การผลิตเชื้อเพลิงชีวมวลคุณภาพสูงโดยใช้กระบวนการทอริแฟคชั่น

นายณัฐพงษ์ ประภาการ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตรและอาหาร
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2558

PRODUCTION OF HIGH - QUALITY BIOMASS FUEL USING TORREFACTION PROCESS

Natthapong Prapakarn

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Doctor of Philosophy in Agricultural Engineering

Suranaree University of Technology

Academic Year 2015

การผลิตเชื้อเพลิงชีวมวลคุณภาพสูงโดยใช้กระบวนการทอริแฟคชั่น

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาดุษฎีบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(ผศ. ดร.พยุงศักดิ์ จุลยุเสน)
ประธานกรรมการ

(ผศ. ดร.วีรชัย อาจหาญ)
กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(ผศ. ดร.เทวรัตน์ ตรีอำนรรค)
กรรมการ

(อ. ดร.พรรษา ลิบลับ)
กรรมการ

(อ. ดร.วันรัฐ อับดุลลากาซิม)
กรรมการ

(ศ. ดร.ชูกิจ ลิมปิจำนงค์)
รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและนวัตกรรม

(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)
คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ณัฐพงษ์ ประภาการ : การผลิตเชื้อเพลิงชีวมวลคุณภาพสูงโดยใช้กระบวนการทอริแฟคชั่น (PRODUCTION OF HIGH - QUALITY BIOMASS FUEL USING TORREFACTION PROCESS) อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วีรชัย อาจหาญ, 112 หน้า

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อผลิตเชื้อเพลิงชีวมวลคุณภาพสูง (เชื้อเพลิงทอริไฟด์) ที่มีคุณสมบัติ ค่าความร้อน และค่าความหนาแน่นพลังงานสูงกว่าเชื้อเพลิงชีวมวลด้วยกระบวนการทอริแฟคชั่น โดยจะทำการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตเชื้อเพลิงทอริไฟด์ ในระดับห้องปฏิบัติการโดยใช้เปลือก/ซังข้าวโพดอัดเม็ด ฟางข้าวอัดเม็ด และใบอ้อยอัดเม็ด ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 175 200 225 และ 250 °C เวลา 30 60 90 และ 120 min และทดสอบผลิตเชื้อเพลิงทอริไฟด์เปลือก/ซังข้าวโพดอัดเม็ดระดับต้นแบบ ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 200 225 และ 250 °C ปริมาณการป้อนวัตถุดิบ 50 100 และ 150 kg เวลา 30 60 90 และ 120 min

ผลการศึกษาระดับห้องปฏิบัติการพบว่า สภาวะที่เหมาะสมในการผลิตเชื้อเพลิงทอริไฟด์เปลือก/ซังข้าวโพดอัดเม็ด คือ สภาวะที่ใช้อุณหภูมิ 225 °C เวลา 60 min เชื้อเพลิงทอริไฟด์เปลือก/ซังข้าวโพดอัดเม็ดที่ผลิตได้มีความหนาแน่น ค่าความร้อนสูง และความหนาแน่นพลังงาน เท่ากับ 541.00 kg/m^3 19.89 MJ/kg และ 10.76 GJ/m^3 ตามลำดับ ผลผลิตมวล และผลผลิตพลังงาน เท่ากับ 77.79 % และ 93.08 % ตามลำดับ สภาวะที่เหมาะสมในการผลิตเชื้อเพลิงทอริไฟด์ฟางข้าวอัดเม็ด คือ สภาวะที่อุณหภูมิ 225 °C เวลา 120 min มีความหนาแน่น ค่าความร้อนสูง และความหนาแน่นพลังงาน เท่ากับ 558.00 kg/m^3 16.37 MJ/kg และ 9.13 GJ/m^3 ตามลำดับ ผลผลิตมวล และผลผลิตพลังงาน เท่ากับ 78.82 % และ 92.82 % ตามลำดับ สภาวะที่เหมาะสมในการผลิตเชื้อเพลิงทอริไฟด์ใบอ้อยอัดเม็ด คือ สภาวะที่อุณหภูมิ 225 °C เวลา 30 min มีความหนาแน่น ค่าความร้อนสูง และความหนาแน่นพลังงาน เท่ากับ 675.00 kg/m^3 11.45 MJ/kg และ 7.73 GJ/m^3 ตามลำดับ ผลผลิตมวล และผลผลิตพลังงาน เท่ากับ 77.79 % และ 89.77 % ตามลำดับ

ผลการศึกษาระดับต้นแบบพบว่า สภาวะที่เหมาะสมในการผลิตเชื้อเพลิงทอริไฟด์เปลือก/ซังข้าวโพดอัดเม็ด คือ สภาวะที่อุณหภูมิ 250 °C ปริมาณการป้อนวัตถุดิบ 150 kg เวลา 120 min มีความหนาแน่นพลังงานสูงสุด เท่ากับ 10.72 GJ/m^3 ซึ่งใกล้เคียงกับผลการศึกษาในระดับห้องปฏิบัติการ โดยเพิ่มขึ้น 48.68 % เมื่อเทียบกับชีวมวลเปลือก/ซังข้าวโพดอัดเม็ดก่อนผ่านกระบวนการทอริแฟคชั่น มีคุณสมบัติ ความหนาแน่น ค่าความร้อนสูง ผลผลิตมวล และผลผลิตพลังงานเท่ากับ 608.83 kg/m^3 17.60 MJ/kg 76.81 % และ 96.39 % ตามลำดับ ต้นทุนการผลิตอยู่ที่ 4,852 Baht/ton (0.28 Baht/MJ)

สาขาวิชา วิศวกรรมเกษตร ลายมือชื่อนักศึกษา ______________________

ปีการศึกษา 2558 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา __________________

NATTHAPONG PRAPAKARN : PRODUCTION OF HIGH - QUALITY BIOMASS FUEL USING TORREFACTION PROCESS. THESIS ADVISOR : ASST. PROF. WEERACHAI ARJHARN, Ph.D., 112 PP.

TORREFACTION /BIOMASS FUEL /CORNCOB/CORN HUSK/RICE STRAW/ SUGARCANE TRASH

The objective of this study is to produce high quality biomass fuel (torrefied fuel), which gives higher heating value and energy density than biomass using torrefaction process. Appropriate conditions of torrefied fuel pellets production in laboratory using corncob/corn husk pellets, rice straw pellets and sugarcane trash pellets were determined from combined conditions at temperature 175, 200, 225 and 250 °C and residence time of 30, 60, 90 and 120 min. The pilot scale test was also conducted for corncob/corn husk pellets at 200, 225 and 250 °C, materials input of 50, 100 and 150 kg and residence time of 30, 60, 90 and 120 min.

The result of the laboratory test showed that appropriate torrefied corncob/corn husk pellets condition was 225 °C and 60 min, resulting in bulk density, HHV and energy density with values of 541.00 kg/m^3, 19.89 MJ/kg and 10.76 GJ/m^3, respectively. Mass yield and energy yield were 77.79 % and 93.08 %, respectively. However, the appropriate torrefied rice straw pellets condition was 225 °C and 120 min, resulting in bulk density, HHV and energy density with values of 558.00 kg/m^3, 16.37 MJ/kg and 9.13 GJ/m^3, respectively. Mass yield and energy yield were 78.82 % and 92.82 %, respectively. For appropriate torrefied sugarcane trash pellets condition was 225 °C and 30 min, resulting in bulk density, HHV and energy density with values of 675.00 kg/m^3,

11.45 MJ/kg and 7.73 GJ/m^3, respectively. Mass yield and energy yield were 77.79 % and 89.77 %, respectively.

The results of the pilot scale test showed that the proper condition of torrefied corncob/corn husk pellets production was at temperature of 250 °C, materials input of 150 kg and residence time of 120 min. It gave the highest energy density of 10.72 GJ/m^3, which was similar to the result of the appropriate condition in the laboratory. Its result increased 48.68 % when comparing to corncob/corn husk pellets biomass before torrefaction process, resulting in bulk density, HHV, mass yield and energy yield with values of 608.83 kg/m^3, 17.60 MJ/kg, 76.81 %, and 96.39 %, respectively. The production cost was 4,852 Baht/ton (0.28 Baht /MJ).

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

School of Agricultural Engineering	Student's Signature_______________
Academic Year 2015	Advisor's Signature_______________

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทั้งด้านวิชาการ และด้านการดำเนินงานวิจัยจากบุคคล และกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ได้แก่

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วีรชัย อาจหาญ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้โอกาสทางการศึกษา ให้คำแนะนำปรึกษาด้านวิชาการ ช่วยแก้ไขปัญหา และให้กำลังใจกับผู้วิจัยมาโดยตลอด รวมทั้งช่วยตรวจทาน และแก้ไขวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนเสร็จสมบูรณ์

อาจารย์ ดร.พรรษา ลิบลับ ที่ให้คำแนะนำปรึกษาด้านวิชาการ ช่วยแก้ไขปัญหา และให้กำลังใจกับผู้วิจัยมาโดยตลอด รวมทั้งช่วยตรวจทาน และแก้ไขวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนเสร็จสมบูรณ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พยุงศักดิ์ จุลยุเสน ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เทวรัตน์ ตรีอำนรรค และอาจารย์ ดร.วันรัฐ อับดุลลากาซิม กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำปรึกษาด้านวิชาการอันเป็นประโยชน์

บุคคลากรศูนย์ความเป็นเลิศทางด้านชีวมวล และคุณกรรณิกา ประเสริฐสังข์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่คอยให้ช่วยเหลือ และให้คำแนะนำปรึกษามาโดยตลอด

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัชวาลย์ ชัยชนะ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ที่สนับสนุนอุปกรณ์ เครื่องมือ สถานที่ และเจ้าหน้าที่เพื่อทำวิทยานิพนธ์นี้ให้สำเร็จตามบรรลุวัตถุประสงค์

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ที่ให้ทุนอุดหนุนการวิจัยประเภทบัณฑิตศึกษา ประจำปี 2557

ท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณครูบาอาจารย์ที่เคารพทุกท่าน ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทความรู้ที่ดีให้แก่ผู้วิจัย และสำคัญที่สุดขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัวอันเป็นที่รักยิ่ง ที่ให้การเลี้ยงดู อบรม ส่งเสริมการศึกษา ทำให้ผู้วิจัยมีความรู้ และมีหลักธรรมในการดำเนินชีวิตที่ดีตลอดมา

ณัฐพงษ์ ประภาการ

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย) ... ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ) ... ข
กิตติกรรมประกาศ ... ง
สารบัญ ... จ
สารบัญตาราง ... ฎ
สารบัญรูป ... ฐ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ ... ณ
บทที่
1 บทนำ ... 1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา ... 1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย ... 2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย ... 2
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ ... 2
2 ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ... 3
2.1 บทนำ ... 3
2.2 ชีวมวล ... 3
2.2.1 ข้อมูลทั่วไปของเปลือก/ซังข้าวโพด ... 3
2.2.2 ข้อมูลทั่วไปของฟางข้าว ... 3
2.2.3 ข้อมูลทั่วไปของใบอ้อย ... 4
2.2.4 คุณสมบัติที่ใช้ในการพิจารณาคุณภาพของชีวมวลและเชื้อเพลิงชีวมวล ... 6
2.2.4.1 คุณสมบัติทางกายภาพ ... 6
2.2.4.2 คุณสมบัติองค์ประกอบแบบประมาณ ... 7
2.2.4.3 คุณสมบัติองค์ประกอบแบบแยกธาตุ ... 7
2.2.4.4 คุณสมบัติค่าความร้อน ... 8

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

2.3 เทคโนโลยีการแปรรูปชีวมวล 8
2.3.1 การลดความชื้น 8
2.3.2 การสับ/ย่อยลดขนาด 14
2.3.3 การอัดเม็ด 14
2.3.4 การเก็บรักษา 17
2.4 เทคโนโลยีทอริแฟคชั่น 17
2.4.1 กระบวนการทอริแฟคชั่น 17
2.4.2 ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการทอริแฟคชั่น 18
2.4.3 สมดุลมวลและพลังงาน 19
2.4.4 คุณสมบัติของเชื้อเพลิงทอริไฟด์ 20
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 20
3 เครื่องมือและวิธีการดำเนินการวิจัย 24
3.1 ขั้นตอนการศึกษา 24
3.2 ตัวอย่างชีวมวล 24
3.2.1 ขั้นตอนและวิธีการเตรียมตัวอย่างชีวมวลอัดเม็ด 24
3.2.2 ศึกษาคุณสมบัติของตัวอย่างชีวมวล 25
3.2.2.1 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพ 25
3.2.2.2 การวิเคราะห์คุณสมบัติแบบประมาณ 25
3.2.2.3 การวิเคราะห์คุณสมบัติแบบแยกธาตุ 25
3.2.2.4 การวิเคราะห์ค่าความร้อน 25
3.2.2.5 การวิเคราะห์คุณสมบัติการย่อยสลายทางความร้อน 26
3.3 อุปกรณ์และเครื่องมือวัด 29
3.3.1 เตาปฏิกรณ์ไฟฟ้า 29
3.3.1.1 ส่วนประกอบของเตาปฏิกรณ์ไฟฟ้า 29
3.3.1.2 หลักการทำงานของระบบเตาปฏิกรณ์ไฟฟ้า 30
3.3.2 เครื่องผลิตเชื้อเพลิงทอริไฟด์ระดับต้นแบบ 34
3.3.2.1 ส่วนประกอบของเครื่องผลิตเชื้อเพลิงทอริไฟด์ระดับต้นแบบ 34

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.3.2.2 หลักการทำงานของเครื่องผลิตเชื้อเพลิงทอริไฟด์ระดับต้นแบบ......34
3.4 วิธีการดำเนินงานวิจัย 37
3.4.1 การทดสอบหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตเชื้อเพลิงทอริไฟด์ ระดับห้องปฏิบัติการ 37
3.4.1.1 วิธีการทดสอบ...37
3.4.1.2 การวิเคราะห์คุณสมบัติของเชื้อเพลิงทอริไฟด์ 38
3.4.1.3 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ทางสถิติ..41
3.4.1.4 สรุปสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตเชื้อเพลิงทอริไฟด์ ระดับห้องปฏิบัติการ...41
3.4.2 การทดสอบผลิตเชื้อเพลิงทอริไฟด์ด้วยเครื่องผลิตเชื้อเพลิงทอริไฟด์ ระดับต้นแบบ...41
3.4.2.1 วิธีการทดสอบ...41
3.4.2.2 การวิเคราะห์คุณสมบัติเชื้อเพลิงทอริไฟด์.......................................42
3.4.2.3 สรุปสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตเชื้อเพลิงทอริไฟด์ ระดับต้นแบบ 43
3.4.2.4 วิเคราะห์ต้นทุนการผลิตเชื้อเพลิงทอริไฟด์ระดับต้นแบบ...............43
4 ผลการศึกษาและการวิเคราะห์ผล...45
4.1 บทนำ 45
4.2 ผลการศึกษาการผลิตเชื้อเพลิงทอริไฟด์เปลือก/ซังข้าวโพดอัดเม็ด ระดับห้องปฏิบัติการ 45
4.2.1 คุณสมบัติทางกายภาพของชีวมวลเปลือก/ซังข้าวโพดอัดเม็ดหลังผ่าน กระบวนการทอริแฟคชั่นระดับห้องปฏิบัติการ 46
4.2.2 คุณสมบัติแบบประมาณของชีวมวลเปลือก/ซังข้าวโพดอัดเม็ด หลังผ่านกระบวนการทอริแฟคชั่นระดับห้องปฏิบัติการ..............................47
4.2.3 องค์ประกอบธาตุคาร์บอนและธาตุไฮโดรเจนของชีวมวลเปลือก/ซัง ข้าวโพดอัดเม็ดหลังผ่านกระบวนการทอริแฟคชั่นระดับห้องปฏิบัติการ 51
4.2.4 การย่อยสลายทางความร้อนของชีวมวลเปลือก/ซังข้าวโพดอัดเม็ด.............52

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.2.5 ผลผลิตมวล ผลผลิตพลังงาน และความหนาแน่นพลังงานของชีวมวลเปลือก/ซังข้าวโพดอัดเม็ดหลังผ่านกระบวนการทอริแฟคชั่น ระดับห้องปฏิบัติการ 54
4.2.6 สรุปสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตเชื้อเพลิงทอริไฟด์เปลือก/ซังข้าวโพดอัดเม็ดระดับห้องปฏิบัติการ 56
4.3 ผลการศึกษาการผลิตเชื้อเพลิงทอริไฟด์ฟางข้าวระดับห้องปฏิบัติการ 56
4.3.1 คุณสมบัติทางกายภาพของชีวมวลฟางข้าวอัดเม็ดหลังผ่านกระบวนการทอริแฟคชั่นระดับห้องปฏิบัติการ 56
4.3.2 คุณสมบัติแบบประมาณของชีวมวลฟางข้าวอัดเม็ดหลังผ่านกระบวนการทอริแฟคชั่นระดับห้องปฏิบัติการ 57
4.3.3 องค์ประกอบธาตุคาร์บอนและธาตุไฮโดรเจนของชีวมวลฟางข้าวอัดเม็ดหลังผ่านกระบวนการทอริแฟคชั่นระดับห้องปฏิบัติการ 58
4.3.4 การย่อยสลายทางความร้อนของชีวมวลฟางข้าวอัดเม็ด 61
4.3.5 ผลผลิตมวล ผลผลิตพลังงาน และความหนาแน่นพลังงานของชีวมวลฟางข้าวอัดเม็ดหลังผ่านกระบวนการทอริแฟคชั่นระดับห้องปฏิบัติการ 62
4.3.6 สรุปสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตเชื้อเพลิงทอริไฟด์ฟางข้าวระดับห้องปฏิบัติการ 63
4.4 ผลการศึกษาการผลิตเชื้อเพลิงทอริไฟด์ใบอ้อยระดับห้องปฏิบัติการ 65
4.4.1 คุณสมบัติทางกายภาพของชีวมวลใบอ้อยอัดเม็ดหลังผ่านกระบวนการทอริแฟคชั่นระดับห้องปฏิบัติการ 65
4.4.2 คุณสมบัติแบบประมาณของชีวมวลใบอ้อยอัดเม็ดหลังผ่านกระบวนการทอริแฟคชั่นระดับห้องปฏิบัติการ 67
4.4.3 องค์ประกอบธาตุคาร์บอนและธาตุไฮโดรเจนของชีวมวลใบอ้อยอัดเม็ดหลังผ่านกระบวนการทอริแฟคชั่นระดับห้องปฏิบัติการ 68
4.4.4 การย่อยสลายทางความร้อนของชีวมวลใบอ้อยอัดเม็ด 70

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.4.5 ผลผลิตมวล ผลผลิตพลังงาน และความหนาแน่นพลังงานของชีวมวลใบอ้อยอัดเม็ดหลังผ่านกระบวนการทอริแฟคชั่นระดับห้องปฏิบัติการ 70

4.4.6 สรุปสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตเชื้อเพลิงทอริไฟด์ใบอ้อยระดับห้องปฏิบัติการ 71

4.5 ผลการศึกษาการผลิตเชื้อเพลิงทอริไฟด์เปลือก/ซังข้าวโพดระดับต้นแบบ 74

4.5.1 คุณสมบัติทางกายภาพของเชื้อเพลิงทอริไฟด์เปลือก/ซังข้าวโพดหลังผ่านกระบวนการทอริแฟคชั่นระดับต้นแบบ 74

4.5.2 คุณสมบัติแบบประมาณของเชื้อเพลิงทอริไฟด์เปลือก/ซังข้าวโพดหลังผ่านกระบวนการทอริแฟคชั่นระดับต้นแบบ 79

4.5.3 ผลผลิตมวล ผลผลิตพลังงาน และความหนาแน่นพลังงานของเชื้อเพลิงทอริไฟด์เปลือก/ซังข้าวโพดหลังผ่านกระบวนการทอริแฟคชั่นระดับต้นแบบ 82

4.5.4 ผลการวิเคราะห์อัตราการผลิตและพลังงานที่ใช้ในการผลิตเชื้อเพลิงทอริไฟด์เปลือก/ซังข้าวโพดระดับต้นแบบ 83

4.5.5 สรุปสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตเชื้อเพลิงทอริไฟด์เปลือก/ซังข้าวโพดอัดเม็ดระดับต้นแบบ 84

4.5.6 การวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตเชื้อเพลิงทอริไฟด์เปลือก/ซังข้าวโพดอัดเม็ดระดับต้นแบบ 84

5 สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ 86

5.1 สรุปผลการศึกษา 86

5.1.1 ผลการผลิตเชื้อเพลิงทอริไฟด์เปลือก/ซังข้าวโพดอัดเม็ดระดับห้องปฏิบัติการ 86

5.1.2 ผลการผลิตเชื้อเพลิงทอริไฟด์ฟางข้าวอัดเม็ดระดับห้องปฏิบัติการ 86

5.1.3 ผลการผลิตเชื้อเพลิงทอริไฟด์ใบอ้อยอัดเม็ดระดับห้องปฏิบัติการ 86

5.1.4 ผลการศึกษาการผลิตเชื้อเพลิงทอริไฟด์เปลือก/ซังข้าวโพดอัดเม็ดระดับต้นแบบ 87

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.2 ข้อเสนอแนะ 87
รายการอ้างอิง 89
ภาคผนวก
ภาคผนวก ก วิธีการวิเคราะห์ 95
ภาคผนวก ข ตัวอย่างการวิเคราะห์ทางสถิติ 101
ประวัติผู้เขียน 112

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญตาราง

ตารางที่ **หน้า**

2.1 การเปรียบเทียบข้อดี - ข้อเสีย ของเครื่องอบแห้งแต่ละชนิด 11

3.1 รายละเอียดเตาปฏิกรณ์ไฟฟ้า 30

3.2 รายละเอียดท่อทดสอบ 31

3.3 รายละเอียดเครื่องมือวัดอุณหภูมิ 31

3.4 รายละเอียดเตาผลิตเชื้อเพลิงทอริไฟด์ระดับต้นแบบ 36

3.5 รายละเอียดชุดสกรูลำเลียง 37

3.6 สัญลักษณ์เชื้อเพลิงทอริไฟด์ 38

4.1 ความหนาแน่นของชีวมวลเปลือก/ซังข้าวโพดอัดเม็ดหลังผ่านกระบวนการทอริแฟคชั่นระดับห้องปฏิบัติการ ที่อุณหภูมิ และเวลาต่างๆ 47

4.2 คุณสมบัติแบบประมาณของชีวมวลเปลือก/ซังข้าวโพดอัดเม็ดหลังผ่านกระบวนการทอริแฟคชั่นระดับห้องปฏิบัติการ ที่อุณหภูมิ และเวลาต่างๆ 50

4.3 องค์ประกอบธาตุคาร์บอนและธาตุไฮโดรเจนของชีวมวลเปลือก/ซังข้าวโพดอัดเม็ดหลังผ่านกระบวนการทอริแฟคชั่นระดับห้องปฏิบัติการ ที่อุณหภูมิ และเวลาต่างๆ....................52

4.4 ผลผลิตมวล ผลผลิตพลังงาน และความหนาแน่นพลังงาน ของชีวมวลเปลือก/ซังข้าวโพดอัดเม็ดหลังผ่านกระบวนการทอริแฟคชั่นระดับห้องปฏิบัติการที่อุณหภูมิ และเวลาต่างๆ 55

4.5 ความหนาแน่นของชีวมวลฟางข้าวอัดเม็ดหลังผ่านกระบวนการทอริแฟคชั่นระดับห้องปฏิบัติการ ที่อุณหภูมิ และเวลาต่างๆ 59

4.6 คุณสมบัติแบบประมาณของชีวมวลฟางข้าวอัดเม็ดหลังผ่านกระบวนการทอริแฟคชั่นระดับห้องปฏิบัติการ ที่อุณหภูมิ และเวลาต่างๆ 61

4.7 องค์ประกอบธาตุคาร์บอนและธาตุไฮโดรเจนของชีวมวลฟางข้าวอัดเม็ดหลังผ่านกระบวนการทอริแฟคชั่นระดับห้องปฏิบัติการ ที่อุณหภูมิ และเวลาต่างๆ....................62

4.8 ผลผลิตมวล ผลผลิตพลังงาน และความหนาแน่นพลังงานของชีวมวลฟางข้าวอัดเม็ดหลังผ่านกระบวนการทอริแฟคชั่นระดับห้องปฏิบัติการ ที่อุณหภูมิ และเวลาต่างๆ 65

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ **หน้า**

4.9 ความหนาแน่นของชีวมวลใบอ้อยอัดเม็ดหลังผ่านกระบวนการทอริแฟคชั่นระดับห้องปฏิบัติการ ที่อุณหภูมิ และเวลาต่างๆ 67
4.10 คุณสมบัติแบบประมาณของชีวมวลใบอ้อยอัดเม็ดหลังผ่านกระบวนการทอริแฟคชั่นระดับห้องปฏิบัติการ ที่อุณหภูมิ และเวลาต่างๆ 69
4.11 องค์ประกอบธาตุคาร์บอนและธาตุไฮโดรเจนของชีวมวลใบอ้อยอัดเม็ดหลังผ่านกระบวนการทอริแฟคชั่นระดับห้องปฏิบัติการ ที่อุณหภูมิ และเวลาต่างๆ....71
4.12 ผลผลิตมวล ผลผลิตพลังงาน และความหนาแน่นพลังงาน ของชีวมวลใบอ้อยอัดเม็ดหลังผ่านกระบวนการทอริแฟคชั่นระดับห้องปฏิบัติการ ที่อุณหภูมิ และเวลาต่างๆ 74
4.13 ความชื้นและความหนาแน่นของชีวมวลเปลือก/ซังข้าวโพดหลังผ่านกระบวนการทอริแฟคชั่นระดับต้นแบบ ปริมาณการป้อน ที่อุณหภูมิ และเวลาต่างๆ 75
4.14 คุณสมบัติแบบประมาณของชีวมวลเปลือก/ซังข้าวโพดหลังผ่านกระบวนการทอริแฟคชั่นระดับต้นแบบ ที่ปริมาณการป้อน อุณหภูมิ และเวลาต่างๆ 80
4.15 คุณสมบัติค่าความร้อนของชีวมวลเปลือก/ซังข้าวโพดหลังผ่านกระบวนการทอริแฟคชั่นระดับต้นแบบ ที่ปริมาณการป้อน อุณหภูมิ และเวลาต่างๆ 81
4.16 ผลผลิตมวล ผลผลิตพลังงาน และความหนาแน่นพลังงานของชีวมวลเปลือก/ซังข้าวโพดหลังผ่านกระบวนการทอริแฟคชั่นระดับต้นแบบที่อุณหภูมิ ปริมาณการป้อนและเวลาต่างๆ 82
4.17 อัตราการผลิตและพลังงานที่ใช้ในการผลิตเชื้อเพลิงทอริไฟด์เปลือก/ซังข้าวโพดโดยใช้กระบวนการทอริแฟคชั่นระดับต้นแบบ ที่ปริมาณการป้อน อุณหภูมิ และเวลาต่างๆ 83
4.18 ต้นทุนการผลิตเชื้อเพลิงทอริไฟด์เปลือก/ซังข้าวโพดโดยใช้กระบวนการทอริแฟคชั่นระดับต้นแบบ 85

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญรูป

รูปที่ หน้า

2.1 ลักษณะการสีข้าวโพด 4
2.2 ลักษณะของเปลือก/ซังข้าวโพด 5
2.3 ลักษณะของฟางข้าว 5
2.4 ลักษณะของใบอ้อย 6
2.5 เครื่องอบแห้งแบบโรตารี่ 11
2.6 เครื่องอบแห้งแบบพาหะลม 12
2.7 เครื่องอบแห้งแบบจาน 12
2.8 เครื่องอบแห้งแบบโรยตัว 13
2.9 เครื่องอบแห้งแบบพาหะไอน้ำ 13
2.10 เครื่องสับ/ย่อย (Hammer Mill) 15
2.11 เครื่องอัดแบบลูกสูบ 16
2.12 เครื่องอัดแบบสกรู 16
2.13 เครื่องอัดแบบแท่ง 16
2.14 กระบวนการทอริแฟคชั่น 19
2.15 ตัวอย่างสมดุลมวลและพลังงานของกระบวนการทอริแฟคชั่น 20
3.1 ขั้นตอนการศึกษา 26
3.2 ตัวอย่างชีวมวลก่อนแปรรูป 27
3.3 แผนผังกระบวนการแปรรูปตัวอย่างชีวมวลอัดเม็ด 27
3.4 เครื่องสับ/ย่อยชีวมวล (Hammer Mill) 28
3.5 เครื่องอัดเม็ดชีวมวล (Pellet Mill) 28
3.6 ลักษณะตัวอย่างชีวมวลตามขั้นตอนการแปรรูป 29
3.7 เตาปฏิกรณ์ไฟฟ้า 31
3.8 ท่อทดสอบหรือห้องตัวอย่าง 32
3.9 เครื่องมือวัด 32
3.10 แสดงส่วนประกอบของเตาปฏิกรณ์ไฟฟ้า 33

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

3.11 ลักษณะการติดตั้งท่อทดสอบเข้ากับเตาปฏิกรณ์ไฟฟ้า.....33
3.12 ส่วนประกอบของเตาทอริไฟด์ระดับต้นแบบ.....35
3.13 เครื่องผลิตเชื้อเพลิงทอริไฟด์ระดับต้นแบบ.....36
3.14 ขั้นตอนการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตเชื้อเพลิงทอริไฟด์ระดับห้องปฏิบัติการ.....39
3.15 ขั้นตอนการศึกษาการผลิตเชื้อเพลิงทอริไฟด์ระดับต้นแบบ.....44
4.1 ลักษณะของชีวมวลเปลือก/ซังข้าวโพดอัดเม็ดก่อนผ่านกระบวนการทอริแฟคชั่น.....48
4.2 ลักษณะของชีวมวลเปลือก/ซังข้าวโพดอัดเม็ดหลังผ่านกระบวนการทอริแฟคชั่นระดับห้องปฏิบัติการ ที่อุณหภูมิ และเวลาต่างๆ.....49
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนออกซิเจนต่อคาร์บอนกับสัดส่วนไฮโดรเจนต่อคาร์บอนของชีวมวลเปลือก/ซังข้าวโพดอัดเม็ดก่อนและหลังผ่านกระบวนการทอริแฟคชั่นระดับห้องปฏิบัติการ.....53
4.4 ลักษณะการย่อยสลายทางความร้อนของชีวมวลเปลือก/ซังข้าวโพดอัดเม็ด.....53
4.5 ลักษณะของชีวมวลฟางข้าวอัดเม็ดก่อนผ่านกระบวนการทอริแฟคชั่น.....59
4.6 ลักษณะของชีวมวลฟางข้าวอัดเม็ดหลังผ่านกระบวนการทอริแฟคชั่นระดับห้องปฏิบัติการที่อุณหภูมิ และเวลาต่างๆ.....60
4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนออกซิเจนต่อคาร์บอนกับสัดส่วนไฮโดรเจนต่อคาร์บอนของชีวมวลฟางข้าวอัดเม็ดก่อนและหลังผ่านกระบวนการทอริแฟคชั่นระดับห้องปฏิบัติการ.....64
4.8 ลักษณะการย่อยสลายทางความร้อนของชีวมวลฟางข้าวอัดเม็ด.....64
4.9 ลักษณะของชีวมวลใบอ้อยอัดเม็ดก่อนผ่านกระบวนการทอริแฟคชั่น.....67
4.10 ลักษณะของชีวมวลใบอ้อยอัดเม็ดหลังผ่านกระบวนการทอริแฟคชั่นระดับห้องปฏิบัติการ ที่อุณหภูมิ และเวลาต่างๆ.....72

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนออกซิเจนต่อคาร์บอนกับสัดส่วนไฮโดรเจนต่อคาร์บอน ของชีวมวลใบอ้อยอัดเม็ดก่อนและหลังผ่านกระบวนการทอริแฟคชั่น ระดับห้องปฏิบัติการ 73
4.12 ลักษณะการย่อยสลายทางความร้อนของชีวมวลใบอ้อยอัดเม็ด....73
4.13 ลักษณะของชีวมวลเปลือก/ซังข้าวโพดหลังผ่านกระบวนการทอริแฟคชั่น ระดับต้นแบบ ณ อุณหภูมิ 200 °C ที่ปริมาณการป้อนและเวลาต่างๆ 76
4.14 ลักษณะของชีวมวลเปลือก/ซังข้าวโพดหลังผ่านกระบวนการทอริแฟคชั่น ระดับต้นแบบ ณ อุณหภูมิ 225 °C ที่ปริมาณการป้อนและเวลาต่างๆ 77
4.15 ลักษณะของชีวมวลเปลือก/ซังข้าวโพดหลังผ่านกระบวนการทอริแฟคชั่น ระดับต้นแบบ ณ อุณหภูมิ 250 °C ที่ปริมาณการป้อนและเวลาต่างๆ 78

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

TF	=	เชื้อเพลิงทอริไฟด์
BM	=	เชื้อเพลิงชีวมวล
CT	=	เปลือก/ซังข้าวโพดอัดเม็ด
RT	=	ฟางข้าวอัดเม็ด
ST	=	ใบอ้อยอัดเม็ด
T-CT	=	เชื้อเพลิงทอริไฟด์เปลือก/ซังข้าวโพดอัดเม็ด
T-RS	=	เชื้อเพลิงทอริไฟด์ฟางข้าวอัดเม็ด
T-ST	=	เชื้อเพลิงทอริไฟด์ใบอ้อยอัดเม็ด
TGA	=	การย่อยสลายทางความร้อน
MC	=	ความชื้น (%)
BD	=	ค่าความหนาแน่น (kg/m^3)
BD_T	=	ค่าความหนาแน่นเชื้อเพลิงทอริไฟด์ (kg/m^3)
VM	=	ค่าสารระเหย (%)
HHV	=	ค่าความร้อนสูง (MJ/kg)
FC	=	ปริมาณคาร์บอนคงตัว (%)
Ash	=	ปริมาณเถ้า (%)
MY	=	ผลผลิตมวล (Mass Yield) (%)
EY	=	ผลผลิตพลังงาน(Energy Yield) (%)
HHV_T	=	ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงทอริไฟด์ (MJ/kg)
HHV_B	=	ค่าความร้อนของตัวอย่างชีวมวล (MJ/kg)
ED	=	ค่าความหนาแน่นพลังงาน (GJ/m^3)
m_T	=	น้ำหนักของเชื้อเพลิงทอริไฟด์ (kg)
m_B	=	น้ำหนักของเชื้อเพลิงชีวมวล (kg)
$\dot{m}_T$	=	อัตราการผลิตเชื้อเพลิงทอริไฟด์ (kg/h)
m_{LPG}	=	น้ำหนักแก๊สแอลพีจีที่ใช้ (kg)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ประเทศไทยมีแหล่งชีวมวลที่เป็นเศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรจำนวนมากสามารถนำมาใช้ผลิตไฟฟ้าได้มากกว่า 3,000 MW แต่ในทางปฏิบัติแหล่งเชื้อเพลิงชีวมวลกระจัดกระจายอยู่ในภูมิภาคต่างๆ ทั่วประเทศ ทั้งที่เป็นเศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร ที่อยู่ในโรงงานอุตสาหกรรมแปรรูปผลผลิตเกษตร และไร่นาสวนเกษตร ทำให้ศักยภาพเชิงพาณิชย์ของการใช้เชื้อเพลิงชีวมวลมีอยู่ไม่ถึง 1,000 MW จากข้อมูลการสำรวจปริมาณเชื้อเพลิงชีวมวลคงเหลือในปี 2549 ของมูลนิธิพลังงานเพื่อสิ่งแวดล้อมพบว่า มีเชื้อเพลิงชีวมวลที่ยังไม่ถูกนำมาใช้เป็นพลังงานความร้อนหรือไฟฟ้าอีกกว่า 34 ล้านตัน คิดเป็นพลังงานเทียบเท่ามันดิบ 7,200 ตัน (ktoe) ประมาณ 2,400 MW ซึ่งจากแผนพัฒนาพลังงานทดแทน 15 ปี (ปี 2550 - 2565) ที่วางเป้าหมายในการผลิตไฟฟ้าจากเชื้อเพลิงชีวมวลให้ได้ 5,608 MW และผลิตเป็นความร้อนทดแทนเชื้อเพลิงจากฟอสซิลเทียบเท่าน้ำมันดิบ 7,433 ตัน (ktoe) ภายในปี 2565

การใช้ประโยชน์เชื้อเพลิงชีวมวลเพื่อผลิตพลังงานความร้อน และกระแสไฟฟ้านั้น ทำได้ยาก เนื่องจากเชื้อเพลิงชีวมวลมีต้นทุนการเก็บรวบรวม แปรรูป และขนส่งสูงมาก ส่งผลให้ราคาของเชื้อเพลิงชีวมวลมีราคาแพง เมื่อเทียบกับเชื้อเพลิงจากฟอสซิส นอกจากนี้เชื้อเพลิงชีวมวลยังมีข้อจำกัดด้านค่าความหนาแน่นพลังงาน (Energy Density) ต่ำ จึงทำให้ภาพรวมการใช้พลังงานจากเชื้อเพลิงชีวมวลในประเทศไม่เป็นไปตามเป้าหมายของแผนพัฒนาพลังงานทดแทน แต่อย่างไรก็ดีเนื่องด้วยศักยภาพชีวมวลในประเทศที่มีอยู่เป็นจำนวนมากทั้งที่ถูกนำมาใช้หรือยังไม่มีการนำมาใช้ในเชิงพาณิชย์นั้น หากมีการนำเทคโนโลยีมาช่วยในกระบวนการเก็บรวบรวม แปรรูป ขนส่ง และเก็บรักษาแล้วนั้นจะส่งผลให้ต้นทุนเชื้อเพลิงชีวมวลมีราคาต่ำลง และมีคุณภาพสูงเทียบเท่าเชื้อเพลิงจากฟอสซิลได้

เทคโนโลยีทอริแฟคชั่น (Torrefaction Technology) เป็นกระบวนการให้ความร้อนกับเชื้อเพลิงชีวมวล ที่อุณหภูมิ 250 - 300 °C ในสภาวะอับอากาศ หรือเรียกว่าไพโรไลซิสอ่อน (Mild Pyrolysis) เกิดผลิตภัณฑ์หลัก 3 ประเภท ได้แก่ เชื้อเพลิงแข็ง (ชาร์) ของเหลว (ทาร์) และแก๊สในขั้นตอนของการใช้ความร้อนจะทำให้เกิดการสลายตัวทางเคมีของสารออกจากเชื้อเพลิงแข็ง เช่น ไฮโดรเจน ออกซิเจน และไนโตรเจน ออกมาในรูปของของเหลว และแก๊สเชื้อเพลิงแข็งที่ได้จะมีปริมาณคาร์บอนเพิ่มขึ้นมากกว่าวัตถุดิบก่อนผ่านกระบวนการเชื้อเพลิงแข็งที่ได้จะมีค่าความ

หนาแน่นของพลังงานสูง และมีการจัดเรียงตัวของโครงสร้างคาร์บอนที่เป็นระเบียบส่งผลทำให้เชื้อเพลิงแข็งดังกล่าวมีค่าความร้อนสูง เก็บรักษาง่ายทนต่อสภาพแวดล้อมที่เปียกชื้น

ในงานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดในการพัฒนาเชื้อเพลิงชีวมวลให้มีคุณภาพสูงเทียบเท่ากับเชื้อเพลิงจากฟอสซิล ด้วยเทคโนโลยีทอริแฟคชั่นเพื่อเป็นองค์ความรู้ด้านการพัฒนาเชื้อเพลิงคุณภาพสูง สนับสนุนแผนการใช้เชื้อเพลิงชีวมวลของประเทศ ลดการนำเข้าเชื้อเพลิงฟอสซิล และลดการปลดปล่อยมลพิษจากการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิล

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1) เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตเชื้อเพลิงคุณภาพสูงโดยใช้กระบวนการทอริแฟคชั่นระดับห้องปฏิบัติการ

2) เพื่อทดสอบผลิตเชื้อเพลิงคุณภาพสูงโดยใช้กระบวนการทอริแฟคชั่นระดับต้นแบบ

3) เพื่อวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตเชื้อเพลิงคุณภาพสูงโดยใช้กระบวนการทอริแฟคชั่นระดับต้นแบบ

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1) ในการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมระดับห้องปฏิบัติการใช้ชีวมวลอัดเม็ด 3 ชนิด ได้แก่ เปลือก/ซังข้าวโพดอัดเม็ด ฟางข้าวอัดเม็ด และใบอ้อยอัดเม็ด โดยใช้เตาปฏิกรณ์ไฟฟ้า

2) ในการทดสอบระดับต้นแบบใช้ชีวมวลอัดเม็ด 1 ชนิด ได้แก่ เปลือก/ซังข้าวโพดอัดเม็ด โดยใช้เครื่องผลิตเชื้อเพลิงทอริไฟด์ต้นแบบ

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ

องค์ความรู้ที่เกิดขึ้นจากรายงานการวิจัยนี้เป็นองค์ความรู้ด้านการผลิตเชื้อเพลิงชีวมวลคุณภาพสูงจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรของประเทศไทย หน่วยงานที่เกี่ยวข้อง และภาคเอกชนสามารถนำไปใช้งานจริงได้ในระดับเชิงพาณิชย์เพื่อสนับสนุนแผนการใช้เชื้อเพลิงชีวมวลของประเทศได้

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 2
ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงรายละเอียดของปริทัศน์วรรณกรรม และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการผลิตเชื้อเพลิงชีวมวลคุณภาพสูงโดยใช้กระบวนการทอริแฟคชั่น ได้แก่ ข้อมูลทั่วไปของชีวมวลเปลือก/ซังข้าวโพด ฟางข้าว และใบอ้อย ซึ่งเป็นชีวมวลที่ใช้ในงานวิจัยนี้ คุณสมบัติที่ใช้ในการพิจารณาคุณภาพของชีวมวล และเชื้อเพลิงชีวมวล เทคโนโลยีการแปรรูปชีวมวล ตั้งแต่การลดความชื้น การสับ/ย่อยลดขนาด การอัดเม็ด และการเก็บรักษา เทคโนโลยีทอริแฟคชั่น และคุณสมบัติของเชื้อเพลิงทอริไฟด์ รวมถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ดังนี้

2.2 ชีวมวล

2.2.1 ข้อมูลทั่วไปของเปลือก/ซังข้าวโพด

เปลือก/ซังข้าวโพดเกิดในกระบวนการเก็บเกี่ยวผลผลิต เริ่มจากเกษตรกรหักฝักข้าวโพดออกจากต้น จากนั้นเกษตรกรจะนำฝักข้าวโพดไปสีด้วยเครื่องจักร ดังแสดงในรูปที่ 2.1 จึงเกิดเป็นชีวมวลเปลือก/ซังข้าวโพดขึ้น ดังแสดงใน รูปที่ 2.2 โดยมีสัดส่วนเปลือก/ซังข้าวโพดต่อผลผลิต เท่ากับ 0.37 ปัจจุบันเปลือก/ซังข้าวโพดมีการนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิง และอาหารสัตว์ แต่ส่วนใหญ่มีการเผาทิ้งโดยเฉพาะในเขตภาคเหนือ (สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย, 2555) เพราะการนำเปลือก/ซังข้าวโพด มาใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมนั้นจะมีต้นทุนสูง เนื่องจากปัญหาด้านความหนาแน่นที่ต่ำของเปลือก/ซังข้าวโพดเอง และปัญหาเส้นทางการขนส่งที่ลาดชัน (วีรชัย อาจหาญ และคณะ, 2555) ผลการศึกษาของงานวิจัยนี้จึงเป็นอีกหนึ่งทางเลือกในการบริหารจัดการเชื้อเพลิงชีวมวลเปลือก/ซังข้าวโพดต่อไป

2.2.2 ข้อมูลทั่วไปของฟางข้าว

ฟางข้าวเป็นชีวมวลที่เกิดจากการเกี่ยวข้าวหรือเป็นเศษวัสดุเหลือใช้ในนาข้าวมีสัดส่วนฟางข้าวต่อผลผลิตประมาณ 0.38 ปัจจุบันการใช้ประโยชน์จากฟางข้าวนั้นมีหลากหลาย โดย ฟางข้าวส่วนใหญ่จะมีการเก็บเกี่ยว และทำเป็นก้อนเพื่อความสะดวกในการขนส่ง และนำไปเลี้ยงสัตว์ ในส่วนการนำไปใช้ประโยชน์อื่น ๆ เช่น ใช้เป็นปุ๋ยโดยการไถกลบตอซังและฟางข้าวลงไปในดิน ใช้ทำเป็นปุ๋ยคอก และปุ๋ยหมัก ใช้คลุมดินในการปลูกพืช ใช้ในการ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ก่อสร้าง โดยนำฟางข้าวมาผลิตเป็นแผ่นหลังคา และใช้ในอุตสาหกรรมทำกระดาษ นอกจากนี้พื้นที่เพาะปลูกข้าวประมาณ 60 % จะมีการเผาฟางข้าว เนื่องจากปัญหาทางด้านการเตรียมพื้นที่ในฤดูกาลปลูกต่อไป ทำให้มีฟางข้าวเหลือทิ้ง ประมาณ 40 % (สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย, 2555) ดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงศักยภาพของการนำฟางข้าวมาใช้ประโยชน์เป็นเชื้อเพลิง แต่ด้วยลักษณะทางกายภาพของฟางข้าว ดังแสดงในรูปที่ 2.3 มีความจำเป็นต้องนำมาผ่านกระบวนการแปรรูปเพื่อง่ายต่อการใช้งาน และการเก็บรักษา โดยในงานวิจัยนี้จะเป็นอีกหนึ่งเทคโนโลยีทางเลือกในการบริหารจัดการเชื้อเพลิงชีวมวลฟางข้าวต่อไป

