

การสังเคราะห์คาร์บอนที่มีรูพรุนในระดับนาโนสำหรับการดักจับ
ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

PREPARATION OF NANOPOROUS CARBONS FOR
CARBON DIOXIDE CAPTURE



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิศวกรรมวัสดุนาโน
วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2560

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Preparation of Nanoporous Carbons for
Carbon Dioxide Capture



SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT
FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF ENGINEERING
IN NANOMATERIAL ENGINEERING
COLLEGE OF NANOTECHNOLOGY
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LARDKRABANG

2017

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2017

COLLEGE OF NANOTECHNOLOGY

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาควิชานาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี
วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
โครงการพิเศษ




หัวข้อโครงการพิเศษ การสังเคราะห์คาร์บอนที่มีรูพรุนในระดับนาโนสำหรับการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

Special Project Title PREPARATION OF NANOPOROUS CARBONS FOR CARBON DIOXIDE CAPTURE

นักศึกษา นางสาวนารณัตตา กัตัญญู
นางสาวอารยา สมุทรโคจร

รหัสประจำตัว 57110025
57110054

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชา นาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี
สาขาวิชา วิศวกรรมวัสดุนาโน
ปีการศึกษา 2560
อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อภิสิทธิ์ชัย เอียดเอื้อ

คณะกรรมการสอบโครงการพิเศษ	ลายมือชื่อ
รศ.ดร.วรรณวิไล วิทยากร	
ผศ.ดร.กนกนันทน์ ภาชีรักษ์	
ผศ.ดร.อภิสิทธิ์ชัย เอียดเอื้อ	

ภาควิชานาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบังอนุมัติให้
โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมวัสดุนาโน
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRBANG



(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ดารินี พรหมโยธิน)

หัวหน้าภาควิชานาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี
วันที่ 15 เดือนสิงหาคม พ.ศ. 2561

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงการพิเศษเรื่อง	การสังเคราะห์คาร์บอนที่มีรูพรุนในระดับนาโน สำหรับการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์
นักศึกษา	นางสาวนารณัดดา กตัญญู นางสาวอารยา สมุทรโคจร
รหัสประจำตัว	57110025 57110054
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมวัสดุนาโน
พ.ศ.	2560
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร.อภิสิทธิ์ชัย เอียดเอื้อ
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ดร.คณิต สูงประสิทธิ์

บทคัดย่อ

ภาวะโลกร้อนส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศโลกในปัจจุบันซึ่งมีสาเหตุหลักมาจากการเพิ่มขึ้นของปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศ ปัจจุบันหลายหน่วยงานได้ให้ความสำคัญในลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศและการพัฒนาเทคโนโลยีสำหรับการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยมีแนวโน้มที่จะเพิ่มสูงขึ้น วัสดุคาร์บอนมีสมบัติเป็นตัวดูดซับที่ดีเนื่องจากมีความพรุนตัวที่สูง จึงนิยมนำมาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์เพื่อพัฒนาเป็นตัวดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทำการสังเคราะห์วัสดุคาร์บอนที่มีรูพรุนระดับนาโนสำหรับการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยสังเคราะห์จากไบรูปถาษีและดอกปาล์ม (เพศผู้) ด้วยกระบวนการคาร์บอนในเซชันที่อุณหภูมิสูงที่อุณหภูมิ 400-900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนในเซชันที่อุณหภูมิ 160-200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8-24 ชั่วโมง ร่วมกับกระบวนการคาร์บอนในเซชันที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นนำมาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ด้วยวิธีการกระตุ้นทางเคมีร่วมกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ สารละลายโซเดียมคาร์บอเนตและสารละลายโพแทสเซียมคาร์บอเนต จากนั้นนำไปเพิ่มประสิทธิภาพการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยการเจือร่วมกับสารละลายโมโนเอทานอลามีนเอมีน จากนั้นนำไปวิเคราะห์ สัณฐานวิทยา หมู่ฟังก์ชันบริเวณพื้นผิว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

องค์ประกอบของธาตุ พื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุน และโครงสร้างผลึกของวัสดุคาร์บอนนาโนโพรง จากนั้นทำการทดสอบประสิทธิภาพในการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยเทคนิคการสลายตัวทางความร้อน พบว่าการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนในเซชันที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง จากนั้นกระตุ้นร่วมกับสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 2 โมลาร์ และเจือร่วมกับสารละลายโมโนเอทานอลามีนความเข้มข้น 3 โมลาร์ จะส่งผลให้วัสดุคาร์บอนที่สังเคราะห์ขึ้นมีพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนสูงที่สุด และเมื่อทำการทดสอบประสิทธิภาพการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์พบว่าสามารถดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้สูงสุดถึง 0.05 mmol/g ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส

คำสำคัญ : กระบวนการดูดซับ, ถ่านกัมมันต์, คาร์บอนนาโนโพรง, คาร์บอนในเซชัน และ ไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนในเซชัน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Special Project Title	Preparation of nanoporous carbon for carbon dioxide capture
Student	Miss Nardnutda Katunyoo Miss Araya Smuthkochorn
Student ID	57110025 57110054
Degree	Bachelor of Engineering
Program	Nanomaterial Engineering
Year	2017
Special Project Advisor	Asst. Prof. Dr. Apiluck Eiad-ua
Special Project Co-Advisor	Dr. Kanit Soongprasit

Abstract

The major cause of rapid CO₂ emissions is a result from human activities (*i.e.* burning of fossil fuels, transportation and air polluted from industrial process) leads to the increasing of average global temperature at a faster rate. Several technologies such as deforestation, carbon storage technology have developed to abate a carbon dioxide from the atmosphere. Reducing CO₂ emissions is of great importance to the community, carbon capture and storage (CCS) is the effective option for reducing these harmful CO₂ emissions. Recently, development of activated carbons from waste and biomass for carbon dioxide capture has been reported with high separation performance and cost-effective solution. Thus, this study explores the activated carbons prepared from cattail leaves (CL) and palm flower (PF). Based on the optimization process, CL and PF were carbonized at 400-900°C for 2 h. and hydrothermal-carbonization at 160-200°C for 8, 12 and 24 h. Then carbonized at 700°C for 1 h. and the produced chars were activated with sodium hydroxide (NaOH), potassium hydroxide (KOH), sodium carbonate (Na₂CO₃) and potassium carbonate (K₂CO₃). Activated carbons were treat with monoethanolamine (MEA). In order to enhance CO₂ adsorption. Morphology, surface functional group, chemical component,

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

surface area, pore volume and crystal structure were characterized. Afterwards the CO₂ adsorption capacity were determined by Thermogravimetric analyzer (TGA). From this investigation, the prepared activated carbon will be an efficient adsorbent for the CO₂ emission capture.

Keywords : adsorption process, activated carbons, nanoporous carbon, carbonization and hydrothermal-carbonization



กิตติกรรมประกาศ

การทำการวิจัยและเรียบเรียงโครงการพิเศษเรื่อง การสังเคราะห์คาร์บอนที่มีรูพรุนในระดับนาโนสำหรับการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพื่อนำไปใช้ให้เกิดประโยชน์เชิงอุตสาหกรรมในด้านพลังงานทดแทน อุตสาหกรรมปิโตรเคมีและโรงงานไฟฟ้าสามารถสำเร็จลุล่วงได้นั้น ผู้เขียนขอขอบคุณผศ.ดร. อภิลักษณ์ เอียดเอื้อ ดร.คณิต สูงประสิทธิ์ รัต.ดร.วรรณวิไล วิทยากร และผศ.ดร. กนกนันท์ ภาชีรักษ์ ที่คอยดูแลให้คำปรึกษาตลอดจนข้อมูลต่างๆที่เป็นประโยชน์สำหรับการทำการวิจัย และขอขอบคุณ นาย นภัส แก้วตระกูลชัย ที่คอยดูแลและให้คำปรึกษาด้านการทดลองและการใช้เครื่องมือเครื่องใช้ต่างๆ ตลอดการทำการวิจัย ขอขอบคุณสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังและศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ สำหรับการเอื้อเฟื้ออุปกรณ์เครื่องมือเครื่องใช้และสถานที่สำหรับการทำวิจัย และขอขอบคุณโครงการ ปริญญาวิทย์ ผลิตนักเทคโนโลยี สำนักพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) ที่ให้ทุนสนับสนุนการวิจัยปริญญาโทและเอื้อเฟื้อสถานที่ในการทำวิจัยตลอดมา

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณสำหรับ ความรัก ความเข้าใจ กำลังใจที่อบอุ่นและการสนับสนุนจากบิดามารดา และครอบครัวซึ่งเป็นส่วนสำคัญในการสนับสนุนและผลักดันให้การทำงานวิจัยครั้งนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ผู้เขียนหวังเป็นอย่างยิ่งว่าโครงการพิเศษฉบับนี้จะสามารถให้ความรู้แก่ผู้อ่านได้ไม่มากนักน้อย สำหรับคุณงานความดีที่เกิดขึ้นจากโครงการพิเศษเล่มนี้ ข้าพเจ้าขอใช้บูชาคุณแก่บิดามารดา ครูบาอาจารย์และผู้มีพระคุณทุกท่าน

นารณัดดา กัตัญญ

อารยา สมุทรโคจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	III
กิตติกรรมประกาศ	V
สารบัญ	VI
สารบัญรูป	IX
สารบัญตาราง	XIV
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์	3
1.3 แผนการดำเนินงาน	3
1.4 สมมติฐานของการศึกษา	4
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
1.6 กรอบแนวคิดในการศึกษา	4
1.7 ขอบเขตของการศึกษา	4
1.8 ข้อตกลงเบื้องต้น	5
1.9 นิยามศัพท์เฉพาะ	5
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง	6
2.1 ภาวะโลกร้อน	6
2.1.1 ก๊าซและสารประกอบที่ส่งผลกระทบต่อสภาวะโลกร้อน	6
2.1.2 ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม	8
2.2 ก๊าซชีวภาพ	9
2.2.1 องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ	9
2.2.2 ประโยชน์ของก๊าซชีวภาพ	9
2.2.3 กระบวนการเกิดก๊าซชีวภาพ	10
2.3 ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์	12
2.3.1 แหล่งกำเนิดของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์	12
2.3.2 องค์ประกอบของวัฏจักรคาร์บอน	13
2.4 การดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์	14
2.4.1 การดักจับด้วยน้ำ	15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและ VI ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4.2 การดูดซับด้วยสารละลายเอมีน	15
2.4.3 การแยกด้วยเยื่อเลือกผ่าน	15
2.4.4 การดูดซับด้วยของแข็งโดยใช้ถ่านกัมมันต์	15
2.5 ถ่านกัมมันต์	16
2.5.1 ลักษณะทั่วไปของถ่านกัมมันต์	16
2.5.2 วัตถุประสงค์ที่ใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์	16
2.5.3 ชนิดของถ่านกัมมันต์	17
2.5.4 การผลิตถ่านกัมมันต์	18
2.5.5 สมบัติของถ่านกัมมันต์	20
2.5.6 ประโยชน์ของถ่านกัมมันต์	23
2.5.7 การใช้ถ่านกัมมันต์ในวิฤภาคก๊าซ	24
2.6 กระบวนการดูดซับ	24
2.6.1 การดูดซับทางกายภาพ	24
2.6.2 การดูดซับทางเคมี	25
2.7 ไอโซเทอมการดูดซับ	25
2.7.1 แบบจำลองของฟรุนดลิช	27
2.7.2 แบบจำลองของแลงมีวัวร์	28
2.7.3 ทฤษฎีการดูดซับของ BET	29
2.8 การจำแนกรูพรุนตามมาตรฐาน	30
2.8.1 รูพรุนไมโคร	30
2.8.2 รูพรุนมีโซ	30
2.8.3 รูพรุนแมโคร	30
2.9 ซิวมวล	31
2.9.1 แหล่งที่มาของซิวมวล	31
2.9.2 องค์ประกอบทั่วไปของสารซิวมวล	32
2.9.3 องค์ประกอบของซิวมวล	34
2.9.4 พลังงานในรูปแบบต่างๆจากการแปรรูปซิวมวล	35
2.10 รูปถาชี	36
2.10.1 ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ของรูปถาชี	36

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา VII ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.11 ปาล์มน้ำมัน	38
2.11.1 ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ของปาล์มน้ำมัน	38
2.12 กระบวนการคาร์บอนเซชัน	42
2.12.1 กระบวนการสลายตัวของชีวมวล	42
2.12.2 ตัวแปรในการเกิดรูพรุน	43
2.12.3 โครงสร้างของพื้นที่ผิวหลังผ่านกระบวนการคาร์บอนเซชัน	44
2.13 กระบวนการสลายตัวด้วยความร้อน	44
2.13.1 กลไกการสลายตัวด้วยความร้อน	44
2.13.2 ประเภทของการไพโรไลซิส	45
2.13.3 ผลผลิตจากกระบวนการสลายตัวด้วยความร้อน	45
2.13.4 ประโยชน์ของผลผลิตจากกระบวนการสลายตัวด้วยการให้ความร้อน	46
2.14 กระบวนการไฮโดรเทอร์มอล	47
2.14.1 ปฏิกริยาที่เกิดขึ้น	47
2.15 การกระตุ้น	47
2.15.1 การกระตุ้นทางความร้อนหรือทางกายภาพ	48
2.15.2 การกระตุ้นทางเคมี	49
2.15.3 การกระตุ้นทางกายภาพและทางเคมี	52
2.16 โมโนเอทานอลามีน	53
2.16.1 การใช้เอทานอลามีนในอุตสาหกรรม	53
2.16.2 ชีวเคมีของเอทานอลามีน	54
2.16.3 การประยุกต์ใช้เอทานอลามีนในการดักจับก๊าซ	54
2.16.4 ปฏิกริยาเคมีของการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายเอมีน	55
2.17 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	56
2.18 เทคนิคและเครื่องมือวัด	60
2.18.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	60
2.18.2 การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์	63
2.18.3 พูเรียทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโคปี	65
2.18.4 เครื่องวิเคราะห์ธาตุที่เป็นองค์ประกอบของสารอินทรีย์	66
2.18.5 การวัดพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนของวัสดุ	67

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.18.6 การวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อน.....	68
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน.....	70
3.1 การวิเคราะห์และศึกษาสมบัติของวัสดุคาร์บอนนาโนโพร่ง	70
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย	71
3.3 วัสดุและสารเคมี	75
3.4 เครื่องมือวิเคราะห์	76
3.5 การเตรียมใบรูปภาชนะและดอกปาล์ม (เพศผู้).....	76
3.6 การสังเคราะห์วัสดุคาร์บอนนาโนโพร่งจากชีวมวล	77
3.6.1 การศึกษาผลของวิธีการสังเคราะห์วัสดุคาร์บอนนาโนโพร่ง.....	77
3.6.2 การศึกษาผลของกระบวนการกระตุ้นทางเคมี.....	78
3.6.3 การปรับปรุงพื้นผิวของวัสดุคาร์บอนนาโนโพร่งด้วยการเจือด้วยสารละลายเอมีน ...	79
3.7 การวิเคราะห์และศึกษาสมบัติของวัสดุคาร์บอนนาโนโพร่ง	79
3.8 การทดสอบประสิทธิภาพในการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์	80
3.8.1 ศึกษาผลของอุณหภูมิต่อประสิทธิภาพการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์	80
3.8.2 ศึกษาผลของร้อยละประกอบของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์	80
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผล.....	81
4.1 ผลของวิธีการสังเคราะห์วัสดุคาร์บอนที่มีรูพรุนในระดับนาโนเมตร	81
4.2 ผลของกระบวนการกระตุ้นทางเคมี	91
4.3 ผลของการปรับปรุงพื้นผิวด้วยการเจือด้วยสารละลายเอมีน.....	108
4.4 ผลการทดสอบประสิทธิภาพในการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์	110
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและแนวทางการพัฒนา	114
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	114
5.2 แนวทางการพัฒนา	115
บรรณานุกรม	116
ภาคผนวก	121
ประวัติผู้เขียน	162

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 กระบวนการเกิดก๊าซชีวภาพ.....	10
2.2 ลำดับการผลิตคาร์บอนกัมมันต์	19
2.3 ไอโซเทอมการดูดซับ.....	26
2.4 สูตรโครงสร้างของเอทานอลามีน.....	53
2.5 ปฏิกริยาการเกิดเมทานอลามีน.....	54
2.6 ภาพองค์ประกอบของกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด	61
2.7 การเกิดอันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนปฐมภูมิกับอะตอมของตัวอย่าง	63
2.8 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ในผลึกของสาร	64
2.9 องค์ประกอบของเครื่องวิเคราะห์ธาตุที่เป็นองค์ประกอบของสารอินทรีย์.....	66
2.10 แสดงการดูดซับโมเลกุลของก๊าซไนโตรเจน	67
2.11 เครื่องวิเคราะห์ขนาดพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรของรูพรุน	68
2.12 แสดงเครื่องมือวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อน.....	69
3.1 เครื่องปั่น.....	71
3.2 ปีกเกอร์และช้อนตักสาร.....	71
3.3 เครื่องชั่งสาร.....	72
3.4 ภาชนะสารอลูมินา.....	72
3.5 ภาชนะเพฟลอนและถังปฏิกรณ์ไฮโดรเทอร์มอล	73
3.6 ตู้อบ	73
3.7 เตาเผา.....	74
3.8 เครื่องกลั่นระเหยสารแบบหมุน	74
3.9 ใบรูปถ้วยและดอกปาล์ม (เพศผู้).....	75
3.10 น้ำไร่ประจุ.....	75
3.11 แผนภาพแสดงขั้นตอนการดำเนินงาน	77
4.1 กราฟแสดงมวลของใบรูปถ้วยและดอกปาล์ม (เพศผู้) ที่ผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชัน.....	82
4.2 กราฟแสดงมวลของใบรูปถ้วยและดอกปาล์ม (เพศผู้) ที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล คาร์บอนไนเซชัน.....	84

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา หรือต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.3 ภาพ SEM (กำลังขยาย 300X และ 500X) ของใบรูปฤาษีที่ผ่านกระบวนการ คาร์บอนไอเซชันที่อุณหภูมิ (A) Raw (B) 500 (C) 700 (D) 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง.....	85
4.4 ภาพ SEM (กำลังขยาย 300X และ 500X) ของดอกปาล์ม (เพศผู้) ที่ผ่านกระบวนการ คาร์บอนไอเซชันที่อุณหภูมิ (A) Raw (B) 500 (C) 700 (D) 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง	86
4.5 ภาพ SEM (กำลังขยาย 300X และ 500X) ของใบรูปฤาษีที่ผ่านกระบวนการ ไฮโดรเทอร์มอล คาร์บอนไอเซชันที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา (A) Raw (B) 8 (C) 12 (D) 24 ชั่วโมง และผ่านกระบวนการคาร์บอนไอเซชันที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง.....	87
4.6 ภาพ SEM (กำลังขยาย 300X และ 500X) ของดอกปาล์ม (เพศผู้) ที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนไอเซชันที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา (A) Raw (B) 8 (C) 12 (D) 24 ชั่วโมง และผ่านกระบวนการคาร์บอนไอเซชัน ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง..	87
4.7 กราฟ FT-IR spectraum ของใบรูปฤาษีและดอกปาล์ม (เพศผู้) ที่ไม่ผ่านกระบวนการคาร์บอนไอเซชันและผ่านกระบวนการคาร์บอนไอเซชันที่อุณหภูมิ 500, 700 และ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง.....	89
4.8 กราฟ FT-IR spectraum ของใบรูปฤาษีและดอกปาล์ม (เพศผู้) ที่ไม่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนไอเซชันและผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนไอเซชันที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8, 12 และ 24 ชั่วโมง และผ่านกระบวนการคาร์บอนไอเซชัน 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง	90
4.9 ภาพ SEM (กำลังขยาย 300X และ 500X) (A) ใบรูปฤาษี (B) ดอกปาล์ม (เพศผู้) ที่ผ่านกระบวนการคาร์บอนไอเซชันและกระบวนการกระตุ้นทางเคมีร่วมกับโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 2 โมลาร์ เป็นเวลา 3 ชั่วโมง.....	91
4.10 ภาพ SEM (กำลังขยาย 300X และ 500X) ใบรูปฤาษี ที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลที่ คาร์บอนไอเซชันและกระบวนการกระตุ้นทางเคมีร่วมกับโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น (A) 1 โมลาร์ (B) 2 โมลาร์ (C) 4 โมลาร์ เป็นเวลา 3 ชั่วโมง	92
4.11 ภาพ SEM (กำลังขยาย 300X และ 500X) ดอกปาล์ม (เพศผู้) ที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล คาร์บอนไอเซชันและกระบวนการกระตุ้นทางเคมีร่วมกับโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น (A) 1 โมลาร์ (B) 2 โมลาร์ (C) 4 โมลาร์ เป็นเวลา 3 ชั่วโมง	93

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.12 ภาพ SEM (กำลังขยาย 300X และ 500X) ใบรูปฤาษี ที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนเซชันและกระบวนการกระตุ้นทางเคมีร่วมกับ (A) NaOH (B) KOH (C) Na ₂ CO ₃ (D) K ₂ CO ₃ ความเข้มข้น 2 โมลาร์ เป็นเวลา 3 ชั่วโมง	94
4.13 ภาพ SEM (กำลังขยาย 300X และ 500X) ดอกปาล์ม (เพศผู้) ที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนเซชันและกระบวนการกระตุ้นทางเคมีร่วมกับ (A) NaOH (B) KOH (C) Na ₂ CO ₃ (D) K ₂ CO ₃ ความเข้มข้น 2 โมลาร์ เป็นเวลา 3 ชั่วโมง	95
4.14 กราฟ FT-IR spectraum ของใบรูปฤาษีและดอกปาล์ม (เพศผู้) ที่ผ่าน กระบวนการคาร์บอนเซชัน กระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนเซชันและผ่านกระบวนการกระตุ้นทางเคมีร่วมกับสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์.....	96
4.15 กราฟ FT-IR spectraum ของใบรูปฤาษีและดอกปาล์ม (เพศผู้) ที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนเซชันที่และผ่านกระบวนการกระตุ้นทางเคมีร่วมกับสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 1, 2 และ 4 โมลาร์ เป็นเวลา 3 ชั่วโมง	97
4.16 กราฟ FT-IR spectraum ของใบรูปฤาษีและดอกปาล์ม (เพศผู้) ที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนเซชันและผ่านกระบวนการกระตุ้นทางเคมีร่วมกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ โซเดียมคาร์บอเนตและโพแทสเซียมคาร์บอเนต ที่ความเข้มข้น 2 โมลาร์ เป็นเวลา 3 ชั่วโมง.....	98
4.17 กราฟ N ₂ adsorption/desorption isotherm และการกระจายตัวของรูพรุนของใบรูปฤาษีและดอกปาล์ม (เพศผู้) ที่ผ่านกระบวนการคาร์บอนเซชันและผ่านกระบวนการกระตุ้นทางเคมีร่วมกับสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 2 โมลาร์ เป็นเวลา 3 ชั่วโมง	102
4.18 กราฟ N ₂ adsorption/desorption isotherm และการกระจายตัวของรูพรุนของใบรูปฤาษีและดอกปาล์ม (เพศผู้) ที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนเซชันและผ่านกระบวนการกระตุ้นทางเคมีร่วมกับสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์	103
4.19 กราฟ N ₂ adsorption/desorption isotherm และการกระจายตัวของรูพรุนของใบรูปฤาษีและดอกปาล์ม (เพศผู้) ที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนเซชันและผ่านกระบวนการกระตุ้นทางเคมีร่วมกับสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 1 โมลาร์ เป็นเวลา 3 ชั่วโมง	104

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.20 กราฟ N_2 adsorption/desorption isotherm และการกระจายตัวของรูพรุนของไบรูปฤาษีและดอกปาล์ม (เพศผู้) ที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนเซชันและผ่านกระบวนการกระตุ้นทางเคมีร่วมกับสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์.....	105
4.21 กราฟ XRD-Spectrum ของไบรูปฤาษีและดอกปาล์ม (เพศผู้) ที่ผ่านกระบวนการคาร์บอนเซชันกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนเซชันที่และผ่านกระบวนการกระตุ้นทางเคมีร่วมกับสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 2 โมลาร์ เป็นเวลา 3 ชั่วโมง.....	107
4.22 กราฟ FT-IR spectraum ของไบรูปฤาษีและดอกปาล์ม (เพศผู้) ที่ผ่านกระบวนการคาร์บอนเซชันและทำการเจือด้วยสารละลายโมโนเอทานอลามีน ที่ความเข้มข้น 0.5, 1.5 และ 3 โมลาร์ ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง.....	108
4.23 กราฟ FT-IR spectraum ของไบรูปฤาษีและดอกปาล์ม (เพศผู้) ที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนเซชันและทำการเจือด้วยสารละลายโมโนเอทานอลามีน ที่ความเข้มข้น 0.5, 1.5 และ 3 โมลาร์ ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง.....	109
4.24 กราฟ TGA ของไบรูปฤาษีและดอกปาล์ม (เพศผู้) ที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนเซชันและทำการเจือด้วยสารละลายโมโนเอทานอลามีน ที่ความเข้มข้น 3 โมลาร์ ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนเซชันและผ่านกระบวนการกระตุ้นทางเคมีร่วมกับสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 2 โมลาร์ เป็นเวลา 3 ชั่วโมง.....	111
4.25 กราฟแท่งแสดงปริมาณการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของไบรูปฤาษีและดอกปาล์ม (เพศผู้) ที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนเซชันและทำการเจือด้วยสารละลายโมโนเอทานอลามีน ที่ความเข้มข้น 3 โมลาร์ ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง.....	113

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 แผนการดำเนินงาน	3
2.1 แสดงความแตกต่างระหว่างการดูดซับทางกายภาพและทางเคมี.....	25
2.2 คุณลักษณะของชีวมวลประเภทต่างๆและค่าพลังงานความร้อนที่ได้จากชีวมวล	34
2.3 องค์ประกอบหลักของรูปถ่ายชี	37
2.4 องค์ประกอบของปาล์มน้ำมัน	41
4.1 มวลของใบรูปถ่ายชีและดอกปาล์ม (เพศผู้) ที่ผ่านกระบวนการคาร์บอนเซชัน	81
4.2 มวลของใบรูปถ่ายชีและดอกปาล์ม (เพศผู้) ที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล	82
4.3 ร้อยละองค์ประกอบของธาตุต่างๆ ในผลิตภัณฑ์	99
4.4 สมบัติบริเวณพื้นผิวของผลิตภัณฑ์	100



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

สภาวะโลกร้อนเป็นสภาวะที่อุณหภูมิโดยเฉลี่ยของโลกมีค่าสูงขึ้นซึ่งมีสาเหตุหลักมากจากปรากฏการณ์เรือนกระจกซึ่งเกี่ยวข้องกับก๊าซที่มีความจำเป็นต่อการรักษาอุณหภูมิในบรรยากาศของโลกให้คงที่โดยจะเป็นก๊าซที่มีคุณสมบัติดูดซับรังสีความร้อนต่างๆ หรือรังสีอินฟราเรด (Infrared radiation) หรือที่เรียกกันว่าก๊าซเรือนกระจก (Greenhouse Gas) มีก๊าซจำนวนมากที่มีคุณสมบัติในการดูดซับคลื่นรังสีความร้อนหรือก๊าซเรือนกระจก ก๊าซเรือนกระจกสามารถแบ่งออกได้เป็นสองชนิดได้แก่ ก๊าซเรือนกระจกที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติและเกิดจากกิจกรรมของมนุษย์ ก๊าซเรือนกระจกที่สำคัญได้แก่ ไอน้ำโอโซน (O_3) มีเทน (CH_4) ก๊าซไนตรัสออกไซด์ (N_2O) และสารซีเอฟซี (CFC) และก๊าซอีกชนิดที่มีความสำคัญและทวีความรุนแรงขึ้นซึ่งก็คือก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ปรากฏการณ์ดังกล่าวมานี้จะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศโลกในปัจจุบันส่งผลในทางลบต่อสิ่งแวดล้อม ระบบนิเวศและการดำเนินชีวิตของมนุษย์ [1]

พลังงานที่มนุษย์ใช้ในปัจจุบันมากกว่า 85% มากจากเชื้อเพลิงฟอสซิลได้แก่ ถ่านหิน ปิโตรเลียมและก๊าซธรรมชาติ ซึ่งพลังงานเหล่านี้ในวันจะมีปริมาณลดลงในขณะที่ความต้องการของมนุษย์นั้นมียู้อย่างไม่สิ้นสุดนอกจากนี้ยังก่อให้เกิดมลพิษและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จำนวนมากซึ่งก่อให้เกิดปรากฏการณ์เรือนกระจกที่เป็นสาเหตุของสภาวะโลกร้อน จากปัญหาดังกล่าวมนุษย์จึงได้มองหาพลังงานชนิดอื่นที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมและสามารถสร้างจากวัตถุดิบที่มีอยู่บนโลกเพื่อนำมาใช้ทดแทนพลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิล พลังงานทดแทนแบ่งออกเป็นสองประเภท ประเภทแรกได้แก่พลังงานทดแทนจากสิ่งที่ใช้แล้วหมดไป อาทิ ถ่านหิน ก๊าซธรรมชาติ น้ำมัน ประเภทที่สองได้แก่พลังงานหมุนเวียน เป็นแหล่งพลังงานตามธรรมชาติและสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ อาทิ พลังงานลม พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานน้ำ พลังงานคลื่น พลังงานความร้อนใต้พิภพและพลังงานจากก๊าซชีวภาพ จากการศึกษาจากงานวิจัยต่างๆ พบว่าพลังงานจากก๊าซชีวภาพเป็นพลังงานชนิดหนึ่งที่มนุษย์หันมาให้ความสนใจในปัจจุบัน โดยก๊าซชีวภาพที่ได้นั้นเกิดจากกระบวนการหมักแบบไม่มีอากาศภายใต้สภาวะที่เหมาะสม โดยเมื่อนำก๊าซชีวภาพจากกระบวนการดังกล่าวไปมาใช้แทนพลังงานที่ได้จากเชื้อเพลิงฟอสซิลแล้วนั้นสามารถทำได้แต่ก็ไม่ประสบผลสำเร็จเท่าที่ควร เนื่องจากใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก๊าซชีวภาพมีส่วนผสมของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งมีคุณสมบัติหลักคือไม่ติดไฟอยู่ประมาณ 30-40% ของส่วนผสมทั้งหมดแม้ว่าอีกประมาณ 60-75% จะเป็นส่วนผสมของก๊าซมีเทนและก๊าซอื่นๆ นอกเหนือจากที่กล่าวไปก็ตาม แต่ผลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ก็ยังทำให้มีค่าพลังงานความร้อนของการเผาไหม้ที่ต่ำ [2]

เพื่อเป็นการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศและก๊าซชีวภาพ ที่เป็นสาเหตุของสภาวะโลกร้อนอันเนื่องมาจากปรากฏการณ์เรือนกระจกนั้น ได้มีผู้ให้ความสนใจทำการศึกษาลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในหลากหลายวิธี อาทิ วิธีการดูดซับซึ่งจะแบ่งเป็นสองประเภท ได้แก่ การดูดซับทางกายภาพและการดูดซับทางเคมี โดยจะมีวัสดุที่นำมาใช้ในการดูดซับหลายชนิด อาทิ น้ำสารละลายเอมีน (Amine) ซิลิกาเจล (Silica gel) ซีโอไลต์ (Zeolite) และถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) จากการศึกษาข้อมูลพบว่าคาร์บอนมีสมบัติเป็นตัวดูดซับที่ดี ในช่วงแรกการผลิตถ่านกัมมันต์จะใช้ถ่านหินมาเป็นวัตถุดิบแต่ถ่านหินมีราคาค่อนข้างสูงอีกทั้งยังเป็นวัสดุที่ใช้แล้วหมดไปจึงมีการนำเอาชีวมวลและผลพลอยได้จากเกษตรกรรมและอุตสาหกรรมมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตถ่านกัมมันต์ อาทิ ชานอ้อย เหง้ามันสำปะหลัง กะลามะพร้าว กากเมล็ดกาแฟ และแกลบ เป็นต้น [3]

ต้นรูปถ่ายซีเป็นวัชพืชที่มีการเจริญเติบโตได้ดีในพื้นที่ลุ่มน้ำขังรวมทั้งตามพื้นที่โล่งทั่วไป เนื่องจากสามารถทนความเป็นกรดต่างและความเค็มได้ดี มีการแพร่พันธุ์ได้อย่างรวดเร็วจากการแตกออกของดอกเป็นขนปลิวไปตามลมสามารถพบได้ทั่วทุกภาคของประเทศไทย รูปถ่ายซีเป็นวัชพืชที่แพร่ระบาดรุกรานจนก่อให้เกิดความเสียหายต่อระบบนิเวศในประเทศ ส่งผลเสียต่อสภาพแวดล้อมคือก่อให้เกิดน้ำเน่าเสียส่งกลิ่นเหม็นและความรำคาญให้แก่ผู้คนที่อยู่อาศัย หรือสัญจรไปมาในบริเวณนั้น ขณะเดียวกันต้นปาล์มน้ำมันเป็นพืชยืนต้นสมบูรณ์เพศ เป็นพืชที่สามารถให้ผลผลิตได้ตลอดปีจากการเก็บเกี่ยวทะลายปาล์ม เกษตรกรรมปาล์มน้ำมันสามารถพบได้หลายภาคของประเทศ โดยส่วนมากจะพบในภาคใต้ของประเทศไทย ดอกของปาล์มน้ำมันสามารถแบ่งได้เป็นสองประเภท ได้แก่ ดอกเพศเมียซึ่งจะเป็นช่อดอกที่สามารถเจริญต่อไปเป็นผลผลิตได้แก่ทะลายปาล์มได้และดอกเพศผู้เป็นดอกที่มีลักษณะที่ไม่พึงประสงค์ เนื่องจากไม่สามารถเจริญเติบโตต่อไปเป็นผลผลิตได้จึงจำเป็นต้องมีการตัดทิ้งเพื่อทำให้ดอกใหม่เกิดขึ้นมา โดยชีวมวลทั้งสองมีองค์ประกอบของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลสและลิกนิน ซึ่งสามารถเปลี่ยนไปเป็นวัสดุคาร์บอนได้ จากความต้องการในการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่กล่าวข้างต้น ผู้จัดทำจึงเห็นความสำคัญในการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้ตัวดูดซับจากถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากใบรูปถ่ายซีและดอกปาล์มเพศผู้มาเป็นวัตถุดิบในการเตรียมถ่านกัมมันต์ โดยการปรับเปลี่ยนโครงสร้างทางกายภาพและเคมีเพื่อให้มีลักษณะเป็นรูพรุนขนาดนาโนเมตรเพื่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำมาเป็นวัสดุดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีประสิทธิภาพรวมทั้งสามารถช่วยลดการแพร่พันธุ์ของ
ไบรจุพลาซีและกากเหลือทิ้งของดอกปาล์มเทศผู้ เพื่อเป็นแนวทางในการลดภาระในการกำจัดวัชพืช
และกากเหลือทิ้งดังกล่าว อีกทั้งเป็นการเพิ่มมูลค่าให้แก่ชีวมวลทั้งสองชนิดอีกด้วย

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อสังเคราะห์วัสดุคาร์บอนนาโนโพรง (Nanoporous carbon) จากชีวมวลด้วยวิธีให้
คาร์บอนในเซชันและไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนในเซชันเพื่อใช้ในการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

1.2.2 เพื่อนำวัสดุคาร์บอนนาโนโพรงที่สังเคราะห์ได้ไปศึกษาสมบัติทางกายภาพ ลักษณะ
สัณฐานวิทยา หมู่ฟังก์ชัน ธาตุองค์ประกอบและความเป็นผลึกของวัสดุ

1.2.3 เพื่อนำวัสดุคาร์บอนนาโนโพรงที่สังเคราะห์ได้ไปทดสอบการดักจับก๊าซ
คาร์บอนไดออกไซด์ด้วยเทคนิคการสลายตัวทางความร้อน

1.3 แผนการดำเนินงาน

ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินงาน

กิจกรรม	เดือน												
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.			
รวบรวมข้อมูลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับ การสังเคราะห์วัสดุคาร์บอนนาโนโพรง													
รวบรวมข้อมูลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับ การดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์													
การสังเคราะห์วัสดุคาร์บอนนาโนโพรง													
การปรับปรุงพื้นผิวของวัสดุคาร์บอน นาโนโพรงด้วยสารละลายเอมีน													
การวิเคราะห์และศึกษาสมบัติของวัสดุ คาร์บอนนาโนโพรง													
การทดสอบประสิทธิภาพการดักจับ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของวัสดุ คาร์บอนนาโนโพรง													
รายงานผลการวิจัยและจัดทำเล่ม ปริญญาานิพนธ์													

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 สมมติฐานของการศึกษา

- 1.4.1 สามารถสังเคราะห์วัสดุคาร์บอนนาโนโพรงเพื่อใช้ในการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ด้วยวิธีการอย่างง่าย
- 1.4.2 วัสดุคาร์บอนนาโนโพรงที่สังเคราะห์มีประสิทธิภาพสูงขึ้นเมื่อมีการทำปฏิกิริยากับต่าง
- 1.4.3 วัสดุคาร์บอนนาโนโพรงที่สังเคราะห์ด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนเนชัน (Hydrothermal carbonization) มีประสิทธิภาพสูงกว่าวิธีคาร์บอนเนชัน (Carbonization)

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.5.1 สามารถสังเคราะห์วัสดุคาร์บอนนาโนโพรงเพื่อนำไปใช้ให้เกิดประโยชน์เชิงอุตสาหกรรม พลังงานทดแทน อุตสาหกรรมปิโตรเลียมและปิโตรเคมี โรงงานไฟฟ้าและอุตสาหกรรมหมัก เป็นต้น
- 1.5.2 องค์ความรู้ในการเตรียมวัสดุดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์
- 1.5.3 ได้ฝึกฝนทักษะกระบวนการวิเคราะห์อย่างเป็นระบบในกระบวนการทำงานวิจัย

1.6 กรอบแนวคิดในการศึกษา

หลักการและวิธีการที่นำมาใช้ในการศึกษาเกี่ยวกับการสังเคราะห์วัสดุคาร์บอนนาโนโพรงเพื่อการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ได้แก่วิธีการดูดซับ ซึ่งแบ่งออกเป็น การดูดซับทางกายภาพและการดูดซับทางเคมี การเตรียมถ่านกัมมันต์จากชีวมวลซึ่งจะมีวิธีการเตรียมสองวิธีได้แก่ วิธีการคาร์บอนเนชันและวิธีการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนเนชัน การปรับปรุงประสิทธิภาพของตัวดูดซับโดยการทำปฏิกิริยากับต่างและการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารละลายเอมีน

1.7 ขอบเขตของการศึกษา

การศึกษาการสังเคราะห์วัสดุคาร์บอนนาโนโพรงเพื่อการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ที่สังเคราะห์ขึ้นจากไบโธปลาซีและดอกปาล์มเทศผู้ด้วยวิธีการคาร์บอนเนชันและไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนเนชันจะส่งผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของวัสดุ โดยเงื่อนไขที่จะทำการศึกษาได้แก่ ชนิดของชีวมวล วิธีที่ใช้ในการสังเคราะห์ กระบวนการกระตุ้นทางเคมี การปรับปรุงพื้นผิวของวัสดุคาร์บอนนาโนโพรงด้วยการเจือด้วยสารละลายเอมีน ที่ส่งผลกระทบต่อสมบัติและประสิทธิภาพของตัวดูดซับ แล้วจะถูกนำไปศึกษาสมบัติทางกายภาพ ลักษณะสัญญาณวิทยา หมู่ฟังก์ชัน ธาตุองค์ประกอบและความเป็นผลึกของวัสดุและนำไปทดสอบการดักจับก๊าซ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คาร์บอนไดออกไซด์ด้วยเทคนิคการสลายตัวทางความร้อน เพื่อนำไปใช้ให้เกิดประโยชน์เชิงอุตสาหกรรมพลังงานทดแทน อุตสาหกรรมปิโตรเลียมและปิโตรเคมี โรงงานไฟฟ้าและอุตสาหกรรมหมัก เป็นต้น

1.8 ข้อตกลงเบื้องต้น

การศึกษาดังกล่าวได้มีการศึกษาเปรียบเทียบชนิดของชีวมวลที่ใช้ในการสังเคราะห์วัสดุคาร์บอนนาโนโพรงได้แก่ ใบธูปฤาษีและดอกปาล์ม (เทศผู้) วิธีการสังเคราะห์วัสดุคาร์บอนนาโนโพรงได้แก่ กระบวนการคาร์บอนไนเซชันและกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนไนเซชัน กระบวนการกระตุ้นทางเคมีโดยต่างที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาได้แก่ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) โซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) และโพแทสเซียมคาร์บอเนต (K_2CO_3) ผลของการปรับปรุงพื้นผิวของวัสดุคาร์บอนนาโนโพรงด้วยการเจือด้วยสารละลายโมโนเอทาโนลามีน (MEA) และการศึกษาประสิทธิภาพในการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของวัสดุคาร์บอนนาโนโพรงที่สังเคราะห์ขึ้น

1.9 นิยามศัพท์เฉพาะ

1.9.1 วัสดุคาร์บอนนาโนโพรง (Nanoporous carbons) คือ วัสดุที่มีปริมาณคาร์บอนสูงถูกนำมาผ่านกระบวนการทางกายภาพและเคมีเพื่อให้มีลักษณะเป็นรูพรุนขนาดนาโนเมตร

1.9.2 กระบวนการคาร์บอนไนเซชัน (Carbonization) คือ กระบวนการให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจน (N_2)

1.9.3 กระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนไนเซชัน (Hydrothermal-carbonization) คือ กระบวนการให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงร่วมกับน้ำจากนั้นนำไปเผาที่อุณหภูมิสูงภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจน (N_2)

1.9.4 การดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon dioxide capture) คือ เทคนิคการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้ตัวดูดซับ

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

2.1 ภาวะโลกร้อน

ภาวะโลกร้อนหรือสภาวะที่อุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงไปอย่างรวดเร็วและรุนแรง ส่งผลให้อุณหภูมิเฉลี่ยของโลกเพิ่มสูงขึ้นเป็นผลมาจากก๊าซเรือนกระจก ซึ่งมีสาเหตุหลักคือ การกระทำของมนุษย์ที่ได้เพิ่มปริมาณของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เข้าไปในบรรยากาศ อาทิ การเผาไหม้เชื้อเพลิงต่างๆ การขนส่ง และกระบวนการผลิตของโรงงานอุตสาหกรรม อีกทั้งมนุษย์นั้นได้มีการลดทอนในการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในระบบออกจากระบบบรรยากาศอีกด้วย คือการตัดไม้ทำลายป่า ทำให้ปริมาณของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์บนโลกของเรานั้นมีปริมาณที่เพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆ ซึ่งก่อให้เกิดปัญหาและผลเสียที่ตามมาต่อมนุษย์ พืช สัตว์ และสิ่งแวดล้อม ไม่ว่าจะเป็น เกิดปัญหาการเปลี่ยนแปลงของปริมาณน้ำฝนทำให้ฝนตกต้องไม่ตามฤดูกาลนำมาสู่ปัญหาแห้งแล้งและน้ำท่วม อีกทั้งยังมีผลกระทบต่ออย่างกว้างขวางต่อมนุษย์ พืช และสัตว์ [4]

ก๊าซเรือนกระจกเป็นก๊าซที่มีคุณสมบัติในเรื่องของการดูดซับคลื่นรังสีความร้อน หรือรังสีอินฟราเรดได้ดี โดยโลกจำเป็นต้องอาศัยก๊าซเหล่านี้เพื่อรักษาอุณหภูมิเฉลี่ยให้คงที่ ถ้าหากในชั้นบรรยากาศโลกไม่มีก๊าซเหล่านี้อยู่ จะส่งผลให้ตอนกลางวันมีอุณหภูมิที่ร้อนจัดและจะหนาวจัดในตอนกลางคืน เป็นผลมาจากในตอนกลางวันก๊าซเหล่านี้ดูดคลื่นรังสีความร้อนเอาไว้และค่อยๆคายออกมาในช่วงเวลากลางคืน ทำให้อุณหภูมิในตอนกลางวันและกลางคืนไม่เปลี่ยนแปลงอย่างกะทันหันและไม่แตกต่างกันมาก มีก๊าซอีกหลากหลายชนิดที่มีคุณสมบัติและถูกจัดอยู่ในกลุ่มของก๊าซเรือนกระจก ซึ่งมีทั้งก๊าซที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติและเกิดขึ้นจากการกระทำของมนุษย์ ก๊าซเรือนกระจกที่สำคัญคือ ไอน้ำ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โอโซน มีเทน ไนตรัสออกไซด์และสารซีเอฟซี เป็นต้น [5]

2.1.1 ก๊าซและสารประกอบที่ส่งผลกระทบต่อสภาวะโลกร้อน

(1.) ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon dioxide ; CO₂)

ปริมาณของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เพิ่มขึ้นเป็นผลมาจากการเผาไหม้ในรูปแบบต่างๆ เช่น การเผาไหม้เชื้อเพลิงโรงงานอุตสาหกรรม การเผาป่าเพื่อใช้สำหรับอยู่อาศัยและการทำปศุสัตว์ เป็นต้น โดยการเผาป่านั้นเป็นการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ขึ้นสู่ชั้นบรรยากาศทางตรงที่ปล่อยได้โดยเร็วที่สุด เนื่องจากต้นไม้ไม่มีคุณสมบัติในการตรึงก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ไว้ก่อนที่จะปล่อยให้

ลอยขึ้นสู่ชั้นบรรยากาศคั่งนั้นเมื่อพื้นที่ป่าลดน้อยลงกลไกในการดักก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากระบบบรรยากาศก็ลดน้อยลง ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จึงลอยขึ้นไปสะสมอยู่ในบรรยากาศได้มากยิ่งขึ้นและทำให้พลังงานความร้อนที่สะสมอยู่บนผิวโลกและในบรรยากาศเพิ่มสูงขึ้น

(2.) ก๊าซมีเทน (Methane ; CH₄)

เกิดขึ้นได้จากการย่อยสลายของซากสิ่งมีชีวิตถึงแม้ว่าจะมีก๊าซมีเทนอยู่ในอากาศเพียง 1.7 ppm ก็ตามแต่ก๊าซมีเทนมีคุณสมบัติของการเป็นก๊าซเรือนกระจกที่สูงกว่าก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ กล่าวได้ว่า หากมีปริมาณที่เท่ากันนั้น ก๊าซมีเทนมีความสามารถดูดกลืนรังสีอินฟราเรดได้ดีกว่าก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซมีเทนมีปริมาณที่เพิ่มสูงขึ้นเนื่องจากการทำนาข้าว ปศุสัตว์และการเผาไหม้มวลชีวภาพ การเผาไหม้เชื้อเพลิงประเภทถ่านหิน น้ำมันและก๊าซธรรมชาติ การเพิ่มขึ้นของก๊าซมีเทนนั้นสามารถส่งผลกระทบต่อภาวะเรือนกระจกได้มากเป็นอันดับที่ 2 รองลงมาจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

(3.) ก๊าซไนตรัสออกไซด์ (Nitrous oxide ; N₂O)

เกิดขึ้นในธรรมชาติซึ่งเกิดจากการย่อยสลายของซากสิ่งมีชีวิตโดยแบคทีเรียแต่ที่มีเพิ่มสูงขึ้นในปัจจุบันเป็นผลเนื่องมาจากอุตสาหกรรมที่ใช้กรดไนตริกในกระบวนการผลิตต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมผลิตเส้นใยไนลอน อุตสาหกรรมเคมี และพลาสติกบางชนิด เป็นต้น ก๊าซไนตรัสออกไซด์ที่เพิ่มปริมาณขึ้นมานั้นส่งผลกระทบต่อการทำงานของพลังงานความร้อนสะสมบนพื้นผิวโลกโดยเพิ่มขึ้นประมาณ 0.14 วัตต์/ตารางเมตร นอกจากนั้นเมื่อก๊าซไนตรัสออกไซด์ถูกปล่อยให้ลอยขึ้นสู่บรรยากาศชั้นสตราโตสเฟียร์แล้ว มันจะทำปฏิกิริยากับก๊าซโอโซนที่มีอยู่ในชั้นบรรยากาศ ส่งผลให้เกราะป้องกันรังสีอัลตราไวโอเล็ตของโลกลดน้อยลงและส่งผลให้อุณหภูมิเฉลี่ยของโลกเพิ่มสูงขึ้น

(4.) สารประกอบคลอโรฟลูออโรคาร์บอน (Chlorofluorocarbon ; CFC)

หรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า “ฟร็อน” (Freon) สารนี้ไม่ได้เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติแต่มาจากสิ่งประดิษฐ์และการกระทำของมนุษย์ ซึ่งมีแหล่งกำเนิดมาจากโรงงานอุตสาหกรรมและอุปกรณ์เครื่องใช้ในชีวิตประจำวัน เช่น ตู้เย็น เครื่องปรับอากาศและสเปรย์ สาร CFC นั้นมีองค์ประกอบหลักเป็นคลอรีน ฟลูออไรด์และโบรมีน ซึ่งสารเหล่านี้มีความสามารถในการทำลายก๊าซโอโซนในชั้นบรรยากาศได้ ตามปกติแล้วในบริเวณพื้นผิวโลกสาร CFC จะทำปฏิกิริยากับสารอื่น แต่เมื่อไหร่ที่ดูดกลืนรังสีอัลตราไวโอเล็ตในบรรยากาศชั้นสตราโตสเฟียร์ โมเลกุลของจะแตกตัวเกิดเป็นคลอรีนอะตอมเดี่ยวและทำปฏิกิริยากับก๊าซโอโซนในชั้นบรรยากาศเกิดเป็นก๊าซคลอรีนโมโนออกไซด์ (ClO) และก๊าซออกซิเจน แต่คลอรีนจำนวน 1 อะตอม นั้นสามารถทำลายก๊าซโอโซน 1 โมเลกุลได้หลายครั้งไปเรื่อยๆ เนื่องจากเมื่อคลอรีนโมโนออกไซด์ทำปฏิกิริยากับออกซิเจนอะตอม เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เดี่ยว แล้วเกิดคลอรีนอะตอมเดี่ยวขึ้นอีกครั้ง ปฏิกิริยาถูกโซ่เช่นนี้จึงเป็นการทำลายโอโซนอย่างต่อเนื่อง

2.1.2 ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

(1.) ผลกระทบด้านนิเวศวิทยา

บริเวณแถบขั้วโลกนั้นได้รับผลกระทบโดยตรงอย่างมากสุดและก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงอีกมากมายโดยเฉพาะอย่างยิ่งบริเวณภูเขา น้ำแข็ง ก้อนน้ำแข็งจะละลายลงอย่างรวดเร็ว ส่งผลทำให้ระดับน้ำทะเลทางขั้วโลกเพิ่มขึ้นและไหลลงสู่ทั่วโลกทำให้เกิดน้ำท่วมได้ในทุกๆทวีป นอกจากนี้ยังส่งผลทำให้สัตว์ทางทะเลเสียชีวิตเพราะระบบนิเวศใต้ท้องทะเลเกิดการเปลี่ยนแปลง ส่วนทวีปยุโรปได้ภูมิประเทศจะกลายเป็นพื้นที่ลาดเอียงทำให้เกิดความแห้งแล้งขึ้นในหลายพื้นที่ ในขณะที่เอเชีย อุณหภูมิจะสูงขึ้นเกิดฤดูกาลที่แห้งแล้ง มีน้ำท่วม ผลผลิตทางอาหารลดลง ระดับน้ำทะเลสูงขึ้นสภาวะอากาศเกิดการแปรปรวนอาจทำให้เกิดพายุต่างๆ มากมายเข้าไปทำลายบ้านเรือนที่อยู่อาศัยของประชาชน นอกจากนี้ยังมีการคาดการณ์ว่าในอนาคตจะเกิดเหตุการณ์ที่ ฤดูร้อนจะขยายเวลายาวนานขึ้น ในขณะที่ฤดูหนาวจะสั้นลง

(2.) ผลกระทบด้านเศรษฐกิจ

เกาะเล็กๆที่อยู่ทั่วทุกมุมโลกจะได้รับผลจากระดับน้ำทะเลที่สูงขึ้นจากการกักความร้อนบริเวณชายฝั่ง จะสร้างความเสียหายแก่ระบบนิเวศ แนวปะการังจะถูกทำลาย สัตว์ทะเลประสบปัญหาเนื่องจากระบบนิเวศที่ที่เกิดการเปลี่ยนแปลงไป ธุรกิจท่องเที่ยวทางทะเลที่สำคัญจะสูญเสียรายได้ มหาศาลนอกจากนี้ ในเอเชียยังมีโอกาสร้อยละ 66-90 ที่อาจเกิดฝนกระหน่ำและมรสุมอย่างรุนแรง รวมถึงเกิดความแห้งแล้งมากกว่าปกติในฤดูร้อนที่ยาวนาน โครงการสิ่งแวดล้อมแห่งสหประชาชาติได้มีการคาดการณ์ไว้ว่า ภายใน 50 ปีข้างหน้า ระบบนิเวศวิทยาทะเลทราย จะเปลี่ยนแปลงไปทั้งด้านชีววิทยา เศรษฐกิจและวัฒนธรรม ประชากรกว่า 500 ล้านคนที่อาศัยอยู่ในเขตทะเลทรายทั่วโลกจะอยู่ไม่ได้อีกต่อไป เป็นผลเนื่องมาจากอุณหภูมิที่สูงขึ้นและน้ำที่ถูกใช้จนหมดหรือเค็มจนไม่สามารถดื่มได้

(3.) ผลกระทบด้านสุขภาพ

ภาวะโลกร้อนไม่เพียงแต่ทำให้ระบบนิเวศเปลี่ยนแปลงไปแต่มีผลเสียที่ตามมาจากปรากฏการณ์นี้ด้วยว่าโลกที่ร้อนขึ้นจะสร้างสภาวะที่เหมาะสมพอให้เชื้อโรคเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว จะก่อให้เกิด สภาพแวดล้อมที่เหมาะสมแก่การฟักตัวของเชื้อโรคและศัตรูพืช โรคที่ฟักตัวได้ดีในสภาพร้อนขึ้นของโลก จะสามารถเพิ่มขึ้นมากในอีก 20 ปีข้างหน้า ทั้งจะมีการติดเชื้อเพิ่มมากขึ้นในโรคมาลาเรีย ไข้ส่า อหิวาตกโรคและอาหารเป็นพิษ นักวิทยาศาสตร์ในที่ประชุมองค์การอนามัยโลกได้มีเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การแถลงไว้ว่า ในแต่ละปีประชาชนราว 160,000 คน เสียชีวิตเพราะได้รับผลกระทบจากภาวะโลกร้อนนี้ ตั้งแต่โรคมะเร็ง ไปจนถึงการขาดแคลนสุขอนามัยที่ดีและตัวเลขผู้เสียชีวิตนี้อาจเพิ่มขึ้นเกือบสองเท่าตัวในอีก 17 ปีข้างหน้า

2.2 ก๊าซชีวภาพ

ก๊าซชีวภาพคือก๊าซที่เกิดขึ้นจากกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ด้วยแบคทีเรียชนิดที่ไม่อาศัยออกซิเจน (Anaerobic) ซึ่งทำให้เกิดก๊าซกลุ่มนี้ขึ้นมาในระหว่างที่เกิดการย่อยสลาย กลุ่มก๊าซนี้เรียกว่า ก๊าซชีวภาพ ก๊าซชีวภาพประกอบด้วย ก๊าซมีเทน (CH_4) ที่มีอยู่ประมาณร้อยละ 60–70 ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ที่มีอยู่ประมาณร้อยละ 30–40 ส่วนที่เหลือจะเป็นก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) และก๊าซไนโตรเจน (N_2) ซึ่งก๊าซมีเทนนั้นมีคุณสมบัติติดไฟได้ดีจึงสามารถนำมาเป็นเชื้อเพลิงพลังงานทดแทนต่างๆได้ เช่น การหุงต้ม เชื้อเพลิงรถยนต์ เชื้อเพลิงในภาคอุตสาหกรรม เป็นต้น การย่อยสลายอินทรีย์วัตถุนั้นสามารถให้ก๊าซชีวภาพ แต่จะเกิดก๊าซในปริมาณที่มากน้อยเพียงใดขึ้นอยู่กับชนิดของสารอินทรีย์วัตถุที่นำมาย่อยสลาย เช่น พืชสดจะเกิดก๊าซมากกว่ามูลสัตว์ เนื่องจากมูลสัตว์มีการย่อยสลายมาบ้างแล้วจากตัวสัตว์เอง ทำให้แบคทีเรียสามารถย่อยสลายได้รวดเร็วขึ้น ดังนั้น การนำพืชสดมาใช้กระบวนการหมักเพื่อที่จะให้ได้ก๊าซชีวภาพนั้นจะต้องทำการสับหรือบดให้มีขนาดเล็กก่อนและหมักทิ้งไว้ก่อน สำหรับวัสดุที่นำมาหมัก นอกจากจะมีพืชสดและมูลสัตว์แล้วยังสามารถนำของเสียหรือน้ำเสียจากกระบวนการต่างๆมาใช้หมักได้ด้วย เช่น น้ำเสียจากโรงงานแปรงมันสำปะหลัง น้ำเสียจากฟาร์มสุกร เศษอาหารตามบ้านเรือน เป็นต้น [6]

2.2.1 องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ

- (1) ก๊าซมีเทน (CH_4) : 50-60%
- (2) ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) : 25-35%
- (3) ก๊าซไนโตรเจน (N_2) : 2-7%
- (4) ก๊าซไฮโดรเจน (H_2) : 1-5%
- (5) ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) : มีน้อย
- (6) ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) : มีน้อย
- (7) ก๊าซอื่นๆ : มีน้อย

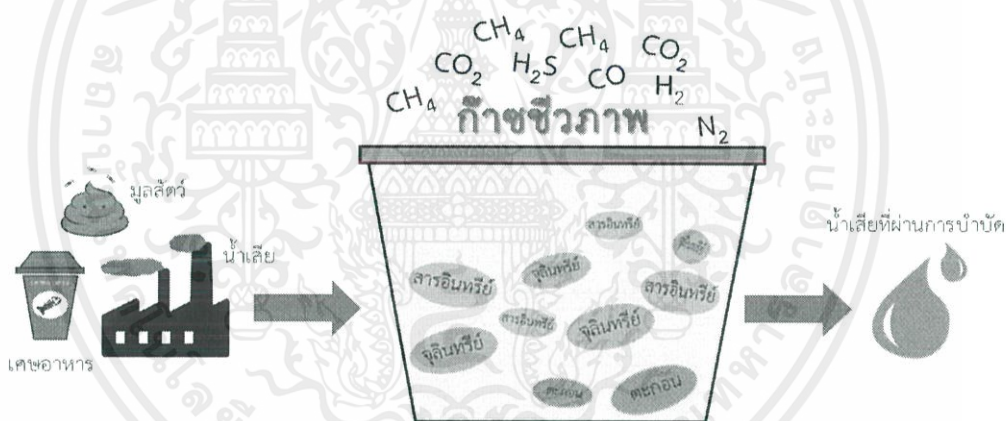
2.2.2 ประโยชน์ของก๊าซชีวภาพ

- (1) เป็นก๊าซใช้สำหรับการหุงต้มแทนเตาแก๊ส
- (2) ใช้สำหรับเป็นแสงสว่าง และให้ความร้อน
- (3) ใช้เป็นเชื้อเพลิงเครื่องยนต์ตูดน้ำ เครื่องยนต์รถยนต์
- (4) ใช้เป็นเชื้อเพลิงเพื่อให้ความร้อนสำหรับการอบแห้งผลิตภัณฑ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- (5.) ใช้เป็นเชื้อเพลิงให้ความร้อนในภาคอุตสาหกรรม เช่น หม้อไอน้ำ
 (6.) ใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับโรงงานผลิตไฟฟ้า

เพราะเหตุนี้ทำให้ก๊าซชีวภาพสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้หลายประการ นอกจากนี้ยังมีการนำก๊าซชีวภาพมาใช้ร่วมกับ Dual Fuel Engine คือ การนำก๊าซชีวภาพมาใช้ร่วมกับน้ำมัน หรืออาจจะกล่าวได้ว่าใช้ส่วนผสมของก๊าซชีวภาพและอากาศผ่านเข้าไปตามท่อผ่านไปยังกระบอกสูบ เมื่ออัดได้อุณหภูมิและความดันตามที่ต้องการแล้วก็ฉีดน้ำมันเข้าไปทำการเผาไหม้กับเครื่องยนต์ดีเซลต่างๆ จากประโยชน์ของแก๊สชีวภาพในหลายๆด้านนี้ทำให้ในปัจจุบันมีการพยายามนำมาประยุกต์ใช้ในชีวิตประจำวันให้มากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ ซึ่งกระบวนการหมักเพื่อผลิตก๊าซชีวภาพ เป็นปฏิกิริยาการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไร้ออกซิเจนโดยจุลินทรีย์หลายโดยที่กระบวนการย่อยสลายในสภาวะไร้ออกซิเจนเป็นกระบวนการหมุนเวียนคาร์บอนและธาตุอื่นๆ ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่สะอาดปลอดภัย มีการเจริญเติบโตของเซลล์น้อย ทำให้ลดการกำจัดตะกอนจุลินทรีย์ ขั้นตอนกระบวนการเกิดก๊าซชีวภาพ มีดังนี้



รูปที่ 2.1 กระบวนการเกิดก๊าซชีวภาพ

2.2.3 กระบวนการเกิดก๊าซชีวภาพ

- (1.) การย่อยสลายในสภาวะไร้ออกซิเจน (Anaerobic Digestion)

การย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไร้ออกซิเจนเป็นกระบวนการเปลี่ยนสารอินทรีย์เป็นก๊าซชีวภาพ ในสภาวะที่ไม่มีออกซิเจน ดังสมการที่ (2.1)



- (1.1) ปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดโดยประมาณจากทฤษฎี

- (1.1.1) คาร์โบไฮเดรต เกิดก๊าซมีเทน 50% คาร์บอนไดออกไซด์ 50%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(1.1.2) โปรตีน เกิดก๊าซมีเทน 70-71% คาร์บอนไดออกไซด์ 29-30%

(1.1.3) ไขมัน เกิดก๊าซมีเทน 67-68% คาร์บอนไดออกไซด์ 32-33%

(1.2) กระบวนการเกิดการย่อยสลาย

(1.2.1) กระบวนการเกิดย่อยสลายสารอินทรีย์ (Hydrolysis)

เป็นการย่อยสารโมเลกุลที่มีขนาดใหญ่ให้มีขนาดที่เล็กลงเพื่อเปลี่ยนไปเป็นกรดอะซิติก กรดโพทิโอนิกและเอทานอล เช่น โปรตีน ไขมัน และคาร์โบไฮเดรต โดยการเกิดขึ้นของปฏิกิริยานี้จะมีปัจจัยหลายอย่าง จะขึ้นอยู่กับสารอินทรีย์ที่มีความเข้มข้นมากหรือน้อย ความเป็นกรดต่าง อุณหภูมิ จำนวนแบคทีเรียที่ใช้ในการย่อยสลาย เป็นต้น ดังสมการที่ (2.2) , (2.3) , (2.4)



(1.2.2) การหมักกรดของสารอินทรีย์

กรดอะซิติกและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากกระบวนการนี้เกิดจากการหมักกรดของสารอินทรีย์ต่างๆ เช่น ไฮโดรเจนและกรดอะซิติกที่เกิดจากการเปลี่ยนแอลกอฮอล์และสารอินทรีย์

(1.2.3) การสร้างมีเทน (Methanogenesis)

เป็นขั้นสุดท้ายของกระบวนการย่อยสลาย โดยจุลินทรีย์จะย่อยอะซิเตตฟอร์เมตเป็นก๊าซมีเทน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซไฮโดรเจนบางส่วน โดยปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นทั้งหมดจะมาจากกระบวนการนี้ปฏิกิริยาอื่นๆที่เกิดขึ้นได้แก่ปฏิกิริยารีดักชันของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซมีเทนบางส่วนสามารถเกิดได้จากปฏิกิริยาการแตกตัวของกรดอะซิติก ได้ก๊าซมีเทนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ดังสมการที่ (2.5)



รวมถึงปฏิกิริยารีดักชันก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์กับก๊าซไฮโดรเจนไปเป็นก๊าซมีเทน ดังสมการที่ (2.6)

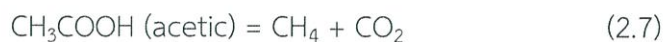


(2.) การเกิดมีเทนจากสับสเตรท

ปฏิกิริยาการเกิดมีเทน แบ่งออกเป็น 3 ปฏิกิริยา คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(2.1) การเกิดมีเทนจากกระบวนการ Decarboxylation ของกรดอินทรีย์ระเหยง่าย กรดอินทรีย์ระเหยง่ายทุกชนิดจะถูกย่อยสลายเป็นกรดอะซิติกแล้วเปลี่ยนเป็นมีเทน ดังสมการที่ (2.7)



โดย 1 โมลของกรดอะซิติกจะได้ 1 โมลของมีเทน และคาร์บอนไดออกไซด์ 1 โมล การย่อยสลายกรดโพรพิโอนิกไปเป็นกรดอะซิติกและมีเทนแต่กรดโพรพิโอนิกมีความสามารถยับยั้งการทำงานของจุลินทรีย์ทั้งชนิดเมทาโนจีนิก (Methanogenic) และ เฟอเมนเททีฟ (Fermentative Bacteria)

(2.2) การเกิดมีเทนจากคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจน การเกิดมีเทนจากสารเหล่านี้ แสดงดังสมการที่ (2.8)



(2.3) การเกิดมีเทนจากสารประกอบอินทรีย์เชิงเดี่ยวอื่นๆ การเกิดมีเทนของรูปแบบนี้เกิดจากสารอินทรีย์เชิงเดี่ยวอื่นๆ ยกตัวอย่าง เช่น Methanol ดังสมการที่ (2.9)



2.3 ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

ก๊าซเรือนกระจกหากมีอยู่ในชั้นบรรยากาศในปริมาณที่มากเกินไปจนความสมดุลไปมันจะไปสะสมอยู่ในชั้นบรรยากาศเป็นเวลาหลายปี อาทิ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์(CO_2) ก๊าซมีเทน(CH_4) ก๊าซไนตรัสออกไซด์ (NO_2) และก๊าซคลอโรฟลูออโรคาร์บอน(CFC) เป็นต้น โดยก๊าซที่กล่าวมาข้างต้นนี้ถือเป็นก๊าซที่เป็นตัวการหลักที่ทำให้เกิดภาวะเรือนกระจกขึ้นเนื่องจากการสะสมอยู่ในชั้นบรรยากาศที่ยาวนานและยังสามารถดูดกลืนรังสีและความร้อนได้ดีอีกด้วย [7]

2.3.1 แหล่งกำเนิดของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

การหมุนเวียนของคาร์บอนไดออกไซด์นำไปสู่การเกิดของวัฏจักรคาร์บอนเริ่มต้นจากการที่มีสถานะเป็นก๊าซในชั้นบรรยากาศ การละลายในน้ำ การตรึง และเปลี่ยนรูปในพืชและสัตว์ พร้อมกับมีการปล่อยออกมาจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง การย่อยสลายของซากพืชซากสัตว์และจากการสลายตัวของหินกลับเป็นคาร์บอนไดออกไซด์กลับขึ้นสู่ชั้นอากาศ เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.2 องค์ประกอบของวัฏจักรคาร์บอน

