



ผลของสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟที่มีต่อสมบัติของขยะชุมชนอัดแห้ง
ความชื้นสูงที่ผ่านกระบวนการให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่ำ

โดย

นางสาวพิชญานันท์ ไวยเนตร

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

ปีการศึกษา 2559

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

ผลของสารตุกกลิ่นคลื่นไมโครเวฟที่มีต่อสมบัติของขยะชุมชนอัดแท่ง
ความชื้นสูงที่ผ่านกระบวนการให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่ำ

โดย

นางสาวพิชญนันท์ ไวยเนตร



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

ปีการศึกษา 2559

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์



THE EFFECTS OF MICROWAVE ABSORBERS ON THE TORREFACTION
OF HIGHLY-MOIST MUNICIPAL SOLID WASTE (MSW) PELLETS

BY

MISS PHICHAYANAN WAIYANATE



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF
THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING
DEPARTMENT OF CHEMICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
THAMMASAT UNIVERSITY
ACADEMIC YEAR 2016
COPYRIGHT OF THAMMASAT UNIVERSITY

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
คณะวิศวกรรมศาสตร์

วิทยานิพนธ์

ของ

นางสาวพิชญนันท์ ไวยเนตร

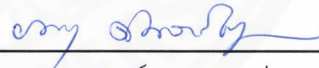
เรื่อง

ผลของสารดูดกลิ่นกลิ่นไมโครเวฟที่มีต่อสมบัติของขยะชุมชนอัดแท่ง
ความชื้นสูงที่ผ่านกระบวนการให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่ำ

ได้รับการตรวจสอบและอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

เมื่อ วันที่ 17 มกราคม พ.ศ. 2560


ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


(รองศาสตราจารย์ ดร.ภาณุ ตำนานิชกุล)

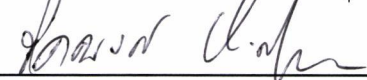
กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์


(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พงศ์ธร รุชปะเตมีย์)

กรรมการสอบวิทยานิพนธ์


(รองศาสตราจารย์ ดร.สาธิต ไชยกุลชื่นสกุล)

กรรมการสอบวิทยานิพนธ์


(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชิตพงศ์ ประดิษฐ์สุวรรณ)

คณบดี


(รองศาสตราจารย์ ดร.ประภัสสร วังศกาญจน์)

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ผลของสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟที่มีต่อสมบัติของขยะชุมชนอัดแท่งความชื้นสูงที่ผ่านกระบวนการให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่ำ
ชื่อผู้เขียน	นางสาวพิชญานันท์ ไวยเนตร
ชื่อปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา/คณะ/มหาวิทยาลัย	วิศวกรรมเคมี วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พงศ์ธร ฐปะเดมิย์
ปีการศึกษา	2559

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟที่มีต่อสมบัติของขยะชุมชนอัดแท่งความชื้นสูงที่ผ่านกระบวนการให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่ำ (torrefaction) โดยศึกษาผลของตัวแปรต่างๆ ได้แก่ ชนิดของสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟที่ทำจากวัสดุเหลือทิ้งจากการเกษตร (ผงถ่านจากฟางข้าว ชังข้าวโพด กะลาปาล์ม และชานอ้อย) กำลังของไมโครเวฟ (500-800 วัตต์) และระยะเวลาการให้ความร้อน (4-12 นาที) ที่มีต่อร้อยละมวลคงเหลือ (mass yield) และอุณหภูมิ ต่อผลการวิเคราะห์แบบประมาณ (proximate analysis) ต่อผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (ultimate analysis) ต่อค่าความร้อน (heating value) และร้อยละพลังงานรวมคงเหลือ (energy yield) ต่อลักษณะสัณฐาน ด้วยภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope: SEM) และต่อค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ (specific surface area) ของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่ผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่ำ พร้อมทั้งศึกษาผลของปริมาณ (ร้อยละ 10-40 โดยน้ำหนักของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่ง) และความสูง (30-100 มิลลิเมตร) ของสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ ที่มีต่อร้อยละมวลคงเหลือและอุณหภูมิของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่ผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่ำ ผลการศึกษา พบว่า ตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่เติมสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟที่เป็นผงถ่านจากชานอ้อยมีการลดลงของร้อยละมวลคงเหลือมากกว่าตัวอย่างที่มีการเติมผงถ่านจากฟางข้าว กะลาปาล์ม และชังข้าวโพด และตัวอย่างที่ไม่ได้เติมสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ ตามลำดับการเติมผงถ่านจากชานอ้อยส่งผลให้มีการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิสูงสุดเมื่อเทียบกับการเติมผงถ่านชนิดอื่นๆ เมื่อพิจารณาผลของปริมาณและความสูงของสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ (ซึ่งเป็นผงถ่านจากชานอ้อย) พบว่า ร้อยละมวลคงเหลือมีค่าลดลง แต่มีอุณหภูมิสูงขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณสารดูดกลืนคลื่น

ไมโครเวฟ ขณะที่ระดับความสูงของสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ (ซึ่งเป็นผงด่านจากชานอ้อย เช่นเดียวกัน) มีผลน้อยมากต่อร้อยละมวลคงเหลือและอุณหภูมิของตัวอย่างชยะชุมชนอัดแห้งที่ผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่ำ การเติมสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ การเพิ่มระยะเวลาการให้ความร้อน และการเพิ่มกำลังของไมโครเวฟ ส่งผลให้ร้อยละมวลคงเหลือ ปริมาณความชื้น และปริมาณสารระเหยได้ในตัวอย่างชยะชุมชนอัดแห้งมีแนวโน้มลดลง ขณะที่ปริมาณเถ้าและคาร์บอนคงตัวมีค่าค่อนข้างคงที่ เมื่อเทียบกับปริมาณเถ้าและคาร์บอนคงตัวก่อนการให้ความร้อน อีกทั้งยังพบว่าตัวอย่างที่มีการเติมผงด่านจากชานอ้อยมีการลดลงของปริมาณสารระเหยได้รวดเร็วและมากที่สุด เมื่อเทียบกับตัวอย่างที่เติมผงด่านชนิดอื่นๆ สำหรับผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ พบว่า สัดส่วนของธาตุคาร์บอนในตัวอย่างชยะชุมชนอัดแห้งเพิ่มขึ้นหลังการให้ความร้อน แต่สัดส่วนของธาตุออกซิเจนลดลง ขณะที่สัดส่วนของธาตุไฮโดรเจนค่อนข้างคงที่ เมื่อเทียบกับปริมาณของธาตุเหล่านี้ก่อนการให้ความร้อน นอกจากนี้ ยังพบว่าตัวอย่างชยะชุมชนอัดแห้งที่มีการเติมผงด่านจากชานอ้อยเป็นสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ มีอัตราส่วนระหว่าง O/C และ H/C เข้าใกล้อัตราส่วนระหว่าง O/C และ H/C ของถ่านหินลิกไนต์ และถ่านหินบิทูมินัส มากที่สุด เมื่อเทียบกับตัวอย่างที่เติมผงด่านจากฟางข้าว กะลาปาล์ม และซังข้าวโพด และตัวอย่างที่ไม่ได้เติมสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ ตามลำดับ เมื่อพิจารณาค่าความร้อน พบว่า ค่าความร้อนของตัวอย่างชยะชุมชนอัดแห้งหลังการให้ความร้อนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อเทียบกับตัวอย่างชยะชุมชนอัดแห้งก่อนการให้ความร้อน และมีค่าใกล้เคียงกับค่าความร้อนของถ่านหินบิทูมินัส ในแง่ของลักษณะสัญญาณและค่าพื้นที่ผิวจำเพาะของตัวอย่างชยะชุมชนอัดแห้งที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ พบว่า ตัวอย่างชยะชุมชนอัดแห้งที่เติมผงด่านจากชานอ้อยเป็นสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟที่ผ่านการให้ความร้อนมีลักษณะเป็นรูพรุนและมีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะมากกว่าตัวอย่างที่เติมผงด่านจากฟางข้าว กะลาปาล์ม และซังข้าวโพด และตัวอย่างที่ไม่ได้เติมสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ ตามลำดับ เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนกับร้อยละมวลคงเหลือ ร้อยละพลังงานรวมคงเหลือ และปริมาณสารระเหยได้คงเหลือของตัวอย่างชยะชุมชนอัดแห้งที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ พบว่า กำลังของไมโครเวฟและระยะเวลาการให้ความร้อนที่เหมาะสมสำหรับการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ คือ 650 วัตต์ และ 4 นาที ตามลำดับ โดยส่งผลให้ได้ตัวอย่างชยะชุมชนอัดแห้งที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟที่มีร้อยละพลังงานรวมคงเหลือสูงที่สุด ขณะเดียวกัน มีค่าความร้อนที่สูง

คำสำคัญ: ชยะชุมชนอัดแห้ง, การให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่ำ, คลื่นไมโครเวฟ, สารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ

Thesis Title	THE EFFECTS OF MICROWAVE ABSORBERS ON THE TORREFACTION OF HIGHLY-MOIST MUNICIPAL SOLID WASTE (MSW) PELLETS
Author	Miss Phichayanan Waiyanate
Degree	Master of Engineering
Major Field/Faculty/University	Chemical Engineering Engineering Thammasat University
Thesis Advisor	Assist. Prof. Pongtorn Dhupatemiya, D.Eng.
Academic Years	2016

ABSTRACT

The purpose of this research was to study the effects of microwave absorbers on the torrefaction of highly-moist municipal solid waste (MSW) pellets. The effects of the type of agricultural residue used as the microwave absorber (char from rice straw, from corncob, from palm shell, or from bagasse), the microwave power (500-800 W), and the torrefaction time (4-12 min) on mass yield and temperature, proximate and ultimate analyses, heating value and energy yield, morphology, and specific surface area of the torrefied MSW pellets were investigated. The effects of the quantity (10-40 wt.%) and the height (30-100 mm) of the microwave absorber (char from bagasse) on mass yield and temperature of the torrefied MSW pellets were also examined. The results from the experiments revealed that the addition of char from bagasse yielded the lowest mass yield and the highest temperature of the torrefied MSW pellets, followed by those with the additions of char from rice straw, palm shell, and corncob, and that without the addition of the microwave absorber, respectively. An increase in the quantity of the char from bagasse (microwave absorber) lowered the mass yield but led to an increase in the temperature of the torrefied MSW pellet. On the other hand, the height of the char from bagasse (microwave absorber) had little effect on the mass yield and temperature of the torrefied MSW pellet. The addition of

microwave absorber, and the increases in torrefaction time and microwave power caused the mass yield, and the remaining amounts of moisture and volatile matter in the torrefied MSW pellets to decrease. However, the remaining amounts of ash and fixed carbon were found to be relatively constant at their initial values. A decrease in volatile matter content was found to be highest for the torrefied MSW pellets with the addition of char from bagasse, followed by those with the addition of char from rice straw, palm shell, and corncob, and that without the addition of the microwave absorber, respectively. For the ultimate analysis, it was found that, after being heated by microwave irradiation, the portion of carbon in the torrefied MSW pellets increased, but the portion of oxygen decreased, while the portion of hydrogen was relatively constant, when comparing to their initial values. The atomic ratio of O/C and H/C of the torrefied MSW pellet with the addition of char from bagasse was found to be the closest one to those of lignite and bituminous coal. The heating values of the MSW pellets were found to increase and similar to that of bituminous coal after being torrefied. For the morphology and the specific surface area, it was found that the amount of pores and the specific surface area of the torrefied MSW pellet with the addition of char from bagasse were relatively higher than those with the additions of char from rice straw, palm shell, corncob, and that without the addition of the microwave absorber, respectively. When considering the relationship between the heating value and mass yield, energy yield, and volatile matter of the torrefied of MSW pellets, it was found that the microwave power of 650 W and the torrefaction time of 4 min were the most suitable ones, as they yielded the torrefied MSW pellet with the highest energy yield and considerably high heating value.

Keywords: Municipal solid waste (MSW) , Torrefaction, Microwave irradiation, Microwave absorber

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีเนื่องจากได้รับความอนุเคราะห์และความช่วยเหลือในทุกๆ ด้านจากหลายท่านตลอดระยะเวลาในการทำวิจัย ซึ่งผู้ทำวิจัยขอขอบคุณทุกท่านเป็นอย่างสูง และหากงานวิจัยนี้มีผลดีและก่อให้เกิดประโยชน์ต่อส่วนรวมประการใดแล้ว ผู้วิจัยขอมอบความดีนั้นให้กับบุคคลที่จะกล่าวถึงต่อไปนี้

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พงศ์ธร ฐปะเตมีย์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่คอยดูแล ให้คำปรึกษา และคำแนะนำ จนวิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี รวมทั้งฝึกให้ผู้วิจัยเป็นนักวิจัยที่ดี สามารถแก้ปัญหาและทำงานอย่างเป็นระบบ พร้อมทั้งขอขอบพระคุณ อาจารย์โปรดปราน สิริธีรศาสน์ ซึ่งเป็นผู้ที่มีส่วนสำคัญอย่างยิ่งในการทำให้วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี โดยได้ให้คำแนะนำและคำชี้แนะในด้านต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ ทั้งที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์ และสิ่งต่างๆ ที่สามารถนำไปใช้ได้ในชีวิตประจำวัน รวมทั้งคอยช่วยเหลือ และอบรมสั่งสอนผู้วิจัยเป็นอย่างดีมาโดยตลอด และคอยกระตุ้นให้ผู้วิจัยมีความกระตือรือร้น ในการค้นคว้าวิจัย ตั้งแต่เริ่มต้นจนกระทั่งวิทยานิพนธ์นี้เสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ภาณุ ตำนวานิชกุล รองศาสตราจารย์ ดร.สาธก ไชยกุลชื่นสกุล และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชิตพงศ์ ประดิษฐ์สุวรรณ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่เสียสละเวลาในการอ่าน ตรวจสอบ และให้คำแนะนำต่างๆ รวมทั้งให้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัยนี้

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ภาควิชาวิศวกรรมเคมี อันได้แก่ คุณสมศักดิ์ หาริรักษ์ดำรง คุณกิตติเมธาวงศ์ คุณจิตตรา ดอกบัว คุณสากล ม่วงเขียว คุณไพรัตน์ รักพิช คุณขวัญมนัส มิตรสุพรรณ และคุณอรสา อินทธร ที่ได้ให้คำปรึกษาและคำแนะนำในด้านต่างๆ รวมทั้งอำนวยความสะดวกในการใช้ห้องปฏิบัติการ เครื่องมือ และอุปกรณ์ต่างๆ ในการทำวิจัยนี้

ขอขอบคุณ คุณปโยธร แซ่ไคว้ บริษัท เจริญทรัพย์ไพศาล จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์กะลาปาล์ม มาใช้ในงานวิจัยนี้ และบริษัท ดับบลิว วาย เอ็น จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ฟางข้าวและซังข้าวโพด มาใช้ในงานวิจัยนี้

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ บิดา มารดา ครอบครัว และเพื่อนๆ ของผู้วิจัยทุกคน ที่คอยเป็นกำลังใจ และคอยสนับสนุนในด้านการศึกษาดูตลอดระยะเวลาที่ผ่านมา

นางสาวพิชญานันท์ ไวยเนตร

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	(1)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	(3)
กิตติกรรมประกาศ	(5)
สารบัญตาราง	(12)
สารบัญภาพ	(14)
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	4
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย	5
1.5 องค์ประกอบของรายงาน	6
บทที่ 2 วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	7
2.1 ขยะชุมชน (Municipal Solid Waste: MSW)	7
2.1.1 ความหมายของขยะชุมชน	7
2.1.2 วิธีการกำจัดขยะชุมชน	7
2.2 การวิเคราะห์คุณสมบัติของขยะชุมชน	8
2.2.1 การวิเคราะห์แบบประมาณ (proximate analysis)	9
2.2.2 การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (ultimate หรือ elemental analysis)	10
2.2.3 ค่าความร้อน (Heating Value: HV)	12

2.3	ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับการให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่ำ (Torrefaction)	13
2.4	ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับไมโครเวฟ	14
2.4.1	คลื่นไมโครเวฟ	14
2.4.2	กลไกการเกิดความร้อนโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ	14
2.4.3	พฤติกรรมการตอบสนองต่อคลื่นไมโครเวฟของวัสดุ	15
2.4.4	หลักการการทำงานของเตาไมโครเวฟ	15
2.5	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	16
บทที่ 3 วิธีการวิจัย		19
3.1	วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย	19
3.1.1	ขยะชุมชนอัดแท่ง	19
3.1.2	สารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ (Microwave Absorber)	20
3.1.2.1	ผงถ่านจากฟางข้าว	20
3.1.2.2	ผงถ่านจากขี้ข้าวโพด	20
3.1.2.3	ผงถ่านจากกะลาปาล์ม	21
3.1.2.4	ผงถ่านจากชานอ้อย	21
3.1.2.5	ซิลิคอนคาร์ไบด์ (SiC)	22
3.2	เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย	22
3.2.1	เตาไมโครเวฟ (Microwave Oven)	22
3.2.2	ถ้วยครุซีเบล (Crucible)	23
3.2.3	ตู้อบลมร้อน (Hot Oven)	23
3.2.4	เตาเผาไฟฟ้าอุณหภูมิสูง (Muffle Furnace)	24
3.2.5	เครื่อง X-Ray Fluorescence Spectrometer (XRF)	24
3.2.6	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM)	25
3.2.7	เครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะและรูพรุน (Surface Area Analyser)	25
3.2.8	เครื่องชั่งละเอียด	26
3.2.9	Infrared Pyrometer	26
3.2.10	อุปกรณ์อื่นๆ	27

3.3	ขั้นตอนและวิธีการดำเนินการวิจัย	27
3.3.1	การวิเคราะห์ตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งก่อน การให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ	27
3.3.1.1	การวิเคราะห์แบบประมาณ (proximate analysis)	28
3.3.1.2	การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (ultimate analysis)	28
3.3.1.3	การวิเคราะห์ค่าความร้อน (heating value)	28
3.3.1.4	การวิเคราะห์ค่าความหนาแน่น (density)	29
3.3.1.5	วิเคราะห์หาปริมาณธาตุองค์ประกอบในตัวอย่าง สารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟชนิดต่างๆ	29
3.3.1.6	วิเคราะห์ลักษณะสัญญาณ	29
3.3.1.7	วิเคราะห์ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ (specific surface area)	29
3.3.2	การเตรียมผงถ่านจากฟางข้าว ชังข้าวโพด กะลาปาล์ม หรือชานอ้อย	30
3.3.3	การให้ความร้อนแก่ขยะชุมชนอัดแท่งด้วยคลื่นไมโครเวฟ	30
3.3.4	การศึกษาผลของปริมาณของสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟที่มีต่อ ร้อยละมวลคงเหลือ (mass yield) ของตัวอย่างขยะชุมชน อัดแท่งที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ	32
3.3.5	การศึกษาผลของความสูงของสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟที่มีต่อ ร้อยละมวลคงเหลือ (mass yield) ของตัวอย่างขยะชุมชน อัดแท่งที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ	33
3.3.6	การวิเคราะห์ตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่ผ่านการให้ความร้อน ด้วยคลื่นไมโครเวฟ	34
บทที่ 4	ผลการวิจัยและวิเคราะห์ผล	35
4.1	ผลการวิเคราะห์ตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งก่อน การให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ	35
4.1.1	ผลการวิเคราะห์แบบประมาณ (proximate analysis) ของตัวอย่าง ขยะชุมชนอัดแท่งก่อนการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ	35
4.1.2	ผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (ultimate analysis) ของตัวอย่าง ขยะชุมชนอัดแท่งก่อนการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ	36

4.1.3	ผลการวิเคราะห์ค่าความร้อน (heating value) ของตัวอย่าง ขยะชุมชนอัดแท่งก่อนการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ	37
4.1.4	ผลการวิเคราะห์ค่าความหนาแน่น (density) ของตัวอย่างขยะ ชุมชนอัดแท่งก่อนการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ	37
4.2	ผลการวิเคราะห์ร้อยละมวลคงเหลือ (mass yield) และอุณหภูมิ ของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่ผ่านการให้ความร้อนด้วย คลื่นไมโครเวฟ	37
4.2.1	ผลของระยะเวลาการให้ความร้อนที่มีต่อร้อยละมวลคงเหลือ (mass yield) และอุณหภูมิของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่ง ที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ	37
4.2.2	ผลของกำลังของไมโครเวฟที่มีต่อร้อยละมวลคงเหลือ (mass yield) และอุณหภูมิของตัวอย่างขยะชุมชน อัดแท่งที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ	42
4.2.3	ผลของสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟที่มีต่อร้อยละมวลคงเหลือ (mass yield) ของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่ผ่าน การให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ เทียบกับ ผลของความชื้นในตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่ง	44
4.2.4	ผลของปริมาณสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟที่มีต่อร้อยละ มวลคงเหลือ (mass yield) ของตัวอย่างขยะชุมชน อัดแท่งที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ	46
4.2.5	ผลของความสูงของสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟที่มีต่อร้อยละ มวลคงเหลือ (mass yield) ของตัวอย่างขยะชุมชน อัดแท่งที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ	49
4.3	ผลการวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate Analysis) ของตัวอย่าง ขยะชุมชนอัดแท่งที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ	50
4.3.1	ปริมาณความชื้น (moisture) คงเหลือของตัวอย่างขยะชุมชน อัดแท่งที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ	50
4.3.2	ปริมาณสารระเหยได้ (volatile matter: VM) คงเหลือของตัวอย่าง ขยะชุมชนอัดแท่งที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ	54
4.3.3	ปริมาณเถ้า (ash) คงเหลือของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่ง ที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ	57

4.3.4 ปริมาณคาร์บอนคงตัว (fixed carbon: FC) คงเหลือของตัวอย่าง ขยะชุมชนอัดแท่งที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ	60
4.4 ผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate Analysis) ของตัวอย่าง ขยะชุมชนอัดแท่งที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ	63
4.4.1 ผลของชนิดสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟที่มีต่อผลการวิเคราะห์ แบบแยกธาตุของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่ผ่าน การให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ	63
4.4.2 ผลของระยะเวลาการให้ความร้อนที่มีต่อผลการวิเคราะห์ แบบแยกธาตุของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่ผ่าน การให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ	66
4.4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน O/C และ H/C	68
4.5 ผลการวิเคราะห์ค่าความร้อน (Heating Value) ของตัวอย่างขยะชุมชน อัดแท่งที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ	72
4.5.1 ผลของระยะเวลาการให้ความร้อนและกำลังของไมโครเวฟที่มีต่อ ผลการวิเคราะห์ค่าความร้อนของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่ง ที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ	72
4.5.2 ผลของชนิดของสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟที่มีต่อผลการวิเคราะห์ ค่าความร้อนของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่ผ่าน การให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ	75
4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนกับร้อยละมวลคงเหลือ (mass yield) ร้อยละพลังงานรวมคงเหลือ (energy yield) และปริมาณสารระเหยได้ (volatile matter: VM) คงเหลือของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่ง ที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ	77
4.7 ผลการวิเคราะห์ลักษณะสัณฐาน ด้วยภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM) และค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ (Specific Surface Area) ของตัวอย่าง ขยะชุมชนอัดแท่งที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ	83
4.8 ผลการศึกษาผลขององค์ประกอบของผงถ่านที่ทำจากวัสดุเหลือทิ้งจากการ เกษตรที่ใช้เป็นสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ ที่มีต่อสมบัติของตัวอย่าง ขยะชุมชนอัดแท่งที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ	85

	(11)
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต	87
5.1 สรุปผลการวิจัย	87
5.2 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต	90
รายการอ้างอิง	91
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก วิธีการวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate Analysis) ตามมาตรฐาน ASTM	96
ภาคผนวก ข ตัวอย่างการคำนวณ	98
ภาคผนวก ค ตัวอย่างข้อมูลดิบ	103
ประวัติผู้เขียน	110

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 ผลการวิเคราะห์แบบประมาณ (proximate analysis) ของตัวอย่าง ขยะชุมชนอัดแท่งก่อนการให้ความร้อน	36
4.2 ผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (ultimate analysis) ของตัวอย่าง ขยะชุมชนอัดแท่งก่อนการให้ความร้อน	36
4.3 ผลการวิเคราะห์ค่าความร้อน (heating value) ของตัวอย่าง ขยะชุมชนอัดแท่งก่อนการให้ความร้อน	37
4.4 ค่าเฉลี่ยของค่าความร้อนของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่ง ที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ ที่ระยะ เวลาในช่วง 4-12 นาที ที่กำลังของไมโครเวฟ และสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟต่างๆ	72
4.5 ค่าเฉลี่ยของค่าความร้อนของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่ผ่าน การให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ ในช่วง 500-800 วัตต์ ที่ระยะเวลาการให้ความร้อนและสารดูดกลืนคลื่น ไมโครเวฟต่างๆ	74
4.6 ผลการวิเคราะห์ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ (specific surface area) ของตัวอย่าง ขยะชุมชนอัดแท่งที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟกำลัง 800 วัตต์ ที่ระยะเวลา 12 นาที สำหรับตัวอย่างที่เต็มและ ไม่เต็มสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ	85
4.7 ปริมาณของสารอนินทรีย์ในผงถ่านของสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ ที่ทำจากวัสดุเหลือทิ้งจากการเกษตร [วิเคราะห์ด้วยเครื่อง X-Ray Fluorescence (XRF)]	86
ค.1 สมบัติของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่ผ่านการให้ความร้อนด้วย คลื่นไมโครเวฟกำลัง 500 W ที่ระยะเวลาการให้ความร้อน ในช่วง 4-12 นาที โดยใช้สารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟต่างๆ	103

- ค.2 สมบัติของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่ผ่านการให้ความร้อนด้วย
คลื่นไมโครเวฟกำลัง 650 W ที่ระยะเวลาการให้ความร้อน
ในช่วง 4-12 นาที โดยใช้สารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟต่างๆ 104
- ค.3 สมบัติของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่ผ่านการให้ความร้อนด้วย
คลื่นไมโครเวฟกำลัง 800 W ที่ระยะเวลาการให้ความร้อน
ในช่วง 4-12 นาที โดยใช้สารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟต่างๆ 105
- ค.4 ร้อยละมวลคงเหลือและอุณหภูมิของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่ผ่าน
การให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟกำลัง 500 W ที่ระยะเวลา
การให้ความร้อนในช่วง 4-12 นาที ในกรณีต่างๆ 106
- ค.5 ร้อยละมวลคงเหลือและอุณหภูมิของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่ผ่าน
การให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟกำลัง 650 W ที่ระยะเวลา
การให้ความร้อนในช่วง 4-12 นาที ในกรณีต่างๆ 107
- ค.6 ร้อยละมวลคงเหลือและอุณหภูมิของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่ผ่าน
การให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟกำลัง 800 W ที่ระยะเวลา
การให้ความร้อนในช่วง 4-12 นาที ในกรณีต่างๆ 108
- ค.7 ร้อยละมวลคงเหลือและอุณหภูมิของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่ผ่าน
การให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟกำลัง 500 W ที่ระยะเวลา
การให้ความร้อน 12 นาที โดยใช้ผงถ่านจากชานอ้อยเป็น
สารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ ที่ระดับความสูงต่างๆ 109

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
3.1 ตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่ใช้ในงานวิจัย	19
3.2 ฟางข้าวก่อนและหลังทำเป็นผงถ่าน	20
3.3 ชังข้าวโพดก่อนและหลังทำเป็นผงถ่าน	20
3.4 กะลาปาล์มก่อนและหลังทำเป็นผงถ่าน	21
3.5 ชานอ้อยก่อนและหลังทำเป็นผงถ่าน	21
3.6 ซิลิคอนคาร์ไบด์ (SiC)	22
3.7 เตามาโครเวฟ	22
3.8 ถ้วยครุชชีเบลพร้อมฝาปิดที่ใช้เป็นเครื่องปฏิกรณ์สำหรับงานวิจัย	23
3.9 ตู้อบลมร้อน (hot oven)	24
3.10 เตเผาไฟฟ้าอุณหภูมิสูง (muffle furnace)	24
3.11 เครื่อง X-Ray Fluorescence Spectrometer (XRF)	25
3.12 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)	25
3.13 เครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะและรูพรุน	26
3.14 เครื่องชั่งแบบละเอียด (4 ตำแหน่ง)	26
3.15 Infrared thermometer	27
4.1 ร้อยละมวลคงเหลือของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟกำลัง 500 วัตต์ ที่ระยะเวลาในช่วง 4-12 นาที โดยใช้สารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟต่างๆ	38
4.2 อุณหภูมิของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟกำลัง 500 วัตต์ ที่ระยะเวลาในช่วง 4-12 นาที โดยใช้สารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟต่างๆ	38
4.3 ร้อยละมวลคงเหลือของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟกำลัง 650 วัตต์ ที่ระยะเวลาในช่วง 4-12 นาที โดยใช้สารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟต่างๆ	39

- 4.4 อุณหภูมิของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่ผ่านการให้ความร้อนด้วย
คลื่นไมโครเวฟกำลัง 650 วัตต์ ที่ระยะเวลาในช่วง 4-12 นาที
โดยใช้สารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟต่างๆ 39
- 4.5 ร้อยละมวลคงเหลือของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่ผ่านการให้ความร้อน
ด้วยคลื่นไมโครเวฟกำลัง 800 วัตต์ ที่ระยะเวลาในช่วง 4-12 นาที
โดยใช้สารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟต่างๆ 40
- 4.6 อุณหภูมิของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่ผ่านการให้ความร้อนด้วย
คลื่นไมโครเวฟกำลัง 800 วัตต์ ที่ระยะเวลาในช่วง 4-12 นาที
โดยใช้สารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟต่างๆ 40
- 4.7 ร้อยละมวลคงเหลือของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่เติมสารดูดกลืนคลื่น
ไมโครเวฟที่เป็นผงถ่านจากชานอ้อย แต่ไม่มีการให้ความร้อน เทียบกับ
ตัวอย่างที่มีการเติมสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟที่เป็นผงถ่านจาก
ชานอ้อยและมีการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟกำลัง
500 วัตต์ ที่ระยะเวลาในช่วง 4-12 นาที 42
- 4.8 ร้อยละมวลคงเหลือของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่ผ่านการให้
ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟกำลัง 500-800 วัตต์ ที่ระยะ
เวลา 12 นาที โดยใช้สารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟต่างๆ 43
- 4.9 อุณหภูมิของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่ผ่านการให้ความร้อน
ด้วยคลื่นไมโครเวฟกำลัง 500-800 วัตต์ ที่ระยะเวลา
12 นาที โดยใช้สารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟต่างๆ 43
- 4.10 ร้อยละมวลคงเหลือของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่ผ่านการให้ความร้อน
ด้วยคลื่นไมโครเวฟกำลัง 500-800 วัตต์ ที่ระยะเวลา 12 นาที ในกรณี
(1) ตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งไม่มีความชื้น (ตัวอย่างแห้ง) และไม่มีการ
เติมสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ (2) ตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งมีความชื้น
ร้อยละ 40 แต่ไม่มีการเติมสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ (3) ตัวอย่างขยะ
ชุมชนอัดแท่งไม่มีความชื้น (ตัวอย่างแห้ง) แต่มีการเติมสารดูดกลืน
คลื่นไมโครเวฟ (ผงถ่านจากชานอ้อย) ร้อยละ 40 และ (4) ตัวอย่าง
ขยะชุมชนอัดแท่งมีความชื้นร้อยละ 40 และมีการเติมสารดูดกลืน
คลื่นไมโครเวฟ (ผงถ่านจากชานอ้อย) ร้อยละ 40 45

- 4.11 อุณหภูมิของของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่ผ่านการให้ความร้อนด้วย
คลื่นไมโครเวฟกำลัง 500-800 วัตต์ ที่ระยะเวลา 12 นาที ในกรณีที่ 46
(1) ตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งไม่มีความชื้น (ตัวอย่างแห้ง) และไม่มี
การเติมสารดูดกลิ่นคลื่นไมโครเวฟ (2) ตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่ง
มีความชื้นร้อยละ 40 แต่ไม่มีการเติมสารดูดกลิ่นคลื่นไมโครเวฟ
(3) ตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งไม่มีความชื้น (ตัวอย่างแห้ง) แต่มี
การเติมสารดูดกลิ่นคลื่นไมโครเวฟ (ผงถ่านจากชานอ้อย)
ร้อยละ 40 และ (4) ตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งมีความชื้น
ร้อยละ 40 และมีการเติมสารดูดกลิ่นคลื่นไมโครเวฟ
(ผงถ่านจากชานอ้อย) ร้อยละ 40
- 4.12 ร้อยละมวลคงเหลือและอุณหภูมิของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่ง 47
ที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟกำลัง 500 วัตต์
ที่ระยะเวลา 12 นาที โดยใช้ผงถ่านจากชานอ้อย
เป็นสารดูดกลิ่นคลื่นไมโครเวฟที่ปริมาณต่างๆ
- 4.13 ร้อยละมวลคงเหลือและอุณหภูมิของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่ง 47
ที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟกำลัง 650 วัตต์
ที่ระยะเวลา 12 นาที โดยใช้ผงถ่านจากชานอ้อย
เป็นสารดูดกลิ่นคลื่นไมโครเวฟที่ปริมาณต่างๆ
- 4.14 ร้อยละมวลคงเหลือและอุณหภูมิของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่ง 48
ที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟกำลัง 800 วัตต์
ที่ระยะเวลา 12 นาที โดยใช้ผงถ่านจากชานอ้อย
เป็นสารดูดกลิ่นคลื่นไมโครเวฟที่ปริมาณต่างๆ
- 4.15 ร้อยละมวลคงเหลือและอุณหภูมิของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่ง 49
ที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟกำลัง 500 วัตต์
ที่ระยะเวลา 12 นาที โดยใช้ผงถ่านจากชานอ้อยเป็น
สารดูดกลิ่นคลื่นไมโครเวฟที่ระดับความสูงต่างๆ
- 4.16 ปริมาณความชื้นของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่ผ่านการให้ความร้อน 50
ด้วยคลื่นไมโครเวฟกำลัง 500 วัตต์ ที่ระยะเวลาในช่วง
4-12 นาที โดยใช้สารดูดกลิ่นคลื่นไมโครเวฟต่างๆ

- 4.36 ผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟกำลัง 650 วัตต์ ที่ระยะเวลาในช่วง 4-12 นาที โดยใช้ผงถ่านจากขานอ้อยเป็นสารดูดกลิ่น คลื่นไมโครเวฟ 67
- 4.37 ผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟกำลัง 800 วัตต์ ที่ระยะเวลาในช่วง 4-12 นาที โดยใช้ผงถ่านจากขานอ้อยเป็นสารดูดกลิ่น คลื่นไมโครเวฟ 67
- 4.38 แผนภาพ van Krevelen ของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งก่อนและหลังการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟกำลัง 500 วัตต์ ที่ระยะเวลา 12 นาที โดยใช้สารดูดกลิ่นคลื่นไมโครเวฟต่างๆ เทียบกับของถ่านหินลิกไนต์และบิทูมินัส 68
- 4.39 แผนภาพ van Krevelen ของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งก่อนและหลังการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟกำลัง 650 วัตต์ ที่ระยะเวลา 12 นาที โดยใช้สารดูดกลิ่นคลื่นไมโครเวฟต่างๆ เทียบกับของถ่านหินลิกไนต์และบิทูมินัส 69
- 4.40 แผนภาพ van Krevelen ของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งก่อนและหลังการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟกำลัง 800 วัตต์ ที่ระยะเวลา 12 นาที โดยใช้สารดูดกลิ่นคลื่นไมโครเวฟต่างๆ เทียบกับของถ่านหินลิกไนต์และบิทูมินัส 69
- 4.41 แผนภาพ van Krevelen ของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งก่อนและหลังการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟกำลัง 500-800 วัตต์ ที่ระยะเวลาในช่วง 4-12 นาที โดยใช้สารดูดกลิ่นคลื่นไมโครเวฟต่างๆ เทียบกับของถ่านหินลิกไนต์และบิทูมินัส 71
- 4.42 ค่าความร้อนของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟกำลัง 500-800 วัตต์ ที่ระยะเวลาในช่วง 4-12 นาที โดยใช้สารดูดกลิ่นคลื่นไมโครเวฟต่างๆ 73

- 4.43 ค่าความร้อนของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งก่อนการให้ความร้อนด้วยคลื่น
ด้วยคลื่นไมโครเวฟ และที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ
กำลัง 650 วัตต์ที่ระยะเวลาในช่วง 4-12 นาที สำหรับตัวอย่าง
ที่เติมสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟชนิดต่างๆ เปรียบเทียบกับ
ค่าความร้อนของถ่านหินลิกไนต์และบิทูมินัส 76
- 4.44 ร้อยละมวลคงเหลือ ร้อยละพลังงานรวมคงเหลือ ปริมาณสารระเหยได้คงเหลือ
และค่าความร้อนของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่ผ่านการให้ความร้อนด้วย
คลื่นไมโครเวฟกำลัง 500-800 วัตต์ ที่ระยะเวลาในช่วง 4-12 นาที
สำหรับตัวอย่างที่ไม่มีเติมสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ 78
- 4.45 ร้อยละมวลคงเหลือ ร้อยละพลังงานรวมคงเหลือ ปริมาณสารระเหยได้คงเหลือ
และค่าความร้อนของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่ผ่านการให้ความร้อนด้วย
คลื่นไมโครเวฟกำลัง 500-800 วัตต์ ที่ระยะเวลาในช่วง 4-12 นาที
สำหรับตัวอย่างที่มีเติมผงถ่านจากซังข้าวโพด 79
- 4.46 ร้อยละมวลคงเหลือ ร้อยละพลังงานรวมคงเหลือ ปริมาณสารระเหยได้คงเหลือ
และค่าความร้อนของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่ผ่านการให้ความร้อนด้วย
คลื่นไมโครเวฟกำลัง 500-800 วัตต์ ที่ระยะเวลาในช่วง 4-12 นาที
สำหรับตัวอย่างที่มีเติมผงถ่านจากกะลาปาล์ม 80
- 4.47 ร้อยละมวลคงเหลือ ร้อยละพลังงานรวมคงเหลือ ปริมาณสารระเหยได้คงเหลือ
และค่าความร้อนของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่ผ่านการให้ความร้อนด้วย
คลื่นไมโครเวฟกำลัง 500-800 วัตต์ ที่ระยะเวลาในช่วง 4-12 นาที
สำหรับตัวอย่างที่มีเติมผงถ่านจากฟางข้าว 81
- 4.48 ร้อยละมวลคงเหลือ ร้อยละพลังงานรวมคงเหลือ ปริมาณสารระเหยได้คงเหลือ
และค่าความร้อนของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่ผ่านการให้ความร้อนด้วย
คลื่นไมโครเวฟกำลัง 500-800 วัตต์ ที่ระยะเวลาในช่วง 4-12 นาที
สำหรับตัวอย่างที่มีเติมผงถ่านจากชานอ้อย 82
- 4.50 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (SEM) ของตัวอย่าง
ขยะชุมชนอัดแท่งที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ กำลัง
800 วัตต์ ที่ระยะเวลา 12 นาที สำหรับตัวอย่างที่เติมและ
ไม่เติมสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ 84

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย

ปัญหาขยะถือเป็นปัญหาที่สำคัญปัญหาหนึ่งของประเทศไทย โดยปริมาณขยะมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆ ซึ่งมีสาเหตุเนื่องมาจากจำนวนประชากรที่เพิ่มขึ้น การขยายตัวของเขตเมือง และพฤติกรรมกรอุปโภคบริโภคของประชาชนที่เปลี่ยนไป รวมถึงเทคโนโลยีต่างๆ ที่พัฒนาขึ้นมาอย่างต่อเนื่อง⁽¹⁾ สาเหตุที่สำคัญอีกประการหนึ่งที่ทำให้ปัญหาขยะมีความรุนแรงมากขึ้นคือความสามารถในการกำจัดขยะที่ไม่เพียงพอต่อปริมาณขยะที่เพิ่มขึ้น จากข้อมูลของกรมควบคุมมลพิษ⁽²⁾ พบว่าในปี 2558 จากปริมาณขยะที่เกิดขึ้นทั้งหมดประมาณ 29 ล้านตัน ถูกนำไปกำจัดอย่างถูกต้อง 22 ล้านตัน อีกประมาณ 7 ล้านตัน ถูกกำจัดอย่างผิดวิธี เช่น เผากลางแจ้ง เกล่งในบ่อดิน หรือลักลอบทิ้งในพื้นที่รกร้าง เป็นต้น ทั้งนี้ขยะที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่เกิดจากกิจกรรมต่างๆ ในชุมชน เช่น ตลาดสด บ้านพักอาศัย ร้านค้า สถานประกอบการ สถานบริการต่างๆ เป็นต้น โดยมักเรียกว่า ขยะชุมชน (municipal solid waste: MSW)⁽³⁾ ซึ่งขยะชุมชนเหล่านี้ก่อให้เกิดปัญหาต่อสุขภาพของประชาชนและสิ่งแวดล้อม ด้วยเหตุนี้ จึงจำเป็นต้องเร่งหาวิธีการกำจัดขยะที่มีประสิทธิภาพ⁽⁴⁾

เทคโนโลยีที่นิยมใช้ในการกำจัดขยะในปัจจุบันมีด้วยกันหลากหลายวิธี ไม่ว่าจะเป็นการฝังกลบแบบถูกสุขลักษณะ (sanitary landfill) การนำไปหมักเพื่อผลิตก๊าซชีวภาพ (anaerobic digestion) และการเผาขยะโดยใช้เทคโนโลยีเตาเผา (incineration) จากการศึกษาพบว่า⁽⁵⁾ เทคโนโลยีเตาเผาขยะ (waste incinerator) เป็นเทคโนโลยีที่สามารถกำจัดขยะได้ในปริมาณที่มาก สามารถกำจัดขยะที่มีองค์ประกอบที่หลากหลายได้ ใช้เวลาในการกำจัดที่รวดเร็ว และใช้พื้นที่ในการกำจัดน้อยกว่าวิธีการอื่นๆ นอกจากนี้ พลังงานที่ได้จากเตาเผาขยะยังสามารถนำไปใช้ผลิตไฟฟ้าได้ อีกทั้งส่วนที่เหลือจากการเผาไหม้ขยะก็สามารถนำไปแปรรูปเป็นวัสดุก่อสร้างได้อีกด้วย⁽⁶⁾ ด้วยเหตุนี้จึงมีความสนใจที่จะนำเทคโนโลยีดังกล่าวมาใช้ในการจัดการขยะที่มีปริมาณเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องในปัจจุบัน อย่างไรก็ตามเนื่องจากขยะชุมชนส่วนใหญ่ก็มีความชื้นสูง⁽³⁾ หากนำไปเผาไหม้ทันที จะต้องสูญเสียพลังงานส่วนหนึ่งไปในกระบวนการระเหยความชื้นหรือน้ำออกจากขยะชุมชน ทำให้อุณหภูมิของการเผาไหม้ลดลง ส่งผลให้เกิดการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ จนเกิดคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และสารประกอบไดออกซิน (dioxin) ขึ้น ซึ่งคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) เมื่อเข้าสู่ร่างกายทางระบบหายใจแล้วจะเป็นพิษต่อร่างกาย เพราะคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) จะเข้าไปแทนที่ออกซิเจนในกระแสเลือด จนทำให้ร่างกายขาดออกซิเจน⁽⁷⁾ นอกจากนี้ หากขยะชุมชนที่นำมาเผาไหม้มีความชื้นสูง น้ำ (หรือความชื้น) จะเกิดการแตกตัว

ก่อให้เกิด hydroxyl radicals ($\bullet\text{OH}$) ซึ่งมีความว่องไวสูงต่อการทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์หรือสารไฮโดรคาร์บอน ส่งผลให้เกิดสารประกอบไดออกซิน (dioxin) ขึ้น ซึ่งสารประกอบไดออกซิน (dioxin) เป็นสารประกอบอินทรีย์ที่มีพิษสูง สามารถตกค้างในสิ่งแวดล้อมได้นาน ทำให้สะสมในร่างกายของสิ่งมีชีวิตได้ในปริมาณมาก ก่อให้เกิดอันตรายต่อร่างกาย อีกทั้งยังเป็นสารก่อมะเร็งหรือเนื้องอกในอวัยวะต่างๆ อีกด้วย⁽⁸⁾ ดังนั้น จึงจำเป็นต้องทำการปรับปรุงสมบัติของขยะชุมชน โดยกำจัดความชื้นในขยะชุมชนเสียก่อน นอกจากนี้ ก่อนที่จะนำขยะชุมชนไปเผาไหม้ในเตาเผาควรทำการอัดแท่งขยะชุมชนเสียก่อน เพื่อเพิ่มความหนาแน่นพลังงาน (energy density) ให้แก่ขยะชุมชน ซึ่งจะทำให้ขยะชุมชนสามารถจัดเก็บและขนส่งได้ง่าย ทั้งนี้ เภอภัณฑ์ที่จะนำขยะชุมชนมาทำเป็นขยะอัดแท่ง คือขยะชุมชนควรมีค่าความร้อนอย่างน้อยอยู่ในช่วง 6-7 MJ/kg และต้องไม่ต่ำกว่า 4 MJ/kg⁽⁹⁾

จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมา พบว่า กระบวนการให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่ำ (torrefaction) ซึ่งเป็นกระบวนการให้ความร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 200-300 องศาเซลเซียส ในบรรยากาศที่ปราศจากออกซิเจน⁽¹⁰⁾ สามารถนำมาใช้เพื่อปรับปรุงคุณภาพของขยะชุมชนก่อนนำไปเผาไหม้ในเตาเผาได้ โดยสามารถลดความชื้นและสารระเหยได้ (บางส่วน) ออกจากขยะชุมชน ส่งผลให้ขยะชุมชนมีค่าความร้อน (heating value) ที่เพิ่มขึ้น⁽¹⁰⁾ ทั้งนี้ โดยทั่วไปแล้ว เทคนิคการให้ความร้อนสำหรับกระบวนการให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่ำส่วนใหญ่เป็นการให้ความร้อนแบบดั้งเดิม (conventional heating) ซึ่งเป็นการให้ความร้อนโดยการแปลงพลังงานไฟฟ้าให้เป็นพลังงานความร้อนด้วยการใช้เตาเผาอุณหภูมิสูง (muffle furnace) หรือเตาอบลมร้อน (hot oven) ซึ่งวิธีการนี้ใช้เวลาในการให้ความร้อนที่นาน กว่าวัตถุจะได้รับความร้อนอย่างทั่วถึง ทำให้ต้องใช้พลังงานสูงในการให้ความร้อน⁽⁵⁾ ดังนั้น จึงมีความพยายามหาวิธีการให้ความร้อนที่ใช้พลังงานต่ำ ซึ่งหนึ่งในเทคนิคการให้ความร้อนที่ใช้พลังงานต่ำ คือ การให้ความร้อนโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ (microwave irradiation) จากการศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่า คลื่นไมโครเวฟเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่สูงสามารถทำให้โมเลกุลที่มีขั้ว เช่น น้ำ ภายในตัวอย่างเกิดการหมุนตัวและสั่นสะเทือน แล้วชนกับโมเลกุลอื่น ก่อให้เกิดเป็นความร้อนที่ไ้ระเหยน้ำออกจากตัวอย่างได้ในเวลาที่รวดเร็ว⁽¹¹⁾ ดังงานวิจัยที่ผ่านมาที่มีการศึกษากระบวนการให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่ำโดยใช้คลื่นไมโครเวฟของชีวมวลต่างๆ เช่น ฟางข้าว (rice straw) และต้นหญ้าเนเปียร์ (*Pennisetum*)⁽¹²⁾ ข้าวสาลี (wheat) และข้าวบาร์เลย์ (barley straw)⁽¹³⁾ แกลบ (rice husk) และชานอ้อย (sugarcane residues)⁽¹⁴⁾ เป็นต้น และเมื่อเปรียบเทียบกันระหว่างการให้ความร้อนแบบดั้งเดิม (conventional heating) กับการให้ความร้อนโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ (microwave irradiation) พบว่า การให้ความร้อนแบบดั้งเดิมใช้เวลาในการระเหยความชื้นออกจากตัวอย่างนานกว่าการให้ความร้อนโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ ดังแสดงในงานวิจัยของ Siritheerasas และคณะ⁽¹⁵⁾ และ Arshanitsa และคณะ⁽¹⁶⁾

อย่างไรก็ตาม เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการให้ความร้อนโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ ควรมีการเติมสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ เพื่อเพิ่มอุณหภูมิของระบบให้สูงขึ้น⁽¹⁷⁾ จากงานวิจัยของ Zuo และคณะ⁽¹⁸⁾ และ Liu และคณะ⁽¹⁹⁾ มีการใช้ silicon carbide (SiC) และ carbon black เป็นสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ ตามลำดับ และพบว่าการเติมสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟเข้าไปในระบบ ทำให้อุณหภูมิของระบบเพิ่มขึ้น จนส่งผลให้ประสิทธิภาพการให้ความร้อนโดยใช้คลื่นไมโครเวฟเพิ่มขึ้น อนึ่ง สารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟที่ทำจากวัสดุสังเคราะห์เช่นนี้มีราคาแพง จึงมีความพยายามในการหาวัสดุราคาถูกมาเป็นสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ โดยจากงานวิจัยของ Siritheerasas และคณะ⁽²⁰⁾ พบว่า ผงถ่าน (char) สามารถใช้เป็นสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟได้ ซึ่งผงถ่าน (char) ที่ใช้ในงานวิจัยดังกล่าวมีลักษณะคล้ายกับผงถ่านที่ได้จากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร ประกอบกับประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรม ซึ่งผลพลอยได้ที่สำคัญที่นอกเหนือไปจากผลผลิตทางการเกษตรก็คือวัสดุเหลือทิ้งจากการเกษตร เช่น ชี้อย่อย ฟางข้าว แกลบ ชานอ้อย กะลาปาล์ม และซังข้าวโพด เป็นต้น ดังนั้น จึงมีแนวคิดที่จะนำผงถ่าน (char) จากวัสดุเหลือทิ้งจากการเกษตรเหล่านี้มาใช้เป็นสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ

อย่างไรก็ตาม จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมา พบว่า มีงานวิจัยจำนวนน้อยที่ศึกษาผลของสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟที่ทำจากวัสดุเหลือทิ้งจากการเกษตรที่ส่งผลต่อสมบัติของขยะชุมชนที่ผ่านการให้ความร้อน ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาผลของสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟที่ทำจากวัสดุเหลือทิ้งจากการเกษตร ที่มีต่อสมบัติของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่มีความชื้นสูงที่ผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่ำ (torrefaction) โดยใช้คลื่นไมโครเวฟ โดยตัวแปรที่ทำการศึกษา ได้แก่ ชนิดของสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ ระยะเวลาการให้ความร้อน และกำลังของไมโครเวฟ ที่มีต่อร้อยละมวลคงเหลือ (mass yield) และอุณหภูมิ ผลการวิเคราะห์แบบประมาณ (proximate analysis) ผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (ultimate analysis) ค่าความร้อน (heating value) และร้อยละพลังงานรวมคงเหลือ (energy yield) ลักษณะสัณฐาน ด้วยภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope: SEM) และค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ (specific surface area) ของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ รวมทั้งศึกษาผลของปริมาณและความสูงของสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟที่มีต่อร้อยละมวลคงเหลือและอุณหภูมิของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์หลัก ดังต่อไปนี้

1.2.1 เพื่อศึกษาผลของสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ (microwave absorber) ที่ทำจากวัสดุเหลือทิ้งจากการเกษตร อันได้แก่ ผงถ่านจากฟางข้าว ผงถ่านจากซังข้าวโพด ผงถ่านจากกะลา

ปาล์ม และผงถ่านจากขานอ้อย ที่มีต่อสมบัติของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่ง (MSW) ที่มีความชื้นสูง ที่ผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่ำ (torrefaction) โดยใช้คลื่นไมโครเวฟ (microwave irradiation) เทียบกับสมบัติของตัวอย่างก่อนการให้ความร้อน

1.2.2 เพื่อศึกษาผลของระยะเวลาการให้ความร้อนและกำลังของไมโครเวฟ ที่มีต่อสมบัติของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่ง (MSW) ที่มีความชื้นสูง ที่ผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่ำ (torrefaction) โดยใช้คลื่นไมโครเวฟ (microwave irradiation) เทียบกับสมบัติของตัวอย่างก่อนการให้ความร้อน

1.2.3 เพื่อเปรียบเทียบผลของสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ ที่ทำจากวัสดุเหลือทิ้งจากการเกษตร กับสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟที่เป็นวัสดุสังเคราะห์ (SiC) ที่มีต่อร้อยละมวลคงเหลือ (mass yield) และอุณหภูมิของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่ง (MSW) ที่มีความชื้นสูงที่ผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่ำ (torrefaction) โดยใช้คลื่นไมโครเวฟ (microwave irradiation)

1.2.4 เพื่อศึกษาผลของปริมาณและความสูงของสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ ที่มีต่อร้อยละมวลคงเหลือ (mass yield) และอุณหภูมิของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่ง (MSW) ที่ผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่ำ (torrefaction) โดยใช้คลื่นไมโครเวฟ (microwave irradiation)

1.2.5 เพื่อศึกษาหาชนิดของสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ ระยะเวลาการให้ความร้อน และกำลังของไมโครเวฟ ที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่ำ (torrefaction) โดยใช้คลื่นไมโครเวฟ (microwave irradiation)

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ ได้ทำการศึกษาผลของตัวแปรต่างๆ ที่มีต่อการให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่ำ โดยใช้คลื่นไมโครเวฟของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่มีความชื้นสูง (ร้อยละ 40 โดยน้ำหนักของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งเริ่มต้น) โดยมีขอบเขตของตัวแปรต่างๆ ดังนี้

1.3.1 ศึกษาผลของชนิดสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ (microwave absorber) ที่ทำจากวัสดุเหลือทิ้งจากการเกษตร อันได้แก่ ผงถ่านจากฟางข้าว ผงถ่านจากชังข้าวโพด ผงถ่านจากกะลาปาล์ม และผงถ่านจากขานอ้อย

1.3.2 ศึกษาผลของชนิดสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ (microwave absorber) ที่ทำจากวัสดุเหลือทิ้งจากการเกษตรในข้อ 1 เปรียบเทียบกับผลของสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ ซึ่งเป็นวัสดุสังเคราะห์ (SiC)

1.3.3 ศึกษาผลของระยะเวลาการให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่ำโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ ที่เวลา 4, 8, และ 12 นาที

1.3.4 ศึกษาผลของกำลังของไมโครเวฟ ที่กำลัง 500, 650, และ 800 วัตต์

1.3.5 ศึกษาผลของปริมาณสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ ที่ปริมาณของสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟร้อยละ 10, 20, 30, และ 40 โดยน้ำหนักของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแห้งเริ่มต้น

1.3.6 ศึกษาผลของความสูงของสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ (ที่ปริมาณร้อยละ 40 โดยน้ำหนักของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแห้งเริ่มต้น) ที่ความสูง 30, 40, 50, 60, 70, และ 100 มิลลิเมตร

1.3.7 ศึกษาสมบัติของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแห้ง (ความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 40) ก่อนและหลังการให้ความร้อนที่อุณหภูมิค่าโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ อันได้แก่

- ร้อยละมวลคงเหลือ (mass yield) และอุณหภูมิ
- ผลการวิเคราะห์แบบประมาณ (proximate analysis) ได้แก่ ปริมาณความชื้น (moisture) สารระเหยได้ (volatile matter) เถ้า (ash) และคาร์บอนคงตัว (fixed carbon)
- ผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (ultimate analysis) ได้แก่ ปริมาณธาตุคาร์บอน (C) ไฮโดรเจน (H) และออกซิเจน (O) รวมถึงอัตราส่วน O/C และ H/C
- ค่าความร้อน (heating value) และร้อยละพลังงานรวมคงเหลือ (energy yield)
- ลักษณะสัญญาณ ด้วยภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope: SEM) และค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ (specific surface area)

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย

ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัยนี้ มีดังนี้

1.4.1 สามารถทราบถึงผลของสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟที่ทำจากวัสดุเหลือทิ้งจากการเกษตร ระยะเวลาการให้ความร้อน และกำลังของไมโครเวฟ ที่มีต่อสมบัติของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแห้งที่มีความชื้นสูงที่ผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิค่าโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ อันได้แก่

- ร้อยละมวลคงเหลือ (mass yield) และอุณหภูมิ
- ผลการวิเคราะห์แบบประมาณ (proximate analysis) ได้แก่ ปริมาณความชื้น (moisture) สารระเหยได้ (volatile matter) เถ้า (ash) และคาร์บอนคงตัว (fixed carbon)
- ผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (ultimate analysis) ได้แก่ ปริมาณธาตุคาร์บอน (C) ไฮโดรเจน (H) และออกซิเจน (O) รวมถึงอัตราส่วน O/C และ H/C
- ค่าความร้อน (heating value) ร้อยละพลังงานรวมคงเหลือ (energy yield)

- ลักษณะสัญญาณ ด้วยภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope: SEM) และค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ (specific surface area)

1.4.2 สามารถเปรียบเทียบผลของสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟที่ทำจากวัสดุเหลือทิ้งจากการเกษตร กับสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟที่เป็นวัสดุสังเคราะห์ (SiC) ที่มีต่อร้อยละมวลคงเหลือ (mass yield) และอุณหภูมิของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่มีความชื้นสูงหลังที่การให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่ำ

1.4.3 สามารถทราบถึงผลของปริมาณและความสูงของสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ ที่มีต่อร้อยละมวลคงเหลือ (mass yield) และอุณหภูมิของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่ผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่ำโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ

1.4.4 สามารถทราบถึงชนิดของสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ ระยะเวลาการให้ความร้อน และกำลังของไมโครเวฟ ที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่ำโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ

1.5 องค์ประกอบของรายงาน

รายงานฉบับนี้ประกอบด้วย 5 บทหลัก ประกอบด้วย บทที่ 1 บทนำ ซึ่งกล่าวถึงที่มาและความสำคัญของงานวิจัยนี้ รวมทั้งแสดงวัตถุประสงค์ ขอบเขตของการศึกษา และประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย บทที่ 2 เป็นส่วนของวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง สำหรับรายละเอียดของวัสดุอุปกรณ์ และเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย รวมทั้งขั้นตอนและวิธีการดำเนินการวิจัย ได้แสดงไว้ใน บทที่ 3 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลได้แสดงไว้ในบทที่ 4 ซึ่งแสดงผลของตัวแปรต่างๆ ที่มีต่อร้อยละมวลคงเหลือและอุณหภูมิ ผลการวิเคราะห์แบบประมาณ ผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ ผลการวิเคราะห์ค่าความร้อนและร้อยละพลังงานรวมคงเหลือ ลักษณะสัญญาณ และค่าพื้นที่ผิวจำเพาะของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งก่อนและหลังการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ บทที่ 5 เป็นการสรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต เพื่อเป็นแนวทางในการทำงานวิจัยต่อไป และส่วนสุดท้ายเป็นส่วนของภาคผนวก ซึ่งประกอบด้วยรายละเอียดของการทดลองตามมาตรฐาน ASTM ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ตัวอย่างการคำนวณต่างๆ และตัวอย่างข้อมูลดิบของการทดลอง

บทที่ 2

วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้ได้แสดงรายละเอียดต่างๆ ของทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ซึ่งประกอบด้วย ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับขยะชุมชน การวิเคราะห์สมบัติของขยะชุมชน ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับการให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่ำ (torrefaction) ความรู้ทั่วไปและหลักการทำงานของไมโครเวฟ และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ซึ่งแต่ละส่วนมีรายละเอียด ดังนี้

2.1 ขยะชุมชน (Municipal Solid Waste: MSW)

2.1.1 ความหมายของขยะชุมชน

ขยะชุมชน (municipal solid waste: MSW) หมายถึง ของเสียที่อยู่ในรูปของแข็งซึ่งอาจจะมีปริมาณขึ้นปะปนมาด้วยจำนวนหนึ่ง ขยะชุมชนจะมีปริมาณและลักษณะที่ต่างกันไปตามกิจกรรมต่างๆ ในชุมชน เช่น อาคารที่พักอาศัย บ้านพักอาศัย ตลาดสด ธุรกิจร้านค้า สถานประกอบการ สถานบริการ เป็นต้น⁽³⁾ โดยปกติแล้ววัตถุต่างๆ ที่ถูกทิ้งในรูปของขยะนั้น จะมีทั้งส่วนที่เป็นสารอินทรีย์ และส่วนที่เป็นสารอนินทรีย์ โดยส่วนที่เป็นสารอินทรีย์ (ซึ่งย่อยสลายได้ง่าย) ประกอบด้วย เศษอาหาร กระดาษ พลาสติก เส้นใยสังเคราะห์ และไม้ เป็นต้น และส่วนที่เป็นสารอนินทรีย์ (ซึ่งย่อยสลายได้ยากหรือไม่สามารถย่อยสลายได้) ประกอบด้วย แก้ว กระจก ติบูกอลูมิเนียม โลหะ และอุปกรณ์เครื่องครัว เป็นต้น⁽²¹⁾

2.1.2 วิธีการกำจัดขยะชุมชน

ปัจจุบันปริมาณขยะชุมชนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ซึ่งมีสาเหตุอันเนื่องมาจากจำนวนประชากรที่เพิ่มขึ้น การขยายตัวทางเศรษฐกิจ และพฤติกรรมกรอุปโภคบริโภคของประชาชนที่เปลี่ยนไป⁽¹⁾ โดยในปัจจุบัน มีวิธีการกำจัดขยะชุมชนหลายวิธี เช่น นำไปกองทิ้งบนพื้นดิน นำไปหมักเพื่อผลิตก๊าซชีวภาพ ฝังกลบที่ถูกสุขลักษณะ เผากลางแจ้ง และเผาโดยใช้เทคโนโลยีเตาเผา เป็นต้น⁽²²⁾ การกำจัดขยะชุมชนด้วยวิธีที่กล่าวมาข้างต้นนั้น บางวิธีก็เป็นการกำจัดที่ไม่ถูกต้อง ทำให้เกิดสถานะที่เป็นพิษต่อสภาพแวดล้อม และก่อให้เกิดปัญหาต่อสุขภาพของประชาชน⁽⁴⁾

วิธีการกองทิ้งบนพื้นดิน และการเผากลางแจ้ง ถือว่าเป็นวิธีการกำจัดขยะชุมชนที่ไม่ถูกต้อง⁽²⁾ เนื่องจากก่อให้เกิดปัญหามลพิษต่อสภาพแวดล้อม และการเผากลางแจ้งของขยะชุมชนที่มีความชื้นสูง ส่งผลให้เกิดการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ จนเกิดก๊าซพิษ เช่น ไดออกซิน (dioxin) และคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ขึ้น ซึ่งสารประกอบไดออกซิน (dioxin) เป็นสารประกอบอินทรีย์ที่มีพิษสูง

สามารถเกิดที่อุณหภูมิของการเผาไหม้ที่ต่ำ ในช่วง 250-500 องศาเซลเซียสได้ โดยเกิดจากองค์ประกอบของน้ำหรือความชื้นแตกตัวเป็น hydroxyl radicals ($\cdot\text{OH}$) ซึ่งมีความว่องไวสูงต่อการทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์หรือสารไฮโดรคาร์บอน จนทำให้เกิดเป็นสารประกอบไดออกซิน (dioxin) ทั้งนี้ สารประกอบไดออกซิน (dioxin) สามารถตกค้างในสิ่งแวดล้อมได้นาน ทำให้สะสมในร่างกายสิ่งมีชีวิตได้ในปริมาณมาก ก่อให้เกิดอันตรายต่อร่างกาย อีกทั้งยังเป็นสารก่อมะเร็งหรือเนื้องอกในอวัยวะต่างๆ อีกด้วย⁽⁸⁾ ในส่วนของคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ซึ่งเกิดจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ เช่นเดียวกัน เมื่อเข้าสู่ร่างกายทางระบบหายใจแล้วจะเป็นพิษต่อร่างกาย เนื่องจากคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) จะเข้าไปแทนที่ออกซิเจนในกระแสเลือด ทำให้ร่างกายขาดออกซิเจน⁽⁷⁾

ด้วยความสำคัญของปัญหาขยะชุมชนดังกล่าว จึงจำเป็นต้องเร่งหาวิธีการกำจัดขยะที่มีประสิทธิภาพ โดยวิธีการกำจัดขยะที่ยอมรับทั่วไปว่าเป็นวิธีการกำจัดที่ถูกต้อง คือ การนำไปหมักเพื่อผลิตก๊าซชีวภาพ การฝังกลบที่ถูกต้องสุขลักษณะ และการเผาโดยใช้เทคโนโลยีเตาเผา ทั้งนี้ วิธีการกำจัดขยะโดยการหมักและการฝังกลบต้องใช้พื้นที่ในการกำจัดมาก ใช้เวลานานกว่าขยะจะย่อยสลายเองตามธรรมชาติ และมักจะส่งกลิ่นเหม็นถ้ากำจัดแบบผิดวิธี⁽²⁾

วิธีการกำจัดขยะโดยใช้เทคโนโลยีเตาเผา (incineration) เป็นเทคโนโลยีที่สามารถกำจัดขยะที่มีประสิทธิภาพที่ดีมากวิธีหนึ่ง⁽⁵⁾ สามารถลดปริมาณขยะลงได้ประมาณร้อยละ 70-90 ใช้พื้นที่ในการกำจัดขยะน้อยกว่าวิธีอื่นๆ และใช้เวลาในการกำจัดที่รวดเร็ว จึงสามารถลดปริมาณขยะลงได้อย่างมาก ซึ่งการลดลงของปริมาณขยะทำให้สามารถลดค่าใช้จ่ายที่เกิดจากการขนส่งและการกำจัดขยะเหล่านี้ ทั้งนี้ การเผาไหม้จะต้องมีการควบคุมที่ดี เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดมลพิษและสิ่งรบกวนต่อสิ่งแวดล้อม เช่น ก๊าซพิษ เหมม่า และกลิ่นเหม็น เป็นต้น ซึ่งก๊าซพิษ เหมม่า และอนุภาคที่เกิดจากการเผาไหม้ขยะจะต้องมีการกำจัดให้เป็นไปตามที่กฎหมายกำหนด ก่อนปล่อยออกสู่บรรยากาศ ถ้าที่เหลือจากการเผาไหม้ ซึ่งมีปริมาณประมาณร้อยละ 10 จะถูกนำไปฝังกลบหรือใช้เป็นวัสดุปูพื้นสำหรับการสร้างถนน⁽⁶⁾ นอกจากนี้ เทคโนโลยีเตาเผาขยะยังมีผลพลอยได้ที่สำคัญคือสามารถนำพลังงานความร้อนที่ได้ไปใช้ในการผลิตไอน้ำหรือผลิตเป็นกระแสไฟฟ้าได้⁽²³⁾

2.2 การวิเคราะห์สมบัติของขยะชุมชน

ขยะชุมชน (municipal solid waste: MSW) จัดเป็นเชื้อเพลิงแข็งชนิดหนึ่ง โดยเชื้อเพลิงแข็งเป็นเชื้อเพลิงที่มีองค์ประกอบส่วนใหญ่ประกอบด้วย ธาตุคาร์บอน (C) ไฮโดรเจน (H) และออกซิเจน (O) และมีธาตุอื่นๆ ปนอยู่ในปริมาณน้อย⁽²⁴⁾ เมื่อเกิดการเผาไหม้แล้วจะให้พลังงานความร้อนออกมา (จากการเปลี่ยนรูปพลังงานเคมีเป็นพลังงานความร้อน) ซึ่งตัวอย่างขยะชุมชนที่ใช้ในงานวิจัยนี้อยู่ในรูปแบบเชื้อเพลิงแข็งอัดแท่ง เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพด้านพลังงานความร้อนให้สูงขึ้น และ

ทำให้จัดเก็บและขนส่งได้ง่าย อีกทั้งมีควันและเถ้าน้อย จึงช่วยลดมลพิษทางอากาศได้อีกด้วย⁽²⁵⁾ การวิเคราะห์ตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งในงานวิจัยนี้ ใช้วิธีการวิเคราะห์สมบัติของเชื้อเพลิงแข็งมาใช้ในการวิเคราะห์ โดยในงานวิจัยนี้ได้วิเคราะห์สมบัติของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งก่อนและหลังการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ

สมบัติที่สำคัญของเชื้อเพลิงแข็ง ประกอบด้วย

- ผลการวิเคราะห์แบบประมาณ (proximate analysis)
- ผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (ultimate analysis)
- ค่าความร้อน (heating value)

ซึ่งมีรายละเอียดของสมบัติเหล่านี้ ดังนี้

2.2.1 การวิเคราะห์แบบประมาณ (proximate analysis)

การวิเคราะห์แบบประมาณของเชื้อเพลิงแข็ง ประกอบด้วย

- ความชื้น (moisture) หมายถึง ปริมาณน้ำที่คงเหลืออยู่หลังจากการอบแห้งเชื้อเพลิงแข็ง⁽²⁶⁾ ความชื้นของเชื้อเพลิงแข็งมีผลโดยตรงต่อค่าความร้อน โดยหากเชื้อเพลิงแข็งมีความชื้นมากจะทำให้สูญเสียความร้อนไปกับการระเหยความชื้นในระหว่างการเผาไหม้ ทำให้ต้องใช้พลังงานสูงในการจุดติดเชิ้อเพลิงนั้น ส่งผลให้ค่าความร้อนที่ได้ต่ำลง⁽²⁴⁾

- สารระเหยได้ (volatile matter: VM) เป็นส่วนที่เผาไหม้ได้ (combustibles) ที่เป็นสารอินทรีย์หรือสารไฮโดรคาร์บอนที่มีโมเลกุลขนาดเล็ก สามารถระเหยออกจากตัวเชื้อเพลิงได้ง่ายเมื่อมีการให้ความร้อนแก่ตัวเชื้อเพลิง⁽²⁴⁾ เชื้อเพลิงที่ดีควรมีสารระเหยได้อยู่ในระดับที่เหมาะสม จึงจะทำให้จุดติดไฟได้ง่าย ถ้ามีสารระเหยได้น้อยเกินไปจะทำให้จุดติดไฟได้ยาก และเกิดการลุกไหม้อย่างช้าๆ แต่ถ้ามีสารระเหยได้ในปริมาณที่มากเกินไป จะทำให้เกิดเขม่าและควันสูงในช่วงแรกของการเผาไหม้⁽²⁶⁾

- เถ้า (ash) เป็นสารอนินทรีย์ที่เผาไหม้ไม่ได้ (incombustibles) ที่เหลือจากการเผาไหม้ เชื้อเพลิงที่ดีไม่ควรมีเถ้าในปริมาณมากเกินไป เนื่องจากจะทำให้มีประสิทธิภาพในการให้พลังงานความร้อนต่ำ⁽²⁴⁾

- คาร์บอนคงตัว (fixed carbon: FC) เป็นส่วนที่เผาไหม้ได้ (combustibles) ที่เป็นสารอินทรีย์หรือสารไฮโดรคาร์บอนที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ ถือเป็นส่วนที่ให้พลังงานหลักของเชื้อเพลิง⁽²⁴⁾ ดังนั้น หากเชื้อเพลิงมีสัดส่วนของคาร์บอนคงตัวมาก จะทำให้ลุกติดไฟได้ยาก แต่ถ้าลุกติดไฟแล้วจะเผาไหม้ได้นาน และมีค่าความร้อนสูง⁽²⁶⁾

2.2.2 การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (ultimate หรือ elemental analysis)

การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (ultimate analysis) เป็นการวิเคราะห์อย่างละเอียดอันจะทำให้ทราบร้อยละโดยมวลของธาตุที่มีอยู่ในเชื้อเพลิงแข็ง ซึ่งประกอบด้วย

- คาร์บอน (carbon: C) ซึ่งปริมาณคาร์บอนจะประกอบด้วยคาร์บอนที่อยู่ในคาร์บอนคงตัว (fixed carbon: FC) และในสารระเหยได้ (volatile matter: VM) เป็นหลัก โดยคาร์บอนจะมีสัดส่วนอยู่ในส่วนของคาร์บอนคงตัวมากกว่าในส่วนของสารระเหยได้ ทั้งนี้ คาร์บอนจะปรากฏในเชื้อเพลิงใน 2 รูปแบบ คือ ในรูปสารอินทรีย์ ซึ่งได้แก่ สารพวก aromatic และ aliphatic และสารประกอบคาร์บอนเนตของธาตุต่างๆ เช่น calcite และ siderite เป็นต้น⁽²⁴⁾

- ไฮโดรเจน (hydrogen: H) ซึ่งส่วนใหญ่อยู่ในส่วนที่เป็นสารอินทรีย์ แต่อาจมีบางส่วนอยู่ในรูปของความชื้นหรือน้ำในเชื้อเพลิง ปริมาณไฮโดรเจนจะขึ้นกับปริมาณสารระเหยได้เป็นหลัก⁽²⁴⁾

- ออกซิเจน (oxygen: O) ซึ่งเป็นองค์ประกอบในส่วนของสารอินทรีย์ สารอนินทรีย์ในส่วนที่เป็นความชื้น และแร่ธาตุต่างๆ เช่น ดินเหนียว สารประกอบคาร์บอนเนต และสารประกอบซัลเฟต เป็นต้น ปริมาณออกซิเจนจะขึ้นกับปริมาณสารระเหยได้เป็นหลัก เช่นเดียวกับไฮโดรเจน⁽²⁴⁾

- ไนโตรเจน (nitrogen: N) ซึ่งส่วนใหญ่อยู่ในส่วนที่เป็นสารอินทรีย์ ไนโตรเจนส่วนมากเกิดจากซากพืช ซากสัตว์ และโปรตีนของสัตว์ ที่ในที่สุดแล้วได้กลายสภาพมาเป็นเชื้อเพลิง⁽²⁴⁾

- กำมะถัน (sulphur: S) โดยกำมะถันมีทั้งองค์ประกอบในส่วนของสารอินทรีย์ และในส่วนของสารอนินทรีย์ (ซึ่งอยู่ในรูป pyrite, marcasite, และ sulphate เป็นต้น)⁽²⁴⁾

โดยปกติแล้ว การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (ultimate analysis) ของเชื้อเพลิงสามารถวิเคราะห์ได้โดยตรงจากการทดลอง โดยใช้เครื่องมือที่เรียกว่า elemental analyser หรือสามารถคำนวณได้จากสมการความสัมพันธ์ (correlation) ระหว่างปริมาณของธาตุต่างๆ กับผลการวิเคราะห์แบบประมาณ (proximate analysis) ซึ่งที่ผ่านมามีงานวิจัยที่ทำการศึกษาค้นคว้าความสัมพันธ์ระหว่างผลการวิเคราะห์แบบประมาณกับผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ เช่น

Jaruchattada และคณะ⁽²⁷⁾ ทำการวิจัยเพื่อหาสมการความสัมพันธ์ (correlation) ระหว่างปริมาณของธาตุต่างๆ กับผลการวิเคราะห์แบบประมาณของเชื้อเพลิง ซึ่งได้สมการความสัมพันธ์ ดังนี้

$$C = -183.87 + 2.27VM + 2.7835FC \quad (2.1)$$

$$H = -1.31 + 0.00871VM + 0.00249FC \quad (2.2)$$

$$O = 815.32 - 7.6285VM - 8.1252FC \quad (2.3)$$

โดยที่ C, H, และ O เป็นร้อยละของธาตุ C, H, และ O ในแบบ dry and ash basis (DAF) และปริมาณสารระเหยได้ (VM) และคาร์บอนคงตัว (FC) เป็นแบบ DAF basis และมีค่าสัมประสิทธิ์ของสมการความสัมพันธ์ (coefficient of determination, R²) สำหรับแบบจำลองของ C, H, และ O เท่ากับ 0.914, 0.775, และ 0.792 ตามลำดับ

Shen และคณะ⁽²⁸⁾ ได้เสนอสมการที่สามารถทำนายปริมาณของธาตุต่างๆ ของชีวมวลโดยใช้ข้อมูลจากผลการวิเคราะห์แบบประมาณ ซึ่งได้สมการความสัมพันธ์ ดังนี้

$$C = 0.635FC + 0.460VM - 0.095Ash \quad (2.4)$$

$$H = 0.059FC + 0.060VM + 0.010Ash \quad (2.5)$$

$$O = 0.340FC + 0.469VM - 0.023Ash \quad (2.6)$$

โดยที่ C, H, และ O เป็นร้อยละของธาตุ C, H, และ O ในแบบ DAF basis และคาร์บอนคงตัว (FC) มีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 9.2-32.8 ปริมาณสารระเหยได้ (VM) มีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 57.2-90.6 และเถ้า (ash) มีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 0.1-24.6 โดยเป็นแบบ DAF basis

งานวิจัยนี้ได้ทำการคำนวณผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ โดยใช้สมการของ Parikh และคณะ⁽²⁹⁾

$$C = 0.637FC + 0.455VM \quad (2.7)$$

$$H = 0.052FC + 0.062VM \quad (2.8)$$

$$O = 0.304FC + 0.476VM \quad (2.9)$$

โดยที่ C, H, และ O เป็นร้อยละของธาตุ C, H, และ O ในแบบ dry basis และคาร์บอนคงตัว (FC) มีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 4.7-38.4 และปริมาณสารระเหยได้ (VM) มีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 57.2-90.6 ทั้งนี้ ความสัมพันธ์นี้มีค่า AAE (average absolute error) สำหรับ C, H, และ O ร้อยละ 3.21, 4.79, และ 3.40 ตามลำดับ และมีค่า BE (bias error) สำหรับ C, H, และ O ร้อยละ 0.21, -0.15 และ 0.49 ตามลำดับ

ซึ่งข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์แบบแยกธาตุสามารถนำมาวิเคราะห์อัตราส่วนต่างๆ⁽³⁰⁾ ดังนี้

- อัตราส่วนออกซิเจนต่อคาร์บอน (O/C)

โดยหากมีอัตราส่วน O/C สูง จะทำให้ค่าความร้อนต่ำ เนื่องจากต้องใช้พลังงานส่วนหนึ่งในการแตกพันธะของออกซิเจน นอกจากนี้ การมีออกซิเจนมากเกินไป จะทำให้เชื้อเพลิงเกิดการออกซิไดซ์ตัวเอง (self-oxidation) ส่งผลให้เชื้อเพลิงเกิดการเสื่อมสภาพในระหว่างที่เก็บไว้ก่อนการใช้งาน

- อัตราส่วนไฮโดรเจนต่อคาร์บอน (H/C)

โดยหากมีอัตราส่วน H/C สูง จะมีโอกาสเกิดการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์และมีเขม่ามาก แต่หากมีอัตราส่วน H/C ต่ำ จะเกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์และไม่มีเขม่า

ความสัมพันธ์ระหว่าง O/C และ H/C ของเชื้อเพลิงต่างๆ สามารถแสดงได้ด้วยแผนภาพ van Krevelen ซึ่งเป็นกราฟที่มีอัตราส่วน O/C เป็นแกน X และอัตราส่วน H/C เป็นแกน Y เชื้อเพลิงที่ดีต้องมีอัตราส่วน O/C และอัตราส่วน H/C ที่ต่ำ หรือเข้าใกล้จุด (0, 0) ของกราฟ โดยถ่านหินที่มีค่า (rank) สูง จะมีอัตราส่วนของ O/C และ H/C ที่ต่ำ⁽³¹⁾

2.2.3 ค่าความร้อน (Heating Value: HV)

ค่าความร้อน หมายถึง ปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นเมื่อเชื้อเพลิงถูกเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ หรือเรียกว่าความร้อนของการเผาไหม้⁽³²⁾ โดยค่าความร้อนอาจรายงานในหน่วยต่างๆ กัน เช่น MJ/kg, BTU/lb, Cal/g, หรือ kCal/kg เป็นต้น ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ ค่าความร้อนขั้นสูง และค่าความร้อนขั้นต่ำ ซึ่งมีรายละเอียด ดังนี้

- ค่าความร้อนขั้นสูง (higher heating value) หมายถึง ค่าความร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงทั้งหมด ซึ่งรวมถึงค่าความร้อนแฝงที่ได้จากการกลั่นตัวเป็นไอ (ความร้อนแฝงในที่นี้คือค่าความร้อนเมื่อไอน้ำกลั่นตัวเป็นของเหลว) โดยค่าความร้อนในกรณีนี้ พิจารณาน้ำซึ่งเป็นหนึ่งในผลิตภัณฑ์จากการเผาไหม้ อยู่ในสภาพของเหลว⁽³²⁾

- ค่าความร้อนขั้นต่ำ (lower heating value) หมายถึง ค่าความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ ที่ไม่รวมค่าความร้อนแฝงที่ได้จากการกลั่นตัวเป็นของเหลว โดยค่าความร้อนในกรณีนี้ พิจารณาน้ำอยู่ในสถานะไอ⁽³²⁾

โดยปกติแล้วค่าความร้อนของเชื้อเพลิงสามารถวิเคราะห์ได้โดยตรงจากการทดลอง โดยใช้เครื่องมือที่เรียกว่า bomb calorimeter อนึ่ง นอกจากการวิเคราะห์ค่าความร้อนโดยตรงจากการทดลองแล้ว ยังสามารถคำนวณค่าความร้อนได้จากสมการความสัมพันธ์ (correlation) ระหว่างค่าความร้อนกับผลการวิเคราะห์แบบประมาณ หรือผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ ซึ่งที่ผ่านมามีงานวิจัยที่ทำการศึกษาค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนกับผลการวิเคราะห์แบบประมาณ หรือผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ เช่น

Yin และคณะ⁽³³⁾ ได้เสนอสมการเพื่อใช้ในการทำนายค่าความร้อนของชีวมวลจากสมการความสัมพันธ์ (correlation) ระหว่างค่าความร้อนกับผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ ดังนี้

$$HHV = 0.2949C + 0.8250H \quad (2.10)$$

โดยที่หน่วยของ HHV เท่ากับ MJ/kg และปริมาณคาร์บอน (C) และไฮโดรเจน (H) เป็นแบบ dry and ash-free basis (DAF) ทั้งนี้ สมการความสัมพันธ์นี้มีค่า mean absolute error (MAE) น้อยกว่า

ร้อยละ 5 และมีค่า mean bias error (MBE) ร้อยละ 0.57 ส่วนความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนกับผลการวิเคราะห์แบบประมาณ เป็นดังนี้

$$\text{HHV} = 0.1905\text{VM} + 0.2521\text{FC} \quad (2.11)$$

โดยที่หน่วยของ HHV เท่ากับ MJ/kg และคาร์บอนคงตัว (FC) และปริมาณสารระเหยได้ (VM) เป็นแบบ dry basis ทั้งนี้ สมการความสัมพันธ์นี้มีค่า mean absolute error (MAE) ร้อยละ 0.67

งานวิจัยนี้ได้ทำการคำนวณค่าความร้อน โดยใช้สมการของ Demirbas⁽³⁴⁾

$$\text{HHV} = 0.3120\text{FC} + 0.1534\text{VM} \quad (2.12)$$

โดยที่หน่วยของ HHV เท่ากับ MJ/kg และคาร์บอนคงตัว (FC) และปริมาณสารระเหยได้ (VM) เป็นแบบ dry basis ทั้งนี้ สมการความสัมพันธ์นี้มีค่า average absolute error (AAE) ร้อยละ 7.69 และมีค่า average bias error (ABE) ร้อยละ -6.96

2.3 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับการให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่ำ (Torrefaction)

กระบวนการให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่ำ เป็นกระบวนการปรับปรุงคุณภาพชีวมวลด้วยความร้อนทางเคมี (thermo-chemical process) หรือเป็นกระบวนการไพโรไลซิสแบบหนึ่ง กระบวนการนี้เป็นกระบวนการให้ความร้อนแก่ชีวมวลที่อุณหภูมิต่ำประมาณ 200-300 องศาเซลเซียส ในบรรยากาศที่ปราศจากออกซิเจน (หรืออากาศ) หรือมีออกซิเจน (หรืออากาศ) ในปริมาณที่น้อย⁽¹⁰⁾ โดยกระบวนการให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่ำจะทำให้ความชื้นและสารระเหยได้ที่มีอยู่ในชีวมวลนั้นถูกขับออกไป อีกทั้งสารจำพวกพอลิเมอร์ภายในชีวมวล เช่น เซลลูโลส เฮมิ-เซลลูโลส และลิกนิน ก็จะถูกละลายด้วยความร้อนไปด้วยเช่นกัน คงเหลือส่วนที่เป็นคาร์บอนคงตัว ซึ่งเป็นส่วนที่ให้ความร้อนหลักของเชื้อเพลิง ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์มีค่าความร้อนสูงขึ้น ทั้งนี้ โดยทั่วไปผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่ำมี 3 รูปแบบ⁽¹⁰⁾ คือ

- น้ำมันทาร์ (tar) หรือน้ำมันชีวภาพ ซึ่งเป็นของเหลวที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่ำ มีลักษณะทางกายภาพเป็นของเหลวสีดำ น้ำตาลเข้ม หรืออาจเป็นน้ำตาลแดงเข้ม
- ก๊าซชีวภาพ ซึ่งเป็นก๊าซที่ได้จากกระบวนการให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่ำ เช่น คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) มีเทน (CH₄) คาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) และก๊าซที่มีมวลโมเลกุลต่ำ เป็นต้น
- ถ่านชีวภาพ (biochar) ซึ่งเป็นของแข็งที่ได้จากกระบวนการให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่ำ ประกอบด้วยคาร์บอนเป็นส่วนใหญ่ สีดำคล้ำ ในด้านสิ่งแวดล้อม ถ่านชีวภาพสามารถนำไปผลิตเป็นวัสดุต่าง ๆ เช่น ตัวดูดซับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ได้จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่มี

กำมะถันเป็นองค์ประกอบ ตัวดูดซับน้ำมัน วัสดุก่อสร้าง ฉนวน ปูย ตัวกรองหรือถ่านกัมมันต์ หรือนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงโดยตรง เป็นต้น

ข้อดีของการให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่ำ ในการปรับปรุงสมบัติของชีวมวลได้แก่⁽¹⁰⁻¹¹⁾

- ทำให้ค่าความหนาแน่นพลังงาน (energy density) ของชีวมวลสูงขึ้น เนื่องจากชีวมวลที่ผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่ำแล้ว จะเหลือสัดส่วนของส่วนที่เผาไหม้ได้เป็นหลัก จึงสามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงได้ดี และจุดติดไฟได้ง่ายขึ้น
- ทำให้องค์ประกอบของชีวมวลเป็นเนื้อเดียวกัน (homogeneous property) เนื่องจากการให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่ำจะทำให้สารที่มีมวลโมเลกุลต่ำของชีวมวลระเหยออกไป ดังนั้นจึงเหลือส่วนที่มีโมเลกุลสูง ซึ่งได้แก่ คาร์บอนคงตัวและเถ้า เป็นส่วนใหญ่ จึงอยู่ในลักษณะที่เป็นเนื้อเดียวกัน

2.4 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับไมโครเวฟ

2.4.1 คลื่นไมโครเวฟ

คลื่นไมโครเวฟเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic wave) ที่มีความถี่สูงระหว่าง 300 เมกะเฮิรตซ์ (MHz) ถึง 300 จิกะเฮิรตซ์ (GHz)⁽¹¹⁾ คลื่นไมโครเวฟถูกใช้กันอย่างแพร่หลายในการสื่อสาร โทรคมนาคม และในอุตสาหกรรมต่างๆ ทั้งนี้ คลื่นไมโครเวฟอยู่ในรูปของพลังงาน โดยคลื่นไมโครเวฟจะถูกเปลี่ยนเป็นความร้อนโดยการหมุนตัวของโมเลกุลที่มีขั้ว ทำให้ชนกับอนุภาคหรือโมเลกุลที่อยู่ข้างเคียง ซึ่งเกิดขึ้นหลังจากที่วัตถุได้รับคลื่นและมีการดูดกลืนพลังงานจนเกิดการหมุนของโมเลกุล เป็นผลให้เกิดความร้อนขึ้น⁽¹²⁾

2.4.2 กลไกการเกิดความร้อนโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ

กระบวนการเกิดความร้อนโดยคลื่นไมโครเวฟนั้นอาศัยกลไกการเปลี่ยนแปลงคลื่นให้เป็นพลังงาน 2 กลไก คือ กลไกขบวนการเหนี่ยวนำเชิงไอออน (ionic conduction) และกลไกการหมุนของขั้ว (dipolar rotation) โดยมีรายละเอียดของแต่ละกลไก⁽¹²⁾ ดังนี้

1. กลไกการเหนี่ยวนำเชิงไอออน (ionic conduction) ซึ่งกลไกการให้ความร้อนแบบนี้จะเกิดขึ้นเมื่อสารที่ถูกให้ความร้อนนั้นเป็นตัวนำไฟฟ้า หรือตัวนำประจุ เช่น ไอออนหรืออิเล็กตรอน เป็นต้น และโมเลกุลภายในสารเหล่านั้นเกิดการเคลื่อนที่ภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้า จนเกิดเป็นกระแสไฟฟ้า โดยความร้อนที่เกิดขึ้นเกิดจากความต้านทานของกระแสไฟฟ้านั่นเอง

2. กลไกการหมุนของขั้ว (dipolar rotation) โดยที่กลไกการให้ความร้อนแบบนี้ เป็นกลไกการให้ความร้อนจากคลื่นไมโครเวฟที่เกิดกับสารที่มีโมเลกุลที่มีขั้ว หรือโมเลกุลที่สามารถ ชักนำให้เกิดขั้วได้ เช่น โมเลกุลของน้ำ ซึ่งมีสมบัติเป็นขั้ว (dipole) เมื่อนำโมเลกุลเหล่านั้นไปวางไว้ใน สนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่ที่เหมาะสม โมเลกุลที่มีขั้วเหล่านี้จะถูกเหนี่ยวนำให้เกิดการเคลื่อนที่ และจัดเรียงตัวตามสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีการเคลื่อนที่เปลี่ยนทิศทางกลับไปมา จนทำให้เกิดแรง เสียดทานระหว่างโมเลกุล และส่งผลให้เกิดความร้อนในที่สุด

2.4.3 พฤติกรรมการตอบสนองต่อคลื่นไมโครเวฟของวัสดุ

คลื่นไมโครเวฟจะมีลักษณะ 3 ประการ⁽³⁵⁾ คือ

1. สมบัติการสะท้อนกลับ (reflection) วัสดุที่มีความสามารถในการนำไฟฟ้าสูง เช่น โลหะ จะสะท้อนคลื่นไมโครเวฟ ทำให้คลื่นไมโครเวฟไม่สามารถทะลุผ่านวัสดุเหล่านี้ได้

2. สมบัติการส่งผ่าน (transmission) คลื่นไมโครเวฟสามารถทะลุผ่านวัสดุใน กลุ่มของเซรามิกส์และพอลิเมอร์ เช่น อลูมินา แก้ว พลาสติกบางชนิดที่มีโครงสร้างโมเลกุลที่ ไม่มีขั้ว รวมทั้งยางบางชนิดที่ไม่มีขั้ว (เช่น ยางธรรมชาติ) เป็นต้น เมื่อวัสดุเหล่านี้ได้รับคลื่นไมโครเวฟ จะยอมให้คลื่นไมโครเวฟทะลุผ่านได้

