

การแปรรูปทะลายปาล์มเปล่าด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลให้เป็น
ถ่านกัมมันต์คุณภาพสูง

HYDROTHERMAL CONVERSION OF EMPTY FRUIT BUNCH TO HIGH
QUALITY ACTIVATED CARBON

วันชนะ สีสฤง

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2567

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

การแปรรูปทะเลาะปาล์มเปล่าด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลให้เป็น
ถ่านกัมมันต์คุณภาพสูง

วันชนะ สีสุธก

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2567

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การแปรรูปทะลายปาล์มเปล่าด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลให้เป็น ถ่านกัมมันต์คุณภาพสูง Hydrothermal Conversion of Empty Palm Fruit Bunches into High Quality Activated Carbon
ชื่อ - นามสกุล	นายวันชนะ สีสุก
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ไชยยนต์ ไชยยะ, ประ.ด.
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	อาจารย์ลลิตา อัดนโณ, ประ.ด.
ปีการศึกษา	2567

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ศิริดี จันทลี ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิริดี จันทลี, วศ.ด.)

.....  กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ, Ph.D.)

.....  กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์วรินทร์ดา เมนส์, วศ.ด.)

.....  กรรมการ
(อาจารย์ลลิตา อัดนโณ, Ph.D.)

.....  กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ไชยยนต์ ไชยยะ, ประ.ด.)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....  คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์รพพงษ์ ภาสุปรีย์, Ph.D.)
วันที่ 25 เดือน ตุลาคม พ.ศ. 2567

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การแปรรูปทะลายปาล์มเปล่าด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลให้เป็น ถ่านกัมมันต์คุณภาพสูง
ชื่อ - นามสกุล	นายวันชนะ สีสุรก
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ไชยยันต์ ไชยยะ, ประ.ด.
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	อาจารย์ลลิตา อัดนโถ, ประ.ด.
ปีการศึกษา	2567

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการแปรรูปทะลายปาล์มเปล่าด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลและการกระตุ้นทางเคมี เพื่อผลิตเป็นไฮโดรชาร์และถ่านกัมมันต์ที่มีคุณภาพสูง รวมทั้งทดสอบการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยศึกษาตัวแปรในกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล ได้แก่ อุณหภูมิ 160 200 240 และ 280 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 2 4 6 และ 8 ชั่วโมง และสารกระตุ้น H_2SO_4 และ H_2O_2 หลังจากนั้นไฮโดรชาร์ที่มีคุณภาพสูงได้ถูกนำไปผ่านกระบวนการกระตุ้นทางเคมีอีกขั้นตอนหนึ่ง โดยใช้สารกระตุ้น KOH และ $ZnCl_2$

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า สภาวะที่ส่งผลทำให้ไฮโดรชาร์มีคุณภาพสูงคือการใช้ H_2O_2 เป็นสารกระตุ้น อุณหภูมิ 280 องศาเซลเซียส และเวลาทำปฏิกิริยา 2 ชั่วโมง (O-EFB240h2) ไฮโดรชาร์จากสภาวะดังกล่าวมีผลได้ผลิตภัณฑ์ร้อยละ 34.24 ปริมาณคาร์บอนคงตัวร้อยละ 71.36 พื้นที่ผิวจำเพาะ 479.19 ตารางเมตรต่อกรัม ปริมาตรรูพรุน 0.727 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม ขนาดรูพรุนเฉลี่ย 3.06 นาโนเมตร และมีหมู่ทำหน้าที่กลุ่มออกซิเจนสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ

เมื่อนำไฮโดรชาร์ที่กระตุ้นด้วย H_2SO_4 ที่อุณหภูมิ 240 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง (A-EFB240h2) มาผ่านกระบวนการกระตุ้นทางเคมีด้วย KOH ที่ อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส 1 ชั่วโมง (A-EFB240KOH) จะได้ถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะ 1,348 ตารางเมตรต่อกรัม ปริมาณปริมาตรรูพรุน 0.830 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม และขนาดรูพรุนเฉลี่ย 2.4 นาโนเมตร โดยถ่านกัมมันต์ดังกล่าวมีประสิทธิภาพการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ร้อยละ 3.879 โดยน้ำหนัก ซึ่งมีประสิทธิภาพเทียบเท่ากับถ่านกัมมันต์เชิงพาณิชย์

คำสำคัญ : กระบวนการไฮโดรเทอร์มอล, การกระตุ้นทางเคมี, ไฮโดรชาร์, ถ่านกัมมันต์

Thesis Title	Hydrothermal Conversion of Empty Palm Fruit Bunches into High Quality Activated Carbon
Name-Surname	Mr. Wanchana Sisuthog
Program	Chemical Engineering
Thesis Advisor	Associate Professor Chaiyan Chaiya, Ph.D.
Thesis Co-Advisor	Ms. Lalita Attanatho, Ph.D.
Academic Year:	2024

ABSTRACT

This research aimed to study the conversion of empty palm fruit bunches (EFB) through the hydrothermal process and chemical activation to produce high-quality hydrochar and activated carbon, as well as to evaluate their carbon dioxide adsorption capacity. The study examined the hydrothermal process under various conditions, including the temperatures of 160, 200, 240 and 280 °C, the reaction time of 2, 4, 6 and 8 h, and the use of H₂SO₄ and H₂O₂ as activators. The high-quality hydrochar was also subjected to a second chemical activation process using KOH and ZnCl₂ as activating agents.

The experimental results showed that the optimal conditions for producing high-quality hydrochar included the use of H₂O₂ as an activator at 280 °C with the reaction time of 2 h (O-EFB240h2). The hydrochar obtained under these conditions had a product yield of 34.24%, a fixed carbon content of 71.36%, a specific surface area of 479.19 m²/g, a total pore volume of 0.727 cm³/g and an average pore size of 3.06 nm. Furthermore, the hydrochar showed a significant increase in oxygenate functional groups.

When the hydrochar prepared with H₂SO₄ at 240 °C for 2 h (A-EFB240h2) was chemically activated with KOH at 800 °C for an hour (A-EFB240KOH), the resulting activated carbon had a specific surface area of 1,348 m²/g, a pore volume of 0.830 cm³/g and an average pore size of 2.4 nm. This activated carbon showed a carbon dioxide adsorption capacity of 3.879 wt%, comparable to that of commercial activated carbon.

Keywords: hydrothermal process, chemical activation, hydrochar, activated carbon

กิตติกรรมประกาศ

การทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงอย่างสมบูรณ์ได้ด้วยความกรุณา และความอนุเคราะห์ของ รองศาสตราจารย์ ดร. ไชยยันต์ ไชยยะ อาจารย์ที่ปรึกษา ดร. ลลิตา อัตนโก นักวิจัยอาวุโส สถาบันวิจัย วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่ได้กรุณาเสียสละเวลาให้คำปรึกษา คำแนะนำ และให้ข้อเสนอแนะในการปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ผู้ทำ การศึกษาวิจัยขอกราบขอบพระคุณอย่างสูงมา ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศศิธร จันทสี ประธานกรรมการสอบ และกรรมการ สอบผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิรินทร์ดา เมนส์ และ รองศาสตราจารย์ ดร. ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ ที่ได้ ให้ความกรุณา ในการแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ของงานวิจัย รวมทั้งเสียสละเวลาในการเป็นกรรมการ สอบในครั้งนี้

ขอขอบพระคุณ ดร.ยุทธนา ฐานมงคล และดร. อมรรัตน์ สีส้มโนธรรม นักวิจัยอาวุโส สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทยที่ได้เสียสละเวลาในการให้คำปรึกษา สนับสนุน อุปกรณ์ เครื่องมือ และสารเคมีในการทำวิจัยในครั้งนี้

ขอขอบพระคุณ และมอบความดีทั้งหมดนี้ให้แก่ คุณพ่อ คุณแม่ ภรรยาและลูก พี่น้อง เพื่อน และคณะครู-อาจารย์ ที่ให้การสนับสนุนและประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้ สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยหวังเป็น อย่างยิ่งว่างานวิจัยฉบับนี้จะเป็นประโยชน์สำหรับผู้สนใจหากการวิจัยในครั้งนี้ขาดตกบกพร่อง หรือไม่ สมบูรณ์ประการใด ผู้วิจัยขอกราบขออภัยมา ณ โอกาสนี้ด้วย

วันชนะ สีสุก

สารบัญ

บทคัดย่อภาษาไทย	(3)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	(4)
กิตติกรรมประกาศ	(5)
สารบัญ.....	(6)
สารบัญตาราง.....	(8)
สารบัญรูป(.....	(10)
บทที่ 1 บทนำ	14
1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย	14
1.2 วัตถุประสงค์	17
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	17
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	20
2.1 อุตสาหกรรมปาล์มน้ำมัน	20
2.1.1 ศักยภาพและคุณสมบัติของชีวมวลเหลือทิ้งทางการเกษตร.....	21
2.2 วัสดุคาร์บอนคุณภาพสูง	27
2.3 ไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนไนเซชัน (Hydrothermal Carbonization)	36
2.4 การกระตุ้น (Activation).....	44
2.5 การทดสอบการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยถ่านกัมมันต์.....	48
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	53
3.1 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย.....	53
3.2 กิจกรรมที่ดำเนินงานวิจัย.....	57
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	65
4.1 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของทะลายปาล์มเปล่า.....	65
4.2 ผลการศึกษาการผลิตไฮโดรชาร์ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล	66

สารบัญ (ต่อ)

4.3 ผลการศึกษาการผลิตถ่านกัมมันต์ด้วยกระบวนการกระตุ้นทางเคมี.....	89
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง.....	99
5.1 การผลิตไฮโดรชาร์ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนไนเซชัน	99
5.2 การผลิตถ่านกัมมันต์ด้วยกระบวนการกระตุ้นทางเคมี.....	100
บรรณานุกรม.....	101
ภาคผนวก.....	107
ภาคผนวก ก	108
ภาคผนวก ข.....	111
ประวัติผู้เขียน	114

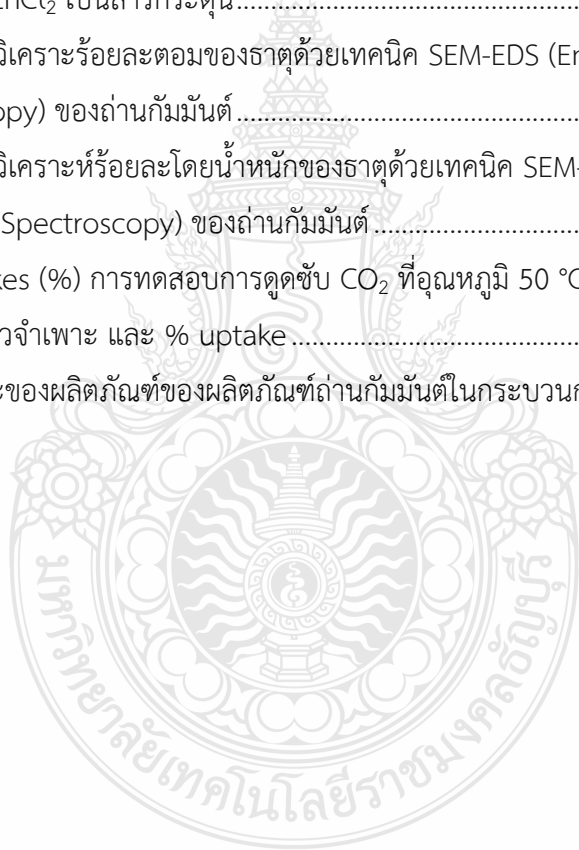


สารบัญตาราง

ตารางที่ 2.1	ศักยภาพชีวมวลแต่ละชนิดในประเทศไทย ปี 2556 (ข้อมูลกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน) [3]	21
ตารางที่ 2.2	คุณสมบัติชีวมวลเหลือทิ้งทางการเกษตร [9]	23
ตารางที่ 2.3	ราคาชีวมวลเหลือทิ้งทางการเกษตรปี พ.ศ 2553 [9]	24
ตารางที่ 2.4	ราคาทะลายปาล์มเปล่าจากจังหวัดกระบี่ ปี 2549-2561 (ข้อมูลจาก มูลนิธิพลังงานเพื่อสิ่งแวดล้อม) [10]	26
ตารางที่ 2.5	ลักษณะทางกายภาพของถ่านกัมมันต์ชนิดผง	31
ตารางที่ 2.6	การเปรียบเทียบงานวิจัยที่เกี่ยวข้องสำหรับกระบวนการกระตุ้นทางเคมี	47
ตารางที่ 2.8	การเปรียบเทียบงานวิจัยที่เกี่ยวข้องสำหรับกระบวนการกระตุ้นทางเคมี (ต่อ)	48
ตารางที่ 2.8	งานวิจัยการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ด้วยถ่านกัมมันต์และถ่านกัมมันต์ที่ปรับปรุงคุณสมบัติด้วยสารเคมีและวัสดุต่างๆ [40]	51
ตารางที่ 4.1	องค์ประกอบแบบประมาณและแบบแยกธาตุและค่าความร้อนของตัวอย่างทะลาย	65
ตารางที่ 4.2	ปริมาณองค์ประกอบทางเคมีของทะลายปาล์มเปล่า	66
ตารางที่ 4.3	ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบแบบประมาณ (Proximate analysis) ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนในเซชันของทะลายปาล์มเปล่า	72
ตารางที่ 4.4	ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุ (Ultimate analysis) ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนในเซชัน	73
ตารางที่ 4.5	ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุ (Ultimate analysis) ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนในเซชัน (ต่อ)	74
ตารางที่ 4.6	ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุ (Ultimate analysis) ของไฮโดรชาร์ที่ใช้ตัวกระตุ้นในกระบวนการ HTC	76
ตารางที่ 4.7	ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบแบบประมาณ (Proximate analysis) ของไฮโดรชาร์ที่ใช้ตัวกระตุ้นในกระบวนการ HTC	77
ตารางที่ 4.8	ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุนและขนาดของรูพรุนเฉลี่ยของผลิตภัณฑ์ ไฮโดรชาร์	80
ตารางที่ 4.9	ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุนและขนาดของรูพรุนของผลิตภัณฑ์	81

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ 4.10 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของผลิตภัณฑ์ของเหลวที่เกิดขึ้นในกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนไนเซชันด้วยเครื่อง High Performance Liquid Chromatography (HPLC)	87
ตารางที่ 4.11 ผลการวิเคราะห์ปริมาณคาร์บอนในผลิตภัณฑ์ของเหลวที่เกิดขึ้นในกระบวนการ HTC ด้วยเครื่องวิเคราะห์ปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ (TOC Analyzer)	88
ตารางที่ 4.12 พื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุน และขนาดรูพรุนของถ่านกัมมันต์เกิดขึ้นจากการที่ใช้ KOH และ $ZnCl_2$ เป็นสารกระตุ้น	90
ตารางที่ 4.13 ผลการวิเคราะห์ร้อยละของธาตุด้วยเทคนิค SEM-EDS (Energy Dispersive Spectroscopy) ของถ่านกัมมันต์	93
ตารางที่ 4.14 ผลการวิเคราะห์ร้อยละโดยน้ำหนักของธาตุด้วยเทคนิค SEM-EDS (Energy Dispersive Spectroscopy) ของถ่านกัมมันต์	93
ตารางที่ 4.15 Uptakes (%) การทดสอบการดูดซับ CO_2 ที่อุณหภูมิ 50 °C	94
ตารางที่ 4. 16 พื้นที่ผิวจำเพาะ และ % uptake	95
ตารางที่ 4. 17 ร้อยละของผลิตภัณฑ์ของผลิตภัณฑ์ถ่านกัมมันต์ในกระบวนการกระตุ้นทางเคมี	98



สารบัญรูป

รูปที่ 1. 1 แสดงการจำแนกประเภทของชีวมวล	14
รูปที่ 2. 1 ห่วงโซ่อุปทานอุตสาหกรรมปาล์มน้ำมันและน้ำมันปาล์มประเทศไทย (สำนักงานพัฒนา การวิจัยการเกษตร พ.ศ. 2558) [7]	19
รูปที่ 2.2 ขั้นตอนการสกัดน้ำมันปาล์ม [8]	20
รูปที่ 2.3 ชีวมวลเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมปาล์มน้ำมัน	20
รูปที่ 2.4 สัดส่วนเชื้อเพลิงชีวมวลเหลือทิ้งสำหรับผลิตกระแสไฟฟ้า [9]	27
รูปที่ 2.5 โครงสร้างแบบผสมของถ่านกัมมันต์ [14]	33
รูปที่ 2.6 แบบจำลองโครงสร้างการดูดซับของถ่านกัมมันต์ [15]	34
รูปที่ 2.7 กระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์	35
รูปที่ 2.8 แผนภาพแสดงภูมิภาคของน้ำที่อุณหภูมิและความดันต่าง ๆ [17]	37
รูปที่ 2.9 ปฏิริยาที่เกี่ยวข้องในกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนไนเซชัน [17]	37
รูปที่ 2.10 ปฏิริยาเคมีที่เกิดขึ้นในกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนไนเซชัน [19]	37
รูปที่ 2.11 ช่วงของการใช้อุณหภูมิที่แตกต่างกันของกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลและกระบวนการ ไพโรไลซิส	39
รูปที่ 2.12 การจัดเรียงตัวของคาร์บอนที่อุณหภูมิต่าง ๆ [13]	39
รูปที่ 2.13 ความสัมพันธ์ร้อยละของผลิตภัณฑ์คาร์บอนกับเวลาในการทำปฏิริยาของทะเลาะปาล์มเปล่า ในกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนไนเซชัน [21]	40
รูปที่ 2.14 คุณสมบัติของตัวกระตุ้นและการประยุกต์ใช้ [22]	41
รูปที่ 2.15 ออกซิเจนที่เกิดขึ้นหลังผ่านกระบวนการ HTC	42
รูปที่ 2.16 แสดงปริมาตรรูพรุนที่เพิ่มขึ้นของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการใช้ H_2O_2 ในกระบวนการ	43
รูปที่ 2.17 การผลิตถ่านกัมมันต์แบบใช้และไม่ใช้ตัวกระตุ้น [25]	43
รูปที่ 2.18 การเปรียบเทียบความต่างระหว่างการกระตุ้นทางกายภาพและทางเคมี [27]	46
รูปที่ 2.19 การทดสอบการดูดซับ CO_2 ของ AC1 และ CHAR3 ที่สภาวะอุณหภูมิ 50 °C	49
รูปที่ 2.20 สภาวะอุณหภูมิสำหรับการวิเคราะห์การดูดซับ CO_2 ด้วย TGA	50
รูปที่ 2.21 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับและพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์	50

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ 3.1 เครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวนทวนความดันสูง.....	54
รูปที่ 3.2 แผนภาพเครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวนทวนความดัน.....	54
รูปที่ 3.3 เตาเผาอุณหภูมิสูงแบบท่อ.....	55
รูปที่ 3.4 เครื่อง Thermogravimetric analysis (TGA).....	56
รูปที่ 3.5 เครื่อง GC-FID/TCD.....	56
รูปที่ 3.6 ทะลายปาล์ม จากบริษัทไทยสมบูรณ์น้ำมันปาล์ม จำกัด.....	58
รูปที่ 3.7 ผลิตภัณฑ์ที่ได้กระบวนการไฮโดรเทอร์มอล	58
รูปที่ 4.1 ทะลายปาล์มเปล่าที่ผ่านการคัดขนาดแล้ว	66
รูปที่ 4.2 ลักษณะทางกายภาพของทะลายปาล์มเปล่าและไฮโดรคาร์ที่อุณหภูมิและเวลาต่าง ๆ.....	68
รูปที่ 4.3 ผลของอุณหภูมิและเวลาต่อร้อยละของผลิตภัณฑ์ของผลิตภัณฑ์ไฮโดรคาร์ที่ได้จาก กระบวนการ HTC ของทะลายปาล์มเปล่า.....	69
รูปที่ 4.4 ผลของตัวกระตุ้นกรดซัลฟิวริกและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ส่งผลต่อ ร้อยละของผลิตภัณฑ์ของ ผลิตภัณฑ์ไฮโดรคาร์ในกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนไนเซชัน ที่สภาวะอุณหภูมิ 160, 200, 240 และ 280 °C เวลาในการทำปฏิกิริยา 2 ชั่วโมง.....	70
รูปที่ 4.5 ลักษณะทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ไฮโดรคาร์ที่ผ่านการเติมตัวกระตุ้น ด้วยกรดซัลฟิวริกและ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ที่สภาวะอุณหภูมิ 160, 200, 240 และ 280 °C เวลาในการทำ ปฏิกิริยา 2 ชั่วโมง	71
รูปที่ 4.6 ผลของอุณหภูมิและเวลาที่มีต่อปริมาณคาร์บอนและออกซิเจนของผลิตภัณฑ์ได้จาก กระบวนการ ไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนไนเซชัน	73
รูปที่ 4.7 ผลของอุณหภูมิและเวลาที่มีต่อปริมาณคาร์บอนและออกซิเจนของผลิตภัณฑ์ได้จาก กระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนไนเซชัน.....	74
รูปที่ 4.8 กราฟ Van Krevelen แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน O/C และ H/C ของการเติม ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนไนเซชัน	78
รูปที่ 4.9 กราฟ Van Krevelen แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน O/C และ H/C ของการเติมกรด ซัลฟิวริกในกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนไนเซชัน	78

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ 4.10 ผลการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope) ของทะเลสาบปาล์มเปล่าและผลิตภัณฑ์ไฮโดรคาร์ที่ผลิตได้จากสภาวะ 160, 200, 240 และ 280 °C เวลาทำปฏิกิริยา 2 ชั่วโมง.....	82
รูปที่ 4.11 ผลการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope) ของทะเลสาบปาล์มเปล่า (a) ไฮโดรคาร์ (b) และผลิตภัณฑ์ไฮโดรคาร์ที่เติมกรดซัลฟิวริก (c) และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (d) ที่อุณหภูมิ 280 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง	83
รูปที่ 4.12 ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันทางเคมีด้วย Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR) ของทะเลสาบปาล์มเปล่าและไฮโดรคาร์ที่ผลิตได้จากสภาวะ 160, 200, 240 และ 280 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง	84
รูปที่ 4.13 ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันทางเคมีด้วย Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR) ของทะเลสาบปาล์มเปล่าและไฮโดรคาร์ที่ผลิตได้จากสภาวะ 160, 200, 240 และ 280 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง.....	85
รูปที่ 4.14 ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันทางเคมีด้วย Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR) ของทะเลสาบปาล์มเปล่าและไฮโดรคาร์ที่ผลิตได้จากสภาวะ 160, 200, 240 และ 280 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง	86
รูปที่ 4.15 ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันทางเคมีด้วย Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR) ของทะเลสาบปาล์มเปล่าและไฮโดรคาร์ที่ผลิตได้จากสภาวะ 160, 200, 240 และ 280 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง.....	86
รูปที่ 4.16 ลักษณะทางจุลภาคของไฮโดรคาร์หลังการกระตุ้นด้วยสารกระตุ้นต่างๆ	91
รูปที่ 4.17 ลักษณะทางจุลภาคของถ่านกัมมันต์ที่เกิดจากการใช้ไฮโดรคาร์ที่ผ่านกระบวนการปรับปรุงคุณสมบัติด้วยกรดซัลฟิวริกและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์.....	92
รูปที่ 4.18 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง % Uptake กับพื้นที่ผิวจำเพาะของถ่านกัมมันต์	95
รูปที่ 4.19 กราฟการศึกษาทดสอบการดูดซับและการคายซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ของถ่านกัมมันต์เชิงพาณิชย์ด้วย Thermogravimetric Analysis (TGA).....	96
รูปที่ 4.20 กราฟการศึกษาทดสอบการดูดซับและการคายซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากไฮโดรคาร์และผ่านการกระตุ้นทางเคมีด้วย KOH.....	96

สารบัญรูป (ต่อ)

- รูปที่ 4.21 กราฟการศึกษาทดสอบการดูดซับและการคายซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ของถ่าน-
กัมมันต์ที่ผลิตจากไฮโดรชาร์ที่ผ่านการปรับปรุงด้วยกรดซัลฟิวริกและผ่านการกระตุ้น
ทางเคมีด้วย KOH 97
- รูปที่ 4.22 กราฟการศึกษาทดสอบการดูดซับและการคายซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของไฮโดรชาร์.. 97

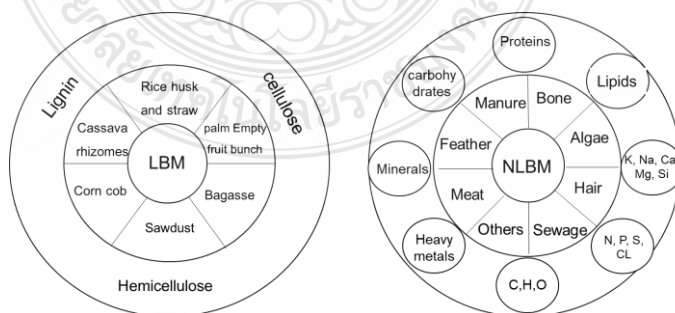


บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ประเทศไทยเป็นประเทศเขตร้อน (Tropical country) ซึ่งเป็นกลุ่มของประเทศที่มีความหลากหลายทางชีวภาพสูง ด้วยสาเหตุนี้จึงส่งผลให้เกิดอุตสาหกรรมการเกษตรในประเทศที่หลากหลายตามมา และถูกจัดให้เป็นประเทศเกษตรกรรม (Agricultural country) ที่มีความสำคัญ ผลพลอยได้ที่สำคัญนอกจากผลผลิตทางการเกษตร คือชีวมวลเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมทางการเกษตร โดยชีวมวลทางการเกษตรสามารถแบ่งออกได้ 2 ประเภท คือ 1) ชีวมวลเหลือทิ้งที่มีเส้นใย (Lignocellulosic Biomass Waste) คือ ชีวมวลอินทรีย์เหลือทิ้งที่มีองค์ประกอบของ ลิกนิน (Lignin) เส้นใยเซลลูโลส (Cellulose) และ เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) เป็นองค์ประกอบหลัก ซึ่งเซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลส มีโครงสร้างเป็นโพลิเมอร์ประเภทน้ำตาล และ ลิกนิน คือสารประกอบประเภท อะโรมาติกโพลีเมอร์ ซึ่งสารประกอบเหล่านี้พบได้ในผนังเซลล์ของพืช [1] ชีวมวลอินทรีย์เหลือทิ้งประเภทนี้ เช่น เศษไม้ ขี้เลื่อย เส้นใยข้าวโพด กากมันสำปะหลัง ขานอ้อย แกลบ ชังข้าวโพด ฟางข้าว กะลาปาล์ม ทะลายปาล์มเปล่า และขยะจากกระบวนการแปรรูปอาหาร เป็นต้น 2) ชีวมวลเหลือทิ้งที่ไม่มีเส้นใย (Non - Lignocellulose biomass Waste) คือ ชีวมวลอินทรีย์เหลือทิ้งที่ไม่ได้ประกอบด้วย ลิกนิน เซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลส เช่น มูลสัตว์ ขนสัตว์ กระดูกของสัตว์ และ กากตะกอนของเสีย (Sewage sludge) เป็นต้น [2]



รูปที่ 1.1 แสดงการจำแนกประเภทของชีวมวล

ในปัจจุบันชีวมวลเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมเหล่านี้สามารถนำมาแปรรูปในเชิงของพลังงานทดแทน (Renewable energy) เช่น เชื้อเพลิงแข็ง เชื้อเพลิงเหลว พลังงานความร้อน และก๊าซชีวภาพ เป็นต้น แต่ด้วยความหลากหลายของชีวมวลเหลือทิ้งทางการเกษตร การแปรรูปชีวมวลเหลือทิ้งเป็นพลังงานทดแทนจึงอาจยังไม่ครอบคลุมถึงชีวมวลเหลือทิ้งที่มีอยู่ทั้งหมด ดังนั้นอีกทางเลือกหนึ่งคือ การแปรรูปชีวมวลเหลือทิ้งทางการเกษตรเพื่อผลิตเป็นวัสดุคาร์บอนที่คุณภาพสูงเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ หรือคาร์บอนหมุนเวียน (Renewable carbon) จึงเป็นอีกแนวทางหนึ่งที่มีคุณค่าและน่าสนใจศึกษา

ปาล์มน้ำมันเป็นพืชเศรษฐกิจที่มีความสำคัญเป็นอันดับต้นๆ ของประเทศไทย ที่มีบทบาทสำคัญทั้งในด้านความมั่นคงทางอาหารและพลังงาน พื้นที่เพาะปลูกส่วนใหญ่อยู่บริเวณภาคใต้ มีพื้นที่คิดเป็นปริมาณร้อยละ 85 ของพื้นที่เพาะปลูกปาล์มทั่วประเทศ ในปี 2562 ประเทศไทยมีพื้นที่เพาะปลูกปาล์มน้ำมันทั้งหมด 6.10 ล้านไร่ โดยมีพื้นที่ที่สามารถเก็บเกี่ยวผลผลิตได้ 5.62 ล้านไร่ และผลผลิตปาล์มน้ำมันรวม 16.4 ล้านตัน ซึ่งเพิ่มขึ้นจากปี 2560 ที่มีพื้นที่ให้ผล 4.98 ล้านไร่ และผลผลิต 14.4 ล้านตัน [3] ดังนั้นจึงพบชีวมวลเหลือทิ้งเป็นจำนวนมาก ทั้งจากสวนปาล์ม ได้แก่ ลำต้นปาล์ม ใบและหางปาล์ม และจากโรงงานสกัดและแปรรูปปาล์มน้ำมัน ในโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม พบว่า ทะลายปาล์มสด 1,000 กิโลกรัม จะให้น้ำมันปาล์มดิบ 250 กิโลกรัม โดยเป็นน้ำมันจากเนื้อปาล์มประมาณ 200 กิโลกรัม และน้ำมันจากเมล็ดในปาล์ม 50 กิโลกรัม ส่วนที่เหลือ 750 กิโลกรัม เป็นของเสียเหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตปาล์มน้ำมัน ซึ่งประกอบด้วย ทะลายปาล์มเปล่า กะลาปาล์ม เส้นใยปาล์ม กากสลัดจ์ และน้ำเสีย อย่างไรก็ตามของเสียดังกล่าวมีศักยภาพในการนำมาแปรรูปเพื่อเพิ่มคุณค่าได้ นอกจากนี้ เป็นการเพิ่มรายได้ให้กับอุตสาหกรรมปาล์มน้ำมันทั้งระบบ เช่น การนำไปใช้เชิงพลังงาน และการนำมาแปรรูปให้วัสดุทดแทนหรือวัสดุที่มีคุณภาพสูงและมีมูลค่าเพิ่มได้ และด้วยปัญหาของปริมาณและราคาของชีวมวลเหลือทิ้งที่ไม่คงที่ เนื่องจากขึ้นกับฤดูกาลและความเสี่ยงจากภัยธรรมชาติ ปัญหาของชีวมวลเหลือทิ้งจำนวนมากมีความชื้นสูงไม่เหมาะสำหรับนำมาเป็นเชื้อเพลิงและต้องผ่านกระบวนการเตรียมก่อนทำให้มีต้นทุนที่สูง ดังนั้นจึงเป็นต้องมีการวิจัยและนวัตกรรมที่เกี่ยวข้องกับการนำเศษวัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมปาล์มน้ำมันมาผลิตเป็นวัสดุที่มีคุณภาพสูงเพื่อเป็นแนวทางต่อการต่อยอดในเชิงพาณิชย์อย่างครบวงจร ดังนั้นวัสดุที่มีศักยภาพสูงและมีปริมาณอย่างเพียงพอเช่น ทะลายปาล์มเปล่า จึงเป็นจุดมุ่งหมายสำคัญที่ได้รับการพิจารณา

การแปรรูปวัสดุคาร์บอนคุณภาพสูงโดยผ่านกระบวนการทางเคมีความร้อน ที่เรียกว่า ไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนไนเซชัน (Hydrothermal carbonization, HTC) และกระบวนการกระตุ้น (Activation)

เพื่อให้เป็นวัสดุคาร์บอนคุณภาพสูง เป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการนำทะลายปาล์มเปล่าไปใช้ประโยชน์ เนื่องจากกระบวนการ HTC เป็นกระบวนการคาร์บอนไนเซชันแบบเปียก (Wet carbonization process) จึงสามารถเลือกใช้วัตถุดิบเริ่มต้นที่มีความชื้นสูงโดยไม่จำเป็นต้องผ่านกระบวนการอบแห้งก่อนใช้งาน [4], [5] ซึ่งสามารถป้อนเข้าสู่กระบวนการ HTC ได้โดยตรง เนื่องจากกระบวนการ HTC เป็นการทำปฏิกิริยาระหว่างชีวมวลและน้ำ จึงเหมาะกับชีวมวลที่มีความชื้นสูง เช่น ทะลายปาล์มเปล่า เป็นต้น กระบวนการดังกล่าวเป็นการทำปฏิกิริยาเพื่อให้ได้วัสดุคาร์บอนแข็ง ที่เรียกว่า ไฮโดรชาร์ (Hydro-char) ในช่วงอุณหภูมิ 160–250 °C [6], [7] ภายใต้สภาวะความดันที่เกิดขึ้นตามอุณหภูมิ ทำให้เกิดกระบวนการสลายตัวของลิกนิน และเส้นใยเฮมิเซลลูโลส และเซลลูโลส ในชีวมวล และเกิดเป็นสารที่มีโมเลกุลขนาดเล็ก และไฮโดรชาร์ซึ่งมีปริมาณคาร์บอนเพิ่มขึ้นและมีคุณสมบัติการดูดซับที่เฉพาะตัว เนื่องจากมีหมู่ฟังก์ชันทางเคมีในไบโอชาร์เกิดขึ้น ซึ่งแตกต่างจากถ่านชีวภาพที่ได้จากกระบวนการคาร์บอนไนเซชันแบบดั้งเดิม หรือการคาร์บอนไนเซชันแบบแห้ง (Dry carbonization) และนอกจากนี้ ไฮโดรชาร์ที่ได้จากกระบวนการ HTC ยังสามารถนำมาผ่านกระบวนการกระตุ้นเพื่อเพิ่มคุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางเคมี โดยวัสดุคาร์บอนหลังจากผ่านกระบวนการกระตุ้นจะถูกเรียกว่า ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) ซึ่งเป็นวัสดุที่มีศักยภาพในการนำไปประยุกต์งาน เช่น นำมาเป็นตัวดูดซับ วัสดุสำหรับกักเก็บพลังงาน และตัวรองรับตัวกระตุ้น เป็นต้น ซึ่งเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่มีความสำคัญในการแปรรูปทะลายปาล์มเปล่าให้เกิดคุณค่าในอนาคต และเป็นการนำวัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมมาทำให้เกิดประโยชน์สูงสุด