วัฏจักรคาร์บอนสามารถแบ่งออกได้หลักๆ 4 แหล่ง คือ [8]

(1.) คาร์บอนในอากาศ ซึ่งแบ่งได้เป็น 4 กระบวนการคือ

(1.1) การหายใจของพืชและสัตว์ เมื่อสัตว์และพืชมีการเจริญเติบโตจึงต้องการพลังงานเพื่อใช้ในการเผาผลาญอาหาร โดยต้องการออกซิเจนจากการหายใจเข้าไปช่วยในกระบวนการและการแลกเปลี่ยนคาร์บอนไดออกไซด์ทางลมหายใจกลับออกสู่อากาศ การแลกเปลี่ยนก๊าซนั้นจะเกิดขึ้นบริเวณปอดซึ่งมีเส้นเลือดฝอยจำนวนมาก

(1.2) กระบวนการเผาไหม้จากเชื้อเพลิง กระบวนการเผาไหม้เชื้อเพลิงทั้งในภาคอุตสาหกรรม ภาคขนส่งและภาคครัวเรือน โดยส่วนมากแล้วจะมีสารประกอบคาร์บอนเป็นหลัก เช่น น้ำมันดีเซล น้ำมันเบนซิน ก๊าซ LPG ไม้ ถ่าน ผืน เป็นต้น เมื่อมีการเผาไหม้เชื้อเพลิงเหล่านี้จะส่งผลให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ จากการรวมตัวกันของตัวคาร์บอน (C) ที่อยู่ในเชื้อเพลิง และออกซิเจน (O_2) ในอากาศแล้ว ดังสมการที่ (2.12)



(1.3) การย่อยสลายอินทรีย์วัตถุ สารประกอบคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลักที่มีอยู่ในการย่อยสลายและจะปลดปล่อยสู่บรรยากาศจากกระบวนการย่อยสลายของจุลินทรีย์ แบ่งเป็นสองแบบ คือ การย่อยสลายทางชีวเคมีและการย่อยสลายทางกายภาพ

(1.4) การเปลี่ยนแปลงชั้นเปลือกโลกการเปลี่ยนแปลงของเปลือกโลกส่งผลให้เกิดการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกสู่บรรยากาศ โดยภูเขาไฟระเบิดนั้นเป็นส่วนมากที่ปลดปล่อยก๊าซออกมา รองลงมาเป็นการปลดปล่อยจากแหล่งก๊าซในชั้นดิน ชั้นหินของเปลือกโลกจากการแยกตัวหรือเกิดรอยแตกเป็นช่องว่าง

(2.) คาร์บอนในน้ำ

(2.1) การละลายในน้ำจืดและน้ำทะเล ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศสามารถที่จะละลายในน้ำจืด และน้ำทะเลได้ โดยปริมาณความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศและอุณหภูมิของน้ำจะส่งผลต่อความสามารถในการละลายน้ำนอกจากนั้นการหายใจของพืช น้ำ และสัตว์น้ำมีการปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ออกมาเช่นกัน บางส่วนจะละลายน้ำ บางส่วนจะถูกปลดปล่อยออกสู่บรรยากาศ การสะสมของคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำจะมีกลไกการควบคุมด้วยการตกตะกอนลงสู่ท้องน้ำลึกเพื่อลดความเข้มข้นให้น้อยลง โดยเมื่อละลายจะอยู่ในรูปของกรดคาร์บอนิกดังสมการที่ (2.13)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(3.) คาร์บอนในดิน

(3.1) กระบวนการย่อยสลายอินทรีย์วัตถุและอินทรีย์วัตถุ

การย่อยสลายอินทรีย์วัตถุบนบกมาจากการย่อยสลายซากพืชซากสัตว์ที่มีอยู่บนผิวดิน หรือในดินด้วย จุลินทรีย์ ทั้งในรูปแบบการใช้ออกซิเจนและไม่ใช้ออกซิเจน คาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นนั้นบางส่วนจะถูกปล่อยกลับสู่อากาศ บางส่วนจะถูกยึดแทรกตัวอยู่ระหว่างอนุภาคของดินเหนียว

(3.2) การทับถมในรูปฟอสซิล

เมื่อพืชและสัตว์ตายจะเกิดการทับถมของซากพืชซากสัตว์ซึ่งมีองค์ประกอบเป็นคาร์บอนสะสมอยู่ด้วย เมื่อเกิดการทับถมเวลานานภายใต้อุณหภูมิและแรงกดของพื้นโลกจะเปลี่ยนรูปคาร์บอนให้อยู่ในรูปอื่น ได้แก่ ถ่านหิน น้ำมันและแก๊ส ซึ่งสารจำเหล่านี้มีคุณสมบัติเผาไหม้เป็นเชื้อเพลิงได้อย่างดี เมื่อมีการเผาไหม้จะเกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์กลับเข้าสู่บรรยากาศอีกครั้ง

(3.3) คาร์บอนในหินและแร่

หินและแร่หลายชนิดมีองค์ประกอบของคาร์บอนไดออกไซด์รวมอยู่ด้วย เช่น หินปูน นอกจากนี้ คาร์บอนไดออกไซด์บางส่วนอาจรวมตัวแทรกอยู่ระหว่างช่องว่างของหินและจะถูกปลดปล่อยออกมาเมื่อชั้นหินมีรอยแตก

(4.) คาร์บอนในสิ่งมีชีวิต

(4.1) แหล่งปฐมภูมิ

แหล่งที่มีการใช้และผลิตคาร์บอนไดออกไซด์ในลำดับแรกที่สำคัญ คือ พืชทุกชนิด ทั้งพืชบนบกและพืชน้ำ ผ่านกระบวนการสังเคราะห์แสง และตรึงคาร์บอนเอาไว้ในรูปของสารอินทรีย์

(4.2) แหล่งทุติยภูมิ

แหล่งกักเก็บคาร์บอน ทุติยภูมิ ได้แก่ สัตว์กินพืชกินเนื้อทุกชนิดรวมทั้งมนุษย์ด้วย ซึ่งเป็นผู้ใช้ประโยชน์จากแหล่งกักเก็บคาร์บอนปฐมภูมิในรูปแบบของแหล่งอาหาร เป็นลำดับขั้นของการบริโภค การปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ของสิ่งมีชีวิตจะเกิดจากกระบวนการหายใจเป็นหลัก

2.4 การดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

จากปัญหาภาวะโลกร้อนที่ทวีความรุนแรงมากในปัจจุบันที่ส่งผลมาจากการเพิ่มขึ้นของปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เพิ่มขึ้น ทำให้การกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งเป็นตัวปัญหานี้เป็นสิ่งที่สำคัญเป็นอย่างมาก สำหรับกระบวนการในการแยกและดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์หรือไม่ว่าจะเป็นโมเลกุลของแก๊สต่าง ๆ นั้น โดยทั่วไปแล้วจะใช้เทคนิคต่างๆ ในการคัดแยกซึ่งในแต่ละเทคนิคนั้นมีประสิทธิภาพที่แตกต่างกันและมีข้อดีข้อเสียที่แตกต่างกันในคนละแบบ โดยเทคนิคที่ใช้ในการแยกก๊าซโดยทั่วไป ได้แก่ [9]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.1 การดักจับด้วยน้ำ (Water scrubbing)

การดักจับด้วยน้ำ หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าระบบบำบัดอากาศเปียก เป็นเทคนิคการแยกก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากกระแสก๊าซด้วยการสัมผัสกันโดยตรงของก๊าซและน้ำ โดยจะมีการให้น้ำในทิศทางที่สวนทางกับทิศทางการไหลของอากาศ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่สัมผัสกับน้ำจะละลายเข้าไปในน้ำได้โดยตรง วิธีการนี้มีข้อดีคือสามารถดักจับได้ทั้งก๊าซ ผุ่น คิววันและกลิ่น อีกทั้งยังมีราคาที่ถูกและง่าย แต่มีข้อเสียตรงที่ น้ำที่ผ่านการดักจับก๊าซหรือผุ่นคิววันมาแล้วจะเป็นน้ำเสียต้องนำไปผ่านการบำบัดก่อนจึงจะสามารถปล่อยทิ้งลงสู่รางระบายน้ำสาธารณะได้

2.4.2 การดูดซึมด้วยสารละลายเอมีน (Amine Absorption Process)

เป็นกระบวนการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางในภาคอุตสาหกรรมที่มีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากกระบวนการ เช่น อุตสาหกรรมที่มีการเผาไหม้เชื้อเพลิงต่างๆ โดยสารละลายเอมีนที่เป็นที่นิยมที่นำมาใช้ในกระบวนการดังกล่าวคือ Monoethanolamine (MEA ; $(\text{CH}_2\text{CH}_2\text{OH})\text{NH}_2$) Diethanolamine (DEA ; $(\text{CH}_2\text{CH}_2\text{OH})_2\text{NH}$) และ Methyl Diglycolamine (DGA) จุดเด่นของกระบวนการนี้คือสามารถนำสารละลายเอมีนนำกลับมาใช้ใหม่ได้ แต่มีข้อเสียคือสารละลายเอมีนค่อนข้างแพง

2.4.3 การแยกด้วยเยื่อเลือกผ่าน (Membrane Separation)

เป็นกระบวนการแยกก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยการบ่อนก๊าซผสมที่บริเวณด้านหนึ่งของเมมเบรน มีการควบคุมความดันไว้ที่ค่าหนึ่ง (P_1) ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกบ่อนเข้าไปจะเคลื่อนที่ผ่านเมมเบรนไปยังอีกด้านหนึ่งซึ่งควบคุมความดันไว้ที่ค่าหนึ่งที่แตกต่างกัน (P_2) ส่งผลให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซอื่นๆสามารถแยกออกจากกันได้อย่างค่อนข้างที่จะสมบูรณ์ โดยเทคนิคนี้นิยมนำมาใช้ปรับปรุงคุณภาพก๊าซชีวภาพ

2.4.4 การดูดซับด้วยของแข็งโดยใช้ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon)

เป็นกระบวนการดูดซับโดยใช้ของแข็งเป็นตัวดูดซับ มีหลักการ คือ การแพร่ของโมเลกุลก๊าซไปยังบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ หลังจากนั้นโมเลกุลก๊าซที่อยู่บริเวณพื้นผิวถ่านกัมมันต์จะเคลื่อนที่เข้าไปในรูพรุนของถ่านกัมมันต์ โมเลกุลของก๊าซที่เข้าไปในรูพรุนจะถูกยึดเหนี่ยวไว้ในรูพรุนด้วยแรงอ่อนๆ โดยเรียงตัวซ้อนทับกันไปเป็นชั้นๆ การดูดซับด้วยของแข็งแบ่งออกเป็น 2 วิธี คือ

(1.) การดูดซับโดยการเปลี่ยนความดัน (Pressure swing absorption ; PSA)

การดูดซับสารจะเกิดขึ้นระหว่างที่มีการเปลี่ยนความดันของก๊าซ โดยที่จะดูดซับสารที่ความดันของก๊าซสูงๆไว้บนพื้นผิวถ่านกัมมันต์ มีการคายสารที่ดูดซับไว้ออกมาเมื่อมีความดันของก๊าซต่ำๆหรือที่ความดันสูญญากาศ ซึ่งวิธีการดูดซับแบบนี้เหมาะกับสภาพที่มีความเป็นไอที่ความดันบรรยากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(2.) การดูดซับโดยการเปลี่ยนอุณหภูมิ (Temperature swing absorption ; TSA)

การดูดซับสารจะเกิดขึ้นในระหว่างช่วงที่มีอุณหภูมิต่ำและจะคายสารที่ดูดซับเอาไว้ออกมาในช่วงที่มีอุณหภูมิสูงๆ ซึ่งการดูดซับแบบนี้มีข้อเสียคือ ต้องใช้พลังงานที่สูงมากในการคายซับสารที่ถูกดูดซับเอาไว้

2.5 ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon)

2.5.1 ลักษณะทั่วไปของถ่านกัมมันต์ [10]

ถ่านกัมมันต์ หรือคาร์บอนกัมมันต์ (Activated carbon หรือ Activated charcoal) เป็นสารคาร์บอนที่มีโครงสร้างรูพรุนและพื้นผิวจำเพาะภายในสูงซึ่งจะประกอบด้วยธาตุคาร์บอนเป็นหลัก (ร้อยละ 87 ถึง 97) และมีธาตุอื่นเป็นองค์ประกอบอยู่บ้าง เช่น ออกซิเจน ไฮโดรเจน กำมะถันและไนโตรเจน นอกจากนี้ยังมีสารประกอบต่างๆ ที่มีอยู่เดิมในวัตถุดิบตั้งต้นที่ใช้ในการผลิตหรือสารที่เติมเข้าไประหว่างกระบวนการผลิต โดยถ่านกัมมันต์จะมีแร่ธาตุที่ไร้ประโยชน์เป็นองค์ประกอบร้อยละ 1 ถึง 20 ซึ่งสารเหล่านี้ปกติจะถูกกำจัดออกและอยู่ในรูปของเถ้าประมาณร้อยละ 0.1-0.2 ถ่านกัมมันต์มีความสามารถในการดูดซับสารต่างๆ โดยจะกักเก็บโมเลกุลที่พื้นผิวได้ จึงทำให้ถ่านกัมมันต์เป็นตัวดูดซับที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย

2.5.2 วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์ [11]

วัสดุของแข็งที่มีองค์ประกอบของคาร์บอนสามารถเปลี่ยนไปเป็นถ่านกัมมันต์ได้ เช่น ชีวมวล เซลลูโลส พืช ลิกไนต์และถ่านหิน เป็นต้น ในทางการค้าถ่านกัมมันต์เป็นสารดูดซับสำหรับการกำจัดโมเลกุลสารมลพิษขนาดเล็กจากของเหลวและก๊าซ การผลิตถ่านกัมมันต์จากวัตถุดิบธรรมชาตินั้นมีราคาถูก เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ซึ่งเป็นทางเลือกที่ดีสำหรับทางเคมีวัสดุในปัจจุบันโดยจะมุ่งไปที่ชีวมวล เช่น แกลบข้าว ซึ่งได้สารคาร์บอนที่มีราคาถูกและยั่งยืน มีโครงสร้างนาโนของซิลิกา มีกลไกการผลิตที่รวดเร็วและมีความจุในการดูดซับที่เหมาะสมสามารถนำมาฟื้นฟูสภาพใหม่ได้และนำไปใช้ประโยชน์ได้อย่างกว้างขวาง ตัวอย่างการนำไปใช้ประโยชน์ได้แก่ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เป็นขั้วไฟฟ้า ตัวเก็บประจุและการกักเก็บก๊าซ นอกจากนี้วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรหรือผลพลอยได้ทางการเกษตรอีกมากมายที่เป็นวัตถุดิบตั้งต้นสำหรับใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์ ซึ่งเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับชีวมวลที่เป็นของเหลือทิ้ง เช่น เมล็ดพุทรา ไม้สน กะลามะพร้าว เมล็ดลำไย กากน้ำเต้าหู้ เป็นต้น สำหรับของเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมซึ่งมีเป็นจำนวนมากและราคาถูก สามารถนำไปผลิตถ่านกัมมันต์ในระดับทางการค้าได้ นอกจากนี้ยังเป็นการรักษาสิ่งแวดล้อมและกำจัดมลพิษและเป็นการนำของเหลือทิ้งจากโรงงานมาใช้ให้เป็นประโยชน์ต่อโรงงานเองในกระบวนการทางชีวภาพและในปฏิกรณ์ชีวภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชั้นลอยตัวสำหรับกระบวนการสลายทางชีวภาพในระบบบำบัดน้ำเสีย เช่น ของเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมไม้ที่เป็นขี้เลื่อยไม้ยาง ของเหลือทิ้งจากโรงงานน้ำมันปาล์ม กากตะกอนโรงงานกระดาษ ไยชีวมวลเกรดต่ำ ของเหลือทิ้งจากการผลิตไบโอดีเซล เป็นต้น การผลิตถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวสูงจากวัตถุดิบชีวมวลสามารถทำได้ทั้งโดยการกระตุ้นทางกายภาพและทางเคมีหรือทั้งสองทางร่วมกัน เพื่อเพิ่มสมบัติพื้นที่ผิวของตัวดูดซับจะส่งผลให้ความจุในการดูดซับสูงขึ้น โดยในการพิจารณาถึงกระบวนการกระตุ้นจะคำนึงถึงวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตคาร์บอนและการกำจัดสารที่ไม่ใช่คาร์บอนเป็นหลัก ซึ่งวัสดุชีวมวลที่นิยมนำมาใช้จะจะมีปริมาณคาร์บอนสูง ปริมาณเถ้าต่ำและเป็นวัตถุดิบที่มีความหนาแน่นหรือมีความแข็งแรงเชิงกลสูง มีโครงสร้างรูพรุนภายในสูงมาก

2.5.3 ชนิดของถ่านกัมมันต์

ในการแบ่งชนิดของถ่านกัมมันต์ได้มีการแบ่งตามเกณฑ์หลายแบบ ได้แก่ แบ่งตามการใช้ประโยชน์ หรือแบ่งตามคุณสมบัติของเนื้อมวล เช่น ขนาดอนุภาค ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็นถ่านกัมมันต์ผง (Powdered activated carbons) และถ่านกัมมันต์เกล็ด (Granular activated carbons) โดยถ่านกัมมันต์ทั้งสองชนิดที่กล่าวไปจะนำไปใช้ในระบบที่เกี่ยวข้องกับการบำบัด เช่น ในระบบเบตนิ่ง (Fixed bed) จะใช้ถ่านกัมมันต์เกล็ด สำหรับการกำจัดมลพิษในก๊าซหรือน้ำ แต่ถ่านกัมมันต์เกล็ดก็ทำให้เกิดการลดความดันในระบบด้วย นอกจากนี้อาจแบ่งชนิดของถ่านกัมมันต์จากรูปร่าง เช่น ไยถ่านกัมมันต์ (Activated carbon fibers) และถ่านกัมมันต์รูปร่างจำเพาะต่างๆ เป็นต้น [12]

(1.) ถ่านกัมมันต์ผง

ถ่านกัมมันต์ผง (Powdered activated carbons) มีขนาดอนุภาคน้อยกว่า 100 ไมครอน โดยส่วนใหญ่จะมีขนาดประมาณ 15-25 ไมครอน โดยปริมาณถ่านกัมมันต์ทั้งหมดที่ผลิตได้ร้อยละ 50 เป็นชนิดผงและปกติถ่านกัมมันต์ชนิดนี้มีการใช้ร่วมกับถ่านกัมมันต์เกล็ด สำหรับในกรณีที่สารละลายมีปัญหาการแพร่กระจายของสารปนเปื้อนจากสารละลายไปบริเวณรูพรุนดูดซับและเพื่อให้เข้าสู่สมดุลง่ายได้เร็วขึ้นจะใช้ถ่านกัมมันต์ผงบำบัดสารในวัฏภาคของเหลวในภาชนะแบบไม่ต่อเนื่องด้วยการกวน ชนิดและปริมาณของคาร์บอนและเวลาที่ใช้ในการกำจัดสารปนเปื้อนเป็นสิ่งที่จะต้องพิจารณาในการทำของเหลวให้บริสุทธิ์ ซึ่งประสิทธิภาพในการบำบัดอาจทำได้โดยการให้คาร์บอนแขวนลอยไหลผ่านในหลายขั้นตอน จากนั้นจะแยกออกมาโดยการปล่อยให้ตกตะกอนหรือกรอง สำหรับการใส่ถ่านกัมมันต์ผงในการบำบัดก๊าซปกติจะเติมลงไปใ้ในโอแก๊สที่ไหลด้วยความเร็วสูงที่มีการกระจายตัวของถ่านกัมมันต์อย่างทั่วถึงจากนั้นจะทำการกรองด้วยแผ่นกรองหรือตัวช่วยตกตะกอนทางไฟฟ้าสถิต

(2.) ถ่านกัมมันต์เกล็ด

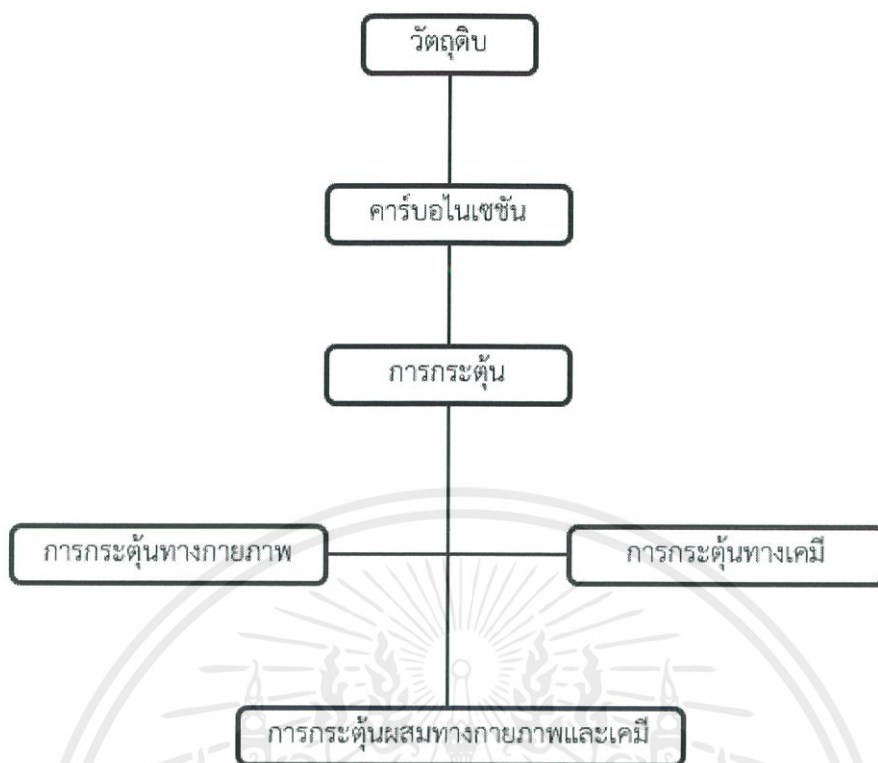
ถ่านกัมมันต์เกล็ด (Granular activated carbons) มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 1-5 มิลลิเมตร ปกติใช้เป็นสารดูดซับในระบบเบตต์ต่อเนื่อง (Fixed bed continuous processes) โดยสามารถใช้ในทั้งวัฏภาคของเหลวและก๊าซ โดยส่วนใหญ่จะใช้ในวัฏภาคก๊าซ เช่น การทำให้อากาศบริสุทธิ์ การนำกลับมาใช้ใหม่ของตัวทำละลาย การกรองอากาศ ใช้เป็นสารกรองในหน้ากากในการแยกก๊าซ รวมทั้งใช้แทนถ่านคาร์บอนกัมมันต์ผงในวัฏภาคของเหลว เช่น การกำจัดสารอินทรีย์ธรรมชาติในน้ำสำหรับการผลิตน้ำดื่ม

(3.) โยถ่านกัมมันต์

ได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีทางอุตสาหกรรมอย่างต่อเนื่องจึงทำให้พบชนิดของถ่านกัมมันต์ใหม่ๆ เกิดขึ้น หนึ่งในนั้นคือเส้นโยถ่านกัมมันต์ (Activated carbon fibers) ซึ่งเป็นเส้นใยคาร์บอนแล้วถูกออกซิไดซ์ในบรรยากาศที่ความร้อนสูง โดยเริ่มมีการผลิตตั้งแต่ปี ค.ศ. 1970 การผลิตโยถ่านกัมมันต์มีทั้งการกระตุ้นทางกายภาพและเคมีซึ่งจะได้โยถ่านกัมมันต์ที่มีสมบัติแตกต่างกัน เช่น การผลิตโยถ่านกัมมันต์จากใยปาล์มโดยการกระตุ้นด้วยสังกะสีคลอไรด์กับกรดฟอสฟอริกและกระตุ้นทางกายภาพด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์กับไอน้ำ เป็นต้น

2.5.4 การผลิตถ่านกัมมันต์

การผลิตถ่านกัมมันต์มีได้หลากหลายวิธีโดยสามารถแบ่งได้เป็นสองวิธีหลัก คือ การกระตุ้นทางกายภาพหรือการกระตุ้นทางความร้อน (Physical activation หรือ Thermal activation) ซึ่งประกอบด้วยกรกำจัดสารระเหยด้วยความร้อน (Thermal devolatilization) ตามกระบวนการแปรสภาพเป็นก๊าซของถ่าน (Char gasification) ด้วยสารออกซิไดซ์ (Oxidizing agent) และการกระตุ้นทางเคมี (Chemical activation) ซึ่งประกอบด้วยกระบวนการทำให้เกิดถ่านของวัตถุดิบในสถานะเฉื่อย ตามด้วยการกระตุ้นด้วยสารเคมี [13]



รูปที่ 2.2 ลำดับการผลิตคาร์บอนกัมมันต์

(1.) การเตรียมวัตถุดิบ

การเตรียมวัตถุดิบในการผลิตถ่านกัมมันต์ผงและถ่านกัมมันต์เกล็ดโดยการบดย่อยวัตถุดิบตั้งต้นให้มีขนาดอนุภาคตามต้องการ โดยปกติจะใช้กับวัตถุดิบตั้งต้นที่มีสารระเหยต่ำ เช่น ถ่านหิน บางครั้งมีการเพิ่มขั้นตอนการล้างด้วยน้ำหรือกรดเพื่อกำจัดสิ่งสกปรกและลดปริมาณแร่ธาตุที่มีอยู่ในวัตถุดิบขั้นต้นก่อน การเกิดรูพรุนขนาดกลาง (Mesopore) และรูพรุนขนาดใหญ่ (Macropore) จะไม่เกิดขึ้นในขั้นตอนคาร์บอนในเซชันจึงทำให้สารกระตุ้นกระจายไปในเนื้อสารวัตถุดิบตั้งต้นได้น้อย เนื่องจากจะกระจายได้แค่บริเวณพื้นผิว ในขั้นการกระตุ้นถ้าต้องการคาร์บอนกัมมันต์ที่มีรูพรุนภายในเกิดขึ้นมากซึ่งอาจมีการเตรียมวัตถุดิบที่แตกต่างกันแล้วแต่ลักษณะของวัตถุดิบตั้งต้น ซึ่งสภาพรูพรุนของถ่านกัมมันต์ที่ได้สัมพันธ์กับองค์ประกอบลิกโนเซลลูโลสของวัตถุดิบเป็นอย่างมาก

(2.) การคาร์บอนในเซชัน

การคาร์บอนในเซชันหรือการผลิตถ่านเป็นขั้นตอนสำคัญที่สุดสำหรับการเตรียมถ่านกัมมันต์ เพราะระหว่างขั้นตอนจะเกิดรูพรุนขนาดเล็กมากขึ้นอาจใช้คำว่าไพโรไลซิส (Pyrolysis) กับการคาร์บอนในเซชัน ใช้ในความหมายที่ไม่แตกต่างกันและทั้งสองกระบวนการเกือบเหมือนกันแต่มีจุดมุ่งหมายที่ต่างกันโดยทั้งสองกระบวนการนี้หมายถึงการสลายตัวเชิงความร้อน (Thermal degradation) เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของสารจำพวกคาร์บอนในบรรยากาศเฉื่อย เช่น ถ่านหิน ลิกไนต์ ไม้ พอลิเมอร์ เป็นต้น ทำให้สารระเหยง่ายถูกกำจัดออกไปจากเนื้อวัสดุตั้งต้นที่ใช้ ในกระบวนการคาร์บอนเซชัน (ไพโรไลซิส) วัสดุประเภทคาร์บอนหรือสารชีวมวลตั้งต้นจะมีการสลายตัวของโมเลกุลระเหยง่ายในระหว่างการให้ความร้อน ได้ผลิตภัณฑ์เป็นสองส่วนได้แก่ ส่วนที่เป็นก๊าซ ประกอบด้วยก๊าซไฮโดรเจนปริมาณมาก สารประกอบไฮโดรคาร์บอนโมเลกุลเบาและน้ำมันดิน ส่วนที่เป็นของแข็งที่มีปริมาณคาร์บอนสูง เรียกว่าถ่าน หลังจากกระบวนการคาร์บอนเซชันปริมาณสารระเหยง่ายลดลงไปอย่างมากโดยปริมาณคาร์บอนคงตัวในถ่านกัมมันต์จะเพิ่มขึ้นอย่างมากเกิดจากน้ำและสารอินทรีย์ส่วนใหญ่สลายและถูกขับออกเป็นก๊าซและน้ำมันดินของเหลวพร้อมกับได้คาร์บอนที่มีปริมาณสูงขึ้น

2.5.5 สมบัติของถ่านกัมมันต์

สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของถ่านกัมมันต์เป็นปัจจัยสำคัญสำหรับการเป็นสารดูดซับที่แสดงถึงคุณภาพของถ่านกัมมันต์สำหรับการนำไปใช้ในวัสดุประสงค์ต่างๆ โดยต้องพิจารณาลักษณะที่เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้ที่ต่างกัน สมบัติที่สำคัญทางกายภาพได้แก่ พื้นที่ผิว ความหนาแน่น ขนาดอนุภาคและความต้านทานการสึก ส่วนสมบัติทางการดูดซับเป็นตัวชี้วัดที่สำคัญของศักยภาพการใช้งานของคาร์บอนสำหรับการกำจัดสารปนเปื้อนในแหล่งน้ำ ลักษณะสำคัญที่จะกำหนดความสามารถของคาร์บอนในการดูดซับคือการกระจายขนาดอนุภาค (Pore size distribution) และ ความจุการดูดซับ (Adsorptive capacity) ซึ่งใช้ในการเปรียบเทียบการวัดประสิทธิภาพการดูดซับด้วยสารประกอบมาตรฐานหลายชนิด สำหรับประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์ที่เป็นตัวดูดซับที่ดีจะต้องมีสมบัติ คือ พื้นที่ผิวสูง ระดับความว่องไวของปฏิกิริยาต่อพื้นที่ผิวสูง สามารถดูดซับสารได้ทั่วไปและมีขนาดรูพรุนเหมาะสม ส่วนสมบัติทางเคมีของถ่านกัมมันต์มีความสำคัญอย่างมากต่อการดูดซับ เช่นเดียวกัน การมีอะตอมต่างๆที่นอกเหนือจากคาร์บอน เช่น ออกซิเจน ไนโตรเจน ไฮโดรเจน กำมะถัน เป็นต้น ทำให้เกิดหมู่พื้นผิวคาร์บอน ได้แก่ หมู่ฟังก์ชันพื้นผิวที่มีออกซิเจน หมู่ฟังก์ชันพื้นผิวที่มีไนโตรเจน หมู่ฟังก์ชันพื้นผิวที่มีกำมะถันและหมู่ฟังก์ชันพื้นผิวที่มีฟอสฟอรัส โดยลักษณะและปริมาณของหมู่พื้นผิวต่างๆที่เกิดขึ้นเป็นผลจากการให้ความร้อนและการกระตุ้นด้วยวิธีต่างๆกัน [14]

(1.) สมบัติทางกายภาพของถ่านกัมมันต์

(1.1) ความหนาแน่น

ความหนาแน่นของคาร์บอน เป็นน้ำหนักของคาร์บอนต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรแสดงในหน่วยปอนด์ต่อลูกบาศก์ฟุตหรือกิโลกรัมต่อลิตร ซึ่งความหนาแน่นเป็นตัวชี้วัดถึงคุณภาพของถ่านกัมมันต์ โดยถ่านกัมมันต์ที่มีความหนาแน่นสูงกว่าจะมีความจุการดูดซับสูงกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(1.2) ความแข็ง

ความแข็งเชิงกล (ประกอบด้วย ความต้านทานการสึก ความทนต่อแรงกระแทกและความต้านทานต่อการแตกหัก) ใช้สำหรับการประมาณความต้านทานต่อการสึกและการขีดสีในระหว่างการดูดซับ เป็นปัจจัยสำคัญในการพิจารณาการสูญเสียระหว่างการขนส่ง การใช้และการฟื้นฟูสภาพซึ่งขึ้นกับความหนาแน่นหรือความแข็งของวัสดุตั้งต้น

(1.3) ขนาดอนุภาค

ขนาดอนุภาค (Particle size) เป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อจลนพลศาสตร์การดูดซับและลักษณะการไหล โดยมีผลต่อการต้านการไหลภายในระบบ ขนาดอนุภาคเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญต่อคาร์บอนที่ใช้งานเฉพาะ ซึ่งมีผลต่อความสามารถในการกรอง อัตราการล้างกลับ อัตราการดูดซับสารปนเปื้อนและความดันในระบบ

(1.4) การกระจายขนาดอนุภาค

การกระจายขนาดอนุภาค (Pore size distribution) ของถ่านกัมมันต์มีผลต่อระบบการกรองหรือการดูดซับ โดยถ่านกัมมันต์ที่มีการกระจายขนาดอนุภาคหรือมีขนาดอนุภาคหลากหลายกว่าจะทำให้สารที่ถูกดูดซับเข้าถึงพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ที่ทำหน้าที่เป็นตัวดูดซับได้ดีกว่าและมีอัตราการดูดซับที่ไวขึ้น

(1.5) โครงสร้างรูพรุน

โครงสร้างของคาร์บอนเป็นของผลสมผลึกคล้ายแกรไฟต์กับโครงสร้างที่ไม่เป็นระเบียบที่ประกอบด้วยอะโรมาติก-อะลิฟาติก โดยในส่วนของผลึกประกอบด้วยระนาบของชั้นแกรไฟต์ที่ขนานกัน มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 2×10^{-9} m ทิศทางที่เป็นระเบียบของพื้นระนาบคาร์บอนบนพื้นผิวของผลึกจะถูกรบกวนในระหว่างกระบวนการกระตุ้นทำให้เกิดการจัดเรียงตัวที่ไม่เป็นระเบียบ ซึ่งช่องว่างที่เกิดขึ้นระหว่างการกระตุ้นเกิดจากคาร์บอนที่ไม่เป็นระเบียบบางส่วนถูกกำจัดออกไปจากผลึก เป็นผลทำให้เกิดช่องว่างตลอดช่วงที่เป็นแกรไฟติกและระหว่างผลึกของถ่านกัมมันต์ที่เป็นโครงสร้างรูพรุน (Porous texture) ขนาดต่างๆกัน และมีพื้นที่ผิวสูงมาก โดยจะมีสองกลไกในการเกิดรูพรุน ได้แก่ กลไกแรกเกิดจากปฏิกิริยาของสารเคมีกับวัสดุตั้งต้นและกลไกที่สองเป็นการเพิ่มความกว้างของรูพรุน โดยการขยายความกว้างรูพรุนจะเริ่มเมื่อรูพรุนอุณหภูมิที่ใช้ในการกระตุ้น

(1.6) พื้นที่ผิว

การดูดซับสารประกอบอินทรีย์ของถ่านกัมมันต์ปกติสัมพันธ์กับพื้นที่ผิว พื้นที่ผิวมากจะดูดซับสารประกอบอินทรีย์ได้สูงโดยเฉพาะโมเลกุลอินทรีย์ไม่มีขั้ว ดังนั้นพื้นที่ผิวจึงมีความสำคัญต่อการเลือกใช้ถ่านกัมมันต์เป็นตัวดูดซับในกระบวนการคัดแยกหรือดูดซับ โดยการกระตุ้นด้วยกรดจะทำให้เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้ถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวสูงส่วนการกระตุ้นทางกายภาพด้วยคาร์บอนไดออกไซด์จะทำให้ได้ถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวต่ำกว่าและมีประสิทธิภาพน้อยกว่าการกระตุ้นด้วยไอน้ำภายใต้สภาวะเดียวกัน ซึ่งการกระตุ้นด้วยกรดและไอน้ำเป็นวิธีการที่เหมาะสมสำหรับการค้ามากกว่าการกระตุ้นด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เนื่องจากคาร์บอนไดออกไซด์มีราคาสูงไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ในทางการค้า พื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์เพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิคาร์บอนในเซชันและการกระตุ้น สำหรับถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นทางกายภาพเป็นผลทำให้ปริมาตรรูพรุนและขนาดรูพรุนมีแนวโน้มลดลงตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิและมีผลทำให้เพิ่มพื้นที่ผิว สำหรับถ่านกัมมันต์ที่มีการกระตุ้นทางเคมีจะมีพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มอัตราส่วนการแช่ในตัวกระตุ้นและอุณหภูมิการกระตุ้นซึ่งเกิดจากการเผาไหม้ของถ่านกัมมันต์และการสลายสารระเหยง่ายด้วยการกระตุ้น

(2.) สมบัติทางเคมีของถ่านกัมมันต์

(2.1) ร้อยละผลผลิต

ร้อยละผลผลิต (Yield percentage) ของถ่านกัมมันต์ คำนวณได้ดังสมการที่ (2.14)

$$\text{ร้อยละผลผลิต} = \frac{\text{น้ำหนักถ่านกัมมันต์ (g)}}{\text{น้ำหนักวัตถุดิบตั้งต้น (g)}} \times 100 \quad (2.14)$$

ผลผลิตคาร์บอนเป็นตัวชี้วัดที่สำคัญมากสำหรับการกระตุ้นจะส่งผลให้เซลลูโลส ลิกนินและเฮมิเซลลูโลสสลายไประหว่างกระบวนการให้ความร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 450 องศาเซลเซียส แล้วเกิดปฏิกิริยาการควบแน่นโดยธาตุที่ถูกกำจัดออกไปเป็นหลักได้แก่ ไฮโดรเจน ออกซิเจน ไนโตรเจน และน้ำมันดิน ซึ่งจะหลุดออกไปในช่วงอุณหภูมิ 400 ถึง 800 องศาเซลเซียส ทำให้ร้อยละการผลิตลดลงประมาณร้อยละ 50-60 ร้อยละผลผลิตของถ่านกัมมันต์โดยใช้การกระตุ้นด้วยวิธีต่างๆจะให้ค่าที่ต่างกันออกไป โดยการกระตุ้นทางเคมีจะให้ค่าที่สูงกว่าการกระตุ้นทางกายภาพ

(2.2) ปริมาณองค์ประกอบธาตุในถ่านกัมมันต์

ประมาณของธาตุในถ่านกัมมันต์เมื่อเทียบกับวัตถุดิบตั้งต้นที่ใช้จะมีปริมาณคาร์บอนเพิ่มขึ้น ในขณะที่ปริมาณออกซิเจนและไฮโดรเจนลดลงซึ่งเกิดจากการสลายออกไปในการให้ความร้อนและการกระตุ้น ปริมาณคาร์บอนที่กระตุ้นทางกายภาพจะมีปริมาณมากกว่าการกระตุ้นทางเคมีเนื่องจากการกระตุ้นทางกายภาพใช้อุณหภูมิสูงกว่าการกระตุ้นทางเคมีจึงทำให้สารประกอบระเหยง่ายต่างๆ นั้นถูกกำจัดออกไปในปริมาณที่มากกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(2.3) เคมีที่พื้นผิวของถ่านกัมมันต์

พื้นที่ผิวที่สูงและการกระจายตัวของรูพรุนที่เหมาะสมเป็นสภาวะที่สำคัญสำหรับการนำถ่านกัมมันต์ไปใช้สำหรับการดูดซับ ลักษณะและปริมาณของหมู่พื้นผิวบนถ่านกัมมันต์มีผลต่อการดูดซับอย่างมาก โดยจะเป็นหมู่ที่เป็นออกซิเจนเป็นส่วนมากแต่ก็สามารถพบหมู่ไฮโดรเจนได้ ซึ่งทำให้เกิดลักษณะการดูดซับที่ดีของถ่านกัมมันต์ โดยลักษณะหมู่พื้นผิวจะมีผลอย่างมากต่ออันตรกิริยาของคาร์บอนกับตัวถูกดูดซับชนิดต่างๆ โดยความสามารถในการดูดซับของถ่านกัมมันต์จะถึงจุดสูงสุดได้โดยการปรับแต่งเคมีพื้นผิวของคาร์บอน หรือ pH ของสารตัวกลาง สามารถสรุปได้ว่าคาร์บอนที่แสดงความเป็นเบสจะดูดซับโมเลกุลกรดได้ดีกว่าขณะที่คาร์บอนที่มีความเป็นกรดจะดูดซับโมเลกุลเบสได้ดี นอกจากนี้การดูดซับไอออนบวกจะเกิดขึ้นได้ดีถ้าพื้นผิวคาร์บอนมีประจุลบขณะที่การดูดซับไอออนลบจะเกิดขึ้นได้ดีถ้าพื้นผิวเป็นประจุบวก

(2.4) การดูดซับและการวัดการดูดซับ

การดูดซับ (Adsorption) สารอินทรีย์บนพื้นผิวถ่านกัมมันต์ขึ้นอยู่กับรูพรุนและสมบัติเคมีพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ โดยการทดสอบการดูดซับจะช่วยให้หาความจุการดูดซับของคาร์บอนต่อโมเลกุลถูกดูดซับตามขนาดอนุภาคและไอโซเทิร์มการดูดซับ (Adsorption isotherms) ซึ่งมีความเป็นไปได้หลายรูปแบบตามลักษณะพื้นผิวของคาร์บอน

2.5.6 ประโยชน์ของถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์เป็นสารดูดซับที่มีประสิทธิภาพสูงเพราะมีพื้นที่ผิวจำเพาะมาก รวมทั้งมีโครงสร้างรูพรุนและเคมีพื้นผิวที่เหมาะสม สามารถนำกลับมาฟื้นฟูสภาพได้ทำให้ลดต้นทุนการผลิตได้เป็นอย่างดี จึงมีการใช้ถ่านกัมมันต์อย่างหลากหลาย เช่น เป็นสารดูดซับ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ใช้ในการแยกก๊าซหรือทำให้ก๊าซบริสุทธิ์ เพื่อใช้สำหรับการกำจัดความชื้นจากก๊าซ ลดมลพิษและการกักเก็บก๊าซธรรมชาติ ใช้ในการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากก๊าซเชื้อเพลิง ในระดับอุตสาหกรรมมีการใช้ถ่านกัมมันต์ในการทำให้บริสุทธิ์ ได้แก่ การบำบัดน้ำและการทำให้น้ำบริสุทธิ์ ใช้ในการควบคุมมลพิษในอากาศ กำจัดกลิ่นไม่พึงประสงค์ในสภาพแวดล้อม รวมทั้งมีการใช้ถ่านกัมมันต์ในหลายอุตสาหกรรม เช่น การแยกก๊าซ การทำยาและสารต่างๆ ให้บริสุทธิ์ ในทางการแพทย์ มีการใช้คาร์บอนกัมมันต์ในโรงพยาบาลสำหรับการกำจัดสารพิษ ควบคุมกลิ่น การกรอง หน้ากากหายใจและตกแต่งแผล ลักษณะของถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในการดูดซับสามารถแบ่งออกได้เป็นสองประเภทใหญ่ๆ คือ ถ่านกัมมันต์เกล็ดและถ่านกัมมันต์ผง ซึ่งถ่านกัมมันต์เกล็ดส่วนใหญ่ใช้สำหรับการดูดซับในวัฏภาคก๊าซในขณะที่ถ่านกัมมันต์ผงใช้สำหรับการดูดซับในวัฏภาคของเหลว [15]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.7 การใช้ถ่านกัมมันต์ในวัฏภาคก๊าซ

ปฏิกิริยาการแปรสภาพเป็นก๊าซของสารที่เป็นแหล่งของคาร์บอนประกอบด้วยชีวมวลและถ่านหิน เป็นเทคโนโลยีในการผลิตพลังงานที่น่าสนใจ สำหรับการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นในไอก๊าซเชื้อเพลิงโดยถ่านกัมมันต์จากใย PAN มีความจุสมมูลของคาร์บอนไดออกไซด์ 5.53 mmol/g และเมื่อเติมแอมโมเนียในถ่านกัมมันต์มีผลทำให้ความจุการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้นแต่การคายซับลดลง โดยมีความจุการดูดซับ 26.47 mg/g และการคายซับร้อยละ 95.4 สำหรับคาร์บอนจากของผสมแลกเปลี่ยนไอออนกับผงโซเดียมคาร์บอเนตสามารถกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นในการคาร์บอนซีวในขวดเหล็กกล้าได้ดี เพื่อใช้ในกระบวนการตกตะกอนซิลิกา [16]

2.6 กระบวนการดูดซับ (Adsorption process)

การดูดซับเป็นกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการสะสมตัวของสาร หรือความเข้มข้นของสารที่บริเวณพื้นผิวหรือระหว่างผิวหน้า (Interface) กระบวนการดูดซับสามารถเกิดขึ้นระหว่างสองสถานะของทั้งสามสถานะ คือ ของแข็ง (Solid) ของเหลว (Liquid) และก๊าซ (Gas) เช่น ของเหลวกับของเหลว ของเหลวกับของแข็ง ก๊าซกับของเหลว หรือก๊าซกับของแข็ง เป็นต้น โดยจะเรียกโมเลกุลที่ถูกดูดซับว่าสารถูกดูดซับ (Adsorbate) และส่วนที่ทำหน้าที่ดูดซับเรียกว่าสารดูดซับ (Adsorbent) โดยกระบวนการดูดซับจะสามารถแบ่งออกได้เป็นสองประเภทโดยจะพิจารณาจากแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของตัวถูกดูดซับกับสารดูดซับ ได้แก่ การดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption) และการดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption) [17]

2.6.1 การดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption)

เป็นกระบวนการดูดซับที่เกิดขึ้นจากแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลอย่างอ่อน คือ แรงแวนเดอร์วาลส์ (Vander Waal forces) ซึ่งเกิดจากการรวมแรงสองชนิดคือแรงกระจาย (London dispersion force) เป็นแรงระหว่างโมเลกุลที่ค้นพบโดยลอนดอน (Fritz-London) โดยแรงชนิดนี้เกิดขึ้นระหว่างโมเลกุลที่ไม่มีขั้วหรือระหว่างอะตอมของก๊าซเฉื่อยจากการกระจายตัวของกลุ่มหมอกอิเล็กตรอนที่ไม่สมมาตรจึงเกิดขั้วเกิดขึ้นชั่วคราวบนอะตอมหรือโมเลกุลของสารและแรงไฟฟ้าสถิตย์ (Electrostatic force) เป็นแรงในสารประกอบโคเวเลนต์ที่เกิดจากความแตกต่างระหว่างขั้วอย่างอ่อนๆ จากการดึงดูดด้วยแรงอย่างอ่อนดังที่กล่าวมาทำให้การดูดซับประเภทนี้มีพลังงานในการคายความร้อนค่อนข้างต่ำ โดยจะต่ำกว่า 20 KJ/mol และสามารถเกิดการผันกลับหรือการฟื้นฟูสภาพของตัวดูดซับได้ง่าย สารที่ถูกดูดซับจะเกาะอยู่บริเวณรอบของพื้นผิวของตัวดูดซับได้หลายชั้น (Multilayer) หรือจะติดกับชั้นของโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับก่อนหน้าโดยจำนวนชั้นจะเป็นสัดส่วนกับความเข้มข้นของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารถูกดูดซับและเพิ่มมากขึ้นตามความเข้มข้นที่สูงขึ้นของตัวถูกละลายที่อยู่ในสารละลาย สารดูดซับที่นิยมนำมาใช้ในการดูดซับมีหลายชนิด เช่น ถ่านกัมมันต์ ซีโอไลต์ ซิลิกาเจล และแกรไฟต์ เป็นต้น [18]

2.6.2 การดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption)

เป็นการดูดซับที่เกิดขึ้นเมื่อสารถูกดูดซับกับสารดูดซับเกิดปฏิกิริยาเคมีขึ้นระหว่างกันซึ่งจะส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีขึ้นกับตัวดูดซับเดิม กล่าวคือ มีการทำลายแรงยึดเหนี่ยวที่เกิดขึ้นระหว่างอะตอมหรือกลุ่มอะตอมเดิมแล้วมีการจัดเรียงอะตอมเกิดเป็นสารประกอบใหม่เกิดขึ้น โดยมีการสร้างพันธะเคมีที่เป็นพันธะที่ค่อนข้างแข็งแรงเกิดขึ้น กระบวนการดังกล่าวมีพลังงานกระตุ้นเข้ามาเกี่ยวข้องส่งผลให้มีการคายพลังงานความร้อนออกมามาก่อนข้างสูงประมาณ 50-400 KJ/mol ส่งผลให้การกำจัดสารถูกดูดซับออกจากพื้นผิวตัวดูดซับเกิดขึ้นได้ยากโดยจะไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาผันกลับได้ (Irreversible) และเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayer) เท่านั้น สารดูดซับที่นิยมนำมาใช้ในการดูดซับมีหลายชนิด เช่น สารละลายแคลเซียม สารละลายลิเทียม [19]

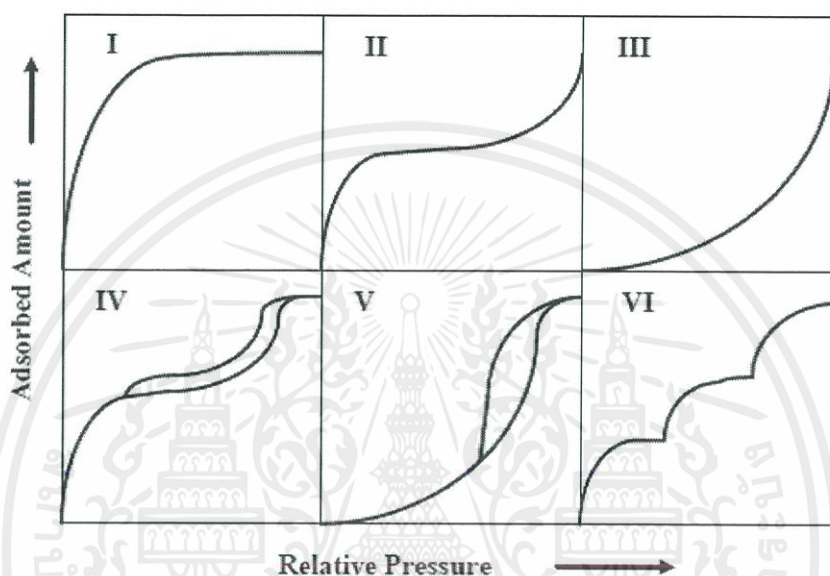
ตารางที่ 2.1 แสดงความแตกต่างระหว่างการดูดซับทางกายภาพและทางเคมี

ตัวแปร	การดูดซับทางกายภาพ	การดูดซับทางเคมี
ค่าความร้อนของการดูดซับ	น้อยกว่า 20 KJ/mol	20 KJ/mol
อุณหภูมิที่เกิดการดูดซับ	ต่ำ	สูง
แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุล	แรงแวนเดอร์วาลส์	พันธะเคมี
การผันกลับของปฏิกิริยา	ผันกลับได้	ผันกลับไม่ได้
การดูดซับบนก๊าซของแข็ง	เกิดได้ทุกชนิด	เกิดได้บางระบบ
พลังงานก่อกัมมันต์ในกระบวนการ	ไม่เกี่ยวข้อง	เกี่ยวข้อง
รูปแบบชั้นของการดูดซับ	Monolayer และ Multilayer	Monolayer

2.7 ไอโซเทอมการดูดซับ

ไอโซเทอมการดูดซับเป็นข้อมูลเชิงเคมีฟิสิกส์พื้นฐานสำหรับการประมาณความสามารถในกระบวนการดูดซับโดยจะสามารถอธิบายถึงพฤติกรรมการดูดซับและคำนวณหาประสิทธิภาพในการดูดซับได้ การจำแนกไอโซเทอมการดูดซับก๊าซตามระบบ (International Union of Pure and Applied Chemistry; IUPAC โดยไอโซเทอมชนิดที่ 1 ถึง 5 (Type I ถึง Type V) ถูกจำแนกโดยนักวิทยาศาสตร์ S. Brunauer, L.S. Deming, W.S. Diming และ E. Teller หรือเรียกว่า BDDT เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1940 ซึ่งการแบ่งประเภทไอโซเทอมการดูดซับของ BDDT ได้เป็นหลักในการแบ่งประเภทไอโซเทอมการดูดซับของ IUPAC และปัจจุบันได้มีการเสนอประเภทไอโซเทอมการดูดซับเพิ่มอีก 1 ประเภท ซึ่งทำให้ไอโซเทอมการดูดซับของ IUPAC สมบูรณ์ เป็น 6 ประเภท แสดงดังรูปที่ 2.3. [20]



รูปที่ 2.3 ไอโซเทอมการดูดซับ

(ที่มา: Gas adsorption technology, Adsorption Equilibrium, 2016)

รูปแบบที่ 1 (Type I) เป็นไอโซเทอมสำหรับการดูดซับที่เป็นแบบชั้นเดียว (Monolayer adsorption) หรือเรียกว่าแบบแลงเมียร์ (Langmuir) ซึ่งถือว่าเป็นรูปแบบที่ง่ายที่สุดของการดูดซับ โดยลักษณะของสารดูดซับที่มีขนาดเล็กกว่า 2 nm (Microporous adsorbent) การดูดซับส่วนใหญ่จะเป็นการดูดซับในรูพรุนขนาดเล็ก ลักษณะไอโซเทอมจะเป็นโค้งเข้า (Concave) หาแกน P/P_0 สารดูดซับมีขนาดใหญ่กว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของโมเลกุลที่ถูกดูดซับไม่มาก สารดูดซับมีพื้นที่ผิวภายนอกน้อย ดังนั้นการดูดซับจะถูกจำกัดเนื่องจากไม่สามารถเข้าไปยังรูพรุนขนาดเล็กได้

รูปแบบที่ 2 (Type II) ไอโซเทอมรูปตัวเอส (Sigmoid หรือ S-shape isotherm) เป็นรูปแบบปกติของไอโซเทอมที่เกิดในสารดูดซับที่ไม่มีรูพรุน (Nonporous) หรือตัวดูดซับที่มีรูพรุนขนาดใหญ่ (Macroporous) โดยในแบบนี้จะเกิดการดูดซับที่ต่อเนื่องจากการเรียงตัวโมเลกุลเพียงชั้น เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เดี่ยว (Monolayer) อย่างสมบูรณ์ก่อนจึงเกิดเป็นหลายชั้น (Multilayer) บริเวณจุดเปลี่ยนโค้งหรือจุด B (Break through) จะแสดงถึงการดูดซับแบบชั้นเดียวนั้นเสร็จสมบูรณ์จากนั้นที่ความดันสูงขึ้น จะเกิดการดูดซับที่ต่อเนื่องจากชั้นแรกต่อไป และจะเกิดการดูดซับเสร็จสมบูรณ์ที่ความดันย่อยสูงๆ

รูปแบบที่ 3 (Type III) เป็นรูปแบบของการดูดซับที่มีแรงดึงดูดอย่างอ่อนระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ แต่แรงดึงดูดระหว่างตัวถูกดูดซับด้วยกันมีค่อนข้างมาก ทำให้เกิดการรวมตัวกันของตัวถูกดูดซับก่อนที่การดูดซับชั้นแรกจะเสร็จสมบูรณ์ ในแบบที่ 2 จะมีแรงกระทำระหว่างโมเลกุลที่ถูกดูดซับกับผิวสารดูดซับมากกว่าแบบ 2 ซึ่งเส้นกราฟจะโค้งออก (Convex) จากแกน P/P_0 ซึ่งเป็นไอโซเทอมแบบพิเศษไม่ค่อยพบมากนัก เกิดกับการดูดซับที่ไม่แข็งแรงเป็นการดูดซับที่เกิดขึ้นกับของแข็งที่ไม่มีรูพรุน (Nonporous solid) และของแข็งที่มีรูพรุนขนาดเล็กเป็นส่วนใหญ่

รูปแบบที่ 4 (Type IV) เป็นไอโซเทอมของการดูดซับที่มีรูพรุนที่มีขนาดใหญ่กว่าขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของโมเลกุลที่ถูกดูดซับมากพบมากในวัสดุที่มีรูพรุนส่วนใหญ่เป็นรูพรุนขนาดกลาง จึงเกิดการเรียงตัวของโมเลกุลที่ผิวของสารดูดซับเป็นสองชั้น (Bilayer) ความชันของกราฟเพิ่มขึ้นอีกครั้งเมื่อความดันเพิ่มขึ้นแสดงให้เห็นว่าตัวถูกดูดซับเริ่มเข้าเติมใน รูพรุนอีกครั้ง และการเปลี่ยนระดับของกราฟเมื่อความดันเพิ่มขึ้นอีกเป็นผลมาจากการควบแน่น ภายในรูพรุนของของแข็ง (Capillary Condensation in Pores) โดยลักษณะของกราฟในช่วงแรกจะเหมือนกับแบบที่ 2 ซึ่งจุดเปลี่ยนโค้งจะแสดงถึงการดูดซับชั้นแรกอย่างสมบูรณ์

รูปแบบที่ 5 (Type V) เป็นไอโซเทอมรูปแบบพิเศษ มีความคล้ายกับแบบ 3 เกิดขึ้นเมื่อแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่ถูกดูดซับกับผิวของสารดูดซับมีค่าน้อย ซึ่งจะพบในสารดูดซับที่มีขนาดรูพรุนในช่วงเดียวกับไอโซเทอมแบบที่ 4 สำหรับไอโซเทอมแบบที่ 3 และแบบที่ 5 จะคำนวณหาพื้นที่ผิวได้ยากเนื่องจากชั้นการดูดซับชั้นที่ 2 จะถูกสร้างขึ้นก่อนที่ชั้นแรกจะเสร็จสมบูรณ์

รูปแบบที่ 6 (Type VI) เป็นไอโซเทอมแบบขั้นบันได (Stepped isotherm) เป็นรูปแบบที่ไม่ค่อยพบโดยส่วนมากจะพบในระบบที่เป็นการดูดซับแบบชั้นต่อชั้นบนพื้นผิวที่ค่อนข้างคล้ายกัน (Uniform)

แบบจำลองการดูดซับที่นำมาใช้สำหรับการสร้างไอโซเทอมการดูดซับมีดังนี้ [21]

2.7.1 แบบจำลองของฟรุนดิช (Freundlich model)

กล่าวว่าการดูดซับการดูดซับจะเกิดขึ้นบริเวณพื้นผิวแบบไม่สม่ำเสมอ (Heterogeneous) พลังงานในการสร้างพันธะระหว่างโมเลกุลถูกดูดซับและสารดูดซับไม่เท่ากันในแต่ละบริเวณ เมื่อการดูดซับเกิดขึ้นระหว่างโมเลกุลที่ถูกดูดซับและสารดูดซับจะเกิดปฏิกิริยาต่อกันอย่างไม่จำกัด

แบบจำลองนี้เหมาะสำหรับอธิบายการดูดซับทางกายภาพสามารถคำนวณหาปริมาณสารที่ถูกดูดซับบนสารดูดซับได้จากสมการที่ (2.15)

$$e = \frac{x}{M} = K_F P_{eq}^{1/n_F} \quad (2.15)$$

หากจัดสมการให้อยู่ในรูปเชิงเส้นจะได้ดังนี้ สมการที่ (2.16)

$$\log q_e = \log \frac{x}{M} = \log K_F + \frac{1}{n_F} \log P_{eq} \quad (2.16)$$

เมื่อ q_e คือ ปริมาณของสารที่ถูกดูดซับด้วยสารดูดซับหนัก 1 กรัม

x คือ มวลของสาร Adsorbate ที่สภาวะสมดุล (mg)

M คือ มวลของ Adsorbent ที่สภาวะสมดุล (g)

K_F คือ ค่าคงที่ของฟรอนดิชแสดงความสามารถในการดูดซับแบบหลายชั้น (cm^3/g)

$1/n_F$ คือ ค่าคงที่ที่จะแปรผันตามความเข้มข้นของสารที่ถูกละลาย

P_{eq} คือ ความดันของสารถูกดูดซับ (Adsorbate) ที่สภาวะสมดุล (mg/cm^3)

2.7.2 แบบจำลองของแลงมัวร์ (Langmuir model)

เป็นแบบจำลองที่ใช้สำหรับการดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayer adsorption) โดยสมมติว่าโมเลกุลที่ถูกดูดซับมีจำนวนที่แน่นอนและมีตำแหน่งที่แน่นอนแต่ละโมเลกุลของสารดูดซับจะดูดซับโมเลกุลสารถูกดูดซับได้เพียงหนึ่งโมเลกุลเท่านั้นและในแต่ละตำแหน่งจะมีค่าความร้อนของการดูดซับเท่ากัน และเป็นค่าคงที่โดยไม่มีแรงกระทำระหว่างโมเลกุลข้างเคียงสามารถแสดงความสัมพันธ์ของการดูดซับได้ตามสมการที่ (2.17)

$$q_e = \frac{x}{M} = K_F P \frac{abP_{eq}}{1+bP_{eq}} \quad (2.17)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หากจัดสมการให้อยู่ในรูปเชิงเส้นจะได้ดังสมการที่ (2.18)

$$\frac{P_{eq}}{q_{eq}} = \frac{1}{b a} + \frac{P_{eq}}{a} \quad (2.18)$$

เมื่อ q_e คือ ปริมาณของสารที่ถูกดูดซับด้วยสารดูดซับหนัก 1 กรัม

X คือ มวลของสาร Adsorbate ที่สภาวะสมดุล (mg)

M คือ มวลของ Adsorbent ที่สภาวะสมดุล (g)

K_F คือ ค่าคงที่ของฟรุนดิชแสดงความสามารถในการดูดซับแบบหลายชั้น (cm^3/g)

$1/n_F$ คือ ค่าคงที่ที่แปรผันตามความเข้มข้นของสารที่ถูกละลาย

P_{eq} คือ ความดันของสารที่ถูกดูดซับ (Adsorbate) ที่สภาวะสมดุล (mg/cm^3)

2.7.3 ทฤษฎีการดูดซับของ BET

ในปี ค.ศ.1938 Brunauer, Emmett และ Teller ได้ทำการปรับปรุงสมการของ Langmuir เพื่อให้อธิบายการดูดซับแบบหลายชั้น โดยเรียกว่าสมการของ BET โดยจะสมมติฐานว่าโมเลกุลที่ถูกดูดซับในชั้นแรกจะเป็นพื้นผิวในการเกาะของสารที่ถูกดูดซับในชั้นที่สองและชั้นต่อไป ดังนั้นโมเลกุลในชั้นที่สองจะเกาะอยู่บนสารที่ถูกดูดซับไม่ใช่พื้นผิวของการดูดซับ จึงเหมือนอยู่ในภาวะอิ่มตัวของเหลว แตกต่างจากในชั้นแรกที่โมเลกุลสัมผัสกับพื้นผิวของสารดูดซับโดยตรง ดังสมการที่ (2.21)

$$\frac{1}{w(P_0/P)-1} = \frac{1}{WmC} + \frac{C-(P_0/P)}{WmC} \quad (2.21)$$

เมื่อ P คือ ความดันของการดูดซับ

P_0 คือ ความดันอิ่มตัว

W คือ น้ำหนักของสารที่ถูกดูดซับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

W_m คือ น้ำหนักของสารที่ปกคลุมเต็มชั้นหนึ่ง

C คือ ค่าคงที่

โดยในปัจจุบันการใช้สมการการดูดซับของ BET เพื่อหาขนาดพื้นที่ของตัวดูดซับได้รับการยอมรับทั่วไป โดยสมการ BET นั้นจะใช้ได้ดีในช่วงความดันสัมพัทธ์ไม่เกิน 0.2 การหาพื้นที่ผิว (Surface area) โดยวิธี BET เป็นการวัดพื้นที่ผิวโดยการคำนวณการดูดซับของก๊าซที่สร้างไอโซเทอมของการดูดซับก๊าซไนโตรเจน

2.8 การจำแนกรูพรุนตามมาตรฐาน IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry)

สามารถจำแนกรูพรุนตามมาตรฐาน IUPAC ได้เป็น 3 ประเภท ได้แก่ [22]

2.8.1 รูพรุนไมโคร (Micropore)

เป็นรูพรุนที่มีขนาดความกว้างตั้งแต่ 0.1 ถึง 2 นาโนเมตร ถ้ามีรูพรุนแบบไมโครเป็นจำนวนมากในโครงสร้างจะส่งผลให้วัสดุมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงมากและเนื่องจากขนาดความกว้างของรูพรุนชนิดดังกล่าวมีขนาดมากกว่าขนาดของโมเลกุลทั่วไปไม่มากนักส่งผลให้โมเลกุลขนาดเล็กที่เคลื่อนที่มาอยู่ในรูพรุนแล้วไม่สามารถออกไปได้โดยจะเกิดอันตรกิริยาต่อกันคือแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der waals interaction) ซึ่งเป็นประโยชน์สำหรับการนำวัสดุที่มีรูพรุนขนาดไมโครไปประยุกต์ใช้ในการดูดซับ ในงานวิจัยจำนวนมากในอดีตนักวิจัยมุ่งเน้นในการสังเคราะห์วัสดุรูพรุนที่มีขนาดไมโครเป็นหลัก เนื่องจากจะสามารถเพิ่มพื้นที่ผิวให้กับวัสดุให้มากขึ้นได้

2.8.2 รูพรุนเมโซ (Mesopore)

เป็นรูพรุนที่มีขนาดความกว้างตั้งแต่ 2 ถึง 50 นาโนเมตร โดยรูพรุนเมโซขนาดเล็กจะมีความกว้างอยู่ที่ 2 ถึง 10 นาโนเมตร จะมีประโยชน์ในด้านการกักเก็บโมเลกุลโดยเฉพาะอย่างยิ่งสารชีวโมเลกุล เช่น เอนไซม์ ดีเอ็นเอ เป็นต้น ซึ่งจะมีความสามารถใกล้เคียงกับรูพรุนไมโคร ด้วยลักษณะดังที่กล่าวมาของรูพรุนเมโสนั้นรูพรุนเมโซจึงเป็นที่นิยมนำมาใช้เป็นวัสดุสำหรับการตรึงเอนไซม์ ในส่วนรูพรุนเมโซขนาดใหญ่จะมีความกว้างตั้งแต่ 10 ถึง 50 นาโนเมตร จะมีการนำไปประยุกต์ใช้สำหรับการดูดซับต่างๆ เช่น ซิลิกาเจล อลูมินาเจล เป็นต้น

2.8.3 รูพรุนแมโคร (Macropore)

เป็นรูพรุนที่มีความกว้างตั้งแต่ 50 ถึง 1000 นาโนเมตร หรือ 50 นาโนเมตรขึ้นไป โดยในการวิจัยในอดีตที่ผ่านมาไม่ค่อยเป็นที่นิยมสำหรับการสังเคราะห์รูพรุนแมโครและมีโซขนาดใหญ่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากไม่สามารถไปเพิ่มพื้นที่ผิวได้ รวมทั้งขนาดของโมเลกุลนั้นใหญ่กว่าโมเลกุลของสารที่พบไปทั่วไประยะหนึ่งจึงไม่เป็นประโยชน์ในการประยุกต์ใช้สำหรับการดูดซับ แต่ในปัจจุบันเริ่มมีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์รูพรุนแมคโครเหล่านี้ในวัสดุเนื่องจากรูพรุนดังกล่าวมีประโยชน์ในการเคลื่อนย้ายโมเลกุลต่างๆไปยังรูพรุนที่มีขนาดเล็กกว่า (รูพรุนไมโครและเมโซ) เนื่องจากสามารถลดความต้านทานที่เกิดจากการแพร่ผ่านรูพรุนที่เกิดขึ้นได้

