

การพัฒนาเชื้อเพลิงทอริไฟต์จากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร  
ด้วยเทคนิคคลื่นไมโครเวฟ



ศกรัตน์ จินดารักษ์

ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานทดแทน  
มหาวิทยาลัยแม่โจ้

พ.ศ. 2562

การพัฒนาเชื้อเพลิงทอริไฟต์จากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร  
ด้วยเทคนิคคลื่นไมโครเวฟ



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของความสมบูรณ์ของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานทดแทน

สำนักบริหารและพัฒนาวิชาการ มหาวิทยาลัยแม่โจ้

พ.ศ. 2562

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยแม่โจ้

การพัฒนาเชื้อเพลิงทอริไฟด์จากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร  
ด้วยเทคนิคคลื่นไมโครเวฟ

ศกสรรัตน์ จินดารักษ์

วิทยานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของความสมบูรณ์ของการศึกษา  
ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานทดแทน

พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษา

อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐภูมิ ดุษฎี)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ. ....

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชูรัตน์ ชารักษ์)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ. ....

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นิกราน หอมดวง)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ. ....

ประธานอาจารย์ผู้รับผิดชอบหลักสูตร

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนศ ไชยชนะ)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ. ....

สำนักบริหารและพัฒนาวิชาการรับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์ ดร.ญาณิน โอภาสพัฒนกิจ)

รักษาการแทนรองอธิการบดี ปฏิบัติการแทน

อธิการบดีมหาวิทยาลัยแม่โจ้

วันที่.....เดือน.....พ.ศ. ....

ชื่อเรื่อง	การพัฒนาเชื้อเพลิงทอริไฟด์จากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร ด้วยเทคนิคคลื่นไมโครเวฟ
ชื่อผู้เขียน	นางสาวศกลรัตน์ จินดารักษ์
ชื่อปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานทดแทน
อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐวุฒิ ดุษฎี

### บทคัดย่อ

กระบวนการทอริไฟด์เป็นกระบวนการปรับปรุงคุณภาพของชีวมวล โดยการกำจัดความชื้นและสารระเหยที่อุณหภูมิ 200-400 °C ภายใต้ความดันบรรยากาศ ทั้งนี้เพื่อนำไปทดแทนการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลในอนาคตได้ อย่างไรก็ตามการป้อนความร้อนในกระบวนการทอริไฟด์มีการใช้พลังงานในการป้อนความร้อนสูง ดังนั้นจึงมีการนำเทคนิคคลื่นไมโครเวฟจึงถูกนำมาประยุกต์ใช้เพื่อเป็นแหล่งพลังงานให้แก่กระบวนการทอริไฟด์ งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อใช้ในการศึกษาการเพิ่มคุณภาพวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรประเภทเศษไม้ลำไยและทางใบปาล์มด้วยกระบวนการทอริไฟด์ด้วยเทคนิคคลื่นไมโครเวฟ โดยมีการวิเคราะห์และเปรียบเทียบผลกระทบของกำลังวัตต์ไมโครเวฟ และเวลาทอริไฟด์ต่อคุณสมบัติทั้งทางเคมี กายภาพ และค่าความร้อนของเศษไม้ลำไยและทางใบปาล์มที่อยู่ในรูปแบบกาก โดยกำหนดกำลังวัตต์ไมโครเวฟเท่ากับ 180-600 W และเวลาเท่ากับ 10-20 min ผลการศึกษา พบว่า กำลังวัตต์ไมโครเวฟและระยะเวลาทอริไฟด์มีผลกระทบต่อคุณสมบัติ และค่าความร้อนของเศษไม้ลำไยและใบปาล์ม โดยเมื่อกำลังวัตต์และเวลาเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความชื้นและสารระเหยลดลง ขณะเดียวกัน ปริมาณเถ้าและคาร์บอนคงตัวเพิ่มขึ้น ซึ่งส่งผลให้ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงทอริไฟด์เพิ่มขึ้น ทำให้ได้ค่าเงื่อนไขกำลังวัตต์และเวลาทอริไฟด์ที่เหมาะสมสำหรับงานวิจัยนี้ คือ 450 W และ 20 min ตามลำดับ ซึ่งมีค่าความร้อนของเศษไม้ลำไยและทางใบปาล์มทอริไฟด์เท่ากับ 23.12 MJ/kg และ 22.76 MJ/kg เพิ่มขึ้นจากชีวมวลตั้งต้น คิดเป็น 25.17% และ 27.50% ตามลำดับ การใช้พลังงานไฟฟ้าของกระบวนการทอริไฟด์เพิ่มขึ้นเมื่อกำลังวัตต์ไมโครเวฟและเวลาเพิ่มขึ้น โดยกำลังวัตต์ไมโครเวฟที่สูงขึ้นและเวลาดลดลง มีการใช้พลังงานใกล้เคียงกับกรณีที่กำลังวัตต์ไมโครเวฟที่ต่ำกว่า แต่ใช้เวลาเพิ่มขึ้น สำหรับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เอมไพริคอลสำหรับหาค่าความร้อนของเชื้อเพลิงทอริไฟด์ สามารถพยากรณ์ค่าความร้อนได้ดี มีค่า R-squares เฉลี่ยอยู่ในช่วง 0.9390-0.9445 อัตราการใช้พลังงานไฟฟ้าโดยเฉลี่ยอยู่ในช่วง 0.04-0.22 kWh ส่งผลให้การผลิตมีต้นทุนพลังงานทั้งหมด 0.54 kWh/g จากการวิเคราะห์ SEM โครงสร้างชีวมวลเกิดการแตกหักและมีขนาดเล็กลงเมื่อกำลังวัตต์ไมโครเวฟเพิ่มสูงขึ้น และเมื่อดูจากอัตราส่วน

อะตอม H/C และ O/C ที่เงื่อนไข 600 W 20 min มีค่าอยู่ในช่วง 0.0928-0.0934 % และ 0.5883-0.5622 % ลดลงจากชีวมวลเริ่มต้น ซึ่งถือเป็นข้อดีเพราะทำให้ควันและไอน้ำที่ก่อตัวน้อยลง

คำสำคัญ : ทอรรีแฟคชัน, เทคนิคคลื่นไมโครเวฟ, ค่าความร้อน, เชื้อเพลิงทอรรีไฟด์



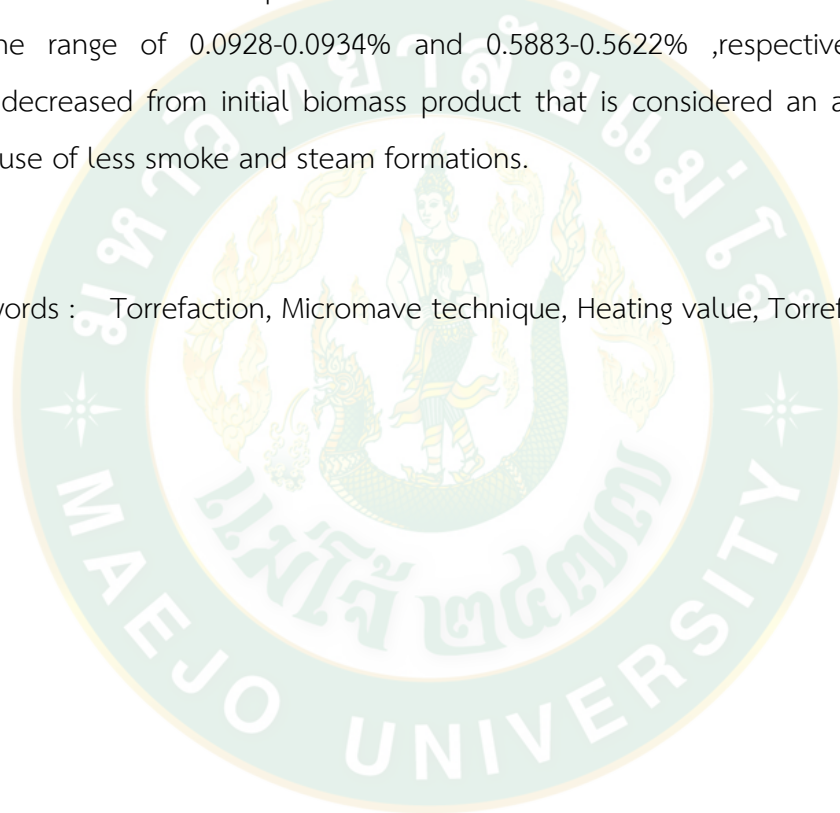
<b>Title</b>	DEVELOPMENT OF TORIFIED FUEL FROM AGRICULTURAL WASTE WITH MICROWAVE TECHNIC
<b>Author</b>	Miss Sakonrat Jindarak
<b>Degree</b>	Master of Engineering in Renewable Energy Engineering
<b>Advisory Committee Chairperson</b>	Assistant Professor Dr. Natthawud Dussadee

### ABSTRACT

Torrefaction is a process in getting rid of moisture and volatile matter at temperature of 200-400 °C under atmospheric pressure which is the procedure to develop qualities of biomass as alternative energy. However, the heat input in the process has high energy consumption. Therefore, Microwave technique is applied to be an energy source for the process. The objectives of this research were to study the quality improvements of agricultural waste, wood chips and palm leaves using microwave torrefaction process, to analyze the effects of microwave power and torrefaction time on chemical and physical properties and heating value of wood chips and palm leaves in powder form by setting 180-600W microwave power and 10-20 min torrefaction time, as well to construct mathematical models to predict heating value of torrefied fuel and to investigate energy consumption of the process. The results showed that microwave power and torrefaction time affected qualities and heating values of wood chips and palm leaves. Increasing the microwave power and torrefaction time moisture content and volatile matter decreased, while ash, fixed carbon and heating vales of torrefied fuel increased. Therefore, the optimal condition of this research was 450W microwave power and 20 min torrefaction time. The heating values of wood chips and palm leaves torrefied at the condition were 23.12% and 22.76% that increased raw biomass about 27.50% and 27.50%, respectively. The energy consumption of torrefaction process increased when both of microwave power and time increased. It was shown that the energy consumption of higher microwave power

with shorter torrefaction time seem to be not different from lower microwave power with longer torrefaction time condition. The empirical mathematical models was suitable for estimating heating values that the average R-squares were in the range 0.9390-0.9445 The average electric power consumption rates were in the range of 0.04 and 0.22 kWh. At production all energy costs equal to 0.54 kWh/g. For SEM analysis, it was found that torrefied products were broken and smaller when the power wattage of microwave increased. The ratio of hydrogen to carbon and oxygen to carbon analysis used microwave power 600 W at 20 minutes it was found that the value was in the range of 0.0928-0.0934% and 0.5883-0.5622% ,respectively. The value that decreased from initial biomass product that is considered an advantage point because of less smoke and steam formations.

Keywords : Torrefaction, Microwave technique, Heating value, Torrefied fuel



## กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร.นคร ทิพย์วงค์ ซึ่งให้เกียรติเป็นประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ตลอดจนให้คำแนะนำการแก้ไขวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐภูมิ ดุษฎี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นิกราน หอมดวง และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชูรัตน์ ธารารักษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ซึ่งได้ให้คำปรึกษา แนวคิดแนวทางในการศึกษาหาความรู้ และการแก้ปัญหาต่าง ๆ และตรวจสอบแก้ไขจนเล่มวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณคณาจารย์ วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ทุกท่านที่ได้ประศาสน์วิชาความรู้ ตลอดจนเจ้าหน้าที่ทุกท่านที่ให้คำปรึกษาและอำนวยความสะดวกในการทำงานวิจัย

ขอขอบพระคุณ ทุนอุดหนุนการศึกษา วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ โครงการการพัฒนาเชื้อเพลิงทอริไฟด์จากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรด้วยเทคนิคคลื่นไมโครเวฟ ประจำปีการศึกษา 2559

ขอขอบพระคุณ เงินทุนสนับสนุนการวิจัย จากมหาวิทยาลัยแม่โจ้ โครงการการพัฒนาเชื้อเพลิงทอริไฟด์จากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรด้วยเทคนิคคลื่นไมโครเวฟ โครงการสนับสนุนทุนวิจัยแก่นักศึกษาระดับอุดมศึกษา ประจำปีงบประมาณ 2561

ขอขอบพระคุณ โครงการการเพิ่มคุณภาพชีวมวลเหลือใช้ทางการเกษตรโดยกระบวนการเพิ่มความหนาแน่นและการอบแห้งสำหรับการผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพ ประจำปี 2559

ท้ายที่สุดนี้ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา และเพื่อน ๆ ที่คอยให้ความช่วยเหลือสนับสนุน พร้อมทั้งคำแนะนำ และเป็นกำลังใจจนทำให้สำเร็จการศึกษาไปด้วยดี

ศกลรัตน์ จินดารักษ์

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ช
สารบัญ.....	ซ
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ.....	ฉ
สารบัญตารางผนวก.....	ณ
สารบัญภาพผนวก.....	ด
สัญลักษณ์และตัวห้อย.....	ต
บทที่ 1 บทนำ.....	1
ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย.....	1
วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	3
ขอบเขตของงานวิจัย.....	4
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและการตรวจสอบเอกสาร.....	5
หลักการและทฤษฎี.....	5
1. ชีวมวลและการแปลงสภาพ.....	5
2. ศักยภาพพลังงานชีวมวลสำหรับประเทศไทย.....	7
3. กระบวนการทอรรีแฟคชั่น.....	9
3.1 กระบวนการทอรรีแฟคชั่น.....	9
3.2 กระบวนการทอรรีแฟคชั่นด้วยคลื่นไมโครเวฟ.....	10

4. ทฤษฎีคลื่นไมโครเวฟและการใช้ประโยชน์กับชีวมวล .....	15
4.1 ข้อดีของการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟ.....	17
4.2 ระบบการผลิตความร้อนด้วยไมโครเวฟ .....	18
4.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ.....	19
4.4 ข้อได้เปรียบและเสียเปรียบของการทำความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ .....	20
5. การวิเคราะห์โดยปริมาตร (Proximate Analysis).....	23
6. การวิเคราะห์ขั้นสุดท้าย (Ultimate Analysis) .....	25
7. การวิเคราะห์ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงชีวมวล .....	27
8. การวิเคราะห์ Mass yield และ Energy yield.....	28
9. การวิเคราะห์ทางความร้อนโดยวิธี (Thermo Gravimetric Analysis : TGA) .....	29
10. การวิเคราะห์ Van krevalen.....	30
การตรวจสอบเอกสาร.....	30
บทที่ 3 อุปกรณ์และวิธีการดำเนินงานวิจัย .....	37
วัสดุและอุปกรณ์.....	37
1. วัสดุชีวมวล .....	37
2. อุปกรณ์สำหรับการผลิตเชื้อเพลิงแบบกาก .....	39
3. เครื่องผลิตเชื้อเพลิงทอร์รีไฟต์ด้วยเทคนิคคลื่นไมโครเวฟ .....	41
4. อุปกรณ์วิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีของชีวมวล .....	45
5. การวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของเชื้อเพลิงทอร์รีไฟต์.....	48
6. เครื่องวิเคราะห์ค่าความร้อนของชีวมวลและเชื้อเพลิงทอร์รีไฟต์.....	49
เครื่องมือวัดที่ใช้ในงานวิจัย.....	50
1. เครื่องชั่งน้ำหนัก .....	50
2. เครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิตอล 4 ตำแหน่ง .....	51
3. เครื่องวัดอุณหภูมิแบบอินฟราเรด .....	52

วิธีการทดสอบกระบวนการทอรีรีแพคชั้นด้วยคลื่นไมโครเวฟ .....	52
1. การเตรียมตัวอย่างชีวมวล .....	52
2. การทดสอบกระบวนการทอรีรีแพคชั้นด้วยคลื่นไมโครเวฟ .....	53
3. การวิเคราะห์โดยประมาณ (proximate analysis).....	53
4. การวิธีการเลือกสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการทอรีรีแพคชั้นด้วยคลื่นไมโครเวฟ .....	54
5. การวิเคราะห์โครงสร้างชีวมวล .....	54
แผนภาพรวมการดำเนินงานวิจัย.....	55
1. การศึกษาเงื่อนไขที่เหมาะสมของกระบวนการทอรีรีแพคชั้นด้วยคลื่นไมโครเวฟ .....	55
บทที่ 4 ผลและอภิปรายผล .....	57
คุณสมบัติพื้นฐานเชื้อเพลิง .....	57
การศึกษากระบวนการทอรีรีแพคชั้นด้วยคลื่นไมโครเวฟของชีวมวล .....	59
1. ผลกระทบของกำลังวัตต์ไมโครเวฟที่มีต่อคุณสมบัติของชีวมวล .....	59
2. ผลกระทบของเวลาทอรีรีแพคชั้นคุณสมบัติของชีวมวล .....	62
3. การประเมินกำลังวัตต์ไมโครเวฟและระยะเวลาทอรีรีแพคชั้นที่เหมาะสม .....	67
4. การวิเคราะห์ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงทอรีรีไฟต์ .....	70
5. ผลการวิเคราะห์โครงสร้างเชื้อเพลิงทอรีรีไฟต์ด้วยคลื่นไมโครเวฟ.....	71
6. อัตราการใช้พลังงานในการผลิตเชื้อเพลิงทอรีรีไฟต์ด้วยคลื่นไมโครเวฟ .....	73
7. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ค่าความร้อนเชื้อเพลิงทอรีรีไฟต์ด้วยคลื่นไมโครเวฟ .....	74
8. อัตราการเปลี่ยนแปลงมวลต่ออุณหภูมิของชีวมวล .....	76
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ .....	80
บรรณานุกรม.....	82
ภาคผนวก.....	87
ภาคผนวก ก คุณสมบัติพื้นฐานของชีวมวล.....	88
ภาคผนวก ข ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักต่ออุณหภูมิ TGA.....	90

ภาคผนวก ค ตารางผลการวิเคราะห์เชื้อเพลิงทอร์รีไฟต์ด้วยคลื่นไมโครเวฟ.....	93
ภาคผนวก ง การคำนวณหาคุณสมบัติของชีวมวล .....	99
ภาคผนวก จ การเผยแพร่งานวิจัย .....	103
ประวัติผู้วิจัย.....	118



## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 การใช้พลังงานขั้นสุดท้ายจำแนกตามชนิดและ ตามชนิดพลังงาน.....	7
ตารางที่ 2 ศักยภาพพลังงานชีวมวลในด้านต่างๆ ในประเทศไทย ปี พ.ศ. 2556.....	8
ตารางที่ 3 ค่าคงที่ได้ไอเล็กตริก และค่าไดไอเล็กตริกกลอสแฟคเตอร์ของน้ำและน้ำแข็ง.....	20
ตารางที่ 4 ข้อได้เปรียบและเสียเทียบของการให้ความร้อนแบบดั้งเดิม และการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ.....	22
ตารางที่ 5 แสดงคุณสมบัติทางเคมีของชีวมวลแต่ละชนิด.....	26
ตารางที่ 6 แสดงคุณสมบัติทางเคมีของชีวมวลแต่ละชนิด.....	27
ตารางที่ 7 การตรวจสอบเอกสารที่เกี่ยวข้อง.....	36
ตารางที่ 8 การวิเคราะห์โดยประมาณ และค่าความร้อนเศษไม้ลำไย และทางใบปาล์ม.....	38
ตารางที่ 9 การวิเคราะห์แบบขั้นสุดท้าย ของเศษไม้ลำไย และทางใบปาล์ม.....	39
ตารางที่ 10 ข้อมูลรายละเอียดทางเทคนิคของไมโครเวฟ.....	42
ตารางที่ 11 การวิเคราะห์โดยประมาณ และค่าความร้อนเศษไม้ลำไย และทางใบปาล์ม.....	58
ตารางที่ 12 การวิเคราะห์แบบขั้นสุดท้าย ของเศษไม้ลำไย และทางใบปาล์ม.....	58

## สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 1 แหล่งพลังงานชีวมวลในประเทศไทย.....	2
ภาพที่ 2 แนวทางการใช้พลังงานชีวมวล.....	5
ภาพที่ 3 แหล่งชีวมวลสำหรับการแปรรูปเป็นพลังงานชีวมวล .....	6
ภาพที่ 4 การสมดุลพลังงานและมวลของกระบวนการทอรีรีแฟคชั่น .....	9
ภาพที่ 5 เครื่องปฏิกรณ์ทอรีฟอริก (A) และชุดทดลอง (B) สำหรับการทอดด้วยคลื่นไมโครเวฟ.....	11
ภาพที่ 6 คุณสมบัติของคลื่นไมโครเวฟ (หมดต่อเล็บ, ม.ป.ป).....	12
ภาพที่ 7 กลไกการเหนี่ยวนำเชิงไอออนและกลไกชนิดการหมุนทั้งสองขั้ว .....	13
ภาพที่ 8 การให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ.....	14
ภาพที่ 9 เส้นโค้งความสัมพันธ์ของการอบแห้งระบบพลังงาน .....	15
ภาพที่ 10 แสดงสเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงความถี่ต่างๆ.....	16
ภาพที่ 11 เครื่องวิเคราะห์คุณสมบัติชีวมวล (วิเคราะห์ขั้นสุดท้าย).....	25
ภาพที่ 12 การเปลี่ยนแปลงมวลของสารตัวอย่างเมื่อเทียบกับอุณหภูมิ.....	29
ภาพที่ 13 เตาปฏิกรณ์ทอรีรีแฟคชั่นโดยใช้ความร้อนจากไมโครเวฟ.....	32
ภาพที่ 14 ชุดอุปกรณ์ที่ใช้ไมโครเวฟในกระบวนการทอรีรีไฟด์ .....	34
ภาพที่ 15 เศษไม้ลำไย.....	38
ภาพที่ 16 ทางใบปาล์ม .....	38
ภาพที่ 17 เครื่องบดย่อยชีวมวลแบบหยาบและชีวมวลที่บดย่อย .....	39
ภาพที่ 18 เครื่องบดย่อยชีวมวลแบบละเอียด .....	40
ภาพที่ 19 ตะแกรงคัดขนาดชีวมวล .....	41
ภาพที่ 20 ชุดควบคุมการทำงานของไมโครเวฟ .....	42
ภาพที่ 21 ชุดวัดอุณหภูมิ.....	42

ภาพที่ 22 ห้องเผาไหม้.....	43
ภาพที่ 23 ห้องใส่เชื้อเพลิง .....	43
ภาพที่ 24 เกจปรับแรงดันแก๊สไนโตรเจน .....	43
ภาพที่ 25 ชุดผลิตเชื้อเพลิงทอร์รีไฟต์ด้วยคลื่นไมโครเวฟ .....	44
ภาพที่ 26 แผนภาพเครื่องผลิตเชื้อเพลิงทอร์รีไฟต์ด้วยคลื่นไมโครเวฟ .....	44
ภาพที่ 27 เตาเผาอุณหภูมิสูง.....	45
ภาพที่ 28 ตู้อบความชื้น.....	46
ภาพที่ 29 โถดูดความชื้นหรือเดซิเคเตอร์ .....	46
ภาพที่ 30 ถ้วยกระเบื้อง.....	47
ภาพที่ 31 เครื่องวิเคราะห์ปริมาณธาตุ .....	48
ภาพที่ 32 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด .....	49
ภาพที่ 33 เครื่องวิเคราะห์ค่าความร้อนชีวมวล .....	50
ภาพที่ 34 เครื่องชั่งน้ำหนัก .....	51
ภาพที่ 35 เครื่องชั่งดิจิทัล Pioneer ทศนิยม 4 ตำแหน่ง .....	51
ภาพที่ 36 เครื่องวัดอุณหภูมิแบบอินฟราเรด .....	52
ภาพที่ 37 แผนภาพขั้นตอนวิธีการดำเนินการวิจัย .....	56
ภาพที่ 38 ผลของความชื้นภายใต้กระบวนการทอร์รีแฟคชันที่กำลังวัตต์ไมโครเวฟ 180-600 W.....	60
ภาพที่ 39 ผลของสารระเหยภายใต้กระบวนการทอร์รีแฟคชันที่กำลังวัตต์ไมโครเวฟ 180-600 W..	61
ภาพที่ 40 ปริมาณคาร์บอนคงที่ภายใต้กระบวนการทอร์รีแฟคชัน ที่กำลังวัตต์ 180-600 W.....	61
ภาพที่ 41 ผลของเถ้าภายใต้กระบวนการทอร์รีแฟคชันที่กำลังวัตต์ไมโครเวฟ 180-600 W.....	62
ภาพที่ 42 แสดงปริมาณความชื้นของเวลาทอร์รีแฟคชันช่วง 10-20 min.....	64
ภาพที่ 43 แสดงปริมาณสารระเหยของเวลาทอร์รีแฟคชันช่วง 10-20 min.....	65
ภาพที่ 44 แสดงปริมาณคาร์บอนคงตัวของเวลาทอร์รีแฟคชันช่วง 10-20 min.....	66
ภาพที่ 45 แสดงปริมาณเถ้าของเวลาทอร์รีแฟคชันช่วง 10-20 min.....	66

ภาพที่ 46 ปริมาณมวลและพลังงานที่ได้ของเชื้อเพลิงทอรรีไฟด์จากเศษไม้ลำไย ..... 68

ภาพที่ 47 ปริมาณมวลและพลังงานที่ได้ของเชื้อเพลิงทอรรีไฟด์จากทางใบปาล์ม..... 69

ภาพที่ 48 ค่าความร้อนของชีวมวลประเภทเศษไม้ลำไย ..... 70

ภาพที่ 49 ค่าความร้อนของชีวมวลประเภททางใบปาล์ม..... 71

ภาพที่ 50 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของเศษไม้ลำไยและทางใบปาล์ม 73

ภาพที่ 51 อัตราการใช้พลังงานในแต่ละเงื่อนไขของการทอรรีไฟด์ ..... 74

ภาพที่ 52 ค่าความร้อนของเศษไม้ลำไยทอรรีไฟด์เมื่อแปรผันกับกำลังวัตต์และเวลาทอรรีไฟด์..... 75

ภาพที่ 53 ค่าความร้อนของทางใบปาล์มทอรรีไฟด์เมื่อแปรผันกับกำลังวัตต์และเวลาทอรรีไฟด์..... 76

ภาพที่ 54 อัตราการเปลี่ยนแปลงมวลต่ออุณหภูมิของเศษไม้ลำไย..... 78

ภาพที่ 55 อัตราการเปลี่ยนแปลงมวลต่ออุณหภูมิของทางใบปาล์ม ..... 79



## สารบัญตารางผนวก

	หน้า
ตารางผนวกที่ 1 ผลการวิเคราะห์ปริมาณความชื้นของเศษไม้และทางใบปาล์มทอร์รีไฟด์ด้วยคลื่นไมโครเวฟ.....	94
ตารางผนวกที่ 2 ผลการวิเคราะห์ปริมาณสารระเหยของเศษไม้และทางใบปาล์มทอร์รีไฟด์ด้วยคลื่นไมโครเวฟ.....	95
ตารางผนวกที่ 3 ผลการวิเคราะห์ปริมาณเถ้าของเศษไม้และทางใบปาล์มทอร์รีไฟด์ด้วยคลื่นไมโครเวฟ.....	96
ตารางผนวกที่ 4 ผลการวิเคราะห์ปริมาณคาร์บอนคงตัวของเศษไม้และทางใบปาล์มทอร์รีไฟด์ด้วยคลื่นไมโครเวฟ.....	97
ตารางผนวกที่ 5 ผลการวิเคราะห์ค่าความร้อนของเศษไม้และทางใบปาล์มทอร์รีไฟด์ด้วยคลื่นไมโครเวฟ.....	98



## สารบัญภาพผนวก

	หน้า
ภาพผนวกที่ 1 ใบงานผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุของเศษไม้และทางใบปาล์ม.....	89
ภาพผนวกที่ 2 ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักต่ออุณหภูมิ TGA ของเศษไม้ลำไย.....	91
ภาพผนวกที่ 3 ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักต่ออุณหภูมิ TGA ของใบปาล์ม.....	92



## สัญลักษณ์และตัวห้อย

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
A	น้ำหนักตัวอย่างก่อนการทดสอบ	g
B	น้ำหนักตัวอย่างหลังการทดสอบ	g
MC	ปริมาณความชื้นของชีวมวล	%
WL	ปริมาณน้ำหนักรวมของชีวมวลที่หายไป	%
VC	ปริมาณสารระเหยของชีวมวล	%
FC	ปริมาณคาร์บอนคงตัวของชีวมวล	%
Ash	ปริมาณเถ้าของชีวมวล	%
HHV	ค่าความร้อนสูงของชีวมวล	MJ/kg
LHV	ค่าความร้อนต่ำของชีวมวล	MJ/kg
M	ปริมาณร้อยละของความชื้นในชีวมวล	%
C	ธาตุคาร์บอน	
H	ธาตุไฮโดรเจน	
O	ธาตุออกซิเจน	
N	ธาตุไนโตรเจน	
S	ธาตุกำมะถัน	
H/C	อัตราส่วนระหว่างไฮโดรเจนและคาร์บอน	
O/C	อัตราส่วนระหว่างออกซิเจนและคาร์บอน	
N <sub>2</sub>	ก๊าซไนโตรเจน	
t	เวลาทอริไฟเคชัน	min
W	กำลังวัตต์ไมโครเวฟในการทอริไฟเคชัน	W
Raw	วัตถุดิบ	
SW	เศษไม้ลำไย	
PL	ใบปาล์ม	
SW180	เศษไม้ทอริไฟด์ที่กำลังวัตต์ไมโครเวฟ 180 W	
SW300	เศษไม้ทอริไฟด์ที่กำลังวัตต์ไมโครเวฟ 300 W	
SW450	เศษไม้ทอริไฟด์ที่กำลังวัตต์ไมโครเวฟ 450 W	
SW600	เศษไม้ทอริไฟด์ที่กำลังวัตต์ไมโครเวฟ 600 W	

PL180	โคมไฟพาล์มทอริไฟต์ที่กำลังวัตต์ไมโครเวฟ 180 W
PL300	โคมไฟพาล์มทอริไฟต์ที่กำลังวัตต์ไมโครเวฟ 300 W
PL450	โคมไฟพาล์มทอริไฟต์ที่กำลังวัตต์ไมโครเวฟ 450 W
PL600	โคมไฟพาล์มทอริไฟต์ที่กำลังวัตต์ไมโครเวฟ 600 W



# บทที่ 1

## บทนำ

### ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

พลังงานเป็นปัจจัยพื้นฐานที่สำคัญอย่างยิ่งต่อการพัฒนาประเทศ ทั้งทางด้านเศรษฐกิจ และสังคม เพราะจำเป็นต้องใช้พลังงานในทุกขั้นตอนของการดำเนินงานทั้งทางด้านอุตสาหกรรม คมนาคม เกษตรกรรมและครัวเรือน ดังนั้น จึงกล่าวได้ว่าปัจจัยที่ส่งผลต่อปริมาณการใช้พลังงานที่เห็นได้อย่างชัด คือ จำนวนประชากร อัตราการเพิ่มของประชากร และระดับของการพัฒนาประเทศที่ยังพัฒนามากเท่าไรจะยังมีการบริโภคพลังงานมากขึ้นเป็นเท่าตัว (ศูนย์ประสานงานการเรียนรู้ด้านพลังงาน, 2558) โดยแหล่งพลังงานพื้นฐานที่สำคัญที่ใช้กันมากในชีวิตประจำวันโดยทั่วไป คือ พลังงานฟอสซิล ได้แก่ น้ำมัน ถ่านหิน และก๊าซธรรมชาติ ซึ่งเป็นพลังงานที่ใช้แล้วหมดไป (Non-renewable Energy)

ประเทศไทยมีอัตราการใช้พลังงานเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยแหล่งผลิตพลังงานในประเทศมีไม่เพียงพอต่อการใช้ของคนในประเทศ จึงจำเป็นต้องมีการนำเข้าพลังงานจากต่างประเทศ ในปี พ.ศ. 2558 ประเทศไทยมีการใช้พลังงานทั้งสิ้น 135,496 ktoe ซึ่งมีการนำเข้าพลังงานคิดเป็นร้อยละ 55.29 (74,928 ktoe) (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน., 2558) ดังนั้น จึงมีความจำเป็นต้องหาแหล่งพลังงานทดแทน (Renewable Energy) นั่นคือ พลังงานที่ได้จากธรรมชาติ ใช้ได้ไม่มีวันหมดหรือสามารถสร้างทดแทนได้ในเวลาสั้นๆ ตัวอย่างเช่น พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม พลังน้ำ พลังงานคลื่นในทะเล พลังงานชีวมวล พลังงานความร้อนใต้พิภพ เป็นต้น มาใช้เพื่อลดการนำเข้า ลดต้นทุนการผลิต และส่งเสริมการใช้พลังงานทดแทนในประเทศ โดยกระทรวงพลังงานได้กำหนดแผนพัฒนาเป็นพลังงานทดแทนในระยะ 20 ปีข้างหน้าในช่วงปี 2558-2579 มุ่งเน้นให้มีการใช้พลังงานทดแทน ในสัดส่วนร้อยละ 30 โดยตั้งเป้าหมายการใช้พลังงานทดแทนทั้งสิ้น 39,388.67 ktoe (โดยเพิ่มจากปี 2558 จาก 12.94% มาเป็น 30%) ของการใช้พลังงานทั้งหมด (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2558) ผลที่ได้จากการใช้พลังงานทดแทนเพิ่มขึ้นจะเป็นการลดการนำเข้าพลังงานจากต่างประเทศ

จากการศึกษาศักยภาพของชีวมวลที่เกิดขึ้นในประเทศไทยพบว่ามีศักยภาพที่สูงและมีสัดส่วนการใช้ชีวมวลที่ผ่านมายังไม่มีการใช้ได้อย่างเต็มศักยภาพ เนื่องด้วยประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรมซึ่งมีผลผลิตทางการเกษตรเหลือใช้จำนวนมาก ที่สามารถนำมาใช้ในรูปแบบพลังงานชีวมวลได้ โดยชีวมวลเป็นเชื้อเพลิงที่ได้มาจากอินทรีย์สาร หรือสิ่งมีชีวิต เช่น แกลบ ฟางข้าว ต้นอ้อย

กะลามะพร้าว เศษไม้ เศษหญ้า เป็นต้น ดังภาพที่ 1 นอกจากนี้ยังรวมถึงมูลสัตว์ที่ใช้ในการเกษตร เช่น โค กระบือ สุกร และของเสียจากโรงงานแปรรูปทางการเกษตร เช่น เปลือกสับปะรด หรือน้ำเสียจากโรงงาน เป็นต้น สำหรับการนำชีวมวลมาใช้เป็นเชื้อเพลิงเพื่อผลิตพลังงานนั้น นับเป็นอีกทางเลือกที่น่าสนใจเป็นอย่างมาก นอกจากนี้ยังมีประโยชน์ที่เห็นได้อย่างชัดเจนของการลดต้นทุนการนำเข้าและการจัดการกับเศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร การใช้ประโยชน์จากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรสามารถทำให้เป็นพลังงานความร้อนได้หลายวิธี เช่น การนำมาเผาไหม้โดยตรง และการสร้างให้เป็นแก๊สเชื้อเพลิง เกิดเป็นกระบวนการทำแก๊สซิฟิเคชัน เป็นต้น การนำมาเผาไหม้โดยตรงจะให้ประสิทธิภาพความร้อนต่ำ ส่วนการนำมาใช้กับกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันจะประสบปัญหาในเรื่องของทาร์ (Tar) ซึ่งส่งผลกระทบต่ออุปกรณ์หรือชิ้นส่วนต่าง ๆ ให้ความเสียหาย เชื้อเพลิงบางชนิดมีความหนาแน่นต่ำ ไม่สามารถนำมาใช้ได้โดยตรง จำเป็นที่จะต้องมีการเพิ่มความหนาแน่นให้กับเชื้อเพลิงก่อนนำไปใช้ ดังนั้น หากสามารถเพิ่มคุณภาพให้กับวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรเหล่านี้ได้น่าจะส่งผลให้มีการใช้ชีวมวลกันอย่างแพร่หลาย และสอดคล้องกับนโยบายพลังงานทดแทนของรัฐบาลได้



ภาพที่ 1 แหล่งพลังงานชีวมวลในประเทศไทย

ที่มา: Saensree (2555)

ปัจจุบันการเพิ่มคุณภาพชีวมวลมีหลายรูปแบบ เช่น การเพิ่มความหนาแน่น การเพิ่มค่าความร้อน และการแปลงสภาพชีวมวล เป็นต้น การเพิ่มคุณภาพชีวมวลโดยการเพิ่มค่าความร้อนโดยการใช้กระบวนการไพโรไลซิสเป็นอีกวิธีการหนึ่งที่กำลังได้รับความสนใจ เนื่องจากวิธีการดังกล่าวเป็นวิธีการที่เพิ่มคุณภาพชีวมวลได้อย่างรวดเร็วและใช้ต้นทุนได้ต่ำมาก

กระบวนการทอรรีแฟกซ์ เป็นกระบวนการปรับปรุงคุณสมบัติของชีวมวลอีกประการหนึ่งที่มีความน่าสนใจ กระบวนการนี้จะสามารถลดความชื้น ลดปริมาณทาร์ การเพิ่มค่าความร้อน และความหนาแน่นทางพลังงานให้กับชีวมวล ประโยชน์ที่ได้จากกระบวนการนี้จะทำให้การนำเอาชีวมวลไปใช้ประโยชน์ทั้งการเผาไหม้ตรงและการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง สามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่อง มีประสิทธิภาพความร้อนสูงขึ้น สามารถนำไปทดแทนการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลได้ในอนาคต ในกระบวนการหลักเชื้อเพลิงประเภททอรรีไฟต์ จำเป็นที่จะต้องใช้พลังงานจากภายนอกในการทำให้ชีวมวล ปลดปล่อยความชื้น และสารระเหยบางตัวออกมา ผลจากการใช้ความร้อนที่อุณหภูมิ 200-400 °C จะทำให้ค่าพลังงานของชีวมวลเพิ่มสูงขึ้น และมีค่าใกล้เคียงกับถ่านหิน (วรสันต์, 2556) อย่างไรก็ตาม การป้อนความร้อนในกระบวนการทอรรีไฟต์ยังคงต้องใช้พลังงานในการป้อนความร้อนค่อนข้างสูง ดังนั้น ถ้าสามารถลดการใช้พลังงานต่อหน่วยลงได้ การพัฒนาเชื้อเพลิงทอรรีไฟต์ก็จะเป็นไปได้ในการนำมาใช้งานในอนาคตสูง

การใช้ไมโครเวฟในการใช้ความร้อนร่วมกับชีวมวลก็เป็นอีกแนวทางหนึ่งที่น่าสนใจ เนื่องจากไมโครเวฟเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic wave) ที่มีความถี่ระหว่าง 300 MHz ถึง 300 GHz (ระหว่างความยาวคลื่น 100 cm – 1 mm) ไมโครเวฟใช้ความร้อนแต่อยู่ในรูปของพลังงานและถูกเปลี่ยนเป็นความร้อนโดยการสั่นสะเทือนของอนุภาคที่มีประจุหรือการหมุนตัวโมเลกุลที่มีขั้วทำให้อันกับอนุภาคหรือโมเลกุลที่อยู่ข้างเคียง ซึ่งเกิดขึ้นหลังจากที่วัตถุได้รับคลื่นและมีการดูดซับพลังงานดังกล่าวเป็นผลให้เกิดความร้อนขึ้น (ปริญญา, 2557) ข้อดีของการทอรรีไฟต์ด้วยเทคนิคไมโครเวฟคือใช้เวลาในกระบวนการต่ำ ความสามารถทะลุทะลวงของพลังงานสูง ประหยัดพลังงานในการให้ความร้อนชีวมวล อย่างไรก็ตามที่ผ่านมา ผลงานวิจัยต่างๆ ยังที่ผ่านมามีไม่ชัดเจนเพียงพอ ดังนั้นเพื่อเป็นการยืนยันผลการใช้เทคนิคไมโครเวฟในการผลิตเชื้อเพลิงทอรรีไฟต์ที่มีอยู่ในท้องถิ่น โครงการวิจัยนี้จึงสนใจและมุ่งเน้นการนำเอาเทคนิคคลื่นไมโครเวฟมาใช้ในกระบวนการผลิตทอรรีไฟต์ซึ่งผลของคลื่นนั้น จะส่งผลให้เชื้อเพลิงชีวมวลมีคุณภาพที่สูงขึ้น มีต้นทุนที่ต่ำ มีความเหมาะสมกับวัสดุที่ใช้ในประเทศไทย และสามารถนำไปใช้ได้ในอนาคต

### วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อเพิ่มคุณภาพเชื้อเพลิงทอรรีไฟต์ด้วยเทคนิคคลื่นไมโครเวฟจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร
2. เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการทอรรีไฟต์เชื้อเพลิงด้วยเทคนิคคลื่นไมโครเวฟ
3. เพื่อวิเคราะห์อัตราการใช้พลังงานจากไมโครเวฟทอรรีไฟต์ และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการทอรรีแฟกซ์ด้วยเทคนิคคลื่นไมโครเวฟ

### ขอบเขตของงานวิจัย

1. ศึกษาคุณสมบัติของวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร ได้แก่ เศษไม้ลำไย และทางใบปาล์ม
2. ระดับกำลังไฟฟ้าอยู่ในช่วงที่เหมาะสม
3. เวลาที่ใช้ในกระบวนการทอรีแฟคชันอยู่ในช่วงที่เหมาะสม
4. ทดสอบกระบวนการทอรีแฟคชันภายใต้บรรยากาศที่ใช้ก๊าซไนโตรเจน
5. การวิเคราะห์ขั้นสุดท้ายจะวิเคราะห์ในส่วนของการเชื่อมเพลิงทอรีไฟต์ในสภาวะที่เหมาะสม
6. การวิเคราะห์ต้นทุนและการใช้พลังงานวิเคราะห์จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

### ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้เชื่อมเพลิงทอรีไฟต์จากเทคนิคการใช้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ
2. ได้ข้อมูลและตัวแปรที่เหมาะสม การผลิตเชื่อมเพลิงทอรีไฟต์ด้วยคลื่นไมโครเวฟ
3. ได้ข้อมูลต้นทุนการผลิตการใช้พลังงานในการผลิตเชื่อมเพลิงประเภททอรีไฟต์ด้วยไมโครเวฟ



## บทที่ 2

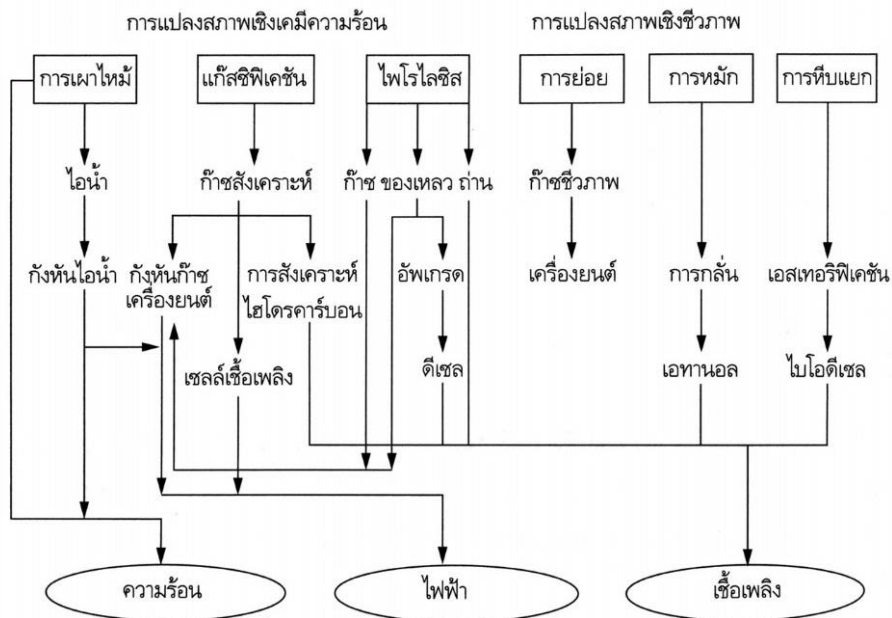
### ทฤษฎีและการตรวจเอกสาร

หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ได้กล่าวถึงพลังงานชีวมวลโดยรวมในประเทศไทย กระบวนการเทอร์รีแพคชั่นด้วยคลื่นไมโครเวฟ และการวิเคราะห์ องค์ประกอบของเชื้อเพลิงประเภทเทอร์รีไฟด์ ซึ่งแต่ละหัวข้อแสดงรายละเอียดดังต่อไปนี้

#### หลักการและทฤษฎี

##### 1. ชีวมวลและการแปลงสภาพ

เชื้อเพลิงเป็นแหล่งพลังงานในการให้ความร้อนและแสงสว่างที่สำคัญแหล่งแรกที่เราใช้ได้ ปัจจุบันก็เป็นแหล่งพลังงานสำคัญในลำดับต้นๆของประเทศไทยเราและประเทศอื่น ๆ ที่กำลังพัฒนาทั้งหลาย ดังภาพที่ 2 ตั้งแต่การใช้พื้นฐานในการเผาไหม้ จนถึงการยกระดับการใช้ด้วยการแปลงสภาพเป็นเชื้อเพลิงที่มีคุณภาพที่ดีขึ้น (นคร, 2553)



ภาพที่ 2 แนวทางการใช้พลังงานชีวมวล

ชีวมวล (Biomass) คือ สารอินทรีย์ที่เป็นแหล่งกักเก็บพลังงานจากธรรมชาติและสามารถนำมาใช้ผลิตพลังงานได้ เช่น เศษวัสดุเหลือใช้จากการเก็บเกี่ยวผลผลิตทางการเกษตร หรือกากจากกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมการแปรรูปสินค้าทางการเกษตร เช่น แกลบจากการสีข้าวเปลือก ชานอ้อยจากการผลิตน้ำตาลทราย ชังข้าวโพดจากการสีข้าวโพดนำเมล็ดตอก กาบและกะลามะพร้าวจากการปอกเปลือกมะพร้าวเพื่อผลิตกะทิและน้ำมันมะพร้าว เป็นต้น ชีวมวลสามารถเปลี่ยนรูปเป็นพลังงานได้เพราะในขั้นตอนการเจริญเติบโตของพืชใช้คาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ และกระบวนการสังเคราะห์แสงเปลี่ยนเป็นแป้งและน้ำตาล แล้วกักเก็บไว้ตามส่วนต่างๆ ของพืช ดังนั้นจึงสามารถแปลงชีวมวลให้กลายเป็นพลังงานชีวมวลได้ทั้งในรูปแบบของพลังงานความร้อนและการผลิตเป็นกระแสไฟฟ้า (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2558)

อย่างไรก็ตาม การเก็บรักษาและการขนส่งชีวมวลมีความยากลำบาก รวมถึงมีความเสี่ยงสูงในการจัดหาหรือรวบรวมชีวมวลที่ต้องการใช้ให้คงที่ตลอดทั้งปี เพราะชีวมวลบางประเภทมีจำนวนจำกัดเพียงบางเดือนเท่านั้น อีกทั้งชีวมวลทุกประเภทต้องการพื้นที่ในการเก็บรักษาขนาดใหญ่ ดังนั้น การพัฒนาระบบและวิธีการจัดเก็บและขนส่งจึงมีความสำคัญและจำเป็นมาก (นคร, 2553)



ภาพที่ 3 แหล่งชีวมวลสำหรับการแปรรูปเป็นพลังงานชีวมวล

ที่มา: กรมอนุรักษ์พลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (2558)

## 2. ศักยภาพพลังงานชีวมวลสำหรับประเทศไทย

พลังงานจากชีวมวลมีศักยภาพสูงมาก เพราะมีประชากรโลกประมาณ 40 % อาศัยชีวมวลในการหุงต้มและให้ความอบอุ่นร่างกาย และถ้าหากพิจารณาเฉพาะปริมาณการใช้พลังงานในประเทศที่กำลังจะพัฒนาทั่วโลกนั้น การใช้พลังงานชีวมวลจะมีสัดส่วนประมาณ 35-40% ของการใช้พลังงานทั้งหมด โดยมีจีนและอินเดียเป็นประเทศหลักในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้มีโครงการพลังงานชีวมวลเกิดขึ้นจำนวนมาก เนื่องจากให้ความสำคัญมากขึ้นและการเจริญเติบโตทางเศรษฐกิจ (นคร, 2553)