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการใช้ประโยชน์จากชีวมวลเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมปาล์มน้ำมัน คือ ทะลายปาล์มเปล่า ซึ่งเป็นวัสดุที่มีความชื้นสูงและมูลค่าต่ำ เพื่อผลิตเป็นวัสดุคาร์บอนที่มีคุณภาพสูง รวมถึงศึกษาคุณสมบัติและประสิทธิภาพของวัสดุคาร์บอนสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ในด้านการดูดซับ ก๊าซ CO₂ เป็นอีกแนวทางหนึ่งสำหรับการเพิ่มมูลค่าให้กับทะลายปาล์มเปล่า อีกทั้งยังเป็นทางเลือกหนึ่งที่น่าวัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมปาล์มน้ำมันมาใช้ประโยชน์ ลดค่าใช้จ่ายในการกำจัดวัสดุเหลือทิ้งและกระตุ้นให้เกิดอุตสาหกรรมต่อเนื่องต่าง ๆ ตามมา อันส่งผลต่อการพัฒนาทรัพยากรธรรมชาติที่เป็นฐานการผลิตภาคเกษตรให้เข้มแข็งในประเทศและยั่งยืนต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาการผลิตไฮโดรคาร์บอนจากทะเลสาบปาล์มเปลาด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนไนเซชัน
2. เพื่อศึกษาการผลิตและทดสอบคุณสมบัติถ่านกัมมันต์จากไฮโดรคาร์บอนด้วยกระบวนการกระตุ้นทางเคมี
3. เพื่อทดสอบประสิทธิภาพการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ของไฮโดรคาร์บอนและถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการแปรรูปทะเลสาบปาล์มเปลา ซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์มให้เป็นวัสดุที่มีคุณภาพสูง ได้แก่ ไฮโดรคาร์บอนและถ่านกัมมันต์ โดยใช้กระบวนการ HTC และกระบวนการกระตุ้นทางเคมีในการผลิต โดยทำการศึกษาปัจจัยต่าง ๆ เช่น ตัวกระตุ้น อุณหภูมิ และเวลาในการทำปฏิกิริยา ที่มีผลต่อ พื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุน ขนาดรูพรุน ปริมาณคาร์บอนและปริมาณคาร์บอนคงตัว ของวัสดุคุณภาพสูงที่ผลิตได้ นอกจากนี้ ศึกษาการทดสอบการดูดซับก๊าซ CO₂ ของวัสดุคุณภาพสูงที่ผลิตได้กับถ่านกัมมันต์เชิงพาณิชย์เพื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติอีกด้วย

บทที่ 2

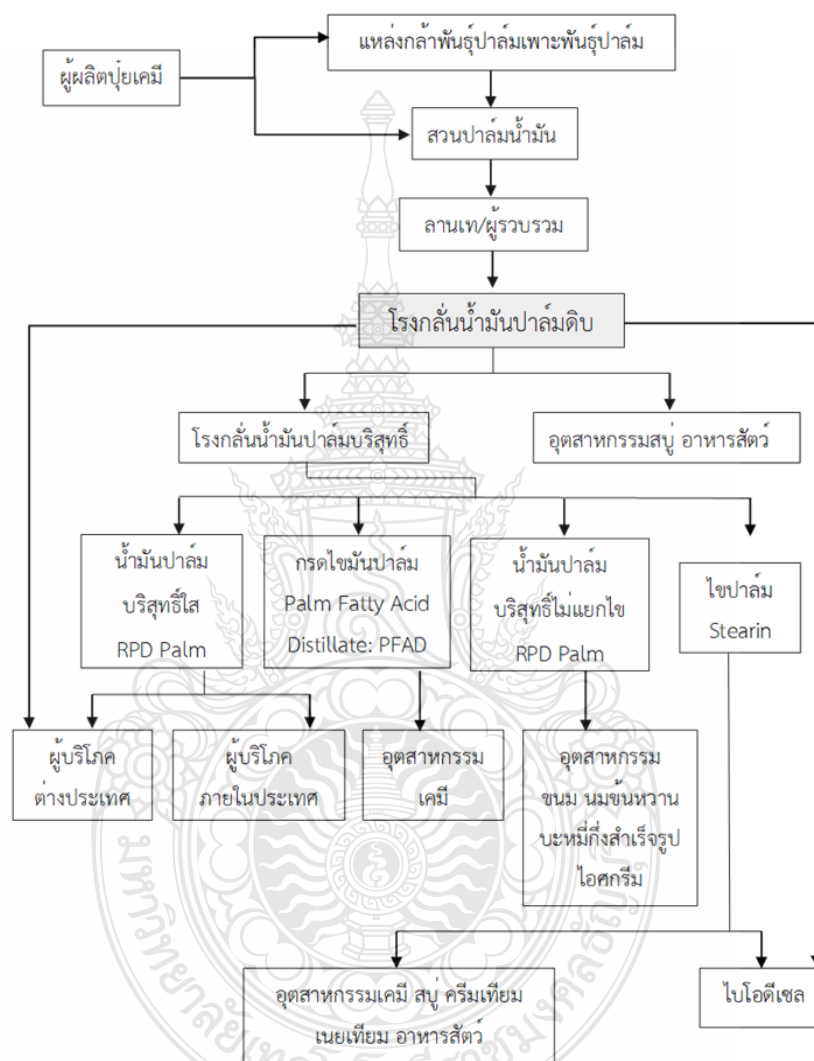
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 อุตสาหกรรมปาล์มน้ำมัน

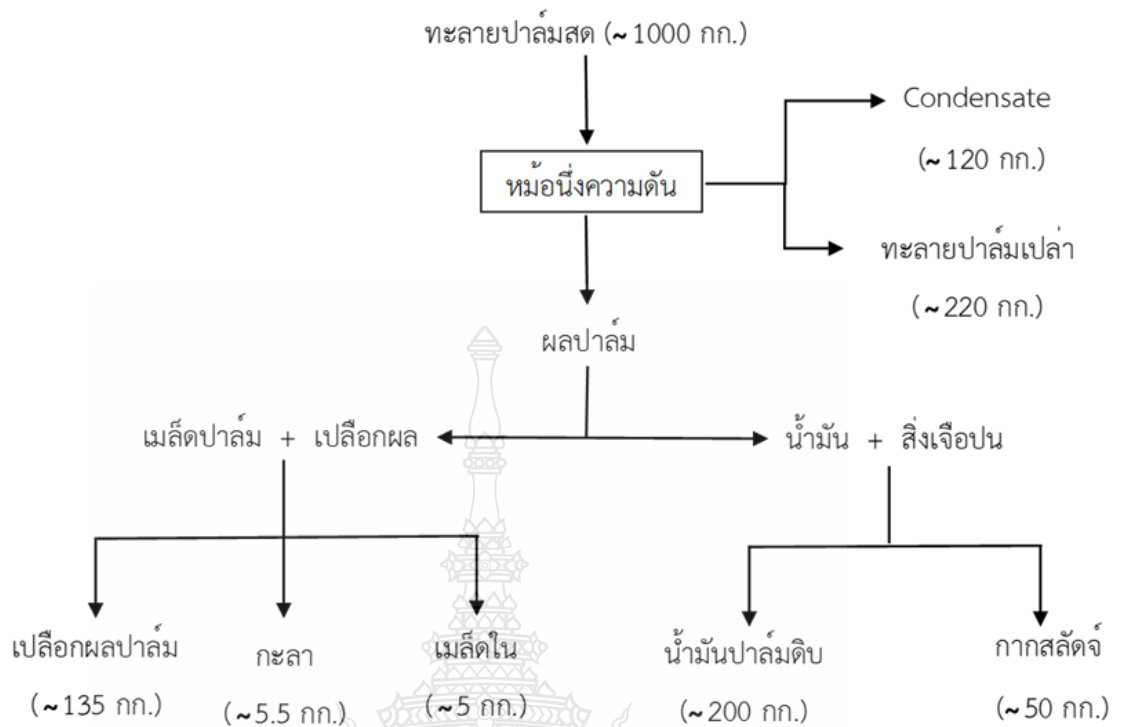
อุตสาหกรรมปาล์มน้ำมันและน้ำมันปาล์มเป็นอุตสาหกรรมที่มีความเกี่ยวเนื่องกัน โดยที่องค์ประกอบหลักที่เกี่ยวข้องกับอุตสาหกรรม ได้แก่ อุตสาหกรรมต่อเนื่องในระดับปลายทาง (อุตสาหกรรมโอเลโอเคมี สบู่ อาหารสัตว์ ขนบะหมี่กึ่งสำเร็จรูป นมข้นหวาน เนยเทียม ครีมเทียม ไบโอดีเซล) โรงกลั่นน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ ย้อนกลับไปโรงสกัดน้ำมันปาล์มดิบ เกษตรกรผู้ปลูกปาล์มน้ำมัน ผู้รวบรวมวัตถุดิบ (ลานเท) และเกษตรกรหรือโรงเรือนเพาะชำพันธุ์ปาล์ม เป็นต้น ผู้เกี่ยวข้องเหล่านี้มีความสำคัญผลักดันให้เกิดอุตสาหกรรมปาล์มน้ำมันและน้ำมันปาล์ม ดังรูปที่ 1 [7] เนื่องจากความต้องการในปัจจุบันที่เพิ่มมากขึ้นของผู้บริโภค ส่งผลต่ออุตสาหกรรมปาล์มน้ำมันในประเทศขยายตัวอย่างต่อเนื่องส่งผลต่อปริมาณพื้นที่การเพาะปลูกปาล์มน้ำมันในประเทศ และในขณะเดียวกันการขยายตัวดังกล่าว ส่งผลต่อวัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมปาล์มน้ำมันที่เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน

กระบวนการสกัดน้ำมันปาล์มจากอุตสาหกรรมปาล์มน้ำมัน จะเริ่มต้นจากการนำทะลายปาล์มสด เข้าสู่กระบวนการนี้ ในหม้อหนึ่งความดันสูง เพื่อให้ผลปาล์มหลุดออกจากทะลายโดยในขั้นตอนนี้จะเกิดของเสียสองอย่าง ได้แก่ น้ำที่ออกจากทะลายปาล์ม ประมาณร้อยละ 12 โดยน้ำหนักของทะลายปาล์มสด และ ทะลายปาล์มเปล่า (Empty fruit bunch) ประมาณร้อยละ 22 โดยน้ำหนักของทะลายปาล์มสด ซึ่งผลปาล์มที่แยกออกจากทะลายปาล์มแล้วจะถูกแยกเอาน้ำมันออก โดยน้ำมันที่ถูกแยกออกมาจะเข้าสู่ขั้นตอนการทำความสะอาดเพื่อแยกสิ่งสกปรกที่เจือปนในน้ำมัน หรือที่เรียกว่า กากสลัดจ์ (Decanter cake) ซึ่งมีประมาณร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักของทะลายปาล์มสด และได้น้ำมันปาล์มดิบที่สะอาด ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของทะลายปาล์มสด ส่วนเปลือกของผลปาล์มผ่านกระบวนการแยกน้ำมันออกแล้วมีปริมาณ ร้อยละ 13.5 โดยน้ำหนักของทะลายปาล์มสด และเมล็ดปาล์มจะถูกกะเทาะแยกเป็นกะลาและเมล็ดใน โดยมีปริมาณร้อยละ 0.55 และ 0.50 โดยน้ำหนักของทะลายปาล์มสด ตามลำดับ โดยสรุปแล้วในกระบวนการสกัดน้ำมันดิบจากทะลายปาล์มจะได้น้ำมันดิบปริมาณร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของทะลายปาล์มสด ในน้ำมันดิบที่ผลิตได้จะแบ่งออกเป็นน้ำมันดิบที่ได้จากเปลือกผลปาล์ม ร้อยละ 80 และจากเมล็ดร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของน้ำมันดิบ

ส่วนที่เหลือร้อยละ 80 โดยน้ำหนักของทะลายปาล์มสด เป็นของเหลือทิ้งในอุตสาหกรรมปาล์ม น้ำมัน ซึ่งได้แก่ ทะลายปาล์มเปล่า เส้นใยเปลือกผลปาล์ม (Mesocarp fiber) กากสลัดจ์ กะลาปาล์ม และน้ำที่อยู่ในทะลายปาล์ม ดังรูปที่ 3 [8]



รูปที่ 2.1 เส้นทางอุตสาหกรรมปาล์มน้ำมันในประเทศไทย (สำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร พ.ศ. 2558) [7]



รูปที่ 2.2 ขั้นตอนการสกัดน้ำมันปาล์ม [8]



รูปที่ 2.3 ชีวมวลเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรม

ของเสียจากกระบวนการสกัดน้ำมันปาล์มบางส่วนถูกนำไปแปรรูปใช้เป็นอาหารเสริมสำหรับนมวัวเพราะมีโปรตีนและแคลเซียมค่อนข้างสูง เช่น กากสลัดจ์ เป็นต้น นอกจากนั้นยังมีการใช้ทะลายปาล์มเปล่าและเปลือกผลปาล์มผสมกับกากสลัดจ์ เพื่อผลิตปุ๋ยหมักได้อีกด้วย ในปัจจุบันยังมีของเหลือทิ้งจากกระบวนการสกัดน้ำมันปาล์มอีกจำนวนมากที่ยังไม่ได้ถูกนำไปใช้ประโยชน์ หรือมีการนำไปใช้แต่

ยังสร้างมูลค่าเพิ่มได้ไม่มาก ดังนั้นงานวิจัยและพัฒนาเพื่อศึกษาหาวิธีการใช้ประโยชน์อื่น ๆ จากของเหลือทิ้งในกระบวนการสกัดน้ำมันปาล์มจึงเป็นการช่วยลดปัญหาทางสิ่งแวดล้อมในการกำจัดของเหลือทิ้ง และยังเป็นการเพิ่มมูลค่าของทะลายปาล์มให้สูงขึ้น ซึ่งอาจเป็นส่วนหนึ่งในการทำให้ราคาปาล์มน้ำมันมีเสถียรภาพมากขึ้นอีกด้วย

2.1.1 ศักยภาพและคุณสมบัติของวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร

ผลการประเมินศักยภาพวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรปี พ.ศ. 2556 ซึ่งจะเห็นถึงปริมาณชีวมวลเหลือทิ้งที่เกิดขึ้น ปริมาณที่นำไปใช้ประโยชน์แล้ว และปริมาณชีวมวลเหลือทิ้งคงเหลือ แสดงในตารางที่ 2.2 [9] ชีวมวลบางชนิดไม่เหมาะนำมาแปรรูปเพื่อใช้ในงานเชิงพลังงานเนื่องจากความชื้นค่อนข้างสูง และบางชนิดมีปัญหาการจัดเก็บ เช่น รากไม้ ใบอ้อย ฟางข้าว ยอดอ้อย ทะลายปาล์เปล่า ยางพารา และเหง้ามันสำปะหลัง เป็นต้น ชีวมวลแต่ละประเภทจะให้พลังงานจากการเผาไหม้แตกต่างกัน ตามลักษณะของชีวมวลแต่ละชนิด และปริมาณความชื้นสะสมในชีวมวล ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2. 1 ปริมาณชีวมวลแต่ละชนิดในประเทศไทย ปี 2556 [3]

ประเภทของชีวมวล	ปริมาณที่เกิดขึ้น (ตัน)	ปริมาณที่นำไปใช้ ประโยชน์ (ตัน)	ปริมาณคงเหลือ (ตัน)
ฟางข้าว	19,005,628	8,112,801	10,892,827
แกลบ	8,145,269	8,006,283	138,986
ใบและยอดอ้อย	17,016,248	1,845,488	15,170,760
ชานอ้อย	28,026,762	28,026,762	0
ยอด ใบและลำต้นข้าวโพด	9,315,604	465,780	8,849,823
ชังข้าวโพด	1,215,079	1,094,082	120,997
เหง้ามันสำปะหลัง	6,045,508	164,197	5,881,312
กากมันสำปะหลัง	1,813,653	1,813,653	0
เปลือกมันสำปะหลัง	8,463,712	8,463,712	0
ลำต้นปาล์มน้ำมัน	1,957,280	0	1,957,280
ใบและทางปาล์ม	18,065,006	1,707,455	16,357,551
ทะลายปาล์มเปล่า	4,099,860	1,891,986	2,207,874
เส้นใยปาล์ม	2,434,292	2,434,292	0
กะลาปาล์ม	512,482	512,482	0

ตารางที่ 2. 1 ศักยภาพชีวมวลแต่ละชนิดในประเทศไทย ปี 2556 (ต่อ) [3]

ประเภทของชีวมวล	ปริมาณที่เกิดขึ้น (ตัน)	ปริมาณที่นำไปใช้ ประโยชน์ (ตัน)	ปริมาณคงเหลือ (ตัน)
ตอและกิ่งไม้ยางพารา	1,094,365	218,873	875,492
ปลายไม้ยางพารา	2,626,476	2,626,476	0
ขี้เลื่อยและเศษไม้ยางพารา	656,619	656,619	0
จั่นและทะลายของมะพร้าว	292,910	56,824	236,085
เปลือกและกาบของมะพร้าว	333,311	329,977	3,334
กะลามะพร้าว	252,508	230,540	21,968
เปลือกของเม็ดมะม่วงหิมพานต์	70,039	1,674	68,364
รวม	134,134,102	71,289,682	62,844,421



ตารางที่ 2. 2 คุณสมบัติชีวมวลเหลือทิ้งทางการเกษตร [9]

พืช	ส่วนประกอบ	ค่าความร้อน (kJ/kg)	ความชื้น (%)	ความหนาแน่นรวม (kg/m ³)
ข้าว	ฟางข้าว	12330	10	125
	แกลบ	14204	8.2	150
อ้อยโรงงาน	ใบ	15204	9.2	100
	ชานอ้อย	7368	50.73	120
มันสำปะหลัง	เหง้ามันสำปะหลัง	5494	59.4	250
	ลำต้น	7560	48.4	-
	ทางใบ	1760	78.4	-
ข้าวโพด	ชังข้าวโพด	16220	7	-
	ลำต้น	9830	41.7	-
ปาล์มน้ำมัน	ทะลายปาล์ม	7240	58.6	380
	เส้นใย	11800	31.84	250
	กะลาปาล์ม	18267	12	400
	ลำต้นปาล์ม	7540	48.4	-
ยางพารา	ไม้ยางพารา	8600	45	450
ยูคาลิปตัส	เปลือกไม้ยูคาลิปตัส	6745	50	-
มะพร้าว	ขุยมะพร้าว	6272	-	270

2.1.2 ราคาของชีวมวลเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมทางการเกษตร

ราคาของชีวมวลเหลือทิ้งทางการเกษตรแต่ละชนิดมีความแตกต่างกันอย่างชัดเจน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับ การนำชีวมวลเหลือทิ้งไปใช้ประโยชน์ในแนวทางที่แตกต่างกัน จากตารางที่ 4 จะแสดงให้เห็นว่า แกลบมีราคาสูงที่สุดอยู่ที่ 1,400 บาทต่อตัน และทะลายปาล์มเปล่ามีราคาต่ำที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับชีวมวลเหลือทิ้งทั้งหมด มีราคาอยู่ที่ 50 บาทต่อตัน และราคาของทะลายปาล์มเปล่ายังคงลดลงอย่างต่อเนื่อง เมื่อปีที่ผ่านมา ราคาของทะลายปาล์มเปล่าลดลงเหลือ 30 บาทต่อตัน แสดงดังตารางที่ 5 เนื่องจากมีความชื้นสูง ราคาต้นทุนการขนส่ง และความหลากหลายของการนำไปแปรรูปยังน้อย เป็นต้น [9]

ตารางที่ 2. 3 ราคาข้าวมวลเหลือทิ้งทางการเกษตรปี พ.ศ 2553 [9]

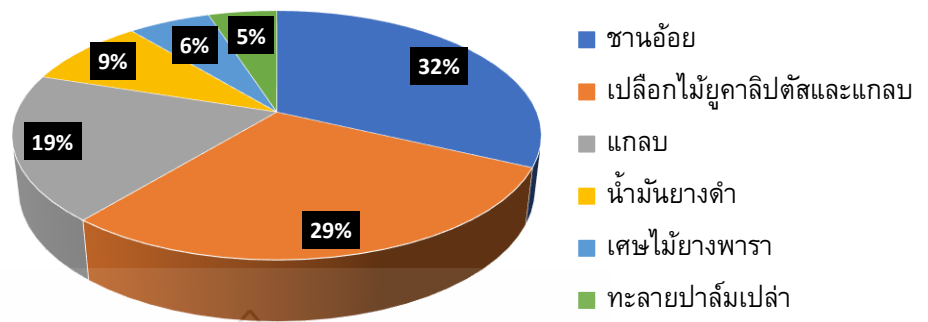
ลำดับ	ข้าวมวล	จังหวัด	ราคาข้าวมวล (บาท/ตัน)							
			ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.
1	แกลบ	สุรินทร์	1,000	900	1,000	1,100	1,200	1,100	1,100	1,200
		กำแพงเพชร	1,000	1,100	1,100	1,200	1,300	1,300	1,300	1,600
		สุพรรณบุรี	950	1,150	1,000	1,100	1,100	1,100	1,100	1,100
		พะเยา	-	300	-	-	-	-	-	-
		ฉะเชิงเทรา	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,400
2	ปึกไม้ยางพารา	กระบี่	50	400	400	400	400	550	550	550
		สงขลา	-	650	620	570	-	-	-	780
		นครศรีธรรมราช	750	750	-	750	750	750	750	750
		สุราษฎร์ธานี	700	700	700	700	700	700	700	700
		นราธิวาส	800	770	-	770	700	750	750	830
3	กะลาปาล์ม	สุราษฎร์ธานี	-	-	-	-	-	-	-	-
		กระบี่	1,500	-	1,500	1,500	1,500	1,500	1,800	
		เพชรบูรณ์	-	-	-	-	-	-	-	-
4	ทะลายปาล์มเปล่า	สุราษฎร์ธานี	-	-	-	-	-	-	-	-

ตารางที่ 2. 4 ราคาชีวมวลเหลือทิ้งทางการเกษตรปี พ.ศ 2553 (ต่อ) [9]

ลำดับ	ชีวมวล	จังหวัด	ราคาชีวมวล (บาท/ตัน)							
			ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.
5	ไม้ซี้บ	กระบี่	-	50	-	50	50	50	50	50
		นครปฐม	180	1,200	1,250	1,250	1,280	1,250	1,250	1,250
		อุดรธานี	-	-	-	-	-	-	-	-
		ขอนแก่น	-	-	-	-	-	-	-	-
		กาญจนบุรี	-	-	-	-	-	-	-	-
6	ใบอ้อยและ ยอด	สุพรรณบุรี	530	530	530	-	-	-	-	-

ตารางที่ 2. 4 ราคาทะลายปาล์มเปล่าจากจังหวัดกระบี่ ปี 2549-2561 [10]

ปี	บาท/ตัน												เฉลี่ย
	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	
2549	-	-	-	-	-	-	-	50	50	50	50	50	50.0
2550	50	50	50	50	50	50	50	100	100	90	90	90	68.3
2551	-	-	-	-	50	50	50	50	50	50	50	50	50.0
2552	-	-	-	-	50	50	50	50	50	50	50	50	50.0
2553		50	-	50	-	-	-	-	-	-	-	-	50.0
2554	50	50	50	50	50	50	50	50	-	50	50	50	50.0
2555	50	50	-	-	55	55	50	55	50	50	50	50	51.5
2556	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50.0
2557	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50.0
2558	50	50	50	50	50	50	50	20	20	20	20	20	37.5
2559	20	20	20	20	35	35	35	50	50	50	35	35	33.8
2560	35	35	35	35	35	20	-	-	-	-	-	-	32.5
2561	30	30	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	30.0



รูปที่ 2. 4 สัดส่วนเชื้อเพลิงชีวมวลเหลือทิ้งสำหรับผลิตกระแสไฟฟ้า [9]

จากการรวบรวมข้อมูลปาล์มน้ำมัน อุตสาหกรรมปาล์มน้ำมันในประเทศและข้อมูลชีวมวลเหลือทิ้งทางการเกษตรจากกระทรวงพลังงาน แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ของปริมาณชีวมวลที่เหลืออยู่จากการนำไปใช้ประโยชน์ และการนำชีวมวลไปผลิตกระแสไฟฟ้าและมูลค่าที่แตกต่างกัน แสดงในตารางที่ 2.4 ตารางที่ 2.5 และรูปที่ 4 ตามลำดับ ซึ่งจะพบว่า แกลบและขี้เถ้ามีสัดส่วนการใช้ผลิตกระแสไฟฟ้าสูงสุด เนื่องจากราคาเชื้อเพลิงปิโตรเลียมปรับตัวสูงขึ้น ส่งผลให้ภาคเอกชนหันมาใช้ชีวมวลกลุ่มนี้ซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งมาผลิตเป็นกระแสไฟฟ้า และความร้อนที่ใช้ในกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรม จนเกือบไม่เหลือศักยภาพที่จะมาผลิตเป็นวัตถุประสงค์อื่น ๆ ได้อีกต่อไป ส่งผลต่อศักยภาพคงเหลือของขี้เถ้าและแกลบที่ต่ำมากและมีราคาสูงขึ้นตามมา แต่ในทางตรงข้าม ทะลายปาล์มเปล่ามีสัดส่วนการใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้าที่ต่ำ ด้วยคุณสมบัติที่ไม่เหมาะสมต่อการทำไปเป็นเชื้อเพลิง ความหลากหลายในการแปรรูปน้อย จึงมีปริมาณคงเหลือปริมาณมาก ดังนั้นจึงควรมีการวิจัยพัฒนาและนวัตกรรมเพื่อแปรรูป ทะลายปาล์มเปล่า ให้เป็นวัสดุคุณภาพสูงเพื่อเพิ่มมูลค่า อันส่งผลต่อระบบเศรษฐกิจและการพัฒนาทรัพยากรธรรมชาติในประเทศต่อไป

2.2 วัสดุคาร์บอนคุณภาพสูง

วัสดุคาร์บอนที่มีคุณภาพสูงมีอยู่ด้วยกันหลายประเภท เช่น Graphite, Graphene, Carbon Nanotube, Fullerene, Carbon black และ Activated carbon เป็นต้น ซึ่งในแต่ละประเภทจะมีคุณสมบัติและกระบวนการผลิตที่มีความเหมาะสมสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ที่แตกต่างกัน เช่น

สามารถนำมาประยุกต์ใช้งานในทางการแพทย์เป็นวัสดุชีวภาพที่ถูกใช้ในร่างกายมนุษย์ ข้อต่อของร่างกาย กระดูก และเป็นตัวนำส่งยา (Drug Delivery) เพื่อให้ยาเข้าสู่เป้าหมายยังจุดที่ต้องการ หรือเป็นส่วนรยนต์และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ใช้ในงานเชิงพลังงาน เป็นอุปกรณ์ช่วยกักเก็บพลังงานหรือตัวเก็บประจุยิ่งยวด ใช้เป็นตัวดูดซับในการบำบัดน้ำเสียและการกำจัดสารพิษในสิ่งแวดล้อม และเป็นตัวรองรับตัวกระตุ้นในโรงงานอุตสาหกรรม เป็นต้น ซึ่งจะเห็นว่าวัสดุคาร์บอนคุณภาพสูงนั้นมีความสำคัญและมีแนวโน้มว่าความต้องการจะยิ่งสูงขึ้นในโลกยุคปัจจุบัน

2.2.1 ถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon)

ถ่านกัมมันต์หมายถึงผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการนำถ่านชีวภาพที่มีองค์ประกอบหลักเป็นคาร์บอนมาผ่านกระบวนการกระตุ้น (Activation) เกิดเป็นผลิตภัณฑ์ของแข็งสีดำ มีรูพรุนหรือรอยแตกขนาดเล็กจำนวนมากเกิดขึ้นในโครงสร้าง ทำให้ลักษณะทางกายภาพเปลี่ยนไป ซึ่งมีขนาดตั้งแต่ 2 ถึง 2,000 nm และ พื้นที่ผิวภายใน (internal surface area) 400-2500 m²/g โดยองค์ประกอบหลักคือธาตุคาร์บอน มีปริมาณตั้งแต่ร้อยละ 87 ถึง 97 มีอีกรูปเป็นคาร์บอนอสัณฐาน (Amorphous carbon) เนื่องจากกระบวนการกระตุ้นทำให้โครงสร้างของถ่านมีรูพรุนขนาดเล็กเป็นจำนวนมาก จึงส่งผลต่อปริมาณพื้นที่ผิวและความจุที่สูงขึ้น และสามารถใช้ในการดูดซับสารได้หลายประเภททั้งขนาด อนุภาค โมเลกุล และไอออน นอกจากนี้ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อ การดูดซับนอกจากขนาดของรูพรุนและพื้นที่ผิวแล้ว คือ ค่าความเป็นกรด-ด่าง อุณหภูมิ เวลาในการสัมผัส และชนิดของสารที่ถูกดูดซับ เป็นต้น และยังมีธาตุต่าง ๆ ในองค์ประกอบของถ่าน เช่น ออกซิเจน ไฮโดรเจน กำมะถัน และไนโตรเจน โดยทั่วไปวัตถุดิบที่นำมาผลิตถ่านกัมมันต์ควรมีสสมบัติที่มีปริมาณสารระเหยต่ำ มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบในปริมาณสูง และมีคุณสมบัติที่ โครงสร้างของถ่านกัมมันต์มีความเป็นผลึกอยู่บ้างแต่ไม่สมบูรณ์เหมือนถ่านแกรไฟต์ จากคุณสมบัติเหล่านี้จึงทำให้ถ่านกัมมันต์แตกต่างจากถ่านชนิดอื่น ๆ เช่น ถ่านลิกไนต์ ถ่านโค้ก และถ่านไม้ เป็นต้น [11], [12], [13]

ประเภทของถ่านกัมมันต์

ในปัจจุบันถ่านกัมมันต์แบ่งโดยอาศัยหลักการดังนี้ [11]

1. แบ่งตามประเภทการกระตุ้น

1.1 กระตุ้นด้วยวิธีทางเคมี (chemical activated carbon) คือ ถ่านกัมมันต์ที่เกิดจากการใช้สารกระตุ้นหรือสารเคมีทำปฏิกิริยากับผิวคาร์บอน

1.2 กระตุ้นด้วยวิธีทางกายภาพ (physical activated carbon) ถ่านกัมมันต์ที่ได้จากวิธีนี้มักจะมีรูพรุนขนาดเล็ก ใช้ก๊าซและไอน้ำในการกระตุ้น

2. แบ่งตามขนาดรูพรุนบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ ซึ่งแบ่งตามเกณฑ์ของ IUPAC [13]

2.1 ขนาดรูพรุนเฉลี่ยไม่เกิน 2 นาโนเมตร คือถ่านกัมมันต์ที่มีรูพรุนขนาดเล็ก ชนิด micropores ถ่านประเภทนี้ มีความสามารถดูดซับสูงที่สุด นิยมนำมาใช้ประโยชน์ในการดูดซับก๊าซและไอระเหย

2.2 ขนาดของรูพรุนระหว่าง 2-50 นาโนเมตร คือ ถ่านกัมมันต์ที่รูพรุนมีขนาดกลาง ชนิด mesopores นิยมใช้ในอุตสาหกรรมการฟอกสี เช่น อุตสาหกรรมน้ำตาล โดยฟอกสีน้ำตาลดิบ ให้มีความขาวสะอาด บริสุทธิ์ เป็นต้น

2.3 ขนาดของรูพรุนใหญ่กว่า 50 นาโนเมตร คือ ถ่านกัมมันต์ที่รูพรุนมีขนาดใหญ่ ชนิด macropores โดยปกติไม่นิยมในการดูดซับสารต่าง ๆ

3. แบ่งตามความหนาแน่นของถ่านกัมมันต์

3.1 ถ่านกัมมันต์ที่มีความหนาแน่นน้อยกว่า 0.35 กรัมต่อมิลลิลิตร ถ่านกัมมันต์ประเภทนี้นิยมใช้ในการดูดซับในสารละลาย เช่น ใช้ในอุตสาหกรรมผลิตน้ำตาล โดยการดูดซับสีน้ำตาลของน้ำตาลดิบให้มีความขาวสะอาดบริสุทธิ์ เป็นต้น

3.2 ถ่านกัมมันต์ที่มีความหนาแน่นมากกว่า 0.45 กรัมต่อมิลลิลิตร ถ่านกัมมันต์ประเภทนี้มักใช้ดูดซับสารพิษ หรือไอระเหย

4. แบ่งตามรูปร่างลักษณะ

4.1 ถ่านกัมมันต์ชนิดผง (powder activated carbon) ซึ่งได้จากการบด ถ่านกัมมันต์ชนิดนี้มักใช้ดูดซับในสถานะของเหลว

4.2 ถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด (granular activated carbon) ซึ่งได้จากการอัดด้วยเครื่องอัดให้มีลักษณะเป็นเส้นกลม ๆ จากนั้น นำมาตัดเป็นชิ้น ให้มีขนาดเท่า ๆ กัน หรือทำเป็นเกล็ดโดยการย่อย

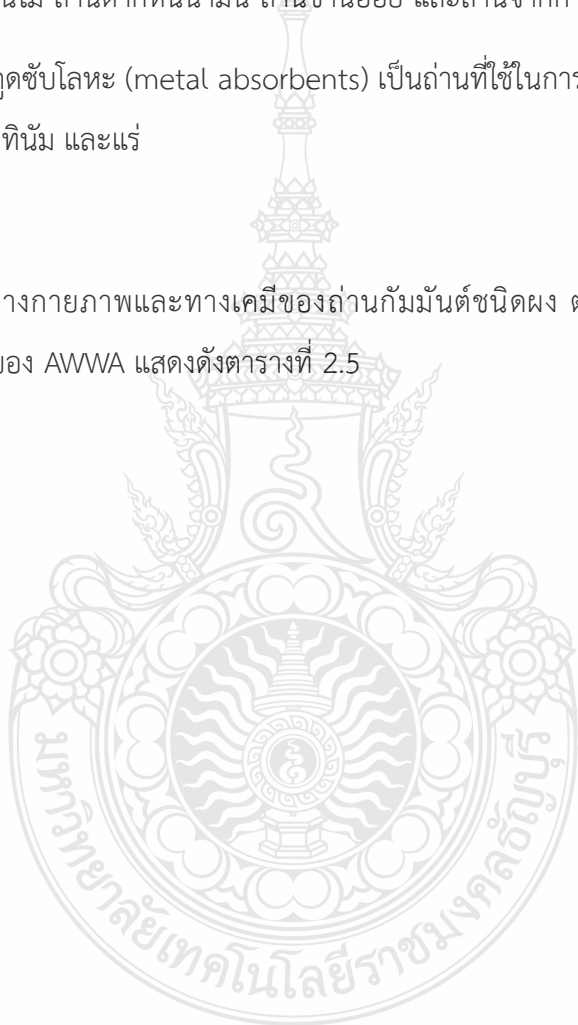
5. แบ่งตามประเภทของตัวถูกดูดซับ

5.1 ถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในการดูดซับก๊าซ (gas absorbents) ส่วนใหญ่เป็นถ่านกัมมันต์ที่เกิดจากการเผาถ่านประเภท hard artificial char เช่น ถ่านที่ได้จากเมล็ดผลไม้ หรือถ่านไม้ที่ได้จากเตาที่เผาที่ความดันสูง

5.2 ดูดซับสี (color absorbents) เป็นถ่านกัมมันต์ที่ใช้เป็นสารฟอกสีส่วนใหญ่ได้จาก ถ่านเคลือบ ถ่านไม้ ถ่านตากหินน้ำมัน ถ่านชานอ้อย และถ่านจากกากน้ำตาล.