2.9 ชีวมวล

ชีวมวล หมายถึง สารอินทรีย์ที่ได้มาจากสิ่งมีชีวิต เช่น ต้นไม้ อ้อย มันสำปะหลัง ถ่านฟืนแกลบ วัชพืชต่างๆ หรือแม้กระทั่งขยะและมูลสัตว์ ซึ่งเป็นแหล่งพลังงานธรรมชาติที่สามารถนำมาพัฒนาเพื่อนำมาผลิตเป็นพลังงานในด้านต่างๆได้

2.9.1 แหล่งที่มาของชีวมวล

สามารถจำแนกแหล่งที่มาของชีวมวลได้ 2 คือ [23]

(1.) ของเสียจากการประกอบการทั้งภาคอุตสาหกรรมและภาคเกษตรกรรม

อาทิ ขนอ้อยที่ได้จากโรงงานน้ำตาล แกลบที่ได้จากโรงสีข้าว ใบปาล์มที่ได้จากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ ชังข้าวโพดที่ได้มาจากไร่ข้าวโพด เป็นต้น ซึ่งเป็นชีวมวลที่ได้จากการแปรรูปสินค้าทางการเกษตร

(2.) ของเสียจากแหล่งชุมชน

อาทิ ขยะชุมชน มูลสัตว์ เป็นต้น ซึ่งมีข้อดีสำหรับการนำไปทำเชื้อเพลิงชีวมวล คือ ราคาที่ถูกกว่าเชื้อเพลิงพาณิชย์มาก มีแหล่งผลิตอยู่ในประเทศ พลังงานจากชีวมวลจะไม่ก่อให้เกิดสภาวะเรือนกระจก มลพิษทางอากาศ อีกทั้งยังเป็นแหล่งพลังงานทดแทนที่ไม่มีวันหมดอีกด้วย การใช้ประโยชน์จากพลังงานชีวมวลนั้น สามารถใช้ได้ทั้งพลังงานในรูปแบบกระบวนการที่ใช้ความร้อนและกระบวนการชีวภาพ การใช้พลังงานชีวมวลโดยกระบวนการที่ใช้ความร้อน เราจะเห็นได้ทั่วไปในลักษณะของการนำถ่านไม้ หรือฟืนมาจุดไฟ เพื่อให้เกิดความร้อน สำหรับนำไปใช้ในการหุงต้มอาหาร ใช้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้า ใช้เป็นเชื้อเพลิงในน้ำมันร้อนสำหรับโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งเมื่อเทียบราคาระหว่างต้นทุนจากพลังงานเชื้อเพลิงชีวมวลกับต้นทุนเชื้อเพลิงน้ำมันเตา เห็นได้อย่างชัดเจนว่า ต้นทุนของพลังงานชีวมวลถูกกว่าอย่างมาก จึงได้มีการนำชีวมวลต่างๆ มาใช้ทดแทนน้ำมันเตาเพื่อผลิตพลังงานความร้อนกันอย่างแพร่หลาย และยังเป็นทางเลือกในการใช้เศษวัสดุการเกษตรในประเทศ เพื่อลดต้นทุนในการนำเข้าเชื้อเพลิงฟอสซิลต่างๆ จึงจำเป็น ต้องพัฒนาการใช้พลังงานจากชีวมวลให้มีประสิทธิภาพสูงสุดและให้มีการสูญเสียพลังงานโดยเปล่าประโยชน์ให้น้อยที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.9.2 องค์ประกอบทั่วไปของสารชีวมวล [24]

สารชีวมวลนั้นมีหลากหลายชนิด ซึ่งแต่ละชนิดนั้นก็มียังค์ประกอบและสัดส่วนที่แตกต่างกันไป ซึ่งองค์ประกอบหลักๆขั้นต้นของสารพวกชีวมวลได้แก่ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส ลิกนิน แป้ง และ โปรตีน ในพืชนั้นอาจจะมียังค์ประกอบของแป้งมาก แต่ในขณะที่มูลสัตว์อาจจะมียังค์ประกอบของ โปรตีนมาก เนื่องจากมีโครงสร้างทางเคมีที่แตกต่างกัน ซึ่งองค์ประกอบเหล่านี้ขึ้นอยู่กับแหล่งที่มาของ พลังงานชีวมวล ซึ่งองค์ประกอบหลักของสารชีวมวลมีดังนี้

(1.) เซลลูโลส

เซลลูโลส (Cellulose) เป็นพอลิแซ็กคาไรด์ขนาดใหญ่ ประกอบด้วยน้ำตาล ดีกลูโคส (โมโนแซ็กคาไรด์) จับกันเป็นสายยาวโดยไม่มีกิ่งก้านสาขา ยาวถึง 2,000–10,000 หน่วยกลูโคส หน่วยกลูโคสที่เหมือนกันหมดแต่ละตัวจะจับกับตัวต่อไปโดยพันธะโควาเลนต์ประเภทเบต้าไกลโคซิดิกบอนด์ สายเซลลูโลสในพืชบางตัวเป็นชั้นๆ มีพันธะไฮโดรเจน ระหว่างหน่วยกลูโคสต่างๆ ที่อยู่ชั้นที่ติดกัน และระหว่างหน่วยกลูโคสต่างๆ ในสายเดียวกันด้วย มีสูตรโมเลกุลเป็น $(C_6H_{12}O_6)_n$ เป็นสารประกอบของคาร์โบไฮเดรตที่พบมากในผนังเซลล์ของพืชและผลไม้ทุกชนิดโดยเฉพาะที่เปลือกใบและเส้นใยที่ปนในเนื้อผลไม้

(2.) เฮมิเซลลูโลส

เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) เป็นคาร์โบไฮเดรตประเภทพอลิแซ็กคาไรด์ ในโมเลกุลของเฮมิเซลลูโลสเป็น Heteropolysaccharide ที่ประกอบด้วยน้ำตาลหลายชนิด มีน้ำตาลไซโลส (Xylose) เชื่อมต่อกันด้วยพันธะไกลโคไซด์ (Glycosidic bond) ที่ตำแหน่ง ปีตา (1-4) เป็นโซ่หลัก อาจมีน้ำตาลแมนโนส (Mannose) กาแล็กโทส (Galactose) หรือกลูโคส (Glucose) มาต่อกันเป็นโซ่หลักด้วยและมีน้ำตาลชนิดอื่นมาต่อกันเป็นโซ่สาขา หรือโซ่แขนง ได้แก่ น้ำตาลอะราบินโนส (Arabinose) กรดกลูคูโรนิก (Glucuronic acid) เฮมิเซลลูโลส จัดเป็นเส้นใยอาหาร ที่ไม่ละลายน้ำ ไม่สามารถย่อยได้ด้วยเอนไซม์ในระบบทางเดินอาหารของมนุษย์และสัตว์กระเพาะเดี่ยว สามารถละลายได้ในสารละลายต่างเจือจาง สมบัติทางกายภาพที่สำคัญคือ มีความสามารถในการอุ้มน้ำ (Water holding capacity) และแลกเปลี่ยนไอออนประจุบวก (Cation exchange) เมื่ออยู่ในกระเพาะอาหารและลำไส้ของมนุษย์เฮมิเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบในผนังเซลล์ของพืชที่อยู่ร่วมกับเซลลูโลสพบมากในผักและผลไม้

(3.) ลิกนิน

ลิกนิน (Lignin) เป็นสารเคมีที่มีความซับซ้อนได้มากที่สุดที่ได้จากไม้และเป็นส่วนหนึ่งของผนังเซลล์ของพืชอยู่ในช่องว่างในผนังเซลล์ของระหว่างองค์ประกอบเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลสและเพคติน เป็นสารประกอบพอลิเมอร์ไม่มีรูปร่างจะเกาะกันอยู่ในชั้นระหว่างเส้นใย (Middle lamella) ซึ่งทำหน้าที่ ยึดเกาะเส้นใยเข้าด้วยกันและมีบางส่วนผสมอยู่ในเส้นใยด้วย โครงสร้างพื้นฐานของลิกนินคือ Phenylpropane หรือสารประกอบ Hydrocarbon ที่มี Carbon 9 อะตอม ลิกนินเป็นหนึ่งในองค์ประกอบที่ย่อยสลายช้าที่สุดของพืชที่ตายแล้ว ซึ่งเมื่อสลายตัวจะกลายเป็นฮิวมัส

(4.) แป้ง

เป็นพอลิแซคคาไรด์ที่เกิดจากกลูโคสจำนวนหลายพันโมเลกุลมาต่อกัน มีโครงสร้างเป็นทั้งแบบสายยาวและกิ่งก้านสาขา เมื่อแป้งถูกความร้อนจะกลายเป็นเดกซ์ตริน โครงสร้างประกอบด้วยสายโซ่ของกลูโคสพอลิเมอร์ 2 ชนิดคือ พันธะไกลโคซิดิกแอลฟา 1- 4 ที่ต่อสายเอมิโลส พบประมาณร้อยละ 20 และสายโซ่โพลีแซคคาไรด์เอมิโลเพกทินที่ต่อกันด้วยพันธะไกลโคซิดิกอัลฟา 1 ถึง 6 ที่พบได้ประมาณร้อยละ 85 แป้งมีมากในพืชประเภทเมล็ดและหัว

(5.) โปรตีน

เป็นสารประกอบอินทรีย์ ซึ่งเป็นพอลิเมอร์สายยาวของกรดอะมิโน (Amino acid) น้ำหนักของโมเลกุลโปรตีนมีน้อยมาก จะถูกสังเคราะห์ในเซลล์ไรโบโซมซึ่งมีหน่วยเล็กที่สุดของโปรตีนคือ กรดอะมิโน โดยกรดอะมิโนหลายโมเลกุลมาเรียงต่อกันเรียกว่าพันธะเปปไทด์ เมื่อเกิดการเรียงตัวกันจะเป็นโปรตีน ส่วนในทางของโภชนาการโปรตีนนั้นเป็นสารอาหารที่ให้พลังงาน โดยโปรตีน 1 กรัมจะให้พลังงาน 4 แคลอรี โปรตีนประกอบไปด้วยธาตุต่างๆ คาร์บอน 50% ออกซิเจน 20% ไนโตรเจน 6% และกำมะถันอยู่เล็กน้อย โปรตีนในแต่ละชนิดจะให้ประโยชน์ที่แตกต่างกัน

(6.) สารอื่นๆ (สารอินทรีย์และสารอนินทรีย์)

ปริมาณของสารอินทรีย์และอนินทรีย์มีได้มากมายหลายชนิดโดยจะขึ้นอยู่กับชนิดของสารชีวมวล โดยสารอินทรีย์เป็นพบในสิ่งมีชีวิต เรียกว่าอีกอย่างหนึ่งว่าสารชีวโมเลกุล เป็นสารที่สิ่งมีชีวิตสามารถนำไปใช้ในกระบวนการดำรงชีวิต สารชีวโมเลกุลมีหน้าที่แตกต่างกันตามลักษณะโครงสร้าง มีบทบาทสำคัญต่อสิ่งมีชีวิตซึ่งสารอินทรีย์สามารถจำแนกได้ดังนี้คือ คาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน ออกซิเจน คาร์โบไฮเดรต ไขมัน โปรตีน กรดนิวคลีอิกและวิตามิน เป็นต้น ส่วนสารอนินทรีย์เป็นสารที่สามารถพบได้โดยทั่วไปตามธรรมชาติ ได้แก่ น้ำและแร่ธาตุ ซึ่งแต่ละชนิดจะมีคุณสมบัติที่แตกต่างกันออกไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.9.3 องค์ประกอบของชีวมวล

สามารถแบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลัก คือ [25]

(1.) ความชื้น (Moisture) หมายถึง น้ำที่สะสมอยู่ในชีวมวล

(2.) ส่วนที่เผาไหม้ได้ (Combustibles substance) มีด้วยกัน 2 ส่วน คือ สารระเหย (Volatiles matter) และคาร์บอนคงที่ (Fixed carbon)

(3.) ส่วนที่ไม่ได้เกิดการเผาไหม้ หรือ ขี้เถ้า (Ash)

น้ำหนักที่หายไปเมื่อเผาที่อุณหภูมิ 105–110 องศาเซลเซียสคือน้ำหนักที่หายไปนั้นคือความชื้น จากนั้นนำไปเผาที่ภาชนะปิดที่อุณหภูมิสูง น้ำหนักที่ลดลงไปคือสารระเหย เชื้อเพลิงส่วนที่เหลือถูกนำมาเผาต่อที่อุณหภูมิสูงในสภาพเปิด ส่วนที่เผาไหม้คือคาร์บอนคงที่และส่วนที่เผาไหม้ไม่หมดคือ ขี้เถ้า หากชีวมวลแต่ละชนิดมีการเผาไหม้สมบูรณ์แล้วจะมีปริมาณของส่วนที่เผาไหม้ได้และขี้เถ้าที่แตกต่างกัน ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของชีวมวล

(4.) พลังงานที่ได้จากชีวมวล [26]

ชีวมวลแต่ละชนิดจึงได้พลังงานที่แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับสัดส่วนและองค์ประกอบของชีวมวล อีกทั้งยังขึ้นอยู่กับความชื้นที่มีอยู่ในชีวมวล โดยพลังงานความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ มีด้วยกัน 2 คือ

(4.1) ค่าพลังงานความร้อนต่ำ (Low heating value)

ค่าพลังงานที่ได้โดยลบความชื้นจากการระเหยออกไปแล้วในหน่วยกิโลจูลต่อกิโลกรัมชีวมวล (KJ/Kg) หรือกิโลแคลอรีต่อกิโลกรัมชีวมวล (Kcal/Kg) ซึ่งเป็นค่าพลังงานที่ได้จากการเผาไหม้ที่แท้จริง

(4.2) ค่าพลังงานความร้อนสูง (High heating value , HHV)

พลังงานจากการเผาไหม้ชีวมวลทั้งหมด มีหน่วยเป็น K/Kg หรือ Kcal/Kg

ตารางที่ 2.2 คุณลักษณะของชีวมวลประเภทต่างๆและค่าพลังงานความร้อนที่ได้จากชีวมวล

ชีวมวล	Moisture (%)	Ash (%)	Volatile Matter (%)	Fixed Carbon (%)	HHV (kJ/kg)	LHV (kJ/kg)
แกลบ	12	12.65	56.46	18.88	14,755	13,517
ฟางข้าว	10	10.36	60.70	18.90	13,650	12,330
ชานอ้อย	50.73	1.43	41.98	5.86	9,243	7,368
ใบอ้อย	9.20	6.10	67.80	16.90	1,6794	15,479
ไม้ยางพารา	45	1.59	45.70	7.71	10,365	8,600
เส้นใยปาล์ม	38.50	4.42	42.68	14.39	13,127	11400
กะลาปาล์ม	12	3.50	68.20	16.30	18,267	16900
ทะลายปาล์ม	58.60	2.03	30.46	8.90	9,196	7240

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชีวมวล	Moisture (%)	Ash (%)	Volatile Matter (%)	Fixed Carbon (%)	HHV (kJ/kg)	LHV (kJ/kg)
ต้นปาล์ม	48.40	1.20	38.70	11.70	9,370	7,556
ทางปาล์ม	78.40	0.70	16.30	4.60	3,908	1,760
ซังข้าวโพด	40	0.90	45.42	13.68	11,298	9,615
ลำต้นข้าวโพด	41.70	3.70	46.46	8.14	11,704	9,830
เหง้ำมันสำปะหลัง	59.40	1.50	31	8.10	7,451	5,494
เปลือกไม้ยูคาลิปตัส	60	2.44	28	9.56	6,811	4,917

2.9.4 พลังงานในรูปแบบต่างๆจากการแปรรูปชีวมวล [27]

(1.) การเผาไหม้โดยตรง (Combustion)

เมื่อนำชีวมวลมาเผา ชนิดของชีวมวลที่แตกต่างกันทำให้ค่าความร้อนที่ได้แตกต่างกัน ซึ่งสามารถผลิตไอน้ำความดันสูงได้จากการนำค่าพลังงานความร้อนนี้มาใช้ ไอน้ำนี้จะถูกนำไปขับเคลื่อนกังหันเพื่อให้เกิดการผลิตกระแสไฟฟ้าขึ้น ตัวอย่างชีวมวลเช่น วัสดุเหลือทิ้งจากการเกษตรและเศษไม้

(2.) การผลิตก๊าซ (Gasification)

เป็นกระบวนการที่จะเปลี่ยนชีวมวลให้เป็นก๊าซเชื้อเพลิง หรือที่เรียกกันว่า ก๊าซชีวภาพ (Biogas) ประกอบไปด้วย ก๊าซมีเทน ไฮโดรเจนและคาร์บอนมอนอกไซด์ โดยสามารถที่จะนำไปใช้กับกังหันแก๊ส (Gas turbine) ได้อีกด้วย

(3.) การหมัก (Fermentation)

เป็นการหมักชีวมวลด้วยแบคทีเรียในถังอับอากาศ ชีวมวลจะถูกย่อยสลายและ เกิดแก๊สชีวภาพ (Biogas) ที่ประกอบไปด้วยแก๊สมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์ สามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในรถยนต์เพื่อนำไปผลิตกระแสไฟฟ้าต่อไปได้

(4.) การผลิตเชื้อเพลิงเหลวจากพืช มีกระบวนการที่ใช้ผลิตดังนี้

(4.1) กระบวนการทางชีวภาพ ทำการย่อยสลายแป้ง น้ำตาล และ

เซลลูโลสจากพืชทางการเกษตร เช่น อ้อย มันสำปะหลังให้เป็นเอทานอล เพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงเหลวในเครื่องยนต์เบนซิน

(4.2) กระบวนการทางฟิสิกส์และเคมี โดยสกัดน้ำมันออกจากพืช

น้ำมัน จากนั้นนำน้ำมันที่ได้ไปผ่านกระบวนการ Transesterification เพื่อผลิตเป็นไบโอดีเซล

(4.3) กระบวนการใช้ความร้อนสูง เช่น กระบวนการไพโรไลซิส

เมื่อวัสดุทางการเกษตรได้รับความร้อนสูงในสภาพไร้ออกซิเจนจะเกิดการสลายตัวเกิดเป็นเชื้อเพลิงในรูปของเหลวและแก๊สผสมกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.10 รูปฤาษี

รูปฤาษีมีชื่ออื่นว่า กกข้าง กกรูป เพื่อ เพ็อง หญ้าเพ็อง หญ้ากกข้าง หญ้าปรีอ (ภาคกลาง) หญ้าสะลาบลวง (ภาคเหนือ) และปรีอ (ภาคใต้) มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Typha Angustifolia* Lin และมีชื่อทางสามัญว่า Narrow-leaved Cattail จัดอยู่ในวงศ์ Typhaceae [28]

2.10.1 ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ของรูปฤาษี

รูปฤาษี มีถิ่นกำเนิดในทวีปยุโรปและอเมริกา เป็นวัชพืชน้ำที่จัดเป็นไม้ล้มลุก มีอายุหลายปี เหน่ากลม ลักษณะลำต้นตั้งตรงสูง 1-3 เมตร คล้ายทางมะพร้าวมีเหง้าใต้ดิน แทะแตกหน่อขึ้นเป็นกอใหญ่ เจริญเติบโตได้ดีในพื้นที่ลุ่มน้ำขังและชายขอบพรุ พบตามหนองน้ำ ลุ่มน้ำทิ้งน้ำจืดและน้ำเค็มตามทะเลสาบหรือริมคลอง รวมไปถึงตามท้องทุ่งๆ ไป เนื่องจากสามารถทนความเป็นกรดเป็นด่างและความเค็มได้ ขยายพันธุ์ด้วยผลหรือเมล็ด มีการแพร่พันธุ์ได้อย่างรวดเร็วจากการแตกออกของดอกเป็นขนปลิวไปตามลม พบในที่ลุ่มทั้งน้ำจืดและ มีเขตการกระจายพันธุ์ทั่วโลกในเขตร้อนและในเขตอบอุ่น สำหรับในประเทศไทยสามารถพบได้ทั่วทุกภูมิภาค

(1.) ลำต้นของรูปฤาษี

ลำต้นตั้งตรง สูงประมาณ 1-3 เมตร แทะหน่อขึ้นเป็นระยะสั้นๆ มีลำต้นทั้งส่วนที่อยู่บนดินและใต้ดิน ส่วนที่อยู่บนดินจะถูกหุ้มด้วยกาบใบบริเวณด้านล่างของลำต้น ส่วนที่อยู่บริเวณใต้ดินจะมีลักษณะเป็นเหง้ากลม

(2.) ใบของรูปฤาษี

ใบเดี่ยวออกสลับซ้อนชิดกัน แผ่นใบเรียวยาวแคบ กว้าง 1-2 เซนติเมตร ใบยาวประมาณ 50-120 เซนติเมตร แผ่นใบด้านบนมีลักษณะโค้งเล็กน้อยเพราะมีเซลล์หุ่ยตัวดูเหมือนฟองน้ำหุ้มอยู่บริเวณกลางใบ ส่วนด้านล่างของใบนั้นจะแบน มีผิวใบที่เกลี้ยง เป็นกาบหุ้มลำต้นเอาไว้

(3.) ดอกของรูปฤาษี

ช่อดอกจะอยู่บริเวณที่ปลายลำต้น มีขนาดดอกเล็ก สีน้ำตาลแกมเหลืองออกรวมชิดกันแน่นบนช่อรูปทรงกระบอกมองดูคล้ายรูปขนาดใหญ่ กลุ่มของดอกตัวผู้และดอกตัวเมียอยู่บนก้านช่อเดียวกัน ช่วงดอกเพศผู้มีความยาวประมาณ 8-40 เซนติเมตร มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางช่อประมาณ 0.2-0.7 เซนติเมตร มีอับเรณูยาวประมาณ 1.5-2 มิลลิเมตร และมีใบประดับประมาณ 1-3 ใบ หลุดร่วงได้ ส่วนช่วงดอกเพศเมียจะมีความยาวประมาณ 5-30 เซนติเมตร มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่อประมาณ 0.6-2 เซนติเมตร มีรังไข่เป็นรูปกระสวย ช่อดอกที่เป็นหมันที่มีความยาวประมาณ 2.5-7 เซนติเมตร ดอกมีขนาดเล็ก ไม่มีกลีบเลี้ยงและกลีบดอก ช่อผลมีขนสีขาวเป็นปุย เมื่อแก่จะแตกออกปลิวไปตามลมทำให้เกิดการขยายพันธุ์ได้

รูปถ่ายจัดเป็นวัชพืชที่แพร่ระบาดรุกรานจนก่อให้เกิดความเสียหายต่อระบบนิเวศในประเทศไทย ผลเสียที่เกิดจากรูปถ่ายต่อสภาพแวดล้อมคือ ก่อให้เกิดน้ำเสียในแหล่งน้ำ ส่วนกินเน่าเหม็นไปรอบบริเวณ สร้างความรำคาญให้แก่ผู้สัญจรไปมาและผู้อยู่อาศัยบริเวณนั้น เนื่องจากมีการเจริญเติบโตอย่างหนาแน่น ทำให้มีลักษณะเป็นที่รกและสกปรกทำให้มีสัตว์มีพิษเข้าไปอาศัยอยู่ได้ เป็นแหล่งอาศัยของเชื้อโรค แมลงและศัตรูพืช มีการแย่งน้ำและอาหารจากพืชเพาะปลูก ทำให้ผลผลิตและคุณภาพผลผลิตลดลง นอกจากนี้ ยังทำให้แหล่งน้ำตื้นเขิน รากและซากรูปถ่ายเกิดการทับถมกันแน่น ส่งผลให้สัตว์น้ำไม่สามารถอาศัยอยู่ได้และเมื่อทับถมไปนานๆ จะทำให้เกิดน้ำเสีย น้ำเน่า ขาดออกซิเจน สัตว์น้ำก็จะตาย อีกทั้งความสูงของต้นรูปถ่ายทำให้พรรณพืชชนิดอื่นๆ เช่น กกและหญ้าหลายชนิด ไม้ล้มลุก รวมทั้งไม้พุ่มที่ขึ้นตามริมน้ำหรือที่ขึ้นและถูกบดบังแสงขาดทำให้ไม่สามารถเจริญเติบโตได้เต็มที่และค่อยๆ สูญหายไปจากพื้นที่

ตารางที่ 2.3 องค์ประกอบหลักของรูปถ่าย [29]

องค์ประกอบ	ร้อยละ
เส้นใย (Fiber)	40.1
เซลลูโลส (Cellulose)	63.2
เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose)	8.7
ลิกนิน (Lignin)	9.6
ไข (Wax)	1.4
เถ้า (Ash)	1.9

จากองค์ประกอบข้างต้นพบว่ารูปถ่ายมีปริมาณโปรตีนและคาร์โบไฮเดรตสูงซึ่งมาจากองค์ประกอบของเซลลูโลส หากนำแบคทีเรียชนิดไม่ใช้ออกซิเจนมาย่อยกากที่เหลือของโปรตีนนั้นจะให้ก๊าซมีเทนออกมา ซึ่งก๊าซมีเทนนี้สามารถนำมาใช้เป็นแหล่งพลังงานเชื้อเพลิงได้ ดอกของรูปถ่ายอุดมไปด้วยสารจำพวกไฮโดรคาร์บอนพวก โฟโตรสเตอรอล 2 ชนิด คือ B – Phytosterol และ B-Sitosteryl-3-0-B-D-Glucopyranoside ทำให้รูปถ่ายมีคุณสมบัติที่สามารถกำจัดไนโตรเจนได้ อีกทั้งยังสามารถดูดเก็บโพแทสเซียมได้อีกด้วย จากคุณสมบัติของรูปถ่ายข้างต้นนี้เอง ทำให้มีผู้นำประยุกต์และทดลองใช้ในการบำบัดน้ำเสีย จึงทำให้รูปถ่ายอาจจะเป็นพืชอีกชนิดหนึ่งที่จะมีบทบาทเป็นพืชเศรษฐกิจในอนาคต

2.11 ปาล์มน้ำมัน

ปาล์มน้ำมัน (*Elaeis guineensis*) จัดอยู่ในพืชตระกูลปาล์ม (Palmae หรือ Arecaceae) ตระกูลย่อยเดียวกับมะพร้าว สามารถจำแนกปาล์มออกเป็น 6 วงศ์ย่อย

2.11.1 ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ของปาล์มน้ำมัน

ปาล์มน้ำมันเป็นพืชยืนต้นสมบูรณเพศ คือ มีดอกเพศผู้และเพศเมียอยู่ภายในต้นเดียวกัน ดังนั้นปาล์มจะไม่มี การแยกว่าเป็นต้นตัวเมียหรือต้นตัวผู้ มีใบเลี้ยงเดี่ยวผสมข้ามต้นโดยใช้เกสรตัวผู้จากต้นอื่นมาผสมกับเกสรตัวเมียจากต้นตัวเอง เป็นพืชที่สามารถให้ผลผลิตได้ตลอดปี โดยการเก็บเกี่ยวทะลายปาล์มจะเริ่มจากที่ปาล์มน้ำมันที่มีอายุได้ประมาณ 2 ปีครึ่ง หลังจากปลูกและจะสามารถเก็บเกี่ยวผลผลิตได้นานกว่า 20 ปี หลังจากนั้นผลผลิตจะค่อยๆ ลดลง มีลักษณะเฉพาะที่เด่นชัด คือ ลำต้นเป็นข้อ มีใบบนยอดเพียงที่เดียว ไม่แตกกิ่งก้าน มีก้านใบที่ยาวและใหญ่ ลักษณะใบแตกต่างกัน แต่ก็ไปรวมกลุ่มกันที่ปลายก้านที่เดียว [30]

(1.) รากของปาล์ม

เกิดขึ้นตรงฐานโคนของลำต้นเป็นระบบรากฝอย จะมีรากอ่อนงอกออกจากเมล็ดเป็นอันดับแรก เมื่ออายุได้ประมาณ 2-4 เดือน รากอ่อนจะหยุดเจริญเติบโตและหายไป รากจริงจะงอกจากส่วนฐานของลำต้น ต้นปาล์มที่เจริญเติบโตเต็มที่แล้ว ประกอบด้วยราก 4 ชุด ทำหน้าที่ค้ำจุนลำต้น ดูดซึมน้ำและธาตุอาหาร ราก โดยทั่วไปจะเกิดมากและสามารถดูดซึมน้ำและธาตุอาหารที่ปาล์มนำมาใช้ประโยชน์ที่ระดับความลึก 30-50 เซนติเมตร การแผ่กระจายของรากจะขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมต่างๆ เช่น สภาพของดิน ปริมาณของธาตุอาหาร ความชื้นของระดับน้ำใต้ดิน เป็นต้น นอกจากนี้จะพบรากพิเศษหรือ รากอากาศ ตรงบริเวณโคนต้นทำหน้าที่ถ่ายเทอากาศระหว่างรากกับบรรยากาศ

(2.) ลำต้นของปาล์ม

ปาล์มส่วนมากมีลักษณะลำต้นเดี่ยวตั้งตรงรูปร่างทรงกระบอก งอกขึ้นจากพื้นเพียงต้นเดียวไม่มีการแตกหน่อหรือแตกกิ่ง เช่น มะพร้าว หมาก มีเนื้อเยื่อเจริญเฉพาะตรงปลายยอด (Apical meristem) ต้นปาล์มน้ำมันในระยะ 2-3 ปีแรก จะเจริญเติบโตทางด้านกว้าง หลังจากนั้นลำต้นจะยึดขึ้นปล้องฐานโคนใบและข้อจะปรากฏให้เห็นก็ต่อเมื่อปาล์มน้ำมันอายุมากแล้ว โดยทั่วไปลำต้นมีความสูงเพิ่มขึ้นประมาณ 35-60 เซนติเมตรต่อปี ขึ้นกับสภาพแวดล้อมและพันธุกรรม ปาล์มน้ำมันมีความสูงมากกว่า 30 เมตร และมีอายุยืนนานมากกว่า 100 ปี แต่ในทางการค้าปาล์มน้ำมัน ไม่ควรมีความสูงเกิน 15-18 เมตร หรืออายุประมาณ 25 ปี เนื่องจากอายุที่มากขึ้นผลผลิตจะลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(3.) ใบของปาล์ม

ใบของปาล์มน้ำมันเป็นใบประกอบมีรูปทรงคล้ายขนนก ประกอบด้วยแกน ทางใบ ก้านใบ และใบย่อย ซึ่งเกิดจากการพัฒนาของเนื้อเยื่อที่ปลายยอดของลำต้น บริเวณดังกล่าวนี้ จะมีจุดกำเนิดตาใบอยู่มากกว่า 50 ตาใบ ในปาล์มที่มีอายุ 5-6 ปี จำนวนใบหรือทางใบของปาล์มน้ำมันจะมีอยู่ระหว่าง 30-40 ทางใบต่อปี หลังจากนั้นจะลดลงเป็น 20-25 ทางใบต่อปี ทางใบ จะเกิดในลักษณะเป็นเกลียวรอบต้น โดยลักษณะการเวียนของทางใบมี 2 แบบคือเวียนซ้ายและเวียนขวา ซึ่งขึ้นอยู่กับตอนแรกเริ่มแตกตาใบว่าเวียนซ้ายหรือเวียนขวา ไม่ว่าจะเวียนทางใดจะไม่มีผลต่อการให้ผลผลิตของปาล์มน้ำมัน ซึ่งสามารถสังเกตจากรอยที่ฐานใบติดกับลำต้นหลังการตัดแต่งทางใบของต้นปาล์ม

(4.) ช่อดอกของปาล์ม

ดอก หรือ เรียกอีกอย่างหนึ่งว่า จัน ดอกของปาล์มไม่ได้มีกลิ่นหอมเหมือนดอกของพืชชนิดอื่นๆ ไม่ได้มีความสวยงาม ขนาดดอกที่เล็กและแข็ง ประกอบด้วยกลีบเลี้ยง กลีบดอก เกสรเพศผู้และเกสรเพศเมีย มีการออกดอกเป็นช่อพวง โดยช่ออ่อนจะมีน้ำหวานอยู่ที่ปลายช่อ สามารถนำมาทำน้ำตาลสด และน้ำตาลปีปได้ ปาล์มส่วนใหญ่จะออกดอกเป็นระยะตลอดอายุขัยของต้น แต่มีปาล์มบางชนิดที่ออกดอกครั้งเดียว เมื่อออกดอกและให้ผลแล้วต้นก็จะตายไป เนื่องจากใช้อาหารที่สะสมในลำต้นจนหมด แต่กว่าใช้เวลาในนานกว่าจะออกดอก ปาล์มที่มีลักษณะเช่นนี้ ได้แก่ สาคุ เนื่องจากปาล์มน้ำมันเป็นพืชผสมข้ามดอกเพศเมียและดอกเพศผู้แยกช่อดอกภายในต้นเดียวกัน (Monoecious) ที่ตำแหน่งของทางใบมีตาดอก 1 ตา อาจจะพัฒนาเป็น ช่อดอกเพศผู้หรือเพศเมียก็ได้ ซึ่งบางครั้งจะพบว่ามีช่อดอกกะเทยซึ่งมีทั้งดอกเพศผู้และเพศเมียอยู่ร่วมกัน (Hermaphrodite) การบานของดอกปาล์มน้ำมันแต่ละดอกจะเกิดขึ้นไม่พร้อมกัน ใช้เวลาประมาณ 33-34 เดือนในการพัฒนา จากระยะตาดอกจนเจริญเติบโตพร้อมที่จะได้รับการผสมพันธุ์ ในช่วง 20 เดือนก่อนดอกจะบานจะเกิดการเปลี่ยนเพศของตาดอก ในสภาพแวดล้อมที่มีเหมาะสม โดยส่วนมากดอกเพศเมียนั้นจะพัฒนามาจากช่อดอก ลมและแมลงเป็นพาหะสำคัญที่ช่วยในการผสมเกสร โดยเฉพาะด้วงงวงปาล์มน้ำมัน เป็นแมลงที่สำคัญอย่างยิ่งในการช่วยผสมพันธุ์ของเกสร 5-6 เดือนหลังจากมีการผสมเกสรแล้ว จะมีการเก็บเกี่ยวผลผลิตทะลายปาล์มที่สุกแก่เต็มที่ซึ่งทะลายปาล์มนี้พัฒนามาจากช่อดอกตัวเมีย

(4.1) ช่อดอกตัวเมีย (Female inflorescences)

เป็นแบบช่อเชิงลด (Spike) คือมีแกนกลางช่อดอกและดอกจะบานจากโคนไปหาปลายช่อ ยาวประมาณ 24-45 เซนติเมตร มีกาบหุ้ม (Bract) กาบรอง (Bractiole) และมีกลีบดอก (Perianth) ซึ่งทำหน้าที่ห่อหุ้มรังไข่ไว้ ยอดเกสรตัวเมียมี 3 แฉก เมื่อดอกบานแฉกนี้จะมีการโค้งเปิดออก วันแรกกลีบดอกเป็นสีขาว ตรงกลางมีต่อมผลิตของเหลว เหนียว วันต่อมาเปลี่ยนเป็นสีชมพู วันที่ 2-3 ของเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การบานของดอกจะเป็นระยะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการผสมพันธุ์ปาล์มน้ำมัน วันที่3 เปลี่ยนเป็น สี น้ำตาลอ่อน และวันที่4 เปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลเข้ม หลังจากผสมเกสรแล้วยอดเกสรตัวเมียจะเปลี่ยนเป็น สีดำและแข็ง ปาล์มน้ำมันที่โตเต็มที่แล้วช่อดอกตัวเมียมีช่อดอกย่อย ประมาณ 110 ช่อ และมีดอกตัว เมีย ประมาณ 4,000 ดอก

(4.2) ช่อดอกตัวผู้ (Male inflorescences)

ประกอบด้วยช่อดอกย่อย (Spikelet) มีลักษณะยาวเรียว คล้ายนิ้วมือ แต่ละอันยาวประมาณ 10-20 เซนติเมตร หนา 0.8-1.5 เซนติเมตร ดอกตัวผู้ที่เจริญเต็มที่แล้วก่อนที่จะบานมีขนาดกว้าง 1.5-2 มิลลิเมตร ยาว 3-4 มิลลิเมตร จะถูกห่อหุ้มด้วยกาบหุ้มรูปสามเหลี่ยม มีกลีบดอก 2 ชั้น มีเกสรตัวผู้ รวมกันอยู่เป็นท่อตรงกลางดอก อับเกสรตัวผู้มี 2 พู ละอองเกสรจะหลุดจากช่อดอกทั้งหมดภายใน เวลา 3 วัน แต่ถ้าอากาศชื้นจะใช้เวลามากขึ้น ละอองเกสรจะมีชีวิตอยู่ได้เพียง 7 วัน แต่หลังจากวันที่ 4 นั้นความมีชีวิตของเกสรจะต่ำลง ต้นปาล์มน้ำมันที่โตเต็มที่ ช่อดอกตัวผู้ 1 ดอกให้ละอองเกสรมี น้ำหนักประมาณ 30-50 กรัม ช่อดอกผสม หรือ กระเทย (Mixed or hermaphrodite inflorescences) ช่อดอกประเภทนี้คือช่อดอกที่มีช่อดอกย่อยทั้งเพศผู้และเพศเมียอยู่ในช่อดอก เดียวกัน เกิดขึ้นในบางโอกาสเท่านั้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งในระยะที่ปาล์มเริ่มผลิตช่อดอกใหม่ (อายุ ประมาณ 3-4 ปี) โดยทั่วไปช่อดอกย่อยเพศ เพศผู้จะอยู่ทางส่วนโคนและปลายของช่อดอก โดยช่อดอกประเภทนี้ทั้งเพศผู้และช่อดอกกระเทย เป็นช่อดอกที่มีลักษณะที่ไม่พึงประสงค์ เพราะจะทำให้ ผลผลิตต่ำและไม่สามารถเจริญเติบโตต่อไปเป็นผลผลิตได้ จึงต้องมีการตัดทิ้งเพื่อให้ช่อดอกใหม่เกิด ขึ้นมา โดยโอกาสที่จะเกิดเป็นช่อดอก เพศผู้ เพศเมีย หรือว่าดอกกระเทย นั้นขึ้นอยู่กับพันธุกรรม อายุพืช สภาพแวดล้อม และการจัดการ

(5.) ทะลายของปาล์ม

ทะลายปาล์มน้ำมันประกอบด้วย ก้านทะลาย ช่อดอกย่อยและผล ในแต่ละทะลายมีปริมาณ ผล 45-70 เปอร์เซ็นต์ เมื่อทะลายปาล์มน้ำมันสุกแก่เต็มที่แล้ว มีน้ำหนักประมาณ 1-60 กิโลกรัม ขึ้นอยู่กับอายุของปาล์มน้ำมันและปัจจัยสิ่งแวดล้อมแบบการปลูกทางการค้าต้องการทะลายที่มี น้ำหนัก 10-25 กิโลกรัม เนื่องจากจะเป็นขนาดที่ให้สัดส่วนของผลปาล์มต่อทะลายมากที่สุด จำนวน ทะลายต่อต้นก็มีความแตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดของพันธุ์หรือความสมบูรณ์ของปาล์ม ถ้าทะลาย ขนาดใหญ่จำนวนทะลายต่อต้นจะน้อย แต่ถ้าหากทะลายมีขนาดเล็กจะมีจำนวนทะลายมาก

(6.) ผลของปาล์ม

ผลของปาล์มจะไม่มีก้าน มีหลายรูปร่าง ทั้งเรียวยาวกลมไปจนถึงยาวรี มีความยาวผลประมาณ 2-5 เซนติเมตร น้ำหนักตั้งแต่ 3 กรัม จนถึง 30 กรัม ผลนั้นประกอบไปด้วยเปลือกหิวด้านนอก เปลือก เองสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ด้านนอกที่มีเนื้อเยื่อด้านในที่มีความความเป็นเส้นใย เมื่อสุกจะเป็นสีส้มแดงและชั้นมีจะมีส่วนของน้ำมันอยู่ โดยเปลือกนอกนั้นมี 3 แบบ คือ

(6.1) Nigrescens

เป็นสีดำเมื่อยังดิบ ปลายผลมีสีข้างจะเปลี่ยนเป็นสีแดงเมื่อสุกแล้ว (Deep reddish-orange)

(6.2) Virescens

เมื่อผลดิบเป็นสีเขียว จะเปลี่ยนเป็นสีส้มเมื่อสุก (Light reddish-orange) จะพบน้อยกว่าแบบแรก

(6.3) Albescens

ผลจะเป็นสีเหลืองซีดเมื่อสุกแล้ว ซึ่งจะพบได้น้อยมาก

(7.) เมล็ดของปาล์ม

เมล็ดมีลักษณะแข็ง ประกอบไปด้วย กะลาปาล์มด้านนอกและเนื้อข้างใน ซึ่งเนื้อข้างในนั้นจะเจริญมาจากไข่ ความหนาของกะลาปาล์มและเนื้อในปาล์มจะส่งผลต่อขนาดของเมล็ด บนกะลานั้นจะมีช่องสำหรับการงอกของต้นอ่อนปาล์ม โดยมี 3 ช่อง ซึ่งประกอบด้วย อาหารของต้นอ่อน (Endosperm) ที่เป็นเนื้อข้างในมีสีขาวอมเทาโดยในส่วนของเนื้อในนี้จะมีส่วนที่เป็นน้ำมันสะสมอยู่ และมีเยื่อ (Testa) สีน้ำตาลแก่หุ้มอยู่ โดยปกติเมล็ดปาล์มน้ำมันมีการพักตัวซึ่งสามารถทำลายการพักตัวโดยการอบด้วยการให้ความร้อนจะทำให้เมล็ดงอกเมื่อได้รับการกระตุ้นโดยอุณหภูมิและความชื้นที่เหมาะสม กระบวนการงอกจะเกิดในระยะเวลา 3-4 วัน ซึ่งแต่ละเมล็ดนั้นจะใช้เวลาในการงอกแตกต่างกัน โดยจะขึ้นอยู่กับความสมบูรณ์และสภาวะแวดล้อมที่เหมาะสม

ตารางที่ 2.4 องค์ประกอบของปาล์มน้ำมัน

องค์ประกอบ	ร้อยละ
เซลลูโลส (Cellulose)	25.3
เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose)	27.8
ลิกนิน (Lignin)	26.6
เถ้า (Ash)	16

จากข้อมูลขององค์ประกอบและลักษณะทางพฤกษศาสตร์ของปาล์มน้ำมันข้างต้นนั้น ในปัจจุบันได้มีการนำส่วนต่างๆของปาล์มมาประยุกต์ใช้มากมาย อาทิ กะลาปาล์ม ที่สามารถนำมาเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พัฒนาทำเป็นเชื้อเพลิงในอุตสาหกรรมใช้แทนน้ำมันดีเซล สามารถใช้ได้เครื่องยนต์ที่ผ่านการดัดแปลงสภาพให้มีความเหมาะสมกับน้ำมันปาล์มและจากการทดสอบพบว่าไอเสียจากเครื่องยนต์มีความสะอาดกว่าเครื่องยนต์ที่ใช้ น้ำมันดีเซลและที่สำคัญคือไม่มีซัลเฟอร์ หรือไนโตรเจนออกไซด์ในไอเสีย มีราคาถูกและมีจุดวาบไฟสูง (230 องศาเซลเซียส) กว่าน้ำมันดีเซล (52 องศาเซลเซียส) จึงปลอดภัยต่อการขนส่ง ทำให้ปาล์มน้ำมันนั้นกลายเป็นพืชเศรษฐกิจทางภาคใต้ของประเทศไทย เนื่องจากสามารถนำไปพัฒนาใช้ประโยชน์ได้ในหลายๆด้าน

2.12 กระบวนการคาร์บอไนเซชัน

คาร์บอไนเซชันเป็นกระบวนการสลายตัวของชีวมวลโดยการให้ความร้อน ทำได้โดยการเผาวัตถุดิบในที่อับอากาศ อุณหภูมิไม่เกิน 1,000°C โดยจะขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุดิบ ขั้นตอนในการทำปฏิกิริยาคาร์บอไนเซชันจัดว่าเป็นขั้นตอนที่สำคัญเนื่องจากขั้นตอนนี้จะเป็นขั้นตอนที่มีการเริ่มสร้างโครงสร้างรูพรุนขึ้น โดยในระหว่างการทำปฏิกิริยา ธาตุและองค์ประกอบบางชนิด เช่น ไฮโดรเจน ออกซิเจน ไนโตรเจนและน้ำ ได้มีการถูกจำกัดออกไปจากตัววัตถุดิบ [32]

2.12.1 กระบวนการสลายตัวของชีวมวลด้วยความร้อนในสภาพอับอากาศ

แบ่งออกได้เป็น 4 ขั้นตอน ดังนี้

(1.) การไล่ความชื้น

เป็นการให้ความร้อนแก่ชีวมวลที่อุณหภูมิบรรยากาศจนถึง 180°C ช่วงนี้ชีวมวลจะคายน้ำที่ดูดซับอยู่ในช่องว่างระหว่างเซลล์ (Free water) และน้ำที่อยู่ในผนังเซลล์ (Bound water) คว้นที่ออกมาจะมีสีขาวปนน้ำเงินอ่อนซึ่งจะมีแต่ไอน้ำ ไม่มีกลิ่นฉุน ไม่แสบตาและจุ่มก

(2.) การไล่สารระเหิด

เป็นการให้ความร้อนแก่ชีวมวลที่อุณหภูมิประมาณ 180-270°C ช่วงนี้เฮมิเซลลูโลส (Hemicelluloses) จะสลายตัวออกมาจนไปหมดที่อุณหภูมิประมาณ 270 °C เตาเผาถ่านที่ดีจะรักษาอุณหภูมิระดับนี้ไว้นานและใกล้เคียงกันทั่วทุกจุดของเตา คว้นที่ออกมาในช่วงนี้จะเริ่มมีสีจาง ๆ เจือปนอยู่ด้วยและจะมีก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) กรดน้ำส้ม (Acetic acid) และเมทานอล (Methanol) เจือปนออกมากับคว้นด้วย แต่มีปริมาณต่ำมาก นำไปใช้ประโยชน์ไม่ได้

(3.) การเปลี่ยนชีวมวลเป็นถ่าน

อุณหภูมิจะอยู่ประมาณ 270-400°C ช่วงนี้ชีวมวลสลายตัวด้วยตัวเองจากปฏิกิริยาคายความร้อน (Exothermic reaction) อันเกิดจากความร้อนที่สะสมไว้ เซลลูโลสจะเริ่มสลายตัวอย่างรวดเร็ว เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่อุณหภูมิประมาณ 275°C คาร์บอนที่ออกมาจะมีสีขาวปนเหลือง มีกลิ่นฉุนจัด สามารถติดไฟได้ การดักเก็บน้ำส้มควันไม้ที่มีคุณภาพจะทำได้ในช่วงนี้ ลิกนิน (Lignin) ที่อุณหภูมิประมาณ 310°C ไปจนถึง 400°C จะเริ่มมีการสลายตัวเริ่มสลายตัว โดยในกระบวนการนี้เสร็จสิ้นชีวมวลจะเปลี่ยนเป็นถ่านทั้งหมดแล้ว

(4.) การทำให้ถ่านบริสุทธิ์

ถึงแม้ว่าที่ 400°C ชีวมวลจะเปลี่ยนเป็นถ่านทั้งหมดแล้วแต่ก็ยังคงมีบางส่วนที่มีน้ำมันนาร์ปะปนอยู่ เมื่อนำไปใช้สำหรับประกอบอาหาร น้ำมันนาร์จะถูกเผาไหม้ในเตาเผาเกิดเป็นสารประกอบขึ้น ซึ่งได้แก่คือ เบนโซไพเร็น (Benzopyrene) และไดเบนซานทราเซน (Dibenzanthracene) ที่ถือว่าเป็นสารก่อโรคมะเร็ง จึงถือว่าถ่านนี้ยังมีคุณภาพที่ต่ำอยู่ ควรอบถ่านต่อไปที่อุณหภูมิในช่วง 500-600°C ต่อไปอีกระยะหนึ่งเพื่อไล่น้ำมันนาร์ออกไปให้หมด

2.12.2 ตัวแปรในการเกิดรูพรุน

ถ่านชาร์ที่ได้จะมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับคาร์บอน ที่มีการจัดการโครงสร้างผลึกที่ไม่มีความเป็นระเบียบซึ่งจะมีช่องว่างรูพรุนระหว่างผลึก โดยมีตัวแปรในการทำปฏิกิริยาดังนี้

(1.) อุณหภูมิ

อุณหภูมิเป็นตัวแปรที่มีผลต่อการทำปฏิกิริยาและปริมาณผลิตภัณฑ์มากที่สุด คือ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ปริมาณการเกิดถ่านชาร์จะลดลง จะกลายเป็นส่วนของน้ำมันนาร์และแก๊สมากขึ้น และคุณสมบัติของน้ำมันนาร์ก็จะเปลี่ยนแปลงไปด้วย เพราะการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมินั้นเป็นการเพิ่มพลังงานในการเข้าไปทำลายพันธะของวัตถุดิบนั้นด้วย

(2.) อัตราความร้อน

อัตราความร้อนเป็นตัวแปรที่จะกำหนดว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีสถานะแบบใด ซึ่งมีผลต่อคุณสมบัติและปริมาณของน้ำมันนาร์และสารระเหย การเพิ่มขึ้นของอัตราความร้อนจะทำให้สารระเหยหลุดปลดปล่อยไปอย่างรวดเร็ว ทำให้คาร์บอนที่ได้มีขนาดรูพรุนที่ค่อนข้างใหญ่ ความว่องไวในการทำปฏิกิริยาค่อนข้างสูงกว่าคาร์บอนที่มีอัตราความร้อนที่ต่ำ คาร์บอนจะเรียงตัวเป็นระเบียบน้อยกว่า ทำให้เมื่อนำไปกระตุ้นจะเกิดการเข้าไปทำปฏิกิริยาได้ง่ายกว่า

(3.) ตัวกลางของปฏิกิริยา

ตัวกลางของปฏิกิริยาจะมีผลกระทบต่อปฏิกิริยา ถ้าแก๊สและไอที่เกิดขึ้นนั้นถูกพาออกไปอย่างรวดเร็ว เช่น ไนโตรเจน มีความเฉื่อยต่อปฏิกิริยาเผาไหม้ของคาร์บอนน้อยกว่า จะทำให้เกิดความว่องไวกับการทำปฏิกิริยากับตัวกระตุ้นที่สูงกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(4.) ธรรมชาติของวัตถุดิบ

วัตถุดิบแต่ละชนิดมีสถานะที่เหมาะสมแตกต่างกันไปในการทำปฏิกิริยาคาร์บอนในเซชัน ชนิดของวัตถุดิบที่ต่างกันนั้นอาจจะมีวิธีการกระตุ้นที่ต่างกันไปด้วย เพื่อให้ได้คาร์บอนที่มีคุณภาพที่ดีที่สุด ซึ่งเหมาะแก่การนำไปใช้งานในด้านอื่นๆต่อไป

2.12.3 โครงสร้างของพื้นที่ผิวหลังผ่านกระบวนการคาร์บอนในเซชัน

จากการทำปฏิกิริยาคาร์บอนในเซชัน ธาตุและองค์ประกอบต่างๆที่ไม่ใช่คาร์บอน เช่น ไนโตรเจน ไฮโดรเจน ออกซิเจนและน้ำ ถูกกำจัดออกไปในรูปของแก๊ส อะตอมของคาร์บอนที่ยังคงอยู่เหมือนจะเรียงตัวกันเป็นชั้นๆ วงแหวนเฮลิซึม (Aromatic ring) เชื่อมโยงกันไปอย่างไม่เป็นระเบียบ เกิดช่องว่างและรูพรุนขึ้น ซึ่งจะเป็นที่อยู่ของพวกทาร์ ช่องว่างเหล่านี้จะสามารถพัฒนาไปเป็นรูพรุนได้เมื่อผ่านกระบวนการกระตุ้น ซึ่งจะนำมาถึงสมบัติการดูดซับ โดยการล้างหรือเผาพวกทาร์ทิ้งไป แล้วสร้างหมู่ฟังก์ชันขึ้นมาแทน เพื่อนำไปช่วยในการดูดซับที่ดีขึ้น การดูดซับเหล่านี้ จะเกิดขึ้นที่พื้นผิวของตัวคาร์บอน

2.13 กระบวนการสลายตัวด้วยความร้อน (Pyrolysis)

คือกระบวนการที่มีการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีของสารประกอบอินทรีย์ขนาดใหญ่ โดยใช้ความร้อนในสถานะที่ไร้อากาศ โดยจะเกิดการแตกของพันธะโมเลกุลในองค์ประกอบของสารจากที่สายโซ่พันธะเคมียาวๆ แตกให้เป็นสายโซ่สั้นๆ ส่วนที่เป็นองค์ประกอบของคาร์บอนที่ระเหยได้ก็จะกลายเป็นก๊าซเชื้อเพลิง บางส่วนที่ถูกควบแน่นก็จะกลายเป็นของเหลว (น้ำมันทาร์) กระบวนการไพโรไลซิส เป็นการให้ความร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 400-700 องศาเซลเซียส ในสถานะที่ปราศจากออกซิเจน (หรือมีออกซิเจนอยู่น้อย) ความร้อนจึงทำให้สายโซ่ของโมเลกุลเกิดการตัดขาดทำให้สายโซ่โมเลกุลนั้นมีความยาวสั้นลง เป็นการสลายตัวด้วยความร้อนที่มีเป็นกระบวนการแบบปฏิกิริยาดูดความร้อนที่ต้องใช้ความร้อนเป็นพลังงานเพื่อแยกองค์ประกอบต่างๆ ซึ่งเกิดจากการระเหยเป็นไอของสารอินทรีย์ [33]

2.13.1 กลไกการสลายตัวด้วยความร้อน

(1.) ช่วงก่อนการสลายตัวด้วยความร้อน

อยู่ในช่วงอุณหภูมิ 120-200 องศาเซลเซียส ช่วงนี้จะเป็นช่วงที่เริ่มมีการจัดเรียงองค์ประกอบใหม่ โดยที่องค์ประกอบเดิม เช่น น้ำ สารระเหยง่ายบางชนิด ที่มีการระเหยหลุดออกไป ซึ่งจะเกิดการทำลายพันธะโมเลกุลของสารตั้งต้นบางส่วน รวมทั้งยังมีการเกิดหมู่ฟังก์ชันอื่นๆเกิดขึ้น อาทิ หมู่คาร์บอนิล (Carbonyl group) หมู่คาร์บอกซิล (Carboxyl group) และหมู่ไฮเปอร์ออกไซด์ (Hyperoxyl group) เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

oxide) ขึ้นซึ่งถือว่าช่วงก่อนการสลายตัวนี้เป็นช่วงที่มีความสำคัญของกระบวนการสลายตัวด้วยความร้อน

(2.) ช่วงการสลายส่วนที่เป็นของแข็ง

เป็นขั้นตอนหลักของการเกิดกระบวนการสลายตัวด้วยความร้อน ขั้นตอนนี้จะมียุทธการเกิดที่ค่อนข้างเร็วมาก อยู่ในอุณหภูมิระหว่าง 300-600 องศาเซลเซียส สำหรับไนโมเลกุลใหญ่สายโซ่พหุวัณที่ยาวนั้นจะเกิดการแตกสลายของพหุวัณให้สั้นลง เกิดการแตกตัวของพหุวัณ C-C, C-S และ C- พร้อมกับเกิดสารผลิตภัณฑ์ระหว่างปฏิกิริยา โดยสารผลิตภัณฑ์จะตั้งไฮโดรเจนจากสารอื่นๆมากล้นตัวเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันเกิดเป็นถ่านโค้ก โดยที่ถ่านโค้กนั้นจะไม่เกิดปฏิกิริยาต่อ ก็จะกลายมาเป็นถ่านชาร์ในที่สุดเมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้น มีแก๊สผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นคือ มีเทน ไฮโดรเจนและคาร์บอนมอนอกไซด์

2.13.2 ประเภทของการไพโรไลซิส

(1.) ไพโรไลซิสแบบช้า (Slow pyrolysis) คือ การไพโรไลซิสที่ใช้ความเร็วในการให้ความร้อนไม่เกิน 10 องศาเซลเซียสต่อวินาที (Heating rate) อุณหภูมิที่ใช้ให้ความร้อนจะอยู่ในช่วง 400-600 องศาเซลเซียส ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะเป็นของแข็ง (เขม่าดำ ถ่านชาร์) ในปริมาณสูง และไอน้ำมันและก๊าซในปริมาณที่น้อย

(2.) ไพโรไลซิสแบบเร็ว (Fast pyrolysis) คือ การไพโรไลซิสที่ใช้ความเร็วในการให้ความร้อน 10-100 องศาเซลเซียสต่อวินาที (Heating rate) อุณหภูมิที่ใช้ให้ความร้อนจะอยู่ในช่วง 600-650 องศาเซลเซียส ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะเป็นน้ำมัน 50-60% ของแข็ง 25-30% และก๊าซ 15-20%

(3.) ไพโรไลซิสแบบเร็วมาก (Flash pyrolysis) คือการไพโรไลซิสที่ใช้ความเร็วในการให้ความร้อนมากกว่า 100 องศาเซลเซียสต่อวินาที (Heating rate) อุณหภูมิที่ใช้ให้ความร้อนสูงถึง 1,000 องศาเซลเซียส ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะเป็นก๊าซทั้งหมด

2.13.3 ผลิตภัณฑ์จากกระบวนการสลายตัวด้วยความร้อน

ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีจากกระบวนการนี้มีด้วยกัน 3 ประเภท คือ

(1.) แก๊ส

ในการทำลายพหุวัณโดยการให้ความร้อนจะมีแก๊สที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่ประกอบด้วย คาร์บอนไดออกไซด์ คาร์บอนมอนอกไซด์ สารประกอบไฮโดรคาร์บอน และไฮโดรเจน ตามสภาวะเงื่อนไขหากอยากให้ได้ผลิตภัณฑ์เป็นแก๊ส จะมีการเติมอากาศลงไปในเตาปฏิกรณ์ เพื่อให้อากาศไปเผาไหม้คาร์บอนบางส่วน ทำให้เกิดแก๊สจากการเผาไหม้มากขึ้น สำหรับกระบวนการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีเพื่อให้ได้แก๊สเป็นส่วนใหญ่นี้เรียกว่า “แก๊สซิฟิเคชัน (Gasification)” โดยเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระบวนการนี้จะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิค่อนข้างจะสูงที่ประมาณ 1,500-1,600 องศาเซลเซียส ซึ่งต้องมีการเติมอากาศหรือออกซิเจนเข้าไปเพื่อนำรักษาอุณหภูมิให้สูงเท่านี้ได้

(2.) ของเหลว

ของเหลวที่เกิดขึ้นจากการสลายพันธะทางความร้อนนี้เรียกว่า น้ำมันชีวภาพ (Pyrolysis oil หรือ Bio oil) ของเหลวนี้จะประกอบด้วยน้ำและสารอินทรีย์ ซึ่งเกิดจากการควบแน่นมาจากกระบวนการให้ความร้อน นอกจากนี้ยังประกอบด้วยเซลล์ลูโลสและลิกนิน ซึ่งหลุดออกมาจากกระบวนการโดยผ่านการระเหย สำหรับสภาวะนี้ต้องไม่มีอากาศหรือออกซิเจนระบบ จะมีการให้ความร้อนในอัตราที่สูงและค่อนข้างเร็ว จึงจะทำให้ได้น้ำมันชีวภาพในปริมาณที่ค่อนข้างมาก

(3.) ของแข็ง

ของแข็งที่ได้จากกระบวนการสลายตัวด้วยความร้อนนี้เรียกว่า ถ่านชาร์ (Char) ซึ่งจะมีคุณสมบัติที่ค่อนข้างใกล้เคียงกับคาร์บอน โดยเงื่อนไขและสภาวะที่เหมาะสมคือ ไม่มีการเติมอากาศหรือออกซิเจนในระบบและอัตราการให้ความร้อนอย่างช้าๆ สม่ำเสมอ ขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนเบื้องต้นที่ทำให้เกิดโครงสร้างรูพรุน กระบวนการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบเพื่อให้ได้ของแข็งเป็นส่วนมาก เรียกว่าคาร์บอนเซชัน (Carbonization) ถ่านชาร์ ที่ได้จากกระบวนการนี้จะมีความสามารถในการดูดซับที่ค่อนข้างต่ำ เพราะว่ามีอุณหภูมิที่ใช้ในการสลายตัวมีอุณหภูมิต่ำกว่า 400-600 องศาเซลเซียสซึ่งยังมีน้ำมันที่ตกค้างอยู่ในช่องว่าง ต้องนำไปผ่านกระบวนการพัฒนาโครงสร้างในขั้นต่อไป เช่น การทำคาร์บอนเซชันและการกระตุ้น

2.13.4 ประโยชน์ของผลิตภัณฑ์จากกระบวนการสลายตัวด้วยการให้ความร้อน

(1) ผลิตภัณฑ์แก๊ส

ค่าความร้อนของแก๊สที่ได้มีค่าค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับเชื้อเพลิงหลายๆ ชนิด จึงทำให้สามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงได้

(2) ผลิตภัณฑ์ของเหลว

สมบัติของน้ำมันชีวภาพที่ได้มากจากกระบวนการมีค่าความถ่วงจำเพาะ ความหนืด อยู่ระหว่างน้ำมันดีเซลและน้ำมันเตา ซึ่งสามารถนำไปพัฒนาเป็นน้ำมันเชื้อเพลิงพลังงานใหม่ได้

(3.) ผลิตภัณฑ์แข็ง

เนื่องจากความเป็นรูพรุนที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างที่ผ่านกระบวนการสลายตัวด้วยความร้อนนี้ สามารถนำไปพัฒนาเพื่อนำไปทำตัวดูดซับได้ โดยการนำไปกระตุ้นอีกครั้งหนึ่ง หรือว่าจะนำไปทำการคาร์บอนเซชันอีกรอบหนึ่ง เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวและประสิทธิภาพในการดูดซับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.14 กระบวนการไฮโดรเทอร์มอล

ไฮโดรเทอร์มอล (Hydrothermal Process) เป็นวิธีการสังเคราะห์สารหรือการทำให้เกิดผลึกในสถานะที่ใช้อุณหภูมิและความดันสูงในตัวทำละลายที่เป็นน้ำ (Hydrothermal) การปลูกผลึกโดยวิธีนี้จะใช้อุปกรณ์ที่เรียกว่า ถังปฏิกรณ์ (Autoclave or Teflon lined Hydrothermal Synthesis Autoclave Reactor) โดยทั่วไป ถังปฏิกรณ์นี้จะประกอบด้วย กระบอกและฝาปิดอย่างหนาที่ทำด้วยสแตนเลสสตีล (Stainless steel) ซึ่งยึดกันด้วยเกลียวของฝาและกระบอกสแตนเลส หรือใช้น็อตหกเหลี่ยมที่มีเกลียวยึดฝาและกระบอกสแตนเลส ภายในกระบอกสแตนเลสจะมีภาชนะที่มีลักษณะเป็นกระบอกมีฝาปิดเช่นเดียวกัน ใช้สำหรับใส่สารเคมีและตัวทำละลายต่างๆ วัสดุที่ใช้จะต้องทนกรด-ด่าง รวมถึงทนความร้อนและความดันสูงได้ ซึ่งวัสดุนี้จะทำมาจากเทฟลอน (Teflon) และจะมียางที่ทนความร้อน (O-ring) ประกบระหว่างฝาปิดและกระบอกเทฟลอน เพื่อป้องกันไอของสารรั่วออกมา [34]

2.14.1 ปฏิกริยาที่เกิดขึ้น

(1.) ปฏิกริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis)

หมายถึงปฏิกริยาของสารกับน้ำ คือการให้โมเลกุลของน้ำ (H_2O) ไปทำปฏิกริยากับสารตัวอย่าง เช่น ซิวมวล เป็นต้น โดยที่โมเลกุลของน้ำจะเข้าไปทำลายพันธะของ ลิกนิน เซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส ซึ่งเป็นส่วนประกอบของชีวมวล จากพันธะที่มีสายโซ่โมเลกุลยาวก็จะมีสายโซ่พันธะที่สั้นลง

(2.) ปฏิกริยาดีไฮเดรชัน (Dehydration)

เป็นการกำจัดโมเลกุลของน้ำ (H_2O) ออกไปส่งผลให้ปริมาณคาร์บอนที่ได้มีมากขึ้น (Carbon content, %C) อีกแง่หนึ่งเป็นการกำจัดออกซิเจนที่อยู่ในรูปของน้ำออกไป

(3.) ปฏิกริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน (Polymerization)

เป็นการรวมตัวกันของโมเลกุลหรือสายโซ่ขนาดเล็กที่มีความไม่เสถียร มารวมตัวกันให้เป็นโมเลกุลขนาดใหญ่หรือสายโซ่ที่ใหญ่ขึ้น ให้เกิดความเสถียรมากขึ้น

2.15 การกระตุ้น (Activation)

ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการคาร์บอนไนเซชันดังที่กล่าวไปข้างต้นนั้นยังมีโครงสร้างรูพรุนเริ่มแรกที่ยังไม่มากและยังใช้เป็นสารดูดซับที่ไม่ดีพอจนกว่าจะมีการเพิ่มโครงสร้างรูพรุนด้วยการกระตุ้น (Activation) เช่น การกระตุ้นเชิงความร้อน ที่ประกอบด้วยการออกซิเดชันถ่านบางส่วนด้วยไอน้ำ คาร์บอนไดออกไซด์ ออกซิเจน หรืออากาศ ซึ่งก๊าซเหล่านี้จะทำปฏิกริยากับอะตอมคาร์บอนทำให้มวล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บนพื้นผิวภายนอกของถ่านถูกกำจัดออกไป ขณะที่รูพรุนขนาดเล็กของถ่านกัมมันต์จะเริ่มเกิดมากขึ้น ในขั้นการกระตุ้นรวมทั้งเกิดการเผาไหม้พื้นผิวบางส่วนออกไปทำให้รูพรุนขนาดเล็กที่ถูกปิดกั้นอยู่ ภายในเปิดสู่พื้นผิวภายนอกได้ ทั้งนี้อัตราการกระตุ้นจะถูกควบคุมโดยลักษณะเฉพาะของวัสดุตั้ง ต้นและสารกระตุ้น โดยจะสามารถแบ่งการกระตุ้นหลักๆได้ 3 แบบ ดังนี้ [35]

2.15.1 การกระตุ้นทางความร้อนหรือทางกายภาพ

การกระตุ้นทางความร้อนหรือทางกายภาพ (Thermal หรือ Physical activation) โดยทั่วไป จะประกอบด้วยสองขั้นตอน ขั้นตอนแรกเป็นการผลิตถ่านด้วยความร้อน (Thermal carbonization) จากวัตถุดิบภายใต้บรรยากาศของก๊าซเฉื่อย เช่น ไนโตรเจน อาร์กอน หรือฮีเลียม ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยา ทำให้สารระเหยง่ายถูกกำจัดออกไปในช่วงอุณหภูมิปานกลางหรือสูง จะได้ถ่านที่มีปริมาณคาร์บอนสูง ขั้นตอนที่สองคือการกระตุ้น (Activation) โดยบางส่วนของถ่านจะเกิดเป็นก๊าซด้วยการออกซิไดซ์ใน เตาเผาที่อุณหภูมิสูงโดยสารที่ใช้ส่วนใหญ่จะเป็นไอน้ำหรือคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งถ่านกัมมันต์ที่ได้จะมีพื้นที่ผิวสูงและมีรูพรุนขนาดเล็กเป็นส่วนใหญ่ แต่ถ้าอุณหภูมิในการกระตุ้นสูงขึ้นจะทำให้สัดส่วนรูพรุนขนาดกลางเพิ่มขึ้นตามระดับการเผาไหม้ที่สูงขึ้น โดยการกระตุ้นทางความร้อนหรือทางกายภาพ สามารถแบ่งประเภทย่อยๆได้อีกสี่ประเภท ดังนี้

