การสังเคราะห์เส้นใยนาโนจากมูลม้าโดยวิธีไฮโดรเทอร์มัลคาร์บอนไนเซชัน

ศิวกร สังข์น้อย

สรกิต เวทยาวงศ์

โครงงานพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุนาโน
วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Synthesis of carbon nano fibers from Thai horse manure via hydrothermal carbonization

Siwakron Sangnoi

Sorakit Wettayavong

A 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 LADKRABANG
2016

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

COPYRIGHT 2016

COLLEGE OF NANOTECHNOLOGY

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาควิชานาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี
วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
โครงงานพิเศษ

หัวข้อโครงงานพิเศษ	การสังเคราะห์เส้นใยนาโนจากมูลม้าโดยวิธีไฮโดรเทอร์มัลคาร์บอนไนเซชัน
Special Project Title	Synthesis of carbon nano fibers from Thai horse manure via hydrothermal carbonization
นักศึกษา	นายศิวกร สังข์น้อย นายสรกิต เวทยาวงศ์
รหัสประจำตัว	56110044 56110046
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชา	นาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี
สาขาวิชา	วิศวกรรมวัสดุนาโน
ปีการศึกษา	2559
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร.อภิลักษณ์ เอียดเอื้อ

คณะกรรมการสอบโครงงานพิเศษ	ลายมือชื่อ
ดร.ศุภมาส วิรุญจิตร	[signature]
ผศ.ดร.วณิชยา เมฆประสาท	[signature]
ผศ.ดร.อภิลักษณ์ เอียดเอื้อ	[signature]

ภาควิชานาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบังอนุมัติให้โครงงานพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมวัสดุนาโน

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

สุธี ชุติไพจิตร

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุธี ชุติไพจิตร)
หัวหน้าภาควิชานาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี
วันที่ 6 **เดือน** กรกฎาคม **พ.ศ. 2560**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงงานพิเศษเรื่อง	การสังเคราะห์เส้นใยนาโนจากมูลม้าโดยวิธีไฮโดรเทอร์มัลคาร์บอนไนเซชัน
นักศึกษา	นายศิวกร สังข์น้อย นายสรกิต เวทยาวงศ์
รหัสประจาตัว	56110044 56110046
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมวัสดุนาโน
พ.ศ.	2559
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร.อภิลักษณ์ เอียดเอื้อ

บทคัดย่อ

วัสดุคาร์บอนเป็นวัสดุที่น่าสนใจชนิดหนึ่งเนื่องจากสามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้อย่างหลากหลายในปัจจุบัน ทั้งทางด้านอิเลคทรอนิค ด้านพลังงาน รวมถึงการใช้งานทางด้านสิ่งแวดล้อม งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสังเคราะห์วัสดุเส้นใยนาโนคาร์บอน (Carbon nanofiber) จากมูลม้าด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลคาร์บอนไนเซชันเพื่อประยุกต์ใช้เป็นฐานรองรับของตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) สำหรับการใช้ในอุตสาหกรรมพลังงาน และเป็นวัสดุดูดซับสำหรับการบำบัดสีย้อม โดยทำการศึกษาอุณหภูมิและเวลา ในกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลคาร์บอนไนเซชัน ด้วยการนำมูลม้าที่ผ่านการบดให้มีขนาดไมโครเมตร ใส่ลงในเตาปฏิกรณ์ จากนั้นนำไปไฮโดรเทอร์มัลที่อุณหภูมิ 140 - 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 - 24 ชั่วโมง ซึ่งเงื่อนไขที่ดีสุดคือ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เนื่องจากโครงสร้างของเส้นใยนาโนคาร์บอนมีการแตกตัวมากที่สุด หลังจากนั้นทำการศึกษาผลของการเติมตัวเร่งปฏิกิริยา 4 ชนิดได้แก่ ตัวเร่งปฏิกิริยากลุ่มกรด กลุ่มเบส กลุ่มแอลกอฮอล์ และกลุ่มตัวทำลาย ที่ความเข้มข้น 1, 3, 5 wt% ต่อลักษณะของโครงสร้างเส้นใยนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ขึ้น ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไฮโดรเทอมัลจะถูกนำไปอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมงเพื่อกำจัดความชื้น จากนั้นนำไปเผาในบรรยากาศไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 300 – 900 องศาเซลเซียสและสภาวะอับอากาศที่อุณหภูมิ 300 – 500 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมง เพื่อปรับปรุงความเป็นรูพรุนและทำให้คาร์บอนมีความบริสุทธิ์เพิ่มมากขึ้น สำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างสัณฐานวิทยา (Morphology) จะทำการตรวจวัดด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) รวมถึงการศึกษาหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของวัสดุเส้นใยนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ขึ้น (Surface functional group) ด้วยวิธีฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโคปี (Fourier Transform Infrared Spectroscopy, FTIR), นอกจากนั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำการศึกษาความเป็นรูพรุนด้วยเครื่องวัดพื้นที่ผิวจำเพาะ (BET Analysis) สำหรับการวิเคราะห์สมบัติเชิงความร้อนของวัตถุต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิด้วยเทอร์โมกราวิเมติกส์ (Thermal Gravimetric Analysis) พบว่าในกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมงโดยเติมตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรด HCl 5 wt% จะส่งผลให้วัสดุเส้นใยนาโนคาร์บอนมีพื้นที่ผิวมากที่สุด ในขณะเดียวกันวัสดุเส้นใยนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ขึ้นจะถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลู (Methylene blue) และนำไปคำนวณค่าการดูดซับด้วยเครื่อง ยูวีวิซิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV–Vis spectrophotometer) ซึ่งพบว่าเส้นใยนาโนคาร์บอนที่ผ่านการกระตุ้นด้วยกรด HCl สามารถดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูได้มากที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Special Project Title	Characterization of carbon nano fibers from Thai horse manure via hydrothermal carbonization
Student	Mr. Siwakron Sangnoi Mr. Sorakit Wettayavong
Student ID	56110044 56110046
Degree	Bachelor of Engineering
Program	Nanomaterial Engineering
Year	2016
Special Project Advisor	Asst. Prof. Dr. Apiluck Eiad-ua

Abstract

Nowadays, carbon are the most interesting material since it can apply in several industries such as electronic, energy or environment application. In this study, carbon nanofiber was manufactured from horse manure which is available in Thailand and it has been produced via hydrothermal-carbonization (HTC) at the temperature 160 - 200 °C for 4-24 h in order to investigate the effect of HTC parameters on the physical mophology of carbon nanofiber. Then, acid, base, alcohol and solvent with ratio of 1, 3 and 5 wt% were added in the HTC process at the identical conditions as a catalyst. The samples derived from hydrothermal were pyrolysed at 300-900 °C under the nitrogen atmosphere and heated at 300-500 °C in partial oxygen for 2 h to pretreat the carbon sample in terms of chemical properties (i.e. carbon content, surface functional group) including the physical properties such as porosity. Afterwards, the physical morphology of carbon nanofiber was employed by scanning electron microscopy (SEM) and the surface functional group was measured by Infrared spectroscopy (FTIR). Moreover, the proximate analysis was also determined by thermal gravimetric analysis, TG method. The pore characteristics of carbon nanofiber such as BET surface area, pore size were studied by nitrogen sorption isotherm. The carbon nanofiber produced from HTC process at temperature of 200 °C for 24 h with adding 5 wt% of HCl showed the highest surface area. On the other hand, the carbon

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

nanofiber was applied for methylene blue adsorption. The adsorption capacity was calculated by UV – Vis Spectrophotometer. It was found that the carbon nanofiber nanofiber produced from HTC process at temperature of 200 °C for 24 h with adding of HCl shows the highest adsorption capacity of methylene blue.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

การศึกษาและเรียบเรียงโครงงานพิเศษเส้นใยนาโนคาร์บอนที่มีพื้นที่ผิวสูงด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลคาร์บอนไนเซชั่นจากมูลม้าเพื่อประยุกต์ใช้เป็นฐานรองรับของตัวเร่งปฏิกิริยาสำเร็จลุล่วงได้ ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณ ผศ.ดร. อภิลักษณ์ เอียดเอื้อ ผศ.ดร.วณิชยา เมฆประสาท ดร.ศุภมาส วิรุญจิตรและวิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่คอยดูแลให้คำปรึกษาตลอดการทำโครงงานวิจัยและนาย นภัส แก้วตระกูลชัยที่คอยดูแลและให้คำปรึกษาด้านการทดลองและการใช้เครื่องมือต่างๆ และขอขอบคุณวิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารสำหรับการเอื้อเฟื้ออุปกรณ์ต่างๆและสถานที่ในการทำวิจัย

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณความรัก ความเข้าใจ และกำลังใจอันอบอุ่นเสมอมาจากบิดา มารดาและครอบครัว ซึ่งเป็นหัวใจสำคัญในการผลักดันให้โครงงานพิเศษนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี และหวังเป็นอย่างยิ่งว่าเนื้อหาความรู้ จากโครงงานพิเศษฉบับนี้จะเป็นประโยชน์แก่ท่านผู้อ่านไม่มากก็น้อยสำหรับคุณงามความดีที่เกิดขึ้นจากโครงงานพิเศษเล่มนี้ ข้าพเจ้าขอใช้บูชาคุณแก่บิดา มารดา ครูบาอาจารย์และผู้มีพระคุณทุกท่าน

ศิวกร สังข์น้อย
สรกิต เวทยาวงศ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ III
กิตติกรรมประกาศ V
สารบัญ VI
สารบัญตาราง VII
สารบัญรูป VIII
คำย่อและสัญลักษณ์ IX
บทที่ 1 บทนำ 1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย 2
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ 2
1.3 แผนการดำเนินงานวิจัย 3
1.4 สมมติฐานงานวิจัย 4
1.5 ขอบเขตการดำเนินการ 4
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 4
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ 5
2.1 มูลม้า 5
2.1.1 ลักษณะของมูลม้า 5
2.1.2 การทำงานของระบบทางเดินอาหารของม้า 5
2.1.2.1 ปาก (Mouth) 6
2.1.2.2หลอดอาหาร (Esophagus) 6
2.1.2.3 กระเพาะอาหาร (Stomach) 6
2.1.2.4 ลำไส้เล็ก (Small Intestine) 7
2.1.2.5 ลำไส้ใหญ่ (Large intestine) 7
2.1.3 ระบบย่อยอาหารของม้า 8
2.1.3.1 ทางเดินอาหารส่วนต้น 8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

2.1.3.2 ทางเดินอาหารส่วนท้าย 8
2.1.4ประโยชน์ของมูลม้า 8
2.2 ชีวมวล..... 9
2.2.1 องค์ประกอบของชีวมวล (Biomass Compositions)..... 10
2.2.2 องค์ประกอบทั่วไปของสารชีวมวล 10
2.2.2.1 เซลลูโลส 10
2.2.2.2 เฮมิเซลลูโลส 10
2.2.2.3 ลิกนิน..... 11
2.2.2.4 แป้ง..... 11
2.2.2.5 โปรตีน..... 11
2.2.2.6 สารอื่นๆ (อินทรีย์และอนินทรีย์)..... 11
2.2.3 พลังงานที่ได้จากชีวมวล (Biomass Heating Value)..... 12
2.2.3.1 ค่าความร้อนสูง (High Heating Value, HHV)..... 12
2.2.3.2 ค่าความร้อนต่ำ (Low Heating Value, LHV) 12
2.3 กระบวนการไฮโดรเทอร์มัล..... 14
2.3.1 ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis)..... 14
2.3.2 ปฏิกิริยาดีไฮเดรชัน (Dehydration)..... 14
2.3.3 ปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน (Polymerization)..... 14
2.3.3.1 ปฏิกิริยารวมตัว (Addition Reaction)..... 14
2.3.3.2 ปฏิกิริยาควบแน่น (Condensation Reaction)..... 15
2.3.4 กระบวนการดีพอลิเมอร์ไรเซชั่น (Depolymerization) 16
2.4 กระบวนการแยกสลายด้วยความร้อน (Pyrolysis)..... 16
2.4.1 กลไกการเกิดการแยกสลายด้วยความร้อน..... 17
2.4.2 ผลิตภัณฑ์จากกระบวนการแยกสลายด้วยความร้อน..... 18
2.4.3 ประโยชน์ของผลิตภัณฑ์จ้ากกระบวนการแยกสลายด้วยความร้อน 18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

2.5 กระบวนการคาร์บอนไนเซชัน (Carbonization) 19

2.5.1 อุณหภูมิ 19

2.5.2 อัตราความร้อน 19

2.5.3 ตัวกลางของปฏิกิริยา 19

2.5.4 ธรรมชาติของวัตถุดิบ 20

2.6 การกระตุ้น (Activation) 20

2.6.1 การกระตุ้นทางกายภาพ 21

2.6.2 การกระตุ้นทางเคมี 22

2.7 การจำแนกขนาดรูพรุนตามมาตรฐาน IUPAC (International Union of Pureand AppliedChemistry) 23

2.8 กระบวนการดูดซับ (Adsorption Process) 24

2.8.1 กลไกของกระบวนการดูดติดผิว 24

2.8.2 ประเภทของการดูดซับ 25

2.8.2.1 การดูดซับทางกายภาพ 25

2.8.2.2 การดูดซับทางเคมี 25

2.8.3 ไอโซเทอมการดูดซับ 26

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 27

2.10 เทคนิคและเครื่องมือวัด 30

2.10.1 การศึกษาอสัณฐาน (Morphology) ด้วยเทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM) 30

2.10.1.1 หลักการทำงานของ SEM 30

2.10.1.2 ส่วนประกอบของ SEM 32

2.10.2 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันโดยวิธีฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโคปี 34

2.10.2.1 การเตรียมสารตัวอย่าง 34

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

2.10.2.2 ประเภทของเครื่องอินฟราเรดสเปกโทรสโคปี 35
2.10.3 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน 36
2.10.3.1 ข้อมูลจำเพาะ 36
2.10.4 การวิเคราะห์ธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน และไนโตรเจน 37
2.10.5 ยูวี-วิสิเบิล สเปกโทรสโคปี.. 38
2.10.6 การวัดพื้นที่ผิว ขนาดและปริมาตรรูพรุนโดยวิธีบีอีที (BET)..................... 40
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย 45
3.1 การศึกษาสมบัติของเส้นใยนาโนคาร์บอนจากดอกมูลม้า 45
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย 46
3.2.1 อุปกรณ์.. 46
3.2.2 วัสดุและสารเคมี.. 48
3.2.3 เครื่องวิเคราะห์ 49
3.3 การเตรียมมูลม้า 49
3.4 การสังเคราะห์เส้นใยนาโนคาร์บอนจากมูลม้า.. 49
3.4.1 ศึกษาปัจจัยในการสังเคราะห์เส้นใยนาโนคาร์บอนแบบที่ไม่ได้ เติมตัวเร่งปฏิกิริยาโดยอาศัยกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลและคาร์บอนไนเซชัน............ 51
3.4.2 ศึกษาปัจจัยในการสังเคราะห์เส้นใยนาโนคาร์บอนแบบเติมตัวเร่งปฏิกิริยาโดยอาศัยกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลและคาร์บอนไนเซชัน..... 51
3.5 การตรวจวัดและวิเคราะห์คุณสมบัติต่างๆ 52
3.5.1 การศึกษาสัณฐานวิทยา (Morphology) ด้วย SEM................................. 52
3.5.2 การศึกษาหมู่ฟังก์ชัน (Function group) ด้วย FT-IR............................... 52
3.5.3 การศึกษาการสลายตัวทางความร้อนด้วย TGA 52
3.5.4 การศึกษาพื้นที่ผิวและขนาดรูพรุ ด้วยBET.. 52
3.5.5 การศึกษาการดูดซับสีย้อมด้วย UV-Vis 52

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผล 54
4.1 ผลของอุณหภูมิและเวลาของกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล 54
4.2 ผลของชนิดตัวเร่งปฏิกิริยา 67
4.3 ผลของอุณหภูมิของกระบวนการคาร์บอนไนเซชัน 103
4.4 ประยุกต์การใช้งานในงานดูดซับน้ำสีย้อม 117
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและแนวทางการพัฒนา 132
5.1 สรุปผลการทดลอง 133
5.2 แนวทางการพัฒนา 133
บรรณานุกรม 134

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

1.1 แผนการดำเนินงานวิจัย....3
2.1 คุณลักษณะของชีวมวลประเภทต่างๆ และค่าพลังงานความร้อนที่ได้จากชีวมวลแต่ละประเภท 12
4.1 มวลของมูลม้าที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลคาร์บอนไนเซชั่น 55
4.2. มวลของมูลม้าที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลคาร์บอนไนเซชั่น 61
4.3 มวลของมูลม้าที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลคาร์บอนไนเซชั่นและเติมตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรด.... 67
4.4 มวลของมูลม้าที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลคาร์บอนไนเซชั่นและเติมตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบส 76
4.5 มวลของมูลม้าที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลคาร์บอนไนเซชั่นและเติมตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดแอลกอฮอล์ 85
4.6 มวลน้ำหนักที่เหลืออยู่ของมูลม้าที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลคาร์บอนไนเซชั่นและเติมตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดตัวทำลาย 94
4.7 มวลของมูลม้าที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลคาร์บอนไนเซชั่น 103
4.8 มวลของมูลม้าที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลคาร์บอนไนเซชั่น 108
4.9 การสลายตัวทางความร้อนของชีวมวล 113
4.10 พื้นที่ผิวปริมาตรและขนาดของรูพรุนของมูลม้า.... 116
4.11 เปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำสีย้อมสีน้ำเงินเมทิลีนบลูโดยใช้มูลม้าที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลคาร์บอนไนเซชัน 118
4.12 เปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำสีย้อมสีน้ำเงินเมทิลีนบลูโดยใช้มูลม้าที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลคาร์บอนไนเซชัน 119
4.13 เปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำสีย้อมสีน้ำเงินเมทิลีนบลูโดยใช้มูลม้าที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลคาร์บอนไนเซชันเติมตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรด 122

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่ หน้า

4.14 เปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำสีย้อมสีน้ำเงินเมทิลีนบลูโดยใช้มูลม้าที่ผ่าน
กระบวนการไฮโดรเทอร์มัลคาร์บอนไนเซชันเติมตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบส 124
4.15 เปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำสีย้อมสีน้ำเงินเมทิลีนบลูโดยใช้มูลม้าที่ผ่าน
กระบวนการไฮโดรเทอร์มัลคาร์บอนไนเซชันเติมตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดแอลกอฮอล์........ 126
4.16 เปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำสีย้อมสีน้ำเงินเมทิลีนบลูโดยใช้มูลม้าที่ผ่าน
กระบวนการไฮโดรเทอร์มัลคาร์บอนไนเซชันเติมตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดตัวทำละลาย 128
4.17 เปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำสีย้อมสีน้ำเงินเมทิลีนบลูโดยใช้มูลม้าที่ผ่าน
กระบวนการไฮโดรเทอร์มัลคาร์บอนไนเซชัน 130
4.18 เปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำสีย้อมสีน้ำเงินเมทิลีนบลูโดยใช้มูลม้าที่ผ่าน
กระบวนการไฮโดรเทอร์มัลคาร์บอนไนเซชัน 131

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แสดงลักษณะของมูลม้า	5
2.1 โครงสร้างทางเคมีของสารประกอบหลักของสารชีวมวล	12
2.3 ปฏิกิริยารวมตัวแบบลูกโซ่	15
2.4 ปฏิกิริยารวมตัวแบบควบแน่น	15
2.5 ไอโซเทอมการดูดซับ	26
2.6 การเกิดอันตรกริยาระหว่างอิเล็กตรอนปฐมภูมิกับอะตอมตัวอย่าง	31
2.7 แผนภาพขององค์ประกอบกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	32
2.8 การกระตุ้นให้เกิดรังสีเอกซ์เฉพาะตัวโดยใช้ลำอิเล็กตรอน	33
2.9 แผนภาพองค์ประกอบของเครื่องอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์	36
2.10 UV-VIS spectrum	38
2.11 องค์ประกอบของเครื่อง UV-VIS	39
2.12 Double beam spectrophotometer	40
2.13 แสดงการดูดซับแก๊สไนโตรเจนบนผิวหน้าและภายในรูพรุนของวัสดุ	41
2.14 แสดงการดูดซับโมเลกุลของแก๊สไนโตรเจนของวัสดุเป็นชั้นๆ	41
2.15 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของแก๊สที่ถูกดูดซับกับความดันสัมพัทธ์	42
2.16 แสดงเครื่องวิเคราะห์ขนาดพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุน	44
3.1 เครื่องปั่น	46
3.2 ถังปฏิกรณ์ไฮโดรเทอร์มัล	46
3.3 ภาชนะใส่เทฟลอน	47
3.4 ถ้วยเซรามิกส์	47
3.5 เตาอบสาร	47
3.6 เตาเผาสาร	48
3.7 แผนภาพแสดงขั้นตอนการวิจัย	50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

4.1 แสดง (A) FT-IR spectrum และ (B) กราฟเชิงปริมาตร (i) มูลม้าไม่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล, มูลม้าที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลที่เงื่อนไขแตกต่างกัน 160 °C เป็นเวลา(ii) 4 h, (iii) 8 h, (iv) 12hและ (v) 24h และผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชันที่ 300°C-2hในบรรยากาศออกซิเจน 55

4.2 แสดง (A) FT-IR spectrum และ (B) กราฟเชิงปริมาตร (i) มูลม้าไม่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล, มูลม้าที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลที่เงื่อนไขที่แตกต่างกัน 180 °C เป็นเวลา (ii) 4h, (iii) 8h} (iv) 12h และ (v) 24h และผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชันที่ 300°C-2hในบรรยากาศออกซิเจน 56

4.3 แสดง (A) FT-IR spectrum และ (B) กราฟเชิงปริมารตร (i) มูลม้าไม่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล, มูลม้าที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลที่เงื่อนไขที่แตกต่างกัน 200 °C เป็นเวลา (ii) 4h, (iii) 8h, (iv) 12hและ (v) 24h และทำปฏิกิริยาคาร์บอนไนเซชั่น 300 °C-2h ในบรรยากาศออกซิเจน 57

4.4 รูปที่4.4 แสดงภาพ SEM (กำลังขยาย 1000X) ของมูลม้าที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลที่อุณหภูมิ 160°C ที่เวลาแตกต่างกัน(A) 4h, (B) 8h, (C) 12h และ (E) 24h และผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชันที่300°C 2hในบรรยากาศออกซิเจน 58

4.5 แสดงภาพ SEM (กำลังขยาย 1000X) ของมูลม้าที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลที่อุณหภูมิ 180°C ที่เวลาแตกต่างกัน (A) 4 h, (B) 8 h, (C) 12 h และ (E) 24h และผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชันที่ 300°C-2h ในบรรยากาศออกซิเจน 59

4.6 รูปที่4.6 แสดงภาพ SEM (กำลังขยาย 1000X) ของมูลม้าที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลที่อุณหภูมิ 200°C ที่เวลาแตกต่างกัน (A) 4 h, (B) 8 h, (C) 12 h และ (E) 24 h และผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชันที่ 300°C-2h ในบรรยากาศออกซิเจน 60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

4.7แสดง (A) FT-IR spectrum และ (B) กราฟเชิงปริมาตร (i) มูลม้าไม่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล, มูลม้าที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลที่เงื่อนไขที่แตกต่างกัน 200 °C เป็นเวลา (ii) 24 h, (iii) 30 h, (iv) 36 h, (iv) 42 h, (iv) 48 h, (iv) 60 h และ (viii) 72 h และทำปฏิกิริยาคาร์บอนไนเซชั่น 300 °C 2 h ในบรรยากาศอกซิเจน 62

4.8 แสดงภาพ SEM (กำลังขยาย 1000X) (A) ของมูลม้าที่ไม่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลและมูลม้าที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลที่อุณหภูมิ 200°C ที่เวลาแตกต่างกัน (B) 24 h, (C)30 h, (D) 36 h, (E) 42 h, (F) 48 h, (G) 60 h และ (H) 72 ผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชันที่ 300°C 2h ในบรรยากาศออกซิเจน.. 64

4.9 แสดงกราฟ TGA ของมูลม้าที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลที่อุณหภูมิ 200°C 24 h และผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชันที่ 300°C-2h ในบรรยากาศออกซิเจน 66

4.10 แสดง (A) FT-IR spectrum และ (B) กราฟเชิงปริมาตร (i) มูลม้าไม่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล, มูลม้าที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล, (ii) ที่อุณหภูมิ 200°C-24h,(iii) เติม HCl 1 wt%, (iv) HCl 3 wt%, (v) HCl 5 wt% และผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชันที่ 300°C-2h ในบรรยากาศออกซิเจน.. 67

4.11 แสดง (A) FT-IR spectrum และ (B) กราฟเชิงปริมาตร (i) มูลม้าไม่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล, มูลม้าที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล, (ii) ที่อุณหภูมิ 200°C-24h , (iii) เติม H_2SO_4 1 wt%, (iv) H_2SO_4 3 wt%, (v) H_2SO_4 5 wt% และผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชั่นที่ 300°C-2h ในบรรยากาศออกซิเจน.. 68

4.12 แสดง (A) FT-IR spectrum และ (B) กราฟเชิงปริมาตร (i) มูลม้าไม่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล, มูลม้าที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล, (ii) ที่อุณหภูมิ 200°C 24 h, (iii) H_3PO_4 1 wt%, (iv) H_3PO_4 3 wt%, (v) H_3PO_4 5 wt% และผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชั่นที่ 300°C-2h ในบรรยากาศออกซิเจน.. 69

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

4.13 (A) FT-IR spectrum และ (B) กราฟเชิงปริมาตร (i) มูลม้าไม่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล, มูลม้าที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล, (ii) ที่อุณหภูมิ 200°C-24h, (iii) HNO_3 1 wt%, (iv) HNO_3 3 wt%, (v) HNO_3 5 wt% และผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชั่นที่ 300°C-2 h ในบรรยากาศออกซิเจน 70

4.14 แสดง (A) FT-IR spectrum และ (B) กราฟเชิงปริมาตร (i) มูลม้าไม่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล, มูลม้าที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล, (ii) ที่อุณหภูมิ 200°C-24h, (iii) HCl 5 wt%, (iv) H_2SO_4 5 wt%, (v) H_3PO_4 5 wt%, (vi) NHO_3 5 wt% และผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชันที่ 300°C-2h ในบรรยากาศ ออกซิเจน................. 71

4.15แสดงภาพSEM (กำลังขยาย1000X) มูลม้าที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลที่อุณหภูมิ 200°C-24hเติมตัวเร่งปฏิกิริยา (A) HCl 1 wt%, (B) HCl 3 wt%, (C) HCl 5 wt%, (D) H_2SO_4 1 wt%, (E) H_2SO_4 3 wt%, (F) H_2SO_4 5 wt%. และผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชันที่ 300°C-2h ในบรรยากาศออกซิเจน.. 73

4.16 แสดงภาพ SEM (กำลังขยาย1000X) มูลม้าที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลที่อุณหภูมิ 200°C-24h เติมตัวเร่งปฏิกิริยา (A) H_3PO_4 1 wt%, (B) H_3PO_4 3 wt%, (C) H_3PO_4 5 wt%, (กำลังขยาย300X) (D) HNO_3 1 wt%, (E) HNO_3 3 wt%, (F) HNO_3 5 wt%. และผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชั่นที่ 300°C 2 h ในบรรยากาศ ออกซิเจน................. 74

4.17 4.17 แสดงกราฟ TGA ของมูลม้าที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลที่อุณหภูมิ 200°C-24h และเติมตัวเร่งปฏิกิริยา HCl 5 wt%และผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชันที่ 300°C-2h ในบรรยากาศ ออกซิเจน 75

4.18 แสดง(A)กราฟFT-IRและ(B)กราฟเชิงปริมาตร (i) มูลม้าไม่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล, มูลม้าที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล, (ii) ที่อุณหภูมิ 200°C 24 h, (iii) KOH 1 wt%, (iv) KOH 3 wt%, (v) KOH 5 wt% และผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชันที่ 300°C-2h ในบรรยากาศ ออกซิเจน 76

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

4.19 แสดง (A) FT-IR spectrum และ (B) กราฟเชิงปริมาตร (i) มูลม้าไม่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล, มูลม้าที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล, (ii) ที่อุณหภูมิ 200°C-24h, (iii) NaOH 1 wt%, (iv) NaOH 3 wt%, (v) NaOH 5 wt% และผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชั่นที่ 300°C-2h ในบรรยากาศ ออกซิเจน 77

4.20 แสดง (A) FT-IR spectrum และ (B) กราฟเชิงปริมาตร (i) มูลม้าไม่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล, มูลม้าที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล, (ii) ที่อุณหภูมิ 200°C-24 h, (iii) $Ca(OH)_2$ 1 wt%, (iv) $Ca(OH)_2$ 3 wt%, (v) $Ca(OH)_2$ 5 wt% และผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชั่นที่ 300°C-2h ในบรรยากาศ ออกซิเจน 78

4.21 แสดง (A) FT-IR spectrum และ (B) กราฟเชิงปริมาตร (i) มูลม้าไม่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล, มูลม้าที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล, (ii) ที่อุณหภูมิ 200°C-24h, (iii) NH_3 1 wt%, (iv) NH_3 3 wt%, (v) NH_3 5 wt% และผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชันที่ 300°C-2h ในบรรยากาศออกซิเจน.. 79

4.22 แสดง (A) FT-IR spectrum และ (B) กราฟเชิงปริมาตร (i) มูลม้าไม่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล, มูลม้าที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล, (ii) ที่อุณหภูมิ 200°C-24h, (iii) KOH 5 wt%, (iv) NaOH 5 wt%, (v)$Ca(OH)_2$ 5 wt%,, (vi) NH_3 5 wt% และผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชั่นที่ 300°C-2h ในบรรยากาศออกซิเจน.................. 80

4.23 แสดงภาพ SEM (กำลังขยาย1000X) มูลม้าที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลที่อุณหภูมิ 200°C-24h เติมตัวเร่งปฏิกิริยา (A) KOH 1 wt%, (B) KOH 3 wt%, (C) KOH 5 wt%, (D) NaOH 1 wt%, (E) NaOH 3 wt%, (F) NaOH 5 wt%. และผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชั่นที่ 300°C-2h ในบรรยากาศออกซิเจน.. 82

4.24 แสดงภาพSEM (กำลังขยาย1000X) มูลม้าที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลที่อุณหภูมิ 200°C-24h เติมตัวเร่งปฏิกิริยา (A) $Ca(OH)_2$ 1 wt%, (B) $Ca(OH)_2$ 3 wt%, (C) $Ca(OH)_2$ 5 wt%, (D) NH_3 1 wt%, (E) NH_3 3 wt%, (F) NH_3 5 wt%. และผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชันที่ 300°C-2h ในบรรยากาศออกซิเจน 83

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

4.25แสดงกราฟ TGA ของมูลที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลที่อุณหภูมิ 200°C-24h โดยเติมตัวเร่งปฏิกิริยา KOH 5 wt% และผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชันที่ 300°C-2h ในบรรยากาศออกซิเจน 84

4.26 แสดง (A) FT-IR spectrum และ (B) กราฟเชิงปริมาตร (I) มูลม้าไม่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล, มูลม้าที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล, (ii) ที่อุณหภูมิ 200°C-24h, (iii) CH_3OH 1 wt%, (iv) CH_3OH 3 wt%, (v) CH_3OH 5 wt% และผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชั่นที่300°C-2h ในบรรยากาศออกซิเจน 85

4.27 แสดง (A) FT-IR spectrum และ (B) กราฟเชิงปริมาตร (i) มูลม้าไม่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล, มูลม้าที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล, (ii) ที่อุณหภูมิ 200°C-24h, (iii) C_2H_5OH 1 wt%, (iv) C_2H_5OH 3 wt%, (v) C_2H_5OH 5 wt% และผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชั่นที่ 300°C-2h ในบรรยากาศออกซิเจน 86

4.28 แสดง (A) FT-IR spectrum และ (B) กราฟเชิงปริมาตร (i) มูลม้าที่ไม่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล, มูลม้าที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล, (ii) ที่อุณหภูมิ 200°C-24h, (iii) C_4H_9OH 1 wt%, (iv) C_4H_9OH 3 wt%, (v) C_4H_9OH 5 wt% และผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชันที่ 300°C-2h ในบรรยากาศออกซิเจน 87

4.29 (A) FT-IR spectrum และ (B) กราฟเชิงปริมาตร (i) มูลม้าที่ไม่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล, มูลม้าที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล, (ii) ที่อุณหภูมิ 200°C-24h, (iii) $(CH_3)_2CHOH$ 1 wt%, (iv)) $(CH_3)_2CHOH$ 3 wt%, (v) $(CH_3)_2CHOH$ 5 wt% และผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชันที่ 300°C-2h ในบรรยากาศ ออกซิเจน 88

4.30แสดง (A) FT-IR spectrum และ (B) กราฟเชิงปริมาตร (i) มูลม้าที่ไม่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล, มูลม้าที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล, (ii) ที่อุณหภูมิ 200°C-24h, (iii) CH_3OH 5 wt%, (iv) C_2H_5OH 5 wt%, (v) C_4H_9OH 5 wt%, (vi) $(CH_3)_2CHOH$ 5 wt% และผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชั่นที่ 300°C-2h ในบรรยากาศ ออกซิเจน.......... 89

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

4.31 แสดงภาพ SEM (กำลังขยาย1000X) มูลม้าที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลที่อุณหภูมิ 200°C 24 h เติมตัวเร่งปฏิกิริยา (A) CH_3OH 1 wt%, (B) CH_3OH 3 wt%, (C) CH_3OH 5 wt%, (D) C_2H_5OH 1 wt%, (E) C_2H_5OH 3 wt%, (F) C_2H_5OH 5 wt%. และผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชั่นที่ 300°C-2h ในบรรยากาศ ออกซิเจน 91

4.32 แสดงภาพ SEM (กำลังขยาย1000X) มูลม้าที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลที่อุณหภูมิ 200°C 24 h เติมตัวเร่งปฏิกิริยา (A) C_4H_9OH 1 wt%, (B) C_4H_9OH 3 wt%, (C) C_4H_9OH 5 wt%,(D) $(CH_3)_2CHOH$ 1 wt%, (E) $(CH_3)_2CHOH$ 3 wt%, (F) $(CH_3)_2CHOH$ 5 wt%. และผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชั่นที่ 300°C-h ในบรรยากาศ ออกซิเจน 92

4.33รูปที่ 4.31แสดงกราฟTGAของมูลของมูลม้าที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล และมูลม้าที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลที่อุณหภูมิ200°C 24hเติมตัวเร่งปฏิกิริยา $(CH_3)_2CHOH$ 5 wt%และผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชันที่300°C-2h ในบรรยากาศ ออกซิเจน 93

4.34 แสดง (A) FT-IR spectrum และ (B) กราฟเชิงปริมาตร (i) มูลม้าที่ไม่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล, มูลม้าที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล, (ii) ที่อุณหภูมิ 200°C-24h , (iii) C_3H_6 O 1 wt%, (iv) C_3H_6 O 3 wt%, (v) C_3H_6 O 5 wt% และผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชั่นที่ 300°C-2h ในบรรยากาศ ออกซิเจน 94

4.35 แสดง (A) FT-IR spectrum และ (B) กราฟเชิงปริมาตร (i) มูลม้าที่ไม่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล, มูลม้าที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล, (ii) ที่อุณหภูมิ 200°C-24h, (iii) C_6H_5-CH_3 1 wt%, (iv) C_6H_5-CH_3 3 wt%, (v) C_6H_5-CH_3 5 wt% และผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชั่นที่ 300°C-2h ในบรรยากาศ ออกซิเจน 95

4.36 แสดง (A) FT-IR spectrum และ (B) กราฟเชิงปริมาตร (i) มูลม้าที่ไม่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล, มูลม้าที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล, (ii) ที่อุณหภูมิ 200°C 24 h, (iii) C_6H_{14} 1 wt%, (iv) C_6H_{14} 3 wt%, (v) C_6H_{14} 5 wt% และผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชั่นที่ 300°C 2 h ในบรรยากาศ ออกซิเจน 96

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

4.37 แสดง (A) FT-IR spectrum และ (B) กราฟเชิงปริมาตร (i) มูลม้าที่ไม่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล, มูลม้าที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล, (ii) ที่อุณหภูมิ 200°C-24h, (iii) C_6H_{12} 1 wt%, (iv) C_6H_{12} 3 wt%, (v) C_6H_{12} 5 wt% และผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชันที่ 300°C-2h ในบรรยากาศ ออกซิเจน 97

4.38 แสดง (A) FT-IR spectrum และ (B) กราฟเชิงปริมาตร (i) มูลม้าที่ไม่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล, มูลม้าที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล, (ii) ที่อุณหภูมิ 200°C 24 h, (iii) C_3H_6 O 5 wt%, (iv) C_6H_5-CH_3 5 wt%, (v) C_6H_{14} 5 wt%, (vi) C_6H_{12}5 wt% และผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชั่นที่300°C-2h ในบรรยากาศ ออกซิเจน.................. 98

4.39 แสดงภาพSEM (กำลังขยาย1000X) มูลม้าที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลที่อุณหภูมิ 200°C 24 h เติมตัวเร่งปฏิกิริยา (A) C_3H_6 O 1 wt%, (B) C_3H_6 O 3 wt%, (C) C_3H_6 O 5 wt%, (D) C_6H_5-$CH_3$1 wt%, (E) C_6H_5-CH_3 3 wt%, (F) C_6H_5-CH_3 5 wt% และผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชั่นที่ 300°C-2h ในบรรยากาศ ออกซิเจน................ 100

4.40 แสดงภาพSEM (กำลังขยาย1000X) มูลม้าที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลที่อุณหภูมิ 200°C 24 h เติมตัวเร่งปฏิกิริยา (A) C_6H_{14} 1 wt%, (B) C_6H_{14} 3 wt%, (C) C_6H_{14} 5 wt%, (D) C_6H_{12} 1 wt%, (E) C_6H_{12} 3 wt%, (F) C_6H_{12} 5 wt%. และผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชั่นที่300°C 2 h ในบรรยากาศ ออกซิเจน................ 101

4.41แสดงกราฟ TGA ของมูลม้าที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลที่อุณหภูมิ 200°C -24 h เติมตัวเร่งปฏิกิริยา Hexane 5 wt% และผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชั่นที่ 300°C-2 h ในบรรยากาศ ออกซิเจน.. 102

4.42 แสดง (A) FT-IR spectrum และ (B) กราฟเชิงปริมาตร (i) มูลม้าที่ไม่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล, มูลม้าที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลที่เงื่อนไขที่แตกต่างกัน 200 °C เป็นเวลา (ii) 2 h, (iii) 36 h, (iv) และ (v) 48 h และผ่านปฏิกิริยาคาร์บอนไนเซชั่น 300 °C-2h ในบรรยากาศ ออกซิเจน 103

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.43 แสดง(A) FT –IR spectrum และ (B) กราฟเชิงปริมาตร (i) มูลม้าที่ไม่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล, มูลม้าที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลที่เงื่อนไขที่แตกต่างกัน 200 °C เป็นเวลา(ii)2 h, (iii) 36 h, (iv)42h และ (v) 48 h และผ่านปฏิกิริยาคาร์บอนไนเซชั่น 400 °C-2h ในบรรยากาศ ออกซิเจน 104

4.44แสดง (A) FT –IR spectrum และ (B) กราฟเชิงปริมาตร (i) มูลม้าที่ไม่ผ่ากระบวนการไฮโดรเทอร์มัล, มูลม้าที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลที่เงื่อนไขที่แตกต่างกัน 200 °C เป็นเวลา (ii) 2h, (iii) 36 h (iv)42h และ (v) 48 hและผ่านปฏิกิริยาคาร์บอนไนเซชั่น 500 °C 2 h ในบรรยากาศ ออกซิเจน 105

4.45 แสดงภาพ SEM (กำลังขยาย 1000X) ของมูลม้าที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลที่อุณหภูมิ200°C ที่เวลาแตกต่างกัน (A) 24 h, (B) 36 h, (C) 48 h และ (E) 24 hและทำปฏิกิริยาคาร์บอนไนเซชั่น 400 °C 200 h, (D) 24 h, (E) 36 h, (F) 48 h และ (E) 24 h และผ่านปฏิกิริยาคาร์บอนไนเซชั่น 500 °C-2 h ในบรรยากาศออกซิเจน...... 107

4.46 แสดง (A) FT –IR spectrum และ (B) กราฟเชิงปริมาตร (i) มูลม้าที่ไม่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล, มูลม้าที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลที่ 200 °C 2 h และทำปฏิกิริยาคาร์บอนไนเซชั่นที่ (ii) 300 °C, (iii) 400 °C, (iv) 500 °C, (v) 600 °C, (vi) 700 °C, (vii) 800 °C, (vi) 900 °C เป็นเวลา 2 h ในบรรยากาศ N_2...... 109

4.47 แสดงภาพ SEM (กำลังขยาย 500X) (A) มูลม้าที่ไม่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล, มูลม้าที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลที่ 200 °C 2 h และทำปฏิกิริยาคาร์บอนไนเซชั่นที่ (B) 300 °C, (C) 400 °C, (D) 500 °C, (E) 600 °C, (F) 700 °C, (G) 800 °C, (H) 900 °Cเป็นเวลา 2 h ในบรรยากาศ N_2...... 110

4.48 แสดงกราฟ TGA ของมูลม้าที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลที่อุณหภูมิ 200°C 24 h และผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชั่นที่ (A) 300°C (B) 500°C (C) 700°C (D) 900°C เป็นเวลา 2 h ในบรรยากาศ N_2...... 112

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

4.49 กราฟ BET ของมูลม้าที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลที่อุณหภูมิ(A)200°C-24h ที่เติมตัวเร่งปฏิกิริยา(B) HCl 5 wt%, (C) KOH 5 wt%, (D) $(CH_3)_2CHOH$ 5 wt%, (E) C_6H_{14} 5wt% ผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชันที่300°C-2ในบรรยากาศออกซิเจน และ(F)ผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชันที่900°C-2 ในบรรยากาศ ไนโตรเจน 114

4.50 ภาพการทดสอบการดูดซับ (i) สีย้อมเมทิลีนบลูโดยใช้มูลม้าที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลตัวดูดซับ (ii) 160°C-4h, (iii) 160°C-8h, (iv) 160°C-12h, (v) 160°C-24h และคาร์บอนไนเซชั่นที่ 300°C-2h ในบรรยากาศ ออกซิเจน 117

4.51 ภาพการทดสอบการดูดซับ (i) สีย้อมเมทิลีนบลูโดยใช้มูลม้าที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลเป็นตัวดูดซับ (ii) 180°C-4h, (iii) 180°C-8h, (iv) 180°C-12h, (v) 180°C-24h และคาร์บอนไนเซชั่นที่ 300°C-2h ในบรรยากาศ ออกซิเจน 117

4.52 ภาพการทดสอบการดูดซับ (i) สีย้อมเมทิลีนบลูโดยใช้มูลม้าที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลเป็นตัวดูดซับ (ii) 200°C-4h, (iii) 200°C-8h, (iv) 200°C-12h, (v) 200°C-24h และคาร์บอนไนเซชั่นที่ 300°C-2h ในบรรยากาศ ออกซิเจน 119

4.53 ภาพการทดสอบการดูดซับ (i) สีย้อมเมทิลีนบลูโดยใช้มูลม้าที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลเป็นตัวดูดซับ (ii) 200°C-30h, (iii) 200°C-36h, (iv) 200°C-42h, (v) 200°C-48h, (vi) 200°C-60h, (vii) 200°C-72h และคาร์บอนไนเซชันที่ 300°C-2hในบรรยากาศ ออกซิเจน 119

4.54 ภาพการทดสอบการดูดซับ (i) สีย้อมเมทิลีนบลูโดยใช้มูลม้าที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลเป็นตัวดูดซับที่เติมตัวเร่งปฏิกิริยา (ii) HCl 1 wt%, (iii) HCl 3 wt%, (iv) HCl 5 wt% และคาร์บอนไนเซชั่นที่300°C 2h ในบรรยากาศ ออกซิเจน 120

4.55 ภาพการทดสอบการดูดซับ (i) สีย้อมเมทิลีนบลูโดยใช้มูลม้าที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลเป็นตัวดูดซับเติมตัวเร่งปฏิกิริยา (ii) H_2SO_4 1 wt%, (iii) H_2SO_4 3 wt%, (iv) H_2SO_4 5 wt% และคาร์บอนไนเซชั่นที่ 300°C-2h ในบรรยากาศ ออกซิเจน 120

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

4.56 ภาพการทดสอบการดูดซับ (i) สีย้อมเมทิลีนบลูโดยใช้มูลม้าที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลเป็นตัวดูดซับเติมตัวเร่งปฏิกิริยา (ii) H_3PO_4 1 wt%, (iii) H_3PO_4 3 wt%, (iv) H_3PO_4 5 wt% และคาร์บอนไนเซชั่นที่ 300°C-2h ในบรรยากาศ ออกซิเจน 121

4.57 ภาพการทดสอบการดูดซับ (i) สีย้อมเมทิลีนบลูโดยใช้มูลม้าที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลเป็นตัวดูดซับเติมตัวเร่งปฏิกิริยา (ii) HNO_3 1 wt%, (iii) HNO_3 3 wt%, (iv) HNO_3 5 wt% และคาร์บอนไนเซชั่นที่ 300°C-2h ในบรรยากาศ ออกซิเจน 121

4.58 ภาพการทดสอบการดูดซับ (i) สีย้อมเมทิลีนบลูโดยใช้มูลม้าที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลเป็นตัวดูดซับที่เติมตัวเร่งปฏิกิริยา (ii) KOH 1 wt%, (iii) KOH 3 wt%, (iv) KOH 5 wt% และคาร์บอนไนเซชั่นที่300°C-2h ในบรรยากาศ ออกซิเจน 122

4.59 ภาพการทดสอบการดูดซับ (i) สีย้อมเมทิลีนบลูโดยใช้มูลม้าที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลเป็นตัวดูดซับเติมตัวเร่งปฏิกิริยา (ii) NaOH 1 wt%, (iii) NaOH 3 wt%, (iv) NaOH 5 wt%และคาร์บอนไนเซชั่นที่ 300°C-2h ในบรรยากาศ ออกซิเจน............ 122

4.60 ภาพการทดสอบการดูดซับ (i) สีย้อมเมทิลีนบลูโดยใช้มูลม้าที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลเป็นตัวดูดซับเติมตัวเร่งปฏิกิริยา (ii) $Ca(OH)_2$ 1 wt%, (iii) $Ca(OH)_2$ 3 wt%, (iv) $Ca(OH)_2$ 5 wt% และคาร์บอนไนเซชั่นที่ 300°C-2h ในบรรยากาศ ออกซิเจน.. 123

4.61 ภาพการทดสอบการดูดซับ (i) สีย้อมเมทิลีนบลูโดยใช้มูลม้าที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล เป็นตัวดูดซับเติมตัวเร่งปฏิกิริยา (ii) NH_3 1 wt%, (iii) NH_3 3 wt%, (iv) NH_3 5 wt% และคาร์บอน ไนเซชั่นที่300°C-2h ในบรรยากาศ ออกซิเจน 123

4.62 ภาพการทดสอบการดูดซับ (i) สีย้อมเมทิลีนบลูโดยใช้มูลม้าที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลเป็นตัวดูดซับที่เติมตัวเร่งปฏิกิริยา (ii) CH_3OH 1 wt%, (iii) CH_3OH 3 wt%, (iv) CH_3OH 5 wt% และคาร์บอนไนเซชั่นที่300°C-2h ในบรรยากาศ ออกซิเจน 124

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

4.63 ภาพการทดสอบการดูดซับ (i) สีย้อมเมทิลีนบลูโดยใช้มูลม้าที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลเป็นตัวดูดซับเติมตัวเร่งปฏิกิริยา (ii) C_2H_5OH 1 wt%, (iii) C_2H_5OH 3 wt% , (iv) C_2H_5OH 5 wt% และคาร์บอนไนเซชั่นที่300°C-2h ในบรรยากาศออกซิเจน.......... 124

4.64 ภาพการทดสอบการดูดซับ (i) สีย้อมเมทิลีนบลูโดยใช้มูลม้าที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลเป็นตัวดูดซับเติมตัวเร่งปฏิกิริยา (ii) C_4H_9OH 1 wt%, (iii) C_4H_9OH 3 wt%, (iv) C_4H_9OH 5 wt% และคาร์บอนไนเซชั่นที่300°C 2 h ในบรรยากาศออกซิเจน........... 125

4.65 ภาพการทดสอบการดูดซับ (i) สีย้อมเมทิลีนบลูโดยใช้มูลม้าที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลเป็นตัวดูดซับเติมตัวเร่งปฏิกิริยา (ii) $(CH_3)_2CHOH$ 1 wt%, (iii) $(CH_3)_2CHOH$ 3 wt%,(iv) $(CH_3)_2CHOH$ 5 wt% และคาร์บอนไนเซชั่นที่ 300°C 2 h ในบรรยากาศ ออกซิเจน 125

4.66 ภาพการทดสอบการดูดซับ (i) สีย้อมเมทิลีนบลูโดยใช้มูลม้าที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลเป็นตัวดูดซับที่เติมตัวเร่งปฏิกิริยา (ii) C_3H_6O 1 wt%, (iii) C_3H_6O 3 wt%, (iv) C_3H_6O 5 wt% และคาร์บอนไนเซชั่นที่ 300°C 2 h ในบรรยากาศ ออกซิเจน 126

4.67 ภาพการทดสอบการดูดซับ (i) สีย้อมเมทิลีนบลูโดยใช้มูลม้าที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลเป็นตัวดูดซับเติมตัวเร่งปฏิกิริยา (ii) C_3H_5-CH_3 1 wt%, (iii) C_3H_5-CH_3 3 wt%, (iv) C_3H_5-CH_3 5 wt% และคาร์บอนไนเซชั่นที่ 300°C-2h ในบรรยากาศออกซิเจน 126

4.68ภาพการทดสอบการดูดซับ (i) สีย้อมเมทิลีนบลูโดยใช้มูลม้าที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลเป็นตัวดูดซับเติมตัวเร่งปฏิกิริยา (ii) C_6H_{14} 1 wt%, (iii) C_6H_{14} 3 wt%, (iv) C_6H_{14} 5 wt% และคาร์บอนไนเซชั่นที่ 300°C-2h ในบรรยากาศออกซิเจน.. 127

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

4.69 ภาพการทดสอบการดูดซับ (i) สีย้อมเมทิลีนบลูโดยใช้มูลม้าที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลเป็นตัวดูดซับเติมตัวเร่งปฏิกิริยา (ii) C_6H_{12} 1 wt%, (iii) C_6H_{12} 3 wt%, (iv) C_6H_{12} 5 wt% และคาร์บอนไนเซชั่นที่ 300°C 2 h ในบรรยากาศออกซิเจน 127

4.70 ภาพการทดสอบการดูดซับ (i) สีย้อมเมทิลีนบลูโดยใช้มูลม้าที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลเป็นตัวดูดซับเติมตัวเร่งปฏิกิริยา (ii) 200°C-24h, (iii) 200°C-36h, (iv) 200°C-48h และคาร์บอนไนเซชั่นที่400°C-2h ในบรรยากาศออกซิเจน 129

4.71 ภาพการทดสอบการดูดซับ (i) สีย้อมเมทิลีนบลูโดยใช้มูลม้าที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลเป็นตัวดูดซับเติมตัวเร่งปฏิกิริยา (ii) 200°C-24h, (iii) 200°C-36h, (iv) 200°C-48h และคาร์บอนไนเซชั่นที่500°C-2h ในบรรยากาศออกซิเจน 129

4.72 ภาพการทดสอบการดูดซับ (i) สีย้อมเมทิลีนบลูโดยใช้มูลม้าที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลเป็นตัวดูดซับที่ 200°C-24h และคาร์บอนไนเซชั่นที่ (ii) 300°C 2 h, (iii) 400°C-2h, (iv) 500°C-2h, (v) 600°C-2h, (vi) 700°C-2h, (vii) 800°C-2h, (viii) 900°C-2 h ในบรรยากาศ N_2 130

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำย่อและสัญลักษณ์

%	ร้อยละ
% wt	ร้อยละน้ำหนักโดยน้ำหนัก
ml	มิลลิลิตร
h	ชั่วโมง
℃	องศาเซลเซียส
CC/min	ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที
cm^{-1}	เลขคลื่น
μm	ไมโครเมตร
nm	นาโนเมตร
$m2g^{-1}$	ตารางเมตรต่อกรัม
$cm3g^{-1}$	ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม
MJ/kg	เมกะจูลต่อกิโลกรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรม มีการเพาะปลูกพืช, การประมง และการเลี้ยงปศุสัตว์ เกิดผลผลิตทางการเกษตรมากมาย ในขณะเดียวกันก็จะเกิดวัสดุที่เหลือใช้จากกระบวนการผลิต หรือไม่ได้ถูกนำมาใช้ประโยชน์อยู่ เราเรียกวัสดุเหลือใช้เหล่านี้ว่า “ชีวมวล”

ชีวมวลเป็นสารอินทรีย์ต่างๆในธรรมชาติ ที่สามารถกักเก็บพลังงาน และนำมาใช้ผลิตพลังงานได้ โครงสร้างของชีวมวลจะประกอบไปด้วย เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส ลิกนิน แป้ง โปรตีน เป็นองค์ประกอบหลัก [1-4] เช่น กากชานอ้อย เปลือกผลไม้ และมูลของสัตว์ ซึ่งมูลของสัตว์จะมีปริมาณที่เหลือทิ้ง และ ส่งกลิ่นเหม็นมากกว่า ชีวมวลตัวอื่น

มูลของสัตว์ จะมีหญ้าเป็นองค์ประกอบหลัก เนื่องจากสัตว์ในฟามส่วนใหญ่กินหญ้าเป็นอาหาร เราเลือกใช้มูลม้าเพราะว่าเมื่อเทียบกับมูลของสัตว์อื่น เช่น วัว กับ ควาย ซึ่งมีระบบการย่อยที่ละเอียดจนเกินไป ทำให้เกิดปริมาณคาร์บอนน้อย ส่วนช้างกินอาหารหลายชนิด เช่น กล้วย, ใบไม้ และ อ้อย แต่ม้ากินหญ้าเพียงอย่างเดียว

มูลม้า มีลักษณะเป็นของแข็ง สีน้ำตาล จับกันเป็นก้อนแบบหลวมๆ ไม่ค่อยได้ถูกนำไปใช้ประโยชน์อะไร เมื่อปล่อยทิ้งไว้จะดูไม่สะอาด เกิดกลิ่นเหม็น เป็นที่อยู่ของแมลงมีพิษที่เป็นอันตรายต่างๆ สร้างความรำคาญให้แก่ผู้พบเห็น และเป็นอันตรายต่อการทำงานได้ ต้องเสีย เวลา และค่าใช้จ่ายในการกำจัด ซึ่งเป็นการเพิ่มต้นทุนโดยไม่จำเป็นการกำจัดวัสดุเหลือใช้ทำได้หลายวิธีเช่น การใช้สารเคมี การฝังกลบ การเผา แต่เราเลือกที่จะนำมันมาใช้ให้เกิดประโยชน์ได้ หญ้าที่ผ่านกระบวนการย่อยของม้าแล้วนั้นเมื่อนำไปตรวจวัดวิเคราะห์โครงสร้างด้วย NREL method [5] พบว่า ลิกนิน ลดลงไปจากเดิมมาก ซึ่งลิกนินนั้นจะไม่สามารถย่อยได้ในร่างกายมนุษย์ มีโครงสร้างที่แข็งแรงและซับซ้อนมาก อีกทั้งยังเป็นตัวขัดขวางการฟอร์มตัวเป็นคาร์บอน การย่อยสลายมูลม้า ทำได้หลายวิธี เช่น การหมัก (fermentation), การทำแก๊สซิฟิเคชัน (gasification) และ ไพโรไลซิส (Pyrolysis) แต่เราเลือกกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลคาร์บอนไนเซชันก็เพราะว่าเป็นกระบวนการที่ง่าย, ใช้พลังงานต่ำ, ได้ yield สูง และมีการสลายตัวของโครงสร้างต่ำเมื่อเทียบกับวิธีอื่นๆ

กระบวนการไฮโดรเทอร์มัลคาร์บอนไนเซชันมีกลไกคือ การให้โมเลกุลของน้ำ ความร้อน และความดัน เข้าไปทำลายพันธะของ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของชีวมวล ทำให้มีความไม่ชอบน้ำมากขึ้น และโมเลกุลของน้ำจะเข้าไปเปิดรูพรุน ทำให้พื้นที่ผิวมากขึ้น ส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้นด้วย ทำได้โดยให้ความร้อนกับชีวมวลที่อยู่ในเตาปฏิกรณ์ใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สภาพปิด ภายใต้อุณหภูมิต่างๆ (350 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ทำโดย Wei-Hong Yan) (290 - 360 และ 390 - 500 องศาเซลเซียส ที่ความดัน 24 Mpa ทำโดย Raisa Korzh) โดยงานเราจะศึกษาอุณหภูมิ และเวลาในการทำปฏิกิริยาของกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลคาร์บอนไนเซชัน ที่มีผลต่อสมบัติต่างๆของคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้ โดยดูโครงสร้าง สัณฐาน และลักษณะ ของพื้นผิวด้วยเครื่อง (Scanning Electron Microscope; SEM) ดูหมู่ฟังชันต่างๆด้วย เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier transform infrared spectroscopy; FTIR) ศึกษาวิเคราะห์สมบัติเชิงความร้อนของวัตถุต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิด้วยเทอร์โมกราวิเมติกส์ (Thermogravimetric Analysis) ศึกษาความเป็นรูพรุน กับ พื้นที่ผิวจำเพาะ ด้วยเครื่องวิเคราะห์พื้นผิว (apparatus adsorption) โดย BET method นำมาประยุกต์ใช้โดยดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลู (methylend blue) และนำไปคำนวณหาความเข้มข้นที่เหลือจากการดูดซับด้วยเครื่อง ยูวีวิซิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV–Vis spectrophotometer)

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1.เพื่อศึกษาอุณหภูมิและเวลาที่มีผลต่อการสังเคราะห์คาร์บอนจากมูลม้าด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล

2.เพื่อศึกษาอุณหภูมิที่มีผลต่อการสังเคราะห์คาร์บอนจากมูลม้าด้วยกระบวนการคาร์บอนไนเซชัน

3.เพื่อศึกษาชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ส่งผลต่อการสังเคราะห์คาร์บอนจากมูลม้าด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล

4.เพื่อศึกษาและพัฒนาความเป็นรูพรุนของคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้ไปประยุกต์ใช้เป็นฐานรองรับของตัวเร่งปฏิกิริยาได้อย่างมีประสิทธิภาพ

5.สามารถประยุกต์ใช้ดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูได้อย่างมีประสิทธิภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 แผนการดำเนินงานวิจัย

ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินงานวิจัย

กิจกรรม	เดือน								
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.
1. ศึกษาค้นคว้าข้อมูลงานวิจัยที่มีส่วนเกี่ยวข้องกับการนำขี้ม้ามาทำปฏิกิริยาไฮโดรเทอร์มัลคาร์บอนไนเซชัน									
2. การดำเนินการในงานวิจัย ศึกษาตัวแปรต่างๆ เช่นการปรับเปลี่ยนอุณหภูมิ เวลาในการทำปฏิกิริยา การเติมตัวเร่งปฏิกิริยาในการทำปฏิกิริยา ที่คาดมีผลต่อความเป็นรูพรุน ค่าพื้นที่ผิว และปริมาณคาร์บอน									
3. ทำการทดลองโดยการนำขี้ม้ามาผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลคาร์บอนไนเซชัน จากนั้นศึกษาผลผลจากปรับเปลี่ยนอุณหภูมิ เวลาในการทำปฏิกิริยา ปฏิกิริยา การเติมตัวเร่งปฏิกิริยาในการทำปฏิกิริยา ที่คาดมีผลต่อความเป็นรูพรุน ค่าพื้นที่ผิว และปริมาณคาร์บอน									
4. วิเคราะห์ขี้ม้าที่ผ่านกระบวนการไอโดรเทอร์มัลคาร์บอนไนเซชันด้วยเครื่องมือต่างๆ									
5 .นำขี้ม้าที่ผ่านกระบวนการไอโดรเทอร์มัลคาร์บอนไนเซชันทำการเจือโลหะ									
6. เขียนรายงาน									

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 สมมุติฐานงานวิจัย

ถ้าอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลคาร์บอนไนเซชันสูงขึ้น จะส่งผลต่อโครงสร้างของเส้นใยนาโนคาร์บอนทำให้พื้นที่ผิวเพิ่มมากขึ้น และถ้าเติมตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งมี กรด, เบส , แอลกอฮอล์ และตัวทำละลาย ลงไปจะได้เส้นใยนาโนคาร์บอนที่มีรูพรุน ค่าพื้นที่ผิว และความเป็นคาร์บอนเพิ่มสูงขึ้น ส่งผลให้การดูดซับดีขึ้นด้วย

1.5 ขอบเขตการดำเนินการ

งานวิจัยนี้จะจำกัดขอบเขตของงานในส่วนการวิจัยพัฒนาการทดลอง เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของ มูลม้าโดยกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลคาร์บอนไนเซชัน เงื่อนไขที่จะทำการทดลองเพื่อศึกษาอุณหภูมิและเวลาของกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลคาร์บอนไนเซชัน และผลของตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งมี กรด เบส แอลกอฮอล์ สารละลาย ที่มีผลต่อการทำเป็นฐานรองรับ สามารถพัฒนาความเป็นรูพรุนของมูลม้าที่สังเคราะห์ได้ไป ประยุกต์ใช้เป็นฐานรองรับของตัวเร่งปฏิกิริยาได้อย่างมีประสิทธิภาพ

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.สามารถสังเคราะห์เส้นใยนาโนคาร์บอนที่มีขนาดในระดับนาโนเมตร

2.สร้างคุณค่าและเพิ่มมูลค่าให้แก่ทรัพยากรธรรมชาติ

3.สามารถนำฐานรองรับของตัวเร่งปฏิกิริยาที่สังเคราะห์ได้ไปประยุกต์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

4.สร้างทางเลือกใหม่ให้กับนำชีวมวลที่เหลือใช้

5.ประยุกต์ใช้ดูดซับสีย้อมเมทิลินบลูได้อย่างมีประสิทธิภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่2
ทฤษฎีและหลักการ

2.1 มูลม้า

รูปที่ 2.1 แสดงลักษณะของมูลม้า

ชื่อภาษาไทย : มูลม้า

ชื่อภาษาอังกฤษ : Horse poop, Horse manure

2.1.1 ลักษณะของมูลม้า

มูลม้า ส่วนใหญ่เป็นของแข็งประกอบไปด้วยเศษของพืชซึ่งเป็นอาหารที่สัตว์กินเข้าไปแล้วไม่สามารถย่อยหรือนำไปใช้ประโยชน์ได้หมด จึงเหลือเป็นกากที่สัตว์ขับถ่ายออกมา โดยเศษอาหารเหล่านี้ได้ผ่านกระบวนการย่อยสลายไปบางส่วนแล้วในทางเดินอาหาร ดังนั้นส่วนที่เป็นมูลสัตว์จึงอุดมไปด้วยธาตุอาหารชนิดต่างๆ รวมทั้งสารอินทรีย์ที่ละลายน้ำได้หลายชนิด ซึ่งเมื่อรวมกันเข้าก็จะมีองค์ประกอบที่สามารถใช้เป็นธาตุอาหารที่สมบูรณ์ของพืชได้ ส่วนมูลสัตว์แต่ละชนิดจะมีธาตุอาหารชนิดใดมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับชนิดของอาหารที่สัตว์ชนิดนั้นกินเข้าไปเป็นปัจจัยสำคัญรวมทั้งปัจจัยอื่นๆได้แก่ ระบบการย่อยอาหารของสัตว์ วิธีการให้อาหารรวมทั้งการจัดการรวบรวมมูล การเก็บรักษา

2.1.2 การทำงานของระบบทางเดินอาหารของม้า

ระบบย่อยอาหารของม้าจะมีระบบคล้ายกับมนุษย์มีความซับซ้อนและละเอียดจะแตกต่างกับวัว ควายที่มี 4 กระเพาะและระบบย่อยอาหารมีความแตกต่างกันสิ้นเชิง การทำงานของระบบทางเดินอาหารของม้า 5 ประเภท [5] คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2.1 ปาก (Mouth)

ม้าเป็นสัตว์ที่ใช้ปากกินอาหารเหมือนสัตว์ประเภทอื่นๆ แต่ความแตกต่างของมันอยู่ที่วิธีการจับอาหาร เพราะม้าเป็นสัตว์ที่ใช้ริมฝีปากในการจับอาหารไม่ว่าจะเป็นหญ้า หรืออาหารเม็ด ฟันม้ามีประโยชน์สำหรับม้าคือใช้ตัดและบดเคี้ยวหญ้า และอาหารให้ละเอียดก่อนที่จะส่งลงไปยังกระเพาะอาหาร แต่สำหรับสัตว์แพทย์แล้วฟันม้าสามารถประเมินอายุม้าได้ด้วย ในทางสัตว์แพทย์จะมีการเรียกชื่อฟันด้วยระบบที่จำเพาะคือ ระบบไตรเดน (Triadan system) ซึ่งเป็นระบบที่ใช้กันอย่างแพร่หลายที่สุด แต่ในการสื่อสารกับเจ้าของม้า สัตว์แพทย์มักจะเรียกชื่อฟันตามชนิดของฟันที่เราคุ้นเคยได้แก่ ฟันตัด ฟันเขี้ยว และฟันกราม เพื่อให้ง่ายต่อการทำความเข้าใจ

ในการเลี้ยงม้าฟันม้าเป็นสิ่งหนึ่งที่เจ้าของม้าจะต้องให้ความสำคัญ เพราะเมื่อม้าอายุมากขึ้นฟันของม้าจะสึกเนื่องจากการเคี้ยว และฟันจะคมขึ้นถึงขั้นบาดกระพุ้งแก้ม และลิ้นได้ ซึ่งจะส่งผลให้ม้าไม่อยากกินอาหารเนื่องจากความเจ็บปวด อาจเคี้ยวหญ้าแล้วคายออกมา ม้าจะไม่ค่อยเชื่อฟังคำสั่งของคนขี่เนื่องจากการใส่บังเหียน และเหล็กปากจะทำให้ม้าเจ็บเนื่องจากฟันบาดกระพุ้งแก้ม และลิ้นด้วยเหตุนี้จึงควรให้สัตว์แพทย์ตรวจความคมของฟันม้า และตะไบฟันเพื่อลดความคมอย่างน้อยปีละ 2 ครั้ง

2.1.2.2 หลอดอาหาร (EsopHagus)

หลอดอาหารของม้าจะอยู่ด้านซ้ายของลำคอ มีความยาวตลอดลำคอของม้า มีหน้าที่ในการลำเลียงอาหารจากปากลงไปยังกระเพาะอาหาร โรคที่เกิดกับหลอดอาหารที่สามารถพบได้คืออาการหลอดอาหารตัน (Choke) เป็นอาการที่มีสิ่งแปลกปลอมเข้าไปติดคอ ซึ่งสิ่งแปลกปลอมนั้นอาจเป็นอะไรก็ได้ ที่พบได้บ่อยคือการให้ของขวัญม้าโดยให้แอปเปิ้ล หรือแครอทที่ชิ้นใหญ่จนเกินไป เมื่อสงสัยว่าม้าอาจจะมีอาการหลอดอาหารตัน (Choke) ควรให้สัตว์แพทย์เข้าทำการตรวจและรักษาทันที เพราะหากปล่อยไว้ม้าจะไม่สามารถกินน้ำกินอาหารได้ ทำให้สภาพร่างกายม้าทรุดโทรมลงอย่างรวดเร็ว และเสียดท้องตามมาได้

2.1.2.3 กระเพาะอาหาร (Stomach)

ม้าจัดเป็นสัตว์ที่มีกระเพาะเดี่ยว (Single stomach) ซึ่งแตกต่างจากวัวที่มีกระเพาะโดยสิ้นเชิง วัวมีกระเพาะอาหารขนาดใหญ่มาก และแบ่งออกเป็นหลายห้อง หรือที่เรียกกันว่า 4 กระเพาะ ถ้าเทียบขนาดตัวของม้ากับกระเพาะอาหารจะพบว่าม้าเป็นสัตว์ที่มีกระเพาะอาหารขนาดเล็กมาก (ม้าเล็ก 8 - 10 ลิตร, ม้าใหญ่ 16 - 20 ลิตร) ด้วยเหตุนี้การให้อาหารในม้าจึงมีความจำเป็นต้องให้อาหารครั้งละน้อยๆ แต่บ่อยครั้ง ลักษณะทางกายวิภาคของกระเพาะอาหารม้าบริเวณช่วงต่อจากหลอดอาหารจะเป็นรูปตัวเจ (J) ส่งผลให้ม้าไม่สามารถอาเจียนได้ การขยับตัวของกระเพาะอาหารจะช่วยให้อาหารที่เข้ามาเป็นก้อนๆ กระจายตัวออก และง่ายต่อการย่อยมากขึ้น

กระเพาะอาหารจะหลั่งกรดกระเพาะ Gastric acid และ Pepsinogen เพื่อใช้ในการย่อยโปรตีน (Protein) นอกจากการย่อยแล้วกระเพาะอาหารก็มีการหมักคาร์โบไฮเดรต (Carbohydrate;

