในการแปลงสภาพชีวมวลเป็นพลังงาน.....                               | 34 |
| ภาพประกอบ 12 กระบวนการผลิตเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด .....                                       | 35 |
| ภาพประกอบ 13 ผังขั้นตอนการทดลอง.....                                                          | 46 |
| ภาพประกอบ 14 หญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 (Pennisetum purpureum x P. glaucum (Pakchong 1); PC) ..... | 49 |
| ภาพประกอบ 15 หญ้าเนเปียร์ธรรมดา (Pennisetum purpureum; PP).....                               | 49 |
| ภาพประกอบ 16 หญ้าเนเปียร์สีม่วง (Pennisetum purpureum (Prince); PR) .....                     | 49 |
| ภาพประกอบ 17 หญ้าเนเปียร์สุราษฎร์ 1 (Pennisetum purpureum (Surat 1); PS).....                 | 50 |
| ภาพประกอบ 18 หญ้าเนเปียร์แคระ (Pennisetum purpureum (Mott); PM) .....                         | 50 |
| ภาพประกอบ 19 หญ้าอู่มากู (Panicum maximum (Umaku); UM) .....                                  | 50 |
| ภาพประกอบ 20 หญ้ากินนีมอมบาซ่า (Panicum maximum (Mombaza); MB) .....                          | 51 |
| ภาพประกอบ 21 หญ้าอะตราดัม (Paspalum atratum; PA) .....                                        | 51 |
| ภาพประกอบ 22 หญ้าตาเรียสเปลนดา (Setaria sphacelata (Splenda); SS).....                        | 51 |

|              |                                                                              |     |
|--------------|------------------------------------------------------------------------------|-----|
| ภาพประกอบ 23 | หญ้าหวานอิสราเอล ( <i>Pennisetum purpureum</i> (Mahasarakham); MS).....      | 52  |
| ภาพประกอบ 24 | ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างหญ้าขนาด 3 มิลลิเมตร.....                            | 53  |
| ภาพประกอบ 25 | ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างหญ้าขนาดบดผงละเอียด.....                             | 53  |
| ภาพประกอบ 26 | ขั้นตอนการเตรียมตัวประสาน .....                                              | 54  |
| ภาพประกอบ 27 | เทคโนโลยีการอัดขึ้นรูปเชื้อเพลิง Briquettes .....                            | 57  |
| ภาพประกอบ 28 | เทคโนโลยีการอัดขึ้นรูปเชื้อเพลิง Pellet .....                                | 57  |
| ภาพประกอบ 29 | ขั้นตอนการอัดขึ้นรูปก้อนเชื้อเพลิง Briquettes .....                          | 59  |
| ภาพประกอบ 30 | ขั้นตอนการอัดขึ้นรูปก้อนเชื้อเพลิง Pellet.....                               | 60  |
| ภาพประกอบ 31 | เครื่อง Mettler Toledo: TGA 2.....                                           | 69  |
| ภาพประกอบ 32 | องค์ประกอบโดยประมาณ (Proximate Property) ของหญ้าหลายฤดู.....                 | 78  |
| ภาพประกอบ 33 | ปริมาณความชื้นในส่วนลำต้นและใบของหญ้าหลายฤดู .....                           | 81  |
| ภาพประกอบ 34 | ปริมาณสารระเหยง่ายในส่วนลำต้นและใบของหญ้าหลายฤดู .....                       | 81  |
| ภาพประกอบ 35 | ปริมาณคาร์บอนคงตัวในส่วนลำต้นและใบของหญ้าหลายฤดู .....                       | 82  |
| ภาพประกอบ 36 | ปริมาณเถ้าในส่วนลำต้นและใบของหญ้าหลายฤดู .....                               | 82  |
| ภาพประกอบ 37 | ค่าความร้อนสูงของหญ้าหลายฤดู.....                                            | 85  |
| ภาพประกอบ 38 | เปรียบเทียบค่าความร้อนระหว่างหญ้า 4 ชนิดและวัสดุปัจจุบันที่โรงไฟฟ้าใช้ ..... | 87  |
| ภาพประกอบ 39 | องค์ประกอบเยื่อใยของหญ้าหลายฤดู.....                                         | 90  |
| ภาพประกอบ 40 | ปริมาณเซลลูโลสในส่วนลำต้นและใบของหญ้าหลายฤดู.....                            | 92  |
| ภาพประกอบ 41 | ปริมาณเฮมิเซลลูโลสในส่วนลำต้นและใบของหญ้าหลายฤดู.....                        | 92  |
| ภาพประกอบ 42 | ปริมาณลิกนินของหญ้าหลายฤดู.....                                              | 93  |
| ภาพประกอบ 43 | องค์ประกอบทางเคมีของหญ้าหลายฤดู.....                                         | 96  |
| ภาพประกอบ 44 | เชื้อเพลิง pellets อัตราส่วน 100:0 ไม่สามารถขึ้นรูปได้.....                  | 99  |
| ภาพประกอบ 45 | เชื้อเพลิง briquettes อัตราส่วน 100:0 ไม่สามารถขึ้นรูปได้.....               | 99  |
| ภาพประกอบ 46 | ความหนาแน่นรวมของเชื้อเพลิง pellets จากหญ้าหลายฤดู.....                      | 102 |

|                                                                                                                                 |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| ภาพประกอบ 47 ความหนาแน่นรวมของเชื้อเพลิง briquettes กำลังอัด 1 MPa.....                                                         | 103 |
| ภาพประกอบ 48 ความหนาแน่นรวมของเชื้อเพลิง briquettes กำลังอัด 2 MPa.....                                                         | 103 |
| ภาพประกอบ 49 ความหนาแน่นรวมของเชื้อเพลิง briquettes กำลังอัด 3 MPa.....                                                         | 104 |
| ภาพประกอบ 50 เปรียบเทียบความหนาแน่นรวมของอัตราส่วนตัวประสานที่เหมาะสมที่สุดในการขึ้นรูปด้วยกำลังอัด 1 MPa, 2 MPa และ 3 MPa..... | 105 |
| ภาพประกอบ 51 ความหนาแน่นก้อนของเชื้อเพลิง pellets.....                                                                          | 106 |
| ภาพประกอบ 52 ความหนาแน่นก้อนของเชื้อเพลิง briquettes กำลังอัด 1 MPa.....                                                        | 108 |
| ภาพประกอบ 53 ความหนาแน่นก้อนของเชื้อเพลิง briquettes กำลังอัด 2 MPa.....                                                        | 108 |
| ภาพประกอบ 54 ความหนาแน่นก้อนของเชื้อเพลิง briquettes กำลังอัด 3 MPa.....                                                        | 109 |
| ภาพประกอบ 55 การต้านทานการขัดสีของเชื้อเพลิง pellets.....                                                                       | 114 |
| ภาพประกอบ 56 การต้านทานการขัดสีของเชื้อเพลิง briquettes กำลังอัด 1 MPa.....                                                     | 114 |
| ภาพประกอบ 57 การต้านทานการขัดสีของเชื้อเพลิง briquettes กำลังอัด 2 MPa.....                                                     | 115 |
| ภาพประกอบ 58 การต้านทานการขัดสีของเชื้อเพลิง briquettes กำลังอัด 3 MPa.....                                                     | 115 |
| ภาพประกอบ 59 การต้านทานการแตกร่วนของเชื้อเพลิง pellets.....                                                                     | 119 |
| ภาพประกอบ 60 การต้านทานการแตกร่วนของเชื้อเพลิง briquettes กำลังอัด 1 MPa.....                                                   | 119 |
| ภาพประกอบ 61 การต้านทานการแตกร่วนของเชื้อเพลิง briquettes กำลังอัด 2 MPa.....                                                   | 120 |
| ภาพประกอบ 62 การต้านทานการแตกร่วนของเชื้อเพลิง briquettes กำลังอัด 3 MPa.....                                                   | 120 |
| ภาพประกอบ 63 การรับแรงกดของเชื้อเพลิง pellets.....                                                                              | 123 |
| ภาพประกอบ 64 การรับแรงกดของเชื้อเพลิง briquettes กำลังอัด 1 MPa.....                                                            | 124 |
| ภาพประกอบ 65 การรับแรงกดของเชื้อเพลิง briquettes กำลังอัด 2 MPa.....                                                            | 124 |
| ภาพประกอบ 66 การรับแรงกดของเชื้อเพลิง briquettes กำลังอัด 3 MPa.....                                                            | 125 |
| ภาพประกอบ 67 ลักษณะเชื้อเพลิงที่ไม่สามารถทนต่อการดูดซึมน้ำ.....                                                                 | 127 |
| ภาพประกอบ 68 การต้านทานการดูดซึมน้ำของเชื้อเพลิง pellets.....                                                                   | 129 |
| ภาพประกอบ 69 การต้านทานการดูดซึมน้ำของเชื้อเพลิง briquettes กำลังอัด 1 MPa.....                                                 | 129 |

|              |                                                                        |     |
|--------------|------------------------------------------------------------------------|-----|
| ภาพประกอบ 70 | การต้านทานการดูดซึมน้ำของเชื้อเพลิง briquettes กำลังอัด 2 MPa .....    | 130 |
| ภาพประกอบ 71 | การต้านทานการดูดซึมน้ำของเชื้อเพลิง briquettes กำลังอัด 3 MPa .....    | 130 |
| ภาพประกอบ 72 | ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากหญ้าหลายฤดู.....                     | 133 |
| ภาพประกอบ 73 | ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง briquettes จากหญ้าหลายฤดู กำลังอัด 1 MPa .... | 134 |
| ภาพประกอบ 74 | ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง briquettes จากหญ้าหลายฤดู กำลังอัด 2 MPa .... | 134 |
| ภาพประกอบ 75 | ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง briquettes จากหญ้าหลายฤดู กำลังอัด 3 MPa .... | 135 |
| ภาพประกอบ 76 | ความหนาแน่นพลังงานของเชื้อเพลิง Pellet.....                            | 139 |
| ภาพประกอบ 77 | ความหนาแน่นพลังงานของเชื้อเพลิง briquettes กำลังอัด 1 MPa .....        | 139 |
| ภาพประกอบ 78 | ความหนาแน่นพลังงานของเชื้อเพลิง briquettes กำลังอัด 2 MPa .....        | 140 |
| ภาพประกอบ 79 | ความหนาแน่นพลังงานของเชื้อเพลิง briquettes กำลังอัด 3 MPa .....        | 140 |
| ภาพประกอบ 80 | กำลังอัดขึ้นรูปของเชื้อเพลิงจากหญ้ากินนีอมบาซ่า .....                  | 143 |
| ภาพประกอบ 81 | กำลังอัดขึ้นรูปของเชื้อเพลิงจากหญ้าอะตราดัม .....                      | 143 |
| ภาพประกอบ 82 | กำลังอัดขึ้นรูปของเชื้อเพลิงจากหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 .....             | 144 |
| ภาพประกอบ 83 | ลักษณะการเผาไหม้และการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิใน PC (70:30)-P.....          | 148 |
| ภาพประกอบ 84 | ลักษณะการเผาไหม้และการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิใน PC (70:30)-B1 .....        | 149 |
| ภาพประกอบ 85 | ลักษณะการเผาไหม้และการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิใน แกลบ:ไม้ (50:50) .....     | 150 |
| ภาพประกอบ 86 | อัตราการเผาไหม้เชื้อเพลิงอัด PC (70:30)-P .....                        | 153 |
| ภาพประกอบ 87 | อัตราการเผาไหม้เชื้อเพลิงอัด PC (70:30)-B1 .....                       | 153 |
| ภาพประกอบ 88 | อัตราการเผาไหม้เชื้อเพลิงแกลบ:ไม้ (50:50).....                         | 154 |
| ภาพประกอบ 89 | ศักยภาพการผลิตพลังงานความร้อนต่อน้ำหนักของเชื้อเพลิง.....              | 157 |
| ภาพประกอบ 90 | ศักยภาพการผลิตพลังงานไฟฟ้าต่อน้ำหนักของเชื้อเพลิง .....                | 157 |
| ภาพประกอบ 91 | ศักยภาพการผลิตพลังงานความร้อนต่อปริมาตรของเชื้อเพลิง .....             | 159 |
| ภาพประกอบ 92 | ศักยภาพการผลิตพลังงานไฟฟ้าต่อปริมาตรของเชื้อเพลิง .....                | 159 |

## สารบัญตาราง

|                                                                                                                                      |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ตาราง 1 ส่วนประกอบหลักของชีวมวล.....                                                                                                 | 9  |
| ตาราง 2 กลุ่มโมเลกุลขนาดใหญ่ที่สร้างขึ้นเป็นชีวมวล.....                                                                              | 10 |
| ตาราง 3 ส่วนประกอบลิกโนเซลลูโลสของชีวมวล (Dry basis).....                                                                            | 11 |
| ตาราง 4 การวิเคราะห์ชีวมวลโดยการประมาณค่าของชีวมวลชนิดต่าง ๆ.....                                                                    | 17 |
| ตาราง 5 การวิเคราะห์เชื้อเพลิงชีวมวลแบบแยกธาตุของชีวมวลชนิดต่าง ๆ.....                                                               | 18 |
| ตาราง 6 ค่าความร้อนของชีวมวลชนิดต่างๆ ในหน่วย MJ/kg.....                                                                             | 20 |
| ตาราง 7 พันธุ์พืชอาหารสัตว์ที่เพาะปลูกในประเทศไทย.....                                                                               | 23 |
| ตาราง 8 ปริมาณผลผลิตชีวมวลน้ำหนักแห้งและองค์ประกอบโดยประมาณของหญ้าหลายฤดู.....                                                       | 32 |
| ตาราง 9 องค์ประกอบเยื่อใยและองค์ประกอบธาตุของหญ้าหลายฤดู.....                                                                        | 33 |
| ตาราง 10 ความเหมาะสมของปัจจัยการผลิตที่ส่งผลต่อความแข็งแรงและความคงทน.....                                                           | 42 |
| ตาราง 11 หญ้าหลายฤดูทั้ง 10 ชนิด ในพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย.....                                                     | 48 |
| ตาราง 12 จำนวนชุดการทดลองของปัจจัยที่ใช้ในการอัดขึ้นรูปของก้อนเชื้อเพลิงอัดแข็ง.....                                                 | 61 |
| ตาราง 13 ปริมาณความชื้นภายนอกและสัดส่วนของลำต้น-ใบ ของหญ้าหลายฤดูแต่ละชนิด.....                                                      | 73 |
| ตาราง 14 ปริมาณผลผลิตน้ำหนักสดของหญ้าหลายฤดูทั้ง 10 ชนิด.....                                                                        | 75 |
| ตาราง 15 องค์ประกอบโดยประมาณ (Proximate Property) ของหญ้าหลายฤดู.....                                                                | 77 |
| ตาราง 16 ผลการทดสอบทางสถิติ (ANOVA test) และ Scheffe test ขององค์ประกอบโดยประมาณ (Proximate analysis) ในหญ้าหลายฤดูทั้ง 10 ชนิด..... | 79 |
| ตาราง 17 องค์ประกอบโดยประมาณ (Proximate Property) ในส่วนลำต้นและใบของหญ้าหลายฤดู.....                                                | 80 |
| ตาราง 18 ค่าความร้อนสูง (High Heat Value: HHV) ของหญ้าหลายฤดู.....                                                                   | 83 |
| ตาราง 19 ผลการทดสอบทางสถิติ (ANOVA test) และ Scheffe test ของค่าความร้อนในหญ้าหลายฤดูทั้ง 10 ชนิด.....                               | 84 |
| ตาราง 20 ค่าความร้อนสูง (High Heat Value: HHV) ในส่วนลำต้นและใบของหญ้าหลายฤดู.....                                                   | 86 |

|                                                                                                                                |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| ตาราง 21 องค์ประกอบเยื่อใย (Lignocellulose) ของหญ้าหลายฤดู.....                                                                | 88  |
| ตาราง 22 ผลการทดสอบทางสถิติ (ANOVA test) และ Scheffe test ขององค์ประกอบเยื่อใย (Lignocellulose) ในหญ้าหลายฤดูทั้ง 10 ชนิด..... | 89  |
| ตาราง 23 องค์ประกอบเยื่อใยในส่วนลำต้นและใบของหญ้าหลายฤดู .....                                                                 | 91  |
| ตาราง 24 ปริมาณผลผลิตชีวมวลน้ำหนักแห้งของหญ้าหลายฤดู.....                                                                      | 94  |
| ตาราง 25 องค์ประกอบทางเคมี (Ultimate) ของหญ้าหลายฤดู.....                                                                      | 95  |
| ตาราง 26 องค์ประกอบธาตุของหญ้าหลายฤดูชนิดอื่นๆ.....                                                                            | 97  |
| ตาราง 27 ความหนาแน่นรวม (Bulk Density) ของเชื้อเพลิงอัดแข็ง.....                                                               | 100 |
| ตาราง 28 ความหนาแน่นก้อน (Pellets and Briquettes Density) ของเชื้อเพลิงอัดแข็ง .....                                           | 107 |
| ตาราง 29 คุณสมบัติการต้านทานการขัดสี (Abrasion Resistance) ของเชื้อเพลิงอัดแข็ง.....                                           | 111 |
| ตาราง 30 คุณสมบัติการต้านทานการแตกร่วน (Impact resistance) ของเชื้อเพลิงอัดแข็ง.....                                           | 117 |
| ตาราง 31 คุณสมบัติการรับแรงกด (Compressive resistance) ของเชื้อเพลิงอัดแข็ง .....                                              | 122 |
| ตาราง 32 คุณสมบัติการต้านทานการดูดซึมน้ำ (Water resistance) ของเชื้อเพลิงอัดแข็ง.....                                          | 128 |
| ตาราง 33 ค่าความร้อน (High heat value: HHV) ของเชื้อเพลิงอัดแข็งจากหญ้าหลายฤดู .....                                           | 132 |
| ตาราง 34 ความหนาแน่นพลังงาน (Energy Density) ของเชื้อเพลิงอัดแข็ง.....                                                         | 138 |
| ตาราง 35 เปรียบเทียบศักยภาพการผลิตพลังงานไฟฟ้าของเชื้อเพลิงอัดแข็งจากหญ้าหลายฤดูและเชื้อเพลิงปัจจุบันที่โรงไฟฟ้าใช้ .....      | 145 |
| ตาราง 36 ช่วงอุณหภูมิการสูญเสียน้ำหนักของเชื้อเพลิงชีวมวล.....                                                                 | 147 |
| ตาราง 37 ปริมาณน้ำหนักที่สูญเสียไปจากการทดสอบด้วย TGA.....                                                                     | 148 |
| ตาราง 38 คุณสมบัติของตัวอย่างในกระบวนการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งด้วยเทคนิค TGA.....                                               | 151 |
| ตาราง 39 ศักยภาพพลังงานความร้อนและพลังงานไฟฟ้าของเชื้อเพลิงอัดแข็งต่อน้ำหนัก .....                                             | 156 |
| ตาราง 40 ศักยภาพพลังงานความร้อนและพลังงานไฟฟ้าของเชื้อเพลิงอัดแข็งต่อปริมาตร .....                                             | 158 |
| ตาราง 41 ผลการทดสอบทางสถิติ (ANOVA test) และ Scheffe test ของค่าเฉลี่ยความหนาแน่นในอัตราส่วนตัวประสานของเชื้อเพลิงอัดแข็ง..... | 190 |

|                                                                                                                                                      |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>ตาราง 42</b> ผลการทดสอบทางสถิติ ANOVA test และ T-test และ Scheffe test ของค่าเฉลี่ยความหนาแน่นในกำลังอัดการขึ้นรูปของเชื้อเพลิงอัด.....           | 191 |
| <b>ตาราง 43</b> ผลการทดสอบทางสถิติ (T-test) ของค่าเฉลี่ยความหนาแน่นในรูปทรงของเชื้อเพลิงอัดแข็ง .....                                                | 192 |
| <b>ตาราง 44</b> ผลการทดสอบทางสถิติ (ANOVA test) และ Scheffe test ของค่าเฉลี่ยการต้านทานการขัดสีในอัตราส่วนตัวประสานของเชื้อเพลิงอัดแข็ง.....         | 193 |
| <b>ตาราง 45</b> ผลการทดสอบทางสถิติ (ANOVA test และ T-test) และ Scheffe test ของค่าเฉลี่ยการต้านทานการขัดสีในกำลังอัดการขึ้นรูปของเชื้อเพลิง.....     | 194 |
| <b>ตาราง 46</b> ผลการทดสอบทางสถิติ (T-test) ของค่าเฉลี่ยการต้านทานการขัดสีในรูปทรงของเชื้อเพลิง .....                                                | 195 |
| <b>ตาราง 47</b> ผลการทดสอบทางสถิติ (ANOVA test) และ Scheffe test ของค่าเฉลี่ยการต้านทานการแตกร่วนในอัตราส่วนตัวประสานของเชื้อเพลิง .....             | 196 |
| <b>ตาราง 48</b> ผลการทดสอบทางสถิติ (ANOVA test และ T-test) และ Scheffe test ของค่าเฉลี่ยการต้านทานการแตกร่วนในกำลังอัดการขึ้นรูปของเชื้อเพลิง .....  | 197 |
| <b>ตาราง 49</b> ผลการทดสอบทางสถิติ (T-test) ของค่าเฉลี่ยการต้านทานการแตกร่วนในรูปทรงของเชื้อเพลิงอัดแข็ง.....                                        | 198 |
| <b>ตาราง 50</b> ผลการทดสอบทางสถิติ (ANOVA test) และ Scheffe test ของค่าเฉลี่ยการรับแรงกดในอัตราส่วนตัวประสานของเชื้อเพลิงอัดแข็ง .....               | 199 |
| <b>ตาราง 51</b> ผลการทดสอบทางสถิติ (ANOVA test และ T-test) และ Scheffe test ของค่าเฉลี่ยการรับแรงกดในกำลังอัดการขึ้นรูปของเชื้อเพลิง .....           | 200 |
| <b>ตาราง 52</b> ผลการทดสอบทางสถิติ (T-test) ของค่าเฉลี่ยการรับแรงกดในรูปทรงของเชื้อเพลิงอัดแข็ง .....                                                | 201 |
| <b>ตาราง 53</b> ผลการทดสอบทางสถิติ (ANOVA test) และ Scheffe test ของค่าเฉลี่ยการต้านทานการดูดซึมน้ำในอัตราส่วนตัวประสานของเชื้อเพลิง.....            | 202 |
| <b>ตาราง 54</b> ผลการทดสอบทางสถิติ (ANOVA test และ T-test) และ Scheffe test ของค่าเฉลี่ยการต้านทานการดูดซึมน้ำในกำลังอัดการขึ้นรูปของเชื้อเพลิง..... | 203 |

|                                                                                                                                                |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| ตาราง 55 ผลการทดสอบทางสถิติ (T-test) ของค่าเฉลี่ยการต้านทานการดูดซึมน้ำในรูปทรงของ<br>เชื้อเพลิงอัดแข็ง.....                                   | 204 |
| ตาราง 56 ผลการทดสอบทางสถิติ (ANOVA test) และ Scheffe test ของค่าเฉลี่ยความหนาแน่น<br>พลังงานในอัตราส่วนตัวประสานของเชื้อเพลิง.....             | 205 |
| ตาราง 57 ผลการทดสอบทางสถิติ (ANOVA test และ T-test) และ Scheffe test ของค่าเฉลี่ย<br>ความหนาแน่นพลังงานในกำลังอัดการขึ้นรูปของเชื้อเพลิง ..... | 206 |
| ตาราง 58 ผลการทดสอบทางสถิติ (T-test) ของค่าเฉลี่ยความหนาแน่นพลังงานในรูปทรงของ<br>เชื้อเพลิงอัดแข็ง.....                                       | 207 |



## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ชีวมวลถือเป็นแหล่งพลังงานรูปแบบใหม่ที่สามารถนำมาพัฒนาให้เกิดประโยชน์ทางด้านการผลิตพลังงานทดแทน ในช่วงแรกพลังงานชีวภาพส่วนใหญ่ผลิตมาจากกลุ่มของพืชที่ถูกนำมาใช้เป็นอาหาร หรือเชื้อเพลิงชีวภาพรุ่นแรก (First- Generation Biofuels) ต่อมาเริ่มมีความตระหนักถึงประเด็นของผลกระทบต่อความมั่นคงทางอาหารในแง่ของต่อปริมาณและราคา จึงหันมาสนใจกลุ่มของพืชและวัตถุดิบที่ไม่ถูกนำมาใช้เป็นอาหาร หรือ เชื้อเพลิงชีวภาพรุ่นที่สอง (Second-Generation Biofuels: SGBs) ได้แก่ พืชวัสดุเหลือใช้จากการทำเกษตรกรรม (agricultural waste), วัสดุเหลือใช้จากอุตสาหกรรม (industrial waste) และพืชพลังงานอื่นๆ เช่น หญ้าพลังงาน เป็นต้น

สำหรับในประเทศไทยนั้นพบว่ามี การนำพืชตระกูลหญ้าหลายฤดู (Perennial Grasses) ซึ่งจัดอยู่ในกลุ่มของเชื้อเพลิงชีวภาพรุ่นที่สองนำมาผลิตพลังงานทดแทน เนื่องจากให้ผลผลิตสูงและใช้ระยะเวลาในการเพาะปลูกเพียงครั้งเดียวแต่สามารถเก็บเกี่ยวผลผลิตได้หลายครั้ง โดยที่หญ้าหลายฤดูมีองค์ประกอบทางเยื่อใยและคุณสมบัติทางพลังงานที่เหมาะสมต่อการผลิตเป็นเชื้อเพลิง ในการนำชีวมวลมาผลิตเป็นเชื้อเพลิงสำหรับป้อนโรงงาน เนื่องจากหญ้าหลายฤดูให้ค่าความร้อน 16-18 MJ/kg ซึ่งมากกว่าความร้อนของแกลบ ฟางข้าว และเห้ง้ามันสำปะหลัง (Mohammed et al., 2015; Wongwatanapaiboon et al., 2012; บุญรอด สัจจกุลนุกิจ และ บุชา พงกษาพันธุ์รัตน์, 2555) นอกจากนี้วัสดุเหล่านี้มีปริมาณกำมะถัน ไนโตรเจน และเถ้าในระดับต่ำ ซึ่งทำให้เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม (Mohammed et al., 2015) อย่างไรก็ตามหญ้าหลายฤดูยังมีข้อด้อยคือ มีความหลากหลายทางโครงสร้าง คุณสมบัติไม่สม่ำเสมอ ความหนาแน่นต่ำ และ ความหนาแน่นพลังงานต่ำ หากต้องการใช้เป็นวัสดุผลิตเชื้อเพลิง ต้องมีการปรับปรุงข้อด้อยดังกล่าว ซึ่งมีกระบวนการหลายรูปแบบ หนึ่งในนั้นที่ได้รับความนิยมคือ กระบวนการอัดแข็งเป็นเชื้อเพลิง (Shojaeiarani et al., 2019) ซึ่งสามารถเพิ่มประสิทธิภาพให้ความร้อนได้มากกว่าวัสดุที่มีความหนาแน่นต่ำ (Biomass Energy Resource Center, 2009)

การอัดแข็งเชื้อเพลิง เป็นกระบวนการอัดขึ้นรูปก้อนเชื้อเพลิงที่สามารถทำให้เชื้อเพลิงมีความคงรูป มีความคงทนต่อการจัดเก็บและขนส่ง คุณสมบัติสม่ำเสมอ และมีประสิทธิภาพพลังงานที่ดีกว่าเมื่อเทียบกับวัสดุที่มีความหนาแน่นต่ำ (Artemio et al., 2018; Gil et al., 2010; Larsson et al., 2008) ซึ่งมีวิธีการคือ การเพิ่มความหนาแน่นเชื้อเพลิงโดยการอัดให้เป็นเม็ดและเป็นก้อน จะทำ

ให้วัสดุชีวมวลมีความหนาแน่นเพิ่มมากขึ้น จากปกติมีความหนาแน่น 40–150 kg/m<sup>3</sup> เมื่อมีการอัดแข็งทำให้มีความหนาแน่นเพิ่มมากขึ้นเป็น 600–800 kg/m<sup>3</sup> ดังนั้นการเพิ่มความหนาแน่นของวัสดุชีวมวลสามารถลดต้นทุนการขนส่ง การจัดการและการจัดเก็บ เนื่องจากรูปร่างและขนาดที่สม่ำเสมอ โดยทั่วไปจะใช้วิธีการผสมวัสดุชีวมวลกับตัวประสานให้มีการยึดเกาะกัน เช่น กากไขมัน และแป้ง เป็นต้น (Kaliyan and Morey, 2009) และอัดเชื้อเพลิงด้วยแรงกดที่สูง เพื่อให้เชื้อเพลิงมีความหนาแน่นขึ้น ซึ่งกระบวนการเพิ่มความหนาแน่นจะต้องมีคุณภาพของเชื้อเพลิงเป็นไปตามข้อกำหนดของผู้บริโภคและมาตรฐานการตลาด ปัจจัยคุณภาพที่สำคัญคือ เชื้อเพลิงต้องมีความหนาแน่นสูง ทนต่อการดูดซึมน้ำ แรงกด การแตกร่วนและการขัดสี (Kaliyan and Morey, 2009) ในระหว่างการจัดการ การขนส่งและการจัดเก็บ

ด้วยเหตุนี้ผู้วิจัยจึงได้ศึกษาวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพ ทางเคมี และชีวเคมีของหญ้าหลายฤดูในประเทศไทยเพื่อประเมินทางเลือกสำหรับชีวมวลทดแทน และการผลิตเชื้อเพลิงอัดแข็งในรูปแบบต่างๆ เพื่อให้ได้วัสดุเชื้อเพลิงมีความคงทน (Durability), คุณสมบัติทางกายภาพ, องค์ประกอบทางเคมี/ชีวเคมี และคุณสมบัติทางพลังงานที่เหมาะสมต่อการผลิตในเชิงอุตสาหกรรม ทนต่อการขนส่ง การเก็บสะสม เคลื่อนย้าย และการป้อนวัตถุดิบ เพราะทุกกระบวนการขั้นตอนของโรงงานมีค่าใช้จ่ายทั้งสิ้น รวมทั้งมีคุณสมบัติคงที่ เพื่อให้การควบคุมกระบวนการผลิตดำเนินไปได้ อย่างสม่ำเสมอและมีประสิทธิภาพ

## 1.2 วัตถุประสงค์ในการศึกษา

1.2.1 เพื่อวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพ องค์ประกอบทางเคมี/ชีวเคมี และคุณสมบัติทางพลังงานของชีวมวลจากหญ้าหลายฤดู

1.2.2 เพื่อศึกษากระบวนการผลิตเชื้อเพลิงอัดแข็งจากหญ้าหลายฤดู และปัจจัยที่ส่งผลต่อความคงทนและประสิทธิภาพการให้พลังงานของเชื้อเพลิงสำหรับโรงไฟฟ้าชีวมวล

1.2.3 เพื่อประเมินความเหมาะสมของการใช้เชื้อเพลิงอัดแข็งจากหญ้าหลายฤดู เป็นวัสดุทางเลือกสำหรับโรงไฟฟ้าชีวมวล

## 1.3 ขอบเขตการศึกษา

การศึกษานี้มีขอบเขตการของดำเนินการดังนี้

1.3.1 พืชที่ใช้ในการศึกษา

หญ้าหลายฤดูจำนวน 10 ชนิด ในพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย

1.3.2 สถานที่วิเคราะห์และทดลอง

1) ห้องปฏิบัติการทดลองของคณะสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

2) ห้องปฏิบัติการทดลองของคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

3) ศูนย์วิเคราะห์เครื่องมือกลาง มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

4) ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ สำนักงานวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ

### 1.3.3 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

1) การวิเคราะห์คุณสมบัติและองค์ประกอบด้านต่างๆ ของหญ้าหลายฤดู ประกอบด้วย การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี (Ultimate Analysis) ได้แก่ ปริมาณคาร์บอน, ไฮโดรเจน, ไนโตรเจน, กำมะถัน, และออกซิเจน การวิเคราะห์องค์ประกอบทางชีวเคมี (Biochemical Component Analysis) ได้แก่ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน การวิเคราะห์คุณสมบัติโดยประมาณของชีวมวล (Proximate Analysis) ได้แก่ ปริมาณความชื้น (Moisture Content) ปริมาณเถ้า (Ash Content) ปริมาณสารระเหย (Volatile Matter) และปริมาณคาร์บอนคงตัว (Fixed Carbon) รวมทั้งค่าความร้อน (Heat Value) เพื่อใช้ในการประเมินหาวัสดุที่มีคุณสมบัติที่ดีในการนำไปผลิตเป็นเชื้อเพลิงอัดแข็ง สำหรับเป็นวัสดุทางเลือก

2) การทดสอบเทคโนโลยีการอัดขึ้นรูปเชื้อเพลิงและกระบวนการผลิตเชื้อเพลิงอัดแข็งจากหญ้าหลายฤดู จะศึกษากระบวนการผลิตและปัจจัยที่ส่งผลต่อคุณภาพของเชื้อเพลิง จากคุณสมบัติด้านต่างๆ จะได้นำมาสู่การวิเคราะห์ประเมินข้อดีและข้อจำกัดของการประยุกต์เทคโนโลยีการอัดขึ้นรูปที่เหมาะสมสำหรับการผลิตเชื้อเพลิงอัดแข็งจากชีวมวลหญ้าหลายฤดู และศึกษาปัจจัยด้านกระบวนการผลิตที่ส่งผลต่อคุณภาพเชื้อเพลิงอัดแข็ง ได้แก่ 1) ปัจจัยด้านกระบวนการผลิต ประกอบด้วย ตัวประสาน กำลังอัดขึ้นรูป และรูปทรง และ 2) คุณภาพเชื้อเพลิงอัดแข็ง จะได้ทำการทดสอบแบ่งเป็น 3 ส่วน ได้แก่ คุณสมบัติทางกายภาพ การทดสอบความคงทน และค่าความร้อนของเชื้อเพลิง

3) การทดสอบประสิทธิภาพการให้พลังงานของเชื้อเพลิงอัดแข็งจากหญ้าหลายฤดู โดยศึกษาจากพฤติกรรมเผาไหม้โดยใช้ผลิตพลังงานไฟฟ้าจากเชื้อเพลิงอัดแข็งของหญ้าหลายฤดู ด้วยการวิเคราะห์สมบัติเชิงทางความร้อนของเชื้อเพลิง ด้วยเทคนิค Thermal Gravimetric Analysis (TGA) และศึกษาการผลิตพลังงานไฟฟ้า เพื่อใช้ในการประเมินความเหมาะสมในการใช้เชื้อเพลิงโดยการเปรียบเทียบกับวัสดุชีวมวลที่โรงงานใช้ในปัจจุบันคือ แกลบ และเศษไม้สับ

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

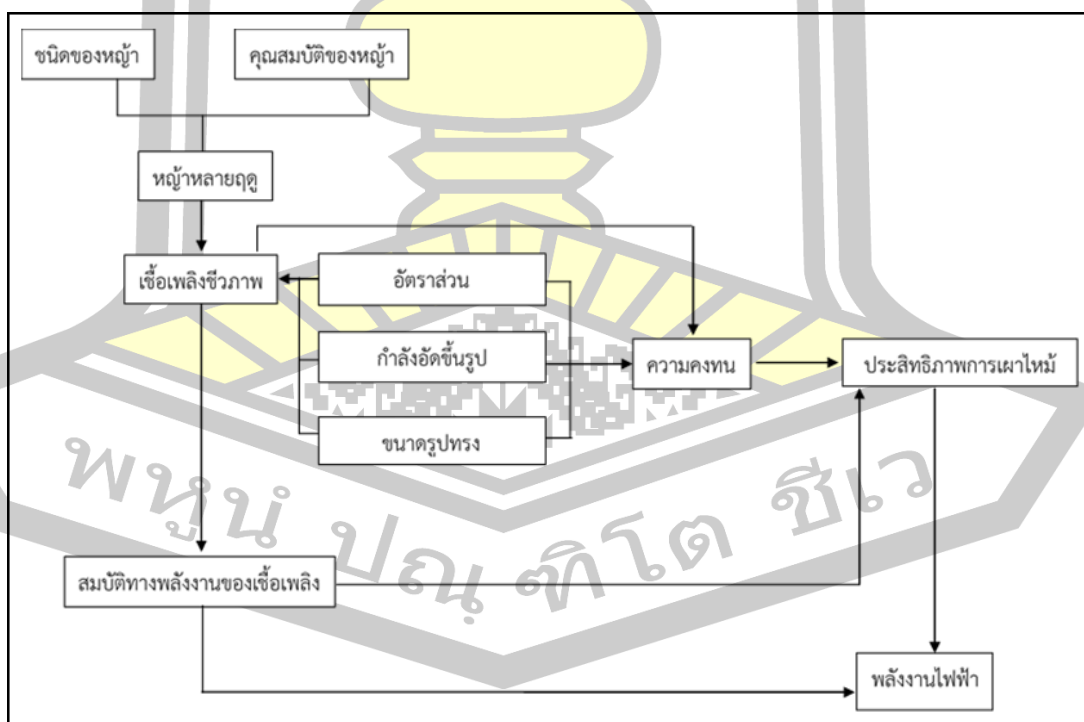
1.4.1 การพัฒนาเชื้อเพลิงชีวมวลทางเลือกที่เหมาะสมสำหรับโรงไฟฟ้าชีวมวลทั้งในด้านคุณสมบัติความคงทนของเชื้อเพลิงที่ต้องเก็บรวบรวม และคุณสมบัติทางพลังงาน ด้วยเทคโนโลยีการผลิตเชื้อเพลิงอัดแข็งจากหญ้าหลายฤดู

1.4.2 ได้เชื้อเพลิงอัดแข็งจากหญ้าหลายฤดู ที่มีประสิทธิภาพในการนำไปสู่ทางเลือกที่เหมาะสมสำหรับเป็นวัตถุดิบในการผลิตพลังงานไฟฟ้า

1.4.3 สามารถเสนอแนวทางในการส่งเสริมการนำหญ้าหลายฤดูมาใช้ประโยชน์โดยนำมาผลิตเป็นพลังงานเชื้อเพลิงอัดแข็ง

## 1.5 กรอบแนวคิดในการศึกษาวิจัย

ในการศึกษาการปรับปรุงประสิทธิภาพทางพลังงานของเชื้อเพลิงจากหญ้าหลายฤดู จะทำการศึกษาคุณสมบัติทางพลังงาน คุณสมบัติทางเคมี และคุณสมบัติทางชีวเคมีของหญ้าหลายแต่ละชนิดในพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย เพื่อเลือกชนิดหญ้าที่มีคุณสมบัติที่ดี นำไปผลิตเป็นวัสดุในการอัดขึ้นรูปเป็นเชื้อเพลิงอัดแข็งที่มีรูปทรง คุณสมบัติทางกายภาพ ที่มีความคงทน (Durability) และความแข็งแรง (Strength) อีกทั้งมีการทดสอบประสิทธิภาพการให้พลังงานและประสิทธิภาพการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง แสดงดังภาพประกอบ 1



ภาพประกอบ 1 กรอบแนวคิดในการวิจัย

## บทที่ 2

### ปริทัศน์เอกสารข้อมูล

งานวิจัยนี้ได้ศึกษา “การปรับปรุงประสิทธิภาพทางพลังงานของเชื้อเพลิงจากหญ้าหลายฤดู (Enhancing Energy Performance of Perennial-Grass Biofuel Feedstock)” ครั้งนี้ผู้วิจัยได้ศึกษาเอกสารทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ซึ่งผู้วิจัยได้ทำการศึกษาเรียบเรียงและนำเสนอสาระสำคัญตามหัวข้อต่อไปนี้

- 1) แหล่งพลังงานชีวมวล
- 2) กระบวนการแปรรูปชีวมวลเพื่อผลิตพลังงาน
- 3) เทคโนโลยีการผลิตเชื้อเพลิง
- 4) งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 แหล่งพลังงานชีวมวล

#### 2.1.1 ชีวมวล (Biomass)

ชีวมวล(Biomass) คือ สารอินทรีย์ที่เป็นแหล่งกักเก็บพลังงานจากธรรมชาติและสามารถนำมาใช้ผลิตพลังงานได้ สารอินทรีย์เหล่านี้ได้มาจากพืชและสัตว์ต่างๆ เช่น เศษไม้ ขยะ วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร โดยที่ชีวมวลนั้นประกอบด้วยธาตุหลักๆ คือ คาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน รวมทั้งมีปริมาณของไนโตรเจนและธาตุอื่นๆ อีกเล็กน้อย ชีวมวลนั้นมีอยู่มากมายทั้งที่ได้จากสิ่งมีชีวิต (ยกเว้นที่ได้กลายเป็นเชื้อเพลิงประเภทฟอสซิล เช่น ถ่านหิน น้ำมัน และก๊าซธรรมชาติไปแล้ว) และยังรวมไปถึงสิ่งต่างๆ ที่มีธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจนเป็นองค์ประกอบหลัก (วรพจน์ งามชมพู, 2556)

การใช้งานชีวมวลเพื่อให้ได้พลังงานอาจจะทำได้โดย นำมาเผาไหม้เพื่อนำพลังงานความร้อนที่ได้ไปใช้ในกระบวนการผลิตไฟฟ้าทดแทนพลังงานจากฟอสซิล (เช่น น้ำมัน) ซึ่งมีอยู่อย่างจำกัดและอาจหมดลงได้ ชีวมวลเหล่านี้มีแหล่งที่มาต่างๆ กัน อาทิ พืชผลทางการเกษตร (agricultural crops) เศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร (agricultural residues) ไม้และเศษไม้ (wood and wood residues) หรือของเหลือจากจากอุตสาหกรรมและชุมชน (เสาวนิตย์ แดงทองดี, 2554) ซึ่งสามารถเป็นวัสดุที่ใช้ผลิตพลังงานชีวมวลได้ดังภาพประกอบ 2 ตัวอย่างเช่น แกลบที่ได้จากการสีข้าวเปลือก ชานอ้อยได้จากการผลิตน้ำตาลทราย เศษไม้ได้จากการแปรรูปไม้ยางพาราหรือไม้ยูคาลิปตัสเป็นส่วนใหญ่ และบางส่วนได้จากสวนป่าที่ปลูกไว้ กากปาล์มได้จากการสกัดน้ำมันปาล์มดิบออกจากผลปาล์มสด กาก

มันสำปะหลังได้จากการผลิตแป้งมันสำปะหลัง ซึ่งข้าวโพดได้จากการสีข้าวโพดเพื่อนำเมล็ดออก กาบ และกะลามะพร้าวได้จากการนำมะพร้าวมาปลอกเปลือกออกเพื่อนำเนื้อมะพร้าวไป ผลิตกะทิ และ น้ำมันมะพร้าว และลำเหล้าได้จากการผลิตแอลกอฮอล์ เป็นต้น

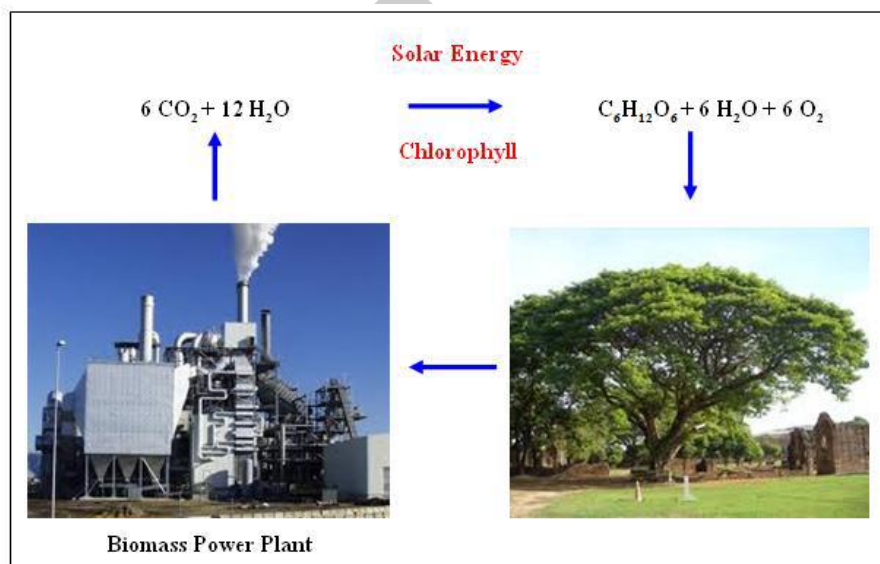


ภาพประกอบ 2 วัสดุที่ใช้เป็นพลังงานชีวมวล

ที่มา: Encos, 2014

ชีวมวลสามารถเปลี่ยนรูปเป็นพลังงานได้ เพราะในขั้นตอนการเจริญเติบโตนั้นพืชใช้คาร์บอนไดออกไซด์และน้ำแล้วเปลี่ยนพลังงานจากแสงอาทิตย์โดยผ่านกระบวนการสังเคราะห์แสงได้ออกมา เป็นแป้งและน้ำตาลแล้วกักเก็บไว้ตามส่วนต่างๆ ของพืช ดังนั้น เมื่อนำพืชมาเป็นเชื้อเพลิงเราก็จะได้พลังงานออกมา การใช้ประโยชน์จากพลังงานชีวมวลสามารถใช้ได้ทั้งในรูปแบบของพลังงานความร้อน ไอน้ำ หรือผลิตเป็นกระแสไฟฟ้า โดยจะใช้เชื้อเพลิงชีวมวลชนิดใดชนิดหนึ่งที่กล่าวมาข้างต้นหรือหลายชนิดรวมกันก็ได้ ชีวมวลจึงเป็นเชื้อเพลิงราคาถูกหากมีการใช้ประโยชน์ในบริเวณที่ไม่ไกลจากแหล่งเชื้อเพลิงมากนักเพื่อลดต้นทุนในการขนส่ง ในการนำเข้าเชื้อเพลิงและสร้างรายได้ให้กับคนในท้องถิ่น นอกจากนี้ในด้านด้านผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากการใช้ชีวมวล เพื่อผลิตความร้อนหรือไฟฟ้าจะมีน้อย เนื่องจากการปลูกทดแทนทำให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เกิดการหมุนเวียนและไม่มี การปลดปล่อยเพิ่มเติม (ปิยวรา แดงนา, 2558) อีกทั้งในด้านผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากการใช้ชีวมวล เพื่อผลิตความร้อนหรือไฟฟ้าจะมีน้อย เนื่องจากชีวมวลที่ผลิตใหม่จะดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดจากการเผาไหม้ ผ่านกระบวนการสังเคราะห์แสงเข้าไปใช้เพื่อการเจริญเติบโต โดยสามารถแสดงวงจรของกระบวนการดังกล่าวได้ในภาพประกอบ 3 นอกจากนั้นชีวมวลยังมีปริมาณกำมะถันที่ต่ำกว่าเชื้อเพลิงฟอสซิลมาก (วรพจน์ งามชมพู, 2556) ซึ่งทำให้การใช้ชีวมวล

มวลจะลดโอกาสการเกิดปรากฏการณ์เรือนกระจก (Greenhouse Effect) เมื่อเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงฟอสซิล



ภาพประกอบ 3 วงจรของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในกระบวนการผลิตพลังงานจากชีวมวล

ที่มา: วรพจน์ งามชมพู, 2556

### 2.1.2 องค์ประกอบของชีวมวล

แหล่งชีวมวลประกอบด้วยวัสดุหลายประเภท แต่ในทางพลังงานมักจะหมายถึงวัสดุจากพืชเป็นหลัก เช่น วัสดุที่เหลือจากผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร เศษไม้จากการทำป่าไม้หรือแปรรูปไม้ เป็นต้น ชีวมวลจึงกำเนิดจากปฏิกิริยาทางชีวเคมีของพืชในการเปลี่ยนรูปพลังงานแสงอาทิตย์เรียกว่า การสังเคราะห์แสง (Photosynthesis) ซึ่งเป็นกระบวนการเปลี่ยนรูปคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) ในอากาศและน้ำ ( $\text{H}_2\text{O}$ ) เกิดเป็นโมเลกุลคาร์โบไฮเดรต ซึ่งสะสมพลังงานศักย์ทางเคมีในรูปของคาร์บอน (C) ซึ่งได้มาจากคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) และ ไฮโดรเจน (H) ซึ่งได้มาจากน้ำ ( $\text{H}_2\text{O}$ ) โดยจะแบ่งองค์ประกอบออกเป็น 3 องค์ประกอบใหญ่ๆ ดังนี้ (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2559)

#### 1) องค์ประกอบทางชีวเคมี

สารชีวมวลนั้นมีหลากหลายชนิดซึ่งมีองค์ประกอบต่างกัน องค์ประกอบขั้นต้นได้แก่ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส ลิกนิน แป้ง สารชีวมวลต่างชนิดกัน ย่อมมีองค์ประกอบต่างกัน เช่น ธัญพืชมีแป้งมากในขณะที่ของเสียจากปศุสัตว์มีโปรตีนมาก เนื่องจากมีโครงสร้างทางเคมีที่แตกต่างกัน จากทัศนคติของการใช้พลังงานสารชีวมวลที่ประกอบด้วย ลิกโนเซลลูโลส จะประกอบไปด้วยเซลลูโลส และลิกนินจำนวนมาก เช่น ต้นไม้ ซึ่งมีจำนวนมากและมีศักยภาพมาก โดยทั่วไปมีองค์ประกอบหลัก

อยู่ 3 ส่วน (ภาพประกอบ 4) (สถาบันนวัตกรรมการเรียนรู้ มหาวิทยาลัยมหิดล 2555) ได้แก่ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

### 1.1) เซลลูโลส

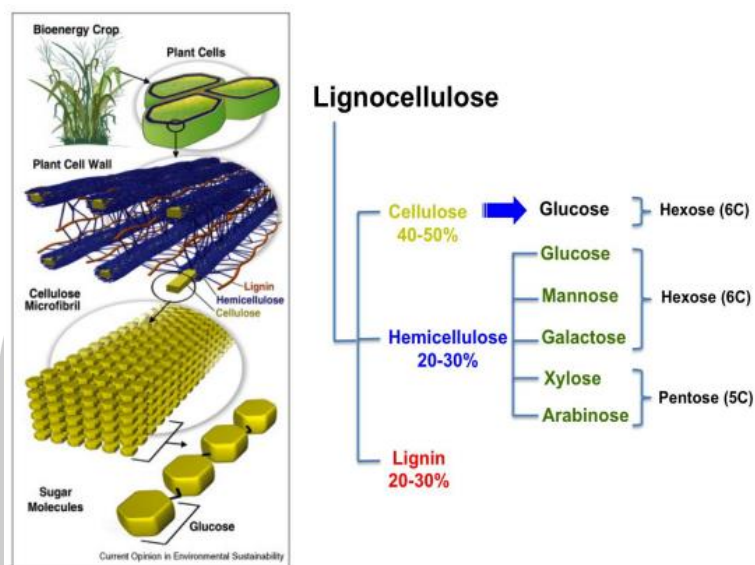
เซลลูโลส พบอยู่ในประมาณ 50 เปอร์เซ็นต์ ส่วนใหญ่สะสมอยู่ที่ผนังเซลล์ในพืชชั้นสูงทุกชนิด ซึ่งมีส่วนประกอบของเซลลูโลสมากกว่า 97-99% จัดว่าเป็นเซลลูโลสบริสุทธิ์ ประกอบด้วย polymer chain เรียงขนานกัน และยึดกันด้วย dispersion force และ hydrogen bond ภายในโมเลกุลเซลลูโลสจึงยึดติดกันแน่น ทำให้เซลลูโลสทำปฏิกิริยากับสารต่างๆ ได้ช้า เซลลูโลสใน primary cell wall ประกอบด้วยกลูโคสยาวประมาณ 2,000 โมเลกุล และ ไม่ต่ำกว่า 14,000 โมเลกุลใน secondary cell wall โดยโมเลกุลของเซลลูโลสจะเกาะกันเป็นคู่ตามยาวและเรียงขนานกันเป็นกลุ่ม 40 คู่ เรียกว่า ไมโครไฟบริล (micro fibril) เพื่อให้ความแข็งแรงกับผนังเซลล์ของพืช

### 1.2) เฮมิเซลลูโลส

เฮมิเซลลูโลส พบได้มากเป็นอันดับ 2 รองจากเซลลูโลส จะอยู่ในพืชประมาณ 10-30% ซึ่งเฮมิเซลลูโลสเป็นพอลิแซ็กคาไรด์ชนิดหนึ่งซึ่งคล้ายเซลลูโลสแต่ประกอบด้วยน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวหลายชนิด เช่น กลูโคส กาแลกโตส แมนโนส ไฮโลส อะราบินอส รวมทั้งกรดกลูโคนิก และกาแลกทูโรนิกและกาแลกทูโรนิก เฮมิเซลลูโลสพบในเนื้อเยื่อของพืชโดยรวมอยู่กับสารอื่นๆ เช่น ลิกนินและเซลลูโลส ซึ่งเฮมิเซลลูโลสนั้นเป็นโครงสร้างของผนังเซลล์ แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินในผนังเซลล์พืช

### 1.3) ลิกนิน

ลิกนิน พบได้มากในพืชที่มีอายุมาก โดยจะพบอยู่ตามผนังเซลล์ของพืช และมีอยู่ในพืชประมาณ 5-30% ลิกนินสารประกอบที่ประกอบด้วย ยูนิตฟีนิลโพรเพนและอนุพันธ์ซึ่งเชื่อมกันเป็นสามมิติ โครงสร้างนั้นซับซ้อนและยังไม่มี การเข้าใจอย่างแท้จริง โครงสร้างสามมิตินั้นยากที่จะสลายโดยจุลชีพและสารเคมี นอกจากนั้นยังมีความแข็งแรงทางกลและการป้องกันร่วมด้วย เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลสและลิกนินถูกพบอย่างสากลในสารชีวมวลชนิดต่าง ๆ และแหล่งคาร์บอนธรรมชาติจำนวนมากมายบนโลก



ภาพประกอบ 4 องค์ประกอบทางชีวเคมีของพืช

ที่มา: ปิติพร มโนคูน, 2562

ชีวมวลประกอบด้วยเซลลูโลส (Cellulose) เฮมิเซลลูโลส (Hemicelluloses) ลิกนิน (Lignin) และสารสกัด (Extractives) ดังแสดงในตาราง 1 ซึ่งสร้างขึ้นจากกลุ่มโมเลกุลขนาดใหญ่ที่แสดงในตาราง 2

ตาราง 1 ส่วนประกอบหลักของชีวมวล

|                                               |                                                         |
|-----------------------------------------------|---------------------------------------------------------|
| เซลลูโลส                                      |                                                         |
| เฮมิเซลลูโลส                                  | กาแลคโตไกลโคแมนแนน (Galactoglucomannans)                |
| อาราบีโนกรุโรนออกไซด์ (Arabinoglucuronoxylan) |                                                         |
| อาราบีโนกาแลคแทน (Arabinogalactan)            |                                                         |
| กลูคูโรนออกไซด์ (Glucuronoxylan)              |                                                         |
| กลูโคแมนแนน (Glucomannan)                     |                                                         |
| ลิกนิน                                        |                                                         |
| สารสกัด                                       | สารประกอบอะลิฟาติก พวงไฮและแว็กซ์ (Aliphatic compounds) |
| เทอร์ปีนส์และเทอร์ปีนอยด์ (Glucuronoxylan)    |                                                         |
|                                               | สารประกอบฟีนอลิก (Phenolic compounds)                   |

ที่มา: กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2559

ตาราง 2 กลุ่มโมเลกุลขนาดใหญ่ที่สร้างขึ้นเป็นชีวมวล

| ส่วนประกอบ   | กลุ่มโมเลกุลขนาดใหญ่ | สูตรเคมีอย่างง่าย    |
|--------------|----------------------|----------------------|
| เซลลูโลส     | เซลโลบิโอส           | $C_{12}H_{20}O_{10}$ |
| เฮมิเซลลูโลส | กลูโคส               | $C_6H_{10}O_6$       |
|              | แมนโนส               | $C_6H_{10}O_6$       |
|              | ไซโลส                | $C_5H_{10}O_5$       |
|              | กาแลคโทส             | $C_6H_{10}O_6$       |
|              | อาราบินอส            | $C_5H_{10}O_5$       |
|              | รามโนส               | $C_6H_{12}O_5$       |
|              | กรดกลูคูโรนิก        | $C_6H_{10}O_7$       |
| ลิกนิน       | โคนิฟอร์ลแอลกอฮอล์   | $C_{10}H_{12}O_3$    |
|              | ซินาพิลแอลกอฮอล์     | $C_{11}H_{14}O_7$    |
|              | ฟิคูมาริลแอลกอฮอล์   | $C_9H_{10}O_2$       |

ที่มา: กระทรวงพลังงาน, 2559

เซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสรวมกลุ่มด้วยกัน จะเรียกว่า โฮโลเซลลูโลส (Holocellulose) ซึ่งเป็นส่วนประกอบหลักของผนังเซลล์ของเส้นใยไม้ เซลลูโลสเกิดจากหน่วยเซลล์ของเซลโลบิโอส หลายหน่วยต่อกันเข้าไปมา ขณะที่เฮมิเซลลูโลสเกิดจากการผสมผสานกันของหน่วยต่าง ๆ ของเฮกโซสและเพนโทสซึ่งมีระดับพอลิเมอร์ไรเซชันระหว่าง 15-14,000 ส่วนลิกนินนั้น เกิดจากการต่อข้ามเชื่อมกันของกลุ่มพอลิเมอร์สามมิติซึ่งเป็นโครงสร้างพื้นฐาน โดยปกติไม้เนื้ออ่อนมีเซลลูโลสอยู่ประมาณ 45-50% เฮมิเซลลูโลส 25-35% และลิกนิน 25-35% ขณะที่ไม้เนื้อแข็งมีเซลลูโลส 40-55% เฮมิเซลลูโลส 24-40% และลิกนิน 18-25% โดยอาจจะมีสารสกัดอื่น ๆ ซึ่งเป็นสารประกอบธรรมชาติที่พบในไม้ คล้ายกับสารประกอบไฮโดรคาร์บอน อยู่อีกประมาณ 1-5% เป็นที่น่าสนใจว่าสารประกอบโฮโลเซลลูโลสที่เป็นกลุ่มอะลิฟาติกมีอะตอมออกซิเจนร่วมจะพบเป็นส่วนใหญ่ในมวลเนื้อไม้ แต่ไม่พบสารประกอบอะโรมาติกเลย โฮโลเซลลูโลสเหล่านี้มีกลุ่มฟังก์ชันนัล (Functional group) สำคัญคือ ไฮดรอกซิล (-OH) และเมทานอล (-CH<sub>2</sub>OH) แต่ในลิกนินกลับพบกลุ่มของวงแหวนเบนซีนอยู่ โดยสารประกอบอะโรมาติกเหล่านี้พบว่าเกิดเป็นหน่วยเดี่ยว ไม่ได้รวมกันเป็นกลุ่มก้อนใหญ่เหมือนกับในเชื้อเพลิงฟอสซิล กลุ่มฟังก์ชันนัลในลิกนิน คือ เมทอกซี (-OCH<sub>3</sub>) โดยมีกลุ่มไฮดรอกซิลและเมทานอลอยู่บ้างเล็กน้อย สำหรับส่วนที่เป็นสารสกัด จะมีทั้งโครงสร้างของอะลิฟาติกและอะโรมาติกที่มีความไวต่อการเกิดปฏิกิริยาธาตุอื่น ๆ เช่น ไนโตรเจน ก็สามารถพบได้ในชีวมวลโดยจะอยู่ในรูปของโปรตีน

เศษวัสดุการเกษตรจะมีส่วนประกอบแตกต่างจากไม้ วัสดุเหล่านี้มีไฮโดรเซลลูโลสเป็นส่วนใหญ่ และมีลิกนินน้อยหรือไม่มีเลย และมีส่วนที่เป็นโปรตีนสูง โดยทั่วไปพืชตระกูลหญ้า เช่น ข้าว อ้อย จะมีเซลลูโลส 25-40% เฮมิเซลลูโลส 25-50% และลิกนิน 10-30% พืชอื่น ๆ เช่น ใผ่ มีเซลลูโลสถึง 80-95% เฮมิเซลลูโลส 5-20% และไม่มีลิกนินเลย ต้นข้าวโพดมีลิกนินเพียง 3% เท่านั้น สำหรับปริมาณโปรตีน ในไม้มีต่ำมากเพียง 0.2-0.5% แต่พืชไม้ใช้ไม้ เช่น ใผ่ มีโปรตีน 1.3% ต้นทานตะวัน 2.1% ต้นถั่วเหลือง 5.5% หญ้าหวาน 24.7% ส่วนกลุ่มอะโรมาติก ในเศษวัสดุการเกษตรที่ไม้ใช้ไม้มีอยู่ปริมาณน้อยกว่าในไม้ กลุ่มฟังก์ชันนี้จะเป็นพวกไฮดรอกซิลและเอมีน ( $-NH_2$ ) เพราะพบในโปรตีนนั่นเอง ตาราง 3 แสดงส่วนประกอบของพืชพลังงานตัวอย่าง โดยส่วนประกอบอื่น ๆ หมายถึง โปรตีน น้ำมัน และแร่ธาตุต่าง ๆ

ตาราง 3 ส่วนประกอบลิกโนเซลลูโลสของชีวมวล (Dry basis)

| พืช        | เซลลูโลส (%) | เฮมิเซลลูโลส (%) | ลิกนิน (%) | อื่น ๆ (%) |
|------------|--------------|------------------|------------|------------|
| ฟางข้าว    | 38           | 36               | 16         | 10         |
| ต้นข้าวโพด | 53           | 15               | 16         | 16         |
| ซังข้าวโพด | 32           | 44               | 13         | 11         |
| ชานอ้อย    | 35           | 25               | 20         | 20         |
| ไม้ไผ่เร็ว | 50           | 23               | 22         | 5          |
| กระต๊าก    | 76           | 13               | 11         | 0          |
| ไม้ไผ่     | 41           | 26               | 27         | 7          |

ที่มา: กระทรวงพลังงาน, 2559

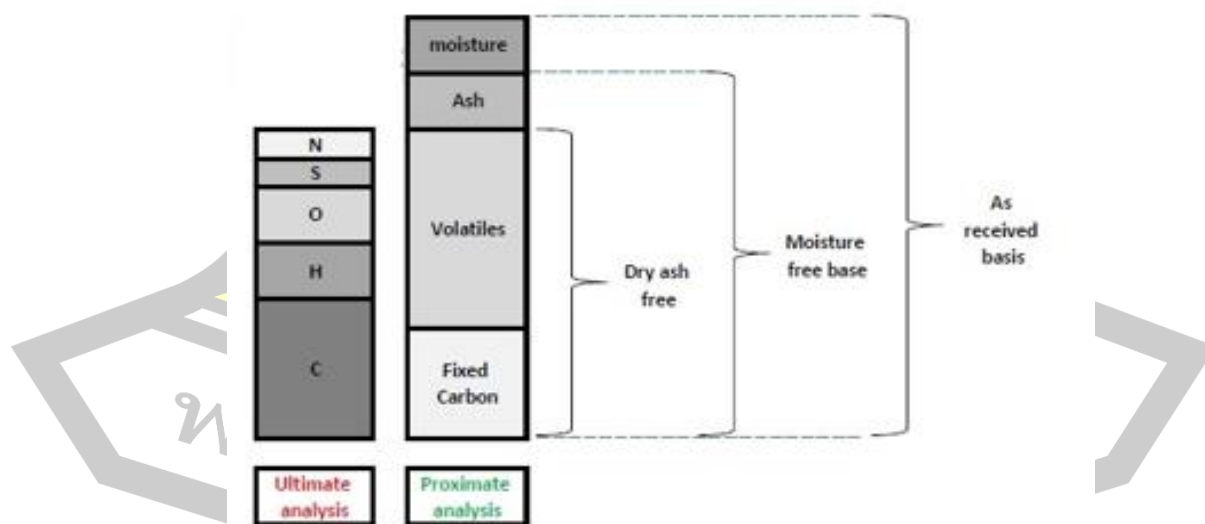
## 2) องค์ประกอบทางเคมี

องค์ประกอบที่ไม่มีเถ้าของสารประกอบอินทรีย์ของชีวมวลมีลักษณะที่ค่อนข้างแน่นอน สำหรับชีวมวลทั่วไป องค์ประกอบที่เป็นธาตุที่สำคัญ คือ คาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน โดยมีไนโตรเจนอยู่เป็นสัดส่วนเล็กน้อย และธาตุชนิดอื่นๆที่เป็นส่วนประกอบในชีวมวลบางชนิดในปริมาณที่น้อย ซึ่งธาตุแต่ละชนิดจะส่งผลต่อกระบวนการผลิตพลังงานหรือส่งผลเสียต่อสิ่งแวดล้อม

### 2.1) องค์ประกอบธาตุหลักของชีวมวล

ชีวมวลประกอบด้วยธาตุหลักๆ คือ คาร์บอน (C), ไฮโดรเจน (H), ออกซิเจน (O), ซัลเฟอร์ (S), ไนโตรเจน (N) แสดงดังภาพประกอบ 5 เมื่อสารใดๆ เมื่อเกิดการเผาไหม้แล้ว จะให้พลังงานความร้อนออกมา ซึ่งนำไปใช้ประโยชน์ได้ธาตุที่เป็นองค์ประกอบที่สำคัญของเชื้อเพลิงคือ คาร์บอน (C) และไฮโดรเจน (H) เมื่อเชื้อเพลิงถูกเผาไหม้ ธาตุคาร์บอนและไฮโดรเจนจะทำปฏิกิริยา

กับก๊าซออกซิเจน แล้วเกิดพลังงานความร้อนน้ำและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ หรือในบางครั้งอาจจะเกิดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ หรือ เชม่า สำหรับไนโตรเจน สามารถทำปฏิกิริยากับออกซิเจนเกิดเป็นสารประกอบไนโตรเจนออกไซด์ แต่เกิดในปริมาณที่น้อยมากคือ ในล้านส่วน ดังนั้น ในแง่การเผาไหม้ ถือว่าไม่เกิดการเผาไหม้ จากสมการการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงจะเห็นว่าไอเสียที่เกิดขึ้นจะประกอบด้วย คาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ), น้ำ ( $\text{H}_2\text{O}$ ) และซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ( $\text{SO}_2$ ) ในทางปฏิบัติ อาจเกิดการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงไม่สมบูรณ์ ทำให้สารคาร์บอนในเชื้อเพลิงเกิดเป็นเชม่า ซึ่งเป็นคาร์บอนที่ไม่เผาไหม้หรือคาร์บอนมอนอกไซด์ ( $\text{CO}$ ) สำหรับการนำชีวมวลมาทำเชื้อเพลิงเผาไหม้ จำเป็นต้องทราบปริมาณองค์ประกอบของธาตุแต่ละชนิด เนื่องจากธาตุบางชนิดเมื่อทำปฏิกิริยาระหว่างการเผาไหม้จะทำให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม และสร้างความเสียหายให้กับระบบเตาเผาหรืออุปกรณ์ในระบบได้ เช่น ซัลเฟอร์ (S) เมื่อมีการเผาไหม้จะเกิดเมื่อก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์แพร่กระจายเข้าสู่อากาศ จะรวมตัวหรือทำปฏิกิริยากับก๊าซออกซิเจนในอากาศจะกลายเป็นซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (Sulphur trioxide) กลายเป็นซัลเฟตได้มักถูกเรียกว่า กรดซัลฟูริก (Sulphuric acid) หรืออาจเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า กรดกำมะถัน มีฤทธิ์ในการกัดกร่อน ทำให้เกิดฝนกรดและออกไซด์ของซัลเฟอร์ยังเป็นก๊าซที่มีอันตรายต่อพืช สัตว์และมนุษย์ รวมทั้งวัสดุและสิ่งก่อสร้าง และไนโตรเจน (N) ถ้ามีในปริมาณมากเกินไป เมื่อมีการเผาไหม้เกิดขึ้นจะทำปฏิกิริยาทำให้เกิด  $\text{NO}_x$  เป็นต้น (Obernberger and Thek, 2004)



ภาพประกอบ 5 องค์ประกอบธาตุหลักของเชื้อเพลิงชีวมวล

ที่มา: ญัฐพงศ์ ไชยสิทธิ์, 2554

## 2.2) องค์ประกอบธาตุอื่นๆของชีวมวล

ชีวมวลนอกจากจะองค์ประกอบของธาตุหลักแล้ว ยังมีองค์ประกอบของธาตุอื่นๆ อีก แต่ก็มีในปริมาณที่น้อยมาก ถึงอย่างนั้นก็สามารถที่จะส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และระบบการเผาไหม้ได้ เมื่อเกิดปฏิกิริยาเกิดขึ้น ซึ่งธาตุเหล่านั้นได้แก่ คลอรีน (Cl), โพแทสเซียม (K), และธาตุกลุ่มโลหะหนัก (Obernberger and Thek, 2004) ซึ่งจะแสดงรายละเอียดดังนี้

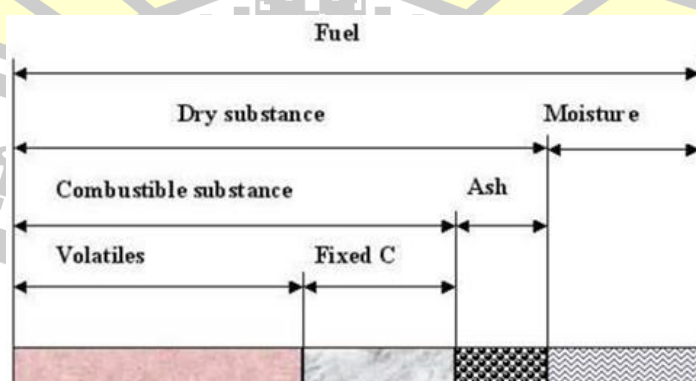
2.2.1) คลอรีน (Cl) เป็นธาตุเมื่อมีการเผาไหม้เกิดขึ้นจะส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและอุปกรณ์ในระบบ เมื่อคลอรีนทำปฏิกิริยากับก๊าซไฮโดรเจนแล้วเกิดเป็นกรดไฮโดรคลอริก หรือ กรดเกลือ (HCl) ซึ่งจะเป็นตัวกัดกร่อนทำลายอุปกรณ์ภายในเตาเผาไหม้ นอกจากนี้คลอรีนยังมีอิทธิพลต่อการเกิดไดออกซิน (Dioxins) และฟิวแรน (Furans) หรือมักรู้จักกันทั่วว่า “ไดออกซิน/ฟิวแรน” (PCDD/F).

2.2.2) โพแทสเซียม (K) มีอิทธิพลต่อพฤติกรรมของการสลายตัวของเถ้า และการเกิดละออง การเพิ่มปริมาณโพแทสเซียมทำให้ลดจุดหลอมเหลวของเถ้า ซึ่งสามารถก่อให้เกิดตะกรันในเตาเผาและหม้อไอน้ำ นอกจากนี้ ปริมาณโพแทสเซียม (K) เพิ่มสูงขึ้นปริมาณละอองลอยที่เกิดขึ้นในระหว่างการเผาไหม้จึงเปื้อนใน boilers และการปล่อยอนุภาคได้

2.2.3) โลหะหนัก จะพิจารณา แคดเมียม (Cd), ตะกั่ว (Pb), สังกะสี (Zn) , โครเมียม (Cr), ทองแดง (Cu), สารหนู (As) และปรอท (Hg) ซึ่งโลหะหนักมีแรงผลกระทบต่อคุณภาพเถ้า เช่นเดียวกับการปล่อยอนุภาคของเขม่า ดังนั้นเกี่ยวกับเหตุผลทางนิเวศวิทยาปริมาณโลหะหนักในเชื้อเพลิงชีวมวล ควรจะถูกจำกัด โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อเกี่ยวกับระบบผลิตพลังงานขนาดเล็กซึ่งมักจะไม่ได้ติดตั้งอุปกรณ์ด้วยฝุ่น ซึ่งปัญหาเหล่านี้จะส่งผลกระทบต่อสุขภาพ สิ่งมีชีวิต พืช และสิ่งแวดล้อม

## 3) องค์ประกอบทางพลังงาน

องค์ประกอบของชีวมวลหรือสสารทั่วไปแบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลักๆ คือ ความชื้น ส่วนที่เผาไหม้ได้ และส่วนที่เผาไหม้ไม่ได้ ดังแสดงในภาพประกอบ 6



ภาพประกอบ 6 สัดส่วนองค์ประกอบทางพลังงานของชีวมวล

ที่มา : บุญรอด สัจกุลนุกิจ และ บุชบา พุกษาพันธุ์รัตน์, 2555

### 3.1) ความชื้น (Moisture)

ความชื้น (Moisture) หมายถึง ปริมาณน้ำที่อยู่ในชีวมวล โดยทั่วไปชีวมวลมีความชื้นค่อนข้างสูง ชีวมวลที่เหมาะสมนำไปเป็นเชื้อเพลิงในการเผาไหม้ ความชื้นที่มีอยู่ในเชื้อเพลิงชีวมวลในการทำปฏิกิริยาจะเกิดไฮโดรเจน แต่ถ้ามีมากเกินไปจะทำให้สูญเสียความร้อนภายในเตาเพื่อใช้ในการระเหยของน้ำและปฏิกิริยาที่เกิดคาร์บอนมอนอกไซด์จะลดลง โดยทั่วไปเชื้อเพลิงที่ใช้ผลิตก๊าซในเตาควรมีความชื้นอยู่ประมาณ 10-15% โดยน้ำหนัก ถ้ามีมากเกินไป ควรมีการนำมามากแดดหรือนำมาอบแห้งก่อนนำมาใช้

### 3.2) ส่วนที่เผาไหม้ได้ (Combustible Substance)

ส่วนที่เผาไหม้ได้ (Combustible Substance) แบ่งออกได้เป็น 2 ส่วน คือ Volatiles Matter และ Fixed Carbon สำหรับ Volatiles Matter คือ ส่วนที่ลุกเผาไหม้ได้ง่าย ดังนั้นชีวมวลใดที่มีค่า Volatiles Matter สูงแสดงว่าสามารถติดไฟได้ง่าย สำหรับ Fixed Carbon เป็นสารประกอบของคาร์บอน เป็นค่าที่ใช้วัดปริมาณสารที่สามารถเผาไหม้ได้ที่หลงเหลืออยู่ และเป็นค่าหนึ่งที่ใช้ในการคำนวณหาประสิทธิภาพในการเผาไหม้ ยิ่งค่า Fixed Carbon มาก ค่าความร้อนจะยิ่งสูง ซึ่งเป็นส่วนที่เสถียรของโครงสร้างโมเลกุลของชีวมวล

### 3.3) ขี้เถ้า (Ash)

ขี้เถ้า (Ash) คือส่วนที่เผาไหม้ไม่ได้ ชีวมวลส่วนใหญ่จะมีขี้เถ้าประมาณร้อยละ 1 ถึง 3 ยกเว้นแกลบและฟางข้าว จะมีสัดส่วนขี้เถ้าประมาณร้อยละ 10 ถึง 20 ถ้าปริมาณเถ้ามากจะทำให้เกิดการสะสมภายในส่วนที่เผาไหม้ และขวางทางการเผาไหม้ ทำให้เกิดการสูญเสียความดันสูงขึ้นภายในเตาผลิตก๊าซ โดยปกติแล้วปริมาณของเถ้าในเชื้อเพลิงไม่ควรเกิน 5-6 % โดยน้ำหนัก

## 4) การวิเคราะห์คุณสมบัติของชีวมวล

สมบัติและองค์ประกอบของเชื้อเพลิงชีวมวลเป็นข้อมูลเบื้องต้น ที่สำคัญมากในระบบผลิตพลังงานที่จำเป็นต้องทราบเพื่อนำข้อมูลใช้ในการออกแบบและวิเคราะห์ประสิทธิภาพของระบบผลิตพลังงานความร้อนหรือก๊าซเชื้อเพลิง โดยการวิเคราะห์องค์ประกอบและสมบัติของเชื้อเพลิงแข็งโดยทั่วไปทำการวิเคราะห์ 3 แบบ ซึ่งการวิเคราะห์แต่ละแบบมีวัตถุประสงค์ที่ต่างกัน ได้แก่ การหาค่าองค์ประกอบในเชื้อเพลิงชีวมวลโดยการประมาณค่า (Proximate analysis) การหาค่าองค์ประกอบในเชื้อเพลิงชีวมวลโดยละเอียดหรือแบบแยกธาตุ (Ultimate analysis) และ การหาค่าความร้อนของเชื้อเพลิงชีวมวล (Heating value analysis)

### 4.1) การหาค่าองค์ประกอบในเชื้อเพลิงชีวมวลโดยการประมาณค่า

การวิเคราะห์องค์ประกอบของเชื้อเพลิงชีวมวลโดยการประมาณค่า (Proximate analysis) จะวิเคราะห์โดยอ้างอิงหลักวิธีการวิเคราะห์หาองค์ประกอบโดยประมาณของถ่านหินและ

ถ่านโค้กที่กำหนดตามมาตรฐานการทดสอบ และวัสดุของสมาคมอเมริกันสำหรับถ่านหิน ASTM D3172-07 ซึ่งได้กำหนดมาตรฐานวิธีการวิเคราะห์และมาตรฐานปริมาณที่ต้องการทำการวิเคราะห์ไว้

การวิเคราะห์องค์ประกอบของเชื้อเพลิงชีวมวลหรือเชื้อเพลิงแข็งโดยการประมาณค่า ปริมาณที่ทำการวิเคราะห์มี 4 ปริมาณ ได้แก่ ความชื้น (Moisture Content) สารระเหย (Volatile Matter) เถ้า (Ash) และคาร์บอนคงตัว (Fixed Carbon)

ความชื้นที่อยู่ในเชื้อเพลิงแข็งหรือชีวมวลจะใช้วิธีวิเคราะห์อ้างอิงตามมาตรฐานการทดสอบและวัสดุของอเมริกันสมาคม โดยเชื้อเพลิงไม่ใช้วิธีวิเคราะห์ตามมาตรฐานการทดสอบและวัสดุของอเมริกันสมาคม D871-1762-84 (ASTM D1762-84) และสำหรับเชื้อเพลิงขยะ (Refuse derived fuel: RDF) ใช้วิธีวิเคราะห์ตามมาตรฐานการทดสอบและวัสดุของอเมริกันสมาคม E949-88 (ASTM E949-88) ซึ่งวิธีการวิเคราะห์ตามมาตรฐานต่าง ๆ จะแตกต่างกันไป เช่นการวิเคราะห์ค่าความชื้นของไม้ตามมาตรฐานการทดสอบและวัสดุของอเมริกันสมาคม D1762-84 (ASTM D1762-84) จะใช้ไม้ตัวอย่างในการวิเคราะห์น้ำหนัก 50 กรัม อบในเตาอบที่อุณหภูมิ 103 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 30 นาที และหลังจากนั้นทิ้งไม้ไว้ในเตาอบที่ควบคุมอุณหภูมิที่ 103 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 16 ชม. และหลังจากนั้นนำไม้ออกมาชั่งน้ำหนัก น้ำหนักที่หายไปคือค่าความชื้นที่อยู่ในไม้

สารระเหยที่อยู่ในชีวมวลหมายถึง ไม้ที่สามารถควบแน่นได้ และไม้ที่ไม่สามารถควบแน่นได้ที่ปล่อยออกมาเมื่อชีวมวลได้รับความร้อน ปริมาณสารระเหยที่ปล่อยออกมาจะขึ้นกับอัตราการให้ความร้อนเชื้อเพลิงและอุณหภูมิ ในการวิเคราะห์ปริมาณสารระเหยจะใช้วิธีวิเคราะห์อ้างอิงตามมาตรฐานการทดสอบและวัสดุของอเมริกันสมาคม สำหรับเชื้อเพลิงไม่ใช้วิธีวิเคราะห์ตามมาตรฐานการทดสอบและวัสดุของอเมริกันสมาคม E-872 (ASTM E-872) การวิเคราะห์ทำโดยใช้เชื้อเพลิงไม้ตัวอย่าง 50 กรัม ที่สุมมาจากเชื้อเพลิงไม้ 10 กิโลกรัม โดยการสุมตัวอย่างใช้วิธีตามมาตรฐานการทดสอบและวัสดุของอเมริกันสมาคม D-346 (ASTM D-346) และนำตัวอย่างมาบดให้มีขนาดเล็กกว่า 1 มิลลิเมตร และนำเชื้อเพลิงแห้งที่บดแล้วน้ำหนัก 1 กรัม มาใช้ในการวิเคราะห์ โดยวางตัวอย่างในเบ้าหลอมที่มีฝาปิดและใส่ลงในเตาอบที่มีอุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส โดนให้ความร้อนเป็นเวลา 7 นาที สารระเหยจะปล่อยออกมาซึ่งสามารถสังเกตได้จากเปลวไฟ หลังจากนั้นนำตัวอย่างออกมาและทำให้เย็น และชั่งน้ำหนักของเชื้อเพลิงไม้ น้ำหนักส่วนที่หายไปคือสารระเหย

เถ้า คือ สารอนินทรีย์ที่ยังคงเหลืออยู่หลังจากที่คาร์บอนในชีวมวลถูกเผาไหม้หมดแล้ว สารอนินทรีย์ที่อยู่ในเถ้าได้แก่ ซิลิกา อลูมิเนียม เหล็ก แคลเซียม แมกนีเซียม และโพแทสเซียม เป็นต้น การวิเคราะห์องค์ประกอบของเถ้าสำหรับเชื้อเพลิงไม่ใช้วิธีการวิเคราะห์ตามมาตรฐานการทดสอบและวัสดุของอเมริกันสมาคม D1102 (ASTM D1102) การวิเคราะห์เถ้าทำโดยใช้เชื้อเพลิงไม้ตัวอย่าง 1 กรัม ที่มีขนาดเล็กกว่า 475 ไมครอน อบแห้งตามวิธีมาตรฐาน และนำมาวางบนเบ้าหลอมที่ไม่ต้องปิดฝา และใส่ไว้ในเตาเผาอุณหภูมิสูง โดยให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ เมื่อ

คาร์บอนในชีวมวลถูกเผาไหม้หมดแล้ว ทั้งไว้ให้เย็น และนำมาชั่งน้ำหนัก น้ำหนักที่ได้เป็นน้ำหนักของเถ้าที่อยู่ในเชื้อเพลิง

คาร์บอนคงตัว หมายถึง ปริมาณคาร์บอนในชีวมวลที่ยังคงเหลืออยู่ในถ่านชาร์หลังจากที่สารระเหยถูกปล่อยออกมาในกระบวนการสลายตัวด้วยความร้อน การหาปริมาณคาร์บอนคงตัว สามารถทำได้เมื่อทราบปริมาณความชื้น ปริมาณสารระเหย และเถ้า โดยใช้ความสัมพันธ์ดังแสดงในสมการที่ 1

$$\text{ปริมาณคาร์บอนคงตัว (\%)} = 100 - (\% \text{ เถ้า} + \% \text{ ความชื้น} + \% \text{ สารระเหย}) \quad (1)$$

ปริมาณคาร์บอนคงตัวที่ได้จากการวิเคราะห์โดยการประมาณค่าและจากการวิเคราะห์โดยละเอียดจะมีค่าแตกต่างกัน เนื่องจากการวิเคราะห์โดยวิธีการประมาณค่าไม่ได้รวมคาร์บอนที่อยู่ในสารระเหย ซึ่งโดยปกติจะหมายถึงวิเคราะห์โดยละเอียดจะมีค่าแตกต่างกัน เนื่องจากการวิเคราะห์โดยวิธีการประมาณค่าไม่ได้รวมคาร์บอนที่อยู่ในสารระเหย ซึ่งโดยปกติจะหมายถึงถ่านชาร์ที่เกิดขึ้นหลังจากกระบวนการสลายตัวด้วยความร้อน

การวิเคราะห์องค์ประกอบของเชื้อเพลิงแข็งหรือชีวมวลโดยการประมาณค่าอาจทำการวิเคราะห์ตามลักษณะของชีวมวลที่ใช้ในการพิจารณาที่มีลักษณะที่แตกต่างกันเป็น 4 แบบ คือ

แบบที่ 1 วิเคราะห์เชื้อเพลิงตามสมบัติของเชื้อเพลิงตามที่ได้รับมา

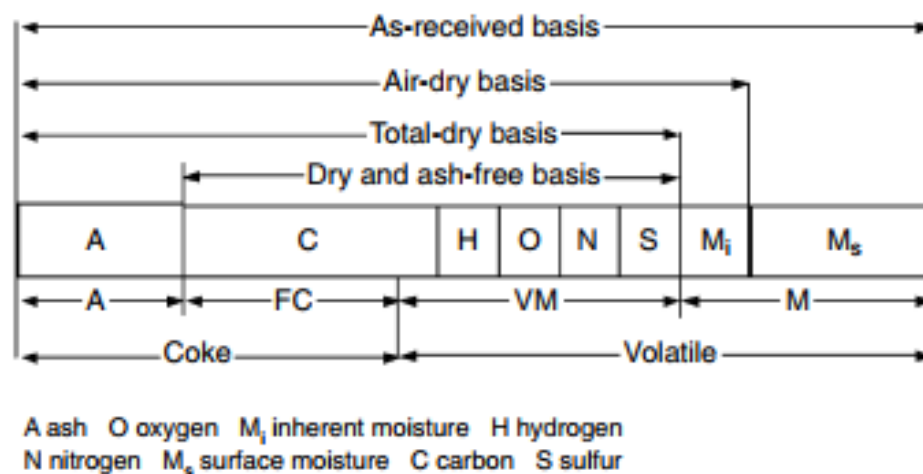
แบบที่ 2 วิเคราะห์เชื้อเพลิงภายใต้เกณฑ์การพิจารณาว่าเชื้อเพลิงเป็นเชื้อเพลิงแห้ง (Total dry basis) เป็นการวิเคราะห์เชื้อเพลิงที่ไม่พิจารณาความชื้นทั้งหมดที่อยู่ในเชื้อเพลิง

แบบที่ 3 วิเคราะห์เชื้อเพลิงภายใต้เกณฑ์การพิจารณาที่ไม่รวมความชื้นที่ผิว (air dry basis) เป็นการวิเคราะห์เชื้อเพลิงแห้งที่ไม่พิจารณาความชื้นที่อยู่ผิวของเชื้อเพลิงเป็นองค์ประกอบในเชื้อเพลิง

แบบที่ 4 วิเคราะห์เชื้อเพลิงภายใต้เกณฑ์การพิจารณาว่าเชื้อเพลิงเป็นเชื้อเพลิงแห้งและไม่มีเถ้า (dry ash free basis) ซึ่งเป็นการวิเคราะห์เชื้อเพลิงแห้งที่ไม่พิจารณาความชื้นและเถ้าเป็นองค์ประกอบในเชื้อเพลิง

การวิเคราะห์ภายใต้เกณฑ์ต่าง ๆ ปริมาณที่ทำการวิเคราะห์และปริมาณองค์ประกอบที่วิเคราะห์ได้จะมีค่าแตกต่างกัน การวิเคราะห์องค์ประกอบโดยประมาณตามเกณฑ์ที่พิจารณาต่าง ๆ กันจะได้ข้อมูลที่แตกต่างกัน เช่น การวิเคราะห์องค์ประกอบของเชื้อเพลิงแข็งตามลักษณะของเชื้อเพลิงตามที่ได้รับมา ข้อมูลที่ได้รับประกอบด้วย เถ้า คาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน ไนโตรเจน ซัลเฟอร์ คาร์บอนคงตัว สารระเหย ความชื้นที่อยู่ในเนื้อของชีวมวลและความชื้นที่อยู่ผิว

ของชีวมวลปริมาณที่ได้จากการวิเคราะห์เชื้อเพลิงแข็งตามเกณฑ์ต่าง ๆ ทั้ง 4 แบบ แสดงรายละเอียดดังภาพประกอบ 7 และการวิเคราะห์องค์ประกอบของชีวมวลโดยการประมาณค่าของชีวมวลชนิดต่างๆ แสดงดังตาราง 4



ภาพประกอบ 7 ปริมาณที่ใช้ในการวิเคราะห์องค์ประกอบของเชื้อเพลิงแข็งโดยการประมาณค่า  
ที่มา: Basu, 2010

ตาราง 4 การวิเคราะห์ชีวมวลโดยการประมาณค่าของชีวมวลชนิดต่าง ๆ

| ชีวมวล             | คาร์บอนคงตัว | สารระเหย | เถ้า  |
|--------------------|--------------|----------|-------|
| ไม้อัดเม็ด         | 15.77        | 82.14    | 2.09  |
| เปลือกถั่วอลันท์   | 21.16        | 78.28    | 0.56  |
| เปลือกถั่วอัลมอนต์ | 21.54        | 76.83    | 1.63  |
| ซังข้าวโพด         | 18.54        | 80.10    | 1.36  |
| ฟางข้าวสาลี        | 19.80        | 71.30    | 8.90  |
| ลำต้นนุ่น          | 22.43        | 70.89    | 6.68  |
| ลำต้นและใบข้าวโพด  | 19.25        | 75.17    | 5.58  |
| ชานอ้อย            | 14.95        | 73.78    | 11.27 |
| เกลบ               | 15.80        | 63.60    | 20.60 |
| ผักตบชวา           | -            | 80.40    | 19.60 |

ที่มา: Gaur and Reed, 1998

#### 4.2) การหาค่าองค์ประกอบในเชื้อเพลิงชีวมวลโดยละเอียดหรือแบบแยกธาตุ

การวิเคราะห์องค์ประกอบของเชื้อเพลิงชีวมวลโดยละเอียดหรือแบบแยกธาตุ (Ultimate Analysis) โดยทั่วไปจะใช้วิธีอ้างอิงตามวิธีการวิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุของถ่านหินและถ่านโค้กที่กำหนดตามมาตรฐานการทดสอบ และวัสดุของอเมริกันสมาคมสำหรับถ่านหิน ASTM D 3176-09 ตามมาตรฐานนี้ได้กำหนดวิธีวิเคราะห์และปริมาณที่ต้องการวิเคราะห์และปริมาณที่ต้องทำการวิเคราะห์ได้แก่ ปริมาณของคาร์บอน ไฮโดรเจน กำมะถัน ไนโตรเจน และเถ้าโดยปริมาณของออกซิเจน ใช้วิธีคำนวณโดยคิดว่าปริมาณสารทั้งหมดในเชื้อเพลิงมีค่าเป็น 100 ส่วน สำหรับการวิเคราะห์แบบแยกธาตุจะวิเคราะห์โดยพิจารณาตามพื้นฐานที่เชื้อเพลิงเป็นเชื้อเพลิงแห้งโดยไม่พิจารณาความชื้นเป็นองค์ประกอบในเชื้อเพลิง การวิเคราะห์เชื้อเพลิงชีวมวลแบบแยกธาตุของชีวมวลชนิดต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 5

ตาราง 5 การวิเคราะห์เชื้อเพลิงชีวมวลแบบแยกธาตุของชีวมวลชนิดต่าง ๆ

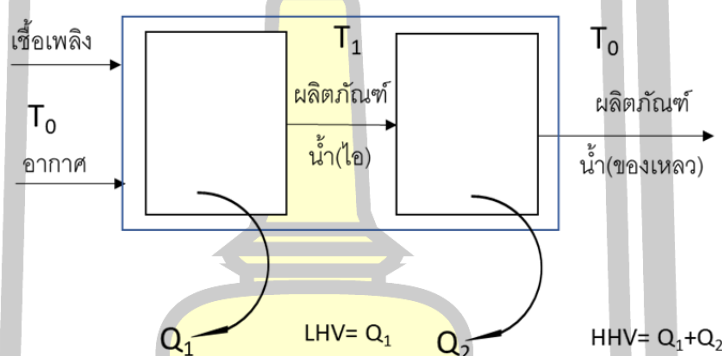
| ชีวมวล             | C     | H    | O     | N    | S    |
|--------------------|-------|------|-------|------|------|
| ไม้อัดเม็ด         | 48.13 | 5.87 | 42.46 | 1.45 | 0    |
| เปลือกถั่ววอลนัท   | 49.98 | 5.71 | 43.35 | 0.21 | 0.01 |
| เปลือกถั่วอัลมอนด์ | 51.3  | 5.29 | 40.9  | 0.66 | 0.01 |
| ซังข้าวโพด         | 46.58 | 5.87 | 45.46 | 0.47 | 0.01 |
| ฟางข้าวสาลี        | 43.2  | 5    | 39.4  | 0.61 | 0.11 |
| ลำต้นนุ่น          | 43.64 | 5.81 | 43.87 | 0    | 0    |
| ลำต้นและใบข้าวโพด  | 43.65 | 5.56 | 43.31 | 0.61 | 0.01 |
| ชานอ้อย            | 44.8  | 5.36 | 39.55 | 0.35 | 0.01 |
| แกลบ               | 38.3  | 4.36 | 36.45 | 0.83 | 0.06 |
| ผักตบชวา           | 40.3  | 4.6  | 33.99 | 1.51 | 0    |

ที่มา: Gaur and Reed, 1998

#### 4.3) การหาค่าความร้อนของเชื้อเพลิงชีวมวล

ค่าความร้อนของชีวมวลสามารถหาได้โดยวิเคราะห์โดยใช้เครื่องมือวัดที่เรียกว่า บอมบ์แคลอริมิเตอร์ และโดยวิธีการคำนวณโดยใช้ข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์โดยละเอียด การวิเคราะห์หาค่าความร้อนของเชื้อเพลิงชีวมวลที่นิยมใช้โดยทั่วไปใช้วิธีอ้างอิงตามค่ากำหนดตามมาตรฐานการทดสอบและวัสดุของอเมริกันสมาคมสำหรับถ่านหินที่ใช้มาตรฐาน ASTM D 5868 โดยค่าความร้อนของชีวมวลชนิดต่าง ๆ แสดงดังตาราง 6

การหาค่าความร้อนของชีวมวลหรือเชื้อเพลิงแข็งมี 2 วิธี คือ วิเคราะห์โดยหาค่าความร้อนสูง ของเชื้อเพลิง (Higher Heating Value: HHV) และวิเคราะห์โดยหาค่าความร้อนต่ำของเชื้อเพลิง (Lower Heating Value; LHV) ค่าความร้อนต่ำของเชื้อเพลิงชีวมวลหรืออาจเรียกว่า ค่าความร้อนสุทธิ (Net Calorific Value; NCV) เป็นการหาค่าความร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลที่อุณหภูมิเริ่มต้น 25 องศาเซลเซียส โดยพิจารณาว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการเผาไหม้ทั้งหมดรวมทั้งน้ำมีสถานะเป็นไอ ค่าความร้อนสูงของเชื้อเพลิงชีวมวลหรืออาจเรียกว่าค่าความร้อนรวม (Gross Calorific Value: GCV) เป็นการหาค่าความร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลที่อุณหภูมิเริ่มต้น 25 องศาเซลเซียส ในกรณีนี้ไอน้ำจากการเผาไหม้จะควบแน่นกลับมาเป็นของเหลว ทำให้คายความร้อนออกมา ซึ่งจะทำให้ความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงมีค่าเพิ่มมากขึ้น ซึ่งความร้อนที่เพิ่มขึ้นมีค่าเท่ากับค่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอของไอน้ำ



ภาพประกอบ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนต่ำและค่าความร้อนสูง  
ที่มา: กระทรวงพลังงาน, 2559