3. สมบัติการดูดกลืน (absorption) วัสดุที่สามารถดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ ได้แก่ วัสดุชนิดไดอิเล็กทริก (dielectric material) ซึ่งเป็นวัสดุที่ไม่มีความเป็นกลางทางไฟฟ้าหรือเป็นวัสดุ ที่มีลักษณะเป็นขั้วทางไฟฟ้า (dipole) หรือวัสดุที่มีความเป็นฉนวนที่ต่ำ เช่น ซิลิกอนคาร์ไบด์ พลาสติกบางชนิดที่มีโครงสร้างที่มีขั้ว ยางบางชนิดที่มีโครงสร้างที่มีขั้ว รวมทั้งโมเลกุลของน้ำ เป็นต้น วัสดุเหล่านี้จะสามารถดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ และพลังงานที่ถูกดูดกลืนไว้จะเปลี่ยนเป็นพลังงาน ความร้อนด้วยกลไกการหมุนของขั้ว (dipolar rotation) ทำให้วัสดุมีอุณหภูมิสูงขึ้นในที่สุด

2.4.4 หลักการทำงานของเตาไมโครเวฟ

เตาไมโครเวฟใช้คลื่นไมโครเวฟที่มีความถี่สูงถึง 2,450 เมกะเฮิร์ตซ์ (MHz) หรือ 2.45 GHz ที่มาจากแหล่งผลิตคลื่นไมโครเวฟที่เรียกว่า แมกนีตรอน (magnetron) คลื่นไมโครเวฟนี้ จะถูกดูดกลืนเข้าไปในวัตถุ ทำให้โมเลกุลของสารที่มีขั้วทางไฟฟ้า ซึ่งเป็นสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ เช่น น้ำ ในวัตถุนั้น เกิดการหมุนตัว สั่นสะเทือน และเสียดสีกันของโมเลกุล ทำให้อุณหภูมิสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว จนเกิดเป็นพลังงานความร้อน⁽³⁵⁾ ทั้งนี้ การให้ความร้อนโดยใช้คลื่นไมโครเวฟเป็นการให้ ความร้อนด้วยวิธีที่ต่างจากการใช้เตาอบธรรมดา โดยเตาอบธรรมดาจะแปลงพลังงานไฟฟ้าเป็น พลังงานความร้อน และส่งต่อความร้อนดังกล่าวมายังวัตถุโดยการแผ่รังสีหรือการพาความร้อน แล้วส่ง ต่อเข้าไปในวัตถุด้วยการนำความร้อน ทำให้ใช้เวลานานในการให้ความร้อน⁽¹⁵⁾ ด้วยเหตุผลข้างต้น จึงได้ มีงานวิจัยจำนวนมากที่ทำการศึกษาเพื่อนำคลื่นไมโครเวฟไปใช้ในการให้ความร้อนแก่วัตถุ เช่น เชื้อเพลิง ในรูปแบบต่างๆ

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการสืบค้นงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เพื่อประกอบการศึกษาในงานวิจัยนี้ พบว่ามีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่ำ เทคนิคการให้ความร้อนโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ (microwave heating) และเทคนิคการให้ความร้อนแบบพื้นฐาน (conventional heating) รวมถึงงานวิจัยที่ศึกษาผลของสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟที่มีต่อการให้ความร้อน ดังนี้

Huang และคณะ⁽³⁶⁾ ศึกษาการ co-pyrolysis ของกากตะกอน (sewage sludge) กับฟางข้าว (rice straw) โดยใช้คลื่นไมโครเวฟ เพื่อศึกษาสมบัติของกากตะกอนหลังผ่านการให้ความร้อนโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นเชื้อเพลิงแทนการใช้เชื้อเพลิงจากถ่านหิน โดยงานวิจัยนี้นำกากตะกอนมาผสมกับฟางข้าวที่อัตราส่วนร้อยละ (โดยน้ำหนัก) 10, 20, 30, และ 40 และใช้กำลังของไมโครเวฟที่ 100, 200, 300, และ 400 วัตต์ ผลการทดลองพบว่า เมื่อทำการให้ความร้อนแก่กากตะกอนที่มีการเติมฟางข้าว ส่งผลให้อุณหภูมิและค่าความร้อนของกากตะกอนที่มีการเติมฟางข้าวมีค่าสูงกว่ากากตะกอนที่ไม่ได้เติมฟางข้าว และเมื่อเพิ่มอัตราส่วนผสมของฟางข้าว พบว่า ร้อยละมวลคงเหลือ (mass yield) ซึ่งหมายถึงสัดส่วนมวลที่เหลืออยู่หลังการให้ความร้อนเทียบกับมวลเริ่มต้นก่อนการให้ความร้อน และร้อยละพลังงานรวมคงเหลือ (energy yield) ซึ่งหมายถึงพลังงานรวมของเชื้อเพลิงหลังการให้ความร้อนเทียบกับพลังงานรวมของเชื้อเพลิงก่อนการให้ความร้อน) ลดลงตามอัตราส่วนของฟางข้าวที่เพิ่มขึ้น ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากฟางข้าวมีสมบัติของการมีชีวมวลที่ดี จึงช่วยในการดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ และพบว่า กากตะกอนที่ผสมกับฟางข้าวที่ร้อยละ 40 มีอัตราส่วน O/C และ H/C ที่ใกล้เคียงกับถ่านหินมากที่สุด จึงสามารถนำไปสู่การประยุกต์ใช้เป็นเชื้อเพลิงแทนการใช้เชื้อเพลิงจากถ่านหินได้

Huang และคณะ⁽¹²⁾ ศึกษาการให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่ำ (torrefaction) ของฟางข้าว (rice straw) และต้นหญ้าเนเปียร์ (*Pennisetum*) ซึ่งเป็นตัวอย่างที่ได้จากพื้นที่เพาะปลูกในประเทศไต้หวัน โดยใช้คลื่นไมโครเวฟ การทดลองเริ่มต้นจากการนำตัวอย่างมาบดละเอียดให้ได้ขนาด 50 mesh (0.297 mm) หลังจากนั้น ให้ความร้อนแก่ตัวอย่างโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ ที่กำลัง 150, 200, 250, 300, และ 350 วัตต์ เป็นเวลา 5, 10, 15, 20, และ 25 นาที ผลการทดลองพบว่า เมื่อเพิ่มกำลังของไมโครเวฟและเพิ่มเวลาในการให้ความร้อน ส่งผลให้อุณหภูมิของตัวอย่างเพิ่มขึ้น และอุณหภูมิสุดท้ายของฟางข้าวสูงกว่าอุณหภูมิสุดท้ายของต้นหญ้าเนเปียร์ ทำให้สามารถสรุปได้ว่า ฟางข้าวมีความสามารถในการดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟและมีสมบัติของการมีชีวมวลที่ดีกว่าต้นหญ้าเนเปียร์

Satpathy และคณะ⁽¹³⁾ ศึกษาการให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่ำ (torrefaction) ของข้าวสาลี (wheat) และข้าวบาร์เลย์ (barley straw) ซึ่งเป็นตัวอย่างข้าวสาลีและข้าวบาร์เลย์ได้จากพื้นที่เพาะปลูกในเมือง Saskatoon จังหวัด Saskatchewan ประเทศแคนาดา จากการวิเคราะห์

สมบัติของตัวอย่างก่อนการให้ความร้อน พบว่า ข้าวสาลีและข้าวบาร์เลย์มีค่าความร้อน ปริมาณคาร์บอน ปริมาณไฮโดรเจน และปริมาณออกซิเจน ใกล้เคียงกัน และจากการวิเคราะห์สมบัติของตัวอย่างหลังผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่ำโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ ที่กำลังของไมโครเวฟ 200, 250, และ 300 วัตต์ ด้วยระยะเวลาในการให้ความร้อนที่ 10, 15, และ 20 นาที พบว่า เมื่อเพิ่มกำลังของไมโครเวฟ และระยะเวลาในการให้ความร้อน ส่งผลให้ข้าวสาลีและข้าวบาร์เลย์มีค่าความร้อนเพิ่มขึ้น เมื่อเทียบกับค่าความร้อนของข้าวสาลีและข้าวบาร์เลย์ก่อนการให้ความร้อน และพบว่า ข้าวบาร์เลย์มีค่าความร้อนสูงกว่าข้าวสาลีหลังผ่านการให้ความร้อน เมื่อเพิ่มกำลังของไมโครเวฟและระยะเวลาในการให้ความร้อน พบว่า สัดส่วนธาตุคาร์บอนของตัวอย่างทั้งสองเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับของตัวอย่างก่อนการให้ความร้อน ขณะที่สัดส่วนธาตุไฮโดรเจน และสัดส่วนธาตุออกซิเจนลดลง เมื่อเทียบกับของตัวอย่างก่อนการให้ความร้อน ทั้งนี้ สามารถสรุปได้ว่า ข้าวสาลีและข้าวบาร์เลย์มีสมบัติสามารถดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟได้ดี แต่ข้าวบาร์เลย์มีสมบัติของการมีขี้ที่ต่ำกว่าข้าวสาลี จึงสามารถดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟได้ดีกว่าข้าวสาลี ส่งผลให้ตัวอย่างข้าวบาร์เลย์หลังการให้ความร้อนมีค่าความร้อนที่สูงกว่า ดังที่ได้กล่าวข้างต้น

Wang และคณะ⁽¹⁴⁾ ศึกษาการให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่ำ (torrefaction) ของแกลบ (rice husk) และชานอ้อย (sugarcane residue) ด้วยคลื่นไมโครเวฟ โดยใช้แกลบจากโรงงานสีข้าวในเมือง Changhua และชานอ้อยในเมือง Nantou ประเทศไต้หวัน ทำการให้ความร้อนแก่ตัวอย่างด้วยเครื่อง single-mode microwave ที่กำลังของไมโครเวฟ 150, 200, 250, 300, 350, และ 400 วัตต์ ผลการทดลองพบว่า ช่วงของกำลังไมโครเวฟที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่ำอยู่ในช่วง 250-300 วัตต์ และค่าความร้อนของแกลบและชานอ้อยหลังผ่านการให้ความร้อนโดยใช้คลื่นไมโครเวฟเพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 26 และ 57 ตามลำดับ เมื่อเทียบกับค่าความร้อนก่อนการให้ความร้อน ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง thermogravimetric analyser (TGA) พบว่า มวลของชานอ้อยหลังผ่านการให้ความร้อนลดลงมากกว่ามวลของแกลบ

Chen และคณะ⁽³⁷⁾ ศึกษาการให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่ำ (torrefaction) ของไม้รัง (Lauan wood) ซึ่งเป็นไม้ที่สามารถพบได้ในแถบภูมิภาคเอเชีย เพื่อปรับปรุงสมบัติบางประการของไม้รังก่อนที่จะนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิง ซึ่งในการศึกษานี้ได้ทำการให้ความร้อนโดยใช้เตาเผาไฟฟ้า ที่อุณหภูมิ 220, 250, และ 280 องศาเซลเซียส และใช้เวลาในการให้ความร้อน 30, 60, 90, และ 120 นาที ผลการทดลองพบว่า การให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 280 องศาเซลเซียส ส่งผลให้ค่าความร้อนของไม้รังเพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 40 และมีการสูญเสียมวลมากกว่าร้อยละ 50 ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์แบบประมาณ ที่มีปริมาณความชื้นและสารระเหยได้รวมกันสูงกว่าร้อยละ 50 จากการศึกษาลักษณะพื้นผิวของไม้รังจากการส่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron

microscope: SEM) พบว่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิการให้ความร้อน พื้นผิวของไม้รังมีลักษณะเป็นรูพรุนเพิ่มมากขึ้น

Chen และคณะ⁽³⁸⁾ ศึกษาการให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่ำ (torrefaction) ของก้านฝ้าย (cotton stalk) ที่ได้จากแหล่งเพาะปลูกในเมือง Jurong มณฑล Jiangsu ประเทศจีน โดยทำการเตรียมก้านฝ้ายให้ได้ขนาด 2-3 เซนติเมตร และให้ความร้อนแก่ก้านฝ้ายโดยใช้เครื่อง tubular furnace เป็นแหล่งให้ความร้อน ที่อุณหภูมิ 220, 250, และ 280 องศาเซลเซียส ผลการทดลองพบว่า ก้านฝ้ายหลังผ่านกระบวนการให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่ำมีปริมาณความชื้นและสารระเหยได้ลดลง เป็นผลให้มีค่าความร้อนเพิ่มขึ้น ส่วนสมบัติทางกายภาพของก้านฝ้ายหลังผ่านการให้ความร้อน มีลักษณะเปราะ และแตกง่าย เนื่องจากก้านฝ้ายได้รับความร้อน ทำให้ผนังเซลล์ถูกทำลาย พื้นผิวมีลักษณะเป็นรูพรุนมากขึ้น ส่งผลให้สามารถบดได้ง่ายขึ้น

Sirithereerasas และคณะ⁽¹⁵⁾ ศึกษาการปรับปรุงสมบัติของตัวอย่างขยะชุมชนด้วยวิธีการไพโรไลซิสโดยใช้เตาอบลมร้อน และเปรียบเทียบผลที่ได้กับการให้ความร้อนโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ ผลการศึกษาพบว่า อุณหภูมิและสมบัติของตัวอย่างขยะชุมชนที่ได้จากการไพโรไลซิสโดยใช้เตาเผาที่อุณหภูมิ 200 และ 250 องศาเซลเซียส มีความใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการให้ความร้อนด้วยกำลังของไมโครเวฟ 500 และ 650 วัตต์ ตามลำดับ ทั้งนี้ พบว่ามวลที่ลดลงจากการไพโรไลซิสตัวอย่างขยะชุมชนส่วนใหญ่มาจากการลดลงของความชื้น โดยมีสารระเหยได้ถูกขับออกมาด้วย แต่ในปริมาณที่น้อย ผลการเปรียบเทียบการไพโรไลซิสตัวอย่างขยะชุมชนโดยใช้เตาเผากับเตาไมโครเวฟ พบว่า การให้ความร้อนโดยใช้คลื่นไมโครเวฟใช้เวลาในการในการระเหยความชื้นออกจากตัวอย่างรวดเร็วกว่าการให้ความร้อนด้วยวิธีการดั้งเดิม (conventional heating) ที่ใช้เตาอบลมร้อน ซึ่งต้องใช้เวลาในการขับความชื้นออกจากตัวอย่างนานถึง 25 นาที ขณะที่เตาไมโครเวฟใช้เวลาเพียง 4-12 นาที ก็สามารถระเหยความชื้นออกจากตัวอย่างขยะชุมชนได้หมด

อนึ่ง งานวิจัยที่กล่าวถึงข้างต้นเป็นการศึกษาการให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่ำของชีวมวลแทบทั้งหมด มีงานวิจัยจำนวนน้อยที่ทำการวิจัยเกี่ยวกับการให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่ำของขยะชุมชน รวมทั้งพบว่ายังขาดงานวิจัยที่ทำการศึกษาผลของสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟที่มีต่อสมบัติของขยะชุมชนหลังผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่ำ จึงเป็นที่มาของงานวิจัยนี้ ที่ทำการศึกษาผลของชนิดและปริมาณ (รวมถึงความสูง) ของสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ ระยะเวลาการให้ความร้อน และกำลังของไมโครเวฟ ที่มีผลต่อสมบัติของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่มีความชื้นสูง ที่ผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่ำด้วยคลื่นไมโครเวฟ

บทที่ 3

วัสดุ อุปกรณ์ และขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

ในบทนี้ได้แสดงรายละเอียดต่างๆ ของการดำเนินการวิจัย ซึ่งประกอบด้วยวัสดุ เครื่องมือ และอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย ตลอดจนขั้นตอนการดำเนินการวิจัย เพื่อศึกษาผลของชนิด รวมถึงปริมาณและความสูงของสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ ระยะเวลาการให้ความร้อน และกำลังของ ไมโครเวฟ ที่มีต่อสมบัติของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ เพื่อเปรียบเทียบกับสมบัติของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งก่อนการให้ความร้อน

3.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

วัสดุที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีรายละเอียด ดังนี้

3.1.1 ขยะชุมชนอัดแท่ง งานวิจัยนี้ใช้ตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งจำลอง (model municipal solid waste: MSW) แทนการใช้ขยะชุมชนจริง เพื่อควบคุมองค์ประกอบและสมบัติของ ตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งให้ใกล้เคียงกันในทุกการทดลอง โดยตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งจำลองที่ใช้ ในงานวิจัยนี้ ประกอบด้วยกระดาษ ร้อยละ 40 เศษซีลี้อย ร้อยละ 30 ซังข้าวโพด ร้อยละ 20 พลาสติก ร้อยละ 10 (อัตราส่วนดังกล่าวมาจากอัตราส่วนของส่วนที่เผาไหม้ได้ในขยะชุมชนจริง) ดัง แสดงในภาพที่ 3.1 (บริษัท PSF เพิ่มทรัพย์ฟาร์ม จำกัด จัดทำตัวอย่างขยะชุมชนให้)



ภาพที่ 3.1 ตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่ใช้ในงานวิจัย

3.1.2 สารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ (Microwave Absorber)

สารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟที่ใช้ในงานวิจัยนี้ เป็นผงถ่านของวัสดุเหลือทิ้งจากการเกษตร ได้แก่ ฟางข้าว ชังข้าวโพด กะลาปาล์ม และชานอ้อย และเป็นวัสดุสังเคราะห์ (SiC) โดยมีรายละเอียด ดังนี้

3.1.2.1 ผงถ่านจากฟางข้าว

ผงถ่านจากฟางข้าว ใช้เป็นสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ ซึ่งมีลักษณะดังแสดงในภาพที่ 3.2 (ดูวิธีการผลิตผงถ่านจากฟางข้าวในหัวข้อ 3.3.2)



ภาพที่ 3.2 ฟางข้าวก่อนและหลังทำเป็นผงถ่าน

3.1.2.2 ผงถ่านจากชังข้าวโพด

ผงถ่านจากชังข้าวโพด ใช้เป็นสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ ซึ่งมีลักษณะดังแสดงในภาพที่ 3.3 (ดูวิธีการผลิตผงถ่านจากชังข้าวโพดในหัวข้อ 3.3.2)



ภาพที่ 3.3 ชังข้าวโพดก่อนและหลังทำเป็นผงถ่าน

3.1.2.3 ผงถ่านจากกะลาปาล์ม

ผงถ่านจากกะลาปาล์ม ใช้เป็นสารดูดกลิ่นคลื่นไมโครเวฟ ซึ่งมีลักษณะ
ดังแสดงในภาพที่ 3.4 (ดูวิธีการผลิตผงถ่านจากกะลาปาล์มในหัวข้อ 3.3.2)



ภาพที่ 3.4 กะลาปาล์มก่อนและหลังทำเป็นผงถ่าน

3.1.2.4 ผงถ่านจากชานอ้อย

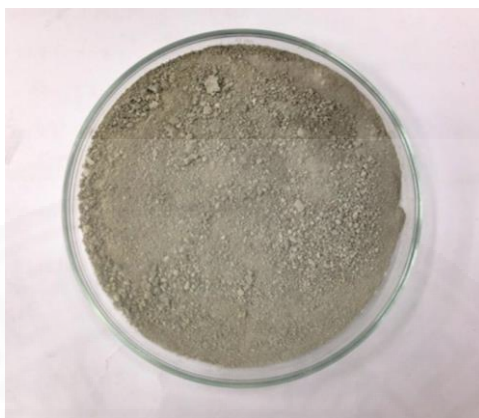
ผงถ่านจากชานอ้อย ใช้เป็นสารดูดกลิ่นคลื่นไมโครเวฟ ซึ่งมีลักษณะดัง
แสดงในภาพที่ 3.5 (ดูวิธีการผลิตผงถ่านจากกะลาปาล์มในหัวข้อ 3.3.2)



ภาพที่ 3.5 ชานอ้อยก่อนและหลังทำเป็นผงถ่าน

3.1.2.5 ซิลิคอนคาร์ไบด์ (SiC)

ซิลิคอนคาร์ไบด์ (SiC) ใช้เป็นสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟที่เป็นวัสดุสังเคราะห์ มีลักษณะดังแสดงในภาพที่ 3.6



ภาพที่ 3.6 ซิลิคอนคาร์ไบด์ (SiC)

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ มีรายละเอียด ดังนี้

3.2.1 เตาไมโครเวฟ (Microwave Oven)

เตาไมโครเวฟที่ใช้ในงานวิจัยนี้ เป็นเตาไมโครเวฟที่ใช้ทั่วไปในครัวเรือน ยี่ห้อ Toshiba รุ่น ERG23SCW ซึ่งมีกำลังไฟฟ้าในช่วง 200-800 วัตต์ ความถี่ไฟฟ้า 50/60 เฮิร์ตซ์ ขนาดความจุ 23 ลิตร ดังแสดงในภาพที่ 3.7



ภาพที่ 3.7 เตาไมโครเวฟ

3.2.2 ถ้วยครุชชีเบิล (Crucible)

ถ้วยครุชชีเบิลที่ใช้เป็นเครื่องปฏิกิริยาหลักในงานวิจัยนี้ เป็นถ้วยครุชชีเบิลชนิด porcelain ทรงสูง ขนาด 25 มิลลิลิตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 3.5 เซนติเมตร สูง 4 เซนติเมตร พร้อมฝาปิด ดังแสดงในภาพที่ 3.8



ภาพที่ 3.8 ถ้วยครุชชีเบิลพร้อมฝาปิดที่ใช้เป็นเครื่องปฏิกิริยาสำหรับงานวิจัย

นอกจากนี้ยังมีถ้วยครุชชีเบิลขนาดต่างๆ อันได้แก่

- ถ้วยครุชชีเบิลชนิด porcelain ทรงสูง ขนาด 15 มิลลิลิตร
- ถ้วยครุชชีเบิลชนิด porcelain ทรงสูง ขนาด 30 มิลลิลิตร
- ถ้วยครุชชีเบิลชนิด porcelain ทรงเตี้ย ขนาด 30 มิลลิลิตร
- ถ้วยครุชชีเบิลชนิด porcelain ทรงสูง ขนาด 50 มิลลิลิตร
- ถ้วยครุชชีเบิลชนิด porcelain ทรงเตี้ย ขนาด 50 มิลลิลิตร

ซึ่งใช้สำหรับการทดสอบผลของความสูงของสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟที่มีต่อร้อยละมวลคงเหลือ (mass yield) และอุณหภูมิของตัวอย่างขณะชุกรวที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ

3.2.3 ตู้อบลมร้อน (Hot Oven)

ตู้อบลมร้อน ใช้สำหรับวิเคราะห์ปริมาณความชื้นในตัวอย่าง ตามมาตรฐาน ASTM D3173⁽³⁹⁾ และใช้สำหรับกำจัดความชื้นให้กับภาชนะที่ใช้วิเคราะห์ปริมาณความชื้นในตัวอย่าง ยี่ห้อ Memmert รุ่น INB500 ดังแสดงในภาพที่ 3.9



ภาพที่ 3.9 ตู้อบลมร้อน (hot oven)

3.2.4 เตาเผาไฟฟ้าอุณหภูมิสูง (Muffle Furnace)

เตาเผาไฟฟ้าอุณหภูมิสูง ใช้สำหรับวิเคราะห์ปริมาณสารระเหยได้และเก็บตัวอย่าง ตามมาตรฐาน ASTM D3175⁽⁴⁰⁾ และ ASTM D3174⁽⁴¹⁾ ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 3.10



ภาพที่ 3.10 เตาเผาไฟฟ้าอุณหภูมิสูง (muffle furnace)

3.2.5 เครื่อง X-Ray Fluorescence Spectrometer (XRF)

เครื่อง X-Ray Fluorescence Spectrometer ใช้สำหรับวิเคราะห์หาปริมาณธาตุองค์ประกอบในตัวอย่างสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟชนิดต่างๆ ยี่ห้อ Burker รุ่น S8 Tiger ดังแสดงในภาพที่ 3.11 (วิเคราะห์ที่ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)



ภาพที่ 3.11 เครื่อง X-Ray Fluorescence Spectrometer (XRF)

3.2.6 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ใช้สำหรับวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานของตัวอย่างขยະขุมชนอัดแท่งก่อนและหลังการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM-7800F ดังแสดงในภาพที่ 3.12 (วิเคราะห์ที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์เพื่อการวิจัยขั้นสูง มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต)



ภาพที่ 3.12 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

3.2.7 เครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะและรูพรุน (Surface Area Analyser)

เครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะและรูพรุน (surface area analyser) ใช้สำหรับวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะ (specific surface area) ของตัวอย่างขยະขุมชนอัดแท่งก่อนและหลังการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ ยี่ห้อ Quantachrome รุ่น Autosorb-1 ดังแสดงในภาพที่ 3.13



ภาพที่ 3.13 เครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะและรูพรุน

3.2.8 เครื่องชั่งละเอียด

เครื่องชั่งละเอียด ใช้สำหรับชั่งตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่ง ปริมาณน้ำ ปริมาณสาร
 ดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ และใช้สำหรับการวิเคราะห์แบบประมาณ (proximate analysis) ยี่ห้อ
 Ohaus รุ่น PA 214 ซึ่งชั่งได้สูงสุด 210 กรัม และชั่งได้ 4 ตำแหน่ง ดังแสดงในภาพที่ 3.14



ภาพที่ 3.14 เครื่องชั่งแบบละเอียด (4 ตำแหน่ง)

3.2.9 Infrared Thermometer

Infrared thermometer ใช้สำหรับวัดอุณหภูมิของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่ง
 หลังการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ ยี่ห้อ Fluke รุ่น 66-IR ดังแสดงในภาพที่ 3.15



ภาพที่ 3.15 Infrared thermometer

3.2.10 อุปกรณ์อื่นๆ เป็นอุปกรณ์ที่นอกเหนือจากที่กล่าวมาข้างต้นและจำเป็นต่อการวิเคราะห์ต่างๆ อาทิเช่น บีกเกอร์ (ซึ่งใช้สำหรับใส่สาร) หลอดฉีดยา (ซึ่งใช้สำหรับหยดน้ำเข้าสู่ตัวอย่างเพื่อปรับความชื้นเริ่มต้นของตัวอย่าง) โถดูดความชื้น (ซึ่งใช้สำหรับป้องกันไม่ให้ตัวอย่างที่ผ่านการให้ความร้อนแล้วได้รับความชื้นจากอากาศภายนอกอีก) และนาฬิกาจับเวลา (ซึ่งใช้สำหรับจับเวลาในระหว่างการทดลอง) เป็นต้น

3.3 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินการวิจัย

ในส่วนของขั้นตอนและวิธีการทดลอง ประกอบด้วย การวิเคราะห์ตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งก่อนการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ การเตรียมผงถ่านจากฟางข้าว ชังข้าวโพด กะลาปาล์ม หรือชานอ้อย การให้ความร้อนแก่ตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งด้วยคลื่นไมโครเวฟ การศึกษาผลของปริมาณและความสูงของสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟที่มีต่อร้อยละมวลคงเหลือ (mass yield) และอุณหภูมิของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ และการวิเคราะห์ตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ ซึ่งแต่ละส่วนมีรายละเอียด ดังนี้

3.3.1 การวิเคราะห์ตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งก่อนการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ

ก่อนนำไปทำการให้ความร้อนโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ ตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งถูกนำมาวิเคราะห์และคำนวณหาค่าต่างๆ ดังต่อไปนี้

3.3.1.1 การวิเคราะห์แบบประมาณ (proximate analysis) ดังมีรายละเอียด ดังนี้

- 1) การวิเคราะห์ปริมาณความชื้น (moisture) ตามมาตรฐาน ASTM D3173⁽³⁹⁾ (ดูรายละเอียดวิธีการวิเคราะห์ปริมาณความชื้นในภาคผนวก ก.1)
- 2) การวิเคราะห์ปริมาณสารระเหยได้ (volatile matter: VM) ตามมาตรฐาน ASTM D3175⁽⁴⁰⁾ (ดูรายละเอียดวิธีการวิเคราะห์ปริมาณสารระเหยได้ในภาคผนวก ก.2)
- 3) การวิเคราะห์ปริมาณเถ้า (ash) ตามมาตรฐาน ASTM D3174⁽⁴¹⁾ (ดูรายละเอียดวิธีการวิเคราะห์ปริมาณเถ้าในภาคผนวก ก.3)
- 4) การคำนวณปริมาณคาร์บอนคงตัว (fixed carbon: FC) ตามมาตรฐาน ASTM D3172⁽⁴²⁾ (ดูรายละเอียดวิธีการคำนวณปริมาณคาร์บอนคงตัวในภาคผนวก ก.4)

3.3.1.2 การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (ultimate analysis) ทำการคำนวณผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ ดังมีรายละเอียดดังนี้

- 1) ทำการคำนวณปริมาณคาร์บอน (carbon: C) โดยใช้สมการของ Parikh และคณะ⁽²⁹⁾ ดังนี้

$$C = 0.637FC + 0.455VM \quad (2.7)$$

- 2) ทำการคำนวณปริมาณไฮโดรเจน (hydrogen: H) โดยใช้สมการของ Parikh และคณะ⁽²⁹⁾ ดังนี้

$$H = 0.052FC + 0.062VM \quad (2.8)$$

- 3) ทำการคำนวณปริมาณออกซิเจน (oxygen: O) โดยใช้สมการของ Parikh และคณะ⁽²⁹⁾ ดังนี้

$$O = 0.304FC + 0.476VM \quad (2.9)$$

โดยที่ C, H, และ O เป็นร้อยละของธาตุ C, H, และ O ในแบบ dry basis และปริมาณสารระเหยได้ (VM) และคาร์บอนคงตัว (FC) เป็นแบบ dry basis [ดูตัวอย่างการคำนวณปริมาณคาร์บอน (C) ไฮโดรเจน (H) และออกซิเจน (O) ของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งในภาคผนวก ข.3]

3.3.1.3 การวิเคราะห์ค่าความร้อน (heating value)

ทำการคำนวณค่าความร้อน (HHV) ของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่ง โดยใช้สมการของ Demirbas⁽³⁴⁾ ดังนี้

$$HHV = 0.3120FC + 0.1534VM \quad (2.12)$$

โดยที่ ค่าความร้อนมีหน่วยเป็น MJ/kg และปริมาณสารระเหยได้ (VM) และคาร์บอนคงตัว (FC) เป็นแบบ dry basis [ดูตัวอย่างการคำนวณหาค่าความร้อน (HHV) ของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งในภาคผนวก ข.4]

3.3.1.4 การวิเคราะห์ค่าความหนาแน่น (density) ของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่ง ดังมีรายละเอียดดังนี้

- 1) เตรียมตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่ง โดยการตัดตัวอย่างให้มีขนาดใกล้เคียงกันให้มีน้ำหนักประมาณ 1 กรัม โดยชั่งน้ำหนักถึงทศนิยมตำแหน่งที่ 4 ประมาณ 10 ตัวอย่าง
- 2) วัดขนาดความยาวและเส้นผ่าศูนย์กลางของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่ง โดยใช้เวอร์เนียร์คาลิปเปอร์แบบดิจิตอล (electronic digital vernier caliper)
- 3) ทำการคำนวณปริมาตรของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่ง ซึ่งมีลักษณะเป็นทรงกระบอก โดยใช้สมการที่ 3.1 ดังนี้

$$V = \frac{\pi d^2 h}{4} \quad (3.1)$$

โดยที่ d = เส้นผ่าศูนย์กลางของตัวอย่าง และ h = ความยาวของตัวอย่าง

- 4) ทำการคำนวณค่าความหนาแน่นของตัวอย่าง โดยใช้สมการที่ 3.2 ดังนี้

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (3.2)$$

โดยที่ m = น้ำหนักของตัวอย่าง และ V = ปริมาตรของตัวอย่าง

3.3.1.5 วิเคราะห์หาปริมาณธาตุองค์ประกอบในตัวอย่างสารตุกกลืนคลื่นไมโครเวฟชนิดต่างๆ โดยใช้เครื่อง X-Ray Fluorescence Spectrometer (XRF)

ทำการวิเคราะห์หาปริมาณธาตุในตัวอย่างสารตุกกลืนคลื่นไมโครเวฟชนิดต่างๆ โดยใช้เครื่อง X-Ray Fluorescence Spectrometer ยี่ห้อ Burker รุ่น S8 Tiger โดยส่งไปทำการวิเคราะห์ที่ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.3.1.6 วิเคราะห์ลักษณะพื้นฐาน ด้วยภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope: SEM)

ทำการวิเคราะห์ลักษณะพื้นฐานของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งก่อนและหลังการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ โดยใช้เครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscopy: SEM) ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM-7800F โดยส่งไปทำการวิเคราะห์ที่ศูนย์วิจัยขั้นสูง มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต

3.3.1.7 วิเคราะห์ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ (specific surface area) ด้วยเครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะและรูพรุน (surface area analyser)

ทำการวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งก่อนและหลังการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ โดยใช้เครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะและรูพรุน (surface area analyser) ยี่ห้อ Quantachrome รุ่น Autosorb-1

3.3.2 การเตรียมผงถ่านจากฟางข้าว ชังข้าวโพด กะลาปาล์ม หรือชานอ้อย

- 1) นำตัวอย่างฟางข้าว ชังข้าวโพด กะลาปาล์ม หรือชานอ้อย มาบดให้ละเอียดพอประมาณ ด้วยเครื่องบดแบบใบมีด
- 2) ชังตัวอย่างฟางข้าว ชังข้าวโพด กะลาปาล์ม หรือชานอ้อย ที่ผ่านการบดจากข้อ 1 ให้มีน้ำหนักประมาณ 50 กรัม ใส่ในครุชีเบล
- 3) นำตัวอย่างในครุชีเบลเข้าเตาอบลมร้อนที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อไล่ความชื้นออกจากตัวอย่าง
- 4) เมื่อถึงเวลาที่กำหนด (1 ชั่วโมง) นำครุชีเบลพร้อมตัวอย่างออกจากเตาอบลมร้อน และนำไปเก็บไว้ใน desiccator รอให้เย็น แล้วนำมาบดให้ละเอียดอีกครั้งหนึ่ง
- 5) นำตัวอย่างที่บดจนละเอียดจากข้อ 4 ใส่ครุชีเบล ปิดฝา แล้วนำเข้าเตาเผาอุณหภูมิสูง ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที
- 6) เมื่อถึงระยะเวลาที่กำหนด (30 นาที) นำครุชีเบลพร้อมตัวอย่างออกจากเตาเผาอุณหภูมิสูง และนำไปเก็บไว้ใน desiccator เมื่อเย็นแล้ว บรรจุใส่ถุงพลาสติกอย่างมิดชิด เพื่อรอการนำไปใช้งานต่อไป

3.3.3 การให้ความร้อนแก่ขยะชุมชนอัดแท่งด้วยคลื่นไมโครเวฟ

ทำการให้ความร้อนแก่ขยะชุมชนอัดแท่งโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ ด้วยวิธีการ ดังนี้

- 1) เตรียมตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่ง โดยการตัดตัวอย่างให้มีขนาดใกล้เคียงกัน โดยให้มีน้ำหนักประมาณ 1 กรัม และใส่ตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งในถ้วยครุชีเบล
- 2) เติมน้ำลงในตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งในปริมาณที่ได้จากการคำนวณ เพื่อปรับความชื้นเริ่มต้นให้เป็นร้อยละ 40 โดยน้ำหนักของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งเริ่มต้น (ดูตัวอย่างการคำนวณหาปริมาณน้ำที่ต้องเติมเพื่อปรับความชื้นของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งในภาคผนวก ข.1)
- 3) เติมสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ (ที่เป็นผงถ่านจากวัสดุเหลือทิ้งจากการเกษตร) อันได้แก่ ผงถ่านจากฟางข้าว หรือชังข้าวโพด หรือกะลาปาล์ม หรือชานอ้อย ลงในถ้วยครุชีเบลในปริมาณร้อยละ 40 โดยน้ำหนักของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งเริ่มต้น โดยทำการเติมสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟบริเวณรอบๆ ผิวหน้าตัวอย่างขยะชุมชน (ดูตัวอย่างการคำนวณหาปริมาณสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟที่ต้องเติมในภาคผนวก ข.2)
- 4) ปิดฝากล้วยครุชีเบลที่บรรจุตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่มีความชื้นและปริมาณสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟตามที่กำหนด เพื่อไม่ให้ออกซิเจนเข้าไปในระบบขณะทำการให้ความร้อนโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ

5) นำถ้วยครุชชีเบลที่บรรจุตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่จากข้อ 4 ใส่เตาไมโครเวฟ เปิดเตาไมโครเวฟให้ทำงานโดยใช้กำลัง 500, 650, หรือ 800 วัตต์ และใช้ระยะเวลาการให้ความร้อน 4, 8, หรือ 12 นาที

6) เมื่อถึงระยะเวลาที่กำหนด (ในช่วง 4-12 นาที) ปิดเตาไมโครเวฟ แล้ววัด อุณหภูมิของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งในถ้วยครุชชีเบลทันที โดยใช้ infrared thermometer จากนั้น นำตัวอย่างออกจากเตาไมโครเวฟ และนำไปเก็บไว้ใน desiccator รอให้เย็น แล้วจึงชั่งน้ำหนักหลัง ผ่านการให้ความร้อน บันทึกค่าน้ำหนักที่ได้

7) คำนวณร้อยละมวลคงเหลือ (mass yield) โดยใช้สมการที่ 3.3 (ดูตัวอย่าง การคำนวณหาร้อยละมวลคงเหลือของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งในภาคผนวก ข.5) ดังนี้

$$\text{Mass yield} = \frac{M_f}{M_i} \times 100 \quad (3.3)$$

โดยที่ M_f = น้ำหนักของตัวอย่างที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ

M_i = น้ำหนักของตัวอย่างก่อนการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ

8) คำนวณร้อยละพลังงานรวมคงเหลือ (energy yield) โดยใช้สมการที่ 3.4 (ดูตัวอย่างการคำนวณหาร้อยละพลังงานรวมคงเหลือของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งในภาคผนวก ข.6) ดังนี้

$$\text{Energy yield} = \text{Mass yield} \times \frac{HV_f}{HV_i} \quad (3.4)$$

โดยที่ HV_f = ค่าความร้อนของตัวอย่างที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ

HV_i = ค่าความร้อนของตัวอย่างก่อนการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ

9) ทำการทดลองซ้ำตามข้อ 1-7 ที่กำลังของไมโครเวฟ 500-800 วัตต์ และใช้ ระยะเวลาการให้ความร้อน 12 นาที แต่

9.1) ใช้ตัวอย่างที่ไม่มีความชื้น (ทำได้โดยการอบตัวอย่างให้แห้งด้วยเตาอบ ลมร้อน ที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง) และไม่มีการเติมสารดูดกลืนคลื่น ไมโครเวฟ

9.2) ใช้ตัวอย่างที่ไม่มีความชื้น (ทำได้โดยการอบตัวอย่างให้แห้งด้วยเตาอบ ลมร้อน ที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง) ที่มีการเติมสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ (ผงถ่านจากชานอ้อย) ในปริมาณร้อยละ 40 โดยน้ำหนักของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งเริ่มต้น

9.3) ใช้ตัวอย่างที่มีความชื้นร้อยละ 40 โดยน้ำหนักของตัวอย่างขยะชุมชนอัด แท่งเริ่มต้น แต่ไม่มีการเติมสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ

3.3.4 การศึกษาผลของปริมาณของสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟที่มีต่อร้อยละมวลคงเหลือ (mass yield) และอุณหภูมิของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ

ทำการศึกษาค่าผลของปริมาณของสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟที่มีต่อร้อยละมวลคงเหลือ (mass yield) และอุณหภูมิของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟด้วยวิธีการ ดังนี้

1) เตรียมตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่ง โดยการตัดตัวอย่างให้มีขนาดใกล้เคียงกัน โดยให้มีน้ำหนักประมาณ 1 กรัม และใส่ตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งในถ้วยครุชชีเบลชนิด porcelain ทรงสูง ขนาด 25 มิลลิเมตร

2) เติมน้ำลงในตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งในปริมาณที่ได้จากการคำนวณ เพื่อปรับความชื้นเริ่มต้นให้เป็นร้อยละ 40 โดยน้ำหนักของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งเริ่มต้น (ดูตัวอย่างการคำนวณหาปริมาณน้ำที่ต้องเติมเพื่อปรับความชื้นของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งในภาคผนวก ข.1)

3) เติมสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ (ที่เป็นผงถ่านจากวัสดุเหลือทิ้งจากการเกษตร) ซึ่งเป็นผงถ่านชานอ้อย ลงในถ้วยครุชชีเบลในปริมาณร้อยละ 10, 20, 30, และ 40 โดยน้ำหนักของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งเริ่มต้น โดยทำการเติมสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟบริเวณรอบๆ ผิวหน้าตัวอย่างขยะชุมชน (ดูตัวอย่างการคำนวณหาสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟที่ต้องเติมในภาคผนวก ข.2)

4) ปิดฝาถ้วยครุชชีเบลที่บรรจุตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่มีความชื้นและปริมาณสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟตามที่กำหนด เพื่อไม่ให้ออกซิเจนเข้าไปในระบบขณะทำการให้ความร้อนโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ

5) นำถ้วยครุชชีเบลที่บรรจุตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งจากข้อ 4 ใส่เตาไมโครเวฟ เปิดเตาไมโครเวฟให้ทำงานโดยใช้กำลัง 500, 650, หรือ 800 วัตต์ และใช้ระยะเวลาการให้ความร้อน 12 นาที

6) เมื่อถึงระยะเวลาที่กำหนด (12 นาที) ปิดเตาไมโครเวฟ แล้ววัดอุณหภูมิของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งในถ้วยครุชชีเบลทันที โดยใช้ infrared thermometer จากนั้นนำตัวอย่างออกจากเตาไมโครเวฟ และนำไปเก็บไว้ใน desiccator รอให้เย็น แล้วจึงชั่งน้ำหนักหลังผ่านการให้ความร้อน บันทึกค่าน้ำหนักที่ได้ จากนั้นนำน้ำหนักที่ได้หลังผ่านการให้ความร้อนและก่อนการให้ความร้อนไปวิเคราะห์ร้อยละมวลคงเหลือ (mass yield) ตามสมการที่ 3.3

3.3.5 การศึกษาผลของความสูงของสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟที่มีต่อร้อยละมวลคงเหลือ (mass yield) และอุณหภูมิของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ

ทำการศึกษาผลความสูงของสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟที่มีต่อร้อยละมวลคงเหลือ (mass yield) และอุณหภูมิของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ ด้วยวิธีการ ดังนี้

1) เตรียมตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่ง โดยการตัดตัวอย่างให้มีขนาดใกล้เคียงกัน โดยให้น้ำหนักประมาณ 1 กรัม และใส่ตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งในถ้วยครุซีเบลที่มีขนาดแตกต่างกัน ดังนี้

- ถ้วยครุซีเบลชนิด porcelain ทรงสูง ขนาด 25 มิลลิเมตร ซึ่งเมื่อใส่สารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ (ผงถ่านจากชานอ้อย) จะมีความสูงของสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ เท่ากับ 100 มิลลิเมตร

- ถ้วยครุซีเบลชนิด porcelain ทรงสูง ขนาด 15 มิลลิเมตร ซึ่งเมื่อใส่สารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ (ผงถ่านจากชานอ้อย) จะมีความสูงของสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ เท่ากับ 70 มิลลิเมตร

- ถ้วยครุซีเบลชนิด porcelain ทรงเตี้ย ขนาด 30 มิลลิเมตร ซึ่งเมื่อใส่สารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ (ผงถ่านจากชานอ้อย) จะมีความสูงของสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ เท่ากับ 60 มิลลิเมตร

- ถ้วยครุซีเบลชนิด porcelain ทรงสูง ขนาด 30 มิลลิเมตร ซึ่งเมื่อใส่สารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ (ผงถ่านจากชานอ้อย) จะมีความสูงของสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ เท่ากับ 50 มิลลิเมตร

- ถ้วยครุซีเบลชนิด porcelain ทรงสูง ขนาด 50 มิลลิเมตร ซึ่งเมื่อใส่สารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ (ผงถ่านจากชานอ้อย) จะมีความสูงของสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ เท่ากับ 40 มิลลิเมตร

- ถ้วยครุซีเบลชนิด porcelain ทรงเตี้ย ขนาด 50 มิลลิเมตร ซึ่งเมื่อใส่สารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ (ผงถ่านจากชานอ้อย) จะมีความสูงของสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ เท่ากับ 30 มิลลิเมตร

2) เติมสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ ซึ่งเป็นผงถ่านชานอ้อย ลงในถ้วยครุซีเบลในปริมาณร้อยละ 40 โดยน้ำหนักของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งเริ่มต้น โดยทำการเติมสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟบริเวณรอบๆ ผิวหน้าตัวอย่างขยะชุมชน (ดูตัวอย่างการคำนวณหาสารดูดกลืนคลื่น

ไมโครเวฟที่ต้องเติมในภาคผนวก ข.2) วัดความสูงของผงถ่านจากชานอ้อยในถ้วยครุชชีเบลขนาดต่างๆ (ซึ่งจะได้ความสูงของผงถ่านจากชานอ้อยในถ้วยครุชชีเบลขนาดต่างๆ ตามที่แสดงในข้อ 1)

3) ปิดฝาถ้วยครุชชีเบลที่บรรจุตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่มีความชื้นและปริมาตรสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟตามที่กำหนด เพื่อไม่ให้ออกซิเจนเข้าไปในระบบขณะทำการให้ความร้อนโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ

4) นำถ้วยครุชชีเบลที่บรรจุตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งจากข้อ 3 ใส่เตาไมโครเวฟ เปิดเตาไมโครเวฟให้ทำงานโดยใช้กำลัง 500 วัตต์ และใช้ระยะเวลาการให้ความร้อน 12 นาที