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

CHO) ซึ่งจะได้ผลผลิตเป็นกรดแลคติก (Lactic acid) เนื่องจากในกระเพาะอาหารมีแต่แบคทีเรียที่ผลิตกรดแลคติก (Lactic acid) เท่านั้น ซึ่งร่างกายจะนำไปใช้ในการสร้างเซลล์ผนังกระเพาะอาหาร กระเพาะอาหารมีการสร้างเมือกเคลือบกระเพาะ (Mucous secretion) และสารที่มีฤทธิ์เป็นกรด (HCO_3) เพื่อช่วยในการป้องกันน้ำย่อยไม่ให้ย่อยตัวผนังกระเพาะอาหารเอง โดยการสร้างระบบป้องกันผนังกระเพาะเหล่านี้จะถูกกระตุ้นให้สร้างด้วยสารเคมีในร่างกายที่ชื่อว่า Prostaglandin E การให้ยาที่ไปยับยั้งการทำงานของ Prostaglandin E ก็จะส่งผลให้ระบบที่ป้องกันผนังกระเพาะอาหารทำงานได้ลดลง และเกิดแผลในกระเพาะอาหารได้ในที่สุดยาที่ยับยั้ง Prostaglandin E ได้แก่ Phenylbutazole, Dexamethasone, Flunixin meglumin, Prednisolone เป็นต้น) นอกจากนี้กระเพาะอาหารก็มีไบคาร์บอเนต (HCO_3) ที่เป็นองค์ประกอบในน้ำลายมาช่วยลดความเป็นกรดด้วย อาหารที่กินเข้าไปจะใช้เวลาในกระเพาะอาหารประมาณ 30 นาทีก็จะถูกเคลื่อนที่ไปสู่ลำไส้เล็กต่อไป

2.1.2.4 ลำไส้เล็ก (Small Intestine)

ลำไส้เล็กมีความยาว 19 - 30 เมตร ขึ้นอยู่กับขนาดม้า มีหน้าที่ย่อยและดูดซึมคาร์โบไฮเดรต ไขมัน และโปรตีน ลำไส้เล็กจะมีการหลั่งน้ำย่อยที่เรียกว่า Pancreatic enzyme ปริมาณมากถึง 10 - 12 ลิตรต่อวันต่อน้ำหนักม้า 100 กิโลกรัม (ม้าน้ำหนัก 400 กิโลกรัมก็จะหลั่งน้ำย่อยชนิดนี้มากถึงวันละ 40 - 50 ลิตร) คาร์โบไฮเดรต และโปรตีนจะถูกย่อยที่ลำไส้เล็ก และไปดูดซึมที่ลำไส้ใหญ่ (การย่อยในส่วนนี้จะสามารถทำได้ 50% ของอาหารที่กินเข้าไป ส่วนไขมันจะสามารถถูกย่อยและดูดซึมที่ลำไส้เล็กได้ทันที) การให้อาหารมื้อใหญ่จะส่งผลให้ประสิทธิภาพในการย่อยทำได้ลดลง เพราะอาหารที่มีปริมาณมากจะถูกดันผ่านลำไส้เล็กเร็วกว่าปกติ คาร์โบไฮเดรตก็จะตกสู่ลำไส้ใหญ่ และลำไส้เล็กจะไม่สามารถดูดซึมน้ำย่อยที่หลั่งออกมากลับไปใช้ได้ทัน ส่งผลให้ม้าเกิดภาวะแห้งน้ำ (Dehydrate)

2.1.2.5 ลำไส้ใหญ่ (Large intestine)

ลำไส้ใหญ่จะไม่มีการย่อย ไม่มีการหลั่งเอนไซม์ ใช้จุลินทรีย์ในการย่อยและช่วยดูดซึมคาร์โบไฮเดรต โปรตีน และผลิตผลที่ได้จากการย่อยจากลำไส้เล็กต่างๆ กระบวนการหลักที่เกิดขึ้นในลำไส้ใหญ่คือการหมักคาร์โบไฮเดรต (อาหารเม็ดที่เหลือจากลำไส้เล็ก หญ้า ฟาง) ผลผลิตที่ได้จากการหมักนี้จะเป็นกรดไขมันระเหยได้ (Volatile Fatty Acid; VFA) เป็นหลัก และเกิดกรดแลคติก (Lactic acid) เพียงเล็กน้อยเท่านั้น และกรดแลคติกที่เกิดขึ้นก็จะโดนแบคทีเรียเปลี่ยนไปเป็น VFA ในที่สุด เพราะกรดแลคติกไม่สามารถถูกดูดซึมเข้ากระแสเลือดได้ แตกต่างกับ VFA ที่สามารถดูดซึมได้เร็ว และนำไปใช้ได้ แต่อย่างไรก็ตามการให้อาหารมื้อใหญ่ ก็จะส่งผลให้ VFA ดูดซึมไม่ทันทำให้ความเป็นกรดในลำไส้เพิ่มขึ้น (pH ลดลง) ก็จะทำให้ภาวะสมดุลของลำไส้สูญเสียไปการดูดซึมโปรตีนในม้านั้นทำได้ค่อนข้างจำกัด ม้ามีความต้องการโปรตีนในอาหารเพียง 10-11% เท่านั้น โปรตีนที่ถูกย่อยสุดท้ายจะกลายเป็นแอมโมเนีย (NH_3) ในที่สุด ซึ่งหากมีโปรตีนในอาหารจำนวนมากเกินไปก็จะส่งผลให้ม้าไม่สามารถดูดซึมได้หมด เหลือเป็นแอมโมเนียออกมากับขี้ม้า และกลิ่นแอมโมเนียก็เป็นผลเสียกับม้า โดยจะระคายเคืองทางเดินหายใจ ทำให้ม้าเครียด และมึนหัวจากการสูดดม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.3 ระบบย่อยอาหารของม้า

ระบบย่อยอาหารของม้าเป็นระบบที่มีความแตกต่างจากสัตว์ชนิดอื่นจะประกอบด้วย 2 ส่วน [6]

2.1.3.1 ทางเดินอาหารส่วนต้น

กระเพาะอาหาร (Stomach) ม้าเป็นสัตว์กระเพาะเดี่ยว และมีขนาดเล็กมากเมื่อเทียบกับน้ำหนักตัว (ม้าเล็กจุ 8 - 10 ลิตร, ม้าใหญ่ 16 – 20 ลิตร) ถ้ามีการอุดตันด้วยอาหาร น้ำ หรือแก๊สกระเพาะจะแตกได้ เพราะม้าไม่สามารถอาเจียนได้ และเรอไม่ได้ ลำไส้เล็ก (Small intestine) (ความยาว 19 – 30 เมตร) มีหน้าที่ย่อยและดูดซึมคาร์โบไฮเดรต(แป้ง) ไขมัน โปรตีน ในส่วนนี้จะมีการใช้น้ำย่อยเพื่อย่อยอาหาร ถึงต้องมีความยาวมากให้น้ำย่อยสัมผัสอาหารได้ทั่วถึง

2.1.3.2 ทางเดินอาหารส่วนท้าย

ประกอบด้วยไส้ตัน (Caecum) ความยาว 0.8 - 1.3 เมตร ความจุ 33.4 ลิตร ลำไส้ใหญ่ส่วนแรก(Large colon) ความยาว 3 - 4 เมตร ความจุ 81.2 ลิตร ลำไส้ใหญ่ส่วนหลัง (Small colon) ความยาว 2.5 - 4 เมตร ความจุ 14.8 ลิตร ไส้ตรง (Rectum) ลำไส้ใหญ่ของม้าแตกต่างจากลำไส้เล็กเพราะไม่มีน้ำย่อย การย่อยในส่วนนี้อาศัยจุลินทรีย์ในลำไส้หมักอาหาร ดังนั้นความจุในส่วนนี้จึงมีความจุมาก เพราะเปรียบเสมือนถังหมักปกติจะหมักอาหารหยาบ (ฟาง/หญ้า/หญ้าแห้ง) ถ้าหมักคาร์โบไฮเดรตปริมาณมากๆ มันจะสลายกลายเป็นกรด รวมทั้งมีแก๊สเกิดขึ้นมากด้วย เป็นเหตุให้ลำไส้เคลื่อนไหวช้า เกิดการอุดตันตามมาได้

2.1.4 ประโยชน์ของมูลม้า

การนำมาทำปุ๋ยคอก ปุ๋ยจากมูลม้า ปุ๋ยคอกเป็นปุ๋ยอินทรีย์ชนิดหนึ่งซึ่งได้มาจากการเลี้ยงสัตว์และได้มีการนำไปใช้ในทางการเกษตรอย่างแพร่หลายเป็นเวลานานหลายปีแล้ว ปุ๋ยคอกไม่เพียงแต่จะให้อินทรีย์ และธาตุอาหารหลักและธาตุอาหารรอง ที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของพืชเท่านั้น แต่ยังช่วยให้โครงสร้างของดินที่เสื่อมโทรมกลับมาดีขึ้นอีกด้วย ดินที่ได้รับการใส่ปุ๋ยคอกบ่อย ๆจะเป็นดินที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของพืชทำให้ดินมีระบายน้ำได้ดีอากาศถ่ายเทได้สะดวก ช่วยเพิ่มความคงทนให้แก่เม็ดดินเป็นการลดการชะล้างพังทลายของดินและช่วยรักษาหน้าดินไว้ นอกจากนี้ยังเป็นแหล่งธาตุอาหารของจุลินทรีย์ที่เป็นประโยชน์ในดิน ซึ่งมีผลทำให้กิจกรรมต่าง ๆ ของจุลินทรีย์ดำเนินไปอย่างมีประสิทธิภาพและยังช่วยเพิ่มปริมาณของจุลินทรีย์ในดิน อีกด้วย คุณค่าทางอาหารของปุ๋ยคอก สำหรับคุณค่าอาหารพืชของ ปุ๋ยคอก นั้นจะแตกต่างกันไปตามแหล่งวิธีการเลี้ยงและรักษา ถ้ามองในแง่ของธาตุอาหารหลัก คือ ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียมแล้วจะมีค่อนข้างน้อย ยกเว้นมูลสุกร มูลไก่ และมูลค้างคาวซึ่งค่อนข้างจะมีธาตุอาหารหลักอยู่สูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 ชีวมวล

ประเทศไทยนับเป็นประเทศเกษตรกรรมที่สำคัญแห่งหนึ่งของโลกประชาชนมากกว่าร้อยละ 50 ประกอบอาชีพเกษตรกรรม ผลพลอยได้ที่สำคัญนอกเหนือจากผลผลิตการเกษตรก็คือ วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร เช่น ฟางข้าวแกลบ กากอ้อย กากกาแฟ กากชาเขียว กากกะทิ กะลามะพร้าว และกะลาปาล์ม เป็นต้น [7]

ชีวมวล (biomass) คือ สารอินทรีย์ที่เป็นแหล่งกักเก็บพลังงานจากธรรมชาติและสามารถนำมาใช้ผลิตพลังงานได้ โดยที่ชีวมวลนั้นประกอบด้วยธาตุหลักๆ คือ คาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน รวมทั้งมีปริมาณของไนโตรเจนและธาตุอื่นๆอีกเล็กน้อย ชีวมวลนั้นมีอยู่มากมายทั้งที่ได้จากสิ่งมีชีวิต ทั้งนี้อาจจะสามารถจำแนกแหล่งที่มาของชีวมวลได้ 2 แหล่ง ดังนี้

1. ของเสียจากการประกอบการทั้งภาคอุตสาหกรรม และภาคเกษตรกรรม มาจากโรงงานแปรรูปทางการเกษตร โรงงานผลิตน้ำตาล โรงสีข้าว ได้แก่ ฟางข้าว ชานอ้อย เป็นต้น รวมไปถึงของเสียประเภทอื่น พลาสติก และกากตะกอนของเสียจากโรงสีย้อมจากภาคอุตสาหกรรม
2. ของเสียจากแหล่งชุมชน อาทิ ขยะชุมชน กากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชน ของทางเกษตรของเกษตรกร ของเสียจากสัตว์ เช่น มูลสัตว์ เป็นต้น ซึ่งข้อดีของเชื้อเพลิงชีวมวล เป็นดังนี้

- มีปริมาณกำมะถันต่ำ
- ราคาถูกกว่าพลังงานเชิงพาณิชย์อื่น (เมื่อคำนวณต่อหน่วยความร้อนที่เท่ากัน)
- มีแหล่งผลิตอยู่ในประเทศ
- พลังงานจากชีวมวลจะไม่ก่อให้เกิดสภาวะเรือนกระจกและแทบจะไม่ทำให้เกิด

มลภาวะทางอากาศหรืออากาศเป็นพิษเลยในกรณีมีการปลูกทดแทน

เนื่องจากในขั้นตอนของการเจริญเติบโตของพืชนั้น พืชได้ใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) น้ำ (H_2O) และแร่ธาตุต่างๆ เพื่อเปลี่ยนพลังงานจากแสงอาทิตย์โดยผ่านกระบวนการสังเคราะห์แสงเพื่อให้ได้ออกมาเป็นมวลสารของพืช ที่ประกอบด้วยธาตุองค์ประกอบหลักได้แก่ คาร์บอน (C) ไฮโดรเจน (H) ออกซิเจน (O) และไนโตรเจน (N) แล้วกักเก็บไว้ตามส่วนต่างๆ ของพืช และเมื่อนำพืชหรือชีวมวลดังกล่าวมาเป็นเชื้อเพลิงเพื่อเผาไหม้ให้ได้พลังงาน คาร์บอน (C) ที่สะสมอยู่ในชีวมวลจะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศได้เป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ซึ่งก็จะถูกนำไปใช้ในกระบวนการสังเคราะห์แสงของพืชเพื่อใช้ในการเจริญเติบโตของพืชต่อไป ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าการนำพลังงานที่สะสมในชีวมวลมาใช้ประโยชน์จึงเป็นการใช้พลังงานที่ไม่ก่อให้เกิดก๊าซเรือนกระจก (Greenhouse Gases) สามารถช่วยลดผลกระทบที่มีอยู่ในปัจจุบันจากปรากฏการณ์โลกร้อน (Global Warming) ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การใช้ประโยชน์จากพลังงานชีวมวล สามารถใช้ได้ทั้งในรูปของพลังงานความร้อนเพื่อผลิตไอน้ำหรือน้ำมันร้อนใช้ในกระบวนการผลิตของโรงงานต่างๆ หรือใช้เป็นเชื้อเพลิงเพื่อผลิตไฟฟ้า โดยจะใช้เชื้อเพลิงชีวมวลชนิดใดชนิดหนึ่งที่กล่าวมาข้างต้น หรือหลายชนิดรวมกันก็ได้ และเนื่องจากต้นทุนพลังงานจากชีวมวล ซึ่งก็คือ ราคาของชีวมวลเทียบกับพลังงานที่ได้จากชีวมวล ยังมีราคาถูกเทียบกับต้นทุนพลังงานจากการใช้น้ำมันปิโตรเลียม เช่น น้ำมันเตา จึงได้มีการนำชีวมวลต่างๆ มาใช้ทดแทนน้ำมันเตาเพื่อผลิตพลังงานความร้อนอย่างแพร่หลาย และยังเป็นการสนับสนุนการใช้เศษวัสดุการเกษตรในประเทศเพื่อลดการสูญเสียเงินตราต่างประเทศในการนำเข้าเชื้อเพลิงฟอสซิลต่างๆ

2.2.1 องค์ประกอบของชีวมวล (Biomass Compositions)

องค์ประกอบของชีวมวลหรือสสารทั่วไปจะแบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลักคือ

- ความชื้น (Moisture) หมายถึงปริมาณน้ำที่สะสมอยู่ในชีวมวล
- ส่วนที่เผาไหม้ได้ (Combustible substance ส่วนที่เผาไหม้ได้จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ สารระเหย (Volatiles Matter) และคาร์บอนคงที่ (Fixed Carbon)
- ส่วนที่เผาไหม้ไม่ได้ หรือขี้เถ้า (Ash)

เมื่อชีวมวลถูกเผาไหม้อย่างสมบูรณ์แล้ว จะมีเนื้อสารบางส่วนที่ไม่สามารถเผาไหม้ได้ ซึ่งคือขี้เถ้าโดยชีวมวลแต่ละประเภทจะมีสัดส่วนของปริมาณขี้เถ้าในชีวมวลแตกต่างกัน [8]

2.2.2 องค์ประกอบทั่วไปของสารชีวมวล

สารชีวมวลนั้นมีหลากหลายชนิดซึ่งมีองค์ประกอบต่างกัน องค์ประกอบขั้นต้นได้แก่ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส ลิกนิน แป้ง และโปรตีน ต้นไม้มีองค์ประกอบหลักได้แก่ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส ลิกนิน รวมถึงพืชสมุนไพรเพียงแต่ ปริมาณขององค์ประกอบที่จะแตกต่างกัน สารชีวมวลต่างชนิดกัน ย่อมมีองค์ประกอบต่างกัน เช่น ธัญพืชมีแป้งมาก ในขณะที่ของเสียจากปศุสัตว์มีโปรตีนมาก เนื่องจากมีโครงสร้างทางเคมีที่แตกต่างกัน จากทัศนคติของการใช้พลังงานสารชีวมวลที่ ประกอบด้วย ลิกโนเซลลูโลส จะประกอบไปด้วยเซลลูโลสและลิกนินจำนวนมากเช่น ต้นไม้ ซึ่งมีจำนวนมากและมีศักยภาพมาก [8]

2.2.2.1 เซลลูโลส

โพลีแซคคาไรด์ กลูโคสถูกเชื่อมต่อกันด้วยพันธะเบต้ากลูโคซิดิกซึ่งมีสูตรโมเลกุลเป็น $(C_6H_{12}O_6)_n$ n คือดีกรีของโพลิเมอร์ไรเซชัน ซึ่งมีความกว้างตั้งแต่หลายพันจนถึงหลายหมื่น จำนวนผลลัพธ์ของการโรไลซิสเซลลูโลส คือ ดีกลูโคส (โมโนแซคคาไรด์) แต่บางส่วนให้ผลลัพธ์เป็นไดแซคคาไรด์ (เซลลูไบโอส) และโพลีแซคคาไรด์ลำดับ n = 3 ถึง 10 เซลลูโลสมีโครงสร้างเป็นผลึกและต้านทานต่อกรดและด่าง รูป2.3.1-a แสดงโครงสร้างสูตรของเซลลูโลส

2.2.2.2 เฮมิเซลลูโลส

โพลีแซคคาไรด์ซึ่งมีจำนวนยูนิตคาร์บอนเท่ากับ 5 โมโนแซคคาไรด์รวมถึง ดีไซโลสและดีอะราไบโนสและคาร์บอนเท่ากับ 6 โมโนแซคคาไรด์รวมถึง ดีแมนโนส ดีกาแลคโตสและดีกลูโคส โมโน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แซคคาไรด์ที่มีคาร์บอนเท่ากับ 5 มีจำนวนมากกว่า โมโนแซคคาไรด์ที่มีคาร์บอนเท่ากับ 6 สูตรโมเลกุลโดยเฉลี่ยคือ $(C_5H_8O_4)n$ เนื่องจากดีกรี โพลิเมอร์ไรเซชัน ของเฮมิเซลลูโลสเท่ากับ 50 - 200 โดยมีขนาดเล็กกว่าเซลลูโลส จึงสามารถสลายพันธะได้ง่ายกว่าเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสเป็นจำนวนมากสามารถละลายได้ในสารละลาย เบส เฮมิเซลลูโลสทั่วไปคือไซแลน ซึ่งประกอบด้วยไซโลสด้วยพันธะ 1,4 รูป 2.3.1-c แสดงสูตรโครสร้างของไซแลน เฮมิเซลลูโลสอื่นๆได้แก่กลูโคแมนแนน อย่างไรก็ตามเซลลูโลสทั้งหมดขึ้นกับชนิดและส่วนของพืช

2.2.2.3 ลิกนิน

สารประกอบที่ประกอบด้วย ยูนิตฟีนิลโพรเพนและอนุพันธ์ ซึ่งเชื่อมกันเป็นสามสิติ โครงสร้างนั้นซับซ้อนและยังไม่มีการเข้าใจอย่างแท้จริง แสดงยูนิตที่ประกอบกันเป็นลิกนินโครงสร้างสามมิตินั้นยากที่จะสลายโดยจุลชีพและสารเคมี นอกจากนั้นยังมีความแข็งแรงทางกลและการป้องกันร่วมด้วย เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลสและลิกนินถูกพบอย่างสากลในสารชีวมวลชนิดต่างๆ และแหล่งคาร์บอนธรรมชาติจำนวนมากมายบนโลก

2.2.2.4 แป้ง

คล้ายเซลลูโลส แป้งเป็นโพลีแซคคาไรด์ที่ประกอบด้วยยูนิตของดีกลูโคส แต่ถูกเชื่อมกันโดยพันธะแอลฟากลูโคไซดิก เนื่องจากความต่างของโครงสร้างพันธะ เซลลูโลสละลายน้ำ แต่บางส่วนของแป้งในรูป 2.3.1-b จะละลายในน้ำร้อน (อะไมโลสที่มีน้ำหนักโมเลกุลตั้งแต่ 10,000 จนถึง 50,000 ประมาณ 10%-20%ของแป้ง) และบางส่วนที่ไม่ละลาย (อะไมโลเพกทิน ซึ่งมีน้ำหนักโมเลกุลตั้งแต่ 50,000 ถึง 100,000 ประมาณ 80%-90% ของแป้ง) แป้งถูกพบในเมล็ด ราก และลำต้นซึ่งถือเป็นอาหาร

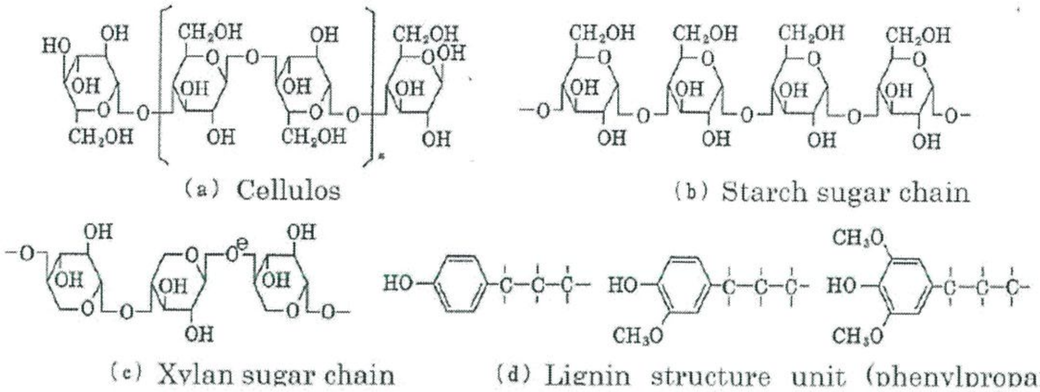
2.2.2.5 โปรตีน

เป็นสารประกอบโมเลกุลขนาดใหญ่ซึ่งกรดอะมิโนหลายตัวถูกโพลิเมอร์ไรซ์เข้าด้วยกัน คุณสมบัติต่างกันขึ้นกับชนิดของกรดอะมิโนและอัตราส่วนขององค์ประกอบของกรดอะมิโนและลำดับของโพลิเมอร์ไรเซชัน โปรตีนไม่ใช่สารประกอบพื้นฐานของสารชีวมวลและมีสัดส่วนน้อยกว่าสามสารข้างต้นที่กล่าวมา

2.2.2.6 สารอื่นๆ (อินทรีย์และอนินทรีย์)

ปริมาณของสารประกอบอินทรีย์ อื่นๆมีได้หลากหลายขึ้นกับชนิด สารอินทรีย์ที่มีจำนวนมากได้แก่ กลีเซอรอล (ตัวอย่าง เช่น น้ำมันผักกาดก้านขาว น้ำมันปาล์ม และน้ำมันจากพืชชนิดต่างๆ) และซูโครสในอ้อยและต้นบีท ตัวอย่างอื่นๆ เช่น อัลคาลอยด์ รงค์วัตถุ เทอร์ปีน และขี้ผึ้ง ถึงแม้ว่าจะพบสารเหล่านี้ได้น้อยแต่คุณค่ามากเนื่องจากใช้เป็นส่วนผสมของยาสารชีวมวลนั้นประกอบไปด้วยสารประกอบอินทรีย์โมเลกุลขนาดใหญ่ แต่ยังประกอบด้วยสารอนินทรี เช่นขี้เถ้าในจำนวนน้อย ธาตุโลหะพื้นฐานได้แก่ แคลเซียม โพแทสเซียม ฟอสฟอรัส แมกนีเซียม ซิลิกอน อลูมิเนียม เหล็กและโซเดียม สารและปริมาณขึ้นกับชนิดของวัตถุดิบตั้งต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป2.2 โครงสร้างทางเคมีของสารประกอบหลักของสารชีวมวล

2.2.3 พลังงานที่ได้จากชีวมวล (Biomass Heating Value)

ชีวมวลแต่ละประเภทจะให้พลังงานจากการเผาไหม้แตกต่างกัน ตามลักษณะองค์ประกอบต่างๆ ของชีวมวลแต่ละชนิด และสัดส่วนความชื้นที่สะสมอยู่ในชีวมวล โดยค่าความร้อนหรือพลังงานที่ได้จากการเผาไหม้ชีวมวลจะแสดงได้เป็น

2.2.3.1 ค่าความร้อนสูง (High Heating Value, HHV)

เป็นค่าพลังงานทั้งหมดที่ได้จากการเผาไหม้ชีวมวลซึ่งได้รวมพลังงานส่วนหนึ่งที่ต้องใช้ในการระเหยน้ำที่สะสมอยู่ในชีวมวลออกไประหว่างการเผาไหม้มีหน่วยเป็น kJ/kg หรือ kcal/kg

2.2.3.2 ค่าความร้อนต่ำ (Low Heating Value, LHV)

เป็นค่าพลังงานที่สามารถนำมาใช้ได้จริงจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล ซึ่งได้หักพลังงานส่วนหนึ่งที่ต้องใช้ในการระเหยน้ำที่สะสมอยู่ในชีวมวลออกไประหว่างการเผาไหม้ โดยทั่วไปจะมีหน่วยเป็น กิโลจูล (kJ) ต่อกิโลกรัมชีวมวล (kg) หรือ กิโลแคลอรี (kcal) ต่อกิโลกรัมชีวมวล(kg)

จากการสำรวจคุณลักษณะของชีวมวลประเภทต่างๆ จะได้คุณสมบัติเบื้องต้น และค่าพลังงานความร้อนที่ได้จากชีวมวลแต่ละประเภทดังนี้

ตารางที่ 2.1 คุณลักษณะของชีวมวลประเภทต่างๆ และค่าพลังงานความร้อนที่ได้จากชีวมวลแต่ละประเภท

คุณสมบัติชีวมวลต่างๆ	Moisture (%)	Ash (%)	Volatile Matter (%)	Fixed Carbon (%)	Higher Heating Value (kJ/kg)	Lower Heating Value (kJ/kg)
แกลบ (Rice Husk)	12.00	12.65	56.46	18.88	14,755	13,517
ฟางข้าว (Rice Straw)	10.00	10.39	60.70	18.90	13,650	12,330

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชานอ้อย (Bagasse)	50.73	1.43	41.98	5.86	9,243	7,368
ใบอ้อย (Cane Trash)	9.20	6.10	67.80	16.90	16,794	15,479
ไม้ยางพารา (Parawood)	45.00	1.59	45.70	7.71	10,365	8,600
เส้นใยปาล์ม (Palm Fiber)	38.50	4.42	42.68	14.39	13,127	11,400
กะลาปาล์ม (Palm Shell)	12.00	3.50	68.20	16.30	18,267	16,900
ทะลายปาล์ม (Empty Fruit Bunch)	58.60	2.03	30.46	8.90	9,196	7,240
ต้นปาล์ม (Palm Trunk)	48.40	1.20	38.70	11.70	9,370	7,556
ทางปาล์ม (Palm Leaf)	78.40	0.70	16.30	4.60	3,908	1,760
ซังข้าวโพด (Corncob)	40.00	0.90	45.42	13.68	11,298	9,615
ลำต้นข้าวโพด (Corn Stalk)	41.70	3.70	46.46	8.14	11,704	9,830
เหง้ามันสำปะหลัง (Tapioca Rhizome)	59.40	1.50	31.00	8.10	7,451	5,494
เปลือกไม้ยูคาลิปตัส (Eucalyptus Bark)	60.00	2.44	28.00	9.56	6,811	4,917

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 กระบวนการไฮโดรเทอร์มัล

การสังเคราะห์ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล เป็นกระบวนการสลายสารคาร์ไฮเดรต (Carbohydrates) ในรูปของน้ำ (มีน้ำเป็นตัวทำปฏิกิริยา) โดยอาศัยความร้อนและความดันในการทำปฏิกิริยา อุณหภูมิที่ใช้อยู่ระหว่าง 140 - 220 องศาเซลเซียสในถังปฏิกรณ์ (ระบบปิด) และจะใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาสั้นๆไปจนถึงหลายชั่วโมง [9] และความดันประมาณ 10 บาร์ กระบวนการไฮโดรเทอร์มัลประกอบด้วยปฏิกิริยาย่อยดังนี้ [10]

2.3.1 ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis)

ไฮโดรไลซิสโดยทั่วไปหมายถึงปฏิกิริยาของสารกับน้ำ เป็นการให้โมเลกุลของน้ำ (H_2O) ไปทำปฏิกิริยากับสารตัวอย่างเช่น ชีวมวล เป็นต้น โดยโมเลกุลของน้ำจะเข้าไปทำลายพันธะ (Break bond) ของลิกนิน, เซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลส ซึ่งเป็นส่วนประกอบในชีวมวล จากพันธะที่ต่อกันเป็นสายโซ่ยาว (โมเลกุลขนาดใหญ่) ก็จะเกิดการแยกเป็นสายโซ่สั้นหรือโมเลกุลที่มีขนาดเล็กลง

2.3.2 ปฏิกิริยาดีไฮเดรชัน (Dehydration)

เป็นการกำจัดโมเลกุลของน้ำ (H_2O) ออก ส่งผลให้มีปริมาณคาร์บอน (Carbon content, %C) มากขึ้น หรืออีกในแง่หนึ่งคือเป็นการกำจัดออกซิเจนในรูปของน้ำ

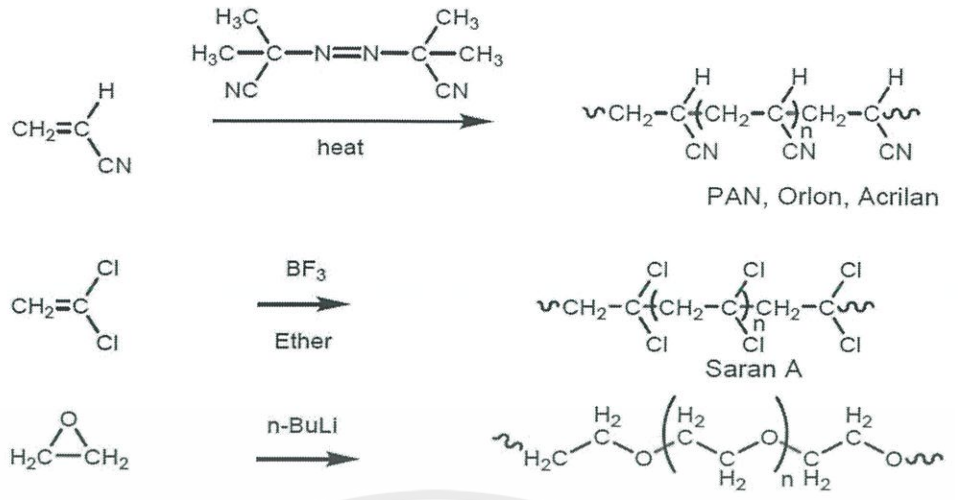
2.3.3 ปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน (Polymerization)

เป็นการรวมตัวกันของโมเลกุลที่มีขนาดเล็กหรือพันธะสั้นๆ (ซึ่งยังไม่เสถียร) เป็นโมเลกุลขนาดใหญ่ที่มีความเสถียรมากขึ้นกลไกการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน (Polymerization) ได้ 2 แบบ ดังนี้

2.3.3.1 ปฏิกิริยารวมตัว (Addition Reaction)

ปฏิกิริยาลูกโซ่ (Chain Reaction) ปฏิกิริยาเริ่มต้นจาก ตัวริเริ่ม (initiator) ที่มีพลังงานสูงทำปฏิกิริยากับมอนอเมอร์โมเลกุลที่หนึ่ง แล้วมอนอเมอร์โมเลกุลที่หนึ่งที่มีพลังงานสูงขึ้น จะทำปฏิกิริยาต่อกับมอนอเมอร์โมเลกุลที่2 และโมเลกุลที่ 3 ต่อไปเรื่อยเป็นลูกโซ่จนสิ้นสุดปฏิกิริยา และในปฏิกิริยาจะไม่มีการสูญเสียโมเลกุลเล็กๆ ออกไป สำหรับตัวริเริ่มที่มีพลังงานสูงมีทั้งที่เป็น อนุมูลอิสระ (Free radicals) แคทไอออน (cation) หรือ แอนไอออน (anion)

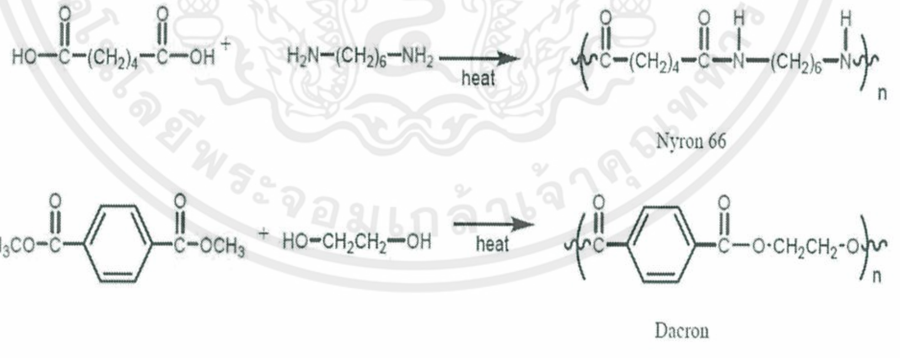
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 ปฏิกิริยารวมตัวแบบลูกโซ่

2.3.3.2 ปฏิกิริยาควบแน่น (Condensation Reaction)

ปฏิกิริยาเป็นขั้นตอน (Step Reaction) ปฏิกิริยาเริ่มต้นจากปฏิกิริยาควบแน่นของมอนอเมอร์โมเลกุลที่ 1 กับ มอนอเมอร์โมเลกุลที่ 2 โดยมีกรด หรือ ด่าง เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา หลังจากที่มอนอเมอร์โมเลกุลที่ 1 กับมอนอเมอร์โมเลกุลที่ 2 เกิดปฏิกิริยาควบแน่นได้โมเลกุลใหม่ แต่ในโมเลกุลใหม่ก็ยังคงมีหมู่ฟังก์ชันที่สามารถเกิดปฏิกิริยาได้ต่อไปอีกเรื่อยๆ โดยในปฏิกิริยาจะกำจัดโมเลกุลขนาดเล็ก ออกมาเช่น H_2O หรือ NH_3 หรือ CH_3OH ฯ เป็นต้น [11]



รูปที่2.4 ปฏิกิริยารวมตัวแบบควบแน่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.4 กระบวนการดีพอลิเมอร์ไรเซชัน (Depolymerization)

Depolymerization คือการสลายตัวของโครงสร้างโมเลกุลที่อุณหภูมิสูงในบรรยากาศที่มีออกซิเจน ซึ่งโดยทั่วไปกระบวนการแปรรูปนี้มักเกิดที่อุณหภูมิต่ำกว่า 550 องศาเซลเซียส ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่เป็นไฮโดรคาร์บอนที่เป็นน้ำมัน จากนั้นจึงนำไปสู่กระบวนการกลั่นเพื่อนำมาใช้กับเครื่องยนต์ นอกจากนี้ยังได้ผลิตภัณฑ์อีกส่วนหนึ่งที่เป็นแก๊สฯ ซึ่งสามารถนำกลับมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในกระบวนการผลิตในระบบ Polymer Energy ได้อีกครั้งหนึ่งด้วย เทคโนโลยีนี้สามารถรองรับการปนเปื้อนของพลาสติกได้ประมาณ 25-30% ซึ่งประเภทของขยะพลาสติกที่สามารถแปรรูปผ่านกระบวนการนี้ได้ ได้แก่ พลาสติกประเภทโพลิโอเลฟินส์ เช่น HDPE, LLDPE, LDPE, PE และ PP [12]

2.4 กระบวนการแยกสลายด้วยความร้อน (Pyrolysis)

เป็นกระบวนการที่ทำให้สารประกอบอินทรีย์ขนาดใหญ่ ที่ต่อกันเป็นสายโซ่ยาวแตกออกเป็นโมเลกุลที่มีขนาดเล็กลงหรือต่อกันเป็นสายโซ่ที่สั้นลง โดยถูกย่อยสลายทางเคมีด้วยความร้อน ณ อุณหภูมิสูง ๆ ในที่ที่อับอากาศปราศจากออกซิเจน อุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการแยกสลายด้วยความร้อนอยู่ในช่วงระหว่าง 400 - 700 องศาเซลเซียส กระบวนการนี้แตกต่างกับกระบวนการเผาทิ้งเป็นเถ้า (Incineration) ในเตาเผา ทั้งนี้เพราะการเผาทิ้งในเตาเผาเป็นกระบวนการสันดาปแบบปฏิกิริยาคายความร้อนโดยตรงกับอากาศ แต่การแยกสลายด้วยความร้อนเป็นกระบวนการแบบปฏิกิริยาดูดความร้อนที่ต้องใช้ความร้อนเป็นพลังงานเพื่อแยกองค์ประกอบต่าง ๆ ซึ่งจะระเหย กลายเป็นไอออกจากสารอินทรีย์ ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้จะเป็นสารประกอบที่มีคุณค่ามาก ปฏิกิริยาทางเคมีที่เกิดขึ้นในกระบวนการแยกสลายด้วยความร้อนทั่วๆไปจะเป็นดังนี้ [13]

<u>ปฏิกิริยามูลฐาน</u>

$$\text{สารอินทรีย์} \xrightarrow[\text{ปราศจากออกซิเจน}]{\text{ความร้อน}} \text{แก๊ส + ของเหลว + ถ่านชาร์} \quad (2.1)$$

<u>ปฏิกิริยารอง</u>

$$CO_2 + H_2 \Longleftrightarrow CO + H_2O + \text{ความร้อน} \quad (2.2)$$

$$C + H_2O \Longleftrightarrow CO + H_2 - \text{ความร้อน} \quad (2.3)$$

$$C + CO_2 \Longleftrightarrow 2CO - \text{ความร้อน} \quad (2.4)$$

$$C + O_2 \Longleftrightarrow CO_2 + \text{ความร้อน} \quad (2.5)$$

$$C + 2H_2 \Longleftrightarrow CH_4 + \text{ความร้อน} \quad (2.6)$$

2.4.1 กลไกการเกิดการแยกสลายด้วยความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. ช่วงก่อนการแยกสลายด้วยความร้อน (Pre-pyrolysis)

ในช่วงอุณหภูมิจาก 120 - 200 องศาเซลเซียส ช่วงนี้จะมีการจัดองค์ประกอบภายในวัตถุดิบใหม่คือ องค์ประกอบน้ำ ในวัตถุดิบจะระเหยออกไปมีการทำลายพันธะในโมเลกุลของวัตถุดิบบางส่วน และเริ่มมีอนุมูลอิสระ (Free radical) เกิดขึ้น รวมทั้งยังมีการเกิดหมู่คาร์บอนิล (Carbonyl group) หมู่คาร์บอกซิล (Carboxyl group) และหมู่ไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (Hydro peroxide group) ขึ้น เมื่อชีวมวลได้รับความร้อนที่อุณหภูมิต่ำ (น้อยกว่า 200 องศาเซลเซียส) เป็นเวลานาน โครงสร้างภายในของชีวมวลจะมีการเปลี่ยนแปลง ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความแตกต่างกับผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแยกสลายตัวด้วยความร้อนวัตถุดิบชนิดเดียวกัน แต่ไม่มีช่วงก่อนการแยกสลายด้วยความร้อน ดังนั้นขั้นตอนของช่วงก่อนการแยกสลายด้วยความร้อน จึงมีความสำคัญ ต่อกระบวนการทั้งหมด

2. ช่วงการสลายส่วนที่เป็นของแข็ง

เป็นขั้นตอนหลักของกระบวนการเกิดการแยกสลายด้วยความร้อน ขั้นตอนนี้จะมีอัตราการเกิดที่เร็วมาก และจะทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ของกระบวนการแยกสลายด้วยความร้อนโดยที่อุณหภูมิที่เหมาะสมอยู่ระหว่าง 300-600 องศาเซลเซียส ในการเปลี่ยนแปลงทางเคมีนั้น โมเลกุลที่มีขนาดใหญ่เป็นสายโซ่ยาวจะเกิดการแตกตัวของพันธะ C-C, C-S และ C-O พร้อมกับการเกิดสารผลิตผลระหว่างปฏิกิริยา (Intermediate) สารผลิตผลเหล่านี้จะดึงไฮโดรเจนจากสารอื่นแล้วกลั่นตัวเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันได้ถ่านโค้กในขณะที่ถ่านนี้ไม่เกิดปฏิกิริยา ก็จะกลายเป็นถ่านชาร์ไปในที่สุดเมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้น น้ามันทาร์จะผ่านกระบวนการแตกตัว (Cracking) และถูกทาให้เป็นแก๊สซึ่งผลิตภัณฑ์มีเทน ไฮโดรเจน และคาร์บอนมอนออกไซด์ต่อไป

2.4.2 ผลิตภัณฑ์จากกระบวนการแยกสลายด้วยความร้อน

ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการนี้ แบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ

1. แก๊ส: ในการทำลายพันธะโดยความร้อนแก๊สที่ได้ส่วนใหญ่จะประกอบด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 53 โดยน้ำหนัก คาร์บอนมอนอกไซด์ร้อยละ 39 โดยน้ำหนัก สารประกอบไฮโดรคาร์บอนร้อยละ 6.7 โดยน้ำหนัก และไฮโดรเจนร้อยละ 4 โดยน้ำหนัก ตามสภาวะเงื่อนไขที่อยากให้ได้ผลิตภัณฑ์เป็นแก๊สมาก จะมีการเติมอากาศลงไปในปฏิกรณ์ด้วย เพื่อทำให้คาร์บอนบางส่วนเกิดการเผาไหม้ ทำให้ได้แก๊สจากการเผาไหม้มากขึ้น และทำให้เกิดแก๊สผสมระหว่างไฮโดรเจน กับคาร์บอนมอนอกไซด์มากจะเรียกแก๊สผสมนี้ว่า “แก๊สสังเคราะห์ (Synthesis gas)” สำหรับกระบวนการเปลี่ยนองค์ประกอบทางเคมี โดยความร้อนเพื่อให้ได้แก๊สเป็นส่วนใหญ่นี้เรียกว่า “แก๊สซิฟิเคชัน (Gasification)” กระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน

จะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูงประมาณ 1,500-1,600 องศาเซลเซียส ซึ่งต้องเติมอากาศหรือออกซิเจนเข้าไปบางส่วนเพื่อรักษาสภาพของอุณหภูมิสูงๆนี้ได้ สารอินทรีย์ที่มีองค์ประกอบของคาร์บอนจะเกิดปฏิกิริยากับออกซิเจน ไอน้ำ และ คาร์บอนไดออกไซด์ ได้แก๊สเชื้อเพลิงเป็นผลิตภัณฑ์หลัก

2. ของเหลว : ของเหลวที่ได้จากการทำลายพันธะด้วยความร้อนมีชื่อเรียกว่า น้ำมันชีวภาพ “Pyrolysis oil” หรือ “Bio – oil” ของเหลวนี้ประกอบด้วยน้ำ และสารอินทรีย์ ซึ่งควบแน่นออกมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกระบวนการ นอกจากนี้อาจจะประกอบด้วยเซลลูโลส และลิกนิน ซึ่งหลุดออกจากกระบวนการได้โดยการระเหย สำหรับสภาวะเงื่อนไขนี้จะไม่มีอากาศหรือว่าออกซิเจนเลยในระบบ และมีการให้ความร้อนกับระบบในอัตราที่สูง และเร็ว จึงทำให้ได้ผลิตภัณฑ์เป็นน้ำมันชีวภาพมากที่สุด เรียกกระบวนการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบโดยความร้อนเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์เป็นของเหลวเป็นส่วนใหญ่นี้ว่า การแยกสลายด้วยความร้อน

3. ของแข็ง : ของแข็งที่ได้จากกระบวนการทำลายพันธะโดยความร้อนนี้จะเรียกว่า ชาร์ (Char) ซึ่งจะมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับคาร์บอน ซึ่งเงื่อนไขสภาวะที่เหมาะสมคือ ไม่มีการให้อากาศหรือว่าออกซิเจนเลยในระบบและมีอัตราการให้ความร้อนอย่างช้าๆ และสม่ำเสมอเป็นขั้นตอนเริ่มต้นของการทำให้โครงสร้างมีรูพรุน โดยทำให้เกิดการแตกตัวทางเคมีของสารที่ไม่ใช่คาร์บอน (เช่น ไฮโดรเจน ออกซิเจน ไนโตรเจน) ออกมาในรูปของแก๊ส คาร์บอนอิสระที่มีอยู่จะรวมตัวกันในรูปของชาร์ จึงทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็งมาก เรียกกระบวนการการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบเพื่อให้ได้ของแข็งเป็นส่วนใหญ่นี้ว่า "คาร์บอนไนเซชัน (Carbonization)" ชาร์ที่ได้จากกระบวนการคาร์บอนไนเซชันควรมีลักษณะดังต่อไปนี้

- มีสีดำตลอด (Uniformly black)
- เมื่อหักดู ส่วนที่หักจะมีผิวที่เป็นมันเงา (Shiny surface)
- ปลายที่หักจะแหลมคม (Sharp)
- ปราศจากผงฝุ่นและขี้เถ้า

ชาร์ที่ได้จากขั้นตอนการคาร์บอนไนเซชันนี้มีความสามารถในการดูดซับต่ำ เพราะว่าการทำให้เกิดชาร์จะใช้อุณหภูมิประมาณ 400 - 600 องศาเซลเซียส ซึ่งยังคงมีน้ำมันทาร์ตกค้างอยู่ภายในช่องว่าง (Pore) หรือเกาะอยู่ตามผิว จึงจำเป็นต้องนำไปผ่านกระบวนการพัฒนาโครงสร้างไปในทิศทางเดียวกับการเกิดคาร์บอนไนเซชัน หรือ ก็คือการทำการกระตุ้นนั่นเอง

2.4.3 ประโยชน์ของผลิตภัณฑ์จากกระบวนการแยกสลายด้วยความร้อน

ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการแยกสลายด้วยความร้อนสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ ดังนี้

- ผลิตภัณฑ์แก๊ส : ค่าความร้อนของแก๊สที่ได้มีค่าสูงเทียบได้กับเชื้อเพลิงหลาย ชนิดสามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงได้
- ผลิตภัณฑ์ของเหลว : สมบัติของน้ำมันชีวภาพที่ได้จากการแยกสลายด้วยความร้อนมีคุณสมบัติอยู่ระหว่างน้ำมันดีเซล และน้ำมันเตา กล่าวคือ มีค่าความถ่วงจำเพาะ ความหนืด และการกลั่นลำดับส่วนใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซล ในขณะที่คุณค่าเชิงความร้อนใกล้เคียงกับน้ำมันเตา แต่มีปริมาณซัลเฟอร์น้อยกว่าน้ำมันเตา ซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นพลังงานใหม่ได้

ผลิตภัณฑ์ของแข็ง : ใช้เป็นตัวดูดซับได้ โดยต้องนำชาร์ที่ได้ทำการกระตุ้นอีกครั้งหนึ่งก่อน เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวและเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับ

2.5 กระบวนการคาร์บอนไนเซชัน (Carbonization)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คาร์บอนไนเซชันเป็นกระบวนการทางไพโรไลซิส (Pyrolysis) ทำโดยการเผาวัตถุดิบในที่อับอากาศในที่อุณหภูมิต่ำกว่า 1000 องศาเซลเซียส ขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุดิบ ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์สามประเภท ได้แก่ ถ่านที่มีลักษณะสีดำเรียกว่า ชาร์ (Char) ส่วนที่เป็นของเหลวเรียกว่าทาร์ (Tar) และส่วนที่เป็นแก๊ส ขั้นตอนการทำปฏิกิริยาคาร์บอนไนเซชันจัดว่าเป็นขั้นตอนหนึ่งที่มีความสำคัญมากที่สุด เนื่องจากในการทำปฏิกิริยาคาร์บอนไนเซชันจะมีการเริ่มสร้างของโครงสร้างรูพรุน โดยในระหว่างการทำปฏิกิริยา ธาตุและองค์ประกอบต่างๆที่ไม่ใช่คาร์บอนรวมถึงสารระเหยต่างๆ เช่น ไฮโดรเจน ออกซิเจน ไนโตรเจน และน้ำ จะถูกกำจัดออกจากโครงสร้างของวัตถุดิบในรูปของแก๊สและน้ำมันทาร์ จากนั้นจะได้ชาร์ (คุณสมบัติใกล้เคียงกับคาร์บอน) ที่มีการจัดตัวของโครงสร้างผลึกที่ไม่เป็นระเบียบซึ่งจะมีช่องว่างรูพรุนระหว่างผลึก โดยมีตัวแปรในการทำปฏิกิริยาคาร์บอนไนเซชันได้แก่ [14-17]

2.5.1 อุณหภูมิ

อุณหภูมิจะมีผลต่อปริมาณผลิตภัณฑ์มากที่สุด คือเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ปริมาณการเกิดชาร์จะลดลง ส่วนน้ำมันทาร์และแก๊สที่ได้เพิ่มมากขึ้น และคุณสมบัติของน้ำมันทาร์จะมีกลุ่มโครงสร้างเปลี่ยนแปลงไปด้วย เพราะการเพิ่มอุณหภูมิเป็นการเพิ่มพลังงานเพื่อทำลายพันธะภายในโครงสร้างของวัตถุดิบนั้น

2.5.2 อัตราความร้อน

อัตราความร้อนจะมีผลต่อคุณสมบัติและปริมาณของน้ำมันทาร์และสารระเหย การเพิ่มอัตราการให้ความร้อนอย่างรวดเร็วจะมีผลทำให้ปริมาณสารระเหยถูกปลดปล่อยอย่างรวดเร็วทำให้คาร์บอนที่ได้มีรูพรุนขนาดใหญ่ ความว่องไวในการทำปฏิกิริยาสูงกว่าคาร์บอนที่ได้จากการให้ความร้อนด้วยอัตราที่ต่ำกว่า เพราะคาร์บอนที่ได้จากการทำปฏิกิริยาคาร์บอนไนเซชันด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิสูง คาร์บอนจะเรียงตัวเป็นระเบียบน้อยกว่า ทำให้เกิดช่องว่างเป็นรูพรุนขนาดใหญ่เมื่อทำการกระตุ้น สารกระตุ้นจะเข้าไปทำปฏิกิริยาได้ง่าย

2.5.3 ตัวกลางของปฏิกิริยา

ตัวกลางของปฏิกิริยา (Medium of reaction) จะมีผลกระทบต่อปฏิกิริยา ถ้าแก๊สและไอที่เกิดระหว่างการไพโรไลซิสถูกพาออกไปอย่างรวดเร็ว โดยแก๊สที่เป็นตัวกลางเช่น แก๊สไนโตรเจน (เฉื่อยต่อปฏิกิริยาการเผาไหม้ของคาร์บอน) และแก๊สจากการเผาไหม้ ถ้าตัวกลางเป็นแก๊สที่ได้จากการเผาไหม้ปริมาณคาร์บอนที่ได้จะน้อยกว่าตัวกลางที่เป็นแก๊สไนโตรเจน แต่มีความว่องไวในการทำปฏิกิริยากับตัวกระตุ้นสูงกว่า

2.5.4 ธรรมชาติของวัตถุดิบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วัตถุดิบแต่ละชนิดจะมีภาวะที่เหมาะสมแตกต่างกันในการทำปฏิกิริยาคาร์บอนไนเซชัน โดยวัตถุดิบที่แตกต่างกันอาจมีวิธีการกระตุ้นที่แตกต่างกัน เพื่อให้ได้คาร์บอนที่มีคุณภาพดีที่สุด ซึ่งเหมาะแก่การนำไปใช้งานในระบบที่เหมาะสมต่อไป

โครงสร้างทางเคมีของพื้นผิวหลังทาปฏิกิริยาคาร์บอนไนเซชัน

จากการทำปฏิกิริยาคาร์บอนไนเซชัน อะตอมต่างๆที่ไม่ใช่คาร์บอน เช่น ออกซิเจน ไนโตรเจน และไฮโดรเจน จะถูกกำจัดออกในรูปของแก๊ส อะตอมคาร์บอนที่เหมือนจะเรียงตัวเป็นชั้นๆ แต่ละชั้นประกอบไปด้วยวงหกเหลี่ยม (Aromatic ring) เชื่อมโยงกันอย่างไม่เป็นระเบียบและเกิดช่องว่างหรือโพรง ซึ่งจะเป็นที่อยู่ของพวกทาร์ และสารอื่นที่ได้จากการเผาสลาย ช่องว่างเหล่านี้จะกลายเป็นรูพรุนที่มีความสามารถในการดูดซับด้วยกระบวนการที่เรียกกว่า การกระตุ้น โดยการล้างพวกทาร์และสารต่างๆที่ได้จากการเผาสลายออกจากช่องว่างหรือโพรง และสร้างหมู่ฟังก์ชันขึ้นมาแทน ความสามารถในการดูดซับของผลิตภัณฑ์ที่ได้จึงเป็นผลสืบเนื่องจากโครงสร้างทางเคมีด้วย

ความสามารถในการดูดซับเกิดจากอิเล็กตรอนอิสระ ซึ่งอยู่ในสภาพที่ไม่เสถียร คือ วาเลนซ์ไม่อิ่มตัว (Unsaturated valencies) จึงพยายามที่จะเกาะกับอะตอมหรือโมเลกุลอื่น เช่น ออกซิเจนในอากาศ หรืออะตอมต่างๆที่อยู่ในสารตั้งต้น กระบวนการกระตุ้นจะช่วยให้การเกาะของอะตอมคาร์บอนกับอะตอมอื่นกลายเป็นพันธะเคมีที่แข็งแรง มักจะเกิดกับอะตอมคาร์บอนที่อยู่ที่ขอบของวงหกเหลี่ยม สามารถดูดซับแบบเคมี (Chemisorption) กับออกซิเจนที่อุณหภูมิ 400 - 500 องศาเซลเซียส และกลายสภาพเป็นออกไซด์เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น นอกจากนี้พบว่ายังสามารถสร้างพันธะที่แข็งแรงกับอะตอมไฮโดรเจน ซึ่งจะไม่หลุดออกมาแม้จะใช้อุณหภูมิสูงถึง 1,000 องศาเซลเซียส และสามารถดึงอะตอมไนโตรเจนออกจากโมเลกุลแอมโมเนีย และซัลเฟอร์ออกจากโมเลกุลไฮโดรเจนซัลไฟด์ และดึงอะตอมกลุ่มแฮโลเจน (Halogen) ออกจากโมเลกุล แฮโลเจน ทั้งที่อยู่ในสภาพแก๊สหรือของเหลวก็ได้ จึงเกิดเป็นหมู่ฟังก์ชันต่างๆบนผิวของตัวอย่าง แต่ที่สำคัญคือผิวที่เกิดจากอะตอมของคาร์บอนและออกซิเจน หรือที่เรียกว่า ผิวออกไซด์

2.6 การกระตุ้น (Activation)

การกระตุ้นหมายถึงการทำให้คาร์บอนมีความสามารถในการดูดซับสูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มพื้นที่ผิว และการทำให้คาร์บอนมีความว่องไวมากขึ้น ความหมายของการกระตุ้นมี 3 ลักษณะ [18, 19] คือ

- เป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวว่องไว (Active surface area) โดยเกิดปฏิกิริยาเคมีทำให้โมเลกุลบางกลุ่มหลุดออกไป และส่วนที่มีอำนาจดูดซับขึ้นมาแทน
- เป็นการเพิ่มความว่องไวในการดูดซับให้กับผิวที่มีอยู่แล้ว ซึ่งหมายถึงทำให้อะตอมของคาร์บอนมีพลังงานศักย์สูงขึ้น โดยจัดเปลี่ยนโครงสร้างใหม่ เพื่อให้มีความว่องไวในการดูดซับสูงขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เป็นการกำจัดสารอินทรียวัตถุหรืออนินทรีย์วัตถุต่างๆ ซึ่งเป็นสารปนเปื้อนออกจากบริเวณที่ทำหน้าที่ดูดซับ (Active center)

การกระตุ้นแบ่งตามกลไกวิธีการกระตุ้นที่ใช้ สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 วิธีใหญ่ๆ คือ

2.6.1 การกระตุ้นทางกายภาพ

วิธีกระตุ้นทางกายภาพเป็นการทำให้พื้นผิวของคาร์บอนเกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ เช่น ให้มีรูพรุนขนาดต่างๆ ให้มีพื้นที่ผิวมากขึ้น และคาร์บอนมีการจัดเรียงโครงสร้างใหม่ซึ่งจะเพิ่มความสามารถในการดูดซับให้สูงขึ้น โดยทั่วไปสารที่ใช้ในการกระตุ้นทางกายภาพ ได้แก่ ไอน้ำ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ อากาศ แก๊สออกซิเจน และแก๊สไอเสียจากการเผา ซึ่งเรียกสารดังกล่าวว่า แก๊สออกซิไดซ์ (Oxidizing gas) โดยใช้ร่วมกับการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 800-1000°C ขึ้นกับชนิดของวัตถุดิบ แก๊สพวกนี้จะไปทำปฏิกิริยากับทาร์ที่เหลืออยู่และคาร์บอนอะตอมเกิดการแก๊สซิฟิเคชัน (Gasification) ทำให้คาร์บอนอะตอมหลุดออกไป ส่งผลให้เกิดรูพรุนด้วยกลไกที่ต่างๆกันคือ การเปิดรูพรุนที่ปิด การทำให้รูพรุนขนาดเล็กใหญ่ขึ้น และการสร้างรูพรุนใหม่ ทำให้คาร์บอนมีรูพรุนและมีพื้นที่ผิวที่มีอิเล็กตรอนอิสระมากขึ้น จึงส่งผลให้มีความสามารถในการดูดซับสูงขึ้น ข้อดีของการกระตุ้นวิธีนี้คือ ไม่มีสารเคมีตกค้างอยู่ในผลิตภัณฑ์ที่ได้ แต่มีข้อเสียคือต้องใช้อุณหภูมิในการกระตุ้นสูง ตัวแปรที่มีผลต่อการกระตุ้นด้วยแก๊สออกซิไดซ์ ได้แก่ ชนิดและปริมาณขององค์ประกอบที่มีอยู่ในวัตถุดิบ ชนิดของแก๊สออกซิไดซ์ อัตราส่วนของแก๊สที่ใช้อุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการกระตุ้น ตัวอย่างการกระตุ้นโดยวิธีทางกายภาพ คือ

- การกระตุ้นด้วยไอน้ำ โดยการใช้ไอน้ำเป็นตัวออกซิไดซ์คาร์บอน จัดว่าเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน ดังนั้นจึงต้องทำการกระตุ้นที่อุณหภูมิสูง ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นดังสมการที่ 2.7

$$C + H_2O \longrightarrow H_2 + CO \quad \Delta H = 37 \text{ kcal/g. mole} \tag{2.7}$$

อัตราการออกซิไดซ์เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว แต่ไม่ควรให้อุณหภูมิสูงเกิน 1,000 องศาเซลเซียส เพราะปฏิกิริยาจะกลายเป็น Diffusion controlled rate ซึ่งอะตอมของคาร์บอนที่อยู่ชั้นนอก จำนวนมากจะถูกเผาไหม้ให้มีขนาดและความพรุนของอนุภาคเล็กลง

- การกระตุ้นด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ โดยการให้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เป็นตัวออกซิไดซ์คาร์บอน จัดว่าเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อนเช่นกัน ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นดังสมการที่ 2.8

$$C + CO_2 \longrightarrow H_2 + 2CO \quad \Delta H = 91 \text{ kcal/g. mole} \tag{2.8}$$

จากค่า ΔH จะเห็นได้ว่าปฏิกิริยานี้ต้องการพลังงานความร้อนมากกว่าวิธีการกระตุ้นด้วยด้วยไอน้ำ ดังนั้นจึงใช้อุณหภูมิกระตุ้นสูงกว่าการกระตุ้นด้วยไอน้ำ โดยทั่วไปมักจะใช้อุณหภูมิในการกระตุ้นประมาณ 850-1,100 องศาเซลเซียส ทั้งนี้อุณหภูมิที่ใช้จะขึ้นอยู่กับวัตถุดิบที่ใช้ด้วย แต่ในทางปฏิบัติแล้วจะใช้แก๊สเชื้อเพลิงเผาไหม้ ซึ่งจะให้ทั้งไอน้ำและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และอาจมีแก๊ส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ออกซิเจนส่วนเกินบ้างเล็กน้อย หรืออาจจะมีการเติมไอน้ำเข้าไปด้วยเพื่อเป็นการกระตุ้น โดยใช้ทั้งสองวิธีร่วมกัน

- การกระตุ้นด้วยอากาศ โดยการใช้ออกซิเจนในอากาศเป็นตัวออกซิไดซ์คาร์บอน เกิดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และคาร์บอนมอนนอกไซด์ จัดเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นดังสมการ 2.9 และ 2.10

$$C + O_2 \rightarrow CO_2 \ \Delta H = 37 \text{ kcal/g. mole} \quad (2.9)$$

$$2C + O_2 \rightarrow 2CO \ \Delta H = 37 \text{ kcal/g. mole} \quad (2.10)$$

การใช้อากาศเพื่อทาการกระตุ้นมีการใช้กันน้อยมาก ทั้งนี้เพราะว่าการควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ในสภาวะที่ต้องการทาได้ยากกว่า อีกทั้งแก๊สออกซิเจนอาจจะทาให้เกิดการเผาไหม้ที่ผิวของถ่านทาให้เกิดความเสียหายได้ด้วย

2.6.2 การกระตุ้นทางเคมี

วิธีกระตุ้นทางเคมี เป็นการทำปฏิกิริยาคาร์บอนไนเซชันวัตถุดิบที่ผสมกับสารเคมีที่ใช้เป็นสารกระตุ้นที่อุณหภูมิ 500 - 900 องศาเซลเซียส ขึ้นกับชนิดของวัตถุดิบและสารเคมีที่ใช้ สารเคมีที่ใช้เป็นสารกระตุ้นโดยทั่วไปเป็นสารประเภทแอลคาไลน์ โลหะแอลคาไลน์ สารประกอบคาร์บอเนต สารประเภทเบส และกรดบางชนิด เช่น โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) โพแทสเซียมคาร์บอเนต (K_2CO_3) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ซิงค์คลอไรด์ ($ZnCl_2$) และ กรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) เป็นต้น สารเคมีที่เติมลงไปจะช่วยทำลายโครงสร้างของวัตถุดิบและขณะที่ทำปฏิกิริยาคาร์บอนไนเซชันจะเกิดการสลายตัวของสารอินทรีย์ในวัตถุดิบ และเกิดการเชื่อมไขว้กัน (Cross- link) ของโครงสร้างทำให้ผลิตภัณฑ์เกิดรูพรุนขึ้น สารระเหยบางตัวในโครงสร้างของวัตถุดิบไม่สามารถหลุดออกไปได้ เนื่องจากติดการเชื่อมไขว้กันนี้ทำให้ปริมาณคาร์บอนที่ได้เพิ่มขึ้นและการเกิดทาร์ลดลง การเชื่อมไขว้กันประกอบกับสารเคมีที่ใช้มีความคงทนต่อการสลายตัวที่อุณหภูมิสูงๆ จึงยังคงสภาพหุ้มอยู่รอบๆ และแทรกตัวอยู่ภายใน ทำให้เกิดการหดตัวน้อย เมื่อนำชาร์ที่ได้มาล้างสารเคมีออกด้วยน้ำหรือกรดจะเกิดช่องว่างหรือรูพรุนเพิ่มขึ้นอีก

ข้อดีของวิธีนี้คือ ใช้อุณหภูมิไม่สูงมากนัก แต่มีข้อเสียคือมีสารตกค้างในผลิตภัณฑ์ทำให้ต้องเสียเวลาและค่าใช้จ่ายในการล้างสารเคมี รวมทั้งเครื่องมือที่ใช้ต้องเป็นชนิดพิเศษที่สามารถต้านทานการกัดกร่อนได้เพราะสารเคมีบางชนิดเป็นสารกัดกร่อน ตัวแปรที่มีผลต่อการกระตุ้นด้วยวิธีทางเคมี ได้แก่ ชนิดและปริมาณขององค์ประกอบที่มีอยู่ในวัตถุดิบ ชนิดของสารเคมี อัตราส่วนของสารเคมีต่อวัตถุดิบ อุณหภูมิ และเวลา ปัจจุบันนิยมใช้วิธีการกระตุ้นทางเคมีมากกว่า เนื่องจากให้ข้อดีดังต่อไปนี้

(1) อุณหภูมิที่ใช้ในการกระตุ้นต่ำและใช้เวลาน้อย

(2) ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูง ได้รูพรุนขนาดเล็ก และมีขนาดที่ใกล้เคียงกัน

(3) ช่วยลดการเกิดทาร์และสารอื่นๆ ที่เกิดขึ้นในกระบวนการดังนั้นร้อยละของผลิตภัณฑ์ที่ได้จึงค่อนข้างสูง

(4) องค์ประกอบเถ้าของสารตั้งต้น ไม่เป็นอุปสรรคต่อการกระตุ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- การกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH)

เมื่อนำเอาวัตถุดิบที่ต้องการทำเป็นถ่านกัมมันต์ มาผสมกับสารละลายที่มีไอออนของโพแทสเซียม ไอออนของธาตุดังกล่าวจะแทรกเข้าไปอยู่ธาตุดังกล่าวจะแทรกเข้าไปอยู่ในโครงสร้างของวัตถุดิบเมื่อให้ความร้อนโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ เพื่อให้ได้ถ่านกัมมันต์พื้นที่ผิวสูง แสดงดังนี้

$$2KOH\ K_2O + H_2O \quad (2.11)$$

$$C + H_2O\ H_2 + CO \quad (2.12)$$

สมการที่ 2.11 และ 2.12 เป็นการสลายตัวของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เกิดเป็นโพแทสเซียมออกไซด์ (K_2O) และน้ำ ซึ่งเป็นสารทำให้คาร์บอนในถ่านหินเกิดปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันจากนั้นโพแทสเซียมออกไซด์ถูกรีดิวซ์ด้วยไฮโดรเจนหรือคาร์บอนกลายเป็นโลหะโพแทสเซียม ดังสมการที่ 2.13 และ 2.14 ตามลำดับ

$$K_2O + H_2\ 2K + H_2O \quad (2.13)$$

$$K_2O + C\ 2K + CO \quad (2.14)$$

ที่อุณหภูมิสูงโพแทสเซียมเป็นโลหะที่อ่อนตัวจึงทำให้แทรกเข้าไปในชั้นของอะตอมคาร์บอน ทำให้เกิดรูพรุนได้มากขึ้น

2.7 การจำแนกขนาดรูพรุนตามมาตรฐาน IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry)

เราสามารถจำแนกรูพรุนได้เป็น 3 ประเภท ได้แก่

รูพรุนประเภทแรกคือ “ไมโครพอร์ (Micropore)” เป็นรูพรุนที่มีขนาดความกว้างไม่เกิน 2 นาโนเมตร โครงสร้างรูพรุน แบบไมโครพอร์นี้ถ้ามีอยู่จำนวนมากจะส่งผลให้วัสดุ ดังกล่าวมีขนาดพื้นที่ผิวจำเพาะสูงมาก (หมายถึงพื้นที่ผิวของวัสดุที่โมเลกุลใดๆสามารถเข้าถึงได้ต่อหน่วยน้ำหนักของวัสดุนั้น) และเนื่องจากความกว้างของรูพรุนแบบ ไมโครพอร์มีขนาดที่โตกว่าขนาดของโมเลกุลทั่วไปไม่มากนักผลที่ตามมาคือ เมื่อมีโมเลกุลใดๆ เคลื่อนที่เข้ามาอยู่ในรูพรุนแล้วโมเลกุลเหล่านั้นจะตกอยู่ภายใต้อิทธิพลของแรงอันตรกิริยาจากผนังของรูพรุน เราเรียกแรงอันตรกิริยา นี้ว่า “แรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals interaction)” และแรงแวนเดอร์วาลส์นี้เองที่ทำให้โครงสร้างรูพรุนแบบไมโครพอร์สามารถกักเก็บโมเลกุลบางชนิดเอาไว้ได้ ซึ่งเป็นประโยชน์อย่างยิ่งเมื่อนำวัสดุที่มีรูพรุนแบบไมโครพอร์ ไปประยุกต์ในเทคโนโลยีการดูดซับ (Adsorption) หรือ วัสดุสำหรับตรึงรูปตัวเร่งปฏิกิริยาเคมี ในงานวิจัยด้านวัสดุที่มีรูพรุนในอดีต นักวิจัยมักจะมุ่งเน้นความสำคัญ ไปที่การสังเคราะห์รูพรุนขนาดไมโครพอร์เป็นหลัก เนื่องด้วยต้องการเพิ่มขนาดพื้นที่ผิวจำเพาะของวัสดุ เท่านั้นตัวอย่างของตัวดูดซับที่มีขนาดของรูเป็นไมโครพอร์ คือ ซีโอไลต์ (Zeolite) [20,21]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูพรุนประเภทที่สองซึ่งมีขนาดรูพรุนที่กว้างกว่าคือ มีขนาดความกว้างในช่วง 2 ถึง 50 นาโนเมตร เรียกว่า “มีโซพอร์ (Mesopore)” โดยเฉพาะอย่างยิ่งรูพรุน แบบมีโซพอร์ขนาดเล็ก (ขนาดความกว้างอยู่ระหว่าง 2 ถึง 10 นาโนเมตร) จะมีประโยชน์คล้ายกับรูพรุน แบบไมโครพอร์ในด้านความสามารถในการกักเก็บโมเลกุลโดยเฉพาะอย่างยิ่งโมเลกุลขนาดใหญ่จำพวกสารชีวโมเลกุลเช่น เอนไซม์ หรือ ดีเอ็นเอ เป็นต้นเนื่องจาก สารชีวโมเลกุลโดยมากมีขนาดโมเลกุลที่ใหญ่ในระดับนาโนเมตร จึงทำให้แรงแวนเดอร์วาลส์จากผนังของมีโซพอร์ ยังคงมีอิทธิพลต่อโมเลกุลขนาดใหญ่เหล่านี้ ผลที่ตามมาทำให้โครงสร้างรูพรุนแบบมีโซพอร์ขนาดเล็กยังคงมีศักยภาพในการกักเก็บสารชีวโมเลกุลเหล่านี้ได้เป็นอย่างดี ด้วยลักษณะดังกล่าวจึงทำให้โครงสร้าง รูพรุนแบบมีโซพอร์นั้นมักถูกนิยมนำมาใช้เป็นวัสดุสำหรับการตรึงรูปเอนไซม์ [22,23] สำหรับรูพรุนแบบมีโซพอร์ขนาดใหญ่ (ขนาดความกว้างตั้งแต่ 10 นาโนเมตร) ตัวอย่างสารดูดซับที่มีขนาดของรูเป็นมีเมโซพอ ได้แก่ ซิลิกาเจล (Silica gel) อลูมินาเจล (Alumina gels) อะมิโนซิลิเกดคะตะลิสต์ (Aminosilicate catalyst)

