

การเตรียมวัสดุแหล่งคาร์บอนจากกากกล้วยโดยกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล

เมธัส ขาญนิรุติ

TNI

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

บัณฑิตวิทยาลัย สาขาเทคโนโลยีวิศวกรรม

สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น

ปีการศึกษา 2556

PREPARATION OF CARBON SOURCE MATERIAL FROM BANANA PETIOLE USING
HYDROTHERMAL PROCESS

Methus Channirutti

TNI

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Engineering Technology

Graduate School

Thai-Nichi Institute of Technology

Academic Year 2013

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การเตรียมวัสดุแหล่งคาร์บอนจากกากกล้วย โดยกระบวนการ
ไฮโดรเทอร์มัล

โดย

เมธัส ชาญนิรุตติ

สาขาวิชา

เทคโนโลยีวิศวกรรม

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จินตวัฒน์ ไชยชนวงค์

บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัย
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(รองศาสตราจารย์ ดร. พิชิต สุขเจริญพงษ์)

วันที่เดือน.....พ.ศ.....

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(ดร. อภิสิทธิ์ เอียดเอื้อ)

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิภาวดี วงษ์สุวรรณ)

..... กรรมการ

(ดร. กรกฎ เหมสถาปัตย์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จินตวัฒน์ ไชยชนวงค์)

เมธัส ชาญนิตติ : การเตรียมวัสดุแหล่งคาร์บอนจากก้านกล้วยโดยกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จินตวัฒน์ ไชยชนะวงศ์, 80 หน้า.

งานวิจัยนี้ศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์ด้วยการไฮโดรเทอร์มัลคาร์บอนในเซชันของก้านกล้วย โดยทำการศึกษาผลกระทบจากปัจจัยของ ปริมาณน้ำตั้งต้น, อุณหภูมิในการไฮโดรเทอร์มัลคาร์บอนในเซชันและระยะเวลาในการไฮโดรเทอร์มัลคาร์บอนในเซชัน, ต่อปริมาณผลผลิต (Yield) ของวัสดุแหล่งคาร์บอน และศึกษาคุณสมบัติของวัสดุแหล่งคาร์บอนด้วย การวิเคราะห์พื้นที่ผิวและโครงสร้างรูพรุน ด้วยการทดสอบการดูดซับไนโตรเจน, การวิเคราะห์โครงสร้างพื้นผิวโดยเครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM), การวิเคราะห์องค์ประกอบทั่วไป (Proximate Analysis), การวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุ (Ultimate Analysis), จากนั้นนำผลิตภัณฑ์ที่มีคุณสมบัติที่ดีที่สุดไปทำการกระตุ้นเพื่อเพิ่มปริมาณพื้นที่ผิวและรูพรุนโดยการกระตุ้นด้วยไอน้ำ

จากการศึกษาพบว่า ปัจจัยหลักที่มีผลต่อปริมาณผลผลิตได้แก่ อุณหภูมิในการไฮโดรเทอร์มัลคาร์บอนในเซชันและระยะเวลาในการไฮโดรเทอร์มัลคาร์บอนในเซชัน สำหรับปัจจัยที่มีผลต่อโครงสร้างพื้นผิวได้แก่ อุณหภูมิในการไฮโดรเทอร์มัลคาร์บอนในเซชัน ระยะเวลาในการไฮโดรเทอร์มัลคาร์บอนในเซชันและปริมาณน้ำตั้งต้น และวัสดุแหล่งคาร์บอนที่ได้จากการไฮโดรเทอร์มัลคาร์บอนในเซชัน มีขนาดอนุภาคเล็กสุดประมาณ 1 ไมโครเมตร มีพื้นที่ผิวเท่ากับ $6.4 \text{ m}^2/\text{g}$ มีปริมาตรรูพรุนทั้งหมดเท่ากับ $0.007 \text{ cm}^3/\text{g}$ มีขนาดรูพรุนเฉลี่ยเท่ากับ 4.5 nm โดยมีรูพรุนขนาดเล็กที่สุดเท่ากับ 0.4 nm