2.2.3 ข้อมูลทั่วไปของใบอ้อย

ชีวมวลที่เกิดจากการกระบวนการตัดอ้อยในขั้นตอนเก็บเกี่ยวผลผลิต คือ ใบอ้อย ดังแสดงในรูปที่ 2.4 โดยมีสัดส่วนใบอ้อยต่อผลผลิต เท่ากับ 0.23 (สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย, 2555) ปัจจุบันมีการนำใบอ้อยมาใช้ทำเป็นปุ๋ยให้แก่อ้อยที่จะงอกขึ้นใหม่ในฤดูกาลปลูกอ้อยถัดไป และใช้เป็นเชื้อเพลิงเสริมในโรงงานน้ำตาล ซึ่งปัญหาหนึ่งของการใช้เป็นเชื้อเพลิง คือ ปัญหาความหนาแน่นต่ำ ขนส่งได้น้อย จึงมีการนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงเสริมในโรงงานอุตสาหกรรมใกล้ๆ แปลงปลูกเท่านั้น (โรงงานน้ำตาล) งานวิจัยนี้จึงเป็นอีกหนึ่งเทคโนโลยีทางเลือกในการบริหารจัดการเชื้อเพลิงชีวมวลใบอ้อย เช่นเดียวกับชีวมวลฟางข้าว

รูปที่ 2.1 ลักษณะการสีข้าวโพด

รูปที่ 2.2 ลักษณะของเปลือก/ซังข้าวโพด

รูปที่ 2.3 ลักษณะของฟางข้าว

รูปที่ 2.4 ลักษณะของใบอ้อย

2.2.4 คุณสมบัติที่ใช้ในการพิจารณาคุณภาพของชีวมวลและเชื้อเพลิงชีวมวล

คุณสมบัติที่จำเป็นในการพิจารณาคุณภาพของชีวมวล และเชื้อเพลิงชีวมวลทั่วๆ ไป ได้แก่ คุณสมบัติทางกายภาพ คุณสมบัติองค์ประกอบแบบประมาณ คุณสมบัติองค์ประกอบแบบแยกธาตุ และคุณสมบัติค่าความร้อน มีรายละเอียดดังนี้

2.2.4.1 คุณสมบัติทางกายภาพ

คุณสมบัติทางกายภาพ (Physical Property) ของชีวมวล และเชื้อเพลิงชีวมวล ประกอบไปด้วย ขนาด ความหนาแน่น และความชื้น โดยชีวมวล และเชื้อเพลิงชีวมวลแต่ละชนิดจะมีขนาดไม่แน่นอนขึ้นอยู่กับชนิด สายพันธุ์ วิธีการเก็บเกี่ยว และการแปรรูป การที่ชีวมวลและเชื้อเพลิงชีวมวล มีความแตกต่างไม่สม่ำเสมอกันจะเป็นอุปสรรคต่อการนำมาใช้ประโยชน์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งถ้าชีวมวล และเชื้อเพลิงชีวมวล มีขนาดใหญ่จะไม่เหมาะที่จะนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในการเผาไหม้โดยตรง เพราะประสิทธิภาพการเผาไหม้จะต่ำ ทั้งนี้ชีวมวล และเชื้อเพลิงชีวมวลที่มีขนาดใหญ่ จะมีความหนาแน่นน้อย ทำให้เสียพื้นที่ในการขนส่งและเก็บรักษา จึงควรที่จะนำมาสับ/ย่อย ลดขนาดจะทำให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้ดีขึ้น ส่วนความชื้นของชีวมวล และเชื้อเพลิงชีวมวล ก็เป็นอีกหนึ่งคุณสมบัติที่ต้องคำนึง เนื่องจากความชื้นของชีวมวล และเชื้อเพลิงชีวมวลนั้นมีผลต่อค่าความร้อน คือ ถ้าค่าความชื้นสูง ค่าความร้อนจะมีค่าต่ำ ดังนั้นการที่จะนำชีวมวล และเชื้อเพลิงชีวมวลที่มีความชื้นสูงมาใช้ จำเป็นต้องผ่านกระบวนการลดความชื้นก่อนนำไปใช้ นอกจากนี้ชีวมวล และเชื้อเพลิงชีวมวลยังเป็นวัสดุที่ยังไม่เสถียร สามารถย่อยสลายได้โดยจุลินทรีย์ที่มีอยู่ตามธรรมชาติ ซึ่งอัตราการย่อยสลายจะเหมาะสมในสภาวะที่มีความชื้น

ประมาณ 50 - 60 % (วีรชัย อาจหาญ และคณะ, 2552) ดังนั้นถ้านำชีวมวล และเชื้อเพลิงชีวมวลมากองเก็บไว้โดยไม่ผ่านกระบวนการลดความชื้นก่อนจะทำให้ชีวมวล และเชื้อเพลิงชีวมวลผุสลาย ส่งผลต่อคุณภาพความเป็นเชื้อเพลิง

2.2.4.2 คุณสมบัติองค์ประกอบแบบประมาณ

คุณสมบัติองค์ประกอบแบบประมาณ (Proximate Value) เป็นคุณสมบัติเฉพาะตัวของชีวมวล และเชื้อเพลิงชีวมวลที่แสดงถึงสัดส่วนของสารระเหย คาร์บอนคงตัว และเถ้า คุณสมบัตินี้นิยมใช้ประกอบการพิจารณาในการเลือกใช้เชื้อเพลิงของโรงงานอุตสาหกรรม (นฤภัทร ตั้งมั่นคงวรกุลม, 2557) มีรายละเอียดดังนี้

สารระเหย (Volatile Matter) คือ ปริมาณสารที่ระเหยออกจากชีวมวล และเชื้อเพลิงชีวมวล ที่อุณหภูมิ 950 °C เป็นเวลา 7 min ซึ่งปริมาณสารระเหย สามารถนำมาเป็นข้อมูลเพื่อคาดคะเนองค์ประกอบอื่นๆ ของเชื้อเพลิงได้ เช่น ถ้ามีปริมาณสารระเหยสูงก็มีแนวโน้มที่ชีวมวล และเชื้อเพลิงชีวมวลจะมีค่าความร้อนสูง แต่ปริมาณของคาร์บอนคงตัวจะต่ำ เป็นต้น

เถ้า (Ash) คือ ปริมาณสาร หรือของแข็งที่เหลืออยู่ในชีวมวล และเชื้อเพลิงชีวมวลภายหลังการเผาที่อุณหภูมิ 750 °C เป็นเวลาอย่างน้อย 4 h ซึ่ง สามารถนำมาเป็นข้อมูลเพื่อคาดคะเนค่าความร้อนของเชื้อเพลิงได้ คือ ถ้ามีเถ้าสูงก็มีแนวโน้มที่ชีวมวล และเชื้อเพลิงชีวมวลจะมีค่าความร้อนต่ำ

คาร์บอนคงตัว (Fixed Carbon) คือ ปริมาณองค์ประกอบคาร์บอนที่มีอยู่ในชีวมวล และเชื้อเพลิงชีวมวล ซึ่งปริมาณคาร์บอนคงตัวในชีวมวล และเชื้อเพลิงชีวมวล สามารถนำมาเป็นข้อมูลเพื่อคาดคะเนองค์ประกอบอื่นๆ ของเชื้อเพลิงได้เช่นเดียวกัน เช่น ถ้ามีคาร์บอนคงตัวสูงก็มีแนวโน้มที่จะให้ผลผลิตของถ่านชาร์สูง เป็นต้น

2.2.4.3 คุณสมบัติองค์ประกอบแบบแยกธาตุ

คุณสมบัติองค์ประกอบแบบแยกธาตุ (Ultimate Value) เป็นคุณสมบัติที่แสดงถึงธาตุองค์ประกอบของชีวมวล และเชื้อเพลิงชีวมวล อันประกอบไปด้วย คาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน ไนโตรเจน และซัลเฟอร์ ซึ่งองค์ประกอบของธาตุต่างๆ จะมีความแตกต่างกันโดยขึ้นอยู่กับชนิด และสายพันธุ์ของชีวมวล ทั้งนี้ธาตุองค์ประกอบที่สำคัญ ที่มีผลต่อค่าความร้อนคือ คาร์บอนและไฮโดรเจน เนื่องจากคาร์บอน และไฮโดรเจน เป็นตัวทำปฏิกิริยากับออกซิเจนแล้วเกิดเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ และพลังงานในกระบวนการเผาไหม้แบบสมบูรณ์ อย่างไรก็ตามหากมีปริมาณไฮโดรเจนมากในปฏิกิริยาการเผาไหม้แบบสมบูรณ์ จะเกิดน้ำมากเช่นกันซึ่งเป็นผลทำให้น้ำส่วนนี้ดูดซับพลังงานไว้บางส่วน พลังงานที่ระบบปลดปล่อยออกมาจึงลดลง (สุนี ลาวัณยากุล และศิริวรรณ ศิลป์สกุลสุขม, ม.ป.ป.)

2.2.4.4 คุณสมบัติค่าความร้อน

คุณสมบัติค่าความร้อน (Heating Value) ของชีวมวล และเชื้อเพลิงชีวมวล แสดงถึงปริมาณพลังงานที่ถูกปลดปล่อยออกมาขณะเผาไหม้ของเชื้อเพลิงต่อหน่วยน้ำหนักในรูปของความร้อนซึ่งค่าความร้อนของเชื้อเพลิงชีวมวลแต่ละชนิดจะมีค่าแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติและประสิทธิภาพการเปลี่ยนคาร์บอน และไฮโดรเจนในชีวมวล และเชื้อเพลิงชีวมวลไปเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำ

ค่าความร้อนสูง (High Heating Value; HHV) หมายถึง พลังงานความร้อนที่ปลดปล่อยออกมาจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงแบบสมบูรณ์ (Gross Calorific Value) โดยเริ่มจากเชื้อเพลิงมีอุณหภูมิ 25 °C และผลิตภัณฑ์สุดท้ายมีอุณหภูมิ 25 °C ซึ่งเป็นพลังงานความร้อนที่รวมถึงพลังงานความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอของน้ำ (Latent Heat of Vaporization) ส่วนค่าความร้อนต่ำ (Low Heating Value; LHV) หมายถึง พลังงานความร้อนสุทธิที่ปลดปล่อยออกมาจากการเผาไหม้แบบสมบูรณ์ของเชื้อเพลิง (Net Calorific Value) โดยเริ่มจากเชื้อเพลิงมีอุณหภูมิ 25 °C และผลิตภัณฑ์สุดท้ายมีอุณหภูมิ 25 °C ซึ่งไม่รวมถึงพลังงานที่ได้จากการควบแน่น (Condensate) ไอน้ำมาใช้งาน โดยปกติค่าความร้อนใช้งานของเชื้อเพลิง จะไม่รวมถึงพลังงานที่ได้จากการควบแน่นดังกล่าวนี้ด้วย (สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย, 2555)

2.3 เทคโนโลยีการแปรรูปชีวมวล

เทคโนโลยีการแปรรูปชีวมวลที่เกี่ยวข้องกับการวิจัยนี้ ได้แก่ การลดความชื้น การสับ/ย่อยลดขนาด และการอัดเม็ด โดยขั้นตอนดังกล่าวเป็นการแปรรูปชีวมวลให้เป็นเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดเพื่อนำไปผลิตเป็นเชื้อเพลิงคุณภาพสูงหรือเชื้อเพลิงทอริไฟด์ต่อไป มีรายละเอียดดังนี้

2.3.1 การลดความชื้น

การลดความชื้นเป็นขั้นตอนหนึ่งในการบริหารจัดการเชื้อเพลิงชีวมวล เนื่องจากชีวมวลส่วนใหญ่ที่ทำการเก็บรวบรวม และแปรรูปโดยการสับ/ย่อย ลดขนาดจากพื้นที่ไร่ นา สวนเกษตร มีความชื้นค่อนข้างสูง ซึ่งความชื้นมีความสัมพันธ์กับค่าความร้อนของเชื้อเพลิงชีวมวลโดยตรงกล่าวคือ ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงมีแนวโน้มน้อยลงเมื่อเชื้อเพลิงชีวมวลมีความชื้นสูง และเชื้อเพลิงที่มีความชื้นสูงจะมีแนวโน้มเสื่อมคุณภาพถูกทำให้ย่อยสลายได้โดยเชื้อรา และเชื้อจุลินทรีย์ ทำให้ระยะเวลาการเก็บรักษาที่จะคงสภาพเชื้อเพลิงชีวมวลสั้นลง ส่งผลต่อการวางแผนการจัดการเชื้อเพลิงชีวมวลของโรงงานอุตสาหกรรม และโรงไฟฟ้าเป็นอย่างยิ่ง (วีรชัย อาจหาญ และคณะ, 2552)

การลดความชื้น มีหลายวิธีแต่วิธีที่นิยมใช้กับวัสดุทางการเกษตรหรือเชื้อเพลิงชีวมวลจะใช้วิธีการอบแห้ง ซึ่งการอบแห้งเป็นกระบวนการถ่ายเทความร้อน โดยทั่วไปจะอาศัยความร้อนจากภายนอกถ่ายเทความร้อนเข้าสู่วัสดุที่ต้องการ ความร้อนที่ถ่ายเทเข้าไปจะทำให้ความชื้นของวัสดุที่อยู่ที่ผิว และเนื้อวัสดุระเหยออกมา ความชื้น (Moisture Content) สามารถระบุได้ทั้งเป็น ความชื้นเปียก (Wet Basis; %wb) และความชื้นแห้ง (Dry Basis; %db) ซึ่งใช้ฐานในการเปรียบเทียบแตกต่างกัน Wet Basis หมายถึงการเทียบปริมาณความชื้นกับน้ำหนักรวมของวัสดุ ส่วน Dry Basis หมายถึงการเทียบปริมาณความชื้นกับน้ำหนักแห้งของวัสดุ

ตัวแปรสำคัญ ที่มีผลต่อพลังงานที่ใช้ในการอบแห้ง คือ สมบัติ และประเภทของความชื้น โดยปกติความชื้นที่อยู่ในวัสดุจะประกอบไปด้วย ความชื้นรอบผิว และความชื้นในเนื้อวัสดุ ซึ่งความชื้นรอบผิวจะเป็นความชื้นที่ถูกดึงออกไปได้ง่าย นอกจากนี้ ยังมีความชื้นของบรรยากาศ (Relative Humidity) ซึ่งมีผลทำให้ระยะเวลาในการอบแห้งนานขึ้นอีกด้วย โดยปกติในการอบแห้งวัสดุใดๆ ความชื้นสุดท้ายของวัสดุที่ยังคงเหลืออยู่ในเนื้อวัสดุจะสมดุลกับความชื้นอากาศที่ใช้อบ โดยที่ความชื้นในวัสดุดังกล่าวจะไม่ลดต่ำกว่านี้อีกแม้ว่าจะใช้เวลานานเท่าใดก็ตาม เราเรียกความชื้น ณ จุดนี้ว่า ค่าความชื้นสมดุล (วิเชียร ดวงสีเสน, 2555)

องค์ประกอบของการอบแห้งจะประกอบไปด้วย แหล่งพลังงานความร้อน พัดลมในการพาความร้อน และถังอบวัสดุ ซึ่งในส่วนของการเลือกใช้หรือการออกแบบเครื่องอบแห้งจะต้องพิจารณาถึงวัสดุที่ต้องการนำมาอบแห้ง โดยเครื่องอบแห้งที่นิยมใช้กับเชื้อเพลิงชีวมวล มีอยู่หลายประเภทจำแนกตามวิธีการ และชนิดของถังอบแห้ง ดังนี้

1) เครื่องอบแห้งแบบโรตารี่ (Rotary Dryer)

เครื่องอบแห้งชนิดนี้มีหลายชนิด แต่นิยมใช้สำหรับอบแห้งเชื้อเพลิงชีวมวล จะมีลักษณะเป็นแบบช่องเดียวที่รับสัมผัสความร้อนโดยตรง ดังแสดงในรูปที่ 2.5 โดยหลักการทำงานจะใช้ลมร้อนสัมผัสกับวัสดุอบโดยตรงภายในตัวถังที่หมุน การหมุนของตัวถังทรงกระบอกจะอาศัยใบพาช่วยโรยวัสดุอบผ่านอากาศร้อนเพื่อเพิ่มอุณหภูมิ และเพิ่มอัตราการลดความชื้น ท่อลมร้อนจะต่อตรงเข้าไปในเครื่องอบแห้งโดยตรง และอีกด้านหนึ่งจะติดตั้งหัวเผาหรือเครื่องทำความร้อน วัสดุอบ และลมร้อนจะไหลขนานกัน โดยลมร้อนที่สุดจะสัมผัสกับวัสดุอบที่มีความชื้นสูงที่สุด แต่สำหรับวัสดุที่อุณหภูมิไม่มีผลกับวัสดุ ลมร้อนกับวัสดุจะไหลในทิศสวนทางกัน คือ วัสดุอบที่แห้งที่สุดจะปะทะลมร้อนที่ร้อนที่สุด และมีความชื้นสัมผัสน้อยที่สุด ในสุดท้ายวัสดุอบที่มีความชื้นน้อยก็จะออกจากเครื่องอบแห้ง แต่อาจจะมีการลุกไหม้เกิดขึ้น หากวัสดุอบที่แห้งแล้วเจอกับลมร้อนที่อุณหภูมิสูง เครื่องอบแห้งชนิดนี้เหมาะสำหรับวัสดุที่มีความหนาแน่นปานกลาง (Zhou, 2011)

2) เครื่องอบแห้งแบบพาหะลม (Flash Dryers)

เครื่องอบแห้งชนิดนี้มีหลักการทำงาน คือ วัสดุอบจะถูกผสมกับลมร้อนที่มีความเร็วสูง ดังแสดงในรูปที่ 2.6 การสัมผัสกันอย่างใกล้ชิดกันของวัสดุอบกับลมร้อนจะทำให้เกิดการลดความชื้นอย่างรวดเร็ว วัสดุอบ และลมร้อนจะถูกแยกออกโดยใช้ไซโคลน ในกรณีต้องการปล่อยลมร้อนออกสู่บรรยากาศอาจจะต้องทำการดักฝุ่นละเอียดออกอีกครั้ง ข้อดีของเครื่องอบแห้งแบบพาหะลม คือ ระยะเวลาในการอบแห้งสั้น ขนาดเล็กเมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องอบแห้งแบบโรตารี่ อย่างไรก็ตามอัตราการสิ้นเปลืองไฟฟ้าจะสูง เพราะใช้ปริมาณลมร้อนที่สูงกว่า นอกจากนี้ยังมีขีดจำกัด คือ วัสดุอบจะต้องมีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา หรือความหนาแน่นต่ำ และสามารถลอยตัวในอากาศได้ เครื่องอบประเภทนี้เหมาะสำหรับใช้ในการอบแห้งวัสดุที่ผ่านการสับ/ย่อย ลดขนาดแล้ว (Zhou, 2011)

3) เครื่องอบแห้งแบบจาน (Disk Dryers)

เครื่องอบชนิดนี้เหมาะสำหรับวัสดุอบที่มีการเคลื่อนตัวต่ำ ภายในเครื่องอบ วัสดุอบจะถูกทำให้ร้อนโดยไอน้ำจะเข้าไปในเพลากลางดังแสดงในรูปที่ 2.7 ซึ่งมีจานที่มีรูติดอยู่เพื่อเพิ่มพื้นที่ในการถ่ายเทความร้อน โดยมีส่วนที่ยื่นออกมา เพื่อช่วยผสมวัสดุ และช่วยเก็บสะสมความร้อน เครื่องอบแห้งแบบนี้สามารถใช้งานได้ในสภาวะสุญญากาศ หรือแรงดันต่ำได้ ส่วนไอน้ำที่ควบแน่นจากการอบสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ เครื่องอบแห้งชนิดนี้เหมาะสำหรับอบแห้งวัสดุที่มีลักษณะเป็นโคลน (waterleau, www, 2016)

4) เครื่องอบแห้งแบบโรยตัว (Cascade Dryers)

เครื่องอบแห้งชนิดนี้ โดยทั่วไปจะใช้ในการอบแห้งเมล็ดพืช ดังแสดงในรูปที่ 2.8 แต่เราสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับวัสดุอบที่เป็นเชื้อเพลิงชีวมวลได้ หลักการทำงาน คือ วัสดุอบจะถูกนำเข้าสู่ถัง และถูกโรยตัวเข้าไปในห้องอบ และลอยตัวโดยลมร้อน หมุนเวียนในห้องอบแห้ง เมื่อความชื้นลดลงจะทำให้น้ำหนักวัสดุอบเบาลงจะถูกเป่า ให้เคลื่อนที่ออกไปทางด้านช่องเปิดด้านข้างของถัง โดยทั่วไปวัสดุจะใช้เวลาอยู่ในถังอบประมาณ 2 min เครื่องอบแห้งแบบโรยตัวนี้ เหมาะสำหรับวัสดุอบที่มีน้ำหนักเบา และสามารถลอยตัวในอากาศได้ เหมือนกับเครื่องอบแบบพาหะลม (Zhou, 2011)

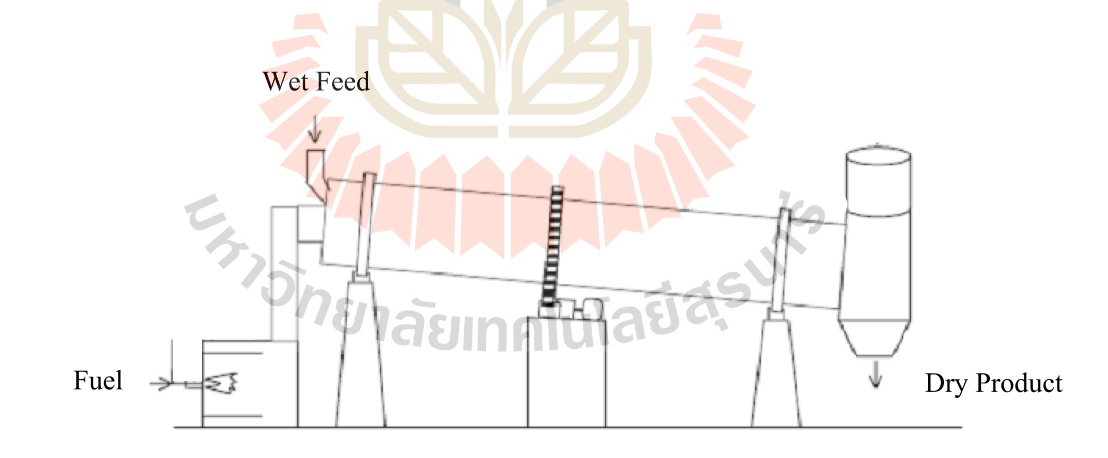
5) เครื่องอบแห้งแบบพาหะไอน้ำ (Superheat Steam Dryer)

เครื่องอบแห้งชนิดนี้จะมีลักษณะการทำงานคล้ายๆ กับเครื่องอบแห้งแบบพาหะลม แต่จะใช้ไอน้ำแทนลมร้อน ดังแสดงในรูปที่ 2.9 หลักการทำงาน คือ จะใช้ไอน้ำมาเพิ่มอุณหภูมิให้สูงกว่าอุณหภูมิไอน้ำอิ่มตัวกลายเป็นไอน้ำยิ่งยวดมาดึงความชื้นออกจากวัสดุอบ ซึ่งไอน้ำอิ่มตัวยิ่งยวดจะเปลี่ยนเป็นไอน้ำอิ่มตัว สามารถนำกลับมาใช้ในกระบวนการอบแห้งได้อีก (วีรชัย อาจหาญ และคณะ, 2552)

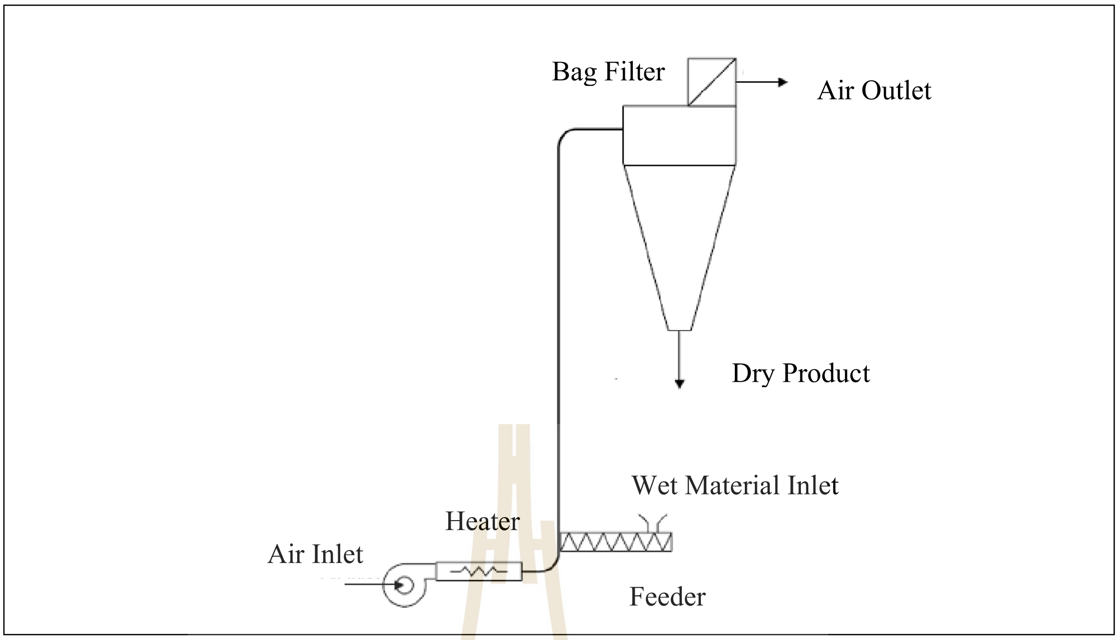
การเลือกใช้เครื่องอบแห้งในลดความชื้นชีวมวลแต่ละชนิดต้องพิจารณาถึงขนาด ความชื้น การเสี่ยงต่อประกายไฟ และต้นทุนเป็นหลัก ดังแสดงในตารางที่ 2.1 นอกจากเครื่องอบแห้งดังที่กล่าวมาแล้ว สำหรับประเทศไทยแล้ว สามารถลดความชื้นได้ด้วยแสงอาทิตย์ ซึ่งเป็นการลดความชื้นที่ใช้ต้นทุนต่ำ และมีศักยภาพสูง เหมาะสำหรับการลดความชื้นให้กับชีวมวลยกเว้นฤดูฝน

ตารางที่ 2.1 การเปรียบเทียบข้อดี - ข้อเสีย ของเครื่องอบแห้งแต่ละชนิด (วีรชัย อาจหาญ และคณะ, 2552)

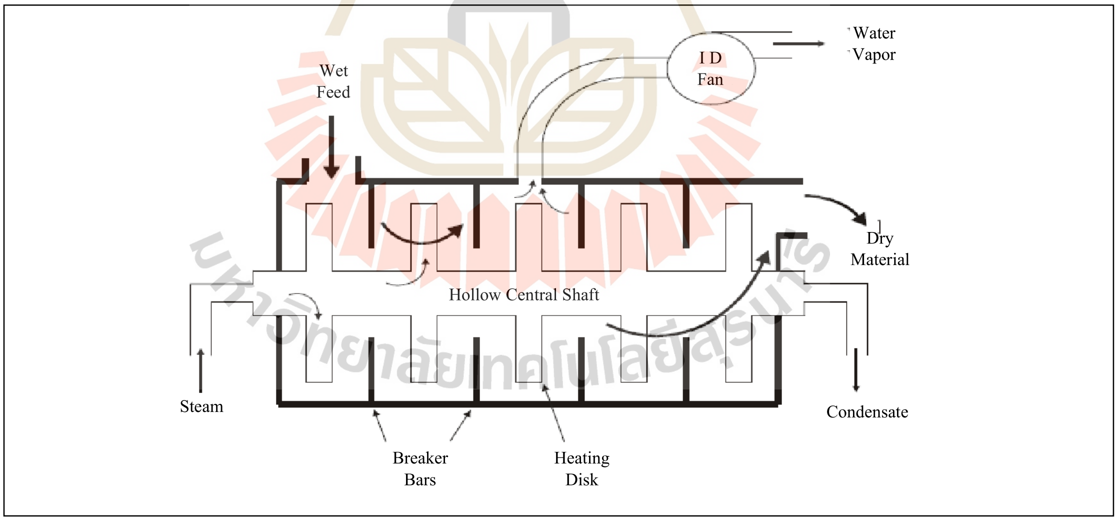
ชนิดเครื่องอบแห้ง	ต้องการวัสดุขนาดเล็ก	ต้องการขนาดวัสดุใกล้เคียงกัน	เสี่ยงต่อประกายไฟ	ต้นทุน
Rotary Dryer	ไม่	ไม่	สูง	ต่ำ
Flash Dryer	ใช่	ไม่	ปานกลาง	ปานกลาง
Disk Dryer	ไม่	ไม่	ต่ำ	สูง
Cascade Dryer	ไม่	ใช่	ปานกลาง	สูง
Superheated Steam Dryer	ใช่	ไม่	ต่ำ	สูง



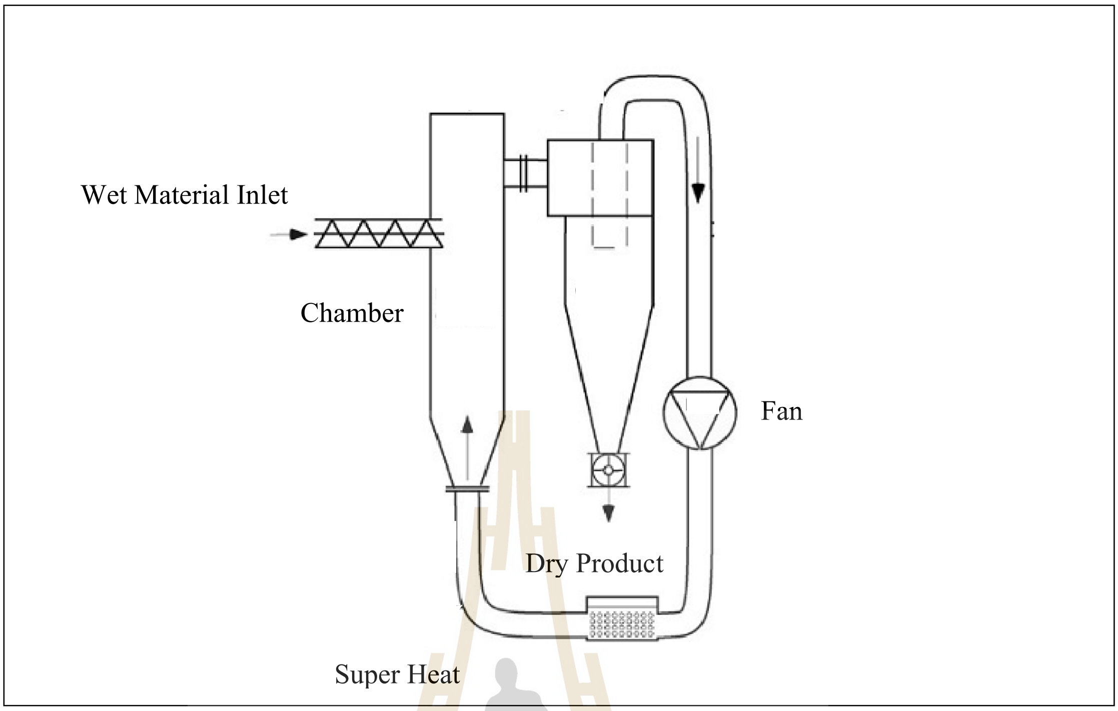
รูปที่ 2.5 เครื่องอบแห้งแบบโรตารี่ (Zhou, 2011)



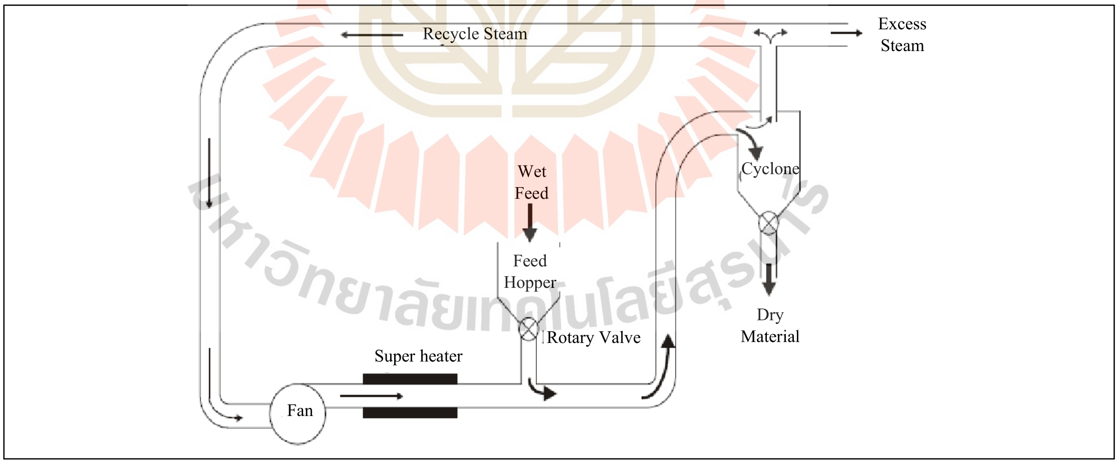
รูปที่ 2.6 เครื่องอบแห้งแบบพาหะลม (Zhou, 2011)



รูปที่ 2.7 เครื่องอบแห้งแบบจาน (waterleua, www, 2016)



รูปที่ 2.8 เครื่องอบแห้งแบบโรยตัว (Zhou, 2011)



รูปที่ 2.9 เครื่องอบแห้งแบบพาหะไอน้ำ (วีรชัย อาจหาญ และคณะ, 2555)

2.3.2 การสับ/ย่อยลดขนาด

การลดขนาดของเชื้อเพลิงชีวมวล ให้มีขนาดเล็กเป็นผงละเอียด เพื่อใช้ในการแปรรูปผลิตเป็นเชื้อเพลิงอัดแท่ง (วีรชัย อาจหาญ และคณะ, 2555) จะนิยมใช้เครื่องสับ/ย่อยลดขนาด (Hammer Mills) ดังแสดงในรูปที่ 2.10 โดยหลักการที่ใช้ในการบด/ย่อยลดขนาด ใช้แรงกระแทก (Impact Forces) และแรงเฉือน (Shearing Forces) โดยลักษณะวัสดุที่จะทำการบด/ย่อย ซึ่งจะเหมาะกับวัสดุที่แข็ง และมีความชื้นต่ำ โดยเครื่องสับ/ย่อย ลดขนาด จะทำงานที่ความเร็วสูง 1,500 - 4,000 rpm ทำการตีเชื้อเพลิงชีวมวลให้มีขนาดเล็กตามต้องการที่กำหนดโดยขนาดของรูตะแกรง ลงสู่ส่วนล่างของตัวเครื่องโดยที่ตัวใบมีดตีจะยึดติดกับแกนเพลามีทั้งแบบหมุนได้ (Swing Type) และแบบอยู่กับที่ (Fixed Type) ดังนั้นเครื่องสับ/ย่อย ลดขนาดประเภทนี้ จึงเหมาะสมกับการสับย่อยเศษวัสดุเหลือใช้จากข้าวโพด ฟางข้าว และใบอ้อย

2.3.3 การอัดเม็ด

การอัดเม็ด (Densification) เป็นการลดปริมาตร โดยการทำให้เกิดการจับตัวกันเป็นกลุ่มก้อนของชีวมวล ที่มีการกระจายตัวกันอย่างหลวมๆ การอัดเม็ดชีวมวลสามารถทำได้หลายรูปแบบ เช่น อัดเป็นเม็ด หรือเม็ดเล็กๆ (Pelleting) อัดเป็นแท่ง (Extruded Log or Briquetting) อัดเป็นลูกบาศก์ (Cubing) และอัดเป็นฟ่อน (Baling) ส่วนใหญ่การนำชีวมวลไปใช้ผลิตเป็นพลังงานนั้น จะอัดให้เป็นเม็ด หรือแท่งเล็กๆ และเป็นชิ้น ส่วนการอัดเป็นลูกบาศก์หรืออัดเป็นฟ่อนจะนิยมอัดเพื่อมีวัตถุประสงค์ในการลดพื้นที่ในการขนส่ง จากการศึกษาของ วีรชัย อาจหาญ และคณะ (2552) พบว่าแรงดันที่ใช้มีผลต่อความหนาแน่นของแท่งชีวมวล ซึ่งสามารถอัดแท่งได้ โดยทำการอัดภายใต้แรงดัน 0.2 - 5.0 MPa ซึ่งจะทำให้ช่องว่างระหว่างอนุภาคมีค่าลดลง และเมื่อเพิ่มแรงกดให้สูงมากกว่า 100 MPa จะทำให้ผนังเซลล์ของเซลลูโลสสลายตัว และจับตัวกันมีความหนาแน่นเพิ่มมากขึ้นซึ่งจะเลือกใช้ วิธีการอัดภายใต้แรงดันต่ำหรือสูงนั้นขึ้นอยู่กับชนิดของชีวมวล และลักษณะการนำไปใช้ประโยชน์

ปัจจัยที่มีผลต่อความหนาแน่นของแท่งชีวมวลขึ้นอยู่กับ 1) ประเภทของชีวมวล และ 2) เครื่องมือและอุปกรณ์การอัด สำหรับการอัดที่แรงดันสูงสุดจะได้ความหนาแน่นสูงสุดของชีวมวล คือ 1,200 - 1,400 kg/m^3 โดยวิธีการอัดที่มีความหนาแน่นสูงสุด คือ วิธีการอัดเป็นเม็ดหรือแท่งเล็กๆ (Pelleting) จะมีความหนาแน่นที่ 1,450 - 1,500 kg/m^3 และวิธีที่น้อยที่สุด คือ วิธีอัดแบบใช้สกรูอัด (วีรชัย อาจหาญ และคณะ, 2555)

ลักษณะการจับตัวกันของชีวมวลในขณะถูกอัดสามารถอธิบายได้โดยขึ้นกับระดับแรงดันที่ใช้ในการอัด และความร้อนที่ให้หรือที่เกิดขึ้นขณะทำการอัดกรณีระดับแรงดันที่ใช้สูงๆ ซึ่งเกิดความร้อน และมีผลต่อการสลายตัวขององค์ประกอบทางเคมี ที่มีอยู่ในผนังเซลล์ของชีวมวลไปเป็นตัวประสานธรรมชาติ โดยลิกนินเป็นตัวประสานธรรมชาติที่เกิดขึ้นขณะให้ความร้อน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

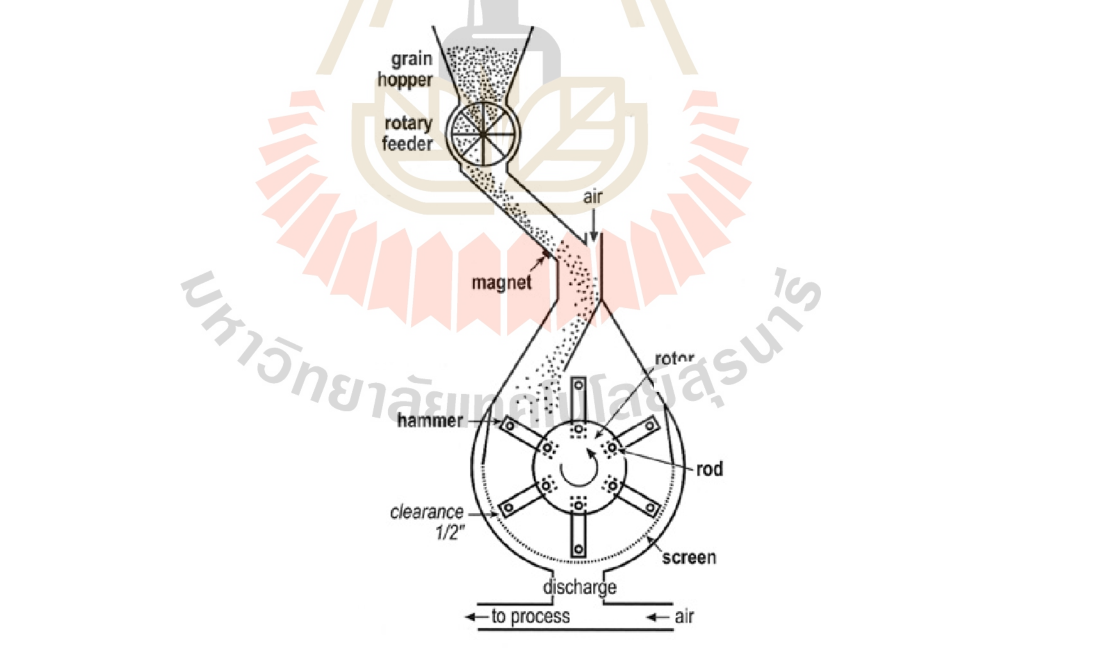
130 - 190 °C (วีรชัย อาจหาญ และคณะ 2552) ส่วนกรณีระดับแรงดันต่ำๆ จะมีการผสมตัวประสานเข้าไปในชีวมวลขณะอัด เช่น แป้งมัน และโมลาส เป็นต้น

โดยทั่วไปเครื่องอัดแท่งเชื้อเพลิงชีวมวล สามารถแบ่งออกเป็น 3 แบบ คือ

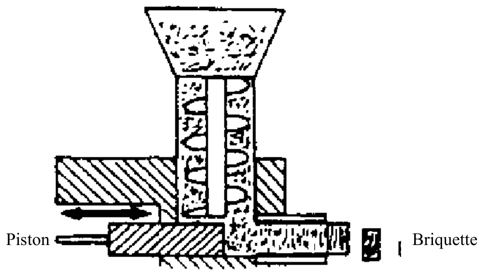
ก) เครื่องอัดแบบลูกสูบ (Piston Presses) ลูกสูบจะทำหน้าที่อัดชีวมวลเข้าสู่กระบอกอัด และถูกอัดออกมาทางหัวดาย (Die) โดยส่งกำลังด้วยฟลายวีล และคับปลิง ดังแสดงในรูปที่ 2.11

ข) เครื่องอัดแบบสกรู (Screw Presses) การลำเลียงวัสดุเข้าสู่เกลียวอัดจะทำให้วัสดุถูกกดอัดอย่างต่อเนื่องให้มีปริมาตรเล็กลงโดยใช้สกรูแบบกรวย และจะใช้แหล่งความร้อนจากภายนอกเพื่อสลายลิกนินหรือไม่ก็ได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.12

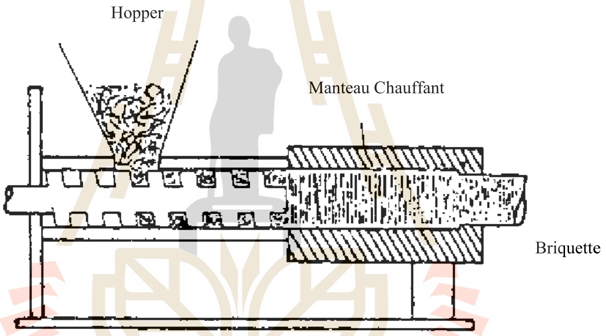
ค) เครื่องอัดแบบแท่ง (Pellet Presses) การอัดลักษณะนี้จะใช้ลูกกลิ้งหมุนกดทับวัสดุชีวมวลผ่านหน้าแปลนที่ถูกเจาะเป็นรูเล็กๆ เอาไว้ โดยวัสดุจะถูกอัดออกมาผ่านรูเหล่านั้นเมื่อลูกกลิ้งวิ่งกดทับผ่าน ซึ่งหัวดายจะมีลักษณะเป็นแผ่นจานหรือแผ่นวงแหวน ดังแสดงในรูปที่ 2.13



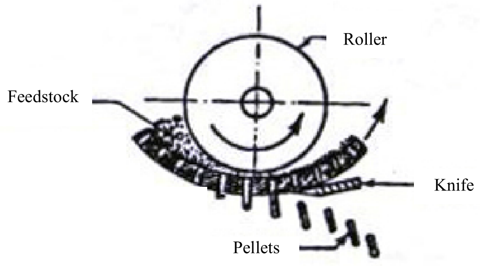
รูปที่ 2.10 เครื่องสับ/ย่อย (Hammer Mill) (Rictec, www, 2016)



รูปที่ 2.11 เครื่องอัดแบบลูกสูบ (Munson Machinery Company, www, n.d.)



รูปที่ 2.12 เครื่องอัดแบบสกรู (Munson Machinery Company, www, n.d.)