รูพรุนประเภทที่สามคือ “แมคโครพอร์ (Macropore)” หมายถึง รูพรุนที่มีขนาดความกว้างตั้งแต่ 50 นาโนเมตร ขึ้นไป เดิมทีในอดีตนั้นโครงสร้างรูพรุนขนาดใหญ่เหล่านี้ (ทั้งมีโซพอร์ขนาดใหญ่และแมคโครพอร์) ไม่ได้รับความสนใจมากนัก เนื่องจากไม่ได้มีส่วนช่วยโดยตรงต่อการเพิ่มขนาดพื้นที่ผิวจำเพาะของวัสดุพรุนรวมถึงการมีขนาดความกว้างของรูพรุนที่ใหญ่กว่าโมเลกุลทั่วไปมาก(หลายร้อยเท่า) จึงทำให้แรงแวนเดอร์วาลส์ไม่มีอิทธิพลภายในรูพรุนเหล่านี้ อย่างไรก็ดีในปัจจุบันนักวิจัยด้านวัสดุที่มีรูพรุนได้มุ่งความสำคัญไปยังการมีอยู่ของโครงสร้างรูพรุนขนาดใหญ่เหล่านี้ในวัสดุ เนื่องจากโครงสร้างรูพรุน ดังกล่าวมีประโยชน์เป็นอย่างมากในด้านการเป็นช่องทาง ลำเลียงขนาดใหญ่สำหรับการเคลื่อนที่ของโมเลกุลต่างๆ ไปยังรูพรุนแบบไมโครพอร์ที่มีขนาดเล็กกว่าได้ง่ายและรวดเร็วขึ้น เนื่องจากช่วยลดความต้านทานที่เกิดจากการ แพร่ผ่านรูพรุนของโมเลกุลของของไหลที่เคลื่อนที่เข้ามาได้ [24,25]

2.8กระบวนการดูดซับ (Adsorption Process)

การดูดซับเป็นกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการสะสมตัวของสาร หรือความเข้มข้นของสารที่บริเวณพื้นผิวหรือระหว่างผิวหน้า (Interface) กระบวนการนี้สามารถเกิดที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่าง 2 สภาวะใด ๆ เช่น ของเหลวกับของเหลว ก๊าซกับของเหลว ก๊าซกับของแข็ง หรือของเหลวกับของแข็ง โดยโมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่ถูกดูดจับเรียกว่า สารถูกดูดซับ (Adsorbate) ส่วนสารที่ทำหน้าที่ดูดซับเรียกว่า สารดูดซับ (Adsorbent)

2.8.1 กลไกของกระบวนการดูดติดผิว

การดูดติดผิว (Adsorption) เป็นกระบวนการกักพวกสารละลายหรือสารแขวนลอยขนาดเล็กซึ่งละลายอยู่ในน้ำให้อยู่บนผิวของสารอีกชนิดหนึ่ง โดยที่สารละลายหรือสารแขวนลอย ขนาดเล็กนี้เรียกว่า Adsorbate ส่วนของแข็งที่มีผิวเป็นที่เกาะจับของสารที่ถูกดูดติดเรียกว่า Adsorbent การ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดูดติดผิวนี้จะเป็นการดูดติดแบบระหว่างสถานะ (Phase) ต่างๆทั้งสามสถานะ คือ ของเหลว (Liquid) ก๊าซ (Gas) และ ของแข็ง (Solid) ซึ่งมีได้ทั้งแบบ ของเหลว-ของเหลว ก๊าซ-ของเหลว ก๊าซ-ของแข็ง และ ของเหลว-ของแข็ง โดยในที่นี้จะพิจารณาถึงเฉพาะแบบ ของเหลว-ของแข็ง (Liquid-Solid Interface) ในการดูดติดผิวโมเลกุลของสารละลายหรือสารแขวนลอยก็จะถูกกำจัดออกจากน้ำและไปเกาะติดอยู่บนตัวดูดซับ โมเลกุลของสารส่วนใหญ่จะเกาะจับอยู่กับผิวภายในโพรงของตัวดูดซับและมีเพียงส่วนน้อยเท่านั้นที่เกาะอยู่ที่ผิวภายนอก การถ่ายเทโมเลกุลจากน้ำไปหาตัวดูดซับเกิดขึ้นได้จนถึงสมดุลจึงหยุด ณ จุดสมดุล ความเข้มข้นของโมเลกุลในน้ำจะเหลือน้อยเพราะโมเลกุลส่วนใหญ่เคลื่อนที่ไปเกาะจับอยู่กับตัวดูดซับโดยในการเกาะติดจะมี Driving Force อยู่ 2 แบบ คือ การดูดซับทางกายภาพ และการดูดซับทางเคมี

2.8.2 ประเภทของการดูดซับ

ปัจจัยสำคัญในการบอกชนิดของกระบวนการดูดซับจะพิจารณาจากแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลที่ถูกดูดซับกับผิวของสารดูดซับ ถ้าแรงยึดเหนี่ยวเป็นแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals Forces) จะเป็นการดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption) แต่ถ้าแรงยึดเหนี่ยวทำให้เกิดพันธะเคมีระหว่างโมเลกุลที่ถูกดูดซับกับผิวของสารดูดซับจะเรียกว่า การดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption)

2.8.2.1 การดูดซับทางกายภาพ

เป็นการดูดซับที่เกิดจากแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลอย่างอ่อน คือ แรงแวนเดอร์วาลส์ (Vander Waals Forces) ซึ่งเกิดจากการรวมแรง 2 ชนิด คือ แรงกระจาย (London dispersion force) และแรงไฟฟ้าสถิต(Electrostatic force) การดึงดูดด้วยแรงที่อ่อนทำให้การดูดซับประเภทนี้มีพลังงานการคายความร้อนค่อนข้างน้อย คือ ต่ำกว่า 20 กิโลจูลต่อโมลและสามารถเกิดการผันกลับของกระบวนการได้ง่าย ซึ่งเป็นข้อดี เพราะสามารถฟื้นฟูสภาพของตัวดูดซับได้ง่ายด้วย สารที่ถูกดูดซับสามารถเกาะอยู่รอบ ๆ ผิวของสารดูดซับได้หลายชั้น(Multilayer) หรือในแต่ละชั้นของโมเลกุลสารถูกดูดซับจะติดอยู่กับชั้นของโมเลกุลของสารถูกดูดซับในชั้นก่อนหน้านี้ โดยจำนวนชั้นจะเป็นสัดส่วนกับความเข้มข้นของสารถูกดูดซับ และจะเพิ่มมากขึ้นตามความเข้มข้นที่สูงขึ้นของตัวถูกละลายในสารละลาย

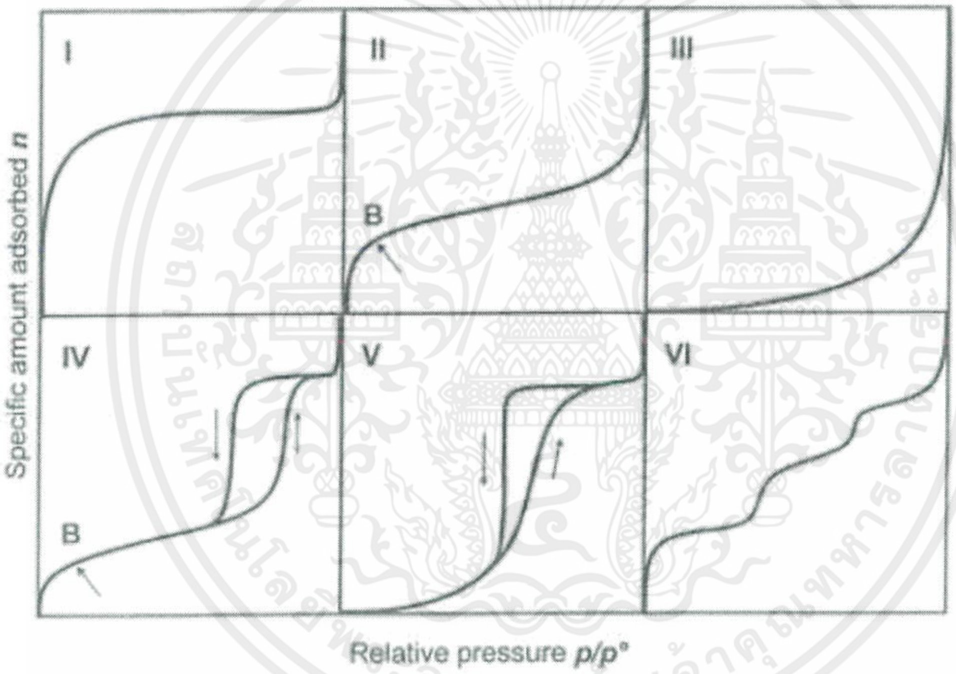
2.8.2.2 การดูดซับทางเคมี

การดูดซับประเภทนี้เกิดขึ้นเมื่อตัวถูกดูดซับกับตัวดูดซับทำปฏิกิริยาเคมีกัน ซึ่งส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของตัวถูกดูดซับเดิม คือมีการทำลายแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมหรือกลุ่มอะตอมเดิมแล้วมีการจัดเรียงอะตอมไปเป็นสารประกอบใหม่ขึ้น โดยมีพันธะเคมีซึ่งเป็นพันธะที่แข็งแรง มีพลังงานกระตุ้นเข้ามาเกี่ยวข้องทำให้ความร้อนของการดูดซับมีค่าสูงประมาณ 50 - 400 กิโลจูลต่อโมล หมายความว่าการกำจัดตัวถูกดูดซับออกจากผิวตัวดูดซับจะทำได้ยาก คือไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาผันกลับได้ (Irreversible) และการดูดซับประเภทนี้จะเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayer) เท่านั้น ซึ่งการดูดซับทางกายภาพและทางเคมีมีข้อแตกต่างกันหลายอย่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8.3 ไอโซเทอมการดูดซับ

การดูดซับเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับคือ ความดันหรือความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับ อุณหภูมิ ชนิดของสารถูกดูดซับและสารดูดซับ ดังนั้นในการดูดซับจะต้องคำนึงถึงปัจจัยเหล่านี้ด้วย โดยทั่วไปมักจะควบคุมให้อุณหภูมิของการดูดซับให้คงที่ และศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของตัวถูกดูดซับกับความดันหรือความเข้มข้นของสารละลายที่สภาวะสมดุลของการดูดซับ โดยเส้นกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ดังกล่าวเรียกว่า “ไอโซเทอม (Isotherm)” ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ซึ่งเป็นการจำแนกไอโซเทอมการดูดซับแก๊สตามระบบ IUPAC โดยไอโซเทอม 5 ชนิดแรก (Type I ถึง Type V) ได้ถูกจำแนกไว้ตั้งแต่ ปี ค.ศ. 1940 โดยนักวิทยาศาสตร์ 4 ท่าน ได้แก่ S. Brunauer, L.S. Deming, W.S. Diming and E. Teller หรืออาจเรียกการจำแนกไอโซเทอม 5 ชนิดแรกว่าเป็นการจำแนกตามแบบของ BDDT



รูปที่ 2.5 ไอโซเทอมการดูดซับ [26]

Type I เป็นไอโซเทอมสาหรับการดูดซับที่เป็นแบบชั้นเดียว (Monolayer adsorption) หรือว่าแบบแลงเมียร์ (Langmuir) เป็นแบบที่ง่ายที่สุด เป็นปรากฏการณ์การดูดซับของสารที่ไม่มีความพรุน หรือมีรูพรุนขนาดเล็กเป็นจานวนมาก เช่น ถ่านกัมมันต์ หรือซีโอไลต์ พบทั้งในการดูดซับทางเคมี และการดูดซับทางกายภาพ ซึ่งปริมาณการดูดซับจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วที่ความดันสัมพัทธ์ (Relative pressure) ต่างๆ และที่ความดันสัมพัทธ์สูง เข้าใกล้ 1 จะมีการดูดซับเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อย

Type II ไอโซเทอมรูปตัวเอส (S-shaped isotherm) มักจะเกิดกับวัสดุที่ไม่มีความพรุนหรือมีความพรุนขนาดใหญ่ (Macro-porous) ที่จุดเปลี่ยนกราฟ (Inflection point or knee of isotherm) เป็นตำแหน่งที่ผิวหน้าถูกคลุมแบบชั้นเดียวเกือบสมบูรณ์แล้ว เมื่อเพิ่มความดันจะทาให้การดูดซับเกิดขึ้นมากกว่าหนึ่งชั้นดังนั้นการดูดซับแบบนี้จึงเป็นการดูดซับแบบหลายชั้น (Multilayer adsorption)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Type III เป็นไอโซเทอมที่ไม่มีจุดเปลี่ยนกราฟ มีรูปร่างคล้ายกระจกเว้า ไอโซเทอมแบบนี้ไม่ค่อยพบมากนักจะเกิดกับการดูดซับที่ไม่แข็งแรง เป็นการดูดซับที่เกิดขึ้นกับของแข็งที่ไม่มี รูพรุน (Nonporous solid) และของแข็งที่มีรูพรุนขนาดเล็กเป็นส่วนใหญ่ แต่เป็นพวกที่มีแรงดึงดูดระหว่างตัวดูดซับ และตัวถูกดูดซับที่ไม่แข็งแรงทาให้ดูดซับได้น้อย เกิดการดูดซับแบบชั้นเดียวที่ความดันสัมพัทธ์ต่ำ แต่เมื่อเกิดการดูดซับแบบหลายชั้นจะเกิดแรงดึงดูดระหว่างตัวถูกดูดซับด้วยกันเองทา ให้ดูดซับได้มากขึ้นที่ความดันสัมพัทธ์ที่มีค่าสูง

Type IV เป็นไอโซเทอมที่พบมากในวัสดุที่มีรูพรุนส่วนใหญ่เป็นรูพรุนขนาดกลาง (ขนาดรูพรุนระหว่าง 2-50 นาโนเมตร) ในช่วงแรกซึ่งมีค่าความดันสัมพัทธ์ต่ำเส้นไอโซเทอมจะเหมือนกับไอโซเทอมชนิดที่ 2 จากนั้นการดูดซับเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อความดันสัมพัทธ์สูงขึ้นเนื่องจากเกิดการควบแน่นคาปิลลารี (Capillary condensation) ขึ้นในรูพรุน ซึ่งทา ให้เกิด Hysteresis loop ในช่วง Desorption ซึ่งข้อมูลของการเกิดการควบแน่นในช่วงคาปิลลารีสามารถนำมาคำนวณหาการกระจายขนาดของรูพรุน (Pore size distribution) ในของแข็งที่มีรูพรุนขนาดกลางได้ การควบแน่นคาปิลลารีทาให้ช่วง Desorption มีปริมาณดูดซับที่สูงกว่าการเกิดการดูดซับที่ความดันเท่ากัน

Type V เหมือนไอโซเทอมชนิด Type IV ต่างกันเพียงเกิดการควบแน่นในรูพรุน (มี Hysteresis loop) ไอโซเทอมแบบนี้จะพบไม่บ่อยนัก

Type VI เป็นไอโซเทอมแบบขั้นบันได (Stepped isotherm) ไอโซเทอมแบบนี้จะพบไม่บ่อยนักโดยมากพบในระบบที่เป็นการดูดซับแบบชั้นต่อชั้นบนพื้นที่ผิวที่ค่อนข้างคล้ายกัน (Uniform) โดยรูปร่างของไอโซเทอมจะขึ้นอยู่กับระบบ และอุณหภูมิในการดูดซับ

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Ekaterina Sermyagina [27] และคณะงานวิจัยนี้ทำปฏิกิริยาไฮโดรเทอร์มัลคาร์บอนไนเซชันเพื่อเปลี่ยนชีวมวลเป็นพลังงานเชื้อเพลิงโดยทำการปรับเปลี่ยนอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาไฮโดรเทอร์มัลคาร์บอนไนเซชัน 180 - 250 องศาเซลเซียส ที่เวลา 3 ชั่วโมงกับ 6 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 230 องศาเซลเซียสเฮมิเซลลูโลสมีการย่อยสลายอย่างสมบูรณ์แต่เซลลูโลสลิกนินจะคงมีเสถียรภาพอยู่ที่อุณหภูมินี้ วัตถุในการศึกษามีดังนี้ ศึกษาอุณหภูมิที่ผลต่อการสังเคราะห์ชีวมวลและการปรับปรุงคุณสมบัติเชื้อเพลิงของชีวมวลที่ได้จากกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลคาร์บอนไนเซชันและการกำหนดอุณหภูมิต่อปฏิกิริยาไฮโดรเทอร์มัลคาร์บอนไนเซชันจะพบว่าอุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียสมีค่า yield ของชีวมวล 72.93% ค่าEnergy yield 75.96% และค่า HHV_{dry} 22.73 [MJ/kg] ที่250องศาเซลเซียสมีค่าyieldของชีวมวล 45.19% ค่าEnergy yield 74.16% และค่าHHVdry 28.36 [MJ/kg] การทำปฏิกิริยาไฮโดรเทอร์มัลคาร์บอนไนเซชันจะปรับปรุงคุณสมบัติที่ดีขึ้นเช่นค่าheating valueของชีวมวลเพิ่มขึ้น36-40%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Marta Sevilla [28] และคณะงานวิจัยนี้ทำปฏิกิริยาไฮโดรเทอร์มัลคาร์บอนไนเซชันเพื่อประยุกต์ใช้ในด้านของการเร่งปฏิกิริยาการส่งมอบยาหรือการตรึงเอนไซม์ ที่มีพื้นผิวที่สูง โดยการสังเคราะห์ ชีวมวลคือน้ำตาล (กลูโคสซูโครสและแป้ง)ภายใต้เงื่อนไขที่อุณหภูมิตั้งแต่ 170 ถึง240 องศาเซลเซียส เวลา 0.5 - 4.5 ชั่วโมงนำไปสู่การก่อตัวคาร์บอนที่เป็นของแข็งโดยมีลักษณะเป็นทรงกลม มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง0.4 - 6.0 มิลลิเมตร สามารถปรับความโดยการปรับเปลี่ยนเงื่อนไขการสังเคราะห์ ดังนั้น เส้นผ่าศูนย์ ขนาดกับการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยา ความเข้มข้นของ สารละลายและเวลาปฏิกิริยา Hydrothermal Carbonizationจะพบว่า ความเข้มข้นของสารมากและอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยามากจะส่งผลให้มีค่า yieldจะมีมากขึ้นตามไปด้วย และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของชีวมวลจะมีใหญ่เมื่อความเข้มข้นของสารมากและอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยามากเช่นกัน

Tuo Ji [29] และคณะ งานวิจัยนี้เป็นการนำไบโอแมส 4 ชนิดคือ พืช ไผ่ ไม้เนื้ออ่อน ไม้เนื้อแข็ง มาทำเป็นตัว support โดยนำไปผ่านกระบวนการ Carbonization ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ในบรรยากาศไนโตรเจน เป็นเวลา 2 ชั่วโมง rate 5 องศาเซลเซียส/นาที แล้วนำไป Oxidation ที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 3 ชั่วโมง โดพ Nano silver(Ag) เพื่อทำเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา แล้วนำไปล้างกรองและล้างด้วยน้ำ Deionized water และนำไปอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมงตรวจวัด pore size , pore volume , mesopore volume fraction พบว่า ไม้เนื้ออ่อนมีค่าเฉลี่ยสูงที่สุด

M. Toufiq Reza [30] และคณะนำชีวมวล 4 อย่างคือ ซังข้าวโพด หญ้า Miscanthus และหญ้า Switch grass และ แกลบ นำไป Hydrothermal Carbonization โดยใช้อัตราส่วนของชีวมวลต่อน้ำ คือ 1:5 (ตามน้ำหนัก)และปล่อย ไนโตรเจน เข้าสู่เตาปฏิกรณ์ด้วย rate 80 cm^3/min เป็นเวลา 10 นาที ส่วนอุณหภูมิจะสูงขึ้นไปจนถึงที่ต้องการและค้างไว้ 5 นาที โดยทำที่อุณหภูมิ 200 230 260 องศาเซลเซียส เมื่อเสร็จก็นำไปแช่น้ำเพื่อให้อุณหภูมิลดลงอย่างรวดเร็วจนถึงอุณหภูมิห้อง ผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สจะถูกปล่อยสู่อากาศ ส่วนผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็งจะนำไปกรอง และนำไปอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส 24 ชั่วโมง yield จะลดลง 41 % จากวัตถุดิบเริ่มต้น และจะลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการ Hydrothermal ปรากฏว่า Hemicellulose จะสลายไปอย่างสมบูรณ์ที่อุณหภูมิ 200 องศา ส่วน lignin จะสลายตัวเพียงเล็กน้อยเท่านั้น กระบวนการ Hydrothermal Carbonization สามารถไล่ธาตุจากชีวมวล Ca, S, P, Mg และ K ถึง 90 % ธาตุ Mn, Fe 50 % และแสดงให้เห็นว่าการ Hydrothermal Carbonization สามารถไล่โลหะหนักได้ถึง 72 – 93 %

Sunday E. Elaigwu[31] และ คณะทำการศึกษาขั้นตอนการเปลี่ยนเป็นถ่านของ rapeseed husk (แกลบชนิดหนึ่ง) ด้วยวิธีการ Hydrothermal Carbonization โดยอาศัยไมโครเวฟ และศึกษาผลกระทบของพารามิเตอร์ในกระบวนการได้แก่ อุณหภูมิ และเวลา เพื่อนำมาประยุกต์ใช้เป็นเชื้อเพลิงแข็ง วิธีทำคือนำ rapeseed husk 15 กรัมผสมกับน้ำ DI (Deionized water) 30 ml และนำลงในเตาปฏิกรณ์ไมโครเวฟที่อุณหภูมิ 150 – 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 – 30 นาที จาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลองพบว่า ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส 25 นาที มีความเหมาะสมที่จะนำมาเป็นเชื้อเพลิงแข็งมากที่สุด เนื่องจาก มีพื้นที่ผิว และค่า HHV มากที่สุด

Gustan Pari[32] และคณะ ได้ทำการสังเคราะห์ Porous carbon Spheres จากมันสำปะหลังและแป้งมันสำปะหลังด้วยวิธีการ Hydrothermal Carbonization โดยกระตุ้นด้วยตัวทำละลาย KOH ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง และนำไปตรวจวัดความเป็นรูพรุนด้วยเครื่องมือ BET และดูความเป็นทรงกลมด้วยเครื่อง SEM พบว่ากระบวนการ Hydrothermal carbonization ช่วยให้คาร์บอนมีรูพรุนเพิ่มมากขึ้นและความเป็นทรงกลมเสถียรมากขึ้น ส่วนการกระตุ้นด้วย KOH นั้นช่วยให้พื้นผิวมีความขรุขระ ซึ่งทำให้พื้นผิวเพิ่มมากขึ้น แต่จะลด yield ของคาร์บอนมากเช่นกัน

Min li[33]และคณะ ได้ทำการสังเคราะห์ Spherical carbon ด้วยวิธีการ Hydrothermal Treatment (HT) โดย activated ด้วย KOH สาเหตุที่เลือกสังเคราะห์ Spherical carbon เพราะว่า มีพลังงานที่พื้นผิวน้อย ควบคุมขนาด, โครงสร้าง, สมบัติทางเคมีได้ง่าย และที่เลือกใช้วิธีการ Hydrothermal Treatment ก็เพราะว่า เป็นวิธีการที่ง่าย, มีเงื่อนไขที่ต้องควบคุมน้อย วิธีทำก็คือ Spherical carbon ที่ได้ 0.8 กรัมผสมกับ KOH ที่บด 3.2 กรัม แล้วในไปเผาที่ 600 องศาเซลเซียส ในบรรยากาศไนโตรเจน เป็นเวลา 2 ชั่วโมง โดยมี heating rate 20 องศาต่อนาที จากนั้นนำไป dried ที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง จากผลการทลองพบว่า เราสามารถควบคุมโครงสร้าง และ การกระจายตัวขนาดของ Spherical carbon ได้ที่อุณหภูมิระหว่าง 180-190 องศาเซลเซียส ที่อุณหภูมิ 4-5 ชั่วโมง และการ activated ด้วย KOH พัฒนาโครงสร้าง (ความเป็นรูพรุนรูปร่างสมบูรณ์มากขึ้น) อีกทั้งยังช่วยให้การกระจายตัวขนาดของ Spherical carbon ดีมากขึ้น

Jingxing Chen[34] และคณะ ทำการสังเคราะห์ Mesoporous Carbon Spheres (MCSs) เพราะว่าcarbon Spheres มีความน่าสนใจเนื่องจาก มีรูปร่างที่สม่ำเสมอ ทนความร้อนได้สูง ความหนาแน่นสูง และนำไฟฟ้าได้อย่างดีเยี่ยม จึงถูกนำมาศึกษาทำเป็น ตัวดูดซับ ฐานรองรับของตัวเร่งปฏิกิริยา และขั้วแอโนดในแบตเตอรี่ โดยวิธีการ Hydrothermal โดยไม่ใช้สารเคมีใดๆ เพราะว่า เป็นวิธีที่ง่ายได้ yield ที่สูง ผลการทลองพบว่า MCSs ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการ Hydrothermal มีความ uniform และมีความแข็งแรงมากกว่า CSs ธรรมดา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.10 เทคนิคและเครื่องมือวัด

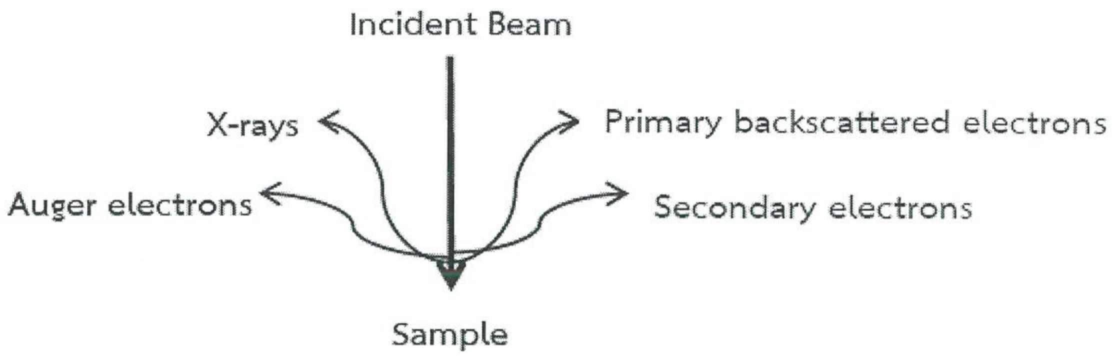
2.10.1 การศึกษาสัณฐาน (Morphology) ด้วยเทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM)

เป็นเทคนิคที่เกิดจากการคิดค้นเพื่อพัฒนาประสิทธิภาพในการมองเห็นวัตถุของกล้องจุลทรรศน์ให้สามารถแจกแจงรายละเอียดของภาพได้มากขึ้นกว่าเดิม โดยการประยุกต์นำเอาอิเล็กตรอนให้สามารถแจกแจงรายละเอียดของภาพได้มากขึ้นกว่าเดิม ที่มีช่วงคลื่นสั้นกว่าคลื่นแสงมาใช้แทนคลื่นแสงและใช้เลนส์สนามไฟฟ้ามาแทนเลนส์กระจก และมีตัวตรวจวัดที่จะมาจับสัญ ญาณอิเล็กตรอนที่เกิดจากการที่ลำอิเล็กตรอนไปกระทบผิวตัวอย่าง จากนั้นก็จะมีอุปกรณ์ในการแปลงสัญญาณที่ได้ให้เป็นสัญญาณภาพที่ปรากฏบนจอรับภาพต่อไป เทคนิคนี้มีการใช้งานอย่างกว้างขวางในหลายสาขา เช่น วัสดุศาสตร์ ไมโครอิเล็กทรอนิกส์ ธรณีวิทยา ชีววิทยา และการแพทย์ ซึ่งมีจุดเด่นที่สำคัญ 3 ประการ ได้แก่ (1) สามารถให้ภาพที่มีความชัดลึกสูง (High Depth of Field) (2) สามารถให้กำลังแยกแยะเชิงสูง (High Spatial Resolution) (3) สามารถใช้ร่วมกับเทคนิคอื่น เช่น Energy Dispersive Spectrometry (EDS) และ Wavelength Dispersive Spectrometry (WDS) เพื่อเป็นข้อมูลเชิงเคมี โดยเครื่องมือที่ใช้ เรียกว่า กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope)

2.10.1.1 หลักการทางานของ SEM

หลักการทำงานของเครื่อง SEM จะประกอบด้วยแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน (Electron Gun) ซึ่งทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนเพื่อป้อนให้กับระบบ โดยกลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้จากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า จากนั้นกลุ่มอิเล็กตรอนจะผ่านเลนส์รวบรวมรังสี (Condenser Lens) ซึ่งทำหน้าที่ปรับลำอิเล็กตรอน (Electron Beam) ให้มีขนาดแคบลง เพื่อเป็นการเพิ่มความเข้มของอิเล็กตรอนจากนั้นลำอิเล็กตรอนจะวิ่งสู่เบื้องล่างผ่านเลนส์วัตถุ (Objective Lens) ซึ่งมีหน้าที่ในการปรับลำอิเล็กตรอนปฐมภูมิให้มีจุดโฟกัสบนผิวตัวอย่างพอดี และลำอิเล็กตรอนที่ตกกระทบผิววัตถุหรือตัวอย่างจะมีขนาดในช่วง 5 ถึง 200 นาโนเมตร โดยมีชุดขดลวดควบคุมการส่องกราด (Scanning Coil) ของลำอิเล็กตรอน ทำหน้าที่ในการควบคุมทิศทางการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนบนพื้นผิวที่ระดับต่างๆทำให้เกิดการปลดปล่อยสัญญาณชนิดต่างๆ ออกมา ดังแสดงในรูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 การเกิดอันตรกริยาระหว่างอิเล็กตรอนปฐมภูมิกับอะตอมตัวอย่าง

สัญญาณที่ได้จากสัญญาณอิเล็กตรอนชนิดต่างๆที่เกิดขึ้น คือ

1. สัญญาณภาพจากอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary Electron) เป็นกลุ่มอิเล็กตรอนพลังงานต่ำประมาณ 3-5 อิเล็กตรอนโวลต์ เกิดที่ผิวระดับไม่ลึก (ไม่เกิน 10 นาโนเมตร) โดยเกิดกับธาตุที่มีแรงยึดเหนี่ยวที่ผิวอิเล็กตรอนต่ำ

2. สัญญาณภาพจากอิเล็กตรอนกระเจิงกลับ (Backscattered Electron) เป็นกลุ่มอิเล็กตรอนที่เสียพลังงานให้กับอะตอมในชิ้นงานเพียงบางส่วนและกระเจิงกลับออกมา ซึ่งมีพลังงานสูงกว่าอิเล็กตรอนทุติยภูมิ เกิดที่พื้นผิวระดับลึกกว่า 10 นาโนเมตร โดยเกิดได้ดีกับธาตุที่มีเลขอะตอมสูง

3. สัญญาณภาพจากรังสีเอกซ์ ชนิดที่เป็นรังสีเอกซ์เฉพาะตัว เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากอิเล็กตรอนจากชั้นโคจรถัดไปเข้ามาแทนที่ และต้องลดพลังงานภายในเนื่องจากอิเล็กตรอนที่ถูกดึงมาแทนที่มีพลังงานสูงกว่า โดยการปลดปล่อยพลังงานส่วนเกินออกมาในรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เพื่อทำให้ตัวเองมีพลังงานมากพอจนหลุดออกจากวงจรออกมา ทำให้อิเล็กตรอนต้องรักษาสมดุลของโครงสร้างภายในอะตอม โดยการดึงอิเล็กตรอนจากชั้นโคจรถัดไปเข้ามาแทนที่ และต้องลดพลังงานภายในเนื่องจากอิเล็กตรอนที่ถูกดึงมาแทนที่มีระดับพลังงานสูงกว่า โดยการปลดปล่อยพลังงานส่วนเกินออกมาในรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เพื่อทำให้ตัวเองมีพลังงานเท่ากับชั้นโคจรที่เข้ามาแทนที่ ซึ่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้านี้มีความยาวคลื่นเฉพาะในแต่ละธาตุ จึงสามารถนำมาใช้ประโยชน์ในการวิเคราะห์ธาตุตามลำดับพลังงานของตัวอย่างได้ทั้งเชิงปริมาณและคุณภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.10.1.3 ส่วนประกอบของ SEM

ส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แสดงดังรูปที่ 2.13 และมีส่วนประกอบสำคัญอยู่ในท่อสุญญากาศ โดยหน้าที่ของส่วนประกอบแต่ละอันมีรายละเอียดดังนี้

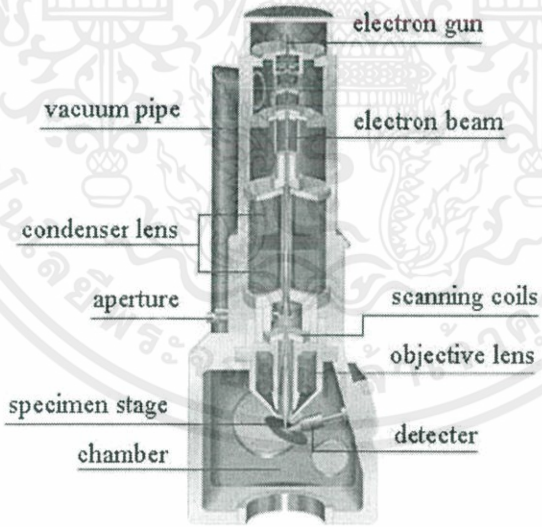
1) แหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนแบบปืนอิเล็กตรอน (Electron Gun) โดยทั่วไปใช้ขดลวดทังสเตน อิเล็กตรอนที่ใช้ในกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด คือ อิเล็กตรอนที่กระเจิงกลับและอิเล็กตรอนทุติยภูมิ

2) เลนส์รวมแรง (Condenser Lens) ทำหน้าที่บังคับให้อิเล็กตรอนมีขนาด และความเข้มข้นเหมาะสมกับตัวอย่าง เพื่อให้ได้ภาพที่ชัดที่สุดที่กำลังขยายที่ต้องการ การลดขนาดของลำอิเล็กตรอนจะช่วยเพิ่มขนาดของกำลังขยาย

3) ขดลวดสำหรับการส่องกราด (Scanning Coil) ทำหน้าที่บังคับให้อิเล็กตรอนเคลื่อนในแนวนอนและแกนตั้งบนระนาบของตัวอย่าง

4) เลนส์วัตถุ (Objective Lens) เป็นเลนส์ที่ทำให้อิเล็กตรอนเกิดภาพขั้นต้น อาศัยอำนาจสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก สามารถปรับเปลี่ยนกำลังขยายความคมชัดของภาพได้ โดยการปรับปริมาณกระแสไฟฟ้าในขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้า เพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก

5) ตัวตรวจวัดอิเล็กตรอน (Detector) ตัวเปลี่ยนสัญญาณอิเล็กตรอนให้เป็นสัญญาณไฟฟ้าหรือสัญญาณภาพ โดยเก็บสัญญาณแต่ละจุดจากปลายอิเล็กตรอน ปรากฏเป็นภาพบนจอภาพ

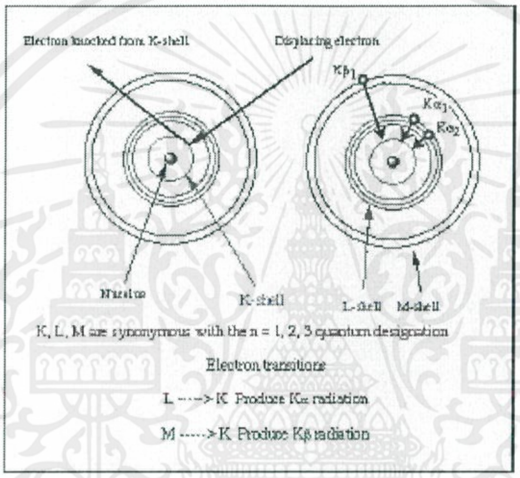


รูปที่ 2.7 แผนภาพขององค์ประกอบกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด [35]

ตัวอย่างที่ใช้ในการวิเคราะห์ต้องเป็นตัวอย่างที่นำไฟฟ้า และต้องทำให้แห้งด้วยการอบไล่ความชื้นถ้าตัวอย่างไม่นำไฟฟ้าต้องนำมาทำเคลือบเพื่อให้นำไฟฟ้า การเคลือบจะช่วยลดการสะสมของประจุและเพิ่มปริมาณของอิเล็กตรอนทุติยภูมิ ส่วนมากใช้ทองเป็นโลหะเคลือบ เทคนิคที่นิยมใช้ได้แก่การสปัตเตอร์(Sputtering) การวิเคราะห์ธาตุด้วยรังสีเอกซ์ สำหรับ SEM ในระบบวิเคราะห์แบบ Energy

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Dispersive Spectrometry (EDS) มีหลักการวิเคราะห์ คือ เมื่อลำอิเล็กตรอนพลังงานสูงเคลื่อนที่เข้าชนอิเล็กตรอนในวงโคจรในชั้นของอะตอม เช่น ชั้น K หรือ L แล้วเกิดการถ่ายโอนพลังงานให้แก่อิเล็กตรอน ทำให้อิเล็กตรอนในชั้นที่ได้รับพลังงานดังกล่าวมีพลังงานสูงขึ้นเกิน พลังงานยึดเหนี่ยว (Binding Energy) ของชั้นโคจรจึงหลุดออกจากวงโคจรและทำให้เกิดที่ว่างของอิเล็กตรอนในชั้นโคจร จากนั้นอะตอมของวงโคจรชั้นถัดไปจะลดระดับพลังงานลงมาให้เท่ากับพลังงานยึดเหนี่ยวของวงโคจรที่เกิดที่ว่างของอิเล็กตรอน ด้วยการปล่อยพลังงานส่วนเกินในรูปของรังสีเอกซ์ แล้วอิเล็กตรอนจะเข้ามาแทนที่พลังงานส่วนเกินนี้มีพลังงานเท่ากับความแตกต่างของระดับพลังงานยึดเหนี่ยวเฉพาะชั้นโคจรของอิเล็กตรอน และเฉพาะของธาตุนั้นๆ จึงมีค่าพลังงานเฉพาะค่า เรียกรังสีเอกซ์ชนิดนี้ว่า รังสีเอกซ์เฉพาะตัว ซึ่งแสดงกระตุ้นให้เกิดรังสีเอกซ์เฉพาะตัวดังรูป



รูป 2.8 การกระตุ้นให้เกิดรังสีเอกซ์เฉพาะตัวโดยใช้ลำอิเล็กตรอน

ในระบบการวิเคราะห์ธาตุด้วยรังสีเอกซ์แบบ EDS หัววัดรังสีที่นิยมใช้ในปัจจุบัน คือหัววัดรังสีแบบ Si(Li) ซึ่งเหมาะสำหรับการวัดรังสีเอกซ์เฉพาะตัวที่มีพลังงานในช่วง 1 ถึง 30 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ หรือ หัววัดชนิดเจอร์มาเนียมความบริสุทธิ์สูง (High Purity Germanium, HPGe) ซึ่งสามารถรังสีเฉพาะตัวในช่วงกว้าง คือ 3 ถึง 200 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ ทั้งนี้หัววัดรังสีเอกซ์ทั้งสองแบบ จะเปลี่ยนแปลงพลังงานของรังสีให้เป็นสัญญาณไฟฟ้าในรูปของศักย์ไฟฟ้า โดยขนาดของสัญญาณไฟฟ้าที่ทางออกของหัววัดจะแปรผันตรงกับพลังงานของรังสีที่ตกกระทบบนหัววัด จากนั้นวงจรขยายแบบช่องเดี่ยวหรือหลายช่องจะเก็บสัญญาณไฟฟ้าจากหัววัดในหน่วยความจำที่อยู่ภายในเครื่อง และแสดงผลการวิเคราะห์บนจอภาพในรูปของสเปกตรัม พร้อมทั้งผลการวิเคราะห์เชิงปริมาณและคุณภาพโดยโปรแกรมสำเร็จรูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.10.2 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันโดยวิธีฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโคปี

การดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของสาร ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงพลังงานในการสั่นของโมเลกุล อินฟราเรด เป็นช่วงหนึ่งของสเปกตรัมของการแผ่รังสีแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งมีเลขคลื่น (Wave number) อยู่ในช่วงประมาณ 12,800 ถึง 10 cm^{-1} หรือช่วงความยาวคลื่นจาก 0.78 - 1000 μm ช่วงของอินฟราเรดแบ่งได้เป็น 3 ช่วง [32, 33] คือ

- ช่วงใกล้อินฟราเรด (Near IR region) เป็นช่วงที่อยู่ใกล้กับช่วงวิสิเบิล พบว่าแถบการดูดกลืน (Absorption band) ที่ได้ค่อนข้างต่ำ มีประโยชน์ในการวิเคราะห์สารประกอบอะโรมาติก (Aromatic compounds)
- ช่วงกลางอินฟราเรด (Middle IR region) ช่วงนี้แบ่งออกเป็น Group frequency region อยู่ระหว่าง 4000-1300 cm^{-1} ซึ่งสเปกตรัมที่ได้ในช่วงนี้ส่วนใหญ่ได้จากพวกหมู่ฟังก์ชัน (Functional groups) แต่ไม่ให้โครงสร้างของโมเลกุลที่สมบรูณ์และ Finger print region อยู่ระหว่าง 1300-200 cm^{-1} สเปกตรัมที่ได้ในช่วงนี้ส่วนใหญ่เกิดจากโครงสร้างของโมเลกุลที่สมบรูณ์ ดังนั้นสเปกตรัมที่ได้จึงค่อนข้างยุ่งยาก การวิเคราะห์จึงต้องใช้วิธีเปรียบเทียบกับสเปกตรัมของสารที่ทราบโครงสร้างแล้ว
- ช่วงไกลอินฟราเรด (Far IR region) ช่วงนี้ไม่ค่อยได้ใช้ ในการวิเคราะห์เนื่องจากสเปกตรัมช่วงนี้มักจะเกิดจากการสั่นของโครงสร้างหรือเกิดการหมุนของโมเลกุล ช่วงนี้อยู่ระหว่าง 200-10 cm^{-1}

สำหรับช่วงเลขคลื่นที่ใช้ประโยชน์ในการวิเคราะห์นั้น เป็นช่วงกลางอินฟราเรดเป็นส่วนใหญ่ คือ 4000-400 cm^{-1}กระบวนการดูดกลืนแสงอินฟราเรด โมเลกุลของสารจะดูดกลืนแสงอินฟราเรดได้ต้องมีลักษณะ และสภาวะที่เหมาะสม คือ

1. รังสีหรือแสงนั้นจะต้องมีพลังงานพอเหมาะพอดี ที่จะทำให้เกิดทรานซิชัน
2. ต้องเกิดการคู่ควบ (Coupling) พอดีระหว่างสนามไฟฟ้าจากการแผ่รังสีกับสารนั้น เมื่อมีการดูดกลืนพลังงานแล้วจะทำให้เกิดโมเมนต์ขั้วคู่ของโมเลกุลนั้นเปลี่ยนไปดังนั้นเมื่อแสงอินฟราเรดผ่านเข้าไปในโมเลกุลของสารใดก็ตาม แล้วเกิดปรากฏการณ์ทั้งสองอย่างข้างบนนี้เรียกสารนั้นว่า IR active ถ้าไม่มีการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ขั้วคู่แสดงว่าสารนั้นเป็น IR inactive ถือว่าไม่มีการดูดกลืนแสงอินฟราเรด ถ้ามีการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ขั้วคู่มากจะได้พีคแถบดูดกลืนสูง ถ้าเปลี่ยนแปลงน้อยจะได้พีคแถบดูดกลืนต่ำ

2.10.1.1 การเตรียมสารตัวอย่าง

สารตัวอย่างที่เป็นของแข็ง

1. เทคนิคมัลล์ (Mull technique) เป็นวิธีการเตรียมสารโดยการบดสารใน Mineral oil เช่น นูจอล (Nujol) การเตรียมสารที่เป็นของแข็งมักมีปัญหาเกี่ยวกับการกระเจิงแสง จึงแก้ปัญหาโดยการบดสารตัวอย่างให้เป็นผงละเอียด และให้แขวนลอยในของเหลวที่มีดัชนีหักเหใกล้เคียงกับของแข็งเพื่อตัดการกระเจิงแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. วิธีการอัดเม็ด (Pellet method) วิธีนี้ให้ของแข็งแขวนลอยในเม็ดโพแทสเซียมโบรไมด์ ซึ่งถูกอัดด้วยความดันสูงด้วยเครื่องไฮโดรลิค เม็ดของสารตัวอย่างโปร่งแสง จึงใช้วิเคราะห์คุณภาพและปริมาณได้

3. เทคนิคฟิล์ม (Film technique) ทำได้โดยตัดวางตัวอย่างให้เป็นแผ่นบางๆ โดยใช้เครื่องตัดหรือหลอม สารตัวอย่างแล้วทิ้งให้แห้งจนได้เป็นแผ่นฟิล์ม

4. วิธีเตรียมสารตัวอย่างให้เป็นของเหลว นำตัวอย่างมาละลายในตัวทำละลายที่เหมาะสมโดยมีของแข็งประมาณ 5 เปอร์เซ็นต์

สารตัวอย่างที่เป็นของเหลว

ตัวอย่างที่เป็นของเหลววิเคราะห์ได้ในสภาพของเหลวที่บริสุทธิ์โดยเตรียมใส่เซลล์ที่มีความหนาพอประมาณ ถ้าใช้ตัวทำละลายต้องเป็นตัวทำละลายที่ไม่มีขั้ว เพื่อปูองกันไม่ให้ตัวทำละลายดูดกลืนแสงอินฟราเรด

สารตัวอย่างที่เป็นแก๊ส

ตัวอย่างที่เป็นแก๊สใส่ในเซลล์บรรจุแก๊สที่เป็นหลอดแก้วคล้ายท่อมีหน้าต่างทำด้วยโซเดียมคลอไรด์ โพแทสเซียมโบรไมด์ หรือ แคลเซียมฟลูออไรด์

2.10.1.2 ประเภทของเครื่องอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี

เครื่องอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์แบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ

1) เครื่องอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ ที่ใช้ระบบกระจายแสง (Dispersive infrared spectropHotometer) ซึ่งมีทั้งลำแสงเดี่ยว (Single beam) และชนิดลำแสงคู่ (Double beam) แต่ลำแสงคู่เป็นเครื่องที่ได้รับความนิยมมากกว่า และพบเห็นโดยทั่วไปเพราะแบ็คกราวด์ (Background) ที่เกิดจากแก๊สในบรรยากาศเช่น แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และไอน้ำ จะหมดปัญหาไป

2) เครื่องฟูเรียร์ทรานฟอร์ม อินฟราเรดสเปกโตมิเตอร์ (Fourier Transform Infrared Spectrometer, FT-IR) โดยทั่วไปเครื่องมือทางสเปกโทรสโคปี นั้นมักใช้หลักการกระจายแสงของสเปกตรัม การแผ่รังสีแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงที่สนใจ เป็นตัวกำหนด เช่น ในช่วงของอินฟราเรดดังที่กล่าว

มาแล้ว จากการบันทึกผลของค่าความเข้มข้นของแสงต่อความถี่ หรือความยาวคลื่นซึ่งได้ออกมาเป็นสเปกตรัมเรียกว่า Frequency-domain spectrum ดังที่เป็นกันอยู่ แต่ถ้าใช้วิธีการวัดต่างไปโดยวัดความเข้มข้นของแสงหรือกำลังของแสงที่ความยาวคลื่นต่างๆกันอย่างต่อเนื่องเทียบกับเวลาเรียกว่า Time-domain spectroscopy หรือโดยทั่วไปเรียก Fourier Transform Spectroscopy ซึ่งจะให้สเปกตรัมที่ได้จากการวัดการดูดกลืนแสงที่ความถี่ต่างๆพร้อมกันหมด ดังนั้นจึงสามารถช่วยให้การวิเคราะห์รวดเร็วขึ้น การแยก (Resolution) ก็ดีขึ้น หรือเป็นการทำให้ Signal-to-noise ratio ดีขึ้นกว่าวิธีธรรมดา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อดีของการใช้เทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์ม ที่เห็นได้ชัดๆก็คือ ช่วยให้การวิเคราะห์หรือการวัดสเปกตรัมของสารตัวอย่างทำได้เร็วกว่าเครื่องอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ธรรมดาหลายเท่า เพราะการวัดด้วยเครื่องธรรมดาจะเป็นแบบวัดทีละความถี่ ส่วน FT-IR วัดที่ความถี่ต่างๆอย่างต่อเนื่อง นอกจากนี้ยังสามารถช่วยให้การวิเคราะห์ง่าย และสะดวกขึ้นด้วยการใช้คอมพิวเตอร์ควบคุมการทำงาน ส่วนข้อเสีย คือ FT-IR เป็นเครื่องมือที่มีราคาแพง และต้องเสียค่าบำรุงรักษาสูง

ส่วนประกอบของเครื่องอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ โดยทั่วไป มีส่วนประกอบสำคัญ คือ

1. ต้นกำเนิดแสงอินฟราเรด (IR Source)
2. เซลล์ที่ใส่ตัวอย่าง (Sample Cell)
3. โมโนโครเมเตอร์ (Monochromator)
4. เครื่องวัดแสงอินฟราเรด (IR Detector)
5. เครื่องบันทึกสเปกตรัม (Recorder หรือ Readout Devices)

รูป 2.9 แผนภาพองค์ประกอบของเครื่องอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์

2.10.3 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน(Thermogravimetric Analysis; TGA)

เป็นเทคนิคที่ใช้วิเคราะห์ความเสถียรของวัสดุโดยเฉพาะพอลิเมอร์เมื่อได้รับความร้อนโดยการวัดน้ำหนักของวัสดุที่เปลี่ยนแปลงในแต่ละช่วงอุณหภูมิด้วยเครื่องชั่งที่มีความไวสูง เทคนิคนี้เหมาะสำหรับการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสภาพของวัสดุที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับแก๊สหรือระเหยของน้ำ การตกผลึก (crystallization) อันเนื่องมาจากการเปลี่ยนเฟส การแตกตัวของวัสดุ (decomposition) ศึกษาการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชัน หรือ ปริมาณสารสัมพันธ์ (stoichiometry) [38]

ในการวิเคราะห์ตัวอย่าง ตัวอย่างจะถูกวางบนจานขนาดเล็ก ซึ่งเชื่อมต่อกับเครื่องชั่งละเอียดที่มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงสูง โดยที่ทั้งหมดจะอยู่ในเตาที่สามารถควบคุมอุณหภูมิและบรรยากาศได้ บรรยากาศภายในอาจจะเป็นแก๊สเฉื่อย เช่น ไนโตรเจน หรือแก๊สที่มีความว่องไว เช่น อากาศ หรือออกซิเจน โดยน้ำหนักของตัวอย่างที่เปลี่ยนแปลงจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิเฉพาะของสารแต่ละชนิด โดยน้ำหนักที่หายไปนั้นเกิดมาจากการระเหย การย่อยสลาย หรือการเกิดปฏิกิริยาต่างๆ

2.10.3.1 ข้อมูลจำเพาะ (Specifications)

ช่วงอุณหภูมิ อุณหภูมิห้อง – 1,600 °C

อัตราการให้ความร้อนตั้งแต่อุณหภูมิห้อง – 1,100 °C 10 นาที

อัตราการทำความเย็นตั้งแต่ 1,000 – 100 °C 25 นาที

ความถูกต้องของอุณหภูมิ +0.5°C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความแม่นยำของอุณหภูมิ +0.3 °C

ความสามารถในการให้บริการวิเคราะห์ทดสอบ

องค์ประกอบของสาร (Composition)

1. เสถียรภาพทางความร้อน (Thermal stability/decomposition)
2. ปริมาณสารสัมพันธ์ที่เกิดปฏิกิริยา (Stochiometry of reaction)
3. จลพลศาสตร์ของการเกิดปฏิกิริยา (Kinetics of reactions)
4. กระบวนการดูด/คายพลังงาน (Desorption/adsorption processes)
5. การระเหย (Evaporation)

2.10.4 การวิเคราะห์ธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน และไนโตรเจน (CHN Analyzer)

เครื่องวิเคราะห์ธาตุคาร์บอนไฮโดรเจน และไนโตรเจน (CHN analyzer) หรืออาจเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า เครื่องวิเคราะห์ธาตุที่เป็นองค์ประกอบของสารอินทรีย์ (organic elemental analyzer) เป็นเครื่องมือสำคัญที่ใช้หาปริมาณธาตุที่เป็นองค์ประกอบของสารอินทรีย์ต่างๆ ในเครื่องมือบางรุ่นสามารถใช้วิเคราะห์หาปริมาณซัลเฟอร์ (S) ได้ด้วย

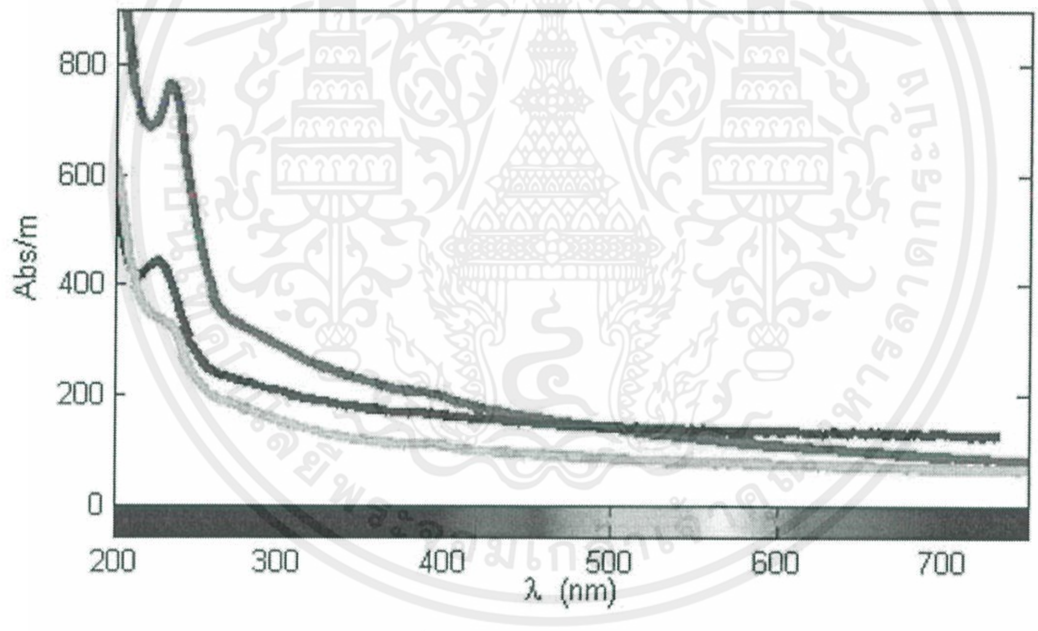
หลักการทำงานของเครื่องมือในการหาปริมาณธาตุเหล่านี้อาศัยการเผาไหม้อย่างรวดเร็ว (flash combustion) เพื่อเปลี่ยนธาตุที่เป็นองค์ประกอบของสารอินทรีย์ในตัวอย่างไปเป็นแก๊สที่สัมพันธ์กับธาตุนั้นๆ อย่างมีสัดส่วนที่แน่นอน เช่น ธาตุไนโตรเจนจะถูกเปลี่ยนไปเป็นแก๊สไนโตรเจน (N_2) ธาตุคาร์บอนจะถูกเปลี่ยนไปเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และธาตุไฮโดรเจนจะถูกเปลี่ยนเป็นไอน้ำ (H_2O) จากนั้นจึงแยกแก๊สผสมออกจากกันเพื่อหาปริมาณแก๊สแต่ละชนิดต่อไป ในการวิเคราะห์จะชั่งน้ำหนักที่แน่นอนของตัวอย่างมาในช่วง 2-3 มิลลิกรัม (มากที่สุดไม่เกิน 10 มิลลิกรัม) และห่อด้วยแผ่นดีบุกบาง ๆ (tin foil) เป็นแคปซูลเล็ก ๆ และนำไปใส่ในเครื่องสุ่มตัวอย่างอย่างอัตโนมัติ (autosample) จากนั้นแคปซูลของตัวอย่างข้างต้นจะถูกนำไปหย่อนลงในหลอดเผาไหม้ (combustion tube) ที่ทำจากควอทซ์หรือเหล็กกล้าซึ่งให้อุณหภูมิสูงถึง 1020 °C. ภายใต้บรรยากาศแก๊สฮีเลียมซึ่งไหลผ่านตลอดเวลา จากนั้นจึงนำแก๊สออกซิเจนผ่านเข้ามา ซึ่งจะทำปฏิกิริยากับดีบุกได้ SnO_2 พร้อมกับคายความร้อนออกมาทำให้อุณหภูมิสูงถึง 1800 °C ซึ่งช่วยให้การเผาไหม้สมบูรณ์ขึ้น คาร์บอนจะถูกเปลี่ยนไปเป็น CO_2 และไนโตรเจนถูกเปลี่ยนไปเป็น N_2 และออกไซด์อื่น ๆ ของไนโตรเจน ซึ่งจะให้ผลิตผลเป็นแก๊สผสม N_2, NO_x , H_2O, O_2 และ CO_2 ซึ่งจะถูกพาโดยแก๊สฮีเลียมไหลผ่านหลอดที่มีลวดทองแดงตัดเป็นชิ้นเล็ก ๆ บรรจุอยู่ ซึ่งมีอุณหภูมิประมาณ 650 °C จะทำให้ NO_x เปลี่ยนไปเป็น N_2 และเกิด CuO ขึ้น จากนั้นจะผ่านไปยังคอลัมน์ที่บรรจุด้วยไยลวดเงิน (silver wool) ซึ่งใช้จับแก๊สของธาตุซัลเฟอร์ จากนั้นจึงแยก CO_2 และ N_2 โดยใช้ chromatograpHic column (Porapak QS) โดยจะให้ N_2 ถูกพาออกมาก่อน CO_2 ซึ่งจะตรวจวัดได้โดย thermal conductivity detector (TCD) ได้โครมาโตแกรมดังตัวอย่างในรูป 1 การหาปริมาณจะทำได้โดยเทียบกับการวิเคราะห์สารมาตรฐานที่ทราบปริมาณ C และ N ที่แน่นอน ในระบบดังกล่าวนี้จะเห็นว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีการเปลี่ยนแก๊สที่กัดกร่อนไปเป็นแก๊สที่ไม่กัดกร่อนเสียก่อนที่จะทำการแยกและวิเคราะห์หาปริมาณ โดยใช้ TCD เนื่องจากลวด TCD มีขนาดเล็กมากอาจถูกกัดกร่อนจนขาดได้ง่าย

2.10.5 ยูวี-วิสิเบิล สเปกโทรสโคปี Ultraviolet–visible spectroscopy

เป็นเครื่องมือที่ใช้ในวิเคราะห์สารโดยอาศัยหลักการดูดกลืนรังสีของสารที่อยู่ในช่วง Ultra violet (UV) และ Visible (VIS) ความยาวคลื่นประมาณ 190 - 1000 นาโนเมตรส่วนใหญ่เป็นสารอินทรีย์ สารประกอบเชิงซ้อน หรือสารอนินทรีย์ ทั้งที่มีสีและไม่มีสี สารแต่ละชนิดจะดูดกลืนรังสีในช่วงความยาวคลื่นที่แตกต่างกันและปริมาณการดูดกลืนรังสีก็ขึ้นอยู่กับความเข้มของสารนั้น การดูดกลืนแสงของสารต่างๆเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้นของสาร จึงสามารถวิเคราะห์ได้ในเชิงคุณภาพและปริมาณ เป็นเทคนิคที่ให้สภาพไวที่ดี และใช้กันอย่างแพร่หลาย ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคนี้จะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) และค่าความยาวคลื่น (Wavelength) ซึ่งเรียกว่า Spectrum ดังรูป



รูปที่2.10 UV-VIS spectrum

ที่มา: http://en.wikipedia.org/wiki/File:UVVIS_spectrum_of_bisulpHide_in_sewage.jpg

ส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่อง UV-VIS spectropHotometer ประกอบไปด้วย

1. Light source แหล่งกำเนิดรังสีเป็นส่วนที่ให้รังสีในช่วงความยาวคลื่นที่ต้องการออกมาอย่างต่อเนื่องและคงที่ รวมทั้งมีความเข้มแสงที่มากพอ หลอดกำเนิดรังสีมีหลายชนิดตามความยาวคลื่นรังสีที่เปล่งออกมา เช่น ช่วง UV จะใช้หลอด H2 and D2 lamp ให้ความยาวคลื่นอยู่ในย่าน 160 - 380 นาโนเมตร และช่วง Visible ใช้หลอด Tungsten/halogen ให้ความยาวคลื่นในช่วง 240 -2,500 นาโนเมตร เป็นต้น

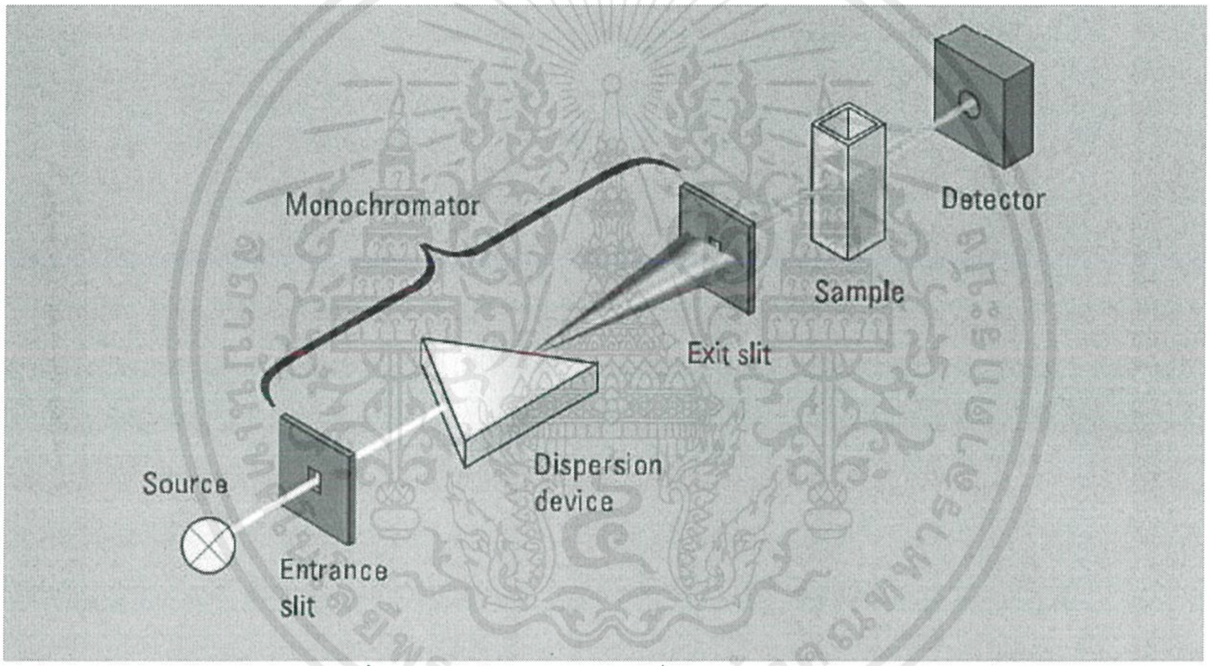
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. Monochromator เป็นส่วนที่ใช้ควบคุมแสงโดยจะทำให้แสงที่ออกมาจากต้นกำเนิดแสง ซึ่งเป็นพอลิโครเมติก ให้เป็นแสงโมโนโครเมติก ซึ่งเป็นแถบแสงแคบๆ หรือมีความยาวคลื่นเดียวใช้ฟิลเตอร์ ปริซึมหรือ เกรตติง

3. Cell sample เซลล์ที่ใช้บรรจุสารละลายตัวอย่าง บางครั้งอาจเรียกว่า Cuvettes ที่ใช้กันทั่วไป ได้แก่เซลล์ที่ทำด้วยแก้วจะใช้ได้เฉพาะช่วงวิสิเบิล เพราะแก้วจะดูดกลืนรังสีในช่วงยูวีได้ และเซลล์ที่ทำด้วยซิลิกา และ

ควอร์ซ ซึ่งใช้ได้ทั้งช่วงยูวีและวิสิเบิล

4. Detector ทำหน้าที่ในการวัดความเข้มของรังสีที่ถูกดูดกลืนโดยการแปลงพลังงานคลื่นรังสีเป็นพลังงานไฟฟ้า เครื่องวัดรังสีมีหลายชนิดที่นิยม ได้แก่ PHotomultiplier tube และเครื่องวัดแสงชนิดซิลิกอนไดโอด Silicon diode detector



รูปที่2.11 องค์ประกอบของเครื่อง UV-VIS

ที่มา: http://faculty.sdmiramar.edu/fgarces/LabMatters/Instruments/UV_Vis/Cary50.htm

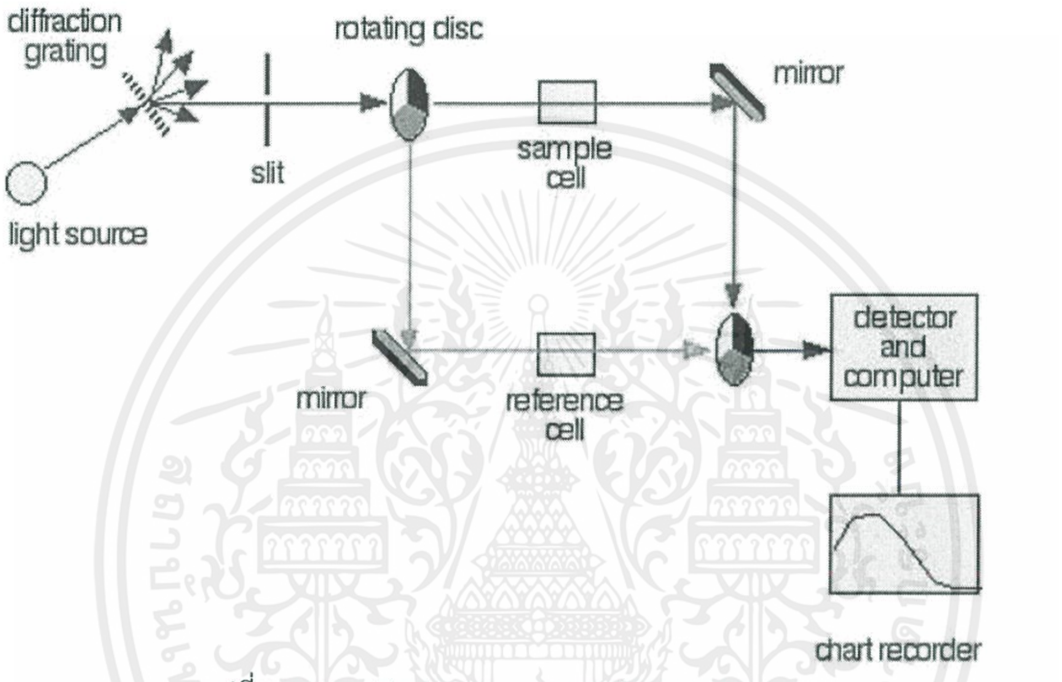
เครื่องสเปคโทรโฟโทมิเตอร์ที่ใช้โดยทั่วไปแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่

1. Single-Beam spectropHotometer เมื่อลำรังสีออกจากแหล่งกำเนิดรังสีจะผ่านเลนส์โมโนโครเมเตอร์ที่เป็น Grating ผ่านสารตัวอย่าง แล้วจึงเข้าสู่อุปกรณ์ตรวจรับ สัญญาณ เนื่องจากสเปคโทรโฟโตมิเตอร์ประเภทนี้ใช้ลำรังสีเพียงลำเดียวผ่านจากโมโนโครเมเตอร์ไปสู่สารละลายที่ต้องการวัดลำรังสีนี้จะไปสู่อุปกรณ์ตรวจรับสัญญาณเลย การวัดแต่ละครั้งจึงต้องใช้เซลล์ 2 เซลล์ให้ลำรังสีผ่านสลับกัน

2. Double-Beam SpectropHotometer ลำรังสีจะผ่านโมโนโครเมเตอร์ 2 ครั้งด้วยกัน ทำให้ได้ลำรังสีความยาวคลื่นเดียวอย่างมีประสิทธิภาพและความละเอียดมากขึ้น เมื่อออกจาก Exit slit แล้ว ลำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รังสีจะไปสู่อุปกรณ์ตัดลำรังสี (Beam chopper) ก็จะสะท้อนไปผ่านสารตัวอย่าง ในขณะเดี่ยวกันลำรังสีจะผ่านไปผ่านสารอ้างอิง ด้วยวิธีนี้ ลำรังสีลำเดี่ยวที่ผ่านโมโนโครเมเตอร์จะถูกอุปกรณ์ตัดลำรังสีแยกออกเป็นลำรังสีสองลำที่มีความเข้มเท่ากันตลอดเวลา เมื่อลำรังสีทั้งสองนี้ไปตกกระทบ phototubeความแตกต่างของความเข้มจะกลายเป็นสัญญาณส่งต่อไปยังอุปกรณ์บันทึกสัญญาณต่อไปในการใช้สเปคโทรโฟโตมิเตอร์แบบลำรังสีคู่