5.3 ดูดซับโลหะ (metal absorbents) เป็นถ่านที่ใช้ในการแยกโลหะชนิดต่าง ๆ เช่น ทอง เงิน แพลทินัม และแร่

คุณลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของถ่านกัมมันต์ชนิดผง ตาม มอก. 900-2562 โดยทดสอบตามมาตรฐานของ AWWA แสดงดังตารางที่ 2.5



ตารางที่ 2. 5 ลักษณะทางกายภาพของถ่านกัมมันต์ชนิดผง

คุณลักษณะ	เกณฑ์กำหนด (มอก. 900-2565)	
	ชั้นคุณภาพพิเศษ	ชั้นคุณภาพที่ 1
ค่าไอโอดีน ไม่น้อยกว่า (มิลลิกรัมต่อกรัม)	1,000	600
ความชื้น % ไม่เกิน (เศษส่วนโดยมวล)	20	
ความหนาแน่นปรากฏ (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)	0.20 - 0.75	

ลักษณะและโครงสร้างของถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์มีการจัดเรียงตัวของอะตอมคาร์บอนในโครงสร้างใกล้เคียงกับแกรไฟต์แต่การมีความเป็นระเบียบน้อยกว่าโครงสร้างผลึกแกรไฟต์ ประกอบด้วยชั้นของอะตอมคาร์บอนสร้างพันธะกันเป็นรูปวงเบนซิน ซึ่งจะตอมในแผ่นระนาบที่สมมาตรกันสร้างพันธะเดียวกับอะตอมของคาร์บอนที่อยู่ถัดไป โดยอิเล็กตรอนที่เกิดพันธะ เรียกว่าซิกมาอิเล็กตรอน (σ -electron) และอิเล็กตรอนที่เหลือซึ่งเป็นไพอิเล็กตรอน (π -electron) จะเคลื่อนที่ไปทั่วทั้งโครงสร้าง (หรือเกิดเรโซแนนซ์) ทำให้โครงสร้างมีความเสถียรมากขึ้น โดยยึดเหนี่ยวระหว่างชั้นด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ โครงสร้างของถ่านกัมมันต์จะขึ้นอยู่กับสถานะในการผลิต ได้แก่ อุณหภูมิและระยะเวลาในการให้ ความร้อน เป็นต้น โดยทั่วไปสามารถพิจารณาโครงสร้างของถ่านกัมมันต์ออกได้ 2 ประเภท ได้แก่ โครงสร้างทางกายภาพ และโครงสร้างทางเคมีของผิวถ่านกัมมันต์รายละเอียดมีดังนี้ [12], [13]

1. โครงสร้างทางกายภาพของถ่านกัมมันต์ (Physical Structure of Activated Carbon)

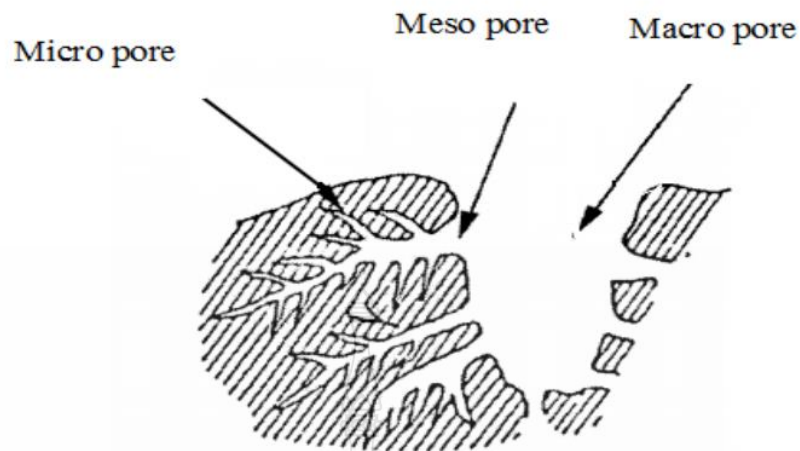
โดยทั่วไปจะหมายถึงลักษณะพื้นผิว ความหยาบและขรุขระบนพื้นผิว โครงสร้างของรูพรุน รวมไปถึงขนาดรูพรุน และปริมาตรรูพรุนของถ่านกัมมันต์ โดยโครงสร้างของถ่านกัมมันต์ที่มีความแตกต่างกันเกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการกระตุ้น ซึ่งในกระบวนการกระตุ้นจะทำให้ถ่านเกิดรูพรุนมาก เนื่องจากเกิดการสูญเสียองค์ประกอบของคาร์บอน ที่อยู่ระหว่างผลึก ทำให้รูพรุนเกิดพื้นที่ผิวสัมผัสมากขึ้น การกระตุ้นที่เหมาะสม หมายถึงการสร้างรูพรุนจำนวนมากขึ้น ไม่ใช่เป็นการขยายขนาดของรูให้ใหญ่ขึ้น รูพรุนที่ดีควรเป็นรูพรุนขนาดเล็ก ที่จะเกิดลึกเข้าไปในเนื้อของถ่านกัมมันต์ และแทรกตัวกันอย่างไม่เป็นระเบียบและไม่สม่ำเสมอ รูพรุนของถ่านกัมมันต์นั้นสามารถจำแนกได้ตามขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนคือ

(1) แมโครพอร์ (macropores) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 100 - 200 นาโนเมตร ปริมาตรของรูพรุนขนาดแมโครพอร์อยู่ระหว่าง $0.2 - 0.8 \text{ cm}^3/\text{g}$ มีพื้นที่ผิวประมาณ $0.5 \text{ m}^2/\text{g}$ ดังนั้น รูพรุนประเภทแมโครพอร์จึงไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ในการดูดซับ เป็นเพียงช่องทางผ่านให้อนุภาคเข้าไปสู่รูพรุนที่เล็กกว่า

(2) เมโซพอร์ (mesopores) หรือ ทรานซิชันนัลพอร์ (transitional pores) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ ระหว่าง 2 - 50 นาโนเมตร ปริมาตรอยู่ระหว่าง $0.1 - 0.5 \text{ cm}^3/\text{g}$ พื้นที่ผิว 20-100 m^2/g เหมาะสำหรับการดูดซับ สารพิษ สี และก๊าซบางชนิด

(3) ไมโครพอร์ (micropores) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนน้อยกว่า 1.5 นาโนเมตร ปริมาตร $0.2 - 0.6 \text{ cm}^3/\text{g}$ พื้นที่ผิวจำเพาะเป็นจำนวนมากหลายร้อยตารางเมตรต่อกรัม บางครั้งถึง $1,500 \text{ m}^2/\text{g}$ ไมโครพอร์มีประสิทธิภาพในการดูดซับสูงที่สุด เนื่องจากมีพลังงานดูดซับ (adsorption energy) และมีพื้นที่การดูดซับมากที่สุด รูพรุนขนาดเล็กเป็นจำนวนมากส่งผลให้ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะสูง [13]

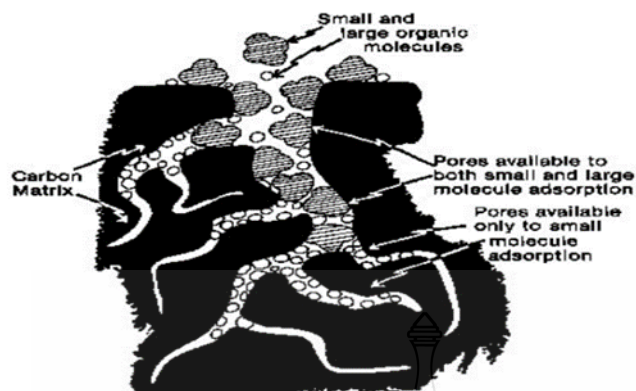
แต่สำหรับการผลิตถ่านกัมมันต์ โครงสร้างของถ่านกัมมันต์ที่ได้ส่วนใหญ่ประกอบด้วยรูพรุนหลายขนาดปะปนกัน มีทั้งแมโครพอร์ เมโซพอร์และไมโครพอร์เรียกว่า “โครงสร้างผสม (mixed structural type)” ดังรูปที่ 2.5. [14] พบว่าแมโครพอร์เป็นเพียงช่องทางผ่านให้อนุภาคเข้าไปสู่รูพรุนที่เล็กกว่า โดยมีเมโซพอร์เป็นส่วนประกอบที่แยกออกมาจากไมโครพอร์อีกทีหนึ่ง โดยทั่วไปถ่านกัมมันต์เกรดทางการค้าจะมีรูพรุนประเภทเมโซพอร์ ประมาณ $200-300 \text{ m}^2/\text{g}$ สำหรับรูพรุนประเภทไมโครพอร์ จะมีประมาณร้อยละ 90-95 ของพื้นที่ผิวทั้งหมด ซึ่งมีผลต่อความสามารถในการดูดซับ นอกจากนี้ธรรมชาติและลักษณะของผิว ยังส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับด้วย ดังนั้น ถ้าบริเวณผิวของถ่านกัมมันต์เป็นเพียงระนาบ (basal planes) ซึ่งไม่มีหมู่ฟังก์ชันนอล (functional groups) อื่น ๆ การดูดซับอาจเกิดจากไฟิเล็กตรอน หรือแรงแวนเดอร์วาลส์ ซึ่งแรงยึดเหนี่ยวทั้งสองนี้ เป็นแรงที่อ่อนมาก แม้ว่าจะเกิดการดูดซับได้แต่ก็สามารถหลุดออกได้ง่ายเช่นกัน



รูปที่ 2. 5 โครงสร้างแบบผสมของถ่านกัมมันต์ [14]

2. โครงสร้างทางเคมีของผิวถ่านกัมมันต์ (Chemical Structure of Activated Carbon Surface) ที่บริเวณรูพรุน และพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ จะมีธาตุที่สามารถสร้างพันธะเคมีระหว่างอะตอม หรือโมเลกุลอื่น ๆ ได้ เช่น ออกซิเจน ซัลเฟอร์ ไนโตรเจน แมกนีเซียม และไฮโดรเจน ในกระบวนการผลิต ถ่านกัมมันต์จะทำให้ธาตุเหล่านี้เปลี่ยนแปลงไป ซึ่งอะตอมของธาตุต่างๆ เหล่านี้ จะมีอิทธิพลอย่างมาก ต่อคุณสมบัติในการยึดเกาะ หรือการดูดซับทางเคมีของถ่านกัมมันต์ เช่น ความเป็นกรด หรือเบส เนื่องจากธาตุเหล่านี้ สามารถรวมตัวเกิดพันธะเคมีกับอะตอมของคาร์บอน เกิดเป็นหมู่ฟังก์ชันต่าง ๆ เช่น carboxylic acid anhydride, fluoresce in-type lactone, carboxyl, hydroxyl, normal lactone, และphenolic เป็นต้น

ความเป็น กรด-เบส ของถ่านกัมมันต์ โดยพบว่า ปริมาณของอะตอม O บนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ส่งผลโดยตรงต่อความเป็นกรด หรือเบส กล่าวคือ ถ่านกัมมันต์ที่มีปริมาณอะตอมบนพื้นผิวมาก จะมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก ซึ่งแสดงถึงความเป็นกรด ส่วนถ่านกัมมันต์ที่มีอะตอมของออกซิเจนน้อย จะมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุลบได้ดี ก็แสดงความเป็นเบส



รูปที่ 2. 6 แบบจำลองโครงสร้างการดูดซับของถ่านกัมมันต์ [15]

2.2.2 กระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์จากชีวมวล

การผลิตถ่านกัมมันต์มีวิธีการหลากหลาย โดยวิธีที่เลือกใช้ขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุดิบและคุณสมบัติที่ต้องการในถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้ อย่างไรก็ตาม กระบวนการผลิตทั่วไปมักประกอบด้วย 3 ขั้นตอนหลัก ได้แก่:

การเตรียมวัตถุดิบ (Preparation):

วัตถุดิบที่จะนำมาใช้ทำถ่านกัมมันต์ เช่น ไม้ กะลามะพร้าว ถ่านหิน หรือวัสดุชีวมวลต่าง ๆ จะต้องผ่านกระบวนการเตรียมเพื่อให้ได้ขนาดและลักษณะที่เหมาะสม โดยมักมีการบดหรือหั่นให้มีขนาดเล็กพอเหมาะ เพื่อให้มีพื้นที่ผิวสัมผัสมากขึ้นในกระบวนการต่อไป

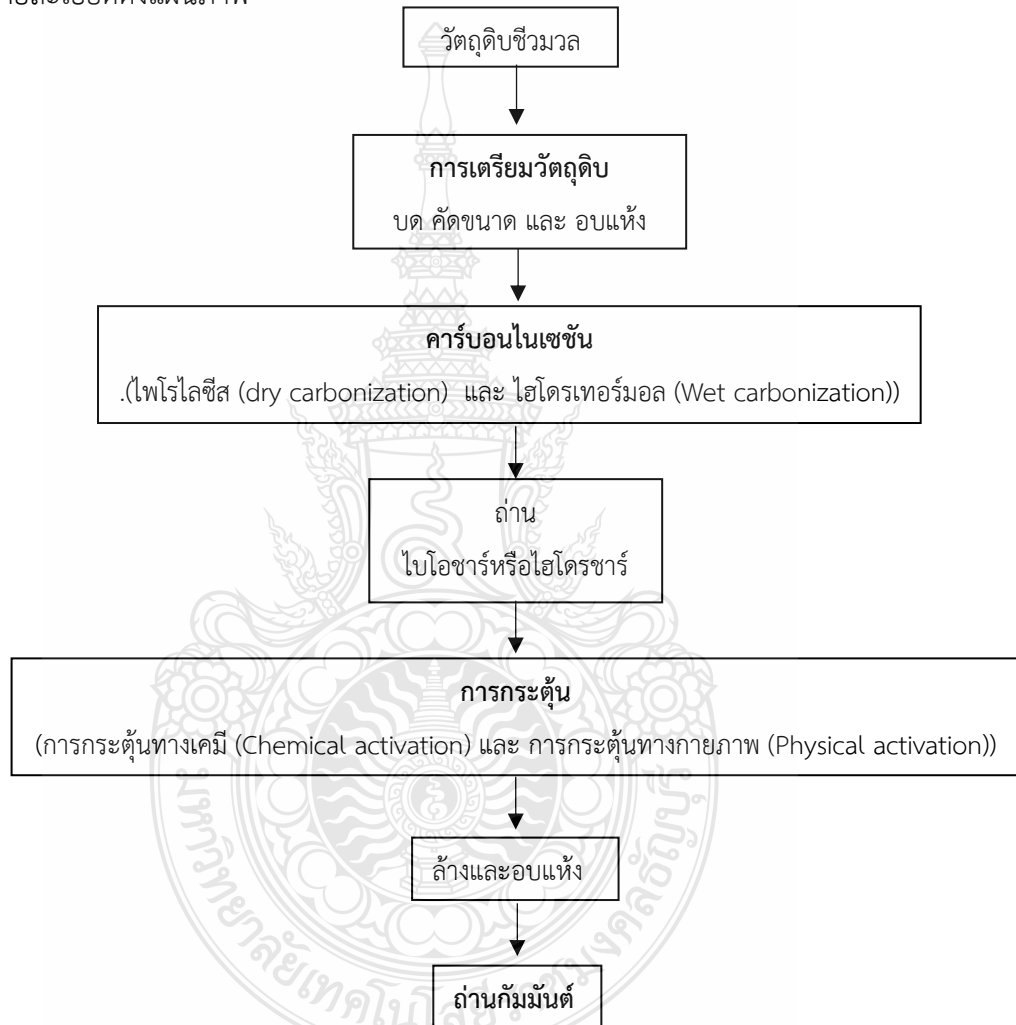
การคาร์บอนไนเซชัน (Carbonization):

ขั้นตอนนี้เป็นการเผาวัตถุดิบที่เตรียมไว้ในสภาวะที่มีอุณหภูมิสูงและมีออกซิเจนจำกัด วัตถุดิบจะสูญเสียความชื้นและสารระเหยต่าง ๆ ทำให้เกิดโครงสร้างคาร์บอนที่มีรูพรุนเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นพื้นฐานของถ่านกัมมันต์

การกระตุ้นหรือการก่อกัมมันต์ (Activation):

ขั้นตอนเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวและรูพรุนของคาร์บอนโดยใช้สารเคมี เช่น กรด ฟอสฟอริก สังกะสี คลอไรด์ หรือโดยการเผาด้วยไอน้ำร้อนหรือก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ กระบวนการนี้ทำให้คาร์บอนมีพื้นที่ผิวที่กว้างขึ้นและสามารถดูดซับ ได้ดีขึ้น ซึ่งเป็นคุณสมบัติหลักของถ่านกัมมันต์

รายละเอียดผังแผนภาพ



รูปที่ 2. 7 แผนภาพแสดงขั้นตอนการผลิตถ่านกัมมันต์

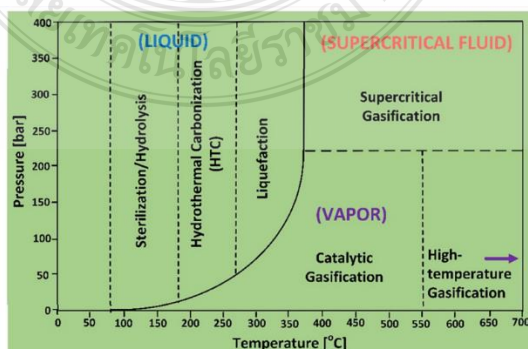
การเตรียมวัตถุดิบ ในการผลิตถ่านกัมมันต์สามารถเลือกใช้วัตถุดิบใด ๆ ก็ได้ที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก เช่น ไม้ซี้เลื่อย กะลามะพร้าว ชังข้าวโพด กากสา쿠 และทะเลายปาล์มเปล่า เป็นต้น

โดยพิจารณาสมบัติของวัตถุดิบ ดังนี้ 1) มีปริมาณคาร์บอนคงตัวมาก 2) ปริมาณความชื้นต่ำ 3) มีปริมาณซัลเฟอร์ต่ำ 4) ไม่สลายตัวเมื่อเก็บ

2.3 ไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนไนเซชัน (Hydrothermal Carbonization, HTC)

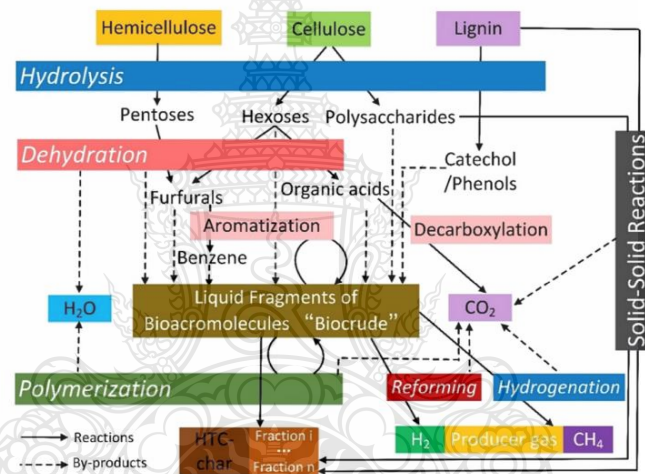
โดยทั่วไปการแปรรูปชีวมวลเป็นถ่านเกิดจากกระบวนการคาร์บอนไนเซชัน ซึ่งเป็นกระบวนการทางเคมีความร้อน (Thermo - chemical process) ในสภาวะปราศจากออกซิเจนหรือมีออกซิเจนเบาบาง ความร้อนและความดันภายในจะทำให้โมเลกุลของสารประกอบภายในชีวมวลเกิดการสลายตัวและสารระเหยในชีวมวลถูกปล่อยออกจากโครงสร้าง เปลี่ยนชีวมวลให้อยู่ในสถานะของแข็ง ของเหลว และก๊าซ กระบวนการนี้เรียกได้อีกอย่างคือ กระบวนการไพโรไลซิสแบบช้า (Slow Pyrolysis) เป็นกระบวนการทำปฏิกิริยาที่ใช้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงระหว่าง 400-600 °C ในสภาวะที่มีออกซิเจนจำกัด มีอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิต่ำ (น้อยกว่า 80 °C/min) [16] ทั้งนี้ขึ้นกับชนิดของวัตถุดิบ ผลิตภัณฑ์ที่ได้มักมีสัดส่วนเป็นถ่าน 25-35 % ก๊าซ 35 % และของเหลว 30 % และ ซึ่งเป็นกระบวนการที่ถูกเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า กระบวนการทางเคมีความร้อนแบบแห้ง (dry thermo-chemical process) หรือ กระบวนการคาร์บอนไนเซชันแบบแห้ง (dry carbonization) [5]

ในขณะทำการผลิตถ่านชีวมวลอีกรูปแบบหนึ่งด้วยกระบวนการ HTC เป็นกระบวนการทางเคมีและความร้อน (Thermo-chemical conversion) ของชีวมวลและน้ำ วัตถุดิบที่ใช้จึงไม่ต้องการกำจัดความชื้นออกก่อน โดยไม่จำเป็นต้องมีการเตรียมวัตถุดิบให้แห้ง ซึ่งสามารถเรียกระบวนการนี้ว่า กระบวนการคาร์บอนไนเซชันแบบเปียก (wet carbonization) เพื่อผลิตวัสดุคาร์บอนแข็งที่เรียกว่า ไฮโดรชาร์ (Hydrochar) โดยทั่วไปอุณหภูมิของกระบวนการ HTC จะอยู่ในช่วง 180 – 250 °C ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาสามารถเกิดขึ้นได้ตั้งแต่ 1 นาที จนถึงหลายชั่วโมง และความดันที่เกิดขึ้นเองตามการเพิ่มของอุณหภูมิดังรูปที่ 8 เกิดเป็นไฮโดรชาร์ ประมาณ 35 – 65 เปอร์เซ็นต์

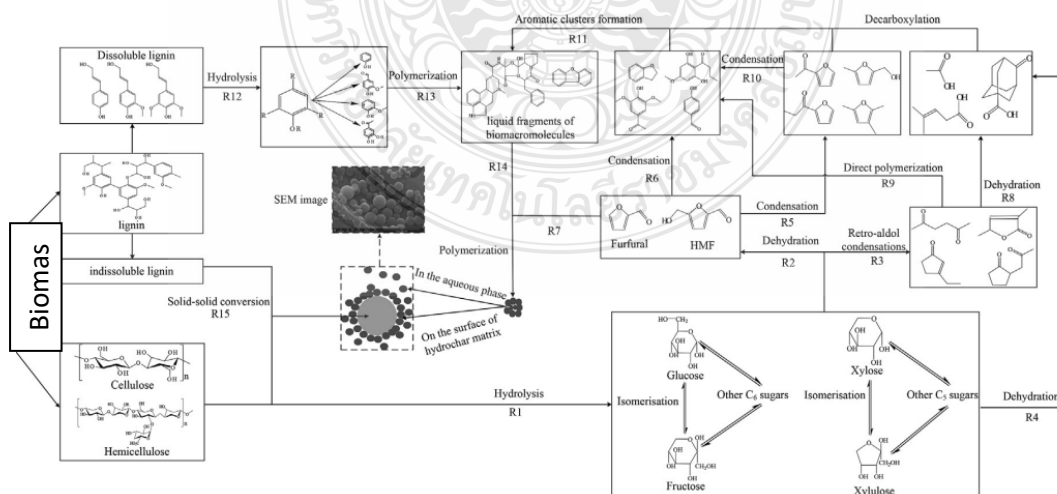


รูปที่ 2.8 แผนภาพแสดงวิวัฒนาการของน้ำที่อุณหภูมิและความดันต่าง ๆ [17]

ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการ HTC ได้แก่ ชนิดของวัตถุดิบ อุณหภูมิ ความดัน ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา และตัวกระตุ้น เป็นต้น [18] ภายใต้อุณหภูมิและความดันทำให้เกิดการทำลายโครงสร้างของลิกนิน เส้นใยเซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลส ในชีวมวล ปฏิกิริยาที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ Hydrolysis Decarboxylation, Dehydration และ Polymerization (aromatization) และ Solid-solid reaction ปฏิกิริยาเหล่านี้จะลด หมู่คาร์บอกซิล และไฮดรอกซิล และลดอัตราส่วนระหว่างอะตอม ออกซิเจนต่อคาร์บอน (O/C) ดังแสดงในรูปที่ 9 และ 10



รูปที่ 2.9 ปฏิกิริยาที่เกี่ยวข้องในกระบวนการ HTC [17]



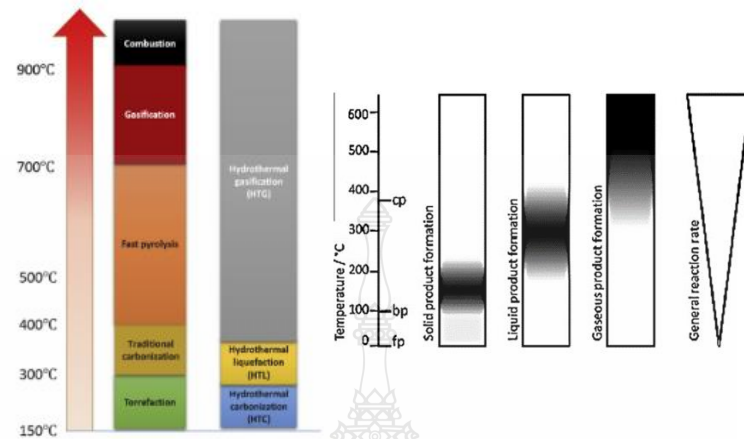
รูปที่ 2.10 ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นในกระบวนการ HTC [19]

กระบวนการ HTC สามารถเกิดขึ้นได้ทั้งมีหรือไม่มีตัวกระตุ้นร่วมด้วย กระบวนการ HTC ที่มีตัวกระตุ้นร่วมด้วยจะช่วยเร่งอัตราการเกิดปฏิกิริยา ตัวกระตุ้นที่เหมาะสมต้องมีศักยภาพในการทนความร้อนได้ดี ราคาถูก ช่วยเพิ่มผลผลิตและอัตราการเลือกเกิดเป็นผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ [15] [6] กระบวนการ HTC เหมาะสำหรับวัตถุดิบที่มีความชื้นสูง (มากกว่าร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก) โดยไม่ต้องผ่านการเตรียมวัตถุดิบให้มีความชื้นต่ำ ลดการใช้พลังงานและค่าใช้จ่าย รวมถึงระยะเวลา และยังสามารถดำเนินการที่อุณหภูมิและความดันไม่สูงนักเมื่อเทียบกับกระบวนการอื่นที่ใช้สภาวะรุนแรง นอกจากนี้การใช้น้ำร่วมในการทำปฏิกิริยาเป็นการสกัดเอาแร่ธาตุหรือของเสียออกจากชีวมวลด้วย กระบวนการนี้จึงเป็นกระบวนการบำบัดของเสีย (waste treatment) ออกจากชีวมวล ที่ได้รับความนิยมสูง เพราะสามารถจัดการกับชีวมวลที่มีความชื้นสูงได้ ตัวแปรต่าง ๆ ที่มีผลต่อคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ มีดังนี้

1. อุณหภูมิ

อุณหภูมิเป็นตัวแปรของการผลิตที่มีผลกระทบต่อลักษณะและคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ กล่าวคือเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ปริมาณการเกิดของแข็งหรือไฮโดรคาร์บอนจะลดลง แต่ในทางกลับกันปริมาณคาร์บอนในไฮโดรคาร์บอนจะเพิ่มขึ้น การเรียงตัวของโครงสร้างทางเคมีของคาร์บอนในไฮโดรคาร์บอนเปลี่ยนไป ดังรูปที่ 2.11 ผลิตภัณฑ์ของเหลวและก๊าซ จะเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิเป็นการให้พลังงานเพิ่มการสลายตัวของพันธะทางเคมีภายในโครงสร้างโมเลกุลของวัตถุดิบ จากรูปที่ 2.12 แสดงถึงการเปรียบเทียบการใช้อุณหภูมิ ของกระบวนการ HTC และกระบวนการไพโรไลซิส ที่ส่งผลให้ลักษณะของผลิตภัณฑ์แตกต่างกัน จะเห็นว่าที่อุณหภูมิไม่เกิน 300 °C กระบวนการ HTC สามารถเกิดกระบวนการคาร์บอนไนเซชันได้ แต่สำหรับกระบวนการไพโรไลซิส หรือกระบวนการทางเคมีความร้อนแบบแห้ง ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 300 °C อุณหภูมิยังไม่สูงพอที่เกิดกระบวนการคาร์บอนไนเซชัน และในขณะเดียวกัน ผลิตภัณฑ์ของเหลวและก๊าซของกระบวนการ HTC จะใช้อุณหภูมิในการสลายตัวที่ต่ำกว่ากระบวนการไพโรไลซิส ในปี 2021 จากรายงานการศึกษาของ Kim และคณะ ได้ศึกษาการผลิตไฮโดรคาร์บอนจากทะเลสาบปาล์มเปล่า โดยศึกษาผลของอุณหภูมิ 180-250 °C เวลา 30 นาที ที่มีผลต่อปริมาณคาร์บอนที่เกิดขึ้น พบว่าร้อยละปริมาณคาร์บอนเพิ่มขึ้นจาก 43 เป็น 58 โดยน้ำหนัก แต่ในทางกลับกันผลได้ไฮโดรคาร์บอนลดลงจาก 80 เป็น 42 โดยน้ำหนัก [20] จากการทบทวนงานวิจัยก่อนหน้านี้พบว่า อุณหภูมิที่ใช้ในการผลิตวัสดุคาร์บอนโดยผ่านกระบวนการ HTC ควรใช้อุณหภูมิต่ำกว่า 300 °C เพื่อป้องกันการเกิดกระบวนการลิกวิเลชัน และ ก๊าซซิฟิเคชัน ซึ่งจะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์หลักเป็นของแข็งหรือที่เรียกว่า ไฮโดรคาร์บอน อีกทั้งงานวิจัยโดยส่วนใหญ่ ได้นำเสนอคุณสมบัติของไฮโดรคาร์บอน ที่นำไปใช้เชิง

พลังงาน แต่การศึกษาการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่มีผลต่อคุณสมบัติของไฮโดรคาร์สำหรับการนำไปใช้งานทางด้านวัสดุคาร์บอนยังมีไม่มากพอ



รูปที่ 2. 11 อุณหภูมิที่แตกต่างกันของกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลและกระบวนการไพโรไลซิส

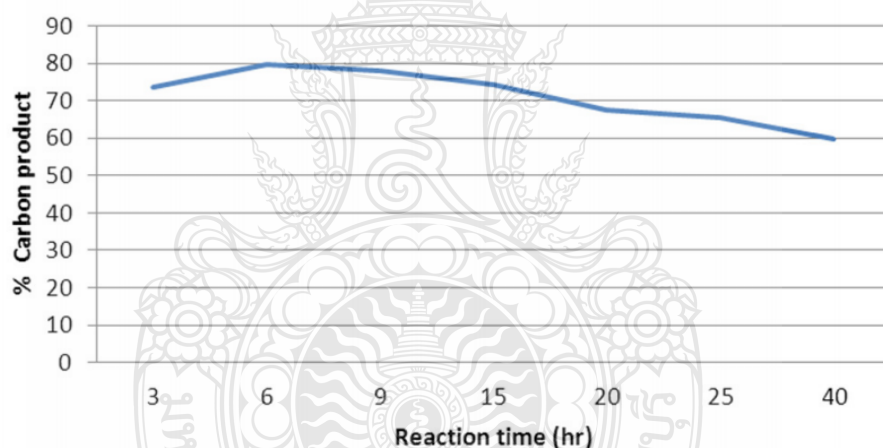


รูปที่ 2. 12 ลักษณะการเรียงตัวของโครงสร้างของอะตอมคาร์บอนที่อุณหภูมิต่าง ๆ [13]

2. ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา

ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยามีผลต่อปริมาณของคาร์บอนที่เกิดขึ้น โดยจากรายงานการศึกษาที่ผ่านมา ร้อยละของผลิตภัณฑ์ของคาร์บอนจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มเวลาให้การทำปฏิกิริยา ในปี 2017 รายงาน

การศึกษาของ Sarwono และคณะ ได้ทำการศึกษาผลของเวลาที่มือทริพลต่อการสลายตัวของทะเลาปาล์มเปล่าในกระบวนการ HTC โดยศึกษาเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 3-40 ชั่วโมง พบว่า ร้อยละของผลิตภัณฑ์คาร์บอนเพิ่มขึ้นสูงสุดเมื่อเวลาในการทำปฏิกิริยา 6 ชั่วโมง โดยเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 72 (เมื่อใช้เวลา 3 ชั่วโมง) เป็น ร้อยละ 80 หลังจากนั้นร้อยละของผลิตภัณฑ์คาร์บอนจะลดลงเหลือร้อยละ 60 เมื่อใช้เวลา 40 ชั่วโมง ดังรูปที่ 13 [21] ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า การใช้เวลาที่มากขึ้นนั้น (จาก 3 ชั่วโมง เป็น 6 ชั่วโมง) อินเทอร์มีเดียตของการสลายตัวทางความร้อนของเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส มีเวลามากเพียงพอที่จะเกิดปฏิกิริยา recondensation และ Polymerization เพิ่มขึ้น จึงได้ผลิตภัณฑ์เป็นของแข็งมากขึ้น ดังนั้นจากการทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องสามารถสรุปได้ว่า ระยะเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาในกระบวนการ HTC ของชีวมวลเพื่อผลิตวัสดุคาร์บอนคุณภาพสูง ควรใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาไม่ต่ำกว่า 6 ชั่วโมง เพื่อเพียงพอต่อการเกิด recondensation ของ เซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลส และป้องกันการเกิดอินเทอร์มีเดียตที่ไม่ต้องการ ซึ่งจะทำได้ผลิตภัณฑ์หลักเป็นของแข็งเพิ่มขึ้น

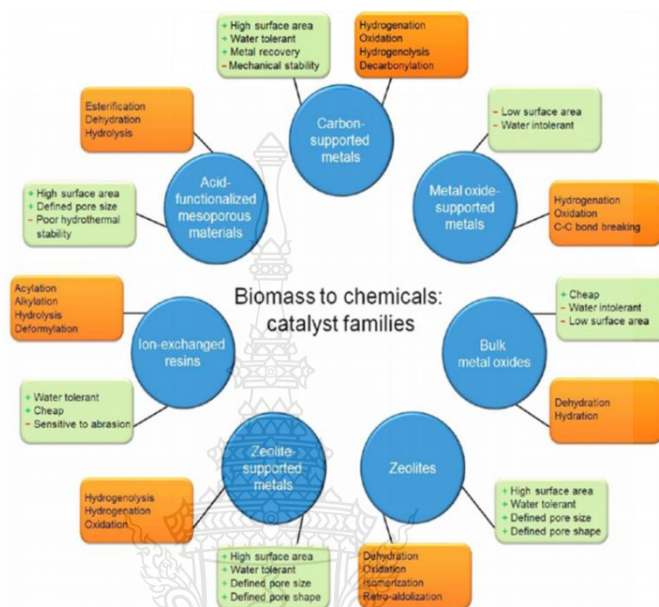


รูปที่ 2. 13 ความสัมพันธ์ร้อยละของผลิตภัณฑ์คาร์บอนกับเวลาในการทำปฏิกิริยาของทะเลาปาล์มเปล่าในกระบวนการ HTC [21]