TNI

บัณฑิตวิทยาลัย
สาขาวิชา เทคโนโลยีวิศวกรรม
ปีการศึกษา 2556

ลายมือชื่อนักศึกษา.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

METHUS CHANNIRUTTI : PREPARATION OF CARBON SOURCE MATERIAL FROM BANANA PETIOLE USING HYDROTHERMAL PROCESS. ADVISOR : ASST. PROF. DR. JINTAWAT CHAICHANAWONG, 80 PP.

In this study, the carbon source materials were synthesized by mean of the hydrothermal carbonization of banana petioles. The effect of water content, carbonization temperature, carbonization time on yield and characterization of the carbon source materials were investigated. The characterization of carbon source material was performed by using nitrogen adsorption for analyzed the porous and surface area, Scanning Electron Microscope (SEM), Proximate Analysis and Ultimate Analysis. The best of sample have been activated with steam activation

The results indicated carbonization temperature and carbonization time are the most important factors affecting yield of the carbon source materials. Carbonization temperature, carbonization time and water content are mainly factors affecting the morphology of the carbon source materials. The smallest particle size of carbon source materials were around 1 micrometer and have surface area about $6.4 \text{ m}^2/\text{g}$ porous volume about $0.007 \text{ cm}^3/\text{g}$ and smallest porous about 0.4 nm

TNI

Graduate School

Student's Signature.....

Field of Engineering of Technology

Advisor's Signature

Academic Year 2013

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้กระทำให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี อันเนื่องมาจากความกรุณาของ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จินตวัฒน์ ไชยชนะวงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ กรุณาเสียเวลาอันมีค่าของท่าน มาให้คำแนะนำและให้คำปรึกษาแนวทางและการพัฒนาในการทำวิจัย ตลอดจนสอนขั้นตอนการดำเนินวิจัยตลอดการทำงานวิจัยนี้

ขอขอบพระคุณ ดร.อภิสิทธิ์ เอียดเอื้อ (สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง) ที่กรุณาเสียสละเวลาให้คำปรึกษา อีกทั้งยังแนะนำแนวทางการส่งชื่ออุปกรณ์ทำวิจัยและความรู้ในเรื่องต่างๆ

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิภาวดี วงษ์สุวรรณ (สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น) ที่กรุณาเสียสละเวลาเป็นคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้

ขอขอบพระคุณ ดร.กรกฎ เหมสถาปัตย์ (สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น) ที่กรุณาเสียสละเวลาเป็นคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้

ขอขอบพระคุณ ดร.นาวิน วิริยะเอี่ยมพิกุล (ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ) ที่กรุณาให้ความรู้และคำปรึกษา การใช้เครื่องมือและอนุญาตให้ใช้เครื่องมือ Hydrothermal และได้รับความอนุเคราะห์ในการถ่ายภาพจากเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM)

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ศิริชัย พุฒวัฒนะ (สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น) ที่ให้ความอนุเคราะห์เตาเผาและเครื่องมือในการทำวิจัย

ขอขอบพระคุณ อาจารย์เดชะ ดันมีสุข (สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น) ที่ให้ความอนุเคราะห์เตาอบและเครื่องมือในการทำวิจัย

และท้ายที่สุดขอขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และครอบครัว ที่ให้โอกาสในการศึกษาและขอบคุณเพื่อนๆ อาจารย์ และผู้มีพระคุณทุกท่าน ทั้งผู้ที่กล่าวนามและไม่ได้กล่าวนามใน ณ ที่นี้ผู้เขียนมีความซาบซึ้งในความกรุณาอันดีจากทุกท่านและขอกราบขอบพระคุณมา ณ โอกาสนี้