รูปที่2.12 Double beam spectrophotometer

ที่มา: http://www.chemguide.co.uk/analysis/uvvisible/spectrometer.html

2.10.6การวัดพื้นที่ผิว ขนาดและปริมาตรรูพรุนโดยวิธีบีอีที (BET)

พื้นที่ผิวจำเพาะของวัสดุ เป็นสมบัติทางกายภาพที่มี ความสำคัญต่อการนำไปใช้ประกอบการพิจารณาเพื่อนำวัสดุนั้น ไปพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ที่มีคุณภาพตามที่ต้องการหรือ ตามที่มาตรฐานกำหนด การวัดพื้นที่ผิวจำเพาะทำได้หลายวิธี แต่วิธีที่จะกล่าวในที่นี้เป็นการวัดปริมาณของแก๊สไนโตรเจนที่ถูก ดูดซับบนผิวของวัสดุ แล้วนำมาคำนวณเป็นค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ และปริมาตรรูพรุนของวัสดุ [37-39]

ทฤษฎีพื้นฐานและหลักการเบื้องต้น

บรูนัวร์ เอ็มเมทท์และเทลเลอร์ (StepHen Brunauer, Paul Hugh Emmett and Edward Teller) ได้ศึกษาการ ดูดซับแก๊สไนโตรเจนทั้งบนผิวหน้าและภายในรูพรุนของวัสดุ ดังแสดงในรูปที่ 2.8 พบว่าแก๊สไนโตรเจนที่ถูกดูดซับนั้นจะมี ส่วนหนึ่งที่เคลือบบนผิวของวัสดุในลักษณะที่เป็นโมเลกุลชั้นเดียวจนเต็มพื้นที่ผิวก่อน จากนั้นแก๊สไนโตรเจนที่เหลือแพร่กระจายไปเคลือบบนผิวของวัสดุใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะที่เป็นโมเลกุลหลายชั้น ดังแสดงในรูปที่ 2.9 ซึ่งจากผลการศึกษานี้สามารถ เขียนแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง
ปริมาณของแก๊สที่ถูกดูดซับ (W) กับความดันสัมพัทธ์ (P/Po) ของวัสดุที่เพิ่มขึ้น เป็นสมการที่ เรียกว่า "สมการของ BET" ได้ดังนี้

$$\frac{1}{W\left[\left(\frac{P_0}{P}\right)-1\right]}=\frac{1}{W_mC}-\frac{C-1}{W_mC}\left(\frac{P}{P_o}\right)$$

โดย W = ปริมาณของแก๊สไนโตรเจนที่ถูกดูดซับที่ ความดันสัมพัทธ์ P/PO

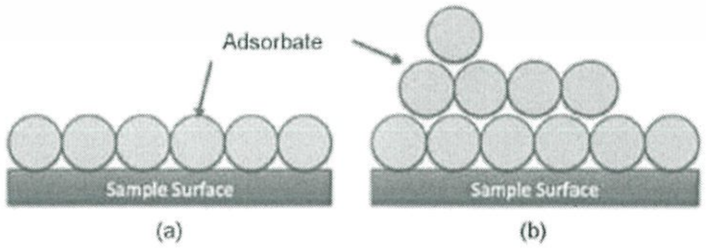
Wm = ปริมาณของแก๊สไนโตรเจนที่ถูกดูดซับเคลือบบนผิวของสารในลักษณะที่เป็นโมเลกุล ชั้นเดียว

P = ความดันของแก๊สไนโตรเจนที่ใช้ในขณะ ทำการทดลอง (หน่วยเป็นมิลลิเมตรปรอท)

Po = ความดันอิ่มตัวของแก๊สไนโตรเจน (หน่วย เป็นมิลลิเมตรปรอท)

C = ค่าคงที่ที่ขึ้นอยู่กับพลังงานที่ใช้ในการดูดซับ

รูปที่ 2.13 แสดงการดูดซับแก๊สไนโตรเจนบนผิวหน้าและภายในรูพรุนของวัสดุ



รูปที่ 2.14 แสดงการดูดซับโมเลกุลของแก๊สไนโตรเจนของวัสดุเป็นชั้นๆ

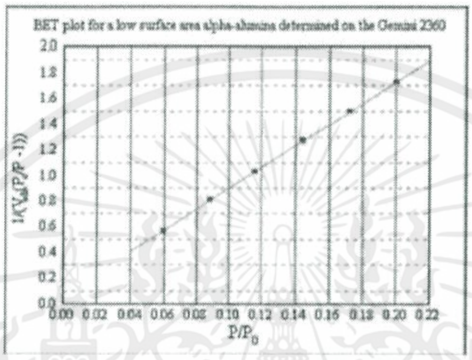
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากความสัมพันธ์สมการ BET เมื่อพล็อตกราฟระหว่าง 1/W [(P0/P) -1] กับ P/P0 จะได้กราฟเส้นตรง ดังแสดงใน ภาพที่ 3 มีความชัน (Slope, s) ดังสมการ ;

$$S = \frac{C-1}{W_m C}$$

และจุดตัดแกน y (y-intercept, i) ดังสมการ ;

$$i = \frac{1}{W_m C}$$



รูปที่2.15 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของแก๊สที่ถูกดูดซับกับความดันสัมพัทธ์

ปริมาณของแก๊สไนโตรเจนที่ถูกดูดซับบนผิวของวัสดุใน ลักษณะที่เป็นโมเลกุลชั้นเดียว (Wm) คำนวณโดยนำ s และ i แทนค่าในสมการ

$$W_m = \frac{1}{s+i}$$

พื้นที่ผิวจำเพาะของวัสดุคำนวณโดยนำ W_m แทนค่าในสมการ

$$S_t = \frac{W_m N A_{cs}}{M}$$

โดย St = พื้นที่ผิวของวัสดุ (หน่วยเป็นตารางเมตร)

N = เลขอาโวกราโดร (6.023 x 1023) (หน่วยเป็น โมเลกุลต่อโมล)

M = น้ำหนักโมเลกุลของแก๊สไนโตรเจน (28 กรัมต่อ โมล)

A_{cs} = พื้นที่หน้าตัดของโมเลกุลของแก๊สไนโตรเจนที่ถูก ดูดซับ (16.2 x 10-23) (หน่วยเป็นตารางเมตร)

ค่า St ที่ได้เมื่อหารด้วยปริมาณของตัวอย่างวัสดุที่ใช้ทดสอบ (w) จะได้ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ หน่วย เป็นตารางเมตรต่อกรัม

$$S = \frac{S_t}{W}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริมาตรรูพรุนรวม (V_p) และขนาดรูพรุนเฉลี่ย ($\bar{r}_p$) ของวัสดุคำนวณได้จากความสัมพันธ์ของ สมการดังนี้

$$V_P = \frac{W_S}{P}$$

$$\overline{r_P} = \frac{2V_P}{S_t}$$

โดย Ws = ปริมาณของแก๊สไนโตรเจนที่ถูกดูดซับบนผิวของวัสดุที่ความดันสัมพัทธ์(P/Po) ≈ 1

r = ความหนาแน่นของแก๊สไนโตรเจนที่ถูกดูดซับบน ผิวของวัสดุที่ความดันสัมพัทธ์(P/Po) ≈ 1

S_t = พื้นที่ผิวของวัสดุที่ทดสอบได้

ในการทดสอบด้วยเครื่องวิเคราะห์ขนาดพื้นที่ผิวจำเพาะ และปริมาตรรูพรุน ดังแสดงในรูปที่ 2.15 ใช้เซลล์สำหรับใส่ ตัวอย่าง (Sample cell) จำนวน 2 เซลล์เซลล์หนึ่งบรรจุวัสดุตัวอย่างที่ต้องการทดสอบพื้นที่ผิวจำเพาะ ส่วนอีกเซลล์ไม่ใส่วัสดุตัวอย่างแต่ทำหน้าที่เป็นเซลล์อ้างอิงก่อนการทดสอบ ต้องให้ความร้อนแก่เซลล์ที่บรรจุวัสดุตัวอย่างเพื่อไล่ความชื้นและโมเลกุลของสารถูกดูดซับชนิดอื่นให้ออกจากผิวหน้าของวัสดุตัวอย่าง จากนั้นทำให้เซลล์ทั้งสองเป็นสุญญากาศ เพื่อให้ภายในเซลล์ไม่มีโมเลกุลของแก๊สชนิดอื่นก่อนจุ่มเซลล์ทั้ง 2 ลงในภาชนะที่บรรจุไนโตรเจนเหลวเพื่อให้เซลล์ทั้งสองอยู่ในภาวะอุณหภูมิต่ำจากนั้นผ่านแก๊สไนโตรเจนเข้ามาในเซลล์ทั้ง 2 โดยแก๊สไนโตรเจนที่เข้ามาในเซลล์ที่มีวัสดุตัวอย่างจะถูกดูดซับบนผิวของวัสดุทำให้ความดันภายในเซลล์ที่บรรจุวัสดุตัวอย่างลดลงจนกระทั่งคงที่ (P) ในขณะที่เซลล์ที่ไม่มีวัสดุตัวอย่างความดันของแก๊สไนโตรเจนจะคงที่ (P_0) ข้อมูลที่เครื่องบันทึกผลคือค่าความดันสัมพัทธ์(P/P_o) และปริมาณของแก๊สไนโตรเจนที่ถูกดูดซับ (W) โดยวัสดุตัวอย่าง จากนั้นเครื่องจะปล่อยแก๊สไนโตรเจนเข้ามาอีกเช่นเดียวกับครั้งแรก และแก๊สไนโตรเจนถูกดูดซับจนความดันคงที่อีกเป็นเช่นนี้จนกระทั่งความดันภายในเซลล์ที่มีวัสดุตัวอย่างไม่ลดลง (P/Po = 1) แสดงว่า ไม่เกิดการดูดซับแก๊สไนโตรเจนอีกแล้ว จากข้อมูลค่าความดันสัมพัทธ์และปริมาณของแก๊สไนโตรเจนที่ถูกดูดซับที่ได้เครื่องทำการประมวลผลโดยใช้โปรแกรมตามสมการของ BET แสดงผลออกมาเป็นค่าพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรของรูพรุน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่2.16 แสดงเครื่องวิเคราะห์ขนาดพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
วิธีดำเนินการวิจัย

การวิจัยนี้เป็นการศึกษาการสังเคราะห์เส้นใยนาโนคาร์บอนจากมูลม้า โดยวิธีการไฮโดรเทอร์มัลคาร์บอนไนเซชันเพื่อนำไปประยุกต์ใช้งานเป็นฐานรองรับของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยจะศึกษาปัจจัยของอุณหภูมิและเวลาในการทำปฏิกิริยาไฮโดรเทอร์มัลคาร์บอนไนเซชัน และผลของ ตัวเร่งปฏิกิริยากรด เบส แอลกอฮอร์ และสารละลาย จากนั้นทำการเปรียบเทียบอิทธิพลของเงื่อนไขไฮโดรเทอร์มัลคาร์บอนไนเซชันต่อความเป็นรูพรุนที่พื้นผิว

3.1 การศึกษาสมบัติของเส้นใยนาโนคาร์บอนจากมูลม้า

การศึกษาสมบัติของเส้นใยนาโนคาร์บอน (Carbon nanofiber) โดยการนำเส้นใยจากมูลม้าปกติและเส้นใยนาโนคาร์บอนที่ได้จากการทำปฏิกิริยาไฮโดรเทอร์มัลและคาร์บอนไนเซชัน นำไป ทดสอบวิเคราะห์หาสมบัติต่างๆ ดังนี้

1. ศึกษาสัณฐานวิทยา (Morphology) ของตัวอย่างด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่อง กราด (Scanning electron microscopy, SEM)
2. ศึกษาหมู่ฟังก์ชัน (Functional group) บนพื้นผิวของตัวอย่างโดยเครื่อง Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR)

หลังจากการวิเคราะห์ข้างต้นแล้ว ก็นำเส้นใยนาโนคาร์บอนจากมูลม้า ที่ผ่านกระบวนการ ไฮโดรเทอร์มัลคาร์บอนไนเซชันไปทำการทดสอบเป็นฐานรองรับในตัวเร่งปฏิกิริยา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

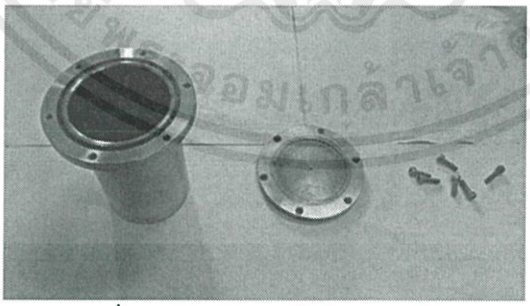
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

3.2.1 อุปกรณ์

1.เครื่องปั่น

รูปที่ 3.1 เครื่องปั่น

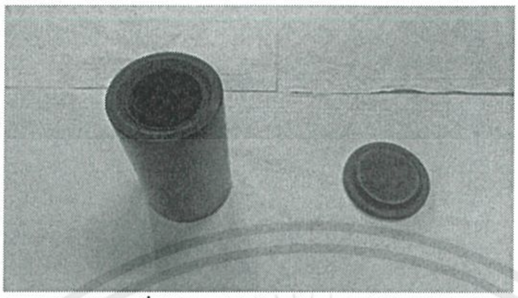
2. ถังปฏิกรณ์สำหรับกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล (Autoclave)



รูปที่ 3.2 ถังปฏิกรณ์ไฮโดรเทอร์มัล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ภาชนะที่เป็นเทฟลอนสำหรับใส่ในถังปฏิกรณ์ไฮโดรเทอร์มัล (Teflon)

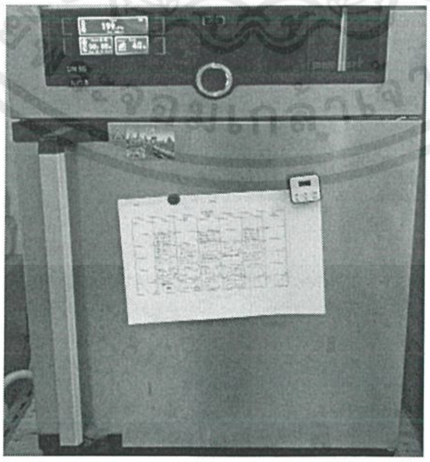


รูปที่ 3.3 ภาชนะใส่เทฟลอน

4. ถ้วยเซรามิกส์ใช้ใส่สารสำหรับทำปฏิกิริยาคาร์บอนไนเซชัน (Boat)

รูปที่ 3.4 ถ้วยเซรามิกส์

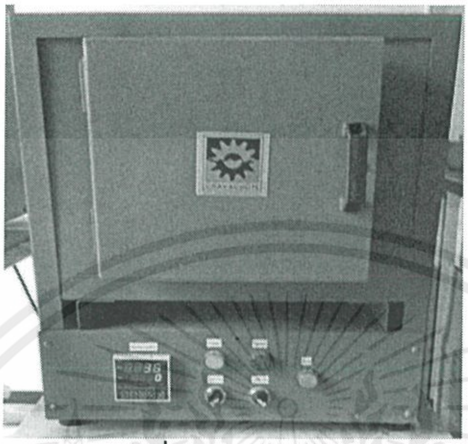
5. ตู้อบสำหรับกระบวนไฮโดรเทอร์มัล



รูปที่ 3.5 เตาอบสาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. เตาเผาสาร



รูปที่ 3.6 เตาเผาสาร

7. เครื่องชั่งสาร
8. บีกเกอร์ (Beaker) ขนาด 800 ml
9. กระบอกตวง (Cylinder)
10. ช้อนตักสาร (Spatula)
11. หลอดดูดสาร (Chemical Suction Tube)

3.2.2 วัสดุและสารเคมี

1. มูลม้า
2. น้ำปราศจากไอออน (De-ionized water)
3. กรดซัลฟิวริก (Sulphuric Acid, H_2SO_4)
4. กรดไนตริก (Nitric acid, HNO_3)
5. กรดฟอสฟอริก (Phosphoric acid, H_3PO_4)
6. กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric acid, HCl)
7. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium Hydroxide, NaOH)
8. โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (Potassium Hydroxide, KOH)
9. แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Calcium hydroxide, $Ca(OH)_2$)
10. แอมโมเนีย (Ammonia, NH_3)
11. เมทิลแอลกอฮอล์ (Methanol, CH_3OH)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

12. เอทิลแอลกอฮอล์ (Ethanol, C_2H_5OH)
13. บิวทิลแอลกอฮอล์ (Butanol, C_4H_9OH)
14. ไอโซโพรพานอล แอลกอฮอล์ (Isopropanol, $(CH_3)_2CHOH$)
15. อะซิโตน (Acetone, C_3H_6O)
16. โทลูอีน (, C_6H_5-CH_3)
17. เฮกเซน (Hexane, C_6H_{14})
18. ไซโคเฮกเซน (Cyclohexane, C_6H_{12})

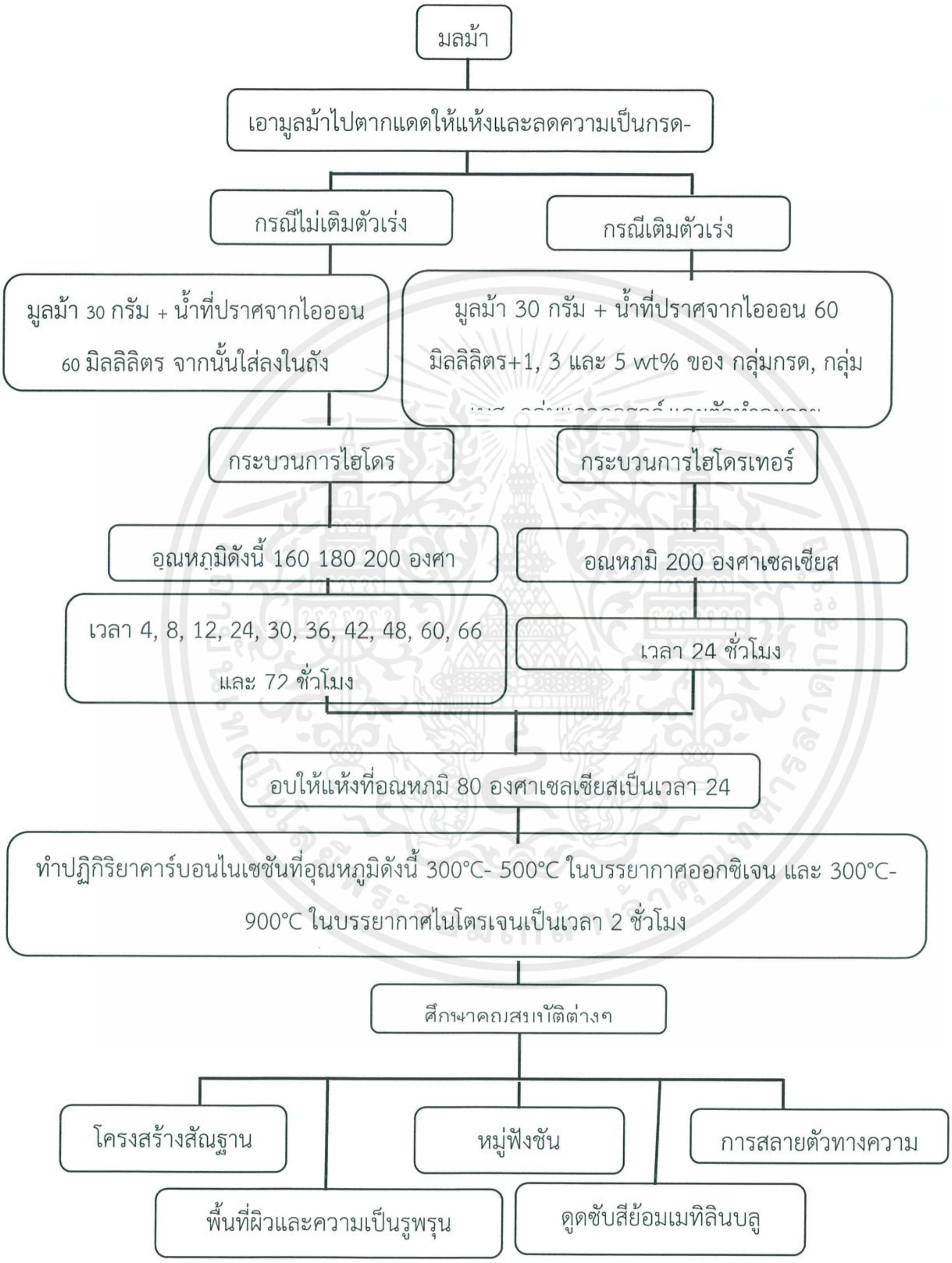
3.2.3 เครื่องวิเคราะห์

1. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy; SEM)
2. เครื่องฟูเรียร์ทรานฟอร์ม อินฟราเรดสเปกโตมิเตอร์ (Fourier Transform Infrared Spectrometer; FT-IR)
3. การศึกษาการสลายตัวทางความร้อนด้วยเครื่องการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน (Thermogravimetric Analysis; TGA)
4. การศึกษาพื้นที่ผิวและขนาดรูพรุนด้วยวิธีบีอีที (BET)
5. การศึกษาการดูดซับสีย้อมด้วยเครื่อง ยูวี-วิสิเบิล สเปกโทรสโคปี Ultraviolet–visible spectroscopy

3.3 การเตรียมมูลม้า

1.นำมูลม้าไปตากแดดให้แห้ง เพื่อไล่แอมโมเนีย ทำให้ขี้ม้ามีความเป็นกลาง
2. เอามูลม้าที่แห้งแล้วมาบดด้วยเครื่องปั่น ให้อยู่ในระดับ 800 ไมโครเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.7 แผนภาพแสดงขั้นตอนการวิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 การสังเคราะห์เส้นใยนาโนคาร์บอนจากมูลม้า

การศึกษาการสังเคราะห์เส้นใยนาโนคาร์บอนจากมูลม้าโดย อาศัย 2 กระบวนการร่วมกัน คือ กระบวนการไฮโดรเทอร์มัล และกระบวนการคาร์บอนไนเซชัน สามารถ แบ่งการทดลองย่อยได้เป็น 2 การทดลองดังนี้

3.4.1 ศึกษาปัจจัยในการสังเคราะห์เส้นใยนาโนคาร์บอนแบบที่ไม่ได้ เติมตัวเร่งปฏิกิริยาโดยอาศัยกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลและคาร์บอนไนเซชัน

1.ชั่งมูลม้าที่ทำการคัดขนาดแล้ว 30 กรัม

2.เตรียมน้ำที่ปราศจากไอออน (De-ionized water) 60 มิลลิลิตร

3.เทมูลม้าที่ชั่งแล้วทั้งหมด 30 กรัมกับน้ำที่ปราศจากไอออน (De-ionized water) 60 มิลลิลิตร ลงใส่ลงในภาชนะเทฟลอน

4.นำภาชนะเทฟลอนใส่ลงในถังปฏิกรณ์ไฮโดรเทอร์มัล

5.ใส่ถังปฏิกรณ์ไฮโดรเทอร์มัลในตู้อบด้วยเงื่อนไขของอุณหภูมิและเวลาดังนี้ 160, 180, 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4, 8, 12, 24 ชั่วโมง

6.นำมูลม้าที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลแล้วใส่ลงในบิกเกอร์ จากนั้นใส่ในตู้อบ เพื่อไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากอบจนแห้งสนิทแล้วชั่งน้ำหนัก ตัวอย่างหลังจากผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล แล้วเก็บตัวอย่างใส่ในภาชนะปิด

7.นำมูลม้าที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลแล้วอบจนแห้งสนิทมาผ่าน กระบวนการคาร์บอนไนเซชันที่อุณหภูมิดังนี้ 300 องศาเซลเซียส ในบรรยากาศ ออกซิเจน (O_2 Atmosphere) เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

3.4.2 ศึกษาปัจจัยในการสังเคราะห์เส้นใยนาโนคาร์บอนแบบเติมตัวเร่งปฏิกิริยาโดยอาศัยกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลและคาร์บอนไนเซชัน

1. ชั่งมูลม้าที่ทำการคัดขนาดแล้ว 30 กรัม
2. เตรียมน้ำที่ปราศจากไอออน (De-ionized water) 60 มิลลิลิตร
3. เตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา กรด, เบส, แอลกอฮอร์และสารละลายที่ความเข้มข้น 1, 3 และ 5 %W/W
4. ผสมมูลม้าที่ชั่งแล้วทั้งหมด 30 กรัม กับ น้ำที่ปราศจากไอออน และ ตัวเร่งปฏิกิริยา ในภาชนะเทฟลอน
5. นำภาชนะเทฟลอนใส่ลงในถังปฏิกรณ์ไฮโดรเทอร์มัล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. ใส่ถังปฏิกรณ์ไฮโดรเทอร์มัลในตู้อบที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
7. นำมูลม้าที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลแล้วใส่ลงในบิกเกอร์ จากนั้นใส่ในตู้อบ เพื่อไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
8. นำมูลม้าที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลแล้วอบจนแห้งสนิทมาผ่าน กระบวนการคาร์บอนไนเซชันที่อุณหภูมิดังนี้ 300 องศาเซลเซียส ในบรรยากาศ ออกซิเจน (O_2 Atmosphere) เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

3.5 การตรวจวัดและวิเคราะห์คุณสมบัติต่างๆ

นำตัวอย่างมูลม้าปกติและมูลม้าที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลและคาร์บอนไนเซชันไปทำการวิเคราะห์เพื่อหาคุณลักษณะและคุณสมบัติในด้านต่างๆ

3.5.1 การศึกษาสัณฐานวิทยา (Morphology) ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscopy, SEM)

การศึกษาสัณฐานวิทยา (Morphology) ของตัวอย่างด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscopy, SEM) (ยี่ห้อเครื่อง EVO MA10) สารตัวอย่างจะต้องทำ การเคลือบด้วยทอง (Au) โดยการ sputtering ก่อนที่จะนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง SEM เพื่อให้พื้นผิวของตัวอย่างนำไฟฟ้า เมื่อยิงอิเล็กตรอนไปที่พื้นผิวของตัวอย่าง ก็จะทำให้พื้นผิวของตัวอย่างมีความคมชัดในการตรวจวัด โดยจะใช้กำลังขยายคือ 150X, 300X, 500X และ 1000X

3.5.2 การศึกษาหมู่ฟังก์ชัน (Function group) ด้วยเครื่อง Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR)

การศึกษาหมู่ฟังก์ชัน (Functional group) บนพื้นผิวของตัวอย่างโดยเครื่อง Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR) (ยี่ห้อเครื่อง PerkinElmer UATR Two) โดยจะใช้หัวเพชรและโหมด Transmission ในการวิเคราะห์ สแกนในช่วงระหว่างเลขคลื่นที่ 400 cm^{-1} ถึง 4000 cm^{-1}

3.5.3 การศึกษาการสลายตัวทางความร้อนด้วยเครื่องการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน (Thermogravimetric Analysis; TGA)

3.5.4 การศึกษาพื้นที่ผิวและขนาดรูพรุนด้วยวิธีบีอีที (BET)

3.5.5 การศึกษาการดูดซับสีย้อมด้วยเครื่อง ยูวี-วิสิเบิล สเปกโทรสโคปี Ultraviolet–visible spectroscopy

เป็นเครื่องมือที่ใช้ในวิเคราะห์สารโดยอาศัยหลักการดูดกลืนรังสีของสารที่อยู่ในช่วง Ultra violet (UV) และ Visible (VIS) ความยาวคลื่นประมาณ 190 - 1000 นาโนเมตรส่วนใหญ่เป็นสารอินทรีย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารประกอบเชิงซ้อน หรือสารอนินทรีย์ ทั้งที่มีสีและไม่มีสี สารแต่ละชนิดจะดูดกลืนรังสีในช่วงความยาวคลื่นที่แตกต่างกันและปริมาณการดูดกลืนรังสีก็ขึ้นอยู่กับความเข้มของสารนั้น การดูดกลืนแสงของสารต่างๆเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้นของสาร จึงสามารถวิเคราะห์ได้ในเชิงคุณภาพและปริมาณ เป็นเทคนิคที่ให้สภาพไวที่ดี และใช้กันอย่างแพร่หลาย ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคนี้จะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) และค่าความยาวคลื่น (Wavelength) ซึ่งเรียกว่า Spectrum

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่4

ผลการทดลองและอภิปรายผล

4.1 ผลของอุณหภูมิและเวลาของกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล

ตารางที่4.1. มวลของมูลม้าที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลคาร์บอนไนเซชัน

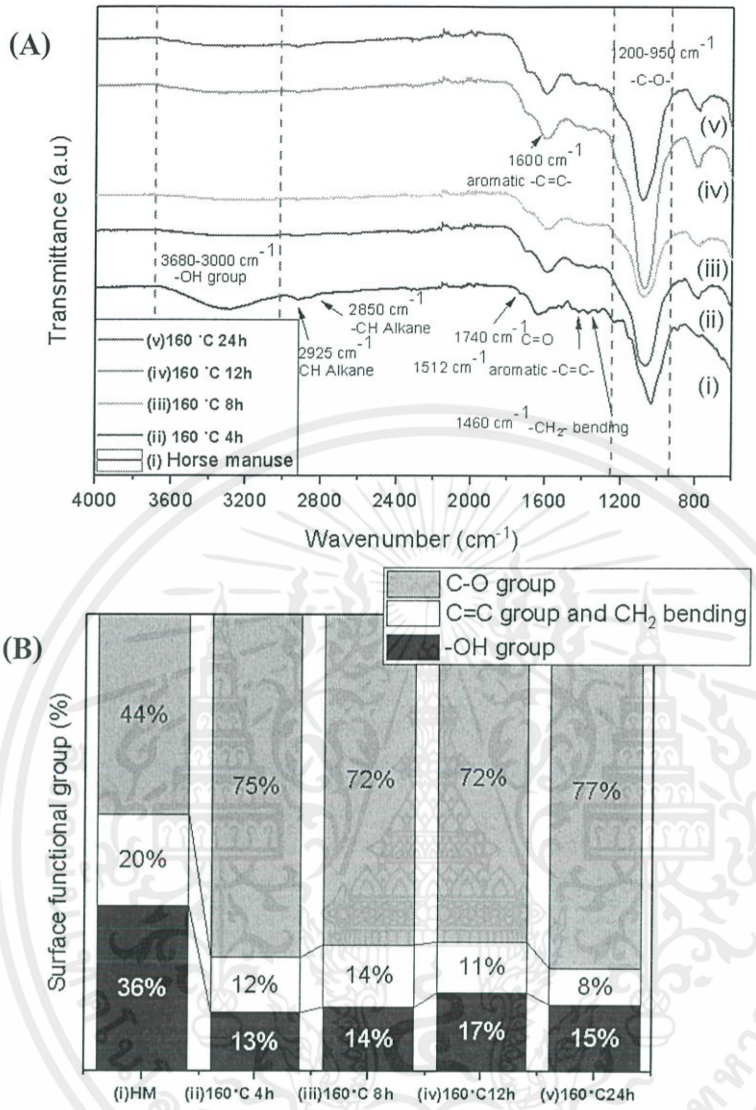
Temperature[°C]	Time[h]	HTC Char [wt%][a]	CFs Product [wt%][b]
160	4	91.17	63.8
160	8	87.40	63.0
160	12	84.03	61.8
160	24	75.03	61.7
180	4	88.43	62.4
180	8	79.70	61.6
180	12	77.70	61.4
180	24	74.37	61.0
200	4	78.40	61.0
200	8	73.80	60.4
200	12	71.27	59.8
200	24	68.37	59.4

[a] น้ำหนักที่เหลืออยู่หลังผ่านกระบวกการไฮโดรเทอร์มัล

[b] น้ำหนักที่เหลืออยู่หลังผ่านกระบวกการคาร์บอนไนเซชัน ที่อุณหภูมิ 300°C-2h ในบรรยายกาศออกซิเจนเมื่อเทียบมวลของมูลม้าที่ผ่านกระบวกการไฮโดรเทอร์มัล

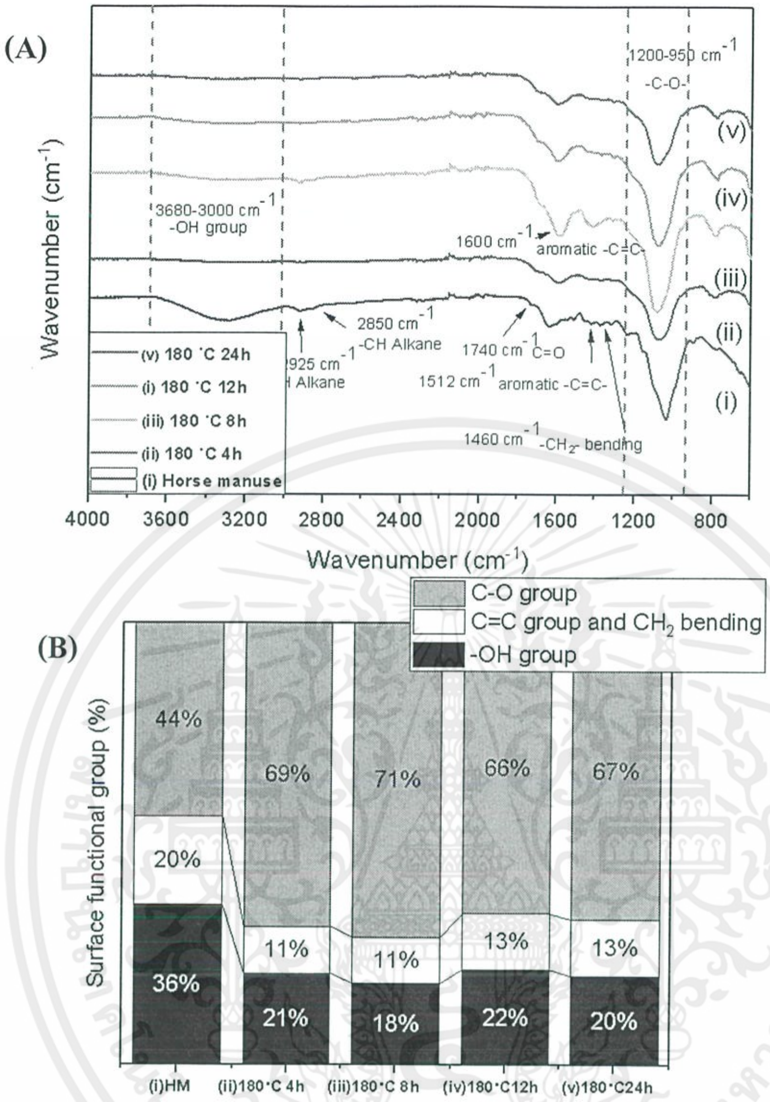
จากตารางที่ 4.1 มวลของมูลม้าผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลจะขึ้นอยู่กับปัจจัย 2 อย่างคือ อุณหภูมิและเวลา อุณหภูมิและเวลาเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้เกิดมวลของมูลม้าลดลงเพราะโดยที่อุณหภูมิและเวลามากขึ้นจะสลายชีวมวลหรือมูลม้าทำให้มวลจากของแข็งเปลี่ยนไปอยู่ในรูปแบบของเหลวและแก๊สทำให้คาร์บอนที่ได้จากมูลม้ามีมวลลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



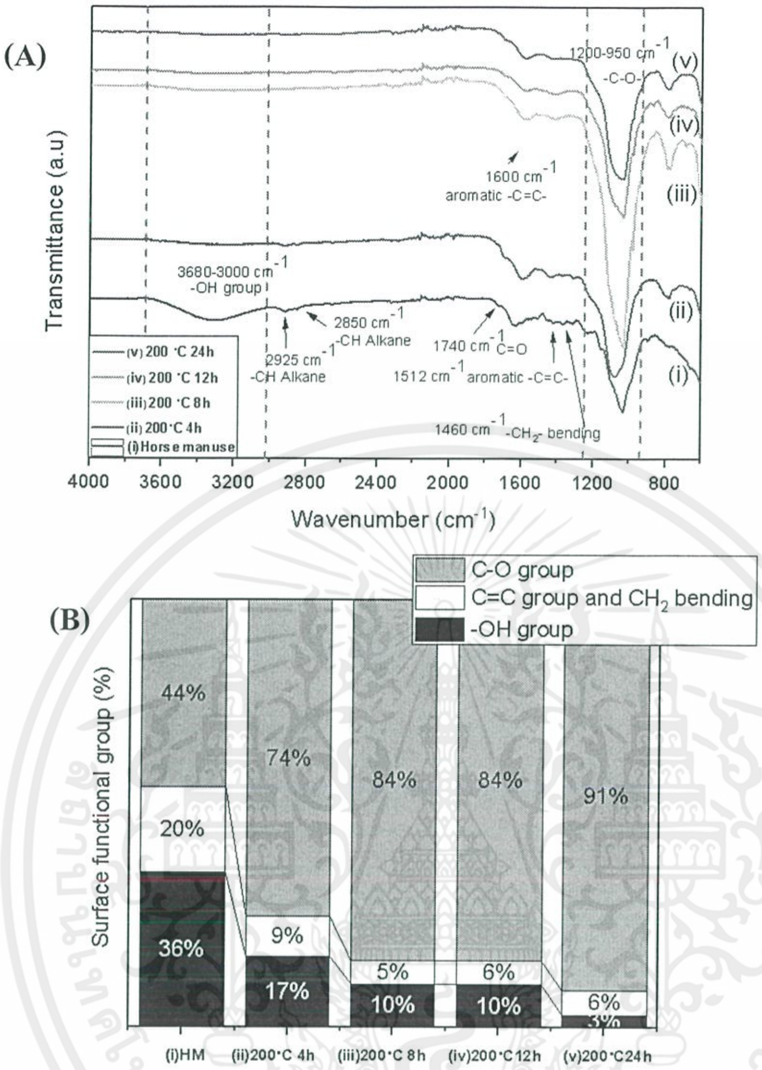
รูปที่ 4.1 (A) FT-IR spectrum และ (B) กราฟเชิงปริมาตร (i) มูลม้าไม่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล, มูลม้าที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลที่เงื่อนไขแตกต่างกัน 160 °C เป็นเวลา (ii) 4 h, (iii) 8 h, (iv) 12h และ (v) 24h และผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชันที่ 300°C-2h ในบรรยากาศออกซิเจน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 (A) FT-IR spectrum และ (B) กราฟเชิงปริมาตร (i) มูลม้าไม่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล, มูลม้าที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลที่เงื่อนไขที่แตกต่างกัน 180 °C เป็นเวลา (ii) 4h, (iii) 8h} (iv) 12h และ (v) 24h และผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชันที่ 300°C-2hในบรรยากาศออกซิเจน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

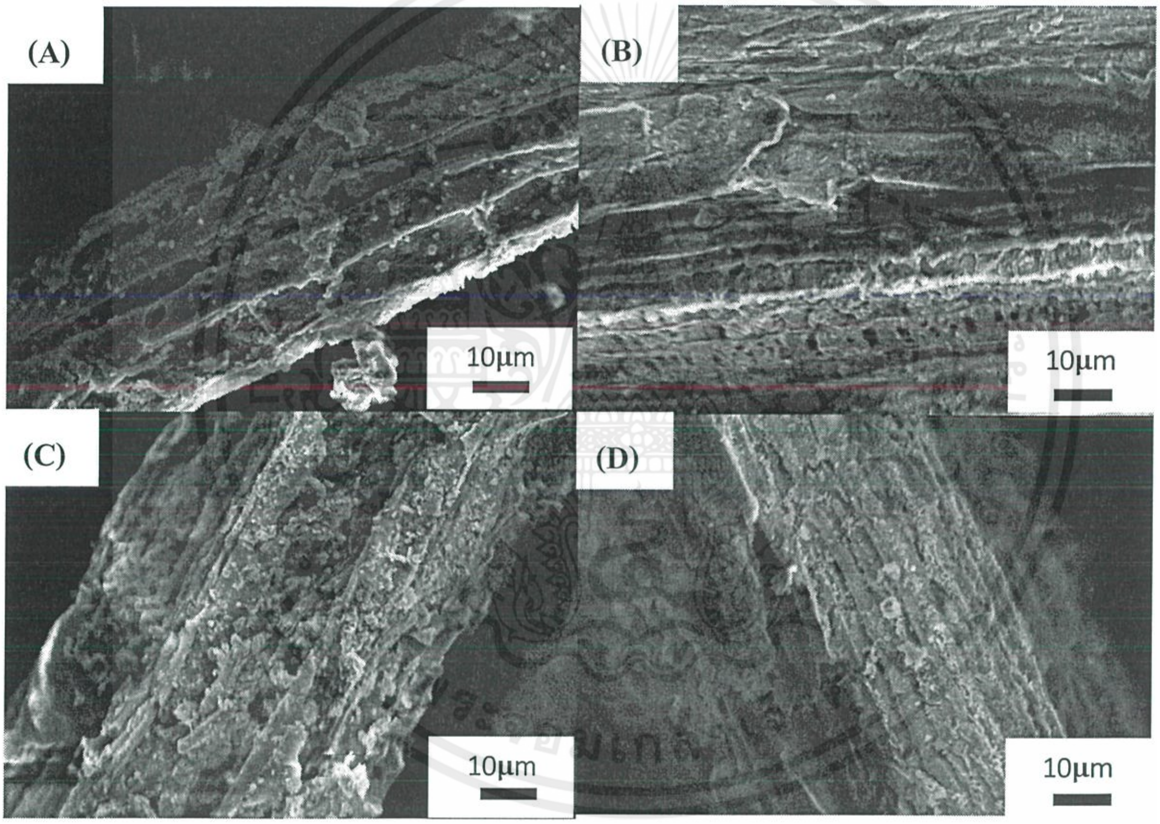


รูปที่ 4.3 (A) FT-IR spectrum และ (B) กราฟเชิงปริมารตร (i) มูลม้าไม่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล, มูลม้าที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลที่เงื่อนไขที่แตกต่างกัน 200 °C เป็นเวลา (ii) 4h, (iii) 8h, (iv) 12h และ (v) 24h และทำปฏิกิริยาคาร์บอนไนเซชัน 300 °C-2h ในบรรยากาศออกซิเจน

จากรูปที่4.1 4.2 และ 4.3 แสดงให้เห็นว่าเกิดพีค(broad band) ในช่วง 3680 - 3000 cm^{-1} ซึ่งเป็น หมู่ -OH stretching ในหมู่ไฮดรอกซิลหรือคาร์บอนิล พีคที่ 2925 cm^{-1} และ 2850 cm^{-1} เป็นหมู่ C-H stretching ในพอลิแซ็กคาไรด์ ประกอบด้วยเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส [40] พีคที่ 1740 cm^{-1} เป็นหมู่เอสเทอร์ของเฮมิเซลลูโลสหรือคาร์บอกซิลิกของลิกนินและเฮมิเซลลูโลส พีคที่ 1600 cm^{-1} และ1512 cm^{-1} เป็นหมู่ aromatic -C=C- stretching เป็นวงอะโรมาติก(aromatic ring) ของลิกนิน พีคที่ 1460 cm^{-1} เป็นหมู่ $-CH_2$ - bending พีคในช่วง 1380-1240 cm^{-1} เป็นหมู่ G lignin และ S lignin และพีค

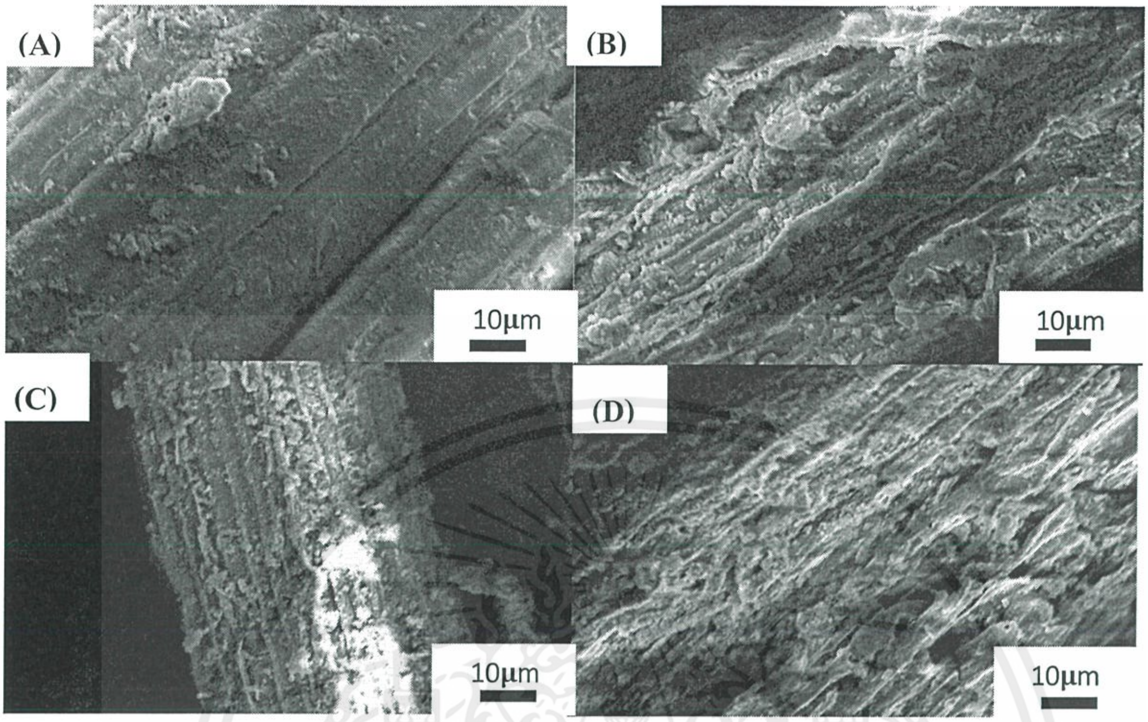
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในช่วง 1200-950 cm $^{-1}$ เป็นหมู่ -C-O จากผลการวิเคราะห์ข้างต้นสามารถสรุปได้ว่า เมื่ออุณหภูมิและเวลาในการทำ ปฏิกิริยาไฮโดรเทอร์มัลมากขึ้น หมู่ -OH stretchingและหมู่-C-O จะมีปริมาณลดลง เนื่องมาจากเมื่ออุณหภูมิและเวลา ในการทำปฏิกิริยาไฮโดรเทอร์มัลมากขึ้น หมู่ –OH และ -C-O บริเวณรอบนอกของตัวอย่างมีน้อย โมเลกุลของน้ำไป เกาะได้น้อย ปริมาณของหมู่ –OH และ -C-O จึงลดลง ส่งผลให้มีความเป็นคาร์บอนหรือ (%C) สูงขึ้นและหมู่aromatic -C=C- stretchingและหมู่ -CH2 – bendingจะมีการสลายตัวสมบูรณ์ที่อุณหภูมิที่270°Cเลยทำให้อุณหภูมิและเวลาสูงขึ้นทำให้หมู่aromatic -C=C- stretchingและหมู่ -CH2 – bendingลดลงส่งผลให้มีความเป็นคาร์บอนหรือ (%C) สูงขึ้น



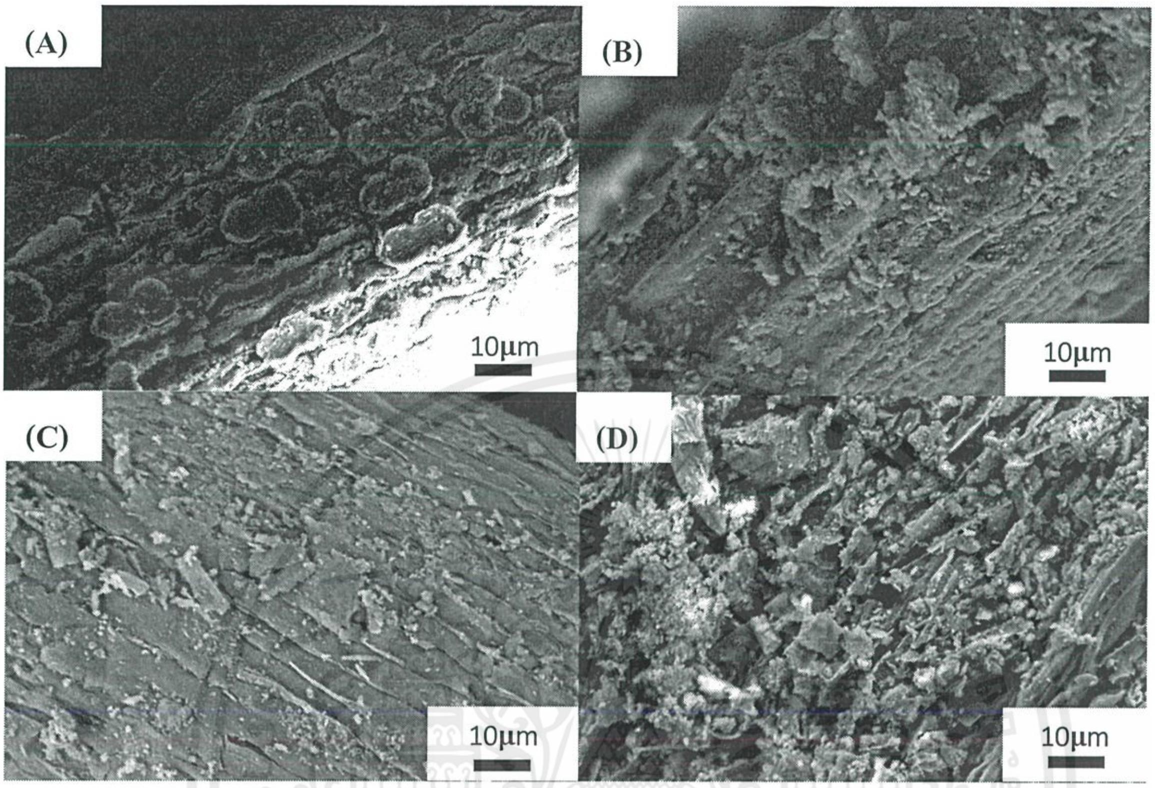
รูปที่4.4 ภาพ SEM (กำลังขยาย 1000X) ของมูลม้าที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลที่อุณหภูมิ 160°C ที่เวลาแตกต่างกัน(A) 4h, (B) 8h, (C) 12h และ (E) 24h และผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชันที่300°C-2hในบรรยากาศออกซิเจน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่4.5 ภาพ SEM (กำลังขยาย 1000X) ของมูลม้าที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลที่อุณหภูมิ 180°C ที่เวลาแตกต่างกัน (A) 4 h, (B) 8 h, (C) 12 h และ (E) 24h และผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชันที่ 300°C -2h ในบรรยากาศ ออกซิเจน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่4.6 ภาพ SEM (กำลังขยาย 1000X) ของมูลม้าที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลที่อุณหภูมิ 200°C ที่เวลาแตกต่างกัน (A) 4 h, (B) 8 h, (C) 12 h และ (E) 24 h และผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชันที่ 300°C-2h ในบรรยากาศออกซิเจน

จากรูป 4.4, 4.5 และ 4.6 แสดงให้เห็นว่ามูลม้าที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลที่อุณหภูมิ 160, 180 และ 200 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 4, 8, 12 และ 24 ชั่วโมง (รูปที่ 4.4A) มีเส้นผ่าศูนย์กลางขนาดประมาณ 37 μm และมีความยาวประมาณ 272 μm (รูปที่ 4.4B) มีเส้นผ่าศูนย์กลางขนาดประมาณ 34 μmและมีความยาว 250 μm (รูปที่ 4.4C) มีเส้นผ่าศูนย์กลางขนาดประมาณ 32 μmและยาว 225 μm (รูปที่ 4.4D) มีเส้นผ่าศูนย์กลางขนาดประมาณ 30 μmและความยาว 200 μm (รูปที่ 4.5A) มีเส้นผ่าศูนย์กลางขนาดประมาณ 33 μm. และความยาว 230 μm (รูปที่ 4.5B) มีเส้นผ่าศูนย์กลางขนาดประมาณ 31 μm และมีความยาว 215 μm(รูปที่ 4.5C) มีเส้นผ่าศูนย์กลางขนาดประมาณ 29 μm และมีความยาว 205 μm (รูปที่ 4.5D) มีเส้นผ่าศูนย์กลางขนาดประมาณ 28 μmและความยาว 195 μm (รูปที่ 4.6A) มีเส้นผ่าศูนย์กลางขนาดประมาณ 29 μmและมีความยาว 205 μm (รูปที่ 4.6B) มีเส้นผ่าศูนย์กลางขนาดประมาณ 27 μm และมีความยาว 190 μm(รูป 4.6C) มีเส้นผ่าศูนย์กลางขนาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประมาณ 25 µm และมีความยาวอยู่ที่ 185 µm พื้นผิวบนคาร์บอน µm (รูปที่4.6D) มีเส้นผ่าศูนย์กลางขนาดมูลม้าที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมงและคาร์บอนไรเซชันมีโครงสร้างรูพรุนกว้างกว่าเงื่อนไขอื่น ๆ ขนาดของเส้นใยนาโนคาร์บอนมีเส้นผ่าศูนย์กลาประมาณ 20 µm และความยาว 175 นอกจากนี้เกิดโครงสร้างที่มี ยิ่งอุณหภูมิและเวลาผ่านไปทำให้โครงสร้างแยกออกจากกันและแตกตัวเป็นชิ้นเล็ก จะมีลักษณะขรุขระ เริ่มมองเห็นโครงสร้างเห็นผนังเซลล์ และรอยต่อของผนังเซลล์ที่อยู่ภายใต้เส้นใย รอยแตกที่ชัดเจนขึ้น

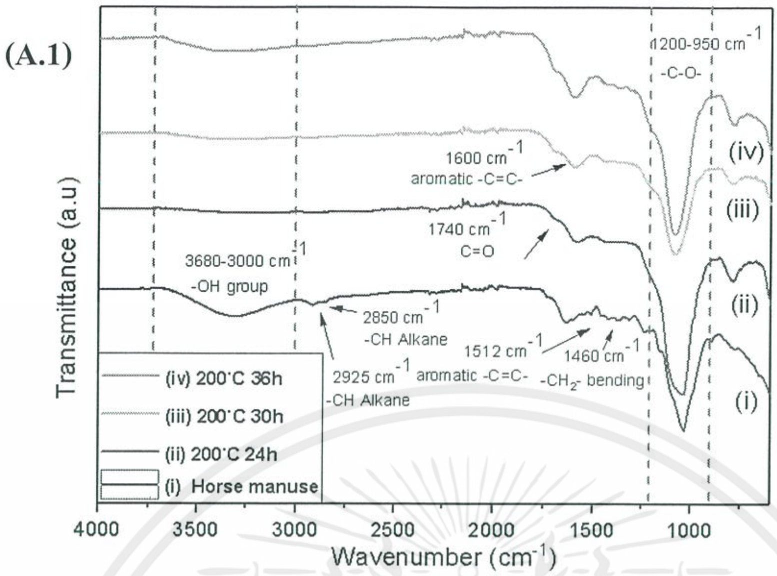
ตารางที่4.2. มวลมูลม้าที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลคาร์บอนไนเซชัน

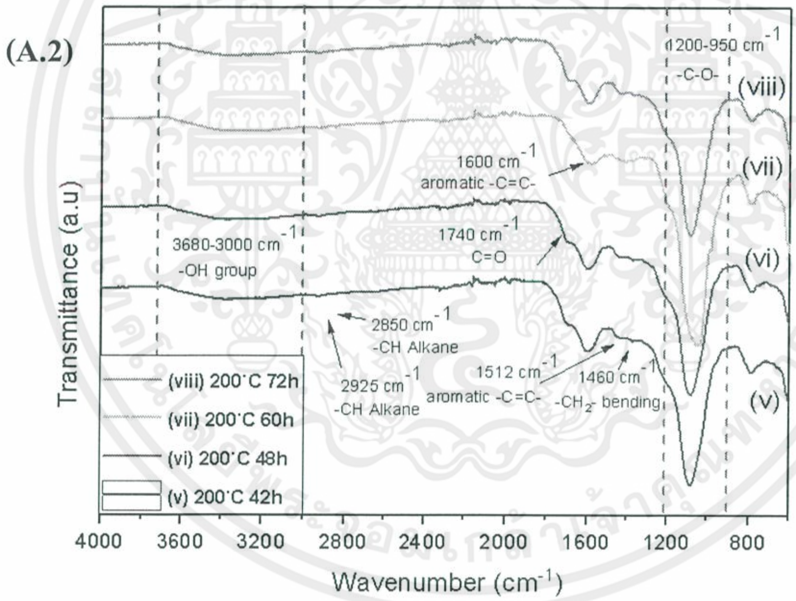
Temperature [°C]	Time [h]	HTC Char [wt%][a]	CFs Product [wt%][b]
200	24	68.37	63.8
200	30	60.85	63.0
200	36	60.08	61.8
200	42	65.30	61.7
200	48	66.32	62.4
200	60	61.55	61.6
200	72	59.99	61.4

[a] น้ำหนักที่เหลืออยู่หลังผ่านกระบวกการไฮโดรเทอร์มัล

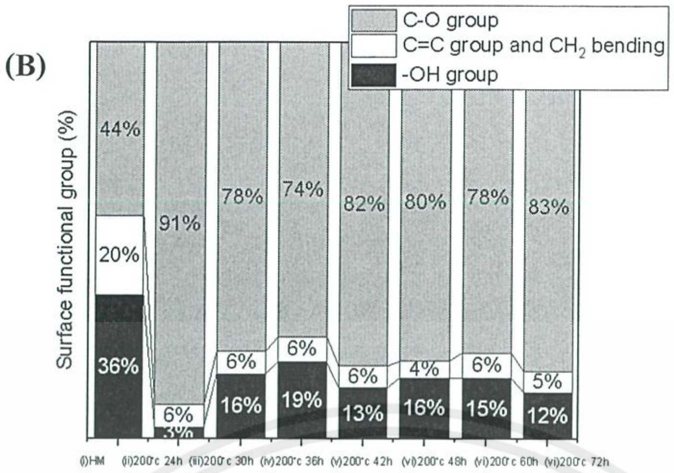
[b] น้ำหนักที่เหลืออยู่หลังผ่านกระบวกการคาร์บอนไนเซชัน ที่อุณหภูมิ 300°C-2h ในบรรยายกาศออกซิเจนเมื่อเทียบมวลของมูลม้าที่ผ่านกระบวกการไฮโดรเทอร์มัล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้





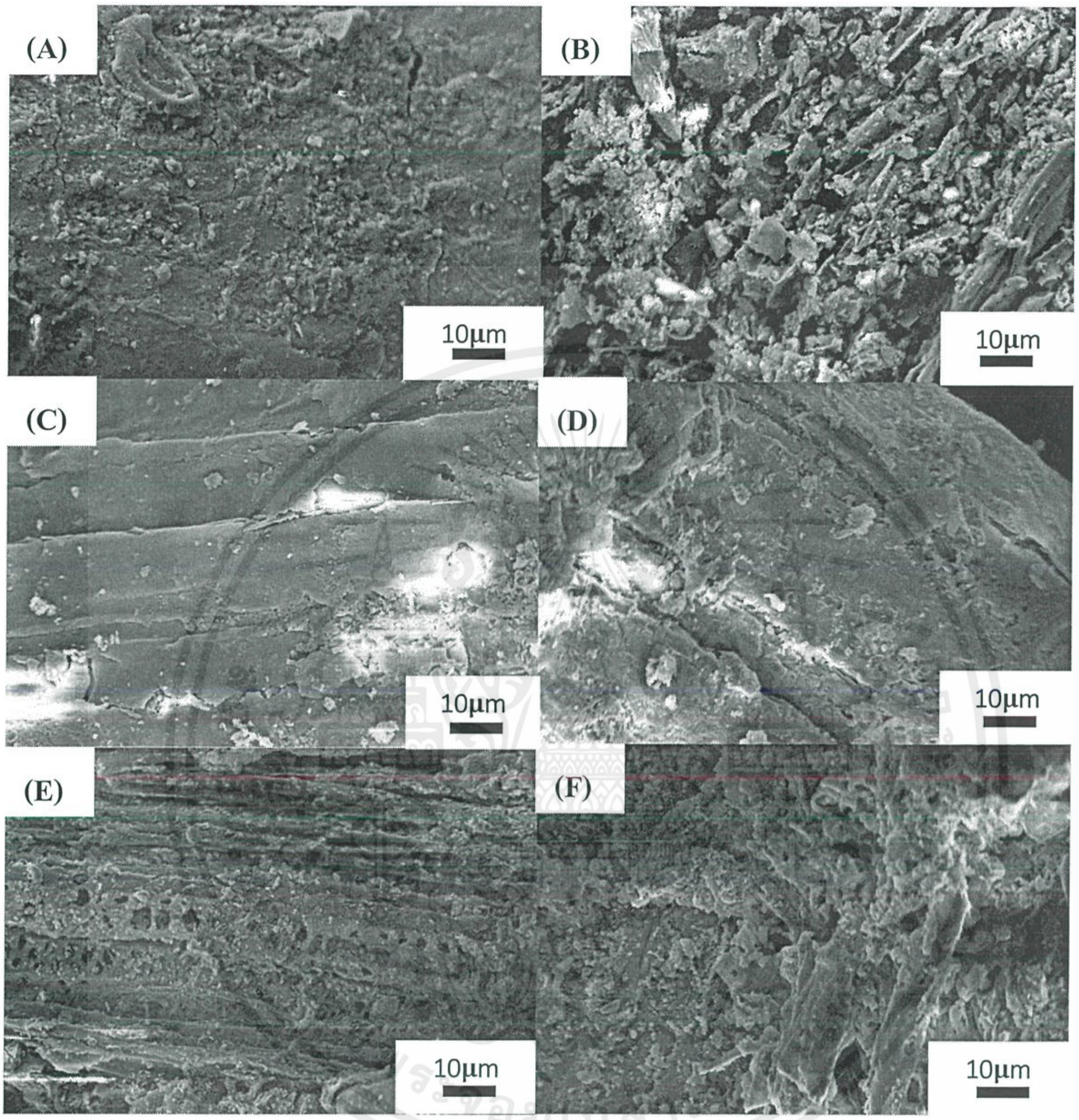
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



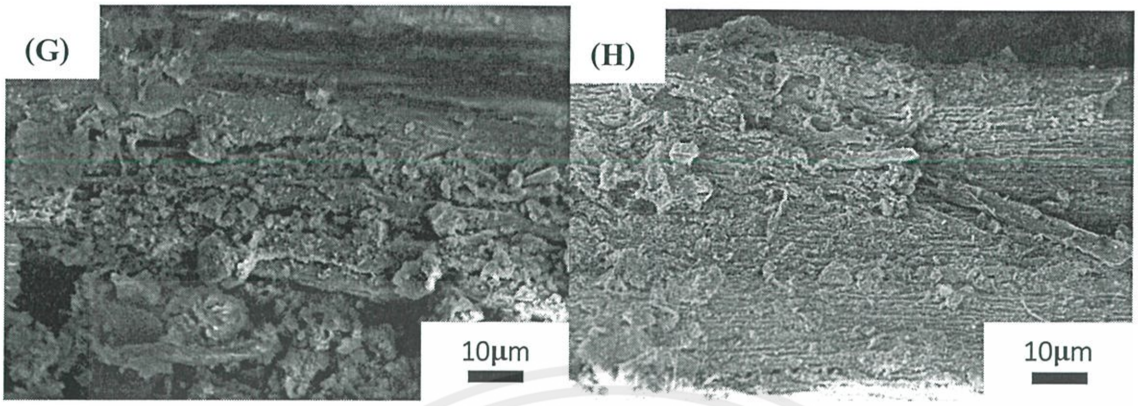
รูปที่ 4.7 (A) FT-IR spectrum และ (B) กราฟเชิงปริมาตร (i) มูลม้าไม่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล, มูลม้าที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลที่เงื่อนไขที่แตกต่างกัน 200 °C เป็นเวลา (ii) 24 h, (iii) 30 h, (iv) 36 h, (iv) 42 h, (iv) 48 h, (iv) 60 h และ (viii) 72 h และทำปฏิกิริยาคาร์บอนไนเซชัน 300 °C-2 h ในบรรยากาศออกซิเจน

จากรูปที่4.7แสดงให้เห็นว่าเกิดพีค broad band ในช่วง 3680-3000 cm^{-1} ซึ่งเป็น หมู่ -OH stretching ในหมู่ไฮดรอกซิลหรือคาร์บอนิล [40] พีคที่ 2925 cm^{-1} และ 2850 cm^{-1} เป็นหมู่ C-H stretching ในพอลิแซ็กคาไรด์ ประกอบด้วยเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส[40] พีคที่ 1740 cm^{-1} เป็น หมู่เอสเทอร์ของเฮมิเซลลูโลสหรือคาร์บอกซิลิกของลิกนินและเฮมิเซลลูโลส พีคที่ 1600 cm^{-1} และ1512 cm^{-1} เป็นหมู่ aromatic -C=C- stretching เป็นเป็นวงอะโรมาติก (aromatic ring) ของลิกนิน พีคที่ 1460 cm^{-1} เป็นหมู่ $-CH_2$ - bending พีคในช่วง 1380-1240 cm^{-1} เป็นหมู่ G lignin และ S lignin และพีคในช่วง 1200-950 cm^{-1} เป็นหมู่ -C-O จากผลการวิเคราะห์ข้างต้นสามารถสรุปได้ว่า เมื่ออุณหภูมิและเวลาในการทำ ปฏิกิริยาไฮโดรเทอร์มัลที่ 200°C 24h หมู่ -OH stretching หมู่-C-O หมู่aromatic -C=C- stretchingและหมู่ $-CH_2$ – bending จะมีปริมาณลดลงแต่เมื่อเวลาไป 30 h, 36 h มีการรวมตัวของหมู่ฟังก์ชัน -OH stretching หมู่-C-O หมู่aromatic -C=C- stretchingและหมู่ $-CH_2$ – bending เวลาผ่านไปที่42hกับ48h-OH stretching หมู่-C-O หมู่aromatic -C=C- stretchingและหมู่ $-CH_2$ – bendingจะมีปริมาณลดลงและเวลา 60 h กับ72hจะมี-OH stretching หมู่-C-O หมู่aromatic -C=C- stretchingและหมู่ $-CH_2$ – bendingลดลงมากขึ้นส่งผลให้มีความเป็นคาร์บอนหรือ (%C) สูงขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



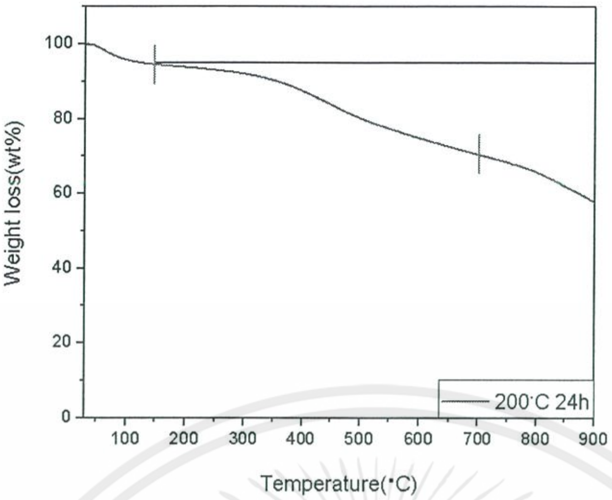
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่4.8 ภาพ SEM (กำลังขยาย 1000X) (A) ของมูลม้าที่ไม่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลและมูลม้าที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลที่อุณหภูมิ 200°C ที่เวลาแตกต่างกัน (B) 24 h, (C)30 h, (D) 36 h, (E) 42 h, (F) 48 h, (G) 60 h และ (H) 72 ผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชันที่ 300°C-2h ในบรรยากาศออกซิเจน

จากรูป4.8 แสดงให้เห็นว่า (รูปที่4.8A) ของมูลม้ามีเส้นผ่าศูนย์กลางขนาดประมาณ 45 µm และความยาวประมาณ 300 µm มีโครงสร้างผิวเรียบ(รูปที่4.8B) มีการแตกตัวภายในโครงสร้างและเห็นโครงสร้างผนังและรอยต่อของผนังเซลล์อย่างเห็นชัดเจน มีลักษณะ แยกออกจากกันเป็นชิ้นเล็ก และเมื่อเวลาผ่าน 30 h เริ่มรวมตัวกัน จากชิ้นเล็กรวมเป็นเส้นใยนาโน เริ่มรวมตัวกันอย่างเห็นได้ชัดเจนขึ้น 36h เริ่มมีการแตกตัวเพิ่มมากขึ้นจาก 42 hกับ 48 h และเวลาผ่านไป 60 h มีการแตกตัวเพิ่มมากขึ้น เริ่มเห็นโครงสร้างผนังและรอยต่อของผนังเซลล์และเวลาผ่านไป 72 h มีการแตกตัวและเห็นเห็นโครงสร้างผนังและรอยต่อของผนังเซลล์อย่างเห็นชัดเจน สรุปได้ว่า 200°C 24 h มีการแตกตัวมากที่สุดเพราะใช้เวลาน้อยกว่า 72 h ทำให้ประหยัดพลังงานถึง 3 เท่าจึงเลือก200°C 24 h มาเติมตัวเร่งปฏิกิริยา 16 ชนิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 กราฟ TGA ของมูลม้าที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลที่อุณหภูมิ 200°C 24 h และผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชันที่ 300°C -2 h ในบรรยากาศออกซิเจน