(1.) การกระตุ้นด้วยไอน้ำ

การกระตุ้นด้วยไอน้ำ (Activation with steam) มีการใช้กันอย่างกว้างขวางสำหรับการผลิต ถ่านกัมมันต์ซึ่งสามารถให้พื้นที่ผิวจำเพาะได้มากกว่า $1,000 \text{ m}^2/\text{g}$ และได้ผลผลิตประมาณร้อยละ 50 ปกติการกระตุ้นด้วยไอน้ำสำหรับวัตถุดิบที่ปริมาณต่ำกว่าร้อยละ 10 จะได้ถ่านกัมมันต์ที่มีรูพรุน ขนาดเล็กโดยขนาดของรูพรุนจะเพิ่มขึ้นตามระดับการกระตุ้นแต่จะไม่ขยายขนาดไปเป็นรูพรุนขนาด กลางและเกิดหมู่ฟังก์ชันกรดออกซิเจนบนพื้นผิวในรูปฟีนอลิกเป็นหลัก นอกจากนี้จะทำให้เกิดวงอะโร มาติกที่ควบแน่นที่อุณหภูมิสูง ผลกระทบหลักของการกระตุ้นด้วยไอน้ำคือมีการเกิดและขยายรูพรุนที่ คงอยู่ในถ่าน ซึ่งการกระตุ้นด้วยไอน้ำไม่เพียงแต่ขจัดสารที่ไม่ต้องการออกไปแต่ยังสามารถทำให้เกิดรูพรุนขนาดเล็กและขยายความกว้างของรูพรุนขนาดเล็กด้วยการเพิ่มระดับการเผาไหม้มีผลทำให้ ปริมาตรรูพรุนขนาดเล็กของถ่านกัมมันต์มีค่าเพิ่มขึ้นจากตอนแรก

(2.) การกระตุ้นด้วยคาร์บอนไดออกไซด์

ในทางอุตสาหกรรมจะใช้ไอน้ำในการกระตุ้นมากกว่าคาร์บอนไดออกไซด์สำหรับการผลิต ถ่านกัมมันต์แต่มีข้อเสียบางประการคือ ไอน้ำทำปฏิกิริยาภายใต้การควบคุมทางเคมีในช่วงอุณหภูมิ กว้าง จึงจะทำให้ความพรุนเกิดขึ้นในทางตรงกันข้ามคาร์บอนไดออกไซด์ทำปฏิกิริยาภายใต้การ ควบคุมการแพร่ ซึ่งเป็นอุปสรรคในการใช้เป็นสารออกซิไดซ์ โดยจากการเปรียบเทียบพบว่าการเผา เภกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใหม่เกิดขึ้นคล้ายๆกันสำหรับวัตถุดิบตั้งต้นที่เหมือนกัน มีความจุในการดูดซับเหมือนกันการเกิดรูพรุน โดยคาร์บอนไดออกไซด์จะด้รูพรุนขนาดเล็กที่ใหญ่กว่าการกระตุ้นด้วยไอน้ำและร้อยละการผลิตสูงกว่า โดยขั้นตอนการกระตุ้นด้วยคาร์บอนไดออกไซด์มีสามขั้นตอนได้แก่ ขั้นตอนแรกการทำให้แห้งที่อุณหภูมิประมาณ 200 องศาเซลเซียส ขั้นที่สองการไฟโรไลซิสภายใต้บรรยากาศของไนโตรเจนและขั้นสุดท้ายการกระตุ้นด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ โดยในการกระตุ้นจะเกิดปฏิกิริยาวิวิธพันธ์ระหว่างคาร์บอนกับคาร์บอนไดออกไซด์ได้ผลิตภัณฑ์เป็นคาร์บอนมอนอกไซด์ โดยอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการกระตุ้นอยู่ที่ประมาณ 900 องศาเซลเซียสภายใต้อัตราเร็วที่ไม่สูงมากนักโดยการเกิดรูพรุนขึ้นอยู่กับสถานะของคาร์บอนไดออกไซด์

(3.) การกระตุ้นด้วยออกซิเจน

ออกซิเจน (O_2 หรือ O_3) เป็นสารออกซิไดซ์ที่แรงทำให้เกิดหมู่พื้นผิวกรดที่มีออกซิเจนและไปทำให้หมู่เบสลดลงและรูพรุนขนาดเล็กเกิดขึ้นไม่มากแต่กลับทำให้รูพรุนขนาดเล็กสูญหายไป ในกระบวนการกระตุ้นด้วยออกซิเจนขั้นตอนแรกเป็นช่วงให้ความร้อนจนอุณหภูมิถึงประมาณ 200 ถึง 300 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นช่วงที่ถ่านดูดซับออกซิเจนที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดติดไฟและขั้นต่อไปเป็นการปรับสภาพให้อยู่ในบรรยากาศของก๊าซเฉื่อยพร้อมกับเพิ่มความร้อนอย่างรวดเร็วซึ่งออกซิเจนที่ถูกดูดซับโดยถ่านในขั้นแรกจะเกิดการเผาไหม้ได้สารเชิงซ้อนคาร์บอนออกซิเจนโดยใช้เวลาในการกระตุ้นเพียงสั้น หลังจากนั้นทำให้เย็นลงในบรรยากาศของก๊าซเฉื่อยผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีการกระจายของรูพรุนที่แคบ แต่มีข้อเสียคือกระบวนการนี้มีค่าใช้จ่ายค่อนข้างสูงสำหรับการผลิตในระดับอุตสาหกรรม

(4.) การกระตุ้นด้วยอากาศ

การกระตุ้นด้วยอากาศคือการกระตุ้นในสภาพที่มีออกซิเจน ผลที่ได้หลังจากการกระตุ้นจะคล้ายกับการกระตุ้นด้วยออกซิเจนแต่ความรุนแรงของปฏิกิริยาจะน้อยกว่าเนื่องจากมีปริมาณความเข้มข้นของออกซิเจนน้อยกว่า เป็นผลให้ผลผลิตที่ได้จากการกระตุ้นด้วยอากาศสูงกว่าการกระตุ้นด้วยออกซิเจน พื้นผิวของคาร์บอนกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยอากาศยังค่อนข้างต่ำ ซึ่งในการกระตุ้นด้วยวิธีดังกล่าวจะใช้เวลาสั้นๆโดยปกติจะใช้เวลาไม่เกิน 1 ชั่วโมง

2.15.2 การกระตุ้นทางเคมี

การกระตุ้นทางเคมี (Chemical activation) เป็นวิธีที่ใช้กันอย่างกว้างขวางสำหรับการผลิตถ่านกัมมันต์ แต่การกำจัดและการคืนกลับของสารที่ใช้ในการกระตุ้นจากกระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์เป็นกระบวนการที่ค่อนข้างยุ่งยาก โดยความเข้มข้นหรืออัตราส่วนการแช่ของสารกระตุ้นและอุณหภูมิมีผลต่อพื้นผิว การกระจายขนาดรูพรุนและรูพรุนของถ่านกัมมันต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(1.) การกระตุ้นด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์

การผลิตถ่านกัมมันต์โดยการกระตุ้นด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์สำหรับสารลิกโนเซลลูโลสิกเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ถ่านกัมมันต์ใช้อุณหภูมิในการกระตุ้นที่ 800 องศาเซลเซียส อัตราส่วนของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 1:1 ถึง 1:4 ต่อน้ำหนัก โดยโซเดียมคาร์บอเนตจะถูกรีดิวซ์ด้วยคาร์บอนได้โลหะโซเดียมในระหว่างการให้ความร้อนได้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยากับโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เหลืออยู่ได้โซเดียมคาร์บอเนตเป็นการเกิดโซเดียมคาร์บอเนตอีกทางหนึ่ง นอกจากนี้จะเกิดโลหะโซเดียมขึ้นด้วยซึ่งจะถูกออกซิไดซ์เป็นโซเดียมออกไซด์และสุดท้ายจะถูกไฮโดรไลซ์ไปเป็นโซเดียมไฮดรอกไซด์ [36]

(2.) การกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์

การผลิตถ่านกัมมันต์โดยการกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ได้มีการศึกษาและการนำไปใช้อย่างกว้างขวางมากที่สุด การกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์จะทำการผสมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์กับวัตถุดิบตั้งต้นโดยการแช่ในสารละลายเป็นเวลาหนึ่งถึงสองวันโดยอาจจะลดเวลาให้น้อยลงโดยการแช่ร่วมกับสารลดแรงตึงผิว เช่น สบู่ สามารถลดเวลาลงเหลือเพียง 30 นาที ซึ่งประสิทธิภาพในการกระตุ้นเทียบเท่ากัน โดยปกติอัตราส่วนที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาอยู่ในช่วงระหว่าง 2 ถึง 4 ในส่วนของ การให้ความร้อนมีสองขั้นตอนโดยขั้นแรกจะทำที่อุณหภูมิต่ำกว่า 100 องศาเซลเซียส และขั้นที่สองที่ 700 ถึง 900 องศาเซลเซียสในบรรยากาศของก๊าซเฉื่อยทั้งสองขั้นตอน สำหรับในขั้นแรกต้องทำการระเหยน้ำออกก่อนหลังจากแช่กับสารละลายและในขั้นที่สองอุณหภูมิที่ใช้จะเท่ากับอุณหภูมิที่ใช้ในการกระตุ้นทางกายภาพ ในการกระตุ้นดังกล่าวนี้จะส่งผลให้เกิดรูพรุนขนาดเล็กในช่วงแรกและในช่วงท้ายๆจะเกิดทั้งรูพรุนขนาดเล็กและขนาดกลาง โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์จะทำปฏิกิริยากับโครงสร้างคาร์บอนได้ผลิตภัณฑ์เป็นของแข็งและก๊าซ ในขณะที่เดียวกันจะเกิดการเผาไหม้ของคาร์บอนที่ส่งผลให้เกิดรูพรุนในเนื้อคาร์บอนโดยระหว่างการเกิดปฏิกิริยาจะเกิดการไฮโดรเจนและโลหะโพแทสเซียมออกไซด์ขึ้น โดยปกติแล้วการกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์จะส่งผลให้เกิดถ่านกัมมันต์ที่มีประสิทธิภาพในการดูดซับที่สูงจากการที่มีรูพรุนขนาดเล็กที่แคบและมีรูพรุนขนาดใหญ่เพียงเล็กน้อย เมื่ออัตราส่วนของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการกระตุ้นเพิ่มขึ้นจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงที่รุนแรงขึ้น ซึ่งถ่านกัมมันต์ที่ได้จะมีความสามารถในการดูดซับที่สูงและมีการกระจายตัวของรูพรุนขนาดเล็กเพิ่มขึ้น ส่วนเวลาที่ใช้ในการกระตุ้นที่นานขึ้นและการเพิ่มอุณหภูมิที่ใช้ในการกระตุ้นจะทำให้เกิดรูพรุนขนาดกลางมากขึ้นโดยมีการขยายขนาดของรูพรุนขนาดเล็กไปเป็นรูพรุนขนาดกลางและยังทำให้เกิดการเผาไหม้คาร์บอนมากขึ้นซึ่งจะส่งผลให้พื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์มากขึ้นด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปฏิกิริยาการคาร์บอนในเซชันของสารลิกโนเซลลูโลซิกด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ในช่วงอุณหภูมิต่างๆจะเริ่มที่ 100 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นการระเหยน้ำและเมื่ออุณหภูมิมากขึ้นน้ำที่เกิดพันธะในวัตถุบดจะเริ่มระเหย ส่วนน้ำหนักที่สูญเสียอย่างรวดเร็วในช่วงระหว่าง 270 ถึง 370 องศาเซลเซียส เกิดจากการที่สารระเหยง่ายระเหยออกไป ในขณะที่อุณหภูมิสูงกว่า 370 องศาเซลเซียส เกิดการสลายของโครงสร้างภายในและปริมาณผลผลิตของถ่านกัมมันต์ที่ลดลงเกิดจากผลของอัตราส่วนโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาโดยจะไปเพิ่มการเผาไหม้ของคาร์บอนที่ทำให้เกิดการขยายตัวของรูพรุนขนาดเล็กไปเป็นรูพรุนขนาดกลางและยังทำให้เกิดรูพรุนขนาดเล็กใหม่ แต่ที่อัตราส่วนโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาดำ (0.25 ถึง 0.5) จะทำให้เกิดรูพรุนขนาดเล็กอย่างมากทำให้พื้นผิวและปริมาตรรูพรุนขนาดเล็กเพิ่มขึ้น เมื่ออัตราส่วนโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เพิ่มถึง 1 จะเกิดการขยายรูพรุนขนาดเล็กที่มีอยู่พร้อมกับเกิดรูพรุนขนาดเล็กใหม่ขึ้นต่อเนื่อง ทำให้มีพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนรวมสูงขึ้นโดยที่อัตราส่วนโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์สูงๆ รูพรุนขนาดเล็กที่เพิ่มขึ้นส่วนใหญ่เกิดจากการที่โลหะโพแทสเซียมเข้าไปแทรกในโครงสร้างคาร์บอน ส่วนการขยายขนาดรูพรุนปกติจะเกิดขึ้นเมื่อรูพรุนในโครงสร้างเริ่มเปิด การกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ปกติจะทำในบรรยากาศของก๊าซเฉื่อยโดยไม่สามารถทำในบรรยากาศปกติได้เพราะจะทำให้วัตถุบดตั้งต้นเกิดการเผาไหม้มากยิ่งขึ้นนอกจากนี้อากาศจะทำปฏิกิริยากับโลหะโพแทสเซียม [37]

(3.) การกระตุ้นด้วยโซเดียมคาร์บอเนต

การผลิตถ่านกัมมันต์โดยการกระตุ้นด้วยโซเดียมคาร์บอเนตเพื่อให้ได้ถ่านกัมมันต์ที่ดีต้องให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงกว่า 850 องศาเซลเซียส เนื่องจากอุณหภูมิการสลายตัวของโซเดียมคาร์บอเนตอยู่ที่ 850 องศาเซลเซียส เมื่ออุณหภูมิสูงเกินอุณหภูมิวิกฤตนี้จะทำให้โซเดียมคาร์บอเนตสลายตัวอย่างรวดเร็วและทำให้เกิดกระบวนการกระตุ้น ปริมาตรรูพรุนจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น โดยปริมาตรรูพรุนจะค่อยๆเพิ่มจาก 850 ถึง 875 องศาเซลเซียส และเมื่ออุณหภูมิอยู่ในช่วง 875 ถึง 900 องศาเซลเซียส ปริมาตรรูพรุนของถ่านกัมมันต์จะเพิ่มขึ้นถึงค่าสูงสุด แต่เมื่ออุณหภูมิมากกว่า 900 องศาเซลเซียส ปริมาตรรูพรุนกลับลดลงเนื่องจากอุณหภูมิสูงไปทำให้โซเดียมคาร์บอเนตสลายตัวที่อัตราสูงและเกิดการเผาไหม้คาร์บอนเพิ่มขึ้น ส่วนผลของอัตราส่วนในการทำปฏิกิริยาระหว่างโซเดียมคาร์บอเนตที่ 900 องศาเซลเซียส จะทำให้ปริมาตรรูพรุนเพิ่มขึ้นในช่วงอัตราส่วน 1:1 ไปจนถึงค่าสูงสุดที่ 1:1.75 แต่หลังจากนั้นจะลดลง ส่วนกรณีที่อัตราส่วนของโซเดียมคาร์บอเนตในการทำปฏิกิริยาสูงๆนั้นจะทำให้รูพรุนถูกทำลายเนื่องจากมีปริมาณโซเดียมคาร์บอเนตมากเกินไป ในการใช้โซเดียมคาร์บอเนตในการกระตุ้นจะผสมกับวัตถุบดในรูปผงแห้งและสามารถคืนกลับได้ง่าย ทำให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าใช้จ่ายไม่สูงมากนัก ประหยัดพลังงาน เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและเหมาะสำหรับการผลิตขนาดใหญ่ หรือสามารถทำในระดับปฏิบัติการขนาดใหญ่ได้ [38]

(4.) การกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมคาร์บอเนต

การผลิตถ่านกัมมันต์โดยการกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมคาร์บอเนต ผลของอุณหภูมิและกระบวนการกระตุ้นมีผลอย่างมากต่อสมบัติพื้นผิวของผงถ่านกัมมันต์จากการกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมคาร์บอเนตเช่นเดียวกับการกระตุ้นอื่นๆที่ได้ถ่านที่มีลักษณะผลึกคล้ายแกรไฟต์น้อยมากและเป็นคาร์บอนที่ไม่เป็นระเบียบมากกว่า และจะทำหน้าที่ในการรีดิวซ์โพแทสเซียมคาร์บอเนตโดยปริมาณคาร์บอนในถ่านจะเพิ่มขึ้นในระหว่างการรีดักชันโพแทสเซียมคาร์บอเนต ซึ่งในระหว่างการให้ความร้อนของการกระตุ้นมีการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นคือ อุณหภูมิระหว่าง 100 ถึง 280 องศาเซลเซียส จะเกิดการสูญเสียมวลเล็กน้อยที่เกิดจากการที่ความชื้นในวัตถุดิบถูกกำจัดออกไปและที่อุณหภูมิสูงกว่า 280 องศาเซลเซียส จะมีการสูญเสียน้ำอย่างมากซึ่งเป็นการเริ่มต้นของกระบวนการคาร์บอนเซชันที่มีสาเหตุจากการระเหยของสารระเหยง่ายในช่วงอุณหภูมิ 280 ถึง 410 องศาเซลเซียส ค่าการสูญเสียน้ำหนักที่เกิดจากการสลายตัวของความร้อนของโครงสร้างอสัณฐานพร้อมกับทำให้มีปริมาณคาร์บอนสูงขึ้นขณะที่ปริมาณสารอื่นๆ เช่น ไฮโดรเจน ไนโตรเจน ออกซิเจน กำมะถันลดลงในระหว่าง 410 ถึง 750 องศาเซลเซียส จะมีการสูญเสียน้ำหนักน้อยมากซึ่งเป็นผลจากการได้ของแข็งคาร์บอนที่ไม่มีสารระเหยง่ายปะปนอยู่ โพแทสเซียมคาร์บอเนตจะทำหน้าที่เป็นสารกระตุ้นในระหว่างการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิมากกว่า 600 องศาเซลเซียส ซึ่งทำให้มีการสูญเสียคาร์บอนบนพื้นผิวที่มีผลทำให้เกิดพื้นที่ผิวจำเพาะปริมาตรรูพรุนที่สูงในถ่านกัมมันต์ แต่เมื่ออุณหภูมิในการกระตุ้นมากกว่า 900 องศาเซลเซียสจะเกิดการระเหยของโพแทสเซียมคาร์บอเนตและทำให้รูพรุนขนาดเล็กรวมกันเป็นรูพรุนขนาดกลางและขนาดใหญ่มีผลทำให้ปลดปล่อยปริมาตรรูพรุนขนาดเล็กและพื้นที่ผิวจำเพาะ ในการผลิตถ่านกัมมันต์จากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรสามารถคืนกลับโพแทสเซียมคาร์บอเนตได้สูง ดำเนินการผลิตได้ง่าย เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมและต้นทุนในการผลิตต่ำ [39]

2.15.3 การกระตุ้นทางกายภาพและทางเคมี

การกระตุ้นผสมทางกายภาพและทางเคมี (Physiochemical activation) เป็นการกระตุ้นร่วมระหว่างการกระตุ้นทางกายภาพและเคมีต่อเนื่องกัน เช่น การคาร์บอนไนเซชันวัตถุดิบแล้วนำถ่านที่ได้ผสมเข้ากับโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ตามอัตราส่วน ต่อด้วยการกระตุ้นทางกายภาพ เป็นต้น

2.16 โมโนเอทานอลามีน (Monoethanolamine, MEA)

Ethanolamine, 2-aminoethanol หรือ monoethanolamine (มักเรียกย่อๆว่า ETA, MEA) เป็นโมเลกุลของสารประกอบอินทรีย์ที่มีสูตรโมเลกุลเป็น $\text{HOCH}_2\text{CH}_2\text{NH}_2$ โดยประกอบด้วยเอมีนปฐมภูมิ (Primary amine) และแอลกอฮอล์ปฐมภูมิ (Primary alcohol) หรือเรียกรวมกันว่าหมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl group) เอทานอลามีนเป็นสารประกอบไม่มีสี เป็นของเหลวหนืดมีกลิ่นคล้ายกับสารแอมโมเนีย มีการใช้กันอย่างแพร่หลาย

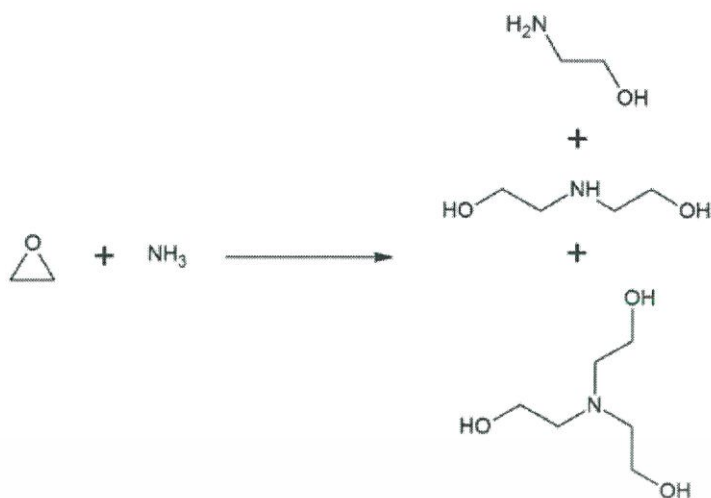


รูปที่ 2.4 สูตรโครงสร้างของเอทานอลามีน

(ที่มา: Academic Dictionaries and Encyclopedies, Ethanolamine, 2012)

2.16.1 การใช้เอทานอลามีนในอุตสาหกรรม

โมโนเอทานอลามีนได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่าง Ethylene oxide ร่วมกับ Ammonia ได้ผลิตภัณฑ์เป็น Diethanolamine และ Triethanolamine อัตราส่วนของผลิตภัณฑ์สามารถควบคุมได้จากการเปลี่ยนปริมาณของสารตั้งต้นที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา โดยปฏิกิริยานี้เป็นปฏิกิริยาคายความร้อนต้องมีการควบคุมการเกิดปฏิกิริยาเพื่อไม่ให้เกิดอันตราย



รูปที่ 2.5 ปฏิกิริยาการเกิดเมทาโนลามีน

(ที่มา: Academic Dictionaries and Encyclopedias, Reaction of Ethylene, 2013)

2.16.2 ซิวเคมีของเอทานอลามีน

เอทานอลามีนสามารถสังเคราะห์ได้จากกระบวนการ Decarboxylation ของซีรีน ดังสมการที่ (2.22)



เอทานอลามีนเป็นโมเลกุลที่อยู่บริเวณหัวของฟอสโฟลิพิด (Phospholipids) ซึ่งเป็นสารที่พบในเยื่อหุ้มเซลล์ของสิ่งมีชีวิตพวกที่มีนิวเคลียส ตัวอย่างเช่น Phosphatidylethanolamine ซึ่งจะใช้เป็นโมเลกุลที่ทำหน้าที่สื่อสารระหว่างเซลล์ เช่น Palmitoylethanolamide เป็นต้น [40]

2.16.3 การประยุกต์ใช้เอทานอลามีนในการดักจับก๊าซ

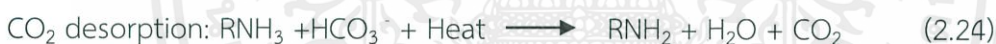
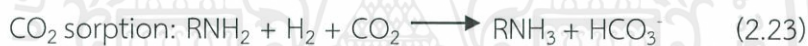
เอมีนหรือโมโนเอทานอลามีนมีสมบัติเป็นเบสอ่อนๆ นิยมนำไปใช้ประโยชน์เป็นตัวดักจับก๊าซต่างๆ สารละลายโมโนเอทานอลามีน นิยมนำมาใช้ในการดักจับก๊าซ ตัวอย่าง สารละลายเอทานอลามีนใช้ในการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์จากก๊าซผสมในบรรยากาศ เช่น เชื้อเพลิงและก๊าซธรรมชาติ โดยเอทานอลามีนไอออนจะไปทำลายโมเลกุลกรดโดยทำให้มีขั้วเกิดขึ้นแล้วทำให้สามารถละลายในน้ำได้มากขึ้นวิธีการการดักจับก๊าซของโมโนเอทานอลามีนสามารถนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กลับมาใช้ใหม่ได้โดยทำให้ความร้อนเพื่อทำให้โครงสร้างมีความแข็งแรงต่ำลงแล้วจะปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ออกมาจนกลายเป็นโมโนเอทานอลามีนที่บริสุทธิ์

2.16.4 ปฏิริยาเคมีของการดูดซึ่มก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายเอมีน

ปฏิริยาเคมีของการดูดซึ่มก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายเอมีนเป็นดังสมการที่ (2.23) โดยจากสมการจะใช้สารละลายเอมีน 2 mol ต่อคาร์บอนไดออกไซด์ 1 mol นอกจากนี้ สารละลายเอมีนที่ผ่านการใช้งานแล้วสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้โดยการทำปฏิริยาคายซึบของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2 desorption) ด้วยการให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงประมาณ 80-100 องศาเซลเซียส แล้วทำการลดความดันซึ่งจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ สารละลายเอมีนและน้ำดังสมการที่ (2.24) โดยสารละลายเอมีนสามารถกลับมาใช้ในอีกครั้งในกระบวนการเดิมได้ ส่วนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สามารถนำไปใช้ประโยชน์ต่างๆได้ ตัวอย่างเช่น การใช้ประโยชน์ในด้านอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น ผลิตน้ำแข็งแห้ง เป็นสารตั้งต้นในการผลิตน้ำอัดลม ใช้ในระบบปั๊มลม ของเครื่องจักร หุ่นยนต์ แขนกล หรือเครื่องมือต่างๆ เป็นต้น [41]



กลไกการดูดซึ่มก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยโมโนเอทานอลามีนมีปฏิริยาชีวิตเตอร์ไอออนเป็นปฏิริยาหลักโดยแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ การสร้างโมเลกุลชีวิตเตอร์ไอออนโดยคาร์บอนไดออกไซด์หนึ่งโมเลกุลทำปฏิริยากับโมโนเอทานอลามีนหนึ่งโมเลกุล เกิดเป็นโมเลกุลของชีวิตเตอร์ไอออน ดังสมการที่ (2.25) สำหรับการดูดซึ่มก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายโมโนเอทานอลามีนนั้น จะเรียก $\text{MEA} + \text{CO}_2$ ว่าคาร์บาเมท (carbamate) จากนั้นคาร์บาเมทหนึ่งโมเลกุลจะเข้าทำปฏิริยากับโมโนเอทานอลามีนอีกหนึ่งโมเลกุล เพื่อเป็นการถ่ายโอนโปรตรอน ดังสมการที่ (2.26)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปฏิกิริยาการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายเอมีนนั้นเป็นปฏิกิริยาชนิดคายความร้อนและเป็นแบบผันกลับได้ โดยอุณหภูมิที่สูงขึ้นจะนำไปสู่การผันกลับของปฏิกิริยามากขึ้น ดังนั้นในระบบที่มีอุณหภูมิสูงจะทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ต่ำลง นอกจากนี้ปฏิกิริยาในสมการที่ (2.27) ซึ่งเป็นปฏิกิริยาหลักแล้วนั้นยังสามารถเกิดปฏิกิริยาข้างเคียงได้อีกด้วย แสดงดังสมการที่ (2.26)



โดยที่ B คือ สารละลายเบสที่สามารถเข้ามารับโปรตอนซึ่งเป็นได้หลายสาร ได้แก่ OH^- , CO_3^{2-} , HCO_3^- หรือแม้แต่ น้ำ (H_2O) โดยจะสนใจ MEA^+ กับ MEACOO^- เป็นหลัก ส่วนสารละลายเบสชนิดอื่นนั้นมีความเข้มข้นต่ำมากจึงไม่นำมาพิจารณา

2.17 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Wan Nor Roslam และคณะ [42] ได้ทำการสังเคราะห์วัสดุคาร์บอนรูพรุนสูงจากชีวมวลด้วยกระบวนการทางเคมีและการคาร์บอนไนเซชัน โดยรูพรุนคาร์บอนเกิดจากปฏิกิริยาเคมีระหว่างชีวมวลกับสารละลายกรดซัลฟิวริก จากการทดลองและการวิเคราะห์พื้นผิว BET พบว่า วัสดุคาร์บอนที่สังเคราะห์จากไม้ไผ่มีพื้นผิว BET สูงสุดถึง $1507.8 \text{ m}^2/\text{g}$ จากการทดลองชี้ให้เห็นว่าชีวมวลสามารถนำมาสังเคราะห์เป็นวัสดุคาร์บอนที่มีรูพรุนสูงได้อีกทั้งยังเป็นทางเลือกที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและไม่ปล่อยมลพิษสู่บรรยากาศอีกทั้งยังเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับชีวมวลอีกด้วย

Hye-sun และคณะ [43] ได้ทำการศึกษาการสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์ที่มีรูพรุนสูงจากสารชีวมวลเพื่อใช้สำหรับการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และเพื่อศึกษาประสิทธิภาพของรูพรุนของถ่านกัมมันต์ที่สังเคราะห์ขึ้นโดยทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพที่สภาวะต่างๆ โดยใช้เทคนิคการดูดซับ-คายซับของก๊าซไนโตรเจน (N_2 adsorption) ซึ่งการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ 273 K ที่ความดัน 1 bar. นั้นเหมาะสมสำหรับรูพรุนที่มีขนาดอยู่ในช่วง 0.3-0.86 nm. แต่ถ้าอุณหภูมิที่ใช้สูงขึ้นถึง 298 K นั้นจะเหมาะสมกับรูพรุนที่มีขนาดอยู่ที่ 0.30-0.33 nm. ซึ่งเห็นได้ว่าจะมีขนาดลดลงโดยช่วงขนาดรูพรุนที่จะสามารถดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อยู่ที่ 0.3-0.57 nm. อีกทั้งสารตั้งต้นที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำมาใช้ในการสังเคราะห์จะมีผลต่อสมบัติของและความสามารถในการดูดซับก๊าซของถ่านกัมมันต์ที่สังเคราะห์ขึ้นอีกด้วย

Raildo Alves Fiuza-Jr และคณะ [44] งานวิจัยนี้เป็นการสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์จากเมล็ดมะกอกซึ่งเป็นผลไม้ที่อุดมสมบูรณ์ในเขตร้อน โดยถูกเตรียมด้วยกระบวนการคาร์บอนในเซชันที่อุณหภูมิ 500 และ 700°C และกระบวนการคาร์บอนในเซชันร่วมกับการกระตุ้นด้วยวิธีทางเคมีด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิ 500 และ 700°C โดยเมื่อทำการวิเคราะห์คุณสมบัติขั้นสูงด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction ; XRD) , กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope ; SEM) , ชุดเอ็กซ์เรย์สเปกโตรสโคปีแบบกระจายพลังงาน (Energy-dispersive X-ray spectroscopy ; EDX) และ รามานสเปกโตรสโคปี (Raman spectroscopy) พบว่าปริมาณรูพรุนไมโครของถ่านกัมมันต์มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิในการคาร์บอนในเซชันเพิ่มขึ้น ตัวอย่างถ่านกัมมันต์ที่ถูกเตรียมขึ้นที่อุณหภูมิ 500°C จะมีรูพรุนขนาด 0.85-1.0 nm และเมื่อทำการทดสอบประสิทธิภาพการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์พบว่าตัวอย่างที่ถูกกระตุ้นด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิ 500°C มีประสิทธิภาพสูงสุด ร้อยละ 46.2 และได้รับการยืนยันว่าสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

Jun'ichi Hayashi และคณะ [45] งานวิจัยนี้เป็นการสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์จากถิกนินด้วยกระบวนการทางเคมีร่วมกับซิงค์คลอไรด์ กรดฟอสฟอริกและสารประกอบโลหะอัลคาไลน์ โดยได้มีการทำการวิเคราะห์อุณหภูมิที่ใช้ในการคาร์บอนในเซชันและความเข้มข้นของสารเคมีที่ส่งผลต่อโครงสร้างรูพรุนของถ่านกัมมันต์เพื่อหาเงื่อนไขในการทำงานของตัวกระตุ้นที่เหมาะสมที่สุดและเมื่อทำการเปรียบเทียบพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ที่สังเคราะห์ขึ้นกับถ่านกัมมันต์ที่ขายตามท้องตลาดพบว่าตัวอย่างที่คาร์บอนในเซชันที่อุณหภูมิ 600°C ที่ถูกกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์และกรดฟอสฟอริก และตัวอย่างที่คาร์บอนในเซชันที่อุณหภูมิ 800°C ที่ถูกกระตุ้นด้วยสารประกอบโลหะอัลคาไลน์ พบว่ามีค่าพื้นที่ผิวสูงกว่าโดยมีค่าสูงสุดอยู่ที่ประมาณ 2,000 m²/g และมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิในการคาร์บอนในเซชันมีค่าเพิ่มขึ้น

Jia Guo และคณะ [46] งานวิจัยนี้เป็นการวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากเมล็ดปาล์มซึ่งเป็นขยะทางเกษตรกรรมในพื้นที่เขตร้อนที่อุดมสมบูรณ์ด้วยกระบวนการทางเคมีร่วมกับกรดซัลฟิวริกและโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์และเมื่อทำการวิเคราะห์ผลของพื้นที่ผิว BET และไอโซเทอมการดูดซับ พบว่าประสบความสำเร็จในการนำมาประยุกต์ใช้งานสำหรับการดักจับก๊าซซัลเฟอร์เฮกซารีนเป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไดออกไซด์และแอมโมเนีย จากการทดสอบการดูดซับก๊าซซัลเฟอไดออกไซด์และแอมโมเนียพบว่า ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมขึ้นร่วมกับการกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์มีความสามารถในการดูดซับ ก๊าซซัลเฟอไดออกไซด์สูงกว่ากรดซัลฟิวริกแต่ในการดูดซับแอมโมเนียจะมีความสามารถต่ำกว่าใน เงื่อนไขที่มีพื้นที่ผิว BET ใกล้เคียงกันและจากการทดลองชี้ให้เห็นว่าความสามารถในการดูดซับของ ถ่านกัมมันต์เป็นผลโดยตรงจากเคมีที่พื้นผิวของถ่านกัมมันต์

M.A. Lillo-Ródenas และคณะ [47] งานวิจัยนี้เป็นการสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์จากถ่านหิน ด้วยกระบวนการทางเคมีร่วมกับโซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยได้ทำการวิเคราะห์หัตถ์แปรต่างๆที่มีผลต่อ การทดลอง ได้แก่ สารเคมีที่ใช้ อัตราส่วนที่ใช้สำหรับการกระตุ้น วิธีในการกระตุ้น และปริมาณแร่ธาตุ ที่อยู่ในถ่านหิน ผลการทดลองระบุว่าถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์จะมีค่าพื้นที่ผิว และปริมาตรรูพรุนไม่โครสูงสุดเท่ากับ $2700 \text{ m}^2/\text{g}$ และ $1 \text{ cm}^3/\text{g}$ ตามลำดับ เป็นการยืนยันว่าการ กระตุ้นด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์จะให้ผลที่ดีกว่าโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์

Donni Adinata และคณะ [48] งานวิจัยนี้เป็นวิเคราะห์คุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจาก กะลาปาล์มด้วยกระบวนการทางเคมีร่วมกับโพแทสเซียมคาร์บอเนต โดยอิทธิพลของอุณหภูมิคาร์บอ ไนเซชัน $600-1000^\circ\text{C}$ และอัตราส่วนในการกระตุ้น $0.5-2.0$ โดยจากการทดลองสามารถสรุปได้ว่า มวลยังผลของถ่านกัมมันต์จะมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการคาร์บอไนเซชันสูงขึ้น พื้นที่ผิวจำเพาะมี ค่าเพิ่มสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิคาร์บอไนเซชันเพิ่มจาก 600 ถึง 800°C และลดลงเล็กน้อยเมื่ออุณหภูมิ เพิ่มสูงถึง 1000°C โดยมีค่าสูงสุดถึง $1170 \text{ m}^2/\text{g}$ ที่ 800°C สำหรับอัตราส่วนในการกระตุ้นเท่ากับ 1 และจากไอโซเทอมการดูดซับพบว่าพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ประกอบด้วยรูพรุนไม่โคร

Li Zhao และคณะ [49] ได้ทำการสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์จากเปลือกขนุนด้วยกระบวนการทาง เคมีร่วมกับกรดฟอสฟอริก โดยกระบวนการคาร์บอไนเซชันจะทำที่อุณหภูมิ 450 ถึง 550°C โดยเมื่อ ทำการวิเคราะห์คุณสมบัติขั้นสูงด้วยเทคนิค การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction ; XRD) , กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope ; SEM) , ฟลูเรียทราน ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (Fourier-transform infrared spectroscopy ; FTIR) และ การดูด ซับ-คายซับของก๊าซไนโตรเจน (N_2 adsorption) พบว่าปริมาตรรูพรุนของตัวอย่างมีค่าอยู่ที่ประมาณ $0.525-0.733 \text{ cm}^3/\text{g}$ และเมื่ออุณหภูมิในการคาร์บอไนเซชันสูงขึ้นสำหรับเงื่อนไขอัตราส่วนของ ตัวกระตุ้นเท่ากันพบว่าความเป็นกรดของพื้นผิวมีค่าลดลงและความเป็นเบสของถ่านกัมมันต์จะมีค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพิ่มสูงขึ้น จากการทดลองเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับเปลือกขนุนซึ่งเป็นผลผลิตที่เหลือทิ้งทางการเกษตรอีกด้วย

Seul-Yi Lee และคณะ [50] งานวิจัยนี้เป็นการสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์จากชีวมวลที่อุดมไปด้วยเซลลูโลสโดยกระบวนการคาร์บอนไนเซชันที่อุณหภูมิ 600-800°C และกระบวนการทางเคมีร่วมกับโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์และโพแทสเซียมคาร์บอเนต จากการทดลองพบว่าการกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ให้ผลที่ดีกว่า มีพื้นที่ผิวสูงสุดเท่ากับ 1,352.86 m²/g และเมื่อนำไปวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุพบว่าการกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์มีปริมาณเถ้าและกัมมะถันน้อยกว่า

Jarostaw Serafin และคณะ [51] งานวิจัยนี้เกี่ยวข้องกับการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในโครงข่ายพอลิเมอร์ยืดหยุ่นที่มีโครงร่างแบบสามมิติ โดยได้มีการนำเสนอการใช้โครงข่ายโคออดิเนตพอลิเมอร์ (Coordination polymer network ; CPNs) ซึ่งช่องว่าง หรือรูพรุนเกิดความเป็นโครงข่ายพอลิเมอร์จึงมีความสามารถในการกักเก็บและแยกก๊าซรวมทั้งการดูดซับโมเลกุลของสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ อย่างไรก็ตามในกรณีของการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์นั้น ความสามารถในการดักจับจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ความดันในการปล่อยก๊าซและก๊าซอื่นที่ผสมอยู่ด้วย

Suryadi Ismadji และคณะ [52] ได้ศึกษาการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกลูโคสด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนไนเซชันร่วมกับการเจือเอมีนบนพื้นผิวของตัวอย่าง โดยเมื่อทำการวิเคราะห์คุณสมบัติขั้นสูง กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope ; SEM) , กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Tunneling electron microscope ; TEM) , การดูดซับ-คายซับของก๊าซไนโตรเจน (N₂ adsorption) และ เทคนิคการสลายตัวทางความร้อน (Thermo gravimetric analysis) พบว่าเมื่อมีการเจือสารละลายเอมีนบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์มีความสามารถในการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เท่ากับ 4.3 mmolg⁻¹ ที่อุณหภูมิ -20°C ความดัน 1 bar และสามารถเลือกการดูดซับเฉพาะการคาร์บอนไดออกไซด์เนื่องจากการมีหมู่เอมีนบนพื้นผิว

M.L.Gray และคณะ [53] ได้ทำการศึกษาการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากกระแสของก๊าซผสม เป็นผลจากการใช้ตัวดูดซับชนิดของแข็งที่ถูกตรึงและปรับปรุงคุณสมบัติด้วยเอมีน (aminated-SBA-15) SBA-15 ซึ่งเป็นวัสดุซิลิกาที่มีรูพรุนระดับเมโสและมีขนาดของรูพรุนสม่ำเสมอ ผลการศึกษาพบว่าเอมีนทุกชนิดที่นำมาใช้ในการปรับปรุงนั้นมีความสามารถในการดักจับก๊าซ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คาร์บอนไดออกไซด์จากการกระแสของก๊าซผสมมากกว่าเอมีนปฐมภูมิ ประสิทธิภาพของตัวดูดซับชนิดของแข็งที่ผ่านการตรึงและปรับปรุงคุณสมบัติด้วยเอมีนดังกล่าว (aminated-SBA-15) มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีการปรับปรุงในปริมาณและสภาวะที่เหมาะสมและจะมีค่าลดลงเมื่อมีการปรับปรุงมากเกินไป

M.L.Gray และคณะ [54] ได้ทำการศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพในการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของเถ้าลอยคาร์บอนเข้มข้นด้วยการเจือกับสารละลายเอมีน 3-Chloropropylamine-hydrochloride (CPAHCL) ที่อุณหภูมิ 25°C จากการทดลองได้ถูกยืนยันว่าตัวดูดซับเถ้าลอยคาร์บอนดังกล่าวนั้นถูกเพิ่มประสิทธิภาพด้วยสารละลายเอมีนแล้วมีความสามารถในการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 9% เมื่อเทียบกับตัวดูดซับพื้นฐานที่ใช้ตามท้องตลาดเนื่องจากการเจือด้วยสารละลายเอมีนทำให้พื้นผิวของตัวดูดซับประกอบด้วยหมู่เอมีนซึ่งมีความสามารถในการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้มากกว่า

Aroon Kongnoo และคณะ [55] ได้ทำการสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกะลาปาล์มที่ทำการปรับปรุงพื้นที่ผิวด้วยสารละลายโมโนเอทานอลามีน (Monoethanolamine ; MEA) และสารละลายไดเอทานอลามีน (Diethanolamine ; DEA) โดยการกระตุ้นในอัตราส่วนร้อยละ 3 โดยมวลต่อปริมาตร โดยเมื่อทำการวิเคราะห์ประสิทธิภาพในการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยเทคนิคการดูดซับ-คายซับของก๊าซไนโตรเจน (N_2 adsorption) พบว่ามีความจุในการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เท่ากับ 5.3 mol/kg และความสามารถในการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกกระตุ้นด้วยโมโนเอทานอลามีนจะมีค่าน้อยกว่าไดเอทานอลามีนภายใต้การทดลองในเงื่อนไขเดียวกัน

2.18 เทคนิคและเครื่องมือวัด

2.18.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope ; SEM)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเป็นกล้องจุลทรรศน์ที่มีแหล่งกำเนิดแสงเป็นอิเล็กตรอน เป็นเครื่องมือที่ใช้ศึกษาลักษณะสัญญาณของวัสดุในระดับจุลภาค ซึ่งเป็นรายละเอียดที่เล็กมากและเนื่องจากข้อจำกัดของกล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่มีความยาวคลื่นแสงขนาดใหญ่กว่าลักษณะโครงสร้างที่ต้องการศึกษาและกำลังขยายที่ค่อนข้างต่ำไม่เกิน 3,000 เท่า ทำให้สามารถใช้วัตถุที่เล็กสุดแค่ 0.2 ไมโครเมตร จึงทำให้วัตถุขนาดเล็กมากๆ จะไม่สามารถตรวจสอบรายละเอียดได้ทำให้มี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่มีกำลังขยายสูงและมีความสามารถในการแยกชัดดี เนื่องจากมีความยาวคลื่นสั้น เพื่อช่วยในการวิเคราะห์ลักษณะพื้นฐานของวัสดุ โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดมีกำลังขยายที่ค่อนข้างสูงมากกว่า 3,000 เท่า จนถึง 100,000 เท่า ทำให้สามารถแจกแจงรายละเอียดภาพได้ค่อนข้างดี โดยจะขึ้นอยู่กับลักษณะของตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์ซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้ตั้งแต่ 3 ถึง 100 นาโนเมตร อีกทั้งยังนำเทคนิควิเคราะห์อื่นๆ มาร่วมการวิเคราะห์ได้อีกด้วย เช่น เครื่องเอ็กซ์เรย์สเปกโตรสโคปีแบบกระจายพลังงาน (Energy Dispersive Spectrometry ; EDS) และเครื่องวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณ (Wavelength Dispersive Spectrometry ; WDS) จึงส่งผลให้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดได้รับความนิยมเป็นอย่างมากในการวิเคราะห์โครงสร้างของวัตถุ [56]

(1.) องค์ประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด



รูปที่ 2.6 ภาพองค์ประกอบของกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด

(ที่มา: Jonathan Atteberry, Scanning electron microscope, 20127)

(1.1) แหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนแบบปืนอิเล็กตรอน (Electron gun)

โดยทั่วไปนั้นเป็นขดลวดทั้งสแตน มีอิเล็กตรอน 2 แบบที่ใช้ในกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดคือ อิเล็กตรอนที่กระเจิงกลับและอิเล็กตรอนทุติยภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(1.2) เลนส์รวมแสง (Condense lens)

ทำหน้าที่บังคับอิเล็กตรอนให้มีขนาดและความเข้มที่เหมาะสมกับตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์ เพื่อให้เห็นภาพตามกำลังขยายที่ต้องการ การลดขนาดของอิเล็กตรอนลง จะช่วยเพิ่มขนาดกำลังขยาย

(1.3) ขดลวดสำหรับการส่องกราด (Scanning coil)

ทำหน้าที่บังคับอิเล็กตรอนให้เคลื่อนที่ตามแนวระนาบของตัวอย่าง

(1.4) เลนส์วัตถุ (Objective lens)

เป็นเลนส์ที่ทำให้อิเล็กตรอนเกิดภาพขั้นต้น โดยอาศัยจากอำนาจสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้า สามารถปรับเปลี่ยนกำลังขยายความคมชัดของภาพได้ โดยการปรับปริมาณกระแสไฟฟ้าในขดลวดสนามแม่เหล็ก

(1.5) ตัวตรวจวัดอิเล็กตรอน (Detector)

ทำหน้าที่เป็นตัวเปลี่ยนสัญญาณอิเล็กตรอนเป็นสัญญาณไฟฟ้าหรือสัญญาณภาพ โดยจะทำการเก็บสัญญาณแต่ละจุดจากปลายอิเล็กตรอน ปรากฏลงบนจอภาพ

แหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนนั้นสร้างจากการจ่ายกระแสไฟฟ้าสูงแก่ขดลวดทั้งสแตน ทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกมาจากขดลวด จากนั้นอิเล็กตรอนที่หลุดออกมาจะถูกควบคุมทิศทางด้วยภายในสนามแม่เหล็ก ซึ่งอาศัยหลักการการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอนในสนามแม่เหล็กหรือที่เรียกว่าเลนส์แม่เหล็กทำให้ลำอิเล็กตรอนแบบปฐมภูมิเข้ามาชนที่พื้นผิวชิ้นงาน อิเล็กตรอนและชิ้นงานเกิดอันตรกิริยาต่อกันในหลายรูปแบบ เป็นผลมาจากอิเล็กตรอนที่มาชนกับชิ้นงานนั้นมีพลังงานสูง ทำให้เกิดเป็นหลายระดับพลังงานจากอิเล็กตรอนที่หลุดออกมาจากชิ้นงาน ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น

(1.1) อิเล็กตรอนแบบทุติยภูมิ (Secondary electron)

เป็นอิเล็กตรอนที่หลุดออกมาจากแถบการนำ (Conduction band) หรือแถบพลังงานเวเลนซ์ (Valance band) โดยสามารถหลุดออกมาจากผิวชิ้นงานได้ง่ายโดยไม่ต้องใช้พลังงานสูงก็สามารถหลุดออกมาได้ อาจจะมีเรียกว่าอิเล็กตรอนอิสระ มีช่วงพลังงานอนุที่ประมาณ 10 ถึง 50 อิเล็กตรอนโวลต์ (eV.) โดยภาพที่เกิดขึ้นของบริเวณผิวชิ้นงานเกิดจากการอาศัยพลังงานของอิเล็กตรอนชนิดนี้

(1.2) อิเล็กตรอนแบบกระเจิงกลับ (Back scattered electron)

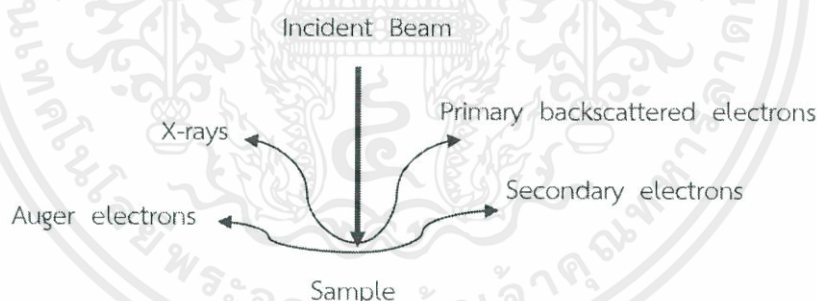
เกิดจากการที่อิเล็กตรอนแบบปฐมภูมิวิ่งไปชนที่พื้นผิวของชิ้นงานแล้วชนเข้ากับอะตอมของชิ้นงาน โดยจะมีการสูญเสียพลังงานบางส่วนให้กับอะตอมในชิ้นงานที่ถูกชน แล้วเกิดการกระเจิงออกมาจากชิ้นงาน โดยจะมีค่าพลังงานตั้งแต่ปฐมภูมิจนถึงทุติยภูมิ โดยพลังงานที่กระเจิงกลับมานี้จะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับธาตุแต่ละธาตุที่เข้าไปชนซึ่งขึ้นอยู่กับมวลอะตอมของธาตุนั้นๆ ดังนั้นการสร้างภาพที่แสดงถึงความแตกต่างกันของธาตุได้จากการวิเคราะห์นั้นสามารถอาศัยพลังงานจากอิเล็กตรอน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชนิดนี้ โดยแสดงในรูปแบบของความเข้ม และความสว่างของภาพที่เกิดขึ้นในแต่ละบริเวณ สามารถใช้ในการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุที่เป็นองค์ประกอบในชิ้นงานได้

(1.3) รังสีเอกซ์ (X-ray)

เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นที่สั้นแต่มีความถี่ที่สูง เกิดจากการที่ลำอิเล็กตรอนที่มีพลังงานสูงวิ่งเข้าชนชิ้นงาน ทำให้อิเล็กตรอนในระดับชั้นโคจรต่างๆของชิ้นงาน (K , L , M , ...) ได้รับพลังงานจากการที่อิเล็กตรอนเข้ามาชนซึ่งมีพลังงานที่มากพอที่จะสามารถทำให้หลุดออกจากวงโคจรได้หลังจากนั้นอิเล็กตรอนที่อยู่ในชั้นวงโคจรถัดไปจะเข้ามาแทนที่จากการเข้าไปแทนที่นั้นทำให้เกิดการเปลี่ยนระดับชั้นพลังงาน จึงทำให้เกิดการมีปลดปล่อยรังสีเอกซ์ออกมา ซึ่งพลังงานของรังสีเอกซ์ที่ปลดปล่อยออกมามีความแตกต่างกันเนื่องจากมวลอะตอมของธาตุแต่ละชนิดแตกต่างกัน ทำให้สามารถนำพลังงานที่ปลดปล่อยออกมานี้ไปวิเคราะห์หาองค์ประกอบของธาตุได้ โดยในการวิเคราะห์ข้อมูลขององค์ประกอบของธาตุนั้นจะวิเคราะห์ร่วมกันกับ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

ทิศทางการเคลื่อนของอิเล็กตรอนบนพื้นผิวในระดับต่างๆทำให้เกิดการปลดปล่อยสัญญาณชนิดต่างๆออกมา ดังที่แสดงในรูป



รูปที่ 2.7 การเกิดอันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนปฐมภูมิกับอะตอมของตัวอย่าง

2.18.2 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray Diffractometer ; XRD)

เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์สมบัติความเป็นผลึกของวัสดุ โดยอาศัยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ โดยสามารถทำการวิเคราะห์ได้ทั้งสารประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่างและนำมาใช้ศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างผลึกของสารตัวอย่างได้อีกด้วย ในผลึกของตัวอย่างแต่ละชนิดจะมีขนาดของ Unit Cell ที่ไม่เท่ากันทำให้ Pattern ของการเลี้ยวเบน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

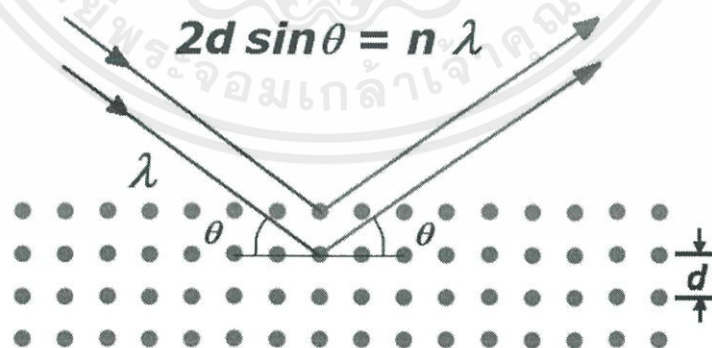
รังสีเอกซ์ที่ออกมาไม่เท่ากันทำให้เราสามารถหาความสัมพันธ์ของสารประกอบต่างๆ กับ Pattern การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ได้ ซึ่งจะทำให้เราทราบว่าในตัวอย่างนั้นๆ มีสารประกอบอะไรอยู่บ้าง นอกจากนี้ผลการวิเคราะห์ของ XRD จะสามารถหองค์ประกอบของตัวอย่างได้แล้วนั้นยังสามารถคำนวณหาปริมาณขององค์ประกอบต่างๆ ที่อยู่ในตัวอย่างคำนวณหาขนาดอนุภาคของแต่ละ Unit cell ความเครียดของตัวอย่าง ค่าความเป็นผลึกของตัวอย่างได้อีกด้วย นอกจากนี้ยังสามารถทำการวิเคราะห์ องค์ประกอบของฟิล์มบางและคำนวณค่าความหนาของชั้นฟิล์มบางได้อีกด้วย เครื่อง XRD เป็นเครื่องมือวิเคราะห์เลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ในผลึกของตัวอย่างโดยจะใช้ Detector รับความเข้มของรังสีเอกซ์ที่เกิดจากการเลี้ยวเบนในมุมต่างๆ ของการทดสอบโดยเครื่อง XRD ของมหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง เป็นเครื่องที่ติดตั้ง Detector ที่สามารถทำการทดสอบตัวอย่างได้รวดเร็วและให้ความแม่นยำในการวิเคราะห์ที่สูงโดยอาศัยหลักการของ Bragg's law เพื่อบรรณาค่าต่างๆดังสมการที่ (2.28) [57]

$$2d \sin\theta = n\lambda \quad (2.28)$$

เมื่อ λ คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์

n คือ ลำดับในการสะท้อน

d คือ ระยะห่างระหว่างระนาบ



รูปที่ 2.8 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ในผลึกของสาร

(ที่มา: Warwick David Leadley, X-Ray diffraction, 2009)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อจำกัดของการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD ก็คือไม่สามารถทำการวิเคราะห์ตัวอย่างเพื่อหาปริมาณหรือหาค่าประกอบตัวอย่างที่เป็น Amorphous ได้เนื่องจากสารตัวอย่างกลุ่มนี้จะไม่เกิดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ แต่เราอาจสามารถให้ XRD คำนวณหาปริมาณของส่วนที่เป็น Amorphous ในตัวอย่างว่ามีสัดส่วนกี่ % ได้โดยใช้การเปรียบเทียบกับปริมาณของสารมาตรฐานที่ทราบค่าแน่นอน

2.18.3 พูเรียทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโคปี (Fourier Transform Infrared Spectrometer ; FTIR)

เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของสาร โดยหลักการวิเคราะห์คือการวัดการดูดกลืนของรังสีในช่วงของรังสีอินฟราเรดที่มีเลขคลื่นอยู่ที่ประมาณ $12,800-10\text{ cm}^{-1}$ โดยสามารถวิเคราะห์ตัวอย่างได้ทุกสถานะทั้ง ของแข็ง ของเหลว และ ก๊าซ โดยแหล่งพลังงานคือรังสีอินฟราเรดซึ่งเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มองไม่เห็นด้วยตาเปล่าแต่สามารถรับรู้ได้จากความร้อน รังสีอินฟราเรดอยู่ในช่วงระหว่าง Visible radiation กับ Microwave radiation โดยช่วงของรังสีอินฟราเรดแบ่งออกเป็น 3 ช่วง ได้แก่ [58]

(1.) Near Infrared ($12,800-4,000\text{ cm}^{-1}$)

มีแถบการดูดกลืนที่ค่อนข้างต่ำ มีประโยชน์ค่อนข้างมากในการวิเคราะห์สารจำพวกสารประกอบอะโรมาติก (Aromatic compounds)

(2.) Middle Infrared ($4,000-200\text{ cm}^{-1}$)

แบ่งออกเป็น 2 ช่วง คือ Group frequency region มีสเปกตรัมอยู่ที่ประมาณ $4,000-1,300\text{ cm}^{-1}$ ซึ่งสเปกตรัมช่วงนี้จะมาจากพวกหมู่ฟังก์ชันต่างๆ และ Finger print region อยู่ระหว่าง $1,300-200\text{ cm}^{-1}$ สเปกตรัมในช่วงนี้เกิดจากโครงสร้างโมเลกุลที่สมบูรณ์ ดังนั้นสเปกตรัมที่ได้จึงค่อนข้างที่จะยุ่งยาก

(3.) Far Infrared ($200-10\text{ cm}^{-1}$)

สเปกตรัมช่วงนี้ไม่ค่อยได้ใช้เนื่องจากช่วงนี้เกิดจากการสั่นของโมเลกุลและการหมุนของโมเลกุล

ช่วงของรังสีอินฟราเรดที่ใช้ประโยชน์ในการวิเคราะห์ทางเคมีคือช่วง Middle IR เนื่องจากรังสีอินฟราเรดมีพลังงานค่อนข้างต่ำ เมื่อโมเลกุลของสารดูดกลืนรังสีอินฟราเรดเข้าไปจะทำให้พันธะในโมเลกุลเกิดการสั่นและการหมุน ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของโมเลกุล การที่โมเลกุลจะดูดกลืนรังสีอินฟราเรดได้นั้นความถี่ของรังสีอินฟราเรดต้องเท่ากับความถี่การสั่นของโมเลกุลของสารนั้นๆ ซึ่งสารอินทรีย์แต่ละชนิดจะมีค่าความถี่ของการสั่นที่จำเพาะและแตกต่างกันไปทำให้สามารถนำเทคนิคนี้มาใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างและชนิดของสารอินทรีย์ได้ การแสดงผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย

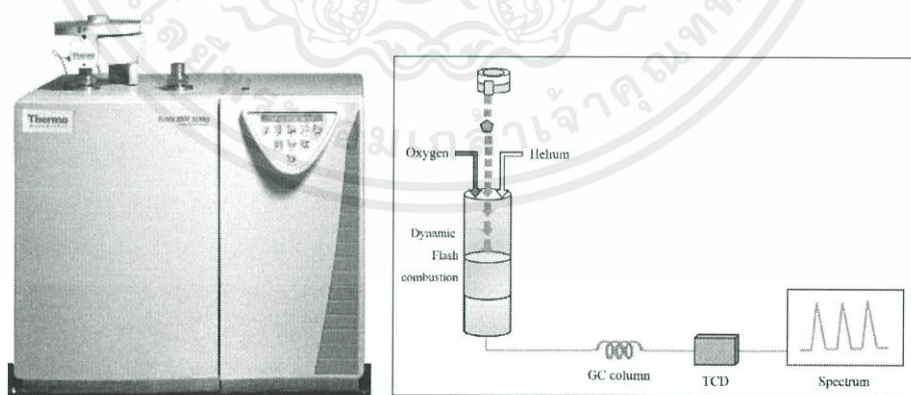
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เทคนิคนี้แสดงเป็นความสัมพันธ์ระหว่าง Wave number กับ Transmittance ซึ่งเรียกว่า Infrared spectrum โดยโมเลกุลของสารที่จะดูดกลืนแสงอินฟราเรดได้นั้นต้องมีลักษณะและสภาวะที่เหมาะสมคือ

- (1.) แสงนั้นจะต้องมีพลังงานที่เหมาะสมพอดีที่จะทำให้เกิดการทรานซิชันได้
- (2.) ต้องเกิดการคู่ควบ (Coupling) พอดีระหว่างสารนั้นกับสนามไฟฟ้าจากการแผ่รังสี เมื่อมีการดูดกลืนพลังงานแล้วจะทำให้เกิดโมเมนต์ขั้วคู่ของโมเลกุลซึ่งจะเปลี่ยนแปลงไปเมื่อแสงอินฟราเรดผ่านเข้าไป

2.18.4 เครื่องวิเคราะห์ธาตุที่เป็นองค์ประกอบของสารอินทรีย์ (Organic elemental analyzer)

เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการหาปริมาณธาตุที่เป็นองค์ประกอบของสารอินทรีย์ต่างๆ โดยหลักการการทำงานของเครื่องมือนี้อาศัยการเกิดการเผาไหม้อย่างรวดเร็ว ภายใต้บรรยากาศของฮีเลียมแล้วมีการเติมแก๊สออกซิเจน เพื่อทำให้เกิดการเปลี่ยนธาตุที่เป็นองค์ประกอบของสารอินทรีย์นั้นไปเป็นก๊าซที่มีความสัมพันธ์กับธาตุนั้นๆ เช่น ธาตุไนโตรเจนถูกเปลี่ยนไปเป็นก๊าซไนโตรเจน (N_2) ธาตุคาร์บอนถูกเปลี่ยนไปเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และธาตุไฮโดรเจนถูกเปลี่ยนให้เป็นไอน้ำ (H_2O) แต่ในส่วนการวิเคราะห์ธาตุออกซิเจน ในกระบวนการเผาไหม้นั้นจะไม่มีการเติมแก๊สออกซิเจนลงไป จากนั้นจึงแยกก๊าซผสมออกจากกันเพื่อทำการคำนวณหาปริมาณก๊าซแต่ละชนิดต่อไป โดยตัวอย่างจะต้องมีความเป็นเนื้อเดียวกัน ตัวอย่างที่วิเคราะห์ เช่น สารเคมี สารอินทรีย์ สารอนินทรีย์ ยาง พอลิเมอร์ ดิน ตะกอน เป็นต้น [59]



รูปที่ 2.9 องค์ประกอบของเครื่องวิเคราะห์ธาตุที่เป็นองค์ประกอบของสารอินทรีย์

(ที่มา: Redok Labs, CHNs/O analyzer, 2013)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.18.5 การวัดพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนของวัสดุด้วยเทคนิคการดูดซับ-คายซับก๊าซไนโตรเจน (N₂ adsorption-desorption)

พื้นที่ผิวจำเพาะ ขนาดและปริมาตรรูพรุนถือว่าเป็นสมบัติทางกายภาพที่สำคัญเพื่อนำไปประยุกต์ใช้งานให้เกิดประโยชน์สูงสุดให้วัสดุนั้นมีคุณภาพตามที่ต้องการใช้งานให้เหมาะสมกับการวัดและวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะของวัสดุสามารถทำได้หลากหลายวิธี แต่วิธีดังกล่าวนี้อาจจะเป็นวิธีการวิเคราะห์ปริมาณของแก๊สไนโตรเจนที่ดูดซับอยู่บนพื้นผิวของวัสดุ แล้วสามารถนำมาคำนวณต่อเป็นค่าพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนของวัสดุได้

(1.) หลักการเบื้องต้น

การศึกษาการดูดซับของแก๊สไนโตรเจนทั้งบนบริเวณพื้นผิวและภายในรูพรุนของวัสดุพบว่าแก๊สไนโตรเจนที่ถูกดูดซับเอาไว้จะมีบางส่วนที่ไปเกาะอยู่บนพื้นผิวของวัสดุในลักษณะที่เป็นโมเลกุลแบบชั้นเดียวจนเต็มพื้นที่ผิวชั้นแรกก่อน จากนั้นแก๊สไนโตรเจนที่ยังคงหลงเหลืออยู่จะแพร่กระจายไปเกาะลงบนพื้นผิวของวัสดุในชั้นต่อไปดังที่แสดงในภาพที่สามารถเขียนสมการของ BET ได้ซึ่งแสดงถึงความสัมพันธ์ความดันสัมพัทธ์ (P/P₀) กับปริมาณก๊าซไนโตรเจนที่ดูดซับเอาไว้ (W) ได้ดังสมการที่ (2.29)

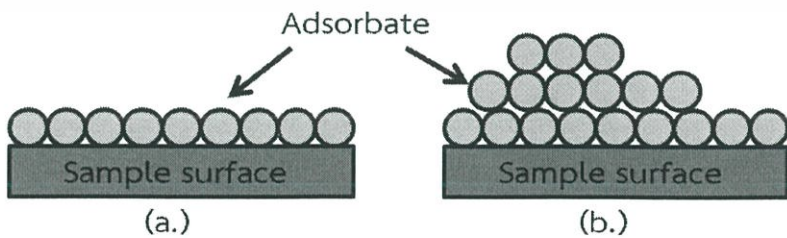
$$\frac{1}{W\left(\frac{P_0}{P}-1\right)} = \frac{1}{W_m C} - \frac{C-1}{W_m C} \left(\frac{P}{P_0}\right) \tag{2.29}$$

เมื่อ W คือ ปริมาณก๊าซไนโตรเจนที่ดูดซับ

W_m คือ ปริมาณก๊าซไนโตรเจนที่ดูดซับลงบนพื้นผิวแบบชั้นเดียว

P คือ ความดันก๊าซไนโตรเจนขณะดูดซับ (mmHg)

