

การผลิตถ่านชาร์จากทะเลลายปาล์มด้วยกระบวนการ
ไพโรไลซิสร่วมกับไมโครเวฟ



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2561

การผลิตถ่านชาร์จากทะเลสาบปาล์มด้วยกระบวนการ
ไพโรไลซิสร่วมกับไมโครเวฟ



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2561

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PRODUCTION OF BIOCHAR FROM EMPTY PALM BUNCH USING
PYROLYSIS ASSISTED-MICROWAVE



A REPORT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENTS
FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF CHEMICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2018

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2018

FACULTY OF ENGINEERING

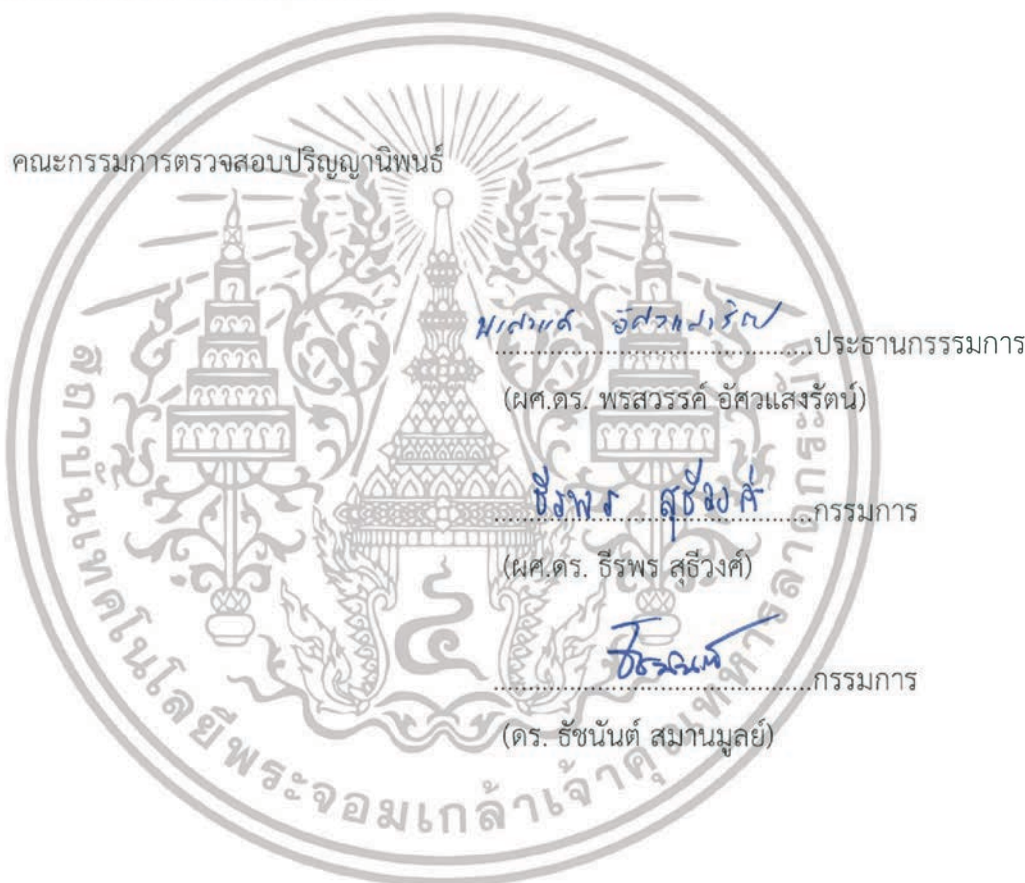
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์เรื่อง การผลิตถ่านชาร์จากทะเลาปาล์มด้วยกระบวนการไพโรไลซิสร่วมกับ
ไมโครเวฟ
โดย นาย สิริราชย์ ชัดชุมแสง
อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร. พรสวรรค์ อัสวแสงรัตน์
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปริญญานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

คณะกรรมการตรวจสอบปริญญานิพนธ์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์เรื่อง	การผลิตถ่านชาร์จากทะเลลายปาล์มด้วยกระบวนการไพโรไลซิสร่วมกับไมโครเวฟ
โดย	นายสิริราชย์ ชัดชุมแสง
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
ปีการศึกษา	2561
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร. พรสวรรค์ อัครแสงรัตน์
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ดร. พงษ์เสริฐ ศรีพรหม

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการผลิตถ่านชาร์จากทะเลลายปาล์มเปล่าด้วยกระบวนการไพโรไลซิสร่วมกับการใช้ไมโครเวฟ โดยการออกแบบระบบของเครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิส เพื่อทำการหาสภาวะที่เหมาะสมและปัจจัยที่มีส่งผลต่อการผลิตถ่านชาร์ด้วยกระบวนการไพโรไลซิสร่วมกับไมโครเวฟจากทะเลลายปาล์ม ซึ่งปัจจัยที่ทำการศึกษาได้แก่ กำลังของไมโครเวฟ(วัตต์) ระยะเวลาในการให้ความร้อน(นาที) และสัดส่วนโดยมวลของปริมาณทะเลลายปาล์มเปล่าต่อปริมาณกรดซัลฟิวริกเข้มข้น ผลการศึกษาพบว่า การวิเคราะห์แบบประมาณค่าของตัวอย่างทะเลลายปาล์ม มีปริมาณเถ้าร้อยละ 5.48 ปริมาณความชื้นร้อยละ 6.65 ปริมาณสารระเหยร้อยละ 2.49 และปริมาณของคาร์บอนคงตัวร้อยละ 85.38 จะเห็นได้ว่าจากการวิเคราะห์แบบประมาณค่าของตัวอย่างทะเลลายปาล์มมีค่าปริมาณของคาร์บอนคงตัวที่สูง ทำให้เมื่อนำตัวอย่างทะเลลายปาล์มไปผ่านกระบวนการไพโรไลซิสร่วมกับไมโครเวฟแล้วสามารถให้ผลิตภัณฑ์ในส่วนที่เป็นถ่านชาร์ได้สูงถึงร้อยละ 53.78 ที่สภาวะกำลังของไมโครเวฟ 300 วัตต์ ระยะเวลา 10 นาที และสัดส่วนโดยมวลของปริมาณทะเลลายปาล์มเปล่าต่อปริมาณกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 1:2.5 และเมื่อนำถ่านชาร์ ณ สภาวะที่เหมาะสมไปวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวพบว่า มีพื้นที่ผิวอยู่ระหว่าง 317-320 ตารางเมตรต่อกรัมถ่านชาร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Report Title	Production of biochar from empty palm bunch using pyrolysis assisted-microwave
By	Mr. Sirirach Kadchumsaeng
Degree	Bachelor of Engineering
Program	Chemical Engineering
Year	2018
Advisor	Asst.Prof.Dr. Pornsawan Assawasaengrat
Co-advisor	Dr. Pongsert Sriprom

Abstract

The production of biochar from empty palm bunch using pyrolysis assisted-microwave was studied. The pyrolysis reactor was designed and optimized the conditions of variables that effect on the production of biochar by using pyrolysis assisted-microwave from empty palm bunch. The microwave power (Watt), heating time (Minute) and ratio of empty palm bunch to initial amount of sulfuric acid (conc.) were investigated. The empty palm bunch was analyzed by proximate analysis. The results shown that the empty palm bunch compositions were obtained by 5.48% of ash content, 6.65% of moisture content, 2.49% of volatile matter and 85.38% of fixed carbon. From the results, when taking the empty palm bunches through the pyrolysis assisted-microwave, the yield of biochar products can be as high as 53.78% at the microwave power 300 watt, heating time 10 minutes and ratio of empty palm bunch to initial amount of concentrated sulfuric acid 1:2.5. And put biochar at optimum condition to analyze the surface area, it was found that the surface area was between 317-320 square meters per gram of biochar.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความกรุณาจาก ผศ.ดร. พรสวรรค์ อัครแสงรัตน์ อาจารย์ที่ปรึกษา และ ดร. พงษ์เสรีฐ ศรีพรหม อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่กรุณาให้ความเอาใจใส่ ความช่วยเหลือ ความรู้ ข้อชี้แนะ คำปรึกษาในงานวิจัย และตรวจสอบแก้ไขข้อบกพร่องในปริญญาานิพนธ์ ตลอดจนจัดหาเครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆ สำหรับทำงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยตระหนักถึงความตั้งใจจริงและความทุ่มเทของอาจารย์ และขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง ณ ที่นี้ด้วย

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร. อีรพร สุธีวงศ์ และ ดร. อัจฉรินทร์ สมานมุลย์ กรรมการสอบหัวข้อและโครงสร้างปริญญาานิพนธ์ที่ให้คำแนะนำ และข้อชี้แนะในปริญญาานิพนธ์ จนทำให้ปริญญาานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลงได้

ขอขอบพระคุณ คณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความรู้ในวิชาต่างๆ เพื่อเป็นพื้นฐานความรู้ในการทำปริญญาานิพนธ์ ซึ่งเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการทำงานวิจัยให้สำเร็จลงได้

ขอขอบพระคุณ คุณพิสันต์ ผลโพธิ์ เจ้าหน้าที่สนับสนุนวิชาการ ที่คอยช่วยเหลือด้านการสร้างเครื่องปฏิกรณ์ไมโครเวฟ และให้ยืมเครื่องมือช่างต่างๆ เพื่อทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลงได้

ขอขอบคุณ คุณวงศกร สองเมืองแก่น ที่คอยให้คำแนะนำ คำปรึกษา ตลอดจนความช่วยเหลือในการทำงานวิจัยตลอดมา

ขอขอบพระคุณ บิดา มารดาและครอบครัวอันเป็นที่เคารพภักดี ซึ่งเป็นผู้มอบความรัก กำลังใจที่ดีและคอยสนับสนุนผู้วิจัยมาโดยตลอดจนทำให้มีวันนี้ได้ ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในพระคุณอย่างสูง

อนึ่ง ผู้วิจัยหวังว่าปริญญาานิพนธ์เล่มนี้จะมีประโยชน์อยู่ไม่น้อย จึงขอมอบส่วนดีทั้งหมดนี้ให้แก่ผู้มีพระคุณทุกท่าน สำหรับข้อบกพร่องต่างๆ ที่อาจจะเกิดขึ้นนั้น ผู้วิจัยขอน้อมรับผิดเพียงผู้เดียว และยินดีรับฟังคำแนะนำจากทุกท่านที่ได้เข้ามาศึกษา เพื่อเป็นประโยชน์ในการพัฒนางานวิจัยต่อไป

สิริราชย์ ชัดชุมแสง

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
Abstract.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป.....	VII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มา และความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	3
1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย.....	4
2.1 ปาล์มน้ำมัน (Oil palm).....	4
2.2 ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon).....	5
2.3 ไพโรไลซิส (Pyrolysis).....	6
2.4 คลื่นไมโครเวฟ.....	10
2.5 วัสดุไดอิเล็กตริก (Dielectric material).....	12
2.6 ผลงานการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมา.....	13
บทที่ 3 วิธีการศึกษาค้นคว้าและวิธีการทดลอง.....	15
3.1 การสร้างเครื่องปฏิกรณ์ไมโครเวฟ (Microwave reactor).....	15
3.2 การเตรียมตัวอย่าง.....	16
3.3 การทำปฏิกิริยาไพโรไลซิสร่วมกับไมโครเวฟ.....	16
3.4 การวิเคราะห์เลขไอโอดีน (Iodine number).....	16
บทที่ 4 ผลการทดลอง.....	18
4.1 การออกแบบและการสร้างเครื่องปฏิกรณ์ไมโครเวฟ.....	18
4.2 การศึกษาหาตัวดูดซึมคลื่นไมโครเวฟที่เหมาะสม.....	19
4.3 ศึกษาวิธีการออกแบบการทดลองและวิเคราะห์ข้อมูล.....	20
4.4 ศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อเปอร์เซ็นต์การเกิดถ่านชาร์.....	23
4.5 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมต่อเปอร์เซ็นต์การเกิดถ่านชาร์.....	27
4.6 วิเคราะห์เลขไอโอดีนของถ่านชาร์.....	28

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	29
5.1 สรุปผลการทดลอง	29
5.2 ข้อเสนอแนะ	30
เอกสารอ้างอิง.....	31
ภาคผนวก.....	33
4.1 ภาคผนวก ก.....	34
4.2 ภาคผนวก ข.....	41



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 ข้อดีและข้อเสียของกระบวนการเปลี่ยนองค์ประกอบทางเคมีโดยใช้พลังงานความร้อนและโดยวิธีชีวเคมี	6
ตารางที่ 2.2 ค่าการสูญเสียแทนเจนต์ ($\tan \delta$) ของสารต่างๆที่ความถี่ 2,450 MHz และ 20 °C	13
ตารางที่ 4.1 เปอร์เซ็นต์ของการเกิดถ่านชาร์ที่สภาวะต่างๆ.....	21
ตารางที่ 4.2 ค่าการทดสอบสมมติฐาน (P-value) ของตัวแปรต่างๆ.....	24
ตารางที่ 4.3 เปอร์เซ็นต์การเกิดถ่านชาร์ที่สภาวะเหมาะสม (จากการทดลอง).....	28
ตารางที่ 4.4 เลขไอโอดีนของถ่านชาร์ที่ได้จากสภาวะที่เหมาะสม.....	28
ตารางที่ ก.1 เปอร์เซ็นต์การเกิดถ่านชาร์ ณ สภาวะต่างๆ.....	38



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 ทะลายปาล์มเปล่า	4
รูปที่ 2.2 ถ่านชาร์	5
รูปที่ 4.1 เครื่องปฏิกรณ์ไมโครเวฟและองค์ประกอบที่เกี่ยวข้อง.....	18
รูปที่ 4.2 ผลของชนิดตัวดูดซึ่มคลื่นไมโครเวฟต่ออุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปในเครื่อง ปฏิกรณ์ภายในระยะเวลา 30 นาที (ปริมาณทะลายปาล์มเปล่า 2 กรัมต่อ ปริมาณตัวดูดซึ่ม 10 กรัม และกำลังวัตต์ไมโครเวฟ 450 วัตต์).....	19
รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความคลาดเคลื่อนของเปอร์เซ็นต์การเกิดถ่านชาร์ (ก) กราฟความ น่าจะเป็น (ข) กราฟแสดงความคลาดเคลื่อน (ค) แผนภูมิฮิสโตแกรม (ง) ความคลาดเคลื่อนกับลำดับการทดลอง	23
รูปที่ 4.4 ผลกระทบเชิงเส้นของกำลังวัตต์ของไมโครเวฟ เวลาและสัดส่วนโดยน้ำหนัก ของปริมาณทะลายปาล์มเปล่าต่อปริมาณกรดซัลฟิวริกเข้มข้นที่มีผลต่อ เปอร์เซ็นต์การเกิดถ่านชาร์ที่สภาวะเริ่มต้น	25
รูปที่ 4.5 ผลกระทบร่วมของ 2 ตัวแปรระหว่าง กำลังวัตต์-สัดส่วนโดยน้ำหนักของปริมาณ ทะลายปาล์มเปล่าต่อปริมาณกรดซัลฟิวริกเข้มข้น ที่มีผลต่อเปอร์เซ็นต์การเกิด ถ่านชาร์ที่เวลา 7.5 นาที	26
รูปที่ 4.6 ผลกระทบร่วมของ 2 ตัวแปรระหว่าง เวลา-สัดส่วนโดยน้ำหนักของปริมาณ ทะลายปาล์มเปล่าต่อปริมาณกรดซัลฟิวริกเข้มข้น ที่มีผลต่อเปอร์เซ็นต์การเกิด ถ่านชาร์ ที่กำลัง 450 วัตต์	26
รูปที่ 4.7 สภาวะที่เหมาะสมต่อเปอร์เซ็นต์การเกิดถ่านชาร์มากที่สุด (จากการทำนาย).....	27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

เกษตรกรรมการปลูกต้นปาล์มในปัจจุบัน สามารถใช้ประโยชน์จากต้นปาล์มได้ทั้งในส่วนของใบปาล์มและผลปาล์ม ในส่วนของผลปาล์มนั้นสามารถนำมาสกัดเพื่อให้ได้น้ำมันที่นำไปใช้ในการประกอบอาหารหรือนำมาสกัดเพื่อใช้เป็นส่วนผสมในการผลิตยารักษาโรคได้ และผลปาล์มบางชนิดยังสามารถนำมาสกัดเพื่อทำเป็นกะทิ น้ำตาล และแป้งได้อีกด้วย ในส่วนของใบปาล์มนั้นสามารถนำมาทำเป็นหลังคา เสาบ้านเรือน พื้น และฝาบ้าน แต่หลังจากที่ทั้งใบปาล์มและผลปาล์มถูกนำมาใช้แล้ว จะเกิดส่วนที่ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้อีกที่เรียกว่า “ทะลายปาล์มเปล่า (Empty palm bunch)” ซึ่งเราสามารถนำทะลายปาล์มเปล่านี้ออกไปขายให้กับเกษตรกรบางกลุ่มที่สามารถใช้ประโยชน์จากทะลายปาล์มเปล่าได้ แต่ราคาที่ยขายได้ค่อนข้างต่ำทำให้เกิดแนวความคิดที่จะเปลี่ยนรูปทะลายปาล์มเปล่าให้มีมูลค่ามากขึ้น

ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) ถือเป็นวัสดุที่ค่อนข้างมีราคาสูงเมื่อเทียบกับทะลายปาล์มเปล่า ซึ่งองค์ประกอบของถ่านกัมมันต์ประกอบด้วยคาร์บอนเป็นส่วนใหญ่ และมีลักษณะทางกายภาพที่ค่อนข้างเด่นชัดคือเป็นวัสดุที่มีพื้นที่ผิวภายในสูงเพราะประกอบด้วยรูพรุนเล็กๆ (Microporosity) เป็นจำนวนมาก ด้วยลักษณะทางกายภาพเช่นนี้ทำให้ส่วนใหญ่จะใช้ถ่านกัมมันต์เป็นตัวดูดซับสารพิษ เช่น โลหะหนัก ไฮโดรคาร์บอนที่มีหมู่คลอรีน (Chlorinated hydrocarbons) และออกซิแอนไอออน (Oxyanion) เพื่อทำให้ระบบที่ศึกษามีความเป็นพิษลดลง อีกทั้งถ่านกัมมันต์ประกอบไปด้วยปริมาณคาร์บอนที่สูงทำให้สามารถใช้เป็นวัตถุดิบในการฟื้นฟูหรือปรับสภาพดินให้ดียิ่งขึ้น เช่น เพิ่มการกักเก็บของน้ำและสารอาหาร เพิ่มการสะสมของปริมาณคาร์บอนพร้อมกับให้พลังงานออกมาและเพิ่มปริมาณผลผลิตของพืชผลชนิดนั้นอีกด้วย [1]

กรรมวิธีในการผลิตถ่านกัมมันต์มักทำผ่านกระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis) คือ กระบวนการเปลี่ยนองค์ประกอบทางเคมีโดยใช้พลังงานความร้อนในการแยกสลายองค์ประกอบของสารอินทรีย์ต่างๆในชีวมวลอย่างรวดเร็วในสภาวะที่ปราศจากออกซิเจน ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ออกมาเป็นของแข็ง (Solid bio-char) ของเหลว (Liquid bio-oil) และแก๊สที่ไม่กลั่นตัว (Non-condensable gas) ซึ่งอาศัยความร้อนจากแหล่งความร้อนทั่วไป (Conventional Heating) เช่น เตาเผา เป็นต้น วิธีกระบวนการไพโรไลซิสที่อาศัยความร้อนจากแหล่งความร้อนทั่วไปนี้มีประโยชน์มากเมื่อเทียบกับวิธีอื่นๆที่ใช้ในการแปลงชีวมวลให้เป็นพลังงาน ไม่ว่าจะเป็นการลดปริมาณของแข็งที่ตกค้าง ค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมันและแก๊สมีค่าสูง และอุณหภูมิในกระบวนการมีค่าต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการเผา (Incineration) ทำให้มีความปลอดภัยในการดำเนินการมากกว่า อีกทั้งยังมี

มลพิษทางอากาศที่ค่อนข้างจำกัดซึ่งเป็นผลจากปริมาณของออกซิเจนในการทำปฏิกิริยามีค่าต่ำกว่าวิธีอื่นๆที่ใช้ในการแปลงชีวมวลให้เป็นพลังงาน [2]

โดยทั่วไปความร้อนที่ใช้ในกระบวนการไพโรไลซิสแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบคือโดยตรง (Direct heating) จากแหล่งกำเนิดพลังงานความร้อน และทางอ้อม (Indirect heating) จากแก๊สร้อน ของแข็งร้อน ตัวกลางการถ่ายโอนความร้อน และจากปฏิกิริยาเคมี เช่น ปฏิกิริยาออกซิเดชัน เป็นต้น การใช้ไมโครเวฟมาช่วยให้ความร้อนในกระบวนการไพโรไลซิส (Microwave assisted pyrolysis) เป็นการให้ความร้อนจากแหล่งความร้อนโดยตรงและได้รับการยืนยันแล้วว่าเป็นวิธีทางเลือกที่เหมาะสมกว่าวิธีการให้ความร้อนทั่วไป (Conventional pyrolysis) เนื่องจากมีอัตราการให้ความร้อนที่เร็ว มีการให้ความร้อนเฉพาะตัววัสดุ และสามารถให้ความร้อนในปริมาณที่เท่ากันตลอดทั้งปริมาตรของวัสดุนั้น ทำให้ถ่านกัมมันต์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสมีพื้นที่ผิวภายในและปริมาตรของรูพรุนที่สูงกว่าการให้ความร้อนแบบทั่วไป และลักษณะของรูพรุนที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะที่เหมือนกันและค่อนข้างสะอาดทั่วปริมาตรของวัสดุนั้น [1]

นักวิจัยศึกษาค้นคว้าเกี่ยวกับผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการนำชีวมวลต่างๆมาผ่านกระบวนการไพโรไลซิสร่วมกับไมโครเวฟ และศึกษาในเรื่องของปัจจัยที่มีผลต่อผลิตภัณฑ์ต่างๆ พบว่า การศึกษาผลของอุณหภูมิและเวลาในกระบวนการไพโรไลซิสของทะเลาะปาล์มเบลาและหาสภาวะที่เหมาะสมในการดำเนินการ (Kiky C sembirning และคณะ, 2015) ซึ่งเมื่ออุณหภูมิและเวลาของกระบวนการไพโรไลซิสเพิ่มขึ้น (400-500 °C) ทำให้ผลิตภัณฑ์ในส่วนของเหลวหรือน้ำมันเพิ่มขึ้น ในขณะที่ทั้งผลิตภัณฑ์ในส่วนของแข็ง(ถ่าน) และผลิตภัณฑ์ในส่วนของแก๊สมีค่าลดลง แต่เมื่ออุณหภูมิและเวลาของกระบวนการเพิ่มไปถึงค่าหนึ่ง (600 °C) ผลิตภัณฑ์ในส่วนของเหลวและของแข็งมีค่าลดลง ในขณะที่ผลิตภัณฑ์ในส่วนของแก๊สมีค่าเพิ่มขึ้น และค่าสภาวะที่เหมาะสมก็คือที่อุณหภูมิ 500 °C เพราะทำให้ปริมาณของผลิตภัณฑ์ในส่วนของเหลวหรือน้ำมันมากที่สุด (27%) ต่อมาการศึกษาผลของปริมาณของตัวดูดซึมคลื่นไมโครเวฟ (Microwave absorber) ต่อกระบวนการไพโรไลซิสร่วมกับไมโครเวฟ (Farid Nasir Ani และคณะ, 2010) ตัวดูดซึมคลื่นไมโครเวฟที่ใช้คือถ่านที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสของเปลือกปาล์ม และสัดส่วนของปริมาณชีวมวลต่อปริมาณตัวดูดซึมคลื่นไมโครเวฟที่ศึกษาคือ 1:0.25 1:0.5 และ 1:1 ซึ่งพบว่าที่ปริมาณตัวดูดซึมคลื่นไมโครเวฟมากขึ้นจะทำให้อุณหภูมิของกระบวนการไพโรไลซิสมีค่าสูงขึ้นหรือกล่าวได้ว่ากำลังในหน่วยวัตต์ของไมโครเวฟที่ใช้มีค่าลดลง ทำให้ประหยัดค่าใช้จ่ายในด้านของพลังงาน

สำหรับงานวิจัยนี้จะทำการออกแบบและสร้างเครื่องปฏิกรณ์ไมโครเวฟ เพื่อนำไปใช้เป็นแหล่งพลังงานความร้อนให้แก่กระบวนการเปลี่ยนองค์ประกอบทางเคมี ซึ่งใช้กระบวนการไพโรไลซิสมาช่วยในการทำให้ทะเลาะปาล์มเบลาเปลี่ยนรูปเป็นถ่านชาร์ สนใจที่จะศึกษาในเรื่องของสภาวะที่เหมาะสมที่ทำให้เกิดถ่านชาร์ในปริมาณที่มากที่สุดและปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตถ่านชาร์อีกด้วย

1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 ศึกษาสถานะที่เหมาะสมในการผลิตถ่านชาร์ด้วยกระบวนการไพโรไลซิสร่วมกับไมโครเวฟ
- 1.2.2 ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตถ่านชาร์ด้วยกระบวนการไพโรไลซิสร่วมกับไมโครเวฟ

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

- 1.3.1 ศึกษาสถานะที่เหมาะสมในการผลิตถ่านชาร์ด้วยกระบวนการไพโรไลซิสร่วมกับไมโครเวฟ
 - 1.3.1.1 ทำการสร้างเครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสด้วยไมโครเวฟ
 - 1.3.1.2 หาสถานะที่เหมาะสมสำหรับการผลิตถ่านชาร์ในกระบวนการไพโรไลซิสร่วมกับไมโครเวฟ
- 1.3.2 ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตถ่านชาร์ด้วยกระบวนการไพโรไลซิสร่วมกับไมโครเวฟ
 - 1.3.2.1 กำลังวัตต์ของไมโครเวฟ (300-600 วัตต์)
 - 1.3.2.2 เวลา (5-10 นาที)
 - 1.3.2.3 สัดส่วนโดยน้ำหนักของปริมาณทะเลลายปาล์มเปล่าต่อปริมาณตัวดูดซิมคลิ่นไมโครเวฟ (1:2.5 1:3 และ 1:3.5)

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ

- 1.4.1 สามารถกำหนดสถานะที่เหมาะสมในกระบวนการไพโรไลซิสร่วมกับไมโครเวฟเพื่อให้ได้ปริมาณของถ่านชาร์มีค่าสูงที่สุด
- 1.4.2 สามารถดัดแปลงไมโครเวฟเพื่อใช้ในกระบวนการไพโรไลซิสได้
- 1.4.3 สามารถวิจัยต่อยอดเพื่อนำไปประยุกต์ใช้กับชีวมวลชนิดอื่นๆได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

สำหรับเนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานของปาล์มน้ำมัน ถ่านกัมมันต์ กระบวนการไฟโรไลซิส คลื่นไมโครเวฟ และการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมา รวมถึงหลักการต่างๆที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการไฟโรไลซิสร่วมกับไมโครเวฟของทะเลาะปาล์มเปล่า ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.1 ปาล์มน้ำมัน (Oil palm)

ปาล์มน้ำมันเป็นพืชตระกูลปาล์มที่มีลักษณะลำต้นเดี่ยวและเป็นพืชเศรษฐกิจที่ให้ผลผลิตน้ำมันต่อหน่วยพื้นที่สูงกว่าพืชน้ำมันทุกชนิด มีลักษณะของผลเป็นทะลายนึ่งซึ่งผลจะเกาะติดกันแน่นจนไม่สามารถสอดนิ้วมือเข้าไปที่ก้านของผลได้ เวลาเก็บเกี่ยวผลผลิตนั้นเกษตรกรมักใช้มีดงอเกี่ยวที่โคนของทะลายนึ่งแล้วดึงให้ขาด จากนั้นต้องตัดทางปาล์ม(ใบปาล์ม)ก่อนเพราะผลปาล์มจะตั้งอยู่บนทางปาล์ม ซึ่งวิธีที่ใช้ในการตัดทางปาล์มและตัดเอาทะลายนึ่งปาล์มลงถูกเรียกว่า “แทงปาล์ม”

การใช้ประโยชน์ของปาล์มน้ำมันนั้นมีด้วยกันหลากหลายรูปแบบ ไม่ว่าจะเป็นการนำมาแปรรูปเพื่อทำเป็นน้ำมันพืชที่ใช้ในการประกอบอาหาร การนำไปใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมอาหารต่างๆ เช่น ขนมขบเคี้ยว บะหมี่กึ่งสำเร็จรูป นมข้นหวาน ครีมและเนยเทียม การนำไปใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตพลังงานทดแทน (ไบโอดีเซล) เพื่อเพิ่มความมั่นคงทางด้านพลังงานให้กับประเทศและยังช่วยลดปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อมอีกด้วย ส่วนใบของปาล์มสามารถนำมาบดเพื่อใช้เป็นอาหารสัตว์ และกะลาปาล์มเป็นวัตถุดิบเชื้อเพลิง ซึ่งหลังจากทุกส่วนของทะลายนึ่งปาล์มถูกนำมารีดเอาน้ำมันปาล์มออกแล้วจะถูกเรียกว่า “ทะเลาะปาล์มเปล่า (Empty palm bunch)”



รูปที่ 2.1 ทะลายนึ่งปาล์มเปล่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon)

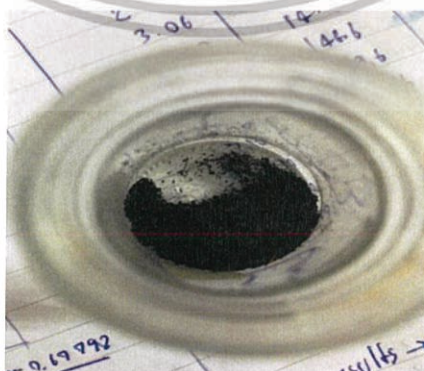
ถ่านกัมมันต์เป็นถ่านที่อยู่ในรูปคาร์บอนอสัณฐาน (Amorphous carbon) ชนิดหนึ่ง แต่ถูกผลิตขึ้นมาเป็นพิเศษโดยกระบวนการก่อกัมมันต์ (Activation process) ซึ่งทำให้พื้นที่ผิวภายใน (Internal surface area) เพิ่มขึ้นอันเนื่องมาจากโครงสร้างที่เป็นรูพรุนจำนวนมาก ถ่านกัมมันต์มีความสามารถในการดูดซับสูง อันเนื่องมาจากมีพื้นที่ผิวมาก มีความจุในการดูดซับสูง ผิวโครงสร้างเป็นแบบรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมาก (Microporous structure) และมีความว่องไวในการดูดซับสูงด้วย เมื่อถ่านกัมมันต์ดูดซับสารเคมีเหล่านี้จนถึงจุดอิ่มตัวแล้วสามารถใช้ความร้อนเพื่อทำให้ถ่านกัมมันต์สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้อีกครั้ง

โดยทั่วไปการผลิตถ่านกัมมันต์ประกอบด้วยขั้นตอนสำคัญ 3 ขั้นตอนคือ เตรียมวัตถุดิบ การทำให้เป็นถ่านหรือคาร์บอนไนซ์เซชัน (Carbonization) และการกระตุ้น (Activation) โดยในขั้นตอนของการเตรียมวัตถุดิบสามารถเตรียมวัตถุดิบจากวัตถุดิบที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ และวัตถุดิบที่ใช้ผลิตจะขึ้นอยู่กับกระบวนการผลิต อาจเป็นอินทรีย์วัตถุหรือถ่านก็ได้ ซึ่งอินทรีย์วัตถุที่ใช้เป็นวัตถุดิบแบ่งได้ดังนี้

- สารเซลลูโลสที่มาจากพืช เช่น ทะลายปาล์มเปล้า กะลามะพร้าว กะลาปาล์ม ชี้เลื่อย ขาน อ้อย ชังข้าวโพด เป็นต้น
- ถ่านหิน เช่น ลิกไนต์ (Lignite) พีท (Peat) บิทูมินัส (Bituminous) เป็นต้น
- วัตถุดิบจากสัตว์ เช่น เลือด กระดุก เป็นต้น

สำหรับถ่านที่ใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์โดยทั่วไปจะเป็นถ่านสังเคราะห์ (Artificial char) ซึ่งเป็นถ่านที่ได้จากการเผาอินทรีย์วัตถุธรรมชาติ เช่น กราไฟต์ แอนทราไซต์

ในขั้นตอนการทำให้เป็นถ่านหรือคาร์บอนไนซ์เซชันคือกระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis) รูปแบบหนึ่งที่จะทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ในรูปของถ่านชาร์ (Biochar) ที่เป็นของแข็งมากกว่าน้ำมันทาร์ (Tar) และแก๊ส อาจกล่าวได้ว่าขั้นตอนคาร์บอนไนซ์เซชันเป็นการเพิ่มปริมาณคาร์บอนให้สูงขึ้น ทำได้ง่าย โดยการเผาในที่ปราศจากออกซิเจนที่อุณหภูมิ 200-500 องศาเซลเซียส



รูปที่ 2.2 ถ่านชาร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับขั้นตอนการกระตุ้นก็แบ่งออกเป็น 2 วิธีคือ การกระตุ้นทางฟิสิกส์ (Physical activation) โดยใช้ไอน้ำหรือก๊าซที่อุณหภูมิสูงออกซิไดซ์ มักเป็นพวกที่มีรูพรุนขนาดเล็ก และการกระตุ้นทางเคมี (Chemical activation) โดยจะใช้สารเคมีทำปฏิกิริยาเคมีกับผิวคาร์บอน มักเป็นพวกที่มีรูพรุนขนาดใหญ่ และส่วนมากจะใช้กรดในการกระตุ้น ซึ่งการกระตุ้นด้วยสารเคมีมีข้อดีคือ ใช้เวลาในการกระตุ้นสั้นกว่า ใช้อุณหภูมิในการกระตุ้นต่ำกว่าทำให้ประหยัดเชื้อเพลิง ได้ปริมาณถ่านกัมมันต์มาก และสารเคมีนั้นสามารถแทรกซึมลงไปยังผิวถ่านได้อย่างทั่วถึงทำให้เกิดรูพรุนในถ่านกัมมันต์มาก แต่ก็มีข้อเสียในเรื่องของการล้างเอาสารเคมีออกนั้นทำได้ยากและสารเคมีที่ใช้มีราคาที่สูงกว่าแพงอีกด้วย [4]

2.3 ไพโรไลซิส (Pyrolysis)