จากรูปที่ 4.9 แสดงกราฟระหว่างน้ำหนักที่สูญเสียไปกับอุณหภูมิมีช่วงอุณหภูมิการสลายตัวที่แตกต่างกันอยู่ 3 ช่วง ส่วนใหญ่ช่วงแรกเกิดจากการสลายตัวความชื้นสำหรับน้ำหนักสูญเสียไปในต่ำกว่าอุณหภูมิ 150°C คิดเป็นส่วนน้ำหนัก ที่สูญเสียน้ำหนักไป 5.73% ช่วงที่ 2 สลายตัวของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส ลิกนินที่อุณหภูมิ 150-700°C สูญเสียน้ำหนักไป 23.99% ช่วงสุดท้ายจะไปการสลายตัวของเหลวและแก็สในชีวมวลหรือมูลม้าที่อุณหภูมิ 700-900°C สูญเสียน้ำหนักไป 12.44% สูญเสียน้ำหนักทั้งหมดไป42.16%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

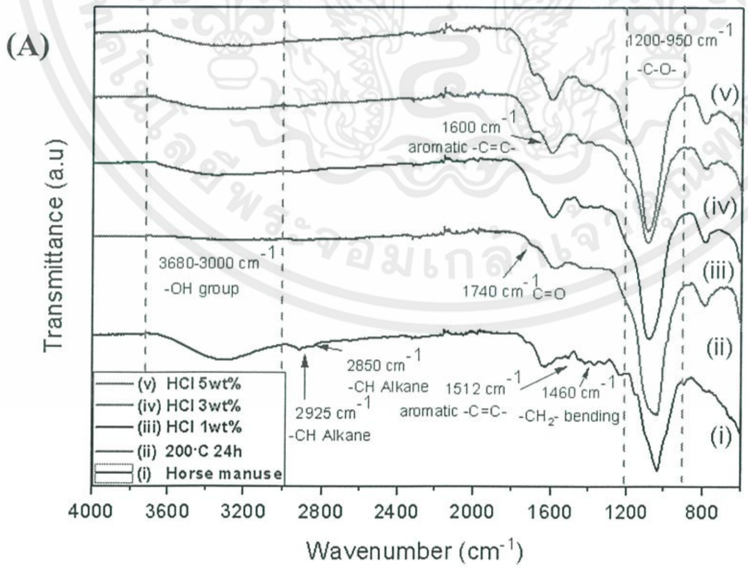
4.2 ผลของชนิดตัวเร่งปฏิกิริยา

ตารางที่ 4.3 มวลของมูลม้าที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลคาร์บอนไนเซชันและเติมตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรด

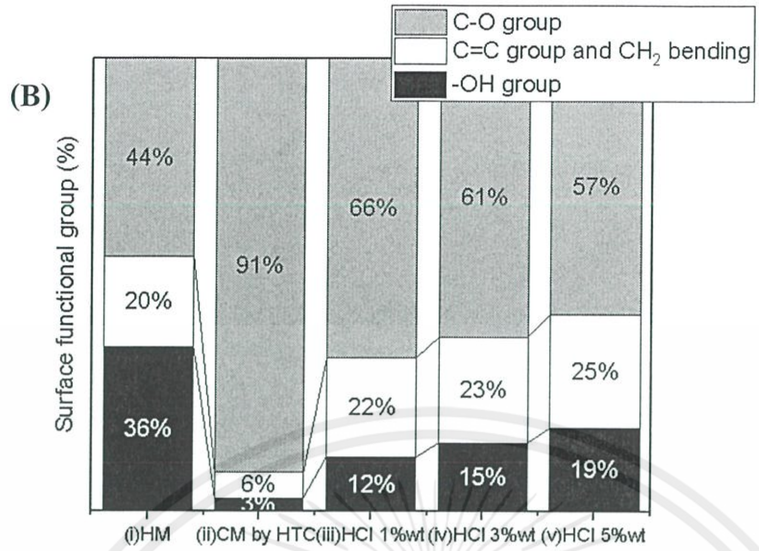
Parameter	HT Char [wt%][a]			HTC Process [wt%][b]		
HM-200-24	68.37			59.54		
	1wt%	3wt%	5wt%	1wt%	3wt%	5wt%
HCl	52.52	51.51	51.44	77.31	75.36	74.75
H_2SO_4	80.13	78.22	76.04	74.75	73.28	73.05
H_3PO_4	82.54	81.40	81.40	72.39	73.52	75.14
HNO_3	65.95	66.44	65.81	76.64	79.66	76.81

[a] น้ำหนักที่เหลืออยู่หลังผ่านกระบวกการไฮโดรเทอร์มัล

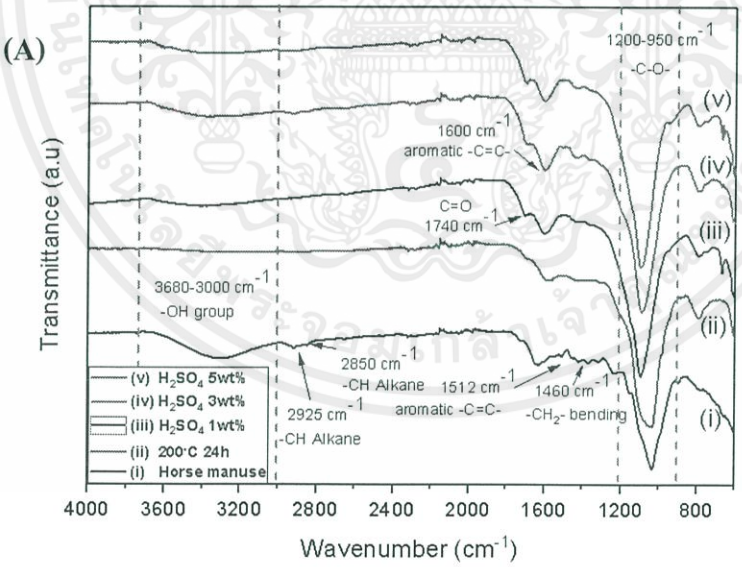
[b] น้ำหนักที่เหลืออยู่หลังผ่านกระบวกการคาร์บอนไนเซชัน ที่อุณหภูมิ 300°C 2h ในบรรยายกาศออกซิเจนเมื่อเทียบมวลของมูลม้าที่ผ่านกระบวกการไฮโดรเทอร์มัล



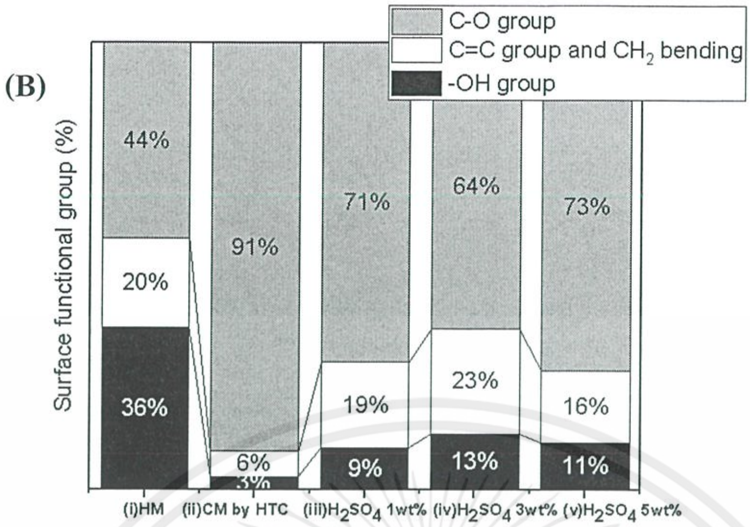
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



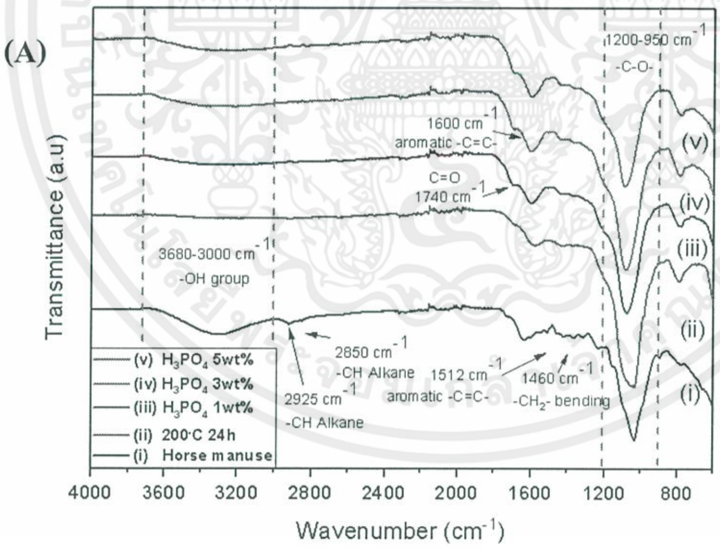
รูปที่ 4.10 (A) FT-IR spectrum และ (B) กราฟเชิงปริมาตร (i) มูลม้าไม่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล, มูลม้าที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล, (ii) ที่อุณหภูมิ 200°C-24 h, (iii) เติม HCl 1 wt%, (iv) HCl 3 wt%, (v) HCl 5 wt% และผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชันที่ 300°C-2h ในบรรยากาศออกซิเจน



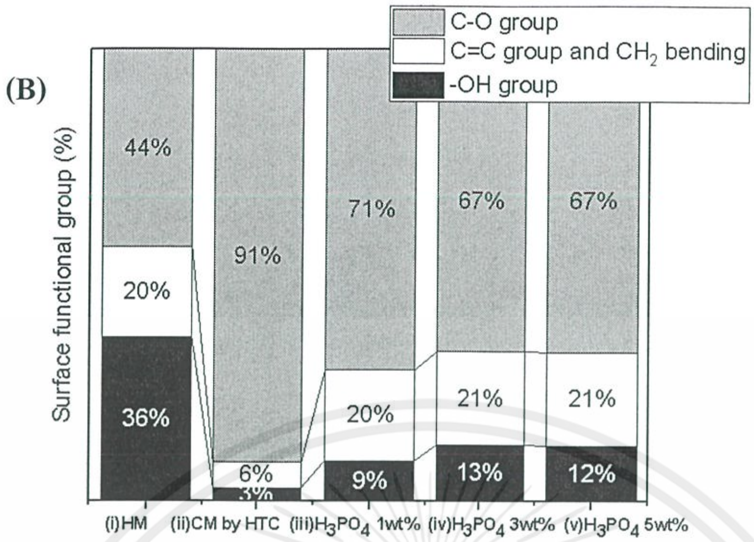
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



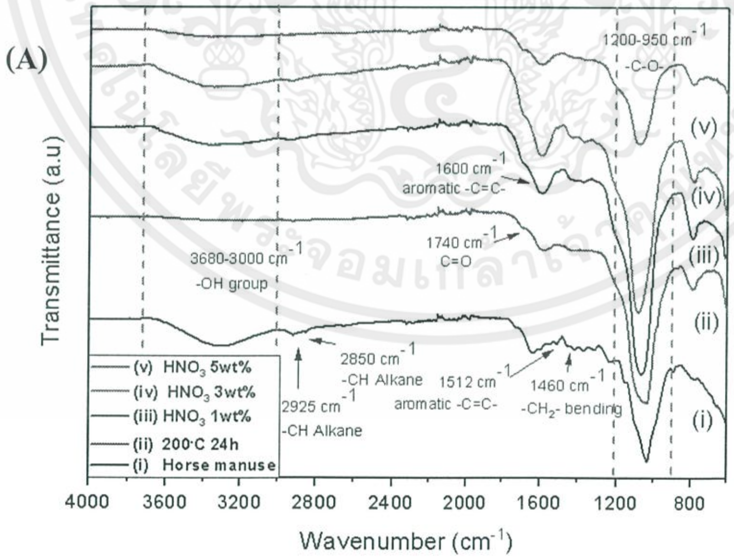
รูปที่ 4.11 (A) FT-IR spectrum และ (B) กราฟเชิงปริมาตร (i) มูลม้าไม่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล, มูลม้าที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล, (ii) ที่อุณหภูมิ 200°C-24h, (iii) เติม H_2SO_4 1 wt%, (iv) H_2SO_4 3 wt%, (v) H_2SO_4 5 wt% และผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชันที่ 300°C 2h ในบรรยากาศออกซิเจน



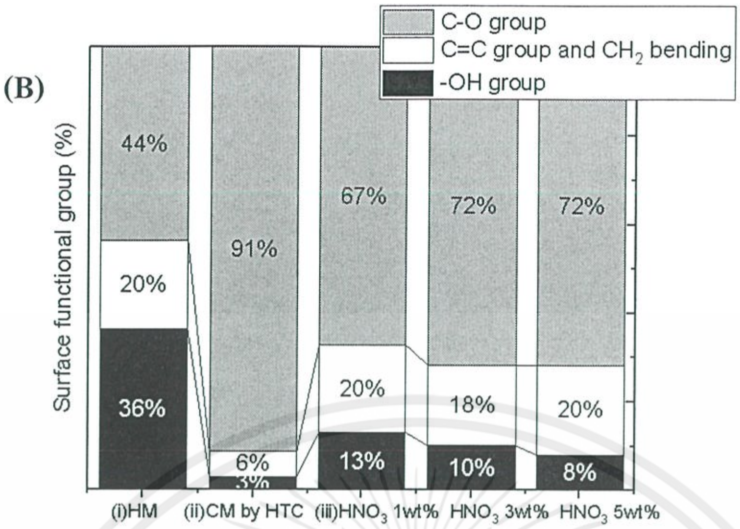
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



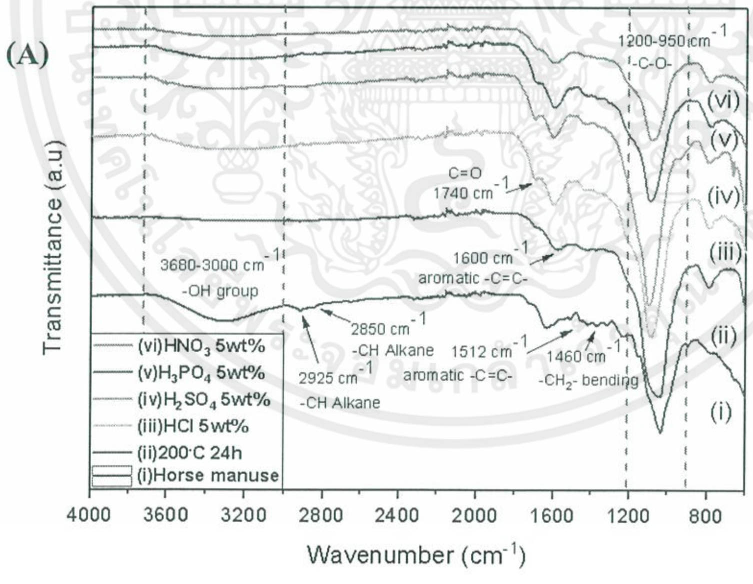
รูปที่ 4.12 (A) FT-IR spectrum และ (B) กราฟเชิงปริมาตร (i) มูลม้าไม่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล , มูลม้าที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล, (ii) ที่อุณหภูมิ 200°C-24 h, (iii) H_3PO_4 1 wt%, (iv) H_3PO_4 3 wt%, (v) H_3PO_4 5 wt% และผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชันที่ 300°C-2h ในบรรยากาศ ออกซิเจน



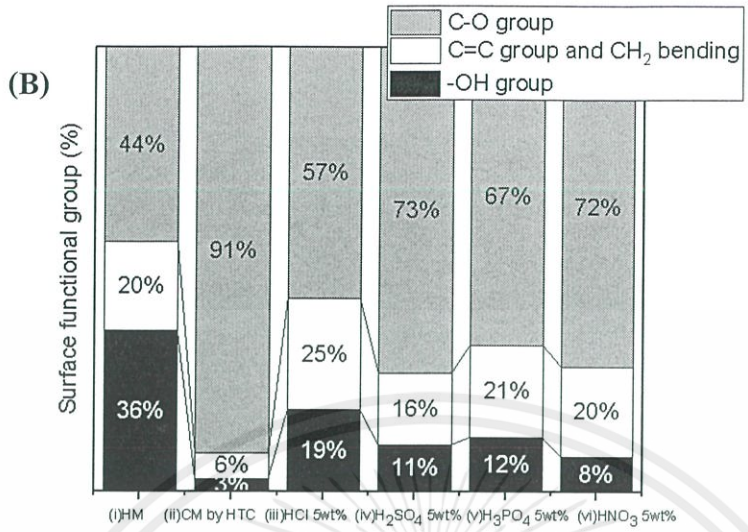
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.13 (A) FT-IR spectrum และ (B) กราฟเชิงปริมาตร (i) มูลม้าไม่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล, มูลม้าที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล, (ii) ที่อุณหภูมิ 200°C-24 h, (iii) HNO_3 1 wt%, (iv) 3 wt%, (v) HNO_3 5 wt% และผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชันที่ 300°C-2 h ในบรรยากาศออกซิเจน



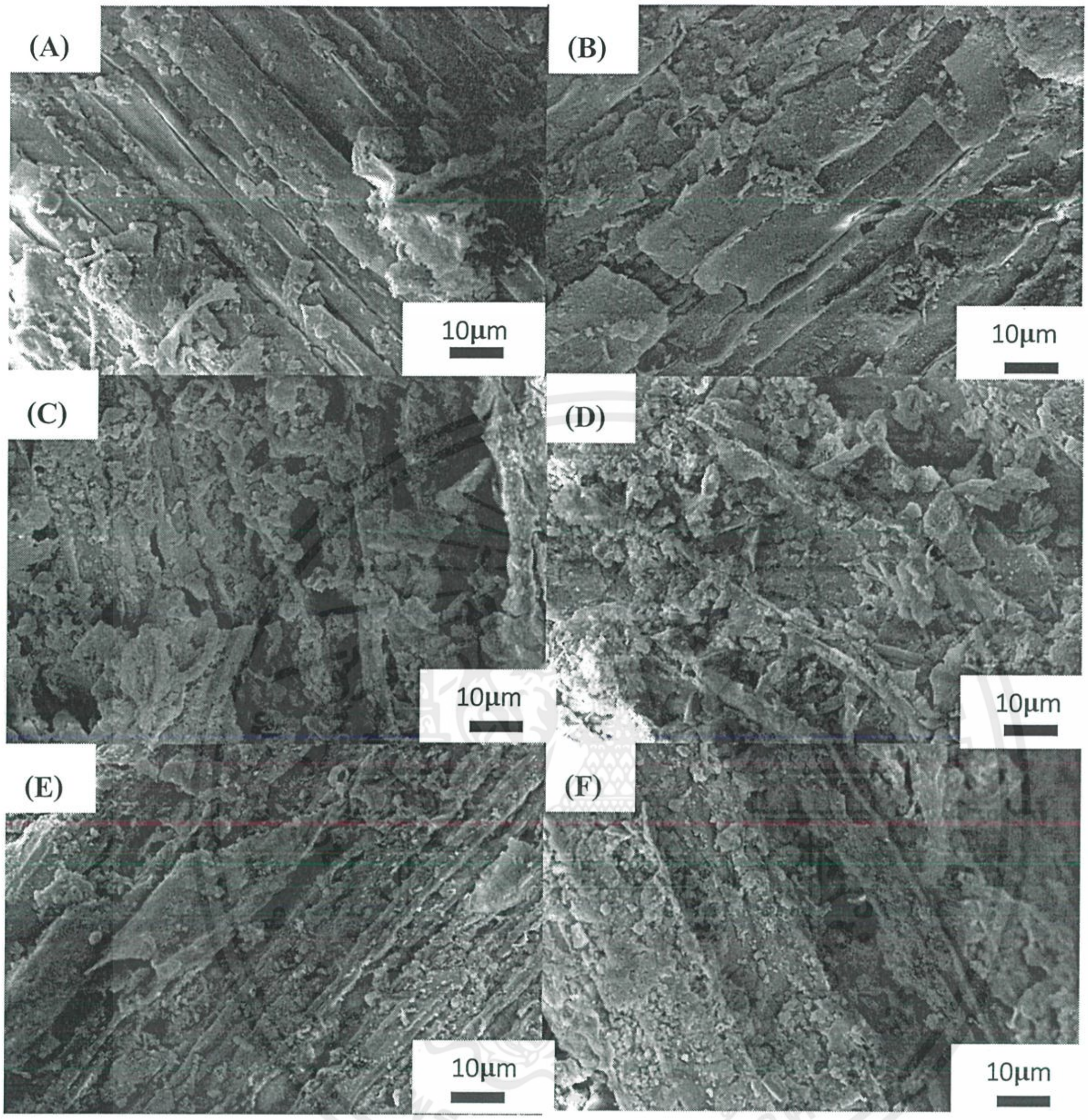
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่4.14 (A) FT-IR spectrum และ (B) กราฟเชิงปริมาตร (i) มูลม้าไม่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล, มูลม้าที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล, (ii) ที่อุณหภูมิ 200°C-24 h, (iii) HCl 5 wt%, (iv) H_2SO_4 5 wt%, (v) H_3PO_4 5 wt%, (vi) NHO_3 5 wt% และผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชันที่ 300°C-2h ในบรรยากาศ ออกซิเจน

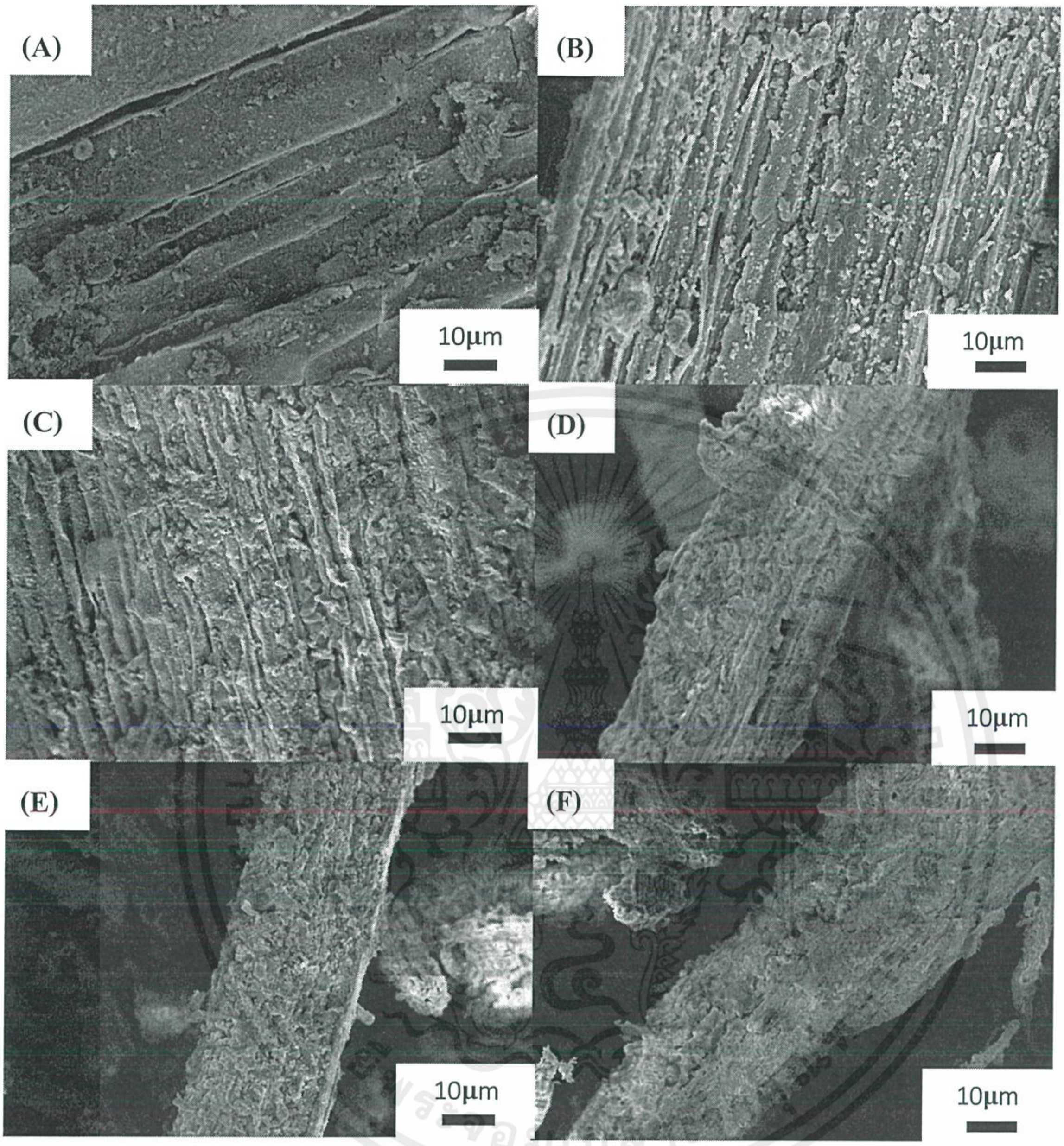
จากรูปที่ 4.10, 4.11, 4.12, 4.13 และ 4.14 แสดงให้เห็นว่าเกิดพีค broad band ในช่วง 3680-3000 cm^{-1} ซึ่งเป็น หมู่ -OH stretching ในหมู่ไฮดรอกซิลหรือคาร์บอนิลพีคที่ 2925 cm^{-1} และ 2850 cm^{-1} เป็นหมู่ C-H stretching ในพอลิแซ็กคาไรด์ ประกอบด้วยเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส [40] พีคที่ 1740 cm^{-1} เป็น หมู่เอสเทอร์ของเฮมิเซลลูโลสหรือคาร์บอกซิลิกของลิกนินและเฮมิเซลลูโลส พีคที่ 1600 cm^{-1} และ1512 cm^{-1} เป็นหมู่ aromatic -C=C- stretching เป็นวงอะโรมาติก (aromatic ring) ของลิกนิน พีคที่ 1460 cm^{-1} เป็นหมู่ -CH_2 - bending พีคในช่วง 1380-1240 cm^{-1} เป็นหมู่ G lignin และ S lignin และพีคในช่วง 1200-950 cm^{-1} เป็นหมู่ -C-O จากผลการวิเคราะห์ข้างต้นสามารถสรุปได้ว่า เมื่ออุณหภูมิและเวลาในการทำ ปฏิกิริยาไฮโดรเทอร์มัลที่ 200°C 24 h หมู่ -OH stretching หมู่-C-O ผลิตภัณฑ์ที่ถูกกระตุ้นด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรดและความเข้มข้น 1 3 5 wt% ก็จะเกิดพีคใน ปริมาณที่แตกต่างกัน มูลม้าที่ถูกกระตุ้นด้วยตัวเร่งปฏิกิริยากรด จะมีปริมาณของหมู่ –OH ที่น้อยกว่ากรณีที่ไม่ได้ถูกกระตุ้นด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.15 ภาพSEM (กำลังขยาย1000X) มูลม้าที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลที่อุณหภูมิ 200°C-24h เติมตัวเร่งปฏิกิริยา (A) HCl 1 wt%, (B) HCl 3 wt%, (C) HCl 5 wt%, (D) H_2SO_4 1 wt%, (E) H_2SO_4 3 wt%, (F) H_2SO_4 5 wt%. และผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชันที่ 300°C-2h ในบรรยากาศออกซิเจน

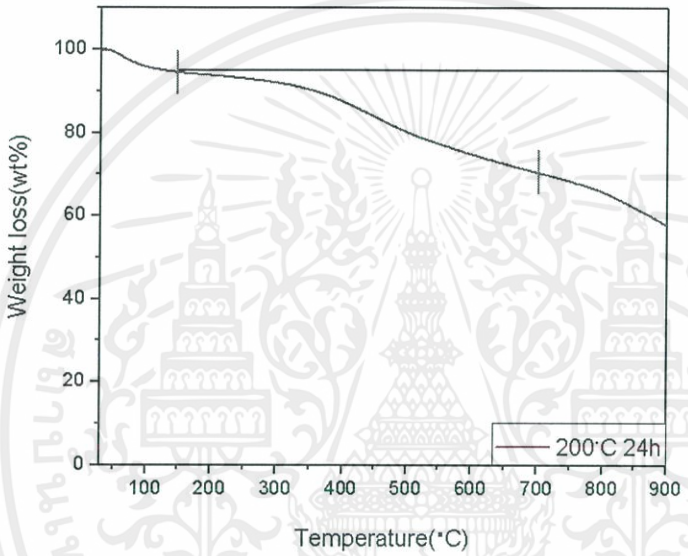
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.16 ภาพ SEM (กำลังขยาย1000X) มูลม้าที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลที่อุณหภูมิ 200°C-24h เติมตัวเร่งปฏิกิริยา (A) H_3PO_4 1 wt%, (B) H_3PO_4 3 wt%, (C) H_3PO_4 5 wt%, (กำลังขยาย300X) (D) HNO_3 1 wt%, (E) HNO_3 3 wt%, (F) HNO_3 5 wt%. และผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชันที่ 300°C-2 h ในบรรยากาศออกซิเจน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูป 4.15 และ 4.16 แสดงลักษณะพื้นผิวของมูลม้า ที่ผ่านกระบวนการที่ไฮโดรเทอร์มัล 200 องศาเซลเซียส 24 ชั่วโมงเติมตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรด HCl กับ HNO_3เมื่อความเข้มข้นขึ้นจะทำให้เส้นใยนาโนคาร์บอนแตกตัวเพิ่มมากขึ้นบนพื้นผิว HCl กับ HNO_3 แตกตัวในน้ำทำให้Cl^- กับ NO_3^- เข้าไปแทรกตัวในเส้นใยนาโนคาร์บอนทำให้เกิดการแตกตัวจึงเกิดพื้นที่ผิวสูง แต่ H_2SO_4 กับ H_3PO_4 แตกตัวในน้ำเป็น 2 และ 3 ขั้นตอนจึงทำให้ได้ไอออนบวกเป็นจำนวนมากจึงเกิดการรวมตัวและเมื่อเพิ่มความเข้มข้นมากขึ้นจึงเกิดการรวมตัวที่สูงขึ้นจึงสรุปได้ว่าเส้นใยนาโนคาร์บอนที่เติมตัวเร่งปฏิกิริยา HCl 5 wt% แตกตัวบนพื้นผิวของเส้นใยนาโนคาร์บอนที่มากที่สุดส่งให้มีพื้นที่ผิวที่สูงที่สุด



รูปที่ 4.17 กราฟ TGA ของมูลม้าที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลที่อุณหภูมิ 200°C-24 h และเติมตัวเร่งปฏิกิริยา HCl 5 wt%และผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชันที่ 300°C-2h ในบรรยากาศออกซิเจน

จากรูปที่ 4.17 แสดงกราฟระหว่างน้ำหนักที่สูญเสียไปกับอุณหภูมิมีช่วงอุณหภูมิการสลายตัวที่แตกต่างกันอยู่ 3 ช่วง ส่วนใหญ่ช่วงแรกเกิดจากการสลายตัวความชื้นสำหรับน้ำหนักสูญเสียไปในต่ำกว่าอุณหภูมิ 150°C คิดเป็นส่วนน้ำหนัก ที่สูญเสียน้ำหนักไป 5.70% ช่วงที่ 2 สลายตัวของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส ลิกนินที่อุณหภูมิ 150-700°C สูญเสียน้ำหนักไป 46.69% ช่วงสุดท้ายจะไปการสลายตัวของเหลวและแก็สในชีวมวลหรือมูลม้าที่อุณหภูมิ 700-900°C สูญเสียน้ำหนักไป 19.10% สูญเสียน้ำหนักทั้งหมดไป71.49%

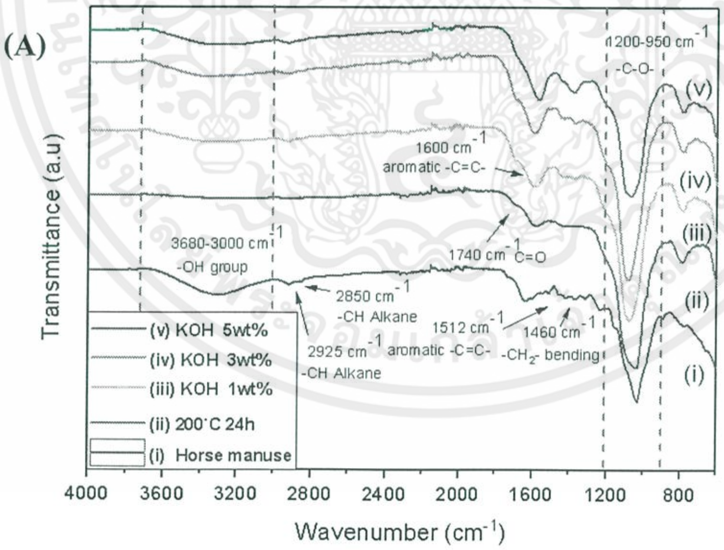
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่4.4 มวลของมูลม้าที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลคาร์บอนไนเซชันและเติมตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบส

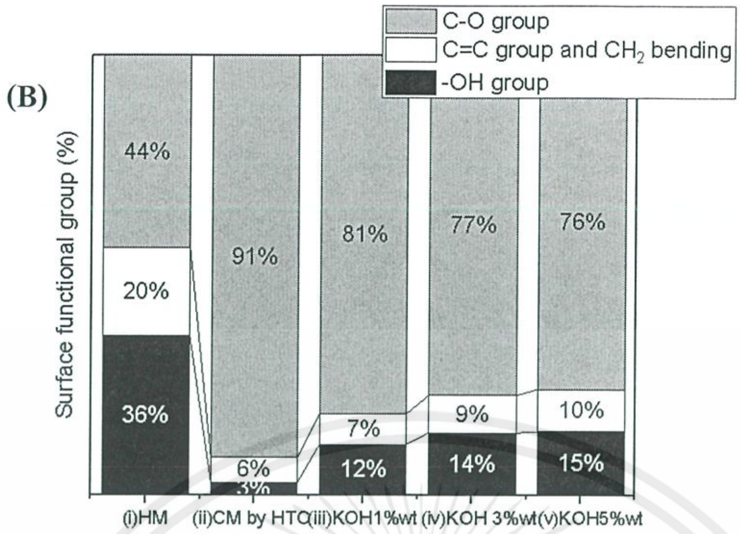
Parameter	HT Char [wt%][a]			HTC Process [wt%][b]		
HM-200-24	68.37			59.54		
	1wt%	3wt%	5wt%	1wt%	3wt%	5wt%
KOH	65.68	67.78	68.75	76.31	73.21	75.30
NaOH	67.78	68.75	73.84	73.21	75.30	77.75
$Ca(OH)_2$	68.75	73.84	68.83	75.30	77.75	74.63
NH_3	73.84	68.83	70.88	77.75	74.63	78.13

[a] น้ำหนักที่เหลืออยู่หลังผ่านกระบวกการไฮโดรเทอร์มัล

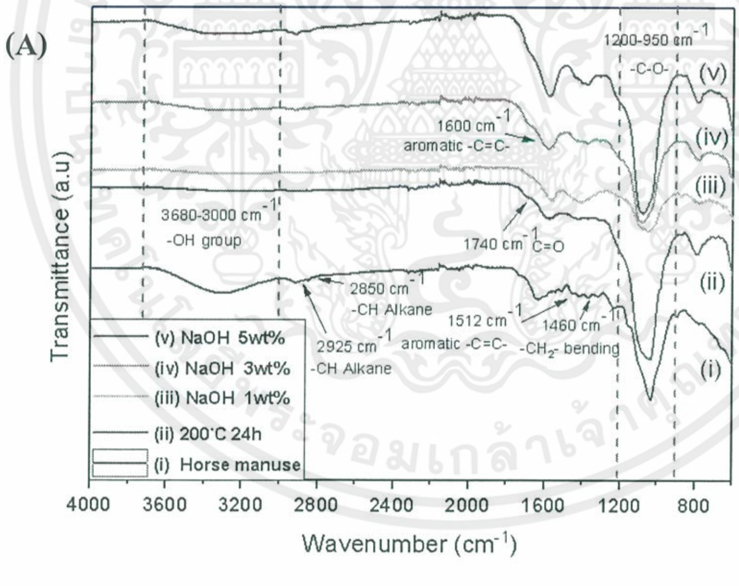
[b] น้ำหนักที่เหลืออยู่หลังผ่านกระบวกการคาร์บอนไนเซชัน ที่อุณหภูมิ 300°C-2h ในบรรยายกาศออกซิเจนเมื่อเทียบมวลของมูลม้าที่ผ่านกระบวกการไฮโดรเทอร์มัล



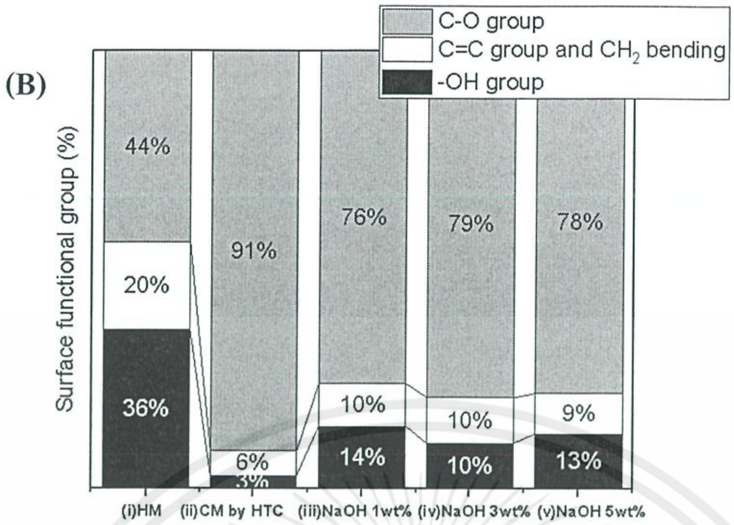
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



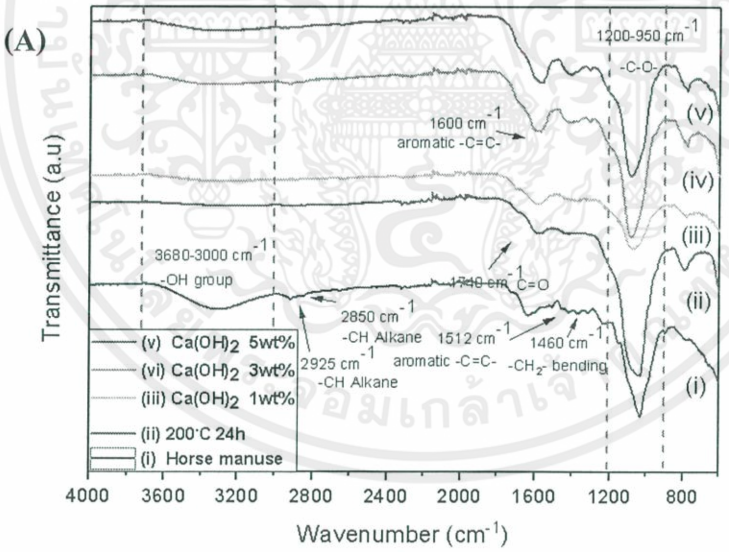
รูปที่ 4.18 แสดง(A)กราฟFT-IRและ(B)กราฟเชิงปริมาตร (i) มูลม้าไม่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล, มูลม้าที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล, (ii) ที่อุณหภูมิ 200°C-24h, (iii) KOH 1 wt%, (iv) KOH 3 wt%, (v) KOH 5 wt% และผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชันที่ 300°C-2h ในบรรยากาศออกซิเจน



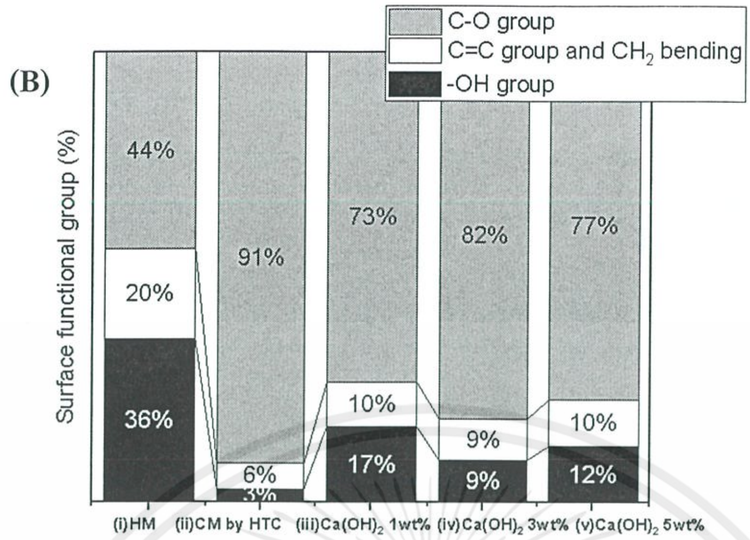
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



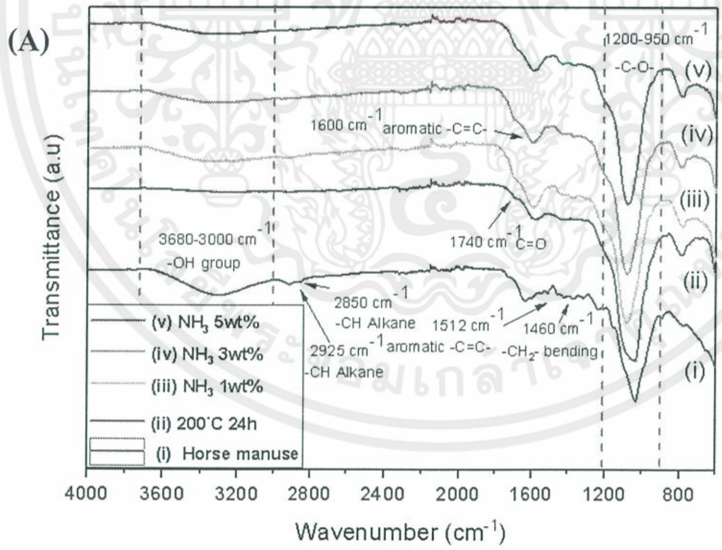
รูปที่ 4.19 (A) FT-IR spectrum และ (B) กราฟเชิงปริมาตร (i) มูลม้าไม่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล, มูลม้าที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล, (ii) ที่อุณหภูมิ 200°C-24 h, (iii) NaOH 1 wt%, (iv) NaOH 3 wt%, (v) NaOH 5 wt% และผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชันที่ 300°C-2h ในบรรยากาศ O_2



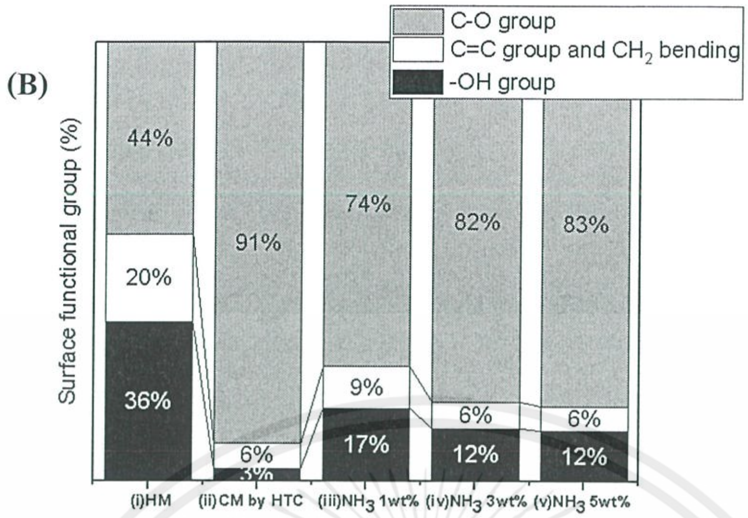
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



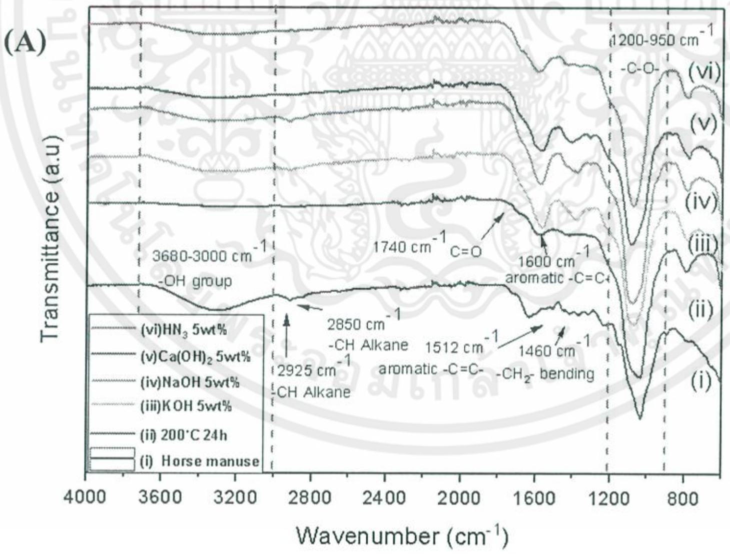
รูปที่ 4.20แสดง (A) FT-IR spectrum และ (B) กราฟเชิงปริมาตร (i) มูลม้าไม่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล, มูลม้าที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล, (ii) ที่อุณหภูมิ 200℃-24 h, (iii) $Ca(OH)_2$ 1 wt%, (iv) $Ca(OH)_2$ 3 wt%, (v) $Ca(OH)_2$ 5 wt% และผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชันที่ 300℃-2h ในบรรยากาศออกซิเจน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

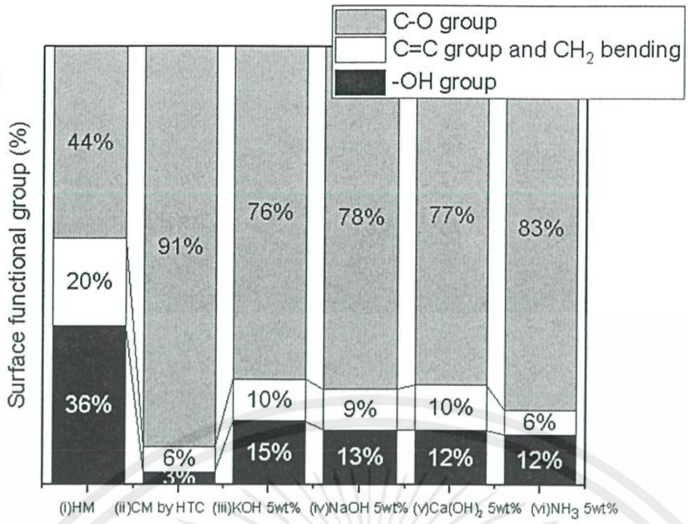


รูปที่ 4.21 (A) FT-IR spectrum และ (B) กราฟเชิงปริมาตร (i) มูลม้าไม่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล, มูลม้าที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล, (ii) ที่อุณหภูมิ 200°C-24 h, (iii) NH_3 1 wt%, (iv) NH_3 3 wt%, (v) NH_3 5 wt% และผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชันที่ 300°C-2h ในบรรยากาศออกซิเจน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

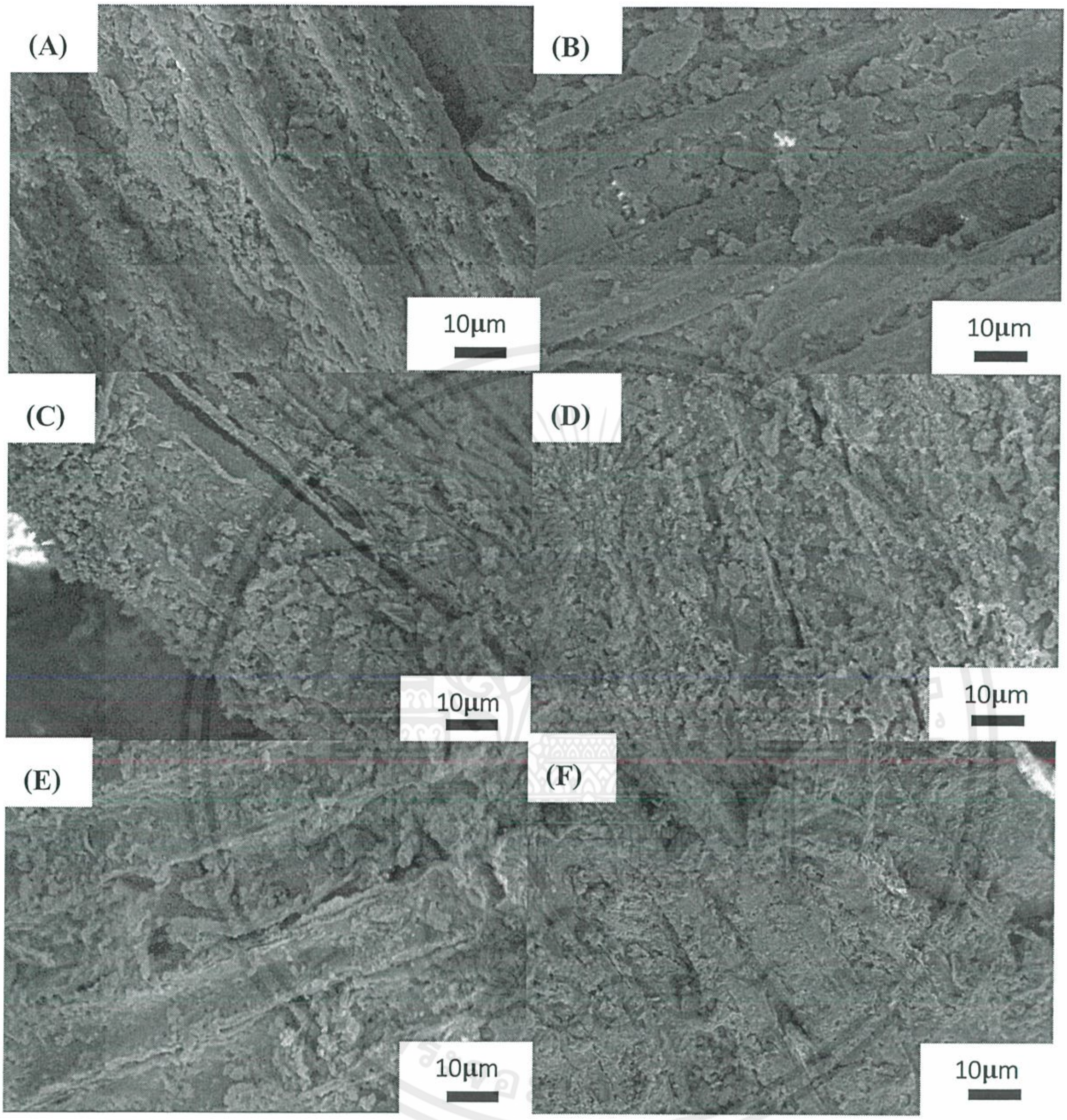
(B)



รูปที่ 4.22 (A) FT-IR spectrum และ (B) กราฟเชิงปริมาตร (i) มูลม้าไม่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล, มูลม้าที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล, (ii) ที่อุณหภูมิ 200°C-24 h, (iii) KOH 5 wt%, (iv) NaOH 5 wt%, (v)$Ca(OH)_2$ 5 wt%, (vi) NH_3 5 wt% และผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชันที่ 300°C-2 h ในบรรยากาศ ออกซิเจน

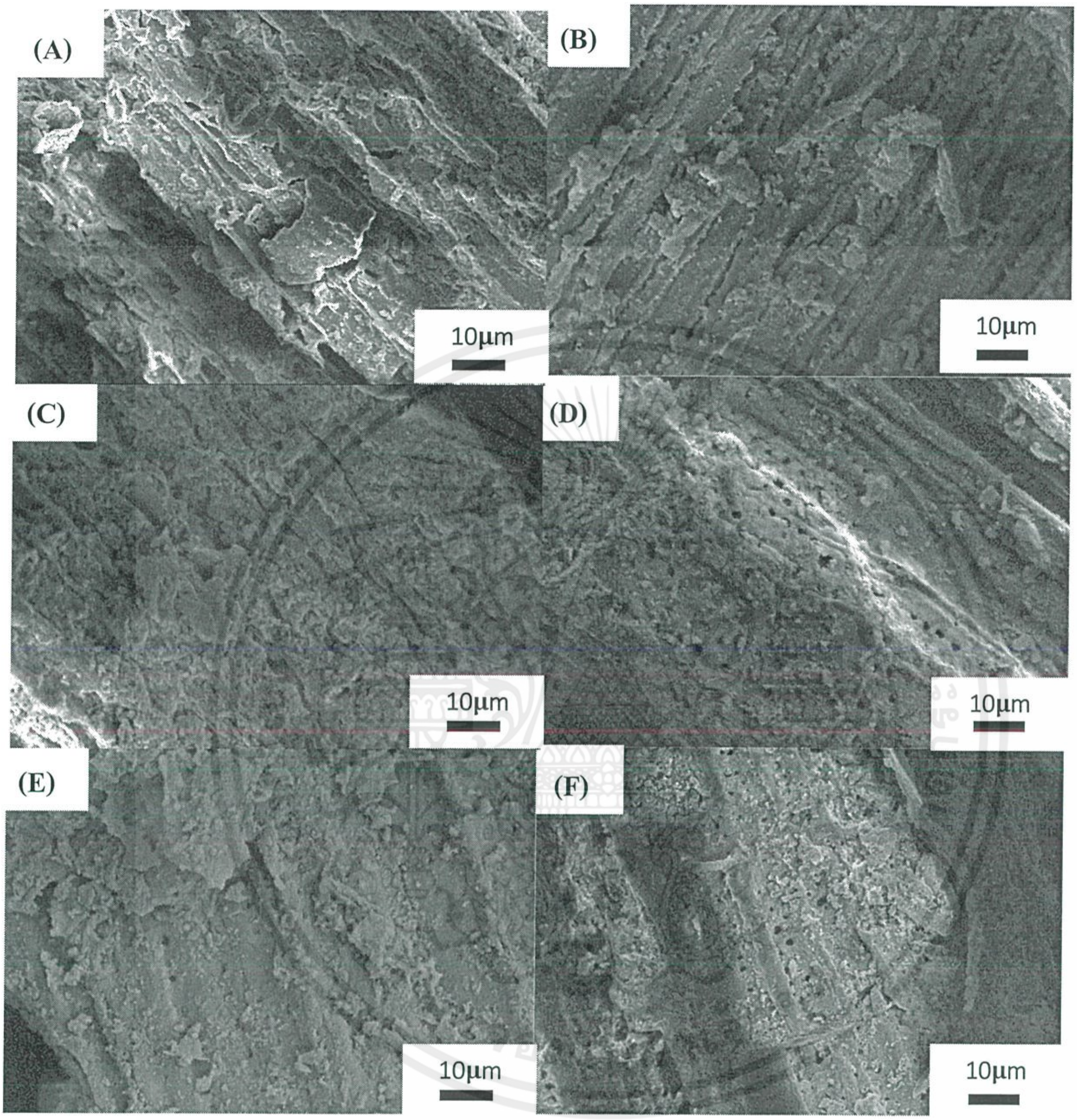
จากรูปที่ 4.18, 4.19, 4.20, 4.21, 4.22 แสดงให้เห็นว่าเกิดพีค broad band ในช่วง 3680-3000 cm^{-1} ซึ่งเป็น หมู่ -OH stretching ในหมู่ไฮดรอกซิลหรือคาร์บอนิล [60] พีคที่ 2925 cm^{-1} และ 2850 cm^{-1} เป็นหมู่ C-H stretching ในพอลิแซ็กคาไรด์ ประกอบด้วยเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส [40] พีคที่ 1740 cm^{-1} เป็น หมู่เอสเทอร์ของเฮมิเซลลูโลสหรือคาร์บอกซิลิกของลิกนินและเฮมิเซลลูโลส พีคที่ 1600 cm^{-1} และ1512 cm^{-1} เป็นหมู่ aromatic -C=C- stretching เป็นวงอะโรมาติก(aromatic ring) ของลิกนิน พีคที่ 1460 cm^{-1} เป็นหมู่ -CH_2 - bending พีคในช่วง 1380-1240 cm^{-1} เป็นหมู่ G lignin และ S lignin และพีคในช่วง 1200-950 cm^{-1} เป็นหมู่ -C-O จากผลการวิเคราะห์ข้างต้นสามารถสรุปได้ว่า เมื่ออุณหภูมิและเวลาในการทำ ปฏิกิริยาไฮโดรเทอร์มัลที่ 200°C 24 h หมู่ -OH stretching หมู่ -C-O ผลิตภัณฑ์ที่ถูกกระตุ้นด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบสและความเข้มข้น 1, 3, 5 wt% ก็จะเกิดพีคในปริมาณที่แตกต่างกัน มูลม้าที่ถูกกระตุ้นด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเบส จะมีปริมาณของหมู่ –OH ที่น้อยกว่ากรณีที่ไม่ได้ถูกกระตุ้นด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา ยิ่งความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นจะส่งต่อหมู่ฟังก์ชันต่างๆ ส่งผลให้การเปลี่ยนแปลงของคาร์บอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.23 ภาพ SEM (กำลังขยาย1000X) มูลม้าที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลที่อุณหภูมิ 200°C-24 h เติมตัวเร่งปฏิกิริยา (A) KOH 1 wt%, (B) KOH 3 wt%, (C) KOH 5 wt%, (D) NaOH 1 wt%, (E) NaOH 3 wt%, (F) NaOH 5 wt%. และผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชันที่ 300°C-2h ในบรรยากาศออกซิเจน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

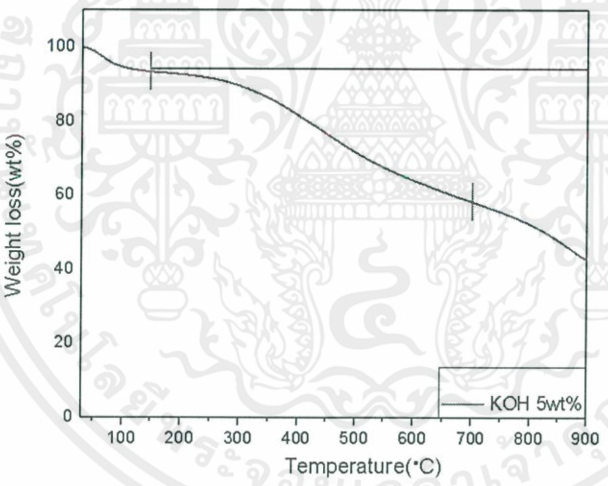


รูปที่ 4.24 ภาพSEM (กำลังขยาย1000X) มูลม้าที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลที่อุณหภูมิ 200°C-24 h เติมตัวเร่งปฏิกิริยา (A) $Ca(OH)_2$ 1 wt%, (B) $Ca(OH)_2$ 3 wt%, (C) $Ca(OH)_2$ 5 wt%, (D) NH_3 1 wt%, (E) NH_3 3 wt%, (F) NH_3 5 wt%. และผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชันที่ 300°C-2h ในบรรยากาศออกซิเจน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูป 4.23 และ 4.24 แสดงให้เห็นว่ามูลม้าที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมงโดยเติมตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบส (รูปที่ 4.24 4.23A-4.24C)มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 µm และมีความยาวประมาณ 170 µm ทำให้โครงสร้างแยกออกจากกันและแตกตัวเป็นชิ้นเล็ก จะมีลักษณะขรุขระ เริ่มมองเห็นโครงสร้างเห็นผนังเซลล์ และรอยต่อของผนังเซลล์ที่อยู่ภายใต้เส้นใยรอยแตกที่ชัดเจนขึ้น (รูปที่ 4.24D-4.24E)มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดประมาณ 21 µm และมีความยาวประมาณ 172 µm เส้นใยที่มีขนาด ใหญ่จะเกิดการแตกหักและแยกออก มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่เล็กลง และคาร์บอนที่มีรูปทรงกลม (Carbon Sphere) ที่ก่อตัวจะมีลักษณะที่สมบูรณ์คือมีลักษณะที่เป็นทรงกลมอย่างชัดเจนขนาดเส้นผ่านและมีรูพรุนทรงกลมมีศูนย์กลางประมาณ 2 µm และส่งผลให้มีความเป็นคาร์บอน (%C) เพิ่มสูงขึ้น

จึงสรุปได้ว่าKOH 5 wt% มีการแตกตัวบนพื้นผิวของเส้นใยนาโนคาร์บอนที่สูงที่สุด เมื่อKOHแตดตัวในน้ำจะทำให้ K^+ จึงเข้าไปแทรกตัวและจับกับหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิลทำให้คาร์บอน จึงให้เส้นใยนาโนคาร์บอนมีรูพรุ่นที่สูง



รูปที่ 4.25 กราฟ TGA ของมูลที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลที่อุณหภูมิ 200°C-24 h โดยเติมตัวเร่งปฏิกิริยา KOH 5 wt% และผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชันที่ 300°C-2 h ในบรรยากาศออกซิเจน

จากรูปที่ 4.25 แสดงกราฟระหว่างน้ำหนักที่สูญเสียไปกับอุณหภูมิมีช่วงอุณหภูมิการสลายตัวที่ แตกต่างกันอยู่ 3 ช่วง ส่วนใหญ่ช่วงแรกเกิดจากการสลายตัวความชื้นสำหรับน้ำหนักสูญเสียไปในต่ำกว่าอุณหภูมิ 150°C คิดเป็นส่วนน้ำหนัก ที่สูญเสียน้ำหนักไป 7.00% ช่วงที่ 2 สลายตัวของเซลลูโลสเฮมิเซลลูโลส ลิกนินที่อุณหภูมิ 150-700°C สูญเสียน้ำหนักไป 35.17% ช่วงสุดท้ายจะไปการสลายตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

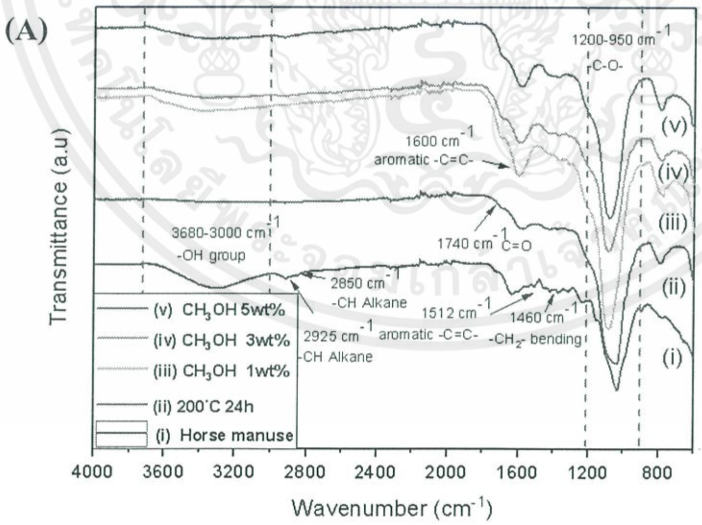
ของเหลวและแก๊สในชีวมวลหรือมูลม้าที่อุณหภูมิ 700-900°C สูญเสียน้ำหนักไป 15.13% สูญเสียน้ำหนักทั้งหมดไป57.30%

ตารางที่4.5 มวลของมูลม้าที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลคาร์บอนไนเซชันและเติมตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดแอลกอฮอล์

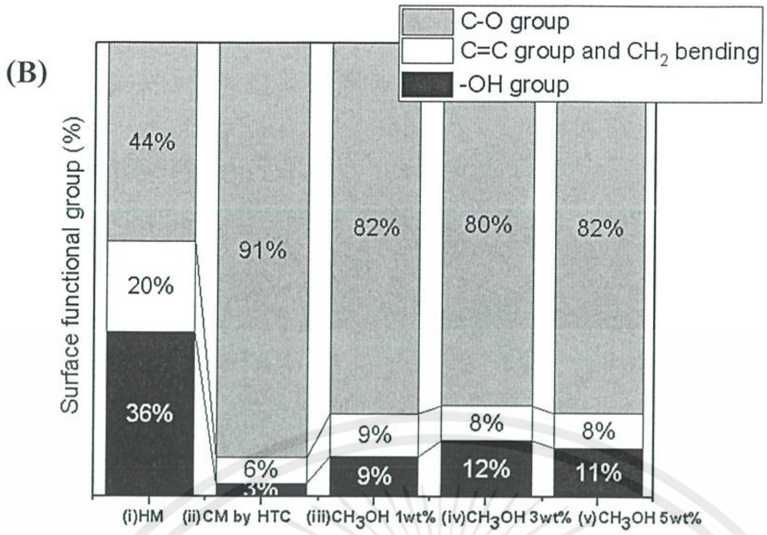
Parameter	HT Char [wt%][a]			HTC Process [wt%][b]		
HM-200-24	68.37			59.54		
	1wt%	3wt%	5wt%	1wt%	3wt%	5wt%
CH_3OH	67.04	66.63	64.82	77.39	78.01	74.57
C_2H_5OH	66.63	64.82	65.98	78.01	74.57	75.39
C_4H_9OH	64.82	65.98	65.79	74.57	75.39	76.62
$(CH_3)_2CHOH$	65.98	65.79	64.10	75.39	76.62	77.88

[a] น้ำหนักที่เหลืออยู่หลังผ่านกระบวกการไฮโดรเทอร์มัล

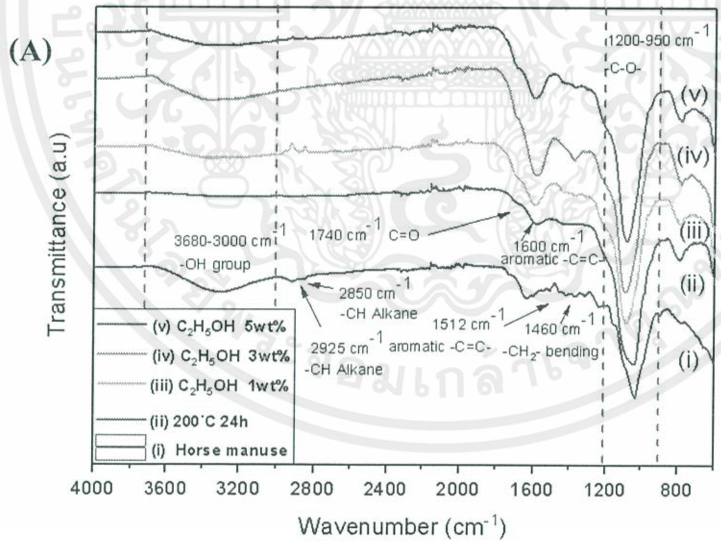
[b] น้ำหนักที่เหลืออยู่หลังผ่านกระบวกการคาร์บอนไนเซชัน ที่อุณหภูมิ 300°C-2h ในบรรยายกาศออกซิเจนเมื่อเทียบมวลของมูลม้าที่ผ่านกระบวกการไฮโดรเทอร์มัล



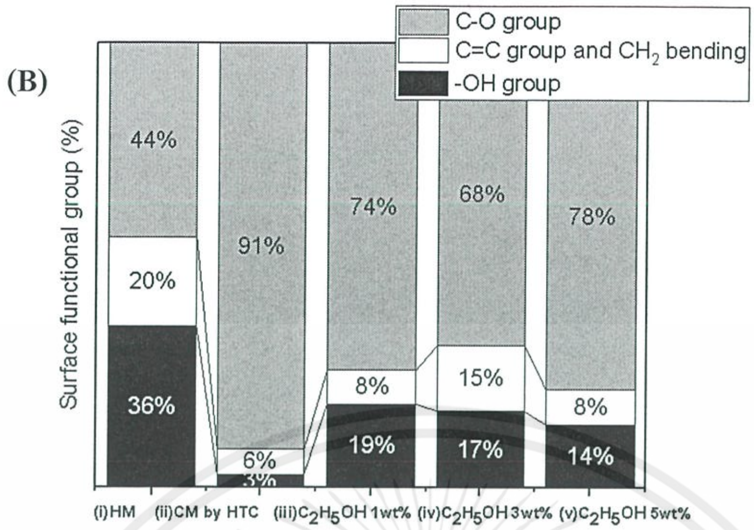
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



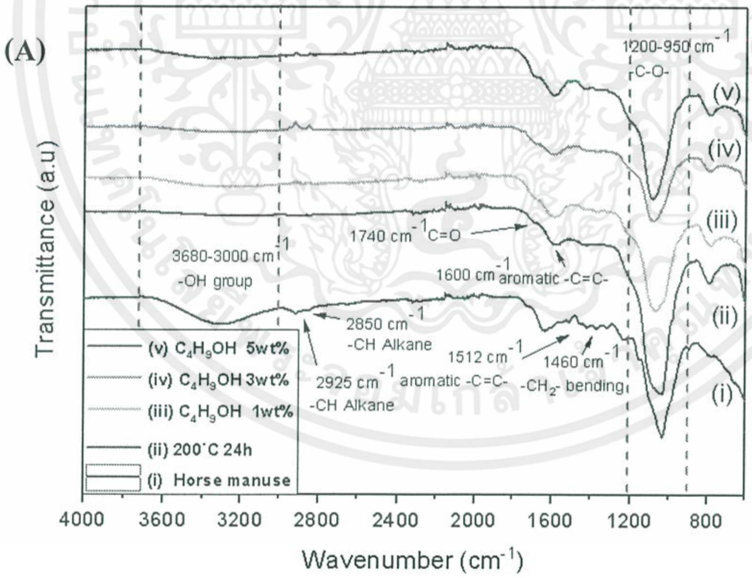
รูปที่4.26 (A) FT-IR spectrum และ (B) กราฟเชิงปริมาตร (I) มูลม้าไม่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล, มูลม้าที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล, (ii) ที่อุณหภูมิ 200°C-24 h, (iii) CH_3OH 1 wt%, (iv) CH_3OH 3 wt%, (v) CH_3OH 5 wt% และผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชันที่ 300°C-2 h ในบรรยากาศออกซิเจน



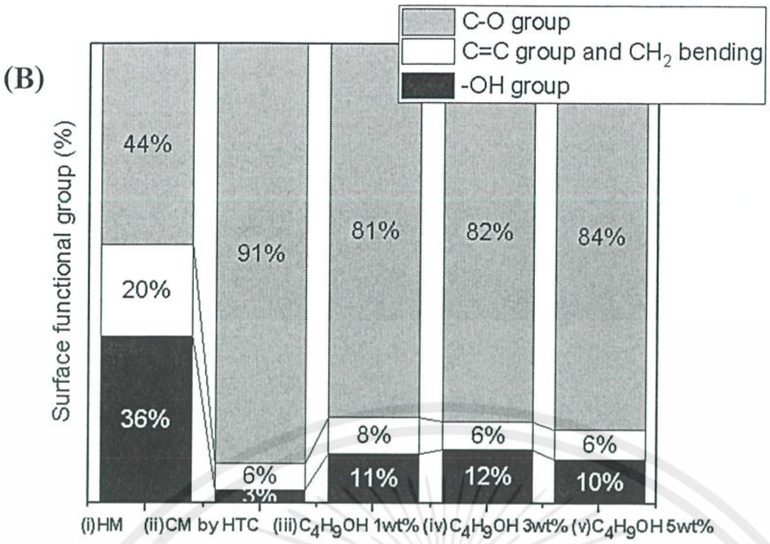
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