การใช้พลังงานขั้นสุดท้ายของประเทศไทยในช่วง 5 เดือนแรกของปี 2562 มีปริมาณ 36,640 พันตัน เทียบเท่ากับน้ำดิบ ดังตารางที่ 1 เพิ่มขึ้นจากช่วงเดียวกันของปีก่อน ร้อยละ 1.4 คิดเป็นมูลค่าการใช้พลังงานรวมกว่า 567,521 ล้านบาท โดยมีการใช้พลังงานเชิงพาณิชย์ในสัดส่วนร้อยละ 83.4 ของการใช้พลังงานขั้นสุดท้ายทั้งหมด พลังงาน หมุนเวียนและพลังงานหมุนเวียนดั้งเดิม ร้อยละ 9.5 และ 7.1 ตามลำดับ

ตารางที่ 1 การใช้พลังงานขั้นสุดท้ายจำแนกตามชนิดและ ตามชนิดพลังงาน

การใช้พลังงานขั้นสุดท้าย จำแนกตามชนิดพลังงาน	ปริมาณ (พันตันเทียบเท่ากับน้ำดิบ)			อัตราการเปลี่ยนแปลง (ร้อยละ)	
	ม.ค.-พ.ค.	ม.ค.-พ.ค.	ม.ค.-พ.ค.	ม.ค.-พ.ค.	ม.ค.-พ.ค.
	2560	2561	2562 <sup>P</sup>	2561	2562 <sup>P</sup>
การใช้พลังงานขั้นสุดท้าย (รวม)	33,514	36,143	36,640	7.8	1.4
● เชิงพาณิชย์	28,223	30,009	30,555	6.3	1.8
- น้ำมันสำเร็จรูป	17,008	17,573	17,849	3.3	1.6
- ไฟฟ้า	6,802	6,863	7,330	0.9	6.8
- ถ่านหิน/ลิกไนท์	2,025	3,181	3,029	57.1	4.8
- ก๊าซธรรมชาติ	2,388	2,392	2,347	0.2	1.9
● พลังงานหมุนเวียน *	2,971	3,480	3,469	17.1	0.3
● พลังงานหมุนเวียนดั้งเดิม **	2,320	2,654	2,616	14.4	1.4

P คือ ตัวเลขเบื้องต้น

\* ประกอบด้วย ฟืน แกลบ กากอ้อย วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร ขยะ และก๊าซชีวภาพ

\*\* ประกอบด้วย ฟืน ถ่าน แกลบ วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร ที่ใช้ในบ้านอยู่อาศัย และอุตสาหกรรมครัวเรือน

ที่มา: กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (2558)

ทั้งนี้ การใช้พลังงานเชิงพาณิชย์มีปริมาณ 30,555 พันตันเทียบเท่าน้ำมันดิบ เพิ่มขึ้นจากช่วงเดียวกันของ ปีก่อนร้อยละ 1.8 ประกอบด้วย น้ำมันสำเร็จรูป มีการใช้ 17,849 พันตันเทียบเท่าน้ำมันดิบเพิ่มขึ้น ร้อยละ 1.6 ไฟฟ้า มีการใช้ 7,330 พันตันเทียบเท่าน้ำมันดิบเพิ่มขึ้น ร้อยละ 6.8 ถ่านหิน/ลิกไนต์ มีการใช้ 3,029 พันตัน เทียบเท่าน้ำมันดิบลดลง ร้อยละ 4.8 และก๊าซธรรมชาติ มีการใช้ 2,347 พันตันเทียบเท่าน้ำมันดิบลดลง ร้อยละ 1.9 สำหรับพลังงานหมุนเวียน (พิน แกลบ กากอ้อย วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร ขยะ และก๊าซชีวภาพ) มีการใช้ 3,469 พันตันเทียบเท่าน้ำมันดิบลดลง ร้อยละ 0.3 และพลังงานหมุนเวียนดั้งเดิม (พิน ถ่าน แกลบ วัสดุเหลือใช้ทาง การเกษตร) มีการใช้ 2,616 พันตันเทียบเท่าน้ำมันดิบลดลง ร้อยละ 1.4 อย่างไรก็ตาม น้ำมันสำเร็จรูปยังคงมีการใช้ในสัดส่วนที่สูงกว่าพลังงานชนิดอื่น โดยมีการใช้ร้อยละ 48.7 ของการใช้พลังงานขั้นสุดท้ายทั้งหมด และมีการใช้ไฟฟ้า ถ่านหิน/ลิกไนต์ ก๊าซธรรมชาติ พลังงานหมุนเวียนและ พลังงานหมุนเวียนดั้งเดิม ร้อยละ 20.0 8.3 6.4 9.5 และ 7.1 ตามลำดับ

## ตารางที่ 2 ศักยภาพพลังงานชีวมวลในด้านต่างๆ ในประเทศไทย ปี พ.ศ. 2556

ชนิด	ผลผลิต (ตัน)	ชีวมวล	ปริมาณชีวมวล เหลือทิ้ง (ตัน)	ค่าความร้อน (MJ/kg)	ศักยภาพพลังงาน	
					(TJ)	(ktoe)
อ้อย	66,816,446	ชานอ้อย	4,190,794	14.40	60,347	1,428
		ยอดและใบ	13,439,727	17.39	233,716	5,532
ข้าว	31,508,364	แกลบ	3,510,598	14.27	50,096	1,185
		ฟางข้าว	25,646,547	10.24	262,620	6,216
ถั่วเหลือง	190,480	ต้น/เปลือก/ใบ	170,383	19.44	3,312	78
ข้าวโพด	4,616,119	ซัง	584,539	18.04	10,545	249
		ลำต้น	2,758,777	18.04	49,768	1,178
		ทะลายเปล่า	1,024,868	17.86	18,304	433
ปาล์ม น้ำมัน	8,162,379	ใบ	162,970	17.62	2,871	67
		กะลา	38,959	18.46	719	17
มัน สำปะหลัง	30,088,025	ก้าน	2,203,740	9.83	21,824	516
		ลำต้น	2,439,236	18.42	44,930	1,063
		เหง้า	1,834,466	18.42	33,790	799
มะพร้าว	1,380,980	ก้าน	628,990	15.40	9,686	229
		กาบ	464,250	16.23	7,534	178
ไม้ยางพารา	3,090,280	กะลา	128,936	17.93	2,311	54
		กิ่ง/ก้าน	312,118	14.98	4,675	110
<b>รวม</b>	<b>145,853,073</b>		<b>59,539,905</b>		<b>504,339</b>	<b>11,938</b>

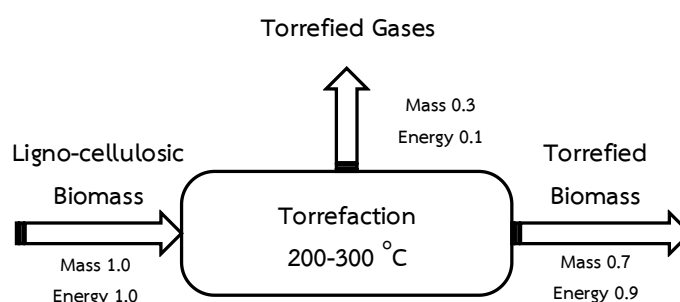
ที่มา : รายงานพลังงานทดแทนของประเทศไทย (2556)

### 3. กระบวนการทอรรีแฟคชัน

#### 3.1 กระบวนการทอรรีแฟคชัน

กระบวนการทอรรีแฟคชัน เป็นการรักษาความร้อนของชีวมวลที่ 200-400 °C ภายใต้ความดันบรรยากาศ ในระหว่างกระบวนการทอรรีแฟคชัน น้ำที่มีอยู่ในชีวมวลถูกทำให้ระเหยออกไป และโพลีเมอร์ชีวภาพ เช่น เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ก็จะถูกย่อยสลายออกไปเช่นกัน ผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่ได้จะเป็นวัสดุของแข็ง แห้ง ซึ่งถูกเรียกว่า ชีวมวลทอรรีไฟด์ torrefied หรือ ไบโอถ่านหิน และเป็นการปรับปรุงคุณภาพของชีวมวลในแง่ของคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมี ในระหว่างกระบวนการชีวมวลจะสูญเสียร้อยละ 20 โดยมวล และร้อยละ 10 ของค่าความร้อนของชีวมวลนั้น ๆ พลังงานที่สูญเสียไปนี้สามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงให้ความร้อนสำหรับกระบวนการทอรรีแฟคชัน หลังจากชีวมวลผ่านกระบวนการทอรรีแฟคชันแล้ว จึงมีมวลและความชื้นลดลง แต่จะมีความหนาแน่นและค่าความร้อนสูงขึ้น ซึ่งอาจกลายเป็นแท่ง (briquettes) หรือ เม็ด (pellet) ชีวมวลที่ผ่านกระบวนการทอรรีแฟคชัน และผ่านการเพิ่มความหนาแน่น มีข้อดีหลายประการซึ่งทำให้มันเป็นตัวเลือกในการแข่งขันเมื่อเทียบกับชีวมวลทั่วไปดังนี้ (ณรงค์ฤทธิ์ และคณะ, 2557)

- มีความหนาแน่นสูงขึ้นได้ถึง 18-20 GJ/m<sup>3</sup> โดยการเพิ่มความหนาแน่นนั้นทำได้ทั้งแบบอัดเม็ดหรืออัดก้อน สามารถลดต้นทุนการขนส่งลงประมาณ 40-50%
- องค์ประกอบเป็นเนื้อเดียวกันมากชีวมวลทอรรีไฟด์ ผลิตจากวัตถุดิบที่หลากหลายมารวมกันได้
- เชื้อเพลิงที่ผ่านกระบวนการทอรรีแฟคชันมีพฤติกรรมที่ไม่ชอบน้ำ เมื่อเพิ่มความหนาแน่นจะทำให้สะดวกต่อการจัดเก็บ เนื่องจากสามารถสัมผัสอากาศได้
- การกำจัดทางชีวภาพ จะลดความเสี่ยงของการเกิดไฟไหม้และการสลายตัวทางชีวภาพ เช่น เน่าเปื่อย



ภาพที่ 4 การสมดุลพลังงานและมวลของกระบวนการทอรรีแฟคชัน

### 3.2 กระบวนการทอรรีแฟคชันด้วยคลื่นไมโครเวฟ

การเกิดความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟมีกลไกการเหนี่ยวนำให้เกิดความร้อนภายในตัววัสดุ การเกิดความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ ประกอบไปด้วยกลไกการเหนี่ยวนำของไอออน โดยผลการเหนี่ยวนำจะทำประจุไอออนขั้วบวกกับขั้วลบเกิดการสั่นและเสียดสีกันระหว่างโมเลกุล จนเกิดพลังงานความร้อนภายในวัสดุไดอิเล็กตริก โดยอาหารและวัตถุทางการเกษตรที่มีความชื้นสูงจัดเป็นวัสดุไดอิเล็กตริกจึงสามารถดูดซับคลื่นไมโครเวฟและเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพ ข้อได้เปรียบด้านวิศวกรรมของการเกิดความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟที่ดีกว่าวิธีการให้ความร้อนแบบดั้งเดิม และมีประสิทธิภาพการเปลี่ยนแปลงด้านพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นพลังงานความร้อนสูง

การทำความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟอาศัยคุณสมบัติของการดูดซึมพลังงานจากคลื่นไมโครเวฟภายในวัสดุหรือโพลิตซึ่งวัสดุที่สามารถเหนี่ยวนำให้เกิดความร้อนภายใต้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เรียกว่าวัสดุนี้ว่า “วัสดุไดอิเล็กตริก” ซึ่งหมายถึงวัสดุที่โครงสร้างพื้นฐานทางจุลภาคที่มีลักษณะเป็นขั้วไฟฟ้า เช่น โมเลกุลน้ำ เป็นต้น ซึ่งอันตรกิริยา ระหว่างวัสดุที่มีขั้วทางไฟฟ้าและคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีการสลับเฟสไปมาหลายล้านครั้งใน 1 sec ส่งผลให้เกิดการสั่นของโมเลกุลน้ำและเกิดการหมุนและเสียดสีกันในระหว่างโมเลกุลน้ำ ทำให้เกิดความร้อนภายในวัสดุ

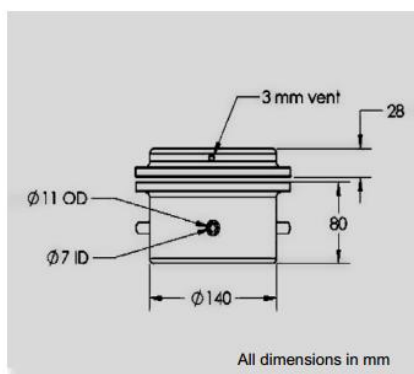
การเกิดพลังงานความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟเป็นนวัตกรรมการสร้างความร้อนที่มีประสิทธิภาพสูง โดยคลื่นไมโครเวฟจะเหนี่ยวนำให้เกิดความร้อนในผลผลิตทางการเกษตรที่มีคุณสมบัติเป็นวัสดุไดอิเล็กตริกที่สามารถดูดซับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและแปลงเป็นพลังงานความร้อนได้ การเกิดความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ ประกอบไปด้วยกลไกการเหนี่ยวนำไอออน และกลไกชนิดการหมุนของทั้งสองขั้ว จนเกิดเป็นพลังงานความร้อนจากภายในวัสดุไดอิเล็กตริก โดยอาหารและวัตถุทางการเกษตรที่มีความชื้นสูงจัดเป็นวัสดุไดอิเล็กตริกจึงสามารถดูดซับคลื่นไมโครเวฟ และเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพ

กระบวนการทอรรีแฟคชันด้วยคลื่นไมโครเวฟเป็นอีกเทคนิคที่ถูกนำมาใช้เพื่อพัฒนาคุณภาพและคุณสมบัติของเชื้อเพลิงชีวมวลทั้งด้านกายภาพและเคมี หลักการทำงาน คือ การให้ความร้อนในช่วงไพโรไลซิสที่มีอุณหภูมิประมาณ 200-400 °C แก่ชีวมวลในสภาวะไร้ออกซิเจน เมื่อชีวมวลผ่านกระบวนการทอรรีแฟคชันด้วยคลื่นไมโครเวฟแล้ว จะมีลักษณะเป็นวัสดุแข็งแห้งที่เรียกว่าชีวมวลทอรรีไฟต์ (torrefied biomass) ซึ่งในภาพรวมมวลของชีวมวลจะลดลงจากเดิมประมาณ 20% ส่วนหนึ่งเกิดจากการระเหยของน้ำในชีวมวลและสารระเหยบางส่วน สุดท้ายปริมาณความหนาแน่นทางพลังงานและค่าความร้อนเพิ่มสูงขึ้นอีกด้วย (ฤทธิชัย, 2554) ข้อดีของการทอรรีไฟต์ด้วยคลื่นไมโครเวฟคือ ใช้เวลาในกระบวนการต่ำ มีความสามารถทะลุทะลวงของพลังงานสูง ประหยัด

พลังงานในการให้ความร้อนชีวมวล มีต้นทุนที่ต่ำ มีความเหมาะสมกับวัสดุที่ใช้ในประเทศไทย และสามารถนำไปใช้ได้ในอนาคตได้

### 3.3 การประยุกต์การใช้กระบวนการทอรีไฟต์ด้วยคลื่นไมโครเวฟ

บทความนี้ศึกษากระบวนการทอรีไฟต์ด้วยไมโครเวฟ ใช้เศษวัสดุทางการเกษตรที่หาได้ง่าย ได้แก่ ฟางข้าว และ หญ้าเนเปียร์ ซึ่งจากผลการศึกษาข้างต้นแสดงให้เห็นว่าการทอรีไฟต์ด้วยไมโครเวฟ ดังภาพที่ 6 สามารถใช้ได้กับชีวมวลหลายชนิด เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีดั้งเดิม พบว่ากระบวนการทอรีไฟต์ด้วยไมโครเวฟเพื่อให้ได้ mass yield และ energy yield ที่ต้องการใช้เวลาไม่มากและใช้ระดับกำลังไฟฟ้าที่ต่ำก็เพียงพอแล้ว ดังนั้น พลังงานไฟฟ้าที่ให้กับกระบวนการก็ใช้น้อย นอกจากนี้ผลจากกระบวนการทอรีไฟต์ด้วยไมโครเวฟ นำไปใช้ให้เกิดประโยชน์ในการผลิตความร้อนไฟฟ้า นั่นคือ ประสิทธิภาพด้านพลังงานของกระบวนการทอรีไฟต์ด้วยไมโครเวฟสามารถพัฒนาต่อไปได้อีกมาก นอกจากนี้ ด้วยกระบวนการที่เหมาะสมในโรงกลั่นหรือโรงงาน จะได้ว่าผลจากการทอรีไฟต์สามารถนำไปเป็นแหล่งผลิตชีวมวลสีเขียว ซึ่งจากการศึกษาข้างต้น การทอรีไฟต์ด้วยไมโครเวฟ แก่ชีวมวลเป็นเทคโนโลยีที่สามารถแข่งกับวิธีอื่นและนำไปประยุกต์ใช้ได้ (Huanga et al., 2012)



(A)



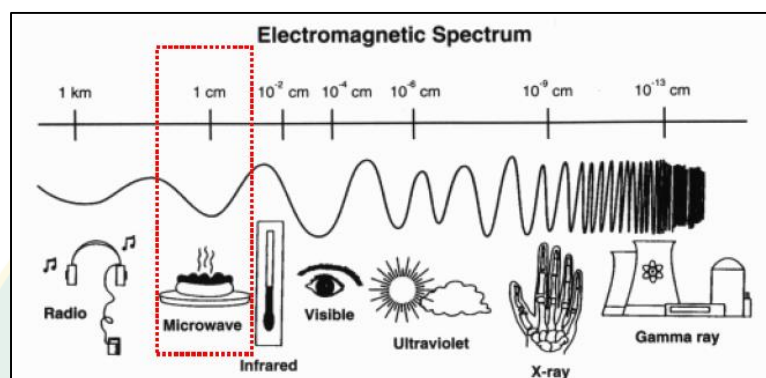
(B)

ภาพที่ 5 เครื่องปฏิกรณ์ทอรีฟอริก (A) และชุดทดลอง (B) สำหรับการทอด้วยคลื่นไมโครเวฟ  
(a: ก๊าซไนโตรเจน b: เทอร์โมคัปเปิล c: หลอดไอเสีย d: เครื่องปฏิกรณ์ด้วยชีวมวล)

ที่มา: Sangram Kishor Satpathy et al.(2014)

ไมโครเวฟเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามีความถี่ระหว่าง 300 MHz –300 GHz ถูกนำมาประยุกต์ใช้งานทางด้าน การให้ความร้อน โดยคลื่นไมโครเวฟจะเหนี่ยวนำให้เกิดความร้อนภายในตัว

วัสดุเมื่อเกิดอันตรกิริยากับวัสดุ (lossy Material) โดยกลไกการเกิดความร้อนของคลื่นไมโครเวฟจะประกอบไปด้วยกลไกการเหนี่ยวนำเชิงไอออน (Ionic Conduction) และกลไกชนิดการหมุนของทั้งสองขั้ว (Dipolar Rotation) ภาพที่ 6 แสดงกลไกการเหนี่ยวนำเชิงประจุไอออนภายใต้สนามไฟฟ้า โดยผลจากการเหนี่ยวนำจะทำให้ประจุไอออนขั้วบวกกับขั้วลบเกิดการสั่น และการหมุน และการเกิดการเสียดสีกันระหว่างโมเลกุลจนเกิดเป็นพลังงานความร้อน (ฤทธิชัย, 2554)

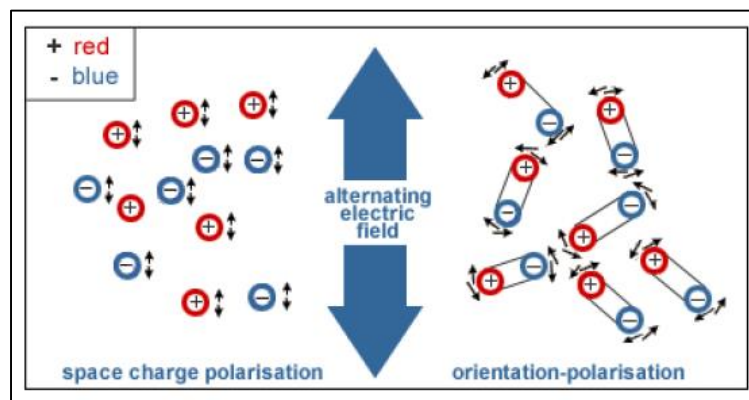


ภาพที่ 6 คุณลักษณะของคลื่นไมโครเวฟ (หมุดต่อเล็บ, ม.ป.ป)

ไมโครเวฟเป็นสนามของพลังงานไฟฟ้า และพลังงานแม่เหล็กอยู่ด้วยกัน จึงจัดเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความเร็วเท่ากับความเร็วแสง มีการแผ่รังสีเหมือนแสง แต่มีพลังงานน้อยกว่าเคลื่อนที่ในรูปแบบคลื่น ดังนั้นไมโครเวฟจึงสะท้อนไปมา ถูกส่งผ่านหรือดูดกลืนได้โดยขึ้นกับสารที่ไมโครเวฟทำปฏิกิริยาด้วยหลักการทำงานอาศัยน้ำ เพราะน้ำเป็นโมเลกุลชนิดมีขั้วบวกที่ปลายด้านหนึ่ง โมเลกุลของน้ำในอาหารจะจัดเรียงตัวอย่างไม่เป็นระเบียบ โมเลกุลของน้ำจะเริ่มดูดกลืนไมโครเวฟ สนามของไมโครเวฟจะเกิดการสั่นเป็นจำนวนล้านๆ ครั้งใน 1 วินาที ขณะเดียวกันโมเลกุลของน้ำสั่นไปด้วยพร้อมๆ กับเปลี่ยนตำแหน่งของโมเลกุลน้ำ ทำให้เกิดการจัดเรียงตัวของโมเลกุลให้เป็นระเบียบมากขึ้น การที่โมเลกุลของน้ำสั่นอย่างมกนี้ทำให้มีความร้อนเกิดขึ้นอย่าง (ฐิติพงษ์ และคณะ, 2549)

ความชื้นในวัสดุจัดเป็นวัสดุประเภทที่มีคุณสมบัติอยู่ระหว่างตัวนำ และฉนวนไฟฟ้าประเภทวัสดุไดอิเล็กตริกที่มีการสูญเสียของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Lossy Dielectrics) ดังนั้นความชื้นในวัสดุจึงสามารถดูดซับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และแปลงเป็นพลังงานความร้อนได้ โดยทั่วไปความชื้นในชีววัสดุ (Biological Materials) คือ สารที่สามารถระเหยได้เมื่อได้รับความร้อนโดยน้ำถือเป็นองค์ประกอบหลักซึ่งมีมากถึงร้อยละ 50-80 โครงสร้างเซลล์โมเลกุลของน้ำมีลักษณะโครงสร้างเชิงขั้ว จึงสามารถดูดซับพลังงานไมโครเวฟ และเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนได้ง่าย น้ำในวัสดุสามารถแบ่งออกเป็น

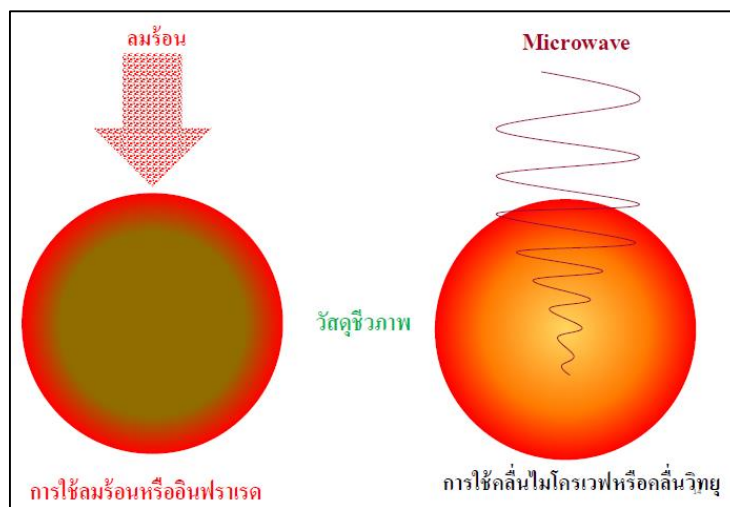
2 ชนิด ได้แก่ น้ำอิสระ (Free Water) และน้ำที่อยู่ระหว่างโครงสร้างเซลล์ภายใน ดังนั้นผลผลิตเกษตรจึงจัดเป็นวัสดุไดอิเล็กตริกที่มีความสามารถในการเกิดความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟได้ดี (ฤทธิชัย, 2554)



ภาพที่ 7 กลไกการเหนี่ยวนำเชิงไอออนและกลไกขั้วการหมุนทั้งสองขั้ว

ที่มา: ฤทธิชัย (2554)

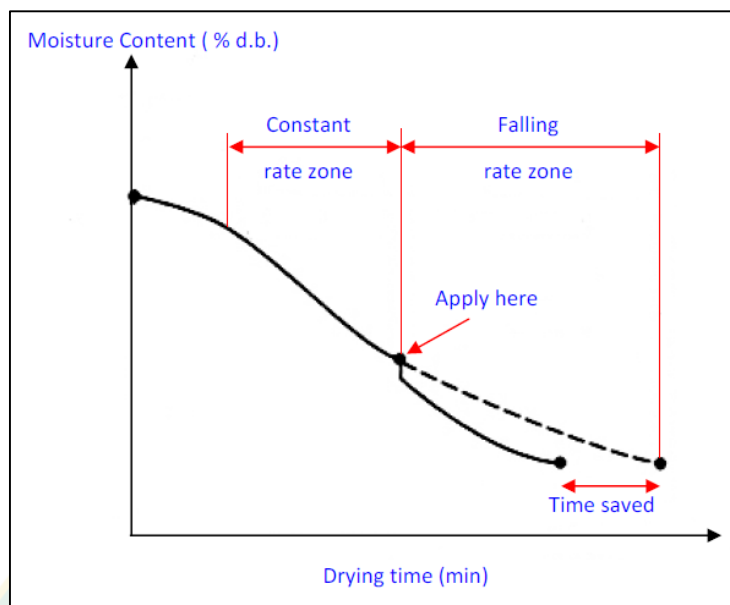
เทคโนโลยีการใช้ไมโครเวฟในการผลิตความร้อนจัดได้เป็นเทคโนโลยีที่มีประสิทธิภาพสูง รวดเร็ว รวมถึงไม่มีของเสียออกจากกระบวนการที่ใช้เทคโนโลยีนี้ หลักการของเทคโนโลยีนี้สามารถอธิบายเพื่อความเข้าใจอย่างง่าย คือ เครื่องกำเนิดคลื่นไมโครเวฟจะให้ความร้อนกับวัสดุโดยการแผ่คลื่นย่านความถี่ไมโครเวฟผ่านเข้าไปในเนื้อวัสดุโมเลกุลของน้ำที่อยู่ในวัสดุจะดูดซับพลังงานของคลื่นที่ผ่านเข้าไป ซึ่งโมเลกุลของน้ำเป็นโมเลกุลที่มีขั้วไฟฟ้า คือ มีประจุบวกและประจุลบที่ตรงกันข้าม เมื่อคลื่นไมโครเวฟซึ่งเป็นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านเข้าไปโมเลกุลเหล่านี้ก็จะถูกเหนี่ยวนำ และหมุนขั้วเพื่อปรับเรียงตัวตามสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของคลื่นเป็นสนามที่เปลี่ยนแปลงสลับไปมา จึงส่งผลให้โมเลกุลเหล่านี้หมุนกลับไปกลับมาทำให้เกิดเป็นความร้อนขึ้น น้ำจึงกลายเป็นไอน้ำออกจากวัสดุ ซึ่งเวลาการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมินั้นแตกต่างกันขึ้นอยู่กับวัสดุแต่ละชนิดที่มีปัจจัยแตกต่างกัน เช่น ความชื้นในชั้นวัสดุความหนาแน่น และองค์ประกอบอื่นในการกลายเป็นไอน้ำ ไอน้ำจะลอยตัวสู่ด้านบนหากต้องการให้วัสดุแห้งจะต้องดูดไอน้ำนี้ออกแต่หากไม่ดูดออกวัสดุจะถูกนึ่งหรือต้มด้วยน้ำภายในชั้นวัสดุเองจึงทำให้เตาอบไมโครเวฟสามารถนำใช้งานในครัวเรือนได้อย่างแพร่หลาย ดังภาพที่ 8 (ธราวุธ และคณะ 2555)



ภาพที่ 8 การให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ

การอบแห้งด้วยลมร้อนที่มีตัวกลางทางความร้อนเพื่อถ่ายเทพลังงานไปสู่ความชื้นภายใน ผลผลิตส่งผลให้อัตราการแพร่ความชื้นลดต่ำลงจึงต้องใช้เวลายาวนานในการระเหยความชื้นจาก ภายในวัสดุ ในขณะที่การอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟ จะเกิดการเหนี่ยวนำความร้อนของน้ำอิสระที่ชั้นผิว และภายในโครงสร้างเซลล์ เกิดเป็นไออย่างรวดเร็วโดยจะเกิดเป็นไวก่อนที่ความชื้นจะออกจากวัสดุ การอบแห้งผลผลิตเกษตรด้วยคลื่นไมโครเวฟ ถูกเผยแพร่มาตั้งแต่ปี ค.ศ. 1960 (ฤทธิชัย, 2561) เป็น เทคโนโลยีที่มีประสิทธิภาพสูงในการทำให้เกิดความร้อนภายใน จึงช่วยเร่งอัตราการอบแห้งได้เป็นอย่างดี และถูกนำมาใช้อบแห้งผลผลิตเกษตรชนิดต่างๆ ซึ่งสามารถช่วยลดอัตราการสิ้นเปลือง พลังงานของการอบแห้งได้มากถึงร้อยละ 25-90 เมื่อเปรียบเทียบกับ การอบแห้งด้วยลมร้อน นอกจากนี้ผลผลิตเกษตรที่อบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟยังมีคุณภาพในด้านคุณลักษณะทางประสาทสัมผัส สี อัตราการคืนตัว และอัตราการหดตัวที่ดีกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อนแบบดั้งเดิมอีกด้วย

การอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับคลื่นไมโครเวฟเป็นระบบที่ได้รับความนิยมมากที่สุด เป็นการ ใช้อากาศร้อนที่มีประสิทธิภาพสูงระเหยน้ำอิสระที่บริเวณผิวหน้าของผลผลิตซึ่งจะช่วยเร่งอัตราการ แพร่ความชื้นจากภายในได้ดี จึงเหมาะสมต่อการลดความชื้นในช่วงคาบเวลาที่อัตราการอบแห้งคงที่ จนกระทั่งความชื้นลดลงถึงค่าความชื้นวิกฤติ จากนั้นใช้คลื่นไมโครเวฟในการอบแห้งในช่วงคาบเวลา ที่อัตราการอบแห้งลดลง เพื่อเหนี่ยวนำให้ความชื้นที่อยู่ภายใต้ชั้นของความแห้งเกิดความร้อน และ กลายเป็นไออย่างรวดเร็ว โดยไอความชื้นที่เกิดขึ้นจะเคลื่อนที่ไปสู่ผิวหน้าของเซลล์โดยตรง กลไกการ เปลี่ยนแปลงมวลความชื้นของผลผลิต สามารถแสดงได้ในเส้นโค้งความสัมพันธ์ของระบบการอบแห้ง ด้วยลมร้อน และการเร่งอัตราการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟ ดังรูปที่ 9



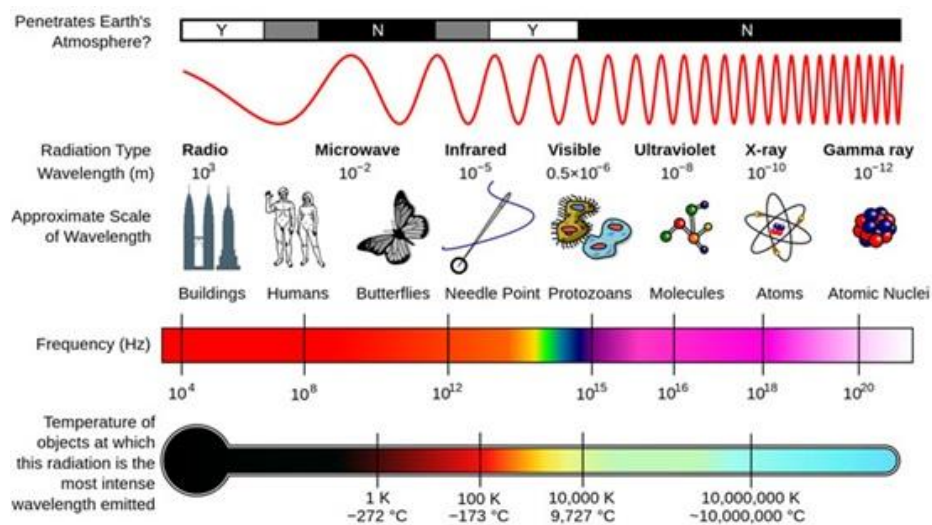
ภาพที่ 9 เส้นโค้งความสัมพันธ์ของการอบแห้งระบบพลังงาน

ที่มา: ผดุงศักดิ์ (2551)

การใช้คลื่นไมโครเวฟในการอบแห้งในคาบเวลาดังกล่าวจะช่วยเร่งอัตราการอบแห้งได้ดี ระบบพลังงานผสมนี้มีประสิทธิภาพในการอบแห้งที่สูง และยังช่วยรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์อาหาร ภายหลังจากกระบวนการอบแห้งได้เป็นอย่างดี

#### 4. ทฤษฎีคลื่นไมโครเวฟและการใช้ประโยชน์กับชีวมวล

ทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับกระบวนการทำความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่ง ในการศึกษาพฤติกรรมของการทำความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟ ไม่ว่าจะเป็นกระบวนการทำความร้อน กระบวนการอบแห้ง กระบวนการฆ่าเชื้อ เป็นต้น เนื่องจากเป็นหัวใจหลักของงานวิจัย ถ้าทำการวิจัย โดยขาดความรู้พื้นฐาน คลื่นไมโครเวฟ (Microwave) เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic) ที่มีสมบัติเดินทางเป็นเส้นตรงและเคลื่อนที่ในอากาศด้วยความเร็วเท่ากับแสง ความถี่ของคลื่น ไมโครเวฟอยู่ระหว่าง 300 MHz ถึง 300 GHz หรือในช่วงความยาวคลื่น 1 mm ถึง 1 m ดังแสดงได้ ในภาพที่ 10



ภาพที่ 10 แสดงสเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงความถี่ต่างๆ

ที่มา: Christopher Crockett (2019)

หลักการทํางานพื้นฐานของการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ (Microwave Heating) คือ โครงสร้างโมเลกุลของวัสดุหลายๆชนิด สามารถดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟได้แตกต่างกัน คลื่นไมโครเวฟจะเหนี่ยวนําและก่อให้เกิดการกระตุ้นของสารที่สามารถดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟได้ ทำให้โมเลกุลของสารนั้นเกิดการสั่นและการเสียดสีกันจนกระทั่งภายในเนื้อสารเกิดความร้อนสูงขึ้น ซึ่งเป็นการถ่ายเทความร้อนโดยทั่วไป ความร้อนจากแหล่งกำเนิดจะเดินทางผ่านตัวกลางต่างๆ ในรูปแบบของการนำความร้อน การพาความร้อน หรือการแผ่รังสีความร้อน ก่อนที่จะไปถึงยังตัววัสดุที่ต้องการรับความร้อน จากนั้นความร้อนจึงถ่ายเทเข้าสู่ภายในของวัสดุ คลื่นไมโครเวฟยังมีคุณสมบัติที่แตกต่างกันในการเดินทางผ่านตัวกลางและวัสดุต่างๆ (Wang et al., 2003) อยู่อีก 3 รูปแบบ

**1. การสะท้อน (Reflection)** เมื่อคลื่นไมโครเวฟกระทบกับวัสดุที่เป็นโลหะหรือมีส่วนผสมของโลหะ คลื่นไมโครเวฟไม่สามารถทะลุผ่านวัสดุดังกล่าวได้ ทำให้เกิดการสะท้อนกลับหมด ดังนั้นวัสดุที่นำมาใช้เป็นตัวถังปฏิกรณ์ หรือสารที่จะนำมาประยุกต์ใช้กับกระบวนการไมโครเวฟไม่ควรเป็นวัสดุที่เป็นโลหะหรือมีส่วนผสมของโลหะ เนื่องจากวัสดุที่เป็นโลหะจะทำให้คลื่นไมโครเวฟเกิดการสะท้อนกลับและทำให้แมกนีตรอน เสื่อมเร็ว ทำให้อายุการใช้งานของเตาไมโครเวฟสั้นลง รวมถึงสิ้นเปลืองพลังงานอีกด้วย (Siamchemi, 2019)

**2. การส่งผ่าน (Transmission)** คลื่นไมโครเวฟสามารถส่งทะลุผ่านวัสดุที่เป็นสารที่ไม่นำไฟฟ้า เช่น แก้ว กระจก ไม้ เซรามิกส์และพลาสติกได้ เพราะภาชนะดังกล่าวไม่มีส่วนผสมของโลหะ จึงเป็นวัสดุที่ใช้ได้ดีกับเตาไมโครเวฟและยังช่วยให้คลื่นไมโครเวฟสามารถทะลุผ่านไปได้ง่ายอีกด้วย (Siamchemi, 2019)

**3. การดูดซึม (Absorption)** วัสดุบางชนิดมีความสามารถในการดูดซึมคลื่นไมโครเวฟ และเมื่อโมเลกุลของวัสดุนั้นดูดซึมคลื่นไมโครเวฟแล้ว จะทำให้สารนั้นร้อนขึ้นอย่างรวดเร็ว และอีกนัยหนึ่งเมื่อโมเลกุลของสารนั้นดูดซึมคลื่นไมโครเวฟแล้วจะสลายตัวเป็นความร้อนในทันทีและไม่สะสมในสารนั้นๆ ทำให้การให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟใช้เวลาในการเกิดสั้นกว่าและสูญเสียความร้อนน้อยกว่ากระบวนการให้ความร้อนแบบเดิมที่ความร้อนจะต้องสูญเสียไปกับการถ่ายเทความร้อนในรูปแบบต่างๆ ทำให้ช่วยประหยัดเวลา ประหยัดพลังงาน และช่วยลดต้นทุนการผลิต อีกทั้งยังเป็นเทคนิคที่ช่วยปรับปรุงและเพิ่มคุณภาพของผลิตภัณฑ์ให้ดีขึ้น หรือช่วยให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่แตกต่างไปจากการแตกตัวของสารโดยการใช้กระบวนการไพโรไลซิสแบบเดิมอีกด้วย (Siamchemi, 2019)

#### 4.1 ข้อดีของการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟ

- ใช้เวลาน้อย (High Speed) ประหยัดเนื้อที่และแรงงาน ลดจำนวนวัสดุที่เสียเนื่องจากอุปกรณ์ทำงานส่วนใหญ่ไม่เคลื่อนที่ (stationary part) (สรภฤช, 2552)
- การทะลุทะลวงของพลังงาน (Energy Penetration) ไมโครเวฟสามารถทะลุทะลวงเข้าไปกำเนิดพลังงานความร้อนภายในวัสดุทำให้มีความร้อนกระจายสม่ำเสมอทั่วทั้งวัสดุ การให้ความร้อนแบบอื่นจะทำให้ความร้อนจากผิวนอกวัสดุอาจก่อให้เกิดความเสียหายที่ผิวนอกเพราะมีอุณหภูมิสูงเกินไปในขณะที่ภายในเนื้อวัสดุยังไม่ได้คุณภาพตามที่ต้องการนอกจากนั้นยังใช้เวลานานเพราะข้อจำกัดทางการนำความร้อน ดังนั้นการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟจึงให้คุณภาพผลิตภัณฑ์ที่ดีกว่า
- ความสามารถในการเลือกวัสดุรับความร้อน (Selective Energy Absorption) วัสดุบางชนิดสามารถดูดซับพลังงานไมโครเวฟได้ทันทีแต่วัสดุบางชนิดไม่สามารถดูดซับพลังงานได้ คุณสมบัติเหล่านี้เป็นข้อได้เปรียบอีกประการหนึ่งของกระบวนการไมโครเวฟ
- การควบคุมด้วยระบบอิเล็กทรอนิกส์อย่างทันทีทันใด (Instantaneous Electronic Control) อุปกรณ์ให้ความร้อนแบบเก่าเช่น เตาอบ ต้องใช้เวลานานในการปรับอุณหภูมิ แต่เตาไมโครเวฟสามารถปรับอุณหภูมิด้วยระบบอิเล็กทรอนิกส์ซึ่งใช้เวลาน้อยมาก (ภายในเศษเสี้ยววินาที)
- มีประสิทธิภาพสูง (High Efficiency) การทำความร้อนด้วยไมโครเวฟใช้พลังงานน้อยกว่าการทำความร้อนแบบเก่ามากเมื่อให้ปริมาณความร้อนเท่ากัน (การทำความร้อนแบบเก่ามีประสิทธิภาพโดยรวมประมาณ 10-30% ในขณะที่ไมโครเวฟมีประสิทธิภาพโดยรวมประมาณ 60-70%)

- ไมโครเวฟเป็นกระบวนการสะอาด (Microwave Processing is Clean) กระบวนการทางไมโครเวฟไม่สร้างมลภาวะ ต่างจากกระบวนการให้ความร้อนแบบอื่นที่ใช้เชื้อเพลิงในการเผาไหม้

ในปัจจุบันกระบวนการทางไมโครเวฟถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในงานอุตสาหกรรม (เช่น การอบแห้งอาหาร อบแห้งสิ่งทอ อบแห้งไม้และกระดาษ อุตสาหกรรมพลาสติก การทำสเตอร์ไรส์ ฯลฯ) งานทางการแพทย์ (เช่นการคลายเนื้อเยื่อที่แข็งตัว การอุ่นเลือด และกำจัดเนื้องอก) นอกจากนี้ ไมโครเวฟยังสามารถใช้ในงานแยกสารระเหยออกจากวัสดุ (เช่น การแยกกำมะถันออกจากถ่านหิน และการแยกสารสกัดออกจากดิน) การประยุกต์ใช้พลังงานไมโครเวฟ

#### 4.2 ระบบการผลิตความร้อนด้วยไมโครเวฟ

การทำความร้อนด้วยไมโครเวฟมีองค์ประกอบหลัก 3 ส่วนคือ ตัวกำเนิดคลื่นไมโครเวฟ (Magnetron) ท่อนำคลื่นไมโครเวฟ (Wave guide) และบริเวณทำความร้อน (ที่ใส่วัสดุทำความร้อน (Applicator)) การเคลื่อนที่ของคลื่นไมโครเวฟจะเคลื่อนที่จากตัวกำเนิดผ่านมายังท่อนำคลื่นและเข้าสู่บริเวณทำความร้อนตามลำดับ (สรกฤษ, 2552)

คลื่นสะท้อนที่เกิดจากการสะท้อนกลับของคลื่นเมื่อชนกับวัสดุทำความร้อนอาจทำให้ตัวกำเนิดคลื่นไมโครเวฟเสียหายได้ ดังนั้นโดยทั่วไปเครื่องไมโครเวฟจะติดตั้งตัวดักคลื่น (Isolator) ระหว่างตัวกำเนิดคลื่นและท่อนำคลื่นเพื่อป้องกันการเสียหายดังกล่าว นอกจากนี้ยังติดตั้งอุปกรณ์ปรับแต่งคลื่นระหว่างท่อนำคลื่นและบริเวณทำความร้อนเพื่อให้ระบบไมโครเวฟเกิดประสิทธิภาพสูงสุดอีกด้วย

บริเวณทำความร้อนเป็นตัวบ่งบอกถึงรูปแบบคลื่นไมโครเวฟที่กระทำต่อวัสดุว่าเป็นลักษณะคลื่นเดี่ยว (Single-mode) หรือคลื่นผสม (Multi-mode) สำหรับบริเวณทำความร้อนที่ออกแบบมาเพื่อให้คลื่นไมโครเวฟมีลักษณะเป็นคลื่นเดี่ยวนั้นจะเกิดความไม่สม่ำเสมอของสนามไฟฟ้าภายในบริเวณทำความร้อน วัสดุทดสอบจะมีอุณหภูมิที่บริเวณสนามไฟฟ้าสูงดังนั้นต้องมีความระมัดระวังในการเลือกขนาดและชนิดวัสดุ เครื่องไมโครเวฟชนิดคลื่นเดี่ยว เหมาะกับวัสดุที่มีขนาดเล็กที่มีการดูดกลืนคลื่นน้อย (Low-lossy materials) แต่ไม่เหมาะกับวัสดุที่มีขนาดใหญ่ สำหรับเครื่องไมโครเวฟที่มีลักษณะเป็นคลื่นผสม (Multi-mode) สามารถหลีกเลี่ยงปัญหาความไม่สม่ำเสมอของสนามไฟฟ้าโดยทำให้บริเวณทำความร้อนมีขนาดใหญ่กว่าวัสดุและมีการเพิ่มความถี่จากแหล่งกำเนิดคลื่นทำให้คลื่นมีการกระจายตัวมากขึ้น ส่งผลให้การทำความร้อนภายในวัสดุมีความสม่ำเสมอ ดังนั้นเครื่องไมโครเวฟลักษณะคลื่นผสมจึงเหมาะสมสำหรับการทำความร้อนวัสดุขนาดใหญ่หรือวัสดุที่มีการดูดกลืนคลื่นสูง (High-lossy materials) หรือเมื่อต้องการให้วัสดุที่ทำความร้อนมีอุณหภูมิสม่ำเสมอ

โดยทั่วไปเครื่องไมโครเวฟที่ผลิตมีอยู่สองชนิด คือ แบบเตาอบ (มีลักษณะเป็นคลื่นผสม) และแบบท่อนำคลื่น (มีลักษณะเป็นคลื่นเดี่ยว) ที่ผ่านมาเครื่องไมโครเวฟส่วนใหญ่ผลิตแบบเตาอบ ซึ่งการวิเคราะห์พฤติกรรมทำความร้อนที่เกิดขึ้นภายในเตาอบนั้นทำได้ยากมาก มีกระบวนการซับซ้อนไม่เหมาะสำหรับวิเคราะห์เชิงทฤษฎี

สำหรับเครื่องไมโครเวฟแบบท่อนำคลื่น จะเกิดคลื่นเดี่ยวมีลักษณะเป็นระนาบและตกกระทบลงบนผิวหน้าวัสดุ ดังนั้นพฤติกรรมจึงไม่ซับซ้อนเหมือนเครื่องไมโครเวฟชนิดเตาอบ ดังนั้นการวิเคราะห์เชิงทฤษฎีจึงอ้างอิงจากเครื่องไมโครเวฟลักษณะเดี่ยวเป็นหลัก (สรภฤช, 2552)

#### 4.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ

ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ ค่าความชื้นอิสระในอาหารมีผลอย่างมากต่อค่าคงที่ไดอิเล็กตริก เนื่องจากน้ำมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกที่อุณหภูมิห้องประมาณ 78 เหตุนี้ เมื่อมีปริมาณน้ำมากในสสารหรือวัสดุย่อยทำให้ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ซึ่งโดยปกติจะเป็นสัดส่วนซึ่งกันและกัน และเมื่อวัสดุไดอิเล็กตริกหลายชนิดมาผสมกัน เกิดพฤติกรรมที่เกิดขึ้นมีความซับซ้อนและยากต่อการอธิบายได้ แต่อย่างไรก็ตามได้มีกฎหลัก สำหรับอธิบายปรากฏการณ์นี้ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