เมธัส ชาญนิรุตติ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฌ
สารบัญรูป.....	ญ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	3
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	3
1.3 ขอบเขตการศึกษาและวิจัย.....	4
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
1.5 แผนการดำเนินงาน.....	5
2 หลักการพื้นฐาน เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	28
3 ระเบียบวิธีวิจัย.....	37
3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	37
4 ผลการวิจัยและการวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	44
4.1 ปริมาณผลผลิต (Yield) ของวัสดุแหล่งคาร์บอน.....	44
4.2 พื้นผิวโครงสร้างของวัสดุแหล่งคาร์บอน.....	48
4.3 การวิเคราะห์องค์ประกอบทั่วไปด้วยวิธี Proximate Analysis.....	56
4.4 การวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุด้วยวิธี Ultimate Analysis.....	56
4.5 การทดสอบการดูดซับไนโตรเจน.....	57

สารบัญ (ต่อ)

บทที่		หน้า
4	4.6 พฤติกรรมการเผาไหม้.....	57
5	สรุปผลการวิจัย.....	59
	5.1 ปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณผลผลิตของวัสดุแหล่งคาร์บอน.....	59
	5.2 ปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณผลผลิตของวัสดุแหล่งคาร์บอน.....	59
	5.3 สมบัติของผลิตภัณฑ์.....	60
	5.4 ข้อเสนอแนะ.....	61
	บรรณานุกรม.....	62
	ภาคผนวก.....	67
	ภาคผนวก ก. การถ่ายภาพโครงสร้างพื้นผิวด้วย Scanning Electron Microscope.....	68
	ภาคผนวก ข. การหาค่าความชื้น (Moisture content) ของวัตถุดิบ.....	74
	ภาคผนวก ค. ไอโซเทอมการดูดซับของก๊าซ.....	76
	ประวัติย่อผู้วิจัย.....	80

TNI

TAHITI - NICHI INSTITUTE OF TECHNOLOGY

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
1.1 แผนการดำเนินงาน.....	5
2.1 การเปรียบเทียบปฏิกิริยาที่สภาวะต่างๆ และอัตราการเกิดผลิตภัณฑ์สำหรับการ แปรรูปผลิตภัณฑ์ให้เป็นถ่านโดยกระบวนการเคมีความร้อน(Thermochemical)	7
2.2 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	34
3.1 การทดลองที่สภาวะต่างๆ.....	43
4.1 ปริมาณผลผลิตของวัสดุแหล่งคาร์บอนที่สภาวะต่างๆ	45
4.2 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของ วัสดุดิบตั้งต้นและวัสดุแหล่งคาร์บอน.....	56
4.3 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุของ วัสดุดิบตั้งต้นและวัสดุแหล่งคาร์บอน.....	56
ข-1 บันทึกผลการหาค่าความชื้นของวัสดุดิบ.....	75

