

การเพิ่มคุณภาพวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร
ด้วยกระบวนการทอรีรีแฟคชัน



เจนจิรา อุตเรือน

ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานทดแทน
มหาวิทยาลัยแม่โจ้

พ.ศ. 2561

การเพิ่มคุณภาพวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร
ด้วยกระบวนการทอรีรีแฟคชัน



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของความสมบูรณ์ของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานทดแทน

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยแม่โจ้

พ.ศ. 2561

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยแม่โจ้

การเพิ่มคุณภาพวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร
ด้วยกระบวนการทอรีแฟคชัน

เจนจิรา อดิเรื่อน

วิทยานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของความสมบูรณ์ของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานทดแทน

พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษา

อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นิกราน หอมดวง)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐภูมิ ดุษฎี)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชูรัตน์ ธารารักษ์)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.

ประธานอาจารย์ประจำหลักสูตร

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สราวุธ พลวงษ์ศรี)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.

บัณฑิตวิทยาลัยรับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์ ดร.เกรียงศักดิ์ เม่งอำพัน)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.

| | |
|----------------------|---|
| ชื่อเรื่อง | การเพิ่มคุณภาพวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรด้วยกระบวนการทอรรีแฟคชัน |
| ชื่อผู้เขียน | นางสาวเจนจิรา อุดเรือน |
| ชื่อปริญญา | วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานทดแทน |
| อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก | ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นิกราน หอมดวง |

บทคัดย่อ

กระบวนการทอรรีแฟคชันเป็นการปรับปรุงคุณสมบัติทางเคมี ค่าความร้อนและความหนาแน่นทางพลังงานให้สูงขึ้น ประโยชน์ที่ได้จากกระบวนการนี้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ทั้งการเผาไหม้โดยตรงและการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง ซึ่งสามารถนำไปทดแทนการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลในอนาคตได้ งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มคุณภาพวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรประเภทฟางข้าวและต้นข้าวโพดด้วยกระบวนการทอรรีแฟคชัน โดยมีการประเมินและเปรียบเทียบคุณสมบัติทางเคมี ทางกายภาพ และค่าความร้อนของฟางข้าวและต้นข้าวโพดทั้งในรูปแบบกากและอัดเม็ด ภายใต้เงื่อนไขอุณหภูมิและเวลาทอรรีแฟคชัน 200-400 °C และ 10-60 min ตามลำดับ ช่วงท้ายของงานวิจัยได้มีการประเมินต้นทุนการใช้พลังงานในการผลิตเชื้อเพลิงทอรรีไฟด์ และการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อทำนายค่าความร้อนของเชื้อเพลิงทอรรีไฟด์ ผลการศึกษาพบว่า การใช้กระบวนการทอรรีแฟคชันสามารถเพิ่มคุณภาพคุณสมบัติทางเคมี ทางกายภาพ และค่าความร้อนของชีวมวลประเภทฟางข้าวและต้นข้าวโพดได้ โดยเงื่อนไขการทดสอบอุณหภูมิและเวลาทอรรีแฟคชันที่เหมาะสมของฟางข้าวและต้นข้าวโพดคือ อุณหภูมิ 200 °C และ 40 min สามารถเพิ่มค่าความร้อนให้สูงได้ 19.25% และ 11.6% ตามลำดับ การเพิ่มอุณหภูมิและเวลาทอรรีแฟคชันส่งผลให้ปริมาณองค์ประกอบชีวมวล และค่าความร้อนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยปริมาณความชื้นและสารระเหยลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิและเวลาทอรรีแฟคชัน ในขณะที่เดียวกันปริมาณคาร์บอนคงตัว เถ้า และค่าความร้อนจะเพิ่มขึ้น การผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากฟางข้าวและต้นข้าวโพดมีคุณสมบัติส่วนใหญ่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานเชื้อเพลิงอัดเม็ด การเปรียบเทียบเชื้อเพลิงทอรรีไฟด์อัดเม็ดและเชื้อเพลิงอัดเม็ดทอรรีไฟด์คุณสมบัติทางด้านความชื้นของเชื้อเพลิงทั้งสองเชื้อเพลิงใกล้เคียงกัน ในขณะที่ปริมาณสารระเหย คาร์บอนคงตัวและค่าความร้อนของเชื้อเพลิงทอรรีไฟด์อัดเม็ดสูงกว่าเชื้อเพลิงแบบอัดเม็ดทอรรีไฟด์ คุณสมบัติทางด้านกายภาพเชื้อเพลิงทอรรีไฟด์อัดเม็ดและเชื้อเพลิงอัดเม็ดทอรรีไฟด์ มีความยาวโดยเฉลี่ยของเชื้อเพลิงทั้งสองประเภทอยู่ในช่วง 2.5-3.5 cm ลักษณะผิวเป็นผิวเรียบ มันวาว สีน้ำตาลเข้มจนถึงอ่อน คุณสมบัติความหนาแน่นและดัชนีการแตกร่วนของเชื้อเพลิงทอรรีไฟด์อัดเม็ดสูงกว่า

เชื้อเพลิงอัดเม็ดทอร์รีไฟต์ ในขณะที่ความต้านทานแรงอัดและความต้านทานน้ำของเชื้อเพลิงอัดเม็ดทอร์รีไฟต์สูงกว่า สมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อทำนายค่าความร้อนของเชื้อเพลิง ภายใต้การปรับอุณหภูมิและเวลาทอร์รีแฟคชัน สามารถทำนายผลค่าความร้อนเชื้อเพลิงทอร์รีไฟต์ได้ดี มีค่า R-squared เฉลี่ยอยู่ในช่วง 0.9772-0.9890 การผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดทอร์รีไฟต์ของชีวมวลประเภทฟางข้าวและต้นข้าวโพด มีอัตราการใช้พลังงานไฟฟ้าโดยเฉลี่ยอยู่ในช่วง 783.78 - 839.53 kWh_e/Ton และอัตราการใช้พลังงานความร้อนของชีวมวลทั้งสองคือ 4,166.67 kWh_{th}/Ton ส่งผลให้การผลิตฟางข้าวและต้นข้าวโพดอัดเม็ดทอร์รีไฟต์มีต้นทุนทางพลังงานทั้งหมด 9,924.88 Baht/Ton และ 9,674.02 Baht/Ton ตามลำดับ

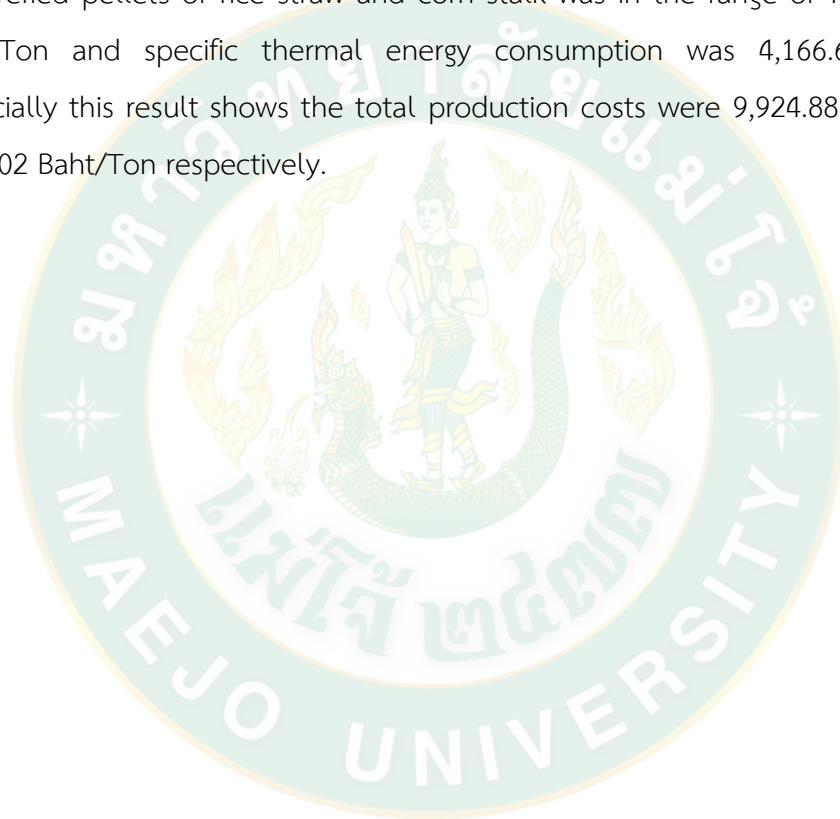


| | |
|--------------------------------------|--|
| Title | AGRICULTURAL WASTE UPGRADINGBY TORREFACTION PROCESS |
| Author | MissJenjira Uttareun |
| Degree | Master of Engineering in Renewable Energy Engineering |
| Advisor Committee Chairperson | Assistant Professor Dr.Nigran Homdoun |

ABSTRACT

Torrefaction process did improve the chemical properties, heating value and energy density of biomass. The benefits of this process was biomass torrefied could be used for both direct combustion and gasification. It could renew fossil fuel in the future. This research aims to improve the quality of agricultural waste such as rice straw and corn stalk by torrefaction process along with comparing chemical and physical properties and heating value of rice straw and corn stalk torrefied both with powder and pellet form under conditions of temperature and time range 200-400 °C and 10-60 min respectively. The final part of this research made energy costs assessment for the production of torrefied fuel, and made mathematical model for heating value prediction of torrefied fuel. The results of this study show that the torrefaction process could improve chemical and physical properties and heating value of rice straw and corn stalk. In appropriate torrefaction with temperature and time conditions being 200 °C and 40 min heating value could increase up to 19.25% and 11.6% respectively. By increasing torrefaction temperature and time the components of biomass and heating values tended to increase. When torrefaction temperature and time increases moisture and volatile content decreases. However fixed carbon, ash and heating value increases. Production of pellets from rice straw and corn stalk had more properties as standard passed pellets. Comparing between pellet torrefied fuel and torrefied pellet fuel moisture of both type of fuels were similar, while the content of volatile, fixed carbon and heating value of pellet torrefied fuel were higher than torrefied pellet fuel. Physical length properties of pellet torrefied fuel and

torrefied pellet fuel were in range 2.5-3.5 cm. It had smooth, glossy, and dark to light brown skin. Density and shatter index of pellet torrefied fuel were higher than torrefied pellet fuel, while compressive strength and water resistance of torrefied pellet fuel being higher than pellet torrefied fuel. Mathematical model equation for heating value prediction of torrefied fuel under adjustments of torrefaction temperature and time could predict the heating value of torrefied fuel as well. Average R-squared value was in range 0.9772-0.9890. The specific electrical energy consumption in the production of torrefied pellets of rice straw and corn stalk was in the range of 783.78 - 839.53 kWh_e/Ton and specific thermal energy consumption was 4,166.67 kWh_{th}/Ton. Financially this result shows the total production costs were 9,924.88 Baht/Ton and 9,674.02 Baht/Ton respectively.



กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิรินุช จินดารักษ์ ซึ่งได้ให้เกียรติเป็นประธาน กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ตลอดจนให้คำแนะนำในการปรับปรุงแก้ไขวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นิกราน หอมดวง ที่ได้รับเป็นประธานที่ปรึกษา วิทยานิพนธ์ที่ได้กรุณาให้ความรู้คำแนะนำ และให้คำปรึกษา ตลอดจนการดูแลเอาใจใส่จนวิทยานิพนธ์นี้ เสร็จสมบูรณ์ลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐวุฒิ ดุษฎี และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชูรัตน์ ธารารักษ์ ซึ่งได้ให้เกียรติเป็นที่ปรึกษาร่วมในการทำวิทยานิพนธ์ และให้คำแนะนำต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์ แก่การทำวิจัย รวมถึงตรวจแก้ไขรูปเล่มวิทยานิพนธ์นี้ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณอาจารย์ทุกท่าน และบุคลากรวิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ที่พร้อมให้คำแนะนำในหลาย ๆ ด้าน และเป็นกำลังใจจนทำให้สำเร็จการศึกษาไปด้วยดี

ขอขอบคุณวิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ที่ให้ทุนอุดหนุนการทำวิทยานิพนธ์ใน “โครงการผลิตและพัฒนาศัทยภาพบัณฑิตทางด้านพลังงานทดแทน ในกลุ่มประเทศอาเซียน ในระดับ บัณฑิตศึกษา” ครั้งนี้

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบคุณครอบครัว และเพื่อน ๆ ที่คอยให้ความช่วยเหลือสนับสนุน พร้อมทั้ง คำแนะนำ และเป็นกำลังใจจนทำให้สำเร็จการศึกษาไปด้วยดี

เจนจิรา อุตเวื่อน
พฤษภาคม 2561

สารบัญ

| | หน้า |
|---|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย..... | ค |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... | จ |
| กิตติกรรมประกาศ..... | ช |
| สารบัญ..... | ซ |
| สารบัญตาราง..... | ฅ |
| สารบัญภาพ..... | ญ |
| สารบัญตารางผนวก..... | ฎ |
| สารบัญภาพผนวก..... | ฏ |
| สัญลักษณ์และตัวห้อย..... | ฒ |
| บทที่ 1 บทนำ..... | 1 |
| ความสำคัญของปัญหา..... | 1 |
| วัตถุประสงค์การวิจัย..... | 3 |
| ขอบเขตของงานวิจัย..... | 3 |
| ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ..... | 3 |
| บทที่ 2 ทฤษฎีและการตรวจสอบเอกสาร..... | 4 |
| ชีวมวล..... | 4 |
| การเพิ่มความหนาแน่นด้วยการอัดเม็ดชีวมวล..... | 7 |
| กระบวนการทอรรีแฟคชัน..... | 12 |
| การวิเคราะห์องค์ประกอบเคมีและกายภาพชีวมวลทอรรีไฟต์..... | 15 |
| การตรวจสอบเอกสาร..... | 19 |
| บทที่ 3 อุปกรณ์และวิธีการวิจัย..... | 23 |
| วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย..... | 23 |

| | |
|---|-----|
| เครื่องมือวัดที่ใช้ในงานวิจัย..... | 36 |
| วิธีการทดสอบกระบวนการทอรีรีไฟเคชั่น..... | 39 |
| ไดอะแกรมภาพรวมการดำเนินงานวิจัย | 43 |
| บทที่ 4 ผลและอภิปรายผลการทดลอง..... | 47 |
| คุณสมบัติพื้นฐานเชื้อเพลิง..... | 47 |
| การศึกษากระบวนการอัดเม็ดเชื้อเพลิง..... | 48 |
| การศึกษากระบวนการทอรีรีไฟเคชั่นชีวมวลรูปแบบกาก..... | 56 |
| การวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีและทางกายภาพ เชื้อเพลิงอัดเม็ดทอรีรีไฟด์..... | 76 |
| การเปรียบเทียบคุณสมบัติเชื้อเพลิงทอรีรีไฟด์..... | 81 |
| การวิเคราะห์อัตราการใช้พลังงานการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดทอรีรีไฟด์..... | 84 |
| การวิเคราะห์ต้นทุนทางพลังงานการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดทอรีรีไฟด์..... | 86 |
| การประเมินศักยภาพเชื้อเพลิงทอรีรีไฟด์สำหรับประเทศไทย..... | 87 |
| บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ | 89 |
| สรุปผลการวิจัย..... | 89 |
| ข้อเสนอแนะ | 90 |
| บรรณานุกรม..... | 91 |
| ภาคผนวก | 92 |
| ภาคผนวก ก คุณสมบัติพื้นฐานของชีวมวล..... | 93 |
| ภาคผนวก ข ตารางผลการวิเคราะห์เชื้อเพลิงทอรีรีไฟด์ | 96 |
| ภาคผนวก ค การคำนวณหาคุณสมบัติของชีวมวล..... | 102 |
| ภาคผนวก จ การเผยแพร่ผลงานวิจัย..... | 106 |
| ประวัติผู้วิจัย..... | 124 |

สารบัญตาราง

| ตารางที่ | หน้า |
|--|------|
| 1 ศักยภาพของชีวมวลที่สำคัญในประเทศไทย ปี พ.ศ. 2556..... | 6 |
| 2 คุณลักษณะของเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดที่ต้องการสำหรับประเทศไทย | 10 |
| 3 มาตรฐานชีวมวลอัดเม็ด EN 14961-1:2010 ของยุโรป..... | 11 |
| 4 ผลผลิตมวลและพลังงาน (mass and energy yield) ของต้นหลิว (willow) หลังจากผ่านกระบวนการทอรรีไฟต์..... | 14 |
| 5 การวิเคราะห์โดยประมาณ และค่าความร้อนของฟางข้าวและต้นข้าวโพด | 24 |
| 6 การวิเคราะห์แบบขั้นสุดท้าย (ultimate analysis) ของฟางข้าวและต้นข้าวโพด | 25 |
| 7 คุณสมบัติพื้นฐานทางเคมีและทางกายภาพของชีวมวล..... | 48 |
| 8 การเปลี่ยนแปลงลักษณะของฟางข้าวอัดเม็ดตามอุณหภูมิและความชื้น..... | 49 |
| 9 การเปลี่ยนแปลงลักษณะของต้นข้าวโพดอัดเม็ดตามอุณหภูมิและความชื้น..... | 50 |
| 10 สรุปลักษณะสมบัติทางกายภาพของเชื้อเพลิงอัดเม็ด | 55 |
| 11 สรุปลักษณะสมบัติทางกายภาพเชื้อเพลิงทอรรีไฟต์อัดเม็ด | 75 |
| 12 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีของเชื้อเพลิงอัดเม็ดทอรรีไฟต์..... | 76 |
| 13 สรุปลักษณะสมบัติทางกายภาพของเชื้อเพลิงอัดเม็ดทอรรีไฟต์ | 80 |
| 14 ผลสรุปการวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีและค่าความร้อนของชีวมวลตั้งต้นและชีวมวลแบบกากทอรรีไฟต์ | 82 |
| 15 ผลสรุปการวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีและค่าความร้อนของชีวมวลตั้งต้นอัดเม็ดและชีวมวลแบบอัดเม็ดทอรรีไฟต์..... | 83 |
| 16 ผลสรุปการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของชีวมวลตั้งต้นอัดเม็ด ชีวมวลแบบกากทอรรีไฟต์อัดเม็ด และชีวมวลอัดเม็ดทอรรีไฟต์..... | 83 |
| 17 ข้อมูลสำหรับการประเมินศักยภาพชีวมวลของประเทศไทย ในปี พ.ศ. 2558 | 87 |

สารบัญญภาพ

| ภาพที่ | หน้า |
|---|------|
| 1 การเผาวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร..... | 2 |
| 2 การจำแนกแหล่งพลังงานชีวมวล | 5 |
| 3 เชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดจากต้นข้าวโพด | 7 |
| 4 เครื่องอัดเม็ดเชื้อเพลิง..... | 9 |
| 5 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง สี และคุณสมบัติทางเคมีของชีวมวล ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน ... | 13 |
| 6 ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการทอรรีฟแฟคชัน | 14 |
| 7 แสดงองค์ประกอบของเชื้อเพลิงชีวมวล | 17 |
| 8 ชีวมวลประเภทฟางข้าว | 24 |
| 9 ชีวมวลประเภทต้นข้าวโพด | 24 |
| 10 เครื่องบดย่อยชีวมวลแบบหยาบ | 25 |
| 11 เครื่องบดย่อยชีวมวลแบบละเอียด | 26 |
| 12 ตะแกรงคัดขนาดชีวมวล | 26 |
| 13 เครื่องอัดเม็ดชีวมวล | 27 |
| 14 ชุดควบคุมอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้..... | 28 |
| 15 ชุดวัดอุณหภูมิ (thermocouple)..... | 28 |
| 16 ห้องเผาไหม้ | 29 |
| 17 ชุดห้องเชื้อเพลิง..... | 29 |
| 18 ชุดระบายความร้อน..... | 29 |
| 19 ชุดอุปกรณ์การยึดและภาชนะบรรจุชีวมวล..... | 30 |
| 20 ชุดป้อนก๊าซไนโตรเจน | 30 |
| 21 เครื่องผลิตเชื้อเพลิงทอรรีไฟต์ | 31 |
| 22 ไตอะแกรมเครื่องผลิตเชื้อเพลิงทอรรีไฟต์..... | 31 |
| 23 เครื่องผลิตเชื้อเพลิงทอรรีไฟต์ระดับ Pilot scale..... | 32 |
| 24 เตาเผาอุณหภูมิสูง..... | 33 |
| 25 ตู้อบความชื้นชีวมวล | 33 |
| 26 โถดูดความชื้น..... | 34 |
| 27 ถ้วยกระเบื้อง | 34 |

| ภาพที่ | หน้า |
|--|------|
| 28 เครื่องวิเคราะห์ค่าความร้อนชีวมวล | 35 |
| 29 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด | 36 |
| 30 เครื่องชั่งน้ำหนัก | 36 |
| 31 เครื่องซังดิจิตอล Pioneer ทศนิยม 4 ตำแหน่ง..... | 37 |
| 32 เครื่องวัดความชื้นธัญพืช รุ่น MD-7822 | 37 |
| 33 เครื่องวัดอุณหภูมิแบบอินฟราเรด | 38 |
| 34 เวอร์เนียร์คาลิเปอร์ | 38 |
| 35 การป้อนชีวมวลเข้าเครื่องอัดเม็ด | 40 |
| 36 เครื่องวิเคราะห์ปริมาณธาตุ..... | 42 |
| 37 แผนการศึกษาเงื่อนไขที่เหมาะสมของกระบวนการทอรรีแฟคชัน..... | 44 |
| 38 แผนการศึกษากระบวนการทอรรีแฟคชันเชื้อเพลิงทอรรีไฟต์อัดเม็ด | 45 |
| 39 แผนการศึกษากระบวนการทอรรีแฟคชันของเชื้อเพลิงอัดเม็ดทอรรีไฟต์ | 46 |
| 40 ลักษณะกายภาพของชีวมวลอัดเม็ดจากฟางข้าว (a) และต้นข้าวโพด (b)..... | 51 |
| 41 ความหนาแน่นของเชื้อเพลิงอัดเม็ด | 52 |
| 42 ดัชนีการแตก่วนของเชื้อเพลิงอัดเม็ด | 53 |
| 43 ความต้านทานแรงอัดของเชื้อเพลิงอัดเม็ด..... | 54 |
| 44 ผลความต้านทานน้ำของเชื้อเพลิงอัดเม็ด | 55 |
| 45 ผลของความชื้นภายใต้กระบวนการทอรรีแฟคชันที่อุณหภูมิ 200-400 °C | 56 |
| 46 ผลของสารระเหยภายใต้กระบวนการทอรรีแฟคชัน | 57 |
| 47 ผลของคาร์บอนคงที่ภายใต้กระบวนการทอรรีแฟคชัน | 58 |
| 48 ผลของเถ้าภายใต้กระบวนการทอรรีแฟคชัน | 59 |
| 49 การเพิ่มขึ้นของระยะเวลาทอรรีแฟคชันที่มีต่อความชื้นชีวมวล..... | 60 |
| 50 การเพิ่มขึ้นของระยะเวลาทอรรีแฟคชันที่มีต่อสารระเหย | 61 |
| 51 การเพิ่มขึ้นของระยะเวลาทอรรีแฟคชันที่มีต่อคาร์บอนคงตัว | 62 |
| 52 การเพิ่มขึ้นของระยะเวลาทอรรีแฟคชันที่มีต่อปริมาณเถ้า..... | 63 |
| 53 ปริมาณมวลและพลังงานที่ได้ของเชื้อเพลิงทอรรีไฟล์จากฟางข้าว | 64 |
| 54 ปริมาณมวลและพลังงานที่ได้ของเชื้อเพลิงทอรรีไฟล์จากต้นข้าวโพด | 65 |
| 55 ค่าความร้อนของชีวมวลประเภทฟางข้าวและต้นข้าวโพด | 66 |
| 56 ค่าความร้อนของฟางข้าวทอรรีไฟต์เมื่อแปรผันอุณหภูมิ..... | 68 |
| 57 ค่าความร้อนต้นข้าวโพดทอรรีไฟต์เมื่อแปรผันอุณหภูมิ | 68 |

| ภาพที่ | หน้า |
|--------|---|
| 58 | ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด 70 |
| 59 | ฟางข้าวทอรรีไฟต์อัดเม็ด (a) และต้นข้าวโพดทอรรีไฟต์อัดเม็ด (b)..... 71 |
| 60 | ฟางข้าวอัดเม็ด (a) และต้นข้าวโพดอัดเม็ด (b) 72 |
| 61 | ผลความหนาแน่นของเชื้อเพลิงทอรรีไฟต์อัดเม็ด..... 72 |
| 62 | ผลดัชนีการแตกร่วนของเชื้อเพลิงทอรรีไฟต์อัดเม็ด 73 |
| 63 | ผลความต้านทานแรงอัดของเชื้อเพลิงทอรรีไฟต์ 74 |
| 64 | ผลความต้านทานน้ำของเชื้อเพลิงอัดเม็ดทอรรีไฟต์..... 75 |
| 65 | ผลความหนาแน่นของเชื้อเพลิงอัดเม็ดทอรรีไฟต์..... 77 |
| 66 | ผลดัชนีการแตกร่วนของเชื้อเพลิงอัดเม็ดทอรรีไฟต์..... 78 |
| 67 | ผลความต้านทานแรงอัดของเชื้อเพลิงอัดเม็ดทอรรีไฟต์..... 79 |
| 68 | ผลความต้านทานน้ำของเชื้อเพลิงอัดเม็ดทอรรีไฟต์..... 80 |
| 69 | ไดอะแกรมเครื่องมือและข้อมูลที่ใช้สำหรับวิเคราะห์อัตราการใช้พลังงาน 85 |
| 70 | การวิเคราะห์การใช้พลังงานการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดทอรรีไฟต์ 85 |
| 71 | การวิเคราะห์ต้นทุนทางพลังงานการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดทอรรีไฟต์..... 86 |
| 72 | การประเมินศักยภาพพลังงานทางความร้อนจากเชื้อเพลิงทอรรีไฟต์..... 88 |
| 73 | การประเมินความสามารถทดแทนน้ำมันดิบจากเชื้อเพลิงทอรรีไฟต์..... 88 |

สารบัญตารางผนวก

| ตารางผนวกที่ | | หน้า |
|--------------|--|------|
| 1 | ผลการวิเคราะห์ปริมาณความชื้นของต้นข้าวโพดและฟางข้าวทอรรีไฟต์..... | 102 |
| 2 | ผลการวิเคราะห์ปริมาณสารระเหยของต้นข้าวโพดและฟางข้าวทอรรีไฟต์..... | 103 |
| 3 | ผลการวิเคราะห์ปริมาณเถ้าของต้นข้าวโพดและฟางข้าวทอรรีไฟต์..... | 104 |
| 4 | ผลการวิเคราะห์ปริมาณคาร์บอนคงตัวของต้นข้าวโพดและฟางข้าวทอรรีไฟต์.... | 105 |
| 5 | ผลการวิเคราะห์ค่าความร้อนของต้นข้าวโพดและฟางข้าวทอรรีไฟต์ | 106 |



สารบัญภาพผนวก

| ภาพผนวกที่ | | หน้า |
|------------|---------------------------------------|------|
| 1 | ใบงานงานผลการวิเคราะห์โดยประมาณ | 99 |
| 2 | ใบรายงานผลการวิเคราะห์โดยประมาณ | 100 |



สัญลักษณ์และตัวห้อย

| สัญลักษณ์ | ความหมาย | หน่วย |
|-----------|--|-------|
| A | น้ำหนักตัวอย่างก่อนการทดสอบ | g |
| B | น้ำหนักตัวอย่างหลังการทดสอบ | g |
| MC | ปริมาณความชื้นของชีวมวล | % |
| W_L | ปริมาณน้ำหนักของชีวมวลที่หายไป | % |
| VC | ปริมาณสารระเหยของชีวมวล | % |
| FC | ปริมาณคาร์บอนคงตัวของชีวมวล | % |
| A_{sh} | ปริมาณเถ้าของชีวมวล | % |
| HHV | ค่าความร้อนสูงของชีวมวล | MJ/kg |
| LHV | ค่าความร้อนต่ำของชีวมวล | MJ/kg |
| M | ปริมาณร้อยละของความชื้นในชีวมวล | % |
| C | ธาตุคาร์บอน | |
| H | ธาตุไฮโดรเจน | |
| O | ธาตุออกซิเจน | |
| N | ธาตุไนโตรเจน | |
| S | ธาตุกำมะถัน | |
| H/C | อัตราส่วนระหว่างไฮโดรเจนและคาร์บอน | |
| O/C | อัตราส่วนระหว่างออกซิเจนและคาร์บอน | |
| N_2 | ก๊าซไนโตรเจน | |
| T | อุณหภูมิเทอร์รีแฟคชัน | °C |
| t | เวลาเทอร์รีแฟคชัน | min |
| RC200 | ฟางข้าวผ่านกระบวนการเทอร์รีแฟคชันที่ 200 °C | |
| RC400 | ฟางข้าวผ่านกระบวนการเทอร์รีแฟคชันที่ 400 °C | |
| CS200 | ต้นข้าวโพดผ่านกระบวนการเทอร์รีแฟคชันที่ 200 °C | |
| CS400 | ต้นข้าวโพดผ่านกระบวนการเทอร์รีแฟคชันที่ 200 °C | |
| RC | ฟางข้าว | |
| CS | ต้นข้าวโพด | |

บทที่ 1

บทนำ

ความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันพลังงานจากฟอสซิลทั่วโลกมีแนวโน้มที่จะลดลงเรื่อย ๆ ซึ่งสวนทางกับการใช้พลังงานของโลกที่มีอัตราเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยน้ำมันถือเป็นพลังงานที่มีการใช้มากที่สุดเป็นอันดับหนึ่ง อันดับที่สองคือ ก๊าซธรรมชาติ รองลงมาคือถ่าน จากการคาดการณ์สถานการณ์พลังงานอีก 20 ปีข้างหน้า (ค.ศ.2035) คาดว่าโลกจะมีความต้องการใช้พลังงานเพิ่มขึ้นประมาณ 41% จากปี 2012 ถึง 2035 โดยเฉลี่ยจะเพิ่มขึ้น 1.5% ต่อปี ปัจจัยหลักของการเพิ่มขึ้นมาจากการพัฒนาเศรษฐกิจของประเทศอุตสาหกรรมใหม่ต่างๆ เช่น จีน เป็นต้น โดยที่ประเทศอุตสาหกรรมหรือประเทศพัฒนาแล้วเดิม เช่น กลุ่มประเทศ OECD (Organization for European Economic Cooperation) เป็นต้น มีการใช้พลังงานไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก สำหรับการเพิ่มการใช้พลังงานภาคอุตสาหกรรมยังคงเป็นส่วนที่ใช้พลังงานมากที่สุด และมีอัตราการเติบโตมากที่สุด ทั้งส่วนที่เป็นการใช้ทางตรงหรือทางอ้อม (ผลิตกระแสไฟฟ้า) ส่วนถ้าพิจารณาตามแหล่งพลังงานพบว่าการใช้เพิ่มขึ้นในทุกแหล่งพลังงาน แต่มีอัตราการเพิ่มที่แตกต่างกัน แหล่งพลังงานยุคใหม่ที่มีอัตราการเพิ่มขึ้นสูง คือ พลังงานทดแทน ถึงแม้จะยังมีสัดส่วน แต่เมื่อเปรียบเทียบกับพลังงานทั้งหมดแล้วยังไม่สูงมากนัก (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2558ข) อย่างไรก็ตามประเทศไทยโดยกระทรวงพลังงานได้ตระหนักถึงปัญหา ได้มีการจัดหาแหล่งพลังงานหมุนเวียนในประเทศให้เป็นแหล่งพลังงานหลักและได้จัดทำแผนพัฒนาพลังงานทดแทน 20 ปี (พ.ศ. 2558–2579) เพื่อเพิ่มศักยภาพและสัดส่วนการใช้พลังงานทดแทนในประเทศไทย โดยพลังงานทดแทนประกอบด้วยที่พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม พลังงานน้ำ พลังงานชีวมวล และพลังงานความร้อนใต้พิภพ (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2558ก)

ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรม ประชากรส่วนใหญ่ประกอบอาชีพเป็นเกษตรกร ผลพลอยได้ที่สำคัญนอกเหนือจากผลผลิตการเกษตรแล้วก็คือ เศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร เช่น ฟางข้าว แกลบ ชานอ้อย เศษไม้ ก้านข้าวโพด ชังข้าวโพด ทะลายปาล์ม มันสำปะหลัง และกะลามะพร้าว เป็นต้น ซึ่งเศษวัสดุชีวมวลเหล่านี้ที่มีปริมาณค่อนข้างมาก เกษตรกรและชุมชนบางส่วนได้มีการจัดการกับเศษวัสดุเหลือทิ้งอย่างผิดวิธี โดยการนำมาเผา จึงทำให้เกิดปัญหาหมอกควันพิษฝุ่นละออง และหมอกควัน ผลที่ตามมาคือการทำลายสิ่งแวดล้อม หน้าที่ดินเสื่อมสภาพ และสูญเสียแร่ธาตุในดิน หากพิจารณาในด้านพลังงาน วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรเหล่านี้เหมาะสำหรับนำมาผ่านกระบวนการ

แปรรูปให้เป็นพลังงานรูปแบบต่าง ๆ ได้ ดังนั้นพลังงานจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร จึงเป็นพลังงานทดแทนที่น่าสนใจอีกทางหนึ่ง การใช้ประโยชน์จากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรสามารถทำให้เป็นพลังงานความร้อนได้หลายวิธี เช่น การนำมาเผาไหม้โดยตรง และการสร้างให้เป็นแก๊สเชื้อเพลิง เกิดเป็นกระบวนการทำแก๊สซิฟิเคชัน เป็นต้น การนำมาเผาไหม้โดยตรงจะให้ประสิทธิภาพความร้อนต่ำ ส่วนการนำมาใช้กับกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันจะประสบปัญหาในเรื่องของทาร์ (Tar) ซึ่งส่งผลกระทบต่ออุปกรณ์หรือชิ้นส่วนต่าง ๆ ให้เกิดความเสียหาย เชื้อเพลิงบางชนิดมีความหนาแน่นต่ำ ไม่สามารถนำมาใช้ได้โดยตรง จำเป็นที่จะต้องมีการเพิ่มความหนาแน่นให้กับเชื้อเพลิงก่อนนำไปใช้ ดังนั้นหากสามารถเพิ่มคุณภาพให้กับวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรเหล่านี้ได้ น่าจะส่งผลให้มีการใช้ชีวมวลกันอย่างแพร่หลาย และสอดคล้องกับนโยบายพลังงานทดแทนของรัฐบาล



ภาพที่ 1 การเผาวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร

กระบวนการเทอร์รีแฟคชันหรือกระบวนการไพโรไลซิสในเชื้อเพลิงอัดเม็ด เป็นกระบวนการปรับปรุงคุณสมบัติของชีวมวล คือ การลดความชื้น ลดปริมาณทาร์ การเพิ่มค่าความร้อนและความหนาแน่นให้กับชีวมวล ประโยชน์ที่ได้จากกระบวนการนี้จะทำให้การนำเอาชีวมวลไปใช้ประโยชน์ทั้งการเผาไหม้ตรงและการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง สามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่อง มีประสิทธิภาพความร้อนสูงขึ้น สามารถนำไปทดแทนการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลได้ในอนาคต ดังนั้นในโครงการวิจัยนี้จึงสนใจในการเพิ่มคุณภาพวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรที่เป็นปัญหาในเรื่องการเผาในปัจจุบัน ซึ่งได้แก่ ฟางข้าว และข้าวโพด โดยมีการศึกษาลักษณะชีวมวลที่เป็นแบบกากและแบบเชื้อเพลิงอัดเม็ด ที่ช่วงอุณหภูมิ 200–400 °C โดยศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพ ทางเคมี และโครงสร้างของชีวมวลที่เปลี่ยนไป ตลอดจนต้นทุนสำหรับการผลิตเป็นเชื้อเพลิงอัดเม็ดประเภทเทอร์รีไฟด์ ผลที่ได้จะทำให้ประเทศไทยเกิดความมั่นคงทางด้านพลังงานมากขึ้นในอนาคต

วัตถุประสงค์การวิจัย

1. เพื่อเพิ่มคุณภาพเชื้อเพลิงและเชื้อเพลิงอัดเม็ดทอร์รีไฟด์จากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร
2. เพื่อประเมินและเปรียบเทียบคุณสมบัติเชื้อเพลิงและเชื้อเพลิงอัดเม็ดประเภททอร์รีไฟด์จากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร
3. เพื่อสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการทอร์รีแฟคชันจากการทดลอง (Empirical model)
4. เพื่อวิเคราะห์ต้นทุนเศรษฐศาสตร์สำหรับการผลิตเชื้อเพลิงทอร์รีไฟด์อัดเม็ดเทียบคุณสมบัติของเชื้อเพลิงที่ผ่านกระบวนการทอร์รีแฟคชันในรูปแบบกาก

ขอบเขตของงานวิจัย

1. ศึกษาคุณสมบัติของวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรที่เป็นต้นเหตุของการเผาไหม้ ได้แก่ ฟางข้าวและต้นข้าวโพด
2. อุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการทอร์รีแฟคชันอยู่ในช่วง 200-400 °C
3. เวลาที่ใช้ในกระบวนการทอร์รีแฟคชันอยู่ในช่วง 10-60 min
4. ทดสอบกระบวนการทอร์รีแฟคชันภายใต้บรรยากาศที่ใช้ก๊าซไนโตรเจนหรือก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์
5. ศึกษาลักษณะเชื้อเพลิงในรูปแบบกากและแบบอัดเม็ด
6. มวลตัวอย่างที่ใช้ทดสอบอยู่ในช่วง 10-100 g/ครั้งการทดสอบ

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้เชื้อเพลิงอัดเม็ดทอร์รีไฟด์จากฟางข้าวและต้นข้าวโพด ที่มีคุณสมบัติทางพลังงานที่เพิ่มขึ้น
2. ได้กระบวนการผลิตเชื้อเพลิงประเภททอร์รีไฟด์ที่เหมาะสม
3. ได้ข้อมูลต้นทุนและการใช้พลังงานในการผลิตเชื้อเพลิงประเภททอร์รีไฟด์

บทที่ 2

ทฤษฎีและการตรวจสอบเอกสาร

หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ได้กล่าวถึงพลังงานชีวมวลโดยรวมในประเทศไทย การเพิ่มความหนาแน่นหรือการอัดเม็ดชีวมวล กระบวนการเทอร์รีแฟคชัน และการวิเคราะห์องค์ประกอบของเชื้อเพลิงอัดเม็ดประเภทเทอร์รีไฟด์ ซึ่งแต่ละหัวข้อแสดงรายละเอียดดังต่อไปนี้

ชีวมวล

ชีวมวลเป็นแหล่งกักเก็บพลังงานหมุนเวียนที่กักเก็บพลังงานจากดวงอาทิตย์ซึ่งมาจากการสังเคราะห์ด้วยแสง และเกิดขึ้นหมุนเวียนซ้ำได้อีกในธรรมชาติ สามารถนำมาผลิตพลังงานเพื่อใช้ทดแทนพลังงานที่ได้จากแหล่งพลังงานฟอสซิล ซึ่งมีอยู่อย่างจำกัดและอาจหมดลงได้ในอนาคต ชีวมวลอาจมองว่าเป็นสารอินทรีย์ที่ได้จากสิ่งมีชีวิต พืช และสัตว์ หรือกระบวนการทางชีวภาพที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ มีความหลากหลายของรูปแบบและลักษณะเฉพาะแหล่งตามความหลากหลายและซับซ้อนทางชีววิทยาและสภาพสิ่งแวดล้อม ชีวมวลเป็นพลังงานที่มาจากแหล่งที่ไม่มีวันหมด เพราะวงจรการผลิตชีวมวลคือวงจรของพืชที่มีระยะเวลาสั้น ต่างจากน้ำมันหรือถ่านหินที่ต้องอาศัยการทับถมกันเป็นเวลาหลายล้านปี น้ำจากชีวมวลสามารถผลิตได้ภายในประเทศ เกษตรกรจึงมีรายได้เพิ่มขึ้นจากการจำหน่ายชีวมวลสู่ผู้ใช้ และยังช่วยลดการนำเข้าพลังงานจากต่างประเทศได้อีกด้วย ข้อดีต่อสิ่งแวดล้อมที่สำคัญคือ การใช้ชีวมวลในการผลิตความร้อนหรือไฟฟ้าไม่เพิ่มปริมาณสิทธิของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศโลก ในกรณีที่เรามีการผลิตชีวมวลขึ้นมาเพื่อทดแทนชีวมวลที่ใช้ไป เพราะก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะถูกหมุนเวียนมาใช้ในชีวมวลที่ผลิตใหม่เท่ากับปริมาณก๊าซที่ถูกผลิตจากการเผาไหม้ชีวมวลนั้น ๆ เนื่องจากพืชต้องหายใจเพื่อเอาก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เข้าไปใช้ในการเจริญเติบโต อีกทั้งชีวมวลยังมีปริมาณกำมะถันต่ำกว่าเชื้อเพลิงฟอสซิลเป็นอย่างมาก นั้นหมายความว่า การใช้ชีวมวลจะลดโอกาสในการเกิดปรากฏการณ์เรือนกระจก (greenhouse effect) ซึ่งตรงกันข้ามกับการใช้น้ำมันในภาคขนส่งหรือการในถ่านหินในโรงไฟฟ้า (นคร, 2552)

ชีวมวลประกอบด้วยธาตุหลัก ๆ คือ คาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน รวมทั้งปริมาณของไนโตรเจน และธาตุอื่น ๆ แหล่งชีวมวลมีอยู่มากมายโดยทั่วไปสามารถจำแนกออกเป็น 3 ประเภทหลัก ๆ คือ ชีวมวลแบบไม้ (woody) แบบไม่ใช่ไม้ (non woody) และของเสียจากสัตว์ ซึ่งมาจากแหล่งที่มาต่าง ๆ ดังภาพที่ 2 ดังนี้ (นคร, 2552)

- ผลผลิตจากป่า ไร่ นา สวน ต้นไม้ และวัชพืชต่าง ๆ ทั้งบนบกและในน้ำ เช่น ไม้เนื้อแข็ง ไม้เนื้ออ่อน ไม้โตเร็ว ใบไม้ กิ่งไม้ หญ้า พืชล้มลุก จากส่วนเมล็ด เปลือก ผล และจากมวลสารห้ำย พืชน้ำ เป็นต้น
- ผลผลิตจากพืชเศรษฐกิจ เศษวัสดุเหลือทิ้งจากการเกษตร เช่น ข้าว อ้อย มันสำปะหลัง ข้าวโพด ปาล์มน้ำมัน แกลบ ฟาง ชังข้าวโพด เป็นต้น
- เศษวัสดุและของเสียจากระบบการและการประกอบการของภาคอุตสาหกรรม เช่น ขี้เลื่อย กลิเซอร์ลิน สำเหล้า กากอาหาร รวมไปถึงของเสียจากโรงงานแปรรูป ของเสียประเภทพลาสติก และกากตะกอนจากโรงบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรม
- ของเสียจากแหล่งชุมชน เช่น ขยะชุมชน กากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชน
- ผลิตภัณฑ์และของเสียจากสัตว์ เช่น ไขมัน มูลสัตว์ เป็นต้น



ภาพที่ 2 การจำแนกแหล่งพลังงานชีวมวล

ที่มา: Zafar (2016)

แหล่งพลังงานชีวมวลปฐมภูมิที่ชัดเจน ได้แก่ ไม้พื้น ซึ่งมีความสะดวกในการใช้และมีการใช้กันอย่างแพร่หลาย โดยเฉพาะชนบท แหล่งที่มีของไม้พื้นเหล่านี้หาได้ตามป่าไม้ พื้นที่ป่ากร้าง ป่าปลูก และต้นไม้วัดตามห้วยไร่ปลายนา ซึ่งจะเป็นส่วนลำต้น กิ่ง ก้าน ใบ เป็นต้น (นคร, 2552) ส่วนชีวมวลจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรเป็นแหล่งพลังงานชีวมวลทุติยภูมิ ได้แก่ เศษกากจากระบบการในโรงงาน ชีวมวลจากสัตว์เลี้ยง หรือจากชีวมวลที่ผ่านกระบวนการแปลงสภาพมาแล้ว ซึ่งปริมาณชีวมวลจากเศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรที่ผลิตภายในประเทศจะแปรผันและขึ้นอยู่กับปริมาณผลผลิตทางการเกษตรของประเทศ ตารางที่ 1 แสดงศักยภาพชีวมวลของพืชเศรษฐกิจของ

อ้อย ข้าว ข้าวโพดปาล์มน้ำมัน มันสำปะหลัง มะพร้าว และยางพารา โดยพบว่าชีวมวลจากข้าวให้ปริมาณชีวมวลเหลือทิ้งสูงสุด ถัดมาเป็นชีวมวลจากอ้อย มันสำปะหลัง ปาล์มน้ำมันและซังข้าวโพด ตามลำดับ ตัวเลขชีวมวลที่เหลือทิ้งทั้งหมดของประเทศไทยเฉลี่ย $59,539 \times 10^3$ ตัน/ปี โดยค่าความร้อนของชีวมวลแต่ละประเภทอยู่ในช่วง 9.83-18.46 MJ/kg ซึ่งวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรเหล่านี้สามารถนำมาปรับปรุงคุณภาพทั้งทางด้านเคมีและด้านกายภาพ เพื่อผลิตและใช้เป็นพลังงานทดแทนจากแหล่งเชื้อเพลิงฟอสซิลได้ สำหรับศักยภาพของการผลิตชีวมวลในประเทศไทยจะประเมินจากผลคูณของปริมาณผลผลิตทางการเกษตรที่ก่อให้เกิดชีวมวลนั้นๆ กับสัดส่วนของการเปลี่ยนแปลงปริมาณผลผลิตเป็นปริมาณชีวมวล โดยศักยภาพชีวมวลมีค่าเฉลี่ย 504×10^3 TJ ซึ่งสามารถทดแทนน้ำมันดิบได้ 12×10^3 ktoe

ตารางที่ 1 ศักยภาพของชีวมวลที่สำคัญในประเทศไทย ปี พ.ศ. 2556

| ชนิด | ผลผลิต ($\text{ton} \times 10^3$) | ชีวมวล | ชีวมวลเหลือทิ้ง ($\text{ton} \times 10^3$) | ค่าความร้อน (MJ/kg) | ศักยภาพพลังงาน | |
|-------------|--|------------|---|------------------------|-----------------------------|-------------------------------|
| | | | | | ($\text{TJ} \times 10^3$) | ($\text{ktoe} \times 10^3$) |
| อ้อย | 66,816.4 | ชานอ้อย | 4,190.8 | 14.40 | 60.3 | 1.4 |
| | | ยอดและใบ | 13,439.7 | 17.39 | 233.7 | 5.5 |
| ข้าว | 31,508.3 | แกลบ | 3,510.6 | 14.27 | 50.1 | 1.2 |
| | | ฟางข้าว | 25,646.5 | 10.24 | 262.6 | 6.2 |
| ข้าวโพด | 4,616.1 | ซัง | 584.5 | 18.04 | 10.5 | 0.2 |
| | | ลำต้น | 2,758.8 | 18.04 | 49.8 | 1.2 |
| | | ทะลายเปล่า | 1,024.9 | 17.86 | 18.3 | 0.4 |
| ปาล์มน้ำมัน | 8,162.4 | ใย | 163.0 | 17.62 | 2.9 | 0.1 |
| | | กะลา | 38.9 | 18.46 | 0.7 | 0.02 |
| | | ก้าน | 2,203.7 | 9.83 | 21.8 | 0.5 |
| มันสำปะหลัง | 30,088.0 | ลำต้น | 2,439.2 | 18.42 | 44.9 | 1.1 |
| | | เหง้า | 1,834.5 | 18.42 | 33.8 | 0.8 |
| | | ก้าน | 629.0 | 15.40 | 9.7 | 0.2 |
| มะพร้าว | 1,381.0 | กาบ | 464.2 | 16.23 | 7.5 | 0.2 |
| | | กะลา | 128.9 | 17.93 | 2.3 | 0.1 |
| ไม้ยางพารา | 3,090.3 | กิ่ง/ก้าน | 312.1 | 14.98 | 4.7 | 0.1 |
| รวม | 145,853.1 | | 59,539.9 | | 504.3 | 12.0 |

ที่มา: กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (2556)

การเพิ่มความหนาแน่นด้วยการอัดเม็ดชีวมวล

การใช้ประโยชน์จากชีวมวลหรือวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรนั้นค่อนข้างทำได้ยาก เนื่องจากชีวมวลมีคุณสมบัติและลักษณะที่มีความหลากหลาย ไม่สม่ำเสมอ โดยเฉพาะปัญหาด้านคุณสมบัติความหนาแน่นของชีวมวลที่มีค่าค่อนข้างต่ำ ดังนั้นการนำชีวมวลมาใช้ประโยชน์จึงจำเป็นต้องนำชีวมวลมาผ่านกระบวนการเพิ่มความหนาแน่น (densification) การอัดเม็ดเชื้อเพลิงเป็นอีกแนวทางหนึ่งในการเพิ่มความหนาแน่นให้กับเชื้อเพลิง และยังได้รับความสนใจเนื่องจากมีต้นทุนที่ต่ำ (อิธิพงษ์ และคณะ, 2558) การศึกษาการเพิ่มความหนาแน่นการอัดเม็ดชีวมวลในหัวข้อนี้ประกอบด้วย ศึกษา กลไกการเกาะตัว การเตรียมวัตถุดิบ การอัดเม็ดชีวมวล ปัจจัยที่มีผลต่อการอัดเม็ดชีวมวล และมาตรฐานเชื้อเพลิงอัดเม็ด ซึ่งรายละเอียดของแต่ละหัวข้อแสดงดังต่อไปนี้