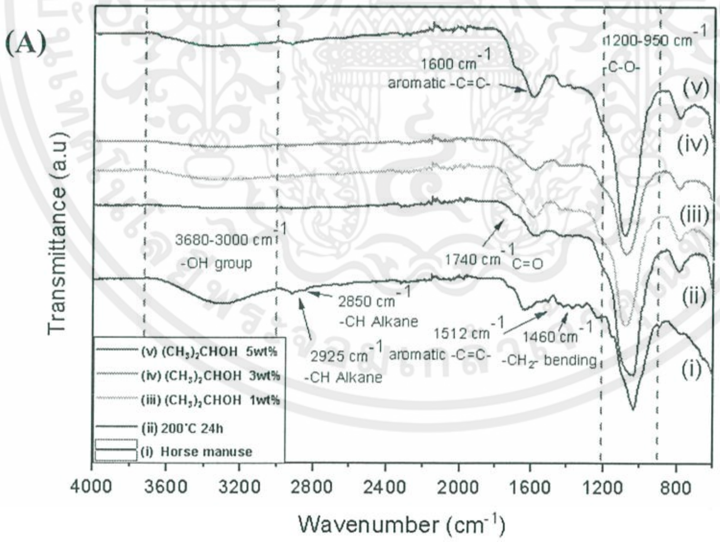
รูปที่ 4.27 (A) FT-IR spectrum และ (B) กราฟเชิงปริมาตร (i) มูลม้าไม่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล, มูลม้าที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล, (ii) ที่อุณหภูมิ 200°C-24h, (iii) C_2H_5OH 1 wt%, (iv) C_2H_5OH 3 wt%, (v) C_2H_5OH 5 wt% และผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชันที่ 300°C-2h ในบรรยากาศออกซิเจน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

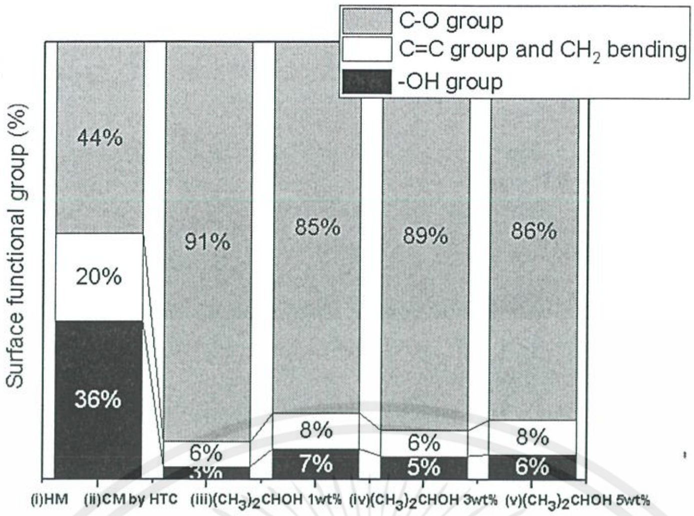


รูปที่ 4.28 (A) FT-IR spectrum และ (B) กราฟเชิงปริมาตร (i) มูลม้าที่ไม่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล, มูลม้าที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล, (ii) ที่อุณหภูมิ 200°C-24 h, (iii) C_4H_9OH 1 wt%, (iv) C_4H_9OH 3 wt%, (v) C_4H_9OH 5 wt% และผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชันที่ 300°C-2h ในบรรยากาศออกซิเจน



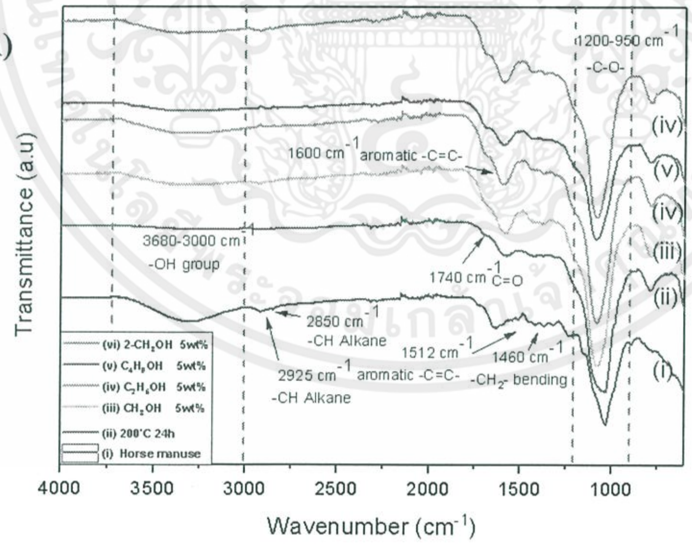
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(B)

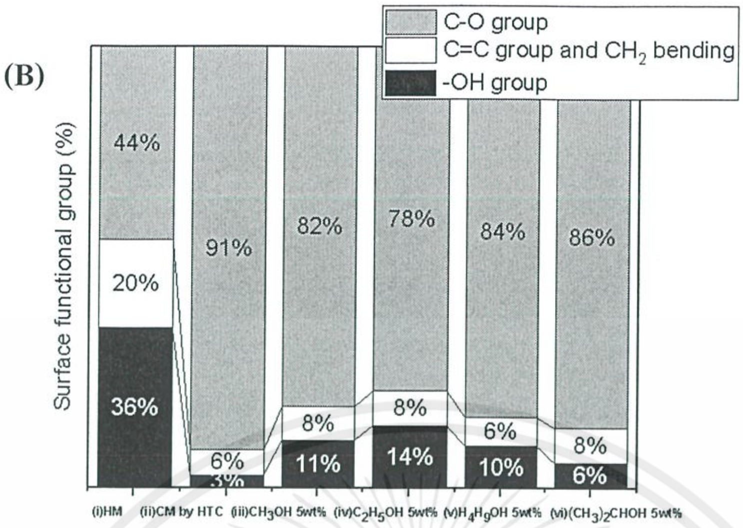


รูปที่ 4.29 (A) FT-IR spectrum และ (B) กราฟเชิงปริมาตร (i) มูลม้าที่ไม่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล, มูลม้าที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล, (ii) ที่อุณหภูมิ 200°C-24h, (iii) $(CH_3)_2CHOH$ 1 wt%, (iv) $(CH_3)_2CHOH$ 3 wt%, (v) $(CH_3)_2CHOH$ 5 wt% และผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชันที่ 300°C-2h ในบรรยากาศออกซิเจน

(A)



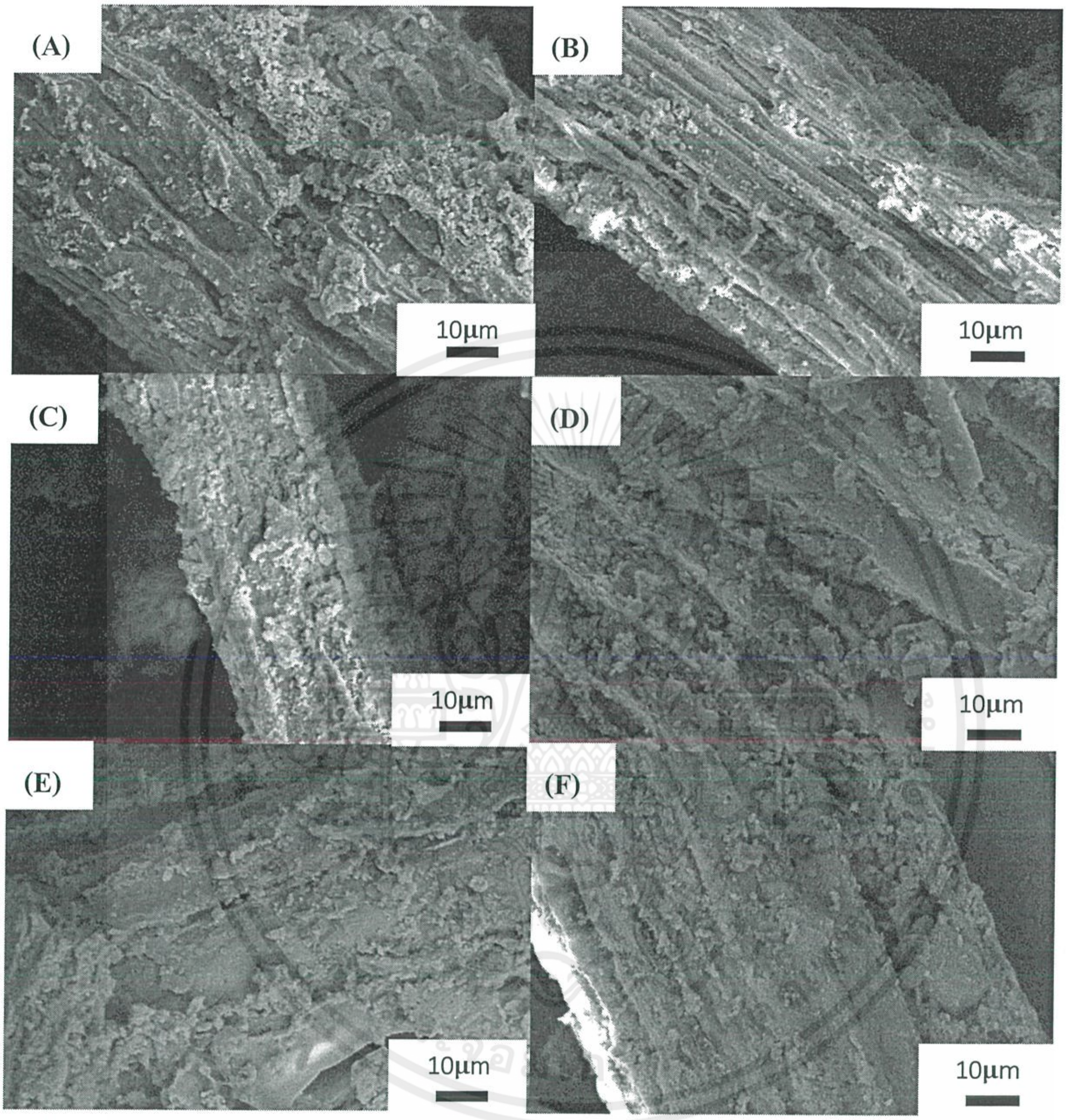
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.30 แสดง (A) FT-IR spectrum และ (B) กราฟเชิงปริมาตร (i) มูลม้าที่ไม่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล, มูลม้าที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล, (ii) ที่อุณหภูมิ 200°C-24h, (iii) CH_3OH 5 wt%, (iv) C_2H_9OH 5 wt%, (v) C_4H_9OH 5 wt%, (vi) $(CH_3)_2CHOH$ 5 wt% และผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชัน ที่ 300°C-2h ในบรรยากาศออกซิเจน

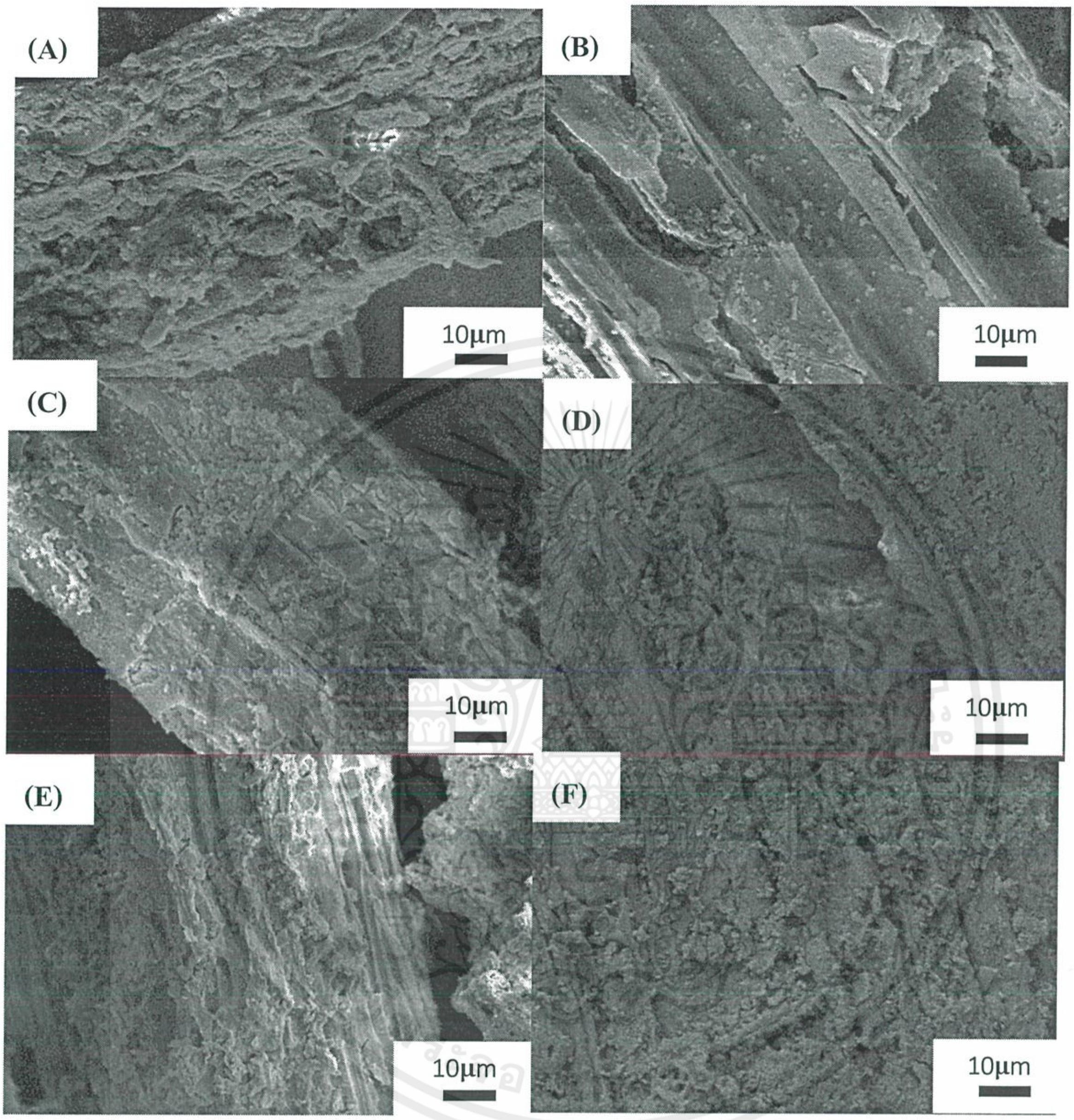
จากรูปที่4.26, 4.27, 4.28, 4.29 และ 4.30 แสดงให้เห็นว่าเกิดพีค broad band ในช่วง 3680-3000 cm^{-1} ซึ่งเป็น หมู่ -OH stretching ในหมู่ไฮดรอกซิลหรือคาร์บอนิลพีคที่ 2925 cm^{-1} และ 2850 cm^{-1} เป็นหมู่ C-H stretching ในพอลิแซ็กคาไรด์ ประกอบด้วยเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส[40] พีคที่ 1740 cm^{-1} เป็น หมู่เอสเทอร์ของเฮมิเซลลูโลสหรือคาร์บอกซิลิกของลิกนินและเฮมิเซลลูโลส พีคที่ 1600 cm^{-1} และ1512 cm^{-1} เป็นหมู่ aromatic -C=C- stretching เป็นวงอะโรมาติก (aromatic ring) ของลิกนิน พีคที่ 1460 cm^{-1} เป็นหมู่ $-CH_2$ - bending พีคในช่วง1380-1240 cm^{-1} เป็นหมู่ G lignin และ S lignin และพีคในช่วง 1200-950 cm^{-1} เป็นหมู่ -C-O จากผลการวิเคราะห์ข้างต้นสามารถสรุปได้ว่า เมื่ออุณหภูมิและเวลาในการทำ ปฏิกิริยาไฮโดรเทอร์มัลที่ 200°C 24 h หมู่ -OH stretching หมู่ -C-O ผลิตภัณฑ์ที่ถูกกระตุ้นด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดแอลกอฮอล์และความเข้มข้น 1, 3 และ 5 wt% ก็จะเกิดพีคใน ปริมาณที่แตกต่างกัน มูลม้าที่ถูกกระตุ้นด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาแอลกอฮอล์ จะมีปริมาณของหมู่ –OH ที่น้อยกว่ากรณีที่ไม่ได้ถูกกระตุ้นด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา ตัวเร่งปฏิกิริยา 2-CH_3 เป็นสายโซพอลิเมอร์แบบก้านจึงทำให้หมู่หมู่ -OH stretching ในหมู่ไฮดรอกซิลหรือคาร์บอนิลพีคที่ 2925 cm^{-1} ลดลงอย่างมากจึงส่งมีความเป็นคาร์บอน (%C) ที่สูงขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.31 ภาพ SEM (กำลังขยาย1000X) มูลม้าที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลที่อุณหภูมิ 200°C-24h เติมตัวเร่งปฏิกิริยา (A) CH_3OH 1 wt%, (B) CH_3OH 3 wt%, (C) CH_3OH 5 wt%, (D) C_2H_5OH 1 wt%, (E) C_2H_5OH 3 wt%, (F) C_2H_5OH 5 wt%. และผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชันที่ 300°C-2h ในบรรยากาศออกซิเจน

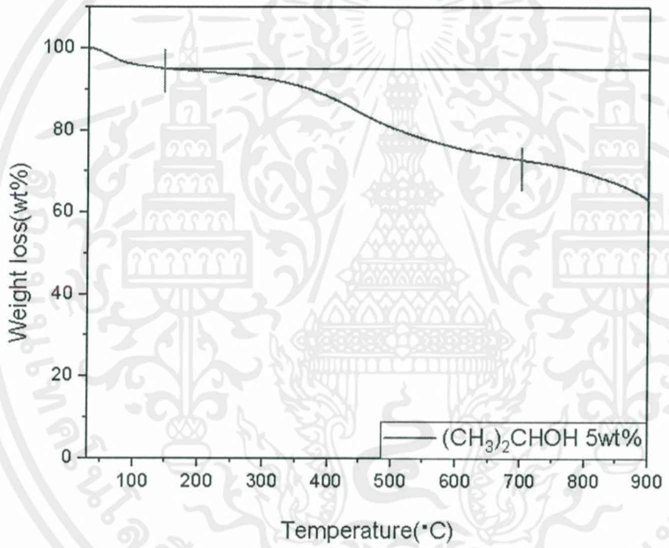
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.32 แสดงภาพ SEM (กำลังขยาย1000X) มูลม้าที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลที่อุณหภูมิ 200°C- 24h เติมตัวเร่งปฏิกิริยา (A) C_4H_9OH 1 wt%, (B) C_4H_9OH 3 wt%, (C) C_4H_9OH 5 wt%, (D) $(CH_3)_2CHOH$ 1 wt%, (E) $(CH_3)_2CHOH$ 3 wt%, (F) $(CH_3)_2CHOH$ 5 wt%. และผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชันที่ 300°C-2h ในบรรยากาศออกซิเจน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูป 4.31 และ 4.32 แสดงให้เห็นว่ามูลม้าที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมงโดยเติมตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดแอลกอฮอล์ (รูป.431-4.32)มีเส้นผ่านศูนย์กลาง21.5 μm และมีความยาวประมาณ 173 μm **ทำให้โครงสร้างแยกออกจากกันและแตกตัวเป็นชิ้นเล็ก จะมีลักษณะขรุขระ เริ่มมองเห็นโครงสร้างเห็นผนังเซลล์ และรอยต่อของผนังเซลล์ที่อยู่ภายใต้เส้นใย รอยแตกที่ชัดเจนขึ้น** มีรูพรุนทรงกลม ศูนย์กลางประมาณ 2 μm และส่งผลให้มีความเป็นคาร์บอน (%C) ที่สูงขึ้น เส้นใยนาโนคาร์บอนที่เติมตัวเร่งปฏิกิริยา CH_3OH C_4H_9OH C_2H_5OH และ $(CH_3)_2CHOH$ เพิ่มความเข้มข้นเข้าไปทำให้เส้นใยนาโนคาร์บอนมีการแตกตัวที่พื้นผิวมากขึ้น จึงสรุปได้ว่าเส้นใยนาโนคาร์บอนที่เติมตัวเร่งปฏิกิริยา$(CH_3)_2CHOH$ 5 wt% ดีที่สุดเพราะ$(CH_3)_2CHOH$ เป็นสายโซ่พอลิเมอร์ที่ยาวที่สุดและมีกิ่งก้านของพอลิเมอร์จึงแตกตัวได้มากและเข้าไปแทรกตัวได้ง่าย



รูปที่ 4.33แสดงกราฟTGAของมูลของมูลม้าที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลและมูลม้าที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลที่อุณหภูมิ200°C-24hเติมตัวเร่งปฏิกิริยา $(CH_3)_2CHOH$ 5 wt%และผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชันที่300°C-2hในบรรยากาศออกซิเจน

จากรูปที่ 4.33 แสดงกราฟระหว่างน้ำหนักที่สูญเสียไปกับอุณหภูมิมีช่วงอุณหภูมิการสลายตัวที่แตกต่างกันอยู่ 3 ช่วง ส่วนใหญ่ช่วงแรกเกิดจากการสลายตัวความชื้นสำหรับน้ำหนักสูญเสียไปในต่ำกว่าอุณหภูมิ 150°C คิดเป็นส่วนน้ำหนัก ที่สูญเสียน้ำหนักไป 5.15% ช่วงที่ 2 สลายตัวของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส ลิกนินที่อุณหภูมิ150-700°C สูญเสียน้ำหนักไป 22.34% ช่วงสุดท้ายจะไปการสลายตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

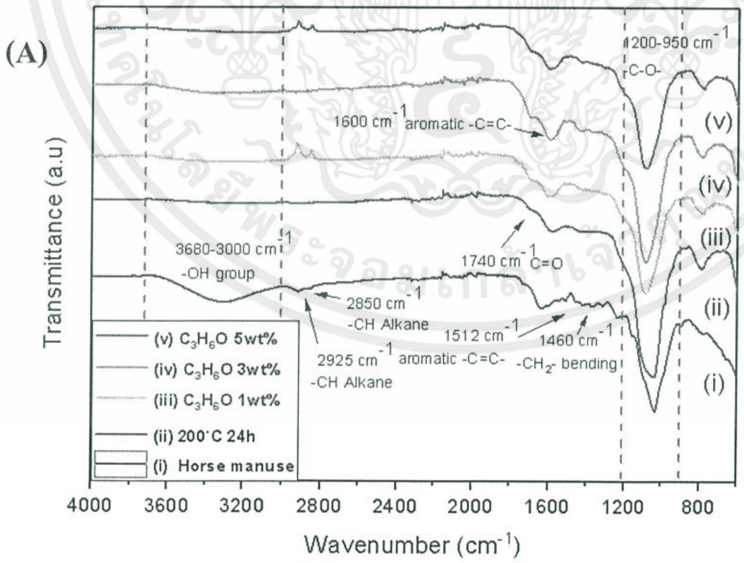
ของเหลวและแก็สในชีวมวลหรือมูลม้าที่อุณหภูมิ 700-900°C สูญเสียน้ำหนักไป 9.24% สูญเสียน้ำหนักทั้งหมดไป 36.73%

ตารางที่4.6น้ำหนักที่เหลืออยู่ของมูลม้าที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลคาร์บอนไนเซชันและเติมตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดตัวทำละลาย

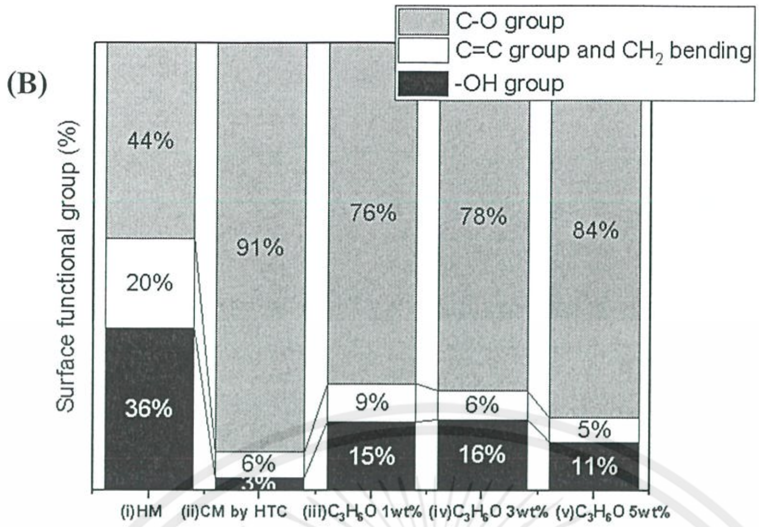
Parameter	HT Char [wt%][a]			HTC Process [wt%][b]		
HM-200-24	68.37			59.54		
	1wt%	3wt%	5wt%	1wt%	3wt%	5wt%
C_3H_6O	49.16	49.10	49.09	77.54	74.69	77.80
C_6H_5-CH_3	46.28	51.09	65.38	74.69	77.80	75.94
C_6H_{14}	51.09	65.38	64.82	77.80	75.94	76.02
C_6H_{12}	65.38	64.82	58.37	75.94	76.02	76.86

[a] น้ำหนักที่เหลืออยู่หลังผ่านกระบวกการไฮโดรเทอร์มัล

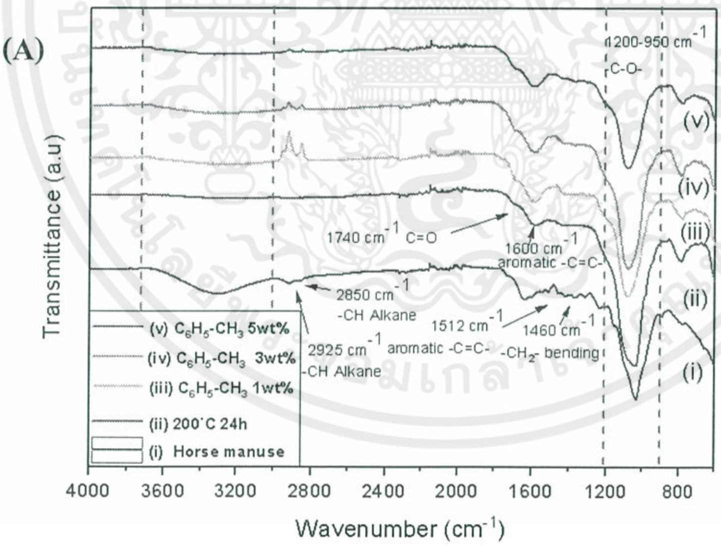
[b] น้ำหนักที่เหลืออยู่หลังผ่านกระบวกการคาร์บอนไนเซชัน ที่อุณหภูมิ 300°C 2 h ในบรรยายกาศ O_2



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

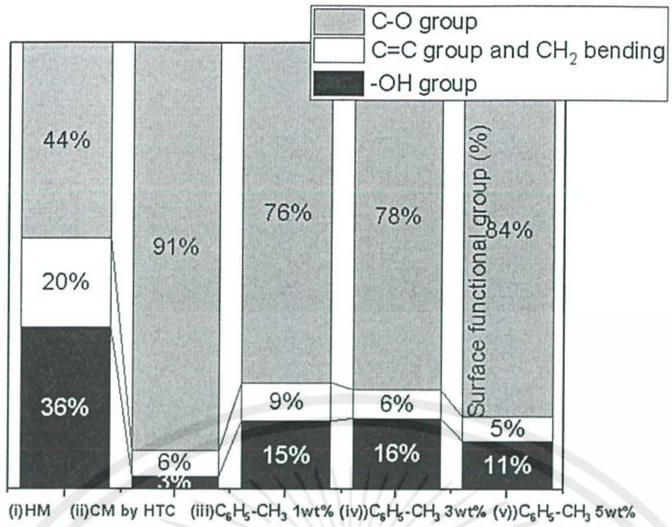


รูปที่ 4.34 (A) FT-IR spectrum และ (B) กราฟเชิงปริมาตร (i) มูลม้าที่ไม่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล, มูลม้าที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล, (ii) ที่อุณหภูมิ 200°C-24h, (iii) C_3H_6O 1 wt%, (iv) C_3H_6O 3 wt%, (v) C_3H_6O 5 wt% และผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชันที่ 300°C-2h ในบรรยากาศออกซิเจน



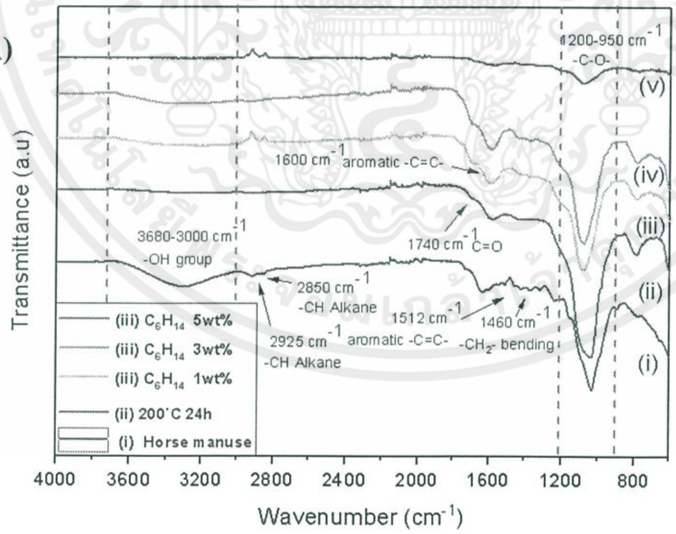
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(B)

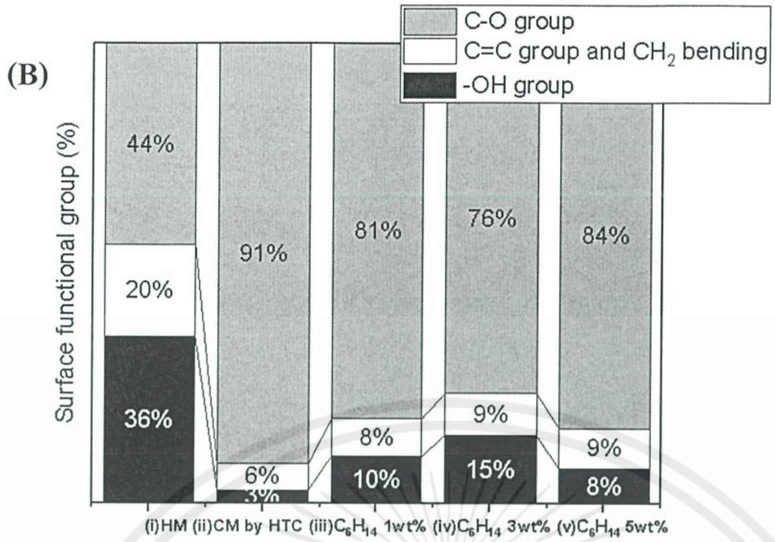


รูปที่ 4.35 (A) FT-IR spectrum และ (B) กราฟเชิงปริมาตร (i) มูลม้าที่ไม่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล, มูลม้าที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล, (ii) ที่อุณหภูมิ 200°C-24 h, (iii) C_6H_5-CH_3 1 wt%, (iv) C_6H_5-CH_3 3 wt%, (v) C_6H_5-CH_3 5 wt% และผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชันที่ 300°C-2h ในบรรยากาศออกซิเจน

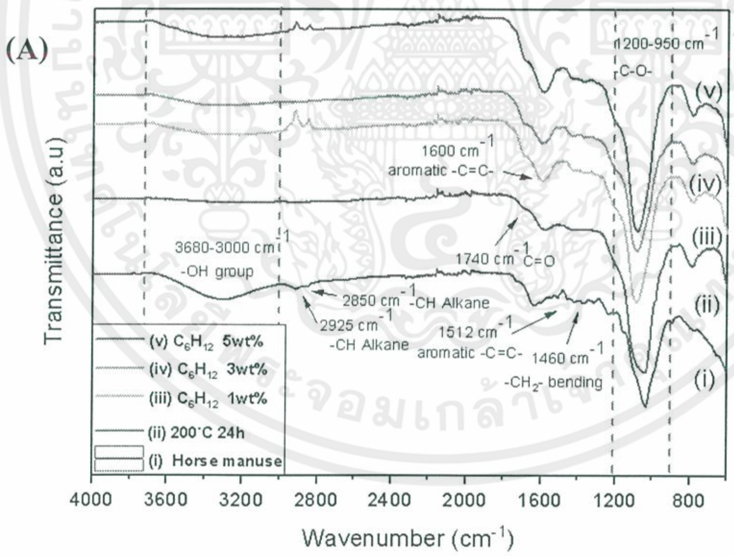
(A)



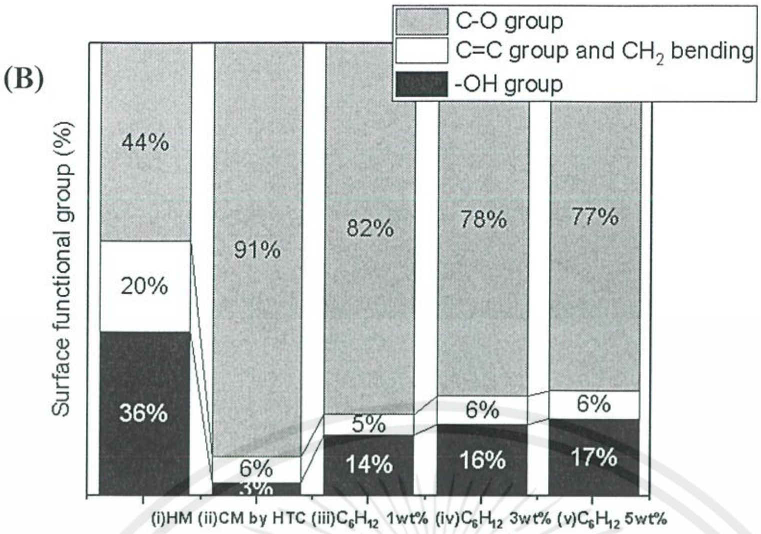
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



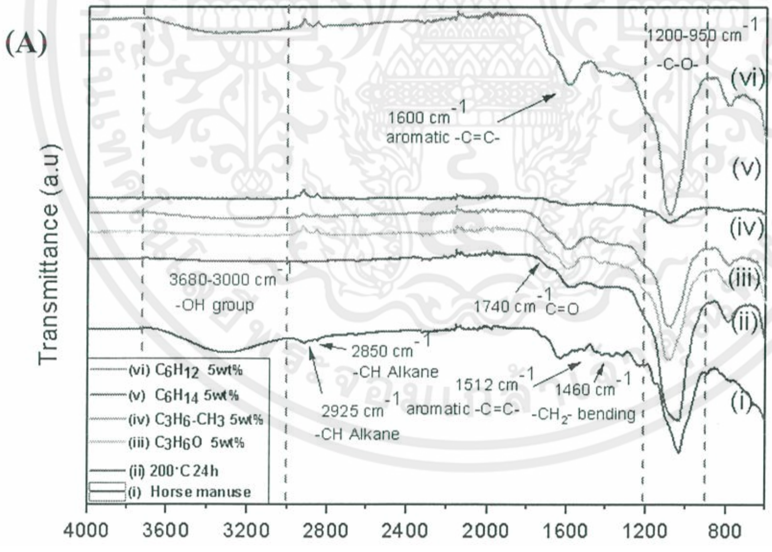
รูปที่ 4.36 (A) FT-IR spectrum และ (B) กราฟเชิงปริมาตร (i) มูลม้าที่ไม่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล, มูลม้าที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล, (ii) ที่อุณหภูมิ 200°C-2h, (iii) C_6H_{14} 1 wt%, (iv) C_6H_{14} 3 wt%, (v) C_6H_{14} 5 wt% และผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชันที่ 300°C-2h ในบรรยากาศออกซิเจน



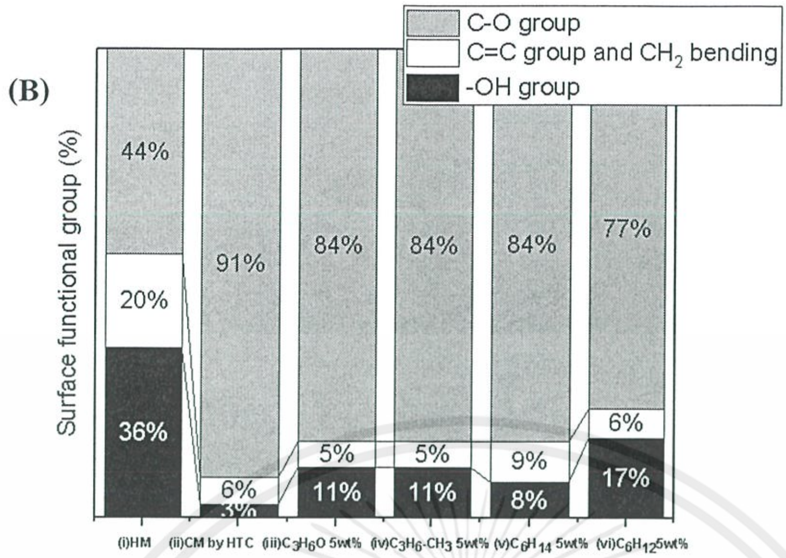
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.37 (A) FT-IR spectrum และ (B) กราฟเชิงปริมาตร (i) มูลม้าที่ไม่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล, มูลม้าที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล, (ii) ที่อุณหภูมิ 200°C-24 h, (iii) C_6H_{12} 1 wt%, (iv) C_6H_{12} 3 wt%, (v) C_6H_{12} 5 wt% และผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชันที่ 300°C-2h ในบรรยากาศออกซิเจน



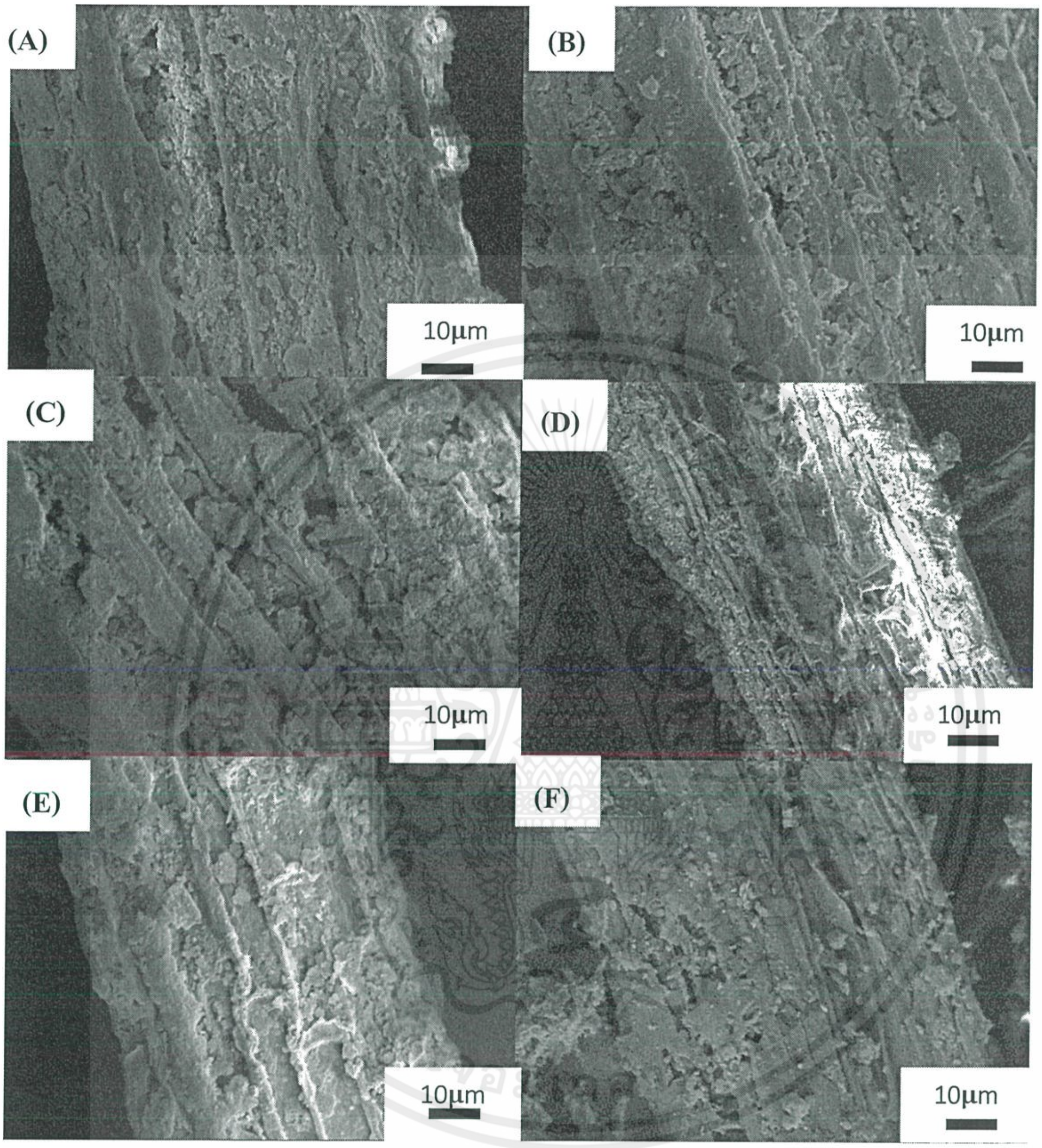
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.38 (A) FT-IR spectrum และ (B) กราฟเชิงปริมาตร (i) มูลม้าที่ไม่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล, มูลม้าที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล, (ii) ที่อุณหภูมิ 200°C-24h, (iii) C_3H_6O 5 wt%, (iv) C_6H_5-CH_3 5 wt%, (v) C_6H_{14} 5 wt%, (vi) C_6H_{12} 5 wt% และผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชันที่300°C-2h ในบรรยากาศออกซิเจน

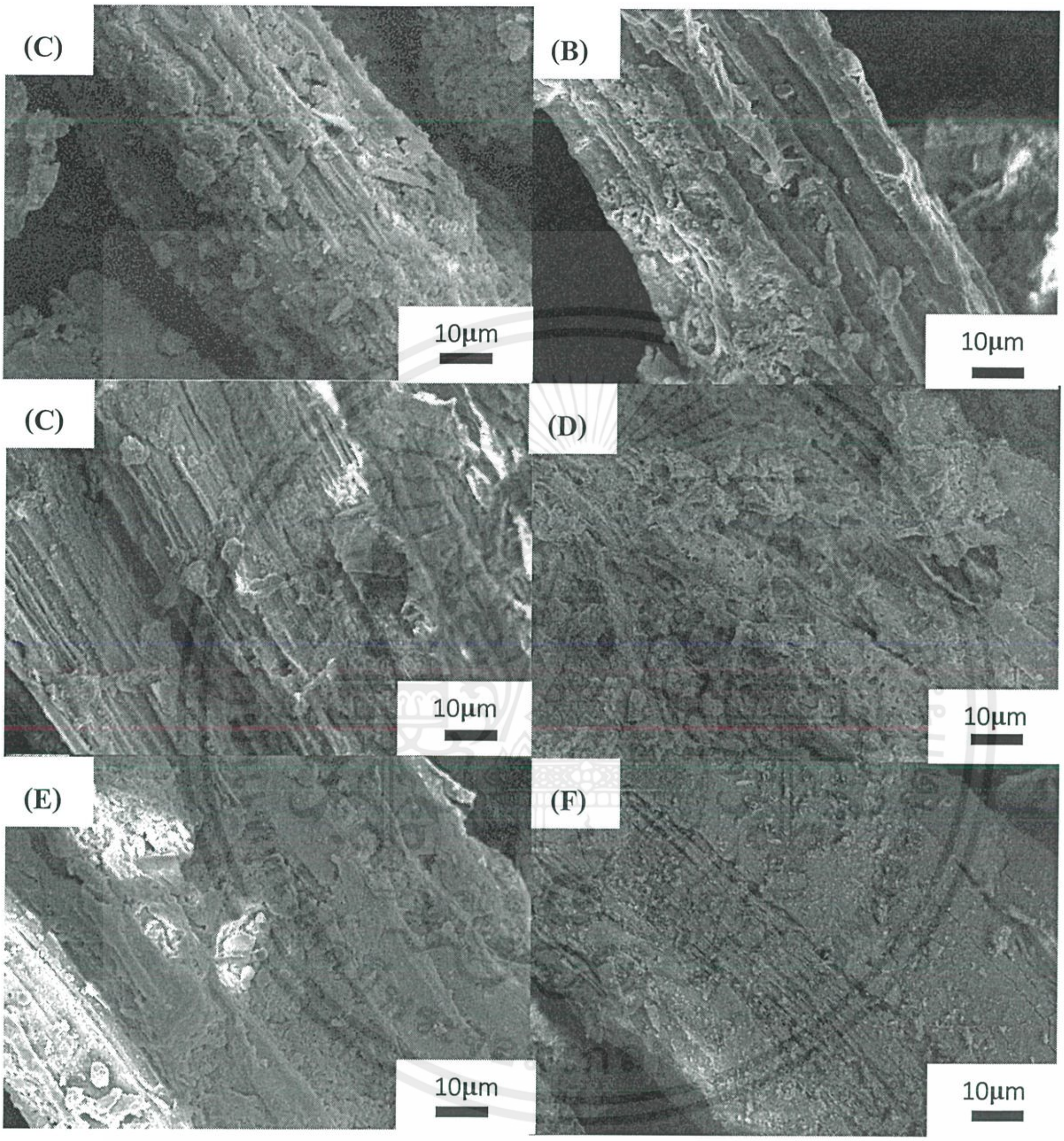
จากรูปที่ 4.34, 4.35, 4.36, 4.37 และ 4.38 แสดงให้เห็นว่าเกิดพีค broad band ในช่วง 3680-3000 cm^{-1} ซึ่งเป็น หมู่ -OH stretching ในหมู่ไฮดรอกซิลหรือคาร์บอนิลพีคที่ 2925 cm^{-1} และ 2850 cm^{-1} เป็นหมู่ C-H stretching ในพอลิแซ็กคาไรด์ ประกอบด้วยเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส [40] พีคที่ 1740 cm^{-1} เป็น หมู่เอสเทอร์ของเฮมิเซลลูโลสหรือคาร์บอกซิลิกของลิกนินและเฮมิเซลลูโลส พีคที่ 1600 cm^{-1} และ1512 cm^{-1} เป็นหมู่ aromatic -C=C- stretching เป็นวงอะโรมาติกaromatic ring ของลิกนิน พีคที่ 1460 cm^{-1} เป็นหมู่ $-CH_2$ - bending พีคในช่วง 1380-1240 cm^{-1} เป็นหมู่ G lignin และ S lignin และพีคในช่วง 1200-950 cm^{-1} เป็นหมู่ -C-O จากผลการวิเคราะห์ข้างต้นสามารถสรุปได้ว่า เมื่ออุณหภูมิและเวลาในการทำ ปฏิกิริยาไฮโดรเทอร์มัลที่ 200°C 24 h หมู่ -OH stretching หมู่ -C-O ผลิตภัณฑ์ที่ถูกกระตุ้นด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดตัวทำละลายและความเข้มข้น 1, 3 และ 5 wt% ก็จะเกิดพีคใน ปริมาณที่แตกต่างกัน มูลม้าที่ถูกกระตุ้นด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาตัวทำลาย จะมีปริมาณของหมู่ –OH ที่น้อยกว่ากรณีที่ไม่ได้ถูกกระตุ้นด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา ตัวเร่งปฏิกิริยา Hexane เข้าไปในชีวมวลจึงทำให้หมู่หมู่ -OH stretching ในหมู่ไฮดรอกซิลหรือคาร์บอนิล [60] พีคที่ 2925 cm^{-1}ลดลงอย่างมากจึงส่งมีความเป็นคาร์บอน (%C) ที่สูงขึ้นแต่ Cyclohexane เป็นวงจึงทำให้ตัว Cyclohexane แตกตัวได้น้อยกว่า Hexaneจึงทำหมู่ฟังก์ชันลดลงแต่น้อยกว่า Hexane

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.39 แสดงภาพSEM (กำลังขยาย1000X) มูลม้าที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลที่อุณหภูมิ 200°C- 24 h เติมตัวเร่งปฏิกิริยา (A) C_3H_6O 1 wt%, (B) C_3H_6O 3 wt%, (C) C_3H_6O 5 wt%, (D) C_6H_5-CH_3 1 wt%, (E) C_6H_5-CH_3 3 wt%, (F) C_6H_5-CH_3 5 wt%. และผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชันที่ 300°C-2h ในบรรยากาศออกซิเจน

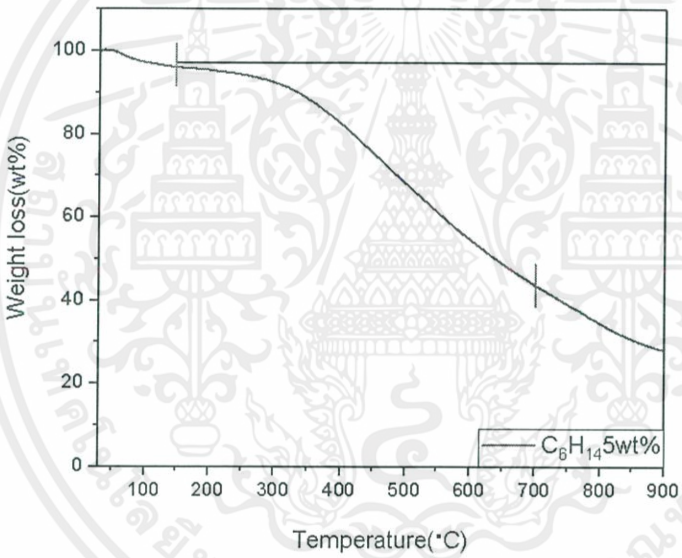
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.40 ภาพSEM (กำลังขยาย1000X) มูลม้าที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลที่อุณหภูมิ 200°C-24h เติมตัวเร่งปฏิกิริยา (A) C_6H_{14} 1 wt%, (B) C_6H_{14} 3 wt%, (C) C_6H_{14} 5 wt%, (D) C_6H_{12} 1 wt%, (E) C_6H_{12} 3 wt%, (F) C_6H_{12} 5 wt%. และผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชันที่300°C-2h ในบรรยากาศออกซิเจน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูป 4.39 และ 4.40 แสดงให้เห็นว่ามูลม้าที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมงโดยเติมตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดตัวทำละลาย(รูป.431-4.32)มีเส้นผ่านศูนย์กลาง22.5 μm และมีความยาวประมาณ 174 μm **ทำให้โครงสร้างแยกออกจากกันและแตกตัวเป็นชิ้นเล็ก จะมีลักษณะขรุขระ เริ่มมองเห็นโครงสร้างเห็นผนังเซลล์ และรอยต่อของผนังเซลล์ที่อยู่ภายใต้เส้นใย รอยแตกที่ชัดเจนขึ้น** มีรูพรุนทรงกลม ศูนย์กลางประมาณ 2.2 μm และส่งผลให้มีความเป็นคาร์บอน (%C) ที่สูงขึ้น เส้นใยนาโนคาร์บอนที่เติมตัวเร่งปฏิกิริยาตัวทำละลาย พิ่มความเข้นข้นเข้าไปทำให้เส้นใยนาโนคาร์บอนมีการแตกตัวที่พื้นผิวมากขึ้น จึงสรุปได้ว่าเส้นใยนาโนคาร์บอนที่เติมตัวเร่งปฏิกิริยาC_6H_{14} 5 wt% ดีที่สุดเพราะ C_6H_{14}เป็นสายโซ่พอลิเมอร์ที่ยาวกว่า C_3H_6O กับ C_6H_5-CH_3 จึงแตกตัวได้มากและเข้าไปแทรกตัวได้ง่ายแต่ C_6H_{12} เป็นวงจับกันด้วบพันธะคู่จึงแตกตัวได้ยากในน้ำ



รูปที่ 4.41 กราฟ TGA ของมูลม้าที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลที่อุณหภูมิ 200°C-24h เติมตัวเร่งปฏิกิริยา C_6H_{14} 5 wt% และผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชันที่ 300°C-2h ในบรรยากาศออกซิเจน

จากรูปที่ 4.41 แสดงกราฟระหว่างน้ำหนักที่สูญเสียไปกับอุณหภูมิมีช่วงอุณหภูมิการสลายตัวที่แตกต่างกันอยู่ 2 ช่วง ส่วนใหญ่ช่วงแรกเกิดจากการสลายตัวความชื้นสำหรับน้ำหนักสูญเสียไปในต่ำกว่าอุณหภูมิ 150°C คิดเป็นส่วนน้ำหนัก ที่สูญเสียน้ำหนักไป 4.15% ช่วงที่ 2 สลายตัวของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส ลิกนินและสลายตัวของเหลวและแก็สในชีวมวลหรือมูลม้าที่อุณหภูมิ 150-900°C สูญเสียน้ำหนักไป67.70% สูญเสียน้ำหนักทั้งหมดไป 71.85%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

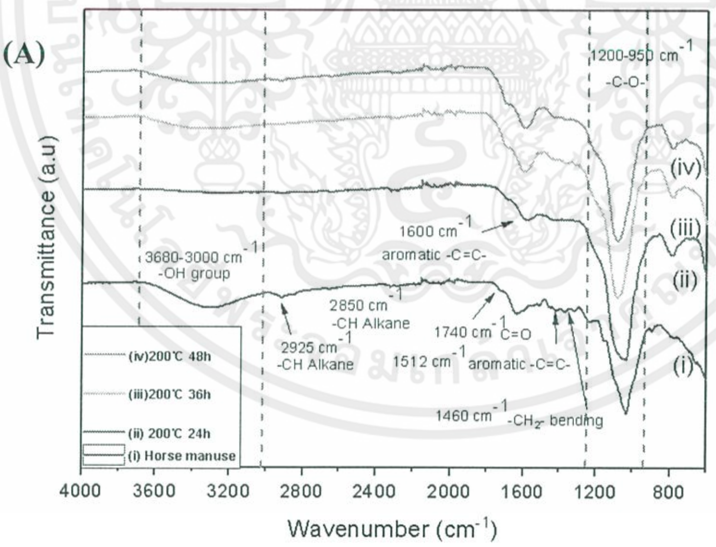
4.3 ผลของอุณหภูมิของกระบวนการคาร์บอนไนเซชัน

ตารางที่ 4.7 มวลของมูลม้าที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลคาร์บอนไนเซชัน

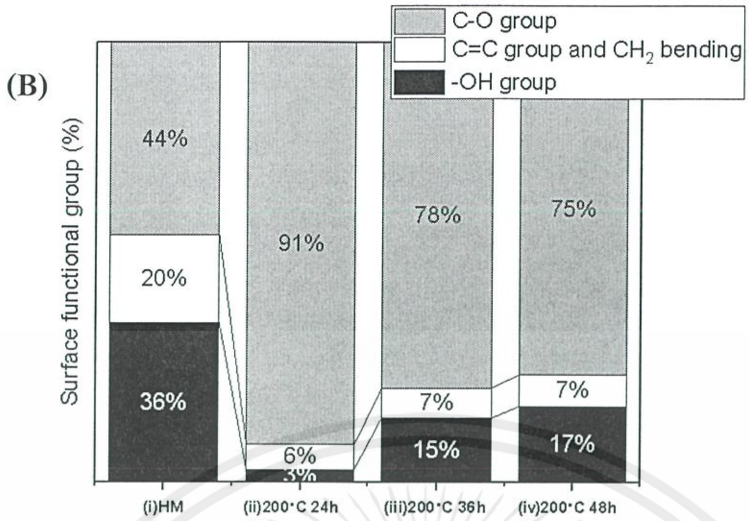
Temperature[°C] Time[h] HT	Temperature[°C] Time[h] C	CFs Product [wt%][b]
200-24	400-2	52.07
200-36	400-2	62.97
200-48	400-2	66.44
200-24	500-2	47.21
200-36	500-2	53.88
200-48	500-2	59.33

[a] น้ำหนักที่เหลืออยู่หลังผ่านกระบวกการไฮโดรเทอร์มัล

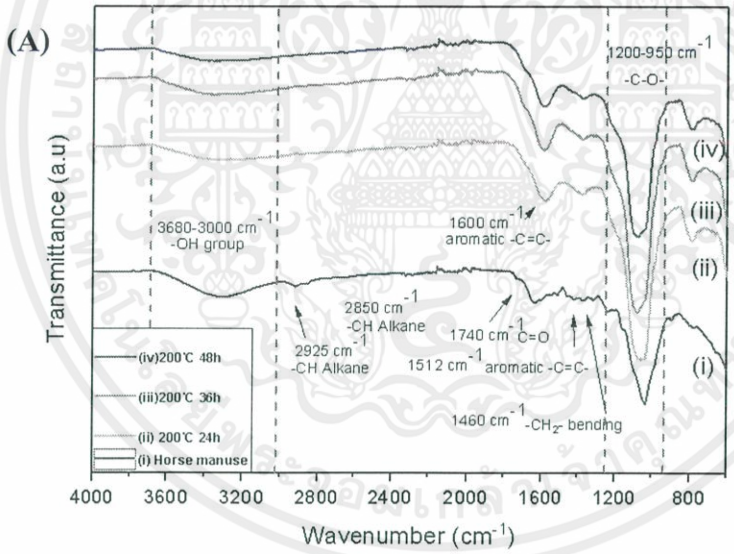
[b] น้ำหนักที่เหลืออยู่หลังผ่านกระบวกการคาร์บอนไนเซชัน ที่อุณหภูมิ 300°C 2 h ในบรรยากาศ O_2



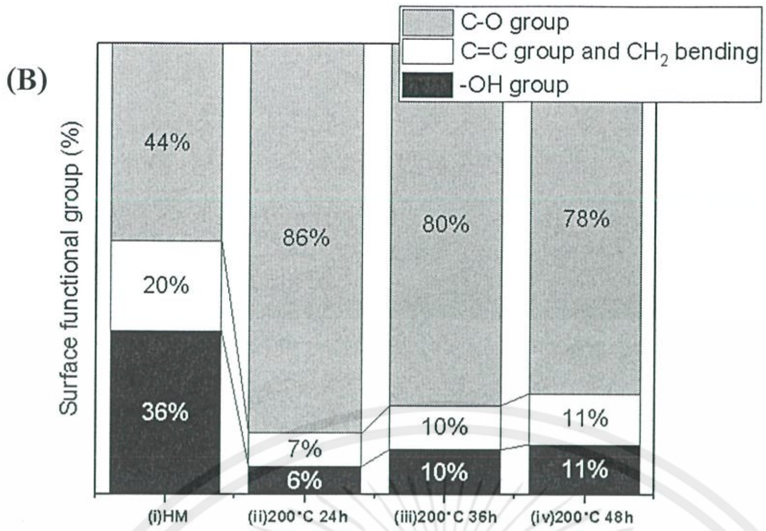
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



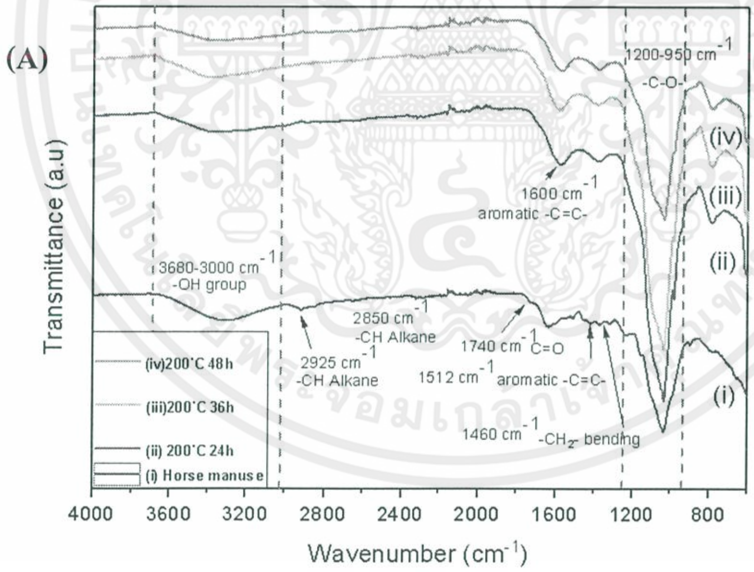
รูปที่ 4.42 (A) FT-IR spectrum และ (B) กราฟเชิงปริมาตร (i) มูลม้าที่ไม่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล, มูลม้าที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลที่เงื่อนไขที่แตกต่างกัน 200°C เป็นเวลา (ii) 2h, (iii) 36h, (iv) และ (v) 48h และผ่านปฏิกิริยาคาร์บอนไนเซชัน 300°C-2hในบรรยากาศออกซิเจน



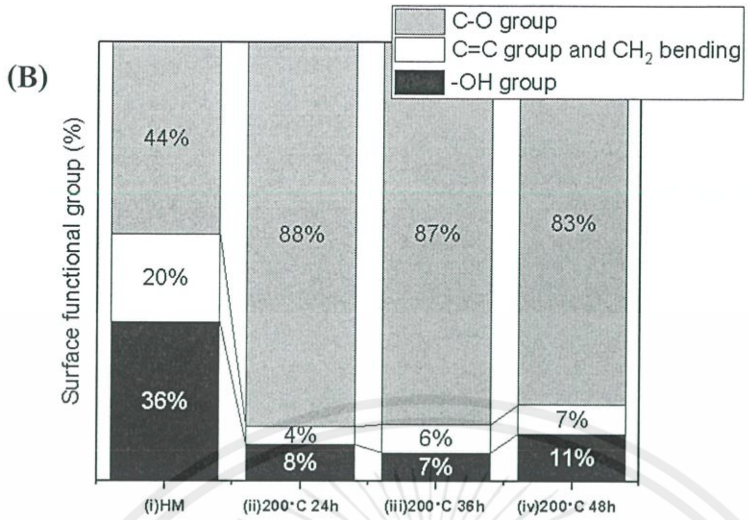
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.43 (A) FT –IR spectrum และ (B) กราฟเชิงปริมาตร (i) มูลม้าที่ไม่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล, มูลม้าที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลที่เงื่อนไขที่แตกต่างกัน 200 °C เป็นเวลา (ii)2h, (iii) 36h, (iv)4h และ (v) 48 h และผ่านปฏิกิริยาคาร์บอนไนเซชัน 400 °C-2 h ในบรรยากาศออกซิเจน



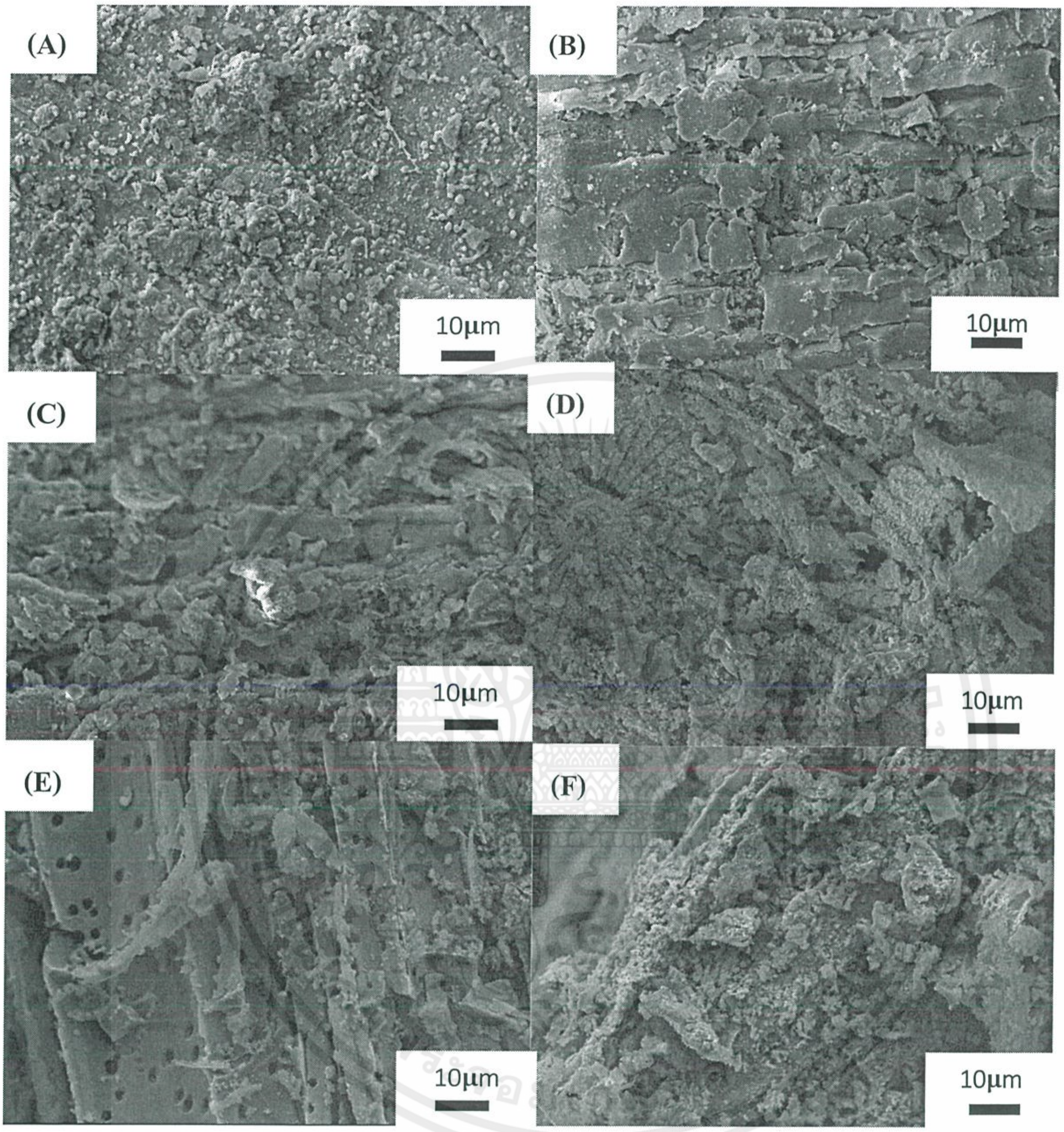
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.44 แสดง (A) FT –IR spectrum และ (B) กราฟเชิงปริมาตร (i) มูลม้าที่ไม่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล, มูลม้าที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลที่เงื่อนไขที่แตกต่างกัน 200 °C เป็นเวลา (ii) 2h, (iii) 36 h (iv)42h และ (v) 48 hและผ่านปฏิกิริยาคาร์บอนไนเซชัน 500 °C-2h ในบรรยากาศออกซิเจน

จากรูปที่4.40, 4.41 และ 4.43 แสดงให้เห็นว่ามูลม้าที่ผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชันที่อุณหภูมิ 300°C, 400°C, และ 500°C ยังคงมีหมู่ฟังก์ชันเหลืออยู่ เนื่องจากอุณหภูมิยังไม่สูงมากที่จะทำให้หมู่ฟังก์ชันนั้นหายไป ที่ อุณหภูมิคาร์บอนไนเซชัน 300°C พบว่ายังมีหมู่ -OH stretching (3650 - 3000 cm^{-1}), หมู่ C-H 76 stretching (2925 cm^{-1} และ 2850 cm^{-1}), หมู่เอสเทอร์หรือคาร์บอกซิลิก (C=O) (1740 cm^{-1}), หมู่ aromatic -C=C- stretching (1600 cm^{-1}) และ หมู่ $-CH_2$ - bending (1460 cm^{-1}) เหลืออยู่ ส่วนที่ อุณหภูมิคาร์บอนไนเซชัน 400°C และ 500°C พบว่ายังมีหมู่วงอะโรติกaromatic -C=C- stretching (1600 cm^{-1}), หมู่ $-CH_2$ - bending (1460 cm-^{1}) และหมู่ -C-O (1200 - 950 cm^{-1}) เหลืออยู่ ซึ่งแต่ละพีคจะbroad มากกว่าที่ อุณหภูมิ 300° C ส่วนหมู่ -OH stretching และหมู่ C-H stretching เหลืออยู่แต่น้อยมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.45 ภาพ SEM (กำลังขยาย 1000X) ของมูลม้าที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลที่อุณหภูมิ200°C ที่เวลาแตกต่างกัน (A) 24h, (B) 36h, (C) 48h และ (E) 24hและทำปฏิกิริยาคาร์บอนไนเซชัน 400 °C-200h, (D) 24h, (E) 36h, (F) 48h และ (E) 24h และผ่านปฏิกิริยาคาร์บอนไนเซชัน 500 °C-2h ในบรรยากาศออกซิเจน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.45 แสดงให้เห็นว่ามูลม้าที่ผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชันที่อุณหภูมิ 400°C (รูปที่ 4.45A - 4.45C) จะเกิดโครงสร้างที่มีลักษณะเป็นเส้นใยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 20 µm มีความยาวอยู่ที่ 165µm บริเวณ พื้นผิวของเส้นใยจะเกิดการก่อตัวของคาร์บอนที่มีรูปทรงกลม (Carbon spHere) แต่ยังไม่สมบูรณ์ เมื่อ อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาคาร์บอนไนเซชันมากขึ้นคือที่อุณหภูมิ 500°C (รูปที่ 4.43D-4.43E) เส้นใยที่มีขนาด ใหญ่จะเกิดการแตกหักและแยกออก มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่เล็กลง และคาร์บอนที่มีรูปทรงกลม (Carbon spHere) ที่ก่อตัวจะมีลักษณะที่สมบูรณ์คือมีลักษณะที่เป็นทรงกลมอย่างชัดเจนขนาดเส้นผ่านและมีรูพรุนทรงกลม ศูนย์กลางประมาณ 1-1.5 µm และเมื่ออุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาคาร์บอนไนเซชันมากขึ้น 500°C ในบรรยากาศออกซิเจนเริ่มเกิดขี้เถ้าจึงนำมาใช้จริงไม่ได้