5) เมื่อถึงระยะเวลาที่กำหนด (12 นาที) ปิดเตาไมโครเวฟ แล้ววัดอุณหภูมิของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งในถ้วยครุชชีเบลทันที โดยใช้ infrared thermometer จากนั้นนำตัวอย่างออกจากเตาไมโครเวฟ และนำไปเก็บไว้ใน desiccator รอให้เย็น แล้วจึงชั่งน้ำหนักหลังผ่านการให้ความร้อน บันทึกค่าน้ำหนักที่ได้ จากนั้นนำน้ำหนักที่ได้หลังผ่านการให้ความร้อนและก่อนการให้ความร้อนไปวิเคราะห์ร้อยละมวลคงเหลือ (mass yield) ตามสมการที่ 3.3

3.3.6 การวิเคราะห์ตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ

นำตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟไปทำการวิเคราะห์และคำนวณหาค่าต่างๆ ดังนี้

1) ร้อยละมวลคงเหลือ (mass yield) (ดูตัวอย่างการคำนวณร้อยละมวลคงเหลือในภาคผนวก ข.5)

2) ผลการวิเคราะห์แบบประมาณ (proximate analysis)

3) ผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (ultimate analysis)

4) ค่าความร้อน (heating value) และร้อยละพลังงานรวมคงเหลือ (energy yield) (ดูตัวอย่างการคำนวณร้อยละมวลคงเหลือในภาคผนวก ข.6)

5) วิเคราะห์ลักษณะพื้นฐานของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่ง ด้วยภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope: SEM)

6) วิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะ (specific surface area) โดยใช้เครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะและรูพรุน (surface area analyser)

บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

ในบทนี้เป็นการนำเสนอผลการทดลองพร้อมด้วยการวิเคราะห์ผล ซึ่งประกอบด้วย ร้อยละมวลคงเหลือ (mass yield) และอุณหภูมิ ผลการวิเคราะห์แบบประมาณ (proximate analysis) ผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (ultimate analysis) ค่าความร้อน (heating value) และร้อยละพลังงานรวมคงเหลือ (energy yield) ลักษณะสัณฐาน ด้วยภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope: SEM) และค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ (specific surface area) ของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งก่อนและหลังการให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่ำ (torrefaction) โดยใช้คลื่นไมโครเวฟ โดยศึกษาผลของตัวแปรต่างๆ อันได้แก่ ชนิดรวมถึงปริมาณและความสูงของสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ ระยะเวลาการให้ความร้อน และกำลังของไมโครเวฟ ที่มีต่อผลวิเคราะห์เหล่านี้ ซึ่งแต่ละส่วนมีรายละเอียด ดังนี้

4.1 ผลการวิเคราะห์ตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งก่อนการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ

งานวิจัยนี้ใช้ตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งจำลอง (model municipal solid waste: MSW) แทนการใช้ขยะชุมชนจริง เพื่อควบคุมองค์ประกอบและสมบัติของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งให้ใกล้เคียงกันในทุกการทดลอง โดยตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งจำลองที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ประกอบด้วย กระดาษ ร้อยละ 40 เศษซีลี้อย ร้อยละ 30 ซังข้าวโพด ร้อยละ 20 พลาสติก ร้อยละ 10 (อัตราส่วนดังกล่าวมาจากอัตราส่วนของส่วนที่เผาไหม้ได้ในขยะชุมชนจริง) ซึ่งมีผลการวิเคราะห์แบบประมาณ (proximate analysis) แสดงไว้ในตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (ultimate analysis) แสดงไว้ในตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์ค่าความร้อน (heating value) แสดงไว้ในตารางที่ 4.3 และผลการวิเคราะห์ค่าความหนาแน่น (density) ดังมีรายละเอียด ดังนี้

4.1.1 ผลการวิเคราะห์แบบประมาณ (proximate analysis) ของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งก่อนการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ

จากตารางที่ 4.1 จะเห็นว่าตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งก่อนการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟมีส่วนที่เผาไหม้ได้ประมาณร้อยละ 90 โดยแบ่งเป็นสารระเหยได้ (volatile matter: VM) ประมาณร้อยละ 75 และคาร์บอนคงตัว (fixed carbon: FC) ประมาณร้อยละ 15 และเป็นส่วนที่เผาไหม้ไม่ได้ประมาณร้อยละ 10 โดยแบ่งเป็นความชื้น (moisture) ประมาณร้อยละ 5-6 และเถ้า (ash) ประมาณร้อยละ 3-4

ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์แบบประมาณ (proximate analysis) ของตัวอย่างขยะชุมชนก่อนการให้ความร้อน

รายการวิเคราะห์	ร้อยละโดยน้ำหนัก	
	air-dried basis	dry basis
การวิเคราะห์แบบประมาณ (wt.%)		
● ความชื้น (M)	5.51	-
● สารระเหยได้ (VM)	76.24	80.68
● คาร์บอนคงตัว (FC)	14.86	15.73
● เถ้า (Ash)	3.39	3.59

4.1.2 ผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (ultimate analysis) ของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งก่อนการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ

จากตารางที่ 4.2 ซึ่งเป็นผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ สามารถวิเคราะห์ได้ว่า ตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งมีธาตุออกซิเจน (O) เป็นองค์ประกอบหลัก (ประมาณครึ่งหนึ่ง) รองลงมาคือ ธาตุคาร์บอน (C) ประมาณร้อยละ 44 และมีธาตุไฮโดรเจน (H) ในปริมาณน้อย ประมาณร้อยละ 6 ทั้งนี้ มีอัตราส่วนระหว่างธาตุไฮโดรเจนต่อธาตุคาร์บอน (H/C molar ratio) เท่ากับ 0.13 และอัตราส่วนระหว่างธาตุออกซิเจนต่อธาตุคาร์บอน (O/C molar ratio) เท่ากับ 1.12

ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (ultimate analysis) ของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งก่อนการให้ความร้อน

รายการวิเคราะห์	ร้อยละโดยน้ำหนัก (dry basis)
การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (wt.%)	
● คาร์บอน (C)	44.48
● ไฮโดรเจน (H)	5.68
● ออกซิเจน (O)	49.84
● H/C molar ratio	0.13
● O/C molar ratio	1.12

4.1.3 ผลการวิเคราะห์ค่าความร้อน (heating value) ของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งก่อนการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ

จากตารางที่ 4.3 จะเห็นว่าตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งก่อนการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟมีค่าความร้อน (heating value: HV) เท่ากับ 17.38 MJ/kg (dry basis) และเมื่อคิดค่าความร้อนของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่มีความชื้นร้อยละ 40 พบว่า มีค่าเท่ากับ 12.92 MJ/kg ซึ่งพบว่าอยู่ในช่วงของค่าความร้อนของถ่านหินลิกไนต์ที่มีค่าความร้อนในช่วง 9.2-19.0 MJ/kg⁽⁴⁴⁾ อนึ่ง มีค่าต่ำกว่าค่าความร้อนของถ่านหินลิกไนต์ที่ใช้ในงานวิจัยของ Gaur และ Reed⁽⁴⁵⁾ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 16.3 MJ/kg และต่ำกว่าค่าความร้อนของขยะชุมชนในงานวิจัยของ Patumsawad และ Cliffe⁽⁴⁶⁾ ที่มีค่าความร้อนประมาณ 15-16 MJ/kg อย่างไรก็ตาม มีค่าความร้อนสูงมากพอที่จะนำมาทำเป็นขยะอัดแท่งได้ (เมื่อเทียบกับเกณฑ์ที่ได้กล่าวถึงในบทนำ ซึ่งระบุว่า ขยะชุมชนที่จะนำมาทำเป็นขยะอัดแท่งได้ ควรมีค่าความร้อนอย่างน้อยอยู่ในช่วง 6-7 MJ/kg และต้องไม่ต่ำกว่า 4 MJ/kg⁽⁹⁾)

ตารางที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์ค่าความร้อน (heating value) ของตัวอย่างขยะชุมชนก่อนการให้ความร้อน

รายการวิเคราะห์	Dry basis	เมื่อมีความชื้นร้อยละ 40
● ค่าความร้อน (MJ/kg)	17.38	12.92

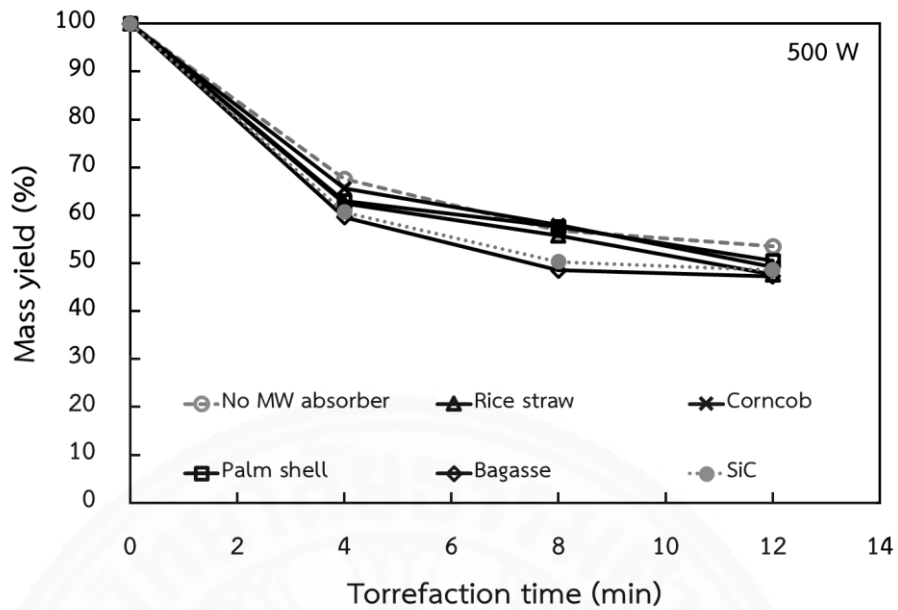
4.1.4 ผลการวิเคราะห์ค่าความหนาแน่น (density) ของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งก่อนการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ

จากการวิเคราะห์ค่าความหนาแน่น (density) ของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งก่อนการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ พบว่า ตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งก่อนการให้ความร้อนมีค่าความหนาแน่นอยู่ในช่วง 1,046-1,112 kg/m³ โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1,079 kg/m³ และมีค่าความคลาดเคลื่อนเท่ากับ ± 14.08 หรือร้อยละ ± 1.30 (ด้วยความชื้นร้อยละ 95) แสดงว่าความหนาแน่นของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีค่าใกล้เคียงกัน

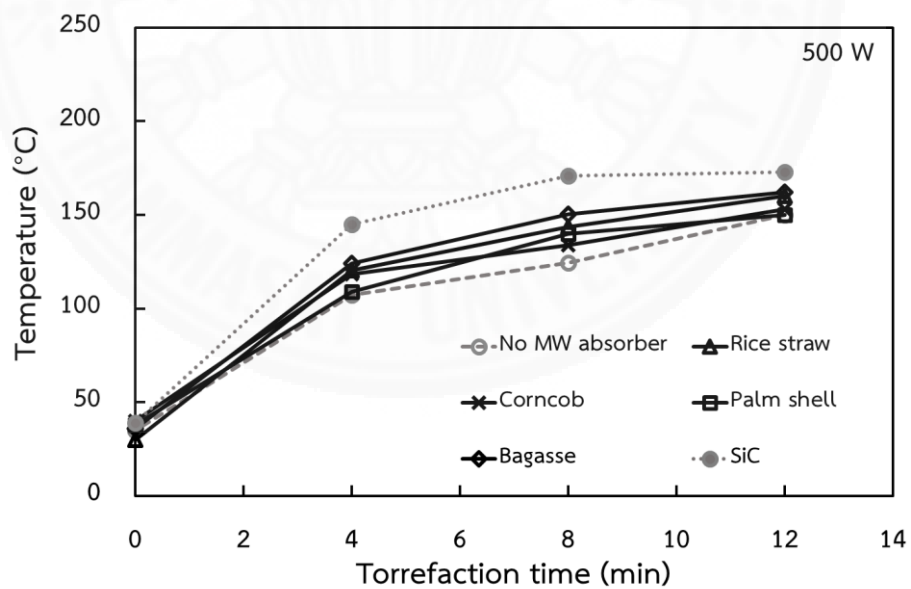
4.2 ผลการวิเคราะห์ร้อยละมวลคงเหลือ (mass yield) และอุณหภูมิของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ

4.2.1 ผลของระยะเวลาการให้ความร้อนที่มีต่อร้อยละมวลคงเหลือ (mass yield) และอุณหภูมิของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ

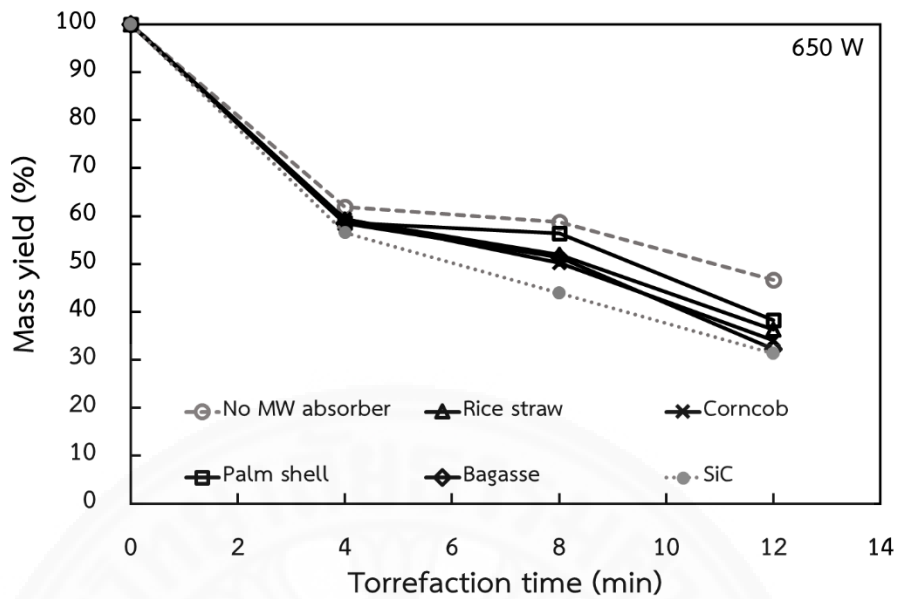
ผลของร้อยละมวลคงเหลือ (mass yield) ซึ่งหมายถึง สัดส่วนมวลที่เหลืออยู่หลังการให้ความร้อนเทียบกับมวลเริ่มต้นก่อนการให้ความร้อน และอุณหภูมิของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่ผ่านการให้ความร้อนที่เวลาในช่วง 4-12 นาที แสดงได้ดังภาพที่ 4.1-4.6



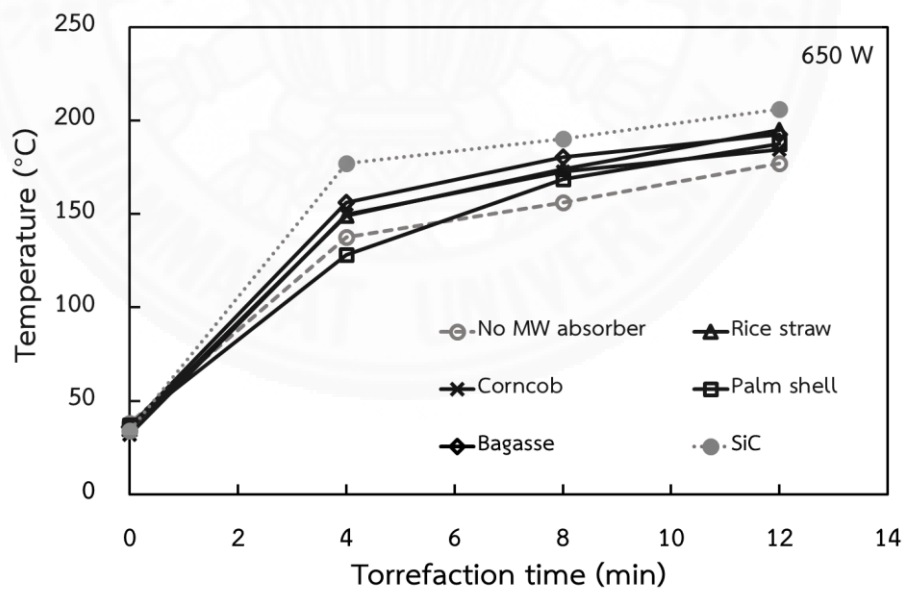
ภาพที่ 4.1 ร้อยละมวลคงเหลือของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟกำลัง 500 วัตต์ ที่ระยะเวลาในช่วง 4-12 นาที โดยใช้สารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟต่างๆ



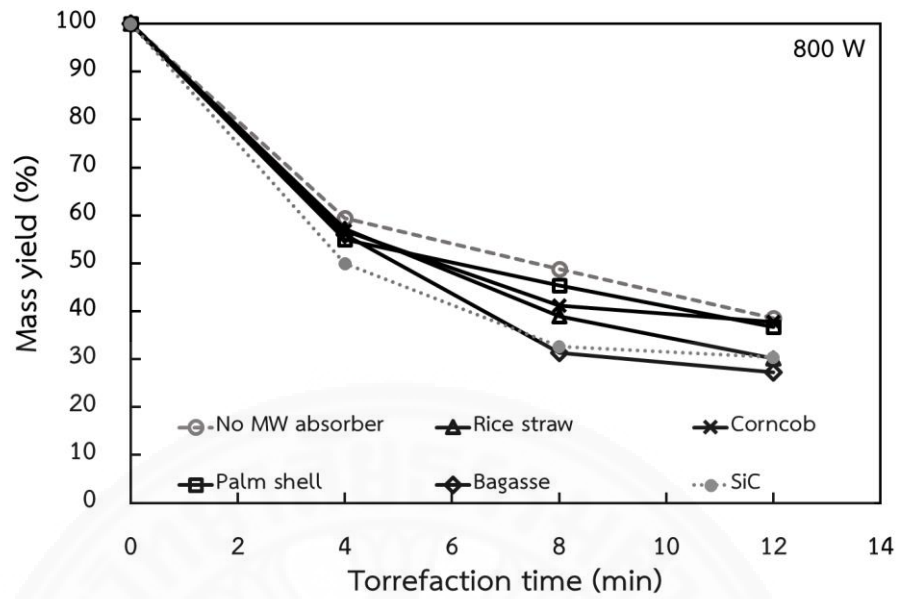
ภาพที่ 4.2 อุณหภูมิของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟกำลัง 500 วัตต์ ที่ระยะเวลาในช่วง 4-12 นาที โดยใช้สารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟต่างๆ



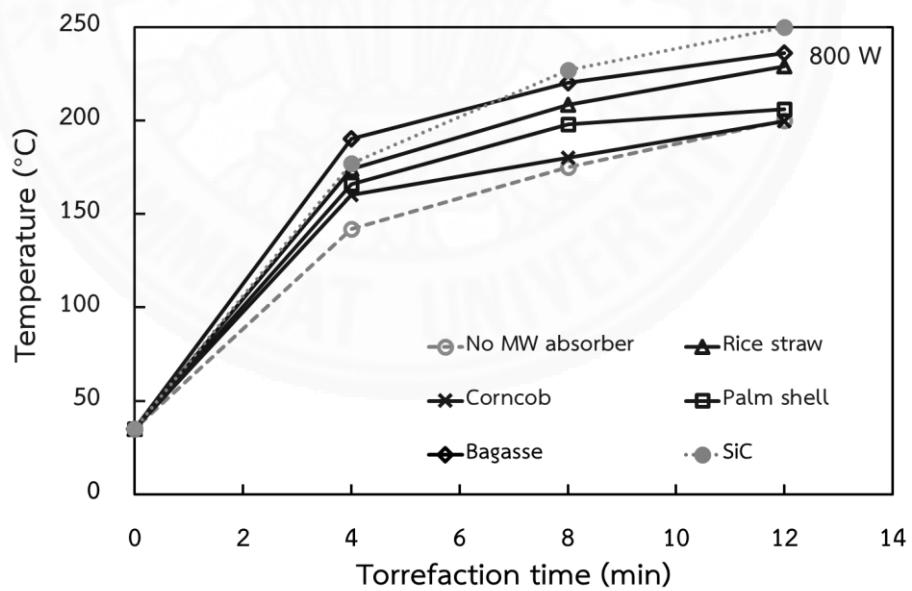
ภาพที่ 4.3 ร้อยละมวลคงเหลือของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟกำลัง 650 วัตต์ ที่ระยะเวลาในช่วง 4-12 นาที โดยใช้สารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟต่างๆ



ภาพที่ 4.4 อุณหภูมิของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟกำลัง 650 วัตต์ ที่ระยะเวลาในช่วง 4-12 นาที โดยใช้สารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟต่างๆ



ภาพที่ 4.5 ร้อยละมวลคงเหลือของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟกำลัง 800 วัตต์ ที่ระยะเวลาในช่วง 4-12 นาที โดยใช้สารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟต่างๆ



ภาพที่ 4.6 อุณหภูมิของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟกำลัง 800 วัตต์ ที่ระยะเวลาในช่วง 4-12 นาที โดยใช้สารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟต่างๆ

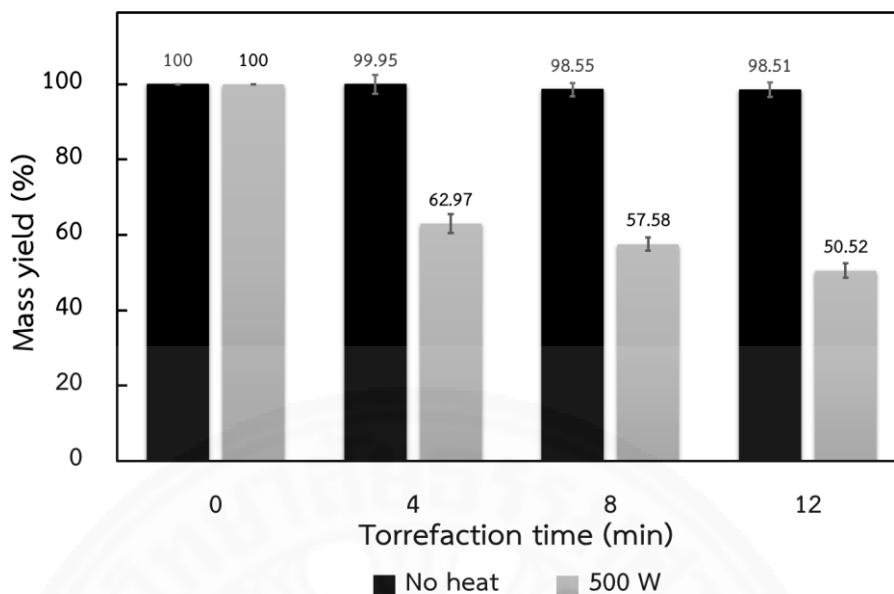
จากภาพที่ 4.1-4.6 พบว่า ตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่ผ่านการให้ความร้อนมี ร้อยละมวลคงเหลือลดลงเมื่อเพิ่มระยะเวลาการให้ความร้อน ทั้งนี้ น่าจะเนื่องจากระยะเวลาที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้อุณหภูมิของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่ผ่านการให้ความร้อนเพิ่มสูงขึ้น ทำให้สามารถขับ ส่วนของความชื้นและสารระเหยได้ (บางส่วน) ออกจากตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งได้มากขึ้น (ซึ่งจะ กล่าวถึงในรายละเอียดในหัวข้อที่ 4.3.1 และ 4.3.2) ส่งผลให้ร้อยละมวลคงเหลือลดลง

จากการพิจารณาผลของการเติมผงถ่านที่ทำจากวัสดุเหลือทิ้งจากการเกษตรที่มีต่อ ร้อยละมวลคงเหลือ พบว่า ตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่มีการเติมผงถ่านที่ทำจากวัสดุเหลือทิ้งจาก การเกษตรมีร้อยละมวลคงเหลือต่ำกว่าตัวอย่างที่ไม่ได้เติมผงถ่านที่ทำจากวัสดุเหลือทิ้งจากการเกษตร และมีแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิสูงกว่าตัวอย่างที่ไม่ได้เติมผงถ่านที่ทำจากวัสดุเหลือทิ้งจาก การเกษตร แสดงว่าผงถ่านที่ทำจากวัสดุเหลือทิ้งจากการเกษตรมีสมบัติเป็นสารดูดกลืนกลิ่นไม่โครเวฟ ได้ดี ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Siritheerasas⁽²⁰⁾ ที่พบว่าผงถ่าน (char) ที่ทำจากวัสดุเหลือทิ้งจาก การเกษตรสามารถดูดกลืนกลิ่นไม่โครเวฟได้ ทำให้อุณหภูมิของตัวอย่างสูงขึ้น ส่งผลให้มวลคงเหลือลดลง

เมื่อพิจารณาผลของชนิดของสารดูดกลืนกลิ่นไม่โครเวฟที่มีต่อร้อยละมวล คงเหลือ พบว่า ตัวอย่างที่มีการเติมสารดูดกลืนกลิ่นไม่โครเวฟที่ทำจากผงถ่านจากชานอ้อย (bagasse) มีแนวโน้มของการลดลงของมวลมากกว่าตัวอย่างที่เติมผงถ่านจากฟางข้าว (rice straw) ผงถ่านจากกะลาปาล์ม (palm shell) และผงถ่านจากซังข้าวโพด (corn cob) ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้อง กับผลของอุณหภูมิที่แสดงว่า ตัวอย่างที่เติมผงถ่านจากชานอ้อยมีอุณหภูมิที่สูงกว่าตัวอย่างที่เติมผง ถ่านจากฟางข้าว ผงถ่านจากกะลาปาล์ม และผงถ่านจากซังข้าวโพด ตามลำดับ ทำให้สามารถสรุปได้ ว่าการเติมผงถ่านจากชานอ้อย สามารถดูดกลืนกลิ่นไม่โครเวฟได้ดี เมื่อเทียบกับการเติมผงถ่านที่ได้ จากวัสดุเหลือทิ้งจากการเกษตรอื่นๆ ที่ศึกษาในงานวิจัยนี้

ทั้งนี้ เพื่อศึกษาว่าสารดูดกลืนกลิ่นไม่โครเวฟสามารถทำให้ความชื้นในตัวอย่าง ลดลงโดยที่ไม่จำเป็นต้องให้ความร้อนหรือเพิ่มอุณหภูมิของระบบด้วยการใช้กลิ่นไม่โครเวฟหรือไม่ จึง ได้ทำการทดลองเช่นเดียวกับการให้ความร้อนด้วยกลิ่นไม่โครเวฟแก่ตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่ง (ตาม รายละเอียดในหัวข้อ 3.3.3) แต่ไม่มีการใช้กลิ่นไม่โครเวฟ ซึ่งผลการทดลองเป็นไปดังแสดงในภาพที่ 4.7

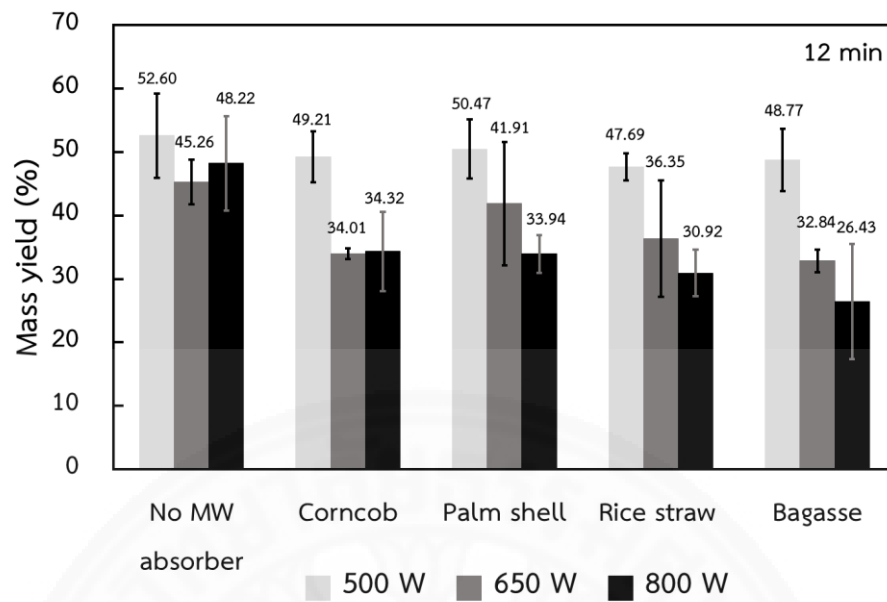
จากภาพที่ 4.7 พบว่า ตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่มีการเติมสารดูดกลืนกลิ่น ไม่โครเวฟแต่ไม่ผ่านการให้ความร้อนด้วยกลิ่นไม่โครเวฟ มีการลดลงของร้อยละมวลคงเหลือ (ในช่วง 4-12 นาที) น้อยมาก (จนถึงได้ว่าคงที่) เมื่อเทียบกับร้อยละมวลคงเหลือของตัวอย่างขยะชุมชน อัดแท่งตอนเริ่มต้น ขณะที่ ตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่มีการเติมสารดูดกลืนกลิ่นไม่โครเวฟที่ผ่าน การให้ความร้อนด้วยกลิ่นไม่โครเวฟที่กำลัง 500 วัตต์ มีร้อยละมวลคงเหลือลดลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อ เพิ่มระยะเวลาการให้ความร้อน แสดงว่า เมื่อไม่ได้ให้ความร้อนแก่ระบบ สารดูดกลืนกลิ่นไม่โครเวฟไม่ สามารถทำให้ความชื้นในตัวอย่างลดลงได้ ซึ่งสังเกตได้จากการที่ร้อยละมวลคงเหลือมีค่าคงที่



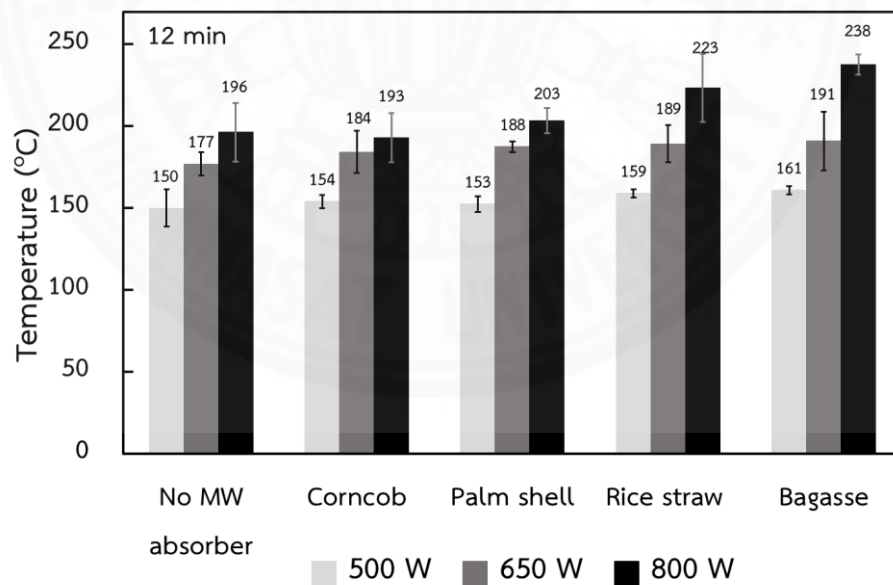
ภาพที่ 4.7 ร้อยละมวลคงเหลือของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่เติมสารดูดกลืนกลิ่นไม่โครเวฟที่เป็นผงถ่านจากชานอ้อย แต่ไม่มีการให้ความร้อน เทียบกับตัวอย่างที่มีการเติมสารดูดกลืนกลิ่นไม่โครเวฟที่เป็นผงถ่านจากชานอ้อยและมีการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟกำลัง 500 วัตต์ ที่ระยะเวลาในช่วง 4-12 นาที

4.2.2 ผลของกำลังของไมโครเวฟที่มีต่อร้อยละมวลคงเหลือ (mass yield) และอุณหภูมิของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ

ผลของกำลังของไมโครเวฟที่มีต่อร้อยละมวลคงเหลือ (mass yield) และอุณหภูมิของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ โดยใช้สารดูดกลืนกลิ่นไม่โครเวฟต่างๆ แสดงได้ดังภาพที่ 4.8 และ 4.9 ตามลำดับ ซึ่งพบว่า ตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่ผ่านการให้ความร้อนมีร้อยละมวลคงเหลือลดลงเมื่อเพิ่มกำลังของไมโครเวฟ ดังแสดงในภาพที่ 4.8 ซึ่งสอดคล้องกับผลของอุณหภูมิของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ (ดังแสดงในภาพที่ 4.9) ที่พบว่าการเพิ่มกำลังของไมโครเวฟส่งผลให้อุณหภูมิของระบบเพิ่มสูงขึ้น และสอดคล้องกับงานวิจัยของ Huang และคณะ⁽¹²⁾ ที่พบว่า การเพิ่มกำลังของไมโครเวฟส่งผลให้ชีวมวลมีอุณหภูมิสูงขึ้น ที่เป็นเช่นนี้ น่าจะเนื่องมาจากข้อเท็จจริงที่ว่าเมื่อกำลังของไมโครเวฟเพิ่มขึ้นจะทำให้โมเลกุลภายในตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่มีขั้วเกิดการหมุนจนเกิดเป็นพลังงานหรือความร้อนได้มากขึ้น จึงส่งผลให้ตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งมีอุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้น ทำให้สามารถขับส่วนของความชื้นและสารระเหยได้ (บางส่วน) ออกจากตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งได้มากยิ่งขึ้น ร้อยละมวลคงเหลือจึงลดลง



ภาพที่ 4.8 ร้อยละมวลคงเหลือของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟกำลัง 500-800 วัตต์ ที่ระยะเวลา 12 นาที โดยใช้สารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟต่างๆ

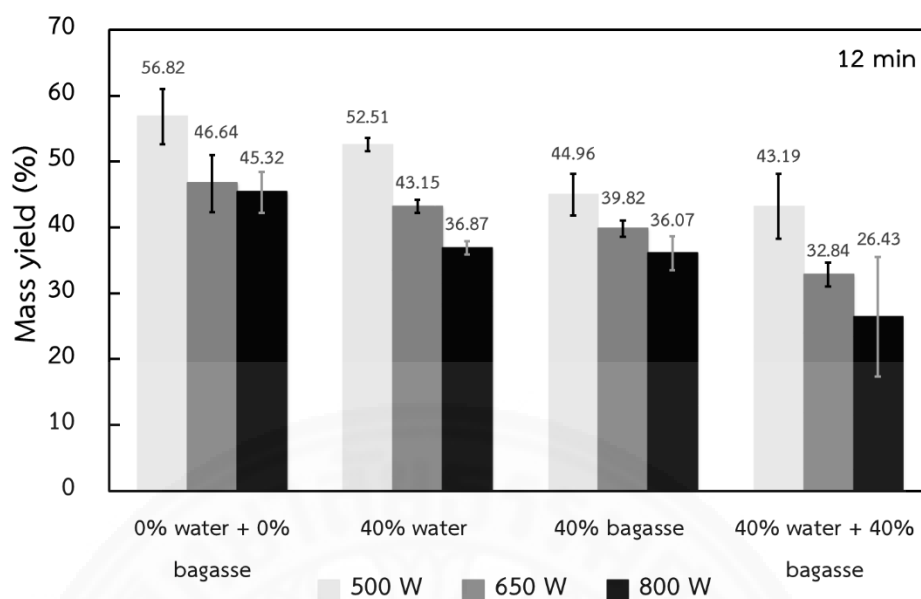


ภาพที่ 4.9 อุณหภูมิของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟกำลัง 500-800 วัตต์ ที่ระยะเวลา 12 นาที โดยใช้สารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟต่างๆ

4.2.3 ผลของสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟที่มีต่อร้อยละมวลคงเหลือ (mass yield) และอุณหภูมิของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ เทียบกับผลของความชื้นในตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่ง

ดังที่กล่าวไว้ในบทที่ 1 และ 2 ว่า น้ำ (หรือความชื้น) ซึ่งเป็นสารที่มีขี้ สามารถดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟได้เช่นเดียวกับสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ (ซึ่งคือผงถ่านจากวัสดุเหลือทิ้งจากการเกษตร) และเนื่องจากงานวิจัยนี้ศึกษาผลของสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟที่มีต่อสมบัติหลังการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่มีความชื้นสูง (ร้อยละ 40) ดังนั้น เพื่อแยกผลของการเติมสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟออกจากผลของการมีความชื้นในขยะชุมชนอัดแท่ง รวมทั้งศึกษาผลของการมีทั้งความชื้นในตัวอย่างและการเติมสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟพร้อมกัน จึงได้ทำการทดลองเพื่อศึกษาร้อยละมวลคงเหลือและอุณหภูมิของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟในกรณี (1) ตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งไม่มีความชื้น (ตัวอย่างแห้ง) และไม่มีการเติมสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ (2) ตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งมีความชื้นร้อยละ 40 แต่ไม่มีการเติมสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ (3) ตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งไม่มีความชื้น (ตัวอย่างแห้ง) แต่มีการเติมสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ (ผงถ่านจากขานอ้อย) ร้อยละ 40 และ (4) ตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งมีความชื้นร้อยละ 40 และมีการเติมสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ (ผงถ่านจากขานอ้อย) ร้อยละ 40 ผลการทดลองเป็นไปดังแสดงในภาพที่ 4.10-4.11

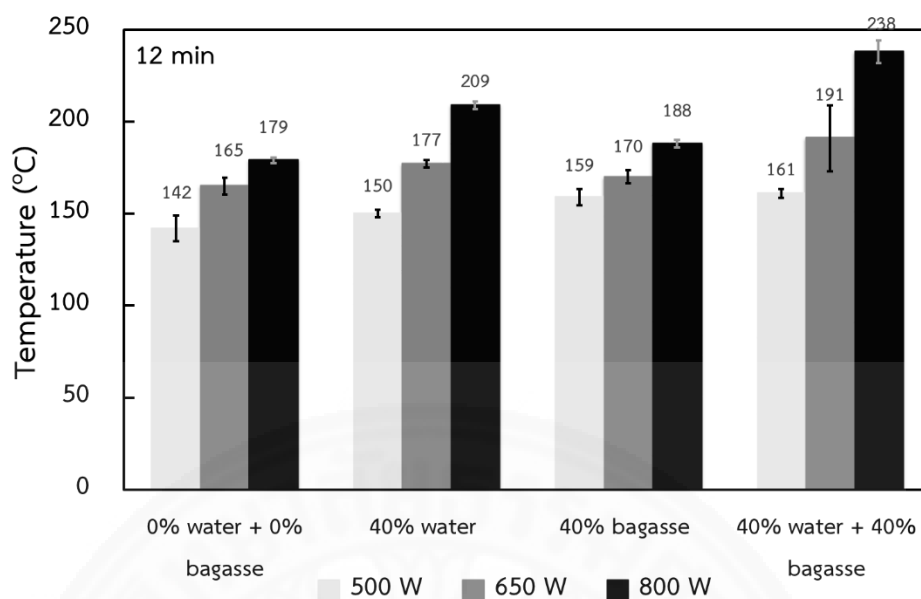
จากภาพที่ 4.10 พบว่า ร้อยละมวลคงเหลือของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มกำลังของไมโครเวฟ และเมื่อเปรียบเทียบร้อยละมวลคงเหลือของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่มีความชื้นร้อยละ 40 ตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่ไม่มีความชื้น (ตัวอย่างแห้ง) แต่มีการเติมสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ (ผงถ่านจากขานอ้อย) ร้อยละ 40 และตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่มีความชื้นร้อยละ 40 และมีการเติมสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ (ผงถ่านจากขานอ้อย) ร้อยละ 40 ที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟที่กำลังไมโครเวฟ 500-800 วัตต์ พบว่า ที่กำลังไมโครเวฟเดียวกัน ตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่มีแต่ความชื้นเพียงอย่างเดียว (ไม่ได้เติมผงถ่านจากขานอ้อย) มีร้อยละมวลคงเหลือสูงกว่าตัวอย่างที่มีการเติมผงถ่านจากขานอ้อยแต่ไม่มีความชื้น แสดงว่า การเติมสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ (ผงถ่านจากขานอ้อย) มีผลต่อร้อยละมวลคงเหลือมากกว่าการมีความชื้นในตัวอย่าง และเมื่อมีการเติมสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟให้กับตัวอย่างที่มีความชื้น (ร้อยละ 40) พบว่า ร้อยละมวลคงเหลือลดต่ำลงอีก แสดงว่าเมื่อมีการเติมทั้งสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟและมีความชื้นในตัวอย่าง จะเป็นแรงเสริมกัน ทำให้สามารถจับความชื้นและสารระเหยได้ (บางส่วน) ออกจากตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งได้มากขึ้น ส่งผลให้ร้อยละมวลคงเหลือลดต่ำลง



ภาพที่ 4.10 ร้อยละมวลคงเหลือของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟกำลัง 500-800 วัตต์ ที่ระยะเวลา 12 นาที ในกรณีที่ (1) ตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งไม่มีความชื้น (ตัวอย่างแห้ง) และไม่มีการเติมสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ (2) ตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งมีความชื้นร้อยละ 40 แต่ไม่มีการเติมสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ (3) ตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งไม่มีความชื้น (ตัวอย่างแห้ง) แต่มีการเติมสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ (ผงถ่านจากชานอ้อย) ร้อยละ 40 และ (4) ตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งมีความชื้นร้อยละ 40 และมีการเติมสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ (ผงถ่านจากชานอ้อย) ร้อยละ 40

เมื่อพิจารณาอุณหภูมิของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟกำลัง 500-800 วัตต์ ที่ระยะเวลา 12 นาที ในกรณีต่างๆ ดังแสดงในภาพที่ 4.11 พบว่าอุณหภูมิของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มกำลังของไมโครเวฟ ซึ่งการที่ระบบมีอุณหภูมิสูงขึ้นส่งผลให้สามารถขั้บความชื้นและสารระเหยได้ (บางส่วน) ร้อยละมวลคงเหลือจึงลดลง

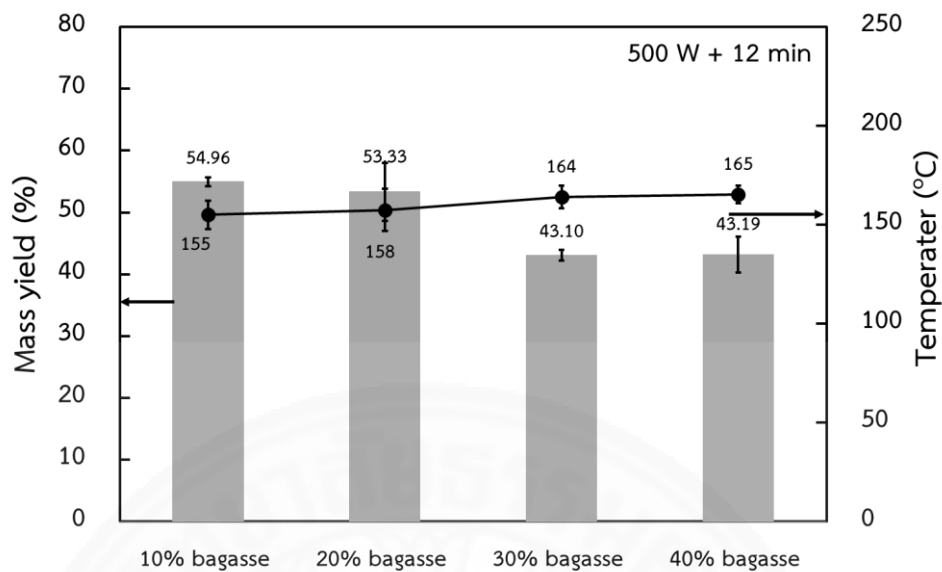
ทั้งนี้ การที่สารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟมีผลต่อร้อยละมวลคงเหลือและอุณหภูมิของระบบมากกว่าน้ำหรือความชื้น น่าจะเนื่องมาจากการที่สารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ (ผงถ่านจากชานอ้อย) สามารถดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟได้ดีกว่าน้ำ (ซึ่งจะได้กล่าวถึงเรื่องนี้ในรายละเอียดในหัวข้อที่ 4.8)



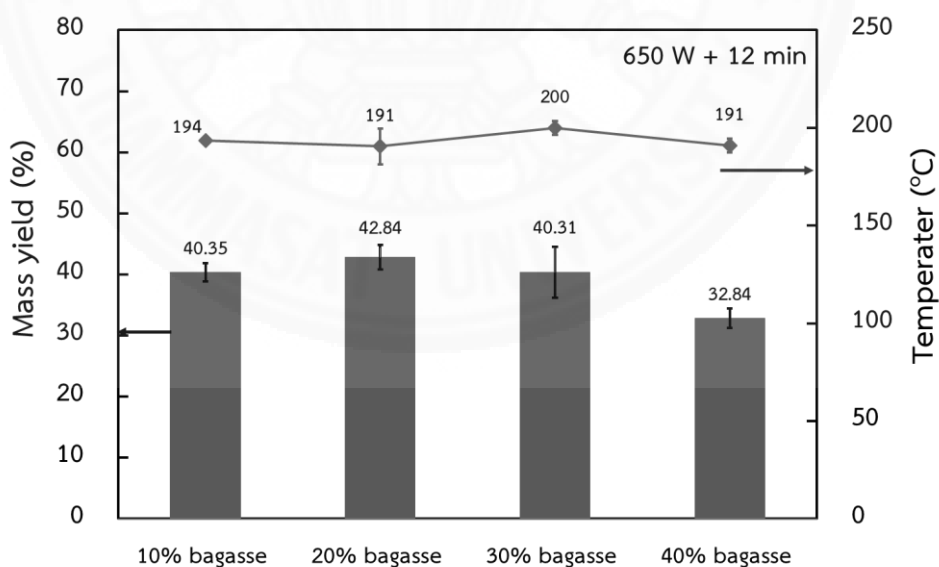
ภาพที่ 4.11 อุณหภูมิของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟกำลัง 500-800 วัตต์ ที่ระยะเวลา 12 นาที ในกรณีที่ (1) ตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งไม่มีความชื้น (ตัวอย่างแห้ง) และไม่มีการเติมสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ (2) ตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งมีความชื้นร้อยละ 40 แต่ไม่มีการเติมสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ (3) ตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งไม่มีความชื้น (ตัวอย่างแห้ง) แต่มีการเติมสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ (ผงถ่านจากชานอ้อย) ร้อยละ 40 และ (4) ตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งมีความชื้นร้อยละ 40 และมีการเติมสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ (ผงถ่านจากชานอ้อย) ร้อยละ 40