เนื่องจากค่าความร้อนแฝงในการเป็นไอของน้ำมีค่า 2,260 กิโลจูลต่อกิโลกรัม และโมเลกุลของน้ำประกอบด้วยไฮโดรเจน 2 อะตอม และออกซิเจน 1 อะตอม คิดเป็นอัตราส่วนมวลโมเลกุลของไฮโดรเจนต่อมวลโมเลกุลของน้ำ มีค่าเท่ากับ 1:9 ดังนั้นจากสมการที่ 2 จะสามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนต่ำและค่าความร้อนสูงของเชื้อเพลิงชีวมวลได้ดังสมการที่ 2

$$\text{HHV} = \text{LHV} + 23.95(9H + M) \text{ kJ/kg} \quad (2)$$

เมื่อ H เท่ากับปริมาณร้อยละของธาตุไฮโดรเจนในชีวมวล

M เท่ากับปริมาณร้อยละของความชื้นในชีวมวล

การหาค่าความร้อนของชีวมวลสามารถคำนวณได้ ถ้าทราบปริมาณองค์ประกอบต่าง ๆ ของเชื้อเพลิงจากการวิเคราะห์โดยการประมาณค่าและการวิเคราะห์โดยละเอียด ได้มีผู้เสนอความสัมพันธ์เพื่อหาค่าความร้อนสูงของเชื้อเพลิงโดยการคำนวณจากปริมาณธาตุต่าง ๆ ที่มีในเชื้อเพลิงที่ได้จากการวิเคราะห์โดยละเอียดซึ่งปรากฏในรูปของสมการอย่างง่ายหลายสมการ โดยแต่ละสมการจะมีสูตรและเงื่อนไขในการใช้สมการที่แตกต่างกันไปการจะเลือกนำสมการใดไปใช้งานจะขึ้นกับข้อมูลองค์ประกอบของธาตุต่าง ๆ ที่มีในเชื้อเพลิง

การหาค่าความร้อนของเชื้อเพลิงชีวมวลอาจทำการคำนวณได้ถ้าทราบผลการวิเคราะห์เชื้อเพลิงโดยประมาณ เนื่องจากการวิเคราะห์โดยประมาณนั้นทำได้ง่ายกว่าการวิเคราะห์โดยละเอียด จากการศึกษาของเชื้อเพลิงโดยใช้ข้อมูลจากการวิเคราะห์โดยประมาณ แสดงดังสมการที่ 3 (Motghare et al., 2016)

$$\text{HHV (MJ/kg)} = 0.3536(\text{FC}) + 0.1559(\text{VM}) - 0.0078(\text{Ash}) \quad (\text{MJ/kg}) \quad (3)$$

เมื่อ FC = ปริมาณคาร์บอนคงตัว (ร้อยละโดยน้ำหนัก)

VM = ปริมาณสารระเหย (ร้อยละโดยน้ำหนัก)

Ash = ปริมาณเถ้า (ร้อยละโดยน้ำหนัก)

ตาราง 6 ค่าความร้อนของชีวมวลชนิดต่างๆ ในหน่วย MJ/kg

| ชีวมวล          | วัสดุเหลือทิ้ง | ค่าความร้อน | ชีวมวล      | วัสดุเหลือทิ้ง | ค่าความร้อน |
|-----------------|----------------|-------------|-------------|----------------|-------------|
| อ้อย            | ชานอ้อย        | 14.4        | มะพร้าว     | เปลือก         | 16.23       |
|                 | ยอดและใบ       | 17.39       |             | กะลา           | 17.93       |
| ข้าว            | แกลบ           | 14.27       | มันสำปะหลัง | ทะลาย          | 15.4        |
|                 | ฟางข้าว        | 10.24       |             | ต้น            | 18.42       |
| น้ำมัน<br>ปาล์ม | ทะลายปาล์ม     | 17.86       | ข้าวโพด     | ซัง            | 18.04       |
|                 | เส้นใย         | 17.62       | ถั่วลิสง    | เปลือก         | 12.66       |
|                 | กะลา           | 18.46       | ฝ้าย        | ลำต้น          | 14.49       |
|                 | ก้านทาง        | 9.83        | ถั่วเหลือง  | ลำต้นและใบ     | 19.44       |
|                 | ทะลายตัวผู้    | 16.33       | ข้าวฟ่าง    | ใบและต้น       | 10.23       |
|                 | กิ่งก้าน       | 14.98       |             |                |             |

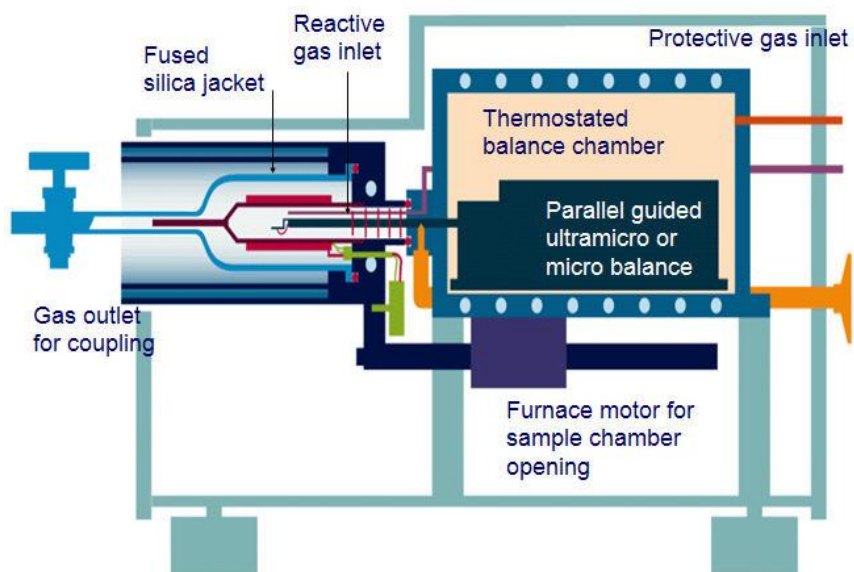
ที่มา: กระทรวงพลังงาน, 2559

#### 4.4) การวิเคราะห์ทางความร้อนของชีวมวล

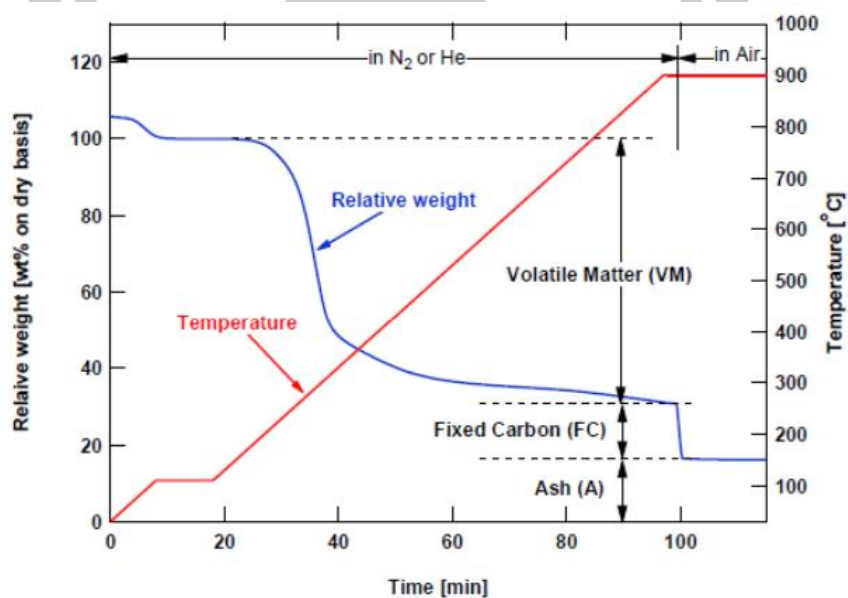
หลักการของเทคนิค Thermal Gravimetric Analysis (TGA) เป็นวิธีเบื้องต้นในการวิเคราะห์ความเสถียรภาพของวัสดุ และสมบัติทางความร้อนของวัสดุ เมื่อได้รับความร้อนโดยใช้พื้นฐานการวัดน้ำหนักอย่างต่อเนื่องด้วยเครื่องชั่งที่มีความไวสูง (Thermo Balance) ในระหว่างการวิเคราะห์ อุณหภูมิของตัวอย่างซึ่งอยู่ในบรรยากาศปกติ หรือก๊าซเฉื่อย จะถูกทำให้เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องข้อมูลการวิเคราะห์จะถูกบันทึกเป็น เทอร์โมแกรม ที่แสดงการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของตัวอย่างและอุณหภูมิ การสูญเสียน้ำหนักในช่วงแรกของการวิเคราะห์หรือที่อุณหภูมิต่ำอาจเกิดจากการระเหยของน้ำหรือตัวทำละลายแต่ที่อุณหภูมิสูงมักเกิดจากการสลายตัวของพอลิเมอร์ เทคนิคนี้มีประโยชน์มากในการวิเคราะห์หาสารที่ระเหยหรือสารเติมแต่งที่ใส่ลงไปในวัสดุ (ห้องปฏิบัติการทดสอบสมบัติเชิงฟิสิกส์, 2559)

การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน เป็นการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพหรือทางเคมีของวัสดุที่ขึ้นกับอุณหภูมิและเวลา ผลการวิเคราะห์จะให้ข้อมูลเกี่ยวกับ สมบัติทางความร้อน เสถียรภาพต่อความร้อน เสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน และลักษณะการผ่านกระบวนการทางความร้อนของวัสดุ โดยทำการศึกษาน้ำหนักที่หายไปเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ความร้อนที่วัสดุดูดหรือคาย เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิหรือเวลา และการเปลี่ยนแปลงขนาดของวัสดุขึ้นงานภายใต้การเปลี่ยนอุณหภูมิหรือเวลา (ห้องปฏิบัติการทดสอบสมบัติเชิงฟิสิกส์, 2559)

เทอร์โมกราวิเมทรี (Thermogravimetry) เป็นเทคนิคที่ใช้ตรวจสอบมวลของสารตัวอย่างเทียบกับเวลาหรืออุณหภูมิ ให้แก่สารตัวอย่างนั้นในบรรยากาศเฉพาตัว เรียกว่า การวิเคราะห์โดยวิธีการชั่งน้ำหนักเชิงความร้อน (Thermogravimetric Analysis, TGA) ใช้อุปกรณ์ที่สำคัญ คือ สารเชิงความร้อน (Thermobalance) หรือเครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์โดยวิธีชั่งน้ำหนักเชิงความร้อน (Thermogravimetric Analyser) ถ้าต้องการระบุเส้นกราฟ TGA ก็ใช้วิธีลากเส้นแบบอนุพันธ์ซึ่งเป็นเทคนิคที่ช่วยเพิ่มความถูกต้องและแม่นยำในการตรวจวัดและให้ข้อมูลการวิเคราะห์ในแง่จลนพลศาสตร์ ณ อุณหภูมิต่างๆ ได้เป็นอย่างดี เทคนิคนี้มักจะเรียกว่า “เดริเวทีฟ เทอโมกราวิเมทริก อะนาไลซิส” (Derivative Thermogravimetric Analysis; DTG) ซึ่งหมายถึง การพล็อตอัตราการสูญเสียมวลเทียบกับเวลา แสดงดังภาพประกอบ 9 ซึ่งจากการวิเคราะห์โดยเครื่อง TGA โดยการตั้งโปรแกรมการให้ความร้อนข้างต้น จะได้ข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักของชีวมวล อุณหภูมิและเวลา แสดงดังภาพประกอบ 10



ภาพประกอบ 9 หลักการทำงานของ Thermo gravimetric Analysis (TGA)  
ที่มา: วีระพงศ์ สังวาล, 2559



ภาพประกอบ 10 การวิเคราะห์หาองค์ประกอบเชิงปริมาณของชีวมวล โดยใช้เครื่อง TGA  
ที่มา: นคร วรสุวรรณรักษ์, 2558

### 2.1.3 หญ้าหลายฤดู (Perennial Grass)

หญ้าหลายฤดูเป็นพืชพลังงานที่ได้รับความนิยมในปัจจุบันเป็นสารชีวมวลที่กำลังส่งเสริมให้นำมาผลิตพลังงานทดแทนในอนาคต ซึ่งจะมีลักษณะคือมีอายุมากกว่า 2 ปี เจริญเติบโต ออกดอก และผลิตเมล็ดได้หลายครั้ง สามารถขยายพันธุ์ได้ทั้งเมล็ด และส่วนขยายพันธุ์แบบไม่ใช้เพศ ได้แก่ เหง้า หัว ไหล ลำต้น เช่น หญ้าคา แห้วหมู หญ้าชันกาด หญ้าเนเปียร์ เป็นต้น มีผลผลิตสูง เพาะปลูกครั้งเดียวเก็บเกี่ยวผลผลิตได้หลายครั้ง สำหรับในประเทศไทยนั้นพบพืชพลังงานที่เป็นพืชตระกูลหญ้าหลายฤดูอยู่หลายชนิด โดยที่หญ้านั้นมีศักยภาพการนำไปเป็นเชื้อเพลิงเพื่อผลิตพลังงานได้หลายรูปแบบแตกต่างกันตามกระบวนการผลิตที่ต้องการพลังงานออกมา เช่น นำมาเป็นวัสดุในการผลิตพลังงานความร้อน พลังงานเอทานอล และพลังงานไฟฟ้า เป็นต้น ซึ่งในปัจจุบันหญ้าหลายฤดูถูกนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงแข็งในโรงไฟฟ้า ตลอดจนเป็นวัตถุดิบทางเลือกสำหรับเชื้อเพลิงชีวภาพ เช่น เอทานอลจากเซลลูโลส และยังสามารถนำมาผลิตเป็นเชื้อเพลิงอัดแข็งเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้ความร้อนได้มากถึงสามเท่า (Biomass Energy Resource Center, 2009)

#### 1) หญ้าที่นิยมปลูกในประเทศไทย

ทั่วโลกมีพืชตระกูลหญ้าทั้งหมดประมาณ 10,000 ชนิด (Species) มีการปลูกในทุ่งหญ้าประมาณ 40 ชนิด สำหรับในเขตร้อนของประเทศไทยมีการใช้ทำเพื่อทุ่งหญ้าเพียง 15-20 ชนิด เท่านั้น และสำหรับพันธุ์พืชอาหารสัตว์ที่มีการเพาะปลูกในประเทศไทยโดยแบ่งตามพันธุ์หญ้าธรรมชาติ (Non-Hybrid Grass) และพันธุ์หญ้าลูกผสม (Hybrid Grass) ดังตาราง 7

ตาราง 7 พันธุ์พืชอาหารสัตว์ที่เพาะปลูกในประเทศไทย

| พันธุ์หญ้า                               | ชนิดพันธุ์พืชอาหารสัตว์ | ชื่อสามัญ       | ชื่อวิทยาศาสตร์               |
|------------------------------------------|-------------------------|-----------------|-------------------------------|
| พันธุ์หญ้าธรรมชาติ<br>(Non-Hybrid Grass) | หญ้าซิกแนลนอน           | Signal          | <i>Brachiaria decumbens</i>   |
|                                          | หญ้าซิกแนลตั้ง          | Signal          | <i>Brachiaria brizantha</i>   |
|                                          | หญ้าซิกแนลเลื้อย        | Humidicola      | <i>Brachiaria humidicola</i>  |
|                                          | หญ้าโคโร                | Cori            | <i>Brachiaria miliiformis</i> |
|                                          | หญ้ารูซี่               | Ruzi Grass      | <i>Brachiaria ruziziensis</i> |
|                                          | หญ้ามอริซัสหรือหญ้าขน   | Mauritius Grass | <i>Brachiaria mutica</i>      |
|                                          | หญ้าพลิแคทูลัม          | Plicatulum      | <i>Paspalum plicatulum</i>    |
|                                          | หญ้าแพนโกลา             | Pangola Grass   | <i>Digitaria eriantha</i>     |

ตาราง 7 (ต่อ) พันธุ์พืชอาหารสัตว์ที่เพาะปลูกในประเทศไทย

| พันธุ์หญ้า                                    | ชนิดพันธุ์พืชอาหารสัตว์   | ชื่อสามัญ                    | ชื่อวิทยาศาสตร์                                              |
|-----------------------------------------------|---------------------------|------------------------------|--------------------------------------------------------------|
| พันธุ์หญ้า<br>ธรรมดา<br>(Non-Hybrid<br>Grass) | หญ้าเนเปียร์              | Napier Grass                 | <i>Pennisetum purpureum</i>                                  |
|                                               | หญ้าขจรจบ                 | Feather pennisetum           | <i>Pennisetum pedicellatum</i>                               |
|                                               | หญ้าไผ่มุก                | -                            | <i>Pennisetum americanum</i>                                 |
|                                               | หญ้ากีนี่                 | Guinea                       | <i>Panicum maximum</i>                                       |
| พันธุ์หญ้า<br>ลูกผสม<br>(Hybrid<br>Grass)     | หญ้ากีนี่สีม่วง           | Purple Guinea Grass          | <i>Panicum maximum</i> cv. TD 58                             |
|                                               | หญ้าเนเปียร์<br>แคระ      | Mott Dwarf<br>Elephant Grass | <i>P. purpureum</i> cv.Mott.                                 |
|                                               | หญ้าเนเปียร์ยักษ์         | King Grass                   | <i>P. purpureum</i> cv. Kinggrass                            |
|                                               | หญ้าเนเปียร์ปาก<br>ช่อง 1 | Pak Chong 1                  | <i>P. purpureum</i> x <i>pennisetum</i><br><i>americanum</i> |
|                                               | หญ้าบาน่า                 | Bana Grass                   | <i>P. purpureum</i> X <i>P.</i><br><i>americanum</i>         |
|                                               | หญ้าอะตราตัม              | Atratum                      | <i>Paspalum atratum</i> . Swallen.                           |

### 1.1) พันธุ์หญ้าธรรมดา (Non Hybrid Grass)

#### 1.1.1) หญ้าซิกแนลนอน (*Brachiaria decumbens*)

หญ้าซิกแนลนอน มีถิ่นกำเนิดอยู่ในประเทศอุกันดาประเทศในแถบแอฟริกา ทวีปที่เต็มไปด้วยทะเลทรายเป็นส่วนใหญ่ บุคคลที่นำเข้ามาปลูกในประเทศไทยคือ Dr.Hudson เมื่อปี พ.ศ. 2499 เจริญเติบโตได้ดีในเขตร้อนชื้นซึ่งมีฤดูแล้งนานกว่า 4-5 เดือน ทนต่อร่มเงาของไม้ยืนต้น เช่น สวนมะพร้าว หรือสวนยางโดยผลผลิตน้ำหนักแห้งประมาณ 1,700 กิโลกรัมต่อไร่ โดยทั่วไปจะมีปริมาณโปรตีนเฉลี่ยประมาณ 8.1 เปอร์เซ็นต์

การเก็บเกี่ยว ทำการตัดหญ้าครั้งแรกเมื่ออายุ 60 วัน และตัดหญ้าครั้งต่อไป ทุกๆ 45 วัน โดยตัดหญ้าสูงจากพื้นดิน 10 เซนติเมตร ใช้สำหรับเลี้ยงโค และกระบือ

การศึกษาผลผลิตและส่วนประกอบของหญ้าซิกแนลนอนในสภาพดินร่วนปนทรายของพื้นที่จังหวัดมุกดาหาร ที่อายุ 60 วัน พบว่า ผลผลิตน้ำหนักแห้ง คือ 1,899 กิโลกรัมต่อไร่ และองค์ประกอบทางเคมี ได้แก่ โปรตีน NDF ADF ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียม คือ 9.5, 62.78, 39.10, 0.16 และ 0.98 % ตามลำดับ (เกียรติศักดิ์ กล้าเอม และคณะ, 2540)

การศึกษาผลผลิตและส่วนประกอบของหญ้าชิกแนลนอนในสภาพดินร่วนปนทรายของพื้นที่จังหวัดอุบลราชธานี พบว่า ผลผลิตน้ำหนักร้าง คือ 1,933 กิโลกรัมต่อไร่ และองค์ประกอบทางเคมี ได้แก่ โปรตีน NDF ADF ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียม คือ 9.72, 70.99, 40.52, 0.28 และ 1.13 % ตามลำดับ (เกียรติก้องดี กล้าเอม และคณะ, 2540)

#### 1.1.2) หญ้าชิกแนลตั้ง (*Brachiaria brizantha*)

หญ้าชิกแนลตั้ง มีถิ่นกำเนิดในทวีปแอฟริกา นำเข้ามาปลูกในประเทศไทยโดย Dr. Hudson เจ้าหน้าที่องค์การอาหารและเกษตร เมื่อปีพ.ศ. 2499 มีความทนแล้งได้ดีกว่าหญ้ารูซี่ และหญ้ามอริซัส สามารถปรับตัวและเจริญเติบโตได้ในสภาพร่มเงาของสวนมะพร้าวได้ดี และให้ผลผลิตน้ำหนักร้างประมาณ 1,500 กิโลกรัมต่อไร่ โดยทั่วไปจะมีโปรตีนประมาณ 8 เปอร์เซ็นต์

การตัด เพื่อนำให้สัตว์กินควรตัดครั้งแรกเมื่ออายุ 60 วัน หลังจากนั้นทำการตัดทุกๆ 45 วัน ควรตัดสูงจากพื้นดิน 10-15 เซนติเมตร เหมาะสำหรับใช้เลี้ยงโค กระบือ ในรูปสดแห้งหรือหมัก

การศึกษาผลผลิตและส่วนประกอบของหญ้าชิกแนลนอนในสภาพดินร่วนปนทรายของพื้นที่จังหวัดมุกดาหาร ที่อายุ 60 วัน พบว่า ผลผลิตน้ำหนักร้าง คือ 2,963 กิโลกรัมต่อไร่ และองค์ประกอบทางเคมี ได้แก่ โปรตีน NDF ADF ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียม คือ 9.6, 63.38, 37.61, 0.17 และ 0.96 % ตามลำดับ (เกียรติก้องดี กล้าเอม และคณะ, 2540)

การศึกษาผลผลิตและส่วนประกอบของหญ้าชิกแนลนอนในสภาพดินร่วนปนทรายของพื้นที่จังหวัดอุบลราชธานี พบว่า ผลผลิตน้ำหนักร้าง คือ 2,007 กิโลกรัมต่อไร่ และองค์ประกอบทางเคมี ได้แก่ โปรตีน NDF ADF ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียม คือ 9.53, 71.22, 40.44, 0.26 และ 1.15 % ตามลำดับ (เกียรติก้องดี กล้าเอม และคณะ, 2540)

#### 1.1.3) หญ้าชิกแนลเลื้อย (*Brachiaria humidicola*)

หญ้าชิกแนลเลื้อย มีถิ่นกำเนิดในทวีปแอฟริกา นำเข้ามาปลูกในประเทศไทยโดย นายมงคล หาญกล้า เมื่อปีพ.ศ. 2528 ทนทานต่อสภาพอากาศแล้งหรือน้ำท่วมขัง และทนต่อการเหยียบย่ำของสัตว์ สามารถเจริญเติบโตได้ภายใต้สภาพร่มเงาของสวนมะพร้าว โดยให้ผลผลิตน้ำหนักร้างเพียง 700 กิโลกรัมต่อไร่ ปลูกในที่โล่งแจ้งจะได้ผลผลิตน้ำหนักร้าง 2,100 – 3,000 กิโลกรัมต่อไร่ มีโปรตีนประมาณ 8 เปอร์เซ็นต์

การตัด เพื่อนำให้สัตว์กินควรตัดครั้งแรกเมื่ออายุ 60 วัน หลังจากนั้นทำการตัดทุกๆ 45 วัน ควรตัดสูงจากพื้นดิน 10-15 เซนติเมตร เหมาะสำหรับใช้เลี้ยงโค และกระบือ ในรูปสดหรือแห้ง

การศึกษาผลผลิตและส่วนประกอบของหญ้าชิกแนลเลื้อยในสภาพดินร่วนปนทรายของพื้นที่จังหวัดมุกดาหาร ที่อายุการตัด 60 วัน พบว่า ผลผลิตน้ำหนักร้าง คือ 2,073 กิโลกรัม

ต่อไร่ และองค์ประกอบทางเคมี ได้แก่ โปรตีน NDF ADF ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียม คือ 8.5, 67.58, 40.09, 0.17 และ 1.02 % ตามลำดับ (เกียรติก้องดี กล้าเอม และคณะ, 2540)

จากการศึกษาของ นิรันดร์ (2555) พบว่าส่วนประกอบทางเคมีของหญ้าชิกแนลเลื่อยอายุ 30 วัน มีระดับโปรตีนสูงสุด คือ 13.87 เปอร์เซ็นต์ และระดับโปรตีนลดลงเมื่ออายุหญ้า 45 และ 60 วัน คือ 12.75 และ 8.10 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อหญ้าชิกแนลเลื่อยมีอายุมากขึ้นมีผลทำให้ระดับโปรตีนลดลง

#### 1.1.4) หญ้าโคโร (*Brachiaria miliiformis*)

หญ้าโคโร มีถิ่นกำเนิดในประเทศอินเดีย ศรีลังกา พม่า และมาเลเซีย โดยนายรัชชัย อินทรตุลย์ เป็นผู้นำเข้ามาปลูกในประเทศไทย เมื่อปีพ.ศ. 2522 เป็นหญ้าที่มีอายุหลายปี ไม่ทนต่อสภาพแห้งแล้ง ผลผลิตจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความอุดมสมบูรณ์ของดินและปริมาณน้ำฝน เมื่อปลูกในดินที่มีความอุดมสมบูรณ์สูงจะได้ผลผลิต 2,000 กิโลกรัมต่อไร่ เมื่อปลูกในสภาพที่ร่มเงาได้ผลผลิต 1,600 กิโลกรัมต่อไร่ มีโปรตีน 8-12 เปอร์เซ็นต์

การตัด เพื่อนำให้สัตว์กินควรตัดครั้งแรกเมื่ออายุ 60 วัน หลังจากนั้นทำการตัดทุกๆ 45 วัน ควรตัดสูงจากพื้นดิน 10-15 เซนติเมตร เหมาะสำหรับใช้เลี้ยงโค และกระบือ ในรูปสดหรือแห้ง

การศึกษาผลผลิตและส่วนประกอบของหญ้าโคโรในสภาพดินร่วนปนทรายของพื้นที่จังหวัดมุกดาหาร ที่อายุการตัด 60 วัน พบว่า ผลผลิตน้ำหนักรวม คือ 2,525 กิโลกรัมต่อไร่ และองค์ประกอบทางเคมี ได้แก่ โปรตีน NDF ADF ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียม คือ 7.8, 66.17, 40.65, 0.15 และ 0.93 % ตามลำดับ (เกียรติก้องดี กล้าเอม และคณะ, 2540)

#### 1.1.5) หญ้ารูซี่ (*Brachiaria ruziziensis*)

หญ้ารูซี่ เป็นหญ้าที่มีอายุหลายปี ให้ผลผลิตทั่วไปประมาณ 2,000-3,000 กิโลกรัมต่อไร่ต่อปี มีโปรตีนประมาณ 8-9 เปอร์เซ็นต์ จัดเป็นพืชวันสั้น เจริญเติบโตได้ทั้งดินอุดมสมบูรณ์ในที่ดอนน้ำไม่ขัง และในดินที่มีธาตุอาหารค่อนข้างต่ำ ไม่ทนต่อสภาพน้ำขัง หญ้ารูซี่ตอบสนองต่อปุ๋ยได้ดี เมื่อใส่ปุ๋ยให้ผลผลิต 2,584 กิโลกรัมต่อไร่ ถ้าปลูกในดินทรายชุดโคราชเมื่อใส่ปุ๋ยได้ผลผลิต 3,400 กิโลกรัมต่อไร่ต่อปี มีปริมาณโปรตีนประมาณ 8.2 เปอร์เซ็นต์ มีถิ่นกำเนิดในทวีปแอฟริกาแถบประเทศคองโก นำเข้ามาจากประเทศออสเตรเลีย ปลูกในประเทศไทยครั้งแรกที่มวกเหล็ก เมื่อปี พ.ศ. 2511 โดยฟาร์มโคนมไทย – เดนมาร์ก (ปัจจุบัน คือ องค์การส่งเสริมกิจการโคนมแห่งประเทศไทย) สถานีอาหารสัตว์ปากช่องปลูกขยายพันธุ์และทดสอบพันธุ์ ต่อมาศูนย์ส่งเสริมการขยายพันธุ์สัตว์ของ กปร. กลาง นำเข้าจากไต้หวัน

การตัด เพื่อนำให้สัตว์กินควรตัดครั้งแรกเมื่อหญ้ามียายุ 60-70 วัน ถ้าปล่อยสัตว์เข้าแทะเล็มในแปลงหญ้าควรปล่อยแทะเล็มครั้งแรกที่หญ้ามียายุ 70-90 วัน ควรตัดสูงจากพื้นดิน 10-15 เซนติเมตร เหมาะสำหรับใช้เลี้ยงโค กระบือในรูปสด แห้งหรือหมัก

การศึกษาผลผลิตและส่วนประกอบของหญารูชีในสภาพดินร่วนปนทรายของพื้นที่จังหวัดมุกดาหาร ที่อายุการตัด 60 วัน พบว่า ผลผลิตน้ำหนักรากแห้ง คือ 2,526 กิโลกรัมต่อไร่ และองค์ประกอบทางเคมี ได้แก่ โปรตีน NDF ADF ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียม คือ 9.1, 62.41, 35.96, 0.17 และ 1.03 % ตามลำดับ (เกียรติศักดิ์ กล้าเอม และคณะ, 2540)

#### 1.1.6) หญ้ามอริชส์หรือหญ้านน (Brachiaria mutica)

หญ้ามอริชส์หรือหญ้านน มีถิ่นกำเนิดในทวีปแอฟริกา และอเมริกาใต้ นำเข้ามาปลูกในประเทศไทยโดย R.J. Jones เมื่อปีพ.ศ. 2472 เป็นหญ้ามียายุหลายปี ทนต่อสภาพพื้นที่ชื้นแฉะหรือมีน้ำท่วม เหมาะสำหรับบริเวณพื้นที่ที่เป็นดินเหนียวโดยไม่ใส่ปุ๋ยจะได้ผลผลิต 3,100 กิโลกรัมต่อไร่ และผลผลิตจะเพิ่มขึ้นเป็น 4,370 กิโลกรัมต่อไร่ เมื่อใส่ปุ๋ย มีปริมาณโปรตีนเฉลี่ยประมาณ 7.2 เปอร์เซ็นต์

การตัด ควรตัดครั้งแรกที่อายุ 80-90 วัน แล้วตัดทุกๆ 40-45 วัน สามารถตัดให้สัตว์เคี้ยวเอื้อง เช่น โค กระบือกินได้ หรืออาจใช้วิธีทาหญ้าหมัก เพื่อเก็บรักษาไว้เป็นอาหารสัตว์

#### 1.1.7) หญ้าพลิแคทูลัม (Paspalum plicatulum)

หญ้าพลิแคทูลัม มีถิ่นกำเนิดทางเขตร้อนของทวีปอเมริกา นำเข้ามาปลูกในประเทศไทยโดย นายรัตน์ อุณยวงศ์ เมื่อปีพ.ศ. 2507 มีเจริญเติบโตแบบเป็นกอ สามารถทนทานต่อความแห้งแล้งได้ดี และทนต่อสภาพน้ำขังได้ นอกจากนี้ยังทนต่อสภาพดินเลว ตอบสนองต่อความอุดมสมบูรณ์ ความชื้น และปุ๋ยได้ดี ให้ผลผลิต 1,250 กิโลกรัมต่อไร่ แต่ถ้าไม่ใส่ปุ๋ยจะให้ผลผลิตเพียง 225 กิโลกรัมต่อไร่เท่านั้น มีโปรตีนประมาณ 5-6 เปอร์เซ็นต์

การตัด สามารถตัดหญ้าพลิแคทูลัมครั้งแรกเมื่อต้นหญ้ามียายุได้ 60-70 วัน ควรตัดโดยที่ต้นหญ้ามีความสูงจากพื้นดินประมาณ 10-15 เซนติเมตร นิยมใช้เลี้ยงโค กระบือ ในรูปของหญ้าสด หญ้าหมัก หรือหญ้าแห้ง

#### 1.1.8) หญ้าแพนโกลา (Digitaria eriantha)

หญ้าแพนโกลา มีถิ่นกำเนิดอยู่ในแถบแคว้นทรานสวาเลตะวันออกของแอฟริกา นำเข้ามาปลูกในประเทศไทยครั้งแรก เมื่อปี พ.ศ. 2496 จากประเทศฟิลิปปินส์ โดยกองอาหารสัตว์กรมปศุสัตว์ เป็นหญ้าที่มีอายุหลายปี สามารถปรับตัวขึ้นได้ดีในพื้นที่ลุ่มและมีการระบายน้ำดี ทนน้ำท่วมขัง เจริญเติบโตดีในดินที่มีความอุดมสมบูรณ์สูง ให้ผลผลิตประมาณ 4-7 ตันต่อไร่ต่อปี มีโปรตีนประมาณ 7-11 เปอร์เซ็นต์

การตัด การตัดหญ้าแพงโกล่าไปใช้เลี้ยงสัตว์ ควรตัดหญ้าครั้งแรก 60-70 วัน หลังปลูก และตัดครั้งต่อไปทุกๆ 40-45 วัน โดยตัดสูงจากพื้นดิน 5-10 เซนติเมตร หญ้าแพงโกล่า เหมาะสำหรับใช้เลี้ยงโค กระบือ ในรูปหญ้าสด หรือหญ้าแห้ง

#### 1.1.9) หญ้าเนเปียร์ (*Pennisetum purpureum*)

หญ้าเนเปียร์สายพันธุ์ต่างๆ เป็นหญ้าที่มีอายุหลายปีเจริญเติบโตได้ในดินหลายชนิดตั้งแต่ดินร่วนปนทราย ถึงดินเหนียวที่มีการระบายน้ำค่อนข้างดี ตอบสนองต่อความอุดมสมบูรณ์ของดินและน้ำได้ดี ทนแล้งได้พอสมควร ไม่ทนน้ำท่วมขังและการเหยียบย่ำของสัตว์ มีผลผลิตน้ำหนักแห้งประมาณ 2-4.2 ตัน ต่อไร่ต่อปี มีโปรตีนประมาณ 8-10 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งจัดว่าเป็นหญ้าที่ให้ผลผลิตสูงมีคุณค่าทางอาหารสัตว์อยู่ในเกณฑ์ดี มีถิ่นกำเนิดในแถบประเทศของแอฟริกา ปัจจุบันพบปลูกแพร่กระจายทั่วโลกในแถบประเทศอบอุ่น ส่วนประเทศไทยได้นำหญ้าเนเปียร์จากประเทศมาเลเซียเข้ามาปลูกครั้งแรกในปีพ.ศ. 2472 โดย นายอาร์ พี โจนส์ และในช่วงปีพ.ศ. 2504-2507 ประเทศไทยได้นำเมล็ดพันธุ์จากต่างประเทศมาปลูกอย่างต่อเนื่อง อาทิ กรมปศุสัตว์ นำเข้าพันธุ์ลูกผสมจากประเทศอินเดียเข้ามาปลูก

#### 1.1.10) หญ้าขจรจบ (*Pennisetum pedicellatum*)

หญ้าขจรจบ มีถิ่นกำเนิดในประเทศเอธิโอเปีย ขึ้นอยู่มากมายในทุกภูมิภาคของประเทศไทย ซึ่งถูกนำเข้ามาจากประเทศฟิลิปปินส์ เมื่อปี พ.ศ. 2495 เจริญเติบโตดีมากในสภาพที่มีความชื้นสูง การแพร่กระจายเป็นไปอย่างรวดเร็ว มีลักษณะนุ่มคล้ายขนหางสัตว์ ซึ่งดอกหญ้าขจรจบจะออกดอกในช่วงเดือนตุลาคม และเมล็ดที่ร่วงลงดินจะงอกใหม่หลังฝนตกในช่วงเดือนพฤษภาคม

การตัด หญ้าขจรจบที่นำเข้ามาในไทยครั้งแรกมีวัตถุประสงค์เพื่อปลูกเป็นอาหาร แกะโค กระบือ สามารถให้ผลผลิตประมาณ 1.8 ตัน/ไร่ นอกจากนี้หญ้ายังเติบโตได้รวดเร็ว สามารถเก็บเกี่ยวได้ในระยะ 40-60 วัน หลังการปลูก

#### 11) หญ้าไข่มุก (*Pennisetum americanum*)

หญ้าไข่มุก เป็นหญ้าประเภทล้มลุก มีอายุสั้นเพียงฤดูเดียวในฤดูการเพาะปลูกหรือฤดูฝน มีคุณสมบัติสามารถให้ผลผลิตสูงประมาณ 8 ตันต่อไร่ต่อปี ปรับตัวได้ดีบนดินที่มีความอุดมสมบูรณ์ต่ำ ทนแล้งได้ดี

การตัด ควรตัดครั้งแรกหลังจากการปลูก 60 วัน หลังจากนั้นตัดทุกๆ 40-50 วัน ในฤดูฝนและตัดสูงจากพื้นดิน 15 เซนติเมตร และมีผลผลิตและคุณภาพของหญ้าไข่มุก ปลูกที่ศูนย์วิจัยข้าวโพดข้าวฟ่างแห่งชาติ ตำบลกลางดง อำเภอปากช่อง จังหวัดนครราชสีมา ภายใต้สภาพการชลประทานหรือให้น้ำทุกๆ 7 วัน พบว่าน้ำหนักหญ้าสด เท่ากับ 8 ตัน/ไร่ และน้ำหนักแห้ง เท่ากับ

0.58 ตัน/ไร่ และมีส่วนประกอบทางเคมี ได้แก่ โปรตีน (Crude Protein, CP) และ เยื่อใย (Crude fiber, CF) เท่ากับ 20 และ 23 % โดยน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ (ศศิธร ถิ่นนคร, 2531)

#### 1.1.12) หญ้ากินนี (*Panicum maximum*)

หญ้ากินนี สามารถปรับตัวได้ในสภาพร่มเงา จึงปลูกในสวนไม้ยืนต้นหรือสวนป่าได้ หญ้ากินนีที่ปลูกในสวนมะพร้าวบริเวณจังหวัดนราธิวาส ให้ผลผลิตน้ำหนักแห้ง 2,000 กิโลกรัมต่อไร่ต่อปี แต่ถ้าปลูกในสวนยางซึ่งร่มเงาหนาทึบกว่าจะให้ผลผลิต 700 กิโลกรัมต่อไร่ต่อปี สำหรับผลผลิตหญ้ากินนีที่ปลูกในที่โล่งแจ้งโดยทั่วไปได้ประมาณ 2,500–3,500 กิโลกรัมต่อไร่ต่อปี มีปริมาณโปรตีนประมาณ 8.2 เปอร์เซ็นต์ มีถิ่นกำเนิดในเขตร้อนและกึ่งร้อนของทวีปแอฟริกา ปลูกกันแพร่หลายในทวีปอเมริกาใต้ เอเชียตะวันออกเฉียงใต้ และในออสเตรเลีย สำหรับประเทศไทยนั้น เจ้าพระยาสุรวงศ์เป็นผู้นำเข้ามาปลูกใน พ.ศ. 2444

การตัด ควรตัดครั้งแรกเมื่อหญ้าอายุประมาณ 60 วัน หลังจากนั้นในฤดูฝนสามารถตัดได้ทุก 30-45 วัน ส่วนในฤดูแล้งควรตัดทุก 45-60 วัน เนื่องจากหญ้าจะเจริญเติบโตช้าเหมาะสำหรับใช้เลี้ยงโค กระบือในรูปสด แห้งหรือหมัก

#### 1.2) พันธุ์หญ้าลูกผสม (Hybrid Grass)

##### 1.2.1) หญ้ากินนีสีม่วง (*Panicum maximum* cv. TD 58)

หญ้ากินนีสีม่วง เป็นพืชที่มีอายุหลายปี การเจริญเติบโตเป็นแบบกอตั้งตรง มีใบขนาดใหญ่ ดอก อ่อนนุ่ม มีลำต้นสูงใหญ่กว่าหญ้ากินนีธรรมดา ส่วนของข้อปล้อง กลุ่มดอก (Spikelets) และเมล็ดสีม่วงอมเขียวต่างจากหญ้ากินนีพันธุ์อื่นๆ ซึ่งส่วนใหญ่มีสีเขียว ขนาดของเมล็ดใหญ่กว่ากินนีธรรมดา หญ้ากินนีสีม่วงมีช่วงเวลาของการเจริญเติบโต ก่อนออกดอกอยู่ระหว่าง 90-110 วัน ความสูงเมื่อเริ่มออกดอก ประมาณ 220 เซนติเมตร (ศศิธร ถิ่นนคร, 2531) สามารถเจริญเติบโตได้ในสภาพร่มเงา เช่นเดียวกับหญ้ากินนีธรรมดาหญ้ากินนีสีม่วงสามารถปลูกได้เกือบทุกสภาพพื้นที่ ตั้งแต่ดินเหนียว จนถึงดินทราย ทนทานต่อสภาพดินค่อนข้างเค็ม ทนแล้ง และสามารถตอบสนองต่อการให้น้ำ ตอบสนองต่อปุ๋ยไนโตรเจน และปุ๋ยคอกได้ดีได้ผลผลิตปีละ 1.5-4 ตันต่อไร่ มีโปรตีนประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ นายกีร์ โรแบร์ ที่ปรึกษา กรป.กลาง นำมาจากประเทศไอเวอรี่โคส ทวีปแอฟริกา เมื่อปี พ.ศ. 2518 ปลูกครั้งแรกที่จังหวัดสกลนคร ให้ผลผลิตสูงและคุณภาพดี สามารถผลิตเมล็ดพันธุ์ได้ดี เป็นที่นิยมสำหรับเกษตรกรผู้เลี้ยงโคอย่างแพร่หลาย กรมปศุสัตว์ได้เริ่มขยายพันธุ์เพื่อผลิตเมล็ดในหน่วยงานของกองอาหารสัตว์ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2531 และส่งเสริมให้เกษตรกร ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือปลูกเพื่อผลิตเมล็ดพันธุ์จำหน่าย ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2536 เป็นต้นมา

การตัด ควรตัดหญ้าเลี้ยงสัตว์ครั้งแรกหลังปลูก 70 วัน และหลังจากนั้น ควรตัดทุก 30-45 วัน หญ้ากินนีสีม่วงเริ่มออกดอกระหว่างเดือนกันยายน-ตุลาคม และเก็บเมล็ดในเดือนพฤศจิกายน เหมาะสำหรับใช้เลี้ยงโค กระบือในรูปสด แห้งหรือหมัก

### 1.2.2) หญ้าเนเปียร์แคระ (*P. purpureum* cv. Mott.)

หญ้าเนเปียร์แคระ จัดเป็นหญ้าอาหารสัตว์ที่นิยมปลูกมาก เนื่องจากลำต้นและใบมีขนาดใหญ่ และมีคุณค่าทางอาหารสัตว์สูง รวมถึงสามารถเติบโตเร็ว ให้ผลผลิตต่อไร่สูง สามารถเก็บเกี่ยวต้นได้ตลอดทั้งปี และเก็บเกี่ยวได้นาน 5-7 ปี ต่อการปลูก 1 ครั้ง โดย นายวิฑูรย์ กำเนิดเพชร นำเข้ามาจากมหาวิทยาลัยแห่งรัฐฟลอริดา ประเทศสหรัฐอเมริกา เมื่อพฤศจิกายน 2532 เจริญเติบโตได้ดีในดินที่มีความอุดมสมบูรณ์สูง เหมาะสำหรับการปลูกในเขตชลประทาน ผลผลิตน้ำหนักแห้ง 3.0-4.0 ตันต่อไร่ต่อปี โปรตีน 8-10 เปอร์เซ็นต์

การตัดหญ้าเนเปียร์ไปเลี้ยงสัตว์ ควรตัดครั้งแรก 60-70 วันหลังปลูก และตัดหญ้าครั้งต่อไปทุก 30-45 วัน ช่วงฤดูฝนหญ้าโตเร็ว อาจตัดอายุน้อยกว่า 30 วัน โดยตัดชิดดิน หญ้าเนเปียร์เหมาะสำหรับใช้เลี้ยงโค กระบือ ในรูปหญ้าสด หรือหญ้าหมัก ไม่เหมาะสำหรับทำหญ้าแห้ง

### 1.2.3) หญ้าเนเปียร์ยักษ์ (*P. purpureum* cv. Kinggrass)

หญ้าเนเปียร์ยักษ์ นำเข้ามาจากประเทศอินโดนีเซีย โดยนายชาญชัย มณีคุลย์ เมื่อมกราคม พ.ศ. 2533 เป็นหญ้าเขตร้อนที่มีอายุหลายปี มีลักษณะเป็นทรงต้น กอตั้งตรงคล้ายอ้อย และมีต้นสูง 2-3 เมตร เมื่อเจริญเติบโตจะมีความสูงประมาณ 3-4 เมตร ขยายพันธุ์ด้วยท่อนพันธุ์ สามารถเจริญเติบโตได้ดีในดินร่วนปนทรายถึงดินเหนียว และในดินที่มีความอุดมสมบูรณ์สูงและมีการให้น้ำชลประทานดี ให้ผลผลิตประมาณ 3-4 ตันต่อไร่ต่อปี มีปริมาณโปรตีน 8-10 เปอร์เซ็นต์

การตัด ควรตัดครั้งแรก 60-70 วันหลังปลูก และตัดครั้งต่อไปทุกๆ 30-45 วัน ในช่วงฤดูฝนหญ้าโตเร็วอาจตัดได้อายุน้อยกว่า 30 วัน โดยตัดชิดดิน หญ้าเนเปียร์เหมาะสำหรับใช้เลี้ยงโค กระบือ ในรูปหญ้าสดหรือหญ้าหมัก

### 1.2.4) หญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1

หญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 (*P. purpureum* x *pennisetum americanum*) เป็นหญ้าเนเปียร์ลูกผสมสายพันธุ์หนึ่ง ซึ่งเกิดจากการผสมข้ามระหว่างหญ้าเนเปียร์ยักษ์และหญ้าไข่มุก ลำต้นมีข้อและปล้องชัดเจน มีใบเกิดสลับข้างกัน มีส่วนกาบใบหุ้มลำต้นไว้ ใบและลำต้นอ่อนนุ่มสูงเต็มที่ประมาณ 5 เมตร รากเป็นระบบรากฝอยแข็งแรงแผ่กระจายออกรอบลำต้น สามารถแตกหน่อได้จากตาของข้อต่างๆ ที่อยู่ชิดดิน เจริญเติบโตเร็ว แตกกอดี ทนแล้ง ทนบ่นองต่อน้ำและปุ๋ยดีปรับตัวได้ดีในดินหลายสภาพ ปลูกครั้งเดียวเก็บเกี่ยวต่อเนื่องได้นาน 8-9 ปี ให้ผลผลิตน้ำหนักสดประมาณ 70-80 ตันต่อไร่ต่อปี (น้ำหนักแห้งประมาณ 9.5-11.5 ตัน/ไร่/ปี) มีปริมาณโปรตีน 8-10 เปอร์เซ็นต์ (ไกรลาศ เขียวทอง และคณะ, 2556)

การตัด ควรตัดครั้งแรก 60-70 วันหลังปลูก และตัดครั้งต่อไปทุกๆ 30-45 วัน ในช่วงฤดูฝนหญ้าโตเร็วอาจตัดได้อายุน้อยกว่า 30 วัน โดยตัดชิดดิน หญ้าเนเปียร์เหมาะสำหรับใช้เลี้ยงโค กระบือ ในรูปหญ้าสดหรือหญ้าหมัก

### 1.2.5) หญ้าบาน่า (*P. purpureum* X *P. americanum*)

หญ้าบาน่า (Bana grass) เป็นหญ้าเนเปียร์ลูกผสม (*P. purpureum* x *P. americanum* hybrid) เจริญเติบโตเต็มที่สูงประมาณ 3-4 เมตร เจริญเติบโตได้ดีในดินร่วนปนทราย ถึงดินเหนียว แต่ต้องการดินที่ระบายน้ำดี มีความอุดมสมบูรณ์สูง เหมาะสำหรับปลูกในบริเวณพื้นที่มี ฝนตกสม่ำเสมอเฉลี่ยมากกว่า 1000 มิลลิเมตรต่อปี หรือมีการให้น้ำชลประทาน จะได้ผลผลิตสูงและมี คุณภาพดีโดยให้ผลผลิตน้ำหนักเฉลี่ยประมาณ 3-4 ตันต่อไร่ต่อปี มีโปรตีน 8-10 เปอร์เซ็นต์ หากตัดที่ อายุ 30 วัน จะมีโปรตีน 10-12 เปอร์เซ็นต์ เป็นหญ้าที่ติดเมล็ดน้อยมาก จึงต้องปลูกขยายพันธุ์ด้วย ท่อนพันธุ์เท่านั้น ไม่ทนต่อสภาพพื้นที่น้ำท่วมขังและไม่ทนต่อการแทะเล็มเหยียบย่ำของสัตว์ เหมาะ สำหรับตัดไปเลี้ยงสัตว์ ถ้าปลูกในพื้นที่ดินมีความอุดมสมบูรณ์สูงและมีการให้น้ำชลประทาน

การตัด ควรตัดครั้งแรกเมื่ออายุ 60-70 วัน และตัดหญ้าครั้งต่อไปทุก 30-45 วัน ส่วนในช่วงฤดูฝนหญ้าเจริญเติบโตเร็ว อาจตัดอายุน้อยกว่า 30 วัน โดยตัดชิดดิน แต่ถ้าสังเกตเห็น รากลอย ควรทำการพรวนและพูนดินกลบโคน โดยตัดสูงจากพื้นดินไม่ควรเกิน 10 เซนติเมตร หญ้า บาน่าเหมาะสำหรับปลูกในเขตชลประทานเพื่อตัดหญ้าสดไปใช้เลี้ยงสัตว์ได้ตลอดทั้งปี ถ้าปลูกในพื้นที่ ดินดินน้ำดี จะเจริญเติบโตรวดเร็ว ขนาดต้นสูงใหญ่ ให้ผลผลิตสูง เหมาะสำหรับใช้ทำหญ้าหมักด้วย

### 1.2.6) หญ้าอะตราตัม (*Paspalum atratum*)

หญ้าอะตราตัม เป็นหญ้าพื้นเมืองของประเทศบราซิล นำเข้ามาปลูกใน ประเทศไทย ครั้งแรกในปีพ.ศ. 2537 มีลักษณะลำต้นตั้งเป็นกอสูงประมาณ 1 เมตร และขณะมีช่อ ดอกจะสูงมากกว่า 2 เมตร ใบมีขนาดใหญ่แบบใบกว้างประมาณ 3-4 ซม. ยาวประมาณ 50 ซม. ขอบใบมีความคมลักษณะช่อดอกเป็นแบบ raceme เมล็ดมีขนาดเล็กสีน้ำตาลแดงผิวเป็นมัน จากการศึกษานี้พบว่าหญ้า อะตราตัมสามารถเจริญเติบโตได้ดีในพื้นที่ชื้นแฉะ และถ้าปลูกใน ดินที่มีความอุดมสมบูรณ์จะให้ผลผลิตสูงถึง 3-4 ตันต่อไร่ต่อปี มีปริมาณโปรตีน 7-8 เปอร์เซ็นต์

การตัด ควรตัดครั้งแรกประมาณ 60 วันหลังปลูก และตัดครั้งต่อไปทุกๆ 30-40 วัน โดยตัดสูงจากพื้นดิน 5-10 เซนติเมตร ช่วงฤดูฝนโตเร็ว สามารถตัดได้ทุก 25-30 วัน หญ้าอะตราตัมเหมาะสำหรับใช้เลี้ยงโค กระบือ ในรูปหญ้าสด หรือทำหญ้าหมัก แต่ไม่เหมาะสำหรับ ทำหญ้าแห้ง

จากชนิดหญ้าทั้งหมดที่กล่าวมาข้างต้นนั้นเมื่อเทียบกับชีวมวลที่เป็นแกลบ และขึ้นไม้สับกับหญ้าหลายฤดูชนิดอื่นๆ ทั้งในแง่โภชนาการและความสะดวกในการตัดมาใช้ประโยชน์ พบว่า หญ้าหลายฤดูเหมาะสมที่จะนำมาผลิตพลังงานทดแทนวัสดุเดิมได้ ทั้งในแง่ของปริมาณผลผลิต ที่ได้ องค์ประกอบชีวมวลของหญ้า ในการวิจัยครั้งนี้จึงเลือกหญ้าหลายฤดูนำมาศึกษาพัฒนาเทคโนโลยี การผลิตวัสดุเชื้อเพลิงอัดแข็งจากหญ้าหลายฤดู ให้มีประสิทธิภาพเหมาะสมกับโรงงานไฟฟ้าจาก

ชีวมวล โดยสามารถเปรียบเทียบคุณลักษณะทางกายภาพ คุณลักษณะทางชีวเคมี องค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางพลังงานของชีวมวลจากหญ้าหลายฤดูดังตาราง 8-9

**ตาราง 8** ปริมาณผลผลิตชีวมวลน้ำหนักแห้งและองค์ประกอบโดยประมาณของหญ้าหลายฤดู

| ชนิดหญ้า          | ผลผลิตแห้ง<br>(ตัน/ไร่/ปี) | องค์ประกอบของหญ้า |                 |                 |                     |             |
|-------------------|----------------------------|-------------------|-----------------|-----------------|---------------------|-------------|
|                   |                            | HHV<br>(MJ/kg)    | ความชื้น<br>(%) | สารระเหย<br>(%) | คาร์บอนคงตัว<br>(%) | เถ้า<br>(%) |
| เนเปียร์ธรรมดา    | 3-4                        | 16.1              | 74.22           | 85.17           | 8.49                | 6.34        |
| เนเปียร์แคระ      | 2.91                       | 14.9              | 12.00           | 78.00           | 10.00               | 9.00        |
| เนเปียร์ยักษ์     | 4.33                       | 17.2              | 11.00           | 80.00           | 11.00               | 9.00        |
| เนเปียร์ปากช่อง 1 | 9.5-11.5                   | 18.7              | 9.43            | 72.58           | 9.35                | 9.68        |
| รูชี              | 2.35                       | N/A               | N/A             | N/A             | N/A                 | N/A         |
| อะตราดัม          | 3.13                       | 16.8              | 12.00           | 82.00           | 12.00               | 6.00        |
| กินนีสีม่วง       | 3.13                       | N/A               | N/A             | N/A             | N/A                 | N/A         |
| ไต้หวัน           | 4                          | 16.1              | N/A             | N/A             | N/A                 | 7.70        |
| บาน่า             | 1.28                       | 16.2              | N/A             | N/A             | N/A                 | 9.30        |
| แพงโกล่า          | 6.25                       | N/A               | N/A             | N/A             | N/A                 | N/A         |

หมายเหตุ : N/A คือ ข้อมูลไม่ปรากฏ

HHV คือ ค่าความร้อนสูงของหญ้าหลายฤดู (High heat value; HHV)

ที่มา: Mohammed et al., 2015; Rengsirikul et al., 2013; Wongwatanapaiboon et al., 2012; ไกรลาศ เขียวทอง et al., 2556; ชินยา โยโกยามะ, 2551; ดวงใจ จินนารักษ์, 2557; สุริยะ สมศิริ และ สุภวัฒน์ วิวรรณัทธกิจ, 2558

พจน ปลูกพืชชีว

ตาราง 9 องค์ประกอบเยื่อใยและองค์ประกอบธาตุของหญ้าหลายฤดู

| ชนิดหญ้า          | องค์ประกอบเยื่อใย (ร้อยละ) |              |        | องค์ประกอบธาตุ (ร้อยละ) |      |       |      |      |
|-------------------|----------------------------|--------------|--------|-------------------------|------|-------|------|------|
|                   | เซลลูโลส                   | เฮมิเซลลูโลส | ลิกนิน | C                       | H    | O     | N    | S    |
| เนเปียร์ธรรมดา    | 32.92                      | 36.46        | 3.60   | 45.10                   | 5.93 | 47.17 | 1.45 | 0.35 |
| เนเปียร์แคระ      | 35.64                      | 34.19        | 3.66   | 39.0                    | 4.5  | 54.3  | 2.0  | 0.2  |
| เนเปียร์ยักษ์     | 32.01                      | 31.13        | 3.10   | 39.8                    | 4.7  | 54.2  | 1.1  | 0.2  |
| เนเปียร์ปากช่อง 1 | 30.86                      | 10.56        | 17.87  | 42.4                    | 5.96 | 45.32 | 1.71 | 0.09 |
| รูชี              | 33.64                      | 34.01        | 4.56   | N/A                     | N/A  | N/A   | N/A  | N/A  |
| อะตราดัม          | 34.87                      | 32.62        | 5.64   | N/A                     | N/A  | N/A   | N/A  | N/A  |
| กีนีสีม่วง        | 33.40                      | 31.26        | 4.00   | N/A                     | N/A  | N/A   | N/A  | N/A  |
| ไต้หวัน           | 42.20                      | 23.1         | 11.00  | 40.80                   | 4.80 | 53.10 | 1.10 | 0.2  |
| บาน่า             | 33.93                      | 35.12        | 3.55   | 43.3                    | 4.9  | 56.6  | 1.0  | 0.2  |
| แพงโกล่า          | 33.07                      | 35.46        | 4.47   | N/A                     | N/A  | N/A   | N/A  | N/A  |

หมายเหตุ: N/A คือ ข้อมูลไม่ปรากฏ

ที่มา: Mohammed et al., 2015; Rengsirikul et al., 2013; Wongwatanapaiboon et al., 2012; ไกรลาศ เขียวทอง et al., 2556; ชินยา โยโกยามะ, 2551; ดวงใจ จินนารักษ์, 2557; สุริยะ สมศิริ และ สุภวัฒน์ วิวรรณัทธ์กิจ, 2558

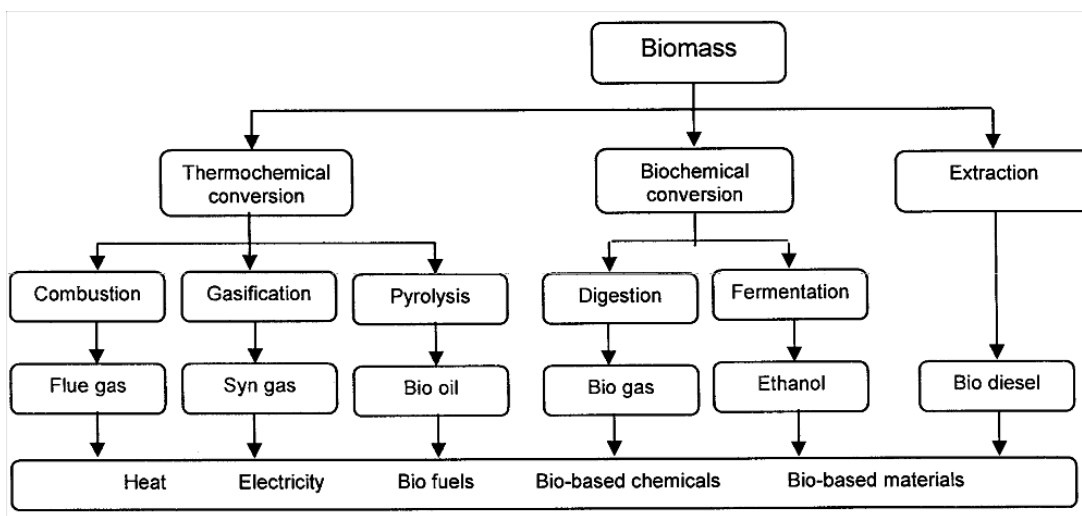
## 2.2 กระบวนการแปรรูปชีวมวลเพื่อผลิตพลังงาน

เทคโนโลยีที่ใช้ในการแปรรูปชีวมวลให้อยู่ในรูปพลังงานที่สะดวกต่อการใช้งานและการจัดการ เช่น ในรูปของเหลวหรือก๊าซซึ่งนิยมใช้ในปัจจุบันนั้นสามารถจำแนกได้เป็น 3 ประเภทหลักๆ ดังแสดงในภาพประกอบ 11 คือ

2.2.1) กระบวนการแปลงสภาพเชิงกายภาพ (Physical Conversion) ได้แก่ การอัดแท่ง (Densification) และการหีบคั้นน้ำมัน (Oil Extraction) เป็นต้น

2.2.2) กระบวนการแปลงสภาพเชิงชีวเคมี (Biochemical Conversion) ซึ่งวิธีการนี้ใช้เชื้อจุลินทรีย์เป็นตัวดำเนินการ ได้แก่ กระบวนการหมักย่อยไร้อากาศ (Anaerobic Digestion) เพื่อผลิตก๊าซชีวภาพ และกระบวนการไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) เพื่อสังเคราะห์เมทานอล เป็นต้น

2.2.3) กระบวนการแปลงสภาพเชิงเคมีความร้อน (Thermochemical Conversion) โดยกระบวนการดังกล่าวนี้สามารถแบ่งออกเป็นกระบวนการย่อยๆได้อีก คือ กระบวนการเผาไหม้ (Combustion) กระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis) และกระบวนการก๊าซซิฟิเคชัน (Gasification)



ภาพประกอบ 11 เทคโนโลยีที่ใช้ในการแปลงสภาพชีวมวลเป็นพลังงาน

ที่มา: วรพจน์ งามชมพู, 2556

## 2.3 เทคโนโลยีการผลิตเชื้อเพลิง

### 2.3.1 กระบวนการผลิตและเทคโนโลยีการอัดขึ้นรูปเชื้อเพลิง

ปัจจุบันมีความพยายามที่จะหาวิธีนำพลังงานต่างๆ มาใช้แทนพลังงานจากปิโตรเลียมที่ใช้อยู่ในปัจจุบันและมีปริมาณลดลงอย่างรวดเร็ว พลังงานทดแทนอีกรูปแบบหนึ่งที่สามารถนำมาใช้คือ พลังงานจากชีวมวล และรูปแบบหนึ่งที่สามารถนำไปใช้ได้สะดวก คือ เชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดหรือเรียกชื่ออื่นๆ เช่น เชื้อเพลิงแท่งตะเกียบ เชื้อเพลิงไม้อัดเม็ด เป็นต้น ซึ่งเป็นการนำเอาวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร เช่น เหม้ามันสำปะหลัง ชังข้าวโพด เปลือกยูคาลิปตัส และเศษไม้เหลือใช้ ปีกไข่ที่เหลือที่ได้จากอุตสาหกรรมเฟอร์นิเจอร์และยังรวมถึงไม้จากการโค่นต้นไม้ที่ไม่จำเป็นหรือยืนต้นตาย การตัดแต่งกิ่งไม้ เป็นต้น หรือวัสดุที่มีความหนาแน่นต่ำ มาผลิตเป็นชีวมวลอัดเม็ดเพื่อให้สามารถใช้ประโยชน์ได้ในรูปแบบต่างๆ ทั้งในรูปของพลังงานความร้อนเพื่อผลิต ไอน้ำหรือน้ำมันร้อนใช้ในกระบวนการผลิตของโรงงานต่างๆ หรือใช้เป็นเชื้อเพลิงเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าจากระบบหม้อต้มไอน้ำ (Boiler) รวมถึงการให้ความร้อนกับที่อยู่อาศัยและการใช้งานประเภทอื่นๆ นอกจากนี้ยังนำมาใช้แทนชีวมวล (Biomass) ที่มีสมบัติค่าความร้อนที่ต่ำมาก ทำให้ต้องใช้เชื้อเพลิงชีวมวลในปริมาณที่สูง ส่งผลให้มีต้นทุน การผลิตและค่าใช้จ่ายในการขนส่งสูงตามไปด้วย ซึ่งในภาพประกอบ 12 ได้ยกตัวอย่างชีวมวลที่สามารถนำไปใช้ผลิตเป็นเชื้อเพลิงอัดเม็ดได้ (สถาบันพลาสติก, 2558)



ภาพประกอบ 12 กระบวนการผลิตเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด

ที่มา: Biomasspelletthai, 2557

กระบวนการผลิตเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด จากภาพประกอบ 12 มีขั้นตอนกระบวนการผลิตเชื้อเพลิง ดังนี้

- 1) **Crushing Process** (กระบวนการย่อย) สำหรับวัตถุดิบที่ยังมีขนาดไม่เหมาะสมสำหรับการผลิตต้องนำลดขนาดก่อน เช่น เศษไม้ ปีกไม้ เปลือกไม้ ฟางข้าว ใบอ้อย หญ้า เป็นต้น โดยเครื่องจักรที่ใช้สำหรับการย่อยมีหลายประเภท เช่น shredder, crusher, hammer mill เป็นต้น
- 2) **Drying Process** (กระบวนการลดความชื้น) เป็นกระบวนการลดความชื้นในตัววัตถุดิบ ให้ความมีความชื้นที่เหมาะสมกับกระบวนการอัด เครื่องจักรที่ใช้คือ Rotary drum dryer
- 3) **Mixing Process** (กระบวนการผสม) เป็นกระบวนการในการผสมวัตถุดิบที่ใช้ตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไปเพื่อให้เข้ากัน
- 4) **Pelleting Process** (กระบวนการอัด) เป็นกระบวนการขึ้นรูปวัตถุดิบให้เป็นเม็ด มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6-10 mm. ความยาว 3-6 cm. หรือตามความต้องการ โดยเครื่องจักรที่ใช้มีอยู่หลายประเภท เช่น flat die pellet mill, ring die pellet mill, vertical die pellet mill เป็นต้น
- 5) **Cooling Process** (กระบวนการระบายความร้อน) เป็นกระบวนการระบายความร้อนให้กับเชื้อเพลิงชีวมวลที่ขึ้นรูปเป็นเม็ดแล้วให้เย็นตัวลง และคงรูปของเชื้อเพลิง
- 6) **Packing Process** (กระบวนการบรรจุ) เป็นกระบวนการบรรจุชีวมวลอัดเม็ดในถุงตามขนาดและตามความต้องการของลูกค้า (Biomasspelletthai, 2557)

### 2.3.2 เชื้อเพลิงอัดแข็ง

#### 1) คุณสมบัติของเชื้อเพลิงอัดเม็ด

##### 1.1) คุณสมบัติความคงทนของเชื้อเพลิงชีวมวล

การใช้ชีวมวลเป็นเชื้อเพลิงในการเผาไหม้ แม้จะมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยกว่าเชื้อเพลิงอื่นๆ คือ ไม่เป็นการเพิ่มปริมาณสุทธิของคาร์บอนไดออกไซด์นั้นบรรยากาศ ไม่ก่อให้เกิดมลภาวะเรือนกระจก แต่ในการนำชีวมวลมาใช้โดยวิธีการเผาไหม้โดยตรงก็อาจมีผลกระทบต่ออุปกรณ์ต่างๆ รวมทั้งสิ่งแวดล้อมได้ ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติและคุณภาพของชีวมวลนั้นๆ โดยผลกระทบที่เกิดขึ้นสามารถสรุปได้ดังนี้

1.1.1) ความหนาแน่น เชื้อเพลิงชีวมวลที่มีความหนาแน่นสูงจะให้ค่าความร้อนสูงและให้การเผาไหม้อย่างต่อเนื่อง หากเชื้อเพลิงชีวมวลมีความหนาแน่นที่แตกต่างกันมาก จะส่งผลต่อประสิทธิภาพในการเผาไหม้โดยเฉพาะกับหม้อไอน้ำ เนื่องจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงไม่ทั่วถึง ดังนั้นความหนาแน่นของเชื้อเพลิงชีวมวลเป็นสมบัติที่ส่งผลโดยตรงต่อปฏิกิริยาการเกิดก๊าซเชื้อเพลิงในด้านต่าง ๆ เช่น อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง และระยะเวลาที่ใช้ในการจุดเตา เชื้อเพลิงที่มีความหนาแน่นสูงจะมีอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงต่ำกว่าเชื้อเพลิงที่มีความหนาแน่นต่ำกว่า การผลิตก๊าซเชื้อเพลิงภายในเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงแบบไหลขึ้น โดยใช้ชีวมวลต่างกัน 3 ชนิด ได้แก่ ชิ้นไม้ยูคา ลิปดัส กะลามะพร้าว และซังข้าวโพด พบว่าระยะเวลาที่ใช้ในการจุดเตา (Start time) ขึ้นกับค่าความหนาแน่นของเชื้อเพลิงชีวมวล โดยชีวมวลที่มีค่าความหนาแน่นสูงจะใช้ระยะเวลาในการจุดเตานานกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับชีวมวลที่มีความหนาแน่นต่ำกว่า (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2559)

ความหนาแน่นของเชื้อเพลิงชีวมวลหรือเชื้อเพลิงแข็ง พิจารณาได้เป็น 3 ลักษณะ คือ ความหนาแน่นที่แท้จริง (True density) ความหนาแน่นปรากฏ (Apparent density) และความหนาแน่นรวม (Bulk density)

ความหนาแน่นที่แท้จริง คือความหนาแน่นที่คิดจากมวลทั้งก้อนของชีวมวลเทียบกับปริมาตรของชีวมวล สามารถคำนวณได้จากอัตราส่วนของมวลต่อปริมาตรของชีวมวลทั้งก้อน ความหนาแน่นที่แท้จริงสามารถหาได้จากความสัมพันธ์ดังแสดงในสมการที่ 10

$$\text{ความหนาแน่นที่แท้จริง} = \text{มวลทั้งก้อนของชีวมวล/ปริมาตรทั้งก้อน} \quad (10)$$

ความหนาแน่นปรากฏ คือ ความหนาแน่นที่คิดจากมวลของเนื้อชีวมวลเทียบกับปริมาตร ทั้งหมดของชีวมวลรวมทั้งปริมาตรของรูพรุนด้วย สามารถคำนวณได้จากอัตราส่วนของ

มวลต่อปริมาณภายนอกของเชื้อเพลิงชีวมวล ซึ่งรวมทั้งปริมาตรของรูปพรุน ความหนาแน่นปรากฏ สามารถหาได้จากความสัมพันธ์ดังแสดงในสมการที่ 11

$$\text{ความหนาแน่นปรากฏ} = \text{มวลทั้งก้อนของชีวมวล} / (\text{ปริมาตรของชีวมวลที่ปรากฏ} + \text{ปริมาตรรูปพรุน}) \quad (11)$$

ความหนาแน่นรวม คือ ความหนาแน่นที่คิดจากมวลของเนื้อชีวมวลต่อปริมาตรของภาชนะที่บรรจุชีวมวลนั้น ค่าความหนาแน่นรวมของชีวมวลมีความสำคัญและส่งผลต่อปฏิกิริยาการผลิตก๊าซเชื้อเพลิง และคุณภาพของก๊าซเชื้อเพลิงที่ผลิตได้ เนื่องจากความหนาแน่นรวมจะมีความสัมพันธ์กับระยะเวลาที่เชื้อเพลิงใช้ในการทำปฏิกิริยาภายในเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิง ซึ่งถ้าเชื้อเพลิงอยู่ภายในเตานานมากเกินไปจะทำให้เกิดเถ้าหลอม และถ้าระยะเวลาที่เชื้อเพลิงอยู่ภายในเตาสั้นเกินไป จะทำให้มีคาร์บอนที่ไม่เผาไหม้เกิดขึ้นมาก ความหนาแน่นรวมสามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ดังแสดงในสมการที่ 12

$$\text{ความหนาแน่นรวม} = \text{มวลทั้งก้อนของชีวมวล} / \text{ปริมาตรของภาชนะที่บรรจุชีวมวล} \quad (12)$$

ความหนาแน่นรวมมีค่าขึ้นกับประเภทของชีวมวล สำหรับที่ชีวมวลมีลักษณะเป็นเมสส์ หรือเป็นเส้น เช่น แกลบหรือฟางข้าว จะมีค่าความหนาแน่นรวมต่ำ โดยมีค่าประมาณ 150-200 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ชีวมวลที่เป็นชิ้น เช่น ไม้สับ ความหนาแน่นรวมจะมีค่าประมาณ 600-900 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

1.1.2) ขนาดของชีวมวล ขนาดที่ไม่เหมาะสมกับประเภทของระบบการเผาไหม้ทำให้ระบบการลำเลียงติดขัดได้ และส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการเผาไหม้ได้

1.1.3) ความทนทาน เชื้อเพลิงชีวมวลที่มีความทนทานต่ำ อาจกลายเป็นอนุภาคเล็กในระหว่างลำเลียงเข้าสู่ห้องการเผาไหม้และทำให้มีฝุ่นละอองมากขึ้น และฝุ่นนั้นทำให้เกิดการปะทุระเบิดในระบบเตาเผาได้

1.1.4) การสึกหลอแบบขัดสี (Abrasive Wear) การเขarseร่อง การขัดหยาบ และการขูดผิว เป็นตัวอย่างที่ดีสำหรับการเสียหายด้วยรูปแบบดังกล่าวที่เกิดขึ้นเนื่องจากผิวหน้าชิ้นงานที่เป็นวัตถุแข็งมีการเปลี่ยนที่หรือมีการเคลื่อนที่ของวัสดุที่มีผลมาจากแรงปฏิสัมพันธ์กับผิวหน้าของวัตถุอื่นหรืออนุภาคอื่น โดยอนุภาคสามารถฝังลึกลงไปผิวหน้าของวัสดุทั้งสองที่สัมผัสกันและมีการเคลื่อนที่เสียดสีระหว่างกันทำให้เกิดการเสียดสี (การเปลี่ยนที่และการเคลื่อนที่ของผิวหน้าวัสดุ) ของผิวหน้าวัสดุที่มีความแข็งน้อยกว่า แหล่งที่มาของอนุภาคอาจเกิดจากสารแปลกปลอม (ที่มาจากสิ่งแวดล้อมด้านนอก) เศษชิ้นส่วนที่เกิดจากการสึกหลอ หรืออนุภาคของแข็งที่เจือปนอยู่ในของไหล ในอีกนัยหนึ่ง การสึกหลอจากการเสียดสีสามารถเกิดได้จากกรณีที่ไม่มีเศษวัสดุหลุดออกมา แต่เกิดขึ้น

เนื่องจากความหยาบของผิวหน้าวัสดุอีกอันหนึ่งทำให้เกิดการเสียดสี กลไกการสึกหลอนนี้ต่างจากการสึกหลอแบบยึดติดคือไม่มีพันธะอะตอมมิคที่เกิดขึ้นบนผิวหน้าทั้งสอง การสึกกร่อนแบบขัดสี (Abrasive Erosion) อาจเกิดขึ้นเมื่อของไหลมีอนุภาคของแข็งเจือปนและมีทิศทางการเคลื่อนที่ขนานกับผิวหน้าของวัสดุ และอนุภาคเหล่านั้นก็ทำให้ผิวหน้าวัสดุค่อยๆ เกิดการเสื่อมสภาพทีละเล็กทีละน้อย

1.1.5) ด้านทานต่อการเสียดสี (Resistance to Abrasion) โดยการทดสอบการเสียดสี (Wear Hardness Test) เป็นวิธีการทดสอบความแข็ง ที่พิจารณาจากการสึกหลอของผิววัสดุเมื่อใช้งานที่ต้องเสียดสีกัน ถ้าวัสดุใดอ่อนกว่าก็就会被เสียดสีทำให้เกิดการสึกหลอมากกว่า การทดสอบโดยการเสียดสีนี้อาจจะใช้ตะไบทดสอบได้ (File Test) คือทำการตะไบที่ผิวงานทดสอบ ถ้าผิวงานแข็งก็จะตะไบไม่เข้า ผิวงานสึกหลอน้อย แต่ถ้าผิวงานอ่อนก็จะสามารถตะไบได้ลึก ผิวงานสึกหลอมาก ซึ่งจะสังเกตเห็นว่าเป็นวิธีทดสอบที่ง่าย สะดวกรวดเร็ว แต่ไม่สามารถระบุค่าความแข็งของผิวงานทดสอบได้ และผลการทดสอบก็ไม่แน่นอน ขึ้นอยู่กับประสบการณ์ของผู้ทดสอบด้วย การทดสอบโดยการเสียดสีนี้สามารถระบุได้เพียงว่าวัสดุใดแข็งหรืออ่อนกว่ากันเท่านั้นจึงไม่ใช่วิธีการทดสอบความแข็งที่ได้มาตรฐานเช่นเดียวกัน

1.1.6) ความเปราะ (Brittleness) เป็นสมบัติเชิงกลอย่างหนึ่งของวัสดุที่รับแรงเพียงเล็กน้อย แล้วเกิดการขาดออกจากกัน เช่น เหล็กหล่อ แก้ว เป็นต้น โดยจะคิดจากค่า 5% ของความเครียดเป็นหลัก กล่าวคือวัสดุใดๆ ก็ตามที่เกิด การแตกหักก่อนค่า 5% ของความเครียดวัสดุนั้นก็จะมี ความเปราะมากนั่นเอง

1.1.7) ความเหนียว (toughness) เป็นสมบัติของวัสดุที่สามารถยืดตัวออกไปได้อย่างถาวร หรือเป็นการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวร ซึ่งจะคิดจากค่า 5% ของความเครียดเป็นหลักเช่นกัน

1.1.8) ความแข็งแรง (strength) หมายถึงความแข็งแรงดึงสูงสุด (Ultimate Tensile Strength) ความแข็งแรงกดหรือแรงอัด สูงสุด (Ultimate Compressive Strength) ซึ่งเราสามารถจะสังเกตได้จาก Stress-Stain Curve ซึ่งตรงจุดแตกหัก (Breaking Point) นั้นเราจะเรียกกันว่า เป็นจุดความแข็งแรงที่จุดแตกหักนั่นเอง

1.1.9) ความแข็งเกร็ง (stiffness) หมายถึงสมบัติของวัสดุที่แสดงความสามารถในการต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างหรือ ต่อการเปลี่ยนรูปในช่วง Elastic limit ในขณะที่กำลังรับแรงนั้นๆ อยู่ ค่าความเกร็งจะเปลี่ยนแปลงไป ตามค่าของ Modulus of Elastic และค่า Rigidity

1.1.10) พลาสติคิตี (plasticity) หมายถึงสมบัติของวัสดุที่สามารถในการเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้โดยที่มิได้เกิด ขาดหรือแตกหัก โดยเฉพาะจะมีความสำคัญมากในงาน Rolling Extruding และ Drawing เป็นต้น

## 1.2) สมบัติทางกายภาพของเชื้อเพลิงชีวมวล

สมบัติและลักษณะทางกายภาพของเชื้อเพลิงชีวมวลมีความสำคัญอย่างยิ่งที่จะต้องนำมาพิจารณาประกอบในการนำชีวมวลชนิดนั้นมาใช้ในการผลิตพลังงาน โดยเฉพาะการเปลี่ยนรูปชีวมวลโดยใช้กระบวนการทางเคมีความร้อน สมบัติและลักษณะทางกายภาพของเชื้อเพลิงชีวมวลได้แก่ ความหนาแน่น ความชื้น และขนาดของชีวมวล เป็นต้น สมบัติทางกายภาพเป็นสมบัติเบื้องต้นที่จะต้องนำมาพิจารณาประกอบในการคัดเลือกชีวมวลชนิดนั้นไปใช้งาน เนื่องจากสมบัติและลักษณะทางกายภาพของชีวมวลจะมีผลต่อขั้นตอน และกระบวนการในการนำชีวมวลนั้นไปใช้งาน เช่น การขนส่งชีวมวล การเตรียมชีวมวล และการนำชีวมวลไปใช้งาน เช่น กรณีที่เชื้อเพลิงชีวมวลมีความหนาแน่นต่ำจะทำให้สิ้นเปลืองในการขนส่ง ซึ่งอาจต้องมีการเตรียมชีวมวลก่อนที่จะขนส่งเพื่อนำไปใช้งานโดยการทำเป็นเชื้อเพลิงอัดแท่ง หรือตัดให้มีขนาดเล็ก เป็นต้น สำหรับเชื้อเพลิงชีวมวลที่มีความชื้นสูงจะไม่เหมาะสมที่จะนำไปใช้ในกระบวนการผลิตก๊าซเชื้อเพลิง ดังนั้นจะต้องนำชีวมวลนั้นมาผ่านกระบวนการลดความชื้นก่อนที่จะนำไปใช้งาน เป็นต้น สมบัติและลักษณะทางกายภาพของเชื้อเพลิงชีวมวลที่ส่งผลต่อกระบวนการและปฏิกิริยาการผลิตเชื้อเพลิงได้แก่ ความหนาแน่น และขนาดของชีวมวล เป็นต้น (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2559)

### 1.2.1) ความชื้นของเชื้อเพลิงชีวมวล

ความชื้นของเชื้อเพลิงชีวมวลส่งผลต่อการเผาไหม้เชื้อเพลิงและความร้อนเป็นอย่างมาก ชีวมวลที่นำมาใช้ในกระบวนการผลิตพลังงานควรมีค่าความชื้นไม่เกิน 30 % ความชื้นในเชื้อเพลิงอาจพิจารณาจากชีวมวลตามที่ได้จากแหล่ง หรือชีวมวลที่ได้ผ่านกระบวนการเตรียมเชื้อเพลิงเพื่อลดความชื้นมาแล้ว ความชื้นที่อยู่ในเชื้อเพลิงมี 3 ลักษณะ คือ ความชื้นที่อยู่ภายในเนื้อชีวมวล ความชื้นที่อยู่ที่ชั้นผิวของชีวมวล และความชื้นที่เกิดจากการแตกตัวของอินทรีย์สาร

ความชื้นของเชื้อเพลิงชีวมวลพิจารณาจากปริมาณน้ำที่อยู่ในเชื้อเพลิงเปรียบเทียบกับน้ำหนักของน้ำที่อยู่ในชีวมวลต่อน้ำหนักของชีวมวลทั้งก้อน การหาความชื้นของชีวมวลสามารถทำได้ 2 วิธี ได้แก่ (1) การหาค่าความชื้นของชีวมวลโดยเปรียบเทียบกับชีวมวลเปียก เรียกว่าการหาค่าความชื้นตามมาตรฐานเปียก (Wet basis) และ (2) การหาค่าความชื้นของชีวมวลโดยเปรียบเทียบกับชีวมวลแห้ง เรียกว่าการหาค่าความชื้นตามมาตรฐานแห้ง (dry basis)

การหาค่าความชื้นตามมาตรฐานเปียก (wet basis) หาได้จากสมการที่ 13

$$MC_w = (W_{wet} - W_{dry})/W_{wet} \quad (13)$$

การหาค่าความชื้นตามมาตรฐานแห้ง (dry basis) หาได้จากสมการที่ 14

$$MC_d = (W_{wet} - W_{dry})/W_{dry} \quad (14)$$

เมื่อ  $MC_w$  = ความชื้นของชีวมวลตามมาตรฐานเปียก

$MC_d$  = ความชื้นของชีวมวลตามมาตรฐานแห้ง

$W_{wet}$  = น้ำหนักของชีวมวลเปียก

$W_{dry}$  = น้ำหนักของชีวมวลแห้ง

### 1.2.2) ขนาดและลักษณะของเชื้อเพลิงชีวมวล

เชื้อเพลิงชีวมวลที่นำมาใช้ในเตาเผาไหม้จะต้องมีขนาดที่เหมาะสมและสม่ำเสมอ ขนาดของเชื้อเพลิงชีวมวลมีอิทธิพลอย่างมากต่อค่าความดันลดที่เกิดขึ้นภายในเครื่องผลิตพลังงานจากเชื้อเพลิง ชีวมวลที่มีขนาดเล็กมากจะทำให้อากาศแทรกเข้าไปในระหว่างชีวมวลได้น้อย ซึ่งจะทำให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นไม่สม่ำเสมอ

## 2) ความแข็งแรง (Strength) และความคงทน (Durability)

### 2.1) วิธีการวัดความแข็งแรง (Strength) และความคงทน (Durability)

การวัดประสิทธิภาพของแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคที่สร้างขึ้นในระหว่างกระบวนการความหนาแน่นของความแข็งแรง (Strength) และความคงทน (Durability) ซึ่งมีขั้นตอนที่ใช้สำหรับวัดความต้านทานแรงอัด ความต้านทานการกัดกร่อน ด้านทาน และทนทานต่อน้ำของเชื้อเพลิงอัดแข็ง (Kaliyan and Morey, 2009) ที่จะแสดงรายละเอียดดังนี้

#### 2.1.1) ความต้านทานแรงกด (Compressive resistance)

เป็นการจำลองสถานการณ์ของการที่แท่งเชื้อเพลิงเมื่อถูกเก็บไว้รวมกันจำนวนมากหรือขณะทำการขนส่งซึ่งจะมีการกดทับกันด้วยน้ำหนักของแต่ละชั้น จนรับน้ำหนักไม่ไหวทำให้เกิดการเสียรูปหรือแตกหักได้ หากมีความต้านทานแรงกดมากก็จะส่งผลให้มีความคงทนมาก แต่ยังไม่สามารถใช้เป็นตัวชี้วัดได้ทั้งหมด จะทดสอบ โดยใช้เครื่อง Compression Testing Machine การทนแรงกดอัดของเชื้อเพลิงอัดแข็งนั้น สังเกตผลจนกระทั่งก้อนเชื้อเพลิงแตกหรือหัก โดยทั่วไปมี 2 ลักษณะ คือ ความเครียดและความแข็ง ดังนี้

- ความเครียด (Strain) เป็นความเครียดที่ปรากฏภายใต้แรงที่มากกระทำต่อเนื้อของวัสดุจนวัสดุเกิดรับแรงไม่ไหว ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงขนาดและรูปร่างไปในทิศทางของแรงที่มากกระทำ (เกิดความเค้น) ทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปของวัสดุ เป็นผลมาจากการเคลื่อนที่ภายในเนื้อวัสดุ

- ความแข็งแรง (Strength) เป็นความแข็งแรงกดหรือแรงอัดสูงสุด (Ultimate Compressive Strength) ซึ่งสังเกตได้จาก จุดแตกหัก (Breaking Point) เรียกว่าเป็นจุดความแข็งแรงที่จุดแตกหัก

## 2.2) ความทนทาน (Durability)

ความทนทานหรือการทดสอบการขัดสี หรือนิวเมติก การทดสอบเหล่านี้สามารถช่วยควบคุมกระบวนการขึ้นรูปของซีเมนต์อัดแข็ง ให้มีคุณภาพสูง โดยที่ความทนทาน (Durability) เป็นกระบวนการที่ใช้วัดอย่างแพร่หลาย ซึ่งวิธี tumbling can, Holmen tester และ Ligno tester เป็นวิธีที่นำมาใช้ในการทดสอบเชื้อเพลิงอัดแข็ง

Tumbling can method เป็นวิธีที่ใช้เพื่อประเมินคุณภาพดัชนีความทนทานของเม็ดเชื้อเพลิง (PDI) หรือเพียงแค่ความทนทานร้อยละ การทดสอบนี้จะจำลองการจัดการเชิงกลของเชื้อเพลิงอัดและคาดการณ์ค่าที่เป็นไปได้เนื่องจากการผลิตทางกล จะทดสอบเชื้อเพลิงอัดที่ 500 กรัม หมุนด้วยความเร็วระหว่าง 50 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที ให้นำตัวอย่างเชื้อเพลิงมาร่อนผ่านตะแกรงขนาด 20 มิลลิเมตร และชั่งน้ำหนักตัวอย่างเชื้อเพลิงที่ค้างบนตะแกรง

Holmen tester เป็นการทดสอบความทนทานของเชื้อเพลิงอัด โดยการทดสอบการไหลของก้อนเชื้อเพลิงผ่านท่อตรงหรือโค้งให้กระทบกับพื้นผิว เพื่อดูก้อนเชื้อเพลิงที่แตกหัก ซึ่งตัวอย่างมีการหมุนในเครื่อง Holmen tester เป็นเวลา 30-120 วินาที ให้นำตัวอย่างเชื้อเพลิงมาร่อนผ่านตะแกรง แล้วชั่งน้ำหนักและวัดขนาด

Ligno tester คือการชั่งน้ำหนักตัวอย่างลงไปเครื่องทดสอบ 100 g แล้วใช้อากาศหมุนด้วยความเร็ว 60 รอบ/วินาที เป็นเวลา 30 วินาที หลังจากนั้นชั่งน้ำหนักของก้อนเชื้อเพลิงที่เหลืออยู่ ซึ่งวิธีนี้จะเร็วกว่า Tumbling can method และ Holmen tester ถ้าตามมาตรฐานออสเตรเลีย จะชั่งน้ำหนักตัวอย่างลงไปเครื่องทดสอบ 100 g แล้วใช้อากาศหมุนด้วยความเร็ว 70 รอบ/วินาที เป็นเวลา 60 วินาที

## 2.3) ความต้านทานแรงกระแทก (Impact resistance)

เป็นการทดสอบเพื่อหาความสามารถของเชื้อเพลิงอัดแข็งที่มีความทนทานของเชื้อเพลิง ทดสอบโดยนำเชื้อเพลิงอัดแข็งปล่อยจากที่สูงลงสู่พื้นด้วยความสูง 1.85 เมตร จำนวน 4 ครั้ง แล้วชั่งน้ำหนักของซีเมนต์ที่แตกออก หรือก้อนเชื้อเพลิงที่ยังเหลืออยู่ ซึ่งจะคำนวณได้จากสมการที่ 15

$$IRI = (100 \times N)/n \quad (15)$$

เมื่อ  $N$  = จำนวนครั้งที่ปล่อย  
 $n$  = จำนวนทั้งหมดของชั้นทั้งหมดหลังจากการปล่อย  $N$   
 $IRI$  = ความต้านทานแรงกระแทก

#### 2.4) ความทนทานต่อน้ำ (Water resistance)

การที่เชื้อเพลิงอัดแข็งได้สัมผัสกับความชื้นหรือฝนในระยะสั้นอาจส่งผลต่อคุณภาพเชื้อเพลิงอัดได้ ซึ่งการวัดความทนทานต่อน้ำ (Water resistance) นั้นสามารถทำได้โดยการการดูดซึมน้ำของก้อนเชื้อเพลิงที่ถูกแช่อยู่ในน้ำที่มีอุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 วินาที การที่ก้อนเชื้อเพลิงมีการดูดซึมน้ำเข้าไป โดยน้ำจะเป็นตัวทำให้เชื้อเพลิงเกิดการเปลี่ยนรูปไป เนื่องจากหากมีการดูดซึมน้ำเข้าไปมากแล้วจะเกิดการพองตัวและเปื่อยยุ่ยแล้วเมื่อเกิดการระเหยของน้ำออกมาวัสดุก็จะเกิดการหดตัวทำให้เกิดการแตกหักส่งผลต่อการนำไปใช้งาน ดังนั้นหากมาค่าการดูดซึมน้ำมาก แสดงว่าเชื้อเพลิงนั้นไม่มีความคงทนต่อน้ำหรือความชื้น

#### 3) ปัจจัยที่ส่งผลต่อความแข็งแรงและความคงทนของเชื้อเพลิง

การอัดขึ้นรูปของเชื้อเพลิงให้มีความคงทนและมีคุณสมบัติในการเป็นเชื้อเพลิงที่ดีนั้นจะขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย และแต่ละปัจจัยก็มีข้อจำกัดในการนำมาใช้ ซึ่งปัจจัยเหล่านั้นจะส่งผลต่อความแข็งแรง (Strength) และความคงทน (Durability) ซึ่งจะแสดงดังตาราง 10

ตาราง 10 ความเหมาะสมของปัจจัยการผลิตที่ส่งผลต่อความแข็งแรงและความคงทน

| ตัวแปร | ช่วงของสถานะที่เหมาะสม/ค่า                                                                                                        | กลยุทธ์ในการผลิตสินค้าที่มีความหนาแน่นสูงและคุณภาพสูง                                                                                      |
|--------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| แป้ง   | เงื่อนไขที่จะช่วยให้การเกิดเจลของแป้งสูง เช่นอุณหภูมิและความชื้นสูง (เช่นไอน้ำแรงดันต่ำเช่น ความดันไอน้ำ 103 KPag อุณหภูมิ 85 °C) | ทำให้แป้งประสานกัน เมื่อปริมาณแป้งสูงจะทำให้ความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์สูง                                                                     |
| โปรตีน | การที่จะทำให้คุณสมบัติของโปรตีนเปลี่ยนจะต้องใช้อุณหภูมิและความชื้นที่จำกัด (เช่น อบไอน้ำ แรงดัน 448 KPag ที่อุณหภูมิ 85°C)        | <ul style="list-style-type: none"> <li>- การเพิ่มปริมาณโปรตีนจะทำให้มีความหนาแน่นมาก</li> <li>- โปรตีนดิบดีกว่าโปรตีนสังเคราะห์</li> </ul> |

ที่มา: Kaliyan and Morey, 2009

ตาราง 10 (ต่อ) ความเหมาะสมของปัจจัยการผลิตที่ส่งผลต่อความแข็งแรงและความคงทน

| ตัวแปร                      | ช่วงของสภาวะที่เหมาะสม/ค่า                                                                                                                                                                                   | กลยุทธ์ในการผลิตสินค้าที่มีความหนาแน่นสูงและคุณภาพสูง                                                                                                                                                                                                         |
|-----------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| การเพิ่มตัวประสาน           | <ul style="list-style-type: none"> <li>- คุณสมบัติทางเคมีปริมาณ 0.5-5%</li> <li>- คุณสมบัติทางชีวภาพ 20%หรือมากกว่านั้นก็ได้ (ขึ้นอยู่กับต้นทุนในการซื้อตัวประสาน)</li> </ul>                                | <ul style="list-style-type: none"> <li>- ตัวประสานที่เป็นเคมี เช่น lignosulfonate , ปูนเป็นตัวประสานที่ดี</li> <li>- ตัวประสานที่เป็นชีวภาพ ได้แก่ กากน้ำตาล, แป้ง, เศษการดาษ, ขี้เลื่อย ช่วยปรับปรุงคุณภาพความหนาแน่น</li> </ul>                             |
| ช่วงความดันที่เปลี่ยนแปลง   | ช่วงความดัน 100 -150 MPa                                                                                                                                                                                     | <ul style="list-style-type: none"> <li>- แรงดันสูงจะช่วยให้เกิดการแข็งตัว</li> <li>- กระบวนการแข็งตัวขึ้นอยู่กับวัสดุที่ใช้และคุณสมบัติทางเคมีของวัสดุอาจมีจำกัดในด้านปริมาณต่อแรงดัน</li> <li>- การบดเม็ดสามารถทำได้ที่แรงดัน 100-150 MPa</li> </ul>         |
| เครื่องอัด                  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- การอัดเม็ดมีเส้นผ่านศูนย์กลางต่อพื้นที่ 8-10 mm (<math>\phi = 4.8-9.5</math> mm.)</li> <li>- ความเร็วรอบในการอัด 150-250 รอบ/นาที (ความเร็วที่ต่ำที่สุด)</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- วัสดุใดที่มีความจำเพาะต่อการอัดเม็ดต้องหาปัจจัยที่เหมาะสมของวัสดุขั้นต้นในการนำวัสดุไปอัดแท่งจะต้องนำวัสดุไปพิสูจน์ขั้นต้น</li> <li>- การเพิ่มขนาดของเม็ดสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของเชื้อเพลิงให้ดียิ่งขึ้น</li> </ul> |
| สภาพแวดล้อมหลังการผลิต/เวลา | <ul style="list-style-type: none"> <li>- ทันทีหลังการผลิต</li> <li>- หนึ่งสัปดาห์หลังจากการบ่ม</li> </ul>                                                                                                    | เก็บรักษา ความคงทนและความแข็งแรงของผลิตภัณฑ์ ทำให้เข้าใจการทำลายหรือสิ่งที่ทำให้ผลิตภัณฑ์มีความหนาแน่นและความสัมพันธ์ของกลไกต่างๆ                                                                                                                             |
| การกดม้วน                   | ปัจจัยแวดล้อมที่เหมาะสมไม่สามารถทำให้ก่อตัวได้ผลจากการหมุนหลายๆครั้งมีค่าไม่แน่นอน                                                                                                                           | ความเร็วของสกรูความเร็วหมุน แรงบิดม้วนและช่องว่างระหว่างลูกกลิ้งควรจะเพิ่มประสิทธิภาพโดยการดำเนินการทดสอบเบื้องต้น                                                                                                                                            |