ภาพที่ 3 เชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดจากต้นข้าวโพด

1. กลไกการเกาะตัว

การอัดแน่นเป็นเทคโนโลยีที่มีใช้มานาน แต่กลไกในการอัดเม็ดชีวมวลทำให้เกิดการเกาะตัวกันของเนื้อวัสดุยังไม่ชัดเจนมากนัก ดังนั้นจึงได้มีการเสนอแนวคิดเกี่ยวกับการเกาะตัวกันของเนื้อวัสดุ (Self bonding) 3 ประการ (นคร, 2552) ดังนี้

จากอิทธิพลของแรงกดอัด ทำให้เพคติน (Pectin) และสารโมเลกุลต่ำอื่นๆ ในเนื้อวัสดุชีวมวลถูกขับออกมาจากเซลล์ของเนื้อไม้ และทำหน้าที่เสมือนตัวเป็นตัวประสานระหว่างเนื้อวัสดุชีวมวล

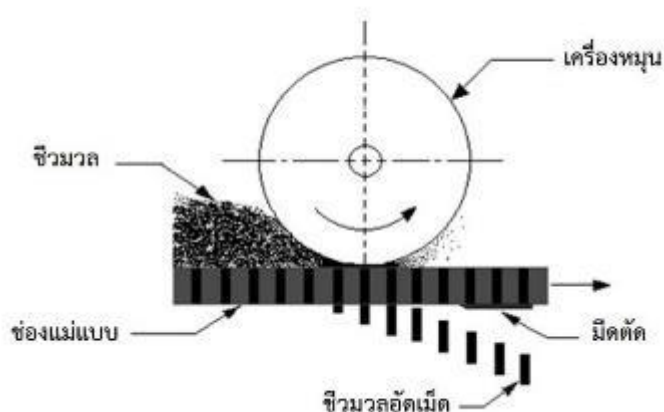
1. ลิกนิน (Lignin) เป็นองค์ประกอบสำคัญของชีวมวลส่วนใหญ่ เกิดการอ่อนตัวที่อุณหภูมิระหว่าง 130-190 °C หากมีผลกระทบจากน้ำในเนื้อชีวมวล จะทำให้ย่านการอ่อนตัวของลิกนินลดลงไปที่อุณหภูมิต่ำกว่า 100 °C ได้ เป็นที่เชื่อกันว่า ลิกนินที่อ่อนตัวจะเป็นตัวสร้างการยึดเกาะขึ้นภายในเนื้อวัสดุระหว่างการอัดแน่นชีวมวล แล้วนำไปสู่การเกาะตัวกันของเนื้อเชื้อเพลิง
2. การเกาะตัวกันของเนื้อวัสดุที่ถูกบีบอัดอาจจะมาจากรวมกันของแรงยึดติดของผลิตภัณฑ์จากเฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) ที่สลายตัวแปรสภาพระหว่างกระบวนการ

2. การเตรียมวัตถุดิบ

ปัจจัยที่สำคัญในการอัดแน่นชีวมวลคือ ปริมาณความชื้นของวัตถุดิบชีวมวลที่ใช้ เนื่องจากความชื้นมีส่วนทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนได้ดี ความชื้นที่ต่ำเกินไปก็จะทำให้กระบวนการบีบอัดทำได้ยาก เนื่องจากไม่เกิดการถ่ายเทความร้อนที่เหมาะสม หากความชื้นสูงเกินไปอาจทำให้เกิดไอน้ำขึ้นระหว่างกระบวนการ และส่งผลให้เกิดการปะทุระเบิดได้ โดยทั่วไปปริมาณความชื้นสูงสุดควรอยู่ในช่วง 10-20% หรือถ้าจะให้ดีควรอยู่ระหว่าง 8-12% ขนาดของชีวมวลก็เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่สำคัญต่อการเพิ่มความหนาแน่นชีวมวลหรือการอัดเม็ดชีวมวล เนื่องจากขนาดวัตถุดิบที่ป้อนเข้าอุปกรณ์เครื่องจักรสำหรับการอัดเม็ดควรมีขนาดไม่เกิน 25% ของเส้นผ่านศูนย์กลางของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ต้องการ ซึ่งการลดขนาดชีวมวลทำได้โดยการบดย่อยด้วยค้อนบด (hammer mill) แต่ชีวมวลบางชนิดอาจต้องมีการสกัดเป็นชิ้นเล็ก ๆ ก่อน เช่น กิ่งไม้ ฟางข้าว ทางใบปาล์ม และต้นข้าวโพด เป็นต้น (นคร, 2552)

3. การอัดเม็ดชีวมวล

เครื่องอัดเม็ด (Pelletizing press) ประกอบด้วยแม่พิมพ์และลูกกลิ้ง ซึ่งแรงอัดระหว่างแม่พิมพ์กับลูกกลิ้งทำให้เกิดความร้อนจากแรงเสียดสีและทำการอัดวัตถุดิบผ่านแม่พิมพ์ที่เจาะเป็นรูดังภาพที่ 4 เครื่องอัดเม็ดมี 2 แบบ คือ เครื่องอัดแบบแม่พิมพ์แผ่นกลม (Disk matrix press) และเครื่องอัดแม่พิมพ์วงแหวน (Ring matrix press) แ่งเม็ดชีวมวลที่ถูกอัดออกมาแล้วจะถูกตัดด้วยใบมีดตามขนาดความยาวที่กำหนดไว้ โดยปกติจะมีความยาวน้อยกว่า 30 mm และมีเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในช่วง 5-15 mm ถ้าแ่งอัดมีขนาดใหญ่กว่านี้แล้วจะใช้การอัดเป็นลูกบาศก์แทนการอัดเม็ด (ทองทิพย์, 2552; นคร, 2552) การใช้ประโยชน์จากชีวมวลอัดเม็ด ได้แก่ การให้ความร้อนแก่ที่อยู่อาศัยในประเทศเขตอบอุ่น และใช้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตไฟฟ้าสำหรับโรงไฟฟ้าหรืออุตสาหกรรมต่าง ๆ เนื่องจากชีวมวลอัดเม็ดมีข้อดีคือ ให้ความร้อนสูงกว่าชีวมวลอื่น ขนส่งได้สะดวก เนื่องจากมีความหนาแน่นสูง มีเขี้ยวเล็กน้อย และยังมีผลเสียต่อสิ่งแวดล้อมน้อยมาก (ฉัญพิสิษฐ์, 2558)



ภาพที่ 4 เครื่องอัดเม็ดซีวมวล

4. ปัจจัยที่มีผลต่ออัดเม็ดซีวมวล

ปัจจัยที่มีผลต่อการเพิ่มความหนาแน่นซีวมวลด้วยวิธีการอัดเม็ดนั้นมีอยู่หลากหลายปัจจัย เนื่องจากซีวมวลแต่ละประเภทมีคุณสมบัติและลักษณะที่แตกต่างกัน ซึ่งมีอยู่ 4 ปัจจัยที่สำคัญ (นคร, 2552) ดังต่อไปนี้

1. ปริมาณความชื้นในวัตถุดิบซีวมวลเป็นปัจจัยสำคัญในการเพิ่มความหนาแน่น เนื่องด้วยความชื้นช่วยในการถ่ายเทความร้อน หากมีปริมาณต่ำเกินไปจะทำให้การเพิ่มความหนาแน่นเป็นไปได้ยากเนื่องจากการถ่ายเทความร้อนไม่ดี นอกจากนี้ความชื้นยังช่วยสร้างพันธะระหว่างเนื้อซีวมวลขณะการอัด และมีส่วนช่วยให้ลิกนินเคลื่อนที่ได้ดี แต่หากปริมาณความชื้นสูงเกินไป จะส่งผลให้เกิดไอน้ำและการปะทุระเบิดขึ้นในระหว่างการอัด โดยปริมาณความชื้นที่เหมาะสมควรอยู่ในช่วง 8-12%
2. ขนาดซีวมวลก็เป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญต่อการเพิ่มความหนาแน่น ขนาดซีวมวลที่เล็กจะทำให้ง่ายต่อการอัด และเพิ่มความหนาแน่นให้มากขึ้นได้ง่าย เนื่องจากซีวมวลที่มีขนาดเล็กจะมีพื้นที่ผิวสัมผัสสำหรับการสร้างพันธะยึดเกาะกันได้มาก และทำให้กระบวนการอัดทำได้เร็วขึ้น
3. อุณหภูมิที่เกิดขึ้นภายในงานหมุนของเครื่องอัดเม็ดนั้นมีผลต่อการขึ้นรูปเป็นเม็ดซีวมวลเป็นอย่างมาก เนื่องจากอุณหภูมิที่สูงจะส่งผลให้ซีวมวลบางส่วนเกิดการสลายตัว และปล่อยสารระเหยกลุ่มยางเหนียว ทำให้การยึดเกาะของเนื้อซีวมวลเพิ่มสูงขึ้น
4. ผลของความดันจะมีผลต่อความหนาแน่นของซีวมวลอัดเม็ด โดยความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับความหนาแน่นเป็นแบบเชิงเส้น (Kaliyan and Morey, 2009)

5. มาตรฐานเชื้อเพลิงอัดเม็ด

สำหรับในประเทศไทยได้มีการศึกษากำหนดมาตรฐานของ Biomass Pellet เพื่อจัดทำมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมเชื้อเพลิงอัดเม็ด โดยสำนักวิจัยค้นคว้าพลังงาน กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงานเมื่อปี พ.ศ. 2555 โดยในมาตรฐานผลิตภัณฑ์ฯ ได้สรุปคุณลักษณะที่ต้องการของเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดสำหรับประเทศดังแสดงในตารางที่ 2

ในส่วนมาตรฐานเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากยุโรปประเทศสหราชอาณาจักรกำหนดมาตรฐานของเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดตามมาตรฐานยุโรป ใช้ชื่อ BS EN 14961-1:2010 โดยเป็นการปรับปรุงจากมาตรฐาน DD CEN/TS 14961:2005 Fuel specifications and classes สำหรับมาตรฐาน EN 14961-1:2010 แสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 2 คุณลักษณะของเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดที่ต้องการสำหรับประเทศไทย

| คุณสมบัติ | เกรดธรรมดา | เกรดคุณภาพสูง |
|-------------------|--|--|
| ความหนาแน่นรวม | $\geq 600 \text{ kg/m}^{23}$ | $\geq 600 \text{ kg/m}^3$ |
| เส้นผ่านศูนย์กลาง | $\geq 6 \text{ mm} < 12 \text{ mm}$ | $\geq 6 \text{ mm} < 12 \text{ mm}$ |
| ดัชนีความคงทน | $\geq 95 \% \text{ wt}$ | $\geq 95\% \text{ wt}$ |
| ฝุ่น | $\leq 3\% \text{ wt}$ | $\leq 3\% \text{ wt}$ |
| ความยาว | $\geq 3.15 \text{ mm} < 40 \text{ mm}$ | $\geq 3.15 \text{ mm} < 40 \text{ mm}$ |
| ความยาวเกิน 40 mm | $\leq 1\% \text{ wt}$ | $\leq 1\% \text{ wt}$ |
| ความชื้น | $\leq 10\% \text{ wt}$ | $\leq 10\% \text{ wt}$ |
| ค่าความร้อน | $\geq 14.6 \text{ MJ/kg}$ | $\geq 16.7 \text{ MJ/kg}$ |
| ซี้เถ้า | $\leq 20\% \text{ wt}$ | $\leq 20\% \text{ wt}$ |
| คุณสมบัติ | เกรดธรรมดา | เกรดคุณภาพสูง |
| สารคลอรีน | $\leq 0.02\% \text{ wt}$ | $\leq 0.02\% \text{ wt}$ |
| สารกำมะถัน | $\leq 0.08\% \text{ wt}$ | $\leq 0.08\% \text{ wt}$ |
| สารไนโตรเจน | $\leq 0.3\% \text{ wt}$ | $\leq 0.3\% \text{ wt}$ |

ที่มา: กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (2555)

ตารางที่ 3 มาตรฐานชีวมวลอัดเม็ด EN 14961-1:2010 ของยุโรป

| Maser table | | | |
|---|--------------------------------------|---|--|
| Dimensions (mm), Diameter (D) and Length (L) (Amount of pellets longer 40 mm (50 mm) can be 5 w-%) | | | |
| D 06 | 6 mm ± 1 mm and 3.15 ≤ L ≤ 40 mm | D 12 | 12mm ± 1 mm and 3.15 ≤ L ≤ 50 mm |
| D 08 | 8 mm ± 1 mm and 3.15 ≤ L ≤ 40 mm | D 25 | 25 mm ± 1 mm and 1015 ≤ L ≤ 50 mm |
| D 10 | 10 mm ± 1 mm and 3.15 ≤ L ≤ 40 mm | | |
| Moisture, M (w-% as received) prEN 14774-1. prEN14774-2 | | | |
| M10 | ≤ 10% | M15 | ≤ 15% |
| Ash, A (w-% of dry basis) EN 14775 | | | |
| A0.5 | ≤ 0.5% | A2.0 | ≤ 2.0% |
| A0.7 | ≤ 0.7% | A3.0 | ≤ 3.0% |
| A1.0 | ≤ 1.0% | A5.0 | ≤ 5.0% |
| A1.5 | ≤ 1.5% | A7.0 | ≤ 7.0% |
| | | A10.0 | ≤ 10.0% |
| | | A10.0+ | > 10.0% |
| Mechanical durability, DU (w-% of pellets after testing) prEN15210-1 | | | |
| DU97.5 | ≥ 97.5% | DU95.0 | ≥ 95.0% |
| DU96.5 | ≥ 96.5% | DU95.0- | < 95.0% (minimum value to be stated) |
| Amount of fines, F (w-%, <3.15 mm) after production when loaded or packed, prEN 15149-1 | | | |
| F1.0 | ≤ 1.0% | F5.0 | ≤ 5.0% |
| F2.0 | ≤ 2.0% | F5.0+ | ≤ 5.0% (maximum value to be stated) |
| F3.0 | ≤ 3.0% | Fines shall be determinate by using method prEN 15149-1 | |
| Additives (w-% of pressing mass) Type and content of pressing aids, slagging inhibitors or any other additives have to be stated (The maximum amount of additive is 20 w% of pressing mass) | | | |
| Bulk density (BD) as received (kg/m³) EN 15103 | | | |
| BD550 | ≥ 550 kg/m ³ | BD700 | ≥ 700 kg/m ³ |
| BD600 | ≥ 600 kg/m ³ | BD700+ | > 700 kg/m ³ (maximum value to be stated) |
| BD650 | ≥ 650 kg/m ³ | | |
| Net calorific value as received, Q (MJ/kg or kWh/kg) EN14918 Minimum value to be stated | | | |
| Sulphur, S (w-% of dry basis) prEN 15289 | | | |
| S0.02 | ≤ 0.02% | S0.10 | ≤ 0.10% Normative: Chemically treated biomass |
| S0.05 | ≤ 0.05% | S0.20 | ≤ 0.20% Informative: All fuels that are not chemically treated |
| S0.08 | ≤ 0.08% | S0.20+ | > 0.20% (maximum value to be stated) |
| Nitrogen, N (w-% of dry basis) prEN 1104 | | | |
| N0.3 | ≤ 0.3% | N2.0 | ≤ 2.0% Normative: Chemically treated biomass |
| N0.5 | ≤ 0.5% | N3.0 | > 3.0% Informative: All fuels that are not chemically treated |
| N1.0 | ≤ 1.0% | N3.0+ | > 3.0% (maximum value to be stated) |
| Chlorine, Cl (w-% of dry basis) prEN 15289 | | | |
| Cl0.02 | ≤ 0.02% | Cl0.03 | ≤ 0.03% Normative: Chemically treated biomass |
| Cl0.07 | ≤ 0.07% | Cl0.10 | ≤ 0.10% Informative: All fuels that are not chemically treated |
| Cl0.10+ | > 0.10% (maximum value to be stated) | | |
| Informative: Ash melting behavior (°C) prEN 1537-1 Deformation temperature, DT should be stated | | | |

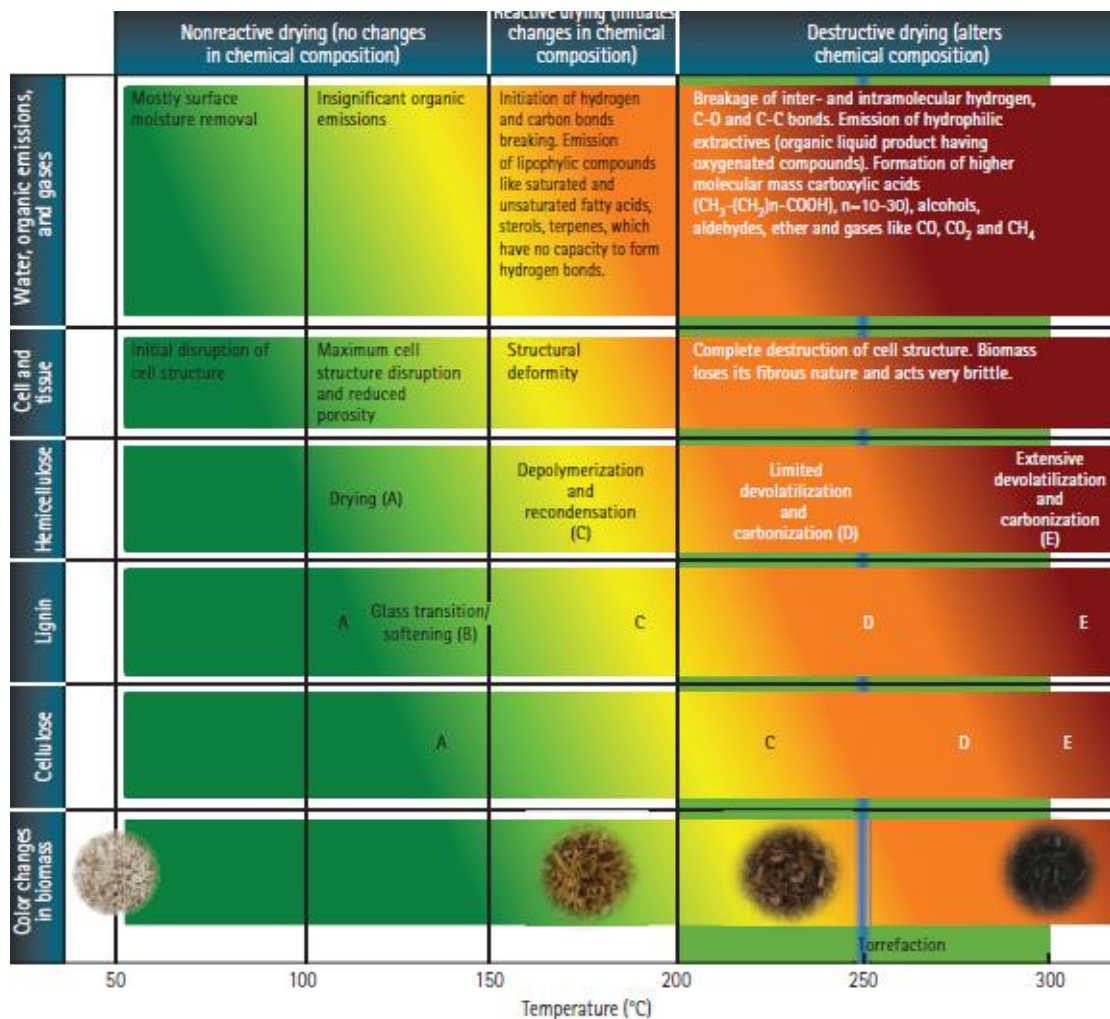
ที่มา: คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร (2555)

กระบวนการทอรรีแฟคชัน

กระบวนการทอรรีแฟคชัน เป็นการรักษาความร้อนของชีวมวลที่ 200-400 °C ภายใต้ความดันบรรยากาศที่ไร้ก๊าซออกซิเจน ในระหว่างกระบวนการทอรรีแฟคชัน น้ำที่มีอยู่ในชีวมวลถูกทำให้ระเหยออกไป และโพลิเมอร์ชีวภาพ เช่น เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ก็จะถูกย่อยสลายออกไปเช่นกัน ผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่ได้จะเป็นวัสดุของแข็งแห้ง ซึ่งถูกเรียกว่า ชีวมวลทอรรีไฟด์ (biomass torrefied) หรือ ไบโอถ่านหิน และเป็นการปรับปรุงคุณภาพของชีวมวลในแง่ของคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมี ในระหว่างกระบวนการชีวมวลจะสูญเสียน้ำหนัก 20% และค่าความร้อนของชีวมวลนั้น ๆ 10% พลังงานที่สูญเสียไปนี้สามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงให้ความร้อนสำหรับกระบวนการทอรรีแฟคชัน หลังจากชีวมวลผ่านกระบวนการทอรรีแฟคชันแล้ว จะมีปริมาณความชื้นและมวลลดลง แต่มีความหนาแน่นและค่าความร้อนสูงขึ้น เมื่อชีวมวลที่ผ่านกระบวนการทอรรีแฟคชัน และผ่านกระบวนการเพิ่มความหนาแน่น มีข้อดีหลายประการซึ่งทำให้ชีวมวลอัดเม็ดทอรรีไฟด์เป็นตัวเลือกหนึ่งในการแข่งขันทางการตลาด เมื่อเทียบกับชีวมวลทั่วไปดังนี้ (ณรงค์ฤทธิ์ และ ธนพร, 2557)

1. มีความหนาแน่นสูงขึ้นได้ถึง 18-20 GJ/m³ โดยการเพิ่มความหนาแน่นนั้นทำได้ทั้งแบบอัดเม็ดหรืออัดก้อน สามารถลดต้นทุนการขนส่งลงประมาณ 40-50%
2. ชีวมวลทอรรีไฟด์มีองค์ประกอบเป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้น และสามารถผลิตได้จากวัตถุดิบที่หลากหลายมารวมกันได้
3. เชื้อเพลิงที่ผ่านกระบวนการทอรรีแฟคชันมีพฤติกรรมที่ไม่ชอบน้ำ เมื่อเพิ่มความหนาแน่นจะทำให้สะดวกต่อการจัดเก็บ เนื่องจากสามารถสัมผัสอากาศได้
4. การกำจัดทางชีวภาพจะลดความเสี่ยงของการเกิดไฟไหม้ และการสลายตัวของชีวภาพ เช่น เน่าเปื่อย เป็นต้น

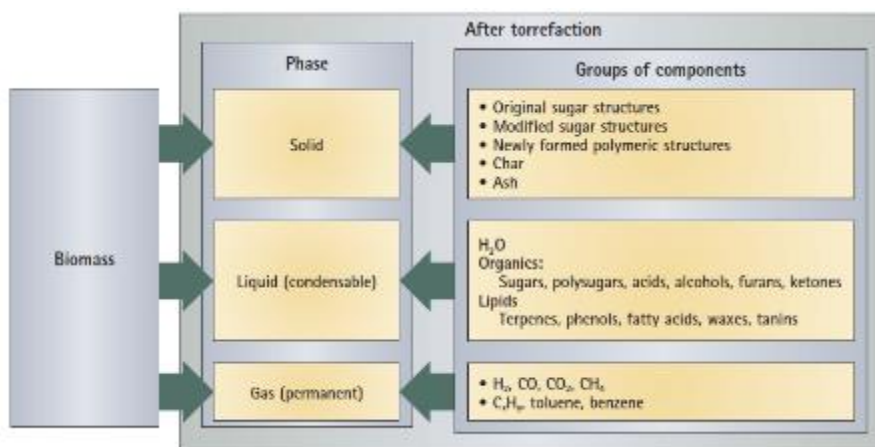
การเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง สี และคุณสมบัติทางเคมีของชีวมวลที่อุณหภูมิแตกต่างกัน จากภาพที่ 5 จะเห็นว่าในช่วงอุณหภูมิ 50-150 °C มีปริมาณความชื้นและขนาดของชีวมวลลดลง ที่ช่วงอุณหภูมิ 120-150 °C ลิกนินที่เป็นองค์ประกอบทางเคมีของชีวมวลเริ่มอ่อนตัวลง ซึ่งเป็นช่วงที่เหมาะสมต่อการเพิ่มความหนาแน่น ช่วงอุณหภูมิ 150-200 °C โครงสร้างของชีวมวลได้รับความเสียหาย เกิดการสลายตัวของพันธะไฮโดรเจนและพันธะคาร์บอน ทำให้สารระเหยและองค์ประกอบธาตุอื่น ๆ เกิดการสลายตัวของโครงสร้างโพลิเมอร์ (depolymerization) ของเฮมิเซลลูโลส ทำให้พอลิเมอร์มีขนาดเล็กลง ส่วนช่วงอุณหภูมิ 200-300 °C เซลล์ต่าง ๆ ถูกทำลาย และผลของอุณหภูมิในช่วงนี้ทำให้เกิดถ่าน (carbonization) และการลดสารระเหย (devolatilization)



ภาพที่ 5 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง สี และคุณสมบัติทางเคมีของชีวมวล ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน

ที่มา: Zafar (2016)

ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการเทอร์รีแฟคชั่น ถูกจำแนกออกเป็น 3 สถานะ คือ ของแข็ง ของเหลว และก๊าซ ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็ง ประกอบด้วย ถ่าน ถ้ำ โครงสร้างโมเลกุลน้ำตาล แป้ง และโพลีเมอร์อื่น ๆ ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลว ประกอบด้วย น้ำ ไขมัน และสารระเหยต่าง ๆ ส่วนผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊ส ได้แก่ ก๊าซไฮโดรเจน ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซมีเทน โทลูอิน และเบนซีนหรือสารประกอบอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนที่ประกอบด้วยคาร์บอนและไฮโดรเจนอย่างละหอะตอม (Zafar, 2016) ดังแสดงในภาพที่ 6



ภาพที่ 6 ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการทอร์รีแฟคชัน

ที่มา: Zafar (2016)

การกระจายผลผลิตมวลและพลังงาน (mass and energy yield) ส่วนใหญ่ถูกกักเก็บไว้ในผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็ง ซึ่งน้ำและของเหลวอื่น ๆ ที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการทอร์รีแฟคชัน ก็เป็นตัวแปรหนึ่งที่เพิ่มปริมาณผลผลิตมวล ส่วนผลผลิตทางพลังงานนอกจากจะถูกกักเก็บไว้ในผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็งแล้วยังถูกกักเก็บไว้ในผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวหรือสารระเหย (Volatile) ดังแสดงในตารางที่ 4 (Zafar, 2016)

ตารางที่ 4 ผลผลิตมวลและพลังงาน (mass and energy yield) ของต้นหลิว (willow) หลังจากผ่านกระบวนการทอร์รีแฟคชัน

| Reaction products | Mass yield (%) | Energy yield (%) (LHV, daf) |
|-------------------|----------------|-----------------------------|
| Solid | 87.5 | 94.9 |
| Lipids | 1.4 | 3.4 |
| Organics | 1.7 | 1.6 |
| Gases | 1.4 | 0.1 |
| Water | 8.0 | 0.0 |

ที่มา: Zafar (2016)

ในประเทศไทยเม็ดเชื้อเพลิงทอร์รีไฟด์นับเป็นแหล่งพลังงานในอุดมคติสำหรับการนำมาเป็นเชื้อเพลิงเผาไหม้โดยตรงเพื่อทดแทนถ่านหินในการผลิตพลังงาน และยังสามารถผลิตเป็นแก๊สสังเคราะห์เพื่อทดแทนก๊าซธรรมชาติในการผลิตไฟฟ้า เนื่องจากค่าความร้อนต่อหน่วยของเชื้อเพลิงทอร์รีไฟด์เทียบเท่ากับค่าความร้อนของถ่านหิน ดังนั้นเชื้อเพลิงทอร์รีไฟด์จึงสามารถนำไปใช้เป็เชื้อเพลิงทดแทนสำหรับโรงงานผลิตไฟฟ้าถ่านหิน ซึ่งสามารถลดปริมาณเถ้าและอัตราการปลดปล่อยซัลเฟอร์ที่ต่ำลง ลดปัญหาด้านมลภาวะทั้งภายในโรงงานและชุมชนโดยรอบ และในปัจจุบันราคาถ่านหินมีแนวโน้มสูงขึ้น ยิ่งทำให้เม็ดเชื้อเพลิงทอร์รีไฟด์มีความน่าสนใจ และทำให้หลาย ๆ ประเทศที่ให้ความสำคัญและตระหนักถึงความมั่นคงด้านพลังงานภายในประเทศ จึงได้สนับสนุนให้เม็ดเชื้อเพลิงทอร์รีไฟด์เป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการประหยัดการนำเข้าพลังงานเชิงพาณิชย์ สำหรับต้นทุนในการสร้างโรงงานผลิตเม็ดเชื้อเพลิงทอร์รีไฟด์เพื่อป้อนเข้าสู่โรงไฟฟ้าจะอยู่ที่ประมาณ 14 ล้านเหรียญสหรัฐ และอีกประมาณ 13 ล้านเหรียญสหรัฐ ในการผลิตไฟฟ้าจากเชื้อเพลิงทอร์รีไฟด์มีกำลังการผลิตประมาณ 600,000 mmW ต่อปี ซึ่งต้นทุนรวมจะอยู่ที่ประมาณ 27 ล้านเหรียญสหรัฐ อย่างไรก็ตาม ต้นทุนการผลิตของโรงไฟฟ้าชีวมวลในปัจจุบันยังถือว่าแพงกว่าโรงไฟฟ้าถ่านหินค่อนข้างมาก (พงษ์ศักดิ์ และ ไตรรัตน์, 2554)

การวิเคราะห์องค์ประกอบเคมีและกายภาพชีวมวลทอร์รีไฟด์

การวิเคราะห์องค์ประกอบต่าง ๆ ของชีวมวลทอร์รีไฟด์ มีวิธีการวิเคราะห์ที่หลากหลาย โดยในงานวิจัยนี้ได้ใช้วิธีการวิเคราะห์โดยประมาณ (proximate analysis) ซึ่งประกอบด้วยการวิเคราะห์ค่าความชื้น สารระเหย คาร์บอนคงตัว และเถ้า นอกจากนี้ยังมีการวิเคราะห์ขั้นสุดท้าย (ultimate analysis) เป็นการวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีของชีวมวลทอร์รีไฟด์ และสุดท้ายเป็นการวิเคราะห์ค่าความร้อนของชีวมวลแต่ละชนิด ซึ่งแต่ละหัวข้อแสดงรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. การวิเคราะห์โดยประมาณ (Proximate Analysis)

องค์ประกอบของเชื้อเพลิงชีวมวลหรือสสารทั่วไป สามารถวิเคราะห์แยกองค์ประกอบโดยประมาณได้เป็น 3 ส่วนหลัก คือ

1.1 ความชื้น (Moisture) หมายถึง ปริมาณน้ำที่มีอยู่ในเชื้อเพลิงชีวมวล ส่วนมากเชื้อเพลิงชีวมวลจะมีความชื้นสูงเพราะเป็นผลผลิตทางการเกษตร ผลผลิตทางการเกษตรนี้เป็นสิ่งมีชีวิตซึ่งมีน้ำเป็นองค์ประกอบเป็นส่วนใหญ่ ปริมาณความชื้นที่พบในเชื้อเพลิงชีวมวลขึ้นอยู่กับชนิดของเชื้อเพลิง ดังนั้นเชื้อเพลิงชีวมวลที่นำมาใช้ควรมีความชื้นไม่เกิน 50% เพื่อไม่ให้เกิดการสูญเสียความร้อนในการไล่ความชื้นของเชื้อเพลิงชีวมวล สำหรับการวิเคราะห์ปริมาณความชื้นตามวิธีมาตรฐาน ASTM

D3173 โดยนำตัวอย่างมาวิเคราะห์โดยให้ความร้อนคงที่ในตู้อบ (Drying Oven) ที่อุณหภูมิ 105 °C เพื่อให้ได้น้ำระเหยออกจากตัวอย่าง ค่าความชื้นที่ได้สามารถคำนวณจากน้ำหนักของตัวอย่างที่ลดลง ดังแสดงในสมการที่ 1 (ธนาพล และคณะ, 2558)

$$MC = \frac{(A - B)}{A} \times 100 \quad \text{สมการที่ 1}$$

| | | | |
|-------|----|-----|------------------------------|
| เมื่อ | MC | คือ | ปริมาณความชื้นของชีวมวล (%) |
| | A | คือ | น้ำหนักตัวอย่างก่อนทดสอบ (g) |
| | B | คือ | น้ำหนักตัวอย่างหลังทดสอบ (g) |

1.2 ส่วนที่เผาไหม้ได้ (Combustible Substance) จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ สารระเหย (Volatile Matter) และคาร์บอนคงที่ (Fixed Carbon)

1.2.1 สารระเหย (Volatile Matter) คือ ก๊าซและทาร์ (Tar) ที่อยู่ในเนื้อถ่าน เป็นตัวกลางที่ทำให้ถ่านเกิดการติดไฟก่อนที่จะเผาไหม้คาร์บอนซึ่งอยู่ในถ่าน นอกจากนี้ถ่านที่มีปริมาณ Volatile สูงจะทำให้ติดไฟง่ายและลุกไหม้อย่างรวดเร็ว แต่ถ่านที่มีปริมาณ Volatile ต่ำจะเกิดการติดไฟยาก และลุกไหม้อย่างช้า ๆ ส่วนที่ลุกเผาไหม้ได้ง่าย ดังนั้นเชื้อเพลิงชีวมวลใดที่มีค่าสารระเหยสูง แสดงว่าติดไฟได้ง่าย สำหรับการวิเคราะห์ปริมาณสารระเหยตามมาตรฐาน SATM D3175 โดยนำตัวอย่างมาเผาที่อุณหภูมิ 950 °C เป็นเวลา 7 min แล้วนำมาคำนวณหาปริมาณสารระเหยจากการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่าง ดังสมการที่ 2 และ 3 (ธนาพล และคณะ, 2558)

$$W_L = \frac{(A - B)}{A} \times 100 \quad \text{สมการที่ 2}$$

$$VC (\%) = W_L (\%) - MC (\%) \quad \text{สมการที่ 3}$$

| | | | |
|-------|-------|-----|------------------------------------|
| เมื่อ | VC | คือ | ปริมาณสารระเหยของชีวมวล (%) |
| | W_L | คือ | ปริมาณน้ำหนักของชีวมวลที่หายไป (%) |

1.2.2 คาร์บอนคงที่ (Fixed Carbon) เป็นสารประกอบของคาร์บอน (Carbonaceous Residue) ที่ไม่รวม Ash ที่เหลือจาก Organic Matter หลังจากที่ Volatile Matter ถูกไล่ออกไปแล้ว

สำหรับการวิเคราะห์การหาปริมาณคาร์บอนคงตัวของชีวมวลหาได้จากสมการที่ 4 (ธนาพล และคณะ, 2558)

$$FC = 100 - (\%A_{sh} + \%MC + \%VC) \quad \text{สมการที่ 4}$$

เมื่อ FC คือ ปริมาณคาร์บอนคงตัวของชีวมวล (%)

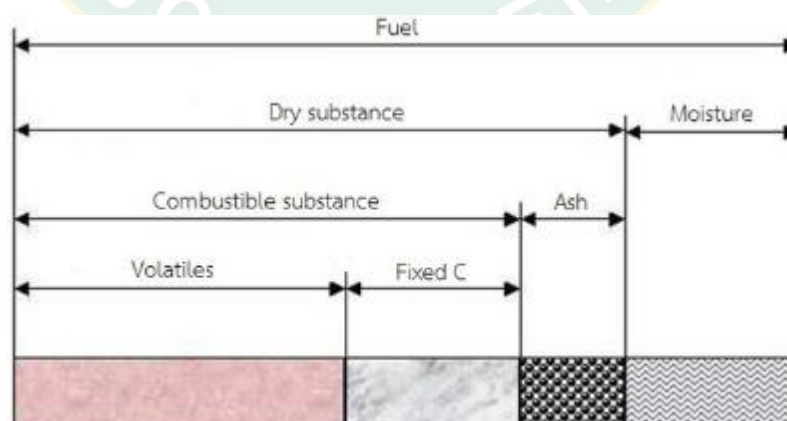
A_{sh} คือ ปริมาณเถ้าของชีวมวล (%)

1.3 ส่วนที่เผาไหม้ไม่ได้หรือขี้เถ้า (Ash) เชื้อเพลิงชีวมวลส่วนใหญ่จะมีขี้เถ้าประมาณ 1 ถึง 3 % ยกเว้นแกลบและฟางข้าว จะมีสัดส่วนขี้เถ้าประมาณ 10-20% ซึ่งจะมีปัญหาในการเผาไหม้และกำจัดพอสมควร แต่ยังคงต้องควบคุม 20 องค์กรประกอบทางเคมีของปฏิกิริยา ดังนั้นจึงมีข้อจำกัดในการใช้เชื้อเพลิงชีวมวลที่มีขี้เถ้ามาก โดยเฉพาะแกลบ สำหรับการวิเคราะห์ปริมาณเถ้าตามมาตรฐาน ASTM D3174 โดยนำตัวอย่างไปเผาให้ความร้อนในเตาเผา ที่อุณหภูมิประมาณ 500 °C แล้วค่อย ๆ เพิ่มความร้อนเป็น 700-750 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จนกระทั่งได้น้ำหนักคงที่ของถ้วยอลูมิเนียมรวมกับน้ำหนักของเถ้าที่เหลือ จึงนำมาชั่งน้ำหนัก ซึ่งสามารถคำนวณปริมาณเถ้าได้จากสมการที่ 5 (ธนาพล และคณะ, 2558)

$$A_{sh} = \frac{B}{A} \times 100$$

สมการที่ 5

เมื่อ A_{sh} คือ ปริมาณเถ้าของชีวมวล (%)



ภาพที่ 7 แสดงองค์ประกอบของเชื้อเพลิงชีวมวล

ที่มา: บุชบา และคณะ (2555)

2. การวิเคราะห์ขั้นสุดท้าย (ultimate analysis)

การวิเคราะห์ขั้นสุดท้ายเป็นการวิเคราะห์ส่วนประกอบของเชื้อเพลิง เพื่อใช้ในการหาค่าความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ โดยจะรายงานเป็นปริมาณร้อยละของธาตุต่าง ๆ ที่ประกอบขึ้นเป็น ถ่านหินได้แก่ ปริมาณคาร์บอน (C) ไฮโดรเจน (H) ออกซิเจน (O) ไนโตรเจน (N) และกำมะถัน (S)

3. การวิเคราะห์ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงชีวมวล

ความร้อนต่ำ หรือ Lower Heating Value (LHV) หมายถึง การนำชีวมวลหนัก 1 kg มาหาค่าความร้อน ค่าที่วัดได้คือ ค่าความร้อนต่ำ (LHV) ต่อ kg

ค่าความร้อนสูง หรือ Higher Heating Value (HHV) หมายถึง การนำชีวมวลหนัก 1 kg มาลดความชื้นหรือกำจัดน้ำออกให้หมด จากนั้น นำมาหาค่าความร้อน ค่าที่วัดได้คือ ค่าความร้อนสูง (HHV) ต่อ kg และมีความสัมพันธ์กับค่าความร้อนต่ำดังนี้

$$HHV = LHV + 23.95(9H + MC)$$

สมการที่ 7

| | | | |
|-------|-----|-----|---------------------------------|
| เมื่อ | HHV | คือ | ค่าความร้อนสูงของชีวมวล (kJ/kg) |
| | LHV | คือ | ค่าความร้อนต่ำของชีวมวล (kJ/kg) |
| | H | คือ | ปริมาณร้อยละของธาตุไฮโดรเจน |

ความร้อนแห้ง หรือ Dry Heating Value หมายถึง การนำชีวมวลส่วนหนึ่งมาลดความชื้นหรือกำจัดน้ำออกให้หมด จากนั้นแบ่งมา 1 kg เพื่อนำมาหาค่าความร้อน ค่าที่วัดได้คือค่าความร้อนแห้งต่อกิโลกรัม และมีความสัมพันธ์กับค่าความร้อนสูง ดังนี้

$$DHV = \frac{HHV}{1 - MC} \times 100$$

สมการที่ 8

เมื่อ DHV คือ ความร้อนแห้งของชีวมวล

4. การวิเคราะห์ Mass yield และ Energy yield

Mass yield และ Energy yield ที่ได้จากระบวนการทอรรีแฟกชันของชีวมวล เป็นตัวแปรหลักที่นำมาพิจารณาและการประเมินการใช้ประโยชน์ของกระบวนการทอรรีแฟกชัน รวมทั้งใช้

สำหรับเลือกเงื่อนไขของอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมที่สุดของชีวมวลแต่ละชนิด (Tumuluru et al., 2011) โดยค่า Mass yield และ Energy yield สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 9 และ 10

$$MY = \frac{\text{mass after torrefaction}}{\text{mass of raw sample}} \times 100 \quad \text{สมการที่ 9}$$

$$EY = MY \times \frac{\text{HHV (torrefied sample)}}{\text{HHV (raw sample)}} \times 100 \quad \text{สมการที่ 10}$$

| | | | |
|-------|----|-----|----------------------------------|
| เมื่อ | MY | คือ | ผลผลิตมวล (mass yield) (%) |
| | EY | คือ | ผลผลิตพลังงาน (energy yield) (%) |

การตรวจสอบเอกสาร

จากการค้นคว้าเอกสารที่เกี่ยวข้องกับการเพิ่มคุณภาพชีวมวลหรือวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร ด้วยกระบวนการทอรรีแฟคชันแสดงดังต่อไปนี้

Huang et al. (2012) ได้ศึกษากระบวนการทอรรีแฟคชันของฟางข้าวและหญ้าเนเปียร์ โดยใช้แหล่งความร้อนจากเตาไมโครเวฟช่วงกำลังไฟฟ้า 150 - 350 W ระยะเวลา 5-25 min ภายใต้บรรยากาศที่ใช้ก๊าซไนโตรเจน สำหรับฟางข้าวอุณหภูมิที่ใช้ทดสอบเพิ่มขึ้นจาก 237-423 °C และอัตราความร้อนเฉลี่ยเพิ่มขึ้นจาก 12.9-31.2 °C/min ส่วนหญ้าเนเปียร์อุณหภูมิที่ใช้ทดสอบเพิ่มขึ้นจาก 252-394 °C และอัตราความร้อนเฉลี่ยเพิ่มขึ้นจาก 14.8-29.2 °C/min ภายใต้บรรยากาศที่ใช้ก๊าซไนโตรเจน หลังจากการทดสอบกระบวนการทอรรีแฟคชัน ค่าความร้อนของฟางข้าวและหญ้าเนเปียร์เพิ่มขึ้นจาก 16.16-20.97 MJ/kg และ 16.98-26.51 MJ/kg ตามลำดับ ซึ่งผลของงานวิจัยนี้สรุปได้ว่า กำลังไฟฟ้าจากไมโครเวฟที่เหมาะสมสำหรับการทดสอบกระบวนการทอรรีแฟคชันของฟางข้าวและหญ้าเนเปียร์คือ 150 W ใช้ระยะเวลาในการทดสอบ 10 min จะส่งผลทำให้ได้ค่า Mass yield และค่า Energy yield มีค่าสูงที่สุดคือ 70% และ 80% ตามลำดับ

Satpathy et al. (2014) ได้ศึกษาเกี่ยวกับกระบวนการทอรรีแฟคชันของฟางข้าวสาาลีและฟางข้าวบาร์เลย์ โดยใช้ความร้อนจากไมโครเวฟที่ช่วงกำลังไฟฟ้า 200-300 W ซึ่งฟางข้าวสาาลีและฟางข้าวบาร์เลย์ทดสอบที่ช่วงอุณหภูมิ 133-392 °C และ 227-427 °C ตามลำดับ ระยะเวลาในการทดสอบ 10-20 min ภายใต้บรรยากาศที่ใช้ก๊าซไนโตรเจน จากผลการวิจัยพบว่า เมื่อทดสอบกระบวนการทอรรีแฟคชันที่ 300 W เป็นเวลา 20 min ฟางข้าวบาร์เลย์และฟางข้าวสาาลีมีปริมาณ

คาร์บอนเพิ่มขึ้น 29.1% และ 16.2% ตามลำดับ และอัตราส่วน H/C และ O/C มีปริมาณลดลงเมื่อใช้กำลังไฟฟ้าและระยะเวลาในการทดสอบมากขึ้น ส่วนค่า Mass yield และ Energy yield ของฟางข้าวสาลีคือ 64.0-97.8% และ 73.8-98.4% ตามลำดับ ส่วนฟางข้าวบาร์เลย์ค่า Mass yield และ Energy yield คือ 42.7-97.4% และ 52.5-97.3% ตามลำดับ ค่าความร้อนของฟางข้าวสาลีและฟางข้าวบาร์เลย์เพิ่มขึ้นจาก 17.8-20.5 MJ/kg และ 17.7-21.9 MJ/kg ตามลำดับ

Chen et al. (2015) ได้ศึกษาคุณสมบัติของลำต้นฝ้ายและลำต้นข้าวโพดที่ผ่านกระบวนการทอรรีแฟคชัน โดยดำเนินการที่ช่วงอุณหภูมิ 200-290 °C ระยะเวลา 30 min ภายใต้บรรยากาศที่ใช้ก๊าซไนโตรเจน จากผลการทดสอบพบว่า การเพิ่มอุณหภูมิของกระบวนการทอรรีแฟคชันอย่างรวดเร็ว ส่งผลกระทบต่อลำต้นฝ้ายและลำต้นข้าวโพดอย่างชัดเจน ยกตัวอย่างเช่น มีลักษณะสีเข้มขึ้น มีปริมาณคาร์บอนเพิ่มขึ้น แต่ปริมาณออกซิเจนลดลง ส่วนผลผลิตที่ได้หลังจากผ่านกระบวนการทอรรีแฟคชันได้แก่ ถ่านแข็ง น้ำมันเหลว และ แก๊ส โดยพบว่าถ่านแข็งของลำต้นข้าวโพดและลำต้นฝ้ายมีปริมาณเพิ่มขึ้น แต่ในขณะเดียวกันน้ำมันเหลวและแก๊สมีปริมาณลดลง นอกจากนี้ลำต้นฝ้ายและลำต้นข้าวโพดที่ผ่านกระบวนการทอรรีแฟคชัน มีค่าความร้อนเพิ่มขึ้นจาก 18.31-25.43 MJ/kg และ 18.06-23.61 MJ/kg ตามลำดับ

Li et al. (2015) ได้ศึกษากระบวนการทอรรีแฟคชันของไม้ไผ่ โดยได้ดำเนินการที่ช่วงอุณหภูมิ 220-280 °C เป็นระยะเวลา 10-60 min ภายใต้บรรยากาศที่ใช้ก๊าซไนโตรเจน พบว่าเมื่ออุณหภูมิและระยะเวลาในการทดสอบเพิ่มมากขึ้น ค่า Mass yield และค่า Energy yield จะมีค่าลดลง ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 74.6-98.0% และ 91.0-100% ตามลำดับ ซึ่งค่าทั้งสองนี้จะค่อย ๆ ลดลงตามอุณหภูมิและเวลาเพิ่มขึ้น ส่วนค่าความร้อนพบว่ามีการเพิ่มขึ้นจาก 16.73-20.42 MJ/kg

Toscano et al. (2015) ได้ศึกษากระบวนการทอรรีแฟคชันของเปลือกมะเขือเทศ ทดสอบที่ช่วงอุณหภูมิ 214-316 °C เป็นระยะเวลา 30-60 min ภายใต้บรรยากาศที่ใช้ก๊าซไนโตรเจน จากการทดสอบตามเงื่อนไขที่กล่าวมาข้างพบว่า ค่า Mass yield และค่า Energy yield มีค่าอยู่ในช่วง 69.9-94.7% และ 86.0-98.0% ตามลำดับ ส่วนความหนาแน่นทางพลังงานมีค่าประมาณ 1.04-1.23 นอกจากนี้กระบวนการทอรรีแฟคชันยังสามารถปรับปรุงให้ค่าความร้อนของเปลือกมะเขือเทศมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 26 MJ/kg เป็น 30 MJ/kg

Poudel et al. (2015) กระบวนการทอรรีแฟคชันของชีวมวลภายใต้สุญญากาศ สามารถปรับปรุงคุณสมบัติของชีวมวลทั้งทางด้านเคมีและกายภาพให้ดีขึ้นได้ และสามารถเพิ่มความหนาแน่นทางด้านพลังงานให้แก่ชีวมวลอีกด้วย ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษากระบวนการทอรรีแฟคชันของเศษอาหารจำพวกผัก กล้วยพืช และเนื้อสัตว์ จากโรงอาหารในมหาวิทยาลัยของประเทศเกาหลีใต้ โดยศึกษาความแตกต่างของอุณหภูมิและเวลา ที่ส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติทางด้านความร้อนและทางด้านกายภาพของชีวมวล โดยทดสอบที่ช่วงที่อุณหภูมิ 150-600 °C และช่วงเวลา 0-50 นาที ภายในเตาปฏิกรณ์

ภายใต้บรรยากาศที่ใช้ก๊าซไนโตรเจน จากการทดสอบกระบวนการทอรรีแฟคชันของเศษอาหารที่อุณหภูมิสูงส่งผลในค่า Energy yield และค่า Mass yield มีค่าลดลง แต่มีค่าความร้อน (HHV) สูงขึ้น จาก 19.52 เป็น 22.25 MJ/kg และในขณะเดียวกันปริมาณคาร์บอน (C) มีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนปริมาณไฮโดรเจน (H) และออกซิเจน (O) มีแนวโน้มลดลง จากงานวิจัยนี้สรุปได้ว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการทดสอบกระบวนการทอรรีแฟคชันของเศษอาหารคือ 290 และ 330 °C