2.3.1 เทคโนโลยีการแปลงชีวมวลให้เป็นพลังงาน

เทคโนโลยีการแปลงชีวมวลให้เป็นพลังงานสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือกระบวนการเปลี่ยนองค์ประกอบทางเคมีโดยวิธีชีวเคมี (Biochemical conversion) ซึ่งจะเปลี่ยนชีวมวลโดยใช้จุลินทรีย์และเอนไซม์ในการทำให้ชีวมวลที่มีรูปร่างซับซ้อนมีขนาดเล็กลงและสร้างเชื้อเพลิงออกมา ตัวอย่างเช่น การหมัก การย่อยแบบไม่ใช้ออกซิเจน เป็นต้น กระบวนการเหล่านี้มักดำเนินการที่อุณหภูมิต่ำ ทำให้การดำเนินไปของปฏิกิริยาค่อนข้างช้าและจะดำเนินการแบบแบตช์ได้เท่านั้น สำหรับกระบวนการเปลี่ยนองค์ประกอบทางเคมีโดยใช้พลังงานความร้อน (Thermochemical conversion) เป็นเทคโนโลยีที่มีความสำคัญทางด้านเศรษฐกิจและด้านสิ่งแวดล้อมเป็นอย่างมากสำหรับการทำให้ชีวมวลมีมูลค่าทางเศรษฐกิจที่เพิ่มขึ้นโดยการเปลี่ยนชีวมวลให้อยู่ในรูปของวัตถุดิบ เชื้อเพลิง และสารเคมีที่มีมูลค่าและมีประโยชน์มากขึ้น ซึ่งเทคโนโลยีนี้สามารถดำเนินการแบบต่อเนื่องได้ โดยที่อุณหภูมิของการดำเนินการมีค่าสูงกว่าและอัตราของการเกิดปฏิกิริยามีค่าสูงกว่ากระบวนการเปลี่ยนองค์ประกอบทางเคมีโดยวิธีชีวเคมี อีกทั้งยังสามารถเปลี่ยนองค์ประกอบอินทรีย์ของชีวมวลทั้งหมดให้กลายเป็นสารเคมีและเชื้อเพลิงที่มีประสิทธิภาพได้ แต่อย่างไรก็ตาม กระบวนการนี้ดำเนินการที่อุณหภูมิสูง ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นมีองค์ประกอบที่ซับซ้อนและไม่สามารถควบคุมคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ได้

ตารางที่ 2.1 ข้อดีและข้อเสียของกระบวนการเปลี่ยนองค์ประกอบทางเคมีโดยใช้พลังงานความร้อนและโดยวิธีชีวเคมี

	กระบวนการเปลี่ยนองค์ประกอบทางเคมีโดยใช้พลังงานความร้อน	กระบวนการเปลี่ยนองค์ประกอบทางเคมีโดยวิธีชีวเคมี
ข้อดี	-กระบวนการดำเนินไปอย่างรวดเร็ว -เหมาะสำหรับความต้องการผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิง	-สถานะในการทำปฏิกิริยาไม่รุนแรง -มีความเฉพาะเจาะจงในการเกิดผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	กระบวนการเปลี่ยนองค์ประกอบทางเคมีโดยใช้พลังงานความร้อน	กระบวนการเปลี่ยนองค์ประกอบทางเคมีโดยวิธีชีวเคมี
		-กระบวนการที่ใช้เอนไซม์สามารถปรับขนาดได้
ข้อเสีย	-ใช้พลังงานมาก -ข้อจำกัดในเรื่องของตัวเร่ง (ต้องแข็งแรงเพียงพอที่จะต้านสภาวะการให้ความร้อนที่รุนแรงของระบบ) -ใช้ในการสังเคราะห์สารเคมีบางครั้ง -ต้องการวัตถุดิบเริ่มต้นที่ค่อนข้างแห้ง (ความชื้นอากาศ < 10%)	-กระบวนการดำเนินไปค่อนข้างช้า -เอนไซม์และวัตถุดิบเริ่มต้นที่ใช้ต้องมีความบริสุทธิ์ที่สูง (แพง) -สภาวะการดำเนินการที่ไม่กว้างขวาง -เกิดปริมาณน้ำเสียมากระหว่างการทำให้ผลิตภัณฑ์บริสุทธิ์ -มักดำเนินการแบบแบตช์

โดยปกติแล้วกระบวนการเปลี่ยนองค์ประกอบทางเคมีโดยใช้พลังงานความร้อนสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภทคือ

2.3.1.1 การเผาไหม้ (Incineration)

เป็นกระบวนการที่ถูกนำมาใช้ทั่วไปเพื่อที่จะได้รับค่าพลังงานของชีวมวลกลับมา ซึ่งเทคนิคนี้มีการใช้มาเป็นระยะเวลาอันยาวนานและกว้างขวางเป็นอย่างมาก ไม่ว่าจะเป็นในงานขนาดเล็ก ขนาดกลาง และขนาดใหญ่ เทคนิคนี้มักจะทำให้สภาวะของการมีปริมาณออกซิเจนที่มากเกินไป ทำให้เกิดการปฏิกิริยาออกซิเดชันแบบสมบูรณ์ของชีวมวลเพื่อสร้างเป็นพลังงานในรูปแบบของไฟฟ้าและความร้อนขึ้น และยังเกิดคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ เถ้า และผลิตภัณฑ์อื่นๆ บางตัว (เช่น โลหะ ไฮโดรคาร์บอนเล็กน้อย และแก๊สที่เป็นกรด) อย่างไรก็ตามจะมีเฉพาะพลังงานของชีวมวลเท่านั้นที่สามารถเอากลับคืนมาผ่านการเผาไหม้ได้ และข้อเสียของวิธีนี้คือ มีการปลดปล่อยฝุ่น (Particulate matters) ในระดับที่ค่อนข้างสูง ซึ่งสารนี้จะเป็นตัวบ่งชี้สำคัญถึงปัญหาทางด้านมลภาวะทางอากาศ ยิ่งไปกว่านั้นทั่วโลกยังตระหนักในเรื่องของการปลดปล่อยแก๊สเรือนกระจก และมลพิษทางด้านสิ่งแวดล้อมที่มีความเกี่ยวข้องกับการปลดปล่อยสารพิษ เช่น สารประกอบอินทรีย์ระเหย สารประกอบของไนโตรเจนและซัลเฟอร์ ทำให้เทคนิคนี้ไม่สามารถนำมาใช้ได้ในปัจจุบัน

2.3.1.2 การแปรสภาพเป็นแก๊ส (Gasification)

เป็นกระบวนการพิเศษที่แปลงวัสดุคาร์บอนพื้นฐาน (Carbon-based materials) ทั้งในรูปของแข็งและของเหลว อาทิเช่น ขยะชุมชน หรือชีวมวล ให้อยู่ในรูปของก๊าซโดยการให้ความร้อนระดับหนึ่งแต่ไม่ถึงระดับการเผา (อุณหภูมิสูงกว่า 800 °C) และจำกัดปริมาณออกซิเจนหรืออากาศ โดยความร้อนระดับนี้จะทำให้โมเลกุลเกิดการแตกตัวเป็นซินแก๊ส (Synthesis gas) เช่น คาร์บอนมอนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ มีเทน ไฮโดรเจน เถ้า และน้ำมันหาร์ท ซึ่งซินแก๊สนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นพลังงานที่สะอาดและสามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงโดยตรงในการผลิตพลังงานความร้อนและพลังงานไฟฟ้าได้ ผลิตภัณฑ์ในรูปแก๊สสามารถเปลี่ยนให้อยู่ในรูปเชื้อเพลิงเหลวและสารเคมีได้ (เช่น แอลกอฮอล์ กรดอินทรีย์ และแอมโมเนีย) ด้วยการผ่านกระบวนการของ Fischer-Tropsch ซึ่งในปีที่ผ่านมามีความสนใจในการใช้ประโยชน์จากเทคโนโลยีนี้มากขึ้นทำให้เทคโนโลยีนี้เกิดการเปลี่ยนแปลงจากการผลิตพลังงานความร้อนและพลังงานไฟฟ้ากลายเป็นการผลิตผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่าตัวอื่นๆแทน เช่น สารเคมี เชื้อเพลิงเหลวที่ใช้ในการขนส่ง เป็นต้น สำหรับข้อเสียของเทคนิคนี้คือมีการใช้เงินในการลงทุนและการดำเนินการมากในโรงงานขนาดใหญ่ที่ต้องการนำเทคนิคนี้ไปใช้ ทำให้วิธีการนี้ยังไม่สามารถใช้ได้อย่างครอบคลุมทุกขนาดของโรงงาน

2.3.1.3 กระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis)

เป็นกระบวนการทางเคมีความร้อนที่มีแนวโน้มจะสามารถใช้ในการเปลี่ยนรูปของชีวมวล พลาสติก รวมถึงยางที่ใช้แล้วให้เป็นเชื้อเพลิงที่มีค่าทางความร้อนสูงขึ้น ได้แก่ ถ่าน (Charcoal) น้ำมัน (Bio-oil) และ แก๊สไม่กลั่นตัว (Non-condensable gas) ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นเหล่านี้มักเกิดผ่านการแตกตัวด้วยความร้อนของชีวมวลในสถานะที่ปราศจากออกซิเจน โดยการให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูง ซึ่งกระบวนการไพโรไลซิสนี้จะมีศักยภาพในการที่จะได้รับทั้งพลังงานและมูลค่าทางเคมีของวัตถุดิบตั้งต้นที่ใช้ กระบวนการไพโรไลซิสนี้ค่อนข้างจะใช้ในอย่างกว้างขวางเพราะว่าสามารถใช้ได้กับทุกองค์ประกอบและยังทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ที่ต้องการออกมาสูงสุดเพียงแค่ปรับสภาวะในการดำเนินการเท่านั้น เช่น อัตราการให้ความร้อน อุณหภูมิของกระบวนการ และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา [5]

2.3.2 ประเภทของกระบวนการไพโรไลซิส

ตามสภาวะการดำเนินการของกระบวนการไพโรไลซิสนั้นสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ กระบวนการไพโรไลซิสแบบช้า (Slow pyrolysis) และกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็ว (Fast pyrolysis / Flash pyrolysis)

2.3.2.1 กระบวนการไพโรไลซิสแบบช้า

กระบวนการไพโรไลซิสแบบช้าเป็นกระบวนการที่มีการทำปฏิกิริยาในอุณหภูมিরะหว่าง 400-600 องศาเซลเซียส มีอัตราการให้ความร้อนต่ำ (น้อยกว่า 10 องศาเซลเซียส ต่อ นาที) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของวัตถุดิบที่ใช้ในการทำปฏิกิริยามีขนาดใหญ่กว่า 2 มิลลิเมตร ผลิตภัณฑ์จากการไพโรไลซิสแบบช้ามีส่วนเป็นของเหลว 30-50 เปอร์เซ็นต์ และถ่าน 25-35 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งไพโรไลซิสแบบช้ายังสามารถแบ่งออกเป็น 2 กระบวนการย่อยคือ คาร์บอนไนเซชันไพโรไลซิส (Carbonization pyrolysis) และไพโรไลซิสแบบดั้งเดิม (Conventional pyrolysis) โดยที่ คาร์บอนไนเซชันไพโรไลซิสเป็นกระบวนการที่ให้ความร้อนในระยะเวลาอันยาวนาน โดยใช้เวลาประมาณหนึ่งวัน ได้ผลิตภัณฑ์เป็นถ่านสำหรับใช้เป็นเชื้อเพลิงในการทำอาหาร ส่วนผลิตภัณฑ์ในสถานะแก๊สจะถูกปลดปล่อยออกสู่บรรยากาศ กระบวนการไพโรไลซิสแบบดั้งเดิมเป็นกระบวนการที่ใช้เวลาให้ความร้อนน้อยกว่าคือ 15-30 นาที ได้ผลิตภัณฑ์ครบทั้งสามสถานะคือ ถ่าน น้ำมัน และแก๊สไม่กลั่นตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องมาจากกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้าได้ผลิตภัณฑ์ในส่วนของน้ำมันในปริมาณน้อย ดังนั้นน้ำมันส่วนใหญ่จึงถูกใช้เป็นเชื้อเพลิงในกระบวนการเผาไหม้ อย่างไรก็ตามเราสามารถแยกสารเคมีบางชนิดออกจากส่วนมีขี้หรือส่วนที่ละลายน้ำของน้ำมันได้ โดยสารเคมีที่สามารถสกัดได้จากน้ำมันในส่วนนี้ได้แก่ อะซิโตน คีโตน เมทานอล กรดฟอร์มิก และกรดอะซิติก เป็นต้น

2.3.2.2 กระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็ว

เป็นกระบวนการที่ได้น้ำมันเป็นผลิตภัณฑ์หลัก โดยทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิปานกลาง 400 - 650 องศาเซลเซียส มีอัตราการให้ความร้อนสูง (มากกว่า 1,000 องศาเซลเซียสต่อวินาที) เส้นผ่านศูนย์กลางของวัตถุดิบมีขนาดต่ำกว่า 2 มิลลิเมตร มีระยะเวลาของไอที่อยู่ในเครื่องปฏิกรณ์สั้นมาก (น้อยกว่า 2 วินาที) เมื่อใช้วัตถุดิบประเภทชีวมวลจะได้สัดส่วนของผลิตภัณฑ์ในสถานะของเหลว เรียกว่า น้ำมันชีวภาพ ประมาณ 60-75 เปอร์เซ็นต์ ของแข็ง 15-25 เปอร์เซ็นต์ และ ก๊าซไม่กลั่นตัว 10-15 เปอร์เซ็นต์ และมีองค์ประกอบของน้ำในน้ำมันชีวภาพ 10-30 เปอร์เซ็นต์ ขึ้นอยู่กับปริมาณความชื้นที่มีในชีวมวลเริ่มต้น นอกจากนี้ น้ำมันชีวภาพยังประกอบด้วยสารประกอบอื่นๆ ซึ่งเป็นสารเคมีที่ได้จากการสลายตัวทางความร้อนและการทำปฏิกิริยา ของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินในชีวมวล องค์ประกอบของสารเคมีส่วนใหญ่ในน้ำมันชีวภาพจากวัตถุดิบประเภทชีวมวลเป็นสารประกอบอินทรีย์ ดังนั้นน้ำมันชีวภาพที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วจึงสามารถปรับปรุงคุณภาพเป็นเชื้อเพลิงและสารเคมีได้หลายประเภท โดยสารประกอบที่พบในน้ำมันชีวภาพมีมากกว่า 3,000 ชนิด

สิ่งที่สำคัญที่สุดของกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็ว คือ การออกแบบเครื่องปฏิกรณ์ให้มีอัตราการถ่ายโอนความร้อนสูง และ ออกแบบให้ไอกลั่นตัวเป็นของเหลวโดยเร็วที่สุด เพื่อให้ได้ปริมาณน้ำมัน 70-80 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้ยังต้องออกแบบให้มีการกำจัดถ่านและเถ้าออกจากผลิตภัณฑ์ให้มากที่สุด เพื่อได้ผลิตภัณฑ์ที่สะอาด ไม่มีเถ้าเฝื่อนซึ่งเป็นอุปสรรคต่อการนำไปใช้ประโยชน์ กระบวนการผลิตน้ำมันจากกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วประกอบด้วยหน่วยต่างๆ ได้แก่ หน่วยลดความชื้นและย่อยขนาดชีวมวล (Biomass drying and grinding) หน่วยทำปฏิกิริยา (Fast pyrolysis reactor) หน่วยกำจัดถ่านและเถ้า (Char removal) หน่วยควบแน่นและเก็บผลิตภัณฑ์น้ำมัน (Product collection)

2.3.3 ผลิตภัณฑ์และการนำไปใช้ประโยชน์

ผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากกระบวนการไพโรไลซิส ได้แก่ ถ่าน น้ำมัน และแก๊สไม่กลั่นตัว สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลากหลาย ผลิตภัณฑ์ในส่วนของน้ำมันสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลายรูปแบบ เนื่องจากอยู่ในสถานะของเหลวที่มีข้อดีในด้านการจัดเก็บ และการขนส่ง

2.3.3.1 ถ่าน

ถ่านมักถูกใช้เป็นเชื้อเพลิงในกระบวนการเผาไหม้สำหรับผลิตความร้อน ไอน้ำ และไฟฟ้า ถ่านที่ผลิตได้จากกระบวนการไพโรไลซิส จะถูกใช้เป็นเชื้อเพลิงให้กับเครื่องปฏิกรณ์ภายในกระบวนการ โดยค่าความร้อนของถ่านมีค่า 15-30 เมกะจูลต่อกิโลกรัม เถ้าที่เกิดจากการเผา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไหม้ถ่านสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้เช่นกัน โดยนำไปใช้ในกระบวนการผลิตซีเมนต์ นอกจากนี้ถ่านยังมีคุณสมบัติที่ดีเกี่ยวกับการปรับปรุงคุณสมบัติของดิน ดังนั้นจึงมีความพยายามในการพัฒนาถ่านจากกระบวนการไพโรไลซิสเพื่อใช้เป็นสารปรับปรุงดินสำหรับเกษตรกร

2.3.3.2 น้ำมัน

น้ำมันจากกระบวนการไพโรไลซิสมีคุณสมบัติที่สำคัญหลายประการ มีความหนาแน่น 12 กิโลกรัมต่อลิตร มีความหนืดสูง มีความเป็นกรดทำให้น้ำมันมีคุณสมบัติกัดกร่อน อุดมทฤษฎีจุดติดไฟสูง มีค่าความร้อน 15-18 เมกะจูลต่อกิโลกรัม มีคุณสมบัติไม่รวมเป็นเนื้อเดียวกันกับน้ำมันจากปิโตรเลียม นอกจากนี้หากเติมน้ำลงไปทำให้น้ำมันจะแยกออกเป็นสองส่วนคือ ส่วนที่ละลายน้ำ (Aqueous phase) และส่วนที่ไม่ละลายน้ำหรือละลายในสารอินทรีย์ (Organic phase) น้ำมันสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลากหลาย วิธีการที่ง่ายที่สุดคือ ใช้เป็นเชื้อเพลิง ในหม้อต้มไอน้ำ (Boiler) หรือกังหันแก๊ส (Gas turbine) สำหรับเผาไหม้เพื่อผลิตความร้อนและไฟฟ้า นอกจากนี้ยังสามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงให้กับเครื่องยนต์

นอกจากนี้ น้ำมันจากกระบวนการไพโรไลซิสสามารถนำไปผลิตสารเคมีต่างๆ โดยผ่านกระบวนการแยก เช่น กลีโกลเซียมเพื่อใช้ดักจับซัลเฟอร์ออกไซด์ (SO_x) ปุ๋ยจากการทำปฏิกิริยาระหว่าง คาร์บอนิลกับแอมโมเนีย ผลิตแอลดีไฮด์ เรซินและพลาสติก รวมถึง เมทานอล กรดอะซิติก และอะซิโตน