รูปที่ 2.13 เครื่องอัดแบบแท่ง (Munson Machinery Company, www, n.d.)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

2.3.4 การเก็บรักษา

การเก็บรักษาเป็นอีกขั้นตอนที่สำคัญขั้นตอนหนึ่ง เนื่องจากเชื้อเพลิงชีวมวลเป็นวัสดุที่ไม่เสถียร สามารถเปลี่ยนแปลงหรือลดคุณภาพได้ในสภาพแวดล้อมที่ไม่เหมาะสมในการเก็บรักษา ซึ่งจะถูกย่อยสลายโดยเชื้อจุลินทรีย์ และเชื้อรา ซึ่งการถูกทำลายหรือทำให้เสื่อมคุณภาพดังกล่าว ขึ้นอยู่กับชนิด สมบัติ องค์ประกอบ โครงสร้างทางเคมี และลักษณะการเก็บรักษา โดยปกติการเสื่อมสภาพของเชื้อเพลิงชีวมวล มักเกิดจากการย่อยสลายโดยเชื้อจุลินทรีย์ ดังนั้น การเก็บรักษาจึงจำเป็นที่จะต้องจำกัดการเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์

ปัจจัยที่มีผลมากต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ (วีรชัย อาจหาญ และคณะ, 2552) คือ ความชื้น และอุณหภูมิ ซึ่งมีความเกี่ยวเนื่องกัน คือ จุลินทรีย์จะสามารถเติบโตดีที่ความชื้นประมาณ 40 - 60 % ขึ้นไป และอุณหภูมิประมาณ 35 - 45 °C ซึ่งโดยปกติเมื่อจุลินทรีย์เติบโตจะปลดปล่อยพลังงานความร้อนออกมาส่งเสริมให้การเติบโตของจุลินทรีย์รวดเร็วขึ้น นอกจากนี้ การกองเชื้อเพลิงชีวมวลสูงๆ จะเสี่ยงต่อการเกิดเพลิงไหม้ เนื่องจากจุลินทรีย์บางประเภทนั้นสามารถทำงานได้ในสภาวะไร้อากาศได้ ซึ่งใต้กองเชื้อเพลิงสูงๆ จะไม่มีอากาศ และเกิดการหมักเกิดความร้อนลอยตัวเมื่อมีออกซิเจนเพียงพอ ทำให้เกิดการจุดติดตัวเองได้ (Self - Ignition)

จากการศึกษาการกองเชื้อเพลิงชีวมวลอยู่กลางแจ้งภายนอกอาคารของ Nurmi (1999) พบว่า เมื่อระยะเวลาผ่านไป 1 สัปดาห์ เชื้อเพลิงจะเริ่มมีการหมักซึ่งจะทำให้พลังงานในชีวมวลเกิดการสูญเสีย และองค์ประกอบไฮโดรคาร์บอนจะระเหยไปสู่บรรยากาศ และลงสู่พื้นดินเมื่อเวลาผ่านไป 2 - 3 เดือน ที่ทำเก็บรักษา (Rupar et al., 2005)

Wu et al. (2011) ได้ศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของ ไม้สับ ไม้อัดเม็ด และเชื้อเพลิงไม้ทอริไฟด์อัดเม็ด พบว่าคุณสมบัติ และลักษณะทางกายภาพของวัสดุชีวมวลการเก็บรักษา และการขนส่ง โดยไม้สับ ไม้อัดเม็ด และเชื้อเพลิงไม้ทอริไฟด์อัดเม็ดต้องควบคุมสภาพแวดล้อมในการเก็บรักษา ควบคุมความชื้นที่ทำการเก็บรักษา ควบคุมการระบายอากาศภายในอาคารเก็บรักษา และควบคุมอุณหภูมิที่เก็บรักษาแตกต่างกัน

2.4 เทคโนโลยีทอริแฟคชั่น

2.4.1 กระบวนการทอริแฟคชั่น

กระบวนการทอริแฟคชั่นหรือกระบวนการไพโรไลซิอ่อน (Mild Pyrolysis) ซึ่งเป็นการกำจัดน้ำ และสารระเหยบางส่วนที่เป็นองค์ประกอบหลักในชีวมวล ด้วยกรรมวิธีที่ใช้ความร้อนในการอบที่อุณหภูมิ 200 - 300 °C (อลงกต แขพรมราช ชัยณรงค์ บ้านหมู่ และเอกราช ปานอำพันธ์, 2551) ซึ่งในสภาวะที่ปราศจากออกซิเจนหรือที่เรียกว่า กระบวนการทางไพโรไลซิสนั้น จะทำให้เกิดผลิตภัณฑ์หลัก 3 ประเภท ได้แก่ เชื้อเพลิงแข็ง ที่มีลักษณะสีดำ เรียกว่า ชาร์ ส่วนที่

เป็นของเหลว เรียกว่า ทาร์ และส่วนที่เป็นแก๊ส ในขั้นตอนการใช้ความร้อนจะทำให้เกิดการสลายตัวทางเคมีของสารที่ไม่ใช่คาร์บอน เช่น ไฮโดรเจน ออกซิเจน และไนโตรเจน ออกมาในรูปของ ของเหลว และแก๊ส มีผลให้เชื้อเพลิงแข็งที่ได้มีปริมาณคาร์บอนสูงขึ้นกว่าวัตถุดิบ โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีความหนาแน่นของอนุภาคสูงขึ้น มีการจัดเรียงตัวของโครงสร้างคาร์บอนที่เป็นระเบียบมากกว่าจึงแปรสภาพง่าย หากเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงชีวมวล จะมีค่าความหนาแน่นพลังงาน และค่าความร้อนเพิ่มขึ้น (Arias et al., 2008; Bergman and Kiel, 2005; Zanzi1 et al., 2004)

กระบวนการทอริแฟคชั่นสามารถแบ่งตามช่วงอุณหภูมิของการเกิดปฏิกิริยา (Sule., 2012) ออกเป็น 5 ขั้นตอน ดังแสดงในรูปที่ 2.14 มีรายละเอียดดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 ชีวมวลจะเริ่มได้รับความร้อนช่วงนี้ (t_h) ความชื้นจะลดลงจากการระเหยของโมเลกุลน้ำอิสระในชีวมวล

ขั้นตอนที่ 2 ก่อนอบแห้งอัตราการลดลงของความชื้นในชีวมวลเริ่มคงที่ (t_{dry})

ขั้นตอนที่ 3 หลังอบแห้งเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจนถึง 200 °C ในช่วงนี้จะมีการปลดปล่อยโมเลกุลของน้ำซึ่งจับอยู่ในโครงสร้างโมเลกุลของชีวมวลหลังจากช่วงนี้จะได้ชีวมวลที่แห้ง ($t_{h,int}$)

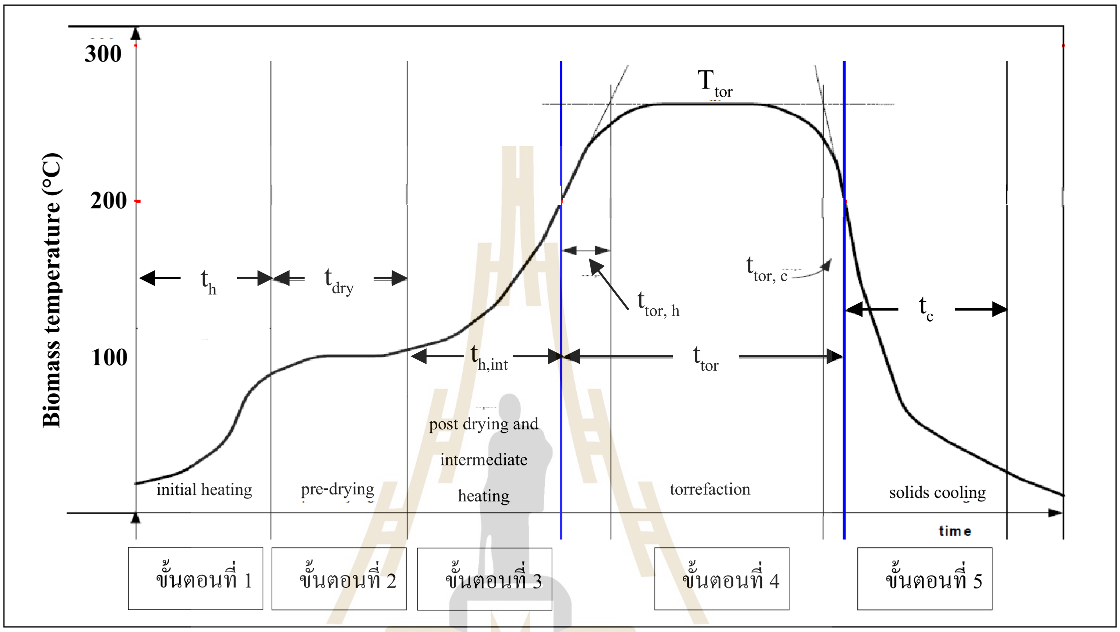
ขั้นตอนที่ 4 ทอริแฟคชั่นจะเกิดขึ้นในขั้นตอนนี้อยู่ในช่วงอุณหภูมิเกิน 200 °C ซึ่งจะประกอบ ด้วยช่วงได้รับความร้อน ($t_{tor,h}$) ช่วงอุณหภูมิคงที่ (t_{tor}) และช่วงเย็นตัว ($t_{tor,c}$) โดยการระเหยของสารระเหยจะเกิดขึ้นในช่วงได้รับความร้อน และช่วงอุณหภูมิคงที่ โดยจะหยุดการปลด ปล่อยสารระเหยในระหว่างช่วงเย็นตัวหรืออาจหยุดหลังช่วงเย็นตัว

ขั้นตอนที่ 5 ผลิตภัณฑ์ของแข็งเย็นตัว (t_c) จะเย็นตัวจนกระทั่งถึงอุณหภูมิ 200 °C และลดลงจนถึงอุณหภูมิห้องโดยไม่มีการปลดปล่อยสารระเหย แต่มีการระเหยสารระเหยซึ่งผลิตภัณฑ์ของแข็งอาจดูดซับไว้

2.4.2 ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการทอริแฟคชั่น

ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการทอริแฟคชั่น คือ อุณหภูมิ และเวลาที่ใช้ในกระบวนการทอริแฟคชั่น (อลงกต แขพรมราช ชัยณรงค์ บ้านหมู่ และเอกราช ปานอำพันธ์, 2551) โดย Bergman and Kiel (2005) ได้ทำการศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิที่มีต่อเชื้อเพลิงอัดแท่ง (Briquettes) พบว่าเมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิของกระบวนการจาก 220 °C ไปจนถึง 270 °C จะส่งผลให้เชื้อเพลิงมีค่าความร้อนเพิ่มขึ้น 10 % สารระเหยลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น คาร์บอนคงตัวเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ มวล และพลังงานของเชื้อเพลิงที่เหลือเมื่อผ่านกระบวนการจะลดลงอย่างต่อเนื่องตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ และจากการศึกษาของ Felfli (2005)

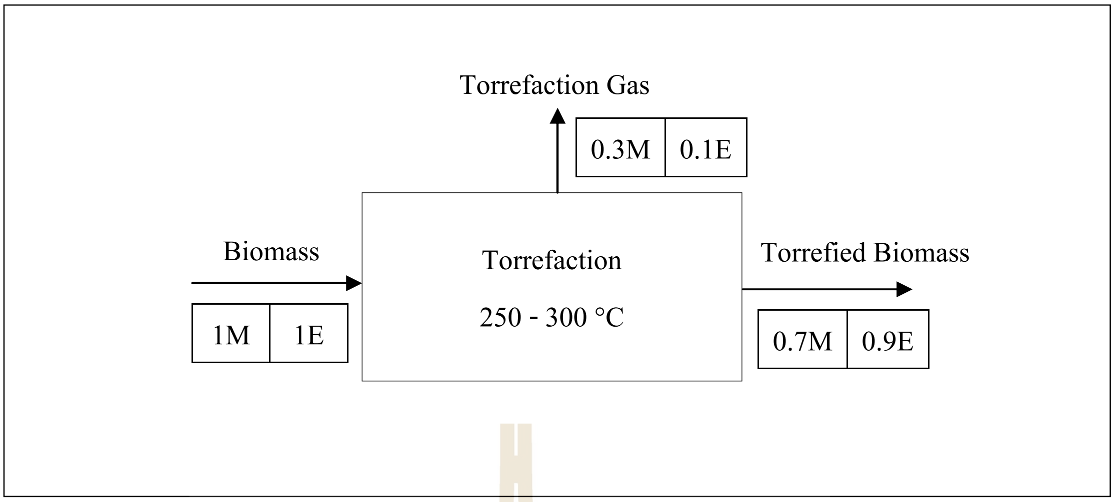
ที่นำไม้อัดแท่งมาผ่านกระบวนการทอริแฟคชั่นที่อุณหภูมิ 220 250 และ 270 °C พบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มจาก 220 - 270 °C ค่าความร้อนเพิ่มขึ้นประมาณ 10 % แต่ในทางกลับกัน เมื่อเพิ่มเวลาของกระบวนการ จาก 0.5 เป็น 1.5 h ค่าความร้อนเพิ่มขึ้นเพียง 4 % เท่านั้น แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิจะส่งผลต่อเชื้อเพลิงมากกว่าการเพิ่มขึ้นของเวลา



รูปที่ 2.14 กระบวนการทอริแฟคชั่น (Sule, 2012)

2.4.3 สมดุลมวลและพลังงาน

จากรูปที่ 2.15 แสดงตัวอย่างแผนผังสมดุลมวล และพลังงานของกระบวนการทอริแฟคชั่น ซึ่งในกระบวนการทอริแฟคชั่นนั้น เกิดการสูญเสียมวลของชีวมวลเนื่องจากการหายไปของความชื้น และการระเหยของไฮโดรคาร์บอน และก๊าซบางส่วน จากตัวอย่างในรูปที่ 2.15 เชื้อเพลิงชีวมวลก่อนผ่านกระบวนการทอริแฟคชั่น 1 M และขณะผ่านกระบวนการสารระเหยจะถูกปล่อยออก 0.3 M เหลือเป็นเชื้อเพลิงทอริแฟคชั่นในรูปของแข็ง 0.7 M ส่วนปริมาณพลังงานของเชื้อเพลิงชีวมวล 1 E สารระเหยออกไป 10 % ของพลังงานคิดเป็น 0.1 E พลังงานที่เหลือ 90 % คิดเป็นของพลังงาน 0.9 E ดังนั้น ความหนาแน่นของพลังงานชีวมวล จึงมีค่าเพิ่มขึ้น 30 % ซึ่งมีค่าสูงกว่าค่าเริ่มต้น ซึ่งกระบวนการทอริแฟคชั่นจะมีความแตกต่างจากกระบวนการไพโรไลซิส คือ กระบวนการไพโรไลซิสจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูง และมีผลผลิตพลังงานลดลงมากกว่ากระบวนการทอริแฟคชั่น ผลผลิตพลังงานประมาณ 55 - 65 % หรือลดลง 20 % ของพลังงานเดิม (Bergman et al., 2005)



รูปที่ 2.15 ตัวอย่างสมดุลมวลและพลังงานของกระบวนการทอริแฟคชั่น (Bergman et al., 2005)

2.4.4 คุณสมบัติของเชื้อเพลิงทอริไฟด์

ชีวมวลหรือเชื้อเพลิงที่ผ่านกระบวนการทอริแฟคชั่น เรียกว่า เชื้อเพลิงทอริไฟด์ จะมีคุณสมบัติที่สำคัญ ได้แก่ ค่าความชื้นต่ำกว่า 3 % (Lipinsky et al., 2002) สารระเหยลดลง 13 - 21 % (Kleinschmidit, 2011) คาร์บอนคงตัวเพิ่มขึ้นมากกว่า 15 % (Jaya et al., 2010) อัตราส่วนออกซิเจนต่อคาร์บอนลดลงเมื่อเทียบกับชีวมวล (Prins et al., 2006) ค่าความร้อนสูงขึ้นเมื่อเทียบกับชีวมวลและน้ำหนักลดลงเหลือ 70 - 80 % ของน้ำหนักเดิม (Tumuluru et al., 2011) ซึ่งคุณสมบัติของเชื้อเพลิงทอริไฟด์นี้จะนำไปใช้ในการเลือกสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตเชื้อเพลิงคุณภาพสูง (เชื้อเพลิงทอริไฟด์) จากเปลือก/ซังข้าวโพดอัดเม็ด ฟางข้าวอัดเม็ด และใบอ้อยอัดเม็ด ในงานวิจัยนี้ต่อไป

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

กฤษกร รับสมบัติ และคณะ (2555) ได้ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง เปลือกไม้ยูคาลิปตัสด้วยการเพิ่มความหนาแน่นของวัสดุชีวมวล พบว่าการเพิ่มความหนาแน่น เปลือกไม้ยูคาลิปตัส โดยการอัดเม็ดสามารถเพิ่มค่าความหนาแน่นขึ้น 6 เท่าตัว ส่งผลให้ค่าความหนาแน่นพลังงานเพิ่มขึ้นเป็น 6 เท่าตัวเช่นเดียวกัน

พงษ์ศักดิ์ เฮงนิรันด์ และ ไตรรัตน์ เนียมสุวรรณ (2011) ได้ทำการศึกษาเทคโนโลยีและโอกาสทางการตลาดของเชื้อเพลิงทอริไฟด์ไม้ พบว่าเชื้อเพลิงทอริไฟด์ไม้ มีคุณสมบัติการเผาไหม้ที่ดี ติดไฟง่าย สามารถนำมาทดแทนการใช้ถ่านหินเพื่อใช้ผลิตเป็นความร้อน และผลิตไฟฟ้าได้ และเชื้อเพลิงทอริไฟด์ไม้ ยังมีค่าความหนาแน่นพลังงานเพิ่มขึ้นจากไม้ จึงลดค่าใช้จ่ายในการขนส่งได้

Jaya et al. (2010) ได้ทำการทบทวนเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการผลิตเชื้อเพลิงทอริไฟด์ด้วยกระบวนการทอริแฟคชั่น โดยสรุปผลการศึกษาว่า กระบวนการทอริแฟคชั่นนั้น เป็นปฏิกิริยาของกระบวนการไพโรไลซิสแบบอ่อนที่อุณหภูมิ 200 - 300 °C ในสภาวะเฉื่อย ซึ่งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในกระบวนการทอริแฟคชั่น คือ Devolatilization Depolymerization และ Carbonization ของเฮมิเซลลูโลส และเซลลูโลส เชื้อเพลิงทอริไฟด์ที่ได้จะเป็นของแข็งสีดำ ผลผลิตมวล 70 % คาร์บอนคงตัวเพิ่มขึ้น 15 % ความชื้นมีค่าน้อยกว่า 3 % และค่าความร้อนเพิ่มขึ้น 25 % สอดคล้องกับงานวิจัยของ China et al. (2013) ที่ทำการศึกษาการผลิตเชื้อเพลิงทอริไฟด์ต้นปาล์มน้ำมันด้วยกระบวนการทอริแฟคชั่นที่อุณหภูมิ 200 250 และ300 °C เวลา 15 30 และ 45 min พบว่าเชื้อเพลิงทอริไฟด์ต้นปาล์มน้ำมันที่อุณหภูมิ และเวลาต่างๆ มีค่าความร้อนเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับต้นปาล์มน้ำมันก่อนผ่านกระบวนการทอริแฟคชั่น

Kim et al. (2012) ได้ทำการศึกษาไม้ Yellow Poplar ที่ผ่านกระบวนการทอริแฟคชั่น โดยใช้ตัวอย่างที่มีขนาด 3 - 10 mm และ 10 - 30 mm ที่ความชื้น 10 % จำนวน 500 g ต่อหนึ่งการทดลอง ที่อุณหภูมิ 240 260 และ 280 °C ที่เวลา 30 min อัตราการป้อนไนโตรเจน 2 L/min พบว่าเชื้อเพลิงทอริไฟด์ไม้ Yellow Poplar มีค่าขององค์ประกอบธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน มีค่าอยู่ในช่วง 49.5 - 54.4 % 6.1 - 5.7 % และ 28.7 - 26.6 % ตามลำดับ และค่าพลังงานความร้อนสูงสุด 1.2 MJ/kg ที่อุณหภูมิ 280 °C เวลา 30 min

Tumuluru et al. (2010) ทำการศึกษาค่าความชื้นของต้นข้าวโพดที่ผ่านกระบวนการทอริไฟด์พบว่าที่กระบวนการผลิตเชื้อเพลิงทอร์ไฟด์ต้นข้าวโพดที่อุณหภูมิ 300 °C เวลา 30 min เชื้อเพลิงทอร์ไฟด์ต้นข้าวโพด มีความชื้นอยู่ ระหว่าง 1 - 2 % ซึ่งมีค่าต่ำกว่าต้นข้าวโพดที่ไม่ผ่านกระบวนการฯ และเป็นค่าความชื้นสมดุลแล้ว

Couhert et al. (2009) ได้ทำการศึกษาไม้บีชที่ผ่านกระบวนการทอริแฟคชั่นที่ อุณหภูมิ 240 และ 260 °C พบว่าน้ำหนักของเชื้อเพลิงทอริไฟด์ไม้บีชลดลง 11.5 และ 21.0 % ตามลำดับ เมื่อเทียบกับไม้บีช และค่าสารระเหยลดลงจาก 84.2 % เป็น 80.6 % และ 75.7 % ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Bridgeman et al., (2007) ที่พบว่า ปริมาณสารระเหยจะลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น แต่คาร์บอนคงตัว และเถ้าจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ Couhert ยังพบอีกว่าออกซิเจนที่อยู่ในไม้บีชมีค่า 42.9 % และ 40.4 % (ก่อนผ่านกระบวนการ 44.4 %) หลังจาก

ผ่านกระบวนการทอริแฟคชั่นที่อุณหภูมิ 240 °C และ 260 °C ตามลำดับ ส่งผลให้อัตราส่วนของออกซิเจนต่อคาร์บอนมีค่าลดลงด้วยเช่นกัน

Medic et al. (2012) ได้ทำการศึกษากระบวนการทอริแฟคชั่น ซังข้าวโพด ที่ความชื้น 30 40 และ 50 % อุณหภูมิ 200 250 และ300 °C ภายใต้บรรยากาศก๊าซเฉื่อยเวลา 10 20 และ 30 min พบว่าค่าความหนาแน่นพลังงานเพิ่ม 2.0 - 19.0 % มวลของผลผลิตลดลง 45.0 % และผลผลิตพลังงานลดลง 1.0 - 35.0 %

Chen et al. (2014) ได้ทำการศึกษาการผลิตเชื้อเพลิงแกลบคุณภาพสูงด้วยกระบวนการทอริแฟคชั่น ที่อุณหภูมิ 200 230 260 และ 290 °C เวลา 30 min พบว่า อุณหภูมิ 200 °C ให้ผลผลิตมวล 97.4 % จากการระเหยของน้ำ อุณหภูมิ 230 °C ผลผลิตมวลลดลง 92.3 % ที่อุณหภูมิ 260 ถึง 290 °C ผลผลิตมวลลดลงในอัตราที่รวดเร็ว โดยอุณหภูมิ 290 °C ผลผลิตมวลลดลงเหลือเพียง 67.0 % ส่วนผลผลิตพลังงานมีแนวโน้มที่คล้ายกันกับที่ผลผลิตมวล คือ มีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ที่อุณหภูมิ 230 °C ผลผลิตพลังงานมีค่าเท่ากับ 93.9 % และอุณหภูมิ 290 °C ผลผลิตพลังงานมีค่าเท่ากับ 72.2 % เนื่องจากที่อุณหภูมิสูงกว่า 260 °C เฮมิเซลลูโลส และเซลลูโลสส่วนใหญ่ของแกลบจะถูกย่อยสลายอย่างรวดเร็ว แต่ค่าความร้อนมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย ดังนั้นผลผลิตพลังงานจึงมีค่าลดลง

Jaya et al. (2010) ได้ทำการศึกษาการผลิตเชื้อเพลิงทอริไฟด์ฟางข้าวสาลี ด้วยกระบวนการทอริแฟคชั่น ที่อุณหภูมิ 290 °C เวลา 30 min พบว่า เชื้อเพลิงทอริไฟด์ฟางข้าวสาลี มีความชื้น 0.8 % (ฟางข้าวสาลีมีความชื้น 4.7 %) องค์ประกอบธาตุคาร์บอน 54.3 % (ฟางข้าวสาลีมีองค์ประกอบธาตุคาร์บอน 48.6 %) องค์ประกอบธาตุไฮโดรเจนมีค่าลดลงจาก 6.8 % เหลือ 6.1 % และองค์ประกอบธาตุไนโตรเจนลดลงจาก 0.3 % เหลือ 0.1 % ตามลำดับ ส่งผลให้อัตราส่วนไฮโดรเจนต่อคาร์บอน และออกซิเจนต่อคาร์บอนมีค่าลดลง เช่นเดียวกันกับงานวิจัยของ Couhert (2009)

Wannapeera et al. (2012) ได้ศึกษาการผลิตเชื้อเพลิงทอริไฟด์ไม้กระถิน ด้วยกระบวนการทอริแฟคชั่น ที่อุณหภูมิ 200 - 275 °C พบว่าที่อุณหภูมิ 250 °C เวลา 15 h ผลผลิตมวลลดลงจาก 91.1 % เป็น 54.3 % อย่างมีนัยสำคัญกับการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ และเวลาที่เพิ่มขึ้น สารระเหยและออกซิเจนของเชื้อเพลิงทอริไฟด์ไม้กระถิน มีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญกับการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ และเวลา ค่าความร้อนสูงมีค่าเท่ากับ 24.4 MJ/kg ซึ่งเพิ่มขึ้น 20 % เมื่อเทียบกับไม้กระถินก่อนผ่านกระบวนการ

Van der Stelt et al. (2011) ทำการศึกษาทบทวนเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวกับเชื้อเพลิงทอริไฟด์ด้วยกระบวนการทอริแฟคชั่น สรุปไว้ดังนี้ กระบวนการทอริแฟคชั่นเป็นกระบวนการพัฒนาเชื้อเพลิงที่อุณหภูมิ 200 - 300 °C ให้เป็นเชื้อเพลิงแข็งที่มีคุณภาพสูง ในกระบวนการ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ทอริแฟคชั่นออกซิเจนจะถูกกำจัดออก เพื่อให้เชื้อเพลิงมีความหนาแน่นพลังงานเพิ่มขึ้น เชื้อเพลิงที่ผลิตได้จะมีคุณสมบัติที่สามารถเก็บรักษาได้นาน

Shang (2012) ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติค่าความร้อนของเชื้อเพลิงทอริไฟด์ฟางข้าวสาลี เชื้อเพลิงทอริไฟด์ไม้ชิฟ เชื้อเพลิงทอริไฟด์ไม้อัดเม็ด พบว่า ค่าความร้อนสูง เชื้อเพลิงทอริไฟด์ไม้ชิฟ เชื้อเพลิงทอริไฟด์ไม้อัดเม็ดมีค่าใกล้เคียงกัน และมีค่าสูงกว่าเชื้อเพลิงก่อนผ่านกระบวนการทอริแฟคชั่น แต่เชื้อเพลิงทอริไฟด์ฟางข้าวสาลีมีค่าต่ำกว่า 0.8 MJ/kg เนื่องจากฟางข้าวสาลีก่อนผ่านกระบวนการทอริแฟคชั่นมีค่าความร้อนต่ำกว่าไม้ชิฟ และไม้อัดเม็ด

Pala et al. (2014) ได้ทำการศึกษาการผลิตเชื้อเพลิงทอริไฟด์กากองุ่น ด้วยกระบวนการทอริแฟคชั่น ที่อุณหภูมิ 250 และ 300 °C ที่สภาวะบรรยากาศ โดยใช้แก๊สไนโตรเจน ผลการศึกษาพบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิปฏิกิริยาจาก 250 °C ถึง 300 °C ผลผลิตมวลลดลง 78.1 - 58.8 % โดยน้ำหนัก เพราะในช่วงอุณหภูมินี้เกิดการสลายตัวของเฮมิเซลลูโลสของกากองุ่น และคาร์บอนเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ ส่งผลให้สัดส่วนอะตอมของไฮโดรเจนต่อคาร์บอน และออกซิเจนต่อคาร์บอนลดลง เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Couhert (2009) โดยเมื่อนำสัดส่วนอะตอมของไฮโดรเจนต่อคาร์บอน และออกซิเจนต่อคาร์บอน ไปพล็อตลงใน Van Krevelen Diagram เชื้อเพลิงทอริไฟด์กากองุ่นจะมีแนวโน้มค่าดังกล่าวเข้าหาลิกไนต์

Sadaka and Negi (2009) ทำการศึกษาลักษณะการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพของเชื้อเพลิงทอริไฟด์ชีวมวลต่างๆ พบว่า เชื้อเพลิงทอริไฟด์ชีวมวลต่าง ๆ มีการเปลี่ยนแปลงค่าความชื้น ความหนาแน่น ขนาด และค่าความร้อน รวมทั้งองค์ประกอบธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน อย่างมีนัยสำคัญ เมื่อเทียบกับชีวมวลที่ยังไม่ผ่านกระบวนการทอริแฟคชั่น

Sadaka et al. (2014) ทำการศึกษาการผลิตเชื้อเพลิงทอริไฟด์หญ้าหวาน ที่อุณหภูมิ 300 และ 400 °C เวลา 3 hr พบว่าที่อุณหภูมิ 300 °C ผลผลิตมวลลดลงจาก 82.6 % เป็น 35.2 % ที่อุณหภูมิ 400 °C ผลผลิตมวลลดลงจาก 72.1 % เป็น 43.9 % ตามลำดับ แต่ค่าความร้อนและคาร์บอนคงตัวมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 17.6 MJ/kg เป็น 21.9 MJ/kg และ 22.5 % เป็น 44.9 % ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Wannapeera et al. (2012) และ China et al. (2013)

Wattananoi, Khumsak and Worasuwannarak (2011) ทำการศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพความเป็นเชื้อเพลิงของไม้ยูคาลิปตัส โดยใช้กระบวนการทอริแฟคชั่น ที่อุณหภูมิ 300 °C ในปฏิกรณ์แบบเบด ภายใต้บรรยากาศ ด้วยแก๊สไนโตรเจน แล้วนำเชื้อเพลิงทอริไฟด์ไม้ยูคาลิปตัสไปอัดเป็นเม็ด พบว่าเชื้อเพลิงทอริไฟด์ไม้ยูคาลิปตัสอัดเม็ดมีค่าความร้อนเพิ่มขึ้นถึง 21.8 % และปริมาตรความหนาแน่นพลังงานเพิ่มขึ้น 399.3 % เมื่อเทียบกับไม้ยูคาลิปตัสก่อนผ่านกระบวนการ

บทที่ 3
เครื่องมือและวิธีการดำเนินการวิจัย

3.1 ขั้นตอนการศึกษา

ในการวิจัยนี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตเชื้อเพลิงทอริไฟด์ระดับห้องปฏิบัติการ และทดลองผลิตเชื้อเพลิงทอริไฟด์ระดับต้นแบบ เพื่อเพิ่มคุณสมบัติค่าความร้อนและความหนาแน่นพลังงานของชีวมวล ในขั้นตอนการศึกษาประกอบไปด้วยขั้นตอนสำคัญดังนี้ 1) การเตรียมตัวอย่างชีวมวลอัดเม็ด 3 ชนิด ได้แก่ เปลือก/ซังข้าวโพดอัดเม็ด ฟางข้าวอัดเม็ด และใบอ้อยอัดเม็ด 2) การหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตเชื้อเพลิงทอริไฟด์ด้วยเตาปฏิกรณ์ไฟฟ้าระดับห้องปฏิบัติการ และ 3) การทดสอบ และวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตเชื้อเพลิงทอริไฟด์ระดับต้นแบบ ดังแสดงในรูปที่ 3.1

3.2 ตัวอย่างชีวมวล

ตัวอย่างชีวมวลที่ใช้ในการวิจัยนี้ เป็นชีวมวลจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร 3 ชนิด คือ เปลือก/ซังข้าวโพด ฟางข้าว และใบอ้อย ดังแสดงในรูปที่ 3.2 ซึ่งชีวมวลทั้ง 3 ชนิด ที่เก็บรวบรวมได้จากแปลงเกษตรจะยังคงมีความหนาแน่นต่ำ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงนำชีวมวลดังกล่าวมาแปรรูปเป็นเชื้อเพลิงอัดเม็ด โดยการสับ/ย่อยลดขนาด และอัดเม็ด ดังแสดงในรูปที่ 3.3 ก่อนนำไปใช้ผลิตเชื้อเพลิงทอริไฟด์ โดยมีขั้นตอน และวิธีการเตรียมตัวอย่างอัดเม็ด ดังนี้

3.2.1 ขั้นตอนและวิธีการเตรียมตัวอย่างชีวมวลอัดเม็ด

การเตรียมตัวอย่างชีวมวลอัดเม็ดประกอบไปด้วย 2 กระบวนการ คือ กระบวนการสับ/ย่อย ด้วยเครื่องสับ/ย่อยชีวมวล (Hammer Mill) และกระบวนการอัดเม็ดด้วยเครื่องอัดเม็ด (Pellet Mill) มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1) การสับ/ย่อย ลดขนาด โดยใช้เครื่องสับ/ย่อยชีวมวล (Hammer Mill) ดังแสดงในรูปที่ 3.4 มีกำลังการผลิต 360 kg/h เพื่อลดขนาดของตัวอย่างชีวมวลให้เหมาะสมกับเครื่องอัดเม็ด โดยเครื่องจักรจะทำงานที่ความเร็วสูง 1,500 - 4,000 rpm ทำการตีตัวอย่างชีวมวลจนกว่าจะได้ขนาดที่เล็กลงตามต้องการ ที่กำหนดโดยขนาดของรูตะแกรง ลงสู่ส่วนล่างของตัวเครื่อง ตัวอย่างชีวมวลที่บดละเอียดแล้วมีลักษณะเป็นชิ้นขนาดความยาวประมาณ 1.0 - 3.0 mm กว้างประมาณ 0.5 - 1.5 mm ดังแสดงในรูปที่ 3.6

2) การอัดเม็ด โดยใช้เครื่องอัดเม็ด (Pellet Mill) ดังแสดงในรูปที่ 3.5 การอัดลักษณะนี้จะใช้ลูกกลิ้งหมุนกดทับตัวอย่างชีวมวลผ่านหน้าแปลนที่ถูกเจาะเป็นรูเล็กๆ เอาไว้ โดยตัวอย่างจะถูกอัดออกมาผ่านรูเหล่านั้นเมื่อลูกกลิ้งวิ่งกดทับผ่าน ซึ่งหัวดายจะมีลักษณะเป็นแผ่นจานหรือแผ่นวงแหวน มีกำลังการผลิต 2,000 kg/h ตัวอย่างชีวมวลอัดเม็ดที่ได้มีขนาด Ø 8.0 mm ยาว 20.0 - 45.0 mm ดังแสดงในรูปที่ 3.6

3.2.2 ศึกษาคุณสมบัติของตัวอย่างชีวมวล

3.2.2.1 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพ (Physical Properties)

1) ขนาด (Size) คือ เส้นผ่านศูนย์กลาง และความยาวของชีวมวลก่อน และหลังแปรรูป การหาขนาดใช้วิธีการวัดด้วยเวอร์เนียคาลิปเปอร์ จดบันทึกผล แล้วคำนวณหาค่าเส้นผ่านศูนย์กลาง และความยาวเฉลี่ย

2) ความชื้น (Moisture) คือ เปอร์เซ็นต์ของน้ำต่อน้ำหนักวัสดุ วิธีการวิเคราะห์อ้างอิง ตามมาตรฐาน ASTM D1762 - 84 ดังแสดงในภาคผนวก ก.

3) ความหนาแน่นปกติ (Bulk Density) คือ น้ำหนักตัวอย่างชีวมวลต่อ 1 หน่วยปริมาตร วิธีการวิเคราะห์ดังแสดงในภาคผนวก ก.

3.2.2.2 การวิเคราะห์คุณสมบัติแบบประมาณ (Proximate Analysis)

เป็นคุณสมบัติเฉพาะที่แสดงถึงสัดส่วนของ ปริมาณความชื้น (Moisture Content) ปริมาณสารระเหย (Volatile Matter) ปริมาณคาร์บอนคงตัว (Fixed Carbon) และปริมาณเถ้า (Ash) โดยใช้วิธีการวิเคราะห์ตามมาตรฐาน ASTM D1762 - 84 ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่นิยมใช้ในการประกอบการพิจารณาในการเลือกใช้ตัวอย่างเชื้อเพลิงในโรงงานอุตสาหกรรม วิธีการวิเคราะห์ดังแสดงในภาคผนวก ก.

3.2.2.3 การวิเคราะห์คุณสมบัติแบบแยกธาตุ (Ultimate Analysis)

เป็นคุณสมบัติที่แสดงถึงองค์ประกอบของตัวอย่างชีวมวล ซึ่งประกอบไปด้วย คาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน และซัลเฟอร์ โดยใช้เครื่องวิเคราะห์ปริมาณธาตุ (Carbon Hydrogen Nitrogen and Sulfur Elemental Analyzer) รุ่น Analyzer CHNS - 932 ซึ่งองค์ประกอบธาตุของชีวมวลต่างๆ จะมีค่าเฉพาะที่แตกต่างกัน

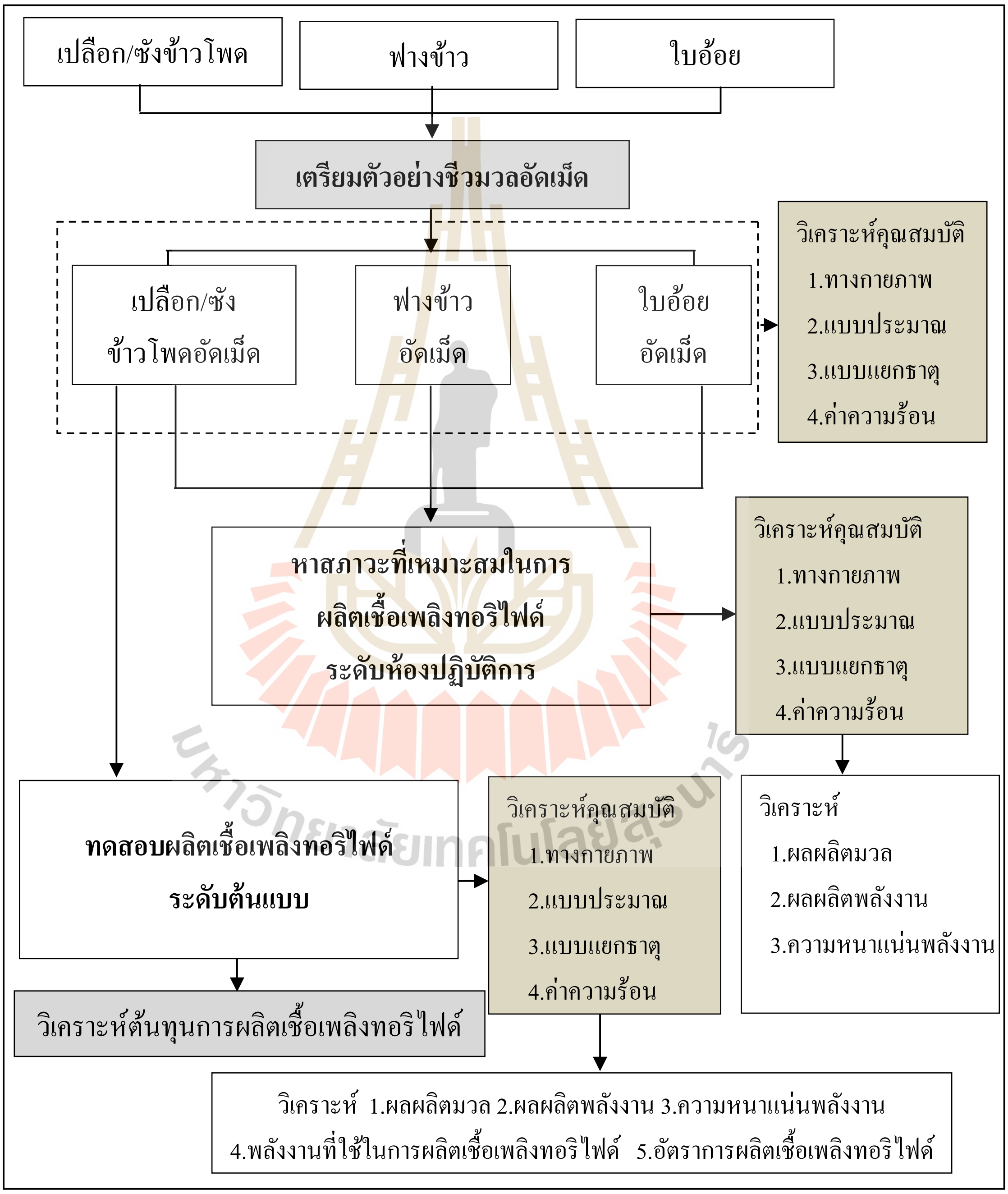
3.2.2.4 การวิเคราะห์ค่าความร้อน

เป็นคุณสมบัติที่แสดงถึงค่าพลังงานความร้อนของเชื้อเพลิงเมื่อเทียบต่อ 1 หน่วยน้ำหนัก หรือปริมาตรของเชื้อเพลิง โดยมีหน่วยเป็น kJ/kg kcal/kg Btu/lb หรือ kcal/L ค่าความร้อนจะเป็นค่าที่บ่งบอกว่าชีวมวลนั้นๆ มีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงหรือไม่ วิธีการวิเคราะห์ อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D2015

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

3.2.2.5 การวิเคราะห์คุณสมบัติการย่อยสลายทางความร้อน

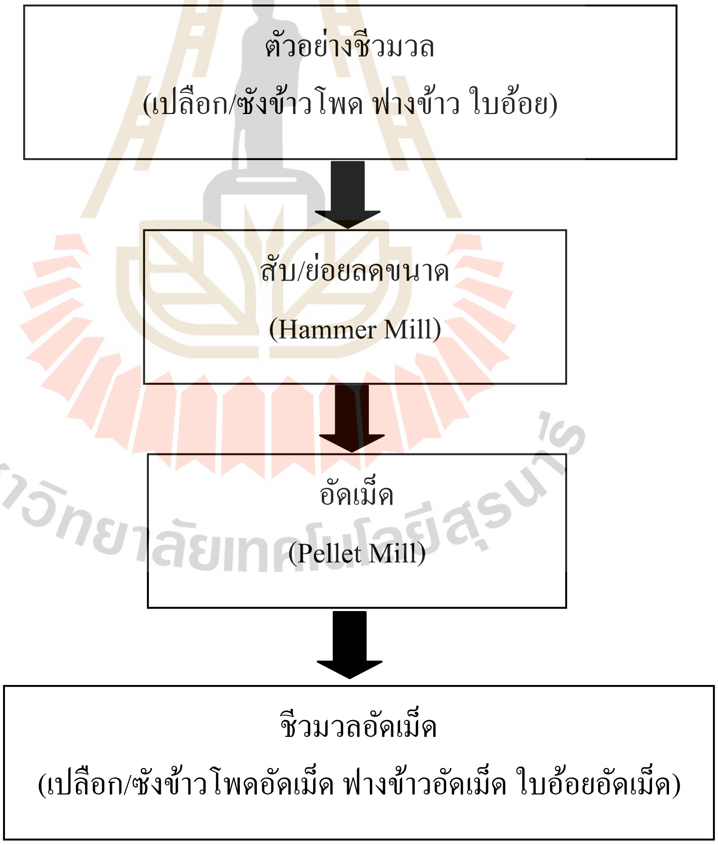
การศึกษาการย่อยสลายตัวของชีวมวลโดยการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักที่อุณหภูมิต่าง ๆ ด้วยเครื่อง Themogravimetric Analysis NETZSCH STA 449 F3 ที่อุณหภูมิห้องถึง 1,200 °C ด้วยอัตราการให้ความร้อน 10 °C/min ภายใต้อัตราการไหลไนโตรเจน



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการศึกษา

(ก) เปลือก/ซังข้าวโพด (ข) ฟางข้าว (ค) ใบอ้อย

รูปที่ 3.2 ตัวอย่างชีวมวลก่อนแปรรูป



รูปที่ 3.3 แผนผังกระบวนการแปรรูปตัวอย่างชีวมวลอัดเม็ด

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รูปที่ 3.4 เครื่องสับ/ย่อยชีวมวล (Hammer Mill)

รูปที่ 3.5 เครื่องอัดเม็ดชีวมวล (Pellet Mill)

รูปที่ 3.6 ลักษณะตัวอย่างชีวมวลตามขั้นตอนการแปรรูป

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

3.3 อุปกรณ์และเครื่องมือวัด

3.3.1 เตาปฏิกรณ์ไฟฟ้า

3.3.1.1 ส่วนประกอบของเตาปฏิกรณ์ไฟฟ้า

เตาปฏิกรณ์ไฟฟ้า (อัมรินทร์ เมฆฉาย, 2558) ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ มีส่วนประกอบสำคัญดังนี้

1) เตาปฏิกรณ์ไฟฟ้า (Tube Furnace) เป็นอุปกรณ์ที่ให้ความร้อนกับระบบทอริแฟคชั่น โดยให้ความร้อนด้วยขดลวดไฟฟ้า หุ้มด้วยฉนวนเซรามิคไฟเบอร์ ควบคุมด้วยโปรแกรมปรับค่าอุณหภูมิตามเวลา มีลักษณะเป็นทรงกล่อง พันด้วยขดลวด แล้วหุ้มด้วยฉนวน รายละเอียดดังแสดงตารางที่ 3.1 และรูปที่ 3.7

2) ท่อทดสอบ หรือห้องตัวอย่าง (Tube Chamber) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับเป็นห้องทดสอบ มีลักษณะเป็นทรงกระบอกด้านบนเป็นฝาปิดแบบประกบ ซึ่งฝาปิดด้านบนทำหน้าที่สำหรับติดตั้งอุปกรณ์วัดอุณหภูมิภายในท่อทดสอบ และใช้เป็นทางเข้า - ออก ของไนโตรเจน ส่วนภายในมีตะแกรงไว้รองรับเถ้าที่เกิดจากปฏิกิริยาทอริแฟคชั่น ดังแสดงในรูปที่ 3.8

3) เครื่องมือวัดอุณหภูมิ ประกอบไปด้วยเทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) สำหรับวัดอุณหภูมิ ในการศึกษานี้จะติดตั้ง 2 จุด คือ ภายในท่อทดสอบ และภายในเตาปฏิกรณ์ไฟฟ้าเพื่อควบคุมการทำงานของระบบ และอุปกรณ์บันทึกค่าอุณหภูมิ รายละเอียด ดังแสดงตารางที่ 3.3 และ ในรูปที่ 3.9 ก)