ณรงค์ฤทธิ์ และ ธนพร (2557) ได้นำเศษไม้ยางพาราอัดเม็ดมาเข้าสู่กระบวนการทอรรีแฟคชัน โดยมีปัจจัยสำคัญคือ อุณหภูมิในการเผาอบ เวลาในการเผาอบ และความดันอัดในช่วงเวลาที่ต่างกัน จากการตรวจสอบพบว่าปัจจัยที่มีผลต่อค่าความหนาแน่นคือ อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาอบ ความดันอัด และสภาวะที่จะทำให้ได้ค่าความหนาแน่นสูงสุดคือ ใช้อุณหภูมิเผาอบ 200 °C เวลาเผาอบ 90 min และความดันอัด 56 MPa ได้ความหนาแน่นสูงสุดเท่ากับ 1198.1842 kg/m³ ปัจจัยที่มีผลต่อค่าความร้อนคือ อุณหภูมิที่ใช้ในการเผา เวลาในการเผาอบ และสภาวะที่จะทำให้ได้ค่าความร้อนสูงสุดคือ ใช้อุณหภูมิเผาอบ 300 °C เวลา 30 min และความดันอัด 166 MPa ได้ค่าความร้อนสูงสุดเท่ากับ 55.066 MJ/kg และปัจจัยที่มีผลต่อค่าความแข็งแรงคือ อุณหภูมิที่ใช้ในการเผา และเวลาที่ใช้ในการเผา สภาวะที่จะทำให้ได้ค่าความแข็งแรงสูงสุดคือ ใช้อุณหภูมิเผาอบ 200 °C เวลา 90 min และความดัน 56 MPa ได้ค่าความแข็งแรงเท่ากับ 477.81 kN/m²

อรอริน และคณะ (2554) ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของกระบวนการทอรรีแฟคชันต่อกระบวนการผลิตน้ำมันชีวภาพจากไม้กระถินยักษ์ (*Leucaena leucocephala*) จากการวิจัยพบว่าปริมาณออกซิเจนในกระถินยักษ์ลดลงจาก 46.2% เป็น 37.3% โดยน้ำหนัก เมื่อผ่านกระบวนการทอรรีแฟคชันที่ 295 °C ในขณะที่ผลผลิตของกระถินยักษ์ที่ผ่านกระบวนการทอรรีแฟคชันมีปริมาณลดลงเมื่ออุณหภูมิของกระบวนการทอรรีแฟคชันสูงขึ้น หลังจากนั้นกระถินยักษ์ที่ผ่านกระบวนการทอรรีแฟคชันแล้วจะนำมาผ่านกระบวนการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 550 °C เพื่อผลิตน้ำมันชีวภาพโดยพบว่า ปริมาณคาร์บอนที่อยู่ในกระถินยักษ์หลังผ่านกระบวนการไพโรไลซิสมีค่ามากขึ้น ในขณะที่ปริมาณออกซิเจนมีค่าลดลง เมื่อนำน้ำมันชีวภาพมาวิเคราะห์ด้วยวิธีการสกัดด้วยตัวทำละลาย (Fractionation) ซึ่งจะแยกน้ำมันชีวภาพเป็นน้ำมันเบา (Light oil) และน้ำมันหนัก (Heavy oil) โดยนำน้ำมันเบามาวิเคราะห์ด้วยเทคนิค GC-MS พบว่าปริมาณกรดอะซิติก (acetic acid) และฟูแรน (furans) ที่อยู่ในน้ำมันเบา มีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิของกระบวนการทอรรีแฟคชันเพิ่มขึ้น และยังพบว่า น้ำมันชีวภาพมีความเป็นกรดลดลง ซึ่งจะสอดคล้องกับการลดลงของปริมาณกรดอะซิติกในน้ำมันเบา จากผลทั้งหมดนี้บ่งชี้ว่า กระบวนการทอรรีแฟคชันไม่เพียงแต่สามารถปรับปรุงคุณสมบัติของน้ำมันชีวภาพให้ดีขึ้น แต่ยังมีผลต่อคุณสมบัติของชีวมวลหลังผ่านกระบวนการไพโรไลซิสอีกด้วย

สุดาวลัย และ ธรารพงษ์ (2554) ได้ศึกษากระบวนการทอรรีแฟกชันชีวมวลด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบเขย่ากับตัวอย่างชีวมวล ซีเลื่อยและไม้กระถินยักษ์ โดยศึกษาผลของวัสดุเบดต่อประสิทธิภาพของกระบวนการทอรรีแฟกชัน วัสดุเบดที่ใช้ ได้แก่ ทราช ซีโอไลต์ 3A และซีโอไลต์ 5A โดยพบว่ากระบวนการทอรรีแฟกชันร่วมกับวัสดุเบดให้ประสิทธิภาพของกระบวนการที่ดีกว่าเทียบกับกรณีไม่ใช้วัสดุเบด ผลผลิตก๊าสของแข็งหลังผ่านกระบวนการ มีค่าความร้อน และความหนาแน่นพลังงานเพิ่มขึ้น ในขณะที่ปริมาณสารระเหย ความชื้น และองค์ประกอบออกซิเจนลดลง และมีสมบัติความเป็นเชื้อเพลิงแข็งที่ใกล้เคียงถ่านหินปิทูมินัสมากขึ้น นอกจากนี้พบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิของกระบวนการจะให้คาร์บอนปริมาณของแข็งที่ได้น้อยลง โดยไม้กระถินยักษ์จะให้ร้อยละผลปริมาณของแข็งที่ได้น้อยกว่าขึ้น

นคร (2552) ได้ศึกษาคุณสมบัติทางเคมีความร้อนและอพเกรดคุณสมบัติเชื้อเพลิงให้มีความหนาแน่นพลังงานเพิ่มขึ้น โดยกระบวนการทอรรีแฟกชัน ของฟางข้าว ไม้กระถินยักษ์ ทะลายปาล์ม เปล่า และผักตบชวา จากผลการทดลองพบว่าปริมาณธาตุคาร์บอนและค่าความร้อนของชีวมวลที่ผ่านการทอรรีแฟกชันแล้วจะเพิ่มขึ้นมาก เมื่อเพิ่มอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการทอรรีแฟกชัน พฤติกรรมการไพโรไลซิสของชีวมวลที่ผ่านการทอรรีแฟกชันแล้ว แตกต่างเป็นอย่างมากจากพฤติกรรมการไพโรไลซิสของชีวมวลเริ่มต้น ปริมาณทาร์ที่เกิดขึ้นระหว่างการไพโรไลซิส กลับลดลงเป็นอย่างมากเมื่อเพิ่มเวลาในการทอรรีแฟกชัน โครงสร้างของชีวมวลเปลี่ยนไปด้วยการทอรรีแฟกชันที่อุณหภูมิต่ำกว่า 275 °C และพบว่าเกิดปฏิกิริยา Cross-linking ระหว่างการไพโรไลซิสชีวมวลที่ผ่านการทอรรีแฟกชันแล้ว ซึ่งส่งผลให้ปริมาณถ่านชาร์หลังจากการไพโรไลซิสเพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อเพิ่มเวลาในการทอรรีแฟกชัน ปฏิกิริยา Cross-linking จะยิ่งดำเนินไปมากขึ้น

บทที่ 3

อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการปรับปรุงคุณภาพของชีวมวลจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรที่เป็นต้นเหตุของปัญหาการเผาและปัญหาหมอกควันในพื้นที่ภาคเหนือ โดยผ่านกระบวนการทอรรีแฟคชั่นภายใต้เงื่อนไขของอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสม รวมทั้งศึกษาคูณสมบัติทั้งทางด้านเคมีและทางด้านกายภาพของชีวมวลทอรรีไฟด์ที่ผลิตได้ โดยรายละเอียดวัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการทดสอบ แสดงดังต่อไปนี้

วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

ในส่วนของวัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้การทดสอบสำหรับงานวิจัยนี้ได้กล่าวถึงวัสดุชีวมวล อุปกรณ์สำหรับการผลิตเชื้อเพลิงแบบกากและแบบอัดเม็ด เครื่องผลิตเชื้อเพลิงทอรรีไฟด์ อุปกรณ์ทดสอบการวิเคราะห์โดยประมาณ และเครื่องวิเคราะห์คุณสมบัติเชื้อเพลิงอัดเม็ด ซึ่งรายละเอียดแต่ละหัวข้อแสดงดังต่อไปนี้

1. วัสดุชีวมวล

ชีวมวลที่นำมาทดสอบกระบวนการทอรรีแฟคชั่นมีทั้งหมด 2 ประเภท ได้แก่ ฟางข้าว และต้นข้าวโพด ดังภาพที่ 8 และภาพที่ 9 ซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรเหล่านี้หาได้ง่ายในพื้นที่จังหวัดเชียงใหม่ ภาคเหนือของประเทศไทย โดยฟางข้าวและต้นข้าวโพดมีคุณสมบัติความชื้นอยู่ในช่วง 7.22-7.87% ปริมาณสารระเหยอยู่ในช่วง 79.93-86.74% ปริมาณเถ้าอยู่ในช่วง 5.75-11.28% และปริมาณคาร์บอนคงตัวอยู่ในช่วง 0.29-0.92% ส่วนค่าความร้อนของฟางข้าวและต้นข้าวโพดจะอยู่ในช่วง 15.01-15.94 MJ/kg ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 5 สำหรับผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุนั้นพบว่า ฟางข้าวและต้นข้าวโพดมีสัดส่วนของปริมาณคาร์บอนอยู่ในช่วง 39.7-42.1% ปริมาณออกซิเจนอยู่ในช่วง 38.66-39.91% ปริมาณธาตุไนโตรเจนอยู่ในช่วง 0.35-0.53% และมีปริมาณไฮโดรเจนอยู่ในช่วง 5.12-5.37% ดังแสดงในตารางที่ 6



ภาพที่ 8 ซึวมวลประเภทฟางข้าว



ภาพที่ 9 ซึวมวลประเภทต้นข้าวโพด

ตารางที่ 5 การวิเคราะห์โดยประมาณ และค่าความร้อนของฟางข้าวและต้นข้าวโพด

| พารามิเตอร์ | ฟางข้าว | ต้นข้าวโพด |
|---------------------|---------|------------|
| ความชื้น (%) | 7.87 | 7.22 |
| สารระเหย (%) | 79.93 | 86.74 |
| เถ้า (%) | 11.28 | 5.75 |
| คาร์บอนคงตัว (%) | 0.92 | 0.29 |
| ค่าความร้อน (MJ/kg) | 15.01 | 15.94 |

ตารางที่ 6 การวิเคราะห์แบบขั้นสุดท้าย (ultimate analysis) ของฟางข้าวและต้นข้าวโพด

| พารามิเตอร์ | ฟางข้าว | ต้นข้าวโพด |
|--------------|---------|------------|
| คาร์บอน (%) | 39.70 | 42.10 |
| ออกซิเจน (%) | 39.91 | 38.66 |
| ไนโตรเจน (%) | 0.35 | 0.53 |
| ไฮโดรเจน (%) | 5.12 | 5.37 |

2. อุปกรณ์สำหรับการผลิตเชื้อเพลิงแบบกากและแบบอัดเม็ด

2.1 เครื่องบดย่อยชีวมวลแบบหยาบ

เครื่องบดย่อยชีวมวลแบบหยาบเป็นเครื่องบดย่อยแบบสำหรับลดขนาดชีวมวลประเภทฟางข้าวและต้นข้าวโพด ใช้ใบมีดสับผสมกับการตีชีวมวลให้เป็นชิ้นขนาดเล็กภายในมีใบมีดทั้งหมด 4 ใบ รับกำลังมาจากสายพานแบบร่อนวีโดยมีต้นกำลังมาจากมอเตอร์ขนาด 1 hp 220 V ตะแกรงในการคัดกรองชีวมวลหลังจากการบดมีขนาด 10 mm การป้อนชีวมวลจะป้อนจากทางด้านบน จากนั้นชีวมวลจะผ่านการสับย่อยและไหลผ่านตะแกรงไหลลงสู่ด้านล่าง เครื่องย่อยชีวมวลแบบหยาบจะใช้สำหรับการย่อยฟางข้าวและต้นข้าวโพด ดังภาพที่ 10



ภาพที่ 10 เครื่องบดย่อยชีวมวลแบบหยาบ

2.2 เครื่องย่อยชีวมวลแบบละเอียด

เครื่องบดย่อยชีวมวลแบบละเอียดใช้สำหรับบดย่อยชีวมวลที่มีขนาดเล็กกว่า 3.0 mm ซึ่งชีวมวลที่ผ่านการบดย่อยจะมีขนาดอยู่ในช่วง 0.5–3.0 mm โดยเครื่องนี้นำมาใช้สำหรับบด ฟางข้าว และต้นข้าวโพด ชุดบดของเครื่องรับกำลังมาจากมอเตอร์ขนาด 3 hp (2.2 kW) แรงดันไฟฟ้า 220 V ใช้สายพานส่งกำลังจากมอเตอร์ให้กับชุดบด ภายในจะมีชุดตีและบดชีวมวลทั้งหมด 4 ชุด พร้อมตะแกรงกรอง ขนาด 3 mm และ 1 mm ดังภาพที่ 11



ภาพที่ 11 เครื่องบดย่อยชีวมวลแบบละเอียด

2.3 ตะแกรงคัดขนาดชีวมวล

ตะแกรงคัดขนาด เป็นตะแกรงร้อนรูปทรงสี่เหลี่ยมขนาดความกว้าง 550 mm ความยาว 700 mm และความสูง 100 mm ส่วนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูตะแกรงคือ 3 mm สามารถคัดขนาดชีวมวลที่อยู่ในช่วง 0-3 mm ดังแสดงในภาพที่ 12



ภาพที่ 12 ตะแกรงคัดขนาดชีวมวล

2.4 เครื่องอัดเม็ดชีวมวล

เครื่องอัดเม็ดชีวมวลเป็นเครื่องผลิตที่มอเตอร์ไฟฟ้าเป็นแหล่งต้นกำลังสำหรับการส่งถ่ายกำลังของเครื่องอัดเม็ดชีวมวล ดังภาพที่ 13 โดยเริ่มจากมอเตอร์ขนาด 5 hp ผ่านคัปปลิ่ง ชุดเฟืองทด และชุดอัดเม็ดชีวมวล ส่วนแม่พิมพ์เป็นแบบแผ่นหมุน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรู 6 mm ความหนา 20 mm ชุดอัดใช้ลูกกลิ้งที่ทำมาจากวัสดุเหล็กผสมสังกะสีคุณภาพสูงทนต่อการสึกหรอมีกำลังการผลิตของเครื่องอยู่ในช่วง 100-250 kg/h วัสดุที่นำมาอัดเป็นเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลต้องมีคุณสมบัติที่นุ่ม เช่น ขี้เลื่อย ฟางข้าว ต้นข้าวโพด แกลบ ก้านดอกทานตะวัน และวัตถุดิบอื่น ๆ เป็นต้น



ภาพที่ 13 เครื่องอัดเม็ดชีวมวล

3. เครื่องผลิตเชื้อเพลิงทอร์รีไฟต์

เครื่องทดสอบกระบวนการทอร์รีแฟชันของงานวิจัยนี้มีส่วนประกอบที่สำคัญอยู่ทั้งหมด 6 ส่วน ได้แก่ ชุดห้องเชื้อเพลิง ชุดห้องเผาไหม้ ชุดควบคุมอุณหภูมิ ชุดอุปกรณ์การยึดและภาชนะบรรจุชีวมวล ชุดระบายความร้อน และชุดป้อนก๊าซไนโตรเจน ดังภาพที่ 14 เป็นชุดควบคุมการทำงานของเครื่องผลิตเชื้อเพลิงทอร์รีไฟต์ ทำหน้าที่ในการตัดต่อวงจรการทำงานเพื่อควบคุมอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ ภาพที่ 15 เป็นเทอร์โมคัปเปิลใช้สำหรับวัดอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ ซึ่งภาพที่ 16 ห้องเผาไหม้ ประกอบไปด้วย ฮีตเตอร์ และท่อสแตนเลส ลักษณะการวางท่อสแตนเลส แสดงดังภาพที่ 17 เป็นการวางท่อแบบแนวตั้งอยู่ตรงกลางห้องเผาไหม้ และเชื่อมต่อกับท่อสแตนเลสที่อยู่ภายนอกชุดห้องเผาไหม้ทั้งด้านบนและด้านล่าง ซึ่งท่อสแตนเลสที่อยู่ด้านบนก็คือชุดระบายความร้อน แสดงดังภาพที่ 18 ส่วนภาพที่ 19 เป็นชุดอุปกรณ์การยึดและภาชนะบรรจุตัวอย่างชีวมวล ทำมาจากเหล็กสแตนเลส โดยอุปกรณ์การยึดใช้สำหรับยึดภาชนะบรรจุชีวมวล และสามารถเลื่อนขึ้นลงได้ตามแนวตั้ง

เมื่อต้องการระบายความร้อนให้แก่ตัวอย่างชีวมวล ก็สามารถดึงภาชนะบรรจุตัวอย่างขึ้นมายังชุดระบายความร้อนที่อยู่ด้านบนห้องเผาไหม้ นอกจากนี้เครื่องทดสอบกระบวนการทอรีรีแฟคชันยังมีชุดป้อนก๊าซไนโตรเจน แสดงดังภาพที่ 20 โดยป้อนก๊าซไนโตรเจนเข้าสู่ท่อสแตนเลสจากทางด้านบน และระบายก๊าซออกทางด้านล่างของเครื่องผลิตเชื้อเพลิงทอรีรีไฟด์ ซึ่งภาพรวมทั้งหมดและไดอะแกรมของเครื่องผลิตเชื้อเพลิงทอรีรีไฟด์แสดงดังภาพที่ 21 และ 22



ภาพที่ 14 ชุดควบคุมอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้



ภาพที่ 15 ชุดวัดอุณหภูมิ (thermocouple)



ภาพที่ 16 ห้องเผาไหม้



ภาพที่ 17 ชุดห้องเชื้อเพลิง



ภาพที่ 18 ชุดระบายความร้อน



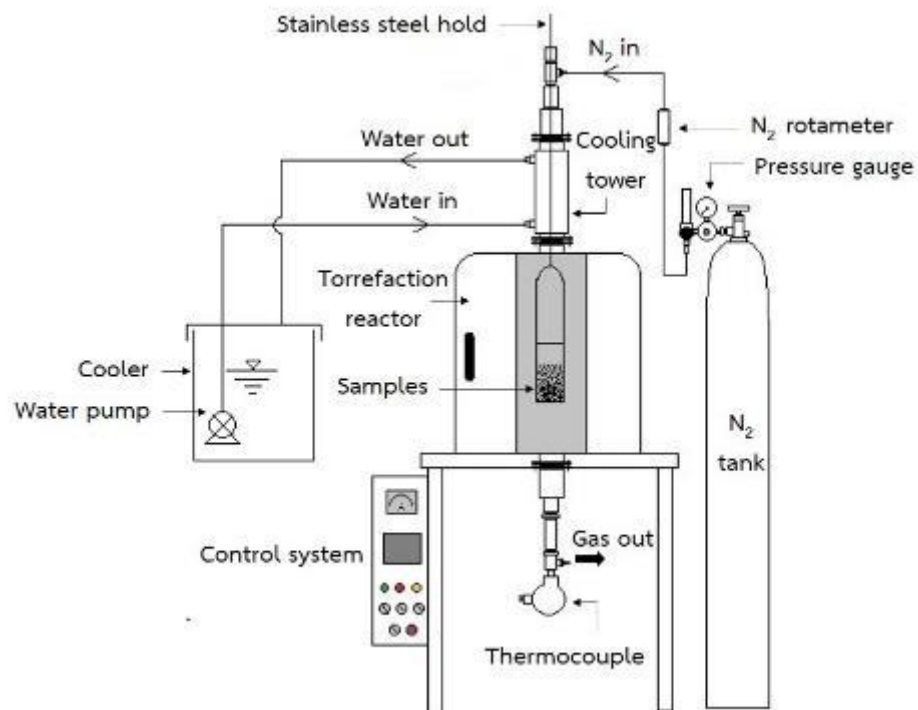
ภาพที่ 19 ชุดอุปกรณ์การวัดและภาชนะบรรจุซีเมนต์



ภาพที่ 20 ชุดป้อนก๊าซไนโตรเจน



ภาพที่ 21 เครื่องผลิตเชื้อเพลิงทอรรีไฟต์



ภาพที่ 22 ไดอะแกรมเครื่องผลิตเชื้อเพลิงทอรรีไฟต์

4. เครื่องผลิตเชื้อเพลิงทอร์รีไฟต์ขนาดนำร่อง

เครื่องผลิตเชื้อเพลิงทอร์รีไฟต์ขนาดนำร่อง ใช้สำหรับวิเคราะห์อัตราการใช้พลังงานและต้นทุนการผลิตในการผลิตเชื้อเพลิงทอร์รีไฟต์ โดยใช้หลักการให้ความร้อนจากภายนอกในสภาวะไร้ออกซิเจน ใช้แก๊สหุงต้มที่เป็นผลิตภัณฑ์ของเวิลด์แก๊ส (world gas) ขนาด 15 kg เป็นแหล่งพลังงานความร้อน ดังภาพที่ 23 ในกระบวนการทอร์รีแฟคชันเชื้อเพลิงชีวมวลจะได้รับความร้อนพร้อมกับเคลื่อนที่แบบหมุน โดยได้รับกำลังจากมอเตอร์ขนาด 5.6 kW และส่งถ่ายกำลังไปยังเพลลา เพื่อทำการหมุนห้องเผาไหม้ด้วยความถี่ 50 Hz ส่วนด้านข้างของเครื่องจะติดตั้งหัวป้อนไนโตรเจน เพื่อป้องกันก๊าซเข้าไปยังห้องเผาไหม้ และด้านข้างอีกด้านหนึ่งจะติดตั้งหัววัดอุณหภูมิสำหรับอ่านค่าอุณหภูมิภายในเครื่องเผาไหม้ ข้อดีของกระบวนการแบบนี้คือ ชีวมวลที่ผ่านกระบวนการจะมีการถ่ายเทความร้อนอย่างทั่วถึง กระบวนการมีประสิทธิภาพเพิ่มสูงขึ้นและที่สำคัญเครื่องนี้จะเป็นต้นแบบในการนำไปขยายผลการผลิตเชื้อเพลิงประเภททอร์รีไฟล์ ต่อไปในอนาคต



ภาพที่ 23 เครื่องผลิตเชื้อเพลิงทอร์รีไฟต์ระดับ Pilot scale

5. อุปกรณ์ทดสอบและวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีและกายภาพ

5.1 เตาเผาอุณหภูมิสูง

เตาเผาอุณหภูมิสูงเป็นเตาเผาแบบปิด สามารถควบคุมอุณหภูมิได้สูงสุด 1,200 °C ขนาดเตาภายนอกมีความกว้าง 450 mm ความสูง 530 mm และความลึก 500 mm ส่วนขนาดเตาภายในมีความกว้าง 170 mm ความสูง 160 mm และความลึก 500 mm ทั้งสองข้างภายในเตาเผามีขดลวดความร้อนและมีเทอร์โมคัปเปิลตรวจวัดอุณหภูมิติดตั้งอยู่ด้านในสุดของเตาเผา ดังภาพที่ 24



ภาพที่ 24 เตาเผาอุณหภูมิสูง

5.2 เตาอบควบคุมอุณหภูมิ

ตู้อบควบคุมอุณหภูมิยี่ห้อ MEMMERT รุ่น UFB500 ทำมาจากเหล็กสแตนเลส ขนาดภายนอกภายนอกตู้อบกว้าง 710 mm ลึก 550 mm และสูง 760 mm ส่วนขนาดภายในตู้อบกว้าง 560 mm ลึก 400 mm และสูง 480 mm มีน้ำหนัก 69 kg และมีปริมาณทั้งหมด 108 L สามารถควบคุมอุณหภูมิได้สูงสุด 300 °C และมีกำลังไฟสูงสุด 2 kW ดังภาพที่ 25



ภาพที่ 25 ตู้อบความชื้นชีวมวล

5.3 โถดูดความชื้น

โถดูดความชื้น (desiccator) ใช้สำหรับดูดความชื้นออกจากสารเคมีต่างๆ ให้เหลือเฉพาะสารเคมี ไม่มี ความชื้นหรือน้ำอยู่ในโมเลกุลของสาร โดยทำงานร่วมกับสารดูดความชื้นที่บรรจุไว้ด้านล่างภายในโถดูดความชื้นหรือเรียกว่าซิลิกาเจล (silica gel) ซึ่งโถดูดความชื้นมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 300 mm ดังภาพที่ 26



ภาพที่ 26 โถดูดความชื้น

5.4 ถ้วยกระเบื้อง

ถ้วยกระเบื้อง (crucible porcelain) เป็นถ้วยกระเบื้องวิทยาศาสตร์พร้อมฝาปิด รูปทรงสูง (tall shape) ปริมาตร 40 ml ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 40 mm ความสูง 50 mm และทนความร้อนได้ถึง 1000 °C ดังภาพที่ 27



ภาพที่ 27 ถ้วยกระเบื้อง

5.5 เครื่องทดสอบค่าความร้อนชีวมวล

ชุดทดสอบค่าความร้อนชีวมวล รุ่น ART.2060/270 ประกอบด้วย Stainless steel bomb เทอร์โมมิเตอร์ ใช้สำหรับวัดอุณหภูมิในน้ำ อุปกรณ์ที่ใช้ในการกวนน้ำ (stirrer) ขนาด 24 V ดังภาพที่ 28 โดยมีหลักการทำงานคือ การเผาไหม้สารด้วยก๊าซออกซิเจนจะให้ความร้อนออกมา แล้ววัดอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ทำให้สามารถคำนวณค่าพลังงานความร้อนของสารนั้น ๆ ได้ โดยมีจุดเด่นคือ ใช้งานง่าย สะดวก และมีความปลอดภัย



ภาพที่ 28 เครื่องวิเคราะห์ค่าความร้อนชีวมวล

5.6 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope) เป็นกล้องจุลทรรศน์ที่ใช้ electron เป็นแหล่งกำเนิดแสง เป็นเครื่องมือที่ใช้ศึกษาลักษณะสัณฐานของวัสดุในระดับจุลภาค ซึ่งเป็นรายละเอียดที่เล็กมาก ใช้ดูวัตถุเล็กสุดประมาณ $0.2 \mu\text{m}$ และให้กำลังขยายสูงสุดไม่เกิน 3,000-100,000 เท่า และสามารถแจกแจงรายละเอียดของภาพได้ตั้งแต่ 3-100 nm ดังแสดงในภาพที่ 29 อีกทั้งยังสามารถใช้งานร่วมกับเทคนิคการวิเคราะห์อื่น เช่น Energy Dispersive Spectrometry (EDS) และ Wavelength Dispersive Spectrometry (WDS) ที่เป็นข้อมูลทางเคมี จึงทำให้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเป็นที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางในปัจจุบัน (หัสวิภา, 2553)



ภาพที่ 29 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

เครื่องมือวัดที่ใช้ในงานวิจัย

ในส่วนของเครื่องมือวัดที่ใช้ในงานวิจัยนี้ประกอบด้วย เครื่องชั่งน้ำหนัก มีอยู่ 2 แบบคือแบบธรรมดา และแบบละเอียด เครื่องวัดความชื้น เครื่องวัดอุณหภูมิ และเวอร์เนียคาลิเปอร์ ซึ่งรายละเอียดข้อมูลของแต่ละเครื่องวัดแสดงดังต่อไปนี้

1. เครื่องชั่งน้ำหนัก

เครื่องชั่งน้ำหนักระบบอิเล็กทรอนิกส์ เป็นผลิตภัณฑ์ของ CST รุ่น CDR-30 พิกัดกำลัง $30 \text{ kg} \times 1 \text{ g}$ อุณหภูมิใช้งานที่ $5\text{--}40^\circ\text{C}$ ดังภาพที่ 30 ใช้สำหรับชั่งน้ำหนักชีวมวลประเภทฟางข้าว และต้นข้าวโพด เพื่อเตรียมตัวอย่างก่อนการอัดเม็ด และทดสอบกระบวนการทอรรีแฟกชัน



ภาพที่ 30 เครื่องชั่งน้ำหนัก

2. เครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิทัล 4 ตำแหน่ง

เครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิทัล เป็นผลิตภัณฑ์ของ Ohaus รุ่น PA214 มีทศนิยม 4 ตำแหน่ง พิกัด 210 g ค่าความละเอียด 0.0001 g ส่วนจานชั่งน้ำหนักมีขนาด 9.0 cm ดังภาพที่ 31 ใช้สำหรับชั่งน้ำหนักชีวมวลในการวิเคราะห์โดยประมาณ ซึ่งต้องการความละเอียดสูง



ภาพที่ 31 เครื่องชั่งดิจิทัล Pioneer ทศนิยม 4 ตำแหน่ง

3. เครื่องวัดความชื้น

เครื่องวัดความชื้น รุ่น MD-7822 สามารถวัดความชื้นได้ตั้งแต่ 8-30% และวัดอุณหภูมิได้ตั้งแต่ -10 - 55 °C มีหัววัดของเครื่องเป็นเหล็กยาว 2 ขา สำหรับเสียบลงไปในชีวิตมวลที่ต้องการวัดความชื้น โดยคำนวณค่าความชื้นด้วยระบบ micro-computer LSI circuit ดังภาพที่ 32 ในงานวิจัยนี้ใช้สำหรับการวัดความชื้นชีวมวลระหว่างกระบวนการอัดเม็ด ซึ่งสามารถอ่านค่าได้อย่างแม่นยำและรวดเร็ว



ภาพที่ 32 เครื่องวัดความชื้นธัญพืช รุ่น MD-7822

4. เครื่องวัดอุณหภูมิแบบอินฟราเรด

เครื่องวัดอุณหภูมิแบบอินฟราเรด เป็นผลิตภัณฑ์ของ CEM รุ่น DT-8828 สามารถวัดอุณหภูมิในช่วง $-50 - 1,000^{\circ}\text{C}$ ความละเอียด 0.1°C ขนาดเครื่อง $23 \times 10 \times 5.6$ cm ดังภาพที่ 33 ใช้สำหรับวัดอุณหภูมิเครื่องอัดเม็ดในระหว่างการอัดเม็ด และวัดอุณหภูมิของเม็ดเชื้อเพลิง เพื่อศึกษาอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการอัดเม็ดชีวมวลประเภทฟางข้าว และต้นข้าวโพด



ภาพที่ 33 เครื่องวัดอุณหภูมิแบบอินฟราเรด

5. เวอร์เนียคาลิปเปอร์

เวอร์เนียคาลิปเปอร์ ใช้สำหรับการวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง และความยาวของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลที่ได้จากการอัดเม็ด เพื่อใช้ในการหาความหนาแน่นของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล และให้ได้ขนาดที่แม่นยำดังแสดงภาพที่ 34



ภาพที่ 34 เวอร์เนียคาลิปเปอร์

วิธีการทดสอบกระบวนการทอรีรีแฟคชั่น

ในการศึกษาครั้งนี้เป็นการทดสอบกระบวนการทอรีรีแฟคชั่น เพื่อเพิ่มคุณภาพชีวมวลทั้งทางด้านเคมีและทางด้านกายภาพ โดยมีเงื่อนไขและขั้นตอนการทดสอบดังนี้

1. การเตรียมตัวอย่างชีวมวลแบบกากและแบบอัดเม็ด

การเตรียมชีวมวลแบบกาก เริ่มจากการนำเอาชีวมวลมาลดขนาดด้วยเครื่องบดย่อยแบบหยาบ และนำมาบดอีกครั้งด้วยเครื่องบดย่อยแบบละเอียด จากนั้นนำชีวมวลมาคัดขนาดด้วยตะแกรงขนาด 3 mm เพื่อให้ได้ชีวมวลที่มีขนาดสม่ำเสมอ และจัดเก็บชีวมวลไว้ในที่แห้งเตรียมสำหรับการทดสอบกระบวนการทอรีรีแฟคชั่น

การเตรียมชีวมวลแบบอัดเม็ด เริ่มจากการลดขนาดของชีวมวลด้วยเครื่องบดย่อยแบบหยาบ และแบบละเอียดเช่นกัน จากนั้นนำมาร่อนให้ได้ชีวมวลขนาด 3 mm เพื่อเตรียมชีวมวลสำหรับการอัดเม็ด สำหรับขั้นตอนการอัดเม็ดชีวมวลสามารถทำได้ดังนี้

1. การใช้เครื่องอัดเม็ดชีวมวลแต่ละครั้งต้องมีการอุ่นเครื่องก่อนเสมอ เพื่อให้เครื่องอัดเม็ดร้อนและมีอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการเป็นเม็ดของชีวมวล โดยใช้วัสดุตั้งต้นที่ใช้สำหรับการอุ่นเครื่องอัดเม็ดยังทำจากส่วนผสมของขี้เลื่อย 5 kg ทรายละเอียด 1 kg และน้ำมันเครื่อง 1 kg ซึ่งใช้เวลาในการอุ่นเครื่องหรือป้อนวัสดุตั้งต้นเข้าเครื่องอัดเม็ดประมาณ 5-10 min อุณหภูมิของเครื่องจะสูงขึ้นอยู่ในช่วง 50-60 °C

2. การเตรียมชีวมวลสำหรับการอัดเม็ด เริ่มจากการนำชีวมวลฟางข้าวและต้นข้าวโพดบดขนาด 3 mm มาผสมกับน้ำประมาณ 70-80% และคลุกเคล้าให้เข้ากันมากที่สุด

3. ชีวมวลที่เตรียมไว้ป้อนเข้าเครื่องอัดเม็ดหลังเสร็จจากกันอุ่นเครื่องทันที และป้อนชีวมวลแบบวนลูบไปเรื่อย ๆ ดังภาพที่ 35 จนเครื่องอัดเม็ดร้อนหรือมีอุณหภูมิประมาณ 70-90 °C ซึ่งขั้นตอนนี้จะใช้เวลาประมาณ 15-20 min ก็จะสามารถผลิตชีวมวลอัดเม็ดออกมาได้



ภาพที่ 35 การบดชีวมวลเข้าเครื่องอัดเม็ด

2. การทดสอบกระบวนการเทอร์รีแฟคชัน

เงื่อนไขการทดสอบกระบวนการเทอร์รีแฟคชันของงานวิจัยนี้ ได้แก่

1. เงื่อนไขของตัวอย่างชีวมวลที่ใช้ในการทดสอบกระบวนการเทอร์รีแฟคชันคือ ใช้ชีวมวลประเภทฟางข้าว และต้นข้าวโพด และมีลักษณะเป็นแบบกาก และแบบอัดเม็ด
2. เงื่อนไขของอุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบกระบวนการเทอร์รีแฟคชัน จะใช้อุณหภูมิทดสอบอยู่ 3 อุณหภูมิ ได้แก่ 200, 300 และ 400 °C
3. เงื่อนไขของเวลาที่ใช้ในการทดสอบกระบวนการเทอร์รีแฟคชัน จะใช้เวลาทดสอบอยู่ทั้งหมด 3 เวลา ได้แก่ 20, 40 และ 60 min
4. เงื่อนไขการป้อนก๊าซไนโตรเจนเข้าเครื่องทดสอบกระบวนการเทอร์รีแฟคชัน มีอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจน 5 l/min

3. การวิเคราะห์โดยประมาณ (proximate analysis)

3.1 ความชื้น

ปริมาณความชื้นสามารถวิเคราะห์ได้จากมาตรฐาน ASTM 3173-73 โดยเริ่มจากการนำตัวอย่างกระเบื้องไปเผาที่อุณหภูมิ 750 °C เป็นระยะเวลา 30 min เพื่อทำความสะอาดด้วยกระเบื้อง แล้วนำไปเก็บไว้ในโถดูดความชื้น ทิ้งไว้ให้เย็น จากนั้นชั่งน้ำหนักตัวอย่างชีวมวลลงในถ้วยกระเบื้องประมาณ 1 g นำไปเข้าตู้อบที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 3 h หรือจนกว่าน้ำหนักจะคงที่ หลังจากนั้นนำมาเก็บไว้ในโถดูดความชื้น เพื่อรอให้ถ้วยกระเบื้องเย็นตัวลง แล้วนำมาชั่งน้ำหนักหลังการทดสอบ โดยสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 1

3.2 สารระเหย

ปริมาณสารระเหยสามารถวิเคราะห์ได้จากมาตรฐาน ASTM D 5382-98 โดยการนำถ้วยกระเบื้องไปเผาที่อุณหภูมิ 750 °C เป็นเวลา 30 min แล้วนำไปเก็บไว้ในโถดูดความชื้น เพื่อร้อนให้ถ้วยเย็นตัวลง จากนั้นชั่งน้ำหนักตัวอย่างชีวมวลลงในถ้วยกระเบื้อง 1 g แล้วปิดฝาถ้วยและนำไปเผาที่อุณหภูมิ 950 °C เป็นเวลา 7 min หลังจากนั้นนำถ้วยที่เผาเสร็จไปเก็บไว้ในโถดูดความชื้น เพื่อรอให้เย็นตัวลง แล้วนำไปชั่งน้ำหนักหลังการทดสอบ เพื่อนำมาคำนวณหาปริมาณสารระเหยของตัวอย่างชีวมวลจากสมการที่ 2 และ 3

3.3 เถ้า

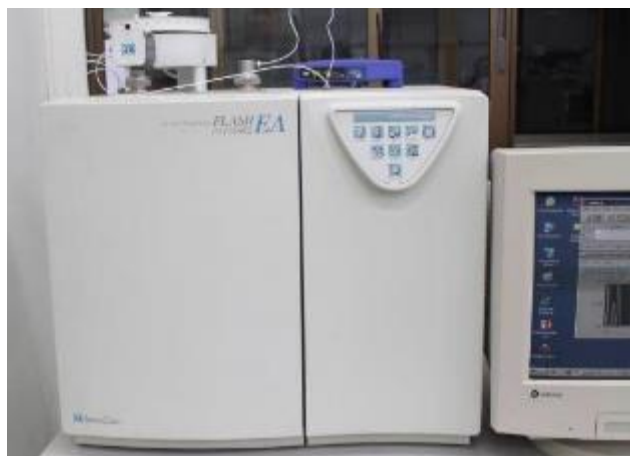
การวิเคราะห์ปริมาณเถ้าของชีวมวล วิเคราะห์ได้จากมาตรฐาน ASTM D 28866-94 โดยวิธีการเริ่มจากการนำถ้วยกระเบื้องไปเผาเพื่อทำความสะอาดที่อุณหภูมิ 750 °C เป็นเวลา 30 min แล้วนำไปเก็บทิ้งไว้ในโถดูดความชื้นเพื่อรอให้เย็นลง จากนั้นชั่งน้ำหนักตัวอย่างชีวมวล 1 g และปิดฝาถ้วย เพื่อนำไปเผาที่อุณหภูมิ 650 °C เป็นเวลา 3 h เมื่อเผาเสร็จนำถ้วยกระเบื้องพร้อมตัวอย่างชีวมวลมาเก็บไว้ในโถดูดความชื้น เพื่อรอให้เย็นตัวลง จากนั้นนำไปชั่งน้ำหนักตัวอย่างหลังการทดสอบ และคำนวณหาปริมาณเถ้าจากสมการที่ 5

3.4 คาร์บอนคงตัว

ปริมาณคาร์บอนคงตัวของตัวอย่างชีวมวลสามารถวิเคราะห์ได้จากการคำนวณปริมาณน้ำหนักของตัวอย่างชีวมวลทั้งหมด แล้วลบด้วยปริมาณความชื้น ปริมาณสารระเหย และปริมาณเถ้า ซึ่งสามารถคำนวณได้ตั้งสมการที่ 4

4. การวิเคราะห์แบบขั้นสุดท้าย (ultimate analysis)

งานวิจัยนี้ได้วิเคราะห์ขั้นสุดท้ายของตัวอย่างชีวมวลประเภทฟางข้าวและต้นข้าวโพดจากศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ โดยใช้เครื่องวิเคราะห์ปริมาณธาตุยี่ห้อ Thermo Scientific รุ่น Flash 2000 ดังภาพที่ 36 ซึ่งอาศัยหลักการเผาตัวอย่างที่อุณหภูมิสูงให้กลายเป็นแก๊สผสม โดยตัวอย่างจะต้องมีความเป็นเนื้อเดียวกัน จึงสามารถวิเคราะห์ธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน ซัลเฟอร์ และออกซิเจน ของตัวอย่างชีวมวลได้



ภาพที่ 36 เครื่องวิเคราะห์ปริมาณธาตุ

ที่มา: ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ และมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ (2559)

5. การทดสอบค่าความร้อน

การวิเคราะห์ค่าความร้อนของฟางข้าวและต้นข้าวโพด สามารถวิเคราะห์ได้ตามมาตรฐาน ASTM D240 D4809 D2382 IP12 โดยใช้เครื่องทดสอบค่าความร้อนชีวมวล รุ่น ART.2060/2070 โดยเริ่มจากการเตรียมชีวมวลก่อนการทดสอบค่าความร้อน โดยการนำไปอัดเป็นเม็ดน้ำหนักอยู่ในช่วง 0.5-1.0 g จากนั้นเม็ดชีวมวลบรรจุลงไปใน Stainless steel bomb ปิดฝา และอัดแก๊สออกซิเจน แล้วนำไป ใส่ลงไปในเครื่อง Bomb calorimeter กดปุ่มเริ่มทำงาน ซึ่งเครื่องนี้สามารถวิเคราะห์ค่าความร้อนได้ทั้งหน่วย MJ/kg และ หน่วย kcal/kg

6. การวิธีการเลือกสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการเทอร์รีแฟคชัน

ในการคัดเลือกอุณหภูมิและระยะเวลาที่เหมาะสมของกระบวนการเทอร์รีแฟคชันสำหรับชีวมวลประเภทฟางข้าวและต้นข้าวโพด สามารถคัดเลือกได้จากการเปรียบเทียบค่าผลผลิตพลังงาน (energy yield) ของแต่ละเงื่อนไขที่ใช้ในกระบวนการเทอร์รีแฟคชัน ซึ่งวิธีการดังกล่าวนี้เป็นวิธีการที่ได้รับความนิยมและการยอมรับจากนักวิจัยหลาย ๆ ท่าน (Huang et al., 2012; Poudel et al., 2015; Chiou et al., 2015) โดยเริ่มจากการคำนวณหาค่าผลผลิตมวล (mass yield) ดังสมการที่ 10 เพื่อนำมาคำนวณหาค่าผลผลิตพลังงาน ดังสมการที่ 11 หลังจากนั้นนำค่าผลผลิตพลังงานของแต่ละเงื่อนไขอุณหภูมิและเวลามาเปรียบเทียบกัน จะเห็นได้ว่าเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดจะมีค่าผลผลิตพลังงานสูงสุด

7. การวิเคราะห์โครงสร้างชีวมวล

โครงสร้างพื้นผิวของชีวมวลสามารถวิเคราะห์ได้ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด โดยงานวิจัยนี้ได้ส่งวิเคราะห์โครงสร้างพื้นผิวตัวอย่างชีวมวลที่สถาบันตรวจสอบคุณภาพและมาตรฐานผลิตภัณฑ์ (IQS) มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ซึ่งวิเคราะห์โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด รุ่น JSM-5410LV โดยใช้กำลังขยาย 500 μm ดังภาพที่ 28

ไดอะแกรมภาพรวมการดำเนินงานวิจัย

1. การศึกษาเงื่อนไขที่เหมาะสมของกระบวนการทอรีรีแฟคชัน

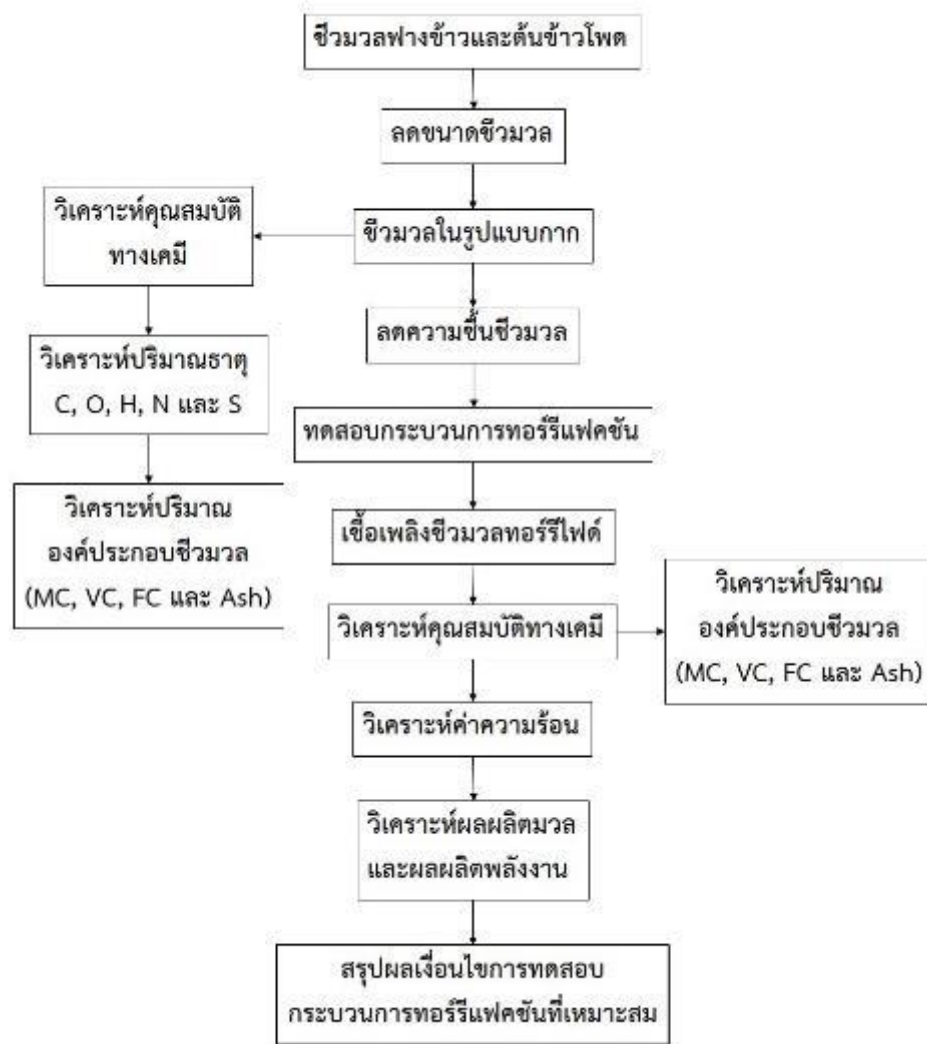
การศึกษาหาเงื่อนไขกระบวนการทอรีรีแฟคชันสำหรับชีวมวลประเภทฟางข้าวและต้นข้าวโพด เป็นการศึกษาเพื่อสรุปหาเงื่อนไขอุณหภูมิและระยะเวลาทอรีรีแฟคชันที่เหมาะสมที่สุดสำหรับชีวมวลแต่ละประเภท ซึ่งผลสรุปเงื่อนไขที่ได้จะนำไปใช้ในการทดสอบการผลิตเชื้อเพลิงทอรีรีไฟต์อัดเม็ดและเชื้อเพลิงอัดเม็ดทอรีรีไฟต์ โดยรายละเอียดขั้นตอนการศึกษาแสดงดังภาพที่ 37

2. การศึกษากระบวนการทอรีรีแฟคชันเชื้อเพลิงทอรีรีไฟต์อัดเม็ด

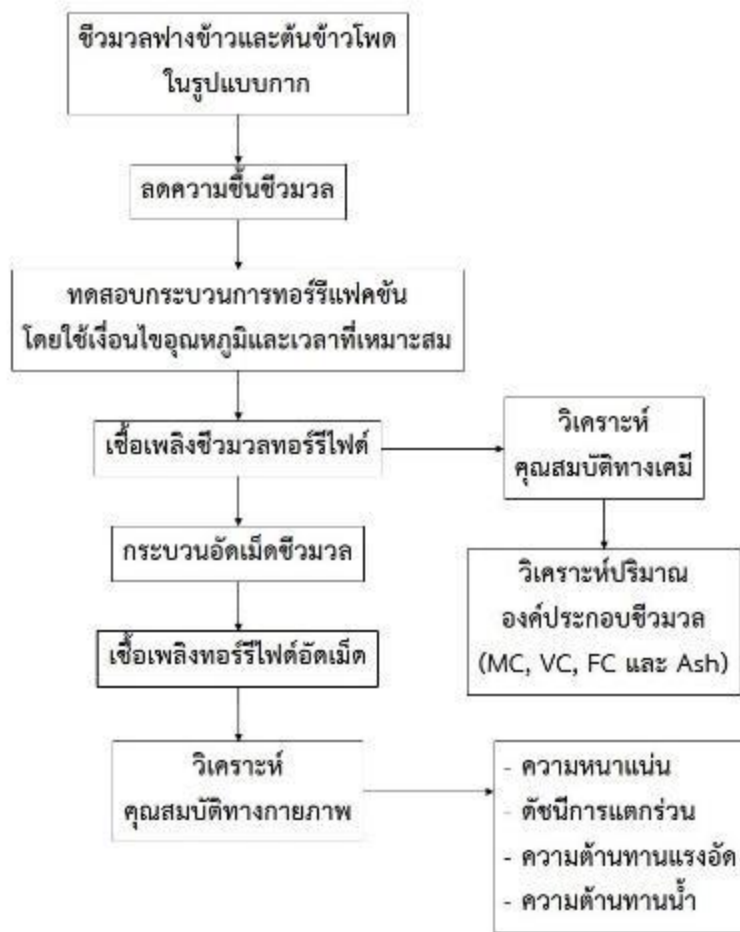
การศึกษากระบวนการทอรีรีแฟคชันสำหรับการผลิตเชื้อเพลิงทอรีรีไฟต์อัดเม็ด เป็นการนำเอาชีวมวลที่อยู่ในรูปแบบกากมาผ่านกระบวนการทอรีรีแฟคชัน ภายใต้เงื่อนไขของอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสม เรียกว่า เชื้อเพลิงทอรีรีไฟต์ จากนั้นนำเชื้อเพลิงทอรีรีไฟต์ที่ได้มาผ่านกระบวนการอัดเม็ด จึงเรียกชีวมวลที่ได้ว่า เชื้อเพลิงทอรีรีไฟต์อัดเม็ด โดยรายละเอียดขั้นตอนการศึกษาแสดงดังภาพที่ 38