TNI

TAH - NICHI INSTITUTE OF TECHNOLOGY

สารบัญรูป

รูป	หน้า
2.1 ตัวอย่างการแปรรูปชีวมวลกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลด้วยวิธีต่างๆ และผลิตภัณฑ์ ที่ได้.....	6
2.2 การเปลี่ยนแปลงของการจัดเรียงคาร์บอนอะตอมตามอุณหภูมิที่เผา.....	9
2.3 การเปรียบเทียบวัฏจักรคาร์บอนระหว่างสารชีวมวลและฟอสซิล.....	10
2.4 ตัวอย่างการแบ่งประเภทของสารชีวมวลในเชิงประยุกต์การใช้งาน.....	11
2.5 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการแปรรูปและลักษณะในการนำไปใช้งานต่างๆของถ่าน.....	13
2.6 กระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์.....	16
2.7 ขั้นตอนการผลิตถ่านกัมมันต์ด้วยวิธีการกระตุ้นทางเคมี.....	18
2.8 ขั้นตอนการผลิตถ่านกัมมันต์ด้วยวิธีการกระตุ้นทางกายภาพ.....	19
2.9 ไอโซเทอมการดูดซับ Type I – Type VI.....	28
3.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	37
3.2 ก้านกล้วย (กล้วยน้ำว้า).....	38
3.3 เตาอบรุ่น Redline RF115.....	38
3.4 Hydrothermal Chamber.....	39
3.5 เตาเผาอุณหภูมิสูง.....	39
3.6 ก้านกล้วยขนาด 0.5-1.0 เซนติเมตร.....	40
3.7 ก้านกล้วยหลังจากอบแห้งที่อุณหภูมิ 110 °C.....	40
4.1 ผลกระทบของอุณหภูมิในการไฮโดรเทอร์มัลต่อปริมาณผลผลิตที่ได้ของวัสดุแหล่ง คาร์บอน.....	46
4.2 ผลกระทบของเวลาในการไฮโดรเทอร์มัลต่อปริมาณผลผลิตที่ได้ของวัสดุแหล่ง คาร์บอน.....	47
4.3 ผลกระทบของปริมาณน้ำตั้งต้นต่อปริมาณผลผลิตที่ได้ของวัสดุแหล่งคาร์บอน.....	47
4.4 ลักษณะพื้นผิวของวัสดุแหล่งคาร์บอนจากการไฮโดรเทอร์มัลที่สภาวะ 200°C 4h 10ml.....	50
(ก) กำลังขยาย 500 เท่า.....	50
(ข) กำลังขยาย 1000 เท่า.....	50
(ค) กำลังขยาย 2500 เท่า.....	50

สารบัญรูป (ต่อ)

รูป	หน้า
4.5 ลักษณะพื้นผิวของวัสดุแหล่งคาร์บอนจากการไฮโดรเทอร์มัลที่สภาวะ 200°C 4h	
100ml.....	51
(ก) กำลังขยาย 500 เท่า.....	51
(ข) กำลังขยาย 1000 เท่า.....	51
(ค) กำลังขยาย 2500 เท่า.....	51
4.6 ลักษณะพื้นผิวของวัสดุแหล่งคาร์บอนจากการไฮโดรเทอร์มัลที่สภาวะ 240°C 2h	
10ml.....	52
(ก) กำลังขยาย 500 เท่า.....	52
(ข) กำลังขยาย 1000 เท่า.....	52
(ค) กำลังขยาย 2500 เท่า.....	52
(ง) กำลังขยาย 5000 เท่า.....	52
4.7 ลักษณะพื้นผิวของวัสดุแหล่งคาร์บอนจากการไฮโดรเทอร์มัลที่สภาวะ 240°C 4h	
10ml.....	53
(ก) กำลังขยาย 500 เท่า.....	53
(ข) กำลังขยาย 1000 เท่า.....	53
(ค) กำลังขยาย 2500 เท่า.....	53
(ง) กำลังขยาย 5000 เท่า.....	53
4.8 ลักษณะพื้นผิวของวัสดุแหล่งคาร์บอนจากการไฮโดรเทอร์มัลที่สภาวะ 240°C 8h	
10ml.....	54
(ก) กำลังขยาย 500 เท่า.....	54
(ข) กำลังขยาย 1000 เท่า.....	54
(ค) กำลังขยาย 2500 เท่า.....	54
(ง) กำลังขยาย 5000 เท่า.....	54

สารบัญรูป (ต่อ)