P₀ คือ ความดันก๊าซไนโตรเจนที่อิ่มตัว



รูปที่ 2.10 แสดงการดูดซับโมเลกุลของก๊าซไนโตรเจน

(a.) ดูดซับบนพื้นผิวของวัสดุ (b.) ดูดซับเป็นชั้นๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์ขนาดพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุน ดังที่แสดงในภาพที่ 2.12 ใช้สำหรับเซลล์ใส่ตัวอย่าง (Sample cell) จำนวน 2 เซลล์ โดยที่เซลล์หนึ่งบรรจุวัสดุตัวอย่างที่ต้องการทดสอบ ส่วนอีกเซลล์หนึ่งไม่ใส่วัสดุตัวอย่างแต่ใช้ทำหน้าที่เป็นเซลล์อ้างอิง (Reference cell) ก่อนที่จะทำการทดสอบต้องให้ความร้อนแก่เซลล์ที่มีการบรรจุวัสดุตัวอย่างไว้เพื่อเป็นการไล่ความชื้นและโมเลกุลของสารอื่นให้ออกไปจากพื้นผิวของวัสดุตัวอย่างก่อน จากนั้นทำให้เซลล์ทั้งสองอันเป็นสุญญากาศเพื่อให้ภายในเซลล์ไม่มีโมเลกุลของแก๊สชนิดอื่น ๆ หลงเหลืออยู่ หลังจากนั้นทำการจุ่มเซลล์ทั้ง 2 ลงในภาชนะที่บรรจุไนโตรเจนเหลวเพื่อให้เซลล์ทั้งสองนั้นอยู่ในภาวะที่มีอุณหภูมิค่าจากนั้นผ่านแก๊สไนโตรเจนเข้ามาในเซลล์ทั้ง 2 โดยแก๊สไนโตรเจนที่เข้ามาในเซลล์ที่มีวัสดุตัวอย่างนั้น จะถูกดูดซับลงบนพื้นผิวของวัสดุทำให้ความดันภายในเซลล์ที่มีการบรรจุวัสดุตัวอย่างเอาไว้ลดลงจนกระทั่งมีความดันของแก๊สไนโตรเจนที่คงที่ (P) จะมีแก๊สปล่อยแก๊สไนโตรเจนเข้าไปเรื่อยๆจะถูกดูดซับไปเรื่อยๆ จนกระทั่งความดันของเซลล์ที่มีตัวอย่างคงที่ไม่มีการลดลง (P/P_0-1) ซึ่งแสดงว่าไม่เกิดการดูดซับไนโตรเจนอีกแล้ว (อิ่มตัว) โดยสามารถดูได้จากข้อมูลค่าความดัน



รูปที่ 2.11 เครื่องวิเคราะห์ขนาดพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรของรูพรุน

(ที่มา: Thai Alibaba, BET surface area, 2015)

2.18.6 การวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อน (Thermogravimetric Analysis ; TGA)

TGA เป็นเทคนิคที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์หาความเสถียรของวัสดุเมื่อได้รับความร้อนโดยสามารถทำการวัดจากมวลวัสดุที่เปลี่ยนแปลงเมื่ออุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงในแต่ละช่วงด้วยเครื่องเอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส่งมอบไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งที่มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงมวลสูง เหมาะสำหรับการนำไปวิเคราะห์วัสดุที่มีการเปลี่ยนแปลงไปจากการดูดซับของแก๊ส หรือว่าการระเหยของน้ำและการตกผลึกของสาร ซึ่งเป็นผลมาจากวัสดุเกิดการแตกตัวหรือว่าเปลี่ยนแปลงเฟสไป (Decomposition) ปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชันนั้นสามารถศึกษาได้ด้วยจากเทคนิคนี้ ในการทำการวิเคราะห์นั้น จะมีการวางตัวอย่างที่ทำการวิเคราะห์ลงบนจานที่มีขนาดเล็ก ซึ่งมีการเชื่อมต่อกับเครื่องซึ่งที่มีความไวและละเอียดต่อการเปลี่ยนแปลงมวลที่สูงมาก โดยที่ทั้งหมดจะอยู่ภายในเตาที่สามารถควบคุมอุณหภูมิและบรรยากาศได้ บรรยากาศภายในอาจจะเป็นแก๊สเฉื่อยซึ่งจะไม่ทำปฏิกิริยากับสารตัวอย่าง เช่น ไนโตรเจน หรือแก๊สที่มีความไวสูง เช่น อากาศ หรือออกซิเจน โดยน้ำหนักของตัวอย่างที่เปลี่ยนแปลงไปจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิเฉพาะของสารแต่ละชนิด โดยน้ำหนักที่หายไปนั้นเกิดขึ้นมาจากการระเหย การย่อยสลาย หรือการเกิดปฏิกิริยาต่างๆ ของสารตัวอย่าง [60]



รูปที่ 2.12 แสดงเครื่องมือวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อน

(ที่มา: LMS technologies Vietnam, Thermalgravimetric analyzer, 2015)

การใช้เครื่องมือ TGA มีจุดประสงค์ 2 ประการ ได้แก่

- (1.) ใช้เพื่อศึกษาลักษณะของปฏิกิริยาทางจลศาสตร์ เช่น Decomposition, Evaporation และ Dehydration
- (2.) ใช้ในการศึกษาเพื่อหาปริมาณของส่วนประกอบต่างๆที่ผสมกันอยู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงาน

การวิจัยนี้เป็นการศึกษาการสังเคราะห์วัสดุคาร์บอนนาโนโพรงจากชีวมวลสองชนิด ได้แก่ ใบ
รูปถ่ายและดอกปาล์ม (เพศผู้) โดยใช้วิธีการคาร์บอนเซชันและวิธีการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนเซชัน
เพื่อนำไปประยุกต์ใช้สำหรับกับดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยจะศึกษาชนิดของชีวมวล วิธีการ
สังเคราะห์วัสดุคาร์บอนนาโนโพรง กระบวนการกระตุ้นทางเคมีและการปรับปรุงพื้นผิวของวัสดุ
คาร์บอนนาโนโพรงด้วยการเจือด้วยสารละลายเอมีน จากนั้นจะนำวัสดุคาร์บอนนาโนโพรงที่
สังเคราะห์ได้ไปการวิเคราะห์ ศึกษาสมบัติและทำการทดสอบประสิทธิภาพในการดักจับก๊าซ
คาร์บอนไดออกไซด์

3.1 การวิเคราะห์และศึกษาสมบัติของวัสดุคาร์บอนนาโนโพรง

การวิเคราะห์และศึกษาสมบัติของวัสดุคาร์บอนนาโนโพรง โดยนำวัสดุคาร์บอนนาโนโพรงที่
สังเคราะห์ได้จากวิธีการคาร์บอนเซชันและวิธีการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนเซชันไปวิเคราะห์และ
ศึกษาสมบัติด้วยเทคนิคต่างๆ ดังนี้

3.1.1 ศึกษาสมบัติทางกายภาพ ลักษณะสัณฐานและขนาดของรูพรุนของวัสดุคาร์บอนนาโน
โพรงด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope ; SEM)

3.1.2 ศึกษาเอกลักษณ์ของสารรวมถึงลักษณะความเป็นผลึกของวัสดุคาร์บอนนาโนโพรงด้วย
เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffraction ; XRD)

3.1.3 ศึกษาหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของวัสดุคาร์บอนนาโนโพรงด้วยเทคนิค ฟูเรียทรานฟอร์มอิน
ฟราเรดสเปกโตรสโคปี (Fourier transform infrared spectroscopy ; FTIR)

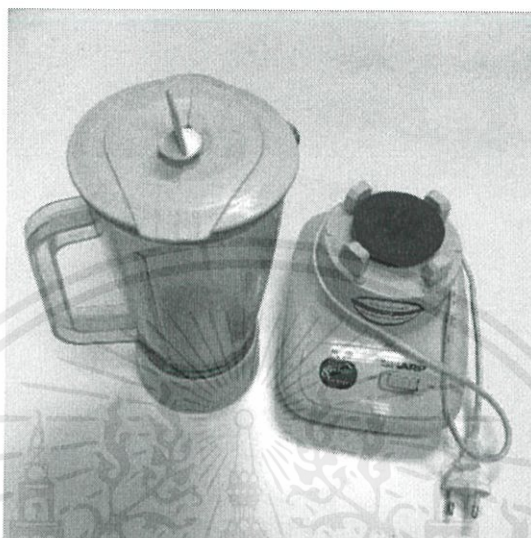
3.1.4 ศึกษาองค์ประกอบและปริมาณของธาตุในวัสดุคาร์บอนนาโนโพรงด้วยเครื่อง
วิเคราะห์ธาตุที่เป็นองค์ประกอบ (Combustion elemental analyzer ; CHNOS)

3.1.5 ศึกษาพื้นผิวและสมบัติความเป็นรูพรุนของวัสดุคาร์บอนนาโนโพรงด้วยเทคนิค การดู
ซับ-คายซับของก๊าซไนโตรเจน (N_2 adsorption-desorption)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

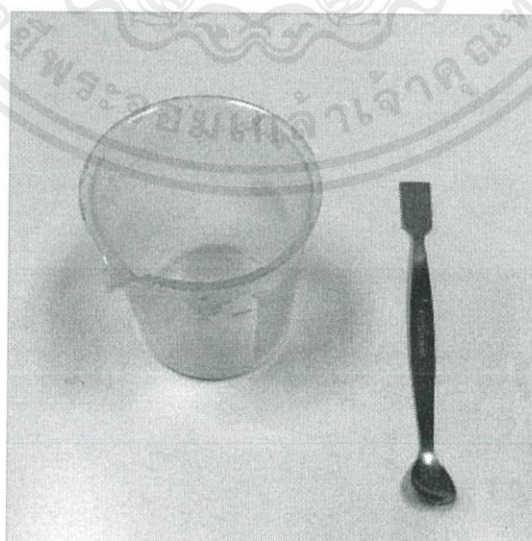
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

3.2.1 เครื่องปั่น



รูปที่ 3.1 เครื่องปั่น

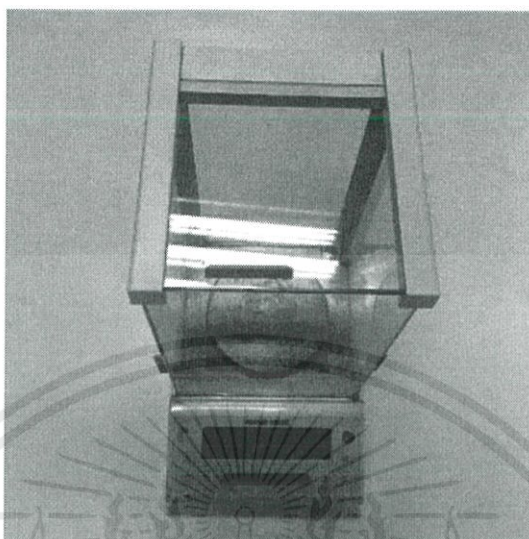
3.2.2 บีกเกอร์ (Beaker) และ ช้อนตักสาร (Spatula)



รูปที่ 3.2 บีกเกอร์และช้อนตักสาร

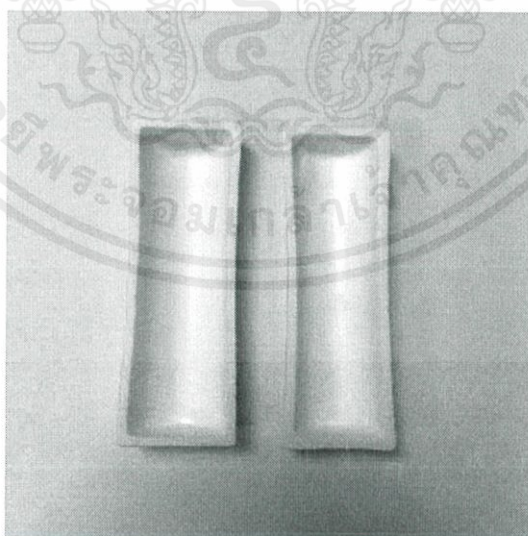
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.3 เครื่องชั่งสารแบบดิจิตอล



รูปที่ 3.3 เครื่องชั่งสาร

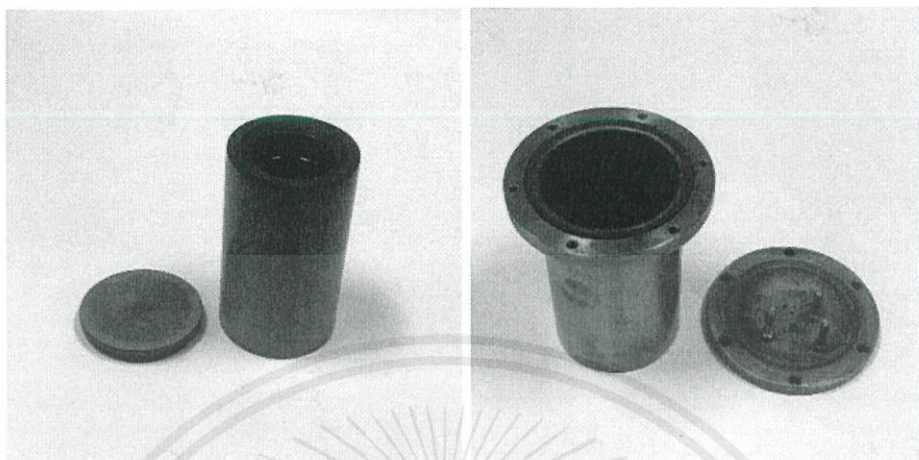
3.2.4 เบ้าเผาสารอลูมินา (Alumina boat)



รูปที่ 3.4 เบ้าเผาสารอลูมินา

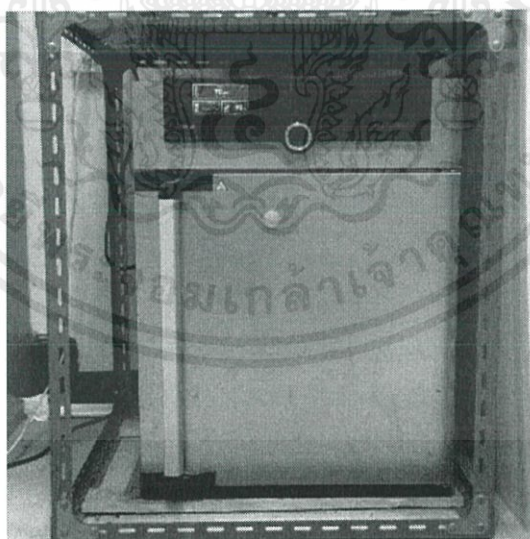
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.5 ภาชนะเทฟลอน (Teflon) และ ถังปฏิกิริยาไฮโดรเทอร์มอล (Hydrothermal)



รูปที่ 3.5 ภาชนะเทฟลอนและถังปฏิกิริยาไฮโดรเทอร์มอล

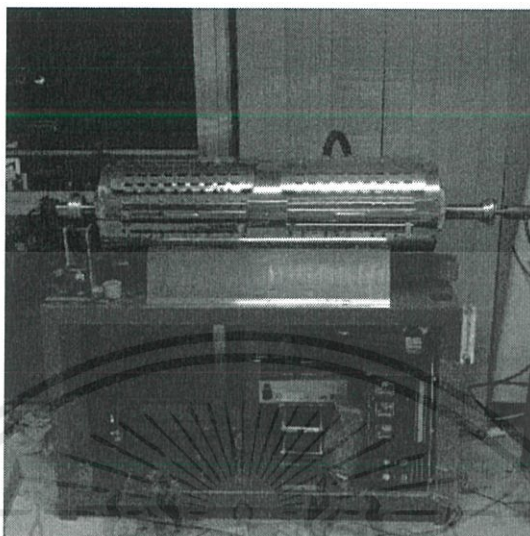
3.2.6 ตู้สำหรับกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล



รูปที่ 3.6 ตู้อบ

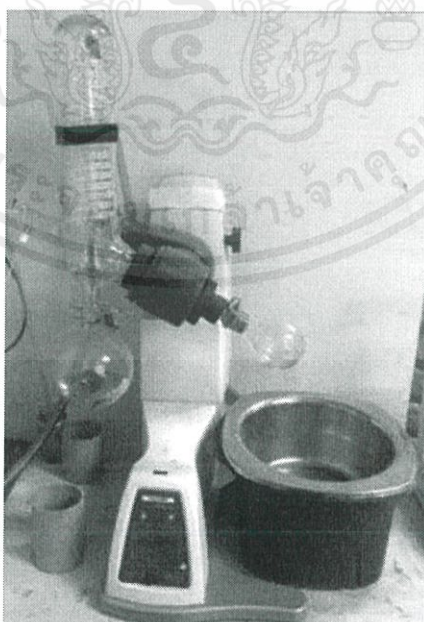
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.7 เตาเผาอับอากาศ ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน



รูปที่ 3.7 เตาเผา

3.2.8 เครื่องกลั่นระเหยสารแบบหมุน (Rotary Evaporator)

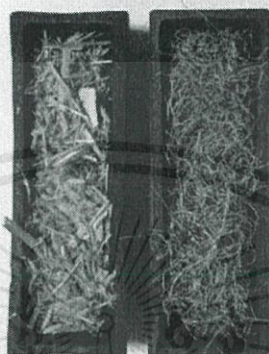


รูปที่ 3.8 เครื่องกลั่นระเหยสารแบบหมุน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 วัสดุและสารเคมี

3.3.1 ใบธูปฤาษีและดอกปาล์ม (เพศผู้)



รูปที่ 3.9 ใบธูปฤาษีและดอกปาล์ม (เพศผู้)

3.3.2 น้ำไร้ประจุ (Deionized water, DI water)



รูปที่ 3.10 น้ำไร้ประจุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

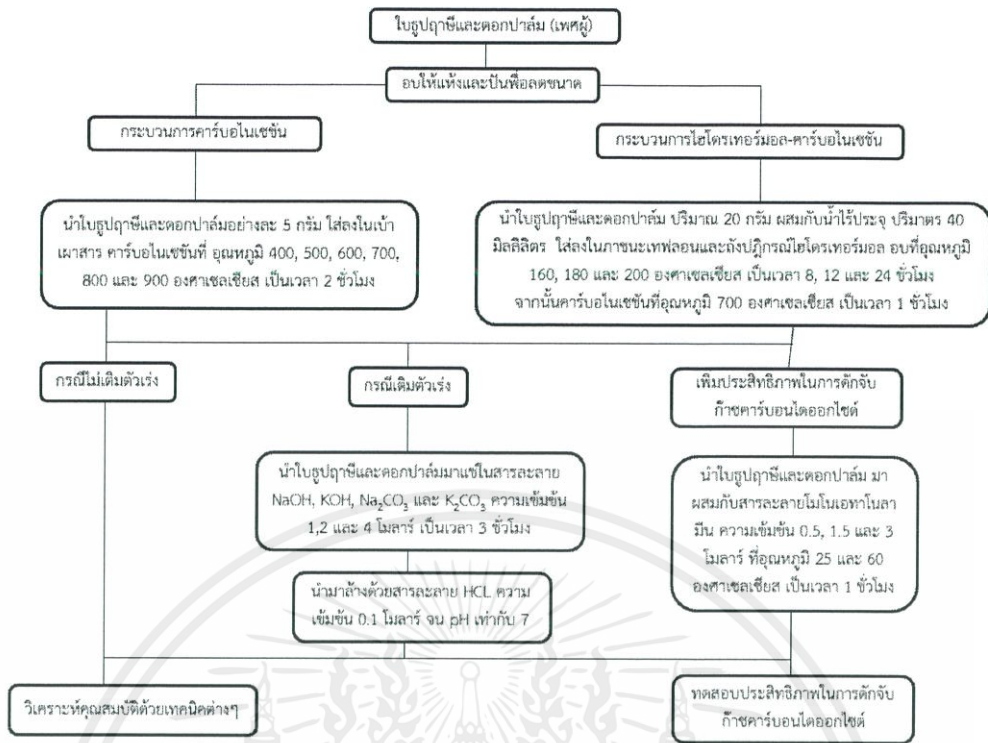
- 3.3.3 โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide ; NaOH)
- 3.3.4 โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (Potassium hydroxide ; KOH)
- 3.3.5 โซเดียมคาร์บอเนต (Sodium carbonate ; Na₂CO₃)
- 3.3.6 โพแทสเซียมคาร์บอเนต (Potassium carbonate ; K₂CO₃)
- 3.3.7 สารละลายโมโนเอทานอลามีน (Monoethanolamine ; MEA)
- 3.3.8 กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric acid ; HCl)

3.4 เครื่องมือวิเคราะห์

- 3.4.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope ; SEM)
- 3.4.2 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffraction ; XRD)
- 3.4.3 เครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์ม อินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (Fourier transform infrared spectroscopy ; FTIR)
- 3.4.4 เครื่องวิเคราะห์ธาตุที่เป็นองค์ประกอบ (Combustion elemental analyzer ; CHNOS)
- 3.4.5 การศึกษาพื้นผิวและสมบัติความเป็นรูพรุนของวัสดุคาร์บอนนาโนโพรงด้วยเทคนิคการดูดซับก๊าซไนโตรเจน (N₂ adsorption-desorption)
- 3.4.6 การศึกษาการสลายตัวทางความร้อนด้วยเครื่องวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน (Thermogravimetric Analysis ; TGA)

3.5 การเตรียมไบรฎุภาชีและดอกปาล์ม (เพศผู้)

- 3.5.1 นำไบรฎุภาชีและดอกปาล์ม (เพศผู้) ไปอบให้แห้งในเตาอบที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อไล่ความชื้น
- 3.5.2 นำไบรฎุภาชีและดอกปาล์ม (เพศผู้) มาบดด้วยเครื่องปั่นเพื่อให้มีขนาดเล็กกลง



รูปที่ 3.11 แผนภาพแสดงขั้นตอนการดำเนินงาน

3.6 การสังเคราะห์วัสดุคาร์บอนนาโนโพรงจากชีวมวล

การสังเคราะห์วัสดุคาร์บอนนาโนโพรงจากชีวมวลได้แก่ใบธูปฤาษีและดอกปาล์ม (เพศผู้) โดยใช้สองวิธีการได้แก่กระบวนการคาร์บอนไนเซชันและกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนไนเซชัน จะสามารถแบ่งการทดลองย่อยได้ดังนี้

3.6.1 การศึกษาผลของวิธีการสังเคราะห์วัสดุคาร์บอนนาโนโพรง

(1.) การสังเคราะห์ด้วยวิธีการคาร์บอนไนเซชัน

(1.1) ชั่งใบธูปฤาษีและดอกปาล์ม (เพศผู้) อย่างละ 5 กรัม

(1.2) นำไปใส่ในเตาเผาสารอลูมินา

(1.3) นำไปคาร์บอนไนเซชันที่อุณหภูมิสูง 400, 500, 600, 700, 800 และ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ในเตาเผาอับอากาศภายใต้บรรยากาศของไนโตรเจน

(1.4) นำวัสดุคาร์บอนนาโนโพรงที่สังเคราะห์ขึ้นมาชั่งน้ำหนักมาเก็บในภาชนะปิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(2.) การสังเคราะห์ด้วยวิธีการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนโนเซชัน

(2.1) ชั่งใบรูปถั่วและดอกปาล์ม (เพศผู้) 20 กรัม

(2.2) เตรียมน้ำไร้ประจุ 40 มิลลิลิตร

(2.3) เทใบรูปถั่วและดอกปาล์ม (เพศผู้) กับน้ำไร้ประจุลงในภาชนะเทพลอน

(2.4) นำภาชนะเทพลอนใส่ลงถังปฏิกรณ์ไฮโดรเทอร์มอล

(2.5) ใส่ถังปฏิกรณ์ไฮโดรเทอร์มอลในตู้อบที่อุณหภูมิ 160, 180 และ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8, 12 และ 24 ชั่วโมง

(2.6) นำใบรูปถั่วและดอกปาล์ม (เพศผู้) ที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลแล้ว มาใส่ในบีกเกอร์ จากนั้นนำไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 12 ชั่วโมง เพื่อไล่ความชื้น

(2.7) นำใบรูปถั่วและดอกปาล์ม (เพศผู้) ที่แห้งสนิทแล้วมาคาร์บอนโนเซชันที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียสในเตาเผาอับอากาศภายใต้บรรยากาศของไนโตรเจน เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

(2.8) นำวัสดุคาร์บอนนาโนโพร่งที่สังเคราะห์ขึ้นมาซึ่งน้ำหนักมาเก็บในภาชนะปิด

3.6.2 การศึกษาผลของกระบวนการกระตุ้นทางเคมี

(1.) การสังเคราะห์ด้วยวิธีการคาร์บอนโนเซชัน

(1.1) เตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา โซเดียมไฮดรอกไซด์, โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์, โซเดียมคาร์บอเนตและโพแทสเซียมคาร์บอเนต ความเข้มข้น 1, 2 และ 4 โมลาร์ ปริมาตร 40 มิลลิลิตร

(1.2) นำใบรูปถั่วและดอกปาล์ม (เพศผู้) ปริมาณ 20 กรัม มาแช่ในสารละลายตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมไว้ ในอัตราส่วน 1:2 เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง

(1.3) นำใบรูปถั่วและดอกปาล์ม (เพศผู้) มาอบที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เพื่อเป็นการไล่ความชื้น

(1.4) นำใบรูปถั่วและดอกปาล์ม (เพศผู้) ที่ได้มาคาร์บอนโนเซชันที่อุณหภูมิสูง 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ในเตาเผาอับอากาศภายใต้บรรยากาศของไนโตรเจน

(1.5) นำวัสดุคาร์บอนนาโนโพร่งที่สังเคราะห์ขึ้นมาล้างด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์และน้ำไร้ประจุจนมีค่า pH เท่ากับ 7 จากนั้นอบที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อเป็นการไล่ความชื้นและสารละลายออก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(2.) การสังเคราะห์ด้วยวิธีการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนในเซชัน

(2.1) นำใบรูปถั่วและดอกปาล์ม (เพศผู้) 20 กรัม กับน้ำไร้ประจุ ปริมาตร 40 มิลลิลิตร มาไฮโดรเทอร์มอลที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง

(2.2) เตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา โซเดียมไฮดรอกไซด์, โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์, โซเดียมคาร์บอเนตและโพแทสเซียมคาร์บอเนต ความเข้มข้น 1, 2 และ 4 โมลาร์ ปริมาตร 40 มิลลิลิตร

(2.3) นำใบรูปถั่วและดอกปาล์ม (เพศผู้) ที่ได้จากกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล มาแช่ในสารละลายตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมไว้ ในอัตราส่วน 1:2 เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง

(2.4) นำใบรูปถั่วและดอกปาล์ม (เพศผู้) มาอบที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เพื่อเป็นการไล่ความชื้น

(2.5) นำใบรูปถั่วและดอกปาล์ม (เพศผู้) ที่ได้มาคาร์บอนในเซชันที่อุณหภูมิสูง 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ในเตาเผาอับอากาศภายใต้บรรยากาศของไนโตรเจน

(2.6) นำวัสดุคาร์บอนนาโนโพร่งที่สังเคราะห์ขึ้นมาล้างด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์และน้ำไร้ประจุจนมีค่า pH เท่ากับ 7 จากนั้นอบที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อเป็นการไล่ความชื้นและสารละลายออก

3.6.3 การปรับปรุงพื้นผิวของวัสดุคาร์บอนนาโนโพร่งด้วยการเจือด้วยสารละลายเอมีน

(1.) ชั่งวัสดุคาร์บอนนาโนโพร่งที่ได้จากกระบวนการคาร์บอนในเซชันและไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนในเซชัน ปริมาณ 2 กรัม

(2.) เตรียมสารละลายโมโนเอทานอลามีน ความเข้มข้น 0.5, 1.5 และ 3 โมลาร์ ปริมาตร 40 มิลลิลิตร

(3.) นำวัสดุคาร์บอนนาโนโพร่งมาผสมกับสารละลายโมโนเอทานอลามีนในอัตราส่วน 1:20 ในเครื่องกั่นระเหยสารแบบหมุน ที่อุณหภูมิ 25 และ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

(4.) จากนั้นนำวัสดุคาร์บอนนาโนโพร่งที่ได้มาอบที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อเป็นการไล่ความชื้น

3.7 การวิเคราะห์และศึกษาสมบัติของวัสดุคาร์บอนนาโนโพร่ง

นำตัวอย่างวัสดุคาร์บอนนาโนโพร่งที่สังเคราะห์ขึ้นจากกระบวนการคาร์บอนในเซชันและ

กระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนในเซชันไปทำการวิเคราะห์คุณสมบัติต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.7.1 ศึกษาสมบัติทางกายภาพ ลักษณะสัญญาณและขนาดของรูพรุนของวัสดุคาร์บอนนาโนโพรงด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope ; SEM)

3.7.2 ศึกษาเอกลักษณ์ของสารรวมถึงลักษณะความเป็นผลึกของวัสดุคาร์บอนนาโนโพรงด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffraction ; XRD)

3.7.3 ศึกษาหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของวัสดุคาร์บอนนาโนโพรงด้วยเทคนิคฟูเรียรทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (Fourier transform infrared spectroscopy ; FTIR)

3.7.4 ศึกษาองค์ประกอบและปริมาณของธาตุในวัสดุคาร์บอนนาโนโพรงด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุที่เป็นองค์ประกอบ (Combustion elemental analyzer ; CHNOS)

3.7.5 ศึกษาพื้นผิวและสมบัติความเป็นรูพรุนของวัสดุคาร์บอนนาโนโพรงด้วยเทคนิคการดูดซับและคายซับของก๊าซไนโตรเจน (N_2 adsorption-desorption)

3.8 การทดสอบประสิทธิภาพในการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของวัสดุคาร์บอนนาโนโพรง

ทำการทดสอบประสิทธิภาพในการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของวัสดุคาร์บอนนาโนโพรงที่สังเคราะห์ขึ้นด้วยวิธีคาร์บอนเซชันและไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนเซชัน โดยทำการศึกษาการสลายตัวทางความร้อน ด้วยเครื่องวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน (Thermogravimetric analyzer ; TGA) โดยจะมีเงื่อนไขต่าง ๆ ดังนี้

3.8.1 ศึกษาผลของอุณหภูมิต่อประสิทธิภาพการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

- (1.) อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส
- (2.) อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส
- (3.) อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส

3.8.2 ศึกษาผลของร้อยละประกอบของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่อประสิทธิภาพในการดักจับของวัสดุคาร์บอนนาโนโพรง

- (1.) 10% CO_2 / 90% N_2
- (2.) 15% CO_2 / 85% N_2
- (3.) 30% CO_2 / 90%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

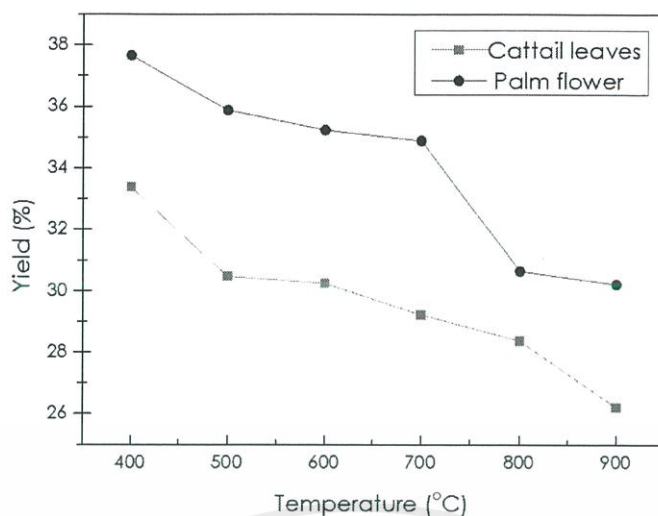
ผลการทดลองและอภิปรายผล

4.1 ผลของวิธีการสังเคราะห์วัสดุคาร์บอนที่มีรูพรุนในระดับนาโนเมตร

ตารางที่ 4.1 มวลของไบรุธฤาษีและดอกปาล์ม (เพศผู้) ที่ผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชัน

Biomass	Temperature [°C]	Product [wt%] [a]
CL	400	33.37
CL	500	30.45
CL	600	30.28
CL	700	29.25
CL	800	28.35
CL	900	26.21
PF	400	37.66
PF	500	35.90
PF	600	35.22
PF	700	34.90
PF	800	30.60
PF	900	30.19

[a] น้ำหนักที่เหลืออยู่หลังจากผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชันเป็นเวลา 2 ชั่วโมง



รูปที่ 4.1 กราฟแสดงมวลของใบธูปฤาษีและดอกปาล์ม (เพศผู้) ที่ผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชัน

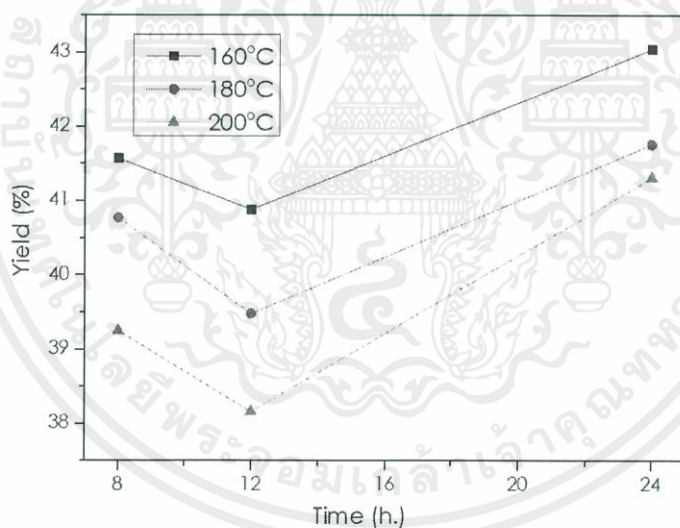
จากตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.1 มวลของใบธูปฤาษีและดอกปาล์ม (เพศผู้) หลังจากผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชันเป็นเวลา 2 ชั่วโมง มีแนวโน้มลดลงเมื่ออุณหภูมิในกระบวนการคาร์บอนไนเซชันเพิ่มสูงขึ้นจาก 400 ถึง 900 องศาเซลเซียส โดยจะสังเกตได้ว่าอุณหภูมิเป็นตัวแปรที่สำคัญที่ส่งผลต่อการลดลงของมวล ซึ่งเป็นผลจากกระบวนการสลายตัวทางความร้อนขององค์ประกอบต่างๆ ที่อยู่ในชีวมวลบางส่วนจะเปลี่ยนไปเป็นของเหลว แก๊ส และคาร์บอนที่อยู่ในรูปของแข็ง

ตารางที่ 4.2 มวลของใบธูปฤาษีและดอกปาล์ม (เพศผู้) ที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนไนเซชัน

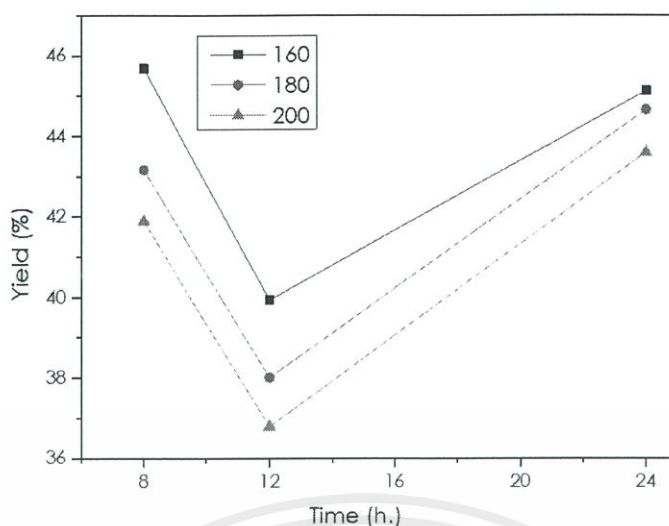
Biomass	Temperature [°C]	Time [h]	Product [wt%] [a]
CL	160	8	41.55
CL	160	12	40.87
CL	160	24	43.03
CL	180	8	40.77
CL	180	12	39.46
CL	180	24	41.77
CL	200	8	39.21
CL	200	12	38.13

Biomass	Temperature [°C]	Time [h]	Product [wt%] [a]
CL	200	24	41.30
PF	160	8	45.68
PF	160	12	39.93
PF	160	24	45.12
PF	180	8	43.16
PF	180	12	38.01
PF	180	24	44.65
PF	200	8	41.89
PF	200	12	36.79
PF	200	24	43.59

[a] น้ำหนักที่เหลืออยู่หลังจากผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนเซชัน

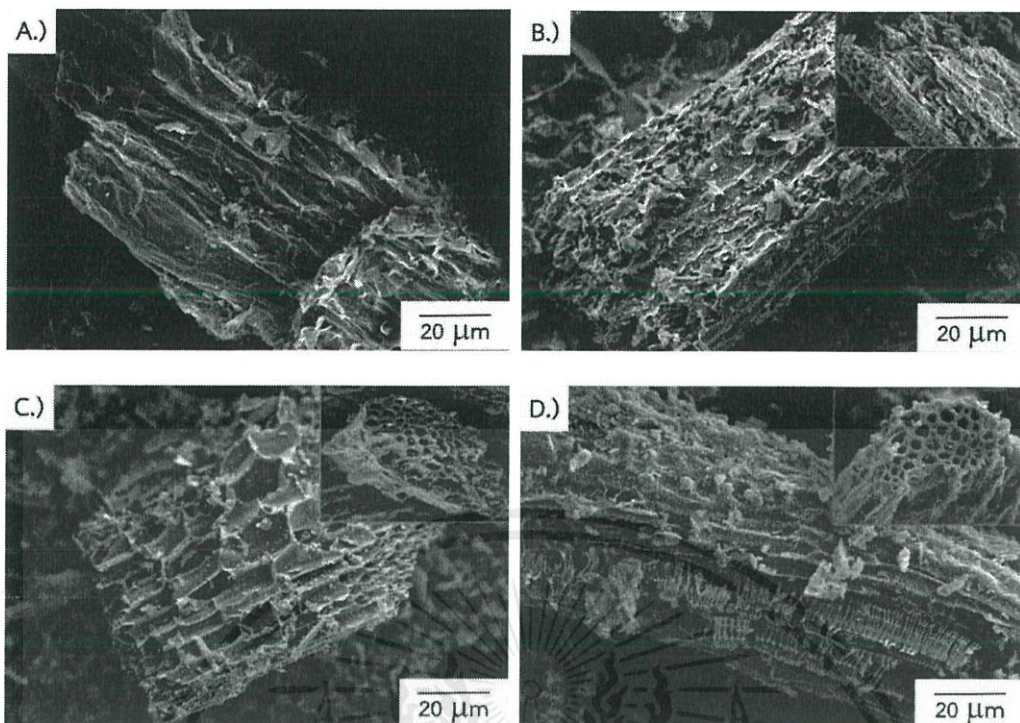


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

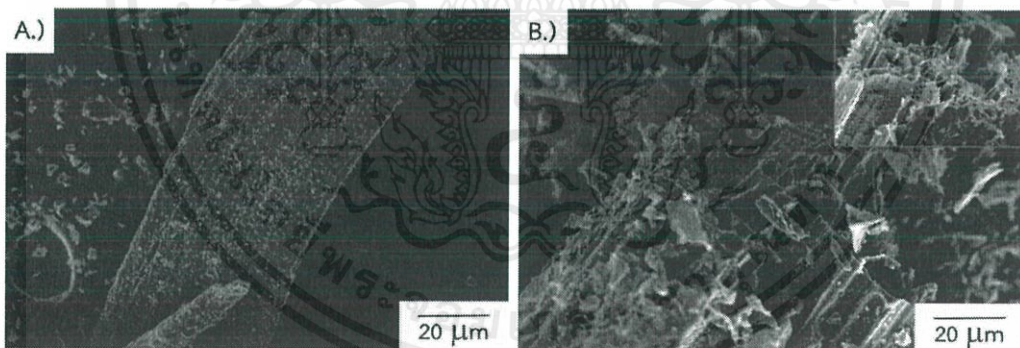


รูปที่ 4.2 กราฟแสดงมวลของไบรูปฤาษีและดอกปาล์ม (เพศผู้) ที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนเซชัน

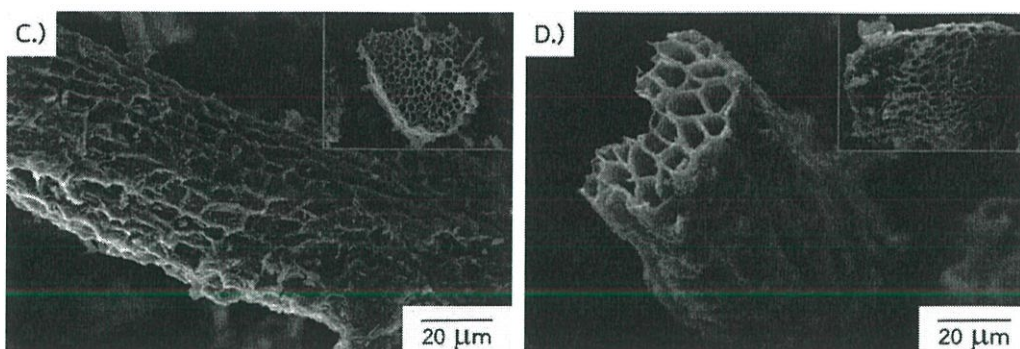
จากตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.2 มวลของไบรูปฤาษีและดอกปาล์ม (เพศผู้) หลังจากผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลที่อุณหภูมิ 160, 180 และ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8, 12 มีแนวโน้มลดลง และที่ 24 ชั่วโมง มีค่าเพิ่มสูงขึ้น โดยจะสังเกตได้ว่าอุณหภูมิและเวลาเป็นตัวแปรที่สำคัญที่ส่งผลต่อการลดลงของมวล ซึ่งเป็นผลจากน้ำ ความร้อนและความดันในกระบวนการดังกล่าวเข้าไปช่วยในการแตกโครงสร้างของสารประกอบอินทรีย์ต่างๆ ของชีวมวล แต่เมื่อเวลาผ่านไปจะส่งผลให้สารประกอบอินทรีย์ต่างๆ ในระบบกลับมารวมตัวกันอีกครั้งจึงทำให้มวลมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเนื่องจากปฏิกิริยา Repolymerization และหลังจากผ่านกระบวนการคาร์บอนเซชันองค์ประกอบต่างๆ ที่อยู่ในชีวมวลบางส่วนจะเปลี่ยนไปเป็นของเหลว แก๊ส และคาร์บอนที่อยู่ในรูปของแข็ง ซึ่งจากกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนเซชันจะสามารถรักษามวลของผลิตภัณฑ์ได้มากกว่ากระบวนการคาร์บอนเซชัน



รูปที่ 4.3 ภาพ SEM (กำลังขยาย 300X และ 500X) ของใบกล้วยที่ผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชันที่อุณหภูมิ (A) Raw (B) 500 (C) 700 (D) 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

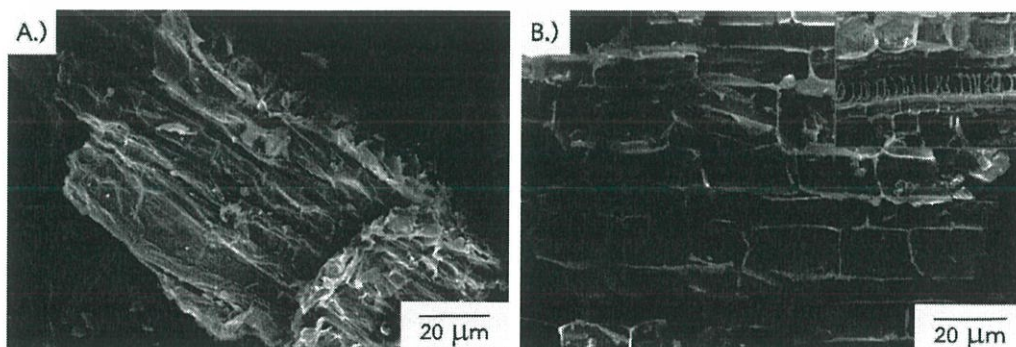


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

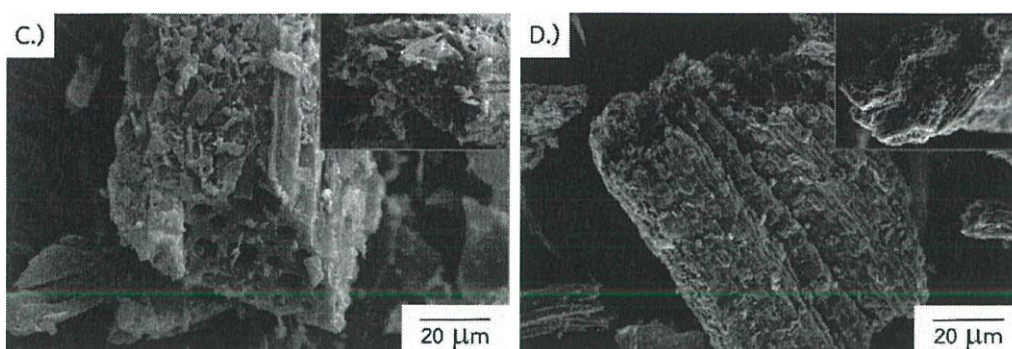


รูปที่ 4.4 ภาพ SEM (กำลังขยาย 300X และ 500X) ของดอกปาล์ม (เพศผู้) ที่ผ่านกระบวนการคาร์บอนเซชันที่อุณหภูมิ (A) Raw (B) 500 (C) 700 (D) 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

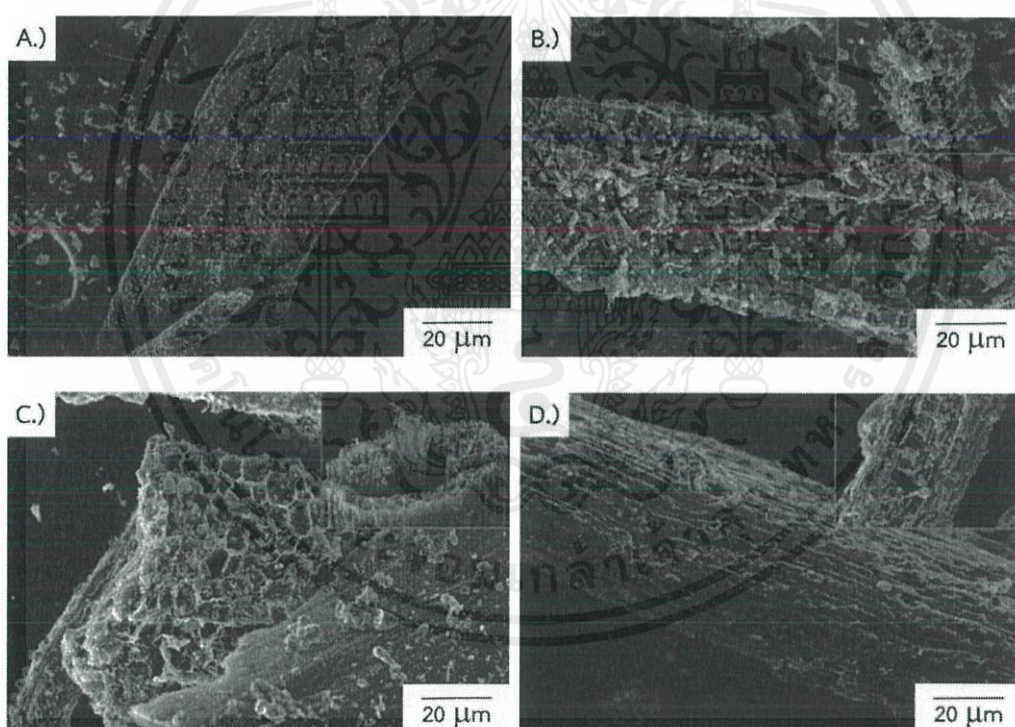
จากรูป 4.3 และ 4.4 ภาพ SEM ของใบรูปฤาษีและดอกปาล์ม (เพศผู้) ที่ยังไม่ผ่านกระบวนการคาร์บอนเซชันและผ่านกระบวนการคาร์บอนเซชันที่อุณหภูมิ 500, 700 และ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จะเห็นได้ว่าโครงสร้างทั้งภายนอกและภายในของชีวมวลมีการเปลี่ยนแปลงไปซึ่งแตกต่างจากชีวมวลที่ยังไม่ผ่านกระบวนการคาร์บอนเซชันและเมื่ออุณหภูมิในกระบวนการคาร์บอนเซชันสูงขึ้นจาก 500 ถึง 700 องศาเซลเซียส พบว่าโครงสร้างภายนอกของชีวมวลเริ่มมีการแตกออก ส่วนโครงสร้างภายในเริ่มมีการก่อตัวของรูพรุนเกิดขึ้นเนื่องจากอิทธิพลของความร้อนและความดัน แต่ที่อุณหภูมิในการคาร์บอนเซชันสูงเกินไปที่ 900 องศาเซลเซียส พบว่าโครงสร้างภายนอกและรูพรุนภายในที่เกิดขึ้นเริ่มมีการพังทลายเนื่องจากอิทธิพลของความร้อนที่มากเกินไปจนทำให้โครงสร้างดังกล่าวเสียรูปไปจากเดิม โดยเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดในการทดลองดังกล่าวคือ คาร์บอนเซชันที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



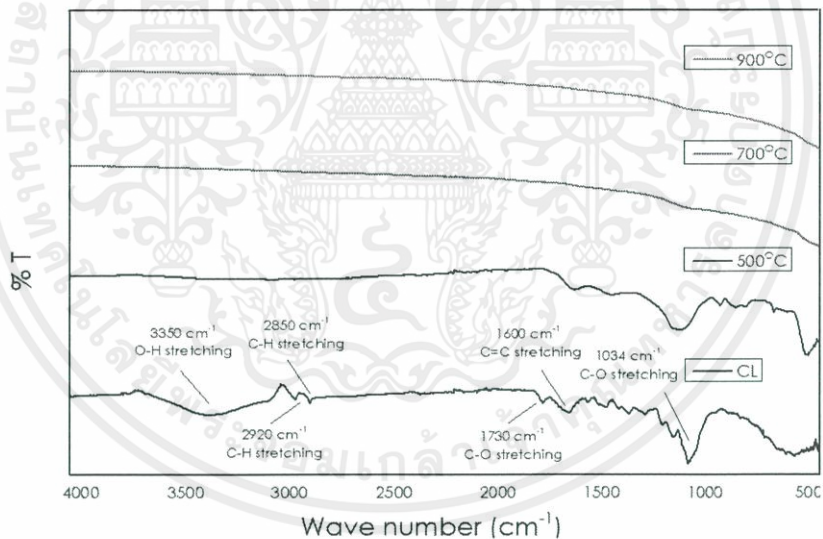
รูปที่ 4.5 ภาพ SEM (กำลังขยาย 300X และ 500X) ของใบรูปฤาษีที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนเซชันที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา (A) Raw (B) 8 (C) 12 (D) 24 ชั่วโมง และผ่านกระบวนการคาร์บอนเซชันที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง



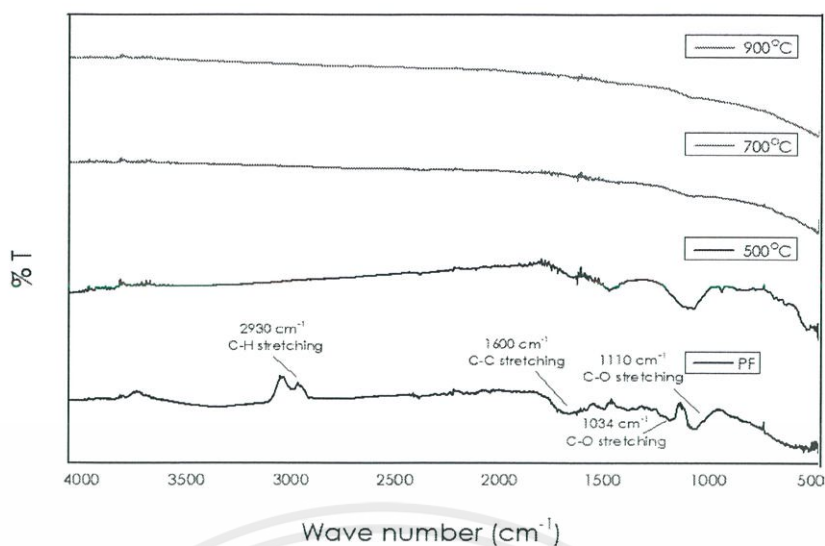
รูปที่ 4.6 ภาพ SEM (กำลังขยาย 300X และ 500X) ของดอกปาล์ม (เพศผู้) ที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนเซชันที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา (A) Raw (B) 8 (C) 12 (D) 24 ชั่วโมง และผ่านกระบวนการคาร์บอนเซชันที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูป 4.5 และ 4.6 SEM ของใบรูปฤาษีและดอกปาล์ม (เพศผู้) ที่ยังไม่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนไนเซชันและผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 8, 12 และ 24 ชั่วโมง และคาร์บอนไนเซชันที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จะเห็นได้ว่าโครงสร้างทั้งภายนอกและภายในของชีวมวลมีการเปลี่ยนแปลงไปซึ่งแตกต่างจากชีวมวลที่ยังไม่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนไนเซชันและเมื่อเวลาที่ใช้ในกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลเพิ่มขึ้นจาก 8 ถึง 12 ชั่วโมง พบว่าโครงสร้างภายนอกของชีวมวลเริ่มมีการแตกออก ส่วนโครงสร้างภายในเริ่มมีการก่อตัวของรูพรุนเกิดขึ้นเนื่องจากอิทธิพลของความร้อนและความดัน แต่ที่เวลาในกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลเพิ่มถึง 24 ชั่วโมง พบว่าโครงสร้างภายนอกและรูพรุนบางส่วนเริ่มมีการกลับมารวมตัวกันอีกครั้งในระบบเนื่องอิทธิพลของเวลาที่มากเกินไป โดยเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดในการทดลองดังกล่าวคือ ไฮโดรเทอร์มอลที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง และคาร์บอนไนเซชันที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง



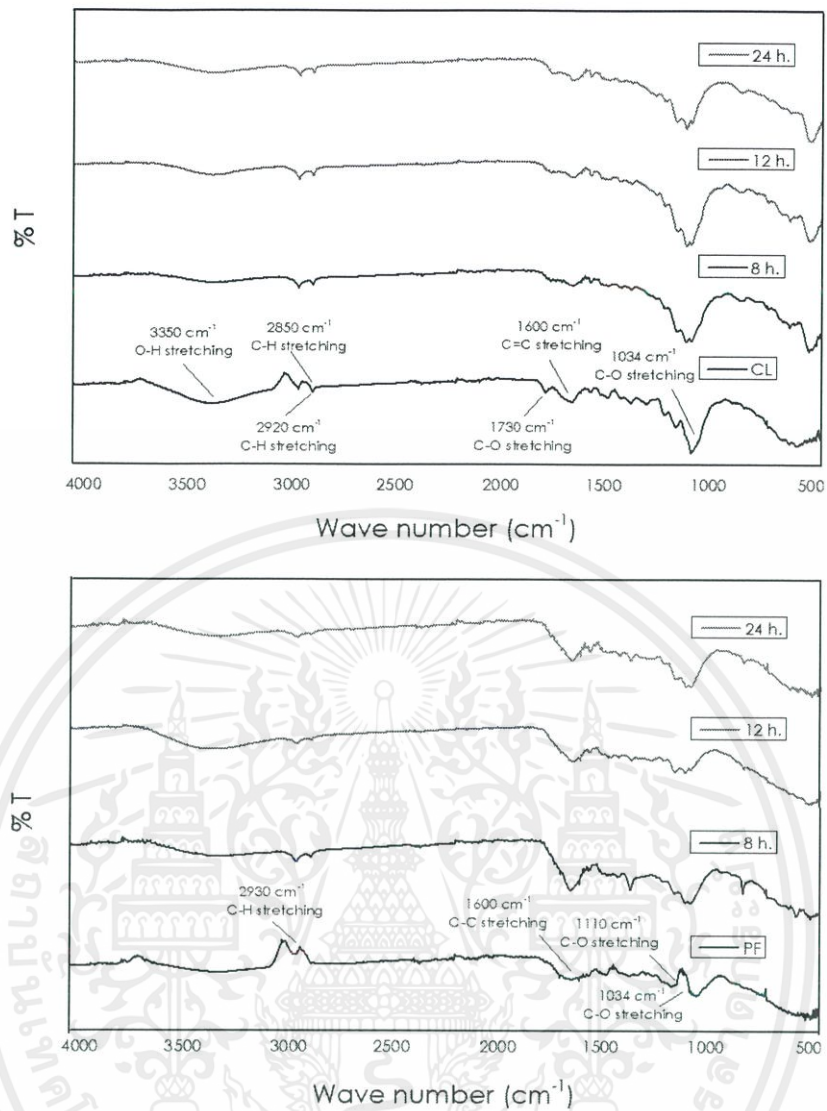
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 กราฟ FT-IR spectraum ของโพลิอะทาศีและดอกปาล์ม (เพศผู้) ที่ไม่ผ่านกระบวนการคาร์บอนเนชันและผ่านกระบวนการคาร์บอนเนชันที่อุณหภูมิ 500, 700 และ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

จากรูป 4.7 แสดงให้เห็นว่าพบพีคในช่วง 3350 cm^{-1} ซึ่งเป็นหมู่ -OH stretching ในหมู่ไฮดรอกซิลหรือคาร์บอนิล พีค $2920\text{-}2850\text{ cm}^{-1}$ ซึ่งเป็นหมู่ C-H stretching ในพอลิแซ็กคาไรด์ ประกอบด้วยลิกนิน พีค $1730\text{-}1034\text{ cm}^{-1}$ ซึ่งเป็นหมู่ C-O stretching ในพอลิแซ็กคาไรด์ ประกอบด้วยลิกนิน และที่พีค 1600 cm^{-1} ซึ่งเป็นหมู่ C=C stretching ในพอลิแซ็กคาไรด์ ประกอบด้วยเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส และแสดงให้เห็นว่าพบพีคในช่วง 2930 cm^{-1} ซึ่งเป็นหมู่ C-H stretching ในพอลิแซ็กคาไรด์ ประกอบด้วยลิกนิน พีค 1600 cm^{-1} ซึ่งเป็นหมู่ C=C stretching ในพอลิแซ็กคาไรด์ ประกอบด้วยเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส และพีค $1110\text{-}1034\text{ cm}^{-1}$ ซึ่งเป็นหมู่ C-O stretching ในพอลิแซ็กคาไรด์ ประกอบด้วยเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลสและลิกนิน จากกราฟแสดงผลข้างต้นสามารถสรุปได้ว่าเมื่อผ่านกระบวนการคาร์บอนเนชันพบว่า พีค -O-H stretching C-H stretching และ C-O stretching จะมีปริมาณลดลงจนเกือบไม่สามารถพบพีคดังกล่าวได้อีก และพีค C=C stretching และ C-O stretching จะมีปริมาณลดลง และเมื่ออุณหภูมิในกระบวนการคาร์บอนเนชันเพิ่มสูงขึ้นเป็น 700 และ 900 องศาเซลเซียส พบว่าไม่มีพีคใดปรากฏอยู่ แสดงว่าพวกสารประกอบอินทรีย์ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลสและลิกนินได้เกิดการสลายตัวเนื่องจากความร้อนและส่งผลให้มีความเป็นคาร์บอนมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

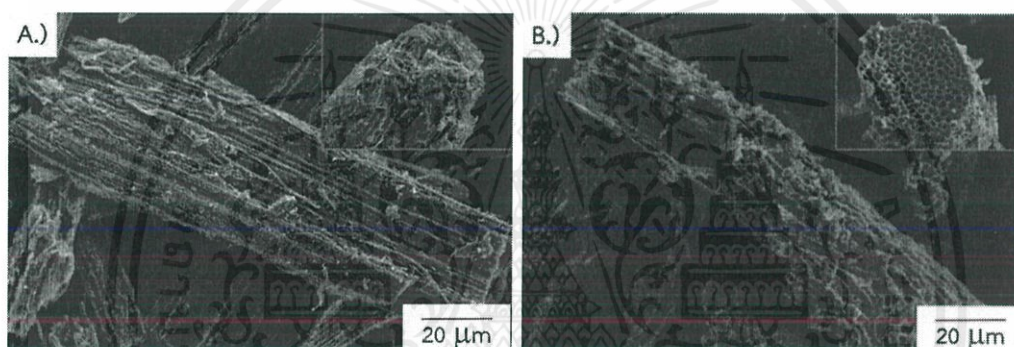


รูปที่ 4.8 กราฟ FT-IR spectrum ของใบรูปกล้วยและดอกปาล์ม (เพศผู้) ที่ไม่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนเซชันและผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนเซชันที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8, 12 และ 24 ชั่วโมง และผ่านกระบวนการคาร์บอนเซชัน 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

จากรูป 4.8 แสดงให้เห็นว่าพบพิกใน ช่วง 3350 cm^{-1} ซึ่งเป็นหมู่ -OH stretching ในหมู่ไฮดรอกซิลหรือคาร์บอนิล พิก $2920\text{-}2850\text{ cm}^{-1}$ ซึ่งเป็นหมู่ C-H stretching ในพอลิแซ็กคาไรด์ ประกอบด้วยลิกนิน พิก $1730\text{-}1034\text{ cm}^{-1}$ ซึ่งเป็นหมู่ C-O stretching ในพอลิแซ็กคาไรด์ ประกอบด้วยลิกนิน และที่พิก 1600 cm^{-1} ซึ่งเป็นหมู่ C=C stretching ในพอลิแซ็กคาไรด์ ประกอบด้วยเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส และแสดงให้เห็นว่าพบพิกในช่วง 2930 cm^{-1} ซึ่งเป็นหมู่ C-H stretching ในพอลิแซ็กคาไรด์ ประกอบด้วยลิกนิน พิก 1600 cm^{-1} ซึ่งเป็นหมู่ C=C stretching ในเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พอลิแซ็กคาไรด์ ประกอบด้วยเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส และพีค $1110-1034\text{ cm}^{-1}$ ซึ่งเป็นหมู่ C-O stretching ในพอลิแซ็กคาไรด์ ประกอบด้วยเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลสและลิกนิน จากกราฟแสดงผลข้างต้นสามารถสรุปได้ว่าเมื่อผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนไนเซชันพบว่า พีค -O-H stretching C-H stretching C-O stretching C-O stretching และ C=C stretching จะมีปริมาณลดลงเมื่อเวลาในการไฮโดรเทอร์มอลที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เพิ่มขึ้นจาก 8 ถึง 24 ชั่วโมง แสดงว่าพวกสารประกอบอินทรีย์ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลสและลิกนินได้เกิดการสลายตัวเนื่องจากความร้อนและส่งผลให้มีความเป็นคาร์บอนมากขึ้น

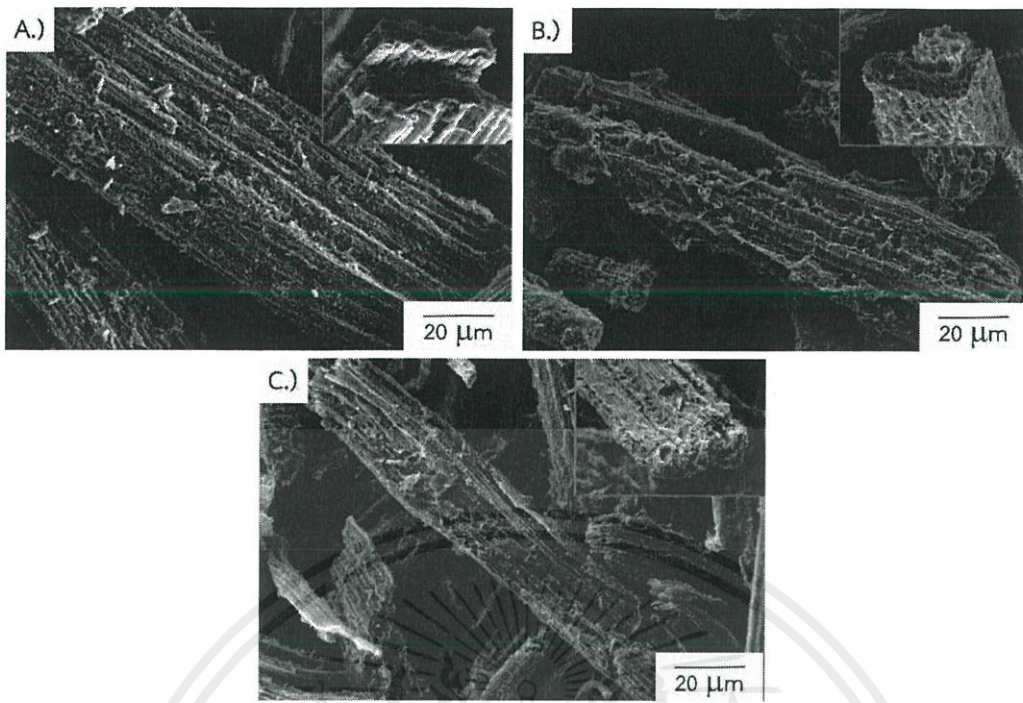
4.2 ผลของกระบวนการกระตุ้นทางเคมี



รูปที่ 4.9 ภาพ SEM (กำลังขยาย 300X และ 500X) (A) ใบรูปถาษี (B) ดอกปาล์ม (เพชผู้) ที่ผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชันและกระบวนการกระตุ้นทางเคมีร่วมกับโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 2 โมลาร์ เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

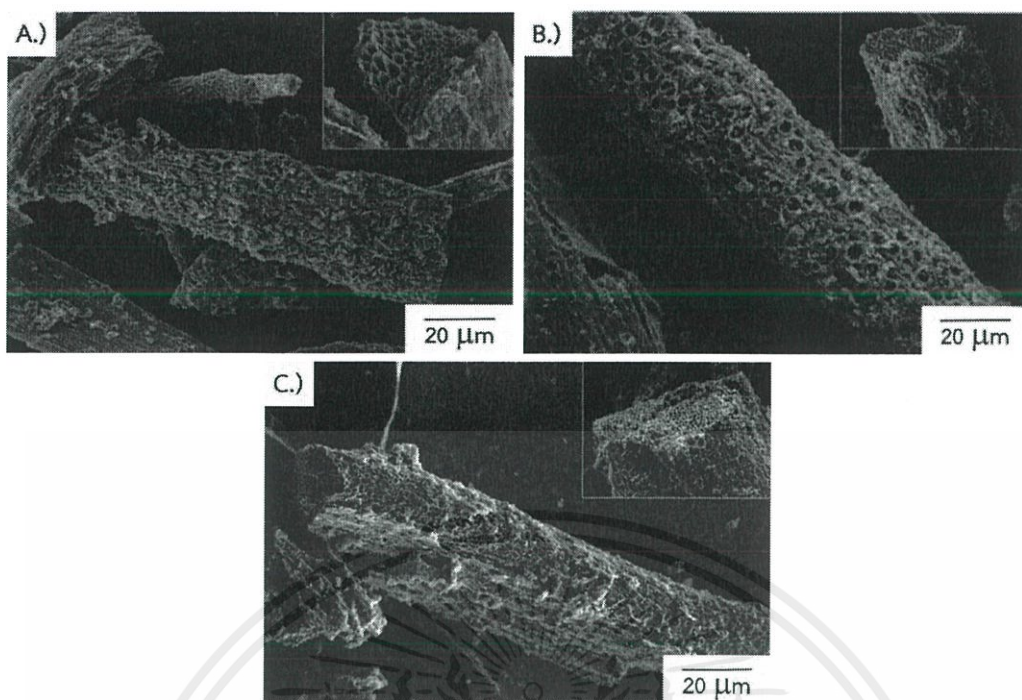
จากรูป 4.9 ภาพ SEM ของใบรูปถาษีและดอกปาล์ม (เพชผู้) ที่ผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชันที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และกระบวนการกระตุ้นทางเคมีร่วมกับสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 2 โมลาร์ เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จะเห็นได้ว่าโครงสร้างทั้งภายนอกและภายในของชีวมวลมีการเปลี่ยนแปลงไปซึ่งเป็นผลจากสารละลายดังกล่าวไปช่วยในการแตกโครงสร้างของสารประกอบอินทรีย์ต่างๆ ในชีวมวลทำให้เห็นลักษณะที่แตกออกของโครงสร้างและช่วยกระตุ้นให้เกิดการก่อตัวของรูพรุนที่มีความเป็นระเบียบและสม่ำเสมอเพิ่มมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 ภาพ SEM (กำลังขยาย 300X และ 500X) ใบธูปฤาษี ที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลที่คาร์บอนเซชันและกระบวนการกระตุ้นทางเคมีร่วมกับโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น (A) 1 โมลาร์ (B) 2 โมลาร์ (C) 4 โมลาร์ เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