- ความชื้นสูงขึ้นทำให้ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสูงขึ้น
- โดยปกติค่าไดอิเล็กตริกของวัสดุ มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีค่าความชื้นเพิ่มขึ้นแต่อยู่ในช่วงความชื้นประมาณ 20-30% แต่ก็เป็นไปได้ ที่จะมีค่าลดลงที่ไดอิเล็กตริกของแต่ละองค์ประกอบ

สำหรับวัสดุหลายๆ ประเภท ซึ่งประกอบด้วยแอลกอฮอล์และตัวทำละลายอินทรีย์จะมีสมบัติไดอิเล็กตริกที่เหมาะสมสำหรับการทำความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟและไดอิเล็กตริก ดังนั้นจึงมีพฤติกรรมคล้ายกับน้ำ ดังแสดงค่าสมบัติตามประเภทวัสดุในการทำความร้อนด้วยเหตุที่การอบแห้งเกี่ยวข้องกับการไล่น้ำหรือสารละลายออกจากวัสดุ เมื่อเกิดการลดความชื้นทำให้ค่าไดอิเล็กตริกของสเปคเตอร์มีค่าลดลง โดยในหลายๆ กรณีที่น้ำถูกไล่ออกทำให้การทำความร้อนของวัสดุมีขีดจำกัดและกลายเป็นวัสดุที่สามารถทำให้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าทะลุผ่านของตัววัสดุไปได้ที่ระดับความชื้นต่ำ เช่น น้ำที่ถูกตรึงกับโครงสร้างวัสดุ และน้ำอิสระ ซึ่งอยู่ในรูพรุน ถ้าค่าความชื้นต่ำกว่าค่าความชื้นวิกฤตจะพิจารณาน้ำดังกล่าวเป็นน้ำที่ถูกตรึงกับโครงสร้าง (มีค่าความชื้นอยู่ระหว่าง 10-40%) และจุดที่ค่าความชื้นสูงกว่าค่าความชื้นวิกฤตก็จะพิจารณาน้ำให้เป็นอิสระ (ฤทธิชัย, 2561)

ตารางที่ 3 ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก และค่าไดอิเล็กตริกสูญเสียของน้ำและน้ำแข็ง

Martial	Relative dielectric constant ( $\epsilon'$ )	Relative dielectric loss constant ( $\epsilon''$ )	Loss tangent ( $\tan \delta$ )
น้ำแข็ง	3.2	0.0029	0.0009
น้ำ (ที่ 25 °C)	78	12.48	0.16

ที่มา: ฤทธิ์ชัย (2561)

วัสดุไดอิเล็กตริก (dielectric material) หมายถึงวัสดุที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (dielectric constant) สูง มีความเป็นขั้ว (polar) สูง สามารถกักเก็บประจุไฟฟ้าไว้ จึงเป็นตัวนำไฟฟ้าไม่ดี หรือเป็นฉนวนไฟฟ้า น้ำจัดเป็นวัสดุไดอิเล็กตริกเนื่องจากโมเลกุลของน้ำมีขั้ว มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริก เท่ากับ 78.5 อาหารสด เช่น ผัก ผลไม้ เนื้อสัตว์ มีน้ำเป็นส่วนประกอบ ก็มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสูงใกล้เคียงกับน้ำ แสดงดังต่อไปนี้

- น้ำในสถานะของเหลว โมเลกุลของน้ำ เป็นโมเลกุลที่มีขั้ว โดยอะตอมของออกซิเจนมีขั้วเป็นลบเล็กน้อย และอะตอมของไฮโดรเจนมีขั้วเป็นบวกเล็กน้อย จึงทำให้น้ำมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสูงจัดเป็นวัสดุไดอิเล็กตริก (dielectric material) มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริก เท่ากับ 78.5
- น้ำในสถานะของแข็ง เมื่อน้ำเปลี่ยนสถานะเป็นน้ำแข็งจะมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกลดลง เนื่องจากโมเลกุลยึดจับกับน้ำที่อยู่รอบตัวด้วยพันธะไฮโดรเจน ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของน้ำแข็งมีค่าเท่ากับ 3.2

#### 4.4 ข้อได้เปรียบและเสียเปรียบของการทำความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ

ข้อได้เปรียบของการทำความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟของวัสดุไดอิเล็กตริกหรือเรียกว่าการทำความร้อนไดอิเล็กตริกมีข้อได้เปรียบที่เด่นชัดเรื่องของกลไกการเหนี่ยวนำความร้อนจากภายใน โมเลกุลจึงไม่มีผลกระทบในด้านลบของการถ่ายเทความร้อนและเป็นกระบวนการเชิงการทำความร้อนทั่วถึงทั้งก้อน (Bulk Heating) ซึ่งเกิดขึ้นจากอันตรกิริยาระหว่างสนามแม่เหล็กไฟฟ้าและวัสดุตลอดเนื้อวัสดุในขณะที่การให้ความร้อนระบบดั้งเดิมที่ใช้จะเกิดความล่าช้าในการเคลื่อนที่ของความร้อนจากผิวของวัสดุเข้าสู่ภายในซึ่งถูกกำหนดจากความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างภายนอกที่ร้อนกับภายในที่เย็นกว่าซึ่งเป็นข้อจำกัดในเรื่องของการถ่ายเทความร้อนและการกระจายความร้อน การเพิ่มความร้อนหรืออัตราการเกิดความร้อนอย่างรวดเร็วของการทำความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ นั้นเป็นข้อได้เปรียบที่สำคัญประการหนึ่งสำหรับการออกแบบเชิงอุตสาหกรรมซึ่งมีความเป็นไปได้ใน

การใช้เวลาเพียงช่วงวินาทีหรือนาทีในบางกระบวนการผลิตในขณะที่วิธีการให้ความร้อนแบบดั้งเดิมใช้เวลาเป็นนาที ชั่วโมงหรือเป็นวันเพื่อทำให้กระบวนการดำเนินอย่างเสร็จสมบูรณ์ยกตัวอย่างระบบการทำความร้อนในงานอุตสาหกรรมที่มีความเร็วสูงที่สุดซึ่งเป็นที่ทราบกันอยู่คือการใช้ความร้อนพลาสติกบางชนิดที่สามารถทำได้ในอัตรา  $30,000\text{ }^{\circ}\text{C} / \text{sec}$  ในทางตรงกันข้ามหากต้องการทำความร้อนที่ระดับต่ำมากสามารถทำได้ที่อัตรา  $1\text{ }^{\circ}\text{C} / 100\text{ sec}$  โดยตัวแปรที่กำหนดความเร็วของการทำความร้อน ได้แก่ ความจุความร้อนจำเพาะสมบัติไดอิเล็กตริกลักษณะรูปร่างประสิทธิภาพของการเกิดคัปปลิงของคลื่นภายในควิตี (Coupling efficiency) พลังงานที่ถูกสร้างขึ้นภายในวัสดุและกำลังไมโครเวฟและไดอิเล็กตริกที่ป้อนเข้าไปรวมถึงตัวแปรอื่นที่มีคุณสมบัติเทียบเท่ากันพบว่าความเร็วในการทำความร้อนจะเพิ่มขึ้นเป็นสองเท่าการทำความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟเป็นกระบวนการสะอาด (Green technology) ซึ่งเป็นการทำความร้อนในการแปรรูปอาหารที่ไม่สร้างมลภาวะต่างจากกระบวนการให้ความร้อนแบบอื่นที่ใช้เชื้อเพลิงในการเผาไหม้ทำให้มีก๊าซไอเสียออกมาด้วยและข้อจำกัดด้านวิศวกรรมของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบดั้งเดิม (ฤทธิชัย, 2561)

การทำความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟของวัสดุไดอิเล็กตริกมีประสิทธิภาพสูง (High efficiency) การทำความร้อนด้วยไมโครเวฟใช้พลังงานน้อยกว่าการทำความร้อนแบบเก่ามากเมื่อเทียบกับการเกิดปริมาณความร้อนภายในวัสดุที่เท่ากัน (การทำความร้อนแบบเก่ามีประสิทธิภาพโดยรวมประมาณ 10-30% ในขณะที่การทำความร้อนด้วยไมโครเวฟมีประสิทธิภาพโดยรวมประมาณ 60-70%) โดยในการทำความร้อนด้วยวิธีนี้พลังงานจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจะถูกแปลงโดยตรงเพื่อทำให้วัสดุเกิดความร้อนขึ้นโดยไม่เกิดการสูญเสียไปกับอากาศผนังของเตาสายพานลำเลียงหรือส่วนอื่น ๆ ของกระบวนการแปรรูปอันจะนำไปสู่การประหยัดพลังงานจากข้อได้เปรียบของการทำความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟของวัสดุไดอิเล็กตริกจึงถูกนำมาช่วยปรับปรุงกระบวนการแปรรูปเช่นปฏิกิริยาทางเคมีและกายภาพจะถูกเร่งให้เกิดขึ้นจากความร้อนที่สร้างด้วยวิธีนี้ซึ่งได้แก่ปฏิกิริยาการพองตัว (Puffing) การอบแห้ง (Drying) การหลอมละลาย (Melting) การทำให้โปรตีนเปลี่ยนสภาพไป (Protein denaturation) การที่แป้งเกิดเจลลาติไนซ์เซชัน (Starch gelatinization) อย่างไรก็ตามการทำความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟของวัสดุไดอิเล็กตริกมีข้อจำกัดในเรื่องของความสามารถของการทะลุทะลวงของพลังงาน (Energy penetration) หรือค่าความลึกในการทะลุทะลวง (Penetration depth) หรือความลึกเชิงกำลัง (Power penetration)

ตารางที่ 4 ข้อได้เปรียบและเสียเทียบของการให้ความร้อนแบบดั้งเดิม และการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ

วิธีการให้ความร้อน	ข้อได้เปรียบ	ข้อเสียเปรียบ
1. การให้ความร้อนแบบดั้งเดิม	- เทคโนโลยีแบบดั้งเดิมที่มีกลไกการข้อจำกัดในเรื่องของการถ่ายเทความร้อนทำงานที่ไม่ซับซ้อน	- ข้อจำกัดในเรื่องของการถ่ายเทความร้อนและปัญหาคราบตะกอน  - การสูญเสียคุณภาพอาหารเนื่องจากได้รับความร้อนสูงเป็นเวลานานเนื่องจากข้อจำกัดด้านการถ่ายเทความร้อนผ่านเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน
2. การให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ	- สามารถเกิดความร้อนได้อย่างรวดเร็วเนื่องจากการเกิดความร้อนจากภายใน (ไม่มีผลกระทบจากการถ่ายเทความร้อน) สามารถใช้กับอาหารเหลวและชิ้นอาหาร (ของแข็ง) เหมาะสมต่อการอบแห้งและการสกัด	- ประสิทธิภาพในการเปลี่ยนแปลงพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานความร้อนน้อยหรือประมาณ 45-48%  - มีข้อจำกัดในการกระจายอุณหภูมิ จึงไม่เป็นที่ยอมรับในการแปรรูปด้วยความร้อนเนื่องจากการกระจายตัวของคลื่นภายในวัสดุมีความไม่สม่ำเสมอทำให้เกิดโซนร้อนและโซนเย็นซึ่งไม่มีอันตรกิริยากับคลื่นซึ่งเกิดจากข้อจำกัดในเรื่องค่าความลึกในการทะลุทะลวง (Penetration Depth) จึงไม่เหมาะในการแปรรูปในทำลายจุลินทรีย์

ที่มา: ฤทธิชัย (2561)

## 5. การวิเคราะห์โดยปริมาณ (Proximate Analysis)

การวิเคราะห์แบบประมาณเป็นอีกวิธีการที่วัดค่าปริมาณพลังงานที่เพิ่มขึ้นจากกระบวนการทอรรีแฟกซ์ด้วยคลื่นไมโครเวฟ การวิเคราะห์สมบัติเชื้อเพลิง โดยจำแนกเป็น 4 กลุ่ม ประกอบด้วย ความชื้น (moisture) สารระเหย (volatile matter) เถ้า (ash) และปริมาณคาร์บอนคงตัว (fixed carbon) ค่าที่ได้บ่งบอก โดยประมาณถึงคุณภาพด้านการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงและความเหมาะสมที่จะนำเชื้อเพลิงไปแปรรูป เป็นเชื้อเพลิงที่มีคุณค่ามากขึ้น เช่น อัตราส่วนระหว่างคาร์บอนคงตัวกับสารระเหย บ่งชี้ในเบื้องต้นถึงความเหมาะสมในการเปลี่ยนถ่านหินเป็นถ่านโค้ก (ธนาพล และคณะ, 2558) เป็นต้น

### 5.1 ความชื้น (Moisture)

ปริมาณน้ำที่มีอยู่ในเชื้อเพลิงชีวมวล ส่วนมากเชื้อเพลิงชีวมวลจะมีความชื้นสูงเพราะเป็นผลผลิตทางการเกษตร ผลผลิตทางการเกษตรนี้เป็นสิ่งมีชีวิตซึ่งมีน้ำเป็นองค์ประกอบเป็นส่วนใหญ่ ปริมาณความชื้นที่พบในเชื้อเพลิงชีวมวลขึ้นอยู่กับชนิดของเชื้อเพลิง ดังนั้นเชื้อเพลิงชีวมวลที่นำมาใช้ควรมีความชื้นไม่เกิน 50% เพื่อไม่ให้เกิดการสูญเสียความร้อนในการไล่ความชื้นของเชื้อเพลิงชีวมวล สำหรับการวิเคราะห์ปริมาณความชื้นตามวิธีมาตรฐาน ASTM D3173 โดยนำตัวอย่างมาวิเคราะห์โดยให้ความร้อนคงที่ในตู้อบ (Drying Oven) ที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เพื่อให้ไอน้ำระเหยออกจากตัวอย่าง ค่าความชื้นที่ได้สามารถคำนวณจากน้ำหนักของตัวอย่างที่ลดลง ดังแสดงในสมการที่ 1 (ธนาพล และคณะ, 2558)

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

เมื่อ A คือ น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบ (g)  
B คือ น้ำหนักตัวอย่างหลังอบ (g)

### 5.2 สารระเหย (Volatile Matter)

สารระเหย (Volatile Matter) คือ ก๊าซและทาร์ (Tar) ที่อยู่ในเนื้อถ่าน เป็นตัวกลางที่ทำให้ถ่านเกิดการติดไฟก่อนที่จะเผาไหม้คาร์บอนซึ่งอยู่ในถ่าน นอกจากนี้ถ่านที่มีปริมาณ Volatile สูงจะทำให้ติดไฟง่ายและลุกไหม้อย่างรวดเร็ว แต่ถ่านที่มีปริมาณ Volatile ต่ำจะเกิดการติดไฟยาก และลุกไหม้อย่างช้าๆ ส่วนที่ลุกเผาไหม้ได้ง่าย ดังนั้นเชื้อเพลิงชีวมวลใดที่มีค่าสารระเหยสูงแสดงว่าติดไฟได้ง่าย สำหรับการวิเคราะห์ปริมาณสารระเหยตามมาตรฐาน ASTM D3175 โดยนำตัวอย่างมาเผาที่

อุณหภูมิ 950 °C เป็นเวลา 7 min แล้วนำมาคำนวณหาปริมาณสารระเหยจากการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่าง ดังสมการที่ 2 และ 3 (ธนาพล และคณะ, 2558)

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

$$\text{Volatile Matter (\%)} = \text{Weight Loss (\%)} - \text{Moisture (\%)} \quad \text{สมการที่ 3}$$

เมื่อ A คือ น้ำหนักตัวอย่างทดลอง (g)  
B คือ น้ำหนักตัวอย่างทดลองหลังเผา (g)

### 5.3 คาร์บอนคงที่ (Fixed Carbon)

เป็นสารประกอบของคาร์บอน (Carbonaceous Residue) ที่ไม่รวม Ash ที่เหลือจาก Organic Matter หลังจาก Volatile Matter ถูกไล่ออกไปแล้ว สำหรับการวิเคราะห์การหาปริมาณคาร์บอนคงที่ตัวสามารถหาได้จากสมการที่ 4 (ธนาพล และคณะ, 2558)

$$\text{Fixed Carbon (\%)} = (\% \text{Ash} + \% \text{Moisture} + \% \text{Volatile Matter}) - 100 \quad \text{สมการที่ 4}$$

เมื่อ Ash คือ ปริมาณเถ้าของชีวมวล (%)  
Moisture คือ ปริมาณความชื้นของชีวมวล (%)  
Volatile Matter คือ ปริมาณสารระเหยของชีวมวล (%)

### 5.4 ชี้เถ้า (Ash)

ส่วนที่เผาไหม้ไม่ได้หรือชี้เถ้า (Ash) เชื้อเพลิงชีวมวลส่วนใหญ่จะมีชี้เถ้าประมาณ 1 ถึง 3 % ยกเว้นแกลบและฟางข้าว จะมีสัดส่วนชี้เถ้าประมาณ 10 - 20% ซึ่งจะมีปัญหาในการเผาไหม้และกำจัดพอสมควร แต่เนื่องจากการเผาไหม้ปุ๋ยหมักชี้เถ้าที่เกิดขึ้นทั้งหมดจะรวมอยู่ในผลิตภัณฑ์ปุ๋ยหมักปริมาณชี้เถ้าจึงไม่ก่อให้เกิดปัญหาในการเผาไหม้มากนัก แต่ยังคงต้องควบคุม 20 องค์ประกอบทางเคมีของปุ๋ยหมัก ดังนั้นจึงมีข้อจำกัดในการใช้เชื้อเพลิงชีวมวลที่มีชี้เถ้ามาก โดยเฉพาะแกลบ สำหรับการวิเคราะห์ปริมาณเถ้าตามมาตรฐาน ASTM D3174 โดยนำตัวอย่างไปเผาให้ความร้อนในเตาเผาที่อุณหภูมิประมาณ 500 °C แล้วค่อย ๆ เพิ่มความร้อนเป็น 700 - 750 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จนกระทั่ง

ทั้งได้น้ำหนักคงที่ของถ้วยอลูมิเนียมรวมกับน้ำหนักของเถ้าที่เหลือ จึงนำมาชั่งน้ำหนัก ซึ่งสามารถคำนวณปริมาณเถ้าได้จากสมการที่ 5 (ธนาพล และคณะ, 2558)

$$\text{ปริมาณเถ้า (\%)} = \frac{A}{B} \times 100 \quad \text{สมการที่ 5}$$

เมื่อ A คือ น้ำหนักสุดท้ายของตัวอย่างหลังเผา (g)  
B คือ น้ำหนักตัวอย่างเริ่มต้น (g)

## 6. การวิเคราะห์ขั้นสุดท้าย (Ultimate Analysis)

การวิเคราะห์ขั้นสุดท้ายเป็นการวิเคราะห์ส่วนประกอบของเชื้อเพลิง เพื่อใช้ในการหาค่าความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ โดยจะรายงานเป็นปริมาณร้อยละของธาตุต่างๆ ที่ประกอบขึ้นเป็นถ่านหินได้แก่ ปริมาณคาร์บอน (C) ไฮโดรเจน (H) ออกซิเจน (O) ไนโตรเจน (N) และกำมะถัน (S) วิเคราะห์โดยเครื่อง Elemental CHNS Microanalyzer Thermo Finningan Flash 1112 Series. แสดงดังภาพที่ 11

เริ่มจากการหาค่าธาตุคาร์บอนและไฮโดรเจนวิธีการเผา ส่วนธาตุไฮโดรเจนและกำมะถันใช้กระบวนการทางเคมี ที่มีผลกระทบต่อกระบวนการสันดาปในหม้อไอน้ำ ส่วนออกซิเจนจะไม่ทำการวิเคราะห์ แต่จะได้จากการใช้ปริมาณส่วนที่เหลือจากการหาค่าจากธาตุอื่นๆแล้ว ซึ่งได้เปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์ชีวมวลแต่ละชนิดไว้ในตารางที่ 3 และ 4



ภาพที่ 11 เครื่องวิเคราะห์คุณสมบัติชีวมวล (วิเคราะห์ขั้นสุดท้าย)

ตารางที่ 5 แสดงคุณสมบัติทางเคมีของชีวมวลแต่ละชนิด

Proximate Analysis	แกลบ	ฟางข้าว	ชานอ้อย	ใบอ้อย	ไม้ยางพารา	ไยปาล์ม	กะลาปาล์ม
Moisture (%)	12.00	10.00	50.73	9.20	45.00	38.50	12.00
Ash (%)	12.65	10.39	1.43	6.10	1.59	4.42	3.50
Volatile Matter(%)	56.46	60.70	41.98	67.80	45.70	42.68	68.20
Fixed Carbon (%)	18.80	18.90	5.86	16.90	7.71	14.39	16.30
<b>Ultimate Analysis</b>							
Carbon (%)	37.48	38.17	21.33	41.60	35.58	30.82	44.44
Hydrogen (%)	4.41	5.02	3.06	5.08	3.19	3.74	5.01
Oxygen (%)	33.27	35.28	23.29	37.42	24.48	21.61	34.70
Nitrogen (%)	0.17	0.58	0.12	0.40	0.14	0.84	0.28
Sulfur (%)	0.04	0.09	0.03	0.17	0.02	0.08	0.02
Ash (%)	12.65	10.39	1.43	6.10	1.60	4.42	3.52
Moisture (%)	12.00	10.00	50.73	9.20	45.00	38.50	12.00
<b>Other Characteristics</b>							
Bulk Density (kg/m <sup>3</sup> )	150	125	120	100	450	250	400
High Heating Value (KJ/kg)	14,755	13,650	9,243	16,794	10,365	13,127	18,267
Low Heating Value (KJ/kg)	13,517	12,330	7,368	15,479	8,600	11,400	16,900

ที่มา: ศูนย์ส่งเสริมพลังงานชีวมวล (2549)

ตารางที่ 6 แสดงคุณสมบัติทางเคมีของชีวมวลแต่ละชนิด

Proximate Analysis	ทะลาย ปาล์ม	ลำต้น ปาล์ม	ทางปาล์ม	ซัง ข้าวโพด	ลำต้น ข้าวโพด	เหง้ำมัน สำปะหลัง	เปลือกไม้ ยูคา
Moisture (%)	58.60	48.40	78.40	40.00	41.70	59.40	60.00
Ash (%)	2.03	1.20	0.70	0.90	3.70	1.50	2.44
Volatile Matter (%)	30.46	38.70	16.30	45.42	46.46	31.00	28.00
Fixed Carbon (%)	8.90	11.70	4.60	13.68	8.14	8.10	9.56
<b>Ultimate Analysis</b>							
Carbon (%)	21.15	23.90	10.13	28.19	27.83	18.76	18.60
Hydrogen (%)	2.56	3.04	1.25	3.36	4.06	2.48	2.12
Oxygen (%)	15.34	22.91	9.44	27.42	22.47	17.50	16.68
Nitrogen (%)	0.27	0.56	0.07	0.12	0.13	0.32	0.15
Sulfur (%)	0.04	0.06	0.02	0.03	NA	0.04	0.02
Ash (%)	2.03	1.20	0.70	0.90	3.70	1.50	2.44
Moisture (%)	58.60	48.40	78.40	40.00	41.70	59.40	60.00
<b>Other Characteristics</b>							
Bulk Density (kg/m <sup>3</sup> )	380	NA	NA	NA	NA	250	NA
High Heating Value (KJ/kg)	9,196	9,370	3,908	11,298	11,704	7,451	6,811
Low Heating Value (KJ/kg)	7,240	7,556	1,760	9,615	9,830	5,494	4,917

ที่มา: ศูนย์ส่งเสริมพลังงานชีวมวล (2549)

## 7. การวิเคราะห์ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงชีวมวล

1) ค่าความร้อนต่ำ หรือ Lower Heating Value (LHV) หมายถึง การนำชีวมวลหนัก 1 กิโลกรัม มาหาค่าความร้อน ค่าที่วัดได้คือ ค่าความร้อนต่ำ (LHV) ต่อกิโลกรัม

2) ค่าความร้อนสูง หรือ Higher Heating Value (HHV) หมายถึง การนำชีวมวลหนัก 1 กิโลกรัม มาลดความชื้นหรือกำจัดน้ำออกให้หมด จากนั้น นำมาหาค่าความร้อน ค่าที่วัดได้คือ ค่าความร้อนสูง (HHV) ต่อกิโลกรัม และมีความสัมพันธ์กับค่าความร้อนต่ำดังนี้

		$HHV = LHV + 5.72(9H + M) \text{ kcal/kg}$	สมการที่ 6
หรือ		$HHV = LHV + 23.95(9H + M) \text{ kJ/kg}$	สมการที่ 7

เมื่อ	H	คือ	ปริมาณร้อยละของธาตุไฮโดรเจนในชีวมวล
	M	คือ	เท่ากับปริมาณร้อยละของความชื้นในชีวมวล

3) ค่าความร้อนแห้ง หรือ Dry Heating Value หมายถึง การนำชีวมวลส่วนหนึ่งมาลดความชื้นหรือกำจัดน้ำออกให้หมด จากนั้นแบ่งมา 1 กิโลกรัม เพื่อนำมาหาค่าความร้อน ค่าที่วัดได้คือค่าความร้อนแห้งต่อกิโลกรัม และมีความสัมพันธ์กับค่าความร้อนสูง ดังนี้

$$\text{Dry Heating Value} = HHV / (1-M/100) \quad \text{สมการที่ 8}$$

เมื่อ	M	คือ	ปริมาณร้อยละของความชื้นในชีวมวล
-------	---	-----	---------------------------------

## 8. การวิเคราะห์ Mass yield และ Energy yield

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

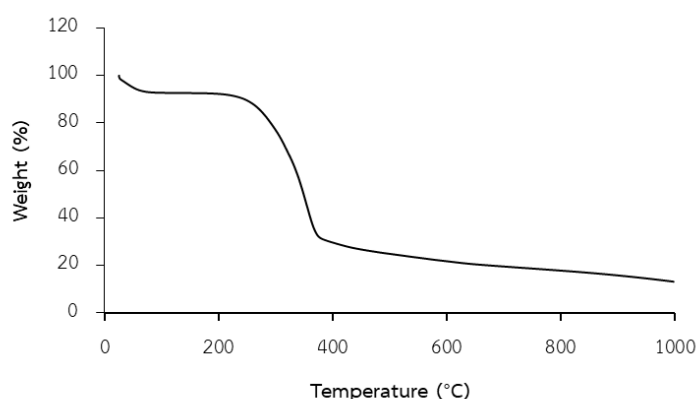
$$MY = \frac{\text{mass after torrefaction}}{\text{mass of raw sample}} \times 100 \quad \text{สมการที่ 9}$$

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

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

## 9. การวิเคราะห์ทางความร้อนโดยวิธี (Thermo Gravimetric Analysis : TGA)

Thermo Gravimetric Analysis เป็นวิธีการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนแบบหนึ่ง ตามมาตรฐาน ASTM D5142 โดยตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงมวลของสารตัวอย่าง เมื่อเทียบกับเวลาที่อุณหภูมิคงที่หรือเมื่อเทียบกับอุณหภูมิที่อัตราการเพิ่มอุณหภูมิคงที่ ในการวิเคราะห์วิธีนี้มีมวลของสารตัวอย่างซึ่งอยู่ในบรรยากาศที่ถูกควบคุมจะถูก บันทึกอย่างต่อเนื่องกราฟที่ได้จาก TGA เรียกว่า TGA Thermogram หรือ Thermal Decomposition curve เป็นความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงมวลเทียบกับเวลาหรืออุณหภูมิ เป็นกราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงมวลของสารตัวอย่างเทียบกับอุณหภูมิ โดยการสลายตัวของสาร เกิดขึ้นเพียงขั้นตอนเดียว ดังภาพที่ 12 โดยทั่วไป TGA จะใช้ในการศึกษาการเสถียรภาพ (Decomposition) ความเสถียร (Stability) ของสารตัวอย่าง หรือใช้ในการศึกษาจลนพลศาสตร์ (Kinetics) ความร้อนที่เกิดขึ้น กับสารตัวอย่างภายใต้สภาวะการทดลองหนึ่งๆ สำหรับปฏิกิริยาต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการสลายตัว



ภาพที่ 12 การเปลี่ยนแปลงมวลของสารตัวอย่างเมื่อเทียบกับอุณหภูมิ

การเปลี่ยนแปลงมวลของสารตัวอย่างจะขึ้นอยู่กับสภาวะการทดลอง มวลเริ่มต้น ปริมาตร และลักษณะทางกายภาพของสารตัวอย่าง รูปร่างและธรรมชาติของวัสดุที่ใช้เป็นภาชนะ บรรจุสาร ตัวอย่าง ความดันและอัตราเร็วของการเพิ่มอุณหภูมิการนำก๊าซที่เกิดจากการสลายตัวของสาร ตัวอย่างไปวิเคราะห์ต่อ โดยใช้วิธี การวิเคราะห์แบบอื่น ๆ เช่น ก๊าซโครมาโตกราฟี (Gas Chromatography) อินฟราเรด สเปกโตรสโคปี (Infrared Spectroscopy) ฯลฯ เป็นวิธีที่จะได้ข้อมูลเพิ่มเติมเกี่ยวกับสารตัวอย่างที่นำมาทำการทดสอบ (พัทธานนท์, 2557)

## 10. การวิเคราะห์ Van krevalen

การวิเคราะห์แบบแยกธาตุของเชื้อเพลิงชีวมวลแสดงให้เห็นการเปลี่ยนแปลงของสัดส่วนอะตอมทั้ง 3 องค์ประกอบหลัก ซึ่งถูกนำเสนอในแผนภาพ Van Krevelen กล่าวคือกระบวนการทอรรีแฟคชันด้วยคลื่นไมโครเวฟส่งผลทำให้สัดส่วนอะตอม H และ O ลดลง ในขณะที่ สัดส่วนอะตอม C จะเพิ่มขึ้น ทั้งนี้ เนื่องมาจากเกิดการก่อกำเนิดของผลิตภัณฑ์ก๊าซที่เป็น ไอน้ำ, CO, และ CO<sub>2</sub> ซึ่งโดยทั่วไปนั้นการเปลี่ยนแปลงนี้จะมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิและเวลาของการทอรรีแฟคชันด้วยคลื่นไมโครเวฟสูงขึ้น และในกระบวนการนี้เองก็เป็นสาเหตุทำให้อัตราส่วนอะตอม H/C และ O/C ลดลง ซึ่งถือเป็นข้อดีเพราะจะทำให้ควันและไอน้ำที่ก่อกำเนิด น้อยลง และระหว่างกระบวนการเผาไหม้กับแก๊สซิฟิเคชัน เกิดการสูญเสียความร้อนลดลง นอกจากนี้ยังทำให้ ได้ผลิตภัณฑ์ของเหลวจากการไพโรไลซิสลดความเป็นกรดลง (ทศพร, 2018) สำหรับแผนภาพ Van Krevelen นอกจาก จะแสดงการเพิ่มขึ้นของสัดส่วนอะตอม C แล้วยังแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มความรุนแรงของการทอรรีแฟคชันด้วยคลื่นไมโครเวฟจะทำให้ อัตราส่วนอะตอม H/C และ O/C ของผลิตภัณฑ์ของแข็ง ที่ได้จะมีความใกล้เคียงกับถ่านหินลิกไนต์มากขึ้น ซึ่งถ้าเราเปรียบเทียบสัดส่วนของอะตอม O, H, N, และ S ระหว่างชีวมวลทอรรีแฟคชันด้วยคลื่นไมโครเวฟกับถ่านหินจะพบว่าสัดส่วนของ N และ S ในชีวมวลทอรรีแฟคชันจะต่ำกว่าถ่านหินมาก นั่นเป็นการบอกเป็นนัยว่าเมื่อใช้ชีวมวลทอรรีแฟคชันเป็นเชื้อเพลิงค่าของ มลพิษ NO<sub>x</sub> และ SO<sub>x</sub> ในไอเสียจะต่ำกว่าที่ได้จากการเผา ไหม้ถ่านหิน นอกจากนี้การทอรรีแฟคชันด้วยคลื่นไมโครเวฟยังส่งผลให้สัดส่วน N และ S ในชีวมวลทอรรีแฟคชันด้วยคลื่นไมโครเวฟลดลงอีกด้วย ในขณะที่สัดส่วนของ O และ H ในชีวมวลยังสูงกว่าถ่านหิน ซึ่ง เป็นเหตุทำให้ค่าความร้อนต่ำกว่าถ่านหิน แต่อย่างไรก็ตาม การใช้ชีวมวลทอรรีแฟคชันด้วยคลื่นไมโครเวฟร่วมกับถ่านหินไม่มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพของหม้อต้ม (boiler) ที่สัดส่วนการใช้ของชีวมวลทอรรีแฟคชันด้วยคลื่นไมโครเวฟสูง (มากกว่า 56 % โดยมวล) (ทศพร, 2018)

### การตรวจสอบเอกสาร

จากการค้นคว้าเอกสารที่เกี่ยวข้องกับการเพิ่มคุณภาพชีวมวลหรือวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร ด้วยกระบวนการทอรรีแฟคชันด้วยคลื่นไมโครเวฟ แสดงดังต่อไปนี้

Huanga et al. (2012) ได้ศึกษากระบวนการทอรรีแฟคชันของฟางข้าวและหญ้าเนเปียร์ โดยใช้แหล่งความร้อนจากเตาไมโครเวฟช่วงกำลังไฟฟ้า 150-350 W ระยะเวลา 5-25 min ภายใต้บรรยากาศที่ใช้ก๊าซไนโตรเจน สำหรับฟางข้าวอุณหภูมิที่ใช้ทดสอบเพิ่มขึ้นจาก 237-423 °C และอัตราความร้อนเฉลี่ยเพิ่มขึ้นจาก 12.9-31.2 °C/min ส่วนหญ้าเนเปียร์อุณหภูมิที่ใช้ทดสอบเพิ่มขึ้นจาก 252-394 °C และอัตราความร้อนเฉลี่ยเพิ่มขึ้นจาก 14.8-29.2 °C/min ภายใต้บรรยากาศที่ใช้

ก๊าซไนโตรเจน หลังจากการทดสอบกระบวนการทอรรีแฟคชัน ค่าความร้อนของฟางข้าวและหญ้าเนเปียร์เพิ่มขึ้นจาก 16.16-20.97 MJ/kg และ 16.98-26.51 MJ/kg ตามลำดับ ซึ่งผลของงานวิจัยนี้สรุปได้ว่า กำลังไฟฟ้าจากไมโครเวฟที่เหมาะสมสำหรับการทดสอบกระบวนการทอรรีแฟคชันของฟางข้าวและหญ้าเนเปียร์ คือ 150 W ใช้ระยะเวลาในการทดสอบ 10 min จะส่งผลทำให้ได้ค่า Mass yield และค่า Energy yield มีค่าสูงที่สุดคือ 70% และ 80% ตามลำดับ ผลการศึกษาข้างต้นแสดงให้เห็นว่าการทอรรีแฟคชันด้วยไมโครเวฟ สามารถใช้ได้กับชีวมวลหลายชนิด เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีดั้งเดิมพบว่า กระบวนการทอรรีแฟคชันด้วยไมโครเวฟเพื่อให้ได้ mass yield และ energy yield ที่ต้องการใช้เวลาไม่มากและใช้ระดับกำลังไฟฟ้าที่ต่ำก็เพียงพอแล้ว ดังนั้น พลังงานไฟฟ้าที่ให้กับกระบวนการก็ใช้น้อย นอกจากนี้ผลจากการทอรรีแฟคชัน (ของเหลวกับแก๊ส) นำไปใช้ให้เกิดประโยชน์ในการผลิตไฟฟ้า นั่นคือ ประสิทธิภาพด้านพลังงานของกระบวนการทอรรีแฟคชันด้วยไมโครเวฟสามารถพัฒนาต่อไปได้อีกมาก

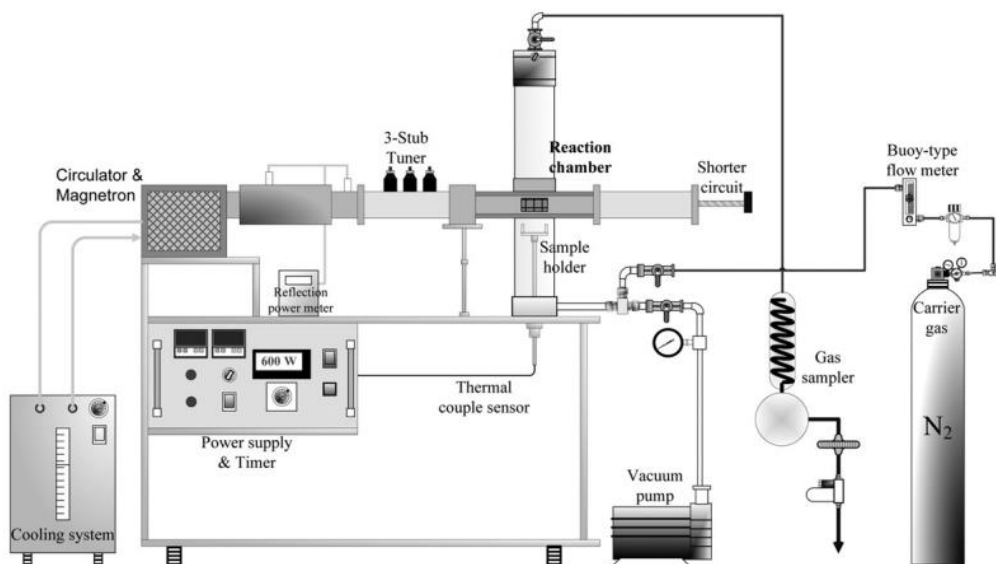
Sangram Kishor Satpathy et al. (2014) ได้ศึกษาเกี่ยวกับกระบวนการทอรรีแฟคชันของฟางข้าวสาเลีและฟางข้าวบาร์เลย์ โดยใช้ความร้อนจากไมโครเวฟที่ช่วงกำลังไฟฟ้า 200-300 W ซึ่งฟางข้าวสาเลีและฟางข้าวบาร์เลย์ทดสอบที่ช่วงอุณหภูมิ 133-392 °C และ 227-427 °C ตามลำดับ ระยะเวลาในการทดสอบ 10-20 min ภายใต้บรรยากาศที่ใช้ก๊าซไนโตรเจน จากผลการวิจัยพบว่าเมื่อทดสอบกระบวนการทอรรีแฟคชันที่ 300 W เป็นเวลา 20 min ฟางข้าวบาร์เลย์และฟางข้าวสาเลีมีปริมาณคาร์บอนเพิ่มขึ้น 29.1% และ 16.2% ตามลำดับ และอัตราส่วน H/C และ O/C มีปริมาณลดลงเมื่อใช้กำลังไฟฟ้าและระยะเวลาในการทดสอบมากขึ้น ส่วนค่า Mass yield และ Energy yield ของฟางข้าวสาเลี คือ 64.0-97.8% และ 73.8-98.4% ตามลำดับ ส่วนฟางข้าวบาร์เลย์ค่า Mass yield และ Energy yield คือ 42.7-97.4% และ 52.5-97.3% ตามลำดับ ค่าความร้อนของฟางข้าวสาเลีและฟางข้าวบาร์เลย์เพิ่มขึ้นจาก 17.8-20.5 MJ/kg และ 17.7-21.9 MJ/kg ตามลำดับ

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

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

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

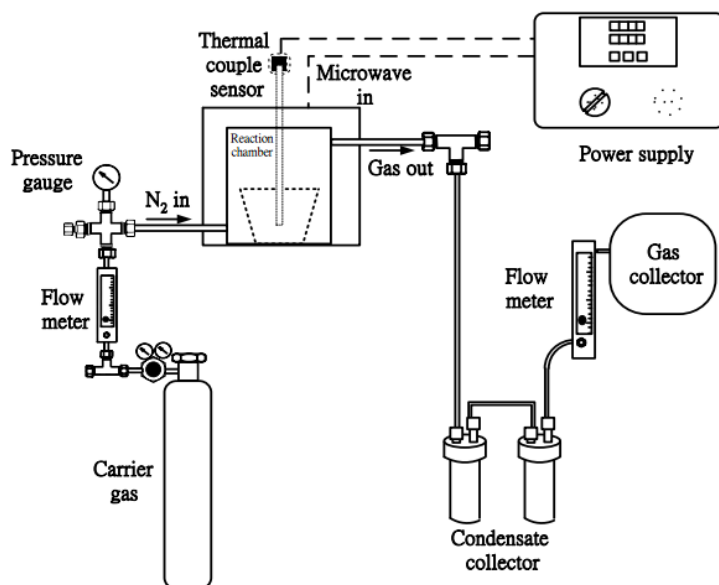
Wanga et al. (2012) ได้ศึกษากระบวนการทอรรีแฟคชันของแกลบและเศษอ้อย โดยใช้ความร้อนจากไมโครเวฟที่มีความถี่ 2.45 GHz ภายใต้บรรยากาศที่ใช้ก๊าซไนโตรเจน โดยประยุกต์ได้เตาปฏิกรณ์ดังภาพที่ 13



ภาพที่ 13 เตาปฏิกรณ์ทอรรีแฟคชันโดยใช้ความร้อนจากไมโครเวฟ

มีตัวแปรในการศึกษา ได้แก่ ระดับกำลังไฟฟ้าอยู่ในช่วง 150-400 W ระยะเวลา 4-30 min ความชื้นระหว่าง 0-15% และชิ้นส่วนชีวมวลขนาด 50/100, 100/200 และมากกว่า 200 mesh ภายใต้บรรยากาศที่ใช้ก๊าซไนโตรเจน ผลการศึกษา พบว่า การให้ความร้อนแก่แกลบ ใน 5 นาทีแรก ระดับกำลังไฟฟ้าวระหว่าง 150-300 W จะได้อัตราความร้อนอยู่ระหว่าง 17-50 °C/min อุณหภูมิอยู่ที่ 272-527 °C เมื่อกำลังไฟฟ้า 400 W จะมีอัตราความร้อนสูงถึง 65 °C/min และอุณหภูมิ 604 °C สำหรับเศษอ้อย มีอัตราความร้อนอยู่ระหว่าง 16-78 °C/min อุณหภูมิอยู่ที่ 179-573 °C ค่าความร้อนของแกลบและเศษอ้อยเพิ่มขึ้นสูงสุดร้อยละ 26 และ 57 ตามลำดับ ค่า Mass yield และ Energy yield ของแกลบมีค่าสูงสุดเท่ากับ 49.45% และ 57.46% ตามลำดับ ที่ระดับกำลังไฟฟ้า 300 W เวลา 4 นาที ส่วนค่า Mass yield และ Energy yield ของเศษอ้อยเท่ากับ 67.16% และ 79.42% ที่ระดับกำลังไฟฟ้า 250 W เวลา 4 นาที

Lin (2015) ได้ศึกษาผลกระทบของกระบวนการทอรรีแฟคชันในการพัฒนาคุณภาพและคุณสมบัติทางพลังงานของฟางข้าว โดยใช้ความร้อนจากไมโครเวฟที่มีความถี่ 2.45 GHz ระดับกำลังไฟฟ้าอยู่ที่ 250-450 W ระยะเวลา 10-30 นาที และความชื้นของฟางข้าวอยู่ที่ 8-30 wt% และควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ในช่วง 200-300 °C ภายใต้บรรยากาศที่ใช้ก๊าซไนโตรเจน ผลการศึกษา พบว่า ที่เวลา 30 นาที อัตราส่วน H/C และ O/C ของฟางข้าว ที่ระดับกำลังไฟฟ้า 350 W ความชื้น 8 และ 30 wt% กับ 400 W ความชื้น 30 wt% มีคุณลักษณะใกล้เคียงกับถ่านพีต (Peat) นอกจากนี้เมื่อเพิ่มระดับกำลังไฟฟ้ามากขึ้น ทำให้ค่าคาร์บอนคงที่ ค่าความร้อน และความหนาแน่นของพลังงานเพิ่มมากขึ้น แต่ความชื้นลดลง เมื่อพิจารณาค่า Mass yield และ Energy yield ที่สูงที่สุด มากกว่า 60% และ 80% ตามลำดับ ที่ระดับกำลังไฟฟ้า 350 W เวลา 30 นาที ความชื้น 8wt% นอกจากนี้ผู้วิจัยได้แนะนำสภาวะที่เหมาะสมในการทอรรีไฟด์ฟางข้าว ได้แก่ ระดับกำลังไฟฟ้า 350 W เวลา 10-30 นาที ความชื้น 8-20 wt% และที่ระดับกำลังไฟฟ้า 450 W เวลา 10 นาที ความชื้น 8 wt%



ภาพที่ 14 ชุดอุปกรณ์ที่ใช้ไมโครเวฟในกระบวนการทอรรีไฟต์

Huanga et al. (2012) ได้ศึกษาเกี่ยวกับกระบวนการทอรรีไฟต์ของกากตะกอนน้ำเสีย และไม้กระถิน โดยใช้ความร้อนจากตัวไมโครเวฟที่มีความถี่ 2.45 GHz ซึ่งระดับกำลังไฟฟ้าของกากตะกอนน้ำเสีย และไม้กระถิน อยู่ระหว่าง 100-400 W และ 100-250 W ตามลำดับ ระยะเวลา 30 นาที ผลการศึกษา พบว่า เมื่อระดับกำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้น จะได้ว่าปริมาณซีเฝ้าและ C ของกากตะกอนน้ำเสียเพิ่มขึ้น แต่ปริมาณสารระเหย H, O, N และค่าความร้อนลดลง โดยค่าคาร์บอนคงที่สูงสุดมีค่า 34.54 wt% ที่ระดับกำลังไฟฟ้า 150 W ส่วนไม้กระถิน มีค่าความร้อน และ C เพิ่มขึ้น แต่ปริมาณสารระเหย H และ O ลดลง ค่าคาร์บอนคงที่ของไม้กระถินมีค่าสูงสุดเท่ากับ 81.21 wt% ที่ระดับกำลังไฟฟ้า 250 W สำหรับค่า Mass yield และ Energy yield ที่สูงที่สุดของกากตะกอนมากกว่า 65% และ 80% ตามลำดับ และของไม้กระถินมีค่ามากกว่า 60% และ 80% ตามลำดับ เมื่อพิจารณาอัตราส่วน H/C และ O/C ของกากตะกอนน้ำเสีย ที่ระดับกำลังไฟฟ้า 350-400 W มีค่า 0.41-0.56 และ 0.13-0.31 ซึ่งมีคุณลักษณะอยู่ระหว่างถ่านฟิตและลิกไนต์ สำหรับไม้กระถิน มีอัตราส่วน H/C และ O/C เท่ากับ 0.41 และ 0.14 ตามลำดับ ซึ่งต่ำกว่าของกากตะกอนน้ำเสีย แต่ยังคงมากกว่าของถ่านปิทูมินัส

อรอริน และคณะ (2554) ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของกระบวนการทอรรีไฟต์ต่อกระบวนการผลิตน้ำมันชีวภาพจากไม้กระถินยักษ์ (*Leucaena leucocephala*) จากการวิจัยพบว่าปริมาณออกซิเจนในกระถินยักษ์ลดลงจาก 46.2% เป็น 37.3% โดยน้ำหนัก เมื่อผ่านกระบวนการทอรรีไฟต์ที่ 295 °C ในขณะที่ผลผลิตของกระถินยักษ์ที่ผ่านกระบวนการทอรรีไฟต์มีปริมาณ