3. การศึกษากระบวนการทอรีรีแฟคชันเชื้อเพลิงอัดเม็ดทอรีรีไฟต์

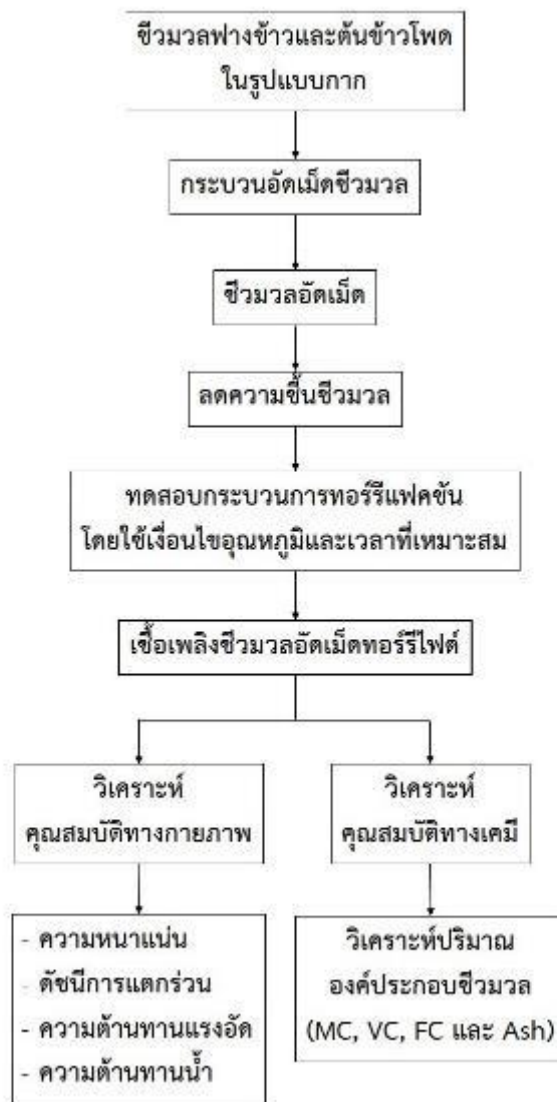
การศึกษากระบวนการทอรีรีแฟคชันสำหรับการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดทอรีรีไฟต์ เป็นการนำเอาชีวมวลที่อยู่ในรูปแบบกากมาผ่านกระบวนการอัดเม็ดก่อน แล้วนำเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ได้ไปผ่านกระบวนการทอรีรีแฟคชัน ภายใต้เงื่อนไขของอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมสำหรับชีวมวลแต่ละชนิด โดยเรียกเชื้อเพลิงเหล่านี้ว่า เชื้อเพลิงอัดเม็ดทอรีรีไฟต์ ซึ่งรายละเอียดการศึกษาแสดงดังภาพที่ 39



ภาพที่ 37 แผนการศึกษาเงื่อนไขที่เหมาะสมของกระบวนการทอรีแฟคชัน



ภาพที่ 38 แผนการศึกษากระบวนการทอรรีแฟคชันเชื้อเพลิงทอรรีไฟต์อัดเม็ด



ภาพที่ 39 แผนการศึกษากระบวนการทอริไฟเคชันของเชื้อเพลิงอัดเม็ดทอริไฟด์

บทที่ 4

ผลและอภิปรายผลการทดลอง

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลและการอภิปรายผลการทดลองอันประกอบไปด้วย คุณสมบัติพื้นฐานของชีวมวล ผลการศึกษากระบวนการอัดเม็ดเชื้อเพลิง กระบวนการทอรีไฟเคชันของเชื้อเพลิงทั้งในรูปแบบกากและแบบอัดเม็ด โดยแบ่งเป็นการวิเคราะห์เชิงกายภาพและเคมี การวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ อัตราการใช้พลังงาน และต้นทุนการผลิตเชื้อเพลิง โดยเชื้อเพลิงทอรีไฟด์ที่ได้ทดสอบแบ่งเป็นแบบกากแล้วทอรีไฟเคชัน เรียกว่า เชื้อเพลิงทอรีไฟด์ และเชื้อเพลิงแบบอัดเม็ดแล้วทอรีไฟเคชัน เรียกว่า เชื้อเพลิงอัดเม็ดทอรีไฟด์ ซึ่งรายละเอียดผลการทดสอบ มีดังต่อไปนี้

คุณสมบัติพื้นฐานเชื้อเพลิง

1. คุณสมบัติทางเคมีและทางกายภาพของชีวมวล

ในกระบวนการเพิ่มความคุณภาพชีวมวลต้องมีการตรวจวัดคุณสมบัติทางเคมีและกายภาพของชีวมวลก่อนนำไปทดลอง ซึ่งคุณสมบัติพื้นฐานประกอบด้วย การวิเคราะห์โดยประมาณ (proximate analysis) การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (ultimate analysis) และการวิเคราะห์กายภาพ ประกอบด้วย การวิเคราะห์ความหนาแน่น ความต้านทานแรงอัด ดัชนีการแตกร่วนและความต้านทานน้ำ เป็นต้น ผลการศึกษาพบว่าปริมาณความชื้นของฟางข้าวและต้นข้าวโพดมีค่าเฉลี่ยใกล้เคียงกัน โดยมีค่าเท่ากับ 7.87% และ 7.22% ตามลำดับ ดังตารางที่ 7 ปริมาณความชื้นส่งผลต่อคุณสมบัติเชื้อเพลิง หากชีวมวลมีความชื้นสูงจะส่งผลต่อประสิทธิภาพการเผาไหม้และค่าความร้อนของชีวมวลลดต่ำลง (Wang et al., 2012) ในด้านสารระเหยของฟางข้าวและต้นข้าวโพดมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 79.93% และ 86.74% ตามลำดับ ชีวมวลที่มีปริมาณสารระเหยสูงจะส่งผลให้การเผาไหม้ก่อให้เกิดคราบน้ำมันดิน ซึ่งการใช้งานในระยะยาวจะเป็นปัญหาต่อระบบการทำงานของอุปกรณ์ ในด้านปริมาณคาร์บอนคงตัวของชีวมวลทั้ง 2 ชนิด มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 0.92% และ 0.29% ตามลำดับ ซึ่งปริมาณคาร์บอนคงตัวที่มีอยู่ในชีวมวลจะส่งผลให้สัดส่วนค่าความร้อนของชีวมวลเพิ่มสูงขึ้น (Parikh et al., 2005) และในด้านของปริมาณเถ้าของฟางข้าวและต้นข้าวโพด มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 11.28% และ 5.75% ตามลำดับ ชีวมวลที่มีปริมาณเถ้าสูงจะส่งผลต่อปริมาณของเสียตกค้างที่หลงเหลือจากการเผาไหม้ ซึ่งท้ายที่สุดจะส่งผลต่อการออกแบบระบบกำจัดเถ้า และแหล่งเก็บเถ้า ซึ่งหมายถึงการลงทุนค่าใช้จ่ายในการสร้างระบบที่เพิ่มสูงขึ้น ในส่วนของการวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีใช้วิธีการวิเคราะห์โดยแยกธาตุ พบว่าชีวมวลประเภทฟางข้าวและต้นข้าวโพด มีค่าคาร์บอนอยู่ในช่วง 39.70-41.10%

ไฮโดรเจนมีค่าอยู่ในช่วง 5.12-5.37% ไนโตรเจนมีค่าอยู่ในช่วง 0.35-0.52% และออกซิเจนมีค่าอยู่ในช่วง 37.91-38.66% ในส่วนของค่าความร้อนของฟางข้าวและต้นข้าวโพดมีค่าเฉลี่ย 15.01 MJ/kg และ 15.94 MJ/kg ตามลำดับ ขณะเดียวกันในส่วนของความหนาแน่นของฟางข้าวและต้นข้าวโพดมีค่าเฉลี่ย 310.8 kg/m³ และ 373.02 kg/m³ ตามลำดับ ลักษณะสีของฟางข้าวเป็นน้ำตาลอ่อน ส่วนต้นข้าวโพดเป็นสีออกสีเขียวอ่อน ผลการวิเคราะห์ภาพรวมในตารางปริมาณธาตุแต่ละธาตุของต้นข้าวโพดทั้งหมดและรวมถึงค่าความร้อนสูงกว่าฟางข้าว อย่างไรก็ตามเมื่อเอาชีวมวลที่ทดสอบไปเปรียบเทียบกับชีวมวลฟางข้าวและต้นข้าวโพดทั่วไปมีค่าเฉลี่ยใกล้เคียงกัน

ตารางที่ 7 คุณสมบัติพื้นฐานทางเคมีและทางกายภาพของชีวมวล

| Proximate analysis (%wt.) | ฟางข้าว | ต้นข้าวโพด |
|----------------------------------|------------|------------|
| ความชื้น | 7.87 | 7.22 |
| สารระเหย | 79.93 | 86.74 |
| คาร์บอนคงตัว | 0.92 | 0.29 |
| เถ้า | 11.28 | 5.75 |
| Ultimate analysis (%wt.) | ฟางข้าว | ต้นข้าวโพด |
| คาร์บอน | 39.70 | 41.10 |
| ไฮโดรเจน | 5.12 | 5.37 |
| ไนโตรเจน | 0.35 | 0.52 |
| ออกซิเจน | 37.91 | 38.66 |
| ค่าความร้อน (MJ/kg) | 15.01 | 15.94 |
| Physical analysis | ฟางข้าว | ต้นข้าวโพด |
| ความหนาแน่น (kg/m ³) | 310.8 | 373.02 |
| ลักษณะสี | น้ำตาลอ่อน | เหลืองอ่อน |







การศึกษากระบวนการอัดเม็ดเชื้อเพลิง

1. ผลกระทบของอุณหภูมิและความชื้นที่มีต่อการอัดเม็ดชีวมวล







ในกระบวนการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากชีวมวล อุณหภูมิและความชื้นเป็นตัวแปรหลักในการขึ้นรูปเป็นเม็ดเชื้อเพลิง (Ishii and Furuichi, 2014) การศึกษาการปรับอุณหภูมิและความชื้นจะ

ใช้วิธีการเพิ่มอุณหภูมิในแต่ละรอบการผลิต โดยการวนรอบการผลิตเพื่อเพิ่มอุณหภูมิเม็ดชีวมวลให้สูงขึ้น ซึ่งเมื่ออุณหภูมิเม็ดเชื้อเพลิงสูงขึ้น อุณหภูมิของการอัดเม็ดก็จะสูงตาม ในส่วนของความชื้นรอบการผลิตจะทำให้ความชื้นลดลง ซึ่งตรงกันข้ามกับอุณหภูมิ ส่วนการทดสอบการอัดเม็ดฟางข้าวและต้นข้าวโพดพบว่า การใช้อุณหภูมิการอัดสูงจะส่งผลให้เม็ดเชื้อเพลิงขึ้นรูปดีขึ้น ในขณะที่การใช้อุณหภูมิต่ำ จะทำให้แรงยึดเกาะระหว่างเนื้อชีวมวลมีค่าต่ำ และผิวเชื้อเพลิงมีลักษณะแตกร่วน ดังตารางที่ 8 และตารางที่ 9 อุณหภูมิเฉลี่ยที่เหมาะสมต่อการอัดเม็ดของเชื้อเพลิงชีวมวลประเภทฟางข้าวและต้นข้าวโพด คือ 81.6 °C และ 84.6 °C ตามลำดับ การใช้อุณหภูมิที่สูงเกินไปส่งผลให้มอเตอร์ทำงานหนัก มีความร้อนสูงและอัตราการสึกหรอสูง โดยทั่วไปอุณหภูมิการอัดเม็ดไม่ควรเกิน 90 °C (Huang et al., 2015) ผลการใช้อุณหภูมิที่สูงของการอัดเม็ดเชื้อเพลิง จะส่งผลให้องค์ประกอบของชีวมวลบางส่วนเกิดการสลายตัว และปล่อยสารระเหยกลุ่มยางเหนียวออกมา ทำให้เกิดการยึดเกาะกันของเนื้อชีวมวลได้ดีขึ้น (Kaliyan and Morey, 2009) ในด้านความชื้นพบว่าการใช้ความชื้นในการอัดเม็ดที่สูงเกินไป จะส่งผลให้การจับตัวกันเป็นก้อนของเม็ดเชื้อเพลิงลดลง โดยความชื้นที่เหมาะสมสำหรับฟางข้าวและต้นข้าวโพดสอดคล้องกัน ซึ่งจะอยู่ในช่วง 28.5-30%

ตารางที่ 8 การเปลี่ยนแปลงลักษณะของฟางข้าวอัดเม็ดตามอุณหภูมิและความชื้น

| Samples | Temperature (°C) | Moisture (%) | Characteristic |
|---------|------------------|--------------|---|
| 1 | 56 | 31.5 |  |
| 2 | 61.4 | 31.5 |  |
| 3 | 67.8 | 30.5 |  |
| 4 | 74.1 | 29.5 |  |
| 5 | 78.8 | 29.5 |  |
| 6 | 81.6 | 28.5 |  |

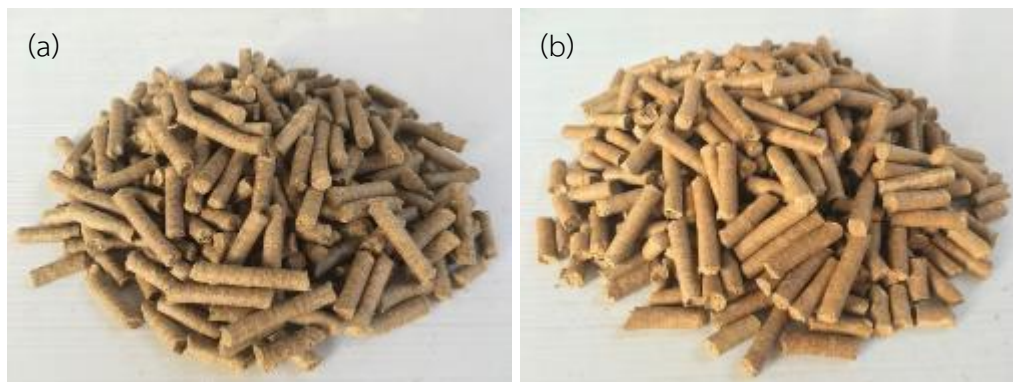
ตารางที่ 9 การเปลี่ยนแปลงลักษณะของต้นข้าวโพดอัดเม็ดตามอุณหภูมิและความชื้น

| Samples | Temperature (°C) | Moisture (%) | Characteristic |
|---------|------------------|--------------|---|
| 1 | 56.8 | 31.5 |  |
| 2 | 60.1 | 31.5 |  |
| 3 | 67.8 | 30.5 |  |
| 4 | 75.4 | 30.5 |  |
| 5 | 80.1 | 30.0 |  |
| 6 | 84.6 | 30.0 |  |

2. คุณสมบัติทางกายภาพของเชื้อเพลิงอัดเม็ด

2.1 ลักษณะทางกายภาพทั่วไป

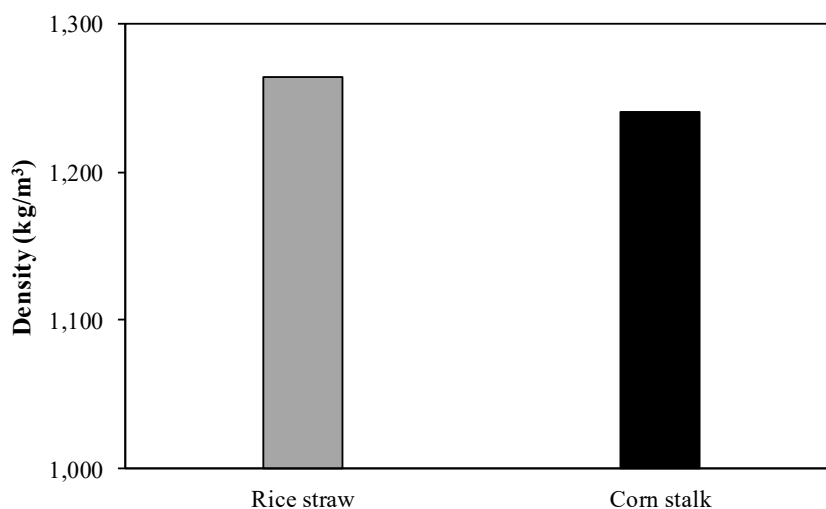
ผลการทดสอบการอัดเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลฟางข้าวและต้นข้าวโพดพบว่า ถ้ามีการใช้อุณหภูมิและความชื้นที่เหมาะสมจะนำไปสู่ลักษณะและคุณสมบัติของเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ดี (Zafari, 2012) ลักษณะของเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่อัดภายใต้สภาวะอุณหภูมิและความชื้นที่เหมาะสม เนื้อของเชื้อเพลิงอัดเม็ดจะมีลักษณะเป็นผิวเรียบ มีความเป็นมันวาว ความยาวโดยเฉลี่ย 2.7-3.5 cm ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 6 mm การบิบบด้วยนิ้วมีความแข็ง ไม่แตกง่าย ดังภาพที่ 40 อย่างไรก็ตามถ้าเปรียบเทียบลักษณะทางกายภาพของชีวมวลอัดเม็ดจากงานวิจัยอื่น พบว่าความยาวโดยเฉลี่ยและลักษณะผิวก็จะมีลักษณะใกล้เคียงกัน (Said et al., 2015; อธิพงษ์ และคณะ, 2558)



ภาพที่ 40 ลักษณะกายภาพของชีวมวลอัดเม็ดจากฟางข้าว (a) และต้นข้าวโพด (b)

2.2 ความหนาแน่น

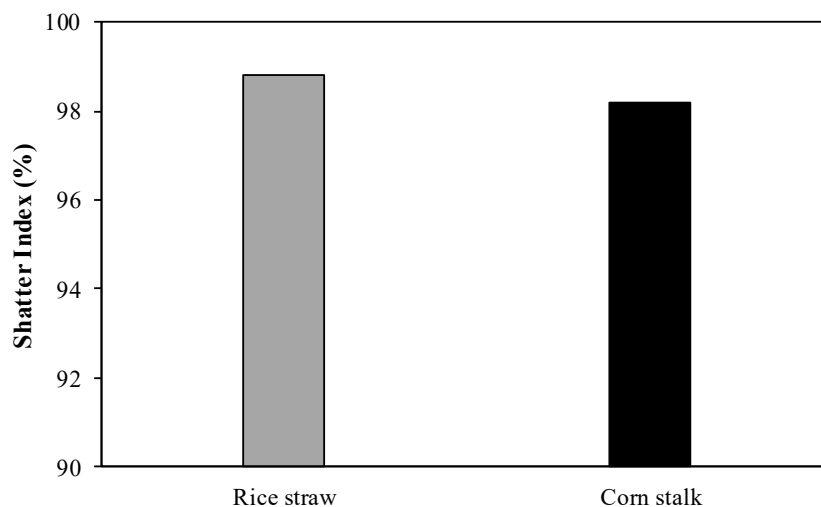
การวิเคราะห์ความหนาแน่นของเชื้อเพลิงอัดเม็ดชีวมวลประเภทฟางข้าว และต้นข้าวโพด พบว่าการใช้ฟางข้าวทำเป็นเชื้อเพลิงอัดเม็ดให้ความหนาแน่นสูงกว่าต้นข้าวโพด โดยมีความหนาแน่นเฉลี่ย 1,264.69 และ 1,241.26 kg/m³ ตามลำดับ ซึ่งมีค่าสูงกว่ามาตรฐานเชื้อเพลิงอัดเม็ดโดยทั่วไป มีค่าเฉลี่ย 600 kg/m³ (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2555) สาเหตุที่ชีวมวลประเภทฟางข้าวมีความหนาแน่นสูงกว่าต้นข้าวโพด เนื่องจากชีวมวลกลุ่มข้าวมีปริมาณลิกนินและไฟเบอร์สูงกว่าชีวมวลกลุ่มข้าวโพด (Kaliyan and Morey, 2009; Liu et al., 2013) ซึ่งการอัดเม็ดชีวมวลที่อุณหภูมิสูง ลิกนินจะอ่อนตัวและทำหน้าที่เป็นเสมือนตัวประสาน ส่งผลให้เนื้อของชีวมวลเกาะรวมกันได้ดี ในขณะที่ไฟเบอร์ที่อยู่ในชีวมวลแต่ละชนิดจะประกอบด้วยไฟเบอร์ที่ละลายน้ำและไม่ละลายน้ำ ในส่วนที่สามารถละลายน้ำได้จะไปเพิ่มความหนืด ซึ่งช่วยให้เนื้อชีวมวลยึดเกาะกันได้ดี และเป็นผลดีต่อการอัดเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล (Kaliyan and Morey, 2009)



ภาพที่ 41 ความหนาแน่นของเชื้อเพลิงอัดเม็ด

2.3 ดัชนีการแตกร่วน

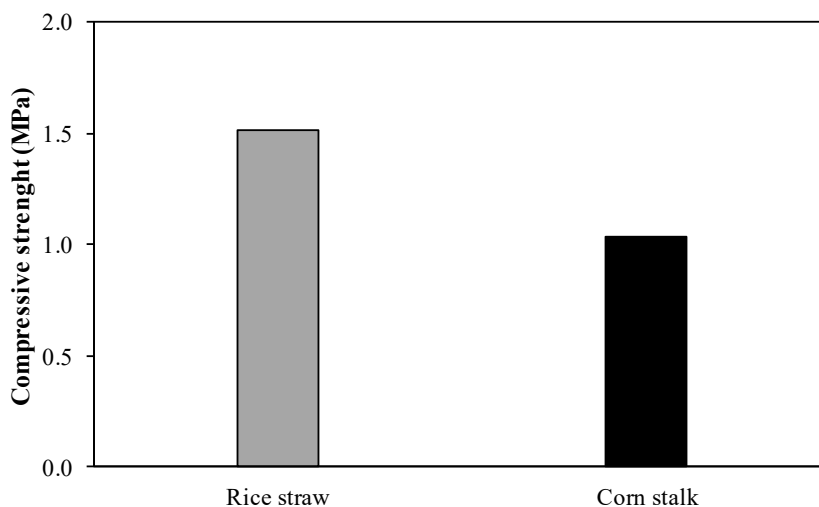
ดัชนีการแตกร่วนของเชื้อเพลิงอัดเม็ดเป็นค่าที่ใช้สำหรับการประเมินความทนทานต่อการสลายตัวของเชื้อเพลิงอัดเม็ด ซึ่งอาจเกิดขึ้นในระหว่างการลำเรียงขนส่งหรือระหว่างการใช้งาน ค่ามาตรฐานการแตกร่วนของเชื้อเพลิงชีวมวลนั้นโดยทั่วไปควรมีค่าสูงกว่า 95% ตามมาตรฐานการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดในประเทศไทยหรือแถบยุโรป (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2555; คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม, 2555) เมื่อเปรียบเทียบชีวมวลประเภทฟางข้าวและต้นข้าวโพดพบว่า ต้นข้าวโพดมีดัชนีการแตกร่วนต่ำกว่าฟางข้าวเล็กน้อยคือ 98.2% และ 98.8% ตามลำดับ ดังภาพที่ 39 สาเหตุของดัชนีการแตกร่วนต้นข้าวโพดต่ำกว่าฟางข้าว เนื่องจากลิกนิน ไฟเบอร์และสารระเหยกลุ่มยางเหนียวต่าง ๆ ที่มีอยู่ภายในต้นข้าวโพดมีปริมาณต่ำ ส่งผลให้แรงยึดเกาะระหว่างเนื้อชีวมวลค่อนข้างต่ำ จึงเกิดการแตกร่วนได้ง่าย (Kaliyan and Morey, 2009)



ภาพที่ 42 ดัชนีการแตกร่วนของเชื้อเพลิงอัดเม็ด

2.4 ความต้านทานแรงอัด

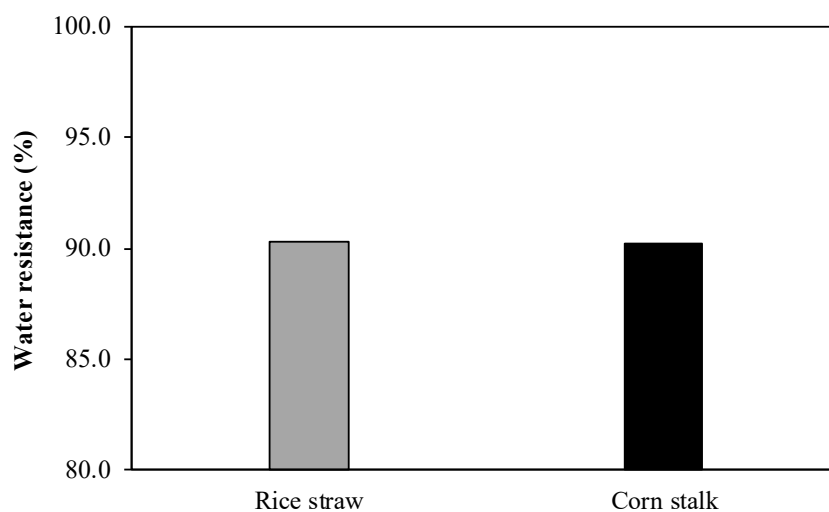
ความต้านทานแรงอัดของเชื้อเพลิงหาได้จากการนำเอาเชื้อเพลิงอัดเม็ดเข้าไปทดสอบกับเครื่อง Universal Testing Machine โดยการนำไปวางในแนวตั้งแล้วทำการกดอัดเชื้อเพลิงอัดเม็ดจนเม็ดเชื้อเพลิงเริ่มมีการเสียสภาพและมีการแตกร่วนเกิดขึ้น ผลการทดสอบพบว่าเชื้อเพลิงอัดเม็ดมีความต้านทานต่อการอัดตัวได้ดี โดยความเข้มแข็งการอัดตัวเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากฟางข้าวและต้นข้าวโพดให้ค่าสูงสุดคิดเป็น 1.51 MPa และ 1.04 MPa ตามลำดับ ดังภาพที่ 43 สาเหตุของความต้านทานแรงอัดต้นข้าวโพดต่ำกว่าฟางข้าวอัดเม็ด เกิดจากความชื้นที่หลงเหลืออยู่ในเนื้อต้นข้าวโพดอัดเม็ด เนื่องจากความชื้นเป็นตัวทำลายความแข็งแรงพันธะที่ยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคของชีวมวลอัดเม็ด ทำให้เชื้อเพลิงอัดเม็ดมีความเปราะ (Chico-Santamarta et al., 2012; Huang et al., 2017) ความต้านทานแรงอัดของชีวมวลโดยทั่วไปของเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดกลุ่มฟางข้าวและต้นข้าวโพดส่วนใหญ่มีค่าเฉลี่ยในช่วง 0.2- 4.3 MPa (Jittabut, 2015; Chiou et al., 2015)



ภาพที่ 43 ความต้านทานแรงอัดของเชื้อเพลิงอัดเม็ด

2.5 ความต้านทานน้ำ

เชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ดีจะต้องมีคุณสมบัติในการต้านทานการซึมของน้ำได้ดี ความต้านทานต่อการซึมของน้ำจะมีประโยชน์ในด้านการเก็บรักษาและความคงคุณภาพของเชื้อเพลิงไม่ให้ลดต่ำลง ส่วนใหญ่มีสาเหตุมาจากความชื้นของอากาศที่สามารถแทรกเข้าทางผิวเชื้อเพลิงอัดเม็ด สุดท้ายส่งผลให้ค่าความร้อนเชื้อเพลิงลดต่ำลง (Huang et al, 2017) ผลการศึกษาวิเคราะห์ความต้านทานน้ำของเชื้อเพลิงอัดเม็ดทั้ง 2 ชนิด พบว่าสาเหตุที่ฟางข้าวมีความต้านทานน้ำสูงกว่าต้นข้าวโพดอัดเม็ด เกิดจากชีวมวลฟางข้าวอัดเม็ดมีความพรุนของน้อยกว่าต้นข้าวโพดอัดเม็ด ส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับน้ำของฟางข้าวต่ำกว่าต้นข้าวโพดอัดเม็ด (Muazu and Stegemann, 2015) เชื้อเพลิงอัดเม็ดจากฟางข้าวมีความต้านทานการซับน้ำสูงกว่าเชื้อเพลิงอัดเม็ดต้นข้าวโพด โดยความต้านทานน้ำของฟางข้าวและต้นข้าวโพดมีค่าเฉลี่ย 90.28% และ 90.19% ตามลำดับ ดังภาพที่ 44



ภาพที่ 44 ผลความต้านทานน้ำของเชื้อเพลิงอัดเม็ด

ตารางที่ 10 แสดงผลสรุปคุณสมบัติทางกายภาพของเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากฟางข้าวและต้นข้าวโพด ซึ่งผลจากการวิเคราะห์เชื้อเพลิงอัดเม็ดของชีวมวลทั้งสองชนิดในภาพรวมเชื้อเพลิงอัดเม็ดมีคุณสมบัติที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานเชื้อเพลิงอัดเม็ดในประเทศไทย (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2555)

ตารางที่ 10 สรุปคุณสมบัติทางกายภาพของเชื้อเพลิงอัดเม็ด

| คุณสมบัติทางกายภาพ | ฟางข้าว | ต้นข้าวโพด |
|---------------------------------|--------------|--------------|
| ความยาว (mm) | 2.7-3.5 | 2.7-3.5 |
| ลักษณะผิว | เรียบ มันวาว | เรียบ มันวาว |
| ความหนาแน่น (kg/m^3) | 1,264.69 | 1,241.26 |
| ดัชนีการแตก่วน (%) | 98.2 | 98.8 |
| ความต้านทานแรงอัด (MPa) | 1.51 | 1.04 |
| ความต้านทานน้ำ (%) | 90.28 | 91.19 |

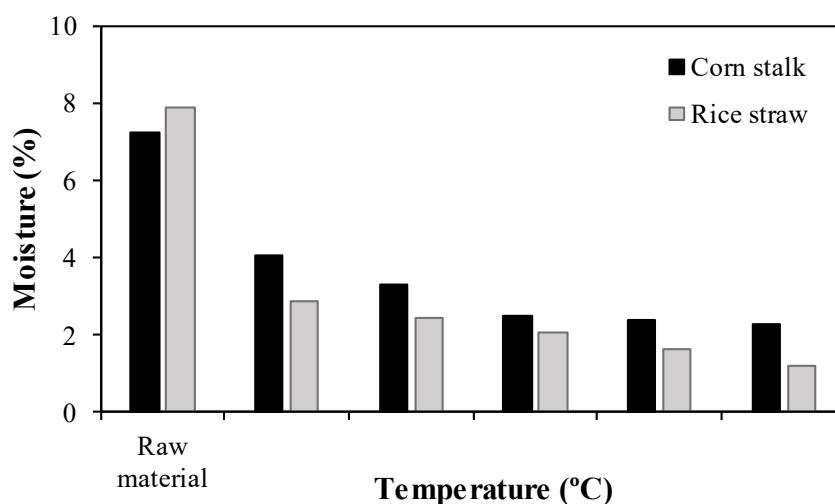
การศึกษากระบวนการทอรรีแฟคชันชีวมวลรูปแบบกาก

1. ผลกระทบของอุณหภูมิทอรรีแฟคชันที่มีต่อคุณสมบัติทางเคมีของชีวมวล

ในกระบวนการทอรรีแฟคชัน คุณสมบัติชีวมวลจะแปรผันกับอุณหภูมิที่ป้อนเข้าสู่กระบวนการ (Wang et al., 2012) คุณสมบัติพื้นฐานที่มีความจำเป็นต่อการวิเคราะห์คุณสมบัติเชื้อเพลิง ประกอบด้วย ความชื้น สารระเหย คาร์บอนคงตัวและเถ้า ซึ่งรายละเอียดผลการวิเคราะห์มีดังต่อไปนี้

1.1 ผลกระทบของอุณหภูมิทอรรีแฟคชันที่มีต่อความชื้น

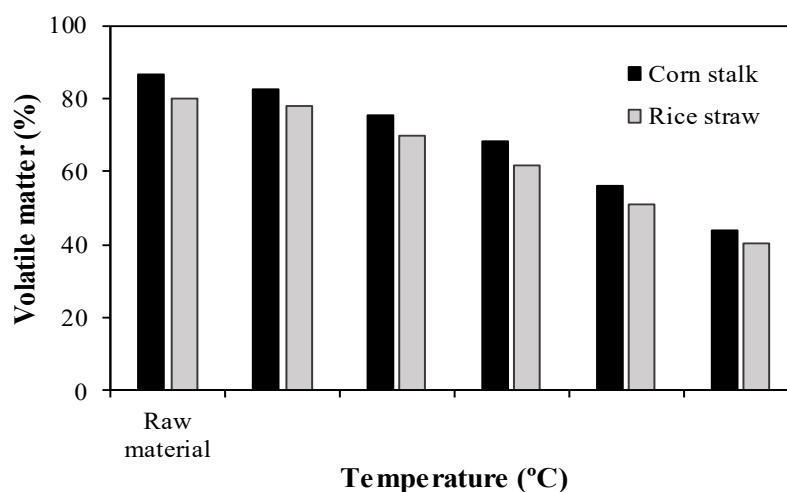
ภาพที่ 45 แสดงผลกระทบของอุณหภูมิทอรรีแฟคชันที่มีผลต่อปริมาณความชื้นของชีวมวล ผลการศึกษาพบว่า การเพิ่มอุณหภูมิทอรรีแฟคชันส่งผลให้ความชื้นชีวมวลลดต่ำลง โดยทั่วไปการระเหยของความชื้นในชีวมวลจะเริ่มที่อุณหภูมิสูงกว่า 100 °C แต่อย่างไรก็ตามก็ยังคงมีความชื้นบางส่วนที่ไม่สามารถระเหยได้ ถึงแม้จะเพิ่มอุณหภูมิสูงกว่า 100 °C แล้วก็ตาม (Chen et al., 2012) การเพิ่มอุณหภูมิทอรรีแฟคชันส่งผลให้ความชื้นของชีวมวลทั้งสองชนิดลดลง โดยฟางข้าวมีอัตราการลดของความชื้นต่ำกว่าต้นข้าวโพด ซึ่งอาจมีสาเหตุมาจากความชื้นเริ่มต้นของฟางข้าวสูงกว่าต้นข้าวโพด ความชื้นสูงสุดของฟางข้าวและต้นข้าวโพดเกิดขึ้นที่อุณหภูมิทอรรีแฟคชัน 200 °C คิดเป็น 2.87% และ 4.05% ตามลำดับ และเมื่อคิดเป็นอัตราร้อยละของชีวมวลที่ลดลงคิดเฉลี่ยเป็น 63.5% และ 43.9% ตามลำดับ เมื่อเทียบกับความชื้นของวัสดุชีวมวลเริ่มต้น



ภาพที่ 45 ผลของความชื้นภายใต้กระบวนการทอรรีแฟคชันที่อุณหภูมิ 200-400 °C

1.2 ผลกระทบอุณหภูมิทอรรีแฟคชันที่มีต่อสารระเหย

ภาพที่ 46 แสดงปริมาณสารระเหยของชีวมวลเมื่อมีการปรับอุณหภูมิทอรรีแฟคชัน การเพิ่มอุณหภูมิทอรรีแฟคชันให้สูงขึ้น ส่งผลให้ปริมาณสารระเหยของชีวมวลมีแนวโน้มลดลง การลดลงของสารระเหยเกิดจากการสลายตัวขององค์ประกอบชีวมวลประเภทสารแทรก เฮมิเซลลูโลส ลิกนิน และเซลลูโลส (Tumuluru et al., 2011) ซึ่งการลดลงของสารระเหยในชีวมวล ส่งผลให้มวลและพลังงานบางส่วนของชีวมวลลดลง (Sadaka et al., 2014) ชีวมวลประเภทต้นข้าวโพดมีอัตราการลดลงของปริมาณสารระเหยสูงกว่าฟางข้าวเล็กน้อย โดยคิดค่าเฉลี่ยเป็น 25.03% และ 24.87% ตามลำดับ การใช้อุณหภูมิทอรรีแฟคชันสูงสุด 400 °C ของฟางข้าวและต้นข้าวโพด มีปริมาณสารระเหยเฉลี่ย 40.12% และ 43.61% ตามลำดับ การใช้อุณหภูมิทอรรีแฟคชันต่ำสุด 200 °C มีปริมาณสารระเหยที่หลงเหลือในชีวมวลฟางข้าวและต้นข้าวโพดโดยเฉลี่ย 77.81% และ 82.25% ตามลำดับ

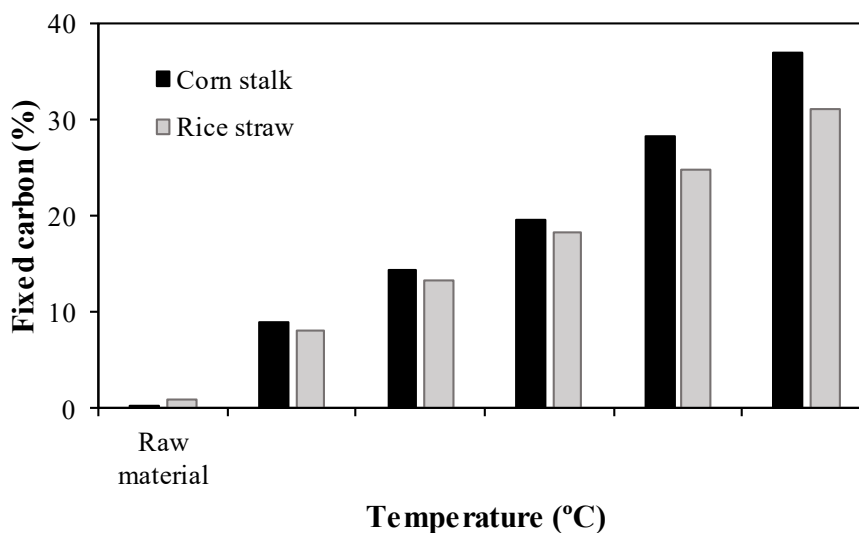


ภาพที่ 46 ผลของสารระเหยภายใต้กระบวนการทอรรีแฟคชัน
ที่อุณหภูมิ 200-400 °C

1.3 ผลกระทบอุณหภูมิทอรรีแฟคชันที่มีต่อคาร์บอนคงตัว

ภาพที่ 47 แสดงผลกระทบของอุณหภูมิทอรรีแฟคชันที่มีผลต่อคาร์บอนคงตัวของชีวมวล ทั้ง 2 ชนิด ผลการศึกษาพบว่า การเพิ่มอุณหภูมิทอรรีแฟคชันส่งผลให้สัดส่วนปริมาณคาร์บอนคงตัวเพิ่มสูงขึ้น การเพิ่มขึ้นของคาร์บอนคงตัวจะเป็นสัดส่วนที่ผกผันกับสารระเหยที่เป็นองค์ประกอบที่มีอยู่ในชีวมวล (van der Stelt et al., 2011) ดังนั้นการนำเอาความร้อนเข้าจัดการหรือไล่สารระเหยออกจึงส่งผลให้ปริมาณคาร์บอนคงตัวเพิ่มสูงขึ้น อีกประการในการเพิ่มอุณหภูมิทอรรีแฟคชันจะทำให้ปริมาณความชื้นและสารระเหยบางตัวของชีวมวลลดลง และนำไปสู่ของการเพิ่มความร้อนได้อีกทาง

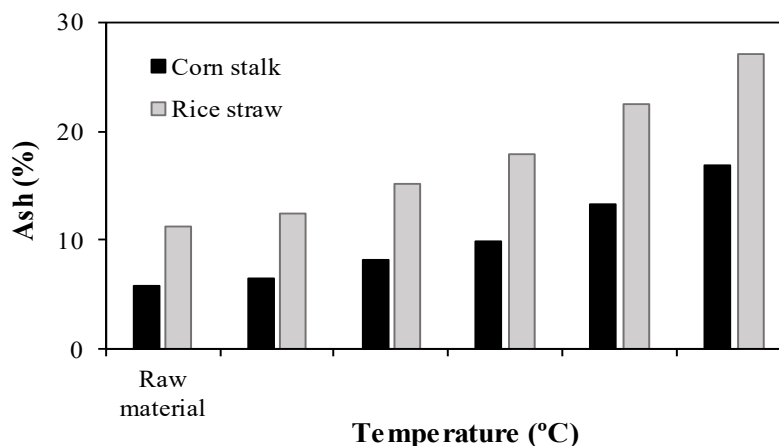
หนึ่ง (Parikha et al., 2005) การใช้อุณหภูมิทอรรีแฟคชันที่ 400 °C กับฟางข้าวและต้นข้าวโพดให้ปริมาณคาร์บอนคงตัวสูงสุด โดยมีค่าปริมาณคงที่เฉลี่ย 31.1% และ 37.08% ตามลำดับ โดยเพิ่มขึ้นสูงกว่าชีวมวลปกติที่ยังไม่ได้ผ่านกระบวนการทอรรีแฟคชันสูงอยู่ในช่วง 97-99%



ภาพที่ 47 ผลของคาร์บอนคงที่ภายใต้กระบวนการทอรรีแฟคชันที่อุณหภูมิ 200-400 °C

1.4 ผลกระทบอุณหภูมิทอรรีแฟคชันที่มีต่อเถ้า

ภาพที่ 48 ปริมาณเถ้าชีวมวลที่ผ่านกระบวนการทอรรีแฟคชันที่อุณหภูมิ 200-400 °C พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิทอรรีแฟคชันส่งผลให้ปริมาณเถ้าของชีวมวลเพิ่มสูงขึ้น โดยฟางข้าวมีปริมาณเถ้าเกิดขึ้นสูงกว่าต้นข้าวโพด สาเหตุของเถ้าที่มีปริมาณเพิ่มสูงขึ้นเกิดจากสัดส่วนของความชื้นและสารระเหยบางส่วนได้สลายในระหว่างกระบวนการทอรรีแฟคชันชีวมวล (Borges et al., 2016) การเพิ่มอุณหภูมิทอรรีแฟคชันในช่วง 200-400 °C จะทำให้สัดส่วนปริมาณเถ้าของฟางข้าวและต้นข้าวโพดเพิ่มขึ้นอยู่ในช่วง 12.51-27.15% และ 6.44-16.84% ตามลำดับ



ภาพที่ 48 ผลของเถ้าภายใต้กระบวนการทอรรีแฟคชัน
ที่อุณหภูมิ 200-400 °C

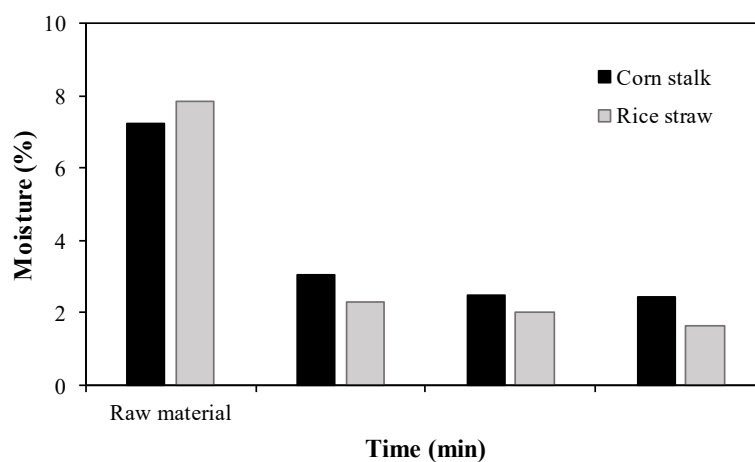
2. ผลกระทบของเวลาทอรรีแฟคชัน

ช่วงระยะเวลาของกระบวนการทอรรีแฟคชัน เป็นอีกตัวแปรที่มีผลต่อการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของคุณสมบัติทางเคมีของชีวมวล ซึ่งประกอบด้วย ความชื้น สารระเหย คาร์บอนคงตัว และเถ้า และ การใช้เวลาทอรรีแฟคชันที่สูงจะส่งผลให้มีการใช้พลังงานในการบ้อนความร้อนเข้าสู่กระบวนการทอรรีแฟคชันเพิ่มขึ้น ซึ่งหมายถึงค่าใช้จ่ายต่อหน่วยการผลิตเชื้อเพลิงทอรรีไฟด์ที่เพิ่มขึ้น ผลการศึกษาผลกระทบของเวลาในการทดสอบนี้ได้คัดเลือกผลจากอุณหภูมิ 300 °C มาศึกษาโดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.1 ผลกระทบของเวลาทอรรีแฟคชันที่มีต่อความชื้น

ภาพที่ 49 แสดงผลกระทบของระยะเวลาทอรรีแฟคชันช่วง 20-60 min ที่มีต่อปริมาณความชื้นของชีวมวลประเภทฟางข้าวและต้นข้าวโพด โดยพบว่าที่ระยะเวลาทอรรีแฟคชัน 20, 40 และ 60 min ของฟางข้าวและต้นข้าวโพดมีปริมาณความชื้นโดยเฉลี่ยอยู่ในช่วง 2.3-3.1%, 2.0-2.5% และ 1.6-2.4% ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่าอัตราการลดลงของความชื้นสำหรับฟางข้าวและต้นข้าวโพด ณ เวลาทอรรีแฟคชัน 20, 40 และ 60 min โดยเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 64%, 15.9% และ 10.9% ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มระยะเวลาทอรรีแฟคชันส่งผลให้อัตราการลดลงของความชื้นมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากการให้ความร้อนในกระบวนการทอรรีแฟคชันแก่ชีวมวลในช่วงแรกจะถูกใช้ไปในการระเหยความชื้นเท่านั้น ซึ่งขั้นของการระเหยจะเกิดขึ้นที่ผิวชีวมวล เมื่อปริมาณความชื้นที่ผิวหน้าชีวมวลแห้งลง และความชื้นภายในเนื้อวัสดุก็เริ่มลดลง ความชื้นอิสระภายในตัววัสดุก็จะซึมขึ้นมาทดแทนให้ทันกับอัตราเร็วในการระเหยที่ผิวหน้าชั้นของการระเหยจะค่อยๆ เลื่อนลงลึกเข้า

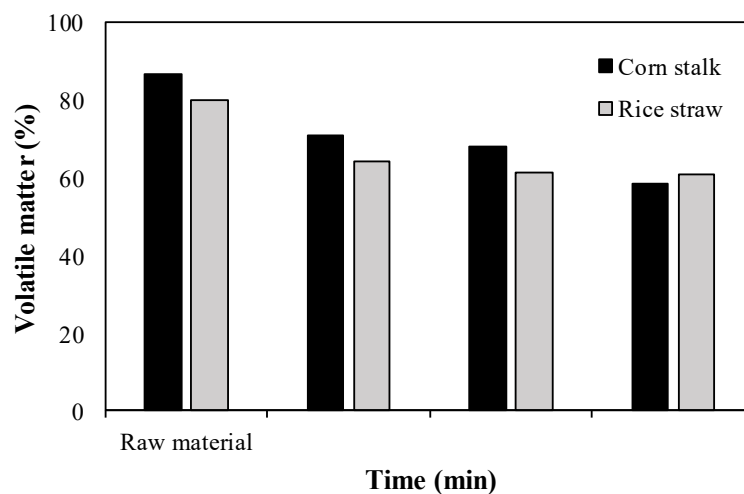
ไปในเนื้อวัสดุดิบ อุณหภูมิของวัสดุดิบจะเริ่มเข้าไปใกล้อุณหภูมิของห้องเผาไหม้จากบริเวณพื้นผิว นอกจากนี้ความร้อนส่วนหนึ่งยังต้องใช้ในการให้ความร้อนแก่ตัวชีวมวลเอง ดังนั้นอัตราเร็วการลดลงของความชื้นจึงค่อยๆ ลดลงตามเวลาที่ผ่านไป (กชกร, 2540)



ภาพที่ 49 การเพิ่มขึ้นของระยะเวลาทอรีแฟคชันที่มีต่อความชื้นชีวมวล

2.2 ผลกระทบของเวลาทอรีแฟคชันที่มีต่อสารระเหย

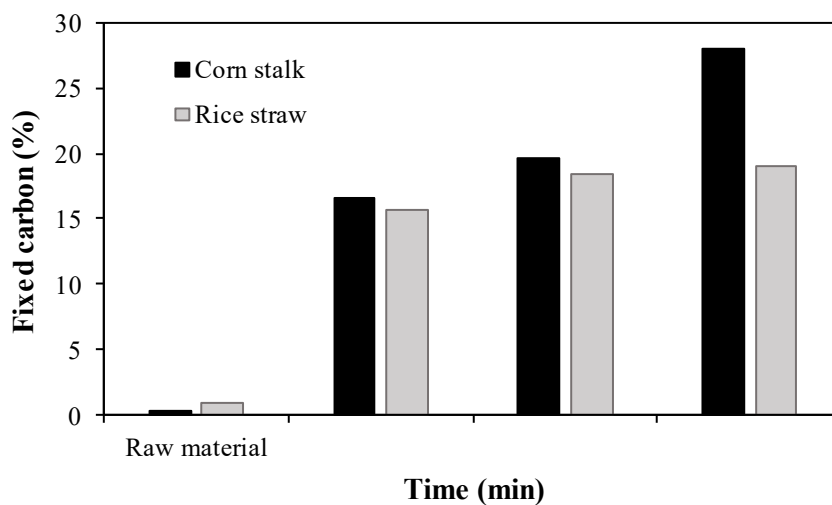
จากภาพที่ 50 แสดงผลกระทบของระยะเวลาทอรีแฟคชันที่มีต่อปริมาณสารระเหยของชีวมวลประเภทฟางข้าวและต้นข้าวโพด ที่อุณหภูมิ 300 °C จากผลการศึกษาพบว่า สารระเหยมีปริมาณลดลง เมื่อเพิ่มระยะเวลาทอรีแฟคชัน โดยระยะเวลาทอรีแฟคชัน 20, 40 และ 60 min ของฟางข้าวและต้นข้าวโพดเฉลี่ยอยู่ในช่วง 64.4-71.1%, 61.7-68.2% และ 58.7-60.9% ตามลำดับ นอกจากนี้ยังเห็นว่าปริมาณสารระเหยของฟางข้าวทอรีไฟต์ของแต่ละเวลาทอรีแฟคชันจะต่ำกว่าต้นข้าวโพดทอรีไฟต์ เนื่องจากการลดลงของปริมาณสารระเหยเกิดจากการสลายตัวของเฮมิเซลลูโลสและเซลลูโลสที่มีอยู่ในชีวมวลแต่ละชนิด (Zhao et al., 2014) ดังนั้นเมื่อฟางข้าวมีปริมาณเฮมิเซลลูโลสสูงกว่าต้นข้าวโพด จึงส่งผลให้ปริมาณสารระเหยของฟางข้าวมีอัตราการลดลงสูงกว่าต้นข้าวโพด เมื่อทดสอบที่เวลาทอรีแฟคชันเพิ่มขึ้น (Liu, 2013; Mei et al., 2016)