4) มาตรวัดอัตราการไหล (Flow Meter) สำหรับวัดอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนที่ป้อนเข้าสู่ท่อทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 3.9 ข)

3.3.1.2 หลักการทำงานของระบบเตาปฏิกรณ์ไฟฟ้า

จากรูปที่ 3.10 ตัวอย่างจะถูกบรรจุลงในท่อทดสอบ (หมายเลข 6) ติดตั้งท่อไนโตรเจน (หมายเลข 3) ติดตั้งท่อทางออกแก๊ส (หมายเลข 4) และติดตั้งอุปกรณ์วัดอุณหภูมิ (หมายเลข 1) จากนั้นนำท่อทดสอบติดตั้งในเตาปฏิกรณ์ไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 3.11 เปิดไนโตรเจนเข้าสู่ท่อทดสอบ เปิดชุดควบคุมอุณหภูมิให้อุณหภูมิที่เตาปฏิกรณ์ให้ได้อุณหภูมิที่ต้องการ และคงอุณหภูมิไว้ตามเวลา ตามสภาวะที่ใช้ในการทดสอบ หลังจากครบเวลา ปิดเตาปฏิกรณ์ รอให้อุณหภูมิตัวอย่างเย็นตัวลง นำตัวอย่างที่ผ่านการทดสอบไปชั่งน้ำหนัก และศึกษาวิเคราะห์คุณสมบัติต่อไป

ตารางที่ 3.1 รายละเอียดเตาปฏิกรณ์ไฟฟ้า

Technical Data	Specification
Dimensions	430 mm x 400 mm x 500 mm
Power	3.08 kW
Temperature	Max 1,000 °C
Heat rate	Max 100 °C/min
Insulator	เซรามิคไฟเบอร์
Control	ตู้ควบคุมพร้อมโปรแกรมการปรับค่าอุณหภูมิตามเวลา 8 ขั้นตอน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

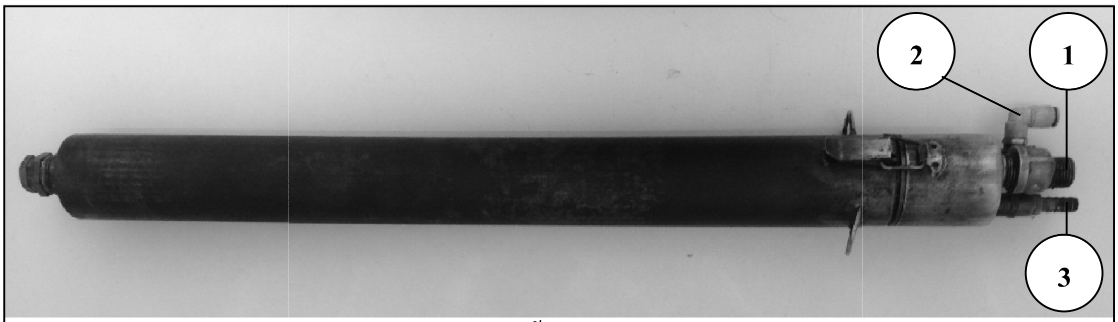
ตารางที่ 3.2 รายละเอียดท่อทดสอบ

Technical Data	Specification
Dimensions	Ø 50 mm x 620 mm
Material	Stainless Steel 253MA
Temperature	Max Load 1,100 °C

ตารางที่ 3.3 รายละเอียดเครื่องมือวัดอุณหภูมิ

Technical Data	Specification
Thermocouple	Type K
- Temperature range °C (cont.)	0 ถึง +1,100 °C
- Temperature range °C (short term)	-180 ถึง +1,300 °C

รูปที่ 3.7 เตาปฏิกรณ์ไฟฟ้า



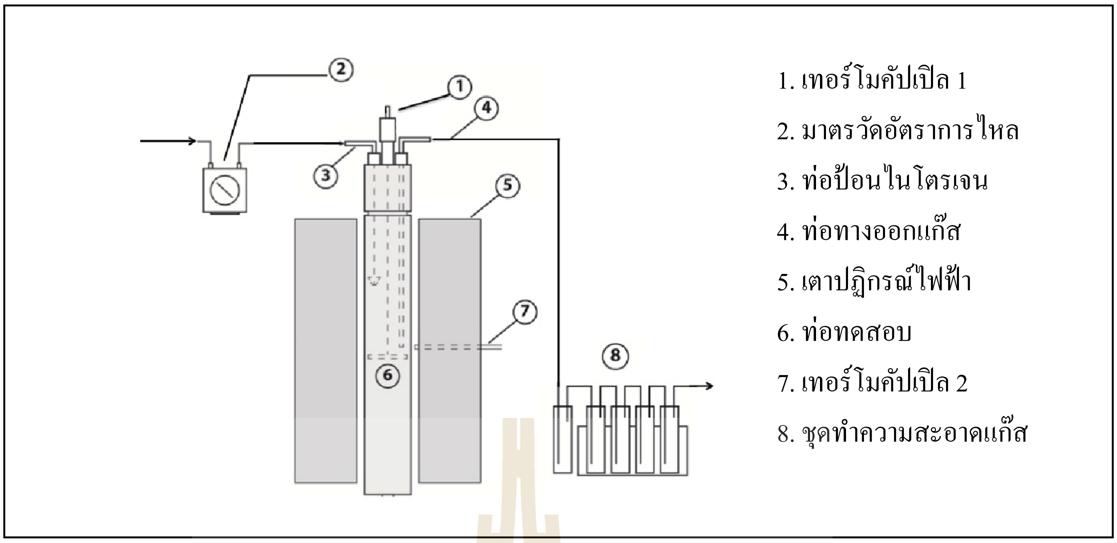
หมายเลข : 1.ช่องสำหรับติดตั้งอุปกรณ์วัดอุณหภูมิ
2.หัวต่อสำหรับชุดป้อนไนโตรเจน
3.หัวต่อสำหรับทางออกแก๊ส

รูปที่ 3.8 ท่อทดสอบหรือห้องตัวอย่าง

ก) เครื่องอ่านและบันทึกอุณหภูมิ

ข) มาตรวัดอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน

รูปที่ 3.9 เครื่องมือวัด



รูปที่ 3.10 แสดงส่วนประกอบของเตาปฏิกรณ์ไฟฟ้า

รูปที่ 3.11 ลักษณะการติดตั้งท่อทดสอบเข้ากับเตาปฏิกรณ์ไฟฟ้า

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

3.3.2 เครื่องผลิตเชื้อเพลิงทอริไฟด์ระดับต้นแบบ

3.3.2.1 ส่วนประกอบของเครื่องผลิตเชื้อเพลิงทอริไฟด์ระดับต้นแบบ

เครื่องผลิตเชื้อเพลิงทอริไฟด์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ มีส่วนประกอบหลัก 2 ส่วน คือ 1) เตาผลิตเชื้อเพลิงทอริไฟด์ และ 2) ชุดสกรูลำเลียง โดยมีหลักการทำงาน และส่วนประกอบ ดังแสดงในรูปที่ 3.12 มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

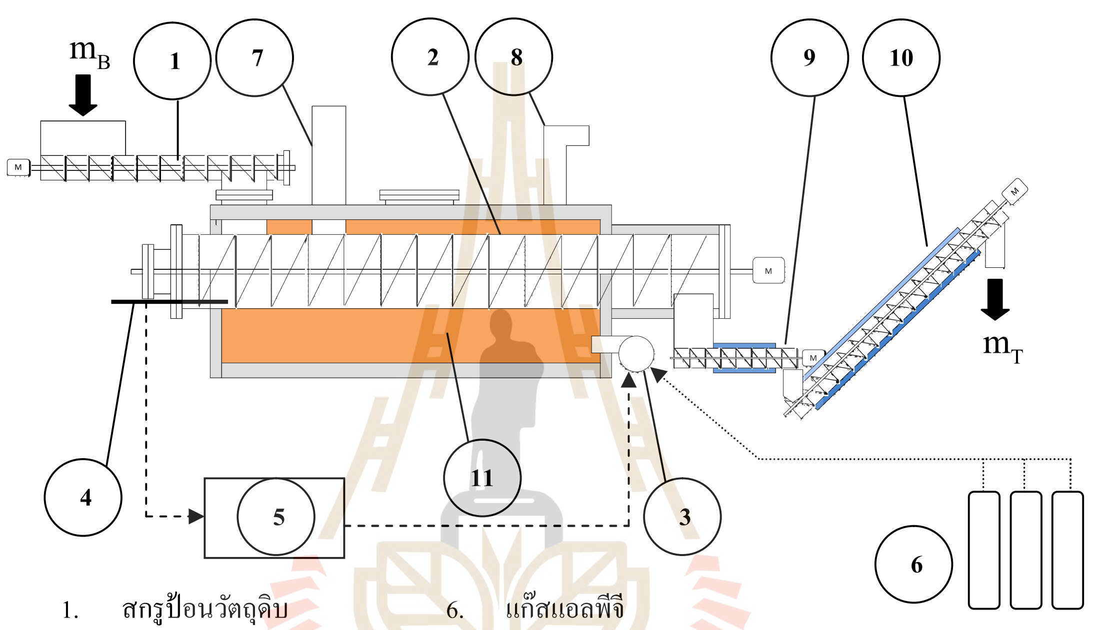
1) เตาผลิตเชื้อเพลิงทอริไฟด์ (Torrefied Reactor) มีส่วนประกอบหลักทั้งหมด 2 ส่วน คือ 1.ห้องผลิตวัตถุดิบ มีลักษณะทรงกระบอกวางตัวในแนวนอน ภายในทำจากวัสดุโลหะม้วนกลม บุด้วยฉนวนกันความร้อน ทำจากวัสดุทนความร้อน ซึ่งทำหน้าที่เก็บรักษาอุณหภูมิ ลดการสูญเสียความร้อน และหุ้มด้วยโลหะม้วนกลมอีกชั้นหนึ่ง ภายในประกอบไปด้วยใบกวนแบบ Ribbon ทำหน้าที่ พลิก กลับ กวน และลำเลียงตัวอย่างภายในเตา ด้านบนของเตาประกอบไปด้วยทางเข้าใช้สำหรับ ป้อนเชื้อเพลิงทำหน้าที่ป้อนเชื้อเพลิงเข้าสู่เตาทอริไฟด์ และมีปล่องระบายไอเสียจากความร้อนของห้องเผาไหม้ และไอน้ำที่ระเหยออกด้านบนของเตา ทางออกของวัตถุดิบอยู่บริเวณด้านล่างมีระบบลำเลียงวัตถุดิบออกจากเตาทอริไฟด์ สามารถควบคุมระยะเวลาลำเลียงออกได้ ดังแสดงใน รูปที่ 3.12 และ ส่วนที่ 2. ห้องเผาไหม้ มีลักษณะเป็นห้องสี่เหลี่ยม อยู่บริเวณใต้ห้องผลิตวัตถุดิบ ทำหน้าที่ให้ความร้อนแก่ห้องผลิตฯ โดยมีแหล่งให้ความร้อน คือ ชุดหัวเผา (Gas Burner) ดังแสดงรูปที่ 3.12 - 3.13

2) ชุดสกรูลำเลียง (Screw Conveyer) ประกอบไปด้วยชุดสกรู 2 ชุด คือ 1. สกรูป้อนวัตถุดิบ (Hopper Feeder) มีหน้าที่ป้อนวัตถุดิบเข้าสู่เตาผลิตฯ มีลักษณะเป็นกะบะรับและมีสกรูลำเลียง มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.15 m ยาว 1.50 m สามารถปรับความเร็วรอบได้ รายละเอียดดังแสดงในตาราง 3.5 และ 2. สกรูลำเลียงวัตถุดิบออก (Screw Feeder) มีหน้าที่ลำเลียงวัตถุดิบที่ผ่านกระบวนการฯ ออก จากเตาผลิตฯ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.15 m ยาว 2.50 m มีน้ำหล่อเย็นอยู่ภายนอก เพื่อลดอุณหภูมิให้แก่เชื้อเพลิงทอริไฟด์ และสกรูลำเลียง (2) มีหน้าที่ลำเลียงเชื้อเพลิงฯ ที่ผ่านกระบวนการฯ ต่อไปยังถังพักเชื้อเพลิงฯ ซึ่งถังพักมีวาล์วเปิด - ปิด (Knife-valve) สำหรับป้องกันไม่ให้อากาศไหลย้อนเข้าสู่เตาฯ รายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 3.5

3.3.2.2 หลักการทำงานของเครื่องผลิตเชื้อเพลิงทอริไฟด์ระดับต้นแบบ

นำตัวอย่างชีวมวลอัดเม็ด (m_B) เทใส่ช่องป้อนวัตถุดิบบนชุดสกรูป้อนวัตถุดิบ (หมายเลข 1) หลังจากให้ความร้อนที่เตาฯ ได้อุณหภูมิตามที่สภาวะกำหนด ตัวอย่างชีวมวลอัดเม็ดจะถูกลำเลียงเข้าสู่เตาผลิตเชื้อเพลิงทอริไฟด์ (หมายเลข 2) แล้วเกิดปฏิกิริยาทอริแฟคชั่น ตามอุณหภูมิ และเวลาที่กำหนด ไอน้ำ และแก๊สที่เกิดขึ้นในกระบวนการจะถูกระบายออกทางท่อระบายไอน้ำ และแก๊ส (หมายเลข 7) ส่วนไอเสียที่เกิดจากห้องเผาไหม้จะระบายออกทางท่อไอเสีย (หมายเลข 8) ของห้องเผาไหม้ ตัวอย่างชีวมวลอัดเม็ด จะถูกเคลื่อนที่ตลอดเวลาภายในเตาฯ

ด้วยใบกวนแบบ Ribbon ซึ่งสามารถปรับความเร็วรอบได้ และหลังจากผ่านกระบวนการฯ แล้ว เชื้อเพลิงทอริไฟด์อัดเม็ด (m_T) จะถูกลำเลียงด้วยสกรู (Screw Feeder) ออกจากเตาฯ โดยเชื้อเพลิงทอริไฟด์อัดเม็ดที่ออกมาจะมีความร้อนจะถูกลดความร้อนด้วยน้ำหล่อเย็น แต่จะมีความร้อนเหลืออุ่นๆ ดังนั้นจึงวางเชื้อเพลิงทอริไฟด์อัดเม็ดไว้ในอากาศประมาณ 15 min เพื่อลดอุณหภูมิหลังจากลดอุณหภูมิแล้วเก็บบรรจุใส่กระสอบ และนำตัวอย่างไปวิเคราะห์ต่อไป



1. สกรูป้อนวัตถุดิบ
2. เตาผลิตเชื้อเพลิงทอริไฟด์
3. ชุดหัวเผา
4. เทอร์โมคัปเปิลวัดอุณหภูมิ
5. ระบบควบคุม
6. แก๊สแอลพีจี
7. ท่อระบายความชื้นและแก๊ส
8. ท่อไอเสียของห้องเผาไหม้
9. สกรูลำเลียงวัตถุดิบออก 1
10. สกรูลำเลียงวัตถุดิบออก 2
11. ห้องเผาไหม้

รูปที่ 3.12 ส่วนประกอบของเตาทอริไฟด์ระดับต้นแบบ

รูปที่ 3.13 เครื่องผลิตเชื้อเพลิงทอริไฟด์ระดับต้นแบบ

ตารางที่ 3.4 รายละเอียดเตาผลิตเชื้อเพลิงทอริไฟด์ระดับต้นแบบ

Technical Data	Specification
Dimensions $_{in}$	Ø 0.75 m ยาว 4.00 m
Dimensions $_{out}$	Ø 1.35 m ยาว 3.50 m
Material	Steel
Screw - Power Motor	Ribbon 2.2 kW
Burner Room	1.35 m ยาว 3.50 m
Control	ตู้ควบคุมพร้อมชุดปรับความเร็วรอบ
Gas Burner -Fuel	Burner 0.36 kw 230 V 50 Hz Pressione Gas Naturale 20 - 360 mbar LPG

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 3.5 รายละเอียดชุดสกรูลำเลียง

Technical Data	Specification
สกรูลำเลียงแนวนอน	Ø 0.15 m ยาว 2.50 m
- Power Moter	2.2 kW
- Material	Stainless Steel
- Control	ตู้ควบคุมพร้อมชุดปรับความเร็วรอบ
- Cooling	น้ำ
สกรูลำเลียง 2	Ø 0.15 m ยาว 3.50 m ทำมุม 45 °
- Power Moter	2.2 kW
- Material	Stainless Steel
- Control	ตู้ควบคุมพร้อมชุดปรับความเร็วรอบ
- Cooling	น้ำ
ระบบวาล์ว เปิด-ปิด	Knife Valve
- Control	ตู้ควบคุมอัตโนมัติ
Hopper Feeder	
- Hopper	กว้าง 0.40 m ยาว 0.50 m
- Screw Feeder	Ø 0.15 m ยาว 1.50 m
- Power Motor	2.2 kW

3.4 วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.4.1 การทดสอบหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตเชื้อเพลิงทอริไฟด์ระดับห้องปฏิบัติการ

3.4.1.1 วิธีการทดสอบ

การทดสอบผลิตเชื้อเพลิงทอริไฟด์ด้วยเตาปฏิกรณ์ไฟฟ้า เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตเชื้อเพลิงทอริไฟด์ และหาความสัมพันธ์ต่างๆ ของค่าคุณสมบัติความเป็นเชื้อเพลิง โดยใช้ตัวอย่างชีวมวลอัดเม็ด 3 ชนิด ในการทดสอบ ได้แก่ เปลือก/ซังข้าวโพดอัดเม็ด ฟางข้าวอัดเม็ด และใบอ้อยอัดเม็ด กำหนดสภาวะการทดสอบที่เวลา 30 60 90 และ 120 min ที่อุณหภูมิ 175 200 225 และ 250 °C สัญลักษณ์เชื้อเพลิงทอริไฟด์เปลือก/ซังข้าวโพดอัดเม็ดที่สภาวะอุณหภูมิ และเวลาการทดสอบค่าต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 3.6 ในแต่ละสภาวะการทดสอบใช้ชีวมวลอัดเม็ด ปริมาณ 150 ± 5 g โดยน้ำหนัก เป็นค่าน้ำหนักชีวมวลอัดเม็ดเริ่มต้น ใช้ไนโตรเจน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

เพื่อแทนที่ออกซิเจนป้อนเข้าภายในเตาปฏิกรณ์ หรือห้องตัวอย่าง ที่อัตราการไหล 1.5 L/min และให้ความร้อนแก่เตาปฏิกรณ์ไฟฟ้า ที่อัตราการให้ความร้อน 10 °C/min จนได้อุณหภูมิที่ต้องการ ที่ 175 200 225 และ 250 °C ตามลำดับ จากนั้นคงอุณหภูมิที่ได้เป็นเวลา 30 60 90 และ 120 min ตามลำดับ แล้วนำตัวอย่างที่ผ่านกระบวนการไปวิเคราะห์คุณสมบัติต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 3.14

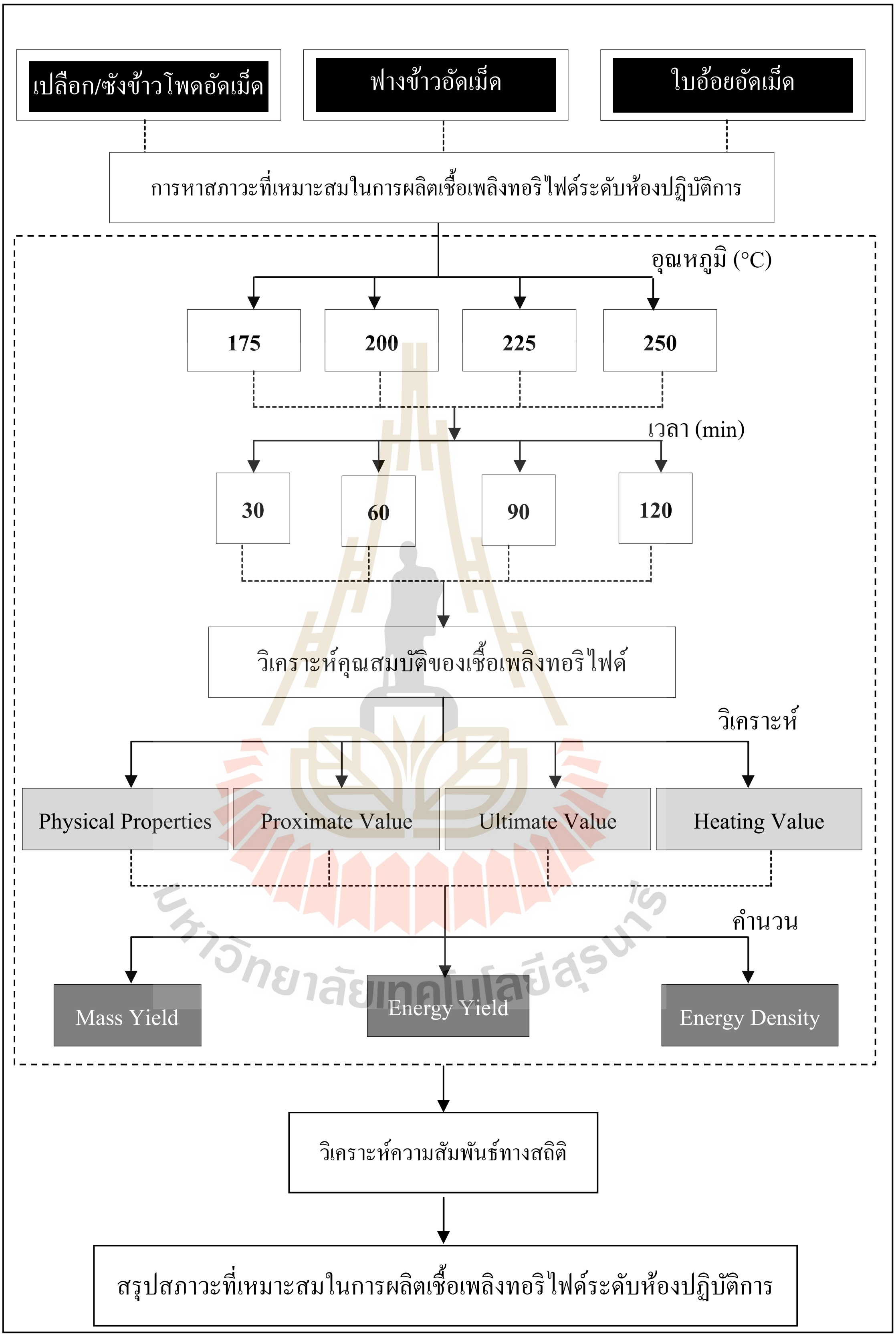
3.4.1.2 การวิเคราะห์คุณสมบัติของเชื้อเพลิงทอริไฟด์

ตัวอย่างเชื้อเพลิงทอริไฟด์ที่ได้จากการทดสอบระดับห้องปฏิบัติการ นำมาวิเคราะห์หาคุณสมบัติทางกายภาพ คุณสมบัติแบบประมาณ คุณสมบัติแบบแยกธาตุ และค่าความร้อน โดยใช้วิธีการวิเคราะห์เช่นเดียวกันกับการวิเคราะห์คุณสมบัติของตัวอย่างชีวมวล ในหัวข้อ 3.2.2.1-3.2.2.4 แล้วนำผลที่ได้ไปให้คำนวณหาค่าต่างๆ ต่อไป

ตารางที่ 3.6 สัญลักษณ์เชื้อเพลิงทอริไฟด์

อุณหภูมิ (°C)	เวลา (min)	สัญลักษณ์		
		เปลือก/ซังข้าวโพดอัดเม็ด	ฟางข้าวอัดเม็ด	ใบอ้อยอัดเม็ด
		B-CT(C)	B-RS(C)	B-ST(C)
175	30	T-CT(175/30)	T-RS(175/30)	T-ST(175/30)
175	60	T-CT(175/60)	T-RS(175/60)	T-ST(175/60)
175	90	T-CT(175/90)	T-RS(175/90)	T-ST(175/90)
175	120	T-CT(175/120)	T-RS(175/120)	T-ST(175/120)
200	30	T-CT(200/30)	T-RS(200/30)	T-ST(200/30)
200	60	T-CT(200/60)	T-RS(200/60)	T-ST(200/60)
200	90	T-CT(200/90)	T-RS(200/90)	T-ST(200/90)
200	120	T-CT(200/120)	T-RS(200/120)	T-ST(200/120)
225	30	T-CT(225/30)	T-RS(225/30)	T-ST(225/30)
225	60	T-CT(225/60)	T-RS(225/60)	T-ST(225/60)
225	90	T-CT(225/90)	T-RS(225/90)	T-ST(225/90)
225	120	T-CT(225/120)	T-RS(225/120)	T-ST(225/120)
250	30	T-CT(250/30)	T-RS(250/30)	T-ST(250/30)
250	60	T-CT(250/60)	T-RS(250/60)	T-ST(250/60)
250	90	T-CT(250/90)	T-RS(250/90)	T-ST(250/90)
250	120	T-CT(250/120)	T-RS(250/120)	T-ST(250/120)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 3.14 ขั้นตอนการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตเชื้อเพลิงทอริไฟด์ระดับห้องปฏิบัติการ

ผลผลิตมวล

ผลผลิตมวล (Mass Yield) คือ เปอร์เซ็นต์อัตราส่วนน้ำหนักของเชื้อเพลิงทอริไฟด์ต่อน้ำหนักของชีวมวลก่อนผ่านกระบวนทอริฟิแฟคชั่น อ้างอิงสมการ การคำนวณตามงานวิจัยของ Gucho et al., 2015; Chen et al., 2015; Basu et al., 2012; Acharya et al., 2015; Tran et al., 2016

$$\text{Mass Yield} = \frac{m_T}{m_B} \times 100 \quad (3.1)$$

เมื่อ

Mass Yield	ผลผลิตมวล (%)
m_T	น้ำหนักของเชื้อเพลิงทอริไฟด์ (kg)
m_B	น้ำหนักตัวอย่างชีวมวล (kg)

ผลผลิตพลังงาน

ผลผลิตพลังงาน (Energy Yield) แสดงสัดส่วนร้อยละของพลังงานที่มีอยู่ในเชื้อเพลิงทอริไฟด์ต่อพลังงานที่มีอยู่ในชีวมวล อ้างอิงสมการการคำนวณตามงานวิจัยของ Gucho et al., 2015, Chen et al., 2015, Basu et al., 2012, Acharya et al., 2015, Tran et al., 2016

$$\text{Energy Yield} = \frac{m_T}{m_B} \times \frac{HHV_T}{HHV_B} \times 100 \quad (3.2)$$

เมื่อ

Energy Yield	ผลผลิตพลังงาน (%)
HHV_T	ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงทอริไฟด์ (MJ/kg)
HHV_B	ค่าความร้อนของตัวอย่างชีวมวล (MJ/kg)
m_T	น้ำหนักของเชื้อเพลิงทอริไฟด์ (kg)
m_B	น้ำหนักตัวอย่างชีวมวล (kg)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ความหนาแน่นพลังงาน

ความหนาแน่นพลังงาน (Energy Density) แสดงค่าพลังงานที่มีอยู่ในเชื้อเพลิงทอริไฟด์ต่อ 1 หน่วยพื้นที่

$$\text{Energy Density} = HHV_T \times BD_T \quad (3.3)$$

เมื่อ

Energy Density	ค่าความหนาแน่นพลังงาน (MJ/m^3)
HHV_T	ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงทอริไฟด์ (MJ/kg)
BD_T	ความหนาแน่นของเชื้อเพลิงทอริไฟด์ (kg/m^3)

3.4.1.3 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ทางสถิติ

ทำการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่าง ความหนาแน่น คุณสมบัติองค์ประกอบแบบประมาณ คุณสมบัติองค์ประกอบแบบแยกธาตุ ค่าความร้อน ผลผลิตมวล ผลผลิตพลังงาน ค่าความหนาแน่นพลังงาน กับอุณหภูมิ และเวลา โดยการวิเคราะห์แบบ 2-WAY ANOVA และหาความแตกต่างทางสถิติโดยใช้ Duncan ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($P < 0.05$) ด้วยโปรแกรม SPSS

3.4.1.4 สรุปสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตเชื้อเพลิงทอริไฟด์ระดับห้องปฏิบัติการ

นำผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของเชื้อเพลิงทอริไฟด์มาสรุปหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตเชื้อเพลิงทอริไฟด์ระดับห้องปฏิบัติการ โดยพิจารณาสภาวะที่เหมาะสมจากเชื้อเพลิงทอริไฟด์ที่มีค่าความหนาแน่นพลังงานสูงสุด ค่าความร้อนมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับชีวมวล ค่าความชื้นต่ำกว่า 3 % สารระเหยลดลง 13 - 21 % เป็นเกณฑ์ในการคัดเลือกสภาวะที่เหมาะสมสำหรับผลิตเชื้อเพลิงทอริไฟด์ และเปรียบเทียบคุณภาพของเชื้อเพลิงทอริไฟด์ระดับห้องปฏิบัติการและระดับต้นแบบต่อไป

3.4.2 การทดสอบผลิตเชื้อเพลิงทอริไฟด์ด้วยเครื่องผลิตเชื้อเพลิงทอริไฟด์ระดับต้นแบบ

3.4.2.1 วิธีการทดสอบ

การทดสอบผลิตเชื้อเพลิงทอริไฟด์โดยเครื่องต้นแบบ ใช้ตัวอย่างชีวมวลเปลือก/ซังข้าวโพดอัดเม็ด น้ำหนัก 50 100 และ 150 kg ทำการทดสอบที่เวลา 30 60 90 และ 120 min และอุณหภูมิ 200 225 และ 250 °C แล้วนำตัวอย่างที่ผ่านกระบวนการไปวิเคราะห์คุณสมบัติต่างๆ ต่อไป ดังแสดงในรูปที่ 3.15

3.4.2.2 การวิเคราะห์คุณสมบัติเชื้อเพลิงทอริไฟด์

นำตัวอย่างเชื้อเพลิงทอริไฟด์มาวิเคราะห์หาคุณสมบัติทางกายภาพ คุณสมบัติแบบประมาณ และค่าความร้อน โดยใช้วิธีการวิเคราะห์ เช่นเดียวกันกับการวิเคราะห์คุณสมบัติของตัวอย่างชีวมวล ในหัวข้อ 3.2.2.1 - 3.2.2.4 แล้วนำผลที่ได้ไปให้คำนวณหาค่าผลผลิตมวล ผลผลิตพลังงาน และความหนาแน่นพลังงาน ตามวิธีสมการที่ (3.1) - (3.3) ในหัวข้อ 3.4.1.2 และคำนวณหาอัตราการผลิต และพลังงานที่ใช้ในการผลิตเชื้อเพลิงทอริไฟด์ ดังนี้

อัตราการผลิตเชื้อเพลิงทอริไฟด์

อัตราการผลิตเชื้อเพลิงทอริไฟด์ (Torrefaction Rate) แสดงปริมาณของเชื้อเพลิงทอริไฟด์ที่ผลิตได้ต่อหนึ่งหน่วยเวลา

$$\dot{m}_T = \frac{m_T}{time} \tag{3.4}$$

เมื่อ

$\dot{m}_T$	อัตราการผลิตเชื้อเพลิงทอริไฟด์ (kg/h)
m_T	น้ำหนักของเชื้อเพลิงทอริไฟด์ (kg)
time	เวลาที่ใช้ในกระบวนการทอริแฟคชั่น (h)

พลังงานที่ใช้ในการผลิตเชื้อเพลิงทอริไฟด์

พลังงานที่ใช้ในการผลิตเชื้อเพลิงทอริไฟด์ (Energy Consumption) แสดงปริมาณเชื้อเพลิงหรือแก๊สแอลพีจีที่ใช้ในกระบวนการผลิตเชื้อเพลิงทอริไฟด์ต่อ 1 หน่วยเชื้อเพลิงทอริไฟด์

$$\text{Energy Consumption} = \frac{m_{LPG}}{m_T} \tag{3.5}$$

เมื่อ

Energy Consumption	พลังงานที่ใช้ในการผลิตเชื้อเพลิงทอริไฟด์ (kg_{LPG}/kg_T)
m_{LPG}	น้ำหนักของแก๊สแอลพีจีที่ใช้ (kg)
m_T	น้ำหนักของเชื้อเพลิงทอริไฟด์ (kg)

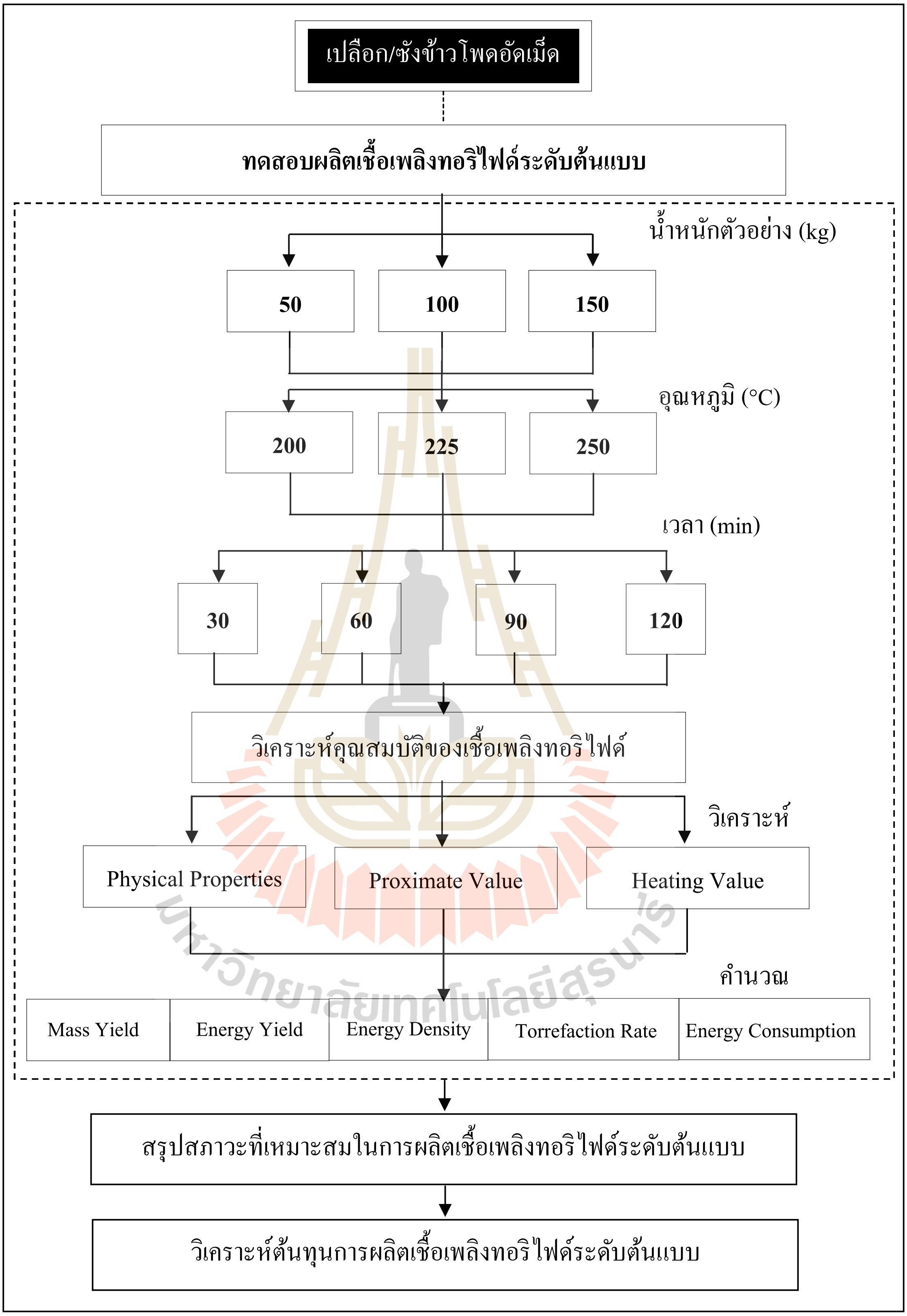
3.4.2.3 สรุปสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตเชื้อเพลิงทอริไฟด์ระดับต้นแบบ

นำผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของเชื้อเพลิงทอริไฟด์มาสรุปหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตเชื้อเพลิงทอริไฟด์ระดับต้นแบบ เช่นเดียวกับหัวข้อ 3.4.1.4 และพิจารณาอัตราการผลิตเชื้อเพลิงทอริไฟด์ และพลังงานที่ใช้ในการผลิตเชื้อเพลิงทอริไฟด์ร่วมด้วย แล้วนำข้อมูลการผลิตเชื้อเพลิงทอริไฟด์ในสภาวะที่เหมาะสมไปคำนวณต้นทุนการผลิตเชื้อเพลิงทอริไฟด์ต่อไป

3.4.2.4 วิเคราะห์ต้นทุนการผลิตเชื้อเพลิงทอริไฟด์ระดับต้นแบบ

ทำการวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตเชื้อเพลิงทอริไฟด์ระดับต้นแบบ โดยวิเคราะห์ต้นทุนค่าเครื่องจักร ค่าซ่อมบำรุง ค่าตัวอย่าง ค่าแรงงาน ค่าการเตรียมเชื้อเพลิงอัดเม็ด และค่าพลังงานที่ใช้ เพื่อหาต้นทุนการผลิตในหน่วยบาทต่อตัน และต้นทุนพลังงานในหน่วยบาทต่อเมกกะจูน เพื่อเปรียบเทียบต้นทุนเชื้อเพลิงทอริไฟด์กับต้นทุนถ่านหิน และพลังงานชีวมวลตัวอื่นๆ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 3.15 ขั้นตอนการศึกษาการผลิตเชื้อเพลิงทอริไฟด์ระดับต้นแบบ

บทที่ 4
ผลการศึกษาและการวิเคราะห์ผล

4.1 บทนำ

ในบทนี้กล่าวถึง ผลการผลิตเชื้อเพลิงชีวมวลคุณภาพสูงหรือเชื้อเพลิงทอริไฟด์ จากชีวมวล 3 ชนิด ได้แก่ ชีวมวลเปลือก/ซังข้าวโพดอัดเม็ด ชีวมวลฟางข้าวอัดเม็ด และชีวมวลใบอ้อยอัดเม็ด ที่ผ่านกระบวนการทอริแฟคชั่นระดับห้องปฏิบัติการ โดยผลแสดงถึงคุณสมบัติทางกายภาพ คุณสมบัติแบบประมาณ คุณสมบัติแบบแยกธาตุ ผลผลิตมวล ผลผลิตพลังงาน และความหนาแน่น-พลังงาน ของชีวมวลชนิดต่างๆ ที่มีการเปลี่ยนแปลงไปเมื่อผ่านกระบวนการทอริแฟคชั่นที่อุณหภูมิ และเวลาต่างๆ รวมถึงผลการคัดเลือกอุณหภูมิ และเวลาที่เหมาะสมสำหรับผลิตเชื้อเพลิงทอริไฟด์อัดเม็ดจากชีวมวลแต่ละชนิด

นอกจากนี้ยังกล่าวถึง ผลการผลิตเชื้อเพลิงทอริไฟด์จากชีวมวลเปลือก/ซังข้าวโพดอัดเม็ด ที่ผ่านกระบวนการทอริแฟคชั่นระดับต้นแบบ โดยผลแสดงถึงคุณสมบัติทางกายภาพ คุณสมบัติแบบ-ประมาณ คุณสมบัติแบบแยกธาตุ ผลผลิตมวล ผลผลิตพลังงาน ความหนาแน่นพลังงาน อัตราการผลิต และพลังงานที่ใช้ในการผลิตของชีวมวลเปลือกซัง/ข้าวโพด ที่มีการเปลี่ยนแปลงไปเมื่อผ่านกระบวนการทอริแฟคชั่นที่ปริมาณการป้อนวัตถุดิบ อุณหภูมิ และเวลาต่างๆ รวมถึงสรุปผลการคัดเลือกปริมาณการป้อนวัตถุดิบ อุณหภูมิ และเวลาต่างๆ ที่เหมาะสมสำหรับผลิตเชื้อเพลิงทอริไฟด์เปลือกซัง/ซังข้าวโพด ด้วยเครื่องผลิตเชื้อเพลิงทอริไฟด์ระดับต้นแบบ และผลการวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตเชื้อเพลิงทอริไฟด์เปลือก/ซังข้าวโพด มีรายละเอียดผลการศึกษา และผลการวิเคราะห์ดังนี้

4.2 ผลการศึกษาการผลิตเชื้อเพลิงทอริไฟด์เปลือก/ซังข้าวโพดอัดเม็ด ระดับห้องปฏิบัติการ

ผลการศึกษาการผลิตเชื้อเพลิงทอริไฟด์เปลือก/ซังข้าวโพดอัดเม็ด ที่ผ่านกระบวนการทอริแฟคชั่น ระดับห้องปฏิบัติการ ที่อุณหภูมิ 175 200 225 และ 250 °C เวลา 30 60 90 และ 120 min พบว่า คุณสมบัติต่างๆ ของเชื้อเพลิง ผลผลิตมวล และผลผลิตพลังงาน มีลักษณะการเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ และเวลาที่ใช้ในกระบวนการผลิต ดังนี้

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

4.2.1 คุณสมบัติทางกายภาพของชีวมวลเปลือก/ซังข้าวโพดอัดเม็ดหลังผ่านกระบวนการทอริแฟคชั่นระดับห้องปฏิบัติการ

ผลการศึกษาค่าความชื้นของชีวมวลเปลือก/ซังข้าวโพดอัดเม็ด หลังผ่านกระบวนการทอริแฟคชั่นระดับห้องปฏิบัติการพบว่า ค่าความชื้นของชีวมวลเปลือก/ซังข้าวโพดอัดเม็ด หลังผ่านกระบวนการทอริแฟคชั่น ที่อุณหภูมิ 175 200 225 และ 250 °C เวลา 30 60 90 และ 120 min มีค่าต่ำกว่า 3.00 %wb ซึ่งมีค่าลดลงจากค่าความชื้นเริ่มต้น 8.10 %wb เนื่องจากในกระบวนการทอริแฟคชั่นมีการระเหยของน้ำ เมื่อชีวมวลได้รับความร้อนที่อุณหภูมิ 100 °C และเมื่อทดสอบวางชีวมวลเปลือก/ซังข้าวโพดอัดเม็ด ที่ผ่านกระบวนการทอริแฟคชั่นแล้วทุกตัวอย่าง ไว้ในสภาวะอุณหภูมิห้อง ชีวมวลทั้งหมดยังคงมีค่าความชื้นต่ำกว่า 3.00 %wb ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Tumuluru et al. (2010) ที่ทำการศึกษาค่าความชื้นของต้นข้าวโพดที่ผ่านกระบวนการทอริแฟคชั่น แล้วพบว่า กระบวนการผลิตเชื้อเพลิงทอร์ไฟด์ต้นข้าวโพดที่อุณหภูมิ 300 °C เวลา 30 min เชื้อเพลิงทอริไฟด์ต้นข้าวโพด มีความชื้นอยู่ระหว่าง 1.00 - 2.00 % ซึ่งมีค่าต่ำกว่าต้นข้าวโพด ที่ไม่ผ่านกระบวนการและเป็นค่าความชื้นสมดุลแล้ว

ผลการศึกษาสีของชีวมวลเปลือก/ซังข้าวโพดอัดเม็ด ก่อน และหลังผ่านกระบวนการทอริแฟคชั่นระดับห้องปฏิบัติการพบว่า สีของชีวมวลเปลือก/ซังข้าวโพดอัดเม็ด หลังผ่านกระบวนการทอริแฟคชั่นระดับห้องปฏิบัติการที่อุณหภูมิ 175 และ 200 °C เวลา 30 60 90 และ 120 min มีแนวโน้มเข้มขึ้นตามเวลา และอุณหภูมิ และที่อุณหภูมิ 225 และ 250 °C เวลา 30 60 90 และ 120 min มีการเปลี่ยนเป็นสีดำเหมือนถ่านทั้งหมด ดังแสดงในรูปที่ 4.1 - 4.2 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Chen et al. (2011) ที่ทำการศึกษาการผลิตเชื้อเพลิงทอริไฟด์ไม้ Lauan ด้วยกระบวนการทอริแฟคชั่นแล้วพบว่า ที่อุณหภูมิ 220 °C เวลา 2 h ไม้ Lauan มีการเปลี่ยนสี จากน้ำตาลเป็นสีดำ และยังคงเปลี่ยนเป็นสีดำเมื่อเพิ่มอุณหภูมิขึ้นเป็น 250 และ 280 °C เนื่องจากที่อุณหภูมิ 220 °C ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบคาร์บอน และไฮโดรเจน เกิดเป็นสารระเหย และทาร์ ของแข็งหรือชีวมวลที่เหลืออยู่จึงเกิดการเปลี่ยนสีดังกล่าว

ผลการศึกษาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง และความยาวของชีวมวลเปลือก/ซังข้าวโพดอัดเม็ดก่อนผ่านกระบวนการฯ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 8.00 mm และความยาวเฉลี่ย 27.79 mm ซึ่งมีค่าสูงกว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง และความยาวของชีวมวลเปลือก/ซังข้าวโพดอัดเม็ดหลังผ่านกระบวนการฯ ที่อุณหภูมิ และเวลาต่างๆ ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 7.58 mm และความยาวเฉลี่ย 26.56 mm เนื่องจากในกระบวนการฯ เกิดการระเหยของน้ำ และสารระเหย ของแข็งที่เหลือจึงเกิดการยุบตัวลงตัวแทนที่น้ำ และสารระเหย (Sule, 2012) น้ำหนัก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง และความยาวจึงมีค่าลดลง ซึ่งน้ำหนัก และขนาดที่ลดลง จะส่งผลต่อความหนาแน่นของชีวมวลเปลือก/ซังข้าวโพดอัดเม็ดหลังผ่านกระบวนการฯ โดยจากผลการศึกษา ดังแสดงในตารางที่ 4.1 พบว่า