3. ตัวกระตุ้น

ตัวกระตุ้นในกระบวนการ HTC หรือที่นิยมเรียกว่า ไฮโดรไลติก เอเจนต์ (hydrolytic agents) เป็นสารที่จะช่วยเพิ่มระดับการสลายตัวของชีวมวลส่งผลต่อการลดลงของระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาอย่างมีนัยสำคัญ ตัวกระตุ้นบางชนิดสามารถทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีในกระบวนการเปลี่ยนไปส่งอิทธิพล

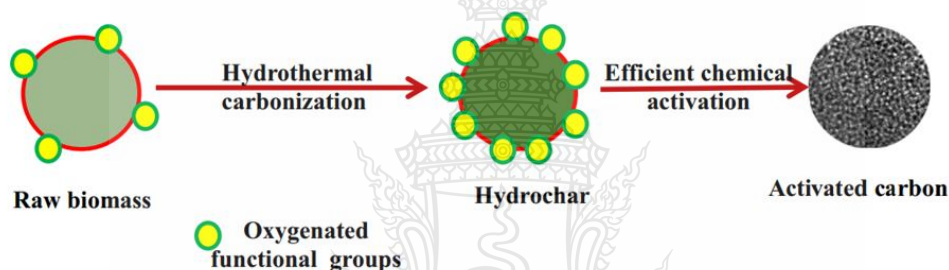
ต่อลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น และอีกทั้งยังเป็นการเพิ่มคุณสมบัติบางอย่างเข้าไปในผลิตภัณฑ์ด้วย ขึ้นอยู่กับชนิดของตัวกระตุ้นที่แตกต่างกัน ตัวกระตุ้นในกระบวนการ HTC มีหลายชนิด ดังนั้นการเลือกใช้งานตัวกระตุ้นขึ้นอยู่กับความต้องการลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่ไปประยุกต์ใช้ ดังรูปที่ 2.14 [22]



รูปที่ 2. 14 คุณสมบัติของตัวกระตุ้นและการประยุกต์ใช้ [22]

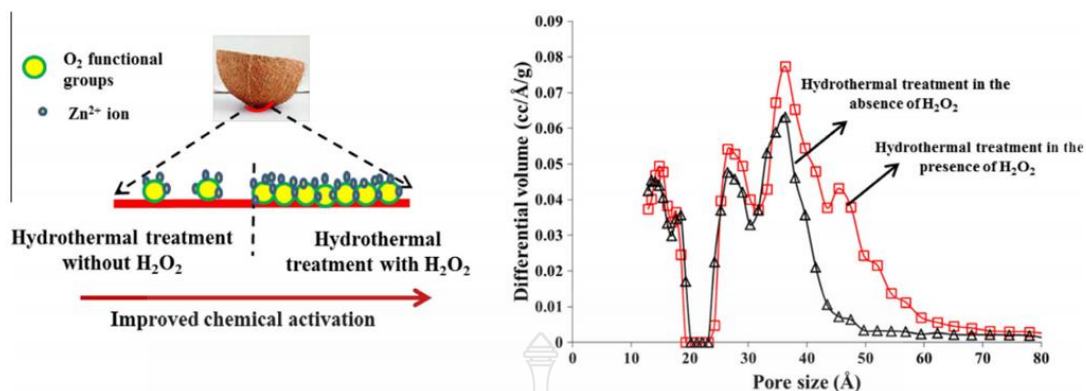
ในกระบวนการ HTC เพื่อผลิตไฮโดรคาร์บอนและนำไปพัฒนาเป็นวัสดุคาร์บอนคุณภาพสูง นิยมใช้ตัวกระตุ้นชนิดกรด (acidic catalyst) เช่น HCl , H_2SO_4 , HNO_3 , CH_3COOH , CH_2O_2 และ $\text{CH}_2=\text{CHCOOH}$ ซึ่งจะเพิ่มปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (hydrolysis) และดีไฮเดชัน (Dehydration) ในกระบวนการ HTC [6] ช่วยเพิ่มระดับการคาร์บอนไนเซชัน พื้นที่ผิวและรูพรุน ลดเวลาในการทำปฏิกิริยา และลดปริมาณออกซิเจนในไบโอชาร์ที่เกิดขึ้น ในปี 2019 รายงานการวิจัยของ Huang และคณะ [23] ทำการศึกษาการแปรรูปเปลือกหน่อไม้ให้เป็นถ่านกัมมันต์ ด้วยกระบวนการ HTC และในตัวกระตุ้น 1% H_2SO_4 จากนั้นนำไปผ่านกระบวนการกระตุ้นทางเคมี ทำให้ได้ถ่านกัมมันต์ที่มีขนาดของรูพรุนเฉลี่ย 2.8 nm และมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงถึง $3300 \text{ m}^2/\text{g}$ แต่ในขณะที่ตัวกระตุ้นชนิดเบส (basic catalyst) จะขัดขวางการก่อตัวของไฮโดรคาร์บอนทำให้ผลิตภัณฑ์ของแข็งลดลงและของเหลวหรือน้ำมันเพิ่มขึ้น เช่น RbOH , CsOH และ K_2CO_3 [22] [24] ในปี 2021 มีรายงานการศึกษาของ Zhang และคณะ ได้ทำการศึกษา การใช้ตัวกระตุ้นชนิดกรด Hydrochloric acid, Sulfuric acid และ Nitric acid, ในกระบวนการ HTC ที่มีผลต่อลักษณะของไมโครสเฟียร์ที่เกิดขึ้นบนไฮโดรคาร์บอนที่ได้จากไม้ไผ่ ซึ่งการใช้

ตัวกระตุ้นชนิดกรดทำให้ได้ปริมาณคาร์บอนมากขึ้นจาก 48% เป็น 68 % และการใช้ hydrochloric acid ก่อให้เกิดเกิดรูพรุนขนาดเล็ก 2.4-3.7 nm และสม่ำเสมอกว่าตัวกระตุ้นชนิดอื่น [25] แต่ยังมีตัวกระตุ้นอีกประเภทหนึ่ง คือตัวกระตุ้นชนิดดัดแปลงปฏิกิริยาเคมี (Catalyst for Chemical modification) เช่น H_2O_2 $FeCl_2$ และ $ZnCl_2$ ช่วยเพิ่มระดับการคาร์บอนไนเซชัน เพิ่มพื้นที่ผิว และเพิ่มหมู่ฟังก์ชันทางเคมีที่พิเศษลงไปในไฮโดรชาร์ ส่งผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของวัสดุคาร์บอนที่ได้ อีกทั้งยังก่อให้เกิดการนำไปผลิตถ่านกัมมันต์อย่างมีนัยสำคัญ [17] เนื่องจากการใช้ตัวกระตุ้นชนิดนี้จะเป็นการเพิ่มอะตอมของธาตุที่แตกต่างจากคาร์บอนเข้าไปแทรกตัวในรูพรุนของไฮโดรชาร์ เช่น ออกซิเจนฟังก์ชัน ซึ่งมีผลต่อการนำไปกระตุ้นเพื่อให้ได้ถ่านกัมมันต์ที่มีปริมาตรรูพรุนและพื้นที่ผิวที่เพิ่มขึ้นดัง รูปที่ 2.15 [17]

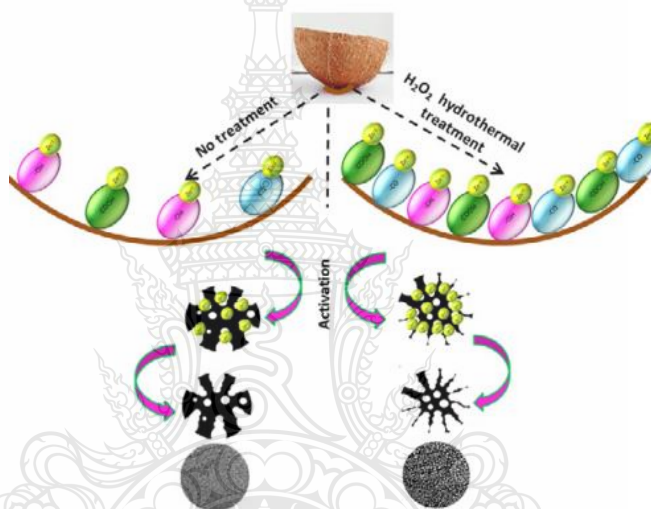


รูปที่ 2. 15 ออกซิเจนที่เกิดขึ้นหลังผ่านกระบวนการ HTC

บทวิจัยของ Jain และคณะ ได้ทำการศึกษาการผลิตถ่านกัมมันต์ จากกะลามะพร้าว ด้วยกระบวนการ HTC และใช้ H_2O_2 เป็นตัวกระตุ้น ด้วยการกระตุ้นทางเคมี พบว่า ถ่านกัมมันต์ที่ผ่านกระบวนการ HTC ใช้ตัวกระตุ้น H_2O_2 ให้ปริมาตรรูพรุนและพื้นที่ผิวที่สูงกว่า ไม่ใช้ตัวกระตุ้น [25] ดังรูปที่ 2.16 และ 2.17



รูปที่ 2. 16 แสดงปริมาณรูพรุนที่เพิ่มขึ้นของถ่านกัมมันต์จากการใช้ H_2O_2 ในกระบวนการ HTC



รูปที่ 2. 17 การผลิตถ่านกัมมันต์แบบใช้และไม่ใช้ตัวกระตุ้น [25]

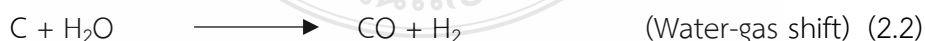
จากการรวบรวมข้อมูลรายงานการศึกษาพบว่า การผลิตถ่านกัมมันต์จากชีวมวลนิยมใช้ตัวกระตุ้น ชนิดกรด และ ตัวกระตุ้นชนิดดัดแปลงปฏิกิริยาเคมี เพื่อให้เกิดถ่านกัมมันต์ที่มีคุณภาพสูง การศึกษาการผลิตวัสดุถ่านกัมมันต์จากชีวมวล และการศึกษาการใช้ตัวกระตุ้นชนิดต่าง ๆ ในกระบวนการ HTC นิยมใช้ชีวมวลที่เป็นไม้เนื้อแข็งหรือเมล็ดในของพืชที่ความแข็ง ซึ่งยังมีงานวิจัยส่วนน้อยที่นำทะลายปาล์มเปล่ามาศึกษาการผลิตวัสดุถ่านกัมมันต์ และใช้ตัวกระตุ้นในกระบวนการ HTC ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงพิจารณาเลือกใช้ สารกระตุ้น H_2SO_4 และ H_2O_2 ในการผลิตไฮโดรชาร์เพื่อเอาไปพัฒนาต่อเป็นถ่านกัมมันต์

2.4 การกระตุ้น (Activation)

การกระตุ้นถ่านชีวมวล เป็นการปรับปรุงคุณภาพชีวมวลและถ่านชีวมวลให้ดียิ่งขึ้นถ่านชีวมวลที่ผ่านกระบวนการกระตุ้นแล้วจะถูกรเรียกว่า “ถ่านกัมมันต์ หรือ Activated carbons” รูปแบบของถ่านกัมมันต์ สามารถเป็นได้ทั้งในรูปแบบผง แบบเม็ดและแบบแท่ง นิยมนำมาใช้เพื่อเป็นสารดูดซับในอุตสาหกรรม เพื่อกำจัดสารมลพิษออกจากของเหลวและก๊าซ นอกจากนี้ยังอาจใช้เป็นตัวรองรับตัวกระตุ้นได้ อย่างไรก็ตามเพียงกระบวนการคาร์บอนไนเซชัน อาจไม่เพียงพอที่จะพัฒนาพื้นที่ผิวในถ่านให้เป็นวัสดุคาร์บอนคุณภาพสูงได้หรือเป็นไปตามเกณฑ์ของถ่านกัมมันต์เกรดพาณิชย์ได้ ซึ่งมีพื้นที่ผิวจำเพาะอยู่ระหว่าง 500 ถึง 1,500 ตารางเมตรต่อกรัม การพัฒนาเพิ่มพื้นที่ผิวของถ่านด้วยการกระตุ้นจึงเป็นขั้นตอนการเปิดรูพรุนให้เกิดมากขึ้น เพื่อขยายพื้นที่ผิวภายในของถ่าน โดยมีวิธีการกระตุ้นอยู่ด้วย 2 วิธี คือ การกระตุ้นทางกายภาพ (Physical activation) และทางกระตุ้นทางเคมี (Chemical activation)

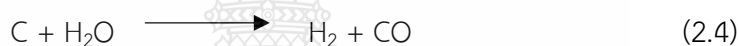
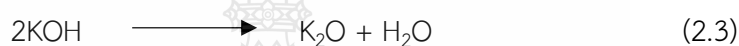
2.4.1 การกระตุ้นทางกายภาพ (physical activation)

การกระตุ้นทางกายภาพหมายถึงการใช้ไอน้ำและคาร์บอนไดออกไซด์เป็นตัวกระตุ้นเพื่อให้เกิดรูพรุนขนาดกลางชนิด mesopores (2-50 nm) โดยไอน้ำและคาร์บอนไดออกไซด์ จะทำหน้าที่เป็นตัวออกซิไดซ์ ภายใต้อุณหภูมิ 800-1,000 °C อาจใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาตั้งแต่ไม่กี่ชั่วโมง ไปจนถึง 2-3 วัน โดยลักษณะการเกิดปฏิกิริยามี 2 ขั้นตอน เริ่มจากการเกิดคาร์บอนไนเซชันและไล่สารระเหยออกจากถ่าน ทำให้เกิดพื้นที่ในการเกิดปฏิกิริยาออกเดชัน (oxidation sites) จากนั้นตัวออกซิไดซ์จะเข้าไปทำปฏิกิริยา ทำให้คาร์บอนหลุดออกจากโครงสร้างของถ่านเกิดเป็นคาร์บอนมอนอกไซด์ และไฮโดรเจน ดังสมการที่ 1 และ 2 [26] ซึ่งอุณหภูมิที่สูงและเวลาในการทำปฏิกิริยา มีอิทธิพลต่อสภาวะออกซิเดชัน ทำให้รูพรุนชนิด mesopores มีขนาดต่างกัน

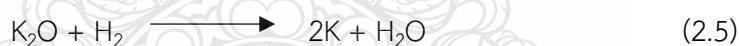


2.4.2 การกระตุ้นทางเคมี (Chemical activation)

การกระตุ้นทางเคมีโดยส่วนใหญ่เป็นการใช้สารเคมีประเภทกรดแก่และเบสแก่ในการกระตุ้นเพื่อทำให้เกิดรูพรุนขนาดเล็ก (large micropores (2 nm)) โดยใช้อุณหภูมิ 500 - 800 °C เวลา 2-3 ชั่วโมง [26], [27] ซึ่งเป็นการกระตุ้นแบบขั้นตอนเดียว การเกิดคาร์บอนไนเซชันและการกระตุ้นเกิดขึ้นขั้นตอนเดียว ทำให้ใช้เวลาน้อยกว่าซึ่งเป็นการประหยัดพลังงาน แต่มีข้อจำกัดที่เกิดจากการกระตุ้นทางเคมีคือ ต้องมีการล้างสารเคมีที่ตกค้างก่อนจึงจะสามารถนำไปใช้ตามวัตถุประสงค์ได้ สำหรับการใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) เป็นสารกระตุ้นนั้น เมื่อนำเอาวัตถุดิบที่ต้องการทำถ่านกัมมันต์มาผสมกับสารละลายที่มีโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์และให้ความร้อนโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์จะแทรกตัวเข้าไปในโครงสร้างของวัตถุดิบทำให้เกิดเป็นถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวสูงขึ้น ดังสมการที่ 3 และ 4

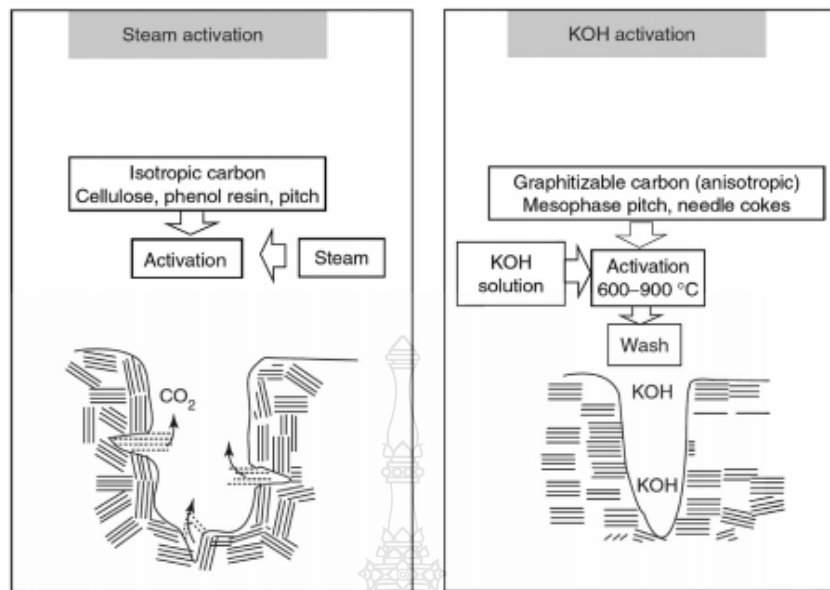


สมการที่ 3 และ สมการที่ 4 เป็นการสลายตัวของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เกิดเป็นโพแทสเซียมออกไซด์ (K_2O) และน้ำ ซึ่งเป็นสารที่ทำให้คาร์บอนเกิดปฏิกิริยาก๊าซซิฟิเคชันจากนั้นโพแทสเซียมจะถูกรีดิวซ์ด้วยไฮโดรเจนหรือคาร์บอนกลายเป็นโลหะโพแทสเซียมดังสมการ ที่ 5 และ 6



ที่อุณหภูมิสูงโพแทสเซียมเป็นโลหะที่อ่อนตัวจึงทำให้แทรกเข้าไปในชั้นของอะตอมคาร์บอนทำให้เกิดรูพรุนได้มากขึ้น [28]

มีงานวิจัยของ Peter Kurzweil ประเทศเยอรมนี ปี 2015 ได้ทำการศึกษาการนำถ่านจากกะลาปาล์มผ่านการกระตุ้นทางเคมีโดยใช้ H_2SO_4 , HCl , ZnCl_2 , H_3PO_4 , HNO_3 , NaOH และ KOH โดยใช้อุณหภูมิ 800 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง โดยวัดค่า Iodine number พบว่า ถ่านจากกะลาปาล์ม หลังผ่านการกระตุ้นทางเคมีด้วย H_2SO_4 ให้ค่า Iodine number 709.20 g/kg of carbon ซึ่งมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับสารชนิดอื่น [29]



รูปที่ 2. 18 การเปรียบเทียบความต่างระหว่างการกระตุ้นทางกายภาพและการกระตุ้นทางเคมี [27]



ตารางที่ 2. 6 การเปรียบเทียบงานวิจัยที่เกี่ยวข้องสำหรับกระบวนการกระตุ้นทางเคมี

เอกสารอ้างอิง	ชีวมวล เหลือทิ้ง	กระบวนการกระตุ้น	พื้นที่ผิวจำเพาะ $S_{BET}(m^2/g)$	ปริมาตรรูพรุน (cm^3/g)
Islam และคณะ ปี 2017 [29]	กะลามะพร้าว HTC 200 °C, 2 hr	การกระตุ้นทางเคมี NaOH 600 °C (heating rate 10 °C/min)	876.14	0.441
Susanti และ คณะ ปี 2019 [30]	เปลือกสละ HTC 200 – 250 °C, 5 hr.	การกระตุ้นทางเคมี KOH 800 °C	775.6-1,635.4	0.156 -0.881
Ding และคณะ ปี 2013 [31]	แกลบ	การกระตุ้นทางเคมี H ₃ PO ₄ , NaOH และ KOH 400 – 800 °C	1,355–3,322	1.45–2.53
Sevilla และ คณะ ปี 2017 [32]	ขี้เลื่อยจากไม้ ยูคาลิปตัส HTC 250 °C 4 hr.	การกระตุ้นทางเคมี K ₂ C ₂ O ₄ และ C ₃ H ₆ N ₆ 800 °C (heating rate 3 °C/ min)	2,600 -3,000	1.30-1.60
Benstoem และคณะ ปี 2018[33]	กระดาดขำระ HTC 220-270 °C 2 hr.	การกระตุ้นทางเคมี KOH 450-550 °C (heating rate 10 K/ min)	400-1,300	-
Dhelipan และ คณะ ปี 2016 [34]	เปลือกส้ม	การกระตุ้นทางเคมี H ₃ PO ₄ 600 °C	508.68	-

ตารางที่ 2. 7 การเปรียบเทียบงานวิจัยที่เกี่ยวข้องสำหรับกระบวนการกระตุ้นทางเคมี (ต่อ)

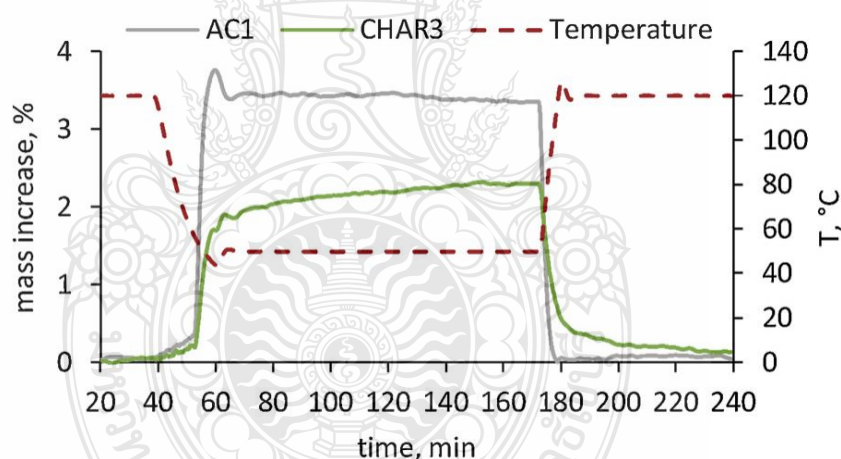
เอกสารอ้างอิง	ชีวมวล เหลือทิ้ง	กระบวนการกระตุ้น	พื้นที่ผิวจำเพาะ $S_{BET}(m^2/g)$	ปริมาตรรูพรุน (cm^3/g)
Liew และคณะ ปี 2017 [35]	กะลาปาล์ม carbonization	การกระตุ้นทางเคมี KOH และ NaOH microwave pyrolysis (700 W, 25 min)	480-750	0.26-0.37
Huang และ คณะ ปี 2019 [22]	เปลือกจากหน่อ ไผ่ HTC 200 °C 24 hr. (1 % H ₂ SO ₄)	การกระตุ้นทางเคมี KOH 600-800°C (2 °C/min) 1hr. under N ₂ flow	1,370-3,300 (Mesopores centering at ~2.8 nm.)	0.61-1.85
Shi และคณะ 2015 [36], [37]	HTC T=180°C t=24hr จาก Sucrose	การกระตุ้นทางเคมี KOH 750°C 1hr	2,217	0.776
Jain และคณะ 2015 [25]	กะลามะพร้าว HTC T=275°C t= 20 min (H ₂ O ₂)	การกระตุ้นทางเคมี ZnCl ₂ 600-800°C	1,652	1.29
Titirici และ คณะ 2012 [38]	ชี้เลื่อยจากไม้ยู คาลิป ตัส T=250°C t= 2h	การกระตุ้นทางเคมี KOH 600 °C 4hr	2,252 (Supercapacito rs CO ₂ capture)	0.96

2.5 การทดสอบการดูดซับ CO₂ ด้วยถ่านกัมมันต์

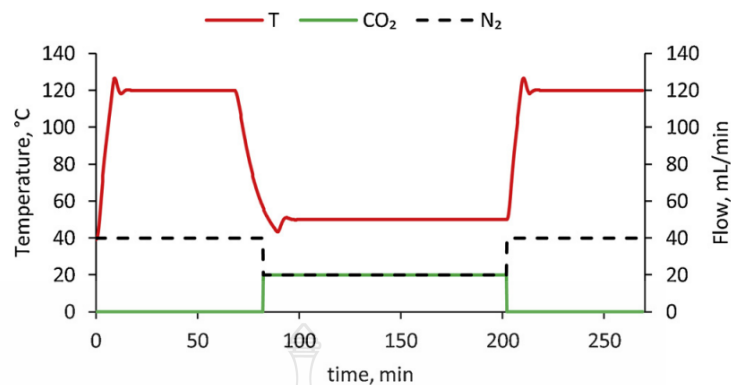
การดูดซับ CO₂ ด้วยถ่านกัมมันต์เป็นกรรมวิธีที่มีการใช้กันมากในงานวิจัยและอุตสาหกรรม ด้วยเหตุว่าถ่านกัมมันต์มีพื้นที่ผิวที่มีรูพรุนมาก ซึ่งช่วยให้ดูดซับสารต่างๆ ได้มากขึ้น โดยเฉพาะก๊าซ CO₂ ถ่านกัมมันต์ที่มีโครงสร้างมีรูพรุนขนาดเล็กมาก ซึ่งเพิ่มพื้นที่ผิวที่สามารถสัมผัสกับก๊าซ CO₂ ได้มากขึ้น

ทำให้มีประสิทธิภาพการดูดซับสูง กระบวนการดูดซับ CO_2 ของถ่านกัมมันต์เกิดจากกระบวนการทางฟิสิกส์ โดยก๊าซ CO_2 จะถูกดึงดูดเข้าสู่รูพรุนของถ่านกัมมันต์และเก็บไว้ ปัจจุบันมีการพัฒนาถ่านกัมมันต์ให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นโดยการปรับเปลี่ยนกระบวนการผลิต หรือการเติมสารอื่นๆ เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวและปรับปรุงศักยภาพในการดูดซับ ข้อดีของการใช้ถ่านกัมมันต์ในการดูดซับ CO_2 คือสามารถนำถ่านกัมมันต์กลับมาใช้ใหม่ได้ ถ่านกัมมันต์สามารถรีเจนเนอเรตหรือทำให้กลับมาใช้ใหม่ได้หลังจากที่ดูดซับ CO_2

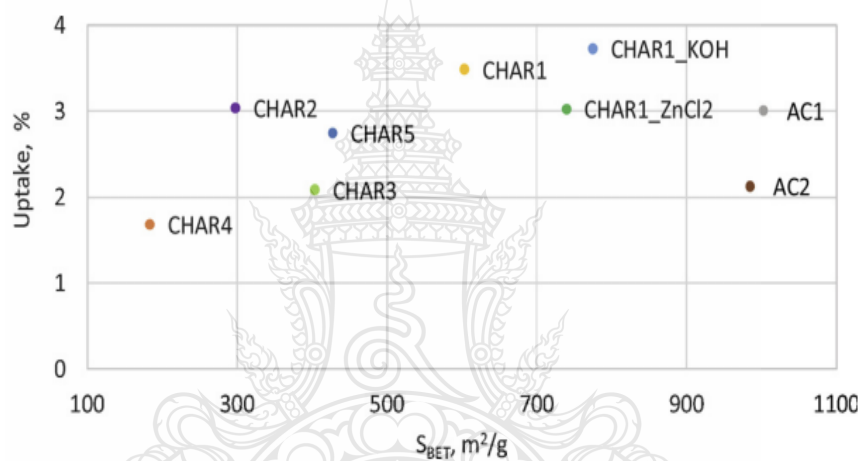
งานวิจัยของ Vittoria Benedetti และคณะได้ศึกษาการนำซีมวเลทเหลือทิ้งจากกระบวนการก๊าซซิไฟเออร์ มาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์โดยใช้ KOH และ ZnCl_2 เป็นตัวกระตุ้น จากนั้นนำมาศึกษาการดูดซับ CO_2 โดยใช้เครื่อง Thermogravimetric Analysis เป็นแบบจำลองการทดสอบการดูดซับที่สภาวะน้ำหนักของถ่านกัมมันต์ 10 มิลลิกรัม อุณหภูมิ 50°C อัตราส่วน $\text{CO}_2:\text{N}_2 = 1:1$ อัตราการไหลของ CO_2 40 mL/min เพื่อเทียบกับถ่านกัมมันต์เชิงพาณิชย์ พบว่า % CO_2 uptake ของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้ เท่ากับ 3.73 และ 3.03 ซึ่งเทียบเท่ากับถ่านกัมมันต์เชิงพาณิชย์ซึ่งมีค่า % CO_2 uptake เท่ากับ 3.01 [39]



รูปที่ 2.19 การทดสอบการดูดซับ CO_2 ของ AC1 และ CHAR3 ที่สภาวะอุณหภูมิ 50°C



รูปที่ 2.20 สภาวะอุณหภูมิสำหรับการวิเคราะห์การดูดซับ CO_2 ด้วย Thermogravimetric Analysis



รูปที่ 2.21 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับและพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์

ในปี 2021 งานวิจัยของ Junya Wang และคณะ[40] ได้รวบรวมงานวิจัยการดูดซับ CO_2 ด้วย ถ่านกัมมันต์และถ่านกัมมันต์ที่ปรับปรุงคุณสมบัติด้วยสารเคมีและวัสดุต่างๆ พร้อมแสดง % CO_2 uptake ดังตารางที่ 2.14

ตารางที่ 2. 8 งานวิจัยการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ด้วยถ่านกัมมันต์และถ่านกัมมันต์ที่ปรับปรุงคุณสมบัติด้วยสารเคมีและวัสดุต่างๆ [40]

Composite	Adsorption		
	Condition (at 1 bar)	Time (min)	CO ₂ Uptake (mmol g ⁻¹)
AC/zeolite X	20 °C	60	3.50
AC/NaUSY	25 °C	—	3.21
AC/H-ZSM-5	25 °C	10	2.3
AC/Cr ₂ O-Zn	25 °C	—	4.24
AC/MgO	180 °C	60	0.74
AC/NiO	25 °C	—	2.23
AC/CaO	25 °C	—	1.79
AC/Cr ₂ O-Zn	25 °C	—	1.53
AC/Cr ₂ O	25 °C	—	1.45
AC/Fe ₂ O ₃ -Zn	25 °C	—	0.88
AC/Fe ₂ O ₃	25 °C,	—	1.1
AC-MgO	25 °C	30	1.12
AC/MgO	25 °C	—	6.5
AC/MgO	100 °C	—	0.19
AC/CuO	25 °C	—	1.44
AC/CuO	25 °C	—	6.72
AC/CuO	30 °C	—	6.78
AC/NiO	30 °C	—	6.5
AC/Cu/Ce	25 °C	—	0.91

ตารางที่ 2. 8 งานวิจัยการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ด้วยถ่านกัมมันต์และถ่านกัมมันต์ที่ปรับปรุงคุณสมบัติด้วยสารเคมีและวัสดุต่างๆ (ต่อ)

Composite	Condition	Adsorption	
		Time (min)	CO ₂ Uptake (mmol g ⁻¹)
AC/Cu/Zn	30 °C	45	2.25
AC/Ca	25 °C	—	0.33
AC/KOH/Ba(OH) ₂	25 °C	35	5.07
AC/KOH	25 °C	35	3.51
AC/Ba (OH) ₂	25 °C	35	3.41
AC/K ₂ CO ₃	15% CO ₂ , 15% H ₂ O	—	2.26
AC/K ₂ CO ₄	8% CO ₂ , 10% H ₂ O, 60 °C	40	1.64
AC/K ₂ CO ₃ -PEI	8% CO ₂ , 10% H ₂ O, 60 °C	40	3.6
AC/K ₂ CO ₃	100 °C	60	2.13

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการผลิตไฮโดรซาร์และถ่านกัมมันต์จากทะลายปาล์มเปล่าซึ่งเป็นชีวมวลเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมปาล์ม ด้วยกระบวนการ HTC โดยศึกษาการเทียบผลของอุณหภูมิ เวลา และ ตัวกระตุ้น และผ่านกระบวนการกระตุ้นทางเคมี วิเคราะห์คุณสมบัติของไฮโดรซาร์และถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้ รวมถึงการทดสอบประสิทธิภาพการดูดซับ

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

3.1.1 วัตถุดิบและสารเคมี

3.1.1.1 ทะลายปาล์ม จากบริษัทไทยสมบูรณ์น้ำมันปาล์ม จำกัด

3.1.1.2 โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ความบริสุทธิ์ร้อยละ 70 โดยน้ำหนัก จากบริษัท Sigma-Aldrich

3.1.1.3 ซิงค์คลอไรด์ ($ZnCl_2$) ความบริสุทธิ์ร้อยละ 70 โดยน้ำหนัก จากบริษัท Sigma-Aldrich

3.1.1.4 น้ำปราศจากไอออน (Deionized water)

3.1.1.5 ก๊าซไนโตรเจน ความบริสุทธิ์ร้อยละ 99 โดยน้ำหนัก

3.1.1.6 ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ความบริสุทธิ์ร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก

3.1.1.7 กรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) ความบริสุทธิ์ร้อยละ 98 จากบริษัท Sigma-Aldrich

3.1.1.8 ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ความบริสุทธิ์ร้อยละ 30 จากบริษัท Sigma-Aldrich

3.1.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

3.1.2.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ในการผลิตวัสดุคาร์บอนคุณภาพสูงจากทะลายปาล์มเปล่า ได้แก่ เครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวนทนความดันสูง และเครื่องปฏิกรณ์เตาเผาอุณหภูมิสูงแบบท่อ โดยมีรายละเอียด ดังต่อไปนี้

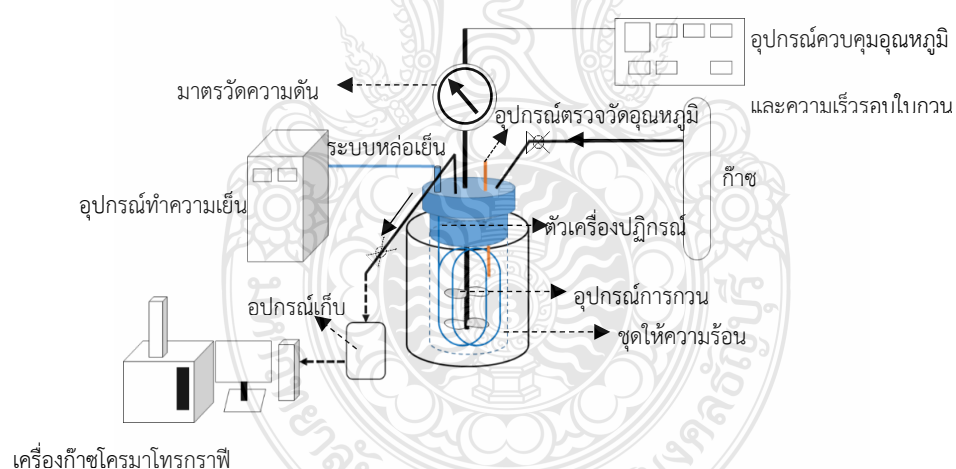
3.1.2.1.1 เครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวนทนความดันสูง

เครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวนทนความดันสูง (High pressure stirred batch reactor) รุ่น Model 4561 Mini Bench Top Reactor / PID controller 4848, USA ขนาด 4000 มิลลิลิตร จากบริษัท Parr Instrument Company ดังแสดงในรูปที่ 3.1 ตัวเครื่องปฏิกรณ์ผลิตจาก Stainless steel no. 316 ประกอบด้วย อุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ (Temperature controller) ชุดให้ความร้อน

(Heater) ระบบหล่อเย็น (Colling system) อุปกรณ์เครื่องกวนสาร-(Stirrer) และ มาตรวัดความดัน (Pressure gauge) ซึ่งประกอบด้วยชุดควบคุมใบกวนและความเร็วรอบใบกวน ดังแสดงในรูปที่ 3.2 แผนภาพเครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวนทนความดัน



รูปที่ 3.1 เครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวนทนความดันสูง

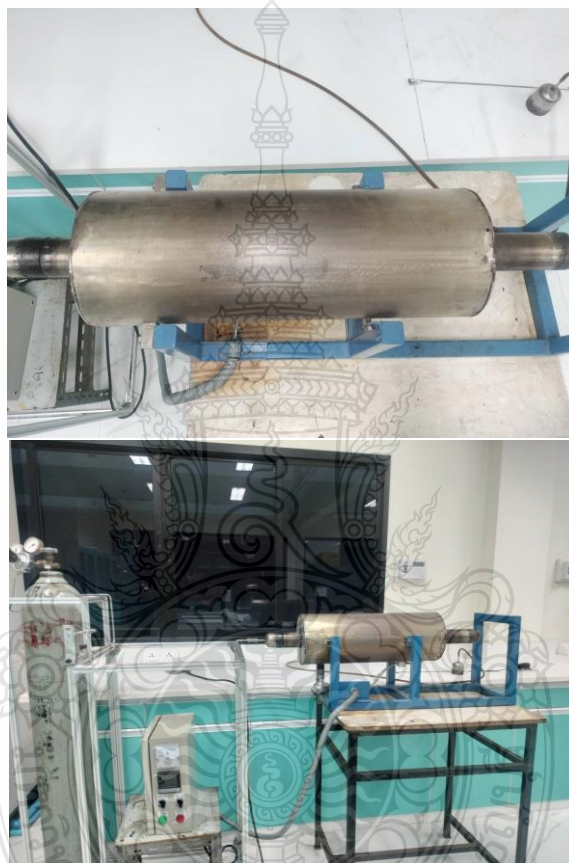


รูปที่ 3. 2 แผนภาพเครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวนทนความดัน

3.1.2.1.2 เครื่องปฏิกรณ์เตาเผาอุณหภูมิสูงแบบท่อ

เตาเผาอุณหภูมิสูงแบบท่อ (High-Temperature Tube Furnaces) ดังแสดงในรูปที่ 3.3 เตาเผาอุณหภูมิสูงแบบท่อ หรือเตาเผาอุณหภูมิสูงแบบหลอด วัสดุ Stainless steel no. 316 มี

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางกลางของท่อเผา 10 cm ความยาว 1.5 m อุณหภูมิสูงสุดถึง 1,000 °C ประกอบด้วย ชุดให้ความร้อน (Heater) อุปกรณ์ควบคุมอัตราการไหลของก๊าซ (rotameter) และอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ (Temperature controller)



รูปที่ 3.3 เตาเผาอุณหภูมิสูงแบบท่อ

3.1.2.1.3 เครื่องชั่งความละเอียด 2 และ 4 ตำแหน่ง บริษัท เมทเลอร์-ทอเลโด (ประเทศไทย)

จำกัด

3.1.2.1.4 ชุดกรอง ประกอบด้วยกรวยบุชเซอร์ ขวดรูปชมพู่ และเครื่องปั๊มสุญญากาศ

3.1.2.1.5 ตู้บ รุ่น UNB400 บริษัท Memmert

3.1.2.1.6 ถังเก็บก๊าซ ขนาด 1-2 ลิตร

3.1.2.1.7 อุปกรณ์เครื่องแก้ว

3.1.2.2 เครื่อง Thermogravimetric analysis (TGA) อุปกรณ์สำหรับการศึกษาการดูดซับ
ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ แสดงดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 เครื่อง Thermogravimetric analysis (TGA)

3.1.2.3 เครื่อง Flame Ionization Detector and thermal conductivity (GC-FID/TCD) รุ่น 7890B จากบริษัท Agilent Technologies เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ที่เป็น
ก๊าซ



รูปที่ 3.5 เครื่อง GC-FID/TCD

3.2 กิจกรรมที่ดำเนินงานวิจัย

การศึกษาการสังเคราะห์วัสดุคาร์บอนคุณภาพสูงจากทะเลสาบปาล์ม โดยกิจกรรมในการดำเนินงานวิจัยประกอบด้วย กระบวนการ HTC การกระตุ้นทางเคมี และการทดสอบการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ทั้งนี้ในกระบวนการ HTC เพื่อผลิต ไฮโดรชาร์ มีการศึกษาสภาวะต่าง ๆ ได้แก่ อุณหภูมิ (160, 200, 240 และ 280 $^{\circ}\text{C}$) และระยะเวลา (2, 4, 6 และ 8 ชั่วโมง) สารกระตุ้น H_2SO_4 และ H_2O_2 เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไฮโดรชาร์ จากนั้นนำมากระตุ้นด้วยตัวกระตุ้นทางเคมี ได้แก่ ZnCl_2 และ KOH เพื่อหาตัวกระตุ้นที่เหมาะสมในการผลิตวัสดุคาร์บอนมูลค่าสูง ที่มีคุณสมบัติเป็นตัวดูดซับก๊าซ CO_2 เทียบเท่าถ่านกัมมันต์เชิงพาณิชย์ โดยงานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองความสามารถในการดูดซับของวัสดุคาร์บอนที่สังเคราะห์ด้วยการจำลองสภาวะการดูดซับก๊าซ CO_2 โดยใช้เครื่อง TGA เป็นระบบการทดสอบการดูดซับ โดยรายละเอียดของการทดลองของแต่ละกิจกรรมมีรายละเอียดดังนี้

3.2.1 การเตรียมไฮโดรชาร์

การศึกษาการผลิตไฮโดรชาร์จากทะเลสาบปาล์มด้วยกระบวนการ HTC ที่อุณหภูมิ (160, 200, 240 และ 260 $^{\circ}\text{C}$) และระยะเวลาต่างๆ (2, 4, 6 และ 8 ชั่วโมง) โดยมีขั้นตอนดังนี้

1. ทะเลสาบปาล์ม 100 กรัม ผสมกับน้ำกลั่น 1000 กรัม ใส่ในเครื่องปฏิกรณ์จากนั้นประกอบเครื่องปฏิกรณ์
2. ทำการไล่อากาศออกจากเครื่องปฏิกรณ์และตรวจสอบการรั่ว ด้วยก๊าซไนโตรเจนที่ความดัน 20 บาร์ จากนั้นเปิดวาล์วเพื่อปล่อยก๊าซออก ทำซ้ำอย่างน้อย 3 รอบ
3. ประกอบฮีตเตอร์และปรับสภาวะการทดลอง ดังแสดงในตารางที่ 3.1 ความดันเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 2 บาร์ และความเร็วรอบมีค่าเท่ากับ 200 rpm
4. เมื่อการทดลองเสร็จสิ้น ทำการลดอุณหภูมิเครื่องปฏิกรณ์ให้มีอุณหภูมิประมาณ 60 $^{\circ}\text{C}$ จดบันทึกความดันและทำการเก็บผลิตภัณฑ์ที่ได้ และนำไปกรองด้วยการกรองสุญญากาศ จากนั้นนำไปอบด้วยตู้อบที่อุณหภูมิ 105 $^{\circ}\text{C}$ เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง
5. การศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางเคมีของทะเลสาบปาล์ม ก่อนและหลังกระบวนการ HTC ด้วยเทคนิคต่างๆ ได้แก่ การศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM) และ วิเคราะห์ปริมาณคาร์บอน ด้วย เทคนิคการวิเคราะห์ธาตุ CHNOS



รูปที่ 3.6 ทะลายปาล์ม จากบริษัทไทยสมบูรณ์น้ำมันปาล์ม จำกัด



รูปที่ 3.7 ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล

ตารางที่ 3.1 สภาวะที่ใช้ในการศึกษากระบวนการ HTC ของทะลายปาล์มเปล่าที่อุณหภูมิ 160, 200, 240 และ 280 °C ที่ระยะเวลา 2, 4, 6 และ 8 ชั่วโมง อัตราส่วนโดยน้ำหนัก

ชื่อการทดลอง	เวลา (ชั่วโมง)	อุณหภูมิ (°C)
EFB160h2	2	160
EFB160h4	4	160
EFB160h6	6	160
EFB160h8	8	160
EFB200h2	2	200
EFB200h4	4	200
EFB200h6	6	200
EFB200h8	8	200
EFB240h2	2	240
EFB240h4	4	240
EFB240h6	6	240
EFB240h8	8	240
EFB280h2	2	280
EFB280h4	4	280
EFB280h6	6	280
EFB280h8	8	280

ตารางที่ 3.2 ตัวกระตุ้นที่ใช้ในการศึกษากระบวนการ HTC ของทะเลาะปาล์มเปล่าที่อุณหภูมิ 160, 200, 240 และ 280 °C ที่ระยะเวลา 2 ชั่วโมง อัตราส่วนโดยน้ำหนัก

ชื่อการทดลอง	ตัวกระตุ้น	อุณหภูมิ (°C)
A-EFB160h2	H ₂ SO ₄	160
A-EFB200h2	H ₂ SO ₄	200
A-EFB240h2	H ₂ SO ₄	240
A-EFB280h2	H ₂ SO ₄	280
O-EFB160h2	H ₂ O ₂	160
O-EFB200h2	H ₂ O ₂	200
O-EFB240h2	H ₂ O ₂	240
O-EFB280h2	H ₂ O ₂	280

หมายเหตุ : อักษรย่อ A คือการศึกษาที่ใช้กรดซัลฟิวริก (H₂SO₄) และ อักษรย่อ o คือการศึกษาที่ใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H₂O₂) เป็นตัวกระตุ้น

3.2.1.2. การเตรียมถ่านกัมมันต์

การศึกษานี้เป็นการกระตุ้นถ่านชีวภาพหรือไฮโดรชาร์ ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการ HTC ที่ใช้ตัวกระตุ้นและไม่ใช้ตัวกระตุ้นที่อุณหภูมิ 200, 240 และ 280 °C เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง โดยปัจจัยศึกษาสารกระตุ้นได้แก่ KOH, ZnCl₂ ที่มีอิทธิพลต่อคุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางเคมีของไฮโดรชาร์

กระตุ้นถ่านชีวภาพในการศึกษานี้ โดยทำการทดลองในเตาเผาอุณหภูมิสูงแบบท่อ ดังแสดงในรูปที่ 3.4 ภายใต้บรรยากาศ N₂ อัตราการไหล เท่ากับ 100 mL/min อุณหภูมิ 800 °C ระยะเวลา 1 ชั่วโมง และอัตราส่วนระหว่างถ่านชีวภาพต่อสารกระตุ้น เท่ากับ 1:1 สารกระตุ้น ได้แก่ KOH, ZnCl₂ โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. ไฮโดรชาร์ผสมกับสารกระตุ้น (ZnCl₂ หรือ KOH) แล้วใส่ในเครื่องปฏิกรณ์จากนั้นประกอบเครื่องปฏิกรณ์ให้สนิท
2. ทำการไล่อากาศออกจากเครื่องปฏิกรณ์และตรวจสอบการรั่ว ด้วยก๊าซไนโตรเจน
3. ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 800 °C ระยะเวลา 1 ชั่วโมง แสดงดังตารางที่ 3.3

4. เมื่อการทดลองเสร็จสิ้น ทำการลดอุณหภูมิเครื่องปฏิกรณ์ให้มีอุณหภูมิประมาณ 30 °C จากนั้นนำผลิตภัณฑ์มาล้างด้วยน้ำกลั่นจนกระทั่ง pH เท่ากับ 7 แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง
5. นำผลิตภัณฑ์ที่ได้ไปศึกษาทางกายภาพและคุณสมบัติทางเคมี

ตารางที่ 3.3 สภาวะที่ใช้ในการศึกษาสารกระตุ้นถ่านชีวภาพในกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลที่อุณหภูมิ 200, 240 และ 280 °C ระยะเวลา 1 ชั่วโมง

ชื่อการทดลอง	สารกระตุ้น	อุณหภูมิที่ทำการศึกษา (°C)
EFB200KOH	KOH	200
EFB200ZnCl ₂	ZnCl ₂	200
EFB240KOH	KOH	240
EFB240ZnCl ₂	ZnCl ₂	240
EFB280KOH	KOH	280
EFB280ZnCl ₂	ZnCl ₂	280

3.2.1 การวิเคราะห์คุณสมบัติของไฮโดรชาร์และถ่านกัมมันต์

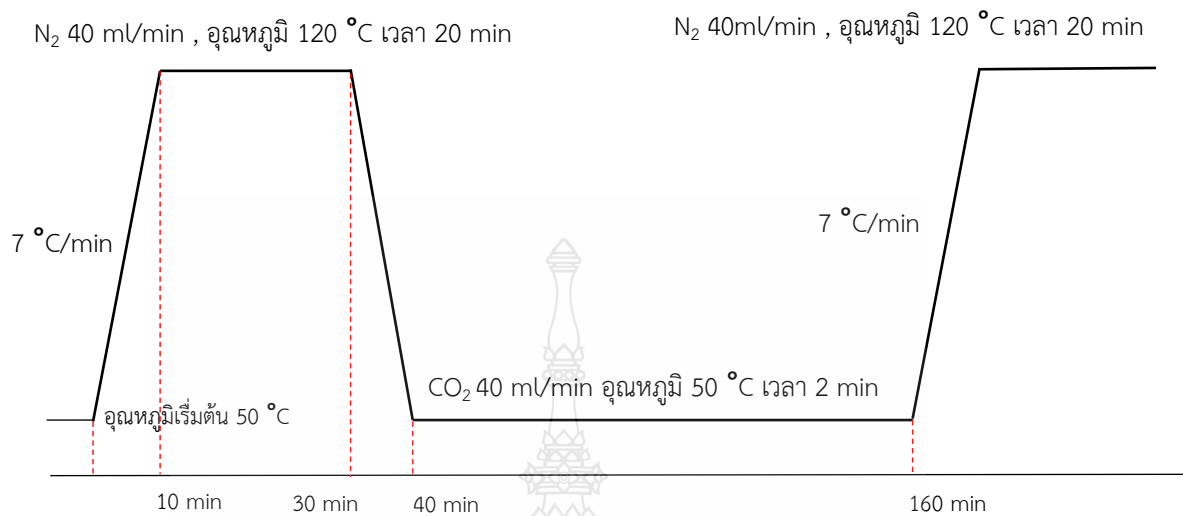
- การวิเคราะห์ปริมาณองค์ประกอบ CHONS และ คาร์บอนคงตัว ได้แก่ Proximate และ Ultimate analysis
- วิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของตัวกระตุ้น ได้แก่ พื้นที่ผิว (S_{BET}) ขนาดรูพรุน และปริมาตรรูพรุนด้วยเครื่องวิเคราะห์การดูดซับ-คายซับของไนโตรเจน (N_2 Adsorption-desorption) จากบริษัท Micromeritics รุ่น ASAP 2020 .
- การตรวจสอบลักษณะพื้นผิว รูพรุน และสัณฐานของตัวกระตุ้น โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) รุ่น SU5000
- วิเคราะห์ลักษณะทางเคมี ได้แก่ หมู่ฟังก์ชัน ด้วย เทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี (Fourier transform Infrared Spectroscopy, FTIR)

3.2.2. การศึกษาประสิทธิภาพในการใช้ถ่านกัมมันต์เป็นตัวดูดซับก๊าซ CO₂

ทดสอบการดูดซับก๊าซ CO₂ โดยใช้เครื่อง TGA เป็นแบบจำลอง โดยทำการศึกษาเปรียบเทียบระหว่างถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้จากการศึกษา กับถ่านกัมมันต์เชิงพาณิชย์ เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับก๊าซ CO₂ โดยศึกษาปริมาณการดูดซับ CO₂ ที่ความเข้มข้นของก๊าซ CO₂ ร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก โดยมีสภาวะการศึกษาดังรูปที่ 3.8

ถ่านกัมมันต์ 10 มิลลิกรัม ใส่ในถ้วยอลูมินาขนาด 50 ไมโครลิตร จากนั้นนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง TGA โดยสร้างสภาวะศึกษาดังนี้

1. เพิ่มอุณหภูมิปฏิกิริยาจาก 50 °C จนถึง 120 °C อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ 7 °C ต่อนาที ด้วยก๊าซ N₂ ที่อัตราการไหล 40 mL/min เพื่อไล่ความชื้นที่สะสมอยู่ในรูพรุนของถ่านกัมมันต์ออกก่อน โดยคงสภาวะนี้ไว้เป็นเวลา 20 นาที เพื่อให้แน่ใจว่าความชื้นถูกไล่ออกไปหมดและน้ำหนักของถ่านกัมมันต์คงที่พร้อมที่จะทดสอบในขั้นต่อไป
2. จากนั้นลดอุณหภูมิลงจนถึง 50 °C และปล่อยก๊าซ CO₂ เข้ามาในระบบ โดยอัตราการไหล 40 mL/min ในขั้นตอนนี้ถ่านกัมมันต์จะเริ่มดูดซับก๊าซ CO₂ โดยคงสภาวะนี้ไว้เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จนน้ำหนักของถ่านกัมมันต์คงที่ จากนั้นสลับเป็นก๊าซ N₂ ที่อัตราการไหล 40 mL/min
3. ทำการเพิ่มอุณหภูมิจนถึง 120 °C อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ 7 °C ต่อนาที เพื่อทดสอบการคายซับ โดยคงสภาวะนี้ไว้เป็นเวลา 20 นาที
4. นำผลของการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักไปคำนวณ ร้อยละของผลิตภัณฑ์เชิงมวลของผลิตภัณฑ์ เพื่อเปรียบเทียบผลดูดซับก๊าซ CO₂ (% Uptake)



รูปที่ 3.8 สภาวะจำลองการดูดซับก๊าซ CO₂-ด้วยเครื่อง TGA

ตารางที่ 3.4 การศึกษาการดูดซับก๊าซ CO₂ ของถ่านกัมมันต์ โดยใช้เครื่อง TGA เป็นแบบจำลองการดูดซับ

ชื่อการทดลอง	ความเข้มข้นของ CO ₂ (ร้อยละโดยโมล)
AC (ถ่านกัมมันต์เชิงพาณิชย์)	40
EFB240 (ไฮโดรชาร์)	40
A-EFB240KOH (ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้)	40
EFB240KOH (ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้)	40

การคำนวณร้อยละของผลิตภัณฑ์เชิงมวลของผลิตภัณฑ์

$$\text{ร้อยละของผลิตภัณฑ์เชิงมวลของผลิตภัณฑ์} = \frac{\text{น้ำหนักผลิตภัณฑ์}}{\text{น้ำหนักละลายปาล์มเปล่าเริ่มต้น}} \times 100$$

การคำนวณการดูดซับก๊าซ CO₂ % Uptake [39]

$$\% \text{ Uptake} = \frac{(W_{\text{end}} \times W_0)}{W_0} \times 100$$

เมื่อ W_0 คือ น้ำหนักตัวอย่างหลังไล่ความชื้นออก

W_{end} คือ น้ำหนักตัวอย่างหลังจากดูดซับ CO₂ จนสมดุล



บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ทำการศึกษากระบวนการแปรรูปทะลายปาล์มเปล่าให้เป็นถ่านกัมมันต์ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนไนเซชัน (HTC) และกระบวนการถ่านทางเคมี พร้อมทั้งศึกษาผลของปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ผลิต ได้แก่ อุณหภูมิ ระยะเวลาและตัวกระตุ้น

4.1 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของทะลายปาล์มเปล่า

จากรายงานของกระทรวงพลังงาน ถึงผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของทะลายปาล์มเปล่า [9] พบว่าทะลายปาล์มเปล่ามีความชื้นสูงถึง ร้อยละ 58.6 ความหนาแน่นรวม 380 kg/m^3 ดังตารางที่ 2.6 และผลการวิเคราะห์องค์ประกอบแบบประมาณ (Proximate analysis) การวิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุ (Ultimate analysis) และค่าความร้อนของทะลายปาล์มเปล่า ดังแสดงในตารางที่ 4.1 พบว่ามีปริมาณคาร์บอนคงตัว สารระเหย และเถ้า ร้อยละ 15.27, 78.52 และ 6.21 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ เมื่อพิจารณาองค์ประกอบแบบแยกธาตุพบว่า ทะลายปาล์มเปล่ามีปริมาณคาร์บอนและไฮโดรเจนร้อยละ 58.83 และ 6.76 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ และมีปริมาณออกซิเจนร้อยละ 38.43 โดยน้ำหนัก

ตารางที่ 4. 1 องค์ประกอบแบบประมาณและแบบแยกธาตุและค่าความร้อนของตัวอย่างทะลายปาล์มเปล่า

องค์ประกอบแบบประมาณ (ร้อยละโดยน้ำหนัก, dry basis)	
ความชื้น (Moisture) ^a	33.00
สารระเหย (Volatile matter)	78.52
คาร์บอนคงตัว (Fixed carbon)	15.27
เถ้า (Ash)	6.21
องค์ประกอบแบบแยกธาตุ (ร้อยละโดยน้ำหนัก, dry ash free)	
คาร์บอน (C)	58.83
ไฮโดรเจน (H)	6.76
ออกซิเจน (O) ^b	38.43
ไนโตรเจน (N)	0.83

^a as received ^b by different

การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีอื่น ๆ ได้แก่ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส ลิกนิน ของทะเลสาบปาล์มเปล่า ให้ผลการทดสอบดังแสดงในตารางที่ 4.2 พบว่า ทะเลสาบปาล์มเปล่ามีปริมาณเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส (ไฮโดรเซลลูโลส) รวมกันร้อยละ 48 โดยน้ำหนัก และมีปริมาณลิกนินร้อยละ 14 โดยน้ำหนัก



รูปที่ 4. 1 ทะเลสาบปาล์มเปล่าที่ผ่านการคัดขนาดแล้ว

ตารางที่ 4. 2 ปริมาณองค์ประกอบทางเคมีของทะเลสาบปาล์มเปล่า

องค์ประกอบทางเคมีของทะเลสาบปาล์มเปล่า	ร้อยละโดยน้ำหนัก
เซลลูโลส (Cellulose)	19.2
เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose)	29.0
ลิกนิน (Lignin)	14.4
สารอื่น ๆ (Extractives)	30.2

4.2 ผลการศึกษาการผลิตไฮโดรชาร์ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล

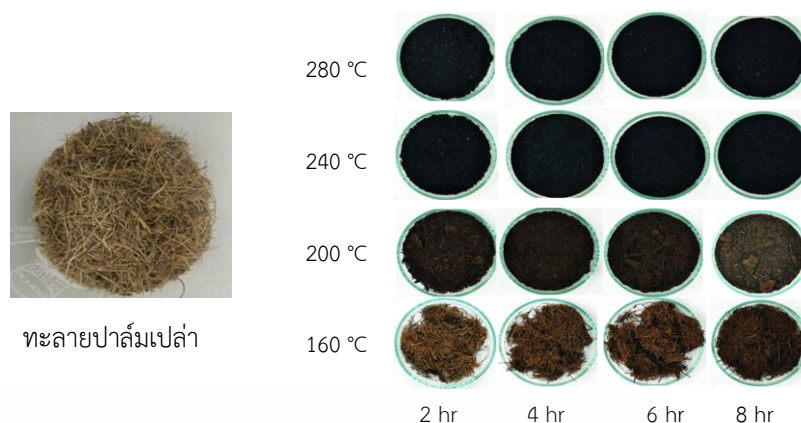
สำหรับการศึกษาการผลิตไฮโดรชาร์ด้วยกระบวนการ HTC โดยการศึกษาผลของระยะเวลา อุณหภูมิ และตัวกระตุ้น ที่มีต่อประสิทธิภาพของไฮโดรชาร์ด้วยกระบวนการ HTC ที่ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 2, 4, 6 และ 8 ชั่วโมง อัตราส่วนทะเลสาบปาล์มเปล่าต่อน้ำ 1:10 ที่อุณหภูมิ 160, 200, 240 และ 280 °C ความดันเริ่มต้น 2 บาร์ ความเร็วรอบของใบกวนในการกวนผสม 200 rpm ตัวกระตุ้น 2 ชนิด ได้แก่ H_2SO_4 และ H_2O_2 ด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวนมีผลดังนี้

4.2.1 ผลของอุณหภูมิ ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาและการเติมตัวกระตุ้น ที่ส่งผลต่อร้อยละของผลิตภัณฑ์

ผลของอุณหภูมิและเวลาต่อร้อยละของผลิตภัณฑ์

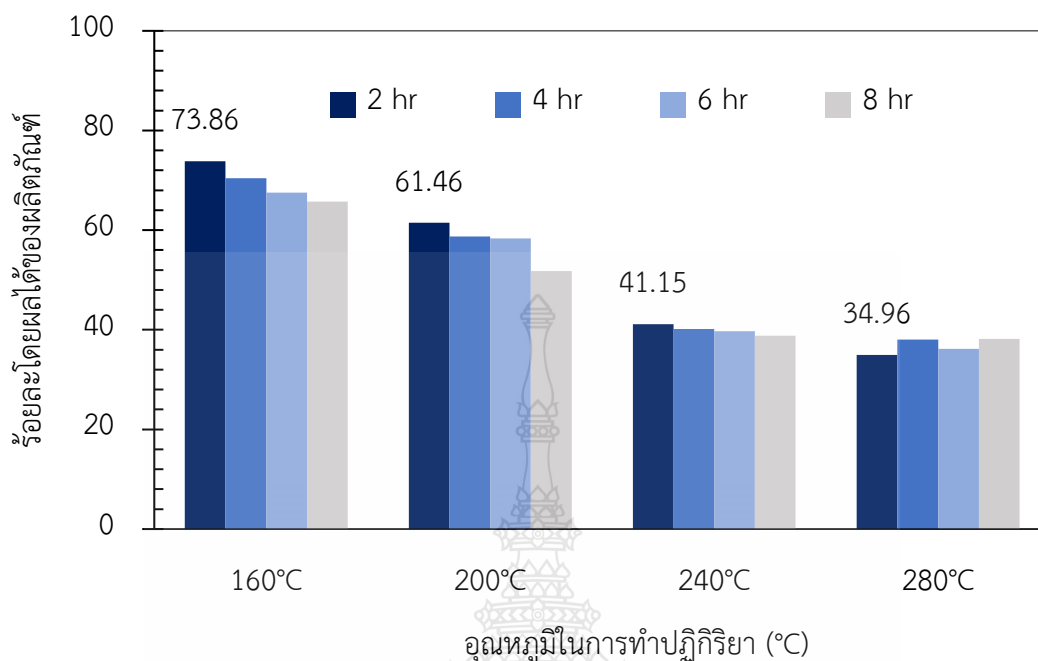
การศึกษากระบวนการ HTC ในเครื่องปฏิกรณ์ทนอุณหภูมิและความดันขนาด 4 ลิตร ที่อัตราส่วนของทะเลาปาล์มเปล่าต่อน้ำเท่ากับ 1:10 ที่อุณหภูมิในการทดลอง 160, 200, 240 และ 280 °C เป็นระยะเวลา 2, 4, 6 และ 8 ชั่วโมง เกิดไฮโดรชาร์ ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์หลัก ส่วนก๊าซและชั้นน้ำเป็นผลิตภัณฑ์รอง เมื่อพิจารณาลักษณะทางกายภาพของไฮโดรชาร์ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์หลักของกระบวนการนี้ พบว่า สีของไฮโดรชาร์หลังผ่านกระบวนการ HTC มีสีเข้มขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น แสดงในรูปที่ 4.2 โดยที่อุณหภูมิ 160 °C จะมีสีน้ำตาลใกล้เคียงกับสีของทะเลาปาล์มเปล่าที่เป็นวัตถุดิบตั้งต้น เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ไฮโดรชาร์ที่ได้จะเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลเข้มขึ้น ซึ่งที่อุณหภูมิ 280 °C ไฮโดรชาร์จะเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลเข้มดำคล้ายกับสีของถ่าน





รูปที่ 4.2 ลักษณะทางกายภาพของทะลายปาล์มเปล่าและไฮโดรชาร์ที่อุณหภูมิและเวลาต่าง ๆ

เมื่อพิจารณาร้อยละของผลิตภัณฑ์เชิงมวลของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการ HTC พบว่า ที่ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 2 ชั่วโมง อุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 160 เป็น 280 °C ส่งผลให้ร้อยละของผลิตภัณฑ์เชิงมวลของไฮโดรชาร์ลดลง ซึ่งเป็นผลมาจากการสลายตัวของเส้นใยเซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลส โดยที่อุณหภูมิสูงขึ้นผลได้ของไฮโดรชาร์จะลดลง ดังรูปที่ 4.3 จะเห็นได้ว่า อุณหภูมิ 160 °C มีผลได้เชิงมวลของไฮโดรชาร์เท่ากับร้อยละ 73.86 ส่วนที่อุณหภูมิ 280 °C จะมีผลได้เชิงมวลของไฮโดรชาร์ลดลงมาก เหลือเพียงร้อยละ 34.96 โดยน้ำหนัก เป็นผลมาจากการสลายตัวของเฮมิเซลลูโลส และเซลลูโลสของทะลายปาล์มเปล่า ซึ่งการสลายตัวนั้นเกี่ยวข้องกับปฏิกิริยา Depolymerization และ Decarboxylation เกิดเป็นผลิตภัณฑ์ก๊าซ และสารอินทรีย์ในชั้นน้ำเพิ่มขึ้น ดังนั้น กระบวนการ HTC ที่อุณหภูมิต่ำ จะเกิดผลิตภัณฑ์ไฮโดรชาร์สูง แต่เมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น จะเกิดเป็นสารอินทรีย์ในชั้นน้ำและก๊าซมากขึ้น ส่วนผลิตภัณฑ์ไฮโดรชาร์จะลดลง และจะเห็นว่าระยะเวลาในการ ทำปฏิกิริยาที่ 2 ชั่วโมง ไม่แตกต่างจาก 8 ชั่วโมง อย่างมีนัยสำคัญ ดังรูปที่ 4.3 ดังนั้นจึงเลือกระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 2 ชั่วโมง เพื่อศึกษาผลของตัวเร่งปฏิกิริยาในการศึกษาต่อไป



รูปที่ 4.3 ผลของอุณหภูมิและเวลาต่อร้อยละของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการ HTC ของทะเลสาบ ปาล์มเปล่า

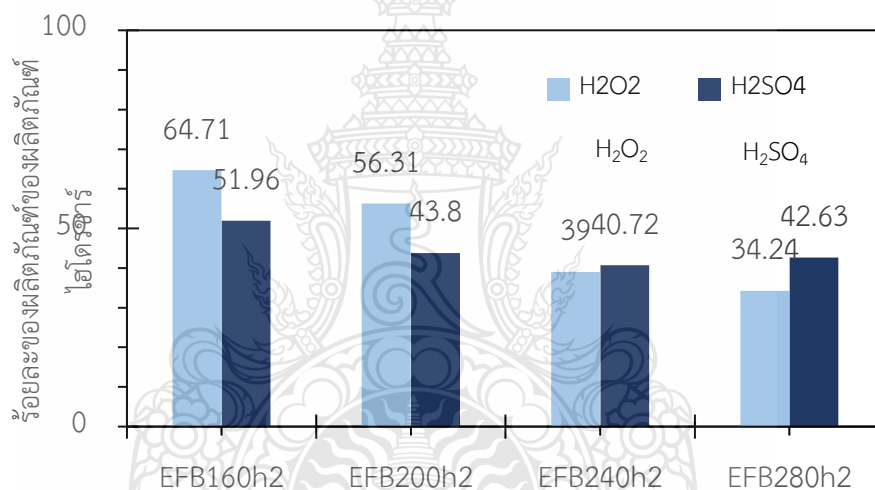
ผลของการเติมตัวกระตุ้นต่อร้อยละของผลิตภัณฑ์ไฮโดรคาร์

ผลการศึกษาการผลิตไฮโดรคาร์ด้วยกระบวนการ HTC โดยใช้ตัวกระตุ้น 2 ชนิด ในกระบวนการ ได้แก่ H_2SO_4 และ H_2O_2 ระยะเวลา 2 ชั่วโมง อัตราส่วนทะเลสาบปาล์มเปล่าต่อน้ำ 1:10 ที่อุณหภูมิ 160, 200, 240 และ 280 °C ความดันเริ่มต้น 2 บาร์ และความเร็วในการกวนผสม 200 rpm มาศึกษาด้วยการทำปฏิกิริยาแบบกะด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวนพบว่า เมื่อพิจารณาร้อยละของผลิตภัณฑ์เชิงมวลของไฮโดรคาร์ที่เกิดจากกระบวนการ HTC โดยใช้กรด H_2SO_4 และ H_2O_2 เป็นตัวกระตุ้น พบว่าที่ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 2 ชั่วโมง อุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 160 เป็น 280 °C ส่งผลให้ร้อยละของผลิตภัณฑ์เชิงมวลของไฮโดรคาร์ลดลง ถ้าใช้ กรด H_2SO_4 เป็นตัวกระตุ้นร้อยละของผลิตภัณฑ์เชิงมวลของไฮโดรคาร์ลดลงจาก 51.91 เป็น 42.63 และในขณะเดียวกัน ถ้าใช้ H_2O_2 ร้อยละของผลิตภัณฑ์เชิงมวลของไฮโดรคาร์ลดลงจาก 64.71 เป็น 34.24 ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.4

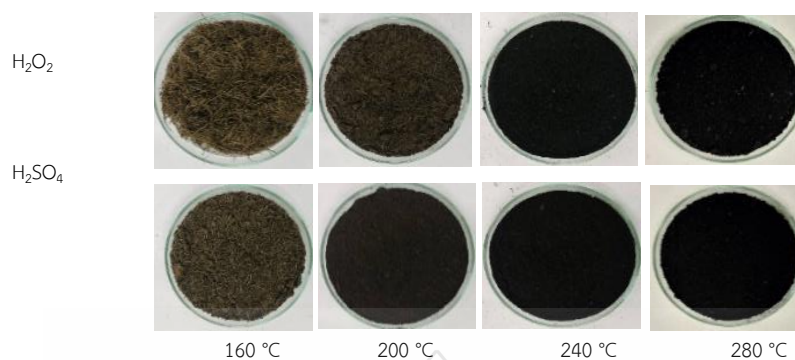
ในช่วงอุณหภูมิ 160-200 °C การใช้กรดซัลฟริกทำให้ร้อยละของผลิตภัณฑ์เชิงมวลของไฮโดรคาร์ต่ำกว่าการใช้ H_2O_2 แต่เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น การใช้กรดซัลฟริกทำให้ได้ร้อยละของผลิตภัณฑ์เชิงมวล