ลดลงเมื่ออุณหภูมิของกระบวนการทอรรีแฟคชันสูงขึ้น หลังจากนั้นกระถินยักษ์ที่ผ่านกระบวนการทอรรีแฟคชันแล้วจะนำมาผ่านกระบวนการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 550 °C เพื่อผลิตน้ำมันชีวภาพโดยพบว่าปริมาณคาร์บอนที่อยู่ในกระถินยักษ์หลังผ่านกระบวนการไพโรไลซิสมีค่ามากขึ้น ในขณะที่ปริมาณออกซิเจนมีค่าลดลงเมื่อนำน้ำมันชีวภาพมาวิเคราะห์ด้วยวิธีการสกัดด้วยตัวทำละลาย (Fractionation) ซึ่งจะแยกน้ำมันชีวภาพเป็นน้ำมันเบา (Light oil) และน้ำมันหนัก (Heavy oil) โดยนำน้ำมันเบามาวิเคราะห์ด้วยเทคนิค GC-MS พบว่าปริมาณกรดอะซิติก (acetic acid) และฟูแรน (furans) ที่อยู่ในน้ำมันเบา มีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิของกระบวนการทอรรีแฟคชันเพิ่มขึ้น และยังพบว่าน้ำมันชีวภาพมีความเป็นกรดลดลง ซึ่งจะสอดคล้องกับการลดลงของปริมาณกรดอะซิติกในน้ำมันเบา จากผลทั้งหมดนี้บ่งชี้ว่า กระบวนการทอรรีแฟคชันไม่เพียงแต่สามารถปรับปรุงคุณสมบัติของน้ำมันชีวภาพให้ดีขึ้น แต่ยังมีผลต่อคุณสมบัติของชีวมวลหลังผ่านกระบวนการไพโรไลซิสอีกด้วย

สุดาวัลย์ และ ธาราพงษ์ (2554) ได้ศึกษากระบวนการทอรรีแฟคชันชีวมวลด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบเขย่ากับตัวอย่างชีวมวล ชี้อ้อยและไม้กระถินยักษ์ โดยศึกษาผลของวัสดุเบดต่อประสิทธิภาพของกระบวนการทอรรีแฟคชัน วัสดุเบดที่ใช้ ได้แก่ ททราย ซีโอไลต์ 3A และซีโอไลต์ 5A โดยพบว่าการทอรรีแฟคชันร่วมกับวัสดุเบดให้ประสิทธิภาพของกระบวนการที่ดีกว่าเทียบกับกรณีไม่ใช้วัสดุเบด ผลผลิตก๊าซของแข็งหลังผ่านกระบวนการ มีค่าความร้อน และความหนาแน่นพลังงานเพิ่มขึ้น ในขณะที่ปริมาณสารระเหย ความชื้น และองค์ประกอบออกซิเจนลดลง และมีสมบัติความเป็นเชื้อเพลิงแข็งที่ใกล้เคียงถ่านหินบิทูมินัสมากขึ้น นอกจากนี้พบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิของกระบวนการจะให้คาร์บอนและปริมาณของแข็งที่ได้น้อยลง โดยไม้กระถินยักษ์จะให้ร้อยละผลผลิตปริมาณของแข็งที่ได้น้อยกว่าขึ้น

จากการตรวจสอบเอกสารพบว่าการทอรรีไฟต์ด้วยเทคนิคคลื่นไมโครเวฟช่วยทำให้การผลิตเชื้อเพลิงทอรรีไฟต์ได้เร็วขึ้นกว่าการทอรรีไฟต์แบบปกติ ซึ่งจะช่วยลดต้นทุน และระยะเวลาการผลิตเชื้อเพลิงได้ดียิ่งขึ้น และช่วงการทอรรีแฟคชันด้วยคลื่นไมโครเวฟอยู่ที่ระดับกำลังไมโครเวฟที่ 100-450 W ที่ระยะเวลา 10-30 นาที ภายใต้บรรยากาศแก๊สไนโตรเจน และมีค่าความร้อนอยู่ประมาณ 16-27 MJ/kg

ตารางที่ 7 การตรวจสอบเอกสารที่เกี่ยวข้อง

นักวิจัย	วัสดุ	แหล่งความ ร้อน	กระบวนการ	ช่วงกำลังไฟฟ้า (W)	ช่วงเวลา (min)	บรรยากาศ	ค่าความร้อน (MJ/kg)
Huang, et al.	ฟางข้าว หญ้าเนเปียร์	ไมโครเวฟ	ทอริแพคชั่น	150-350 150-350	5-25	N <sub>2</sub> N <sub>2</sub>	16.16 เป็น 21.80 16.98 เป็น 26.33
Wang, et al.	แกลบ เศษอ้อย	ไมโครเวฟ	ทอริแพคชั่น	150-400 150-400	4-30	N <sub>2</sub>	17.4 เป็น 21.90 17.8 เป็น 27.80
Satpathy, et al.	ฟางข้าวสาลี ฟางข้าวบาร์เลย์	ไมโครเวฟ	ทอริแพคชั่น	200-300	10-20	N <sub>2</sub>	17.8 เป็น 20.5 17.7 เป็น 21.9
Lin	ฟางข้าว	ไมโครเวฟ	ทอริแพคชั่น	250-450	10-30	N <sub>2</sub>	20 เป็น 24
Huang, et al.	กากตะกอนน้ำเสีย	ไมโครเวฟ	ทอริแพคชั่น	100-400	30	N <sub>2</sub>	15.04 เป็น 16.16
Chen et al.	ลำต้นฝ้าย ลำต้นข้าวโพด	เตาปฏิกรณ์	ทอริแพคชั่น	200-290 200-290	30 30	N <sub>2</sub> N <sub>2</sub>	18.31 เป็น 25.43 18.06 เป็น 23.61
Li et al.	ไม่ไฟ	เตาปฏิกรณ์	ทอริแพคชั่น	220-280	10-60	N <sub>2</sub>	16.73 เป็น 20.42
Tcano et al.	เปลือกมะเขือเทศ	เตาปฏิกรณ์	ทอริแพคชั่น	214-316	30-60	N <sub>2</sub>	26.0 เป็น 32.0
อรุณ และคณะ	ไม้กระถินยักษ์	เตาปฏิกรณ์	ทอริแพคชั่น	230-295	10	N <sub>2</sub>	17.0 เป็น 22.6
สุวาลัย คำทนก	ชีเลี้ยง ไม้กระถินยักษ์	เตาปฏิกรณ์	ไพโรไลซิส ทอริแพคชั่น	450-600 200-300	10 -	- N <sub>2</sub>	- น้อยกว่าหรือเท่ากับ
				200-300	30	N <sub>2</sub>	30

### บทที่ 3

## อุปกรณ์และวิธีการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ดำเนินการศึกษาเนื้อหาสภาวะเหมาะสมของการผลิตเชื้อเพลิงทอร์รีไฟต์ทั้งใน ส่วนของอุณหภูมิและเวลา ด้านกระบวนการทอร์รีแฟคชั่น และการหาอัตราการใช้พลังงานจากการใช้ ไมโครเวฟในการทอร์รีแฟคชั่น รายละเอียดของวิธีการดำเนินงานวิจัย แบ่งออกเป็นในส่วนของ การเตรียมวัสดุชีวมวล เครื่องมือวิจัยและวิธีการดำเนินงานวิจัย โดยรายละเอียดดังนี้

### วัสดุและอุปกรณ์

วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัยจะอธิบายถึงวัสดุชีวมวล อุปกรณ์ สำหรับการผลิต เชื้อเพลิงแบบกาก เครื่องผลิตเชื้อเพลิงทอร์รีไฟต์ด้วยคลื่นไมโครเวฟ เครื่องมือวัด อุปกรณ์ทดสอบ การวิเคราะห์โดยประมาณ และการถ่ายภาพโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน รายละเอียดของวัสดุและ อุปกรณ์ แสดงดังต่อไปนี้

#### 1. วัสดุชีวมวล

ชีวมวลที่นำมาทดสอบกระบวนการทอร์รีแฟคชั่นด้วยเทคนิคคลื่นไมโครเวฟ มีทั้งหมด 2 ประเภท ได้แก่ เศษไม้ลำไย และทางใบปาล์ม ดังภาพที่ 15 และภาพที่ 16 เศษไม้ลำไยที่นำมาใช้ใน โครงการหาได้จากการตัดแต่งกิ่งของเกษตรกรในพื้นที่ อำเภอสันทราย จังหวัดเชียงใหม่ และใน ส่วนของทางใบปาล์มได้มาจากการตัดแต่งกิ่งในพื้นที่มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ซึ่งในเบื้องต้นได้นำเอาเศษไม้ลำไย และทางใบปาล์มไปวิเคราะห์ทางเคมี โดยวิธีการประมาณ และแบบแยกธาตุโดยนำไปวิเคราะห์ ซึ่ง พบว่า เศษไม้และทางใบปาล์มมีคุณสมบัติความชื้นอยู่ในช่วง 7.91-8.18% ปริมาณสารระเหยอยู่ใน ช่วง 83.95-85.24% ปริมาณเถ้าอยู่ในช่วง 1.8-4.5% และปริมาณคาร์บอนคงตัวอยู่ในช่วง 7.91- 1.63% ส่วนค่าความร้อนของเศษไม้และทางใบปาล์มจะอยู่ในช่วง 14.74-15.87 MJ/kg ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 6 สำหรับผลการวิเคราะห์ แบบแยกธาตุนั้นพบว่า เศษไม้และทางใบปาล์มมี สัดส่วนของปริมาณคาร์บอนอยู่ในช่วง 43.28-47.31% ปริมาณออกซิเจนอยู่ในช่วง 40.64-41.37% ปริมาณธาตุไนโตรเจนอยู่ในช่วง 0.21-0.68% และมีปริมาณไฮโดรเจนอยู่ในช่วง 5.78-6.01% ดัง แสดงในตารางที่ 7



ภาพที่ 15 เศษไม้ลำไย



ภาพที่ 16 ทางใบปาล์ม

ตารางที่ 8 การวิเคราะห์โดยประมาณ และค่าความร้อนเศษไม้ลำไย และทางใบปาล์ม

พารามอเตอร์	เศษไม้ลำไย	ทางใบปาล์ม
ความชื้น (%ar)	6.34	8.18
สารระเหย (%ar)	83.95	85.24
เถ้า (%ar)	1.8	4.95
คาร์บอนคงตัว (%ar)	7.91	1.63
ค่าความร้อน (MJ/kg)	15.87	14.74

## ตารางที่ 9 การวิเคราะห์แบบขั้นสุดท้าย ของเศษไม้ลำไย และทางใบปาล์ม

พารามอเตอร์	เศษไม้ลำไย	ทางใบปาล์ม
คาร์บอน (%ar)	47.310 ± 0.047	43.287 ± 0.083
ออกซิเจน (%ar)	40.645 ± 0.568	41.375 ± 0.052
ไนโตรเจน (%ar)	0.212 ± 0.005	0.685 ± 0.008
ไฮโดรเจน (%ar)	6.010 ± 0.023	5.781 ± 0.033

## 2. อุปกรณ์สำหรับการผลิตเชื้อเพลิงแบบกาก

### 2.1 เครื่องบดย่อยชีวมวลแบบหยาบ

เครื่องบดย่อยชีวมวลแบบหยาบเป็นเครื่องบดย่อยแบบสำหรับลดขนาดชีวมวลประเภทเศษไม้และทางใบปาล์ม ใช้ใบมีดสับผสมกับการตีชีวมวลให้เป็นชิ้นขนาดเล็กภายในมีใบมีดทั้งหมด 4 ใบ รับกำลังมาจากสายพานแบบร่อนวีโดยมีต้นกำลังมาจากมอเตอร์ขนาด 746 W 220 V ชนิด 1 เฟส ตะแกรงในการ คัดกรองชีวมวลหลังจากการบดมีขนาด 10 mm การป้อนชีวมวลจะป้อนจากทางด้านบน จากนั้นชีวมวลจะผ่านการสับย่อยและไหลผ่านตะแกรงไหลลงสู่ด้านล่าง กำลังการผลิตโดยเฉลี่ยของการสับเศษไม้ อยู่ในช่วง 10 kg/min และทางใบปาล์มอยู่ในช่วง 8 kg/min ดังภาพที่ 17



ภาพที่ 17 เครื่องบดย่อยชีวมวลแบบหยาบและชีวมวลที่บดย่อย

## 2.2 เครื่องย่อยชีวมวลแบบละเอียด

เครื่องบดย่อยชีวมวลแบบละเอียดใช้สำหรับบดย่อยชีวมวลที่มีขนาดเล็กกว่า 3.0 mm ซึ่งชีวมวลที่ผ่านการบดย่อยจะมีขนาดอยู่ในช่วง 0.5-3.0 mm โดยเครื่องนี้นำมาใช้สำหรับบด เศษไม้ ลำไย และทางใบปาล์ม ชุดบดของเครื่องรับกำลังมาจากมอเตอร์ขนาด 3 hp (2.2 kW) แรงดันไฟฟ้า 220 V ใช้สายพานส่งกำลังจากมอเตอร์ให้กับชุดบด ภายในจะมีชุดตีและบดชีวมวลทั้งหมด 4 ชุด พร้อมตะแกรงกรอง ขนาด 3 mm และ 1 mm กำลังการผลิตในการบดย่อยชีวมวลอยู่ในช่วง 5 kg/min ดังภาพที่ 18



ภาพที่ 18 เครื่องบดย่อยชีวมวลแบบละเอียด

## 2.3 ตะแกรงคัดขนาดชีวมวล

เนื่องจากขนาดของชีวมวลที่ใช้ในกระบวนการเทอร์รีแพคชั่นต้องการเป็นชนิดกาก มีขนาดไม่เกิน 3 mm การคัดขนาดจึงจำเป็นต้องใช้ตะแกรงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 mm โดยตะแกรงดังกล่าว จะคัดขนาดของชีวมวลเฉลี่ยได้อยู่ในช่วง 1-3 mm ดังภาพที่ 19 มิติของตะแกรงที่ใช้ที่ขนาดความกว้าง 550 mm ความยาว 700 mm และความสูง 100 mm สามารถร่อนขนาดชีวมวลได้ประมาณ 5 kg



ภาพที่ 19 ตะแกรงคัดขนาดชีวมวล

### 3. เครื่องผลิตเชื้อเพลิงทอร์รีไฟต์ด้วยเทคนิคคลื่นไมโครเวฟ

การทดลองผลิตเชื้อเพลิงทอร์รีไฟต์ด้านกระบวนการทอร์รีแฟคชัน ด้านการใช้ไมโครเวฟมีส่วนประกอบหลัก 3 ส่วน คือ ชุดไมโครเวฟสำหรับการให้ความร้อนในกระบวนการไพโรไลซิส ชุดป้อนไนโตรเจน ชุดไมโครเวฟกระบวนการไพโรไลซิส

ชุดไมโครเวฟสำหรับการให้ความร้อนในกระบวนการไพโรไลซิส ข้อมูลรายละเอียดทางเทคนิคของเครื่องไมโครเวฟ แสดงดังตารางที่ 8 ภาพที่ 20 เป็นชุดควบคุมการทำงานของเครื่องผลิตเชื้อเพลิงทอร์รีไฟต์ด้วยคลื่นไมโครเวฟ ทำหน้าที่ในการตัดต่อวงจรการทำงานเพื่อควบคุมกำลังวัตต์ไมโครเวฟภายในห้องเผาไหม้ ดังภาพที่ 22 ภาพที่ 21 เป็นเทอร์โมคัปเปิลใช้สำหรับวัดอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ แสดงดังภาพที่ 23 นอกจากนี้เครื่องทดสอบกระบวนการทอร์รีแฟคชันด้วยคลื่นไมโครเวฟยังมีชุดป้อนก๊าซไนโตรเจน มีถังแก๊สไนโตรเจน มีเกจวัดความดันของแก๊ส แสดงดังภาพที่ 24 โดยป้อนก๊าซไนโตรเจนเข้าสู่ท่อแก้วจากทางด้านบน และระบายก๊าซออกทางท่อแก้วด้านบนอีกทางด้านของเครื่องผลิตเชื้อเพลิงทอร์รีไฟต์ด้วยคลื่นไมโครเวฟ ซึ่งภาพรวมทั้งหมด และไดอะแกรมของเครื่องผลิตเชื้อเพลิงทอร์รีไฟต์ด้วยคลื่นไมโครเวฟ แสดงดังภาพที่ 25 และ 26

ตารางที่ 10 ข้อมูลรายละเอียดทางเทคนิคของไมโครเวฟ

Microwave/model	SAMSUNG No. ME711K
Maximum power	200 V-50 Hz Power 800 W
Duration time	1-60 min
Electric consumption rate	1150 W
Microwave frequency	2450 MHz
Capacity	20 L



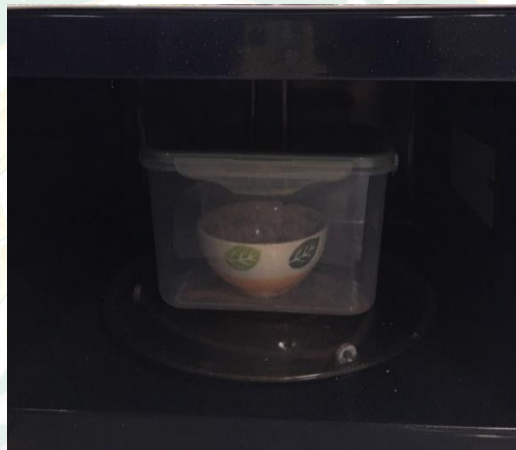
ภาพที่ 20 ชุดควบคุมการทำงานของไมโครเวฟ



ภาพที่ 21 ชุดวัดอุณหภูมิ



ภาพที่ 22 ห้องเผาไหม้



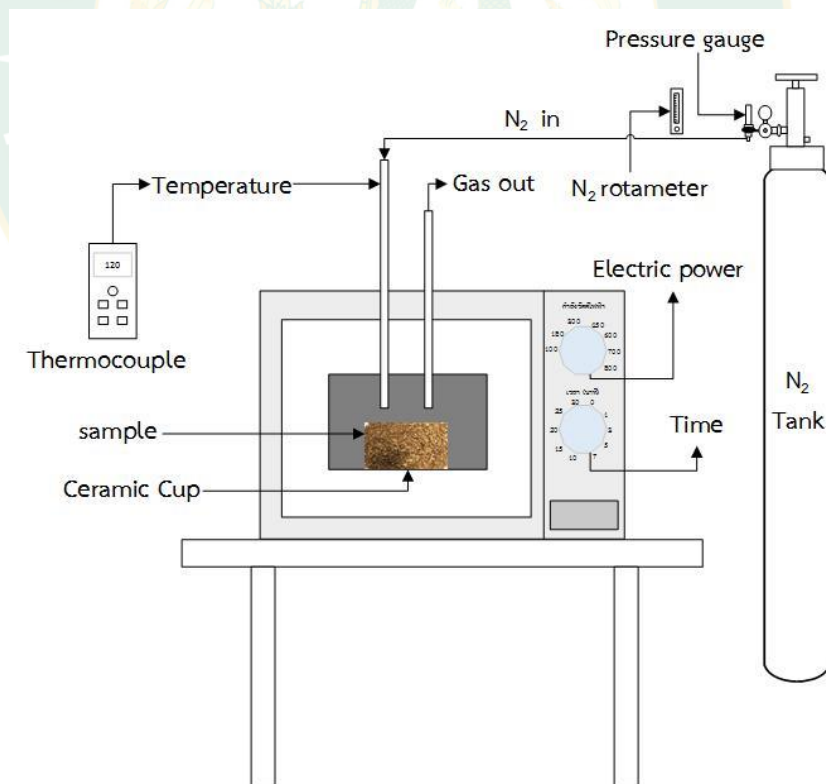
ภาพที่ 23 ห้องใส่เชื้อเพลิง



ภาพที่ 24 เกจปรับแรงดันแก๊สไนโตรเจน



ภาพที่ 25 ชุดผลิตเชื้อเพลิงทอรรีไฟต์ด้วยคลื่นไมโครเวฟ



ภาพที่ 26 แผนภาพเครื่องผลิตเชื้อเพลิงทอรรีไฟต์ด้วยคลื่นไมโครเวฟ

#### 4. อุปกรณ์วิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีของชีวมวล

การวิเคราะห์ทางเคมีของงานวิจัยแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ การวิเคราะห์โดยประมาณและการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ โดยในส่วนของ การวิเคราะห์โดยประมาณมีอุปกรณ์ ดังต่อไปนี้

##### 4.1 เตาเผาอุณหภูมิสูง

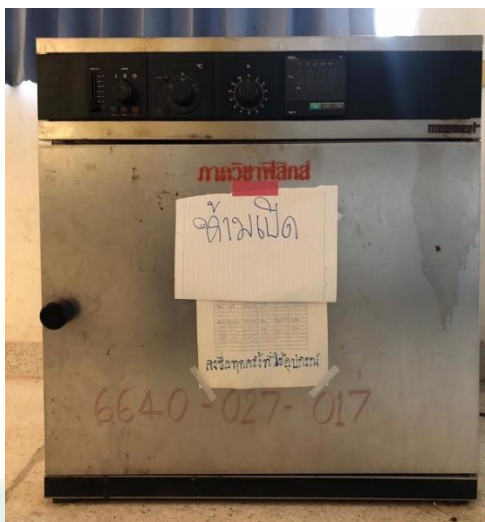
เตาเผาอุณหภูมิสูงเป็นเตาเผาแบบปิด สามารถควบคุมอุณหภูมิได้สูงสุด 1,200 °C ขนาดเตาภายนอกมีความกว้าง 450 mm ความสูง 530 mm และความลึก 500 mm ส่วนขนาดเตาภายในมีความกว้าง 170 mm ความสูง 160 mm และความลึก 500 mm ทั้งสองข้างภายในเตาเผามีขดลวดความร้อนและมีเทอร์โมคัปเปิลตรวจวัดอุณหภูมิติดตั้งอยู่ด้านในสุดของเตาเผา ดังภาพที่ 27



ภาพที่ 27 เตาเผาอุณหภูมิสูง

##### 4.2 ตู้อบลมร้อนควบคุมอุณหภูมิ

ตู้อบลมร้อนควบคุมอุณหภูมิตยี่ห้อ MEMMERT รุ่น UFB500 ทำมาจากเหล็กสแตนเลส ขนาดภายนอกตู้กว้าง 710 mm ลึก 550 mm และสูง 760 mm ส่วนขนาดภายในตู้กว้าง 560 mm ลึก 400 mm และสูง 480 mm มีน้ำหนัก 69 kg และมีปริมาตรทั้งหมด 108 L สามารถควบคุมอุณหภูมิได้สูงสุด 300 °C และมีกำลังไฟฟ้าสูงสุด 2 kW ดังภาพที่ 28



ภาพที่ 28 ตู้อบความชื้น

#### 4.3 โถดูดความชื้น

โถดูดความชื้น (desiccator) ใช้สำหรับดูดความชื้นออกจากสารเคมีต่างๆ ให้เหลือเฉพาะสารเคมี ไม่มี ความชื้นหรือน้ำอยู่ในโมเลกุลของสาร โดยทำงานร่วมกับสารดูดความชื้นที่บรรจุไว้ด้านล่างภายในโถดูดความชื้นหรือเรียกว่าซิลิกาเจล (silica gel) ซึ่งโถดูดความชื้นมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 300 mm ดังภาพที่ 29



ภาพที่ 29 โถดูดความชื้นหรือเดซิเคเตอร์

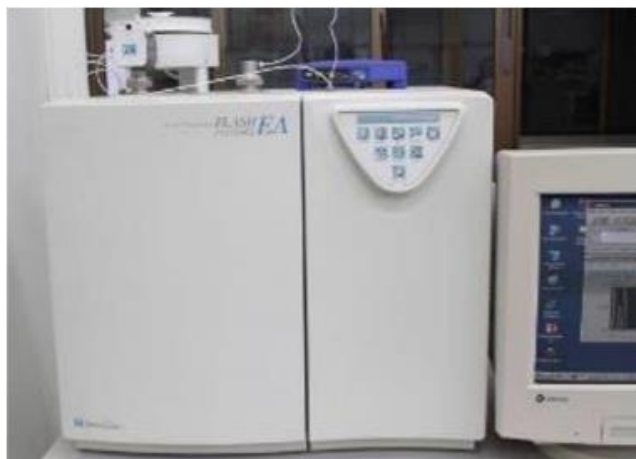
#### 4.4 ถ้วยกระเบื้อง

ถ้วยกระเบื้อง (crucible porcelain) เป็นถ้วยกระเบื้องวิทยาศาสตร์พร้อมฝาปิด รูปทรงสูง (tall shape) ปริมาตร 40 ml ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 40 mm ความสูง 32 mm และทนความร้อนได้ถึง 1000 °C ดังภาพที่ 30



ภาพที่ 30 ถ้วยกระเบื้อง

ในส่วนของการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (ultimate analysis) งานวิจัยนี้ได้วิเคราะห์ขั้นสุดท้ายของตัวอย่างชีวมวลประเภทเศษไม้ลำไยและทางใบปาล์มจากศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ โดยใช้เครื่องวิเคราะห์ปริมาณธาตุยี่ห้อ Thermo Scientific รุ่น Flash 2000 ดังภาพที่ 31 ซึ่งอาศัยหลักการเผาตัวอย่างที่อุณหภูมิสูงให้ กลายเป็นแก๊สผสม โดยตัวอย่างจะต้องมีความเป็นเนื้อเดียวกัน จึงสามารถวิเคราะห์ธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน ซัลเฟอร์ และออกซิเจน ของตัวอย่างชีวมวลได้



ภาพที่ 31 เครื่องวิเคราะห์ปริมาณธาตุ

ที่มา: ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ (2559)

#### 5. การวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของเชื้อเพลิงทอร์รีไฟต์

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope) เป็นกล้องจุลทรรศน์ที่ใช้ electron เป็นแหล่งกำเนิดแสง เป็นเครื่องมือที่ใช้ศึกษาลักษณะสัณฐานของวัสดุในระดับจุลภาค ซึ่งเป็นรายละเอียดที่เล็กมาก ใช้ดูวัตถุเล็กสุดประมาณ  $0.2 \mu\text{m}$  และให้กำลังขยายสูงสุดไม่เกิน 3,000-100,000 เท่า และสามารถแจกแจงรายละเอียดของภาพได้ตั้งแต่ 3-100 nm ดังแสดงที่ 32 อีกทั้งยังสามารถใช้งานร่วมกับเทคนิคการวิเคราะห์อื่น เช่น Energy Dispersive Spectrometry (EDS) และ Wavelength Dispersive Spectrometry (WDS) ที่เป็นข้อมูลทางเคมี จึงทำให้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเป็นที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางในปัจจุบัน (หัสวิภา , 2553)



ภาพที่ 32 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

## 6. เครื่องวิเคราะห์ค่าความร้อนของชีวมวลและเชื้อเพลิงทอร์รีไฟต์

การวิเคราะห์ค่าความร้อนของชีวมวลมีทั้งหมด 2 แบบ คือ การใช้สมการในการวิเคราะห์หาค่าและการใช้เครื่องบอมบ์แคลอริมิเตอร์ (Bomb calorimeter)

การวิเคราะห์หาค่าความร้อนจากเครื่องบอมบ์แคลอริมิเตอร์ เนื่องจากต้องเอาตัวอย่างไปวิเคราะห์ค่าความร้อน ดังนั้นจึงได้ดำเนินการเอาเชื้อเพลิงไปบอมบ์แคลอริมิเตอร์ เพื่อหาค่าความร้อนที่แท้จริงและใช้สมการที่ได้จากการวิเคราะห์โดยประมาณ วิเคราะห์เปรียบเทียบและหาค่าความคลาดเคลื่อนที่ใกล้เคียงกัน โดยค่าความร้อนที่ใช้ได้มาจากการเทียบค่าจากสมการโดยที่ได้ค่าเพิ่มขึ้น 5% ของสมการ ชุดทดสอบค่าความร้อนชีวมวล รุ่น ART.2060/2070 ประกอบด้วย Stainless steel bomb เทอร์โมมิเตอร์ ใช้สำหรับวัดอุณหภูมิในน้ำ อุปกรณ์ที่ใช้ในการกวนน้ำ (stirrer) ขนาด 24 V ดังภาพที่ 33 โดยมีหลักการทำงานคือ การเผาไหม้สารด้วยก๊าซออกซิเจนจะให้ความร้อนออกมา แล้ววัดอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ทำให้สามารถคำนวณค่าพลังงานความร้อนของสารนั้น ๆ ได้ โดยมีจุดเด่น คือ ใช้งานง่าย สะดวก และมีความปลอดภัย

การวิเคราะห์ค่าความร้อนของเศษไม้ลำไยและทางใบปาล์ม สามารถวิเคราะห์ได้ตามมาตรฐาน ASTM D240 D4809 D2382 IP12 โดยใช้เครื่องทดสอบค่าความร้อนชีวมวล รุ่น ART.2060/2070 โดยเริ่มจากการเตรียมชีวมวลก่อนการทดสอบค่าความร้อน โดยการนำไปอัดเป็นเม็ดน้ำหนักอยู่ในช่วง 1 g จากนั้นเม็ดชีวมวลบรรจุลงไปใน Stainless steel bomb ปิดฝา และอัดแก๊สออกซิเจนเข้าไป แล้วนำไป ใส่ลงไปในเครื่อง Bomb calorimeter กดปุ่มเริ่มทำงาน ซึ่งเครื่องนี้สามารถวิเคราะห์ค่าความร้อนได้ทั้งหน่วย MJ/kg และ หน่วย kcal/kg



ภาพที่ 33 เครื่องวิเคราะห์ค่าความร้อนชีวมวล

### เครื่องมือวัดที่ใช้ในงานวิจัย

ในส่วน of เครื่องมือวัดที่ใช้ในงานวิจัยนี้ประกอบด้วย เครื่องชั่งน้ำหนัก มีอยู่ 2 แบบคือแบบธรรมดา และแบบละเอียด เครื่องวัดความชื้น เครื่องวัดอุณหภูมิ ซึ่งรายละเอียดข้อมูลของแต่ละเครื่องวัดแสดงดังต่อไปนี้

#### 1. เครื่องชั่งน้ำหนัก

เครื่องชั่งน้ำหนักระบบอิเล็กทรอนิกส์ เป็นผลิตภัณฑ์ของ CST รุ่น CDR-30 พิกัดกำลัง  $30 \text{ kg} \times 1 \text{ g}$  อุณหภูมิใช้งานที่  $5\text{--}40 \text{ }^{\circ}\text{C}$  ดังภาพที่ 34 ใช้สำหรับชั่งน้ำหนักชีวมวลประเภทเศษไม้ และทางใบปาล์ม เพื่อเตรียมตัวอย่าง และทดสอบกระบวนการทอรรีแฟคชันด้วยคลื่นไมโครเวฟ



ภาพที่ 34 เครื่องชั่งน้ำหนัก

## 2. เครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิทัล 4 ตำแหน่ง

เครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิทัล เป็นผลิตภัณฑ์ของ Ohaus รุ่น PA214 มีทศนิยม 4 ตำแหน่ง พิกัด 210 g ค่าความละเอียด 0.0001 g ส่วนจานชั่งน้ำหนักมีขนาด 9.0 cm ดังภาพที่ 35 ใช้สำหรับชั่งน้ำหนักชีวมวลในการวิเคราะห์โดยประมาณ ซึ่งต้องการความละเอียดสูง



ภาพที่ 35 เครื่องชั่งดิจิทัล Pioneer ทศนิยม 4 ตำแหน่ง

### 3. เครื่องวัดอุณหภูมิแบบอินฟราเรด

เครื่องวัดอุณหภูมิแบบอินฟราเรด เป็นผลิตภัณฑ์ของ CENTER 350 สามารถวัดอุณหภูมิในช่วง  $-50 - 1,000\text{ }^{\circ}\text{C}$  ความละเอียด  $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$  ขนาดเครื่อง  $23 \times 10 \times 5.6\text{ cm}$  ดังภาพที่ 36 ใช้สำหรับวัดอุณหภูมิเครื่องไมโครเวฟ เพื่อศึกษาอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการทอรีไฟต์ด้วยคลื่นไมโครเวฟ



ภาพที่ 36 เครื่องวัดอุณหภูมิแบบอินฟราเรด

#### วิธีการทดสอบกระบวนการทอรีไฟต์ชิ้นด้วยคลื่นไมโครเวฟ

ในการศึกษาครั้งนี้เป็นการทดสอบกระบวนการทอรีไฟต์ชิ้นด้วยคลื่นไมโครเวฟ เพื่อเพิ่มคุณภาพชีวมวลทั้งทางด้านเคมีและทางด้านกายภาพ โดยมีเงื่อนไขและขั้นตอนการทดสอบดังนี้

#### 1. การเตรียมตัวอย่างชีวมวล

การเตรียมชีวมวล เริ่มจากการนำเอาชีวมวลมาลดขนาดด้วยเครื่องบดย่อยแบบหยาบ และนำมาบดอีกครั้งด้วยเครื่องบดย่อยแบบละเอียด จากนั้นนำชีวมวลมาคัดขนาดด้วยตะแกรง ขนาด  $3\text{ mm}$  เพื่อให้ได้ชีวมวลที่มีขนาดสม่ำเสมอ และจัดเก็บชีวมวลไว้ในที่แห้งเตรียมสำหรับการทดสอบกระบวนการทอรีไฟต์ชิ้นด้วยคลื่นไมโครเวฟ

## 2. การทดสอบกระบวนการทอรีรีแพคชั้นด้วยคลื่นไมโครเวฟ

เงื่อนไขการทดสอบกระบวนการทอรีรีแพคชั้นด้วยคลื่นไมโครเวฟของงานวิจัยนี้ ได้แก่

1. เงื่อนไขของตัวอย่างชีวมวลที่ใช้ในการทดสอบกระบวนการทอรีรีแพคชั้นด้วยคลื่นไมโครเวฟ คือ ใช้ชีวมวลประเภทเศษไม้ลำไย และทางใบปาล์ม และมีลักษณะเป็นแบบกาก
2. เงื่อนไขของอุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบกระบวนการทอรีรีแพคชั้นด้วยคลื่นไมโครเวฟ จะใช้กำลังวัตต์ไมโครเวฟในการทดสอบ อยู่ 4 ระดับ ได้แก่ 180 300 450 และ 600 W
3. เงื่อนไขของเวลาที่ใช้ในการทดสอบกระบวนการทอรีรีแพคชั้นด้วยคลื่นไมโครเวฟ จะใช้เวลาทดสอบอยู่ ทั้งหมด 3 เวลา ได้แก่ 10 15 และ 20 min
4. เงื่อนไขการป้อนก๊าซไนโตรเจนเข้าเครื่องทดสอบกระบวนการทอรีรีแพคชั้นด้วยคลื่นไมโครเวฟ มีอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจน 5 L/min

## 3. การวิเคราะห์โดยประมาณ (proximate analysis)

### 3.1 ความชื้น

ปริมาณความชื้นสามารถวิเคราะห์ได้จากมาตรฐาน ASTM 3173-73 โดยเริ่มจากการนำถั่วฝักยาวไปเผาที่อุณหภูมิ 750 °C เป็นระยะเวลา 30 min เพื่อทำความสะอาดถั่วฝักยาว แล้วนำไปเก็บไว้ในโถดูดความชื้น ทิ้งไว้ให้ถั่วฝักยาวเย็น จากนั้นชั่งน้ำหนักตัวอย่างชีวมวลลงในถั่วฝักยาวประมาณ 1 g นำไปเข้าตู้อบที่อุณหภูมิ 103 °C เป็นเวลา 3 h หรือจนกว่าน้ำหนักจะคงที่ หลังจากนั้นนำมาเก็บไว้ในโถดูดความชื้น เพื่อรอให้ถั่วฝักยาวเย็นตัวลง แล้วนำมาชั่งน้ำหนักหลังการทดสอบ (ธนาพล ต้นดีสัตยกุล และคณะ 2558) โดยสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 1

### 3.2 สารระเหย

ปริมาณสารระเหยสามารถวิเคราะห์ได้จากมาตรฐาน ASTM D 5382-98 โดยการนำถั่วฝักยาวไปเผาที่อุณหภูมิ 750 °C เป็นเวลา 30 min แล้วนำไปเก็บไว้ในโถดูดความชื้น เพื่อรอให้ถั่วฝักยาวเย็นตัวลง จากนั้นชั่งน้ำหนักตัวอย่างชีวมวลลงในถั่วฝักยาว 1 g แล้วปิดฝาถั่วฝักยาวและนำไปเผาที่อุณหภูมิ 950 °C เป็นเวลา 7 min หลังจากนั้นนำถั่วฝักยาวที่เผาเสร็จไปเก็บไว้ในโถดูดความชื้น เพื่อรอให้ถั่วฝักยาวเย็นตัวลง แล้วนำไปชั่งน้ำหนักหลังการทดสอบ (ธนาพล ต้นดีสัตยกุล และคณะ 2558) เพื่อนำมาคำนวณหาปริมาณสารระเหยของตัวอย่างชีวมวลจากสมการที่ 2 และ 3

### 3.3 คาร์บอนคงตัว

ปริมาณคาร์บอนคงตัวของตัวอย่างชีวมวลสามารถวิเคราะห์ได้จากการคำนวณปริมาณน้ำหนักของตัวอย่างชีวมวลทั้งหมด (ธนาพล และคณะ, 2558) แล้วลบด้วยปริมาณความชื้น ปริมาณสารระเหย และปริมาณเถ้า ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 4

### 3.4 เถ้า

การวิเคราะห์ปริมาณเถ้าของชีวมวล วิเคราะห์ได้จากมาตรฐาน ASTM D 28866-94 โดยวิธีการเริ่มจากการนำถั่วฝักกระเบื้องไปเผาเพื่อทำความสะอาดที่อุณหภูมิ 750 °C เป็นเวลา 30 min แล้วนำไปเก็บทิ้งไว้ในโถดูดความชื้นเพื่อรอให้เย็นลง จากนั้นชั่งน้ำหนักตัวอย่างชีวมวล 1 g และเปิดฝาดั่วฝัก เพื่อนำไปเผาที่อุณหภูมิ 650 °C เป็นเวลา 3 h เมื่อเผาเสร็จนำถั่วฝักกระเบื้องพร้อมตัวอย่างชีวมวล มาเก็บทิ้งไว้ในโถดูดความชื้น เพื่อรอให้ถั่วฝักเย็นตัวลง จากนั้นนำไปชั่งน้ำหนักตัวอย่างหลักการทดสอบ (ธนาพล และคณะ, 2558) และคำนวณหาปริมาณเถ้าจากสมการที่ 5

### 4. การวิธีการเลือกสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการเทอร์รีแฟคชันด้วยคลื่นไมโครเวฟ

ในการคัดเลือกอุณหภูมิและระยะเวลาที่เหมาะสมของกระบวนการเทอร์รีแฟคชันสำหรับชีวมวลประเภทเศษไม้ลำไยและทางใบปาล์ม สามารถคัดเลือกได้จากการเปรียบเทียบค่าผลผลิตพลังงาน ของแต่ละเงื่อนไขที่ใช้ในกระบวนการเทอร์รีแฟคชันด้วยคลื่นไมโครเวฟ ซึ่งวิธีการดังกล่าวนี้เป็นวิธีการที่ได้รับความนิยมและการยอมรับจากนักวิจัยหลาย ๆ ท่าน (Huang et al., 2012) (Poudel et al., 2015) (Chiou et al., 2015) โดยเริ่มจากการคำนวณหาค่าผลผลิตมวล ดังสมการที่ 10 เพื่อนำมาคำนวณหาค่าผลผลิตพลังงาน ดังสมการที่ 11 หลังจากนั้นนำค่าผลผลิตพลังงานของแต่ละเงื่อนไขอุณหภูมิและเวลามาเปรียบเทียบกัน จะเห็นได้ว่าเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดจะมีค่าผลผลิตพลังงานสูงสุด และค่าความร้อนที่เหมาะสมที่สุดในการเทอร์รีแฟคชัน

### 5. การวิเคราะห์โครงสร้างชีวมวล

หลักการทำงานกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด คือ อิเล็กตรอนปฐมภูมิ (Primary electron) จากแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน (Electron gun) จะถูกเร่งด้วยศักย์ไฟฟ้าสูง (1,000 ถึง 3,000 อิเล็กตรอนโวลต์ หรือมากกว่า) ที่สามารถปรับค่าได้ จากนั้นจึงถูกดึงดูดลงสู่เบื้องล่างโดยแผ่นอาโนด (Anode plate) ภายใต้ภาวะความดันสุญญากาศ และมีชุดคอนเดนเซอร์เลนส์ที่จะปรับลำอิเล็กตรอน (Electron beam) ให้มีขนาดเล็กลงเพื่อเป็นการเพิ่มความเข้มของลำอิเล็กตรอน จากนั้นลำอิเล็กตรอนจะวิ่งลงสู่เบื้องล่างผ่านเลนส์วัตถุ ซึ่งทำหน้าที่ในการปรับลำอิเล็กตรอนปฐมภูมิให้มีจุดโฟกัสบนผิวตัวอย่างพอดี และลำอิเล็กตรอนที่ตกกระทบผิววัตถุ หรือตัวอย่างจะมีขนาดในช่วง 5 ถึง

200 นาโนเมตร โดยมีชุดขดลวดควบคุมการส่องกราด (Scan coil) ของลำอิเล็กตรอนทำหน้าที่ในการควบคุมทิศทางเคลื่อนที่ของลำอิเล็กตรอนบนผิวตัวอย่าง ซึ่งผู้ใช้สามารถกำหนดได้โดยผ่านทางชุดควบคุม (Control unit) ขณะที่ลำอิเล็กตรอนกระทบผิวตัวอย่างจะเกิดอันตรกิริยา (Interaction) ระหว่างอิเล็กตรอนปฐมภูมิกับอะตอมธาตุในวัตถุหรือตัวอย่างและเกิดการถ่ายโอนพลังงานที่ชั้นความลึกจากพื้นผิวที่ระดับต่างๆ ทำให้เกิดการปลดปล่อยสัญญาณอิเล็กตรอน (Electron signal) ชนิดต่างๆ ออกมา ซึ่งใช้ประโยชน์ในการศึกษาลักษณะผิวของตัวอย่างและวิเคราะห์ธาตุที่มีในตัวอย่างได้ตามลักษณะสัญญาณภาพที่ได้จากสัญญาณอิเล็กตรอนชนิดต่างๆ ที่เกิดขึ้น

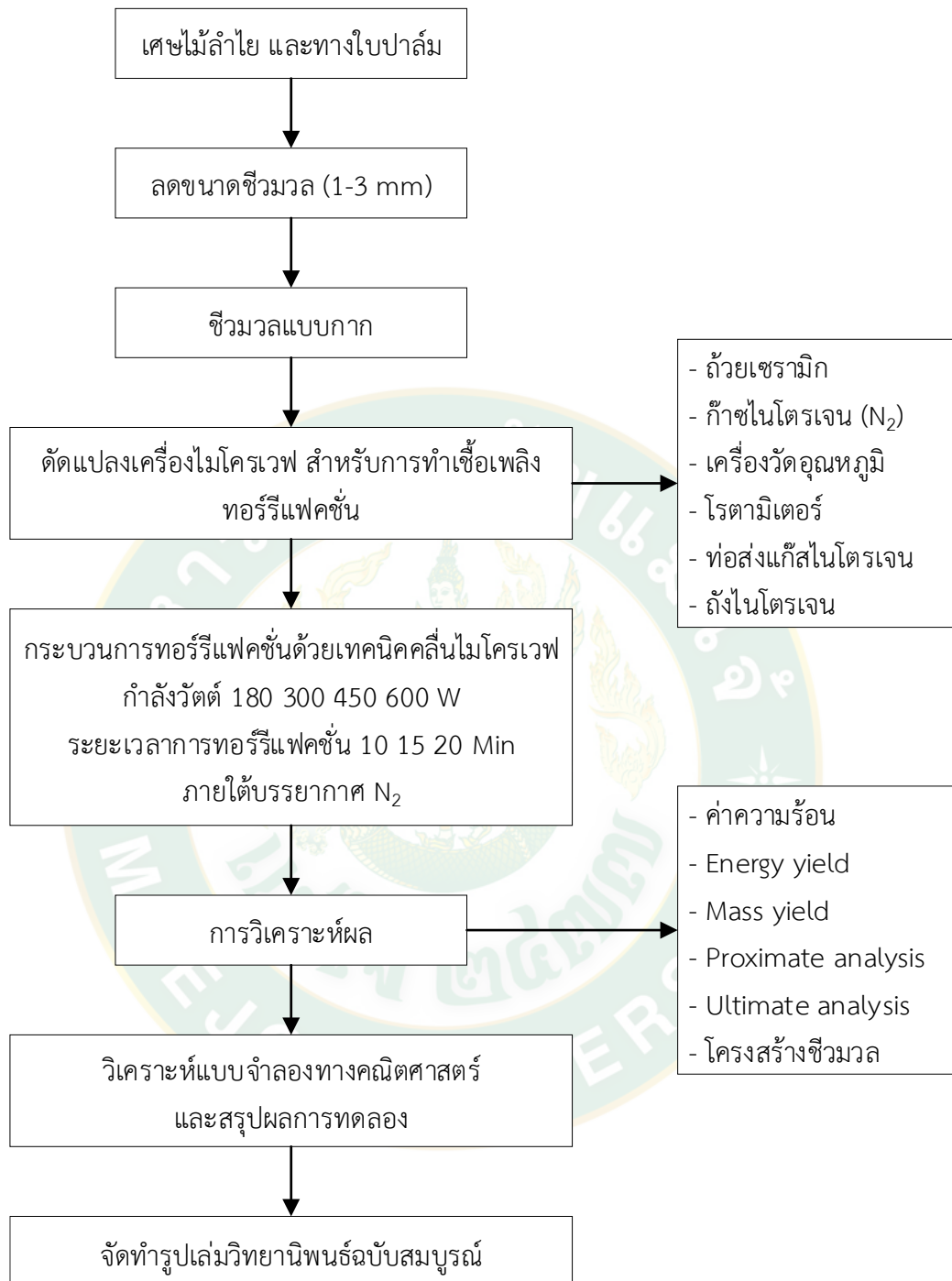
สัญญาณภาพจากอิเล็กตรอนเหล่านี้จะถูกเปลี่ยนมาเป็นสัญญาณภาพปรากฏบนจอรับภาพได้โดยต้องเลือกใช้อุปกรณ์ในการวัดให้เหมาะสมกับสัญญาณแต่ละชนิด โดยทั่วไปสัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิใช้ตัวตรวจวัดชนิดพลาสติกเรืองแสง (Plastic scintillation detector) สัญญาณภาพจากอิเล็กตรอนกระเจิงกลับจะใช้ตัวตรวจวัดที่เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดรอยต่อพีเอ็น (PN junction detector) หรือตัวตรวจวัดชนิดโรบินสัน (Robinson detector) และในสัญญาณภาพจากรังสีเอกซ์จะใช้หัววัดรังสีชนิดสารกึ่งตัวนำประเภทซิลิคอนลิเทียม (lithium drifted silicon, Si(Li)) ทำงานร่วมกับอุปกรณ์ในการวิเคราะห์พลังงานของรังสีเอกซ์เฉพาะตัวซึ่งอุปกรณ์วิเคราะห์นั้นมีทั้งแบบช่องเดี่ยว (Single Channel Analyzer, SCA) และอุปกรณ์วิเคราะห์แบบหลายช่อง (Multi Channel Analyzer, MCA)

โครงสร้างพื้นผิวของชีวมวลสามารถวิเคราะห์ได้ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด โดยงานวิจัยนี้ได้ส่งวิเคราะห์โครงสร้างพื้นผิวตัวอย่างชีวมวลที่สถาบันตรวจสอบคุณภาพและมาตรฐานผลิตภัณฑ์ (IQS) มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ซึ่งวิเคราะห์โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด รุ่น JSM-5410LV โดยใช้ 500  $\mu\text{m}$  ดังภาพที่ 32

### แผนภาพรวมการดำเนินงานวิจัย

#### 1. การศึกษาเงื่อนไขที่เหมาะสมของกระบวนการทอรรีแฟกซ์ด้วยคลื่นไมโครเวฟ

การศึกษาค้นหาเงื่อนไขกระบวนการทอรรีแฟกซ์ด้วยคลื่นไมโครเวฟสำหรับชีวมวลประเภทเศษไม้ลำไยกับทางใบปาล์ม เป็นการศึกษาเพื่อสรุปหาเงื่อนไขของกำลังวัตต์ไมโครเวฟ และระยะเวลาการทอรรีแฟกซ์ที่เหมาะสมที่สุด สำหรับชีวมวลแต่ละประเภท ซึ่งผลสรุปเงื่อนไขที่ได้จะนำไปใช้ในการทดสอบการผลิตเชื้อเพลิงทอรรีไฟต์ด้วยคลื่นไมโครเวฟ โดยรายละเอียดขั้นตอนการศึกษาแสดงดังภาพที่ 37