ที่มา: Kaliyan and Morey, 2009

ตาราง 10 (ต่อ) ความเหมาะสมของปัจจัยการผลิตที่ส่งผลต่อความแข็งแรงและความคงทน

| ตัวแปร   | ช่วงของสภาวะที่เหมาะสม/ค่า                                                                         | กลยุทธ์ในการผลิตสินค้าที่มีความหนาแน่นสูงและคุณภาพสูง                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|----------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| เส้นใย   | เส้นใยที่เหมาะสมในการทำเชื้อเพลิงประมาณ 4-27 % แต่จะต้องกำหนดความชื้นในการอัดให้มีปริมาณน้อยที่สุด | <ul style="list-style-type: none"> <li>- หากมีน้ำในเส้นใยปริมาณมากจะทำให้การอัดเป็นไปได้อย่างยาก</li> <li>- ลดคุณสมบัติของเส้นใยได้โดยการเพิ่มความชื้นให้ถึง 25 % (w.b.) ภายใต้อุณหภูมิห้อง หรือเพิ่มแคลเซียมออกไซด์</li> <li>- วัตถุเจือปนเช่น lignosulfonate หรือมะนาวสามารถช่วยเพิ่มความหนาแน่นสูงของผลิตภัณฑ์</li> </ul> |
| ลิกนิน   | น้อยกว่า 34 %                                                                                      | มีมากยิ่งดี จะส่งผลต่อปริมาณความร้อน                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| ไขมัน    | ไขมัน 1.5-6.5 ต้องเพิ่มเข้าไปก่อนการอัดแท่งเชื้อเพลิง                                              | <ul style="list-style-type: none"> <li>- ปริมาณไขมันมาก ส่งผลให้การอัดแท่งไม่ดี</li> <li>- การทำให้เม็ดไขมันแตกจะต้องนำไปบีบอัด</li> <li>- เพิ่มสารเคมีที่เป็นตัวประสานที่จะทำให้ไขมันจับกันได้ดี</li> </ul>                                                                                                                 |
| ความชื้น | 8 ถึง 12% (w.b.)                                                                                   | <ul style="list-style-type: none"> <li>- ความชื้น 12-20% จะทำให้เกิดกระบวนการจับตัวกัน แต่ถ้าเกิน 20% อาจไม่เกิดการจับตัวกัน</li> <li>- ความชื้นมากกว่า 16% (w.b.) อาจทำให้การอัดแท่งหยุดชะงัก</li> </ul>                                                                                                                    |

ที่มา: Kaliyan and Morey, 2009

## 2.4. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.4.1 เชื้อเพลิงอัดแข็งจากชีวมวล

เชื้อเพลิงชีวมวลเป็นการนำเศษวัสดุทางการเกษตร จากงานผลิตในโรงงานอุตสาหกรรม มาสับบดให้เป็นผงฝุ่นขนาดเล็ก ผ่านกระบวนการอบให้แห้งเพื่อลดความชื้น แล้วนำมาเข้าเครื่องบดอัดแรงดันสูง ให้อัดแน่นเป็นแท่ง ซึ่งในปัจจุบันมีศึกษาเชื้อเพลิงอัดแข็งนี้ได้หลายรูปแบบ ได้แก่ การอัดเป็นเม็ดขนาดเล็ก (pellet) และการอัดเป็นก้อน (briquettes) เป็นต้น โดยการศึกษาการอัดขึ้นรูปจากชีวมวลในรูปแบบการอัดเชื้อเพลิงชีวมวลเป็นก้อน ได้แก่ ชี้อาซานอ้อย (S.R.Teixeira et al.,

2010) ข้าวสาลี ฟางข้าว ชังข้าวโพด และหญ้าหวาน (Mani et al., 2004) และการอัดเชื้อเพลิงชีวมวลเป็นเม็ดขนาดเล็ก ได้แก่ จิ้นไม้สับ (Arce et al., 2017) หญ้า (Larsson et al. 2008) ซึ่งกระบวนการอัดแข็งชีวมวลจะเป็นการเพิ่มคุณภาพของเชื้อเพลิงชีวมวล ให้สามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิง ในภาคอุตสาหกรรม อาทิเช่น ใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับหม้อต้มไอน้ำ (Boiler)

#### 2.4.2 ปัจจัยการผลิตที่ส่งผลต่อความคงทนและแข็งแรง

การอัดขึ้นรูปของเชื้อเพลิงให้มีความคงทนและมีคุณสมบัติในการเป็นเชื้อเพลิงที่ดีนั้นจะขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย และแต่ละปัจจัยก็มีข้อจำกัดในการนำมาใช้ โดยที่ปัจจัยเหล่านั้น ได้แก่ ความหนาแน่น ความชื้น ขนาดอนุภาค ความคงทน (Lehtikangas, 2001; Obernberger and Thek, 2004) เส้นใย โปรตีน ลิกนิน ไขมัน (Kaliyan and Morey, 2009) รวมทั้งปัจจัยตัวประสาน ซึ่งจะช่วยให้ชีวมวลจับตัวกันได้มากขึ้น (พงษ์ศักดิ์ อยู่มนั, 2559) เป็นการเพิ่มความแข็งแรง (Strength) และความคงทน (Durability) ซึ่งมีขั้นตอนที่ใช้สำหรับวัดความต้านทานแรงอัด ความต้านทานการกัดกร่อน ต้านทาน และทนทานต่อน้ำของเชื้อเพลิงอัดแข็ง (Kaliyan and Morey, 2009)

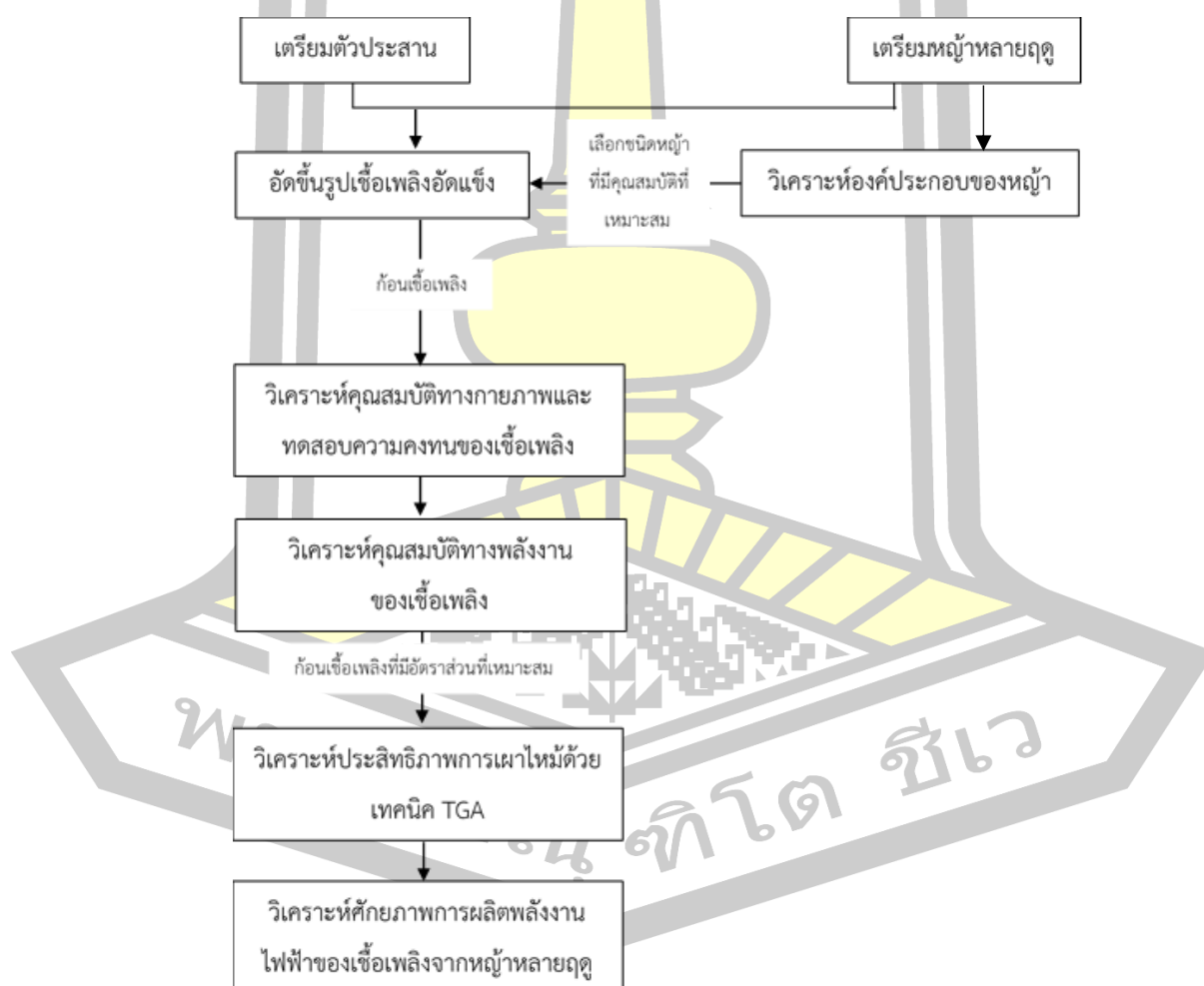
#### 2.4.3 ประสิทธิภาพการเผาไหม้เชื้อเพลิง

ประสิทธิภาพการเผาไหม้เชื้อเพลิง คือคุณสมบัติที่ส่งเสริมให้เชื้อเพลิงอัดแข็งมีประสิทธิภาพการเผาไหม้ คือ ค่าพลังงานความร้อนและพฤติกรรมการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงที่จะเกิดขึ้นในเตาเผา รวมถึงประมาณของก๊าซที่ปล่อยออกมาในแต่ละช่วงอุณหภูมิของการเผาไหม้ โดยแต่ละสมบัตินี้สามารถใช้ในการออกแบบเตาเผา เพื่อให้เหมาะสมกับเชื้อเพลิงและมีประสิทธิภาพการเผาไหม้ได้เต็มที่ โดยที่ประสิทธิภาพการเผาไหม้เชื้อเพลิงจะสามารถวัดได้โดยทำการทดสอบการเผาไหม้ด้วยเครื่องวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักเชื้อเพลิง (Thermogravimetric analysis หรือ TGA) ที่สามารถดูน้ำหนักของตัวอย่างเชื้อเพลิงที่หายไป หรืออัตราการหายไปของน้ำหนักตัวอย่างเทียบกับอุณหภูมิหรือเวลา ซึ่งมีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงของมวลและอุณหภูมิ (Obernberger and Thek, 2004; S.R.Teixeira et al., 2010; Xiang-guo et al., 2006; จันจิรา จับศิลป์, 2555) โดยจะศึกษาจาก initial temperature, peak temperature และ ending temperature (Miranda et al., 2008; ศิย์ สร้อยทอง และคณะ, 2562) ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่ใช้สังเกตจุดติดไฟและพฤติกรรมการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงชีวมวล (Muthuraman et al., 2010; Vamvuka et al., 2011)

### บทที่ 3

#### วิธีดำเนินการวิจัย

ในบทนี้นำเสนอรายละเอียดของการดำเนินการศึกษาเรื่อง “การปรับปรุงประสิทธิภาพทางพลังงานของเชื้อเพลิงจากหญ้าหลายฤดู (Enhancing Energy Performance of Perennial-Grass Biofuel Feedstock)” โดยศึกษาชนิดของหญ้าที่มีอยู่ในพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย ซึ่งศึกษาการวิเคราะห์คุณสมบัติและองค์ประกอบของชีวมวล การทดสอบเทคโนโลยีการอัดขึ้นรูปและกระบวนการผลิตเชื้อเพลิงอัดแข็ง การทดสอบประสิทธิภาพการให้พลังงาน และประสิทธิภาพการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงอัดแข็งจากหญ้าหลายฤดู ดังภาพประกอบ 13



ภาพประกอบ 13 ผังขั้นตอนการทดลอง

### 3.1. การเตรียมวัสดุและอุปกรณ์การทดลอง

#### 3.1.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

- 1) กล้วยหลายฤดู จำนวน 10 ชนิด ที่ปลูกอยู่ในพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ
- 2) แป้งมันสำปะหลัง ใช้สำหรับเป็นตัวประสานในการอัดขึ้นรูปก้อนเชื้อเพลิง

#### 3.1.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

การวิเคราะห์องค์ประกอบทางชีวเคมีของกล้วยหลายฤดูด้วยเทคนิคในการวิเคราะห์หา ส่วนประกอบของเยื่อใยต่างๆ ด้วยวิธี Detergent Analysis ซึ่งจะวิเคราะห์หาเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินที่อยู่ในชีวมวล จะใช้สารเคมีในการวิเคราะห์ดังนี้

- 1.2.1 Sodium lauryl sulphate
- 1.2.2 Disodium Ethylenediaminetetraacetate (EDTA)
- 1.2.3 Sodium borate decahydrate ( $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ )
- 1.2.4 Disodium hydrogen phosphate anhydrous ( $\text{Na}_2\text{HPO}_4$ )
- 1.2.5 Triethylene glycol
- 1.2.6 Acetone
- 1.2.7 Sulfuric acid ( $\text{H}_2\text{SO}_4$  conc.)
- 1.2.8 Cetyl triethyl ammonium bromide (CTAB)

#### 3.1.3 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

การศึกษาและการทดลองในครั้งนี้ แบ่งอุปกรณ์และเครื่องมือสำหรับหลักๆ สำหรับการศึกษากออกเป็น 4 ส่วน ได้แก่ การเตรียมหญ้า การวิเคราะห์องค์ประกอบของกล้วยหลายฤดู การอัดขึ้นรูปก้อนเชื้อเพลิงและทดสอบความคงทน ดังนี้

- 1) เครื่องมือสำหรับการเตรียมวัสดุ
  - 1.1) เครื่องบดฟီชอนเนกประสงค์ แบบหยาบ
  - 1.2) เครื่องบดฟီชอนเนกประสงค์ แบบละเอียด
- 2) เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับการวิเคราะห์องค์ประกอบของกล้วยหลายฤดู
  - 1.1) เครื่องชั่งดิจิตอล
  - 1.2) เตาเผาแบบอุณหภูมิสูง (Electric muffle furnace)
  - 1.3) โถดูดความชื้น (Desiccator)
  - 1.4) ตู้อบ (Drying Oven)
  - 1.5) Bomb Calorimeter

- 1.6) ถ้วยทนไฟ (Crucible)
- 1.7) ถ้วยแก้วกูชูลีเบล (Gooch Crucible)
- 1.8) เครื่องดูดสูญญากาศ (Vacuum extractor)
- 1.9) เตาให้ความร้อน (Hot plat)
- 2) เครื่องมือสำหรับการอัดขึ้นรูปก้อนเชื้อเพลิงและทดสอบความคงทน
  - 2.1) Tumbling Barrel Test Machine
  - 2.2) Compression Testing Machine
  - 2.3) เครื่องอัดไฮดรอลิค
  - 2.4) เครื่องอัดเชื้อเพลิง Pellet

### 3.1.4 การเตรียมวัสดุสำหรับวิเคราะห์และทดสอบ

#### 1) การเก็บตัวอย่างหญ้าหลายฤดู

ในงานวิจัยนี้ได้นำหญ้าหลายฤดู 10 ชนิด ในพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย ซึ่งสามารถเก็บตัวอย่างได้จาก 4 แห่งคือ หยกฟาร์ม จังหวัดกาฬสินธุ์, ศูนย์วิจัยและพัฒนามาตรฐานอาหารสัตว์เคี้ยวเอื้อง จังหวัดขอนแก่น, หน่วยผลิตพันธุ์พืชอาหารสัตว์ อำเภอกุดรัง และศูนย์วิจัยและพัฒนาอาหารสัตว์มหาสารคาม จังหวัดมหาสารคาม โดยหญ้าทั้ง 10 ชนิดที่ได้แสดงดังตาราง 11 และภาพประกอบ 14-23

ตาราง 11 หญ้าหลายฤดูทั้ง 10 ชนิด ในพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย

| ลำดับ | ชื่อ                   | ชื่อวิทยาศาสตร์                                              | สัญลักษณ์ |
|-------|------------------------|--------------------------------------------------------------|-----------|
| 1     | หญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1  | <i>Pennisetum purpureum</i> x <i>P. glaucum</i> (Pakchong 1) | PC        |
| 2     | หญ้างินนิมอมบาซ่า      | <i>Panicum maximum</i> (Mombaza)                             | MB        |
| 3     | หญ้าอะตราตัม           | <i>Paspalum atratum</i>                                      | PA        |
| 4     | หญ้าเนเปียร์สุราษฎร์ 1 | <i>Pennisetum purpureum</i> (Surat 1)                        | PS        |
| 5     | หญ้าเนเปียร์ธรรมดา     | <i>Pennisetum purpureum</i>                                  | PP        |
| 6     | หญ้าเนเปียร์สีม่วง     | <i>Pennisetum purpureum</i> (Prince)                         | PR        |
| 7     | หญ้าเนเปียร์แคระ       | <i>Pennisetum purpureum</i> (Mott)                           | PM        |
| 8     | หญ้าอูมากุ             | <i>Panicum maximum</i> (Umaku)                               | UM        |
| 9     | หญ้าซีตาเรียสเปลนดา    | <i>Setaria sphacelata</i> (Splenda)                          | SS        |
| 10    | หญ้าหวานอิสราเอล       | <i>Pennisetum purpureum</i> (Mahasarakham)                   | MS        |



ภาพประกอบ 14 หญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1  
(*Pennisetum purpureum* x *P. glaucum* (Pakchong 1); PC)



ภาพประกอบ 15 หญ้าเนเปียร์ธรรมดา (*Pennisetum purpureum*; PP)



ภาพประกอบ 16 หญ้าเนเปียร์สีม่วง (*Pennisetum purpureum* (Prince); PR)



ภาพประกอบ 17 หญ้าเนเปียร์สุราษฎร์ 1 (*Pennisetum purpureum* (Surat 1); PS)



ภาพประกอบ 18 หญ้าเนเปียร์แคระ (*Pennisetum purpureum* (Mott); PM)



ภาพประกอบ 19 หญ้าอู่มากุ (*Panicum maximum* (Umaku); UM)



ภาพประกอบ 20 หญ้ากินนีมอมบาซ่า (*Panicum maximum* (Mombaza); MB)



ภาพประกอบ 21 หญ้าอะตราตัม (*Paspalum atratum*; PA)



ภาพประกอบ 22 หญ้าตาเรียสเปลดตา (*Setaria sphacelata* (Splenda); SS)



ภาพประกอบ 23 หญ้าหวานอิสราเอล (*Pennisetum purpureum* (Mahasarakham); MS)

## 2) การเตรียมตัวอย่างหญ้าหลายฤดู

ในการเตรียมตัวอย่างหญ้าหลายฤดูที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์ เมื่อทำการเก็บตัวอย่างหญ้าหลายฤดูมาแล้วให้สับเป็นท่อน แยกส่วนต้นและใบของหญ้า ตากให้แห้ง ประมาณ 1 สัปดาห์ หรือจนกว่าน้ำหนักของหญ้าหลายฤดูจะคงที่ แล้วนำมาบดให้ได้ขนาดสำหรับการวิเคราะห์ ซึ่งแบ่งขนาดได้เป็นดังนี้

2.1) การเตรียมตัวอย่างสำหรับการวิเคราะห์องค์ประกอบและการอัดขึ้นรูปก้อนเชื้อเพลิงของหญ้าหลายฤดู (ภาพประกอบ 24)

2.1.1) นำหญ้าหลายฤดูที่ตากแห้งแล้วมาบดให้ได้ขนาด โดยใช้เครื่องบดพีชแบบเพื่อให้ชีวมวลมีขนาดเล็กลง

2.1.2) นำชีวมวลที่ผ่านการบดหยาบแล้ว มาใส่ในเครื่องบดพีชเพื่อให้ได้ขนาดประมาณ 3 มิลลิเมตร

2.1.3) บรรจุหญ้าหลายฤดูดังกล่าวลงในถุงพลาสติกมัดปากถุงให้แน่นเพื่อป้องกันความชื้น ก่อนนำไปใช้ในการวิเคราะห์และทดลอง



หญ้าหลายฤดูตากแห้ง

เครื่องบดหยาบ

เครื่องบดขนาด 3 mm.

หญ้าขนาด 3 mm.

ภาพประกอบ 24 ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างหญ้าขนาด 3 มิลลิเมตร

2.2) การเตรียมตัวอย่างสำหรับการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี (ภาพประกอบ 25)

2.2.1) นำหญ้าหลายฤดูที่บดแล้วขนาด 1- 3 มิลลิเมตร มาทำให้มีขนาดเล็กลงด้วยเครื่องบดพีชแบบละเอียด ซึ่งลักษณะชีวมวลที่บดแล้วจะมีลักษณะเป็นผงละเอียด

2.2.2) บรรจุหญ้าหลายฤดูดังกล่าวลงในถุงพลาสติกมัดปากถุงให้แน่นเพื่อป้องกันความชื้น ก่อนนำไปใช้ในการวิเคราะห์และทดลอง



หญ้าหลายฤดูตากแห้ง

เครื่องบดหยาบ

เครื่องบดละเอียด

หญ้าบดเป็นผงละเอียด

ภาพประกอบ 25 ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างหญ้าขนาดบดผงละเอียด

3) การเตรียมตัวประสาน

3.1) ชั่งแป้งมันสำปะหลังตามอัตราส่วนโดยน้ำหนัก (หญ้าหลายฤดู:แป้งมันสำปะหลัง) คือ 60:40, 70:30, 80:20, 90:10, และ 100:0 ซึ่งจะชั่งแป้งได้ 200, 128.6, 75, 33.3 และ 0 กรัม ตามลำดับเพื่อใช้สำหรับหญ้าหลายฤดูปริมาณ 300 กรัม

3.2) ละลายแป้งในน้ำเปล่า 350 มิลลิลิตรในแต่ละปริมาณแป้งทุกอัตราส่วน

3.3) นำน้ำแป้งที่ได้ไปต้ม โดยใช้ไฟในระดับกลาง ต้มจนกว่าแป้งจะสุกมีลักษณะเป็นเจลใส เรียกว่า แป้งเปียก แล้วนำไปผสมกับหญ้าหลายฤดูที่เตรียมไว้ ดังภาพประกอบ 26



ภาพประกอบ 26 ขั้นตอนการเตรียมตัวประสาน

### 3.2. วิธีการวิเคราะห์และการทดลอง

#### 3.2.1 การวิเคราะห์คุณสมบัติและองค์ประกอบเบื้องต้นของหญ้าหลายฤดู

คุณสมบัติที่เกี่ยวข้องกับความเป็นเชื้อเพลิงของชีวมวลมีความโดดเด่นในตัวเอง ซึ่งเป็นผลโดยตรงจากการเป็นผลิตภัณฑ์จากสิ่งมีชีวิต คุณสมบัติที่สำคัญเหล่านี้ ได้แก่ การวิเคราะห์คุณสมบัติโดยประมาณของชีวมวล (Proximate Analysis), การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี (Ultimate Analysis), การวิเคราะห์องค์ประกอบทางชีวเคมี (Biochemical Component Analysis) และการวิเคราะห์หาค่าความร้อนของชีวมวล (Heating Value)

##### 1) การวิเคราะห์โดยประมาณของชีวมวล (Proximate Analysis)

ในการวิเคราะห์โดยประมาณของหญ้าหลายฤดู จะใช้หญ้าหลายฤดูขนาด 3 mm. ปริมาณ 1.0000 g. ใส่ในถ้วยทนไฟ เพื่อวิเคราะห์หาปริมาณความชื้น (Moisture) ตามมาตรฐาน ASTM D3173 โดยการนำไปอบในตู้อบ (Drying Oven) ที่อุณหภูมิ 105 °C หลังจากนั้นใช้ตัวอย่างเดียวกันนำไปวิเคราะห์หาปริมาณสารระเหย (Volatile Matter) โดยการเผาที่อุณหภูมิ 950±5 °C ในเตาเผาไฟฟ้า (Muffle Furnace) ตามมาตรฐาน ASTM D3174 และวิเคราะห์ปริมาณเถ้า (Ash) ตามมาตรฐาน ASTM D3115 โดยการเผาที่อุณหภูมิ 750±5 °C โดยไม่ต้องปิดฝาถ้วยทนไฟ ส่วนคาร์บอนคงตัว หาได้จากค่าผลต่างของหนึ่งร้อยละด้วยผลรวมของร้อยละของความชื้น สารระเหยง่าย และเถ้าของชีวมวลจากหญ้าหลายฤดู (สมการที่ 16) ซึ่งเป็นการวิเคราะห์มาตรฐานของ ASTM D3172 (ภาคผนวก ก-1)

$$\text{ปริมาณคาร์บอนคงตัว (\%)} = 100 - (\% \text{Ash} + \% \text{MC} + \% \text{VM}) \quad (16)$$

เมื่อ

Ash = ปริมาณเถ้า ในหน่วยร้อยละ

MC = ปริมาณความชื้น ในหน่วยร้อยละ

VM = ปริมาณสารระเหยง่าย ในหน่วยร้อยละ

## 2) การวิเคราะห์องค์ประกอบทางชีวเคมี (Biochemical Component Analysis)

### 2.1) วิเคราะห์หา Neutral Detergent Fiber (NDF)

การวิเคราะห์องค์ประกอบทางชีวเคมีของหญ้าหลายฤดู จะทำการวิเคราะห์ Cell Wall Constituents (CWC) หรือ Neutral Detergent Fiber (NDF) ทำได้โดยนำตัวอย่างหญ้าหลายฤดูที่บดขนาด 1-3 mm. ปริมาณ 1 g. ไปต้มกับสารละลาย Neutral Detergent (ภาคผนวก ข.) ปริมาณ 50 มิลลิลิตร เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วล้างด้วย Acetone หลังจากการวิเคราะห์ส่วนที่เหลือซึ่งไม่ละลายในสารละลายที่เป็นกลางคือส่วนของ Cell Wall Constituents ซึ่งเป็นสารต่างๆ ที่เป็นส่วนของผนังเซลล์พืช (ภาคผนวก ก-3) ได้แก่ เซลลูโลส (Cellulose) เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) ลิกนิน (Lignin) รวมทั้ง Cutin, Silica และ Tannin

### 2.2) วิเคราะห์หา Acid Detergent Fiber (ADF)

การวิเคราะห์หา Acid Detergent Fiber (ADF) ในหญ้าหลายฤดู ทำโดยนำเอาตัวอย่างหญ้าที่เหลือหลังจากการวิเคราะห์ NDF โดยนำไปต้มในสารละลาย Acid detergent (ภาคผนวก ข.) ในปริมาตร 100 มิลลิลิตร เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วล้างด้วย Acetone หลังจากการวิเคราะห์ส่วนที่เหลือที่ไม่ละลายคือส่วนของ ADF ซึ่งประกอบด้วย Cellulose และ Lignin ประมาณ 90 เปอร์เซ็นต์ ส่วนที่เหลือ 10 เปอร์เซ็นต์ จะเป็นพวก Cutin และเถ้าที่ไม่ละลายในกรด ดังนั้น ส่วนที่หายไป คือ Hemicellulose ซึ่งละลายในสารละลายที่เป็นกรดได้ ในที่นี้จะใช้ Sulfuric acid ที่มีความเข้มข้น 1 นอร์มอล (N) และมี Detergent คือ Cetyl trimethyl ammonium bromide จะช่วยย่อยพวกโปรตีนออกไป (ภาคผนวก ก-3)

### 2.3) วิเคราะห์หา Acid Detergent Lignin (ADL)

การวิเคราะห์หา Acid Detergent Lignin (ADL) เป็นวิเคราะห์การปริมาณ Cellulose ในชีวมวลของหญ้าหลายฤดู โดยวิธี Detergent analysis ซึ่งจะนำตัวอย่างหญ้าหลายฤดูที่เหลือจากการวิเคราะห์ ADF มาวิเคราะห์ต่อโดยการนำไปแช่ในสารละลาย  $\text{H}_2\text{SO}_4$  72% (ภาคผนวก ข.) ที่มีปริมาตร 150 มิลลิลิตร เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นกรองสารละลายออก แล้วล้างสารละลายด้วยน้ำร้อนปริมาตร 1,500 มิลลิลิตร หรือจนกระทั่งหมด ส่วนที่เหลือหลังจากการวิเคราะห์คือ ลิกนิน (Lignin) และ เถ้า (Ash) (ภาคผนวก ก-3)

### 2.4) วิเคราะห์หาลิกนิน (Lignin)

การวิเคราะห์ Lignin ในชีวมวลของหญ้าหลายฤดู ทำได้โดยใช้ตัวอย่างที่ได้จากการวิเคราะห์หา ADF มาทำการวิเคราะห์หา Lignin โดยใช้การเผาในเตาเผาแบบอุณหภูมิสูง (Electric muffle furnace) ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ถึงแม้ลิกนินไม่จัดเป็นสารพวกคาร์โบไฮเดรตแม้จะมีคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน แต่ก็จัดเป็นส่วนประกอบที่สำคัญของผนังเซลล์พืชทำให้เซลล์พืชมีความแข็งแรง ซึ่งจะไม่ละลายออกไปกับการวิเคราะห์ด้วยสารละลาย

NDF ADL และ ADL แต่สามารถวิเคราะห์หาได้จากการเผา เนื่องจากลิกนินจะหายออกไปในระหว่างการเผา ทำให้สิ่งที่เหลืออยู่คือเถ้า เนื่องจากเป็นส่วนที่เผาไหม้ไม่ได้ (ภาคผนวก ก-3)

### 3) การวิเคราะห์หาค่าความร้อนของชีวมวล (Heating Value)

การวิเคราะห์หาค่าความร้อนของชีวมวลหญ้าหลายฤดู สามารถวิเคราะห์ได้โดยการใช้เครื่อง Bomb Calorimeter ในการวิเคราะห์หาค่าความร้อนสูงของเชื้อเพลิงชีวมวล โดยใช้วิธีมาตรฐานของ ASTM D3286 (ภาคผนวก ก-4) ซึ่งจะใช้ตัวอย่างชีวมวลจากหญ้าหลายฤดูที่บดแล้วมีขนาด 1-3 mm. มาใช้ในการวิเคราะห์ โดยใช้ปริมาณ 0.5 กรัม มาอัดเป็นเม็ด แล้วนำมาวิเคราะห์ในเครื่อง Bomb Calorimeter โดยอัดก๊าซออกซิเจนในลูก Bomb ให้มีความดันบรรยากาศที่ 28-30 บรรยากาศ ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ของเครื่อง Bomb Calorimeter จะเป็นค่าความร้อนสูงในหน่วยของเมกะจูลต่อกิโลกรัม (MJ/Kg.) ซึ่งการวิเคราะห์นี้จะวิเคราะห์วัสดุหญ้าหลายฤดูทั้ง 10 ชนิด

### 4) การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี (Ultimate Analysis)

การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของหญ้าหลายฤดู โดยจะทำการวิเคราะห์หญ้าที่มีคุณสมบัติที่เหมาะสมสำหรับเป็นเชื้อเพลิงเพียง 3 ชนิด ได้จากการประเมินจากคุณสมบัติอื่นๆแล้ว ซึ่งในการวิเคราะห์จะหญ้าหลายฤดูที่บดเป็นผงละเอียดในปริมาณ 0.5 กรัม โดยจะวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุหลักในเชื้อเพลิงชีวมวลประกอบไปด้วย คาร์บอน (C), ไฮโดรเจน (H), ออกซิเจน (O), ซัลเฟอร์ (S) และไนโตรเจน (N) ซึ่งการวิเคราะห์ปริมาณธาตุหลักในชีวมวลของหญ้าหลายฤดูเป็นสิ่งที่จำเป็นเพื่อใช้สำหรับการคำนวณปริมาณอากาศในการเผาไหม้ การให้พลังงานความร้อน และประเมินมลพิษที่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง อีกทั้งยังสามารถนำปริมาณธาตุหลักๆในเชื้อเพลิงชีวมวลมาคำนวณหาค่าความร้อน (HHV) ของชีวมวลได้ ซึ่งการศึกษาครั้งนี้จะใช้เครื่อง CHNS/O Analyser ณ ศูนย์วิเคราะห์เครื่องมือกลาง มหาวิทยาลัยมหาสารคามในการวิเคราะห์แบบแยกธาตุของเชื้อเพลิงชีวมวลที่ศึกษา (ภาคผนวก ก-2)

จากการวิเคราะห์คุณสมบัติและองค์ประกอบเบื้องต้นของหญ้าหลายฤดูนั้น ข้อมูลที่ได้จะนำมาเป็นเกณฑ์ที่ใช้ในการเลือกชนิดหญ้าที่มีคุณสมบัติการให้พลังงานที่ดี เพื่อนำหญ้าดังกล่าวไปใช้ทดสอบการอัดขึ้นรูปและกระบวนการผลิตเชื้อเพลิงอัดแข็ง ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อต่อไป

## 3.2.2 การอัดขึ้นรูปและกระบวนการผลิตเชื้อเพลิงอัดแข็ง

การวิจัยจะได้ทำการวิจัยเอกสาร (Documentation Research) เกี่ยวกับเทคโนโลยีการอัดขึ้นรูปเชื้อเพลิง เพื่อศึกษากระบวนการผลิตและปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพของเชื้อเพลิง จากคุณสมบัติด้านต่างๆ นำมาสู่การวิเคราะห์ประเมินข้อดีและข้อจำกัดของการประยุกต์เทคโนโลยีการอัดขึ้นรูปที่เหมาะสมสำหรับการผลิตเชื้อเพลิงอัดแข็งจากชีวมวลหญ้าหลายฤดู โดยจะศึกษาเทคโนโลยีการอัดขึ้นรูปเชื้อเพลิงที่แตกต่างกันและศึกษาปัจจัยด้านกระบวนการผลิตที่ส่งต่อคุณภาพเชื้อเพลิงอัดแข็ง

### 1) เทคโนโลยีการอัดขึ้นรูปเชื้อเพลิง

ในงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่ส่งผลต่อความคงทนและคุณสมบัติด้านพลังงานของเชื้อเพลิงอัดแข็งจากหญ้าหลายฤดู เพื่อนำมาผลิตเป็นเชื้อเพลิงอัดแข็ง โดยปัจจัยที่ศึกษาได้แก่ เรื่องของขนาดรูปร่างและรูปทรงของก้อนเชื้อเพลิง ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องศึกษาเทคโนโลยีการอัดขึ้นรูปเชื้อเพลิงแต่ละประเภท เพื่อใช้ประกอบการประเมินคุณภาพของก้อนเชื้อเพลิงที่เหมาะสม ซึ่งเทคโนโลยีที่จะนำมาศึกษาในครั้งนี้ประกอบไปด้วยเทคโนโลยีดังนี้

1.1) เครื่องอัดไฮดรอลิก ขนาดกระบอกอัดมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 cm เพื่อใช้ในการอัดขึ้นรูปก้อนเชื้อเพลิงรูปร่างลักษณะเป็นเชื้อเพลิงอัดก้อน (Briquettes) แสดงดังภาพประกอบ 27

1.2) เครื่องอัดเม็ดหรืออัดเป็นแท่งเล็ก (Pelletizing press) เป็นเทคโนโลยีสำหรับการอัดขึ้นรูปก้อนเชื้อเพลิงรูปร่างลักษณะเป็นเชื้อเพลิงอัดเม็ด (Pellet) แสดงดังภาพประกอบ 28



ภาพประกอบ 27 เทคโนโลยีการอัดขึ้นรูปเชื้อเพลิง Briquettes



ภาพประกอบ 28 เทคโนโลยีการอัดขึ้นรูปเชื้อเพลิง Pellet

## 2) ปัจจัยด้านกระบวนการผลิตที่ส่งต่อคุณภาพเชื้อเพลิงอัดแข็ง

ปัจจัยด้านกระบวนการผลิตที่ทำการศึกษแบ่งออกเป็น 3 ปัจจัย ซึ่งประกอบด้วย การกระจายตัวของอนุภาค อัตราส่วนของหญ้าหลายฤดู:ต่อตัวประสาน กำลังอัดขึ้นรูป และขนาดรูปร่างของก้อนเชื้อเพลิง ดังนี้

2.1) อัตราส่วนของหญ้าหลายฤดู: ตัวประสาน (แยมันสำปะหลัง) โดยจะศึกษาทั้งหมด 5 อัตราส่วน ได้แก่ 60:40, 70:30, 80:20, 90:10, และ 100:0

2.2) กำลังอัดที่ใช้ในการขึ้นรูปของชนิดเชื้อเพลิงอัดก้อน (Briquettes) จะมีทั้งหมด 3 กำลังอัด คือ 1 MPa, 2 MPa และ 3 MPa

2.3) รูปร่างของก้อนเชื้อเพลิง คือ รูปร่างของก้อนเชื้อเพลิงจะทำการศึกษา โดยการอัดขึ้นรูปก้อนเชื้อเพลิง 2 รูปแบบ คือ เชื้อเพลิงอัดเม็ด (Pellet) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.7 เซนติเมตร และเชื้อเพลิงอัดก้อน (Briquettes) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 เซนติเมตร

## 3) วิธีการอัดขึ้นรูปก้อนเชื้อเพลิงจากหญ้าหลายฤดู

ในการศึกษาครั้งนี้ จะกำหนดใช้อัตราส่วนของหญ้าหลายฤดู:แยมันสำปะหลังทั้งหมด 5 อัตราส่วน ได้แก่ 60:40, 70:30, 80:20, 90:10, 100:0 และกำลังการอัดขึ้นรูปก้อนเชื้อเพลิงทั้งหมด 3 กำลังอัด คือ 1 MPa, 2 MPa และ 3 MPa โดยในกระบวนการอัดขึ้นรูปของเชื้อเพลิงอัดแข็ง หญ้าหลายฤดูจะถูกอัดขึ้นรูปในรูปทรง 2 แบบ คือ เชื้อเพลิงอัดเม็ด (Pellet) และเชื้อเพลิงอัดก้อน (Briquettes) โดยจะแบ่งการจะขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดแข็ง โดยมีวิธีการขึ้นรูปก้อนเชื้อเพลิง คือ การอัดก้อนเชื้อเพลิงที่เตรียมโดยการต้มส่วนผสมของแยม และน้ำ ให้กลายเป็นแยมเปียก แล้วไปผสมกับชีวมวลหญ้าหลายฤดู (ก่อนที่จะกด) ซึ่งมีวิธีการอัดดังนี้

3.1) การอัดก้อนเชื้อเพลิงที่เตรียมตัวประสานโดยการต้มส่วนผสมของแยม และน้ำเป็นแยมเปียก ก่อนการอัดขึ้นรูปก้อนเชื้อเพลิงในรูปทรง เชื้อเพลิงอัดก้อน (Briquettes) ดังภาพประกอบ 29

3.1.1) จัดเตรียมวัตถุดิบที่ใช้ในการผสมเชื้อเพลิงอัดแข็ง โดยชั่งหญ้าหลายฤดูให้ได้ตามอัตราส่วนที่กำหนด โดยมีน้ำหนักหญ้าและแยมันสำปะหลังรวม 500 กรัม

3.1.2) ผสมแยมันสำปะหลัง 200, 128.6, 75, 33.3 และ 0 กรัม กับน้ำ 350 มิลลิลิตร แล้วนำไปต้มให้ความร้อน เพื่อให้แยมมีลักษณะเหนียวเหมือนกาว เรียกว่า แยมเปียก

3.1.3) นำหญ้าหลายฤดูหนัก 300 กรัม ไปผสมกับแยมเปียกให้เข้ากัน

3.1.3) นำส่วนผสมที่เตรียมไว้ชั่งน้ำหนักให้ได้ 10 กรัม/ก้อน แล้วใส่ในกระบอบกอัด ขนาดสูง 10 cm. เส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 cm. และนำไปขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิกโดยใช้กำลังอัด 1 MPa, 2 MPa และ 3 MPa

3.1.4) นำก้อนเชื้อเพลิงออกจากแม่พิมพ์

3.1.5) นำก้อนเชื้อเพลิงที่ผลิตได้มาทำการลดความชื้น โดยการนำไปตากแดด เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง

3.1.6) นำก้อนเชื้อเพลิงไปหาความหนาแน่น ทดสอบความคงทน และวิเคราะห์ ค่าความร้อนในขั้นตอนต่อไป



1. จัดเตรียมวัตถุดิบที่ใช้ในการผสมเชื้อเพลิงอัดแข็ง



2. ทำแป้งเปียก



3. ผสมหญ้ากับแป้งเปียกให้เข้ากัน



4. ชั่งหญ้าที่ผสมแป้งแล้ว น้ำหนัก 10 กรัม



5. อัดขึ้นรูปในลักษณะก่อนเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.4 cm



6. นำไปตากแดด/อบ

### ภาพประกอบ 29 ขั้นตอนการอัดขึ้นรูปก้อนเชื้อเพลิง Briquettes

3.2) การอัดก้อนเชื้อเพลิงที่เตรียมตัวประสานโดยการต้มส่วนผสมของแป้ง และน้ำ เป็นแป้งเปียก ก่อนการอัดขึ้นรูปก้อนเชื้อเพลิงในรูปทรง เชื้อเพลิงอัดเม็ด (Pellet) (ภาพประกอบ 30)

3.2.1) จัดเตรียมวัตถุดิบที่ใช้ในการผสมเชื้อเพลิงอัดแข็ง โดยชั่งหญ้าหลายฤดูให้ได้ตามอัตราส่วนที่กำหนด โดยมีน้ำหนักหญ้าและแป้งมันสำปะหลังรวม 500 กรัม

3.2.2) ผสมแป้งมันสำปะหลัง 200, 128.6, 75, 33.3 และ 0 กรัม กับน้ำ 350 มิลลิลิตร แล้วนำไปต้มให้ความร้อน เพื่อให้แป้งมีลักษณะเหนียวเหมือนกาว เรียกว่า แป้งเปียก

3.2.3) นำหญ้าหลายฤดูหนัก 300 กรัม ไปผสมกับแป้งเปียกให้เข้ากัน

3.2.4) นำส่วนผสมที่เตรียมไว้ใส่เครื่องอัดเชื้อเพลิง Pellet

3.2.5) นำก้อนเชื้อเพลิงที่ผลิตได้มาทำการลดความชื้น โดยการนำไปตากแดด เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง

3.2.6) นำก้อนเชื้อเพลิงไปหาความหนาแน่น ทดสอบความคงทน และวิเคราะห์ ค่าความร้อนในขั้นตอนต่อไป



1. จัดเตรียมวัตถุดิบที่ใช้ในการผสมเชื้อเพลิงอัดแข็ง



2. ทำแป้งเปียก



3. ผสมหญ้ากับแป้งเปียกให้เข้ากัน



4. อัดขึ้นรูปในลักษณะ Pellet



5. นำไปตากแดด/อบ

### ภาพประกอบ 30 ขั้นตอนการอัดขึ้นรูปก้อนเชื้อเพลิง Pellet

ในการผลิตเชื้อเพลิงอัดแข็ง ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ถูกเลือกมาจากสิ่งที่คาดว่าจะมีอิทธิพล ต่อคุณภาพของการอัดแข็ง ดังนี้ อัตราส่วนของส่วนวัสดุ แรงอัดในการขึ้นรูป รูปทรงของก้อนเชื้อเพลิง และชนิดหญ้าที่มีคุณสมบัติที่เหมาะสมสำหรับเป็นเชื้อเพลิง ซึ่งมีหญ้าหลายฤดู 3 ชนิด โดยมีชุดการทดลองแสดงดังตาราง 12 หลังจากการอัดขึ้นรูป จะทำการทดสอบความหนาแน่นรวม ความคงทน และค่าความร้อน ซึ่งแต่ละการทดสอบเชื้อเพลิงอัดแข็งจะทำการทดลองอย่างน้อย 3 ซ้ำ

หญ้าหลายฤดูที่ได้รับการอัดขึ้นรูปเป็นก้อนเชื้อเพลิงในรูปทรงทั้ง 2 แบบ คือ เชื้อเพลิงอัดเม็ด (Pellet) และเชื้อเพลิงอัดก้อน (Briquettes) โดยจะขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดแข็ง จะถูกนำมาทดสอบความคงทนของเชื้อเพลิงที่ได้รับการทดสอบความคงทนและวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของก้อนเชื้อเพลิง เพื่อใช้ประเมินหาก้อนเชื้อเพลิงที่มีคุณภาพ โดยจะกล่าวถึงวิธีการวิเคราะห์และวิธีทดสอบในหัวข้อต่อไป

พูน ปณ จิต ชีเว

ตาราง 12 จำนวนชุดการทดลองของปัจจัยที่ใช้ในการอัดขึ้นรูปของก้อนเชื้อเพลิงอัดแข็ง

| ชุดการทดลอง | รูปร่าง    | ชนิดหญ้าหลายฤดู      | กำลังอัด (MPa) | อัตราส่วน (หญ้า:ตัวประสาน) |
|-------------|------------|----------------------|----------------|----------------------------|
| 1           | Pellets    | หญ้าหลายฤดูชนิดที่ 1 | -              | 60:40                      |
| 2           |            |                      |                | 70:30                      |
| 3           |            |                      |                | 80:20                      |
| 4           |            |                      |                | 90:10                      |
| 5           |            |                      |                | 100:0                      |
| 6           |            | หญ้าหลายฤดูชนิดที่ 2 | -              | 60:40                      |
| 7           |            |                      |                | 70:30                      |
| 8           |            |                      |                | 80:20                      |
| 9           |            |                      |                | 90:10                      |
| 10          |            |                      |                | 100:0                      |
| 11          | Briquettes | หญ้าหลายฤดูชนิดที่ 3 | -              | 60:40                      |
| 12          |            |                      |                | 70:30                      |
| 13          |            |                      |                | 80:20                      |
| 14          |            |                      |                | 90:10                      |
| 15          |            |                      |                | 100:0                      |
| 16          |            | หญ้าหลายฤดูชนิดที่ 1 | 1              | 60:40                      |
| 17          |            |                      |                | 70:30                      |
| 18          |            |                      |                | 80:20                      |
| 19          |            |                      |                | 90:10                      |
| 20          |            |                      |                | 100:0                      |
| 21          |            |                      | 2              | 60:40                      |
| 22          |            |                      |                | 70:30                      |
| 23          |            |                      |                | 80:20                      |
| 24          |            |                      |                | 90:10                      |
| 25          |            |                      |                | 100:0                      |

ตาราง 12 (ต่อ) จำนวนชุดการทดลองของปัจจัยที่ใช้ในการอัดขึ้นรูปของก้อนเชื้อเพลิงอัดแข็ง

| ชุดการทดลอง | รูปร่าง    | ชนิดหญ้าหลายฤดู      | กำลังอัด (MPa) | อัตราส่วน (หญ้า:ตัวประสาน) |
|-------------|------------|----------------------|----------------|----------------------------|
| 26          | Briquettes | หญ้าหลายฤดูชนิดที่ 1 | 3              | 60:40                      |
| 27          |            |                      |                | 70:30                      |
| 28          |            |                      |                | 80:20                      |
| 29          |            |                      |                | 90:10                      |
| 30          |            |                      |                | 100:0                      |
| 31          |            | หญ้าหลายฤดูชนิดที่ 2 | 1              | 60:40                      |
| 32          |            |                      |                | 70:30                      |
| 33          |            |                      |                | 80:20                      |
| 34          |            |                      |                | 90:10                      |
| 35          |            |                      |                | 100:0                      |
| 36          |            |                      | 2              | 60:40                      |
| 37          |            |                      |                | 70:30                      |
| 38          |            |                      |                | 80:20                      |
| 39          |            |                      |                | 90:10                      |
| 40          |            |                      |                | 100:0                      |
| 41          |            | หญ้าหลายฤดูชนิดที่ 3 | 3              | 60:40                      |
| 42          |            |                      |                | 70:30                      |
| 43          |            |                      |                | 80:20                      |
| 44          |            |                      |                | 90:10                      |
| 45          |            |                      |                | 100:0                      |

ตาราง 12 (ต่อ) จำนวนชุดการทดลองของปัจจัยที่ใช้ในการอัดขึ้นรูปของก้อนเชื้อเพลิงอัดแข็ง

| ชุดการทดลอง | รูปร่าง    | ชนิดหญ้าหลายฤดู      | กำลังอัด (MPa) | อัตราส่วน (หญ้า:ตัวประสาน) |
|-------------|------------|----------------------|----------------|----------------------------|
| 46          | Briquettes | หญ้าหลายฤดูชนิดที่ 3 | 1              | 60:40                      |
| 47          |            |                      |                | 70:30                      |
| 48          |            |                      |                | 80:20                      |
| 49          |            |                      |                | 90:10                      |
| 50          |            |                      |                | 100:0                      |
| 51          |            |                      | 2              | 60:40                      |
| 52          |            |                      |                | 70:30                      |
| 53          |            |                      |                | 80:20                      |
| 54          |            |                      |                | 90:10                      |
| 55          |            |                      |                | 100:0                      |
| 56          |            |                      | 3              | 60:40                      |
| 57          |            |                      |                | 70:30                      |
| 58          |            |                      |                | 80:20                      |
| 59          |            |                      |                | 90:10                      |
| 60          |            |                      |                | 100:0                      |

### 3.2.3 การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพและความคงทนของก้อนเชื้อเพลิง

ในการผลิตเชื้อเพลิงอัดแข็งคุณสมบัติที่ต้องการคือ เชื้อเพลิงมีคุณสมบัติในการเผาไหม้ที่ดีหรือสามารถติดไฟได้ดี คุณสมบัติข้อนี้จะขึ้นอยู่กับวัสดุที่เป็นวัตถุดิบ ขนาด รูปร่างและความหนาแน่นของแท่งเชื้อเพลิง ซึ่งความหนาแน่นของแท่งเชื้อเพลิงยังมีผลต่อคุณสมบัติความคงทนหรือการคงสภาพของเชื้อเพลิงแข็งอีกด้วย การคงทนคือการที่เชื้อเพลิงไม่ร่วนหรือหลุดเป็นผงขณะมีการเคลื่อนย้าย ขนส่ง และไม่พองตัวระหว่างการจัดเก็บ ดังนั้นจึงสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วน ได้แก่ การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพและความคงทนของก้อนเชื้อเพลิง

#### 1) การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ

เป็นการทดสอบความคงทนของเชื้อเพลิงอัดแข็ง โดยการจำลองสถานการณ์ที่เชื้อเพลิงอัดแข็งจะได้รับเมื่อมีการเคลื่อนย้ายหรือขนส่งไปยังโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งจะมีรูปแบบแรง

ที่มากระทำในรูปแบบต่างๆ เช่น แล้วส่งผลให้เกิดความเสียหายแก่เชื้อเพลิงอัดแข็งก่อนจะนำไปผลิตเป็นพลังงาน โดยมีพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบ ดังนี้

#### 1.1) ความชื้นของก้อนเชื้อเพลิง

ปริมาณความชื้นในเชื้อเพลิงเป็นสัดส่วนน้ำหนักของความชื้นต่อน้ำหนักมวลเชื้อเพลิงแห้งหรือน้ำหนักรวมเชื้อเพลิงทั้งหมด ชีวมวลเป็นเชื้อเพลิงที่มีความชื้นค่อนข้างสูงโดยในกระบวนการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่มีความชื้นสูง มีผลทำให้อุณหภูมิภายในเตาเผาไหม้ลดลง และสูญเสียพลังงานเพิ่มมากขึ้น ซึ่งมีผลต่อปริมาณของผลิตภัณฑ์และประสิทธิภาพของกระบวนการเผาไหม้ ปริมาณความชื้นในก้อนเชื้อเพลิงสามารถหาได้โดยใช้เครื่อง Drying Oven โดยทำการวิเคราะห์หาปริมาณความชื้นโดยใช้วิธีมาตรฐานของ ASTM D3173

#### 1.2) ความหนาแน่นของก้อนเชื้อเพลิง

##### 1.2.1) ความหนาแน่นรวม (Bulk Density)

ความหนาแน่นรวมของก้อนเชื้อเพลิง คือ น้ำหนักต่อปริมาตรของก้อนเชื้อเพลิง ก้อนเชื้อเพลิงที่มีความหนาแน่นสูงแสดงให้เห็นว่ามีปริมาณพลังงานต่อปริมาตรที่สูง เป็นผลดีต่อการนำไปใช้ประโยชน์ และทำให้เป็นประโยชน์อย่างมากในกระบวนการเผาไหม้เชื้อเพลิง ซึ่งมีวิธีการตามมาตรฐาน SS 187120 ดังนี้

#### วิธีการ

- 1.) เตรียมภาชนะที่ทราบปริมาตรที่แน่นอน
- 2.) หาปริมาตรของภาชนะ พร้อมบันทึกปริมาตร
- 3.) นำเชื้อเพลิงมาใส่ในภาชนะที่ทราบปริมาตรที่แน่นอนโดยการปล่อยที่

ความสูงจากขอบภาชนะ 15 เซนติเมตร แล้วนำไปชั่งน้ำหนัก

- 4.) นำค่าน้ำหนักของเชื้อเพลิง และปริมาตรของเชื้อเพลิงที่ใส่ในภาชนะทราบปริมาตรที่แน่นอน มาคำนวณตามสมการ

#### สูตรที่ใช้ในการคำนวณ

$$\rho = M/V \quad (17)$$

เมื่อ  $\rho$  = ความหนาแน่นของเชื้อเพลิงแข็ง (กรัม/ลูกบาศก์เมตร)

$M$  = มวลของเชื้อเพลิงอัดแท่ง (กรัม)

$V$  = ปริมาตรของเชื้อเพลิงอัดแท่ง (ลูกบาศก์เซนติเมตร)

### 1.2.2) ความหนาแน่นของก้อนเชื้อเพลิง

#### วิธีการ

- 1.) วัดความสูงและความกว้างของเชื้อเพลิง
- 2.) ชั่งน้ำหนักของเชื้อเพลิง
- 3.) คำนวณหาความหนาแน่นของเชื้อเพลิงอัดแข็ง ได้จากสมการ

#### สูตรที่ใช้ในการคำนวณ

$$\text{ความหนาแน่นของก้อนตัวอย่าง} = \frac{M}{(3.14 \times r^2 \times h)} \quad (18)$$

เมื่อ

M = มวลของวัตถุ (กรัม)

h = ความสูงของวัตถุ (เซนติเมตร)

r = รัศมี (เซนติเมตร)

#### 2) การทดสอบความคงทนของก้อนเชื้อเพลิง

##### 2.1) การทดสอบความต้านทานการแตกกร่อน

##### 2.1.1) Tumbling Resistance Test

การทดสอบความต้านทานการแตกกร่อน ด้วยวิธี Tumbling Resistance Test จะเป็นการทดสอบตามมาตรฐาน Pellet Fuels Institute (PFI) ซึ่งมีวิธีการดังนี้

#### วิธีการ

- 1.) สุ่มตัวอย่างก้อนเชื้อเพลิง
- 2.) ใส่ก้อนเชื้อเพลิงลงในเครื่อง ที่มีลักษณะเป็นกล่อ่งสี่เหลี่ยม ขนาด 30×30×45 เซนติเมตร หมุนด้วยความเร็วระหว่าง 50 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 15 นาที
- 3.) 15 นาทีผ่านไป ให้นำตัวอย่างเชื้อเพลิงมาร่อนผ่านตะแกรงขนาด 20 มิลลิเมตร และชั่งน้ำหนักตัวอย่างเชื้อเพลิงที่ค้างบนตะแกรง
- 4.) บันทึกผลและคำนวณ

### สูตรที่ใช้ในการคำนวณ

$$\% \text{ น้ำหนักที่หายไป} = [(W_1 - W_2) / W_1] \times 100 \quad (19)$$

เมื่อ  $W_1$  = น้ำหนักก่อนการทดสอบ

$W_2$  = น้ำหนักหลังการทดสอบ

$$\text{ดัชนีความคงทน} = 100 - \% \text{ น้ำหนักที่หายไป} \quad (20)$$

#### 2.1.2) Drop Test

การทดสอบค่าดัชนีการแตกร่วนโดยวิธี Drop Shatter Test เป็นการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM 3083 ซึ่งมีวิธีการดังนี้

#### วิธีการ

1.) ทดสอบโดยนำเชื้อเพลิงอัดแข็งใส่ถุงพลาสติกประมาณ 100 กรัม มัดปากถุง แล้วปล่อยจากที่สูง 2 เมตร ลงสู่พื้นซีเมนต์ซ้ำๆ กัน 3 ครั้ง จากนั้นนำไปร่อนด้วยตะแกรงขนาด 20 มิลลิเมตร

2.) นำส่วนของเชื้อเพลิงอัดแข็งที่เหลือจากการร่อนแล้วไปชั่งน้ำหนัก

### สูตรที่ใช้ในการคำนวณ

$$\% \text{ น้ำหนักที่หายไป} = [(W_1 - W_2) / W_1] \times 100 \quad (21)$$

$$\% \text{ ความต้านทานการแตกร่วน} = 100 - \% \text{ weight loss} \quad (22)$$

โดย  $w_1$  = น้ำหนักของก้อนเชื้อเพลิงก่อนทดสอบการแตกร่วน (กรัม)

$w_2$  = น้ำหนักของก้อนเชื้อเพลิงหลังทดสอบการแตกร่วน (กรัม)

#### 2.1.3) การทดสอบความต้านทานแรงกด

การทดสอบค่าต้านทานแรงกด (Compressive Strength test) สามารถทดสอบได้โดยใช้เครื่องมือ Compression Testing Machine ซึ่งมีวิธีการดังนี้

#### วิธีการ

1.) วัดขนาดและชั่งน้ำหนักตัวอย่างแต่ละก้อน

2.) วางก้อนตัวอย่างให้ตรงจุดกึ่งกลางแป้นทดสอบและเลื่อนแป้นให้ติดกับผิว

ตัวอย่าง

3.) หลังจากนั้นให้เพิ่มกำลังอัดในอัตราส่วนที่สม่ำเสมอ จนกว่าก้อนตัวอย่างจะเสียสภาพ

4.) บันทึกค่าแรงอัดสูงสุดที่อ่านได้จากเครื่องทดสอบ

#### 2.1.4) การทดสอบความต้านทานการซึมน้ำ

##### วิธีการ

- 1.) นำชิ้นงานที่แห้งแล้ว นำไปชั่งน้ำหนัก จากนั้นแช่ตัวอย่างในน้ำที่มีอุณหภูมิ 27 °C และน้ำในภาชนะจะต้องมีความสูง 25 มิลลิเมตร โดยแช่ตัวอย่างเป็นเวลา 30 วินาที
- 2.) นำตัวอย่างออกจากน้ำซับด้วยผ้าสะอาดหรือกระดาษทิชชู นำไปชั่งน้ำหนัก แล้วนำไปคำนวณ

##### สูตรที่ใช้ในการคำนวณ

$$\% \text{ การดูดซึมน้ำ} = [(W_2 - W_1) / W_2] \times 100 \quad (23)$$

โดย  $w_1$  = น้ำหนักก่อนการทดสอบ

$w_2$  = น้ำหนักหลังการทดสอบ

$$\% \text{ ความต้านทานการดูดซึมน้ำ} = 100 - \% \text{ การดูดซึมน้ำ} \quad (24)$$

ก้อนเชื้อเพลิงอัดแข็งที่ได้รับการทดสอบความคงทนและวิเคราะห์คุณสมบัติกายภาพ ผลที่ได้จะนำมาเป็นเกณฑ์ที่จะใช้ในการเลือกเชื้อเพลิงอัดแข็งที่มีความคงทนและแข็งแรง เพื่อนำไปใช้ทดสอบประสิทธิภาพการให้พลังงานของเชื้อเพลิงอัดแข็งในขั้นตอนต่อไป

#### 3.2.4 การทดสอบพลังงานความร้อนของก้อนเชื้อเพลิง

การวิเคราะห์ประสิทธิภาพการให้พลังงานความร้อนของก้อนเชื้อเพลิง โดยการนำเชื้อเพลิงอัดก้อนมาทดสอบค่าความร้อนสูง (High heat value: HHV) ของเชื้อเพลิงอัดแข็ง ด้วยการใช้เครื่อง Bomb Calorimeter ในการวิเคราะห์หาค่าความร้อนสูงของเชื้อเพลิงชีวมวล ตามวิธีมาตรฐานของ ASTM D3286 (ภาคผนวก ก-4) ซึ่งจะใช้ตัวอย่างเชื้อเพลิงอัดที่บดละเอียดแล้วในปริมาณ 0.5 กรัม มาอัดเป็นเม็ด แล้วนำมาวิเคราะห์ในเครื่อง Bomb Calorimeter โดยอัดก๊าซออกซิเจนในลูก Bomb ให้มีความดันบรรยากาศที่ 28-30 บรรยากาศ ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ของเครื่อง Bomb Calorimeter จะเป็นค่าความร้อนสูงในหน่วยของเมกะจูลต่อกิโลกรัม (MJ/Kg.)

ซึ่งจะนำค่าที่วิเคราะห์ได้เหล่านี้มาใช้ประเมินเลือกเชื้อเพลิงอัดแข็งที่ดีที่สุดมาทดสอบประสิทธิภาพการเผาไหม้

### 3.2.5 การทดสอบประสิทธิภาพการเผาไหม้ของก้อนเชื้อเพลิง

การวิเคราะห์สมบัติเชิงทางความร้อนของเชื้อเพลิงอัดแข็ง โดยใช้เชื้อเพลิงที่ผ่านการทดสอบประสิทธิภาพการให้พลังงานและความคงทนมาวิเคราะห์ ซึ่งจะใช้เทคนิค Thermal Gravimetric Analysis (TGA) ซึ่งเป็นวิธีเบื้องต้นในการวิเคราะห์พฤติกรรมความร้อน การย่อยสลายตัวด้วยความร้อน และการสูญเสียน้ำหนักของเชื้อเพลิงในอุณหภูมิบรรยากาศ โดยการใช้เครื่อง Mettler Toledo TGA 2 (ภาพประกอบ 31) ที่มีความถูกต้องของอุณหภูมิ  $+0.5^{\circ}\text{C}$  และความแม่นยำของอุณหภูมิ  $+0.3^{\circ}\text{C}$  ในการวิเคราะห์จะใช้ตัวอย่างที่บดขนาด 1 มิลลิเมตร ซึ่งตัวอย่างน้ำหนัก 10-20 มิลลิกรัมในการวิเคราะห์ในสภาพบรรยากาศ โดยการป้อนอากาศที่ 60 ml/min ทดสอบโดยการเพิ่มอุณหภูมิ 30-800  $^{\circ}\text{C}$  ด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิเท่ากับ 30  $^{\circ}\text{C}/\text{min}$  ภายใต้บรรยากาศ เพื่อวิเคราะห์หาพารามิเตอร์ที่เป็นตัวบ่งชี้คุณภาพเชื้อเพลิง (Miranda et al., 2008) ดังนี้

- 1) Initial temperature ( $^{\circ}\text{C}$ )
- 2) Peak temperature ( $^{\circ}\text{C}$ )
- 3) Burnout temperature ( $^{\circ}\text{C}$ )
- 4) Maximum combustion rate ( $\%/ \text{min}$ )
- 5) อัตราเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักต่ออุณหภูมิที่มากที่สุด ( $R_m; \% \text{ min}^{-1}/\text{K}$ )
- 6) ดัชนีการจุดติด (D)

โดย Initial temperature, Peak temperature, Burnout temperature และ Maximum combustion rate สามารถหาค่าได้จากกราฟการวิเคราะห์ TGA ส่วน อัตราการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักต่ออุณหภูมิที่มากที่สุด ( $R_m$ ) และ ดัชนีการจุดติด (D) หาได้จากสมการต่อไปนี้

- 1) อัตราเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักต่ออุณหภูมิที่มากที่สุด ( $R_m; \% \text{ min}^{-1}/\text{K}$ )

$$R_m = 100 \times (MCR/T_p) \quad (25)$$

เมื่อ MCR คือ Maximum combustion rate ( $\%/ \text{min}$ )

$T_p$  คือ Peak temperature (K) (Miranda et al., 2008)

2) ดัชนีการจุดติด (D) (Vamvuka et al., 2011)

$$D = MCR / (t_i \times t_m) \quad (26)$$

เมื่อ  $R_m$  คือ อัตราเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักต่ออุณหภูมิที่มากที่สุด ( $\% \text{ min}^{-1}/K$ )

$t_i$  คือ ระยะเวลาตั้งแต่เริ่มจนถึงจุดติด (min)

$t_m$  คือ ระยะเวลาที่ใช้ตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงจุดที่การเผาไหม้สูงสุด (min)



ภาพประกอบ 31 เครื่อง Mettler Toledo: TGA 2  
ที่มา: ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ, 2563

### 3.2.6 การประเมินศักยภาพการผลิตพลังงานไฟฟ้าของเชื้อเพลิงอัดแข็ง

การประเมินศักยภาพการผลิตพลังงานไฟฟ้าของเชื้อเพลิงอัดแข็งจากหญ้าหลายฤดูทั้งสองรูปแบบ ได้แก่ เชื้อเพลิงอัดก้อน (briquettes) และเชื้อเพลิงอัดเม็ด (pellets) มาเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงปัจจุบันที่โรงไฟฟ้าใช้คือ แกลบ:ไม้ (50:50) โดยใช้ข้อมูลองค์ประกอบทางพลังงาน และปริมาณเชื้อเพลิงแต่ละชนิด นำมาเพื่อใช้ในการคำนวณศักยภาพด้านพลังงานโดยใช้สมการคำนวณศักยภาพทางด้านการผลิตพลังงานไฟฟ้า (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2556; พงษ์ศักดิ์ อยู่มัน, 2559) ได้ดังนี้

$$ENU = VOR \times RNU \times HHV \quad (27)$$

เมื่อ  $ENU$  = พลังงานความร้อน (MJ)

$VOR$  = ปริมาณวัสดุ (kg)

$RNU$  = สัดส่วนวัสดุที่นำมาใช้ผลิตพลังงาน (%)

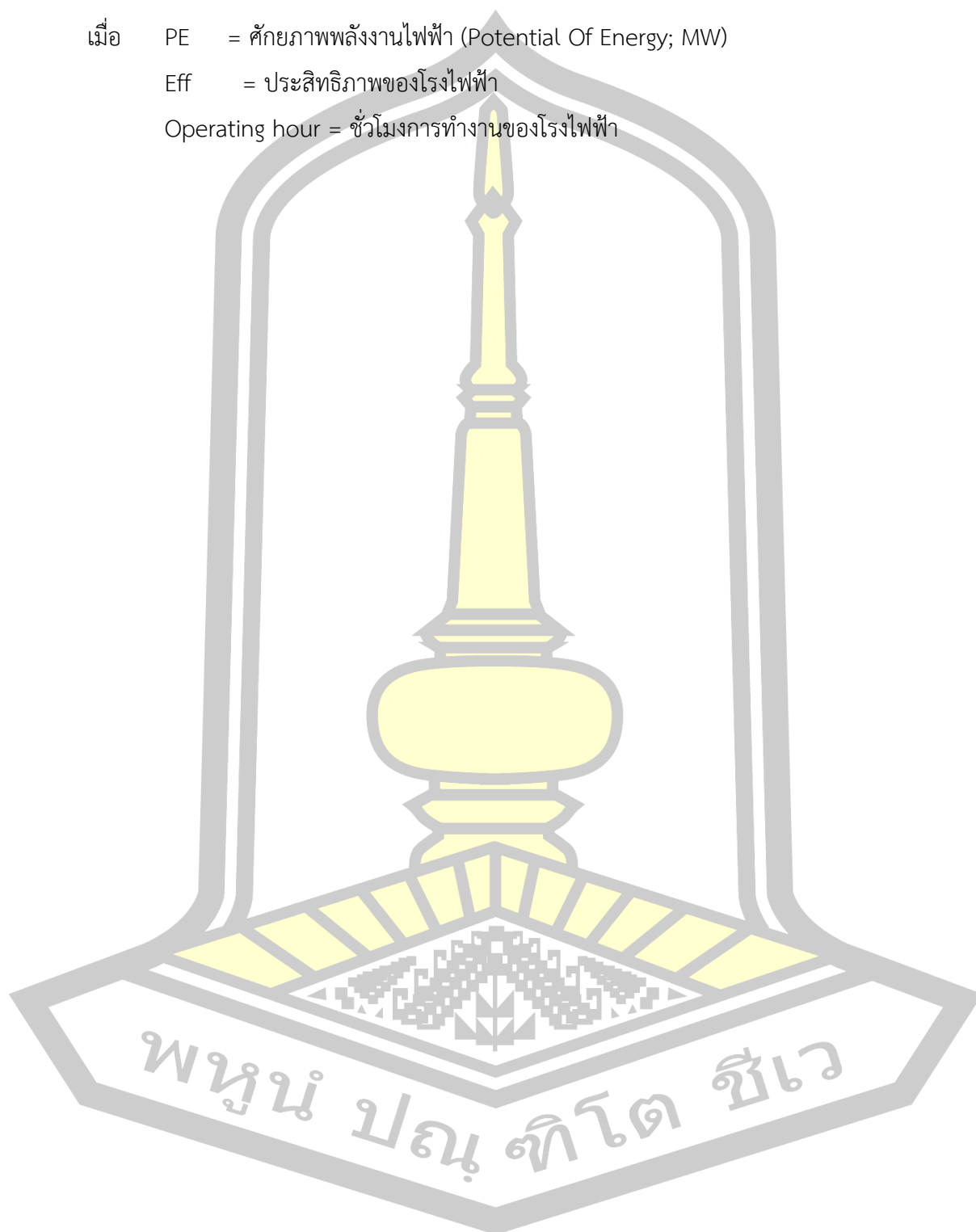
$HHV$  = ค่าความร้อนสูงของเชื้อเพลิงแต่ละชนิด (MJ/kg)

$$PE = (ENU \times Eff)/\text{Operating hour} \quad (28)$$

เมื่อ PE = ศักยภาพพลังงานไฟฟ้า (Potential Of Energy; MW)

Eff = ประสิทธิภาพของโรงไฟฟ้า

Operating hour = ชั่วโมงการทำงานของโรงไฟฟ้า



## บทที่ 4

### ผลการวิจัยและการอภิปราย

จากการศึกษางานวิจัย โดยมีปัจจัยในการศึกษาคือ อัตราส่วน กำลังอัดในการขึ้นรูป และ ขนาดรูปร่างของก้อนเชื้อเพลิง หน้าที่ทุกชนิดจะได้รับการทดสอบคุณสมบัติทางพลังงาน การอัดขึ้นรูป ก้อนเชื้อเพลิง ความคงทน และประสิทธิภาพการให้พลังงาน และผลการศึกษาต่อไปนี้เป็นการศึกษา ปัจจัยในการขึ้นรูปของก้อนเชื้อเพลิง เพื่อดูคุณสมบัติของหญ้าหลายฤดูสำหรับเป็นเชื้อเพลิงทางเลือก ในการผลิตเป็นพลังงานไฟฟ้า โดยการศึกษาจะแบ่งออกเป็นสามส่วนได้แก่ เพื่อศึกษาคุณสมบัติของ เชื้อเพลิงและการใช้ศักยภาพของหญ้าหลายฤดูเป็นเชื้อเพลิงชีวภาพ วิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพ และความทนทานของเชื้อเพลิงอัดก้อน (briquettes) และเชื้อเพลิงอัดเม็ด (pellets) จากหญ้าหลาย ฤดู และวิเคราะห์ประสิทธิภาพการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงจากหญ้าหลายฤดู โดยการศึกษาจะวิเคราะห์ คุณสมบัติของหญ้าหลายฤดูทั้งหมด 10 ชนิด เพื่อเลือกหญ้าที่เหมาะสมสำหรับการเป็นเชื้อเพลิง ผลที่ได้ จะนำไปสู่อัดขึ้นรูปก้อนเชื้อเพลิงโดยผสม หญ้าหลายฤดู : ตัวประสาน (แป้งมันสำปะหลัง) ทั้งหมด 5 อัตราส่วน ได้แก่ 60:40, 70:30, 80:20, 90:10, และ 100:0 และใช้กำลังอัด 3 กำลังอัด ได้แก่ 1 MPa, 2 MPa และ 3 MPa ทำการทดสอบความคงทน และพลังงานของเชื้อเพลิง เพื่อหาปัจจัยการ ขึ้นรูปที่เหมาะสม ซึ่งผลที่ได้จากการศึกษา จะนำไปสู่การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของก้อนเชื้อเพลิง เพื่อประเมินความเหมาะสมของการใช้เชื้อเพลิงอัดแข็งจากหญ้าหลายฤดู เป็นวัสดุทางเลือกสำหรับ โรงไฟฟ้าชีวมวล โดยสามารถแสดงผลการศึกษาได้ตามหัวข้อดังต่อไปนี้

- 1.) คุณสมบัติและองค์ประกอบเบื้องต้นของหญ้าหลายฤดู
- 2.) กระบวนการอัดขึ้นรูปเชื้อเพลิงจากหญ้าหลายฤดู
- 3.) ประสิทธิภาพการเผาไหม้ของก้อนเชื้อเพลิงจากหญ้าหลายฤดู
- 4.) ศักยภาพการผลิตพลังงานไฟฟ้าของเชื้อเพลิงอัดแข็งจากหญ้าหลายฤดู

#### 4.1 คุณสมบัติและองค์ประกอบเบื้องต้นของหญ้าหลายฤดู

หญ้าหลายฤดูมีคุณสมบัติและองค์ประกอบทางกายภาพ ทางเคมี ทางชีวเคมี ความชื้น และ องค์ประกอบอื่นๆ ที่แตกต่างกันออกไป ตามลักษณะองค์ประกอบต่างๆ ของหญ้าแต่ละชนิด และสัดส่วนความชื้นที่สะสมอยู่ในหญ้า โดยหญ้าที่เหมาะสมสำหรับเป็นวัสดุทางเลือกสำหรับผลิตเป็น เชื้อเพลิงต้องพิจารณาจากคุณสมบัติในหลายๆด้านของหญ้า โดยการศึกษาวิจัยในครั้งนี้สามารถแบ่ง

คุณสมบัติของหญ้าหลายฤดูได้เป็น 4 ด้าน ได้แก่ คุณสมบัติทางกายภาพ คุณสมบัติทางพลังงาน คุณสมบัติทางชีวเคมี และคุณสมบัติทางเคมี ซึ่งได้ผลการศึกษาดังนี้

#### 4.1.1 คุณสมบัติทางกายภาพของหญ้าหลายฤดู

คุณสมบัติทางกายภาพของหญ้าหลายฤดู เป็นการวิเคราะห์หาปริมาณความชื้น สัตส่วนต้น และใบของหญ้า และปริมาณผลผลิตของหญ้าหลายฤดูทั้ง 10 ชนิด ที่ได้จากพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย ซึ่งได้แก่ หญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 (*Pennisetum purpureum* x *P. glaucum* (Pakchong 1); PC) , หญ้ากินนีมอมบาซ่า (*Panicum maximum* (Mombaza); MB), หญ้าอะตราดัม (*Paspalum atratum*; PA), หญ้าเนเปียร์สุราษฎร์ 1 (*Pennisetum purpureum* (Surat 1); PS), หญ้าซีตาเรียสเปลดดา (*Setaria sphacelata* (Splenda); SS), หญ้าเนเปียร์ธรรมดา (*Pennisetum purpureum*; PP), หญ้าเนเปียร์สีม่วง (*Pennisetum purpureum* (Prince); PR), หญ้าเนเปียร์แคระ (*Pennisetum purpureum* (Mott); PM), หญ้าอูมาคุ (*Panicum maximum* (Umaku); UM) และหญ้าหวานอิสราเอล (*Pennisetum purpureum* (Mahasarakham); MS) โดยพารามิเตอร์ดังกล่าวมีผลต่อการพิจารณาในการใช้หญ้าแต่ละชนิดให้เกิดประโยชน์สูงสุดสำหรับการผลิตเป็นเชื้อเพลิง ซึ่งมีผลการศึกษา ดังนี้

##### 1) ปริมาณความชื้นและ สัตส่วนต้นและใบในหญ้าหลายฤดู

จากการศึกษาปริมาณความชื้นในหญ้าแต่ละชนิดที่มีอายุตามเวลาการเก็บเกี่ยว พบว่า หญ้าในกลุ่มของหญ้าเนเปียร์ ได้แก่ หญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 (*Pennisetum purpureum* x *P. glaucum* (Pakchong 1); PC), หญ้าเนเปียร์สุราษฎร์ 1 (*Pennisetum purpureum* (Surat 1); PS), (*Pennisetum purpureum*; PP), หญ้าเนเปียร์สีม่วง (*Pennisetum purpureum* (Prince); PR) และหญ้าเนเปียร์แคระ (*Pennisetum purpureum* (Mott); PM) มีปริมาณความชื้นสูงที่สุดทั้งในส่วนของต้นและใบ ซึ่งมีความชื้นมากถึงร้อยละ 70-77 รองลงมาคือ หญ้าอะตราดัม (*Paspalum atratum*; PA) และหญ้ากินนีมอมบาซ่า (*Panicum maximum* (Mombaza); MB) ที่มีความชื้นมากถึงร้อยละ 60-76 และหญ้าที่มีความชื้นน้อยกว่าร้อยละ 50 คือ หญ้าซีตาเรียสเปลดดา (*Setaria sphacelata* (Splenda); SS), หญ้าอูมาคุ (*Panicum maximum* (Umaku); UM) และหญ้าหวานอิสราเอล (*Pennisetum purpureum* (Mahasarakham); MS) แสดงดังตาราง 13 จะเห็นได้ว่าหญ้าแต่ละชนิดมีปริมาณความชื้นที่แตกต่างกัน ซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะของหญ้า

กลุ่มหญ้าเนเปียร์ที่มีปริมาณความชื้นที่สูง เนื่องจากลักษณะของลำต้นเป็นปล้อง มีขนาดต้นใหญ่ สูงประมาณ 1.5-3.5 เมตร ภายในลำต้นมีลักษณะเหมือนฟองน้ำ อ่อนนุ่ม มีการกักเก็บน้ำภายในลำต้น (ไกรลาส เขียวทอง และคณะ, 2556) และเมื่อดูสัดส่วนของต้นและใบของหญ้ากลุ่มนี้พบว่า มีสัดส่วนของลำต้นมากกว่าใบ ซึ่งหญ้าเนเปียร์สีม่วง (*Pennisetum purpureum* (Prince);

PR) มีปริมาณสัดส่วนของลำต้น:ใบ มากที่สุด คือ ร้อยละ 76.39 : 23.61 รองลงมาคือ หญ้าเนเปียร์  
 ธรรมดา (*Pennisetum purpureum*; PP) และหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 (*Pennisetum purpureum*  
 x *P. glaucum* (Pakchong 1); PC) ตามลำดับ (ตาราง 13)

ตาราง 13 ปริมาณความชื้นภายนอกและสัดส่วนของลำต้น:ใบ ของหญ้าหลายฤดูแต่ละชนิด

| ชนิด | ส่วน | น้ำหนักสด<br>(Kg./กอ) | น้ำหนักแห้ง<br>(Kg./กอ) | ปริมาณความชื้น<br>(%) | สัดส่วนน้ำหนักสด<br>(%) |
|------|------|-----------------------|-------------------------|-----------------------|-------------------------|
| PC   | ใบ   | 0.60±0.11             | 0.15±0.16               | 75.00±0.18            | 35.29±0.82              |
|      | ต้น  | 1.10±0.11             | 0.33±0.05               | 70.00±1.37            | 64.71±0.85              |
| MB   | ใบ   | 1.40±0.46             | 0.52±0.06               | 60.67±0.27            | 32.79±0.15              |
|      | ต้น  | 2.87±0.33             | 0.84±0.18               | 70.62±0.25            | 67.21±0.95              |
| PA   | ใบ   | 1.10±0.10             | 0.32±0.04               | 70.97±0.50            | 36.30±0.19              |
|      | ต้น  | 1.93±0.15             | 0.47±0.06               | 76.36±0.18            | 63.70±0.11              |
| PS   | ใบ   | 0.77±0.21             | 0.19±0.00               | 75.32±0.00            | 42.78±0.52              |
|      | ต้น  | 1.03±0.26             | 0.26±0.02               | 74.76±0.65            | 57.22±0.22              |
| PP   | ใบ   | 0.41±0.01             | 0.21±0.06               | 73.17±0.02            | 34.17±0.00              |
|      | ต้น  | 0.79±0.00             | 0.23±0.04               | 70.89±0.01            | 65.83±0.01              |
| PR   | ใบ   | 0.51±0.15             | 0.15±0.15               | 70.59±0.00            | 23.61±0.15              |
|      | ต้น  | 1.65±0.26             | 0.42±0.00               | 74.55±0.00            | 76.39±0.45              |
| PM   | ใบ   | 0.61±0.19             | 0.18±0.17               | 70.49±0.02            | 59.80±0.25              |
|      | ต้น  | 0.41±0.06             | 0.12±0.00               | 70.73±0.00            | 40.20±0.46              |
| UM   | ใบ   | 0.21±0.00             | 0.12±0.00               | 42.86±0.00            | 29.17±0.31              |
|      | ต้น  | 0.51±0.02             | 0.26±0.00               | 49.02±0.00            | 70.83±0.22              |
| SS   | ใบ   | 0.51±0.00             | 0.39±0.00               | 23.53±0.00            | 70.83±0.00              |
|      | ต้น  | 0.21±0.05             | 0.18±0.02               | 14.29±0.00            | 29.17±0.00              |
| MS   | ใบ   | 0.75±0.11             | 0.54±0.03               | 28.00±0.00            | 58.59±0.00              |
|      | ต้น  | 0.53±0.00             | 0.26±0.00               | 50.94±0.03            | 41.41±0.51              |

หญ้าอะตราดัม (*Paspalum atratum*; PA) และหญ้ากินนีมอมบาซ่า (*Panicum maximum* (Mombaza); MB) ที่มีความขึ้นรอนลงมา มีลักษณะของลำต้นที่แข็ง ภายในลักษณะกลวง ซึ่งคล้ายกลับหลอด ซึ่งจะแสดงลักษณะของหญ้าแต่ละชนิด ความสูง 1-2 เมตร และเมื่อดูสัดส่วนของต้นและใบของหญ้างุ่มนี้ พบว่า มีสัดส่วนของลำต้นมากกว่าใบเช่นเดียวกับกลุ่มหญ้าเนเปียร์ โดยจะเห็นได้ว่า หญ้ากินนีมอมบาซ่า (*Panicum maximum* (Mombaza); MB) มีสัดส่วนของลำต้นสูงกว่าหญ้าอะตราดัม (*Paspalum atratum*; PA) ถึงร้อยละ 67.21 และ 63.70 ตามลำดับ ซึ่งมากกว่า ร้อยละ 3.15

กลุ่มหญ้าที่มีปริมาณความขึ้นน้อยที่สุด ได้แก่ หญ้าซีตาเรียสเปลนดา (*Setaria sphacelata* (Splenda); SS), หญ้าอูมากู (*Panicum maximum* (Umaku); UM) และหญ้าหวานอิสราเอล (*Pennisetum purpureum* (Mahasarakham); MS) ที่มีความขึ้นน้อยกว่าร้อยละ 50 เนื่องจากมีลักษณะต้นที่เล็ก มีปริมาณใบมากกว่าลำต้น ลักษณะลำต้นจะแข็งภายในลำต้นจะตัน มีความสูง 0.6-1 เมตร เมื่อดูสัดส่วนของต้นและใบ จะเห็นได้ว่า หญ้าซีตาเรียสเปลนดา (*Setaria sphacelata* (Splenda); SS) และหญ้าหวานอิสราเอล (*Pennisetum purpureum* (Mahasarakham); MS) มีปริมาณสัดส่วนของลำต้นน้อยกว่าใบ ร้อยละ 29.17, 41.41 ตามลำดับ ซึ่งแตกต่างจากส่วนใบมากถึง 41.66, 17.18 (ตาราง 13)

จากการศึกษาลักษณะของหญ้าหลายฤดู และปริมาณความขึ้น รวมถึงสัดส่วนลำต้นและใบของหญ้าแต่ละชนิด จะส่งผลทำให้เกิดปริมาณผลผลิตน้ำหนักแห้งของหญ้าที่แตกต่าง ซึ่งปัจจัยปริมาณผลผลิตจะเป็นอีกหนึ่งปัจจัยสำคัญที่จะใช้ในการพิจารณาคุณสมบัติของหญ้าหลายฤดูในการผลิตเป็นวัตถุดิบเชื้อเพลิงทางเลือก

## 2) ปริมาณผลผลิตของหญ้าหลายฤดู

จากการศึกษาปริมาณผลผลิตของหญ้าหลายฤดู พบว่า ปริมาณผลผลิตน้ำหนัสดของหญ้าหลายฤดูมีปริมาณผลผลิตต่อไร่ต่อปีที่แตกต่างกัน จะเห็นได้ว่า หญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 (*Pennisetum purpureum* x *P. glaucum* (Pakchong 1); PC) มีปริมาณผลผลิตที่มากที่สุด คือ 29.1 ตัน/ไร่/ปี (ตาราง 14) ซึ่งมากกว่าหญ้าซีตาเรียสเปลนดา (*Setaria sphacelata* (Splenda); SS) ที่มีปริมาณน้อยที่สุด (0.6 ตัน/ไร่/ปี) ถึง 28.5 ตัน/ไร่/ปี คิดเป็นร้อยละ 93.75 และรองลงมา คือ หญ้าเนเปียร์สุราษฎร์ 1 (*Pennisetum purpureum* (Surat 1); PS), หญ้าเนเปียร์สีม่วง (*Pennisetum purpureum* (Prince); PR), หญ้าเนเปียร์ธรรมดา (*Pennisetum purpureum*; PP) และหญ้ากินนีมอมบาซ่า (*Panicum maximum* (Mombaza); MB) ที่มีปริมาณผลผลิต เท่ากับ 24.4, 21.9, 21.1 และ 17.5 ตัน/ไร่/ปี ตามลำดับ (ตาราง 14)

เมื่อเทียบปริมาณผลผลิตหญ้าหลายฤดูกับวัสดุที่โรงไฟฟ้าชีวมวลใช้ คือ แกลบ และ เศษไม้สับ พบว่า ผลผลิตแกลบมีปริมาณ 0.21 ตัน/ไร่/ปี และเศษไม้สับ 3 ตัน/ไร่/ปี (ศูนย์เชื้อเพลิง และพลังงานจากชีวมวล, 2560) ซึ่งจะเห็นได้ว่าปริมาณของหญ้ามีปริมาณผลผลิตที่มากกว่า โดยเฉพาะหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 (*Pennisetum purpureum* x *P. glaucum* (Pakchong 1); PC) ที่มีมากกว่าต่างกันถึง 7.79 และ 5 ตัน/ไร่/ปี ตามลำดับ สามารถคิดเป็นร้อยละ 97.38 และ 62.5 ตามลำดับ

อย่างไรก็ตามปริมาณผลผลิตหญ้าที่เกิดขึ้นไม่สามารถใช้เป็นปัจจัยเดียวที่จะพิจารณาความเหมาะสมสำหรับเป็นวัสดุทางเลือกในการผลิตเป็นเชื้อเพลิงพลังงานได้ ถ้าหากคุณสมบัติทางด้านพลังงานไม่ดีเท่า หรือมากกว่าแกลบและเศษไม้สับ

ตาราง 14 ปริมาณผลผลิตน้ำหนักสดของหญ้าหลายฤดูทั้ง 10 ชนิด

| ชนิด | ปริมาณผลผลิต<br>น้ำหนักสด (ตัน/ไร่/ปี) | แหล่งที่มา                      |
|------|----------------------------------------|---------------------------------|
| PC   | 29.1                                   | Rengsirikul et al., 2013        |
| MB   | 17.5                                   | Rengsirikul et al., 2013        |
| PA   | 11.4                                   | Rengsirikul et al., 2013        |
| PS   | 24.4                                   | สถานีพืชอาหารสัตว์ปากช่อง, 2511 |
| PP   | 21.1                                   | สถานีพืชอาหารสัตว์ปากช่อง, 2511 |
| PR   | 21.9                                   | สถานีพืชอาหารสัตว์ปากช่อง, 2511 |
| PM   | 7.1                                    | สถานีพืชอาหารสัตว์ปากช่อง, 2511 |
| UM   | 2.8                                    | สถานีพืชอาหารสัตว์ปากช่อง, 2511 |
| SS   | 0.6                                    | Rengsirikul et al., 2013        |
| MS   | 4.1                                    | จักรพงษ์ ชายคง และคณะ, 2561     |

จากการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของหญ้า จะเห็นได้ว่าหญ้าแต่ละชนิดมีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน ทั้งในส่วนของความชื้น สัตส่วน และปริมาณผลผลิต ซึ่งคุณสมบัติดังกล่าวเป็นอีกหนึ่งปัจจัยสำคัญที่จะใช้ในการพิจารณาความเหมาะสมสำหรับการนำหญ้าหลายฤดูไปการผลิตเป็นวัตถุดิบเชื้อเพลิงทางเลือก ซึ่งยังอีกอีกหลายคุณสมบัติที่นำมาพิจารณาร่วมกัน ได้แก่ คุณสมบัติทางพลังงาน คุณสมบัติทางชีวเคมี และคุณสมบัติทางเคมี ที่จะแสดงผลการศึกษาในหัวข้อถัดไป

### 3) องค์ประกอบโดยประมาณ ( Proximate Analysis) ของหญ้าหลายฤดู

องค์ประกอบโดยประมาณ เป็นปัจจัยหนึ่งด้านคุณสมบัติทางพลังงานที่ใช้ในการพิจารณาศักยภาพของหญ้าหลายฤดู เนื่องจากหญ้ามีองค์ประกอบทั้งส่วนที่เป็นสารอินทรีย์ (ส่วนที่เป็นเชื้อเพลิง) และสารอนินทรีย์ (ส่วนที่เป็นแร่ธาตุ และความชื้น) ทำให้การวิเคราะห์แบบละเอียดค่อนข้างยุ่งยากและบางครั้งไม่มีความจำเป็น จึงมักนิยมใช้การวิเคราะห์แบบประมาณแทน ซึ่งการวิเคราะห์แบบประมาณแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่เผาไหม้ได้ได้แก่ สารที่ระเหยได้และคาร์บอนคงตัว และส่วนที่เผาไหม้ไม่ได้หรือส่วนเฉื่อย ได้แก่ ความชื้นและเถ้า ตามมาตรฐาน ASTM D3173-3175 และจากสภาพของหญ้าแต่ละชนิดที่วิเคราะห์ตามสภาพจะไม่สามารถนำค่าการวิเคราะห์มาเปรียบเทียบกันได้เนื่องจากสภาวะความชื้นที่แตกต่างกัน ดังนั้นจึงต้องคำนวณองค์ประกอบของหญ้าหลายฤดูให้อยู่ในฐานเดียวกันคือที่สภาวะความชื้นแบบอบแห้ง หรือ dry basis โดยตาราง 15 จะแสดงองค์ประกอบโดยประมาณของหญ้าหลายฤดูที่สภาวะอบแห้ง ซึ่งการวิเคราะห์พารามิเตอร์ดังกล่าวมีผลต่อคุณสมบัติทางด้านค่าความร้อน เนื่องจากปริมาณความชื้นจะส่งผลการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง และปริมาณสารระเหยง่ายและคาร์บอนคงตัวส่งผลต่อค่าความร้อนของหญ้าหลายฤดู โดยได้ทำการทดลองหญ้าทั้ง 10 ชนิด รวมทั้งทดลองในส่วนต่างๆของหญ้า (ต้นและใบ) พบว่า ชนิดและส่วนของพืชมีผลต่อเปอร์เซ็นต์ของความชื้น สารระเหยง่าย คาร์บอนคงตัว และเถ้าในหญ้า ซึ่งได้ผลการศึกษาดังตารางที่ 15-16 และภาพประกอบ 32-34

จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าปริมาณความชื้นจะแปรผกผันกับปริมาณสารระเหย คือ หากปริมาณความชื้นมาก ปริมาณของสารระเหยจะน้อย นั่นหมายความว่า การลุกติดไฟของชีวมวลนั้นลุกติดไฟได้ยาก แต่หากมีปริมาณความชื้นที่น้อย ปริมาณสารระเหยก็จะมาก และเชื้อเพลิงที่มีปริมาณชื้นต่ำมากจึงต้องมีการจัดการเป็นพิเศษ ชีเถ้าเป็นสิ่งที่เจือปนที่จะไม่ถูกเผาไหม้จะมีปริมาณอยู่ในช่วง 5-40 เปอร์เซ็นต์โดยชีเถ้าจะมีผล คือ ลดกำลังความสามารถในการจัดการควบคุมและการเผา เพิ่มค่าใช้จ่ายในการจัดการควบคุม มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการเผาไหม้ และประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำ เป็นสาเหตุของการเกิดตะกรันภายในเตาเผา (วรพจน์ งามชมพู, 2556) ซึ่งจากการวิเคราะห์องค์ประกอบโดยประมาณของหญ้าหลายฤดู

จากตาราง 15 จะเห็นว่า ปริมาณความชื้นภายในของหญ้าทั้ง 10 ชนิดมีปริมาณคือ 1-11 เปอร์เซ็นต์ โดยพบใน หญ้าเนเปียร์แคระ (*Pennisetum purpureum* cv. Mott (PM)) มากที่สุด (ร้อยละ 11.20) และพบใน คือ หญ้าอะตราตัม (*Paspalum atratum* (PA)) และ หญ้ากินนีมอมบาซ่า (*Panicum maximum* cv. Mombaza (MB)) (ร้อยละ 3.06 และ 3.22 ตามลำดับ) ซึ่งมีความแตกต่างกันประมาณ 8 เปอร์เซ็นต์ (คิดเป็นร้อยละ 72.7) และเมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐานความชื้นของเชื้อเพลิงพบว่า มาตรฐานถูกกำหนดไว้ที่ ไม่ควรเกิน 15 เปอร์เซ็นต์ (บุญรอด สัจจุลนุกิจ และ บุชบา พุกษาพันธ์รัตน์, 2555) จะเห็นได้ว่าหญ้าหลายฤดูทั้ง 10 ชนิดผ่านมาตรฐานที่กำหนด