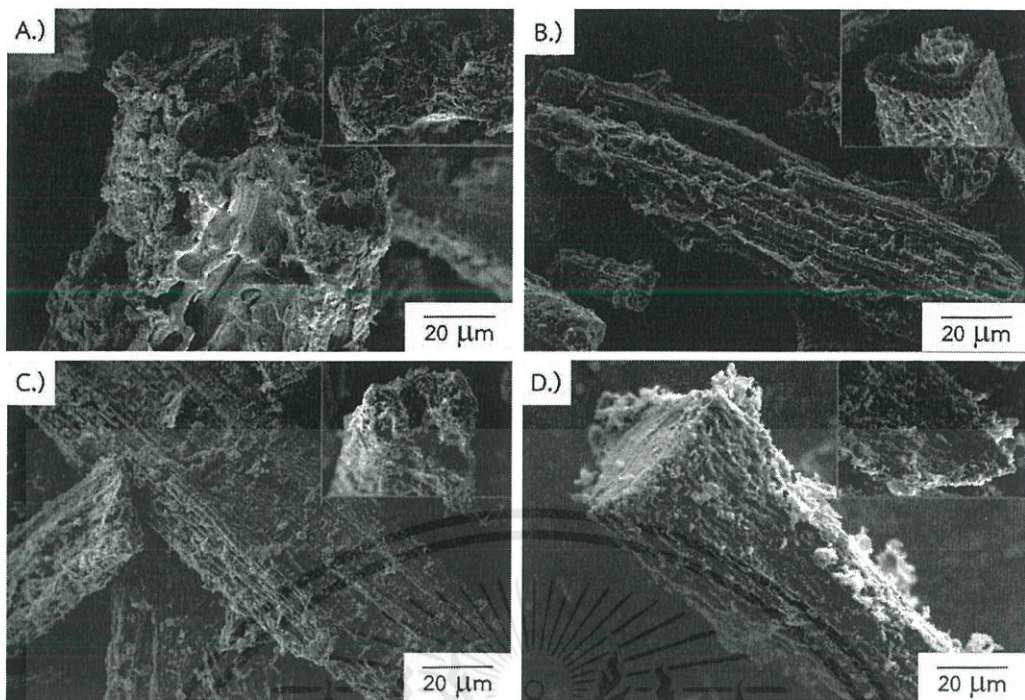
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.11 ภาพ SEM (กำลังขยาย 300X และ 500X) ดอกปาล์ม (เพตผู้) ที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนเซชันและกระบวนการกระตุ้นทางเคมีร่วมกับโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น (A) 1 โมลาร์ (B) 2 โมลาร์ (C) 4 โมลาร์ เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

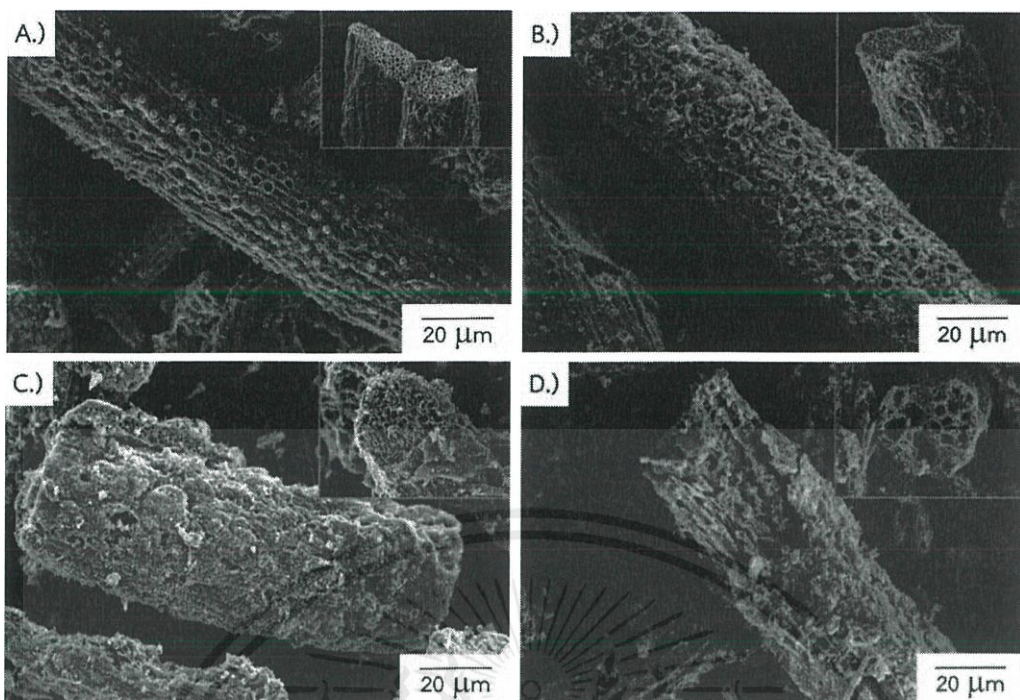
จากรูป 4.10 และ 4.11 ภาพ SEM ของใบรูปถั่วและดอกปาล์ม (เพตผู้) ที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง คาร์บอนเซชันที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และกระบวนการกระตุ้นทางเคมีร่วมกับสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 1, 2 และ 4 โมลาร์ เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จะเห็นได้ว่าเมื่อความเข้มข้นของสารละลายที่ใช้เพิ่มสูงขึ้นจาก 1 ถึง 2 โมลาร์ จะส่งผลทำให้โครงสร้างภายนอกของชีวมวลมีการแตกออกมากขึ้นและโครงสร้างภายในมีการก่อตัวของรูพรุนเพิ่มขึ้นรวมทั้งรูพรุนจะมีความเป็นระเบียบมากขึ้น ซึ่งเป็นผลจากสารละลายดังกล่าวที่ความเข้มข้นที่เหมาะสมไปช่วยในการแตกโครงสร้างของสารประกอบอินทรีย์ในชีวมวลและช่วยกระตุ้นให้เกิดการก่อตัวของรูพรุน แต่ถ้าความเข้มข้นของสารละลายที่ใช้สูงเกินไป 4 โมลาร์ ความรุนแรงของสารละลายจะไปทำลายโครงสร้างของชีวมวลให้เกิดการพังทลาย อีกทั้งสารละลายจะเกิดการเกาะกลุ่มกันเองแล้วเข้าไปปิดโครงสร้างของรูพรุนที่เกิดขึ้น โดยเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดในการทดลองดังกล่าวคือ การกระตุ้นด้วยสารละลายเบสที่ความเข้มข้น 2 โมลาร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 ภาพ SEM (กำลังขยาย 300X และ 500X) ใบธูปฤาษี ที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนเซชันและกระบวนการกระตุ้นทางเคมีร่วมกับ (A) NaOH (B) KOH (C) Na_2CO_3 (D) K_2CO_3 ความเข้มข้น 2 โมลาร์ เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

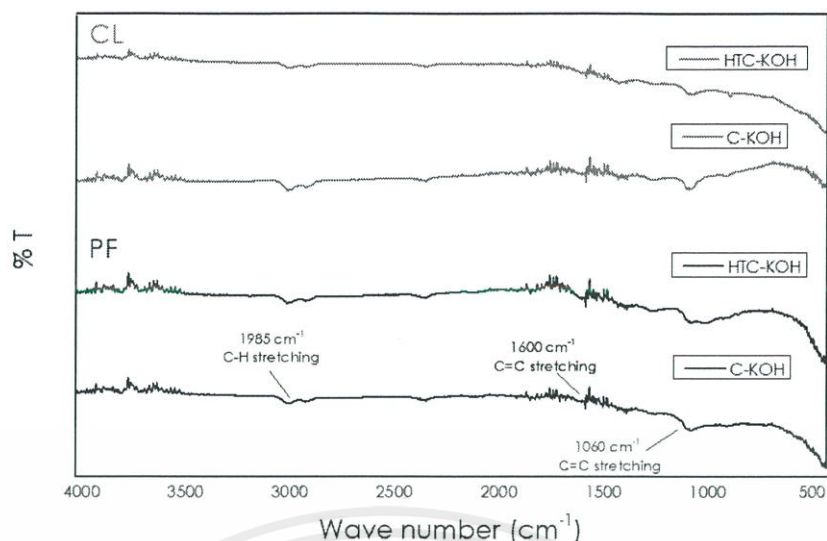
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.13 ภาพ SEM (กำลังขยาย 300X และ 500X) ดอกปาล์ม (เพตซ์) ที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนเซชันและกระบวนการกระตุ้นทางเคมีร่วมกับ (A) NaOH (B) KOH (C) Na_2CO_3 (D) K_2CO_3 ความเข้มข้น 2 โมลาร์ เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

จากรูป 4.12 และ 4.13 ภาพ SEM ของใบรูปถั่วและดอกปาล์ม (เพตซ์) ที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง คาร์บอนเซชันที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และกระบวนการกระตุ้นทางเคมีร่วมกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ โซเดียมคาร์บอเนตและโพแทสเซียมคาร์บอเนต ความเข้มข้น 2 โมลาร์ เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จะเห็นได้ว่าสารละลายแต่ละชนิดจะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างทั้งภายในและภายนอก รวมทั้งการก่อตัวของรูพรุนที่แตกต่างกันออกไปซึ่งเป็นผลมาจากธรรมชาติของสารละลายชนิดนั้นๆ โดยสารละลายกลุ่มไฮดรอกไซด์ จะมีความสามารถในการกระตุ้นให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างและการก่อตัวของรูพรุนได้มากกว่าสารละลายกลุ่มคาร์บอเนต เนื่องจากโมเลกุลของสารจะมีขนาดเล็กกว่าจึงมีความสามารถในการเข้าทำปฏิกิริยาได้ดีกว่า โดยสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์จะมีความสามารถในการกระตุ้นสูงที่สุด เนื่องจากให้การแตกตัวของโครงสร้างภายนอกและการก่อตัวของรูพรุนที่มีความเป็นระเบียบและสม่ำเสมอมากที่สุด โดยเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดในการทดลองดังกล่าวคือ การกระตุ้นด้วยสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์

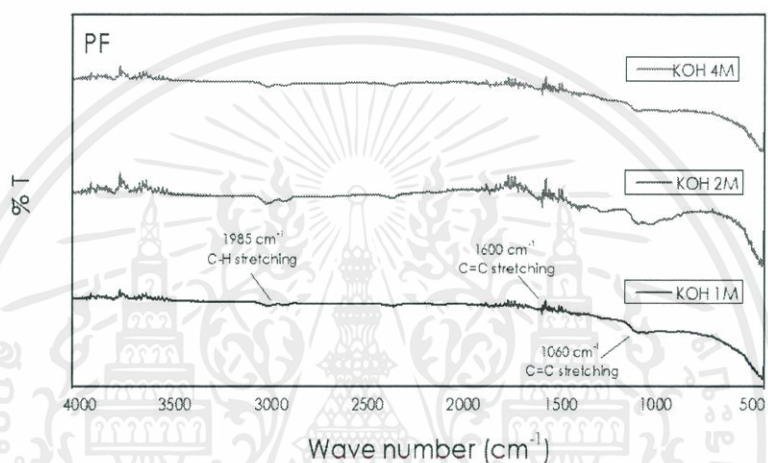
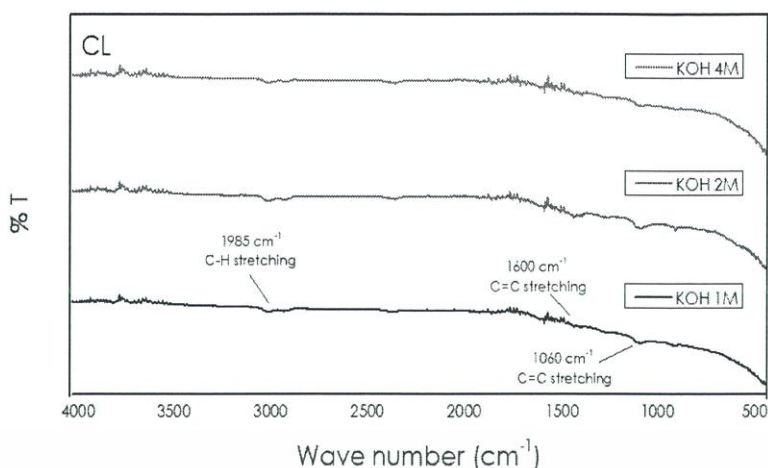
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.14 กราฟ FT-IR spectrum ของโพลิอะเซทิลีนและดอกปาล์ม (เพศผู้) ที่ผ่านกระบวนการคาร์บอนเซชัน กระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนเซชันและผ่านกระบวนการกระตุ้นทางเคมีร่วมกับสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 2 โมลาร์ เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

จากรูป 4.14 แสดงให้เห็นว่าพบพีกในช่วง 1985 cm^{-1} ซึ่งเป็นหมู่ -CH stretching ในพอลิแซ็กคาไรด์ ประกอบด้วยลิกนิน พีก 1600 cm^{-1} ซึ่งเป็นหมู่ C=C stretching ในพอลิแซ็กคาไรด์ ประกอบด้วยเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส และ พีกในช่วง 1060 cm^{-1} ซึ่งเป็นหมู่ C=C stretching ในพอลิแซ็กคาไรด์ ประกอบด้วยเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส จากกราฟแสดงผลข้างต้นสามารถสรุปได้ว่าเมื่อผ่านกระบวนการคาร์บอนเซชัน ไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนเซชันและกระบวนการกระตุ้นทางเคมีพบว่า พีก C-H stretching และ C=C stretching จะมีปริมาณลดลงเล็กน้อยแสดงว่าพวกสารประกอบอินทรีย์ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลสและลิกนินได้เกิดการสลายตัวเนื่องจากความร้อน สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการกระตุ้นจะช่วยแตกพันธะของสารประกอบอินทรีย์ต่างๆ ในชีวมวลส่งผลให้การเปลี่ยนแปลงของโครงสร้าง การก่อตัวของรูพรุนและส่งผลให้มีความเป็นคาร์บอนมากขึ้น

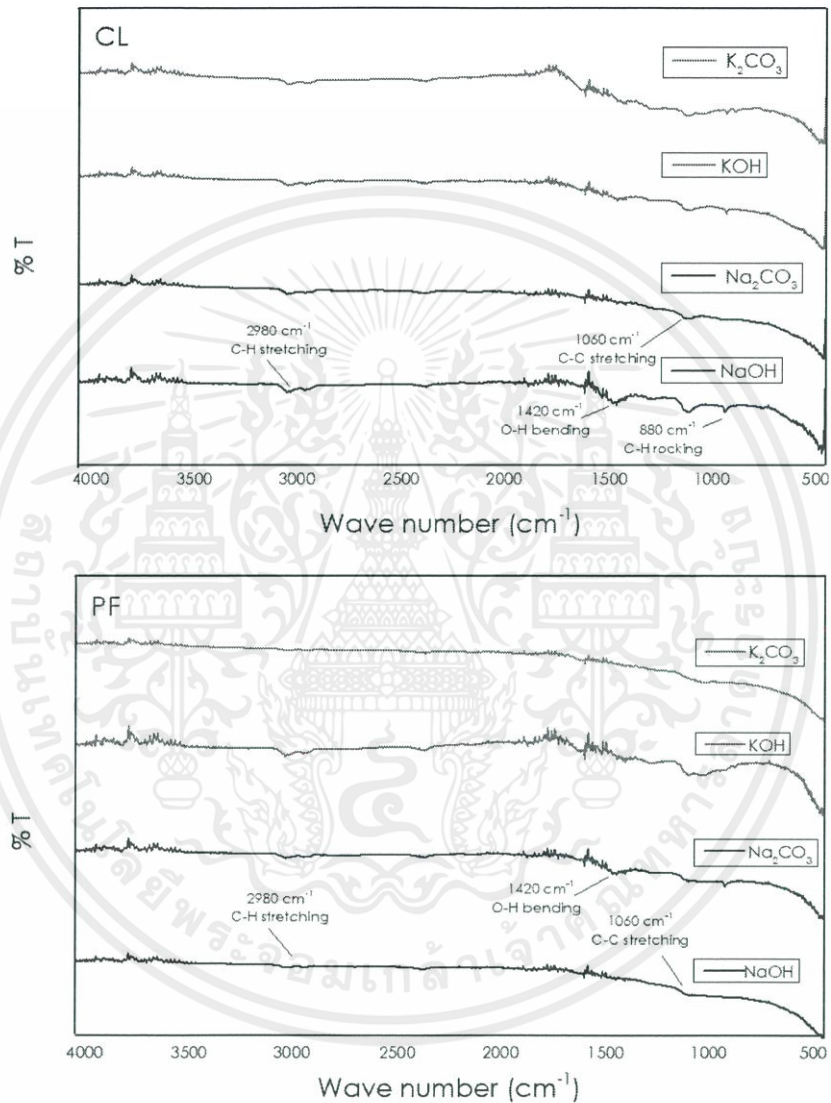
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.15 กราฟ FT-IR spectrum ของไบธูปฤาษีและดอกปาล์ม (เพศผู้) ที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนเซชันที่และผ่านกระบวนการกระตุ้นทางเคมีร่วมกับสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 1, 2 และ 4 โมลาร์ เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

จากรูป 4.15 แสดงให้เห็นว่าพบพีคในช่วง 1985 cm^{-1} ซึ่งเป็นหมู่ -CH stretching ในพอลิแซ็กคาไรด์ ประกอบด้วยกลูโคส พีค 1600 cm^{-1} ซึ่งเป็นหมู่ C=C stretching ในพอลิแซ็กคาไรด์ ประกอบด้วยเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส และ พีคในช่วง 1060 cm^{-1} ซึ่งเป็นหมู่ C=C stretching ในพอลิแซ็กคาไรด์ ประกอบด้วยเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส จากกราฟแสดงผลข้างต้นสามารถสรุปได้ว่าเมื่อผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนเซชันและกระบวนการกระตุ้นทางเคมีร่วมกับสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างกัน เมื่อความเข้มข้นของสารละลายมากขึ้น พีค C-H stretching และ C=C stretching จะมีปริมาณลดลงเล็กน้อยแสดงว่าสารละลายดังกล่าวไปช่วยในการแตกพันธะของพวกสารประกอบอินทรีย์ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลสและกลูโคส โดยเมื่อความเข้มข้นมากขึ้นสารละลายจะมีความสามารถในการเข้าทำปฏิกิริยาและช่วยในการแตกพันธะได้มาก เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ยิ่งขึ้น ที่ความเข้มข้น 4 โมลาร์ พบว่าแทบไม่มีพีคใดปรากฏอยู่เมื่อเทียบกับที่ 1 และ 2 โมลาร์ ความเข้มข้นที่มากขึ้นส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้าง การก่อตัวของรูพรุนและส่งผลให้มีความเป็นคาร์บอนมากขึ้น



รูปที่ 4.16 กราฟ FT-IR spectrum ของใบกล้วยและดอกปาล์ม (เพศผู้) ที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนในเซชันและผ่านกระบวนการกระตุ้นทางเคมีร่วมกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ โซเดียมคาร์บอเนตและโพแทสเซียมคาร์บอเนต ที่ความเข้มข้น 2 โมลาร์ เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูป 4.16 แสดงให้เห็นว่าพบพีกในช่วง 2980 cm^{-1} ซึ่งเป็นหมู่ -CH stretching ในพอลิแซ็กคาไรด์ ประกอบด้วยลิกนิน พีก 1420 cm^{-1} ซึ่งเป็นหมู่ -O-H bending ในพอลิแซ็กคาไรด์ ประกอบด้วยเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส พีกในช่วง 1060 cm^{-1} ซึ่งเป็นหมู่ C=C stretching ในพอลิแซ็กคาไรด์ ประกอบด้วยเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส และ 880 cm^{-1} ซึ่งเป็นหมู่ C-H rocking ในพอลิแซ็กคาไรด์ ประกอบด้วยเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส จากกราฟแสดงผลข้างต้นสามารถสรุปได้ว่าเมื่อผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนเซชันและกระบวนการกระตุ้นทางเคมีร่วมกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ โซเดียมคาร์บอเนตและโพแทสเซียมคาร์บอเนต ที่ความเข้มข้น 2 โมลาร์ พบว่าสารละลายแต่ละชนิดจะมีความสามารถในการช่วยแตกพันธะของสารประกอบอินทรีย์ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลสและลิกนินต่างกันออกไปขึ้นกับธรรมชาติของสารละลาย โดยจะเกี่ยวข้องกับความสามารถในการแตกตัวและการเข้าทำปฏิกิริยา ซึ่งสารละลายที่ใช้ในการกระตุ้นจะส่งผลให้ พีก C-H stretching -O-H bending C=C stretching และ C-H rocking จะมีปริมาณลดลงแสดงว่าสารละลายดังกล่าวไปช่วยในการแตกพันธะของพวกสารประกอบอินทรีย์ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลสและลิกนิน โดยสารละลายกลุ่มไฮดรอกไซด์จะมีความสามารถในการเข้าทำปฏิกิริยาและช่วยในการแตกพันธะได้มากกว่าเนื่องจากโมเลกุลมีขนาดเล็กกว่าสารละลายในกลุ่มคาร์บอเนต ความสามารถในการแตกตัวและการเข้าทำปฏิกิริยาส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้าง การก่อตัวของรูพรุนและส่งผลให้มีความเป็นคาร์บอนมากขึ้น

ตารางที่ 4.3 ร้อยละองค์ประกอบของธาตุต่างๆ ในผลิตภัณฑ์

ตัวอย่าง	C (wt%)	N (wt%)	H (wt%)
CL - C	63.386	2.016	1.1227
PF - C	57.951	1.7214	0.05777
CL - HTC	60.561	2.7943	2.6854
PF - HTC	72.513	2.013	0.40459
CL - C KOH (2M)	54.001	1.0208	0.92254
PF - C KOH (2M)	67.533	2.1487	0.96369
CL - HTC KOH (1M)	67.006	2.0967	1.10429
PF - HTC KOH (1M)	73.432	2.1336	0.74184
CL - HTC KOH (2M)	66.573	1.4433	0.73126
PF - HTC KOH (2M)	49.883	1.2448	1.2986

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่าง	C (wt%)	N (wt%)	H (wt%)
CL – HTC KOH (4M)	72.113	2.1512	0.55029
PF – HTC KOH (4M)	74.95	2.6302	0.46337
CL – HTC NaOH (2M)	50.996	1.4479	0.53288
PF – HTC NaOH (2M)	65.158	1.7986	1.0093
CL – HTC Na ₂ CO ₃ (2M)	75.962	2.2574	0.81749
PF – HTC Na ₂ CO ₃ (2M)	74.589	3.4788	0.4806
CL – HTC K ₂ CO ₃ (2M)	61.332	1.1892	1.3365
PF – HTC K ₂ CO ₃ (2M)	60.311	1.0021	0.9071

จากตารางที่ 4.3 แสดงร้อยละประกอบของธาตุ (wt%) ของไบรูปถาชีและดอกปาล์ม (เพศผู้) หลังจากผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชันที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง กระบวนการไฮโดรเทอร์มอลที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง และกระบวนการกระตุ้นทางเคมีร่วมกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ โซเดียมคาร์บอเนต และโพแทสเซียมคาร์บอเนต ที่ความเข้มข้น 1, 2 และ 4 โมลาร์ เป็นเวลา 3 ชั่วโมง พบว่ามีองค์ประกอบของคาร์บอนมากที่สุดอยู่ที่ประมาณ 49.9-75.9 wt% โดยเป็นส่วนของคาร์บอนที่เกิดขึ้นหลังจากผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชันและไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนไนเซชัน ซึ่งเป็นกระบวนการที่ทำให้ได้มาซึ่งผลผลิตที่เป็นคาร์บอนและในส่วนขององค์ประกอบอื่นๆ พวกสารระเหยต่างๆ หลุดออกระหว่างกระบวนการ นอกจากนี้จะมีองค์ประกอบของไนโตรเจนและไฮโดรเจนอยู่เล็กน้อย โดยจะมีองค์ประกอบของไนโตรเจนอยู่ที่ประมาณ 1.01-3.48 wt% และมีองค์ประกอบของไฮโดรเจนอยู่ที่ประมาณ 0.06- 2.69 wt% ซึ่งได้จากองค์ประกอบเดิมที่อยู่ในชีวมวล น้ำ อากาศและสภาพแวดล้อมในขั้นตอนการทำการทดลอง จากการทดลองพบว่าผลิตภัณฑ์ที่สังเคราะห์ขึ้นมีปริมาณคาร์บอนอยู่ในระดับที่เหมาะสมสำหรับการพัฒนาไปเป็นตัวดูดซับได้

ตารางที่ 4.4 สมบัติบริเวณพื้นผิวของผลิตภัณฑ์

ตัวอย่าง	S _{BET} (m ² /g)	S _{mp} (m ² /g)	AV _{mp} size (nm)	AV _{me} size (nm)	V _T (cm ³ /g)	V _{mp} (cm ³ /g)	V _{me} (cm ³ /g)	V _{ex} (cm ³ /g)
CL – C KOH (2M)	62.1781	17.9261	3.95257	7.0218	0.061441	0.007703	0.051198	0.00254
PF – C KOH (2M)	63.4706	29.6373	3.92692	6.1409	0.062311	0.013060	0.048542	0.000709
CL – HTC KOH (2M)	612.3543	542.3335	1.96702	4.9839	0.301129	0.240129	0.048362	0.012638

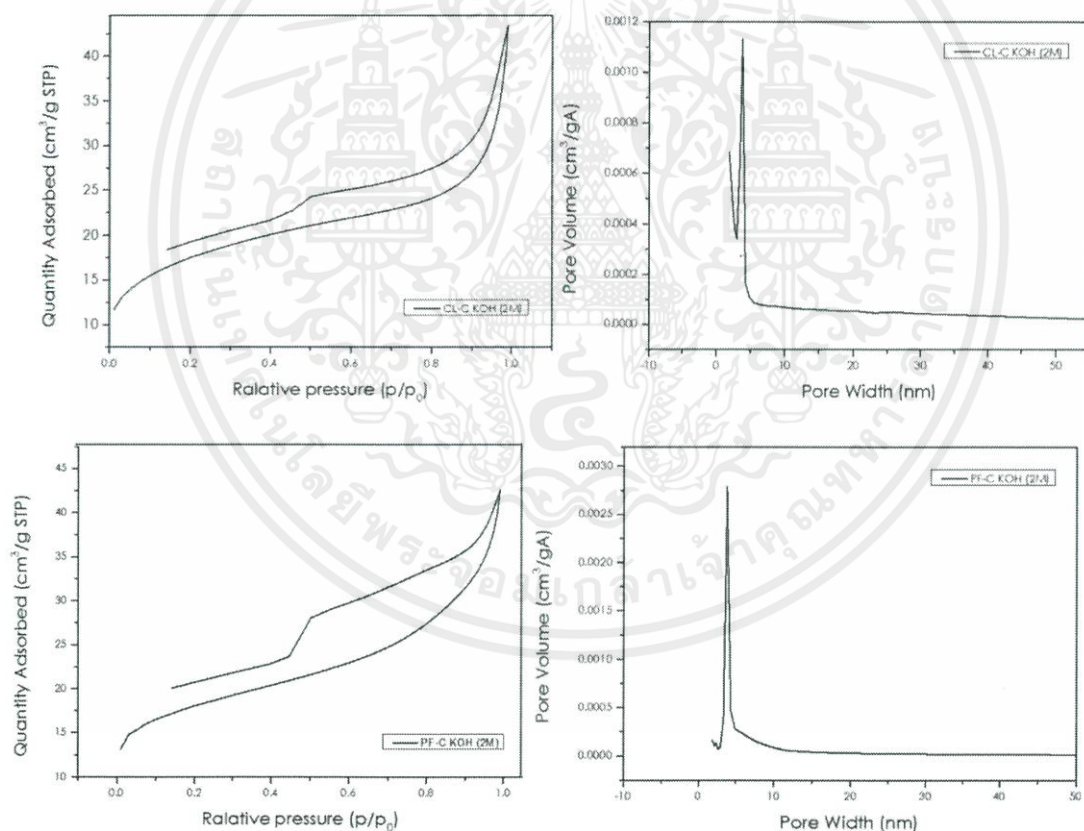
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่าง	S_{BET} (m^2/g)	S_{mp} (m^2/g)	AV_{mp} size (nm)	AV_{me} size (nm)	V_T (cm^3/g)	V_{mp} (cm^3/g)	V_{me} (cm^3/g)	V_{ex} (cm^3/g)
PF – HTC KOH (2M)	854.2494	661.8208	2.2884	5.3103	0.488717	0.292559	0.171403	0.024755
CL – HTC KOH (1M)	98.4049	62.9175	2.65393	7.9445	0.06529	0.027579	0.033005	0.004706
PF – HTC KOH (1M)	335.1823	257.6777	2.18166	3.3946	0.193722	0.114141	0.06266	0.016921
CL – HTC KOH (4M)	161.7751	130.3293	2.10372	6.6934	0.085082	0.057522	0.021544	0.006016
PF – HTC KOH (4M)	260.5602	194.9916	2.20908	4.9963	0.1439	0.085969	0.051568	0.006363

จากตารางที่ 4.4 แสดงสมบัติบริเวณพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ที่สังเคราะห์ขึ้นจากไบธูฤชีและดอกปาล์ม (เพศผู้) ซึ่งประกอบไปด้วย พื้นผิว BET พื้นผิวไมโคร ขนาดเฉลี่ยของรูพรุนไมโคร ขนาดเฉลี่ยของรูพรุนเมโซ ปริมาตรรูพรุนรวม ปริมาตรรูพรุนไมโคร ปริมาตรรูพรุนเมโซและปริมาตรภายนอกรูพรุน ที่ได้จากเทคนิคการดูดซับ-คายซับก๊าซไนโตรเจน ที่อุณหภูมิ -196 องศาเซลเซียส แสดงให้เห็นว่าตัวอย่างที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนเซชันจะมีพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนสูงกว่าตัวอย่างที่ผ่านกระบวนการคาร์บอนเซชันในเงื่อนไขการกระตุ้นด้วยสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นเท่ากัน เท่ากับ 2 โมลาร์ ซึ่งเป็นผลจากกระบวนการแตกพันธะของสารประกอบลิโนเซลลูโลสด้วยโมเลกุลของน้ำในกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลที่ส่งผลให้มีพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนเพิ่มสูงขึ้นโดยจะมีความสามารถมากกว่ากระบวนการคาร์บอนเซชัน นอกจากนี้ยังเป็นผลจากกระบวนการกระตุ้นทางเคมีร่วมกับสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่มีความสามารถในการเข้าทำปฏิกิริยาและช่วยในการแตกพันธะได้มากกว่าเนื่องจากโมเลกุลมีขนาดเล็กและเมื่อทำการเปรียบเทียบความเข้มข้นของสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการกระตุ้นต่อสมบัติบริเวณพื้นผิวของถ่านกัมมันต์พบว่า ความเข้มข้นที่เหมาะสมที่สุดในการทดลองคือ 2 โมลาร์ ซึ่งจะให้พื้นที่ผิว BET ของไบธูฤชีและดอกปาล์ม (เพศผู้) สูงสุดถึง 612.3543 และ 854.2494 m^2/g ตามลำดับ โดยจะเป็นพื้นที่ผิวไมโคร 542.3335 และ 661.8208 m^2/g ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าถ่านกัมมันต์ที่สังเคราะห์ขึ้นนั้นประกอบด้วยรูพรุนไมโครเป็นส่วนใหญ่และรูพรุนเมโซเป็นส่วนน้อยซึ่งเหมาะสมกับการประยุกต์ใช้ในการดูดซับโมเลกุลก๊าซ โดยค่าเฉลี่ยของรูพรุนไมโครจะมีขนาดอยู่ที่ 1.9-2.3 nm รูพรุนเมโซจะมีขนาดอยู่ที่ 4.9-5.3 nm โดยจะมีปริมาตรรูพรุนรวมเท่ากับ 0.301129 และ 0.488717 cm^3/g ตามลำดับ ปริมาตรรูพรุนไมโครเท่ากับ 0.240129 และ 0.292559 cm^3/g ตามลำดับ ปริมาตรรูพรุนเมโซ 0.048362 และ 0.171403 cm^3/g ตามลำดับและปริมาตรภายนอกรูพรุนเท่ากับ 0.012638 และ 0.024755 cm^3/g ตามลำดับ โดยเมื่อทำการทดลองลดความเข้มข้นของสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 1 โมลาร์ พื้นที่ผิวจะมีค่าลดลงประมาณ 500 m^2/g และปริมาตรรูพรุนรวมมีค่าลดลงประมาณ 0.3-0.5 cm^3/g ซึ่งจะเห็นได้ว่าพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนมีค่า

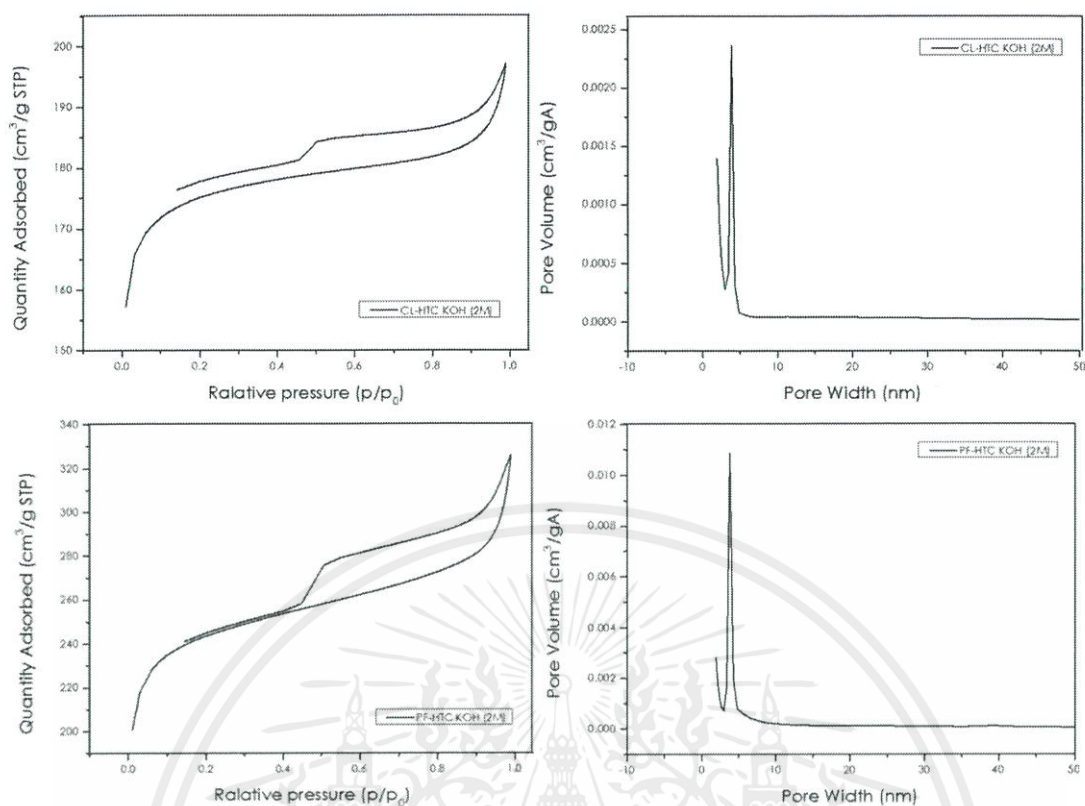
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลดลงเนื่องจากความเข้มข้นที่ไม่มากพอในการแตกพันธะของสารประกอบลิกโนเซลลูโลสและการเปลี่ยนเป็นคาร์บอน และเมื่อทำการทดลองเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 4 โมลาร์ พื้นที่ผิวจะมีค่าลดลงประมาณ 400-600 m^2/g และปริมาตรรูพรุนรวมมีค่าลดลงประมาณ 0./-0.3 cm^3/g ซึ่งจะเห็นได้ว่าพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนมีค่าลดลงเนื่องจากความรุนแรงของสารละลายจะไปทำลายโครงสร้างของชีวมวลให้เกิดการพังทลาย อีกทั้งสารละลายจะเกิดการเกาะกลุ่มกันเองแล้วเข้าไปปิดโครงสร้างของรูพรุนที่เกิดขึ้น โดยเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดในการทดลองดังกล่าวคือ การสังเคราะห์ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนเซชันและการกระตุ้นด้วยสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 2 โมลาร์ ซึ่งจะทำให้ได้พื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนรวมสูงที่สุด

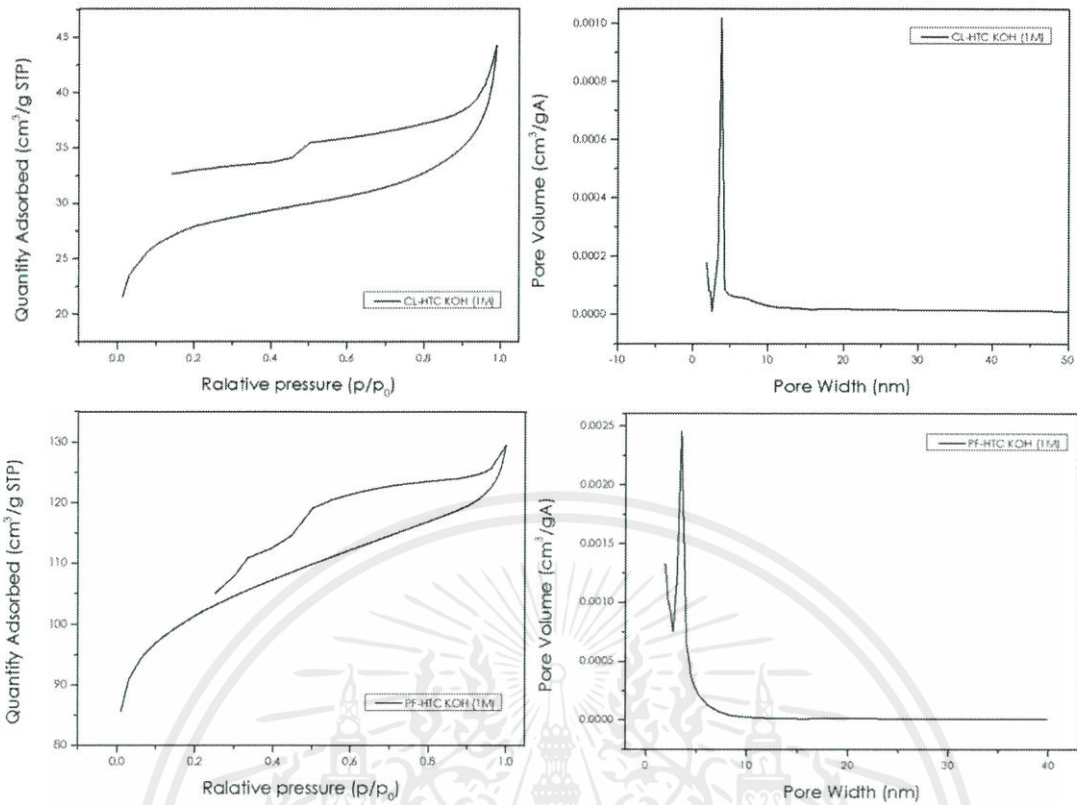


รูปที่ 4.17 กราฟ N_2 adsorption/desorption isotherm และการกระจายตัวของรูพรุนของไบโอปลาซีและดอกปาล์ม (เพศผู้) ที่ผ่านกระบวนการคาร์บอนเซชันและผ่านกระบวนการกระตุ้นทางเคมีร่วมกับสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 2 โมลาร์ เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

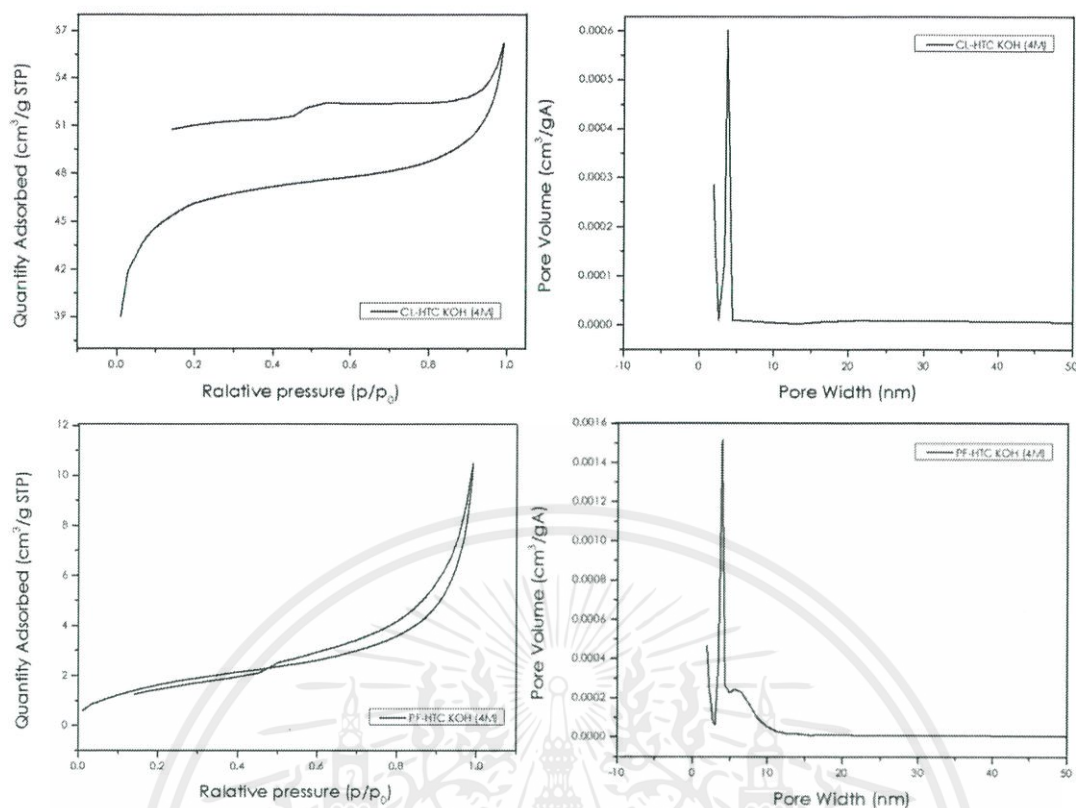
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.18 กราฟ N₂ adsorption/desorption isotherm และการกระจายตัวของรูพรุนของไบรูปถาซีและดอกปาล์ม (เพศผู้) ที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนเซชันและผ่านกระบวนการกระตุ้นทางเคมีร่วมกับสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 2 โมลาร์ เป็นเวลา 3 ชั่วโมง



รูปที่ 4.19 กราฟ N₂ adsorption/desorption isotherm และการกระจายตัวของรูพรุนของไบรูปถาซีและดอกปาล์ม (เพศผู้) ที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนเซชันและผ่านกระบวนการกระตุ้นทางเคมีร่วมกับสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 1 โมลาร์ เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

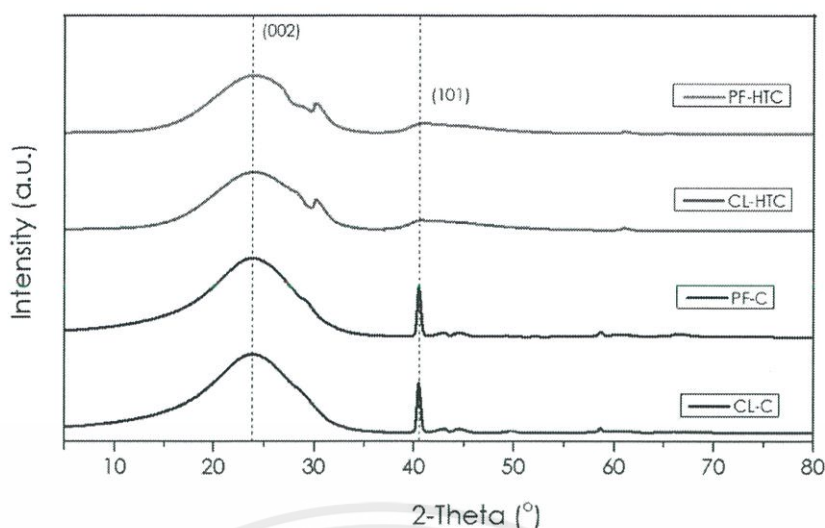


รูปที่ 4.20 กราฟ N₂ adsorption/desorption isotherm และการกระจายตัวของรูพรุนของไบรูปถาซีและดอกปาล์ม (เพศผู้) ที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนเซชันและผ่านกระบวนการกระตุ้นทางเคมีร่วมกับสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 4 โมลาร์ เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

จากรูปที่ 4.17, 4.18, 4.19 และ 4.20 กราฟแสดงการดูดซับ-คายซับก๊าซไนโตรเจนและกราฟแสดงการกระจายตัวของรูพรุนของตัวอย่างไบรูปถาซีและดอกปาล์ม (เพศผู้) ที่ผ่านกระบวนการคาร์บอนเซชัน กระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนเซชันและกระบวนการกระตุ้นทางเคมีร่วมกับสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 1, 2 และ 4 โมลาร์ โดยรูปที่ 4.17, 4.19 และ 4.20 โดยในช่วงแรกที่มีความดันสัมพัทธ์ต่ำจะมีรูปแบบของไอโซเทอมชนิดที่ 2 ซึ่งจะพบในวัสดุที่ไม่มีรูพรุนหรือมีรูพรุนน้อย จากนั้นเมื่อความดันสัมพัทธ์เพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วมีการเกิดการควบแน่นคาปิลลารี (Capillary condensation) ขึ้นในรูพรุนซึ่งทำให้เกิดลักษณะของ Hysteresis loop ในช่วงของการคายซับ จะมีรูปแบบของไอโซเทอมชนิดที่ 4 ซึ่งจะพบมากในวัสดุรูพรุนขนาดกลาง (2-50 nm) ซึ่งจากกราฟจะเห็นได้ว่าตัวอย่างถ่านกัมมันต์นั้นจะประกอบด้วยรูพรุนขนาดกลางเป็นส่วนใหญ่ตามการจำแนกไอโซเทอมการดูดซับ ซึ่งเป็นเงื่อนไขที่ไม่เหมาะสมในการนำไปดูดซับโมเลกุลก๊าซ โดยเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

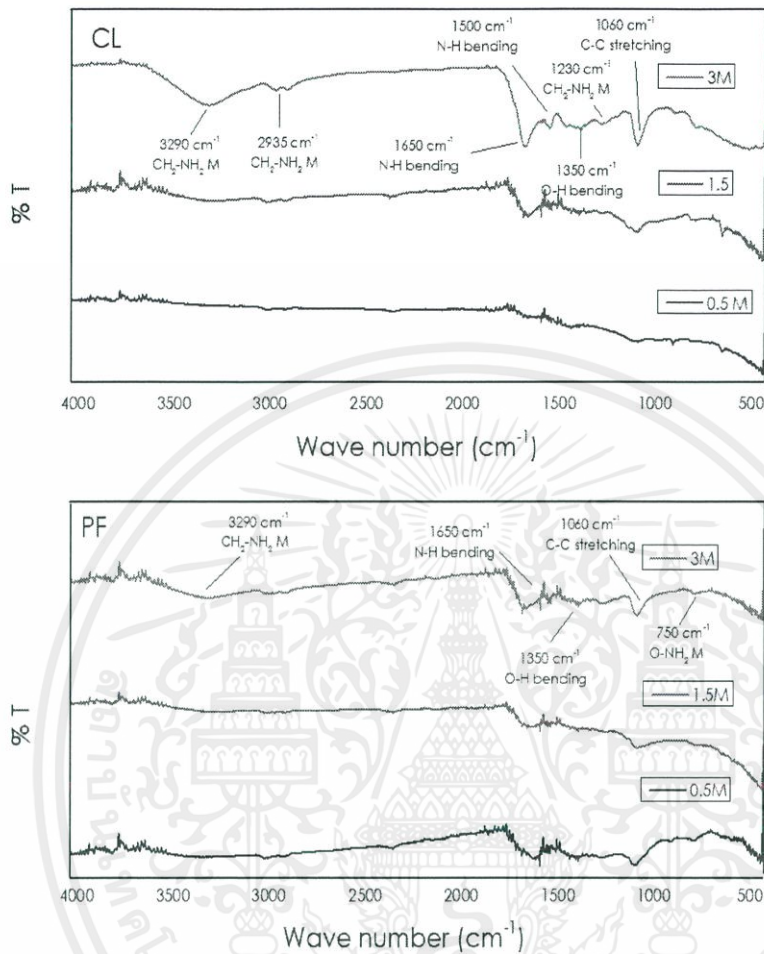
เงื่อนไขที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยกระบวนการคาร์บอนไอเซชัน ที่มีความสามารถในการแตกพันธะของสารประกอบลิโนเชลลูโลสและการฟอร์มตัวเป็นคาร์บอนที่ดียิ่งกว่ากระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนไอเซชัน และจากกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนไอเซชันที่กระตุ้นร่วมกับสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 1 และ 4 โมลาร์ ที่ความเข้มข้นไม่เหมาะสมต่อการแตกพันธะและการก่อตัวของรูพรุน ต่างจากกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนไอเซชันที่กระตุ้นร่วมกับสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 2 โมลาร์ ในรูปที่ 4.18 ซึ่งเป็นเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุด โดยในช่วงแรกที่มีความดันสัมพัทธ์ต่ำจะมีรูปแบบของไอโซเทอมชนิดที่ 1 ซึ่งจะพบมากในวัสดุรูพรุนขนาดเล็ก (< 2 nm) จากนั้นเมื่อความดันสัมพัทธ์เพิ่มสูงขึ้นมีการเกิดการควบแน่นคาปิลลารี (Capillary condensation) ขึ้นในรูพรุนซึ่งทำให้เกิดลักษณะของ Hysteresis loop ในช่วงของการคายซับ จะมีรูปแบบของไอโซเทอมชนิดที่ 4 ซึ่งจะพบมากในวัสดุรูพรุนขนาดกลาง (2-50 nm) โดยการควบแน่นคาปิลลารีทำให้ช่วงการคายซับมีปริมาณดูดซับที่สูงกว่าในช่วงการดูดซับที่ความดันเท่ากัน ช่วงแรกจะเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว (monolayer) ช่วงที่สองจะเป็นการดูดซับมากกว่าหนึ่งชั้น (multilayer) ช่วงสุดท้ายเป็นการดูดซับให้เต็มรูพรุนหลังจากนั้นจะเกิดการคายซับออกจนหมด ซึ่งจากกราฟจะเห็นได้ว่าตัวอย่างถ่านกัมมันต์นั้นจะประกอบด้วยรูพรุนขนาดเล็กและรูพรุนขนาดกลางตามการจำแนกไอโซเทอมการดูดซับ ซึ่งจากข้อมูลของการเกิดการควบแน่นแบบคาปิลลารีสามารถนำมาคำนวณหาการกระจายตัวของรูพรุน (Pore size distribution) ในของแข็งที่มีรูพรุนได้ โดยจากกราฟการกระจายตัวของรูพรุนจะเห็นว่า รูพรุนส่วนใหญ่มีขนาดประมาณ 3.8-4 nm ซึ่งจะเป็รูพรุนขนาดกลาง และบางส่วนจะมีขนาดประมาณ 1.7-19 nm ซึ่งเป็นรูพรุนขนาดเล็ก ซึ่งผลการทดลองที่ได้จะสอดคล้องกับไอโซเทอมการดูดซับที่เป็นการยืนยันในอีกทางหนึ่งว่าถ่านกัมมันต์ที่สังเคราะห์ขึ้นประกอบด้วยรูพรุนขนาดเล็กและขนาดกลาง



รูปที่ 4.21 กราฟ XRD-Spectrum ของไบรูปถาชีและดอกปาล์ม (เพศผู้) ที่ผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชัน กระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนไนเซชันที่และผ่านกระบวนการกระตุ้นทางเคมีร่วมกับสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 2 โมลาร์ เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

จากรูปที่ 4.21 แสดงให้เห็นว่าพบพีคหลักในช่วง $\theta = 23.90^\circ$ ซึ่งเป็นพีคของ Amorphous carbon ที่ระนาบ (002) พีคที่อยู่ในช่วง $\theta = 37.38^\circ$ เป็นพีคของสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์และน้ำ และพีคที่อยู่ในช่วง $\theta = 40.92^\circ$ เป็นพีคของ อนุภาคคาร์บอนอื่นๆ เช่น Carbon nanosphere Amorphous carbon ที่ระนาบ (101) เป็นต้น โดยจากกราฟแสดงผลข้างต้นสามารถสรุปได้ว่า ผลิตภัณฑ์ที่สังเคราะห์ขึ้นได้มีความเป็นคาร์บอนอสัณฐาน โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนไนเซชันจะพบพีคที่ 37.38° ซึ่งเป็นพีคของสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์และน้ำมากกว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการคาร์บอนไนเซชัน เนื่องจากในขั้นตอนไฮโดรเทอร์มอลมีน้ำเป็นส่วนประกอบ และจากกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนไนเซชันจะพบพีคในช่วง 40.92° ในปริมาณน้อยกว่าแทบไม่ปรากฏ เมื่อเทียบกับกระบวนการคาร์บอนไนเซชัน ซึ่งเป็นผลจากขั้นตอนการสังเคราะห์ที่แตกต่างกันจึงส่งผลต่อการเปลี่ยนไปเป็นคาร์บอนผลิตภัณฑ์

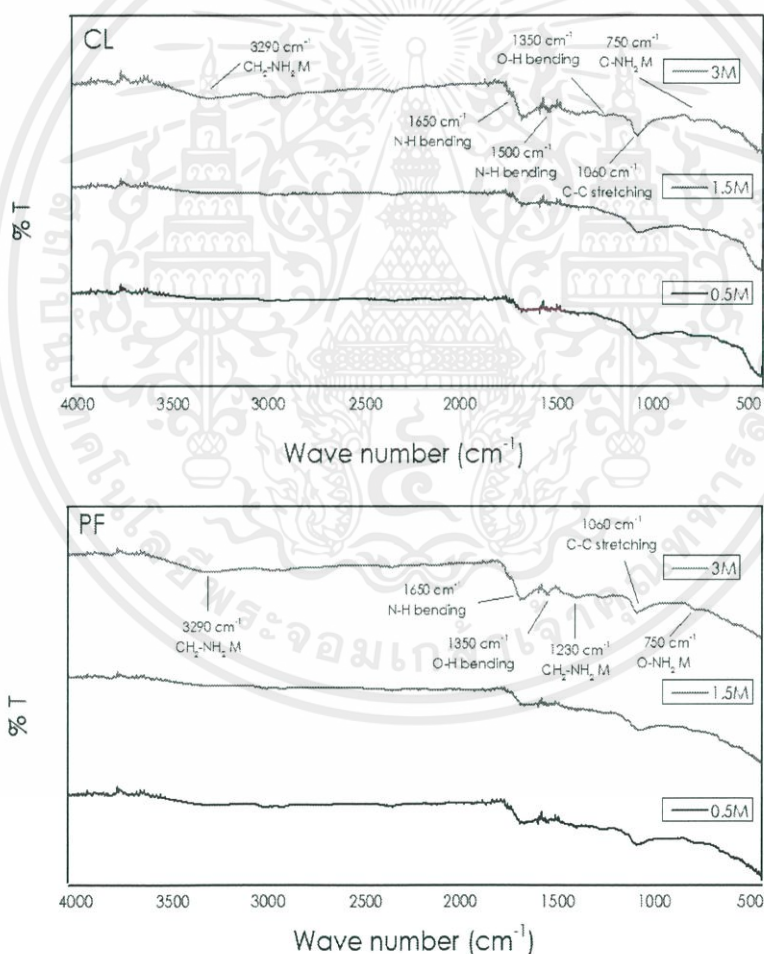
4.3 ผลของการปรับปรุงพื้นผิวด้วยการเจือด้วยสารละลายเอมีน



รูปที่ 4.22 กราฟ FT-IR spectrum ของโพลีเอทิลีนไกลคอลและโพลีเอทิลีนไกลคอลไดเมทิลอีเทอร์ (เพคต์) ที่ผ่านกระบวนการคาร์บอนเซชันและทำการเจือด้วยสารละลายเอมีนโมโนเอทาโนลามีน ที่ความเข้มข้น 0.5, 1.5 และ 3 โมลาร์ ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

จากรูป 4.22 แสดงให้เห็นว่าพบพีคในช่วง 1060 cm^{-1} ซึ่งเป็นหมู่ C=C stretching ในพอลิแซ็กคาไรด์ ประกอบด้วยเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส พีค 1350 cm^{-1} ซึ่งเป็นหมู่ -O-H bending ในพอลิแซ็กคาไรด์ ประกอบด้วยเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลสและลิกนิน ซึ่งเป็นหมู่ของสารประกอบอินทรีย์ต่างๆ ในโครงสร้างของชีวมวลที่ผ่านกระบวนการคาร์บอนเซชัน และพีคในช่วง 750 cm^{-1} ซึ่งเป็นหมู่ O-NH₂ M stretching ซึ่งเป็นพันธะระหว่างออกซิเจนและเอมีนปฐมภูมิ พีค 1230 cm^{-1} ซึ่งเป็นหมู่ CH₂-NH₂ M ซึ่งเป็นพันธะระหว่างคาร์บอนและเอมีนปฐมภูมิ พีค $1500\text{-}1650\text{ cm}^{-1}$ ซึ่งเป็นหมู่ N-H bending ซึ่งเป็นพันธะระหว่างไฮโดรเจนและเอมีนปฐมภูมิ และพีค พีค $2935\text{-}3290\text{ cm}^{-1}$ ซึ่งเป็นหมู่เอกลสารเป็นเอกลสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้า ไมออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$\text{CH}_2\text{-NH}_2$ M ซึ่งเป็นพันธะระหว่างคาร์บอนและเอมีนปฐมภูมิ จากกราฟแสดงผลข้างต้นสามารถสรุปได้ว่าเมื่อผ่านการเจือร่วมกับสารละลายโมโนเอทานอลามีนจะเกิดการสร้างพันธะกันระหว่างเอมีนปฐมภูมิกับคาร์บอน ออกซิเจนและไฮโดรเจน บนพื้นผิวของผลิตภัณฑ์ ซึ่งเป็นการยืนยันว่ามีการเจือสารละลายเอมีนบนพื้นผิวของผลิตภัณฑ์เพื่อสร้างบริเวณที่จะสามารถจับกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ และจากการทดลองพบว่าการเจือด้วยสารละลายโมโนเอทานอลามีนที่มีความเข้มข้นมากขึ้น ที่ความเข้มข้น 3 โมลาร์ จะมีพื้นที่ที่มีความเข้มข้นมากที่สุด ซึ่งหมายถึงมีสารละลายเอมีนบนพื้นผิวผลิตภัณฑ์มากที่สุด ซึ่งจะส่งผลดีต่อการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดในการทดลองดังกล่าวคือ การเจือด้วยสารละลายโมโนเอทานอลามีนความเข้มข้น 3 โมลาร์

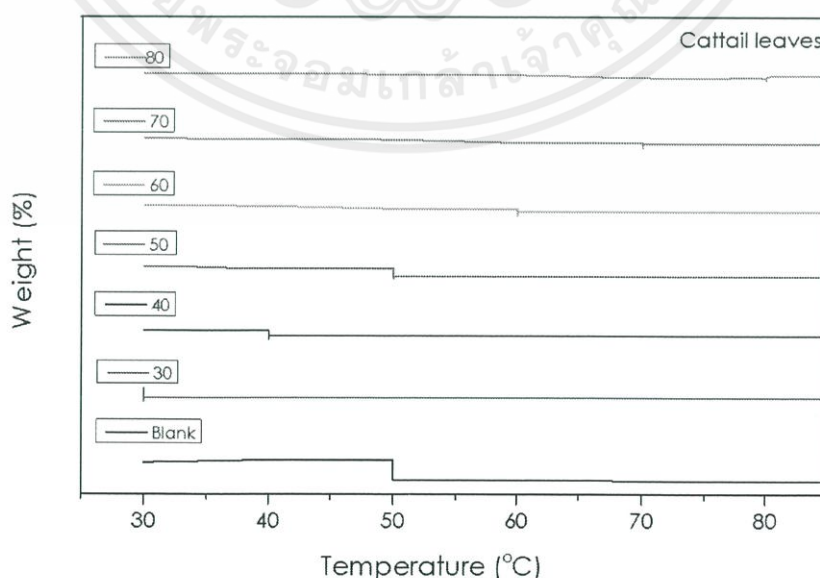


รูปที่ 4.23 กราฟ FT-IR spectrum ของโพลิเอทิลีนไกลคอล (เพคจู) ที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนเซชันและทำการเจือด้วยสารละลายโมโนเอทานอลามีน ที่ความเข้มข้น 0.5, 1.5 และ 3 โมลาร์ ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

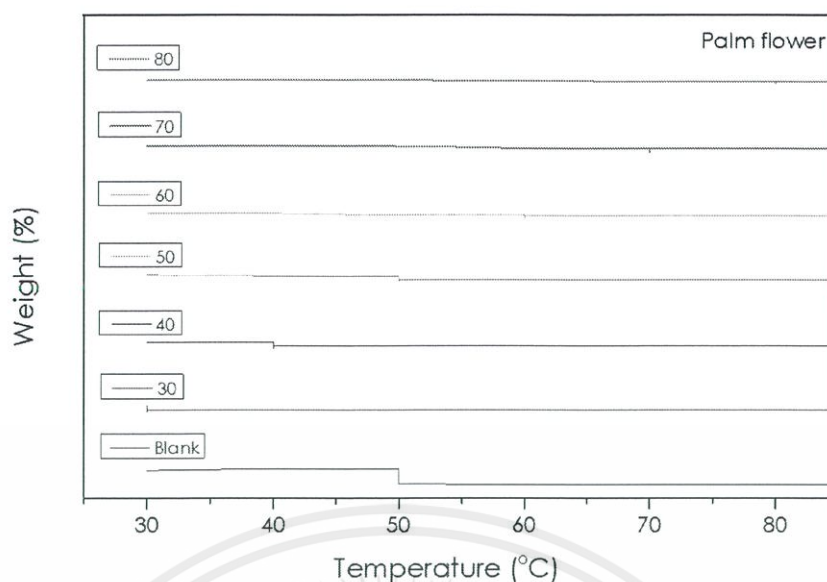
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูป 4.23 แสดงให้เห็นว่าพบพีกในช่วง 1060 cm^{-1} ซึ่งเป็นหมู่ $\text{C}=\text{C}$ stretching ในพอลิแซ็กคาไรด์ ประกอบด้วยเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส พีก 1350 cm^{-1} ซึ่งเป็นหมู่ $-\text{O}-\text{H}$ bending ในพอลิแซ็กคาไรด์ ประกอบด้วยเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลสและลิกนิน ซึ่งเป็นหมู่ของสารประกอบอินทรีย์ต่างๆ ในโครงสร้างของชีวมวลที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนไนเซชัน และพีกในช่วง 750 cm^{-1} ซึ่งเป็นหมู่ $\text{O}-\text{NH}_2$ M stretching ซึ่งเป็นพันธะระหว่างออกซิเจนและเอมีนปฐมภูมิ พีก 1230 cm^{-1} ซึ่งเป็นหมู่ CH_2-NH_2 M ซึ่งเป็นพันธะระหว่างคาร์บอนและเอมีนปฐมภูมิ พีก $1500-1650\text{ cm}^{-1}$ ซึ่งเป็นหมู่ $\text{N}-\text{H}$ bending ซึ่งเป็นพันธะระหว่างไฮโดรเจนและเอมีนปฐมภูมิ และพีก พีก $2935-3290\text{ cm}^{-1}$ ซึ่งเป็นหมู่ CH_2-NH_2 M ซึ่งเป็นพันธะระหว่างคาร์บอนและเอมีนปฐมภูมิ จากกราฟแสดงผลข้างต้นสามารถสรุปได้ว่าเมื่อผ่านการเจือร่วมกับสารละลายโมโนเอทานอลามีนจะเกิดการสร้างพันธะกันระหว่างเอมีนปฐมภูมิกับคาร์บอน ออกซิเจนและไฮโดรเจน บนพื้นผิวของผลิตภัณฑ์ ซึ่งเป็นการยืนยันว่ามีการเจือสารละลายเอมีนบนพื้นผิวของผลิตภัณฑ์เพื่อสร้างบริเวณที่จะสามารถจับกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ และจากการทดลองพบว่าการเจือด้วยสารละลายโมโนเอทานอลามีนที่มีความเข้มข้นมากขึ้น ที่ความเข้มข้น 3 โมลาร์ จะมีพีกที่มีความเข้มข้นมากที่สุด ซึ่งหมายถึงมีสารละลายเอมีนบนพื้นผิวผลิตภัณฑ์มากที่สุด ซึ่งจะส่งผลดีต่อการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดในการทดลองดังกล่าวคือ การเจือด้วยสารละลายโมโนเอทานอลามีนความเข้มข้น 3 โมลาร์

4.4 ผลการทดสอบประสิทธิภาพในการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์



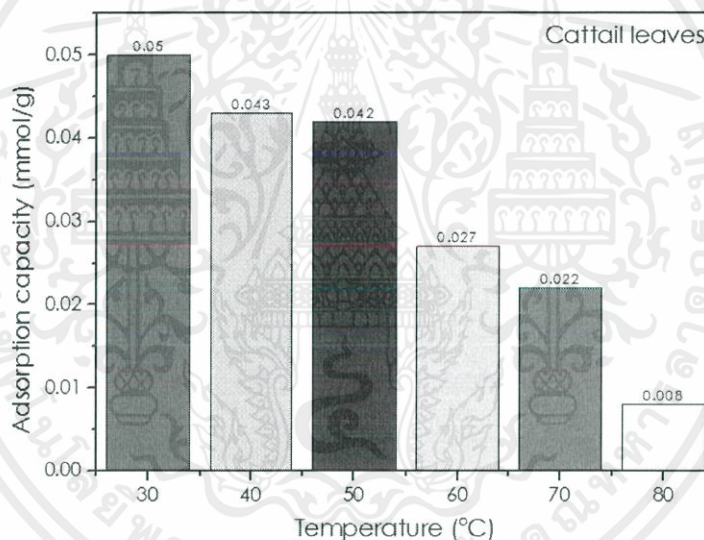
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