รูป	หน้า
4.9 ลักษณะพื้นผิวของวัสดุแหล่งคาร์บอนจากการไฮโดรเทอร์มัลที่สภาวะ 240°C 8h	
100ml.....	55
(ก) กำลังขยาย 500 เท่า.....	55
(ข) กำลังขยาย 2500 เท่า.....	55
(ค) กำลังขยาย 5000 เท่า.....	55
(ง) กำลังขยาย 10000 เท่า.....	55
4.10 ขนาดและการกระจายตัวของรูพรุนของวัสดุแหล่งคาร์บอนจากก้านกล้วย.....	58
4.11 ไอโซเทอมการดูดซับไนโตรเจนที่อุณหภูมิ -196 °C ของวัสดุแหล่งคาร์บอนจากก้านกล้วย.....	58
ก-1 แปะคอปเปอร์เทปกับแท่นวาง.....	69
ก-2 แปะคอปเปอร์เทปกับแท่นวาง.....	70
ก-3 นำตัวอย่างวางบนคอปเปอร์เทป.....	70
ก-4 โค้ทตัวอย่างด้วยทอง.....	71
ก-5 โค้ทตัวอย่างด้วยทอง.....	71
ก-6 นำตัวอย่างใส่เข้าเครื่อง.....	72
ก-7 ปรับกำลังขยายและโฟกัสให้เหมาะสม.....	72
ก-8 ปรับกำลังขยายและโฟกัสให้เหมาะสม.....	73
ค-1 ผสมวัสดุติดกับน้ำกลั่น (DI water).....	77
ค-2 ผสมน้ำกับวัสดุติดให้เข้ากัน.....	77
ค-3 นำวัสดุติดใส่ใน Hydrothermal Chamber.....	78
ค-4 ทำการไฮโดรเทอร์มัลด้วยเตาเผาอุณหภูมิสูง.....	78
ค-5 Cooling down Hydrothermal Chamber ด้วยน้ำแข็ง.....	79
ค-6 อบตัวอย่างให้แห้งในเตาอบ ที่อุณหภูมิ 80 °C.....	79

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

วัสดุชีวมวล (Biomass) หมายถึง วัสดุหรือสสารที่ได้จากสิ่งมีชีวิตไม่ว่าจะเป็น มนุษย์ สัตว์ หรือพืช เช่น ชานอ้อย ชังข้าวโพด ฟางข้าว ก้านกล้วย แกลบและผักตบชวา เป็นต้น โดยส่วนใหญ่แล้ววัสดุชีวมวลมักได้มาจากพืช ในประเทศไทยมีวัสดุชีวมวลเหลือใช้จากพืชหลายชนิดด้วยกัน เช่น แกลบ ชานอ้อย กากปาล์ม ชังข้าวโพด เป็นต้น เนื่องจากประชากรในประเทศไทยมีการเพาะปลูกหรือทำการเกษตรกันอย่างแพร่หลาย ส่งผลให้มีวัสดุชีวมวลที่เหลือใช้จากการแปรรูปทางการเกษตรหรือหลังจากการเก็บเกี่ยวมีอยู่ในปริมาณมาก วัสดุชีวมวลเหลือใช้เหล่านี้สามารถนำมาแปรรูปเพื่อให้เกิดประโยชน์ได้หลากหลายต่างกันไปตามคุณสมบัติของวัสดุชีวมวลแต่ละชนิด ปัจจุบันในประเทศไทยมีการนำชีวมวลเหลือใช้มาแปรรูปเพื่อให้นำไปใช้ให้เกิดประโยชน์อย่างมากมาย เช่น แกลบนำไปเป็นเชื้อเพลิงหรือช่วยในการปรับสภาพดิน ฟางข้าวนำไปเป็นอาหารสัตว์ ชานอ้อยนำไปใช้เป็นอาหารสัตว์ [1] แม้ว่าในปัจจุบันจะมีการรณรงค์ให้มีการใช้พลังงานหมุนเวียน หรือพลังงานทดแทน โดยการนำวัสดุชีวมวลเหลือใช้มาทำให้เกิดประโยชน์หรือแปรรูปเป็นพลังงาน แต่ก็ยังมีวัสดุชีวมวลเหลือใช้ที่ไม่ได้นำมาใช้ให้เกิดประโยชน์อีกเป็นจำนวนมาก นอกจากเป็นการสูญเสียทรัพยากรทางธรรมชาติแล้ว ยังเป็นการสูญเสียเงินทุนเพื่อนำมากำจัดวัสดุชีวมวลเหล่านี้อีกด้วย