ตาราง 15 องค์ประกอบโดยประมาณ (Proximate Property) ของหญ้าหลายฤดู

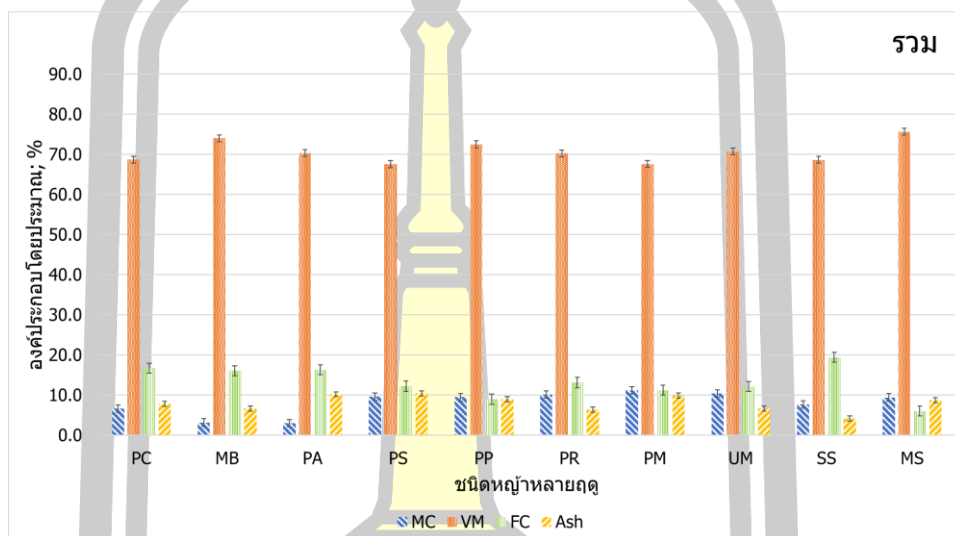
| ชนิด | องค์ประกอบโดยประมาณ (wt. % dry basis) |                           |                           |                   |
|------|---------------------------------------|---------------------------|---------------------------|-------------------|
|      | ความชื้น <sup>a</sup>                 | สารระเหยง่าย <sup>a</sup> | คาร์บอนคงตัว <sup>a</sup> | เถ้า <sup>a</sup> |
| PC   | 6.71 ± 0.26                           | 68.74 ± 1.43              | 16.77 ± 0.94              | 7.78 ± 0.41       |
| MB   | 3.22 ± 0.17                           | 74.02 ± 0.96              | 16.09 ± 1.05              | 6.66 ± 0.26       |
| PA   | 3.06 ± 0.02                           | 70.38 ± 0.41              | 16.33 ± 0.40              | 10.23 ± 0.04      |
| PS   | 9.66 ± 0.14                           | 67.60 ± 1.75              | 12.27 ± 1.63              | 10.47 ± 0.15      |
| PP   | 9.47 ± 0.33                           | 72.54 ± 0.40              | 9.00 ± 0.46               | 8.99 ± 0.22       |
| PR   | 10.14 ± 0.15                          | 70.33 ± 0.20              | 13.14 ± 0.50              | 6.38 ± 0.29       |
| PM   | 11.20 ± 0.30                          | 67.65 ± 0.35              | 11.25 ± 0.24              | 9.90 ± 0.13       |
| UM   | 10.45 ± 0.45                          | 70.73 ± 0.05              | 12.16 ± 0.55              | 6.67 ± 0.70       |
| SS   | 7.68 ± 0.45                           | 68.65 ± 0.98              | 19.45 ± 1.06              | 4.22 ± 0.42       |
| MS   | 9.46 ± 0.33                           | 75.68 ± 0.14              | 6.06 ± 0.29               | 8.79 ± 0.16       |

หมายเหตุ: a หมายถึง ชนิดของหญ้าหลายฤดูทำให้องค์ประกอบโดยประมาณของหญ้ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 (ANOVA)

ปริมาณส่วนที่เผาไหม้ได้ ได้แก่ สารระเหยง่าย คาร์บอนคงตัว ของหญ้าหลายฤดูทั้ง 10 ชนิดในพื้นที่ศึกษาพบว่ามีความมากที่สุดจากองค์ประกอบทั้งหมด โดย หญ้าหวานอิสราเอล (*Pennisetum purpureum* cv. Mahasarakham (MS)) แสดงปริมาณสารระเหยมากที่สุด (ร้อยละ 78) รองลงมาคือ หญ้ากินนีมอมบาซ่า (*Panicum maximum* cv. Mombaza (MB)) และ หญ้าเนเปียร์ธรรมดา (*Pennisetum purpureum* (PP)) (ร้อยละ 74 และ 73 ตามลำดับ) (ภาพประกอบ 33) ในขณะที่ปริมาณคาร์บอนคงตัว พบมากที่สุด ใน หญ้าซีตาเรียสเพลนดา (*Setaria sphacelata* cv. Splenda (SS)) (ร้อยละ 22) รองลงมา คือ หญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 (*Pennisetum purpureum* x *P. glaucum* Pakchong 1 (PC)), หญ้าอะตราตัม (*Paspalum atratum* (PA)) และ หญ้ากินนีมอมบาซ่า (*Panicum maximum* cv. Mombaza (MB)) (ร้อยละ 17, 16 และ 16 ตามลำดับ) (ภาพประกอบ 32) ซึ่งคาร์บอนคงตัวมีความสัมพันธ์กับค่าความร้อนของชีวมวล จะเห็นได้ว่ามีแนวโน้มเดียวกันกับคุณสมบัติดังกล่าว ซึ่งจะแสดงผลได้ดังตาราง 15

ส่วนปริมาณเถ้าของชีวมวลจากหญ้าในพื้นที่ศึกษาทั้ง 10 ชนิด จะเห็นว่าหญ้าหลายฤดูมีปริมาณเถ้าอยู่ในช่วง 4-10 เปอร์เซ็นต์ จากภาพประกอบ 32 พบว่า หญ้าอะตราตัม (*Paspalum atratum* (PA)), หญ้าเนเปียร์แคะ (*Pennisetum purpureum* cv. Mott (PM)) และ หญ้าเนเปียร์สุราษฎร์ 1 (*Pennisetum purpureum* Surat 1 (PS)) มีปริมาณเถ้าสูงที่สุด คือประมาณ

10 เปอร์เซ็นต์ และ หญ้าซีตาเรียสเปลดตา (*Setaria sphacelata* cv. Splenda (SS)) จะแสดงปริมาณเถ้าที่ต่ำที่สุด คือประมาณ 4 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีความแตกต่างกันประมาณ 6 เปอร์เซ็นต์ (คิดเป็นร้อยละ 60) และเมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐานความชื้นของเชื้อเพลิงพบว่า มาตรฐานถูกกำหนดไว้ที่ ไม่ควรเกิน 10 เปอร์เซ็นต์ (บุญรอด สัจกุลนุกิจ และ บุชบา พฤษภาพันธุ์รัตน์, 2555) จะเห็นได้ว่าหญ้าหลายฤดูทั้ง 10 ชนิดผ่านมาตรฐานที่กำหนด



ภาพประกอบ 32 องค์ประกอบโดยประมาณ (Proximate Property) ของหญ้าหลายฤดู

เมื่อนำผลการศึกษารองคประกอบโดยประมาณไปวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของค่าเฉลี่ยของ ความชื้น สารระเหยง่าย คาร์บอนคงตัว และเถ้า พบว่า ชนิดของหญ้าหลายฤดูทั้ง 10 ชนิดมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % และจากการวิเคราะห์องค์ประกอบโดยประมาณ (Proximate Property) ของหญ้าหลายฤดู จะเห็นได้ว่า หญ้าหลายฤดูที่มีคุณสมบัติที่สูงที่สุดโดยพิจารณาองค์ประกอบทั้งหมด สามารถแบ่งความแตกต่างของหญ้าออกเป็นกลุ่มๆ ซึ่งภายในกลุ่มมีค่าเฉลี่ยขององค์ประกอบโดยประมาณไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 (ตาราง 16) ซึ่งจะสามารถเลือกชนิดหญ้าที่มีความแตกต่างจากชนิดอื่นๆได้ 4 ชนิด คือ หญ้าซีตาเรียสเปลดตา (*Setaria sphacelata* cv. Splenda (SS)) หญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 (*Pennisetum purpureum* x *P. glaucum* Pakchong 1 (PC)), หญ้าอะตราดัม (*Paspalum atratum* (PA)) และ หญ้ากินนิมอมบาซ่า (*Panicum maximum* cv. Mombaza (MB)) มีคาร์บอนคงตัวและสารระเหยง่ายที่สูงที่สุด ซึ่งจะช่วยให้เชื้อเพลิงติดไฟและให้พลังงานความร้อนได้ดี และมีปริมาณความชื้นและเถ้าที่ต่ำ ที่จะส่งผลต่อพลังงานงานให้ลดต่ำลง และหากพิจารณาในแง่ของการผลิตพลังงานที่ต้องการคุณสมบัติที่เหมาะสม คือ สารระเหยง่ายและคาร์บอนคงตัวสูง

ความชื้นและเถ้าดำ (บุญรอด สัจกุลนุกิจ และ บุชบา พุกษาพันธุ์รัตน์, 2555) ทำให้หญ้าทั้ง 4 ชนิดดังกล่าวมีคุณสมบัติที่เพียงพอต่อการผลิตเป็นเชื้อเพลิง

**ตาราง 16** ผลการทดสอบทางสถิติ (ANOVA test) และ Scheffe test ขององค์ประกอบโดยประมาณ (Proximate analysis) ในหญ้าหลายฤดูทั้ง 10 ชนิด

| Proximate Analysis | ANOVA test |         | Scheffe test <sup>s</sup>                                                                       |
|--------------------|------------|---------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                    | F value    | P value |                                                                                                 |
| ความชื้น (%)       | 361.981    | .000    | 1. PA, MB 2. PC, SS 3. PR, UM, PM<br>4. MS, PP, PS, PR, UM                                      |
| สารระเหยง่าย (%)   | 37.479     | .000    | 1. PS, PM, SS, PC, PR, UM<br>2. UM, PR, PP, MB 3. PP, MB, PA, SS                                |
| คาร์บอนคงตัว (%)   | 77.629     | .000    | 1. SS, PP 2. PP, PM 3. PM, UM, PS<br>4. UM, PS, PR, MB 5. PR, MB, PA<br>6. MB, PA, PC 7. PC, SS |
| เถ้า (%)           | 130.679    | .000    | 1. SS 2. PA, PR, UM 3. UM, PC<br>4. PC, MS, PP 5. MS, PP, MB 6. PS, PM                          |

**หมายเหตุ:** s คือ ชนิดหญ้าภายในกลุ่มเดียวกันมีค่าเฉลี่ย Proximate ไม่แตกต่างกัน แต่ชนิดหญ้าแต่ละกลุ่มมีความมีค่าเฉลี่ย Proximate แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

เมื่อพิจารณาสัดส่วนของใบและต้นของหญ้าหลายฤดูทั้ง 10 ชนิด พบว่า ส่วนของลำต้นและใบ แสดงองค์ประกอบโดยประมาณ (Proximate Property) ที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับสัดส่วนของลำต้นและใบ (ตาราง 13) ซึ่งประกอบไปด้วยปริมาณความชื้น ปริมาณสารระเหยง่าย ปริมาณคาร์บอนคงตัว และปริมาณเถ้า ที่จะแสดงผลดังตาราง 17 และภาพประกอบ 33-36

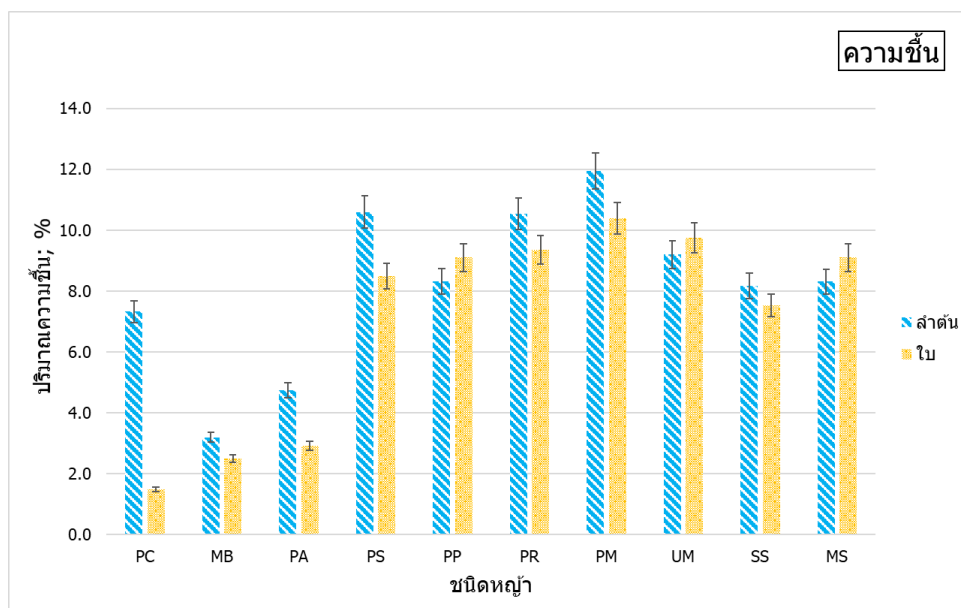
จากการวิเคราะห์ความแปรปรวน (T-test) ของค่าเฉลี่ยความชื้น สารระเหยง่าย คาร์บอนคงตัว และเถ้า ระหว่างส่วนลำต้นและใบของหญ้าหลายฤดูทั้ง 10 ชนิดมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % ซึ่งแสดงให้เห็นว่าส่วนลำต้นและใบ แสดงความแตกต่างคุณสมบัติของหญ้าหลายฤดู (ตาราง 17) ทำให้คุณสมบัติของหญ้าในส่วนรวมมีองค์ประกอบที่ต่างกัน เมื่อนำไปใช้ในการผลิตเชื้อเพลิง โดยหญ้าหลายฤดูส่วนใหญ่จะปริมาณความชื้นในลำต้นที่สูงกว่าใบ (ภาพประกอบ 33) สารระเหยง่ายจะพบในส่วนของลำต้นสูงกว่าใบ (ภาพประกอบ 34) ปริมาณปริมาณเถ้า และเมื่อพิจารณาปริมาณสัดส่วนของลำต้นและใบ (ตาราง 13) พบว่าหญ้าหลายฤดูมีปริมาณลำต้นที่สูงกว่าใบ เมื่อนำหญ้าส่วนรวมไปใช้ทำให้ความแตกต่างของคุณสมบัติโดยประมาณยัง

อยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสม โดยเฉพาะหญ้าซีดาเรียสเปลนดา (*Setaria sphacelata* cv. Splenda (SS)) หญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 (*Pennisetum purpureum* x *P. glaucum* Pakchong 1 (PC)), หญ้าอะตราดัม (*Paspalum atratum* (PA)) และ หญ้ากินนีมอมบาซ่า (*Panicum maximum* cv. Mombaza (MB))

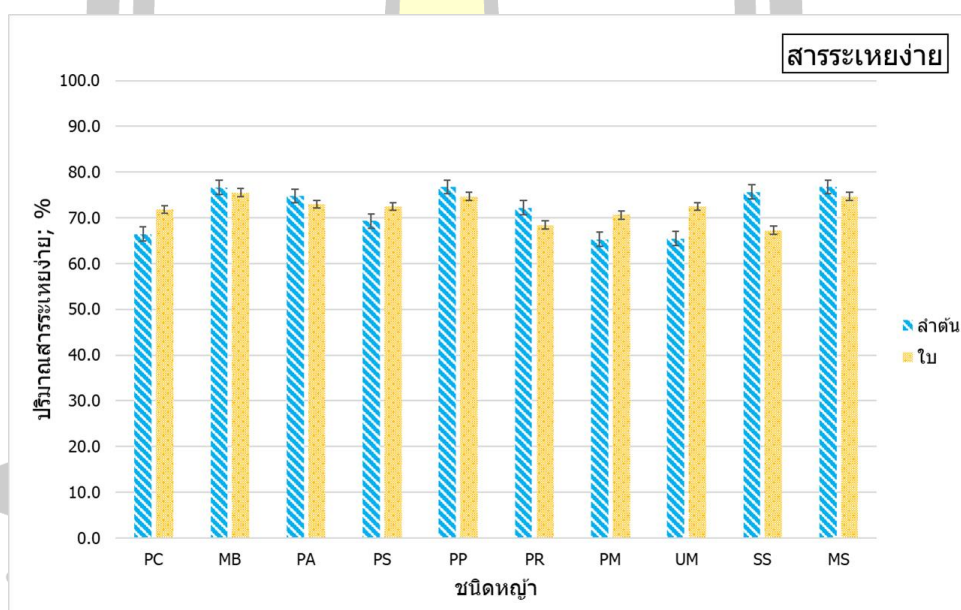
ตาราง 17 องค์ประกอบโดยประมาณ (Proximate Property) ในส่วนลำต้นและใบของหญ้าหลายฤดู

| ส่วน | ชนิด | องค์ประกอบโดยประมาณ (wt. % dry basis) |                           |                           |                           |
|------|------|---------------------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
|      |      | ความชื้น                              | สารระเหยง่าย              | คาร์บอนคงตัว              | เถ้า                      |
| ใบ   | PC   | 1.49 ± 0.11 <sup>a</sup>              | 71.86 ± 0.56 <sup>a</sup> | 18.19 ± 0.66              | 8.46 ± 0.15 <sup>a</sup>  |
|      | MB   | 2.49 ± 0.27 <sup>a</sup>              | 75.50 ± 0.95 <sup>a</sup> | 15.78 ± 0.68 <sup>a</sup> | 6.23 ± 0.14 <sup>a</sup>  |
|      | PA   | 2.91 ± 0.06                           | 72.94 ± 0.19              | 15.01 ± 0.39 <sup>a</sup> | 9.14 ± 0.15               |
|      | PS   | 8.49 ± 0.18 <sup>a</sup>              | 72.44 ± 0.64 <sup>a</sup> | 9.91 ± 0.75 <sup>a</sup>  | 9.16 ± 0.36 <sup>a</sup>  |
|      | PP   | 9.10 ± 0.22                           | 74.68 ± 0.68 <sup>a</sup> | 7.96 ± 0.91 <sup>a</sup>  | 8.26 ± 0.56 <sup>a</sup>  |
|      | PR   | 9.36 ± 0.18 <sup>a</sup>              | 68.45 ± 0.28 <sup>a</sup> | 15.59 ± 0.25 <sup>a</sup> | 6.60 ± 0.27 <sup>a</sup>  |
|      | PM   | 10.38 ± 0.06 <sup>a</sup>             | 70.60 ± 0.1 <sup>a</sup>  | 7.29 ± 0.09 <sup>a</sup>  | 11.73 ± 0.15 <sup>a</sup> |
|      | UM   | 9.75 ± 0.09 <sup>a</sup>              | 72.47 ± 0.32 <sup>a</sup> | 12.63 ± 0.13 <sup>a</sup> | 5.15 ± 0.40 <sup>a</sup>  |
|      | SS   | 7.53 ± 0.08 <sup>a</sup>              | 67.28 ± 0.37 <sup>a</sup> | 18.74 ± 0.37 <sup>a</sup> | 6.46 ± 0.08 <sup>a</sup>  |
|      | MS   | 9.10 ± 0.22                           | 74.68 ± 0.68              | 7.80 ± 0.69               | 8.42 ± 0.36               |
| ต้น  | PC   | 7.32 ± 0.09 <sup>a</sup>              | 66.46 ± 0.99 <sup>a</sup> | 19.60 ± 0.84              | 6.62 ± 0.23 <sup>a</sup>  |
|      | MB   | 3.20 ± 0.09 <sup>a</sup>              | 76.67 ± 1.39 <sup>a</sup> | 13.00 ± 1.44 <sup>a</sup> | 7.13 ± 0.20 <sup>a</sup>  |
|      | PA   | 4.74 ± 0.13                           | 74.77 ± 0.22              | 12.62 ± 0.06 <sup>a</sup> | 7.88 ± 0.13               |
|      | PS   | 10.60 ± 0.69 <sup>a</sup>             | 69.32 ± 0.86 <sup>a</sup> | 8.12 ± 0.24 <sup>a</sup>  | 11.96 ± 0.40 <sup>a</sup> |
|      | PP   | 8.32 ± 0.72                           | 76.77 ± 0.84 <sup>a</sup> | 5.12 ± 0.40 <sup>a</sup>  | 9.79 ± 0.17 <sup>a</sup>  |
|      | PR   | 10.54 ± 0.26 <sup>a</sup>             | 72.22 ± 0.09 <sup>a</sup> | 11.67 ± 0.26 <sup>a</sup> | 5.56 ± 0.40 <sup>a</sup>  |
|      | PM   | 11.94 ± 0.15 <sup>a</sup>             | 65.30 ± 0.03 <sup>a</sup> | 10.52 ± 0.32 <sup>a</sup> | 12.25 ± 0.31 <sup>a</sup> |
|      | UM   | 9.20 ± 0.07 <sup>a</sup>              | 65.47 ± 0.40 <sup>a</sup> | 15.86 ± 0.29 <sup>a</sup> | 9.47 ± 0.43 <sup>a</sup>  |
|      | SS   | 8.17 ± 0.18 <sup>a</sup>              | 75.64 ± 0.83 <sup>a</sup> | 14.52 ± 0.52 <sup>a</sup> | 1.67 ± 0.38 <sup>a</sup>  |
|      | MS   | 8.31 ± 0.72                           | 76.77 ± 0.84              | 5.12 ± 0.40               | 9.79 ± 0.17               |

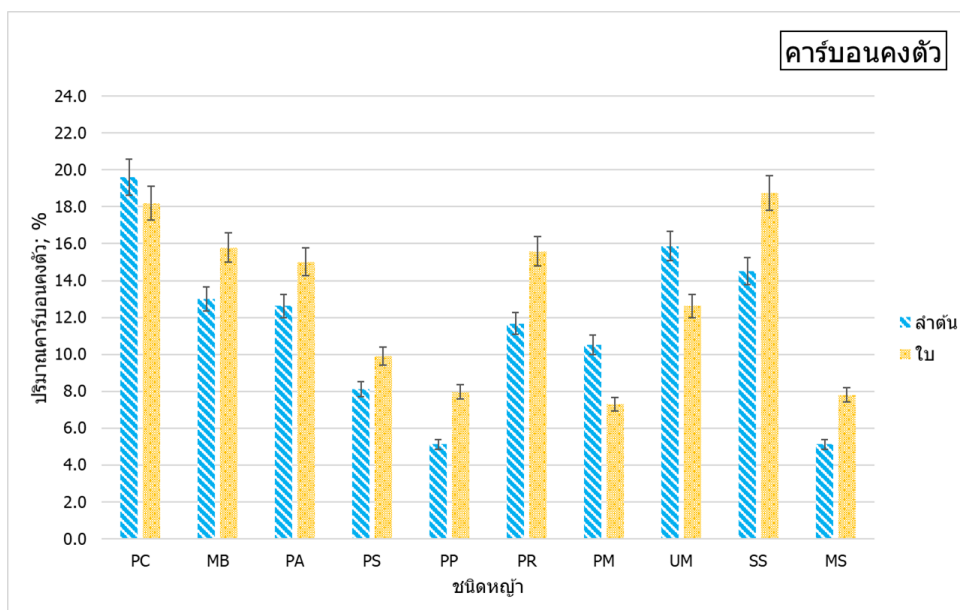
หมายเหตุ: a หมายถึง สัดส่วนลำต้นและใบของหญ้าหลายฤดูทำให้องค์ประกอบโดยประมาณของหญ้ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 (T-test)



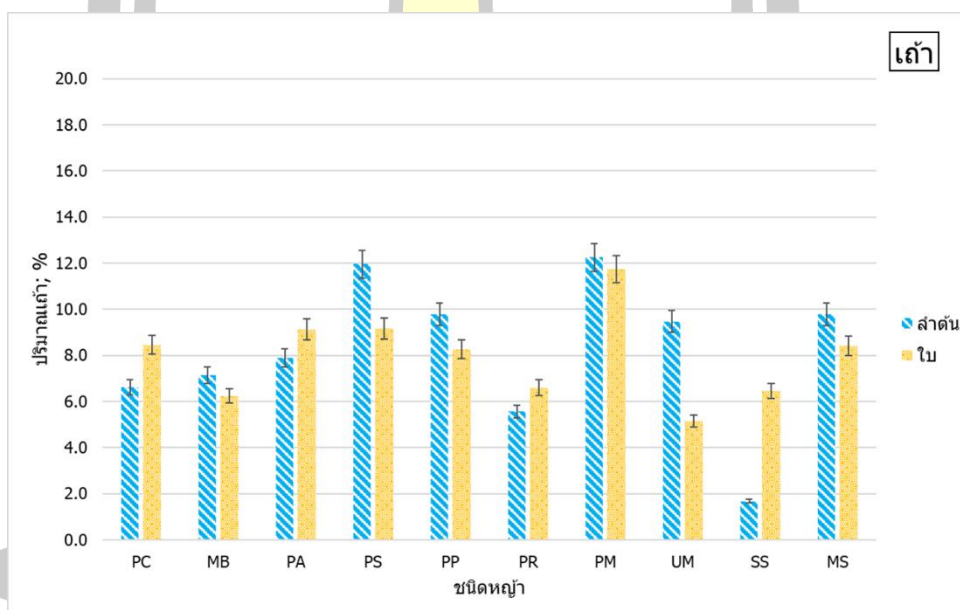
ภาพประกอบ 33 ปริมาณความชื้นในส่วนลำต้นและใบของหนุ่หลายฤดู



ภาพประกอบ 34 ปริมาณสารระเหยง่ายในส่วนลำต้นและใบของหนุ่หลายฤดู



**ภาพประกอบ 35** ปริมาณคาร์บอนคงตัวในส่วนลำต้นและใบของหญ้าหลายฤดู



**ภาพประกอบ 36** ปริมาณเถาในส่วนลำต้นและใบของหญ้าหลายฤดู

และเมื่อเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงชีวมวลชนิดอื่นๆ พบว่า หญ้ามีปริมาณเถาที่ต่ำกว่า ซึ่งได้แก่ วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร เช่น แกลบ ฟางข้าว เหง้ามันสำปะหลัง ใบและยอดอ้อย เป็นต้น (8-20 เปอร์เซ็นต์) (Gaur and Reed, 1998; กระทรวงพลังงาน, 2559; บุญรอด สัจจุกลุณกิจ และ บุษบา พฤกษาพันธุ์รัตน์, 2555) , ผักตบชวา (19.60 เปอร์เซ็นต์) (Gaur and Reed, 1998) และวัสดุจากเศษไม้ ได้แก่ ไม้ยางพารา ไม้ยูคาลิปตัส และลำต้นนุ่น เป็นต้น (8-16 เปอร์เซ็นต์) (Gaur and Reed, 1998; กระทรวงพลังงาน, 2559) ซึ่งเถาที่เกิดขึ้นส่งผลให้มีความพลังงานต่ำลง การมีสัดส่วนเถาในเชื้อเพลิงชีวมวลที่

สูงนอกจากจะมีผลต่อค่าความร้อนแล้ว ยังส่งผลต่อปริมาณของเสียที่เกิดขึ้น ไม่ว่าจะเป็นเถ้าลอยหรือเถ้าหนักก็ตาม ส่วนปริมาณสารที่ระเหยได้และคาร์บอนคงตัวไม่ค่อยมีผลกระทบต่อการนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับผลิตกระแสไฟฟ้า (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2556) ทำให้หญาหลายฤดูมีศักยภาพด้านกายภาพที่สามารถนำไปเป็นเชื้อเพลิงเพลิงทางเลือกได้ อย่างไรก็ตามยังต้องมีการพิจารณา ร่วมกับคุณสมบัติในด้านอื่นๆ ซึ่งจะแสดงผลในหัวข้อถัดไป

#### 4.1.2 คุณสมบัติทางพลังงานของหญาหลายฤดู

หญาหลายฤดูเป็นหญาพลังงานที่มีศักยภาพสูงในแง่ของผลผลิต การเจริญเติบโตที่รวดเร็ว สามารถให้ผลผลิตที่สูงต่อการเก็บเกี่ยว มีปริมาณเยื่อใยที่สูง ทำให้ผู้วิจัยสนใจศึกษาคุณสมบัติทางพลังงานของหญา เพื่อนำมาใช้ในการพิจารณาหาชนิดหญาที่มีศักยภาพที่เหมาะสมในด้านพลังงาน โดยศึกษาหญาหลายฤดูในพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย โดยการศึกษาค่าความร้อนของหญาหลายฤดู ซึ่งค่าความร้อนสูง (High Heat Value: HHV) เป็นคุณสมบัติที่สำคัญสำหรับการพิจารณาชีวมวลเป็นเชื้อเพลิงผลิตพลังงาน เนื่องจากค่าความร้อนจะส่งผลต่อประสิทธิภาพทางพลังงานของเชื้อเพลิง และค่าความร้อนมีความสัมพันธ์กับคาร์บอน ไฮโดรเจน คาร์บอนคงตัว และปริมาณของลิกนิน ซึ่งทำการศึกษาค่าความร้อนโดยใช้เครื่อง bomb calorimeter ตามมาตรฐาน ASTM D3286 จะแสดงผลการทดลองดังตารางที่ 18 และภาพประกอบ 37

ตาราง 18 ค่าความร้อนสูง (High Heat Value: HHV) ของหญาหลายฤดู

| ชนิด | ค่าความร้อนสูง (MJ/Kg.) <sup>a</sup> |
|------|--------------------------------------|
| PC   | 16.58±0.25                           |
| MB   | 16.49±0.34                           |
| PA   | 16.67±0.48                           |
| PS   | 14.80±0.59                           |
| PP   | 14.42±0.82                           |
| PR   | 15.56±0.29                           |
| PM   | 14.45±0.26                           |
| UM   | 15.27±0.98                           |
| SS   | 17.55±0.45                           |
| MS   | 13.87±0.25                           |

หมายเหตุ: a หมายถึง ชนิดของหญาหลายฤดูทำให้ค่าความร้อนของหญาที่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 (ANOVA)

ตาราง 19 ผลการทดสอบทางสถิติ (ANOVA test) และ Scheffe test ของค่าความร้อนในหญ้าหลายฤดูทั้ง 10 ชนิด

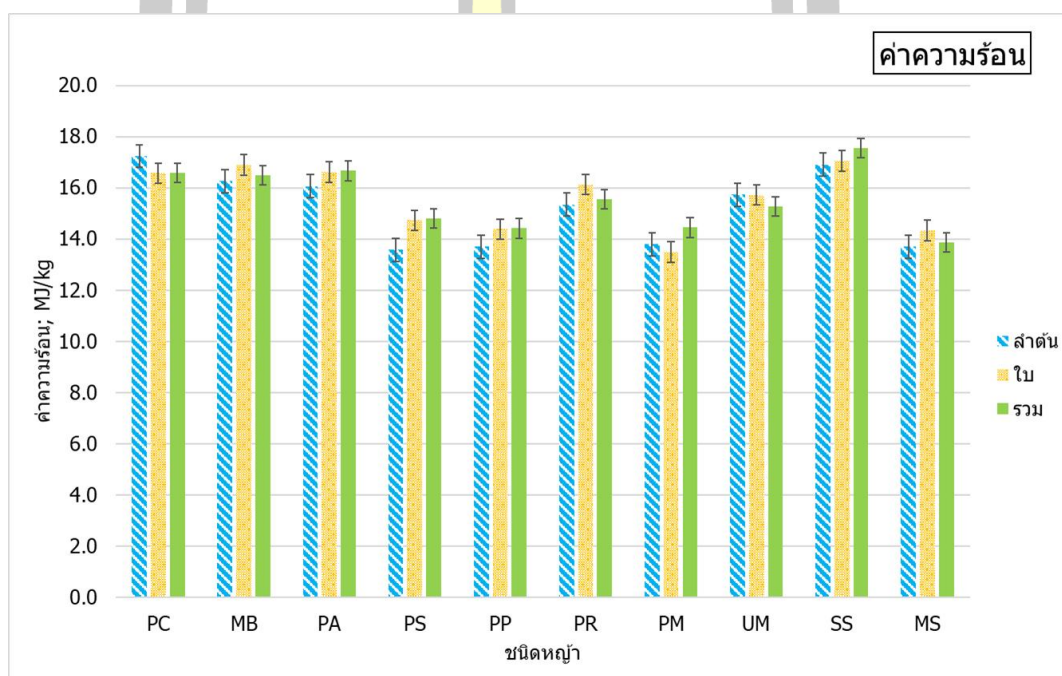
| ANOVA test | Between Groups | เปรียบเทียบความแตกต่าง <sup>s</sup> |
|------------|----------------|-------------------------------------|
| F value    | 331.125        | 1. MS 2. PP, PM, PS                 |
| P value    | .000           | 3. UM, PR 4. PC, PA<br>5. MB, SS    |

หมายเหตุ: s คือ ชนิดหญ้าภายในกลุ่มเดียวกันมีค่าเฉลี่ยความร้อนไม่แตกต่างกัน แต่ชนิดหญ้าแต่ละกลุ่มมีความีค่าเฉลี่ยความร้อนแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

จากการวิเคราะห์ค่าความร้อนสูง (High heat value : HHV) ของหญ้าหลายฤดู โดยจะศึกษาหญ้าหลายฤดูจำนวน 10 ชนิด พบว่า หญ้าซีตาเรียสเปลดดา (*Setaria sphacelata* cv. Splenda (SS)) มีค่าความร้อนสูงมากที่สุด คือ 17.55 MJ/Kg รองลงมาคือ หญ้าอะตราดัม (*Paspalum atratum* (PA)), หญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 (*Pennisetum purpureum* x *P. glaucum* Pakchong 1 (PC)) และหญ้างินนิมอมบาซ่า (*Panicum maximum* cv. Mombaza (MB)) ที่มีค่าความร้อนคือ 16.67 MJ/kg, 16.58 MJ/kg, และ 16.46 MJ/kg ตามลำดับ (ส่วนรวม) ในแง่ของการผลิตเชื้อเพลิง สำหรับป้อนเข้าสู่ระบบเตาเผาไม้เพื่อผลิตไฟฟ้า จะเห็นได้ว่าหญ้าซีตาเรียสเปลดดา (*Setaria sphacelata* cv. Splenda (SS)) มีคุณสมบัติการให้ความร้อนได้ดีที่สุด (ภาพประกอบ 37) และเมื่อนำผลการศึกษาไปวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของค่าเฉลี่ยค่าความร้อนของหญ้าหลายฤดู พบว่า ชนิดของหญ้าหลายฤดูทั้ง 10 ชนิดมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % และเมื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของหญ้าเป็นรายคู่จะสามารถแยกความแตกต่างออกเป็นกลุ่มได้ 5 กลุ่ม (ตาราง 19) ดังนั้นจึงทำให้หญ้าซีตาเรียสเปลดดา (*Setaria sphacelata* cv. Splenda (SS)) หญ้าอะตราดัม (*Paspalum atratum* (PA)), หญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 (*Pennisetum purpureum* x *P. glaucum* Pakchong 1 (PC)) และหญ้างินนิมอมบาซ่า (*Panicum maximum* cv. Mombaza (MB)) มีความแตกต่างจากหญ้ากลุ่มอื่นๆ และมีความน่าสนใจสูงที่สุดเนื่องจากมีค่าความร้อนที่สูง จากการศึกษาของ Rengsirikul et al., (2013) ที่ทำการศึกษาค่าความร้อนของหญ้านเนเปียร์ พบว่า หญ้ามีค่าความร้อนสูง (ส่วนรวม) อยู่ในระหว่างช่วง 14.39-16.28 MJ/kg ซึ่งมีประสิทธิภาพสำหรับการผลิตเป็นเชื้อเพลิง ซึ่งจะมีความสอดคล้องกับผลการวิจัยของผู้วิจัยในครั้งนี้

เมื่อพิจารณาค่าความร้อนของหญ้าหลายฤดูในส่วนลำต้นต้นและใบ (ตาราง 20) พบว่า สัดส่วนลำต้นของหญ้าส่วนใหญ่มีปริมาณค่าความร้อนสูงกว่าสัดส่วนของใบ จากภาพประกอบ 37 โดยจะเห็นได้ว่าในสัดส่วนใบของหญ้า พบว่า หญ้าซีตาเรียสเปลดดา (*Setaria sphacelata* cv. Splenda (SS)) มีค่าความร้อนสูงที่สุด คือ 17.06 MJ/kg รองลงมาคือ หญ้างินนิมอมบาซ่า (*Panicum*

*maximum* cv. Mombaza (MB)), หญ้าอะตราตัม (*Paspalum atratum* (PA)) และ หญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 (*Pennisetum purpureum* x *P. glaucum* Pakchong 1 (PC)) และเมื่อพิจารณาในสัดส่วนของลำต้น พบว่า หญ้าซีตาเรียสเปลดตา (*Setaria sphacelata* cv. Splenda (SS)) ก็ยังมีปริมาณสูงที่สุดคือ 16.91 MJ/kg (ภาพประกอบ 37) รองลงมาก็ยังเป็นหญ้าทั้งสามชนิดดังกล่าวข้างต้นในสัดส่วนใบและรวม ซึ่งจะเห็นได้ว่าสัดส่วนต้นและใบมีแนวโน้มของค่าความร้อนที่เหมือนกับหญ้าที่เป็นส่วนรวม และสัดส่วนของใบจะมีค่าความร้อนที่ใกล้เคียงกับส่วนของลำต้น และเมื่อวิเคราะห์ความแปรปรวน (T-test) ของค่าเฉลี่ยความร้อน พบว่า ส่วนลำต้นและใบของหญ้าหลายฤดูทั้ง 10 ชนิดมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %



ภาพประกอบ 37 ค่าความร้อนสูงของหญ้าหลายฤดู

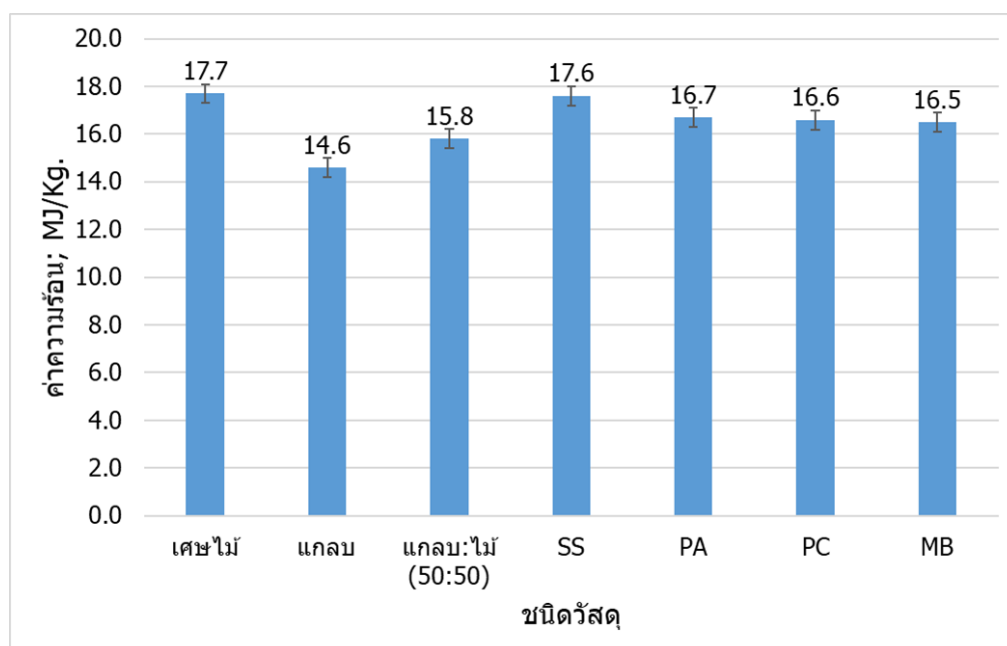
พหุ ประเด็น ชีว

ตาราง 20 ค่าความร้อนสูง (High Heat Value: HHV) ในส่วนลำต้นและใบของหญ้าหลายฤดู

| ชนิด | ค่าความร้อนสูง (MJ/Kg.) <sup>a</sup> |            |
|------|--------------------------------------|------------|
|      | ใบ                                   | ต้น        |
| PC   | 16.57±0.12                           | 17.24±0.11 |
| MB   | 16.89±0.11                           | 16.26±0.49 |
| PA   | 16.61±0.67                           | 16.06±0.60 |
| PS   | 14.73±0.21                           | 13.58±0.21 |
| PP   | 14.39±0.18                           | 13.70±0.10 |
| PR   | 16.13±0.14                           | 15.34±0.06 |
| PM   | 13.49±0.17                           | 13.8±0.33  |
| UM   | 15.72±0.52                           | 15.74±0.30 |
| SS   | 17.06±0.85                           | 16.91±0.48 |
| MS   | 14.33±0.64                           | 13.70±0.26 |

หมายเหตุ: a หมายถึง สัดส่วนลำต้นและใบของหญ้าหลายฤดูทำให้ค่าความร้อนของหญ้ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 (T-test)

จากการศึกษาความร้อนของหญ้า เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุชีวมวลชนิดอื่นๆ พบว่ามีความใกล้เคียงและมากกว่า ได้แก่ ชังข้าวโพด (9-10 MJ/kg.), ทะลายปาล์ม (13-15 MJ/kg.), เปลือกสับปะรด (13.6 MJ/kg), ลำต้นฝ้าย (14.49 MJ/kg), เปลือกถั่วลิสง (12.66 MJ/kg), ยอดและใบอ้อย (17-19 MJ/kg), ต้นมันสำปะหลัง (18.42 MJ/kg) และ เศษไม้ (14.65 MJ/kg) เป็นต้น (Balan, 2014; Mohammed et al., 2015; Wongwatanapaiboon et al., 2012; กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2556; ธนาพล ตันติสัตยกุล และคณะ, 2558; วิจิตรา สิงห์หิรัญสรณ์ และคณะ, 2560) ในขณะที่เทียบกับวัสดุปัจจุบันที่ทางโรงไฟฟ้าใช้ซึ่งเป็นชีวมวลหลักสำหรับโรงไฟฟ้าในประเทศไทย ได้แก่ แกลบ และเศษไม้สับ พบว่า จากภาพประกอบ 38 แสดงให้เห็นว่าหญ้าหลายฤดูทั้ง 4 ชนิด ได้แก่ หญ้าซีตาเรียสเปลดดา (*Setaria sphacelata* cv. Splenda (SS)), หญ้าอะตราตัม (*Paspalum atratum* (PA)), หญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 (*Pennisetum purpureum* x *P. glaucum* Pakchong 1 (PC)) และ หญ้ากินนีมอมบาซ่า (*Panicum maximum* cv. Mombaza (MB)) มีปริมาณความร้อนเทียบเท่าแกลบ และเศษไม้ คือ 14.62 MJ/kg และ 17.73 MJ/kg ตามลำดับ (ซึ่งค่าความร้อนของแกลบและไม้ได้จากการเก็บตัวอย่างจากโรงไฟฟ้ามาวิเคราะห์)



ภาพประกอบ 38 เปรียบเทียบค่าความร้อนระหว่างหญ้า 4 ชนิดและวัสดุปัจจุบันที่โรงไฟฟ้าใช้

ดังนั้นจากการทดลองค่าความร้อนของหญ้าข้างต้น จึงเสนอให้หญ้าทั้ง 4 ชนิด ได้แก่ หญ้าซีตาเรียสเปลดตา (*Setaria sphacelata* cv. Splenda (SS)), หญ้าอะตราตัม (*Paspalum atratum* (PA)), หญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 (*Pennisetum purpureum* x *P. glaucum* Pakchong 1 (PC)) และหญ้างินนิมอมบาซ่า (*Panicum maximum* cv. Mombaza (MB)) เป็นหญ้าที่เหมาะสมสำหรับเป็นเชื้อเพลิงทางเลือกสำหรับโรงไฟฟ้า อย่างไรก็ตามค่าความร้อนสูงเป็นเพียงหนึ่งคุณสมบัติที่ใช้ประกอบในการพิจารณาเท่านั้น

#### 4.1.3 คุณสมบัติทางชีวเคมีของหญ้าหลายฤดู

จากการลงพื้นที่เก็บตัวอย่างหญ้าหลายฤดูในพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือจำนวน เพื่อนำตัวอย่างมาวิเคราะห์คุณสมบัติทางชีวเคมี หรือ องค์ประกอบเยื่อใยของหญ้าแต่ละชนิด โดยหญ้าหลายฤดูประกอบด้วยเซลลูโลส (Cellulose) เฮมิเซลลูโลส (Hemicelluloses) ลิกนิน (Lignin) และ สารสกัด (Extractives) ที่สร้างขึ้นจากกลุ่มโมเลกุลขนาดใหญ่ ดังนั้นในการศึกษาครั้งนี้จึงได้ศึกษาพารามิเตอร์ที่วิเคราะห์ ได้แก่ เฮมิเซลลูโลส เซลลูโลส ลิกนิน และเถ้าที่ไม่ละลายกรด โดยพารามิเตอร์ดังกล่าวจะใช้ในการพิจารณาความเหมาะสมในการผลิตพลังงานในรูปแบบต่างๆ อาทิเช่น ในการผลิตพลังงานเอทานอลจะพิจารณาเฮมิเซลลูโลส เซลลูโลส เป็นองค์ประกอบหลัก ซึ่งในแง่ของการผลิตพลังงานไฟฟ้าจะพิจารณาลิกนิน เนื่องจากปริมาณของลิกนินในหญ้าหลายฤดูจะส่งผลต่อค่าความร้อนในการเผาไหม้เชื้อเพลิง ผู้วิจัยได้ทำการทดลองด้วยวิธีการ Detergent analysis โดยจะแสดงผลการทดลองดังตาราง 21 และภาพประกอบ 39

ตาราง 21 องค์ประกอบเยื่อใย (Lignocellulose) ของหญ้าหลายฤดู

| ชนิด | องค์ประกอบเยื่อใย (wt. %) |                       |                     |                   |
|------|---------------------------|-----------------------|---------------------|-------------------|
|      | เฮมิเซลลูโลส <sup>a</sup> | เซลลูโลส <sup>a</sup> | ลิกนิน <sup>a</sup> | เถ้า <sup>a</sup> |
| PC   | 37.57 ± 1.44              | 47.39 ± 1.27          | 11.07 ± 2.95        | 3.97 ± 0.33       |
| MB   | 35.30 ± 0.52              | 46.98 ± 0.41          | 14.76 ± 0.28        | 2.95 ± 0.46       |
| PA   | 38.92 ± 1.23              | 45.16 ± 1.35          | 14.29 ± 0.97        | 1.63 ± 1.44       |
| PS   | 36.67 ± 0.13              | 48.42 ± 0.10          | 11.07 ± 0.17        | 3.84 ± 0.13       |
| PP   | 30.30 ± 0.07              | 49.54 ± 0.04          | 16.71 ± 0.04        | 3.45 ± 0.08       |
| PR   | 22.35 ± 0.14              | 56.98 ± 0.10          | 16.76 ± 0.13        | 3.91 ± 0.16       |
| PM   | 28.29 ± 0.08              | 49.54 ± 0.08          | 16.71 ± 0.10        | 5.46 ± 0.02       |
| UM   | 36.37 ± 0.13              | 40.20 ± 0.15          | 15.55 ± 0.08        | 7.89 ± 0.18       |
| SS   | 28.30 ± 0.13              | 45.89 ± 0.10          | 21.76 ± 0.09        | 4.06 ± 0.05       |
| MS   | 36.97 ± 0.16              | 46.89 ± 0.07          | 13.07 ± 0.13        | 3.07 ± 0.21       |

หมายเหตุ: a หมายถึง ชนิดของหญ้าหลายฤดูทำให้องค์ประกอบเยื่อใยของหญ้ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 (ANOVA)

จากผลการทดลองวิเคราะห์เยื่อใยของหญ้าหลายฤดู พบว่า ปริมาณเฮมิเซลลูโลสและเซลลูโลสของหญ้ามีปริมาณที่ใกล้เคียงกัน และยังพบในปริมาณที่สูงที่สุด ในแง่ของการผลิตพลังงาน ไฟฟ้าปริมาณลิกนินในชีวมวลจะส่งผลต่อค่าความร้อนในการเผาไหม้เชื้อเพลิง ซึ่งจากข้อมูลการทดลองจะเห็นได้ว่า หญ้าซีตาเรียสเปลดดา (*Setaria sphacelata* cv. Splenda (SS)) มีปริมาณลิกนินที่สูงที่สุด คือ 21.76 เปอร์เซ็นต์ (ภาพประกอบ 39) ซึ่งจะแสดงให้เห็นว่ามีแนวโน้มเดียวกันกับค่าความร้อนสูงของหญ้า ดังภาพประกอบ 37 พบว่า หญ้าซีตาเรียสเปลดดา (*Setaria sphacelata* cv. Splenda (SS)) มีค่าความร้อนสูงมากที่สุด และเมื่อนำผลการศึกษาไปวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของค่าเฉลี่ย เซลลูโลส (Cellulose) เฮมิเซลลูโลส (Hemicelluloses) ลิกนิน (Lignin) ของหญ้าหลายฤดู พบว่า ชนิดของหญ้าหลายฤดูทั้ง 10 ชนิดมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % (ตาราง 22)

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าเฉลี่ยองค์ประกอบเยื่อใย พบว่า ชนิดหญ้าภายในกลุ่มเดียวกันมีค่าเฉลี่ยองค์ประกอบเยื่อใยไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 (ตาราง 22) ในแง่ของการผลิตพลังงานจะพิจารณาลิกนิน พบว่า สามารถแบ่งกลุ่มชนิดหญ้าที่มีความแตกต่างกันได้ 3 กลุ่มซึ่งหญ้าซีตาเรียสเปลดดา (*Setaria sphacelata* cv. Splenda (SS)) มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 กับหญ้าทั้ง 10 ชนิด ในขณะที่หญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 (*Pennisetum*

*purpureum* x *P. glaucum* Pakchong 1 (PC)), หญ้าอะตราดัม (*Paspalum atratum* (PA)) และ หญ้ากินนีมอมบาซ่า (*Panicum maximum* cv. Mombaza (MB)) ไม่มีความแตกต่างกันของค่าเฉลี่ย ลิกนินอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 แต่มีความแตกต่างกันกับหญ้าชนิดอื่น

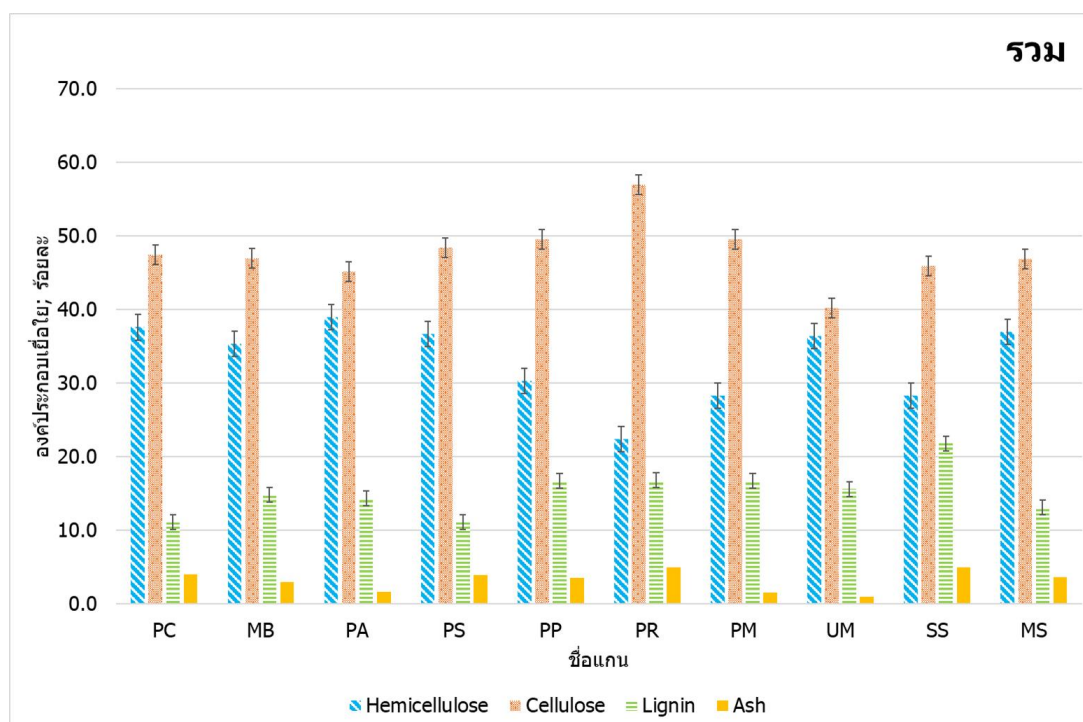
**ตาราง 22** ผลการทดสอบทางสถิติ (ANOVA test) และ Scheffe test ขององค์ประกอบเยื่อใย (Lignocellulose) ในหญ้าหลายฤดูทั้ง 10 ชนิด

| Lignocellulose   | ANOVA test |         | Scheffe test <sup>s</sup>                                                         |
|------------------|------------|---------|-----------------------------------------------------------------------------------|
|                  | F value    | P value |                                                                                   |
| เฮมิเซลลูโลส (%) | 224.169    | .000    | 1. PR 2. PM, SS, PP 3. PS, MS, PC, PA<br>4. MB, UM, PS, MS, PC                    |
| เซลลูโลส (%)     | 146.291    | .000    | 1. UM 2. PA, SS, MS, MB, PC 3. PR<br>4. MS, MB, PC, PS 5. PC, PS, PP, PM          |
| ลิกนิน (%)       | 30.542     | .000    | 1. PC, PS, MS, PA, MB 2. SS<br>3. MS, PA, PC, MB, PP, UM, PM, PR                  |
| เถ้า (%)         | 33.200     | .000    | 1. PA, MB, MS, PP<br>2. PS, PR, PC, SS, PM<br>3. UM 4. MB, MS, PP, PS, PR, PC, SS |

**หมายเหตุ:** s คือ ชนิดหญ้ามีค่าเฉลี่ยเยื่อใยแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

เมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณลิกนินของหญ้างักงานวิจัยอื่นๆ ที่ผ่านมา โดย Mohammed et al. (2015) ได้ทำการศึกษากองค์ประกอบเยื่อใยของหญ้า ในส่วนลำต้น ใบ และส่วนรวม พบว่า มีปริมาณลิกนิน คือ 26.99, 30.09 และ 24.34 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ จะเห็นได้ว่ามากกว่าปริมาณลิกนินของงานที่ผู้วิจัยศึกษา ซึ่งมีความแตกต่างกันถึง 4.68, 9.54 และ 2.58 เปอร์เซ็นต์ (คิดเป็นร้อยละ 17.3, 31.7 และ 10.6) ในขณะที่ Rengsirikul et al. (2013) ได้ศึกษาหญ้าหลายฤดูทั้งหมด 8 ชนิด พบว่า มีปริมาณลิกนินน้อยกว่าที่ผู้วิจัยศึกษา คือ มีลิกนินอยู่ในช่วง 8-12 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีความแตกต่างกันประมาณ 12-16 เปอร์เซ็นต์ (คิดเป็นร้อยละ 57.1-72.7)

ดังนั้นเมื่อพิจารณาองค์ประกอบทางชีวเคมีข้างต้น จะเห็นได้ว่าหญ้าที่เหมาะสมสำหรับเป็น ชีวมวลทางเลือก คือ หญ้าซีตาเรียสเปลนดา (*Setaria sphacelata* cv. Splenda (SS)) ที่เมื่อพิจารณา ปริมาณลิกนินแล้ว พบว่ามีปริมาณลิกนินที่สูง ซึ่งมีแนวโน้มเดียวกับค่าความร้อนสูง ที่แสดงดังตาราง 18 ในผลการศึกษาหัวข้อข้างต้นที่กล่าวมา เนื่องจากลิกนินมีบทบาทสำคัญสำหรับค่าความร้อนของ ชีวมวล โดยหญ้าที่มีความโดดเด่นมากที่สุดในด้านชีวเคมี



**ภาพประกอบ 39** องค์ประกอบเยื่อใยของหญ้าหลายฤดู

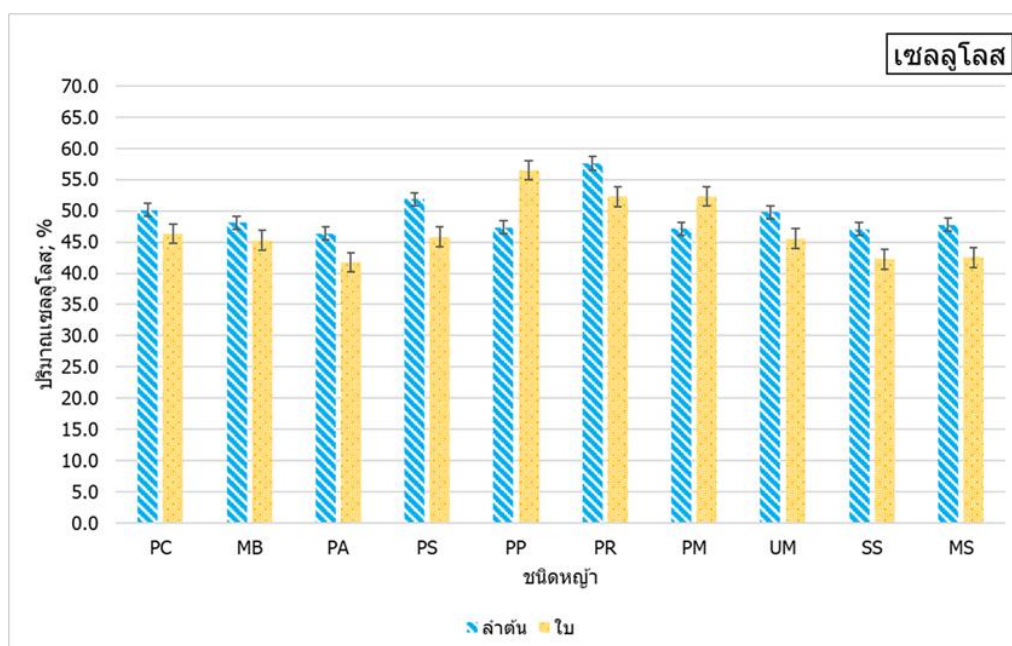
เมื่อพิจารณาสัดส่วนของใบและต้นของหญ้าหลายฤดูทั้ง 10 ชนิด พบว่า ส่วนของลำต้นและใบ แสดงองค์ประกอบเยื่อใยที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับสัดส่วนของลำต้นและใบ (ตาราง 13) ซึ่งประกอบไปด้วยเซลลูโลส (Cellulose) เฮมิเซลลูโลส (Hemicelluloses) ลิกนิน (Lignin) และปริมาณเถ้า ที่จะแสดงผลดังตาราง 23 และภาพประกอบ 40-43

จากผลการทดลองวิเคราะห์เยื่อใยของหญ้าหลายฤดูในส่วนลำต้นและใบ จะเห็นได้ว่า เฮมิเซลลูโลสและเซลลูโลสในส่วนลำต้นจะมีมากกว่าในส่วนใบ (ภาพประกอบ 40-41) ยกเว้นหญ้าเนเปียร์ธรรมดา (*Pennisetum purpureum*; PP) และหญ้าเนเปียร์แคระ (*Pennisetum purpureum* (Mott); PM) ที่มีในส่วนใบมากกว่าในส่วนลำต้น และเมื่อเมื่อวิเคราะห์ความแปรปรวน (T-test) ของค่าเฉลี่ยค่าความร้อน พบว่า ส่วนลำต้นและใบของหญ้าหลายฤดูทั้ง 10 ชนิดมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % (ตาราง 23) ซึ่งพบว่า หญ้าซีตาเรียสเปลนดา (*Setaria sphacelata* cv. Splenda (SS)) ในสัดส่วนของใบและต้น มีปริมาณลิกนินที่สูงที่สุด คือ ร้อยละ 20.55 และ 22.31 ตามลำดับ

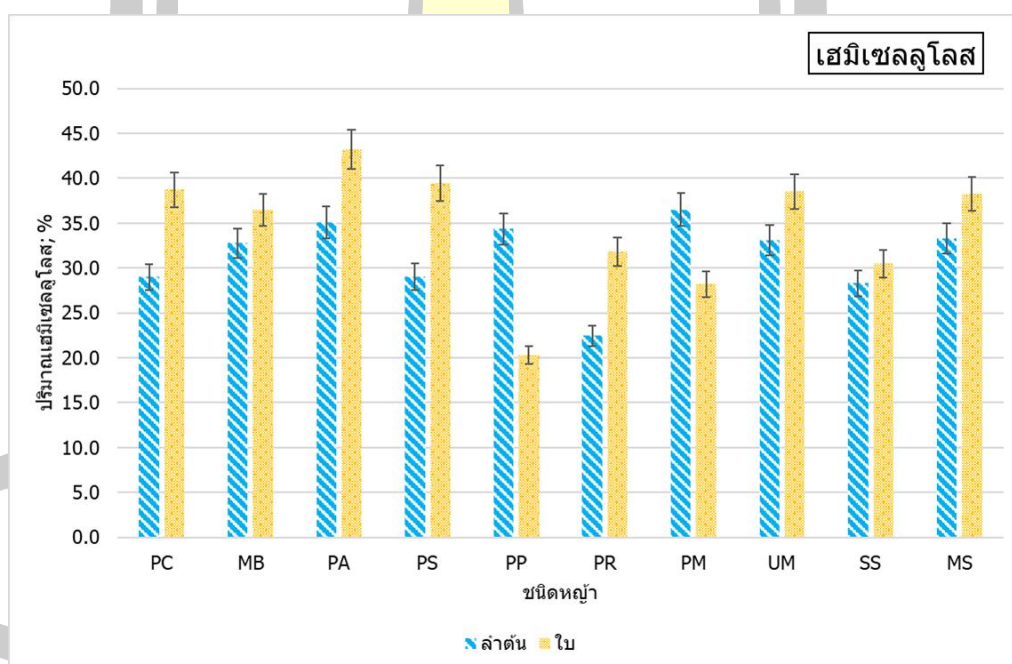
ตาราง 23 องค์ประกอบเยื่อใยในส่วนลำต้นและใบของหญ้าหลายฤดู

| ส่วน | ชนิด | องค์ประกอบเยื่อใย (wt. %) |                       |                     |                   |
|------|------|---------------------------|-----------------------|---------------------|-------------------|
|      |      | เฮมิเซลลูโลส <sup>a</sup> | เซลลูโลส <sup>a</sup> | ลิกนิน <sup>a</sup> | เถ้า <sup>a</sup> |
| ใบ   | PC   | 38.74 ± 0.21              | 46.33 ± 1.39          | 14.63 ± 1.24        | 0.31 ± 0.04       |
|      | MB   | 36.46 ± 1.00              | 45.29 ± 2.33          | 15.47 ± 1.27        | 2.78 ± 0.34       |
|      | PA   | 43.22 ± 0.84              | 41.72 ± 0.58          | 13.35 ± 0.39        | 1.71 ± 0.45       |
|      | PS   | 39.44 ± 0.05              | 45.83 ± 0.09          | 13.72 ± 0.09        | 1.46 ± 0.05       |
|      | PP   | 20.28 ± 0.14              | 56.52 ± 0.10          | 18.59 ± 0.15        | 4.61 ± 0.16       |
|      | PR   | 31.79 ± 0.16              | 52.26 ± 0.05          | 10.55 ± 0.10        | 5.40 ± 0.28       |
|      | PM   | 28.19 ± 0.14              | 52.32 ± 0.12          | 18.21 ± 0.09        | 1.28 ± 0.33       |
|      | UM   | 38.52 ± 0.17              | 45.56 ± 0.09          | 15.42 ± 0.10        | 0.48 ± 0.21       |
|      | SS   | 30.49 ± 0.22              | 42.26 ± 0.08          | 20.55 ± 0.07        | 6.70 ± 0.36       |
|      | MS   | 38.26 ± 0.12              | 42.55 ± 0.14          | 14.97 ± 0.14        | 4.21 ± 0.31       |
| ต้น  | PC   | 29.01 ± 2.61              | 50.13 ± 2.29          | 15.92 ± 1.47        | 4.94 ± 1.23       |
|      | MB   | 32.78 ± 0.54              | 47.43 ± 1.03          | 16.22 ± 0.36        | 3.57 ± 0.77       |
|      | PA   | 35.07 ± 0.74              | 46.37 ± 1.00          | 15.57 ± 0.75        | 2.99 ± 0.41       |
|      | PS   | 29.03 ± 0.02              | 51.88 ± 0.04          | 16.75 ± 0.08        | 2.34 ± 0.03       |
|      | PP   | 34.34 ± 0.06              | 47.37 ± 0.09          | 15.37 ± 0.10        | 2.92 ± 0.10       |
|      | PR   | 22.44 ± 0.22              | 57.60 ± 0.08          | 17.32 ± 0.11        | 2.64 ± 0.28       |
|      | PM   | 36.49 ± 0.18              | 47.12 ± 0.07          | 15.07 ± 0.11        | 1.32 ± 0.10       |
|      | UM   | 33.11 ± 0.09              | 49.79 ± 0.09          | 16.52 ± 0.12        | 0.58 ± 0.19       |
|      | SS   | 28.29 ± 0.14              | 47.08 ± 0.07          | 22.31 ± 0.12        | 2.32 ± 0.21       |
|      | MS   | 33.29 ± 0.15              | 47.77 ± 0.07          | 13.45 ± 0.12        | 5.49 ± 0.19       |

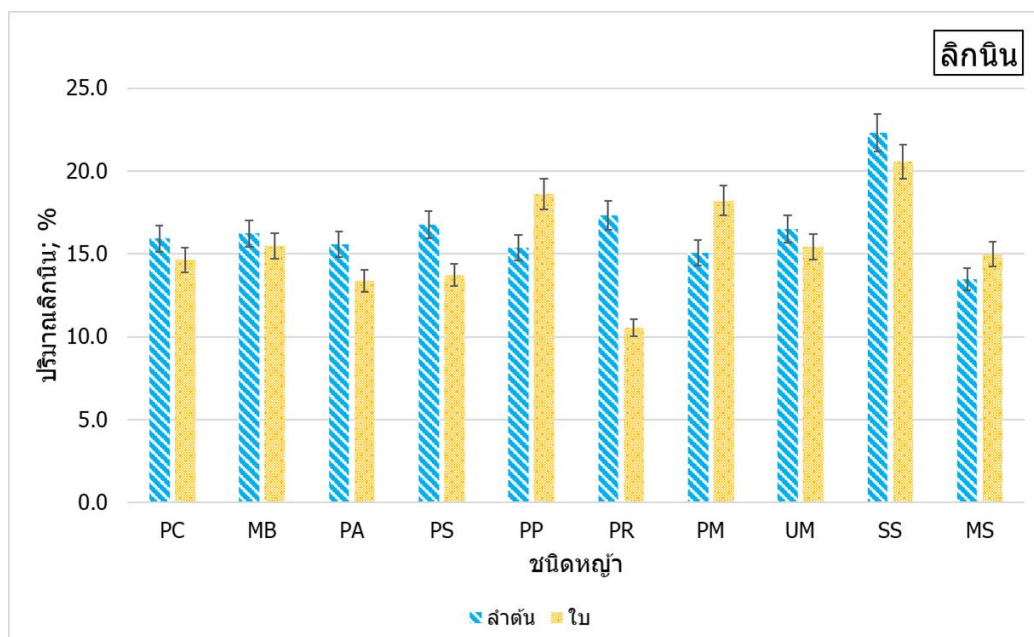
หมายเหตุ: a หมายถึง ส่วนลำต้นและใบทำให้เยื่อใยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95



ภาพประกอบ 40 ปริมาณเซลล์โลสในส่วนลำต้นและใบของหญ้าหลายฤดู



ภาพประกอบ 41 ปริมาณเฮมิเซลล์โลสในส่วนลำต้นและใบของหญ้าหลายฤดู



ภาพประกอบ 42 ปริมาณเล็กนินของหญ้าหลายฤดู

จากการศึกษาคุณสมบัติของหญ้าหลายฤดูในด้านกายภาพ ชีวเคมี และพลังงานความร้อนพบว่า หญ้าหลายฤดูสามารถเป็นชีวมวลทางเลือกสำหรับผลิตพลังงานได้ ซึ่งหญ้าที่มีศักยภาพสูงที่สุดคือ หญ้าซีตาเรียสเปลดดา (*Setaria sphacelata* cv. Splenda; SS) รองลงมา คือ หญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 (*Pennisetum purpureum* x *P. glaucum* Pakchong 1; PC) และ หญ้ากินนีมอมบาซ่า (*Panicum maximum* cv. Mombaza; MB) อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาปริมาณของผลผลิตชีวมวลต่อพื้นที่ พบว่า หญ้าซีตาเรียสเปลดดา (*Setaria sphacelata* cv. Splenda; SS) มีปริมาณผลผลิต 0.5 ตัน/ไร่/ปี (น้ำหนักแห้ง) ซึ่งมีปริมาณชีวมวลที่น้อยมาก และทำให้มีปริมาณไม่เพียงพอสำหรับการผลิตเป็นเชื้อเพลิงทางเลือกให้กับโรงไฟฟ้าในระดับภาคอุตสาหกรรม เมื่อเทียบกับหญ้าหลายฤดูอีก 3 ชนิด ดังนั้นหญ้าหลายฤดูที่เหมาะสมสำหรับเป็นชีวมวลทางเลือกในการผลิตเป็นเชื้อเพลิง คือ หญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 (*Pennisetum purpureum* x *P. glaucum* Pakchong 1; PC) มีปริมาณผลผลิต 8 ตัน/ไร่/ปี (น้ำหนักแห้ง), หญ้าอะตราตัม (*Paspalum atratum*; PA) มีปริมาณผลผลิต 3 ตัน/ไร่/ปี (น้ำหนักแห้ง) และ หญ้ากินนีมอมบาซ่า (*Panicum maximum* cv. Mombaza; MB) มีปริมาณผลผลิต 6 ตัน/ไร่/ปี (น้ำหนักแห้ง) (ตาราง 24)

ตาราง 24 ปริมาณผลผลิตชีวมวลน้ำหนักรากแห้งของหญ้าหลายฤดู

| ชนิด | ปริมาณผลผลิตน้ำหนักรากแห้ง<br>(ตัน/ไร่/ปี) |
|------|--------------------------------------------|
| PC   | 8.0                                        |
| MB   | 6.0                                        |
| PA   | 3                                          |
| PS   | 6.1                                        |
| PP   | 5.9                                        |
| PR   | 6.0                                        |
| PM   | 2.1                                        |
| UM   | 1.5                                        |
| SS   | 0.5                                        |
| MS   | 2.5                                        |

#### 4.1.4 คุณสมบัติทางเคมีของหญ้าหลายฤดู

คุณสมบัติทางเคมี เป็นการวิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุ อันประกอบไปด้วย คาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน ไนโตรเจน และซิลเฟอร์ ซึ่งธาตุดังกล่าวเป็นองค์ประกอบที่สำคัญ และมีผลต่อค่าความร้อน ได้แก่ คาร์บอน และไฮโดรเจน เนื่องจากคาร์บอนและไฮโดรเจนเป็นตัวทำปฏิกิริยากับออกซิเจนแล้วเกิดเป็น คาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ และพลังงานในกระบวนการเผาไหม้สมบูรณ์ (กฤษกร รับสมบัติ, 2555) และออกซิเจน ส่งผลกระทบต่อสมบัติของการเผาไหม้โดยมวลรวมของเชื้อเพลิงจะลดลงในขณะที่การเผาไหม้เกิดการเปลี่ยนแปลง ซึ่งสามารถอธิบายได้จากตราส่วนของออกซิเจนต่อคาร์บอน (ในสัดส่วนที่น้อยกว่า) ของเชื้อเพลิงที่เพิ่มขึ้น และในแง่ของมลพิษที่เกิดจากการเผาไหม้จะพิจารณาธาตุได้แก่ ไนโตรเจน และซิลเฟอร์ มีผลต่อการปล่อยก๊าซที่เป็นอันตราย ซึ่งถ้ามีปริมาณมากเกินไปที่กำหนดจะส่งผลต่อปฏิกิริยาการเผาไหม้ และปริมาณของก๊าซที่เป็นมลพิษทางอากาศ โดยผู้วิจัยได้ทำการทดลองหาองค์ประกอบทางเคมี โดยวิธีการวิเคราะห์แบบละเอียด (Ultimate Analysis) ของหญ้าหลายฤดู ได้แก่ หญ้าอะตราดัม หญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 และหญ้างินนิมอมบาซ่า ด้วยเครื่อง CHNS/O Analyser โดยผลการวิเคราะห์ธาตุจะมีค่าที่แตกต่างกัน ซึ่งแสดงผลการทดลองดังตาราง 25 และภาพประกอบ 43

ตาราง 25 องค์ประกอบทางเคมี (Ultimate) ของหญ้าหลายฤดู

| ชนิดหญ้า                                                                                        | องค์ประกอบทางเคมี (%) |                |                 |                |                |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|----------------|-----------------|----------------|----------------|
|                                                                                                 | C <sup>a</sup>        | H <sup>a</sup> | O <sup>a</sup>  | N <sup>a</sup> | S <sup>a</sup> |
| หญ้าอะตราตัม<br>( <i>Paspalum atratum</i> ; PA)                                                 | 42.52<br>(0.40)       | 5.41<br>(0.03) | 49.82<br>(0.41) | 0.88<br>(0.07) | 1.39<br>(0.05) |
| หญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1<br>( <i>Pennisetum purpureum</i> x <i>P. glaucum</i><br>(Pakchong 1); PC) | 41.78<br>(0.48)       | 5.04<br>(0.19) | 50.89<br>(0.61) | 0.96<br>(0.08) | 1.33<br>(0.05) |
| หญ้างินนิมอมบาซ่า<br>( <i>Panicum maximum</i> (Mombaza); MB)                                    | 44.29<br>(0.46)       | 5.28<br>(0.38) | 47.60<br>(1.34) | 0.90<br>(0.12) | 1.93<br>(0.95) |
| ถ่านหิน (Coal)*                                                                                 | -                     | -              | -               | 1.10           | 2.00           |
| แกลบ**                                                                                          | 38.3                  | 4.36           | 36.45           | 0.83           | 0.06           |
| เศษไม้**                                                                                        | 48.13                 | 5.87           | 42.46           | 1.45           | 0              |

หมายเหตุ: ( ) คือ ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.)

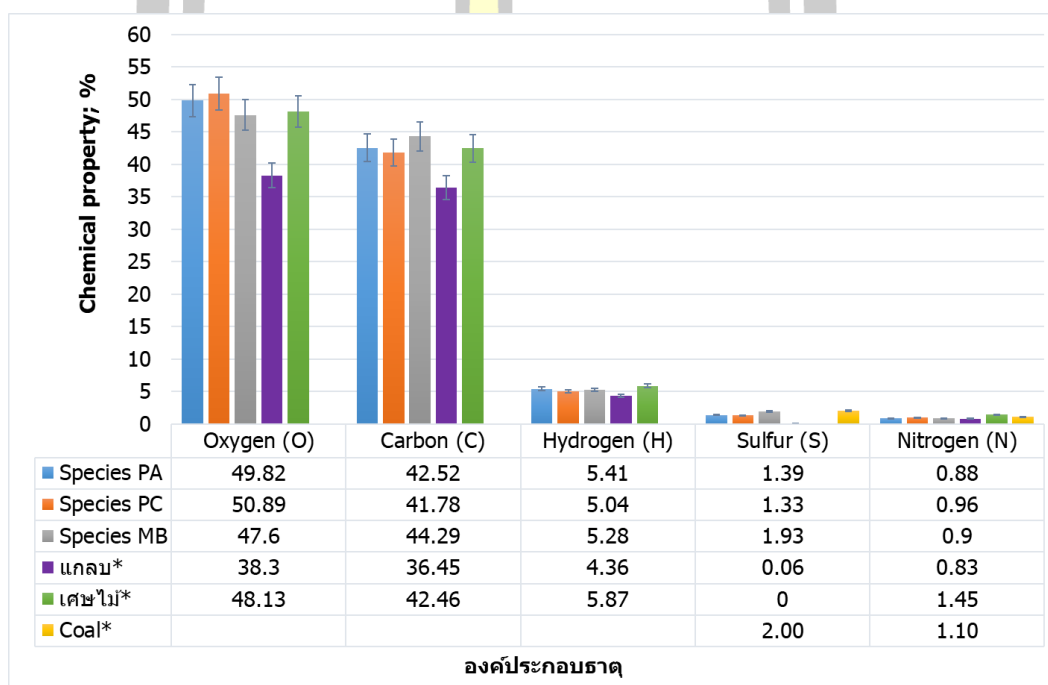
a หมายถึง ชนิดของหญ้าหลายฤดูทำให้องค์ประกอบธาตุของหญ้ามีความแตกต่างกัน  
อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 (ANOVA)

ที่มา: \*กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2559

\*\*Gaur and Reed, 1998

จากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุของหญ้าหลายฤดูทั้ง 3 ชนิด พบว่า องค์ประกอบธาตุมีค่าใกล้เคียงกัน ส่งผลให้การใช้เชื้อเพลิงหลายชนิดในการผลิตกระแสไฟฟ้าสามารถทำได้ง่าย เนื่องจากอัตราส่วนปริมาณอากาศต่อเชื้อเพลิงที่ทำให้เกิดการสันดาปที่ดีที่สุดของเชื้อเพลิงทั้ง 3 ชนิด มีค่าใกล้เคียงกัน เมื่อมีการปรับเปลี่ยนเชื้อเพลิงก็สามารถทำได้ง่าย และประสิทธิภาพการเผาไหม้ไม่เปลี่ยนแปลง โดย ออกซิเจนพบในปริมาณที่มากที่สุด คือร้อยละ 47.60 – 50.98 รองลงมาคือ คาร์บอน และไฮโดรเจน ที่พบในปริมาณร้อยละ 41.78-44.29 และ 5.04-5.41 ตามลำดับ อีกทั้ง ปริมาณมลพิษที่เกิดขึ้นจากหญ้าหลายฤดูเกิดขึ้นในปริมาณที่ใกล้เคียงกัน โดย หญ้างินนิมอมบาซ่า (*Panicum maximum* (Mombaza); MB) ปริมาณซัลเฟอร์ร้อยละ 1.93 ซึ่งมีมากกว่า หญ้าอะตราตัม (*Paspalum atratum*; PA) และ หญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 (*Pennisetum purpureum* x *P. glaucum* (Pakchong 1); PC) ที่มีปริมาณซัลเฟอร์ร้อยละ 1.39 และ 1.33 ตามลำดับ และมีปริมาณไนโตรเจนที่ต่ำ อยู่ในช่วงร้อยละ 0.88 - 0.96

จากภาพประกอบ 43 เป็นการเปรียบเทียบองค์ประกอบธาตุ ไนโตรเจนและซัลเฟอร์ที่ก่อให้เกิดมลพิษของหญ้าหลายฤดูทั้ง 3 ชนิดกับเชื้อเพลิงฟอสซิล คือ ถ่านหิน (Coal) จะเห็นได้ว่าหญ้าหลายฤดูทั้งสามชนิดมีปริมาณของไนโตรเจน และซัลเฟอร์ที่ต่ำกว่า ในขณะที่ถ่านหิน (Coal) มีปริมาณไนโตรเจนถึงร้อยละ 1.10 และซัลเฟอร์ร้อยละ 2.00 (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2559) ซึ่งเท่ากับว่า ถ่านหิน (Coal) มีโอกาสการเกิดมลพิษที่มากกว่าหญ้าหลายฤดู และเมื่อเปรียบเทียบกับแกลบและเศษไม้ พบว่า หญ้ามีองค์ประกอบธาตุที่ใกล้เคียงกัน (ตาราง 26) ดังนั้นจึงทำให้หญ้าทั้ง 3 ชนิดดังกล่าวมีคุณสมบัติที่สามารถเป็นวัสดุทางเลือกสำหรับผลิตเป็นเชื้อเพลิงให้โรงไฟฟ้าชีวมวลได้



ภาพประกอบ 43 องค์ประกอบทางเคมีของหญ้าหลายฤดู

หมายเหตุ: \* กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2559

เมื่อเปรียบเทียบหญ้าทั้ง 3 ชนิดดังกล่าวกับชีวมวลหญ้ากลุ่มอื่นๆ (ตาราง 26) พบว่าหญ้าหลายฤดูทั้ง 3 ชนิดที่ศึกษาในงานวิจัยนี้มีปริมาณซัลเฟอร์สูงกว่าชีวมวลจากหญ้าชนิดอื่นๆ ประมาณ 4-6 เท่า เนื่องจากหญ้าดังกล่าวที่ใช้ในการศึกษามีอายุมากกว่า 120 วัน โดยปริมาณซัลเฟอร์จะมีการสะสมในพืชที่สูงขึ้น เมื่ออายุการตัดเพิ่มขึ้น (จุฑามาศ ช่างประดิษฐ์ และคณะ, 2561) และหญ้าที่มีอายุมากจะมีปริมาณโปรตีนละไขมันสูง ทำให้มีการนำซัลเฟอร์มาใช้ในการสร้างโปรตีนและไขมัน ทำให้เกิดการสะสมของซัลเฟอร์มากขึ้น (จริยา เกตมะ และ กฤษณา ศรีสรรพกิจ, 2539) ซึ่งจะเห็นได้ว่าปริมาณซัลเฟอร์ที่เกิดขึ้นจากหญ้านั้นจะก่อให้เกิดมลพิษในปริมาณมากหากนำไปเป็น

เชื้อเพลิงในการเผา อย่างไรก็ตามเมื่อเทียบกับชีวมวลชนิดอื่นๆ หญ้าหลายฤดูยังถือว่ามามีปริมาณซัลเฟอร์ที่ใกล้เคียงกัน

ตาราง 26 องค์ประกอบธาตุของหญ้าหลายฤดูชนิดอื่นๆ

| ชนิดหญ้า          | องค์ประกอบทางเคมี (%) |     |      |     |     | ที่มา                          |
|-------------------|-----------------------|-----|------|-----|-----|--------------------------------|
|                   | C                     | H   | O    | N   | S   |                                |
| เนเปียร์ธรรมดา    | 45.1                  | 5.9 | 47.2 | 1.5 | 0.4 | Mohammed et al., 2015          |
| เนเปียร์แคะ       | 39.0                  | 4.5 | 54.3 | 2.0 | 0.2 | Rengsirikul et al., 2013       |
| เนเปียร์ยักษ์     | 39.8                  | 4.7 | 54.2 | 1.1 | 0.2 | Rengsirikul et al., 2013       |
| เนเปียร์ปากช่อง 1 | 42.4                  | 5.9 | 45.3 | 1.7 | 0.1 | Wongwatanapaiboon et al., 2012 |
| หญ้าหวาน          | 48.3                  | 1.2 | 49.6 | 0.7 | 0.2 | Qian et al., 2013              |
| เนเปียร์ไต้หวัน   | 40.8                  | 4.8 | 53.1 | 1.1 | 0.2 | Rengsirikul et al., 2013       |

ดังนั้นจากการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพ เคมี ชีวเคมี และคุณสมบัติทางพลังงานข้างต้นจะเห็นได้ว่าหญ้าหลายฤดูเป็นชีวมวลทางเลือกที่ดีและวัตถุดิบในการผลิตพลังงาน มีศักยภาพในทุกๆ ด้านที่ดี การศึกษาครั้งนี้ชนิดหญ้า 3 ชนิด ได้แก่ หญ้าอะตราตัม (*Paspalum atratum*; PA), หญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 (*Pennisetum purpureum* x *P. glaucum* (Pakchong 1); PC) และหญ้ากินนีมอมบาซ่า (*Panicum maximum* (Mombaza); MB) เป็นหญ้าที่ดีที่สุดที่จะใช้เป็นวัตถุดิบทางเลือกสำหรับผลิตเป็นเชื้อเพลิง เนื่องจากหญ้าชนิดดังกล่าวมีค่าความร้อนที่สูงกว่าเชื้อเพลิงปัจจุบันที่โรงงานใช้ และคุณสมบัติอื่น ๆ ที่ดีสำหรับชีวมวล โดยเฉพาะอย่างยิ่งหญ้าหลายฤดู มีปริมาณไนโตรเจนต่ำและซัลเฟอร์ต่ำ ที่จะส่งผลต่อมลพิษที่เกิดขึ้นลดลงด้วย และมีผลผลิตชีวมวลตั้งแต่ 3-8 ตัน/ไร่/ปี (น้ำหนักแห้ง) ซึ่งผลที่ได้จากการศึกษาในส่วนนี้จะใช้หญ้าหลายฤดูชนิดดังกล่าวในการศึกษากระบวนการอัดขึ้นรูปและการทดสอบปัจจัยความคงทนในหัวข้อถัดไป

#### 4.2 กระบวนการอัดขึ้นรูปเชื้อเพลิงจากหญ้าหลายฤดู

จากการทบทวนวรรณกรรมในบทที่ 2 ทำให้ทราบว่าปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการให้พลังงาน ความร้อนและความหนาแน่นพลังงานของเชื้อเพลิงมีอยู่ 3 ปัจจัย ได้แก่ ปริมาณตัวประสาน กำลังอัดในการขึ้นรูป และรูปทรงของก้อนของเชื้อเพลิง ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้นำปัจจัยดังกล่าวมาทำการศึกษากระบวนการอัดขึ้นรูปก้อนเชื้อเพลิงภายใต้เงื่อนไขที่กำหนด คือ อัดขึ้นรูปเชื้อเพลิง 2 ขนาด ได้แก่ เชื้อเพลิงอัดก้อน (briquettes) และเชื้อเพลิงอัดเม็ด (pellets) จากหญ้าหลายฤดู โดยผสม หญ้าหลายฤดู : ตัวประสาน (แป้งมันสำปะหลัง) ทั้งหมด 5 อัตราส่วน ได้แก่ 60:40, 70:30, 80:20,

90:10, และ 100:0 และใช้กำลังอัด 3 กำลังอัด ได้แก่ 1 MPa, 2 MPa และ 3 MPa เพื่อหาปัจจัยที่มีความเหมาะสมสำหรับการขึ้นรูปก้อนเชื้อเพลิงให้ได้พลังงานความร้อนเทียบเท่ากับเชื้อเพลิงปัจจุบันที่โรงไฟฟ้าชีวมวลขนาด 9.9 MW ใช้ในการผลิตพลังงานไฟฟ้า ซึ่งแบ่งผลการศึกษาออกเป็นดังต่อไปนี้

- 1) ผลการศึกษาความหนาแน่นของเชื้อเพลิง
- 2) ผลการทดสอบความคงทนของเชื้อเพลิง
- 3) ปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความร้อนและความหนาแน่นพลังงาน
  - 3.1) ปัจจัยด้านตัวประสานของเชื้อเพลิง
  - 3.2) ปัจจัยด้านกำลังอัดของเชื้อเพลิง
  - 3.3) ปัจจัยด้านขนาดรูปทรงของเชื้อเพลิง

#### 4.2.1 ผลการศึกษาความหนาแน่นของเชื้อเพลิง

เป็นที่ทราบกันแล้วว่าความหนาแน่นของเชื้อเพลิงอัดแข็งมีความสำคัญต่อการขนส่งและการจัดการเชื้อเพลิงอัดแข็ง ชีวมวลที่มีความหนาแน่นต่ำส่งผลให้การขนส่งและการจัดเก็บไม่มีประสิทธิภาพในเรื่องของน้ำหนักเชื้อเพลิง ปริมาตร และปริมาณพลังงาน จากการศึกษาความหนาแน่นของก้อนเชื้อเพลิง งานวิจัยได้ศึกษาความหนาแน่นของเชื้อเพลิงอยู่ 2 รูปแบบ คือ ความหนาแน่นรวม (Bulk Density) และความหนาแน่นก้อน (Pellets and Briquettes Density) พบว่าความหนาแน่นรวมมีความสัมพันธ์กับความหนาแน่นพลังงาน โดยความหนาแน่นรวมสูงจะทำให้ความหนาแน่นพลังงานเพิ่มสูงขึ้น จากการศึกษาความหนาแน่นของเชื้อเพลิงอัดแข็งสามารถแสดงผลการศึกษาได้ดังหัวข้อต่อไปนี้

##### 1) ความหนาแน่นรวมของเชื้อเพลิง (Bulk Density)

ความหนาแน่นรวมของเชื้อเพลิงเป็นปัจจัยสำคัญในแง่ของการขนส่งและการเก็บรักษา การอัดจะเป็นการเพิ่มความหนาแน่นซึ่งสามารถลดปัญหาค่าขนส่งและขนาดของที่เก็บรักษาไว้ได้ รวมถึงเพิ่มการขนส่งพลังงานของเชื้อเพลิงได้เพิ่มมากขึ้น โดยมีสมมุติฐานที่ว่า วัสดุที่มีความหนาแน่นสูงจะมีความคงทนสูง วัสดุยึดเกาะกันได้ดีไม่แตกร่วนง่าย ซึ่งจะศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อความหนาแน่นคือ รูปทรงเชื้อเพลิง กำลังอัดการขึ้นรูป และอัตราส่วนตัวประสานของเชื้อเพลิง โดยเชื้อเพลิงที่ไม่มีตัวประสานเป็นเชื้อเพลิงที่ไม่สามารถขึ้นรูปได้ (ภาพประกอบ 44-45)

จากการวิเคราะห์ความหนาแน่นรวมของเชื้อเพลิงอัดแข็งโดยการนำเชื้อเพลิงหลังจากการขึ้นรูปและผ่านการลดความชื้นเรียบร้อยแล้วมาหาความหนาแน่น ซึ่งจะเปรียบเทียบรูปทรงเชื้อเพลิงสองรูปทรงระหว่างเชื้อเพลิงอัดเม็ด (pellets) และเชื้อเพลิงอัดก้อน (briquettes) เปรียบเทียบกำลังอัดขึ้นรูปของก้อนเชื้อเพลิงคือ 1 MPa, 2 MPa และ 3 MPa รวมทั้งเปรียบเทียบ

เชื้อเพลิงที่ใช้ตัวประสานที่แตกต่างกันในอัตราส่วน หย้าต่อแป้งมันสำปะหลัง 90:10, 80:20, 70:30, และ 60:40 ร้อยละโดยน้ำหนัก ซึ่งจะแสดงผลการวิเคราะห์ความหนาแน่นดังตาราง 27



ภาพประกอบ 44 เชื้อเพลิง pellets อัตราส่วน 100:0 ไม่สามารถขึ้นรูปได้



ภาพประกอบ 45 เชื้อเพลิง briquettes อัตราส่วน 100:0 ไม่สามารถขึ้นรูปได้

ตาราง 27 ความหนาแน่นรวม (Bulk Density) ของเชื้อเพลิงอัดแข็ง

| ชนิด | อัตราส่วน          | ความหนาแน่นรวม (kg/m <sup>3</sup> ) |                    |                    |                    |
|------|--------------------|-------------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
|      |                    | P <sup>b</sup>                      | B-1 <sup>b,c</sup> | B-2 <sup>b,c</sup> | B-3 <sup>b,c</sup> |
| MB   | 60:40 <sup>a</sup> | 307.21±0.87                         | 199.47±0.24        | 237.90±0.56        | N/A                |
|      | 70:30 <sup>a</sup> | 273.70±2.16                         | 187.19±0.70        | 209.93±0.16        | 247.12±0.23        |
|      | 80:20 <sup>a</sup> | 182.43±3.59                         | 127.94±0.47        | 167.15±0.18        | 187.40±0.16        |
|      | 90:10 <sup>a</sup> | 145.24±2.07                         | 79.41±0.27         | 96.34±0.16         | 109.19±0.48        |
|      | 100:0 <sup>a</sup> | N/A                                 | N/A                | N/A                | N/A                |
| PA   | 60:40 <sup>a</sup> | 308.45±1.12                         | 215.48±0.44        | 246.87±0.18        | N/A                |
|      | 70:30 <sup>a</sup> | 271.73±0.24                         | 183.10±1.19        | 211.38±0.23        | 242.46±0.23        |
|      | 80:20 <sup>a</sup> | 156.43±0.63                         | 127.94±0.47        | 170.57±0.24        | 201.59±0.32        |
|      | 90:10 <sup>a</sup> | 143.69±0.23                         | 62.99±0.09         | 83.19±0.18         | 121.00±0.09        |
|      | 100:0 <sup>a</sup> | N/A                                 | N/A                | N/A                | N/A                |
| PC   | 60:40 <sup>a</sup> | 300.48±3.44                         | 224.16±0.25        | 237.33±3.69        | N/A                |
|      | 70:30 <sup>a</sup> | 291.14±3.22                         | 186.89±0.66        | 208.33±0.32        | 234.28±0.09        |
|      | 80:20 <sup>a</sup> | 173.42±1.17                         | 149.43±0.13        | 165.13±0.50        | 194.55±0.16        |
|      | 90:10 <sup>a</sup> | 148.81±0.24                         | 61.20±0.00         | 81.22±0.55         | 105.46±0.09        |
|      | 100:0 <sup>a</sup> | N/A                                 | N/A                | N/A                | N/A                |

หมายเหตุ: N/A คือ not applicable (ไม่สามารถขึ้นรูปเชื้อเพลิงได้)

a หมายถึง อัตราส่วนของเชื้อเพลิงทำให้ความหนาแน่นรวมของเชื้อเพลิงมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 (ANOVA)

b หมายถึง รูปทรงของเชื้อเพลิงทำให้ความหนาแน่นรวมของเชื้อเพลิงมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 (T-test) โดยการวิเคราะห์เปรียบเทียบเป็นคู่ คือ P กับ B-1, P กับ B-2 และ P กับ B-3

c หมายถึง กำลังอัดของหญ้าหลายฤดูทำให้ความหนาแน่นรวมของเชื้อเพลิงมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 (ANOVA)

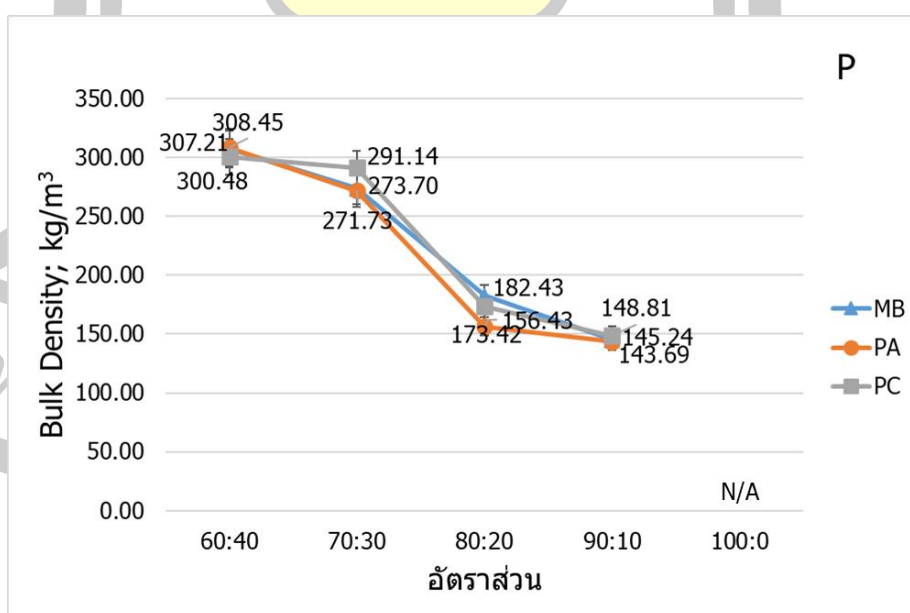
จากการศึกษาความหนาแน่นรวมของเชื้อเพลิงโดยเปรียบเทียบรูปทรง 2 แบบ คือ เชื้อเพลิง pellets และเชื้อเพลิง briquettes พบว่า pellets แสดงค่าความหนาแน่นรวมที่สูงกว่า briquettes โดยจากการวิเคราะห์ความแปรปรวน (T-test) ของค่าเฉลี่ยความหนาแน่นรวม พบว่า รูปทรง pellets และ briquettes มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 (ตาราง 30) และจากการเปรียบเทียบเชื้อเพลิง pellets และ briquettes ในแต่ละกำลังอัดจะเห็นได้ว่า เชื้อเพลิง pellets แสดงค่าความหนาแน่นที่สูงกว่า โดยที่อัตราส่วน 60:40 จะมีความหนาแน่นรวมสูงที่สุด อยู่ในช่วง 300.0–310.0 kg/m<sup>3</sup> เมื่อเปรียบเทียบในอัตราส่วนเดียวกันของ briquettes ที่กำลังอัด 1 และ 2 MPa จะมีความหนาแน่นรวมสูงที่สุดอยู่ในช่วง 199.0–224.0 kg/m<sup>3</sup> ในขณะที่กำลังอัด 3 MPa ไม่สามารถขึ้นรูปเชื้อเพลิงได้