ภาพที่ 37 แผนภาพขั้นตอนวิธีการดำเนินการวิจัย

## บทที่ 4

### ผลและอภิปรายผล

ในบทนี้เป็นการแสดงผลและการวิจารณ์ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง โดยมีเนื้อหาประกอบด้วย คุณสมบัติทางเคมีและทางกายภาพของชีวมวล ผลกระทบของเวลาทอรรีแฟคชันคุณสมบัติของชีวมวล การประเมินกำลังวัตต์และระยะเวลาทอรรีแฟคชันที่เหมาะสม การวิเคราะห์ค่าความร้อนของ เชื้อเพลิงทอรรีไฟด์ ผลการวิเคราะห์โครงสร้างเชื้อเพลิงทอรรีไฟด์ด้วยคลื่นไมโครเวฟ อัตราการใช้ พลังงานในการผลิตเชื้อเพลิงทอรรีไฟด์ด้วยคลื่นไมโครเวฟ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ค่าความร้อน เชื้อเพลิงทอรรีไฟด์ด้วยคลื่นไมโครเวฟ อัตราการเปลี่ยนแปลงมวลต่ออุณหภูมิของชีวมวล รายละเอียด ผลการทดลองมีดังต่อไปนี้

#### คุณสมบัติพื้นฐานเชื้อเพลิง

##### 1. คุณสมบัติทางเคมีและทางกายภาพของชีวมวล

ด้านการวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีและกายภาพของชีวมวลก่อนเข้าสู่กระบวนการทอรรีแฟคชันได้นำเอาชีวมวลไปวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมี โดยใช้การวิเคราะห์โดยประมาณ (proximate analysis) และการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (ultimate analysis) ส่วนทางกายภาพได้วิเคราะห์ ลักษณะของชีวมวลและความหนาแน่น ผลการศึกษาพบว่าปริมาณความชื้นของเศษไม้ลำไยและทาง ใบปาล์มมีค่าเฉลี่ย 6.34% และ 8.18% ตามลำดับ ดังตารางที่ 11 และ 12 ปริมาณความชื้นชีวมวล ส่งผลต่อคุณสมบัติและคุณภาพของเชื้อเพลิง หากชีวมวลที่มีความชื้นสูงจะส่งผลต่อค่าความร้อน และ ประสิทธิภาพการเผาไหม้ของชีวมวลลดให้ต่ำลง (Wang et al., 2012) โดยทั่วไปความชื้นตั้งต้นของ การนำมาผลิตเชื้อเพลิงส่วนใหญ่จะอยู่ต่ำกว่า 10 % (ดุชฎีพร, 2557) สารระเหย คือส่วนหนึ่งของ ชีวมวลที่ถูกปล่อยออกมาเมื่อได้รับความร้อน ในระหว่างการเผาไหม้ ซึ่งชีวมวลจะถูกย่อยสลายด้วย ความร้อนกลายเป็นแก๊สระเหยและถ่านคงตัว โดยทั่วไปชีวมวลจะมีสารระเหยสูงกว่าร้อยละ 80 ผล การวิเคราะห์ทางเคมีสารระเหยของเศษไม้และทางใบปาล์มมีค่าเฉลี่ย เท่ากับ 83.95% และ 85.24% ตามลำดับ ชีวมวลที่มีปริมาณสารระเหยสูงจะส่งผลต่อระบบการเผาไหม้ ซึ่งก่อให้เกิดคราบน้ำมันดิน ซึ่งการใช้งานในระยะยาวจะเป็นปัญหาต่อระบบการทำงานของอุปกรณ์ และการบำรุงรักษานำไปสู่ การเพิ่มต้นทุนด้านการบำรุงรักษาในที่สุด (ดุชฎีพร, 2557) ในด้านปริมาณคาร์บอนคงตัวของชีวมวล ทั้ง 2 ชนิด มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 7.91% และ 1.63% ตามลำดับ ซึ่งปริมาณคาร์บอนคงตัวที่มีอยู่ในชีวมวล จะส่งผลให้สัดส่วนค่าความร้อนของชีวมวลเพิ่มสูงขึ้น (Parikh et al., 2005) และในด้านของปริมาณ

เถาของเศษไม้และทางใบปาล์ม มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 1.8% และ 4.95% ตามลำดับ ชีวมวลที่มีปริมาณเถาสูงจะส่งผลต่อปริมาณของเสียตกค้างที่หลงเหลือจากการเผาไหม้ ซึ่งท้ายที่สุดจะส่งผลต่อการออกแบบระบบกำจัดเถา และแหล่งเก็บเถา (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2562) ซึ่งหมายถึงต้นทุนการลงทุน ค่าใช้จ่ายในการสร้างระบบที่เพิ่มสูงขึ้น ในส่วนของการวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีใช้วิธีการวิเคราะห์ โดยแยกธาตุ พบว่าชีวมวลประเภทเศษไม้และทางใบปาล์ม มีค่าคาร์บอนอยู่ในช่วง 43.29-47.31% ไฮโดรเจนมีค่าอยู่ในช่วง 5.79-6.01% ไนโตรเจนมีค่าอยู่ในช่วง 0.21-0.69% และออกซิเจนมีค่าอยู่ในช่วง 40.66-41.38% ในส่วนของค่าความร้อนของเศษไม้และทางใบปาล์มมีค่าเฉลี่ย 18.47 MJ/kg และ 17.85 MJ/kg ตามลำดับ ผลการวิเคราะห์ภาพรวมในตารางปริมาณธาตุแต่ละธาตุของเศษไม้ลำไยทั้งหมด และรวมถึงค่าความร้อนสูงกว่าทางใบปาล์มเล็กน้อย ทั้งนี้เกิดจากเศษไม้ลำไยมีปริมาณคาร์บอนคงที่มากกว่าทางใบปาล์มในขณะที่ความหนาแน่นของทางใบปาล์มมีค่าเฉลี่ย 310.15 kg/m<sup>3</sup> และเศษไม้ลำไยมีค่าเฉลี่ย 375.05 kg/m<sup>3</sup> (วิชัย, 2558)

**ตารางที่ 11** การวิเคราะห์โดยประมาณ และค่าความร้อนเศษไม้ลำไย และทางใบปาล์ม

พารามิเตอร์	เศษไม้ลำไย	ทางใบปาล์ม
ความชื้น (%ar)	6.34	8.18
สารระเหย (%ar)	83.95	85.24
เถา (%ar)	1.8	4.95
คาร์บอนคงตัว (%ar)	7.91	1.63
ค่าความร้อน (MJ/kg)	18.47	17.85
ความหนาแน่น (kg/m <sup>3</sup> )	375.05	310.15
ลักษณะสี	น้ำตาลอ่อน	เหลืองอ่อน

**ตารางที่ 12** การวิเคราะห์แบบขั้นสุดท้าย ของเศษไม้ลำไย และทางใบปาล์ม

พารามิเตอร์	เศษไม้ลำไย	ทางใบปาล์ม
คาร์บอน C (%ar)	47.310 ± 0.047	43.287 ± 0.083
ออกซิเจน H (%ar)	40.645 ± 0.568	41.375 ± 0.052
ไนโตรเจน N (%ar)	0.212 ± 0.005	0.685 ± 0.008
ไฮโดรเจน O (%ar)	6.010 ± 0.023	5.781 ± 0.033

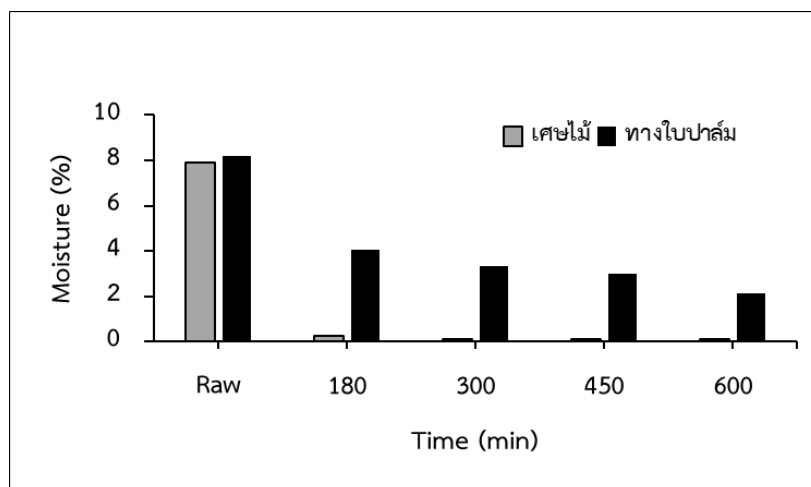
## การศึกษากระบวนการทอรรีแฟคชันด้วยคลื่นไมโครเวฟของชีวมวล

### 1. ผลกระทบของกำลังวัตต์ไมโครเวฟที่มีต่อคุณสมบัติของชีวมวล

ในกระบวนการทอรรีแฟคชันชีวมวล ปัจจัยหลักที่มีผลต่อคุณสมบัติของชีวมวลได้แก่ อุณหภูมิและเวลาทอรรีแฟคชัน (Huang et al., 2019) โดยในส่วนของ การใช้เทคนิคของคลื่นไมโครเวฟกำลังวัตต์ที่มีผลโดยตรงต่อสมบัติของเชื้อเพลิง (Huang et al., 2019) แต่เนื่องด้วยกำลังวัตต์ของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นของไมโครเวฟจะสัมพันธ์กับอุณหภูมิเป็นลักษณะเชิงเส้น (ฤทธิชัย, 2561) โดยอุณหภูมิจะมีผลต่อการเพิ่มสัดส่วนคาร์บอนโดยตรง Wang et al. (2012) และ Huang et al. (2017) ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาการปรับกำลังวัตต์ของไมโครเวฟเทียบกับการวิเคราะห์ผลคุณสมบัติทางเคมีโดยวิธีการโดยประมาณ และ การใช้เครื่องวัดค่าความร้อนเชื้อเพลิง (Bomb) หาค่าความร้อนเชื้อเพลิงทอรรีไฟด์ และ การใช้เครื่องวัดค่าความร้อนกำลังไมโครเวฟที่ศึกษาอยู่ในช่วง 180-600 W และ กำหนดเวลาทอรรีแฟคชันที่ 20 นาที ละเอียดการวิเคราะห์ที่มีดังต่อไปนี้

#### 1.1 ผลกระทบของกำลังวัตต์ไมโครเวฟที่มีต่อความชื้น

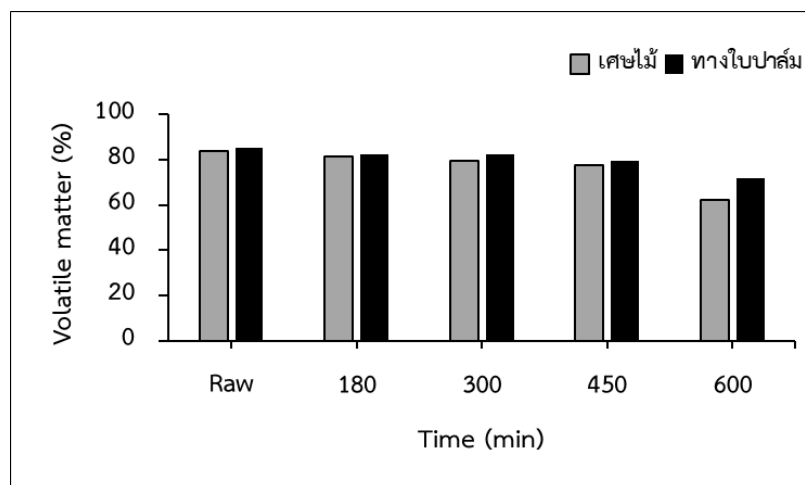
ภาพที่ 38 แสดงผลกระทบของกำลังวัตต์ไมโครเวฟที่มีผลต่อปริมาณความชื้นของชีวมวล ผลการศึกษาพบว่า การเพิ่มกำลังวัตต์ไมโครเวฟของกระบวนการทอรรีแฟคชันส่งผลให้ความชื้นของเศษไม้ลำไยและทางใบปาล์มลดต่ำลง เมื่อพิจารณากำลังวัตต์ไมโครเวฟเท่ากับ 180 W ปริมาณความชื้นของเศษไม้ลำไยและทางใบปาล์ม เท่ากับ 0.27% และ 4.08% ตามลำดับ ซึ่งมีอัตราการลดลงของความชื้นจากความชื้นเริ่มต้นมากที่สุด คิดเป็น 96.65% และ 50.12% ตามลำดับ โดยเมื่อกำลังวัตต์ไมโครเวฟเพิ่มขึ้น ความชื้นลดลงแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย การวิเคราะห์ความชื้นด้วยไมโครเวฟ (Chen et al., 2012) กล่าวว่า การระเหยของความชื้นในชีวมวลจะเริ่มที่อุณหภูมิสูงกว่า 100 °C แต่ยังมีบางส่วนที่ไม่สามารถระเหยได้ ถึงแม้จะเพิ่มอุณหภูมิสูงกว่า 100 °C แล้วก็ตาม ซึ่งจากงานวิจัยของ (Huang et al., 2019) พบว่า ที่กำลังวัตต์ไมโครเวฟ 100W อุณหภูมิของกระบวนการทอรรีแฟคชันมากกว่า 100 °C และเมื่อเทียบกับการทอรรีแฟคชันแบบปกติที่อุณหภูมิ 200 °C มีความชื้นของซังข้าวโพดอยู่ที่ 4.05% (เจนจิรา อุตเรือน, 2561) อย่างไรก็ตามการทอรรีแฟคชันด้วยคลื่นไมโครเวฟกำลังวัตต์ 450 W ระยะเวลา 20 min มีค่าความชื้นใกล้เคียงกัน



ภาพที่ 38 ผลของความชื้นภายใต้กระบวนการทอรีไพเคชันที่กำลังวัตต์ไมโครเวฟ 180-600 W

### 1.2 ผลกระทบของกำลังวัตต์ไมโครเวฟที่มีต่อสารระเหย

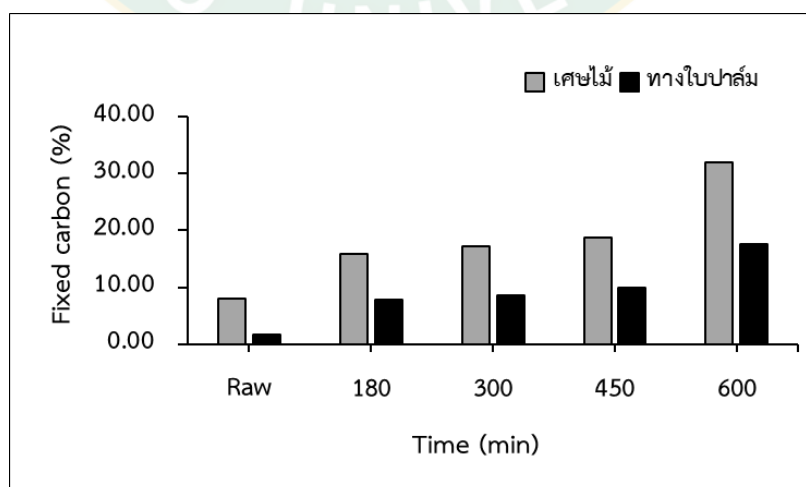
การลดลงของปริมาณสารระเหยเกิดจากการสลายตัวขององค์ประกอบชีวมวลประเภทสารแทรก เฮมิเซลลูโลส ลิกนิน และเซลลูโลส (Shankar Tumuluru et al., 2011) ภาพที่ 39 แสดงปริมาณสารระเหยของชีวมวลเมื่อมีการปรับกำลังวัตต์ไมโครเวฟ พบว่า การเพิ่มกำลังวัตต์ไมโครเวฟ ส่งผลให้ปริมาณสารระเหยของชีวมวลมีแนวโน้มลดลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ (Huang et al., 2017) จากภาพ เมื่อกำลังวัตต์ไมโครเวฟเท่ากับ 180-450 W ปริมาณสารระเหยของชีวมวลทั้งสองชนิดลดลงจากชีวมวลเริ่มต้นเพียงเล็กน้อย เมื่อกำลังวัตต์ไมโครเวฟเท่ากับ 600 W พบว่า ปริมาณสารระเหยของเศษไม้ลำไยและทางใบปาล์มเท่ากับ 62.15% และ 71.73% ตามลำดับ ลดลงจากชีวมวลเริ่มต้นคิดเป็น 25.25% และ 15.86% ตามลำดับ



ภาพที่ 39 ผลของสารระเหยภายใต้กระบวนการทอรรีแฟคชันที่กำลังวัตต์ไมโครเวฟ 180-600 W

### 1.3 ผลกระทบของกำลังวัตต์ไมโครเวฟที่มีต่อคาร์บอนคงตัว

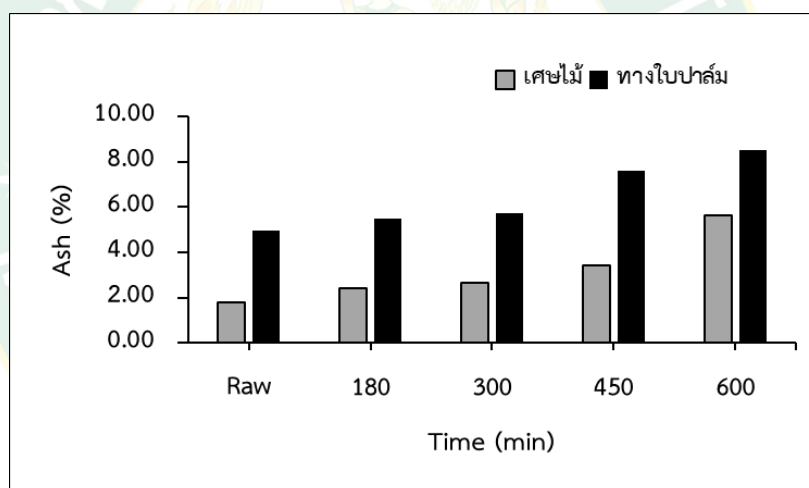
ภาพที่ 40 แสดงผลกระทบของกำลังวัตต์ไมโครเวฟที่มีต่อคาร์บอนคงตัวของชีวมวลทั้งสองชนิด พบว่า การเพิ่มกำลังวัตต์ไมโครเวฟส่งผลให้ปริมาณคาร์บอนคงตัวเพิ่มสูงขึ้น โดยการเพิ่มขึ้นของคาร์บอนคงตัวมีความสัมพันธ์กับปริมาณสารระเหยและความชื้นที่ลดลง (Stelt et al., 2011, Huang et al., 2017) การใช้กำลังวัตต์ไมโครเวฟที่ 600W ทำให้ ปริมาณคาร์บอนคงตัวของเศษไม้ลำไยและทางใบปาล์มที่ค่าสูงสุดเท่ากับ 32.07% และ 17.59% โดยเพิ่มขึ้นจากชีวมวลที่ยังไม่ได้ผ่านกระบวนการทอรรีแฟคชันสูงถึงประมาณ 3 เท่า และ 9 เท่า ตามลำดับ (Satpathy et al., 2014) ค่าคาร์บอนคงตัว เป็นค่าองค์ประกอบส่วนที่เผาไหม้ได้ยาก ปริมาณค่าบอนที่สูงทำให้เชื้อเพลิงชีวมวลมีเวลาในการลุกไหม้ได้นาน (วลัยรัตน์ และคณะ, 2554)



ภาพที่ 40 ปริมาณคาร์บอนคงที่ภายใต้กระบวนการทอรรีแฟคชัน ที่กำลังวัตต์ 180-600 W

#### 1.4 ผลกระทบของกำลังวัตต์ไมโครเวฟที่มีต่อปริมาณเถ้า

ภาพที่ 41 แสดงปริมาณเถ้าของชีวมวลที่ผ่านกระบวนการทอรรีแฟคชันด้วยเทคนิคคลื่นไมโครเวฟที่กำลังวัตต์ 180-600 W พบว่า การเพิ่มกำลังวัตต์ไมโครเวฟส่งผลให้ปริมาณเถ้าของชีวมวลเพิ่มสูงขึ้น โดยทางใบปาล์มมีปริมาณเถ้าเกิดขึ้นสูงกว่าเศษไม้ลำไย เนื่องจากคุณสมบัติเฉพาะด้านของอินทรีย์สารที่มีในเชื้อเพลิง สาเหตุที่ปริมาณเถ้าเพิ่มสูงขึ้นเกิดจากสัดส่วนของความชื้นและสารระเหยบางส่วนได้สลายในระหว่างกระบวนการทอรรีแฟคชันชีวมวล (Borges et al., 2016) โดยเมื่อกำลังวัตต์ไมโครเวฟเท่ากับ 180-450 W ปริมาณเถ้าเพิ่มขึ้นจากปริมาณเถ้าเริ่มต้นเพียงเล็กน้อยที่กำลังวัตต์ไมโครเวฟ 600 W ปริมาณเถ้าของเศษไม้ลำไยและทางใบปาล์มมีค่ามากที่สุดเท่ากับ 5.63% และ 8.53% ตามลำดับ เพิ่มขึ้นจากชีวมวลเริ่มต้นประมาณ 2 เท่า และ 1 เท่า ตามลำดับ การเพิ่มของปริมาณที่กำลังวัตต์ไมโครเวฟสูงเกิดจากการสลายตัวของเฮมิเซลลูโลส เซลลูโลส และลิกนินอย่างรุนแรง จึงเป็นสาเหตุให้สัดส่วนปริมาณเถ้าเพิ่มสูงขึ้นในปริมาณสูง (ธนาพล และคณะ, 2558)



ภาพที่ 41 ผลของเถ้าภายใต้กระบวนการทอรรีแฟคชันที่กำลังวัตต์ไมโครเวฟ 180-600 W

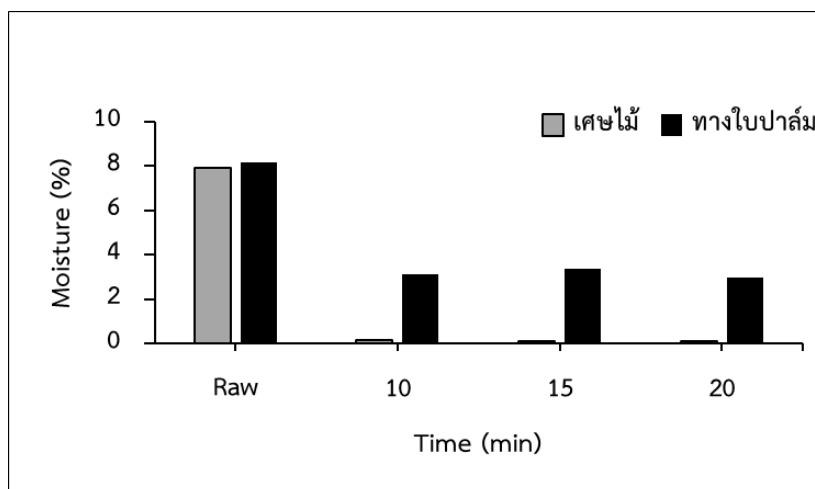
## 2. ผลกระทบของเวลาทอรรีแฟคชันคุณสมบัติของชีวมวล

ช่วงระยะเวลาของกระบวนการทอรรีแฟคชัน เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อคุณสมบัติของชีวมวลอันประกอบด้วย ความชื้น สารระเหย คาร์บอนคงตัว และเถ้า การใช้เวลาทอรรีแฟคชันที่

สูงขึ้นจะส่งผลให้มีการใช้พลังงานในการป้อนความร้อนเข้าสู่กระบวนการทอรีรีแฟคชั่นเพิ่มขึ้น ซึ่งหมายถึงค่าใช้จ่ายต่อหน่วยการผลิตเชื้อเพลิงทอรีรีไฟด์ที่เพิ่มขึ้น ผลการศึกษานำเสนอผลกระทบของเวลาในการทดสอบนี้ได้คัดเลือกผลที่กำลังวัตต์ไมโครเวฟเท่ากับ 450 W มาศึกษาโดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

## 2.1 ผลกระทบของเวลาทอรีรีแฟคชั่นที่มีต่อความชื้น

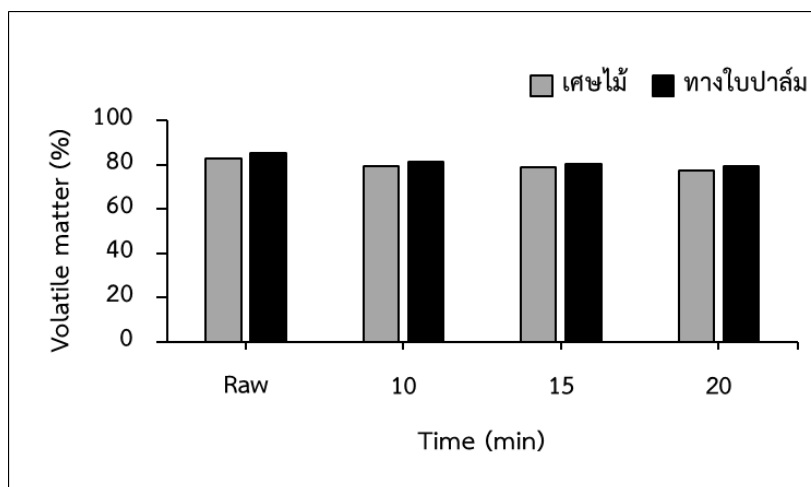
ภาพที่ 42 แสดงปริมาณความชื้นของชีวมวลประเภทเศษไม้ลำไยและทางใบปาล์มที่ผ่านกระบวนการทอรีรีแฟคชั่นด้วยเทคนิคคลื่นไมโครเวฟที่กำลังวัตต์ 450 W ที่ระยะเวลาการทอรีรีแฟคชั่น 10 15 และ 20 min เมื่อพิจารณาระยะเวลาทอรีรีแฟคชั่นเท่ากับ 10 min พบว่า ปริมาณความชื้นของเศษไม้ลำไยและทางใบปาล์มเท่ากับ 0.16% และ 3.15% ตามลำดับ ซึ่งลดลงจากปริมาณความชื้นของชีวมวลเริ่มต้นมากถึง 7.91% และ 8.18% ตามลำดับ เมื่อเวลาทอรีรีแฟคชั่นเพิ่มขึ้นเป็น 15 และ 20 min พบว่า ปริมาณความชื้นลดลงเพียงเล็กน้อย โดยอัตราการลดลงของความชื้น ณ เวลาทอรีรีแฟคชั่น 10 15 และ 20 min สำหรับเศษไม้ลำไยมีค่าเท่ากับ 0.16%, 0.13% และ 0.09% และสำหรับทางใบปาล์มมีค่าเท่ากับ 3.15%, 3.35% และ 2.98% ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มระยะเวลาทอรีรีแฟคชั่นส่งผลให้อัตราการลดลงของความชื้นมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากการให้ความร้อนในกระบวนการทอรีรีแฟคชั่นแก่ชีวมวลในช่วงแรกจะถูกใช้ไปในการระเหยความชื้นเท่านั้น ซึ่งขั้นของการระเหยจะเกิดขึ้นที่ผิวชีวมวล เมื่อปริมาณความชื้นที่ผิวหน้าชีวมวลแห้งลง และความชื้นภายในเนื้อวัตถุดิบเริ่มลดลง ความชื้นอิสระภายในตัววัตถุดิบจะซึมขึ้นมาทดแทนให้ทันกับอัตราเร็วในการระเหยที่ผิวหน้าชั้นของการระเหยจะค่อยๆ เลื่อนลงลึกเข้าไปในเนื้อวัตถุดิบ อุณหภูมิของวัตถุดิบจะเริ่มเข้าใกล้อุณหภูมิของห้องเผาไหม้จากบริเวณพื้นผิว นอกจากนี้ความร้อนส่วนหนึ่งยังต้องใช้ในการให้ความร้อนแก่ชีวมวลเอง ดังนั้นอัตราเร็วการลดลงของความชื้นจึงค่อยๆ ลดลงตามเวลาที่เพิ่มขึ้น (กชกร, 2540)



ภาพที่ 42 แสดงปริมาณความชื้นของเวลาทอรีแฟคชั่นช่วง 10-20 min

## 2.2 ผลกระทบของเวลาทอรีแฟคชั่นที่มีต่อสารระเหย

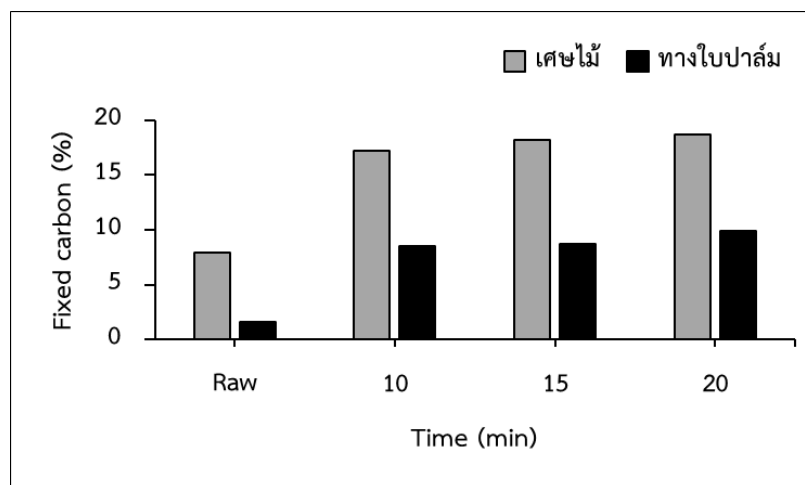
จากภาพที่ 43 แสดงผลกระทบของระยะเวลาทอรีแฟคชั่นที่มีต่อปริมาณสารระเหยของชีวมวลประเภทที่กำล้งวัตต์ไมโครเวฟคงที่เท่ากับ 450 W โดยพบว่า สารระเหยมีปริมาณลดลงไม่แตกต่างกัน เมื่อระยะเวลาทอรีแฟคชั่นเพิ่มขึ้น โดยมีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ (Chiou et al., 2014) พบว่า ที่ระยะเวลาทอรีแฟคชั่น 10 15 และ 20 min ปริมาณสารระเหยของเศษไม้ลำไยมีค่าเท่ากับ 79.33% 78.69% และ 77.38% ตามลำดับ ลดลงสูงสุด 7.83% จากชีวมวลเริ่มต้น ในขณะที่กรณีของทางใบปาล์มมีค่าเท่ากับ 81.21% 80.46% และ 79.57% ลดลงสูงสุด 6.44% จากชีวมวลเริ่มต้น การลดลงของปริมาณสารระเหยเกิดจากการสลายตัวของสารแทรก เหมิเซลลูโลส และ เซลลูโลสที่มีอยู่ในชีวมวลแต่ละชนิด (Zhao Xiqiang et al., 2014)



ภาพที่ 43 แสดงปริมาณสารระเหยของเวลาทอรรีแฟคชันช่วง 10-20 min

### 2.3 ผลกระทบของเวลาทอรรีแฟคชันที่มีต่อคาร์บอนคงตัว

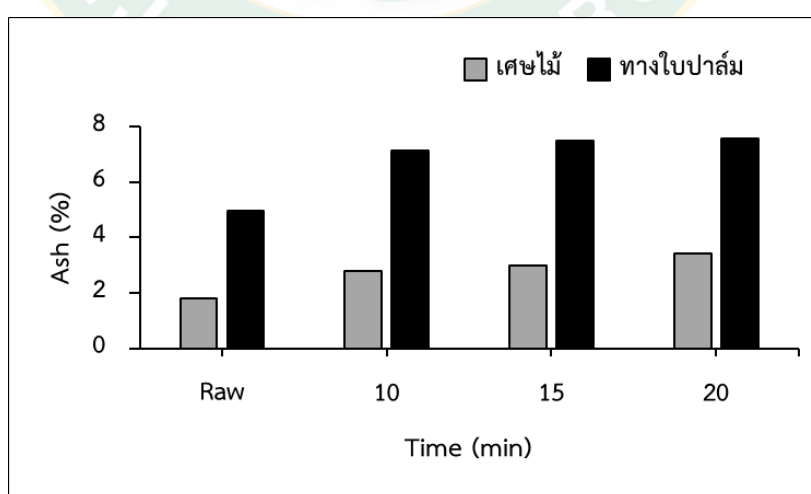
ภาพที่ 44 แสดงผลกระทบของระยะเวลาทอรรีแฟคชันที่มีผลต่อปริมาณคาร์บอนคงตัว ผลการศึกษาพบว่า การเพิ่มระยะเวลาของกระบวนการทอรรีแฟคชันด้วยเทคนิคคลื่นไมโครเวฟ ส่งผลให้ปริมาณคาร์บอนคงตัวของชีวมวลเพิ่มขึ้น (Wannapeera et al., 2011) โดยการใช้เวลาทอรรีแฟคชันที่ 20 min ให้ปริมาณคาร์บอนคงตัวสูงสุดเท่ากับ 18.71% และ 9.86% ในกรณีของเศษไม้ลำไยทางใบปาล์ม ตามลำดับ อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุตั้งต้น พบว่าที่ระยะเวลา 20 min ให้ปริมาณค่าคาร์บอนคงตัว เพิ่มขึ้น เท่ากับ 57.72% และ 83.47% เมื่อใช้เศษไม้ลำไยและทางใบปาล์มตามลำดับ ในด้านของการเปรียบเทียบเวลา ชีวมวลแต่ละชนิดมีอัตราการเพิ่มคาร์บอนค่อนข้างต่ำ มีความแตกต่างกันไม่เกิน 5% อย่างไรก็ตาม เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลของกำลังวัตต์ ที่มีต่อปริมาณค่าคาร์บอนคงตัว ผลของระยะเวลาทอรรีแฟคชัน ส่งผลกระทบทำให้เกิดปริมาณคาร์บอนต่ำ เมื่อเทียบกับการเพิ่มกำลังวัตต์ไมโครเวฟ (Chen Yingquan et al., 2014)



ภาพที่ 44 แสดงปริมาณคาร์บอนคงตัวของเวลาทอรรีแฟคชันช่วง 10-20 min

#### 2.4 ผลกระทบของระยะเวลาทอรรีแฟคชันที่มีต่อเถ้า

จากภาพที่ 45 แสดงผลกระทบของระยะเวลาทอรรีแฟคชันที่มีต่อปริมาณเถ้าของชีวมวล จากผลการทดสอบ พบว่า เมื่อระยะเวลาทอรรีแฟคชันเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ปริมาณเถ้าสูงขึ้น แต่อย่างไรก็ตามเมื่อวิเคราะห์ในด้านของการปรับเวลาการเพิ่มขึ้นถือว่าการเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย (ธนาพล ตันติ สัตยกุล, 2558) นั่นคือ ที่ระยะเวลาทอรรีแฟคชัน 10 15 และ 20 min ปริมาณเถ้าของเศษไม้ลำไย เท่ากับ 2.80%, 3.00% และ 3.43% ตามลำดับ เพิ่มขึ้นจากชีวมวลตั้งต้นกว่า 2.5 เท่า สำหรับ ปริมาณเถ้าของทางใบปาล์มมีค่าเท่ากับ 7.12% 7.49% และ 7.59% ตามลำดับ ซึ่งเพิ่มขึ้นจากชีวมวลตั้งต้นกว่า 90.55%



ภาพที่ 45 แสดงปริมาณเถ้าของเวลาทอรรีแฟคชันช่วง 10-20 min

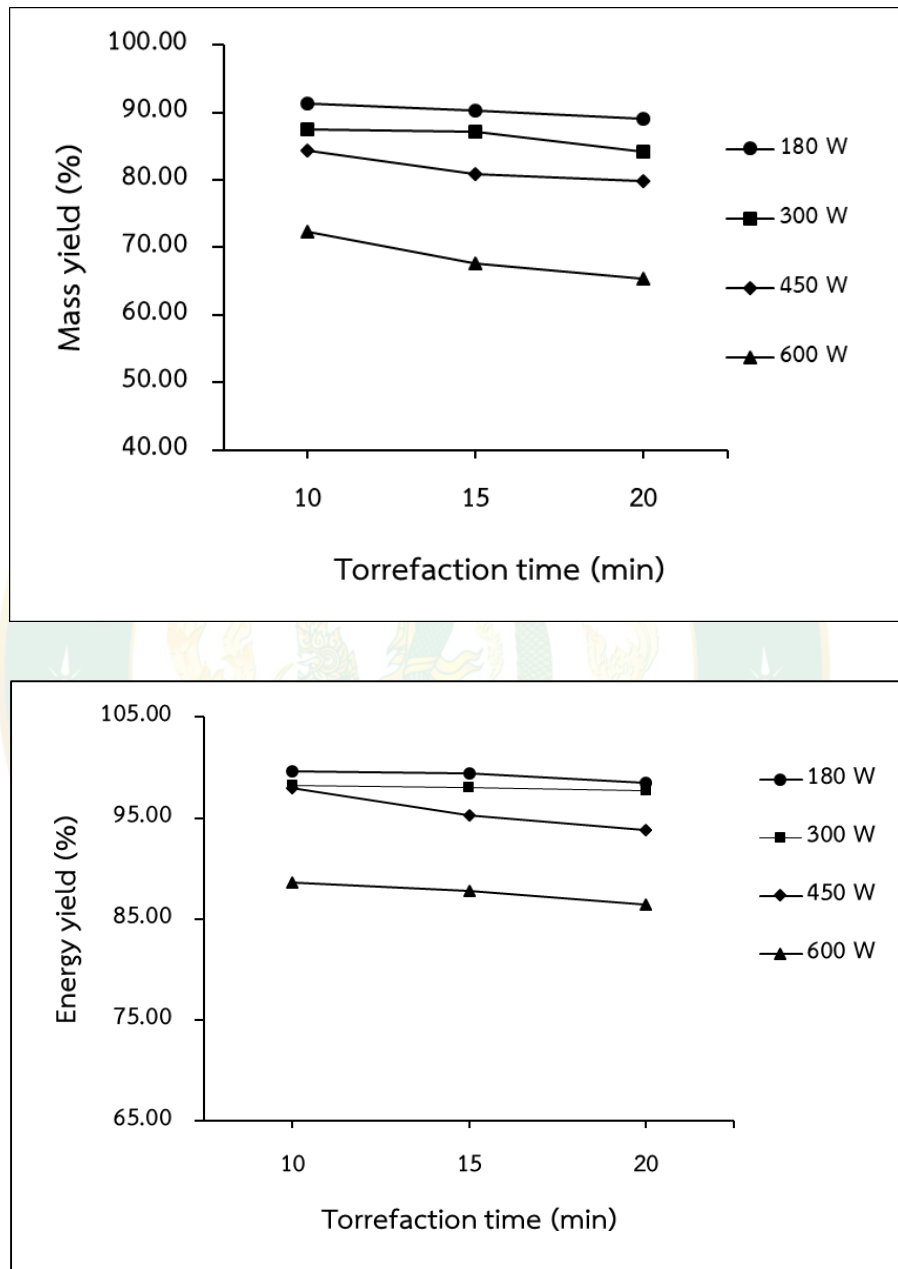
### 3. การประเมินกำลังวัตต์ไมโครเวฟและระยะเวลาทอรรีแฟคชั่นที่เหมาะสม

การวิเคราะห์ด้านการใช้ผลผลิตมวลที่ได้และพลังงานที่ได้เป็นพื้นฐานการคัดเลือกชีวมวลที่ได้รับการยอมรับจากกลุ่มงานวิจัยด้านชีวมวล (Chiou et al., 2014) โคนค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ทั้งสองจะช่วยให้สามารถหาจุดที่เหมาะสมสำหรับการผลิตเชื้อเพลิงทอรรีไฟต์ได้โดยคำนึงถึงผลพลังงานที่ป้อนเข้าต่ำสุด และการให้ได้มาซึ่งพลังงานสูงสุดของเชื้อเพลิงทอรรีไฟต์เป็นปัจจัยหลักของการนำไปใช้งานในภาคอุตสาหกรรม (ทศพร และคณะ, 2561) ภาพที่ 46 และ 47 แสดงร้อยละของมวล (mass yield) และร้อยละของพลังงาน (energy yield) ของเศษไม้ลำไยและทางใบปาล์มหลังผ่านกระบวนการทอรรีแฟคชั่นด้วยเทคนิคคลื่นไมโครเวฟ ภายใต้การปรับกำลังวัตต์และเวลาทอรรีแฟคชั่นพบว่า การเพิ่มกำลังวัตต์ไมโครเวฟในการทอรรีแฟคชั่นส่งผลให้ผลผลิตมวลและพลังงานมีแนวโน้มลดลง ทั้งนี้ เนื่องจากเกิดการสลายตัวของเฮมิเซลลูโลส เซลลูโลสหรือลิกนินบางส่วน ตลอดจนสารแทรกที่อยู่ในชีวมวล (Chiou et al., 2014) จึงเป็นสาเหตุทำให้มวลของชีวมวลลดลง เมื่อมวลลดลงก็จะส่งผลไปยังค่าพลังงานที่ผลิตได้ต่อหน่วยของเชื้อเพลิงทอรรีไฟต์ที่ผ่านกระบวนการลดลง ในส่วนผลกระทบของระยะเวลาทอรรีแฟคชั่น พบว่า การเพิ่มระยะเวลาทอรรีแฟคชั่นนั้นส่งผลให้ผลผลิตมวลและพลังงานมีแนวโน้มลดลง การใช้ระยะเวลาทอรรีแฟคชั่น เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ระยะเวลาการเกิดการสลายตัวขององค์ประกอบของชีวมวลเพิ่มสูงขึ้น ด้านการเปรียบเทียบกำลังวัตต์กับเวลาทอรรีแฟคชั่น พบว่า ตัวแปรด้านกำลังวัตต์ไมโครเวฟจะส่งผลกระทบต่อผลผลิตมวล และพลังงานมากกว่าเวลา (Poudel et al., 2015)

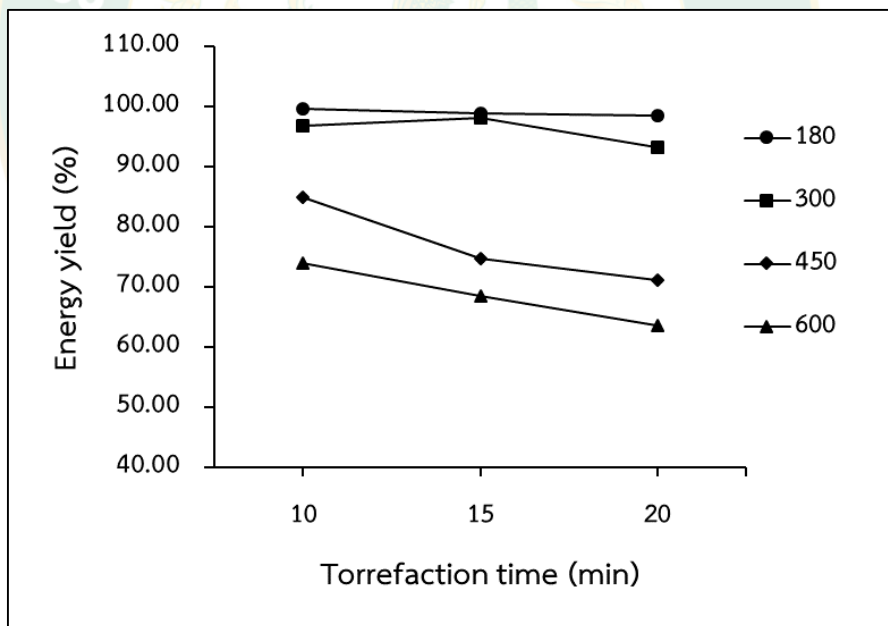
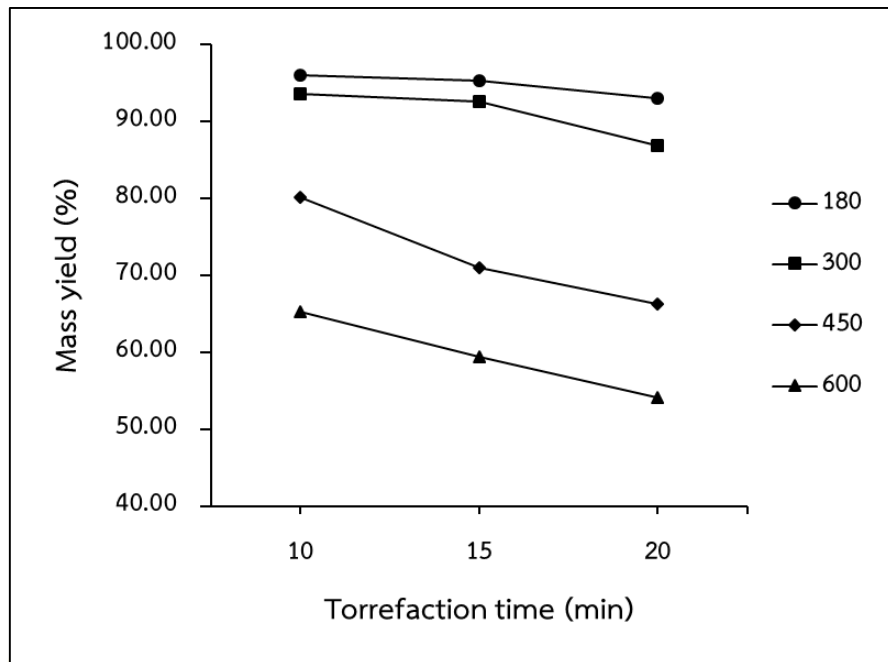
จากข้อมูลดังภาพที่ 46 และ 47 การใช้กำลังไมโครเวฟที่ 180 W และระยะเวลาทอรรีแฟคชั่นด้วยคลื่นไมโครเวฟ 10 min ใช้ปริมาณผลผลิตมวลและพลังงานสูงสุด ผลที่เกิดขึ้นกับผลผลิตมวล การใช้กำลังไมโครเวฟที่สูงจะส่งผลกระทบต่อการลดของมวลค่อนข้างชัดเจน การลดลงของมวลที่สูงเกินไปอาจส่งผลเสียในด้านเศรษฐศาสตร์ โดยเฉพาะต้นทุนการผลิตที่เพิ่มสูงขึ้น (ทศพร และคณะ, 2561) ส่วนทางด้านผลผลิตทางพลังงานการใช้กำลังวัตต์ไมโครเวฟ 180 W และระยะเวลา 10 min ผลผลิตพลังงานสูงสุดและถัดมาเป็นการใช้กำลังไมโครเวฟ 300 W ผลผลิตพลังงานหลักได้ในภาพรวมจะส่งผลทางเศรษฐศาสตร์คล้ายกับผลกระทบที่เกิดจากผลผลิตมวล

อย่างไรก็ตามในการนำไปใช้ในงานอุตสาหกรรมที่แท้จริงจะเพิ่มขึ้นของพลังงานเพียงเล็กน้อยอาจจะส่งผลกระทบต่อการใช้งาน เป็นการนำไปผสมกับถ่านหินในระบบผลิตไฟฟ้าอาจส่งผลให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้ลดลง ดังนั้นการนำไปใช้อาจจะต้องทราบค่าความร้อนที่เหมาะสมอีกทางในการเลือกไปใช้งาน (ทศพร และคณะ, 2561) ผลผลิตมวลและพลังงานที่ได้ของเศษไม้มีค่าเท่ากับ 91.31% และ 99.63% ตามลำดับ ส่วนทางใบปาล์มมีค่าเท่ากับ 96.03% และ 99.65% ตามลำดับ อย่างไรก็ตามเมื่อทดลองเปรียบเทียบกับคุณสมบัติของเชื้อเพลิงกับการทอรรีแฟคชั่นด้วยความร้อน

พบว่า การใช้กำลังไมโครเวฟที่ 450 W ที่ระยะเวลา 20 min มีค่าพลังงานความร้อน และผลผลิตมวลใกล้เคียงกัน การทดสอบของ (เจนจิรา, 2561) ในสภาวะ 200 °C และเวลาทอรรีแฟคชั่นที่ 40 min