ของไฮโดรซาร์มากกว่าการใช้ H_2O_2 เป็นตัวกระตุ้น ดังรูปที่ 4.4 เนื่องจากที่อุณหภูมิต่ำกรดซัลฟริกจะช่วยเร่งทำให้เกิดปฏิกิริยา hydrolysis และ dehydration ได้รุนแรงกว่า H_2O_2 ทำให้เร่งการสลายตัวได้รวดเร็วกว่าส่งผลให้ร้อยละของผลิตภัณฑ์เชิงมวลของไฮโดรซาร์ต่ำกว่าการใช้ H_2O_2 แต่ในทางกลับกันที่อุณหภูมิสูงกรดซัลฟริกจะช่วยเร่งทำให้เกิดปฏิกิริยา Condensation, Polymerization และ Aromatic clusters formation จึงส่งผลให้ไฮโดรซาร์เพิ่มขึ้น

เมื่อพิจารณาลักษณะทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ซึ่งพบว่า สีของไฮโดรซาร์หลังผ่านกระบวนการ HTC จะมีสีเข้มขึ้นจากน้ำตาลอ่อนเป็นสีดำตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น แสดงในรูปที่ 4.5 โดยที่อุณหภูมิต่ำ 160 และ 200 °C การใช้กรดซัลฟริกส่งผลให้ลักษณะของไฮโดรซาร์ละเอียดเป็นผงมากกว่าการใช้ H_2O_2 เป็นตัวกระตุ้น



รูปที่ 4.4 ผลของตัวกระตุ้นกรดซัลฟริกและ H_2O_2 ส่งผลต่อ ร้อยละของผลิตภัณฑ์ของผลิตภัณฑ์ไฮโดรซาร์ในกระบวนการ HTC ที่สภาวะอุณหภูมิ 160, 200, 240 และ 280 °C เวลา 2 ชั่วโมง



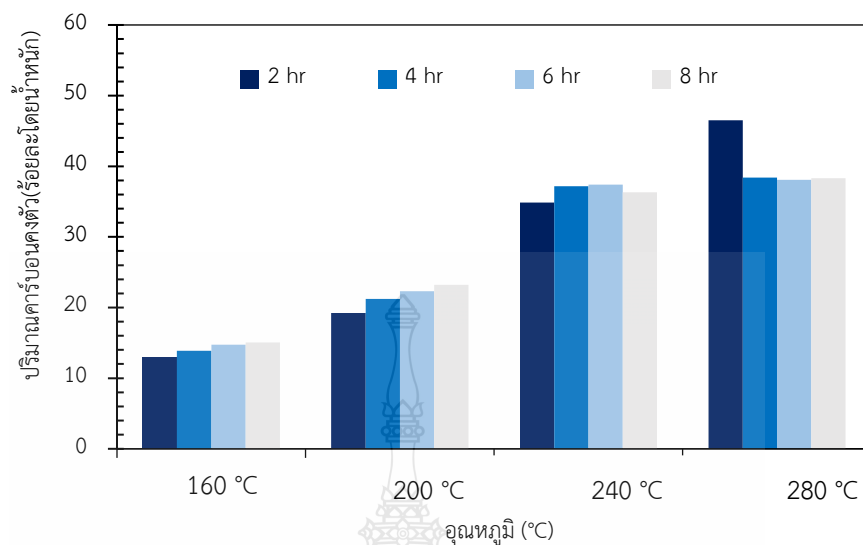
รูปที่ 4. 5 ผลิตภัณฑ์ไฮโดรชาร์ที่ผ่านการเติมตัวกระตุ้น ด้วยกรดซัลฟริกและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ที่สภาวะอุณหภูมิ 160, 200, 240 และ 280 °C เวลาในการทำปฏิกิริยา 2 ชั่วโมง

4.2.2 ผลการศึกษาองค์ประกอบแบบประมาณ (Proximate analysis) และ การวิเคราะห์ องค์ประกอบแบบแยกธาตุ (Ultimate analysis)

ผลของอุณหภูมิและเวลาในการทำปฏิกิริยาที่ส่งผลต่อค่าองค์ประกอบแบบประมาณ และ องค์ประกอบแบบแยกธาตุของผลิตภัณฑ์ไฮโดรชาร์ เมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์องค์ประกอบแบบ ประมาณ (Proximate analysis) ของไฮโดรชาร์ที่เกิดจากกระบวนการ HTC พบว่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิ จาก 160 เป็น 280 °C แสดงให้เห็นว่า ความชื้น สารระเหย และ เถ้า ลดลง แต่ปริมาณคาร์บอนคงตัว (Fixed carbon) เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 14.35 เป็น 46.50 ดังตารางที่ 4.3 และในขณะเดียวกันเมื่อ พิจารณาผลการวิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุ (Ultimate analysis) ของไฮโดรชาร์ที่เกิดจาก กระบวนการ HTC พบว่าปริมาณคาร์บอนเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 50.49 เป็น 70.45 แต่ในทางตรงกันข้าม ปริมาณออกซิเจนลดลงจาก 36.05 เป็น 20.85 ดังตารางที่ 4.4 ซึ่งเกิดจากการสลายตัวด้วยความร้อน ของเส้นใยเฮมิเซลลูโลส และเซลลูโลสของทะลายปาล์มเปล่า เกิดปฏิกิริยา Hydrolysis เพื่อตัดสายพอลิ เมอร์ของเฮมิเซลลูโลสและเซลลูโลสให้แตกลง จากนั้นเกิดปฏิกิริยา Dehydration และ Decarboxylation เป็นการขจัดเอาอะตอมของออกซิเจนออกจากโมเลกุลในรูปของน้ำและก๊าซ CO₂ ส่งผลให้ออกซิเจนลดลง และในขณะเดียวกันเกิดปฏิกิริยา Polymerization, Aromatic clusters formation นำไปสู่การเพิ่มปริมาณอะตอมของคาร์บอนเพิ่มขึ้นในผลิตภัณฑ์ไฮโดรชาร์

ตารางที่ 4.3 ผลการศึกษาองค์ประกอบแบบประมาณ (Proximate analysis) ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการ HTC ของทะลายปาล์มเปล่า

ชื่อการทดลอง	อุณหภูมิ (°C)	เวลา (ชั่วโมง)	ร้อยละ ผลได้	ร้อยละโดยน้ำหนัก			
				ความชื้น	สารระเหย	คาร์บอนคงตัว	เถ้า
EFBs	-	-	-	5.97	73.82	14.35	5.9
EFB160h2	160	2	73.86	4.31	81.32	12.93	1.4
EFB160h4		4	70.40	4.05	80.59	13.87	1.5
EFB160h6		6	67.55	3.95	79.93	14.75	1.4
EFB160h8		8	65.75	3.70	79.94	15.07	1.3
EFB200h2		2	61.46	3.13	76.05	19.24	1.6
EFB200h4	200	4	58.75	2.98	74.06	21.20	1.8
EFB200h6		6	58.33	3.05	72.89	22.30	1.8
EFB200h8		8	51.78	3.18	71.94	23.20	1.7
EFB240h2	240	2	41.15	1.84	60.85	34.88	2.4
EFB240h4		4	40.15	1.74	59.27	37.15	1.8
EFB240h6		6	39.71	1.77	59.09	37.39	1.8
EFB240h8		8	38.81	1.85	60.09	36.33	1.7
EFB280h2		2	34.96	7.40	42.14	46.50	4.0
EFB280h4	280	4	38.06	1.64	58.44	38.40	1.5
EFB280h6		6	36.17	1.71	58.41	38.09	1.8
EFB280h8		8	38.14	1.69	58.25	38.30	1.8



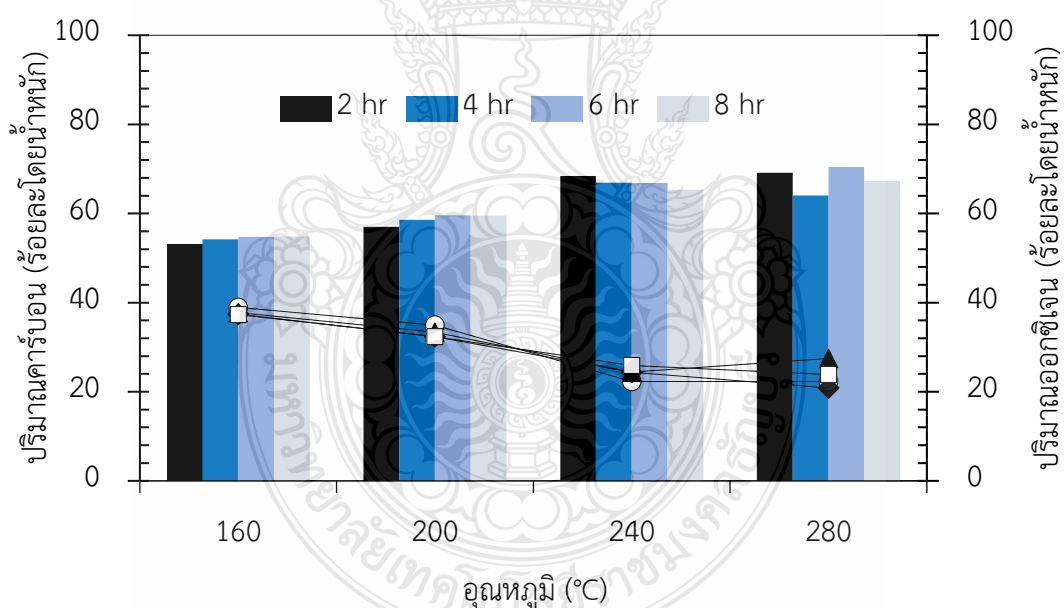
รูปที่ 4. 6 ผลของอุณหภูมิและเวลาที่มีต่อปริมาณคาร์บอนและออกซิเจนของผลิตภัณฑ์ได้จาก กระบวนการ HTC

ตารางที่ 4. 4 ผลการศึกษาคู่ประกอบแบบแยกธาตุ (Ultimate analysis) ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จาก กระบวนการ HTC

ชื่อการทดลอง	อุณหภูมิ (°C)	เวลา (ชั่วโมง)	ร้อยละโดยน้ำหนัก			
			H	C	N	O
EFBs	-	-	6.34	50.49	0.78	36.05
EFB160h2	160	2	6.42	53.16	0.00	38.93
EFB160h4		4	6.47	54.22	0.00	37.75
EFB160h6		6	6.45	54.74	0.00	37.37
EFB160h8		8	6.52	54.82	0.00	37.33
EFB200h2	200	2	6.42	57.00	0.00	34.95
EFB200h4		4	6.28	58.56	0.00	33.34
EFB200h6		6	6.27	59.57	0.00	32.35
EFB200h8		8	6.38	59.54	0.00	32.35

ตารางที่ 4.5 ผลการศึกษาองค์ประกอบแบบแยกธาตุ (Ultimate analysis) ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการ HTC (ต่อ)

ชื่อการทดลอง	อุณหภูมิ (°C)	เวลา (ชั่วโมง)	ร้อยละโดยน้ำหนัก			
			H	C	N	O
EFB240h2	240	2	6.42	68.40	0.38	22.32
EFB240h4		4	6.43	66.94	0.35	24.40
EFB240h6		6	6.60	66.87	0.35	24.39
EFB240h8		8	6.67	65.33	0.36	25.87
EFB280h2	280	2	3.26	69.16	1.01	22.29
EFB280h4		4	6.61	64.02	0.36	27.46
EFB280h6		6	6.55	70.45	0.33	20.85
EFB280h8		8	6.73	67.25	0.39	23.85



รูปที่ 4.7 ผลของอุณหภูมิและเวลาที่มีต่อปริมาณคาร์บอนและออกซิเจนของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการ HTC

ผลของการเติมตัวกระตุ้นหรือสารไฮโดรไลต์ติกในกระบวนการ HTC ส่งผลต่อองค์ประกอบแบบประมาณ และการวิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุของผลิตภัณฑ์ไฮโดรชาร์ เมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์องค์ประกอบแบบประมาณ (Proximate analysis) ของไฮโดรชาร์ที่เกิดจากการเติมสารเติมตัวกระตุ้นในการทำปฏิกิริยาในกระบวนการ HTC พบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 160 เป็น 280 °C ส่งผลให้ ความชื้น และสารระเหย ลดลงแต่ปริมาณคาร์บอนคงตัว (Fixed carbon) เพิ่มขึ้นลักษณะเดียวกับการไม่เติมตัวกระตุ้น โดยที่การเติมกรดซัลฟิวริกในกระบวนการ HTC ร้อยละของปริมาณคาร์บอนคงตัว เพิ่มขึ้นจาก 15.34 เป็น 38.35 และในขณะเดียวกันการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ปริมาณคาร์บอนคงตัว เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 10.25 เป็น 30.54 ดังนั้นการเติมกรดซัลฟิวริกในกระบวนการ HTC ส่งผลให้ปริมาณคาร์บอนคงตัวมากกว่าการเติม H_2O_2 ดังตารางที่ 4.3

และในขณะเดียวกันเมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุ (Ultimate analysis) ปริมาณร้อยละคาร์บอนเพิ่มขึ้น โดยที่การเติมกรดซัลฟิวริกในกระบวนการ HTC ปริมาณร้อยละคาร์บอน เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 56.23 เป็น 72.65 และในขณะเดียวกันการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ปริมาณคาร์บอนคงตัว เพิ่มขึ้นจาก 53.67 เป็น 71.36 การเติมกรดซัลฟิวริกในกระบวนการ HTC ส่งผลให้ร้อยละปริมาณคาร์บอนมากกว่าการเติม H_2O_2 ดังตารางที่ 4.3

ปริมาณร้อยละออกซิเจนลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ โดยที่การเติมกรดซัลฟิวริกในกระบวนการ HTC ปริมาณร้อยละออกซิเจนลดลงจากร้อยละ 32.98 เป็น 15.15 และการเติม H_2O_2 ทำให้ปริมาณร้อยละออกซิเจนลดลงจาก 37.94 เป็น 15.87 จะเห็นว่าการเติม H_2O_2 ส่งผลให้มีอะตอมของออกซิเจนในไฮโดรชาร์มากกว่าการเติมกรดซัลฟิวริกในกระบวนการ HTC เนื่องจาก H_2O_2 มีคุณสมบัติการเป็นตัวออกซิไดร์เชิงเอเจนต์ที่ดีกว่ากรดซัลฟิวริก ดังตารางที่ 4.5

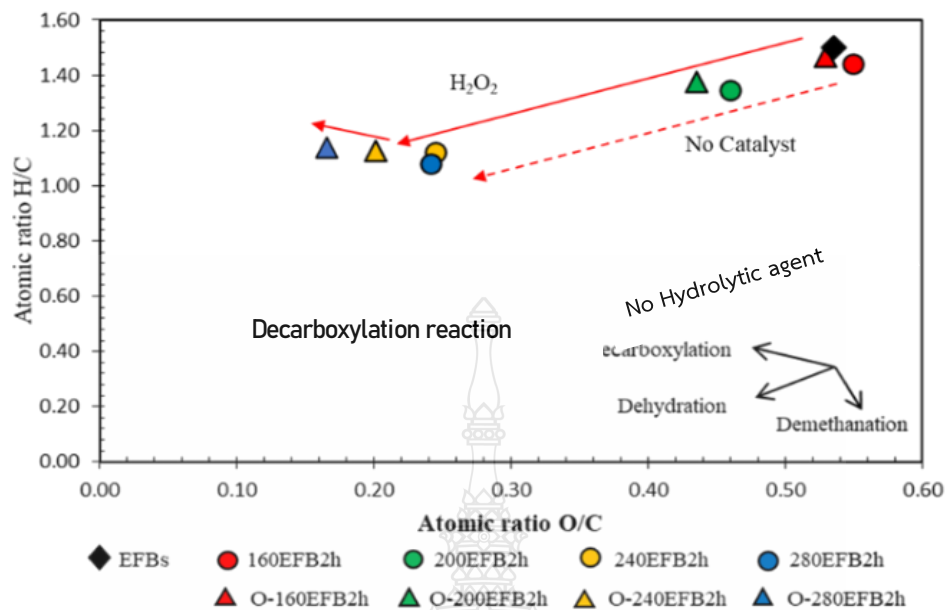
จากข้อมูลองค์ประกอบแบบแยกธาตุ (Ultimate analysis) ของผลิตภัณฑ์ไฮโดรชาร์ที่เติมตัวกระตุ้นและไม่เติมตัวกระตุ้นในกระบวนการ HTC สามารถนำมาข้อมูลของปริมาณคาร์บอน ปริมาณออกซิเจนและปริมาณไฮโดรเจนมาศึกษาพฤติกรรมของปฏิกิริยาเกิดขึ้นในกระบวนการ HTC ได้ โดยสร้างกราฟความสัมพันธ์ Van Krevelen diagram ระหว่างอัตราส่วน อะตอมของ O/C และอัตราส่วนของอะตอมของ H/C ดังรูปที่ 4.9 แสดงให้เห็นว่าการเติมตัวกระตุ้นที่ต่างชนิดกันส่งผลต่อปฏิกิริยาในปฏิกิริยาต่างกัน การเติมตัวกระตุ้น H_2O_2 ที่อุณหภูมิ 240 และ 280 °C จะมีโอกาสการเกิดปฏิกิริยา Decarboxylation มากกว่าการเติมกรดซัลฟิวริก แต่ในทางกลับกันการเติมกรดซัลฟิวริกจะส่งผลให้เกิดปฏิกิริยา Dehydration มากกว่าไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ อย่างไรก็ตามจาก Van Krevelen diagram ไม่ว่าการเติมตัวเร่งปฏิกิริยชนิดใดก็ตาม จะส่งผลให้เร่งปฏิกิริยาไปข้างหน้าส่งผลต่อการเพิ่มปริมาณคาร์บอนในไฮโดรชาร์

ตารางที่ 4. 6 ผลการศึกษาองค์ประกอบแบบแยกธาตุ (Ultimate analysis) ของไฮโดรคาร์บอเนตที่ใช้
ตัวกระตุ้นในกระบวนการ HTC

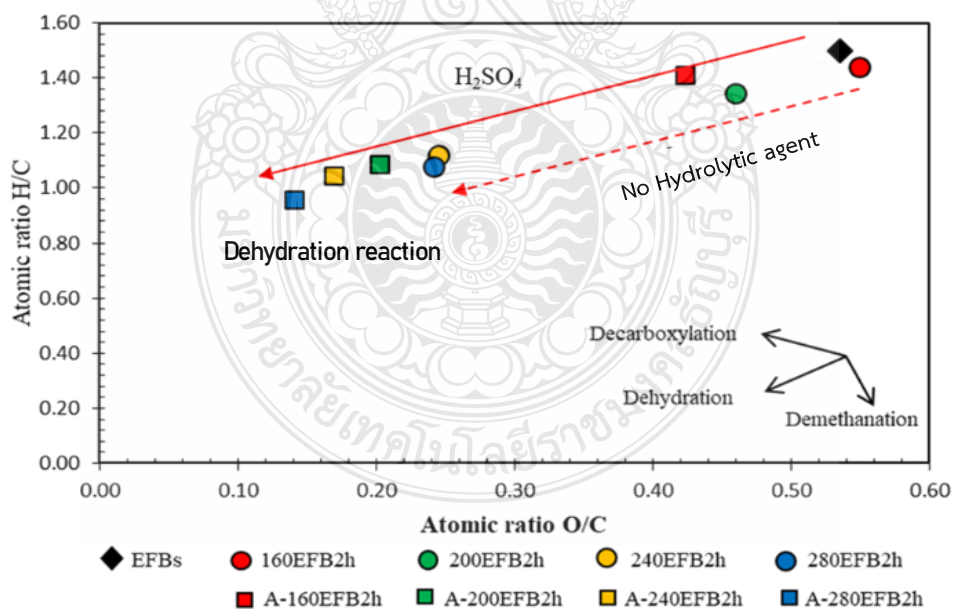
ชื่อการทดลอง	ร้อยละของ ผลิตภัณฑ์	Ultimate Analysis (% dry basis)			
		H	C	N	O
EFBs	-	6.34	50.49	0.78	36.05
O-EFB160h2	64.71	6.58	53.67	0.00	37.94
A-EFB160h2	51.96	6.68	56.23	0.23	32.98
O-EFB200h2	56.31	6.57	57.20	0.12	33.24
A-EFB200h2	43.80	6.30	68.71	0.36	20.02
O-EFB240h2	39.00	6.56	69.68	0.64	18.86
A-EFB240h2	40.72	6.31	71.38	0.38	17.63
O-EFB280h2	34.24	6.80	71.36	0.82	15.87
A-EFB280h2	42.63	5.88	72.65	0.33	15.15

ตารางที่ 4. 7 ผลการศึกษาองค์ประกอบแบบประมาณ (Proximate analysis) ของไฮโดรชาร์ที่ใช้
ตัวกระตุ้นในกระบวนการ HTC

ชื่อการทดลอง	ร้อยละของ ผลิตภัณฑ์	Proximate Analysis (% dry basis)			
		ความชื้น	สารระเหย	คาร์บอนคงตัว	เถ้า
EFBs	-	5.97	73.82	14.35	5.86
O-EFB160h2	64.71	3.98	84.11	10.25	1.67
A-EFB160h2	51.96	2.98	78.57	15.34	3.12
O-EFB200h2	56.31	2.91	79.24	15.21	2.64
A-EFB200h2	43.80	2.78	65.21	28.20	3.81
O-EFB240h2	39.00	1.76	63.72	30.54	3.98
A-EFB240h2	40.72	2.36	61.40	32.75	3.50
O-EFB280h2	34.24	1.44	62.71	30.97	4.88
A-EFB280h2	42.63	2.33	54.23	38.35	5.09



รูปที่ 4.8 กราฟ Van Krevelen แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน H/C และ O/C ของการเติม H_2O_2 ในกระบวนการ HTC



รูปที่ 4.9 กราฟ Van Krevelen แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน H/C และ O/C ของการเติม กรดซัลฟิวริกในกระบวนการ HTC

4.2.3 ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะปริมาณรูพรุนและขนาดของรูพรุนของไฮโดรซาร์ด้วย BET (Brunauer-Emmett-Teller)

ผลของอุณหภูมิและเวลาที่ส่งผลต่อพื้นที่ผิวจำเพาะปริมาณรูพรุนและขนาดของรูพรุนของไฮโดรซาร์ ผลการศึกษาจะแสดง ปริมาตรรูพรุน พื้นที่ผิวจำเพาะ และขนาดรูพรุน โดยใช้หลักการดูดซับ N_2 และประเมินผ่านแบบจำลอง BET (Brunauer-Emmett-Teller) พบว่าพื้นที่ผิวจำเพาะของไฮโดรซาร์ ไม่สัมพันธ์กับอุณหภูมิและเวลา จะมีพื้นที่ผิวจำเพาะอยู่ระหว่าง 7.57–78.56 ตารางเมตรต่อกรัม เนื่องจากสถานะ HTC จะทำงานภายใต้อุณหภูมิต่ำเมื่อเทียบกับกระบวนการไพโรไลซิสหรือกระบวนการกระตุ้น ดังนั้นโครงสร้างของไฮโดรซาร์จึงอาจไม่เป็นเนื้อเดียวกันทั้งหมด จากงานวิจัยของ Hidayu (2015)[41] ได้รายงานวาทะลายปาล์มเปล่า (พื้นที่ผิวจำเพาะ 2.01 m^2/g ขนาดรูพรุนเฉลี่ย 26.54 นาโนเมตร) หลังจากผ่านกระบวนการ HTC พบว่าพื้นที่ผิวของไฮโดรซาร์แปรผันในช่วง 4-78 ตารางเมตรต่อกรัม พื้นที่ผิวไม่สัมพันธ์กับอุณหภูมิและเวลา

ผลของขนาดรูพรุนแสดงให้เห็นความสัมพันธ์ที่น่าสนใจกับอุณหภูมิจากตารางที่ 4.6 ขนาดของรูพรุนเฉลี่ยของไฮโดรซาร์ลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิการทำปฏิกิริยาจาก 160, 200, 240 ไปยังอุณหภูมิ 280 °C เส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนเฉลี่ย เท่ากับ 22.19, 13.65, 6.32 และ 4.84 นาโนเมตร ตามลำดับ เห็นได้ชัดว่าขนาดของรูพรุนของไฮโดรซาร์ที่อุณหภูมิ 160 °C มีค่าใกล้เคียงกับทะลายปาล์มเปล่าของงานวิจัย Hidayu (2015) ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงของรูพรุนเริ่มต้นขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 200 °C และมีการเกิดรูพรุนชนิด mesoporous เกิดขึ้น อย่างไรก็ตาม ขนาดรูพรุนที่สูงกว่า 20.00 นาโนเมตร ไม่มีข้อได้เปรียบในด้านประสิทธิภาพการดูดซับ เนื่องจากโดยปกติแล้วอัตราการถ่ายโอนมวลระหว่างกระบวนการดูดซับและกระบวนการคายซับ มีอัตราที่เท่ากัน

ตารางที่ 4. 8 ผลการศึกษาพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุนและขนาดของรูพรุนเฉลี่ยของผลิตภัณฑ์ไฮโดรซาร์

ชื่อการทดลอง	อุณหภูมิ (°C)	เวลา (hr)	พื้นที่ผิวจำเพาะ (m ² /g)	ปริมาตรรูพรุน (cm ³ /g)	ขนาดรูพรุน เฉลี่ย (nm)
EFB160h2	160	2	42.20	0.30	12.21
EFB160h4		4	46.66	0.47	39.99
EFB160h6		6	17.58	0.05	12.17
EFB160h8		8	9.70	0.06	24.37
EFB200h2	200	2	30.82	0.12	15.10
EFB200h4		4	28.92	0.07	9.57
EFB200h6		6	32.72	0.12	14.06
EFB200h8		8	34.71	0.14	15.86
EFB240h2	240	2	11.91	0.03	10.89
EFB240h4		4	7.57	0.01	5.37
EFB240h6		6	13.36	0.01	4.32
EFB240h8		8	19.37	0.02	4.69
EFB280h2	280	2	78.56	0.23	3.13
EFB280h4		4	18.87	0.02	4.99
EFB280h6		6	4.76	0.01	5.30
EFB280h8		8	25.19	0.03	4.19

การใช้ กรดซัลฟิวริกเป็นสารกระตุ้นในกระบวนการ HTC จะเพิ่มพื้นที่ผิวของไฮโดรซาร์ที่ 76.10-99.14 ตารางเมตรต่อกรัม แต่เมื่อใช้ H₂O₂ ในกระบวนการ HTC ให้พื้นที่ผิวสูงสุด 63.75-479.19 ตารางเมตรต่อกรัม โดยเฉพาะตัวอย่าง O-EFB280h2 หรือไฮโดรซาร์ที่อุณหภูมิ 280 °C แสดงพื้นที่ผิวสูงเป็นพิเศษเมื่อเทียบกับไฮโดรซาร์ทั่วไป ผลการทดลองพบว่าที่อุณหภูมิ 280 °C การกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันโดย H₂O₂ ทำให้เกิดรูพรุนสูงดังแสดงในตารางที่ 4.7 ซึ่งสอดคล้องกับ Van Krevelen diagram นอกจากนั้นขนาดรูพรุนเฉลี่ยของไฮโดรซาร์ที่ได้จากกระบวนการ HTC ที่ไม่มีตัวกระตุ้นจะให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนที่ใหญ่ที่สุดคือ 4.88-15.10 นาโนเมตร [13] เห็นได้ชัดว่าการใช้ตัวกระตุ้นในกระบวนการ HTC จะไปลดขนาดของรูพรุนในช่วง 3.06-4.32 นาโนเมตร ซึ่งเป็นรูพรุนชนิด mesoporous และที่อุณหภูมิ 280 °C การใช้ H₂O₂ ส่งผลต่อปริมาตรรูพรุนมากกว่าการใช้ H₂SO₄

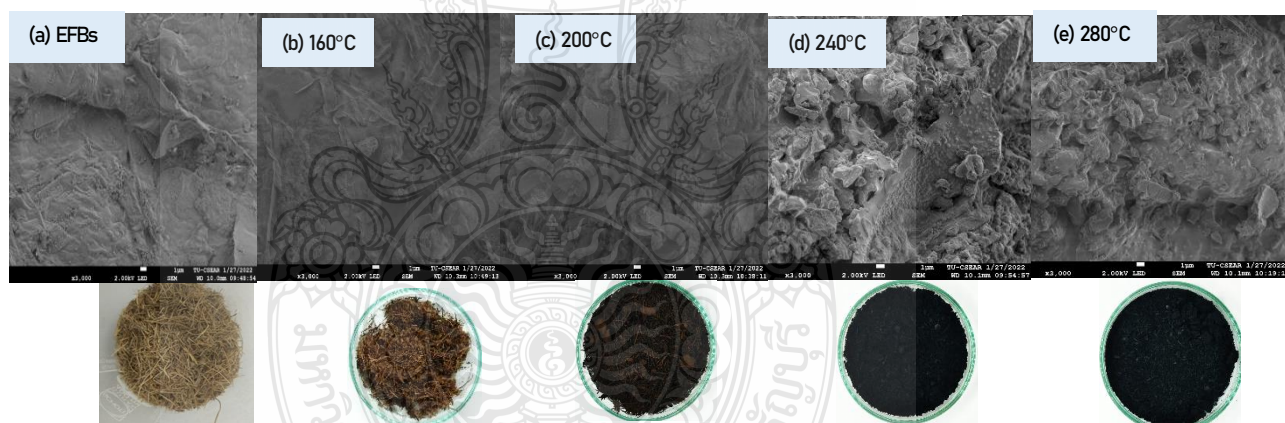
อย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจาก H_2O_2 เกิดปฏิกิริยาการเติม ออกซิเจนเข้าไปในไฮโดรคาร์เพราะเป็นตัวออกซิไดซ์ที่รุนแรง ดังนั้นจึงเพิ่มโอกาสการเกิดปฏิกิริยา decarboxylation เป็นก๊าซ CO_2 มากกว่าการใช้กรดซัลฟิวริก จึงทำให้เกิดรูพรุนมีความลึกกว่า เป็นสาเหตุที่มีอิทธิพลต่อ ปริมาตรรูพรุนและพื้นที่ผิวที่เพิ่มขึ้นตามมา

ตารางที่ 4. 9 ผลการศึกษาพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุนและขนาดของรูพรุนของผลิตภัณฑ์ไฮโดรซาร์

ชื่อการทดลอง	พื้นที่ผิวจำเพาะ (m^2/g)	ปริมาตรรูพรุน (cm^3/g)	ขนาดรูพรุน เฉลี่ย (nm)
A-EFB160h2	76.10	0.023	3.82
A-EFB200h2	93.65	0.011	3.06
A-EFB240h2	84.31	0.026	4.32
A-EFB280h2	99.14	0.028	3.06
O-EFB160h2	63.75	0.073	3.90
O-EFB200h2	106.32	0.146	3.06
O-EFB240h2	115.30	0.176	3.42
O-EFB280h2	479.19	0.727	3.06

4.2.4 ผลการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope) ของผลิตภัณฑ์ไฮโดรซาร์ในกระบวนการ HTC

ผลการศึกษาโครงสร้างพื้นฐานของทะเลาปาล์มเปล่าและผลิตภัณฑ์ไฮโดรซาร์ที่ผลิตได้จากสภาวะ 160, 200, 240 และ 280 °C เวลาทำปฏิกิริยา 2 ชั่วโมง ด้วย SEM ที่กำลังขยาย 3,000 เท่า ดังรูปที่ 4.10 แสดงให้เห็นลักษณะพื้นผิวของทะเลาปาล์มเปล่าและผลิตภัณฑ์ไฮโดรซาร์ รูป (a) แสดงลักษณะพื้นผิวของทะเลาปาล์มเปล่า (EFBs) ซึ่งมีโครงสร้างพื้นฐานแบนและไม่มีรูพรุนชัดเจน แต่ในทางกลับกัน รูป (b) และ (c) ไฮโดรซาร์ที่อุณหภูมิ 160 และ 200 °C แสดงพื้นผิวมีความขรุขระเพิ่มมากขึ้นตามลำดับ ในลักษณะเดียวกัน รูป (d) และ (e) ไฮโดรซาร์ที่อุณหภูมิ 240 และ 280 °C แสดงลักษณะพื้นผิวขรุขระเพิ่มขึ้นมากกว่ารูป (b) และ (c) พื้นผิวที่หยาบกว่า เริ่มเห็นรูพรุนเกิดขึ้น ความหยาบนี้เพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิของ HTC ที่อุณหภูมิสูงกว่า 200 °C ทำให้เกิดรูพรุนแบบ mesoporous รูพรุนจะเกิดขึ้นเมื่อสารระเหยหลุดออกจากโครงสร้าง ทำให้เกิดคาร์บอนอสัณฐานเป็นไฮโดรซาร์ที่มีโครงสร้างต่างกัน ซึ่งรวมถึงโครงข่ายขนาดและรูปร่างที่ไม่สม่ำเสมอ

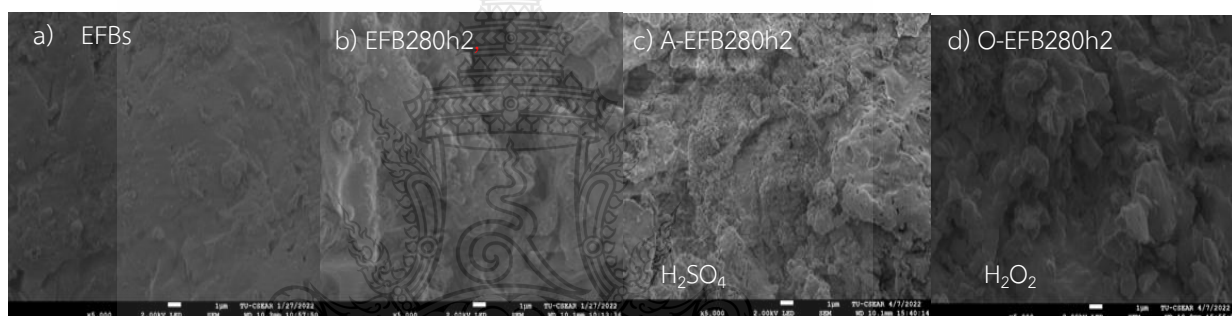


รูปที่ 4. 10 การศึกษาโครงสร้างพื้นฐานวิยาบนพื้นผิวของผลการวิเคราะห์ของทะเลาปาล์มเปล่าและผลิตภัณฑ์ไฮโดรซาร์ที่ผลิตได้จากสภาวะ 160, 200, 240 และ 280 °C เวลาทำปฏิกิริยา 2 ชั่วโมง ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope)