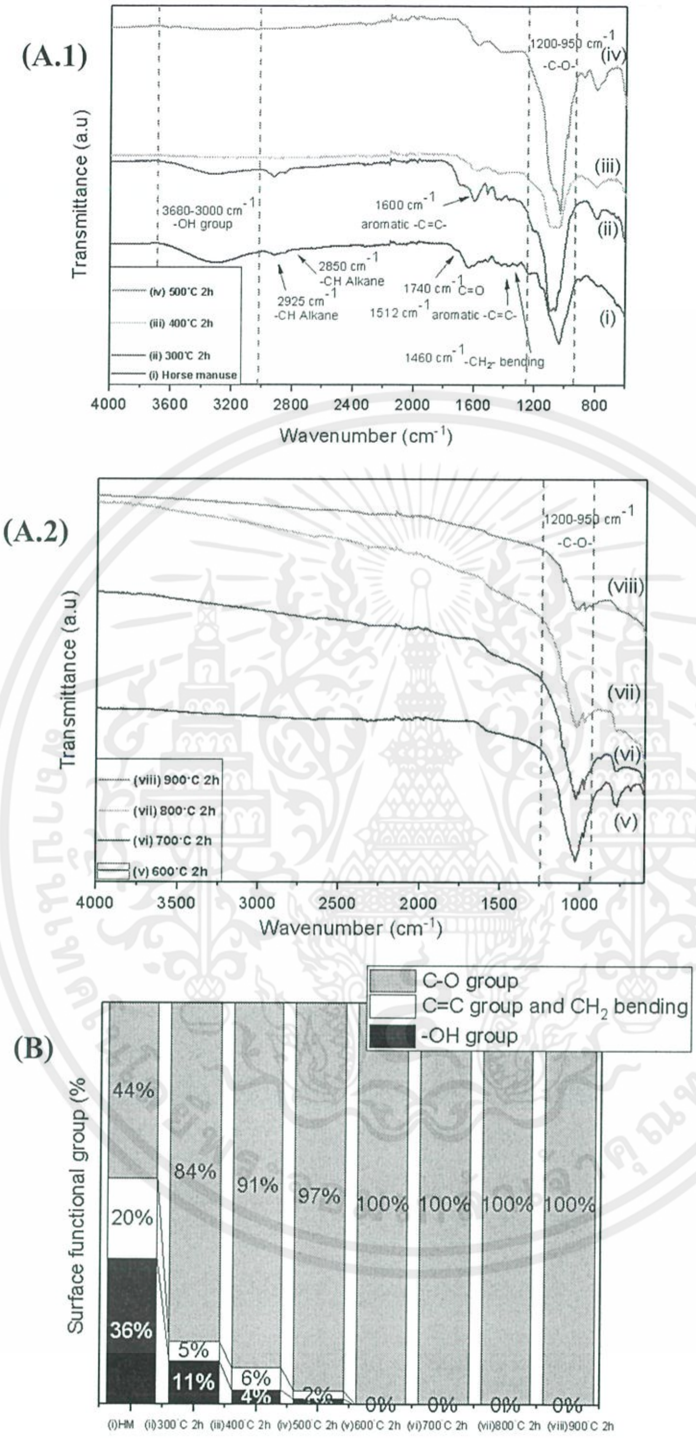
ตารางที่4.8 มวลของมูลม้าที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลคาร์บอนไนเซชัน

Temperature[°C]	Time[h]	CFs Product[wt%][a]
300	2	90.07
400	2	60.74
500	2	54.53
600	2	53.67
700	2	50.27
800	2	48.38
900	72	38.33

[a] น้ำหนักที่เหลืออยู่หลังผ่านกระบวกการคาร์บอนไนเซชัน ที่อุณหภูมิต่างๆในบรรยายกาศไนโตรเจน เมื่อเทียบมวลของมูลม้าที่ผ่านกระบวกการไฮโดรเทอร์มัล

จากตารางที่ 4.8 มวลของมูลม้าผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลคาร์บอนไนเซชันอุณหภูมิ 300°C ในบรรยายกาศไนโตรเจน จะทำให้เกิดปฏิกิริยาช้าเพราะมีแก็สเฉื่อยทำให้เกิดการเผาไหม้น้อยเลยเหลือมวลของคาร์บอนน้อย อุณหภูมิหลัง 500°C เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์จึงและสลายชีวมวลหรือมูลม้าทำให้มวลจากของแข็งเปลี่ยนไปอยู่ในรูปแบบของเหลวและแก็สทำให้คาร์บอนที่ได้จากมูลม้ามีมวลลดลงอย่างมาก

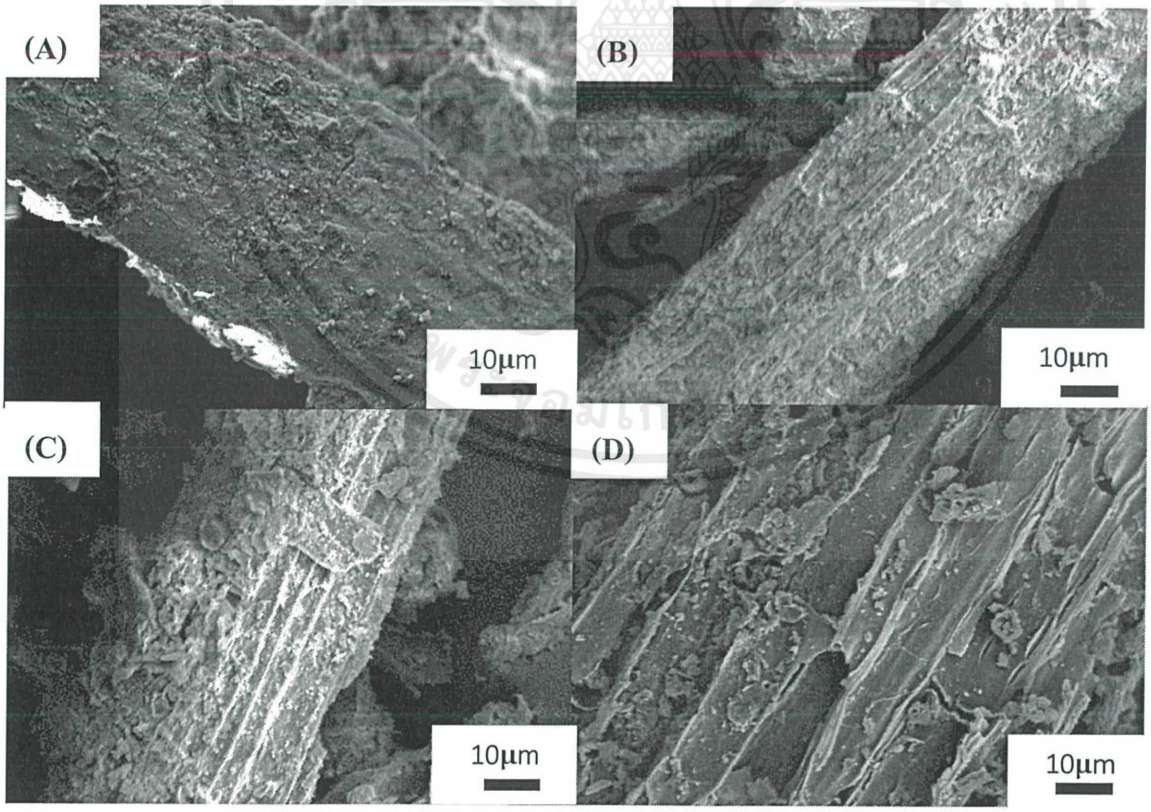
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



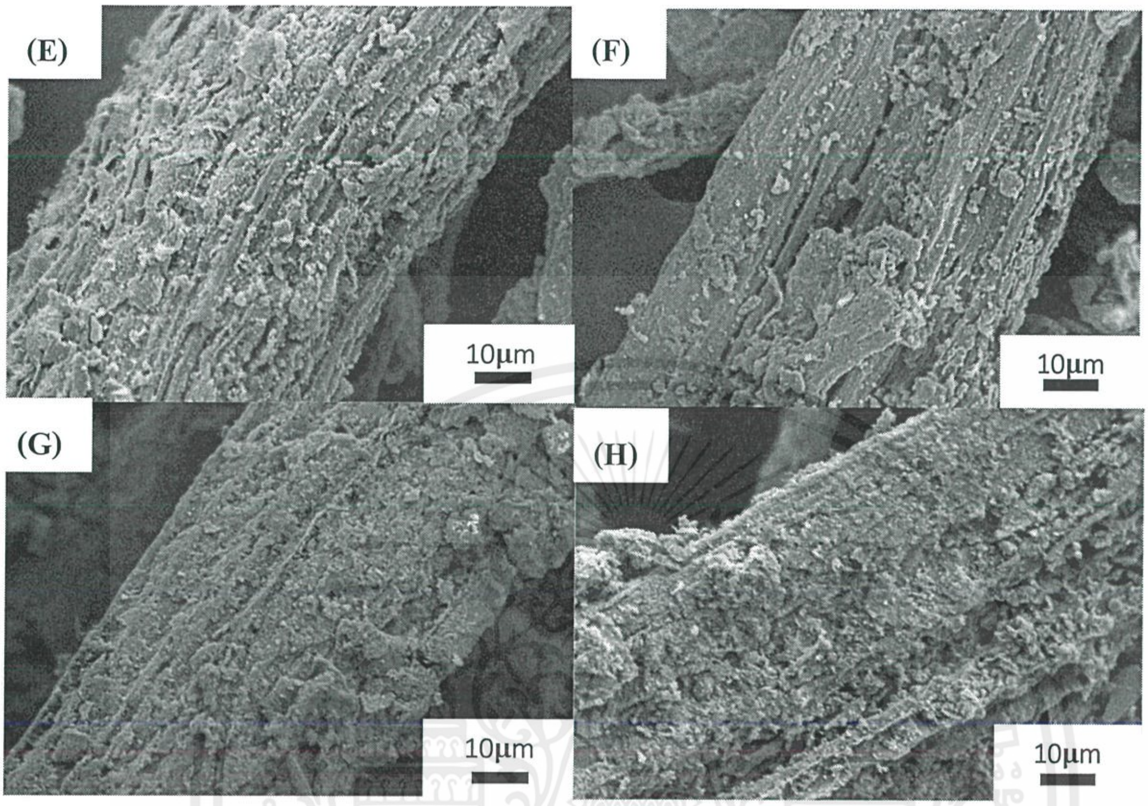
รูปที่ 4.46 แสดง (A) FT –IR spectrum และ (B) กราฟเชิงปริมาตร (i) มูลม้าที่ไม่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล, มูลม้าที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลที่ 200 °C-2h และทำปฏิกิริยาคาร์บอนไนเซชันที่ (ii) 300 °C, (iii) 400 °C, (iv) 500 °C, (v) 600 °C, (vi) 700 °C, (vii) 800 °C, (vi) 900 °C เป็นเวลา 2h ในบรรยากาศ ไนโตรเจน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.44 แสดงให้เห็นว่ามูลม้าที่ผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชันที่อุณหภูมิ 300°C และ 400°C ยังคงมีหมู่ฟังก์ชันเหลืออยู่ เนื่องจากอุณหภูมิยังไม่สูงมากที่จะทำให้หมู่ฟังก์ชันนั้นหายไป ที่อุณหภูมิคาร์บอนไนเซชัน 300°C พบว่ายังมีหมู่ -OH stretching (3650 - 3000 cm^{-1}), หมู่ C-H 76 stretching (2925 cm^{-1} และ 2850 cm^{-1}), หมู่เอสเทอร์หรือคาร์บอกซิลิก (C=O) (1740 cm^{-1}), หมู่ aromatic -C=C- stretching (1600 cm^{-1}) และ หมู่ $-CH_2$ - bending (1460 cm^{-1}) เหลืออยู่ ส่วนที่อุณหภูมิคาร์บอนไนเซชัน 500°C พบว่ายังมีหมู่ aromatic -C=C- stretching (1600 cm^{-1}), หมู่ $-CH_2$ - bending (1460 cm-[1]) และหมู่ -C-O (1200 - 950 cm^{-1}) เหลืออยู่ ซึ่งแต่ละพีคจะbroad มากกว่าที่อุณหภูมิ 300° C ส่วนหมู่ -OH stretching และหมู่ C-H stretching เหลืออยู่แต่น้อยมาก นั้นจะหายไป เนื่องจากไม่สามารถ ทนต่ออุณหภูมิสูงได้ ส่วนที่อุณหภูมิคาร์บอนไนเซชัน 700°C และ 900°C พบว่าปริมาณของหมู่ฟังก์ชัน ลดลงมากจนไม่เหลือหมู่ฟังก์ชันนั้นอยู่ เนื่องจากการเผาที่อุณหภูมิสูงขึ้น จากผลการวิเคราะห์ข้างต้น สามารถสรุปได้ว่า เมื่ออุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาคาร์บอนไนเซชันเพิ่มขึ้น ปริมาณของหมู่ฟังก์ชันจะลดลง เนื่องจากผลิตภัณฑ์มีสมบัติที่เป็นคาร์บอนมากขึ้น



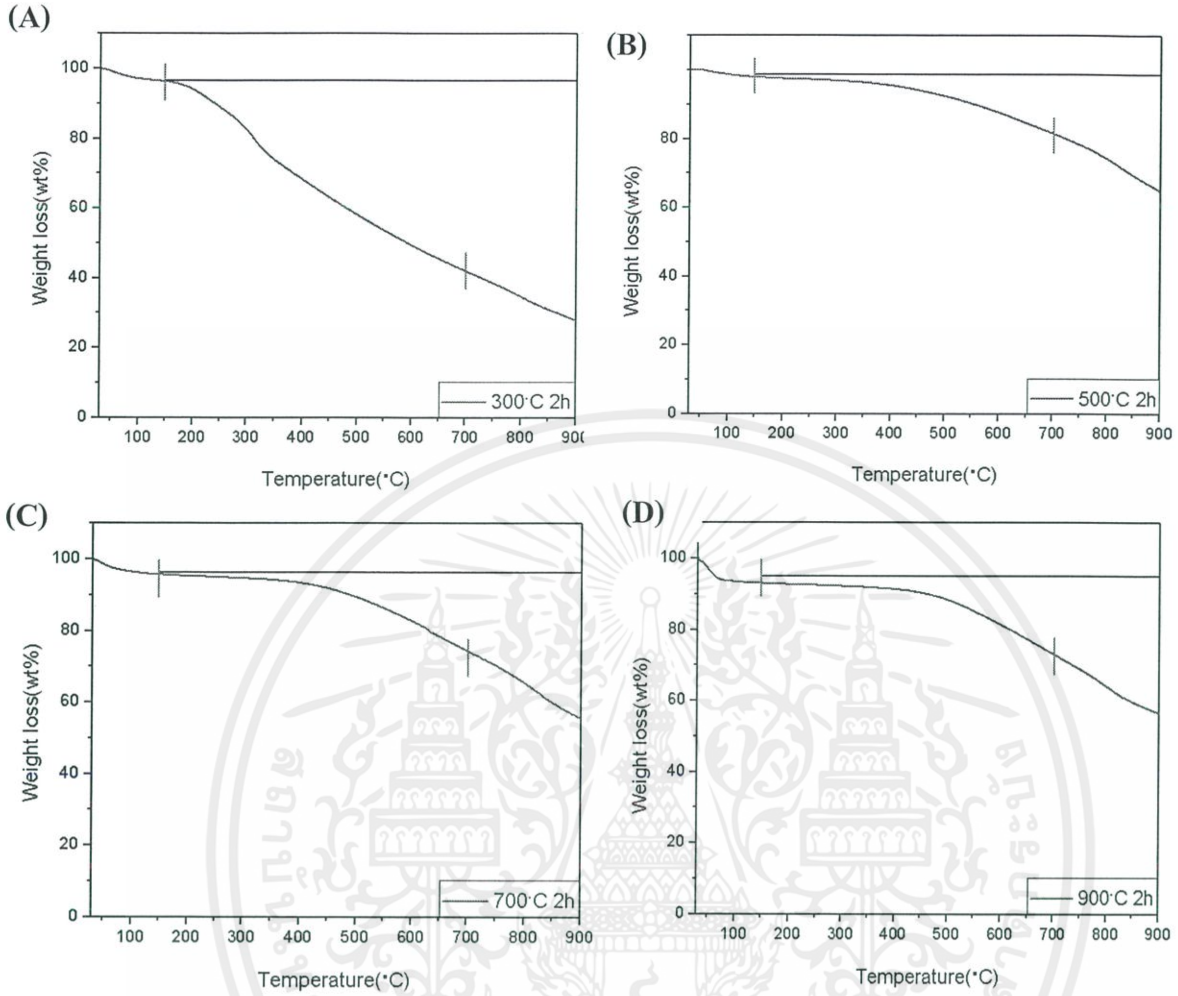
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.47 ภาพ SEM (กำลังขยาย 500X) (A) มูลม้าที่ไม่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล, มูลม้าที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลที่ 200 ℃-2h และทำปฏิกิริยาคาร์บอนไนเซชันที่ (B) 300 ℃, (C) 400 ℃, (D) 500 ℃, (E) 600 ℃, (F) 700 ℃, (G) 800 ℃, (H) 900 ℃เป็นเวลา 2h ในบรรยากาศไนโตรเจน

จากรูปที่ 4.45 แสดงให้เห็นว่า (รูปที่4.45A)มูลม้าไม่ที่ผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชันมีขนาดประมาณ 45 µm และความยาวประมาณ 300 µm มีโครงสร้างผิวเรียบและมูลม้าที่ผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชันที่อุณหภูมิ 300°C (รูปที่4.45B) มีลักษณะเรียบและโครงสร้างคล้ายๆกับมูลม้าที่ไม่ผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชันแต่เริ่มมีการแตกที่โครงสร้าง อุณหภูมิ 400°C (รูปที่ 4.45C) จะเกิดโครงสร้างที่มีลักษณะเป็นเส้นใยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 19.5 µm มีความยาวอยู่ที่ 160 µm บริเวณ พื้นผิวของเส้นใยจะแยกตัวตัวของคาร์บอนที่มีเริ่มมองเห็นรอยต่อผนังเซลลูโลส แต่ยังไม่สมบูรณ์ เมื่อ อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาคาร์บอนไนเซชันมากขึ้นคือที่อุณหภูมิ 500°C - 900°C (รูปที่ 4.45D) เส้นใยที่มีขนาด ใหญ่จะเกิดการแตกหักและแยกออก มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่เล็กลงเริ่มมองเห็นรอยต่อผนังเซลลูโลสชัดเจน รูพรุนเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่สูงขึ้น และส่งผลให้มีความเป็นคาร์บอน (%C) ที่สูงขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.48 กราฟ TGA ของมูลม้าที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลที่อุณหภูมิ200°C 24 h และผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชันที่ (A) 300℃ (B) 500℃ (C) 700℃ (D) 900℃ เป็นเวลา 2 h ในบรรยากาศ ไนโตรเจน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

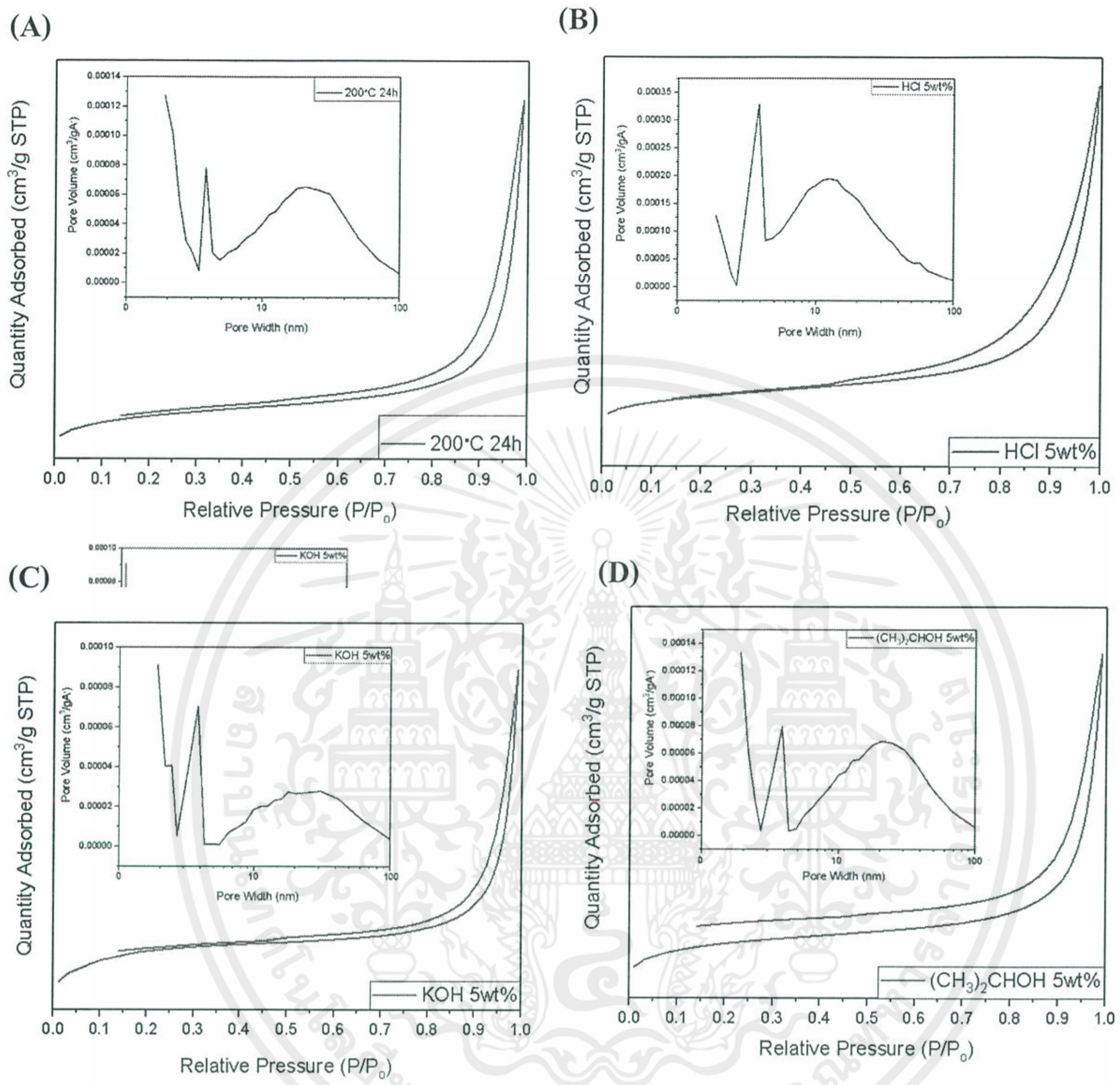
ตารางที่ 4.9 การสลายตัวทางความร้อนของชีวมวล

Parameter	Moisture (%)	Combustible (%)	Ash (%)
Horse manure	7.79	78.67	13.54
200°C-24h	5.73	80.63	13.64
HCl 5wt%	5.71	81.48	12.81
KOH 5wt%	5.23	81.1	13.67
2-CH_3 5wt%	5.15	81.64	13.21
Hexane 5wt%	4.96	81.58	13.46
200°C-24h car300°C-2h	3.19	82.84	13.97
200°C-24h car500°C-2h	2.61	82.78	14.61
200°C-24h car700°C-2h	5.02	78.66	16.32
200°C-24h car900°C-2h	7.3	73.23	19.47

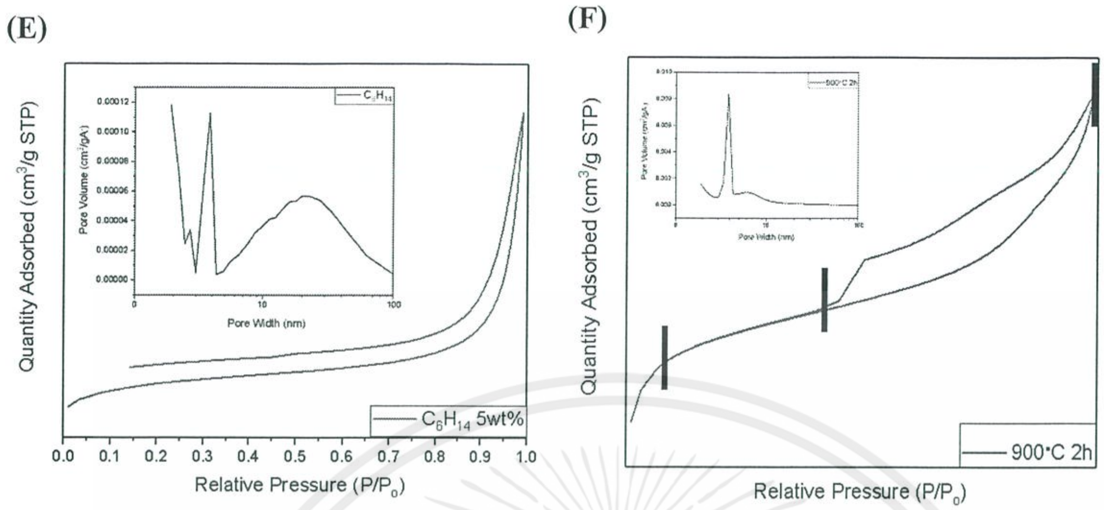
จากตาราง4.9และรูปที่ 4.48 แสดงกราฟระหว่างน้ำหนักที่สูญเสียไปกับอุณหภูมิมีช่วงอุณหภูมิการสลายตัวที่ แตกต่างกันอยู่ 3 ช่วง ส่วนใหญ่ช่วงแรกเกิดจากการสลายตัวความชื้นสำหรับน้ำหนักสูญเสียไปในต่ำกว่าอุณหภูมิ 150°C คิดเป็นส่วนน้ำหนัก ที่สูญเสียน้ำหนักไป 3.19%, 2.16%, 5.02%, 7.30% ตามลำดับภาพช่วงที่ 2 สลายตัวของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส ลิกนินที่อุณหภูมิ 150-700°C สูญเสียน้ำหนักไป 8.98%, 14.92%, 14.78% และ 21.18% ตามลำดับภาพช่วงสุดท้ายจะไปการสลายตัวของเหลวและแก็สในชีวมวลหรือมูลม้าที่อุณหภูมิ 700-900°C สูญเสียน้ำหนักไป 59.74 %, 17.52%, 24.59% และ 14.89% ตามลำดับภาพสูญเสียน้ำหนักทั้งหมดไป 71.91%, 35.05%, 44.39% และ 43.37% ตามลำดับภาพเมื่อเปรียบเทียบกัน

ช่วงที่3ของเส้นใยนาโนคาร์บอนที่เผาที่900°C-2hนั้นดิ่งลงที่สุดเพราะเปอร์เซ็นไอระเหยกับเปอร์เซ็นของแข็งมีน้อยนั่นเอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.49 กราฟ BET ของมูลม้าที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลที่อุณหภูมิ(A)200°C-24hที่เติมตัวเร่งปฏิกิริยา(B) HCl 5 wt%, (C) KOH 5 wt%, (D) $(CH_3)_2CHOH$ 5 wt%, (E) C_6H_{14} 5wt% ผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชันที่300°C-2ในบรรยากาศออกซิเจนและ(F)ผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชันที่900°C-2 ในบรรยากาศ ไนโตรเจน

จากรูปที่4.9 กราฟแสดงการดูดซับเป็นไอโซเทอมแบบที่4ที่พบมากในวัสดุที่มีรูพรุนส่วนใหญ่เป็นรูพรุนขนาดกลาง (ขนาดรูพรุนระหว่าง 2-50 นาโนเมตร) ในช่วงแรกซึ่งมีค่าความดันสัมพัทธ์ต่ำเส้นไอโซเทอมจะเหมือนกับไอโซเทอมชนิดที่ 2 จากนั้นการดูดซับเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อความดันสัมพัทธ์สูงขึ้นเนื่องจากเกิดการควบแน่นคาปิลลารี (Capillary condensation) ขึ้นในรูพรุน ซึ่งทา ให้เกิด Hysteresis loop ในช่วง Desorption ซึ่งข้อมูลของการเกิดการควบแน่นในช่วงคาปิลลารีสามารถนำมาคำนวณหาการกระจายขนาดของรูพรุน (Pore size distribution) ในของแข็งที่มีรูพรุนขนาดกลางได้ การควบแน่นคาปิลลารีทาให้ช่วง Desorption มีปริมาณดูดซับที่สูงกว่าการเกิดการดูดซับที่ความดันเท่ากัน ช่วงแรกเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว ช่วงที่ 2 เป็นการดูดซับมากกว่า1ชั้น ช่วงสุดท้ายเป็นการดูดซับให้เต็มรูพรุน หลังจากนั้นก็คายการดูดซับออกจนหมด กราฟเล็กเป็นกราฟแสดงว่ารูพรุนมีขนาดเป็นการยืนยัดได้อีกทางว่ารูพรุนของเส้นใยนาโนคาร์บอนมีขนาด 2-50 นาโนเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.10 พื้นที่ผิวปริมาตรและขนาดของรูพรุนของมูลม้า

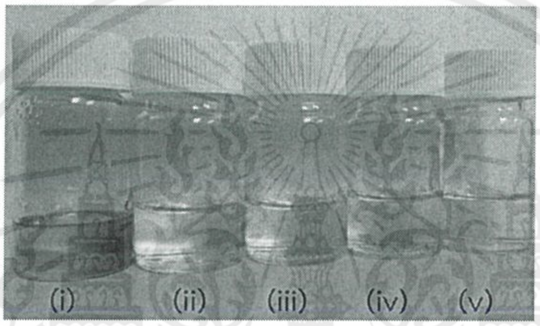
Parameter	S_{BET} (m^2g^{-1})	Pore Volume (cm^3g^{-1})	Pore size (nm)
200°C-24h	10.687	0.03242	19.964
HCl 5wt%	18.941	0.06415	18.140
KOH 5wt%	15.441	0.03316	18.291
$(CH_3)_2CHOH$ 5wt%	16.329	0.03822	19.603
Hexane 5wt%	14.278	0.02613	18.240
200°C-24h car900°C-2h	460.360	0.31530	5.847

จากตาราง4.10 จะพบว่าค่าพื้นที่ผิวและขนาดรูพรุนเส้นใยนาโนคาร์บอนที่เติมตัวเร่งปฏิกิริยามีพื้นที่ที่มากกว่าเส้นใยนาโนที่ไม่เติมตัวเร่งปฏิกิริยาและรูพรุนที่เล็กลงและจะพบว่าที่เผาที่อุณหภูมิสูงส่งผลให้มีพื้นที่ผิวที่สูง และรูพรุนสูงตามไปด้วย เนื่องจากโมเลกุลน้ำสามารถแพร่เข้าไปทำลายพันธะในตัวมูลม้าได้มาก โมเลกุลขนาดเล็กหรือพันธะสั้นๆก็จะถูกเอาออกจากเส้นใยนาโนคาร์บอนและในขณะเดียวกันกันก็จะเปิดรูพรุนอีกด้วย

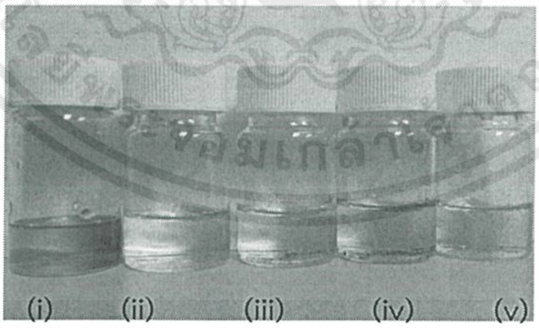
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 ประยุกต์การใช้งานในงานดูดซับน้ำสีย้อม

ชั่งเส้นใยนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้ 1 กรัม ผสมกับสีย้อมเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้น 25 มิลลิกรัมต่อลิตร (ppm) และนำไปปั่นเหวี่ยงด้วยความเร็วรอบ 250 รอบต่อนาทีที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นกรองเส้นใยนาโนคาร์บอนออก ด้วยกระดาษกรองขนาด 125 ไมโครเมตร แล้วนำสารละลายที่เหลือนำไปคำนวณหาความเข้มข้นที่เหลือจากการดูดซับด้วยเครื่อง ยูวีวิซิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์

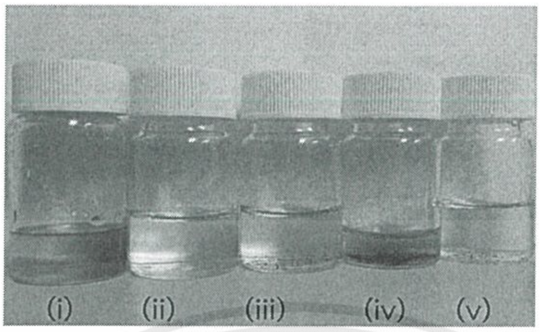


รูปที่ 4.50 ภาพการทดสอบการดูดซับ (i) สีย้อมเมทิลีนบลูโดยใช้มูลม้าที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลตัวดูดซับ (ii) 160°C-4h, (iii) 160°C-8h, (iv) 160°C-12h, (v) 160°C-24h และคาร์บอนไนเซชันที่ 300°C-2 h ในบรรยากาศออกซิเจน



รูปที่ 4.51 ภาพการทดสอบการดูดซับ (i) สีย้อมเมทิลีนบลูโดยใช้มูลม้าที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลเป็นตัวดูดซับ (ii) 180°C-4h, (iii) 180°C-8h, (iv) 180°C-12h, (v) 180°C-24h และคาร์บอนไนเซชันที่ 300°C -2h ในบรรยากาศศออกซิเจน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

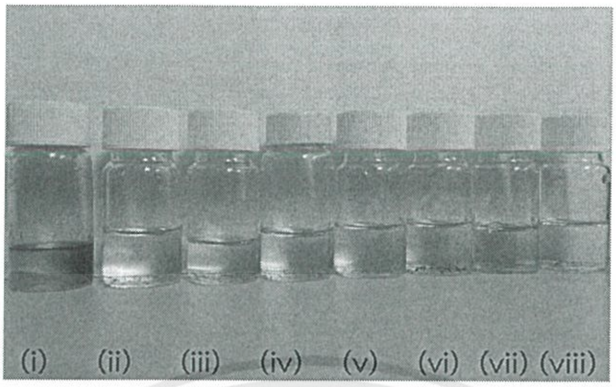


ที่ 4.52 ภาพการทดสอบการดูดซับ (i) สีย้อมเมทิลีนบลูโดยใช้มูลม้าที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลเป็นตัวดูดซับ (ii) 200°C-4h, (iii) 200°C-8h, (iv) 200°C-12h, (v) 200°C-2 h และคาร์บอนไนเซชันที่ 300°C-2 h ในบรรยากาศออกซิเจน

ตารางที่4.11 เปอร์เซ็นการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูโดยใช้มูลม้าที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลคาร์บอนไนเซชัน

Parameter	pH	Adsorption[%]
160°C-4h car 300°C-8h	7.0	91.171
160°C-8h car 300°C-2h	7.1	95.962
160°C-12h car 300°C-2h	7.0	87.355
160°C-24h car 300°C-2h	7.2	96.556
180°C-4h car 300°C-8h	7.2	97.870
180°C-8h car 300°C-2h	7.2	98.047
180°C-12h car 300°C-2h	7.2	96.495
180°C-24h car 300°C-2h	7.2	98.757
200°C-4h car 300°C-8h	7.3	98.580
200°C-8h car 300°C-2h	7.2	98.003
200°C-12h car 300°C-2h	7.3	98.192
200°C-24h car 300°C-2h	7.2	99.498

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



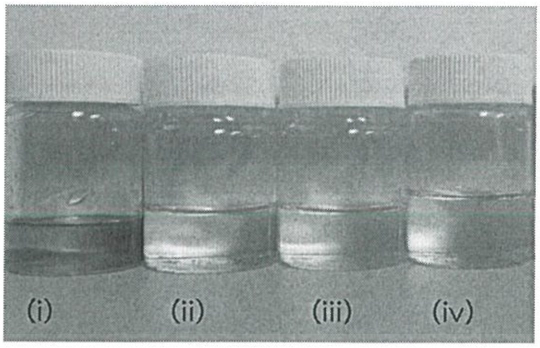
รูปที่ 4.53 ภาพการทดสอบการดูดซับ (i) สีย้อมเมทิลีนบลูโดยใช้มูลม้าที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลเป็นตัวดูดซับ (ii) 200°C-24h, (iii) 200°C-30h, (iv) 200°C-36h, (v) 200°C-42h, (vi) 200°C-42h, (vii) 200°C -60h, (vi) 200°C-72h และคาร์บอนไนเซชันที่ 300°C-2h ในบรรยากาศออกซิเจน

ตารางที่ 4.12 เปอร์เซ็นการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูโดยใช้มูลม้าที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลคาร์บอนไนเซชัน

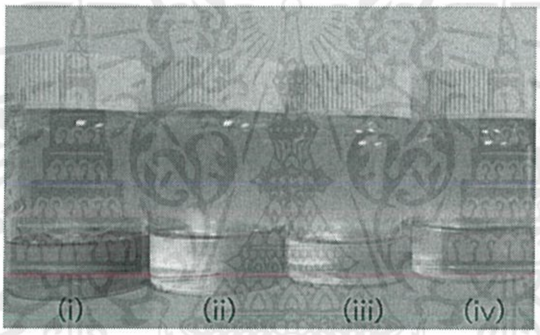
Parameter	pH	Adsorption[%]
200°C-30h car 300°C-2h	7.2	99.956
200°C-36h car 300°C-2h	6.9	93.922
200°C-42h car 300°C-2h	7.1	98.004
200°C-48h car 300°C-2h	7.2	97.649
200°C-60h car 300°C-2h	6.9	96.806
200°C-72h car 300°C-2h	7.2	98.935

จากตาราง 4.9 และ 4.10 พบว่าเปอร์เซ็นการในดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูขึ้นอยู่กับความสามารถในการดูดซับสีย้อม สมบัติของตัวดูดซับและสารที่ถูกดูดซับ ความสามารถในการดูดซับสีย้อมบนตัวดูดซับขึ้นอยู่กับประจุบนผิวของตัวดูดซับและประจุของสีย้อม เนื่องจาก 200°C 24 h มีความเป็นเบสอ่อนจึงมีประจุบวก น้ำสีย้อมเมทิลีนบลูมีประจุเป็นลบ จึงสามารถดูดซับได้ดี [41] 200°C 24 h มีการแตกตัวและแยกออกจากกันทำให้พื้นที่ผิวมากและรูพรุนที่สูง จึงส่งผลโมเลกุลของเมทิลีนบลูการแพร่ของโมเลกุลเข้าสู่รูพรุนของคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้จากมูลม้า และการดูดซับโมเลกุลสีย้อมเมทิลีนบลูบนผิวภายในรูพรุนของคาร์บอน (adsorption) [42]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

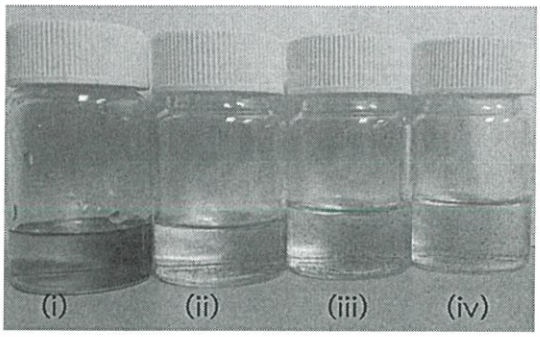


รูปที่ 4.54 ภาพการทดสอบการดูดซับ (i) สีย้อมเมทิลีนบลูโดยใช้มูลม้าที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลเป็นตัวดูดซับที่เติมตัวเร่งปฏิกิริยา (ii) HCl 1 wt%, (iii) HCl 3 wt%, (iv) HCl 5 wt% และคาร์บอนไนเซชันที่300°C 2h ในบรรยากาศออกซิเจน

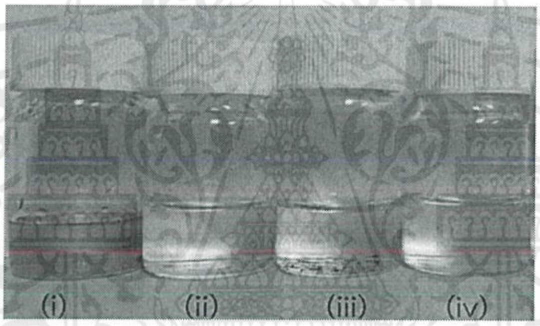


รูปที่ 4.55 ภาพการทดสอบการดูดซับ (i) สีย้อมเมทิลีนบลูโดยใช้มูลม้าที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลเป็นตัวดูดซับเติมตัวเร่งปฏิกิริยา (ii) H_2SO_4 1 wt%, (iii) H_2SO_4 3 wt%, (iv) H_2SO_4 5 wt% และคาร์บอนไนเซชันที่ 300°C 2 h ในบรรยากาศออกซิเจน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.56 ภาพการทดสอบการดูดซับ (i) สีย้อมเมทิลีนบลูโดยใช้มูลม้าที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลเป็นตัวดูดซับเติมตัวเร่งปฏิกิริยา (ii) H_3PO_4 1 wt%, (iii) H_3PO_4 3 wt%, (iv) H_3PO_4 5 wt% และคาร์บอนไนเซชันที่ 300°C-2h ในบรรยากาศออกซิเจน

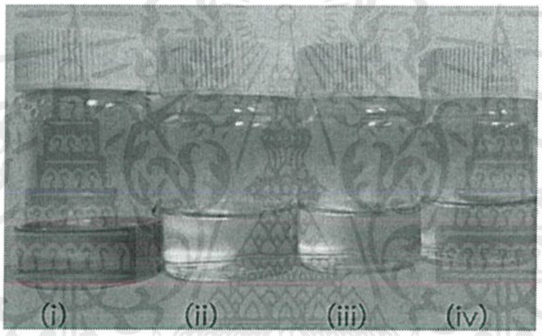


รูปที่ 4.57 ภาพการทดสอบการดูดซับ (i) สีย้อมเมทิลีนบลูโดยใช้มูลม้าที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลเป็นตัวดูดซับเติมตัวเร่งปฏิกิริยา (ii) HNO_3 1 wt%, (iii) HNO_3 3 wt%, (iv) HNO_3 5 wt% และคาร์บอนไนเซชันที่ 300°C-2h ในบรรยากาศออกซิเจน

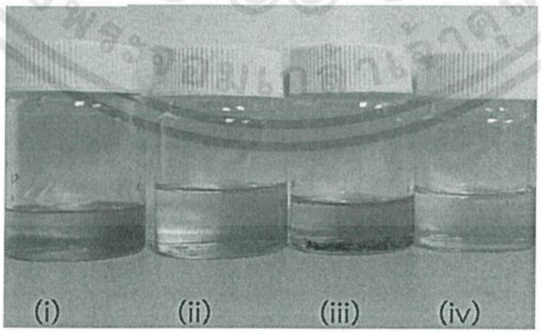
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่4.13 เปอร์เซ็นการดูดซับน้ำสีย้อมสีน้ำเงินเมทิลีนบลูโดยใช้มูลม้าที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลคาร์บอนไนเซชันเติมตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรด

Parameter	Adsorption [%]					
	1wt%	pH	3wt%	pH	5wt%	pH
HCl	99.444	6.9	99.724	6.6	100.000	6.6
H_2SO_4	100.000	6.6	100.000	6.5	100.000	6.4
H_3PO_4	100.000	6.7	98.758	6.6	98.089	6.5
HNO_3	98.713	6.8	100.000	6.8	10.000	6.8

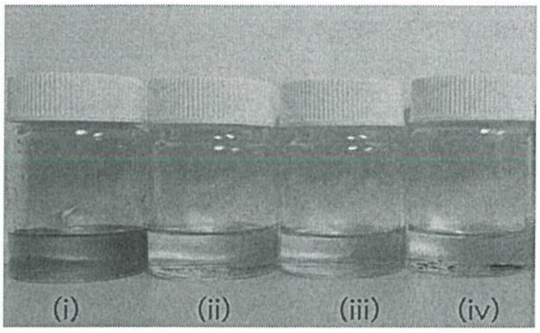


รูปที่ 4.58 ภาพการทดสอบการดูดซับ (i) สีย้อมเมทิลีนบลูโดยใช้มูลม้าที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลเป็นตัวดูดซับที่เติมตัวเร่งปฏิกิริยา (ii) KOH 1 wt%, (iii) KOH 3 wt%, (iv) KOH 5 wt% และคาร์บอนไนเซชันที่300°C-2h ในบรรยากาศออกซิเจน

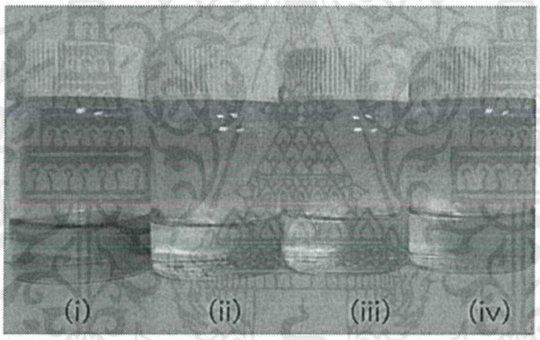


รูปที่ 4.59 ภาพการทดสอบการดูดซับ (i) สีย้อมเมทิลีนบลูโดยใช้มูลม้าที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลเป็นตัวดูดซับเติมตัวเร่งปฏิกิริยา (ii) NaOH 1 wt%, (iii) NaOH 3 wt%, (iv) NaOH 5 wt%และคาร์บอนไนเซชันที่ 300°C-2h ในบรรยากาศออกซิเจน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.60 ภาพการทดสอบการดูดซับ (i) สีย้อมเมทิลีนบลูโดยใช้มูลม้าที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลเป็นตัวดูดซับเติมตัวเร่งปฏิกิริยา (ii) $Ca(OH)_2$ 1 wt%, (iii) $Ca(OH)_2$ 3 wt%, (iv) $Ca(OH)_2$ 5 wt% และคาร์บอนไนเซชันที่ 300°C-2h ในบรรยากาศออกซิเจน

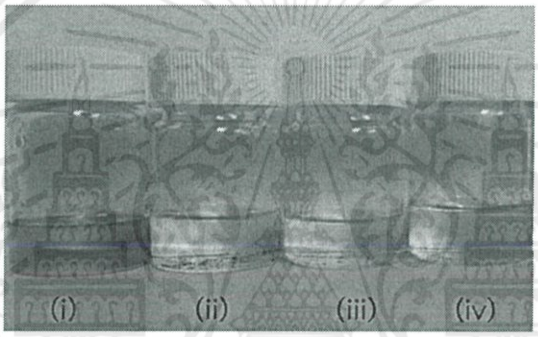


รูปที่ 4.61 ภาพการทดสอบการดูดซับ (i) สีย้อมเมทิลีนบลูโดยใช้มูลม้าที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลเป็นตัวดูดซับเติมตัวเร่งปฏิกิริยา (ii) NH_3 1 wt%, (iii) NH_3 3 wt%, (iv) NH_3 5 wt% และคาร์บอนไนเซชันที่300°C-2h ในบรรยากาศออกซิเจน

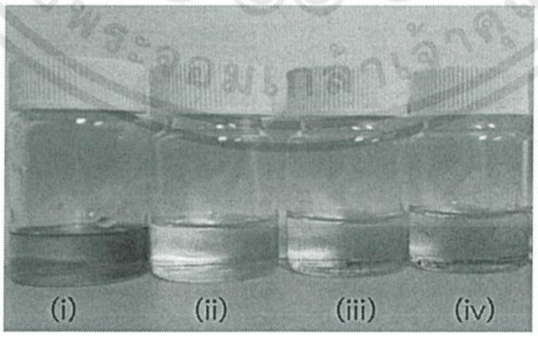
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.14 เปอร์เซ็นการดูดซับน้ำสีย้อมสีน้ำเงินเมทิลีนบลูโดยใช้มูลม้าที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลคาร์บอนไนเซชันเติมตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบส

Parameter	Adsorption [%]					
	1wt%	pH	3wt%	pH	5wt%	pH
KOH	99.189	7.1	99.290	7.2	99.802	7.3
NaOH	91.083	7.3	94.911	7.4	95.164	7.5
$Ca(OH)_2$	97.867	7.3	98.092	7.3	98.802	7.3
NH_3	98.669	7.0	98.867	7.1	99.335	7.2

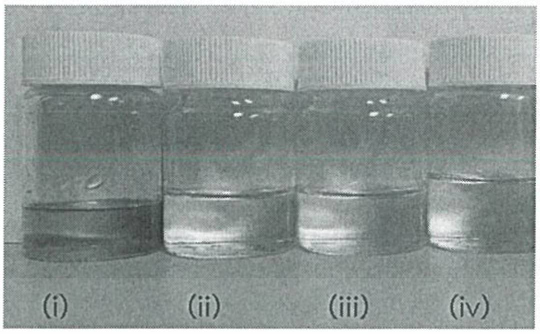


รูปที่ 4.62 ภาพการทดสอบการดูดซับ (i) สีย้อมเมทิลีนบลูโดยใช้มูลม้าที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลเป็นตัวดูดซับที่เติมตัวเร่งปฏิกิริยา (ii) CH_3OH 1 wt%, (iii) CH_3OH 3 wt%, (iv) CH_3OH 5 wt% และคาร์บอนไนเซชันที่300°C-2h ในบรรยากาศออกซิเจน

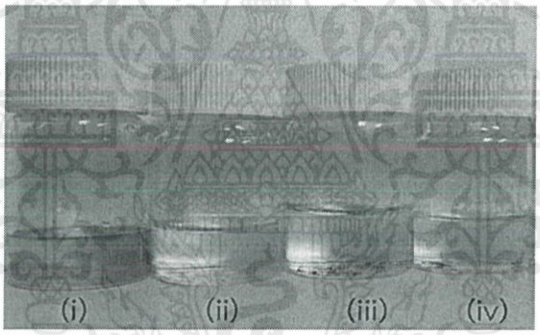


รูปที่ 4.63 ภาพการทดสอบการดูดซับ (i) สีย้อมเมทิลีนบลูโดยใช้มูลม้าที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลเป็นตัวดูดซับเติมตัวเร่งปฏิกิริยา (ii) C_2H_5OH 1 wt%, (iii) C_2H_5OH 3 wt%, (iv) C_2H_5OH 5 wt% และคาร์บอนไนเซชันที่300°C-2h ในบรรยากาศออกซิเจน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.64 ภาพการทดสอบการดูดซับ (i) สีย้อมเมทิลีนบลูโดยใช้มูลม้าที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลเป็นตัวดูดซับเติมตัวเร่งปฏิกิริยา (ii) C_4H_9OH 1 wt%, (iii) C_4H_9OH 3 wt%, (iv) C_4H_9OH 5 wt% และคาร์บอนไนเซชันที่300°C-2 h ในบรรยากาศออกซิเจน

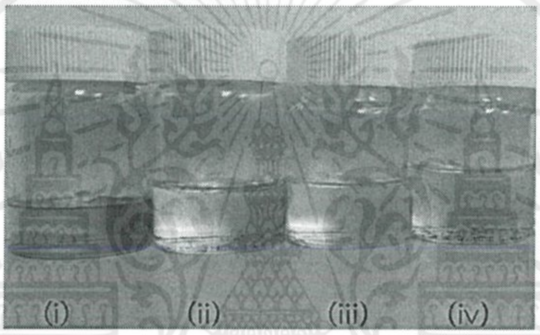


รูปที่ 4.65 ภาพการทดสอบการดูดซับ (i) สีย้อมเมทิลีนบลูโดยใช้มูลม้าที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลเป็นตัวดูดซับเติมตัวเร่งปฏิกิริยา (ii) $(CH_3)_2CHOH$ 1 wt%, (iii) $(CH_3)_2CHOH$ 3 wt%, (iv) $(CH_3)_2CHOH$ 5 wt% และคาร์บอนไนเซชันที่ 300°C 2 h ในบรรยากาศออกซิเจน

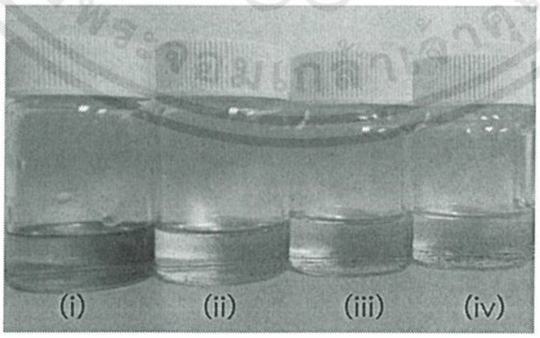
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่4.15 เปอร์เซ็นการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูโดยใช้มูลม้าที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลคาร์บอนไนเซชันเติมตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดแอลกอฮอล์

Parameter	Adsorption [%]					
	1wt%	pH	3wt%	pH	5wt%	pH
CH_3OH	97.649	7.0	98.024	7.1	98.128	7.1
C_2H_5OH	98.246	7.0	98.753	7.0	98.812	7.0
C_4H_9OH	97.182	7.0	97.205	7.0	99.531	7.0
$(CH_3)_2CHOH$	95.830	7.0	97.737	6.9	100.000	6.9

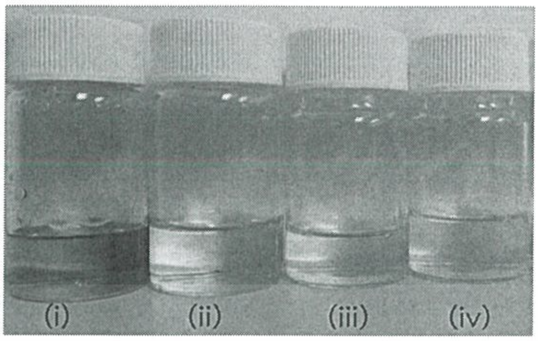


รูปที่ 4.66 ภาพการทดสอบการดูดซับ (i) สีย้อมเมทิลีนบลูโดยใช้มูลม้าที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลเป็นตัวดูดซับที่เติมตัวเร่งปฏิกิริยา (ii) C_3H_6O 1 wt%, (iii) C_3H_6O 3 wt%, (iv) C_3H_6O 5 wt% และคาร์บอนไนเซชันที่ 300°C-2 h ในบรรยากาศออกซิเจน

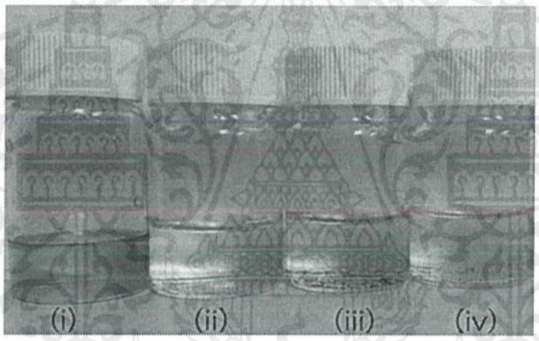


รูปที่ 4.67 ภาพการทดสอบการดูดซับ (i) สีย้อมเมทิลีนบลูโดยใช้มูลม้าที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลเป็นตัวดูดซับเติมตัวเร่งปฏิกิริยา (ii) C_6H_5-CH_3 1 wt%, (iii) C_6H_5-CH_3 3 wt%, (iv) C_6H_5-CH_3 5 wt% และคาร์บอนไนเซชันที่ 300°C-2h ในบรรยากาศออกซิเจน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.68 ภาพการทดสอบการดูดซับ (i) สีย้อมเมทิลีนบลูโดยใช้มูลม้าที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลเป็นตัวดูดซับเติมตัวเร่งปฏิกิริยา (ii) C_6H_{14} 1 wt%, (iii) C_6H_{14} 3 wt%, (iv) C_6H_{14} 5 wt% และคาร์บอนไนเซชันที่ 300°C 2 h ในบรรยากาศออกซิเจน



รูปที่ 4.69 ภาพการทดสอบการดูดซับ (i) สีย้อมเมทิลีนบลูโดยใช้มูลม้าที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลเป็นตัวดูดซับเติมตัวเร่งปฏิกิริยา (ii) C_6H_{12} 1 wt%, (iii) C_6H_{12} 3 wt%, (iv) C_6H_{12} 5 wt% และคาร์บอนไนเซชันที่ 300°C-2h ในบรรยากาศออกซิเจน

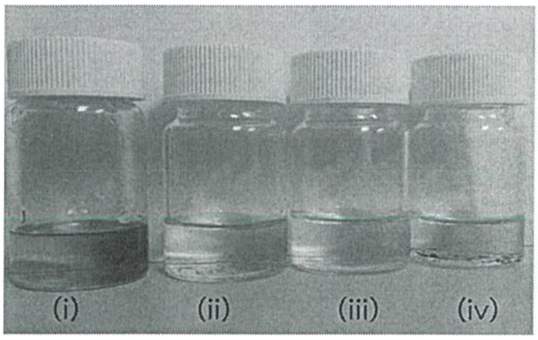
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่4.16 เปอร์เซ็นการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูโดยใช้มูลม้าที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลคาร์บอนไนเซชัน

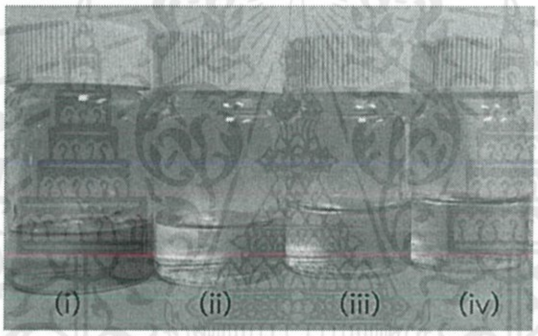
Parameter	Adsorption [%]					
	1wt%	PH	3wt%	PH	5wt%	PH
C_3H_6O	91.083	7.1	95.297	7.0	99.956	7.0
C_6H_5-CH_3	97.826	7.1	98.225	7.0	98.536	7.0
C_6H_{14}	97.471	7.1	99.823	7.1	100.000	7.1
C_6H_{12}	92.358	7.1	93.434	7.0	95.830	7.0

จากตาราง4.11, 4.12, 4.13 และ 4.14 พบว่าเปอร์เซ็นการในดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูขึ้นอยู่กับความสามารถในการดูดซับสีย้อมในน้ำเสีย สมบัติของตัวดูดซับและสารที่ถูกดูดซับ ความสามารถในการดูดซับสีย้อมบนตัวดูดซับ ขึ้นอยู่กับประจุบนผิวของตัวดูดซับและประจุของสีย้อม (ตาราง 4.10) เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรด HCl H_2SO_4 H_3PO_4 HNO_3 มีความแรงกรดขึ้นอยู่กับความเข้มข้นที่ใส่เข้าไปทำให้เข้าไปแทนตัวได้ดีขึ้น คาร์บอนจึงรูพรุนที่สูงจึงดูดซับน้ำสีย้อมได้ดี (ตาราง4.11) ปฏิกิริยาชนิดเบส KOH, NaOH, $Ca(OH)_2$, NH_3มีความเป็นเบสอ่อนจึงมีประจุบวก สีย้อมเมทิลีนบลูมีประจุเป็นลบ จึงสามารถดูดซับได้ดี [41]และ KOH มีการแตกตัวและแยกออกจากกันทำให้พื้นที่ผิวมากและรูพรุนที่สูงจึงส่งผลโมเลกุลของเมทิลีนบลูการแพร่ของ โมเลกุลเข้าสู่รูพรุนของคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้จากมูลม้า และการดูดซับโมเลกุลเมทิลีนบนผิวภายในรูพรุนของคาร์บอน (adsorption) [42] (ตาราง 4.10-4.11)ปฏิกิริยาชนิดและหมู่แอลกอฮอล์และตัวทำละลาย CH_3, C_2H_5, C_4H_9, 2-CH_3, C_3H_6O, C_6H_5-CH_3, C_6H_{14}, C_6H_{12} มีความเป็นเบสอ่อนจึงมีประจุบวก น้ำสีย้อมเมทิลีนบลูมีประจุเป็นลบ จึงสามารถดูดซับได้ดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.70 ภาพการทดสอบการดูดซับ (i) สีย้อมเมทิลีนบลูโดยใช้มูลม้าที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลเป็นตัวดูดซับเติมตัวเร่งปฏิกิริยา (ii) 200°C-24h (iii) 200°C-36h, (iv) 200°C-48h และคาร์บอนไนเซชันที่400°C-2h ในบรรยากาศออกซิเจน

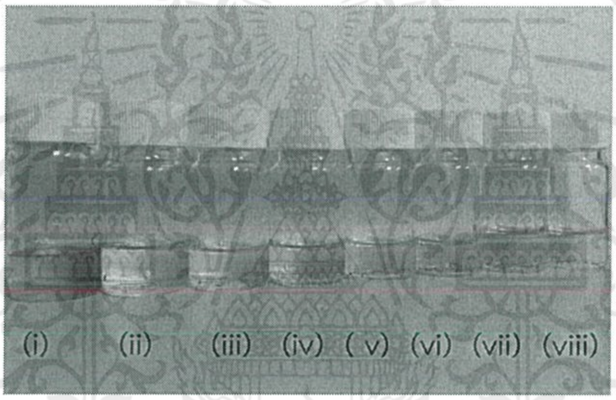


รูปที่ 4.71 ภาพการทดสอบการดูดซับ (i) สีย้อมเมทิลีนบลูโดยใช้มูลม้าที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลเป็นตัวดูดซับเติมตัวเร่งปฏิกิริยา (ii) 200°C-24h, (iii) 200°C -36h, (iv) 200°C-48h และคาร์บอนไนเซชันที่500°C-2h ในบรรยากาศออกซิเจน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่4.17 เปอร์เซ็นการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูโดยใช้มูลม้าที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลคาร์บอนไนเซชัน

Parameter	pH	Adsorption[%]
200°C-24h car 400°C-2h	6.9	98.181
200°C -36h ca r400°C-2h	7.0	93.922
200°C -48h car 400°C-2h	6.9	97.471
200°C -24h car 500°C-2h	7.0	98.625
200°C -36h car 500°C-2h	7.0	98.314
200°C -48h car 500°C-2h	6.9	98.181



รูปที่ 4.72 ภาพการทดสอบการดูดซับ (i) สีย้อมเมทิลีนบลูโดยใช้มูลม้าที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลเป็นตัวดูดซับที่ 200°C 22 h และคาร์บอนไนเซชันที่ (ii) 300°C-2h, (iii) 400°C-2h, (iv) 500°C-2h, (v) 600°C-2 h, (vi) 700°C-2h, (vii) 800°C-2h, (viii) 900°C-2h ในบรรยากาศไนโตรเจน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่4.18 เปอร์เซ็นการดูดซับน้ำสีย้อมสีน้ำเงินเมทิลีนบลูโดยใช้มูลม้าที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลคาร์บอนไนเซชัน

Parameter	pH	Adsorption [%]
200°C-24h car 300°C-2h	7.0	96.894
200°C-24h car 400°C-2h	7.1	96.925
200°C-24h car 500°C-2h	7.2	97.826
200°C-24h car 600°C-2h	7.3	98.209
200°C-24h car 700°C-2h	7.4	98.377
200°C-24h car 800°C-2h	7.4	99.113
200°C-24h car 900°C-2h	7.4	99.468

จากตาราง4.15และ4.16 พบว่าเปอร์เซ็นการในดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูขึ้นอยู่กับความสามารถในการดูดซับสีย้อมในน้ำเสีย สมบัติของตัวดูดซับและสารที่ถูกดูดซับ ความสามารถในการดูดซับสีย้อมบนตัวดูดซับขึ้นอยู่กับประจุบนผิวของตัวดูดซับและประจุของสีย้อม เนื่องจากคาร์บอนไนเซชันที่อุณหภูมิสูงมีความเป็นเบสอ่อนจึงมีประจุบวก น้ำสีย้อมเมทิลีนบลูมีประจุเป็นลบจึงสามารถดูดซับได้ดีกระบวนการคาร์บอนไนเซชันที่อุณหภูมิสูงมีการแตกตัวและแยกออกจากกันทำให้พื้นที่ผิวมากมีความเป็นคาร์บอน (%C) ที่สูงขึ้นตามไปด้วยและรูพรุนมีขนาดเล็กลงตามกระบวนการคาร์บอนไนเซชันที่อุณหภูมิที่สูงตามไปด้วย จึงสามารถดูดซับโมเลกุลของเมทิลีนบลูไว้ในรูพรุนได้มีประสิทธิภาพและสามารถเกาะบนพื้นผิวของมูลม้าที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลคาร์บอนไนเซชัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
สรุปผลการทดลองและแนวทางการพัฒนา

5.1 สรุปผลการทดลอง

มูลม้าที่ทำปฏิกิริยาไฮโดรเทอร์มัลที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง มีการ ดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูได้ดี เนื่องจากใน สภาวะที่เป็นเบสอ่อน พื้นผิวของมูลม้าที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลจะมีประจุลบซึ่ง ช่วยการดึงดูดสีย้อมเมทิลีนบลูซึ่งมีประจุบวก จึงเกิดการดูดซับได้ดี และด้วยพื้นที่ผิวสัมผัสและความเป็นรูพรุนที่มากขึ้นเมื่อผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล ทำให้ความสามารถในการดูดซับสีย้อมจึงมากกว่ามูลม้าปกติ ซึ่งกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลจะช่วย ปรับปรุงปริมาณคาร์บอนในตัวของ มูลม้าที่มากขึ้น โดยจะให้น้ำ (H_2O) ความดันและความร้อน เข้าไปทำลายพันธะ (Break bond) ของลิกนิน, เซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลสซึ่งเป็นส่วนประกอบชีวมวลของมูลม้า เกิด 3 ปฏิกิริยาคือ ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ปฏิกิริยาดีไฮเดรชัน ปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันทำให้มีปริมาณคาร์บอนมากขึ้น และในขณะเดียวกันโครงสร้างน้ำจะเข้าไปเปิดรูพรุน (Pore) ในมูลม้า ทำให้พื้นที่ผิว (Surface area) มากขึ้นเมื่อเทียบกับมูลม้าที่ไม่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล สรุปได้ว่าอุณหภูมิและเวลาใน การทำปฏิกิริยาไฮโดรเทอร์มัลจะส่งผลต่อปริมาณคาร์บอน, พื้นที่ผิวและความเป็นรูพรุนของมูลม้าที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล

การเติมตัวเร่งปฏิกิริยา เมื่อเติมตัวเร่งปฏิกิริยากรด, เบส, แอลกอฮอล์ และตัวทำลายในกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลส่งผลให้มีความเป็นคาร์บอน (%C) ที่สูงขึ้นเนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใส่ลงไปพร้อมกับโมเลกุล ของน้ำ, ความดัน และความร้อน จะเข้าไปทำลายพันธะ (Break bond) ของลิกนิน เซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลสซึ่ง เป็นส่วนประกอบชีวมวลของมูลม้าและในขณะเดียวกันตัวเร่งปฏิกิริยาก็จะช่วยเปิดรูพรุน (Pore) มีปริมาณคาร์บอนในตัวของมูลม้าที่มากขึ้น และมีพื้นที่ในการดูดซับ มากขึ้น สามารถสรุปได้ว่าการเติมตัวเร่งปฏิกิริยา กรด เบส แอลกอฮอล์และตัวทำลายที่แตกต่างกันในการทำปฏิกิริยาไฮโดรเทอร์มัลจะส่งผลต่อปริมาณคาร์บอนที่แตกต่างกัน และพื้นที่ผิวหรือความเป็นรูพรุนคาร์บอนที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมงโดยเติมตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์จะมีประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูมากที่สุด เนื่องจากพื้นผิวของเส้นใยคาร์บอนที่ได้จะมีความขรุขระมาก เกิดคาร์บอนที่สามารถเห็นรอยต่อผนังเซลลูโลส และมีขนาดเล็กกระจายอยู่ทั่วพื้นผิวของเส้นใยนาโน คาร์บอน ส่งผลให้ค่าพื้นที่ผิวมากขึ้น ความสามารถในการดูดซับสีย้อมจึงเพิ่มสูงขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 แนวทางการพัฒนา

5.2.1 ควรจะศึกษาผลชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดอื่นเพิ่มเติม เนื่องจากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่แตกต่างกันกระตุ้น จะช่วยให้เกิดความเป็นรูพรุนและค่าพื้นที่ผิวที่ไม่เท่ากัน อาจส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับสีย้อมได้

5.2.2 ควรจะศึกษาผลกระทบของพารามิเตอร์ต่างๆ ในการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูเช่น ความเข้มข้นของสีย้อมเมทิลินบลู เวลาและความเร็วในปั่นเหวี่ยง และอัตราส่วนคาร์บอนกับสีย้อมเมทิลินบลู เนื่องจากจะได้รู้ว่าคาร์บอนสามารถูซับสีย้อมเมทิลินบลูได้มากแค่ไหน อีกทั้งการดูดซับสีย้อมตัวอื่น เช่น เมทิลออเรนจ์ เมทิลเรด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

[1] Parveen Kumar, Diane M. Barrett, Michael J. Delwiche, and Pieter Stroeve, Methods for Pretreatment of Lignocellulosic Biomass for Efficient Hydrolysis and Biofuel Production, Ind. Eng. Chem. Res. 2009, 48, 3713–3729

[2] Christos K. Nitsos, Theodora Choli-Papadopoulou, Konstantinos A. Matis,and Kostas S. Triantafyllidis, Optimization of Hydrothermal Pretreatment of Hardwood and Softwood Lignocellulosic Residues for Selective Hemicellulose Recovery and Improved Cellulose Enzymatic Hydrolysis, DOI: 10.1021/acssuschemeng.6b00535 ACS Sustainable Chem. Eng. 2016, 4, 4529–4544.

[3] Tulay Gungoren Madeno glu , Mehmet Sa glam, Mithat Yuksel, Levent Ballice, Hydrothermal gasification of biomass model compounds (celluloseand lignin alkali) and model mixtures, J. of Supercritical Fluids 115 (2016) 79–85.

[4] Dennis Fougere a, Sonil Nanda b, Kimberley Clarke a, Janusz A. Kozinski b, Kecheng Li, Effect of acidic pretreatment on the chemistry and distribution of lignin in aspen wood and wheat straw substrates, Biomass and Bioenergy 91 (2016) 56-68.

[5] โรงพยาบาลม้า. การทำงานของระบบทางเดินอาหารของม้า. [Online]. เข้าถึงได้จาก : http://www.thehorsepital.com/article/96-horsegutfunction. 2552.