4.2.4 ผลของปริมาณสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟที่มีต่อร้อยละมวลคงเหลือ (mass yield) และอุณหภูมิของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ

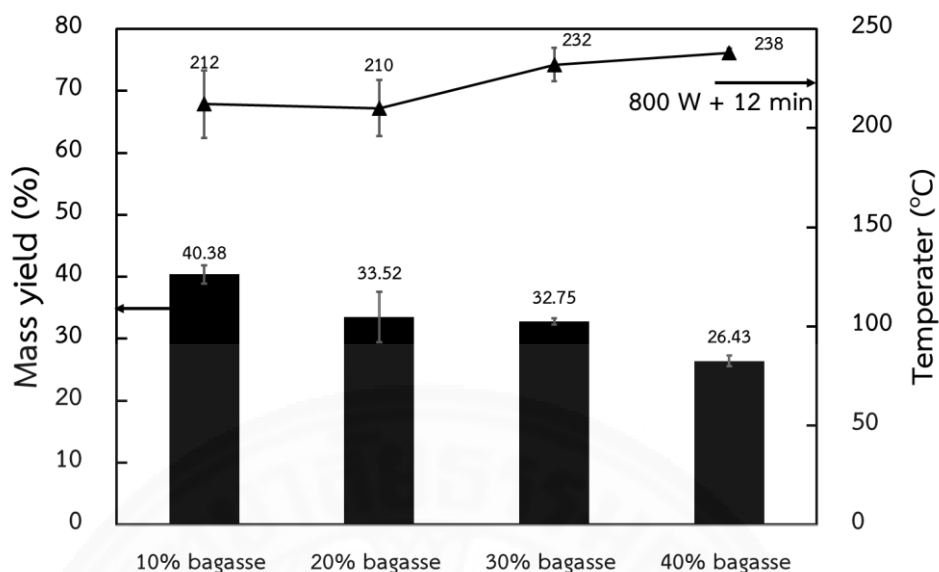
ผลของปริมาณสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ (ผงถ่านจากชานอ้อย) ที่มีต่อร้อยละมวลคงเหลือและอุณหภูมิของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟที่เวลา 12 นาที แสดงได้ดังภาพที่ 4.12-4.14



ภาพที่ 4.12 ร้อยละมวลคงเหลือและอุณหภูมิของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟกำลัง 500 วัตต์ ที่ระยะเวลา 12 นาที โดยใช้ผงถ่านจากชานอ้อยเป็นสารดูดกลิ่น คลื่นไมโครเวฟที่ปริมาณต่างๆ



ภาพที่ 4.13 ร้อยละมวลคงเหลือและอุณหภูมิของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟกำลัง 650 วัตต์ ที่ระยะเวลา 12 นาที โดยใช้ผงถ่านจากชานอ้อยเป็นสารดูดกลิ่น คลื่นไมโครเวฟที่ปริมาณต่างๆ

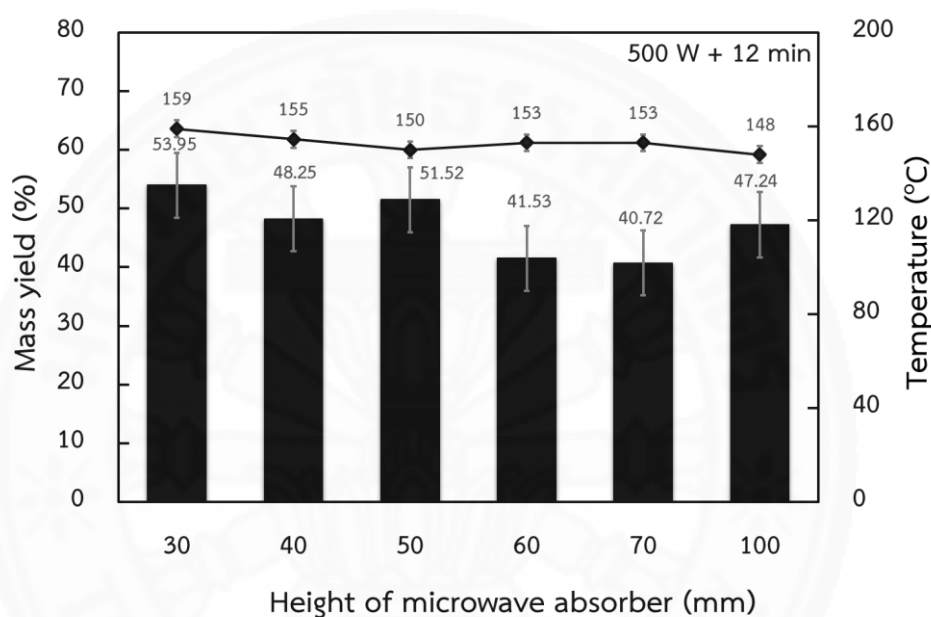


ภาพที่ 4.14 ร้อยละมวลคงเหลือและอุณหภูมิของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟกำลัง 800 วัตต์ ที่ระยะเวลา 12 นาที โดยใช้ผงถ่านจากชานอ้อยเป็นสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟที่ปริมาณต่างๆ

จากภาพที่ 4.12-4.14 พบว่า ที่กำลังไมโครเวฟ 500 วัตต์ ร้อยละมวลคงเหลือของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่มีการเติมผงถ่านจากชานอ้อยที่ร้อยละ 30 และ 40 มีแนวโน้มการลดลงของมวลใกล้เคียงกัน และมีการลดลงของมวลมากกว่าตัวอย่างที่มีการเติมผงถ่านจากชานอ้อยที่ร้อยละ 10 และ 20 แต่ที่กำลังไมโครเวฟเท่ากับ 650 และ 800 วัตต์ พบว่า ตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่มีการเติมผงถ่านจากชานอ้อยที่ร้อยละ 40 มีร้อยละมวลคงเหลือลดลงต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับตัวอย่างที่มีการเติมผงถ่านจากชานอ้อยที่ร้อยละ 30, 20, และ 10 ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับผลของอุณหภูมิ ที่พบว่า ตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่มีการเติมผงถ่านจากชานอ้อยที่ร้อยละ 40 มีอุณหภูมิสูงที่สุดเมื่อเทียบกับตัวอย่างที่มีการเติมผงถ่านจากชานอ้อยที่ร้อยละ 30, 20, และ 10 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่า เมื่อกำลังของไมโครเวฟสูงขึ้น การเติมสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟในปริมาณที่มากขึ้นทำให้อุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น สามารถขั้บความชื้นและสารระเหยได้ (บางส่วน) ออกจากตัวอย่างได้มากขึ้น ซึ่งน่าจะเนื่องมาจากการที่เมื่อมีปริมาณสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟมากขึ้น ทำให้สามารถดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟแล้วเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนในการขั้บความชื้นและระเหยได้ ได้มากขึ้น

4.2.5 ผลของความสูงของสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟที่มีต่อร้อยละมวลคงเหลือ (mass yield) ของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ

ผลของความสูงของสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ ที่ปริมาณของสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ (ผงถ่านจากขานอ้อย) ร้อยละ 40 ที่มีต่อร้อยละมวลคงเหลือและอุณหภูมิของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟกำลังไมโครเวฟ 500 วัตต์ ที่เวลา 12 นาที แสดงได้ดังภาพที่ 4.15



ภาพที่ 4.15 ร้อยละมวลคงเหลือและอุณหภูมิของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟกำลัง 500 วัตต์ ที่ระยะเวลา 12 นาที โดยใช้ผงถ่านจากขานอ้อยเป็นสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟที่ระดับความสูงต่างๆ

จากภาพที่ 4.15 พบว่า ร้อยละมวลคงเหลือและอุณหภูมิของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟเมื่อมีการเติมสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ (ผงถ่านจากขานอ้อย) ในปริมาณร้อยละ 40 ที่ระดับความสูงต่างๆ (30-100 มิลลิเมตร) มีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 40-54 [มีค่าความคลาดเคลื่อน ± 5.54 (ที่ความเชื่อมั่นร้อยละ 95)] และ 148-159 องศาเซลเซียส [มีค่าความคลาดเคลื่อน ± 3.55 (ที่ความเชื่อมั่นร้อยละ 95)] ตามลำดับ และพบว่า ร้อยละมวลคงเหลือและอุณหภูมิไม่มีความสัมพันธ์ระหว่างระดับความสูงของสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ ซึ่งทำให้สามารถสรุปได้ว่า ระดับความสูงของสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ (ซึ่งเป็นผงถ่านจากขานอ้อย) มีผลน้อยต่อร้อยละมวลคงเหลือและอุณหภูมิของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่ง

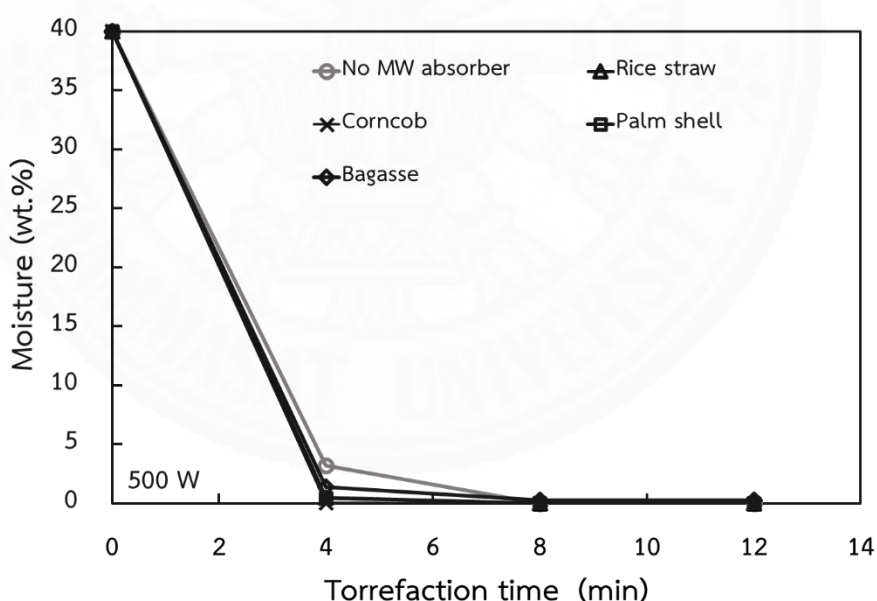
4.3 ผลการวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate Analysis) ของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ

ผลการวิเคราะห์แบบประมาณ ซึ่งได้แก่ ปริมาณความชื้น (moisture) ปริมาณสารระเหยได้ (volatile matter) ปริมาณเถ้า (ash) และปริมาณคาร์บอนคงตัว (fixed carbon) ของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ แสดงได้ดังภาพที่ 4.16-4.31 โดยมีรายละเอียด ดังนี้

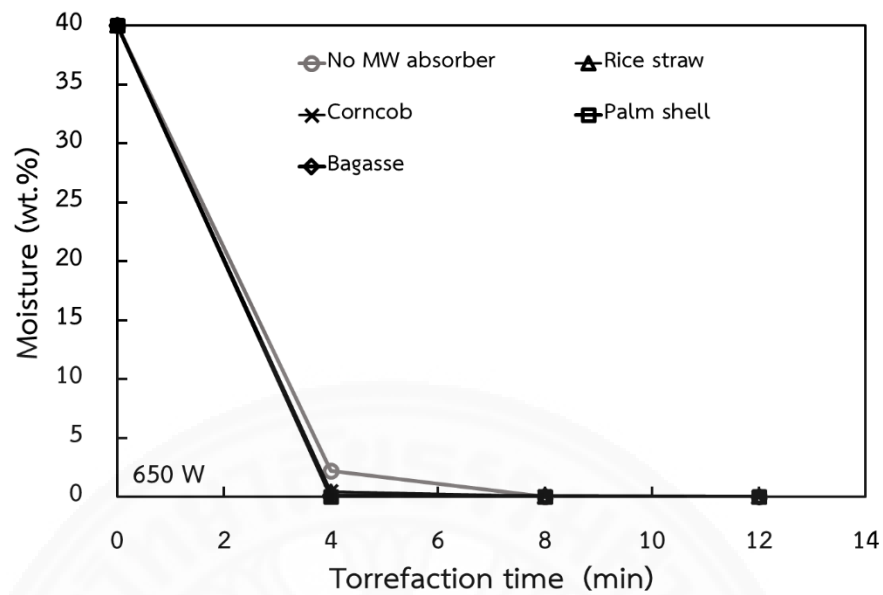
4.3.1 ปริมาณความชื้น (moisture) คงเหลือของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ

1) ผลของระยะเวลาการให้ความร้อนที่มีต่อปริมาณความชื้นคงเหลือ

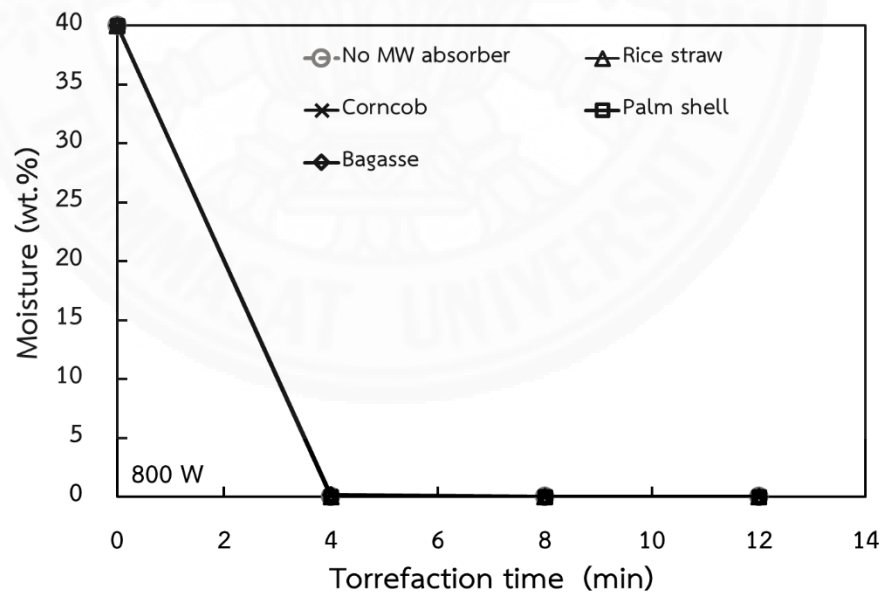
ผลของระยะเวลาการให้ความร้อนที่มีต่อปริมาณความชื้นคงเหลือที่กำลังไมโครเวฟ 500-800 วัตต์ ที่ระยะเวลาในช่วง 4-12 นาที โดยใช้สารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟต่างๆ แสดงดังภาพที่ 4.16-4.18



ภาพที่ 4.16 ปริมาณความชื้นของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟกำลัง 500 วัตต์ ที่ระยะเวลาในช่วง 4-12 นาที โดยใช้สารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟต่างๆ



ภาพที่ 4.17 ปริมาณความชื้นของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟกำลัง 650 วัตต์ ที่ระยะเวลาในช่วง 4-12 นาที โดยใช้สารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟต่างๆ



ภาพที่ 4.18 ปริมาณความชื้นของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟกำลัง 800 วัตต์ ที่ระยะเวลาในช่วง 4-12 นาที โดยใช้สารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟต่างๆ

จากภาพที่ 4.16-4.17 ซึ่งแสดงปริมาณความชื้นคงเหลือที่กำลังของไมโครเวฟ 500 และ 650 วัตต์ พบว่า ตัวอย่างที่ไม่ได้เติมสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟมีปริมาณความชื้นคงเหลืออยู่มากกว่าตัวอย่างที่เติมสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ และตัวอย่างที่เติมสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟซึ่งเป็นผงถ่านจากฟางข้าวมีปริมาณความชื้นคงเหลืออยู่ที่ 4-8 นาที่ แต่ความชื้นลดลงเป็น 0 ที่นาที่ที่ 12 ส่วนตัวอย่างที่เติมผงถ่านจากชานอ้อย ชังข้าวโพด และกะลาปาล์มมีความชื้นลดลงเป็น 0 ตั้งแต่นาทีที่ 4 เป็นต้นไป

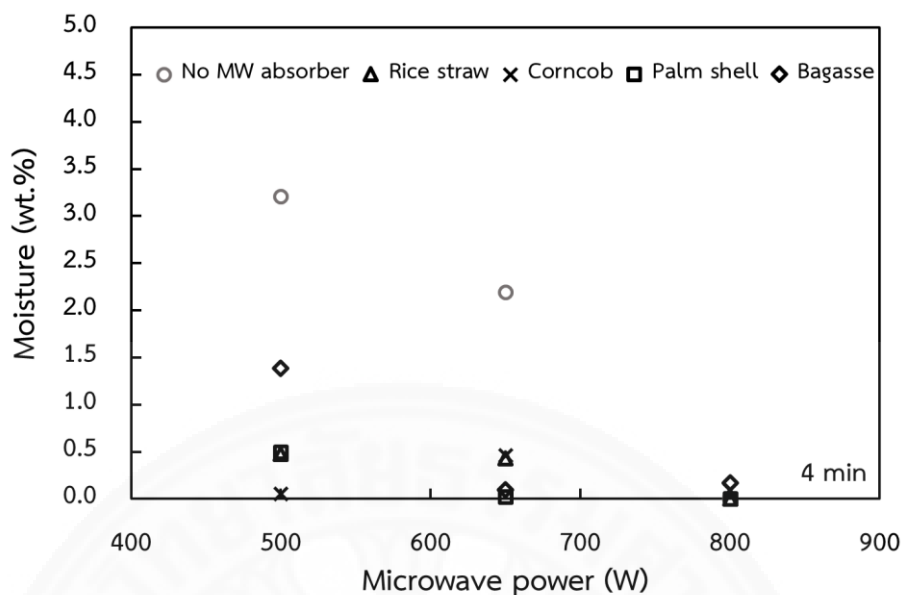
เมื่อพิจารณาที่กำลังของไมโครเวฟ 800 วัตต์ จากภาพที่ 4.18 พบว่า ตัวอย่างที่เติมสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ และตัวอย่างที่ไม่ได้เติมสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟมีความชื้นลดลงจนเป็น 0 เมื่อระยะเวลาการให้ความร้อนผ่านไปเพียง 4 นาที

เมื่อเปรียบเทียบการให้ความร้อนโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ (microwave heating) กับการให้ความร้อนแบบดั้งเดิม (conventional heating) ที่มีอุณหภูมิของการให้ความร้อนในช่วง 200-250 องศาเซลเซียส จากงานวิจัยของ Siritheerasas และคณะ⁽¹⁵⁾ พบว่าการให้ความร้อนโดยใช้คลื่นไมโครเวฟใช้เวลาในการระเหยความชื้นออกจากตัวอย่างรวดเร็วกว่าการให้ความร้อนด้วยวิธีการดั้งเดิม (conventional heating) ที่ใช้เตาอบลมร้อน ที่ต้องใช้เวลาในการจับความชื้นออกจากตัวอย่างนานถึง 25 นาที ที่เป็นเช่นนี้เพราะการใช้คลื่นไมโครเวฟเป็นการส่งคลื่นเข้าไปในตัวอย่างเพื่อไปทำให้โมเลกุลของน้ำ (หรือความชื้น) ภายในตัวอย่างเกิดการหมุน จนเกิดเป็นพลังงานความร้อนที่ใช้จับความชื้นออกจากตัวอย่าง ขณะที่การให้ความร้อนด้วยวิธีการดั้งเดิม (ที่ใช้เตาอบลมร้อน) เป็นการให้ความร้อนจากภายนอก (ด้วยกลไกการพาความร้อนเป็นหลัก) ทำให้ต้องใช้เวลานาน กว่าความร้อนจากภายนอกจะเข้าไปทำให้อุณหภูมิของน้ำภายในตัวอย่างสูงขึ้นจนเกิดการระเหยออกจากตัวอย่าง⁽⁷⁾

ทั้งนี้ การเติมสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ ช่วยทำให้ตัวอย่างขยะชุมชนอัดแห้งสามารถดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟได้มากขึ้น ส่งผลให้ตัวอย่างขยะชุมชนอัดแห้งมีอุณหภูมิที่สูงขึ้น จึงสามารถระเหยความชื้นออกจากตัวอย่างขยะชุมชนอัดแห้งได้มากขึ้น

2) ผลของกำลังของไมโครเวฟที่มีต่อปริมาณความชื้นคงเหลือ

ผลของกำลังของไมโครเวฟที่มีปริมาณความชื้นคงเหลือที่กำลังไมโครเวฟ 500-800 วัตต์ โดยใช้สารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟต่างๆ ที่ระยะเวลา 4 นาที แสดงในดังภาพที่ 4.19 (ที่ระยะเวลา 8 และ 12 นาที ความชื้นในตัวอย่างลดลงเป็นศูนย์เกือบทุกตัวอย่าง ทำให้ไม่สามารถเปรียบเทียบความแตกต่างได้)



ภาพที่ 4.19 ปริมาณความชื้นของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟกำลัง 500-800 วัตต์ ที่ระยะเวลา 4 นาที โดยใช้สารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟต่างๆ

จากภาพที่ 4.19 พบว่า ที่ระยะเวลาการให้ความร้อน 4 นาที ด้วยกำลังของไมโครเวฟเท่ากับ 800 วัตต์ ปริมาณความชื้นคงเหลือของตัวอย่างลดลงมากกว่าที่กำลังของไมโครเวฟเท่ากับ 650 และ 500 วัตต์ ตามลำดับ ทั้งนี้ เนื่องมาจากการเพิ่มกำลังของไมโครเวฟ ส่งผลให้โมเลกุลของน้ำภายในตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งและของสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟเกิดการหมุนมากขึ้น จนทำให้มีอุณหภูมิสูงขึ้น สามารถขับความชื้นหรือระเหยน้ำออกจากตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งได้มากขึ้น

3) ผลของชนิดของสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟที่มีต่อปริมาณความชื้นคงเหลือ

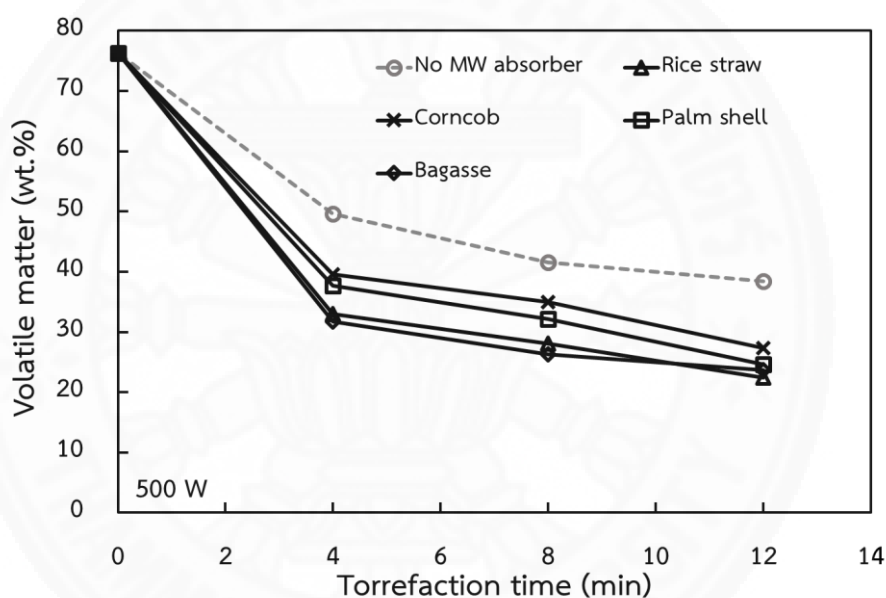
ผลของชนิดของสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟที่มีต่อปริมาณความชื้นคงเหลือเป็นไปดังภาพที่ 4.16-4.19 ซึ่งพบว่า ตัวอย่างที่เติมสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟที่เป็นผงถ่านจากกะลาปาล์ม และซังข้าวโพด มีปริมาณความชื้นคงเหลือลดลงอย่างรวดเร็ว รองลงมาคือ ตัวอย่างที่เติมผงถ่านจากชานอ้อย ฟางข้าว และตัวอย่างที่ไม่ได้เติมสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ ตามลำดับ

อนึ่ง เนื่องจากปริมาณความชื้นคงเหลือของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟที่ระยะเวลา 12 นาที มีความชื้นลดลงจนเป็น 0 แทบทุกการทดลอง (หรือมีปริมาณความชื้นคงเหลือที่น้อยมาก) ซึ่งการที่ตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งมีปริมาณความชื้นคงเหลือต่ำมากเช่นนี้จะทำให้ตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งกลับไปมีค่าความชื้นที่สมดุลกับความชื้นในบรรยากาศได้ ดังนั้น การเก็บตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่ผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่ำ (torrefaction) ก่อนการนำไปเผาไหม้ต้องมีการเก็บตัวอย่างอย่างมิดชิด หรือต้องออกแบบ

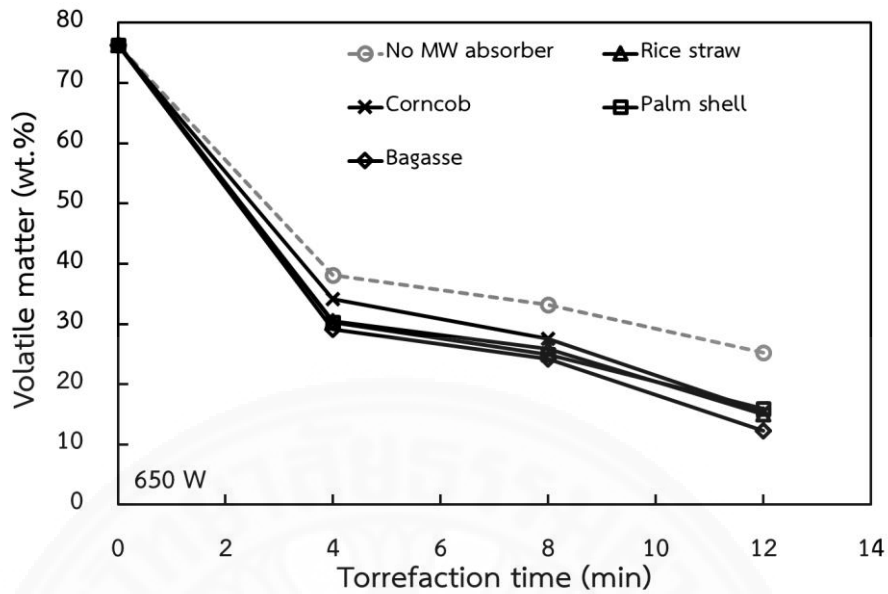
กระบวนการให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่ำ (torrefaction) ก็ับกระบวนการเผาไหม้เป็นกระบวนการที่ต่อเนื่องกัน

4.3.2 ปริมาณสารระเหยได้ (volatile matter: VM) คงเหลือของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ

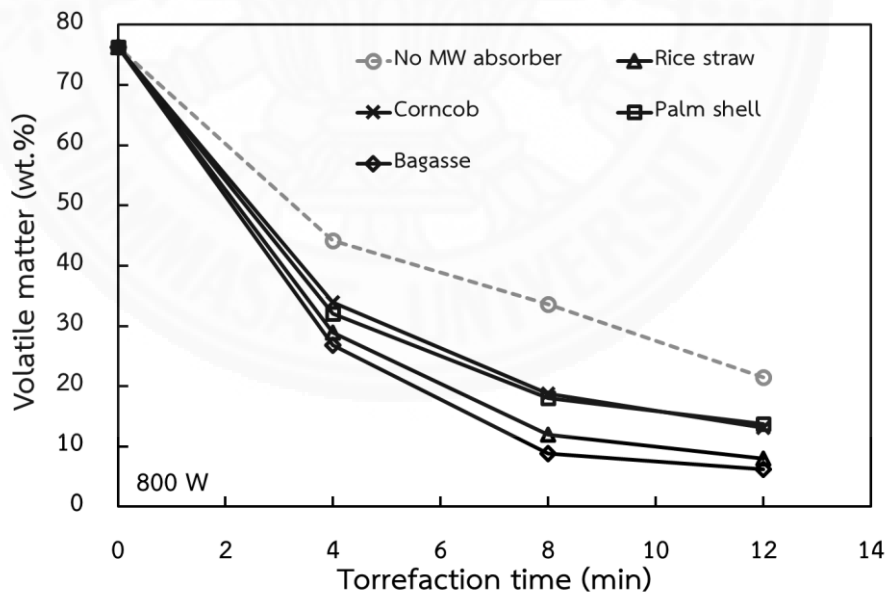
1) ผลของระยะเวลาการให้ความร้อนที่มีต่อปริมาณสารระเหยได้ (VM) คงเหลือของระยะเวลาการให้ความร้อนที่มีต่อปริมาณสารระเหยได้คงเหลือที่กำลังไมโครเวฟ 500-800 วัตต์ ที่ระยะเวลาในช่วง 4-12 นาที โดยใช้สารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟต่างๆ แสดงดังภาพที่ 4.20-4.22



ภาพที่ 4.20 ปริมาณสารระเหยได้คงเหลือของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟกำลัง 500 วัตต์ ที่ระยะเวลาในช่วง 4-12 นาที โดยใช้สารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟต่างๆ



ภาพที่ 4.21 ปริมาณสารระเหยได้คงเหลือของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟกำลัง 650 วัตต์ ที่ระยะเวลาในช่วง 4-12 นาที โดยใช้สารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟต่างๆ

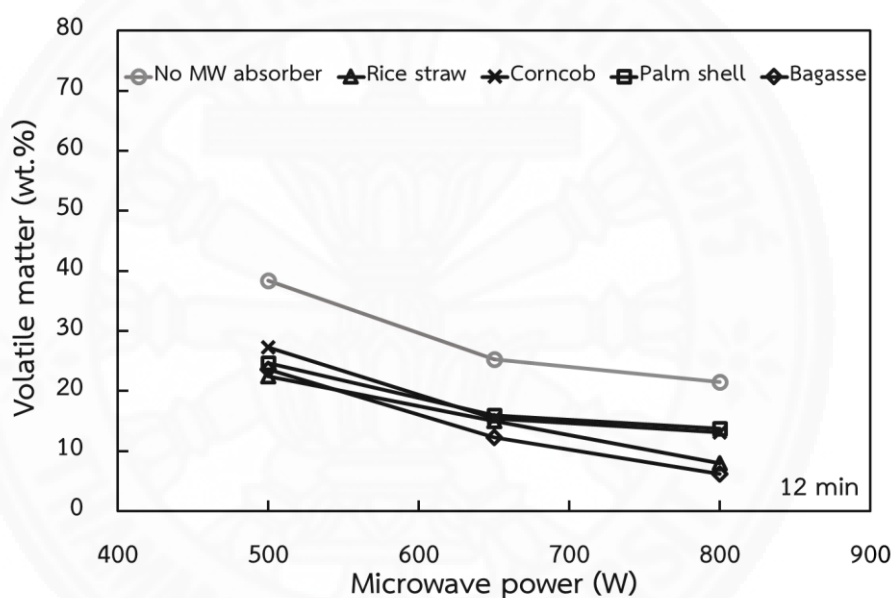


ภาพที่ 4.22 ปริมาณสารระเหยได้คงเหลือของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟกำลัง 800 วัตต์ ที่ระยะเวลาในช่วง 4-12 นาที โดยใช้สารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟต่างๆ

จากภาพที่ 4.20-4.22 พบว่า ปริมาณสารระเหยได้คงเหลือมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มระยะเวลาการให้ความร้อน และเมื่อเทียบกับปริมาณสารระเหยได้ก่อนการให้ความร้อนซึ่งมีค่าอยู่ประมาณ 76 มีค่าลดลงอยู่ในช่วงร้อยละ 10-50 ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากเมื่อเพิ่มระยะเวลาการให้ความร้อนจะส่งผลให้ตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งมีอุณหภูมิสูงขึ้น (ดังแสดงในภาพที่ 4.2, 4.4, และ 4.6) จึงสามารถขับสารระเหยได้บางส่วน (ในช่วงร้อยละ 10-50) ออกมาได้มากขึ้น

2) ผลของกำลังของไมโครเวฟที่มีต่อปริมาณสารระเหยได้ (VM) คงเหลือ

ผลของกำลังของไมโครเวฟที่มีปริมาณสารระเหยได้คงเหลือที่กำลังไมโครเวฟ 500-800 วัตต์ ที่ระยะเวลา 12 นาที โดยใช้สารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟต่างๆ แสดงในดังภาพที่ 4.23



ภาพที่ 4.23 ปริมาณสารระเหยได้คงเหลือของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟกำลัง 500-800 วัตต์ ที่ระยะเวลา 12 นาที โดยใช้สารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟต่างๆ

จากภาพที่ 4.23 พบว่า ปริมาณสารระเหยได้คงเหลือมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มกำลังของไมโครเวฟสูงขึ้น ซึ่งที่เป็นเช่นนี้เนื่องมาจากการเพิ่มกำลังของไมโครเวฟทำให้ตัวอย่างมีการหมุนของโมเลกุลที่มีขั้วภายในตัวอย่างที่แรงขึ้น จนเกิดเป็นความร้อน ส่งผลให้ตัวอย่างมีอุณหภูมิสูงขึ้น (ดังแสดงในภาพที่ 4.2, 4.4, และ 4.6) จนสูงพอที่จะขับสารระเหยได้ออกจากตัวอย่าง

3) ผลของชนิดของสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟที่มีต่อปริมาณสารระเหยได้ (VM)

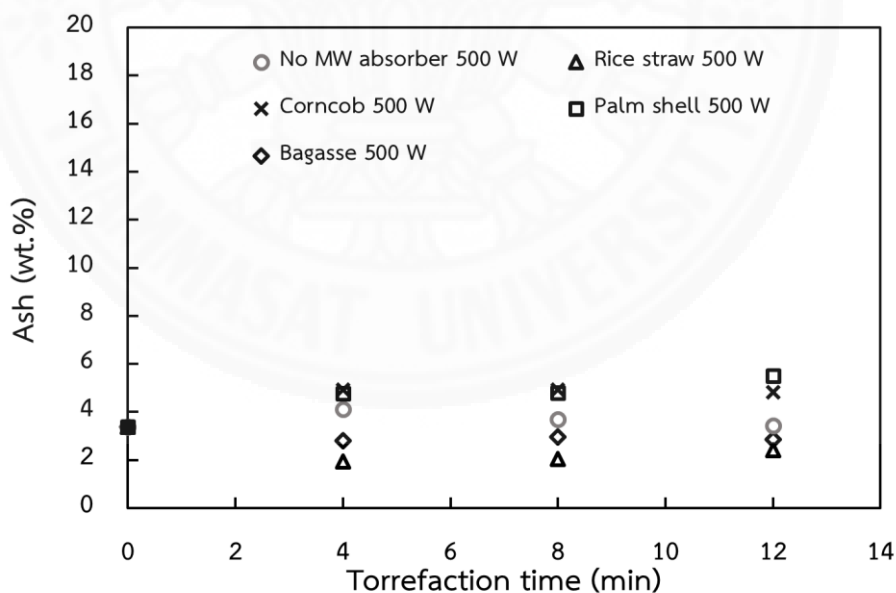
คงเหลือ

เมื่อพิจารณาผลของชนิดของสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟที่มีต่อปริมาณสารระเหยได้คงเหลือ ดังแสดงในภาพที่ 4.20-4.23 พบว่า ตัวอย่างที่เติมสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟซึ่งเป็นผงถ่านจากชานอ้อยมีปริมาณสารระเหยได้คงเหลือลดลงอย่างรวดเร็วและมากที่สุด รองลงมาคือ ตัวอย่างที่เติมผงถ่านจากฟางข้าว กะลาปาล์ม ชังข้าวโพด และตัวอย่างที่ไม่ได้เติมสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ ตามลำดับ

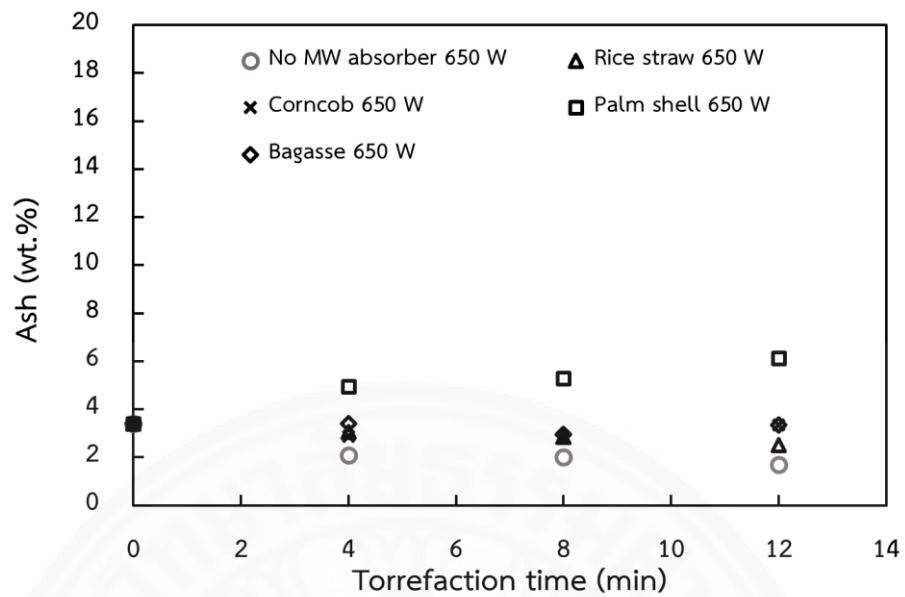
4.3.3 ปริมาณเถ้า (ash) คงเหลือของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ

1) ผลของระยะเวลาการให้ความร้อนและชนิดของสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟที่มีต่อปริมาณเถ้าคงเหลือ

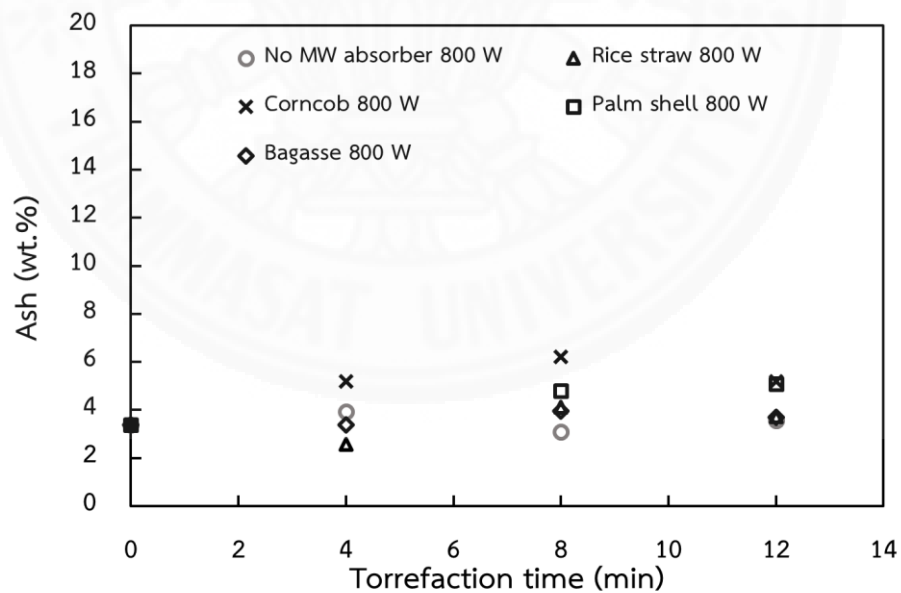
ผลของระยะเวลาการให้ความร้อนและชนิดของสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟที่มีต่อปริมาณเถ้าคงเหลือที่กำลังไมโครเวฟ 500-800 วัตต์ ที่ระยะเวลาในช่วง 4-12 นาที แสดงดังภาพที่ 4.24-4.26



ภาพที่ 4.24 ปริมาณเถ้าคงเหลือของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟกำลัง 500 วัตต์ ที่ระยะเวลาในช่วง 4-12 นาที โดยใช้สารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟต่างๆ



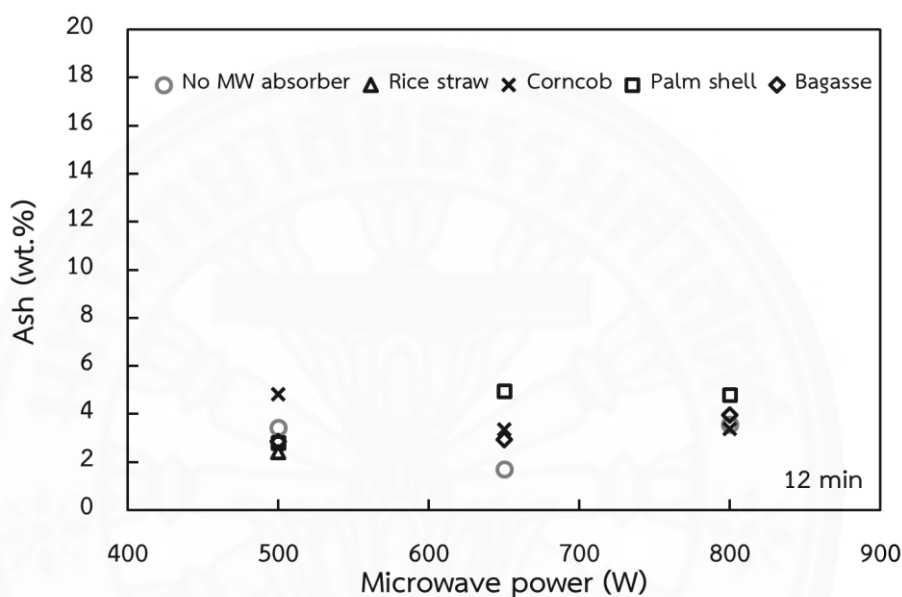
ภาพที่ 4.25 ปริมาณเถ้าคงเหลือของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟกำลัง 650 วัตต์ ที่ระยะเวลาในช่วง 4-12 นาที โดยใช้สารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟต่างๆ



ภาพที่ 4.26 ปริมาณเถ้าคงเหลือของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟกำลัง 800 วัตต์ ที่ระยะเวลาในช่วง 4-12 นาที โดยใช้สารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟต่างๆ

2) ผลของกำลังของไมโครเวฟและชนิดของสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟที่มีต่อปริมาณเถ้าคงเหลือ

ผลของกำลังของไมโครเวฟและชนิดของสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟที่มีต่อปริมาณเถ้าคงเหลือที่กำลังไมโครเวฟ 500-800 วัตต์ ที่ระยะเวลา 12 นาที โดยใช้สารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟต่างๆ แสดงดังภาพที่ 4.27



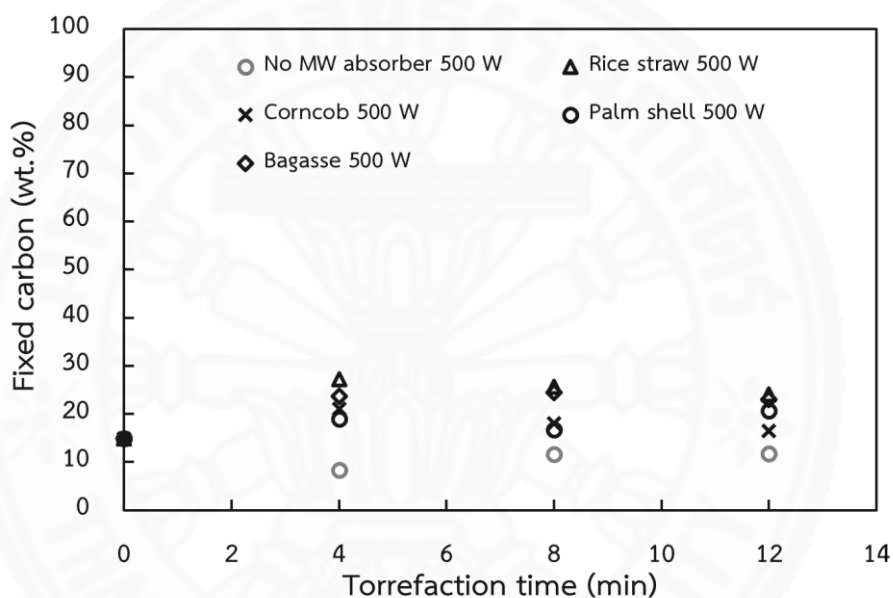
ภาพที่ 4.27 ปริมาณเถ้าคงเหลือของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟกำลัง 500-800 วัตต์ ที่ระยะเวลา 12 นาที โดยใช้สารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟต่างๆ

จากภาพที่ 4.24-4.27 พบว่า ปริมาณเถ้าคงเหลือในตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งมีแนวโน้มคงที่ โดยอยู่ในช่วงร้อยละ 2-6 ซึ่งใกล้เคียงกับปริมาณเถ้าในตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งก่อนการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ ที่มีค่าร้อยละ 3.39 แสดงว่า การเติมสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ ชนิดของสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ การเพิ่มระยะเวลาการให้ความร้อน และการเพิ่มกำลังไมโครเวฟ ไม่ส่งผลต่อปริมาณเถ้าคงเหลือในตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่ง