ผลการศึกษาโครงสร้างพื้นฐานวิยาของทะเลาปาล์มเปล่าและผลิตภัณฑ์ไฮโดรซาร์ที่เติม H_2SO_4 และ H_2O_2 ที่สภาวะอุณหภูมิ 280 °C เวลา 2 ชั่วโมง ด้วย SEM ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า (EFB, EFB280h2, A-EFB280h2 และ O-EFB280h2) ดังรูปที่ 4.11 แสดงให้เห็นลักษณะพื้นผิวของทะเลา

ปาล์มเปล่าและผลิตภัณฑ์ไฮโดรซาร์ จากสภาวะ 280 °C มีความน่าสนใจ เนื่องจากแสดงให้เห็นพื้นที่ผิวสูงสุด พื้นผิวของ EFBs (รูปที่ 4.11a) แสดงพื้นผิวเรียบซึ่งเป็นโครงสร้างทั่วไปของวัสดุธรรมชาติหรือวัสดุประเภทลิกโนเซลลูโลส รูปที่ 4.11b คือไฮโดรซาร์ทั่วไปที่ไม่ใช้สารกระตุ้น แสดงให้เห็นพื้นที่ผิวที่หยาบขึ้นเนื่องจากปฏิกิริยาไฮโดรเทอร์มอล

A-EFB280h2 และ O-EFB280h2 (รูปที่ 4.11c และ d) แสดงพื้นผิวของไฮโดรซาร์ที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 280 °C การเติมตัวกระตุ้นกรด H_2SO_4 และ H_2O_2 ส่งผลให้พื้นผิวของไฮโดรซาร์มีความขรุขระมากกว่าการที่ไม่ได้เติมตัวกระตุ้นในกระบวนการ HTC และการเติม H_2SO_4 ส่งผลให้พื้นผิวถูกกัดกร่อนมีความขรุขระมากกว่าการเติม H_2O_2 แต่อย่างไรก็ตาม ผลวิเคราะห์ด้วย SEM ไม่สามารถอธิบายถึงรูพรุนและปริมาตรรูพรุนที่กลืนเข้าไปในโครงสร้างได้ เป็นเพียงการศึกษาโครงสร้างสัณฐานบนพื้นผิวของไฮโดรซาร์เท่านั้น



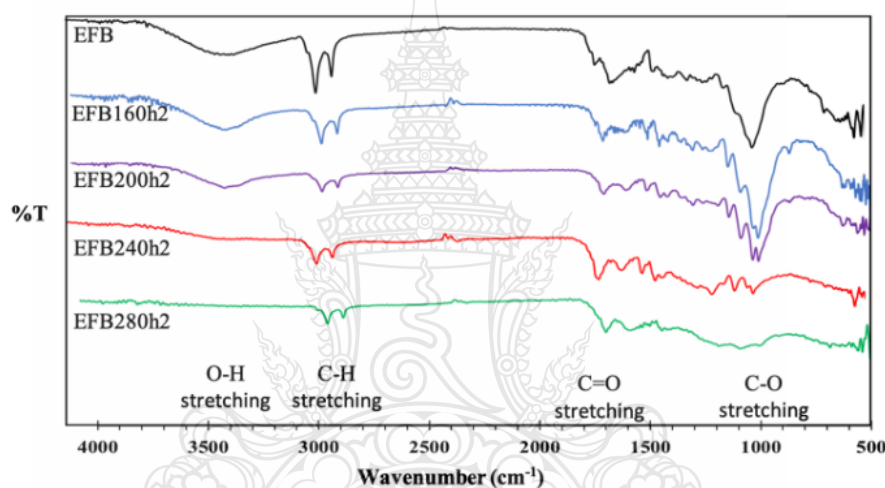
รูปที่ 4.11 การศึกษาโครงสร้างสัณฐานวิทยาบนพื้นผิวของทะลายปาล์มเปล่า (a) ไฮโดรซาร์ (b) และผลิตภัณฑ์ไฮโดรซาร์ที่เติมกรดซัลฟิวริก (c) และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (d) ที่อุณหภูมิ 280 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมงด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope)

4.2.5 ผลการศึกษาหมู่ฟังก์ชันก่ของผลิตภัณฑ์ไฮโดรซาร์ด้วย Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR)

ผลของอุณหภูมิในกระบวนการ HTC ส่งผลต่อหมู่ฟังก์ชันทางเคมีของผลิตภัณฑ์ไฮโดรซาร์ รูปที่ 4.12 แสดงผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันทางเคมีด้วย Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR) ของทะลายปาล์มเปล่า (EFBs) ก่อนผ่านกระบวนการ HTC แสดงสเปกตรัมของลิกโนเซลลูโลสให้เห็นหมู่ฟังก์ชันทางเคมีของ หมู่ (O-H stretching $3,200-3,500\text{ cm}^{-1}$) , หมู่คาร์บอนิล ($C=O$)

stretching $1,705-1,725\text{ cm}^{-1}$), หมู่อีเทอร์,เอสเทอร์ (C-O stretching $1000-1100\text{ cm}^{-1}$) และอัลเคน,อะลิฟาติก ($\text{sp}^3\text{ C-H}$ stretching $2840-3000\text{ cm}^{-1}$)

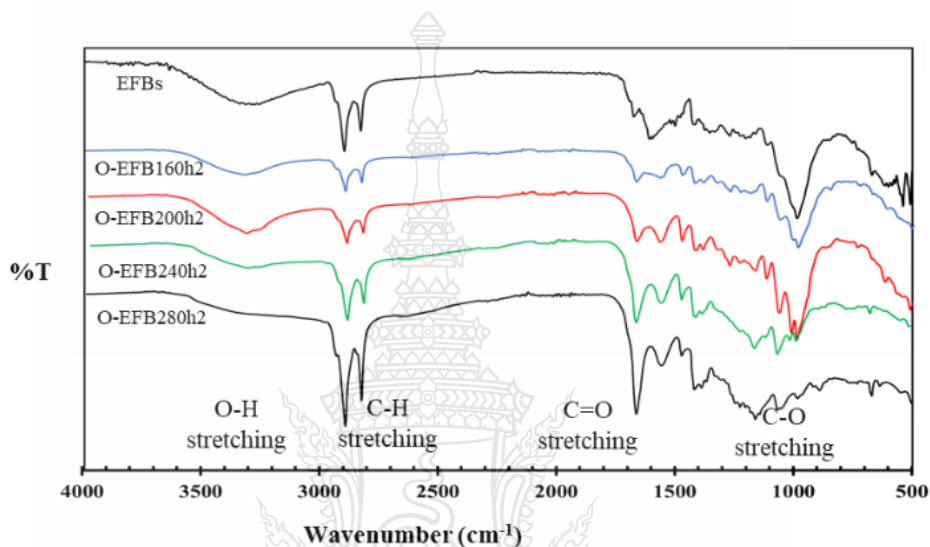
หลังจากผ่านกระบวนการ HTC เมื่อเพิ่มอุณหภูมิขึ้นจาก 160 เป็น $280\text{ }^{\circ}\text{C}$ แถบที่เกิดจากการยืดออกของหมู่ไฮดรอกซิล O-H ($3,200-3,500\text{ cm}^{-1}$) การยืดตัวของหมู่อีเทอร์, เอสเทอร์ C-O ($1000-1100\text{ cm}^{-1}$) จะลดลงจนไม่ปรากฏสเปกตรัมในตัวอย่างไฮโดรซาร์ ดังรูปที่ 4.12 ในขณะเดียวกัน หมู่คาร์บอนิล (C=O stretching $1,705-1,725\text{ cm}^{-1}$) และอัลเคน,อะลิฟาติก ($\text{sp}^3\text{ C-H}$ stretching $2840-3000\text{ cm}^{-1}$) จะลดลงเมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิที่ แต่ยังคงปรากฏสเปกตรัมให้เห็นเนื่องจากเกิดปฏิกิริยา Dehydration และ Decarboxylation



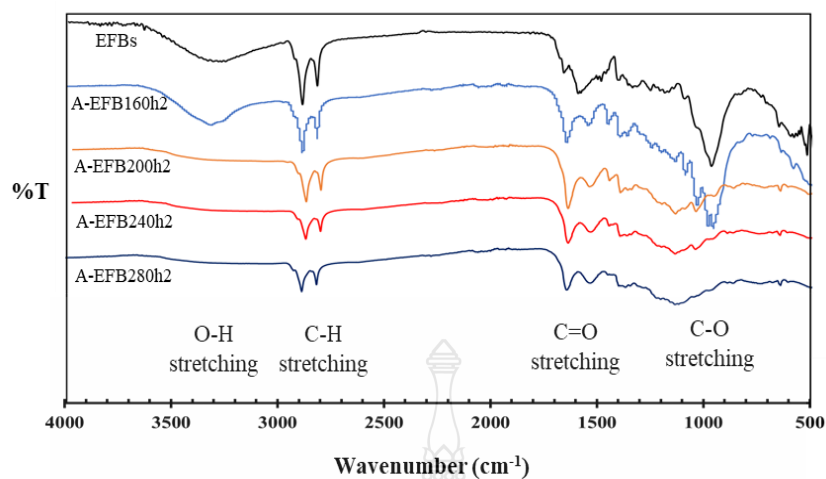
รูปที่ 4. 12 ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันทางเคมีด้วย Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR) ของทะลายปาล์มเปล่าและไฮโดรซาร์ที่ผลิตได้จากสภาวะ 160 , 200 , 240 และ $280\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

ผลการเติมตัวกระตุ้น H_2SO_4 และ H_2O_2 ในกระบวนการ HTC ส่งผลต่อหมู่ฟังก์ชันทางเคมีของผลิตภัณฑ์ไฮโดรซาร์ ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันทางเคมีด้วย Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR) หลังเติม H_2SO_4 และ H_2O_2 ในกระบวนการ HTC เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 160 เป็น $280\text{ }^{\circ}\text{C}$ แถบที่เกิดจากการยืดออกของหมู่ O-H ($3,200-3,500\text{ cm}^{-1}$) และการยืดตัวของหมู่อีเทอร์,เอสเทอร์ C-O ($1000-1100\text{ cm}^{-1}$) จะลดลงจนไม่ปรากฏสเปกตรัมในตัวอย่างไฮโดรซาร์ ดังรูปที่ 4.13 และรูปที่ 4.14 ในทางกลับกันการเติม H_2O_2 ส่งผลให้ หมู่คาร์บอนิล (C=O stretching $1,705-1,725\text{ cm}^{-1}$) และอัลเคน,อะลิฟาติก ($\text{sp}^3\text{ C-H}$ stretching $2840-3000\text{ cm}^{-1}$) เพิ่มขึ้นตามการ

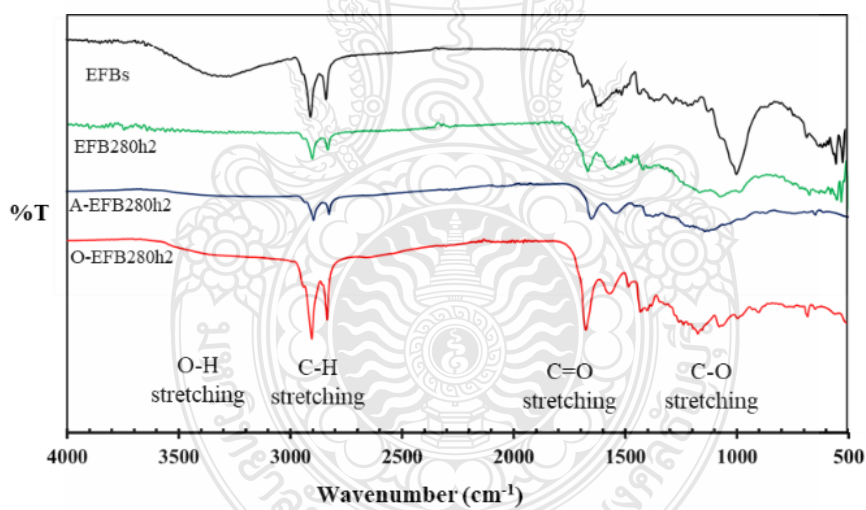
เพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ ในขณะเดียวกัน การเติมกรดซัลฟิวริก ส่งผลให้ หมู่คาร์บอนิล ($\text{C}=\text{O}$ stretching $1,705\text{--}1,725\text{ cm}^{-1}$) และอัลเคน, อะลิฟาติก ($\text{sp}^3\text{ C-H}$ stretching $2840\text{--}3000\text{ cm}^{-1}$) ลดลงเล็กน้อย เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น หมู่ฟังก์ชันทางเคมีของไฮโดรซาร์ที่เติมกรดซัลฟิวริกไม่มีความแตกต่างจากไฮโดรซาร์ที่ไม่ได้เติมตัวกระตุ้น ในขณะที่การเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็นการเพิ่มออกซิเจนฟังก์ชันให้กับไฮโดรซาร์ ดังรูป 4.15



รูปที่ 4. 13 ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันทางเคมีด้วย Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR) ของทะเลาะปาล์มเปล่าและไฮโดรซาร์ที่ผลิตได้จากสภาวะ 160, 200, 240 และ 280 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง



รูปที่ 4. 14 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันทางเคมีด้วย Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR) ของทะลายปาล์มเปล่าและไฮโดรซาร์ที่ผลิตได้จากสภาวะ 160, 200, 240 และ 280 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง



รูปที่ 4. 15 การศึกษาหมู่ฟังก์ชันทางเคมีด้วย Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR) ของทะลายปาล์มเปล่าและไฮโดรซาร์ที่ผลิตได้จากสภาวะ 160, 200, 240 และ 280 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

4.2.6 ผลการศึกษาผลิตภัณฑ์ของเหลวจากกระบวนการ HTC

สำหรับของเหลวจากกระบวนการ HTC ได้ถูกนำมาศึกษาองค์ประกอบและปริมาณคาร์บอนในของเหลวด้วย ลิควิดโครมาโทกราฟี (HPLC) และ ปริมาณสารคาร์บอนอินทรีย์ (TOC) ซึ่งได้ผลการวิเคราะห์แสดงในตารางที่ 4.9 และ 4.10

ตารางที่ 4. 10 ผลการศึกษาองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ของเหลวที่เกิดขึ้นในกระบวนการ HTC ด้วยเครื่อง High Performance Liquid Chromatography (HPLC)

ชื่อการทดลอง	ร้อยละโดยน้ำหนัก					
	Formic acid	Acetic acid	Glycolic acid	Levulinic acid	Dextrose	HMF
EFB160h2	0.005	0.146	0.029	-	-	-
EFB160h4	0.008	0.227	0.021	-	-	-
EFB160h6	0.014	0.244	0.027	-	0.008	-
EFB160h8	0.019	0.253	0.034	-	0.008	-
EFB200h2	0.029	0.322	0.074	0.005	0.012	0.01
EFB200h4	0.022	0.326	0.075	0.005	0.02	0.013
EFB200h6	0.019	0.316	0.074	0.005	0.017	0.011
EFB200h8	0.016	0.311	0.069	0.005	0.017	0.01
EFB240h2	0.005	0.420	0.108	0.018	0.022	-
EFB240h4	-	0.440	0.107	0.016	0.027	-
EFB240h6	-	0.456	0.114	0.014	0.032	-
EFB240h8	-	0.440	0.113	0.012	0.033	-
EFB280h2	-	0.439	0.151	0.019	0.031	-
EFB280h4	-	0.456	0.153	0.023	0.02	-
EFB280h6	-	0.444	0.16	0.02	0.021	-
EFB280h8	-	0.449	0.16	0.022	0.019	-

ตารางที่ 4. 11 ผลการวิเคราะห์ปริมาณคาร์บอนในผลิตภัณฑ์ของเหลวที่เกิดขึ้นในกระบวนการ HTC ด้วยเครื่องวิเคราะห์ปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ (TOC Analyzer)

ชื่อการทดลอง	Total Carbon (TC) (g/L)	Organic Carbon (TOC) (g/L)	Inorganic Carbon (IC) (g/L)
EFB160h2	9.537	9.533	0.004
EFB160h4	11.21	11.205	0.005
EFB160h6	11.006	10.998	0.008
EFB160h8	11.015	11.008	0.007
EFB200h2	10.016	10.012	0.004
EFB200h4	9.644	9.64	0.004
EFB200h6	9.397	9.388	0.009
EFB200h8	8.622	8.616	0.006
EFB240h2	12.05	12.043	0.007
EFB240h4	11.93	11.924	0.006
EFB240h6	11.732	11.726	0.006
EFB240h8	11.36	11.352	0.008
EFB280h2	11.228	11.222	0.006
EFB280h4	11.478	11.466	0.012
EFB280h6	10.944	10.986	0.008
EFB280h8	11.018	11.009	0.009

4.3 ผลการศึกษาการผลิตถ่านกัมมันต์ด้วยกระบวนการกระตุ้นทางเคมี

ผลการศึกษาการผลิตถ่านกัมมันต์ด้วยกระบวนการกระตุ้นทางเคมีของถ่านชีวภาพหรือไฮโดรชาร์ที่ได้จาก กระบวนการ HTC โดยนำไฮโดรชาร์ที่สภาวะการใช้อุณหภูมิ 200, 240 และ 280 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และ ไฮโดรชาร์ที่ผ่านการเติมตัวกระตุ้น H_2SO_4 และ H_2O_2 ที่สภาวะอุณหภูมิ 240 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง มาผ่านกระบวนการกระตุ้น โดยใช้สารกระตุ้น 2 ชนิด คือ และ ZnCl_2 ภายใต้บรรยากาศ N_2 อัตราการไหล เท่ากับ 100 mL/min อุณหภูมิ 800 °C ระยะเวลา 1 ชั่วโมง และ อัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างถ่านชีวภาพต่อสารกระตุ้น เท่ากับ 1:1 มีผลการศึกษา ดังนี้

4.3.1 สารเคมีที่ใช้กระตุ้นส่งผลต่อ พื้นที่ผิวจำเพาะ ขนาดรูพรุน และปริมาตรรูพรุน ของผลิตภัณฑ์

งานวิจัยนี้ศึกษาการผลิตถ่านกัมมันต์โดยการกระตุ้นไฮโดรชาร์ด้วย KOH และ ZnCl_2 พบว่า ผลิตภัณฑ์เกิดขึ้นจากการนำไฮโดรชาร์มาผ่านการกระตุ้นด้วย KOH พื้นที่ผิวจำเพาะเพิ่มขึ้น ตามสภาวะของอุณหภูมิการผลิตไฮโดรชาร์ที่อุณหภูมิ 200 เป็น 280 °C อยู่ในช่วง 631-1,170 m^2/g ปริมาตรรูพรุน 0.133-0.466 cm^3/g และขนาดรูพรุน 2.2-2.6 nm แต่ในทางกลับกัน ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากการกระตุ้นด้วย ZnCl_2 มีพื้นที่ผิวจำเพาะลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 951 เป็น 114 m^2/g ปริมาตรรูพรุนอยู่ในช่วง 0.031-0.204 cm^3/g และขนาดรูพรุน 1.8-2.4 nm

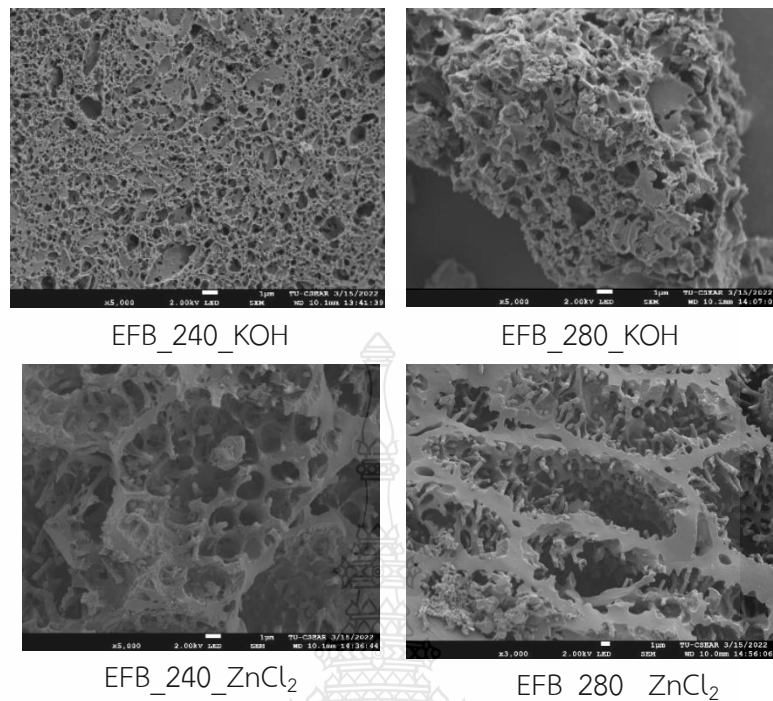
ในขณะเดียวกัน ถ่านกัมมันต์เกิดขึ้นจากการนำไฮโดรชาร์ผ่านการปรับปรุงคุณสมบัติด้วยกรดซัลฟิวริก และใช้สารกระตุ้น เป็น KOH มีพื้นที่ผิวจำเพาะ เท่ากับ 1,348 m^2/g ปริมาตรรูพรุน 0.83 cm^3/g และ ขนาดรูพรุน 2.4 nm และผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากการปรับปรุงคุณสมบัติของไฮโดรชาร์ด้วย H_2O_2 มีพื้นที่ผิวจำเพาะ เท่ากับ 681 m^2/g ปริมาตรรูพรุน 0.46 cm^3/g และ ขนาดรูพรุน 2.7 นาโนเมตร ดังตารางที่ 4.12

ตารางที่ 4.12 พื้นที่ผิวจำเพาะ ขนาดรูพรุน และปริมาตรรูพรุนของถ่านกัมมันต์เกิดขึ้นจากการที่ใช้ KOH และ ZnCl_2 เป็นสารกระตุ้น

ชื่อตัวอย่าง	สารกระตุ้น	พื้นที่ผิวจำเพาะ (m^2/g)	ขนาดรูพรุน (nm)	ปริมาตรรูพรุน (cm^3/g)
EFB200 ZnCl_2	ZnCl_2	951	2.4	0.204
EFB240 ZnCl_2	ZnCl_2	865	2.4	0.109
EFB280 ZnCl_2	ZnCl_2	114	1.8	0.031
A-EFB240 ZnCl_2	ZnCl_2	346	1.95	0.16
O-EFB240 ZnCl_2	ZnCl_2	35	3.76	0.032
EFB200KOH	KOH	631	2.2	0.152
EFB240KOH	KOH	931	2.7	0.466
EFB280KOH	KOH	1,170	2.6	0.133
A-EFB240 KOH	KOH	1,348	2.4	0.830
O-EFB240KOH	KOH	681	2.7	0.460

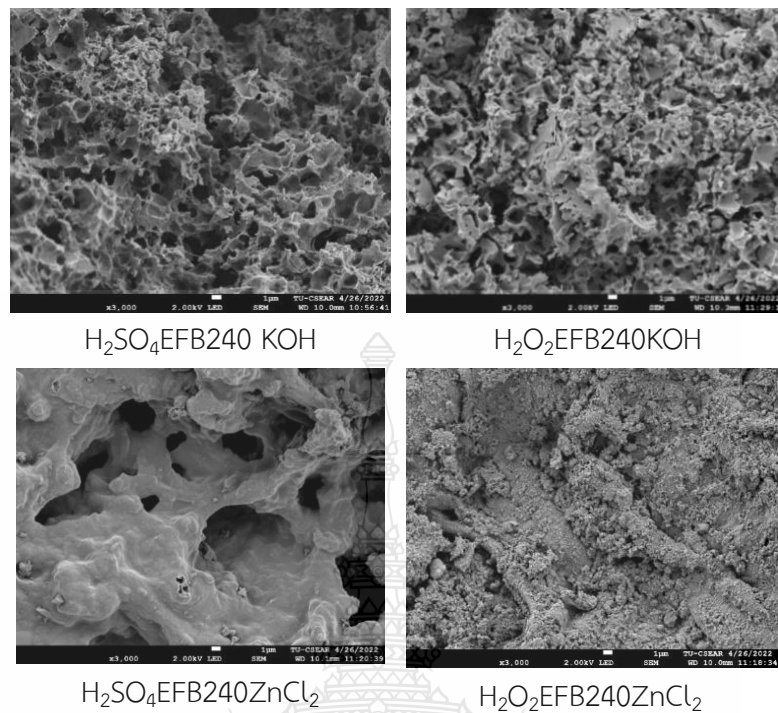
4.3.2 ผลวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาบนพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM)

ผลการวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างสัณฐานวิทยาบนพื้นผิวของผลิตภัณฑ์ถ่านกัมมันต์ที่ใช้ตัวกระตุ้นทางเคมีสองชนิด คือ KOH และ ZnCl_2 ที่กำลังขยาย 3,000 เท่า ดังรูปที่ 4.16 แสดงให้เห็นลักษณะพื้นผิวของผลิตภัณฑ์ถ่านกัมมันต์มีลักษณะขรุขระและพบรูพรุนเป็นจำนวนมาก นอกจากนี้ยังพบว่าถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการกระตุ้นโดยใช้ KOH ในการกระตุ้นจะแสดงลักษณะรูพรุนสม่ำเสมอว่าการใช้ ZnCl_2 แต่ในทางกลับกัน การใช้ ZnCl_2 ในการกระตุ้น เกิดรูพรุนขนาดเล็กจะแทรกด้านในโพรงขนาดใหญ่ จะเกิดโพรงหลายขนาดและรูปร่างที่ไม่สม่ำเสมอ



รูปที่ 4.16 ลักษณะทางจุลภาคของไฮโดรชาร์หลังการกระตุ้นด้วยสารกระตุ้นต่างๆ

เมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์ด้วย SEM พบว่าถ่านกัมมันต์ที่เป็นผลผลิตจากการนำไฮโดรชาร์มาผ่านกระบวนการปรับปรุงคุณสมบัติด้วยด้วยกรดซัลฟิวริกและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และผ่านกระบวนการกระตุ้นทางเคมีด้วย KOH พื้นผิวขรุขระเกิดรูพรุนเป็นจำนวนมากและขนาดของรูพรุนมีความสม่ำเสมอ ในขณะที่ ถ่านนำไฮโดรชาร์ที่ผ่านกระบวนการปรับปรุงคุณสมบัติด้วยด้วยกรดซัลฟิวริกและใช้ ZnCl_2 ในกระบวนการกระตุ้นทางเคมีจะเกิดโพรงหลายขนาดและไม่สม่ำเสมอ และ ถ่านนำไฮโดรชาร์ที่ผ่านกระบวนการปรับปรุงคุณสมบัติด้วยด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ผ่านกระบวนการกระตุ้นทางเคมีด้วย ZnCl_2 ผลลัพธ์ที่ได้ไม่เห็นรูพรุนหรือโพรงที่เกิดขึ้นอย่างชัดเจนลักษณะพื้นผิวขรุขระเล็กน้อย ดังรูป 4.18



รูปที่ 4. 17 ลักษณะทางจุลภาคของถ่านกัมมันต์ที่เกิดจากการใช้ไฮโดรซาร์ที่ผ่านกระบวนการปรับปรุงคุณสมบัติด้วยกรดซัลฟิวริกและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

ตารางที่ 4. 13 ผลการวิเคราะห์ร้อยละของธาตุด้วยเทคนิค SEM-EDS (Energy Dispersive Spectroscopy) ของถ่านกัมมันต์

ชื่อการทดลอง	% อะตอม					
	C	O	K	Zn	Cl	อื่นๆ
A-EFB240KOH	92.33	6.79	0.08	0.03	-	0.77
A-EFB240ZnCl ₂	95.77	2.57	0.45	-	0.67	0.54
O-EFB240KOH	82.41	10.75	0.96	-	0.21	5.53
O-EFB240ZnCl ₂	81.89	15.68	0.10			2.42

ตารางที่ 4. 14 ผลการวิเคราะห์ร้อยละโดยน้ำหนักของธาตุด้วยเทคนิค SEM-EDS (Energy Dispersive Spectroscopy) ของถ่านกัมมันต์

ชื่อการทดลอง	% โดยน้ำหนัก					
	C	O	K	Zn	Cl	อื่นๆ
A-EFB240KOH	89.06	8.73	0.25	0.15	-	1.81
A-EFB240ZnCl ₂	92.04	3.29	1.43	-	1.89	1.35
O-EFB240KOH	71.64	12.45	2.69	-	0.55	12.67
O-EFB240ZnCl ₂	72.01	18.37	0.29	-	-	9.33

4.3.5 ผลการศึกษาคุณสมบัติการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของถ่านกัมมันต์ผ่านการจำลองสถานะการดูดซับด้วยเครื่อง Thermogravimetric Analysis (TGA) เป็นระบบการทดสอบ

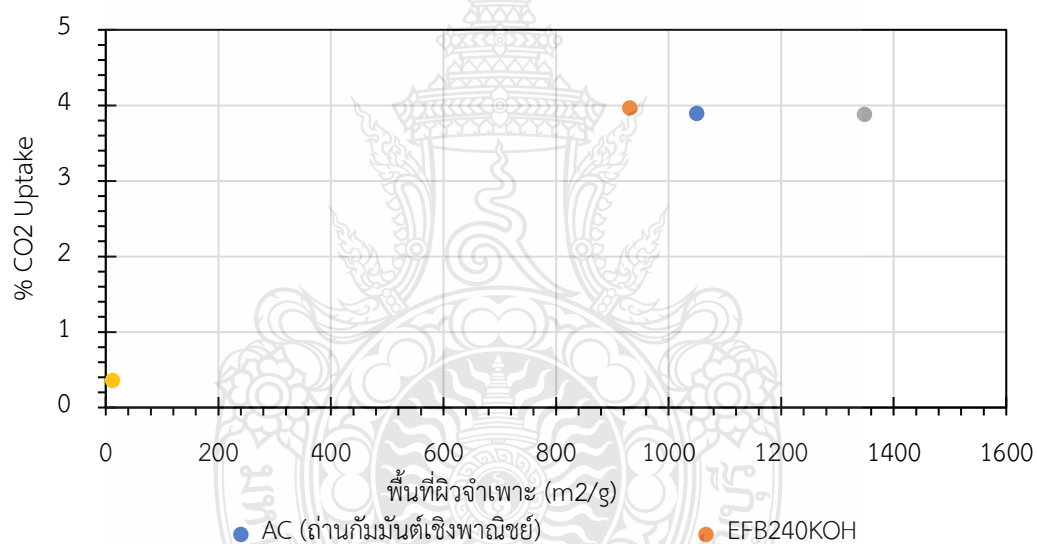
รูปที่ 4.20-4.22 แสดงการทดสอบคุณสมบัติการดูดซับ CO_2 ของไฮโดรซาร์และถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้เทียบกับถ่านกัมมันต์เชิงพาณิชย์ พบว่า ไฮโดรซาร์ที่ไม่ผ่านกระบวนการกระตุ้นทางเคมี (EFB240) ต่ำสุดคือ 0.3589 % ในขณะที่ถ่านกัมมันต์ที่ได้จากกระบวนการ HTC โดยมี KOH เป็นตัวกระตุ้น (EFB240KOH) มีค่าการดูดซับ CO_2 เท่ากับ 3.9652 % และถ่านกัมมันต์ที่ได้จากกระบวนการ HTC โดยมี H_2SO_4 เป็นตัวกระตุ้น (AEFB240KOH) และผ่านกระบวนการกระตุ้นทางเคมีด้วย KOH มาทดสอบการดูดซับ CO_2 มีค่าเท่ากับ 3.8794 % จะพบว่า ผลการการดูดซับ CO_2 แตกต่างจากไฮโดรซาร์อย่างชัดเจน แต่ในทางกลับกัน ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้มีประสิทธิภาพในการดูดซับ CO_2 ได้เทียบเท่าถ่านกัมมันต์เชิงพาณิชย์ (พื้นที่ผิวจำเพาะ 1,050 ตารางเมตรต่อกรัม) ดังตารางที่ 4.11 และรูปที่ 4.20

ตารางที่ 4.15 Uptakes (%) การทดสอบการดูดซับ CO_2 ที่อุณหภูมิ 50 °C

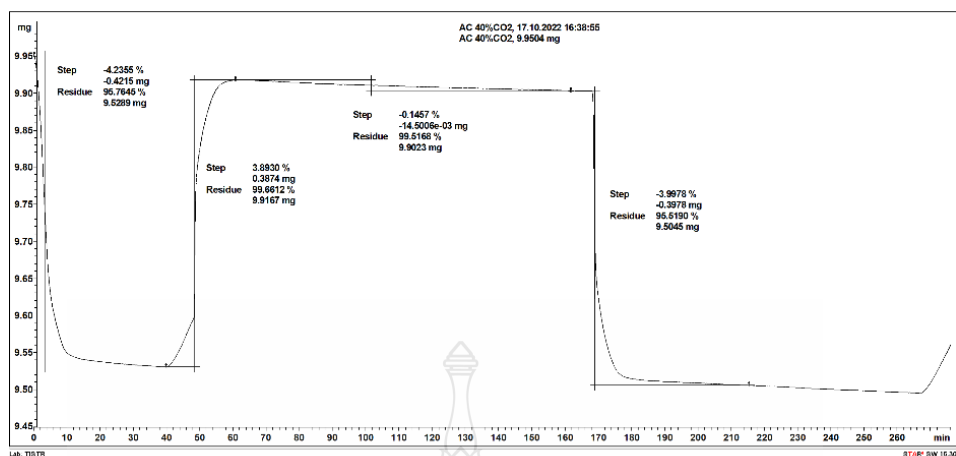
ชื่อตัวอย่าง	น้ำหนักเริ่มต้น (มิลลิกรัม)	น้ำหนักแห้ง (มิลลิกรัม)	น้ำหนักหลังดูดซับ CO_2 (มิลลิกรัม)	% Uptake
AC (ถ่านกัมมันต์เชิงพาณิชย์)	9.9504	9.5289	9.9167	3.8930
EFB240KOH	10.2264	9.8326	10.2378	3.9652
A-EFB240KOH	9.8579	8.6729	9.0553	3.8794
EFB240 (ไฮโดรซาร์)	10.8089	10.5842	10.6233	0.3589