จากการอัดขึ้นรูปจะเห็นได้ว่าเชื้อเพลิงที่ไม่ใช้ตัวประสานไม่สามารถอัดขึ้นรูปได้ ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงศึกษาปัจจัยด้านปริมาณตัวประสานเพื่อให้เชื้อเพลิงมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น โดยใช้หญ้า ผสมกับตัวประสาน คือ แป้งมันสำปะหลัง ที่มีคุณสมบัติในการเป็นตัวประสานทำให้เชื้อเพลิงยึดเกาะ และจับตัวกับได้ดีขึ้น เพื่อให้ได้เชื้อเพลิงที่มีความคงทนต่อการขนส่งและการเก็บรักษา โดยการผสมใน อัตราส่วนที่ต่างกันคือ หญ้าต่อแป้งมันสำปะหลัง 90:10, 80:20, 70:30, และ 60:40 ร้อยละโดยน้ำหนัก ซึ่งจากผลการศึกษา พบว่า เชื้อเพลิงในแต่ละอัตราส่วนมีค่าความหนาแน่นที่แตกต่างกัน เมื่อมีการเพิ่ม ปริมาณตัวประสานจะทำให้เชื้อเพลิงอัดแข็งมีความหนาแน่นเพิ่มมากขึ้น โดย pellets แสดงค่าความ หนาแน่นสูงสุดในหญ้ากินนีอมบาช่า (*Panicum maximum* (Mombaza); MB) เท่ากับ 145.2, 182.4, 273.7 และ 307.2 kg/m<sup>3</sup> (ภาพประกอบ 46) และ briquettes แสดงค่าความหนาแน่นมีลักษณะ แนวโน้มเดียวกัน คือ เมื่อตัวประสานเพิ่มขึ้นค่าความหนาแน่นก็เพิ่มสูงขึ้นเช่นเดียวกัน (ภาพประกอบ 47-49)

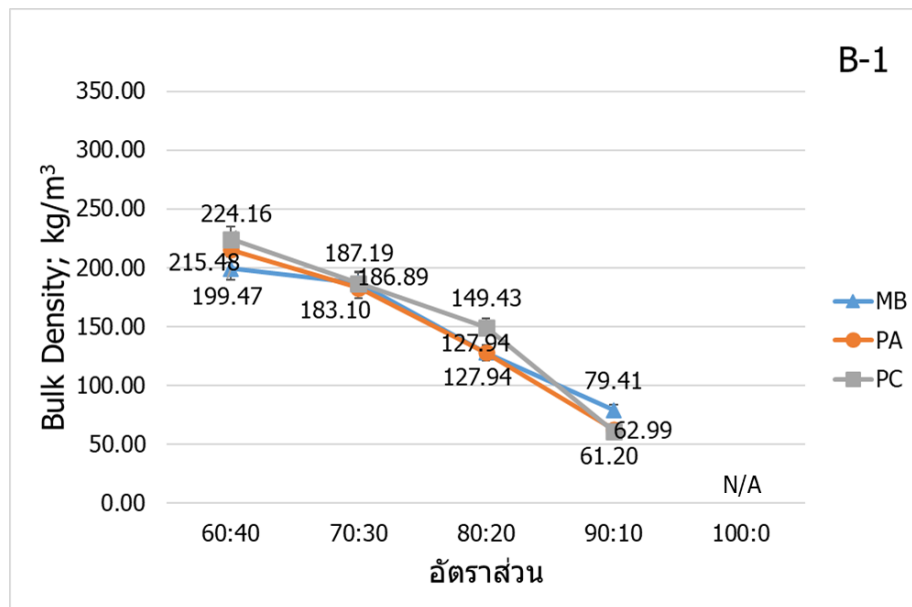
เมื่อนำผลการทดลองไปวิเคราะห์หาความแปรปรวน (ANOVA) ของค่าเฉลี่ยความ หนาแน่นรวม พบว่า ปริมาณของตัวประสานมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ซึ่งหมายความว่าเชื้อเพลิงที่อัตราส่วน 60:40 จะมีความหนาแน่นมากที่สุด แต่อย่างไรก็ตาม การ เพิ่มตัวปริมาณประสานให้สูงขึ้นในอัตราส่วน 60:40 ร้อยละโดยน้ำหนัก นั้นก็ทำให้เชื้อเพลิงมีความ หนาแน่นเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยจากการใช้ตัวประสานในอัตราส่วน 70:30 ร้อยละโดยน้ำหนัก ดังนั้นหาก ต้องการเชื้อเพลิงที่มีความหนาแน่นสูงจึงไม่จำเป็นต้องเพิ่มปริมาณตัวประสานถึง 40% เพราะการใช้ ปริมาณตัวประสานที่มากขึ้นก็จะเป็นการเพิ่มค่าใช้จ่ายในการผลิตให้ที่สูงขึ้นด้วยเช่นกัน และเมื่อ เปรียบเทียบกับความหนาแน่นรวมของวัสดุที่โรงไฟฟ้าใช้ คือ แกลบ (120 kg/m<sup>3</sup>) (Shojaeiarani et al., 2019) และไม้สับ (230 kg/m<sup>3</sup>) หญ้าหลายฤดูยังมีความหนาแน่นรวมสูงกว่าแกลบถึง 170-180 kg/m<sup>3</sup> (แตกต่างกันร้อยละ 56–60) และสูงกว่าไม้สับถึง 60–70 kg/m<sup>3</sup> (แตกต่างกันร้อยละ 20–23) ในขณะที่

เปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานของความหนาแน่นที่ถูกกำหนดไว้ที่  $600 \text{ kg/m}^3$  ที่ถูกระบุในมาตรฐานเชื้อเพลิงของสวีเดน SS 187178 และมาตรฐานอเมริกาที่กำหนดไว้ที่  $596.6\text{--}722.2 \text{ kg/m}^3$  ใน pellets

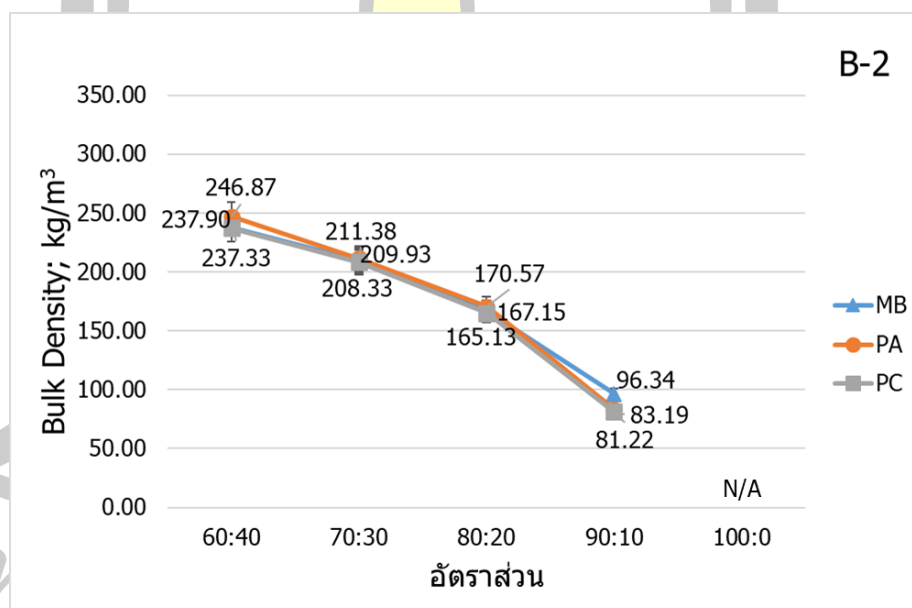
จากภาพประกอบ 47-49 จะเห็นได้ว่าอัตราส่วน 60:40 มีความหนาแน่นรวมสูงที่สุด โดยที่มีความหนาแน่นสูงที่สุดในกำลังอัด 2 MPa ถึง  $250 \text{ kg/m}^3$  ในหญ้าอะตราดัม (*Paspalum atratum*; PA) รองลงมาคือ หญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 (*Pennisetum purpureum* x *P. glaucum* (Pakchong 1); PC) และหญ้างินนิมอมบาซ่า (*Panicum maximum* (Mombaza); MB) ( $240 \text{ kg/m}^3$ ) และในอัตราส่วน 70:30 มีค่าความหนาแน่นสูง (ภาพประกอบ 50-52) เนื่องจากในอัตราส่วน 60:40 ที่กำลังอัด 3 MPa ไม่สามารถขึ้นรูปเชื้อเพลิงได้ (ตาราง 20) แต่จะเห็นได้ว่าที่กำลังอัด 3 MPa เชื้อเพลิงอัดก้อนในหญ้าแต่ละชนิด มีค่าความหนาแน่นใกล้เคียงกัน  $23\text{--}25 \text{ kg/m}^3$  ซึ่งแตกต่างจาก Gendek et al. (2018) ที่ทำการศึกษาจากเชื้อเพลิงอัดแข็งจากต้นสนที่มีความหนาแน่น  $933 \text{ kg/m}^3$ , แกลบและรำ  $380.4 \text{ kg/m}^3$  (Yank A. et al, 2016), และไม้  $450 \text{ kg/m}^3$  (Oberberger and Thek, 2004) แต่ก็ยังมีความหนาแน่นสูงกว่าชีวมวลอีกหลายชนิด ได้แก่ หญ้าหวาน ( $180 \text{ kg/m}^3$ ), พางข้าว ( $120 \text{ kg/m}^3$ ), ข้าวโพด ( $111 \text{ kg/m}^3$ ) และก้านทานตะวัน  $116.05 \text{ kg/m}^3$  (Mohammed et al., 2015; Shojaeiarani et al., 2019) อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานของความหนาแน่นที่ถูกกำหนดไว้ที่  $200 \text{ kg/m}^3$  ที่ถูกระบุในมาตรฐานเชื้อเพลิงอัดแข็ง (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2555) จะเห็นได้ว่าเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากหญ้ายังมีความหนาแน่นรวมที่สูงกว่ามาตรฐานกำหนด ซึ่งมีความเหมาะสมสำหรับเป็นชีวมวลทางเลือก อย่างไรก็ตามยังต้องพิจารณาปัจจัยอื่นๆ ร่วมด้วย



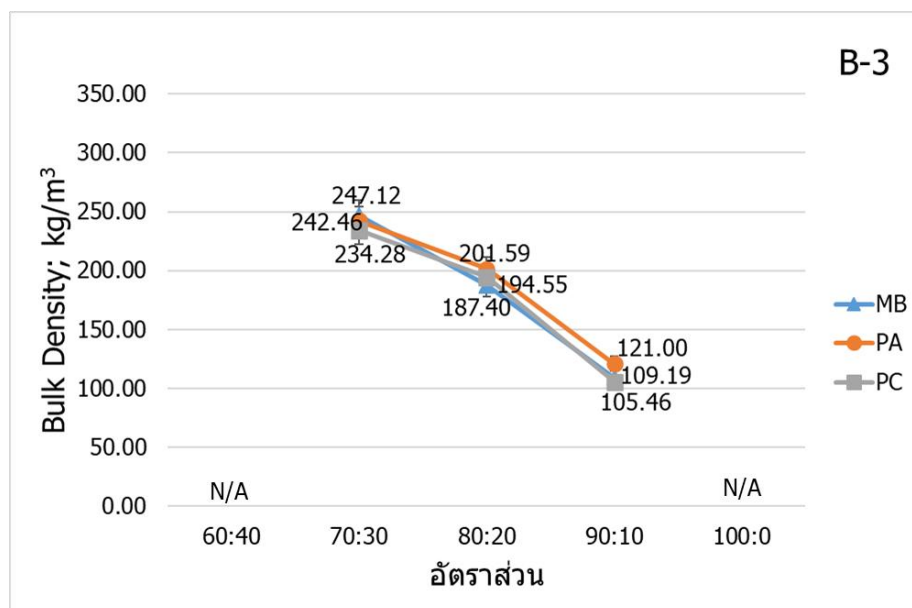
ภาพประกอบ 46 ความหนาแน่นรวมของเชื้อเพลิง pellets จากหญ้าหลายฤดู



ภาพประกอบ 47 ความหนาแน่นรวมของเชื้อเพลิง briquettes กำลังอัด 1 MPa



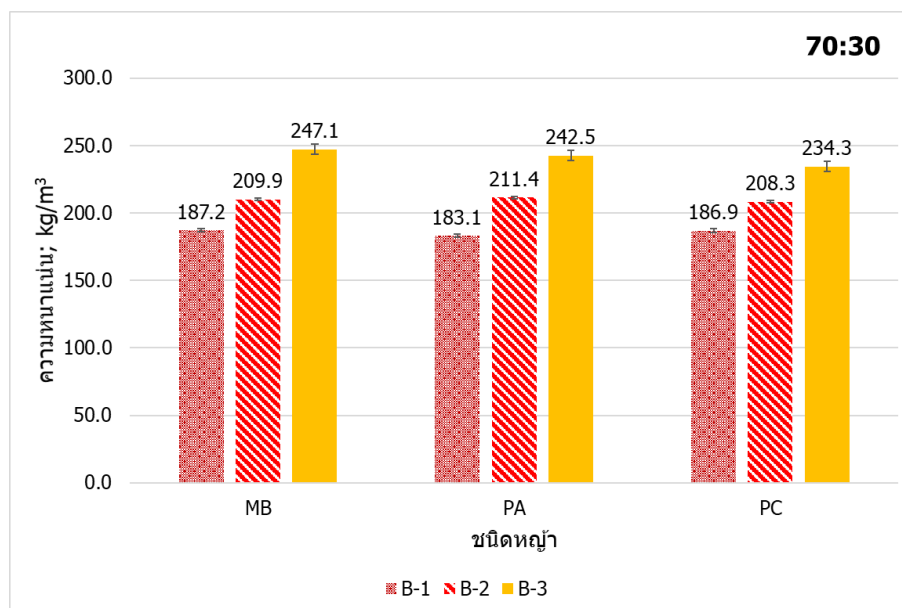
ภาพประกอบ 48 ความหนาแน่นรวมของเชื้อเพลิง briquettes กำลังอัด 2 MPa



**ภาพประกอบ 49** ความหนาแน่นรวมของเชื้อเพลิง briquettes กำลังอัด 3 MPa

หมายเหตุ: N/A คือ not applicable (ไม่สามารถขึ้นรูปเชื้อเพลิงได้)

จากการศึกษา กำลังอัด ในการขึ้นรูปก้อนเชื้อเพลิงด้วยกำลังอัด 1 MPa, 2 MPa และ 3 MPa พบว่า กำลังอัด 3 MPa ในอัตราส่วน 60:40 ไม่สามารถขึ้นรูปได้ (ภาพประกอบ 52) เนื่องจากปริมาณตัวประสานที่มากเกินไป เมื่ออัดด้วยแรงที่สูงมากจะทำให้อนุภาคของหญ้าและตัวประสานไม่สามารถจับตัวกันได้ และจากการศึกษาอัตราส่วน 70:30 เป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมสำหรับการขึ้นรูป จึงนำความหนาแน่นในอัตราส่วนดังกล่าวมาเปรียบเทียบกับกำลังอัดในการขึ้นรูปของเชื้อเพลิง ซึ่งจากภาพประกอบ 50 จะเห็นได้ว่าการเพิ่มแรงอัดในการขึ้นรูปให้สูงขึ้นนั้นส่งผลให้เชื้อเพลิงมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น และเมื่อนำผลการทดลองไปวิเคราะห์หาความแปรปรวน (ANOVA) ของค่าเฉลี่ยความหนาแน่นรวม พบว่า กำลังอัดมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มแรงอัดในการขึ้นรูปให้สูงขึ้นในอัตราส่วนเดียวกันนั้นส่งผลให้เชื้อเพลิงมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามการเพิ่มกำลังอัดทำให้มีการใช้พลังงานงานมากขึ้น ดังนั้นหากใช้ตัวประสานในปริมาณมากขึ้นก็ควรใช้แรงอัดในการขึ้นรูปที่ต่ำ แต่ถ้าใช้ปริมาณตัวประสานที่น้อยควรใช้แรงอัดในการขึ้นรูปสูง เพื่อให้ได้เชื้อเพลิงที่มีความหนาแน่นสูง

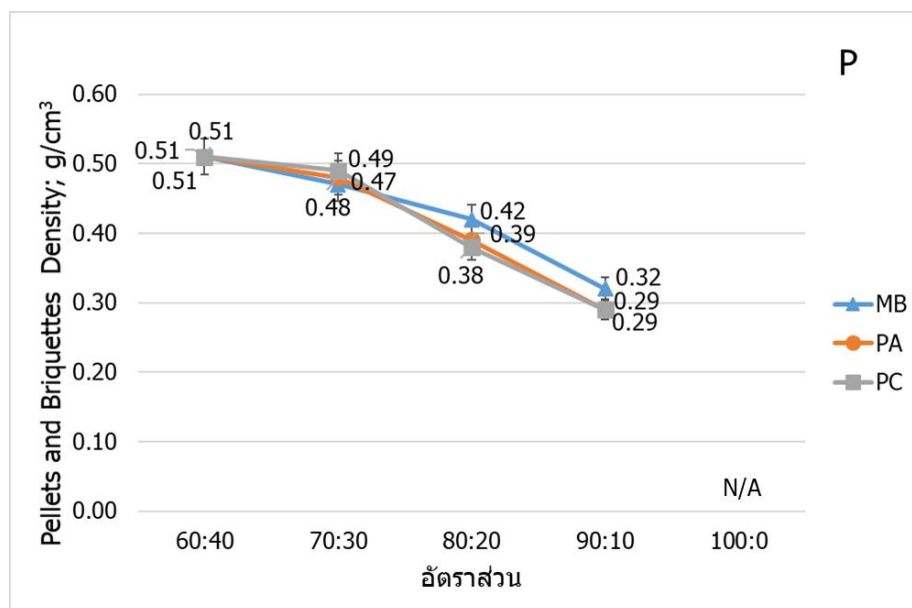


ภาพประกอบ 50 เปรียบเทียบความหนาแน่นรวมของอัตราส่วนตัวประสานที่เหมาะสมที่สุดในการขึ้นรูปด้วยกำลังอัด 1 MPa, 2 MPa และ 3 MPa

## 2) ความหนาแน่นก้อนของเชื้อเพลิง (Pellets and Briquettes Density)

ความหนาแน่นก้อนของเชื้อเพลิงจะส่งผลต่อค่าพลังงานของเชื้อเพลิงและค่าใช้จ่ายในการขนส่งและการจัดเก็บ รวมทั้งส่งผลต่อความหนาแน่นรวมและพฤติกรรมในการเผาไหม้ (Oberberger and Thek, 2004) การศึกษาพบว่า การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของค่าเฉลี่ยความหนาแน่นก้อน พบว่า รูปทรง กำลังอัด และอัตราส่วนมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ซึ่งแสดงผลดังตาราง 28

เชื้อเพลิง pellets จะเห็นได้ว่าความหนาแน่นก้อนของหญ้าแต่ละชนิดในแต่ละอัตราส่วนมีค่าความหนาแน่นที่แตกต่างกันออกไป เมื่อปริมาณตัวประสานเพิ่มขึ้นทำให้ก้อนเชื้อเพลิงมีความหนาแน่นมากขึ้น จากภาพประกอบ 51 พบว่า อัตราส่วน 60:40 จะมีความหนาแน่นก้อนมากที่สุดเท่ากับ  $0.51 \text{ g/cm}^3$  ในหญ้าทั้ง 3 ชนิด รองลงมาคือ เชื้อเพลิงอัดเม็ดอัตราส่วน 70:30, 80:20 และ 90:10 โดยมีค่าความหนาแน่นก้อนระหว่าง  $0.47\text{-}0.49 \text{ g/cm}^3$ ,  $0.38\text{-}0.42 \text{ g/cm}^3$  และ  $0.29\text{-}0.32 \text{ g/cm}^3$  ตามลำดับ และสำหรับอัตราส่วน 100:0 ที่ไม่มีตัวประสาน ไม่สามารถอัดขึ้นรูปได้ (ตาราง 28)



ภาพประกอบ 51 ความหนาแน่นก้อนของเชื้อเพลิง pellets

เชื้อเพลิง briquettes จากการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่าความหนาแน่นก้อน (Pellets and Briquettes Density) มีความแตกต่างกันกับขนาดรูปทรง กำลังอัด และตัวประสานอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งจากภาพประกอบ 52-54 จะเห็นว่าอัตราส่วน 60:40 มีความหนาแน่นรวมสูงที่สุด โดยที่มีความหนาแน่นสูงที่สุดในกำลังอัด 2 MPa ถึง 0.48 kg/m<sup>3</sup> ในหญ้าหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 (*Pennisetum purpureum* x *P. glaucum* Pakchong 1; PC) รองลงมาคือ หญ้าอะตราดัม (*Paspalum atratum*; PA) และหญ้างินนิมอมบาซ่า (*Panicum maximum* cv. Mombaza; MB) (0.47 และ 0.46 kg/m<sup>3</sup> ตามลำดับ) และในอัตราส่วน 70:30 กำลังอัด 3 MPa มีค่าความหนาแน่นสูงเนื่องจากในอัตราส่วน 60:40 ที่กำลังอัด 3 MPa ไม่สามารถขึ้นรูปเชื้อเพลิงได้ (ตาราง 30) ซึ่งมีความหนาแน่นก้อนระหว่าง 0.41-0.45 kg/m<sup>3</sup> แต่ก็ยังมีความหนาแน่นน้อยกว่าเชื้อเพลิงกำลังอัด 2 MPa

พหุ ประถมศึกษา ชีวะ

ตาราง 28 ความหนาแน่นก้อน (Pellets and Briquettes Density) ของเชื้อเพลิงอัดแข็ง

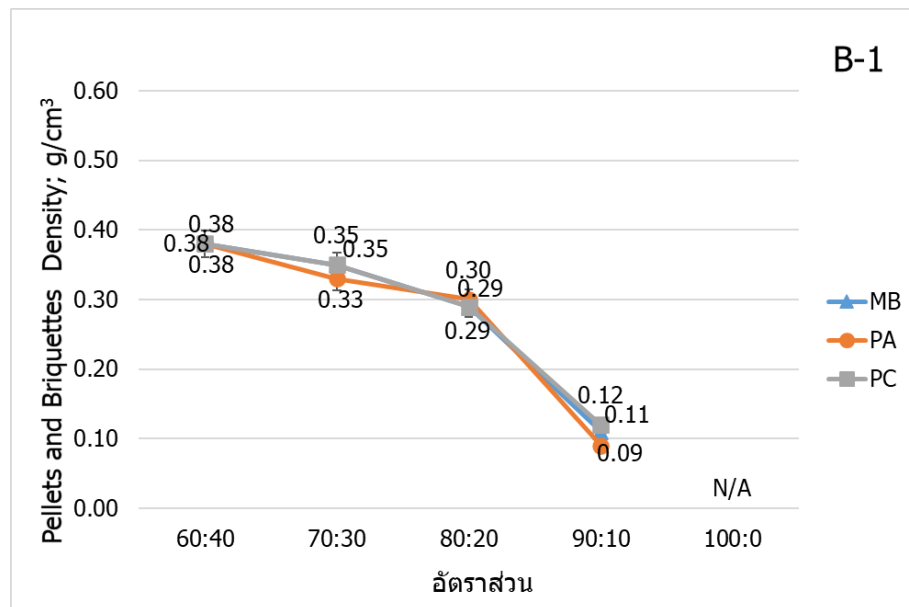
| ชนิด | อัตราส่วน          | ความหนาแน่นก้อน ( $\text{g/cm}^3$ ) |                    |                    |                    |
|------|--------------------|-------------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
|      |                    | P <sup>b</sup>                      | B-1 <sup>b,c</sup> | B-2 <sup>b,c</sup> | B-3 <sup>b,c</sup> |
| MB   | 60:40 <sup>a</sup> | 0.53±0.00                           | 0.50±0.01          | 0.46±0.00          | N/A                |
|      | 70:30 <sup>a</sup> | 0.41±0.08                           | 0.46±0.01          | 0.35±0.01          | 0.46±0.01          |
|      | 80:20 <sup>a</sup> | 0.49±0.06                           | 0.29±0.01          | 0.25±0.01          | 0.40±0.00          |
|      | 90:10 <sup>a</sup> | 0.57±0.12                           | 0.21±0.02          | 0.21±0.01          | 0.31±0.00          |
|      | 100:0 <sup>a</sup> | N/A                                 | N/A                | N/A                | N/A                |
| PA   | 60:40 <sup>a</sup> | 0.50±0.04                           | 0.38±0.00          | 0.51±0.01          | N/A                |
|      | 70:30 <sup>a</sup> | 0.49±0.09                           | 0.33±0.00          | 0.39±0.00          | 0.37±0.00          |
|      | 80:20 <sup>a</sup> | 0.31±0.02                           | 0.30±0.02          | 0.31±0.01          | 0.34±0.00          |
|      | 90:10 <sup>a</sup> | 0.52±0.02                           | 0.09±0.01          | 0.19±0.01          | 0.25±0.01          |
|      | 100:0 <sup>a</sup> | N/A                                 | N/A                | N/A                | N/A                |
| PC   | 60:40 <sup>a</sup> | 0.37±0.07                           | 0.49±0.01          | 0.53±0.07          | N/A                |
|      | 70:30 <sup>a</sup> | 0.56±0.03                           | 0.41±0.01          | 0.40±0.03          | 0.39±0.00          |
|      | 80:20 <sup>a</sup> | 0.35±0.03                           | 0.29±0.01          | 0.27±0.03          | 0.31±0.01          |
|      | 90:10 <sup>a</sup> | 0.43±0.14                           | 0.06±0.00          | 0.19±0.04          | 0.27±0.01          |
|      | 100:0 <sup>a</sup> | N/A                                 | N/A                | N/A                | N/A                |

หมายเหตุ: N/A คือ not applicable (ไม่สามารถขึ้นรูปเชื้อเพลิงได้)

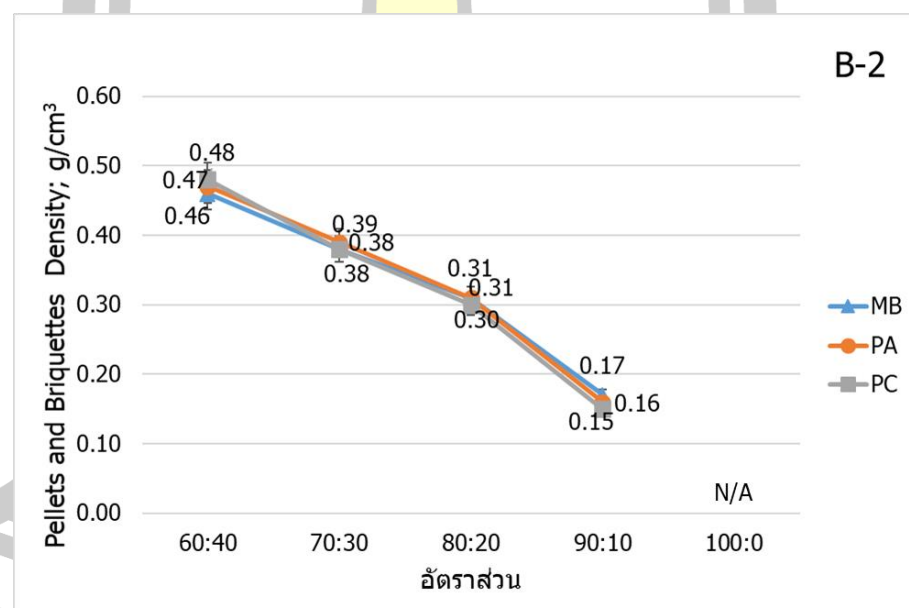
a หมายถึง อัตราส่วนของเชื้อเพลิงทำให้ความหนาแน่นก้อนของเชื้อเพลิงมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 (ANOVA)

b หมายถึง รูปทรงของเชื้อเพลิงทำให้ความหนาแน่นก้อนของเชื้อเพลิงมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 (T-test) โดยการวิเคราะห์เปรียบเทียบเป็นคู่ คือ P กับ B-1, P กับ B-2 และ P กับ B-3

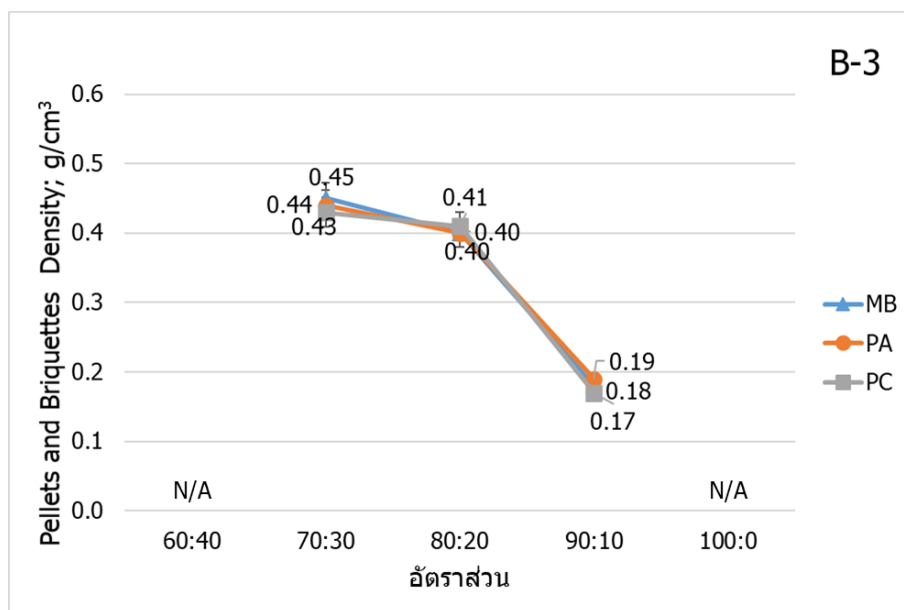
c หมายถึง กำลังอัดของหลู้อหลายฤดูทำให้ความหนาแน่นก้อนของเชื้อเพลิงมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 (ANOVA)



ภาพประกอบ 52 ความหนาแน่นก้อนของเชื้อเพลิง briquettes กำลังอัด 1 MPa



ภาพประกอบ 53 ความหนาแน่นก้อนของเชื้อเพลิง briquettes กำลังอัด 2 MPa



**ภาพประกอบ 54** ความหนาแน่นก้อนของเชื้อเพลิง briquettes กำลังอัด 3 MPa

หมายเหตุ: N/A คือ not applicable (ไม่สามารถขึ้นรูปเชื้อเพลิงได้)

จากการศึกษา พบว่า เชื้อเพลิงอัดแข็งที่อัตราส่วน 60:40 เป็นอัตราส่วนที่ดีที่สุดทั้งในเชื้อเพลิงอัดก้อน (briquettes) ที่กำลังอัด 2 MPa และเชื้อเพลิงอัดเม็ด (pellets) จากภาพประกอบ 51 และ 53 จะเห็นว่า เชื้อเพลิงอัดเม็ดมีความหนาแน่นก้อนมากกว่าเชื้อเพลิงอัดก้อน (briquettes) ของหญ้าทั้ง 3 ชนิด ซึ่งมีความหนาแน่นก้อน 0.51 kg/m<sup>3</sup> โดยมีความแตกต่างกับเชื้อเพลิงอัดก้อนถึง 0.03–0.05 g/cm<sup>3</sup> (ร้อยละ 6-10) ดังนั้นเมื่อพิจารณาคุณสมบัติความหนาแน่นก้อนของเชื้อเพลิง พบว่า เชื้อเพลิงอัดเม็ด ในอัตราส่วนของหญ้าต่อแยมันสำปะหลังที่ 60:40 ของหญ้าทั้งสามชนิดมีความเหมาะสมที่สุด ซึ่งมีแนวโน้มเดียวกันกับความหนาแน่นรวม เนื่องจากความหนาแน่นก้อนส่งผลต่อความหนาแน่นรวม โดยความหนาแน่นก้อนสูงจะทำให้เชื้อเพลิงมีความหนาแน่นรวมสูงตามไปด้วย ซึ่งจากการศึกษางานวิจัย Obernberger and Thek (2004) และ (ดวงกมล ดังโพนทอง และคณะ, 2559) พบว่า มีทิศทางของผลการศึกษาเช่นเดียวกับการทดลองในครั้งนี้คือ เมื่อเพิ่มปริมาณตัวประสานขึ้นจะทำให้ความหนาแน่นเพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตามการเพิ่มตัวประสานให้สูงขึ้นในอัตราส่วน 60:40 ร้อยละโดยน้ำหนัก นั้นก็ทำให้เชื้อเพลิงมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยจากการใช้ตัวประสานใน อัตราส่วน 70:30 ร้อยละโดยน้ำหนัก ดังนั้นหากต้องการเชื้อเพลิงที่มีความหนาแน่นสูงจึงไม่จำเป็นต้องเพิ่มปริมาณตัวประสานถึง 40% เพราะการใช้ปริมาณตัวประสานที่มากขึ้นก็จะเป็นการเพิ่มค่าใช้จ่ายในการผลิตให้ที่สูงขึ้นด้วยเช่นกัน

จากการศึกษาเรื่องกำลังอัดในการขึ้นรูป โดยใช้กำลังอัดในการขึ้นรูปในเชื้อเพลิง briquettes คือ 1, 2 และ 3 MPa เนื่องจากการคาดว่าจะการใช้กำลังอัดที่สูงกว่าจะสามารถทำให้เชื้อเพลิงที่ใช้ตัวประสานที่น้อยกว่านั้นมีความคงทนกว่าการขึ้นรูปด้วยแรงอัดที่ต่ำในอัตราส่วนเดียวกัน แต่อย่างไรก็ตามจากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มแรงอัดในการขึ้นรูปแล้วนั้นส่งผลให้ความหนาแน่นเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย ไม่จำเป็นต้องใช้แรงอัดที่สูงเพราะจะเป็นการสิ้นเปลืองพลังงานในการผลิต จากภาพประกอบ 55-57 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มแรงอัดในการขึ้นรูปให้สูงขึ้น ในอัตราส่วนเดียวกันนั้นส่งผลให้เชื้อเพลิงมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยแต่การเพิ่มตัวประสานขึ้นนั้นทำให้ความหนาแน่นเพิ่มขึ้นมาก ดังนั้นหากใช้ตัวประสานในปริมาณมากขึ้นก็ควรใช้แรงอัดในการขึ้นรูปที่ต่ำ แต่ถ้าใช้ปริมาณตัวประสานที่น้อยควรใช้แรงอัดในการขึ้นรูปสูง เพื่อให้ได้เชื้อเพลิงที่มีความหนาแน่นสูง ซึ่งปัจจัยในเรื่องความหนาแน่นของเชื้อเพลิงจะส่งผลต่อความคงทนของเชื้อเพลิงและความหนาแน่นพลังงาน ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อถัดไป

#### 4.2.2 ผลการทดสอบความคงทนของเชื้อเพลิง

##### 1) ความต้านทานการขัดสี (Abrasion Resistance) ของก้อนเชื้อเพลิง

การทดสอบการขัดสีเป็นการจำลองความทนทานระหว่างกาขนส่งและการจัดเก็บ ซึ่งการทดสอบดัชนีการขัดสีของเชื้อเพลิงอัดแข็งโดยการนำเชื้อเพลิงหลังจากการขึ้นรูปและผ่านการตากให้แห้งเรียบร้อยแล้วนำมาทดสอบดัชนีการขัดสี จากการทดสอบทางสถิติ แสดงให้เห็นว่า การต้านทานการขัดสีมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญระหว่างรูปทรง กำลังอัด และอัตราส่วนตัวประสานที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 แต่ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญกับชนิดหญ้า โดยตาราง 29 จะแสดงให้เห็นถึงคุณสมบัติความคงทนของเชื้อเพลิงอัดเม็ดและเชื้อเพลิงอัดก้อนจากหญ้าหลายฤดูทั้ง 3 ชนิด ซึ่งจากการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อความคงทน พบว่า การเพิ่มปริมาณตัวมากขึ้นจากร้อยละ 10-20 โดยน้ำหนัก ทำให้เชื้อเพลิงมีความต้านทานการขัดสีสูงขึ้น 30-40 % ซึ่งแตกต่างการเพิ่มปริมาณตัวจากร้อยละ 30-40 โดยน้ำหนัก ทำให้เชื้อเพลิงมีความต้านทานการขัดสีสูงขึ้นเพียง 15 % นั้นแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มปริมาณแ่งที่แตกต่างกันในช่วงนี้ไม่ส่งผลให้ค่าดัชนีการแตกร่วนเพิ่มขึ้น ดังนั้นหากจะต้องผลิตเชื้อเพลิงแ่งให้มีความคงทนโดยใช้แ่งเป็นตัวประสานก็ไม่จำเป็นต้องใช้ปริมาณแ่งมากเกินไป โดยค่าดัชนีการขัดสีมีค่าเข้าใกล้ 100 % แสดงว่าเชื้อเพลิงนั้นมีความคงทนสูง และการใช้ตัวประสานเพียงร้อยละ 30 โดยน้ำหนักนั้น ทำให้เชื้อเพลิงสามารถต้านทานการขัดสีได้มากกว่า 80% ซึ่งผ่านเกณฑ์มาตรฐานเชื้อเพลิงที่กำหนดไว้ที่ 70 % แสดงดังภาพประกอบ 55-58

ตาราง 29 คุณสมบัติการต้านทานการขัดสี (Abrasion Resistance) ของเชื้อเพลิงอัดแข็ง

| ชนิด | อัตราส่วน          | การต้านทานการขัดสี (ร้อยละ) |                          |                    |                    |
|------|--------------------|-----------------------------|--------------------------|--------------------|--------------------|
|      |                    | p <sup>b</sup>              | B-1 <sup>b,c</sup>       | B-2 <sup>b,c</sup> | B-3 <sup>b,c</sup> |
| MB   | 60:40 <sup>a</sup> | 95.13±0.11                  | 79.90±0.12               | 98.53±0.01         | N/A                |
|      | 70:30 <sup>a</sup> | 80.65±0.52                  | 70.34±0.11               | 90.31±0.21         | 99.68±0.18         |
|      | 80:20 <sup>a</sup> | 64.67±1.05 <sup>ns</sup>    | 63.21±1.36 <sup>ns</sup> | 43.33±0.26         | 83.91±0.16         |
|      | 90:10 <sup>a</sup> | 27.09±0.85                  | 8.89±0.67                | 19.33±0.17         | 24.41±0.22         |
|      | 100:0 <sup>a</sup> | N/A                         | N/A                      | N/A                | N/A                |
| PC   | 60:40 <sup>a</sup> | 94.76±0.05                  | 80.10±1.11               | 97.95±0.04         | N/A                |
|      | 70:30 <sup>a</sup> | 89.73±0.21                  | 61.15±0.49               | 88.84±0.65         | 99.04±0.03         |
|      | 80:20 <sup>a</sup> | 57.73±0.06 <sup>ns</sup>    | 55.99±1.20 <sup>ns</sup> | 40.81±0.18         | 82.54±0.15         |
|      | 90:10 <sup>a</sup> | 34.80±0.10                  | 8.93±0.64                | 19.12±0.60         | 23.31±0.15         |
|      | 100:0 <sup>a</sup> | N/A                         | N/A                      | N/A                | N/A                |
| PA   | 60:40 <sup>a</sup> | 92.58±0.59                  | 80.07±0.07               | 96.68±0.29         | N/A                |
|      | 70:30 <sup>a</sup> | 83.84±1.09                  | 70.34±0.11               | 88.34±0.33         | 99.27±0.05         |
|      | 80:20 <sup>a</sup> | 63.00±0.98                  | 59.32±0.38               | 40.28±0.17         | 83.07±0.30         |
|      | 90:10 <sup>a</sup> | 25.79±0.26                  | 10.33±0.32               | 19.82±0.04         | 24.19±0.48         |
|      | 100:0 <sup>a</sup> | N/A                         | N/A                      | N/A                | N/A                |

หมายเหตุ: N/A คือ not applicable (ไม่สามารถขึ้นรูปเชื้อเพลิงได้)

a หมายถึง อัตราส่วนของเชื้อเพลิงทำให้การต้านทานการขัดสีของเชื้อเพลิงมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 (ANOVA)

b หมายถึง รูปทรงของเชื้อเพลิงทำให้การต้านทานการขัดสีของเชื้อเพลิงมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 (T-test) โดยการวิเคราะห์เปรียบเทียบเป็นคู่ คือ P กับ B-1, P กับ B-2 และ P กับ B-3

c หมายถึง กำลังอัดของหญ้าหลายฤดูทำให้การต้านทานการขัดสีของเชื้อเพลิงมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 (ANOVA)

ns หมายถึง รูปทรง P กับ B-1 มีค่าเฉลี่ยการต้านทานการขัดสีไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 (T-test)

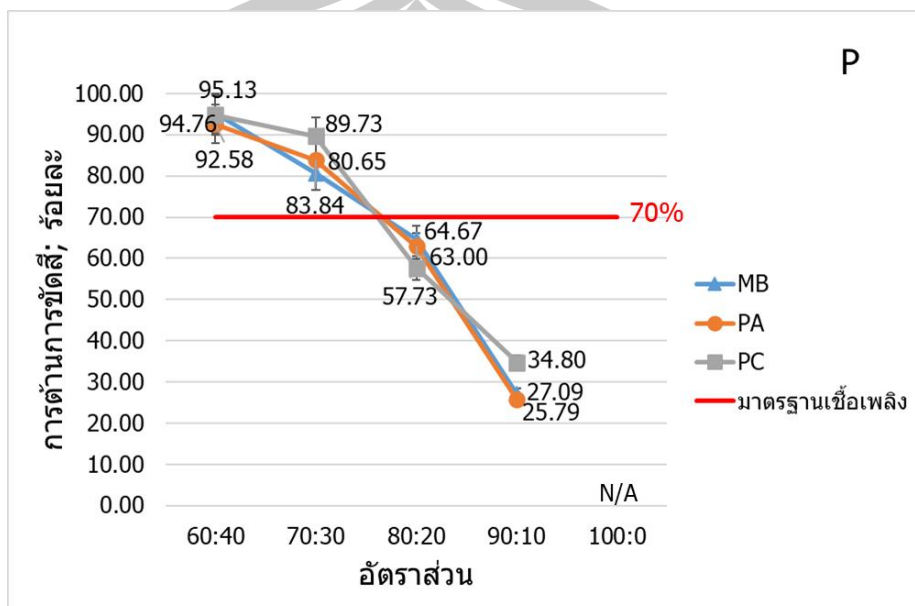
เชื้อเพลิง pellets จากการทดสอบการต้านทานการขัดสี จะเห็นได้ว่า อัตราส่วนของตัวประสานและหญ้าหลายฤดูมีความสำคัญต่อการพิจารณาการต้านทานการขัดสีของก้อนเชื้อเพลิง โดยเชื้อเพลิงอัดเม็ดสามารถต้านทานการขัดสีได้มากกว่าร้อยละ 90 ซึ่งจะแสดงดังภาพประกอบ 55 โดยหญ้ากินนีมอมบาซ่า (*Panicum maximum* (Mombaza); MB) สามารถต้านทานการขัดสีได้สูงที่สุด (ร้อยละ 95.13) รองลงมาคือ หญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 (*Pennisetum purpureum* x *P. glaucum* (Pakchong 1); PC) และ หญ้าอะตราตัม (*Paspalum atratum*; PA) ที่มีความต้านทานเท่ากับร้อยละ 94.73 และ 92.58 ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาอัตราส่วนรองลงมา คือ 70:30 80:20 และ 90:10 จะเห็นได้ว่าเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากหญ้าทั้งสามชนิดจะมีการต้านทานการขัดสีได้น้อยลงตามลำดับ (ตาราง 29) โดยแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มปริมาณตัวประสานเพิ่มขึ้นส่งผลให้เชื้อเพลิงยึดเกาะกันแน่นขึ้นจะสามารถรับแรงกดได้มากขึ้นด้วย ซึ่งมีแนวโน้มเดียวกันกับความหนาแน่นของเชื้อเพลิง

เชื้อเพลิง briquettes จากการศึกษพบว่า เชื้อเพลิงที่สามารถต้านทานการขัดสีได้สูงที่สุดอยู่ที่อัตราส่วน อัตราส่วน 60:40 ซึ่งแสดงผลในหญ้าทั้ง 3 ชนิด จากภาพประกอบ 56 แสดงถึงการต้านทานการขัดสีของเชื้อเพลิงอัดก้อน กำลังอัด 1 MPa พบว่า เชื้อเพลิงที่อัตราส่วน 60:40 มีความสามารถต้านทานการขัดสีได้ดีที่สุด โดยหญ้าหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 (*Pennisetum purpureum* x *P. glaucum* Pakchong 1; PC) สามารถต้านทานได้มากที่สุด ถึงร้อยละ 80.10 รองลงมา คือ หญ้าอะตราตัม (*Paspalum atratum*; PA) และหญ้ากินนีมอมบาซ่า (*Panicum maximum* cv. Mombaza; MB) ที่ต้านทานได้ร้อยละ 80.07 และ 79.90 ตามลำดับ เมื่อลดปริมาณของตัวประสานลงเหลือเพียง 30 เปอร์เซ็นต์ พบว่า หญ้าอะตราตัม (*Paspalum atratum*; PA) และหญ้ากินนีมอมบาซ่า (*Panicum maximum* cv. Mombaza; MB) สามารถต้านทานการขัดสีได้สูงที่สุด (ร้อยละ 70.34) รองลงมา คือ หญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 (*Pennisetum purpureum* x *P. glaucum* (Pakchong 1); PC) สามารถต้านทานการขัดสีเท่ากับร้อยละ 61.15 เมื่อลดปริมาณของตัวประสานลงเหลือเพียง 20 เปอร์เซ็นต์ พบว่า หญ้ากินนีมอมบาซ่า (*Panicum maximum* (Mombaza); MB) สามารถต้านทานการขัดสีได้สูงที่สุด (ร้อยละ 63.21) รองลงมา คือ หญ้าอะตราตัม (*Paspalum atratum*; PA) และหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 (*Pennisetum purpureum* x *P. glaucum* (Pakchong 1); PC) ที่สามารถต้านทานการขัดสีเท่ากับร้อยละ 59.32 และ 55.99 ตามลำดับ และเมื่อลดปริมาณของตัวประสานลงเหลือเพียง 10 เปอร์เซ็นต์ พบว่า หญ้าทั้งสามชนิดดังกล่าว มีความสามารถต้านทานการขัดสีได้ต่ำกว่าร้อยละ 50 ซึ่งกินนีมอมบาซ่า (*Panicum maximum* (Mombaza); MB) สามารถต้านทานการขัดสีได้ต่ำที่สุด (ร้อยละ 8.89) ตามด้วย คือ หญ้าเนเปียร์ปากช่อง (*Pennisetum purpureum* x *P. glaucum* (Pakchong 1); PC) และหญ้าอะตราตัม (*Paspalum atratum*; PA) ที่สามารถต้านทานการขัดสีเท่ากับร้อยละ 8.93 และ 10.33 ตามลำดับ

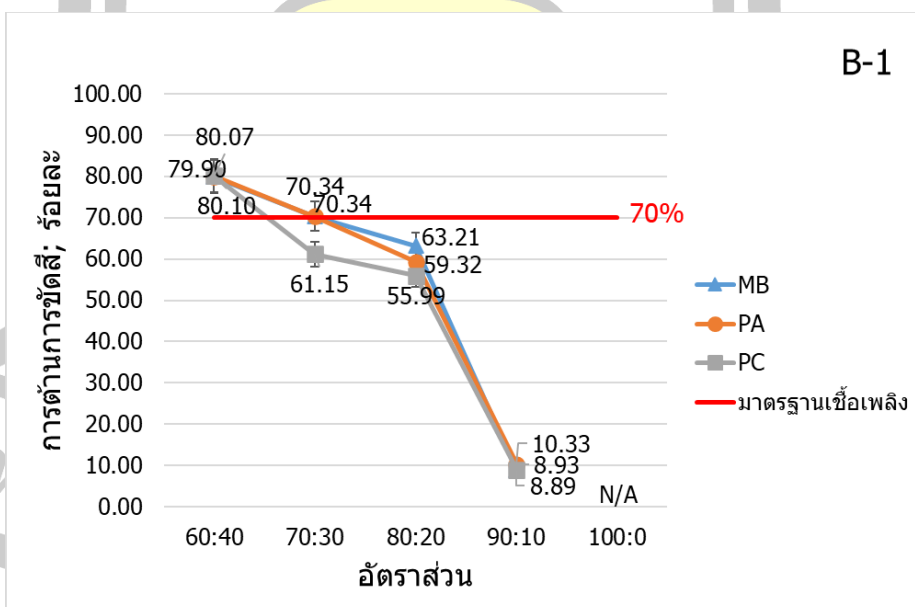
จากภาพประกอบ 57 แสดงถึงการต้านทานการกัดสีของเชื้อเพลิงอัดก้อน กำลังอัด 2 MPa พบว่า เชื้อเพลิงที่อัตราส่วน 60:40 มีความสามารถต้านทานการกัดสีได้ดีที่สุด โดยหญ้ากินนีมอมบาซ่า (*Panicum maximum* (Mombaza); MB) สามารถต้านทานได้มากที่สุด ถึงร้อยละ 98.53 รองลงมา คือหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 (*Pennisetum purpureum* x *P. glaucum* (Pakchong 1); PC) และหญ้าอะตราตัม (*Paspalum atratum*; PA) ที่ต้านทานได้ร้อยละ 97.95 และ 96.68 ตามลำดับ เมื่อลดปริมาณของตัวประสานลงเหลือเพียง 30 เปอร์เซ็นต์ พบว่า หญ้ากินนีมอมบาซ่า (*Panicum maximum* (Mombaza); MB) สามารถต้านทานการกัดสีได้สูงที่สุด (ร้อยละ 90.31) รองลงมา คือหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 (*Pennisetum purpureum* x *P. glaucum* (Pakchong 1); PC) และหญ้าอะตราตัม (*Paspalum atratum*; PA) สามารถต้านทานการกัดสีเท่ากับร้อยละ 88.84 และ 88.34 ตามลำดับ เมื่อลดปริมาณของตัวประสานลงเหลือเพียง 20 เปอร์เซ็นต์ พบว่า หญ้ากินนีมอมบาซ่า (*Panicum maximum* (Mombaza); MB) สามารถต้านทานการกัดสีได้สูงที่สุด (ร้อยละ 43.33) รองลงมา คือ หญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 (*Pennisetum purpureum* x *P. glaucum* (Pakchong 1); PC) และหญ้าอะตราตัม (*Paspalum atratum*; PA) ที่สามารถต้านทานการกัดสีเท่ากับร้อยละ 40.81 และ 40.28 ตามลำดับ และเมื่อลดปริมาณของตัวประสานลงเหลือเพียง 10 เปอร์เซ็นต์ พบว่า หญ้าทั้งสามชนิดดังกล่าว มีความสามารถต้านทานการกัดสีได้ต่ำกว่าร้อยละ 20 ซึ่งหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 (*Pennisetum purpureum* x *P. glaucum* (Pakchong 1); PC) สามารถต้านทานการกัดสีได้ดีที่สุด (ร้อยละ 19.12) ตามด้วย คือ หญ้าอะตราตัม (*Paspalum atratum*; PA) และหญ้ากินนีมอมบาซ่า (*Panicum maximum* (Mombaza); MB) ที่สามารถต้านทานการกัดสีเท่ากับร้อยละ 19.33 และ 19.82 ตามลำดับ

จากภาพประกอบ 58 แสดงถึงการต้านทานการกัดสีของเชื้อเพลิงอัดก้อน กำลังอัด 3 MPa พบว่า เชื้อเพลิงที่อัตราส่วน 60:40 ไม่สามารถขึ้นรูปได้ ทำให้เชื้อเพลิงอัตราส่วน 70:30 มีความสามารถต้านทานการกัดสีได้ดีที่สุด โดยหญ้ากินนีมอมบาซ่า (*Panicum maximum* (Mombaza); MB) สามารถต้านทานได้มากที่สุด ถึงร้อยละ 99.68 รองลงมา คือ หญ้าอะตราตัม (*Paspalum atratum*; PA) และหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 (*Pennisetum purpureum* x *P. glaucum* (Pakchong 1); PC) ที่ต้านทานได้ร้อยละ 99.27 และ 99.04 ตามลำดับ เมื่อลดปริมาณของตัวประสานลงเหลือเพียง 20 เปอร์เซ็นต์ พบว่า หญ้ากินนีมอมบาซ่า (*Panicum maximum* (Mombaza); MB) สามารถต้านทานการกัดสีได้สูงที่สุด (ร้อยละ 83.91) รองลงมา คือ หญ้าอะตราตัม (*Paspalum atratum*; PA) และหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 (*Pennisetum purpureum* x *P. glaucum* (Pakchong 1); PC) ที่ต้านทานได้ร้อยละ 83.07 และ 82.54 ตามลำดับ และเมื่อลดปริมาณของตัวประสานลงเหลือเพียง 10 เปอร์เซ็นต์ พบว่า หญ้าทั้งสามชนิดดังกล่าว มีความสามารถต้านทานการกัดสีได้ต่ำกว่าร้อยละ 50 ซึ่งหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 (*Pennisetum purpureum* x *P. glaucum* (Pakchong 1); PC) สามารถต้านทานการกัดสี

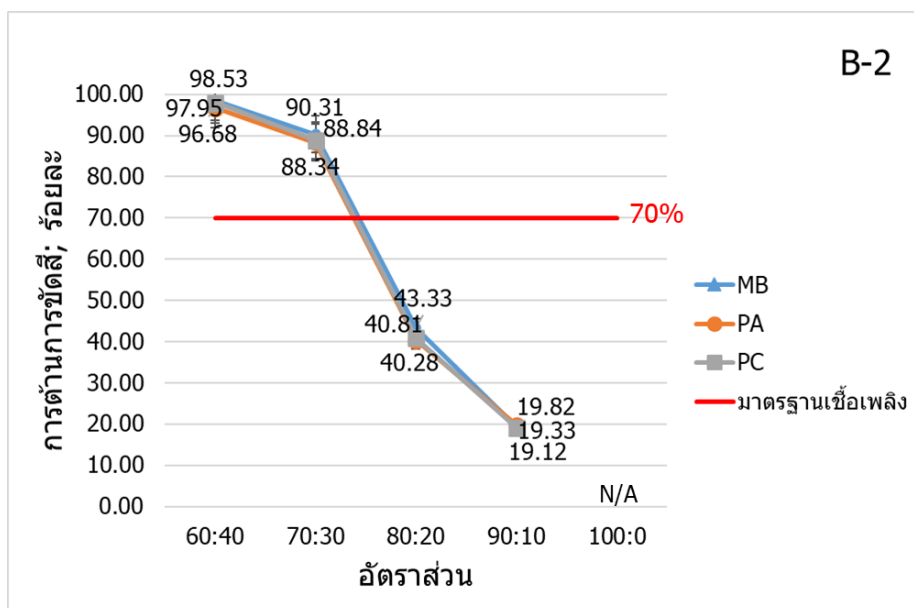
ได้ต่ำที่สุด (ร้อยละ 23.31) ตามด้วย คือ หญ้าอะตราตัม (*Paspalum atratum*; PA) และหญ้ากินนีมอมบาซ่า (*Panicum maximum* (Mombaza); MB) ที่สามารถต้านทานการขัดสีเท่ากับร้อยละ 24.19 และ 24.41 ตามลำดับ



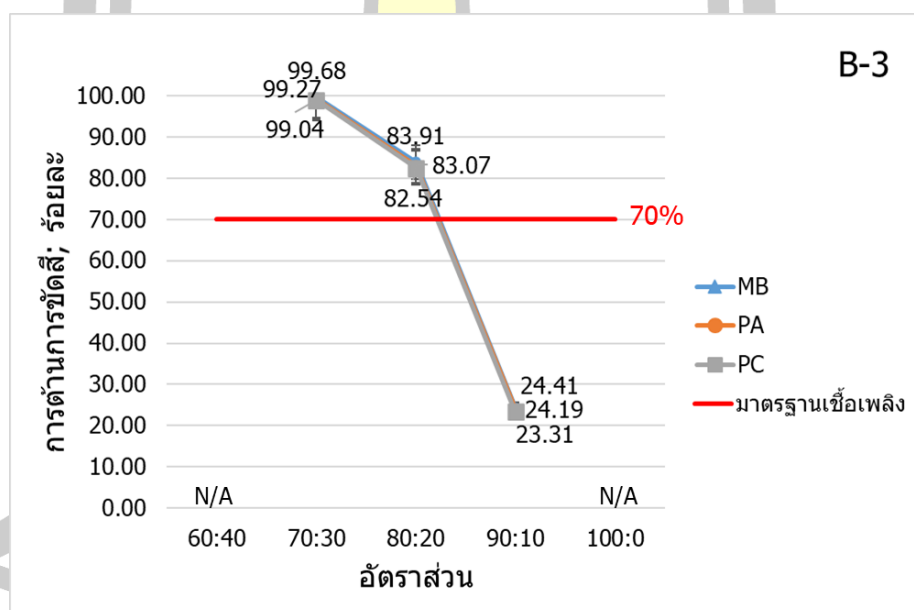
ภาพประกอบ 55 การต้านทานการขัดสีของเชื้อเพลิง pellets



ภาพประกอบ 56 การต้านทานการขัดสีของเชื้อเพลิง briquettes กำลังอัด 1 MPa



ภาพประกอบ 57 การต้านทานการขัดสีของเชื้อเพลิง briquettes กำลังอัด 2 MPa



ภาพประกอบ 58 การต้านทานการขัดสีของเชื้อเพลิง briquettes กำลังอัด 3 MPa

หมายเหตุ: N/A คือ not applicable (ไม่สามารถขึ้นรูปเชื้อเพลิงได้)

## 2) ความต้านทานการแตกร่วน (Impact resistance) ของก้อนเชื้อเพลิง

การทดสอบการแตกร่วนเป็นการจำลองความทนทานระหว่างกาขนส่งและการจัดเก็บ การทดสอบดัชนีการแตกร่วนของเชื้อเพลิงอัดแข็งโดยการนำเชื้อเพลิงหลังจากการขึ้นรูปและผ่านการตากให้แห้งเรียบร้อยแล้วนำมาทดสอบดัชนีการแตกร่วน จากการทดสอบทางสถิติ แสดงให้เห็นว่า การต้านทานการแตกร่วนมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญระหว่างรูปทรง กำลังอัด และอัตราส่วนตัว

ประสาน แต่ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญกับชนิดหญ้า ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 โดยตาราง 30 จะแสดงให้เห็นถึงคุณสมบัติความคงทนของเชื้อเพลิงอัดเม็ดและเชื้อเพลิงอัดก้อนจากหญ้าหลายฤดู ทั้ง 3 ชนิด

เชื้อเพลิง pellets จากการทดสอบการต้านทานการแตกร่วน จะเห็นได้ว่า อัตราส่วนของตัวประสานและหญ้าหลายฤดูมีความสำคัญต่อการพิจารณาการต้านทานการแตกร่วนของก้อนเชื้อเพลิง โดยเชื้อเพลิงอัดเม็ดสามารถต้านทานการแตกร่วนได้มากกว่าร้อยละ 90 ซึ่งจะแสดงถึงภาพประกอบ 59 โดยหญ้าอะตราตัม (*Paspalum atratum*; PA) สามารถต้านทานการแตกร่วนได้สูงที่สุด (ร้อยละ 99.97) รองลงมาคือ หญ้ากินนีมอมบาซ่า (*Panicum maximum* (Mombaza); MB) และหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 (*Pennisetum purpureum* x *P. glaucum* (Pakchong 1); PC) ที่มีความต้านทานเท่ากับร้อยละ 99.93 และ 99.90 ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาอัตราส่วนรองลงมา คือ 70:30 80:20 และ 90:10 จะเห็นได้ว่าเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากหญ้าทั้งสามชนิดจะมีการต้านทานการแตกร่วนได้น้อยลงตามลำดับ (ตาราง 30) โดยแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มปริมาณตัวประสานเพิ่มขึ้นส่งผลให้เชื้อเพลิงยึดเกาะกันแน่นขึ้นจะสามารถทนการแตกร่วนได้มากขึ้นด้วย ซึ่งมีแนวโน้มเดียวกันกับความหนาแน่นของเชื้อเพลิง

เชื้อเพลิง briquettes จากการศึกษาพบว่า เชื้อเพลิงที่สามารถต้านทานการขัดสีได้สูงที่สุดอยู่ที่อัตราส่วน อัตราส่วน 60:40 ซึ่งแสดงผลในหญ้าทั้ง 3 ชนิด จากภาพประกอบ 60 แสดงถึงการต้านทานการแตกร่วนของเชื้อเพลิงอัดก้อน กำลังอัด 1 MPa พบว่า เชื้อเพลิงที่อัตราส่วน 60:40 มีความสามารถต้านทานการแตกร่วนได้ดีที่สุด โดยหญ้าหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 (*Pennisetum purpureum* x *P. glaucum* Pakchong 1; PC) สามารถต้านทานได้มากที่สุด ถึงร้อยละ 100 รองลงมาคือ หญ้าอะตราตัม (*Paspalum atratum*; PA) และหญ้ากินนีมอมบาซ่า (*Panicum maximum* cv. Mombaza; MB) ที่ต้านทานได้ร้อยละ 99.90 เมื่อลดปริมาณของตัวประสานลงเหลือเพียง 30 เปอร์เซ็นต์ พบว่า หญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 (*Pennisetum purpureum* x *P. glaucum* Pakchong 1; PC) สามารถต้านทานได้มากที่สุด ถึงร้อยละ 99.90 รองลงมา คือ หญ้าอะตราตัม (*Paspalum atratum*; PA) และหญ้ากินนีมอมบาซ่า (*Panicum maximum* cv. Mombaza; MB) ที่ต้านทานได้ร้อยละ 99.80 เมื่อลดปริมาณของตัวประสานลงเหลือเพียง 20 เปอร์เซ็นต์ พบว่า หญ้าทั้งสามชนิดดังกล่าว สามารถต้านทานได้ร้อยละ 97.52 เท่ากัน และเมื่อลดปริมาณของตัวประสานลงเหลือเพียง 10 เปอร์เซ็นต์ พบว่า หญ้าทั้งสามชนิดดังกล่าว มีความสามารถต้านทานการแตกร่วนได้ต่ำกว่าร้อยละ 50 ซึ่งหญ้ากินนีมอมบาซ่า (*Panicum maximum* cv. Mombaza; MB) สามารถต้านทานการแตกร่วนได้ร้อยละ 40.03 ตามด้วย คือ หญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 (*Pennisetum purpureum* x *P. glaucum* Pakchong 1; PC) และหญ้าอะตราตัม (*Paspalum atratum*; PA) ที่สามารถต้านทานการแตกร่วนเท่ากับร้อยละ 30.20 และ 21.11 ตามลำดับ

ตาราง 30 คุณสมบัติการต้านทานการแตกร่วน (Impact resistance) ของเชื้อเพลิงอัดแข็ง

| ชนิด | อัตราส่วน          | การต้านทานการแตกร่วน (ร้อยละ) |                          |                    |                          |
|------|--------------------|-------------------------------|--------------------------|--------------------|--------------------------|
|      |                    | P <sup>b</sup>                | B-1 <sup>b,c</sup>       | B-2 <sup>b,c</sup> | B-3 <sup>b,c</sup>       |
| MB   | 60:40              | 99.93±0.06                    | 99.90±0.06               | 99.84±0.06         | N/A                      |
|      | 70:30 <sup>a</sup> | 99.80±0.00 <sup>ns</sup>      | 99.80±0.00 <sup>ns</sup> | 99.74±0.06         | 99.70±0.00 <sup>ns</sup> |
|      | 80:20 <sup>a</sup> | 96.70±0.06                    | 97.52±0.34               | 98.24±0.23         | 96.29±1.15               |
|      | 90:10 <sup>a</sup> | 79.14±0.29                    | 40.03±0.11               | 43.34±0.32         | 60.74±0.33               |
|      | 100:0 <sup>a</sup> | N/A                           | N/A                      | N/A                | N/A                      |
| PA   | 60:40              | 99.97±0.06                    | 99.90±0.06               | 99.80±0.00         | N/A                      |
|      | 70:30              | 99.67±0.07                    | 99.80±0.06               | 99.70±0.00         | 99.70±0.06               |
|      | 80:20              | 98.73±0.15                    | 97.52±0.34               | 97.30±0.20         | 97.30±0.20               |
|      | 90:10 <sup>a</sup> | 76.19±0.29                    | 21.11±0.05               | 43.09±0.30         | 60.74±0.33               |
|      | 100:0 <sup>a</sup> | N/A                           | N/A                      | N/A                | N/A                      |
| PC   | 60:40 <sup>a</sup> | 99.90±0.05                    | 100.00±0.06              | 99.84±0.06         | N/A                      |
|      | 70:30 <sup>a</sup> | 99.80±0.00 <sup>ns</sup>      | 99.90±0.00 <sup>ns</sup> | 99.77±0.06         | 99.93±0.06               |
|      | 80:20 <sup>a</sup> | 97.20±0.46                    | 97.52±0.34               | 95.08±0.46         | 95.99±0.06               |
|      | 90:10 <sup>a</sup> | 80.54±0.25                    | 30.20±0.13               | 58.12±0.36         | 60.74±0.33               |
|      | 100:0 <sup>a</sup> | N/A                           | N/A                      | N/A                | N/A                      |

หมายเหตุ: N/A คือ not applicable (ไม่สามารถขึ้นรูปเชื้อเพลิงได้)

a หมายถึง อัตราส่วนของเชื้อเพลิงทำให้การต้านทานการแตกร่วนของเชื้อเพลิงมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 (ANOVA)

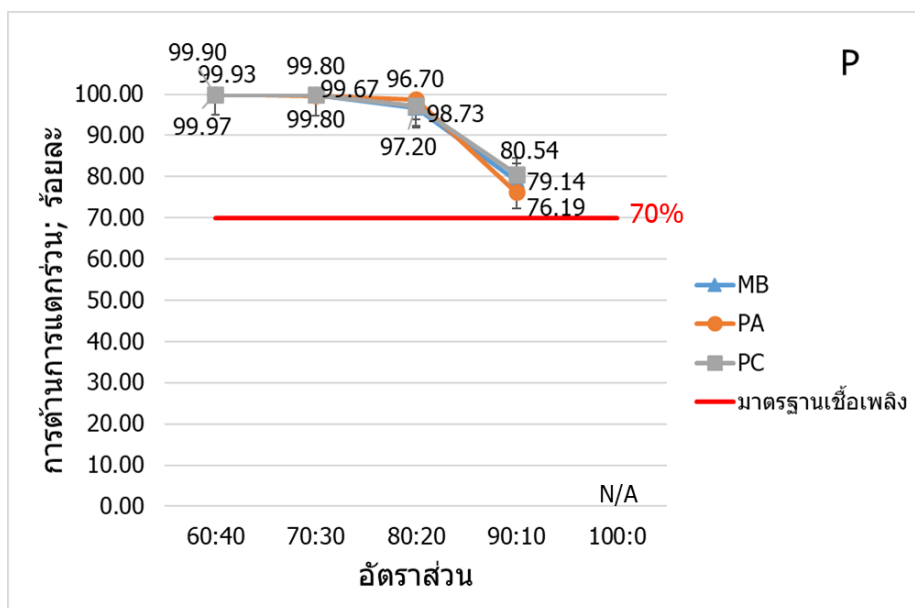
b หมายถึง รูปทรงของเชื้อเพลิงทำให้การต้านทานการแตกร่วนของเชื้อเพลิงมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 (T-test) โดยการวิเคราะห์เปรียบเทียบเป็นคู่ คือ P กับ B-1, P กับ B-2 และ P กับ B-3

c หมายถึง กำลังอัดของหญ้าหลายฤดูทำให้การต้านทานการแตกร่วนของเชื้อเพลิงมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 (ANOVA)

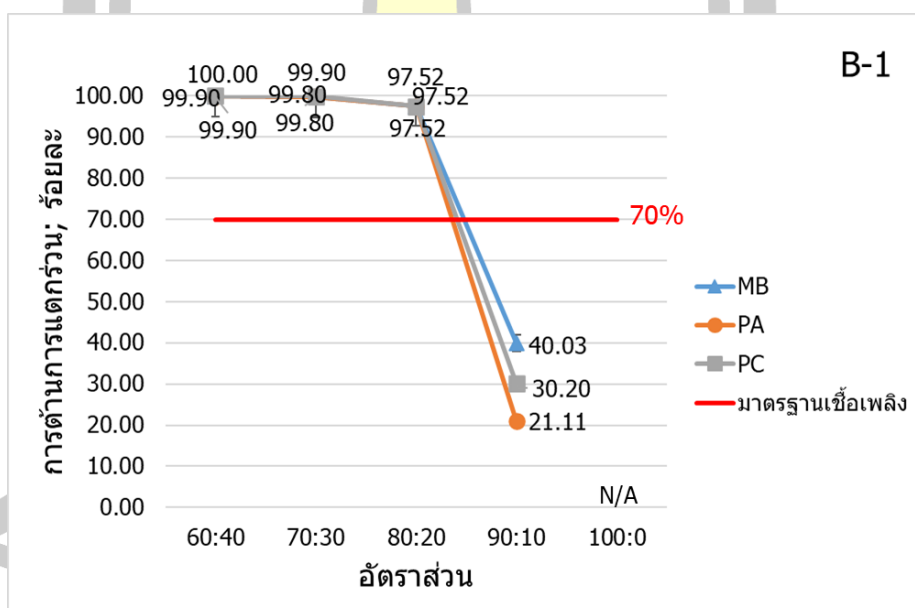
ns หมายถึง รูปทรง P กับ B มีค่าเฉลี่ยการต้านทานการแตกร่วนไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 (T-test)

จากภาพประกอบ 61 แสดงถึงการต้านทานการแตกร่วนของเชื้อเพลิง briquettes กำลังอัด 2 MPa พบว่า เชื้อเพลิงที่อัตราส่วน 60:40 มีความสามารถต้านทานการแตกร่วนได้ดีที่สุด โดยหญ้าหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 (*Pennisetum purpureum* x *P. glaucum* Pakchong 1; PC) และ หญ้ากินนีมอมบาซ่า (*Panicum maximum* cv. Mombaza; MB) สามารถต้านทานได้มากที่สุด ถึงร้อยละ 99.84 เท่ากัน รองลงมา คือ หญ้าอะตราตัม (*Paspalum atratum*; PA) ที่ต้านทานได้ร้อยละ 99.80 เมื่อลดปริมาณของตัวประสานลงเหลือเพียง 30 เปอร์เซ็นต์ พบว่า หญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 (*Pennisetum purpureum* x *P. glaucum* Pakchong 1; PC) สามารถต้านทานได้มากที่สุด ถึงร้อยละ 99.77 รองลงมา คือ หญ้ากินนีมอมบาซ่า (*Panicum maximum* cv. Mombaza; MB) และหญ้าอะตราตัม (*Paspalum atratum*; PA) ที่ต้านทานได้ร้อยละ 99.74 และ 99.70 ตามลำดับ เมื่อลดปริมาณของตัวประสานลงเหลือเพียง 20 เปอร์เซ็นต์ พบว่า หญ้ากินนีมอมบาซ่า (*Panicum maximum* cv. Mombaza; MB) สามารถต้านทานได้มากที่สุด ถึงร้อยละ 98.24 รองลงมา คือ หญ้าอะตราตัม (*Paspalum atratum*; PA) และหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 (*Pennisetum purpureum* x *P. glaucum* Pakchong 1; PC) ที่ต้านทานได้ร้อยละ 97.30 และ 95.08 ตามลำดับ และเมื่อลดปริมาณของตัวประสานลงเหลือเพียง 10 เปอร์เซ็นต์ พบว่า หญ้าทั้งสามชนิดดังกล่าว มีความสามารถต้านทานการแตกร่วนได้ต่ำกว่าร้อยละ 60 ซึ่งหญ้ากินนีมอมบาซ่า (*Panicum maximum* cv. Mombaza; MB) สามารถต้านทานการแตกร่วนได้ร้อยละ 43.09 ตามด้วย คือ หญ้าอะตราตัม (*Paspalum atratum*; PA) และหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 (*Pennisetum purpureum* x *P. glaucum* Pakchong 1; PC) ที่สามารถต้านทานการแตกร่วนเท่ากับร้อยละ 43.34 และ 58.12 ตามลำดับ

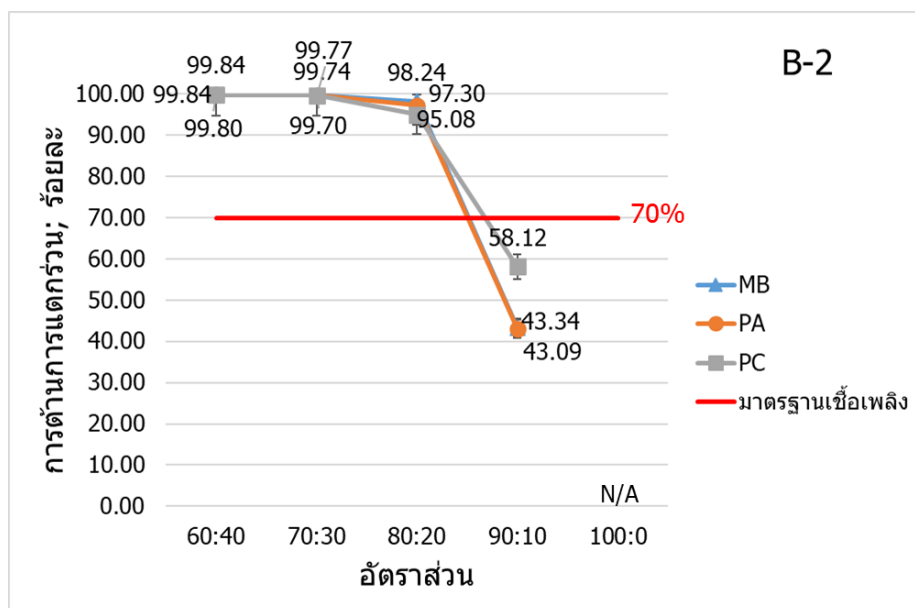
จากภาพประกอบ 62 แสดงถึงการต้านทานการแตกร่วนของเชื้อเพลิง briquettes กำลังอัด 3 MPa พบว่า เชื้อเพลิงที่อัตราส่วน 60:40 ไม่สามารถขึ้นรูปได้ ทำให้เชื้อเพลิงที่อัตราส่วน 70:30 มีความสามารถต้านทานการแตกร่วนได้ดีที่สุด โดยหญ้าหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 (*Pennisetum purpureum* x *P. glaucum* Pakchong 1; PC) สามารถต้านทานได้มากที่สุด ถึงร้อยละ 99.93 รองลงมา คือ หญ้าอะตราตัม (*Paspalum atratum*; PA) และหญ้ากินนีมอมบาซ่า (*Panicum maximum* cv. Mombaza; MB) ที่ต้านทานได้ร้อยละ 99.70 เท่ากัน เมื่อลดปริมาณของตัวประสานลงเหลือเพียง 20 เปอร์เซ็นต์ พบว่า หญ้าอะตราตัม (*Paspalum atratum*; PA) สามารถต้านทานได้มากที่สุด ถึงร้อยละ 97.30 รองลงมา คือ หญ้ากินนีมอมบาซ่า (*Panicum maximum* cv. Mombaza; MB) และหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 (*Pennisetum purpureum* x *P. glaucum* Pakchong 1; PC) ที่ต้านทานได้ร้อยละ 96.29 และ 95.99 ตามลำดับ และเมื่อลดปริมาณของตัวประสานลงเหลือเพียง 10 เปอร์เซ็นต์ พบว่า หญ้าทั้งสามชนิด สามารถต้านทานการแตกร่วนได้ร้อยละ 60.74 เท่ากัน



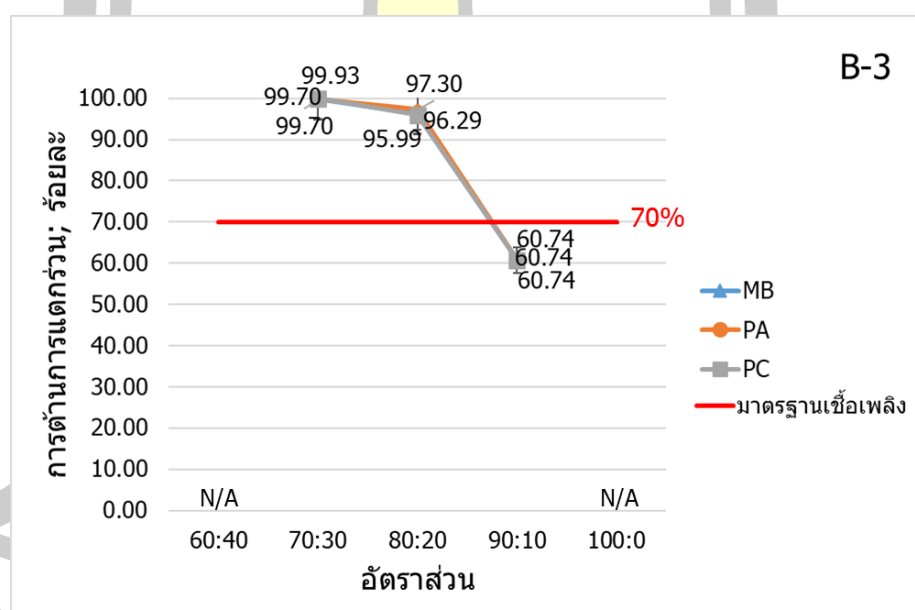
ภาพประกอบ 59 การต้านทานการแตกกรว่นของเชื้อเพลิง pellets



ภาพประกอบ 60 การต้านทานการแตกกรว่นของเชื้อเพลิง briquettes กำลังอัด 1 MPa



ภาพประกอบ 61 การต้านทานการแตกกร่อนของเชื้อเพลิง briquettes กำลังอัด 2 MPa



ภาพประกอบ 62 การต้านทานการแตกกร่อนของเชื้อเพลิง briquettes กำลังอัด 3 MPa  
หมายเหตุ: N/A คือ not applicable (ไม่สามารถขึ้นรูปเชื้อเพลิงได้)

### 3) ความต้านทานแรงกด (Compressive resistance) ของก้อนเชื้อเพลิง

การทดสอบการรับแรงกดเป็นการจำลองความทนทานระหว่างกาขนส่งและการจัดเก็บ ซึ่งการทดสอบทางสถิติ แสดงให้เห็นว่า ขนาดรูปทรง กำลังอัด และอัตราส่วนตัวประสานมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญกับการรับแรงกด ในขณะที่ชนิดของหญ้าไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญกับการรับแรงกด โดยตาราง 31 จะแสดงให้เห็นถึงคุณสมบัติความคงทนของเชื้อเพลิงอัดเม็ดและเชื้อเพลิงอัดก้อนจากหญ้าหลายฤดูทั้ง 3 ชนิด จากการศึกษาพบว่า การรับแรงกดของเชื้อเพลิงที่มีตัวประสานที่ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักสามารถรับแรงกดได้ต่ำที่สุด โดยเชื้อเพลิง pellets สามารถรับแรงกดได้เพียง 0.11-0.13 N และเชื้อเพลิง briquettes สามารถรับแรงกดได้เพียง 0.22-0.58 N (ตาราง 31) แสดงว่าเชื้อเพลิงนั้นไม่มีความสามารถในการต้านทานแรงกด ซึ่งจะทำให้เชื้อเพลิงเกิดการแตกเสียหายง่าย ไม่คงทนต่อการขนส่ง ในขณะที่การเพิ่มตัวประสานเป็นร้อยละ 40 โดยน้ำหนักนั้นทำให้เชื้อเพลิงมีความหนาแน่นมากขึ้น สามารถรับแรงกดได้มากขึ้น โดยเชื้อเพลิง pellets สามารถรับแรงกดได้เพียง 0.37-0.38 N และเชื้อเพลิง briquettes สามารถรับแรงกดได้เพียง 3.26-5.28 N (ตาราง 31)

เชื้อเพลิง pellets จากการทดสอบแรงกด จะเห็นได้ว่า อัตราส่วนของตัวประสานและหญ้าหลายฤดูมีความสำคัญต่อการพิจารณาการรับแรงกดของก้อนเชื้อเพลิง โดยเชื้อเพลิงอัดเม็ดสามารถรับแรงกดได้สูงที่สุดอยู่ที่อัตราส่วน 60:40 คือระหว่างช่วง 0.37-0.38 N โดยหญ้าที่รับแรงกดได้สูงที่สุดคือ หญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 (*Pennisetum purpureum* x *P. glaucum* Pakchong 1; PC) (0.38 N) (ตาราง 31) รองลงมาคือ หญ้าอะตราตัม (*Paspalum atratum*; PA) และหญ้างินนิมอมบาซ่า (*Panicum maximum* cv. Mombaza; MB) (0.37N) (ตาราง 27) ซึ่งมีความแตกต่างกันร้อยละ 2.63 และเมื่อพิจารณาอัตราส่วนรองลงมา คือ 70:30 80:20 และ 90:10 จะเห็นได้ว่าเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากหญ้าทั้งสามชนิดจะมีการรับแรงกดได้น้อยลงตามลำดับ (ตาราง 31) โดยแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มปริมาณตัวประสานเพิ่มขึ้นส่งผลให้เชื้อเพลิงยึดเกาะกันแน่นขึ้นจะสามารถรับแรงกดได้มากขึ้นด้วย ซึ่งมีแนวโน้มเดียวกันกับความหนาแน่นของเชื้อเพลิง

เชื้อเพลิง briquettes จากการศึกษาพบว่า เชื้อเพลิงที่สามารถรับแรงกดได้สูงที่สุดอยู่ที่อัตราส่วน อัตราส่วน 60:40 ซึ่ง เชื้อเพลิงที่รับแรงกดในอัตราส่วนนี้คือ กำลังอัด 2 MPa มีการรับแรงกดได้ในระหว่างช่วง 3.99-5.28 N โดยหญ้าที่รับแรงกดได้สูงที่สุดคือ หญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 (*Pennisetum purpureum* x *P. glaucum* Pakchong 1; PC) (5.28 N) (ตาราง 31) รองลงมาคือ หญ้าอะตราตัม (*Paspalum atratum*; PA) และหญ้างินนิมอมบาซ่า (*Panicum maximum* cv. Mombaza; MB) (4.84 และ 3.99 N ตามลำดับ) (ตาราง 31)

ตาราง 31 คุณสมบัติการรับแรงกด (Compressive resistance) ของเชื้อเพลิงอัดแข็ง

| ชนิด | อัตราส่วน | การรับแรงกด (N) |                            |                            |           |
|------|-----------|-----------------|----------------------------|----------------------------|-----------|
|      |           | P               | B-1                        | B-2                        | B-3       |
| MB   | 60:40     | 0.37±0.00       | 4.22±0.00                  | 3.99±0.00                  | N/A       |
|      | 70:30     | 0.33±0.00       | 2.84±0.01 <sup>a,b,c</sup> | 2.70±0.00                  | 3.43±0.00 |
|      | 80:20     | 0.26±0.00       | 1.61±0.00                  | 1.98±0.00                  | 1.26±0.00 |
|      | 90:10     | 0.14±0.00       | 0.31±0.01 <sup>a,b,c</sup> | 0.46±0.00                  | 0.58±0.00 |
|      | 100:0     | N/A             | N/A                        | N/A                        | N/A       |
| PA   | 60:40     | 0.37±0.00       | 3.26±0.01 <sup>a,b,c</sup> | 4.84±0.00                  | N/A       |
|      | 70:30     | 0.35±0.00       | 2.53±0.01 <sup>a,b,c</sup> | 2.35±0.00                  | 3.55±0.00 |
|      | 80:20     | 0.26±0.00       | 0.95±0.00                  | 1.59±0.00                  | 1.58±0.00 |
|      | 90:10     | 0.11±0.00       | 0.18±0.00                  | 0.50±0.00                  | 0.35±0.00 |
|      | 100:0     | N/A             | N/A                        | N/A                        | N/A       |
| PC   | 60:40     | 0.38±0.00       | 3.77±0.00                  | 5.28±0.01 <sup>a,b,c</sup> | N/A       |
|      | 70:30     | 0.34±0.00       | 2.09±0.00                  | 2.26±0.00                  | 3.53±0.00 |
|      | 80:20     | 0.25±0.00       | 1.12±0.00                  | 1.03±0.01 <sup>a,b,c</sup> | 1.53±0.00 |
|      | 90:10     | 0.13±0.00       | 0.22±0.00                  | 0.22±0.01 <sup>a,b,c</sup> | 0.53±0.00 |
|      | 100:0     | N/A             | N/A                        | N/A                        | N/A       |

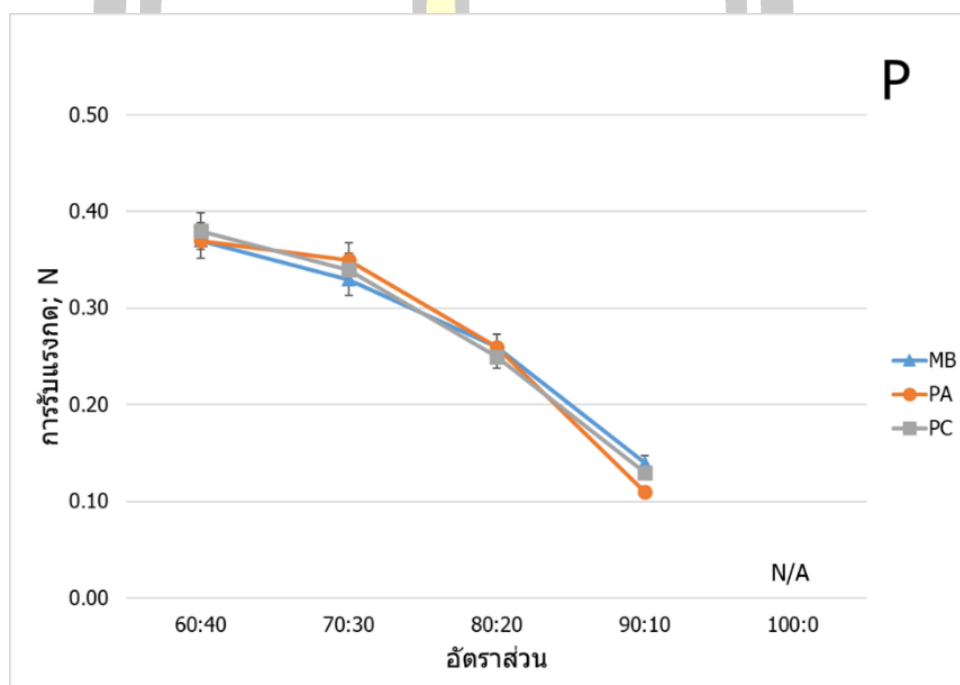
หมายเหตุ: N/A คือ not applicable (ไม่สามารถขึ้นรูปเชื้อเพลิงได้)

a หมายถึง อัตราส่วนของเชื้อเพลิงทำให้การรับแรงกดของเชื้อเพลิงมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 (ANOVA)

b หมายถึง รูปทรงของเชื้อเพลิงทำให้การรับแรงกดของเชื้อเพลิงมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 (T-test) โดยการวิเคราะห์เปรียบเทียบเป็นคู่ คือ P กับ B-1, P กับ B-2 และ P กับ B-3

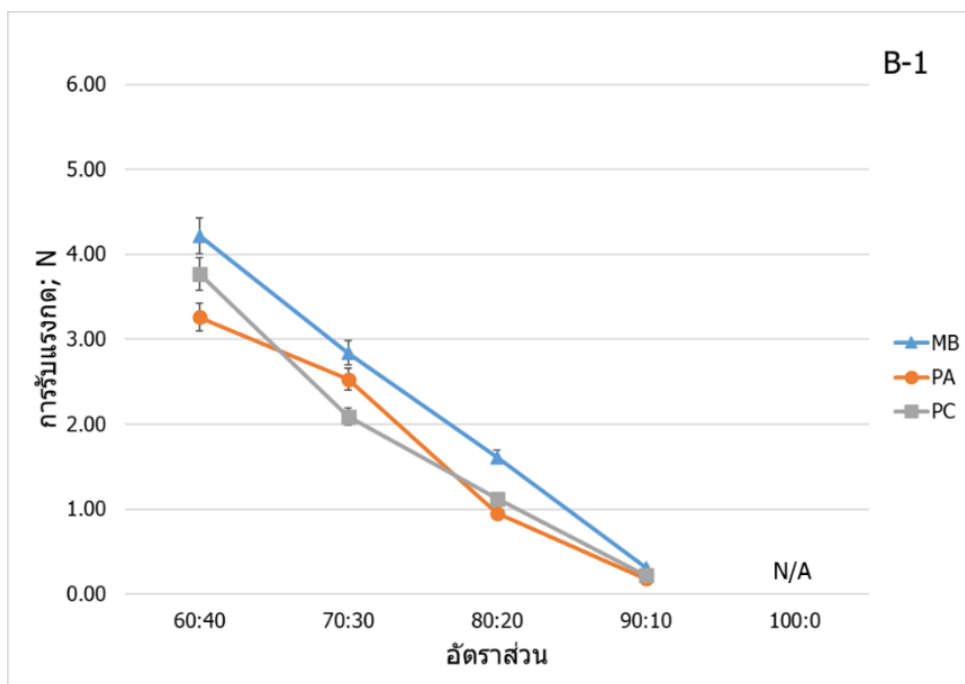
c หมายถึง กำลังอัดของหัวหลายฤดูทำให้การรับแรงกดของเชื้อเพลิงมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 (ANOVA)

จากการศึกษาพบว่า เชื้อเพลิงอัดแข็งที่อัตราส่วน 60:40 เป็นอัตราส่วนที่ดีที่สุดทั้งในเชื้อเพลิง briquettes ที่กำลังอัด 2 MPa และเชื้อเพลิง pellets จากภาพประกอบ 63-66 จะเห็นได้ว่า เชื้อเพลิงอัดก้อนสามารถรับแรงกดได้มากกว่าเชื้อเพลิงอัดเม็ดของหญ้าทั้ง 3 ชนิด ซึ่งหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 (*Pennisetum purpureum* x *P. glaucum* Pakchong 1; PC) สูงที่สุด (5.28 N) ซึ่งสูงกว่าเชื้อเพลิงอัดเม็ด โดยมีความแตกต่างกับเชื้อเพลิงอัดก้อนถึง 4.9 N คิดเป็นร้อยละ 92.8 โดยหญ้าหลายฤดูทั้ง 3 ชนิดไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ( $p>0.05$ ) ดังนั้นเมื่อพิจารณาคุณสมบัติความหนาแน่นก้อนของเชื้อเพลิง พบว่า เชื้อเพลิงอัดก้อน ในอัตราส่วนของหญ้าต่อแยมันสำปะหลังที่ 70:30 กำลังอัด 2 MPa ของหญ้าทั้งสามชนิดมีความเหมาะสมที่สุด

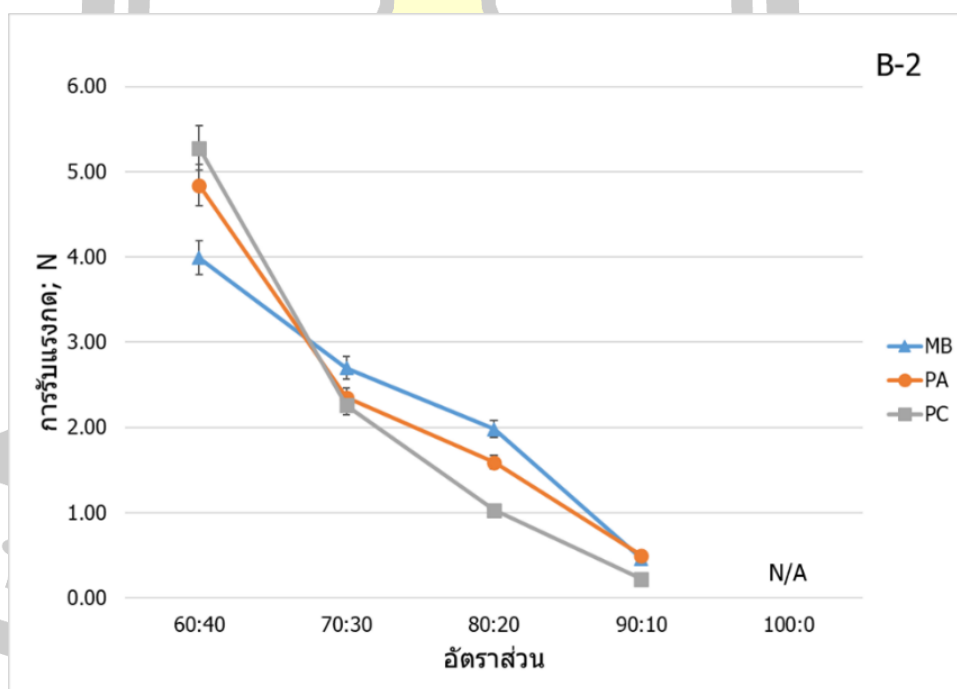


ภาพประกอบ 63 การรับแรงกดของเชื้อเพลิง pellets

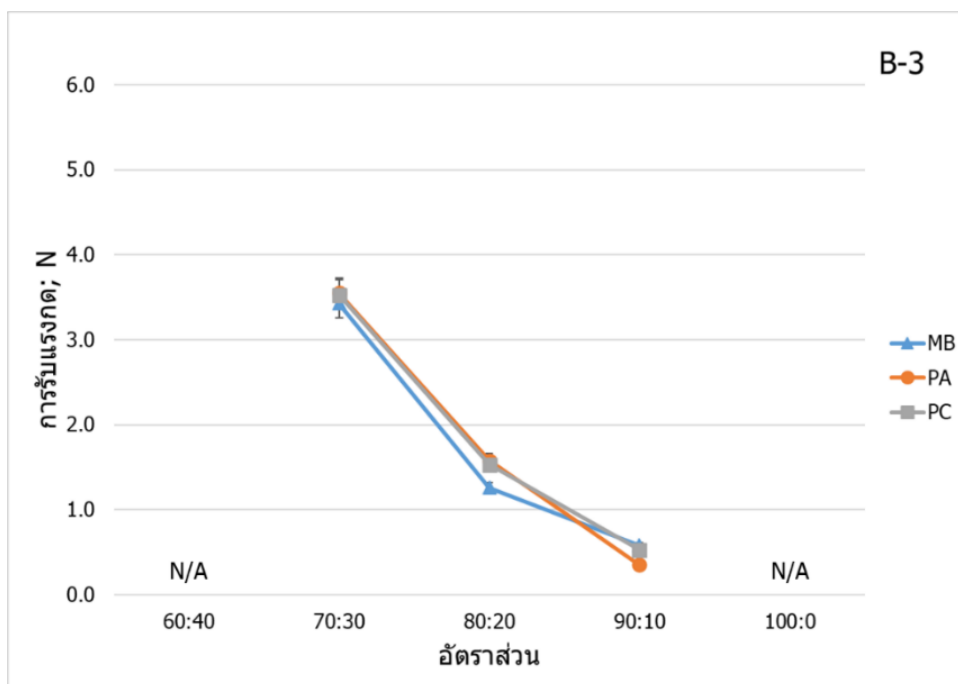
พหุ ประถม ๖๖ ชีวะ



ภาพประกอบ 64 การรับแรงกดของเชื้อเพลิง briquettes กำลังอัด 1 MPa



ภาพประกอบ 65 การรับแรงกดของเชื้อเพลิง briquettes กำลังอัด 2 MPa



ภาพประกอบ 66 การรับแรงกดของเชื้อเพลิง briquettes กำลังอัด 3 MPa

หมายเหตุ: N/A คือ not applicable (ไม่สามารถขึ้นรูปเชื้อเพลิงได้)

#### 4) ความต้านทานการซึมน้ำ (Water resistance) ของก้อนเชื้อเพลิง

ค่าการดูดซึมน้ำเป็นการทดสอบเพื่อ ศึกษาลักษณะของเชื้อเพลิงเมื่อถูกความชื้นซึ่งจะเกิดขึ้นในระหว่างการขนส่งและการจัดเก็บ ก่อนนำไปใช้งาน หากเชื้อเพลิงมีค่าการดูดซึมน้ำสูงและเกิดการขยายตัวไม่คงรูปก็จะทำให้เชื้อเพลิงแตกเสียหายและไม่มีคุณภาพ แต่ถ้าหากเชื้อเพลิงมีค่าการดูดซึมน้ำที่ต่ำและเชื้อเพลิงยังคงรูปแสดงว่าเชื้อเพลิงนั้นมีความคงทนต่อน้ำ และมีการดูดซึมน้ำเข้าไปน้อย จึงสามารถนำกลับมาใช้อีกครั้งได้หากนำไปตากให้แห้ง