ภาพที่ 46 ปริมาณมวลและพลังงานที่ได้ของเชื้อเพลิงทอรรีไฟต์จากเศษไม้ลำไย

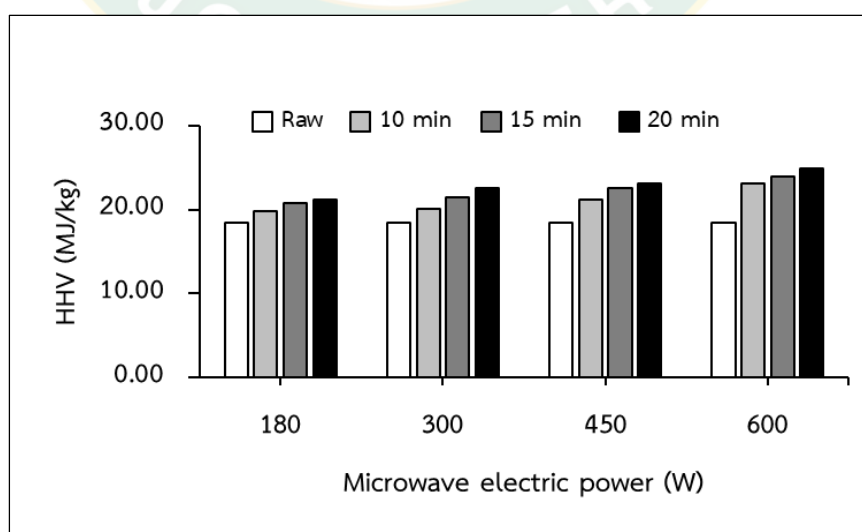


ภาพที่ 47 ปริมาณมวลและพลังงานที่ได้ของเชื้อเพลิงทอร์รีไฟด์จากทางใบปาล์ม

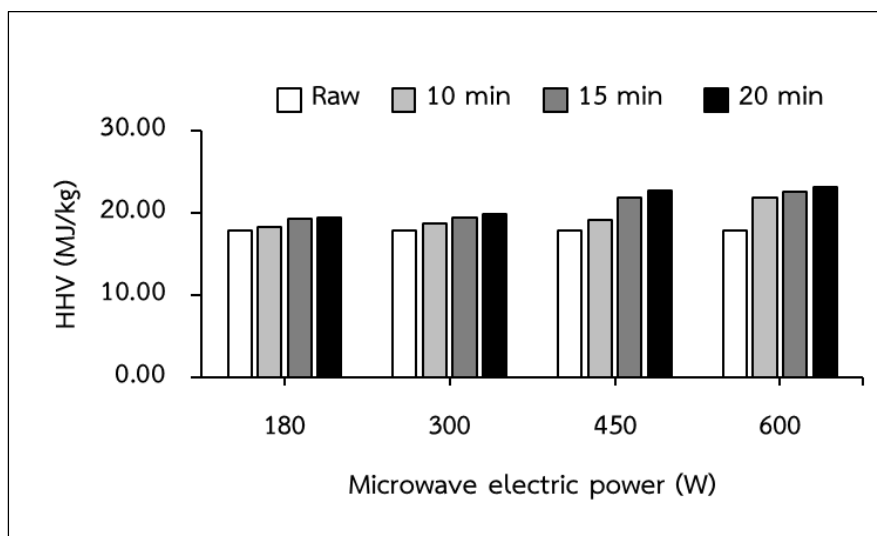
#### 4. การวิเคราะห์ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงทอรรีไฟต์

คุณสมบัติค่าความร้อนเป็นตัวแปรที่จำเป็นต่อการเอาเชื้อเพลิงทอรรีไฟต์ไปใช้งาน การใช้เชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนต่ำเกินไปอาจไม่เกิดความแตกต่างกับการใช้ชีวมวลปกติแต่ในกรณีของการนำชีวมวลไปผสมรวมกับการใช้เชื้อเพลิงประเภทถ่านหิน เชื้อเพลิงเหล่านี้จะส่งผลต่อประสิทธิภาพการเผาไหม้ โดยรวมของระบบหรือเป็นสาเหตุให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้ลดลง (Yingquan et al., 2014) ภาพที่ 48 และ 49 เป็นการวิเคราะห์ ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงทอรรีไฟต์ ภายใต้กำลังวัตต์ที่ 180-600 W และระยะเวลาในการทอรรีไฟต์ที่ 10-20 min ของเศษไม้ลำไย และทางใบปาล์ม พบว่าในส่วนของเศษไม้ลำไย การใช้กำลังวัตต์ไมโครเวฟที่สูงสุดให้ค่าความร้อนเชื้อเพลิงทอรรีไฟต์สูงสุดโดยระยะเวลาทอรรีไฟต์สูงสุดให้ค่าความร้อนสูงสุดเช่นกัน การใช้เศษไม้ลำไยให้ค่าความร้อนสูงสุด 24.87 MJ/kg ในขณะที่การใช้กำลังวัตต์ 180 W ที่เวลา 10 min ให้ค่าความร้อนสูงสุด 19.87 MJ/kg ในส่วนของทางใบปาล์มมีลักษณะสอดคล้องกับเศษไม้ลำไย แต่ในภาพรวมของค่าความร้อนที่ได้ต่ำกว่าเศษไม้ลำไย เฉลี่ยร้อยละ 20.10 โดยที่การใช้กำลังวัตต์ไมโครเวฟและระยะเวลาทอรรีไฟต์สูงสุดให้ค่าความร้อน 22.87 MJ/kg ในขณะที่การใช้กำลังวัตต์และระยะเวลาต่ำสุดให้ค่าความร้อน 18.31 MJ/kg ซึ่งค่าความร้อนสองค่าแตกต่างกับวัสดุทางใบปาล์มตั้งต้นเฉลี่ยร้อยละ 19.93

จากข้อมูลเบื้องต้นการนำเอาค่าความร้อนต่ำสุดไปใช้ผสมกับถ่านหินที่ยอมรับได้พบว่าต้องใช้ค่าความร้อนเฉลี่ยประมาณ 20 ขึ้นไป ดังนั้นในการเลือกใช้ชีวมวลจากกระบวนการนี้เพื่อไปสนับสนุนการใช้ร่วมกับถ่านหินอาจต้องใช้กำลังวัตต์ไมโครเวฟที่มากกว่า 450 W และอาจต้องใช้เวลามากกว่าเป็นระยะเวลา 20 min (Yingquan et al., 2014)



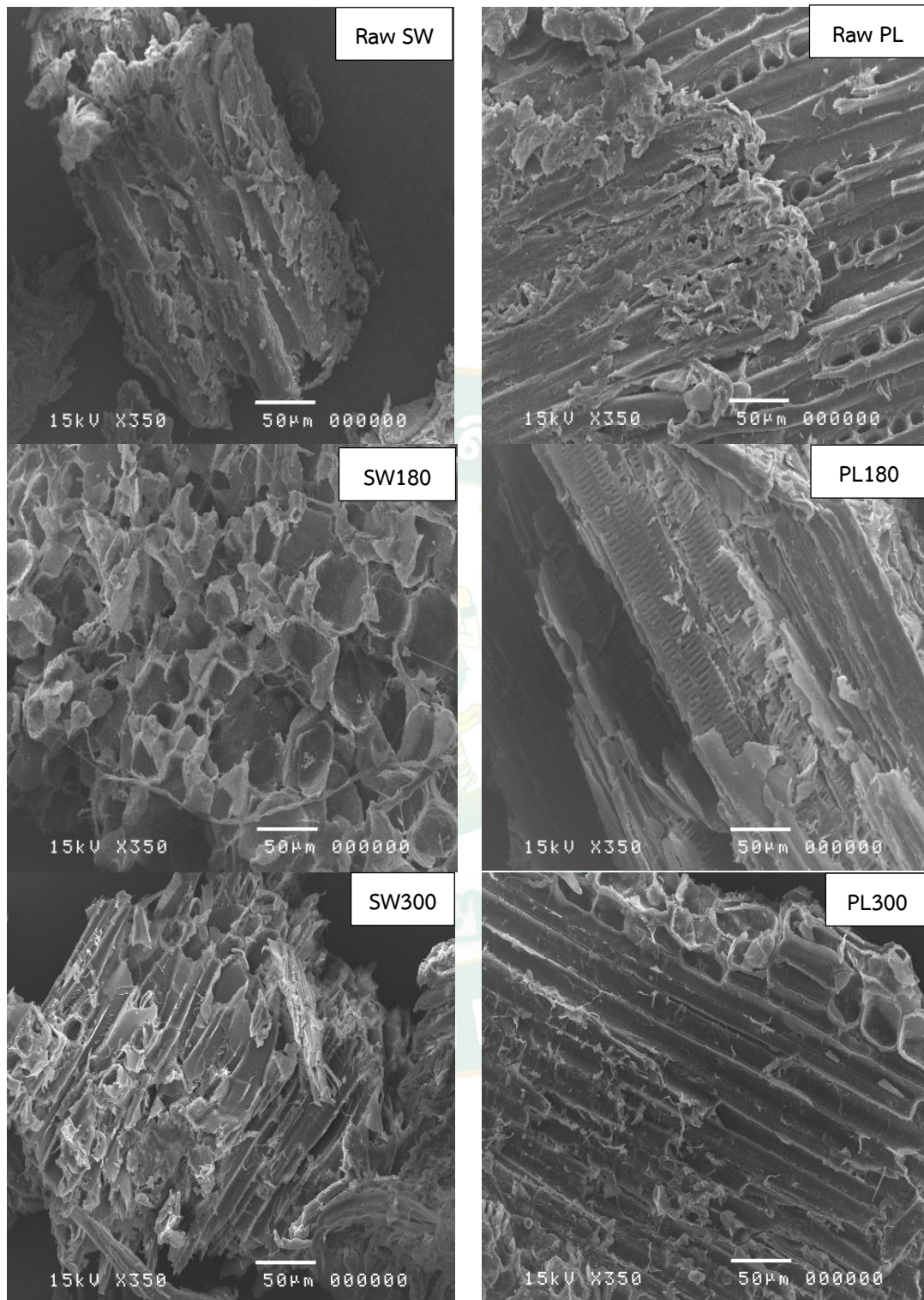
ภาพที่ 48 ค่าความร้อนของชีวมวลประเภทเศษไม้ลำไย

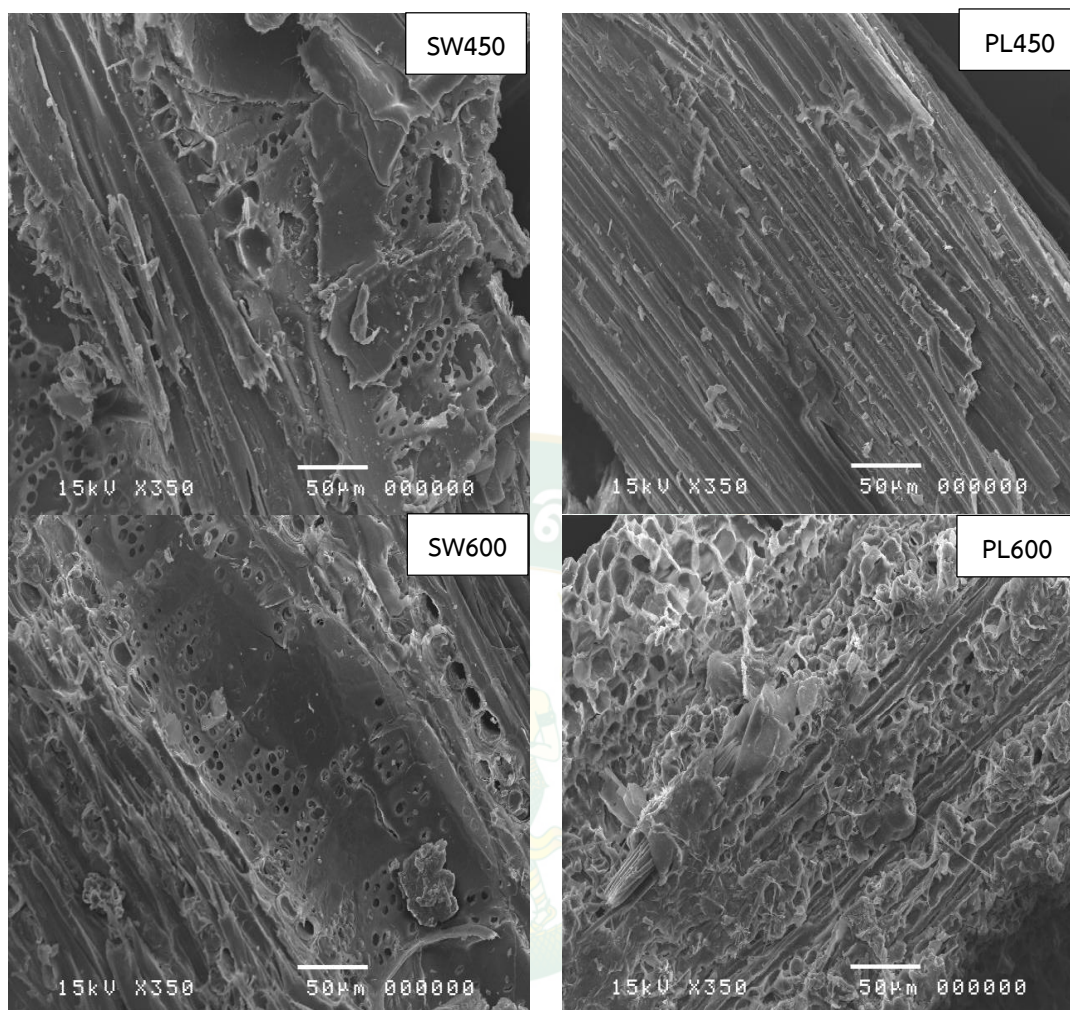


ภาพที่ 49 ค่าความร้อนของชีวมวลประเภททางใบปาล์ม

#### 5. ผลการวิเคราะห์โครงสร้างเชื้อเพลิงทอรรีไฟต์ด้วยคลื่นไมโครเวฟ

จากภาพที่ 50 การวิเคราะห์และเปรียบเทียบโครงสร้างเชื้อเพลิงทอรรีไฟต์จากเศษไม้ลำไย และทางใบปาล์มได้คัดเลือกเงื่อนไขกำลังวัตต์ไมโครเวฟที่กำลังวัตต์ 180-600 W ภายใต้ระยะเวลาทอรรีไฟต์ด้วยคลื่นไมโครเวฟที่ 20 min และเศษไม้ลำไยกับทางใบปาล์มที่ยังไม่ผ่านกระบวนการทอรรีไฟต์ พบว่าการเพิ่มกำลังวัตต์ในการทอรรีไฟต์ด้วยคลื่นไมโครเวฟส่งผลให้โครงสร้างของเศษไม้และทางใบปาล์มที่ผ่านกระบวนการทอรรีไฟต์ มีลักษณะแตกหักและมีขนาดโครงสร้างที่เล็กลง โดยการใช้กำลังวัตต์ไมโครเวฟที่ 600 W ลักษณะของเชื้อเพลิงมีขนาดเล็ก มีความเป็นรูพรุน และแตกหักมากกว่าเชื้อเพลิงทอรรีไฟต์ที่กำลังไมโครเวฟ 180-450 W สาเหตุที่ชีวมวลที่ผ่านกระบวนการทอรรีไฟต์เกิดการแตกหักและมีขนาดเล็กเนื่องจากผลของคลื่นไมโครเวฟจะทำให้โมเลกุลที่เป็นส่วนประกอบในชีวมวลในกลุ่มของ เฮมิเซลลูโลส เซลลูโลส ลิกนินบางส่วน หรือกลุ่มสารแทรกต่าง ๆ เกิดการสั่นและมีอุณหภูมิสูงและทำให้โครงสร้างเกิดการเปลี่ยนแปลงและถูกทำลายลง (Reddy and Yang, 2009) โดยการใช้กำลังไมโครเวฟที่ 180 W เป็นต้นไป จะส่งผลให้โครงสร้างของกลุ่มเฮมิเซลลูโลส เริ่มแตกหักและสลายตัว (Daud et al., 2016) ในขณะที่การใช้กำลังไมโครเวฟที่ 600 W จะส่งผลให้เซลลูโลสและลิกนินได้รับความเสียหาย (Cruz et al., 2012) สุดท้ายเมื่อนำไปใช้งานจะทำให้ง่ายต่อการบดหรือการนำไปแปรสภาพในการขึ้นรูปตามต้องการ (Mei et al., 2016)





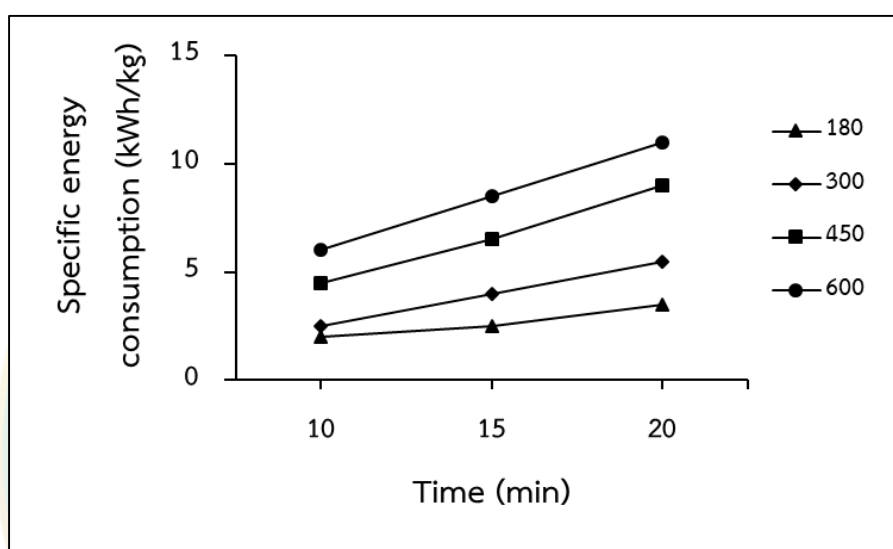
ภาพที่ 50 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของเศษไม้ลำไยและทางใบปาล์ม

หมายเหตุ Raw คือ วัตถุดิบ  
 SW คือ เศษไม้ลำไย PL คือ ทางใบปาล์ม  
 180 300 450 600 คือ กำลังวัตต์ไมโครเวฟ (W)

#### 6. อัตราการใช้พลังงานในการผลิตเชื้อเพลิงทอรรีไฟต์ด้วยคลื่นไมโครเวฟ

ภาพที่ 51 แสดงการใช้พลังงานจำเพาะในการผลิตเชื้อเพลิงทอรรีไฟต์ด้วยเทคนิคคลื่นไมโครเวฟในห้องปฏิบัติการโดยใช้ไมโครเวฟขนาด 20 L แรงดันไฟฟ้า 220 V ความถี่ 50 Hz ชนิด 1 เฟส ทดลองการผลิตที่อัตราการใช้ชีวมวลต่อครั้ง เท่ากับ 20 g ผลการวิเคราะห์ข้อมูลพบว่า การใช้กำลังไมโครเวฟที่ 600 W ที่ระยะเวลา 20 min มีอัตราการใช้พลังงานสูงสุด 0.22 kWh/g ในขณะที่การใช้กำลังไมโครเวฟ 180 W ที่ระยะเวลาทอรรีไฟต์ขั้นต่ำสุดคิดเป็น 0.04 kWh/g

อย่างไรก็ตามเมื่อทดลองประเมินเป็นค่าใช้จ่ายต่อหน่วย (g) การผลิตเชื้อเพลิงทอร์รีไฟต์โดยคิดอัตราค่าไฟฟ้า 3 Baht/kWh สามารถประเมินได้ว่าต้นทุนราคาไฟฟ้าต่อหน่วยที่ 180 W ที่ระยะเวลา 10 min อยู่ที่ 0.12 Baht/g ในขณะที่การใช้กำลังไฟฟ้าที่ 450 W ที่ 10 min มีต้นทุนการผลิต 0.27 Baht/kg หรือที่ระยะเวลาทอร์รีแฟคชั่น 20 min ให้ต้นทุน 0.54 Baht/g ในกราฟของเศษไม้ลำไยและทางใบปาล์ม เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยการใช้ไมโครเวฟผลิตเชื้อเพลิงทอร์รีไฟต์ พบว่ามีต้นทุนราคาเฉลี่ยการใช้ไฟฟ้าที่ใกล้เคียงกัน



ภาพที่ 51 อัตราการใช้พลังงานในแต่ละเงื่อนไขของการทอร์รีไฟต์

## 7. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ค่าความร้อนเชื้อเพลิงทอร์รีไฟต์ด้วยคลื่นไมโครเวฟ

การทำนายค่าความร้อนเชื้อเพลิงทอร์รีไฟต์ด้วยการใช้ไมโครเวฟทอร์รีแฟคชั่น สามารถทำนายได้ด้วยสมการทางคณิตศาสตร์โดยผลจากการสร้างสมการเป็นไปดังภาพที่ 52 และ 53 ในกราฟของการใช้เศษไม้ลำไยและทางใบปาล์ม สามารถนำมาสร้างกราฟได้จากการวิเคราะห์ข้อมูลทั้งหมด 72 ชุด นำมาสร้างสมการทางคณิตศาสตร์เอมไพริคัล โดยใช้ระเบียบวิธีการถดถอยเชิงเส้น โดยในภาพรวมการเพิ่มกำลังวัตต์และระยะเวลาทอร์รีแฟคชั่นทำให้ค่าความร้อนเชื้อเพลิงทอร์รีไฟต์เพิ่มขึ้น ซึ่งเกิดขึ้นทั้งในส่วนของเศษไม้ลำไย ผลจากการวิเคราะห์นำมาจัดอยู่ในสมการที่มีค่าตัวแปรของกำลังวัตต์ไมโครเวฟและระยะเวลาที่มีผลต่อค่าความร้อนดังสมการที่ 12 จึงเป็นกราฟเศษไม้ลำไยและสมการที่ 13 เป็นกราฟทางใบปาล์ม อย่างไรก็ตามเมื่อนำเอาผลสมการที่ได้มาทดสอบกับงานวิจัยอื่นที่ใช้เทคนิคไมโครเวฟ พบว่ามีค่าความร้อนเฉลี่ยใกล้เคียงกัน (ณัฐวุฒิ, 2547) โดยมีค่า R-square ของเศษไม้ลำไย คือ 0.9390 และมีค่า Standard Error of Estimate คือ 0.3692 และ มีค่า

R-square ของทางใบปาล์ม คือ 0.9445 และมีค่า Standard Error of Estimate คือ 0.2106 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของค่าความร้อนเชื้อเพลิงทอรรีไฟต์ที่กำลังวัตต์และระยะเวลาทอรรีแฟคชั่น แสดงในสมการที่ 12 และ 13

$$\text{HHV}_{\text{SW}} = 16.2862 + 0.1412T + (-3.8583W) + (-0.0025T^2) + 13.3715W^2$$

สมการที่ 12

$$\text{HHV}_{\text{PL}} = 16.4031 + (-0.0445T) + (-7.9844W) + 0.0029T^2 + 14.8397W^2$$

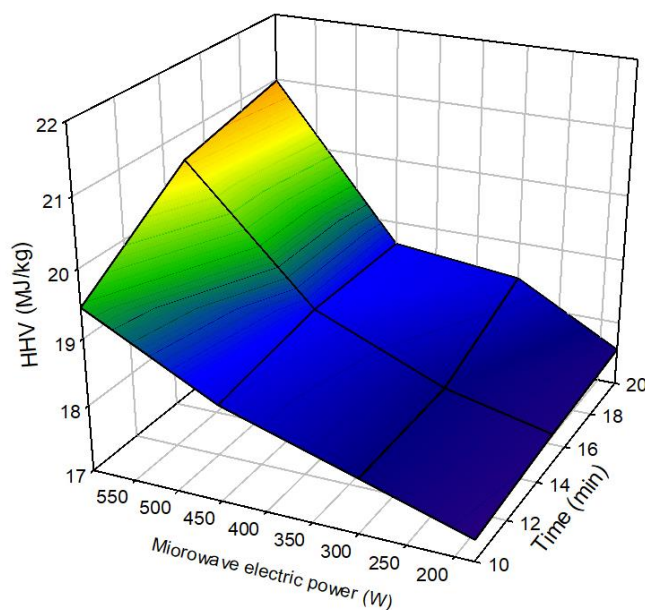
สมการที่ 13

เมื่อ  $\text{HHV}_{\text{SW}}$  คือ ค่าความร้อนของเศษไม้ลำไย (MJ/kg)

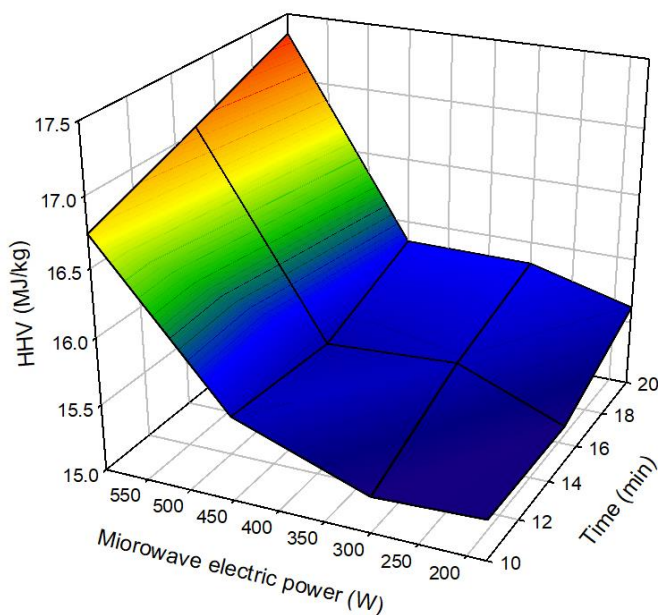
$\text{HHV}_{\text{PL}}$  คือ ค่าความร้อนของทางใบปาล์ม (MJ/kg)

T คือ ระยะเวลาในการทอรรีแฟคชั่น (min)

W คือ กำลังวัตต์ไมโครเวฟ (W)



ภาพที่ 52 ค่าความร้อนของเศษไม้ลำไยทอรรีไฟต์เมื่อแปรผันกับกำลังวัตต์และเวลาทอรรีแฟคชั่น



ภาพที่ 53 ค่าความร้อนของทางใบปาล์มทอรรีไฟด์เมื่อแปรผันกับกำลังวัตต์และเวลาทอรรีไฟด์

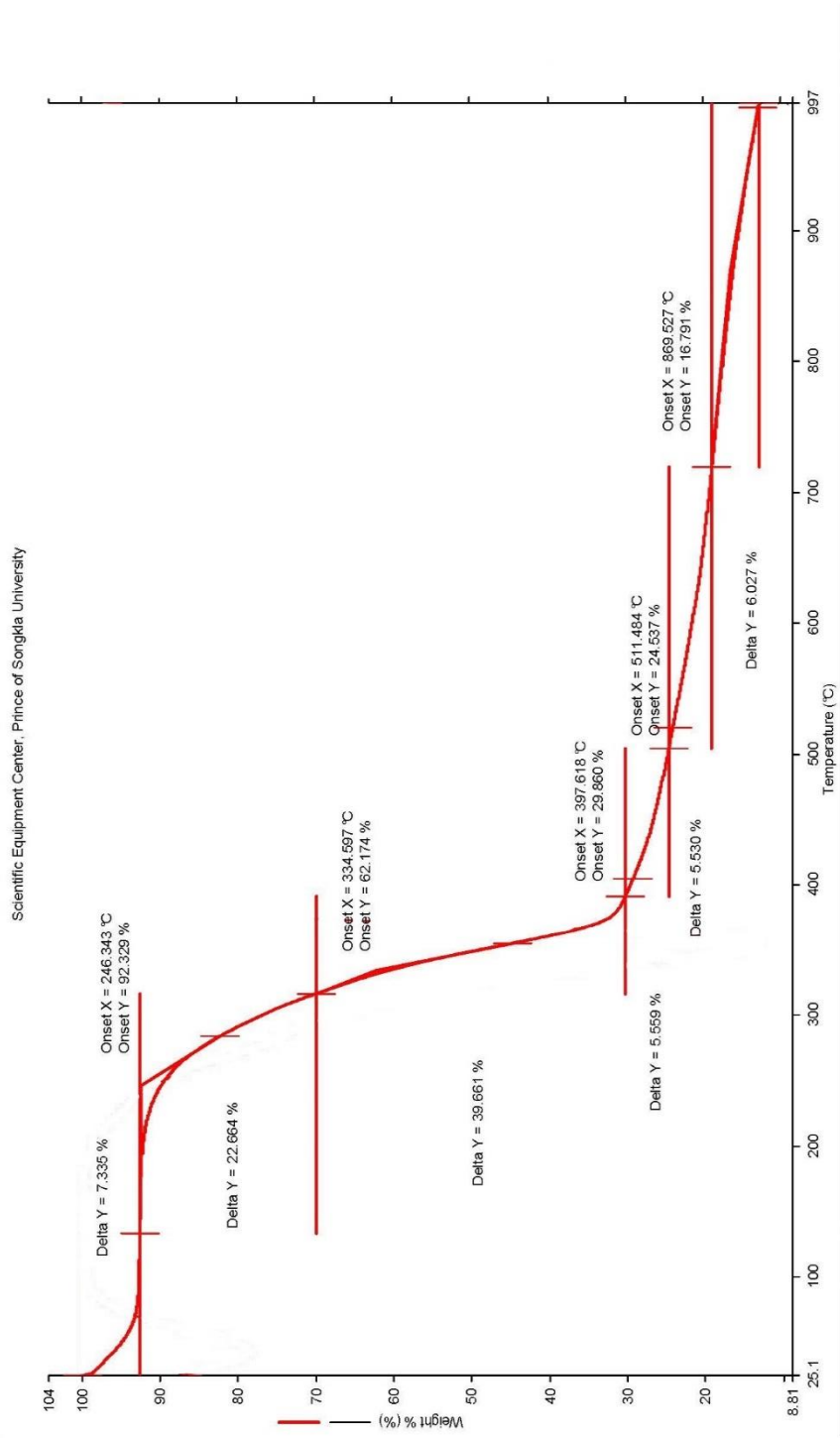
## 8. อัตราการเปลี่ยนแปลงมวลต่ออุณหภูมิของชีวมวล

อัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ เป็นอีกวิธีการที่ใช้อธิบายผลของปริมาณมวลหรือการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างชีวมวลที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการทอรรีไฟด์ การนำไปใช้ทดสอบด้วยเครื่อง TGA ในงานวิจัยนี้จะนำไปใช้สนับสนุนการอธิบายผลของการลดลงของมวลเชื้อเพลิงทอรรีไฟด์ ด้านเทคนิคไมโครเวฟทั้ง 2 ชนิดชีวมวล ผลการวิเคราะห์จากห้องทดลอง ดังภาพที่ 54 และ 55 จุดที่มีอัตราการลดลงของน้ำหนักมากที่สุดหรือเรียกว่าเป็นจุดที่มีอัตราการเผาไหม้สูงที่สุด โดยจุดที่มีอัตราการเผาไหม้ของเศษไม้อยู่ที่อุณหภูมิ 246-397.61 °C และมีอัตราการลดลงของน้ำหนักอยู่ที่ 62.17 % และ 29.86 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักต่อองศาเซลเซียส ต่อมาที่อุณหภูมิ 397.61-869.52 °C คือปริมาณ Fixed carbon และอุณหภูมิที่สิ้นสุดกระบวนการเผาไหม้จะสังเกตได้จากเส้นกราฟของ TGA จะไม่มีอัตราการเปลี่ยนแปลงซึ่งมีค่าเท่ากับ 869.52 °C และหลังจากอุณหภูมินี้ไปแล้ว เศษไม้ที่อยู่ในกระบวนการเผาไหม้ก็คือเถ้า ซึ่งมีน้ำหนักเหลืออยู่ในช่วงน้อยกว่า 20% ที่ช่วงอุณหภูมิ 130-397 °C อัตราการลดลงของน้ำหนักของทางใบปาล์มมากที่สุดหรือเรียกว่าเป็นจุดที่มีอัตราการเผาไหม้สูงที่สุด โดยจุดที่มีอัตราการเผาไหม้ของทางใบปาล์มอยู่ที่อุณหภูมิ 264.18-389.86 °C และมีอัตราการลดลงของน้ำหนักอยู่ที่ 32.26% และ 32.26 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักต่อองศาเซลเซียส ต่อมาที่อุณหภูมิ 397.61-869.52 °C คือปริมาณ Fixed carbon และอุณหภูมิที่สิ้นสุดกระบวนการเผาไหม้จะสังเกตได้จากเส้นกราฟของ TGA จะไม่มีอัตราการเปลี่ยนแปลงซึ่งมีค่าเท่ากับ 869.52 °C และหลังจากอุณหภูมิ

นี้ไปแล้ว ทางใบปาล์มที่อยู่ในกระบวนการเผาไหม้ก็คือเถ้า ซึ่งมีน้ำหนักเหลืออยู่ในช่วงน้อยกว่า 20% ที่ช่วงอุณหภูมิ 130-397 °C พบว่าในด้านของการเปรียบเทียบกับสารทอรรีแฟคชันด้านเทคนิค ไมโครเวฟที่อุณหภูมิใกล้เคียงกันพบว่า ที่กำลังวัตต์ไมโครเวฟที่ 180-600 W จะอยู่ในช่วงอุณหภูมิ 68-330 °C ผลจากการเปรียบเทียบกับกราฟพบว่ามวลมีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่อง เทียบเป็นแนวเส้นตรงซึ่งหมายถึงว่าในช่วงกำลังไมโครเวฟดังกล่าว โครงสร้างของชีวมวลได้มีการสลายตัว คลื่นไมโครเวฟทำลายและเริ่มสลายตัวอย่างต่อเนื่อง (Tumulure et al.,2011)

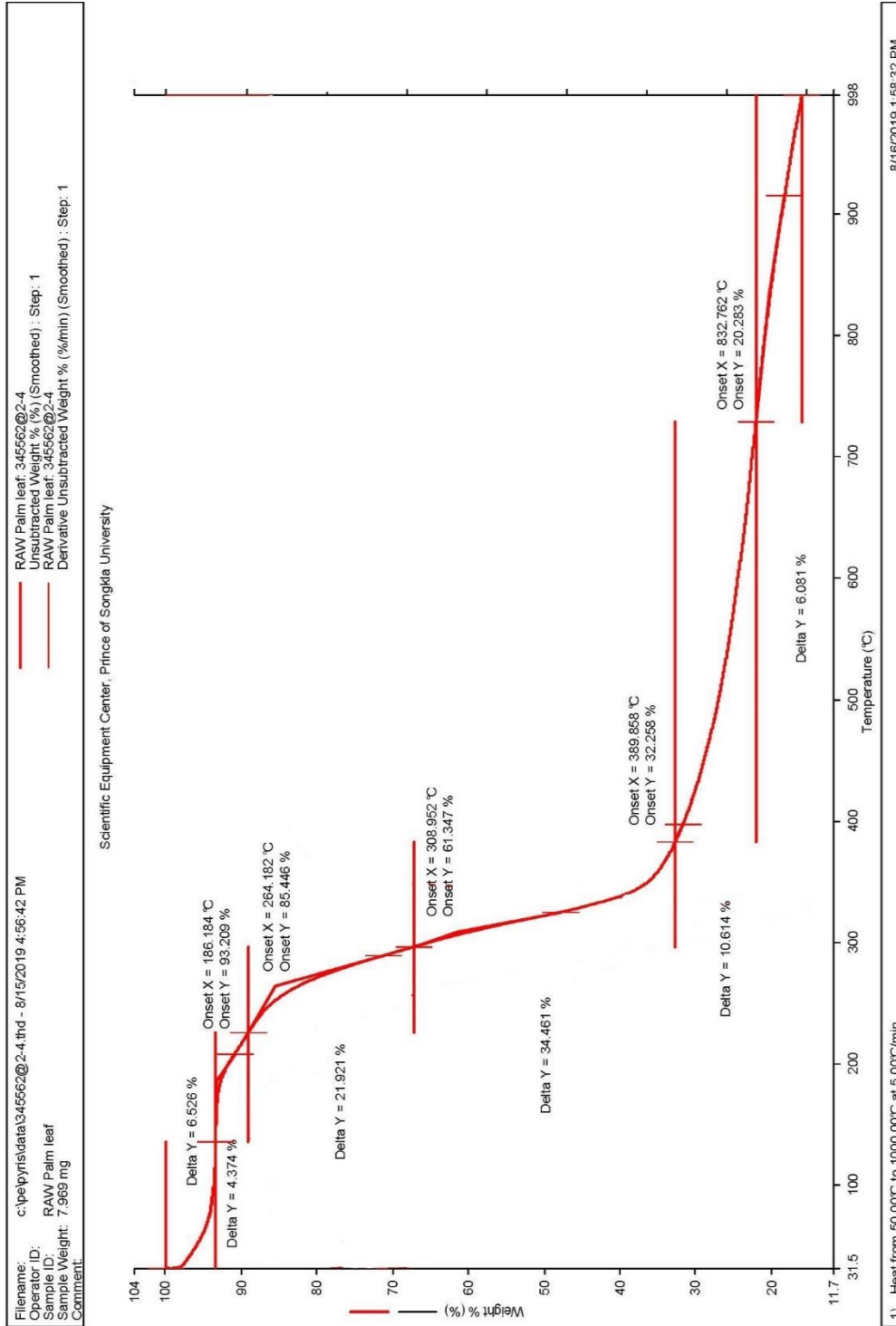


Filename: c:\pelytris\data\345562@1-2.tfd - 8/15/2019 12:13:00 PM  
 Operator ID: RAW scraps of wood  
 Sample ID: RAW scraps of wood  
 Sample Weight: 7.599 mg  
 Comment:



8/16/2019 1:52:48 PM

ภาพที่ 54 อัตราการเปลี่ยนแปลงมวลต่ออุณหภูมิของเศษไม้ไผ่



ภาพที่ 55 อัตราการเปลี่ยนแปลงมวลต่ออุณหภูมิของทางใบปาล์ม

## บทที่ 5

### สรุปและข้อเสนอแนะ

#### สรุปผลการวิจัย

1. การนำชีวมวลประเภทเศษไม้ลำไยและทางใบปาล์มแบบกาก มาผ่านกระบวนการทอรรีแฟคชั่นด้วยคลื่นไมโครเวฟ สามารถเพิ่มคุณภาพชีวมวลในด้านของค่าความร้อนที่เพิ่มขึ้นได้
2. มีปริมาณความชื้นและสารระเหยมีแนวโน้มลดลง ส่วนปริมาณเถ้าและคาร์บอนคงตัวเพิ่มขึ้น โดยการปรับกำลังไมโครเวฟที่ 180 W ที่ระยะเวลาทอรรีไฟต์ 10 min ให้ค่าความร้อนของเศษไม้ลำไยและทางใบปาล์มสูงสุด 19.87 MJ/kg 18.31 MJ/kg ตามลำดับ ในขณะที่กำลังไมโครเวฟที่ 600 W ที่ระยะเวลา 20 min ให้ค่าความร้อนสูงสุด 24.87 MJ/kg 22.87 MJ/kg ตามลำดับ
3. ร้อยละผลผลิตมวลและพลังงานที่กำลังวัตต์ 180 W ให้ร้อยละพลังงานกับมวลสูงสุดที่ 91.31-96.03 และ 99.63-99.65% ตามลำดับ โดยมีค่าความร้อนประมาณ 18-19 MJ/kg ซึ่งเพิ่มขึ้นจากเดิม 2-3%
4. เงื่อนไขกำลังวัตต์ไมโครเวฟและระยะเวลาทอรรีแฟคชั่นที่เหมาะสมสำหรับงานวิจัยนี้คือ 450 W และ 20 min ตามลำดับ สามารถเพิ่มค่าความร้อนให้แก่ชีวมวลประเภทเศษไม้ลำไยและทางใบปาล์มทอรรีไฟต์เป็น 23.12 MJ/kg และ 22.76 MJ/kg ตามลำดับ เพิ่มขึ้นจากเดิม 25-27% อย่างไรก็ตามถ้าต้องการให้คุณสมบัติค่าความร้อนเทียบเท่ากับการให้ความร้อนปกติ ต้องใช้กำลังวัตต์มากกว่า 450 W ขึ้นไป และระยะเวลาที่สูงขึ้น
5. การเพิ่มกำลังวัตต์และระยะเวลาในการทอรรีแฟคชั่นด้วยคลื่นไมโครเวฟส่งผลให้โครงสร้างของเศษไม้และทางใบปาล์มทอรรีไฟต์ มีลักษณะแตกหักและมีขนาดโครงสร้างที่เล็กลง
6. การใช้พลังงานไฟฟ้าของกระบวนการทอรรีแฟคชั่นมีความแปรผันตามกำลังวัตต์ไมโครเวฟและเวลา เมื่อกำลังวัตต์ไมโครเวฟสูงขึ้นและลดระยะเวลาในกระบวนการทอรรีแฟคชั่นลง มีการใช้พลังงานใกล้เคียงกับกรณีที่กำลังวัตต์ไมโครเวฟที่ต่ำกว่า แต่ใช้ระยะเวลาเพิ่มขึ้น
7. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เอมไพริคอลสำหรับหาค่าความร้อนของเชื้อเพลิงทอรรีไฟต์ภายใต้การปรับกำลังวัตต์ไมโครเวฟและเวลาทอรรีแฟคชั่น สามารถทำนายผลค่าความร้อนได้ดี มีค่า R-squares เฉลี่ยอยู่ในช่วง 0.9390-0.9445
8. ในการผลิตเชื้อเพลิงทอรรีไฟต์ สามารถประมาณเม็ดเงินต้นทุนราคาไฟฟ้าต่อหน่วย ที่ 450 W ระยะเวลา 20 min มีต้นทุน 0.54 Baht/g

### ข้อเสนอแนะ

1. เนื่องจากงานวิจัยนี้มีการใช้ชีวมวลเพียง 2 ประเภท และพบว่าชนิดของชีวมวลมีผลต่อการผลิตเชื้อเพลิงทอร์รีไฟด์ ดังนั้น จึงควรมีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับชีวมวลของประเทศไทยที่มีศักยภาพ ได้แก่ ข้าว ชังข้าวโพด หรือยางพารา เป็นต้น
2. เพื่อให้ได้ผลการทดลองที่เป็นภาพรวม ควรมีการศึกษาข้อมูลกำลังวัตต์ไมโครเวฟโดยละเอียด และกำลังวัตต์ที่สูงกว่านี้เพิ่มเติม
3. เนื่องจากงานวิจัยนี้อยู่ในระบบห้องปฏิบัติการเพื่อให้มีการประยุกต์ใช้งานได้จริง ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมของการใช้ไมโครเวฟระดับนำร่องขึ้นไป เพื่อจะทำให้ผลการประมาณต้นทุนมีความใกล้เคียงความจริงมากขึ้น และการผลิตเชื้อเพลิงทอร์รีไฟด์ด้วยกระบวนการทอร์รีแฟคชัน ควรมีการศึกษาในระดับเครื่องทอร์รีแฟคชันนำร่อง ที่มีการใช้ชีวมวลต่อครั้งเพิ่มขึ้นเพื่อเป็นแนวทางในการนำไปใช้ในอุตสาหกรรมได้เพิ่มขึ้น และควรมีการขยายขนาดไปสู่ภาคเอกชน หากต้องการให้ระบบผลิตเชื้อเพลิงมีเสถียรภาพมากขึ้นควรใช้เครื่องมือวัดที่มีความแม่นยำสูง

## บรรณานุกรม

- กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. ม.ป.ป. **ชีวมวล**. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา [http://biomass.dede.go.th/biomass\\_web/index.html](http://biomass.dede.go.th/biomass_web/index.html) (28 เมษายน 2562).
- กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. 2558. **แผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือกพ.ศ. 2558-2579**. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา [http://www.dede.go.th/ewt\\_news.php?nid=42195](http://www.dede.go.th/ewt_news.php?nid=42195). (28 เมษายน 2562).
- กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. 2562. **การศึกษาความเป็นไปได้ของการลงทุนผลิตพลังงานไฟฟ้าจากขยะ ด้วยเทคโนโลยีเตาเผาขยะมูลฝอย**. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา <http://webkc.dede.go.th/testmax/node/2245> (1 กันยายน 2562).
- เจนจิรา อุตเรือน. 2561. **การเพิ่มคุณภาพวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรด้วยกระบวนการทอรีแฟคชัน**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยแม่โจ้.
- ณรงค์ฤทธิ์ สายลุน และ ธนพร พบลาก. 2557. **ชีวมวลที่มีความหนาแน่นเชิงพลังงานสูงจากการทอรีแฟคชันเศษไม้ยางพารา**. โครงการปริญญาตรี. มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- ณัฐวุฒิ แสนอำนวยผล. 2547. **แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ค่าความร้อนของมูลฝอยชุมชนของกรุงเทพมหานครโดยใช้การวิเคราะห์ความถดถอยพหุคูณเชิงเส้น**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยจุฬาลงกรณ์.
- ดุชฎีพร สิทธิกุล. 2557. **คุณสมบัติของชีวมวลในกระบวนการทอรีแฟคชัน**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยศิลปากร.
- ธนาพล ตันตีสัตยกุล, สุริฉาย พงษ์เกษม, ปรีชญ์ปวีณ ภูหญ้า และ ภาณุวัฒน์ ไถ่บ้านกวย. 2558. **พลังงานทดแทนชุมชนจากเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งจากทางมะพร้าว. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, 23(3), 418-431.**
- ธรรารุช บุญน้อม, ณัฐพงษ์ ประภาการ, สาวิตรี คำหอม และ วีรชัย อัจหาญ. 2555. **การศึกษาการประยุกต์ใช้เตาอบไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนในกระบวนการผลิตพริกแห้ง. การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย, 13(13), 641-647.**
- นคร ทิพยาวงค์. 2553. **เทคโนโลยีการเปลี่ยนสภาพชีวมวล**. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์ ส.ส.ท. สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น).

- ปริญญา ฉกาจโนโรดม. 2557. การให้ความร้อนโดยใช้ไมโครเวฟและการประยุกต์ใช้ไมโครเวฟในการแปรรูปวัสดุ. กรุงเทพฯ: ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- พัชรินทร์ สงเดช. 2557. การวิเคราะห์ชิ้นส่วนรถจักรยานยนต์ที่เป็นพลาสติกด้วยเทคนิค TGA และ FTIR เพื่อประโยชน์ทางนิติวิทยาศาสตร์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยศิลปากร.
- ฤทธิชัย อัครวราชันย์. 2554. การอบแห้งผลผลิตทางการเกษตรด้วยคลื่นไมโครเวฟ. วารสารวิศวกรรมสารเกษมบัณฑิต, 1(2), 31-42.
- \_\_\_\_\_. 2561. การแปรรูปด้วยความร้อนและไม่ใช้ความร้อนด้วยเทคโนโลยีสมัยใหม่. เชียงใหม่: สำนักบริหารและพัฒนาวิชาการ มหาวิทยาลัยแม่โจ้.
- วรสันต์ จันทร์เสถียร. 2556. เตาปฏิกรณ์ทอริแฟกซ์แบบฟิกซ์เบดพร้อมระบบจัดการความร้อนโดยใช้ท่อแลกเปลี่ยนความร้อน. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยศิลปากร.
- วัลย์รัตน์ อุตตมะปรากรม และ ธราพงษ์ วิจิตสานนท์. 2554. การผลิตถ่านอัดแท่งจากตะกอนเปียกเหลือทิ้งจากการผลิตเอทานอลจากมันเส้น. วารสารวิจัยพลังงาน, 8(2554), 1-19.
- วิชัย สังข์แก้ว. 2558. ศักยภาพของชีวมวลปาล์มเพื่อผลิตพลังงานไฟฟ้าในภาคใต้. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์. 2559. เครื่องมือวิทยาศาสตร์ เคมี วิเคราะห์ทดสอบหาปริมาณธาตุและค่าความร้อน. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา [http://www.sec.psu.ac.th/th/equipment.php?p=chemi\\_g5](http://www.sec.psu.ac.th/th/equipment.php?p=chemi_g5) (1 สิงหาคม 2562).
- ศูนย์ประสานงานการเรียนรู้ด้านพลังงาน. 2558. สถานการณ์พลังงานและการใช้พลังงานต่อสิ่งแวดล้อม. กรุงเทพฯ: กระทรวงพลังงาน.
- ศูนย์ส่งเสริมพลังงานชีวมวล. 2549. ชีวมวล. 2549(1), 11.
- สรกฤช กมลชัย. 2552. การพัฒนาระบบไมโครเวฟไพโรไลซิส : กรณีศึกษา : พอลิโพรพิลีน. สำนักหอสมุดมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, 2552(1), 16-67.
- สุดาวลัย ดำหนก และ ธราพงษ์ วิจิตสานนท์. 2554. ผลของวัสดุเบดต่อสมบัติของเชื้อเพลิงแข็งจากทอริแฟกซ์ของชีวมวล. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- หัสวีภา หมายมั่น. 2553. เครื่องมือวิเคราะห์ทดสอบทางโครงสร้างจุลภาค. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา <http://web2.mfu.ac.th/center/stic/micro-analysis-instrumentmenu> (12 สิงหาคม 2561).