ภาพที่ 50 การเพิ่มขึ้นของระยะเวลาทอรรีแฟคชันที่มีต่อสารระเหย

2.3 ผลกระทบของเวลาทอรรีแฟคชันที่มีต่อคาร์บอนคงตัว

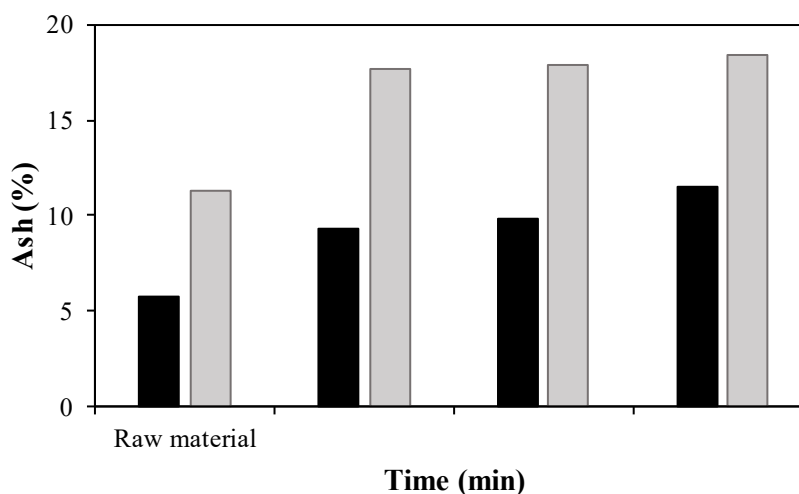
ภาพที่ 51 แสดงผลกระทบของระยะเวลาทอรรีแฟคชันที่มีผลต่อปริมาณคาร์บอนคงตัว ผลการศึกษาพบว่า การเพิ่มเวลาของกระบวนการทอรรีแฟคชันส่งผลให้ปริมาณสัดส่วนคาร์บอนคงตัวเพิ่มขึ้น โดยอัตราการเพิ่มขึ้นของปริมาณคาร์บอนคงตัวของฟางข้าวและต้นข้าวโพดเมื่อใช้เวลาทอรรีแฟคชัน 20, 40 และ 60 min โดยเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 96.18%, 15.42% และ 16.36% ตามลำดับ และเหตุผลอีกประการหนึ่งสำหรับการเพิ่มขึ้นของปริมาณคาร์บอนคงตัวนั้น หากพิจารณาด้านหมู่ฟังก์ชันออกซี (-O-) ของชีวมวลฟางข้าวและต้นข้าวโพดทอรรีไฟต์ จะพบว่าการใช้ระยะเวลาทอรรีแฟคชันที่นานขึ้นก็จะส่งผลให้ปริมาณ H_2O และ CO_2 เพิ่มขึ้น (Wannapeera et al., 2011) ซึ่งส่งผลให้มีปริมาณคาร์บอนและออกซิเจนของชีวมวลเพิ่มสูงขึ้น ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ค่าความร้อนของชีวมวลแต่ละชนิดเพิ่มขึ้นไปด้วย (Yingquan et al., 2014)



ภาพที่ 51 การเพิ่มขึ้นของระยะเวลาทอรีรีแฟคชันที่มีต่อคาร์บอนคงตัว

2.4 ผลกระทบของระยะเวลาทอรีรีแฟคชันที่มีต่อเถ้า

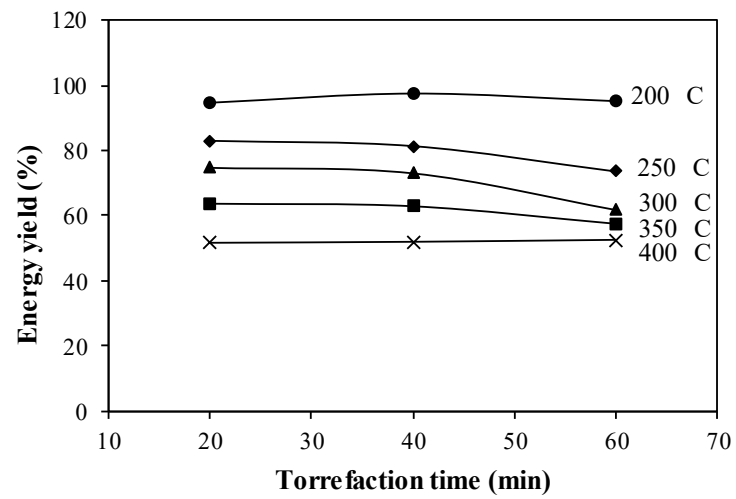
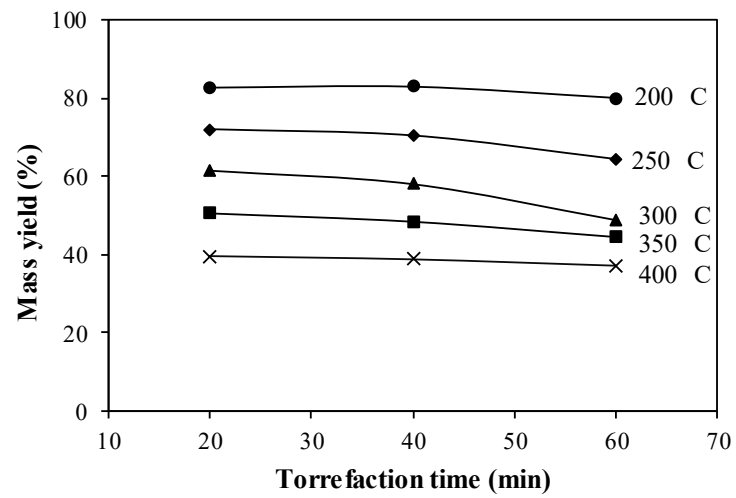
จากภาพที่ 52 แสดงผลกระทบของระยะเวลาทอรีรีแฟคชันที่มีต่อปริมาณเถ้าของชีวมวล จากผลการทดสอบพบว่า เมื่อระยะเวลาทอรีรีแฟคชันเพิ่มขึ้นปริมาณเถ้าก็จะเพิ่มขึ้นด้วย โดยฟางข้าว มีปริมาณเถ้าสูงกว่าต้นข้าวโพด ซึ่งปริมาณเถ้าของฟางข้าวและต้นข้าวโพดที่ใช้เวลาทอรีรีแฟคชัน 20-60 min มีค่าอยู่ในช่วง 17.63-18.44% และ 9.33-11.47% ตามลำดับ ซึ่งปริมาณเถ้าที่มากขึ้นจะส่งผลให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้ต่ำลง และที่สำคัญระบบลำเลียงเถ้าต้องมีการตั้งมีระบบกำจัดภายในโรงงานที่มีประสิทธิภาพ



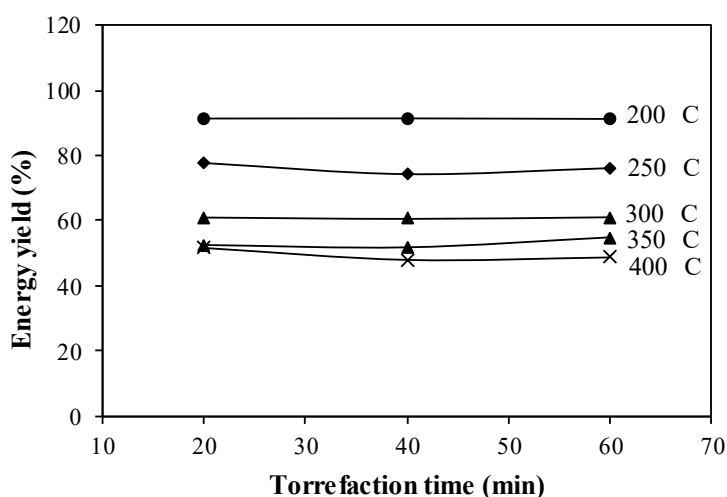
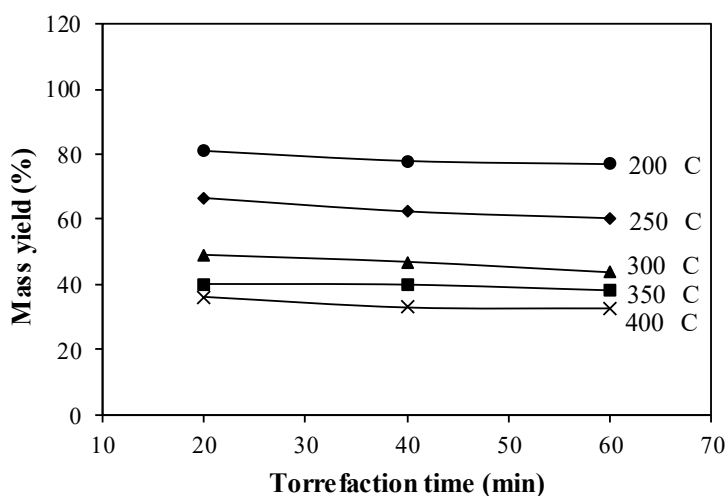
ภาพที่ 52 การเพิ่มขึ้นของระยะเวลาทอรรีแฟคชันที่มีต่อปริมาณเถ้า

3. การวิเคราะห์อุณหภูมิและเวลาทอรรีแฟคชันที่เหมาะสม

ภาพที่ 53 และ 54 การวิเคราะห์ผลของอุณหภูมิและเวลาทอรรีแฟคชันของฟางข้าวและต้นข้าวโพด โดยใช้สมการผลผลิตมวล (mass yield) และสมการผลผลิตพลังงาน (energy yield) พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิทอรรีแฟคชันส่งผลให้ผลผลิตมวลและพลังงานมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากเกิดการสลายตัวของเฮมิเซลลูโลสที่อุณหภูมิสูง (Chiou et al., 2015) ทำให้มวลของชีวมวลลดลง เมื่อมวลลดลงก็จะส่งผลไปยังค่าพลังงานต่อหน่วยของชีวมวลที่ผ่านกระบวนการมีแนวโน้มลดลง ในส่วนของการวิเคราะห์ผลกระทบของระยะเวลาทอรรีแฟคชันพบว่า การเพิ่มระยะเวลาทอรรีแฟคชันนั้นส่งผลให้ผลผลิตมวลและพลังงานส่วนใหญ่มีแนวโน้มลดลงเช่นกัน เนื่องจากการใช้ระยะเวลาทอรรีแฟคชันนาน ๆ ก็จะทำให้เกิดการสลายตัวขององค์ประกอบของชีวมวลเพิ่มสูงขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบผลกระทบของอุณหภูมิและเวลาทอรรีแฟคชันพบว่า ตัวแปรอุณหภูมิจะส่งผลกระทบต่อ ผลผลิตมวลและพลังงานมากกว่าเวลา (Poudel et al., 2015) การหาอุณหภูมิและเวลาทอรรีแฟคชันที่เหมาะสม โดยการใช้ผลผลิตมวลและพลังงานมาเป็นเกณฑ์ มีข้อดีในการใช้ประโยชน์ในด้านการค้าขายชีวมวล ปริมาณมวลที่มากหมายถึงน้ำหนักในการซื้อขายสูงขึ้น ซึ่งมีผลต่อประมาณที่ขายได้ ดังนั้นการเลือกเงื่อนไขกระบวนการทอรรีแฟคชันที่เหมาะสมที่สุด สามารถเลือกได้จากผลผลิตมวลและพลังงานที่มีค่าสูงสุดของชีวมวลแต่ละชนิด โดยเงื่อนไขกระบวนการทอรรีแฟคชันที่ดีที่สุดของฟางข้าวและต้นข้าวโพด คือ การทดสอบกระบวนการทอรรีแฟคชันที่อุณหภูมิ 200 °C ใช้เวลา 40 min จากเงื่อนไขดังกล่าว ผลผลิตมวลและพลังงานของฟางข้าวมีค่าเท่ากับ 82.94% และ 97.48% ตามลำดับ ส่วนต้นข้าวโพดมีค่าเท่ากับ 77.93% และ 91.40% ตามลำดับ



ภาพที่ 53 ปริมาณมวลและพลังงานที่ได้ของเชื้อเพลิงทอร์รีไฟล์จากฟางข้าว

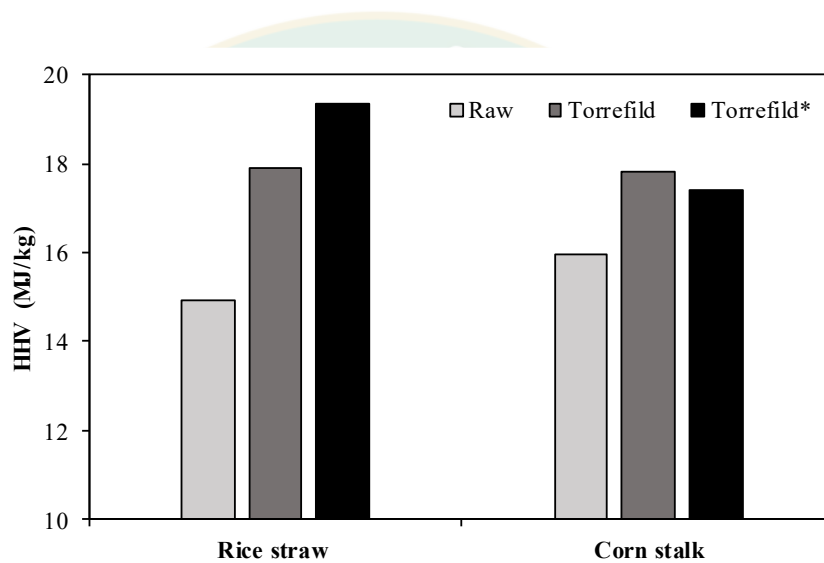


ภาพที่ 54 ปริมาณมวลและพลังงานที่ได้ของเชื้อเพลิงทอร์รีไฟด์จากต้นข้าวโพด

4. การวิเคราะห์ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงทอร์รีไฟด์

ชีวมวลที่ผ่านกระบวนการทอร์รีแฟคชันเรียกว่า เชื้อเพลิงทอร์รีไฟด์ (torrefield fuel) ในหัวข้อนี้เป็นการนำเอาเชื้อเพลิงทอร์รีไฟด์ที่ผ่านกระบวนการทอร์รีแฟคชันเหมาะสมมาวิเคราะห์หาค่าความร้อน ภายใต้เงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดคือ อุณหภูมิ 200 °C และเวลาทอร์รีแฟคชัน 40 min พบว่าค่าความร้อนของฟางข้าวทอร์รีไฟด์สูงกว่าต้นข้าวโพดทอร์รีไฟด์ โดยเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 17.90 MJ/kg และ 17.79 MJ/kg ตามลำดับ ดังภาพที่ 55 และเมื่อเปรียบเทียบค่าความร้อนระหว่างชีวมวลตั้งต้นกับชีวมวลทอร์รีไฟด์ทั้งสองพบว่า ค่าความร้อนของฟางข้าวและต้นข้าวโพดทอร์รีไฟด์เพิ่มขึ้นจากเดิมคือ 19.25% และ 11.60% ตามลำดับ เนื่องจากในระหว่างการทดสอบกระบวนการทอร์รีแฟคชันที่อุณหภูมิสูง ส่งผลให้พันธะ C-O ที่อยู่ในโครงสร้างชีวมวลถูกทำลาย (Yingquan et al., 2014) ทำให้

ความสัมพันธ์ของพันธะ C-C และ C-H เพิ่มขึ้น ด้วยสาเหตุนี้จึงทำให้ปริมาณคาร์บอนเพิ่มขึ้นไปด้วย และยังทำให้ชีวมวลมีคุณสมบัติการเผาไหม้ที่ดีขึ้น นอกจากนี้กระบวนการทอรรีไฟเคชันยังส่งผลให้อัตราส่วน O/C และ H/C ลดลง รวมถึงควัน และไอน้ำก็มีปริมาณลดลง ซึ่งเหตุผลทั้งหมดที่ได้กล่าวมานี้เป็นสาเหตุให้ค่าความร้อนของชีวมวลทอรรีไฟด์เพิ่มขึ้น (Yingquan et al., 2014) นอกจากนี้การตรวจสอบเอกสารพบว่า ค่าความร้อนของฟางข้าวทอรรีไฟด์จากงานวิจัยอื่น เป็นผลมาจากการใช้อุณหภูมิทอรรีไฟเคชันที่เหมาะสมของแต่ละงานวิจัยที่ต่างตากันที่ ซึ่งโดยเฉลี่ยอยู่ในช่วง 200-250 °C (Huang et al., 2012; Medic et al., 2012; Mei et al., 2016; Teh and Jamari, 2016)



ภาพที่ 55 ค่าความร้อนของชีวมวลประเภทฟางข้าวและต้นข้าวโพด

หมายเหตุ Torrefild* คือค่าความร้อนโดยเฉลี่ยของฟางข้าวและต้นข้าวโพดทอรรีไฟด์จากการตรวจสอบเอกสารงานวิจัยอื่น

5. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ค่าความร้อนเชื้อเพลิงทอรรีไฟด์

ในหัวข้อนี้ได้ทำการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เอมไพริคอล (empirical model) สำหรับการทำนายค่าความร้อนของเชื้อเพลิงทอรรีไฟด์ ภายใต้การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและเวลาของกระบวนการทอรรีไฟเคชันของชีวมวลฟางข้าวและต้นข้าวโพด โดยใช้ระเบียบวิธีการถดถอยแบบเชิงเส้น โดยใช้ข้อมูลในการสร้างแบบจำลองสมการทั้งหมด 25 ชุดข้อมูล จากภาพที่ 56 แสดงค่าความร้อนของฟางข้าวเมื่อแปรผันอุณหภูมิและเวลาทอรรีไฟเคชันต่าง ๆ โดยการเพิ่มอุณหภูมิทอรรีไฟเคชันสูงสุด ส่งผลให้ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงทอรรีไฟด์เพิ่มขึ้นโดยเฉลี่ยอยู่ในช่วง

16.96-43.5% ส่วนการเพิ่มระยะเวลาทอรรีแฟคชันสูงสุดส่งผลให้ค่าความร้อนของฟางข้าวเพิ่มขึ้นโดยเฉลี่ยอยู่ในช่วง 16.34-21.84% ในขณะที่การใช้อุณหภูมิทอรรีแฟคชันที่ 200 °C ส่งผลให้ค่าความร้อนฟางข้าวทอรรีไฟต์เพิ่มขึ้น 17.90 MJ/kg ผลจากการทดสอบค่าความร้อนของฟางข้าวทอรรีไฟต์ทั้งหมด 25 ข้อมูล สามารถสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เมอไพริคอลที่มีความสัมพันธ์กับภาพที่ 53 ดังสมการที่ 12 โดยมีค่า R-square คือ 0.9772 และมีค่า Root Mean Square Error (RMSE) คือ 0.18

ภาพที่ 57 แสดงค่าความร้อนของต้นข้าวโพดทอรรีไฟต์เมื่อแปรผันอุณหภูมิและเวลาทอรรีแฟคชันต่าง ๆ โดยการปรับอุณหภูมิทอรรีแฟคชันสูงสุด ส่งผลให้ค่าความร้อนของต้นข้าวโพดทอรรีไฟต์เพิ่มขึ้นโดยเฉลี่ยอยู่ในช่วง 10.91-30.89% และการปรับเพิ่มเวลาทอรรีแฟคชันให้สูงขึ้นส่งผลให้ค่าความร้อนของต้นข้าวโพดทอรรีไฟต์เพิ่มขึ้นโดยเฉลี่ยอยู่ในช่วง 7.53-14.12% ในขณะที่การใช้อุณหภูมิทอรรีแฟคชันที่ 200 °C ส่งผลให้ค่าความร้อนฟางข้าวทอรรีไฟต์เพิ่มขึ้น 17.79 MJ/kg ผลจากการทดสอบค่าความร้อนของฟางข้าวทอรรีไฟต์ทั้งหมด 25 ข้อมูล สามารถสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เมอไพริคอลที่มีความสัมพันธ์กับภาพที่ 54 ดังสมการที่ 13 โดยมีค่า R-square คือ 0.9890 และมีค่า Root Mean Square Error (RMSE) คือ 0.115

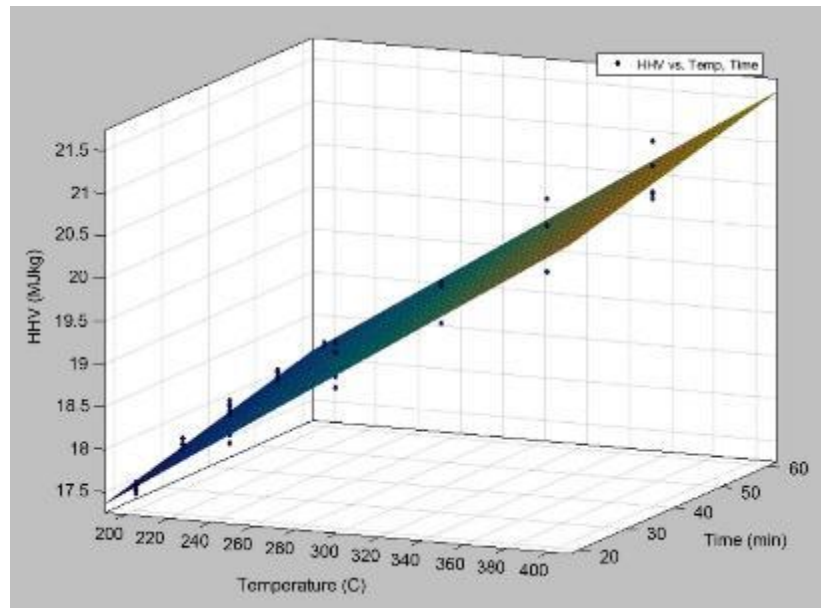
$$HHV_{RS} = 14.03 + 0.016T + 0.01631t$$

สมการที่ 11

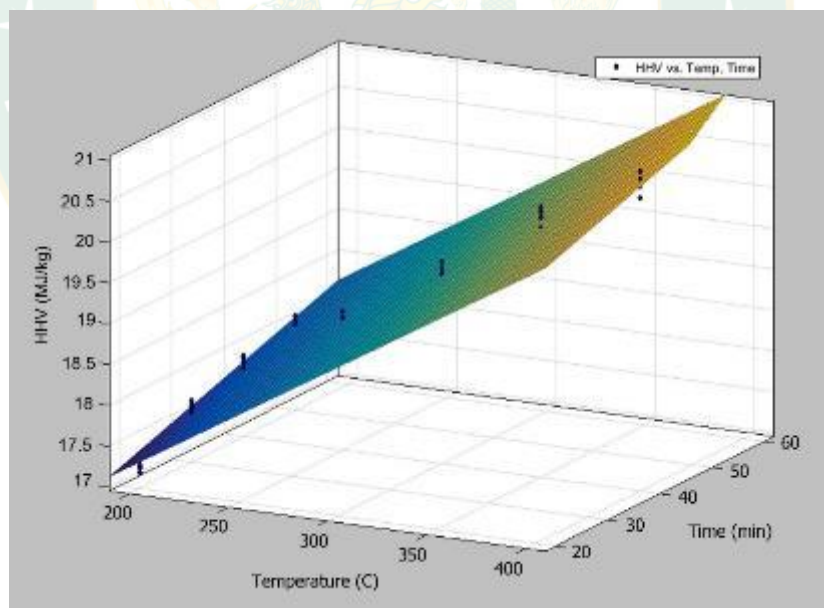
$$HHV_{CS} = 13.88 + 0.01496T + 0.02273t$$

สมการที่ 12

| | | |
|-------|-------|--------------------------------------|
| เมื่อ | HHVRS | คือ ค่าความร้อนของฟางข้าว (MJ/kg) |
| | HHVCS | คือ ค่าความร้อนของต้นข้าวโพด (MJ/kg) |
| | T | คือ อุณหภูมิทอรรีแฟคชัน (°C) |
| | t | คือ เวลาทอรรีแฟคชัน (min) |



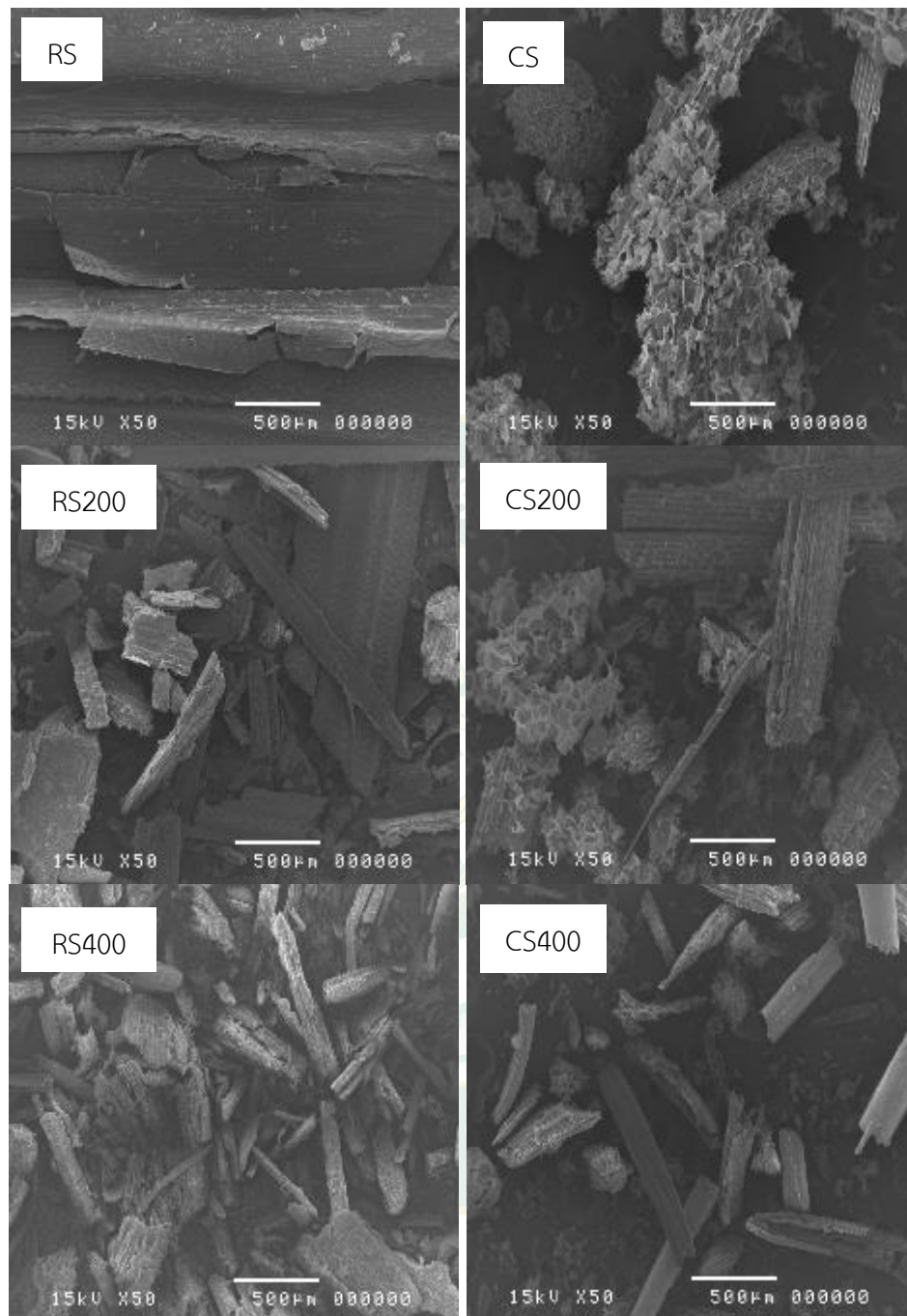
ภาพที่ 56 ค่าความร้อนของฟางข้าวทอรรีไฟต์เมื่อแปรผันอุณหภูมิ และเวลาทอรรีแฟคชัน



ภาพที่ 57 ค่าความร้อนต้นข้าวโพดทอรรีไฟต์เมื่อแปรผันอุณหภูมิ และเวลาทอรรีแฟคชัน

6. ผลการวิเคราะห์โครงสร้างเชื้อเพลิงทอร์รีไฟต์

การวิเคราะห์และเปรียบเทียบโครงสร้างเชื้อเพลิงทอร์รีไฟต์จากฟางข้าวและต้นข้าวโพด ได้คัดเลือกเงื่อนไขอุณหภูมิทอร์รีแฟคชันที่ 200 °C และ 400 °C ภายใต้เวลาทอร์รีแฟคชัน 40 min ดังแสดงในภาพที่ 58 พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิทอร์รีแฟคชันส่งผลให้โครงสร้างของฟางข้าวและต้นข้าวโพดที่ผ่านกระบวนการทอร์รีแฟคชัน มีลักษณะแตกหักและมีขนาดโครงสร้างที่เล็กลง โดยการใช้อุณหภูมิ 400 °C ลักษณะของเชื้อเพลิงมีขนาดเล็กและแตกหักมากกว่าเชื้อเพลิงทอร์รีไฟต์ที่อุณหภูมิ 200 °C สาเหตุที่ชีวมวลที่ผ่านกระบวนการทอร์รีแฟคชันเกิดการแตกหักและมีขนาดเล็กลงตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากเฮมิเซลลูโลสในชีวมวลที่ทำหน้าที่เปรียบเสมือนตัวประสานเส้นใยเซลลูโลสเกิดการสลายตัว เมื่อผ่านกระบวนการทอร์รีแฟคชันที่อุณหภูมิ 200 °C ขึ้นไป จึงทำให้โครงสร้างชีวมวลเกิดการแตกหัก เชื้อเพลิงที่ผ่านกระบวนการทอร์รีแฟคชันจะมีคุณสมบัติง่ายต่อการบดตามขนาดที่ต้องการ (grindability) (Mei et al., 2016) นอกจากนี้ยังสังเกตเห็นว่าลักษณะผิวของชีวมวลทอร์รีไฟต์เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัด เมื่อเทียบกับผิวของชีวมวลธรรมดา เนื่องจากเกิดการสลายของไฟเบอร์ที่อุณหภูมิสูงของกระบวนการทอร์รีแฟคชัน (Reddy and Yang, 2009) และเหตุผลอีกประการหนึ่งอาจเกิดจากการสูญเสียความชื้นและสารระเหยอินทรีย์ต่าง ๆ เมื่อผ่านกระบวนการทอร์รีแฟคชัน ซึ่งกระบวนการนี้จะส่งผลกระทบต่อโครงสร้างของเฮมิเซลลูโลส ซึ่งเริ่มเกิดการแตกสลายได้ตั้งแต่อุณหภูมิ 150 °C (Daud et al., 2016) ขึ้นไป จึงทำให้ชีวมวลทอร์รีไฟต์เกิดการหดเล็กลงซึ่งเห็นได้อย่างชัดเจนที่การทดสอบกระบวนการทอร์รีแฟคชันที่อุณหภูมิ 400 °C (Cruz et al., 2012)



ภาพที่ 58 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด
ของฟางข้าวและต้นข้าวโพด

หมายเหตุ RS คือ ฟางข้าว
CS คือ ต้นข้าวโพด
200 คือ อุณหภูมิทอรรีแฟคชัน 200 °C
400 คือ อุณหภูมิทอรรีแฟคชัน 400 °C

7. วิเคราะห์คุณสมบัติเชื้อเพลิงทอร์รีไฟต์อัดเม็ด

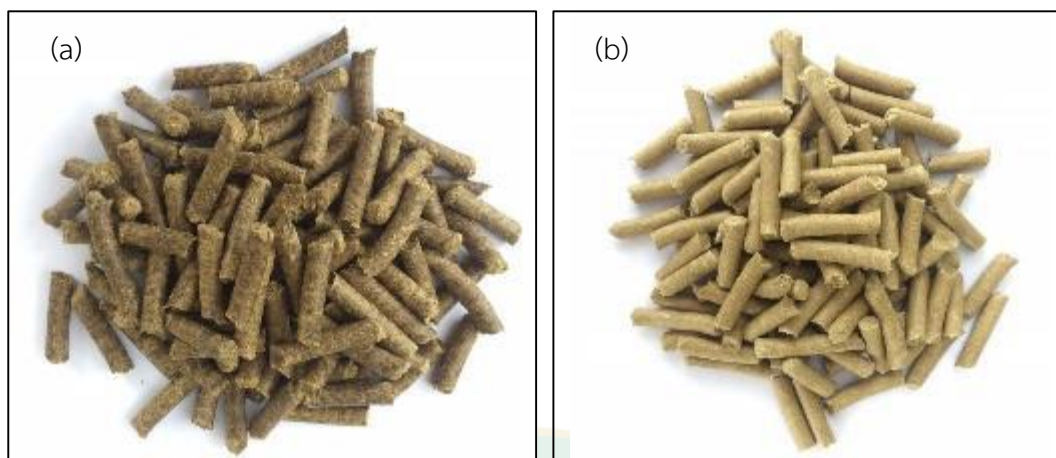
สำหรับการวิเคราะห์ในหัวข้อนี้เป็นการนำเอาเชื้อเพลิงทอร์รีไฟต์ที่ผ่านกระบวนการทอร์รีไฟเคชัน ภายใต้อุณหภูมิและระยะเวลาที่เหมาะสมมาผลิตเป็นเชื้อเพลิงทอร์รีไฟต์อัดเม็ด โดยใช้เครื่องอัดเม็ดซึ่งอัดภายใต้อุณหภูมิและความชื้นใกล้เคียงกับการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่เหมาะสม การวิเคราะห์เชื้อเพลิงทอร์รีไฟต์อัดเม็ดยังประกอบด้วย การวิเคราะห์ความหนาแน่น ดัชนีการแตก ร่วน ความต้านทานแรงอัด และความต้านทานน้ำ

7.1 คุณสมบัติพื้นฐานเชื้อเพลิงทอร์รีไฟต์อัดเม็ด

ภาพที่ 59 แสดงลักษณะแท่งและเม็ดของฟางข้าวและต้นข้าวโพดทอร์รีไฟต์อัดเม็ด ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับฟางข้าวและต้นข้าวโพดอัดเม็ดปกติ ดังภาพที่ 60 พบว่าเชื้อเพลิงฟางข้าวและต้นข้าวโพดทอร์รีไฟต์อัดเม็ดมีสีเข้มขึ้น โดยมีความยาวเฉลี่ยอยู่ในช่วง 2.5-3.0 cm และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 6 mm ลักษณะผิวของเชื้อเพลิงทอร์รีไฟต์อัดเม็ดมีลักษณะเรียบและเป็นมันวาว อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงอัดเม็ดปกติ สีของเชื้อเพลิงทอร์รีไฟต์อัดเม็ดมีสีที่เข้มกว่า และมีความเป็นมันวาวกว่า



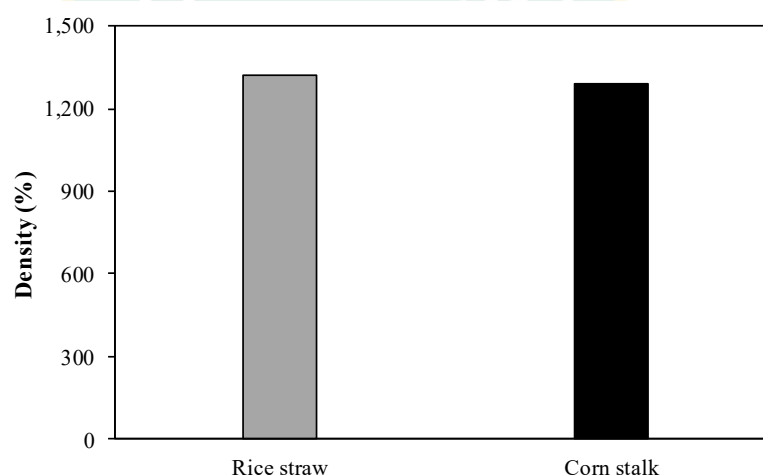
ภาพที่ 59 ฟางข้าวทอร์รีไฟต์อัดเม็ด (a) และต้นข้าวโพดทอร์รีไฟต์อัดเม็ด (b)



ภาพที่ 60 ฟางข้าวอัดเม็ด (a) และต้นข้าวโพดอัดเม็ด (b)

7.2 ความหนาแน่นเชื้อเพลิงทอร์รีไฟต์อัดเม็ด

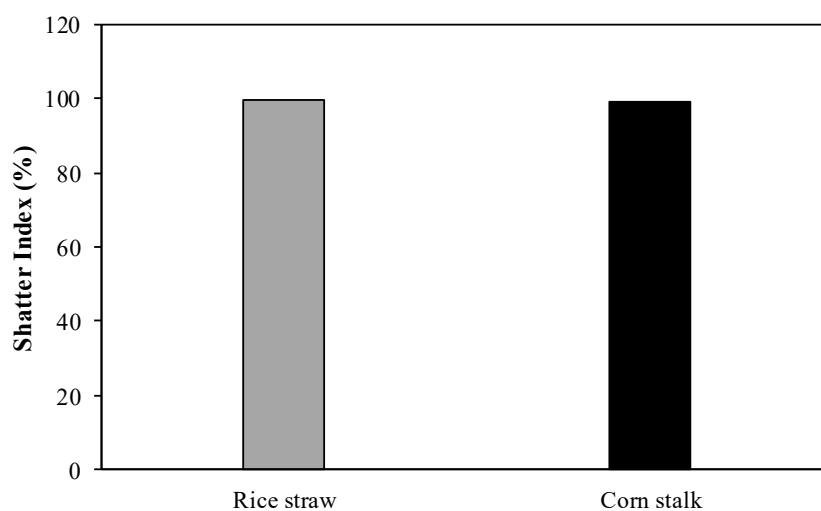
ผลการนำเชื้อเพลิงทอร์รีไฟต์มาอัดเม็ดพบว่า ความหนาแน่นของฟางข้าวทอร์รีไฟต์อัดเม็ดสูงกว่าต้นข้าวโพดทอร์รีไฟต์อัดเม็ดโดยเฉลี่ยคือ $1,318.57 \text{ kg/m}^3$ และ $1,287.94 \text{ kg/m}^3$ ตามลำดับ ดังภาพที่ 61 สาเหตุที่ฟางข้าวอัดเม็ดมีความหนาแน่นสูงกว่าต้นข้าวโพดอัดเม็ด เนื่องจากชีวมวลประเภทฟางข้าวมีปริมาณลิกนินและไฟเบอร์สูงกว่าชีวมวลประเภทต้นข้าวโพด (Kaliyan and Morey, 2009; Liu et al., 2013) ซึ่งปริมาณลิกนินและไฟเบอร์บางส่วนที่มีอยู่ในชีวมวลเกิดการอ่อนตัวเมื่อผ่านการทดสอบที่อุณหภูมิสูง จึงกลายเป็นตัวแปรสำคัญที่ทำหน้าที่เปรียบเสมือนตัวประสานระหว่างเนื้อชีวมวล ทำให้ชีวมวลอัดเม็ดเกิดการยึดเกาะกันได้ดี (Kaliyan and Morey, 2009)



ภาพที่ 61 ผลความหนาแน่นของเชื้อเพลิงทอร์รีไฟต์อัดเม็ด

7.3 ดัชนีการแตกร่วน

การวิเคราะห์ดัชนีการแตกร่วนของฟางข้าวและต้นข้าวโพดทอรรีไฟต์อัดเม็ดพบว่า ชีวมวลทั้งสองชนิดมีค่าดัชนีการแตกร่วนใกล้เคียงกัน โดยเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 99.8 kN/m^2 และ 99.2 kN/m^2 ตามลำดับ ดังภาพที่ 62 สาเหตุของดัชนีการแตกร่วนต้นข้าวโพดสูงกว่าฟางข้าวเล็กน้อย อาจเป็นผลอันเนื่องมาจากปริมาณลิกนิน ไฟเบอร์และสารระเหยกลุ่มยางเหนียวต่าง ๆ ที่มีอยู่ภายในองค์ประกอบต้นข้าวโพดซึ่งมีปริมาณต่ำฟางข้าว ส่งผลให้แรงยึดเกาะระหว่างเนื้อชีวมวลค่อนข้างต่ำ จึงเกิดการแตกหักได้ง่าย (Kaliyan and Morey, 2010) และยังพบว่าชีวมวลทั้งสองมีดัชนีการแตกร่วนสูงกว่าค่ามาตรฐานการแตกร่วนของเชื้อเพลิงชีวมวล โดยทั่วไปควรมีค่ามากกว่า 95% ตามมาตรฐานการใช้เชื้อเพลิงอัดเม็ดในประเทศไทย (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2555)

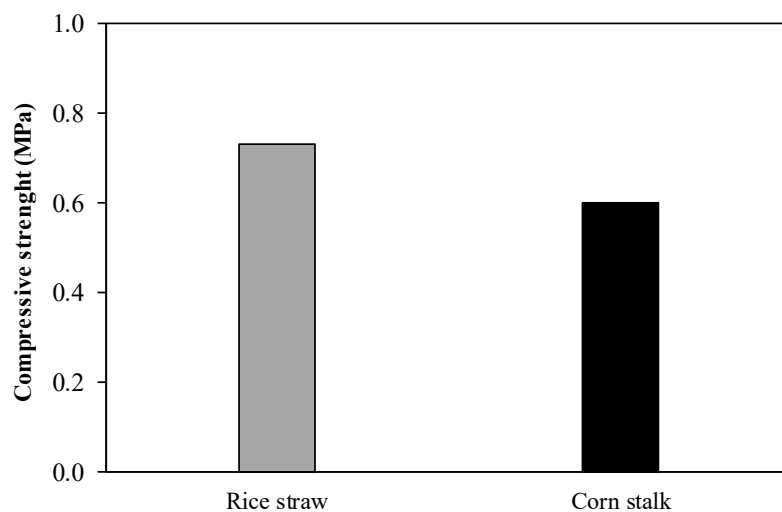


ภาพที่ 62 ผลดัชนีการแตกร่วนของเชื้อเพลิงทอรรีไฟต์อัดเม็ด

7.4 ความต้านทานแรงอัด

จากการวิเคราะห์ความต้านทานแรงอัดของฟางข้าวและต้นข้าวโพดทอรรีไฟต์อัดเม็ดพบว่า ฟางข้าวทอรรีไฟต์อัดเม็ดมีความต้านทานแรงอัดสูงกว่าต้นข้าวโพดทอรรีไฟต์อัดเม็ด โดยเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 0.73 MPa และ 0.6 MPa ตามลำดับ ดังภาพที่ 63 สาเหตุของความต้านทานแรงอัดต้นข้าวโพดต่ำกว่าฟางข้าวอัดเม็ด เกิดจากความชื้นที่หลงเหลืออยู่ในเนื้อต้นข้าวโพดอัดเม็ด เนื่องจากความชื้นเป็นตัวทำลายความแข็งแรงพันธะที่ยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคของชีวมวลอัดเม็ด ทำให้เชื้อเพลิงอัดเม็ดมีความเปราะ (Santamarta et al., 2012; Huang et al., 2017) เมื่อเปรียบเทียบกับ

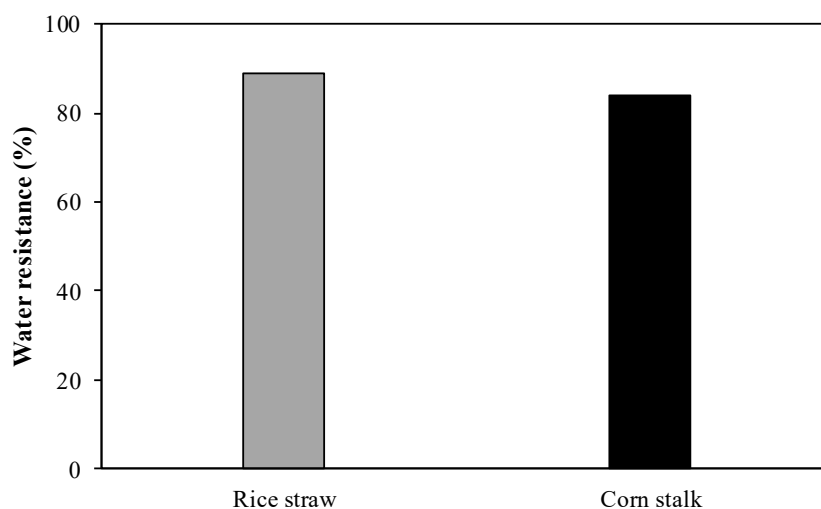
กับงานวิจัยอื่นพบว่าความต้านทานแรงอัดฟางข้าวและต้นข้าวโพดอัดเม็ดโดยเฉลี่ยอยู่ในช่วง 0.6-2.8 MPa (Chou et al., 2009; Xia et al., 2018)



ภาพที่ 63 ผลความต้านทานแรงอัดของเชื้อเพลิงทอร์รีไฟต์

7.5 ความต้านทานน้ำ

จากการวิเคราะห์ความต้านทานน้ำของฟางข้าวและต้นข้าวโพดทอร์รีไฟต์อัดเม็ดพบว่าความต้านทานน้ำของฟางข้าวทอร์รีไฟต์อัดเม็ดสูงกว่าต้นข้าวโพดทอร์รีไฟต์อัดเม็ด โดยเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 88.81% และ 83.89% ตามลำดับ ดังภาพที่ 64 สาเหตุที่ฟางข้าวมีความต้านทานน้ำสูงกว่าต้นข้าวโพดทอร์รีไฟต์อัดเม็ด เกิดจากความพรุนที่แตกต่างกันของชีวมวลทั้งสองชนิด ซึ่งจากการตรวจสอบเอกสารงานวิจัยพบว่า ชีวมวลประเภทต้นข้าวโพดมีความพรุนสูงกว่าชีวมวลประเภทฟางข้าว ทำให้มีความสามารถในการดูดซับน้ำได้ดี ดังนั้นจึงส่งผลให้ความสามารถในการต้านทานน้ำของต้นข้าวโพดทอร์รีไฟต์อัดเม็ดยุ่่น้อยกว่าฟางข้าวทอร์รีไฟต์อัดเม็ด (Muazu and Stegemann, 2015)



ภาพที่ 64 ผลความต้านทานน้ำของเชื้อเพลิงอัดเม็ดทอรรีไฟต์

ตารางที่ 11 เป็นผลสรุปคุณสมบัติทางกายภาพของเชื้อเพลิงทอรรีไฟต์อัดเม็ดของฟางข้าวและต้นข้าวโพด ภาพรวมของการผลิตเชื้อเพลิงทอรรีไฟต์อัดเม็ดจากฟางข้าวและต้นข้าวโพด มีศักยภาพเป็นไปได้ค่อนข้างสูง เนื่องจากคุณสมบัติหลาย ๆ ข้อตั้งแต่ขนาด ผิวน ความหนาแน่น ดัชนีการแตกร่วน ความต้านทานแรงอัด และความต้านทานน้ำ มีคุณสมบัติสูงกว่าและใกล้เคียงกับมาตรฐานการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดทั่วไป

ตารางที่ 11 สรุปคุณสมบัติทางกายภาพเชื้อเพลิงทอรรีไฟต์อัดเม็ด

| คุณสมบัติทางกายภาพ | ฟางข้าว | ต้นข้าวโพด |
|----------------------------------|-------------------|-------------------|
| ความยาว | 2.5 | 3.0 |
| ลักษณะผิว | เรียบเนียน มันวาว | เรียบเนียน มันวาว |
| ความหนาแน่น (kg/m ³) | 1,318.57 | 1,287.94 |
| ดัชนีการแตกร่วน (%) | 99.8 | 99.2 |
| ความต้านทานแรงอัด (MPa) | 0.73 | 0.6 |
| ความต้านทานน้ำ (%) | 88.81 | 83.89 |

การวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีและทางกายภาพ เชื้อเพลิงอัดเม็ดทอรรีไฟต์

คุณสมบัติทางเคมีและกายภาพของเชื้อเพลิงอัดเม็ดทอรรีไฟต์ที่นำมาวิเคราะห์ในหัวข้อนี้เป็นคุณสมบัติที่กระทำภายใต้กระบวนการทอรรีไฟต์ที่อุณหภูมิและเวลาเหมาะสมที่สุดคือ อุณหภูมิ 200 °C และเวลา 40 min การวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีได้วิเคราะห์ในส่วนของความชื้น สารระเหย คาร์บอนคงตัว และปริมาณเถ้า ส่วนการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพได้วิเคราะห์ความหนาแน่น ดัชนีการแตกร่วน ความต้านทานแรงอัด และความต้านทานน้ำ ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. การวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีของชีวมวลอัดเม็ดทอรรีไฟต์

การวิเคราะห์ทางเคมีสำหรับงานวิจัยนี้ใช้วิธีการวิเคราะห์โดยประมาณ ประกอบด้วย การวิเคราะห์ปริมาณความชื้น สารระเหย คาร์บอนคงตัว และเถ้า จากตารางที่ 12 พบว่าชีวมวลฟางข้าวและต้นข้าวโพดทอรรีไฟต์มีปริมาณความชื้นโดยเฉลี่ยเท่ากับ 2.93% และ 2.22% ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับชีวมวลตั้งต้นทั้งสองประเภทพบว่ามีปริมาณความชื้นลดลงโดยเฉลี่ย 62.77% และ 69.25% ตามลำดับ ปริมาณสารระเหยของฟางข้าวและต้นข้าวโพดทอรรีไฟต์โดยเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 76.95% และ 81.07% ตามลำดับ ซึ่งมีปริมาณลดลงจากเดิมโดยเฉลี่ย 3.73% และ 6.54% ตามลำดับ ปริมาณคาร์บอนคงตัวของฟางข้าวและต้นข้าวโพดทอรรีไฟต์พบว่ามีค่าโดยเฉลี่ยเท่ากับ 5.53% และ 8.41% ตามลำดับ เมื่อผ่านกระบวนการปรับปรุงคุณภาพชีวมวลพบว่า ชีวมวลทั้งสองประเภทมีปริมาณคาร์บอนคงตัวเพิ่มขึ้น โดยเฉลี่ยคิดเป็น 83.36% และ 96.55% ตามลำดับ ส่วนปริมาณเถ้าของฟางข้าวและต้นข้าวโพดทอรรีไฟต์ พบว่ามีค่าโดยเฉลี่ยเท่ากับ 14.59% และ 8.30% ตามลำดับ ซึ่งกระบวนการทอรรีไฟต์ส่งผลให้มีปริมาณเถ้าของชีวมวลทอรรีไฟต์ทั้งสองประเภทเพิ่มขึ้น โดยคิดเป็นค่าเฉลี่ยเท่ากับ 22.69% และ 30.72% ตามลำดับ