2.3.3.3 แก๊สไม่กลั่นตัว

แก๊สส่วนใหญ่จากกระบวนการไพโรไลซิส ประกอบด้วย CH₄ CO₂ CO และ H₂ โดยทั่วไปจะนำกลับมาเผาไหม้ เพื่อให้ความร้อนภายในกระบวนการหรือส่งไปยังกระบวนการอื่นเพื่อผลิตความร้อนและไฟฟ้า [6]

2.4 คลื่นไมโครเวฟ

คลื่นไมโครเวฟคือรูปแบบหนึ่งของการแผ่รังสีของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นสูงสุดที่ 1 เมตรและต่ำสุดที่ 1 มิลลิเมตรด้วยความถี่ระหว่าง 0.3-300 GHz ภายในคลื่นช่วงนี้ถูกจัดสรรให้สำหรับโทรศัพท์ เรดาร์ และการสื่อสารผ่านดาวเทียม ความยาวคลื่นเหล่านี้จะถูกควบคุมโดยทางอุตสาหกรรม วิทยาศาสตร์ และอุปกรณ์ทางการแพทย์เพื่อที่จะหลีกเลี่ยงสัญญาณรบกวนอื่นๆ สำหรับในอุตสาหกรรมของกระบวนการที่ใช้ไมโครเวฟของวัตถุดิบหลากหลายประเภทนั้น คลื่นความถี่ที่สามารถใช้ได้คือ 0.915 GHz, 2.45 GHz, 5.8 GHz และ 24.124 GHz สำหรับเตาไมโครเวฟที่ใช้ในครัวเรือนทั่วไปคือ 2.45 GHz และที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมคือ 0.915 GHz ซึ่งสอดคล้องกับความยาวคลื่น 12 และ 33 เซนติเมตร ซึ่งให้ประสิทธิภาพที่สูง แต่ความสามารถในการทะลวงต่ำ

2.4.1 คุณสมบัติของคลื่นไมโครเวฟ

2.4.1.1 การสะท้อนกลับ (Reflection)

คลื่นไมโครเวฟเมื่อวิ่งกระทบกับวัสดุที่เป็นโลหะหรือส่วนที่มีองค์ประกอบของโลหะ คลื่นจะไม่สามารถวิ่งทะลุผ่านโลหะได้ และจะสะท้อนกลับทั้งหมด ดังนั้นอาหารที่ถูกหุ้มด้วยภาชนะดังกล่าวจะไม่ได้ได้รับความร้อน ทำให้อาหารไม่สุก

2.4.1.2 การส่งผ่าน (Transmission)

คลื่นไมโครเวฟเมื่อวิ่งกระทบกับวัสดุที่ไม่ใช่โลหะ ได้แก่ แก้ว พลาสติก กระจก เซรามิก และไม้ เป็นต้น คลื่นจะสามารถทะลุผ่านได้ ดังนั้นวัสดุเหล่านี้จึงนิยมใช้เป็นภาชนะสำหรับรองหรือห่อหุ้มอาหารก่อนเข้าสู่ไมโครเวฟ

2.4.1.3 การดูดซึม (Absorption)

คลื่นไมโครเวฟเมื่อวิ่งกระทบกับวัสดุที่มีน้ำหรือความชื้นภายใน คลื่นบางส่วนจะถูกดูดซึมเอาไว้ ทำให้โมเลกุลของน้ำที่ดูดซึมพลังงานคลื่นจะเกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นพลังงานความร้อนเอาไว้จนเกิดความร้อนตามมา รวมถึงการเคลื่อนที่ของโมเลกุลน้ำ ซึ่งทำให้เกิดความร้อนเช่นกัน ทั้งนี้คลื่นไมโครเวฟหลังถูกดูดซึมจะสลายตัวทันที ไม่มีการตกค้างในอาหาร

2.4.2 หลักการให้ความร้อนของเตาไมโครเวฟ

เมื่อคลื่นไมโครเวฟเคลื่อนที่ออกมาจากตัวกำเนิดคลื่นหรือแมกนีตรอน คลื่นจะเคลื่อนที่เข้าสู่วัตถุดิบที่เราต้องการให้ความร้อน ซึ่งตัวคลื่นไมโครเวฟเองไม่ได้เป็นตัวให้ความร้อน แต่ความร้อนที่เกิดขึ้นในวัตถุดิบนั้นเกิดจากภายในตัววัตถุดิบมีสารบางตัวที่สามารถดูดซึมคลื่นไมโครเวฟแล้วเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนได้ ซึ่งการเกิดความร้อนขึ้นนั้นอธิบายได้จาก คลื่นไมโครเวฟเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดหนึ่งที่ประกอบไปด้วยสนามไฟฟ้าตัดกับสนามแม่เหล็กในทิศทางที่ตั้งฉากกันและสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่ตั้งฉากกันนั้นก็ยิ่งเปลี่ยนแปลงไปตามความถี่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดนั้นๆอีกด้วย ทำให้เมื่อคลื่นไมโครเวฟเคลื่อนที่ผ่านวัตถุดิบ สารที่ทำหน้าที่ดูดซึมคลื่นไมโครเวฟส่วนใหญ่ก็คือโมเลกุลของน้ำ (น้ำเป็นโมเลกุลมีขั้ว) เมื่อโมเลกุลของน้ำที่มีขั้วดูดซึมคลื่นไมโครเวฟแล้ว จะเกิดการจัดเรียงตัวใหม่ตามทิศทางของสนามไฟฟ้าที่เปลี่ยนไป (เช่นเดียวกันกับเศษขี้เลื่อยเหล็กที่พยายามจัดเรียงตัวในสนามแม่เหล็ก) ตามความถี่ของคลื่นไมโครเวฟ ซึ่งทิศทางของขั้วสนามไฟฟ้าเปลี่ยนสลับไปมาหลายล้านๆครั้งต่อวินาที ทำให้เมื่อสนามไฟฟ้าเปลี่ยนไปอย่างรวดเร็ว จะส่งผลต่อการจัดเรียงตัวของโมเลกุลน้ำเปลี่ยนไปอย่างรวดเร็วเช่นกัน ทำให้สุดท้ายเกิดเป็นพลังงานความร้อนขึ้นมาในที่สุด ซึ่งรูปแบบการดูดซึมคลื่นไมโครเวฟเข้าสู่วัตถุดิบเริ่มต้นแบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ

2.4.2.1 Ionic Polarization

เป็นการเกิดความร้อนที่เป็นผลจากการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของสารละลายเมื่อเข้าไปอยู่ในสนามไฟฟ้า แต่ละโมเลกุลซึ่งมีประจุไฟฟ้าประจำตัวจะถูกกระตุ้น และถูกเร่งให้มีการเคลื่อนที่ ทำให้เกิดการเสียดสีกับโมเลกุลอื่นๆและเกิดการแปลงพลังงานจลน์ให้กลายเป็นพลังงานความร้อน จากนั้นเกิดการกระจายความร้อนไปสู่ส่วนอื่นๆต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.2.2 Dipole Rotation

เกิดความร้อนกับวัตถุดิบที่มีสารประกอบมีขั้วเป็นองค์ประกอบ (ซึ่งส่วนใหญ่หมายถึงน้ำ) โดยธรรมชาติโมเลกุลของน้ำจะเรียงตัวประจุบวกและประจุลบอย่างไม่มีการเรียงระเบียบ แต่เมื่อโมเลกุลเหล่านั้นถูกกระทบกับคลื่นไมโครเวฟแล้ว ประจุในโมเลกุลของน้ำเกิดการเคลื่อนที่และจัดเรียงมีระเบียบมากขึ้น และหากมีการสลับสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้า ประจุเหล่านั้นก็จะเคลื่อนที่กลับทิศตามการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าที่เปลี่ยนไปเช่นกัน และเกิดการวิ่งสลับเป็นหลายล้านครั้งต่อวินาที จนส่งผลทำให้เกิดเป็นความร้อนภายในวัตถุดิบขึ้นมา

2.4.3 กระบวนการไพโรไลซิสแบบทั่วไปและกระบวนการไพโรไลซิสร่วมกับไมโครเวฟ

การให้ความร้อนโดยใช้ไมโครเวฟคือเทคนิคที่พิเศษอย่างหนึ่งและมีข้อดีมากกว่าการให้ความร้อนแบบทั่วไปมาก เช่น ควบคุมได้ง่ายกว่า ประสิทธิภาพพลังงานสูงกว่า และลดค่าใช้จ่าย การให้ความร้อนโดยใช้ไมโครเวฟถูกเสนอให้เป็นทางเลือกที่น่าสนใจมากกว่าระบบการให้ความร้อนแบบทั่วไป เนื่องจากพลังงานในการถ่ายโอนจากการใช้ไมโครเวฟมากกว่าความร้อนในการถ่ายโอนของการให้ความร้อนแบบทั่วไปไม่จำเป็นต้องอยู่ใกล้กัน มีอัตราการให้ความร้อนที่รวดเร็ว เป็นการให้ความร้อนเฉพาะที่และตลอดทั่วทั้งปริมาณของวัตถุดิบ มีความปลอดภัยสูงตลอดจนสามารถเปิด-ปิดได้อย่างทันทีทันใด ด้วยผลลัพธ์ที่ได้กล่าวมานั้นทำให้กระบวนการให้ความร้อนโดยใช้ไมโครเวฟดีกว่ากระบวนการให้ความร้อนแบบทั่วไป ซึ่งความแตกต่างระหว่างการให้ความร้อนโดยใช้ไมโครเวฟและการให้ความร้อนโดยทั่วไปนั้นเป็นผลมาจากกลไกการให้ความร้อนที่ต่างกัน ซึ่งการให้ความร้อนโดยใช้ไมโครเวฟคือการให้ความร้อนทั่วทั้งปริมาณของวัตถุดิบในอัตราที่เท่ากันๆ แต่การให้ความร้อนแบบทั่วไปนั้นจะมีผลของสัมประสิทธิ์การนำและการพาความร้อนมาเกี่ยวข้อง การมีอยู่ของน้ำในชีวมวลเริ่มต้นนั้นจะทำให้อัตราการให้ความร้อนแบบทั่วไปมีค่าลดลง เพราะน้ำจะดูดซับพลังงานจากแหล่งพลังงานร่วมด้วย ทำให้อัตราการให้ความร้อนที่ไปถึงวัตถุดิบและอุณหภูมิสุดท้ายในกระบวนการไพโรไลซิสมีค่าลดลงด้วย อย่างไรก็ตาม การมีอยู่ของน้ำในชีวมวลเริ่มต้นจะทำให้อัตราการให้ความร้อนโดยใช้ไมโครเวฟมีค่าเพิ่มขึ้น สาเหตุเนื่องมาจากน้ำเป็นตัวดูดซับคลื่นไมโครเวฟที่ดี เมื่อมีน้ำมากทำให้สามารถดูดซับคลื่นไมโครเวฟได้มากขึ้น ส่งผลให้ความร้อนที่เกิดและอุณหภูมิสุดท้ายของกระบวนการมีค่าเพิ่มขึ้น [1]

2.5 วัสดุไดอิเล็กตริก (Dielectric material)

วัสดุที่มีความสามารถในการมีขั้ว (Polar) ที่สูง ความสามารถนี้แสดงออกมาจากค่าหนึ่งที่เราเรียกว่า แรงต้านสนามไฟฟ้าสัมพันธ์หรือค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (Dielectric constant) วัสดุเหล่านี้ที่สามารถใช้ในการขัดขวางการไหลของกระแสไฟฟ้าได้ จะถูกเรียกว่า ฉนวน แต่ถ้าใช้ในการจัดเก็บพลังงานของวัสดุ(โดยวิธีของการเป็นขั้ว) จะเรียกว่า ไดอิเล็กตริก

จากความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับคุณสมบัติของไดอิเล็กตริกของวัสดุใดๆ ในการใช้งานเกี่ยวกับคลื่นความถี่ จะเป็นส่วนสำคัญในการในการวิเคราะห์เพื่อหาถึงความสามารถของวัสดุต่อการดูดซึม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คลื่นไมโครเวฟแล้วเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน ซึ่งตัวแปรที่บ่งบอกถึงความสามารถนี้เรียกว่า ค่าการสูญเสียแทนเจนต์ (Loss tangent, $\tan \delta$) ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังสมการต่อไปนี้ [9]

$$\tan \delta = \frac{\epsilon''}{\epsilon'} \quad (2.1)$$

โดยที่ ϵ'' = พลังงานไมโครเวฟขาเข้าที่สูญเสียให้กับวัสดุในรูปของความร้อน (Dielectric loss)

ϵ' = ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (Dielectric constant)

ตารางที่ 2.2 ค่าการสูญเสียแทนเจนต์ ($\tan \delta$) ของสารต่างๆที่ความถี่ 2.45 MHz และ 20 °C [10]

วัสดุ	$\tan \delta$
เอทิลีนไกลคอล	1.350
เอทานอล	0.941
เมทานอล	0.659
น้ำ	0.123
กรดซัลฟิวริกเข้มข้น	3.856
โทลูอิน	0.040

2.6 ผลงานการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมา

การศึกษาวิจัยของ Kicky C Sembiring และคณะ(2015) [2] ศึกษาผลของอุณหภูมิและเวลา ในกระบวนการไพโรไลซิสของทะเลาะปาล์มเปล้าและหาสภาวะที่เหมาะสมในการดำเนินการ ซึ่งทำการทดลองโดยใช้วัตถุดิบเริ่มต้นเป็นทะเลาะปาล์มเปล้าที่ต้องผ่านการให้ความร้อนที่ 50 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมงก่อนที่จะใส่เข้าไปในเตาปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไดซ์เบดที่ใช้ตัวกลางการให้ความร้อนคือทราย และช่วงของอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองคือ 400-600 °C จากการทดลองพบว่า เมื่ออุณหภูมิและเวลาของกระบวนการไพโรไลซิสเพิ่มขึ้น (400-500 °C) ทำให้ผลิตภัณฑ์ในส่วนของเหลวหรือน้ำมันเพิ่มขึ้น ในขณะที่ทั้งผลิตภัณฑ์ในส่วนของแข็ง (ถ่าน) และผลิตภัณฑ์ในส่วนของแก๊สมีค่าลดลง แต่เมื่ออุณหภูมิและเวลาของกระบวนการเพิ่มไปถึงค่าหนึ่ง (600 °C) ผลิตภัณฑ์ในส่วนของเหลวและของแข็งมีค่าลดลง ในขณะที่ผลิตภัณฑ์ในส่วนของแก๊สมีค่าเพิ่มขึ้น และค่าสภาวะที่เหมาะสมก็คือที่อุณหภูมิ 500 °C เพราะว่าให้ปริมาณของผลิตภัณฑ์ในส่วนของเหลวหรือน้ำมันมากที่สุด (27%)

งานวิจัยของ Farid Nasir Ani และคณะ (2010) [3] ศึกษาผลของปริมาณของตัวดูดซึมคลื่นไมโครเวฟ (Microwave absorber) ต่อกระบวนการไพโรไลซิสร่วมกับไมโครเวฟ ซึ่งทำการทดลองโดยใช้วัตถุดิบเริ่มต้นเป็นเปลือกของปาล์ม (Oil palm shell) และเส้นใยของปาล์ม (Oil palm fiber)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวดูดซึมคลื่นไมโครเวฟที่ใช้คือถ่านที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสของเปลือกปาล์ม ทำการทดลองที่ กำลังวัตต์ของไมโครเวฟและเวลาที่ต่างกัน สัดส่วนของปริมาณชีวมวลต่อปริมาณตัวดูดซึมคลื่นไมโครเวฟที่ศึกษาคือ 1:0.25 1:0.5 และ 1:1 ซึ่งพบว่าที่ปริมาณตัวดูดซึมคลื่นไมโครเวฟมากขึ้นจะทำให้คุณสมบัติของกระบวนการไพโรไลซิสมีค่าสูงขึ้นหรือกล่าวได้ว่ากำลังในหน่วยวัตต์ของไมโครเวฟที่ใช้มีค่าลดลง ทำให้ประหยัดค่าใช้จ่ายในด้านของพลังงาน

งานวิจัยของ Xiqiang Zhao และคณะ (2012) [7] ศึกษาถึงการออกแบบระบบไมโครเวฟเพื่อช่วยในการทำปฏิกิริยาไพโรไลซิสร่วมกับไมโครเวฟ ศึกษาผลของอุณหภูมิต่อผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นในส่วนของแก๊ส และศึกษาถึงลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น ซึ่งทำการทดลองโดยใช้วัตถุดิบเริ่มต้นคือ ฟางข้าวสาลี (Wheat straw) ขนาด 0-0.09 มิลลิเมตร ทำการทดลองที่อุณหภูมิต่างกัน ผลการทดลองพบว่า ผลิตภัณฑ์ในส่วนแก๊สจะเพิ่มขึ้นจาก 17.69%โดยมวล เป็น 22.27%โดยมวล และ สัดส่วนของแก๊สไวไฟต่อผลิตภัณฑ์แก๊สทั้งหมดเพิ่มขึ้นจาก 67.21%โดยปริมาตร เป็น 77.14%โดยปริมาตร ที่อุณหภูมิระหว่าง 400-600 องศาเซลเซียส สาเหตุที่เป็นเช่นนี้เนื่องมาจากการเพิ่มอุณหภูมิส่งผลต่อการเพิ่มอัตราการให้ความร้อน ซึ่งจะช่วยให้สารตั้งต้นเกิดปฏิกิริยาดีโพลีเมอไรเซชันแบบเร็ว (Fast depolymerization) และการแตกตัวครั้งที่ 2 ของผลิตภัณฑ์ในส่วนที่เป็นของแข็ง และการเพิ่มขึ้นของสารที่ระเหย ส่งผลให้อุณหภูมิภายในระบบสูงขึ้น ทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นของจำนวนรูพรุนของถ่านจาก 0.89 ตารางเมตรต่อกรัมถ่าน (400 องศาเซลเซียส) เป็น 9.81 ตารางเมตรต่อกรัมถ่าน (600 องศาเซลเซียส) และปริมาตรของรูพรุนเพิ่มขึ้นจาก 0.006 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัมถ่านชาร์ (400 องศาเซลเซียส) เป็น 0.012 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัมถ่านชาร์ (600 องศาเซลเซียส)