- อรอริน คุ่มศักดิ์, วีรพงษ์ วัฒนชน้อย และ นคร วรสุวรรณรักษ์. 2554. อิทธิพลของอุณหภูมิของทอรัรี แปกชั้นต่อสมบัติน้ำ. *วารสารวิจัยและพัฒนา มจร.*, 34(4), 341-355
- Chen, D., Zheng, Y. & Zhu, X. 2012. Determination of effective moisture diffusivity and drying kinetics for poplar sawdust by thermogravimetric analysis under isothermal condition. *Bioresource technology*, 107, 451-455.
- Chen Yingquan, Biao Liu, Yang Haiping, Qing Yang & Hanping Chen. 2014. Evolution of functional groups and pore structure during cotton and corn stalks torrefaction and its correlation with hydrophobicity. *Fuel*, 137, 41-49.
- Chiou, B.-S., Valenzuela-Medina, D., Bilbao-Sáinz, C., Klamczynski, A., Avena-Bustillos, R., Milczarek, R., Du, W.-x., Glenn, G. & Orts, W. 2014. Torrefaction of pomaces and nut shells. *Bioresource technology*, 177C, 58-65.
- Christopher Crockett. 2019. **Word of the week: Electromagnetic spectrum**. [Online]. Available <https://earthsky.org/space/what-is-the-electromagnetic-spectrum> (15 September 2019).
- Cruz, G., Avila, I., Santos, A. & Crnkovic, P. 2012. **Effects of torrefaction on biomass: a thermal and morphological evaluation**. 14<sup>th</sup> Brazilian Congress of Thermal Science and Engineering at Rio Janeiro.
- Daud, D., Rahman, A. & Shamsuddin, A. H. 2016. Devolatilization Studies of Oil Palm Biomass for Torrefaction Process through Scanning Electron Microscopy. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 32, 012072.
- Dengyu Chena, Zhongcheng Zheng, Kexin Fua, Ze Zeng, Jiajia Wang & Lu., M. 2015. Torrefaction of biomass stalk and its effect on the yield and quality of pyrolysis products. *Fuel*, 2015(159), 27-32.
- Huang, Y.-F. 2019. **Torrefaction of sewage sludge by using microwave heating**. 158, 67-72.
- Huang, Y.-F., Chiueh, P.-T., Lo, S.-L., Sun, L., Qiu, C. & Wang, D. 2019. Torrefaction of sewage sludge by using microwave heating. *Energy Procedia*, 158, 67-72.
- Huang, Y., Finell, M., Larsson, S., Wang, X., Zhang, J., Wei, R. & Liu, L. 2017. Biofuel pellets made at low moisture content – Influence of water in the binding mechanism of densified biomass. *Biomass and Bioenergy*, 98, 8-14.

- Huanga, W.R. Chena, P.T. Chiueh, W.H. Kuanb & Lo., S. L. 2012. Microwave torrefaction of rice straw and pennisetum. **Bioresource Technology**, 2012(123), 1-7.
- Lin, Y. L. 2015. Effects of Microwave - Induced Torrefaction on Waste Straw Upgrading. **International Journal of Chemical Engineering and Applications**, 6(6), 401-404.
- Mei, Y., Che, Q., Yang, Q., Draper, C., Yang, H., Zhang, S. & Chen, H. 2016. Torrefaction of different parts from a corn stalk and its effect on the characterization of products. **Industrial Crops and Products**, 92, 26-33.
- Ming-Fei Li, Chang-Zhou Chen, Xun Li, Yue Shen, Jing Bian & Sun., R.-C. 2015. Torrefaction of bamboo under nitrogen atmosphere: Influence of temperature and time on the structure and properties of the solid product. **Fuel**, 2015(161), 193-196.
- Parikh, J., Channiwala, S. A. & Ghosal, G. K. 2005. A correlation for calculating HHV from proximate analysis of solid fuels. **Fuel**, 84(5), 487-494.
- Poudel, J., Ohm, T.-I. & Oh, S. 2015. A study on torrefaction of food waste. **Fuel**, 140.
- Reddy, N. & Yang, Y. 2009. Properties and potential applications of natural cellulose fibers from the bark of cotton stalks. **Bioresource technology**, 100, 3563-3569.
- Saensree., K. 2555. **พลังงานทดแทน**. [Online]. Available [http://53011711152.blogspot.com/2012/06/blog-post\\_19.html](http://53011711152.blogspot.com/2012/06/blog-post_19.html) (12 มิถุนายน 2560).
- Sangram Kishor Satpathy, Lope G. Tabil, Venkatesh Medab, Satya Narayana Naik & Prasad., R. 2014. Torrefaction of wheat and barley straw after microwave heating. **Fuel**, 2014(124), 269-278.
- Satpathy, S., Tabil, L., Meda, V., Naik, S. & Prasad, R. 2014. Torrefaction of wheat and barley straw after microwave heating. **Fuel**, 124, 269-278.
- Shankar Tumuluru, J., Sokhansanj, S., Hess, J. R., Wright, C. T. & Boardman, R. D. 2011. REVIEW: A review on biomass torrefaction process and product properties for energy applications. **Industrial Biotechnology**, 7(5), 384-401.
- Siamchemi. 2019. **คลื่นไมโครเวฟ คุณสมบัติ และประโยชน์คลื่นไมโครเวฟ**. [Online]. Available <https://www.siamchemi.com/%E0%B8%84%E0%B8%A5%E0%B8%>

- B7%E0%B9%88%E0%B8%99%E0%B9%84%E0%B8%A1%E0%B9%82%E0%B8%84%E0%B8%A3%E0%B9%80%E0%B8%A7%E0%B8%9F/ (1 September 2019).
- Toscano , A. Pizzi , E. Foppa Pedretti, G. Rossini , G. Ciceri , G. Martignon & Duca., D. 2015. Torrefaction of tomato industry residues. **Fuel**, 2015(143), 89-97.
- Wang, M. J., Huang, Y. F., Chiueh, P. T., Kuan, W. H. & Lo, S. L. 2012. Microwave-induced torrefaction of rice husk and sugarcane residues. **Energy**, 37(1), 177-184.
- Wang, Y., Wig, T., Tang, J. & Hallberg, L. 2003. Dielectric properties of food relevant to RF and microwave pasteurization and sterilization. **Journal of Food Engineering**, 57(257-268).
- Wanga, M. J., Huang, Y. F., Chiueh , P. T. & Kuanb, W. H. 2012. Microwave-induced torrefaction of rice husk and sugarcane residues. **Energy**, 37, 177-184.
- Wannapeera, J., Fungtammasan, B. & Worasuwanarak, N. 2011. Effects of temperature and holding time during torrefaction on the pyrolysis behaviors of woody biomass. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, 92(1), 99-105.
- Zhao Xiqiang, Wenlong Wang, Hongzhen Liu, Chunyuan Ma & Song Zhanlong. 2014. Microwave pyrolysis of wheat straw: Product distribution and generation mechanism. **Bioresource technology**, 158C, 278-285.



ภาคผนวก



ภาคผนวก ก

คุณสมบัติพื้นฐานของชีวมวล



ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์  
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่

ชั้น 1 อาคารบริหารวิชาการรวม อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา 90110  
โทรศัพท์ 07428 6904-7, 07428 6910, 089734 2482, 084407 1732  
อีเมล sec-all@group.psu.ac.th เว็บไซต์ http://www.sec.psu.ac.th

F-RES-003 ฉบับที่ 14 บังคับใช้ 03/04/62

รายงานผลการทดสอบ

เลขที่รายงาน:	R2645/62	หน้า:	1 / 1
วันที่ออกรายงาน:	16 สิงหาคม 2562	วันที่รับตัวอย่าง:	9 สิงหาคม 2562
เลขที่ใบขอใช้บริการฯ:	3456/62		
ชื่อและที่อยู่ลูกค้า:	นางสาวหทัยชนก เนตรคำ คณะกรรมการจัดการสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์		
ผู้ทดสอบ:	นางสาวทรงสุดา พรหมทอง		
วันที่ทำการทดสอบ:	12-13 สิงหาคม 2562		
วิธีการทดสอบ:	In-house method refer to WI-RES-CHNS/O-002		
เครื่องมือทดสอบ:	CHNS/O Analyzer, Flash 2000, ThermoScientific, Italy		
เทคนิคการทดสอบ:	Dynamic Flash Combustion		
สภาพตัวอย่าง:	ของแข็ง		
รายละเอียดตัวอย่าง:	Raw เศษไม้, Raw ไบโพลัม	จำนวน:	4 ตัวอย่าง

ผลการทดสอบ:

ที่	ชื่อตัวอย่าง	หน่วย	ผลการทดสอบ $\pm$ SD			
			ไนโตรเจน	คาร์บอน	ไฮโดรเจน	ออกซิเจน
1	Raw เศษไม้	%wt.	0.212 $\pm$ 0.005	47.310 $\pm$ 0.047	6.010 $\pm$ 0.023	40.645 $\pm$ 0.568
2	Raw ไบโพลัม	%wt.	0.685 $\pm$ 0.008	43.287 $\pm$ 0.083	5.781 $\pm$ 0.033	41.375 $\pm$ 0.052
3	เศษไม้ 600 w 20 นาที	%wt.	0.298 $\pm$ 0.002	56.574 $\pm$ 0.118	5.251 $\pm$ 0.019	33.280 $\pm$ 0.046
4	ไบโพลัม 600 w 20 นาที	%wt.	0.931 $\pm$ 0.013	54.491 $\pm$ 0.053	5.090 $\pm$ 0.034	30.635 $\pm$ 0.291

- อ้างอิงข้อมูลดิบ sever2/raw data/CHNSO\_2000/data\_2562/3456-62/PDF, SD= Standard deviation

- ทดสอบแบบ As received, ตัวอย่างไม้เป็นเนื้อเดียวกัน เตรียมตัวอย่างโดยการบดด้วยเครื่อง Mixer mill

(นางรุสนี กุลวิจิตร)

หัวหน้าฝ่ายบริการเครื่องมือวิจัยทางวิทยาศาสตร์

16 สิงหาคม 2562

สิ้นสุดรายงานผลการทดสอบ.....

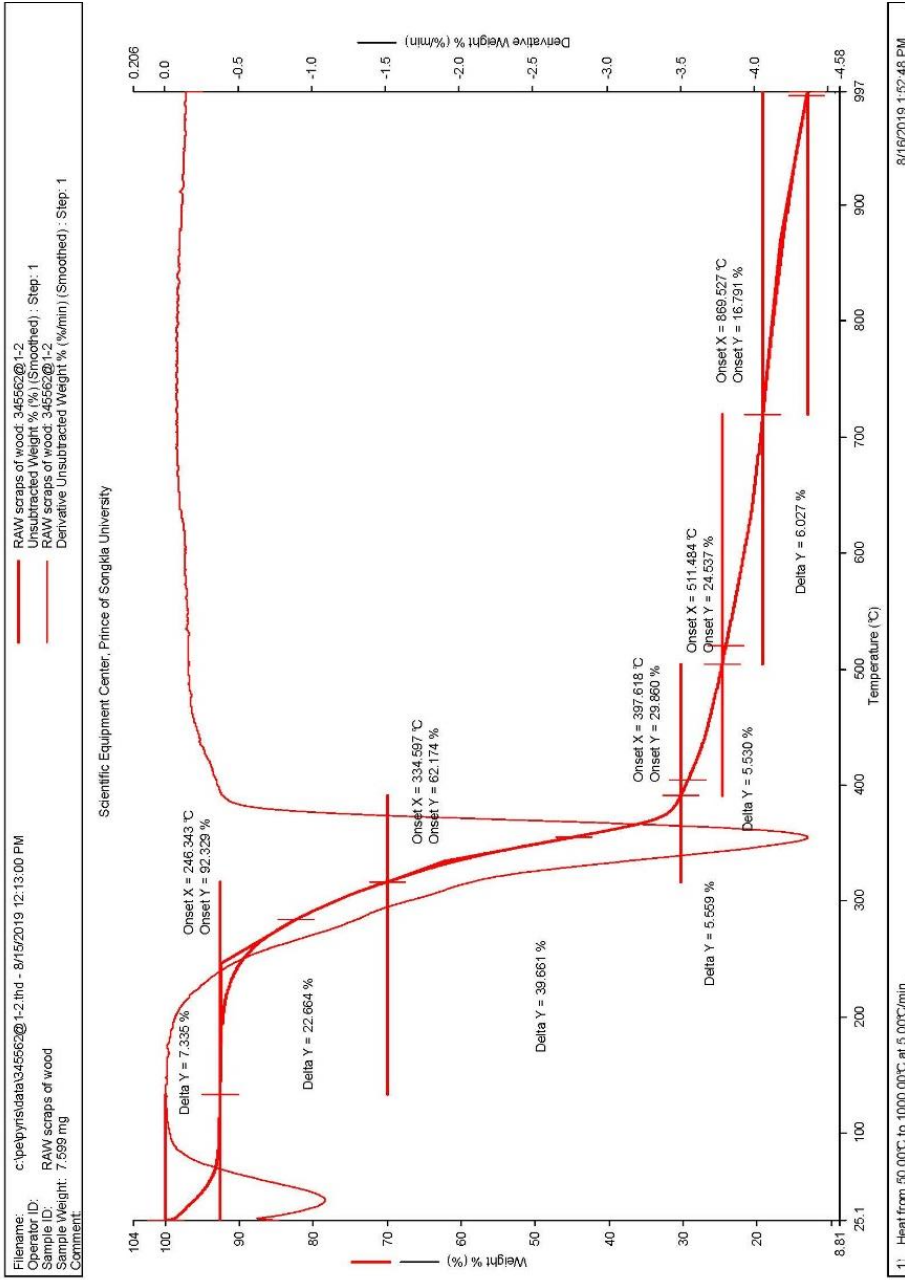
หมายเหตุ รายงานผลการทดสอบนี้มีผลเฉพาะกับตัวอย่างที่นำมาทดสอบเท่านั้น และรายงานผลการทดสอบนี้ต้องไม่ถูกทำสำเนาเพียงบางส่วน  
ยกเว้นทำทั้งฉบับ โดยไม่ได้รับความยินยอมเป็นลายลักษณ์อักษรจากทางศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์

ภาพผนวกที่ 1 ใบงานผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุของเศษไม้และทางไบโพลัม



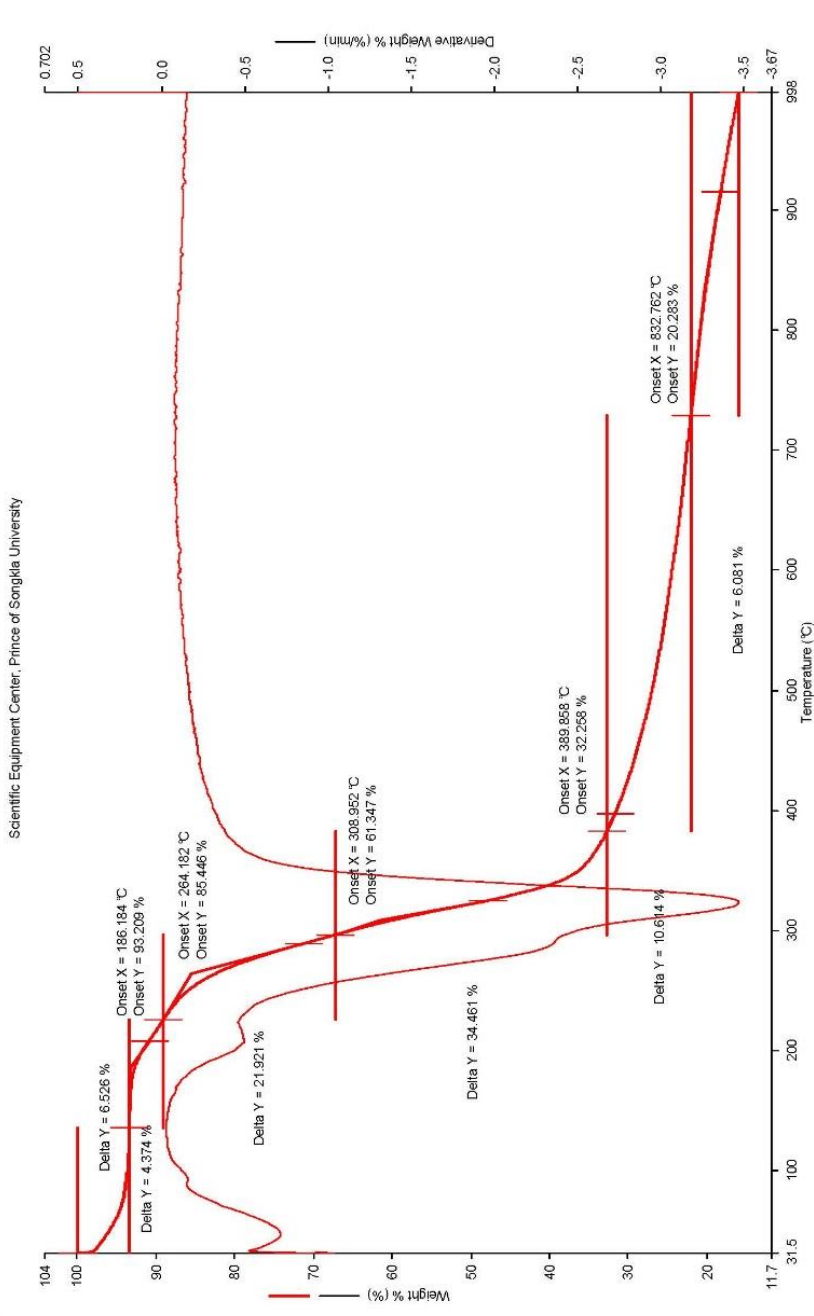
ภาคผนวก ข

ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักต่ออุณหภูมิ TGA



ภาพผนวกที่ 2 ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักต่ออุณหภูมิ TGA ของเศษไม้ไผ่

Filename: c:\pep\pysdata\345562@2-4.thd - 8/15/2019 4:56:42 PM  
 Operator ID: RAW Palm leaf  
 Sample Weight: 7.969 mg  
 Comment:



ภาพผนวกที่ 3 ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักต่ออุณหภูมิ TGA ของใบปาล์ม



ภาคผนวก ค

ตารางผลการวิเคราะห์เชื้อเพลิงทอรีไฟต์ด้วยคลื่นไมโครเวฟ

**ตารางผนวกที่ 1** ผลการวิเคราะห์ปริมาณความชื้นของเศษไม้และทางใบปาล์มทอรรีไฟต์ด้วยคลื่นไมโครเวฟ

<b>เศษไม้ลำใยทอรรีไฟต์ด้วยคลื่นไมโครเวฟ</b>		
กำลังวัตต์ไมโครเวฟ (W)	เวลาทอรรีไฟต์ (min)	ปริมาณความชื้น (%)
180	10	0.3487
	15	0.3076
	20	0.2654
300	10	0.2577
	15	0.2067
	20	0.1284
450	10	0.1607
	15	0.1264
	20	0.0988
600	10	0.1407
	15	0.1256
	20	0.0986
<b>ทางใบปาล์มทอรรีไฟต์ด้วยคลื่นไมโครเวฟ</b>		
กำลังวัตต์ไมโครเวฟ (W)	เวลาทอรรีไฟต์ (min)	ปริมาณความชื้น (%)
180	10	4.7610
	15	4.3681
	20	4.0799
300	10	4.5515
	15	3.4750
	20	3.3403
450	10	3.1525
	15	3.3560
	20	2.9800
600	10	2.9515
	15	2.6865
	20	2.1545

ตารางผนวกที่ 2 ผลการวิเคราะห์ปริมาณสารระเหยของเศษไม้และทางใบปาล์มทอรรีไฟต์ด้วยคลื่นไมโครเวฟ

เศษไม้ลำไยทอรรีไฟต์ด้วยคลื่นไมโครเวฟ		
กำลังวัตต์ไมโครเวฟ (W)	เวลาทอรรีไฟต์ (min)	ปริมาณสารระเหย (%)
180	10	82.78
	15	82.24
	20	81.46
300	10	80.43
	15	80.46
	20	79.50
450	10	79.33
	15	78.69
	20	77.38
600	10	71.76
	15	65.49
	20	62.15
ทางใบปาล์มทอรรีไฟต์ด้วยคลื่นไมโครเวฟ		
กำลังวัตต์ไมโครเวฟ (W)	เวลาทอรรีไฟต์ (min)	ปริมาณสารระเหย (%)
180	10	84.45
	15	83.83
	20	82.51
300	10	84.54
	15	83.69
	20	82.39
450	10	81.21
	15	80.46
	20	79.57
600	10	73.89
	15	72.44
	20	71.73

ตารางผนวกที่ 3 ผลการวิเคราะห์ปริมาณเถ้าของเศษไม้และทางใบปาล์มทอรรีไฟต์ด้วยคลื่นไมโครเวฟ

เศษไม้ลำไยทอรรีไฟต์ด้วยคลื่นไมโครเวฟ		
กำลังวัตต์ไมโครเวฟ (W)	เวลาทอรรีไฟต์ (min)	ปริมาณความเถ้า (%)
180	10	2.01
	15	2.18
	20	2.42
300	10	2.49
	15	2.53
	20	2.66
450	10	2.80
	15	3.00
	20	3.43
600	10	4.53
	15	5.08
	20	5.63
ทางใบปาล์มทอรรีไฟต์ด้วยคลื่นไมโครเวฟ		
กำลังวัตต์ไมโครเวฟ (W)	เวลาทอรรีไฟต์ (min)	ปริมาณความเถ้า (%)
180	10	4.65
	15	5.39
	20	5.51
300	10	4.88
	15	5.47
	20	5.71
450	10	7.12
	15	7.49
	20	7.59
600	10	8.24
	15	8.44
	20	8.53

ตารางผนวกที่ 4 ผลการวิเคราะห์ปริมาณคาร์บอนคงตัวของเศษไม้ละทางใบปาล์มทอรรีไฟต์ด้วย  
คลื่นไมโครเวฟ

เศษไม้ลำไยทอรรีไฟต์ด้วยคลื่นไมโครเวฟ		
กำลังวัตต์ไมโครเวฟ (W)	เวลาทอรรีไฟต์ (min)	ปริมาณคาร์บอนคงตัว (%)
180	10	12.52
	15	13.20
	20	15.79
300	10	14.98
	15	15.20
	20	17.12
450	10	17.24
	15	18.18
	20	18.71
600	10	23.46
	15	29.64
	20	32.07
ทางใบปาล์มทอรรีไฟต์ด้วยคลื่นไมโครเวฟ		
กำลังวัตต์ไมโครเวฟ (W)	เวลาทอรรีไฟต์ (min)	ปริมาณคาร์บอนคงตัว (%)
180	10	6.14
	15	6.41
	20	7.89
300	10	6.03
	15	7.37
	20	8.56
450	10	8.51
	15	8.70
	20	9.86
600	10	14.92
	15	16.44
	20	17.59

ตารางผนวกที่ 5 ผลการวิเคราะห์ค่าความร้อนของเศษไม้และทางใบปาล์มทอรรีไฟต์ด้วยคลื่นไมโครเวฟ

เศษไม้ลำไยทอรรีไฟต์ด้วยคลื่นไมโครเวฟ		
กำลังวัตต์ไมโครเวฟ (W)	เวลาทอรรีไฟต์ (min)	ค่าความร้อน (MJ/kg)
180	10	19.87
	15	20.70
	20	21.12
300	10	20.06
	15	21.39
	20	22.50
450	10	21.22
	15	22.28
	20	23.12
600	10	23.12
	15	23.95
	20	24.87
ทางใบปาล์มทอรรีไฟต์ด้วยคลื่นไมโครเวฟ		
กำลังวัตต์ไมโครเวฟ (W)	เวลาทอรรีไฟต์ (min)	ค่าความร้อน (MJ/kg)
180	10	18.31
	15	19.38
	20	19.43
300	10	18.76
	15	19.43
	20	19.86
450	10	19.19
	15	21.97
	20	22.76
600	10	21.94
	15	22.56
	20	22.87



ภาคผนวก ง

การคำนวณหาคุณสมบัติของชีวมวล



จากสมการ

$$MC = \frac{(A - B)}{A} \times 100$$

$$= \frac{(1.0029 - 0.9870)}{1.0029} \times 100$$

$$= 1.50 \%$$

### 3. การคำนวณหาค่าสารระเหย

กรณี เศษไม้ทอรรีไฟต์ด้วยคลื่นไมโครเวฟ ณ สภาวะการทดสอบกระบวนการทอรรีแฟคชันด้วยคลื่นไมโครเวฟที่กำลังวัตต์ 180 W เป็นระยะเวลา 10 min

กำหนดให้ น้ำหนักตัวอย่างก่อนการทดสอบ = 1.0029 g  
 น้ำหนักตัวอย่างหลังการทดสอบ = 0.2225 g

จากสมการ

$$VC = \frac{(A - B)}{A} \times 100$$

$$= \frac{(1.0029 - 0.2225)}{1.0029} \times 100$$

$$= 77.81 \%$$

หมายเหตุ: ตัวอย่างต้องทำการอบแห้งเพื่อไล่ความชื้นเรียบร้อยแล้ว

### 4. การคำนวณหาค่าเถ้า

กรณี เศษไม้ทอรรีไฟต์คลื่นไมโครเวฟ ณ สภาวะการทดสอบกระบวนการทอรรีแฟคชันด้วยคลื่นไมโครเวฟที่กำลังวัตต์ 180 W เป็นระยะเวลา 10 min

กำหนดให้ น้ำหนักตัวอย่างก่อนการทดสอบ = 1.0030 g  
 น้ำหนักตัวอย่างหลังการทดสอบ = 0.1255 g

จากสมการ

$$Ash = \frac{B}{A} \times 100$$

$$= \frac{0.1255}{1.0030} \times 100$$

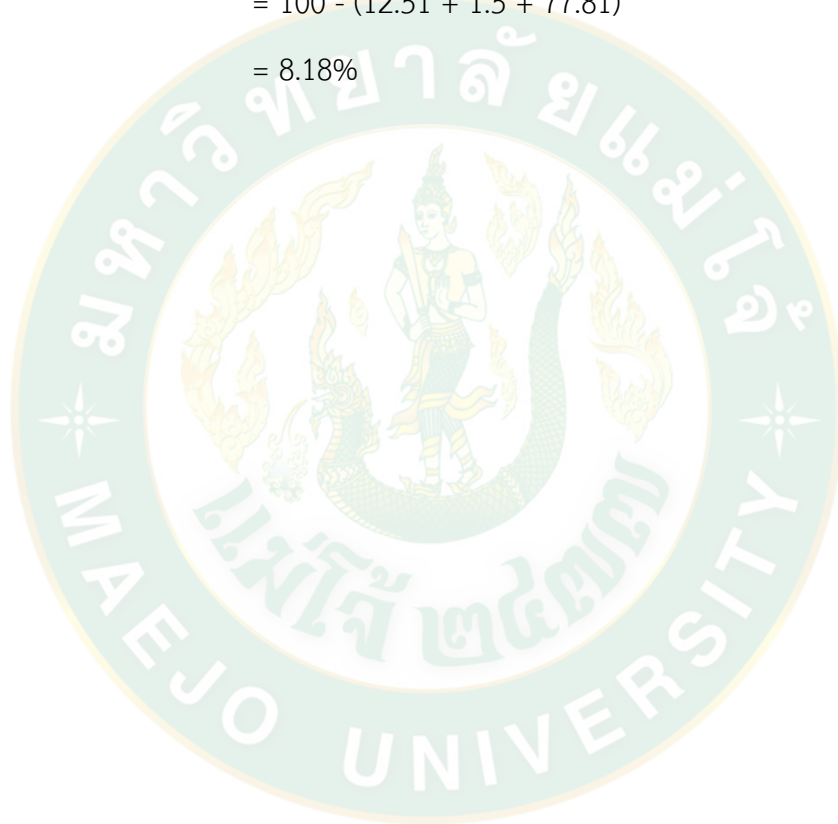
$$= 12.51 \%$$

### 5. การคำนวณหาค่าคาร์บอนคงตัว

กรณี เศษไม้ทอรรีไฟต์ด้วยคลื่นไมโครเวฟ ณ สภาวะการทดสอบกระบวนการทอรรีแฟคชั่น  
ด้วยคลื่นไมโครเวฟที่กำลังวัตต์ 180 W เป็นระยะเวลา 10 min

กำหนดให้ ปริมาณความชื้น = 1.5%  
ปริมาณสารระเหย = 77.81%  
ปริมาณเถ้า = 12.51%

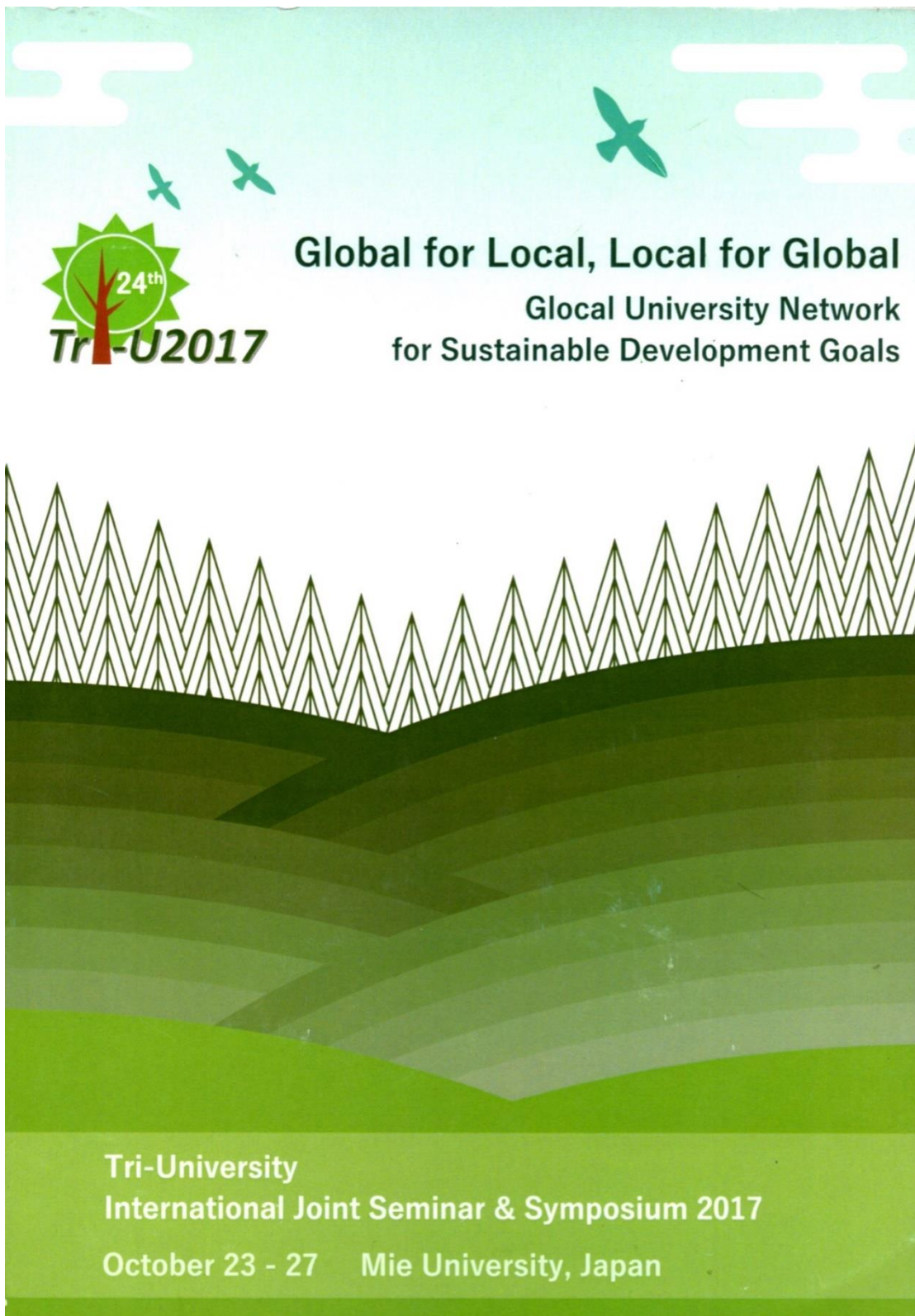
จากสมการ  $FC = (\%Ash + \%MC + \%VC) - 100$   
 $= 100 - (12.51 + 1.5 + 77.81)$   
 $= 8.18\%$





ภาคผนวก จ

การเผยแพร่งานวิจัย



### Oral Presentation Timetable

Oct.26	EG6	Room C [Energy]			
9:00-9:20	L	Maejo	Rameshprabu	Ramaraj	EG6-CL
9:20-9:40	1	Shanghai Ocean	Mengying	Liu	EG6-C1
9:40-10:00	2	Chiang Mai	Phattarapong	Suwatee	EG6-C2
10:00-10:20	3	Maejo	Sasithon	Bunchuai	EG6-C3
10:20-10:40	4	Guangxi	Jiayi	Wang	EG6-C4
Oct.26	EV5	Room D [Environment]			
9:00-9:20	L	Thammasat	Khomsri	Meepukdee	EV5-DL
9:20-9:40	1	Mie	Adriana Anastasia	Jenahat	EV5-D1
9:40-10:00	2	Guangxi	Zhao	Pan	EV5-D2
10:00-10:20	3	Jiangsu	Zhaowei	Zhu	EV5-D3
10:20-10:40	4	Mie	Kenta	Sugiura	EV5-D4
Oct.26	EV6	Room E [Environment]			
9:00-9:20	1	Mie	E	Ridengaoqier	EV6-E1
9:20-9:40	2	Shanghai Ocean	Zexiu	Xiong	EV6-E2
9:40-10:00	3	Jiangsu	Feifan	Wang	EV6-E3
10:00-10:20	4	Bogor Agriculture	Angga	Dwinovantyo	EV6-E4
10:20-10:40	5	Mie	Chinami	Shinoda	EV6-E5
Oct.26	EG7	Room A [Energy]			
11:00-11:20	1	Maejo	Wasun	Junnoi	EG7-A1
11:20-11:40	2	Shanghai Ocean	Xiaoxiao	Feng	EG7-A2
11:40-12:00	3	Chiang Mai	Thanwit	Naemsai	EG7-A3
12:00-12:20	4	Maejo	Jumlong	Malaket	EG7-A4
12:20-12:40	5	Maejo	Sakonrat	Jindarak	EG7-A5

## Effect of torrefaction time on agricultural waste chemical properties

Sakonrat Jindarak, Nigran Homdoun\*, Natthawud Dussadee,  
Churat Thararux and Rameshprabu Ramaraj

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

Corresponding author E-mail: [nigranghd@gmail.com](mailto:nigranghd@gmail.com)

**Abstract:** Biomass is an important energy source and has a high potential for Thailand, ASEAN countries and as well as worldwide. The objective of this study was to study the chemical property of agricultural waste on adjust torrefaction time. The biomass in experiment use corn stalk and longan wood residue which adjust torrefaction time in a range of 20, 40 and 60 minutes on 300°C of torrefaction temperature were adjusted with nitrogen. The experiment data was analyze moisture, volatile, fixed carbon, ash and the heating value. It was found that, the adjust torrefaction time of corn stalk and longan wood residue show better chemical properties. The overall color of both torrefied sample that tested in high torrefaction time was dark black that similar to coal. The use of torrefaction time at 60 min was received optimal time and the high heating value of both torrefied was increased of 14-15.5% at higher torrefaction time. Therefore, this study illustrated that the energy potential of corn stalk and wood residue could be improved through torrefaction process.

**Key words:** biomass, agricultural waste, torrefaction time, torrefied fuel

### 1. INTRODUCTION

Escalating oil price and scarcity of fossil fuels coupled with exploding population have resulted in serious energy crisis. Thai government has promoted alternative energy policy include biomass, solar wind and geothermal etc. Previously, Thailand has imported more than 80% of its fossil fuel as compared to its domestic fuels. For the country policy, biomass fuels are a very interesting energy source because Thailand is an agricultural country. Torrefaction process is one of thermo-chemical process for biomass conversion. It can increase the high heating value which leads to increased efficiency in direct combustion or gasification process [1]. The basic principle of torrefaction process was to eliminate moisture, volatile content, and tar. However, temperature and time were two main variables of torrefaction process, which directly influence the humidity and volatiles reduction. Since, increasing of temperature and time will directly result to more energy consumption, microwave is use. Microwaves is another way to reduce the torrefaction process [2]. Therefore, the objective this research was to determine the effect of torrefaction time on agricultural waste chemical properties. The results will be used as a reference for testing the microwave torrefaction process in future.

Biomass torrefaction is a pre-treatment method conducted at 200-320 °C in the absence of oxygen. The results from the decomposition at this temperature level cause biomass to become completely dry and lose its tenacious structure and fiber. After torrefaction process, the biomass becomes a torrefied fuel. Generally, the torrefaction process can reduce mass of material by 20-30%, resulting in higher density and higher transport costs than traditional wood chips. The applications of torrefied fuel can be used as a coal replacement or co-fired/co-milled with coal in electricity generating power plants. In addition, it can be used in gasification process and can contribute to remove tar in producer gas.

This article studied the microwave torrefaction of often seen and easily obtained agricultural residue: rice straw, and forage grass (*Pennisetum*). Based on the previous statement, microwave torrefaction should be feasible for wide biomass sources. Therefore, the energy input (electricity) of microwave torrefaction can be relatively less. The torrefaction byproducts (liquid and gas) can be utilized to generate heat or electricity, so the overall energy efficiency of microwave torrefaction can be further promoted. Besides, with proper refinery and manufacture processes, the byproducts could be regarded as sources of green

chemicals. According to this study, the microwave torrefaction of biomass should be a competitive and applicable technology [2]. The ultimate goal of biomass torrefaction should be to employ the least energy to acquire the torrefied biomass retaining the most bioenergy

### 2. MATERIALS AND METHOD

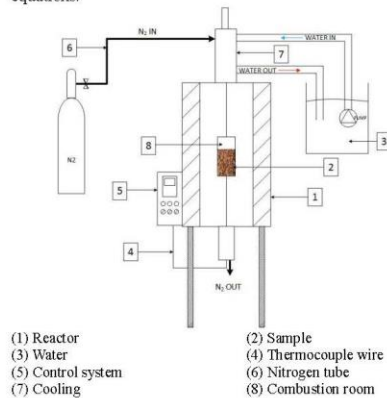
The agricultural waste materials were used in this experiment consist of corn stalk and wood residue from Northern Thailand (Fig.1). Corn wastes are utilized from the corn field, it can be divided into 28% of corn stalk and 62% of the remaining was corn crop and other parts. The average bulk density and moisture of corn stalk 127 kg/m<sup>3</sup> and less than 10% were tested [3]. Wood residue was obtained from longan wood residue, average remaining longan wood residue in Northern Thailand are 250-750 kg/Acre. Bulk density of 500-560 kg/m<sup>3</sup> and moisture less than 10% were used in this experiment. The samples were grinded into fine powder with 1 mm (16 mesh) size and use for 20 g/time in torrefaction process.



Fig.1 Corn stalk and longan wood residue

The experimental set up was presented by diagram (Fig.2) of biomass torrefaction process. The electrical heater of 5,000 W use for external heat source and established of temperature was about 1500 °C. The top of heat reactor was controlled temperature with heat exchanger device and use water cooling. The temperature measurement was use type K of thermocouple and control with electronic system by 220V, single phase and 50 Hz of electricity. Chamber in the reactor was used nitrogen on reaction with input on the top of this chamber. In experiment, the test was studied the effect of torrefaction time on the chemical properties such as proximate analysis, color and the heating value of biomass torrefied fuel with the test before and after of

torrefaction process. The temperature of that process was fixed at 300 °C and adjusted the time in a range of 20, 40 and 60 minutes. The moisture content, volatile matter, fixed carbon, ash and high heating value were evaluated using the following equations:



**Fig.2** Diagram of torrefaction experiment setup

The moisture content is given by:

$$MC (\%) = \frac{(A-B)}{A} \times 100$$

where A is Initial Mass (g) and B is Moisture Mass (g)

The volatile matter can be calculated by the following relation:

$$VM (\%) = \frac{(B-C)}{A} \times 100$$

where C is volatile mass (g)

The ash content of biomass torrefied fuel is given by:

$$Ash (\%) = \frac{(A-B)}{C} \times 100$$

where A is weight of crucible with sample (g) B is weight of crucible with ash (g) and C is weight of sample (g).

The fixed carbon is given by:

$$FC (\%) = 100 - MC - VM + Ash$$

The high heating value of torrefied fuel is given by [11]  
 $HHV (\%) = 0.3536FC + 0.1559VM - 0.0078 Ash$

### 3. RESULT AND DISCUSSION

#### 3.1 Proximate analysis of corn stalk and wood residue

The results of proximate analysis in terms of moisture, volatile matter, fixed carbon and ash contents were presented in Table 1. The fixed carbon of corn stalk and wood residue was about 13.75% and 14.51% respectively while the high heating value and moisture of both biomass were similar. The volatile matter of wood residue was higher than corn stalk, on the other hand, ash content was lower. The fixed carbon and volatile matter were leading to increase the heating value of biomass. While more ash content will be important to design an ash removal system. The volatile matter, ash and high heating value of corn stalk were 67.39%, 10.81% and 16.62 MJ/kg respectively while wood residue were of 73.81%, 1.40% and 16.65 MJ/kg respectively.

Table 2 shows the results of ultimate analysis of corn stalk and wood residue. The wood residue was received carbon oxygen and sulfur higher than corn stalk while remaining was

less than corn stalk. Chemical composition details of corn stalk and wood residue shown in table 2.

**Table 1** The proximate analysis of biomass

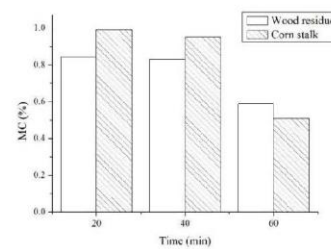
Biomass	MC (%)	VM (%)	Ash (%)	FC (%)	HHV (MJ/kg)
Corn stalk	8.05	67.39	10.81	13.75	16.62
Wood residue	10.28	73.81	1.40	14.51	16.65

**Table 2** The ultimate analysis of biomass

Biomass	C (%)	H (%)	O (%)	N (%)	S (%)
Corn stalk	43.51	6.23	41.70	1.52	0.15
Wood residue	45.34	6.02	47.05	0.53	1.07

#### 3.2 Effect of torrefaction time on torrefied fuel properties

Fig.3 shows effect of torrefaction time on the moisture content temperature at 300°C. The increasing torrefaction time with decreased moisture both biomass. The use of corn stalk was high evaporated water when torrefaction process. The high evaporated of water caused density and composition of the biomass. The lowest moisture content of corn stalk and wood residue torrefied fuel was of 0.51% and 0.83%, occurred at 60 minute.



**Fig 3** effect of torrefaction time on the moisture content

Fig.4 indicates the effect of torrefaction time on the volatile matter temperature at 300°C. The volatile matter of torrefaction process was decreased with increase the torrefaction temperature. The volatile matter of corn stalk was lower than wood residue due to high hemicellulose and cellulose content which cause more easily decomposed into the gas [8]. At the torrefaction time 20 to 60 minutes of both biomass, the volatile matter of corn stalk was of 61.94, 57.06 and 56.71% respectively and wood residue was about 78.07, 76.33 and 75.12%, respectively.

Fig.5 shows the ash content was adjusted torrefaction time temperature at 300°C. The increasing of torrefaction time of corn stalk slightly increase ash content while wood residue increased markedly. The ash content of corn stalk was higher than wood residue in a range of 80-82%. The ash content of corn stalk and wood residue between 20-60 minutes was about 2.17-2.41% and 11.23-13.59%. The problems of high ash content in combustion process caused low combustion efficiency and the boiler slagging and fouling, and resulting frequent operation of soot blowers, are some of the major operations and maintenance factors that can negatively affect power plant reliability and efficiency.

Fig.6 shows the fixed carbon of both biomass after torrefaction process. The increasing of torrefaction time with increase the fixed carbon of corn stalk and wood residue. The

increasing of fixed carbon was leading to high heating value of biomass.

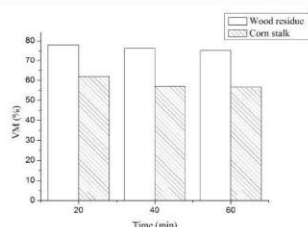


Fig.4 effect of torrefaction time on the volatile matter

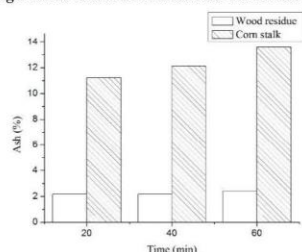


Fig.5 effect of torrefaction time on ash content

The fixed carbon of corn stalk was higher than wood residue, however, comparing before and after torrefaction process, the fixed carbon of corn stalk was slightly increased while wood residue was reduced due to change in biomass mass during heat or temperature rise. The fixed carbon of corn stalk was a range of 25.84-29.86% while the wood residue was between 18.71-19.36%. Table 3 illustrates the summary of proximate analysis of torrefaction process temperature at 300°C of torrefaction temperature. The increasing of torrefaction time was lead to increase fixed carbon and ash content while the moisture and volatile matter was decreased. The fixed carbon content of corn stalk and wood residue was 29.86% and 19.36% respectively at 60 min of torrefaction time. The lowest moisture content on highest torrefaction time of corn stalk and wood residue was in a range of 0.51-0.59%, while the volatile matter between 56.72% - 75.12% and ash content was in a range of 2.41%-13.59%. However, compare to other research, the torrefaction time was affected to torified fuel quality with similar this research [4].

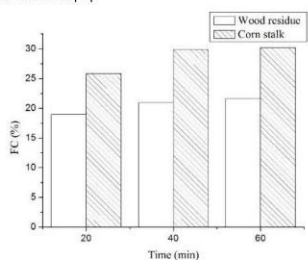


Fig.6 effect of torrefaction time on the fixed carbon

Table 3 Proximate analysis of torified fuel at 300 °C

Time	MC (%)	VM (%)	Ash (%)	FC (%)
<b>Corn stalk</b>				
20 min	0.99	61.94	11.23	25.84
40 min	0.95	57.06	12.13	29.86
60 min	0.51	56.72	13.59	30.18
<b>Wood residue</b>				
20 min	0.84	78.07	2.17	18.92
40 min	0.83	76.32	2.17	20.91
60 min	0.58	75.12	2.41	21.63

3.3 Effect of torrefaction time on the biomass color

Fig.7 shows the physical appearance of corn stalk and wood residue was varied torrefaction time temperature at 300°C. The color of both biomass changed with increased torrefaction time. The raw material of corn stalk and wood residue were brown at 20 min and that gradually become to a darker brown with increase torrefaction time. Wood residue from torrefaction process was darker color than corn stalk. Darker color caused by an exothermal reaction takes place results in hemicellulose decomposition of the biomass [2]. For the torrefaction process, the increasing of torrefaction time was lead to high heating value of solid biomass and that of up to 26 MJ/kg [9].



Fig.7 Color of corn stalk and wood residue at different torrefaction time.