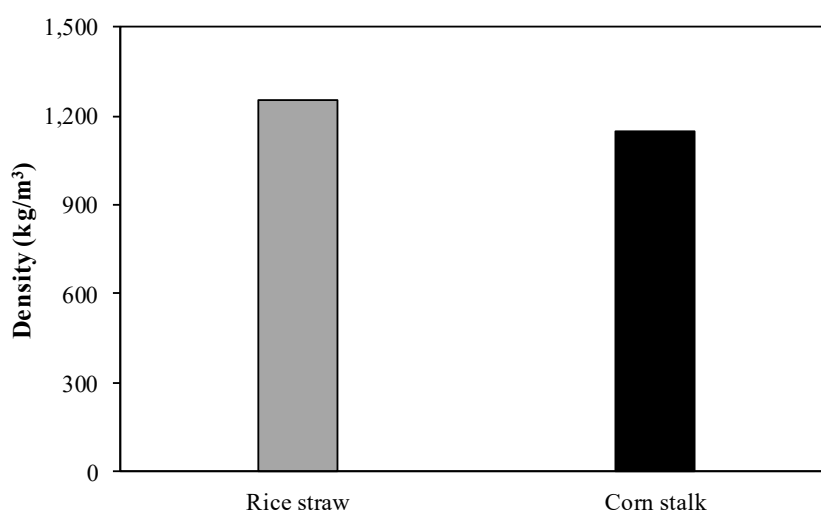
ตารางที่ 12 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีของเชื้อเพลิงอัดเม็ดทอรรีไฟต์

| Proximate analysis (%wt.) | ฟางข้าว | ต้นข้าวโพด |
|---------------------------|---------|------------|
| ความชื้น | 2.93 | 2.22 |
| สารระเหย | 76.95 | 81.07 |
| คาร์บอนคงตัว | 5.53 | 8.41 |
| เถ้า | 14.59 | 8.30 |

2. คุณสมบัติทางกายภาพของเชื้อเพลิงอัดเม็ดทอรรีไฟต์

2.1 ความหนาแน่นเชื้อเพลิงอัดเม็ดทอรรีไฟต์

ภาพที่ 65 แสดงความหนาแน่นของฟางข้าวและต้นข้าวโพดอัดเม็ดทอรรีไฟต์ มีค่าโดยเฉลี่ยเท่ากับ 1,252.61 และ 1,149.94 kg/m³ ตามลำดับ (Said et al., 2015) เมื่อเปรียบเทียบความหนาแน่นระหว่างชีวมวลอัดเม็ดทอรรีไฟต์กับชีวมวลอัดเม็ดของชีวมวลทั้งสองประเภท พบว่า ชีวมวลอัดเม็ดทอรรีไฟต์มีความหนาแน่นน้อยกว่า โดยเฉลี่ยคิดเป็น 0.95% และ 7.28% ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าต้นข้าวโพดอัดเม็ดทอรรีไฟต์มีความหนาแน่นลดลงมากกว่าฟางข้าวอัดเม็ดทอรรีไฟต์ เนื่องจากปริมาณลิกนินและไฟเบอร์ของฟางข้าวสูงกว่าต้นข้าวโพด (Kaliyan and Morey, 2009; Liu et al., 2013) เมื่อองค์ประกอบเหล่านี้อ่อนตัวลงในช่วงอุณหภูมิ 60-200 °C (Liu et al., 2013) จะทำหน้าที่เปรียบเสมือนเป็นตัวประสานระหว่างอนุภาคเนื้อวัสดุชีวมวล และเป็นผลดีต่อการอัดเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล (Kaliyan and Morey, 2009)

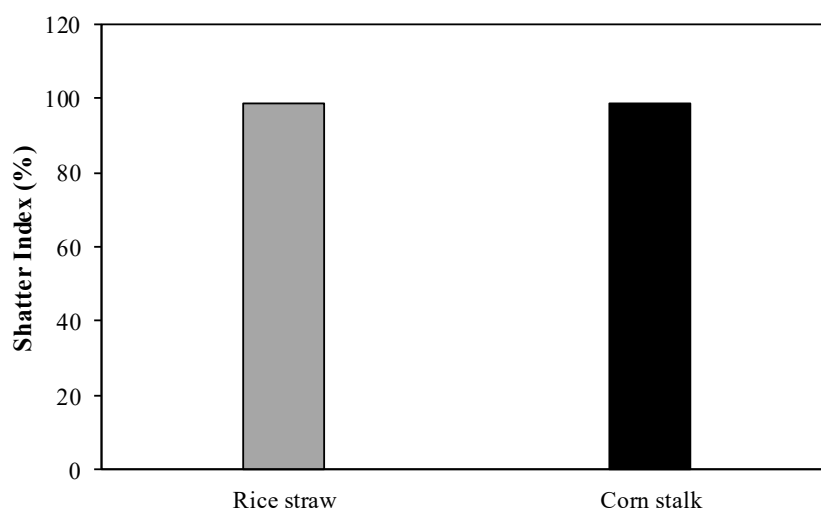


ภาพที่ 65 ผลความหนาแน่นของเชื้อเพลิงอัดเม็ดทอรรีไฟต์

2.2 ดัชนีการแตกร่วนของเชื้อเพลิงอัดเม็ดทอรรีไฟต์

ภาพที่ 66 จะเห็นว่าดัชนีการแตกร่วนของฟางข้าวและต้นข้าวโพดอัดเม็ดทอรรีไฟต์มีค่าเท่ากับ 98.78% และ 98.69% ตามลำดับ ซึ่งถือว่ามีค่าสูงกว่าค่ามาตรฐานการแตกร่วนของเชื้อเพลิงชีวมวล โดยทั่วไปควรมีค่ามากกว่า 95% ตามมาตรฐานการใช้เชื้อเพลิงอัดเม็ดในประเทศไทย (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2555) เมื่อเปรียบเทียบดัชนีการแตกร่วนของฟางข้าวอัดเม็ดทอรรีไฟต์กับฟางข้าวอัดเม็ด พบว่ามีค่าใกล้เคียงกันแต่ฟางข้าวอัดเม็ดทอรรีไฟต์จะมีค่าสูงกว่า

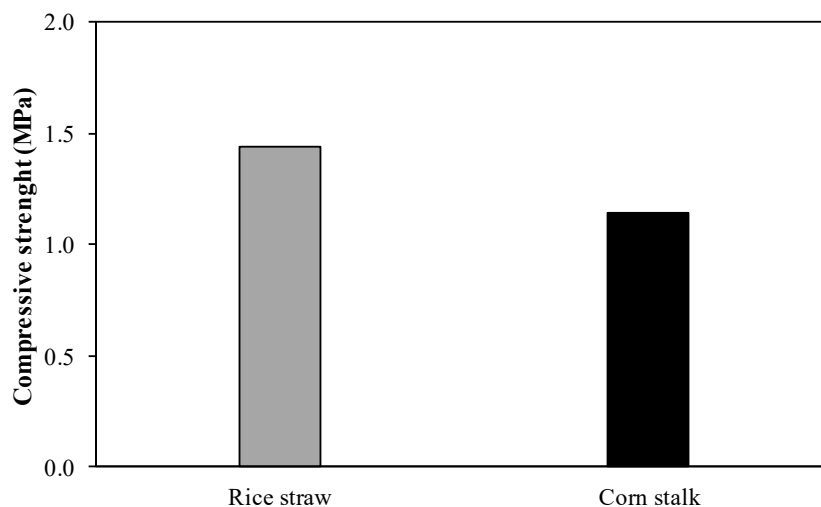
เล็กน้อย และเมื่อเปรียบเทียบดัชนีการแตกร่วนของต้นข้าวโพดอัดเม็ดทอร์รีไฟด์กับต้นข้าวโพดอัดเม็ด พบว่าค่าดัชนีการแตกร่วนของชีวมวลอัดเม็ดทั้งสองแบบมีค่าใกล้เคียงกัน แต่ต้นข้าวโพดอัดเม็ดทอร์รีไฟด์จะมีค่าต่ำกว่าเล็กน้อย เนื่องจากต้นข้าวโพดอัดเม็ดทอร์รีไฟด์มีปริมาณองค์ประกอบของชีวมวลจำพวกลิกนิน ไฟเบอร์ และสารระเหยกลุ่มยางเหนียวค่อนข้างน้อยหาก ซึ่งองค์ประกอบเหล่านี้มีส่วนช่วยให้เกิดแรงยึดเกาะระหว่างเนื้อวัสดุชีวมวล และทำให้มีเกิดการแตกร่วนได้ยาก (Kaliyan and Morey, 2009)



ภาพที่ 66 ผลดัชนีการแตกร่วนของเชื้อเพลิงอัดเม็ดทอร์รีไฟด์

2.3 ความต้านทานแรงอัด

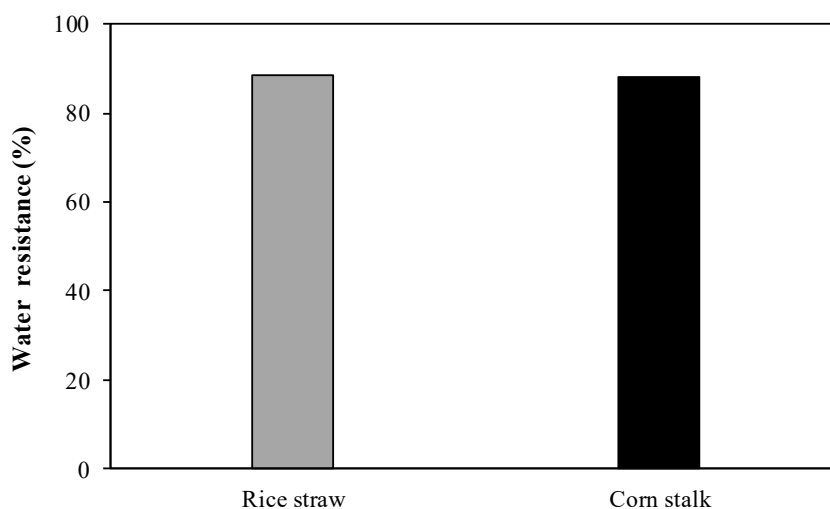
จากการวิเคราะห์ความต้านทานแรงอัดของฟางข้าวและต้นข้าวโพดอัดเม็ดทอร์รีไฟด์ พบว่ามีค่าโดยเฉลี่ยเท่ากับ 1.44 MPa และ 1.14 MPa ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบความต้านทานแรงอัดระหว่างฟางข้าวอัดเม็ดทอร์รีไฟด์และฟางข้าวอัดเม็ดจะพบว่ามีค่าใกล้เคียงกัน แต่ฟางข้าวอัดเม็ดทอร์รีไฟด์จะมีค่าต่ำกว่าเล็กน้อย โดยเฉลี่ยคิดเป็น 4.64% และเมื่อเปรียบเทียบความต้านทานแรงอัดระหว่างต้นข้าวโพดอัดเม็ดทอร์รีไฟด์และต้นข้าวโพดอัดเม็ด พบว่ามีค่าโดยเฉลี่ยใกล้เคียงกัน แต่ต้นข้าวโพดอัดเม็ดทอร์รีไฟด์มีค่าต่ำกว่าเล็กน้อย คิดเป็น 8.77% โดยตัวแปรหลักที่ส่งผลต่อความต้านทานแรงอัดของต้นข้าวโพดอัดเม็ดทอร์รีไฟด์ลดลงคือ ความชื้นที่หลงเหลืออยู่ในเม็ดชีวมวล เนื่องจากความชื้นเป็นตัวทำลายความแข็งแรงพันธะที่ยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคของชีวมวลอัดเม็ด ทำให้ชีวมวลอัดเม็ดมีความเปราะมากขึ้น (Santamart et al., 2012; Huang et al., 2017)



ภาพที่ 67 ผลความต้านทานแรงอัดของเชื้อเพลิงอัดเม็ดทอร์รีไฟด์

2.4 ความต้านทานน้ำ

ภาพที่ 68 แสดงผลความต้านน้ำของฟางข้าวอัดเม็ดทอร์รีไฟด์และต้นข้าวโพดอัดเม็ดทอร์รีไฟด์ พบว่าโดยเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 88.45% และ 88.23% ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบความต้านทานน้ำของชีวมวลทั้งสองประเภทที่เป็นแบบอัดเม็ดทอร์รีไฟด์และแบบอัดเม็ด จะเห็นได้ว่ามีค่าใกล้เคียงกัน แต่ฟางข้าวและต้นข้าวโพดที่เป็นแบบอัดเม็ดทอร์รีไฟด์จะมีความต้านทานน้ำต่ำกว่าเล็กน้อย โดยเฉลี่ยคิดเป็น 2.03% และ 3.25% ตามลำดับ สาเหตุที่ความต้านทานน้ำของชีวมวลที่เป็นแบบอัดเม็ดทอร์ไฟด์ของชีวมวลทั้งสองประเภทมีค่าต่ำลง มีสาเหตุอันเนื่องมาจากคุณสมบัติด้านความพรุนของชีวมวลฟางข้าวและต้นข้าวโพดอัดเม็ดทอร์รีไฟด์ค่อนข้างสูง ทำให้ชีวมวลทั้งสองประเภทมีความสามารถในการดูดซับน้ำในอากาศได้ดี จึงทำให้มีความต้านทานน้ำต่ำลง (Muazu and Stegemann, 2017)



ภาพที่ 68 ผลความต้านทานน้ำของเชื้อเพลิงอัดเม็ดทอร์รีไฟต์

ตารางที่ 13 แสดงผลสรุปคุณสมบัติทางกายภาพของเชื้อเพลิงอัดเม็ดทอร์รีไฟต์จากฟางข้าว และต้นข้าวโพด ซึ่งจะเห็นได้ว่าคุณสมบัติทางกายภาพด้านความหนาแน่น ดัชนีการแตกร่วน ความต้านทานแรงอัด และความต้านทานน้ำ ของชีวมวลทั้งสองประเภทมีค่าค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับค่ามาตรฐานการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดทั่วไป ซึ่งการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดมีศักยภาพเป็นไปได้ค่อนข้างสูงเช่นกัน

ตารางที่ 13 สรุปคุณสมบัติทางการกายภาพของเชื้อเพลิงอัดเม็ดทอร์รีไฟต์

| คุณสมบัติทางกายภาพ | ฟางข้าว | ต้นข้าวโพด |
|---------------------------------|----------|------------|
| ความหนาแน่น (kg/m^3) | 1,252.61 | 1,149.94 |
| ดัชนีการแตกร่วน (%) | 98.78 | 98.69 |
| ความต้านทานแรงอัด (MPa) | 1.44 | 1.14 |
| ความต้านทานน้ำ (%) | 88.45 | 88.23 |

การเปรียบเทียบคุณสมบัติเชื้อเพลิงทอร์รีไฟต์

ตารางที่ 14 แสดงผลสรุปคุณสมบัติทางเคมีและค่าความร้อนของชีวมวลตั้งต้นและชีวมวลแบบกากทอร์รีไฟต์ จะเห็นว่าคุณสมบัติทางเคมีประกอบด้วยปริมาณความชื้น สารระเหย คาร์บอนคงตัวและเถ้า ปริมาณความชื้นของชีวมวลตั้งต้นประเภทฟางข้าวและต้นข้าวโพดโดยเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 7.87% และ 7.22% ตามลำดับ และเมื่อนำมาผ่านกระบวนการทอร์รีแฟคชันพบว่าปริมาณความชื้นลดลงโดยเฉลี่ยอยู่ที่ 1.5% และ 2.39% ตามลำดับ ปริมาณสารระเหยของชีวมวลตั้งต้นประเภทฟางข้าวและต้นข้าวโพดมีค่าเท่ากับ 78.49% และ 81.69% ตามลำดับ เมื่อนำชีวมวลทั้งสองมาผ่านกระบวนการทอร์รีแฟคชันพบว่าปริมาณสารระเหยลดลงโดยเฉลี่ยอยู่ที่ 77.81% และ 82.25% ตามลำดับ ปริมาณคาร์บอนคงตัวของฟางข้าวและต้นข้าวโพดตั้งต้นโดยเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 0.92% และ 0.29% ตามลำดับ เมื่อผ่านกระบวนการทอร์รีแฟคชันปริมาณคาร์บอนคงตัวมีปริมาณเพิ่มขึ้นอยู่ที่ 8.18% และ 8.92% ตามลำดับ ปริมาณเถ้าของชีวมวลตั้งต้นประเภทฟางข้าวและต้นข้าวโพดโดยเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 11.28% และ 5.75% ตามลำดับ เมื่อนำมาทดสอบกระบวนการทอร์รีแฟคชันพบว่ามีค่าเพิ่มขึ้นโดยเฉลี่ยอยู่ที่ 12.51% และ 6.44% ตามลำดับ ในส่วนของค่าความร้อนของชีวมวลฟางข้าวและต้นข้าวโพดพบว่าจากชีวมวลตั้งต้นมีค่าความร้อนโดยเฉลี่ยเท่ากับ 15.01 และ 15.94 MJ/kg ตามลำดับ เมื่อนำมาผ่านกระบวนการทอร์รีแฟคชันค่าความร้อนเพิ่มขึ้นโดยเฉลี่ยเป็น 17.9 และ 17.79 MJ/kg ตามลำดับ

ตารางที่ 15 แสดงผลสรุปคุณสมบัติทางเคมีและค่าความร้อนของชีวมวลตั้งต้นอัดเม็ดและชีวมวลอัดเม็ดทอร์รีแฟคประเภทฟางข้าวและต้นข้าวโพด พบว่าปริมาณความชื้นและสารระเหยของฟางข้าวและต้นข้าวโพดอัดเม็ดโดยเฉลี่ยมีค่าอยู่ในช่วง 5.09-6.03% และ 78.49-81.69% ตามลำดับ เมื่อผ่านกระบวนการทอร์รีแฟคชันมีปริมาณความชื้นและสารระเหยลดลง โดยเฉลี่ยมีค่าอยู่ในช่วง 2.93-2.39% และ 76.95-81.07% ตามลำดับ ส่วนปริมาณคาร์บอนและเถ้าของฟางข้าวและต้นข้าวโพดอัดเม็ดโดยเฉลี่ยมีค่าอยู่ในช่วง 3.62-5.35% และ 6.93-12.8% ตามลำดับ เมื่อผ่านกระบวนการทอร์รีแฟคชันพบว่าปริมาณคาร์บอนคงตัวและเถ้าเพิ่มขึ้นโดยเฉลี่ยมีค่าอยู่ในช่วง 5.53-8.41% และ 8.3-14.59% ตามลำดับ

นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติทางเคมีระหว่างชีวมวลแบบกากทอร์รีไฟต์อัดเม็ดและชีวมวลแบบอัดเม็ดทอร์รีไฟต์พบว่า ปริมาณความชื้นของชีวมวลทั้งสองแบบมีปริมาณเท่ากันคือ 2.39% ส่วนคุณสมบัติทางเคมีในด้านปริมาณสารระเหย คาร์บอนคงตัว และค่าความร้อนของชีวมวลแบบกากทอร์รีไฟต์มีค่าสูงกว่าชีวมวลแบบอัดเม็ดทอร์รีไฟต์ แต่ปริมาณเถ้าของชีวมวลแบบอัดเม็ดทอร์รีไฟต์จะสูงกว่าชีวมวลแบบกากทอร์รีไฟต์อัดเม็ด

ตารางที่ 16 แสดงผลสรุปคุณสมบัติทางกายภาพของชีวมวลตั้งต้นอัดเม็ด ชีวมวลแบบกากทอร์รีไฟต์อัดเม็ด และชีวมวลแบบอัดเม็ดทอร์รีไฟต์ คุณสมบัติในด้านความยาวของชีวมวลอัดเม็ดตั้งต้นและชีวมวลอัดเม็ดทอร์รีไฟต์จะเท่ากันคือมีความยาวโดยเฉลี่ยอยู่ในช่วง 2.7-3.5 cm ส่วนความยาวโดยเฉลี่ยของชีวมวลแบบกากทอร์รีไฟต์อัดเม็ดมีค่าอยู่ในช่วง 2.5-3.0 cm ลักษณะผิวของชีวมวลอัดเม็ดทั้งประเภทมีลักษณะผิวเรียบ มีความเป็นมันวาว ชีวมวลแบบกากทอร์รีไฟต์อัดเม็ดจะมีลักษณะสีผิวที่เข้มกว่าชีวมวลตั้งต้นอัดเม็ดและชีวมวลอัดเม็ดทอร์รีไฟต์ คุณสมบัติความหนาแน่นของฟางข้าวและต้นข้าวโพดแบบอัดเม็ด แบบกากทอร์รีไฟต์อัดเม็ด และแบบอัดเม็ดทอร์รีไฟต์ โดยเฉลี่ยมีค่าอยู่ในช่วง 1241.26-1264.69 kg/m³, 1287.94-1318.57 kg/m³ และ 1149.94-1252.61 kg/m³ ตามลำดับ คุณสมบัติความต้านทานแรงอัดของฟางข้าวและต้นข้าวโพดแบบอัดเม็ด แบบกากทอร์รีไฟต์อัดเม็ด และแบบอัดเม็ดทอร์รีไฟต์ โดยเฉลี่ยมีค่าอยู่ในช่วง 1.51-1.04 MPa, 0.6-0.73 MPa และ 1.14-1.44 MPa ตามลำดับ ส่วนดัชนีการแตกร่วนของฟางข้าวและต้นข้าวโพดแบบอัดเม็ด แบบกากทอร์รีไฟต์อัดเม็ด และแบบอัดเม็ดทอร์รีไฟต์ โดยเฉลี่ยมีค่าอยู่ในช่วง 98.2-99.2% ส่วนคุณสมบัติด้านความต้านทานน้ำของชีวมวลทั้งสามประเภทมีค่าโดยเฉลี่ยอยู่ในช่วง 83.89-90.28%

ตารางที่ 14 ผลสรุปการวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีและค่าความร้อนของชีวมวลตั้งต้นและชีวมวลแบบกากทอร์รีไฟต์

| คุณสมบัติ | ชีวมวลตั้งต้น | | ชีวมวลแบบกากทอร์รีไฟต์ | |
|--------------|---------------|------------|------------------------|------------|
| | ฟางข้าว | ต้นข้าวโพด | ฟางข้าว | ต้นข้าวโพด |
| ความชื้น | 7.87 | 7.22 | 1.50 | 2.39 |
| สารระเหย | 79.93 | 86.74 | 77.81 | 82.25 |
| คาร์บอนคงตัว | 0.92 | 0.29 | 8.18 | 8.92 |
| เถ้า | 11.28 | 5.75 | 12.51 | 6.44 |
| ค่าความร้อน | 15.01 | 15.94 | 17.9 | 17.7 |

ตารางที่ 15 ผลสรุปการวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีและค่าความร้อนของชีวมวลตั้งต้นอัดเม็ดและชีวมวลแบบอัดเม็ดทอร์รีไฟต์

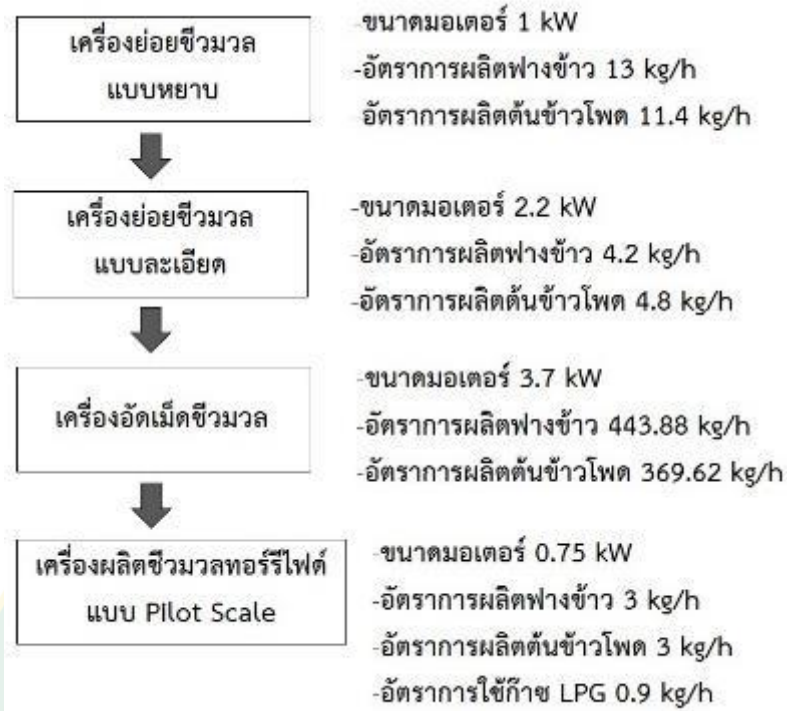
| คุณสมบัติทางเคมี (%) | ชีวมวลตั้งต้นอัดเม็ด | | ชีวมวลแบบอัดเม็ดทอร์รีไฟต์ | |
|----------------------|----------------------|------------|----------------------------|------------|
| | ฟางข้าว | ต้นข้าวโพด | ฟางข้าว | ต้นข้าวโพด |
| ความชื้น | 5.09 | 6.03 | 2.93 | 2.39 |
| สารระเหย | 78.49 | 81.69 | 76.95 | 81.07 |
| คาร์บอนคงตัว | 3.62 | 5.35 | 5.53 | 8.41 |
| เถ้า | 12.80 | 6.93 | 14.59 | 8.30 |
| ค่าความร้อน | 13.62 | 14.12 | 14.07 | 15.68 |

ตารางที่ 16 ผลสรุปการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของชีวมวลตั้งต้นอัดเม็ด ชีวมวลแบบกากทอร์รีไฟต์อัดเม็ด และชีวมวลอัดเม็ดทอร์รีไฟต์

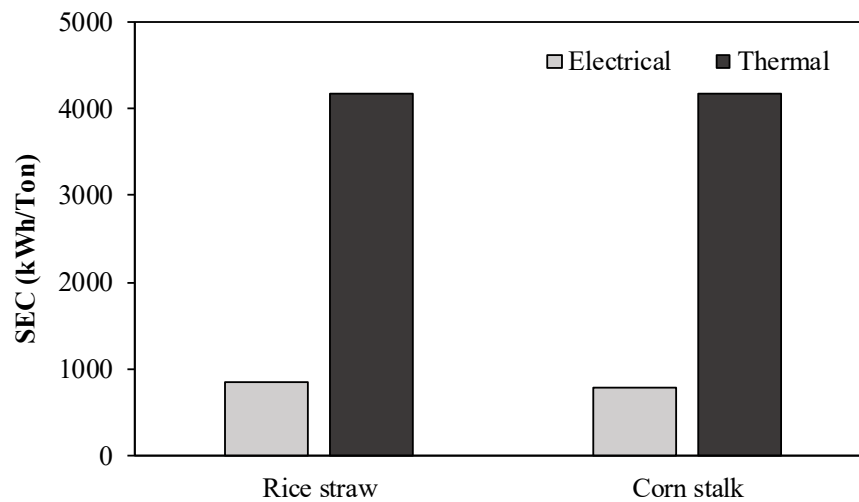
| คุณสมบัติชีวมวล | ตั้งต้นอัดเม็ด | | กากทอร์รีไฟต์อัดเม็ด | | อัดเม็ดทอร์รีไฟต์ | |
|----------------------------------|----------------|------------|----------------------|------------|-------------------|------------|
| | ฟางข้าว | ต้นข้าวโพด | ฟางข้าว | ต้นข้าวโพด | ฟางข้าว | ต้นข้าวโพด |
| ความยาว (mm) | 2.7-3.5 | 2.7-3.5 | 2.5-3.0 | 2.5-3.0 | 2.7-3.5 | 2.7-3.5 |
| ลักษณะผิว | เรียบ | เรียบ | เรียบ | เรียบ | เรียบ | เรียบ |
| | มันวาว | มันวาว | มันวาว | มันวาว | มันวาว | มันวาว |
| ความหนาแน่น (kg/m ³) | 1264.69 | 1241.26 | 1318.57 | 1287.94 | 1252.6 | 1149.94 |
| | | | | | 1 | |
| ความต้านทานแรงอัด (MPa) | 1.51 | 1.04 | 0.73 | 0.6 | 1.44 | 1.14 |
| ดัชนีการแตกร่วน (%) | 98.8 | 98.2 | 99.8 | 99.2 | 98.78 | 98.69 |
| ความต้านทานน้ำ (%) | 90.28 | 90.19 | 88.81 | 83.89 | 88.45 | 88.23 |

การวิเคราะห์อัตราการใช้พลังงานการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดทอร์รีไฟต์

การวิเคราะห์อัตราการใช้พลังงานสำหรับการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดทอร์รีไฟต์มีรายละเอียดแสดงดังภาพที่ 69 ประกอบด้วยการวิเคราะห์การใช้พลังงานของเครื่องย่อยชีวมวลทั้งแบบหยาบและแบบละเอียด ซึ่งขนาดมอเตอร์ของเครื่องย่อยชีวมวลทั้งสองแบบคือ 1.1 kW และ 2.2 kW ตามลำดับ และวิเคราะห์การใช้พลังงานของเครื่องอัดเม็ดชีวมวล ประกอบด้วยกำลังมอเตอร์ขนาด 3.7 kW ส่วนการวิเคราะห์การใช้พลังงานของเครื่องผลิตเชื้อเพลิงทอร์รีไฟต์ สามารถแบ่งการวิเคราะห์การใช้พลังงานออกเป็น 2 ประเภท คือ พลังงานไฟฟ้าและพลังงานความร้อน โดยมีขนาดมอเตอร์ 0.75 kW ทำหน้าที่หมุนดรัมเพื่อให้ชีวมวลได้รับความร้อนจากแก๊สสูงต้มอย่างทั่วถึง จากภาพที่ 70 จะเห็นว่าอัตราการใช้พลังงานไฟฟ้าในการผลิตฟางข้าวและต้นข้าวโพดอัดเม็ดทอร์รีไฟต์โดยเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 839.53 kWh_e/Ton และ 783.78 kWh_e/Ton ตามลำดับ สำหรับการวิเคราะห์อัตราการใช้พลังงานความร้อนในการผลิตฟางข้าวและต้นข้าวโพดอัดเม็ดทอร์รีไฟต์ ได้มีการวิเคราะห์ในส่วนของเครื่องผลิตเชื้อเพลิงทอร์รีไฟต์ระดับ Pilot scale เท่านั้น เนื่องจากเป็นเครื่องเดียวที่มีการใช้ก๊าซสูงต้มมาเป็นแหล่งพลังงานความร้อน ซึ่งจะเห็นว่าอัตราการใช้พลังงานความร้อนของการผลิตเชื้อเพลิงทอร์รีไฟต์ทั้งสองประเภทนั้นมีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากชีวมวลทั้งสองประเภทนี้ใช้เงื่อนไขอุณหภูมิและเวลาทอร์รีแฟคเดียวกันในการทดสอบคือ อุณหภูมิ 200 °C และเวลา 40 min โดยอัตราการใช้พลังงานความร้อนเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 4,166.67 kWh_{th}/Ton



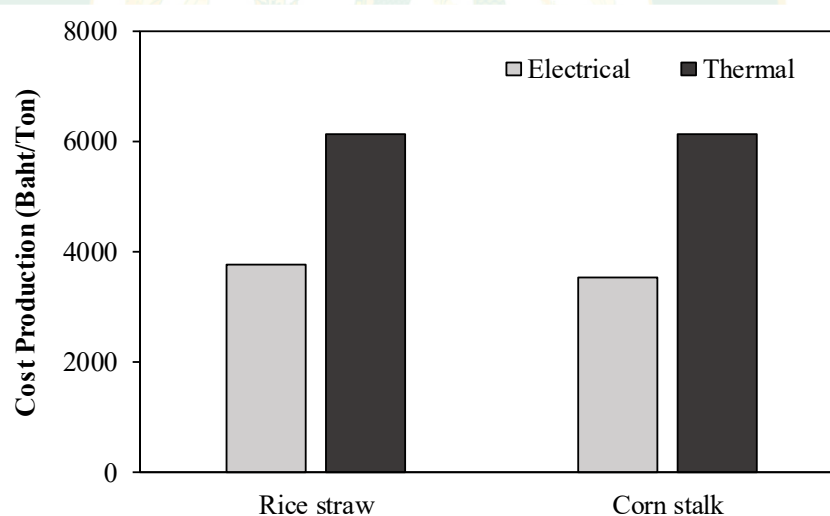
ภาพที่ 69 ไดอะแกรมเครื่องมือและข้อมูลที่ใช้สำหรับวิเคราะห์อัตราการใช้พลังงาน



ภาพที่ 70 การวิเคราะห์การใช้พลังงานการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดทอร์รีไฟต์

การวิเคราะห์ต้นทุนทางพลังงานการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดทอร์รีไฟต์

การวิเคราะห์ต้นทุนทางพลังงานสำหรับการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดทอร์รีไฟต์ ขึ้นอยู่กับอัตราการใช้พลังงานในการผลิตเชื้อเพลิงแต่ละประเภท ซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้จากอัตราการใช้พลังงานของเครื่องย่อยชีวมวลทั้งแบบหยาบและแบบละเอียด วิเคราะห์อัตราการใช้พลังงานของเครื่องอัดเม็ดชีวมวล และวิเคราะห์อัตราการใช้พลังงานของเครื่องผลิตเชื้อเพลิงทอร์รีไฟต์ระดับ Pilot scale โดยการวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตฟางข้าวและต้นข้าวโพดอัดเม็ดทอร์รีไฟต์ สามารถวิเคราะห์ได้ทั้งต้นทุนทางพลังงานไฟฟ้าและต้นทุนทางพลังงานความร้อนของชีวมวลแต่ละประเภท โดยต้นทุนทางพลังงานไฟฟ้าของฟางข้าวและต้นข้าวโพดอัดเม็ดทอร์รีไฟต์โดยเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 3,777.88 Baht/Ton และ 3,527.02 Baht/Ton ตามลำดับ ส่วนต้นทุนทางพลังงานความร้อนของชีวมวลทั้งสองประเภทมีค่าเท่ากันโดยเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 6,147 Baht/Ton ซึ่งโดยรวมแล้วต้นทุนทางพลังงานในการผลิตของเชื้อเพลิงทั้งสองประเภทมีค่าโดยเฉลี่ยเท่ากับ 9,924.88 Baht/Ton และ 9,674.02 Baht/Ton ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 71



ภาพที่ 71 การวิเคราะห์ต้นทุนทางพลังงานการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดทอร์รีไฟต์

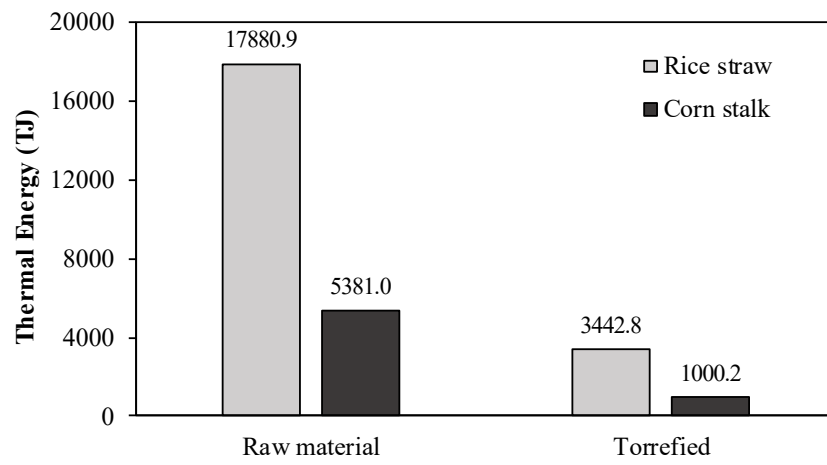
การประเมินศักยภาพเชื้อเพลิงทอร์รีไฟต์สำหรับประเทศไทย

จากผลการศึกษาการผลิตเชื้อเพลิงทอร์รีไฟต์จากฟางข้าวและต้นข้าวโพดพบว่า ภายใต้เงื่อนไขการทดสอบกระบวนการทอร์รีแฟคที่เหมาะสม ชีวมวลทอร์รีไฟต์ทั้งสองประเภทจะมีค่าพลังงานความร้อนเพิ่มขึ้น 19.25% และ 11.6% ตามลำดับ อย่างไรก็ตามเพื่อเป็นการประเมินในเชิงศักยภาพของเชื้อเพลิงทอร์รีไฟต์ในภาพรวมของประเทศไทย สามารถนำเอาค่าความร้อนที่เพิ่มขึ้นจากกระบวนการทอร์รีแฟคขึ้นมาวิเคราะห์หาพลังงานความร้อนของชีวมวลเหลือทิ้ง โดยเปรียบเทียบจากข้อมูลศักยภาพชีวมวลฟางข้าวและต้นข้าวโพดดังแสดงในตารางที่ 17 จากการประเมินศักยภาพชีวมวลทอร์รีไฟต์พบว่า การนำเอาฟางข้าวและต้นข้าวโพดไปผ่านกระบวนการทอร์รีแฟคขึ้น สามารถเพิ่มศักยภาพด้านค่าพลังงานความร้อนให้แก่ชีวมวลทั้งสองประเภทโดยเฉลี่ยเท่ากับ 3442.8 TJ และ 1000.02 TJ ตามลำดับ ดังภาพที่ 72 เมื่อคิดพลังงานเทียบเท่าน้ำมันดิบ เชื้อเพลิงทอร์รีไฟต์ทั้งสองประเภทสามารถทดแทนน้ำมันดิบเพิ่มขึ้นจากเดิมอีก 815 ktoe และ 236.8 ktoe ตามลำดับ ดังภาพที่ 73 ซึ่งอาจกล่าวได้ว่าเชื้อเพลิงทอร์รีไฟต์เป็นพลังงานทดแทนอีกประเภทหนึ่งที่มีศักยภาพที่สามารถตอบสนองนโยบายของภาครัฐในด้านการส่งเสริมการใช้พลังงานหมุนเวียน และยังเป็นการสร้างความมั่นคงทางด้านพลังงานให้แก่ประเทศอีกด้วย

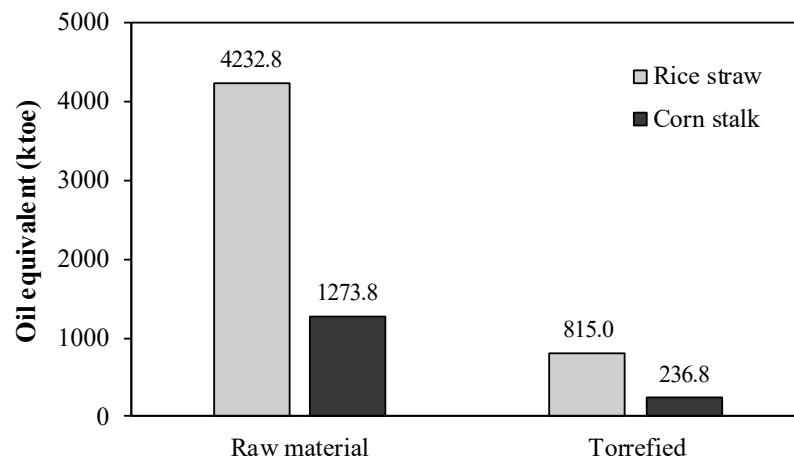
ตารางที่ 17 ข้อมูลสำหรับการประเมินศักยภาพชีวมวลของประเทศไทย ในปี พ.ศ. 2558

| ศักยภาพชีวมวล | ฟางข้าว | ต้นข้าวโพด |
|--|-----------|------------|
| ผลผลิตชีวมวล ($\times 10^6$ Ton) | 24.31 | 4.02 |
| สัดส่วนการเกิดวัสดุเหลือทิ้ง | 0.49 | 0.89 |
| ปริมาณชีวมวลเหลือทิ้ง ($\times 10^6$ Ton) | 11.91 | 3.58 |
| ค่าความร้อน (TJ) | 17,880.89 | 5,381.04 |
| เทียบเท่าน้ำมันดิบ (ktoe) | 4,232.76 | 1,273.80 |

ที่มา: สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร (2558)



ภาพที่ 72 การประเมินศักยภาพพลังงานทางความร้อนจากเชื้อเพลิงทอรรีไฟด์



ภาพที่ 73 การประเมินความสามารถทดแทนน้ำมันดิบจากเชื้อเพลิงทอรรีไฟด์

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุปผลการวิจัย

1. การนำชีวมวลประเภทฟางข้าวและต้นข้าวโพดทั้งแบบกากและแบบอัดเม็ด มาผ่านกระบวนการบดการทอรีไฟเคชัน สามารถเพิ่มคุณภาพชีวมวลทั้งคุณสมบัติทางด้านเคมีและทางด้านกายภาพ
2. เงื่อนไขอุณหภูมิและเวลาทอรีไฟเคชันที่เหมาะสมสำหรับงานวิจัยนี้คือ 200 °C และ 40 min ตามลำดับ สามารถเพิ่มค่าความร้อนให้แก่ชีวมวลประเภทฟางข้าวและต้นข้าวโพดทอรีไฟด์เป็น 19.25% และ 11.6% ตามลำดับ
3. การเปรียบเทียบคุณสมบัติทางเคมีและค่าความร้อนของชีวมวลตั้งต้นแบบกากและชีวมวลแบบกากทอรีไฟด์ พบว่าคุณสมบัติทางเคมีของฟางข้าวและต้นข้าวโพดทอรีไฟด์ มีปริมาณความชื้นและสารระเหยลดลง มีปริมาณเถ้าและคาร์บอนคงตัวเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงแบบกากทอรีไฟด์เพิ่มขึ้น
4. การเปรียบเทียบคุณสมบัติทางเคมีและค่าความร้อนของชีวมวลตั้งต้นแบบอัดเม็ดและเชื้อเพลิงแบบอัดเม็ดทอรีไฟด์ พบว่าคุณสมบัติทางเคมีของฟางข้าวและต้นข้าวโพดอัดเม็ดทอรีไฟด์ มีปริมาณความชื้นและสารระเหยลดลง มีปริมาณเถ้าและคาร์บอนคงตัวเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงแบบอัดเม็ดทอรีไฟด์เพิ่มขึ้น
5. การเปรียบเทียบคุณสมบัติทางเคมีและค่าความร้อนของชีวมวลแบบกากทอรีไฟด์อัดเม็ดและแบบอัดเม็ดทอรีไฟด์พบว่า มีปริมาณความชื้นของชีวมวลทั้งสองแบบใกล้เคียงกัน และปริมาณสารระเหย คาร์บอนคงตัวและค่าความร้อนของชีวมวลแบบกากทอรีไฟด์อัดเม็ดสูงกว่าชีวมวลแบบอัดเม็ดทอรีไฟด์ ซึ่งมีเพียงปริมาณเถ้าของชีวมวลแบบอัดเม็ดทอรีไฟด์เท่านั้นที่สูงกว่าชีวมวลแบบกากทอรีไฟด์อัดเม็ด
6. การเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกายภาพของชีวมวลตั้งต้น อัดเม็ด ชีวมวลแบบแบบกากทอรีไฟด์อัดเม็ดและชีวมวลแบบอัดเม็ดทอรีไฟด์ พบว่าคุณสมบัติทางกายภาพในด้านความยาวโดยเฉลี่ยของชีวมวลตั้งต้นอัดเม็ดและชีวมวลอัดเม็ดทอรีไฟด์มีความยาวกว่าชีวมวลแบบกากทอรีไฟด์อัดเม็ด ลักษณะผิวของชีวมวลทั้งสามแบบเป็นผิวเรียบมันวาว แต่ชีวมวลแบบกากทอรีไฟด์อัดเม็ดมีลักษณะผิวที่ขรุขระกว่า ส่วนคุณสมบัติทางด้านกายภาพพบว่า ความหนาแน่นโดยเฉลี่ยทั้งฟางข้าวและต้นข้าวโพดแบบกากทอรีไฟด์อัดเม็ด มีความหนาแน่นสูงสุด รองลงมาคือชีวมวลตั้งต้นและชีวมวล

แบบอัดเม็ดทอรรีไฟต์ ตามลำดับ คุณสมบัติความต้านทานแรงอัดโดยเฉลี่ยทั้งฟางข้าวและต้นข้าวโพด ในรูปแบบชีวมวลอัดเม็ดทอรรีไฟต์มีค่าสูงสุด รองลงมาคือชีวมวลตั้งต้นอัดเม็ดและชีวมวลแบบกาก ทอรรีไฟต์อัดเม็ด ตามลำดับ ส่วนคุณสมบัติดัชนีการแตก่วนของฟางข้าวและต้นข้าวโพดในรูปแบบ กากทอรรีไฟต์อัดเม็ดมีดัชนีการแตก่วนโดยเฉลี่ยสูงสุด รองลงมาคือชีวมวลแบบอัดเม็ดทอรรีไฟต์และ ชีวมวลตั้งต้นอัดเม็ด ตามลำดับ และคุณสมบัติความต้านทานน้ำของฟางข้าวและต้นข้าวโพดแบบชีวมวลตั้งต้นอัดเม็ดมีความต้านทานน้ำสูงสุด รองลงมาคือชีวมวลแบบกากทอรรีไฟต์และแบบอัดเม็ด ทอรรีไฟต์ ตามลำดับ

7. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เอมไพริคอลสำหรับหาค่าความร้อนเชื้อเพลิงทอรรีไฟต์ ภายใต้การปรับอุณหภูมิและเวลาทอรรีแฟคชัน สามารถทำนายผลค่าความร้อนได้ดี มีค่า R^2 เฉลี่ยอยู่ในช่วง 0.9661-0.9893

8. อัตราการใช้พลังงานในการผลิตฟางข้าวและต้นข้าวโพดอัดเม็ดทอรรีไฟต์ พบว่าอัตราการ ใช้พลังงานไฟฟ้าโดยเฉลี่ยอยู่ในช่วง 2,387.23-2,442.98 kWh/Ton และอัตราการใช้พลังงาน ความร้อนในการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดทอรรีไฟต์ทั้งสองประเภทมีค่าเท่ากับ 4,166.67 kWh/Ton

9. ต้นทุนทางพลังงานสำหรับการผลิตฟางข้าวและต้นข้าวโพดอัดเม็ดทอรรีไฟต์โดยเฉลี่ยมี ค่าเท่ากับ 5,440.56 kWh/Ton และ 5,189.7 kWh/Ton ตามลำดับ

ข้อเสนอแนะ

1. เนื่องจากงานวิจัยนี้มีการใช้ชีวมวลเพียง 2 ประเภท และพบว่าชนิดของชีวมวลมีผลต่อ การผลิตเชื้อเพลิงทอรรีไฟต์ ดังนั้นจึงควรมีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับชีวมวลประเภทอื่นๆ เช่น ชัง ข้าวโพด เศษไม้ ป่าล้มและแกลบ เป็นต้น

2. ในการทดสอบกระบวนการทอรรีแฟคชันควรทดสอบที่ช่วงอุณหภูมิ 200-300 °C ใน ละเอียดยมากขึ้น

3. การผลิตเชื้อเพลิงทอรรีไฟต์ด้วยกระบวนการทอรรีแฟคชัน ควรมีการศึกษาด้านทุนการ ผลิตในสเกลระดับอุตสาหกรรม ทั้งนี้เพื่อสามารถนำข้อมูลไปวิเคราะห์ต้นทุนที่แท้จริงได้อย่างแม่นยำ เพิ่มขึ้น

บรรณานุกรม

- กชกร จันโจอมศึก. 2540. การศึกษากราฟอัตราการอบแห้งของสับประรดแช่ฮีม. กรุงเทพฯ:โครงการ
วิศวกรรมอาหารระดับปริญญาตรี. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. 2555. โครงการศึกษากำหนดมาตรฐานของ
Biomass pellet เพื่อพัฒนาเป็นเชื้อเพลิงชีวมวลสำหรับอนาคต. กรุงเทพฯ:
กระทรวงพลังงาน.
- _____. 2556. ยุทธศาสตร์กระทรวงพลังงาน พ.ศ. 2557-2561. กรุงเทพฯ:
กระทรวงพลังงาน.
- _____. 2558ก. แผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก พ.ศ. 2558-2579.
กรุงเทพฯ: กระทรวงพลังงาน.
- _____. 2558ข. วิเคราะห์ความเหมาะสมเพื่อนำประเทศไปสู่การเป็นศูนย์กลางการค้าเอ
ทานอลในภูมิภาคและจัดตั้งศูนย์ความเป็นเลิศด้านเชื้อเพลิงชีวภาพ. กรุงเทพฯ: กระทรวง
พลังงาน.
- คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม. 2555. โครงการศึกษากำหนดมาตรฐานของ
Biomass Pellet เพื่อพัฒนาเป็นเชื้อเพลิงชีวมวลสำหรับอนาคต. กรุงเทพฯ: สำนักวิจัย
ค้นคว้าพลังงาน กรมพัฒนาพลังงานและอนุรักษ์พลังงาน.
- คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร. 2555. โครงการศึกษา
กำหนดมาตรฐานของ Biomass Pellet เพื่อพัฒนาเป็นเชื้อเพลิงชีวมวลสำหรับอนาคต.
กรุงเทพฯ: สำนักวิจัยคนควาพลังงาน กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน.
- ณรงค์ฤทธิ์ สายสุน และ ธนพร พบลาภ. 2557. ชีวมวลที่มีความหนาแน่นเชิงพลังงานสูงจากการทอ
รีฟแลกซ์เศษไม้ยางพาราสำหรับการผลิตเชื้อเพลิงแข็งอัดแน่น. ขอนแก่น:
มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- ทองทิพย์ พูลเกษม. 2552. การศึกษาการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งจากเปลือกทุเรียนเพื่อทดแทนฟืน
และถ่านในการหุงต้มในครัวเรือน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยมหิดล.
- ธนาพล ตันตีสัตยกุล, สุริยา พงษ์เกษม, ปรีดิ์ปวีณ ภูทัญญา และ ภาณุวัฒน์ ไถ่บ้านกวย. 2558.
พลังงานทดแทนชุมชนจากเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งจากทางมะพร้าว. วารสารวิทยาศาสตร์
และเทคโนโลยี, 23(3), 418-431.
- ธัญพิสิษฐ์ พวงจิก. 2558. เม็ดเชื้อเพลิงจากไม้ : พลังงานทดแทนมูลค่ามหาศาล. วารสาร
วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, 23(1), 35-42.