ในประเทศไทยมีการปลูกกล้วยกันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากกล้วยเป็นพืชที่ปลูกได้ง่าย มีการเจริญเติบโตและขยายพันธุ์เร็ว สามารถปลูกได้ในดินแทบทุกชนิด ต้นกล้วยที่โตเต็มที่จะมีจำนวนก้านใบประมาณ 15-20 ก้าน ขึ้นอยู่กับสายพันธุ์และความอุดมสมบูรณ์ของพื้นที่ที่เพาะปลูกนั้นๆ กล้วยขยายสายพันธุ์โดยใช้หน่อ และสามารถขยายสายพันธุ์ได้ในทุกฤดูกาล แต่จะสามารถขยายสายพันธุ์และเจริญเติบโตได้ดีในฤดูฝน ในพื้นที่เพาะปลูกที่อุดมสมบูรณ์กล้วยสามารถแตกใบให้ผลผลิตได้ตลอดปี สำหรับการปลูกกล้วยในเชิงพาณิชย์จะต้องทำการล้มต้นหลังจากที่กล้วยออกผลเต็มที่แล้ว ซึ่งเศษซากของลำต้นและก้านที่เหลือในปัจจุบันนิยมนำไปเป็นส่วนผสมเพื่อใช้เป็นอาหารสัตว์ [2]

ในปัจจุบันมีการศึกษาวิจัยการนำวัสดุชีวมวลเหลือใช้มาแปรรูปเป็นแหล่งคาร์บอน (Carbon Source) เพื่อใช้เป็นสารตั้งต้นในการพัฒนาวัสดุเพื่อประโยชน์หลายด้าน เช่น ตัวดูดซับ ตัวเก็บพลังงาน เชื้อเพลิงและพลังงานอย่างแพร่หลาย โดยมีวิธีในการแปรรูปต่างกันไป ขึ้นอยู่กับชนิดและคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ เช่น

1.1.1 การแปรรูปวัสดุชีวมวลเป็นถ่าน (Carbonization) ด้วยกระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis) ที่จะได้ผลิตภัณฑ์ในรูปของถ่าน ที่เป็นของแข็งมากกว่าน้ำมัน การคาร์บอนไนเซชันเป็นการเพิ่มปริมาณคาร์บอนให้สูงขึ้น โดยการเผาที่อับอากาศไม่มีออกซิเจนที่อุณหภูมิ 200–500 °C ทำให้โครงสร้างของผลิตภัณฑ์มีรูพรุน โดยทำให้เกิดการแตกตัวทางเคมีของสารที่ไม่ใช่คาร์บอน (เช่น ไฮโดรเจน ออกซิเจน ไนโตรเจน) ออกมาในรูปของก๊าซ [3]

1.1.2 การแปรรูปวัสดุชีวมวลเป็นเชื้อเพลิง โดยจะแบ่งเป็น 2 วิธีคือ การเผาไหม้โดยตรง (Direct combustion) และกระบวนการเคมีความร้อน (Thermo-Chemical Conversion) สำหรับวิธีการเผาไหม้โดยตรงจะนำวัสดุชีวมวลมาใช้เป็นเชื้อเพลิงโดยไม่ผ่านกระบวนการแปรรูปใดๆ โดยการนำวัสดุชีวมวลมาเผาไหม้ในเตาเผาที่ออกแบบเฉพาะให้มีความเหมาะสมกับประเภทเชื้อเพลิง จากนั้นจึงนำความร้อนจากปฏิกิริยาการเผาไหม้ไปใช้ในการผลิตไอน้ำสำหรับใช้ในกระบวนการผลิต หรือใช้ผลิตไฟฟ้า ส่วนวิธีการกระบวนการเคมีความร้อนเป็นการนำวัสดุชีวมวลมาใช้เป็นเชื้อเพลิงโดยกระบวนการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ โดยเปลี่ยนแปลงสถานะให้เป็นก๊าซ (Gasification) ซึ่งจะได้ผลิตภัณฑ์คือก๊าซที่เป็นเชื้อเพลิงเช่น คาร์บอนมอนอกไซด์ มีเทน และ ไฮโดรเจน [4]