วิธีการศึกษาค้นคว้าและวิธีการทดลอง

งานวิจัยนี้จะใช้กระบวนการไพโรไลซิสที่อาศัยพลังงานความร้อนจากไมโครเวฟมาช่วยในการทำให้ทะเลลายปาล์มเปล่าเปลี่ยนรูปเป็นถ่านชาร์ สนใจที่จะศึกษาในเรื่องของสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการไพโรไลซิสร่วมกับไมโครเวฟที่ทำให้เกิดถ่านชาร์ในปริมาณที่มากที่สุด และปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตถ่านชาร์อีกด้วย รวมถึงวิเคราะห์เลขไอโอดีน (Iodine number) ของถ่านชาร์ที่เกิดขึ้น สภาวะที่ทำให้เกิดถ่านชาร์มากที่สุด ซึ่งมีวิธีการดำเนินงานตามต่อไปนี้

3.1 การสร้างเครื่องปฏิกรณ์ไมโครเวฟ (Microwave reactor)

สำหรับหัวข้อนี้จะแสดงถึงขั้นตอนการสร้างเครื่องปฏิกรณ์ไมโครเวฟ รวมถึงวัสดุที่ใช้ในแต่ละส่วนและรายละเอียดของระบบต่างๆที่เกี่ยวข้อง

1. เตาไมโครเวฟที่ใช้คือเตาไมโครเวฟทั่วไปตามบ้านเรือน ที่มีความถี่ของคลื่นไมโครเวฟ 2.45 GHz
2. นำเตาไมโครเวฟมาดัดแปลงโดยการเจาะรูด้านบนของไมโครเวฟให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่าช่องเข้าของเครื่องควบแน่นเล็กน้อย
3. นำเครื่องปฏิกรณ์ที่ทำมาจากแก้วควอร์ตมาวางไว้ในเตาไมโครเวฟ โดยให้ส่วนด้านบนของเครื่องปฏิกรณ์ทะลุผ่านรูวงกลมที่เจาะไว้พอดี และส่วนบนนี้ต้องยื่นออกมาไมโครเวฟเล็กน้อย
4. นำข้อต่อมาเชื่อมระหว่างส่วนบนของเครื่องปฏิกรณ์และช่องเข้าของเครื่องควบแน่น แล้วระหว่างรอยต่อแต่ละด้านให้ปิดด้วยเซรามิกสริง เพื่อป้องกันการรั่วไหลของคลื่นไมโครเวฟ
5. ในส่วนของสารทำความเย็นที่ใช้คือ น้ำที่ผ่านกระบวนการทำความเย็นไหลเข้าสู่ช่องสำหรับสารทำความเย็นและไหลออกด้านล่างเพื่อกลับไปถ่ายเทความร้อนออกจนกลับมาเป็นสารทำความเย็นดังเดิม
6. ในส่วนของการกักเก็บผลิตภัณฑ์ ผลิตภัณฑ์ในส่วนของแข็งจะอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ในเตาไมโครเวฟ ผลิตภัณฑ์ในส่วนของเหลวที่ได้จากการควบแน่นของก๊าซร้อนจะถูกเก็บในขวดแก้วอย่างมิดชิด และผลิตภัณฑ์ในส่วนของแก๊สจะนำมาผ่านน้ำก่อนที่จะปล่อยสู่บรรยากาศเพื่อลดการปล่อยสารพิษสู่บรรยากาศ
7. สำหรับการวัดอุณหภูมิจะใช้เทอร์โมคัปเปิลชนิด K โดยต่อเข้ากับรอยเชื่อมระหว่างส่วนบนของเครื่องปฏิกรณ์และช่องเข้าของเครื่องควบแน่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8. แก๊สเฉื่อยที่ใช้ในการทดลองคือแก๊สไนโตรเจน โดยจะให้ไหลเข้าสู่ระบบตรรกอยเชื่อมระหว่างส่วนบนของเครื่องปฏิกรณ์และช่องเข้าของเครื่องควมแน่น ซึ่งการปรับอัตราการไหลทำได้โดยปรับความดันเกจจากแหล่งกำเนิดแก๊สไนโตรเจน
9. ทั้งเทอร์โมคัปเปิลชนิด K และทางเข้าของแก๊สไนโตรเจนจะถูกยึดไว้ด้วยแลค [7]

3.2 การเตรียมตัวอย่าง

สำหรับหัวข้อนี้จะแสดงถึงขั้นตอนการเตรียมทะเลายปาล์มเปล่า และการวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate analysis) ซึ่งมีวิธีการดำเนินงานตามต่อไปนี้

1. เอาทะเลายปาล์มเปล่ามาล้างให้สะอาด
2. นำไปตากแดด และรอนจนแห้ง
3. นำไปเข้าตู้อบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสและรอนจนกว่าน้ำหนักของทะเลายปาล์มเปล่าจะคงที่ (ไม่มีความชื้นในตัวทะเลายปาล์มเปล่า)
4. นำไปลดขนาดด้วยการใช้กรรไกรตัดให้เหลือขนาด 1-3 ซม.
5. เก็บทะเลายปาล์มเปล่าที่มีขนาดตามที่ต้องการไว้ในถุงที่ปิดอย่างมิดชิด และเก็บไว้ในที่ปลอดความชื้น
6. ทำการวิเคราะห์แบบประมาณเพื่อหาปริมาณของสารระเหย (Volatile matter) ปริมาณคาร์บอนคงที่ (Fixed carbon) ปริมาณขี้เถ้า (Ash) และปริมาณความชื้น (Moisture)

3.3 การทำปฏิกิริยาไพโรไลซิสร่วมกับไมโครเวฟ

สำหรับหัวข้อนี้จะนำตัวอย่างที่เตรียมไว้จากขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างมาแบบหละประมาณ 1 กรัม เข้าสู่ขั้นตอนการทำปฏิกิริยาไพโรไลซิสร่วมกับไมโครเวฟ โดยการทำให้ปฏิกิริยาไพโรไลซิสเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ในส่วนของท่านในปริมาณที่มากที่สุด ซึ่งมีทางเลือกของการศึกษาดังต่อไปนี้

1. ช่วงของกำลังวัตต์ของไมโครเวฟที่ศึกษาคือ 300 450 และ 600 วัตต์
2. ช่วงของเวลาที่ศึกษาคือ 5 7.5 และ 10 นาที
3. ช่วงของสัดส่วนโดยน้ำหนักของปริมาณของทะเลายปาล์มเปล่าต่อปริมาณกรดซัลฟิวริกเข้มข้นที่ศึกษาคือ 1:2.5 1:3 และ 1:3.5

3.4 การวิเคราะห์เลขไอโอดีน (Iodine number)

สำหรับหัวข้อนี้จะนำถ่านชาร์ที่เกิด ณ สภาวะที่ดีที่สุดมาทำการวิเคราะห์เพื่อหาเลขไอโอดีน ซึ่งเลขนี้บ่งบอกถึงปริมาณของไอโอดีนที่ถูกดูดซับ (ในหน่วยมิลลิกรัม) ต่อกรัมของถ่านชาร์ที่ใช้

1. เตรียมสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต (Sodium Thiosulfate) เข้มข้น 0.1 นอร์มอล สารละลายไอโอดีน (Iodine solution) เข้มข้น 0.1 นอร์มอล และสารละลายน้ำแบ่ง สำหรับใช้เป็นอินดิเคเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. นำถ่านชาร์มาบดให้ละเอียด แล้วชั่งให้ได้น้ำหนักประมาณ 1 กรัมและใส่ลงในขวดวัดปริมาตร ขนาด 250 มิลลิลิตร
3. เติมสารละลายไอโอดีนเข้มข้น 0.1 นอร์มอล 100 มิลลิลิตร ลงไปในขวดวัดปริมาตร ขนาด 250 มิลลิลิตร จากนั้นทำการเขย่าและทิ้งไว้ประมาณ 30 วินาที
4. ทำการกรองด้วยกระดาษกรอง และนำส่วนที่เป็นสารละลายมาใส่ลงในขวดวัดปริมาตร ขนาด 250 มิลลิลิตร จำนวน 2 ขวด ขวดละ 40 มิลลิลิตร
5. จากนั้นทำการไตเตรทสารละลายในขวดวัดปริมาตรทั้ง 2 ขวดด้วยสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟตเข้มข้น 0.1 นอร์มอล และใช้น้ำแบ่งเป็นอินดิเคเตอร์
6. ทำการไตเตรทจนสารละลายในขวดวัดปริมาตรเปลี่ยนเป็นสีใส จากนั้นทำการบันทึกค่าปริมาตรของสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟตที่ใช้ พร้อมทั้งคำนวณหาเลขไอโอดีน [13]



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

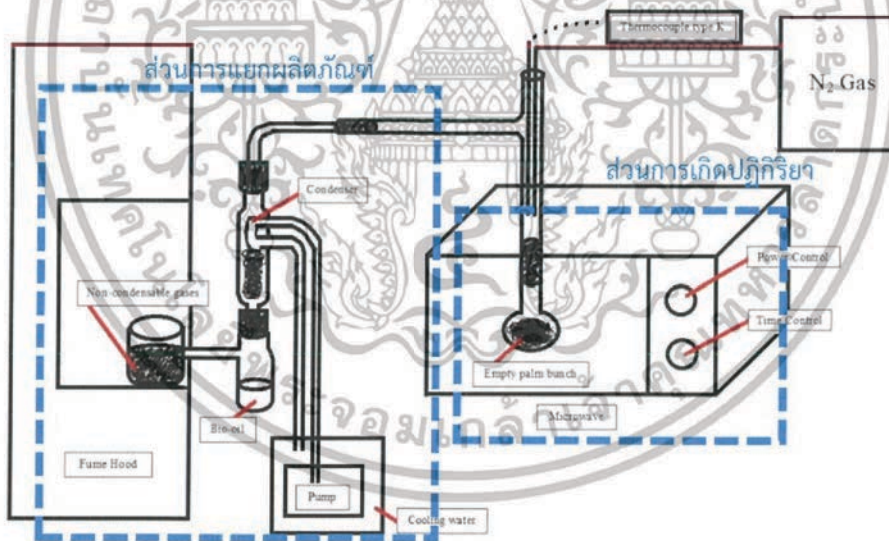
บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้ใช้กระบวนการโฟโวลซิสที่อาศัยพลังงานความร้อนจากไมโครเวฟมาช่วยในการทำให้ทะเลียมปาล์มเปล่าเปลี่ยนรูปเป็นถ่านชาร์ ซึ่งได้ทำการออกแบบและสร้างเครื่องปฏิกรณ์ไมโครเวฟ เพื่อศึกษาหาตัวดูดซับคลีนไมโครเวฟ (Absorber) ที่เหมาะสมที่ทำให้เกิดถ่านชาร์ ศึกษาผลของตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อเปอร์เซ็นต์การเกิดถ่านชาร์ ศึกษาถึงสภาวะที่เหมาะสมที่ทำให้เกิดถ่านชาร์มากที่สุด และวิเคราะห์เลขไอโอดีน (Iodine number) ของถ่านชาร์ที่เกิด ณ สภาวะที่ทำให้เกิดถ่านชาร์มากที่สุด

4.1 การออกแบบและการสร้างเครื่องปฏิกรณ์ไมโครเวฟ

สำหรับหัวข้อนี้จะแสดงถึงเครื่องปฏิกรณ์ไมโครเวฟที่ได้ออกแบบไว้ รวมถึงวัสดุที่ใช้ในแต่ละส่วนและรายละเอียดของระบบต่างๆที่เกี่ยวข้อง



รูปที่ 4.1 เครื่องปฏิกรณ์ไมโครเวฟและองค์ประกอบที่เกี่ยวข้อง

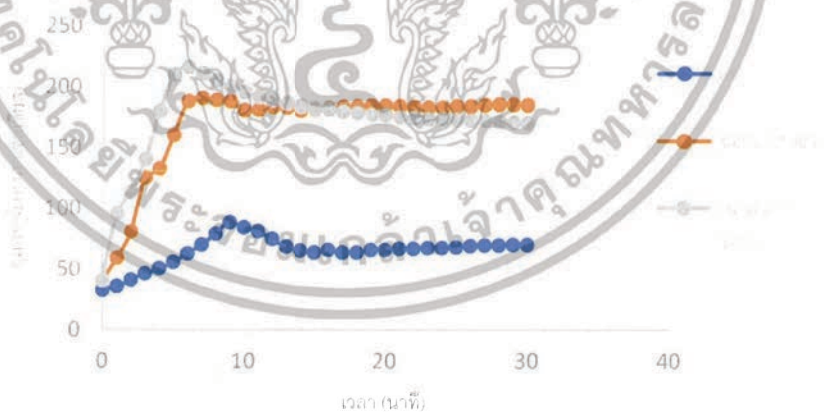
จากรูปที่ 4.1 จะพบว่าระบบเครื่องปฏิกรณ์ไมโครเวฟจะแบ่งออกเป็นทั้งหมด 2 ส่วนได้แก่ ส่วนการเกิดปฏิกิริยาโฟโวลซิสและส่วนการแยกผลิตภัณฑ์ในรูปแบบต่างๆ ซึ่งส่วนการเกิดปฏิกิริยาโฟโวลซิสนี้เราได้ใช้ขวดปริมาตรก้นกลม (Round Bottom Flask) ขนาด 250 มิลลิลิตรที่ทำมาจากแก้วบอโรซิลิเกต (Borosilicate glass) ที่มีคุณสมบัติสามารถทนความร้อนได้สูงและไม่เสียรูปร่างที่อุณหภูมิต่ำกว่า 550 องศาเซลเซียส (ในการทดลองอุณหภูมิที่วัดได้ไม่เกิน 400 องศาเซลเซียส) มาใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นเครื่องปฏิกรณ์ในการเกิดปฏิกิริยาโฟโรไลซิส และตรงจุดเชื่อมต่อระหว่างด้านบนสุดของขวด ปริมาตรก้นกลมและด้านล่างสุดของเครื่องแก้วได้ออกแบบและสร้างออกมาให้สามารถให้การหมุน ขวดแก้วปริมาตรก้นกลมเพื่อทำให้สามารถสวมกับเครื่องแก้วได้แน่นขึ้น และในส่วนนี้ยังได้ติดตั้งเทอร์ โมคัปเปิลชนิด K ที่มีขอบเขตการวัดอุณหภูมิอยู่ที่ -200 ถึง 1,350 องศาเซลเซียส มีการไหลของแก๊ส ไนโตรเจนที่ความดัน 1.5 bar เข้าไปในระบบเพื่อทำให้ระบบปราศจากแก๊สออกซิเจน รวมถึงตรง รอยต่อระหว่างท่อนำแก๊สไนโตรเจนกับระบบและช่องเสียบเทอร์โมคัปเปิลกับระบบได้มีการฉีกด้วย เทปพันเกลียวเอาไว้เพื่อป้องกันอากาศไหลเข้าสู่ระบบและป้องกันการรั่วของแก๊สที่เกิดขึ้นออกนอก ระบบ สำหรับส่วนการแยกผลิตภัณฑ์จะเริ่มด้วยเครื่องควบแน่น (Condenser) ที่ใช้สารหล่อเย็นเป็น น้ำเย็นที่อุณหภูมิประมาณ 2-5 องศาเซลเซียสเพื่อทำการควบแน่นน้ำมันออกมากักเก็บไว้ในส่วนที่ เก็บของเหลว สำหรับแก๊สที่ไม่ควบแน่นจะถูกนำไปดักจับไว้ด้วยน้ำก่อนปล่อยสู่บรรยากาศภายใต้ ตู้ดูดควัน (Fume hood)

4.2 การศึกษาหาตัวดูดซึมคลื่นไมโครเวฟที่เหมาะสม

ตัวดูดซึมคลื่นไมโครเวฟที่เราจะนำมาศึกษาและวิเคราะห์ทั้งหมด 3 ชนิด ได้แก่ น้ำ เอทิลีน ไกลคอล และกรดซิลฟิวริกเข้มข้น ซึ่งสาเหตุที่เลือกเนื่องมาจาก น้ำเป็นสารที่พบในอุตสาหกรรม อาหารมาก เอทิลีนไกลคอลเป็นสารที่ให้ค่าการสูญเสียแทนเจนต์ (Loss tangent) มากในกลุ่ม สารอินทรีย์ และกรดซิลฟิวริกเข้มข้นเป็นสารที่ให้ค่าการสูญเสียแทนเจนต์ (Loss tangent) มากใน กลุ่มสารอนินทรีย์



รูปที่ 4.2 ผลของชนิดตัวดูดซึมคลื่นไมโครเวฟต่ออุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปในเครื่องปฏิกรณ์ภายใน ระยะเวลา 30 นาที (ปริมาณละลายปาล์มเปล่า 2 กรัมต่อปริมาณตัวดูดซึม 10 กรัม และ กำลังวัตต์ไมโครเวฟ 450 วัตต์)

จากรูปที่ 4.2 แสดงให้เห็นถึงผลของตัวดูดซึมคลื่นไมโครเวฟแต่ละชนิดต่อการเปลี่ยนแปลง ของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นภายในเครื่องปฏิกรณ์ไมโครเวฟ ณ สัดส่วนของละลายปาล์มเปล่าต่อปริมาณตัว