ตารางที่ 4. 16 พื้นที่ผิวจำเพาะ และ % uptake

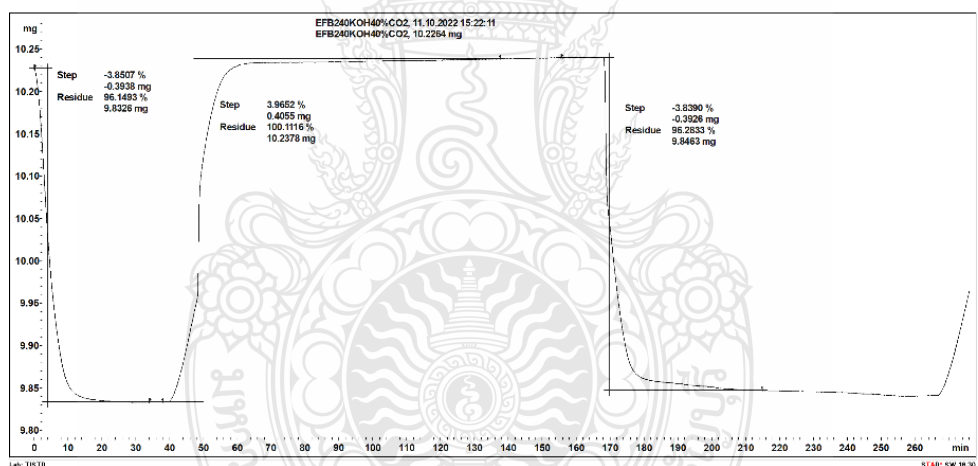
ชื่อตัวอย่าง	พื้นที่ผิวจำเพาะ (ตารางเมตรต่อกรัม)	% Uptake
A-EFB240KOH	1,348	3.8794
EFB240KOH	931	3.9652
AC (ถ่านกัมมันต์เชิงพาณิชย์)	1,050	3.8930
EFB240 (ไฮโดรชาร์)	11.91	0.3589



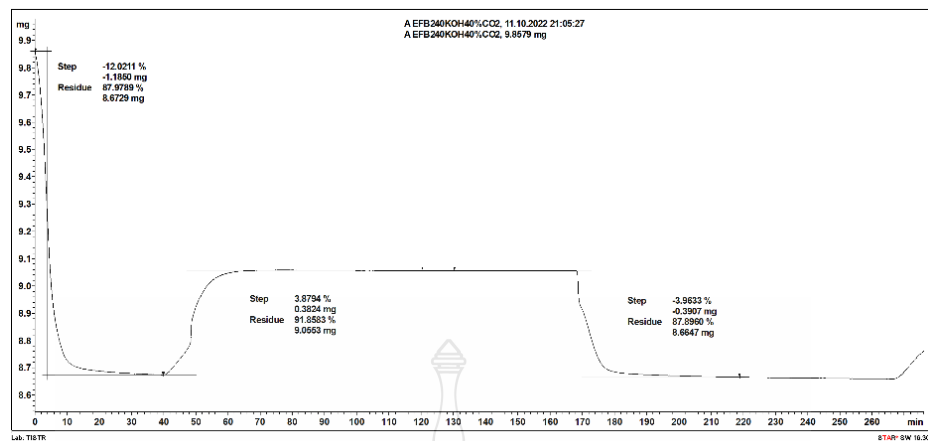
รูปที่ 4. 18 กราฟแสดง % Uptake ที่สัมพันธ์กับพื้นที่ผิวจำเพาะของถ่านกัมมันต์



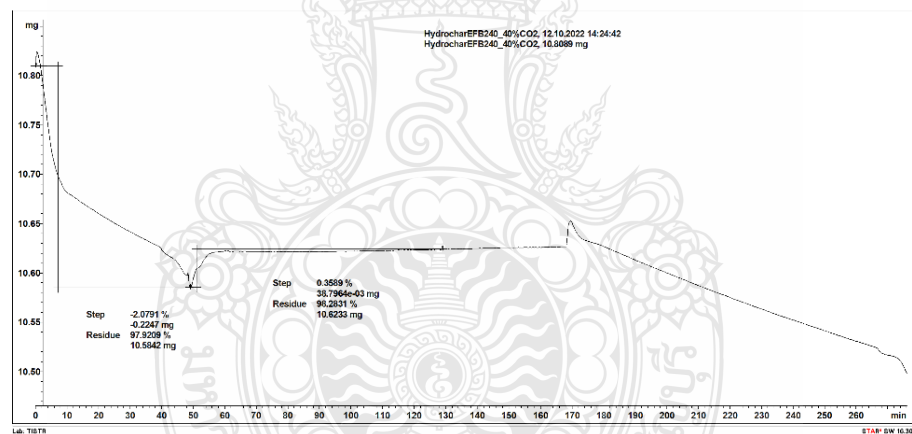
รูปที่ 4.19 กราฟการศึกษาทดสอบการดูดซับและการคายซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ของถ่านกัมมันต์เชิงพาณิชย์ด้วย Thermogravimetric Analysis (TGA)



รูปที่ 4.20 กราฟการศึกษาทดสอบการดูดซับและการคายซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากไฮโดรชาร์และผ่านการกระตุ้นทางเคมีด้วย KOH



รูปที่ 4.21 กราฟการศึกษาทดสอบการดูดซับและการคายซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ของถ่านกัมมันต์ ที่ผลิตจากไฮโดรชาร์ที่ผ่านการปรับปรุงด้วยกรดซัลฟิวริกและผ่านการกระตุ้นทางเคมีด้วย KOH



รูปที่ 4.22 กราฟการศึกษาทดสอบการดูดซับและการคายซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของไฮโดรชาร์

4.3.6 ผลของร้อยละของผลิตภัณฑ์ของถ่านกัมมันต์จากการใช้สารกระตุ้นที่แตกต่างกันสองชนิด KOH และ $ZnCl_2$ ด้วยกระบวนการกระตุ้นทางเคมี

ผลการประเมินร้อยละของผลิตภัณฑ์ของผลิตภัณฑ์ถ่านกัมมันต์พบว่าถ่านกัมมันต์ที่ใช้ KOH เป็นสารกระตุ้นในกระบวนการกระตุ้นทางเคมีให้ร้อยละของผลิตภัณฑ์ของถ่านกัมมันต์น้อยกว่าถ่านกัมมันต์ที่ใช้ $ZnCl_2$ การใช้ KOH ทำให้ร้อยละของผลิตภัณฑ์ของถ่านกัมมันต์อยู่ในช่วง ร้อยละ 1.26-7.32 และ การใช้ $ZnCl_2$ ทำให้ร้อยละของผลิตภัณฑ์ของถ่านกัมมันต์อยู่ในช่วง ร้อยละ 24.97-45.17 ดังตารางที่ 4.17 เนื่องจากปฏิกิริยาเคมีที่แตกต่างกันของการสร้างรูพรุน โดยถ่านกัมมันต์ที่ใช้ KOH จะทำปฏิกิริยาเคมีกับคาร์บอนโดยตรงสลายตัวเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จึงเกิดรูพรุนขึ้นตามสมการข้างต้น ส่วน $ZnCl_2$ จะไม่เกิดปฏิกิริยาเคมีกับคาร์บอนโดยตรงแต่จะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนและไฮโดรเจนอะตอมในโมเลกุลของลิโนเซลลูโลสและระเหยไปเมื่ออุณหภูมิสูงกว่า $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ ซึ่งจะเห็นว่าถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากไฮโดรคาร์บอนมีปริมาณคาร์บอนคงตัวสูงจึงเกิด Interaction กับ KOH มากกว่า $ZnCl_2$ จึงทำให้ร้อยละของผลิตภัณฑ์ของผลิตภัณฑ์ต่ำกว่า

ตารางที่ 4. 17 ร้อยละของผลิตภัณฑ์ของผลิตภัณฑ์ถ่านกัมมันต์ในกระบวนการกระตุ้นทางเคมี

ชื่อการทดลอง	น้ำหนักก่อนกระตุ้น (กรัม)	น้ำหนักหลังกระตุ้น (กรัม)	ร้อยละผลิตภัณฑ์ถ่านกัม มันต์(%)
EFB200 $ZnCl_2$	7.0133	1.7513	24.97
EFB240 $ZnCl_2$	7.0371	2.6286	37.35
EFB280 $ZnCl_2$	7.0006	3.1625	45.17
EFB200KOH	21.111	0.2676	1.26
EFB240KOH	7.0501	0.5162	7.32
EFB280KOH	7.0240	0.4659	6.63

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

การศึกษากการแปรรูปทะลายปาล์มเปล่าด้วยกระบวนการ HTC และกระบวนการกระตุ้นทางเคมี เพื่อผลิตเป็นไฮโดรชาร์และถ่านกัมมันต์ที่มีคุณภาพสูง รวมทั้งทดสอบการดูดซับก๊าซ CO_2 โดยศึกษาตัวแปรในกระบวนการ HTC ได้แก่ อุณหภูมิ ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา และสารกระตุ้น 2 ชนิด ได้แก่ H_2SO_4 และ H_2O_2 หลังจากนั้นไฮโดรชาร์ได้ถูกนำไปผ่านกระบวนการกระตุ้นทางเคมีโดยใช้สารกระตุ้น KOH และ ZnCl_2 สรุปผลได้ ดังนี้

5.1 การผลิตไฮโดรชาร์ด้วยกระบวนการ HTC

ในการผลิตไฮโดรชาร์ในกระบวนการ HTC การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิและระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาส่งผลให้มีอัตราการลดลงของปริมาณร้อยละของผลิตภัณฑ์ไฮโดรชาร์ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิจะส่งผลต่อการลดลงของร้อยละผลิตภัณฑ์ไฮโดรชาร์ มากกว่าการเพิ่มเวลาในการทำปฏิกิริยา โดยผลิตภัณฑ์ไฮโดรชาร์ลดลงจากร้อยละ 73.86 เป็นร้อยละ 34.96 ในขณะเดียวกันปริมาณร้อยละคาร์บอนและคาร์บอนคงตัวเพิ่มขึ้น โดยคาร์บอนคงตัวเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 12.93 เป็นร้อยละ 38.30 ตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิและระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา สำหรับพื้นที่ผิวจำเพาะของผลิตภัณฑ์ไฮโดรชาร์ที่เกิดขึ้นมีแนวโน้มไม่สัมพันธ์กับการเพิ่มอุณหภูมิและระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา แต่อย่างไรก็ตาม รูปพรุนของไฮโดรชาร์มีขนาดเล็กลงอยู่ในช่วง 3.13-5.37 นาโนเมตร เมื่ออุณหภูมิมากกว่า 200 °C

การใช้ตัวกระตุ้นในกระบวนการ HTC นำไปสู่การเพิ่มขึ้นของพื้นที่ผิวจำเพาะของไฮโดรชาร์ อย่างมีนัยสำคัญ การใช้ตัวกระตุ้น H_2SO_4 จะทำให้ไฮโดรชาร์มีปริมาณคาร์บอนและคาร์บอนคงตัวสูงกว่าการใช้ตัวกระตุ้น H_2O_2 เนื่องจาก H_2SO_4 มีคุณสมบัติเป็นสารไฮโดรไลติกที่ดีกว่า H_2O_2 สามารถเร่งการสลายตัวทางเคมีความร้อนได้ดี แต่ในทางกลับกันการใช้ตัวกระตุ้น H_2O_2 ทำให้ได้พื้นที่ผิวจำเพาะของไฮโดรชาร์มากกว่าการใช้ตัวกระตุ้น H_2SO_4 และมีหมู่ออกซิเจนตึงที่มากขึ้นมากกว่าการใช้ตัวกระตุ้น H_2SO_4 เนื่องจาก H_2O_2 มีคุณสมบัติเป็นสารออกซิไดซ์มากกว่า H_2SO_4

5.2 การผลิตถ่านกัมมันต์ด้วยกระบวนการกระตุ้นทางเคมี

เมื่อนำไฮโดรคาร์บอนจากกระบวนการ HTC มากระตุ้นทางเคมีเพื่อผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ การใช้ KOH เหมาะสมมากกว่าการใช้ ZnCl_2 ในการผลิตถ่านกัมมันต์ การใช้ KOH นำไปสู่การเพิ่มพื้นที่ผิวจำเพาะของถ่านกัมมันต์มากกว่า โดยมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงสุดเท่ากับ $1,348 \text{ cm}^2/\text{g}$ มีขนาดของรูพรุน 2.4 nm มากกว่าการใช้ ZnCl_2 ซึ่งมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงสุดเท่ากับ $951 \text{ cm}^2/\text{g}$ มีขนาดรูพรุน 2.4 nm และลักษณะทางจุลภาคที่พื้นผิวของถ่านกัมมันต์มีความขรุขระและพบโพรงรูพรุนจำนวนมากและเมื่อทดสอบการดูดซับก๊าซ CO_2 ของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้ ถูกลำมาเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์เชิงพาณิชย์ ด้วยระบบจำลองการดูดซับด้วย TGA พบว่าความสามารถในการดูดซับ (% uptake) ของถ่านกัมมันต์เชิงพาณิชย์ เท่ากับร้อยละ 3.893 ในขณะที่ถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยกรดซัลฟิวริกในกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลและกระตุ้นทางเคมีด้วย KOH มีความสามารถดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เท่ากับร้อยละ 3.879 จะเห็นว่ามีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับถ่านกัมมันต์เชิงพาณิชย์ อย่างไรก็ตามในการผลิตถ่านกัมมันต์เพื่อดูดซับก๊าซ CO_2 จำเป็นต้องศึกษาเพิ่มเติมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพทั้งทางกายภาพและทางเคมีของการดูดซับต่อไป

5.3 ข้อเสนอแนะ

ในงานวิจัยนี้ศึกษาการแปรรูปทะลายปาล์มเปล่าให้เป็นถ่านกัมมันต์คุณภาพสูงโดยผ่านกระบวนการ HTC ซึ่งผลิตภัณฑ์หลักเป็นของแข็ง และได้ผลิตผลพลอยได้เป็นของเหลวและก๊าซ ซึ่งสามารถนำไปทำประโยชน์ต่อไป ดังนี้

1. จากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเหลวแสดงให้เห็นว่าผลิตภัณฑ์ของเหลวมีความเป็นไปได้ที่จะสามารถนำกลับมาใช้ซ้ำในกระบวนการ HTC เนื่องจากมีองค์ประกอบของอะซิติก แอซิด (acetic acid) ทำให้ของเหลวมีสภาวะเป็นกรด สามารถเร่งกระบวนการคาร์บอไนเซชันในรอบถัดไป
2. ของเหลวเหลือทิ้งจากกระบวนการ HTC สามารถนำไปทำเป็นปุ๋ยน้ำในกิจกรรมทางการเกษตรได้ เนื่องจากกระบวนการ HTC จะดึงเอาแร่ธาตุที่จำเป็นต่อพืช เช่น โพแทสเซียม ฟอสฟอรัส และไนโตรเจน จากทะลายปาล์มเปล่ามาสู่ชั้นน้ำ ดังนั้น น้ำเสียจากกระบวนการจึงมีแร่ธาตุที่มีความสำคัญต่อพืช
3. ผลผลิตพลอยได้ประเภทก๊าซ มีองค์ประกอบหลักเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นก๊าซร้อนในกระบวนการอบแห้งได้

บรรณานุกรม

- [1] C. Wang, X. Zhang, Q. Liu, Q. Zhang, L. Chen, and L. Ma, “A review of conversion of lignocellulose biomass to liquid transport fuels by integrated refining strategies,” *Fuel Processing Technology*, vol. 208, no. January, 2020.
- [2] D. C. Li and H. Jiang, “The thermochemical conversion of non-lignocellulosic biomass to form biochar: A review on characterizations and mechanism elucidation,” *Bioresour Technol*, vol. 246, pp. 57–68, 2017.
- [3] สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร and O. of A. Economics, “ข้อมูลเศรษฐกิจการเกษตรข้อมูลการผลิตสินค้าเกษตรตารางแสดงรายละเอียดปาล์มน้ำมัน.” [Online]. Available: <https://www.oae.go.th/view/1/ตารางแสดงรายละเอียดปาล์มน้ำมัน/TH-TH>
- [4] G. Duman, A. T. Tag, S. Ucar, and J. Yanik, “Comparative evaluation of dry and wet carbonization of agro industrial wastes for the production of soil improver,” *J Environ Chem Eng*, vol. 6, no. 2, pp. 3366–3375, 2018.
- [5] S. Theppitak, D. Hungwe, L. Ding, D. Xin, G. Yu, and K. Yoshikawa, “Comparison on solid biofuel production from wet and dry carbonization processes of food wastes,” *Appl Energy*, vol. 272, no. February, p. 115264, 2020.
- [6] K. MacDermid-Watts, R. Pradhan, and A. Dutta, “Catalytic Hydrothermal Carbonization Treatment of Biomass for Enhanced Activated Carbon: A Review,” *Waste Biomass Valorization*, no. 0123456789, 2020.
- [7] 2558. สำนักส่งเสริมการใช้ประโยชน์ สำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร (องค์การมหาชน), *กรอบแนวคิดเชิงนโยบายเพื่อนำไปสู่การจัดทำร่างพระราชบัญญัติปาล์มน้ำมันและน้ำมันปาล์ม/ สำนักส่งเสริมการใช้ประโยชน์ สำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร (องค์การมหาชน)*. กรุงเทพฯ, 2558.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [8] T. Jungniyom, “กระบวนการไร้ของเสียในอุตสาหกรรมการสกัดน้ำมันปาล์ม,” *วารสารหาดใหญ่วิชาการ*, vol. 6, no. 2, pp. 159–164, 2008.
- [9] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, “คู่มือการพัฒนาและการลงทุนผลิตพลังงานทดแทน,” p. 1, 2554, [Online]. Available:
http://webkc.dede.go.th/testmax/sites/default/files/พลังงาน_ชีวมวล.pdf
- [10] มูลนิธิพลังงานเพื่อสิ่งแวดล้อม, “ราคาชีวมวล.” [Online]. Available:
<http://www.effe.or.th/effe-book.php?task=25>
- [11] จ. คำแก้ว, ป. รุ่งเรือง, and น. ทองศรีนุ่น, “Preparation of Activated Carbon from Sago Log Waste as an Absorbent for the Removal of Lead (II) from Aqueous Solution.”
- [12] R. C. Dante, *Carbon materials*. Elsevier Ltd., 2016. doi: 10.1016/b978-0-08-100619-1.00007-9.
- [13] C. M. From, *Activated Carbon (Origins)*, no. 1997. 1992.
- [14] A. Jeder, “Carbon materials synthesis by Hydrothermal Carbonization of olive stones : Process and Product To cite this version : HAL Id : tel-01906214
soutenance et mis à disposition de l’ensemble de la Contact : ddoc-theses-
contact@univ-lorraine.fr,” 2018.
- [15] “chem-2-62-charcoal”.
- [16] F. Ronsse, R. W. Nachenius, and W. Prins, *Carbonization of Biomass*. Elsevier B.V., 2015. doi: 10.1016/B978-0-444-63289-0.00011-9.
- [17] A. Jain, R. Balasubramanian, and M. P. Srinivasan, “Hydrothermal conversion of biomass waste to activated carbon with high porosity: A review,” *Chemical Engineering Journal*, vol. 283, pp. 789–805, 2016, doi: 10.1016/j.cej.2015.08.014.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [18] R. Wang, Q. Jin, X. Ye, H. Lei, J. Jia, and Z. Zhao, "Effect of process wastewater recycling on the chemical evolution and formation mechanism of hydrochar from herbaceous biomass during hydrothermal carbonization," *J Clean Prod*, vol. 277, p. 123281, 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.123281.
- [19] H. J. Kim, C. Park, R. Nepal, and S. C. Oh, "Hydrothermal treatment of empty fruit bunches to enhance fuel characteristics," *Energies (Basel)*, vol. 14, no. 5, 2021, doi: 10.3390/en14051467.
- [20] R. Sarwono and H. H. Kurniawan, "The influenced of reaction time on the degradation of palm oil empty fruit bunch (EFB) in hydrothermal carbonization," in *AIP Conference Proceedings*, American Institute of Physics Inc., Nov. 2017. doi: 10.1063/1.5011897.
- [21] S. Nizamuddin *et al.*, "An overview of effect of process parameters on hydrothermal carbonization of biomass," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 73, no. December 2015, pp. 1289–1299, 2017, doi: 10.1016/j.rser.2016.12.122.
- [22] G. Huang, Y. Wang, T. Zhang, X. Wu, and J. Cai, "Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers High-performance hierarchical N-doped porous carbons from hydrothermally carbonized bamboo shoot shells for symmetric supercapacitors," *J Taiwan Inst Chem Eng*, vol. 96, pp. 672–680, 2019, doi: 10.1016/j.jtice.2018.12.024.
- [23] S. Y. Karagöz S, Bhaskar T, Muto A, "Catalytic hydrothermal treatment of pine wood biomass: effect of RbOH and CsOH on product distribution.," *J Chem Technol Biotechnol*, vol. 80, pp. 1097–102, 2005.
- [24] S. Zhang *et al.*, "Bamboo derived hydrochar microspheres fabricated by acid-assisted hydrothermal carbonization," *Chemosphere*, vol. 263, p. 128093, 2021, doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.128093.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [25] S. M. Jain A, Balasubramanian R, “Production of high surface area mesoporous activated carbons from waste biomass using hydrogen peroxide-mediated hydrothermal treatment for adsorption applications.,” *Chem Eng J*, vol. 273, pp. 622–629, 2015, doi: 10.1016/j.cej.2015.03.111 tle.
- [26] “การผลิตถ่านกัมมันต์จากถ่านไม้ยางพาราที่ได้จากโรงไฟฟ้าชีวมวลสำหรับงานเครื่องกรองน้ำ. Pdf.”
- [27] P. Kurzweil, *Electrochemical Double-layer Capacitors*. Elsevier B.V., 2015. doi: 10.1016/B978-0-444-62616-5.00019-X.
- [28] F. T. Ademiluyi and E. O. David-West, “Effect of Chemical Activation on the Adsorption of Heavy Metals Using Activated Carbons from Waste Materials,” *ISRN Chemical Engineering*, vol. 2012, pp. 1–5, 2012, doi: 10.5402/2012/674209.
- [29] M. A. Islam, M. J. Ahmed, W. A. Khanday, M. Asif, and B. H. Hameed, “Mesoporous activated coconut shell-derived hydrochar prepared via hydrothermal carbonization-NaOH activation for methylene blue adsorption,” *J Environ Manage*, vol. 203, pp. 237–244, 2017, doi: 10.1016/j.jenvman.2017.07.029.
- [30] R. F. Susanti, A. A. Arie, H. Kristianto, M. Erico, G. Kevin, and H. Devianto, “Activated carbon from citric acid catalyzed hydrothermal carbonization and chemical activation of salacca peel as potential electrode for lithium ion capacitor’s cathode,” *Ionics (Kiel)*, vol. 25, no. 8, pp. 3915–3925, 2019.
- [31] L. Ding *et al.*, “The production of hydrochar-based hierarchical porous carbons for use as electrochemical supercapacitor electrode materials,” *Colloids Surf A Physicochem Eng Asp*, vol. 423, pp. 104–111, 2013.
- [32] M. Sevilla, G. A. Ferrero, and A. B. Fuertes, “Beyond KOH activation for the synthesis of superactivated carbons from hydrochar,” *Carbon N Y*, vol. 114, pp. 50–58, 2017.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [33] F. Benstoem *et al.*, “Elimination of micropollutants by activated carbon produced from fibers taken from wastewater screenings using hydrothermal carbonization,” *J Environ Manage*, vol. 211, pp. 278–286, 2018.
- [34] M. Dhelipan, A. Arunchander, A. K. Sahu, and D. Kalpana, “Activated carbon from orange peels as supercapacitor electrode and catalyst support for oxygen reduction reaction in proton exchange membrane fuel cell,” *Journal of Saudi Chemical Society*, vol. 21, no. 4, pp. 487–494, 2017.
- [35] R. Keey, L. Min, Y. Chong, and O. Uyi, “Production of activated carbon as catalyst support by microwave pyrolysis of palm kernel shell : a comparative study of chemical versus physical activation,” *Research on Chemical Intermediates*, 2018.
- [36] Y. Shi, X. Zhang, and G. Liu, “Activated Carbons Derived from Hydrothermally Carbonized Sucrose: Remarkable Adsorbents for Adsorptive Desulfurization,” *ACS Sustain Chem Eng*, vol. 3, no. 9, pp. 2237–2246, 2015.
- [37] Y. Shen, S. Yu, S. Ge, X. Chen, X. Ge, and M. Chen, “Hydrothermal carbonization of medical wastes and lignocellulosic biomass for solid fuel production from lab-scale to pilot-scale,” *Energy*, vol. 118, pp. 312–323, 2017.
- [38] M. M. Titirici, R. J. White, C. Falco, and M. Sevilla, “Black perspectives for a green future: Hydrothermal carbons for environment protection and energy storage,” *Energy Environ Sci*, vol. 5, no. 5, pp. 6796–6822, 2012.
- [39] V. Benedetti, E. Cordioli, F. Patuzzi, and M. Baratieri, “CO₂ Adsorption study on pure and chemically activated chars derived from commercial biomass gasifiers,” *Journal of CO₂ Utilization*, vol. 33, pp. 46–54, Oct. 2019.
- [40] R. Li, L. Wang, and A. Shahbazi, “A Review of Hydrothermal Carbonization of Carbohydrates for Carbon Spheres Preparation,” *Trends in Renewable Energy*, vol. 1, no. 1, pp. 43–56, 2015.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [41] A. R. Hidayu and N. Muda, "Preparation and Characterization of Impregnated Activated Carbon from Palm Kernel Shell and Coconut Shell for CO₂ Capture," in *Procedia Engineering*, Elsevier Ltd, 2016, pp. 106–113.
- [42] W. Sisuthog, L. Attanatho, and C. Chaiya, "Conversion of empty fruit bunches (EFBs) by hydrothermal carbonization towards hydrochar production," *Energy Reports*, vol. 8, pp. 242–248, Dec. 2022.



ภาคผนวก



ภาคผนวก ก

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของผลิตภัณฑ์ก๊าซที่เกิดขึ้นในกระบวนการ

HTC



ตาราง ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของผลิตภัณฑ์ที่เป็นก๊าซจากกระบวนการ HTC ด้วยเครื่อง Gas Chromatography (GC-FID/TCD)

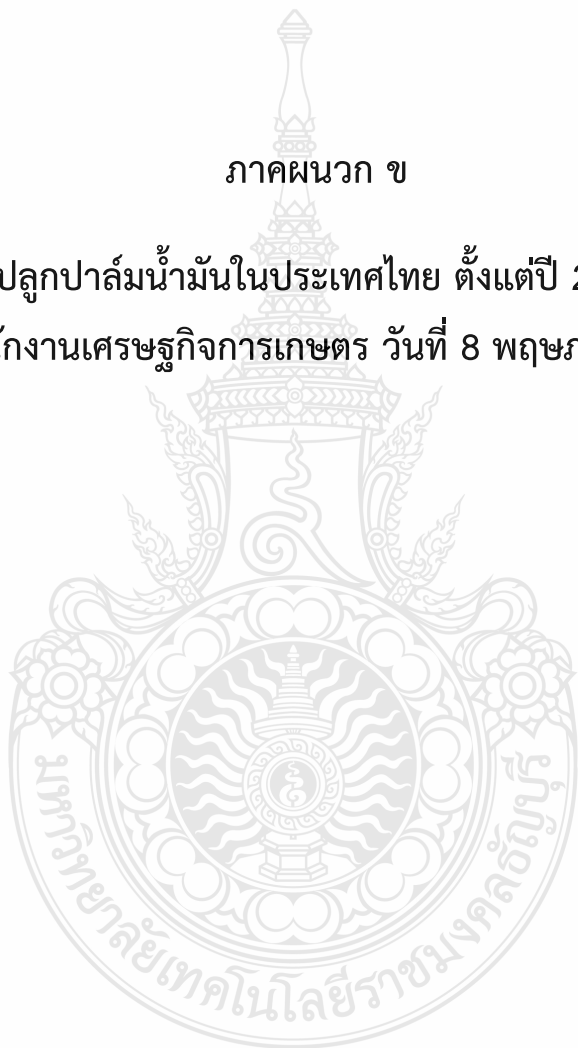
ชื่อการทดลอง	อุณหภูมิ (°C)	เวลา (ชั่วโมง)	องค์ประกอบทางเคมี (ร้อยละโดยโมล)			
			CO ₂	CO	H ₂	Hydrocarbon
EFB160h2	160	2	91.02	6.48	0.00	2.49
EFB160h4		4	95.37	3.85	0.00	0.78
EFB160h6		6	97.30	1.54	0.00	1.15
EFB160h8		8	96.28	1.41	0.00	2.31
EFB200h2	200	2	94.06	5.34	0.00	0.60
EFB200h4		4	95.12	4.73	0.00	0.15
EFB200h6		6	95.71	2.85	0.00	1.44
EFB200h8		8	96.85	2.04	0.00	1.11
EFB240h2	240	2	91.66	7.50	0.00	0.83
EFB240h4		4	91.77	7.49	0.00	0.74
EFB240h6		6	93.19	5.39	0.00	1.42
EFB240h8		8	91.90	5.99	0.00	2.12
EFB280h2	280	2	91.28	5.72	0.00	3.00
EFB280h4		4	91.58	5.39	0.00	3.04
EFB280h6		6	91.54	4.35	0.00	4.10
EFB280h8		8	93.18	3.99	0.00	2.82

ตาราง ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของผลิตภัณฑ์ที่เป็นก๊าซจากกระบวนการ HTC ที่เติม
ตัวกระตุ้นด้วยเครื่อง Gas Chromatography (GC-FID/TCD)

ชื่อการทดลอง	ตัวกระตุ้น	อุณหภูมิ (°C)	องค์ประกอบทางเคมี (ร้อยละโดยโมล)			
			CO ₂	CO	H ₂	Hydrocarbon
A-EFB160h2	H ₂ SO ₄	160	89.31	2.01	5.26	3.42
A-EFB200h2		200	89.13	5.31	2.07	3.49
A-EFB240h2		240	86.47	10.26	1.68	1.59
A-EFB280h2		280	83.30	12.30	3.09	1.32
O-EFB160h2	H ₂ O ₂	160	95.96	1.84	0.00	2.20
O-EFB200h2		200	96.64	1.55	0.00	1.81
O-EFB240h2		240	94.67	3.95	0.00	1.38
O-EFB280h2		280	91.09	6.83	0.00	2.08

ภาคผนวก ข

ข้อมูลการเพาะปลูกปาล์มน้ำมันในประเทศไทย ตั้งแต่ปี 2554-2562 (ข้อมูล
จากสำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร วันที่ 8 พฤษภาคม 2564)



ตาราง ข้อมูลการเพาะปลูกปาล์มน้ำมันในประเทศไทย ตั้งแต่ปี 2554-2562 (ข้อมูลจากสำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร วันที่ 8 พฤษภาคม 2564) [3]

ปี	พื้นที่เพาะปลูก (ไร่)	พื้นที่ให้ผลผลิต (ไร่)	จำนวน ผลผลิต	ผลผลิตต่อไร่ (กิโลกรัม)
ปี 2554				
ทั้งประเทศ	4,086,521	3,565,460	10,760,020	3,018
เหนือ	22,913	6,062	6,241	1,030
ตะวันออกเฉียงเหนือ	73,249	25,663	36,010	1,403
กลาง	384,058	299,228	889,099	2,971
ใต้	3,606,301	3,234,507	9,828,670	3,039
ปี 2555				
ทั้งประเทศ	4,385,804	3,700,508	11,312,301	3,057
เหนือ	44,347	8,768	9,045	1,032
ตะวันออกเฉียงเหนือ	102,067	37,160	60,787	1,636
กลาง	422,795	321,552	809,597	2,518
ใต้	3,816,595	3,333,028	10,432,872	3,130
ปี 2556				
ทั้งประเทศ	4,489,119	3,773,123	12,434,520	3,296
เหนือ	54,626	12,556	13,941	1,110
ตะวันออกเฉียงเหนือ	120,183	45,462	66,775	1,469
กลาง	443,285	335,108	914,708	2,730
ใต้	3,871,025	3,379,997	11,439,096	3,384
ปี 2557				
ทั้งประเทศ	4,693,388	4,120,175	12,623,959	3,064
เหนือ	68,648	29,771	31,383	1,054
ตะวันออกเฉียงเหนือ	137,079	95,040	119,828	1,261
กลาง	473,624	374,917	991,657	2,645
ใต้	4,014,037	3,620,447	11,481,091	3,171

ตาราง ข้อมูลการเพาะปลูกปาล์มน้ำมันในประเทศไทย ปี 2554-2562 (ข้อมูลจากสำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร วันที่ 8 พฤษภาคม 2564) [3] (ต่อ)

ปี	พื้นที่เพาะปลูก (ไร่)	พื้นที่ให้ผลผลิต (ไร่)	จำนวนผลผลิต (ตัน)	ผลผลิตต่อไร่ (กิโลกรัม)
ปี 2558				
ทั่วประเทศ	5,083,100	4,317,615	12,396,682	2,871
เหนือ	75,411	44,668	42,004	940
ตะวันออกเฉียงเหนือ	159,493	106,730	119,961	1,124
กลาง	492,520	405,880	981,645	2,419
ใต้	4,355,676	3,760,337	11,253,072	2,993
ปี 2559				
ทั่วประเทศ	5,408,200	4,520,960	11,662,559	2,580
เหนือ	80,683	59,518	55,570	934
ตะวันออกเฉียงเหนือ	168,523	127,033	153,454	1,208
กลาง	503,231	429,312	939,436	2,188
ใต้	4,655,763	3,905,097	10,514,099	2,692
ปี 2560				
ทั่วประเทศ	5,664,848	4,982,050	14,452,261	2,901
เหนือ	84,645	65,303	77,419	1,186
ตะวันออกเฉียงเหนือ	191,867	153,980	212,880	1,383
กลาง	511,048	473,040	1,124,673	2,378
ใต้	4,877,288	4,289,727	13,037,289	3,039
ปี 2561				
ทั่วประเทศ	5,878,127	5,352,641	15,534,984	2,902
เหนือ	88,753	75,975	97,353	1,281
ตะวันออกเฉียงเหนือ	203,694	167,247	257,966	1,542
กลาง	516,691	487,720	1,218,748	2,499
ใต้	5,068,989	4,621,699	13,960,917	3,021
ปี 2562				
ทั่วประเทศ	6,102,852	5,662,997	16,408,440	2,897
เหนือ	92,585	79,450	94,134	1,185
ตะวันออกเฉียงเหนือ	225,318	189,178	270,954	1,432
กลาง	550,812	511,355	1,258,365	2,461

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล นายวันชนะ สีสุธก
วัน เดือน ปีเกิด 1 พฤศจิกายน 2531
ที่อยู่ 39/296 บ้านพูกษารังสิต-คลอง 5 หมู่ 2 ตำบลคลองห้า อำเภอกลองหลวง จังหวัดปทุมธานี 12120
การศึกษา ปริญญาตรี คณะวิทยาศาสตร์ สาขาเคมี มหาวิทยาลัยรามคำแหง
ประสบการณ์การทำงาน ผู้ช่วยนักวิจัย ฝ่ายเทคโนโลยีพลังงาน สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.) พ.ศ.2556 -2559
วิศวกร บริษัท เวิลด์เทค เอ็นเตอร์ไพรส์ จำกัด พ.ศ. 2565-2566
ผู้ช่วยนักวิจัย ศูนย์เชี่ยวชาญนวัตกรรมพลังงานสะอาดและสิ่งแวดล้อม (ศนพ.) สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.) ฝ่ายเทคโนโลยีพลังงาน พ.ศ.2566 - ปัจจุบัน
เบอร์โทรศัพท์ 06-5721-7242
อีเมล wanchana_s@yahoo.com