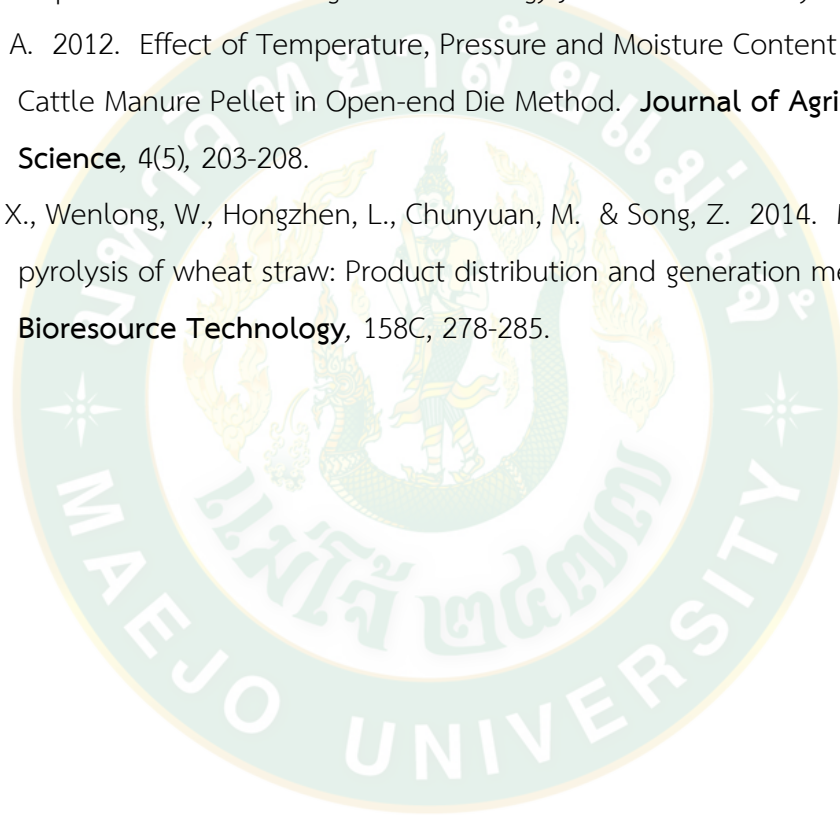
- นคร ทิพยาวงศ์. 2552. **เทคโนโลยีการแปลงสภาพชีวมวล**. กรุงเทพฯ: สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น).
- นคร วรสุวรรณรักษ์. 2552. **การศึกษาสมบัติเชิงเคมีความร้อนของวัสดุชีวมวลที่หาได้ในประเทศไทยเพื่อการแปรรูปเป็นพลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ**. กรุงเทพฯ: สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.).
- บุษบา พฤชาพันธุ์รัตน์, บุญรอด สัจจกุลนุกิจ, วุฒินันท์ นุ่นแก้ว, ธนวัฒน์ ศรีพนมวรรณ และ ชัยวัฒน์ ทานะรมณ์. 2555. **แนวทางการส่งเสริมมาตรฐานเชื้อเพลิงชีวมวลแปรรูปในภาคอุตสาหกรรม**. กรุงเทพฯ: สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.).
- พงษ์ศักดิ์ เสงนิรันดร์ และ ไตรรัตน์ เนียมสุวรรณ. 2554. **เม็ดเชื้อเพลิงไม้ทอร์รีไฟด์ เทคโนโลยีและโอกาสทางการตลาด**. วารสารการจัดการป่าไม้, 5(10), 67-75.
- ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ และ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. 2559. **เครื่องมือวิทยาศาสตร์ เคมีวิเคราะห์ทดสอบหาปริมาณธาตุและค่าความร้อน**. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา http://www.sec.psu.ac.th/th/equipment.php?p=chemi_g5 (5 มกราคม 2560).
- สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. 2558. **สถิติการเกษตรของประเทศไทย ปี 2558**. กรุงเทพฯ: สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร.
- สุดาวลัย ดำหนก และ ธราพงษ์ วิทิตสานต์. 2554. **ผลของวัสดุเบดต่อสมบัติของเชื้อเพลิงแข็งจากทอร์รีแฟกชันของชีวมวล**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- หัสวีภา หมายมั่น. 2553. **เครื่องมือวิเคราะห์ทดสอบทางโครงสร้างจุลภาค**. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา <http://web2.mfu.ac.th/center/stic/micro-analysis-instrument-menu.html> (12 สิงหาคม 2561).
- อติพงษ์ โสภกุล, อีระ ฤทธิรอด และ เทพฤทธิ์ ตูลาพิทักษ์. 2558. **การศึกษาความเป็นไปได้ในการลงทุนธุรกิจพลังงานชีวมวลอัดเม็ดของ หจก.ปิ้งรุ่งเรืองพืชผล**. น. 1790-1796. ใน **ประชุมวิชาการทางธุรกิจและนวัตกรรมทางการจัดการ ระดับชาติและนานาชาติ**. วิทยาลัยการจัดการ มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- ออรอริน คุ่มศักดิ์, วีรพงษ์ วัฒนะน้อยม และ นคร วรสุวรรณรักษ์. 2554. **อิทธิพลของอุณหภูมิของทอร์รีแฟกชันต่อสมบัติน้ำ**. วารสารวิจัยและพัฒนา มจร., 34(4), 341-355.
- Borges, A. C. P., Alves, C. T. & Torres, E. A. 2016. **Torrefied Eucalyptus Grandis Characterization as a Biomass to Using in Industrial Scale**. **Chemical Engineering Transaction**, 49(283-288).

- Chen, D., Zheng, Y. & Zhu, X. 2012. Determination of effective moisture diffusivity and drying kinetics for poplar sawdust by thermogravimetric analysis under isothermal condition. **Bioresour Technology**, 107, 451-455.
- Chen, D., Zheng, Z., Fu, K., Zeng, Z., Wang, J. & Lu, M. 2015. Torrefaction of biomass stalk and its effect on the yield and quality of pyrolysis products. **Fuel**, 159, 27-32.
- Chico-Santamarta, L., Chaney, K., Godwin, R., Richard White, D. & Claire Humphries, A. 2012. Physical quality changes during the storage of canola (*Brassica napus* L.) straw pellets. **Applied Energy**, 95, 220-226.
- Chiou, B. S., Valenzuela-Medina, D., Bilbao-Sainz, C., Klamczynski, A. K., Avena-Bustillos, R. J., Milczarek, R. R., Du, W. X., Glenn, G. M. & Orts, W. J. 2015. Torrefaction of pomaces and nut shells. **Bioresour Technol**, 177, 58-65.
- Chou, C.-S., Lin, S.-H. & Lu, W.-C. 2009. Preparation and characterization of solid biomass fuel made from rice straw and rice bran. **Fuel Processing Technology**, 90(7), 980-987.
- Cruz, G., Avila, I., Santos, A. & Crnkovic, P. 2012. Effects of Torrefaction on Biomass: A Thermal and Morphological Evaluation. In **Proceedings of ENCIT 14th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering**. Rio de Janeiro, RJ Brazil
- Daud, D., Rahman, A. A. & Shamsuddin, A. H. 2016. Devolatilization Studies of Oil Palm Biomass for Torrefaction Process through Scanning Electron Microscopy. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, 32(1), 012072.
- Huang, X., Christensen, C. & Yu, P. 2015. Effects of conditioning temperature and time during the pelleting process on feed molecular structure, pellet durability index, and metabolic features of co-products from bio-oil processing in dairy cows. **Journal of Science**, 98(7), 4869-4881.
- Huang, Y., Finell, M., Larsson, S., Wang, X., Zhang, J., Wei, R. & Liu, L. 2017. Biofuel pellets made at low moisture content – Influence of water in the binding mechanism of densified biomass. **Biomass and Bioenergy**, 98, 8-14.
- Huang, Y. F., Chen, W. R., Chiueh, P. T., Kuan, W. H. & Lo, S. L. 2012. Microwave torrefaction of rice straw and Pennisetum. **Bioresour Technol**, 123, 1-7.

- Ishii, K. & Furuichi, T. 2014. Influence of moisture content, particle size and forming temperature on productivity and quality of rice straw pellets. **Waste Management**, 34(12), 2621-2626.
- Jittabut, P. 2015. Physical and Thermal Properties of Briquette Fuels from Rice Straw and Sugarcane Leaves by Mixing Molasses. **Energy Procedia**, 79, 2-9.
- Kaliyan, N. & Morey, R. V. 2009. Factors affecting strength and durability of densified biomass products. **biomass and bioenergy**, 33(3), 337 - 359.
- . 2010. Natural binders and solid bridge type binding mechanisms in briquettes and pellets made from corn stover and switchgrass. **Bioresour Technol**, 10(3), 1082-1090.
- Li, M.-F., Chen, C.-Z., Li, X., Shen, Y., Bian, J. & Sun, R.-C. 2015. Torrefaction of bamboo under nitrogen atmosphere: Influence of temperature and time on the structure and properties of the solid product. **Fuel**, 161(193-196).
- Liu, Z., Liu, X. e., Fei, B., Jiang, Z., Cai, Z. & Yu, Y. 2013. The properties of pellets from mixing bamboo and rice straw. **Renewable Energy**, 55, 1-5.
- Medic, D., Darr, M. J., Shah, A. & Rahn, S. J. 2012. The Effects of Particle Size, Different Corn Stover Components, and Gas Residence Time on Torrefaction of Corn Stover. **Energies**, 5, 1199-1214.
- Mei, Y., Che, Q., Yang, Q., Draper, C., Haiping, Y., Zhang, S. & Chen, H. 2016. Torrefaction of different parts from a corn stalk and its effect on the characterization of products. **Industrial Crops and Products**, 92, 26-33.
- Muazu, R. I. & Stegemann, J. A. 2015. Effects of operating variables on durability of fuel briquettes from rice husks and corn cobs. **Fuel Processing Technology**, 133, 137-145.
- Muazu, R. I. & Stegemann, J. A. 2017. Biosolids and microalgae as alternative binders for biomass fuel briquetting. **Fuel**, 194, 339-347.
- Parikh, J., Channiwala, S. A. & Ghosal, G. K. 2005. A correlation for calculating HHV from proximate analysis of solid fuels. **Fuel**, 84(5), 487-494.
- Poudel, J., Ohm, T.-I. & Oh, S. C. 2015. A study on torrefaction of food waste. **Fuel**, 140(275-281).

- Reddy, N. & Yang, Y. 2009. Properties and potential applications of natural cellulose fibers from the bark of cotton stalks. **Bioresource Technology**, 100(14), 3563-3569.
- Sadaka, S., Sharara, M. A., Ashworth, A., Keyser, P., Allen, F. & Wright, A. 2014. Characterization of Biochar from Switchgrass Carbonization. **Energies**, 7(2), 548-567.
- Said, N., Abdel daiem, M. M., García-Maraver, A. & Zamorano, M. 2015. Influence of densification parameters on quality properties of rice straw pellets. **Fuel Processing Technology**, 138, 56-64.
- Satpathy, S. K., Tabil, L. G., Meda, V., Naik, S. N. & Prasad, R. 2014. Torrefaction of wheat and barley straw after microwave heating. **Fuel**, 124, 269-278.
- Teh, K. W. & Jamari, S. S. 2016. The Valorization of Rice Waste via Torrefaction Method. **International Journal of Chemical Engineering and Applications**, 7(6), 409-412.
- Toscano, G., Pizzi, A., Foppa Pedretti, E., Rossini, G., Ciceri, G., Martignon, G. & Duca, D. 2015. Torrefaction of tomato industry residues. **Fuel**, 143, 89-97.
- Tumuluru, J. S., Sokhansanj, S., Hess, J. R., Wright, C. T. & Boardman, R. D. 2011. A review on biomass torrefaction process and product properties for energy applications. **Industrial Biotechnology**, 7, 384-401.
- Tumuluru, J. S., Sokhansanj, S., Hess, J. R., Wright, C. T. & Boardman, R. D. 2011. A review on biomass torrefaction process and product properties for energy applications. **Industrial Biotechnology** 7(5), 384-401.
- van der Stelt, M. J. C., Gerhauser, H., Kiel, J. H. A. & Ptasinski, K. J. 2011. Biomass upgrading by torrefaction for the production of biofuels: A review. **Biomass and Bioenergy**, 35(9), 3748-3762.
- Wang, M. J., Huang, Y. F., Pei-Te, C. & Shang-Lien, L. 2012. Microwave-induced torrefaction of rice husk and sugarcane residues. **Energy**, 37(1), 177-184.
- Wannapeera, J., Fungtammasan, B. & Worasuwannarak, N. 2011. Effects of temperature and holding time during torrefaction on the pyrolysis behaviors of woody biomass. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, 92(1), 99-105.

- Xia, X., Xiao, H., Yang, Z., Xie, X. & Bhimani, J. 2018. **Pelletization Characteristics of the Hydrothermal Pretreated Rice Straw with Added Binders**. Berlin: Springer.
- Yingquan, C., Liu, B., Yang, H., Yang, Q. & Chen, H. 2014. Evolution of functional groups and pore structure during cotton and corn stalks torrefaction and its correlation with hydrophobicity. **Fuel**, 137, 41-49.
- Zafar, S. 2016. **Biomass Energy in Jordan**. [Online]. Available <http://www.ecomena.org/biomass-energy-jordan/> (22 February 2016).
- Zafari, A. 2012. Effect of Temperature, Pressure and Moisture Content on Durability of Cattle Manure Pellet in Open-end Die Method. **Journal of Agricultural Science**, 4(5), 203-208.
- Zhao, X., Wenlong, W., Hongzhen, L., Chunyuan, M. & Song, Z. 2014. Microwave pyrolysis of wheat straw: Product distribution and generation mechanism. **Bioresource Technology**, 158C, 278-285.





ภาคผนวก



ภาคผนวก ก

คุณสมบัติพื้นฐานของชีวมวล



ศูนย์เครื่องมือนิวเคลียร์
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่

ชั้น 1 อาคารบริหารอาคารรวม อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา 90110

โทรศัพท์ 874-286904-7 โทรสาร 874-212813 อีเมล sec-nli@group.psu.ac.th เว็บไซต์ http://www.sec.psu.ac.th

วิสัยทัศน์: เป็นองค์กรภาครัฐที่เติบโตด้วยความมุ่งมั่นสู่การเป็นองค์กรที่มีภรณ์ระดม
และส่งเสริมบุคลากรให้บริการทดสอบด้วยเครื่องมือวิจัยทางวิทยาศาสตร์

F.RES-033 ฉบับที่ 1 มีผลใช้ 02/05/59

รายงานผลการทดสอบ

| | | | |
|-----------------------|--|--------------------|-----------------|
| เลขที่รายงาน: | R0842/59-1 | หน้า: | 1/1 |
| เลขที่ใบขอใช้บริการ: | 2780/59 | วันที่รับตัวอย่าง: | 07 กรกฎาคม 2559 |
| ชื่อและที่อยู่ลูกค้า: | วิทยาลัยสงขลานครินทร์ มหาวิทยาลัยอัสสัมชัญ 63 ม.4 ต.หนองหาร อ.สันทราย จ.เชียงใหม่ 50290 | | |
| ชื่อตัวถ่วง: | ต้นข้าวโพดอบ | | |
| สภาพตัวอย่าง: | บรรจุในถุงซิปล็อก | | |
| รายละเอียดตัวอย่าง: | ชีวมวล | | |
| วันที่ทำการทดสอบ: | 7 กรกฎาคม 2559 - 15 กรกฎาคม 2559 | | |

ผลการทดสอบ:

| ลำดับที่ | พารามิเตอร์ | หน่วย | เครื่องมือ/วิธีการทดสอบ | ผลการทดสอบ ± SD | เกณฑ์ |
|----------|---|-------|-----------------------------|-----------------|---------|
| 1. | ความชื้นทั้งหมด (As received basis) | % wt. | ASTM D 3302 และ ASTM D 7582 | 5.69 | ≤ 10 |
| 2. | ค่า (As air dried basis) | % wt. | ASTM D 7582 | 5.308 | ≤ 3 |
| 3. | Volatile matter (As air dried basis) | % wt. | ASTM D 7582 | 81.720 | - |
| 4. | Fixed Carbon (As air dried basis) | % wt. | ASTM D 7582 | 10.313 | - |
| 5. | คาร์บอน (C) (As air dried basis) | % wt. | CHNS/O Analyzer | 42.10 ± 0.01 | - |
| 6. | ออกซิเจน (O) (As air dried basis) | % wt. | EN15104 | 38.69 ± 0.13 | - |
| 7. | ไนโตรเจน (N) (As air dried basis) | % wt. | EN 15104 | 0.53 ± 0.01 | ≤ 0.5 |
| 8. | ไฮโดรเจน (H) (As air dried basis) | % wt. | EN 15104 | 5.37 ± 0.09 | - |
| 9. | ค่าความร้อน (H.H.V.) (As air dried basis) | kJ/kg | ASTM D 5865 | 1,806.7 ± 18.6 | ≥ 4,200 |

- ผลการทดสอบอ้างอิงในข้อใช้วิธี EN 15104 และ EN 15104

- SD = Standard Deviation

- H.H.V. = Higher Heating Value

- ค่าที่เขียนในตารางนี้เป็นค่าเฉลี่ยของ 3 ครั้ง และมาตรฐานอ้างอิงได้รับการอนุมัติและรับรองโดย Analyt (Fixed) on KULAS

(นางรุ่งทิพย์ กู่วิจิตร)

หัวหน้าฝ่ายบริการเครื่องมือวิจัยทางวิทยาศาสตร์

21 กรกฎาคม 2559

หมายเหตุ: รายงานผลการทดสอบนี้จัดทำขึ้นเพื่อใช้สำหรับวัตถุประสงค์ที่ระบุไว้เท่านั้น และรายงานผลการทดสอบนี้จะไม่สามารถใช้เพื่อวัตถุประสงค์อื่นใดโดยไม่ได้รับความยินยอมเป็นลายลักษณ์อักษรจากศูนย์เครื่องมือวิจัยทางวิทยาศาสตร์

ภาพผนวกที่ 1 ใบงานงานผลการวิเคราะห์โดยประมาณ
และแบบแยกธาตุของต้นข้าวโพด



ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่

ชั้น 3 อาคารบริหารวิชาการรวม อ.หาดใหญ่ อ.สงขลา 90110
โทรศัพท์ 874-284984-7 โทรสาร 874-212813 อีเมล sec@mail@guap.psu.ac.th เว็บไซต์ http://www.sec.psu.ac.th

วิสัยทัศน์: เป็นองค์กรภาครัฐที่เติบโตด้วยความมุ่งมั่นในการเป็นองค์กรที่มีนวัตกรรมสูง
และมีบริการที่ให้บริการทดสอบด้วยเครื่องมือวิทยาศาสตร์

F-RBS-035 ฉบับที่ 3 มีผลใช้ 02/05/59

รายงานผลการทดสอบ

| | | | |
|-----------------------|---|--------------------|-----------------|
| เลขที่รายงาน: | R0842/59_2 | หน้า: | 1/1 |
| เลขที่ใบขอใช้บริการ: | 2780/59 | วันที่รับตัวอย่าง: | 07 กรกฎาคม 2559 |
| ชื่อและที่อยู่ลูกค้า: | วิทยาลัยสงขลานครินทร์ มหาวิทยาลัยแม่โจ้ 63 ม.4 ต.หนองหาร อ.สันทราย จ.เชียงใหม่ 50290 | | |
| ชื่อตัวอย่าง: | ฟางข้าวค | | |
| สภาพตัวอย่าง: | บรรจุในถุงซีลล๊อค | | |
| รายละเอียดตัวอย่าง: | ชีวมวล | | |
| วันที่ทำการทดสอบ: | 7 กรกฎาคม 2559 - 15 กรกฎาคม 2559 | | |

ผลการทดสอบ:

| ลำดับที่ | พารามิเตอร์ | หน่วย | เครื่องมือ/วิธีการทดสอบ | ผลการทดสอบ ± SD | เกณฑ์ |
|----------|---|---------|------------------------------|-----------------|---------|
| 1. | ความชื้นทั้งหมด (As received basis) | % wt. | ASTM D 5302 หรือ ASTM D 7582 | 6.43 | ≤ 10 |
| 2. | น้ำ (As air dried basis) | % wt. | ASTM D 7582 | 11.41 | ≤ 3 |
| 3. | Volatile matter (As air dried basis) | % wt. | ASTM D 7582 | 72.608 | - |
| 4. | Fixed Carbon (As air dried basis) | % wt. | ASTM D 7582 | 10.639 | - |
| 5. | คาร์บอน (C) (As air dried basis) | % wt. | CHNS/O Analyzer | 39.70 ± 0.06 | - |
| 6. | ออกซิเจน (O) (As air dried basis) | % wt. | EN15104 | 37.91 ± 0.08 | - |
| 7. | ไนโตรเจน (N) (As air dried basis) | % wt. | EN 15104 | 0.35 ± 0.01 | ≤ 0.5 |
| 8. | ไฮโดรเจน (H) (As air dried basis) | % wt. | EN 15104 | 5.12 ± 0.04 | - |
| 9. | ค่าความร้อน (H.H.V.) (As air dried basis) | kcal/kg | ASTM D 5865 | 5,584.3 ± 23.5 | ≥ 4,200 |

- ผลการทดสอบอ้างอิงใช้วิธีการ (A-ASO-454) หน้าที่ 2/198/19

- SD = Standard Deviation

- H.H.V. = Higher Heating Value

- อ้างอิงตามวิธีทดสอบที่ 2013-3 โดย Korea Forest Research Institute (KFRI) and the standard approved and recognized by Analyte listed as KOLAS

(นางรณณี กุลสุกรี)

หัวหน้าฝ่ายบริการเครื่องมือวิทยาศาสตร์

7/ กรกฎาคม 2559

หมายเหตุ: รายงานผลการทดสอบนี้มีผลเฉพาะตัวตัวอย่างที่นำมาทดสอบเท่านั้น และรายงานผลการทดสอบนี้สงวนไว้เพื่อใช้เฉพาะงาน
ขอสงวนสิทธิ์สงวน โดยไม่รับผิดชอบต่อผลที่ได้จากการทดสอบเครื่องมือวิทยาศาสตร์

ภาพผนวกที่ 2 ใบรายงานผลการวิเคราะห์โดยประมาณ
และแบบแยกธาตุของฟางข้าว



ภาคผนวก ข

ตารางผลการวิเคราะห์เชื้อเพลิงทอรรีไฟต์

ตารางผนวกที่ 1 ผลการวิเคราะห์ปริมาณความชื้นของต้นข้าวโพดและฟางข้าวทอรรีไฟต์

| ต้นข้าวโพดทอรรีไฟต์ | | |
|------------------------|---------------------|--------------------|
| อุณหภูมิทอรรีไฟต์ (°C) | เวลาทอรรีไฟต์ (min) | ปริมาณความชื้น (%) |
| 200 | 20 | 3.17 |
| | 40 | 2.39 |
| | 60 | 1.96 |
| 300 | 20 | 3.09 |
| | 40 | 2.28 |
| | 60 | 1.89 |
| 400 | 20 | 1.62 |
| | 40 | 2.87 |
| | 60 | 1.63 |
| ฟางข้าวทอรรีไฟต์ | | |
| อุณหภูมิทอรรีไฟต์ (°C) | เวลาทอรรีไฟต์ (min) | ปริมาณความชื้น (%) |
| 200 | 20 | 2.02 |
| | 40 | 1.50 |
| | 60 | 1.09 |
| 300 | 20 | 2.32 |
| | 40 | 2.02 |
| | 60 | 1.62 |
| 400 | 20 | 2.87 |
| | 40 | 1.63 |
| | 60 | 1.16 |

ตารางผนวกที่ 2 ผลการวิเคราะห์ปริมาณสารระเหยของต้นข้าวโพดและฟางข้าวทอรรีไฟต์

| ต้นข้าวโพดทอรรีไฟต์ | | |
|------------------------|---------------------|--------------------|
| อุณหภูมิทอรรีไฟต์ (°C) | เวลาทอรรีไฟต์ (min) | ปริมาณสารระเหย (%) |
| 200 | 20 | 84.56 |
| | 40 | 82.25 |
| | 60 | 82.25 |
| 300 | 20 | 71.05 |
| | 40 | 68.17 |
| | 60 | 58.70 |
| 400 | 20 | 45.77 |
| | 40 | 43.61 |
| | 60 | 40.94 |
| ฟางข้าวทอรรีไฟต์ | | |
| อุณหภูมิทอรรีไฟต์ (°C) | เวลาทอรรีไฟต์ (min) | ปริมาณสารระเหย (%) |
| 200 | 20 | 79.29 |
| | 40 | 77.81 |
| | 60 | 76.88 |
| 300 | 20 | 64.40 |
| | 40 | 61.67 |
| | 60 | 60.95 |
| 400 | 20 | 41.24 |
| | 40 | 40.12 |
| | 60 | 37.25 |

ตารางผนวกที่ 3 ผลการวิเคราะห์ปริมาณเถ้าของต้นข้าวโพดและฟางข้าวทอรรีไฟต์

| ต้นข้าวโพดทอรรีไฟต์ | | |
|------------------------|---------------------|----------------|
| อุณหภูมิทอรรีไฟต์ (°C) | เวลาทอรรีไฟต์ (min) | ปริมาณเถ้า (%) |
| 200 | 20 | 6.12 |
| | 40 | 6.44 |
| | 60 | 6.69 |
| 300 | 20 | 9.33 |
| | 40 | 9.87 |
| | 60 | 11.47 |
| 400 | 20 | 16.77 |
| | 40 | 16.84 |
| | 60 | 16.99 |
| ฟางข้าวทอรรีไฟต์ | | |
| อุณหภูมิทอรรีไฟต์ (°C) | เวลาทอรรีไฟต์ (min) | ปริมาณเถ้า (%) |
| 200 | 20 | 12.27 |
| | 40 | 12.51 |
| | 60 | 12.96 |
| 300 | 20 | 17.63 |
| | 40 | 17.90 |
| | 60 | 18.44 |
| 400 | 20 | 26.59 |
| | 40 | 27.15 |
| | 60 | 27.15 |

ตารางผนวกที่ 4 ผลการวิเคราะห์ปริมาณคาร์บอนคงตัวของต้นข้าวโพดและฟางข้าวทอรรีไฟต์

| ต้นข้าวโพดทอรรีไฟต์ | | |
|------------------------|---------------------|------------------------|
| อุณหภูมิทอรรีไฟต์ (°C) | เวลาทอรรีไฟต์ (min) | ปริมาณคาร์บอนคงตัว (%) |
| 200 | 20 | 6.15 |
| | 40 | 8.92 |
| | 60 | 9.65 |
| 300 | 20 | 16.56 |
| | 40 | 19.68 |
| | 60 | 27.98 |
| 400 | 20 | 34.98 |
| | 40 | 37.08 |
| | 60 | 39.64 |
| ฟางข้าวทอรรีไฟต์ | | |
| อุณหภูมิทอรรีไฟต์ (°C) | เวลาทอรรีไฟต์ (min) | ปริมาณคาร์บอนคงตัว (%) |
| 200 | 20 | 6.42 |
| | 40 | 8.18 |
| | 60 | 9.07 |
| 300 | 20 | 15.65 |
| | 40 | 18.41 |
| | 60 | 18.99 |
| 400 | 20 | 29.30 |
| | 40 | 31.10 |
| | 60 | 33.74 |

ตารางผนวกที่ 5 ผลการวิเคราะห์ค่าความร้อนของต้นข้าวโพดและฟางข้าวทอรรีไฟต์

| ต้นข้าวโพดทอรรีไฟต์ | | |
|------------------------|---------------------|---------------------|
| อุณหภูมิทอรรีไฟต์ (°C) | เวลาทอรรีไฟต์ (min) | ค่าความร้อน (MJ/kg) |
| 200 | 20 | 15.31 |
| | 40 | 15.93 |
| | 60 | 16.10 |
| 300 | 20 | 16.86 |
| | 40 | 17.51 |
| | 60 | 18.96 |
| 400 | 20 | 19.37 |
| | 40 | 19.78 |
| | 60 | 20.27 |
| ฟางข้าวทอรรีไฟต์ | | |
| อุณหภูมิทอรรีไฟต์ (°C) | เวลาทอรรีไฟต์ (min) | ค่าความร้อน (MJ/kg) |
| 200 | 20 | 14.54 |
| | 40 | 14.93 |
| | 60 | 15.09 |
| 300 | 20 | 15.44 |
| | 40 | 15.98 |
| | 60 | 16.07 |
| 400 | 20 | 16.58 |
| | 40 | 17.04 |
| | 60 | 17.52 |



ภาคผนวก ค

การคำนวณหาคุณสมบัติของชีวมวล

1. การคำนวณหาค่าผลผลิตมวลและผลผลิตพลังงาน

กรณี ฟางข้าวทอร์รีไฟด์ ณ สภาวะการทดสอบกระบวนการทอร์รีแฟคชันที่อุณหภูมิ 200 °C เป็นระยะเวลา 40 min

| | | |
|----------|-----------------------------|---------------|
| กำหนดให้ | น้ำหนักตัวอย่างก่อนการทดสอบ | = 10 g |
| | น้ำหนักตัวอย่างหลังการทดสอบ | = 9.21 g |
| | ค่าความร้อนก่อนการทดสอบ | = 12.07 MJ/kg |
| | ค่าความร้อนหลังการทดสอบ | = 14.93 |

การคำนวณผลผลิตมวล

$$\begin{aligned} \text{จากสมการ} \quad MY &= \frac{\text{mass after torrefaction}}{\text{mass of raw sample}} \times 100 \\ \text{จะได้ว่า} \quad &= \frac{9.21}{10} \times 100 \end{aligned}$$

$$\text{ดังนั้น} \quad MY = 92.1\%$$

การคำนวณผลผลิตพลังงาน

$$\begin{aligned} \text{จากสมการ} \quad EY &= MY \times \frac{\text{HHV (torrefied sample)}}{\text{HHV (raw sample)}} \times 100 \\ \text{จะได้ว่า} \quad &= 0.921 \times \frac{14.93}{12.70} \times 100 \end{aligned}$$

$$\text{ดังนั้น} \quad EY = 97.47 \text{ MJ/kg}$$

2. การคำนวณหาค่าความชื้น

กรณี ฟางข้าวทอร์รีไฟด์ ณ สภาวะการทดสอบกระบวนการทอร์รีแฟคชันที่อุณหภูมิ 200 °C เป็นระยะเวลา 40 min

| | | |
|----------|-----------------------------|------------|
| กำหนดให้ | น้ำหนักตัวอย่างก่อนการทดสอบ | = 1.0029 g |
| | น้ำหนักตัวอย่างหลังการทดสอบ | = 0.9870 g |

$$\begin{aligned} \text{จากสมการ} \quad MC &= \frac{(A - B)}{A} \times 100 \\ &= \frac{(1.0029 - 0.9870)}{1.0029} \times 100 \\ &= 1.50\% \end{aligned}$$

3. การคำนวณหาค่าสารระเหย

กรณี ฟางข้าวทอร์รีไฟด์ ณ สภาวะการทดสอบกระบวนการทอร์รีแฟคชันที่อุณหภูมิ 200 °C เป็นระยะเวลา 40 min

กำหนดให้ น้ำหนักตัวอย่างก่อนการทดสอบ = 1.0029 g

น้ำหนักตัวอย่างหลังการทดสอบ = 0.2225 g

$$\begin{aligned} \text{จากสมการ} \quad VC &= \frac{(A - B)}{A} \times 100 \\ &= \frac{(1.0029 - 0.2225)}{1.0029} \times 100 \\ &= 77.81\% \end{aligned}$$

หมายเหตุ: ตัวอย่างต้องทำการอบแห้งเพื่อไล่ความชื้นเรียบร้อยแล้ว

4. การคำนวณหาค่าเถ้า

กรณี ฟางข้าวทอร์รีไฟด์ ณ สภาวะการทดสอบกระบวนการทอร์รีแฟคชันที่อุณหภูมิ 200 °C เป็นระยะเวลา 40 min

กำหนดให้ น้ำหนักตัวอย่างก่อนการทดสอบ = 1.0030 g

น้ำหนักตัวอย่างหลังการทดสอบ = 0.1255 g

$$\begin{aligned} \text{จากสมการ} \quad A_{sh} &= \frac{B}{A} \times 100 \\ &= \frac{0.1255}{1.0030} \times 100 \\ &= 12.51\% \end{aligned}$$

5. การคำนวณหาค่าคาร์บอนคงตัว

กรณี ฟางข้าวทอร์รีไฟด์ ณ สภาวะการทดสอบกระบวนการทอร์รีแฟคชันที่อุณหภูมิ 200 °C เป็นระยะเวลา 40 min

กำหนดให้ ปริมาณความชื้น = 1.5%

ปริมาณสารระเหย = 77.81%

ปริมาณเถ้า = 12.51%

จากสมการ

$$\begin{aligned}FC &= (\%A_{sh} + \%MC + \%VC) - 100 \\ &= 100 - (12.51 + 1.5 + 77.81) \\ &= 8.18\%\end{aligned}$$





ภาคผนวก จ

การเผยแพร่ผลงานวิจัย

PROCEEDING

The 23rd Tri-U

International Joint Seminar & Symposium



Asian Contribution to the Sustainable Development Goals



23-28 October 2016

Organized and hosted by
Bogor Agricultural University (IPB), Indonesia



ISBN 978-602-71190-7-9

| | | | |
|------|--|---|-------|
| | | UV Protection | |
| B-14 | Jinyan Wang/ Guangxi University | Analysis of Situation and Measures of the Food Security with Population Growth – In the Case of Indonesia and China | 57-60 |
| B-15 | Phakthila Mannowana/ Chiang Mai University | Evaluation of Risk in Logistics Outsourcing in Thai Food Industries | 61-64 |

THEME C-ENERGY

| Paper Number | Name/ University | Paper Title | Page |
|--------------|---|--|-------|
| C-01 | Xinchen Zhou/ Jiangsu University | Study of the Air Resistance Abatement and the Driving Range Improvement on Electric Vehicle by Setting an Airduct in the Front Cabin | 1-4 |
| C-02 | Jiantian Sun/ Jiangsu University | Study on Handling Stability Control for Two Wheel Motors Electric Vehicles | 5-9 |
| C-03 | Supakrit Thiangtham/ Suranaree University of Technology | Properties and Emissions Characteristics of a Compression Ignition Engine Fueled with Biodiesel and DEE Blends | 10-13 |
| C-04 | Rui Cao/ Jiangsu University | Multi-objective Optimization on Hydraulic Design of Non-Overload Centrifugal Pumps with High Efficiency and Low Noise | 14-18 |
| C-05 | Panisa Ondokmai/ Maejo University | Performance of Paddy Greenhouse Solar Dryer Operated with Hybrid Gasification Technology | 19-23 |
| C-06 | Xiacong Zhao/ Jiangsu University | Study on Enhancing Adaptability and Practicality of Thermoelectric Generator for Reusing Energy in Vehicle Exhaust | 24-27 |
| C-07 | Thanachat Mahawan/ Maejo University | Application of Gasification Technology for Design Household Smokeless Biomass Stove | 28-32 |
| C-08 | Pongsatit Sonpakdee/ Maejo University | Evaluation the Efficacy of a Must Flow Paddy Dryer by Biomass for the Small Community | 33-37 |
| C-09 | Hendi Okta Kurniawan/ Bogor Agricultural University | Design of Wholksstalk Type of Sugarcane Harvester using Hydraulic Transmission | 38-41 |
| C-10 | Jenjira Uttareun/ Maejo University | Investigation Potential Energy of Agricultural Waste from Torrefaction Process | 42-46 |
| C-11 | Xia Zhang/ | A Study on Energy Saving of High | 47-51 |

C-10

INVESTIGATION POTENTIAL ENERGY OF AGRICULTURAL WASTE FROM TORREFACTION PROCESS

Jenjira Uthairon
Nigrao Homboong
Natthawud Damadee
Charat Thararat
Rameshprabho Ramana

School of Renewable Energy,
Maejo University, Chiang Mai 50290,
Thailand.

Corresponding author E-mail:
nigraomhd@gmail.com

ABSTRACT

Biomass is a unique fuel and has the prospective to play a major role in the future energy in the ASEAN countries as well as worldwide. The objective of this study was to find out the properties, temperature effects and reaction time on torrefaction process in Thailand agricultural wastes including corn stalk and rice straw. Temperature and time in the reactor of 150-350°C and 20-40 minutes were adjusted with nitrogen. It was found that, the torrefied rice straw and corn stalk show better physical and chemical properties. The overall color of both torrefied sample that tested in high temperature was dark black that similar to coal. Moreover, mass of torrefied samples was decreased with in high temperature. Therefore, this study illustrated that the energy potential of rice straw and corn stalk could be improved through torrefaction process.

Keywords: torrefaction, corn stalk, rice straw, energy density

1. INTRODUCTION

At present, the fossil fuel is likely to declined on the other hand, the prices of energy consumption is likely to rise, the cause was occurred from changes in new technology with all activity need to use electricity [1]. Recently, Thailand was mainly imports oil which is affected the national economic status. However, Thailand was an agricultural country and more potential for the biomass sources. Therefore, the development of fuels from biomass can use more efficiently. The torrefaction process was interested, because that can be increased with high quality biomass which is suitable for use in direct combustion or gasification. The principle of torrefaction process was to remove moisture and reduce volatile content with leads to increase energy density through biomass and reducing tar. High quality biomass can be mixed or coal to produce electricity and reduce the sulfur dioxide (SO₂) released into the atmosphere. Therefore, the objective this research was to investigate the potential energy of agricultural waste from torrefaction process.

2. PRINCIPLES OF TORREFACTION

Torrefaction is a thermo-chemical process that reduces the moisture content of solid biomass and transforms into a brittle, char-type material. Generally,

the lignocellulosic biomass was consisted of approximately 80 % volatile matter and 20 % fixed carbon by dry mass basis. In the torrefaction process, the solid biomass was heated from external heat source on absence of oxygen in a range of 250-350°C of temperature reaction and leading to a loss of moisture and partial loss of the volatile matter in the biomass. The characteristic of the original biomass was considerably changed. The tenacious fibre structure of the original biomass material is largely destroyed through the breakdown of hemicellulose and to a lesser degree of cellulose molecules, so that the material becomes brittle and easy to grind [2]. These material can change from being hydrophilic to becoming hydrophobic. With the removal of the light volatile fraction that contains most of the oxygen in the biomass, the heating value of the remaining material gradually increases from 19 MJ/kg to 21 or 23 MJ/kg for torrefied wood which similar charcoal heating value of approx. 30 MJ/kg.

The torrefaction process can reduce the mass of wood by 20-30% resulting in a denser, higher-valued product that can be transported more economically than traditional wood chips. Besides, that process can be used as a coal replacement or co-fired/co-milled with coal in electricity generating power plants.

wood by 20-30% resulting in a denser, higher-valued product that can be transported more economically than traditional wood chips. Besides, that process can be used as a coal replacement or co-fired/co-milled with coal in electricity generating power plants.

3. MATERIALS AND METHOD

The experimental materials were rice straw and corn stalk from agricultural waste of Northern Thailand farmer shows in Fig.1, was used in this study. The rice straw was derived from Jusmin rice, 37 % and 63% of rice straw with gain seed respectively [3]. The average remaining rice straw in farm was of 508.7 kg/Acre in Northern Thailand and 300 kg/m³ of bulk density with less than 6.5% was used this experiment. The corn stalk was derived from field corn, 28% of corn stalk and 62% of the remaining was seed, corn cobs and other parts. The average bulk density and moisture of 300 kg/m³ and less than 6% were tested. The torrefaction process experiment was used 20g/time and the sample was crushed into a fine powder with 1 mm (16mesh) of size.

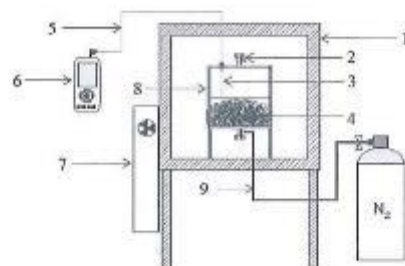


Fig.1 Corn stalk and rice straw

The torrefaction process of biomass was carried out in pyrolysis chamber, 855 cm³ of cylinder, stainless steel and installed the probe on top of chamber shows in Fig.2 and Fig.3. The top and bottom of pyrolysis chamber was installed screw nut for input and drain the nitrogen gas on torrefaction process. The heat source for input torrefaction process was used the electrical heater of 5000 W, 6,375 cm³ of rectangular shape and maximum temperature of 1500 °C was established. The temperature in chamber was controlled with electronic system and use 220V, single phase and 50 Hz of electricity. The temperature measurement was use type K of thermocouple with worked on thermometer recorder, 4 channels, SD card and maximum temperature of 500 °C.

In experiment, the test was studied the property of both biomasses on proximate and ultimate analysis with the test before and after of torrefaction process. The temperature of that process was adjusted in a range of 100-350 °C; and 20-40 minute of was varied the time. The parameter analysis was evaluated proximate

analysis, temperature profile, appearance and mass yield of torrefied samples.



- | | | |
|-------------------|----------------------|-------------------|
| (1) Reactor | (2)Ventilate | (3)Thermocouple |
| (4) Sample | (5)Thermocouple wire | (6)Data logger |
| (7)Control system | (8) Combustion room | (9) Nitrogen tube |

Fig.2 Diagram of torrefaction experiment setup



Fig.3 The electrical heater and accessory

4. RESULT AND DISCUSSION

4.1. Torrefaction process temperature

Fig.4 shows the temperature inside of reactor, pyrolysis chamber (torrefaction temperature) and ambient. For adjusting at 250 °C and 30 minute of reaction temperature in rice straw, the temperature of torrefaction was higher than reaction temperature of approximately 127 °C. The rising of temperature was caused the accumulation of heat in stainless pyrolysis chamber and partial exothermic of the biomass in the pyrolysis process [4]. The adjusting test temperature reactor at 250 °C was used time more than 20 minute for utilize the maximum temperature and after that the torrefaction process started. The temperature in pyrolysis chamber was decreased while reactor temperature rather stabilized, through to finish process at 30 minute. The reduction of temperature torrefaction process was caused the exothermic of that pass through pyrolysis chamber

out to the reactor which low than temperature. The maximum temperature of torrefaction process was occurred of 377 °C.

Fig.5 shows the temperature inside of reactor and pyrolysis chamber on corn stalk material. The highest temperature of that was occurred of 386 °C and slightly higher rice straw while time reaction was similar. The higher than temperature of corn stalk was expected due to the volatile matter was more than rice straw while the moisture was lesser.

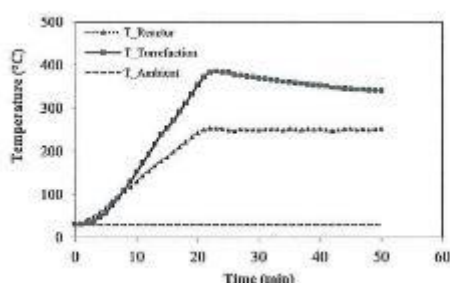


Fig. 4 Torrefaction process temperature of rice stalk

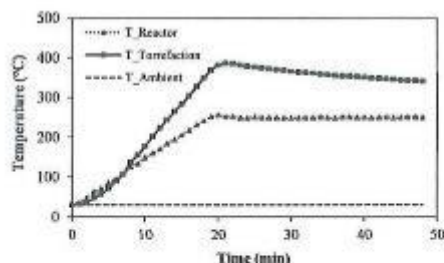


Fig. 5 Torrefaction process temperature of corn stalk

4.2. Physical appearance of torrefied samples

Fig.6 shows the physical appearance of rice straw and corn stalk with before and after torrefaction process at different temperatures and residence times. It was found that, the color of both biomass was changed with increased torrefaction process temperature. The raw rice straw and corn stalk was to brown between of 150-200 °C and that gradually become to darker black with increase temperatures in a range of 280-330 °C. Comparing, the color of both biomass was similar and same as torrefaction process of another solid biomass such as beech wood, miscanthus[ener] and macroalga *Laminaria japonica* [5]. Changing color of solid biomass was caused by the exothermic nature of the reaction above 280 °C. For torrefaction

temperature more than 280 °C, an exothermal reaction takes place results in hemicellulose decomposition of the biomass [6]. The use of highest temperature more than 300 °C and long residence time in torrefaction process was leading to increase the high heating value of solid biomass and that of up to 26 MJ/kg [7].

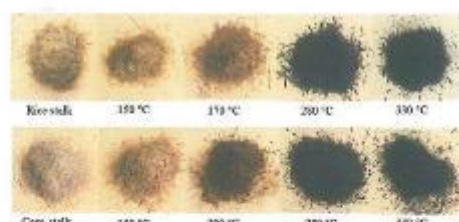


Fig.6 Photograph of rice straw and corn stalk at different torrefaction temperatures and residence times.

4.3. Effect of torrefaction temperature on approximate Analysis

Table 1 presented the comparison of proximate analysis of this work with reference research for predict the property of sametype biomass. Initially, the approximate analysis of raw both biomass was the similar with difference less than 10% of every data. The increasing of torrefaction temperature was occurred decrease moisture, volatile while the ash and fixed carbon was increased. The reduction of moisture and volatile was followed by pyrolysis theory that was increased with energy density. The addition of ash was cause the fact that as the temperature and residence time increase, the rate at which volatiles leave the product increases, which results in more concentrated ash in the solid product become an energy. The same trend has been seen for the fixed carbon content of the torrefied product.

Table 2 shows comparison of proximate analysis of corn stalk with reference. The increasing of torrefaction temperature in corn stalk was similar with rice straw at all conditions. The moisture and volatile was reduced when increase temperature while, the fixed carbon and ash was increased. Comparing with both biomass, the upgrading rice straw in torrefaction process was high than efficiency due to the removal of moisture and volatile can be easier while the fixed carbon was trend high than the corn stalk.

Table 1. Proximate analysis of rice straw

| Proximate analysis | This work | | Ref. [8] | |
|--------------------|-----------|-------|----------|--------------------|
| | Before | After | Before | after torrefaction |
| | | | | |

| | | | 200°C | 230°C | 290°C |
|----|-------|-------|-------|-------|-------|
| M | 6.43 | 5.46 | 3.13 | 2.01 | 2.52 |
| V | 72.61 | 74.4 | 71.51 | 59.78 | 45.95 |
| A | 10.41 | 9.82 | 13.32 | 21.12 | 26.52 |
| FC | 10.64 | 10.43 | 12.42 | 17.39 | 25.43 |

Table 2. Proximate analysis of corn stalk

| Proximate analysis | This work | | Ref. [4] | | |
|--------------------|-----------|-------|--------------------|-------|-------|
| | Before | After | after torrefaction | | |
| | | | 200°C | 230°C | 290°C |
| M | 5.69 | 5.02 | 3.09 | 3.05 | 3.00 |
| V | 81.72 | 70.18 | 69.32 | 64.77 | 35.30 |
| A | 5.31 | 8.25 | 9.18 | 10.70 | 20.52 |
| FC | 10.31 | 16.56 | 18.41 | 21.47 | 41.19 |

4.4. Mass yield

Fig.7 shows the mass yield of rice straw and corn stalk after torrefaction process. The mass yield of both samples was decreased with increasing time. The mass of rice straw and corn stalk was reduced more than 50% with 300°C of torrefaction temperature. Generally, the mass yield was reduced by 50% -60% when to follow to theory. The reduction of biomass mass yield was evaporation of water and volatile with the heat source. The main parameter for evaporation was consisted temperature, time residence and biomass type [7]

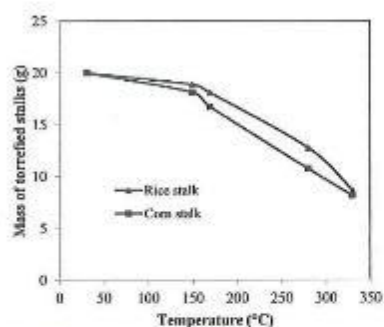


Fig7 Mass yield of rice straw and corn stalk after torrefaction process

5. CONCLUSION

The torrefaction process temperature of corn stalk was higher than rice straw, both maximum temperature in a range of 377°C -386°C; and temperature decreased after the maximum of temperature torrefaction process. The increasing of temperature in torrefaction process was decreased with

mass yield and both biomasses were darker. The moisture and volatile was reduced while the fixed carbon and ash were increased. Consequently, the efficiency torrefaction process of rice straw was higher than that corn stalk.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors would like to thank the National Research Council of Thailand (NRCT) and Graduate Scholarship program production and development of renewable energy in ASEAN graduate of Maejo University for financial support to research under project in "Development of smokeless producer gas stove for heat production in community enterprises" and Energy Research Center, Maejo University for providing experimental facilities.