ดูดซึม 1:5 และกำลังวัตต์ของไมโครเวฟ 450 วัตต์ ภายในระยะเวลา 30 นาทีพบว่าในตอนเริ่มต้นการทดลอง (0-7 นาที)กำลังวัตต์ของไมโครเวฟที่เท่าๆกัน กรดซัลฟิวริกเข้มข้นสามารถรับพลังงานจากคลื่นไมโครเวฟแล้วเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนเพื่อถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นให้กับทะเลลายปาล์มได้มากกว่าเอทิลีนไกลคอลและน้ำ แต่เมื่อเวลาผ่านไปพบว่าอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์ไมโครเวฟที่มีการใช้กรดซัลฟิวริกเข้มข้นเป็นตัวดูดซึมนี้อุณหภูมิต่ำกว่าเครื่องปฏิกรณ์ไมโครเวฟที่มีการใช้เอทิลีนไกลคอลเป็นตัวดูดซึม เพราะจากตารางที่ 2.2 กรดซัลฟิวริกเข้มข้นมีค่าการสูญเสียแทนเจนต์ ($\tan \delta = 3.856$) มากที่สุดซึ่งค่านี้นับบอกถึงความสามารถในการดูดซึมพลังงานจากรังสีไมโครเวฟแล้วเปลี่ยนเป็นพลังงานในรูปของความร้อน ทำให้สามารถรับพลังงานจากคลื่นไมโครเวฟแล้วเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนได้มากและรวดเร็ว ทำให้ช่วงเริ่มต้นจะเกิดการระเหยของกรดซัลฟิวริกบางส่วนจนกรดซัลฟิวริกเข้มข้นระเหยออกจากเครื่องปฏิกรณ์เกือบหมดในนาที่ที่ 6 ซึ่งทำให้อุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์ไมโครเวฟมีค่าลดลง[8]

ถ้าพิจารณาถึงผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากตัวดูดซึมคลื่นไมโครเวฟแต่ละชนิดพบว่าเมื่อใช้น้ำเป็นตัวดูดซึมคลื่นไมโครเวฟ จะทำให้อุณหภูมิสูงสุดที่ทำได้คือ 89 องศาเซลเซียสเพราะถูกจำกัดด้วยจุดเดือดของน้ำซึ่งก็คือ 100 องศาเซลเซียส แต่อุณหภูมิต่ำที่สุดที่ใช้ในปฏิกิริยาโฟโรไลซิสเพื่อทำให้เกิดถ่านชาร์อยู่ที่ประมาณ 300 องศาเซลเซียส ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นในส่วนของแข็งอยู่ในรูปทะเลลายปาล์มเปล่าเหมือนเดิมแต่มีรอยไหม้บางส่วน และในส่วนของกากเก็บของเหลวจะมีแต่น้ำที่ถูกแยกออกมาเมื่อใช้เอทิลีนไกลคอลเป็นตัวดูดซึมคลื่นไมโครเวฟจะพบว่าอุณหภูมิสูงสุดที่ทำได้คือ 191 องศาเซลเซียส และถูกจำกัดด้วยจุดเดือดของเอทิลีนไกลคอลเช่นกันซึ่งก็คือ 197.6 องศาเซลเซียส ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นในส่วนของแข็งยังคงอยู่ในรูปของทะเลลายปาล์มเปล่าที่มีรอยไหม้ผสมกับเอทิลีนไกลคอล ในขณะที่ผลิตภัณฑ์ในส่วนกากเก็บของเหลวไม่มีสารใดออกมาเลย และเมื่อใช้กรดซัลฟิวริกเข้มข้นพบว่าอุณหภูมิสูงสุดที่ทำได้คือ 216 องศาเซลเซียสเช่นเดียวกัน ในขณะที่จุดเดือดของกรดซัลฟิวริกเข้มข้นอยู่ที่ 337 องศาเซลเซียส แต่ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นในส่วนของแข็งสามารถอยู่ในรูปถ่านชาร์และในส่วนกากเก็บของเหลวมีน้ำมันออกมาเล็กน้อย สาเหตุที่ทำให้กรดซัลฟิวริกเข้มข้นสามารถทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ในรูปถ่านชาร์ได้แม้อุณหภูมิไม่ถึง 300 องศาเซลเซียสเป็นผลมาจากตำแหน่งอุณหภูมิที่วัดเพราะวัดในวัฏภาคไอซึ่งอยู่เหนือตัวทะเลลายปาล์มเปล่าทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นจริงกับอุณหภูมิที่วัดได้

ดังนั้นในการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมที่ทำให้เกิดถ่านชาร์มากที่สุดจะเลือกใช้กรดซัลฟิวริกเข้มข้นเป็นตัวดูดซึมคลื่นไมโครเวฟ

4.3 ศึกษาวิธีการออกแบบการทดลองและวิเคราะห์ข้อมูล

วิธีการทดลองที่เลือกใช้คือของ Box-Behnken โดยใช้โปรแกรม Minitab วิเคราะห์ผลทำให้สามารถออกแบบการทดลองตาม Box-Behnken ได้ทั้งหมด 15 แบบซ์ และมีการทำซ้ำทำให้มีการทดลองทั้งหมด 30 แบบซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 เปอร์เซ็นต์ของการเกิดถ่านชาร์ที่สภาวะต่างๆ

Batch	Power (watt)	Time (min)	H ₂ SO ₄ fraction	%Yield of biochar
1	450	10.0	3.5	37.14
2	600	10.0	3.0	42.23
3	450	7.5	3.0	43.56
4	300	7.5	2.5	50.59
5	600	7.5	3.5	41.88
6	600	7.5	2.5	45.49
7	450	7.5	3.0	45.17
8	450	10.0	2.5	48.03
9	300	7.5	3.5	42.23
10	600	5.0	3.0	43.18
11	450	7.5	3.0	44.96
12	450	5.0	2.5	45.52
13	450	5.0	3.5	43.77
14	300	10.0	3.0	46.67
15	300	5.0	3.0	49.52
16	450	10.0	3.5	36.62
17	600	10.0	3.0	42.33
18	450	7.5	3.0	44.69
19	300	7.5	2.5	50.34
20	600	7.5	3.5	42.22
21	600	7.5	2.5	45.27
22	450	7.5	3.0	43.59
23	450	10.0	2.5	49.42
24	300	7.5	3.5	42.69
25	600	5.0	3.0	43.43

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Batch	Power (watt)	Time (min)	H ₂ SO ₄ fraction	%Yield of biochar
26	450	10.0	3.5	44.89
27	600	10.0	3.0	45.11
28	450	7.5	3.0	45.39
29	300	7.5	2.5	47.00
30	600	7.5	3.5	49.87
Standard Deviation (S.D.)				3.36

เมื่อนำผลการทดลองที่ได้จากตารางที่ 4.1 และ 4.2 ไปใส่ลงในโปรแกรม Minitab ที่เลือกใช้การออกแบบการทดลองของ Box-Behnken พบว่า สมการที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต้น (กำลังวัตต์ เวลา และสัดส่วนโดยน้ำหนักของปริมาณทละลายปาล์มเปล่าต่อปริมาณกรดซัลฟิวริกเข้มข้น) ต่อตัวแปรตาม (เปอร์เซ็นต์การเกิดถ่านชาร์) สามารถแสดงดังสมการต่อไปนี้

$$\begin{aligned} \%Yield \text{ of biochar} = & 37.5 - 0.1148*Power + 5.9*Time + 16.22*Fraction_{H_2SO_4} \\ & + 0.000050*(Power)^2 - 0.0130*(Time)^2 - \\ & 2.09*(Fraction_{H_2SO_4})^2 + 0.001223*Power*Time + \\ & 0.01557*Power*Fraction_{H_2SO_4} - \\ & 2.222*Time*Fraction_{H_2SO_4} \end{aligned} \quad (4.1)$$

(R-sq = 95.95%)

หนึ่งในวัตถุประสงค์ของการออกแบบการทดลองคือ การได้แบบจำลองที่เรียบง่ายและมีความน่าเชื่อถือซึ่งสามารถเชื่อมโยงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต้นต่างๆต่อตัวแปรตามที่ต้องการศึกษาได้อย่างมีประสิทธิภาพ จากสมการที่ 4.1 ตัวแปรที่ถูกพิจารณาว่ามีนัยสำคัญทางสถิติในนั้นจะมีค่า p-value น้อยกว่า 0.05 ซึ่งหมายความว่าความน่าจะเป็นที่ไม่ก่อให้เกิดผลลัพธ์ตามความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต้นและตัวแปรตามนั้นมีค่าน้อยกว่า 0.05 และตัวแปรที่มีค่า p-value มากกว่า 0.05 หรือตัวแปรที่ไม่มีนัยสำคัญจะถูกกำจัดออกไป สามารถพิจารณาค่า p-value ได้จากตารางที่ 4.2 และสมการแสดงแบบจำลองสามารถสรุปได้ดังนี้

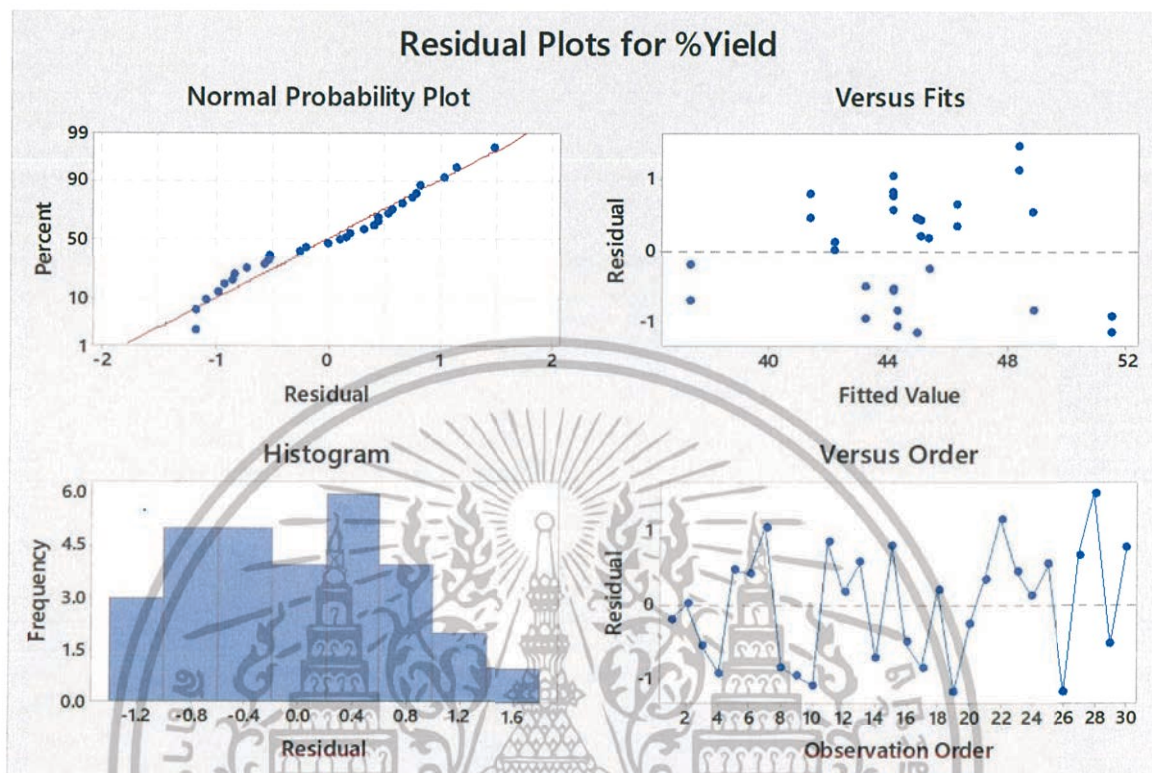
$$\begin{aligned} \%Yield \text{ of biochar} = & 52.90 - 0.1074*Power + 6.257*Time + \\ & 3.68*Fraction_{H_2SO_4} + 0.000052*(Power)^2 + \\ & 0.01557*Power*Fraction_{H_2SO_4} - \\ & 2.222*Time*Fraction_{H_2SO_4} \end{aligned} \quad (4.2)$$

(R-sq = 94.81%)

จากทั้งสมการที่ 4.1 และ 4.2 ให้ค่า R-sq ที่ค่อนข้างสูงซึ่งหมายความว่าสมการแบบจำลองที่ได้มานั้นสามารถอธิบายความผันแปรของค่าตัวแปรตามต่อการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรต้นได้เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อย่างดี แต่ทว่าค่า R-sq ที่สูงไม่ได้หมายความว่าสมการแบบจำลองจะมีความเหมาะสมกับข้อมูลที่ทำการทดลองเสมอไป ทำให้ต้องพิจารณากราฟแสดงความคลาดเคลื่อนของเปอร์เซ็นต์การเกิดถ่านชาร์ประกอบด้วย



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความคลาดเคลื่อนของเปอร์เซ็นต์การเกิดถ่านชาร์ (ก) กราฟความน่าจะเป็น (ข) กราฟแสดงความคลาดเคลื่อน (ค) แผนภูมิฮิสโตแกรม (ง) ความคลาดเคลื่อนกับลำดับการทดลอง

จากรูป 4.3ก พบว่าข้อมูลที่ได้จากการทดลองมีการกระจายตัวใกล้เคียงเส้นตรงที่ได้จากสมการแบบจำลอง ซึ่งบ่งชี้ว่าการประมาณค่าตัวแปรตามจากตัวแปรต้นต่างๆ ตามสมการแบบจำลองมีความใกล้เคียงค่อนข้างสูง ในรูปที่ 4.3ข แสดงให้เห็นถึงค่าที่ได้จากการทดลองมีการกระจายระหว่าง 36 ถึง 52 ซึ่งบ่งชี้ว่ามีการกระจายตัวที่ดีและค่าไม่กระจุกอยู่ที่ค่าใดค่าหนึ่ง ในรูปที่ 4.3ค พบว่าแผนภูมิฮิสโตแกรมมีรูปร่างคล้ายกราฟแบ้ขวา ทำให้ค่าการทดลองบางค่ามีปัญหา และในรูปที่ 4.3ง พบว่าค่าที่ได้จากผลการทดลองในแต่ละแบ้ช มีมีการกระจายตัวรอบค่ากึ่งกลาง ($Residual=0$) ในช่วง ± 2 ซึ่งบ่งชี้ได้ว่าข้อมูลมีความถูกต้องและน่าเชื่อถือ

4.4 ศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อเปอร์เซ็นต์การเกิดถ่านชาร์

การออกแบบการทดลอง ได้เลือกใช้วิธีการออกแบบการทดลองของ Box-Behnken ผ่านโปรแกรม Minitab ที่สามารถประมาณค่าผลกระทบเชิงเส้น ผลกระทบกำลังสอง และผลกระทบร่วม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

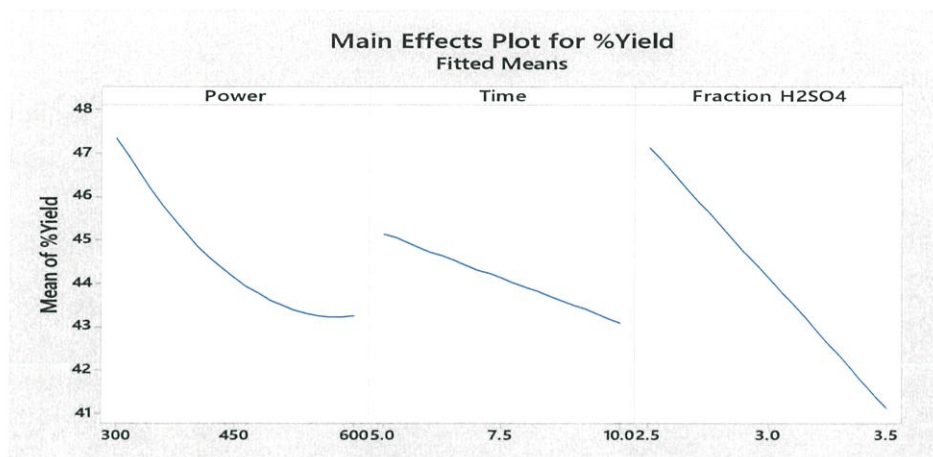
ของ 2 ตัวแปรได้ทุกค่า ซึ่งตัวแปรที่ทำการศึกษามีทั้งหมด 3 ตัวแปรคือ กำลังวัตต์ของไมโครเวฟ เวลา และสัดส่วนโดยน้ำหนักของปริมาณละลายปาล์มเปล่าต่อปริมาณกรดซัลฟิวริกเข้มข้น

ตารางที่ 4.2 ค่าการทดสอบสมมติฐาน (P-value) ของตัวแปรต่างๆ

Term	P-Value
Constant	0.000
Power	0.000
Time	0.000
Fraction H ₂ SO ₄	0.000
Power*Power	0.001
Time*Time	0.790
Fraction H ₂ SO ₄ * Fraction H ₂ SO ₄	0.097
Power*Time	0.127
Power* Fraction H ₂ SO ₄	0.001
Time* Fraction H ₂ SO ₄	0.000

จากตารางที่ 4.2 แสดงผลกระทบเชิงเส้น (กำลังวัตต์ เวลา และสัดส่วนโดยน้ำหนักของปริมาณละลายปาล์มเปล่าต่อปริมาณกรดซัลฟิวริกเข้มข้น) ผลกระทบกำลังสอง (กำลังวัตต์² เวลา² และสัดส่วนโดยน้ำหนักของปริมาณละลายปาล์มเปล่าต่อปริมาณกรดซัลฟิวริกเข้มข้น²) ผลกระทบร่วมของ 2 ตัวแปร (กำลังวัตต์-เวลา กำลังวัตต์-สัดส่วนโดยน้ำหนักของปริมาณละลายปาล์มเปล่าต่อปริมาณกรดซัลฟิวริกเข้มข้น และเวลา-สัดส่วนโดยน้ำหนักของปริมาณละลายปาล์มเปล่าต่อปริมาณกรดซัลฟิวริกเข้มข้น) พบว่า เวลา² สัดส่วนโดยน้ำหนักของปริมาณละลายปาล์มเปล่าต่อปริมาณกรดซัลฟิวริกเข้มข้น² และกำลังวัตต์-เวลา โปรแกรม Minitab ได้วิเคราะห์ผลการทดลองออกมาเป็นค่าทางสถิติและพบว่าตัวแปรคู่นี้ให้ค่าการทดสอบสมมติฐาน (P-value > 0.05) ทำให้ตัวแปรเหล่านี้ไม่มีนัยสำคัญทางสถิติต่อการเกิดถ่านชาร์