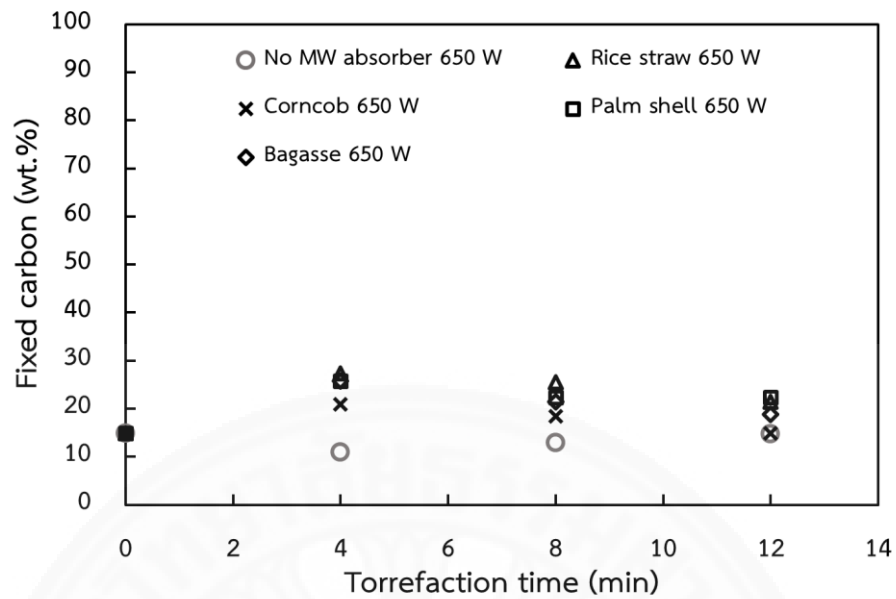
4.3.4 ปริมาณคาร์บอนคงตัว (fixed carbon: FC) คงเหลือของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ

1) ผลของระยะเวลาการให้ความร้อนและชนิดของสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟที่มีต่อปริมาณคาร์บอนคงตัว (FC) คงเหลือ

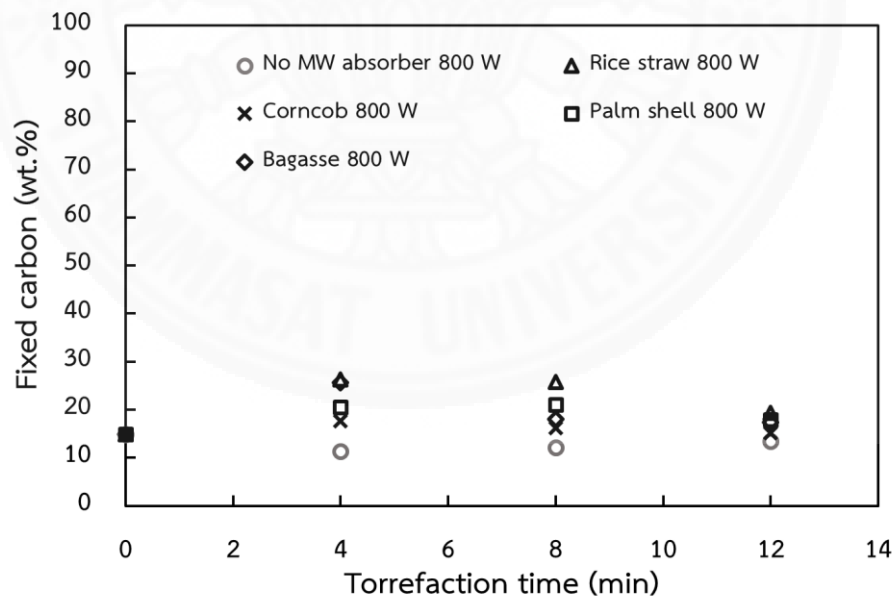
ผลของระยะเวลาการให้ความร้อนและชนิดของสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟที่มีต่อปริมาณคาร์บอนคงตัวคงเหลือที่กำลังไมโครเวฟ 500-800 วัตต์ ที่ระยะเวลาต่างๆ ในช่วง 4-12 นาที โดยใช้สารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟต่างๆ แสดงดังภาพที่ 4.28-4.30



ภาพที่ 4.28 ปริมาณคาร์บอนคงตัวคงเหลือของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟกำลัง 500 วัตต์ ที่ระยะเวลาในช่วง 4-12 นาที โดยใช้สารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟต่างๆ



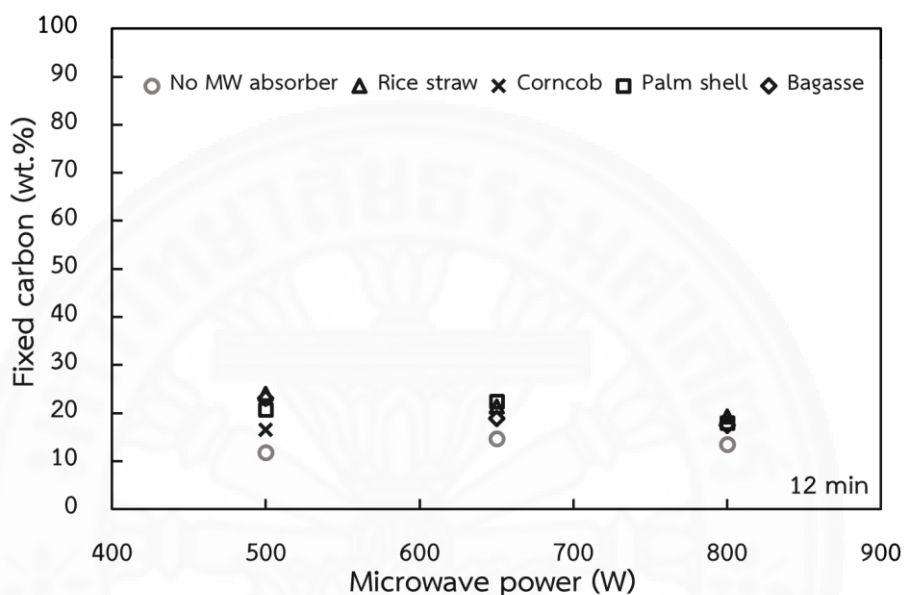
ภาพที่ 4.29 ปริมาณคาร์บอนคงตัวคงเหลือของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟกำลัง 650 วัตต์ ที่ระยะเวลาในช่วง 4-12 นาที โดยใช้สารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟต่างๆ



ภาพที่ 4.30 ปริมาณคาร์บอนคงตัวคงเหลือของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟกำลัง 800 วัตต์ ที่ระยะเวลาในช่วง 4-12 นาที โดยใช้สารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟต่างๆ

2) ผลของกำลังไมโครเวฟและชนิดของสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟที่มีต่อปริมาณคาร์บอนคงตัวคงเหลือ

ผลของกำลังไมโครเวฟและชนิดของสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟที่มีต่อปริมาณคาร์บอนคงตัวคงเหลือที่กำลังไมโครเวฟ 500-800 วัตต์ แสดงในดังภาพที่ 4.31



ภาพที่ 4.31 ปริมาณคาร์บอนคงตัวคงเหลือของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟกำลัง 500-800 วัตต์ ที่ระยะเวลา 12 นาที โดยใช้สารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟต่างๆ

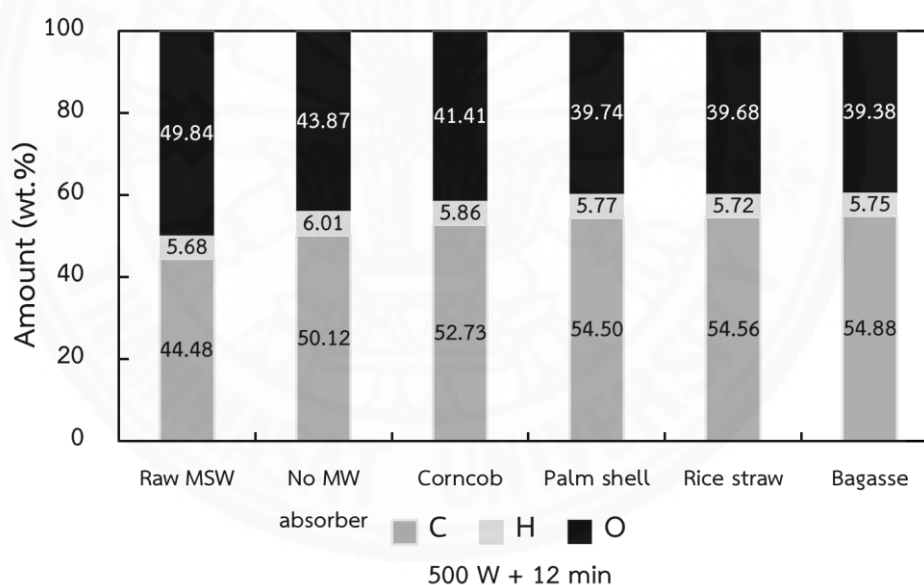
จากภาพที่ 4.28-4.31 พบว่า ปริมาณคาร์บอนคงตัวคงเหลือมีแนวโน้มคงที่เมื่อเทียบกับปริมาณคาร์บอนคงตัวก่อนการให้ความร้อน โดยมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 11-22 ซึ่งใกล้เคียงกับปริมาณคาร์บอนคงตัวในตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งก่อนการให้ความร้อน (ร้อยละ 14.86) แสดงว่าการเติมสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ ชนิดของสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ การเพิ่มระยะเวลาการให้ความร้อน และการเพิ่มกำลังไมโครเวฟ ไม่ส่งผลให้คาร์บอนคงตัวถูกขับออกจากตัวอย่าง ซึ่งน่าจะเนื่องจากอุณหภูมิของการให้ความร้อน (ซึ่งในงานวิจัยนี้อยู่ในช่วง 150-240 องศาเซลเซียส) ที่ยังไม่สูงพอที่จะไปสลายพันธะของคาร์บอนคงตัวที่อยู่ในตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่ง (โดยปกติแล้วสำหรับชีวมวล อุณหภูมิที่ต้องการสำหรับการแตกสลายพันธะของสารที่เป็นคาร์บอนคงตัวอยู่ในช่วง 300-500 องศาเซลเซียส⁽³⁰⁾)

4.4 ผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate Analysis) ของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ

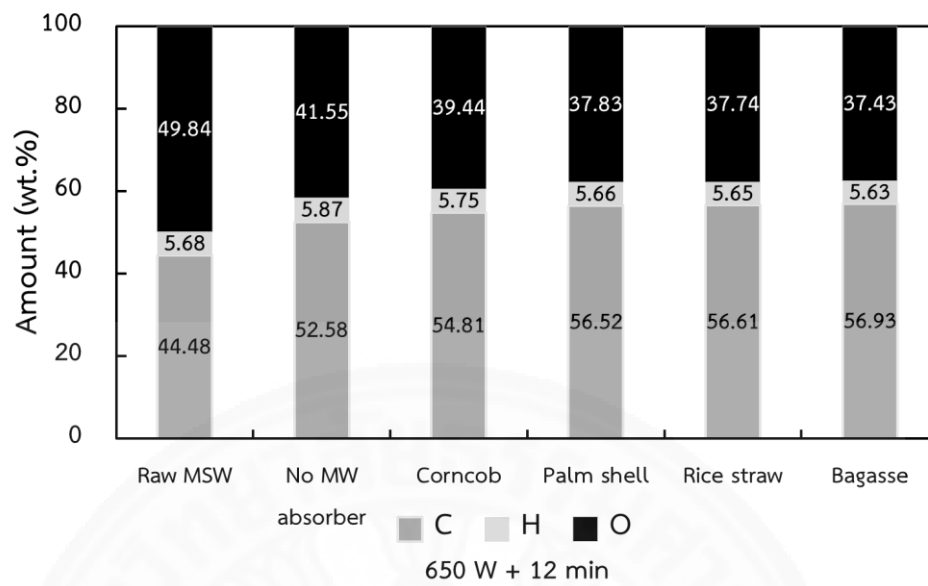
ผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ สำหรับธาตุคาร์บอน (C) ไฮโดรเจน (H) และออกซิเจน (O) ของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ แสดงได้ดังภาพที่ 4.32-4.37 โดยมีรายละเอียด ดังนี้

4.4.1 ผลของชนิดสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟที่มีต่อผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ

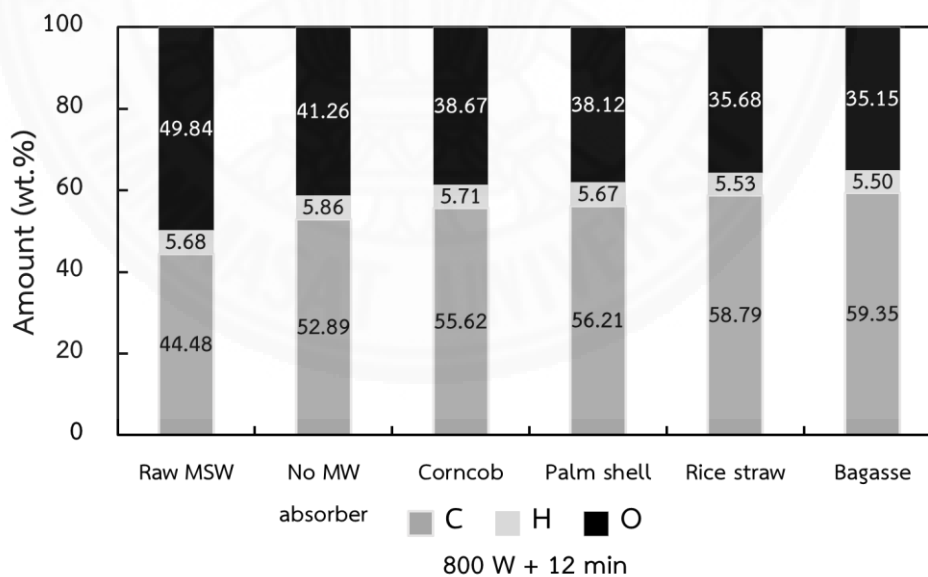
ผลของชนิดสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟที่มีต่อผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ สำหรับธาตุคาร์บอน (C) ไฮโดรเจน (H) และออกซิเจน (O) ของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ ที่ระยะเวลา 12 นาที แสดงได้ดังภาพที่ 4.32-4.34 โดยมีรายละเอียด ดังนี้



ภาพที่ 4.32 ผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟกำลัง 500 วัตต์ ที่ระยะเวลา 12 นาที โดยใช้สารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟต่างๆ



ภาพที่ 4.33 ผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟกำลัง 650 วัตต์ ที่ระยะเวลา 12 นาที โดยใช้สารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟต่างๆ



ภาพที่ 4.34 ผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟกำลัง 800 วัตต์ ที่ระยะเวลา 12 นาที โดยใช้สารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟต่างๆ

จากภาพที่ 4.32-4.34 พบว่า สัดส่วนของธาตุคาร์บอนของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟที่กำลัง 500-800 วัตต์ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น (โดยมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 50-60) เมื่อเทียบกับปริมาณของธาตุคาร์บอนก่อนการให้ความร้อน ซึ่งมีค่าอยู่ที่ร้อยละ 44.48 สำหรับตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่ผ่านการให้ความร้อนที่ 500 วัตต์ พบว่า ตัวอย่างที่เติมสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟซึ่งเป็นผงถ่านจากชานอ้อยมีสัดส่วนของธาตุคาร์บอนสูงที่สุด (ประมาณร้อยละ 54.8) รองลงมาคือ ตัวอย่างที่เติมผงถ่านจากฟางข้าว กะลาปาล์ม และซังข้าวโพด และตัวอย่างที่ไม่ได้เติมสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ โดยมีสัดส่วนของธาตุคาร์บอนประมาณร้อยละ 54.5, 53.5, 53.0, และ 50.1 ตามลำดับ (ดังแสดงในภาพที่ 4.32) เมื่อพิจารณาตัวอย่างที่ผ่านการให้ความร้อนที่กำลัง 650 วัตต์ พบว่า ตัวอย่างที่เติมสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟซึ่งเป็นผงถ่านจากชานอ้อยมีสัดส่วนของธาตุคาร์บอนสูงที่สุด รองลงมาคือ ตัวอย่างที่เติมผงถ่านจากฟางข้าว กะลาปาล์ม และซังข้าวโพด และตัวอย่างที่ไม่ได้เติมสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ โดยมีสัดส่วนของธาตุคาร์บอนประมาณร้อยละ 56.8, 56.6, 55.2, 54.9, และ 52.6 ตามลำดับ (ดังแสดงในภาพที่ 4.34) และที่กำลัง 800 วัตต์ (ดังแสดงในภาพที่ 4.35) พบว่า ตัวอย่างที่เติมสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟซึ่งเป็นผงถ่านจากชานอ้อยมีสัดส่วนของธาตุคาร์บอนสูงที่สุด รองลงมาคือ ตัวอย่างที่เติมผงถ่านจากฟางข้าว กะลาปาล์ม และซังข้าวโพด และตัวอย่างที่ไม่ได้เติมสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ โดยมีสัดส่วนของธาตุคาร์บอนประมาณร้อยละ 59.3, 58.8, 56.2, 51.0, และ 52.0 ตามลำดับ ซึ่งเป็นไปในทิศทางเดียวกันทั้ง 3 ค่าของกำลังไมโครเวฟ

ขณะที่สัดส่วนของธาตุออกซิเจนในตัวอย่างขยะอัดแท่งหลังการให้ความร้อนมีแนวโน้มลดลง (โดยมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 35-43) เมื่อเทียบกับปริมาณของธาตุออกซิเจนของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งก่อนการให้ความร้อน ซึ่งมีค่าอยู่ที่ร้อยละ 49.83 โดยพบว่า การเติมสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟมีผลทำให้ตัวอย่างมีสัดส่วนของธาตุออกซิเจนลดลงมากกว่าตัวอย่างที่ไม่ได้เติมสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ นอกจากนี้ ยังพบว่า การเติมสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟซึ่งเป็นผงถ่านจากชานอ้อยส่งผลให้สัดส่วนของธาตุออกซิเจนลดลงมากที่สุด (เหลือสัดส่วนของออกซิเจนน้อยที่สุด) รองลงมาคือ ตัวอย่างที่เติมผงถ่านจากฟางข้าว กะลาปาล์ม และซังข้าวโพด และตัวอย่างที่ไม่ได้เติมสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ ตามลำดับ ทั้ง 3 ค่าของกำลังไมโครเวฟ

อนึ่ง พบว่าสัดส่วนของธาตุไฮโดรเจนก่อนและหลังการให้ความร้อนมีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก และพบว่าการเติมหรือไม่เติมสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ และชนิดของสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ มีผลน้อยมากต่อสัดส่วนของธาตุไฮโดรเจนในตัวอย่างหลังการให้ความร้อน

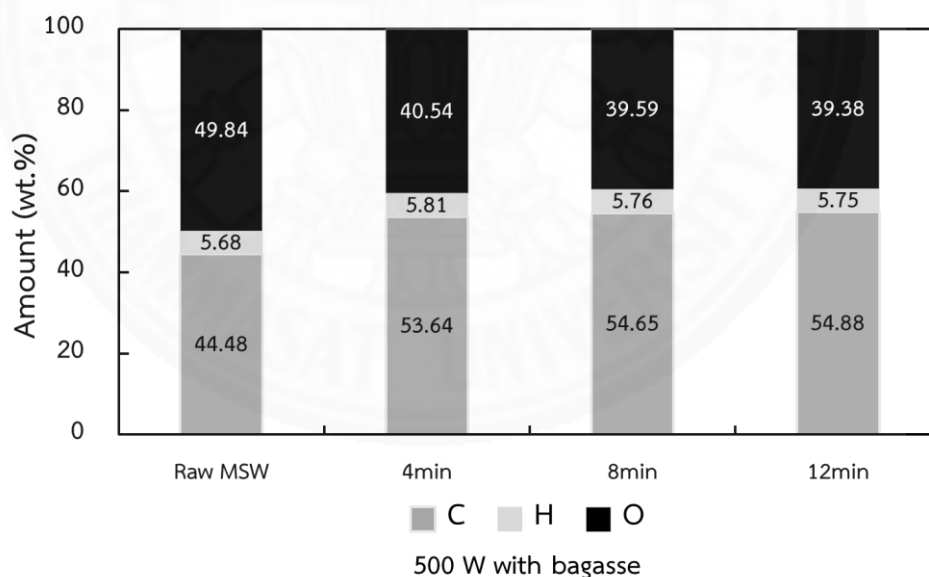
ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากการให้ความร้อนแก่ตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งทำให้ความชื้นและสารระเหยได้บางส่วนถูกขับออกไปจากตัวอย่าง ดังที่กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 4.3.1-4.3.2 เนื่องจากสารระเหยได้ (VM) มีธาตุออกซิเจนเป็นองค์ประกอบหลัก⁽⁴⁴⁾ ดังนั้น ในเมื่อสารระเหยได้ (บางส่วน) ถูกขับ

ออกจากตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่ง ขณะที่คาร์บอนคงตัว (ซึ่งมีธาตุคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก⁽⁴⁴⁾) มีปริมาณคงที่ สัดส่วนของธาตุออกซิเจนในตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่ผ่านการให้ความร้อนจึงมีแนวโน้มลดลง ขณะที่สัดส่วนของธาตุคาร์บอนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

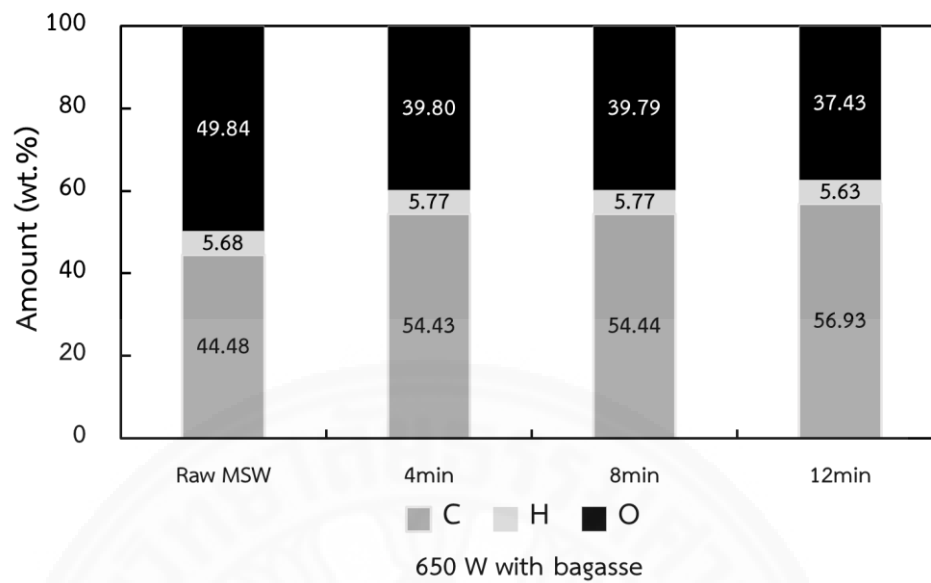
ผลการทดลองที่ได้ข้างต้นนี้ สอดคล้องกับผลการทดลองในงานวิจัยของ Satpathy และคณะ⁽¹³⁾ ที่พบว่า เมื่อเพิ่มกำลังไมโครเวฟและระยะเวลาการให้ความร้อน พบว่า สัดส่วนของคาร์บอนของตัวอย่างทั้งสองเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับตัวอย่างก่อนการให้ความร้อน ขณะที่ สัดส่วนของไฮโดรเจน และสัดส่วนของออกซิเจนลดลง เมื่อเทียบกับตัวอย่างก่อนการให้ความร้อน

4.4.2 ผลของระยะเวลาการให้ความร้อนที่มีต่อผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ

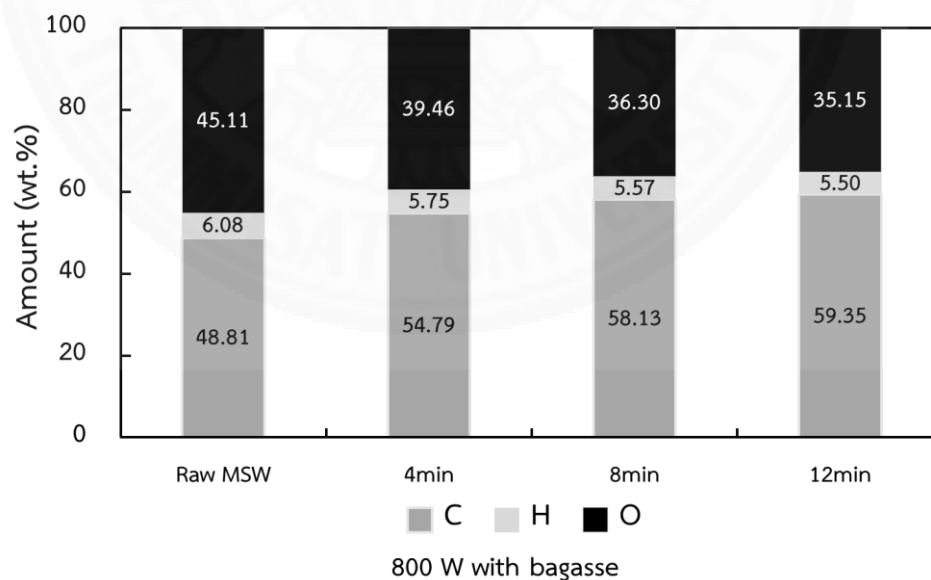
ผลของระยะเวลาการให้ความร้อนที่มีต่อผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ สำหรับธาตุคาร์บอน (C) ไฮโดรเจน (H) และออกซิเจน (O) ของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ โดยใช้ผงถ่านจากขานอ้อยเป็นสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ ที่ระยะเวลาในช่วง 4-12 นาที แสดงได้ดังภาพที่ 4.35-4.37



ภาพที่ 4.35 ผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟกำลัง 500 วัตต์ ที่ระยะเวลาในช่วง 4-12 นาที โดยใช้ผงถ่านจากขานอ้อยเป็นสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ



ภาพที่ 4.36 ผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟกำลัง 650 วัตต์ ที่ระยะเวลาในช่วง 4-12 นาที โดยใช้ผงถ่านจากขาน้อยเป็นสารดูดกลิ่นคลื่นไมโครเวฟ

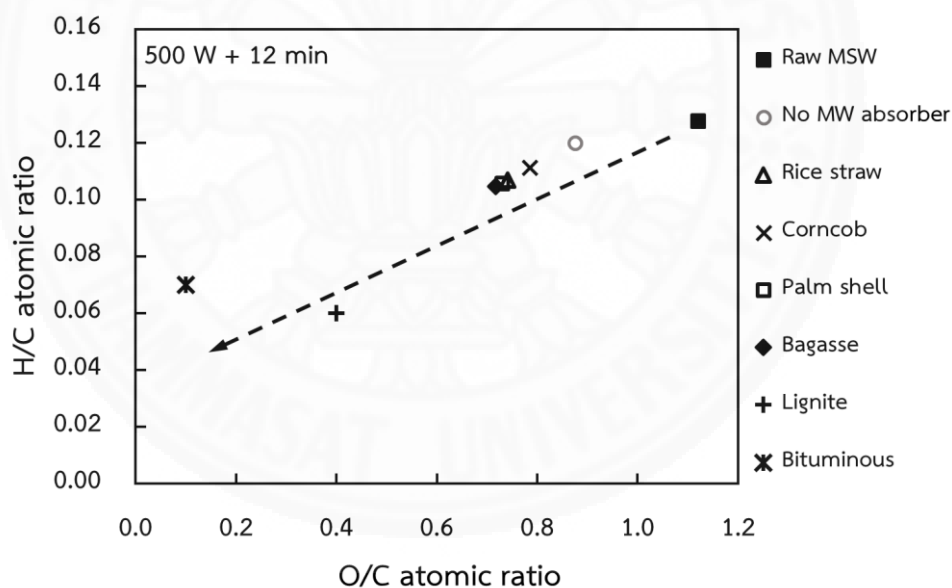


ภาพที่ 4.37 ผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟกำลัง 800 วัตต์ ที่ระยะเวลาในช่วง 4-12 นาที โดยใช้ผงถ่านจากขาน้อยเป็นสารดูดกลิ่นคลื่นไมโครเวฟ

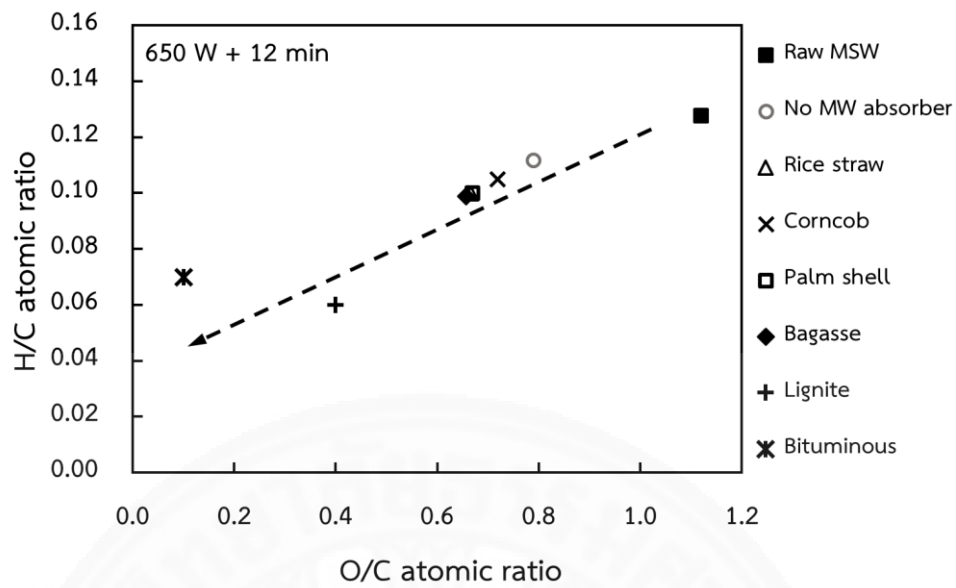
จากภาพที่ 4.35-4.37 พบว่า เมื่อเพิ่มระยะเวลาการให้ความร้อนของตัวอย่าง ชยะชุมชนอัดแท่ง โดยใช้ผงถ่านจากขาน้อยเป็นสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ สัดส่วนของธาตุคาร์บอน ของตัวอย่างชยะชุมชนอัดแท่งที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ขณะที่ สัดส่วนของธาตุออกซิเจนและสัดส่วนของธาตุไฮโดรเจนในตัวอย่างชยะอัดแท่งหลังการให้ความร้อน มีแนวโน้มลดลง เมื่อเทียบกับตัวอย่างชยะชุมชนอัดแท่งก่อนการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ ซึ่ง สอดคล้องกับผลในงานวิจัยของ Satpathy และคณะ⁽¹³⁾ ตามที่ได้กล่าวในหัวข้อที่ 4.4.1

4.4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน O/C และ H/C

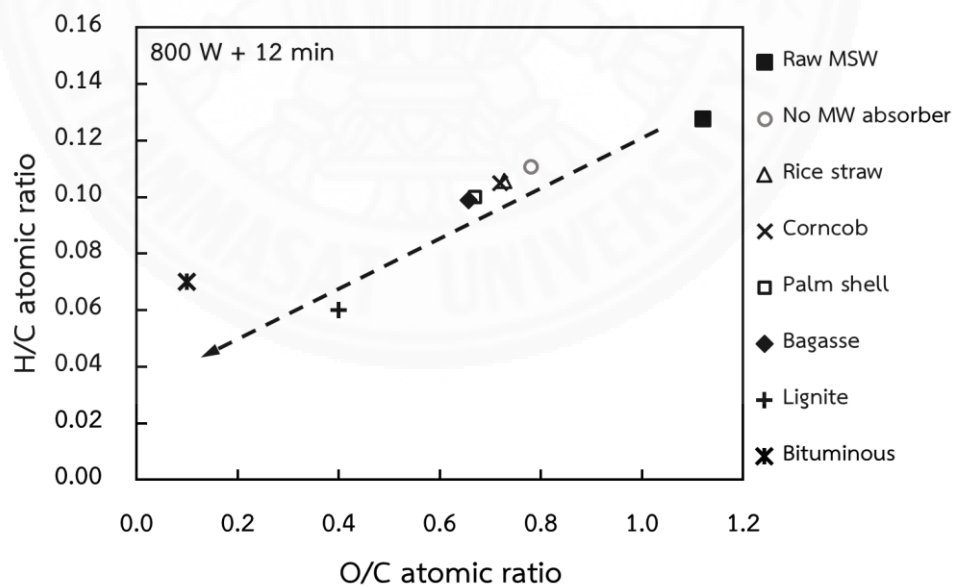
ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนออกซิเจนต่อคาร์บอน (O/C) กับอัตราส่วน ไฮโดรเจนต่อคาร์บอน (H/C) ซึ่งแสดงได้ในรูปของแผนภาพ van Krevelen (ดังที่กล่าวถึงใน รายละเอียดในบทที่ 2) ของตัวอย่างชยะชุมชนอัดแท่งที่ผ่านการให้ความร้อนโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ ด้วยกำลังของไมโครเวฟต่างๆ ที่ระยะเวลา 12 นาที เทียบกับของตัวอย่างชยะชุมชนอัดแท่งก่อนการ ให้ความร้อน และของถ่านหินลิกไนต์และบิทูมินัส แสดงดังภาพที่ 4.38-4.40 โดยมีรายละเอียด ดังนี้



ภาพที่ 4.38 แผนภาพ van Krevelen ของตัวอย่างชยะชุมชนอัดแท่งก่อนและหลังการให้ความร้อน ด้วยคลื่นไมโครเวฟกำลัง 500 วัตต์ ที่ระยะเวลา 12 นาที โดยใช้สารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟต่างๆ เทียบกับของถ่านหินลิกไนต์และบิทูมินัส



ภาพที่ 4.39 แผนภาพ van Krevelen ของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแห้งก่อนและหลังการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟกำลัง 650 วัตต์ ที่ระยะเวลา 12 นาที โดยใช้สารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟต่างๆ เทียบกับของถ่านหินลิกไนต์และบิทูมินัส



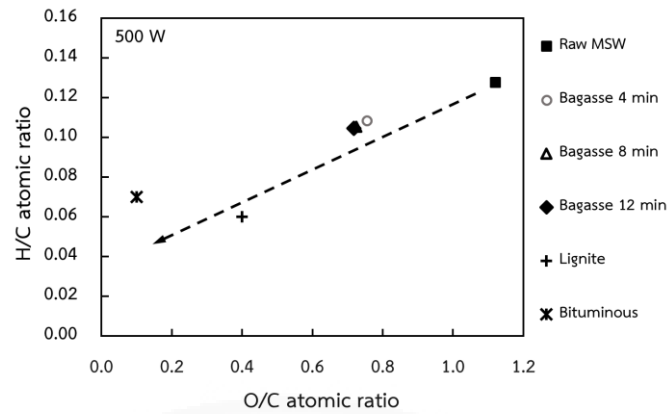
ภาพที่ 4.40 แผนภาพ van Krevelen ของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแห้งก่อนและหลังการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟกำลัง 800 วัตต์ ที่ระยะเวลา 12 นาที โดยใช้สารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟต่างๆ เทียบกับของถ่านหินลิกไนต์และบิทูมินัส

จากแผนภาพ van Krevelen ของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟกำลัง 500-800 วัตต์ ที่ระยะเวลา 12 นาที โดยใช้สารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟต่างๆ ดังแสดงในภาพที่ 4.38-4.40 พบว่า อัตราส่วนระหว่าง O/C และ H/C ของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ โดยใช้สารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟต่างๆ มีแนวโน้มเข้าใกล้ค่าอัตราส่วนระหว่าง O/C และ H/C ของถ่านหินลิกไนต์ (lignite) และถ่านหินบิทูมินัส (bituminous) ตามลำดับ (ถ่านหินลิกไนต์และบิทูมินัสเป็นถ่านหินที่มีปริมาณธาตุคาร์บอนสูง และใช้เป็นเชื้อเพลิงส่วนใหญ่ในโรงงานอุตสาหกรรม) เมื่อเทียบกับตัวอย่างก่อนการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองในงานวิจัยของ Huang และคณะ⁽³⁶⁾ ที่พบว่า กากตะกอนที่ผสมกับฟางข้าวที่ร้อยละ 40 มีอัตราส่วน O/C และ H/C ที่ใกล้เคียงกับถ่านหินมากที่สุด จึงสามารถนำไปสู่การประยุกต์ใช้เป็นเชื้อเพลิงแทนการใช้เชื้อเพลิงจากถ่านหินได้

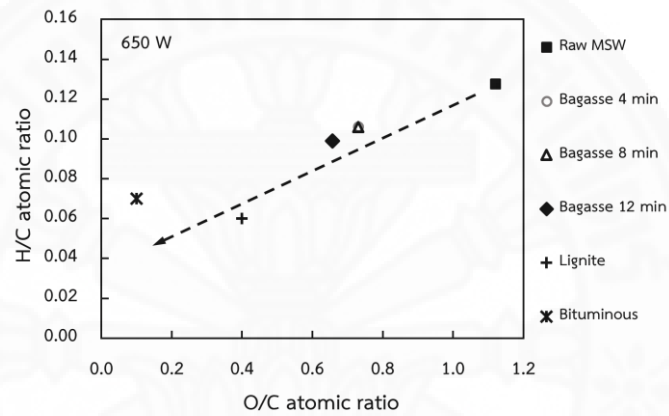
เมื่อพิจารณาผลของชนิดของสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ พบว่า ตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟโดยใช้ผงถ่านจากขานอ้อยเป็นสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ มีอัตราส่วนระหว่าง O/C และ H/C มีค่าเข้าใกล้อัตราส่วนระหว่าง O/C และ H/C ของถ่านหินลิกไนต์ (lignite) และถ่านหินบิทูมินัส (bituminous) มากที่สุด เมื่อเทียบกับตัวอย่างที่เติมผงถ่านจากกะลาปาล์ม ฟางข้าว ชังข้าวโพด และตัวอย่างที่ไม่ได้เติมสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟตามลำดับ

และเมื่อพิจารณาอัตราส่วนระหว่าง O/C และ H/C ของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟกำลัง 500-800 วัตต์ ที่ระยะเวลาในช่วง 4-12 นาที โดยใช้วัสดุเหลือทิ้งจากการเกษตร (ผงถ่านจากขานอ้อย) พบว่าเป็นไปดังภาพที่ 4.41

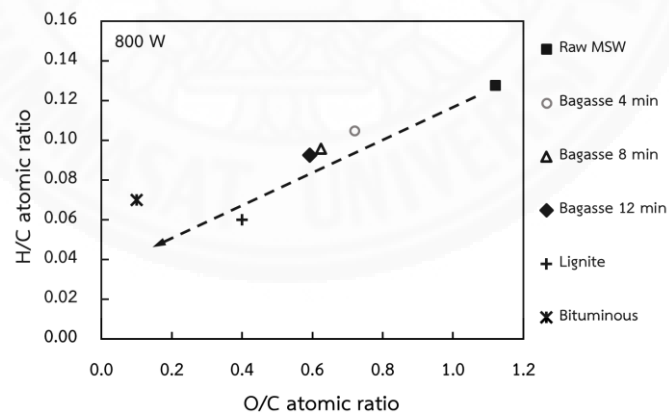
จากภาพที่ 4.41 พบว่า ตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟที่กำลังไมโครเวฟ 500-800 วัตต์ โดยใช้ผงถ่านจากขานอ้อยเป็นสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ ที่ระยะเวลาการให้ความร้อน 12 นาที มีอัตราส่วนระหว่าง O/C และ H/C เข้าใกล้อัตราส่วนระหว่าง O/C และ H/C ของถ่านหินลิกไนต์ (lignite) และถ่านหินบิทูมินัส (bituminous) มากที่สุด เมื่อเทียบกับตัวอย่างที่ผ่านการให้ความร้อนที่ระยะเวลา 8 และ 4 นาที ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อระยะเวลาการให้ความร้อนสูงขึ้น สารระเหยได้ถูกขับออกจากตัวอย่างมากขึ้น (ดังที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 4.3.2) ทำให้ธาตุออกซิเจนและธาตุไฮโดรเจนที่อยู่ในสารระเหยได้ถูกขับออกมามากขึ้นตามไปด้วย ขณะที่ธาตุคาร์บอน ซึ่งอยู่ในส่วนที่เป็นคาร์บอนคงตัวเป็นส่วนใหญ่ มีปริมาณคงที่ (เนื่องจากอุณหภูมิยังไม่สูงพอที่จะขับสารที่เป็นคาร์บอนคงตัวออกมา) จึงส่งผลให้อัตราส่วน O/C และ H/C มีค่าลดลง



a) 500 วัตต์



b) 650 วัตต์



c) 800 วัตต์

ภาพที่ 4.41 แผนภาพ van Krevelen ของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งก่อนและหลังการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟกำลัง 500-800 วัตต์ ที่ระยะเวลาในช่วง 4-12 นาที โดยใช้สารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟต่างๆ เทียบกับของถ่านหินลิกไนต์และบิทูมินัส

4.5 ผลการวิเคราะห์ค่าความร้อน (Heating Value) ของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ

ค่าความร้อนของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ ที่ระยะเวลาการให้ความร้อนและกำลังของไมโครเวฟต่างๆ โดยใช้สารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟชนิดต่างๆ แสดงได้ดังภาพที่ 4.42 โดยมีรายละเอียด ดังนี้

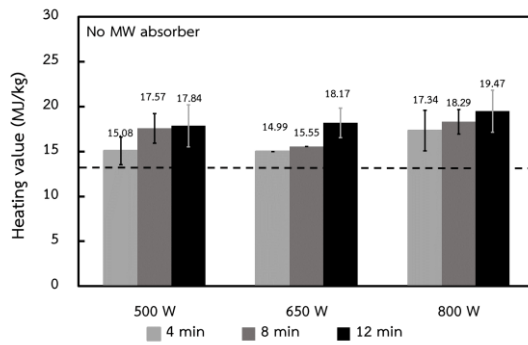
4.5.1 ผลของระยะเวลาการให้ความร้อนและกำลังของไมโครเวฟที่มีต่อผลการวิเคราะห์ค่าความร้อนของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ

ค่าความร้อนของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่ผ่านการให้ความร้อนที่ระยะเวลาในช่วง 4-12 นาที ด้วยกำลังของไมโครเวฟ 500-800 วัตต์ โดยใช้สารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟต่างๆ แสดงได้ดังภาพที่ 4.42

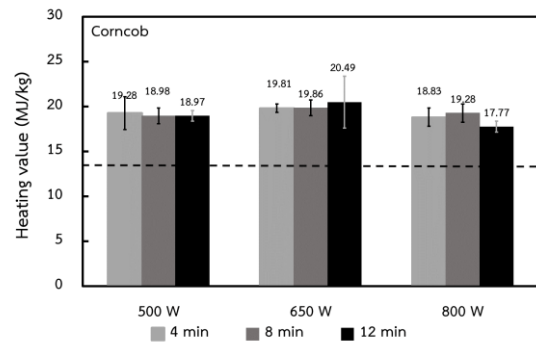
เมื่อพิจารณาผลของกำลังของไมโครเวฟที่มีต่อค่าความร้อนของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ ดังแสดงในภาพที่ 4.42 พบว่า ในกรณีที่ไม่มี การเติมสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ ค่าความร้อนของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่ผ่านการให้ความร้อน ด้วยคลื่นไมโครเวฟมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของกำลังของไมโครเวฟ แต่กรณีที่มีการเติม สารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ พบว่า เมื่อเพิ่มกำลังของไมโครเวฟจาก 500 วัตต์ เป็น 650 วัตต์ ค่า ความร้อนของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่ผ่านการให้ความร้อนมีค่าเพิ่มขึ้น ขณะที่เมื่อเพิ่มกำลังของ ไมโครเวฟเป็น 800 วัตต์ พบว่า ค่าความร้อนของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งมีค่าลดลง ดังแสดงใน ตารางที่ 4.4 ซึ่งเป็นค่าความร้อนเฉลี่ยของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่น ไมโครเวฟที่กำลังของไมโครเวฟ 500-800 วัตต์ ด้วยระยะเวลาการให้ความร้อนในช่วง 4-12 นาที

ตารางที่ 4.4 ค่าเฉลี่ยของค่าความร้อนของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่น ไมโครเวฟ ที่ระยะเวลาในช่วง 4-12 นาที ที่กำลังของไมโครเวฟและสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟต่างๆ

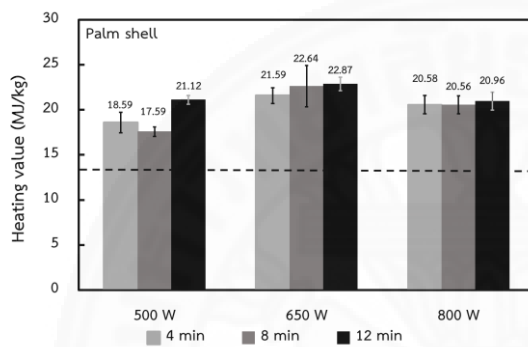
ตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่ง	ค่าความร้อนก่อน การให้ความร้อน (ความชื้นร้อยละ 40)	ค่าความร้อนเฉลี่ย (MJ/kg) ในช่วง 4-12 นาที เมื่อ ผ่านการให้ความร้อนด้วยกำลังไมโครเวฟเท่ากับ		
		500 W	650 W	800 W
• ไม่เติมสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ	↑ 12.92 MJ/kg ↓	17.11	17.49	17.89
• เติมผงถ่านจากซังข้าวโพด		18.65	19.84	18.52
• เติมผงถ่านจากกะลาปาล์ม		19.49	19.69	19.91
• เติมผงถ่านจากฟางข้าว		20.99	22.32	21.43
• เติมผงถ่านจากขานอ้อย		20.89	22.44	21.52