3.4 Effect of torrefaction time on heating value

Fig.8 shows the high heating value of both torrefied fuels from the equation [11]. It was found that the increasing torrefaction time led to increased high heating value due to reducing of moisture content and some liquids that unable burn with depended on torrefaction time. At temperature 300°C of torrefaction process, the use of corn stalk torrefied fuels was slightly higher heating value than wood residue torrefied fuels due to more fixed carbon which effect on the increasing the heating value [ref]. The high heating value of corn stalk was of 19.38 MJ/kg while 19.3 MJ/kg of wood residue which on at 60 min of torrefaction time.

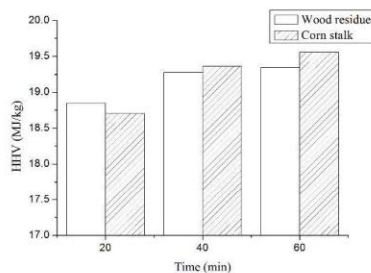


Fig.8 effect of torrefaction time on the high heating value However, comparison of before and after of torrefaction

process on torrefaction time, the high heating value was slight increased which about less than 2%.

#### 4. CONCLUSIONS

The effect of torrefaction time biomass was affected on moisture content, volatile matter, fixed carbon, ash content and heating value. And use of torrefaction time at 60 minutes was received optimal time and the color of both biomass was changed with increased torrefaction time. In addition, the moisture content and volatile matter of corn stalk and wood residue was reduced in a range of 92-95% and 10-15% with experiment at higher torrefaction time while the fixed carbon and ash content was increased between of 32-54% and 21-42%. Finally, the high heating value of corn stalk and wood residue was increased of 14-15.5 at higher torrefaction time.

#### ACKNOWLEDGMENTS

Authors would like to thank for provided the research grand from School of Renewable Energy Maejo University "Project and development of the renewable energy potential graduates ASEAN" and National Research Council of Thailand (NRCT) under the Thailand-China Cooperation Program, Fiscal 2016.

#### REFERENCES

- [1] Daya Ram Nhuchhen, Prabir Basu and Bishnu Acharya, (2014), A Comprehensive Review on Biomass Torrefaction, International Journal of Renewable Energy & Biofuels, Vol. 2014 (2014), Article ID 506376, 56 pages.
- [2] Y.F. Huanga, et al. (2012). "Microwave torrefaction of rice straw and pennisetum." *Bioresource Technology* 2012(123): 1-7.
- [3] Nigran Homdoug, Kittikorn Sasujit, Natthawud Dussadee, Tanet Chaichana, (2009), Potential Agriculture Biomass and Unused Available Biomass in Northern Thailand, 5<sup>th</sup> Conference on Energy Technology Network of Thailand; ENETT, Naresuan University, Phitsanulok.
- [4] Deborah Aller, et al. (2017). "Modified method for proximate analysis of biochars." *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 2017(124): 335-342.
- [5] F. Ronsse, S. Van Hecke, D. Dickinson, W. Prins, Production and characterization of slow pyrolysis biochar: influence of feedstock type and pyrolysis conditions, *GCB Bioenergy* 5 (2013) 104–115, <http://dx.doi.org/10.1111/gcbb.12018>.
- [6] Mehmood, M.A., Ye, G., Luo, H., Liu, C., Malik, S., Afzal, I., Xu, J., Ahmad, M.S., 2017. Pyrolysis and kinetic analyses of Camel grass (*Cymbopogon schoenanthus*) for bioenergy, *Bioresour. Technol.*, Vol 228, pp 18–24.
- [7] Yoshimitsu Uemura, Ryunosuke Matsumoto, Shazleen Saadon, and Yukihiko Matsumura, A study on torrefaction of *Laminaria japonica*, *Fuel Processing Technology*, vol. 138, pp. 133–138, 2015.
- [8] Xiqiang Zhao, et al. (2010). "Microwave pyrolysis of corn stalk bale: A promising method for direct utilization of large-sized biomass and syngas production." *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 2010(89): 87-94.
- [9] Roberto Garcia, et al. (2014). "Spanish biofuels heating value estimation." *Fuel* 2014(117): 1130-1138.
- [10] Wang, Y., Yin, R., Liu, R., 2014. Characterization of biochar from fast pyrolysis and its effect on chemical properties of the tea garden soil, *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, Vol 110, pp375–381.
- [11] Dinh Quoc Viet, Nguyen Van Vinh, Pham Hoang Luong, Van Dinh Son Tho. (2015). Thermogravimetric Study on Rice, Corn and Sugar Cane Crop Residue, *Journal of Sustainable Energy & Environment*, Vol 6 ,pp 87-91.



Ms. Sakonrat Jindarak

Ms. Sakonrat Jindarak  
Date of birth : 12/01/1994  
- Candidate in Master of Engineering (Renewable Energy Engineering)  
- Applied physic of science  
- Biomass technology



Dr. Nigran Homdoug

Dr. Nigran Homdoug  
Date of birth : 09/04/1974  
Doctor of Engineering (Mechanical Engineering)  
**Professional in** Gasification and Pyrolysis Process, Biomass Conversion Technology (Briquette fuel, Biofuel, Biomass Stove), Internal Combustion Engine and Biomass Power Plant Engineering.



Dr. Natthawud Dussadee

Dr. Natthawud Dussadee  
Assistant Professor & Director, School of Renewable Energy, Maejo University,  
**Professional in** Agricultural Drying Processes, Energy Conservation, Solar energy and Thermal Process and Biofuels.



Dr. Churat Thararux

Dr. Churat Thararux,  
Assistant Professor,  
School of Renewable Energy, Maejo University  
Professional in  
Gasification and Pyrolysis Process, Biomass Conversion Technology, Internal Combustion Engine and Bio hydraulic oil.



Dr. Rameshprabu Ramaraj

Dr. Rameshprabu Ramaraj, M.Eng., M.Sc., M.Phil., Ph.D., Lecturer, School of Renewable Energy, Maejo University,  
**Professional in scientific and engineering field** including biology (animal, plant & microbes), sustainable resource engineering, environment and ecological engineering, and biofuels.



14th Conference on Energy Network of Thailand  
การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 14

13 - 15 มิถุนายน 2561 ณ โนโวเทล ระยอง

# Proceeding



การผลิตชิ้นแก้วด้วยเทคโนโลยีแก๊สซีพีเคชั่นสำหรับเครื่องยนต์ขนาดเล็กเพื่อผลิตไฟฟ้า .....	634
การประเมินเชิงเศรษฐศาสตร์ของการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งจากผักขวาและแกลบ .....	642
Preliminary Prediction of Small Wind Turbines Power Output in a Building-Obstructed Wind-Flow Area Using Anemometer Measuring Technique .....	646
การศึกษาความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์เบื้องต้นของการผลิตเอทานอลจากขาน้อย .....	653
กระบวนการสอบเทียบเพื่อหาค่าการตอบสนองและคุณสมบัติเฉพาะของเครื่องวัดรังสีรวมภาคสนาม .....	661
ผลของอัตราส่วนของเปลือกทุเรียนโดยหมักร่วมกับมูลนกกระทาเพื่อการผลิตแก๊สชีวภาพ .....	665
การศึกษาสมรรถนะของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาราโบลาโคมที่ติดตั้งอุปกรณ์เก็บสะสมพลังงานความร้อนแบบ ใช้สารเปลี่ยนเฟส .....	671
การปรับปรุงคุณภาพแก๊สชีวภาพจากมูลโคโดยการลดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ .....	676
การศึกษาความคุ้มค่าของการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากทะลายน้ำตาล .....	683
การผลิตแก๊สโดยเตาแก๊สซีพีเออร์แบบเบดหยุนีงอากาศไหลลง ขนาด 10 kW จากวัสดุเหลือทิ้งจากคั้นตาลโตนด .....	689
ศักยภาพในการผลิตแก๊สชีววมวลจากเชื้อเพลิงอัดเม็ด .....	695
การผลิตถ่านอัดแท่งจากวงตาลโตนดผสมแกลบโดยมีกากน้ำตาลเป็นตัวประสาน .....	703
การทดสอบประสิทธิภาพพลังงานในเชื้อเพลิงชีววมวลที่ผลิตจากอ้อยและฟางข้าว .....	707
การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของใบพัดชนิดกึ่งหันลมแบบคาร์วีอีลที่ใช้ NACA0021 โปรไฟล์ .....	712
การประเมินค่าความร้อนของกระบวนการทอรีนแควชั่นจากวิธีวิเคราะห์แบบประมาณ .....	718
การเพิ่มประสิทธิภาพระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์โดยควบคุมอุณหภูมิความร้อน .....	724
สมรรถนะเตาชีววมวลระดับครัวเรือนเมื่อใช้ชีวมวลอัดเม็ดและอัดแท่งเป็นเชื้อเพลิง .....	729
<b>กระบวนการทอรีนแควชั่นที่วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรด้วยเทคนิคคลื่นไมโครเวฟ .....</b>	<b>734</b>
การปลดปล่อยก๊าซไฮโดรเจนและอัตราการสิ้นเปลืองของเชื้อเพลิงอิมัลชัน (ดีเซล-น้ำ-ไบโอดีเซล) ในเครื่องยนต์ดีเซลการเกษตร .....	740
การลดมลพิษจากเครื่องยนต์ดีเซลที่ขับเคลื่อนโดยใช้น้ำมันไบโอดีเซลผสมกับสารเติมแต่งนาโนซิงค์ออกไซด์ .....	745
ผลการปรับอัตราส่วนผสมที่มีต่อสมรรถนะการทำงานของระบบฟลูอิดเบดแก๊สซีพีเออร์ .....	751
การใช้สารลดแรงตึงผิวร่วมในการผลิตเชื้อเพลิงอิมัลชันเพื่อทดสอบในเครื่องยนต์ดีเซลการเกษตร .....	756
สมรรถนะเครื่องยนต์และมลพิษของเชื้อเพลิงทดแทนจากกระบวนการอิมัลชันของน้ำมันขยะพลาสติกและเอทานอลความบริสุทธิ์ต่ำ .....	762
คุณสมบัติเชื้อเพลิงอัดเม็ดผลิตจากกากตะกอนพลาสติกผสมชีววมวล .....	769
การศึกษาเปรียบเทียบการผลิตเอทานอลจากขาน้อยและกากน้ำตาล .....	773
การผลิตก๊าซชีวภาพจากมูลสุกร โดยใช้ตัวกลางประเภทในลอน .....	779
ผลกระทบของอุณหภูมิและเวลาทอรีนแควชั่นที่มีต่อคุณสมบัติวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร .....	785
การสร้างชั้น Local Back Surface Field (LBSF) ที่ด้านหลังของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิคอนโดยวิธีการประทับลายด้วย Flash foam .....	791
การศึกษาประสิทธิภาพการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้วและน้ำมันสัตว์โดยใช้ไพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา .....	795
การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้วโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาวิธียอนิกจากเถ้าแกลบข้าวรวมกับสารละลายไพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ .....	800

กระบวนการทอริไรไฟต์วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรด้วยเทคนิคคลื่นไมโครเวฟ  
Torrefaction Process of Agricultural Waste with Using Microwave Technic

ศกลรัตน์ จินดารักษ์<sup>1</sup>, ชูรัตน์ อารักษ์<sup>1</sup>, เสริมสุข บัวเจริญ<sup>1</sup>, นิกราน หอมดวง<sup>1</sup> และ ณัฐวุฒิ สุขขี<sup>1</sup>

<sup>1</sup>วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้

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

บทคัดย่อ

RE-01-104

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของกำลังไฟฟ้าไมโครเวฟและเวลาทอริไรไฟต์ของไมโครเวฟที่มีต่อคุณสมบัติวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรประเภทเศษไม้ ชีวมวลที่ใช้จะอยู่ในรูปแบบกากที่มีขนาดน้อยกว่า 3 มม การทดสอบกระบวนการทอริไรไฟต์ของไมโครเวฟที่ใช้มีขนาดกำลังไฟฟ้าไมโครเวฟ 180W 300W 450W และ 600W ระยะเวลาทอริไรไฟต์ 10 และ 20 min ชีวมวลที่ใช้ในการทดสอบแต่ละครั้ง 20 g ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจน ที่อัตราการไหล 5 V/min ผลการทดสอบพบว่า การเพิ่มกำลังไฟฟ้าไมโครเวฟและระยะเวลาทอริไรไฟต์ส่งผลให้ปริมาณความชื้นและสารระเหยมีแนวโน้มลดลง ส่วนปริมาณคาร์บอนคงตัวและแลมมีแนวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น การใช้กำลังไฟฟ้าของไมโครเวฟ 600 W ที่ระยะเวลา 20 นาที ให้ปริมาณคาร์บอนและค่าความร้อนสูงสุด 20.98 MJ/kg ซึ่งเพิ่มขึ้นมากกว่า 32.20% เมื่อเทียบกับชีวมวลตั้งต้น สุดท้ายการใช้เทคนิคไมโครเวฟเป็นอีกแนวทางในการเพิ่มคุณภาพชีวมวลให้เพิ่มขึ้น

**คำหลัก:** ชีวมวล ไทโลโรซิส ทอริไรไฟต์ เชื้อเพลิงทอริไรไฟต์

Abstract

The purpose of this research was to study effects of electric power and time in torrefaction process using microwave on wood chip. The form of biomass sample was powder size less than 3 mm. The microwave electric power and time in process were range of 180W 300W 450W 600W and 10-20 min of torrefaction time. The biomass sample was used 20g and tested on nitrogen atmosphere at flow rate 5 of V/min. The results was found that, the increase of temperature and time torrefaction was leading to moisture and volatile decreased while the fixed carbon and ash increased. The use of microwave power on 600W and 20 min torrefaction time was highest fixed carbon and heating value of 20.98 MJ/kg which more than 32.20% with compare the raw material. Finally, the use of microwave technic on torrefaction process was one of method for high upgrade the biomass.

**Keywords:** Biomass, Pyrolysis, Torrefaction, Torrefied fuel

1. บทนำ

การพัฒนาคุณภาพเชื้อเพลิงชีวมวลด้วยกระบวนการไพโรไลซิซหรือกระบวนการทอริไรไฟต์เป็นอีกแนวทางหนึ่งในการเพิ่มคุณภาพให้กับชีวมวลที่มีอยู่บนโลกแห่งนี้ อย่างไรก็ตาม การใช้เทคโนโลยีไพโรไลซิซจะต้องมีการป้อนพลังงานไปกับระบบก่อนซึ่งใหญ่ก็จะใช้พลังงานทั้งทางไฟฟ้าและความร้อนในรูปแบบต่างๆ เช่น เครื่องทำความร้อน (heater) หรือเชื้อเพลิง LPG หรือชีวมวลซึ่งสุดท้าย ปริมาณพลังงานที่ป้อนส่วนใหญ่จะใช้ในปริมาณที่สูงและคุณภาพของชีวมวลไม่ต่อเนื่อง ที่สำคัญใช้เวลานาน ส่งผลให้เกิดความสิ้นเปลืองพลังงานในที่สุด การนำเสนอแนวทางการพัฒนา การใช้ ไมโครเวฟเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการลดระยะเวลาและการควบคุมคุณภาพของชีวมวลได้ ถึงแม้แหล่งพลังงานที่ป้อนจะเป็นแหล่งพลังงานไฟฟ้าแต่ค่าพลังงานเหล่านี้ สามารถใช้ให้เกิดพลังงานได้สูงสุด การผลิตพลังงานในขนาดได้ พลังงานเหล่านั้น ก็ควรนำมาใช้ได้ ดังนั้น โครงการวิจัยจึงมุ่งเน้นการใช้เทคโนโลยีคลื่นไมโครเวฟในกระบวนการทอริไรไฟต์ เพื่อเพิ่มคุณภาพของชีวมวล สำหรับการพัฒนาและนำไปใช้ในอุตสาหกรรมในอนาคต

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 กระบวนการทอริไรไฟต์

กระบวนการทอริไรไฟต์ เป็นการปรับปรุงคุณภาพของชีวมวลในแง่ของคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมี โดยการรักษาความร้อนของชีวมวลที่ 200-400 °C ภายใต้สภาวะที่ไร้อากาศ ในระหว่างกระบวนการทอริไรไฟต์ น้ำที่มีอยู่ในชีวมวลจะระเหยออกไป โพลีเมอร์ชีวภาพและองค์ประกอบต่าง ๆ ในชีวมวล เช่น เซลลูลอส เฮมิเซลลูลอส และลิกนิน ก็จะถูกย่อยสลายออกไปเช่นกัน ผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่ได้คือวัสดุของแข็งแห้ง เรียกว่า ชีวมวลทอริไรไฟต์ (biomass torrefied) ในระหว่างกระบวนการชีวมวลจะสูญเสียน้ำหนัก 20% และค่าความร้อนของชีวมวลนั้น ๆ 10% พลังงานที่สูญเสียไปนี้สามารถนำไปเป็นเชื้อเพลิงให้ความร้อนสำหรับกระบวนการทอริไรไฟต์ หลังจากชีวมวลผ่านกระบวนการทอริไรไฟต์แล้ว ปริมาณความชื้นและมวลลดลง ปริมาณความหนาแน่นทางพลังงานและค่าความร้อนสูงขึ้น [5]

การใช้ไมโครเวฟในการให้ความร้อนร่วมกับชีวมวลก็เป็นอีกแนวทางหนึ่งที่น่าสนใจเนื่องจากไมโครเวฟเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic wave) ที่มีความถี่ระหว่าง 300 MHz ถึง 300 GHz (ระหว่างความยาวคลื่น 100 cm - 1 mm) ไมโครเวฟไม่ใช้ความร้อนแต่อยู่ในรูปของพลังงานและถูกเปลี่ยนเป็นความร้อนโดยการสั่นสะเทือนของอนุภาคที่มีประจุหรือการหมุนตัวโมเลกุลที่มีขั้วทำให้อนกับอนุภาคหรือโมเลกุลที่อยู่ข้าง

เคียง ซึ่งเกิดขึ้นหลังจากที่วัตถุได้รับคลื่นและมีการดูดซับพลังงานดังกล่าวเป็นผลให้เกิดความร้อนขึ้น [6] ข้อดีของการทอริไรไฟต์ด้วยเทคนิคไมโครเวฟคือ ใช้เวลาในการอบการต่ำ ความสามารถทะลุทะลวงของพลังงานสูง ประหยัดพลังงานในการให้ความร้อนชีวมวล มีต้นทุนที่ต่ำ มีความเหมาะสมกับวัสดุที่ใช้ในประเทศไทย และสามารถนำไปใช้ได้ไดโนอนาคต

**2.2 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีของชีวมวล**  
**- การวิเคราะห์โดยประมาณ (Proximate analysis)**

ปริมาณความชื้น (Moisture) คือปริมาณน้ำที่มีอยู่ในชีวมวล ส่วนมากชีวมวลจะมีความชื้นสูงเนื่องจากเป็นผลผลิตทางการเกษตร ซึ่งมีน้ำเป็นองค์ประกอบเป็นส่วนใหญ่ ปริมาณความชื้นที่พบในชีวมวลขึ้นอยู่กับชนิดของชีวมวล การวิเคราะห์ปริมาณความชื้น งานวิจัยนี้ได้ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D3173 โดยใช้ความร้อนจากตู้อบ ที่อุณหภูมิ 105 °C เพื่อให้น้ำระเหยออกจากชีวมวล ซึ่งปริมาณความชื้นที่สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 1 [6]

$$MC = \frac{(A - B)}{A} \times 100$$

(1)

เมื่อ MC คือ ปริมาณความชื้น (%)  
 A คือ น้ำหนักชีวมวลก่อนทดสอบ (g)  
 B คือ น้ำหนักชีวมวลหลังทดสอบ (g)

ปริมาณสารระเหย (Volatile) คือก๊าซและทาร์ที่อยู่ในเนื้อชีวมวล การวิเคราะห์ปริมาณสารระเหยของงานวิจัยนี้ได้ตามมาตรฐาน ASTM D3175 โดยการเผาตัวอย่างชีวมวลที่อุณหภูมิ 950 °C เป็นเวลา 7 min จากนั้นคำนวณหาปริมาณสารระเหยได้ดังสมการที่ 2 และ 3 [6]

$$WL = \frac{(A - B)}{A} \times 100$$

(2)

$$VC = WL (\%) - MC (\%) \quad (3)$$

เมื่อ VC คือ ปริมาณสารระเหย (%)  
 WL คือ น้ำหนักของชีวมวลที่หายไป (%)  
 ปริมาณเถ้า (Ash) เป็นส่วนที่ไม่สามารถเผาไหม้ได้ ซึ่งชีวมวลส่วนใหญ่จะมีชีเถ้า 1 ถึง 3 % ยกเว้นแกลบและฟางข้าวจะมีชีเถ้า 10-20% [6] งานวิจัยนี้ทดสอบตามการวิเคราะห์ปริมาณเถ้าตามมาตรฐาน ASTM D2866-94 โดยการเผาชีวมวลที่อุณหภูมิ 650 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จึงนำมายังน้ำหนัก ซึ่งสามารถคำนวณปริมาณเถ้าได้ดังสมการที่ 4 [6]

$$Ash = \frac{B}{A} \times 100 \quad (4)$$

เมื่อ Ash คือ ปริมาณเถ้า (%)

ปริมาณคาร์บอนคงตัว (Fixed carbon) เป็นสารประกอบของคาร์บอน (Carbonaceous Residue) ที่ไม่รวม Ash ที่เป็นส่วนที่เหลือจาก Organic Matter หลังจากที่ถูกสารระเหยถูกไล่ออกไปแล้ว ส่วนการวิเคราะห์การปริมาณคาร์บอนคงตัวสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 5 [6]

$$FC = 100 - (Ash + MC + VC) \quad (5)$$

เมื่อ FC คือ ปริมาณคาร์บอนคงตัว (%)

**- ค่าความร้อน (High Heating Value)**

ความสัมพันธ์ของค่าความร้อนกับคุณสมบัติทางเคมีคำนวณได้ตามสมการที่ 6) (อ้างอิง)

$$HHV (\%) = 0.3536FC + 0.1559VM - 0.0078Ash \quad (6)$$

เมื่อ HHV คือ ค่าความร้อน (%)

**3. วิธีการศึกษา**

**3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์**

- เครื่องทดสอบกระบวนการทอริไรไฟต์ขึ้นด้วยคลื่นไมโครเวฟ ประกอบด้วยชุดป้อนแก๊สไมโครเวฟเข้าสู่ด้านบน ถัดมาจะเป็นห้องเผาไหม้ ภายในห้องเผาไหม้จะมีการติดตั้ง ท่อแก๊วภายในห้องเผาไหม้จะเป็นถั่วเขียวสำหรับใส่ตัวอย่างชีวมวล นอกจากนี้จะมีระบบควบคุมกำลังวัตต์ไมโครเวฟและเวลาในการทดสอบกระบวนการทอริไรไฟต์ขึ้นด้วยคลื่นไมโครเวฟ โดยมีเป็นอุปกรณ์ที่ติดมากระเครื่องไมโครเวฟ เพื่อกำลังไฟและเวลาต่าง ๆ ดังรูปที่ 1

- เตาเผาอุณหภูมิสูง เป็นเตาเผาแบบปิด สามารถควบคุมอุณหภูมิได้สูงสุด 1,200 °C ขนาดเตาภายนอกมีความกว้าง 450 mm ความสูง 530 mm และความลึก 500 mm ส่วนขนาดภายในมีความกว้าง 170 mm ความสูง 160 mm และความลึก 500 mm ทั้งสองข้างภายในเตามีการติดตั้งชุดลดความร้อนและเทอร์โมคัปเปิลตรวจวัดอุณหภูมิ

- ตู้อบความชื้น ยี่ห้อ MEMMERT รุ่น UFB500 สามารถควบคุมอุณหภูมิได้สูงสุด 300 °C และมีกำลังไฟสูงสุด 2 kW ขนาดภายนอกภายนอกตู้กว้าง 710 mm ลึก 550 mm และสูง 760 mm ส่วนขนาดภายในตู้กว้าง 560 mm ลึก 400 mm และสูง 480 mm มีน้ำหนัก 69 kg และมีปริมาณทั้งหมด 108 L

- เครื่องบดชีวมวลแบบหยวน ใช้ใบมีดสับผสมกับการตีชีวมวลให้เป็นชิ้นขนาดเล็ก มีขนาดมอเตอร์ขนาด 1 hp 220 V ตระแกรงในการคัดกรองชีวมวลมีขนาด 10 mm การป้อนชีวมวลจะป้อนจากด้านบน เมื่อชีวมวลจะผ่านการสับย่อยและไหลผ่านตะแกรงไหลลงสู่ด้านล่าง

- เครื่องย่อยชีวมวลแบบละเอียด ใช้สำหรับบดชีวมวลที่มีขนาดเล็กกว่า 3.0 mm ภายในประกอบมีชุดตีและบดชีวมวลทั้งหมด 4 ชุด พร้อมตะแกรงขนาด 3 mm ชุดบดของเครื่องรับกำลังมาจากมอเตอร์ขนาด 3 hp (2.2 kW) แรงดันไฟฟ้า 220 V ใช้สายพานส่งกำลังจากมอเตอร์ให้กับชุดบด ชีวมวลที่ผ่านการบดจะมีขนาดอยู่ในช่วง 0.5-3.0 mm

3.2 การเตรียมตัวอย่างชีวมวล

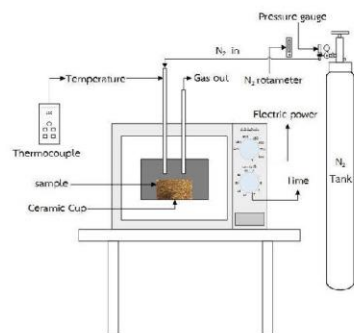
วัสดุที่นำมาทดสอบเป็นวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร ได้แก่ เศษไม้ จากนั้นจะนำชีวมวลทั้งสองชนิดมาบดด้วยเครื่องบดหยาบก่อน จะได้ชีวมวลขนาดน้อยกว่า 10 mm และนำมาบดครั้งที่สองด้วยเครื่องบดละเอียด ชีวมวลที่ได้จะมีขนาดน้อยกว่า 3 mm จากนั้นนำชีวมวลที่ผ่านเครื่องบดละเอียดมาคัดขนาดด้วยตะแกรงที่มีขนาดรู 3 mm และเก็บชีวมวลไว้ในที่แห้งเพื่อเตรียมไว้สำหรับทดสอบกระบวนการทอรีแฟคชันด้วยคลื่นไมโครเวฟ แสดงดังรูปที่ 2 โดยคุณสมบัติทางเคมีและค่าความร้อนของชีวมวลทั้งสองชนิดแสดงดัง ตารางที่ 1



รูปที่ 2 เศษไม้และไมโครเวฟที่ใช้ในงานวิจัย

ตารางที่ 1 คุณสมบัติทางเคมีของเศษไม้

Proximate analysis	Wood residue
Moisture (%)	6.34
Volatile (%)	83.95
Fixed carbon (%)	7.91
Ash (%)	1.80
HHV (MJ/kg)	15.87
Bulk density (kg/m <sup>3</sup> )	627.18



รูปที่ 1 เครื่องทดสอบกระบวนการทอรีแฟคชันด้วยคลื่นไมโครเวฟ

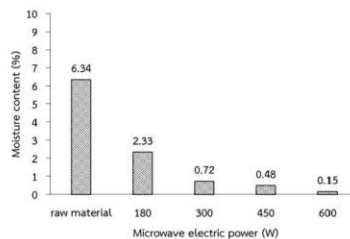
3.3 วิธีการทดลอง

การทดสอบกระบวนการทอรีแฟคชันด้วยคลื่นไมโครเวฟ เริ่มจากการนำเอาตัวอย่างชีวมวลที่เตรียมไว้หรือชีวมวลแบบกากของเศษไม้ โดยน้ำหนักตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบแต่ละครั้งคือ 20 g จากนั้นตัวอย่างใส่เข้าไปในตู้ไมโครเวฟ ของเครื่องทดสอบกระบวนการทอรีแฟคชันด้วยคลื่นไมโครเวฟ และป้อนก๊าซไนโตรเจนที่อัตราการไหล 5 l/min จากนั้นตั้งกำลังไฟฟ้าของไมโครเวฟและเวลาที่ทำการทดสอบทอรีแฟคชันด้วยคลื่นไมโครเวฟ โดยเงื่อนไขของกำลังวัตต์ไมโครเวฟและเวลาที่ใช้ในการทดสอบได้แก่ กำลังวัตต์ไมโครเวฟที่ 180W 300W 450W และ 600W โดยแต่ละกำลังวัตต์ไมโครเวฟจะทดสอบทั้งหมด 2 เวลา ได้แก่ 10 และ 20 min ทดสอบตัวอย่างละ 3 ครั้ง ใช้ค่าเฉลี่ยในการวิเคราะห์ จากนั้นนำไปวิเคราะห์ทางเคมีด้วยการวิเคราะห์โดยปริมาณและหาค่าความร้อน ซึ่งแผนภาพการทดสอบกระบวนการทอรีแฟคชันด้วยคลื่นไมโครเวฟและการวิเคราะห์ข้อมูล

4. ผลการทดลอง

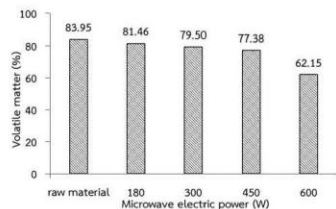
4.1 ผลกระทบกำลังไฟฟ้าไมโครเวฟต่อคุณสมบัติทางเคมีของเศษไม้

รูปที่ 3 แสดงผลกระทบกำลังไฟฟ้าไมโครเวฟที่มีผลต่อความชื้นของเศษไม้ โดยค่าความชื้นก่อนกระบวนการทอรีแฟคชันเท่ากับ 6.34% ที่ผลของเวลาทอรีแฟคชัน 20 นาที การเพิ่มกำลังไฟฟ้าไมโครเวฟส่งผลให้ความชื้นของเศษไม้มีแนวโน้มลดลง โดยเกิดขึ้นในสภาวะกำลังไฟฟ้า 600W และค่าความชื้นลดลงต่ำสุด 0.15% คิดเป็นความชื้นที่ลดลงมากที่สุด 97.63% ความชื้นของเศษไม้ลดลงเนื่องจากเอมิเซลล์โลสลดลง ทำให้ลักษณะที่พื้นผิวของชีวมวลอยู่ในสภาวะแข็ง (active sites) พื้นอะทางเคมีของความชื้นจึงถูกทำลายลง [7]



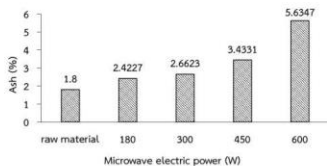
รูปที่ 3 ผลกระทบกำลังไฟฟ้าต่อความชื้นของเศษไม้

รูปที่ 4 แสดงปริมาณสารระเหยของเศษไม้ก่อนและหลังกระบวนการทอรีแฟคชันด้วยเทคนิคไมโครเวฟที่เวลา 20 นาที พบว่า เมื่อใช้ที่ระดับกำลังไฟฟ้า 180W 300W 450W ปริมาณสารระเหยลดลงเล็กน้อย แต่ที่ระดับกำลังไฟฟ้า 600W ปริมาณสารระเหยมีค่าลดลงเหลือ 62.15% คิดเป็น 25.97% ของสารระเหยที่ลดได้ ซึ่งการลดลงของสารระเหยเกิดจากการสลายตัวขององค์ประกอบชีวมวลประเภทสารแทรก เอมิเซลล์โลส ลิกนิน และเซลลูโลส [9] ซึ่งการลดลงของสารระเหยในชีวมวล ส่งผลให้มวลและพลังงานบางส่วนของ ชีวมวลลดลง [9]



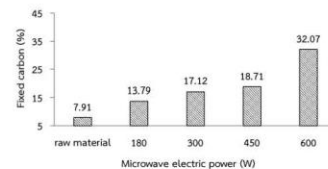
รูปที่ 4 ผลกระทบกำลังไฟฟ้าต่อปริมาณสารระเหยของเศษไม้

จากรูปที่ 5 แสดงผลกระทบของกำลังไฟฟ้าไมโครเวฟต่อปริมาณเถ้าที่เกิดขึ้นกับชีวมวลพบว่า ปริมาณเถ้ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อกำลังไฟฟ้าไมโครเวฟเพิ่มขึ้น ซึ่งสาเหตุของเถ้าที่มีปริมาณเพิ่มสูงขึ้นเกิดจากสัดส่วนของความชื้นและสารระเหยบางส่วนได้สลายในระหว่างกระบวนการทอรีแฟคชันชีวมวล ดังนั้นจึงส่งผลให้สัดส่วนของเถ้าในชีวมวลเพิ่มขึ้นตาม [8] กำลังไฟฟ้าไมโครเวฟที่ 600W ให้ปริมาณเถ้าสูงที่สุด 5.6347% ซึ่งสูงกว่าปริมาณเถ้าก่อนกระบวนการทอรีแฟคชันเฉลี่ย ประมาณ 3 เท่า



รูปที่ 5 ผลกระทบกำลังไฟฟ้าต่อปริมาณเถ้าของเศษไม้

จากรูปที่ 6 แสดงผลกระทบของกำลังไฟฟ้าไมโครเวฟที่มีต่อปริมาณคาร์บอนคงตัวของเศษไม้ที่เวลาทอรีแฟคชัน 20 นาที การเพิ่มกำลังไฟฟ้าไมโครเวฟส่งผลให้ปริมาณคาร์บอนเพิ่มสูงขึ้นพบว่า การเพิ่มขึ้นของคาร์บอนคงตัวจะเป็นสัดส่วนที่ผกผันกับสารระเหยที่เป็นองค์ประกอบที่มีอยู่ในชีวมวล [11] โดยที่ระดับกำลังไฟฟ้าไมโครเวฟซึ่ง 600W คาร์บอนคงตัวค่าสูงสุด เท่ากับ 32.07% เพิ่มขึ้นจากชีวมวลเดิมประมาณ 4 เท่า การเพิ่มขึ้นของปริมาณคาร์บอนคงตัวนำไปสู่การเพิ่มของค่าความร้อนชีวมวล อย่างไรก็ตามการเพิ่มสัดส่วนของปริมาณคาร์บอนก็แปรผันตามพลังงานที่ป้อนให้กับชีวมวล

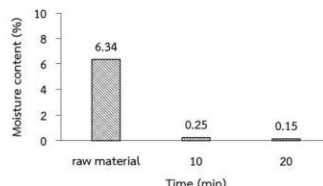


รูปที่ 6 ผลกระทบกำลังไฟฟ้าต่อคาร์บอนคงตัวของเศษไม้

4.2 ผลกระทบของเวลาทอรีแฟคชันต่อคุณสมบัติ

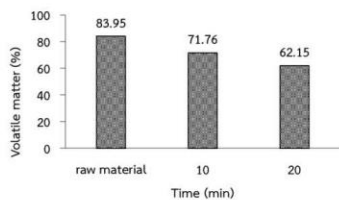
ทางเคมีของเศษไม้

จากรูปที่ 7 แสดงผลกระทบของเวลาทอรีแฟคชันต่อความชื้น ที่ระดับกำลังไฟฟ้า 600W ซึ่งพบว่า ความชื้นมีแนวโน้มลดลง เมื่อเวลาทอรีแฟคชันเพิ่มขึ้น โดยที่เวลา 10 และ 20 นาที มีค่าความชื้นของเศษไม้ลดลงเหลือ 0.25% และ 0.15% ตามลำดับ พฤติกรรมการลดลงของความชื้นจากการใช้ไมโครเวฟอธิบายได้จากการให้ความร้อนในกระบวนการทอรีแฟคชันแก่ชีวมวลในช่วงแรกจะถูกใช้ไปในการระเหยความชื้นเท่านั้น ซึ่งขั้นตอนของการระเหยจะเกิดขึ้นที่ผิวชีวมวล เมื่อปริมาณความชื้นที่ผิวหน้าชีวมวลแห้งลง และความชื้นภายในเนื้อวัสดุจะเริ่มลดลง ความชื้นอิสระภายในตัววัสดุจะซึมขึ้นมาทดแทนให้กับอัตราการเร็วในการระเหยที่ผิวหน้า ขั้นตอนการระเหยจะค่อยๆ เลื่อนลงลึกเข้าไปในเนื้อวัสดุ อุณหภูมิของวัสดุก็จะเริ่มเข้าใกล้อุณหภูมิของห้องเผาไหม้จากบริเวณพื้นผิว นอกจากนี้ความร้อนส่วนหนึ่งยังต้องใช้ในการให้ความร้อนแก่ตัวชีวมวลเอง ดังนั้นอัตราเร็วการลดลงของความชื้นจึงค่อยๆ ลดลงตามเวลาที่ผ่านไป [13]



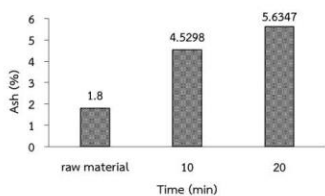
รูปที่ 7 ผลกระทบของเวลาต่อความชื้นของเศษไม้

รูปที่ 8 แสดงผลกระทบของเวลาทอรีแฟคชันที่มีต่อปริมาณสารระเหยของเศษไม้ภายใต้ ที่ระดับกำลังไฟฟ้าไมโครเวฟ 600W พบว่า การเพิ่มระยะเวลาส่งผลให้ปริมาณสารระเหยลดลง โดยที่ระยะเวลา 20 นาที มีปริมาณสารระเหยลดลงต่ำสุดเหลือ 62.15 % ในขณะที่ 10 นาที ลดลงเหลือ 71.76 % การเพิ่มเวลาทำให้การระเหยของสารระเหยในเศษไม้เพิ่มขึ้น

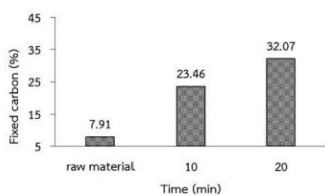


รูปที่ 8 ผลกระทบเวลาต่อปริมาณสารระเหยของเศษไม้

รูปที่ 9 และ 10 แสดงผลกระทบของเวลาทอรีรีแฟคชั่นที่มีต่อปริมาณเถ้าคาร์บอนคงตัว ซึ่งพบว่าปริมาณเถ้าและคาร์บอนคงตัวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น การเพิ่มของปริมาณเถ้าเกิดขึ้นสูงสุดที่ระยะเวลาทอรีรีแฟคชั่น 20 นาที คิดเป็นอัตราปริมาณเถ้าเพิ่มขึ้น 213.05% ในส่วนของปริมาณคาร์บอนคงตัว จะมีค่าสูงสุด 32.07% ที่เวลาทอรีรีแฟคชั่น 20 นาที คิดเป็นอัตราปริมาณคาร์บอนเพิ่มขึ้น 305.31%

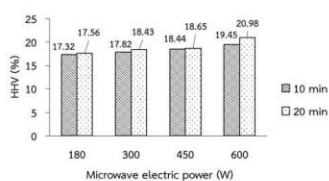


รูปที่ 9 ผลกระทบเวลาต่อปริมาณเถ้าของเศษไม้



รูปที่ 10 ผลกระทบเวลาต่อคาร์บอนคงตัวของเศษไม้

4.3 ผลกระทบกระบวนการทอรีรีแฟคชั่นต่อค่าความร้อนชีวมวล



รูปที่ 11 ผลกระทบกำลังไฟฟ้าและเวลาต่อค่าความร้อนของเศษไม้

รูปที่ 11 แสดงผลกระทบของอุณหภูมิและเวลาทอรีรีแฟคชั่นที่มีต่อค่าความร้อนของเศษไม้ โดยการเพิ่มของอุณหภูมิและเวลาส่งผลให้ค่าความร้อนเพิ่มขึ้นสูงสุด 20.98 MJ/kg คิดเป็นค่าความร้อนที่เพิ่มสูงสุด 32.20% เมื่อเทียบกับค่าความร้อนตัวเดิม สาเหตุที่ค่าความร้อนของชีวมวลทอรีรีแฟคชั่นเพิ่มขึ้นเกิดจากการให้ความร้อนสูงในระหว่างกระบวนการทอรีรีแฟคชั่น ส่งผลให้พันธะ C-O ที่อยู่ในโครงสร้างชีวมวลถูกทำลาย [20] ทำให้ความสัมพันธ์ของพันธะ C-C และ C-H เพิ่มขึ้น ด้วยสาเหตุนี้จึงทำให้ปริมาณคาร์บอนเพิ่มขึ้นไปด้วย และยังทำให้ชีวมวลมีคุณสมบัติการเผาไหม้ที่ดีขึ้น นอกจากนี้กระบวนการทอรีรีแฟคชั่นยังส่งผลให้อัตรารส่วน O/C และ H/C ลดลง รวมถึงควัน และไอน้ำก็มีปริมาณลดลง ซึ่งเหตุผลทั้งหมดที่ได้กล่าวมานี้เป็นสาเหตุให้ค่าความร้อนของชีวมวลทอรีรีแฟคชั่นเพิ่มขึ้น [20] การเปรียบเทียบในการเพิ่มกำลังไฟฟ้าไมโครเวฟกับเวลาทอรีรีแฟคชั่น ปัจจัยของกำลังไฟฟ้าไมโครเวฟส่งผลต่อค่าความร้อนของเศษไม้มากกว่าเวลาทอรีรีแฟคชั่น

5.สรุปผลการทดลอง

- การเพิ่มกำลังไฟฟ้าของไมโครเวฟส่งผลให้ค่าความชื้นและปริมาณสารระเหยลดลง ส่วนปริมาณคาร์บอนคงตัวและเถ้าเพิ่มขึ้นโดยที่การใช้กำลังไฟฟ้า 600W เวลา 20 นาที ซึ่งทำให้ได้ค่าความร้อนสูงที่สุดที่ 20.98 MJ/kg
- การเพิ่มเวลาทอรีรีแฟคชั่นส่งผลให้ปริมาณความชื้นและสารระเหยลดลง ส่วนปริมาณคาร์บอนคงตัวและเถ้าเพิ่มขึ้น
- ปัจจัยกำลังไฟฟ้าไมโครเวฟส่งผลต่อคุณสมบัติทางเคมีและค่าความร้อนของเศษไม้มากกว่าเวลาทอรีรีแฟคชั่น

6. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณทุนวิจัยจากโครงการผลิตและพัฒนาศักยภาพบัณฑิตทางด้านพลังงานทดแทน ในกลุ่มประเทศอาเซียนในระดับบัณฑิตศึกษา ทุนอุดหนุนการวิจัยแก่นักศึกษาระดับอุดมศึกษาประจำปีงบประมาณ 2560 กองทุนเพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงานและสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ภายใต้โครงการวิจัยความร่วมมือไทย-จีน ที่เอื้อเพื่อเชื้อเพลิงชีวมวลพร้อมทั้งอุปกรณ์สำหรับการวิจัย และขอขอบคุณวิทยาลัยพลังงานทดแทนและศูนย์วิจัยพลังงาน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ที่เอื้อเพื่อสถานที่ในการศึกษาครั้งนี้

## 7. เอกสารอ้างอิง

- [1] ศูนย์ประสานงานการเรียนรู้ด้านพลังงาน (2558). "สถานการณ์พลังงานและการใช้พลังงานต่อสิ่งแวดล้อม." กระทรวงพลังงาน 2558(1).
- [2] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. (2558). "แผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือกพ.ศ. 2558-2579." กระทรวงพลังงาน. [ออนไลน์]. เข้าถึงจาก [http://www.dede.go.th/ewt\\_news.php?nid=42195](http://www.dede.go.th/ewt_news.php?nid=42195). (29 เมษายน 2560).
- [3] ปริญญา อากานโรคม (2557). "การให้ความร้อนโดยใช้ไมโครเวฟและการประยุกต์ใช้ไมโครเวฟในการแปรรูปวัสดุ." ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์: 57-67.
- [4] นคร ทิพย์วงศ์. 2552. เทคโนโลยีการแปลงสภาพชีวมวล. กรุงเทพฯ: สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น).
- [5] ณรงค์ฤทธิ์ สายลูน และธนพร พบลาก. 2557. ชีวมวลที่มีความหนาแน่นเชิงพลังงานสูงจากการทอรีแฟคชันเศษไม้ยางพารา. มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- [6] ธนาพล ตันตีสัตยกุล, สุริยา พงษ์เกษม, ปรีชญ์ปวีณ ภูทงู๊ และ กานวรัตน์ ไถ้บ้านกวย. 2558. พลังงานทดแทนชุมชนจากเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งจากทามะพร้าว. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, 23(3)
- [7] Saeed, M.A., Ahmad, S.W., Kazmi, M., Moshi, M. and Feroze, N. 2005. Impact of torrefaction technique on the moisture content, bulk density and calorific value of briquetted biomass. Polish Journal of Chemical Technology, 17(25-28).
- [8] Sadaka, Samy, Sharara, Mahmoud A., Ashworth, Amanda, Keyser, Patrick, Allen, Fred and Wright, Andrew. 2014. Characterization of Biochar from Switchgrass Carbonization. Energies, 7(548-567).
- [9] Borges, Ane C. P., Alves, Carine T. and Torres, Ednildo A. 2016. Torrefied Eucalyptus Grandis Characterization as a Biomass to Using in Industrial Scale. CHEMICAL ENGINEERING TRANSACTIONS, 49 (283-288).
- [10] Stelt, M.J.C. van der, Gerhauser, H., Kiel, J.H.A. and Ptasinski, K.J. 2011. Biomass upgrading by torrefaction for the production of biofuels: A review. biomass and bioenergy, 35(3748-3762).
- [11] Parikha, Jigisha, Channiwala, S.A. and Ghosal, G.K. 2005. A correlation for calculating HHV from proximate analysis of solid fuels. Fuel, 84(487-494).
- [12] กษกร จันใจมติก. 2540. การศึกษาการพ้อตรากรอบแห้งของสับประรดแช่แข็ง. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- [13] Zhao, Xiqiang, Wang, Wenlong, Liu, Hongzhen, Ma, Chunyuan and Song, Zhanlong. 2014. Microwave pyrolysis of wheat straw: Product distribution and generation mechanism. Bioresource Technology, 158 (278-285).
- [14] Yingquan, Chen, Liu, Biao, Haiping, Yang, Yang, Qing and Chen, Hanping. 2014. Evolution of functional groups and pore structure during cotton and corn stalks torrefaction and its correlation with hydrophobicity.
- [15] Chiou, B.S., Medina, V.D., Sainz, B.C., Klamczynski, A.K., Bustillos, R.J.A., Milczarek, R.R., Du, W.X., Glenn, G.M. and Orts, W.J. . 2015. Torrefaction of pomaces and nut shells. Bioresource Technology, 177(58-65).
- [16] Poudel, J., Ohm, T.J. and Oh, S.C. . 2015. A study on torrefaction of food waste. Fuel, 140(275-281).
- [17] Huang, Y. F., Chen, W. R., Chiueh, P. T., Kuan, W. H. and Lo, S. L. . 2012. Microwave torrefaction of rice straw and Pennisetum. Bioresour Technol, 123(1-7)
- [18] Medic, Dord, Darr, Matthew, Shah, Ajay and Rahm, Sarah. 2012. The Effects of Particle Size, Different Corn Stover Components, and Gas Residence Time on Torrefaction of Corn Stover. Energies, 5(1199-1214).
- [19] Mei, Yanyang, Chea, Qingfeng, Yangb, Qing, Draperd, Christopher, Yanga, Haiping, Zhanga, Shihong and Chena, Hanping. 2016. Torrefaction of different parts from a corn stalk and its effect on the characterization of products. Industrial Crops and Products, 92(26-33).
- [20] Teh, Kwo W. and Jamari, Saidatul S. . 2016. The Valorization of Rice Waste via Torrefaction Method. Chemical Engineering and Application

## ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ-สกุล	นางสาวศกลรัตน์ จินดารักษ์	
เกิดเมื่อ	12 มกราคม 2537	
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2554	ระดับมัธยมศึกษา โรงเรียนเฉลิมขวัญสตรี
	พ.ศ. 2559	ระดับปริญญาตรี วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร จังหวัดพิษณุโลก