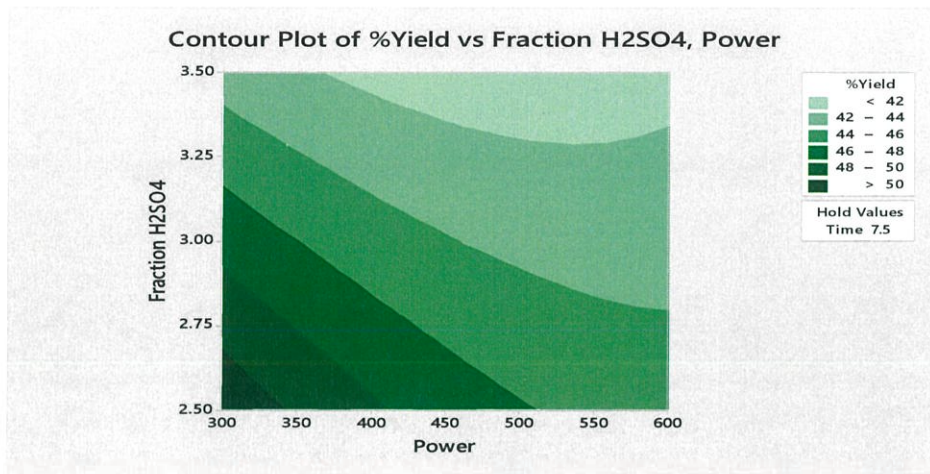
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 ผลกระทบเชิงเส้นของกำลังวัตต์ของไมโครเวฟ เวลาและสัดส่วนโดยน้ำหนักของปริมาณ ทะลายปาล์มเปล่าต่อปริมาณกรดซัลฟิวริกเข้มข้นที่มีผลต่อเปอร์เซ็นต์การเกิดถ่านชาร์ที่ สภาวะเริ่มต้น

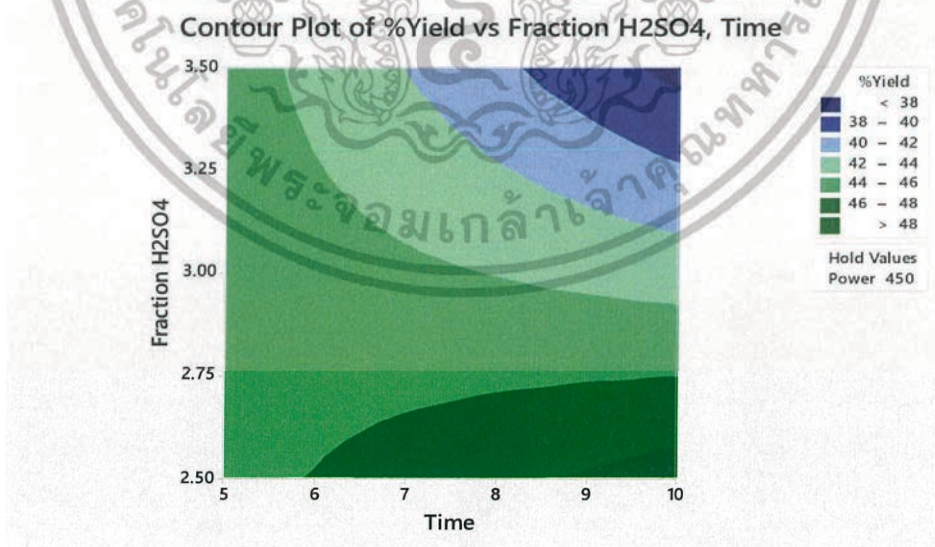
จากรูปที่ 4.4 แสดงผลกระทบเชิงเส้นของกำลังวัตต์ของไมโครเวฟ 300 450 และ 600 วัตต์ เวลา 5 7.5 และ 10 นาทีและสัดส่วนโดยน้ำหนักของปริมาณทะลายปาล์มเปล่าต่อปริมาณกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 1:2.5 1:3 และ 1:3.5 พบว่าเมื่อใช้ไมโครเวฟที่ กำลังวัตต์น้อย (300 วัตต์) จะทำให้เกิดปริมาณถ่านชาร์มากที่สุด เพราะกำลังวัตต์น้อย คือการให้อัตราความร้อน (Heating rate) ต่ำต่อ ทะลายปาล์ม ทำให้โมเลกุลภายในของทะลายปาล์มค่อยๆเปลี่ยนรูปไปเป็นถ่านชาร์ แต่ถ้ากำลังวัตต์ สูงคือมีการให้อัตราความร้อนที่สูงแก่ทะลายปาล์ม ทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปอย่างรวดเร็วจน ปริมาณของทะลายปาล์มบางส่วนเปลี่ยนเป็นน้ำมันทาร์ในรูปของเหลว ทำให้สัดส่วนของถ่านชาร์ที่ได้ มีค่าลดลง สำหรับเมื่อใช้เวลาในการทดลองน้อย (5 นาที) จะทำให้เกิดถ่านชาร์มากที่สุด เพราะการให้ ความร้อนเป็นระยะเวลาสั้นจะทำให้ทะลายปาล์มเปลี่ยนรูปไปเป็นน้ำมันทาร์ในรูปของเหลวและแก๊ส ที่ไม่กลั่นตัวได้มากขึ้น ทำให้สัดส่วนของถ่านชาร์ที่ได้มีค่าลดลงเช่นกัน และสำหรับเมื่อใช้ปริมาณกรดซัลฟิวริกเข้มข้นน้อยจะทำให้เกิดถ่านชาร์มากที่สุดเพราะกรดซัลฟิวริกเข้มข้นมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (Dielectric constant) ที่สูง และค่าการสูญเสียไดอิเล็กตริก (Dielectric loss) ที่สูง ทำให้เมื่อใช้ ปริมาณกรดซัลฟิวริกมาก จะทำอัตราการรับพลังงานจากคลื่นไมโครเวฟแล้วเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนมีค่าสูง ทำให้อุณหภูมิของทะลายปาล์มเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนรูปอย่างรวดเร็วจนทำให้ทะลายปาล์มเปลี่ยนรูปไปเป็นแก๊สที่ไม่ควบแน่นและน้ำมันทาร์บางส่วน ทำให้สัดส่วนของถ่านชาร์ที่ได้มีค่าลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 ผลกระทบร่วมของ 2 ตัวแปรระหว่าง กำลังวัตต์-สัดส่วนโดยน้ำหนักของปริมาณทะเลาะลาย ปาล์มเปล่าต่อปริมาณกรดซัลฟิวริกเข้มข้น ที่มีผลต่อเปอร์เซ็นต์การเกิดถ่านชาร์ที่เวลา 7.5 นาที

จากรูปที่ 4.5 พบว่าที่สภาวะเริ่มต้นตรงบริเวณขอบมุมด้านล่างซ้ายจะมีเปอร์เซ็นต์การเกิดถ่านชาร์มากที่สุด (สีเขียวเข้มสุด) ซึ่งตรงกับสภาวะกำลังวัตต์และสัดส่วนโดยน้ำหนักของปริมาณทะเลาะลายปาล์มเปล่าต่อปริมาณกรดซัลฟิวริกเข้มข้นน้อยๆ และยังมีแนวโน้มเดียวกันกับผลกระทบเชิงเส้นของแต่ละตัวแปร (รูปที่ 4.4)ทำให้สามารถยืนยันได้ว่า ผลกระทบเชิงเส้น (กำลังวัตต์ และสัดส่วนโดยน้ำหนักของปริมาณทะเลาะลายปาล์มเปล่าต่อปริมาณกรดซัลฟิวริกเข้มข้น) และผลกระทบร่วมของ 2 ตัวแปร (กำลังวัตต์-สัดส่วนโดยน้ำหนักของปริมาณทะเลาะลายปาล์มเปล่าต่อปริมาณกรดซัลฟิวริกเข้มข้น) มีความสอดคล้องกัน



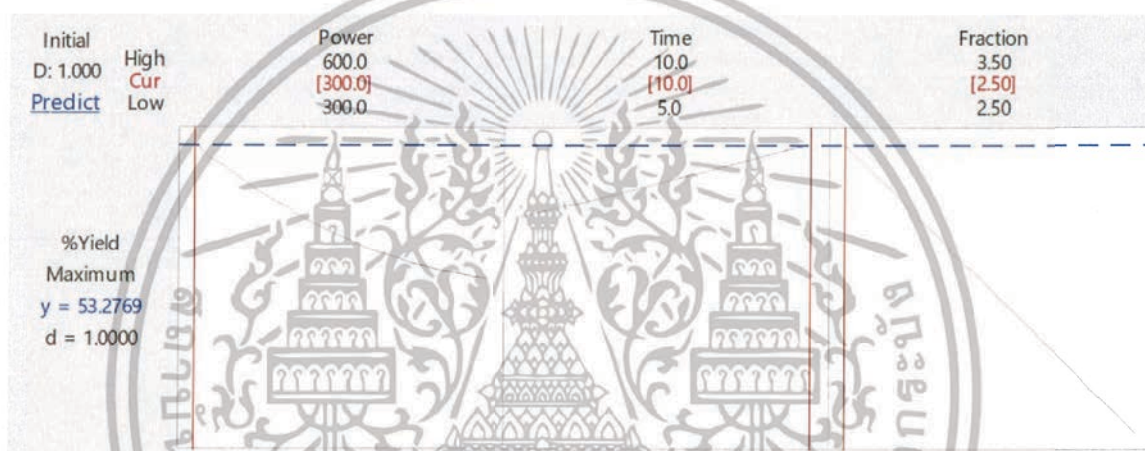
รูปที่ 4.6 ผลกระทบร่วมของ 2 ตัวแปรระหว่าง กำลังวัตต์-สัดส่วนโดยน้ำหนักของปริมาณทะเลาะลาย ปาล์มเปล่าต่อปริมาณกรดซัลฟิวริกเข้มข้น ที่มีผลต่อเปอร์เซ็นต์การเกิดถ่านชาร์ที่กำลัง 450 วัตต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.6 พบว่าที่สภาวะเริ่มต้นตรงบริเวณขอบมุมด้านล่างขวาจะมีเปอร์เซ็นต์การเกิดถ่านชาร์มากที่สุด (สีเขียวเข้มสุด) ตรงกับสภาวะที่ใช้เวลานาน และสัดส่วนโดยน้ำหนักของปริมาณทะเลายปาล์มเปล่าต่อปริมาณกรดซัลฟิวริกเข้มข้นน้อย ซึ่งผลที่ได้มีแนวโน้มตรงข้ามกันในเรื่องผลกระทบเชิงเส้นในส่วนของตัวแปรเวลา (รูปที่ 4.4) ที่เปอร์เซ็นต์การเกิดถ่านชาร์มากที่สุดควรอยู่ที่เวลาและสัดส่วนโดยน้ำหนักของปริมาณทะเลายปาล์มเปล่าต่อปริมาณกรดซัลฟิวริกเข้มข้นน้อยๆ

4.5 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมต่อเปอร์เซ็นต์การเกิดถ่านชาร์

การศึกษาก่อนหน้านี้พบว่าสภาวะที่เหมาะสมต่อเปอร์เซ็นต์การเกิดถ่านชาร์มากที่สุดจะอยู่ในช่วงกำลังวัตต์ของไมโครเวฟที่น้อย เวลาที่ยาวนาน และสัดส่วนโดยน้ำหนักของปริมาณทะเลายปาล์มเปล่าต่อปริมาณกรดซัลฟิวริกเข้มข้นน้อย



รูปที่ 4.7 สภาวะที่เหมาะสมต่อเปอร์เซ็นต์การเกิดถ่านชาร์มากที่สุด (จากการทำนาย)

จากรูปที่ 4.7 พบว่าสภาวะที่เหมาะสมต่อเปอร์เซ็นต์การเกิดถ่านชาร์มากที่สุดอยู่ที่สภาวะกำลัง 300 วัตต์ ระยะเวลา 10 นาทีและสัดส่วนโดยน้ำหนักของปริมาณทะเลายปาล์มเปล่าต่อปริมาณกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 1:2.5 ซึ่งแบบจำลองได้ทำนายเปอร์เซ็นต์การเกิดถ่านชาร์อยู่ที่ 53.28 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อทำการทดลองที่สภาวะดังกล่าว แสดงดังตารางที่ 4.3 พบว่าเปอร์เซ็นต์ในการเกิดถ่านชาร์อยู่ระหว่าง 52-54 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งค่าดังกล่าวมีค่าใกล้เคียงกับค่าจากการทำนาย ดังนั้นผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นถึงความเหมาะสมของแบบจำลองสำหรับการทำนายเปอร์เซ็นต์การเกิดถ่านชาร์ที่สภาวะต่างๆ

ตารางที่ 4.3 เปอร์เซ็นต์การเกิดถ่านชาร์ที่สภาวะเหมาะสม (จากการทดลอง)

Batch	Power (watt)	Time (min)	H ₂ SO ₄ fraction	%Yield of biochar
1	300	10.0	2.5	52.11
2	300	10.0	2.5	53.78
3	300	10.0	2.5	52.84
Standard Deviation (S.D.)				0.68

4.6 วิเคราะห์เลขไอโอดีนของถ่านชาร์

นำผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองในสภาวะกำลังวัตต์ของไมโครเวฟ 300 วัตต์ เวลา 10 นาที และสัดส่วนโดยน้ำหนักของปริมาณทะเลลายปาล์มเปล่าต่อปริมาณกรดซัลฟิวริกเข้มข้นที่ 1:2.5 มาวิเคราะห์เลขไอโอดีน ซึ่งผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 เลขไอโอดีนของถ่านชาร์ที่ได้จากสภาวะที่เหมาะสม

Batch	Biochar (g)	Iodine number (mg _{Iodine absorbed} /g _{biochar})
1	1.003	317.01
2	1.008	320.16

จากตารางที่ 4.4 พบว่า ณ สภาวะที่เหมาะสม (กำลังวัตต์ของไมโครเวฟ 300 วัตต์ เวลา 10 นาทีและสัดส่วนโดยน้ำหนักของปริมาณทะเลลายปาล์มเปล่าต่อปริมาณกรดซัลฟิวริกเข้มข้นที่ 1:2.5) ถ่านชาร์ที่เกิดขึ้นนั้นมีเลขไอโอดีนอยู่ที่ 317-320 มิลลิกรัมของไอโอดีนที่ถูกดูดซับต่อกรัมของถ่านชาร์ ซึ่งเลขไอโอดีนนี้บ่งบอกถึงความสามารถในการดูดซับไอโอดีนของถ่านชาร์ และความสามารถในการดูดซับไอโอดีนของถ่านชาร์จะมีค่ามากหรือน้อยนั้นยังขึ้นกับพื้นที่ผิวของถ่านชาร์อีกด้วย

จากงานวิจัยที่ศึกษาหาความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ผิวของถ่านชาร์และเลขไอโอดีน (A. Mianowski และคณะ, 2007) พบว่าที่ช่วงของเลขไอโอดีนระหว่าง 200-850 มิลลิกรัมของไอโอดีนที่ถูกดูดซับต่อกรัมของถ่านชาร์ สามารถประมาณค่าของเลขไอโอดีนให้มีค่าเท่ากับพื้นที่ผิว BET ของถ่านชาร์ [12] ดังนั้นพื้นที่ผิวของถ่านชาร์ ณ สภาวะที่เหมาะสมมีค่าระหว่าง 317-320 ตารางเมตรต่อกรัมถ่านชาร์

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

การผลิตถ่านชาร์จากทะเลลายปาล์มเปล่าด้วยกระบวนการไพโรไลซิสร่วมกับการใช้ไมโครเวฟ โดยการออกแบบและสร้างระบบของเครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิส ที่ประกอบไปด้วยส่วนสำคัญ 2 ส่วนคือ ส่วนการเกิดปฏิกิริยาและส่วนการแยกผลิตภัณฑ์ในรูปแบบที่ต่างกัน ซึ่งพบว่าสามารถกักเก็บผลิตภัณฑ์ได้ทั้งในส่วนของน้ำมันชาร์และถ่านชาร์ โดยมีการเลือกใช้ตัวดูดซับกลิ่นไมโครเวฟที่เหมาะสมซึ่งก็คือ กรดซัลฟิวริกเข้มข้น มาเป็นส่วนผสมของทะเลลายปาล์มเปล่าก่อนเริ่มการทดลองทุกครั้ง

การศึกษามลกระทบเชิงเส้นของกำลังวัตต์ไมโครเวฟต่อเปอร์เซ็นต์การเกิดถ่านชาร์นั้นพบว่า เปอร์เซ็นต์การเกิดถ่านชาร์ที่มาก จะเกิดขึ้นที่สภาวะกำลังวัตต์ของไมโครเวฟที่ 300 วัตต์ ซึ่งมีเปอร์เซ็นต์การเกิดถ่านชาร์สูงถึง 47.4% เมื่อทำการศึกษามลกระทบเชิงเส้นของเวลาต่อเปอร์เซ็นต์การเกิดถ่านชาร์ พบว่า ที่เวลา 5 นาทีจะมีเปอร์เซ็นต์การเกิดถ่านชาร์สูงถึง 45.1% อีกทั้งทำการศึกษามลกระทบเชิงเส้นของสัดส่วนโดยน้ำหนักของปริมาณทะเลลายปาล์มเปล่าต่อปริมาณกรดซัลฟิวริกเข้มข้น พบว่า ที่สัดส่วนโดยน้ำหนักของปริมาณทะเลลายปาล์มเปล่าต่อปริมาณกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 1:2.5 จะมีเปอร์เซ็นต์การเกิดถ่านชาร์สูงถึง 47.2%