ที่อุณหภูมิ 225 และ 250 °C ที่เวลา 30 60 90 และ 120 min ความหนาแน่นของชีวมวลเปลือก/ซังข้าวโพดอัดเม็ด มีแนวโน้มลดลง เมื่ออุณหภูมิ และเวลาเพิ่มขึ้น อย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$) เนื่องจากที่อุณหภูมิ 225 และ 250 °C เป็นช่วงอุณหภูมิที่ส่งผลให้เกิดการระเหยของสารที่ระเหยได้ (Chen et al., 2011) โดยแนวโน้มการลดลงของความหนาแน่น มีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ Sule (2012) ที่ทำการศึกษาการผลิตเชื้อเพลิงทอริไฟด์ Miscanthus ที่อุณหภูมิ 230 250 และ 270 °C เวลา 15 30 และ 45 min แล้วพบว่า ความหนาแน่นมีค่าลดลง เมื่ออุณหภูมิ และเวลาเพิ่มขึ้นเช่นกัน ส่วนผลการศึกษาความหนาแน่นของชีวมวลเปลือก/ซังข้าวโพดอัดเม็ดหลังผ่านกระบวนการฯ ของงานวิจัยนี้ ที่อุณหภูมิ 175 และ 200 °C ที่เวลา 30 60 90 และ 120 min พบว่าความหนาแน่นของชีวมวลเปลือก/ซังข้าวโพดอัดเม็ด มีความแปรปรวนอย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$) เนื่องจากที่อุณหภูมิ 175 - 200 °C เป็นช่วงของการระเหยของน้ำ และสารระเหยบางส่วน บริเวณผิวนอกของชีวมวลเปลือก/ซังข้าวโพดอัดเม็ดเท่านั้น ประกอบกับตัวอย่างมีลักษณะอัดเม็ดความหนาแน่นสูง การถ่ายเทความร้อนจึงแตกต่างจากชีวมวลที่ไม่ผ่านการแปรรูป จึงส่งผลให้เกิดการแปรปรวนของค่าความหนาแน่นดังกล่าว

ตารางที่ 4.1 ความหนาแน่นของชีวมวลเปลือก/ซังข้าวโพดอัดเม็ด หลังผ่านกระบวนการทอริแฟคชั่นระดับห้องปฏิบัติการ ที่อุณหภูมิ และเวลาต่าง ๆ

Parameter	Time	Temperature (°C)			
	(min)	175	200	225	250
Bulk Density	30	$523^{b\,A}$	$569^{b\,A}$	$545^{c\,B}$	$462^{a\,C}$
(kg/m^3)	60	$548^{b\,C}$	$584^{c\,B}$	$541^{b\,B}$	$447^{a\,B}$
	90	$614^{d\,D}$	$594^{c\,C}$	$537^{b\,B}$	$431^{a\,A}$
Control = 579 kg/m^3	120	$533^{c\,B}$	$569^{d\,A}$	$518^{b\,A}$	$430^{a\,A}$

หมายเหตุ : - ค่าความหนาแน่น ที่มี a, b, c และ d เหมือนกันในแนวนอน ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น ร้อยละ 95 ($P > 0.05$)
- ค่าความหนาแน่น ที่มี A, B, C และ D เหมือนกันในแนวตั้ง ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น ร้อยละ 95 ($P > 0.05$)

4.2.2 คุณสมบัติแบบประมาณของชีวมวลเปลือก/ซังข้าวโพดอัดเม็ด หลังผ่านกระบวนการ ทอริแฟคชั่นระดับห้องปฏิบัติการ

ผลการศึกษาค่าคุณสมบัติแบบประมาณของชีวมวลเปลือก/ซังข้าวโพดอัดเม็ด ได้แก่ สารระเหย เถ้า และคาร์บอนคงตัว หลังผ่านกระบวนการทอริแฟคชั่นระดับห้องปฏิบัติการ

ที่อุณหภูมิ และเวลาต่างๆ พบว่า ที่อุณหภูมิ 225 และ 250 °C ที่เวลา 30 60 90 และ 120 min สารระเหยมีแนวโน้มลดลง ส่งผลให้ เถ้า และคาร์บอนคงตัวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเวลา และอุณหภูมิเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$) เนื่องจากการสลายของเฮมิเซลลูโลส ที่มีไฮโดรเจน คาร์บอน และออกซิเจนเป็นส่วนประกอบ และการเกิดกระบวนการไฮโดรไลซิส ที่สารใดๆ ทำปฏิกิริยากันแล้วได้ผลิตภัณฑ์เป็นน้ำกับสารใดๆ จะเกิดที่สภาวะอุณหภูมิ 190 °C เวลา 10 min (รัชพล พะวงศ์รัตน์, 2558) กล่าวอีกนัยหนึ่ง คือ สารระเหยจะเริ่มระเหยออกจากชีวมวลที่ อุณหภูมิ 190 °C เวลา 10 min ดังนั้น ในผลการศึกษานี้ที่อุณหภูมิ 175 และ 200 °C สารระเหย เถ้า และคาร์บอนคงตัว จึงเกิดการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย และเริ่มเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ และเวลาที่อุณหภูมิ 225 และ 250 °C ดังแสดงในตารางที่ 4.2 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Chen et al. (2012) ที่ทำการศึกษาการผลิตเชื้อเพลิงทอริไฟด์ชานอ้อย โดยใช้ความร้อนจากไมโครเวฟซึ่งพบว่า สารระเหยของชานอ้อยมีค่าลดลงเมื่อเวลาการให้ความร้อนเพิ่มขึ้น และงานวิจัยของ Tumuluru et al. (2012) ที่ทำการศึกษาการผลิตเชื้อเพลิงทอริไฟด์ Miscanthus ที่อุณหภูมิ 250 300 และ 350 °C ที่เวลา 30 60 และ 120 min พบว่า สารระเหยมีค่าลดลง เถ้า และคาร์บอนคงตัวมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่ออุณหภูมิ และเวลาเพิ่มขึ้น

รูปที่ 4.1 ลักษณะของชีวมวลเปลือก/ซังข้าวโพดอัดเม็ดก่อนผ่านกระบวนการทอริแฟคชั่น

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รูปที่ 4.2 ลักษณะของชีวมวลเปลือก/ซังข้าวโพดอัดเม็ดหลังผ่านกระบวนการทอริแฟคชั่น ระดับห้องปฏิบัติการ ที่อุณหภูมิ และเวลาต่าง ๆ

ค่าความร้อนเป็นคุณสมบัติสำคัญที่แสดงถึงพลังงานที่สะสมอยู่ในชีวมวล ซึ่งถ้าชีวมวลมีความร้อนสูงจะแสดงให้เห็นว่าชีวมวลดังกล่าวมีคุณภาพสูงเช่นกัน โดยผลการศึกษาค่าความร้อนของชีวมวลเปลือก/ซังข้าวโพดอัดเม็ด หลังผ่านกระบวนการฯ ที่อุณหภูมิ และเวลาต่างๆ พบว่า ค่าความร้อนของชีวมวลเปลือก/ซังข้าวโพดอัดเม็ด หลังผ่านกระบวนการฯ มีค่าเพิ่มขึ้น 7.04 - 34.78 % เมื่อเทียบกับค่าความร้อนของชีวมวลเปลือก/ซังข้าวโพดอัดเม็ด ก่อนผ่านกระบวนการฯ โดยที่อุณหภูมิ 225 และ 250 °C เวลา 30 60 90 และ 120 min ค่าความร้อนมีแนวโน้มการเพิ่มขึ้น

ตามอุณหภูมิ และเวลาที่เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$) แต่ที่อุณหภูมิ 175 และ 200 °C เวลา 30 60 90 และ 120 min มีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยอย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$) โดยผลการเปลี่ยนแปลงของค่าความร้อนนี้ มีผลมาจากคุณสมบัติแบบประมาณ (Chen et al., 2012) ซึ่งค่าความร้อนจะแปรผันตรงกับสารระเหย และคาร์บอนคงตัว และแปรผกผันกับเถ้า ดังแสดงในตารางที่ 4.2 แต่อย่างไรก็ดีในการผลิตเชื้อเพลิงทอริไฟด์ด้วยกระบวนการทอริแฟคชั่นนั้นต้องพิจารณา ผลผลิตมวล และผลผลิตพลังงานร่วมด้วยเนื่องจากถ้าเชื้อเพลิงทอริไฟด์มีค่าความร้อนสูง จะให้ผลผลิตมวล และผลผลิตพลังงานต่ำ ดังนั้นจึงต้องพิจารณาหาจุดสมดุลระหว่าง ค่าความร้อน ผลผลิตมวล และผลผลิตพลังงานต่อไป

ตารางที่ 4.2 คุณสมบัติแบบประมาณของชีวมวลเปลือก/ซังข้าวโพดอัดเม็ดหลังผ่านกระบวนการทอริแฟคชั่นระดับห้องปฏิบัติการ ที่อุณหภูมิ และเวลาต่าง ๆ

Parameter	Time (min)	Temperature (°C) 175	200	225	250
Volatile Matter (%)	30	$82.79^{c\,B}$	$81.20^{c\,B}$	$75.42^{b\,B}$	$66.67^{a\,C}$
	60	$81.13^{d\,A}$	$79.30^{c\,A}$	$75.10^{b\,B}$	$64.55^{a\,B}$
	90	$81.25^{d\,A}$	$79.95^{c\,A}$	$72.24^{b\,A}$	$62.92^{a\,A}$
Control = 81.56 %	120	$80.78^{d\,A}$	$79.10^{c\,A}$	$71.92^{b\,A}$	$62.09^{a\,A}$
Ash (%)	30	$1.98^{a\,A}$	$2.43^{ab\,A}$	$2.71^{b\,AB}$	$2.86^{b\,A}$
	60	$2.56^{ab\,B}$	$2.19^{a\,A}$	$2.92^{ab\,B}$	$3.89^{b\,A}$
	90	$2.47^{a\,B}$	$2.21^{a\,A}$	$2.56^{a\,A}$	$3.04^{b\,A}$
Control = 2.24 %	120	$2.16^{a\,AB}$	$2.35^{a\,A}$	$3.25^{b\,C}$	$4.05^{c\,A}$
Fixed Carbon (%)	30	$15.23^{a\,A}$	$16.37^{a\,A}$	$21.87^{b\,A}$	$30.47^{c\,A}$
	60	$16.31^{a\,B}$	$18.41^{a\,B}$	$22.64^{b\,A}$	$31.57^{c\,AB}$
	90	$16.37^{a\,B}$	$17.85^{b\,B}$	$25.20^{c\,B}$	$34.04^{d\,B}$
Control = 16.20 %	120	$17.07^{a\,B}$	$18.55^{b\,B}$	$24.83^{c\,B}$	$33.86^{d\,B}$
HHV (MJ/kg)	30	$17.84^{a\,AB}$	$17.96^{a\,A}$	$19.43^{b\,A}$	$21.39^{c\,A}$
	60	$17.79^{a\,A}$	$18.09^{b\,B}$	$19.89^{c\,B}$	$22.32^{d\,B}$
	90	$18.25^{b\,C}$	$18.09^{a\,B}$	$20.01^{c\,BC}$	$22.19^{d\,B}$
Control =16.62 MJ/kg	120	$18.00^{a\,B}$	$18.17^{b\,B}$	$20.18^{c\,C}$	$22.40^{d\,B}$

หมายเหตุ : - ค่าคุณสมบัติแบบประมาณที่มี a, b, c และ d เหมือนกันในแนวนอน ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น ร้อยละ 95 ($P > 0.05$)

- ค่าคุณสมบัติแบบประมาณที่มี A, B, C และ D เหมือนกันในแนวตั้ง ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น ร้อยละ 95 ($P > 0.05$)

4.2.3 องค์ประกอบธาตุคาร์บอนและธาตุไฮโดรเจนของชีวมวลเปลือก/ซังข้าวโพดอัดเม็ดหลังผ่านกระบวนการทอริแฟคชั่นระดับห้องปฏิบัติการ

ผลการศึกษาองค์ประกอบธาตุคาร์บอนและธาตุไฮโดรเจนของชีวมวลเปลือก/ซังข้าวโพดอัดเม็ด หลังผ่านกระบวนการทอริแฟคชั่นระดับห้องปฏิบัติการ ที่อุณหภูมิ และเวลาต่างๆ โดยวิธีการวิเคราะห์คุณสมบัติแบบแยกธาตุ พบว่า องค์ประกอบธาตุคาร์บอน มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น แต่ธาตุไฮโดรเจนมีแนวโน้มลดลง เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$) โดยองค์ประกอบธาตุคาร์บอนเพิ่มขึ้น 5.52 - 30.53 % ธาตุไฮโดรเจนลดลง 0.94 - 16.44% เมื่อเทียบกับชีวมวลเปลือก/ซังข้าวโพดอัด เม็ดก่อนผ่านกระบวนการฯ ดังแสดงในตารางที่ 4.3 เนื่องจากอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ธาตุไฮโดรเจนหลุดออกจากชีวมวลในรูปสารระเหย ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Chen et al. (2014) ที่ทำการศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนทอริแฟคชั่นผลิตเชื้อเพลิงทอริไฟด์ชีวมวลซังข้าวโพดขนาด 40 - 60 mesh ใช้ตัวอย่างทดสอบครั้งละ 5 g ที่อุณหภูมิ 210 240 270 และ 300 °C แล้วพบว่า องค์ประกอบธาตุคาร์บอนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น แต่องค์ประกอบธาตุไฮโดรเจนมีแนวโน้มลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น เช่นเดียวกัน

นอกจากนี้ยังทำการศึกษาความสัมพันธ์ขององค์ประกอบธาตุคาร์บอน ธาตุไฮโดรเจนและธาตุออกซิเจน ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ที่แสดงให้เห็นถึงความแตกต่างระหว่างเชื้อเพลิงฟอสซิลกับเชื้อเพลิงชีวมวล (Barrio, 2000) โดยอธิบายด้วย O/C และ H/C ผ่านแผนภาพ Van Krevelen Diagrams ดังนั้นที่อุณหภูมิ 250 °C ชีวมวลเปลือก/ซังข้าวโพดอัดเม็ด หลังผ่านกระบวนการฯ มีค่า O/C และ H/C ใกล้เคียงพีต (Peat) มากที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 4.3 ซึ่งพีต (Peat) เป็นขั้นแรกในกระบวนการเกิดถ่านหิน ประกอบด้วยซากพืชซึ่งบางส่วนได้สลายตัวไปแล้ว แต่ซากพืชบางส่วนยังสลายตัวไม่หมด มีสีน้ำตาลถึงสีดำ มีปริมาณคาร์บอนต่ำ ประมาณร้อยละ 50.00 - 60.00 % มีกำมะถันสูง มีปริมาณออกซิเจน และความชื้นสูง แต่สามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงได้ จากความสัมพันธ์ของ O/C และ H/C แสดงให้เห็นว่าชีวมวลเปลือก/ซังข้าวโพดอัดเม็ดหลังผ่านกระบวนการฯ ที่อุณหภูมิ 250 °C สามารถนำมาใช้แทนเชื้อเพลิงฟอสซิลประเภทพีตได้ ส่วนที่อุณหภูมิ 175 200 และ 225 °C ก็มีแนวโน้มของความสัมพันธ์ของ O/C และ H/C เข้าหาเชื้อเพลิงฟอสซิสเช่นกัน สอดคล้องกับงานวิจัยของ Bergman et al. (2005) ที่ทำการศึกษาการผลิตเชื้อเพลิงทอริไฟด์ไม้ ด้วยกระบวนการทอริแฟคชั่นที่อุณหภูมิ 250 260 270 275 280 และ 285 °C พบว่า ที่อุณหภมิ 275 และ 280 °C เชื้อเพลิงทอริไฟด์ไม้มีค่าใกล้เคียงพีต และที่อุณหภมิ 285 °C เชื้อเพลิงทอริไฟด์ไม้มีค่าใกล้เคียงถ่านหิน

ตารางที่ 4.3 องค์ประกอบธาตุคาร์บอนและธาตุไฮโดรเจนของชีวมวลเปลือก/ซังข้าวโพดอัดเม็ด หลังผ่านกระบวนการทอริแฟคชั่นระดับห้องปฏิบัติการ ที่อุณหภูมิ และเวลาต่าง ๆ

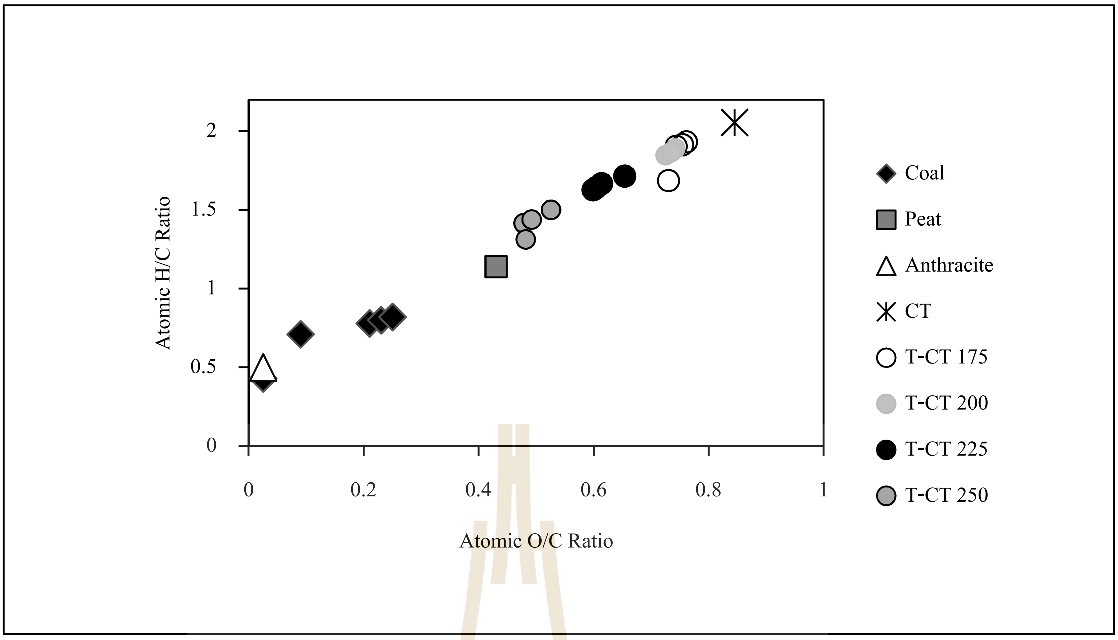
Parameter	Time (min)	Temperature (°C)			
		175	200	225	250
C	30	$45.96^{a\,B}$	$46.33^{b\,A}$	$49.32^{c\,A}$	$54.41^{d\,A}$
(%)	60	$45.68^{a\,A}$	$46.53^{b\,AB}$	$50.79^{c\,B}$	$56.51^{d\,C}$
	90	$47.07^{b\,D}$	$46.91^{a\,C}$	$51.16^{c\,C}$	$55.92^{d\,B}$
Control = 43.29%	120	$46.29^{a\,C}$	$46.59^{b\,B}$	$51.39^{c\,D}$	$56.66^{d\,D}$
H	30	$7.33^{c\,B}$	$7.30^{c\,B}$	$7.05^{b\,BC}$	$6.81^{a\,C}$
(%)	60	$7.36^{d\,B}$	$7.25^{c\,AB}$	$7.06^{b\,C}$	$6.67^{a\,B}$
	90	$6.62^{a\,A}$	$7.23^{c\,A}$	$7.00^{b\,AB}$	$6.71^{a\,B}$
Control = 7.42%	120	$7.35^{d\,B}$	$7.25^{c\,AB}$	$6.97^{b\,A}$	$6.20^{a\,A}$

หมายเหตุ : - ค่าองค์ประกอบธาตุคาร์บอนและธาตุไฮโดรเจนที่มี a, b, c และ d เหมือนกันในแนวนอน ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น ร้อยละ 95 ($P > 0.05$)

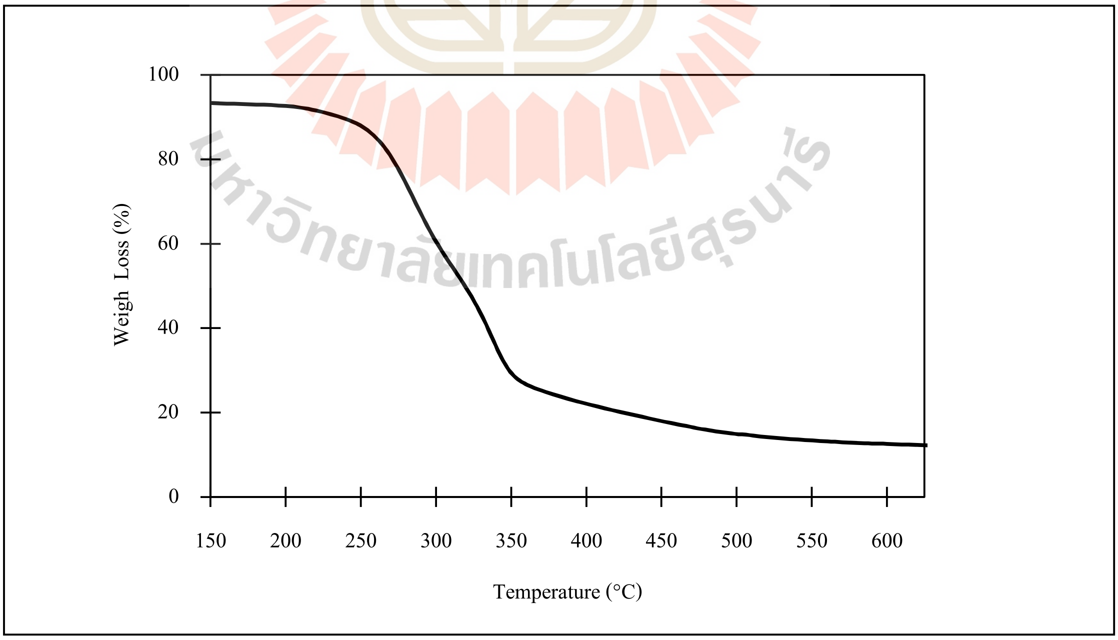
- ค่าองค์ประกอบธาตุคาร์บอนและธาตุไฮโดรเจนที่มี A, B, C และ D เหมือนกันในแนวตั้ง ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น ร้อยละ 95 ($P > 0.05$)

4.2.4 การย่อยสลายทางความร้อนของชีวมวลเปลือก/ซังข้าวโพดอัดเม็ด

จากผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักโดยอาศัยสมบัติการย่อยสลายทางความร้อนของชีวมวลเปลือก/ซังข้าวโพด ที่อัตราการให้ความร้อน 10 °C/min บรรยากาศ N_2 พบว่าที่อุณหภูมิ 175 - 250 °C มีน้ำหนักของของชีวมวลเปลือก/ซังข้าวโพดคงเหลือ 88.00 - 94.00 % ดังแสดงในรูปที่ 4.4 ซึ่งเป็นค่าน้ำหนักตามคุณสมบัติของเชื้อเพลิงทอริไฟด์ ในงานวิจัยของ Tumuluru et al. (2011) พบว่าเชื้อเพลิงทอริไฟด์ควรมีน้ำหนักลดลงเหลือ 70.00 - 80.00 % ของน้ำหนักเดิม โดยผลการศึกษานี้สามารถนำไปใช้ทำนายผลผลิตมวลของเชื้อเพลิงทอริไฟด์เปลือก/ซังข้าวโพดอัดเม็ดหลังผ่านกระบวนการทอริแฟคชั่นได้



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนออกซิเจนต่อคาร์บอนกับสัดส่วนไฮโดรเจนต่อคาร์บอน ของชีวมวลเปลือก/ซังข้าวโพดอัดเม็ดก่อนและหลังผ่านกระบวนการทอริแฟคชั่นระดับห้องปฏิบัติการ



รูปที่ 4.4 ลักษณะการย่อยสลายทางความร้อนของชีวมวลเปลือก/ซังข้าวโพดอัดเม็ด

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

4.2.5 ผลผลิตมวล ผลผลิตพลังงาน และความหนาแน่นพลังงานของชีวมวลเปลือก/ซังข้าวโพดอัดเม็ดหลังผ่านกระบวนการทอริแฟคชั่นระดับห้องปฏิบัติการ

ผลการศึกษาผลผลิตมวลของเปลือก/ซังข้าวโพดอัดเม็ดที่ผ่านกระบวนการทอริแฟคชั่นระดับห้องปฏิบัติการ ที่อุณหภูมิ และเวลาต่างๆ พบว่า ที่อุณหภูมิ 175 200 225 และ 250 °C เวลา 30 60 90 และ 120 min ผลผลิตมวลมีค่า 60.02 - 90.49 % โดยมีแนวโน้มลดลง เมื่อเวลา และอุณหภูมิเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$) เนื่องจากอุณหภูมิ และเวลาที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้เกิดการระเหยของน้ำ และสารระเหย น้ำหนักของชีวมวลที่เหลือจึงมีค่าลดลง ผลผลิตมวลจึงลดลงเช่นกัน โดยในคุณสมบัติของเชื้อเพลิงทอริไฟด์ผลผลิตมวลควรมีค่าประมาณ 70.00 - 80.00 % (Tumuluru et al., 2011) ดังนั้น ที่อุณหภูมิ 225 °C เวลา 30 60 90 และ 120 min จึงเป็นสภาวะที่ให้ผลผลิตมวลตามคุณสมบัติของเชื้อเพลิงทอริไฟด์ ดังแสดงในตารางที่ 4.4 ผลผลิตมวลที่ลดลง เมื่อเวลาและอุณหภูมิเพิ่มขึ้นนี้ มีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ Sule (2015) ที่ทำการศึกษาการผลิตเชื้อเพลิงทอริไฟด์ Miscanthus และ Gucho (2015) ที่ทำการศึกษาการผลิตเชื้อเพลิงทอริไฟด์ไม้บีซ และ Miscanthus

ผลการศึกษาผลผลิตพลังงานของชีวมวลเปลือก/ซังข้าวโพดอัดเม็ด ที่ผ่านกระบวนการทอริแฟคชั่นระดับห้องปฏิบัติการ ที่อุณหภูมิ และเวลาต่างๆ พบว่า อุณหภูมิ 225 และ250 °C ผลผลิตพลังงานมีแนวโน้มลดลง ตามอุณหภูมิ และเวลาที่เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$) โดยลดลงเป็น 80.88 - 92.56 % เนื่องจากอุณหภูมิ และเวลา ส่งผลต่อการระเหยของน้ำ สารระเหย และผลผลิตมวลของเปลือก/ซังข้าวโพดอัดเม็ดที่ผ่านกระบวนการฯ ผลิตพลังงานจึงมีแนวโน้มลดลงในลักษณะดังกล่าวตามการลดลงของสารระเหย ดังแสดงในตารางที่ 4.4 สอดคล้องกับงานวิจัยของ Gucho (2015) ที่ทำการศึกษาการผลิตเชื้อเพลิงทอริไฟด์ไม้บีซ และ Miscanthus ที่อุณหภูมิ 240 260 280 และ 300 °C เวลา 30 min แล้วพบว่า อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ผลผลิตพลังงานลดลง

และเมื่อพิจารณาความหนาแน่นพลังงานของชีวมวลเปลือก/ซังข้าวโพดอัดเม็ดที่ผ่านกระบวนการทอริแฟคชั่นระดับห้องปฏิบัติการ ที่อุณหภูมิ 225 และ 250 °C เวลา 30 60 90 และ 120 min ซึ่งเป็นช่วงอุณหภูมิ และเวลาที่มีการเปลี่ยนแปลงของสารระเหยให้ชีวมวลเปลือก/ซังข้าวโพดอัดเม็ดมีคุณสมบัติเป็นเชื้อเพลิงทอริไฟด์พบว่า ความหนาแน่นพลังงานของชีวมวลเปลือก/ซังข้าวโพดอัดเม็ดหลังผ่านกระบวนการฯ มีค่าเพิ่มขึ้น 2.59 - 11.73 % เมื่อเทียบกับชีวมวลเปลือก/ซังข้าวโพดอัดเม็ดก่อนผ่านกระบวนการฯ เนื่องจากอุณหภูมิ และเวลาส่งผลให้ชีวมวลมีค่าความร้อนเพิ่มขึ้น ค่าความหนาแน่นพลังงานจึงเพิ่มขึ้น แต่การเพิ่มขึ้นของความหนาแน่นพลังงานนี้ เป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนกับค่าความแน่น ดังนั้นในสภาวะการผลิตเชื้อเพลิงเทอริไฟด์จะมีช่วงสมดุลความหนาแน่นพลังงานปรากฏเพื่อให้เลือกสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตเชื้อเพลิงทอริไฟด์สำหรับชีวมวลแต่ละชนิด ซึ่งถ้าค่าความร้อนสูงมาก น้ำหนักชีวมวลที่ผ่านกระบวนการฯ จะลดต่ำ

จนค่าความหนาแน่นต่ำ ค่าความหนาแน่นพลังงานก็จะลดลงต่ำกว่าชีวมวลก่อนผ่านกระบวนการฯ ได้เช่นเดียวกัน ดังแสดงในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ผลผลิตมวล ผลผลิตพลังงาน และความหนาแน่นพลังงาน ของชีวมวลเปลือก/ซังข้าวโพดอัดเม็ดหลังผ่านกระบวนการทอริแฟคชั่นระดับห้องปฏิบัติการที่อุณหภูมิ และเวลาต่าง ๆ

Parameter	Time (min)	Temperature (°C)			
		175	200	225	250
Mass Yield (%)	30	90.49^{dC}	88.60^{cD}	79.19^{bD}	65.89^{aD}
	60	89.82^{dB}	88.22^{cC}	77.79^{bC}	63.45^{aC}
	90	89.13^{dA}	87.67^{cB}	75.35^{bB}	61.69^{aB}
Control = 100%	120	88.73^{dA}	87.04^{cA}	73.77^{bA}	60.02^{aA}
Energy Yield (%)	30	97.10^{dB}	95.75^{cC}	92.56^{bC}	84.81^{aC}
	60	96.16^{dA}	96.00^{cD}	93.08^{bD}	85.19^{aD}
	90	97.89^{dD}	95.40^{cB}	90.73^{bB}	82.36^{aB}
Control = 100%	120	96.11^{dA}	95.15^{cA}	89.57^{bA}	80.88^{aA}
Energy Density (GJ/m^3)	30	9.33^{aA}	10.22^{cA}	10.59^{dAB}	9.88^{bB}
	60	9.75^{aB}	10.56^{cB}	10.76^{dB}	9.98^{bB}
	90	11.21^{cC}	10.74^{bC}	10.75^{bB}	9.56^{aA}
Control=9.63 GJ/m^3	120	9.59^{aB}	10.34^{bA}	10.45^{bA}	9.63^{aA}

หมายเหตุ : - ผลผลิตมวล ผลผลิตพลังงาน และความหนาแน่นพลังงาน ที่มี a, b, c และ d เหมือนกันในแนวนอน ไม่มีความแตกต่าง อย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น ร้อยละ 95 ($P > 0.05$)

- ผลผลิตมวล ผลผลิตพลังงาน และความหนาแน่นพลังงาน ที่มี A, B, C และ D เหมือนกันในแนวตั้ง ไม่มีความแตกต่าง อย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น ร้อยละ 95 ($P > 0.05$)

4.2.6 สรุปสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตเชื้อเพลิงทอริไฟด์เปลือก/ซังข้าวโพดอัดเม็ดระดับห้องปฏิบัติการ

จากผลการศึกษาค่าความหนาแน่น สารระเหย เถ้า คาร์บอนคงตัว ค่าความร้อน คาร์บอน ไฮโดรเจน O/C และ H/C ผลผลิตมวล ผลผลิตพลังงาน และความหนาแน่นพลังงานของชีวมวลเปลือก/ซังข้าวโพดอัดเม็ดที่ผ่านกระบวนการทอริแฟคชั่นระดับห้องปฏิบัติการพบว่าที่อุณหภูมิ 225 และ 250 °C เวลา 30 60 90 และ 120 min เป็นสภาวะที่ให้ชีวมวลมีคุณสมบัติเป็นเชื้อเพลิงทอริไฟด์ แต่ที่สภาวะอุณหภูมิ 225 °C เวลา 60 min เป็นสภาวะที่มีความเหมาะสมในการผลิตเชื้อเพลิงทอริไฟด์เปลือก/ซังข้าวโพดอัดเม็ด เพราะเป็นสภาวะที่มีความหนาแน่นพลังงานสูงสุดเท่ากับ 10.76 GJ/m^3 โดยเพิ่มขึ้น 11.73 % เมื่อเทียบกับชีวมวลเปลือก/ซังข้าวโพดอัดเม็ดก่อนผ่านกระบวนการฯ มีความหนาแน่น 541.00 kg/m^3 ความร้อน 19.89 MJ/kg สารระเหย 75.10 % เถ้า 2.92 % คาร์บอนคงตัว 22.64 % ผลผลิตมวล 77.79 % ผลผลิตพลังงาน 93.08 % และเชื้อเพลิงทอริไฟด์เปลือก/ซังข้าวโพดอัดเม็ดที่ผลิตได้มีคุณสมบัติใกล้เคียงเชื้อเพลิงจากฟอสซิล

4.3 ผลการศึกษาการผลิตเชื้อเพลิงทอริไฟด์ฟางข้าวระดับห้องปฏิบัติการ

ผลการศึกษาการผลิตเชื้อเพลิงทอริไฟด์ฟางข้าวอัดเม็ดที่ผ่านกระบวนการทอริแฟคชั่นระดับห้องปฏิบัติการ ที่อุณหภูมิ 175 200 225 และ 250 °C เวลา 30 60 90 และ 120 min พบว่าคุณสมบัติต่างๆ ของเชื้อเพลิง ผลผลิตมวล และผลผลิตพลังงาน มีลักษณะการเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ และเวลาที่ใช้ในกระบวนการผลิต ดังนี้

4.3.1 คุณสมบัติทางกายภาพของชีวมวลฟางข้าวอัดเม็ดหลังผ่านกระบวนการทอริแฟคชั่นระดับห้องปฏิบัติการ

ผลการศึกษาค่าความชื้นของชีวมวลฟางข้าวอัดเม็ด หลังผ่านกระบวนการทอริแฟคชั่นระดับห้องปฏิบัติการพบว่า ค่าความชื้นของชีวมวลฟางข้าวอัดเม็ด หลังผ่านกระบวนการทอริแฟคชั่นที่อุณหภูมิ 175 200 225 และ 250 °C เวลา 30 60 90 และ 120 min ซึ่งมีค่าลดลงจากค่าความชื้นเริ่มต้น 8.52 %wb มีค่าต่ำกว่า 3.00 %wb (Tumuluru et al., 2010) แล้วเมื่อทดสอบวางชีวมวลฟางข้าวอัดเม็ดไว้ในสภาวะอุณหภูมิห้อง ชีวมวลทั้งหมดยังคงมีค่าความชื้นต่ำกว่า 3.00 %wb

ผลการศึกษาสีของชีวมวลฟางข้าวอัดเม็ดก่อน และหลังผ่านกระบวนการทอริแฟคชั่นระดับห้องปฏิบัติการพบว่า สีของชีวมวลฟางข้าวอัดเม็ดหลังผ่านกระบวนการทอริแฟคชั่นระดับห้องปฏิบัติการที่อุณหภูมิ 175 200 225 และ 250 °C เวลา 30 60 90 และ 120 min มีแนวโน้มเข้มขึ้นตามเวลา และอุณหภูมิ ดังแสดงในรูปที่ 4.5 - 4.6 เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิ และเวลาเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบคาร์บอน และไฮโดรเจน เกิดเป็นสารระเหย และทาร์ (Chen et al.,2011) ส่วนของแข็งหรือชีวมวลที่หลงเหลืออยู่จึงเกิดการเปลี่ยนสีดังกล่าว

ผลการศึกษาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความยาวของชีวมวลฟางข้าวอัดเม็ดก่อนผ่านกระบวนการฯ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 8.00 mm และความยาวเฉลี่ย 27.28 mm ซึ่งมีค่าสูงกว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง และความยาวของชีวมวลฟางข้าวอัดเม็ดหลังผ่านกระบวนการฯ ที่อุณหภูมิ และเวลาต่างๆ โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 7.77 mm และความยาวเฉลี่ย 26.94 mm เนื่องจากในกระบวนการฯ เกิดการระเหยของน้ำ และสารระเหย ของแข็งที่เหลือจึงเกิดการยุบตัวลงตัวแทนที่น้ำ และสารระเหยน้ำหนัก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง และความยาวจึงมีค่าลดลง (Sule, 2012) ซึ่งน้ำหนัก และขนาดที่ลดลง จะส่งผลต่อความหนาแน่นของชีวมวลฟางข้าวอัดเม็ดหลังผ่านกระบวนการฯ โดยจากผลการศึกษา ดังแสดงในตารางที่ 4.5 พบว่า ที่อุณหภูมิ 225 และ 250 °C ที่เวลาต่างๆ ความหนาแน่นของชีวมวลฟางข้าวอัดเม็ด มีแนวโน้มลดลง เมื่ออุณหภูมิ และเวลาของปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$) เนื่องจากที่อุณหภูมิ 225 และ 250 °C เป็นช่วงอุณหภูมิที่ส่งผลให้เกิดการระเหยของสารที่ระเหย (Chen et al., 2011) ส่วนผลการศึกษาความหนาแน่นของชีวมวลฟางข้าวอัดเม็ด หลังผ่านกระบวนการฯ ของงานวิจัยนี้ ที่อุณหภูมิ 175 และ 200 °C ที่เวลา 30 60 90 และ 120 min พบว่า ความหนาแน่นของชีวมวลฟางข้าวอัดเม็ด มีความแปรปรวนอย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$) เนื่องจากที่อุณหภูมิ 175 - 200 °C เป็นช่วงของการระเหยของน้ำ และสารระเหยบางส่วนบริเวณผิวนอกของชีวมวลฟางข้าวอัดเม็ดเท่านั้น ประกอบกับตัวอย่างมีลักษณะอัดเม็ดความหนาแน่นสูงการถ่ายเทความร้อนจึงแตกต่างจากชีวมวลที่ไม่ผ่านการแปรรูป จึงส่งผลให้เกิดการแปรปรวนของค่าความหนาแน่น

4.3.2 คุณสมบัติแบบประมาณของชีวมวลฟางข้าวอัดเม็ดหลังผ่านกระบวนการทอริแฟคชั่นระดับห้องปฏิบัติการ

ผลการศึกษาค่าคุณสมบัติแบบประมาณของชีวมวลฟางข้าวอัดเม็ด ได้แก่ สารระเหย เถ้า และคาร์บอนคงตัว หลังผ่านกระบวนการทอริแฟคชั่นระดับห้องปฏิบัติการ ที่อุณหภูมิ และเวลาต่างๆ พบว่า สารระเหย เถ้า และคาร์บอนคงตัวของชีวมวลฟางข้าวอัดเม็ดที่อุณหภูมิ 175 200 225 และ 250 °C ที่เวลา 30 60 90 และ 120 min สารระเหยมีแนวโน้มลดลง เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$) ส่งผลให้ เถ้า และคาร์บอนคงตัวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อเวลา และอุณหภูมิเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$) เนื่องจากการสลายของเฮมิเซลลูโลสที่มีไฮโดรเจน คาร์บอน และออกซิเจนเป็นส่วนประกอบ และการเกิดกระบวนการไฮโดรไลซิส ที่สารใดๆ ทำปฏิกิริยากันแล้วได้ผลิตภัณฑ์เป็นน้ำกับสารใดๆ สารระเหยจะเริ่มระเหยออกจากชีวมวลที่ อุณหภูมิ 190 °C เวลา 10 min (รัชพล พะวงศ์รัตน์, 2558) ดังนั้นในผลการศึกษานี้ที่อุณหภูมิ 175 และ 200 °C สารระเหย เถ้า และคาร์บอนคงตัวจึงมีค่าการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยอย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$) และเริ่มเปลี่ยนแปลงอย่างมีแนวโน้มตามอุณหภูมิ 225 และ 250 °C และเวลา (Chen et al., 2012; Tumluru et al., 2012) ดังแสดงในตารางที่ 4.6

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ค่าความร้อนเป็นคุณสมบัติสำคัญที่แสดงถึงพลังงานที่สะสมอยู่ในชีวมวล ซึ่งถ้าชีวมวลมีค่าความร้อนสูงจะแสดงให้เห็นว่าชีวมวลดังกล่าวมีคุณภาพของเชื้อเพลิงสูงเช่นกัน โดยผลการศึกษาค่าความร้อนของชีวมวลฟางข้าวอัดเม็ดหลังผ่านกระบวนการฯ ที่อุณหภูมิ และเวลาต่างๆ พบว่า ค่าความร้อนของชีวมวลฟางข้าวอัดเม็ดหลังผ่านกระบวนการฯ มีค่าเพิ่มขึ้น 9.64 - 24.39 % เมื่อเทียบกับค่าความร้อนของชีวมวลฟางข้าวอัดเม็ดก่อนผ่านกระบวนการฯ โดยค่าความร้อนมีแนวโน้มการเพิ่มขึ้น ตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$) ซึ่งผลการเปลี่ยนแปลงของค่าความร้อนนี้มีผลมาจากคุณสมบัติแบบประมาณ ซึ่งค่าความร้อนจะแปรผันตรงกับสารระเหย และคาร์บอนคงตัว และแปรผกผันกับเถ้า (Chen et al., 2012) ดังแสดงในตารางที่ 4.6

4.3.3 องค์ประกอบธาตุคาร์บอนและธาตุไฮโดรเจนของชีวมวลฟางข้าวอัดเม็ดหลังผ่านกระบวนการทอริแฟคชั่นระดับห้องปฏิบัติการ

ผลการศึกษาองค์ประกอบธาตุคาร์บอน และธาตุไฮโดรเจนของชีวมวลฟางข้าวอัดเม็ดหลังผ่านกระบวนการทอริแฟคชั่นระดับห้องปฏิบัติการ ที่อุณหภูมิ และเวลาต่างๆ โดยวิธีการวิเคราะห์คุณสมบัติแบบแยกธาตุ พบว่าตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น และเวลาที่เพิ่มขึ้น องค์ประกอบธาตุคาร์บอนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น แต่ธาตุไฮโดรเจนมีแนวโน้มลดลง เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$) โดยองค์ประกอบธาตุคาร์บอนเพิ่มขึ้น 6.74 - 19.70 % ธาตุไฮโดรเจนลดลง 8.05 -23.83 % เมื่อเทียบกับชีวมวลฟางข้าวอัดเม็ดก่อนผ่านกระบวนการฯ ดังแสดงในตารางที่ 4.7 เนื่องจากอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ไฮโดรเจนหลุดออกจากชีวมวลในรูปสารระเหย (Chen et al., 2015)

นอกจากนี้ยังทำการศึกษาความสัมพันธ์ของธาตุคาร์บอน ธาตุไฮโดรเจน และธาตุออกซิเจน ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ที่แสดงให้เห็นถึง คุณสมบัติการเป็นเชื้อเพลิงซึ่งของเชื้อเพลิงชีวมวลมีความแตกต่างระหว่างเชื้อเพลิงฟอสซิล (Barrio, 2000) โดยอธิบายด้วยความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน O/C และ H/C ผ่านแผนภาพ Van Krevelen Diagrams ดังนี้ ที่อุณหภูมิ 250 °C ชีวมวลฟางข้าวอัดเม็ด หลังผ่านกระบวนการฯ แล้วเมื่อนำความสัมพันธ์ มาพิจารณาพบว่า เชื้อเพลิงทอริไฟด์ฟางข้าวอัดเม็ดมีค่าใกล้เคียงพีต (Peat) มากที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 4.7 ส่วนที่อุณหภูมิ 175 200 และ 225 °C ก็มีแนวโน้มของความสัมพันธ์ของ O/C และ H/C เข้าหาเชื้อเพลิงฟอสซิสเช่นกัน ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Bergman et al., (2005) ที่ทำการศึกษาการผลิตเชื้อเพลิงทอริไฟด์ไม้ด้วยกระบวนการทอริแฟคชั่นที่อุณหภูมิ 250 260 270 275 280 และ 285 °C พบว่า ที่อุณหภมิ 275 และ 280 °C เชื้อเพลิงทอริไฟด์ไม้มีค่าใกล้เคียงพีต และที่อุณหภมิ 285 °C เชื้อเพลิงทอริไฟด์ไม้มีค่าใกล้เคียงถ่านหิน

รูปที่ 4.5 ลักษณะของชีวมวลฟางข้าวอัดเม็ดก่อนผ่านกระบวนการทอริแฟคชั่น

ตารางที่ 4.5 ความหนาแน่นของชีวมวลฟางข้าวอัดเม็ด หลังผ่านกระบวนการทอริแฟคชั่นระดับห้องปฏิบัติการ ที่อุณหภูมิ และเวลาต่าง ๆ

Parameter	Time (min)	Temperature (◦C)			
		175	200	225	250
Bulk Density (kg/m^3)	30	$569^{c\ A}$	$604^{d\ C}$	$553^{b\ B}$	$467^{a\ B}$
	60	$629^{c\ C}$	$548^{b\ A}$	$553^{b\ B}$	$487^{a\ C}$
	90	$569^{c\ A}$	$538^{b\ A}$	$538^{b\ A}$	$457^{a\ A}$
Control=598kg/m^3	120	$594^{d\ B}$	$574^{c\ B}$	$558^{b\ B}$	$523^{a\ D}$

หมายเหตุ : - ความหนาแน่น ที่มี a, b, c และ d เหมือนกันในแนวนอน ไม่มีความแตกต่าง อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น ร้อยละ 95 ($P > 0.05$)