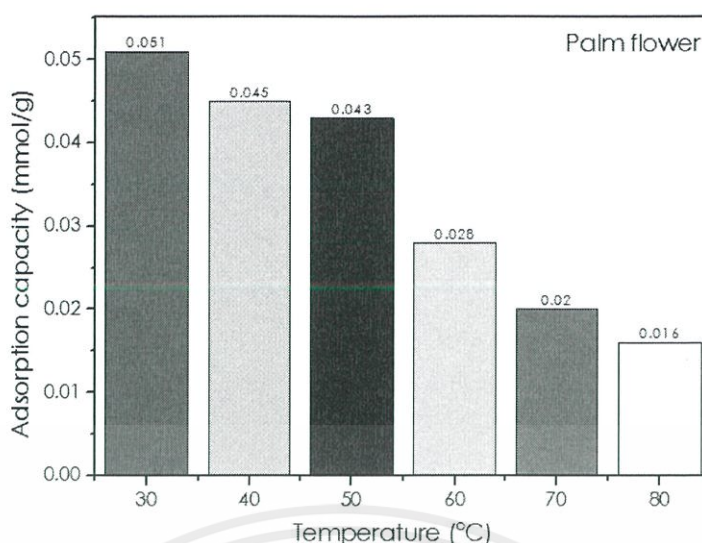
รูปที่ 4.24 กราฟ TGA ของใบรูปกล้วยและดอกปาล์ม (เพศผู้) ที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนเซชันและทำการเจือด้วยสารละลายโมโนเอทาโนลามีน ที่ความเข้มข้น 3 โมลาร์ ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนเซชันและผ่านกระบวนการกระตุ้นทางเคมีร่วมกับสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 2 โมลาร์ เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

จากรูป 4.24 แสดงกราฟระหว่างน้ำหนักของใบรูปกล้วยและดอกปาล์ม (เพศผู้) ที่เพิ่มขึ้นและลดลงในแต่ละช่วงอุณหภูมิ ซึ่งจากกราฟจะพบว่าในช่วงแรกที่อยู่ภายใต้บรรยากาศของไนโตรเจนจะมีลักษณะเป็นเส้นตรงแสดงให้เห็นว่าน้ำหนักของผลิตภัณฑ์มีค่าคงที่ เมื่อถึงอุณหภูมิ 30, 40, 50, 60, 70 และ 80 องศาเซลเซียส จะเป็นช่วงที่เปลี่ยนเป็นบรรยากาศของคาร์บอนไดออกไซด์ เพื่อเป็นการศึกษาความสามารถในการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ พบว่าในช่วงแรกน้ำหนักของผลิตภัณฑ์จะมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วเนื่องจากเป็นกรดคาร์บามิก (Carbamic acid) ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการทำปฏิกิริยากันของสารละลายโมโนเอทาโนลามีน (MEA) กับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ซึ่งหมายถึงการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เนื่องจากเอมีนบริเวณพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ โดยจะเป็นการดูดซับทางเคมี (Chemisorption) จากนั้นน้ำหนักของผลิตภัณฑ์จะมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ซึ่งเกิดจากกรดคาร์บามิก (Carbamic acid) บางส่วนจับกับสารละลายโมโนเอทาโนลามีน (MEA) ได้ผลิตภัณฑ์เป็นเกลือคาร์บาเมต (Carbamate salt) ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าเป็นปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดูดซับไว้และเมื่อเปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์ที่ไม่ได้เจือร่วมกับสารละลายโมโนเอทาโนลามีน จากกราฟจะเห็นได้ว่าน้ำหนักของผลิตภัณฑ์จะมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ โดยจะไม่มีช่วงที่น้ำหนักลดลงแต่อย่างใด เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โต เนื่องจากไม่ได้มีการทำปฏิกิริยากันระหว่างสารละลายโมโนเอทาโนลามีน (MEA) กับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ซึ่งเป็นเพียงการดูดซับกันระหว่างถ่านกัมมันต์กับโมเลกุลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) โดยจะเป็นการดูดซับทางกายภาพ (Physisorption) ซึ่งการดูดซับทางกายภาพจะมีปริมาณการดูดซับมากกว่า โดยจะมีค่าประมาณ 0.75 mmol/g เมื่อเทียบกับการดูดซับทางเคมีที่มีค่าประมาณ 0.042 mmol/g ภายใต้อุณหภูมิเดียวกัน เนื่องจากการสลายตัวของกรดคาร์บามิก (Carbamic acid) บางส่วนระหว่างการทดลอง แต่การดูดซับทางเคมีถือเป็นการดูดซับที่มีประสิทธิภาพมากกว่าในการประยุกต์ใช้งานจริง เพราะการคายซับจะเกิดได้ยากเนื่องจากจะเกิดได้ที่อุณหภูมิค่อนข้างสูง แต่ในกรณีการดูดซับทางกายภาพนั้นจะเกิดการคายซับได้ที่อุณหภูมิต่ำทำให้คาร์บอนไดออกไซด์ที่ดูดซับไว้สามารถหลุดออกได้ง่าย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.25 กราฟแท่งแสดงปริมาณการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของใบรูปปลาชี่และดอกปาล์ม (เพศผู้) ที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนไอเซนซ์และทำการเจือด้วยสารละลายโมโนเอทาโนลามีน ที่ความเข้มข้น 3 โมลาร์ ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

จากรูป 4.25 แสดงปริมาณการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของผลิตภัณฑ์ในหน่วย mmol ของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ต่อ g ของถ่านกัมมันต์ โดยจากกราฟจะเห็นว่าที่อุณหภูมิต่ำจะมีประสิทธิภาพในการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูงกว่าที่อุณหภูมิสูง เนื่องจากเป็นจุดที่สมดุลกันระหว่างน้ำหนักที่ลดลงของการสลายตัวของกรดคาร์บามิก (Carbamic acid) และน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นจากการเกิดของเกลือคาร์บาเมต (Carbamate salt) ที่เป็นผลจากการทำปฏิกิริยาระหว่างสารละลายโมโนเอทาโนลามีน (MEA) กับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) โดยจะสามารถดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้สูงสุดถึง 0.05 mmol/g ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นการดูดซับทางเคมี ที่จะมีประสิทธิภาพในการดูดซับสูงกว่าการดูดซับทางกายภาพในการใช้งานจริง

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและแนวทางการพัฒนา

5.1 สรุปผลการทดลอง

การสังเคราะห์วัสดุคาร์บอนที่มีรูพรุนในระดับนาโนด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนไนเซชันจะสามารถรักษาปริมาณของคาร์บอนได้มากที่สุดถึง ร้อยละ 45 ซึ่งมากกว่ากระบวนการคาร์บอนไนเซชันและผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนสูงกว่า เนื่องจากในกระบวนการดังกล่าวเป็นการใช้ความร้อน ความดันและโมเลกุลของน้ำในการช่วยแตกโครงสร้างโดยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของสารประกอบอินทรีย์ต่างๆ ได้แก่ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ซึ่งเป็นส่วนประกอบที่อยู่ในชีวมวลทั้งสองชนิด จึงทำให้โครงสร้างเหล่านี้มีการเปลี่ยนแปลงไปเป็นคาร์บอนมากขึ้นและในขณะเดียวกันความดันและโมเลกุลของน้ำจะเข้าไปเปิดรูพรุนในโครงสร้างของชีวมวล จึงเป็นผลทำให้พื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนมีค่าเพิ่มขึ้น โดยอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในกระบวนการจะมีผลต่อปริมาณคาร์บอน พื้นที่ผิวและความเป็นรูพรุนของผลิตภัณฑ์

กระบวนการกระตุ้นทางเคมีโดยเติมตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบสลงไประหว่างกระบวนการคาร์บอนไนเซชันและไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนไนเซชันจะส่งผลทำให้ มีโครงสร้างรูพรุนที่เป็นระเบียบมากขึ้น พื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนมีค่าสูงขึ้น เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาจะช่วยในการแตกโครงสร้างของสารประกอบอินทรีย์ต่างๆ ได้แก่ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ซึ่งเป็นส่วนประกอบที่อยู่ในชีวมวลทั้งสองชนิด โดยในการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาต่างชนิดและต่างความเข้มข้นกันนั้น จะส่งผลต่อโครงสร้างของรูพรุน พื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนที่แตกต่างกัน โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง และคาร์บอนไนเซชันที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และเติมตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 2 โมลาร์ จะมีพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนสูงที่สุด เนื่องจากเป็นอุณหภูมิ เวลาที่ให้ปริมาณคาร์บอนสูงที่สุด นอกจากนี้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมในการแตกโครงสร้างพันธะเนื่องจากมีโมเลกุลขนาดเล็กจึงมีความสามารถในการแตกตัว ส่งผลทำให้พื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนมีค่ามากที่สุด

การปรับปรุงพื้นที่ผิวของผลิตภัณฑ์โดยการเจือด้วยสารละลายโมโนเอทานอลามีน โดยทำการ

เจือสารละลายดังกล่าวหลังจากที่ผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชัน ไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนไนเซชัน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และกระบวนการกระตุ้นทางเคมี จะส่งผลทำให้เกิดการสร้างบริเวณที่สามารถดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้มากยิ่งขึ้นโดยการทำพันธะกันระหว่างไนโตรเจนที่อยู่ในโมเลกุลของสารละลายโมโนเอทานอลามีนกับคาร์บอนในโมเลกุลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยในแง่ของสารละลายโมโนเอทานอลามีนที่ต่างความเข้มข้นกันนั้นจะส่งผลต่อการเกาะตัวและสร้างบริเวณที่จะจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของเอมีนบนพื้นผิวของผลิตภัณฑ์ โดยการเจือสารละลายเอมีนที่มีความเข้มข้นสูงสุด 3 โมลาร์ ลงบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนเซชันและกระบวนการกระตุ้นทางเคมีร่วมกัยสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ จะส่งผลให้มีการเกาะตัวของเอมีนและสร้างบริเวณที่จะจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์บนพื้นผิวคาร์บอนมากที่สุด ทำให้มีประสิทธิภาพในการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุดถึง 0.05 mmol/g ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส

5.2 แนวทางการพัฒนา

- 5.2.1 ควรจะศึกษากระบวนการกระตุ้นทางเคมีด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดอื่นเพิ่มเติม เนื่องจากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ต่างชนิดกันจะส่งผลให้พื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนของผลิตภัณฑ์ไม่เท่ากัน ซึ่งอาจจะส่งผลให้ความสามารถในการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้นได้
- 5.2.2 ควรจะศึกษากระบวนการปรับปรุงพื้นที่ผิวด้วยสารละลายเอมีนชนิดอื่นเพิ่ม เนื่องจากการใช้สารละลายเอมีนต่างชนิดกันจะส่งผลให้มีการเกาะตัวของเอมีนและสร้างบริเวณที่จะจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์บนพื้นผิวคาร์บอนต่างกัน ซึ่งอาจจะส่งผลให้ความสามารถในการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้นได้
- 5.2.3 ควรจะศึกษาการทำพันธะกันระหว่างสารละลายเอมีนกับพื้นผิวของคาร์บอนโดยใช้เทคนิคอื่นเพิ่มเติมนอกเหนือจากเทคนิค Fourier-transform infrared spectroscopy เพื่อช่วยในการยืนยันว่ามีการเกิดพันธะจริง
- 5.2.4 ควรจะศึกษาประสิทธิภาพในการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้เทคนิคอื่นเพิ่มเติม เช่น Gas chromatography mass spectrometer detector (GC-MS) เป็นต้น

บรรณานุกรม

- [1] A.-H. Lu.; G.-P. Hao.; X.-Q. Zhang., Porous Carbons for Carbon Dioxide Capture. Green chemistry and Sustainable Technology 2014, 15-68.
- [2] กวีวรรณ รัตนโกสม. 2550. ศึกษาการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในก๊าซชีวภาพโดยการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์. วิทยานิพนธ์ปริญญาตรี. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
- [3] กรมควบคุมมลพิษ. การออกแบบการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์. [Online]. เข้าถึงได้จาก: <http://www.pcd.go.th/adsorption.html>. [25 เมษายน 2560]
- [4] มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี. ภาวะโลกร้อน. [Online]. เข้าถึงได้จาก <http://www.news.rmutt.ac.th>. [8 สิงหาคม 2560]
- [5] อูชา สัตย์ชื่อ ภาวะโลกร้อน. [Online]. เข้าถึงได้จาก <http://www.thaigoodview.com/global.html>. [2 กันยายน 2560]
- [6] สยามเคมี. ก๊าซชีวภาพ. [Online]. เข้าถึงได้จาก: <http://www.siamchemi.com>. [13 ตุลาคม 2560]
- [7] สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติกระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์. [Online]. เข้าถึงได้จาก: <http://www.nimt.or.th>. [25 กันยายน 2560]
- [8] สยามเคมี. วัฏจักรคาร์บอน. [Online]. เข้าถึงได้จาก: <http://www.siamchemi.com>. [15 ตุลาคม 2560]
- [9] M. Deanna.; D' Alessandro.; S. Berend.; R.-L. Jeffrey., Carbon Dioxide capture : Prospects for new materials,6088-6079
- [10] Ahmedna, M., Marshall, W.E. and Rao, R.M. (2000). Production of granular activated carbons from select agricultural by-products and evaluation of their physical, chemical and adsorption properties. Bioresource Technology, 71
- [11] Chen, Y., Zhu, Y., Wang, L. (2011). Application studies of activated carbon derived from rice husks produced by chemical-thermal process-A review. Advances in colloid and interface Science,163
- [12] Lima, I.M., McAloon, A. and Boateng, A.A. (2008). Activated carbon from broiler litter: Process description and cost of production. Biomass and Bioenergy, 32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [13] Baccar, R., Bouzid, J., Feki, M., (2009). Preparation of activated carbon from Tunisian olive-waste cakes and its application for adsorption of heavy metal ion. *Journal of Hazardous Materials*
- [14] Budinova, T., Petrov, N., Parra, J. (2008). Use of an activated carbon from antibiotic waste for the removal of Hg(II) from aqueous solution. *Journal of environmental Management*,88
- [15] Itaya, Y., Kawahara, K.,(2009). Dry gas cleaning process by adsorption of Hydrogensulfine into activated cokes in gasification of carbon resource. *Fuel*, 88
- [16] Jianying , W., Fengyun, Z., Yongqi, H. (2006). Modification of activated carbon fiber by loading metals and their performance on Silicon dioxide removal *Chiniss Journal Chemical Engineering*,14
- [17] C. Solar, A.G. Blanco, A. Vallone, and K. Sapag.(2010).Adsorption of methane in porous materials as the basis for the storage of natural gas. Available online: <http://www.intechopen.com>
- [18] C.E. Byrne and D.C. Nagle.(1997). Carbonization of wood for advanced materials applications.,26
- [19] A. Reffas, V. Bernardet, B. David, L. Reinert, M.(2010). Carbon prepared from coffee grounds by phosphoric acid activation Characterization and adsorption of methylene blue and Nylosan,175
- [20] Akzu,Z.(2001). Biosorption of reactive dyes by dried activate sludge equilibrium and kinetic modeling .*Biochem.Eng*,7
- [21] จิราภรณ์ สงค์สุวรรณ. การดูดซับทางเคมี. [Online]. เข้าถึงได้จาก: <http://www.kasetpibul.net>. [26 กันยายน 2560]
- [22] ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์. การจำแนกรูพรุนตาม IUPAC. [Online]. เข้าถึงได้จาก: <http://share.psu.ac.th/blog/sec-ftir.html> [12 พฤศจิกายน 2560]
- [23] มหาวิทยาลัยมหิดล แหล่งที่มาของชีวมวล. [Online]. เข้าถึงได้จาก: <http://www.il.mahidol.ac.th/th/index.php.html> [28 กันยายน 2560]
- [24] ศูนย์เครือข่ายข้อมูลอาหาร องค์ประกอบของชีวมวล. [Online]. เข้าถึงได้จาก: <http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/3154>. [19 ตุลาคม 2560]

เอกสารนี้เป็นเอกสารทสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่บนสื่อออนไลน์ การนำเอกสารไปใช้โดยไม่ผ่านการขออนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [25] ศูนย์ข้อมูลอาหาร องค์ประกอบหลักของชีวมวล [Online]. เข้าถึงได้จาก: http://119.46.166.126/self_all/selfaccess10/m4/biology4_1_1/Equilibrium_2/lignin_1.php [3 ตุลาคม 2560]
- [26] มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ พลังงานจากชีวมวล. [Online]. เข้าถึงได้จาก: www.ku.ac.th/e-magazine/jun51/know/know4.htm. [3 พฤศจิกายน 2560]
- [27] อินเนอร์วิชั่น การแปรรูปชีวมวล. [Online]. เข้าถึงได้จาก: www.energyvision.co.th. [4 พฤศจิกายน 2560]
- [28] เมดไทย ฐุภาณี. [Online]. เข้าถึงได้จาก: <https://medthai.com>. [25 สิงหาคม 2560]
- [29] พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์ ฐุภาณี. [Online]. เข้าถึงได้จาก: <http://www.il.mahidol.ac.th>. [8 พฤศจิกายน 2560]
- [30] ศูนย์วิจัยปาล์มน้ำมัน ปาล์มน้ำมัน. [Online]. เข้าถึงได้จาก: www.doa.go.th/palm [8 พฤศจิกายน 2560]
- [31] วิสุทธิ์ จันทร์นาค ปาล์มน้ำมัน. [Online]. เข้าถึงได้จาก: <http://www.palmdeedee.blogspot.com> [8 พฤศจิกายน 2560]
- [32] เพ็ญภา มากรอง คาร์บอนเซชัน. [Online]. เข้าถึงได้จาก: <https://krupenka.wordpress.com> [23 สิงหาคม 2560]
- [33] สุวิเชียร ผ่องนัยเลิศ ไพโรไลซิส. [Online]. เข้าถึงได้จาก: <http://libdcms.nida.ac.th/thesis6/2555/b179411.pdf> [17 สิงหาคม 2560]
- [34] นิชิมา รุ่งปิ่น ไฮโดรเทอร์มอล. [Online]. เข้าถึงได้จาก: <http://www.research.rmutt.ac.th> [16 สิงหาคม 2560]
- [35] Dalai, A.k., Zaman, J., Hall, E.s.(1996). Preparation of activated carbon from Canadian coals using a fixed bed reactor. Fuel,75
- [36] Jeon, J.k., Kim, H., Park, Y.K.(2010). Oxidation of activated carbon by dry and wet methods Surface chemistry and textural modifications Fuel processing Technology,91
- [37] Jianying, W., Kim, H.(2011). Modification of active carbon fiber by loading metal fiber. Chiness Journal of Chemical Engineering,14

- [38] Kawano, T., Kubota, M., Onyango, M.s.(2008). Preparation of activated carbon from petroleum coke by KOH chemical activation. Applied Thermal Engineering,28.
- [39] Li, L., Liu, S.(2010). Application of activated carbon from scrap tires for adsorption of Rhodamine. Journal of Environmental Sciences,22
- [40] Sigma Aldrich Amine. Available online:
<https://en.wikipedia.org/wiki/Ethanolamine>
- [41] Mega world Amine Available online:
<http://www.megaworldwide.com/product/>
- [42] Wan Nor Roslam Wan Isahak, Mohamed Wahab Mahamed Hisham.(2013). Highly Porous Carbon Materials from Biomass by Chemical and Carbonization Method: A Comparison Study. Journal of Chemistry,6
- [43] Jarosław Serafin, Urszula Narkiewicz, Antoni W. Morawski (2017), Highly microporous activated carbons from biomass for CO₂ capture and effective micropores at different conditions, Journal of CO₂ Utilization 18,7
- [44] Raildo Alves Fiuza-Jr.(2016). CO₂ capture on KOH-activated carbons derived from yellow mombin fruit stones. Journal of Environmental Chemical Engineering,8
- [45] Jun'ichi Hayashi.(2000). Preparation of activated carbon from lignin by chemical Activation.,7
- [46] Jia Guo.(1999). Textural and chemical characterisations of activated carbon prepared from oil-palm stone with H₂SO₄ and KOH impregnation.,7
- [46] M.A. Lillo-Ródenas, D. Lozano-Castello.(2000). Preparation of activated carbons from Spanish anthracite II. Activation by NaOH.,9
- [47] Donni Adinata, Wan Mohd Ashri Wan Daud.(2007). Preparation and characterization of activated carbon from palm shell by chemical activation with K₂CO₃. Bioresource Technology.,5

- [48] Devarly Prahas, Y. Kartika, N. Indraswati.(2008). Activated carbon from jackfruit peel waste by H₃PO₄ chemical activation: Pore structure and surface chemistry characterization Chemical Engineering Journal.,13
- [49] Seul-Yi Lee, Soo-Jin Park.(2015). review on solid adsorbents for carbon dioxide capture. Journal of Industrial and Engineering Chemistry.,11
- [50] Li Zhao., Zoltan Bacsik.(2011). Carbon Dioxide Capture on Amine-Rich Carbonaceous Materials Derived from Glucose.,6
- [51] Myunghyun Paik Suh(2009) , Highly Selective CO₂ Capture in Flexible 3D Coordination Polymer Networks, Angewandte Chemie International Edition,6
- [52] M.L. Gray ., Y. Soong a, K.J.(2004). CO₂ capture by amine-enriched fly ash carbon sorbents.,6
- [53] Turgay Tay, Suat Ucar(2009) ,Preparation and characterization of activated carbon from waste biomass, Journal of Hazardous Materials 165,
- [54] Scanning Electron Microscope . เข้าถึงได้จาก:
<http://web2.mfu.ac.th/center/stic/micro-analysis-instrument-menu/item/96-scanning-electron-microscope.html>. [27 สิงหาคม 2560]
- [55] Aron Kongnoo, Punyanich Intharapat, Patcharin Worathanakul (2106). Diethanolamine impregnated palm shell activated carbon for CO₂ adsorption at elevated temperatures, Journal of Environmental Chemical Engineering 4,9
- [56] Scanning Electron Microscope . เข้าถึงได้จาก:
<http://www.dosem24hr.com/index> [27 สิงหาคม 2560]
- [57] มหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง การวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ภายในโครงสร้างผลึก. เข้าถึงได้จาก: <http://web2.mfu.ac.th/center/stic/x-ray-analysis> [29 กันยายน 2560]
- [58] มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ การวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุ เข้าถึงได้จาก: <http://www.mic.eng.ku.ac.th> [1 สิงหาคม 2560]
- [59] มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี FTIR เข้าถึงได้จาก: <http://science.kmutt.ac.th> [4 สิงหาคม 2560]
- [60] Nanotech การสลายตัวทางความร้อน. เข้าถึงได้จาก: <https://www2.nanotec.or.th/th>

[26 สิงหาคม 2560]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 1 แสดงเงื่อนไขการทดลองการสังเคราะห์ด้วยกระบวนการคาร์บอนเซชัน

Temperature [°C]	Time [h.]
400	2
	-
	-
500	2
	4
	6
600	2
	-
	-
700	2
	4
	6
800	2
	-
	-
900	2
	4
	6

*เงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการทดลองนี้คือที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เวลา 2 ชั่วโมง

ตารางที่ 2 แสดงเงื่อนไขการทดลองการสังเคราะห์ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล

คาร์บอนเซชัน

Temperature [°C]	Time [h.]
160	8
	12
	24
	8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

180	12
	24
<hr/>	
	8
200	12
	24

*เงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการทดลองนี้คือที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เวลา 12 ชั่วโมง

ตารางที่ 3 แสดงเงื่อนไขการทดลองการกระตุ้นด้วยกระบวนการทางเคมีของกระบวนการ

คาร์บอนโนเซชัน

Base	Concentration [M]	
	Before [3 h.]	After [24 h.]
NaOH	-	4
KOH	2	4
Na ₂ CO ₃	-	4
K ₂ CO ₃	-	4

ตารางที่ 4 แสดงเงื่อนไขการทดลองการกระตุ้นด้วยกระบวนการทางเคมีของกระบวนการ

ไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนโนเซชัน

Base	Concentration [M]	
	Before [3 h.]	After [24 h.]
NaOH	2	4
KOH	1,2,4	4
Na ₂ CO ₃	2	4
K ₂ CO ₃	2	4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5 แสดงเงื่อนไขการทดลองการเจือด้วยสารละลายเอมีน

Concentration [M]	Temperature [°C]
0.5	25
	60
1.5	25
	60
3	25
	60

ขั้นตอนการทดลอง การศึกษาชนิดของต่างที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา

(1.) การสังเคราะห์ด้วยวิธีการคาร์บอนไนเซชัน

(1.1) เตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา โซเดียมไฮดรอกไซด์, โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์, โซเดียมคาร์บอเนตและโพแทสเซียมคาร์บอเนต ความเข้มข้น 4 โมลาร์ ปริมาตร 40 มิลลิลิตร

(1.2) นำใบรูปถั่วและดอกปาล์ม (เพศผู้) ที่ผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชันที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง มาแช่ในตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมไว้ในอัตราส่วน 1:2 เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง

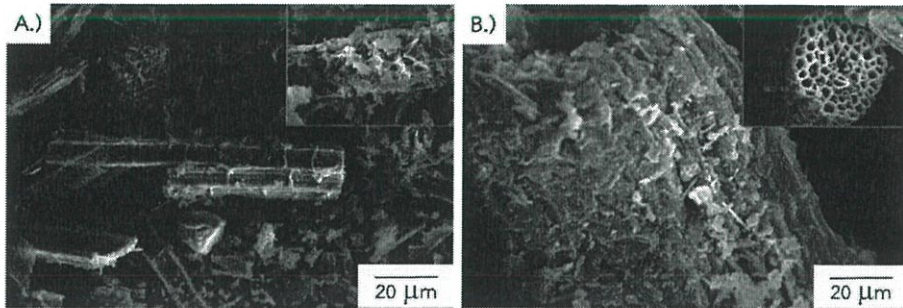
(1.3) นำวัสดุคาร์บอนนาโนโพร่งที่สังเคราะห์ขึ้นมาล้างด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์และน้ำไร้ประจุจนมีค่า pH เท่ากับ 7 จากนั้นอบที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อเป็นการไล่ความชื้นและสารละลายออก

(2.) การสังเคราะห์ด้วยวิธีการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนไนเซชัน

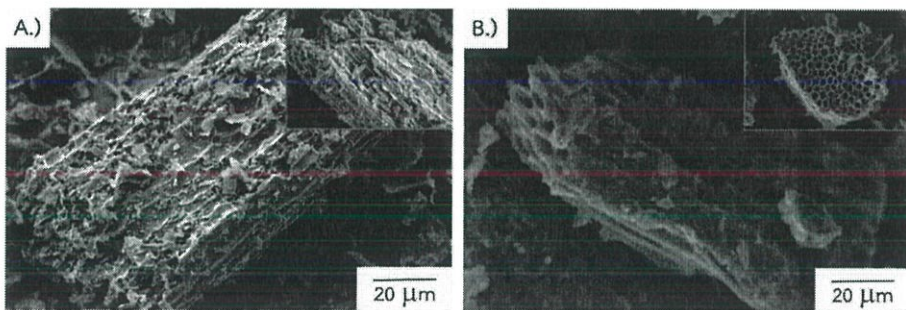
(2.1) เตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา โซเดียมไฮดรอกไซด์, โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์, โซเดียมคาร์บอเนตและโพแทสเซียมคาร์บอเนต ความเข้มข้น 4 โมลาร์ ปริมาตร 40 มิลลิลิตร

(2.2) นำใบรูปถั่วและดอกปาล์ม (เพศผู้) ที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง และคาร์บอนไนเซชันที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง มาแช่ในตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมไว้ในอัตราส่วน 1:2 เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง

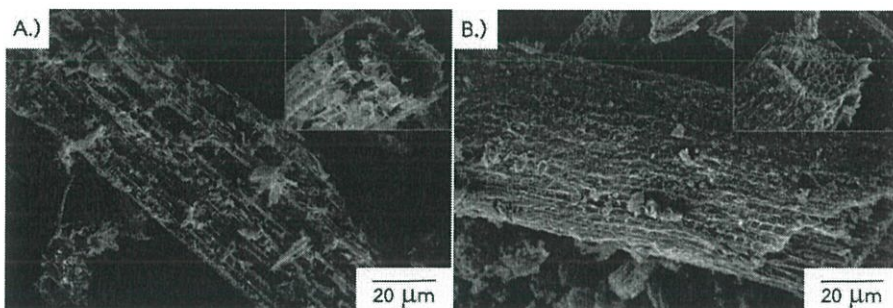
(2.3) นำวัสดุคาร์บอนนาโนโพรงที่สังเคราะห์ขึ้นมาล้างด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์และน้ำไร้ประจุจนมีค่า pH เท่ากับ 7 จากนั้นอบที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อเป็นการไล่ความชื้นและสารละลายออก



รูปที่ 1 ภาพ SEM (กำลังขยาย 300X และ 500X) ของ (A) ไบรอปถาซีและ (B) ดอกปาล์ม (เพศผู้) ที่ผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชันที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

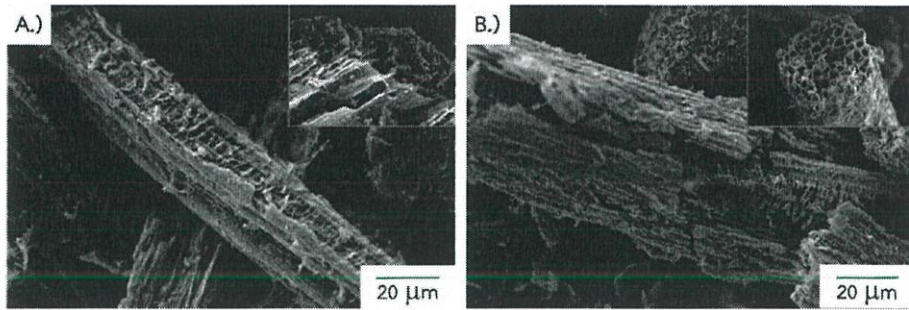


รูปที่ 2 ภาพ SEM (กำลังขยาย 300X และ 500X) ของ (A) ไบรอปถาซีและ (B) ดอกปาล์ม (เพศผู้) ที่ผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชันที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

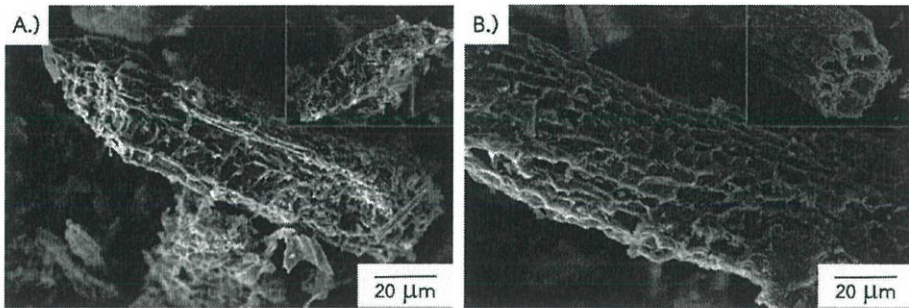


รูปที่ 3 ภาพ SEM (กำลังขยาย 300X และ 500X) ของ (A) ไบรอปถาซีและ (B) ดอกปาล์ม (เพศผู้) ที่ผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชันที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

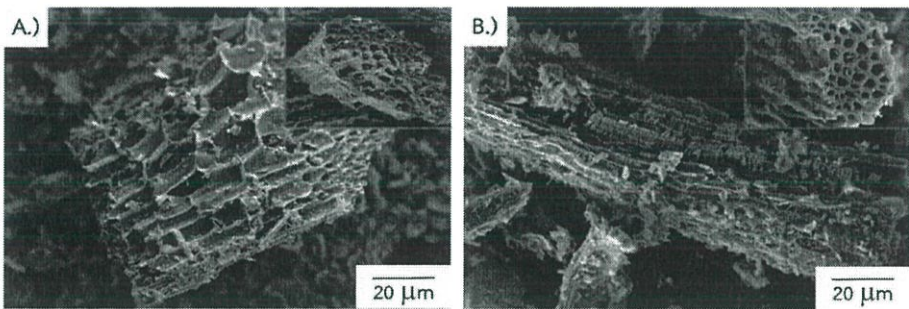
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



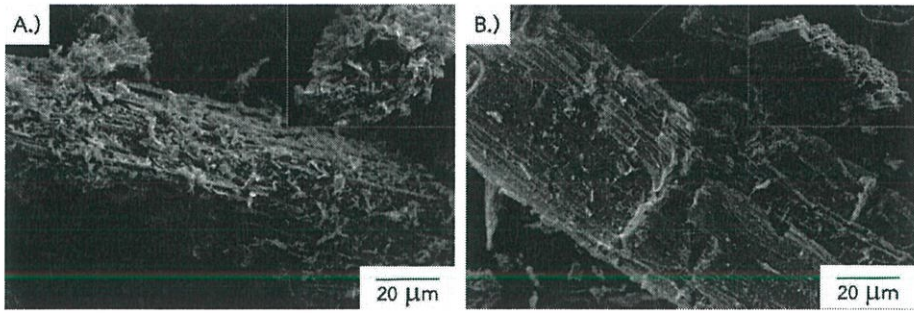
รูปที่ 4 ภาพ SEM (กำลังขยาย 300X และ 500X) ของ (A) ใบธูปฤาษีและ (B) ดอกปาล์ม (เพศผู้) ที่ผ่านกระบวนการคาร์บอนเซชันที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง



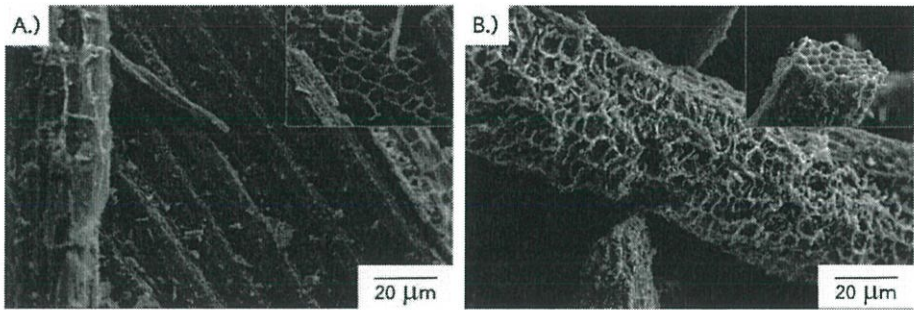
รูปที่ 5 ภาพ SEM (กำลังขยาย 300X และ 500X) ของ (A) ใบธูปฤาษีและ (B) ดอกปาล์ม (เพศผู้) ที่ผ่านกระบวนการคาร์บอนเซชันที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง



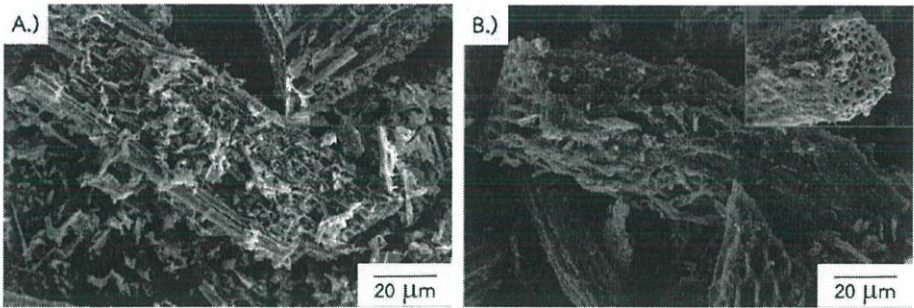
รูปที่ 6 ภาพ SEM (กำลังขยาย 300X และ 500X) ของ (A) ใบธูปฤาษีและ (B) ดอกปาล์ม(เพศผู้) ที่ผ่านกระบวนการคาร์บอนเซชันที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง



รูปที่ 7 ภาพ SEM (กำลังขยาย 300X และ 500X) ของ (A) ใบธูปฤาษีและ (B) ดอกปาล์ม (เพศผู้) ที่ผ่านกระบวนการคาร์บอนเซชันที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

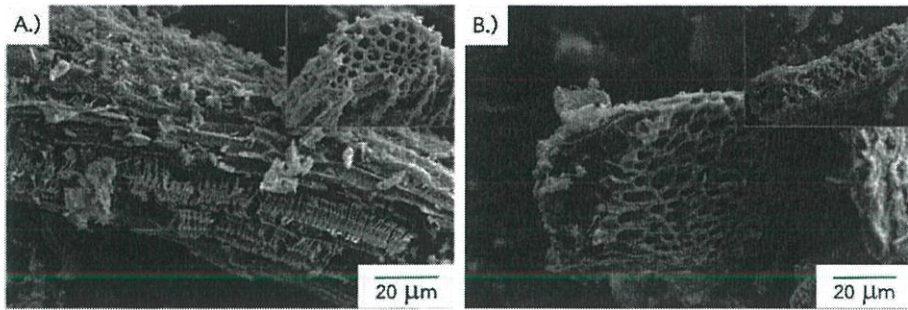


รูปที่ 8 ภาพ SEM (กำลังขยาย 300X และ 500X) ของ (A) ใบธูปฤาษีและ (B) ดอกปาล์ม (เพศผู้) ที่ผ่านกระบวนการคาร์บอนเซชันที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง

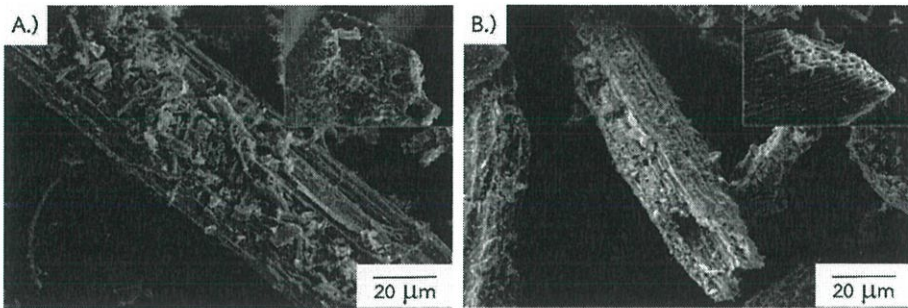


รูปที่ 9 ภาพ SEM (กำลังขยาย 300X และ 500X) ของ (A) ใบธูปฤาษีและ (B) ดอกปาล์ม (เพศผู้) ที่ผ่านกระบวนการคาร์บอนเซชันที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

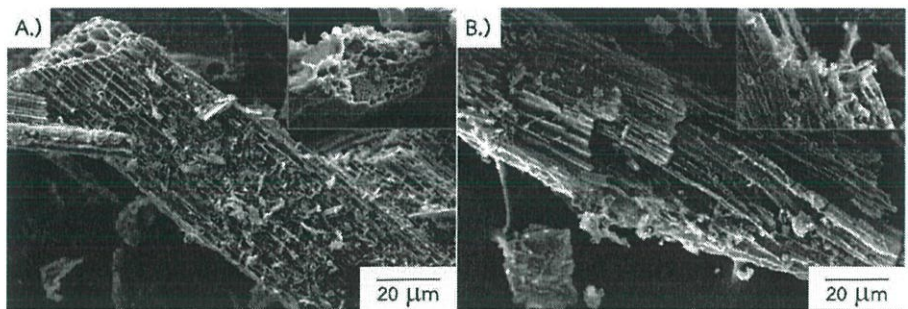
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



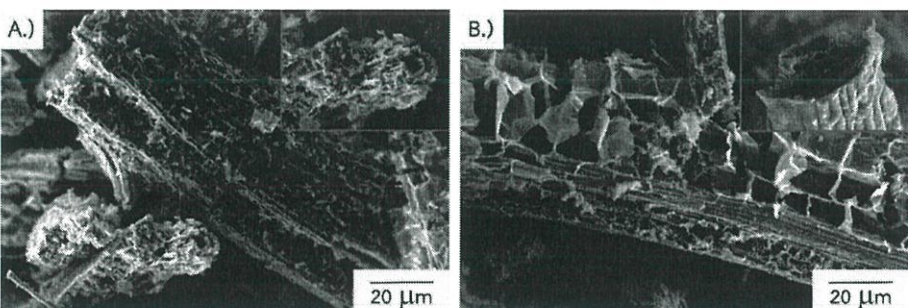
รูปที่ 10 ภาพ SEM (กำลังขยาย 300X และ 500X) ของ (A) ใบธูปฤาษีและ (B) ดอกปาล์ม(เพศผู้) ที่ผ่านกระบวนการคาร์บอนเซชันที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง



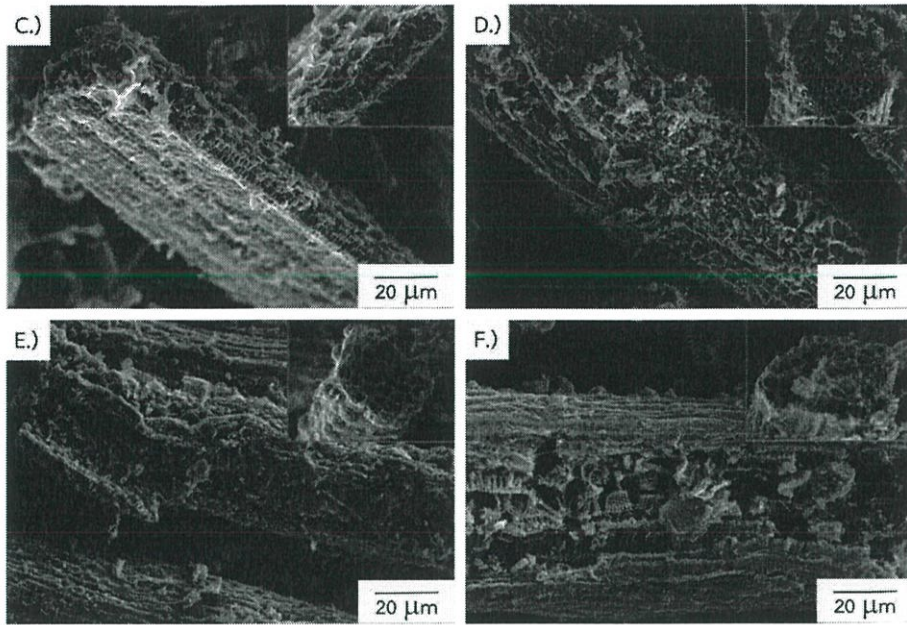
รูปที่ 11 ภาพ SEM (กำลังขยาย 300X และ 500X) ของ (A) ใบธูปฤาษีและ (B) ดอกปาล์ม(เพศผู้) ที่ผ่านกระบวนการคาร์บอนเซชันที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง



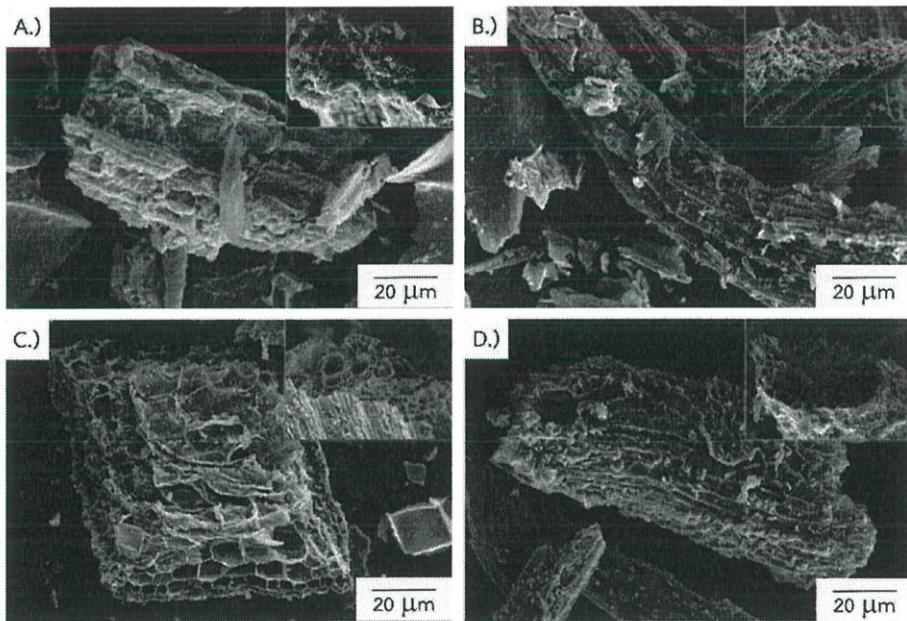
รูปที่ 12 ภาพ SEM (กำลังขยาย 300X และ 500X) ของ (A) ใบธูปฤาษีและ (B) ดอกปาล์ม(เพศผู้) ที่ผ่านกระบวนการคาร์บอนเซชันที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง



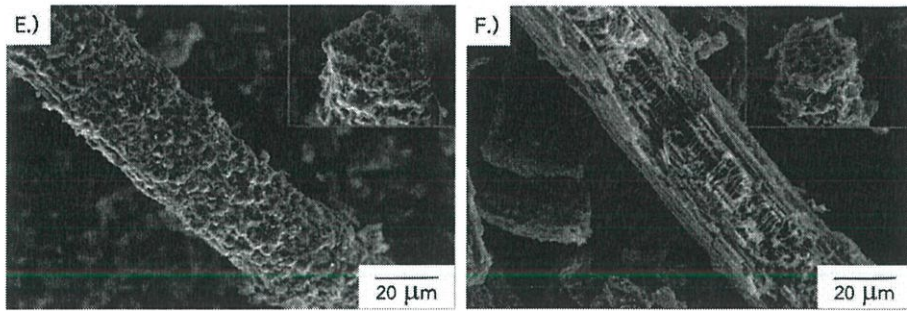
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



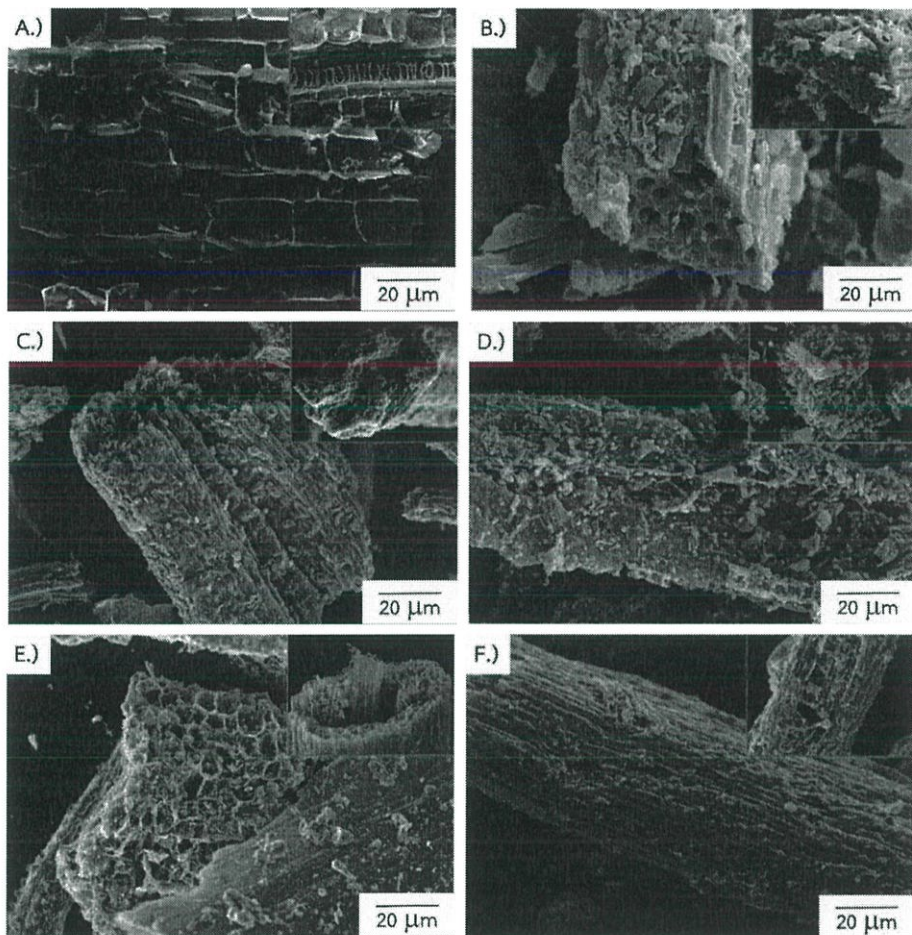
รูปที่ 13 ภาพ SEM (กำลังขยาย 300X และ 500X) ของชีวมวลที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนเซชันที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส ของไบโอปถาษีเป็นเวลา (A) 8 (C) 12 (E) 24 ชั่วโมง และดอกปาล์ม (เพศผู้) เป็นเวลา (B) 8 (D) 12 (F) 24 ชั่วโมง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

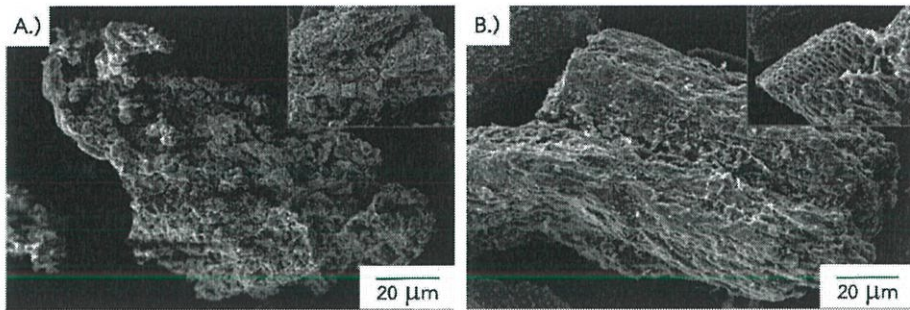


รูปที่ 14 ภาพ SEM (กำลังขยาย 300X และ 500X) ของชีวมวลที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนเซชันที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส ของไบรอปฤาษีเป็นเวลา (A) 8 (B) 12 (C) 24 ชั่วโมง และดอกปาล์ม (เทศผู้) เป็นเวลา (D) 8 (E) 12 (F) 24 ชั่วโมง

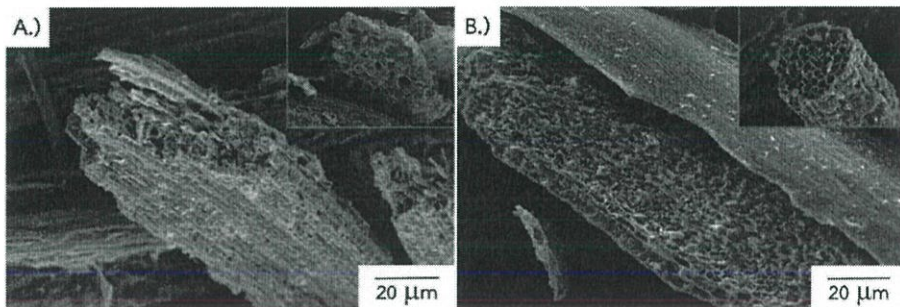


รูปที่ 15 ภาพ SEM (กำลังขยาย 300X และ 500X) ของชีวมวลที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนเซชันที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ของไบรอปฤาษีเป็นเวลา (A) 8 (B) 12 (C) 24 ชั่วโมง และดอกปาล์ม (เทศผู้) เป็นเวลา (D) 8 (E) 12 (F) 24 ชั่วโมง

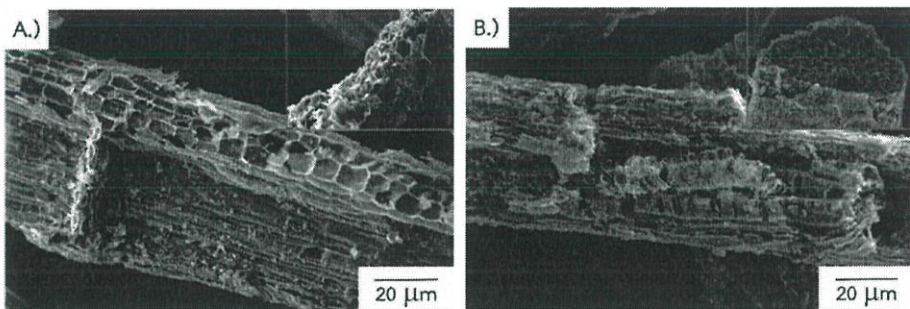
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 16 ภาพ SEM (กำลังขยาย 300X และ 500X) ของ (A) ใบธูปฤาษี และ (B) ดอกปาล์ม (เพศผู้) ที่ผ่านกระบวนการคาร์บอไนเซชันและกระบวนการกระตุ้นทางเคมีร่วมกับโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 4 โมลาร์ เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

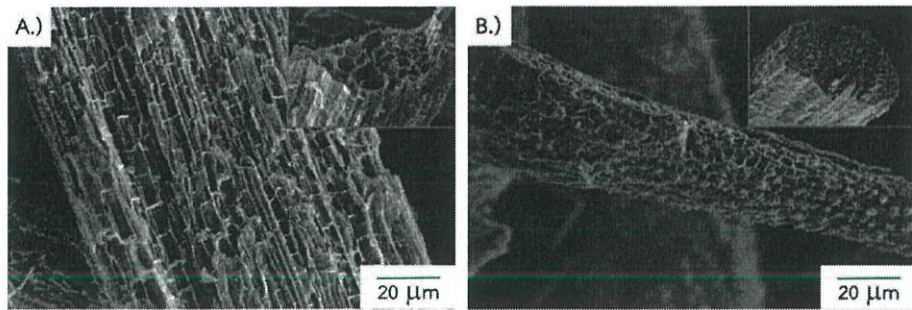


รูปที่ 17 ภาพ SEM (กำลังขยาย 300X และ 500X) ของ (A) ใบธูปฤาษี และ (B) ดอกปาล์ม (เพศผู้) ที่ผ่านกระบวนการคาร์บอไนเซชันและกระบวนการกระตุ้นทางเคมีร่วมกับโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 4 โมลาร์ เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

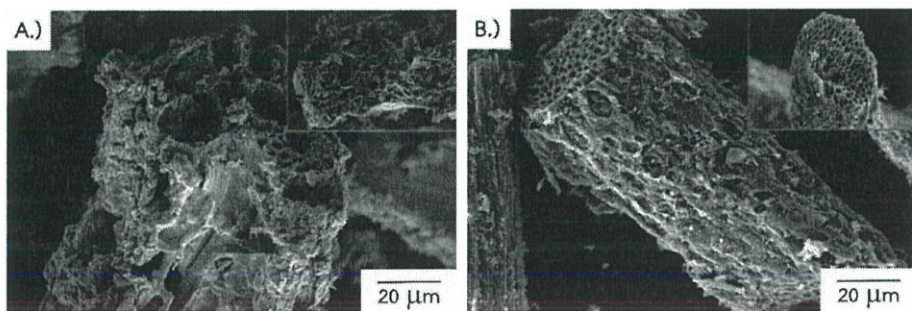


รูปที่ 18 ภาพ SEM (กำลังขยาย 300X และ 500X) ของ (A) ใบธูปฤาษี และ (B) ดอกปาล์ม (เพศผู้) ที่ผ่านกระบวนการคาร์บอไนเซชันและกระบวนการกระตุ้นทางเคมีร่วมกับโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 4 โมลาร์ เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

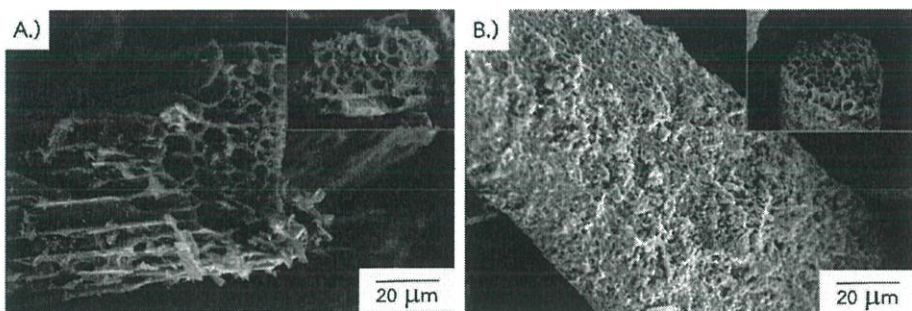
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 19 ภาพ SEM (กำลังขยาย 300X และ 500X) ของ (A) ใบธูปฤาษี และ (B) ดอกปาล์ม (เพศผู้) ที่ผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชันและกระบวนการกระตุ้นทางเคมีร่วมกับโพแทสเซียมคาร์บอเนตความเข้มข้น 4 โมลาร์ เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

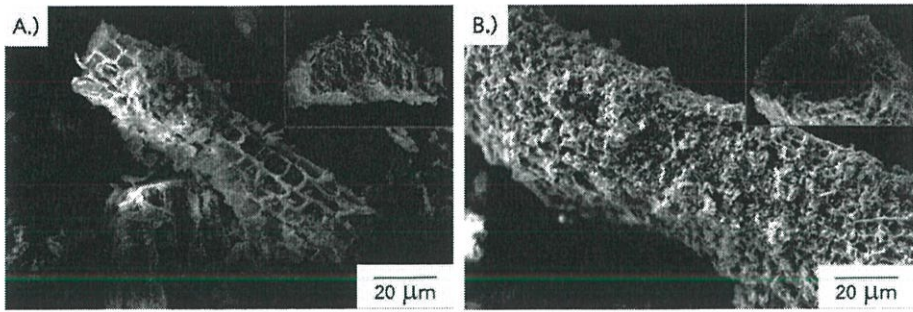


รูปที่ 20 ภาพ SEM (กำลังขยาย 300X และ 500X) ของ (A) ใบธูปฤาษี และ (B) ดอกปาล์ม (เพศผู้) ที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนไนเซชันและกระบวนการกระตุ้นทางเคมีร่วมกับโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 4 โมลาร์ เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

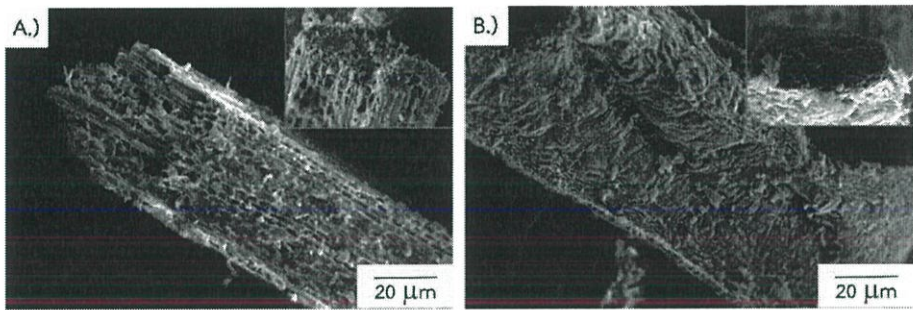


รูปที่ 21 ภาพ SEM (กำลังขยาย 300X และ 500X) ของ (A) ใบธูปฤาษี และ (B) ดอกปาล์ม (เพศผู้) ที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนไนเซชันและกระบวนการกระตุ้นทางเคมีร่วมกับโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 4 โมลาร์ เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

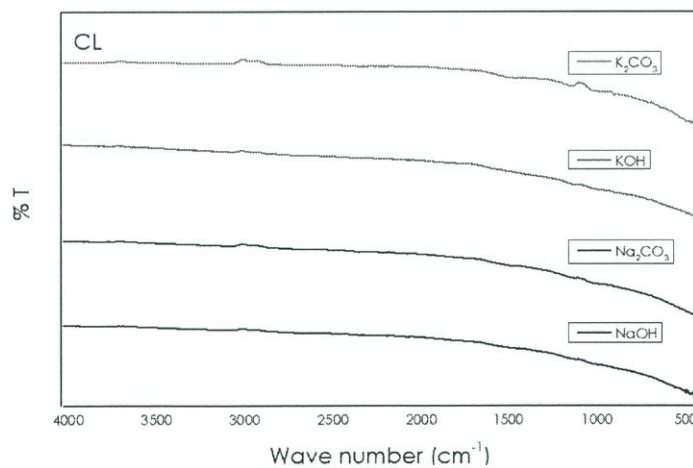
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



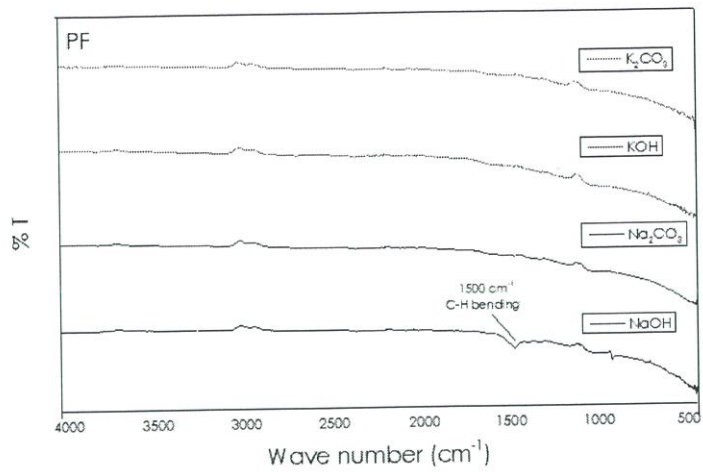
รูปที่ 22 ภาพ SEM (กำลังขยาย 300X และ 500X) ของ (A) ใบรูปกล้วย และ (B) ดอกปลาล์ม (เปลือก) ที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนเซชันและกระบวนการกระตุ้นทางเคมีร่วมกับ โซเดียมคาร์บอเนตความเข้มข้น 4 โมลาร์ เป็นเวลา 3 ชั่วโมง



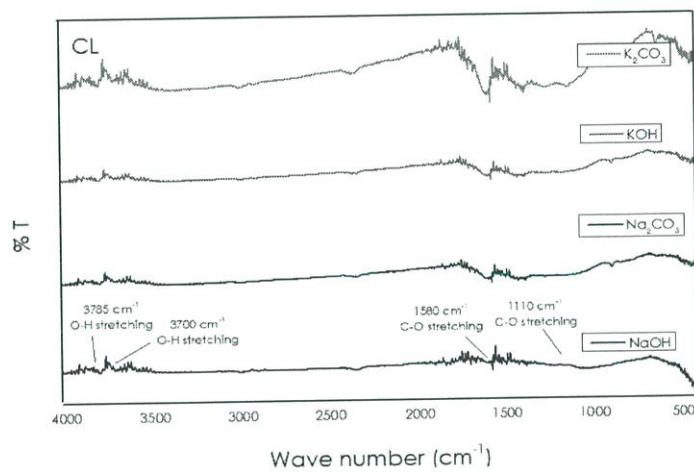
รูปที่ 23 ภาพ SEM (กำลังขยาย 300X และ 500X) ของ (A) ใบรูปกล้วย และ (B) ดอกปลาล์ม (เปลือก) ที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนเซชันและกระบวนการกระตุ้นทางเคมีร่วมกับ โพแทสเซียมคาร์บอเนตความเข้มข้น 4 โมลาร์ เป็นเวลา 3 ชั่วโมง



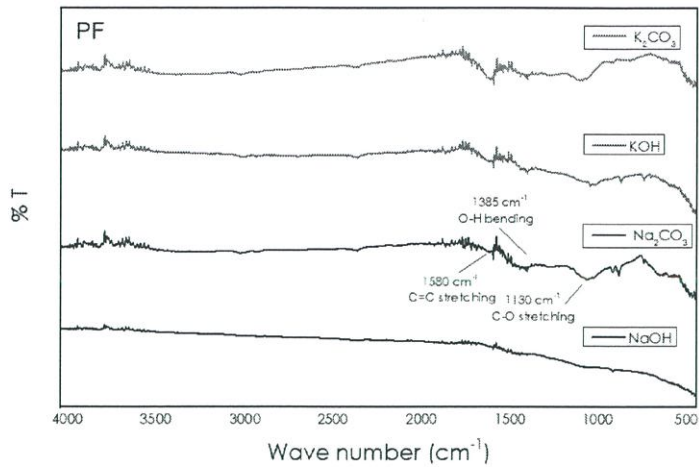
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 24 กราฟ FT-IR spectra ของไบรฎูปลาซีและดอกपाल์ม (เพคตผู้) ที่ผ่านกระบวนการคาร์บอเนชันและกระบวนการกระตุ้นทางเคมี (หลัง)



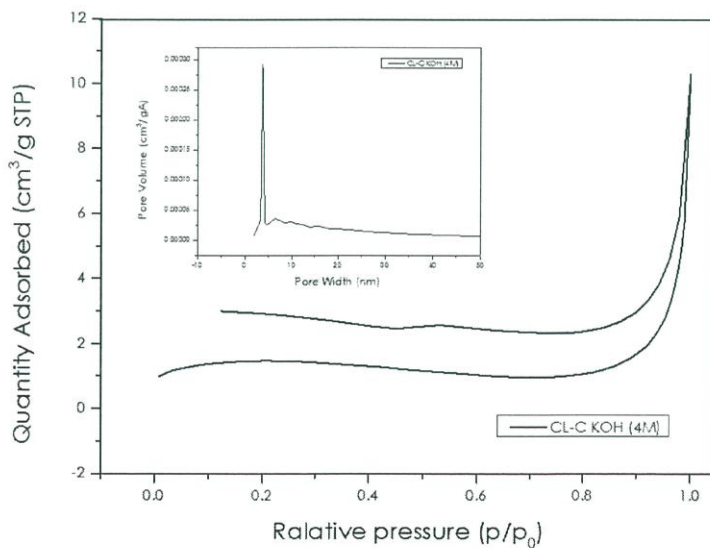
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



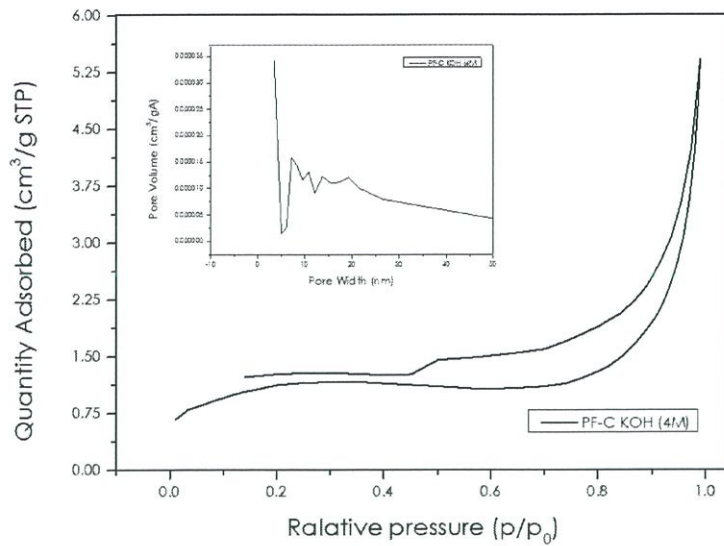
รูปที่ 25 กราฟ FT-IR spectrum ของไบรฎุภาชีและดอกปาล์ม (เพศผู้) ที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนเซชันและกระบวนการกระตุ้นทางเคมี (หลัง)

ตารางที่ 6 แสดงสมบัติบริเวณพื้นผิวของผลิตภัณฑ์

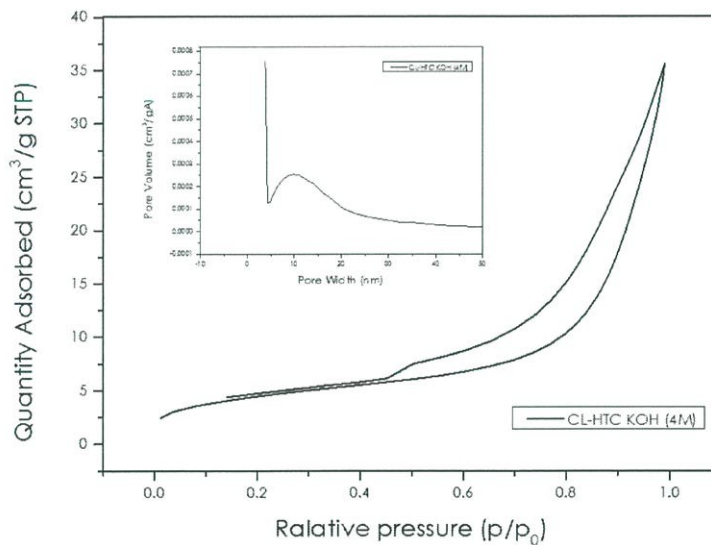
ตัวอย่าง	S_{BET} (m ² /g)	S_{mp} (m ² /g)	AV_{mp} size (nm)	AV_{me} size (nm)	V_T (cm ³ /g)	V_{mp} (cm ³ /g)	V_{me} (cm ³ /g)	V_{ex} (cm ³ /g)
CL-C KOH (4M)	5.2291	3.3742	5.95602	30.7271	0.007786	0.001441	0.014008	-0.00766
PF-C KOH (4M)	4.0061	0.6711	7.14567	18.2893	0.007156	0.000256	0.007345	-0.00045
CL-HTC KOH (4M)	16.0359	0.0275	12.88621	12.0518	0.051566	-0.00011	0.053699	-0.00202
PF-HTC KOH (4M)	6.0902	8.8695	9.43152	10.2725	0.01436	-0.00137	0.016204	-0.00047



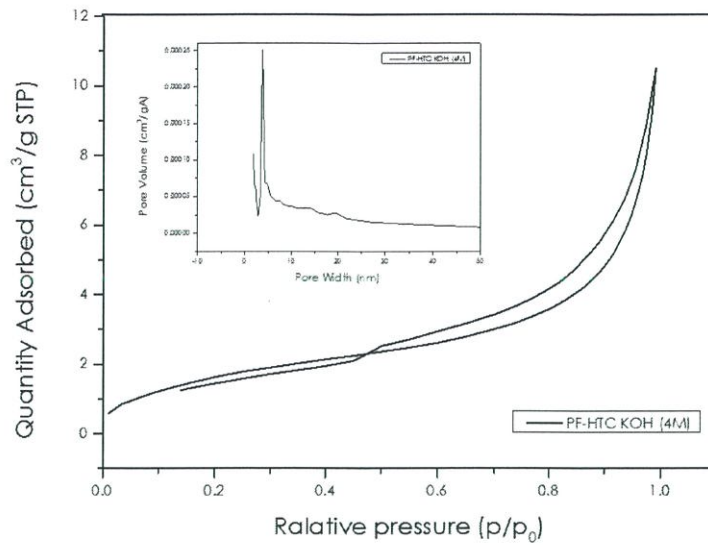
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



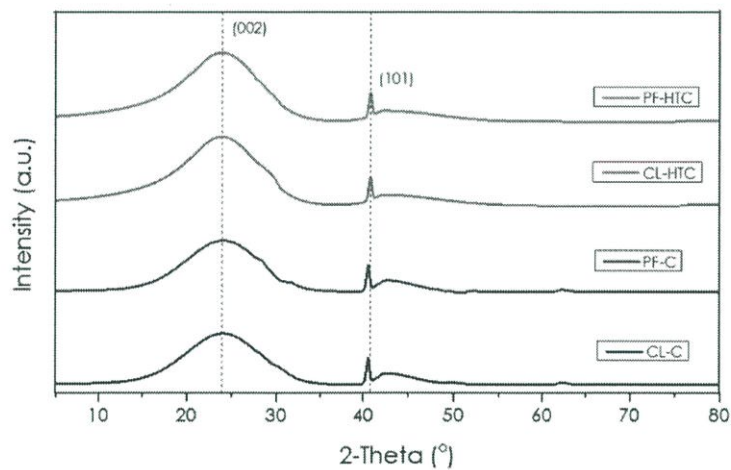
รูปที่ 26 กราฟไอโซเทอมการดูดซับก๊าซไนโตรเจนและการกระจายตัวของรูพรุนของไบรูปถาซีและดอกปาล์ม (เพศผู้) ที่ผ่านกระบวนการคาร์บอนไอเซชันและกระบวนการกระตุ้นทางเคมี (หลัง)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 27 กราฟไอโซเทอมการดูดซับก๊าซไนโตรเจนและการกระจายตัวของรูพรุนของไบรูปถาซีและดอกปาล์ม (เพศผู้) ที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนเซชันและกระบวนการกระตุ้นทางเคมี (หลัง)



รูปที่ 28 กราฟ XRD-Spectrum ของไบรูปถาซีและดอกปาล์ม (เพศผู้) ที่ผ่านกระบวนการคาร์บอนเซชัน กระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนเซชัน ที่และผ่านกระบวนการกระตุ้นทางเคมี (หลัง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MRS_2017

Nanoporous carbon from Cattail leaves for carbon dioxide capture

(Araya Smuthkochorn)^a, Nardnutda Katunyoo^a, Napat Kaewtrakulchai^a,
Duangduen Atong^b, Kanit Soongprasit^b and Apiluck Eiad-ua^{a*} 1

^aCollege of Nanotechnology, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Thailand

^bNational Metal and Materials Technology Center (MTEC), Thailand

Abstract

Reducing anthropogenic CO₂ emissions and lowering the concentration of greenhouse gases in the atmosphere have quickly become one of the most urgent environmental issues of our age. Carbon capture and storage (CCS) is the option for reducing these harmful CO₂ emissions. While a variety of technologies and methods have been developed, the separation of CO₂ from gas streams is still a critical issue. Apart from establishing new techniques, the exploration of capture materials with high separation performance and low capital cost are of paramount importance. Nanoporous carbon derived from leaf of cattail flower that found in all areas throughout Thailand, the biomass was previously pyrolyzed at 500 to 700°C and the produced chars were further activated with NaOH, KOH, Na₂CO₃ and K₂CO₃ subsequently. Afterwards, the resulting materials were characterized by Scanning electron microscopy, Fourier-transform infrared spectroscopy and Raman scattering measurement. From this investigation, produced activated carbon will be efficient as an option for CO₂ emission control.