1.1.3 การแปรรูปวัสดุชีวมวลโดยใช้วิธีไฮโดรเทอร์มัล กระบวนการไฮโดรเทอร์มัลเป็นกระบวนการเคมีความร้อน (Thermo-Chemical Conversion) ชนิดหนึ่ง โดยใช้น้ำหรือตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดอื่นเป็นตัวกลางในการทำปฏิกิริยา อุณหภูมิของกระบวนการจะอยู่ในช่วง 180-250 °C ซึ่งกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้หลากหลายวิธีและจะให้ผลิตภัณฑ์ที่แตกต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ สำหรับปัจจัยที่มีผลต่อผลิตภัณฑ์ได้แก่ วัตถุดิบตั้งต้น อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาและปริมาณความชื้น ข้อดีของวิธีนี้คือ โดยทั่วไปวัสดุชีวมวลที่จะนำมาแปรรูปจากพืชนั้นจะมีความชื้นอยู่ในตัว ซึ่งก่อนทำการแปรรูปจำเป็นต้องนำวัสดุชีวมวลเหล่านั้นมากำจัดความชื้นเสียก่อนโดยอาจทำการอบไล่ความชื้น หรือนำไปตากแดดจนแห้ง จึงจะสามารถนำไปสู่กระบวนการต่อไปได้ ซึ่งจะเป็นการเสียเวลา แต่สำหรับเทคนิคการแปรรูปด้วยวิธีการไฮโดรเทอร์มัลนั้นสามารถนำวัสดุชีวมวลเหล่านั้นมาเข้าสู่กระบวนการได้ทันที เนื่องจากกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลจะใช้น้ำเป็นตัวกลางในการทำปฏิกิริยา จึงเป็นกระบวนการที่ปราศจากสารพิษ เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม มีราคาไม่สูง และกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลจะให้ปริมาณอัตราส่วนของผลผลิตคาร์บอนมากกว่าวิธีการเผาโดยทั่วไปอีกด้วย [5,6]

แหล่งคาร์บอนที่ได้จากการแปรรูปสามารถนำมากระตุ้น (Activation) เพื่อเป็นการปรับปรุงเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับหรือเพิ่มขนาดพื้นที่ผิวให้มากขึ้น การกระตุ้นสามารถทำได้หลาย

วิธีซึ่งประสิทธิภาพจะขึ้นอยู่กับลักษณะและชนิดของวัตถุดิบและปัจจัยอื่นๆร่วมด้วย สามารถแบ่งวิธีการกระตุ้นตามกลไกได้สองวิธีได้แก่

1.1.4 การกระตุ้นทางเคมี โดยวิธีการนี้จะต้องนำวัสดุชีวมวลมาทำเข้าสู่กระบวนการทำให้เป็นคาร์บอน (Carbonization) แล้วจึงนำมากระตุ้นด้วยปฏิกิริยาทางเคมีเพื่อทำการปรับปรุงโครงสร้างของถ่านกัมมันต์ ข้อดีของวิธีนี้คือใช้อุณหภูมิไม่สูงมากประมาณ 400-600 °C แต่มีข้อเสียคือมีสารเคมีตกค้างในถ่านกัมมันต์ ทำให้ต้องเสียเวลา และมีค่าใช้จ่ายในการล้างสารเคมีออกเพิ่มขึ้น รวมทั้งเครื่องมือที่ใช้ต้องเป็นชนิดพิเศษที่สามารถทนทานการกัดกร่อนได้