การทดสอบค่าการดูดซึมของเชื้อเพลิงอัดแข็งโดยการนำเชื้อเพลิงหลังจากการขึ้นรูปและผ่านการตากให้แห้งเรียบร้อยแล้วนำมาทดสอบค่าการดูดซึมน้ำ จากการทดสอบความแปรปรวนของค่าเฉลี่ยการต้านทานการดูดซึม พบว่า ขนาดรูปทรง กำลังอัด และตัวประสาน มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ( $p < 0.05$ ) ในขณะที่ชนิดของหญ้าหลายฤดูไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ( $p > 0.05$ ) โดยตาราง 34 จะแสดงให้เห็นถึงคุณสมบัติความคงทนของเชื้อเพลิงอัดเม็ดและเชื้อเพลิงอัดก้อนจากหญ้าหลายฤดูทั้ง 3 ชนิด

เชื้อเพลิงอัดเม็ด (pellets) จากการทดสอบการต้านทานการดูดซึมน้ำ จะเห็นได้ว่าอัตราส่วนของตัวประสานและหญ้าหลายฤดูมีความสำคัญต่อการพิจารณาการต้านทานการดูดซึมน้ำของก้อนเชื้อเพลิง โดยเชื้อเพลิงอัดเม็ดสามารถต้านทานการดูดซึมน้ำได้มากกว่าร้อยละ 50 ซึ่งจะ

แสดงดังภาพประกอบ 68 โดยหญ้าทั้ง 3 ชนิดดังกล่าว ที่ตัวประสาน 40 และ 30 เปอร์เซนต์สามารถต้านทานการดูดซึมน้ำได้สูงที่สุด (ร้อยละ 86.7) เมื่อพิจารณาอัตราส่วนรองลงมา คือ 80:20 และ 90:10 จะเห็นได้ว่าเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากหญ้าทั้งสามชนิดไม่สามารถต้านทานการดูดซึมน้ำได้เลย ซึ่งมีความแตกต่างกันถึงร้อยละ 86 (ตาราง 32) โดยแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มปริมาณตัวประสานเพิ่มขึ้นส่งผลให้เชื้อเพลิงอัดเม็ดเกาะกันแน่นขึ้นจะสามารถทนการดูดซึมน้ำได้มากขึ้นด้วย ซึ่งมีแนวโน้มเดียวกันกับความหนาแน่นของเชื้อเพลิง

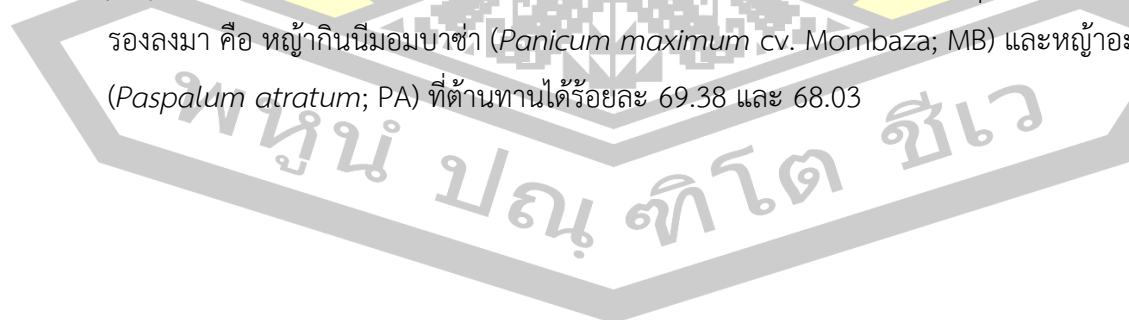
เชื้อเพลิงอัดก้อน (briquettes) จากการศึกษาพบว่า เชื้อเพลิงที่สามารถต้านทานการดูดซึมน้ำได้สูงที่สุดอยู่ที่อัตราส่วน อัตราส่วน 60:40 ซึ่งแสดงผลในหญ้าทั้ง 3 ชนิด จากภาพประกอบ 69 แสดงถึงการต้านทานการดูดซึมน้ำของเชื้อเพลิงอัดก้อน กำลังอัด 1 MPa พบว่าเชื้อเพลิงที่อัตราส่วน 60:40 มีความสามารถต้านทานการดูดซึมน้ำได้ดีที่สุด โดยหญ้าอะตราตัม (*Paspalum atratum*; PA) สามารถต้านทานได้มากที่สุด ถึงร้อยละ 75.93 รองลงมา คือ หญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 (*Pennisetum purpureum* x *P. glaucum* Pakchong 1; PC) และหญ้างินนิมอมบาซ่า (*Panicum maximum* cv. Mombaza; MB) ที่ต้านทานได้ร้อยละ 71.56 และ 71.57 ตามลำดับ เมื่อลดปริมาณของตัวประสานลงเหลือเพียง 30 เปอร์เซนต์ พบว่า หญ้ากินนิมอมบาซ่า (*Panicum maximum* cv. Mombaza; MB) สามารถต้านทานได้มากที่สุด ถึงร้อยละ 65.23 รองลงมา คือ หญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 (*Pennisetum purpureum* x *P. glaucum* Pakchong 1; PC) และหญ้าอะตราตัม (*Paspalum atratum*; PA) ที่ต้านทานได้ร้อยละ 65.19 และ 64.67 ตามลำดับ เมื่อลดปริมาณของตัวประสานลงเหลือเพียง 20 และ 10 เปอร์เซนต์ พบว่า หญ้าทั้งสามชนิดดังกล่าวไม่สามารถต้านทานการดูดซึมน้ำได้เลย (ภาพประกอบ 67) ซึ่งแสดงว่าเชื้อเพลิงนั้นมีการดูดซึมน้ำเข้าไปมาก และเชื้อเพลิงเกิดการขยายตัวเมื่อได้รับความชื้น ไม่มีการจับตัวกัน อาจจะมีผลมาจากก้อนเชื้อเพลิงนั้นมีการจับตัวกันแบบหลวมๆ จึงทำให้น้ำสามารถซึมผ่านเข้าไปได้ง่าย อีกทั้งโครงสร้างของชีวมวลที่มีเฮมิเซลลูโลส ซึ่งมีคุณสมบัติที่ไม่ละลายน้ำ แต่มีความสามารถในการอุ้มน้ำ (water holding capacity) (มาลินี ศรีอรียนันท์, 2555) ดังนั้นจึงเป็นสาเหตุที่ทำให้เชื้อเพลิงที่ขึ้นรูปโดยใช้ตัวประสานปริมาณน้อยนั้นมีความการดูดซึมน้ำที่สูง ซึ่งจะทำให้เชื้อเพลิงเกิดการแตกเสียหายง่าย ไม่คงทนต่อการขนส่ง และไม่สามารถนำไปใช้งานได้



ภาพประกอบ 67 ลักษณะเชื้อเพลิงที่ไม่สามารถทนต่อการดูดซึมน้ำ

จากภาพประกอบ 70 แสดงถึงการต้านทานการดูดซึมน้ำของเชื้อเพลิงอัดก้อน กำลังอัด 2 MPa พบว่า เชื้อเพลิงที่อัตราส่วน 60:40 มีความสามารถต้านทานการดูดซึมน้ำได้ดีที่สุด โดยกินนิมอมบาซ่า (*Panicum maximum* cv. Mombaza; MB) สามารถต้านทานได้มากที่สุด ถึงร้อยละ 79.70 รองลงมา คือ หญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 (*Pennisetum purpureum* x *P. glaucum* Pakchong 1; PC) และหญ้าอะตราตัม (*Paspalum atratum*; PA) ที่ต้านทานได้ร้อยละ 78.81 และ 73.10 ตามลำดับ เมื่อลดปริมาณของตัวประสานลงเหลือเพียง 30 เปอร์เซ็นต์ พบว่า หญ้ากินนิมอมบาซ่า (*Panicum maximum* cv. Mombaza; MB) สามารถต้านทานได้มากที่สุด ถึงร้อยละ 67.91 รองลงมา คือ หญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 (*Pennisetum purpureum* x *P. glaucum* Pakchong 1; PC) และ หญ้าอะตราตัม (*Paspalum atratum*; PA) ที่ต้านทานได้ร้อยละ 67.86 และ 66.69 ตามลำดับ

จากภาพประกอบ 71 แสดงถึงการต้านทานการดูดซึมน้ำของเชื้อเพลิงอัดก้อน กำลังอัด 3 MPa พบว่า เชื้อเพลิงที่อัตราส่วน 60:40 ไม่สามารถขึ้นรูปได้ ทำให้เชื้อเพลิงที่มีตัวประสาน 30 เปอร์เซ็นต์ มีความสามารถต้านทานการดูดซึมน้ำได้ดีที่สุด โดยหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 (*Pennisetum purpureum* x *P. glaucum* Pakchong 1; PC) สามารถต้านทานได้มากที่สุด ถึงร้อยละ 69.56 รองลงมา คือ หญ้ากินนิมอมบาซ่า (*Panicum maximum* cv. Mombaza; MB) และหญ้าอะตราตัม (*Paspalum atratum*; PA) ที่ต้านทานได้ร้อยละ 69.38 และ 68.03



ตาราง 32 คุณสมบัติการต้านทานการดูดซึมน้ำ (Water resistance) ของเชื้อเพลิงอัดแข็ง

| ชนิด | อัตราส่วน          | การต้านทานการดูดซึมน้ำ (ร้อยละ) |                    |                  |                  |
|------|--------------------|---------------------------------|--------------------|------------------|------------------|
|      |                    | p <sup>b</sup>                  | B-1 <sup>b,c</sup> | B-2 <sup>c</sup> | B-3 <sup>c</sup> |
| MB   | 60:40 <sup>a</sup> | 86.67±0.00                      | 71.57±2.23         | 79.70±0.85       | N/A              |
|      | 70:30 <sup>a</sup> | 86.67±0.00                      | 65.23±2.39         | 66.69±1.03       | 69.38±1.03       |
|      | 80:20 <sup>a</sup> | 0.00                            | 0.00               | 0.00             | 0.00             |
|      | 90:10 <sup>a</sup> | 0.00                            | 0.00               | 0.00             | 0.00             |
|      | 100:0 <sup>a</sup> | N/A                             | N/A                | N/A              | N/A              |
| PA   | 60:40 <sup>a</sup> | 86.67±0.00                      | 75.93±1.70         | 73.10±0.00       | N/A              |
|      | 70:30 <sup>a</sup> | 86.67±0.00                      | 64.67±1.25         | 67.91±1.03       | 68.03±1.03       |
|      | 80:20 <sup>a</sup> | 0.00                            | 0.00               | 0.00             | 0.00             |
|      | 90:10 <sup>a</sup> | 0.00                            | 0.00               | 0.00             | 0.00             |
|      | 100:0 <sup>a</sup> | N/A                             | N/A                | N/A              | N/A              |
| PC   | 60:40 <sup>a</sup> | 86.67±0.00                      | 71.56±0.00         | 78.81±1.03       | N/A              |
|      | 70:30 <sup>a</sup> | 86.67±0.00                      | 65.19±0.00         | 67.86±1.21       | 69.56±1.09       |
|      | 80:20 <sup>a</sup> | 0.00                            | 0.00               | 0.00             | 0.00             |
|      | 90:10 <sup>a</sup> | 0.00                            | 0.00               | 0.00             | 0.00             |
|      | 100:0 <sup>a</sup> | N/A                             | N/A                | N/A              | N/A              |

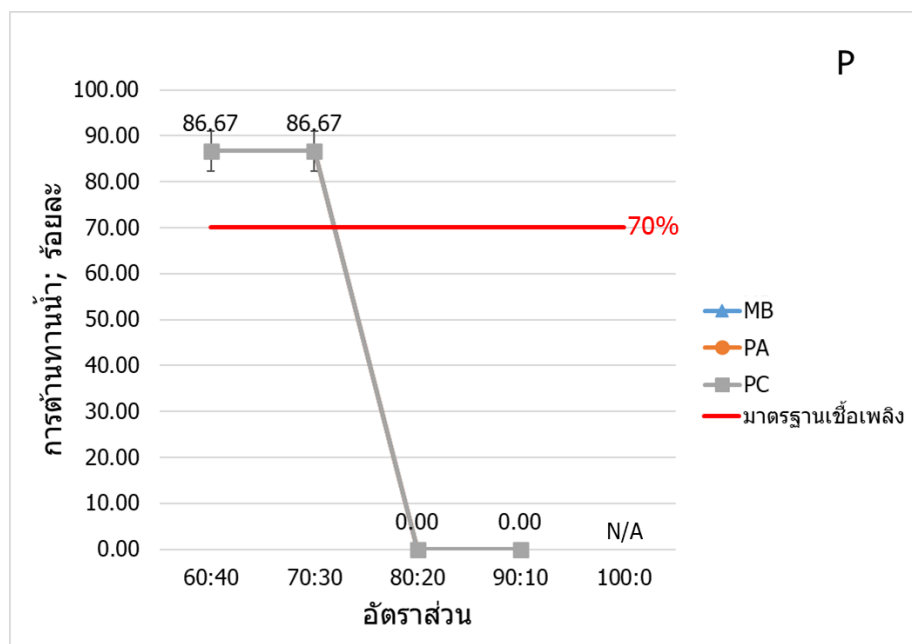
หมายเหตุ: N/A คือ not applicable (ไม่สามารถขึ้นรูปเชื้อเพลิงได้)

0.00 หมายถึง เชื้อเพลิงไม่สามารถทนต่อการดูดซึมน้ำ

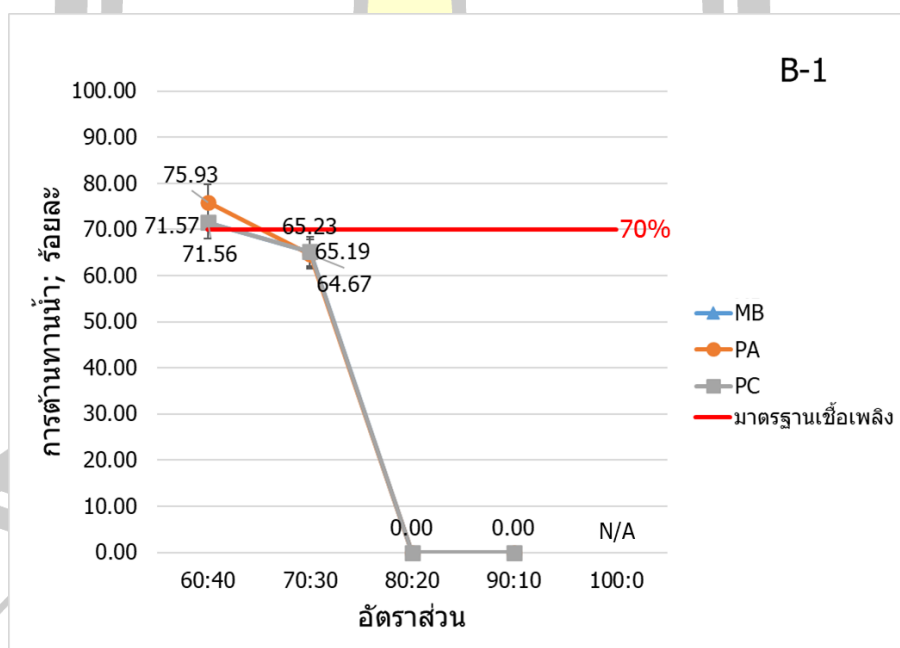
a หมายถึง อัตราส่วนของเชื้อเพลิงทำให้การต้านทานการดูดซึมน้ำของเชื้อเพลิงมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 (ANOVA)

b หมายถึง รูปทรงของเชื้อเพลิงทำให้การต้านทานการดูดซึมน้ำของเชื้อเพลิงมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 (T-test) โดยการวิเคราะห์เปรียบเทียบเป็นคู่ คือ P กับ B-1, P กับ B-2 และ P กับ B-3

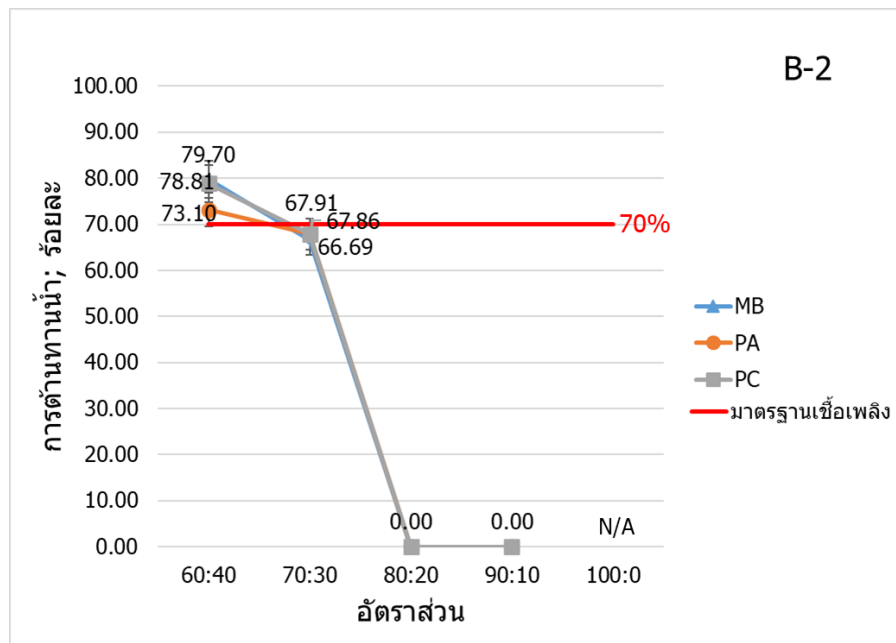
c หมายถึง กำลังอัดของหลัหลายฤดูทำให้การต้านทานการดูดซึมน้ำของเชื้อเพลิงมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 (ANOVA)



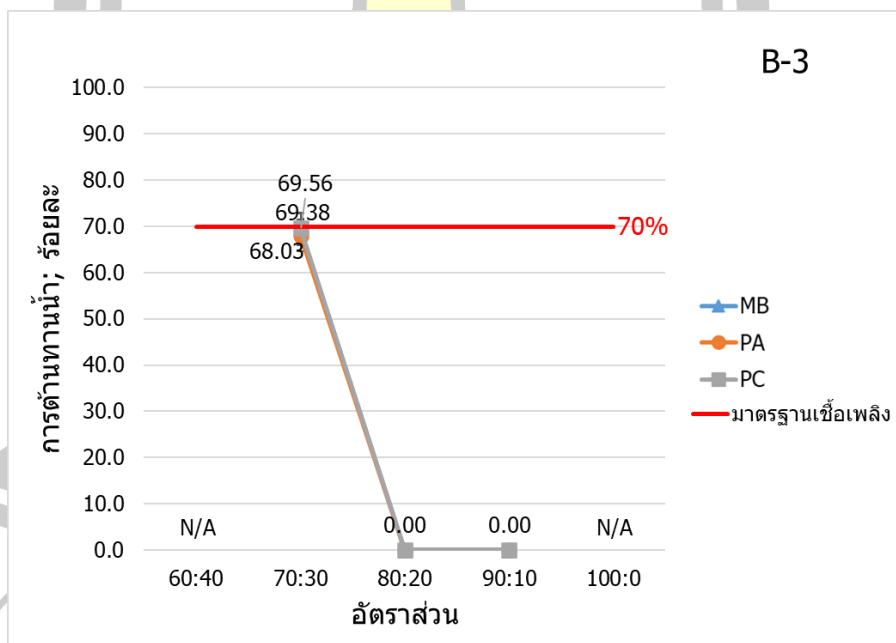
ภาพประกอบ 68 การต้านทานการดูดซึมน้ำของเชื้อเพลิง pellets



ภาพประกอบ 69 การต้านทานการดูดซึมน้ำของเชื้อเพลิง briquettes กำลังอัด 1 MPa



ภาพประกอบ 70 การต้านทานการดูดซึมน้ำของเชื้อเพลิง briquettes กำลังอัด 2 MPa



ภาพประกอบ 71 การต้านทานการดูดซึมน้ำของเชื้อเพลิง briquettes กำลังอัด 3 MPa

หมายเหตุ: N/A คือ not applicable (ไม่สามารถขึ้นรูปเชื้อเพลิงได้)

ดังนั้น จากการศึกษาปัจจัยด้านตัวประสาน กำลังอัด และรูปทรงของเชื้อเพลิงที่ส่งผลต่อความคงทน พบว่า การเพิ่มตัวประสานร้อยละ 10 – 40 ทำให้เชื้อเพลิงมีความคงทนสูงขึ้น โดยที่เชื้อเพลิงที่มีตัวประสานร้อยละ 30 และ 40 โดยน้ำหนัก จะมีความคงทนที่มากกว่า 80 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งผ่านเกณฑ์มาตรฐานเชื้อเพลิงกำหนดไว้ที่ 70 เปอร์เซ็นต์ แต่อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาปริมาณตัวประสานทั้ง 2 ส่วนนั้น พบว่า การเพิ่มปริมาณแ่งที่แตกต่างกันในช่วงนี้ไม่ส่งผลให้ค่าความคงทนแตกต่างกันมาก ดังนั้นหากจะต้องผลิตเชื้อเพลิงให้มีความคงทนโดยใช้แ่งเป็นตัวประสานก็ไม่จำเป็นต้องใช้ปริมาณแ่งมากเกินไป และใช้ปริมาณตัวประสานที่มากขึ้นก็จะเป็นการเพิ่มค่าใช้จ่ายในการผลิตให้ที่สูงขึ้นด้วยเช่นกัน จึงไม่จำเป็นต้องเพิ่มปริมาณตัวประสานถึง 40% ทำให้การใช้ตัวประสานแค่ 30% ก็เพียงพอแล้ว ในส่วนของเชื้อเพลิงอัดก้อนที่ศึกษากำลังอัดขึ้นรูปจะเห็นได้ว่าการเพิ่มแรงอัดในการขึ้นรูปให้สูงขึ้นในอัตราส่วนเดียวกันนั้นส่งผลให้เชื้อเพลิงมีคงทนเพิ่มขึ้น แต่เมื่อพิจารณาร่วมกับตัวประสานแล้ว พบว่าการเพิ่มกำลังอัดทำให้เชื้อเพลิงมีความคงทนเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย แต่การเพิ่มตัวประสานขึ้นนั้นทำให้คงทนเพิ่มขึ้นมากกว่า ดังนั้นหากใช้ตัวประสานในปริมาณมากขึ้นก็ควรใช้แรงอัดในการขึ้นรูปที่ต่ำ แต่ถ้าใช้ปริมาณตัวประสานที่น้อยควรใช้แรงอัดในการขึ้นรูปสูง เพื่อให้ได้เชื้อเพลิงที่มีความคงทนสูง

#### 4.2.3 ปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความร้อนและความหนาแน่นพลังงาน

##### 1) ปัจจัยด้านตัวประสานของเชื้อเพลิง

##### 1.1) ปัจจัยด้านตัวประสานของเชื้อเพลิงส่งผลต่อพลังงานความร้อน

จากการทดสอบหาค่าความร้อน (High heat value: HHV) ของเชื้อเพลิงอัดแข็งจากหญ้าหลายฤดู ได้แก่ หญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 (*Pennisetum purpureum* x *P. glaucum* (Pakchong 1); PC) และ หญ้ากินนีมอมบาซ่า (*Panicum maximum* (Mombaza); MB) ในอัตราส่วนตัวประสาน กำลังอัด และขนาดรูปทรงของเชื้อเพลิงที่แตกต่างกัน จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าเฉลี่ยค่าความร้อน พบว่า ชนิด กำลังอัด รูปทรง และตัวประสานไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 จะเห็นได้ว่า เชื้อเพลิงที่มีตัวประสาน 10 เปอร์เซ็นต์จะให้ค่าความร้อนที่สูงที่สุด ซึ่งแสดงให้เห็นใน หญ้าอะตราตัม (*Paspalum atratum*; PA) คือ 16.5 MJ/kg รองลงมาคือ หญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 (*Pennisetum purpureum* x *P. glaucum* (Pakchong 1); PC) และ หญ้ากินนีมอมบาซ่า (*Panicum maximum* (Mombaza); MB) ที่แสดงค่าความร้อนของเชื้อเพลิงเท่ากัน คือ 16.4 MJ/kg ดังแสดงในตาราง 33

ตาราง 33 ค่าความร้อน (High heat value: HHV) ของเชื้อเพลิงอัดแข็งจากหญ้าหลายฤดู

| ชนิด | อัตราส่วน          | ค่าความร้อน (MJ/kg) |                    |                    |                    |
|------|--------------------|---------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
|      |                    | p <sup>b</sup>      | B-1 <sup>b,c</sup> | B-2 <sup>b,c</sup> | B-3 <sup>b,c</sup> |
| MB   | 60:40 <sup>a</sup> | 15.9±0.02           | 15.9±0.03          | 15.9±0.04          | N/A                |
|      | 70:30 <sup>a</sup> | 16.0±0.01           | 16.0±0.05          | 16.0±0.04          | 16.0±0.01          |
|      | 80:20 <sup>a</sup> | 16.3±0.04           | 16.3±0.01          | 16.3±0.02          | 16.3±0.03          |
|      | 90:10 <sup>a</sup> | 16.4±0.02           | 16.4±0.04          | 16.4±0.06          | 16.4±0.07          |
|      | 100:0 <sup>a</sup> | N/A                 | N/A                | N/A                | N/A                |
| PA   | 60:40 <sup>a</sup> | 15.8±0.01           | 15.8±0.03          | 15.8±0.04          | N/A                |
|      | 70:30 <sup>a</sup> | 16.1±0.05           | 16.1±0.05          | 16.1±0.05          | 16.1±0.05          |
|      | 80:20 <sup>a</sup> | 16.3±0.04           | 16.3±0.06          | 16.3±0.02          | 16.3±0.04          |
|      | 90:10 <sup>a</sup> | 16.5±0.02           | 16.5±0.90          | 16.5±0.08          | 16.5±0.09          |
|      | 100:0 <sup>a</sup> | N/A                 | N/A                | N/A                | N/A                |
| PC   | 60:40 <sup>a</sup> | 16.0±0.04           | 16.0±0.09          | 16.0±0.05          | N/A                |
|      | 70:30 <sup>a</sup> | 16.2±0.02           | 16.2±0.05          | 16.2±0.01          | 16.2±0.07          |
|      | 80:20 <sup>a</sup> | 16.4±0.05           | 16.4±0.02          | 16.4±0.04          | 16.4±0.05          |
|      | 90:10 <sup>a</sup> | 16.4±0.09           | 16.4±0.04          | 16.4±0.08          | 16.4±0.06          |
|      | 100:0 <sup>a</sup> | N/A                 | N/A                | N/A                | N/A                |

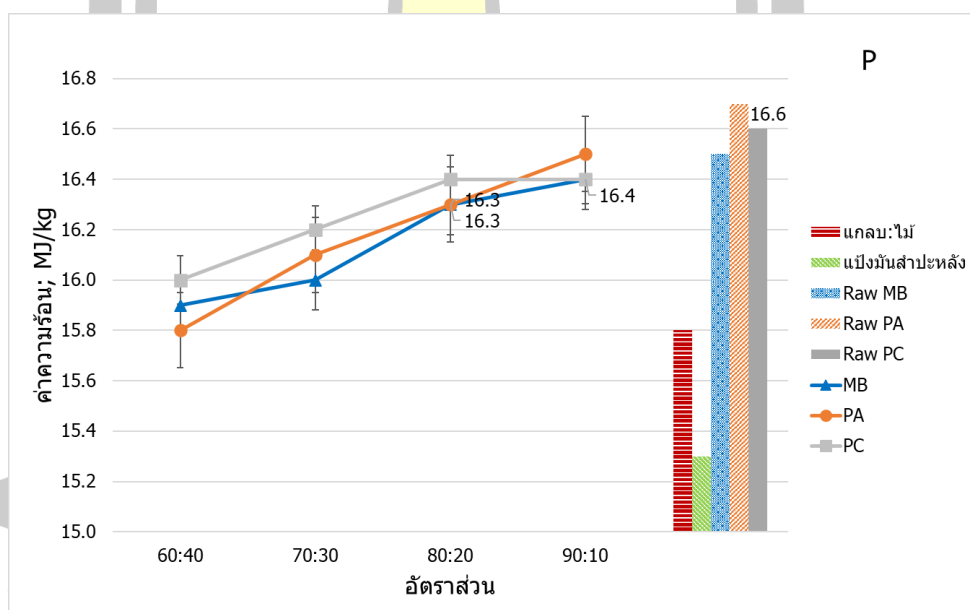
หมายเหตุ: N/A คือ not applicable (ไม่สามารถขึ้นรูปได้)

a หมายถึง อัตราส่วนของเชื้อเพลิงทำให้ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 (ANOVA)

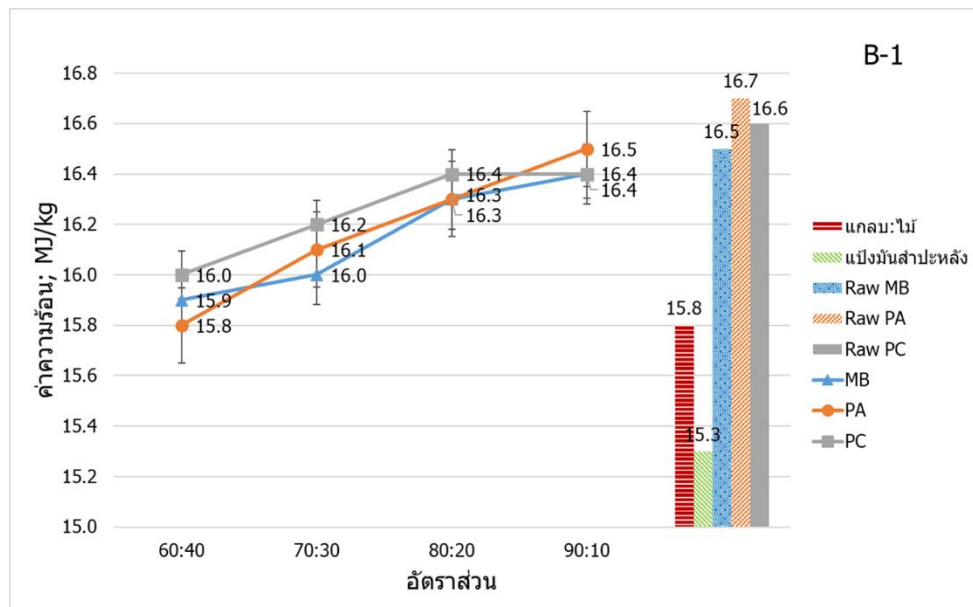
b หมายถึง รูปทรงของเชื้อเพลิงทำให้ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 (T-test) โดยการวิเคราะห์เปรียบเทียบเป็นคู่ คือ P กับ B-1, P กับ B-2 และ P กับ B-3

c หมายถึง กำลังอัดของหญ้าหลายฤดูทำให้ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 (ANOVA)

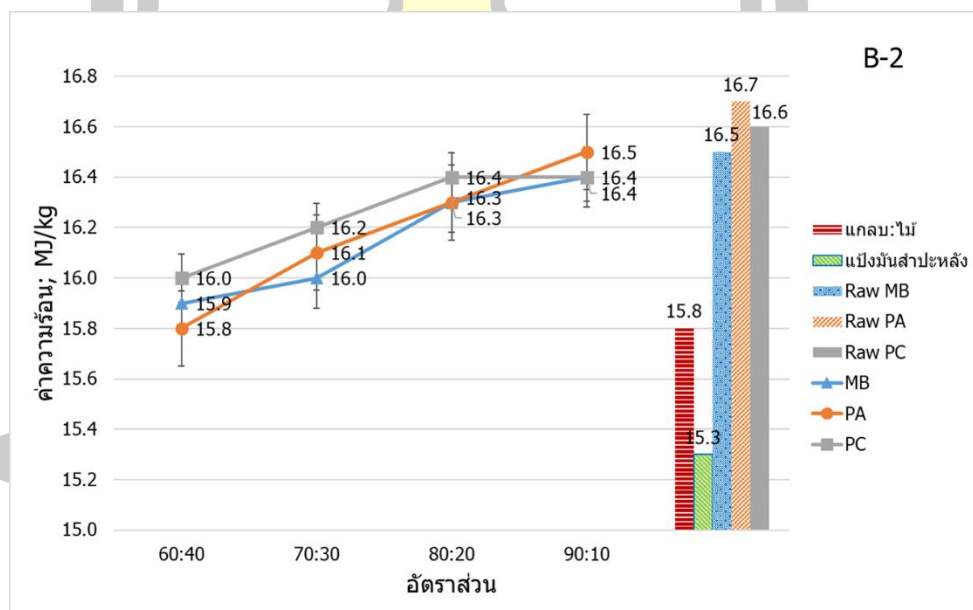
เชื้อเพลิงอัดเม็ดจากภาพประกอบ 72 แสดงให้เห็นถึงค่าความร้อนสูงของเชื้อเพลิงอัดแข็งจากหญ้าหลายฤดู พบว่า เชื้อเพลิงอัตราส่วน 90:10 มีค่าพลังงานที่สูงที่สุดในหญ้าทั้ง 3 ชนิด โดยหญ้าอะตราตัม (*Paspalum atratum*; PA) มีค่าความร้อนมากที่สุด (16.5 MJ/kg) รองลงมาคือ หญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 หญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 (*Pennisetum purpureum* x *P. glaucum* (Pakchong 1); PC) และ หญ้ากินนีมอมบาซ่า (*Panicum maximum* (Mombaza); MB) (16.4 และ 16.4 MJ/kg ตามลำดับ) ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับหญ้าทั้ง 3 ชนิดดังกล่าวที่ยังไม่ได้อัดขึ้นรูปไม่มีตัวประสานจะมีค่าความร้อนสูงอยู่ที่ 16.7, 16.6 และ 16.5 MJ/kg ตามลำดับ และเมื่อเพิ่มตัวประสาน 10-20 เปอร์เซ็นต์ จะทำให้เชื้อเพลิงมีค่าความร้อนลดลงถึง 0.1 MJ/kg คิดเป็นร้อยละ 1.5 ในขณะที่เพิ่มตัวประสาน 30-40 เปอร์เซ็นต์ จะทำให้เชื้อเพลิงมีค่าความร้อนลดลงถึง 0.2 MJ/kg คิดเป็นร้อยละ 3 ซึ่งจากการศึกษาจะเห็นได้ว่า เมื่อมีการเพิ่มตัวประสานมากขึ้นจะทำให้ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงลดลง เนื่องจากตัวประสานที่ใช้ในการอัดขึ้นรูป คือ แป้งมันสำปะหลัง ที่มีค่าความร้อนอยู่ที่ 15.3 MJ/kg ซึ่งน้อยกว่าหญ้าหลายฤดูทั้งสามชนิดดังกล่าวถึง 1.2-1.4 MJ/kg คิดเป็นร้อยละ 7.3-8.4 ดังนั้นกล่าวได้ว่าตัวประสานส่งผลต่อค่าความร้อนของเชื้อเพลิง



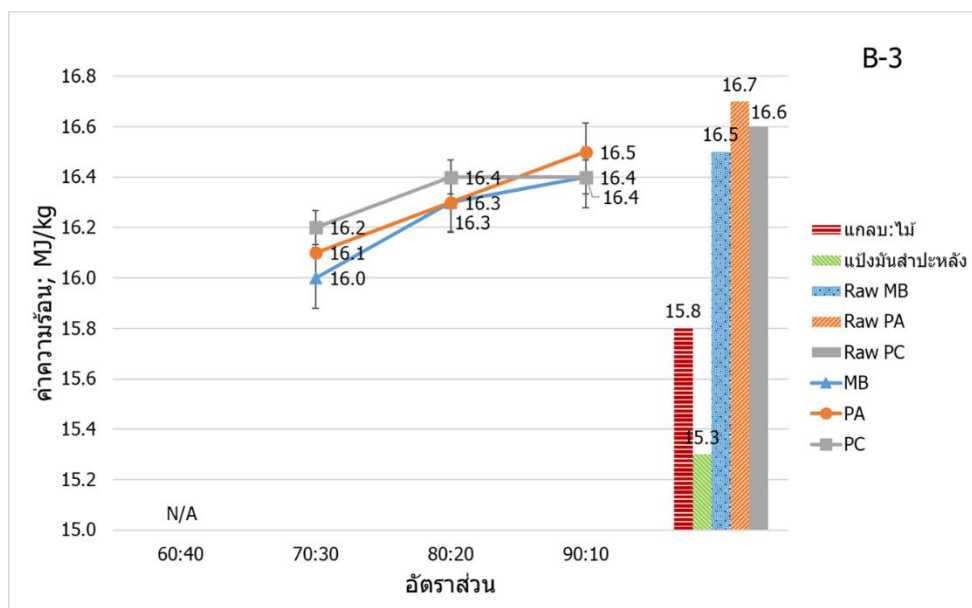
ภาพประกอบ 72 ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากหญ้าหลายฤดู



ภาพประกอบ 73 ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง briquettes จากหญ้าหลายฤดู กำลังอัด 1 MPa



ภาพประกอบ 74 ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง briquettes จากหญ้าหลายฤดู กำลังอัด 2 MPa



**ภาพประกอบ 75** ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง briquettes จากหญ้าหลายฤดู กำลังอัด 3 MPa  
 หมายเหตุ: N/A คือ not applicable (ไม่สามารถขึ้นรูปได้)

เชื้อเพลิงอัดก้อน (briquettes) จากภาพประกอบ 73-75 แสดงถึงค่าความร้อนสูงของเชื้อเพลิงอัดแข็งจากหญ้าหลายฤดู ทั้ง 3 ชนิด พบว่ามีแนวโน้มเดียวกันกับเชื้อเพลิงอัดเม็ดคือ เมื่อมีการเพิ่มตัวประสานมากขึ้นจะทำให้ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงลดลง ซึ่งจากการศึกษา แสดงให้เห็นว่า เชื้อเพลิงอัตราส่วน 90:10 ในเชื้อเพลิง B-1, B-2 และ B-3 ที่มีค่าความร้อนมีค่าพลังงานที่สูงที่สุดในหญ้าทั้ง 3 ชนิด โดยหญ้าอะตราดัม (*Paspalum atratum*; PA) มีค่าความร้อนมากที่สุด (16.5 MJ/kg) รองลงมาคือ หญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 (*Pennisetum purpureum* x *P. glaucum* Pakchong 1; PC) และ หญ้ากินนีมอมบาซ่า (*Panicum maximum* cv. Mombaza; MB) (16.4 และ 16.4 MJ/kg ตามลำดับ) เมื่อเพิ่มตัวประสาน 10-20 เปอร์เซ็นต์ จะทำให้เชื้อเพลิงมีค่าความร้อนลดลง 0.1 MJ/kg คิดเป็นร้อยละ 1.5 ในขณะที่เพิ่มตัวประสาน 30-40 เปอร์เซ็นต์ จะทำให้เชื้อเพลิงมีค่าความร้อนลดลง 0.2 MJ/kg คิดเป็นร้อยละ 3 ซึ่งจากการศึกษาจะเห็นได้ว่า เมื่อมีการเพิ่มตัวประสานมากขึ้นจะทำให้ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงลดลง เนื่องจากตัวประสานที่ใช้ในการอัดขึ้นรูป คือ แป้งมันสำปะหลัง ที่มีค่าความร้อนอยู่ที่ 15.3 MJ/kg ซึ่งน้อยกว่าหญ้าหลายฤดูทั้งสามชนิดดังกล่าว 1.2-1.4 MJ/kg คิดเป็นร้อยละ 7.3-8.4 ดังนั้นกล่าวได้ว่าตัวประสานส่งผลต่อค่าความร้อนของเชื้อเพลิง ในขณะเดียวกันเมื่อเทียบกับค่าความร้อนสูงทั่วไปของวัสดุเหลือทิ้งทางเกษตร เศษไม้ ระหว่าง 13 MJ/kg และ 17 MJ/kg (วิจิตรรา สิงห์หิรัญสุรณ และคณะ, 2560) และชีวมวลอื่นๆ ได้แก่ ชานอ้อย เปลือกถั่วลิสง และทะลายมะพร้าว เป็นต้น ที่มีค่าความร้อนระหว่าง 12.7 – 14.4

MJ/kg (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2554, 2556) ซึ่งพบว่า เชื้อเพลิงที่อัดก้อนมีค่าความร้อนที่สูงกว่าชีวมวลดังกล่าว

อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบกับค่าความร้อนของเชื้อเพลิงปัจจุบันที่โรงไฟฟ้าชีวมวลใช้ คือ แกลบและไม้สับ พบว่า เชื้อเพลิงอัดก้อนในทุกอัตราส่วนของหญ้าต่อตัวประสาน ทั้ง 5 อัตราส่วน มีค่าความร้อนสูงกว่าเชื้อเพลิงปัจจุบัน 0.1-0.9 MJ/kg หรือคิดเป็นร้อยละ 0.6-5.7 และเมื่อนำไปเทียบกับค่ามาตรฐานเชื้อเพลิงอัดเม็ดของยุโรป (CEN/TS 14961) ที่กำหนดไว้ที่  $>16.90$  MJ/kg (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2555) พบว่า เชื้อเพลิงอัดเม็ดจากหญ้าหลายฤดูมีค่าความร้อนมากกว่า 1.0 MJ/kg (คิดเป็นร้อยละ 5.6)

#### 1.2) ปัจจัยด้านตัวประสานของเชื้อเพลิงส่งผลต่อความหนาแน่นพลังงาน

ความหนาแน่นพลังงานของเชื้อเพลิงอัดแข็งมีความสำคัญต่อการขนส่งและการจัดการเชื้อเพลิงอัดแข็ง ชีวมวลที่มีความหนาแน่นต่ำส่งผลให้เกิดการขนส่งและจัดเก็บที่ไม่มีประสิทธิภาพ ปริมาณคาร์บอนต่ำ และปริมาณออกซิเจนสูง ซึ่งจะลด HHV และความหนาแน่นพลังงานโดยรวม (Kambo and Dutta, 2014) ดังนั้นเชื้อเพลิงมีความหนาแน่นและความหนาแน่นพลังงานสูง ส่งผลให้ต้นทุนการขนส่งและการเก็บรักษาถูกลงเพราะใช้พื้นที่น้อยกว่าในการจัดเก็บหรือขนส่งต่อหน่วยพลังงาน ซึ่งจากการศึกษา พบว่า เชื้อเพลิงที่มีตัวประสาน 40 เปอร์เซ็นต์ จะให้ค่าความร้อนที่สูงที่สุด ซึ่งแสดงให้เห็นในหญ้าทั้ง 3 ชนิด ได้แก่ หญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 (*Pennisetum purpureum* x *P. glaucum* (Pakchong 1); PC) หญ้ากินนีมอมบาซ่า (*Panicum maximum* (Mombaza); MB) และหญ้าอะตราตัม (*Paspalum atratum*; PA) คือ 3,900 – 4,873 MJ/m<sup>3</sup> รองลงมาคือ เชื้อเพลิงที่มีตัวประสาน 40 เปอร์เซ็นต์ 30, 20 และ 10 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงไว้ในตาราง 34

จากภาพประกอบ 76-79 แสดงความหนาแน่นพลังงานของเชื้อเพลิงอัดก้อนและเชื้อเพลิงอัดเม็ด จากการคำนวณโดยการคูณความหนาแน่นรวมของตัวอย่างด้วย HHV ของตัวอย่าง แสดงให้เห็นว่าเชื้อเพลิงอัดเม็ดมีความหนาแน่นพลังงานที่สูงกว่าเชื้อเพลิงอัดก้อน โดยในเชื้อเพลิงอัดเม็ด (ภาพประกอบ 76) จะมีความหนาแน่นพลังงานที่สูงที่สุดในอัตราส่วน 60:40 ที่มีตัวประสาน 40 เปอร์เซ็นต์ จากหญ้าทั้ง 3 ชนิด ซึ่งพบในหญ้ากินนีมอมบาซ่า (*Panicum maximum* cv. Mombaza; MB) ที่สูงที่สุด (4,884.6 MJ/m<sup>3</sup>) รองลงมา คือ หญ้าอะตราตัม (*Paspalum atratum*; PA) และหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 (*Pennisetum purpureum* x *P. glaucum* (Pakchong 1); PC) ที่มีความหนาแน่นพลังงานเท่ากับ 4,873.5 และ 4,807.6 MJ/m<sup>3</sup> ตามลำดับ เมื่อมีการลดตัวประสานลงเหลือ 30 เปอร์เซ็นต์ พบว่า ความหนาแน่นของพลังงานลดลงเหลือเพียง 4,374 – 4,716 MJ/m<sup>3</sup> ซึ่งลดลง 91 - 505 MJ/m<sup>3</sup> คิดเป็นร้อยละ 2 – 11 และเมื่อมีการลดตัวประสานลงเหลือ 20 เปอร์เซ็นต์ พบว่า ความหนาแน่นของพลังงานลดลงเหลือเพียง 2,549 – 2,973 MJ/m<sup>3</sup> ซึ่งลดลง

1,405 – 1,873 MJ/m<sup>3</sup> คิดเป็นร้อยละ 55 – 63 เมื่อลดตัวประสานลงเหลือ 10 เปอร์เซนต์ พบว่า ความหนาแน่นของพลังงานลดลงเหลือเพียง 2,371-2,441 MJ/m<sup>3</sup> ซึ่งลดลง 179 - 593 MJ/m<sup>3</sup> คิดเป็นร้อยละ 8 – 24 ซึ่งจะเห็นได้ว่า เมื่อมีการลดตัวประสานลงจะทำให้ความหนาแน่นของพลังงานลดลงด้วย เนื่องจากเมื่อเชื้อเพลิงมีตัวประสานมากขึ้นจะทำให้เชื้อเพลิงมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้นด้วย จะเห็นได้ว่าความหนาแน่นพลังงานจะมีแนวโน้มเดียวกับความหนาแน่นรวม ถึงแม้ค่าความร้อนของหญ้าทั้ง 3 ชนิดในแต่ละอัตราส่วนและกำลังอัดมีความร้อนใกล้เคียงกัน ในขณะที่เมื่อนำมาพิจารณาความหนาแน่นพลังงาน พบว่า หญ้ากินนีมอมบาซ่า (*Panicum maximum* cv. Mombaza; MB) สูงที่สุดเนื่องจากความหนาแน่นเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่อัตราส่วน 60:40 มีความหนาแน่นสูงที่สุด

จากการศึกษาความแปรปรวนของค่าเฉลี่ยความหนาแน่นพลังงาน พบว่า รูปทรงกำลังอัด และตัวประสาน มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 และเมื่อเปรียบเทียบความหนาแน่นพลังงานพบว่า มีปริมาณน้อยกว่า Obernberger and Thek (2004) ที่ได้ศึกษาความหนาแน่นพลังงานของเชื้อเพลิงอัดเม็ด ซึ่งมีความหนาแน่นพลังงานงานระหว่าง 8,900 MJ/m<sup>3</sup> จะเห็นได้ว่ามีความแตกต่างกันประมาณ 4,000 MJ/m<sup>3</sup> (ร้อยละ 45) ในขณะที่มีความใกล้เคียงกับ Kambo and Dutta (2014) ที่ศึกษาเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากชีวมวลเท่ากับ 5,900 MJ/m<sup>3</sup> ซึ่งมีความแตกต่างกันถึง 1,015 MJ/m<sup>3</sup> (ร้อยละ 17)

จากภาพประกอบ 77 แสดงความหนาแน่นพลังงานเชื้อเพลิงอัดก้อน (briquettes) ที่กำลังอัด 1 MPa พบว่า เชื้อเพลิงอัตราส่วน 60:40 มีค่าความหนาแน่นพลังงานที่สูงที่สุด เชื้อเพลิงที่มีตัวประสาน 40 เปอร์เซนต์ จากหญ้าทั้ง 3 ชนิด ซึ่งพบในหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 (*Pennisetum purpureum* x *P. glaucum* (Pakchong 1); PC) ที่สูงที่สุด (3,587 MJ/m<sup>3</sup>) รองลงมา คือ หญ้าอะตราตัม (*Paspalum atratum*; PA) และหญ้ากินนีมอมบาซ่า (*Panicum maximum* cv. Mombaza; MB) ที่มีความหนาแน่นพลังงานเท่ากับ 3,405 และ 3,172 MJ/m<sup>3</sup> ตามลำดับ เมื่อมีการลดตัวประสานลงเหลือ 30 เปอร์เซนต์ พบว่า ความหนาแน่นของพลังงานลดลงเหลือเพียง 2,948–3,028 MJ/m<sup>3</sup> ซึ่งลดลง 177-559 MJ/m<sup>3</sup> คิดเป็นร้อยละ 6-19 และเมื่อมีการลดตัวประสานลงเหลือ 20 เปอร์เซนต์ พบว่า ความหนาแน่นของพลังงานลดลงเหลือเพียง 2,085–2,451 MJ/m<sup>3</sup> ซึ่งลดลง 576-910 MJ/m<sup>3</sup> คิดเป็นร้อยละ 24–37 เมื่อลดตัวประสานลงเหลือ 10 เปอร์เซนต์ พบว่า ความหนาแน่นของพลังงานลดลงเหลือเพียง 1,004-1,302 MJ/m<sup>3</sup> ซึ่งลดลง 756-1,447 MJ/m<sup>3</sup> ซึ่งจะเห็นได้ว่า เมื่อมีการลดตัวประสานลงจะทำให้ความหนาแน่นของพลังงานลดลงด้วย เนื่องจากเชื้อเพลิงมีตัวประสานมากขึ้นจะทำให้เชื้อเพลิงมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งจะเห็นได้ว่าความหนาแน่นพลังงานจะมีแนวโน้มเดียวกับความหนาแน่นรวม

ตาราง 34 ความหนาแน่นพลังงาน (Energy Density) ของเชื้อเพลิงอัดแข็ง

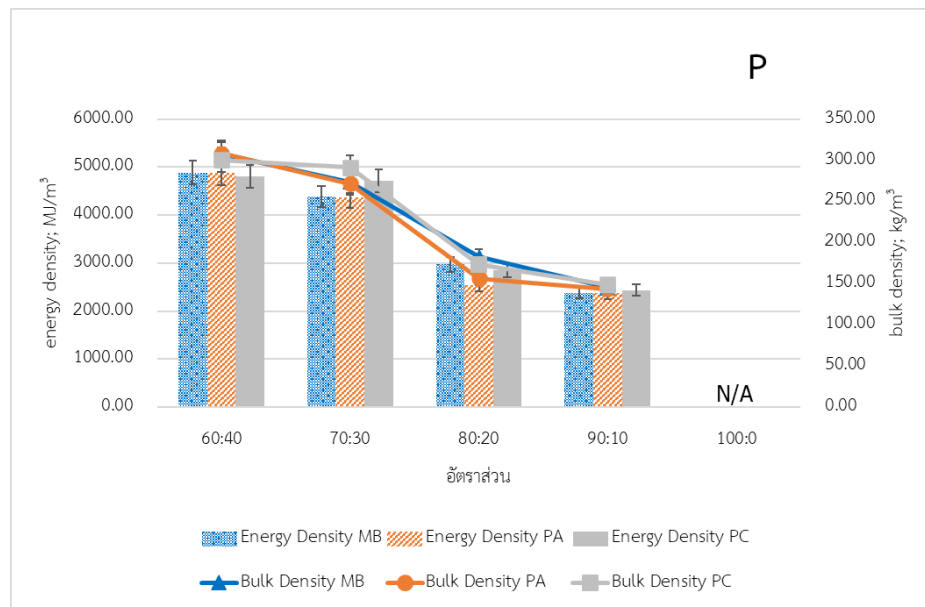
| ชนิด | อัตราส่วน          | ความหนาแน่นพลังงาน (MJ/m <sup>3</sup> ) |                    |                    |                    |
|------|--------------------|-----------------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
|      |                    | P <sup>b</sup>                          | B-1 <sup>b,c</sup> | B-2 <sup>b,c</sup> | B-3 <sup>b,c</sup> |
| MB   | 60:40 <sup>a</sup> | 4884.62±13.76                           | 3171.59±3.77       | 3782.68±8.91       | N/A                |
|      | 70:30 <sup>a</sup> | 4379.14±34.48                           | 2995.12±11.21      | 3358.94±2.49       | 3953.99±3.80       |
|      | 80:20 <sup>a</sup> | 2973.60±58.42                           | 2085.41±7.74       | 2724.54±2.92       | 3054.65±2.54       |
|      | 90:10 <sup>a</sup> | 2381.92±33.94                           | 1302.24±4.42       | 1580.02±2.55       | 1790.69±7.78       |
|      | 100:0 <sup>a</sup> | N/A                                     | N/A                | N/A                | N/A                |
| PA   | 60:40 <sup>a</sup> | 4873.54±17.70                           | 3404.52±7.09       | 3900.47±2.83       | N/A                |
|      | 70:30 <sup>a</sup> | 4374.82±3.82                            | 2947.96±19.11      | 3403.29±3.82       | 3903.65±3.82       |
|      | 80:20 <sup>a</sup> | 2549.77±10.23                           | 2085.41±7.74       | 2780.26±3.87       | 3285.99±5.27       |
|      | 90:10 <sup>a</sup> | 2370.81±3.92                            | 1039.26±1.48       | 1372.57±2.96       | 1996.47±1.48       |
|      | 100:0 <sup>a</sup> | N/A                                     | N/A                | N/A                | N/A                |
| PC   | 60:40 <sup>a</sup> | 4807.61±55.00                           | 3586.52±4.00       | 3797.35±59.06      | N/A                |
|      | 70:30 <sup>a</sup> | 4716.55±52.25                           | 3027.69±10.72      | 3374.92±5.24       | 3795.31±1.45       |
|      | 80:20 <sup>a</sup> | 2844.04±19.24                           | 2450.63±2.17       | 2708.12±8.19       | 3190.62±2.55       |
|      | 90:10 <sup>a</sup> | 2440.54±3.90                            | 1003.68±0.00       | 1331.97±8.95       | 1729.53±1.47       |
|      | 100:0 <sup>a</sup> | N/A                                     | N/A                | N/A                | N/A                |

หมายเหตุ: N/A คือ not applicable (ไม่สามารถขึ้นรูปเชื้อเพลิงได้)

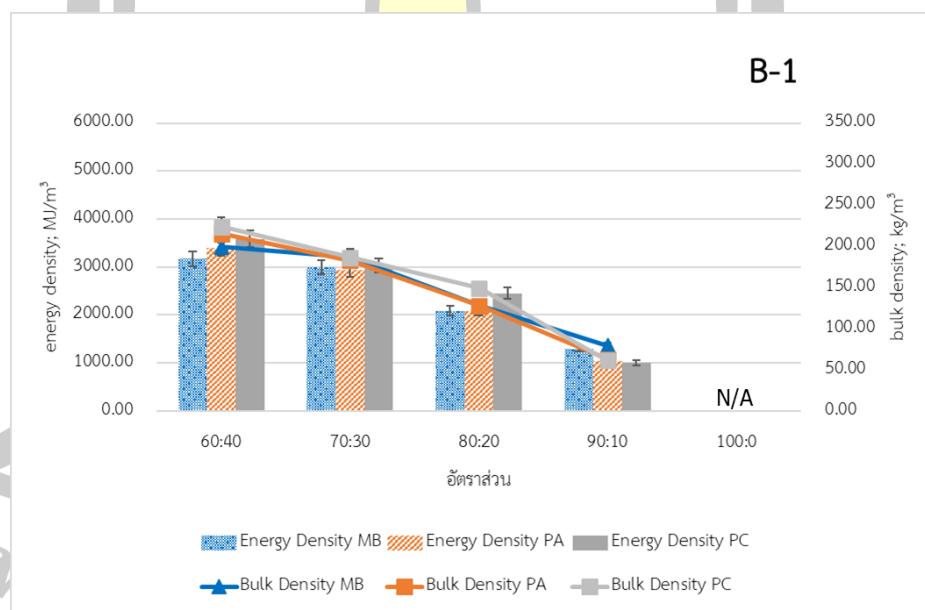
a หมายถึง อัตราส่วนของเชื้อเพลิงทำให้ความหนาแน่นพลังงานของเชื้อเพลิงมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 (ANOVA)

b หมายถึง รูปทรงของเชื้อเพลิงทำให้ความหนาแน่นพลังงานของเชื้อเพลิงมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 (T-test) โดยการวิเคราะห์เปรียบเทียบเป็นคู่ คือ P กับ B-1, P กับ B-2 และ P กับ B-3

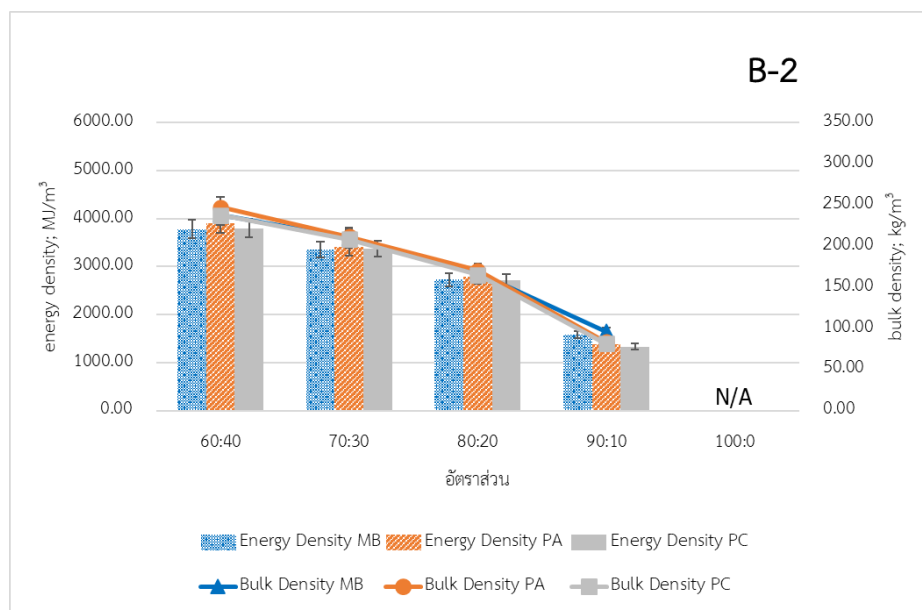
c หมายถึง กำลังอัดของหญ้าหลายฤดูทำให้ความหนาแน่นพลังงานของเชื้อเพลิงมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 (ANOVA)



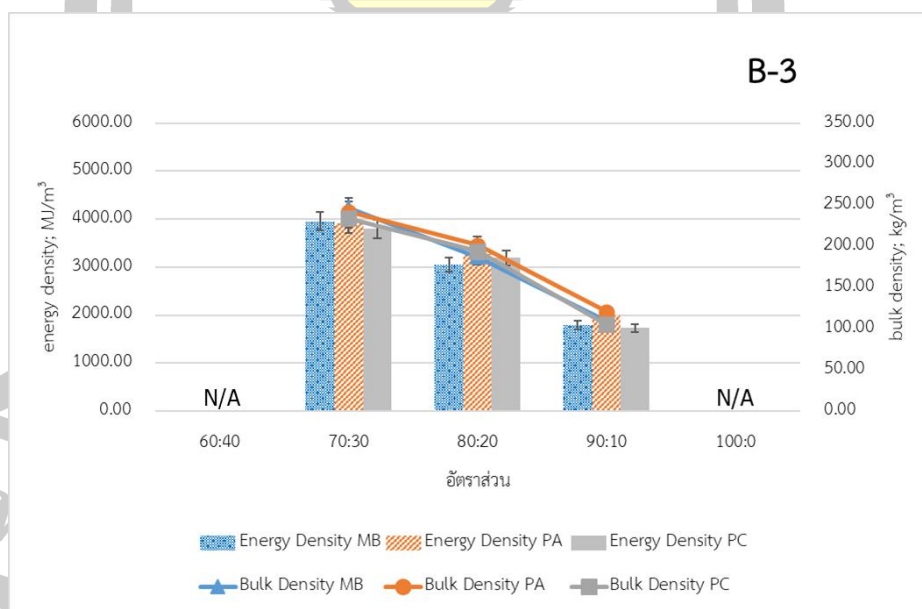
**ภาพประกอบ 76** ความหนาแน่นพลังงานของเชื้อเพลิง Pellet  
หมายเหตุ: N/A คือ not applicable (ไม่สามารถขึ้นรูปเชื้อเพลิงได้)



**ภาพประกอบ 77** ความหนาแน่นพลังงานของเชื้อเพลิง briquettes กำลังอัด 1 MPa  
หมายเหตุ: N/A คือ not applicable (ไม่สามารถขึ้นรูปเชื้อเพลิงได้)



ภาพประกอบ 78 ความหนาแน่นพลังงานของเชื้อเพลิง briquettes กำลังอัด 2 MPa  
 หมายเหตุ: N/A คือ not applicable (ไม่สามารถขึ้นรูปเชื้อเพลิงได้)



ภาพประกอบ 79 ความหนาแน่นพลังงานของเชื้อเพลิง briquettes กำลังอัด 3 MPa  
 หมายเหตุ: N/A คือ not applicable (ไม่สามารถขึ้นรูปเชื้อเพลิงได้)

จากภาพประกอบ 78 แสดงความหนาแน่นพลังงานเชื้อเพลิงอัดก้อน (briquettes) ที่กำลังอัด 2 MPa พบว่า เชื้อเพลิงอัตราส่วน 60:40 มีค่าความหนาแน่นพลังงานที่สูงที่สุด เชื้อเพลิงที่มีตัวประสาน 40 เปอร์เซ็นต์ จากหญ้าทั้ง 3 ชนิด ซึ่งพบในหญ้าอะตราตัม (*Paspalum atratum*; PA) ที่สูงที่สุด ( $3,900 \text{ MJ/m}^3$ ) รองลงมา คือ หญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 (*Pennisetum purpureum* x *P. glaucum* (Pakchong 1); PC) และหญ้านิมอมบาซ่า (*Panicum maximum* (Mombaza); MB) ที่มีความหนาแน่นพลังงานเท่ากับ  $3,797$  และ  $3,783 \text{ MJ/m}^3$  ตามลำดับ เมื่อมีการลดตัวประสานลงเหลือ 30 เปอร์เซ็นต์ พบว่า ความหนาแน่นของพลังงานลดลงเหลือเพียง  $2,359$ – $2,403 \text{ MJ/m}^3$  ซึ่งลดลง  $422$ – $497 \text{ MJ/m}^3$  คิดเป็นร้อยละ 18-21 และเมื่อมีการลดตัวประสานลงเหลือ 20 เปอร์เซ็นต์ พบว่า ความหนาแน่นของพลังงานลดลงเหลือเพียง  $2,708$ – $2,780 \text{ MJ/m}^3$  ซึ่งลดลง  $623$ – $667 \text{ MJ/m}^3$  คิดเป็นร้อยละ 23–24 เมื่อลดตัวประสานลงเหลือ 10 เปอร์เซ็นต์ พบว่า ความหนาแน่นของพลังงานลดลงเหลือเพียง  $1,332$ – $1,580 \text{ MJ/m}^3$  ซึ่งลดลง  $1,145$ – $1,376 \text{ MJ/m}^3$  ซึ่งจะเห็นได้ว่า เมื่อมีการลดตัวประสานลงจะทำให้ความหนาแน่นของพลังงานลดลงด้วย เนื่องจากเชื้อเพลิงมีตัวประสานมากขึ้นจะทำให้เชื้อเพลิงมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งจะเห็นได้ว่าพลังงานความหนาแน่นพลังงานจะมีแนวโน้มเดียวกับความหนาแน่นรวม ถึงแม้ค่าความร้อนของหญ้าทั้ง 3 ชนิดในแต่ละอัตราส่วนและกำลังอัดมีความความร้อนใกล้เคียงกัน

จากภาพประกอบ 79 แสดงความหนาแน่นพลังงานเชื้อเพลิงอัดก้อน (briquettes) ที่กำลังอัด 3 MPa พบว่า เชื้อเพลิงอัตราส่วน 60:40 ไม่สามารถอัดขึ้นรูปได้ ทำให้เชื้อเพลิงอัตราส่วน 70:30 มีค่าความหนาแน่นพลังงานที่สูงที่สุด เชื้อเพลิงที่มีตัวประสาน 30 เปอร์เซ็นต์ จากหญ้าทั้ง 3 ชนิด ซึ่งพบในหญ้านิมอมบาซ่า (*Panicum maximum* (Mombaza); MB) ที่สูงที่สุด ( $3,954 \text{ MJ/m}^3$ ) รองลงมา คือ หญ้าอะตราตัม (*Paspalum atratum*; PA) และหญ้านเนเปียร์ปากช่อง 1 (*Pennisetum purpureum* x *P. glaucum* (Pakchong 1); PC) ที่มีความหนาแน่นพลังงานเท่ากับ  $3,904$  และ  $3,795 \text{ MJ/m}^3$  ตามลำดับ เมื่อมีการลดตัวประสานลงเหลือ 20 เปอร์เซ็นต์ พบว่า ความหนาแน่นของพลังงานลดลงเหลือเพียง  $3,055$ – $3,191 \text{ MJ/m}^3$  ซึ่งลดลง  $604$ – $899 \text{ MJ/m}^3$  คิดเป็นร้อยละ 20–28 และเมื่อลดตัวประสานลงเหลือ 10 เปอร์เซ็นต์ พบว่า ความหนาแน่นของพลังงานลดลงเหลือเพียง  $1,729$ – $1,997 \text{ MJ/m}^3$  ซึ่งลดลง  $1,264$ – $1,462 \text{ MJ/m}^3$  ซึ่งจะเห็นได้ว่า เมื่อมีการลดตัวประสานลงจะทำให้ความหนาแน่นของพลังงานลดลงด้วย เนื่องจากเชื้อเพลิงมีตัวประสานมากขึ้นจะทำให้เชื้อเพลิงมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งจะเห็นได้ว่าความหนาแน่นพลังงานจะมีแนวโน้มเดียวกับความหนาแน่นรวม ถึงแม้ค่าความร้อนของหญ้าทั้ง 3 ชนิดในแต่ละอัตราส่วนและกำลังอัดมีความความร้อนใกล้เคียงกัน

## 2) ปัจจัยด้านกำลังอัดของเชื้อเพลิง

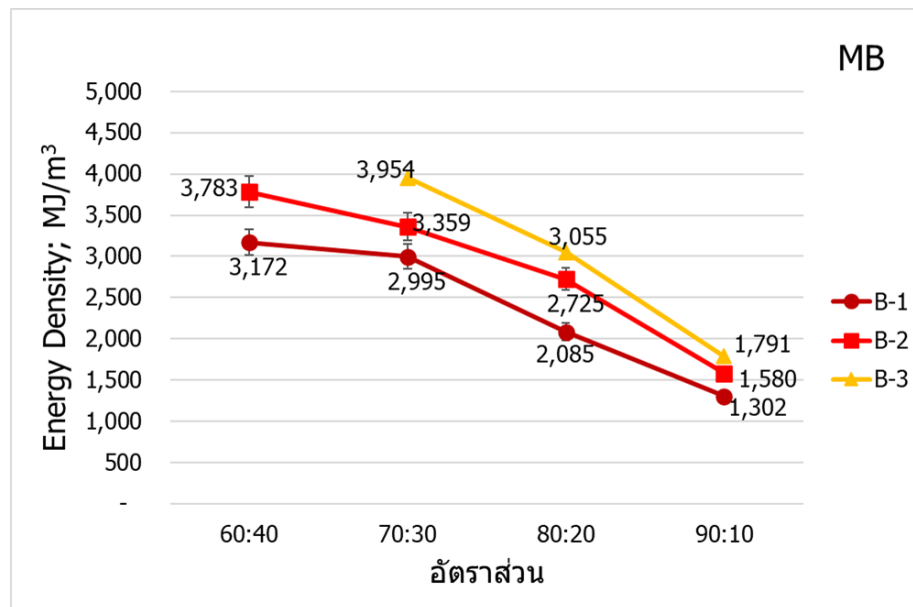
### 2.1) ปัจจัยด้านกำลังอัดของเชื้อเพลิงส่งผลต่อค่าความร้อน

จากสมมุติฐานที่ว่า กำลังอัดขึ้นรูปของก้อนเชื้อเพลิงจะส่งผลต่อพลังงานค่าความร้อนโดยน้ำหนักของเชื้อเพลิง โดยการเพิ่มกำลังอัดขึ้นรูปก้อนเชื้อเพลิงจะสามารถทำให้เชื้อเพลิงมีค่าความร้อนสูงขึ้น จากการศึกษาพบว่า การเพิ่มกำลังอัดจาก 1 MPa เป็น 2 MPa และ 3 MPa ในอัตราส่วนเดียวกัน ทำให้ค่าความร้อนของก้อนเชื้อเพลิงเท่าเดิม ดังตาราง 33 ซึ่งไม่เป็นไปตามสมมุติฐานที่ตั้งไว้ ดังนั้น จากการศึกษาแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มกำลังอัดขึ้นรูปของก้อนเชื้อเพลิงจะไม่ส่งผลต่อค่าความร้อนของก้อนเชื้อเพลิง

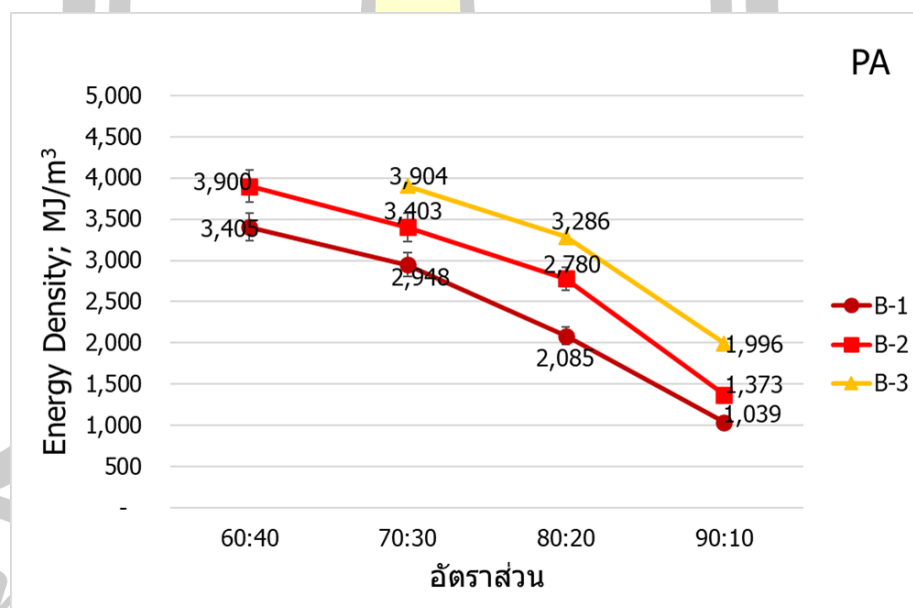
### 2.2) ปัจจัยด้านกำลังอัดของเชื้อเพลิงส่งผลต่อความหนาแน่นพลังงาน

จากสมมุติฐานที่ว่า กำลังอัดขึ้นรูปของก้อนเชื้อเพลิงจะส่งผลต่อความหนาแน่นพลังงานของเชื้อเพลิง โดยการเพิ่มกำลังอัดขึ้นรูปก้อนเชื้อเพลิงจะสามารถทำให้เชื้อเพลิงมีความหนาแน่นพลังงานสูงขึ้น ซึ่งจากการศึกษากำลังอัด 3 กำลังอัด คือ 1, 2 และ 3 MPa พบว่า เชื้อเพลิงที่มีกำลังอัดสูง จะทำให้มีความหนาแน่นพลังงานสูงด้วย โดยพิจารณาเชื้อเพลิงชนิดและอัตราส่วนเดียวกัน คือเชื้อเพลิงจากหญ้ากินนีมอมบาซ่า (*Panicum maximum* (Mombaza); MB) ที่อัตราส่วน 70:30 แสดงค่าความหนาแน่นพลังงานของเชื้อเพลิงกำลังอัดที่ 3 MPa สูงที่สุด (3,953.99 MJ/m<sup>3</sup>) รองลงมา คือ เชื้อเพลิงกำลังอัดที่ 2 MPa (3,358.94 MJ/m<sup>3</sup>) และ 1 MPa (2,995.12 MJ/m<sup>3</sup>) ตามลำดับ ดังภาพประกอบ 80-82 โดยเป็นไปตามสมมุติฐานที่ตั้งไว้ แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มกำลังอัดของเชื้อเพลิงเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อความหนาแน่นพลังงาน ซึ่งความหนาแน่นพลังงานของเชื้อเพลิงอัดแข็งมีความสำคัญต่อการขนส่งและการจัดการเชื้อเพลิงอัดแข็ง ชีวมวลที่มีความหนาแน่นต่ำส่งผลให้เกิดการขนส่งและจัดเก็บที่ไม่มีประสิทธิภาพ (Kambo and Dutta, 2014) ดังนั้นเชื้อเพลิงมีความหนาแน่นและความหนาแน่นพลังงานสูง ส่งผลให้ต้นทุนการขนส่งและการเก็บรักษาถูกลง เพราะใช้พื้นที่น้อยกว่าในการจัดเก็บหรือขนส่งต่อหน่วยพลังงาน

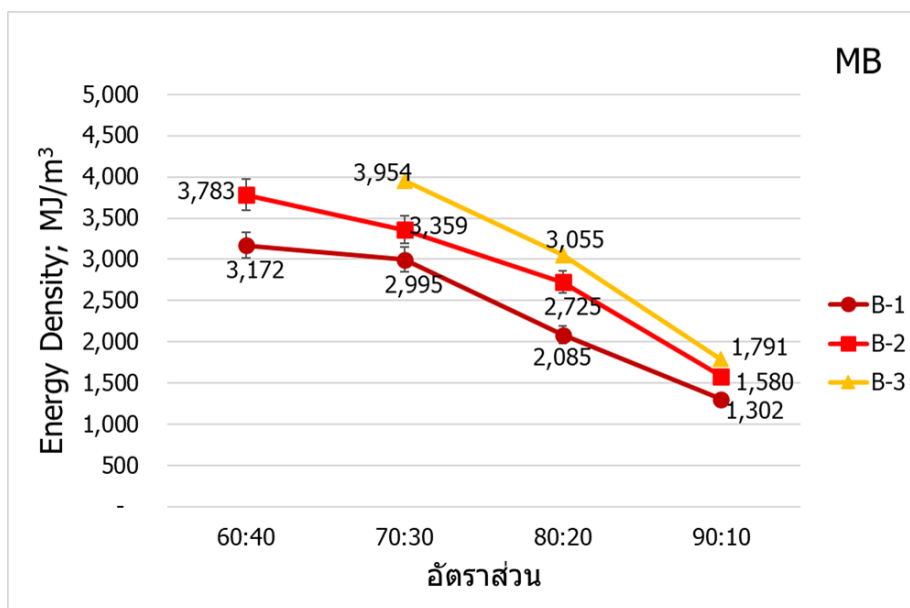
พหุ ประสิทธิภาพ



ภาพประกอบ 80 กำลังอัดขึ้นรูปของเชื้อเพลิงจากหญ้ากินนีอมบ่าซ่า



ภาพประกอบ 81 กำลังอัดขึ้นรูปของเชื้อเพลิงจากหญ้าอะตราดัม



ภาพประกอบ 82 กำลังอัดขึ้นรูปของเชื้อเพลิงจากหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1

### 3) ปัจจัยด้านรูปทรงของเชื้อเพลิง

#### 3.1) ปัจจัยด้านรูปทรงของเชื้อเพลิงส่งผลต่อค่าความร้อน

จากสมมุติฐานที่ว่า รูปทรงของเชื้อเพลิงจะส่งผลต่อพลังงานค่าความร้อนโดยน้ำหนักของเชื้อเพลิง โดยเชื้อเพลิงที่มีรูปทรงที่แตกต่างกันจะสามารถทำให้เชื้อเพลิงมีค่าความร้อนที่ต่างกัน จากการศึกษาคือเชื้อเพลิง 2 รูปแบบคือ เชื้อเพลิงอัดเม็ด (Pellet) และเชื้อเพลิงอัดก้อน (Briquettes) พบว่า เชื้อเพลิงทั้ง 2 แบบในอัตราส่วนเดียวกัน มีค่าความร้อนของก้อนเชื้อเพลิงเท่าเดิม ดังตาราง 33 ซึ่งจะเห็นได้ว่าไม่เป็นไปตามสมมุติฐานที่ตั้งไว้ ดังนั้น จากการศึกษาดังกล่าวเชื้อเพลิงที่มีรูปทรงที่ต่างกันจะไม่ส่งผลต่อค่าความร้อนของเชื้อเพลิง

#### 3.2) ปัจจัยด้านรูปทรงของเชื้อเพลิงส่งผลต่อความหนาแน่นพลังงาน

จากสมมุติฐานที่ว่า รูปทรงเชื้อเพลิงจะส่งผลต่อความหนาแน่นพลังงานของเชื้อเพลิง โดยการศึกษาเชื้อเพลิง Pellet และเชื้อเพลิง Briquettes ที่มีขนาดแตกต่างกันจะสามารถทำให้เชื้อเพลิงมีความหนาแน่นพลังงานต่างกัน ซึ่งจากการศึกษาพบว่า เชื้อเพลิง Pellet มีความหนาแน่นพลังงานที่สูงกว่าเชื้อเพลิง Briquettes ในอัตราส่วนที่มีตัวประสานร้อยละ 40 มากที่สุด (ตาราง 34) ที่แสดงค่าความหนาแน่นที่ 4,884 MJ/m³ เนื่องจากเชื้อเพลิง Pellet มีความหนาแน่นรวมที่สูงกว่าเชื้อเพลิง Briquettes ซึ่งจะเห็นได้ว่าผลที่เกิดขึ้นเป็นไปตามสมมุติฐาน

ดังนั้นจากการศึกษากระบวนการอัดขึ้นรูปเชื้อเพลิง โดยศึกษาปัจจัยในการขึ้นรูปเชื้อเพลิงข้างต้น จะใช้ในการพิจารณาเลือก เชื้อเพลิงที่เหมาะสมสำหรับนำไปทดสอบประสิทธิภาพ

การเผาไหม้ของก้อนเชื้อเพลิงจากหญ้าหลายฤดูในหัวข้อถัดไป ซึ่งจะมีเงื่อนไขคือ เชื้อเพลิงต้องมีคุณสมบัติทางพลังงานและศักยภาพในการผลิตพลังงานเทียบเท่าหรือมากกว่าเชื้อเพลิงปัจจุบันที่โรงงานใช้ คือ แกลบ:ไม้ ในอัตราส่วน 50:50 โดยน้ำหนัก และเชื้อเพลิงต้องมีความคงทนที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานของเชื้อเพลิงที่กำหนด คือ ต้องมีความคงทนมากกว่า 70 % โดยในการศึกษาประสิทธิภาพการเผาไหม้จะทดสอบเชื้อเพลิง Pellet และเชื้อเพลิง Briquettes ทั้งสองรูปแบบ และจะพิจารณาเลือกเชื้อเพลิงจากความหนาแน่นพลังงานและศักยภาพพลังงาน (ตาราง 35)

**ตาราง 35** เปรียบเทียบศักยภาพการผลิตพลังงานไฟฟ้าของเชื้อเพลิงอัดแข็งจากหญ้าหลายฤดูและเชื้อเพลิงปัจจุบันที่โรงไฟฟ้าใช้

| ชนิด             | อัตราส่วน | PE (MW) |      |      |      |
|------------------|-----------|---------|------|------|------|
|                  |           | P       | B-1  | B-2  | B-3  |
| MB               | 60:40     | 15.8    | 10.3 | 12.2 | N/A  |
|                  | 70:30     | 14.2    | 9.7  | 10.9 | 12.8 |
|                  | 80:20     | 9.6     | 6.7  | 8.8  | 9.9  |
|                  | 90:10     | 7.7     | 4.2  | 5.1  | 5.8  |
| PA               | 60:40     | 15.8    | 11.0 | 12.6 | N/A  |
|                  | 70:30     | 14.1    | 9.5  | 11.0 | 12.6 |
|                  | 80:20     | 8.2     | 6.7  | 9.0  | 10.6 |
|                  | 90:10     | 7.7     | 3.4  | 4.4  | 6.5  |
| PC               | 60:40     | 15.5    | 11.6 | 12.3 | N/A  |
|                  | 70:30     | 15.3    | 9.8  | 10.9 | 12.3 |
|                  | 80:20     | 9.2     | 7.9  | 8.8  | 10.3 |
|                  | 90:10     | 7.9     | 3.2  | 4.3  | 5.6  |
| แกลบ:ไม้ (50:50) | -         | 8.8     |      |      |      |

หมายเหตุ: N/A หมายถึง เชื้อเพลิงไม่สามารถขึ้นรูปได้

จากการศึกษาอัตราส่วนตัวประสาน พบว่า มีอิทธิพลต่อความหนาแน่นพลังงานโดยปริมาณตัวประสาน 10, 20, 30 และ 40 % โดยน้ำหนัก มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % ดังนั้นจึงต้องพิจารณาศักยภาพพลังงานร่วมด้วย (ตาราง 35) พบว่า

เชื้อเพลิง Pellet ที่มีศักยภาพพลังงานไฟฟ้าเทียบเท่าและสูงกว่า แกลบ:ไม้ คือ ปริมาณตัวประสาน 20, 30 และ 40 % โดยน้ำหนัก ที่แสดงศักยภาพ คือ 8.2-9.6 MW, 14.1-15.3 MW และ 15.5-15.8 MW ตามลำดับ แต่อย่างไรก็ตามก็ยังมีมาตรฐานเชื้อเพลิงกำหนด โดยพบว่า ปริมาณตัวประสาน 30 และ 40 % โดยน้ำหนัก ผ่านเกณฑ์มาตรฐานสูงกว่า 70 % ในด้านการต้านทานการดูดซึมน้ำ การต้านทานการขัดสี และการต้านทานการแตกร่วน สำหรับการผลิตเชื้อเพลิงมีแนวคิดในการใช้อัตราส่วนผสมของหญ้าให้มากที่สุด โดยที่พลังงานเทียบเท่าเชื้อเพลิงแกลบ:ไม้ คือ ปริมาณตัวประสาน 30 % และหญ้า 70 % โดยน้ำหนัก ที่มีความหนาแน่นพลังงาน 4,379-4,716 MJ/m<sup>3</sup> และมีศักยภาพพลังงานไฟฟ้า 15.5-15.8 MW โดยเลือกหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 (*Pennisetum purpureum* x *P.glaucum* Pakchong 1; PC) เนื่องจากเป็นชนิดที่มีปริมาณผลผลิตชีวมวลที่สูงและเป็นที่นิยมสำหรับการเพาะปลูก ดังนั้นจึงทำให้เชื้อเพลิง Pellet จากหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 (*Pennisetum purpureum* x *P.glaucum* Pakchong 1; PC) ที่อัตราส่วน 70:30 เป็นเชื้อเพลิงที่เหมาะสมที่สุด และผ่านเงื่อนไข เพื่อใช้ในการศึกษาประสิทธิภาพการเผาไหม้ในหัวข้อถัดไป

สำหรับเชื้อเพลิง Briquettes จะมีปัจจัยให้พิจารณา คือ อัตราส่วนตัวประสาน กำลังอัด โดยมีเงื่อนไขและเกณฑ์มาตรฐานเชื้อเพลิงเดียวกันกับ เชื้อเพลิง Pellet ซึ่งจากการศึกษาอัตราส่วนของเชื้อเพลิง พบว่า มีอิทธิพลต่อความหนาแน่นพลังงานโดย ปริมาณตัวประสาน 10, 20, 30 และ 40 % โดยน้ำหนัก มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % ดังนั้นจึงต้องพิจารณาศักยภาพพลังงานไฟฟ้าร่วมด้วย (ตาราง 35) พบว่า ปริมาณตัวประสาน 20, 30 และ 40 % โดยน้ำหนัก ที่แสดงศักยภาพไฟฟ้าเทียบกับแกลบ:ไม้ ในกำลังอัด 1 MPa, 2 MPa และ 3 MPa และเมื่อพิจารณาจากมาตรฐานเชื้อเพลิงกำหนด พบว่า ปริมาณตัวประสาน 30 และ 40 % โดยน้ำหนัก มีข้อได้เปรียบมากที่สุด ซึ่งมีแนวคิดในการผลิตเชื้อเพลิงคือ ใช้อัตราส่วนผสมของหญ้าให้มากที่สุดและกำลังอัดเชื้อเพลิง เพื่อลดต้นทุนในการผลิตและการใช้พลังงานในการผลิตเชื้อเพลิง พบว่า เชื้อเพลิง และย้งต้องให้พลังงานเทียบเท่ากับแกลบ:ไม้ คือ ปริมาณตัวประสาน 30 % และหญ้า 70 % โดยน้ำหนัก ที่กำลังอัด 1 MPa ที่มีความหนาแน่นพลังงาน 2,947-3,027 MJ/m<sup>3</sup> และมีศักยภาพพลังงานไฟฟ้า 9.5-9.8 MW ในแง่ของความคงทน พบว่า มีความคงทนในด้านการต้านทานขัดสี การต้านทานแตกร่วน และการรับแรงกด ซึ่งเป็นเชื้อเพลิงที่ตรงตามเงื่อนไขและเกณฑ์ในเลือกเชื้อเพลิงและหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 (*Pennisetum purpureum* x *P.glaucum* Pakchong 1; PC) เป็นเชื้อเพลิงที่ตอบวัตถุประสงค์ของการศึกษามากที่สุด เนื่องจากเป็นชนิดที่มีปริมาณผลผลิตชีวมวลที่สูงและเป็นที่นิยมสำหรับการเพาะปลูก ดังนั้นเชื้อเพลิงดังกล่าวจึงเป็นเชื้อเพลิงที่ใช้ในการศึกษาประสิทธิภาพการเผาไหม้ในหัวข้อถัดไป

### 4.3 ประสิทธิภาพการเผาไหม้ของก้อนเชื้อเพลิงจากหญ้าหลายฤดู

จากการศึกษาในหัวข้อ 2 จะได้เชื้อเพลิงที่เหมาะสมสำหรับผลิตเป็นพลังงาน คือ เชื้อเพลิงอัดเม็ดจากหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 ที่อัตราส่วน 70:30 (ใช้สัญลักษณ์ คือ PC (70:30)-P) และเชื้อเพลิงอัดก้อนจากหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 ที่อัตราส่วน 70:30 กำลังอัด 1 MPa (ใช้สัญลักษณ์ คือ PC (70:30)-B1) เพื่อนำมาทดสอบประสิทธิภาพการเผาไหม้ของก้อนเชื้อเพลิงกับเชื้อเพลิงปัจจุบันที่โรงไฟฟ้าใช้ (ใช้สัญลักษณ์ คือ แกลบ:ไม้ (50:50)) โดยการวิเคราะห์สมบัติเชิงทางความร้อนของเชื้อเพลิงอัดแข็ง ซึ่งจะใช้เทคนิค Thermal Gravimetric Analysis (TGA) ด้วยเครื่อง Mettler Toledo: TGA 2 โดยการป้อนอากาศที่ 60 ml/min และเพิ่มอุณหภูมิ 30-800 °C ด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิเท่ากับ 30 °C/min ภายใต้บรรยากาศ ซึ่งผลที่ได้จากการศึกษาจะนำไปสู่การวิเคราะห์ประสิทธิภาพการเผาไหม้ของก้อนเชื้อเพลิงจากหญ้าหลายฤดู เพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับโรงไฟฟ้าชีวมวล โดยสามารถแสดงผลการศึกษาได้ตามหัวข้อดังต่อไปนี้

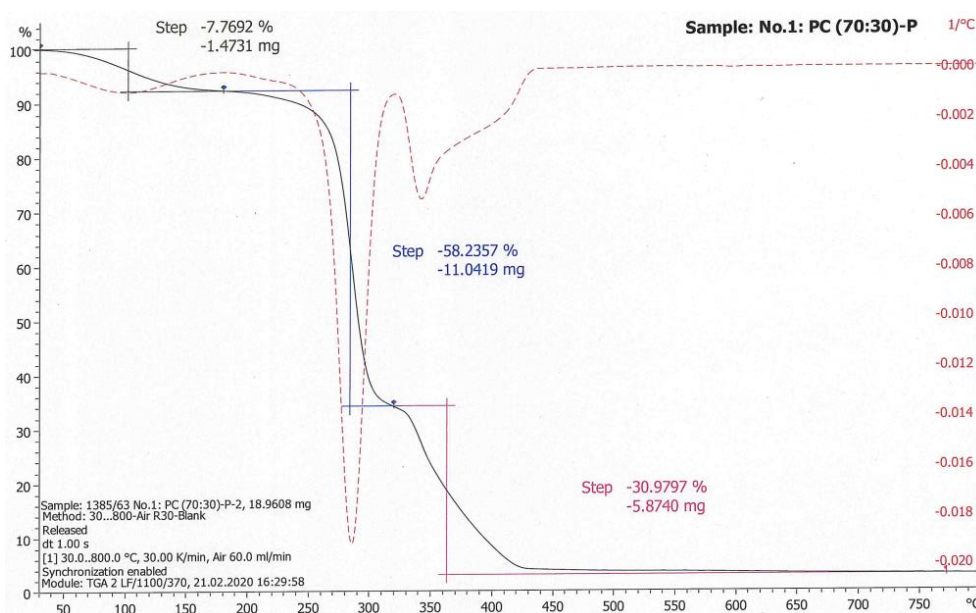
- 1) การวิเคราะห์ทางความร้อนของเชื้อเพลิงชีวมวล
- 2) พฤติกรรมการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงชีวมวล

#### 4.3.1 การวิเคราะห์ทางความร้อนของเชื้อเพลิงชีวมวล

ผลจากการวิเคราะห์ทางความร้อนและการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักเชื้อเพลิงชีวมวลทั้ง 3 ชนิด ได้แก่ PC (70:30)-P, PC (70:30)-B1 และ แกลบ:ไม้ (50:50) จากภาพประกอบ 83-85 จะเห็นว่าเส้นกราฟของน้ำหนักที่หายไปและอัตราการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักที่อุณหภูมิต่าง ๆ แสดงให้เห็นการเปลี่ยนแปลงหลัก 2 ช่วง คือช่วงแรกอุณหภูมิไม่เกิน 200 องศาเซลเซียส เป็นการระเหยของความชื้น และในช่วงหลังประมาณ 200-550 องศาเซลเซียสเป็นการสลายตัวของสารประกอบต่างๆ ที่อยู่ในเชื้อเพลิง และเหลือเป็นเถ้าประมาณร้อยละ 1 ซึ่งจะแสดงผลรายละเอียดดังตาราง 36-38

ตาราง 36 ช่วงอุณหภูมิการสูญเสียน้ำหนักของเชื้อเพลิงชีวมวล

| ชนิด             | ช่วงอุณหภูมิของการสูญเสียน้ำหนัก (°C) |          |              |      |
|------------------|---------------------------------------|----------|--------------|------|
|                  | ความชื้น                              | สารระเหย | คาร์บอนคงตัว | เถ้า |
| PC (70:30)-P     | 50-187                                | 187-321  | 321-445      | 450  |
| (70:30)-B1       | 50-190                                | 190-335  | 335-450      | 480  |
| แกลบ:ไม้ (50:50) | 50-200                                | 230-380  | 380-520      | 520  |



ภาพประกอบ 83 ลักษณะการเผาไหม้และการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิใน PC (70:30)-P

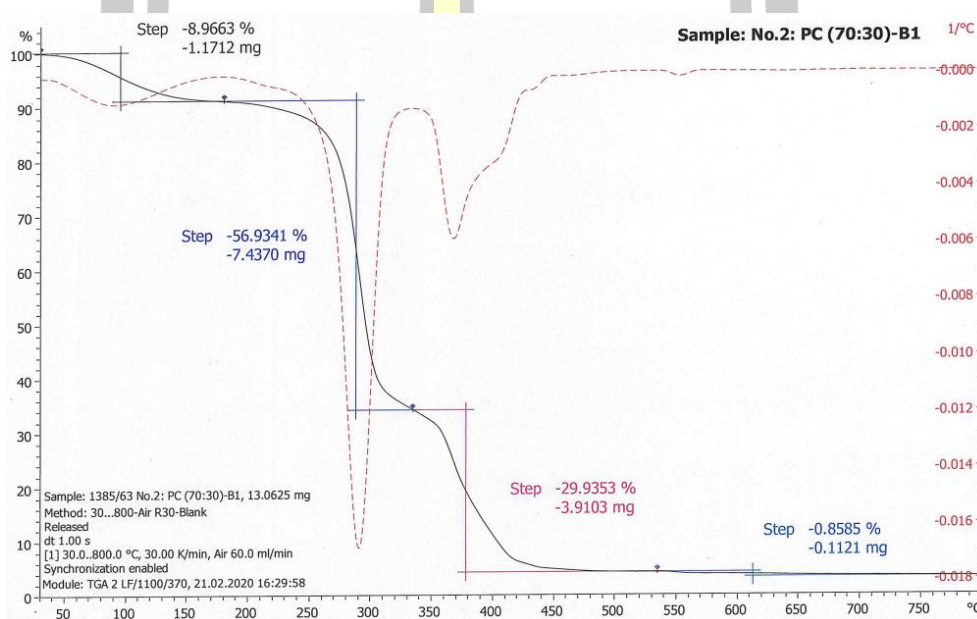
หมายเหตุ: วิเคราะห์โดยศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ

ตาราง 37 ปริมาณน้ำหนักที่สูญเสียไปจากการทดสอบด้วย TGA

| พารามิเตอร์  |     | ชนิด         |               |                 |
|--------------|-----|--------------|---------------|-----------------|
|              |     | PC (70:30)-P | PC (70:30)-B1 | แกลบ:ไม้(50:50) |
| ความชื้น     | %   | 7.77         | 8.97          | 10.39           |
|              | mg. | 1.4731       | 1.1712        | 1.5451          |
| สารระเหย     | %   | 58.23        | 56.93         | 53.13           |
|              | mg. | 11.0419      | 7.4370        | 7.9042          |
| คาร์บอนคงตัว | %   | 30.98        | 30.79         | 27.05           |
|              | mg. | 5.8740       | 4.0224        | 4.0231          |
| เถ้า         | %   | 3.02         | 3.31          | 9.43            |
|              | mg. | 0.5718       | 0.4319        | 1.4034          |

จากภาพประกอบ 83 แสดงความเร็วในการสูญเสียน้ำหนักที่เกี่ยวข้องกับอุณหภูมิในการออกซิไดซ์บรรยากาศในกรณีของ PC (70:30)-P โดยช่วงแรกของการสูญเสียน้ำหนักเป็นการสูญเสียความชื้นภายในเชื้อเพลิง อยู่ในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 50-187 °C ซึ่งมีการสูญเสียความชื้นไป 7.8 เปอร์เซ็นต์ (น้ำหนักแห้ง) และมีเถ้าต่ำถึง 0.11 เปอร์เซ็นต์ (น้ำหนักแห้ง) (ตาราง 37)

สำหรับช่วงอุณหภูมิระหว่าง 187-288 °C จะเกิดสูญเสียน้ำหนักอย่างกะทันหันและรวดเร็ว เนื่องจากเป็นจุดเริ่มต้นของการปล่อยสารระเหยและการเผาไหม้ ในบริเวณที่มีการเผาไหม้อย่างรวดเร็ว และเกิดการสูญเสียน้ำหนักในปริมาณที่สูง หลังจากนั้นจะเกิดความเร็วในการสูญเสียจะช้าลงทันทีในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 288 °C ถึง 321 °C หลังจากจุดนี้อัตราการเผาไหม้จะลดลงในช่วงเวลาสั้น ๆ มันจะมีการสูญเสียน้ำหนักอีกครั้งทำให้เกิดการสูญเสียมวลอย่างต่อเนื่องจนถึงอุณหภูมิ 450 °C เนื่องจากเกิดการสูญเสียคาร์บอนคงตัว และการลดลงของมวลอาจเกิดขึ้นได้เนื่องจากการสูญเสียโลหะที่ระเหยได้และการสลายตัวของคาร์บอนेट (Miranda et al., 2008)