©2018 Elsevier Ltd. All rights reserved

Selection and/or Peer-review under responsibility of The First Materials Research Society of Thailand International Conference

Keywords: Cattail leaves, Carbon dioxide capture, CO₂, Pyrolysis, CO₂ emission

* Corresponding author. Tel.: +66 (0) 2329 8000 Ext. 3132; fax: +66 (0) 2329 8265.

เอกสาร E-mail address: apiluck.ei@kmitl.ac.th งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

2214-7853 ©2018 Elsevier Ltd. All rights reserved
Selection and/or Peer-review under responsibility of The First Materials Research Society of Thailand
International Conference
ไม่ให้นำไปใช้เพื่อการค้าโดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. Introduction

Global warming due to climate change with the increase of the average temperature of the earth. Global warming occurs when carbon dioxide and other air pollutants and greenhouse gases collect in the atmosphere and adsorb sunlight and solar radiation that have bounced off of the earth's surface. It happens in the industrial section, Transportation section, forest fires and burnings. Has increase to the degree that they become significant contributors of much carbon dioxide in to the atmosphere [1], the principal methods used to capture CO₂ from post-combustion gases are absorption and membrane separation [2,3]. The methods based on CO₂ absorption by amines are commonly used and highly effective; however, there are some important technical and economic drawbacks [4].

Solid adsorbents present high adsorption capacity, high thermal stability and may be regenerated by pressure swing adsorption (PSA) or thermal swing adsorption (TSA) processes [5]. Activated carbons [6] and zeolites [7] are useful adsorbents for CO₂ capture due to their large surface area, suitable pore size distribution [8], high mechanical strength and stable adsorption-desorption cycles. Activated carbons made from conventional raw materials such as zeolite, bituminous coal, peat and lignite are very expensive. Thailand, the agricultural country, make use of by-products to produce the activated carbon due to its lower cost, it become an interesting material for adsorbents. Activated carbons may be produced through physical or chemical activation [9,10], physical activation via pyrolysis process are use high temperature to produce a char [11], chemical activation may treat with chemical, for example sodium hydroxide and potassium hydroxide followed by thermal treatment via pyrolysis process are use without heating which is a very low-cost route [12]. Activated carbons are usually prepared from agricultural by-products such as leaf of cattail flower. In this study, we preparation of carbons from the leaf of cattail flower are found in all areas throughout Thailand, cattails grow best from divisions, but they will also grow reliably well from seed. The seeds germinate rapidly under hot, moist conditions and will be ready for transplant in just few months, and their activation with sodium hydroxide (NaOH), potassium hydroxide (KOH), sodium carbonate (Na₂CO₃) and potassium carbonate (K₂CO₃) and thermal treatment by pyrolysis process at 500, 600 and 700°C, the resulting materials were characterization by Scanning electron microscopy, Fourier-transform infrared spectroscopy and Raman scattering measurement. The aim of this work was to study the effects of temperature and chemical activation on the textural, adsorptive and chemical properties of the activated carbons.

The objective of the present study was show the data on the potential of leaf of cattail flower. As raw materials for the production of value CO₂ adsorbents. The adsorption data was collected and analyzed in relation to the morphology, functional group, element compound, surface area, porosity of the adsorbents.

2. Experiment

2.1. Raw material preparation

Leaf of cattail flower were found in all areas throughout Thailand. The leaf was dried 24 h. in an air circulation oven at 70°C for remove moisture, materials were crushed in a knife mill, and then pyrolyzed under N₂ flow in a stainless-steel reactor at a heating rate 10°C/min.

2.2. Cattail leaves carbonization and characterization

For the preparation, the biomass was pyrolyzed at 500, 600 and 700°C under nitrogen flow in a stainless-steel reactor for 2 h. The activated carbon was impregnated with a saturated solution of sodium hydroxide (NaOH), potassium hydroxide (KOH), sodium carbonate (Na₂CO₃) and potassium carbonate (K₂CO₃) 4 molar for 3 h. at room temperature. The samples were dried in an air circulation oven at 70°C for 24 h. and pyrolyzed at 500, 600 and 700°C under nitrogen flow in a stainless steel reactor for 1 h. The prepared samples were characterized by scanning electron microscope (SEM, Zeiss EVO MA10) operated at 10 kV was used for the surface morphology analysis [7], Fourier-transform infrared spectroscopy (FT-IR, Perkin Elmer Spectrum Two) for the surface function group analysis [11] and Raman spectroscopy (DXR Smart Raman) for carbon structural analysis [14,15]. The source of radiation was a laser operating at a wavelength of 532 nm respectively.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. Results and discussion

3.1. Production of activated carbon

The carbon yield (%) obtained by the chemical activation are around 40-72% except the sample which was burned off at 600°C showing an unusual high yield off 72.038%. The yield achieved by physical activation 28-31% are lower than chemical activation. Fig. 1 can be observed that for sample impregnated with sodium carbonate (Na_2CO_3) at 600°C the carbon yield was the highest. There is an increasing yield from 500 to 700°C impregnate with potassium hydroxide (K_2CO_3) but decreases when impregnated with sodium hydroxide (NaOH) and potassium hydroxide (KOH) because of the natural of chemical reagent that using in the chemical activation process [9,11]. The lower production yield in activated carbon manufacturing can be implied that the products has vast porosity since high dense carbon structures is substituted by various empty pores [12].

Yield result are not really high compared to the one obtained by chemical activation the sample prepared by the physical process show low yields of the order 28-31%. In other literature, the carbon yields reported show the same order as with other lignocellulosic raw material as apricot stones and cherry stones activated carbon [13].

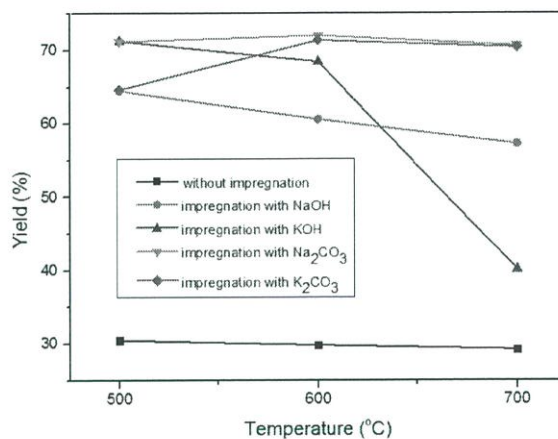


Fig. 1 Results of yield for NaOH, KOH, Na_2CO_3 , K_2CO_3 impregnation and without impregnation at different temperatures.

3.2. SEM micrograph of activated carbon

Scanning electron microscope (SEM) measurements were performed using SEM Zeiss EVO MA10 operated at 10 kV. Used to observe the surface physical morphology of the activated carbons from leaf of cattail flower. The porosity was observed on the external surface of the activated carbons. These pores result from the pyrolysis process with and without impregnated. Fig. 2a-c shows SEM micrograph of activated carbons without impregnated at different temperature of 500°C, 600°C and 700°C, respectively. However, the high dense, compact, and roughness surface without the pore structure is displayed in Fig. 2a which is the condition of low carbonization temperature (500 °C). Whereas, the pore formation found with the increasing of pyrolysis temperature as seen in Fig 2b-c. A various cavities on their surface is resulted from the thermal degradation of lignocellulosic polymers (*i.e.* hemicellulose, cellulose, lignin) [8,25]. Based on the activation by using Na_2CO_3 , Fig. 3a illustrates a very pore on the activated carbon surface since the Na_2CO_3 activating reagent reacts the carbon atom that reduced the pore formation at low carbonization temperature. Seemingly, the high-temperature carbonization combined the chemical also presented a highly pore, quite roughness, on their external surface due to the release of Na_2CO_3 occupied in a carbon structure, as demonstrated in Fig. 3c-d. In chemical treated lignocellulosic materials derived carbon, well-developed pores were observed. The SEM micrograph displayed that the external cavitation is extensively formed during the activation process. These carbon web has resulted

from the reaction of chemical which have an interaction with carbon atom during heat treatment and their porosity could be effective to adsorb gas as the study of Serafin et al. (2017), similarly [25].

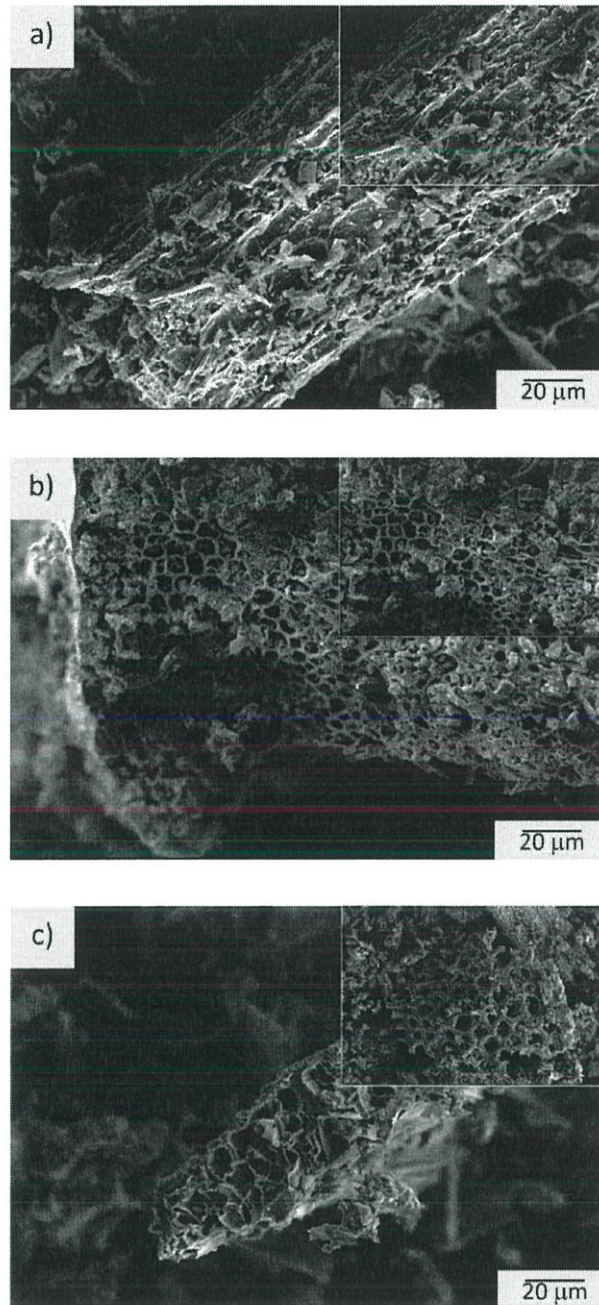


Fig. 2 SEM images (300x and 500x) of activated carbons without impregnated at different temperature (a) 500°C, (b) 600°C and (c) 700°C.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

functional group did not appear. They are melting during burn off only almost pure carbons was the final product. In Fig. 3b, the effect of impregnated with sodium hydroxide (NaOH) and sodium carbonate (Na₂CO₃) was appear the band at 1430 cm⁻¹, 880-700 cm⁻¹ which was related to the C-H bending and C-H rocking, respectively. The spectra indicated to hemicellulose and lignin, with potassium hydroxide (KOH) and potassium carbonate (K₂CO₃) found the different band at 3180 cm⁻¹ and 1060-1050 cm⁻¹ are associated by O-H group and C-C stretching, the other bands that appear are the same of the previously chemical reagents.

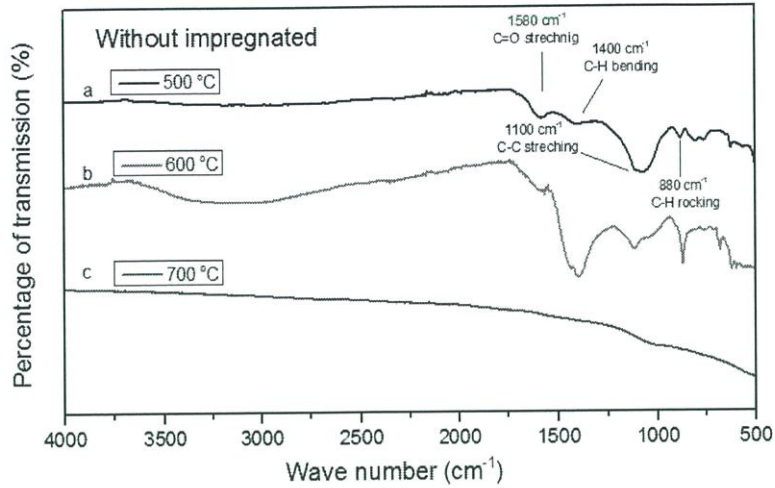
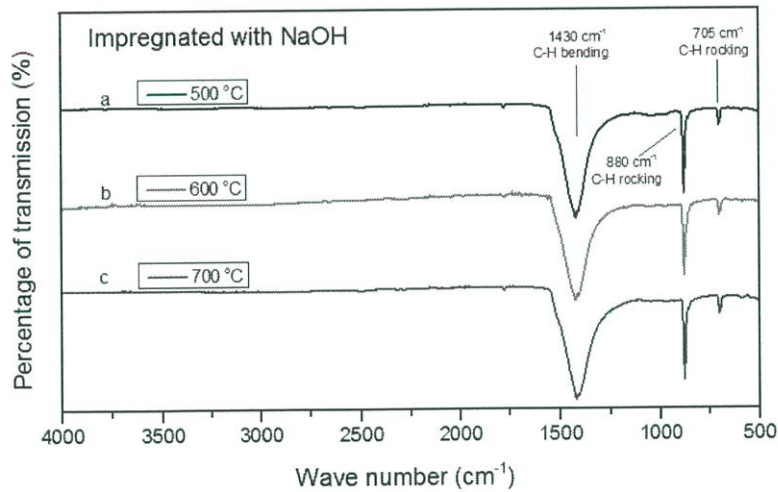


Fig. 3a FTIR-ATR spectra of the activated carbons without impregnated at different temperature (a) 500°C, (b) 600 °C and (c) 700°C.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

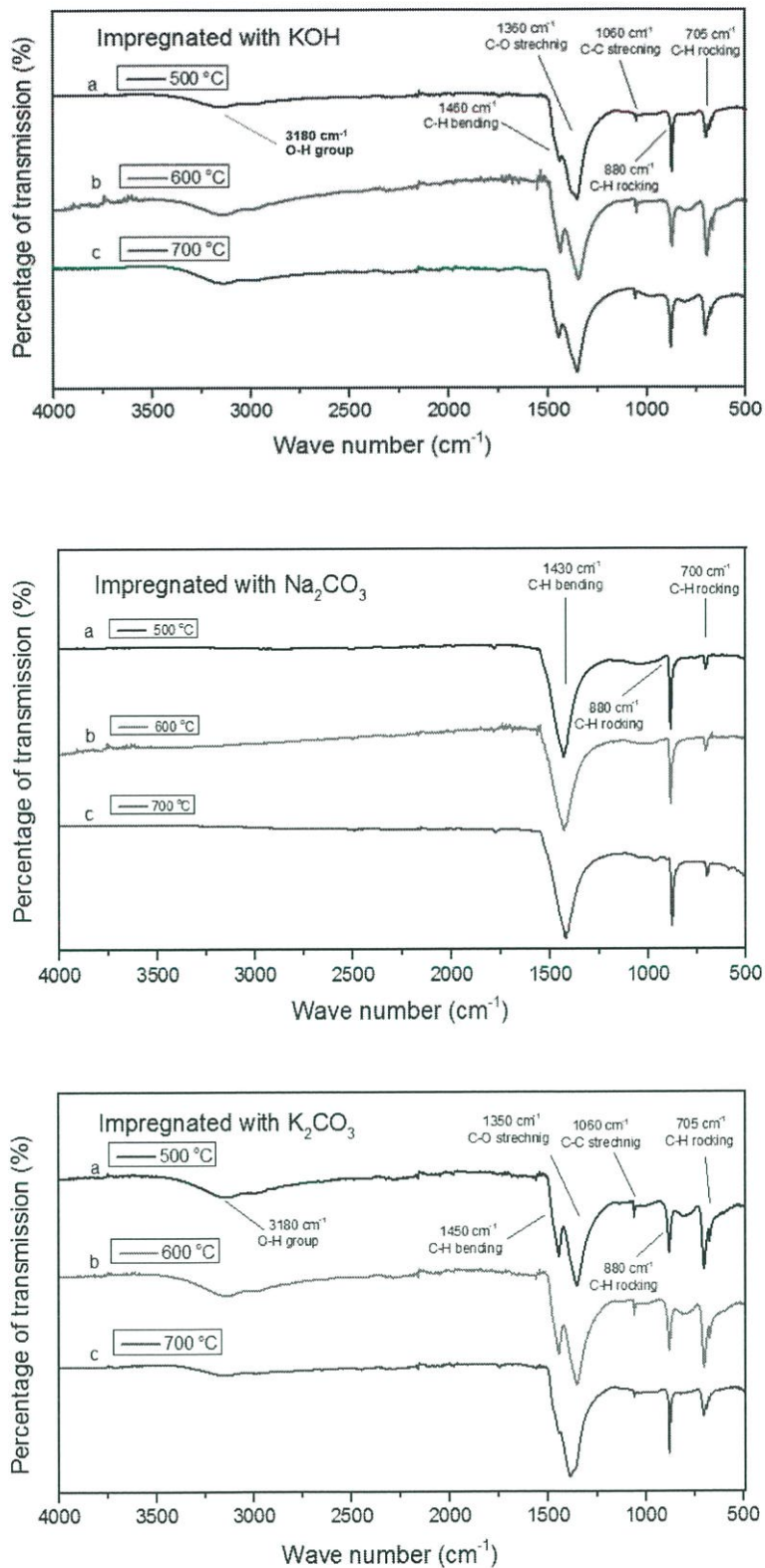


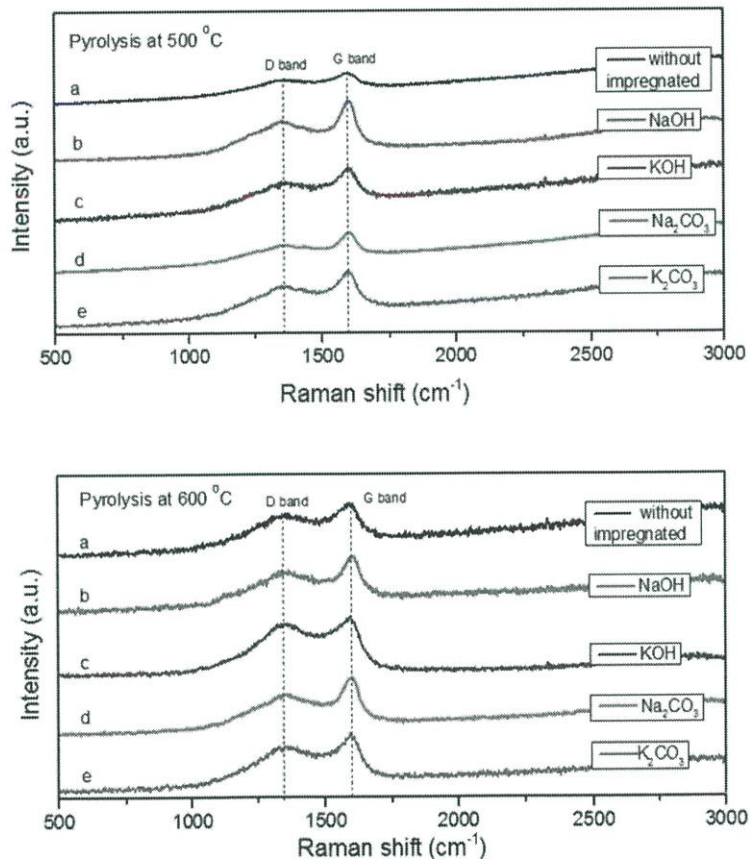
Fig. 3b FTIR-ATR spectra of the activated carbons impregnated with NaOH, KOH, Na₂CO₃ and K₂CO₃ at different temperature (a) 500°C, (b) 600 °C and (c) 700°C.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4. Raman spectroscopy

Raman spectra can be used to generate a characteristic spectrum for any material based on the vibrational modes of its molecules was stimulated by a laser with a wavelength of 532 nm. (2.33 eV). Sample pyrolyzed at 500, 600 and 700°C and impregnated with sodium hydroxide (NaOH), potassium hydroxide (KOH), sodium carbonate (Na_2CO_3) and potassium carbonate (K_2CO_3) revealed peaks at 1353 cm^{-1} and 1589 cm^{-1} which correspond to D band and G band in activated carbon respectively. The D band is associated with the defect concentration or measure of disorders in the C-C bonds such as non-crystalline structure [16,17,18]. The G band is associated with in plane vibration of C-C bonds is measure of a perfect composite [19,20]. The characteristic raman peak intensity ratio (I_D/I_G) is useful qualitative way of evaluating of structural defects graphitization or crystallinity ratio in activated carbons induced during pyrolyzed and chemical activation. The I_D/I_G ratio of activated carbons increased as the pyrolysis temperature increased from 500 to 700°C after chemical activation the I_D/I_G ratio of activated carbons impregnated with sodium hydroxide (NaOH) is lower than sodium carbonate (Na_2CO_3), potassium hydroxide (KOH) and potassium carbonate (K_2CO_3). However, the I_D/I_G ratio of produced activated carbons may be used to show a pure carbon which is one of the main properties of activated carbon since the porosity could be raised up with the reduction of functional molecules resulted in a high remaining carbon in their structure according to the study of Lu et al. (2008) [24].

The first-order Raman spectra of the activated carbons are shown in Fig.4. Raman spectroscopy of the activated carbons shows a typical pattern in which the D band Raman shift of 1353 cm^{-1} is smaller than the G band at Raman shift of 1589 cm^{-1} . That means the activated carbons consist of both amorphous and crystalline structures.



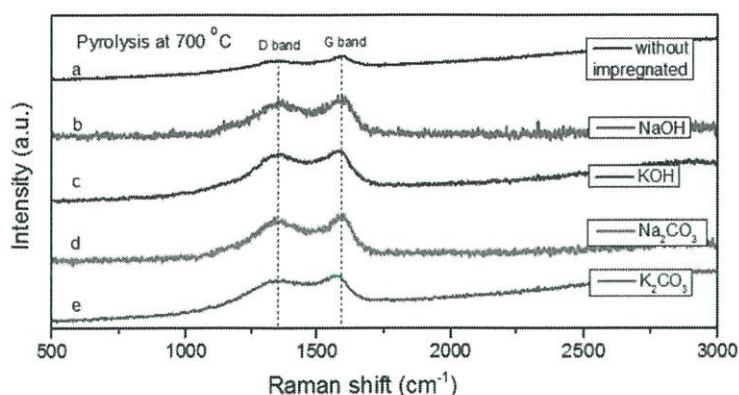


Fig. 4 Raman spectroscopy of the activated carbons pyrolysis at 500, 600 and 700°C without impregnated and impregnated with different base (a) NaOH (b) KOH (c) Na₂CO₃ (d) K₂CO₃, with typical peaks related to graphitic (G) and disordered carbon (D) structures.

4. Conclusions

This study shows the potential of activated carbons produced from leaf of cattail flower by pyrolysis process with chemical activation, temperature and type chemicals were mainly effects on the porosity. The yields achieved by chemical activation are higher than physical activation. Produced activated carbons have proven to be amorphous and crystalline structure, the samples show various external pores and these products could have vast pores. Whereas, it shows some similarities as other lignocellulosic substances derived activated carbon. From this investigation, we expected to apply this produced material for further greenhouse gases reduction to limit CO₂ emissions which is the major cause of global warming, is the easy way to synthesis porous carbon materials from waste biomass resources.

Acknowledgements

The authors wish to thank College of Nanotechnology, King Mongkut's institute of Technology Ladkrabang (Nano KMITL), Bangkok Thailand and the financial support of the Thailand Research Fund to the National Metal and Materials Technology Center (MTEC) via the YSTP program of National science and technology development agency (NSTDA), Pathum thani Thailand (Grant GNA-CO-2560-4662-TH/2560) for support this study.

References

- [1] M.G. Plaza, S. García, F. Rubiera, J.J. Pis, C. Pevida, Post-combustion CO₂ capture with a commercial activated carbon: comparison of different regeneration strategies, *Chem. Eng. J.* 163 (2010) 41–47, doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.cej.2010.07.030.
- [2] S. Deng, H. Wei, T. Chen, B. Wang, J. Huang, G. Yu, Superior CO₂ adsorption on pine nut shell-derived activated carbons and the effective micropores at different temperatures, *Chem. Eng. J.* 253 (2014) 46–54, doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.cej.2014.04.115.
- [3] M. Kacem, M. Pellerano, A. Delebarre, Pressure swing adsorption for CO₂/N₂ and CO₂/CH₄ separation: comparison between activated carbons and zeolites performances, *Fuel Process. Technol.* 138 (2015) 271–283, doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.fuproc.2015.04.032.
- [4] G. Sneddon, A. Greenaway, H.H.P. Yiu, The potential applications of nanoporous materials for the adsorption, separation, and catalytic conversion of carbon dioxide, *Adv. Energy Mater.* 4 (2014) 1–19, doi:http://dx.doi.org/10.1002/aenm.201301873.
- [5] N.A. Rashidi, S. Yusup, An overview of activated carbons utilization for the post-combustion carbon dioxide capture, *J. CO₂ Util.* 13 (2016) 1–16, http://dx.doi.org/10.1016/j.jcou.2015.11.002.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของงานเพื่อการค้า เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

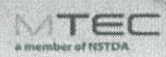
- [6] V. Jimenez, A. Ramirez-Lucas, J.A. Diaz, P. Sanchez, A. Romero, CO₂ capture in different carbon materials, *Environ. Sci. Technol.* 46 (2012) 7407–7414, <http://dx.doi.org/10.1021/es2046553>.
- [7] Y. Kamimura, M. Shimomura, A. Endo, CO₂ adsorption–desorption properties of zeolite beta prepared from OSDA-free synthesis, *Microporous Mesoporous Mater.* 219 (2016) 125–133, doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.micromeso.2015.07.033>.
- [8] R.A. Fiuza-Jr, R.M.J. Neto, L.B. Correia, H.M.C. Andrade, Preparation of granular activated carbons from yellow mombin fruit stones for CO₂ adsorption, *J. Environ. Manage.* 161 (2015) 198–205, doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.06.053>.
- [9] F. Caturla, M. Molina-Sabio, F. Rodriguez-Reinoso, *Carbon* 29 (1991) 999.
- [10] M.C.A. Ferraz, *Fuel* 67 (1988) 1237.
- [11] S. Balci, T. Dogu, H. Yucel, *J. Chem. Technol. Biotechnol.* 60 (1994) 419.
- [12] C.E. Byrne and D. C. Nagle, “Carbonization of wood for advanced materials applications,” *Carbon*, vol. 35, no. 2, pp.259–266, 1997.
- [13] A. Reffas, V. Bernardet, B. David, L. Reinert, M. Bencheikh Lehocine, M. Dubois, N. Batisse, L. Duclaux. Carbons prepared from coffee grounds by H₃PO₄ activation: Characterization and adsorption of methylene blue and Nylosan Red N-2RBL. *Journal of hazardous Materials*, 175, 779–788 (2010).
- [14] P. Delhaes, M. Couzi, M. Trinquecoste, J. Dentzer, H. Hamidou, C. Vix-Guterl, *Carbon* 2006, 44, 3005. CrossRef | CAS | Web of Science® Times Cited: 110
- [15] C. Cooper, R. Young, M. Halsall, *Composites Part A* 2001, 32, 401. CrossRef | Web of Science Times Cited: 233
- [16] J. H. Lehman, M. Terrones, E. Mansfield, K. E. Hurst, V. Meunier, *Carbon* 2011, 49, 2581. CrossRef | CAS | Web of Science® Times Cited: 184
- [17] B. Lohse, A. Calka, D. Wexler, *J. Alloys Compd.* 2007, 434, 405. CrossRef | CAS | Web of Science® Times Cited: 27
- [18] D. Chaira, S. Sangal, B. Mishra, *Trans. Indian Inst. Met.* 2011, 64, 549. CrossRef | CAS | Web of Science® Times Cited: 2
- [19] M. Klein, J. A. Holy, W. Williams, *Phys. Rev. B: Condens. Matter.* 1978, 17, 1546. CrossRef | Web of Science® Times Cited: 69 | ADS
- [20] M. Amer, M. Barsoum, T. El-Raghy, I. Weiss, S. Leclair, D. Liptak, *J. Appl. Phys.* 1998, 84, 5817. CrossRef | CAS | Web of Science® Times Cited: 71 | ADS
- [21] J. Zawadzki, *Carbon* 18 (1980) 281.
- [22] G. Socrates, *Infrared Characteristic Group Frequencies*, Wiley, Chichester, 1994.
- [23] M.S. Solum, R.J. Pugmire, M. Jagtoyen, F. Derbyshire, *Carbon* 33 (1995) 1247.
- [24] C. Lu, H. Bai, B. Wu, F. Su, and J.F. Hwang, *Energy & Fuels* (2008) 3050.
- [25] J. Serafin, U. Narkiewicz, A.W. Morawski, R.J. Wróbel, B. Michalkiewicz, *Journal of CO₂ Utilization* 18 (2017) 73–79.



Nanoporous carbon from Cattail leaves for carbon dioxide capture



Araya Smuthkochorn^a, Nardnuda Katunyoo^a, Napat Kaewtrakulchai^a, Duangduen Atong^b, Kanit Soongprasit^b and Apiluck Eiad-ua^{a*}



^aCollege of Nanotechnology, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Thailand

^bNational Metal and Materials Technology Center (MTEC), Thailand

*Corresponding author's e-mail : apiluck.ei@kmitl.ac.th

Introduction

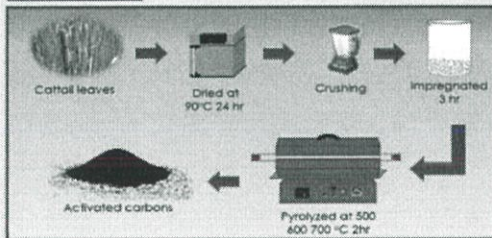


Reducing anthropogenic CO₂ emission and lowering the concentration of greenhouse gases have quickly become the most urgent environmental issues of our age. Carbon capture and storage (CCS) is the option for reducing these harmful CO₂ emissions.

Objective

To investigate the effect of chemical activation on the cattail leaves derived activated carbons for reducing of CO₂ emission.

Experimental



Result and discussion

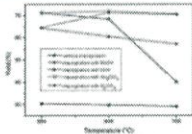


Fig. 1 Results of yield for activated carbons

The yield achieved by physical activation 28-31% are lower than chemical activation. Fig. 1 can be observed that for sample impregnated with sodium carbonate the carbon yield was the highest.

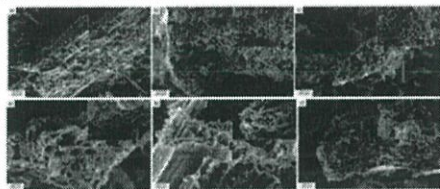


Fig. 2 SEM images (300x and 800x) of activated carbons impregnated with Na₂CO₃ and without impregnated at (a) 500°C (b) 600°C (c) 700°C

Fig. 2, the pore formation apparently found with the increasing of pyrolysis temperature. A various cavities on their surface is resulted from the thermal degradation of lignocellulosic polymers. Based on the activation by using Na₂CO₃ illustrates a very pore on the activated carbon surface.

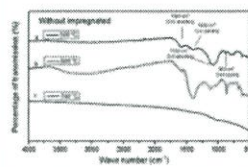


Fig. 3a FTIR-ATR spectra of the activated carbons without impregnated at different temperature

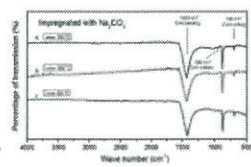


Fig. 3b FTIR-ATR spectra of the activated carbons impregnated with Na₂CO₃

In Fig. 3a the surface function group of the activated carbons without impregnated was increased when the temperature increase from 500°C to 600°C but the highest temperature of pyrolysis process (700°C) the functional group does not appear.

In Fig. 3b The effect of impregnated with sodium carbonate (Na₂CO₃) was appear the band at 1430 cm⁻¹, 880-700 cm⁻¹ was related to the C-H bending and C-H rocking, respectively indicated to hemicellulose and lignin.

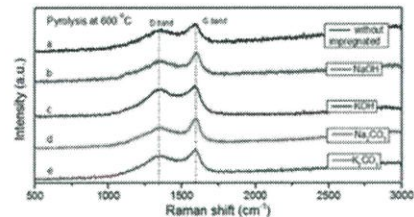


Fig. 4 Raman spectroscopy of the activated carbons pyrolysis at 600°C with and without impregnated

The first-order Raman spectra of the activated carbons are show in Fig. 4 Raman spectroscopy of the activated carbons show typical pattern in which the D band Raman shift of 1353 cm⁻¹ is a smaller than the G band of Raman shift of 1589 cm⁻¹ that mean the activated carbons has consists of both amorphous and crystalline structure.

Conclusion

This study shows activated carbons produced from leaf of cattail flower by pyrolysis process. temperature and base were mainly effected on the porosity. The activated carbons have proven to be amorphous and crystalline structure the surface functional group was mainly of hemicellulose and lignin. The yield achieved by chemical activation are higher than physical activation.

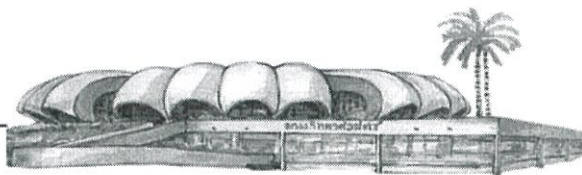
Acknowledgements

The authors wish to thank College of Nanotechnology, KMUTL, Thailand and the financial support of the National Metal and Materials Technology Center (MTEC) via the YSTP program from National Science and Technology Development Agency (NSTDA), Pathumthani Thailand (Grant GNA-CO-2560-4662-TH/2560) for support this study.

References

- [1] M.G. Pardo, S. Garcia, J. Rubiano, J.J. Fu, C. Pevida, Post-combustion CO₂ capture with a commercial activated carbon: comparison of different regeneration strategies. Chem. Eng. J. 163 (2010) 41-47. doi:10.1016/j.cej.2010.07.030.
- [2] S. Deng, H. Wei, I. Chen, B. Wong, J. Huang, C. Yu. Superior CO₂ adsorption on ultra-microporous activated carbons and the effective micropores of different temperatures. Chem. Eng. J. 253 (2014) 46-54. doi:10.1016/j.cej.2014.08.115.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Process optimization and characterization of activated carbon from cattail weed waste prepared by chemical activation for efficient CO₂ removal

Nardnutda Katunyoo¹, Araya Smuthkochorn¹, Napat Kaewtrakulchai¹,
Duangduen Atong², Kanit Soongprasit² and Apiluck Eiad-ua^{1*}

¹College of Nanotechnology, King Mongkut's institute of Technology Ladkrabang, Thailand

²Nation Metal and Materials Technology Center (MTEC), Thailand

*E-mail: apiluck.ei@kmitl.ac.th

Abstract:

The major reason of rapid CO₂ emission is resulted from human activities such as burning of fossil fuels, transportation and air polluted from industrial process causing the increase of average global temperature at a faster rate. Several technologies (*e.g.* CO₂ conversion and carbon storage technology) have been developed to reduce a carbon dioxide from the atmosphere. Reducing CO₂ emissions is of great importance to the global community, and carbon capture and storage (CCS) is one of effective options for reducing these harmful CO₂ emissions. Recently, development of activated carbon from waste and biomass for carbon dioxide capture has been reported with high separation performance and offers a cost-effective solution. Thus, this study explores the activated carbon manufactured from cattail leaves (CL) by using KOH activation, the activated carbon was processed by hydrothermal at 200 °C for 24 hours and substituted to chemical activation at 500 to 900 °C for 1 h. Then, the characteristics of cattail leaves-based activated carbon were analyzed by SEM, FTIR, N₂ adsorption isotherm, and Raman spectroscopy. From this investigation, the prepared activated carbon will be an efficient adsorbent for the CO₂ emission capture.

Keywords: Cattail leaves, KOH activation, CO₂, Carbonization

1. Introduction

Global warming is a current temperature on earth have increased, severe impact on humans and environment. This main reason came from greenhouse effect related to greenhouse gases (*i.e.* ozone, methane, nitrous oxide, chlorofluorocarbon and carbon dioxide), that can trap heat and

infrared radiation. Carbon dioxide has sourced from electricity production, transportation, agriculture activities, commercial, industry and residential sectors. The principal methods used to capture CO₂ are adsorption and membrane separation^{1,2}. The methods of CO₂ adsorption by amines are commonly used and highly effective. However, there are some important

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

technical but economic drawbacks³. Adsorbents have a high adsorption performance and high thermal stability. Activated carbon⁴ and zeolite⁵ has very high surface areas resulted from porosity, size of pores larger than adsorbate molecules. Activated carbon is a useful adsorbent for CO₂ capture due to their large surface areas, suitable pore size distribution⁶, high mechanical strength and stable adsorption-desorption cycles. Basically, activated carbon is produced via physical or chemical activation, physical activation is using a carbonization process with high temperature to prepare char under the activating gas atmosphere such as steam and carbon dioxide⁷, Whereas, chemical activation is treated with chemical solution, for example sodium hydroxide and potassium hydroxide. Activated carbon has been classified according to raw materials used in its preparation such as natural coal, peat, industrial wastes and biomass. Activated carbons are usually prepared from agricultural waste because of its inexpensive cost, it can change lignocellulose to carbon become an interesting material for adsorbents.

In this study, we prepared activated carbon from the cattail leaves, which are a weed waste found in all areas throughout of Thailand. The preparation was performed in 2 step processes (hydrothermal-carbonization and chemical activation using KOH as activating agent). Produced activated carbon was characterization by scanning electron microscopy, Fourier-transform infrared spectroscopy. The aim of this work is to study the effects of carbonization temperatures and

chemical properties of the cattail flower derived activated carbon.

2. Materials and Methods

2.1 Raw materials preparations

Waste biomass (cattail leaves, CL) was obtained from weed in all areas throughout Thailand. The chemical

Structural	Cattail leaves
Cellulose	63.2 %
Hemicellulose	8.7 %
Lignin	9.6 %

component analysers of cattail leaves are shown in Table 1. The collected CL were dried at 110 °C overnight to remove moisture and then crushing to be particle sizes below 1 mm.

Table1: The chemical component analyses of cattail leaves

2.2 Preparation and characterization of activated carbon

Activated carbon were preparation from cattail leaves by Hydrothermal-Carbonization process, prepared CF was heated at 200 °C for 12 h in a stainless-steel chamber. and then carbonized in nitrogen flow at 500, 600, 700, 800 and 900 °C for 1 h. by a ramp rate for 10 °/min. The biochar was chemical activating with a saturated solution of potassium hydroxide (KOH) 4 molar for 24 h at room temperature. After that was washed with 0.1 M of HCl and distilled water several times until pH of filtrate became neutral. The washed sample were dried at 90 °C overnight to prepare the activated carbon.

On the other hand, biochar obtained from cattail leaves without chemical activating at 500, 700 and 900

°C was noted as CL1, CL2 and CL3, respectively. The activated carbon from chemical activation with KOH at 500, 600, 700, 800 and 900 °C was noted as CAC1, CAC2, CAC3, CAC4 and CAC5, respectively. After the preparation, prepared samples were characterized by scanning electron microscope (SEM) used for the surface morphology analysis, Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR, Perkin Elmer Spectrum 2) for the surface function bonding analysis.

3. Results & Discussion

3.1 Production of activated carbon

The carbon yield (%) obtained by the chemical activation are approximately 60% excepted the sample which was burned off at 500 °C showing high yield off 63.43 %. The yield from physical activation around 42-17 % are lower than chemical activation. Fig. 1 is observation for the increase of carbonization temperature led to the reduction of carbon yield due to the disappearance of organic substances. Production yield results are not really high compared to the one obtained by chemical activation the sample prepared by the physical process reveals a lower yield of the order 42-17%.

3.2 Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR)

These analyses were present of functional group on the activated carbons surface prepared from cattail leaves. The band observed in Fig.2a activated carbons after hydrothermal-carbonization without chemical activated, the functional group was decrease when the temperature increased from 500 °C to 900 °C the final product was only pure carbon, the

band at 1514 and 1078 cm^{-1} was related to the C-C and C-O stretching indicated the functional group of lignin. At 874 cm^{-1} , C-C stretching indicated group of hemicellulose, 796 cm^{-1} C-H rocking was the groups of hemicellulose, cellulose and lignin. In Fig. 2b, the effect of impregnated with KOH function group of the activated carbons surface was appeared the band at 1563 cm^{-1} , 1078 cm^{-1} was related to the C-O bonding indicated to cellulose and lignin, at 1370 cm^{-1} was related to the C-H bending indicated to lignin, at 879 cm^{-1} and 768 cm^{-1} was related to the C-C stretching and C-H rocking indicated to hemicellulose, cellulose and lignin. The increased temperatures are melting burn off only pure carbons was the final product.

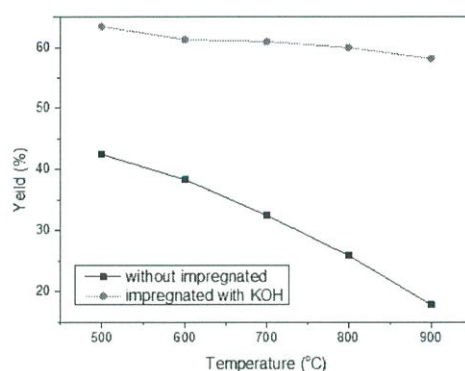


Figure 1. Carbon yield with/without impregnation with KOH at different temperatures.

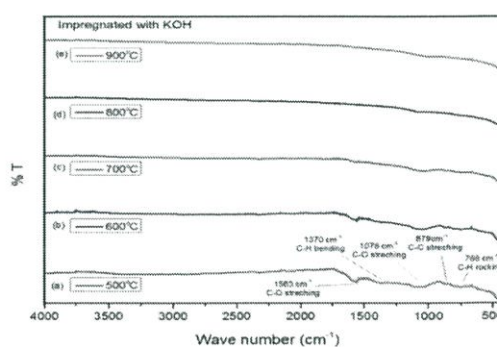


Figure 2a. FTIR-ATR spectra of the activated carbons without impregnated at different temperature (a) 500 °C, (b)

600 °C, (c) 700 °C, (d) 800 °C and (e) 900 °C.

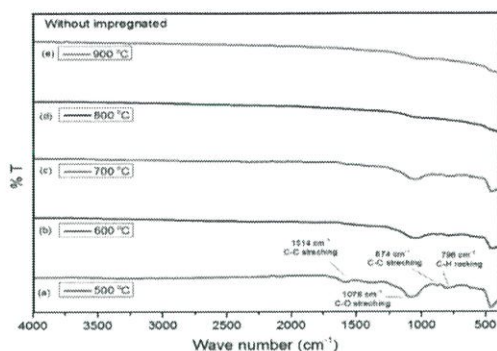
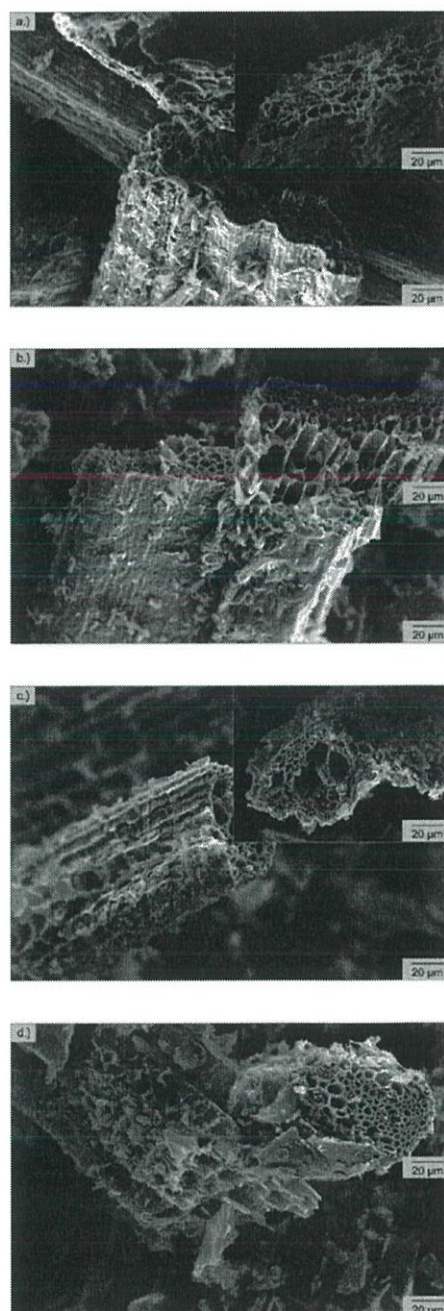


Figure 2b. FTIR-ATR spectra of the activated carbons impregnated with KOH at different temperature (a) 500 °C, (b) 600 °C, (c) 700 °C, (d) 800 °C and (e) 900 °C.

3.3 Scanning electron microscopy

Scanning electron microscope (SEM) measurements were performed using SEM Zeiss EVO MA10 operated at 10 kV applied to observe the surface physical morphology of the activated carbons from cattail leaves. In Fig. 3a-e shows SEM image of activated carbons without impregnated at different temperature of 500 °C, 600 °C, 700 °C, 800 °C and 900 °C, respectively. However, the high dense and low roughness surface without the cavities on the surface is show in Fig. 3a-b which is carbon products performed at carbonization temperature of 500 °C and 600 °C. Generally, the pore and surface roughness begins to form by the release of volatile substances at the temperature greater 700 °C without activation process⁵, as show in Fig 3a-e. Whereas, various pores apparently found with the increasing of carbonization temperature as seen in Fig 3a-c. A wide cavity on their surface

is resulted from the thermal degradation of hemicellulose, cellulose and lignin. On the other hand Fig. 4a-e illustrates various pores of the carbon product performed by using KOH as an activating agent. Furthermore, Fig. 4e displayed the degradation of pore at the highest temperature in carbonization due to the effect of extreme temperature.



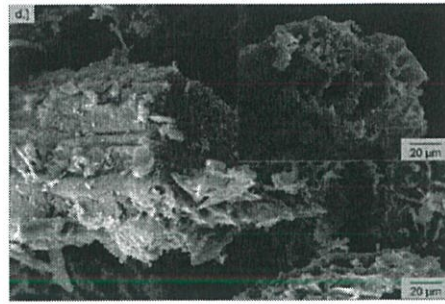
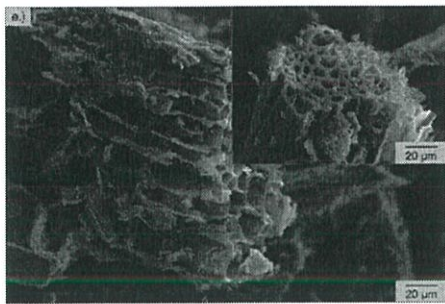


Figure 3. SEM images (300x and 500x) of activated carbons without impregnated at different temperature (a) 500 °C, (b) 600 °C, (c) 700 °C, (d) 800 °C and (e) 900 °C.

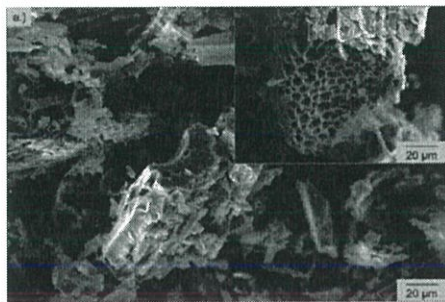
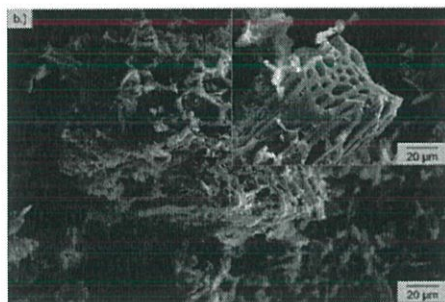


Figure 4. SEM images (300x and 500x) of activated carbons activate with KOH at different temperature (a) 500 °C, (b) 600 °C, (c) 700 °C, (d) 800 °C and (e) 900 °C.



4. Conclusions

This study represents of activated carbons prepare from cattail leaves by hydrothermal carbonization process followed by chemical activation, the main parameter is temperature which significantly affected on the porosity of produced activated carbon. The carbon yield achieved by chemical activation are higher than carbonization. According to this study, we expected to prepare a porous carbon from waste biomass resource for direct reduction of greenhouse gases which is the major cause of global warming in further investigation.

Acknowledgements

The authors would like to thank the College of Nanotechnology, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL), Bangkok Thailand and the financial support of the Thailand Research Fund to the National Metal and Materials Technology Center (MTEC) via the YSTP program of National Science and Technology Development Agency (NSTDA), Pathumthani Thailand (Grant GNA-CO-2560-4662-TH/2560) for support this study.

References

- [1] Deng, S., Wei, H., Chen, T., Wang, B., Huang, J., Yu, G. Superior CO₂ adsorption on pine nut shell-derived activated carbons and the effective micropores at different temperatures; *Chem. Eng. J.* 253; 2014; pp. 46–54.
- [2] Kacem, M., Pellerano, M., Delebarre, A. Pressure swing adsorption for CO₂/N₂ and CO₂/CH₄ separation: comparison between activated carbons and zeolites performances; *Fuel Process. Technol.* 138; 2015; pp. 271–283.
- [3] Sneddon, G., Greenaway, A., Yiu, H.H.P. The potential applications of nanoporous materials for the adsorption, separation, and catalytic conversion of carbon dioxide; *Adv. Energy Mater.* 4; 2014; pp. 1–19.
- [4] Jimenez, V., Ramirez-Lucas, A., Diaz, P., Sanchez, J.A., Romero, A. CO₂ capture in different carbon materials; *Environ. Sci. Technol.* 46; 2012; pp. 7407–7414.
- [5] Kamimura, Y., Shimomura, M., Endo, A. CO₂ adsorption–desorption properties of zeolite beta prepared from OSDA-free synthesis; *Microporous Mesoporous Mater.* 219; 2016; pp. 125–133.
- [6] Fiuza-Jr, R.A., Neto, R.J.M., Correia, L.B., Andrade, H.M.C. Preparation of granular activated carbons from yellow mombin fruit stones for CO₂ adsorption; *J. Environ. Manage.* 16; 2015; pp. 198–205.
- [7] Chao, C., Wha-Seung, A. CO₂ capture using mesoporous alumina prepared by a sol–gel process; *Chemical Engineering Journal* 166; 2011; pp. 646–651.
- [8] Jarosław, S., Urszula, N., Antoni, W.M., Rafał, J.W., Beata, M. Highly microporous activated carbons from biomass for CO₂ capture and effective micropores at different conditions; *Journal of CO₂ Utilization* 18; 2017; pp. 73–79.

Process optimization and characterization of activated carbon from cattail weed waste by chemical activation for efficient CO₂ removal



Nardnutda Katunyoo^a, Araya Smuthkochorn^a, Napat Kaewtrakulchai^a, Duangduen Atong^b, Kanit Soongprasit^b and Apiluck Eiad-ua^{a*}

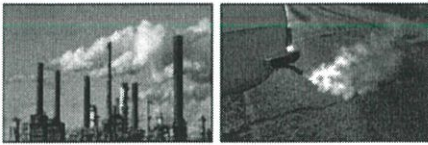
^aCollege of Nanotechnology, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Thailand

^bNation Metal and Materials Technology Center (MTEC), Thailand

*Corresponding author's e-mail: apiluck.ei@kmitl.ac.th



Introduction

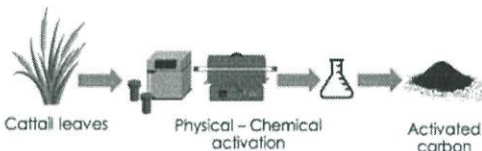


The major cause of rapid CO₂ emission is resulted from human activities and air polluted from industrial process which leads to the increase of average global temperature at a faster rate. Reducing CO₂ emissions is of great importance to the global community, and carbon capture and storage (CCS) is one of the effective options for reducing these harmful CO₂ emissions.

Objective

To study the effect of chemical activation on the activated carbon prepare from cattail leaves for reducing CO₂ emission.

Experimental



Result and discussion

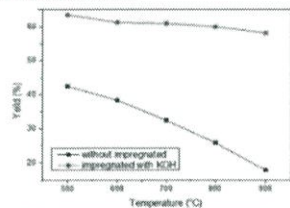


Fig. 1 Result yield of activated carbon

The yield (%) obtained by the chemical activation are approximately 60%. Fig. 1 is observed that the yield from physical activation around 42-17 % are lower than chemical activation.

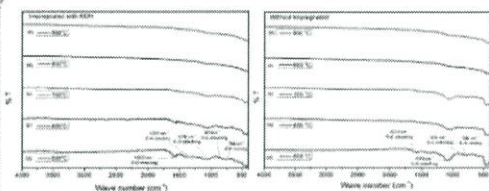


Fig. 2a FTIR-ATR spectra of the activated carbons without impregnated at different temperature

Fig. 2b FTIR-ATR spectra of the activated carbons impregnated with potassium hydroxide (KOH)

Nanoporous Material Research Laboratory, College of Nanotechnology, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

In Fig. 2a the functional group was decrease when the temperature increase from 500°C to 900°C the final product was only pure carbon.

In Fig. 2b the effect of impregnated with potassium hydroxide (KOH) was appear the band at 1563 cm⁻¹, 1078 cm⁻¹ was related to the C-O stretching indicated to cellulose and lignin, at 1370 cm⁻¹ and 879 cm⁻¹ - 768 cm⁻¹ was related to the C-H bending and C-H rocking, respectively indicated to hemicellulose, cellulose and lignin.

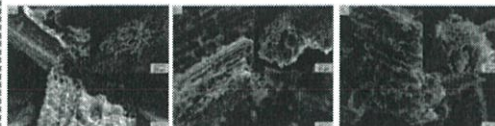


Fig. 3 SEM images of activated carbons without impregnated at different temperature a.) 500 °C, b.) 700 °C and c.) 900 °C



Fig. 4 SEM images of activated carbons activate with KOH at different temperature a.) 500 °C, b.) 700 °C and c.) 900 °C

In Fig. 3 the surface without the pore structure is low carbonization temperature. Whereas, the pore formation apparently found with the increasing of carbonization temperature. In Fig. 4 pore on their external surface due to the releasing of KOH occupied in a carbon structure. A wide cavity on their surface is resulted from the thermal degradation of hemicellulose, cellulose and lignin.

Conclusion

This study represents of activated carbons prepare from cattail leaves by hydrothermal-carbonization process, temperature and chemical activated were significantly affected on the porosity and surface area. The surface functional group was mainly of hemicellulose and lignin. The yield achieved by chemical activation are higher than physical activation.

Acknowledgements

The authors wish to thank College of Nanotechnology, KMITL and the financial support of the National Metal and Materials Technology Center (MTEC) via the YSTP program of National Science and Technology Development Agency (NSTDA) Pathumthani Thailand [Grant GNA-CO-2560-4662-1H/2560] for support this study.

References

- [1] S. Deng, H. Wei, T. Chen, B. Wang, J. Huang, G. Yu, Superior CO₂ adsorption on pine nut shell-derived activated carbons and the effective micropores at different temperatures. Chem. Eng. J. 253 (2014) 46-54. doi:10.1016/j.cep.2014.04.115.
- [2] M. Kacem, J. Palocz, A. Delabare, Pressure swing adsorption for CO₂/N₂ and CO₂/CH₄ separation: comparison between activated carbons and zeolites performances. Fuel Process. Technol. 138 (2015) 271-283. doi:10.1016/j.fuproc.2015.04.032.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน



Name	Nardnutda Katunyoo
ชื่อ-นามสกุล	นารณัตตา กัตัญญู
Date of Birth	Jun 1, 1996
วัน เดือน ปีเกิด	1 มิถุนายน 2539
Address	523 Moo. 10, Patumnak Rd, Pattaya, Banglamung, Chonburi 20150
ที่อยู่	523 หมู่ 10 ถนนพระตำหนัก ต.หนองปรือ อ.บางละมุง จ.ชลบุรี 20150
E-mail address	nnardnutda@hotmail.com
ประวัติการศึกษา	ระดับมัธยมศึกษา โรงเรียนมัธยมสาธิตพัทยา จังหวัด ชลบุรี
ประวัติการทำงาน	ห้องปฏิบัติการพลังงานทดแทน ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ สำนักพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.)
Work experiences	National Metal and Materials Technology Center (MTEC), 130 Phaholyothin Rd., Klong Luang, Pathumthani 12120. Thailand

ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์

[1] Araya Smuthkochorn, Nardnutda Katunyoo, Napat Kaewtrakulchai, Kanit Soongprasit and Apiluck Eiad-ua, **Nanoporous carbon from Cattial leaves for carbon dioxide capture**. Materials Today Proceedings, (2017).

[2] Nardnutda Katunyoo, Araya Smuthkochorn, Napat Kaewtrakulchai, Duangduen Atong, Kanit Soongprasit and Apiluck Eiad-ua, **Process optimization and characterization of activated carbon from cattail weed wastes by chemical activation for efficient CO₂ removal**, PACCON2018 proceedings book (2018).

[3] Araya Smuthkochorn, Nardnutda Katunyoo, Napat Kaewtrakulchai, Kanit Soongprasit and Apiluck Eiad-ua, **Influence of the Hydrothermal-carbonization**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Process on Activated Carbon Properties from cattail weed waste. , Current Applied Science and Technology Journal, 2018 (Submitted).

ผลงานที่ได้นำเสนอในที่ประชุมวิชาการ

[1] Araya Smuthkochorn, Nardnutda Katunyoo, Napat Kaewtrakulchai, Kanit Soongprasit and Apiluck Eiad-ua, **Nanoporous carbon from Cattial leaves for carbon dioxide capture**.The first Materials Research Society of Thailand International Conference, (2017).

[2] Nardnutda Katunyoo, Araya Smuthkochorn, Napat Kaewtrakulchai, Duangduen Atong, Kanit Soongprasit and Apiluck Eiad-ua, **Process optimization and characterization of activated carbon from cattail weed wastes by chemical activation for efficient CO₂ removal**, Pure and Applied Chemistry International Conference, (2018).

[3] Araya Smuthkochorn, Nardnutda Katunyoo, Napat Kaewtrakulchai, Kanit Soongprasit and Apiluck Eiad-ua, **Influence of the Hydrothermal-carbonization Process on Activated Carbon Properties from cattail weed waste**. The Second International Conference on Science and Technology of Emerging Materials, (2018).

ประวัติผู้เขียน



Name	Araya Smuthkochorn
ชื่อ-นามสกุล	อารยา สมุทรโคจร
Date of Birth	Aug 12, 1995
วัน เดือน ปีเกิด	12 สิงหาคม 2538
Address	510 Moo. 14, Pattanakarn 38, Suanluang, Bangkok 10250
ที่อยู่	510 หมู่ 14 พัฒนาการ 38 เขต สวนหลวง แขวง สวนหลวง กรุงเทพมหานคร 10250
E-mail address	aryraya.s@gmail.com
ประวัติการศึกษา	ระดับมัธยมศึกษา โรงเรียนพระหฤทัยคอนแวนต์ จังหวัด กรุงเทพมหานคร
ประวัติการทำงาน	ห้องปฏิบัติการวิศวกรรมเซรามิกส์ ศูนย์เทคโนโลยี โลหะและวัสดุแห่งชาติ สำนักพัฒนาวิทยาศาสตร์ และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.)
Work experiences	National Metal and Materials Technology Center (MTEC), 130 Phaholyothin Rd., Klong Luang, Pathumthani 12120. Thailand

ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์

[1] Araya Smuthkochorn, Nardnutda Katunyoo, Napat Kaewtrakulchai, Kanit Soongprasit and Apiluck Eiad-ua, **Nanoporous carbon from Cattial leaves for carbon dioxide capture**. Materials Today Proceedings, (2017).

[2] Nardnutda Katunyoo, Araya Smuthkochorn, Napat Kaewtrakulchai, Duangduen Atong, Kanit Soongprasit and Apiluck Eiad-ua, **Process optimization and characterization of activated carbon from cattail weed wastes by chemical activation for efficient CO₂ removal**, PACCON2018 book (2018).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[3] Araya Smuthkochorn, Nardnutda Katunyoo, Napat Kaewtrakulchai, Kanit Soongprasit and Apiluck Eiad-ua, **Influence of the Hydrothermal-carbonization Process on Activated Carbon Properties from cattail weed waste.** , Current Applied Science and Technology Journal, 2018 (Submitted).

ผลงานที่ได้นำเสนอในที่ประชุมวิชาการ

[1] Araya Smuthkochorn, Nardnutda Katunyoo, Napat Kaewtrakulchai, Kanit Soongprasit and Apiluck Eiad-ua, **Nanoporous carbon from Cattial leaves for carbon dioxide capture.**The first Materials Research Society of Thailand International Conference, (2017).

[2] Nardnutda Katunyoo, Araya Smuthkochorn, Napat Kaewtrakulchai, Duangduen Atong, Kanit Soongprasit and Apiluck Eiad-ua, **Process optimization and characterization of activated carbon from cattail weed wastes by chemical activation for efficient CO₂ removal** Pure and Applied Chemistry International Conference, (2018).

[3] Araya Smuthkochorn, Nardnutda Katunyoo, Napat Kaewtrakulchai, Kanit Soongprasit and Apiluck Eiad-ua, **Influence of the Hydrothermal-carbonization Process on Activated Carbon Properties from cattail weed waste.** The Second International Conference on Science and Technology of Emerging Materials, (2018)