[6] โรงพยาบาลม้า. ระบบย่อยอาหารของม้า. [Online]. เข้าถึงได้จาก : http://www.thehorsepital.com/article/89-2012-09-12-11-18-03. 2552.

[7] M. Asifa, T. Muneer, “Renewable and Sustainable Energy Reviews”, Energy supply, its demand and security issue for developed and emerging economics, vol. 11,pp. 1388-1413, 2007.

[8] T. Ogi. Biomass Handbook. (2002) Japan Institute of Ed. Ohm-sha. pp. 12-15.

[9] T.P. Fellinger. Hydrothermal and Ionothermal Carbon Structures: From

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Carbon negative materials to energy applications. (2011) Institutional Repository of the University of Potsdam.

[10] R. Demir-Cakan, N. Baccile, M. Antonietti, and M.M.Titirici, “Carboxylate-Rich Carbonaceous Materials via One-Step Hydrothermal Carbonization of Glucose in the Presence of Acrylic Acid”, Chem. Mater, vol. 21, pp. 484-490, 2009.

[11] Polymersociety. ปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอร์ (Polymerization). [Online]. เข้าถึงได้จาก: http://polymersociety.blogspot.com/2010/09/polymerization.html. 2553.

[12] TAGS. Depolymerization. [Online]. เข้าถึงได้จาก : http://www.vcharkarn.com/varticle/43065. 2554.

[13] M. Miura, H. Kaga, A. Sakurai, K. Takahashi, “Rapid pyrolysis of wood block by microwave heating”, Anal. Appl. Pyrolysis, vol. 71, pp. 187-199, 2004.

[14] A. V. Bridgwater, S. A. Bridge, “Biomass Pyrolysis Liquids Upgrading and Utilization”,Elsevier Applied Science, pp. 2, 1991.

[15] J. Lede, “Reaction temperature of solid particles undergoing an endothermal volatilization. Application to the fast pyrolysis of biomass” , Biomass Bioenergy, vol. 7, pp. 49-60, 1994.

[16] S. S. Sofer, O. R. Zaborsky, “ Biomass Conversion processes for Energy and Fuels”,pp. 201-211, 1981.

[17] T. Suzuki, M. Miyamoto, W.M. Luo, T. Yamada, T. Yoshida, “ Science in Thermal and Chemical Biomass Conversion”, vol. 2, pp. 1580-1591, 2006.

[18] B. Viswanathan, P. Indra Neel and T. K. Varadarajan. Methods of Activation and Specific Applications of Carbon Materials (2009) National centre for catalysis research department of chemistry indian institute of technology madrasChennai, India.

[19] J.I. Hayashi, A. Kazehaya , K. Muroyama , A.P. Watkinson, “Preparation of activatedcarbon from lignin by chemical activation”, Carbon, vol. 38, pp. 1873–1878,2000.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[20] G. Q. Lu and X.S. Zhao, Nanoporous materials: an overview. (2004) Nanoporous Materials: Science and Engineering, Imperial College Press.

[21] อดิศักดิ์ ไสยสุข. 2557. วัสดุที่มีรูพรุนแบบลาดับขั้น: ความสาคัญและประโยชน์. เชียงใหม่. สำนักพิมพ์คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

[22] B. Zoua, Y. Hua, F. Cui, L. Jiang, D. Yu, H. Huang, "Effect of surface modification of low cost mesoporous SiO2 carriers on the properties of immobilized lipas", J.Coll. Inter. Sci, vol. 417, pp. 210-216, 2014.

[23] S. Mitchell, J. Pérez-Ramírez, "Mesoporous zeolites as enzyme carriers: Synthesis, characterization, and application in biocatalysis", Cat. Today, vol. 168, pp.28-37, 2011.

[24] E.C. Peters, F. Svec and Jean M.J. Frechet, "Rigid macroporous polymer monoliths", Adv. Mater, vol. 14, pp. 1169-1181, 1999.

[25] Z. Yuan, B. Su, "Insight into hierarchically meso-macroporous structured materials",J. Mat. Chem, vol. 16, pp. 663-677, 2006.

[26] G. Centi, S. Perathononer, "Novel catalyst design for multiplephase reaction", Cat. Today, vol. 79-80, pp. 3-13, 2003.

[27] Ekaterina Sermyagina, Jussi Saari, Juha Kaikko, Esa Vakkilainen, Hydrothermal carbonization of coniferous biomass: Effect of process parameters on mass and energy yields, Journal of Analytical and Applied Pyrolysis 113 (2015) 551–556.

[28] Marta Sevilla, Antonio B. Fuertes, Chemical and Structural Properties of Carbonaceous Products Obtained by Hydrothermal Carbonization of Saccharides, Chem. Eur. J. 2009, 15, 4195 – 4203.

[29] Tuo Ji, Long Chen, Liwen Mua, Ruixia Yuan, Michael Knoblauch, Forrest Sheng Bao c, Yijun Shi , Huaiyuan Wang b, Jiahua Zhu a, Green processing of plant biomass into mesoporous carbon as catalyst support, Chemical Engineering Journal 295 (2016) 301–308.

[30] M. Toufiq Reza, Joan G. Lynam, M. Helal Uddin, Charles J. Coronella,

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Hydrothermal carbonization: Fate of inorganics, biomass and bioenergy 49 (2013) 86-94.

[31] Sunday E. Elaigwu a,b, Gillian M. Greenway a, Microwave-assisted hydrothermal carbonization of rapeseed husk: A strategy for improving its solid fuel properties, Fuel Processing Technology 149 (2016) 305–312.

[32] Gustan Paria , Saptadi Darmawanb * , Bambang Prihandokoc, Porous Carbon Spheres

from Hydrothermal Carbonization and KOH Activation on Cassava and Tapioca Flour

Raw Material, Procedia Environmental Sciences 20 (2014) 342 – 351.

[33] Min Li, Wei Li, Shouxin Liu, Hydrothermal synthesis, characterization, and KOH activation

of carbon spheres from glucose, Carbohydrate Research 346 (2011) 999–1004.

[34] Jingxing Chen, Nannan Xia, Tianxiang Zhou, Sanxiang Tan, Fengping Jiang, Dingsheng Yuan, Mesoporous Carbon Spheres: Synthesis, Characterization and Supercapacitance, Int. J. Electrochem. Sci., 4 (2009) 1063 – 1073.

[35] C.A. Andrade, F. Ruiz, JR. Martinez-Mendoza, H. Terrones, "Infrared and Raman spectra, conformational stability, ab initio calculations of structure, and vibrational assignment of alpha and beta glucose", J Mol Struct THEOCHEM, vol. 714, pp. 143-146, 2005.

[36] NANOTEC. Thermogravimetric Analysis (TGA). [Online]. เข้าถึงได้จาก : http://www.nanotec.or.th/th/?page_id=569. 2556.

[37] แม้น อมรสิทธิ์ และ อมร เพชรสม. 2539. หลักการและเทคนิคการวิเคราะห์เชิงเครื่องมือ. ชวนพิมพ์. หน้า 108-192.

[38] สุพะไชย์ จินดาวุฒิกุล. การวัดพื้นที่ผิวจาเพาะและปริมาตรรูพรุนของวัสดุดูดซับ. สำนักพิมพ์วารสาร กรมวิทยาศาสตร์บริการ.

[39] Lowel, S.L and Shields, Joan E, Powder surface area and porosity. 3 rd. ed, London: Chapman & Hall, pp. 1-40, 1991.

[40] Y. Huang, E. Ma and G. Zhao, "Thermal and structure analysis on reaction

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

mechanisms duringthe preparation of activated carbon fibers by KOH activation from liquefied wood-based fibers Industrial Crops and Products, vol. 69, pp. 447-455, 2015.

[41] นายเฉลิมชัย ไชยธงรัตน์, การวิเคราะห์ปัจจัยทางความร้อนที่มีผลต่อวัสดุพอลคิาร์บอเนตผสม, วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาววิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุนารีปีการศึกษา 2553.

[42] Auradee Ritthichai1 and Sasithorn Muncharoen, Dye Removal of Textile Wastewaters using Crab Shell Activated Carbon, วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา. 19 (2557) 1 : 131-140.

[42] พรสวรรค์ อัศวแสงรัตน์ วีระวัฒน์ คลอวุฒิมันตร,การดูดซับสีย้อมด้วยตัวดูดซับจากธรรมชาติ Adsorption of dyesby natural adsorbents, วิศวสารลาดกระบัง ปี ที่27 ฉบับที่4 ธันวาคม 2553.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

The 5th Thailand International Nanotechnology Conference (NanoThailand2016)

November 27-29, 2016 at Khaoyai, Nakhon Ratchasima, Thailand

Date: February 14, 2017
Ms. Ref. No.: NanoThailand2016 (Submission ID#PO-MA22)
Article Title: Characterization of carbon fibers from Thai horse manure via hydrothermal carbonization
Materials Today: Proceedings

Dear Sorakit Wettayavong,

Upon a complete and satisfactory revision on your manuscript mentioned above, I am pleased to inform you that your manuscript has now been accepted for publication in ***Materials Today: Proceedings.***

Your final revised manuscript will now be transferred to the production department of Elsevier, the publisher of *Materials Today: Proceedings*, where it will undergo technical screening to determine its suitability for production. You will be contacted by production team whether there will be additional query. No proof will be sent to the authors. Please also note that the online copyright form will be directly sent to you during production process.

The issue will be available online within 8 weeks from date of finalization of the article after technical screening. Authors are advised to contact Guest Editors for queries regarding the issue pre- and post-publication.

Thank you once again for submitting your work to NanoThailand2016.

Sincerely Yours,

Rattikorn Yimnirun

Rattikorn Yimnirun, Ph.D.
On Behalf of Guest Editorial Team for Materials Today: Proceedings
The 5th Thailand International Nanotechnology Conference (NanoThailand2016)
School of Physics, Institute of Science, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima 30000 Thailand

NANO
THAILAND 2016

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

NanoThailand 2016

Characterization of carbon fibers from Thai horse manure via hydrothermal carbonization

Sorakit wettayavong[a] , Siwakron Sangnoi [a], Napat Kaewtrakulchaib[b], Apiluck Eiad-Ua [a*]

[a]College of Nanotechnology, King Mongkut's Institute of Technology, Ladkrabang, Bangkok, 10520 Thailand
[b]The Joint Graduate School of Energy and Environment, King Mongkut's university of Technology Thonburi, Bangkok,10140 Thailand
**corresponding author, E-mail : apiluck.ei@kmitl.ac.th*

Abstract

Carbon fibers from biomass have been successfully prepared via hydrothermal-carbonization and activated in air atmosphere for catalyst supporter. In this research, we study the effect of temperature (160 -200 °C) and residence time (4-24 h) to pretreat the initial carbon precursor in terms of chemical properties (i.e. carbon content, surface functional group) including the physical properties such as porosity and total surface areas. Afterwards, carbonization was obtained at the temperature of 300 °C for 2h for developing the porosity and even removing the contaminants of hydrothermal char to reach the carbon fiber. Nevertheless, carbon fiber was characterized. Scanning electron microscopy (SEM) and Functional Transform Infrared spectroscopy (FTIR) were employed to characterize physical morphology and functional group on the surface, respectively.
© 2016 Elsevier Ltd. All rights reserved. (original file comes from [redacted])
Selection and Peer-review under responsibility of 5th Thailand International Nanotechnology Conference (NanoThailand 2016)

Keywords: Carbon fiber, Biomass, Hydrothermal, Carbonization ;

---

1. INTRODUCTION

Biomass, organic material in nature, can retain and utilize for energy production. Generally, biomass polymers consist of cellulose, hemicellulose, lignin, starch and etc., which is an important resource of carbon [1]. Most biomass in Thailand comes from agricultural activities and livestock. Horse manure, Most solid composed of the remnants of the plant a animals ate it cannot digest or useful. Then, there is the residue of animal defecates. By these scraps through decomposition process to some degree in the gastrointestinal tract. So, the horse manure is rich nutrient types including organic matter dissolved species. Any kind of horse manure nutrients more or less depending on the type of food animals eat itself is an important factor and other factors; the digestive system of animals. Horse manure (HM) is a famous residue, which has used as a fertilizer. However, the HM is a natural fiber structure that can be developed for carbon fiber process. As an alternative for carbon material processing, several processes such as carbonization or hydrothermal carbonization have been adapted for its [2, 3]. Hydrothermal carbonization (HTC), which is the thermal conversion process for biomass, which is no need to dry, to produce biochar. The solid product, hydrochar, is also known as HTC char. In this field, water is used as a reaction medium, reactant and sometimes as catalysts for organic and inorganic chemical reactions. Hydrothermal reactions take place under moderate temperature and pressure condition. Recently, the study showed specific surface area of HTC by-product depended on process parameters (i.e. treatment temperature, residence time of the reaction), the pore structure was blocked as a result of re-condensation of water soluble compound at long residence time conditions. This could have resulted in the lesser in surface area for HTC by product. The carbon materials collected directly after hydrothermal carbonization have the characteristic to possess only a small number of micropores and, therefore, a small surface area (as compared to activated carbon). However, by further carbonization at higher temperatures the surface areas can reach up again due to an increase in micro porosity. HTC can be suitable for producing adsorbent or catalyst supporter, but it need some process (i.e. carbonization) after the HTC processing [6-9]. Hence, the present study was investigated the parameters of HTC such as reaction temperature (160-200°C) and reaction time (4-24 h) using HM as a carbon source previous to carbonization. Furthermore, the effect of HTC parameters on the properties of carbon fiber was

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2214-7853 © 2016 Elsevier Ltd. All rights reserved.
Selection and Peer-review under responsibility of 5th Thailand International Nanotechnology Conference (NanoThailand 2016)

characterized regarding the surface morphology by Scanning Electron Microscope (SEM) and the functional group by Transform Infrared Spectroscopy (FTIR).

2. MATERIAL AND METHOD

Preparation of Carbon Fiber

At first stage, 30g of horse manure (size; 800 μm) was mixed with 60 ml of DI water and transferred into Teflon mold and stainless-steel reactor at different reaction temperature (160-200 °C) and reaction time (4-24 h). Then, the hydrochar was quenched via water and dried at 80°C for overnight. Finally, char samples was carbonized at 300°C for 2h to obtain carbon fibers. Moreover, the physical morphology and surface functional group of carbon fiber products were characterized by Scanning Electron Microscope (SEM) and Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR), respectively.

3. Results and Discussion

The result of proximate analysis of horse manure shows in Table 1. It found that horse manure contains 15.33 wt% of fixed carbon content and ash content about 13.54 wt%. Furthermore, moisture is lower than 8.0 wt%. While, the volatile matter content is approximately 63.34 wt%. In addition, elemental analysis carried out to examine the C, H, N, O elemental composition. Results obtained in this study on C, H, N, O about 45.9%, 6.4%, 1.0%, 35.7%, respectively [Table 1]. Production yield of carbon fibers shows in Table 2. The results found that Hydrochar prepared from hydrothermal treatment without carbonization at 160, 180 and 200°C for 4, 8, 12 and 24 hours provide the HTC char yield about 91.17 to 68.37 wt%. While, increasing of HTC temperature and reaction time lead to lower the yield. After that CFs was performed through the carbonization at 300°C for 2 hours provide the CFs yields about 63.8 to 59.4 wt%. CFs yields after hydrothermal had no significantly different in carbonization. Furthermore, SEM image displayed the surface appearance of horse manure and CF products (Fig. 1-2). Feature of horse manure has size about 45 μm and length is approximately 300 μm with smooth surface structure (Fig. 1). While, the size of carbon fiber materials resulting from horse manure at different hydrothermal carbonization is approximately 37 μm and length about 272 μm in Fig 2a, about 34 μm and length is 250 μm in Fig 2b, about 32 μm and length is 225 μm in Fig 2c, about 30 μm and length is 200 μm in Fig 2d, about 33 μm and length is 230 μm in Fig 2e, about 31 μm and length is 215 μm in Fig 2f, about 29 μm and length is 205 μm in Fig 2g, about 28 μm and length is 195 μm in Fig 2h, about 29 μm and length is 205 μm in Fig 2i, about 27 μm and length is 190 μm in Fig 2j, about 25 μm and length is 185 μm in Fig 2k, The CFs surface was influenced from HTC reaction temperature and reaction time. It showed more space on surface structure with smooth edges. The CFs product treated by hydrothermal at 200°C for 24 hours showed larger pore structures than other conditions. Size of carbon fiber materials about 20 μm and length is 175μm in Fig 2l. Furthermore, FT-IR spectra is displayed in Figure 2. The result reveals that the FT-IR patterns of carbon fiber prepared from horse manure using HTC process. The result shown that biochar still remains functional groups after processing. The bands of the functional groups in different hydrothermal conditions at 160°C, 180°C and 200 °C for 24h and carbonization at 300°C for 2h are similarly. The broad band at 950-1200 cm^{-1} corresponded to C-O group, the band at 1,460 cm^{-1} corresponds to CH_2 bending, the band at 1,600 cm^{-1} and the band at 1,512 cm^{-1} attributed to C=C group. While, the peak at 1,740 cm^{-1} corresponds to C=O groups, the band at 2850 $cm^{-1}$and the peak at 2,925 cm^{-1} corresponds to CH alkane [8]. The broad band at 3,000 to 3,680 cm^{-1} corresponds to OH group [9]. Moreover, Fig. 4 showed the proportion of OH group, C=C group and CH_2 bending of CFs product. The functional groups were decreased since HTC process cause the degradation of biomass polymer (i.e. hydrolysis, dehydration reaction [10-12]. OH group was specifically declined owning to the decomposition of hemicellulose structure [7, 8]. After HTC process, the band centered at 3,000-3,680 cm^{-1} corresponds to OH group and the band at 2850 cm^{-1} to 2,925 cm^{-1} describes to CH stretching. In addition, the band between 1,600 cm^{-1} - 1,512 cm^{-1} attributed to C=C group, the band at 1,460 cm^{-1} corresponds to CH_2 bending. All functional groups were decreased in hydrothermal carbonization process [Fig.4].

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Table 1. Proximate and elemental analysis of horse manure.

Parameter	Horse manure
Proximate analysis (wt%)	
Moisture	7.79
Volatile matter	63.34
Fixed carbon	15.33
Ash	13.54
Ultimate analysis (wt%)	
C	45.9
H	6.4
N	1.0
O[a]	35.7

[a.] Oxygen (wt%) = 100 - (carbon + hydrogen + nitrogen + sulfur + ash).

Table 2. Production yield of carbon fiber materials resulting from the HTC of horse manure.

Condition	Temperature [°C]	Time[h]	HTC Char [wt%][a]	CFs Product [wt%][b]
1	160	4	91.17	63.8
2	160	8	87.40	63.0
3	160	12	84.03	61.8
4	160	24	75.03	61.7
5	180	4	88.43	62.4
6	180	8	79.70	61.6
7	180	12	77.70	61.4
8	180	24	74.37	61.0
9	200	4	78.40	61.0
10	200	8	73.80	60.4
11	200	12	71.27	59.8
12	200	24	68.37	59.4

[a] Yield is defined as: Hydrochar by hydrothermal.

[b] Yield is defined as: CFs product with carbonization in air at 300°C 2h.

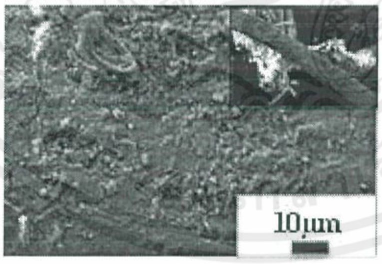


Fig. 1. Scanning Electron Microscope (SEM) of (a) (1000x) Horse manure untreated HTC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

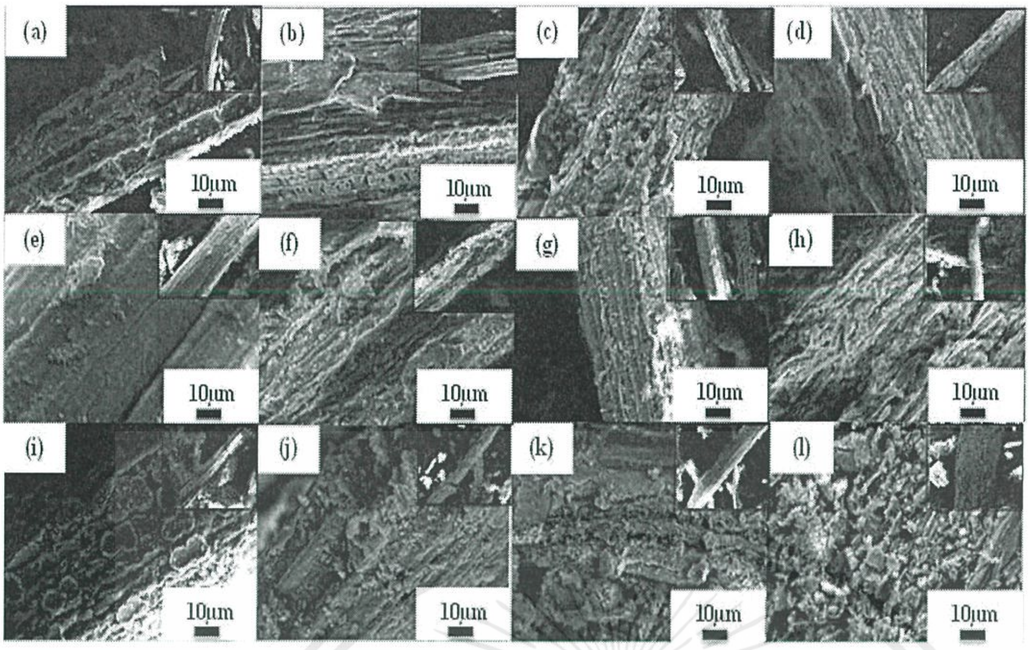


Fig. 2. Scanning Electron Microscope (SEM) of (a) (1000x) CFs product by hydrothermal at 160°C for 4h (b) CFs product by hydrothermal at 160°C for 8h (c) CFs product by hydrothermal at 160°C for 12h (d) CFs product by hydrothermal at 160°C for 24h (e) CFs product by hydrothermal at 180°C for 4h (f) CFs product by hydrothermal at 180°C for 8h (g) CFs product by hydrothermal at 180°C for 12h (h) CFs product by hydrothermal at 180°C for 24 h. (i) CFs product by hydrothermal at 200°C for 4h (j) CFs product by hydrothermal at 200°C for 8h (k) CFs product by hydrothermal at 200°C for 12h (l) CFs product by hydrothermal at 200°C for 24 h. • CFs is after hydrothermal treatment and carbonized at 300°C for 2h conditions.

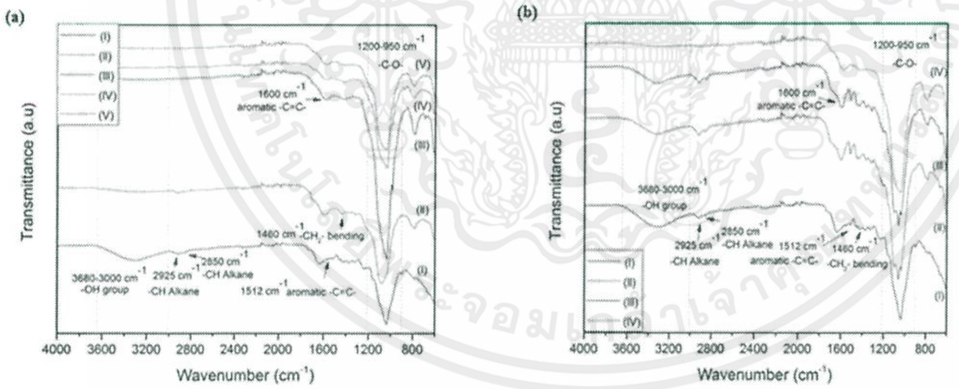


Fig. 3. FTIR spectra of horse manure and carbon fiber synthesized from HTC process (Ia) Horse manure, (IIa) CFs product by Hydrothermal at 200°C for 4h, (IIIa) CFs product by Hydrothermal at 200°C for 8h, (IVa) CFs product by Hydrothermal at 200°C for 12h, (Va) CFs product by Hydrothermal at 200°C for 24h, (Ib) Horse manure (IIb) CFs product by hydrothermal at 160°C for 24h, (IIIb) CFs product by hydrothermal at 180°C for 24h, (IVb) CFs product by hydrothermal at 200°C for 24h. • CFs is after hydrothermal treatment and carbonized at 300°C for 2h conditions.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

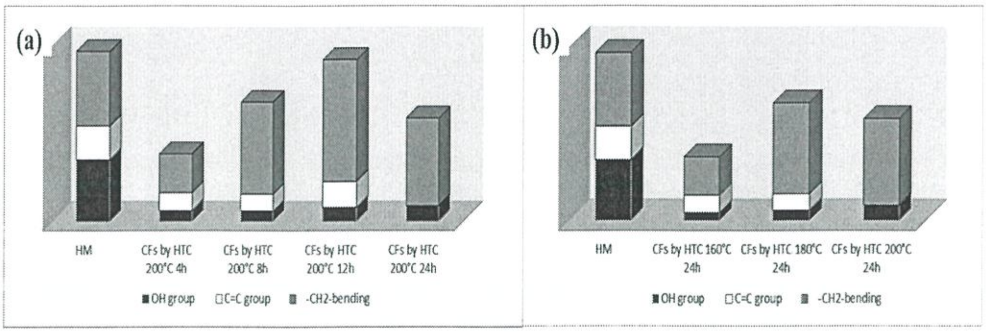


Fig. 4. The proportion of OH group, C=C group and -CH_2-bending in CFs product.

4. Summary

Carbon fibers product was significantly influenced with reaction temperature and reaction time in HTC process. The surface morphology of CFs product prepared from hydrothermal treatment at 200°C for 24h and carbonization at 300°C for 2h reveals a highest porosity and surface area. The production yield is approximately 59.4 wt%. Furthermore, FTIR spectrum confirm, that the functional group of biomass polymer was decreased. Therefore, the carbon content was significantly increased. For these condition, carbon fibers derived from horse manure could be a potential candidate as an alternative materials for several applications.

Acknowledgements

The authors are thankful to the College of Nanotechnology, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang for supporting.

References

[1] Wei-Hong Yan, Pei-Gao Duan, Feng Wang, Yu-Ping Xu, Composition of the bio-oil from the hydrothermal liquefaction of duckweed and the influence of the extraction solvents, Fuel 185 (2016), 229-235.

[2] Raisa Korzh, Valerii Bortyshevskyi, Primary reactions of lignite-water slurry gasification under thesupercritical conditions, J. of Supercritical Fluids 117 (2016) 64–71.

[3] M. M. Titirici, A. Thomas, S. H. Yu, J. Muller, M. Antonietti, A directbsynthesis of mesopore carbon with bicontinuous pore morphology from crude plant material by hydrothermal carbonization. Chemistry of Materials 19 (2007) 4205-4212.

[4] Chao He, Apostolos Giannis, Jing-Yuan Wang, "Conversion of sewage sludge to clean solid fuel using hydrothermal carbonization: Hydrochar fuel characteristis and combustion behavior", Applied Energy, vol. 111, pp. 257-266, 2013.

[5] Jun Hu, Dekui Shen, Shiliang Wu, Huiyan Zhang, Rui Xiao, "Effect of temperature on structure evolution in char from hydrothermal degradation of lignin", Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, vol. 106, pp. 118- 124, 2014.

[6] Daegi Kim, Kwanyong Lee, Ki Young Park, "Hydrothermal carbonization of anaerobically digested sludge for solid fuel production and energy recovery", Fuel, vol. 130, pp. 120-125, 2014.

[7] C.Belver, M.A.B. Munoz, M.A. Vicente, Chemical activation of a kaolinite under acid and alkaline conditions, Chem. Mater. 14 (2002) 2033–2043.

[8] A.K. Pandaa, B.G. Mishraa, D.K. Mishrac, R.K. Singha, Effect of sulphuric acid treatment on the physico-chemical characteristics of kaolin clay, Colloids and Surfaces A: Physicochem 363 (2010) 98–104.

[9] Y. Huang, E. Ma and G. Zhao, "Thermal and structure analysis on reaction mechanisms during the preparation of activated carbon fibers by KOH activation from liquefied wood-based fibers", Industrial Crops and Products, vol. 69, pp. 447- 455, 2015.

[10] Christos K. Nitsos, Theodora Choli-Papadopoulou, Konstantinos A. Matis,and Kostas S. Triantafyllidis, Optimization of Hydrothermal Pretreatment of Hardwood and Softwood Lignocellulosic Residues for Selective Hemicellulose Recovery and Improved Cellulose Enzymatic Hydrolysis, DOI: 10.1021/acssuschemeng.6b00535 ACS Sustainable Chem. Eng. 2016, 4, 4529□4544.

[11] Tülay Gungoren Madeno glu , Mehmet Sa glam, Mithat Yuksel, Levent Ballice, Hydrothermal gasification of biomass model compounds (celluloseand lignin alkali) and model mixtures, J. of Supercritical Fluids 115 (2016) 79–85.

[12] Dennis Fougere a, Sonil Nanda b, Kimberley Clarke a, Janusz A. Kozinski b, Kecheng Li, Effect of acidic pretreatment on the chemistry and distribution of lignin in aspen wood and wheat straw substrates, Biomass and Bioenergy 91 (2016) 56-68.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

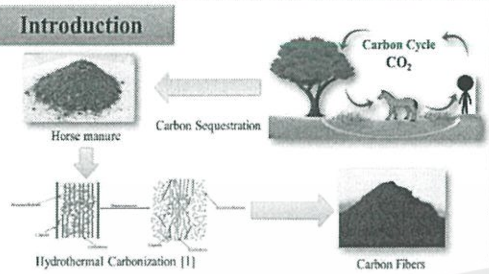
Characterization of carbon fibers from Thai horse manure via hydrothermal carbonization

[a]College of Nanotechnology, King Mongkut's Institute of Technology, Ladkrabang, Bangkok Thailand
[b]The Joint Graduate School of Energy and Environment, King Mongkut's university of Technology Thonburi, Bangkok Thailand

Sorakit wettayavong[a] , Siwakron Sangnoi[a], Napat Kaewtrakulchai[b], Apiluck Eiad-Ua[a]*

E-mail address : apiluck.ei@kmitl.ac.th,

Introduction

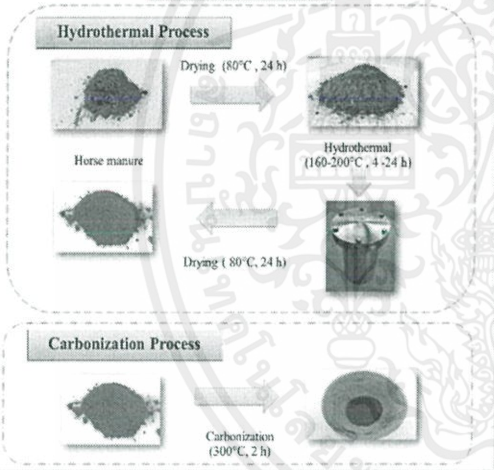


Hydrothermal Carbonization process can break bonding Cellulose, Hemicellulose and Lignin improved features of horse manure to become Carbon fibers and Horse manure are wet product and environmentally safe.

Object of this work

To study the effect of temperatures and residence times on the synthesis of carbon fibers via Hydrothermal Carbonization process.

Experimental



Results and Discussion

Condition	Temperature [°C]	Time [h]	HTC Char [wt%][a]	CF Product [wt%][b]
1	160	4	91.17	63.80
2	160	8	87.40	63.00
3	160	12	84.03	61.80
4	160	24	75.03	61.71
5	180	4	88.43	62.40
6	180	8	79.59	61.60
7	180	12	77.70	61.40
8	180	24	74.37	61.00
9	200	4	78.50	61.00
10	200	8	73.89	60.50
11	200	12	71.27	59.80
12	200	24	68.37	59.40

Taber 2. Physical properties of hydrochar materials resulting from the Hydrothermal Carbonization of horse manure.
[a] Yield is defined as: Hydrochar by Hydrothermal.
[b] Yield is defined as: CFs product after Carbonization at 300°C 2h.

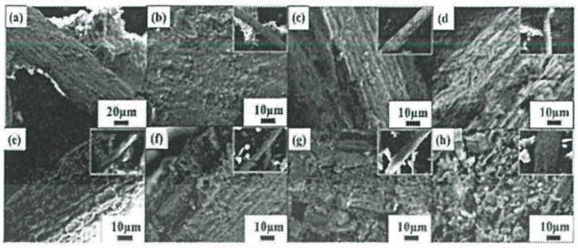


*Fig. 1 Scanning Electron Microscope (SEM) of (a) (300x)HM. (b)(1000x)HM.(c)CFs by HTC at 160°C 24h and Carbonization at 300°C 2h.(d) CFs by HTC at 180°C 24h (e) CFs by HTC at 200°C 4h .(f) CFs by HTC at 200°C 8h (g) CFs by HTC at 200°C (h)CFs by HTC at 200°C 24h. *After Hydrothermal treatment, carbonized at 300°C 2h.*

SEM image displayed the surface structure of horse manure and CFs product (Fig. 1) Feature of horse manure has size about 30 µm with smooth surface structure (Fig. 1a-1b). While, the size of carbon fiber materials resulting from the hydrothermal carbonization of horse manure is approximately 20 µm(Fig 1c-1h). The apperance of CF surface was influenced from HTC temperature and residence time. It showed more space on surface structure with smooth edges. The CFs product treated by hydrothermal at 200°C for 24 hours showed larger pore structures than other conditions(Fig 1h).

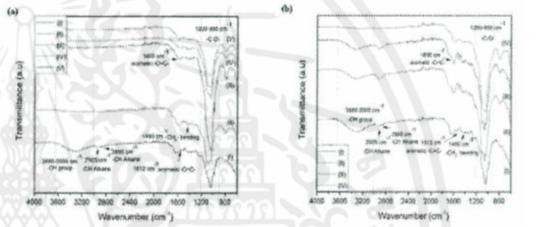


Fig.2 *FTIR spectra* of horse manure and carbon fiber systhesized from HTC process (Ia) Horse manure, (IIa) *CFs by HTC at 200°C* 4h, (IIIa) *CFs* by HTC at 200°C 8h, (IVa) *CFs by HTC* at 200°C 12h, (Va) *CFs* by HTCl at 200°C 24h, (Ib) *Horse manure* (IIb) *CFs by HTC at 160°C 24h,* (IIIb) *CFs by HTC at 180°C 24h,* (IVb) *CFs by HTC at 200°C 24h. *After Hydrothermal treatment, carbonized at 300°C 2h.*

After HTC process, the band centered at 3,000-3,680 cm^{-1} corresponds to –OH group and the band at 2850 cm^{-1} to 2,925 cm^{-1} describes to –CH stretching. In addition, the band between 1,600 cm^{-1} - 1,512 cm^{-1} attributed to C=C group, the band at 1,460 cm^{-1} corresponds to -CH2- bending. All functional groups were decreased in hydrothermal carbonization process.

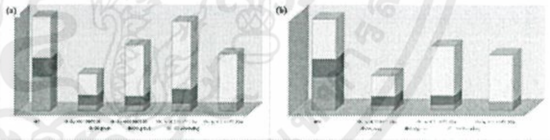


Fig.3 The proportion of OH group, C=C group and -CH2-bending in CFs products..

Conclusions

CFs product was significantly influenced from residence time and temperature in HTC process. The surface morphology of CFs product prepared from hydrothermal treatment at 200°C for 24h and carbonization at 300°C for 2h reveals a higher porosity. The production yield is approximately 59.4 wt%. Furthermore, FTIR spectrum confirm that the functional group of biomass polymer was decreased. Therefore, the carbon content was significantly increased. For these condition, carbon fibers derived from horse manure could be a potential candidate as an alternative materials.

Acknowledgment

The authors are thankful to the College of Nanotechnology, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang for supporting.

References

[1] Parveen Kumar, Diane M. Barrett, Michael J. Delwiche, and Pieter Stroeve, Methods for Pretreatment of Lignocellulosic Biomass for Efficient Hydrolysis and Biofuel Production, *Ind. Eng. Chem. Res.* 2009, *48*, 3713–3729.

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Pure and Applied Chemistry International Conference 2017 - PACCON 2017

Theme: Green Convergence on Chemical Frontiers

February 2-3, 2017 at Centra Government Complex Hotel & Convention Center Chaeng Watthana Bangkok, Thailand

Subject: Acceptance of your full paper

Dear Participant,

I am pleased to inform you that your full paper entitles **"Influence of acidic catalysts in Hydrothemal Carbonization (HTC) process for synthesis of carbon nanomaterial prepared from horse manure"** have been accepted.

Your article will be further processed and published as The Journal of Applied Science.

If you have further enquiries, please do not hesitate to contact us at paccon2017@gmail.com

Best Regards,

Prof. Dr. Santi Maensiri
Chair of Materials Science and Nanotechnology (MS) Session

Pure and Applied Chemistry International Conference 2017 - PACCON 2017
Secretariat Office:
Department of Industrial Chemistry, Faculty of Applied Science, King Mongkut's University of Technology North Bangkok
1518 Pracharat 1 Road, Wongsawang, Bangsue, Bangkok 10800 Thailand
Email: paccon2017@gmail.com
Tel. +66 2 555-2000 ext. 4802
Fax. +66 2 587-8251

If you have any enquiries about registration and submission , please contact
Registration / Submission Organizer:
Wild Blue Co., Ltd.
19/2 Ekkamai 10, Sukhumvit 63, Klong ton, Vadhana, Bangkok 10110 Thailand
Email: paccon2017@gmail.com
Tel. +66 2 714-2590
Fax. +66 2 714-2656

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

The Journal of Applied Science
[2017]
วารสารวิทยาศาสตร์ประยุกต์
10.14416/j.appsci.2017.01.00X
ISSN 1513-7805 Printed in Thailand

Vol. 16 Special issue: Y-Z

doi:

Research Article

Influence of acidic catalysts in Hydrothemal Carbonization (HTC) process for synthesis of carbon nanomaterial prepared from horse manure

Siwakron Sangnoi[1*], Sorakit wettayavong[1], Napat Kaewtrakulchai[2] and Apiluck Eiad-ua[1]

[1]College of Nanotechnology, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Thailand,
[2]The Joint Graduate School of Energy and Environment, King Mongkut's university of Technology Thonburi, Thailand
***E-mail:** apiluck.ei@kmitl.ac.th

Abstract

Horse manure (HM), which is a crucial waste material from livestock sector in Thailand. It consists of hemicellulose, cellulose and lignin that has a potential for carbon material production. In this research, carbon material was prepared from horse manure by hydrothermal treatment (HT) at 200ºC for 24 h with improvement of porosity and surface structure by acid catalyst that HNO_3, H_2SO_4, HCl and H_3PO_4 with ratio of 1, 3 and 5 wt%, respectively. Then, HT char was pyrolysed at 300ºC for 2 h to obtain the carbon nanomaterial. SEM image displayed that HCl catalyst shows highest porosity on char surface. The production yield treated by HCl 5 wt% is approximately 51.44 wt%. FTIR spectrum confirm that the functional group of biomass polymer was decomposed.

Keywords: carbon nanomaterial, biomass, horse manure, hydrothermal-carbonization, acid catalyst

Introduction

Biomass is organic matter derived from living, or recently living organisms. It is used as a source of energy and environment application. As an energy source, conversion of biomass to biofuel can be achieved by different methods such as thermal, chemical and biochemical and used for reduction of carbon dioxide even a low cost adsorbent (Toufiq Reza et al., 2013; Nitsos et al., 2016). Horse manure (HM) is a biomass which is consist a carbon in its structure. Generally, carbon material such as biochar or activated carbon is synthesized via thermochemical conversion as pyrolysis, gasification, or hydrothermal treatment (HT) (Mosier et al., 2005; Ravindran and Jaiswal, 2016). Hydrothermal Carbonization (HTC) can be applied for biomass conversation. HTC is a low-temperature process (<300 °C) and it performs a high production yield. The HTC mechanism provided water molecules, heat and pressure to decompose bonding of biomass polymer; cellulose, hemicellulose and lignin result in increasing of porosity and surface area (Madenoğlu et al., 2016; Yan et al., 2016). These process obtained at 160-200 °C for 4-24 h, which can add acidic or base catalyst for development of the pore structure and surface area (Belver et al., 2002). However, temperature and time can not be increased surface area and pore size distribution as expectation. Acid catalyst is a basic chemical substance that can be used as co-solvent for developed biomass structure, increase in surface area and pore volume (Pandaa et al., 2010; Lynam et al., 2011; Huang et al., 2015; Aston et al., 2016; Fougere et al., 2016).

In this research, the study revealed the effect of acid catalyst (i.e. HCl, H_2SO_4, H_3PO_4 and HNO_3) on the morphology, surface area and porosity of produced carbon material from horse manure via hydrothermal carbonization process.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

The Journal of Applied Science Vol. 16 Special issue: Y-Z [2017]
วารสารวิทยาศาสตร์ประยุกต์ doi: 10.14416/j.appsci.2017.01.00X

Materials and methods

Preparation of carbon nanomaterial

At first stage, 30 g of horse manure (size; 800 µm by sieving) was mixed with 60ml of DI water and 1, 3 and 5 wt% of acidic group (HCl, H_2SO_4, H_3PO_4 and HNO_3). The solution was transferred into telflon and stainless-steel reactor at 200°C for 24 h. Then, the hydrochar was quenched via water and dried at 80°C for overnight. Finally, the samples was carbonized at 300°C for 2 h to obtain carbon nanomaterial. For characterization, proximate and ultimate analysis analysed the chemical and elemental compositions of horse manure followed standard method (Toufiq Reza et al., 2013; Nitsos et al., 2016). Additionally, physical morphology and surface functional group of carbon nanomaterial were characterized by Scanning Electron Microscope (SEM) and Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR), respectively.

Results and discussion

The result on proximate analysis of horse manure shows in Table 1. It found that horse manure contains 15.33 wt% of fixed carbon content and ash content about 13.54 wt%. Furthermore, moisture is lower than 8.0% in weight. While, the volatile matter content is approximately 64 wt%. In addition, elemental analysis carried out to examine the C, H, N, O elemental composition. Results obtained in this study on C, H, N, O about 45.9%, 6.4%, 1.0%, 35.7%, respectively.

Table 1. Proximate and elemental analysis of horse manure.

Parameter	Horse manure
Proximate analysis (wt%)	
Moisture	7.79
Ash	13.54
Volatile matter	63.34
Fixed carbon[a]	15.33
Ultimate analysis (wt%)	
C	45.9
H	6.4
N	1.0
S	0.1
O[a]	35.7

[a] Oxygen (wt%) = 100 - (carbon + hydrogen + nitrogen + sulfur + ash).

Production yield of carbon nanomaterial show in Table 2. The results found that carbon nanomaterial prepared from hydrothermal process without the carbonization process had a yield about 68.37 wt%. The production yield of carbon nanomaterial produced by hydrothermal process adding HCl, H_2SO_4, H_3PO_4, HNO_3 is 51.44 wt% to 82.54 wt%, respectively. Increasing of HTC temperature and residence time become lower yield of char. After hydrothermal process, the char was performed through the carbonization at 300°C for 2 h. Carbon nanomaterial yields was ranged in 59.4 to 79.66 wt%.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Table 2. Production yield of carbon nanomaterials resulting from the HTC of horse manure.

Condition	HT Char (wt%)[a]			HTC Process (wt%)[b]		
HM-200-24	68.37			59.54		
	1wt%	3wt%	5wt%	1wt%	3wt%	5wt%
HCl	52.52	51.51	51.44	77.31	75.36	74.75
H_2SO_4	80.13	78.22	76.04	74.75	73.28	73.05
H_3PO_4	82.54	81.40	81.40	72.39	73.52	75.14
HNO_3	65.95	66.44	65.81	76.64	79.66	76.81

[a] Yield is defined as: Hydrochar by hydrothermal.
[b] Yield is defined as: carbon nanomaterial after carbonization at 300°C 2 h.

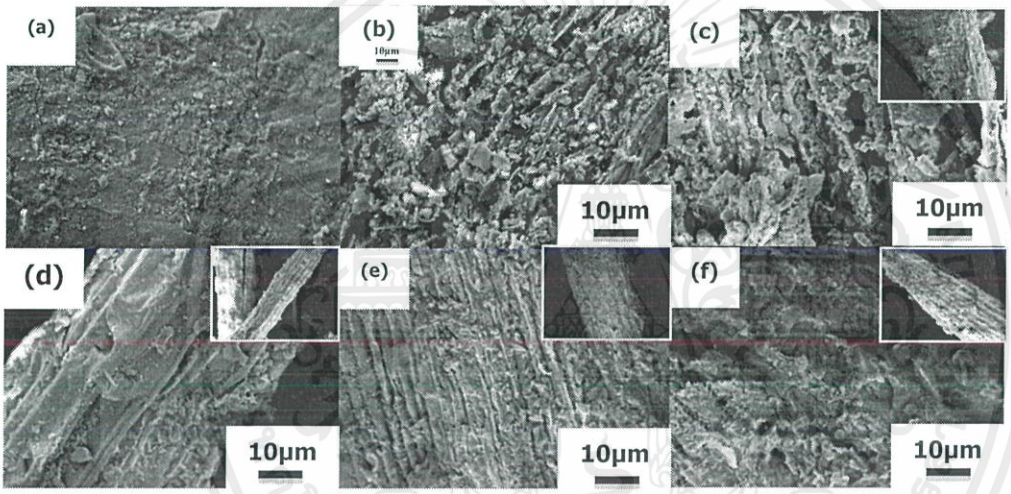


Figure 1. Scanning electron microscope (SEM) of (a) (1000x) horse manure, (b) carbon nanomaterial by hydrothermal at 200°C 24 h, (c) carbon nanomaterial adding HCl 5 wt%, (d) H_2SO_4 5 wt%, (e) H_3PO_4 5wt% and (f) HNO_3 5 wt%, recpectively.

SEM image displayed the surface appearance of horse manure and carbon nanomaterial samples (Figure 1). Feature of horse manure has size about 30 μm with smooth surface structure (Figure 1(a)). While, the size of carbon nanomaterials resulting from the hydrothermal carbonization of horse manure is approximately 20 μm (Figure 1(b)-1(f)). Carbon nanomaterial produced via hydrothermal at 200°C 24 h adding HCl 5 wt% has highest surface area. This is because of acid strength in one step dissociation of HCl and HNO_3 and 2 and 3 step dissociation of H_2SO_4 and H_3PO_4. The dissociation have positive charge leading to agglomerate of small particles. Therefore, carbon nanomaterial adding HCl have more porosity on surface than carbon nanomaterial treated by other acids (Pabst and Carta, 2007).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

The Journal of Applied Science [2017]
วารสารวิทยาศาสตร์ประยุกต์
10.14416/j.appsci.2017.01.00X

Vol. 16 Special issue: Y-Z
doi:

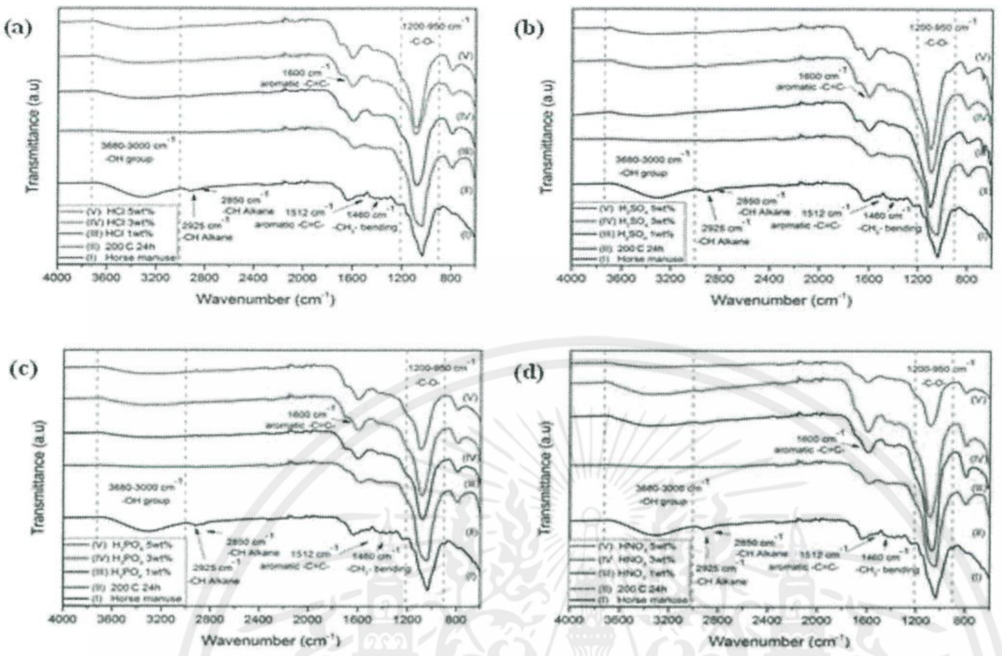


Figure 2. IR spectrum of produced carbon materials treated by a) HCl b) H_2SO_4 c) H_3PO_4 and d) HNO_3. *With Hydrothermal treatment, carbonized at 300 °C 2 h.

FT-IR spectra is displayed in Figure 2. The result reveals that the FT-IR patterns of carbon nanomaterial prepared from horse manure using HTC process.The broad band at 950-1200 cm^{-1} corresponded to C-O group, the band at 1,460 cm^{-1} corresponds to CH_2 bending, the band at 1,600 cm^{-1} and the band at 1,512 cm^{-1} attributed to C=C group. While, the peak at 1,740 cm^{-1} corresponds to C=O groups, the band at 2850 cm^{-1} and the peak at 2,925 cm^{-1} corresponds to CH alkane.The broad peak between 3,000-3,680 cm^{-1} corresponds to OH group (Aston et al., 2016). Moreover, Figure 2 showed the proportion of OH group, C=C group and CH_2 bending of carbon nanomaterial product. The functional groups were decreased since HTC process influenced the degradation of biomass polymer (i.e. hydrolysis, dehydration reaction. OH group was specifically declined owning to the decomposition of hemicellulose structure. After HTC process treated by acid catalyst, the band centered at 3,000-3,680 cm^{-1} corresponds to –OH group and the band at 2850 cm^{-1} to 2,925 cm^{-1} describes to –CH stretching. In addition, the band between 1,600 cm^{-1} - 1,512 cm^{-1} attributed to C=C group, the band at 1,460 cm^{-1} corresponds to -CH_2- bending, the band between 1200-950 cm^{-1} describes to C-O group. All functional groups were decreased with hydrothermal carbonization process in Figure 3.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

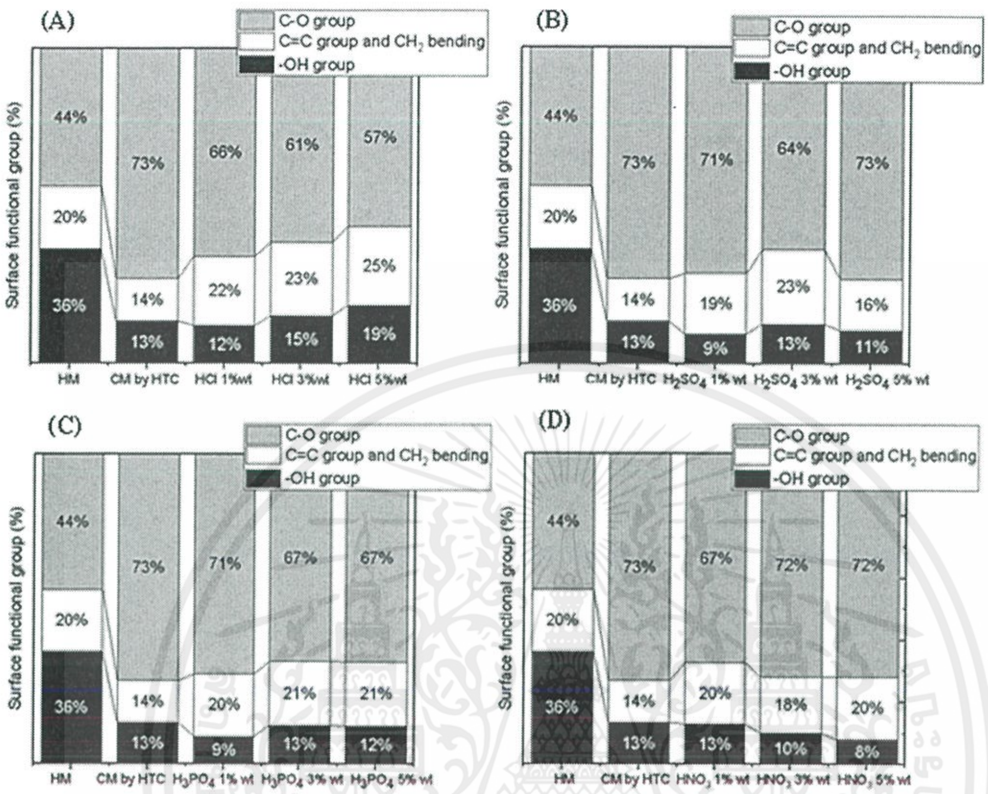


Figure 3. The proportion of OH group, C=C group, -CH_2-bending and CO group in carbon nanomaterial products.

Conclusion

Carbon nanomaterial was significantly influenced from acid catalyst in HTC process. The surface morphology of carbon nanomaterial was controlled by HTC process parameter. The samples produced at 200°C for 24h adding HCl 5 wt% with carbonization at 300°C for 2h reveal highest surface area. The production yield treated by HCl 5 wt% is approximately 51.44 wt%. FTIR spectrum confirm that the functional group of biomass polymer was decomposed. Therefore, the carbon content significantly increased. Carbon nanomaterial derived from horse manure could be a potential candidate as an alternative materials for several application such as catalyst supports for energy and environment applications and low cost adsorbent.

Acknowledgement

The authors are thankful to the College of Nanotechnology, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang for supporting.

References

Aston J.E., Thompson D.N. and Westover T.L. (2016) Performance assessment of dilute-acid leaching to improve corn stover quality for thermochemical conversion. Fuel, 186: 311–319.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Belver C., Muñoz M.G.B. and Vicente M.G. (2002) Chemical activation of a kaolinite under acid and alkaline conditions. Chem. Mater., 14: 2033–2043.

Fougere D., Nanda S., Clarke K., Kozinski J.A., Li K. (2016) Effect of acidic pretreatment on the chemistry and distribution of lignin in aspen wood and wheat straw substrates. Biomass. Bioenerg., 91: 56-68.

Huang Y., Ma E. and Zhao G. (2015) Thermal and structure analysis on reaction mechanisms during the preparation of activated carbon fibers by KOH activation from liquefied wood-based fibers. Ind. Crops. Prod., 69: 447-455.

Lynam L.G., Coronella C.J., Yan W., Reza M.T. and Vasquez V.R. (2011) Acetic acid and lithium chloride effects on hydrothermal carbonization of lignocellulosic biomass. Bioresour. Technol., 102: 6192–6199.

Madenoğlu T.G., Sağlam M., Yüksel M., Ballice L. (2016) Hydrothermal gasification of biomass model compounds (celluloseand lignin alkali) and model mixtures, J. Supercrit. Fluids., 115: 79–85.

Mosier N., Wyman C., Dale B., Elander R., Lee Y.Y., Holtzapple M. and Ladisch M. (2005) Features of promising technologies for pretreatment of lignocellulosic biomass. Bioresour. Technol., 96: 673–686.

Nitsos C.K., Choli-Papadopoulou T., Matis K.A. and Triantafyllidis K.S. (2016) Optimization of Hydrothermal Pretreatment of Hardwood and Softwood Lignocellulosic Residues for Selective Hemicellulose Recovery and Improved Cellulose Enzymatic Hydrolysis. ACS Sustainable Chem. Eng., 4 (9): 4529–4544.

Pabst T.M. and Carta G. (2007) pH transitions in cation exchange chromatographic columns containing weak acid groups. J. Chromatogr. A, 1142(1): 19-31.

Pandaa A.K., Mishraa B.G., Mishrac D.K. and Singha R.K. (2010) Effect of sulphuric acid treatment on the physico-chemical characteristics of kaolin clay. Colloids Surf. A Physicochem., 363: 98–104.

Ravindran R., Jaiswal A.K. (2016) A comprehensive review on pre-treatment strategy for lignocellulosic food industry waste: Challenges and opportunities. Bioresour. Technol., 199: 92–102.

Toufiq Reza M., Lynam J.G., Helal Uddin M. and Coronella C.J. (2013) Hydrothermal carbonization: Fate of inorganics. Biomass. Bioenerg., 49: 86-94.

Yan W.H., Duan P.G., Wang F. and Xu Y.P. (2016) Composition of the bio-oil from the hydrothermal liquefaction of duckweed and the influence of the extraction solvents. Fuel, 185: 229–235.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

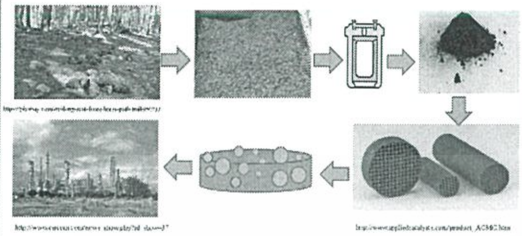
Influence of acidic catalysts in Hydrothermal Carbonization (HTC) process for synthesis of carbon nanomaterial prepared from horse manure

[1]College of Nanotechnology, King Mongkut's Institute of Technology, Ladkrabang, Bangkok Thailand
[2]The Joint Graduate School of Energy and Environment, King Mongkut's university of Technology Thonburi, Bangkok Thailand

Siwakron Sangnoi [1*], Sorakit wettayavong [1], Napat Kaewtrakulchai [2], Apiluck Eiad-Ua [1]

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

Introduction

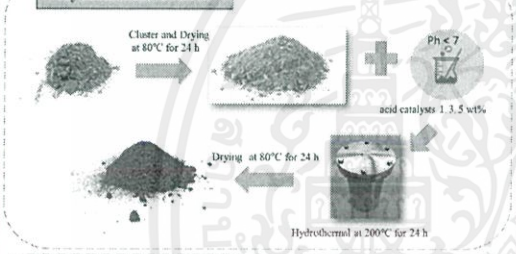


Object of this work

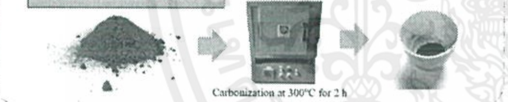
To study the effect of acid catalyst on the synthesis of carbon nanomaterial via hydrothermal carbonization process.

Experimental

Hydrothermal Process



Carbonization Process



Results and Discussion

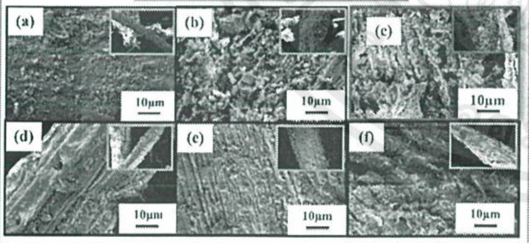


Fig. 1. Scanning Electron Microscope (SEM) of (a) (1000x) horse manure. (b) Carbon nanomaterial by hydrothermal at 200°C 24 h. (c) Carbon nanomaterial by hydrothermal at 200°C 24 h adding HCl 5 wt%. (d) H_2SO_4 5 wt%. (e) H_3PO_4 5 wt%. (f) HNO_3 5 wt%.

Carbon nanomaterial produced via hydrothermal at 200°C 24 h adding HCl 5 wt% has highest surface area. This is because of acid strength in one step dissociation of HCl and HNO_3 and 2 and 3 step dissociation of H_2SO_4 and H_3PO_4, respectively ($HCl > HNO_3 > H_2SO_4 > H_3PO_4$). The dissociation have positive charge leading to agglomerate of small particles. Therefore, carbon nanomaterial adding HCl have more porosity on surface than carbon nanomaterial treated by other acids

Condition	HT Char [wt%][a]			HTC Process [wt%][b]		
HM-200-24	68.37			59.54		
	1wt%	3wt%	5wt%	1wt%	3wt%	5wt%
HCl	52.52	51.51	51.44	77.31	75.36	74.75
H_2SO_4	80.13	78.22	76.04	74.75	73.28	73.05
H_3PO_4	82.54	81.40	81.40	72.39	73.52	75.14
HNO_3	65.95	66.44	65.81	76.64	79.66	76.81

Taber 1. Production yield of carbon nanomaterials resulting from the HTC of horse manure.
[a] Yield is defined as: Hydrochar by hydrothermal.
[b] Yield is defined as: carbon nanomaterial with carbonization at 300°C 2h.

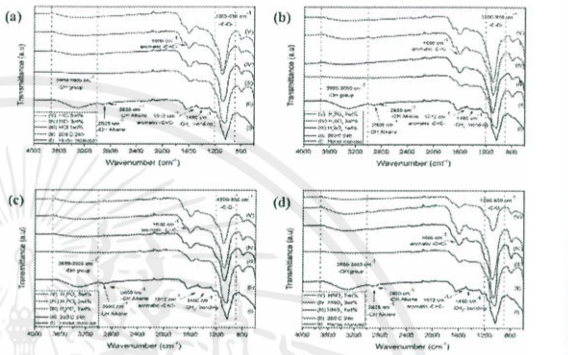


Fig. 2. FTIR spectra of horse manure and carbon nanomaterials synthesized from HTC process (a) Horse manure and carbon nanomaterial treated by HCl, (b) Horse manure and carbon nanomaterial treated by H_2SO_4 (c) Horse manure and carbon nanomaterial treated by H_3PO_4, (d) Horse manure and carbon nanomaterial treated by HNO_3 *With hydrothermal treatment, carbonized at 300°C 2h.

All functional groups of carbon nanomaterial adding acid catalyst were decreased with hydrothermal carbonization process. The band centered at 3,000-3,680 cm^{-1} corresponds to –OH group, the band at 2850 cm^{-1} to 2,925 cm^{-1} describes to –CH stretching, the band between 1,600 cm^{-1} - 1,512 cm^{-1} attributed to C=C group, the band at 1,460 cm^{-1} corresponds to $-CH_2-$ bending, the band between 1200-950 cm^{-1} describes to C-O group, respectively.

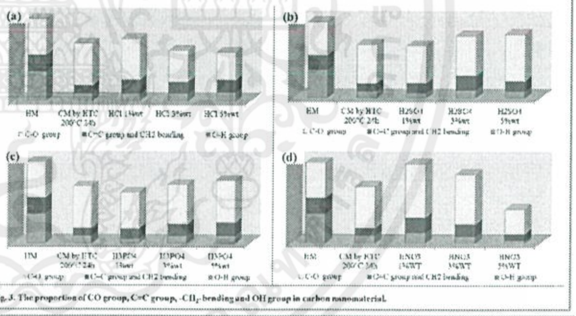


Fig. 3. The proportion of CO group, C=C group, $-CH_2-$ bending and OH group in carbon nanomaterial.

Conclusions

Carbon nanomaterial was significantly influenced from acid catalyst in HTC process. The surface morphology of carbon nanomaterial was controlled by HTC process parameter. The samples produced at 200°C for 24h adding HCl 5 wt% with carbonization at 300°C for 2h reveal a highest surface area. The production yield treated by HCl 5 wt% is approximately 51.44 wt%. FTIR spectrum confirm that the functional group of biomass polymer was decomposed. Therefore, the carbon content significantly increased. Carbon nanomaterial derived from horse manure could be a potential candidate as an alternative materials for several application.

Acknowledgment

The authors are thankful to the College of Nanotechnology, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang for supporting.

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

Name:	Sorakit Wettayavong
ชื่อ-นามสกุล	นายสรกิต เวทยาวงศ์
Date of Birth	Dec 16, 1993
วัน เดือน ปีเกิด	16 ธันวาคม 2536
Address	19/5 Moo. 11, Nong Khai sub-district, Nongkae district, Saraburi 18140
ที่อยู่	19/5หมู่11 ต.หนองไข่น้ำ อ.หนองแค จ.สระบุรี 18140
E-mail address	sorakitkaka@gmail.com
ประวัติการศึกษา	ระดับมัธยมศึกษา โรงเรียนหินกองวิทยาคม จังหวัดสระบุรี
ประวัติการฝึกงาน	ห้องปฏิบัติการวัสดุ ประยุกต์เซรามิกส์ศูนย์เทคโนโลยีโลหะแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ(สวทช.)
WORK EXPERIENCES:	National Metal and Materials Technology Center(MTEC), 130 Phaholyothin Rd., Klong, Klong Luang, Pathumthani 12120, Thailand

ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์

[1] Sorakit wettayavong , Siwakron Sangnoi, Napat Kaewtrakulchaib, Apiluck Eiad-Ua, **Characterization of carbon fibers from Thai horse manure via hydrothermal carbonization**, Materials Today, (2016) (Accepted)

[2] Siwakron Sangnoi , **Sorakit wettayavong** , Napat Kaewtrakulchai and Apiluck Eid-ua , **Influence ofacidic catalysts in Hydrothemal Carbonization (HTC) process for synthesis of carbon nanomaterial prepared from horse manure**, The Journal of Applied Science.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลงานที่ได้นำเสนอในที่ประชุมวิชาการ

[1] **สรกิต เวทยาวงศ์**,พรหมพร เรืองฉิม, ศิวกร สังข์น้อย, ปริภาค เรืองเทพ, นาวิน วิริยะเอี่ยมพิกุล และอภิลักษณ์ เอียดเอื้อ, นิภาวรรณ เฉลียวฉลาด,**หลังคากันความร้อนจากวัสดุนาโน** , การประกวดนวัตกรรมนาโนเทคโนโลยีระดับประเทศครั้งที่ 5 ระดับอุดมศึกษาและบุคคลทั่วไป 1-2 กันยายน 2557, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพฯ.

[2] Apiluck Eid-ua, Panuruj Asawaorait, **Sorakit wettayavong**, Promporn Reangchim, Siwakron Sangnoi, Paripark Ruangthep, Nipawan Chaleiwchalarh, Nawin Viriya-empikul, **Natural Kaolin/Carbon Nanocomposites for Roof Insulation Material**, 8th international Conferenceon Material Science and Technology, December 15-16th, 2014, Bangkok, Thailand(Poter Presentation).

[3] **Sorakit wettayavong** , Siwakron Sangnoi, Napat Kaewtrakulchaib, Apiluck Eiad-Ua, **Characterization of carbon fibers from Thai horse manure via hydrothermal carbonization,** The 5th Thailand International Nanotechnology Conference, 27 November, 2016, Nakhon Ratchasima, Thailand (Poster Presentation).

[4] Siwakron Sangnoi , **Sorakit wettayavong** , Napat Kaewtrakulchai and Apiluck Eid-ua , **Influence ofacidic catalysts in Hydrothemal Carbonization (HTC) process for synthesis of carbon nanomaterial prepared from horse manure**, Pure and Applied, Chemistry International Conference 2017 (PACCON2017), 2-3 February, 2017, Bangkok,Thailand (Poster Presentation)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

Name:	Siwakron Sangnoi
ชื่อ-นามสกุล	นายศิวกร สังข์น้อย
Date of Birth	Feb 19, 1995
วัน เดือน ปีเกิด	19 กุมภาพันธ์ 2538
Address	18 Moo.2, Nong Plamo sub-district, Nongkae district, Saraburi 18140
ที่อยู่	18 หมู่ 2 ต.หนองปลาหมอ อ.หนองแค จ.สระบุรี 18140
E-mail address	siwakron2538@gmail.com
ประวัติการศึกษา	ระดับมัธยมศึกษา โรงเรียนเฉลิมพระเกียรติ จังหวัดลพบุรี
ประวัติการฝึกงาน	ห้องปฏิบัติการวัสดุ ประยุกต์เซรามิกส์ศูนย์เทคโนโลยีโลหะแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ(สวทช.)
WORK EXPERIENCES:	National Metal and Materials Technology Center(MTEC), 130 Phaholyothin Rd., Klong, Klong Luang, Pathumthani 12120, Thailand

ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์

[1] Sorakit wettayavong , **Siwakron Sangnoi**, Napat Kaewtrakulchaib, Apiluck Eiad-Ua, **Characterization of carbon fibers from Thai horse manure via hydrothermal carbonization**, Materials Today, (2016) (Accepted)

[2] Siwakron Sangnoi , **Sorakit wettayavong** , Napat Kaewtrakulchai and Apiluck Eid-ua , **Influence ofacidic catalysts in Hydrothermal Carbonization (HTC) process for synthesis of carbon nanomaterial prepared from horse manure**, The Journal of Applied Science.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลงานที่ได้นำเสนอในที่ประชุมวิชาการ

[1] สรกิต เวทยาวงศ์,พรหมพร เรืองฉิม, **ศิวกร สังข์น้อย**, ปริภาค เรืองเทพ, นาวิน วิริยะเอี่ยมพิกุล แลอภิลักษณ์ เอียดเอื้อ, นิภาวรรณ เฉลียวฉลาด,**หลังคากันความร้อนจากวัสดุนาโน** , การประกวดนวัตกรรมนาโนเทคโนโลยีระดับประเทศครั้งที่ 5 ระดับอุดมศึกษาและบุคคลทั่วไป 1-2 กันยายน 2557, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพฯ.

[2] Apiluck Eid-ua, Panuruj Asawaorait, Sorakit wettayavong, Promporn Reangchim, **Siwakron Sangnoi**, Paripark Ruangthep, Nipawan Chaleiwchalarh, Nawin Viriya-empikul, **Natural Kaolin/ Carbon Nanocomposites for Roof Insulation Material**, 8th international Conference on Material Science and Technology, December 15-16th, 2014, Bangkok, Thailand(Poter Presentation).

[3] Sorakit wettayavong , **Siwakron Sangnoi**, Napat Kaewtrakulchaib, Apiluck Eiad-Ua, **Characterization of carbon fibers from Thai horse manure via hydrothermal carbonization,** The 5th Thailand International Nanotechnology Conference, 27-29 November, 2016, Nakhon Ratchasima, Thailand (Poster Presentation).

[4] **Siwakron Sangnoi** , Sorakit wettayavong , Napat Kaewtrakulchai and Apiluck Eid-ua , **Influence ofacidic catalysts in Hydrothemal Carbonization (HTC) process for synthesi of carbon nanomaterial prepared from horse manure**, Pure and Applied, Chemistry International Conference 2017 (PACCON2017), 2-3 February, 2017, Bangkok,Thailand (Poster Presentation).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้