การศึกษามลกระทบร่วมของ 2 ตัวแปรระหว่างกำลังวัตต์และสัดส่วนโดยน้ำหนักของปริมาณทะเลลายปาล์มเปล่าต่อปริมาณกรดซัลฟิวริกเข้มข้น พบว่า เปอร์เซ็นต์การเกิดถ่านชาร์ที่มากจะเกิดขึ้นที่ สภาวะกำลังวัตต์ 300 วัตต์และสัดส่วนโดยน้ำหนักของปริมาณทะเลลายปาล์มเปล่าต่อปริมาณกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 1:2.5 ซึ่งมีเปอร์เซ็นต์การเกิดถ่านชาร์สูงถึง 51.6% และทำการศึกษามลกระทบร่วมของ 2 ตัวแปรระหว่างเวลากับสัดส่วนโดยน้ำหนักของปริมาณทะเลลายปาล์มเปล่าต่อปริมาณกรดซัลฟิวริกเข้มข้น พบว่า เปอร์เซ็นต์การเกิดถ่านชาร์ที่มากจะเกิดขึ้นที่สภาวะเวลา 10 นาทีและสัดส่วนโดยน้ำหนักของปริมาณทะเลลายปาล์มเปล่าต่อปริมาณกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 1:2.5 ซึ่งมีเปอร์เซ็นต์การเกิดถ่านชาร์สูงถึง 49.1%

จากการศึกษาข้างต้นพบว่า สภาวะที่เหมาะสมที่ทำให้เกิดถ่านชาร์มากที่สุดคือ กำลังวัตต์ของไมโครเวฟ 300 วัตต์ ระยะเวลา 10 นาที และสัดส่วนโดยน้ำหนักของปริมาณทะเลลายปาล์มเปล่าต่อปริมาณกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 1:2.5 พบว่าสามารถสร้างเปอร์เซ็นต์การเกิดของถ่านชาร์สูงถึง 53.78% และเมื่อนำถ่านชาร์ ณ สภาวะที่เหมาะสมไปวิเคราะห์เลขไอโอดีนเพื่อประมาณค่าหาพื้นที่ผิวของถ่านชาร์ พบว่าพื้นที่ผิวของถ่านชาร์ที่ได้มีค่าอยู่ระหว่าง 317-320 ตารางเมตรต่อกรัมถ่านชาร์

5.2 ข้อเสนอแนะ

ในส่วนของแต่ละการทดลอง เลือกใช้ปริมาณทะเลลายปาล์มเปล่าเริ่มต้นที่ประมาณ 1 กรัมทุก การทดลองซึ่งเป็นปริมาณที่น้อยเกินไป เพราะว่าในระหว่างทำการทดลองให้จบใน 1 การทดลอง อาจจะมีถ่านชาร์หายไปปริมาณเล็กน้อย เช่น ขั้นตอนการนำถ่านชาร์ออกจากขวดปริมาตรก้นกลม หลังทำปฏิกิริยาไพโรไลซิสเสร็จ จะมีถ่านชาร์บางส่วนติดไปกับขอบขวดปริมาตรก้นกลม ทำให้ไม่สามารถนำถ่านชาร์ออกมาได้หมด เมื่อเราใช้ปริมาณทะเลลายปาล์มเริ่มต้นน้อย จะทำให้การหายไปของ ถ่านชาร์บางส่วนย่อมส่งผลอย่างมีนัยสำคัญได้ ซึ่งอาจปรับแก้ได้โดยการเพิ่มปริมาณทะเลลายปาล์ม เปล่าเริ่มต้นหรือใช้น้ำชะล้างในขวดปริมาตรก้นกลม แล้วกรองเอาเฉพาะส่วนที่เป็นของแข็งออกมา



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Jing Li, Jianjun Dai, Guangqing Liu, Hedong Zhang, Zuopeng Gao, Jie Fu, Yanfeng He, Yan Huang, Biochar from microwave pyrolysis of biomass: A review, Biomass and Bioenergy, 94 (2016) 228-244.
- [2] Kiky C Sembiring, Nino Rinaldi, Sabar P Simanungkalit, Bio-oil from Fast Pyrolysis of Empty Fruit Bunch at Various Temperature, Energy Procedia, 65 (2015) 162-169.
- [3] Arshad Adam Salema, Farid Nasir Ani, Microwave induced pyrolysis of oil palm biomass, Bioresource Technology, 102 (2011) 3388-3395.
- [4] ปรีนทร เต็มญารศิลป์, การเตรียมและการวิเคราะห์คุณลักษณะเฉพาะของถ่านกัมมันต์จาก ไม้ตง และ ไม้หมาจู้, วิทยานิพนธ์ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, (2008).
- [5] Zhanrong Zhang, Avtar S. Matharu, Thermochemical Valorization of Paper Deinking Residue through Microwave-Assisted Pyrolysis, Waste Biorefinery, 23 (2018) 671-689.
- [6] กุลนันท์ วีรณรงค์กร, ดร. อมรชัย อารณวิธานพ, ไพโรไลซิส (Pyrolysis), Technology Promotion: Energy & Environment, Vol.42 No.241 61-64.
- [7] Xiqiang Zhao, Min Wang, Hongzhen Liu, Longzhi Li, Chunyuan Ma, Zhanglong Song, A microwave reactor for characterization of pyrolyzed biomass, Bioresource Technology, 104 (2012) 673-678.
- [8] Chungen Yin, Microwave-assisted pyrolysis of biomass for liquid biofuels production, Bioresource Technology, 120 (2012) 273-284.
- [9] คงศักดิ์ รัตน์นิยมชัย, การออกแบบเครื่องให้ความร้อนแก๊สไดอิเล็กตริก, วิทยานิพนธ์ ภาควิชาโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, (2013).
- [10] Deibnasser C. Campos, Evandro L. Dall'Oglio, Paulo T. de Sousa Jr, Leonardo G. Vasconcelos, Carlos Alberto Kuhnen, Investigation of dielectric properties of the reaction mixture during the acid-catalyzed transesterification of Brazil nut oil for biodiesel production, Fuel, 117 (2014) 957-965.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [11] จุติพร อินทะนิน, วรรัตน์ ปัตร์ประกร, พระพีพัฒน์ ภาสบุตร, การศึกษาสมบัติของถ่านลอยจากกระบวนการแปรรูปแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นปูนขาวเพื่อนำไปทำเชื้อเพลิงแท่งอัดแข็ง, การประชุมวิชาการ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน ครั้งที่ 5, (2009).
- [12] A. Mianowski, M. Owczarek, A. Marecka, Surface area of activated carbon determined by the iodine adsorption number, Energy Sources, 29 (2007) 839-850.
- [13] American Society for Testing and Materials, Standard test method for determination of iodine number of activated carbon, ASTM D4607, Annual Book of ASTM Standard, Vol. 15.05, Philadelphia, (2006) 310-313



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีการทดลองและข้อมูลผลการทดลอง

ก.1 วิธีการทดลองใน 1 แบทช์

ก.1.1 การทำปฏิกิริยาไพโรไลซิส

1)



ชั่งตะลายน้ำส้มที่ผ่านการลดขนาดให้เหลือประมาณ 1-3 เซนติเมตร มา 1 กรัม

2)



ใส่ลงในขวดแก้วก้นกลมปริมาตร 250 มิลลิลิตร

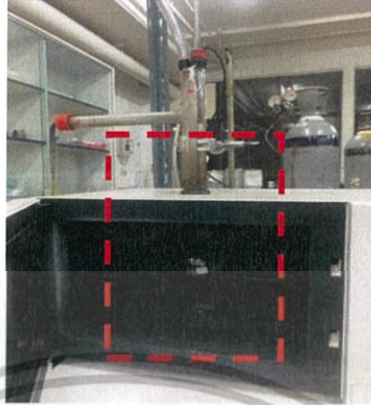
3)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หยุดกรดซัลฟิวริกเข้มข้นลงในขวดแก้วกันกลมตามสัดส่วนที่ต้องการ และใช้แท่งแก้วคนให้
กรดซัลฟิวริกเข้มข้นกระจายลงไปในทะเลลายปาล์มอย่างทั่วถึง

4)



นำขวดแก้วกันกลมต่อเข้ากับระบบเครื่องปฏิกรณ์ไมโครเวฟ

5)



เปิดเครื่องควบแน่น ซึ่งใช้สารทำความเย็นคือน้ำผสมน้ำแข็ง

6)



เปิดการทำงานของตู้ดูดควันและเปิดการไหลของแก๊สไนโตรเจนให้เข้าสู่ระบบที่ 1.5 บาร์เกจ
ประมาณ 10-15 นาที เพื่อไล่อากาศออกจากระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 7) ปรับกำลังวัตต์ของไมโครเวฟ และเวลาตามที่ต้องการ แล้วเริ่มทำการทดลอง
- 8) บันทึกอุณหภูมิทุกนาที จนครบตามเวลาที่กำหนด

ก.1.2 การปรับ pH ของถ่านซาร์ให้เป็นกลาง

1)



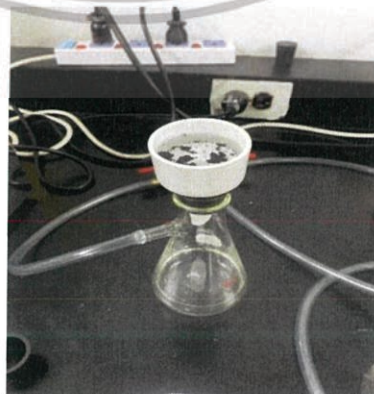
นำกระดาษกรองไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส จากนั้นทุกๆ 2 ชั่วโมงนำออกมาชั่งน้ำหนักจนน้ำหนักกระดาษกรองคงที่

2)



นำถ่านซาร์ที่ได้จากการทำปฏิกิริยาไพโรไลซิสมาล้างด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่ pH = 12 จนถ่านซาร์มีค่า pH = 6-7 โดยใช้ยูนิเวอร์แซลอินดิเคเตอร์ในการตรวจสอบค่า pH

3)



นำไปกรองผ่านชุดกรองสุญญากาศ ซึ่งใช้กระดาษกรองจากขั้นตอนที่ 1 ในการช่วยกรอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4)



นำถ่านชาร์และกระดาษกรองที่ใช้ ไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส จากนั้นทุกๆ 2 ชั่วโมง
นำออกมาชั่งน้ำหนัก จนน้ำหนักรวมคงที่

5) นำค่าน้ำหนักที่ชั่งได้ไปคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การเกิดถ่านชาร์ดังสมการต่อไปนี้

$$\% \text{ถ่านชาร์} = \frac{\text{น้ำหนักแห้งทั้งหมด (กรัม)} - \text{น้ำหนักกระดาษกรอง (กรัม)}}{\text{น้ำหนักหะลายปาล์มเริ่มต้น (กรัม)}} \times 100 \quad (\text{ก.1})$$

6) นำถ่านชาร์ที่ผ่านการปรับ pH เรียบร้อยใส่ลงในขวดพร้อมปิดฝาให้สนิทเพื่อนำไปใช้
วิเคราะห์หาพื้นที่ผิวจำเพาะของถ่านชาร์ด้วยวิธีหาค่าการดูดซับไอโอดีน (Iodine number)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก.2 ข้อมูลผลการทดลอง

ตารางที่ ก.1 เปอร์เซ็นต์การเกิดถ่านชาร์ ณ สภาวะต่างๆ

Batch	EPB (g)	Power (watt)	Time (min)	H ₂ SO ₄ fraction	กระดาษกรอง (g)	Biochar + กระดาษกรอง	Biochar (g)	%Yield of biochar
1	1.00026	450	10.0	3.5	0.76511	1.13658	0.37147	37.14
2	1.00133	600	10.0	3.0	0.72644	1.14926	0.42282	42.23
3	1.00089	450	7.5	3.0	0.74631	1.18225	0.43594	43.56
4	1.00170	300	7.5	2.5	0.88582	1.39263	0.50681	50.59
5	1.00034	600	7.5	3.5	0.86202	1.28095	0.41893	41.88
6	1.00063	600	7.5	2.5	0.87001	1.32523	0.45522	45.49
7	1.00127	450	7.5	3.0	0.85945	1.31171	0.45226	45.17
8	1.00046	450	10.0	2.5	0.87006	1.35058	0.48052	48.03
9	1.00106	300	7.5	3.5	0.85382	1.27660	0.42278	42.23
10	1.00152	600	5.0	3.0	0.87012	1.30261	0.43249	43.18
11	1.00144	450	7.5	3.0	0.87209	1.32231	0.45022	44.96
12	1.00153	450	5.0	2.5	0.87533	1.33125	0.45592	45.52
13	1.00035	450	7.5	3.0	0.85327	1.30032	0.44705	44.69

Batch	EPB (g)	Power (watt)	Time (min)	H ₂ SO ₄ fraction	กระดาศกรอง (g)	Biochar + กระดาศ กรอง	Biochar (g)	%Yield of biochar
14	1.00105	450	10.0	3.5	0.91349	1.28012	0.36663	36.62
15	1.00097	600	7.5	3.5	0.89028	1.31288	0.4226	42.22
16	1.00177	300	7.5	3.5	0.86701	1.29467	0.42766	42.69
17	1.00083	600	5.0	3.0	0.88854	1.32324	0.4347	43.43
18	1.00114	600	7.5	2.5	0.89008	1.34325	0.45317	45.27
19	1.00038	450	5.0	3.5	0.87744	1.31535	0.43791	43.77
20	1.00059	450	5.0	2.5	0.85891	1.3103	0.45139	45.11
21	1.00068	300	10.0	3.0	0.87960	1.34666	0.46706	46.67
22	1.00052	300	5.0	3.0	0.88507	1.38048	0.49541	49.52
23	1.00004	450	5.0	3.5	0.84386	1.2978	0.45394	45.39
24	1.00082	600	10.0	3.0	0.85457	1.27825	0.42368	42.33
25	1.00028	450	10.0	2.5	0.85714	1.35146	0.49432	49.42
26	1.00053	300	7.5	2.5	0.87657	1.38025	0.50368	50.34
27	1.00178	300	10.0	3.0	0.89438	1.36525	0.47087	47.00
28	1.00075	300	5.0	3.0	0.84841	1.34747	0.49906	49.87
29	1.00135	450	7.5	3.0	0.88193	1.31840	0.43647	43.59

Batch	EPB (g)	Power (watt)	Time (min)	H ₂ SO ₄ fraction	กระตาดชกรอง (g)	Biochar + กระตาดชกรอง	Biochar (g)	%Yield of biochar
30	1.00086	450	7.5	3.0	0.85964	1.30895	0.44931	44.89



การคำนวณที่เกี่ยวข้องในการทดลอง

การวิเคราะห์โดยประมาณ (Proximate analysis)

1. การคำนวณหาค่าปริมาณความชื้น (Moisture content) ตามมาตรฐาน ASTM D 3173-73

นำครุชีเบิล (Crucible) ที่บรรจุตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์มาเผาที่ 105 องศาเซลเซียส 2 ชั่วโมง แล้วทิ้งไว้ในตู้ดูดความชื้น 1 ชั่วโมง จากนั้นนำออกมาชั่ง แล้วนำไปไว้ในตู้ดูดความชื้นอีก 1 ชั่วโมง จากนั้นนำออกมาชั่ง หากน้ำหนักทั้ง 2 ครั้งห่างเกินน้อยกว่า 0.5 มิลลิกรัม สามารถคำนวณหาปริมาณความชื้น ดังสมการที่ (ข.1)

$$\text{Moisture content}(\%) = \frac{A - B}{A} \times 100 \quad (\text{ข.1})$$

เมื่อ A คือ น้ำหนักก่อนเผา (กรัม)

B คือ น้ำหนักหลังเผา (กรัม)

2. การหาปริมาณเถ้า (Ash) วิเคราะห์ตามมาตรฐาน ASTM D 3173-73

นำครุชีเบิล (Crucible) ที่บรรจุตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์มาเผาที่ 750 องศาเซลเซียส 6 ชั่วโมง แล้วนำออกมาชั่งหลังจากอุณหภูมิลดลงแล้ว จากนั้นนำไปเผาที่ 750 องศาเซลเซียส 1 ชั่วโมง แล้ว โดยน้ำหนักลดลงไม่เกิน 0.5 มิลลิกรัม จึงจะถือได้ว่าใช้ได้ สามารถคำนวณหาปริมาณเถ้า ดังสมการที่ (ข.2)

$$\text{Ash content}(\%) = \frac{D}{B} \times 100 \quad (\text{ข.2})$$

เมื่อ D คือ น้ำหนักหลังเผา (กรัม)

B คือ น้ำหนักก่อนเผา (กรัม)

3. การหาปริมาณสารระเหย (Volatile matter) ตามมาตรฐาน ASTM D 3175-77

นำครุชีเบิล (Crucible) ที่บรรจุตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์พร้อมทั้งปิดฝา มาเผาที่ 900 องศาเซลเซียส 7 นาที แล้วนำออกมาชั่งหลังจากอุณหภูมิลดลงแล้ว สามารถคำนวณหาปริมาณสารระเหย ดังสมการที่ (ข.3)

$$\text{Volatile matter}(\%) = \frac{B - C}{B} \times 100 \quad (\text{ข.3})$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ B	คือ	น้ำหนักก่อนเผา (กรัม)
C	คือ	น้ำหนักหลังเผา (กรัม)

4. การหาปริมาณคาร์บอนเสถียร (Fixed carbon)

การหาปริมาณคาร์บอนเสถียรเป็นการวิเคราะห์ส่วนที่เสถียรของโครงสร้างโมเลกุลของถ่านล้อย ใช้วิธีการคำนวณด้วยร้อยละผลต่างของปริมาณความชื้น ปริมาณสารระเหย และปริมาณแถ้งสมการที่ (ข.4) (11)

$$\text{Fixed carbon} = 100\% - \text{Moisture content}(\%) - \text{Volatile matter}(\%) - \text{Ash content}(\%) \quad (\text{ข.4})$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้