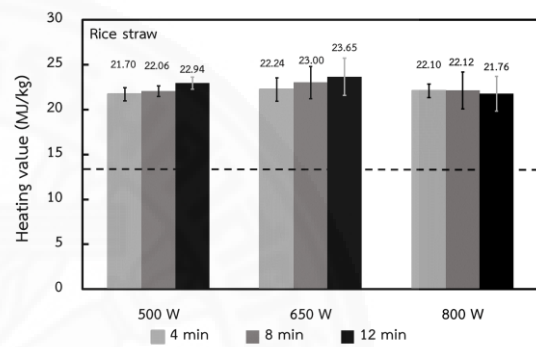
a) No MW absorber



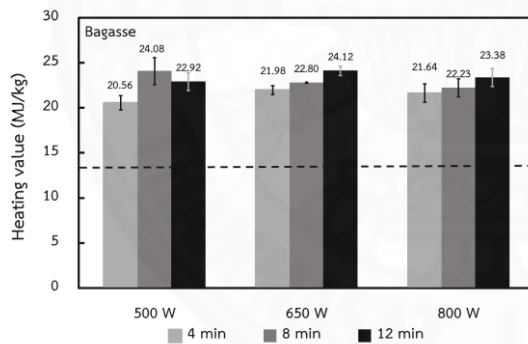
b) Corncob



c) Palm shell



d) Rice straw



e) Bagasse

ภาพที่ 4.42 ค่าความร้อนของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ กำลัง 500-800 วัตต์ ที่ระยะเวลาในช่วง 4-12 นาที โดยใช้สารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟต่างๆ

สาเหตุที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากเมื่อตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งผ่านการให้ความร้อนแล้ว ความชื้นและสารระเหยได้บางส่วนที่อยู่ในตัวอย่างได้ถูกขับออกมา จึงส่งผลให้สัดส่วนที่เผาไหม้ได้ อันได้แก่ สารระเหยได้ (ที่ยังคงเหลืออยู่) และคาร์บอนคงตัว เพิ่มขึ้น จึงทำให้ค่าความร้อนของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนของส่วนที่เผาไหม้ได้ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Satpathy และคณะ⁽¹³⁾ ที่พบว่า เมื่อเพิ่มกำลังของไมโครเวฟ ส่งผลให้ข้าวสาลีและข้าวบาร์เลย์มีค่าความร้อนเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับค่าความร้อนก่อนการให้ความร้อน และงานวิจัยของ Wang และคณะ⁽¹⁴⁾ ที่พบว่า ค่าความร้อนของแกลบและชานอ้อยหลังผ่านการให้ความร้อนโดยใช้คลื่นไมโครเวฟเพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 26 และ 57 ตามลำดับ เมื่อเทียบกับค่าความร้อนก่อนการให้ความร้อน อย่างไรก็ตาม เมื่อกำลังของไมโครเวฟมีค่าสูงถึง 800 วัตต์ (และมีการเติมสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ) จะส่งผลให้ปริมาณสารระเหยได้คงเหลือ (ซึ่งเป็นส่วนที่เผาไหม้ได้) ถูกขับออกมาจากตัวอย่างมากขึ้นจนมีปริมาณน้อยเกินไป ดังแสดงในหัวข้อที่ 4.3.2 ส่งผลให้ค่าความร้อนของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟมีค่าลดลง

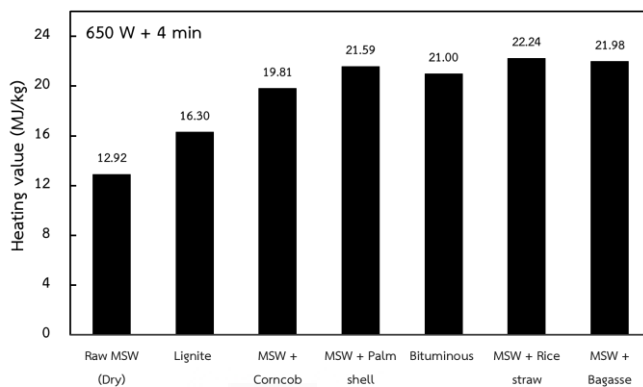
เมื่อพิจารณาค่าความร้อนเฉลี่ยที่ระยะเวลาการให้ความร้อนในช่วง 4-12 นาที ของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ ที่กำลังของไมโครเวฟ 500-800 วัตต์ ดังแสดงในตารางที่ 4.5 พบว่า ค่าความร้อนเฉลี่ย (ที่กำลังของไมโครเวฟ 500-800 วัตต์) ของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่ง (ทั้งที่มีการเติมและไม่เติมสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ) ที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มระยะเวลาการให้ความร้อน

ตารางที่ 4.5 ค่าเฉลี่ยของค่าความร้อนของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ ในช่วง 500-800 วัตต์ นาที ที่ระยะเวลาการให้ความร้อนและสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟต่างๆ

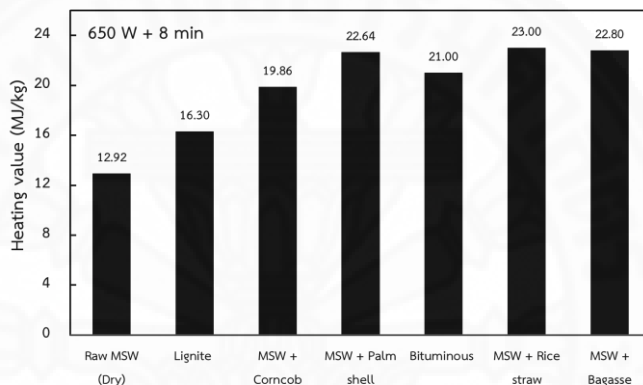
ตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่ง	ค่าความร้อนก่อนการให้ความร้อน (ความชื้นของตัวอย่าง ร้อยละ 40)	ค่าความร้อนเฉลี่ย (MJ/kg) ในช่วงกำลังของไมโครเวฟ 500-800 วัตต์ เมื่อผ่านการให้ความร้อนด้วยระยะเวลาการให้ความร้อนเท่ากับ		
		4 นาที	8 นาที	12 นาที
● ไม่เติมสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ	↑ 12.92 MJ/kg ↓	15.80	17.13	18.49
● เติมผงถ่านจากขังข้าวโพด		19.30	19.37	19.08
● เติมผงถ่านจากกะลาปาล์ม		20.25	20.27	21.65
● เติมผงถ่านจากฟางข้าว		22.01	22.39	22.56
● เติมผงถ่านจากชานอ้อย		21.39	23.01	22.99

4.5.2 ผลของชนิดของสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟที่มีต่อผลการวิเคราะห์ค่าความร้อนของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ

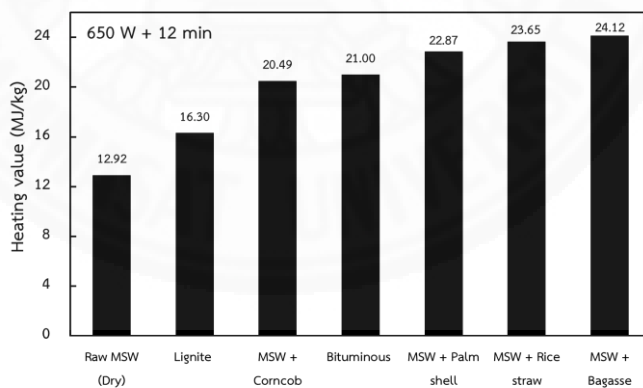
เมื่อเปรียบเทียบค่าความร้อนของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่มีการเติมสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟที่ทำจากวัสดุเหลือทิ้งจากการเกษตรชนิดต่างๆ ที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟกำลัง 650 วัตต์ (ซึ่งเป็นกำลังของไมโครเวฟที่ให้ค่าความร้อนของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่ผ่านการให้ความร้อน สูงที่สุด เมื่อเทียบกับกำลังของไมโครเวฟอื่นๆ ดังที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 4.5.1) ที่ระยะเวลาการให้ความร้อนในช่วง 4-12 นาที กับค่าความร้อนของถ่านหินลิกไนต์และบิทูมินัส ดังแสดงในภาพที่ 4.43 พบว่า ที่ระยะเวลาเวลาการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟที่ระยะเวลา 4 และ 8 นาที ค่าความร้อนของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่มีการเติมผงถ่านจากฟางข้าวเป็นสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟมีค่าสูงที่สุด โดยสูงถึง 22.24 และ 23.00 MJ/kg ตามลำดับ เมื่อเทียบกับค่าความร้อนของขยะชุมชนอัดแท่งที่มีการเติมสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟที่ทำจากวัสดุเหลือทิ้งจากการเกษตรอื่นๆ แต่ที่ระยะเวลาการให้ความร้อน 12 นาที ค่าความร้อนของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่มีการเติมผงถ่านจากขานอ้อยเป็นสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟมีค่าสูงที่สุด โดยสูงถึง 24.12 MJ/kg (ซึ่งสูงกว่าค่าความร้อนของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่มีการเติมผงถ่านจากฟางข้าว ที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟที่ระยะเวลา 4 และ 8 นาที) โดยเมื่อเทียบกับค่าความร้อนของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งก่อนการให้ความร้อน (ซึ่งมีค่าอยู่ที่ 12.92 MJ/kg) พบว่า เพิ่มขึ้นประมาณ 1.8 เท่า และเมื่อเปรียบเทียบกับค่าความร้อนของถ่านหินศักดิ์ (rank) ต่างๆ พบว่า มีค่าใกล้เคียงกับค่าความร้อนของถ่านหินบิทูมินัส (bituminous) ในงานวิจัยของ Gaur และ Reed⁽⁴⁵⁾ ที่มีค่าประมาณ 21.00 MJ/kg ขณะที่ตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งก่อนการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟมีค่าความร้อนอยู่ในช่วงของถ่านหินลิกไนต์ [ทั้งนี้ ถ่านหินบิทูมินัสมีศักดิ์ (rank) สูงกว่า หรือมีสมบัติที่ดีกว่าถ่านหินลิกไนต์] ดังอธิบายแล้วในหัวข้อ 4.1.3 แสดงให้เห็นว่าการให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่ำสามารถทำให้ตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งมีค่าความร้อนหรือสมบัติทางความร้อนที่สูงขึ้น



a) 4 นาที



b) 8 นาที



c) 12 นาที

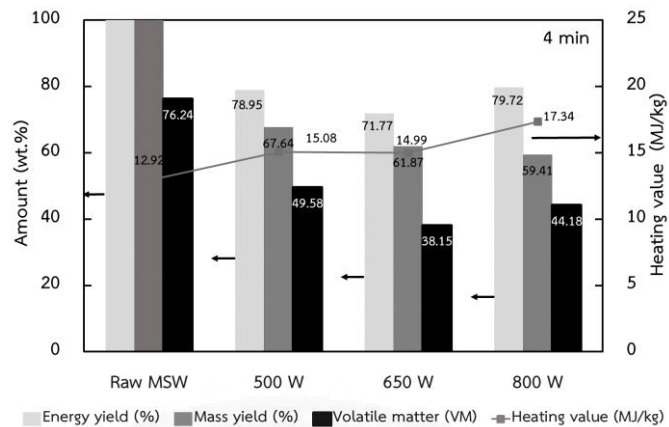
ภาพที่ 4.43 ค่าความร้อนของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งก่อนการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ และ ที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟกำลัง 650 วัตต์ ที่ระยะเวลาในช่วง 4-12 นาที สำหรับ ตัวอย่างที่เติมสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟชนิดต่างๆ เปรียบเทียบกับค่าความร้อนของถ่านหินลิกไนต์ และปิทูมินัส

4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนกับร้อยละมวลคงเหลือ (mass yield) ร้อยละพลังงานรวมคงเหลือ (energy yield) และปริมาณสารระเหยได้ (volatile matter: VM) คงเหลือของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ

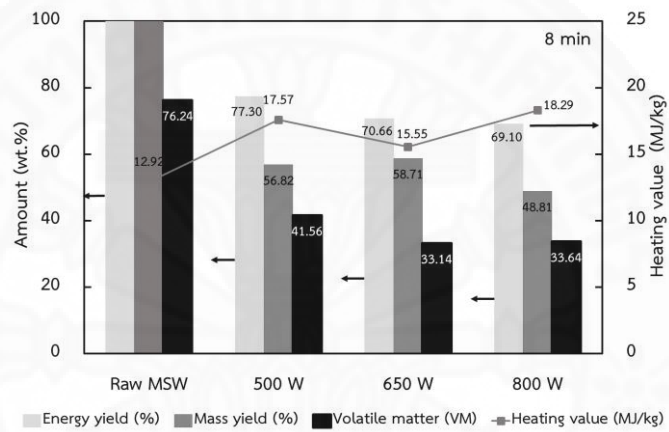
ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนกับร้อยละมวลคงเหลือ (mass yield) ร้อยละพลังงานรวมคงเหลือ (energy yield) และปริมาณสารระเหยได้ (volatile matter: VM) คงเหลือของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่ผ่านการให้ความร้อนที่ระยะเวลาในช่วง 4-12 นาที ด้วยกำลังไมโครเวฟ 500-800 วัตต์ โดยใช้สารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟต่างๆ แสดงได้ดังภาพที่ 4.44-4.48

จากภาพที่ 4.44-4.48 พบว่า ที่ระยะเวลาการให้ความร้อนเดียวกัน เมื่อเพิ่มกำลังของไมโครเวฟจะส่งผลให้ร้อยละมวลคงเหลือ ร้อยละพลังงานรวมคงเหลือ และปริมาณสารระเหยได้ คงเหลือของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่มีการเติมและไม่เติมสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟมีแนวโน้มลดลง ขณะที่ค่าความร้อนของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่ผ่านการให้ความร้อนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และเมื่อพิจารณาค่าเหล่านี้ที่กำลังของไมโครเวฟต่างๆ พบว่า ตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟที่กำลังของไมโครเวฟ 650 วัตต์ มีค่าความร้อนสูงที่สุด เมื่อเทียบกับที่กำลังของไมโครเวฟ 500 และ 800 วัตต์ แต่มีค่าร้อยละพลังงานรวมคงเหลือลดลง และที่กำลังของไมโครเวฟ 800 วัตต์ ค่าความร้อนของตัวอย่างมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับที่กำลังไมโครเวฟ 650 วัตต์ อีกทั้งยังมีร้อยละพลังงานรวมคงเหลือลดลงตามร้อยละมวลคงเหลือที่ลดลง ที่เป็นเช่นนี้เนื่องมาจากเมื่อเพิ่มกำลังของไมโครเวฟเป็น 800 วัตต์ จะส่งผลให้ปริมาณสารระเหยได้ลดลงอย่างมาก (ดังแสดงในภาพที่ 4.44-4.48) จึงส่งผลให้ค่าความร้อน ซึ่งขึ้นกับส่วนที่เผาไหม้ได้ของส่วนที่เป็นสารระเหยได้ลดลงตามไปด้วย

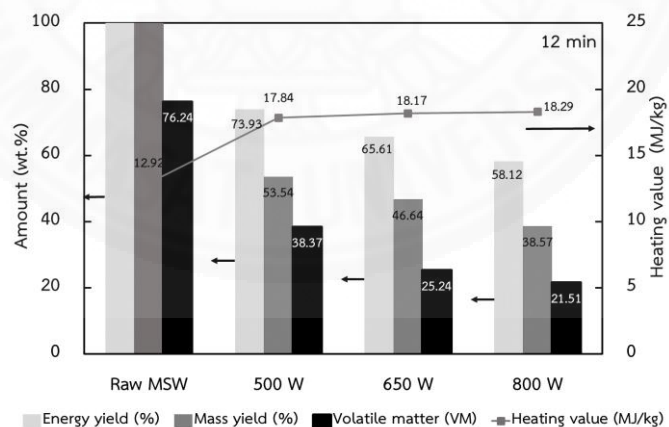
จากผลการทดลองดังกล่าวข้างต้นทำให้สามารถสรุปได้ว่า กำลังของไมโครเวฟ 650 วัตต์ เป็นค่ากำลังไมโครเวฟที่เหมาะสมสำหรับการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ โดยส่งผลให้ได้ตัวอย่างที่มีค่าความร้อนสูงที่สุด และเมื่อศึกษาผลของระยะในการให้ความร้อนที่ส่งผลต่อร้อยละพลังงานรวมคงเหลือ ดังแสดงในภาพที่ 4.44-4.48 เช่นเดียวกัน พบว่า ที่ระยะเวลาการให้ความร้อน 4 นาที ร้อยละพลังงานรวมคงเหลือมีค่าสูงที่สุด เมื่อเทียบกับระยะเวลาการให้ความร้อนที่ 8 และ 12 ตามลำดับ ขณะเดียวกันยังคงให้ค่าความร้อนของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟที่สูง ดังนั้น จึงสรุปได้ว่า กำลังของไมโครเวฟที่ 650 วัตต์ และระยะเวลาการให้ความร้อนที่ 4 นาที เป็นค่ากำลังไมโครเวฟและระยะเวลาในการให้ความร้อนที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่ำ ซึ่งทำให้ได้ตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟมีค่าร้อยละพลังงานรวมคงเหลือสูงที่สุด และมีค่าความร้อนสูง



a) 4 นาที

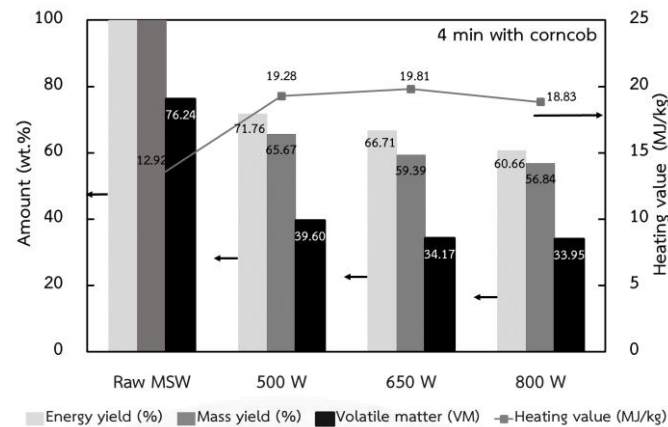


b) 8 นาที

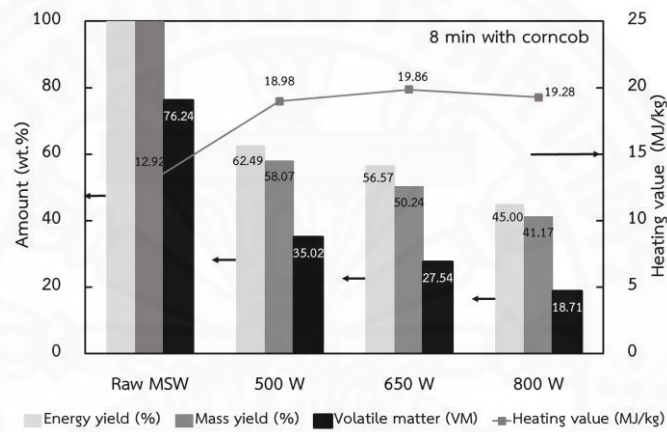


c) 12 นาที

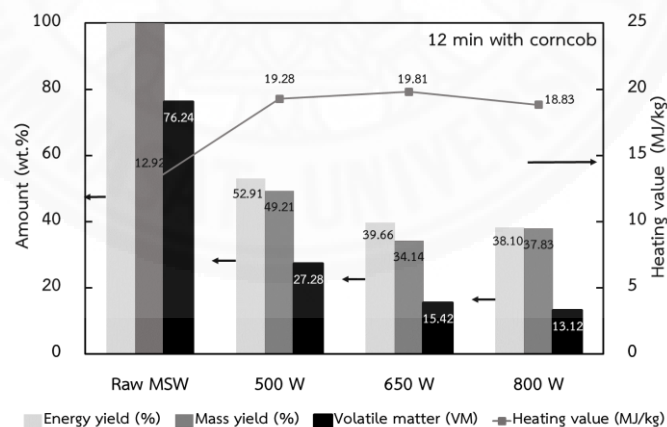
ภาพที่ 4.44 ร้อยละมวลคงเหลือ ร้อยละพลังงานรวมคงเหลือ ปริมาณสารระเหยได้คงเหลือ และค่าความร้อนของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟกำลัง 500-800 วัตต์ ที่ระยะเวลาในช่วง 4-12 นาที สำหรับตัวอย่างที่ไม่มีเติมสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ



a) 4 นาที

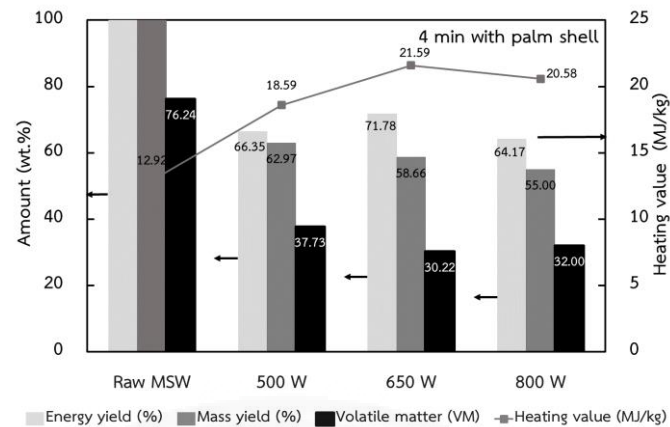


b) 8 นาที

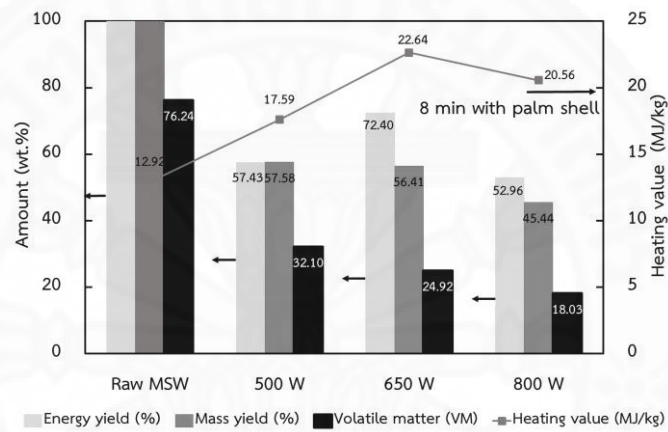


c) 12 นาที

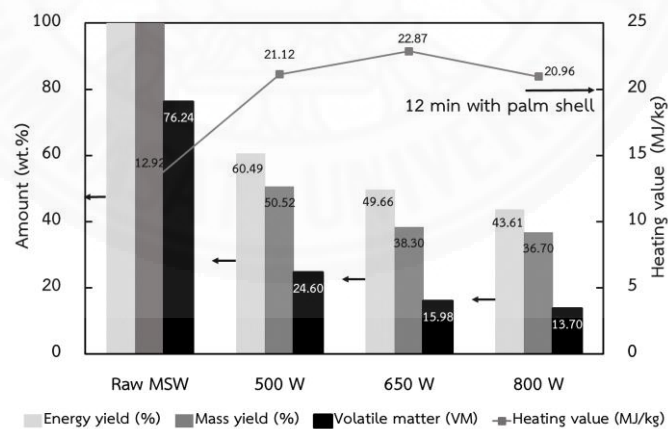
ภาพที่ 4.45 ร้อยละมวลคงเหลือ ร้อยละพลังงานรวมคงเหลือ ปริมาณสารระเหยได้คงเหลือ และค่าความร้อนของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟกำลัง 500-800 วัตต์ ที่ระยะเวลาในช่วง 4-12 นาที สำหรับตัวอย่างที่มีเดิมผงถ่านจากขี้ข้าวโพด



a) 4 นาที

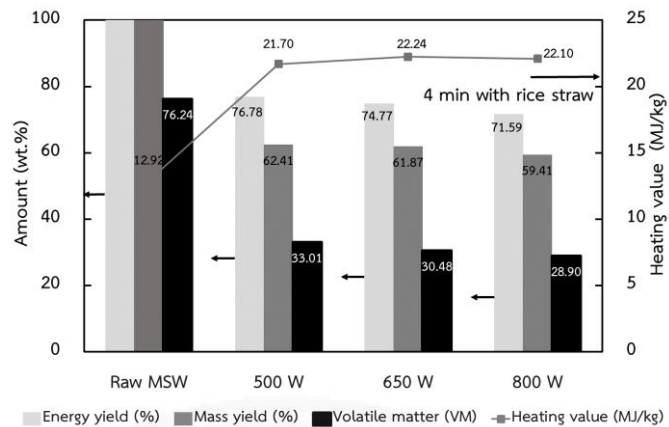


b) 8 นาที

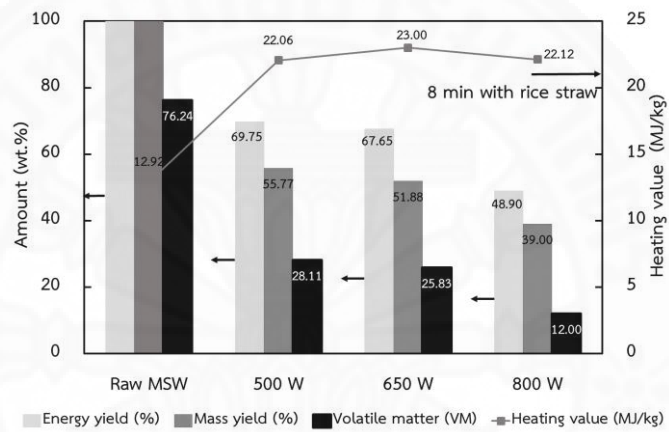


c) 12 นาที

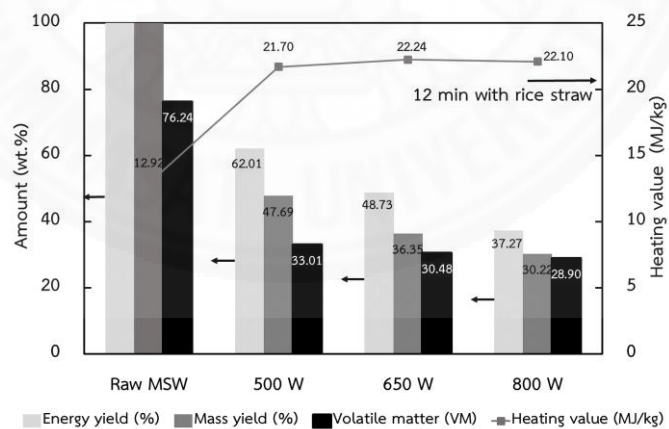
ภาพที่ 4.46 ร้อยละมวลคงเหลือ ร้อยละพลังงานรวมคงเหลือ ปริมาณสารระเหยได้คงเหลือ และค่าความร้อนของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟกำลัง 500-800 วัตต์ ที่ระยะเวลาในช่วง 4-12 นาที สำหรับตัวอย่างที่มีเดิมผงถ่านจากกะลาปาล์ม



a) 4 นาที

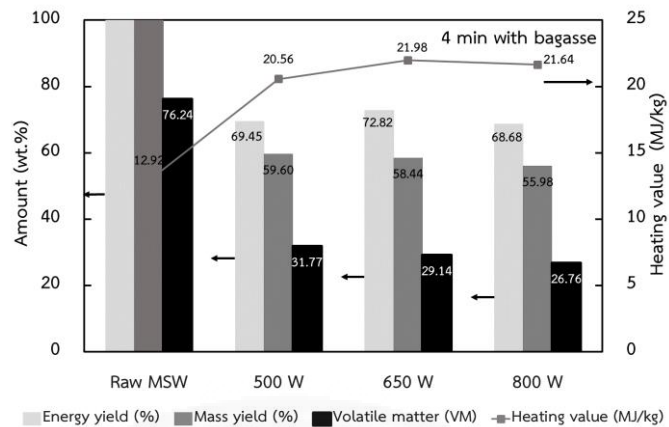


b) 8 นาที

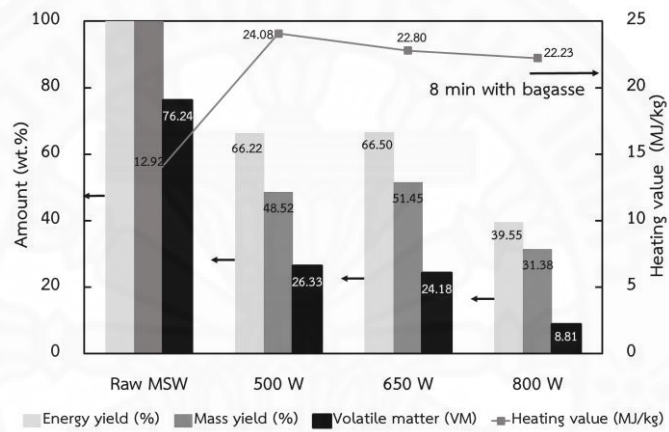


c) 12 นาที

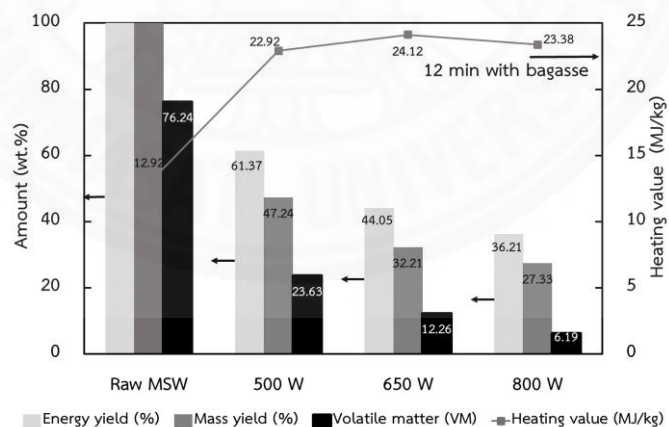
ภาพที่ 4.47 ร้อยละมวลคงเหลือ ร้อยละพลังงานรวมคงเหลือ ปริมาณสารระเหยได้คงเหลือ และค่าความร้อนของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟกำลัง 500-800 วัตต์ ที่ระยะเวลาในช่วง 4-12 นาที สำหรับตัวอย่างที่มีเดิมผงถ่านจากฟางข้าว



a) 4 นาที



b) 8 นาที



c) 12 นาที

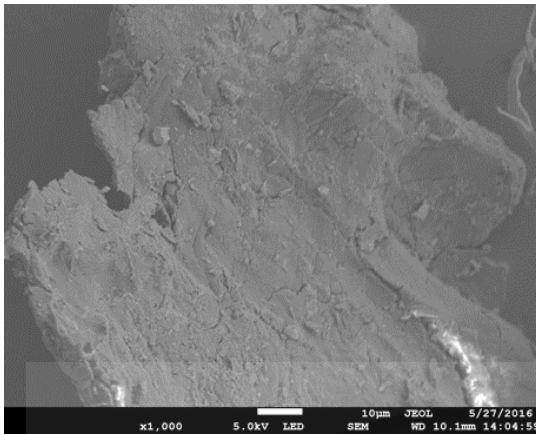
ภาพที่ 4.48 ร้อยละมวลคงเหลือ ร้อยละพลังงานรวมคงเหลือ ปริมาณสารระเหยได้คงเหลือ และค่าความร้อนของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟกำลัง 500-800 วัตต์ ที่ระยะเวลาในช่วง 4-12 นาที สำหรับตัวอย่างที่มีเดิมผงถ่านจากขาน้อย

4.7 ผลการวิเคราะห์ลักษณะสัณฐาน ด้วยภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM) และค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ (Specific Surface Area) ของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ

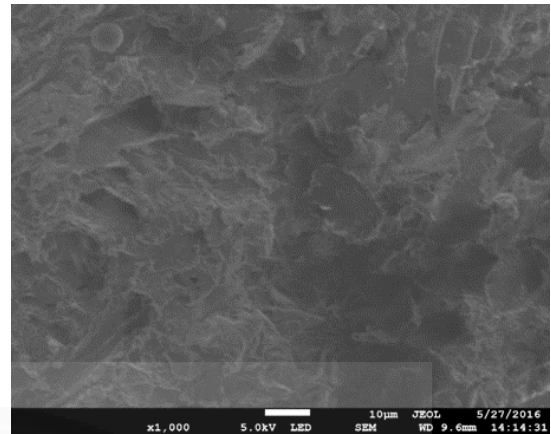
ผลการวิเคราะห์ลักษณะสัณฐาน ด้วยภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ ที่กำลังของไมโครเวฟ 800 วัตต์ และระยะเวลาการให้ความร้อน 12 นาที แสดงดังภาพที่ 4.49 ซึ่งพบว่าตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งหลังการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟที่มีการเติมและไม่เติมสารดูดกลิ่นคลื่นไมโครเวฟชนิดต่างๆ มีลักษณะพื้นผิวแสดงถึงความมีรูพรุนเพิ่มขึ้น เมื่อเทียบกับตัวอย่างขยะชุมชนก่อนการให้ความร้อน ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากการให้ความร้อนแก่ตัวอย่างขยะชุมชนทำให้ความชื้นและสารระเหยได้บางส่วนถูกขับออกไปจากตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่ง ดังที่กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 4.3.1-4.3.2 ทำให้เกิดรูพรุนในตัวอย่าง ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของงานวิจัยของ Chen และคณะ⁽³⁷⁻³⁸⁾ ที่พบว่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิการให้ความร้อน พื้นผิวของไม้รังมีลักษณะเป็นรูพรุนเพิ่มมากขึ้น และสมบัติทางกายภาพของก้านฝ้ายหลังผ่านการให้ความร้อนมีลักษณะเปราะ และแตกง่าย เนื่องจากก้านฝ้ายได้รับความร้อน ทำให้ความชื้นและสารระเหยได้บางส่วนถูกขับออกไปจากตัวอย่างพื้นผิวส่งผลให้ตัวอย่างมีลักษณะเป็นรูพรุนมากขึ้น

ตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่เติมสารดูดกลิ่นคลื่นไมโครเวฟซึ่งเป็นผงถ่านจากชานอ้อยมีลักษณะพื้นผิวทางกายภาพที่แสดงถึงความมีรูพรุนมากที่สุด รองลงมาคือ ตัวอย่างที่เติมผงถ่านจากฟางข้าว กะลาปาล์ม ซังข้าวโพด และตัวอย่างที่ไม่ได้เติมสารดูดกลิ่นคลื่นไมโครเวฟ ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณความชื้นและสารระเหยได้คงเหลือของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ ดังที่ได้กล่าวมาในหัวข้อที่ 4.3.1-4.3.2 ที่พบว่า ปริมาณความชื้นและสารระเหยได้คงเหลือของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่เติมสารดูดกลิ่นซึ่งเป็นผงถ่านจากชานอ้อยลดลงมากที่สุดเมื่อเทียบกับการเติมสารดูดกลิ่นคลื่นไมโครเวฟชนิดอื่นๆ

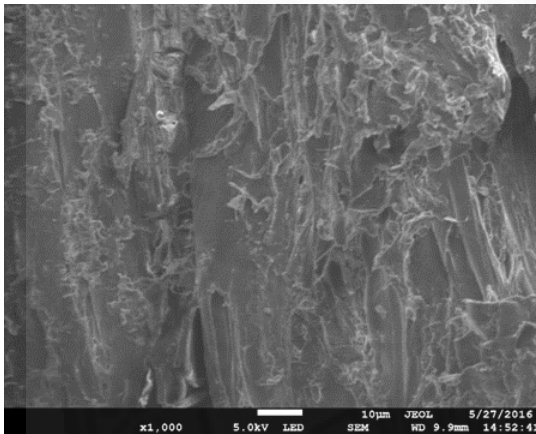
ผลการวิเคราะห์ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ (specific surface area) ของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ โดยใช้เครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะและรูพรุน (surface area analyser) เป็นไปดังแสดงในตารางที่ 4.6 ซึ่งพบว่า ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะของตัวอย่างขยะชุมชนมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเติมสารดูดกลิ่นคลื่นไมโครเวฟ และการเติมสารดูดกลิ่นคลื่นไมโครเวฟที่ทำจากผงถ่านจากชานอ้อยมีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะมากที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่พบว่าตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่เติมสารดูดกลิ่นคลื่นไมโครเวฟที่ทำจากชานอ้อยมีลักษณะพื้นผิวรูพรุนมากที่สุด



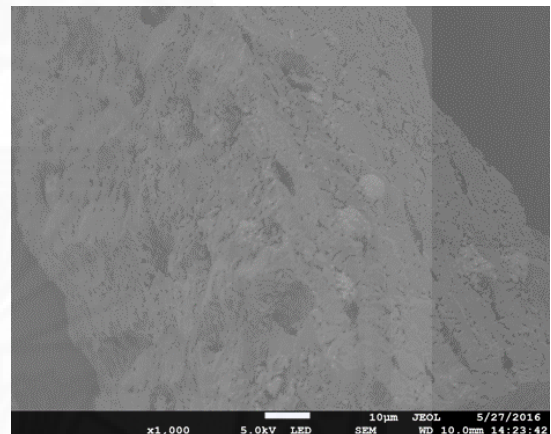
a) Raw MSW



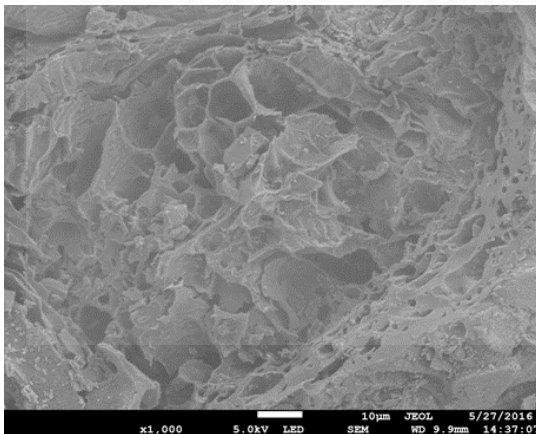
b) No MW absorber



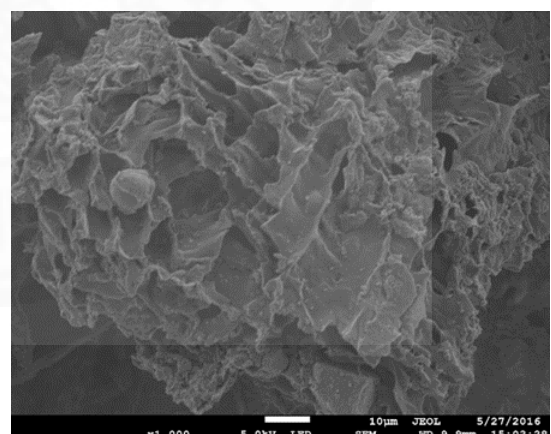
c) Corncob



d) Palm shell



e) Rice straw



f) Bagasse

ภาพที่ 4.50 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (SEM) ของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟกำลัง 800 วัตต์ ที่ระยะเวลา 12 นาที สำหรับตัวอย่างที่เติมและไม่เติมสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ

ตารางที่ 4.6 ผลการวิเคราะห์ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ (specific surface area) ของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟกำลัง 800 วัตต์ ที่ระยะเวลา 12 นาที สำหรับตัวอย่างที่เติมและไม่เติมสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ

ตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่ง	ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ (m ² /g)
● ตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งก่อนการให้ความร้อน	0.009
● ตัวอย่างที่เติมสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟชนิดต่างๆ	
- ไม่เติมสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ (no MW absorber)	0.271
- ผงถ่านจากซังข้าวโพด (corn cob)	0.770
- ผงถ่านจากกะลาปาล์ม (palm shell)	2.548
- ผงถ่านจากฟางข้าว (rice straw)	1.216
- ผงถ่านจากชานอ้อย (bagasse)	9.093

4.8 ผลการศึกษาผลขององค์ประกอบของผงถ่านที่ทำจากวัสดุเหลือทิ้งจากการเกษตรที่ใช้เป็นสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ ที่มีต่อสมบัติของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ

เมื่อศึกษาองค์ประกอบของสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟที่ทำจากวัสดุเหลือทิ้งจากการเกษตรต่างๆ ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ดังแสดงในตารางที่ 4.7 พบว่า ผงถ่านจากชานอ้อยมีปริมาณของ Si สูงที่สุด รองลงมาคือ ผงถ่านจากฟางข้าว ผงถ่านจากกะลาปาล์ม และผงถ่านจากซังข้าวโพด ตามลำดับ หรือกล่าวได้อีกนัยหนึ่งว่าผงถ่านจากชานอ้อยมีปริมาณของสารประกอบของ Si สูงที่สุด ตามด้วยผงถ่านจากฟางข้าว ผงถ่านจากกะลาปาล์ม และผงถ่านจากซังข้าวโพด ตามลำดับ และจากงานวิจัยของ Metaxas และ Meredith⁽⁴⁷⁾ ที่พบว่าสารประกอบของ Si เป็นวัสดุที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (dielectric constant) สูง และสามารถดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟที่ความถี่ 2.45 GHz ซึ่งเป็นความถี่ของคลื่นไมโครเวฟได้ดี และเมื่อสามารถดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟได้ดี ก็จะสามารถแปลงคลื่นไมโครเวฟให้เป็นพลังงานหรือความร้อน (จากการที่โมเลกุลของสารที่ได้รับคลื่นไมโครเวฟเกิดการหมุน) ได้มากขึ้น จนทำให้อุณหภูมิของระบบสูงขึ้น ซึ่งก็จะทำให้สามารถขับความชื้นและสารระเหยได้ (บางส่วน) ออกจากตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งได้มากขึ้น ดังแสดงในหัวข้อที่ 4.3.1-4.3.2 รวมทั้งส่งผลให้ตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟมีลักษณะเป็นรูปพรุนมากขึ้นตามผลการวิเคราะห์ในหัวข้อ 4.7 และเมื่อเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ระหว่างตัวอย่างที่มีการเติมสารดูดกลืน

คลื่นไมโครเวฟที่ทำจากวัสดุเหลือทิ้งจากการเกษตร กับตัวอย่างที่เติม SiC พบว่า ตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่มีการเติม SiC มีแนวโน้มการลดลงของร้อยละมวลคงเหลือและการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิใกล้เคียงกับตัวอย่างที่มีการเติมผงถ่านจากขานอ้อย (โดยมีร้อยละมวลคงเหลือลดลงมากกว่าเล็กน้อย) แต่มากกว่าตัวอย่างที่มีการเติมผงถ่านจากฟางข้าว ผงถ่านจากกะลาปาล์ม และผงถ่านจากซังข้าวโพด และตัวอย่างที่ไม่ได้เติมสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ ตามลำดับ ซึ่งทำให้สามารถสรุปได้ว่า ตัวอย่างที่มีการเติมผงถ่านขานอ้อยเป็นสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ ซึ่งมีปริมาณของ Si สูง สามารถดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟได้ดี เมื่อเทียบกับตัวอย่างที่มีการเติมสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟที่ทำจากวัสดุเหลือทิ้งจากการเกษตรชนิดอื่นๆ ที่มีปริมาณของ Si ต่ำกว่า

ตารางที่ 4.7 ปริมาณของสารอนินทรีย์ในผงถ่านของสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ ที่ทำจากวัสดุเหลือทิ้งจากการเกษตร [วิเคราะห์ด้วยเครื่อง X-Ray Fluorescence (XRF)]

ชนิดของสารดูดกลืน คลื่นไมโครเวฟ	ปริมาณ (wt.%)							
	Si	K	Cl	Ca	P	Mg	Mn	Al
● ขานอ้อย (bagasse)	2.40	0.59	0.82	0.24	0.20	0.36	0.01	0.02
● ฟางข้าว (rice straw)	1.96	5.89	1.37	1.32	0.37	0.30	0.27	0.23
● กะลาปาล์ม (palm shell)	0.85	0.41	0.04	0.86	0.02	0.08	0.01	0.03
● ซังข้าวโพด (corn cob)	0.84	2.22	0.26	0.08	0.26	0.20	0.01	0.03

ทั้งนี้ ผลการทดลองข้างต้นสอดคล้องกับงานวิจัยของ Zuo และคณะ⁽¹⁸⁾, Liu และคณะ⁽¹⁹⁾, Zhao และคณะ⁽⁴²⁾ ที่ศึกษาการให้ความร้อนแก่ชีวมวลโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ (ขยะชุมชนจัดเป็นชีวมวลประเภทหนึ่ง) และพบว่า ตัวอย่างชีวมวลที่มีการเติม SiC มีสัดส่วน (หรือร้อยละ) มวลคงเหลือน้อยกว่าตัวอย่างที่ไม่ได้เติม SiC และมีอุณหภูมิสูงกว่าตัวอย่างที่ไม่ได้เติม SiC

นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (dielectric constant) ของสารประกอบ Si เทียบกับของน้ำ พบว่า สารประกอบ Si และน้ำ มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเท่ากับ 105 และ 78 ตามลำดับ⁽⁴⁷⁾ ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของสารประกอบ Si สูงกว่าของน้ำ ดังนั้น ตัวอย่างที่มีการเติมผงถ่านจากขานอ้อย (ซึ่งมีสารประกอบของ Si ในปริมาณที่สูงที่สุด) เป็นสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ แต่ไม่มีความชื้นหรือน้ำ จึงมีร้อยละมวลคงเหลือที่ต่ำกว่า แต่มีอุณหภูมิหลังการให้ความร้อนที่สูงกว่า ตัวอย่างที่มีแต่ความชื้น แต่ไม่มีการเติมสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ (ผงถ่านจากขานอ้อย) ซึ่งเป็นไปตามการวิเคราะห์ผลการทดลองในหัวข้อที่ 4.2.3 ที่พบว่า ผงถ่านจากขานอ้อยสามารถดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟได้ดีกว่าน้ำ

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต

ในบทนี้ได้ทำการสรุปผลการวิจัย พร้อมทั้งนำเสนอข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต ซึ่งมีรายละเอียดในแต่ละส่วน ดังนี้