REFERENCES

- [1] World Energy Council, (2013), World Energy Resources, World Energy Council Registered in England and Wales.
- [2] Jaap Koppejan, Shahab Sokhansanj, Staffan Melin, Sebnem Madrali, (2012), Status overview of torrefaction technologies, http://www.ieaboc.nl/publications/IEA_Bioenergy_T32_Torrefaction_review.pdf.
- [3] Nigran Homdoun, Kittikorn Sasujit, Natthawud Dussadee, Tanet Chaichana, (2009), Potential Agriculture Biomass and Unused Available Biomass in Northern Thailand, 5th Conference on Energy Technology Network of Thailand; ENETT, Naresuan University, Phitsanulok.
- [4] Yingquan Chen, Haiping Yang, Qing Yang b, Hongmeng Hao, Bo Zhu, and Hanping Chen, Torrefaction of agriculture straws and its application on biomass pyrolysis poly-generation, *Bioresource Technology*, vol. 156, pp 70-77, 2014.
- [5] Yoshimitsu Uemura, Ryunosuke Matsumoto, Shazleen Saadon, and Yukihiko Matsumura, A study on torrefaction of *Laminaria japonica*, *Fuel Processing Technology*, vol. 138, pp. 133-138, 2015.
- [6] Jeeban Poudel, Tae-In Ohmb, and Sea Cheon Oh, A study on torrefaction of food waste, *Fuel*, vol. 140, pp. 275-281, 2015.
- [7] Eyerusalem M. Gucho, Khurram Shahzad, Eddy A. Brammer, Niaz A. Akhtar, Gerrit Brem, (2015) Experimental Study on Dry Torrefaction of Beech Wood and *Miscanthus*, *Energies*, vol. 8, 3903-3923.
- [8] Y.F. Huang, W.R. Chen, P.T. Chiueh, W.H. Kuan, and S.L. Lo, Microwave torrefaction of rice straw and pennisetum, *Bioresource technology*, vol. 123,

pp. 1-7, 2012



Ms. Jenjira Utareun

Ms. Jenjira Utareun
Date of birth : 21/12/1992
- Candidate in Master of Engineering
(Renewable Energy Engineering)
- Agricultural Engineering
- Biomass technology



Dr.
Nigran Homdoug

Dr. Nigran Homdoug
Date of birth : 09/04/1974
Doctor of Engineering (Mechanical Engineering)
Professional:
1. Gasification and Pyrolysis Process
2. Biomass Conversion Technology (Briquette fuel, Biofuel, Biomass Stove)
3. Internal Combustion Engine (Producer gas and Biogas Engine)
4. Biomass Power Plant Engineering
5. Combustion Engineering



Dr. Natthawud
Dussadee

Dr. Natthawud Dussadee
Assistant Professor & Director,
School of Renewable Energy, Maejo
University.
Professional:
1. Agricultural Processes (Drying of Foods and Cereal Grains),
2. Energy Conservation (Energy Conservation in building and Industry),
3. Solar energy and Thermal Process (Solar Heating, Heat exchanger),
4. Renewable Energy (Wind, Hydro, Biomass, Biofuel).



Dr.

Dr. Churat Thararux,
Assistant Professor,
School of Renewable Energy, Maejo
University
Professional:
1. Gasification and Pyrolysis Process
2. Biomass Conversion Technology (Briquette fuel, Biofuel, Biomass

Churat Thararux Stove)

3. Internal Combustion Engine (Producer gas and Biogas Engine, Diesel and spark ignition engine)
4. Biomass Power Plant Engineering
5. Combustion Engineering
6. Bio hydraulic oil



Dr.
Rameshprabu Ramaraj

Dr. Rameshprabu Ramaraj, M.Eng., M.Sc., M.Phil., Ph.D., Lecturer, School of Renewable Energy, Maejo University.
Professional in scientific and engineering field:
biology (animal, plant & microbes), aquatic insects, medical entomology, ecology and environmental science, biochemical and water quality analysis, sustainable resource engineering, environment and ecological engineering, bio-statistical analysis and related software applications, biofuels and solid fuels.



E-NETT 13TH

การประชุมวิชาการ
เครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 13
13TH CONFERENCE ON ENERGY NETWORK OF THAILAND
 “ Sustainable Energy Development for Community and Innovation ”

31 พ.ค. - 2 มิ.ย. 2560 ณ โรงแรม ดิเอ็มเพรส เชียงใหม่

MAEJO
GO ECO
UNIVERSITY

ITALTHAI
ENGINEERING

STC
ศักดิ์ทองพูน
คอนกรีตเสริม

cristalla
TCC sugar industry

SCB
ไทยพาณิชย์

จัดการประชุมโดย : วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ร่วมกับ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

www.e-nett.org Enett13.mju@gmail.com 053 875590 fax : 053 875599

| | | | |
|---|--------|--|---|
| 14.45 น. | CE-262 | การเปรียบเทียบสมรรถนะไดโอดแคสปีและฟลายอิงคาปาซิเตอร์ในอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับ ด้วยเทคนิคที่ปรับลิแวนแบบเลื่อนระดับหลายแคเรียร์ | อดิษฐ์พร เกตุสกุล สุรสิทธิ์ ประกอบกิจ และ ธาดา คำแดง |
| Session 5 | | | |
| ประธานการนำเสนอบทความ อ.มณฑล ชูโชภาส | | | |
| 15.15 น. | CE-265 | ข้อดีให้ฟ้าครบถ้วนเทคนิคควบคุมมอเตอร์ | โกวิท อุบลชาติ นาวี จุฑามาศ ศุภณัฐ สบาย นิยพร จำริญ พานิช ทรนกลี ศรีศุภสุข เฉลิมชาติ มาบพ และ วิจิตร กิยเขต |
| 15.30 น. | CE-320 | การลดค่าพลังงานไฟฟ้าของโคมไฟฟลูออโรและซีดีทีด้วยวิธีการปรับความกว้างสัญญาณ | ดำรงศักดิ์ อรัญกุล และ พันทวี ไชยพิทยา |
| 15.45 น. | CE-338 | ระบบติดตามดวงอาทิตย์แบบไร้สายสำหรับโซลาร์เซลล์ด้วยพีซีแอลอีดี | สมพร เด็ยเจริญ ปริญญาพันธ์ มูลคำกาเจริญ และ กฤษณา ปราบพาล |
| 16.00 น. | SU-67 | วงจรขับเคลื่อนเวอร์เตอร์ควบคุมแบบจัดสัญญาณรบกวนเองอินทิเกรตสำหรับการใช้งานกับเซลล์แสงอาทิตย์ | ศิริวิทย์ ดิถีสวัสดิ์เวทย์ วรรษชาติ สุวรรณงาม และสมยศ เกียรติวินิชัยโอ |
| 16.15 น. | SU-90 | การประเมินพลังงานความร้อนและไฟฟ้าสำหรับการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ บนผนังของอาคารจำลอง | Boungkerd saenbucuttalath และ ศักดินทร์ อินทนิเวศน์ |
| 16.30 น. | SU-91 | วงจรมูลแบบสองไดโอดที่ปรับปรุงสำหรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง | บุญเกียรติ ภูมิภาค และพรชัยชนก พวิชัย |
| 16.45 น. | SU-130 | อิทธิพลของการจัดวางตำแหน่งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ต่อประสิทธิภาพของระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อระบบจำหน่ายขนาดกำลัง 3 kW : กรณีศึกษาในพื้นที่อำเภอป่าพะยอม จังหวัดพัทลุง | ฉัตร มลนาค จอมภพ แววศักดิ์ สมพล ชิวมงคลกานต์ และ ปราณีย์ พุกทองแก้ว |
| 17.00 น. | SU-142 | การวิเคราะห์ ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ติดตั้งบนหลังคาพิศิตขนาด 10kW ด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink | ศักดิ์สินรินทร์ ศรีบุญเรือง และ บุญยั้ง ปุณ็กลาง |

วันที่ 1 มิถุนายน 2560
ห้อง Nophakao 1
Session 3
ประธานการนำเสนอบทความ ดร.พิสิษฐ์ มณีโชติ

| | | | |
|----------|--------|--|--|
| 10.45 น. | BM-259 | การศึกษาความเป็นไปได้ในการนำทิศทางที่เกิดจากการย่อยสลายของอินทรีย์วัตถุในหนองน้ำมาเป็นเชื้อเพลิง | ชาดูชัย ไชยโกธร พญูญ์ ศลงอณี และณรงค์ฤทธิ์ อูปลพงษ์ |
| 11.00 น. | BM-284 | การวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของชีวมวลอัดเม็ดจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร | เจนจิรา สุดเวื่อน นิกราน หอมดวง ณัฐวิภาศ ก้อยอานกิจ ชูรัตน์ ธารารักษ์และณัฐภาณี ศุภญ์ |
| 11.15 น. | BM-290 | การศึกษารูปแบบหัวข้อการสกัดน้ำมันเมล็ดงาแบบร้อน | ณัฐพล วิชาญ สุเทพ บุญบานารุง |

การวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของชีวมวลอัดเม็ดจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร An investigation on the physical quality of biomass pellets from Agricultural waste

เจนจิรา อุยเรือน¹, นิกราน หอมดวง^{1*}, ณัฏฐ์กิตต์ ก้อยสำนึก¹, ชูรัตน์ ธาวารักษ์¹, ณัฏฐาณิ สุขภู¹

¹วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ จังหวัดเชียงใหม่ 63 ตำบลหนองหาร ตำบลสันทราย จังหวัดเชียงใหม่ 50290

*นิกราน หอมดวง: Email:nigranghd@gmail.com เบอร์โทรศัพท์ 0-533 3194, เบอร์โทรสาร 0-533-3194

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาคุณสมบัติของเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดจากฟางข้าว แกลบ ต้นข้าวโพด และซังข้าวโพด ที่เกิดจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร ภายใต้การอัดเม็ดที่อุณหภูมิและความชื้นที่เหมาะสมต่อกระบวนการอัดเม็ด โดยเริ่มจากการ นำเอาชีวมวลมาบดย่อย ร่อนคัดขนาด ซึ่งขนาดชีวมวลที่ใช้อยู่ในช่วง 1-3 มม. โดยวิเคราะห์คุณสมบัติความหนาแน่น ความต้านทานแรงกด ดัชนีการแตกร่วน ความต้านทานน้ำ และค่าความร้อน โดยพบว่าอุณหภูมิและความชื้นที่เหมาะสมส่งผลต่อการขึ้นรูปเป็นเม็ดของชีวมวลทั้ง 4 ชนิด โดยอุณหภูมิและความชื้นที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 70-80°C และ 10-15% ตามลำดับ ความหนาแน่นรวมของชีวมวลอัดเม็ดเพิ่มขึ้นเมื่ออยู่ในช่วง 1,152-1,291 kg/m³ ส่วนความต้านทานแรงกด ดัชนีการแตกร่วน ความต้านทานน้ำ และค่าความร้อน มีค่าอยู่ในช่วง 141.54-182.14 kg/cm², 68-98%, 78-88% และ 17.6-21.2 MJ/kg ตามลำดับ ซึ่งมีค่าเป็นไปตามมาตรฐานชีวมวลอัดเม็ดและสามารถนำไปส่งเสริมการใช้ชีวมวลอัดเม็ดในระดับชุมชนได้

คำหลัก: ชีวมวลอัดเม็ด ความหนาแน่น ความต้านทานแรงกด ดัชนีการแตกร่วน ความต้านทานน้ำ และค่าความร้อน

Abstract

The purpose of this study was to analyze physical properties of rice straw, rice husk, corn stalk and corncob pellets which are wastes from agricultural activities. These samples were formed as pellets by controlling temperature and moisture. The analysis properties consist of bulk density, compressive strength, shatter index, water resistance and calorific value. The result show that the optimum temperature and moisture for all 4 types pellet of biomass were 70-80 °C and 10-15% respectively. This increased the bulk density of biomass pellets which are in range of 1,152 to 1,291 kg/m³. Consequently, compressive strength, shatter index, water resistance and calorific value of biomass were 141.54-182.14 kg/cm², 68-98%, 78-88% and 17.6-21.2 MJ/kg respectively which followed the standard of pellets biomass. Moreover, pellets biomass could be promoted to use in community

Keywords: pellets biomass, bulk density, compressive strength, shatter index, water resistance, calorific value

1. บทนำ

ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรม ผลพลอยได้ที่สำคัญ นอกเหนือจากผลผลิตการเกษตรแล้วก็คือ เศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร ไม่ว่าจะเป็นฟางข้าว แกลบ ขาน้อย เศษไม้ ก้านข้าวโพด และซังข้าวโพด เป็นต้น ซึ่งเศษวัสดุชีวมวลเหล่านี้ มีปริมาณค่อนข้างมาก เกษตรกรและชุมชนบางส่วนมีการจัดการกับเศษวัสดุเหลือทิ้งอย่างผิดวิธี โดยการนำเผา จึงทำให้เกิดปัญหามลภาวะฝุ่นละออง และหมอกควัน ผลที่ตามมาคือการทำลายสิ่งแวดล้อม ทัศนียภาพเสื่อมสภาพ และสูญเสียแร่ธาตุในดิน หากพิจารณาในด้านพลังงาน วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรเหล่านี้เหมาะสำหรับนำมาผ่านกระบวนการแปรรูปให้เป็นพลังงานรูปแบบต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นกระบวนการแก๊สซิฟิ

เคชัน กระบวนการไพโรไลซิส และกระบวนการเทอร์โมไพสซิ่ง เป็นต้น แต่ชีวมวลเหลือทิ้งเหล่านี้ยังมีข้อเสียเกี่ยวกับคุณสมบัติ สำหรับการนำมาแปลงเป็นพลังงานทดแทน กล่าวคือชีวมวล มักมีความชื้นสูง มีความหนาแน่นต่ำ ส่งผลต่อประสิทธิภาพเผาไหม้ การลำเลียงขนส่งและพื้นที่การจัดเก็บ ซึ่งสิ่งเหล่านี้จะกลายเป็นต้นทุนที่สูงขึ้นหากไม่ได้รับการแก้ไขหรือปรับปรุงคุณสมบัติของชีวมวลดังกล่าว ดังนั้นวิธีการที่น่าสนใจสำหรับแก้ไขปัญหาก็คือ การนำเชื้อเพลิงมาอัดเป็นเม็ดที่อุณหภูมิและความชื้นที่เหมาะสมเพื่อเพิ่มความหนาแน่นหรือที่เรียกว่าชีวมวลอัดเม็ดนั่นเอง นอกจากนี้ยังเป็นอีกทางเลือกหนึ่ง สำหรับการสนับสนุนให้เกษตรกรหรือชุมชนมีการใช้ชีวมวลเหลือทิ้งจากการเกษตรให้เกิดประโยชน์ สะვენการเผา ไม่

ทำหลายสิ่งแล้วก็ตาม ปัจจุบันมีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเพิ่มคุณภาพทางด้านความหนาแน่นของชีวมวลด้วยการอัดเม็ดชีวมวลอย่างแพร่หลายพบว่า Kaliyan et.al. [1] ได้ศึกษาเกี่ยวกับการเพิ่มความหนาแน่นของซังข้าวโพดโดยการอัดเม็ดด้วยเครื่องอัดแบบลูกสูบ ความดันสูงสุดคือ 150 MPa ซังข้าวโพด 2.81 mm. ความชื้น 20% อุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการอัดเม็ดคือ 85 °C มีความหนาแน่น >1100 kg/m³ และดัชนีความคงทน 90% Wongsiridamnuay et.al. [2] ศึกษาการเพิ่มความหนาแน่นของต้น ชัง และเปลือกข้าวโพด ด้วยการอัดเม็ด โดยทดสอบด้วยเครื่องอัดเม็ดแบบลูกสูบ ที่ความดัน 150, 200, 250 MPa พบว่าความดันและอุณหภูมิที่เหมาะสมคือ 150 MPa และ 80 °C ตามลำดับ ความหนาแน่นของเชื้อเพลิงอัดเม็ด 900 – 1000 kg/m³ และดัชนีความคงทนต่ำกว่า 60% กิตติผลดา และคณะ [3] ได้ศึกษาศึกษาศักยภาพและความเป็นไปได้ทางตะกอนน้ำเสียจากโรงงานผลิตเยื่อกระดาษ ที่เปลือกยูคาลิปตัสและเศษฟ่อนไม้ มาผลิตเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลพบว่าอัตราส่วนเม็ดเชื้อเพลิงที่มีส่วนผสมของกากตะกอน เปลือกยูคาลิปตัสและเศษฟ่อนไม้ ที่อัตราส่วน 1:2:1 ถือว่าดีที่สุดเมื่อเทียบกับส่วนผสมอื่นๆ มีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น 37.62–86.34 % สามารถรับแรงอัดได้ 2.7 kg แนวตั้ง และ 8.5 kg แนวนอน ส่วนปริมาณความชื้นจะมีค่าความชื้นอยู่ในช่วง 1.75–7.04 % ที่อุณหภูมิห้อง อนินท์ และคณะ [4] ศึกษาขนาดผงขี้ที่มีผลต่อการอัดขึ้นรูปเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลของฟางข้าว เปลือกถั่วเหลือง และชื้อเลื่อย โดยทำการทดสอบความหนาแน่นเม็ดพบว่า ขนาดอนุภาค 80 Mesh สามารถอัดขึ้นรูปอัดเม็ดได้ทุกชนิด และจากการทดสอบความหนาแน่นเม็ดและความหนาแน่นรวมของฟางข้าว เปลือกถั่วเหลือง และชื้อเลื่อย มีค่าอยู่ในช่วง 1,252–1,221 kg/m³, 1,200–1,301 kg/m³ และ 1,098–1,233 kg/m³ ตามลำดับ ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐาน DIN 51731 (>1,000 kg/m³) จากการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการเพิ่มความหนาแน่นของชีวมวลโดยการอัดเม็ด พบว่ามีตัวแปรที่สำคัญสำหรับการขึ้นรูปเป็นเม็ดของชีวมวลคือ อุณหภูมิและความชื้นในระหว่างการอัดเม็ด ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 70-90 °C และ 10-20% ตามลำดับ ขึ้นอยู่กับชนิดของชีวมวล ขนาดของชีวมวลจะมีผลต่อการเป็นเม็ดเชื้อเพลิง ซึ่งควรต่ำกว่า 3 mm. เมื่ออัดเม็ดชีวมวลส่งผลให้ความหนาแน่นชีวมวลเพิ่มขึ้น และเป็นไปตามมาตรฐานความหนาแน่นชีวมวลอัดเม็ด

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 การเพิ่มความหนาแน่นชีวมวล

ความหนาแน่นเป็นคุณสมบัติเฉพาะของวัสดุแต่ละชนิดขึ้นอยู่กับสภาพของโครงสร้าง มวลทิน และรูพรุนในเนื้อของวัสดุ ความหนาแน่นของชีวมวลอัดเม็ดเกิดจากกระบวนการผลิตและ

กระบวนการให้ความร้อนทำให้มีความชื้นต่ำลง การเพิ่มความหนาแน่นที่เหมาะสมส่งผลให้ประสิทธิภาพในการเผาไหม้เพิ่มขึ้น อีกทั้งยังลดปัญหาด้านการขนส่ง ให้มีความสะดวก และลดปัญหาเกี่ยวกับพื้นที่จัดเก็บชีวมวล โดยทั่วไปความหนาแน่นของวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรจะมีค่าอยู่ในช่วง 50-300 kg/m³ [20]

2.2 เครื่องอัดเม็ดและมาตรฐานการชีวมวลอัดเม็ด

เครื่องอัดเม็ด (Pelletizing press) ประกอบด้วยแม่พิมพ์และลูกกลิ้ง ซึ่งแรงอัดระหว่างแม่พิมพ์กับลูกกลิ้งทำให้เกิดความร้อนจากแรงเสียดสี และทำการอัดวัตถุดิบผ่านแม่พิมพ์ที่มี 2 แบบคือ เครื่องอัดเม็ดแบบแม่พิมพ์แผ่นกลม (Disk matrix press) ดังรูปที่ 1 และเครื่องอัดเม็ดแม่พิมพ์วงแหวน (Ring matrix press) แผงเม็ดชีวมวลที่ถูกอัดออกมาจะถูกตัดด้วยใบมีดตามขนาดความยาวที่กำหนด ในปี.ศ.2555 ประเทศไทยได้กำหนดมาตรฐานของเชื้อเพลิงอัดเม็ด [5] โดยขนาดเม็ดเชื้อเพลิงมีความยาวไม่น้อยกว่า 30 mm. และมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 5-15 mm. และมีความหนาแน่นเฉลี่ยไม่น้อยกว่า 600 kg/m³ ดังแสดงในตารางที่ 1



รูปที่ 1 ส่วนประกอบของเครื่องอัดเม็ดเชื้อเพลิงแบบแม่พิมพ์แผ่นกลม

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดที่ต้องการสำหรับประเทศไทย [5]

| คุณสมบัติ | มาตรฐานคอกา | มาตรฐานคุณภาพสูง |
|-------------------|------------------------|------------------------|
| ความหนาแน่น | >600 kg/m ³ | >600 kg/m ³ |
| เส้นผ่านศูนย์กลาง | >6 , < 12 mm | >6 , < 12 mm |
| ดัชนีความคงทน | >90 %wt. | > 90 %wt. |
| ฝุ่น | < 3 %wt. | < 3 %wt. |
| ความยาว | >3.15 , <40 mm | >3.15 , <40 mm |
| ความชื้น | < 10 %wt. | < 10 %wt. |
| ค่าความร้อน | >14.6 MJ/kg | >16.7 MJ/kg |
| ขี้เถ้า | < 20 %wt. | < 10 %wt. |

2.3 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของ

ชีวมวลอัดเม็ด

ความหนาแน่น (Density) ของเชื้อเพลิงอัดเม็ด หมายถึง อัตราส่วนระหว่างมวลของเม็ดเชื้อเพลิงต่อปริมาตรของเม็ดเชื้อเพลิง มีหน่วยเป็นกิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรหาได้จากสมการที่ 1 [21]

$$\rho = \frac{m}{\pi r^2 h} \quad (1)$$

เมื่อ ρ คือความหนาแน่นของเชื้อเพลิงอัดเม็ด, kg/m³

m คือมวลของเชื้อเพลิงอัดเม็ด, kg

r คือรัศมีของเม็ดเชื้อเพลิง, m

h คือความยาวของเม็ดเชื้อเพลิง,

ความต้านทานแรงกดอัด (Compressive strength) ของเชื้อเพลิงอัดเม็ด เป็นการทดสอบความแข็งของเม็ดเชื้อเพลิง โดยใช้แรงกดในทิศทางตรงและกกดตรงที่ว่างกลมของเม็ดเชื้อเพลิงทั้ง 2 ด้าน และเพิ่มแรงขึ้นอย่างช้าๆ จนกระทั่งเม็ดเชื้อเพลิงแตกหักหรือขาดออกจากกัน ค่ารวมได้จากสมการที่ 2

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (2)$$

เมื่อ σ คือความต้านทานแรงกดอัด, kg/cm²

F คือขนาดแรงกดอัด, kg

A คือพื้นที่หน้าตัดที่รับแรงกดอัด, cm²

ดัชนีการแตกร่วน (Shatter index test) ใช้กำหนดความแข็งของเชื้อเพลิงอัดเม็ด ค่ารวมได้จากสมการที่ 3 [6]

$$\text{Weight loss (\%)} = \frac{W_1 - W_2}{W_1} \times 100 \quad (3)$$

เมื่อ W_1 คือน้ำหนักของตัวอย่างก่อนการทดสอบ

W_2 คือน้ำหนักของตัวอย่างหลังการทดสอบ

ความต้านทานน้ำ (Water resistance) ของเชื้อเพลิงอัดเม็ดเป็นการทดสอบเพื่อวัดความต้านทานน้ำเมื่อเชื้อเพลิงอัดเม็ดสัมผัสกับน้ำในอากาศหรือฝน ในระหว่างการจัดเก็บหรือการขนส่ง สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 4 และ 5 [7]

$$\text{Water gained by briquette (\%)} = \frac{W_2 - W_1}{W_1} \times 100 \quad (4)$$

$$\text{Water resistance (\%)} = 100 - \text{Water gained} \quad (5)$$

เมื่อ W_1 คือน้ำหนักของแท่งเชื้อเพลิงอัดเม็ดก่อนแช่น้ำ

W_2 คือน้ำหนักของแท่งเชื้อเพลิงอัดเม็ดหลังแช่น้ำ

ค่าความร้อน (Calorific value) ของชีวมวลถูกกำหนดตามมาตรฐาน ASTM-D5865 วิเคราะห์โดยใช้เครื่องวิเคราะห์ค่าความร้อน สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 6 [8]

$$\text{Calorific value} = \frac{W \times (T_1 - T_2)}{X} \quad (6)$$

เมื่อ W คือปริมาณเทียบเท่าพลังงานจากเครื่องวิเคราะห์ค่าความร้อน

$T_1 - T_2$ คืออุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของการทดสอบ

X คือน้ำหนักของตัวอย่าง

3. วิธีการศึกษา

3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

เครื่องอัดเม็ดชีวมวล ใช้มอเตอร์ไฟฟ้าขนาด 5 hp ขนาดรูของแม่พิมพ์มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 mm. ยาว 20 mm. ส่วนชุดอัดลูกกลิ้งเป็นแบบคู่ ทำมาจากเหล็กผสมสังกะสีที่มีคุณภาพสูงและทนต่อการสึกหรอ กำบังการผลิตของเครื่องอัดเม็ดชีวมวลอยู่ในช่วง 100-200 kg/h ส่วนเครื่องบดชีวมวลมีทั้งหมด 2 แบบ คือเครื่องบดหยาบและบดละเอียด เครื่องบดหยาบมีขนาดมอเตอร์ไฟฟ้า 1.5 hp และ มีขนาดตะแกรง 10 mm. และเครื่องบดละเอียด มีขนาดมอเตอร์ไฟฟ้า 3 hp และขนาดตะแกรง 3 mm.

เครื่องมือวัดในงานวิจัยประกอบด้วย เครื่องวัดอุณหภูมิแบบอินฟราเรด เป็นผลิตภัณฑ์ของ CEM รุ่น DT-8828 สามารถวัดอุณหภูมิในช่วง -50-1,000 °C ความละเอียด 0.1 °C เครื่องวัดความชื้นรطوبة รุ่น MD-7822 สามารถวัดความชื้นได้ตั้งแต่ 8-30% และเครื่องชั่งน้ำหนักระบบอิเล็กทรอนิกส์ เป็นผลิตภัณฑ์ของ CST รุ่น CDR-30 มีความจุ 30 kg × 1 g อุณหภูมิใช้งานที่ 5-40 °C

3.2 ตัวอย่างชีวมวล

ชีวมวลที่นำมาทดสอบการอัดเม็ดเป็นวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรมีทั้งหมด 4 ชนิด ได้แก่ ฟางข้าว แกลบ ต้นข้าวโพด และซังข้าวโพด ดังรูปที่ 2 ซึ่งความหนาแน่นก่อนการอัดเม็ดคือ 75, 102, 127 และ 132 kg/m³ ตามลำดับ มีความชื้นอยู่ในช่วง 8-13% และรายละเอียดองค์ประกอบทางเคมีอื่นๆ แสดงในตารางที่ 2



รูปที่ 2 วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร (a) แกลบ (b) ฟางข้าว (c) ต้นข้าวโพด (d) ชังข้าวโพด

ตารางที่ 2 วิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีตัวอย่างชีวมวลก่อนการอัดเม็ด

| Biomass | Cassava | Corn stalk | Rice straw | Rice husk |
|-----------------------------------|---------|------------|------------|-----------|
| Proximate analysis (Nwt.) | | | | |
| Moisture | 11.82 | 13.17 | < 10% | 8.58 |
| Ash | 5.62 | 11.52 | 18.67 | 18.25 |
| Volatiles | 69.70 | 59.83 | 65.47 | 58.91 |
| Fix carbon | 12.81 | 17.00 | 15.86 | 14.25 |
| Ultimate analysis (Nwt.) | | | | |
| C | 42.12 | 46.23 | 36.20 | 36.29 |
| H | 6.52 | 8.18 | 5.20 | 5.79 |
| N | 0.45 | 0.81 | 0.8 | 0.57 |
| O | 45.11 | 31.08 | 47.5 | 39.21 |
| S | 0.01 | 0.10 | 0.07 | 0.09 |
| LHV (MJ/kg) | 14.29 | 16.29 | 15.09 | 13.29 |
| Bulk density (kg/m ³) | 132.6 | 127.32 | 75 | 102.11 |

3.3 วิธีการผลิตชีวมวลอัดเม็ด

3.2.1 การเตรียมตัวอย่าง

เริ่มจากการนำตัวอย่างชีวมวลทั้ง 4 ชนิด ได้แก่ ฟางข้าว แกลบ ต้นข้าวโพด และชังข้าวโพด มาลดความชื้นด้วยการตากให้แห้งด้วยแสงอาทิตย์ แล้วนำมาลดขนาดโดยการบดหยาบขนาดตะแกรง 10 mm. จากนั้นนำมาบดด้วยเครื่องบดละเอียดขนาดตะแกรง 3 mm. บดตัวอย่างละ 5 kg และเก็บไว้ในที่แห้ง

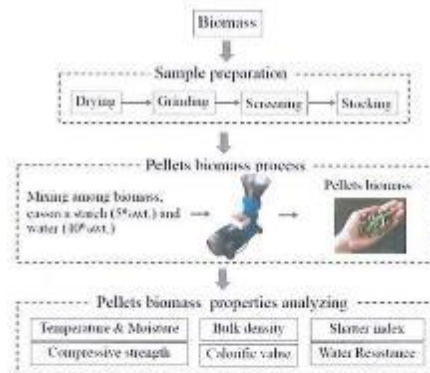
3.2.2 การอัดเม็ดชีวมวล

เครื่องอัดเม็ดชีวมวลต้องมีการอุ่นเครื่องทุกครั้งก่อนการใช้งาน โดยใช้วัสดุตั้งต้นที่ได้จากส่วนผสมของซีลื้อ 5 kg หรือละเอียด 1 kg และน้ำมันเครื่อง 1 kg ซึ่งเป็นการเพิ่มอุณหภูมิเครื่องอัดเม็ด เพื่อให้ได้อุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการเป็นเม็ดของชีวมวล ใช้เวลาในการอุ่นเครื่องประมาณ 5-10 min (40-50°C) พร้อมกับการเตรียมสัปดาห์ของชีวมวล (ขนาด 3 mm.) แต่ละประเภทสำหรับการอัดเม็ด โดยผสมกับแป้งมันสำปะหลังและน้ำในปริมาณ 5% และ 40% ตามลำดับ ผสม

คลุกเคล้าให้เข้ากัน จากนั้นนำชีวมวลที่มีส่วนผสมของแป้งมันสำปะหลังและน้ำ ป้อนเข้าเครื่องอัดเม็ดต่อจากขั้นตอนการอุ่นเครื่องทันที เพื่อไม่ให้เกิดการสูญเสียความร้อนของเครื่อง จากนั้นอัดชีวมวลเข้าจนเม็ดชีวมวลแข็งตัว ซึ่งอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการเป็นเม็ดของชีวมวลอยู่ในช่วง 70-90°C เมื่อได้เม็ดชีวมวลตามที่ต้องการแล้ว ให้นำวัสดุตั้งต้นป้อนเข้าเครื่องอัดเม็ดอีกครั้ง เพื่อเป็นการรักษาสภาพความพร้อมของเครื่องอัดเม็ดสำหรับการใช้งานครั้งต่อไป

3.2.3 การวิเคราะห์คุณสมบัติชีวมวลอัดเม็ด

การวิเคราะห์คุณสมบัติความหนาแน่นของเชื้อเพลิงอัดเม็ด ทำได้โดยการคำนวณจากอัตราส่วนต่อปริมาณของเม็ดเชื้อเพลิง การวิเคราะห์ความต้านทานแรงกด ใช้วิธีการวิเคราะห์ตามมาตรฐาน ASTM D 162 การวิเคราะห์ดัชนีการแตกกร่อน วิเคราะห์โดยวิธี Drop shatter test ตามมาตรฐาน ASTM D 3038 ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงอัดเม็ดวิเคราะห์โดยใช้เครื่องวิเคราะห์ค่าความร้อน ส่วนความต้านทานน้ำ [9] วิเคราะห์โดยใช้เม็ดชีวมวลขนาด 25 mm. แช่น้ำที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 30 วินาที หลังจากการแช่น้ำหนักตัวอย่างก่อนและหลังทดสอบ เพื่อคำนวณร้อยละการต้านทานน้ำของเม็ดตัวอย่างชีวมวล [7]



รูปที่ 3 กระบวนการผลิตและทดสอบคุณสมบัติชีวมวลอัดเม็ด

4. ผลการศึกษา

4.1 ผลของอุณหภูมิและความชื้น

ผลการทดสอบการอัดเม็ดขึ้นรูปของเชื้อเพลิงอัดเม็ด พบว่าอุณหภูมิและความชื้นมีผลต่อการขึ้นรูปเป็นเม็ดของเชื้อเพลิง การเพิ่มอุณหภูมิส่งผลให้เชื้อเพลิงอัดเม็ดขึ้นรูปได้ดีขึ้น ซึ่งการอัดเม็ดในสภาวะอุณหภูมิและความชื้นต่ำ ส่งผลให้แรงยึดเกาะระหว่างเนื้อชีวมวลมีค่าต่ำ มีมีลักษณะแตกกร่อน ดังรูปในตารางที่ 3 อุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการอัดเม็ดของเชื้อเพลิงฟางข้าว แกลบ ต้นข้าวโพด และชังข้าวโพด อยู่ในช่วง 70-80 °C

ความชื้นที่เหมาะสมจะอยู่ในช่วง 10-15% [10] การเพิ่มอุณหภูมิและความชื้นที่เหมาะสมในขณะการอัดจะส่งผลให้การขึ้นรูปเม็ดเชื้อเพลิงมีคุณภาพ เนื่องจากแป้งเมื่อรวมกับน้ำและความร้อน จะไปทำลายพันธะไฮโดรเจนระหว่างอะมิโลสและอะมิโลเพกทิน ที่เป็นโครงสร้างภายในโมเลกุลของแป้ง ทำให้เกิดความหนืดที่สามารถสอดแทรกเข้าไปในช่องว่างเพื่อยึดเกาะระหว่างอนุภาคของชีวมวล เมื่อทำให้แห้งจะส่งผลให้เกิดการแข็งตัว [11] อีกประการหนึ่งในส่วนของชีวมวล อุณหภูมิการอัดเม็ดที่อยู่ภายในจานหมุนที่สูง จะส่งผลให้ชีวมวลบางส่วนเกิดการสลายตัว และปล่อยสารระเหยกลุ่มยางเหนียว ทำให้การยึดเกาะของเนื้อชีวมวลเพิ่มสูงขึ้น [10]

ตารางที่ 3 การเปลี่ยนแปลงลักษณะของต้นข้าวโพดอัดเม็ดตามอุณหภูมิและความชื้น

| Samples | Temperature (°C) | | Moisture (%) | | Characteristic |
|---------|------------------|------------------|-----------------|------------------|----------------|
| | T _{in} | T _{out} | M _{in} | M _{out} | |
| 1 | 37 | 61 | 24 | 22 | |
| 2 | 46 | 56 | 22 | 22 | |
| 3 | 48 | 55 | 21.5 | 21.5 | |
| 4 | 74 | 78 | 13 | 11 | |

4.2 ความหนาแน่น

การวิเคราะห์ความหนาแน่นของเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากชีวมวล 4 ชนิด พบว่าการใช้ฟางข้าวทำเป็นเชื้อเพลิงอัดเม็ดให้ความหนาแน่นสูงสุด รองลงมาคือแกลบ ต้นข้าวโพด และต้นข้าวโพด โดยมีค่าความหนาแน่นเฉลี่ย 1,291, 1,276, 1,203 และ 1,152 kg/m³ ตามลำดับ ดังรูปที่ 4 ซึ่งสูงกว่ามาตรฐานเชื้อเพลิงอัดเม็ดโดยทั่วไปมีค่าเฉลี่ย 600 kg/m³ [5] การใช้ชีวมวลกลุ่มข้าวให้ความหนาแน่นสูงกว่าชีวมวลกลุ่มข้าวโพดอัดเม็ด เนื่องจากชีวมวลกลุ่มข้าวมีปริมาณลิกนินและไฟเบอร์สูงกว่าชีวมวลกลุ่มข้าวโพด [11,13,14] ซึ่งการอัดเม็ดชีวมวลที่อุณหภูมิสูง ลิกนินจะอ่อนตัวและทำหน้าที่เสมือนตัวประสานส่งผลให้เนื้อของชีวมวลเกาะกันได้ดี ส่วนไฟเบอร์จะประกอบด้วยไฟเบอร์ที่ละลายน้ำและไม่ละลายน้ำ ในส่วนที่สามารถละลายน้ำได้จะไปเพิ่มความหนืด ซึ่งจะช่วยให้เนื้อชีวมวลอัดเกาะกันได้ดีและเป็นผลต่อการอัดเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล [10]

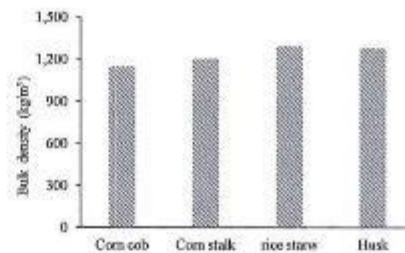
4.3 ความต้านทานแรงกด

การวิเคราะห์ความต้านทานแรงกดของชีวมวลทั้ง 4 ชนิด พบว่าเชื้อเพลิงอัดเม็ดฟางข้าว แกลบ และต้นข้าวโพด มีค่าความต้านทานแรงกดที่ใกล้เคียงกัน โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 182.14, 178.75 และ 175.0 kg/cm² ในขณะที่การใช้ต้นข้าวโพดให้ความต้านทานแรงกดต่ำสุดคือ 141.54 kg/cm² ดังรูปที่ 5 สาเหตุที่ต้นข้าวโพดอัดเม็ดมีค่าความต้านทานแรงกดต่ำ

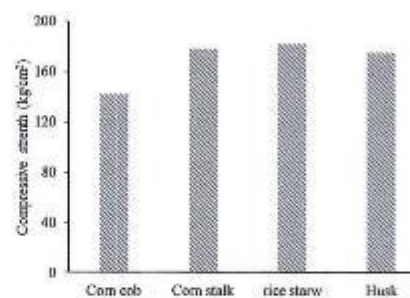
เป็นผลมาจากความชื้นที่หลงเหลืออยู่ในต้นข้าวโพดอัดเม็ด เนื่องจากความชื้นไปทำลายความแข็งแรงของพันธะที่ยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคของชีวมวลอัดเม็ด จึงทำให้เชื้อเพลิงอัดเม็ดมีความเปราะ [12,15]

4.4 ดัชนีการแตก่วน

เชื้อเพลิงที่มีคุณสมบัติการแตก่วนที่สูงจะส่งผลให้ความทนทานต่อการนำไปใช้งานและการขนส่งชีวมวล ผลจากการศึกษาพบว่าการใช้ฟางข้าว แกลบ และต้นข้าวโพด มีคุณสมบัติการแตก่วนที่ดี ซึ่งมีค่าเท่ากับ 98.50%, 93.67% และ 89.33% ตามลำดับ ในขณะที่ต้นข้าวโพดให้ค่าดัชนีการแตก่วนต่ำที่สุดคือ 68.17% ดังรูปที่ 6 สาเหตุที่ต้นข้าวโพดดัชนีการแตก่วนต่ำเกิดจากแรงยึดเกาะระหว่างเนื้อชีวมวลที่มีค่อนข้างน้อย เป็นผลมาจากลิกนิน ไฟเบอร์ และสารระเหยกลุ่มยางเหนียวต่างๆ ที่มีอยู่ภายในต้นข้าวโพดค่อนข้างน้อย [10,14] เมื่อเทียบกับชีวมวลอีก 3 ชนิดที่เหลือ ซึ่งโดยทั่วไปดัชนีการแตก่วนของชีวมวลอัดเม็ดจากชนิดต่างๆ มีค่าอยู่ในช่วง 60-95% [10,16]



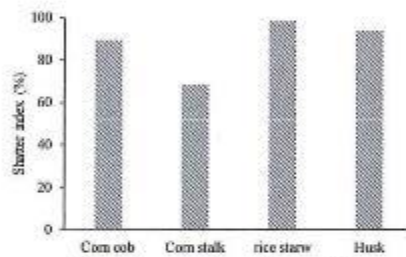
รูปที่ 4 ความหนาแน่นของชีวมวลอัดเม็ด



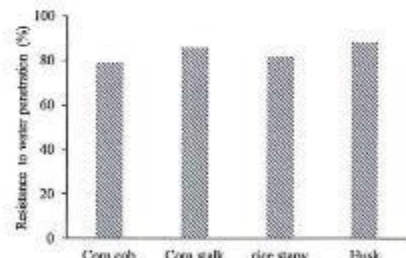
รูปที่ 5 ความต้านทานแรงกดอัดของชีวมวลอัดเม็ด

4.5 ความต้านทานน้ำ

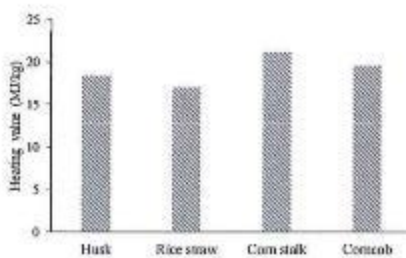
จากการทดสอบความต้านทานน้ำของชีวมวลอัดเม็ด พบว่าความต้านทานน้ำของซังข้าวโพด ต้นข้าวโพด ฟางข้าว และแกลบ คือ 78%, 86%, 81% และ 88% ตามลำดับ ดังรูปที่ 7 จะเห็นว่าชีวมวลประเภทฟางข้าวและแกลบมีความต้านทานน้ำโดยเฉลี่ยสูงกว่าชีวมวลประเภทต้นข้าวโพดและซังข้าวโพด เชื้อเพลิงอัดเม็ดที่มีความสามารถในการต้านทานน้ำ เกิดจากความพรุนของชีวมวลแต่ละชนิดแตกต่างกัน ความพรุนของต้นและซังข้าวโพดสูงกว่าความพรุนของฟางข้าวและแกลบ ส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับน้ำที่ดีกว่า ทำให้ความต้านทานน้ำของฟางข้าวและแกลบมีค่าสูงกว่าต้นข้าวโพดและซังข้าวโพดนั่นเอง [19]



รูปที่ 6 ศักยภาพการแตกตัวของชีวมวลอัดเม็ด



รูปที่ 7 ความต้านทานน้ำของชีวมวลอัดเม็ด



รูปที่ 8 ค่าความร้อนของชีวมวลอัดเม็ด

4.6 ค่าความร้อน

จากการวิเคราะห์ค่าความร้อนของชีวมวลอัดเม็ดด้วยวิธี บอมบ์แคลอรีมิเตอร์ พบว่าค่าความร้อนของแกลบ ฟางข้าว ต้นข้าวโพด และซังข้าวโพด คือ 18.3, 17.6, 21.2 และ 19.5 MJ/kg ตามลำดับ ดังรูปที่ 8 ซึ่งมีค่าความร้อนสูงกว่ามาตรฐาน (14.6-16.7 MJ/kg) [12] และเมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยเกี่ยวกับการอัดเม็ดชีวมวลในกลุ่มข้าว โดยทั่วไปมีค่าเฉลี่ยที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งส่วนใหญ่มีค่าเฉลี่ย 17.8 MJ/kg [17,18] ในส่วนของการอัดเม็ดชีวมวลในกลุ่มข้าวโพด พบว่าค่าความร้อนโดยเฉลี่ยอยู่ในช่วง 17.7-18.3 MJ/kg [8]

5. สรุปผลการศึกษา

- อุณหภูมิและความชื้นที่เหมาะสมต่อการอัดเม็ดฟางข้าว แกลบ ต้นข้าวโพด และซังข้าวโพด อยู่ในช่วง 70-80°C และ 10-15% ตามลำดับ

- ความหนาแน่นรวม ความต้านทานแรงกด ศักยภาพการแตก่วน ความต้านทานน้ำ และค่าความร้อนของชีวมวลอัดเม็ด ทั้ง 4 ชนิด อยู่ในช่วง 1,152-1,291 kg/m³, 141.54-182.14 kg/cm², 68-98%, 78-88% และ 17.6-21.2 MJ/kg ตามลำดับ

- เชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดทั้ง 4 ชนิด ได้แก่ ฟางข้าว แกลบ ต้นข้าวโพด และซังข้าวโพด มีคุณสมบัติเป็นไปตามมาตรฐานของชีวมวลอัดเม็ด และสามารถนำไปส่งเสริมการใช้ชีวมวลอัดเม็ดในระดับชุมชนและครัวเรือน

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณการสนับสนุนทุนวิจัยจากโครงการผลิตและพัฒนาศักยภาพบัณฑิตทางด้านพลังงานทดแทน ในกลุ่มประเทศอาเซียนในระดับบัณฑิตศึกษามหาวิทยาลัยแม่โจ้ สำนักงานวิจัยและส่งเสริมวิชาการการเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ภายใต้โครงการวิจัยความร่วมมือไทย-จีนงบประมาณประจำปี 2559

เอกสารอ้างอิง

- [1] Nalladurai Kaliyan and Vance Morey R. (2010). Densification characteristics of corn cobs, Fuel Processing Technology, vol.91, January 2010, pp. 559-565.
- [2] Thanasit Wongsiriamnuay and Nakorn Tippayawong. (2015). Effect of densification parameters on the properties of maize residue pellets, Biosystems engineering, vol. 139, September 2015, pp. 111 – 120.

- [3] กิตติธิดา วรฉันทน์ และชัชวาล อัยยาอิดิ (2555). ศึกษาภาพในการนำตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานกระดาษมาใช้เป็นเชื้อเพลิงชีวมวล, การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย, จังหวัดมหาสารคาม
- [4] อนันท์ มีมนต์, สุกเอก ประมุขมาก และนายจิรวัดน์ ใจคู่ (2558). อิทธิพลของขนาดบดของอนุภาคเศษพืชเหลือใช้จากงานเกษตรกรรมสำหรับอัดขึ้นรูปเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล, การประชุมสัมมนาเชิงวิชาการ, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, จังหวัดปทุมธานีรูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย
- [5] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (2555). โครงการศึกษากำหนดมาตรฐานของ Biomass Pellet เพื่อพัฒนาเป็นเชื้อเพลิงชีวมวลสำหรับอนาคต, กระทรวงพลังงาน.
- [6] Rajaseenivasan T., Srinivasan V., Syed Mohamed Qadir G. and Srithar K. (2016). An investigation on the performance of sawdust briquette blending with neem powder, Alexandria Engineering Journal, vol.55, July 2016, pp. 2833 – 2838.
- [7] Sengar S. H., Mohod A. G., Khandetod Y. P., Patil S. S., and Chendake A. D. (2012). Performance of Briquetting Machine for Briquette Fuel, International Journal of Energy Engineering, vol.2(1), pp. 28 – 34.
- [8] Saumen Poddar, Mohammed Kamruzzaman, Sujjan S.M.A., Hossain M., Gafur M.A. and Mahfuza Khanam. (2016). Effect of compression pressure on lignocellulosic biomass pellet to improve fuel properties: Higher heating value, Fuel, vol.131, May 2014, pp. 43 – 48.
- [9] สุกชัย ธรรมศิริทรัพย์ และภูมิพัฒน์ ภาชนะ (2558). การศึกษาการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งจากหญ้าเนเปียร์, การประชุมวิชาการและนำเสนอผลงานวิจัยระดับชาติและนานาชาติ, มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา, กรุงเทพฯ
- [10] Nalladurai Kaliyan and Vance Morey R. (2009). Factors affecting strength and durability of densified biomass products, biomass and bioenergy, vol. 33(2009), October 2008, pp. 337 – 359.
- [11] Rukayya I. Muazu and Julia A. Stegemann. (2015). Effects of operating variables on durability of fuel briquettes from rice husks and corn cobs, Fuel Processing Technology, vol. 133(2015), February 2015, pp. 137–145
- [12] Leticia Chico-Santamarta, Keith Chaney, Richard John Godwin, David Richard White and Andrea Claire Humphries. (2012). Physical quality changes during the storage of canola (*Brassica napus* L.) straw pellets, Applied Energy, March 2012, vol. 95(2012) pp. 220–226.
- [13] Zhijia Liu, Xing'e Liu, Benhua Fei, Zehui Jiang, Zhiyong Cai and Yan Yua. (2013). The properties of pellets from mixing bamboo and rice straw, Renewable Energy, vol. 55(2013), January 2013, pp. 1-5.
- [14] Nalladurai Kaliyan, Vance Morey R. (2010). Natural binders and solid bridge type binding mechanisms in briquettes and pellets made from corn stover and switchgrass, Bioresource Technology, vol. 101(2010), September 2009, pp. 1082–1090.
- [15] Yan Huang, Michael Finell, Sylvia Larsson, Xiaohong Wang, Jili Zhang, Rui Wei and Ling Liu.(2017). Biofuel pellets made at low moisture content e Influence of water in the binding mechanism of densified biomass, Biomass and Bioenergy, March 2012, vol. 98(2017), pp. 8-14.
- [16] Rajaseenivasan T., Srinivasan V., Syed Mohamed Qadir G. and Srithar K. (2016). An investigation on the performance of sawdust briquette blending with neem powder, Alexandria Engineering Journal, vol. 55(2016), July 2016, pp. 2833–2838.
- [17] Donghui Lu, Lope G. Tabil, Dechong Wang a, Guanghui Wang and Shahram Emami. (2014). Experimental trials to make wheat straw pellets with wood residue and binders, biomass and bioenergy, vol. 69, July 2014, pp. 287 – 296.
- [18] Chuen-Shii Chou, Sheau-Hong Lin and Wen-Chung Lu. (2009). Preparation and characterization of solid biomass fuel made from rice straw and rice bran, Fuel Processing Technology, vol. 90(2009), April 2009, pp. 980 – 987.
- [19] Rukayya I. Muazu and Julia A. Stegemann. (2010). Effects of operating variables on durability of fuel briquettes from rice husks and corn cobs, Fuel Processing Technology, vol. 133 (2015), February 2015, pp. 137–145.
- [20] Ministry of Agriculture Food and Rural Affairs (2016). Biomass Densification for Energy Production, URL: <http://www.omafra.gov.on.ca>, access on 20/04/2017.

- [21] Nat Thuchayapong and Weeranut Intagun. (2015). The physical of sawdust briquette and the thermal performance of biomass briquette stove, Research and knowledge, vol. 2(1), December 2015, pp. 63-64

ประวัติผู้วิจัย

| | | |
|-----------------|------------------------|--|
| ชื่อ | นางสาวเจนจิรา อุตเรือน | |
| เกิดเมื่อ | 21 ธันวาคม 2535 | |
| ประวัติการศึกษา | พ.ศ. 2559 | ระดับปริญญาตรี วิศวกรรมบัณฑิต คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ จังหวัดเชียงใหม่ |
| | พ.ศ. 2553 | ระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนไชยปราการ อำเภอไชยปราการ จังหวัดเชียงใหม่ |