- ความหนาแน่น ที่มี A, B, C และ D เหมือนกันในแนวตั้ง ไม่มีความแตกต่าง อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น ร้อยละ 95 ($P > 0.05$)

รูปที่ 4.6 ลักษณะของชีวมวลฟางข้าวอัดเม็ดหลังผ่านกระบวนการทอริแฟคชั่นระดับห้องปฏิบัติการที่อุณหภูมิและเวลาต่าง ๆ

ตารางที่ 4.6 คุณสมบัติแบบประมาณของชีวมวลฟางข้าวอัดเม็ดหลังผ่านกระบวนการทอริแฟคชั่นระดับห้องปฏิบัติการ ที่อุณหภูมิ และเวลาต่าง ๆ

Parameter	Time (min)	Temperature (°C)			
		175	200	225	250
Volatile Matter	30	$67.07^{\text{c A}}$	$66.79^{\text{c A}}$	$65.04^{\text{b D}}$	$58.59^{\text{a C}}$
(%)	60	$68.05^{\text{d C}}$	$67.33^{\text{c B}}$	$63.31^{\text{b C}}$	$58.99^{\text{a C}}$
	90	$67.51^{\text{d B}}$	$66.80^{\text{c A}}$	$62.65^{\text{b A}}$	$56.36^{\text{a A}}$
Control=69.99 %	120	$67.69^{\text{d BC}}$	$66.59^{\text{c A}}$	$62.85^{\text{b B}}$	$57.23^{\text{a B}}$
Ash	30	$15.91^{\text{a B}}$	$15.92^{\text{a C}}$	$17.27^{\text{b A}}$	$19.64^{\text{c B}}$
(%)	60	$15.04^{\text{a A}}$	$15.19^{\text{a A}}$	$17.39^{\text{b A}}$	$19.25^{\text{c A}}$
	90	$14.78^{\text{a A}}$	$15.47^{\text{b B}}$	$17.37^{\text{c A}}$	$20.42^{\text{d C}}$
Control=15.62 %	120	$14.62^{\text{a A}}$	$16.45^{\text{b D}}$	$18.21^{\text{c B}}$	$19.72^{\text{d B}}$
Fixed Carbon	30	$17.02^{\text{a A}}$	$17.30^{\text{a AB}}$	$17.69^{\text{b A}}$	$21.76^{\text{c A}}$
(%)	60	$16.91^{\text{a A}}$	$17.48^{\text{b BC}}$	$19.30^{\text{c C}}$	$21.76^{\text{d A}}$
	90	$17.70^{\text{a B}}$	$17.72^{\text{a C}}$	$19.98^{\text{b D}}$	$23.22^{\text{c B}}$
Control=14.40 %	120	$17.69^{\text{b B}}$	$16.96^{\text{a A}}$	$18.93^{\text{c B}}$	$23.04^{\text{d B}}$
HHV	30	$15.32^{\text{a A}}$	$15.53^{\text{b A}}$	$16.12^{\text{c A}}$	$16.79^{\text{d A}}$
(MJ/kg)	60	$15.62^{\text{a B}}$	$15.66^{\text{a AB}}$	$16.24^{\text{b AB}}$	$17.04^{\text{c B}}$
	90	$15.24^{\text{a A}}$	$15.83^{\text{b C}}$	$16.45^{\text{c C}}$	$17.17^{\text{d C}}$
Control=13.90MJ/kg	120	$15.24^{\text{a A}}$	$15.70^{\text{b BC}}$	$16.37^{\text{c BC}}$	$17.29^{\text{d C}}$

หมายเหตุ : - คุณสมบัติแบบประมาณ ที่มี a, b, c และ d เหมือนกันในแนวนอน ไม่มีความแตกต่าง อย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น ร้อยละ 95 ($P > 0.05$)

- คุณสมบัติแบบประมาณ ที่มี A, B, C และ D เหมือนกันในแนวตั้ง ไม่มีความแตกต่าง อย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น ร้อยละ 95 ($P > 0.05$)

4.3.4 การย่อยสลายทางความร้อนของชีวมวลฟางข้าวอัดเม็ด

จากผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักโดยอาศัยสมบัติการย่อยสลายทางความร้อนของชีวมวลฟางข้าว ที่อัตราการให้ความร้อน 10 °C/min บรรยากาศ N_2 พิจารณาที่ช่วงอุณหภูมิ 175 - 250 °C พบว่าน้ำหนักของของชีวมวลฟางข้าว คงเหลือประมาณ 87.00 - 92.00 % ดังแสดงในรูปที่ 4.8 ซึ่งเป็นค่าน้ำหนักตามคุณสมบัติของเชื้อเพลิงทอริไฟด์ ตามงานวิจัยของ Tumuluru et al. (2011) ซึ่งพบว่าเชื้อเพลิงทอริไฟด์ควรมีน้ำหนักลดลงเหลือ 70 - 80 % ของน้ำหนักเดิม โดยผลการศึกษานี้

สามารถนำไปใช้ในการทำนายผลผลิตมวลของเชื้อเพลิงทอริไฟด์ฟางข้าวอัดเม็ดหลังผ่านกระบวนการทอริแฟคชั่นได้

ตารางที่ 4.7 องค์ประกอบธาตุคาร์บอนและธาตุไฮโดรเจนของชีวมวลฟางข้าวอัดเม็ดหลังผ่านกระบวนการทอริแฟคชั่นระดับห้องปฏิบัติการ ที่อุณหภูมิ และเวลาต่าง ๆ

Parameter	Time (min)	Temperature (°C)			
		175	200	225	250
C	30	$40.30^{a\,C}$	$40.33^{a\,A}$	$41.34^{b\,A}$	$43.61^{c\,A}$
(%)	60	$40.11^{a\,C}$	$40.76^{b\,AB}$	$42.40^{c\,B}$	$43.60^{d\,A}$
	90	$39.46^{a\,B}$	$40.96^{b\,B}$	$42.24^{c\,B}$	$44.41^{d\,B}$
Control=37.17 %	120	$34.43^{a\,A}$	$40.80^{b\,AB}$	$41.96^{c\,B}$	$44.55^{d\,B}$
H	30	$5.71^{c\,A}$	$5.61^{bc\,A}$	$5.51^{b\,B}$	$5.23^{a\,B}$
(%)	60	$5.63^{c\,A}$	$5.67^{c\,A}$	$5.44^{b\,AB}$	$5.17^{a\,B}$
	90	$5.50^{bc\,B}$	$5.62^{c\,A}$	$5.42^{b\,AB}$	$5.10^{a\,A}$
Control=6.21 %	120	$4.73^{a\,A}$	$5.61^{d\,A}$	$5.39^{c\,A}$	$5.11^{b\,A}$

หมายเหตุ : - องค์ประกอบธาตุคาร์บอนและธาตุไฮโดรเจน ที่มี a, b, c และ d เหมือนกันในแนวนอน ไม่มีความแตกต่าง อย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น ร้อยละ 95 ($P > 0.05$)

- องค์ประกอบธาตุคาร์บอนและธาตุไฮโดรเจน ที่มี A, B, C และ D เหมือนกันในแนวตั้ง ไม่มีความแตกต่าง อย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น ร้อยละ 95 ($P > 0.05$)

4.3.5 ผลผลิตมวล ผลผลิตพลังงาน และความหนาแน่นพลังงานของชีวมวลฟางข้าวอัดเม็ดหลังผ่านกระบวนการทอริแฟคชั่นระดับห้องปฏิบัติการ

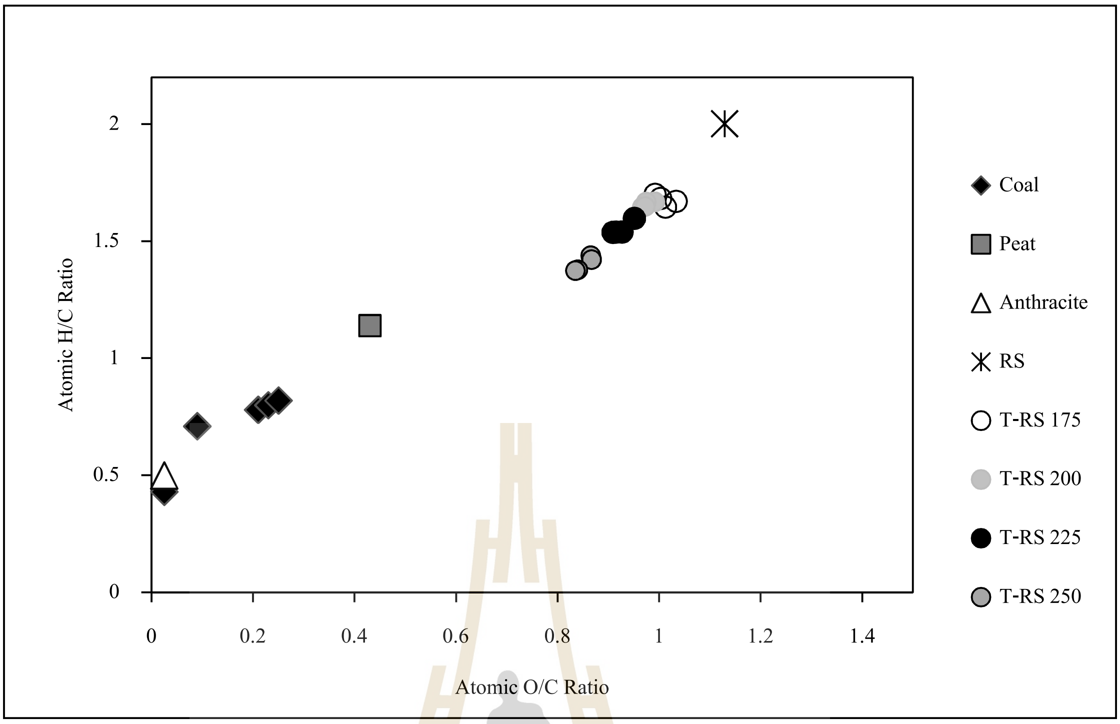
ผลการศึกษาผลผลิตมวลของฟางข้าวอัดเม็ดที่ผ่านกระบวนการทอริแฟคชั่นระดับห้องปฏิบัติการ ที่อุณหภูมิ 175 200 225 และ 250 °C เวลา 30 60 90 และ 120 min พบว่าผลผลิตมวลมีค่าเท่ากับ 70.78 - 90.11% โดยมีแนวโน้มลดลง เมื่อเวลา และอุณหภูมิเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$) เนื่องจากอุณหภูมิ และเวลาที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้เกิดการระเหยของน้ำ และสารระเหย น้ำหนักของชีวมวลที่เหลือจึงมีค่าลดลง ผลผลิตมวลจึงลดลงเช่นกัน (Tumuluru et al., 2011) ได้อธิบายถึงคุณสมบัติของเชื้อเพลิงทอริไฟด์ว่าผลผลิตมวลควรมีค่าประมาณ 70.00 - 80.00 % ดังนั้นเมื่อพิจารณาจากตารางที่ 4.8 ที่อุณหภูมิ 225 °C พบว่าเวลาที่เหมาะสม คือ เวลา 90 และ 120 min และเมื่อพิจารณาที่ อุณหภูมิ 250 °C พบว่าผลผลิตมวลที่เหมาะสมอยู่ที่ช่วง เวลา 30 60 90 และ 120 min จึงเป็นสภาวะที่ให้ผลผลิตมวลตามคุณสมบัติของเชื้อเพลิงทอริไฟด์

ผลการศึกษาผลผลิตพลังงานของชีวมวลฟางข้าวอัดเม็ดที่ผ่านกระบวนการทอริแฟคชั่นระดับห้องปฏิบัติการ ที่อุณหภูมิ และเวลาต่างๆ พบว่าอุณหภูมิ 175 200 225 และ 250 °C ผลผลิตพลังงานมีแนวโน้มลดลง ตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$) โดยลดลงเป็น 88.05 - 99.34 % เนื่องจากอุณหภูมิส่งผลต่อการระเหยของน้ำ สารระเหย และผลผลิตมวลของฟางข้าวอัดเม็ดที่ผ่านกระบวนการฯ (Gucho, 2015)

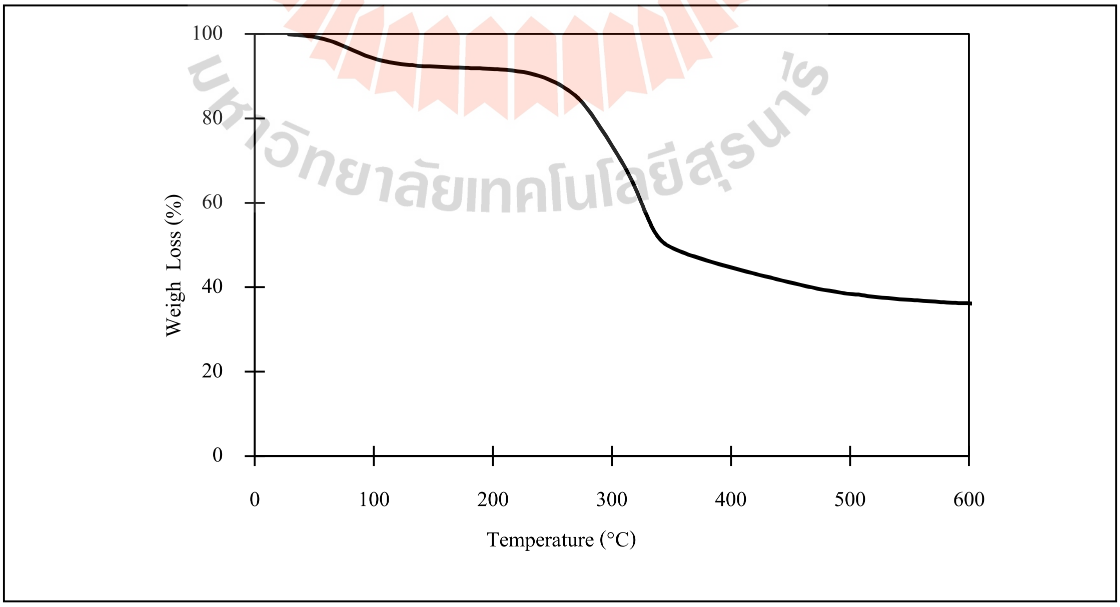
และเมื่อพิจารณาความหนาแน่นพลังงานของชีวมวลฟางข้าวอัดเม็ดที่ผ่านกระบวนการทอริแฟคชั่นระดับห้องปฏิบัติการ แสดงดังตารางที่ 4.8 ที่อุณหภูมิ 225 °C เวลา 90 และ 120 min และ 250 °C เวลา 30 60 90 และ 120 min ซึ่งเป็นช่วงอุณหภูมิ และเวลาที่มีการเปลี่ยนแปลงของผลผลิตมวลที่ให้ชีวมวลฟางข้าวอัดเม็ดมีคุณสมบัติเป็นเชื้อเพลิงทอริไฟด์ พบว่าความหนาแน่นพลังงานของชีวมวลฟางข้าวอัดเม็ดหลังผ่านกระบวนการฯ มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 8.23 GJ/m^3 ถึง 9.84 % เนื่องจากอุณหภูมิ และเวลาส่งผลให้ชีวมวลมีค่าความร้อนเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$) ค่าความหนาแน่นพลังงานจึงเพิ่มขึ้น แต่การเพิ่มขึ้นของความหนาแน่นพลังงานนี้ เป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนกับค่าความหนาแน่น ดังนั้นในสภาวะการผลิตเชื้อเพลิงเทอริไฟด์จะมีช่วงสมดุลความหนาแน่นพลังงานปรากฏเพื่อให้เลือกสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตเชื้อเพลิงทอริไฟด์สำหรับชีวมวลแต่ละชนิด ซึ่งถ้าค่าความร้อนสูงมาก น้ำหนักชีวมวลที่ผ่านกระบวนการฯ จะลดต่ำ จนค่าความหนาแน่นต่ำ ค่าความหนาแน่นพลังงานก็จะลดลงต่ำกว่าชีวมวลก่อนผ่านกระบวนการฯ ได้เช่นเดียวกัน ดังแสดงในตารางที่ 4.8

4.3.6 สรุปสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตเชื้อเพลิงทอริไฟด์ฟางข้าวระดับห้องปฏิบัติการ

จากผลการศึกษาค่าความหนาแน่น สารระเหย เถ้า คาร์บอนคงตัว ค่าความร้อน ความสัมพันธ์ระหว่าง O/C และ H/C ผลผลิตมวล ผลผลิตพลังงาน และความหนาแน่นพลังงานของชีวมวลฟางข้าวอัดเม็ดที่ผ่านกระบวนการทอริแฟคชั่นระดับห้องปฏิบัติการ พบว่าที่อุณหภูมิ 225 °C เวลา 90 และ 120 min และที่อุณหภูมิ 250 °C เวลา 30 60 90 และ 120 min เป็นสภาวะที่ให้ชีวมวลมีคุณสมบัติเป็นเชื้อเพลิงทอริไฟด์ แต่ที่สภาวะอุณหภูมิ 225 °C เวลา 120 min เป็นสภาวะที่มีความเหมาะสมในการผลิตเชื้อเพลิงทอริไฟด์ฟางข้าวอัดเม็ด เพราะเป็นสภาวะที่มีความหนาแน่นพลังงานสูงสุดเท่ากับ 9.13 GJ/m^3 โดยเพิ่มขึ้น 9.74 % เมื่อเทียบกับชีวมวลฟางข้าวอัดเม็ดก่อนผ่านกระบวนการฯ มีความหนาแน่น 558.00 kg/m^3 ความร้อนสูงสุด 16.37 MJ/kg สารระเหย 62.85 % เถ้า 18.21 % คาร์บอนคงตัว 18.93 % ผลผลิตมวล 78.82 % และผลผลิตพลังงาน 92.82 %



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนออกซิเจนต่อคาร์บอนกับสัดส่วนไฮโดรเจนต่อคาร์บอนของชีวมวลฟางข้าวอัดเม็ดก่อนและหลังผ่านกระบวนการทอริแฟคชั่นระดับห้องปฏิบัติการ



รูปที่ 4.8 ลักษณะการย่อยสลายทางความร้อนของชีวมวลฟางข้าวอัดเม็ด

ตารางที่ 4.8 ผลผลิตมวล ผลผลิตพลังงาน และความหนาแน่นพลังงาน ของชีวมวลฟางข้าวอัดเม็ด หลังผ่านกระบวนการทอริแฟคชั่นระดับห้องปฏิบัติการ ที่อุณหภูมิ และเวลาต่าง ๆ

Parameter	Time (min)	Temperature (°C)			
		175	200	225	250
Mass Yield (%)	30	$90.11^{d\,C}$	$88.91^{c\,C}$	$83.32^{b\,C}$	$76.80^{a\,D}$
	60	$89.09^{d\,B}$	$87.69^{c\,B}$	$80.67^{b\,B}$	$73.03^{a\,C}$
	90	$88.69^{d\,B}$	$86.93^{c\,B}$	$79.99^{b\,B}$	$72.03^{a\,B}$
Control=100 %	120	$87.16^{c\,A}$	$85.97^{c\,A}$	$78.82^{b\,A}$	$70.78^{a\,A}$
Energy Yield (%)	30	$99.34^{c\,C}$	$99.36^{c\,D}$	$96.63^{b\,D}$	$92.76^{a\,D}$
	60	$99.66^{d\,D}$	$98.78^{c\,B}$	$94.27^{b\,B}$	$89.53^{a\,C}$
	90	$97.23^{c\,B}$	$98.97^{d\,C}$	$94.69^{b\,C}$	$88.96^{a\,B}$
Control=100 %	120	$95.56^{c\,A}$	$97.10^{d\,A}$	$92.82^{b\,A}$	$88.05^{a\,A}$
Energy Density (GJ/m^3)	30	$8.72^{b\,A}$	$9.39^{d\,C}$	$8.92^{c\,AB}$	$7.85^{a\,A}$
	60	$9.82^{d\,C}$	$8.58^{b\,A}$	$8.98^{c\,AB}$	$8.30^{a\,B}$
	90	$8.67^{bc\,A}$	$8.52^{b\,A}$	$8.85^{c\,A}$	$7.85^{a\,A}$
Control=8.32GJ/m^3	120	$9.06^{a\,B}$	$9.01^{a\,B}$	$9.13^{a\,B}$	$9.05^{a\,C}$

หมายเหตุ : - ผลผลิตมวล ผลผลิตพลังงาน และความหนาแน่นพลังงาน ที่มี a, b, c และ d เหมือนกัน ในแนวนอน ไม่มีความแตกต่าง อย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น ร้อยละ 95 ($P > 0.05$)

- ผลผลิตมวล ผลผลิตพลังงาน และความหนาแน่นพลังงาน ที่มี A, B, C และ D เหมือนกัน ในแนวตั้ง ไม่มีความแตกต่าง อย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น ร้อยละ 95 ($P > 0.05$)

4.4 ผลการศึกษาการผลิตเชื้อเพลิงทอริไฟด์ใบอ้อยระดับห้องปฏิบัติการ

ผลการศึกษาการผลิตเชื้อเพลิงทอริไฟด์ใบอ้อยอัดเม็ดที่ผ่านกระบวนการทอริแฟคชั่นระดับห้องปฏิบัติการ ที่อุณหภูมิ 175 200 225 และ 250 °C เวลา 30 60 90 และ 120 min พบว่า คุณสมบัติต่างๆ ของเชื้อเพลิง ผลผลิตมวล และผลผลิตพลังงาน มีลักษณะการเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ และเวลาที่ใช้ในกระบวนการผลิต ดังนี้

4.4.1 คุณสมบัติทางกายภาพของชีวมวลใบอ้อยอัดเม็ดหลังผ่านกระบวนการทอริแฟคชั่นระดับห้องปฏิบัติการ

ผลการศึกษาค่าความชื้นของชีวมวลใบอ้อยอัดเม็ดหลังผ่านกระบวนการทอริแฟคชั่นระดับห้องปฏิบัติการพบว่า ค่าความชื้นเริ่มต้นของชีวมวลใบอ้อยอัดเม็ดมีค่าเท่ากับ

5.81 % และหลังผ่านกระบวนการทอริแฟคชั่น ที่อุณหภูมิต่างๆ พบว่ามีค่าความชื้นลดลง มีค่าต่ำกว่า 3 %wb เนื่องจากในกระบวนการทอริแฟคชั่นมีการระเหยของน้ำเมื่อชีวมวลได้รับความร้อนที่อุณหภูมิ 100 °C (Tumuluru et al., 2010)

ผลการศึกษาสีของชีวมวลใบอ้อยอัดเม็ดก่อน และหลังผ่านกระบวนการทอริแฟคชั่นระดับห้องปฏิบัติการพบว่า สีของชีวมวลใบอ้อยอัดเม็ดหลังผ่านกระบวนการทอริแฟคชั่นระดับห้องปฏิบัติการที่อุณหภูมิ 175 และ 200 °C เวลา 30 60 90 และ 120 min มีแนวโน้มเข้มขึ้นตามเวลาและอุณหภูมิ Chen et al. (2011) ดังแสดงในรูปที่ 4.9 - 4.10 เนื่องจากอุณหภูมิ และเวลา ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบคาร์บอน และไฮโดรเจนเกิดเป็นสารระเหย และทาร์ ของแข็งหรือชีวมวลที่เหลืออยู่จึงเกิดการเปลี่ยนสีดังกล่าว

ผลการศึกษาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง และความยาวของชีวมวลใบอ้อยอัดเม็ดก่อนผ่านกระบวนการฯ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 8.00 mm และความยาวเฉลี่ย 26.27 mm ซึ่งมีค่าสูงกว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง และความยาวของชีวมวลใบอ้อยอัดเม็ด หลังผ่านกระบวนการฯ ที่อุณหภูมิ และเวลาต่างๆ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 7.80 mm และความยาวเฉลี่ย 25.36 mm เนื่องจากในกระบวนการฯ เกิดการระเหยของน้ำ และสารระเหย ของแข็งที่เหลือจึงเกิดการยุบตัวลงแทนที่น้ำ และสารระเหย (Sule, 2012) น้ำหนัก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง และความยาวจึงมีค่าลดลง ซึ่งน้ำหนัก และขนาดที่ลดลง จะส่งผลต่อความหนาแน่นของชีวมวลใบอ้อยอัดเม็ด หลังผ่านกระบวนการฯ โดยจากผลการศึกษา ดังแสดงในตารางที่ 4.9 พบว่า ที่อุณหภูมิ 175 200 225 และ 250 °C ที่เวลา 30 60 90 และ 120 min ความหนาแน่นของชีวมวลใบอ้อยอัดเม็ด มีแนวโน้มลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$) เนื่องจากอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้เกิดการระเหยของสารที่ระเหย (Chen et al., 2011) โดยแนวโน้มการลดลงของความหนาแน่นมีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ Sule (2012) ที่ทำการศึกษาการผลิตเชื้อเพลิงทอริไฟด์ Miscanthus ที่อุณหภูมิต่างๆ แล้วพบว่า ความหนาแน่นมีค่าลดลง เมื่ออุณหภูมิ และเวลาเพิ่มขึ้นเช่นกัน ส่วนผลการศึกษาความหนาแน่นของชีวมวลใบอ้อยอัดเม็ด หลังผ่านกระบวนการฯ ของงานวิจัยนี้ ที่อุณหภูมิ 175 และ 200°C ที่เวลา 30 60 90 และ 120 min พบว่า ความหนาแน่นของชีวมวลฟางข้าวอัดเม็ด มีความแปรปรวนอย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$) เนื่องจากที่อุณหภูมิ 175 - 200 °C เป็นช่วงของการระเหยของน้ำ และสารระเหยบางส่วนบริเวณบริเวณผิวนอกของชีวมวลใบอ้อยอัดเม็ดเท่านั้น ประกอบกับตัวอย่างมีลักษณะอัดเม็ดความหนาแน่นสูงการถ่ายเทความร้อนจึงแตกต่างจากชีวมวลที่ไม่ผ่านการแปรรูป จึงส่งผลให้เกิดการแปรปรวนของค่าความหนาแน่น

ตารางที่ 4.9 ความหนาแน่นของชีวมวลใบอ้อยอัดเม็ด หลังผ่านกระบวนการทอริแฟคชั่นระดับห้องปฏิบัติการ ที่อุณหภูมิ และเวลาต่าง ๆ

Parameter	Time (min)	Temperature (°C)			
		175	200	225	250
Bulk Density	30	$670^{c\,A}$	$624^{b\,A}$	$675^{c\,C}$	$599^{a\,A}$
(kg/m^3)	60	$660^{b\,A}$	$655^{b\,C}$	$635^{a\,B}$	$635^{a\,C}$
	90	$701^{c\,B}$	$640^{b\,B}$	$624^{a\,A}$	$619^{a\,B}$
Control=717.11kg/m^3	120	$665^{c\,A}$	$665^{c\,C}$	$619^{b\,A}$	$599^{a\,A}$

หมายเหตุ : - ความหนาแน่น ที่มี a, b, c และ d เหมือนกันในแนวนอน ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น ร้อยละ 95 ($P > 0.05$)

- ความหนาแน่น ที่มี A, B, C และ D เหมือนกันในแนวตั้ง ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น ร้อยละ 95 ($P > 0.05$)

รูปที่ 4.9 ลักษณะของชีวมวลใบอ้อยอัดเม็ดก่อนผ่านกระบวนการทอริแฟคชั่น

4.4.2 คุณสมบัติแบบประมาณของชีวมวลใบอ้อยอัดเม็ดหลังผ่านกระบวนการทอริแฟคชั่นระดับห้องปฏิบัติการ

ผลการศึกษาค่าคุณสมบัติแบบประมาณของชีวมวลใบอ้อยอัดเม็ด ได้แก่ สารระเหย เถ้า และคาร์บอนคงตัว หลังผ่านกระบวนการทอริแฟคชั่นระดับห้องปฏิบัติการ ที่อุณหภูมิ และเวลาต่างๆ พบว่า สารระเหย เถ้า และคาร์บอนคงตัวของชีวมวลใบอ้อยอัดเม็ดที่อุณหภูมิ 175 200 225

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

และ 250 °C ที่เวลา 30 60 90 และ 120 min มีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับสารระเหยของชีวมวลใบอ้อยอัดเม็ดก่อนผ่านกระบวนการฯ และที่อุณหภูมิ 200 225 และ 250 °C ที่เวลา 30 60 90 และ 120 min สารระเหยมีแนวโน้มลดลง เมื่อเวลา และอุณหภูมิเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$) เนื่องจากการสลายของ เฮมิเซลลูโลสที่มีไฮโดรเจน คาร์บอน และออกซิเจนเป็นส่วนประกอบ และการเกิดกระบวนการไฮโดรไลซิส ที่สารใดๆ ทำปฏิกิริยากันแล้ว ได้ผลิตภัณฑ์เป็นน้ำกับสารใดๆ จะเกิดที่สภาวะอุณหภูมิ 190 °C เวลา 10 min (รัชพล พะวงศ์รัตน์, 2558) ในผลการศึกษานี้ที่อุณหภูมิ 175 °C สารระเหย จึงเกิดการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยอย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$) และเริ่มเปลี่ยนแปลงอย่างมีแนวโน้มตามอุณหภูมิ และเวลาที่อุณหภูมิ 200 225 และ 250 °C ส่วนเถ้า และคาร์บอนคงตัวมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย เนื่องจากชีวมวลใบอ้อยที่นำมาผลิตเป็นเชื้อเพลิงทอริไฟด์ในงานวิจัยนี้มีเถ้าสูง เพราะสิ่งเจือปนที่ติดมาในกระบวนการเก็บรวบรวมจากแปลงเถ้าจึงมีค่าสูง รวมถึงใบอ้อยที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้เป็นใบอ้อยที่เก็บรักษาไว้เกิน 1 ปี ดังนั้นจึงเกิดการสลายของไฮโดรเจน และคาร์บอน (Rupar and Sanati, 2005) ดังแสดงในตารางที่ 4.10

ค่าความร้อนเป็นคุณสมบัติที่สำคัญอีกคุณสมบัติหนึ่งซึ่ง แสดงถึงพลังงานที่สะสมอยู่ในชีวมวล ซึ่งถ้าชีวมวลมีความร้อนสูงจะแสดงให้เห็นว่าชีวมวลดังกล่าวมีคุณภาพสูงเช่นกัน โดยผลการศึกษาค่าความร้อนของชีวมวลใบอ้อยอัดเม็ด หลังผ่านกระบวนการฯ ที่อุณหภูมิ และเวลาต่างๆ พบว่า ค่าความร้อนของชีวมวลใบอ้อยอัดเม็ด หลังผ่านกระบวนการฯ มีค่าเพิ่มขึ้น 3.20 - 16.21 % เมื่อเทียบกับค่าความร้อนของชีวมวลใบอ้อยอัดเม็ด ก่อนผ่านกระบวนการฯ โดยที่ค่าความร้อนมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย เนื่องจากมีค่าเถ้าสูง โดยผลการเปลี่ยนแปลงของค่าความร้อนนี้ มีผลมาจากคุณสมบัติแบบประมาณ (Chen et al., 2012) ซึ่งค่าความร้อนจะแปรผันตรงกับสารระเหย และคาร์บอนคงตัว และแปรผกผันกับเถ้า ดังแสดงในตารางที่ 4.10 แต่อย่างไรก็ดีในการผลิตเชื้อเพลิงทอริไฟด์ด้วยกระบวนการทอริแฟคชั่นนั้นต้องพิจารณา ผลผลิตมวล และผลผลิตพลังงานร่วมด้วย เนื่องจากถ้าเชื้อเพลิงทอริไฟด์มีค่าความร้อนสูง จะให้ผลผลิตมวล และผลผลิตพลังงานต่ำ ดังนั้นจึงต้องพิจารณาหาจุดสมดุลระหว่าง ค่าความร้อน ผลผลิตมวล และผลผลิตพลังงานต่อไป

4.4.3 องค์ประกอบธาตุคาร์บอนและไฮโดรเจนของชีวมวลใบอ้อยอัดเม็ดหลังผ่านกระบวนการทอริแฟคชั่นระดับห้องปฏิบัติการ

ผลการศึกษาองค์ประกอบธาตุคาร์บอน และธาตุไฮโดรเจนของชีวมวลใบอ้อยอัดเม็ดหลังผ่านกระบวนการทอริแฟคชั่นระดับห้องปฏิบัติการ ที่อุณหภูมิ และเวลาต่างๆ โดยวิธีการวิเคราะห์คุณสมบัติแบบแยกธาตุพบว่า ที่อุณหภูมิ 175 200 225 และ 250°C ที่เวลา 30 60 90 และ 120 min องค์ประกอบธาตุคาร์บอน และธาตุไฮโดรเจนมีความแปรปรวน เมื่ออุณหภูมิ และเวลาเพิ่มขึ้น

อย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$) โดยองค์ประกอบธาตุคาร์บอนเพิ่มขึ้นสูงสุด 28.12 % ธาตุไฮโดรเจนลดลงต่ำสุด 46.70 % เมื่อเทียบกับชีวมวลใบอ้อยอัดเม็ดก่อนผ่านกระบวนการฯ ดังแสดงในตารางที่ 4.11 เนื่องจากค่าเถ้าที่สูง และอายุการเก็บรักษาชีวมวลใบอ้อยก่อนนำมาใช้ในการทดสอบ

ตารางที่ 4.10 คุณสมบัติแบบประมาณของชีวมวลใบอ้อยอัดเม็ด หลังผ่านกระบวนการทอริแฟคชั่นระดับห้องปฏิบัติการ ที่อุณหภูมิ และเวลาต่าง ๆ

Parameter	Time (min)	Temperature (°C)			
		175	200	225	250
Volatile Matter (%)	30	$55.62^{c\,C}$	$56.86^{c\,B}$	$51.31^{b\,C}$	$47.97^{a\,B}$
	60	$53.14^{c\,B}$	$54.61^{c\,A}$	$49.51^{b\,B}$	$44.18^{a\,A}$
	90	$56.93^{d\,D}$	$54.01^{c\,A}$	$47.97^{b\,A}$	$43.47^{a\,A}$
Control=53.51 %	120	$52.51^{c\,A}$	$54.45^{d\,A}$	$48.86^{b\,AB}$	$44.40^{a\,A}$
Ash (%)	30	$34.67^{b\,B}$	$32.63^{a\,A}$	$38.25^{c\,A}$	$41.78^{d\,A}$
	60	$37.29^{b\,C}$	$35.20^{a\,AB}$	$40.31^{c\,B}$	$43.20^{d\,BC}$
	90	$31.70^{a\,A}$	$35.81^{b\,B}$	$41.78^{c\,B}$	$44.02^{c\,C}$
Control=35.73 %	120	$38.64^{b\,D}$	$35.28^{a\,AB}$	$41.00^{c\,B}$	$42.80^{d\,B}$
Fixed Carbon (%)	30	$9.72^{a\,B}$	$10.51^{a\,A}$	$10.44^{a\,A}$	$10.25^{a\,A}$
	60	$9.57^{a\,B}$	$10.19^{a\,A}$	$10.18^{a\,A}$	$12.62^{b\,B}$
	90	$11.37^{b\,C}$	$10.17^{a\,A}$	$10.25^{a\,A}$	$12.51^{c\,B}$
Control=10.76 %	120	$8.85^{a\,A}$	$10.27^{b\,A}$	$10.13^{b\,A}$	$12.80^{c\,B}$
HHV (MJ/kg)	30	$11.08^{b\,B}$	$10.69^{a\,AB}$	$11.45^{c\,A}$	$11.58^{d\,A}$
	60	$10.89^{b\,A}$	$10.63^{a\,A}$	$11.49^{c\,A}$	$11.60^{d\,A}$
	90	$11.09^{b\,B}$	$10.77^{a\,B}$	$11.51^{c\,A}$	$11.75^{d\,B}$
Control=10.30 MJ/kg	120	$10.76^{a\,A}$	$10.97^{b\,C}$	$11.53^{c\,A}$	$11.97^{d\,C}$

หมายเหตุ : - คุณสมบัติแบบประมาณที่มี a, b, c และ d เหมือนกันในแนวนอน ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น ร้อยละ 95 ($P > 0.05$)

- คุณสมบัติแบบประมาณที่มี A, B, C และ D เหมือนกันในแนวตั้ง ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น ร้อยละ 95 ($P > 0.05$)

นอกจากนี้ยังทำการศึกษาความสัมพันธ์ขององค์ประกอบธาตุคาร์บอน ธาตุไฮโดรเจน และธาตุออกซิเจน ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ที่แสดงให้เห็นถึงความแตกต่างระหว่างเชื้อเพลิงฟอสซิลกับเชื้อเพลิงชีวมวล (Barrio, 2000) โดยอธิบายด้วย O/C และ H/C ผ่านแผนภาพ Van Krevelen Diagrams ดังนี้ ที่อุณหภูมิ 250 °C ชีวมวลใบอ้อยอัดเม็ด หลังผ่านกระบวนการฯ มีค่า O/C และ H/C มีค่าเข้าใกล้เชื้อเพลิงฟอสซิลมากที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 4.11 ส่วนที่อุณหภูมิ 175 200 และ 225 °C ก็มีแนวโน้มของความสัมพันธ์ของ O/C และ H/C เข้าหาเชื้อเพลิงฟอสซิสเช่นกัน

4.4.4 การย่อยสลายทางความร้อนของชีวมวลใบอ้อยอัดเม็ด

จากผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักโดยอาศัยสมบัติการย่อยสลายทางความร้อนของชีวมวลใบอ้อยที่อัตราการให้ความร้อน 10 °C/min บรรยากาศ N_2 พบว่า ที่อุณหภูมิ 175 - 250 °C มีน้ำหนักของของชีวมวลใบอ้อยคงเหลือ 94.00 - 95.00 % ดังแสดงในรูปที่ 4.12 ซึ่งมีค่าสูงเนื่องจากผลของเถ้า และอายุการเก็บรักษา

4.4.5 ผลผลิตมวล ผลผลิตพลังงาน และความหนาแน่นพลังงานของชีวมวลใบอ้อยอัดเม็ดหลังผ่านกระบวนการทอริแฟคชั่นระดับห้องปฏิบัติการ

ผลการศึกษาผลผลิตมวลของใบอ้อยอัดเม็ดที่ผ่านกระบวนการทอริแฟคชั่นระดับห้องปฏิบัติการที่อุณหภูมิ และเวลาต่างๆ พบว่า ผลผลิตมวลมีค่า 60.02 - 90.49% โดยมีแนวโน้มลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$) เมื่อเวลา และอุณหภูมิเพิ่มขึ้น เนื่องจากอุณหภูมิ และเวลาที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้เกิดการระเหยของน้ำ และสารระเหย น้ำหนักของชีวมวลที่เหลือจึงมีค่าลดลง ผลผลิตมวลจึงลดลงเช่นกัน (Sule, 2015; Gucho, 2015) ดังแสดงในตารางที่ 4.12

ผลการศึกษาผลผลิตพลังงานของชีวมวลใบอ้อยอัดเม็ดที่ผ่านกระบวนการทอริแฟคชั่นระดับห้องปฏิบัติการ ที่อุณหภูมิ และเวลาต่างๆ พบว่า อุณหภูมิ 225 และ 250 °C ผลผลิตพลังงานมีแนวโน้มลดลง ตามอุณหภูมิ และเวลาที่เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$) โดยลดลงเป็น 93.24 - 99.78 % เนื่องจากอุณหภูมิ และเวลาส่งผลต่อการระเหยของน้ำ สารระเหย และผลผลิตมวลของใบอ้อยอัดเม็ดที่ผ่านกระบวนการฯ ผลิตผลิตพลังงานจึงมีแนวโน้มลดลงในลักษณะดังกล่าวตามการลดลงของสารระเหย ดังแสดงในตารางที่ 4.12

และเมื่อพิจารณาความหนาแน่นพลังงานของชีวมวลใบอ้อยอัดเม็ดที่ผ่านกระบวนการทอริแฟคชั่นระดับห้องปฏิบัติการ ที่อุณหภูมิ 200 225 และ 250 °C เวลา 30 60 90 และ 120 min ซึ่งเป็นช่วงอุณหภูมิ และเวลาที่มีการเปลี่ยนแปลงของสารระเหยให้ชีวมวลใบอ้อยอัดเม็ดมีคุณสมบัติเป็นเชื้อเพลิงทอริไฟด์พบว่า ความหนาแน่นพลังงานของชีวมวลใบอ้อยอัดเม็ด หลังผ่านกระบวนการฯ มีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$) เมื่อเทียบกับชีวมวลใบอ้อยอัดเม็ดก่อนผ่านกระบวนการฯ เนื่องจากเถ้าที่สูง และอายุการเก็บรักษาชีวมวล ดังแสดงในตารางที่ 4.12 ดังนั้น

ชีวมวลที่จะนำมาผลิตเป็นเชื้อเพลิงทอริไฟด์นั้นจะต้องมีการคัดเลือกคุณสมบัติแบบประมาณและควรนำมาผลิตเป็นเชื้อเพลิงทอริไฟด์ทันทีหลังเก็บรวมรวมจากแปลงเกษตร

4.4.6 สรุปสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตเชื้อเพลิงทอริไฟด์ใบอ้อยระดับห้องปฏิบัติการ

จากผลการศึกษาค่าความหนาแน่น สารระเหย เถ้า คาร์บอนคงตัว ค่าความร้อน คาร์บอน ไฮโดรเจน O/C และ H/C ผลผลิตมวล ผลผลิตพลังงาน และความหนาแน่นพลังงานของชีวมวลใบอ้อยอัดเม็ด ที่ผ่านกระบวนการทอริแฟคชั่นระดับห้องปฏิบัติการพบว่า ที่อุณหภูมิ 200 225 และ 250 °C เวลา 30 60 90 และ 120 min เป็นสภาวะที่ให้ชีวมวลมีคุณสมบัติเป็นเชื้อเพลิงทอริไฟด์ แต่ที่สภาวะอุณหภูมิ 225 °C เวลา 30 min เป็นสภาวะที่มีความเหมาะสมในการผลิตเชื้อเพลิงทอริไฟด์ใบอ้อยอัดเม็ด เพราะเป็นสภาวะที่มีความหนาแน่นพลังงานสูงสุดมีค่าเท่ากับ 7.73 GJ/m^3 มีความหนาแน่น 675.00 kg/m^3 ค่าความร้อน 11.45 MJ/kg สารระเหย 51.31 % เถ้า 38.25 % คาร์บอนคงตัว 10.44 % ผลผลิตมวล 77.79 % และผลผลิตพลังงาน 89.77 %

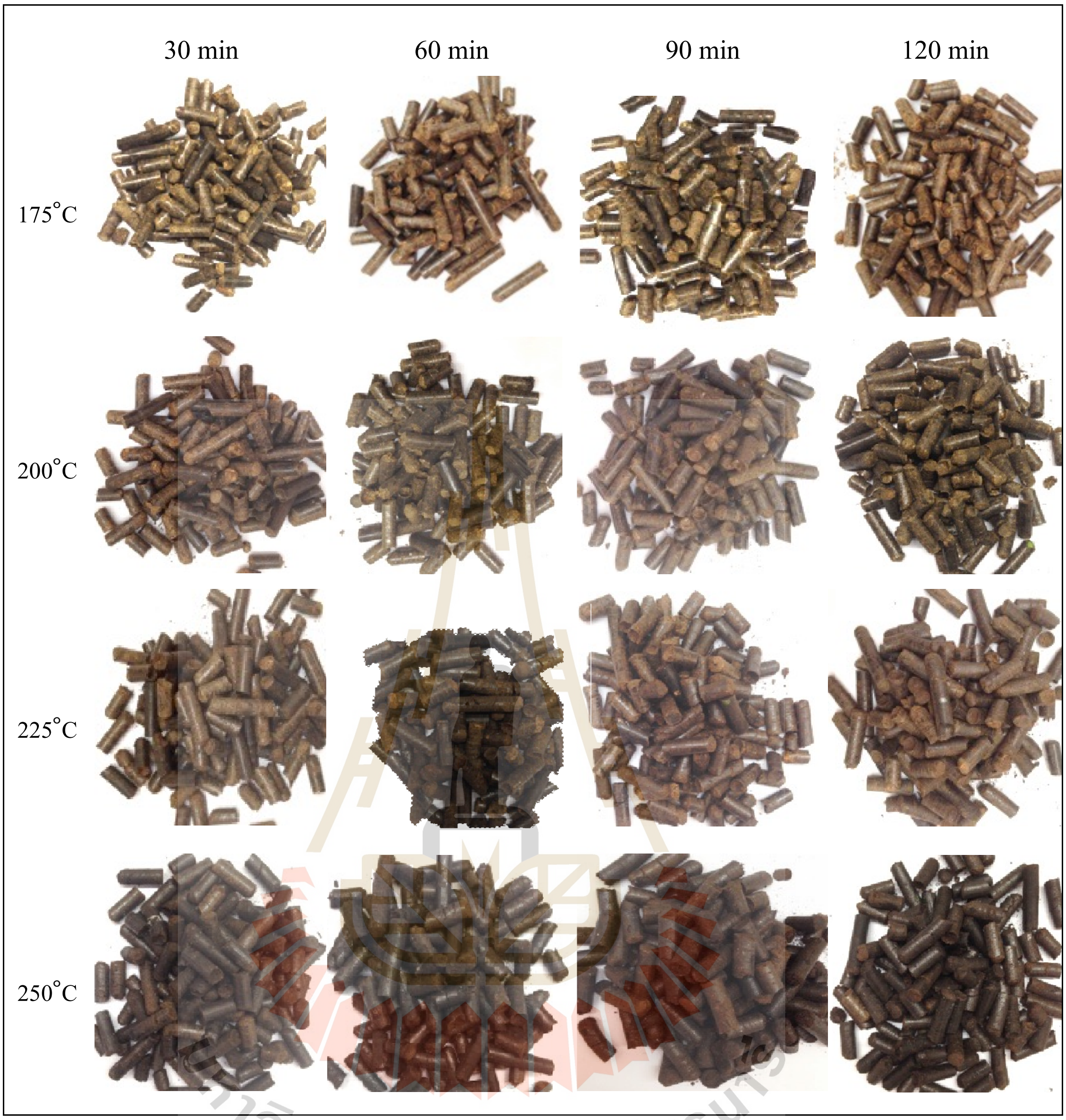
ตารางที่ 4.11 องค์ประกอบธาตุคาร์บอนและธาตุไฮโดรเจนของชีวมวลใบอ้อยอัดเม็ดหลังผ่านกระบวนการทอริแฟคชั่นระดับห้องปฏิบัติการ ที่อุณหภูมิ และเวลาต่าง ๆ