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาผลของชนิดของสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟที่ทำจากวัสดุเหลือทิ้งจากการเกษตร (ผงถ่านจากฟางข้าว ชังข้าวโพด กะลาปาล์ม และชานอ้อย) ระยะเวลาการให้ความร้อน (4-12 นาที) และกำลังของไมโครเวฟ (500-800 วัตต์) ที่มีต่อสมบัติของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่ผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่ำโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ อันได้แก่ ร้อยละมวลคงเหลือและอุณหภูมิ ผลการวิเคราะห์แบบประมาณ ผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ ค่าความร้อนและร้อยละพลังงานรวมคงเหลือ ลักษณะสัญญาณ และค่าพื้นที่ผิวจำเพาะของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ รวมทั้งศึกษาผลของปริมาณ (ร้อยละ 10-40 โดยน้ำหนักของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งเริ่มต้น) และความสูง (30-100 มิลลิเมตร) ของสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ (ผงถ่านจากชานอ้อย) ที่มีต่อร้อยละมวลคงเหลือและอุณหภูมิของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ พบว่ามีผลการทดลองสามารถสรุปได้ ดังนี้

1) เมื่อเพิ่มระยะเวลาในการให้ความร้อน และกำลังของไมโครเวฟ พบว่า ร้อยละมวลคงเหลือของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งมีค่าลดลง แต่อุณหภูมิของตัวอย่างมีค่าเพิ่มขึ้น

2) เมื่อพิจารณาผลของการเติมสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟที่มีต่อร้อยละมวลคงเหลือและอุณหภูมิของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่ง ที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ พบว่า

- การเติมสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟในตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งส่งผลให้ร้อยละมวลคงเหลือของตัวอย่างลดลงมากกว่าตัวอย่างที่ไม่ได้เติมสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ และส่งผลให้มีอุณหภูมิสูงกว่าตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่ไม่ได้เติมสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ

- เมื่อพิจารณาชนิดของสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟที่ทำจากวัสดุเหลือทิ้งจากการเกษตร พบว่า การเติมผงถ่านจากชานอ้อยส่งผลให้มีการลดลงของร้อยละมวลคงเหลือของตัวอย่างมากกว่าการเติมผงถ่านจากฟางข้าว ผงถ่านจากกะลาปาล์ม และผงถ่านจากชังข้าวโพดตามลำดับ และการเติมผงถ่านจากชานอ้อยส่งผลให้มีการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิสูงที่สุดเมื่อเทียบกับการเติมผงถ่านชนิดอื่นๆ

- ตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่มีเติม SiC สามารถดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟได้ดี ทำให้ร้อยละมวลคงเหลือลดลงมากและมีอุณหภูมิสูง และเมื่อเปรียบเทียบกับของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่เติมผงถ่านจากชานอ้อยเป็นสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ พบว่า ตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่มีการเติม SiC มีแนวโน้มของการลดลงของร้อยละมวลคงเหลือและการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิใกล้เคียงกับตัวอย่างที่มีการเติมผงถ่านจากชานอ้อย (โดยมีการลดลงของร้อยละมวลคงเหลือสูงกว่าเล็กน้อย)

3) เมื่อศึกษาผลของปริมาณสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ พบว่า เมื่อกำลังของไมโครเวฟสูงขึ้น การเติมสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟในปริมาณที่มากขึ้น ทำให้สามารถขั้บความชื้นและสารระเหยได้ (บางส่วน) ออกจากตัวอย่างได้มากขึ้น จึงส่งผลให้ร้อยละมวลคงเหลือของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งลดลงมากขึ้น แต่ทำให้อุณหภูมิของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งเพิ่มขึ้น

4) เมื่อศึกษาผลของความสูงของสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ พบว่า ระดับความสูงของสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ (ซึ่งเป็นผงถ่านจากชานอ้อย) ส่งผลน้อยมากต่อร้อยละมวลคงเหลือและอุณหภูมิของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่ง

5) การเติมสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟลงไปในตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่ง การเพิ่มระยะเวลาในการให้ความร้อน และการเพิ่มกำลังของไมโครเวฟ ส่งผลให้ปริมาณความชื้นและสารระเหยได้ในตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งมีแนวโน้มลดลง

6) ตัวอย่างที่มีเติมสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ มีแนวโน้มการลดลงของปริมาณความชื้นและสารระเหยได้มากกว่าตัวอย่างที่ไม่ได้เติมสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ โดยพบว่า เมื่อให้ความร้อนแก่ตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่มีเติมสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟนอกจากจะสามารถขั้บความชื้นออกจากตัวอย่างได้จนหมดแล้ว ยังสามารถขั้บสารระเหยได้บางส่วนออกไปด้วย โดยสามารถขั้บสารระเหยได้ออกมาในปริมาณที่มากกว่า เมื่อเทียบกับตัวอย่างที่ไม่ได้เติมสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ

7) เมื่อพิจารณาชนิดของสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟที่ทำจากวัสดุเหลือทิ้งจากการเกษตร พบว่า ตัวอย่างที่มีการเติมผงถ่านจากชานอ้อย มีการลดลงของปริมาณความชื้นและสารระเหยได้รวดเร็วและมากที่สุด เมื่อเทียบกับตัวอย่างที่มีการเติมผงถ่านชนิดอื่นๆ

8) การเติมสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟลงไปในตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่ง การเพิ่มระยะเวลาในการให้ความร้อน และการเพิ่มกำลังของไมโครเวฟ ไม่ส่งผลให้ปริมาณเถ้าและปริมาณคาร์บอนคงตัวเปลี่ยนไปมากนัก โดยพบว่า ปริมาณเถ้าและปริมาณคาร์บอนคงตัวมีค่าค่อนข้างคงที่เมื่อเทียบกับปริมาณของเถ้าและคาร์บอนคงตัวเริ่มต้น

9) สัดส่วนของธาตุคาร์บอนในตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งหลังการให้ความร้อนด้วยคลีนไมโครเวฟ มีค่าเพิ่มขึ้นจากประมาณร้อยละ 44 เป็นประมาณร้อยละ 50-60 แต่สัดส่วนของธาตุออกซิเจนมีค่าลดลง โดยมีค่าลดลงจากเดิมประมาณร้อยละ 50 เป็นประมาณร้อยละ 35-43 ขณะที่สัดส่วนของธาตุไฮโดรเจนมีค่าค่อนข้างคงที่

10) การเติมสารดูดกลืนคลีนไมโครเวฟส่งผลให้สัดส่วนของธาตุคาร์บอนหลังการให้ความร้อนมีค่าเพิ่มขึ้น แต่สัดส่วนของธาตุออกซิเจนมีค่าลดลง เมื่อเทียบกับตัวอย่างที่ไม่ได้เติมสารดูดกลืนคลีนไมโครเวฟ อนึ่ง การเติมหรือไม่เติมสารดูดกลืนคลีนไมโครเวฟมีผลน้อยมากต่อสัดส่วนของธาตุไฮโดรเจนหลังการให้ความร้อน

11) การเติมผงถ่านจากขานอ้อยเป็นสารดูดกลืนคลีนไมโครเวฟให้แก่ตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่ง ส่งผลให้สัดส่วนของธาตุคาร์บอนหลังการให้ความร้อนมีค่ามากที่สุด แต่สัดส่วนของธาตุออกซิเจนมีค่าน้อยที่สุด เมื่อเทียบกับการเติมผงถ่านที่ทำจากฟางข้าว กะลาปาล์ม และซังข้าวโพด และตัวอย่างที่ไม่ได้เติมสารดูดกลืนคลีนไมโครเวฟ ตามลำดับ

12) ตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยคลีนไมโครเวฟโดยใช้ผงถ่านจากขานอ้อยเป็นสารดูดกลืนคลีนไมโครเวฟ มีอัตราส่วนระหว่าง O/C และ H/C มีค่าเข้าใกล้อัตราส่วนระหว่าง O/C และ H/C ของถ่านหินลิกไนต์ (lignite) และถ่านหินปิทูมินัส (bituminous) มากที่สุด เมื่อเทียบกับตัวอย่างที่เติมผงถ่านจากกะลาปาล์ม ฟางข้าว และซังข้าวโพด และตัวอย่างที่ไม่ได้เติมสารดูดกลืนคลีนไมโครเวฟ ตามลำดับ

13) ค่าความร้อนของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งหลังการให้ความร้อนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มกำลังของไมโครเวฟจาก 500 เป็น 650 วัตต์ แต่ลดลงเมื่อให้กำลังของไมโครเวฟเท่ากับ 800 วัตต์ ทั้งนี้ สามารถเพิ่มขึ้น (จาก 12.92 MJ/kg) ได้สูงสุดถึงประมาณ 24.12 MJ/kg ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าความร้อนของถ่านหินปิทูมินัส

14) เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนกับร้อยละมวลคงเหลือ ร้อยละพลังงานรวมคงเหลือ และปริมาณสารระเหยได้คงเหลือของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยคลีนไมโครเวฟ พบว่า กำลังของไมโครเวฟและระยะเวลาการให้ความร้อนที่เหมาะสมสำหรับการให้ความร้อนด้วยคลีนไมโครเวฟ คือ 650 วัตต์ และ 4 นาที ตามลำดับ โดยส่งผลให้ได้ตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยคลีนไมโครเวฟที่มีร้อยละพลังงานรวมคงเหลือสูงที่สุด ขณะเดียวกันมีค่าความร้อนที่สูง

15) เมื่อพิจารณาลักษณะสัณฐานของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งหลังการให้ความร้อนด้วยคลีนไมโครเวฟ พบว่า ตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่เติมสารดูดกลืนคลีนไมโครเวฟหลังผ่านให้ความร้อนมีลักษณะเป็นรูพรุนมากกว่าตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งก่อนการให้ความร้อน และตัวอย่างที่ไม่ได้เติมสารดูดกลืนคลีนไมโครเวฟ เช่นเดียวกับผลของค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ ซึ่งพบว่า ค่าพื้นที่ผิว

จำเพาะของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่เติมสารดูดกลิ่นคลื่นไมโครเวฟมีค่าสูงกว่าตัวอย่างที่ไม่ได้เติมสารดูดกลิ่นคลื่นไมโครเวฟ และพบว่าตัวอย่างที่มีการเติมผงถ่านจากขานอ้อยเป็นสารดูดกลิ่นคลื่นไมโครเวฟมีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะสูงที่สุด

5.2 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต

ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคตที่ได้จากงานวิจัยนี้ มีดังนี้

1) งานวิจัยนี้ทำการศึกษาชนิดของสารดูดกลิ่นคลื่นไมโครเวฟ ซึ่งผลการทดลองที่ได้พบว่าผงถ่านจากขานอ้อยเป็นสารดูดกลิ่นคลื่นไมโครเวฟที่ดีที่สุด และจากการวิเคราะห์องค์ประกอบของผงถ่าน ซึ่งพบว่า ผงถ่านจากขานอ้อยมีองค์ประกอบของสารประกอบของ Si มากที่สุด อนึ่งอาจมีความเป็นไปได้อื่นที่จะมีองค์ประกอบอื่นๆ ที่มีผลต่อการดูดกลิ่นคลื่นไมโครเวฟและต่อการให้ความร้อน จึงเสนอให้ทำการศึกษาลักษณะและองค์ประกอบอื่นๆ ในผงถ่านเพิ่มเติม เพื่อพิจารณาผลขององค์ประกอบเหล่านั้นที่มีต่อการดูดกลิ่นคลื่นไมโครเวฟและต่อการให้ความร้อน

2) งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาผลของสารดูดกลิ่นคลื่นไมโครเวฟที่มีต่อสมบัติของขยะชุมชนอัดแท่งที่ผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่ำในเชิงเทคนิคเท่านั้น นั่นคือ ศึกษาผลของตัวแปรต่างๆ ที่มีต่อสมบัติของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งก่อนการนำไปเผาไหม้ ยังขาดการศึกษาในขั้นตอนการเผาไหม้ของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่ง ดังนั้น จึงควรมีการศึกษาการเผาไหม้ของตัวอย่างขยะชุมชนที่ผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่ำ [ซึ่งมีการกำจัดความชื้นและสารระเหยได้ (บางส่วน) ออกจากตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งแล้ว] โดยศึกษาในแง่ของการปล่อยสารมลพิษออกสู่สิ่งแวดล้อม และในแง่ของปริมาณของสารมลพิษที่ปล่อยออกมาในระหว่างการเผาไหม้ที่มีผลต่อสุขภาพของมนุษย์ รวมทั้งศึกษาความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์และการใช้พลังงานของกระบวนการให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่ำโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ

3) เนื่องจากงานวิจัยนี้ทำการศึกษาสมบัติของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่ผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่ำในส่วนของของแข็งเท่านั้น จึงเสนอให้มีการศึกษาผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่ำที่อยู่ในรูปของของเหลวหรือก๊าซด้วย

รายการอ้างอิง

1. ธงชัย ทองทวี. **สภาพปัญหาการจัดการขยะมูลฝอย องค์การบริหารส่วนตำบลหนองขาม อำเภोजักราช จังหวัดนครราชสีมา** [วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต]. [นครราชสีมา]: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี; 2559.
2. กรมควบคุมมลพิษ. รายงานสถานการณ์มลพิษของประเทศไทยปี 2558 รอบ 6 เดือน. กรุงเทพฯ: กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม; 2559.
3. ธเรศ ศรีสถิตย์. วิศวกรรมการจัดการมูลฝอยชุมชน. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย; 2553.
4. ปิยชาติ ศิลปสุวรรณ. ขยะมูลฝอยชุมชน ปัญหาใหญ่ที่ประเทศกำลังเผชิญ. บทความวิชาการ สำนักวิชาการ สำนักงานเลขาธิการวุฒิสภา. 2557;4:1-12.
5. เพชรดา เวณันท์, วารุณี ลิขิตสุภิน, ปมทอง มาลากุล ณ อยุธยา. การผลิตพลังงานไฟฟ้าจากขยะมูลฝอยชุมชน. วารสารสิ่งแวดล้อม ศูนย์เทคโนโลยีและวัสดุแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ. 2557;3:27-34.
6. Brunner CR. Incineration System Handbook. Virginia: Incinerator Consultants Incorporated; 1996.
7. จินตนา อุบลวัฒน์, ไชยวัฒน์ ผลลาภ. เทคโนโลยีการผลิตกระแสไฟฟ้าจากขยะชุมชนในประเทศไทย. วารสารพลังงาน สถาบันวิจัยพลังงาน จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2547;5:36-58.
8. Baird C, Cann M. Environment Chemistry. 5th ed. New York: W.H. Freeman & Company; 2008.
9. Vesilind PA, Worrell W, Reinhart D. Solid Waste Engineering. 2nd ed. New York: Brooks/Cole, Thomson Learning Incorporated; 2002.
10. van der Stelt MJC, Gerhauser H, Kiel JHA, Ptasinski KJ. Biomass upgrading by torrefaction for the production of biofuels: A review. Biomass and Bioenergy. 2011;35(7):3748–62.
11. Nhuchhen DR, Basu P, Acharya B. A comprehensive review on biomass torrefaction. International Journal of Renewable Energy & Biofuels. 2014; Article ID 506376.
12. Huang YF, Chen WR, Chiueh PT, Kuan WH, Lo SL. Microwave torrefaction of rice straw and *pennisetum*. Bioresource Technology. 2012;123:1-7.

13. Satpathy SK, Tabil LG, Meda V, Naik SN, Prasad R. Torrefaction of wheat and barley straw after microwave heating. *Fuel*. 2014;124:269-78.
14. Wang MJ, Huang YF, Chiueh PT, Kuan WH, Lo SL. Microwave-induced torrefaction of rice husk and sugarcane residues. *Energy*. 2012;37(1):177-84.
15. Siritheerasas P, Kromtin K, Thanmaneesin D, Waiyanate P, Aroonratsamee P. Comparison of conventional and microwave heating of municipal solid waste (MSW). *Proceedings of the 4th International Symposium on Engineering, Energy, and Environments (ISEEE)*; 2015 Nov 8-10; Pattaya. Thailand; p. 529-37.
16. Arshanitsa A, Akishin Y, Zile E, Dizhbite T, Solodovnik Y, Telysheva G. Microwave treatment combined with conventional heating of plant biomass pellets in a rotated reactor as a high rate process for solid biofuel manufacture. *Renewable Energy*. 2016; 91:386-96.
17. Budarin VL, Milkowski KJ, Shuttleworth P, Lanigan B, Clark JH, Macquarrie DJ, et al. Microwave torrefaction of biomass. United States patent US Patent No. 20110219679. 2011.
18. Zuo W, Tian Y, Ren N. The important role of microwave receptors in bio-fuel production by microwave-induced pyrolysis of sewage sludge. *Waste management*. 2011;31(6):1321-26.
19. Liu X, Zhang Z, Wu Y. Absorber properties of carbon black/silicon carbide microwave absorbers. *Composites Part B: Engineering*. 2011;42(2):326-9.
20. Siritheerasas P, Waiyanate P, Aroonratsamee P, Sekiguchi H, Kodama S. Thermal treatment of municipal solid waste (MSW) using microwave irradiation with the assistance of agricultural residue. *Proceedings of the 4th International Symposium on Engineering, Energy, and Environments (ISEEE)*; 2015 Nov 8-10; Pattaya. Thailand; p.522-8.
21. สุภาภรณ์ ศิริโสภณา. ขยะชุมชน สถานที่ฝังกลบ และการฟื้นฟู. *บทความวิชาการ ภาควิชาวิทยาศาสตร์ทั่วไป มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ*. 2549;22:101-21.
22. สมรัฐ เกิดสุวรรณ. การเผาไหม้และการควบคุมมลพิษ. *ปทุมธานี: สำนักพิมพ์สกายบุ๊กส์*; 2549.
23. สุรงค์ บูลกุล. โรงไฟฟ้าขยะ ระยองโมเดล ทางออกของปัญหาขยะล้นเมือง. *กรุงเทพธุรกิจ*. วันที่ 8 กันยายน 2557.

24. พิริยะ ทองเขียว, ทนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์. การประเมินปริมาณอากาศที่เหมาะสมต่อการสันดาปภายในหม้อไอน้ำเชื้อเพลิงถ่านหินบดละเอียด. วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. 2553;17(1):60-71.
25. บัญจรัตน์ โจลานันท์, อาทิตย์ พุทธรักชาติ, จันสุดา คำด้อย. พลังงานทดแทนชุมชนจากเชื้อเพลิงแข็งอัดแท่งไมยราบยักษ์. วารสารวิจัย มหาวิทยาลัยขอนแก่น. 2554;16:21-31.
26. ขรรค์ชัย บริบูรณ์. การประเมินศักยภาพชีวมวลสำหรับผลิตไฟฟ้าโดยใช้ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ในเขตจังหวัดปทุมธานี [วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ]. [ปทุมธานี]: มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์; 2553.
27. Jaruchattada J, Pornmai K, Siritheerasas P. Correlation between proximate analysis and ultimate analysis, and between proximate analysis and heating value, of biomass. Proceeding of International Conference on Modeling in Chemical and Biological Engineering Sciences; 2006 Oct 25-27; Bangkok. Thailand.
28. Shen J, Zhu S, Liu X, Zhang H, Tan J. The prediction of elemental composition of biomass based on proximate analysis. Energy Conversion and Management. 2010;51(5):983-7
29. Parikh J, Channiwala SA, Ghosal GK. Correlation for calculating elemental composition from proximate analysis of biomass materials. Fuel. 2007;86(12-13):1710-9.
30. Borman GL, Ragland KW. Combustion Engineering. 2nd ed. New York: McGraw Hill; 1998.
31. Ahmad M, Subawi H. New van Krevelen diagram and its correlation with the heating value of biomass. Research Journal of Agriculture and Environmental Management. 2013;2(10):295-301.
32. ประเสริฐ ชุมชุม. เทคโนโลยีการทำเหมืองถ่านหิน. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย; 2538.
33. Yin CY. Prediction of higher heating values of biomass from proximate and ultimate analysis. Fuel. 2011;90(3):1128-32.
34. Demirbas A. Calculation of higher heating values of biomass fuels. Fuel. 1996;76(5):431-4.
35. Singh RP, Heldman DR. Introduction to Food Engineering. 4th ed. London: Academic Press; 2001. p. 306-31.

36. Huang YF, Shih CH, Chiueh PT, Lo SL. Microwave co-pyrolysis of sewage sludge and rice straw. *Energy*. 2015;87:638-44.
37. Chen WH, Hsu HC, Lu KM, Lee WJ, Lin TC. Thermal pretreatment of wood (Lauan) block by torrefaction and its influence on the properties of the biomass. *Energy*. 2011;36(5):3012-21.
38. Chen D, Zheng Z, Fu K, Zeng Z, Wang J, Lu M. Torrefaction of biomass stalk and its effect on the yield and quality of pyrolysis products. *Fuel*. 2015;159:27–32.
39. ASTM Standards D3173. Standard Test Method for Moisture in the Analysis Sample of Coal and Coke. American Society for Testing and Materials. USA; 2006. p. 345-347.
40. ASTM Standards D3175. Standard Test Method for Volatile Matter in the Analysis Sample of Coal and Coke. American Society for Testing and Materials. USA; 2006. p. 353-356.
41. ASTM Standards D3174. Standard Test Method for Ash in the Analysis Sample of Coal and Coke. American Society for Testing and Materials. USA; 2006. p. 348-352.
42. ASTM Standards D3172. Standard Test Method for Proximate Analysis of Coal and Coke. American Society for Testing and Materials. USA; 2006. p. 343-344.
43. Zhao X, Wang M, Liu H, Li L, Ma C, Song Z. A microwave reactor for characterization of pyrolyzed biomass. *Bioresource Technology*. 2012;104:673–8.
44. Miller BG. *Clean Coal Engineering Technology*. 2nd ed. New York: Butterworth-Heinemann; 2011.
45. Gaur S, Reed T. *Thermal Data for Natural and Synthetic Fuels*. New York: Marcel Dekker Incorporated; 1998.
46. Patumsawad S, Cliffe KR. Experimental study on fluidised bed combustion of high moisture municipal solid waste. *Energy Conversion and Management*. 2002;43(17): 2329-40.
47. Metaxas AC, Meredith RJ. *Industrial Microwave Heating*. London: Peter Peregrinus Limited; 1988.



ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

วิธีการวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate Analysis) ตามมาตรฐาน ASTM

ก.1 การวิเคราะห์ปริมาณความชื้น (moisture) ตามมาตรฐาน ASTM D3173

เครื่องมือและอุปกรณ์ เตาอบลมร้อน (hot oven) เครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง ถ้วยครุชิวีล (crucible) โถดูดความชื้น (desiccator)

ขั้นตอนการทดลอง

- 1) ชั่งน้ำหนักถ้วยครุชิวีล และชั่งตัวอย่างประมาณ 1 กรัม ใส่ในถ้วยครุชิวีล อ่านค่าน้ำหนักตัวอย่าง บันทึกค่า
- 2) นำเข้าเตาอบลมร้อน ที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
- 3) เมื่อครบกำหนดเวลา นำถ้วยครุชิวีลพร้อมตัวอย่างออกจากเตาอบลมร้อน ทิ้งไว้ให้เย็นใน desiccator แล้วชั่งน้ำหนัก บันทึกค่า

สูตรที่ใช้ในการคำนวณ

$$\%M = \frac{W_1 - W_2}{W} \times 100$$

เมื่อ %M = ร้อยละของปริมาณความชื้น

W_1 = น้ำหนักถ้วยครุชิวีลและตัวอย่างก่อนอบ (g)

W_2 = น้ำหนักถ้วยครุชิวีลและตัวอย่างหลังอบ (g)

W = น้ำหนักตัวอย่าง (g)

ก.2 การวิเคราะห์ปริมาณสารระเหยได้ (volatile matter) ตามมาตรฐาน ASTM D3175

เครื่องมือและอุปกรณ์ เตาเผาอุณหภูมิสูง (muffle furnace) เครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง ถ้วยครุชิวีล (crucible) พร้อมฝา (lid) โถดูดความชื้น (desiccator)

ขั้นตอนการทดลอง

- 1) ชั่งน้ำหนักถ้วยครุชิวีลพร้อมฝา และชั่งตัวอย่างประมาณ 1 กรัม ใส่ในถ้วยครุชิวีล อ่านน้ำหนักตัวอย่าง บันทึกค่า
- 2) ปิดฝาคือถ้วยครุชิวีล แล้วนำเข้าเตาเผาอุณหภูมิสูง ที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 นาที
- 3) เมื่อครบกำหนดเวลา นำถ้วยครุชิวีลพร้อมตัวอย่างออกจากเตาเผาอุณหภูมิสูง ทิ้งไว้ให้เย็นใน desiccator แล้วชั่งน้ำหนักพร้อมฝา บันทึกค่า

สูตรที่ใช้ในการคำนวณ

$$\%VM = \left(\frac{W_3 - W_4}{W} \times 100 \right) - \%M$$

เมื่อ $\%VM$ = ร้อยละของปริมาณสารระเหยได้

$\%M$ = ร้อยละของปริมาณความชื้น

W_3 = น้ำหนักถ้วยครุชชีเบลและตัวอย่างก่อนนำเข้าเตาเผา (g)

W_4 = น้ำหนักถ้วยครุชชีเบลและตัวอย่างหลังนำเข้าเตาเผา (g)

W = น้ำหนักตัวอย่าง (g)

ก.3 การวิเคราะห์ปริมาณเถ้า (ash) ตามมาตรฐาน ASTM D3174

เครื่องมือและอุปกรณ์ เตาเผาอุณหภูมิสูง (muffle furnace) เครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง ถ้วยครุชชีเบล (crucible) โถดูดความชื้น (desiccator)

ขั้นตอนการทดลอง

1) ชั่งน้ำหนักถ้วยครุชชีเบล และชั่งตัวอย่างประมาณ 1 กรัม ใส่ในถ้วยครุชชีเบล อ่านค่าน้ำหนักตัวอย่าง บันทึกค่า

2) นำถ้วยครุชชีเบลเข้าเตาเผาอุณหภูมิสูง ที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

3) เมื่อครบกำหนดเวลา นำถ้วยครุชชีเบลพร้อมตัวอย่างออกจากเตาเผาอุณหภูมิสูง ทิ้งไว้ให้เย็นใน desiccator แล้วชั่งน้ำหนัก บันทึกค่า

สูตรที่ใช้ในการคำนวณ

$$\%Ash = \frac{W_6 - W_5}{W} \times 100$$

เมื่อ $\%Ash$ = ร้อยละของปริมาณเถ้า

W_5 = น้ำหนักถ้วยครุชชีเบลก่อนเผา (g)

W_6 = น้ำหนักถ้วยครุชชีเบลและตัวอย่างหลังเผา (g)

W = น้ำหนักตัวอย่าง (g)

ก.4 การคำนวณปริมาณคาร์บอนคงตัว (fixed carbon) ตามมาตรฐาน ASTM D3172

สูตรที่ใช้ในการคำนวณ

$$\%FC = 100 - \%M + \%VM + \%ash$$

เมื่อ $\%FC$ = ร้อยละของปริมาณคาร์บอนคงตัว

ภาคผนวก ข

ตัวอย่างการคำนวณ

ข.1 การคำนวณปริมาณน้ำเพื่อปรับความชื้นเริ่มต้นของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่ง

งานวิจัยนี้ต้องการศึกษาสมบัติต่างๆ ของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่มีค่าความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 40 โดยน้ำหนักของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่ง แต่ตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีความชื้นเริ่มต้นเพียงร้อยละ 5.51 เท่านั้น ดังนั้น จึงต้องมีการปรับค่าความชื้นเริ่มต้นของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งโดยการเติมน้ำ ซึ่งมีรายละเอียดวิธีการคำนวณปริมาณน้ำที่ต้องเติมเข้าไปในตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่ง เพื่อให้ได้ความชื้นตามที่ต้องการ ดังต่อไปนี้

การคำนวณปริมาณน้ำที่ต้องเติมลงในตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งเพื่อปรับความชื้นเริ่มต้นของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งจากร้อยละ 5.51 เป็นร้อยละ 40 โดยน้ำหนักของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งเริ่มต้น

ตัวอย่าง 100 กรัม มีน้ำอยู่ 5.51 กรัม (ร้อยละ 5.51) ต้องการปรับให้ตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งมีความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 40 ต้องเติมน้ำปริมาณ x กรัม ซึ่งสามารถคำนวณได้ ดังนี้

$$\frac{5.51 + x}{100 + x} = \frac{40}{100}$$

$$x = 57.48 \text{ g}$$

โดยที่ x = ปริมาณน้ำ (กรัม) ที่ต้องเติมลงในตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่ง 100 กรัม

ดังนั้น หากตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งมีน้ำหนัก 1.0060 กรัม ต้องเติมน้ำในปริมาณเท่ากับ $1.0060 \times \frac{57.48}{100} = 0.5782$ กรัม เพื่อให้ตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งมีความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 40

ข.2 การคำนวณปริมาณสารดูดกลิ่นคลีนไมโครเวฟ (อันได้แก่ ผงถ่านจากฟางข้าว ผงถ่านจากซังข้าวโพด ผงถ่านจากกะลาปาล์ม และผงถ่านจากชานอ้อย)

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาสมบัติต่างๆ ของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งหลังการให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่ำ (torrefaction) โดยใช้คลีนไมโครเวฟ ที่มีการเติมสารดูดกลิ่นคลีนไมโครเวฟเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการดูดกลิ่นคลีนไมโครเวฟ โดยปริมาณของสารดูดกลิ่นคลีนไมโครเวฟที่ทำการศึกษาคือ ร้อยละ 10-40 โดยน้ำหนักของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งเริ่มต้น ซึ่งมีรายละเอียดวิธีการคำนวณปริมาณสารดูดกลิ่นคลีนไมโครเวฟเพื่อให้ได้ปริมาณตามที่ต้องการ ดังต่อไปนี้

การคำนวณปริมาณสารดูดกลืนคลีนไมโครเวฟที่ต้องเติมลงในตัวอย่างขยะชุมชนอัดแห้ง เพื่อให้มีปริมาณสารดูดกลืนคลีนไมโครเวฟร้อยละ 40 โดยน้ำหนักของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแห้ง เริ่มต้น

ตัวอย่างขยะชุมชนอัดแห้งหนัก 1.0060 กรัม ต้องการเติมสารดูดกลืนคลีนไมโครเวฟให้มีปริมาณร้อยละ 40 ต้องเติมสารดูดกลืนคลีนไมโครเวฟปริมาณ x กรัม ซึ่งสามารถคำนวณได้ ดังนี้

$$x = 1.0060 \times \frac{40}{100}$$

$$x = 0.4024 \text{ g}$$

โดยที่ x = ปริมาณสารดูดกลืนคลีนไมโครเวฟที่ต้องเติมลงในตัวอย่างขยะชุมชนอัดแห้ง (กรัม)

ข.3 การคำนวณปริมาณคาร์บอน (C) ไฮโดรเจน (H) และออกซิเจน (O) ของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแห้ง

ต้องการคำนวณปริมาณคาร์บอน (C) ไฮโดรเจน (H) และออกซิเจน (O) ของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแห้งที่มีความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 40 และผ่านการให้ความร้อนด้วยคลีนไมโครเวฟกำลัง 800 วัตต์ ระยะเวลาการให้ความร้อน 12 นาที โดยมีการเติมผงถ่านจากชานอ้อยเป็นสารดูดกลืนคลีนไมโครเวฟที่ร้อยละ 40 ซึ่งมีผลการวิเคราะห์แบบประมาณ (proximate analysis) แบบ air-dried basis ดังนี้

- ปริมาณความชื้น (moisture) ในตัวอย่างขยะชุมชนอัดแห้ง ร้อยละ 0
- ปริมาณสารระเหยได้ (VM) ในตัวอย่างขยะชุมชนอัดแห้ง ร้อยละ 6.19
- ปริมาณเถ้า (ash) ในตัวอย่างขยะชุมชนอัดแห้ง ร้อยละ 3.71
- ปริมาณคาร์บอนคงตัว (FC) ในตัวอย่างขยะชุมชนอัดแห้ง ร้อยละ 17.43

จากข้อมูลข้างต้น ทำการแปลงผลการวิเคราะห์แบบประมาณ (proximate analysis) ให้เป็นแบบ dry basis ได้ดังนี้

$$\%VM = \frac{VM}{VM + FC + \text{ash}} \times 100 = \frac{6.19}{6.19 + 17.43 + 3.71} \times 100 = 22.64$$

$$\%FC = \frac{FC}{VM + FC + \text{ash}} \times 100 = \frac{17.43}{6.19 + 17.43 + 3.71} \times 100 = 63.80$$

จากนั้น นำค่าปริมาณสารระเหยได้ (%VM) และคาร์บอนคงตัว (%FC) แบบ dry basis ที่คำนวณได้ข้างต้น ไปคำนวณร้อยละของคาร์บอน (C) ของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ โดยใช้สมการของ Parikh และคณะ⁽²⁹⁾ ได้ดังนี้

$$C = 0.637(\%FC) + 0.445(\%VM)$$

$$C = 0.637(63.80) + 0.445(22.64)$$

$$C = 50.94\%$$

คำนวณร้อยละของไฮโดรเจน (H) ของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ โดยใช้สมการของ Parikh และคณะ⁽²⁹⁾ ได้ดังนี้

$$H = 0.052(\%FC) + 0.062(\%VM)$$

$$H = 0.052(63.80) + 0.062(22.64)$$

$$H = 4.72\%$$

และคำนวณร้อยละของออกซิเจน (O) ของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ โดยใช้สมการของ Parikh และคณะ⁽²⁹⁾ ได้ดังนี้

$$O = 0.304(\%FC) + 0.476(\%VM)$$

$$O = 0.304(63.80) + 0.476(22.64)$$

$$O = 30.17\%$$

ข.4 การคำนวณค่าความร้อน (heating value) ของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่ง

ต้องการคำนวณค่าความร้อน (heating value) ของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่มีความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 40 และผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟกำลัง 800 วัตต์ ระยะเวลาการให้ความร้อน 12 นาที โดยมีการเติมผงถ่านจากชานอ้อยเป็นสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟที่ร้อยละ 40 ซึ่งมีผลการวิเคราะห์แบบประมาณ (proximate analysis) แบบ dry basis ตามที่คำนวณได้ในหัวข้อ ข.3 ดังนี้

- ร้อยละสารระเหยได้ (%VM) ในตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่ง ร้อยละ 22.64
- ร้อยละคาร์บอนคงตัว (%FC) ในตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่ง ร้อยละ 63.80

ซึ่งสามารถคำนวณค่าความร้อน (HHV) ของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่ผ่านการให้ความร้อนโดยใช้สมการของ Demirbas⁽³⁴⁾ ได้ดังนี้

$$\text{HHV} = 0.312(\%FC) + 0.1534(\%VM)$$

$$\text{HHV} = 0.312(63.80) + 0.1534(22.64)$$

$$\text{HHV} = 23.38 \text{ MJ/kg}$$

ข.5 การคำนวณค่าร้อยละมวลคงเหลือ (mass yield) ของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่ง

สมการสำหรับคำนวณร้อยละมวลคงเหลือ (mass yield) เป็นดังนี้

$$\text{Mass yield} = \frac{M_f}{M_i} \times 100$$

โดยที่ M_f = น้ำหนักของตัวอย่างที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ

M_i = น้ำหนักของตัวอย่างก่อนการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ

ตัวอย่างการคำนวณร้อยละมวลคงเหลือ (mass yield) ของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่มีความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 40 และผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟกำลัง 800 วัตต์ ระยะเวลาการให้ความร้อน 12 นาที ที่มีการเติมผงถ่านจากชานอ้อยเป็นสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟที่ร้อยละ 40 ซึ่งมีผลการทดลองดังนี้

- น้ำหนักของตัวอย่างที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ เท่ากับ 0.4414 กรัม
 - น้ำหนักของตัวอย่างก่อนการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ เท่ากับ 1.5805 กรัม
- ดังนั้น

$$\text{Mass yield} = \frac{0.4414}{1.5805} \times 100 = 27.93\%$$

ร้อยละมวลคงเหลือ (mass yield) ของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่ง เท่ากับ 27.93%

ข.6 การคำนวณค่าร้อยละพลังงานรวมคงเหลือ (energy yield) ของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่ง

สมการสำหรับคำนวณร้อยละพลังงานรวมคงเหลือ (energy yield) เป็นดังนี้

$$\text{Energy yield} = \text{Mass yield} \times \frac{\text{HV}_f}{\text{HV}_i}$$

โดยที่ HV_f = ค่าความร้อนของตัวอย่างที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ

HV_i = ค่าความร้อนของตัวอย่างก่อนการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ

ตัวอย่างการคำนวณร้อยละพลังงานรวมคงเหลือ (energy yield) ของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่มีความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 40 และผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟกำลัง 800 วัตต์ ระยะเวลาการให้ความร้อน 12 นาที ที่มีการเติมผงถ่านจากชานอ้อยเป็นสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟที่ร้อยละ 40 ซึ่งมีผลการทดลองดังนี้

- ร้อยละมวลคงเหลือ (mass yield) ของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่ง เท่ากับ 27.93%
- ค่าความร้อนของตัวอย่างที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ เท่ากับ 23.38

MJ/kg

- ค่าความร้อนของตัวอย่างก่อนการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ เท่ากับ 12.92

MJ/kg

ดังนั้น

$$\text{Energy yield} = 27.93 \times \frac{23.38}{12.92} = 50.54\%$$

ร้อยละพลังงานรวมคงเหลือ (energy yield) ของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่ง เท่ากับ

50.54%

ภาคผนวก ค
ตัวอย่างข้อมูลดิบ

ตารางที่ ค.1 สมบัติของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟกำลัง 500 W ที่ระยะเวลาการให้ความร้อนในช่วง 4-12 นาที โดยใช้สารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟต่างๆ

MW absorber	Time (min)	T (°C)	Mass yield (%)	Proximate analysis (%)			
				Moisture	VM	Ash	FC
No MW absorber	4	107	67.64	3.20	49.58	4.11	8.32
	8	124	56.82	0	41.56	3.69	11.57
	12	150	53.54	0	38.37	3.42	11.75
Rice straw	4	121	62.41	0.48	33.01	1.95	27.18
	8	144	55.77	0	28.11	2.04	25.61
	12	160	47.69	0	22.40	2.42	24.04
Corncob	4	118	65.67	0.05	39.60	4.92	21.10
	8	134	58.07	0	35.02	4.94	18.11
	12	153	49.21	0	27.28	4.82	16.50
Palm shell	4	109	62.97	0.50	37.73	4.76	18.96
	8	140	57.58	0	32.10	4.80	16.69
	12	150	50.52	0	24.60	5.49	20.72
Bagasse	4	124	59.61	1.39	31.77	2.81	23.65
	8	150	48.52	0.29	26.33	2.97	24.49
	12	162	47.24	0.25	23.63	2.85	23.08
SiC	4	145	60.70	0	31.48	1.44	27.77
	8	171	50.29	0	23.33	5.41	21.54
	12	173	48.58	0	26.31	5.34	16.92

ตารางที่ ค.2 สมบัติของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟกำลัง 650 W ที่ระยะเวลาการให้ความร้อนในช่วง 4-12 นาที โดยใช้สารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟต่างๆ

MW absorber	Time (min)	T (°C)	Mass yield (%)	Proximate analysis (%)			
				Moisture	VM	Ash	FC
No MW absorber	4	138	61.87	2.19	38.15	2.10	10.96
	8	156	58.71	0	33.14	2.02	12.97
	12	177	46.64	0	25.24	1.70	14.76
Rice straw	4	149	59.29	0.43	30.48	3.07	27.29
	8	174	51.88	0	25.83	2.85	25.55
	12	195	36.35	0	14.98	2.50	21.43
Corncob	4	150	59.39	0.46	34.17	2.88	20.92
	8	173	50.24	0	27.54	2.89	18.44
	12	184	34.14	0	15.42	3.36	14.84
Palm shell	4	128	58.66	0.02	30.22	4.95	25.73
	8	169	56.41	0	24.92	5.30	22.36
	12	188	38.30	0	15.98	6.12	22.40
Bagasse	4	156	58.44	0.10	29.14	3.40	25.80
	8	181	51.45	0.09	24.18	2.95	21.47
	12	193	32.21	0.03	12.26	3.34	18.28
SiC	4	177	56.57	0	18.50	6.09	31.99
	8	190	43.95	0	11.46	1.18	31.31
	12	206	31.33	0.06	9.68	0.00	27.74

ตารางที่ ค.3 สมบัติของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟกำลัง 800 W ที่ระยะเวลาการให้ความร้อนในช่วง 4-12 นาที โดยใช้สารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟต่างๆ

MW absorber	Time (min)	T (°C)	Mass yield (%)	Proximate analysis (%)			
				Moisture	VM	Ash	FC
No MW absorber	4	142	59.41	0	44.18	3.94	11.29
	8	175	48.81	0	33.64	3.10	12.07
	12	200	38.57	0	21.51	3.57	13.49
Rice straw	4	174	57.16	0	28.90	2.58	26.27
	8	208	39.00	0	12.00	4.11	25.79
	12	229	30.22	0	7.99	3.73	19.31
Corncob	4	160	56.84	0.09	33.95	5.19	17.61
	8	180	41.17	0	18.71	6.22	16.24
	12	200	37.83	0	17.56	5.18	15.09
Palm shell	4	166	55.00	0	32.00	22.73	20.55
	8	198	45.44	0	18.03	4.80	21.08
	12	206	36.70	0	13.70	5.08	17.92
Bagasse	4	190	55.98	0.17	26.76	3.38	25.67
	8	220	31.38	0	8.81	3.97	18.03
	12	236	27.33	0	6.19	3.71	17.43
SiC	4	177	49.97	0	23.67	2.93	23.38
	8	227	32.59	0	12.15	4.34	16.10
	12	250	30.42	0	6.47	5.52	18.43

ตารางที่ ค.4 ร้อยละมวลคงเหลือและอุณหภูมิของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟกำลัง 500 W ที่ระยะเวลาการให้ความร้อนในช่วง 4-12 นาที ในกรณีต่างๆ

Condition	Time (min)	T (°C)	Mass yield (%)
0% water + 0% bagasse	4	129	67.22
	8	133	59.23
	12	142	56.82
40% water	4	107	67.64
	8	124	56.82
	12	150	52.51
40% bagasse	4	122	62.54
	8	143	45.09
	12	159	44.96
40% water + 10% bagasse	4	126	61.26
	8	154	54.46
	12	155	54.96
40% water + 20% bagasse	4	117	61.08
	8	145	59.41
	12	158	53.33
40% water + 30% bagasse	4	118	61.12
	8	155	58.01
	12	164	43.10
40% water + 40% bagasse	4	124	59.61
	8	150	48.52
	12	165	43.19

ตารางที่ ค.5 ร้อยละมวลคงเหลือและอุณหภูมิของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟกำลัง 650 W ที่ระยะเวลาการให้ความร้อนในช่วง 4-12 นาที ในกรณีต่างๆ

Condition	Time (min)	T (°C)	Mass yield (%)
0% water + 0% bagasse	4	130	69.04
	8	162	54.96
	12	165	46.64
40% water	4	137	61.87
	8	156	58.71
	12	177	43.15
40% bagasse	4	152	57.97
	8	160	49.45
	12	170	39.82
40% water + 10% bagasse	4	140	53.36
	8	165	47.74
	12	194	40.35
40% water + 20% bagasse	4	180	51.05
	8	148	59.29
	12	191	42.84
40% water + 30% bagasse	4	152	58.80
	8	175	47.75
	12	200	40.31
40% water + 40% bagasse	4	156	58.44
	8	180	51.45
	12	191	32.84

ตารางที่ ค.6 ร้อยละมวลคงเหลือและอุณหภูมิของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟกำลัง 800 W ที่ระยะเวลาการให้ความร้อนในช่วง 4-12 นาที ในกรณีต่างๆ

Condition	Time (min)	T (°C)	Mass yield (%)
0% water + 0% bagasse	4	138	63.21
	8	145	48.54
	12	179	45.32
40% water	4	142	59.41
	8	175	43.39
	12	209	36.87
40% bagasse	4	150	59.93
	8	169	59.02
	12	188	36.07
40% water + 10% bagasse	4	107	62.55
	8	206	43.36
	12	212	40.38
40% water + 20% bagasse	4	105	55.77
	8	219	37.75
	12	219	33.52
40% water + 30% bagasse	4	109	54.08
	8	222	39.13
	12	232	32.75
40% water + 40% bagasse	4	160	55.98
	8	230	27.93
	12	238	26.43

ตารางที่ ค.7 ร้อยละมวลคงเหลือและอุณหภูมิของตัวอย่างขยะชุมชนอัดแท่งที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟกำลัง 500 W ที่ระยะเวลาการให้ความร้อน 12 นาที โดยใช้ผงถ่านจากชานอ้อย เป็นสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟที่ระดับความสูงต่างๆ

Height of microwave absorber (mm)	T (°C)	Mass yield (%)
30	159	53.95
40	155	48.25
50	150	51.52
60	153	41.53
70	153	40.72
100	148	47.24

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นางสาวพิชญานันท์ ไวยเนตร
วัน-เดือน-ปี เกิด	19 กรกฎาคม 2536
วุฒิการศึกษา	ปีการศึกษา 2557: วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี) มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ปีการศึกษา 2559: วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี) มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

ผลงานทางวิชาการ

- 1 พิชญานันท์ ไวยเนตร, พงศ์ธร ฐปะเดมิย์, โปรตปราน สิริธีรศาสน์. ผลกระทบของสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟต่อกระบวนการให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่ำของขยะชุมชนอัดแท่งที่มีความชื้นสูง. การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 12; 8-10 มิ.ย 2559; คณะวิทยาศาสตร์และวิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยนเรศวร ร่วมกับมหาวิทยาลัยแม่โจ้. บทความหมายเลข BT-229.
- 2 Waiyanate P, Dhupatemiya P, Siritheerasas P. Effects of microwave absorbers on the torrefaction of highly moist municipal solid waste (MSW) pellets. The 6th International Thai Institute of Chemical Engineering and Applied Science Conference; 2016 Oct 26-28; Bangkok, Thailand. Paper No. I-SET11-O95.