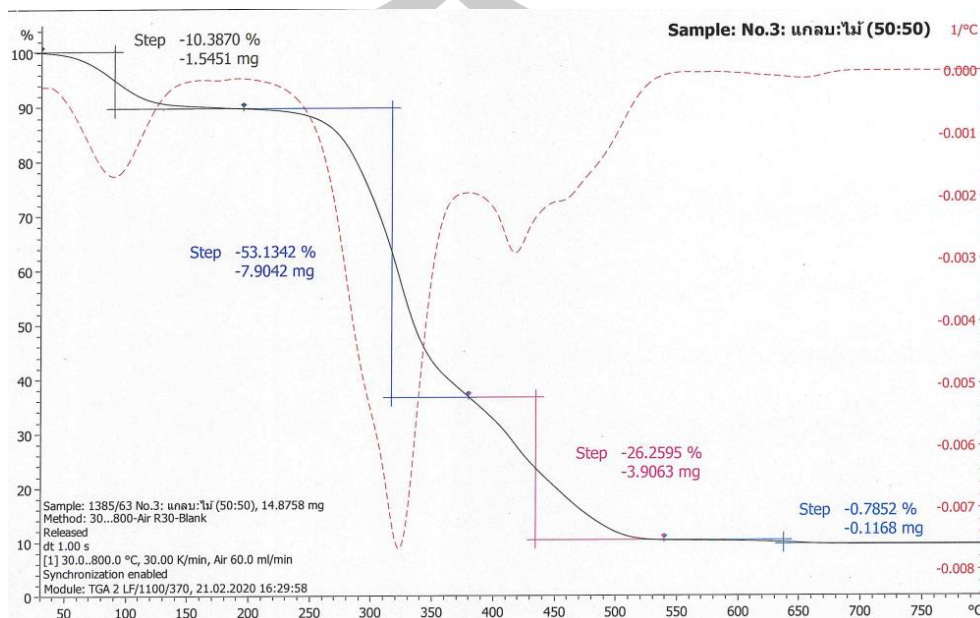
**ภาพประกอบ 84** ลักษณะการเผาไหม้และการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิใน PC (70:30)-B1

**หมายเหตุ:** วิเคราะห์โดยศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ

จากภาพประกอบ 84 แสดงความเร็วในการสูญเสียน้ำหนักที่เกี่ยวข้องกับอุณหภูมิในการออกซิไดซ์บรรยากาศในกรณีของ PC (70:30)-B1 โดยช่วงแรกของการสูญเสียน้ำหนักเป็นการสูญเสียความชื้นภายในเชื้อเพลิง อยู่ในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 50-190 °C ซึ่งมีการสูญเสียความชื้นไป 7.8 เปอร์เซ็นต์ (น้ำหนักแห้ง) และมีเถ้าต่ำถึง 0.11 เปอร์เซ็นต์ (น้ำหนักแห้ง)

สำหรับช่วงอุณหภูมิระหว่าง 190-290 °C จะเกิดสูญเสียน้ำหนักอย่างกะทันหันและรวดเร็ว เนื่องจากเป็นจุดเริ่มต้นของการปล่อยสารระเหยและการเผาไหม้ ในบริเวณที่มีการเผาไหม้อย่างรวดเร็ว และเกิดการสูญเสียน้ำหนักในปริมาณที่สูง หลังจากนั้นจะเกิดความเร็วในการสูญเสียจะช้าลงทันทีในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 290 °C ถึง 335 °C หลังจากจุดนี้อัตราการเผาไหม้จะลดลงในช่วงเวลาสั้น ๆ มันจะมีการสูญเสียน้ำหนักอีกครั้งทำให้เกิดการสูญเสียมวลอย่างต่อเนื่องจนถึงอุณหภูมิ

480 °C เนื่องจากการเกิดการสูญเสียคาร์บอนคงตัว และการลดลงของมวลอาจเกิดขึ้นได้เนื่องจากการสูญเสียโลหะที่ระเหยได้และการสลายตัวของคาร์บอนเนต (Miranda et al., 2008)



**ภาพประกอบ 85** ลักษณะการเผาไหม้และการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิใน แกลบล:ไม้ (50:50)

**หมายเหตุ:** วิเคราะห์โดยศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ

จากภาพประกอบ 85 แสดงความเร็วในการสูญเสียน้ำหนักที่เกี่ยวข้องกับอุณหภูมิในการออกซิไดซ์บรรยากาศในกรณีของ แกลบล:ไม้ (50:50) โดยช่วงแรกของการสูญเสียน้ำหนักเป็นการสูญเสียความชื้นภายในเชื้อเพลิง อยู่ในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 50-200 °C ซึ่งมีการสูญเสียความชื้นไป 7.8 เปอร์เซ็นต์ (น้ำหนักแห้ง) และมีเถ้าต่ำถึง 0.12 เปอร์เซ็นต์ (น้ำหนักแห้ง)

สำหรับช่วงอุณหภูมิระหว่าง 200-325 °C จะเกิดสูญเสียน้ำหนักอย่างกะทันหันและรวดเร็ว เนื่องจากเป็นจุดเริ่มต้นของการปล่อยสารระเหยและการเผาไหม้ ในบริเวณที่มีการเผาไหม้อย่างรวดเร็ว และเกิดการสูญเสียน้ำหนักในปริมาณที่สูง หลังจากนั้นจะเกิดความเร็วในการสูญเสียจะช้าลงทันทีในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 325 °C ถึง 520 °C หลังจากจุดนี้อัตราการเผาไหม้จะลดลงในช่วงเวลาสั้น ๆ มันจะมีการสูญเสียน้ำหนักอีกครั้งทำให้เกิดการสูญเสียมวลอย่างต่อเนื่องจนถึงอุณหภูมิ 520 °C เนื่องจากการเกิดการสูญเสียคาร์บอนคงตัว และการลดลงของมวลอาจเกิดขึ้นได้เนื่องจากการสูญเสียโลหะที่ระเหยได้และการสลายตัวของคาร์บอนเนต (Miranda et al., 2008)

#### 4.3.2 พฤติกรรมกาเผาไหม้ของเชื้อเพลิงชีวมวล

ผลจากการวิเคราะห์สมบัติเชิงทางความร้อนของเชื้อเพลิงอัดแข็งจากหญ้าหลายฤดู กับเชื้อเพลิงปัจจุบันที่โรงไฟฟ้าใช้ ด้วยเทคนิค Thermal Gravimetric Analysis (TGA) ซึ่งเทคนิค

ดังกล่าวสามารถแสดงพฤติกรรมการเผาไหม้และการสลายตัวทางความร้อนของเชื้อเพลิงแข็งที่แตกต่างกัน (Miranda et al., 2008) เพื่อดูลักษณะเฉพาะของกระบวนการเผาไหม้และการสนับสนุนการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง ซึ่งจะสังเกตจุดติดไฟและพฤติกรรมการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงชีวมวล โดยงานวิจัยนี้ได้ศึกษาพฤติกรรมการเผาไหม้ของ PC (70:30)-P, PC (70:30)-B1 และ แกลบ:ไม้ (50:50) ซึ่งจะแสดงผลการศึกษาดังตาราง 38

**ตาราง 38** คุณสมบัติของตัวอย่างในกระบวนการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งด้วยเทคนิค TGA

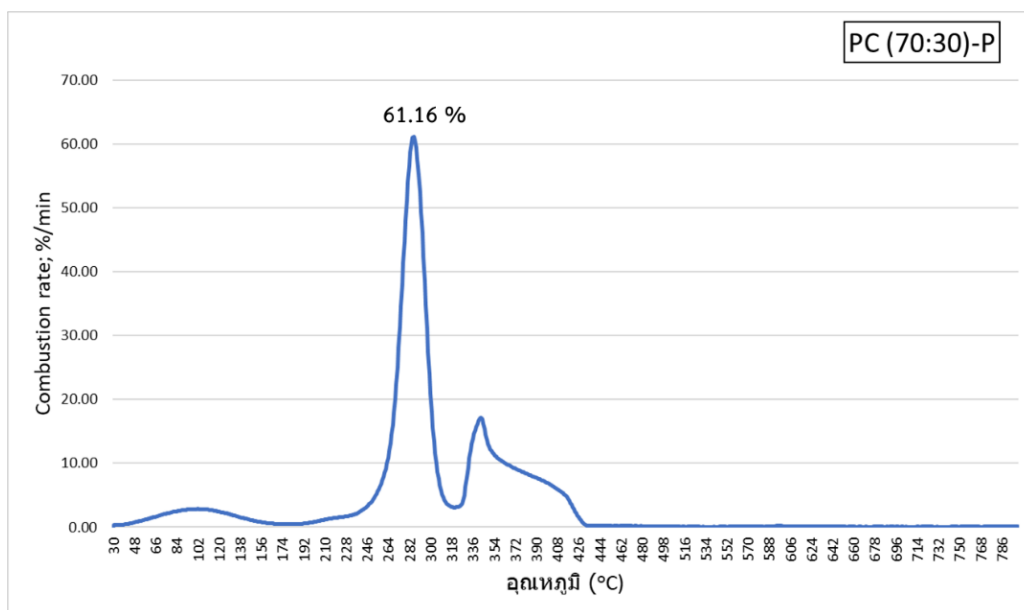
| คุณสมบัติ                       | ชนิด         |               |                  |
|---------------------------------|--------------|---------------|------------------|
|                                 | PC (70:30)-P | PC (70:30)-B1 | แกลบ:ไม้ (50:50) |
| Initial temperature (°C)        | 187          | 190           | 200              |
| Peak temperature (°C)           | 288          | 290           | 325              |
| Burnout temperature (°C)        | 450          | 480           | 520              |
| Maximum combustion rate (%/min) | 61.16        | 53.89         | 23.47            |
| Rm (% min <sup>-1</sup> /°K)    | 10.90        | 9.57          | 3.92             |
| t <sub>i</sub> (min)            | 5.23         | 5.33          | 5.67             |
| t <sub>m</sub> (min)            | 8.60         | 8.67          | 9.83             |
| t <sub>b</sub> (min)            | 14.00        | 15.00         | 16.33            |
| D                               | 0.24         | 0.21          | 0.07             |

จากตาราง 38 จะแสดงลักษณะพฤติกรรมการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง PC (70:30)-P, PC (70:30)-B1 และ แกลบ:ไม้ (50:50) โดย Initial temperature และ Peak temperature เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญที่จะบอกถึงพฤติกรรมการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง โดย Initial temperature เป็นตัวบ่งชี้ถึงจุดเริ่มต้นที่มีการเผาไหม้ จากการศึกษา พบว่า PC (70:30)-P มีอุณหภูมิเผาไหม้ที่ต่ำที่สุด คือ 187 °C รองลงมาคือ PC (70:30)-B1 และ แกลบ:ไม้ (50:50) เท่ากับ 190 และ 200 °C ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่า เชื้อเพลิง PC (70:30)-P สามารถเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ได้เร็วกว่าเชื้อเพลิงอีกทั้งสองชนิด และเมื่อเปรียบเทียบเชื้อเพลิงจากหญ้าทั้งสองชนิดแล้วพบว่า เชื้อเพลิงดังกล่าวสามารถเกิดการเผาไหม้ได้ในอุณหภูมิใกล้เคียงกัน ในขณะที่เชื้อเพลิง แกลบ:ไม้ (50:50) จะเกิดการเผาไหม้ช้าที่สุด ซึ่งใช้อุณหภูมิที่สูงกว่าเชื้อเพลิงจากหญ้า 10-13 °C เนื่องจากเชื้อเพลิงทั้งสามชนิดมีปริมาณความชื้นที่แตกต่างกัน โดยแกลบ:ไม้ (50:50) มีปริมาณความชื้นที่สูงกว่าเชื้อเพลิงจากหญ้า ซึ่งสอดคล้องกับตาราง 37 ที่แสดงถึงองค์ประกอบของเชื้อเพลิง ซึ่งสอดคล้องกับ Haykiri-Açma (2003)

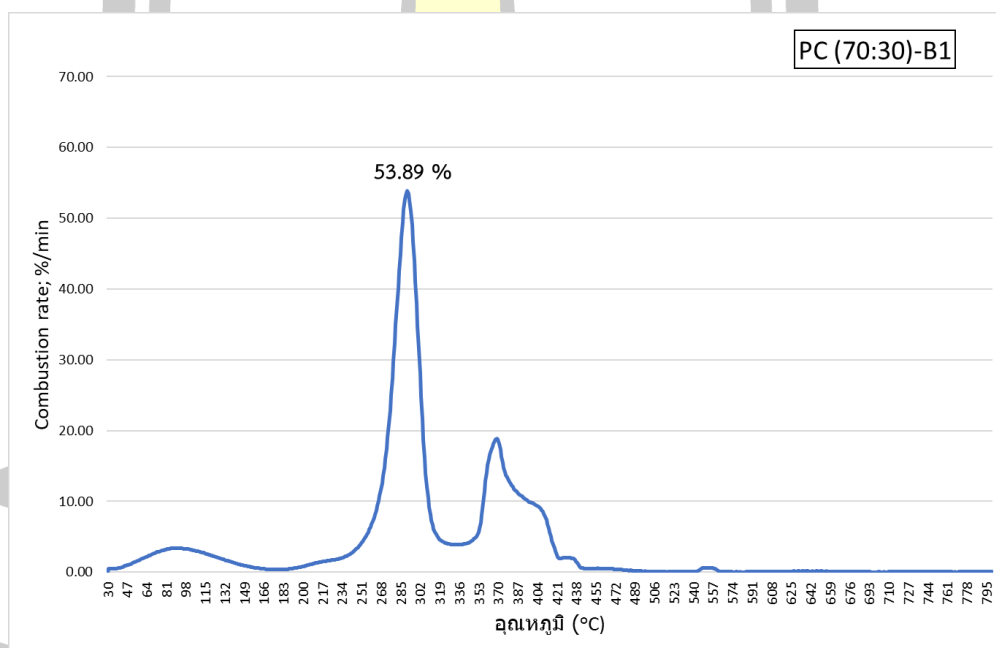
ที่ศึกษาพฤติกรรมการเผาไหม้โดยแสดงค่าของอุณหภูมิเริ่มต้นสำหรับชีวมวลที่แตกต่างกัน ได้แก่ เปลือกทานตะวัน (202 °C) เมล็ดโคลง (150 °C) โคนต้นสน (202 °C) และกากมะกอก (200 °C) และกากฝ้าย (150 °C) ซึ่งอุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้เกิดขึ้นแตกต่างกันเนื่องจากอนุภาคเชื้อเพลิงแต่ละชนิดมีปริมาณความชื้นที่ต่างกัน (คีต สร้อยทอง และคณะ, 2562) เมื่อพิจารณาดัชนีการจุดติดไฟ พบว่ามีความสอดคล้องกันกับ Initial temperature โดย PC (70:30)-P มีดัชนีการจุดติดไฟสูงที่สุด คือ 0.24 รองลงมาคือ PC (70:30)-B1 และ แกลบ:ไม้ (50:50) เท่ากับ 0.21 และ 0.07 ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่า เชื้อเพลิงจากหญ้าสามารถจุดติดไฟได้ดีกว่าถึง 0.13 หรือคิดเป็นร้อยละ 65 ดังนั้นจากผลที่เกิดขึ้นแสดงให้เห็นว่า เชื้อเพลิงจากหญ้าหลายฤดูมีข้อได้เปรียบมากกว่าเชื้อเพลิง แกลบ:ไม้ ที่ใช้ระยะเวลาเร็วกว่าในการทำปฏิกิริยาเผาไหม้ และใช้อุณหภูมิที่ต่ำกว่า

Peak temperature เป็นอุณหภูมิสูงสุดที่สามารถเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ของวัสดุจากการศึกษา พบว่า PC (70:30)-P มีอุณหภูมิเผาไหม้ที่ต่ำที่สุด คือ 288 °C รองลงมาคือ PC (70:30)-B1 และ แกลบ:ไม้ (50:50) เท่ากับ 290 และ 325 °C ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ของ PC (70:30)-P จะใช้อุณหภูมิที่ต่ำกว่าเชื้อเพลิงอีกสองชนิด และใช้ระยะเวลาเผาไหม้เชื้อเพลิงตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงจุดที่การเผาไหม้สูงสุดเร็วกว่า คือ 8.60 นาที ซึ่งจะใช้ระยะเวลาใกล้เคียงกับ PC (70:30)-B1 คือ 8.67 นาที (ตาราง 40) ดังนั้นเชื้อเพลิง PC (70:30)-P และ PC (70:30)-B1 มีข้อได้เปรียบมากกว่า แกลบ:ไม้ (50:50) เนื่องจากเชื้อเพลิงจากหญ้าเกิดการเผาไหม้ได้ดีกว่า ใช้ระยะเวลาที่รวดเร็ว 1.2 นาที หรือคิดเป็นร้อยละ 13.95

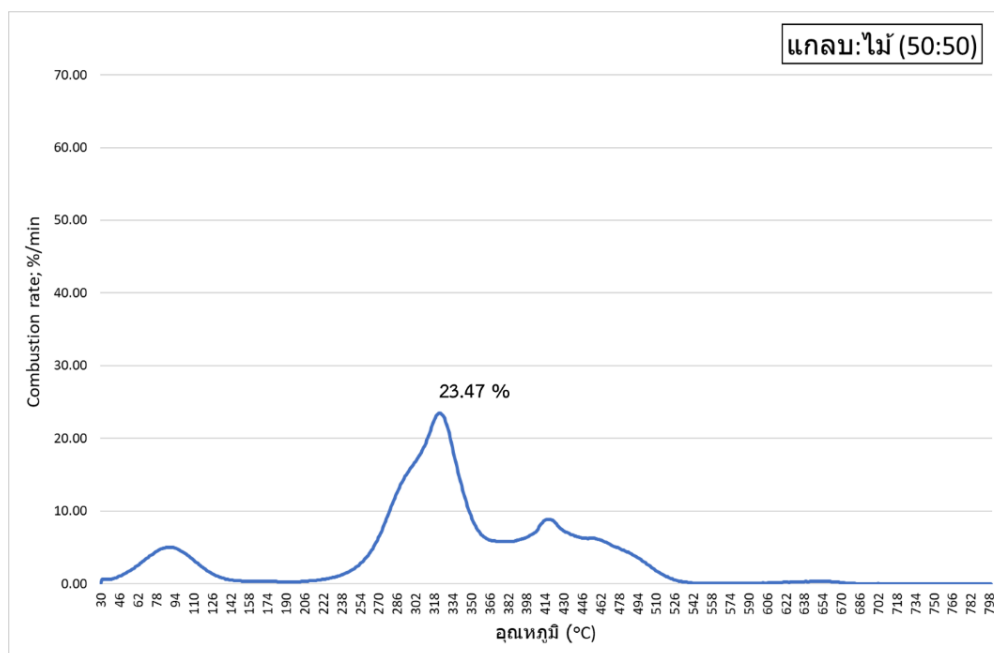
Maximum combustion rate หรืออัตราการเผาไหม้สูงสุดของเชื้อเพลิง ซึ่งจุดนี้เป็นตัวบ่งชี้การเกิดปฏิกิริยาของตัวอย่าง จากการศึกษ พบว่า PC (70:30)-P มีอัตราการเผาไหม้ที่สูงกว่าชนิดอื่น (61.16 %/min) ตามด้วย PC (70:30)-B1 และ แกลบ:ไม้ (50:50) เท่ากับ 53.89 และ 23.47 %/min ซึ่งจะเห็นได้ว่าการอัตราการเผาไหม้ของ PC (70:30)-P มากกว่าเชื้อเพลิงปัจจุบันมาก ถึง 37.69 %/min (ภาพประกอบ 86-88) จะเห็นได้ว่าเชื้อเพลิงอัดเม็ดมีอัตราการเผาไหม้สูง เมื่อใช้ระยะเวลาที่เท่า เชื้อเพลิงอัดแข็งจากหญ้าทั้ง 2 รูปทรงจะมีการสูญเสียน้ำหนักได้มากกว่า แสดงว่าการให้ความร้อนของเชื้อเพลิงจะมีระยะเวลาดสั้นกว่า ทำให้การต้องมีการป้อนเชื้อเพลิงที่เร็วกว่า ซึ่ง Miranda et al. (2008) แสดงอัตราการเผาไหม้ของเปลือกเม็ดมะกอก และกากมะกอก กำหนดความเร็วในการเผาไหม้สูงสุด 30 °C/min เท่ากับ 39.82 %/min และ 63.01 %/min ตามลำดับ ซึ่งค่าเหล่านี้มีความใกล้เคียงกับเชื้อเพลิงอัดเม็ดและเชื้อเพลิงอัดก้อนจากหญ้าหลายฤดู และมีความสอดคล้องที่ว่าอัตราการเผาไหม้มีความสัมพันธ์กับสัดส่วนของสารระเหยและคาร์บอนในเชื้อเพลิง (Xiang-guo et al., 2006)



ภาพประกอบ 86 อัตราการเผาไหม้เชื้อเพลิงอัด PC (70:30)-P



ภาพประกอบ 87 อัตราการเผาไหม้เชื้อเพลิงอัด PC (70:30)-B1



ภาพประกอบ 88 อัตราการเผาไหม้เชื้อเพลิงแกลบ:ไม้ (50:50)

อัตราเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักต่ออุณหภูมิที่มากที่สุด ( $R_m$ ) เป็นปฏิกิริยาการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงสามารถพิจารณาได้จากการแปรผันตรงกับอัตราการเผาไหม้สูงที่สุดและแปรผกผันกับค่าอุณหภูมิที่เกิดขึ้น โดยพารามิเตอร์ดังกล่าวจะเป็นตัวบ่งชี้การเป็นเชื้อเพลิงที่ดี ถ้ามีอัตราเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักต่ออุณหภูมิที่มากที่สุดที่สูง (Miranda et al., 2008; คีต สร้อยทอง และคณะ, 2562) ซึ่งจะแสดงถึงการสูญเสียน้ำหนักต่อหน่วยอุณหภูมิ จากการศึกษ พบว่า PC (70:30)-P มีค่าสูงที่สุด ( $10.90 \text{ } \% \text{ min}^{-1}/\text{K}$ ) รองลงมาคือ PC (70:30)-B1 และ แกลบ:ไม้ (50:50) ที่แสดงค่าเท่ากับ 9.57 และ  $3.92 \text{ } \% \text{ min}^{-1}/\text{K}$  ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าเชื้อเพลิงจากหญ้าทั้งสองชนิดมี ค่า  $R_m$  ที่สูงกว่าอย่างเห็นได้ชัด เมื่อเทียบกับ แกลบ:ไม้ (50:50) ดังนั้น เชื้อเพลิง PC (70:30)-P และ PC (70:30)-B1 สามารถเป็นเชื้อเพลิงที่ดีได้ เนื่องจากปริมาณสารระเหยที่มีอยู่ในเชื้อเพลิงจากหญ้าที่สูง (คีต สร้อยทอง และคณะ, 2562) ซึ่ง  $R_m$  เป็นตัวพิสูจน์ถึงการสนับสนุนกันของการเผาไหม้ เพราะพลังงานที่ปลดปล่อยสารระเหยออกมาจากการเผาไหม้ ซึ่งเป็นตัวเร่งให้เชื้อเพลิงจากหญ้าเผาไหม้ได้เร็วมากขึ้น (Mi et al., 2016) ส่งผลให้อัตราการลดลงของน้ำหนักมากขึ้นด้วย ซึ่งจะสอดคล้องกับปริมาณสารระเหยและระยะการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ตั้งแต่จุดเริ่มต้นจนถึงจุดที่เผาไหม้สูงสุดของเชื้อเพลิง

Burnout temperature แสดงถึงอุณหภูมิสิ้นสุดการเผาไหม้ ซึ่งจะสอดคล้องกับเส้นโค้งของกราฟ TGA การสูญเสียน้ำหนัก ดังภาพประกอบ 86-88 และตาราง 38 จากผลการศึกษาพบว่า PC (70:30)-P, PC (70:30)-B1 และแกลบ:ไม้ (50:50) มีอุณหภูมิสิ้นสุดอยู่ที่ 450, 480 และ  $520 \text{ } ^\circ\text{C}$  ตามลำดับ จะเห็นว่าอุณหภูมิดังกล่าวของเชื้อเพลิงจากหญ้าทั้ง 2 รูปแบบมีค่าใกล้เคียงกัน

แต่ยังต่ำกว่าเชื้อเพลิงจากกลบ:ไม้ อยู่ 70 °C และ 40 °C ตามลำดับ ซึ่งหมายความว่าเชื้อเพลิงจากหญ้ามีระยะเวลาการเผาไหม้ภายในเตาเร็วกว่าเชื้อเพลิงปัจจุบัน โดยใช้ระยะเวลาในการเผาไหม้เชื้อเพลิงจากหญ้าอยู่ที่ 14.00 และ 15.00 นาที ในขณะที่เชื้อเพลิงกลบ:ไม้ (50:50) ใช้ระยะเวลา 16.33 นาที ซึ่งแตกต่างกัน 1.33-2.33 นาที การที่เชื้อเพลิงจากหญ้าใช้ระยะเวลาในการเผาไหม้ที่เร็วกว่าเนื่องจากองค์ประกอบเชื้อเพลิงจากหญ้ามีปริมาณสัดส่วนของออกซิเจนที่สูงกว่า (ร้อยละ 49.82) เชื้อเพลิงจากกลบและไม้ (ร้อยละ 36.45 และ 42.46) แสดงดังตาราง 27 จึงทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้อย่างรวดเร็วที่เป็นส่วนช่วยในการปลดปล่อยพลังงานของเชื้อเพลิง ซึ่งเป็นการสนับสนุนให้อนุภาคเชื้อเพลิงเกิดการเผาไหม้ได้ดีมากขึ้น (คีต สร้อยทอง และคณะ, 2562) และปริมาณน้ำหนักที่เหลืออยู่หลังจากการเผาไหม้สิ้นสุดลงของเชื้อเพลิง กลบ:ไม้ (50:50) มีปริมาณที่สูงกว่าเชื้อเพลิงจากหญ้า สิ่งเหล่านี้เกิดจากความแตกต่างของปริมาณเถ้าในเชื้อเพลิง (Xiang-guo et al., 2006) ซึ่งจะสอดคล้องกับปริมาณเถ้าที่แสดงในตาราง 38 ที่จะเห็นได้ว่าเชื้อเพลิง กลบ:ไม้ (50:50) มีปริมาณเถ้าที่สูงที่สุด

ดังนั้น จากการศึกษาพฤติกรรมของเชื้อเพลิง จะเห็นได้ว่า เชื้อเพลิง PC (70:30)-P และ PC (70:30)-B1 มีข้อได้เปรียบมากกว่าเชื้อเพลิงกลบ:ไม้ (50:50) ในหลายๆด้านได้แก่ ความชื้นต่ำกว่า พลังงานความร้อนสูงกว่า การเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้เร็วกว่า และความสามารถในการเผาไหม้ภายในเตาที่ต่ำกว่า 2 เท่า ซึ่งจะสังเกตได้จากจากอุณหภูมิการสันดาป อุณหภูมิสิ้นสุดการเผาไหม้ และอุณหภูมิที่เกิดการเผาไหม้มากที่สุด ที่มีคุณสมบัติที่ดีกว่าเชื้อเพลิงกลบ:ไม้ (50:50) อย่างไรก็ตามเชื้อเพลิงอัดแข็งจากหญ่ายังมีข้อเสียเปรียบคือ อัตราการเผาไหม้สูงทำให้เชื้อเพลิงเผาไหม้ได้รวดเร็ว ทำให้ต้องป้อนเชื้อเพลิงในปริมาณที่มากกว่าในระยะเวลาที่เท่ากัน

#### 4.4 ศักยภาพการผลิตพลังงานไฟฟ้าของเชื้อเพลิงอัดแข็งจากหญ้าหลายฤดู

จากการศึกษาพฤติกรรมการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงอัดแข็ง ในหัวข้อ 4.3 พบว่า เชื้อเพลิงอัดแข็งเชื้อเพลิง PC (70:30)-P และ PC (70:30)-B1 มีข้อได้เปรียบมากกว่าเชื้อเพลิงกลบ:ไม้ (50:50) มีความเหมาะสมที่จะนำมาพัฒนาเพื่อนำมาเป็นเชื้อเพลิงผลิตพลังงานไฟฟ้า โดยการนำมาศึกษาศักยภาพทางพลังงานในการผลิตพลังงานไฟฟ้า และนำเปรียบเทียบกับพลังงานของเชื้อเพลิงปัจจุบันที่ใช้เพื่อลดการสูญเสีย ค่าใช้จ่ายโดยไม่จำเป็น และมีประสิทธิภาพที่เทียบเท่า สำหรับเลือกกระบวนการอัดและใช้เชื้อเพลิงที่เหมาะสมกับโรงไฟฟ้าชีวมวล โดยแบ่งผลการศึกษาออกเป็นหัวข้อดังต่อไปนี้

- 1) ศักยภาพพลังงานความร้อนและไฟฟ้าของเชื้อเพลิงต่อน้ำหนัก
- 2) ศักยภาพพลังงานความร้อนและไฟฟ้าของเชื้อเพลิงต่อปริมาตร

#### 4.4.1 ศักยภาพพลังงานความร้อนของเชื้อเพลิงต่อน้ำหนัก

จากการศึกษาศักยภาพพลังงานความร้อนและไฟฟ้าของเชื้อเพลิงต่อน้ำหนัก โดยการคำนวณหาศักยภาพการผลิตพลังงานความร้อนและศักยภาพการผลิตพลังงานไฟฟ้าของเชื้อเพลิงอัดแข็ง เพื่อใช้ในการประเมินหาเชื้อเพลิงที่เหมาะสมสำหรับผลิตเป็นพลังงานโดย โดยเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงปัจจุบันที่โรงงานใช้ คือ แกลบ:ไม้ ในอัตราส่วน 50:50 พบว่า เชื้อเพลิงจากหญ้าในปริมาณน้ำหนักที่เท่ากับปริมาณของเชื้อเพลิง แกลบ:ไม้ ที่ป้อนเข้าสู่เตาเผา คือ 10 ตัน ทำให้ได้พลังงานความร้อนใกล้เคียงกันกับ แกลบ:ไม้ (158.0 GJ) ซึ่งจะแสดงผลในตาราง 39

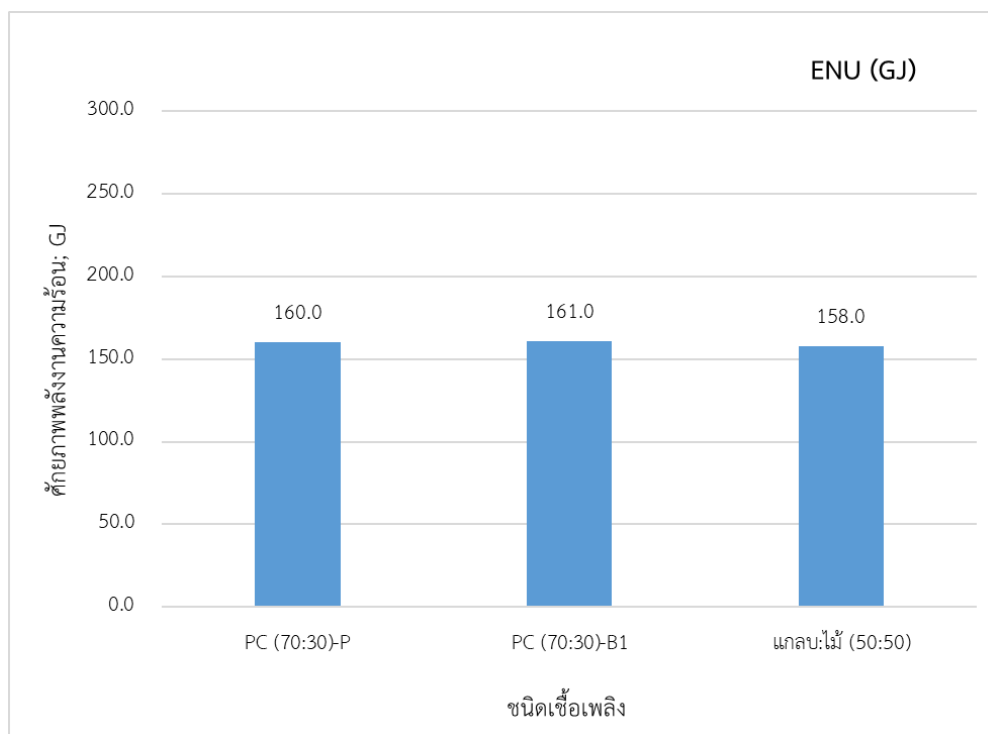
ตาราง 39 ศักยภาพพลังงานความร้อนและพลังงานไฟฟ้าของเชื้อเพลิงอัดแข็งต่อน้ำหนัก

| ชนิด             | ENU (GJ) | PE (MW) |
|------------------|----------|---------|
| PC (70:30)-P     | 160.0    | 8.9     |
| PC (70:30)-B1    | 161.0    | 8.9     |
| แกลบ:ไม้ (50:50) | 158.0    | 8.8     |

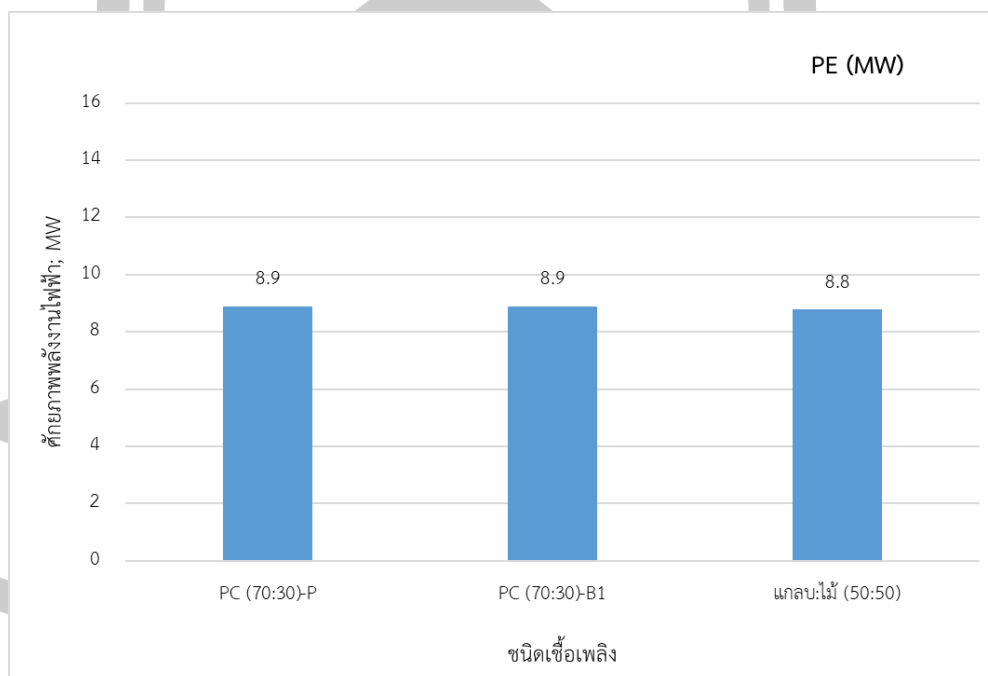
จากภาพประกอบ 89 จะเห็นได้ว่า เชื้อเพลิง PC (70:30)-B1 มีศักยภาพพลังงานความร้อนเทียบเท่า และสูงกว่า เชื้อเพลิงจาก แกลบ:ไม้ โดยเชื้อเพลิงสามารถผลิตพลังงานงานความร้อนที่สูงที่สุด (161.0 GJ) มากกว่าเพียง 3 GJ คิดเป็นร้อยละ 1.9 รองลงมาคือ เชื้อเพลิง PC (70:30)-P ที่สามารถผลิตพลังงานงานความร้อนได้ 160.0 GJ มากกว่าเพียง 2 GJ คิดเป็นร้อยละ 1.2 และเมื่อพิจารณาเชื้อเพลิงทั้ง 2 ชนิดมีพลังงานความร้อนต่างกันเพียง 1 GJ (ตาราง 39)

เมื่อศึกษาศักยภาพการผลิตพลังงานไฟฟ้า พบว่า เชื้อเพลิง แกลบ:ไม้ มีศักยภาพการผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ 8.8 MW (ข้อมูลชีวมวลปริมาณชีวมวลของโรงไฟฟ้าปี 2563 นำมาคำนวณหาพลังงานไฟฟ้า) จะเห็นได้ว่าเชื้อเพลิง PC (70:30)-B1 และ PC (70:30)-P มีศักยภาพการผลิตพลังงานไฟฟ้าเทียบเท่าและสูงกว่าเชื้อเพลิงที่โรงไฟฟ้าใช้ (8.9 MW) มากกว่าเพียง 0.1 MW คิดเป็นร้อยละ 1.1 (ภาพประกอบ 90)

พูน ปณ ทิโต ชเว



ภาพประกอบ 89 ศักยภาพการผลิตพลังงานความร้อนต่อน้ำหนักของเชื้อเพลิง



ภาพประกอบ 90 ศักยภาพการผลิตพลังงานไฟฟ้าต่อน้ำหนักของเชื้อเพลิง

จากการศึกษาศักยภาพพลังงานของเชื้อเพลิงต่อน้ำหนัก จะเห็นได้ว่ารูปทรงของเชื้อเพลิงไม่ส่งผลต่อพลังงานความร้อนและพลังงานไฟฟ้า ซึ่งจากการศึกษาจะเห็นได้ว่าเชื้อเพลิง PC (70:30)-B1 และ PC (70:30)-P เหมาะสำหรับนำไปผลิตเป็นพลังงานไฟฟ้า โดยไม่เพิ่มค่าใช้จ่าย และยังมีประสิทธิภาพเทียบเท่าเชื้อเพลิงปัจจุบัน อย่างไรก็ตาม ในการพิจารณาเชื้อเพลิงที่เหมาะสมยังต้องคำนึงถึงพลังงานต่อปริมาตร เนื่องจากในการขนส่ง จัดเก็บ และการป้อนเชื้อเพลิง ยังต้องการพลังงานที่คุ้มค่าและมีประสิทธิภาพที่ดีที่สุด ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อถัดไป

#### 4.4.2 ศักยภาพพลังงานความร้อนไฟฟ้าของเชื้อเพลิงต่อปริมาตร

จากการศึกษาศักยภาพพลังงานความร้อนของเชื้อเพลิงต่อปริมาตร โดยการคำนวณหาศักยภาพการผลิตพลังงานความร้อนและศักยภาพการผลิตพลังงานไฟฟ้าของเชื้อเพลิงอัดแข็ง เพื่อใช้ในการประเมินหาเชื้อเพลิงที่เหมาะสมสำหรับผลิตเป็นพลังงาน โดยเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงปัจจุบันที่โรงงานใช้ คือ แกลบ:ไม้ ในอัตราส่วน 50:50 พบว่า เชื้อเพลิงจากหญ้าในปริมาณน้ำหนักที่แตกต่างกันในหน่วยปริมาตรเดียวกัน คือ 58.2 ลูกบาศก์เมตร ซึ่งจะนำปริมาตรของการป้อนเชื้อเพลิงไปคำนวณหาปริมาณน้ำหนักการป้อนเชื้อเพลิง ด้วยการคูณปริมาตรการป้อนเชื้อเพลิงกับความหนาแน่นรวมของเชื้อเพลิงจากหญ้า ซึ่งจะนำน้ำหนักที่ได้นั้นไปคำนวณหาพลังงานความร้อนและไฟฟ้าได้ โดยจะแสดงผลการศึกษาในตาราง 40

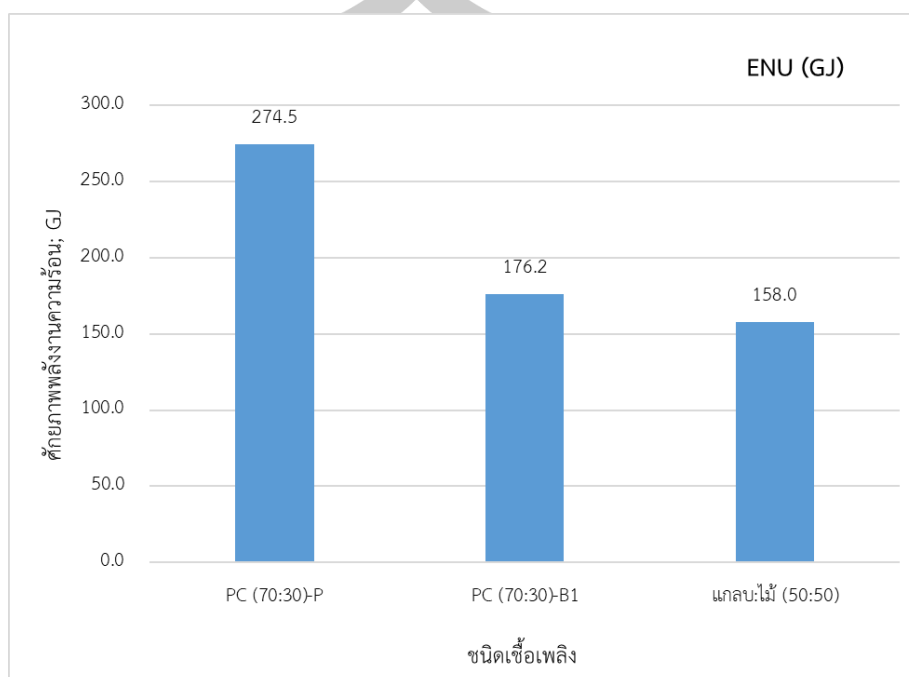
**ตาราง 40** ศักยภาพพลังงานความร้อนและพลังงานไฟฟ้าของเชื้อเพลิงอัดแข็งต่อปริมาตร

| ชนิด             | ENU (GJ) | PE (MW) |
|------------------|----------|---------|
| PC (70:30)-P     | 274.5    | 15.3    |
| PC (70:30)-B1    | 176.2    | 9.8     |
| แกลบ:ไม้ (50:50) | 158.0    | 8.8     |

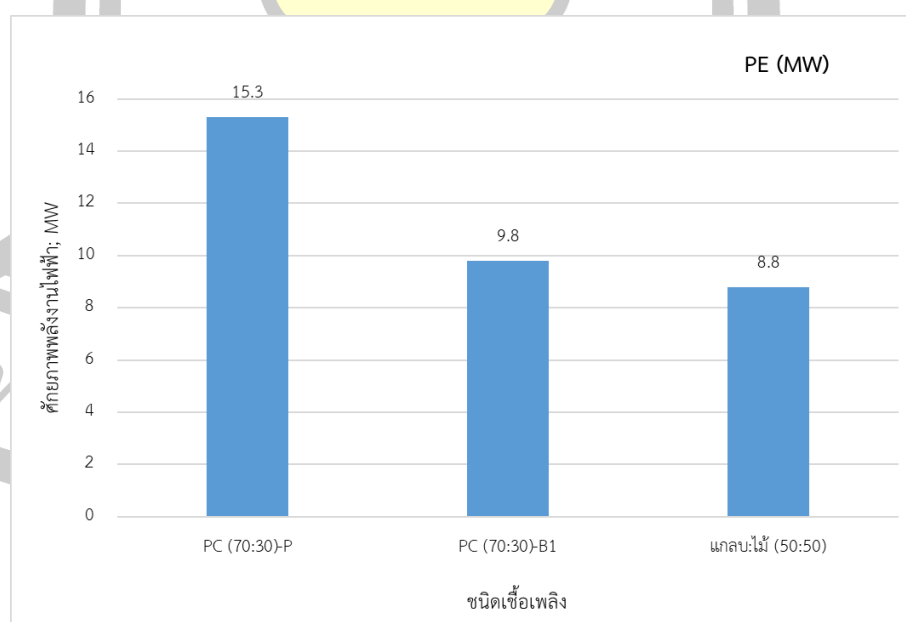
จากภาพประกอบ 91 จะเห็นได้ว่า เชื้อเพลิง PC (70:30)-P มีศักยภาพพลังงานความร้อนสูงกว่าเชื้อเพลิงจาก แกลบ:ไม้ (50:50) โดยเชื้อเพลิงสามารถผลิตพลังงานความร้อนที่สูงที่สุด (274.5 GJ) มากกว่าถึง 116.5 GJ คิดเป็นร้อยละ 42.4 รองลงมาคือ เชื้อเพลิง PC (70:30)-B1 ที่สามารถผลิตพลังงานความร้อนได้ 176.2 GJ มากกว่าถึง 18.2 GJ คิดเป็นร้อยละ 10.3 และเมื่อพิจารณาเชื้อเพลิงทั้ง 2 ชนิดมีพลังงานความร้อนต่างกันถึง 98.3 GJ (ตาราง 40)

เมื่อศึกษาศักยภาพการผลิตพลังงานไฟฟ้า พบว่า เชื้อเพลิง แกลบ:ไม้ มีศักยภาพการผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ 8.8 MW (ข้อมูลชีวมวลปริมาณชีวมวลของโรงไฟฟ้าปี 2563 นำมาคำนวณหาพลังงานไฟฟ้า) จะเห็นได้ว่าเชื้อเพลิง PC (70:30)-P และ PC (70:30)-B1 มีศักยภาพการผลิตพลังงาน

ไฟฟ้าเทียบเท่าและสูงกว่าเชื้อเพลิงที่โรงไฟฟ้าใช้ (15.3 MW และ 9.8 MW ตามลำดับ) มากกว่าถึง 6.5 และ 1 MW ตามลำดับ คิดเป็นร้อยละ 10.2-42.5 (ภาพประกอบ 92)



ภาพประกอบ 91 คํายภาพการผลิตพลังงานความร้อนต่อปริมาตรของเชื้อเพลิง



ภาพประกอบ 92 คํายภาพการผลิตพลังงานไฟฟ้าต่อปริมาตรของเชื้อเพลิง

จากการศึกษาศักยภาพผลิตพลังงานไฟฟ้าของเชื้อเพลิง จะเห็นได้ว่ารูปทรงและกำลังอัดส่งผลต่อพลังงานทำให้พลังงานไฟฟ้าแตกต่างกัน ซึ่งจากการศึกษาจะเห็นได้ว่า เชื้อเพลิง PC (70:30)-P เหมาะสำหรับนำไปผลิตเป็นพลังงานไฟฟ้า โดยทำให้ไม่เพิ่มค่าใช้จ่ายและยังมีประสิทธิภาพเทียบเท่า และมีการใช้ตัวประสานน้อยที่สุด คือ PC (70:30)-P มี สามารถให้พลังงานไฟฟ้าได้ถึง 15.3 MW และมีความคงทนมากกว่า 70 เปอร์เซ็นต์ เกินมาตรฐานเชื้อเพลิงที่กำหนดไว้ อีกทั้งยังได้พลังงานไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจากเดิมถึงร้อยละ 70 สามารถเพิ่มรายได้จากการขายพลังงานไฟฟ้าได้มากถึง 67,680-73,440 บาท (ราคาขายไฟฟ้าให้กับรัฐ คือ 4.8 บาท/KWhr)

เชื้อเพลิง PC (70:30)-B1 สามารถให้พลังงานไฟฟ้าได้ถึง 9.8 MW และมีความคงทนมากกว่า 70 เปอร์เซ็นต์ เกินมาตรฐานเชื้อเพลิงที่กำหนดไว้ และสามารถเพิ่มรายได้จากการขายพลังงานไฟฟ้าได้มากถึง 47,040 บาท (ราคาขายไฟฟ้าให้กับรัฐ คือ 4.8 บาท/KWhr) ซึ่งมากกว่าเชื้อเพลิงปัจจุบันที่ขายให้รัฐ 8 MW คิดเป็นเงิน 38,400 บาท

ดังนั้นจากการศึกษาทั้งหมดจะเห็นได้ว่า เชื้อเพลิงอัดแข็งจากหญ้ามีคุณสมบัติทางพลังงานที่เพิ่มสูงขึ้น ให้พลังงานได้สม่ำเสมอ ตลอดจนมีศักยภาพการผลิตพลังงานไฟฟ้าที่ได้มากกว่าเชื้อเพลิงแกลบ:ไม้ ที่เป็นเชื้อเพลิงหลักของโรงไฟฟ้าชีวมวล ในแง่ของคุณภาพของเชื้อเพลิงอัดแข็ง พบว่า มีความคงทน คงรูป ที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานเชื้อเพลิงชีวมวลที่กำหนด ทำให้เชื้อเพลิงจากหญ้าเป็นเชื้อเพลิงทางเลือกที่มีประสิทธิภาพสำหรับโรงไฟฟ้าชีวมวล



## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการศึกษา

##### 5.1.1 คุณสมบัติทางกายภาพ เคมี ชีวเคมี และคุณสมบัติทางพลังงานของหญ้าหลายฤดู

จากการศึกษาองค์ประกอบโดยประมาณของหญ้าหลายฤดู ได้แก่ ความชื้น สารระเหยง่าย คาร์บอนคงตัว และเถ้า ในหญ้าทั้ง 10 ชนิด พบว่า ความแตกต่างของชนิดและส่วนของพืชมีผลต่อปริมาณของความชื้น สารระเหยง่าย คาร์บอนคงตัว และปริมาณเถ้าในหญ้า อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบกับแกลบ (เชื้อเพลิงปัจจุบันที่ใช้ในโรงไฟฟ้า) หญ้าเหล่านี้มีปริมาณสารระเหยสูง (68.65-74.02 wt%) และคาร์บอนคงที่ (16.77-19.45 wt%) ในขณะที่เดียวกันมีปริมาณเถ้าต่ำกว่า (4.22-10.48 wt%) นอกจากนี้ยังเปิดเผยว่าคาร์บอนคงที่เป็นเนื้อหาที่กำหนดมากที่สุดที่มีส่วนทำให้เกิดค่าความร้อน *Setaria sphacelata* cv. Splenda แสดงให้เห็นถึงบริบทคาร์บอนคงที่สูงที่สุดในส่วนของใบและลำต้น

สำหรับองค์ประกอบเยื่อใยของหญ้าทั้ง 10 ชนิด พบว่ามืองค์ประกอบของเซลลูโลสในปริมาณสูง (ร้อยละ 40-58) รองลงมาคือเฮมิเซลลูโลส (ร้อยละ 22-40) และลิกนิน (ร้อยละ 10-23) นอกจากนี้ปริมาณลิกนินยังมีบทบาทสำคัญสำหรับค่าความร้อนชีวมวล โดยจะเห็นได้ว่า *Setaria sphacelata* cv. Splenda มีปริมาณลิกนินสูงสุด (21.76 wt%) ซึ่งจะมีแนวโน้มเดียวกับปริมาณความร้อนที่พบว่า *Setaria sphacelata* cv. Splenda มีค่าความร้อนสูงสุด (17.55 MJ/kg) โดย *Setaria sphacelata* cv. Splenda มีลิกนินสูงสุดทั้งในส่วนของลำต้น (22.31 wt.%) และใบ (20.55 wt.%) อย่างไรก็ตามในส่วนของลำต้นและใบพบว่าลำต้นมีแนวโน้มของลิกนินสูงกว่าใบ

การศึกษาค่าความร้อนของหญ้าหลายฤดู พบว่า *Setaria sphacelata* cv. Splenda แสดงค่าความร้อนสูงสุด (17.55 MJ/kg) ตามด้วย *Paspalum atratum* (16.67 MJ/kg), *Pennisetum purpureum* x *P. glaucum* Pakchong 1 (16.58 MJ/kg) และ *Panicum maximum* cv. Mombaza (16.46 MJ/kg) ตามลำดับ ในส่วนของใบและลำต้นพบค่าความร้อนสูงที่ใกล้เคียงกัน โดยค่าความร้อนมีความสัมพันธ์กับปริมาณคาร์บอนและลิกนิน

จากองค์ประกอบทางเคมีของหญ้าพบว่า 4 ชนิดแรกที่มีคุณสมบัติที่ดีที่สุดในการผลิตเชื้อเพลิง ได้แก่ *Setaria sphacelata* cv. Splenda, *Paspalum atratum*, *Pennisetum purpureum* x *P. glaucum* Pakchong 1 และ *Panicum maximum* cv. Mombaza ซึ่งมีสารระเหยง่าย คาร์บอนคงตัว ลิกนิน และค่าความร้อนที่สูง ซึ่งผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าหญ้ามียุทธศาสตร์มากกว่าแกลบ

(14.62 MJ/kg) และเทียบเท่าเศษไม้ (17.73 MJ/kg) โดยที่แกลและเศษไม้เป็นเชื้อเพลิงชีวมวลหลักของโรงไฟฟ้า อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาหญ้า 4 อันดับแรกและผลผลิตต่อพื้นที่ พบว่า *Setaria sphacelata* cv. Splenda สามารถให้ผลผลิตได้ 0.6 ตัน/ไร่/ปี (น้ำหนักแห้ง) ซึ่งค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับหญ้าอีกทั้ง 3 ชนิด และไม่เหมาะสมสำหรับการผลิตภาคอุตสาหกรรม ในขณะเดียวกัน *Paspalum atratum*, *Pennisetum purpureum* x *P. glaucum* Pakchong 1 และ *Panicum maximum* cv. Mombaza สามารถผลิตได้ 3, 6 และ 8 ตัน/ไร่/ปี (น้ำหนักแห้งแห้ง)

ดังนั้นจากการศึกษาจึงสามารถเสนอได้ว่า *Paspalum atratum*, *Pennisetum purpureum* x *P. glaucum* Pakchong 1 และ *Panicum maximum* cv. Mombaza เป็นหญ้าที่เหมาะสมที่จะใช้เป็นวัตถุดิบทางเลือก อย่างไรก็ตามการศึกษายังได้ตรวจสอบคุณสมบัติองค์ประกอบของหญ้าเพื่อประเมินการปล่อยมลพิษทางอากาศที่อาจเกิดขึ้นจากกระบวนการเผาไหม้ ส่วนประกอบหลักทางเคมีของออกซิเจน (O), คาร์บอน (C), ไฮโดรเจน (H), ซัลเฟอร์ (S) และไนโตรเจน (N) โดยทั่วไปหญ้าทั้งหมดมีเปอร์เซ็นต์คาร์บอนสูง (C) และออกซิเจน (O) แต่ไฮโดรเจนต่ำ (H), กำมะถัน (S), และไนโตรเจน (N) ต่ำ ในแง่นี้มันสามารถยืนยันได้ว่าหญ้าเป็นเชื้อเพลิงทางเลือกที่ดีโดยมีการปล่อยมลพิษน้อยกว่า  $\text{NO}_x$  และ  $\text{SO}_x$  ในแง่ของมลพิษให้พิจารณากำมะถัน (S) และไนโตรเจน (N) เมื่อเปรียบเทียบกับฟอสซิล หญ้ามีไนโตรเจนต่ำ (0.88-0.96 wt.%) และกำมะถัน (1.3-1.93 wt.%) ซึ่งต่ำกว่าเชื้อเพลิงฟอสซิล ( 2.00 wt.%, S และ 1.10 wt.%, N)

*Paspalum atratum*, *Pennisetum purpureum* x *P. glaucum* Pakchong 1 และ *Panicum maximum* cv. Mombaza มีศักยภาพการผลิตพลังงานไฟฟ้า โดย *Pennisetum purpureum* x *P. glaucum* Pakchong 1 ผลิตได้สูงสุด 7.38 MW รองลงมาคือ *Paspalum atratum* และ *Panicum maximum* cv. Mombaza ที่มีศักยภาพพลังงานไฟฟ้า เท่ากับ 5.60 และ 2.75 ตามลำดับ ซึ่งสามารถผลิตกระแสไฟฟ้าที่มีกำลังงานการผลิตได้ร้อยละ 74.5 ของกำลังการผลิตจากเชื้อเพลิงปัจจุบันที่โรงไฟฟ้าใช้ เมื่อคิดศักยภาพการผลิตไฟฟ้าของหญ้าทั้ง 3 ชนิดรวมกัน พบว่ามีความสามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ถึง 15.73 MW

### 5.1.2 อิทธิพลของปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความร้อนและความหนาแน่นพลังงาน

ในการศึกษาอิทธิพลของปัจจัยที่ส่งผลต่อพลังงานความร้อนและความหนาแน่น พบว่าการเพิ่มตัวประสาน ทำให้ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงลดลง เนื่องจากตัวประสานมีค่าความร้อนที่ต่ำกว่าวัสดุ ถ้าหากเพิ่มตัวประสานในปริมาณที่มากขึ้นค่าความร้อนที่ได้จะเป็นค่าความร้อนของตัวประสาน ซึ่งไม่ใช่วัสดุจากหญ้า ดังนั้นการลดตัวประสานลงจะทำให้เชื้อเพลิงมีค่าความร้อนเพิ่มมากขึ้นทั้งในเชื้อเพลิงอัดเม็ดและเชื้อเพลิงอัดก้อน ในขณะที่ความหนาแน่นพลังงาน แสดงผลที่ตรงกันข้ามกับค่าความร้อน คือ เมื่อมีการลดตัวประสานลงทำให้เชื้อเพลิงมีค่าความร้อนลดลง โดยการลดตัว

ประสานของเชื้อเพลิงจะทำให้ความร้อนหนาแน่นลดลง เนื่องความร้อนหนาแน่นมีความสัมพันธ์กับความหนาแน่นรวม โดยการเพิ่มตัวประสานจะทำให้เชื้อเพลิงมีความหนาแน่นสูงขึ้น

สำหรับปัจจัยของกำลังอัดที่แตกต่างกัน จะเห็นได้ว่า กำลังอัดที่แตกต่างกันไม่ส่งผลต่อค่าความร้อน แต่กำลังอัดส่งผลต่อความหนาแน่นพลังงาน โดยเชื้อเพลิงที่มีกำลังอัดสูง จะทำให้มีความหนาแน่นพลังงานสูงด้วย โดยพิจารณาเชื้อเพลิงชนิดและอัตราส่วนเดียวกัน คือเชื้อเพลิงจากหญ้ากินนีมือขาว ที่อัตราส่วน 70:30 แสดงค่าความหนาแน่นพลังงานของเชื้อเพลิงกำลังอัดที่ 3 MPa สูงที่สุด (3,953.99 MJ/m<sup>3</sup>) รองลงมา คือ เชื้อเพลิงกำลังอัดที่ 2 MPa (3,358.94 MJ/m<sup>3</sup>) และ 1 MPa (2,995.12 MJ/m<sup>3</sup>) ตามลำดับ เช่นเดียวกันกับปัจจัยรูปทรงของเชื้อเพลิง ที่ไม่มีผลต่อพลังงานความร้อน แต่ส่งผลต่อความหนาแน่นทางพลังงาน

โดยปัจจัยทั้ง 3 ปัจจัยดังกล่าวมีอิทธิพลที่ส่งผลต่อความคงทน ซึ่งได้แก่ การต้านทานขัดสี การต้านทานแตกกร่อน การต้านทานดูดซึมน้ำ และการรับแรงกด พบว่า เชื้อเพลิงอัดเม็ดและเชื้อเพลิงอัดก้อน มีคุณสมบัติความคงทนที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานเชื้อเพลิงที่กำหนดไว้ต้องมากกว่า 70 % โดยเชื้อเพลิงที่มีตัวประสาน 40 % มีความคงทนได้มากที่สุด เช่นเดียวกันกับการเพิ่มกำลังอัด เนื่องจากเชื้อเพลิงจะมีการจับตัวกันแน่นมากขึ้น โดยที่เชื้อเพลิงอัดเม็ด จะมีความคงทนได้มากกว่าเชื้อเพลิงอัดก้อน ยกเว้นการรับแรงกดที่เชื้อเพลิงอัดก้อนมีการรับแรงกดได้สูงกว่า

### 5.1.3 ประสิทธิภาพการเผาไหม้ของก้อนเชื้อเพลิงจากหญ้าหลายฤดู

การเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักเชื้อเพลิงชีวมวลทั้ง 3 ชนิด ได้แก่ PC (70:30)-P, PC (70:30)-B1 และ แกลบ:ไม้ (50:50) จะเห็นได้ว่าน้ำหนักที่หายไปและอัตราการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักที่อุณหภูมิต่าง ๆ แสดงให้เห็นการเปลี่ยนแปลงหลัก 2 ช่วง คือช่วงแรกอุณหภูมิไม่เกิน 200 องศาเซลเซียส เป็นการระเหยของความชื้น และในช่วงหลังประมาณ 200-550 องศาเซลเซียสเป็นการสลายตัวของสารประกอบต่างๆ ที่อยู่ในเชื้อเพลิง และเหลือเป็นเถ้าประมาณร้อยละ 1 ซึ่ง PC (70:30)-P มีความชื้น (ร้อยละ 7.8) และเถ้าที่ต่ำที่สุด (ร้อยละ 0.11) รองลงมาคือ PC (70:30)-B1 และ แกลบ:ไม้ (50:50) จะเห็นได้ว่าความชื้นของแกลบ:ไม้ (50:50) (ร้อยละ 10.4) สูงกว่า PC (70:30)-P (ร้อยละ 7.8) และ PC (70:30)-B1 (ร้อยละ 8.9) ทำให้การใช้ปริมาณเชื้อเพลิงในการเผาไหม้มากกว่าเชื้อเพลิงจากหญ้า

จากพฤติกรรมของการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงแข็ง พบว่า เชื้อเพลิงจากหญ้ามีอุณหภูมิติดไฟที่ 187 และ 190 °C ตามลำดับ มีค่าดัชนีการจุดติดไฟ 0.24 และ 0.21 ตามลำดับ และอัตราการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักต่ออุณหภูมิที่มากที่สุดเท่ากับ 10.90 และ 9.57 % min<sup>-1</sup>/K ตามลำดับ จะเห็นได้ว่ามีข้อได้เปรียบกว่าแกลบ:ไม้ (230 °C, 0.07 และ 3.92 % min<sup>-1</sup>/K ตามลำดับ) และเมื่อพิจารณาอัตราการเผาไหม้สูงสุด พบว่า เชื้อเพลิงจากหญ้ามีอัตราการเผาไหม้ (53.89-61.16 %/min)

ที่สูงกว่าแกลบ:ไม้ (23.47 %/min) ตลอดจนมีอุณหภูมิสิ้นสุดการเผาไหม้ที่ต่ำกว่า จะเห็นได้ว่า เชื้อเพลิงจากหญ้ามีข้อได้เปรียบในการเกิดการเผาไหม้ที่ดีกว่า

#### 5.1.4 ศักยภาพการผลิตพลังงานไฟฟ้าของเชื้อเพลิงอัดแข็งจากหญ้าหลายฤดู

สำหรับศักยภาพการผลิตพลังงานไฟฟ้าของเชื้อเพลิง จะเห็นได้ว่ารูปทรงและกำลังอัดส่งผลกระทบต่อพลังงานทำให้พลังงานไฟฟ้าแตกต่างกัน ซึ่งจากการศึกษาจะเห็นได้ว่า เชื้อเพลิง PC (70:30)-P เหมาะสำหรับนำไปผลิตเป็นพลังงานไฟฟ้าที่สุด โดยที่ไม่เพิ่มค่าใช้จ่ายและยังมีประสิทธิภาพเทียบเท่า และมีการใช้ตัวประสานน้อยที่สุด ที่สามารถให้พลังงานไฟฟ้าได้ถึง 15.3 MW และมีความคงทนมากกว่า 70 เปอร์เซ็นต์ เกินมาตรฐานเชื้อเพลิงที่กำหนดไว้ อีกทั้งยังได้พลังงานไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจากเดิมถึงร้อยละ 70 สามารถเพิ่มรายได้จากการขายพลังงานไฟฟ้าได้มากถึง 73,440 บาท/ชั่วโมง (ราคาขายไฟฟ้าให้กับรัฐ คือ 4.8 บาท/KWhr) รองลงมาคือ เชื้อเพลิง PC (70:30)-B1 สามารถให้พลังงานไฟฟ้าได้ถึง 9.8 MW และมีความคงทนมากกว่า 70 เปอร์เซ็นต์ เกินมาตรฐานเชื้อเพลิงที่กำหนดไว้ และสามารถเพิ่มรายได้จากการขายพลังงานไฟฟ้าได้มากถึง 47,040 บาท/ชั่วโมง (ราคาขายไฟฟ้าให้กับรัฐ คือ 4.8 บาท/KWhr) ซึ่งมากกว่าเชื้อเพลิงปัจจุบันที่ขายให้รัฐ 8 MW คิดเป็นเงิน 38,400 บาท/ชั่วโมง

### 5.2 ข้อเสนอแนะ

#### 5.2.1 ข้อเสนอแนะจากการวิจัย

1) จากการศึกษากระบวนการผลิตเชื้อเพลิงอัดแข็ง เพื่อให้ได้เชื้อเพลิงที่มีประสิทธิภาพทางพลังงานที่คงที่ ความคงทน คงรูป และเหมาะสมต่อการขนส่งเข้าสู่โรงงานไฟฟ้าชีวมวลควรมีการควบคุมการผลิตโดยการผสมอัตราส่วนให้เข้ากัน

2) สำหรับพฤติกรรมการเผาไหม้ของก้อนเชื้อเพลิง จะเห็นได้ว่าเชื้อเพลิงจากหญ้าหลายฤดูในรูปทรงอัดเม็ดและอัดก้อน มีอัตราการเผาไหม้ที่สูงกว่า แกลบและไม้มากกว่า 2 เท่า แสดงว่ามีการเผาไหม้เชื้อเพลิงได้อย่างรวดเร็ว ในกรณีที่น่าเชื้อเพลิงจากการศึกษามาเป็นเชื้อเพลิง จำเป็นต้องมีการบ่อนปริมาณเชื้อเพลิงจากเดิมเพิ่มขึ้น 2-3 เท่า แต่ได้พลังงานความร้อนที่เพิ่มสูงขึ้นด้วย

3) งานวิจัยนี้ได้เสนอกระบวนการอัดขึ้นรูปที่เชื้อเพลิงสามารถให้พลังงานเทียบเท่าและมีความคงทน คือ เชื้อเพลิง Pellet ที่มีตัวประสาน ร้อยละ 70 และ Briquettes ที่มีตัวประสาน ร้อยละ 70 กำลังอัด 1 MPa ซึ่งหากต้องการใช้เชื้อเพลิงที่อัตราส่วนอื่นๆ ผู้ใช้ก็ยังสามารถใช้ได้ แต่ต้องมีการคำนึงถึงปริมาณตัวประสาน ซึ่งการเพิ่มปริมาณตัวประสานจะทำให้ค่าพลังงานความร้อนลดลง ในการใช้ตัวประสานที่ต่ำลงจะทำให้เชื้อเพลิงมีความคงทนลดลงด้วยเช่นกัน ดังนั้นหากต้องการเพิ่มพลังงานเชื้อเพลิง ต้องใช้ตัวประสานให้น้อยลง แต่เพิ่มกำลังอัดให้มากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามการเพิ่มกำลังอัดจะทำ

ให้เสียค่าใช้จ่ายในการผลิตเพิ่มขึ้น ใช้พลังงานในการอัดเพิ่มขึ้น ดังนั้นในการขึ้นรูปต้องมีกระบวนการใช้ตัวประสานและกำลังอัดให้เหมาะสมกับพลังงานที่ผลิต

### 5.2.2 ข้อเสนอแนะในอนาคต

1) คุณสมบัติทางกายภาพ เคมี ชีวเคมี และพลังงานของหญ้า พบว่า หญ้าทั้ง 10 ชนิด มีคุณสมบัติดังกล่าวที่ดีและเหมาะสมสำหรับเป็นวัสดุเชื้อเพลิงได้ โดยเฉพาะ *Setaria sphacelata* cv. Splenda ที่มีคุณสมบัติที่ดีที่สุดจากหญ้าทั้งหมด 10 ชนิด จึงสามารถนำไปใช้เป็นวัสดุเสริมได้ ดังนั้นในการศึกษาครั้งต่อไปจึงควรใช้หญ้าเหล่านี้เป็นวัสดุเสริมในการใช้ผสมผสานกับหญ้าหลายฤดูที่เป็นวัสดุหลักทั้ง 3 ชนิดจากการศึกษาในครั้งนี้ ในปริมาณและอัตราส่วนที่เหมาะสม เพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพทางพลังงานของเชื้อเพลิงให้ดีขึ้นได้

2) เชื้อเพลิงที่ไม่มีตัวประสาน มีคุณสมบัติค่าความร้อนสูงกว่าเชื้อเพลิงที่มีตัวประสาน ดังนั้น ในการวิจัยครั้งต่อไปควรศึกษากระบวนการอัดขึ้นรูปเชื้อเพลิงที่เหมาะสม ศึกษาปัจจัยที่ส่งผลให้เชื้อเพลิงสามารถขึ้นรูปได้โดยไม่ใช้ตัวประสาน เช่น การเพิ่มความชื้นในวัสดุ หรือ กระบวนการอัดเชื้อเพลิงด้วยความร้อน ซึ่งวิธีการดังกล่าวจะช่วยให้อายุของเชื้อเพลิงเก็บตัวกันได้นานขึ้น โดยที่เชื้อเพลิงมีพลังงานเพิ่มสูง มีความคงทน คงรูป และเหมาะสมต่อการขนส่งเข้าสู่โรงงานไฟฟ้าได้

3) งานวิจัยนี้เป็นเพียงการปรับปรุงคุณภาพทางพลังงานของเชื้อเพลิงเท่านั้น ควรมีการศึกษาความเป็นไปได้ของการผลิตเชื้อเพลิงอัดแข็งจากหญ้าหลายฤดู ต้นทุนการผลิต ความคุ้มค่าและต้นทุนของการใช้เชื้อเพลิงจากหญ้าเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงปัจจุบันของโรงไฟฟ้าชีวมวล



บรรณานุกรม



## บรรณานุกรม

- กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. (2554). *คู่มือการพัฒนาและการลงทุนผลิตพลังงานทดแทน*. [http://webkc.dede.go.th/testmax/sites/default/files/พลังงาน\\_ชีวมวล.pdf](http://webkc.dede.go.th/testmax/sites/default/files/พลังงาน_ชีวมวล.pdf)
- กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. (2555). *โครงการศึกษากำหนดมาตรฐานของ Biomass Pellet เพื่อพัฒนาเป็นเชื้อเพลิงชีวมวลสำหรับอนาคต*. 22 หน้า
- กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. (2556). *ระบบฐานข้อมูลศักยภาพชีวมวลในประเทศไทย*. [http://biomass.dede.go.th/biomass\\_web/index.html](http://biomass.dede.go.th/biomass_web/index.html)
- กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. (2559). *คู่มือฝึกอบรมภาคปฏิบัติด้านพลังงานทดแทน “แก๊สซิฟิเคชันจากชีวมวล” (ส่วนทฤษฎี)*. 183 หน้า
- กระทรวงพลังงาน. (2559). *คู่มือพลังงานทดแทน แก๊สซิฟิเคชันจากชีวมวล, โครงการฝึกอบรมในหลักสูตรภาคปฏิบัติด้านพลังงานทดแทน แก๊สซิฟิเคชันจากชีวมวล*. <http://e-lib.dede.go.th/mmm-data/BibA11106คู่มือแก๊สซิฟิเคชัน59.pdf>
- กฤษกร รับสมบัติ. (2555). *การเพิ่มประสิทธิภาพการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสสำหรับเครื่องกำเนิดไอน้ำโดยการเพิ่มความหนาแน่นของเชื้อเพลิง*. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- เกียรติศักดิ์ กล้าเอม, กฤษณา ศรีสรรพกิจ, และ ประทวน แสนบุตร. (2540). *การทดสอบผลผลิตและส่วนประกอบเคมีของหญ้าสกุล Brachiaria spp. ในพื้นที่จังหวัดมุกดาหาร*. [http://nutrition.dld.go.th/ResearchReport5355/Research\\_Knowledge/RESEARCH/research\\_full/2540/R4007.pdf](http://nutrition.dld.go.th/ResearchReport5355/Research_Knowledge/RESEARCH/research_full/2540/R4007.pdf)
- ไกรลาศ เขียวทอง, วีรชัย อาจหาญ, อิทธิพล เผ่าไพศาล, เรืองเดช ปั่นด้วง, และ สรยุทธ วินิจฉัย. (2556). *คู่มือการปลูกหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1*. <http://webkc.dede.go.th/webmax/sites/default/files/คู่มือการปลูกหญ้าเนเปียร์.pdf>
- คีต สร้อยทอง, ฉัตรเฉลิม แก้วขมภู, รังสินันท์ ณ รังษี, และ จารุวัตร เจริญสุข. (2562). *ศึกษาพฤติกรรมการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงไม้ยางพาราและไม้ไผ่ทอรีไฟต์ด้วยเครื่องวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสาร. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 33*, 1–8.
- จริยา เกตมะ, และ กฤษณา ศรีสรรพกิจ. (2539). *แร่ธาตุในพืชอาหารสัตว์*. [http://nutrition.dld.go.th/Nutrition\\_Knowledge/article2539/a2539\\_16.pdf](http://nutrition.dld.go.th/Nutrition_Knowledge/article2539/a2539_16.pdf)

- จักรพงษ์ ชายคง, อาณัติ จันทรธีระติกุล, เกศวดี ศรีงาม, พัชรिता หิมล, สายฝน คำนิม, อภิญญา บุญทศ, และ มนัสศิญา อรุณโรจน์วานิช. (2561). ช่วงท่วงเวลาการตัดต่อลักษณะการเจริญเติบโต ผลผลิต และคุณค่าทางโภชนะของหญ้า *Pennisetum purpureum* cv. Mahasarakham ภายใต้ระบบชลประทานในช่วงฤดูหนาว. *KHON KAEN AGR. J.*, 46(1), 158–164.
- จันจิรา จับศิลป์. (2555). *การศึกษาลงพลศาสตร์การสลายตัวทางความร้อนของพอลิเบนซอกซาลิน-ไดแอนไฮโดรโคพอลิเมอร์*. มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ.
- จุฬามาศ ช่างประดิษฐ์, ทรงยศ โชติชุติมา, เอ็จ สโรบล, และ นพ ตันมขยกุล. (2561). อิทธิพลของอายุการตัดและรูปแบบปุ๋ยที่มีต่อผลผลิตชีวมวลและองค์ประกอบทางเคมีของหญ้าเนเปียร์ทิฟตันเพื่อใช้เป็นพลังงานทดแทน. *Thai Journal of Science and Technology*, 7(1), 70–80.
- จินยา โยโกยามะ. (2551). *คู่มือสารชีวมวลเอเชีย แนวทางสำหรับการผลิตและการใช้สารชีวมวล*. โครงการสนับสนุนการสร้างเอเชียพันธมิตร เพื่อการเกษตรใส่ใจสิ่งแวดล้อม. 285 หน้า
- ณัฐพงศ์ ไชยสิทธิ์. (2554). *Fuel Analysis and Heating Value*.  
<http://www.kakaengineering.com/boiler-combustion-part-ii.html>
- ดวงกมล ดังโพนทอง, วสันต์ ปินะเต, และ อติศักดิ์ ฤชา. (2559). การเปรียบเทียบค่าความร้อนและความหนาแน่นของถ่านไม้อัดแท่งจากมอเตอร์ไฟฟ้าและจักรยานขับเคลื่อน. *วารสารวิชาการคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี*, 9(1), 1–13.
- ดวงใจ จินนารักษ์. (2557). *การศึกษาความเป็นไปได้ในการลงทุนโรงไฟฟ้าชีวมวลจากหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 อำเภอมวกเหล็ก จังหวัดสระบุรี*. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ธนาพล ตันติสัตยกุล, สุริยา พงษ์เกษม, ปรีชญ์ปวีณ ภูหญ้า, และ ภาณุวัฒน์ ไถ่บ้านกวย. (2558). พลังงานทดแทนชุมชนจากเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งจากทางมะพร้าว. *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี*, 23(3), 418–431.
- นคร วรสุวรรณรักษ์. (2558). *การวิเคราะห์หาองค์ประกอบเชิงประมาณ (Proximate Analysis) ของชีวมวล โดยใช้เครื่อง TGA*.  
[http://www.jgsee.kmutt.ac.th/v2/uploads/images/files/BiomassWorkshop\\_Dr\\_Nakorn.pdf](http://www.jgsee.kmutt.ac.th/v2/uploads/images/files/BiomassWorkshop_Dr_Nakorn.pdf)
- บุญรอด สัจกุลนุกิจ, และ บุชบา พุกษาพันธุ์รัตน์. (2555). *เชื้อเพลิงชีวมวลแปรรูปในภาคอุตสาหกรรม. รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์ (ฉบับแก้ไข), โครงการ แนวทางการส่งเสริมมาตรฐานเชื้อเพลิงชีวมวลแปรรูปในภาคอุตสาหกรรม*. กรุงเทพมหานคร. 375 หน้า
- ปติพร มโนคุ่น. (2562). *การปรับสภาพหญ้าเนเปียร์โดยใช้คลื่นไมโครเวฟร่วมกับสารประกอบเกลือคลอไรด์*. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ, นนทบุรี.

ปิยวรา แดงนา. (2558). การอัดถ่านชีวภาพจากกะลาปาล์มเพื่อการประยุกต์ใช้เป็นเชื้อเพลิงแข็ง.

มหาวิทยาลัยมหาสารคาม.

พงษ์ศักดิ์ อยู่มั่น. (2559). การพัฒนาเครื่องอัดถ่านในรูปแบบเกลียวอัดเย็นสำหรับเชื้อเพลิงชีว

มวลจากเศษวัสดุเหลือใช้ในกระบวนการผลิตกาแฟชุมชนและการหาคุณสมบัติทางเชื้อเพลิงจาก  
ผลิตภัณฑ์ถ่านอัดแท่ง. *Industrial Technology Lampang Rajabhat University Journal*,  
9(1), 34-48.

มาลินี ศรีอรียนันท์. (2555). การศึกษาเปรียบเทียบกระบวนการปรับสภาพชีวมวลเพื่อการผลิตก๊าซ  
ชีวภาพจากผักตบชวา. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอม  
เกล้าพระนครเหนือ.

วรพจน์ งามชมพู. (2556). การศึกษาการผลิตก๊าซเชื้อเพลิงจากชีวมวลโดยใช้อากาศและไอน้ำ  
อุณหภูมิสูงในเตาผลิตก๊าซแบบไหลลง. มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

วิจิตรา สิงห์หิรัญนุสรณ์, ปิ่นมนัส วิโสรัมย์, และ เพชรรัตน์ บุญร่วม. (2560). การกระจายเชิงพื้นที่  
และศักยภาพของเชื้อเพลิงชีวภาพรุ่นที่สอง: กรณีศึกษาวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรในจังหวัด  
มหาสารคาม. *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยมหาสารคาม: ฉบับพิเศษ*, 13,  
249-261.

วีระพงศ์ สังวาล. (2559). การวิเคราะห์การสูญเสียน้ำหนักเชิงความร้อน (Thermogravimetric  
Analyser; TGA). [http://web2.mfu.ac.th/center/stic/thermal-analysis-instrument-  
menu/item/111-thermogravimetric-analysis-tga.html](http://web2.mfu.ac.th/center/stic/thermal-analysis-instrument-menu/item/111-thermogravimetric-analysis-tga.html)

ศศิธร ถิ่นนคร. (2531). การศึกษาผลผลิตและส่วนประกอบทางเคมีของหญ้าอาหารสัตว์ 8 ชนิดที่  
ศูนย์วิจัยอาหารสัตว์ปากช่อง. มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ. (2563). เครื่อง Mettler Toledo: TGA 2.

<https://www.mtec.or.th/technical-service-2/thermal-analysis>

สถานีพืชอาหารสัตว์ปากช่อง. (2511). เปรียบเทียบผลผลิตของหญ้าปศุสัตว์.

<https://www.lib.ku.ac.th/kuconf/KC3001063.pdf>

สถาบันนวัตกรรมการเรียนรู้ มหาวิทยาลัยมหิดล. (2555). เซลลูโลส.

[http://www.il.mahidol.ac.th/th/index.php/2012-09-11-07-32-25/2012-09-12-07-  
17-23/21-2012-09-17-07-14-47.html](http://www.il.mahidol.ac.th/th/index.php/2012-09-11-07-32-25/2012-09-12-07-17-23/21-2012-09-17-07-14-47.html)

สถาบันพลาสติก. (2558). เชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด.

[http://rubber.oie.go.th/box/ELib\\_Document/1092/.pdf](http://rubber.oie.go.th/box/ELib_Document/1092/.pdf)

สุริยะ สมศิริ, และ สุภาวัฒน์ วิวรรณภัทรกิจ. (2558). ศักยภาพการแปรรูปหญ้าเนเปียร์ไปเป็นพลังงาน.  
*วารสารวิจัยพลังงาน*, 12(2), 47-58.

เสาวนิตย์ แดงทองดี. (2554). *ศึกษาสภาวะการใช้พลังงานชีวมวลในตำบลน้ำก้อ*. รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์. มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์, เพชรบูรณ์. 15 หน้า.

ห้องปฏิบัติการทดสอบสมบัติเชิงฟิสิกส์. (2559). *ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ*.

<https://www.mtec.or.th/mcu/phml/index.php/th.htm>

Arce, V. L., Oliver-Villanueva, J. V., and Guillermo Segura Orenga. (2017). Influence of Raw Material Composition of Mediterranean Pinewood on Pellet Quality. *Biomass and Bioenergy*, 99, 90–96.

Artemio, C. P., Maginot, N. H., Serafin, C. U., Rahim, F. P., Guadalupe, R. Q. J., and Fermín, C. M. (2018). Physical, mechanical and energy characterization of wood pellets obtained from three common tropical species. *PeerJ*, 9, 1–16.

Balan, V. (2014). Current Challenges in Commercially Producing Biofuels from Lignocellulosic Biomass. *ISRN Biotechnology*, 2014(i), 1–31.

Basu, P. (2010). *Biomass Gasification and Pyrolysis: Practical Design and Theory*. Academic Press is an imprint of Elsevier.

Biomass Energy Resource Center. (2009). Grass Energy. In *Biomass* (pp. 1–4).

Biomasspelletthai. (2557). *กระบวนการผลิตเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด (Wood Pellet)*.

<http://biomasspelletthai.myreadyweb.com/article/topic-41000.html>

Encos. (2014). *เทคโนโลยีพลังงานชีวมวล*. <http://www.encos.co.th/articles/details/3>

Gaur, and Reed. (1998). *An Atlas of Thermal Data for Biomass and Other Fuels*. <https://www.nrel.gov/docs/legosti/old/7965.pdf>

Gendek, A., Aniszewska, M., Matalak, J., and Velebil, J. (2018). Evaluation of selected physical and mechanical properties of briquettes produced from cones of three coniferous tree species. *Biomass and Bioenergy*, 117, 173–179.

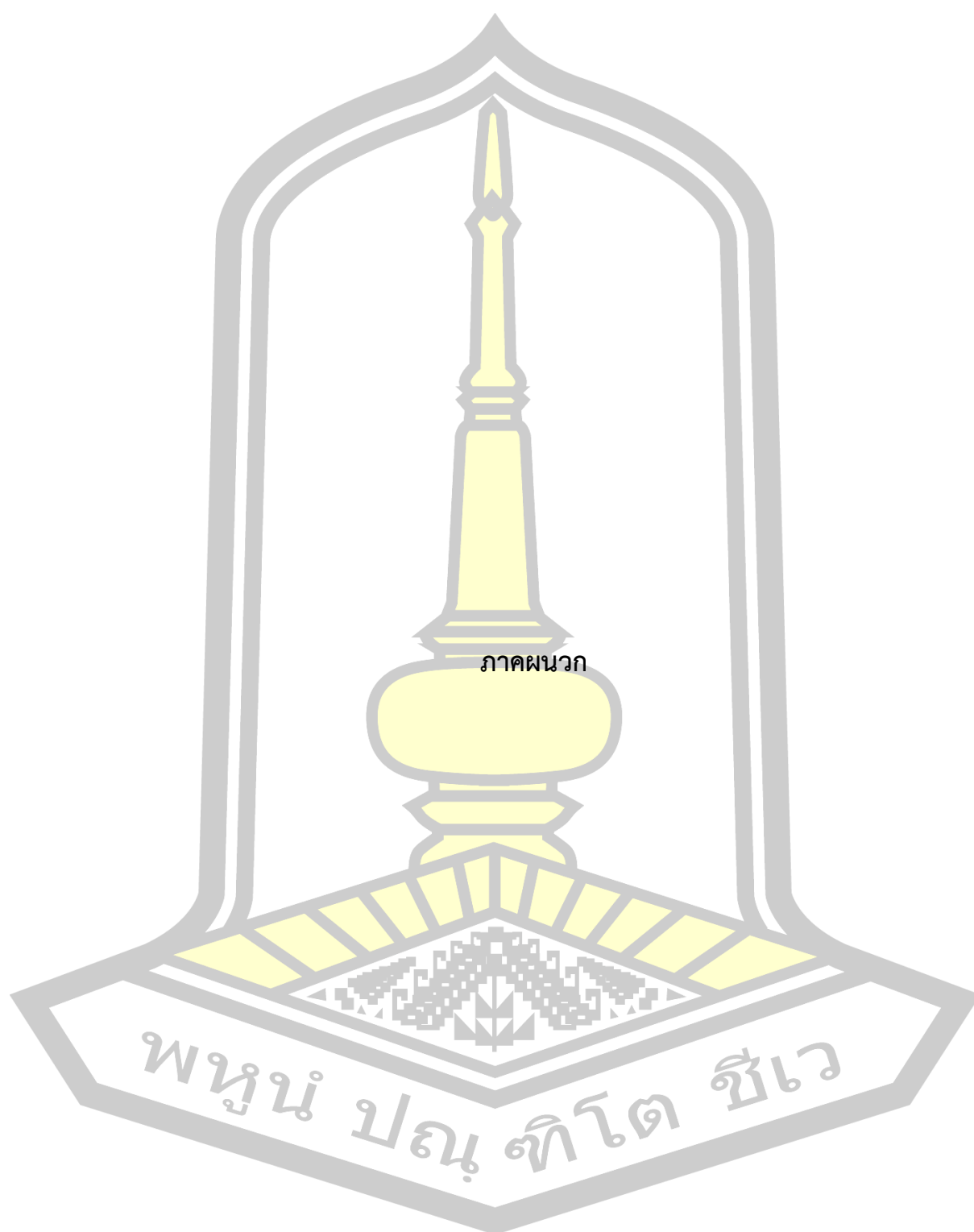
Gil, M. V., Oulego, P., Casal, M. D., Pevida, C., Pis, J. J., and F. Rubiera. (2010). Mechanical Durability and Combustion Characteristics of Pellets from Biomass Blends. *Bioresource Technology*, 101(88), 56–67.

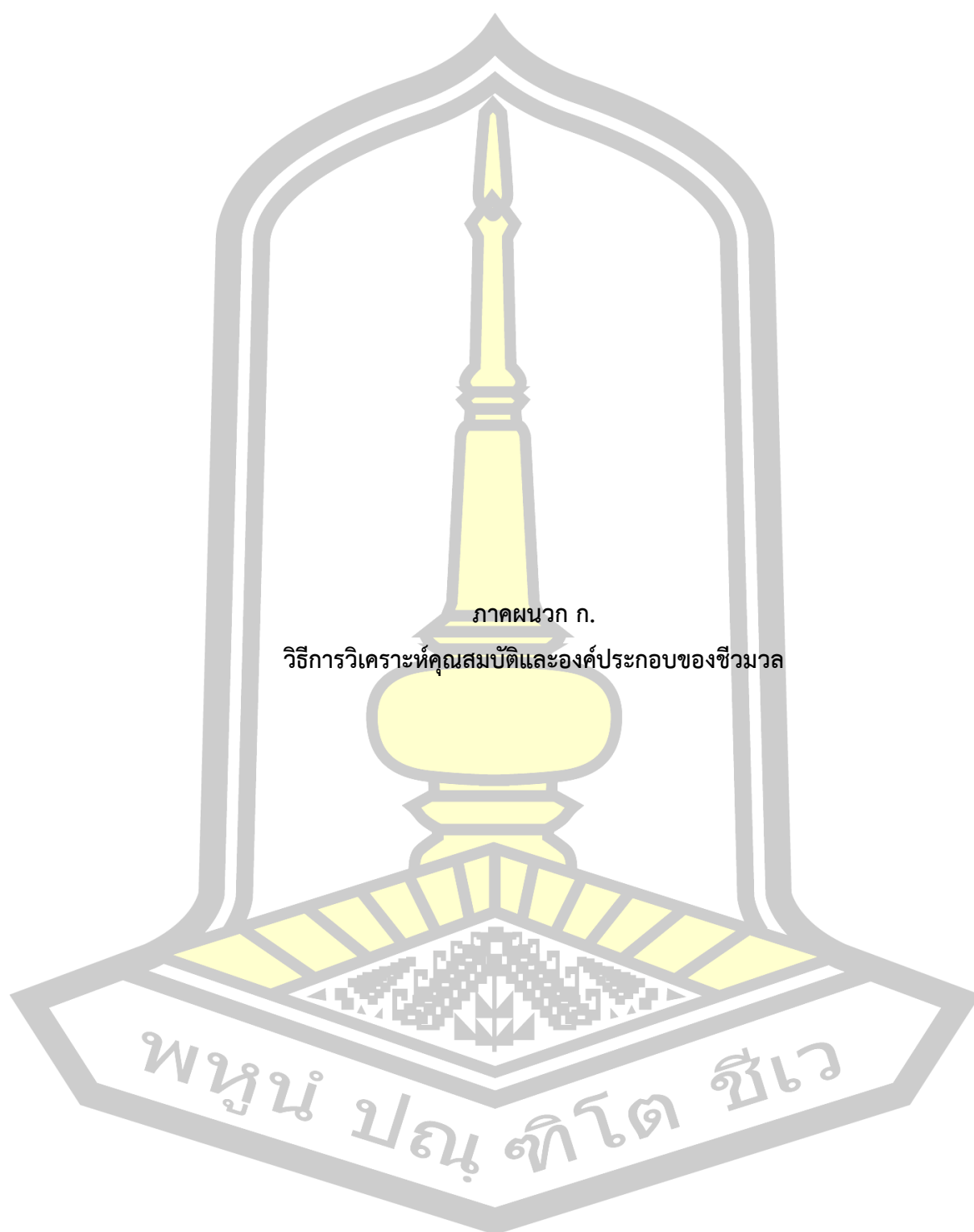
Haykiri-Açma, H. (2003). Combustion Characteristic of different biomass materials. *Energy Conversion Management*, 44, 155–162.

Kaliyan, N., and Morey, R. V. (2009). Factors Affecting Strength and Durability of Densified Biomass Products. *Biomass and Bioenergy*, 33(3), 37–59.

- Kambo, H. S., and Dutta, A. (2014). Strength, storage, and combustion characteristics of densified lignocellulosic biomass produced via torrefaction and hydrothermal carbonization. *Applied Energy*, 135, 182–191.
- Larsson, S. H., Thyrel, M., Geladi, P., and Lestander, T. A. (2008). High quality biofuel pellet production from pre-compacted low density raw materials. *Bioresource Technology*, 99(15), 7176–7182.
- Lehtikangas, P. (2001). Quality properties of pelletised sawdust, logging residues and bark. *Biomass and Bioenergy*, 20(5), 351–360.
- Mani, S., Tabil, L. G., and Sokhansanj, S. (2004). Grinding performance and physical properties of wheat and barley straws, corn stover and switchgrass. *Biomass and Bioenergy*, 27(4), 339–352.
- Mi, B., Liu, Z., Hu, W., Wei, P., Jiang, Z., and Fei, B. (2016). Investigating pyrolysis and combustion characteristics of torrefied bamboo torrefied wood and their blends. *Bioresoure Tecnology*, 209, 50–55.
- Miranda, T., Esteban, A., Rojas, S., Montero, I., and Ruiz, A. (2008). Combustion analysis of different olive residues. *International Journal of Molecular Sciences*, 9(4), 512–525.
- Mohammed, I. Y., Abakr, Y. A., Kazi, F. K., Yusup, S., Alshareef, I., and Chin, S. A. (2015). Comprehensive characterization of Napier grass as a feedstock for thermochemical conversion. *Energies*, 8(5), 3403–3417.
- Motghare, K. A., Rathod, A. P., Wasewar, K. L., and Nitin K. Labhsetwar. (2016). Comparative Study of Different Waste Biomass for Energy Application. *Waste Management*, 47, 40–45.
- Muthuraman, M., Namioka, T., and Yoshikawa, K. (2010). A comparative study on cocombustion performance of municipal solid waste and Indonesian coal with high ash coal with high ash Indian coal: A thermogravimetric analysis. *Fuel Prossing Technology*, 91, 550–558.
- Obernberger, I., and Thek, G. (2004). Physical characterisation and chemical composition of densified biomass fuels with regard to their combustion behaviour. *Biomass and Bioenergy*, 27(6), 653–669.

- Qian, K., Kumar, A., Patil, K., Bellmer, D., Wang, D., Yuan, W., and Raymond L. Huhnke. (2013). Effects of Biomass Feedstocks and Gasification Conditions on the Physiochemical Properties of Char. *Energies*, 6, 3972–3986.
- Rengsirikul, K., Ishii, Y., Kangvansaichol, K., Sripichitt, P., Punsuvon, V., Vaithanomsat, P., Nakamanee, G., and Tudsri, S. (2013). Biomass Yield, Chemical Composition and Potential Ethanol Yields of 8 Cultivars of Napiergrass (*Pennisetum purpureum* Schumach.) Harvested 3-Monthly in Central Thailand. *Journal of Sustainable Bioenergy Systems*, 03(02), 107–112.
- S.R.Teixeira, A.F.V.Pena, and A. G. Miguelb. (2010). Briquetting of Charcoal from Sugar-Cane Bagasse Fly Ash (Scbfa) as an Alternative Fuel. *Waste Management*, 30, 804–807.
- Shojaeiarani, J., Bajwa, D. S., and Bajwa, S. G. (2019). Properties of densified solid biofuels in relation to chemical composition, moisture content, and bulk density of the biomass. *BioResources*, 14(2), 4996–5015.
- Vamvuka, D., Chatib, N. El, and Sfakiotakis., S. (2011). Measurements of Ignition Point and Combustion Characteristics of Biomass Fuels and their Blends with Lignite. *Combustion Institute*.
- Wongwatanapaiboon, J., Kangvansaichol, K., Burapatana, V., Inochanon, R., Winayanuwattikun, P., Yongvanich, T., and Chulalaksananukul, W. (2012). The Potential of Cellulosic Ethanol Production from Grasses in Thailand. *Biomedicine and Biotechnology*, 303748, 1–10.
- Xiang-guo, L., Bao-guo, M., Li, X., Zhen-wu, H., and Wang Xin-gang. (2006). Thermogravimetric analysis of the co-combustion of the blend with high ash coal and waste tyres. *Thermochimica Acta*, 441, 79–83.