Parameter	Time (min)	Temperature (°C)			
		175	200	225	250
C (%)	30	30.32^{bC}	28.6^{aB}	31.52^{cD}	43.37^{dD}
	60	26.95^{aA}	28.20^{bA}	29.77^{cB}	30.6^{dA}
	90	43.05^{dD}	28.53^{aB}	30.15^{bC}	32.59^{cB}
Control=33.85 %	120	30.07^{bB}	31.62^{cC}	28.88^{aA}	42.99^{dC}
H (%)	30	4.15^{bC}	3.79^{aB}	3.89^{aB}	6.23^{cD}
	60	2.99^{aA}	3.88^{cB}	3.69^{bA}	3.74^{bcA}
	90	5.23^{cD}	3.19^{aA}	4.19^{bC}	4.11^{bB}
Control=5.61 %	120	3.50^{aB}	4.18^{cC}	3.89^{bB}	6.12^{dC}

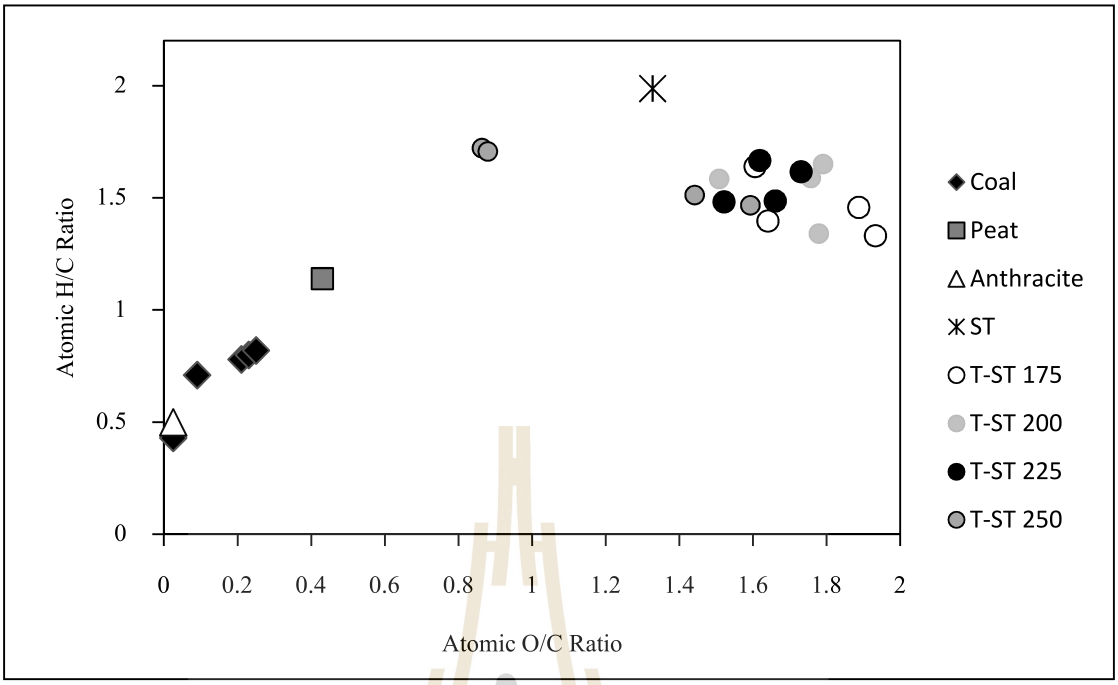
หมายเหตุ : - องค์ประกอบธาตุคาร์บอน และธาตุไฮโดรเจนที่มี a, b, c และ d เหมือนกันในแนวนอน ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น ร้อยละ 95 (P > 0.05)

- องค์ประกอบธาตุคาร์บอน และธาตุไฮโดรเจนที่มี A, B, C และ D เหมือนกันในแนวตั้ง ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น ร้อยละ 95 (P > 0.05)

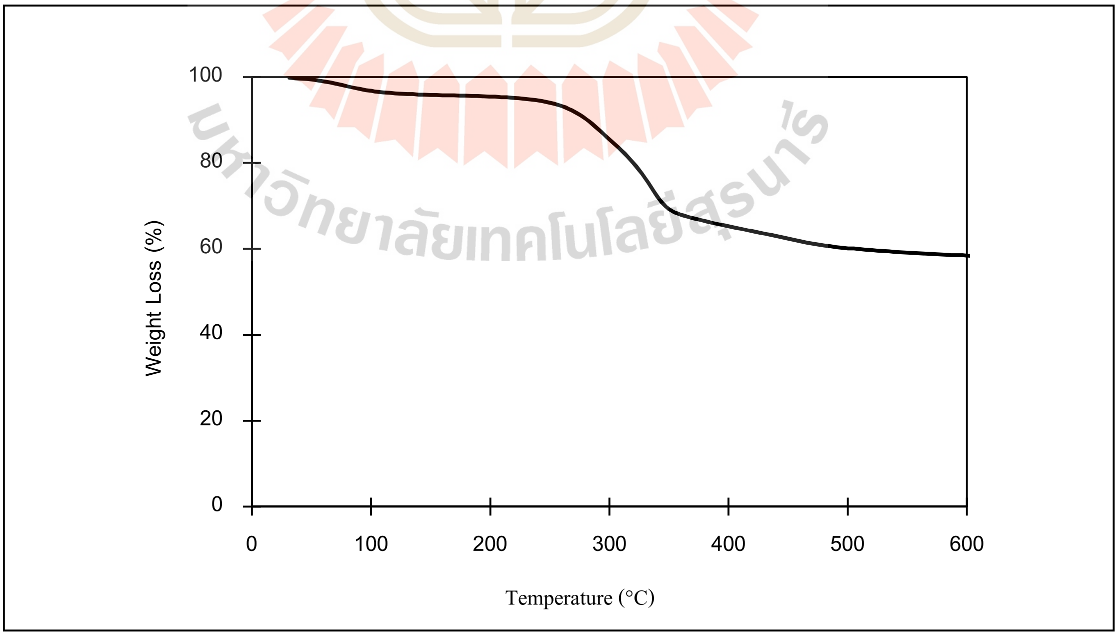
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 4.10 ลักษณะของชีวมวลใบอ้อยอัดเม็ดหลังผ่านกระบวนการทอริแฟคชั่น ระดับห้องปฏิบัติการ ที่อุณหภูมิ และเวลาต่าง ๆ



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนออกซิเจนต่อคาร์บอนกับสัดส่วนไฮโดรเจนต่อคาร์บอนของชีวมวลใบอ้อยอัดเม็ดก่อนและหลังผ่านกระบวนการทอริแฟคชั่นระดับห้องปฏิบัติการ



รูปที่ 4.12 ลักษณะการย่อยสลายทางความร้อนของชีวมวลใบอ้อยอัดเม็ด

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 4.12 ผลผลิตมวล ผลผลิตพลังงาน และความหนาแน่นพลังงาน ของชีวมวลใบอ้อยอัดเม็ด หลังผ่านกระบวนการทอริแฟคชั่นระดับห้องปฏิบัติการ ที่อุณหภูมิ และเวลาต่าง ๆ

Parameter	Time (min)	Temperature (°C)			
		175	200	225	250
Mass Yield (%)	30	$92.88^{c\,C}$	$92.38^{c\,D}$	$89.77^{b\,C}$	$84.19^{a\,D}$
	60	$92.57^{d\,BC}$	$91.74^{c\,C}$	$88.01^{b\,B}$	$82.91^{a\,C}$
	90	$92.20^{d\,AB}$	$90.97^{c\,B}$	$87.80^{b\,B}$	$81.71^{a\,B}$
Control=100 %	120	$91.92^{d\,A}$	$89.21^{c\,A}$	$86.32^{b\,A}$	$80.10^{a\,A}$
Energy Yield (%)	30	$99.78^{c\,C}$	$95.91^{b\,B}$	$99.53^{c\,C}$	$94.68^{a\,B}$
	60	$97.91^{c\,B}$	$94.68^{b\,A}$	$98.21^{c\,B}$	$93.40^{a\,A}$
	90	$98.86^{c\,C}$	$95.13^{b\,AB}$	$98.15^{c\,B}$	$93.24^{a\,A}$
Control=100 %	120	$96.06^{c\,A}$	$94.98^{b\,AB}$	$96.63^{c\,A}$	$93.17^{a\,A}$
Energy Density (GJ/m^3)	30	$7.42^{c\,B}$	$6.67^{a\,A}$	$7.73^{d\,C}$	$6.94^{b\,A}$
	60	$7.19^{b\,A}$	$6.96^{a\,B}$	$7.30^{b\,B}$	$7.37^{b\,C}$
	90	$7.78^{c\,C}$	$6.90^{a\,B}$	$7.18^{b\,AB}$	$7.28^{b\,BC}$
Control=9.28GJ/m^3	120	$7.15^{a\,A}$	$7.29^{a\,C}$	$7.14^{a\,A}$	$7.18^{a\,B}$

หมายเหตุ : - ผลผลิตมวล ผลผลิตพลังงาน และความหนาแน่นพลังงาน ที่มี a, b, c และ d เหมือนกัน ในแนวนอน ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น ร้อยละ 95 (P > 0.05)

- ผลผลิตมวล ผลผลิตพลังงาน และความหนาแน่นพลังงาน ที่มี A, B, C และ D เหมือนกัน ในแนวตั้ง ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น ร้อยละ 95 (P > 0.05)

4.5 ผลการศึกษาการผลิตเชื้อเพลิงทอริไฟด์เปลือก/ซังข้าวโพดระดับต้นแบบ

ผลการศึกษาการผลิตเชื้อเพลิงทอริไฟด์เปลือก/ซังข้าวโพดอัดเม็ดด้วยกระบวนการทอริแฟคชั่นระดับต้นแบบ ที่ปริมาณการป้อนชีวมวลอัดเม็ด 50 100 และ 150 kg ที่สภาวะอุณหภูมิ 200 225 และ 250 °C และเวลาที่เกิดปฏิกิริยา 30 60 90 และ 120 min โดยมีผลการศึกษาดังนี้

4.5.1 คุณสมบัติทางกายภาพของเชื้อเพลิงทอริไฟด์เปลือก/ซังข้าวโพดหลังผ่านกระบวนการทอริแฟคชั่นระดับต้นแบบ

ผลการศึกษาค่าความชื้นของชีวมวลเปลือก/ซังข้าวโพดอัดเม็ดหลังผ่านกระบวนการทอริแฟคชั่นระดับต้นแบบพบว่า ค่าความชื้นของชีวมวลเปลือก/ซังข้าวโพดอัดเม็ดหลังผ่านกระบวนการทอริแฟคชั่น ที่ปริมาณการป้อนเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด 50 100 และ 150 kg อุณหภูมิ 200 °C และเวลา 30 60 และ 90 min และที่ปริมาณการป้อนชีวมวล 150 kg อุณหภูมิ 225

และ 250 °C และเวลา 30 min มีค่าความชื้นของชีวมวลเปลือก/ซังข้าวโพดอัดเม็ดหลังผ่านกระบวนการฯ สูงกว่า 3.00 % ซึ่งคุณสมบัติดังกล่าว ยังไม่มีคุณสมบัติความเป็นเชื้อเพลิงทอริไฟด์ เพราะชีวมวล หรือเชื้อเพลิงที่ผ่านกระบวนการทอริแฟคชั่น เรียกว่า เชื้อเพลิงทอริไฟด์นั้นจะมีคุณสมบัติค่าความชื้นต่ำกว่า 3.00 % (Lipinsky, Arcate and Reed, 2002) ดังแสดงในตารางที่ 4.13

ผลการศึกษาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง และความยาวของชีวมวลเปลือก/ซังข้าวโพดอัดเม็ด ก่อนผ่านกระบวนการฯ พบว่ามีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 8.00 mm และความยาวเฉลี่ย 27.79 mm ซึ่งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง และความยาวของชีวมวลเปลือก/ซังข้าวโพดอัดเม็ด หลังผ่านกระบวนการฯ ที่อุณหภูมิ และเวลาต่างๆ โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 7.88 mm และความยาวเฉลี่ย 10 mm โดยความยาวเฉลี่ยที่ลดลงเกิดการเคลื่อนที่ของชีวมวลภายในเครื่องผลิตเชื้อเพลิงฯ ขณะได้รับความร้อนจึงเกิดการหัก ความยาวจึงลดลง ส่งผลให้ความหนาแน่นมีค่าเพิ่มขึ้นสูงสุด 25 % เมื่อเทียบกับชีวมวลเปลือก/ซังข้าวโพดอัด เม็ดก่อนผ่านกระบวนการฯ ดังแสดงในตารางที่ 4.13 ซึ่งลักษณะการหักของชีวมวลที่เกิดขึ้นนั้นไม่ส่งผลกระทบกับลักษณะทางกายภาพและการนำไปใช้งานแต่อย่างใด เพราะยังคงสภาพเป็นชีวมวลอัดเม็ด ที่พร้อมใช้งาน ดังนั้นการผลิตเชื้อเพลิงทอร์ไฟด์ โดยการนำชีวมวลมาอัดเม็ดก่อน แล้วทำการเพิ่มคุณภาพด้วยเทคโนโลยีทอริแฟคชั่น โดยใช้เครื่องผลิตเชื้อเพลิงทอริไฟด์แบบใบกวนนั้นสามารถผลิตได้จริงในระดับต้นแบบ และสามารถพัฒนาต่อยอดไปสู่เชิงพานิชย์ต่อไปได้

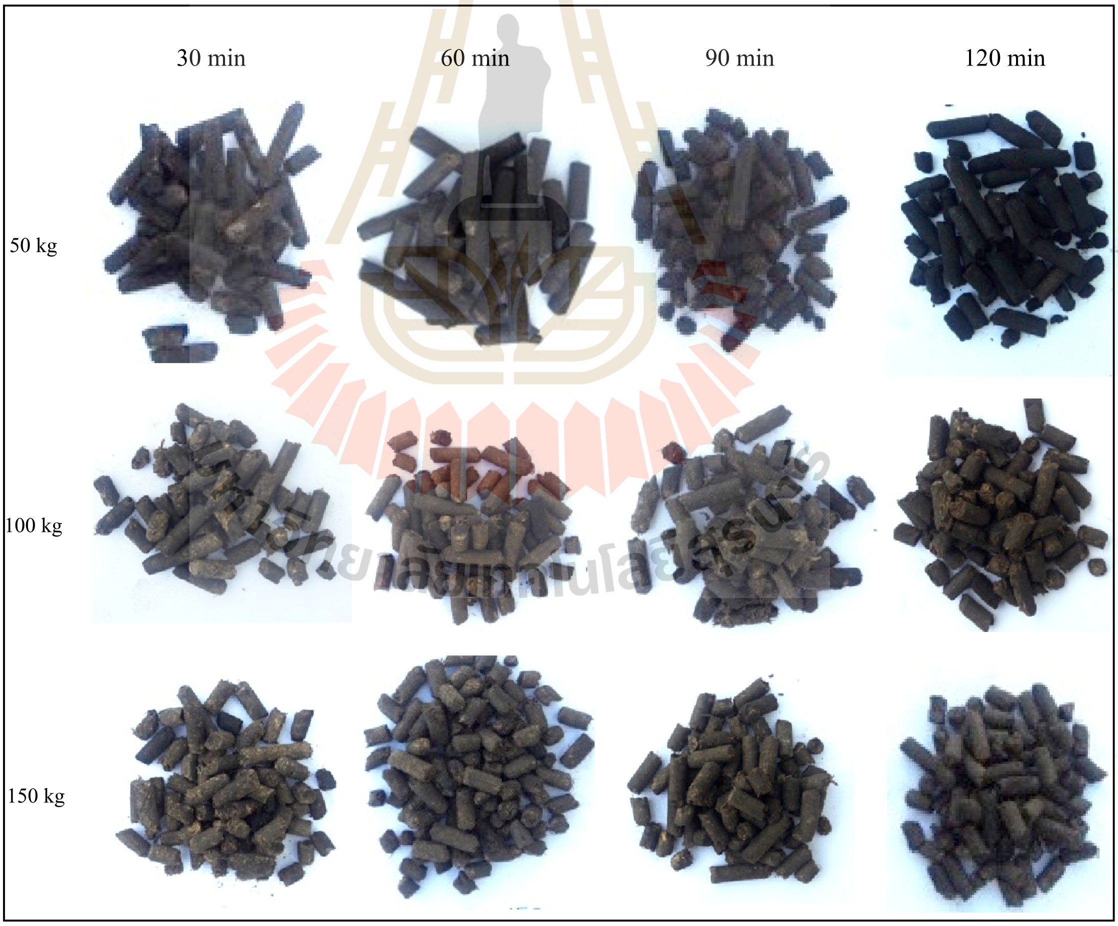
ตารางที่ 4.13 ความชื้นและความหนาแน่นของชีวมวลเปลือก/ซังข้าวโพดหลังผ่านกระบวนการทอริแฟคชั่นระดับต้นแบบ ที่อุณหภูมิ ปริมาณการป้อน และเวลาต่าง ๆ

Weight (kg)	Time (min)	Temperature (°C)					
		Moisture (%)			Bulk Density (kg/m^3)		
		200	225	250	200	225	250
50	30	4.68	1.31	1.66	609.14	593.65	539.49
	60	4.72	2.51	0.93	642.94	615.84	624.81
	90	7.73	0.66	0.93	556.19	611.84	528.12
	120	2.82	0.46	0.71	563.55	533.20	523.45
100	30	6.39	2.00	2.12	582.81	582.67	536.35
	60	6.42	2.18	1.23	558.65	574.11	573.60
	90	4.95	0.18	2.66	541.68	557.77	570.96
	120	2.35	0.08	0.06	569.19	611.88	499.70

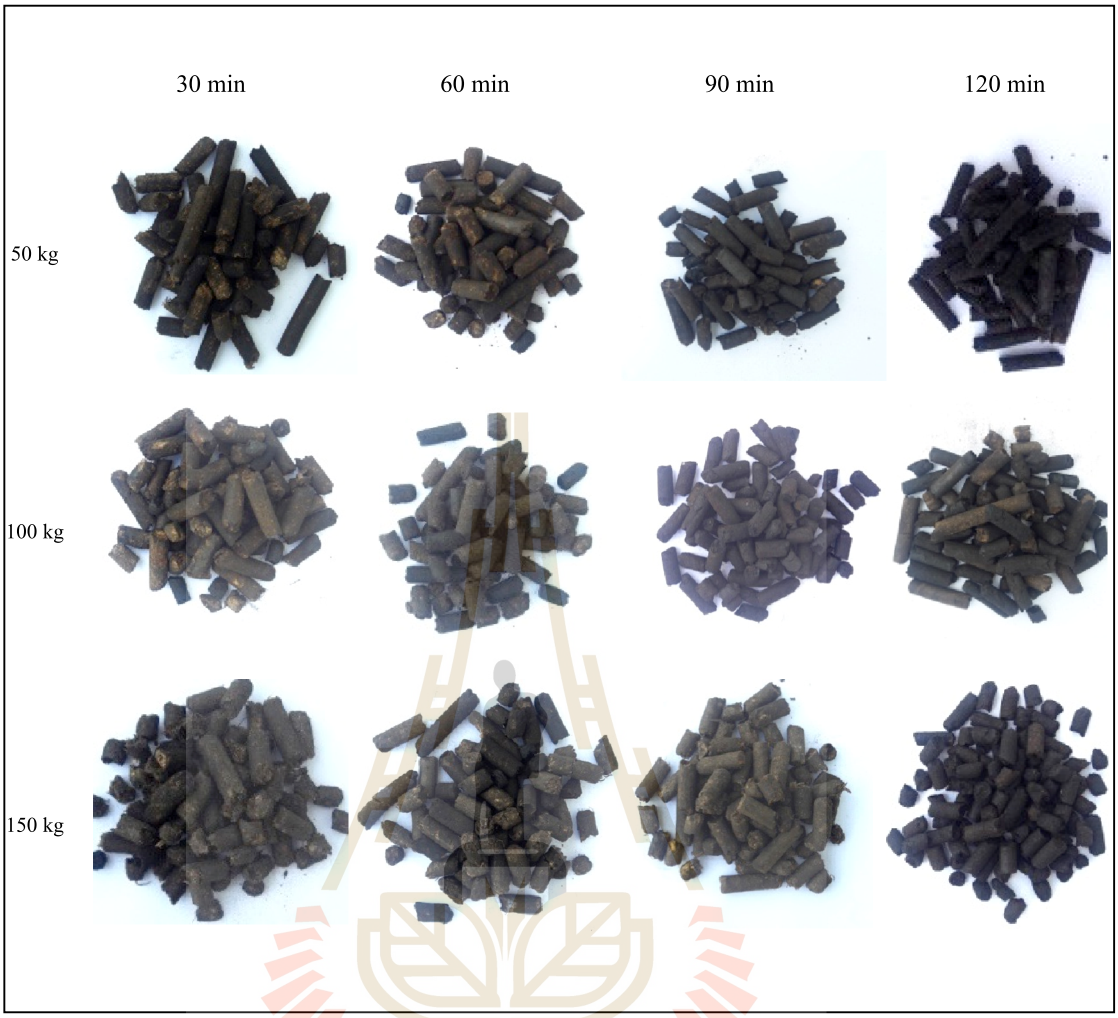
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 4.13 ความชื้นและความหนาแน่นของชีวมวลเปลือก/ซังข้าวโพดหลังผ่านกระบวนการทอริแฟคชั่นระดับต้นแบบ ที่อุณหภูมิ ปริมาณการป้อน และเวลาต่าง ๆ (ต่อ)

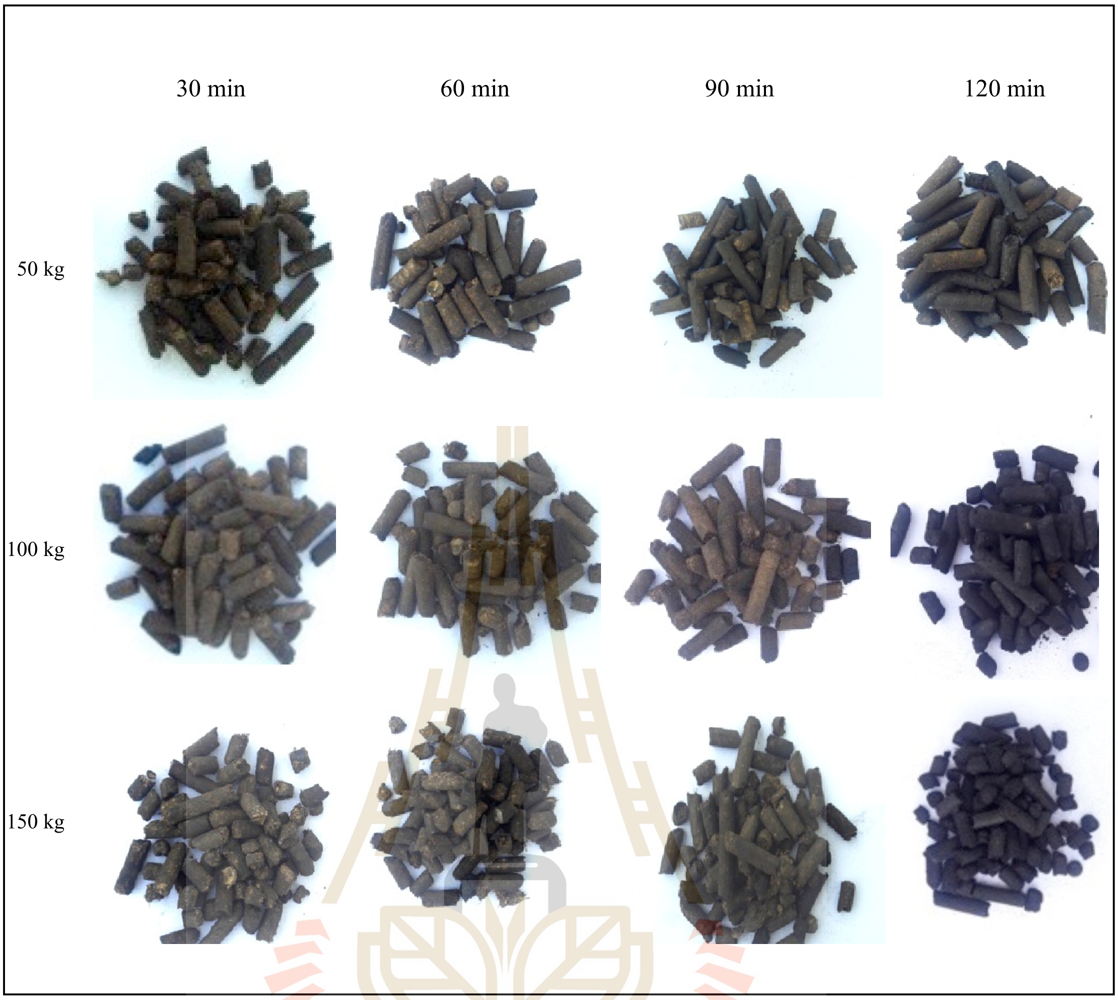
Weight (kg)	Time (min)	Temperature (°C)					
		Moisture (%)			Bulk Density (kg/m^3)		
		200	225	250	200	225	250
150	30	4.20	3.94	3.41	586.19	537.56	585.08
	60	4.36	0.46	2.94	568.27	599.12	587.01
	90	3.55	0.60	2.01	592.54	589.39	559.39
	120	2.04	1.00	0.04	590.10	560.36	608.83
Control		10.07			514.42		



รูปที่ 4.13 ลักษณะของชีวมวลเปลือก/ซังข้าวโพดหลังผ่านกระบวนการทอริแฟคชั่นระดับต้นแบบ ณ อุณหภูมิ 200 °C ที่ปริมาณการป้อน และเวลาต่างๆ



รูปที่ 4.14 ลักษณะของชีวมวลเปลือก/ซังข้าวโพดหลังผ่านกระบวนการทอริแฟคชั่นระดับต้นแบบ ณ อุณหภูมิ 225 °C ที่ปริมาณการป้อน และเวลาต่างๆ



รูปที่ 4.15 ลักษณะของชีวมวลเปลือก/ซังข้าวโพดหลังผ่านกระบวนการทอริแฟคชั่นระดับต้นแบบ ณ อุณหภูมิ 250 °C ที่ปริมาณการป้อน และเวลาต่างๆ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

4.5.2 คุณสมบัติแบบประมาณของเชื้อเพลิงทอริไฟด์เปลือก/ซังข้าวโพดหลังผ่านกระบวนการทอริแฟคชั่นระดับต้นแบบ

ผลการศึกษาค่าคุณสมบัติแบบประมาณ ของชีวมวลเปลือก/ซังข้าวโพดอัดเม็ด ได้แก่ สารระเหย เถ้า และคาร์บอนคงตัว หลังผ่านกระบวนการทอริแฟคชั่นระดับต้นแบบ ที่ปริมาณการป้อนเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด อุณหภูมิ และเวลาต่างๆ พบว่า คุณสมบัติของเชื้อเพลิงทอริไฟด์ชีวมวลนั้น ควรมีค่าสารระเหยลดลงอยู่ในช่วง 13.00 - 21.00 % (Kleinschmidit, 2011) เมื่อเทียบกับชีวมวลอัดเม็ด ก่อนผ่านกระบวนการฯ ดังนั้น ในสภาวะที่ให้เชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด มีคุณสมบัติเป็นเชื้อเพลิงทอริไฟด์ คือ สภาวะที่อุณหภูมิ 225 °C ปริมาณการป้อนเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด 50 kg ที่เวลา 90 และ 120 min ที่อุณหภูมิ 225 °C และที่ปริมาณการป้อนเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด 100 kg ที่เวลา 90 min และที่อุณหภูมิ 250 °C ส่วนที่ปริมาณการป้อนเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด 150 kg เวลา 120 min ซึ่งมีค่าสารระเหยลดลง 13.90 20.96 15.41 และ16.28 % ตามลำดับ ส่งผลให้เถ้ามีค่าเท่ากับ 18.82 20.29 18.74 และ 18 % ตามลำดับ คาร์บอนคงตัวมีค่าเท่ากับ 17.87 21.58 19.05 และ 20.43 % ตามลำดับ ค่าความร้อนมีค่าเท่ากับ 16.16 17.41 16.58 และ 17.60 MJ/kg ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.14 - 4.15 โดยการลดลงของสารระเหย การเพิ่มขึ้นของเถ้า การเพิ่มขึ้นของคาร์บอนคงตัว และการเพิ่มขึ้นของค่าความร้อน เป็นผลมาจากอุณหภูมิ และเวลา ดังแสดงในผลการศึกษาระดับห้องปฏิบัติการ นอกจากนี้ปริมาณการป้อนชีวมวลอัดเม็ด ก็ส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติทางกายภาพของชีวมวลเปลือก/ซังข้าวโพดอัดเม็ดที่ผ่านกระบวนการฯ ด้วยเช่นกัน เนื่องจากชีวมวลที่ทำการเพิ่มคุณภาพด้วยกระบวนการทอริแฟคชั่นนี้ มีความหนาแน่นสูง หากป้อนมาก ต้องใช้เวลามากในกระบวนการ เพื่อให้วัตถุดิบได้รับความร้อนสม่ำเสมอ แต่ถ้าป้อนวัตถุดิบน้อย ก็จะมีผลด้านพลังงานที่ใช้จะมีค่าสูง ดังนั้นในการเลือกสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตเชื้อเพลิงทอริไฟด์เปลือก/ซังข้าวโพดอัดเม็ดระดับต้นแบบ จะพิจารณาพลังงานที่ใช้ในกระบวนการผลิต ร่วมกับผลผลิตมวล ผลผลิตพลังงาน และความหนาแน่นพลังงานดังแสดงในหัวข้อถัดไป

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 4.14 คุณสมบัติแบบประมาณของชีวมวลเปลือก/ซังข้าวโพด หลังผ่านกระบวนการทอริแฟคชั่นระดับต้นแบบ ที่ปริมาณการป้อน อุณหภูมิ และเวลาต่าง ๆ

Weight (kg)	Time (min)	Temperature (°C)								
		Volatile Matter (%)			Ash (%)			Fixed Carbon (%)		
		200	225	250	200	225	250	200	225	250
50	30	69.15	70.36	68.04	16.39	14.81	17.17	14.46	14.83	14.79
	60	70.24	71.00	67.49	14.66	13.95	16.61	15.10	15.06	15.90
	90	67.40	63.32	66.92	16.52	18.82	16.72	16.08	17.87	16.35
	120	54.09	58.12	64.48	21.39	20.29	18.15	24.52	21.58	17.37
100	30	71.75	67.71	69.81	12.80	16.72	16.25	15.45	15.57	13.95
	60	69.07	66.31	70.31	17.03	17.20	15.08	13.90	16.49	14.61
	90	69.20	62.21	67.86	14.91	18.74	15.55	15.89	19.05	16.59
	120	69.88	56.77	42.24	14.22	20.27	26.02	15.90	22.96	31.74
150	30	72.09	71.40	68.54	13.94	14.02	16.76	13.98	14.58	14.70
	60	67.37	71.32	67.58	18.06	14.19	18.28	14.58	14.49	14.14
	90	71.05	67.40	71.25	15.25	18.20	13.99	13.70	14.40	14.76
	120	67.94	57.15	61.57	17.43	21.56	18.00	14.62	21.29	20.43
Control		73.54			15.85			10.62		

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 4.15 คุณสมบัติค่าความร้อนของชีวมวลเปลือก/ซังข้าวโพด หลังผ่านกระบวนการทอริแฟคชั่นระดับต้นแบบ ที่ปริมาณการป้อน อุณหภูมิ และเวลาต่าง ๆ

Weight (kg)	Time (min)	Temperature (°C) HHV (MJ/kg)		
		200	225	250
50	30	15.52	15.60	15.96
	60	15.69	15.69	16.22
	90	15.55	16.16	16.48
	120	17.16	17.41	16.52
100	30	15.06	15.91	15.87
	60	14.32	15.73	16.02
	90	15.40	16.58	16.35
	120	15.60	17.88	19.68
150	30	14.41	15.17	15.06
	60	14.58	16.21	15.23
	90	13.70	16.16	15.97
	120	14.62	16.87	17.60
Control		14.04		

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

4.5.3 ผลผลิตมวล ผลผลิตพลังงาน และความหนาแน่นพลังงาน ของเชื้อเพลิงทอริไฟด์เปลือก/ซังข้าวโพดหลังผ่านกระบวนการทอริแฟคชั่นระดับต้นแบบ

ผลการศึกษาผลผลิตมวล ผลผลิตพลังงาน และความหนาแน่นพลังงานของเปลือก/ซังข้าวโพดอัดเม็ดที่ผ่านกระบวนการทอริแฟคชั่นระดับต้นแบบ ในสภาวะที่อุณหภูมิ 225 °C ปริมาณการป้อน 50 kg เวลา 90 และ 120 min อุณหภูมิ 225 °C ปริมาณการป้อน 100 kg เวลา 90 min และที่อุณหภูมิ 250 °C ปริมาณการป้อน 150 kg ที่เวลา 120 min ซึ่งเป็นสภาวะที่ให้เชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด มีคุณสมบัติเป็นเชื้อเพลิงทอริไฟด์พบว่า ผลผลิตมวลมีค่าเท่ากับ 79.53 74.62 77.78 และ 76.81 % ตามลำดับ ซึ่งมีค่าลดลงตามคุณสมบัติความเป็นเชื้อเพลิงทอริไฟด์ (Tumuluru et al., 2011) ส่งผลให้ผลผลิตพลังงานมีค่าเท่ากับ 91.62 92.62 91.90 และ 96.39% ตามลำดับ และมีค่าความหนาแน่นพลังงานเท่ากับ 9.89 9.28 9.25 และ 10.72 GJ/m^3 ดังแสดงในตารางที่ 4.16

ตารางที่ 4.16 ผลผลิตมวล ผลผลิตพลังงาน และความหนาแน่นพลังงานของชีวมวลเปลือก/ซังข้าวโพดหลังผ่านกระบวนการทอริแฟคชั่นระดับต้นแบบที่อุณหภูมิ ปริมาณการป้อนและเวลาต่างๆ

Weight (kg)	Time (min)	Temperature (°C)								
		Mass Yield (%)			Energy Yield (%)			Energy Density (GJ/m^3)		
		200	225	250	200	225	250	200	225	250
50	30	88.26	86.42	84.47	97.62	96.10	96.11	13.34	9.26	8.61
	60	87.15	88.41	83.14	97.49	98.87	96.11	10.09	9.66	10.13
	90	90.56	79.53	82.63	99.86	91.62	97.07	8.65	9.89	8.70
	120	75.15	74.62	80.19	91.92	92.62	94.43	9.67	9.28	8.65
100	30	93.01	84.79	86.60	99.84	96.13	97.98	8.78	9.27	8.51
	60	90.43	83.68	86.02	92.30	93.79	98.19	8.00	9.03	9.19
	90	89.44	77.78	85.47	98.16	91.90	99.63	8.34	9.25	9.34
	120	86.93	72.82	59.45	96.63	92.81	83.40	8.88	10.94	9.83
150	30	91.51	90.16	86.97	99.98	97.47	93.33	9.27	8.15	8.81
	60	87.06	86.32	85.55	95.02	99.71	92.85	8.70	9.71	8.94
	90	89.40	82.97	88.00	95.63	95.56	99.89	8.89	9.52	8.93
	120	84.82	74.20	76.81	94.73	89.23	96.39	9.25	9.45	10.72
Control		100			100			7.22		

4.5.4 ผลการวิเคราะห์อัตราการผลิตและพลังงานที่ใช้ในการผลิตเชื้อเพลิงทอริไฟด์เปลือก/ซังข้าวโพดระดับต้นแบบ

จากผลการวิเคราะห์อัตราการผลิต และพลังงานที่ใช้ในการผลิตเชื้อเพลิงทอริไฟด์เปลือก/ซังข้าวโพดระดับต้นแบบ ที่ปริมาณการป้อน อุณหภูมิ และเวลาต่างๆ พบว่า ในสภาวะที่อุณหภูมิ 225 °C ปริมาณการป้อน 50 kg เวลา 90 และ 120 min อุณหภูมิ 225 °C ปริมาณการป้อน 100 kg เวลา 90 min และที่อุณหภูมิ 250 °C ปริมาณการป้อน 150 kg เวลา 120 min ซึ่งเป็นสภาวะที่ให้ชีวมวลมีคุณสมบัติเป็นเชื้อเพลิงทอริไฟด์ มีกำลังการผลิต 26.41 18.55 51.84 และ 57.61 kg ตามลำดับ และใช้พลังงาน 164.71 234.50 86.81 และ 80.72 kg_{LPG}/ton ตามลำดับ ซึ่งในกระบวนการผลิตเชื้อเพลิงทอริไฟด์นั้น ต้องพิจารณาถึงพลังงานที่ใช้ร่วมกับคุณสมบัติของเชื้อเพลิงทอริไฟด์ที่ผลิตได้ ดังนั้น สำหรับการผลิตเชื้อเพลิงทอริไฟด์เปลือก/ซังข้าวโพดด้วยกระบวนการทอริแฟคชั่นระดับต้นแบบนี้ สภาวะที่เหมาะสม คือ ที่อุณหภูมิ 250 °C ปริมาณการป้อน 150 kg เวลา 120 min เพราะเป็นสภาวะที่ให้อัตราการผลิตสูง และใช้พลังงานน้อย ดังแสดงในตารางที่ 4.17

ตารางที่ 4.17 อัตราการผลิตและพลังงานที่ใช้ในการผลิตเชื้อเพลิงทอริไฟด์เปลือก/ซังข้าวโพดโดยใช้กระบวนการทอริแฟคชั่นระดับต้นแบบ ที่ปริมาณการป้อน อุณหภูมิ และเวลาต่าง ๆ

Weight (kg)	Time (min)	Temperature (°C)					
		Product (kg/h)			Energy Consumption (kg_{LPG}/ton)		
		200	225	250	200	225	250
50	30	88.16	85.92	84.47	32.89	50.63	53.87
	60	43.65	44.57	41.57	66.44	97.60	109.45
	90	29.90	26.41	27.54	96.99	164.71	165.21
	120	18.53	18.55	20.05	156.50	234.50	226.93
100	30	186.66	170.47	173.20	16.07	26.40	26.56
	60	89.85	83.04	86.02	33.39	54.19	53.48
	90	59.62	51.84	56.98	50.32	86.81	80.73
	120	43.46	36.44	29.73	69.03	123.49	154.73
150	30	266.21	270.79	260.90	12.02	16.99	17.82
	60	130.59	129.64	128.32	24.50	35.48	36.24
	90	89.40	83.33	87.76	35.79	55.20	52.99
	120	63.62	55.08	57.61	50.30	83.51	80.72

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

4.5.5 สรุปผลการผลิตเชื้อเพลิงทอริไฟด์เปลือก/ซังข้าวโพดอัดเม็ดระดับต้นแบบ

จากผลการศึกษาการผลิตเชื้อเพลิงทอริไฟด์เปลือก/ซังข้าวโพดอัดเม็ด ระดับต้นแบบทุกๆ สภาวะการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้ ที่อุณหภูมิ 250 °C ปริมาณการป้อน 150 kg เวลา 120 min เป็นสภาวะที่มีความเหมาะสมในการผลิตเชื้อเพลิงทอริไฟด์เปลือก/ซังข้าวโพดอัดเม็ดระดับต้นแบบ เพราะเป็นสภาวะที่มีความหนาแน่นพลังงานสูงสุดเท่ากับ 10.72 GJ/m^3 ซึ่งใกล้เคียงกับการศึกษาในระดับห้องปฏิบัติการ โดยค่าความหนาแน่นพลังงานเพิ่มขึ้น 48.68 % เมื่อค่าความหนาแน่นพลังงานเทียบกับชีวมวลเปลือก/ซังข้าวโพดอัดเม็ด ก่อนผ่านกระบวนการฯ มีความหนาแน่น 608.83 kg/m^3 ค่าความร้อน 17.60 MJ/kg สารระเหย 61.57 % เถ้า 18.00 % คาร์บอนคงตัว 20.43 % ผลผลิตมวล 76.81 % ผลผลิตพลังงาน 96.39 % มีกำลังการผลิต 57.61 kg/h และอัตราการใช้เชื้อเพลิง 80.72 kg_{LPG}/ton

4.5.6 การวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตเชื้อเพลิงทอริไฟด์เปลือก/ซังข้าวโพดอัดเม็ดระดับต้นแบบ

จากการศึกษาขั้นตอนการแปรรูปชีวมวลเปลือก/ซังข้าวโพดที่มีความหนาแน่นประมาณ 87.32 kg/m^3 เป็นชีวมวลเปลือก/ซังข้าวโพดอัดเม็ดที่มีความหนาแน่นเพิ่มขึ้นเป็น 514.42 kg/m^3 แล้วนำชีวมวลเปลือก/ซังข้าวโพดอัดเม็ดดังกล่าวไปผ่านกระบวนการทอริแฟคชั่นที่อุณหภูมิ 250 °C เวลา 120 min ที่การป้อนตัวอย่าง 150.00 kg จนเกิดเป็นเชื้อเพลิงทอริไฟด์เปลือก/ซังข้าวโพดอัดเม็ด ค่าความร้อนเชื้อเพลิงทอริไฟด์ 17.60 MJ/kg ที่กำลังการผลิต 57.61 kg/h เวลาทำงาน 7,008 h/Year สามารถนำวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตเชื้อเพลิงทอริไฟด์ ได้โดยแบ่งเป็น 1) ต้นทุนคงที่ ได้แก่ ต้นทุนค่าเครื่องจักร และซ่อมบำรุง โดยคำนวณที่เครื่องจักรมีอายุการใช้งาน 10 ปี และ 2) ต้นทุนผันแปร ได้แก่ ค่าวัตถุดิบชีวมวล ค่าเตรียมชีวมวลอัดเม็ด ค่าแรงงาน ค่าไฟฟ้า และค่าแก๊สเชื้อเพลิง โดยผลการวิเคราะห์พบว่า ต้นทุนการผลิตเชื้อเพลิงทอริไฟด์เปลือก/ซังข้าวโพดอัดเม็ดมีค่าเท่ากับ 4,852 Baht /ton หรือเท่ากับ 0.28 Baht /MJ โดยต้นทุนการผลิตเชื้อเพลิงทอริไฟด์เปลือก/ซังข้าวโพดอัดเม็ดของงานวิจัยนี้ ยังมีค่าสูงกว่าราคาพลังงานจากลิกไนต์ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.11 Baht/MJ และสูงกว่าราคาพลังงานของชีวมวลเปลือก/ซังข้าวโพด ที่มีค่า 0.15 Baht/MJ (วีรชัย อาจหาญ และคณะ, 2555) เนื่องในงานวิจัยนี้มีกำลังการผลิตน้อย และต้นทุนพลังงานสูง จึงส่งผลให้ราคาพลังงานสูง ดังแสดงในตารางที่ 4.18

ตารางที่ 4.18 ต้นทุนการผลิตเชื้อเพลิงทอริไฟด์เปลือก/ซังข้าวโพดโดยใช้กระบวนการทอริแฟคชั่นระดับต้นแบบ

ลำดับ	รายการ	รายละเอียด	ต้นทุน (Baht /ton)
1	ค่าเครื่องจักร และซ่อมบำรุง	- ค่าเครื่องจักร 500,000 Baht - ค่าซ่อมบำรุง 10% ตลอดอายุการใช้งาน	136.23
2	ค่าวัตถุดิบชีวมวล	- ชีวมวลตันละ 1200 Baht	1,562.23
3	ค่าเตรียมชีวมวลอัดเม็ด	วีรชัย อาจหาญ และคณะ(2553)	692.59
4	ค่าแรงงาน	- คนงาน 1 คน ทำงานวันละ 8 h - ค่าแรง 300 Baht /day	650.93
5	ค่าไฟฟ้า	- มอเตอร์ 3 ตัว กำลังไฟฟ้า 2.2 kW	384.72
6	ค่าแก๊สเชื้อเพลิง	- อัตราการใช้แก๊ส 4.65 kg/h - ราคาแก๊ส LPG 18.25 Baht /kg - ที่อุณหภูมิ 250°C เวลา 120 min	1,425.53
รวมทั้งหมด			**4,852.23**

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 5
สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการศึกษา

5.1.1 ผลการผลิตเชื้อเพลิงทอริไฟด์เปลือก/ซังข้าวโพดอัดเม็ดระดับห้องปฏิบัติการ

ผลการผลิตเชื้อเพลิงทอริไฟด์เปลือก/ซังข้าวโพดอัดเม็ดระดับห้องปฏิบัติการพบว่า สภาวะอุณหภูมิ และเวลาที่เหมาะสมในการผลิตเชื้อเพลิงทอริไฟด์เปลือก/ซังข้าวโพดอัดเม็ดระดับห้องปฏิบัติการ คือ อุณหภูมิ 225 °C เวลา 60 min โดยเชื้อเพลิงทอริไฟด์เปลือก/ซังข้าวโพดอัดเม็ดที่ผลิตได้มีคุณสมบัติ ดังนี้ ความหนาแน่นพลังงานเท่ากับ 10.76 GJ/m^3 โดยเพิ่มขึ้น 11.73 % เมื่อเทียบกับชีวมวลเปลือก/ซังข้าวโพดอัดเม็ดก่อนผ่านกระบวนการฯ ความหนาแน่น 541.00 kg/m^3 ค่าความร้อน 19.89 MJ/kg สารระเหย 75.10 % เถ้า 2.92 % คาร์บอนคงตัว 22.64 % องค์ประกอบธาตุคาร์บอน 50.79 % และองค์ประกอบธาตุไฮโดรเจน 7.06 % ผลผลิตมวล 77.79 % ผลผลิตพลังงาน 93.08 % และเชื้อเพลิงทอริไฟด์เปลือก/ซังข้าวโพดอัดเม็ดที่ผลิตได้มีคุณสมบัติใกล้เคียงเชื้อเพลิงจากฟอสซิล

5.1.2 ผลการผลิตเชื้อเพลิงทอริไฟด์ฟางข้าวอัดเม็ดระดับห้องปฏิบัติการ

ผลการผลิตเชื้อเพลิงทอริไฟด์ฟางข้าวอัดเม็ดระดับห้องปฏิบัติการพบว่า สภาวะอุณหภูมิ และเวลาที่เหมาะสมในการผลิตเชื้อเพลิงทอริไฟด์ฟางข้าวอัดเม็ดระดับห้องปฏิบัติการ คือ อุณหภูมิ 225 °C เวลา 120 min โดยเชื้อเพลิงทอริไฟด์ฟางข้าวอัดเม็ดที่ผลิตได้มีคุณสมบัติดังนี้ ความหนาแน่นพลังงานเท่ากับ 9.13 GJ/m^3 โดยเพิ่มขึ้น 9.74 % เมื่อเทียบกับชีวมวลฟางข้าวอัดเม็ดก่อนผ่านกระบวนการฯ ความหนาแน่น 558.00 kg/m^3 ค่าความร้อน 16.37 MJ/kg สารระเหย 62.85 % เถ้า 18.21 % คาร์บอนคงตัว 18.93 % ผลผลิตมวล 78.82 % องค์ประกอบธาตุคาร์บอน 41.96 % องค์ประกอบธาตุไฮโดรเจน 5.39 % และผลผลิตพลังงาน 92.82 %

5.1.3 ผลการผลิตเชื้อเพลิงทอริไฟด์ใบอ้อยอัดเม็ดระดับห้องปฏิบัติการ

ผลการผลิตเชื้อเพลิงทอริไฟด์ใบอ้อยอัดเม็ดระดับห้องปฏิบัติการพบว่า สภาวะอุณหภูมิ และเวลาที่เหมาะสมในการผลิตเชื้อเพลิงทอริไฟด์ใบอ้อยอัดเม็ดระดับห้องปฏิบัติการ คือ อุณหภูมิ 225 °C เวลา 30 min โดยเชื้อเพลิงทอริไฟด์ใบอ้อยอัดเม็ดที่ผลิตได้มีคุณสมบัติ ดังนี้ ความหนาแน่นพลังงานเท่ากับ 7.73 GJ/m^3 ซึ่งมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับชีวมวลใบอ้อยอัดเม็ด ก่อนผ่านกระบวนการฯ เนื่องจากใบอ้อยที่นำมาทดสอบมีสิ่งเจือปน เช่น ดิน หิน และอื่นๆ ที่ติดมาจาก

กระบวนการเก็บรวบรวมในแปลง และใบอ้อยดังกล่าวยังเก็บรักษาไว้นานเกิน 1 ปี ก่อนนำมาใช้ในการทดลองส่งผลให้มี เถ้าสูง สารระเหยน้อย องค์ประกอบธาตุคาร์บอนต่ำ องค์ประกอบธาตุไฮโดรเจนต่ำ และค่าความร้อนต่ำ ดังนั้นเมื่อนำมาใช้ในการเพิ่มคุณภาพโดยใช้เทคโนโลยีทอริแฟคชั่น เชื้อเพลิงทอริไฟด์ที่ผลิตได้จึงมีความหนาแน่นพลังงานลดลง และมีคุณสมบัติอื่นๆ ดังนี้ ความหนาแน่น 675.00 kg/m^3 ค่าความร้อน 11.45 MJ/kg สารระเหย 51.31 % เถ้า 38.25 % คาร์บอนคงตัว 10.44 % องค์ประกอบธาตุคาร์บอน 31.52 % องค์ประกอบธาตุไฮโดรเจน 3.89 % ผลผลิตมวล 77.79 % และผลผลิตพลังงาน 89.77 %

5.1.4 ผลการศึกษาการผลิตเชื้อเพลิงทอริไฟด์เปลือก/ซังข้าวโพดอัดเม็ดระดับต้นแบบ

ผลการศึกษาการผลิตเชื้อเพลิงทอริไฟด์เปลือก/ซังข้าวโพดอัดเม็ดระดับต้นแบบ พบว่า สภาวะอุณหภูมิ และเวลาที่เหมาะสมในการผลิตเชื้อเพลิงทอริไฟด์เปลือก/ซังข้าวโพดอัดเม็ดระดับต้นแบบ คือ อุณหภูมิ 250 °C ปริมาณการป้อน 150 kg เวลา 120 min โดยเชื้อเพลิงทอริไฟด์เปลือก/ซังข้าวโพดอัดเม็ดที่ผลิตได้มีคุณสมบัติ ดังนี้ มีความหนาแน่นพลังงานเท่ากับ 10.72 GJ/m^3 โดยเพิ่มขึ้น 48.68 % เมื่อเทียบกับชีวมวลเปลือก/ซังข้าวโพดอัดเม็ดก่อนผ่านกระบวนการฯ ซึ่งมีเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นสูงกว่าผลการศึกษาในระดับห้องปฏิบัติการ เนื่องจากการผลิตในระดับต้นแบบเชื้อเพลิงทอริไฟด์ที่ผลิตได้มีความยาวลดลงเมื่อเทียบกับชีวมวล เพราะเกิดการหักในขณะเคลื่อนที่เพื่อถ่ายเทความร้อนในกระบวนการฯ ส่วนการผลิตในระดับห้องปฏิบัติการ ชีวมวลเชื้อเพลิงทอริไฟด์ที่ผลิตได้มีความยาวใกล้เคียงกับชีวมวลเปลือก/ซังข้าวโพดอัดเม็ดก่อนผ่านกระบวนการฯ เพราะไม่มีการเคลื่อนที่ขณะอยู่ในกระบวนการฯ ดังนั้นความหนาแน่นของเชื้อเพลิงทอริไฟด์เปลือก/ซังข้าวโพดอัดเม็ดจึงมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อเทียบกับชีวมวลเปลือก/ซังข้าวโพดอัดเม็ดส่งผลให้ความหนาแน่นพลังงานเพิ่มสูงขึ้นดังกล่าว แต่อย่างไรก็ดีถึงแม้ว่าเชื้อเพลิงทอริไฟด์เปลือก/ซังข้าวโพดอัดเม็ดจะเกิดการหัก และแตกต่างเพียงความยาว เชื้อเพลิงทอริไฟด์ที่ผลิตได้จึงมีสภาพพร้อมใช้งาน และมีคุณสมบัติอื่นๆ ดังนี้ ความหนาแน่น 608.83 kg/m^3 ค่าความร้อน 17.60 MJ/kg สารระเหย 61.57 % เถ้า 18 % คาร์บอนคงตัว 20.43 ผลผลิตมวล 76.81 % และผลผลิตพลังงาน 96.39 % กำลังการผลิต 57.61 kg/h อัตราการใช้พลังงาน 80.72 kg$_{LPG}$/ton และต้นทุนการผลิตเท่ากับ 4,852 Baht /ton หรือเท่ากับ 0.28 Baht /MJ

5.2 ข้อเสนอแนะ

1) เตาทอริไฟด์ระดับต้นแบบที่ใช้ในการศึกษานี้ มีกำลังการผลิตต่ำ ส่งผลให้ต้นทุนการผลิตเชื้อเพลิงทอริไฟด์เปลือก/ซังข้าวโพดอัดเม็ดสูงกว่าเชื้อเพลิงจากฟอสซิล ในการพัฒนาเตาทอริไฟด์

เพื่อใช้ต่อไป ควรออกแบบขนาดของเตาทอริไฟด์เพิ่มขึ้นเพื่อเพิ่มกำลังการผลิต และให้ต้นทุนการผลิตต่ำลง

2) การผลิตเชื้อเพลิงคุณภาพสูงโดยนำชีวมวลมาอัดเม็ดก่อนแล้วนำไปผ่านกระบวนการทอริแฟคชั่นสามารถเพิ่มคุณภาพใช้กับชีวมวล เปลือก/ซังข้าวโพด ฟางข้าว และใบอ้อย ได้ ดังนั้นการผลิตเชื้อเพลิงคุณภาพสูงวิธีการนี้จึงสามารถนำไปผลิตเชื้อเพลิงคุณภาพสูงให้กับชีวมวลอื่นๆ ได้ อาทิเช่น ต้น/ใบ/ยอดข้าวโพด หญ้าเนเปียร์ยักษ์ ทะลายปาล์ม เหง้ามันสำปะหลัง และเปลือกไม้ยูคาลิปตัส เป็นต้น

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รายการอ้างอิง

กฤษกร รับสมบัติ, ธนธัช มุขขันธ์, สุภัทร หนูแย้ม และวีรชัย อาจหาญ. (2555). การเพิ่มประสิทธิภาพการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสสำหรับเครื่องกำเนิดไอน้ำโดยการเพิ่มความหนาแน่นของเชื้อเพลิง. **การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 13**. เชียงใหม่ : สมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย.

นฤภัทร ตั้งมั่นคงวรกุลม. (2557). การผลิตถ่านอัดแท่งเชื้อเพลิงจากวัสดุเหลือใช้ในอุตสาหกรรมเกษตรและครัวเรือน.**วารสารมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ (สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี).** 6(11).

บริษัท ไทย แคปปิตอล คอร์ปอเรชั่น จำกัด (มหาชน). ข้อมูลถ่านหิน [ออนไลน์] ได้จาก: http: // www. thaicapital.co.th

พงษ์ศักดิ์ เฮงนิรันด์ และไตรรัตน์ เนียมสุวรรณ. (2554). เม็ดเชื้อเพลิงไม้ทอร์ริไฟด์เทคโนโลยี และโอกาสทางการตลาด. **วารสารการจัดการป่าไม้**. 5(10): 67 - 75.

มูลนิธิพลังงานเพื่อสิ่งแวดล้อม. (ม.ป.ป.). ประเภทของชีวมวล [ออนไลน์]ได้จาก: http://www. efe.or.th.

วิภาวี นครพัฒน์, จีรพร เพกเกาะ, ยุวดี พีรพรพิศาล และศุภรินทร์ ไชยกลางเมือง. (2554). การผลิตเชื้อเพลิงเหลวจากสาหร่ายไกโดยการแยกสลายด้วยความร้อน. **การประชุมวิชาการนานาชาติวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์ประเทศไทย ครั้งที่ 21.**

รัชพล พะวงศ์รัตน์. (2558). กระบวนการปรับสภาพเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตเอทานอลจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรประเภทลิกโนเซลลูโลส. **Verdian E - Journal, Science and Technology Silpakorn University**. 2(1): 142 - 157.

วิเชียร ดวงสีเสน. (2555). **การศึกษาการอบแห้งกากมันสำปะหลังโดยใช้เครื่องอบแห้งแบบตะแกรงหมุน.** วิทยานิพนธ์ระดับปริญาโท, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

วีรชัย อาจหาญ และคณะ. (2552). การผลิตพลังงานจากฟางข้าวเพื่อใช้เป็นพลังงานทดแทน. **รายงานการวิจัยฉบับสมบรูณ์ศูนย์นวัตกรรมเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว**. ศูนย์นวัตกรรมเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว.

วีรชัย อาจหาญ และคณะ. (2552). การศึกษาต้นแบบโรงไฟฟ้าชีวมวลขนาดเล็กสำหรับ ชุมชน(ระยะที่ 2). **รายงานการวิจัย**. สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ.

วีรชัย อาจหาญ และคณะ. (2552). การศึกษาแนวทางการบริหารจัดการเชื้อเพลิงชีวมวล เพื่อใช้เป็นพลังงานทดแทน (ระดับชุมชน). **รายงานการวิจัย**. กองทุนอนุรักษ์พลังงานสำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน.

วีรชัย อาจหาญ และคณะ. (2555). โครงการศึกษาแนวทางบริหารจัดการเศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรเพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงและลดการเกิดหมอกควัน. **รายงานการวิจัย**. สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ.

สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย. (2555). การพัฒนาและถ่ายทอดเทคโนโลยีการผลิตไฟฟ้าจากชีวมวลเพื่อสร้างต้นแบบโรงไฟฟ้าชีวมวล ขนาด 1 เมกกะวัตต์. **รายงานการวิจัย**. กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี.

สุนี ลาวัณยากุล และ ศิริวรรณ ศิลป์สกุลสุข. (ม.ป.ป.). ถ่านหินและการทดสอบคุณภาพ. **กองเคมี กรมวิทยาศาสตร์บริการ.**

อลงกต แขพรมราช, ชัยณรงค์ บ้านหมู่ และ เอกราช ปานอำพันธ์. (2551). การทดสอบสมรรถนะในการผลิตก๊าซเชื้อเพลิงของแกลบที่ผ่านกระบวนการ Torrefication. **ปริญญานิพนธ์**.: 5 - 7.

อัมรินทร์ เมฆฉาย และ ชัชวาลย์ ชัยชนะ. (2558). การผลิตแก๊สไฮโดรเจนโดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในเตาปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งจากหินน้ำมันด้วยกระบวนการแก๊สซิฟิเคชั่นด้วยไอน้ำ. **วารสารวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่**. 22(1): 46 - 58.

Arias, B., Pevida, C., Fermoso, J., Plaza, M. G., Rubiera, F. and Pis, J. J. (2008). Influence of torrefaction on the grindability and reactivity of woody biomass. **Fuel Processing Technology**. 89(2): 169 - 175.

Bach, Q - V., Tran, K - Q., Khalil, R. A., Skreiberg, Ø. and Seisenbaeva, G. (2013). **Comparative Assessment of Wet Torrefaction. Article in Energy & Fuels**. 27: 6743 - 6753.

Bergman, P. C. A. and Kiel, J. H. A. (2005). Torrefaction for biomass upgrading. **Biomass Conference & Exhibition**: Paris France.

Bergman, P. C. A., Boersma, A. R., Zwart, R. W .R. and Kiel, J. H. A. (2005). Torrefaction for biomass co - firing in existing coal - fired power stations "BIOCOAL". **ECN Biomass.**

Bridgeman, T. G., Jones. J. M., Shield. B. I. and Williams, P. T. (2007). Torrefaction of reed canary grass wheat strawand willow to enhance solid fuel qualities and combustion properties. **Fuel**. 87(6): 844 - 856.

Chancellor, W. K. (1957). Basic concepts of cutting hay. **Doctoral dissertation, Cornell University**: 169 - 170.

Chattopadhyay, P. S. and Pandey, K. P. (1999). Mechanical properties of sorghum stalk in relation to quasi - static Deformation. **Journal of Agricultural Engineering Research**. 73: 199 - 206.

Chen, D., Zhou, J., Zhang, Q., Zhu, X. and Lu, Q. (2014). Upgrading of rice husk by torrefaction and its Influence on the fuel properties. **Bioresources** .9(4): 5893 - 5905.

Chen, W - H., Ye, S - C. and Sheen, H - K. (2012). Hydrothermal carbonization of sugarcane bagasse via wet torrefaction in association with microwave heating. **Bioresource Technology.** 118: 195 - 203.

Chen, W - H., Hsu, H - C., Lu, K - M., Lee, W - J. and Lin, T - C. (2011). Thermal pretreatment of wood (Lauan) block by torrefaction and its influence on the properties of the biomass. **Energy.** 36: 3012 - 3021.

Chen, W - H. and Kuo, P - C. (2011) .Isothermal torrefaction kinetics of hemicellulose, cellulose, lignin and xylan using thermogravimetric analysis . **Energy.** 36 : 6451 - 6460.

China, K. L. et al. (2013). Optimization of torrefaction conditions for high energy density solidbiofuel from oil palm biomass and fast growing species available in Malaysia. **Industrial Crops and Products**. 49: 768 - 774.

Couhert, C., Salvador, S. and Commandré, J - M. (2009).Impact of torrefaction on syngas production from wood. **Fuel**. 88: 2286 - 2290.

Felfli, F. F. (2005). Wood Briquette Torrefaction. **Energy for Sustainable Development**. 4(3).

Fournier, J. (2009). Low Temperature Pyrolysis for Biochar Systems. **Biochar Engineering Corporation.**

Grigiante, M. and Antolini, D. (2014). Experimental Results of Mass and Energy Yield Referred to Different Torrefaction Pathways, **Waste and Biomass Valorization**. 5(1): 11 - 17.

Gucho, E.M., Shahzad, K., Bramer, E. A., Akhtar, N. A. and Brem, G.(2015). Experimental Study on Dry Torrefaction of Beech Wood and Miscanthus. **Energies.** 8: 3903 - 3923.

Harun, N. Y. and Afzal, M. T. (2013). Characteristics of Product Gas from Torrefied Biomass Blends. International **Journal of Chemical and Environmental Engineering**. 4(4): 266 - 272.

Hustad, J. and Barrio, M. (2000). What is biomass. **IFRF Combustion Handbook**. 23(2).

Ince, A., Ugurluay, S., Guzel, E. and Ozcan, M. T. (2005). Bending and shearing characteristics of sunflower stalk residue. **Biosystems Engineering**. 92(2): 175 - 181.

Kim, Y - H., Lee, S - M., Lee, H - W. and Lee, J - W. (2012). Physical and chemical characteristics of products from the torrefaction of yellow poplar (Liriodendron tulipifera). **Bioresource Technology**. 116: 120 - 125.

Kleinschmidt, C. P. (2011). Overview of international developments on torrefaction.[Online]: **www.kema.com**.

Lee, K - H., Kang, B - S., Park, Y - K. and Kim, J - S. (2005). Influence of Reaction Temperature, Pretreatment, and a Char Removal System on the Production of Bio - oil from Rice Straw by Fast Pyrolysis, Using a Fluidized Bed**. Energy Fuels**. 19(5): 2179 - 2184.

Lipinsky, E. S., Arcate, J. and Reed, T. B. (2002). Enhanced wood fuels via torrefaction. **Fuel Chemistry Division Preprints**. 47(1): 409 - 410.

Medic, D., Darr, M., Shah, A., Potter, B. and Zimmerman, J. (2012). Effects of torrefaction process parameters on biomass feedstock upgrading. **Fuel**. 91: 147 - 154.

Melkior, T. et al. (2012). NMR analysis of the transformation of wood constituents by torrefaction. **Fuel.** 92: 271 - 280.

Mesquita, C. M. and Hunna, M. A. (1995). Physical and mechanical properties of grasses. **Transactions of the ASAE**, 38(6): 1655 - 1658.

Mosier, N., Wyman, C., Dale, B., Elander, R., Lee, Y. Y., Holtzapple, M., Ladisch, M. (2005). Features of promising technologies for pretreatment of lignocellulosic biomass. **Bioresource Technology**. 96(6): 673 - 686.

Munson Machinery Company [Online] : http://www.fao.org.

Nurmi, J. (1999). The storage of logging residue for fuel. **Biomass and Bioenergy**. 17(1): 41 - 47.

Pawongrat, R. (2015). Pretreatment processes for enhancing the efficiency of ethanol production from lignocellulosic agricultural wastes. **Science and Technology Silpakorn University**. 1: 143 - 157.

Persson, S. (1987). Mechanics of Cutting Plant Material. **ASAE Monograph.** 7, St. Joseph, Michigan.

Prins, M. J., Ptasinski K. J. and Janssen F. J. J .G.(2006). Torrefaction of wood Part 1. Weight loss kinetics**. JOURNAL of ANALYTICAL and APPLIED PYROLYSIS.** 77: 28 - 34.

Pala, M., Kantarli, I. C., Buyukisik, H. B. and Yanik, J. (2014). Hydrothermal carbonization and torrefaction of grape pomace: A comparative evaluation. **Bioresource Technology**. 161: 255 - 262.

Pach, M., Zanzi, R and Björnbom, E. (2002). Torrefied Biomass a Substitute for Wood and Charcoal. **6th Asia - Pacific International Symposium on Combustion and Energy Utilization**. Kuala Lumpur.

Rictec Pte Ltd. (2016). **Engineered red System** [on - line]. www.rictec.com.

Rupar, K. and Sanati, M. (2005). The release of terpenes during storage of biomass. **Biomass and Bioenergy**. 28: 29 - 34.

Sadaka, S. and Negi, S. (2009). Improvements of biomass physical and thermochemical characteristics via torrefaction process. **Environmental Progress & Sustainable Energy**. 28(3): 427–434.

Sadaka, S., Sharara, M. A., Ashworth, A., Keyser, P., Allen, F. and And Wright, A. (2014). Characterization of Biochar from Switchgrass Carbonization. **Energies**. 7: 548 - 567.

Shang, L. (2012). Physical and Chemical Property Changes of 3 Biomass Fuels Caused by Torrefaction. **WSED Next**. Wels: Austria.

Shinde, V. B. and Singarvelu, M. (2014). thermo gravimetric analysis of biomass stalks for briquetting. **Journal of Environmental Research And Development**. 9(1): 151 - 160.

Sule, I. O. (2012). Torrefaction Behaviour of Agricultural Biomass. **Master of Applied Science in Engineering**, The University of Guelph.

Tumuluru, J. S., Sokhansanj S., Wright, C. T., Boardman, R. D. and Hess, J. R. (2011). Review on Biomass Torrefaction Process and Product properties and Design of Moving Bed Torrefaction System Model Development. **ASABE Meeting Presentation.** Paper Number: 1110459.

Tumuluru, J. S., Boardman, R. and Wright, C. (2010). Changes in Moisture, Carbon, Nitrogen, Sulphur, Volatiles, and Calorific Value of Miscanthus During Torrefaction. **Proceedings of the 2010 AIChE Annual Meeting**.

Tumuluru, J. S. et al. (2010). Technical Review on Biomass Processing: Densification, Preprocessing, Modeling, and Optimization, **ASABE Annual International Meeting**.

Van der Stelt, M. J. C., Gerhauser, H., Kiel, J. H. A. and Ptasinski, K. J. (2011). Biomass upgrading by torrefaction for the production of biofuel, **biomass and bioenergy.** 35: 3748 - 3762.

Wattananoi, W., Khumsak, O.and Worasuwannarak, N. (2011). Upgrading of biomass by torrefaction and densification process. **IEEE First Conference on Clean Energy and Technology CET**.: 209 - 212.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

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: 99 - 105.

Wannapeera, J., Worasuwannarak, N.(2012). Upgrading of woody biomass by torrefaction under pressure. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**. 96:173–180.

Waterlean. (2006). **Hydrogone horizontal dise dryer [on - line].** www.waterleau.com.

Womac, A. R., Yu. M., Igathinathane, C., Ye, P., Hayes, D., Narayan, S., Sokhansanj, S. and Wright, L. (2005). Shearing characteristics of biomass for size reduction . **ASAE meeting presentation**.

Wu, M. R., Schott, D. L. and Lodewijks, G. (2011). Physical properties of solid biomass. **Biomass and bioenergy**. 35(5) : 2093 - 2105.

Zanzi1 R, Tito Ferro D, Torres A, Beaton Soler P, Björnbom E. (2004). **Biomass torrefaction**.

Zhou, J. (2011). Case Study: Thermal design of a biomass drying process using low grade heat from steel industry. **Epsrc thermal management of industrial processes**. Report prepared by: SUWIC, Sheffield University.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ภาคผนวก ก

วิธีการวิเคราะห์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ก1 การหาคุณสมบัติทางกายภาพวัตถุดิบ

ก1.1 ความหนาแน่น

วิธีการทดลองนำมาจัดเรียงให้ชิดกันที่สุดในภาชนะขนาด 50 x 50 x 50 cm^3 นำไปชั่งน้ำหนักแล้วบันทึกผล ค่ามวลของตัวอย่างต่อหน่วยปริมาตรที่แน่นอน

ก1.2 ความหนาแน่นหลังการอัด

วิธีการทดลอง ทำการวัดค่ามวลต่อปริมาตรของตัวอย่าง แล้วนำค่าที่ได้จากการทดลอง มาคำนวณตามสมการที่ (ก1)

$$Density = \frac{Mass\,(kg)}{Volume\,(m^3)} \qquad (ก1)$$

ก1.3 ความชื้น

คือเปอร์เซ็นต์ของน้ำต่อน้ำหนักตัวอย่าง โดยหาเป็นร้อยละของความชื้นมาตรฐานเปียก (Wet basis) ซึ่งมีขั้นตอนการวิเคราะห์ดังนี้

▪ อบถาดอลูมิเนียมพร้อมฝาในเตาอบ (Drying Oven) ที่อุณหภูมิ 105±1 °C เป็นเวลา 30 min จากนั้นนำเข้าเดสิเกเตอร์ (Desicator) ทิ้งไว้ประมาณ 15 min จากนั้นนำไปชั่ง และบันทึกน้ำหนัก

▪ ชั่งตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองประมาณ 1 g ลงในถาดอลูมิเนียมพร้อมฝา ที่ทราบน้ำหนัก จากนั้นบันทึกน้ำหนักตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง

▪ นำตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองไปเข้าเตาอบที่อุณหภูมิ 105 ± 1 °C เป็นเวลา 1 h หรือจนกว่าน้ำหนักตัวอย่างของตัวอย่างคงที่

▪ นำถาดอลูมิเนียมมาทิ้งไว้ให้เย็นแล้วนำเข้าเดสิเกเตอร์ จากนั้นทิ้งไว้ประมาณ 1 min จึงทำการชั่งน้ำหนักถาดอลูมิเนียมพร้อมฝาที่มีตัวอย่างที่ทำการอบแล้วอยู่ภายใน ทำการบันทึกผล จากนั้นนำผลการทดลองมาคำนวณตามสมการที่ (ก2)

$$M(wb) = 100 \times \frac{(W_1 - W_2)}{W} \qquad (ก2)$$

เมื่อ

M (wb) คือ ร้อยละของความชื้นมาตรฐานเปียก (Wet basis)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

W_1	คือ	น้ำหนักของถาดอลูมิเนียมพร้อมฝารวมกับน้ำหนักของตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองก่อนทำการอบ (g)
W_2	คือ	น้ำหนักของถ่านอลูมิเนียมพร้อมฝารวมกับน้ำหนักของตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองหลังทำการอบ (g)
W	คือ	น้ำหนักของตัวอย่างตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง (g)

ก2 การหาองค์ประกอบแบบประมาณ (Proximate Analysis) วัตถุดิบ

การหาองค์ประกอบประมาณ ได้แก่ ความชื้น เถ้า (Ash) ปริมาณสารระเหย (Volatile Mater) และปริมาณคาร์บอนคงตัว (Fixed Carbon) โดยใช้วิธีการตามมาตรฐานของ ASTM D1762-84 ซึ่งมีวิธีการดังนี้

ก2.1 ความชื้น

คือเปอร์เซ็นต์ของน้ำต่อน้ำหนักตัวอย่างแห้ง โดยหาเป็นร้อยละของความชื้นมาตรฐานแห้ง (Dry basis) ซึ่งมีขั้นตอนการวิเคราะห์ดังนี้

■ อบถาดอลูมิเนียมพร้อมฝาในเตาอบ (Drying oven) ที่อุณหภูมิ 105±1 °C เป็นเวลา 30 min จากนั้นนำเข้าเดสิเกเตอร์ (Desicator) ทิ้งไว้ประมาณ 15 min จากนั้นนำไปชั่ง และบันทึกน้ำหนัก

■ ชั่งตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองประมาณ 1 g ลงในถาดอลูมิเนียมพร้อมฝาที่ทราบน้ำหนัก จากนั้นบันทึกน้ำหนักตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง

■ นำตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองไปเข้าเตาอบที่อุณหภูมิ 105 ± 1 °C เป็นเวลา 1 h หรือจนกว่าน้ำหนักตัวอย่างของตัวอย่างคงที่

■ นำถาดอลูมิเนียมมาทิ้งไว้ให้เย็นแล้วนำเข้าเดสิเกเตอร์ จากนั้นทิ้งไว้ประมาณ 15 min จึงทำการชั่งน้ำหนักถาดอลูมิเนียมพร้อมฝาที่มีตัวอย่าง ที่ทำการอบแล้วอยู่ภายในและทำการบันทึกจากนั้นนำผลการทดลองมาคำนวณตามสมการที่ (ก3)

$$M(db) = 100 \times \frac{(W_1 - W_2)}{W_2 - W_0} \qquad \text{(ก3)}$$

เมื่อ

M (db)	คือ	ร้อยละของความชื้นมาตรฐานแห้ง (Dry Basis)
W_0	คือ	น้ำหนักของถาดอลูมิเนียมพร้อมฝาที่ใช้ในการทดลอง (g)

W_1 คือ น้ำหนักของถาดอลูมิเนียมพร้อมฝารวมกับน้ำหนักของตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองก่อนทำการอบ (g)

W_2 คือ น้ำหนักของถาดอลูมิเนียมพร้อมฝารวมกับน้ำหนักของตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองหลังทำการอบ (g)

ก2.2 เถ้า (Ash) วัตถุดิบ

- เผาครูซิเบลพอร์ซเลน (Porcelain crucible) พร้อมฝาในเตาเผา (Muffle Furnace) ที่อุณหภูมิ 750 °C เป็นเวลาประมาณ 1 h จากนั้นนำออกมาทำให้เย็นในเดสิเกเตอร์แล้วทำการชั่งน้ำหนักครูซิเบลพอร์ซเลนพร้อมฝา
- ชั่งน้ำหนักของตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองใส่ครูซิเบลพอร์ซเลนประมาณ 1 g
- นำไปเผาบนตะเกียงบุนเซน รอจนควันระเหยออกหมด
- ใส่ครูซิเบลพอร์ซเลนพร้อมฝาในเตาเผาที่อุณหภูมิ 750 °C ทิ้งไว้เป็นเวลาประมาณ 2 h หรือรอจนน้ำหนักเถ้าคงที่
- นำครูซิเบลพอร์ซเลนออกจากเตาเผาแล้วนำทิ้งไว้ให้เย็นลง จากนั้นนำไปใส่ในเดสิเกเตอร์ทำการชั่งน้ำหนักและบันทึกผลแล้วทำการคำนวณตามสมการที่ (ก4)

$$A = 100 \times \frac{(W_3 - W_4)}{W} \qquad \text{(ก4)}$$

เมื่อ

A คือ ร้อยละของเถ้า

W_3 คือ น้ำหนักของครูซิเบลพอร์ซเลนพร้อมฝาที่มีเถ้า (g)

W_4 คือ น้ำหนักของครูซิเบลพอร์ซเลนพร้อมฝา (g)

W คือ น้ำหนักของตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง (g)

ก2.3 ปริมาณสารระเหย วัตถุดิบ

- เผาครูซิเบิลพร้อมฝาในเตาเผาที่อุณหภูมิ 950 °C ทิ้งไว้ประมาณ 30 min จากนั้นนำออกจากเตาเผา ทิ้งไว้ให้เย็นในเดสิเกเตอร์ หลังจากนั้นทำการชั่งน้ำหนักของครูซิเบิลพร้อมฝาและทำการบันทึกผล
- ชั่งตัวอย่างตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองใส่ในครูซิเบิลประมาณ 1 g
- ปิดฝาครูซิเบิลให้เรียบร้อย จากนั้นนำไปให้ความร้อนโดยให้อยู่เหนือปากเตาเผาที่อุณหภูมิประมาณ 300 °C เป็นเวลาประมาณ 6 min

■ หย่อนครูซิเบิลให้อยู่บริเวณปากเตา อุณหภูมิประมาณ 600 ºC ทิ้งไว้เป็นเวลาประมาณ 10 min

■ หย่อนครูซิเบิลให้อยู่กึ่งกลางเตาเผา อุณหภูมิประมาณ 950 ºC เป็นเวลาประมาณ 6 min

■ นำครูซิเบิลออกมาทิ้งไว้ให้เย็นลง จากนั้นนำไปใส่ไว้ในเดสิเกเตอร์ ประมาณ 15 min จากนั้นจึงนำไปชั่งน้ำหนักและทำการบันทึกผล แล้วทำการคำนวณตามสมการที่ (ก5)

$$V = 100 \times \frac{(W_5 - W6)}{W} \tag{ก5}$$

เมื่อ

V	คือ	ร้อยละของสารระเหย
W_5	คือ	น้ำหนักของครูซิเบิลพร้อมฝารวมกับนำหนักของตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองก่อนทำการเผา (g)
W_6	คือ	น้ำหนักของครูซิเบิลพร้อมฝารวมกับนำหนักของตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองหลังทำการเผา (g)
W	คือ	นำหนักของตัวอย่างตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง (g)
M	คือ	ร้อยละของความชื้น

ก2.4 ปริมาณคาร์บอนคงตัว วัตถุดิบ

ปริมาณคาร์บอนคงตัว สามารถคำนวณ ได้ตามสมการที่ (ก6)

ร้อยละของคาร์บอนคงตัว = 100 - ร้อยละของความชื้น - ร้อยละของเถ้า (ก6)

ก2.5 การหาค่าความร้อนของการเผาไหม้ (Calorific Value) วัตถุดิบ

การหาค่าความร้อนของการเผาไหม้ตัวอย่างโดยใช้เครื่อง Bomb Calorimeter ตามมาตรฐานของ ASTM D 2015-77 โดยนำตัวอย่างตัวอย่างแห้งบดละเอียด อัดเป็นเม็ด พันด้วยลวดเผาไหม้ (Ignition Wire) ใส่ลงในถ้วยตัวอย่าง วางในเครื่องบอมบ์ปิดฝา อัดแก๊สออกซิเจนบริสุทธิ์เข้าไปด้วยความดัน 30 kg/cm^3 ประมาณ 5 min แล้วประกอบเข้าในถัง (Jacket) เติมน้ำ ประมาณ 1800 ml กดปุ่มเผาไหม้ตัวอย่าง อุณหภูมิเพิ่มขึ้นจนคงที่ ความร้อนที่เกิดขึ้นจะถูกถ่ายเทให้กับน้ำ

แล้วนำค่าความแตกต่างของอุณหภูมิ ไปคำนวณหาค่าความร้อนของตัวอย่าง โดยเทียบกับค่าความร้อนที่ได้จากการ บอมบ์ Benzoic Acid มาตรฐาน

ค่าความร้อนทางเชื้อเพลิง คือ ปริมาณความร้อนที่ต้องถ่ายเทออกจากเชื้อเพลิง เนื่องจากการสันดาปที่เกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ในระบบ โดยปกติการสันดาปของเชื้อเพลิงจำพวกไฮโดรคาร์บอนเมื่อสันดาปในบรรยากาศของออกซิเจน ผลของการสันดาปจะได้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ (ซึ่งอยู่ในรูปของไอน้ำ) ถ้าไอน้ำสามารถกลั่นตัวแล้วคายความร้อนแฝงออกมา ค่าความร้อนเชื้อเพลิงที่ได้จะเป็นค่าความร้อนสูงสุด แต่ถ้าไอน้ำไม่กลั่นตัว ค่าความร้อนทางเชื้อเพลิงจะเป็นค่าความร้อนต่ำ การหาค่าความร้อนทางเชื้อเพลิงโดยการนำเอาเชื้อเพลิงที่จะทำการทดสอบไปชั่งน้ำหนักให้ละเอียดมาเผาไหม้กับออกซิเจนบริสุทธิ์ ภายใต้ความดันภายใน Bomb Calorimeter ความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้จะถ่ายเทให้กับน้ำหล่อเย็นรอบตัวบอมบ์แคลอรีมิเตอร์ ซึ่งสามารถวัดอุณหภูมิของน้ำได้โดยใช้เทอร์โมมิเตอร์และปริมาณความร้อนสามารถคำนวณหาได้จากสมการที่ (ก7)

$$Q = m.c.\Delta T \qquad \text{(ก7)}$$

เมื่อ

Q	คือ	ปริมาณความร้อน (MJ/Kg)
m	คือ	มวลของน้ำในแคลอรีมิเตอร์ (kg)
c	คือ	ค่าความร้อนจำเพาะของน้ำ (4.186 KJ/kg)
ΔT	คือ	อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง (^{o}C)

ก.3 การหาคุณสมบัติแบบแยกธาตุ (Ultimate Analysis) วัตถุดิบ

ก3.1 องค์ประกอบของธาตุ คาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน และ ซัลเฟอร์

สามารถทำได้โดยใช้เครื่องวิเคราะห์ปริมาณธาตุ C H N S Elemental Analyzer นำตัวอย่างบดให้ละเอียด ชั่งปริมาณที่แน่นอนประมาณ 1-2 mg ใส่ภาชนะ นำไปเผาที่อุณหภูมิประมาณ 925 °C ภายใต้ออกซิเจนบริสุทธิ์ ผ่านเข้าไปใน Reagion CO_2 H_2O N_2 ความคุมความดัน อุณหภูมิ ปริมาตรให้คงที่

ก3.2 องค์ประกอบของธาตุออกซิเจน

ปริมาณออกซิเจนของเชื้อเพลิงตัวอย่าง หาได้จากการคำนวณดังสมการที่ (ก8)

$$O\ (\%) = 100 - (\%\ C - \%\ H - \%\ N - \%\ S) \qquad \text{(ก8)}$$

ภาคผนวก ข

ตัวอย่างการวิเคราะห์ทางสถิติ

ข1 ตัวอย่างการหาความสัมพันธ์ ของอุณหภูมิ และเวลา ของฟางข้าว

ข1.1 อุณหภูมิ 225 °C เวลา 120 min

ข1.1.1 ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิ 225 °C

ค่าความหนาแน่น

Duncan[a]

time	N	Subset for alpha = .05	
		1	2
90	3	538.3333	
60	3		552.6667
30	3		553.3333
120	3		557.6667
Sig.		1.000	.224

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

ผลผลิตพลังงาน

Duncan[a]

time	N	Subset for alpha = .05		
		1	2	3
120	3	78.8167		
90	3		79.9933	
60	3		80.6667	
30	3			83.3200
Sig.		1.000	.082	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารระเหย

Duncan[a]

time	N	Subset for alpha = .05			
		1	2	3	4
90	3	62.6533			
120	3		62.8500		
60	3			63.3133	
30	3				65.0400
Sig.		1.000	1.000	1.000	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

เถ้า

Duncan[a]

time	N	Subset for alpha = .05	
		1	2
30	3	17.2700	
90	3	17.3700	
60	3	17.3900	
120	3		18.2100
Sig.		.303	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

คาร์บอนคงตัว

Duncan[a]

time	N	Subset for alpha = .05			
		1	2	3	4
30	3	17.6867			
120	3		18.9267		
60	3			19.3033	
90	3				19.9833
Sig.		1.000	1.000	1.000	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

องค์ประกอบธาตุคาร์บอน

Duncan[a]

time	N	Subset for alpha = .05	
		1	2
30	3	41.3400	
120	3		41.9567
90	3		42.2433
60	3		42.4000
Sig.		1.000	.096

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

องค์ประกอบธาตุไฮโดรเจน

Duncan[a]

time	N	Subset for alpha = .05	
		1	2
120	3	5.3933	
90	3	5.4200	5.4200
60	3	5.4400	5.4400
30	3		5.5133
Sig.		.371	.094

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

ค่าความร้อน

Duncan[a]

time	N	Subset for alpha = .05		
		1	2	3
30	3	16.1233		
60	3	16.2433	16.2433	
120	3		16.3667	16.3667
90	3			16.4467
Sig.		.134	.125	.299

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลผลิตพลังงาน

Duncan[a]

time	N	Subset for alpha = .05			
		1	2	3	4
120	3	92.8167			
60	3		94.2733		
90	3			94.6867	
30	3				96.6300
Sig.		1.000	1.000	1.000	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

ความหนาแน่นพลังงาน

Duncan[a]

time	N	Subset for alpha = .05	
		1	2
90	3	8.8533	
30	3	8.9233	8.9233
60	3	8.9767	8.9767
120	3		9.1233
Sig.		.258	.084

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ข1.1.2 ความสัมพันธ์ของเวลา 120 min

ความหนาแน่น

Duncan[a]

Temp	N	Subset for alpha = .05			
		1	2	3	4
250	3	523.3333			
225	3		557.6667		
200	3			574.0000	
175	3				594.0000
Sig.		1.000	1.000	1.000	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

ผลผลิตมวล

Duncan[a]

Temp	N	Subset for alpha = .05		
		1	2	3
250	3	70.7833		
225	3		78.8167	
200	3			85.9667
175	3			87.1567
Sig.		1.000	1.000	.050

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารระเหย

Duncan[a]

Temp	N	Subset for alpha = .05			
		1	2	3	4
250	3	57.2300			
225	3		62.8500		
200	3			66.5900	
175	3				67.6933
Sig.		1.000	1.000	1.000	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

เถ้า

Duncan[a]

Temp	N	Subset for alpha = .05			
		1	2	3	4
175	3	14.6267			
200	3		16.4433		
225	3			18.2100	
250	3				19.7233
Sig.		1.000	1.000	1.000	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

คาร์บอนคงตัว

Duncan[a]

Temp	N	Subset for alpha = .05			
		1	2	3	4
200	3	16.9567			
175	3		17.6900		
225	3			18.9267	
250	3				23.0400
Sig.		1.000	1.000	1.000	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

องค์ประกอบธาตุคาร์บอน

Duncan[a]

Temp	N	Subset for alpha = .05			
		1	2	3	4
175	3	34.4333			
200	3		40.7967		
225	3			41.9567	
250	3				44.5467
Sig.		1.000	1.000	1.000	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

องค์ประกอบธาตุไฮโดรเจน

Duncan[a]

Temp	N	Subset for alpha = .05			
		1	2	3	4
175	3	4.7333			
250	3		5.1067		
225	3			5.3933	
200	3				5.6133
Sig.		1.000	1.000	1.000	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

ค่าความร้อน

Duncan[a]

Temp	N	Subset for alpha = .05			
		1	2	3	4
175	3	15.2433			
200	3		15.7033		
225	3			16.3667	
250	3				17.2867
Sig.		1.000	1.000	1.000	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลผลิตพลังงาน

Duncan[a]

Temp	N	Subset for alpha = .05			
		1	2	3	4
250	3	88.0467			
225	3		92.8167		
175	3			95.5600	
200	3				97.1000
Sig.		1.000	1.000	1.000	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

ความหนาแน่นพลังงาน

Duncan[a]

Temp	N	Subset for alpha = .05
		1
200	3	9.0133
250	3	9.0433
175	3	9.0533
225	3	9.1233
Sig.		.367

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ประวัติผู้เขียน

นายณัฐพงษ์ ประภาการ เกิดเมื่อวันที่ 10 พฤษภาคม พ.ศ. 2527 เป็นบุตรของ ร.ต.ต.บุญรัตน์ ประภาการ และ นางสมเพียร ประภาการ สำเร็จการศึกษาชั้นประถมศึกษาปีที่ 1 - 4 โรงเรียนบ้านโคกสง่า อำเภอแวงน้อย จังหวัดขอนแก่น สำเร็จการศึกษาประถมศึกษาปีที่ 5 - 6 โรงเรียนเทศบาลพลประชานุกูล อำเภอพล จังหวัดขอนแก่น สำเร็จการศึกษาชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 1 - 6 ที่โรงเรียนเมืองพลพิทยาคม อำเภอพล จังหวัดขอนแก่น สำเร็จการศึกษาปริญญาตรี พ.ศ. 2548 สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัด นครราชสีมา และสำเร็จการศึกษาปริญญาโท พ.ศ. 2552 สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี มีผลงานตีพิมพ์ทางวิชาการดังนี้

1) ณัฐพงษ์ ประภาการ พรรษา ลิบลับ และวีรชัย อาจหาญ. (2551). การศึกษาคุณสมบัติกำลังเฉือนของเชื้อเพลิงชีวมวล. การประชุมวิชาการครั้งที่ 9 ประจำปี 2551. สมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย. 184 - 185.

2) ณัฐพงษ์ ประภาการ สุภัทร หนูแย้ม ธนธัช มุขขันธ์ พรรษา ลิบลับ สาวิตรี คำหอม และวีรชัย อาจหาญ. (2555). คุณสมบัติของเชื้อเพลิงอัดแท่งจากเปลือกไม้ยูคาลิปตัส ฟางข้าว เศษวัสดุเหลือใช้จากข้าวโพด และเหง้ามันสำปะหลัง, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 26 ประจำปี 2555. 24 - 27 ตุลาคม 2555.

3) สาวิตรี คำหอม ธราวุธ บุญน้อม ณัฐพงษ์ ประภาการ พรรษา ลิบลับ และวีรชัย อาจหาญ. (2555). การศึกษาเปรียบเทียบกระบวนการผลิตพริกแห้งด้วยเตาอบไมโครเวฟลมร้อน และเตาอบไมโคเวฟร่วมกับลมร้อน. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 26 ประจำปี 2555. 24 - 27 ตุลาคม 2555.

4) ธราวุธ บุญน้อม ณัฐพงษ์ ประภาการ สาวิตรี คำหอม และวีรชัย อาจหาญ. (2555). การศึกษาการประยกต์ใช้เตาอบไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนในกระบวนการผลิตพริกแห้ง. การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 13. 4 - 5 เมษายน 2555.