## ภาคผนวก ก-1. การวิเคราะห์โดยประมาณของชีวมวล (Proximate Analysis)

### 1. การหาปริมาณความชื้น (Moisture Content)

ทำการวิเคราะห์ตามวิธีมาตรฐาน ASTM D3173 โดยนำตัวอย่างมาวิเคราะห์โดยให้ความร้อนคงที่ในตู้อบ (Drying Oven) ที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เพื่อให้ไอน้ำระเหยออกจากตัวอย่าง ค่าความชื้นที่ได้สามารถคำนวณจากน้ำหนักของตัวอย่างที่ลดลง

#### เครื่องมือ

- 1.1 ตู้อบ (Drying oven)
- 1.2 เครื่องดูดความชื้น (Desiccators)
- 1.3 ถ้วยทนไฟ (Crucible)

#### วิธีการ

- 1.1 เตรียมตัวอย่างทดลอง วิเคราะห์ตามวิธีมาตรฐาน ASTM D3173
- 1.2 อบถ้วยทนไฟพร้อมฝา ที่อุณหภูมิ 104-110 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที นำออกจากตู้อบ แล้วทิ้งให้เย็นในตู้ดูดความชื้นแล้วนำออกมาชั่งน้ำหนัก
- 1.3 เตรียมตัวอย่างชีวมวลทดลอง โดยการบดให้มีขนาด 1 มิลลิเมตร
- 1.4 ชั่งน้ำหนักถ้วยทนไฟพร้อมฝา
- 1.5 ชั่งตัวอย่างชีวมวลหนัก 1 กรัม ใส่ถ้วยทนไฟ และนำไปชั่งน้ำหนักชีวมวลพร้อมถ้วย
- 1.6 อบตัวอย่างชีวมวล ที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส ทิ้งไว้เป็นเวลา 6 - 12 ชั่วโมง
- 1.7 นำถ้วยทนไฟออกจากตู้อบ และนำไปดูดความชื้นที่ถอดความชื้นจนเย็น
- 1.8 ชั่งน้ำหนักชีวมวลหลังการอบ ด้วยเครื่องชั่งดิจิตอล

#### สูตรที่ใช้ในการคำนวณ

$$\text{ปริมาณความชื้น (\%)} = [(A - B) / A \times 100] \quad (29)$$

เมื่อ A = น้ำหนักตัวอย่างทดลองก่อนอบ (กรัม)

B = น้ำหนักตัวอย่างทดลองหลังอบ (กรัม)

### 2. การหาปริมาณสารระเหยง่าย (Volatile Matter)

ทำการวิเคราะห์ตามมาตรฐาน ASTM D3175 โดยนำตัวอย่างมาเผาให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 นาที แล้วนำมาคำนวณหาปริมาณสารระเหยจากการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่าง

### เครื่องมือ

- 2.1 ถ้วยทนไฟ (Crucible)
- 2.2 เตาเผาแบบอุณหภูมิสูง (Electric muffle furnace)
- 2.3 โถดูดความชื้น (Desiccator)
- 2.4 เครื่องชั่งดิจิตอล

### วิธีการ

- 2.1 ชั่งตัวอย่างชีวมวลทดลองประมาณ 1 กรัม ลงในถ้วยทนไฟที่ทราบน้ำหนัก
- 2.2 นำถ้วยทนไฟพร้อมตัวอย่างเข้าเตาเผา โดยเผาที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส นาน 7 นาที แล้วจึงนำออกมาจากเตาเผา ทิ้งไว้ให้เย็นในโถดูดความชื้น
- 2.3 ชั่งน้ำหนักของถ้วยทนไฟและตัวอย่างที่เหลืออยู่ ด้วยเครื่องชั่งดิจิตอล

### สูตรที่ใช้ในการคำนวณ

- คำนวณน้ำหนักที่หายไป

$$\text{น้ำหนักที่หายไป (\%)} = [ (A - B) / A \times 100 ] \quad (30)$$

- เมื่อ
- A = น้ำหนักตัวอย่างทดลอง (กรัม)
  - B = น้ำหนักตัวอย่างทดลองหลังเผา (กรัม)

- คำนวณหาปริมาณสารระเหย

$$\text{ปริมาณสารระเหย} = C - D \quad (31)$$

- เมื่อ
- C = น้ำหนักที่หายไป (%)
  - D = ความชื้น (%)

### 3. การหาปริมาณเถ้า (Ash Content)

ทำการวิเคราะห์ตามวิธีมาตรฐาน ASTM D3174 โดยนำตัวอย่างไปเผาให้ความร้อนในเตาเผา ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส แล้วค่อยๆ เพิ่มความร้อนเป็น 700-750 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จนกระทั่งได้น้ำหนักที่คงที่ของถ้วยทนไฟรวมกับน้ำหนักของเถ้าที่เหลือ จึงนำมาชั่งน้ำหนักเผาถ้วยทนไฟ

### เครื่องมือ

- 3.1 ถ้วยทนไฟ (Crucible)
- 3.1 เตาเผาแบบอุณหภูมิสูง (Electric muffle furnace)

3.3 โถดูดความชื้น (Desiccator)

3.4 เครื่องชั่งดิจิตอล

### วิธีการ

3.1 เผ่าถ้วยทนไฟที่อุณหภูมิสูง 700-750 องศาเซลเซียส เป็นเวลาประมาณ 2 ชั่วโมง ในเตาเผาแล้วนำออกมาทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้น แล้วชั่งน้ำหนักถ้วยทนไฟ

3.2 ชั่งตัวอย่างทดลองประมาณ 1 กรัม ใส่ลงในถ้วยทนไฟที่ทราบน้ำหนัก

3.3 นำเข้าเตาเผา เผ่าที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส แล้วค่อยๆเพิ่มอุณหภูมิเป็น 700-750 องศาเซลเซียส นานประมาณ 2 ชั่วโมง นำถ้วยทนไฟออกมาจากเตาเผาทิ้งไว้ให้เย็นในโถดูดความชื้น จึงชั่งน้ำหนัก

### สูตรที่ใช้ในการคำนวณ

$$\text{ปริมาณซีเถ้า (\%)} = \left[ \left( A / B \right) \times 100 \right] \quad (31)$$

เมื่อ  $A =$  น้ำหนักสุดท้ายของตัวอย่างหลังเผา (กรัม)

$B =$  น้ำหนักตัวอย่างเริ่มต้น (กรัม)

## 4. การหาปริมาณคาร์บอนคงตัว (Fixed Carbon)

ในการหาปริมาณคาร์บอนคงตัวตามมาตรฐาน ASTM D3172 สามารถหาได้จากการ  
ดังนี้

$$\text{ปริมาณคาร์บอนคงตัว (\%)} = 100 - (\% \text{Ash} + \% \text{MC} + \% \text{VM}) \quad (32)$$

เมื่อ  $\text{Ash} =$  ปริมาณเถ้า ในหน่วยร้อยละ

$\text{MC} =$  ปริมาณความชื้น ในหน่วยร้อยละ

$\text{VM} =$  ปริมาณสารระเหยง่าย ในหน่วยร้อยละ

## ภาคผนวก ก-2 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี (Ultimate Analysis)

### 1. การวิเคราะห์ธาตุคาร์บอน (C) ไฮโดรเจน (H) ไนโตรเจน (N) และซัลเฟอร์ (S)

การวิเคราะห์หาธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจนและซัลเฟอร์ สามารถทำได้โดยใช้เครื่อง Organic Element Analysis โดยทำการนำตัวอย่างมาบดให้ละเอียด ชั่งน้ำหนักให้มีปริมาณที่แน่นอน 1 – 2 มิลลิกรัม ใส่ในภาชนะนำไปเผาที่อุณหภูมิประมาณ 925°C ภายใต้ออกซิเจนบริสุทธิ์ผ่านเข้าไปใน Region  $\text{CO}_2$   $\text{H}_2\text{O}$   $\text{N}_2$  ควบคุมความดัน อุณหภูมิ และปริมาตรให้คงที่

## 2. การวิเคราะห์ธาตุออกซิเจน

ปริมาณธาตุออกซิเจนหาได้จากสมการดังนี้

$$\text{ออกซิเจน (\%)} = 100 - (\%C + \%H + \%N + \%S) \quad (33)$$

เมื่อ C = ปริมาณธาตุคาร์บอน ในหน่วยร้อยละ  
 H = ปริมาณธาตุไฮโดรเจน ในหน่วยร้อยละ  
 N = ปริมาณธาตุไนโตรเจน ในหน่วยร้อยละ  
 S = ปริมาณธาตุซัลเฟอร์ ในหน่วยร้อยละ

## ภาคผนวก ก-3 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางชีวเคมี (Biochemical Component Analysis)

### 1. วิเคราะห์หา Neutral Detergent Fiber (NDF)

การวิเคราะห์ Cell Wall Constituents (CWC) หรือ Neutral Detergent Fiber (NDF) ทำได้โดยนำตัวอย่างพืชไปต้มกับสารละลาย Neutral Detergent ส่วนที่เหลือซึ่งไม่ละลายในสารละลายที่เป็นกลางคือส่วนของ CWC ซึ่งเป็นสารต่างๆ ที่เป็นส่วนของผนังเซลล์พืชได้แก่ เซลลูโลส (Cellulose) เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) ลิกนิน (Lignin) รวมทั้ง Cutin, Silica และ Tannin

#### เครื่องมือวิเคราะห์

- 1.1 ตู้อบแห้ง (Hot air oven)
- 1.2 โถดูดความชื้น (Desiccator)
- 1.3 เครื่องชั่งชนิดทศนิยม 4 ตำแหน่ง
- 1.4 เครื่องดูดสุญญากาศ
- 1.5 เตาให้ความร้อน (Hot plat)

#### สารเคมี

- 1.1 Sodium lauryl sulphate
- 1.2 Disodium ethylenediaminetetraacetate (EDTA)
- 1.3 Sodium borate decahydrate ( $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ )
- 1.4 Disodium hydrogen phosphate anhydrous ( $\text{Na}_2\text{HPO}_4$ )
- 1.5 Triethylene glycol
- 1.6 Acetone ชนิดที่ปราศจากสี และสามารถระเหยได้หมด ไม่มีสิ่งตกค้างเหลืออยู่
- 1.7  $\alpha$  - Amylase

### วิธีการวิเคราะห์

1.1 นำ Crucible ขนาด 50 ml. ไปอบในตู้อบ ที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส นาน 2 ชั่วโมง เอาออกใส่ในโถดูดความชื้น (Desiccator) ทิ้งให้เย็น แล้วชั่งน้ำหนักบันทึกไว้

1.2 ชั่งตัวอย่างที่แห้งและบดละเอียด ขนาด 1 มิลลิเมตร 0.5 - 1.0 กรัม ใส่ใน Beaker ขนาด 600 มิลลิลิตร (ใส่  $\text{Na}_2\text{SO}_3$  0.5 กรัม ในตัวอย่างที่มี cutin) สูง ลงไปใน Beaker ที่มีตัวอย่าง

1.3 นำสารละลาย Neutral Detergent Fiber ไปต้มให้ร้อน ประมาณ 5 นาที แล้วตวงใส่ลงใน beaker ที่มีตัวอย่างอยู่ 50 มิลลิลิตร นำไปการย่อย 5 นาที เขย่า Beaker แล้วยกลง ทำการเติมสารละลายมาตรฐาน  $\alpha$ -amylase 0.1 มิลลิลิตร เขย่าให้สารละลายผสมกัน แล้วทำการ Reflux ต่อ 60 นาที

1.4 ทำการกรอง โดยเทสารละลายใน Beaker ลงใน Crucible ที่ชั่งน้ำหนักแล้วที่ต่อติดกับเครื่องดูดสุญญากาศ ล้างตัวอย่างที่อยู่ใน Beaker ด้วยน้ำร้อนจนหมด

1.5 ล้างตัวอย่างใน Crucible ด้วยน้ำร้อนอีกจนหมดฟอง แล้วใช้ขวดฉีดน้ำร้อนล้างตัวอย่างที่ติดอยู่ข้าง Crucible ลงให้หมด แล้วดูดน้ำใน Crucible ออก

1.6 จากนั้นล้างตัวอย่างด้วย Acetone 3 - 5 ครั้ง หรือจนกระทั่งสารละลายล้างออกจาก Crucible ไม่มีสี

1.7 นำ Crucible ที่มีตัวอย่าง ไปอบในตู้อบแห้ง (Hot air oven) ที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส นาน 8 ชั่วโมง หรือตลอดคืน

1.8 นำ Crucible ที่มีตัวอย่างออกจากตู้อบแห้ง (Hot air oven) เอาใส่ในโถดูดความชื้น (Desiccator) ปลอ่ยให้เย็น แล้วชั่งน้ำหนัก เพื่อกำหนดค่า NDF

1.9 นำcrucible เผา (Ignite) ในเตาเผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส นาน 2 ชั่วโมงเอาออกใส่ในโถดูดความชื้น ปลอ่ยให้เย็น

### วิธีการคำนวณ

$$\% \text{NDF} = \frac{[(W1 - W2) \times 100] - \% \text{Neutral insoluble ash}}{W3} \quad (34)$$

เมื่อ W1 = น้ำหนัก Crucible + น้ำหนักตัวอย่าง

W2 = น้ำหนัก Crucible

W3 = น้ำหนักตัวอย่าง

%Neutral insoluble ash คือ %เถ้าที่ได้จากขั้นตอนการเผา

## 2. วิธีวิเคราะห์หา Acid Detergent Fiber (ADF)

การวิเคราะห์หา Acid Detergent Fiber (ADF) ในพืช ทำโดยนำเอาตัวอย่างอาหารไปต้มในสารละลาย Acid detergent ส่วนที่เหลือที่ไม่ละลายคือส่วนของ ADF ซึ่งประกอบด้วย Cellulose และ Lignin ประมาณ 90 เปอร์เซ็นต์ ส่วนที่เหลือ 10 เปอร์เซ็นต์ จะเป็นพวก Cutin และ แก้วที่ไม่ละลายในกรด ดังนั้น ส่วนที่หายไป คือ Hemicellulose ซึ่งละลายในสารละลายที่เป็นกรดได้ ในที่นี่จะใช้ Sulfuric acid ที่มีความเข้มข้น 1 นอร์มอล (N) และมี Detergent คือ Cetyl trimethyl ammonium bromide จะช่วยย่อยพวกโปรตีนออกไป

### เครื่องมือ

- 2.1 ตู้อบแห้ง (Hot air oven)
- 2.2 โถดูดความชื้น (Desiccator)
- 2.3 เครื่องชั่งชนิดทศนิยม 4 ตำแหน่ง
- 2.4 เครื่องดูดสุญญากาศ
- 2.5 เตาให้ความร้อน (Hot plat)

### สารเคมี

- 2.1 Sulfuric acid ( $\text{H}_2\text{SO}_4$  conc.)
- 2.2 Cetyl triethyl ammonium bromide (CTAB)
- 2.3 Acetone

### วิธีการวิเคราะห์

- 2.1 นำ Crucible ขนาด 50 มิลลิลิตร ไปอบในตู้อบ ที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส นาน 2 ชั่วโมง เอาออกใส่ในโถดูดความชื้น (Desiccator) ทิ้งให้เย็น แล้วชั่งน้ำหนักและบันทึกไว้
- 2.2 ชั่งตัวอย่างที่แห้งและบดละเอียด ขนาด 1 มิลลิเมตร 1 กรัม ใส่ใน Beaker ขนาด 600 มิลลิลิตร
- 2.3 นำสารละลาย Acid Detergent ไปต้มให้ร้อน ตวงใส่ลงใน Beaker ที่มีตัวอย่าง อยู่ 100 มิลลิลิตร นำไปทำการย่อย หรือ reflux นาน 1 ชั่วโมง
- 2.4 ทำการกรอง โดยเทสารละลายใน Beaker ลง Crucible ที่ชั่งน้ำหนักแล้วที่ต่อติดกับเครื่องกรองดูดสุญญากาศ ล้างตัวอย่างที่อยู่ใน Beaker ด้วยน้ำร้อน จนกระทั่งตัวอย่างส่วนที่เหลือทั้งหมดลงใน Crucible จนหมดหรือจนหมดฟอง
- 2.5 จากนั้นล้างตัวอย่างด้วย Acetone 3 ครั้ง หรือจนกระทั่งสารละลายที่ไหลออกจาก Crucible ไม่มีสี

2.6 นำ Crucible ที่มีตัวอย่างไปอบในตู้อบ ที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส นาน 8 ชั่วโมง หรือตลอดคืน

2.7 นำ Crucible ที่มีตัวอย่างออกจากตู้อบ เอาไว้ในโถดูดความชื้น (Dessicator) ปล่อยให้เย็น แล้วชั่งน้ำหนัก เพื่อคำนวณหาค่า ADF

2.8 นำcrucible เเผา (Ignite) ในเตาเผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส นาน 2 ชั่วโมง

2.9 เอาออกไว้ในโถดูดความชื้น ปล่อยให้เย็น ชั่งน้ำหนักหา Ash

### วิธีการคำนวณ

- ในกรณีที่ตัวอย่างวิเคราะห์เฉพาะค่า ADF

$$\%ADF = \frac{[(W1 - W2) \times 100]}{W3} - \%Acid\ Insoluble\ Ash \quad (35)$$

เมื่อ  $W1 =$  น้ำหนัก Crucible + น้ำหนักตัวอย่าง  
 $W2 =$  น้ำหนัก Crucible  
 $W3 =$  น้ำหนักตัวอย่าง  
 $\%Acid\ insoluble\ ash$  คือ  $\% ash$  ที่ได้จากขั้นตอนการเผา

- การคำนวณหาปริมาณเยื่อใย Hemicellulose

$$\% Hemicellulose = \%NDF - \%ADF \quad (36)$$

### 3. วิธีวิเคราะห์หา Acid Detergent Lignin (ADL)

การวิเคราะห์การปริมาณ Cellulose โดยวิธี Detergent analysis โดยวิธีการวิเคราะห์หา Lignin แบบ Acid Detergent Lignin (ADL) ผลต่างระหว่าง ADF และ ADL (ADF – ADL) คือ Cellulose ที่มีส่วนของ AIA รวมกันอยู่

#### เครื่องมือ

- 3.1 ตู้อบแห้ง (Hot air oven)
- 3.2 โถดูดความชื้น (Desiccator)
- 3.3 เครื่องชั่งชนิดทศนิยม 4 ตำแหน่ง
- 3.4 เครื่องดูดสุญญากาศ

### 3.5 เตาให้ความร้อน (Hot plat)

#### สารเคมี

#### 3.1 Sulfuric acid ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ conc.)

#### วิธีการวิเคราะห์

3.1 นำ crucible ที่มีตัวอย่างซึ่งวิเคราะห์หา ADF แล้วมาเติมสารละลาย 72%  $\text{H}_2\text{SO}_4$  ที่เย็น (20 องศาเซลเซียส) ลงไปประมาณครึ่ง Crucible จากนั้นนำไปวางลงในภาตสแตนเลส ใช้แท่งแก้วคนให้ทั่วเพื่อให้ตัวอย่างแยกจากกันไม่จับกันเป็นก้อน โดยมีน้ำกลั่นที่อยู่ในภาตสแตนเลสระดับที่ต่ำกว่าระดับของแผ่น Fritted glass รักษาอุณหภูมิของ Crucible ในภาตสแตนเลสที่ 20 - 23 องศาเซลเซียส

3.2 คอยเติมสารละลาย  $\text{H}_2\text{SO}_4$  72% เมื่อสารละลายใน Crucible แห้ง คนเป็นระยะๆ ใช้เวลาย่อยนาน 3 ชั่วโมง

3.3 จากนั้นนำไป Suction เพื่อล้างสารละลายกรดออก แล้วล้างด้วยน้ำร้อน โดยใช้ น้ำร้อนปริมาณ 1,400 มิลลิลิตร หรือจนหมดกรด

3.4 นำ Crucible พร้อมตัวอย่างที่ย่อยแล้ว ไปอบในตู้อบแห้ง (hot air oven) ที่ อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส นาน 8 ชั่วโมง จากนั้นนำออกใส่โถดูดความชื้น (desiccator) ปล่อยให้ เย็น แล้วชั่งน้ำหนัก

#### วิธีการคำนวณ

$$\% \text{ Cellulose} = \frac{[(W1 - W4) \times 100]}{W3} \quad (37)$$

เมื่อ  $W1 =$  น้ำหนัก crucible + น้ำหนัก ADF  
 $W4 =$  น้ำหนัก crucible + น้ำหนักเยื่อใยหลังการอบ  
 $W3 =$  น้ำหนักตัวอย่าง

### 4. วิธีวิเคราะห์หาลิกนิน (Lignin)

การวิเคราะห์ Lignin ทำได้โดยใช้ตัวอย่างที่ได้จากการหา ADF มาทำการวิเคราะห์หา Lignin โดยใช้ Sulfuric acid 72 % ซึ่ง Lignin ที่หาได้โดยวิธีนี้เรียกว่า Acid detergent lignin ลิกนินไม่จัดเป็นสารพหุคาร์โบไฮเดรตแม้จะมีคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน แต่ก็จัดเป็นส่วนประกอบที่สำคัญของผนังเซลล์พืชทำให้เซลล์พืชมีความแข็งแรง

### เครื่องมือวิเคราะห์

4.1 เตาเผา (Muffle furnace)

4.2 โถดูดความชื้น (Balance) ชนิดทศนิยม 4 ตำแหน่ง

### วิธีการวิเคราะห์

4.1 นำ Crucible ที่มีตัวอย่างซึ่งวิเคราะห์หา Cellulose แล้วนำไปเผา (ignite) ในเตาเผา ที่ 500 องศาเซลเซียส นาน 2 ชั่วโมง

4.2 เอาออกใส่ในโถดูดความชื้น ปล่อยให้เย็น ชั่งน้ำหนักหา Lignin

### วิธีการคำนวณ

$$\% \text{ Lignin} = \frac{W4 - W5 \times 100}{W3} \quad (38)$$

เมื่อ  $W4 =$  น้ำหนัก Crucible + น้ำหนักเยื่อใยหลังการอบ

$W5 =$  น้ำหนัก Crucible + น้ำหนักเยื่อใยหลังการเผา

$W3 =$  น้ำหนักตัวอย่าง

$$\% \text{ เก้าที่ไม่ละลายในกรด} = \frac{W5 - W2 \times 100}{W3} \quad (39)$$

เมื่อ  $W5 =$  น้ำหนัก Crucible + น้ำหนักเยื่อใยหลังการเผา

$W2 =$  น้ำหนัก Crucible เปลา ก่อนนำมาใช้วิเคราะห์หา ADF

$W3 =$  น้ำหนักตัวอย่าง (Sample)

### ภาคผนวก ก-4 การวิเคราะห์หาค่าความร้อนของชีวมวล (Heating Value)

#### 1. ค่าความร้อนสูงของชีวมวล (Heating Value)

ทำการวิเคราะห์ตามวิธีมาตรฐาน ASTM D3286 โดยนำตัวอย่างของสาร มาทำการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ในเครื่อง Bomb ที่มีออกซิเจนอยู่ปริมาณมากเกินพอ ความร้อนของการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นเป็นผลให้อุณหภูมิของ Jacket สูงขึ้น และสามารถคำนวณค่าความร้อนที่เกิดขึ้นได้และทำการหาค่าที่ได้ โดยมีเครื่องพิมพ์ผลออกมาให้เห็นหน้ากระดาษ และสามารถนำค่าที่เหลือจากการหาค่าความร้อนไปหาค่าปริมาณก็ได้

### เครื่องมือ

1.1 Isothermal Jacket Bomb Calorimeter

1.2 ลูกบอมบ์

1.3 ถังออกซิเจน

1.4 เครื่องอัดเม็ดและถั่ว

1.5 ลวด

1.6 เชือกนำความร้อน

### วิธีการ

1.1 บดตัวอย่างชีวมวลจนละเอียด และต้องไม่มีความชื้น นำไปชั่งดิจิตอลประมาณ 0.5 กรัม โดยใช้กระดาษชั่งสารรองตัวอย่าง

1.2 นำตัวอย่างมาอัดเป็นเม็ดด้วยเครื่องอัดเม็ด (Pellet press)

1.3 นำแท่นสำหรับผูกเชือกนำความร้อน มาผูกกับลวด โดยให้ตัวอย่างที่อยู่ในถั่วสัมผัสกับเชือกนำความร้อน เพื่อจะเป็นตัวนำความร้อนในการเผาไหม้ได้

1.4 อัดออกซิเจนใน Bomb ให้มีความดันประมาณ 28-30 บรรยากาศ

1.5 ใส่น้ำลงใน Jacket ในปริมาตร 2,000 มิลลิเมตร

1.6 นำ Bomb ใส่ลงใน Jacket ปิดฝาเครื่องแล้วเปิดเครื่องกวน

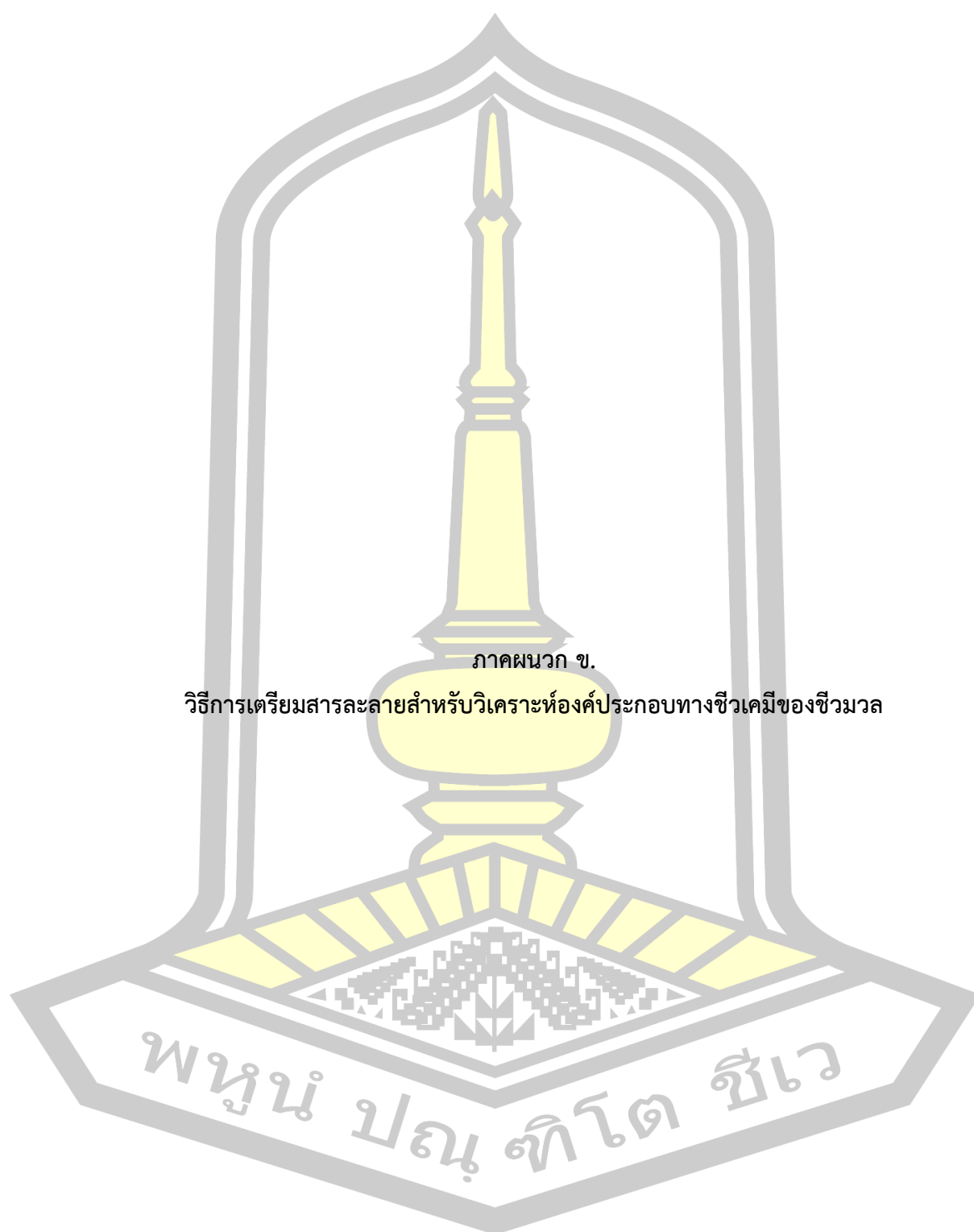
1.7 กรอกข้อมูลน้ำหนักของชีวมวลอัดเม็ด แล้วกดปุ่ม Enter เพื่อเริ่มทำงาน รอจนการเผาไหม้สมบูรณ์ จะขึ้นข้อมูลค่าความร้อน

1.8 กดปุ่ม Ignite จับเวลาและบันทึกอุณหภูมิ

1.9 นำลูก Oxygen Bomb เข้าเครื่องทำความเย็น

1.10 แล้วนำลูก Oxygen Bomb มาปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ออกให้หมด แล้วนำ Oxygen Bomb ไปล้างเพื่อทำการทดสอบตัวอย่างต่อไป





## ภาคผนวก ข. วิธีการเตรียมสารเคมีวิเคราะห์เยื่อใยในพืช ( Detergent analysis )

### 1. วิธีการเตรียมสารเคมีวิเคราะห์หา Neutral Detergent Fiber (NDF)

#### 1.1 หลักการ

การวิเคราะห์ Cell Wall Constituents (CWC) หรือ Neutral Detergent Fiber (NDF) ทำได้โดยนำตัวอย่างพืชไปต้มกับสารละลาย Neutral Detergent ส่วนที่เหลือซึ่งไม่ละลายในสารละลายที่เป็นกลางคือส่วนของ CWC ซึ่งเป็นสารต่างๆ ที่เป็นส่วนของผนังเซลล์พืชได้แก่ เซลลูโลส (Cellulose) เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) ลิกนิน (Lignin) รวมทั้ง Cutin, Silica และ Tannin

#### 1.2 สารเคมี

- 1.2.1 Sodium lauryl sulphate
- 1.2.2 Disodium ethylenediaminetetraacetate (EDTA)
- 1.2.3 Sodium borate decahydrate ( $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ )
- 1.2.4 Disodium hydrogen phosphate anhydrous ( $\text{Na}_2\text{HPO}_4$ )
- 1.2.5 Triethylene glycol
- 1.2.6 Acetone
- 1.2.7  $\alpha$  - Amylase

#### 1.3 วิธีการเตรียมสาร

การเตรียมสารละลาย Neutral Detergent Fiber 2 ลิตร

1.3.1 ชั่ง Sodium lauryl sulphate 60 กรัม ใส่ใน Beaker ขนาด 400 มิลลิลิตร แล้วนำมาใส่ใน Volumetric flask ขนาด 2 ลิตร

1.3.2 เติม Triethylene glycol 20 มิลลิลิตร ใส่ลงใน Volumetric flask ในข้อ (1.3.1) เขย่าให้เข้ากัน

1.3.3 ละลาย Disodium hydrogen phosphate anhydrous ( $\text{Na}_2\text{HPO}_4$ ) 9.12 กรัม, Sodium borate decahydrate ( $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ) 13.62 กรัม และ Disodium Ethylenediaminetetraacetate (EDTA) 37.22 กรัม ด้วยน้ำกลั่นที่ร้อนแล้วนำมาผสมกับสารละลายในข้อ (1.3.2) เทใส่ Volumetric flask เขย่าให้เข้ากัน แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นที่อุณหภูมิห้อง และปรับ pH ให้ได้ 6.9 – 7.1

#### คำเตือนในความปลอดภัย

1) Acetone เป็นสารระเหยและติดไฟง่าย ไม่ให้ระเหยสะสมอยู่ในพื้นที่ทำงาน ใช้อุปกรณ์กำจัดกลิ่นไอและหลีกเลี่ยงการสูดดมหรือสัมผัสกับผิว ทำการระเหย Acetone

2) Sodium lauryl sulphate เป็นสารระคายเคืองที่เยื่อผิวหนัง ควรสวมหน้ากากกันฝุ่น และสวมถุงมือในขณะปฏิบัติการเตรียมสารละลาย

## 2. วิธีการเตรียมสารเคมีวิเคราะห์หา Acid Detergent Fiber (ADF)

### 2.1 หลักการ

การวิเคราะห์หา Acid Detergent Fiber (ADF) ในพืช ทำโดยนำเอาตัวอย่างอาหาร ไปต้มในสารละลาย Acid detergent ส่วนที่เหลือที่ไม่ละลายคือส่วนของ ADF ซึ่งประกอบด้วย Cellulose และ Lignin ประมาณ 90 เปอร์เซ็นต์ ส่วนที่เหลือ 10 เปอร์เซ็นต์ จะเป็นพวก Cutin และ แก้วที่ไม่ละลายในกรด ดังนั้น ส่วนที่หายไป คือ Hemicellulose ซึ่งละลายในสารละลายที่เป็นกรดได้ ในที่นี้จะใช้ Sulfuric acid ที่มีความเข้มข้น 1 นอร์มอล (N) และมี Detergent คือ Cetyl trimethyl ammonium bromide จะช่วยย่อยพวกโปรตีนออกไป

### 2.2 สารเคมี

2.2.1 Sulfuric acid ( $\text{H}_2\text{SO}_4$  conc.)

2.2.2 Cetyl triethyl ammonium bromide (CTAB)

2.2.3 Acetone

### 2.3 วิธีการเตรียมสาร

2.3.1 ชั่งซัลฟูริกเข้มข้น ( $\text{H}_2\text{SO}_4$  conc.) 51.08 กรัม ใส่ใน Beaker ขนาด 250 มิลลิลิตร แล้วเทใส่ volumetric flask ขนาด 1 ลิตร ที่มีน้ำกลั่นอยู่ประมาณ 200 มิลลิลิตร

2.3.2 ล้างกรดที่อยู่ใน beaker ด้วยน้ำกลั่น 2 ครั้ง แล้วเทลงใน Volumetric flask เดิม แล้วเขย่าให้เข้ากัน

2.3.3 เติมน้ำกลั่นปรับปริมาตรให้พอดีขีด ปิดฝา เขย่า 3 ครั้งให้เข้ากัน ปล่อยให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง

2.3.4 ชั่ง CTAB 20 กรัม ลงใน Beaker ขนาด 250 มิลลิลิตร เทใส่ลงในขวดสำหรับ เก็บสารละลาย Acid Detergent Fiber โดยใช้กรวยกรองและแท่งคนสารละลายช่วยล้าง CTAB ที่ติดค้างใน Beaker ด้วยสารละลาย Sulfuric acid ความเข้มข้น 1 นอร์มอล แล้วใส่ลงในขวดเก็บ สารละลาย Acid Detergent Fiber ที่มี CTAB อยู่แล้ว เขย่าให้เข้ากัน แล้วเทกรดซัลฟูริกที่เหลือใส่ ในขวดสารละลาย Acid Detergent Fiber และเขย่าให้เข้ากัน

### 3. วิธีการเตรียมสารเคมีวิเคราะห์หา Acid Detergent Lignin (ADL)

#### 3.1 หลักการ

การวิเคราะห์การปริมาณ Cellulose โดยวิธี Detergent analysis โดยวิธีการวิเคราะห์หา Lignin แบบ Acid Detergent Lignin (ADL) ผลต่างระหว่าง ADF และ ADL (ADF – ADL) คือ Cellulose ที่มีส่วนของ AIA รวมกันอยู่

#### 3.2 สารเคมี

3.2.1 Sulfuric acid ( $H_2SO_4$  conc.)

#### 3.3 วิธีการเตรียมสาร

เตรียมสารละลาย  $H_2SO_4$  72%

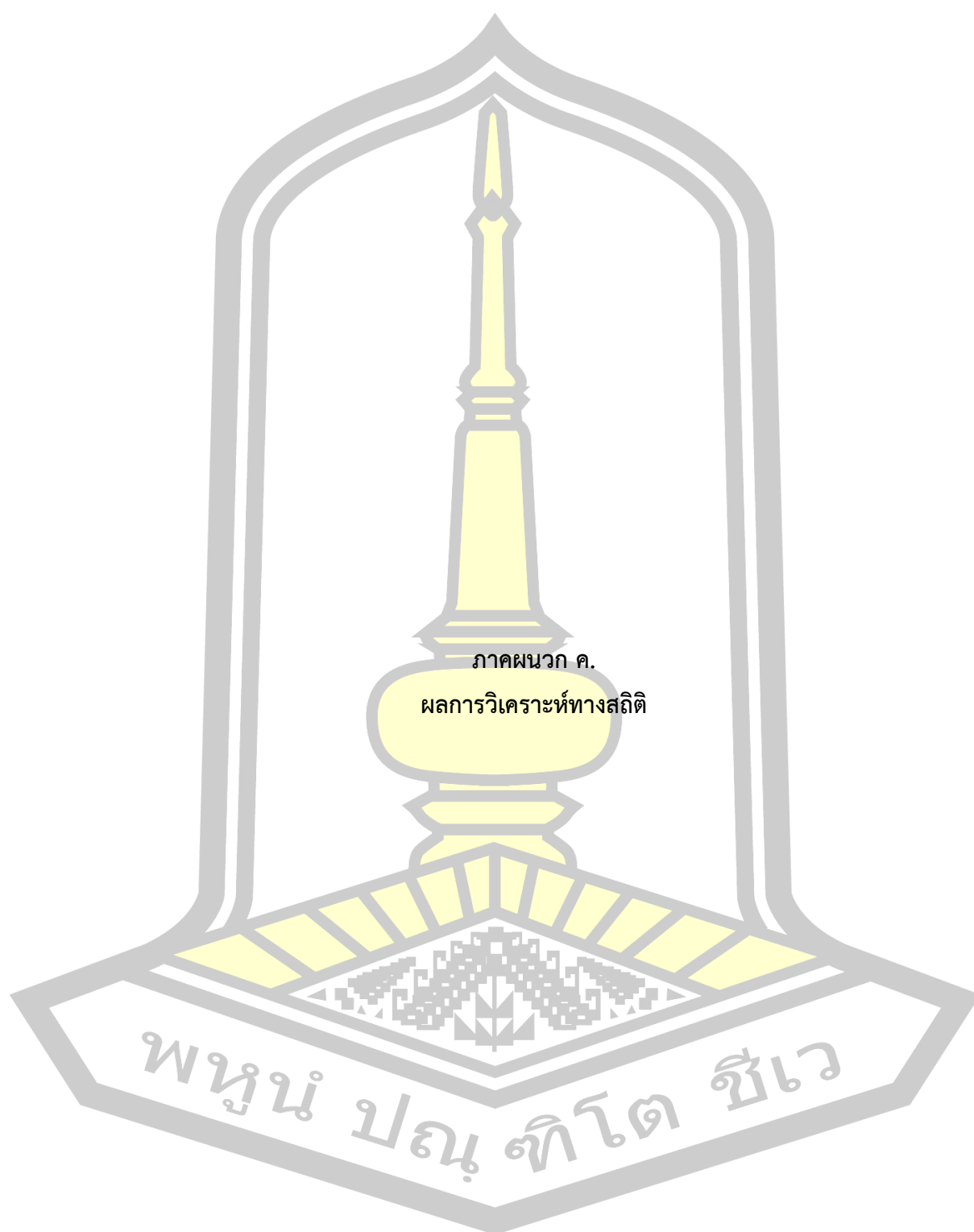
3.3.1 ตวง  $H_2SO_4$  conc. 670 มิลลิลิตร ค่อยๆเทอย่างช้าๆ ลงใน Beaker ขนาด 1,000 มิลลิลิตร ที่มีน้ำกลั่นอยู่แล้ว 100 มิลลิลิตร พร้อมกับใช้แท่งแก้วคนให้สารละลายเข้ากันเป็นระยะ ในขณะที่เตรียมสารละลายนี้ต้องให้ Beaker อยู่ในอ่างน้ำเย็นตลอดเวลา

3.3.2 นำกระจกนาฬิกาปิดไว้ รอจนสารละลายเย็นที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส

3.3.3 เมื่อสารละลายเย็นลง เติมน้ำกลั่นลงไปให้ได้ปริมาตร 1 ลิตร คนสารละลายให้เข้ากันอีกครั้ง เอากระจกนาฬิกาปิด ทิ้งให้เย็นที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส

3.3.4 เมื่อสารละลายเย็นลง เทใส่ลงในขวดสำหรับเก็บสารละลาย  $H_2SO_4$  72 ก่อนนำสารละลาย  $H_2SO_4$  72% มาใช้จะต้องวัดความถ่วงจำเพาะของสารละลายนี้ให้ได้ 1.634 ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส ในการวัดเพื่อหาความถ่วงจำเพาะ 1.634 ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส นั้นเริ่มจากวางขวดสารละลาย  $H_2SO_4$  72% ลงในอ่างน้ำเย็น ใช้ปรอทวัดอุณหภูมิ พออุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส ยกขึ้นจากอ่างน้ำเย็น เขย่าสารละลาย 72% ในขวดเก็บสารละลายให้เข้ากัน แล้วเทลงในกระบอกตวงขนาด 500 มิลลิลิตร ใช้เครื่องวัดความถ่วงจำเพาะวัดให้ได้เท่ากับ 1.634 ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส ถ้าค่าที่วัดได้สูงกว่า 1.634 ให้ค่อยๆเติมน้ำกลั่นลงไป แต่ถ้าต่ำกว่า 1.634 ให้เติมกรดซัลฟูริกเข้มข้นลงไป จนกว่าจะวัดได้ค่าความถ่วงจำเพาะ เท่ากับ 1.634 ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส จึงจะนำไปใช้ได้

พูน ปณ จิต ชีเว





ตาราง 41 ผลการทดสอบทางสถิติ (ANOVA test) และ Scheffe test ของค่าเฉลี่ยความหนาแน่นในอัตราส่วนตัวประสานของเชื้อเพลิงอัดแข็ง

| ชนิดเชื้อเพลิง | ชนิดหญ้า | ความหนาแน่นรวม |         | ความหนาแน่นก้อน |         | Scheffe test <sup>s</sup>  |
|----------------|----------|----------------|---------|-----------------|---------|----------------------------|
|                |          | F value        | P value | F value         | P value |                            |
| P              | MB       | 3067.144       | 0.000   | 41.128          | 0.000   | 60:40, 70:30, 80:20, 90:10 |
|                | PA       | 46431.953      | 0.000   | 146.377         | 0.000   | 60:40, 70:30, 80:20, 90:10 |
|                | PC       | 3126.773       | 0.000   | 116.698         | 0.000   | 60:40, 70:30, 80:20, 90:10 |
| B-1            | MB       | 43877.286      | 0.000   | 652.458         | 0.000   | 60:40, 70:30, 80:20, 90:10 |
|                | PA       | 29208.295      | 0.000   | 440.077         | 0.000   | 60:40, 70:30, 80:20, 90:10 |
|                | PC       | 112428.793     | 0.000   | 845.944         | 0.000   | 60:40, 70:30, 80:20, 90:10 |
| B-2            | MB       | 115221.615     | 0.000   | 1394.250        | 0.000   | 60:40, 70:30, 80:20, 90:10 |
|                | PA       | 338283.285     | 0.000   | 3344.667        | 0.000   | 60:40, 70:30, 80:20, 90:10 |
|                | PC       | 3887.385       | 0.000   | 1421.067        | 0.000   | 60:40, 70:30, 80:20, 90:10 |
| B-3            | MB       | 139598.943     | 0.000   | 1593.500        | 0.000   | 70:30, 80:20, 90:10        |
|                | PA       | 204402.473     | 0.000   | 2425.000        | 0.000   | 70:30, 80:20, 90:10        |
|                | PC       | 940675.452     | 0.000   | 1627.000        | 0.000   | 70:30, 80:20, 90:10        |

หมายเหตุ: s คือ อัตราส่วนแต่ละคู่มีค่าเฉลี่ยความหนาแน่นแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05



ตาราง 42 ผลการทดสอบทางสถิติ ANOVA test และ T-test และ Scheffe test ของค่าเฉลี่ยความหนาแน่นในกำลังอัดการขึ้นรูปของเชื้อเพลิงอัด

| อัตราส่วน          | ชนิดหญ้า | ความหนาแน่นรวม |         | ความหนาแน่นก้อน |         | Scheffe test <sup>s</sup> |                     |
|--------------------|----------|----------------|---------|-----------------|---------|---------------------------|---------------------|
|                    |          | F value        | F value | F value         | P value | ความหนาแน่นรวม            | ความหนาแน่นก้อน     |
| 60:40 <sup>*</sup> | MB       | 2.572          | 0.000   | -               | -       | -                         | -                   |
|                    | PA       | 4.914          | 0.000   | 16.000          | 0.000   | -                         | -                   |
|                    | PC       | 12.974         | 0.004   | 16.000          | 0.000   | -                         | -                   |
| 70:30              | MB       | 14420.319      | 0.000   | 107.375         | 0.000   | 1 MPa, 2MPa, 3 MPa        | 1 MPa, 2 MPa, 3 MPa |
|                    | PA       | 5231.095       | 0.000   | -               | -       | 1 MPa, 2MPa, 3 MPa        | ns                  |
|                    | PC       | 9181.348       | 0.000   | 61.750          | 0.000   | 1 MPa, 2MPa, 3 MPa        | 1 MPa, 2MPa, 3 MPa  |
| 80:20              | MB       | 29348.701      | 0.000   | 222.250         | 0.000   | 1 MPa, 2MPa, 3 MPa        | 1 และ 2 MPa, 3 MPa  |
|                    | PA       | 31888.840      | 0.000   | 42.750          | 0.000   | 1 MPa, 2MPa, 3 MPa        | 1 และ 2 MPa, 3 MPa  |
|                    | PC       | 16154.057      | 0.000   | 162.600         | 0.000   | 1 MPa, 2MPa, 3 MPa        | 1 และ 2 MPa, 3 MPa  |
| 90:10              | MB       | 6138.720       | 0.000   | 636.500         | 0.000   | 1 MPa, 2MPa, 3 MPa        | 1 MPa, 2MPa, 3 MPa  |
|                    | PA       | 158960.823     | 0.000   | 537.333         | 0.000   | 1 MPa, 2MPa, 3 MPa        | 1 MPa, 2MPa, 3 MPa  |
|                    | PC       | 14441.405      | 0.000   | 837.500         | 0.000   | 1 MPa, 2MPa, 3 MPa        | 1 MPa, 2MPa, 3 MPa  |

หมายเหตุ: s คือ กำลังอัดแต่ละกลุ่มมีค่าเฉลี่ยความหนาแน่นแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

ns คือ กำลังอัดแต่ละกลุ่มมีค่าเฉลี่ยความหนาแน่นไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

\* คือ ทดสอบความแปรปรวนด้วย T-test ระหว่างกำลังอัด 1 และ 2 MPa เนื่องจาก 3 MPa ขึ้นรูปไม่ได้

ตาราง 43 ผลการทดสอบทางสถิติ (T-test) ของค่าเฉลี่ยความหนาแน่นในรูปทรงของเชื้อเพลิงอัดแข็ง

| อัตราส่วน | ชนิดหญ้า | P และ B-1      |         |                 |         | P และ B-2      |         |                 |         | P และ B-3      |         |                 |         |
|-----------|----------|----------------|---------|-----------------|---------|----------------|---------|-----------------|---------|----------------|---------|-----------------|---------|
|           |          | ความหนาแน่นรวม |         | ความหนาแน่นก้อน |         | ความหนาแน่นรวม |         | ความหนาแน่นก้อน |         | ความหนาแน่นรวม |         | ความหนาแน่นก้อน |         |
|           |          | F value        | P value | P value         | F value | F value        | P value | F value         | P value | F value        | P value | F value         | P value |
| 60:40     | MB       | 3.345          | .000    | 16.000          | .015    | .569           | .000    | 16.000          | .085    | -              | -       | -               | -       |
|           | PA       | 2.860          | .000    | 5.953           | .013    | 6.250          | .000    | 3.273           | .143    | -              | -       | -               | -       |
|           | PC       | 4.836          | .001    | 3.273           | .011    | .110           | .000    | 5.953           | .208    | -              | -       | -               | -       |
| 70:30     | MB       | 3.677          | .000    | 1.241           | .003    | 7.650          | .000    | 16.000          | .003    | 6.952          | .002    | 8.471           | .507    |
|           | PA       | 4.691          | .000    | 16.000          | .000    | .001           | .000    | 16.000          | .000    | .001           | .000    | 16.000          | .003    |
|           | PC       | 3.495          | .000    | 2.000           | .001    | 4.619          | .000    | 6.400           | .005    | 5.463          | .001    | 16.000          | .001    |
| 80:20     | MB       | 3.799          | .001    | 3.273           | .011    | 4.622          | .018    | 1.923           | .010    | 4.749          | .137    | 5.953           | .370    |
|           | PA       | .239           | .000    | 4.000           | .016    | 2.218          | .000    | -               | -       | 1.194          | .000    | -               | -       |
|           | PC       | 4.626          | .001    | 3.200           | .002    | 1.600          | .002    | 0.000           | .001    | 4.426          | .001    | 16.000          | .116    |
| 90:10     | MB       | 6.245          | .000    | -               | -       | 7.284          | .001    | 16.000          | .000    | 4.760          | .000    | 16.000          | .000    |
|           | PA       | 2.487          | .000    | 16.000          | .000    | .227           | .000    | 16.000          | .000    | 2.487          | .000    | 16.000          | .000    |
|           | PC       | 8.108          | .000    | 16.000          | .000    | 1.338          | .000    | -               | -       | 2.907          | .000    | 16.000          | .002    |

ตาราง 44 ผลการทดสอบทางสถิติ (ANOVA test) และ Scheffe test ของค่าเฉลี่ยการต้านทานการขัดสีในอัตราส่วนตัวประสานของเชื้อเพลิงอัดแข็ง

| ชนิดเชื้อเพลิง | ชนิดหญ้า | การต้านทานการขัดสี |         | Scheffe test <sup>s</sup>  |
|----------------|----------|--------------------|---------|----------------------------|
|                |          | F value            | P value |                            |
| P              | MB       | 4875.225           | 0.000   | 60:40, 70:30, 80:20, 90:10 |
|                | PA       | 4036.829           | 0.000   | 60:40, 70:30, 80:20, 90:10 |
|                | PC       | 161732.180         | 0.000   | 60:40, 70:30, 80:20, 90:10 |
| B-1            | MB       | 5273.753           | 0.000   | 60:40, 70:30, 80:20, 90:10 |
|                | PA       | 44499.305          | 0.000   | 60:40, 70:30, 80:20, 90:10 |
|                | PC       | 3288.555           | 0.000   | 60:40, 70:30, 80:20, 90:10 |
| B-2            | MB       | 125273.385         | 0.000   | 60:40, 70:30, 80:20, 90:10 |
|                | PA       | 72766.758          | 0.000   | 60:40, 70:30, 80:20, 90:10 |
|                | PC       | 21010.707          | 0.000   | 60:40, 70:30, 80:20, 90:10 |
| B-3            | MB       | 130523.547         | 0.000   | 70:30, 80:20, 90:10        |
|                | PA       | 44565.060          | 0.000   | 70:30, 80:20, 90:10        |
|                | PC       | 308537.263         | 0.000   | 70:30, 80:20, 90:10        |

หมายเหตุ: s คือ อัตราส่วนแต่ละคู่มีค่าเฉลี่ยการต้านทานการขัดสีแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05



ตาราง 45 ผลการทดสอบทางสถิติ (ANOVA test และ T-test) และ Scheffe test ของค่าเฉลี่ยการต้านทานการขัดสีในกำลังอัดการขึ้นรูปของเชื้อเพลิง

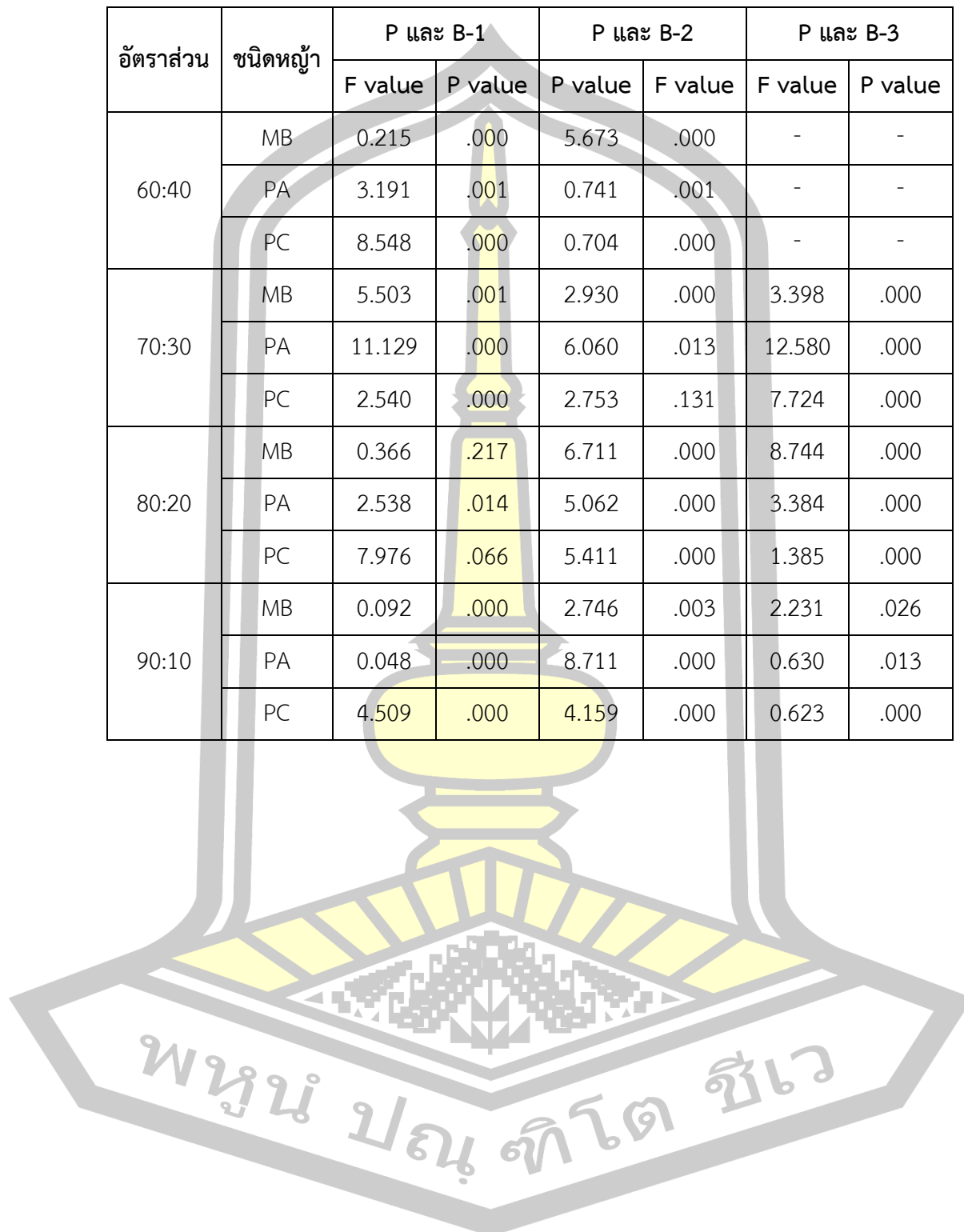
| อัตราส่วน          | ชนิดหญ้า | การต้านทานการขัดสี |         | Scheffe test <sup>s</sup> |
|--------------------|----------|--------------------|---------|---------------------------|
|                    |          | F value            | P value |                           |
| 60:40 <sup>*</sup> | MB       | 13.646             | 0.000   | -                         |
|                    | PA       | 7.771              | 0.000   | -                         |
|                    | PC       | 8.793              | 0.000   | -                         |
| 70:30              | MB       | 23036.217          | 0.000   | 1 MPa, 2MPa, 3 MPa        |
|                    | PA       | 15354.106          | 0.000   | 1 MPa, 2MPa, 3 MPa        |
|                    | PC       | 5166.265           | 0.000   | 1 MPa, 2MPa, 3 MPa        |
| 80:20              | MB       | 1917.984           | 0.000   | 1 MPa, 2MPa, 3 MPa        |
|                    | PA       | 15999.118          | 0.000   | 1 MPa, 2MPa, 3 MPa        |
|                    | PC       | 2674.723           | 0.000   | 1 MPa, 2MPa, 3 MPa        |
| 90:10              | MB       | 1094.496           | 0.000   | 1 MPa, 2MPa, 3 MPa        |
|                    | PA       | 13080.358          | 0.000   | 1 MPa, 2MPa, 3 MPa        |
|                    | PC       | 625.601            | 0.000   | 1 MPa, 2MPa, 3 MPa        |

หมายเหตุ: s คือ กำลังอัดแต่ละกลุ่มมีค่าเฉลี่ยการต้านทานการขัดสีแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

\* คือ ทดสอบความแปรปรวนด้วย T-test ระหว่างกำลังอัด 1 และ 2 MPa เนื่องจาก 3 MPa ขึ้นรูปไม่ได้

ตาราง 46 ผลการทดสอบทางสถิติ (T-test) ของค่าเฉลี่ยการต้านทานการขัดสีในรูปทรงของเชื้อเพลิง

| อัตราส่วน | ชนิดหญ้า | P และ B-1 |         | P และ B-2 |         | P และ B-3 |         |
|-----------|----------|-----------|---------|-----------|---------|-----------|---------|
|           |          | F value   | P value | P value   | F value | F value   | P value |
| 60:40     | MB       | 0.215     | .000    | 5.673     | .000    | -         | -       |
|           | PA       | 3.191     | .001    | 0.741     | .001    | -         | -       |
|           | PC       | 8.548     | .000    | 0.704     | .000    | -         | -       |
| 70:30     | MB       | 5.503     | .001    | 2.930     | .000    | 3.398     | .000    |
|           | PA       | 11.129    | .000    | 6.060     | .013    | 12.580    | .000    |
|           | PC       | 2.540     | .000    | 2.753     | .131    | 7.724     | .000    |
| 80:20     | MB       | 0.366     | .217    | 6.711     | .000    | 8.744     | .000    |
|           | PA       | 2.538     | .014    | 5.062     | .000    | 3.384     | .000    |
|           | PC       | 7.976     | .066    | 5.411     | .000    | 1.385     | .000    |
| 90:10     | MB       | 0.092     | .000    | 2.746     | .003    | 2.231     | .026    |
|           | PA       | 0.048     | .000    | 8.711     | .000    | 0.630     | .013    |
|           | PC       | 4.509     | .000    | 4.159     | .000    | 0.623     | .000    |



ตาราง 47 ผลการทดสอบทางสถิติ (ANOVA test) และ Scheffe test ของค่าเฉลี่ยการต้านทานการแตกร่วนในอัตราส่วนตัวประสานของเชื้อเพลิง

| ชนิดเชื้อเพลิง | ชนิดหญ้า | การต้านทานการแตกร่วน |         | Scheffe test <sup>s</sup>     |
|----------------|----------|----------------------|---------|-------------------------------|
|                |          | F value              | P value |                               |
| P              | MB       | 7661.265             | 0.000   | 60:40 และ 70:30, 80:20, 90:10 |
|                | PA       | 12026.370            | 0.000   | 60:40 และ 70:30, 80:20, 90:10 |
|                | PC       | 3836.438             | 0.000   | 60:40 และ 70:30, 80:20, 90:10 |
| B-1            | MB       | 83022.945            | 0.000   | 60:40 และ 70:30, 80:20, 90:10 |
|                | PA       | 158070.357           | 0.000   | 60:40 และ 70:30, 80:20, 90:10 |
|                | PC       | 108974.390           | 0.000   | 60:40 และ 70:30, 80:20, 90:10 |
| B-2            | MB       | 59015.556            | 0.000   | 60:40 และ 70:30, 80:20, 90:10 |
|                | PA       | 72914.326            | 0.000   | 60:40 และ 70:30, 80:20, 90:10 |
|                | PC       | 14029.970            | 0.000   | 60:40 และ 70:30, 80:20, 90:10 |
| B-3            | MB       | 2920.564             | 0.000   | 70:30, 80:20, 90:10           |
|                | PA       | 29006.959            | 0.000   | 70:30, 80:20, 90:10           |
|                | PC       | 35843.882            | 0.000   | 70:30, 80:20, 90:10           |

หมายเหตุ: s คือ อัตราส่วนแต่ละคู่มีค่าเฉลี่ยการต้านทานการแตกร่วนต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05



ตาราง 48 ผลการทดสอบทางสถิติ (ANOVA test และ T-test) และ Scheffe test ของค่าเฉลี่ยการต้านทานการแตกร่วนในกำลังอัดการขึ้นรูปของเชื้อเพลิง

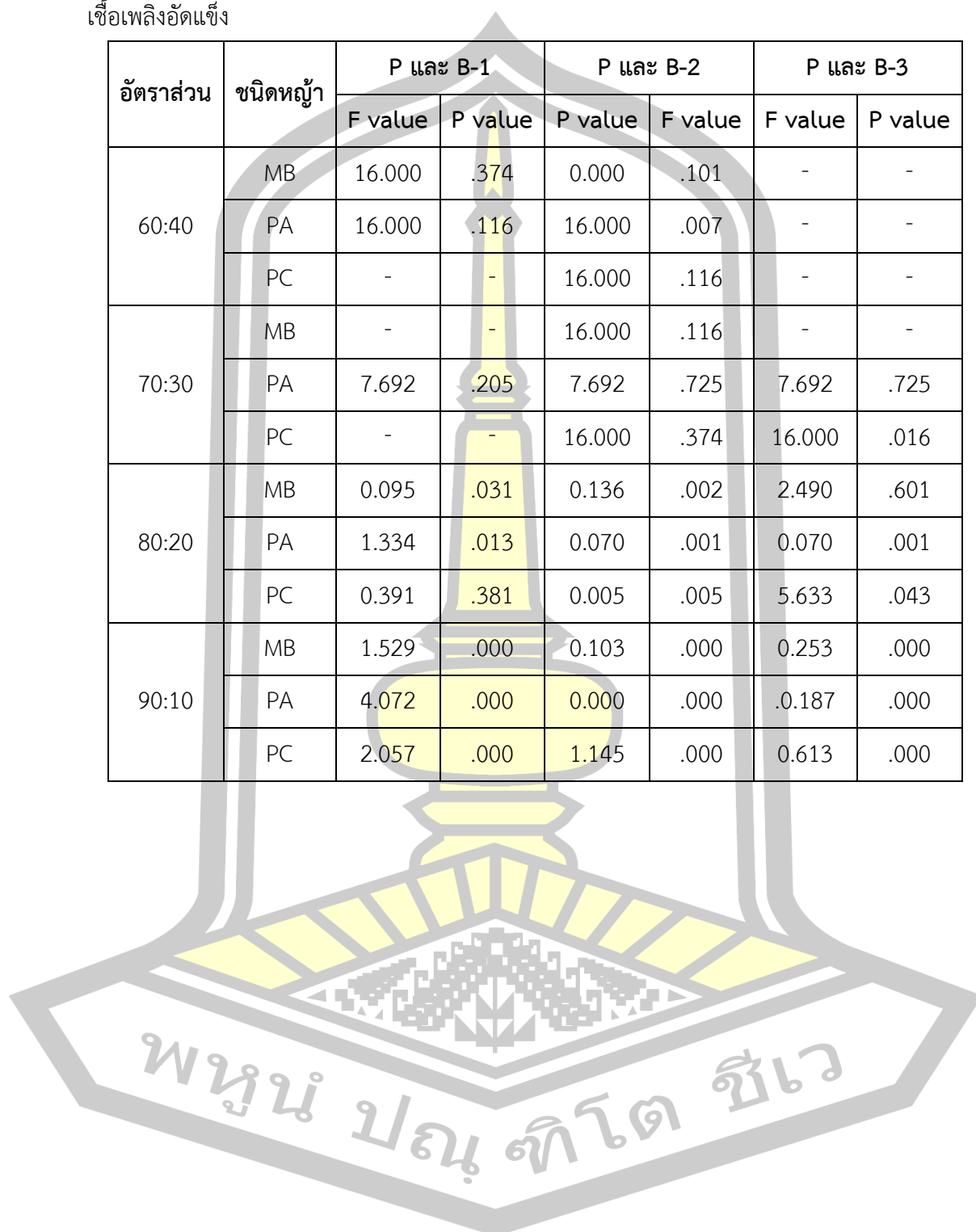
| อัตราส่วน | ชนิดหญ้า | การต้านทานการแตกร่วน |         | Scheffe test <sup>s</sup>      |
|-----------|----------|----------------------|---------|--------------------------------|
|           |          | F value              | P value |                                |
| 60:40*    | MB       | 16.000               | 0.116   | -                              |
|           | PA       | -                    | -       | -                              |
|           | PC       | 16.000               | 0.007   | -                              |
| 70:30     | MB       | 7.000                | 0.027   | 2MPa และ 1 MPa, 2MPa และ 3 MPa |
|           | PA       | -                    | -       | -                              |
|           | PC       | 10.500               | 0.011   | 1 MPa และ 3 MPa, 2MPa          |
| 80:20     | MB       | 5.907                | 0.038   | 2MPa และ 1 MPa, 1MPa และ 3 MPa |
|           | PA       | 0.767                | 0.505   | ns                             |
|           | PC       | 42.095               | 0.000   | 1 MPa, 2MPa, 3 MPa             |
| 90:10     | MB       | 4960.797             | 0.000   | 1 MPa, 2MPa, 3 MPa             |
|           | PA       | 17508.056            | 0.000   | 1 MPa, 2MPa, 3 MPa             |
|           | PC       | 9915.829             | 0.000   | 1 MPa, 2MPa, 3 MPa             |

หมายเหตุ: s คือ อัตราส่วนแต่ละคู่มีค่าเฉลี่ยการต้านทานการแตกร่วนต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

ns คือ กำลังอัดแต่ละกลุ่มมีค่าเฉลี่ยการต้านทานการแตกร่วนไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

ตาราง 49 ผลการทดสอบทางสถิติ (T-test) ของค่าเฉลี่ยการต้านทานการแตกร่วนในรูปทรงของ  
เชื้อเพลิงอัดแข็ง

| อัตราส่วน | ชนิดหญ้า | P และ B-1 |         | P และ B-2 |         | P และ B-3 |         |
|-----------|----------|-----------|---------|-----------|---------|-----------|---------|
|           |          | F value   | P value | P value   | F value | F value   | P value |
| 60:40     | MB       | 16.000    | .374    | 0.000     | .101    | -         | -       |
|           | PA       | 16.000    | .116    | 16.000    | .007    | -         | -       |
|           | PC       | -         | -       | 16.000    | .116    | -         | -       |
| 70:30     | MB       | -         | -       | 16.000    | .116    | -         | -       |
|           | PA       | 7.692     | .205    | 7.692     | .725    | 7.692     | .725    |
|           | PC       | -         | -       | 16.000    | .374    | 16.000    | .016    |
| 80:20     | MB       | 0.095     | .031    | 0.136     | .002    | 2.490     | .601    |
|           | PA       | 1.334     | .013    | 0.070     | .001    | 0.070     | .001    |
|           | PC       | 0.391     | .381    | 0.005     | .005    | 5.633     | .043    |
| 90:10     | MB       | 1.529     | .000    | 0.103     | .000    | 0.253     | .000    |
|           | PA       | 4.072     | .000    | 0.000     | .000    | .0187     | .000    |
|           | PC       | 2.057     | .000    | 1.145     | .000    | 0.613     | .000    |



ตาราง 50 ผลการทดสอบทางสถิติ (ANOVA test) และ Scheffe test ของค่าเฉลี่ยการรับแรงกดในอัตราส่วนตัวประสานของเชื้อเพลิงอัดแข็ง

| ชนิดเชื้อเพลิง | ชนิดหล้า | การรับแรงกด |         | Scheffe test <sup>s</sup>  |
|----------------|----------|-------------|---------|----------------------------|
|                |          | F value     | P value |                            |
| P              | MB       | -           | -       | -                          |
|                | PA       | -           | -       | -                          |
|                | PC       | -           | -       | -                          |
| B-1            | MB       | 312462.667  | 0.000   | 60:40, 70:30, 80:20, 90:10 |
|                | PA       | 359801.333  | 0.000   | 60:40, 70:30, 80:20, 90:10 |
|                | PC       | -           | -       | -                          |
| B-2            | MB       | -           | -       | -                          |
|                | PA       | -           | -       | -                          |
|                | PC       | 355206.067  | 0.000   | 60:40, 70:30, 80:20, 90:10 |
| B-3            | MB       | -           | -       | -                          |
|                | PA       | -           | -       | -                          |
|                | PC       | -           | -       | -                          |

หมายเหตุ: s คือ อัตราส่วนแต่ละคู่มีค่าเฉลี่ยการรับแรงกดต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

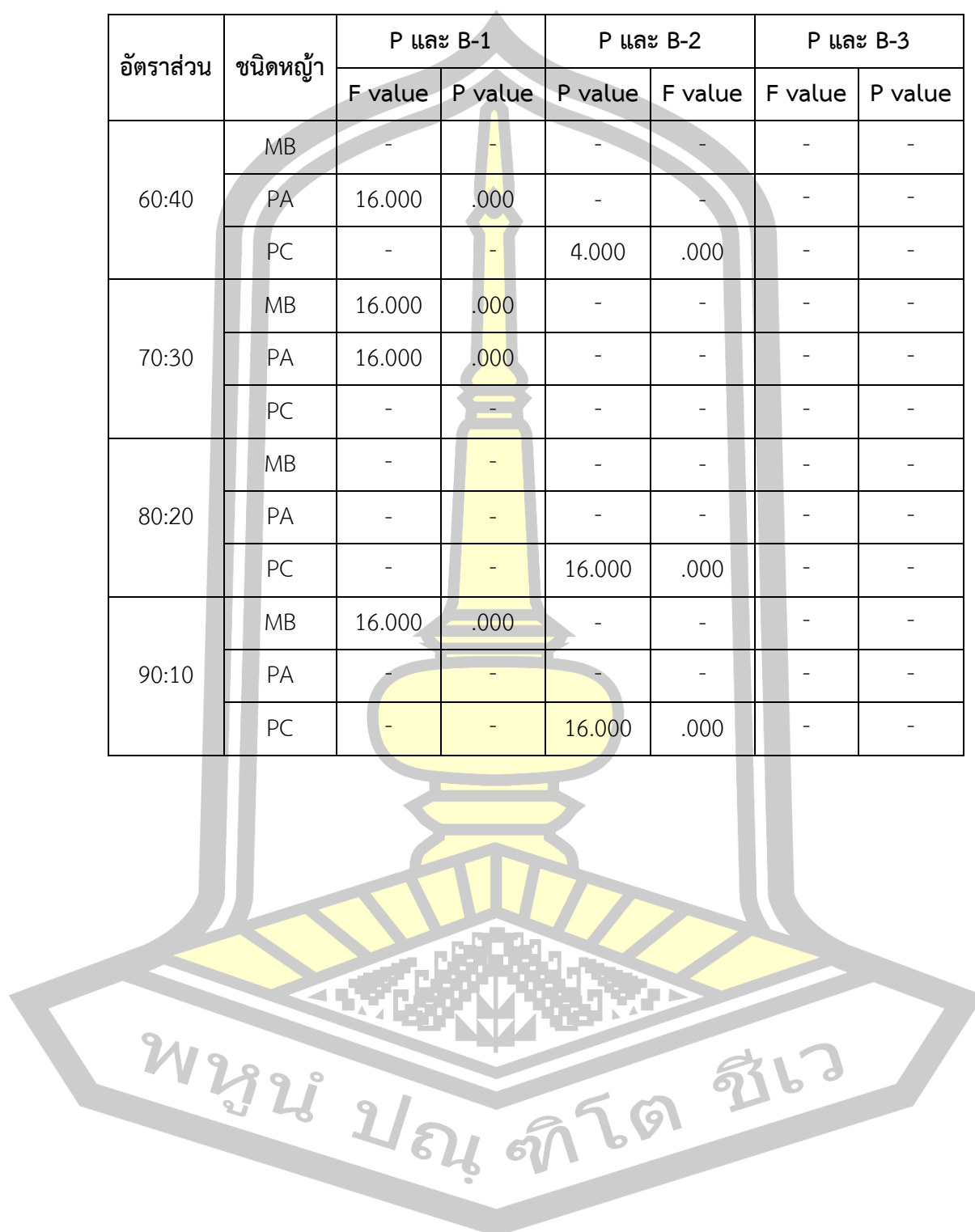
ตาราง 51 ผลการทดสอบทางสถิติ (ANOVA test และ T-test) และ Scheffe test ของค่าเฉลี่ยการรับแรงกดในกำลังอัดการขึ้นรูปของเชื้อเพลิง

| อัตราส่วน          | ชนิดหญ้า | การรับแรงกด |         | Scheffe test <sup>s</sup> |
|--------------------|----------|-------------|---------|---------------------------|
|                    |          | F value     | P value |                           |
| 60:40 <sup>*</sup> | MB       | -           | -       | -                         |
|                    | PA       | 16.000      | 0.000   | -                         |
|                    | PC       | 4.000       | 0.000   | -                         |
| 70:30              | MB       | 40663.000   | 0.000   | 1 MPa, 2MPa, 3 MPa        |
|                    | PA       | 113329.000  | 0.000   | 1 MPa, 2MPa, 3 MPa        |
|                    | PC       | -           | -       | -                         |
| 80:20              | MB       | -           | -       | -                         |
|                    | PA       | -           | -       | -                         |
|                    | PC       | 19357.000   | 0.000   | 1 MPa, 2MPa, 3 MPa        |
| 90:10              | MB       | 5068.000    | 0.000   | 1 MPa, 2MPa, 3 MPa        |
|                    | PA       | -           | -       | -                         |
|                    | PC       | 8743.000    | 0.000   | 1 MPa และ 2MPa, 3 MPa     |

หมายเหตุ: s คือ อัตราส่วนแต่ละคู่มีค่าเฉลี่ยการรับแรงกดต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

ตาราง 52 ผลการทดสอบทางสถิติ (T-test) ของค่าเฉลี่ยการรับแรงกดในรูปทรงของเชื้อเพลิงอัดแข็ง

| อัตราส่วน | ชนิดหญ้า | P และ B-1 |         | P และ B-2 |         | P และ B-3 |         |
|-----------|----------|-----------|---------|-----------|---------|-----------|---------|
|           |          | F value   | P value | P value   | F value | F value   | P value |
| 60:40     | MB       | -         | -       | -         | -       | -         | -       |
|           | PA       | 16.000    | .000    | -         | -       | -         | -       |
|           | PC       | -         | -       | 4.000     | .000    | -         | -       |
| 70:30     | MB       | 16.000    | .000    | -         | -       | -         | -       |
|           | PA       | 16.000    | .000    | -         | -       | -         | -       |
|           | PC       | -         | -       | -         | -       | -         | -       |
| 80:20     | MB       | -         | -       | -         | -       | -         | -       |
|           | PA       | -         | -       | -         | -       | -         | -       |
|           | PC       | -         | -       | 16.000    | .000    | -         | -       |
| 90:10     | MB       | 16.000    | .000    | -         | -       | -         | -       |
|           | PA       | -         | -       | -         | -       | -         | -       |
|           | PC       | -         | -       | 16.000    | .000    | -         | -       |



ตาราง 53 ผลการทดสอบทางสถิติ (ANOVA test) และ Scheffe test ของค่าเฉลี่ยการต้านทานการดูดซึมน้ำในอัตราส่วนตัวประสานของเชื้อเพลิง

| ชนิดเชื้อเพลิง | ชนิดหญ้า | การต้านทานการดูดซึมน้ำ |         | Scheffe test <sup>s</sup>        |
|----------------|----------|------------------------|---------|----------------------------------|
|                |          | F value                | P value |                                  |
| P              | MB       | -                      | -       | -                                |
|                | PA       | -                      | -       | -                                |
|                | PC       | -                      | -       | -                                |
| B-1            | MB       | 10835.278              | 0.000   | 60:40 และ 70:30, 80:20 และ 90:10 |
|                | PA       | 38141.429              | 0.000   | 60:40, 70:30, 80:20, 90:10       |
|                | PC       | -                      | -       | -                                |
| B-2            | MB       | 14751.758              | 0.000   | 60:40, 70:30, 80:20, 90:10       |
|                | PA       | 17365.134              | 0.000   | 60:40, 70:30, 80:20, 90:10       |
|                | PC       | 12225.938              | 0.000   | 60:40, 70:30, 80:20, 90:10       |
| B-3            | MB       | 6875.571               | 0.000   | 70:30, 80:20, 90:10              |
|                | PA       | 8500.083               | 0.000   | 70:30, 80:20, 90:10              |
|                | PC       | 12655.103              | 0.000   | 70:30, 80:20, 90:10              |

หมายเหตุ: s คือ อัตราส่วนแต่ละคู่มีค่าเฉลี่ยการต้านทานการดูดซึมน้ำต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05



ตาราง 54 ผลการทดสอบทางสถิติ (ANOVA test และ T-test) และ Scheffe test ของค่าเฉลี่ยการต้านทานการดูดซึมน้ำในกำลังอัดการขึ้นรูปของเชื้อเพลิง

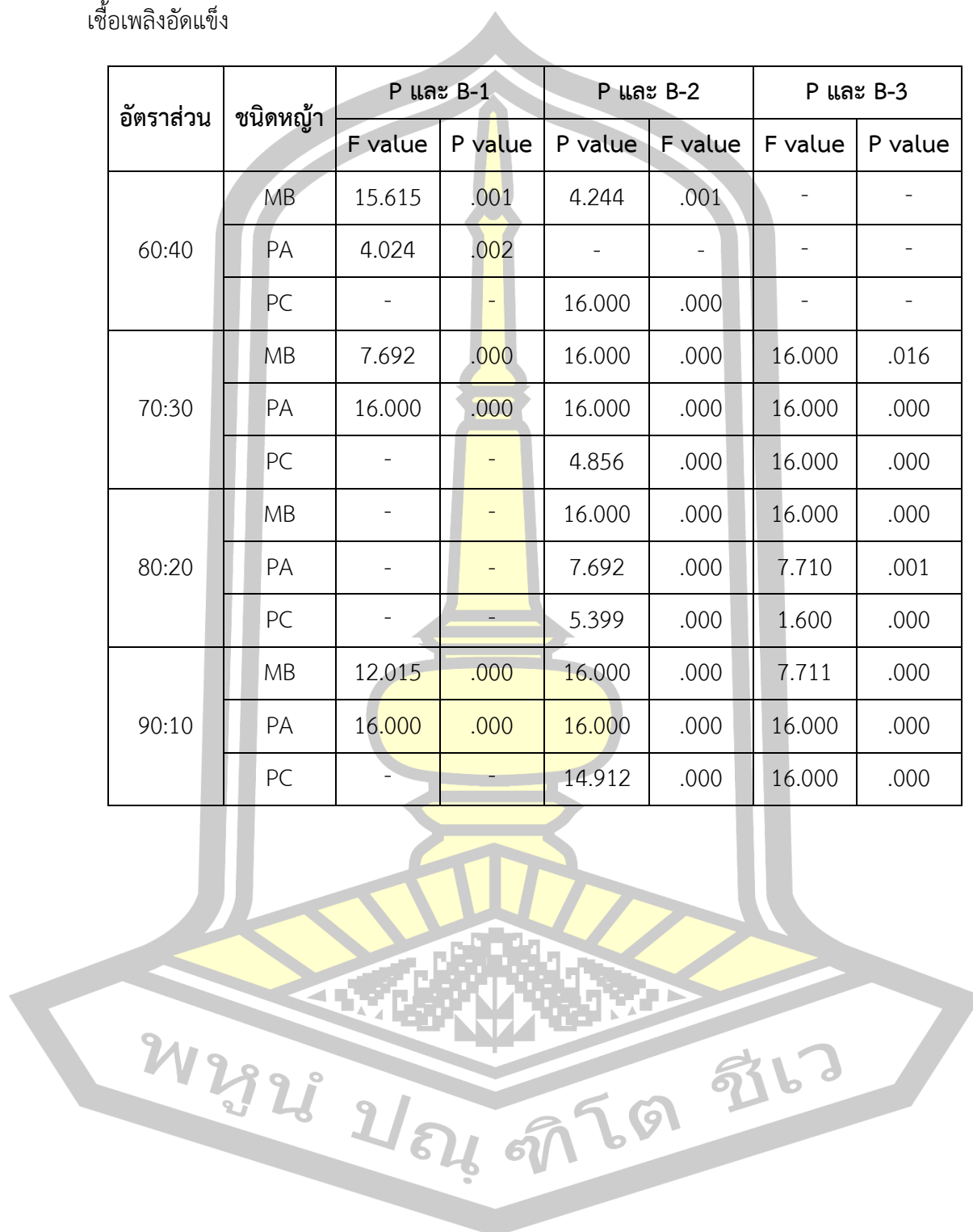
| อัตราส่วน | ชนิดหญ้า | การต้านทานการดูดซึมน้ำ |         | Scheffe test <sup>s</sup> |
|-----------|----------|------------------------|---------|---------------------------|
|           |          | F value                | P value |                           |
| 60:40*    | MB       | -                      | -       | -                         |
|           | PA       | 4.024                  | 0.006   | -                         |
|           | PC       | 16.000                 | 0.010   | -                         |
| 70:30     | MB       | 3840.789               | 0.000   | 1 MPa, 2MPa, 3 MPa        |
|           | PA       | 456.535                | 0.000   | 1 MPa, 2MPa, 3 MPa        |
|           | PC       | 1151.243               | 0.000   | 1 MPa, 2MPa, 3 MPa        |
| 80:20     | MB       | 1333.826               | 0.000   | 1 MPa, 2MPa, 3 MPa        |
|           | PA       | 618.288                | 0.000   | 1 MPa, 2MPa, 3 MPa        |
|           | PC       | 1140.546               | 0.000   | 1 MPa, 2MPa, 3 MPa        |
| 90:10     | MB       | 1197.475               | 0.000   | 1 MPa และ 2 MPa, 3 MPa    |
|           | PA       | 2090.928               | 0.000   | 1 MPa, 2MPa, 3 MPa        |
|           | PC       | 307.748                | 0.000   | 1 MPa และ 2 MPa, 3 MPa    |

หมายเหตุ: s คือ กำลังอัดแต่ละกลุ่มมีค่าเฉลี่ยการต้านทานการดูดซึมน้ำแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

\* คือ ทดสอบความแปรปรวนด้วย T-test ระหว่างกำลังอัด 1 และ 2 MPa เนื่องจาก 3 MPa ขึ้นรูปไม่ได้

ตาราง 55 ผลการทดสอบทางสถิติ (T-test) ของค่าเฉลี่ยการต้านทานการดูดซึมน้ำในรูปทรงของเชื้อเพลิงอัดแข็ง

| อัตราส่วน | ชนิดหญ้า | P และ B-1 |         | P และ B-2 |         | P และ B-3 |         |
|-----------|----------|-----------|---------|-----------|---------|-----------|---------|
|           |          | F value   | P value | P value   | F value | F value   | P value |
| 60:40     | MB       | 15.615    | .001    | 4.244     | .001    | -         | -       |
|           | PA       | 4.024     | .002    | -         | -       | -         | -       |
|           | PC       | -         | -       | 16.000    | .000    | -         | -       |
| 70:30     | MB       | 7.692     | .000    | 16.000    | .000    | 16.000    | .016    |
|           | PA       | 16.000    | .000    | 16.000    | .000    | 16.000    | .000    |
|           | PC       | -         | -       | 4.856     | .000    | 16.000    | .000    |
| 80:20     | MB       | -         | -       | 16.000    | .000    | 16.000    | .000    |
|           | PA       | -         | -       | 7.692     | .000    | 7.710     | .001    |
|           | PC       | -         | -       | 5.399     | .000    | 1.600     | .000    |
| 90:10     | MB       | 12.015    | .000    | 16.000    | .000    | 7.711     | .000    |
|           | PA       | 16.000    | .000    | 16.000    | .000    | 16.000    | .000    |
|           | PC       | -         | -       | 14.912    | .000    | 16.000    | .000    |



ตาราง 56 ผลการทดสอบทางสถิติ (ANOVA test) และ Scheffe test ของค่าเฉลี่ยความหนาแน่นพลังงานในอัตราส่วนตัวประสานของเชื้อเพลิง

| ชนิดเชื้อเพลิง | ชนิดหญ้า | ความหนาแน่นพลังงาน |         | Scheffe test <sup>s</sup>     |
|----------------|----------|--------------------|---------|-------------------------------|
|                |          | F value            | P value |                               |
| P              | MB       | 2774.032           | 0.000   | 60:40, 70:30, 80:20, 90:10    |
|                | PA       | 43050.382          | 0.000   | 60:40, 70:30, 80:20, 90:10    |
|                | PC       | 2982.755           | 0.000   | 60:40 และ 70:30, 80:20, 90:10 |
| B-1            | MB       | 41103.109          | 0.000   | 60:40, 70:30, 80:20, 90:10    |
|                | PA       | 27275.010          | 0.000   | 60:40, 70:30, 80:20, 90:10    |
|                | PC       | 109068.088         | 0.000   | 60:40, 70:30, 80:20, 90:10    |
| B-2            | MB       | 109704.083         | 0.000   | 60:40, 70:30, 80:20, 90:10    |
|                | PA       | 310023.282         | 0.000   | 60:40, 70:30, 80:20, 90:10    |
|                | PC       | 3810.127           | 0.000   | 60:40, 70:30, 80:20, 90:10    |
| B-3            | MB       | 130491.643         | 0.000   | 70:30, 80:20, 90:10           |
|                | PA       | 191063.626         | 0.000   | 70:30, 80:20, 90:10           |
|                | PC       | 941133.746         | 0.000   | 70:30, 80:20, 90:10           |

หมายเหตุ: s คือ อัตราส่วนแต่ละคู่มีค่าเฉลี่ยความหนาแน่นพลังงานต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05



ตาราง 57 ผลการทดสอบทางสถิติ (ANOVA test และ T-test) และ Scheffe test ของค่าเฉลี่ยความหนาแน่นพลังงานในกำลังอัดการขึ้นรูปของเชื้อเพลิง

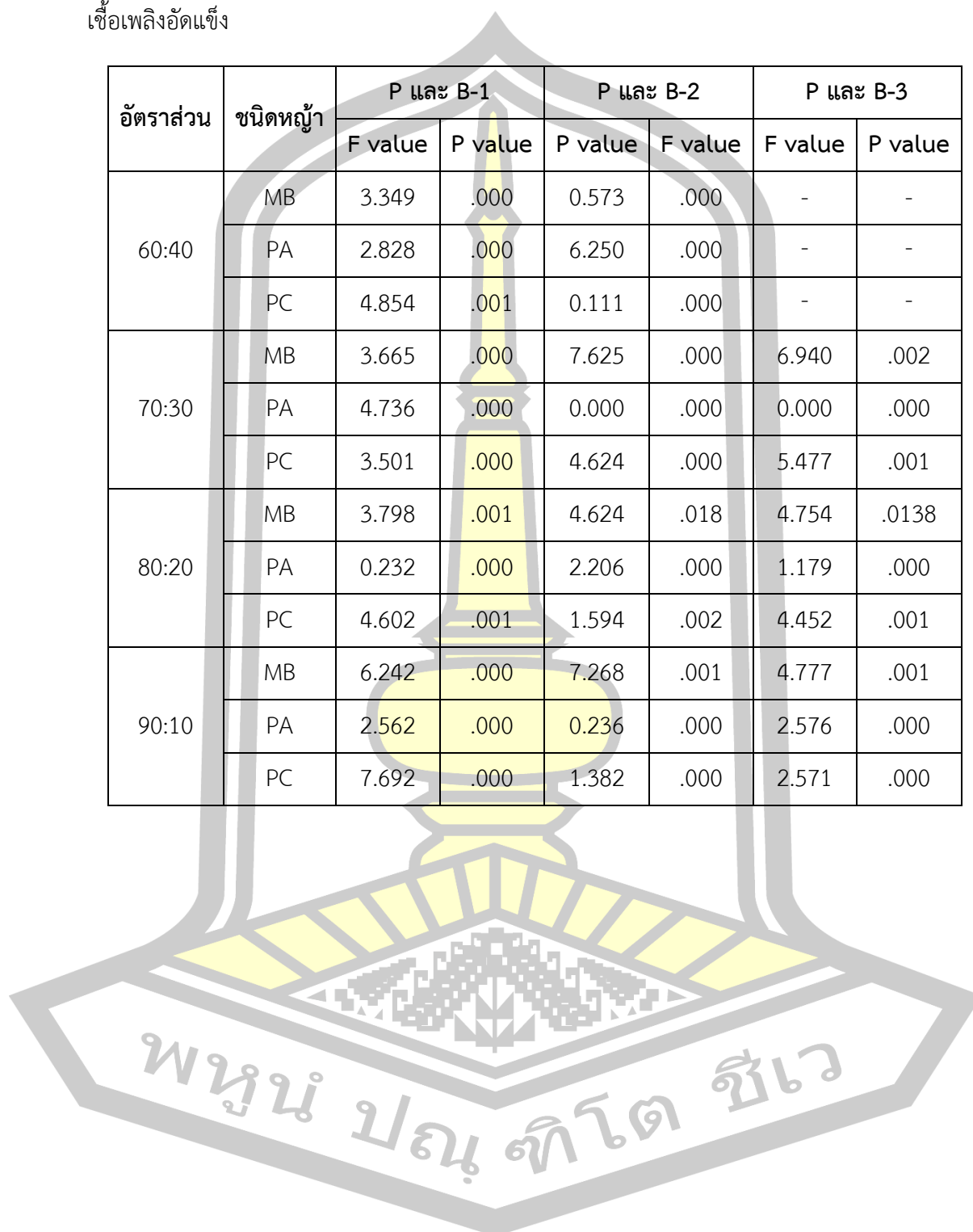
| อัตราส่วน | ชนิดหญ้า | ความหนาแน่นพลังงาน |         | Scheffe test <sup>s</sup> |
|-----------|----------|--------------------|---------|---------------------------|
|           |          | F value            | P value |                           |
| 60:40*    | MB       | 2.579              | 0.000   | -                         |
|           | PA       | 4.969              | 0.000   | -                         |
|           | PC       | 13.004             | 0.004   | -                         |
| 70:30     | MB       | 14421.976          | 0.000   | 1 MPa, 2MPa, 3 MPa        |
|           | PA       | 5214.099           | 0.000   | 1 MPa, 2MPa, 3 MPa        |
|           | PC       | 9198.734           | 0.000   | 1 MPa, 2MPa, 3 MPa        |
| 80:20     | MB       | 29194.957          | 0.000   | 1 MPa, 2MPa, 3 MPa        |
|           | PA       | 31852.942          | 0.000   | 1 MPa, 2MPa, 3 MPa        |
|           | PC       | 16218.668          | 0.000   | 1 MPa, 2MPa, 3 MPa        |
| 90:10     | MB       | 6236.602           | 0.000   | 1 MPa, 2MPa, 3 MPa        |
|           | PA       | 161484.903         | 0.000   | 1 MPa, 2MPa, 3 MPa        |
|           | PC       | 14464.416          | 0.000   | 1 MPa, 2MPa, 3 MPa        |

หมายเหตุ: s คือ กำลังอัดแต่ละกลุ่มมีค่าเฉลี่ยความหนาแน่นพลังงานแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

\* คือ ทดสอบความแปรปรวนด้วย T-test ระหว่างกำลังอัด 1 และ 2 MPa เนื่องจาก 3 MPa ขึ้นรูปไม่ได้

ตาราง 58 ผลการทดสอบทางสถิติ (T-test) ของค่าเฉลี่ยความหนาแน่นพลังงานในรูปทรงของ  
เชื้อเพลิงอัดแข็ง

| อัตราส่วน | ชนิดหญ้า | P และ B-1 |         | P และ B-2 |         | P และ B-3 |         |
|-----------|----------|-----------|---------|-----------|---------|-----------|---------|
|           |          | F value   | P value | P value   | F value | F value   | P value |
| 60:40     | MB       | 3.349     | .000    | 0.573     | .000    | -         | -       |
|           | PA       | 2.828     | .000    | 6.250     | .000    | -         | -       |
|           | PC       | 4.854     | .001    | 0.111     | .000    | -         | -       |
| 70:30     | MB       | 3.665     | .000    | 7.625     | .000    | 6.940     | .002    |
|           | PA       | 4.736     | .000    | 0.000     | .000    | 0.000     | .000    |
|           | PC       | 3.501     | .000    | 4.624     | .000    | 5.477     | .001    |
| 80:20     | MB       | 3.798     | .001    | 4.624     | .018    | 4.754     | .0138   |
|           | PA       | 0.232     | .000    | 2.206     | .000    | 1.179     | .000    |
|           | PC       | 4.602     | .001    | 1.594     | .002    | 4.452     | .001    |
| 90:10     | MB       | 6.242     | .000    | 7.268     | .001    | 4.777     | .001    |
|           | PA       | 2.562     | .000    | 0.236     | .000    | 2.576     | .000    |
|           | PC       | 7.692     | .000    | 1.382     | .000    | 2.571     | .000    |



## ประวัติผู้เขียน

|                     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|---------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ชื่อ                | นางสาวปิ่นมนัส วิโสรัมย์                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| วันเกิด             | วันที่ 3 มิถุนายน พ.ศ. 2538                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| สถานที่เกิด         | อำเภอชุมขันธ์ จังหวัดศรีสะเกษ                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| สถานที่อยู่ปัจจุบัน | บ้านเลขที่ 412 หมู่ 9 ตำบลเสม็ด อำเภอเมือง จังหวัดบุรีรัมย์ 31000                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| ประวัติการศึกษา     | พ.ศ. 2552 มัธยมศึกษาตอนต้น จากโรงเรียนบุรีรัมย์พิทยาคม<br>อำเภอเมืองบุรีรัมย์ จังหวัดบุรีรัมย์<br>พ.ศ. 2555 มัธยมศึกษาตอนปลาย จากโรงเรียนบุรีรัมย์พิทยาคม<br>อำเภอเมืองบุรีรัมย์ จังหวัดบุรีรัมย์<br>พ.ศ. 2559 ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (วท.บ.)<br>สาขาวิชาการจัดการสิ่งแวดล้อมและทรัพยากร<br>คณะสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม<br>จังหวัดมหาสารคาม<br>พ.ศ. 2563 ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วท.ม.)<br>สาขาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรศาสตร์<br>มหาวิทยาลัยมหาสารคาม จังหวัดมหาสารคาม |
| ทุนวิจัย            | พ.ศ. 2562 ทุนอุดหนุนการวิจัยเพื่อพัฒนานิสิตระดับบัณฑิตศึกษา<br>(ปริญญาโท) งบประมาณเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2562<br>มหาวิทยาลัยมหาสารคาม<br>พ.ศ. 2562 ทุนอุดหนุนการทำกิจกรรมส่งเสริมและสนับสนุนการวิจัย<br>ประเภทบัณฑิตศึกษา จากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.)<br>ปีงบประมาณ 2562<br>พ.ศ. 2562 ทุนสนับสนุนการนำเสนอผลงานวิจัยในต่างประเทศ<br>ในการประชุมวิชาการและนำเสนอผลงานวิจัยระดับนานาชาติ<br>(STISWB 2019) ครั้งที่ 11 ประจำปีงบประมาณ 2562<br>บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยมหาสารคาม                    |
| ผลงานวิจัย          | วิจิตรา สิงห์ศิริคุณุสรณ์, ปิ่นมนัส วิโสรัมย์ และเพชรรัตน์ บุญร่วม (2560).<br>การกระจายเชิงพื้นที่และศักยภาพของเชื้อเพลิงชีวภาพรุ่นที่สอง: กรณีศึกษา<br>วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรในจังหวัดมหาสารคาม. วารสารวิทยาศาสตร์และ                                                                                                                                                                                                                                                                                                |

เทคโนโลยี มหาวิทยาลัยมหาสารคาม: ฉบับพิเศษ, การประชุมทางวิชาการ  
มหาวิทยาลัยมหาสารคามวิจัย ครั้งที่ 13, 249-261

Pinmanas Wisoram and Wichitra Singhirunnusorn (2019)  
Potential of Utilizing Perennial Grasses as Feedstock for Biomass  
Power Plant. The 11th International Conference on Science,  
Technology and Innovation for Sustainable Well-Being (STISWB  
XI), Johor Bahru, Malaysia, July 29 - August 1, 2019

Pinmanas Wisoram and Wichitra Singhirunnuson (2019). Utilizing  
perennial grasses as feedstock for biomass power plant. In  
Proceedings of 2019 Workshop on Waste and Energy  
Management, June 12, 2019, Chiangmai, Thailand.