1.1.5 การกระตุ้นทางกายภาพ เป็นการผลิตถ่านกัมมันต์โดยผิวคาร์บอนเกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ เป็นการเพิ่มความสามารถในการดูดซับของถ่านให้สูงขึ้น นิยมใช้ก๊าซออกซิไดซ์ต่างๆ เช่น ไอน้ำอิ่มตัวยิ่งยวด (Steam) ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ก๊าซออกซิเจน (O_2) และอากาศ (Air) เป็นต้น โดยจะใช้อุณหภูมิช่วง 700-1200 °C จะมีข้อดีและข้อเสียคือ ไม่มีสารตกค้างในผลิตภัณฑ์แต่จะต้องใช้อุณหภูมิที่ค่อนข้างสูง [3]

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นไปที่การใช้เทคนิคไฮโดรเทอร์มัลในการแปรรูปวัสดุชีวมวล เพื่อศึกษาผลกระทบของกระบวนการที่มีผลต่อปริมาณผลผลิต (Yield) และองค์ประกอบโครงสร้างของผลิตภัณฑ์ที่ได้ โดยทำการศึกษาพฤติกรรมคาร์บอนในเซชันของวัสดุชีวมวลในสถานะที่ต่างกันออกไป และนำผลิตภัณฑ์ตัวอย่างมาทดลองทำการกระตุ้นด้วยไอน้ำเพื่อศึกษาผลกระทบของการกระตุ้นด้วยไอน้ำ วัสดุชีวมวลที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้คือ ก้านกล้วย เนื่องจากประเทศไทยมีการปลูกกล้วยกันอย่างแพร่หลาย ทั้งในเชิงพาณิชย์ และตามครัวเรือนทั่วไป ก้านกล้วยจึงเป็นวัตถุดิบที่สามารถหาได้ง่าย และไม่ส่งผลกระทบต่อการนำไปแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ชนิดอื่นๆ เนื่องจากในปัจจุบันก้านกล้วยมีขอบเขตในการนำไปใช้งานที่ค่อนข้างจำกัด

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

เพื่อศึกษาผลกระทบจากปัจจัยในการแปรรูปก้านกล้วยซึ่งเป็นวัสดุชีวมวลเหลือใช้ (Biomass) ให้เป็นแหล่งคาร์บอน (Carbon Source) โดยกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล (Hydrothermal Process) โดยปัจจัยที่ทำการศึกษาได้แก่ อุณหภูมิในการไฮโดรเทอร์มัล ระยะเวลาในการไฮโดรเทอร์มัลและปริมาณน้ำตั้งต้นในการไฮโดรเทอร์มัล

1.3 ขอบเขตการศึกษาและวิจัย

1.3.1 ศึกษาผลกระทบสภาวะของกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลได้แก่ อุณหภูมิ ความชื้น เวลาในการทำปฏิกิริยา ต่อปริมาณผลผลิต (Yield) และ องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ที่ได้

1.3.2 ศึกษาผลกระทบของการกระตุ้นแหล่งคาร์บอนจากกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลต่อ สมบัติของผลิตภัณฑ์ที่ได้ด้วยไอน้ำ

1.3.3 กำหนดสภาวะการศึกษาดังนี้

1.3.3.1 ช่วงอุณหภูมิในการไฮโดรเทอร์มัลที่ทำการศึกษา ช่วง 180-240 °C

1.3.3.2 ปริมาณน้ำตั้งต้นในการไฮโดรเทอร์มัลที่ทำการศึกษา ช่วง 0-500% โดย น้ำหนัก

1.3.3.3 เวลาในการทำปฏิกิริยาไฮโดรเทอร์มัล 2-8 ชั่วโมง

1.3.3.4 ช่วงอุณหภูมิในการกระตุ้นด้วยไอน้ำ 700 °C

1.3.3.5 เวลาในการกระตุ้นด้วยไอน้ำ 2 ชั่วโมง

1.3.3.6 สมบัติเฉพาะของผลิตภัณฑ์

- วิเคราะห์โครงสร้างพื้นผิวโดยเครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

- วิเคราะห์องค์ประกอบทั่วไป (Proximate Analysis)

- ร้อยละความชื้น

- ร้อยละปริมาณสารระเหย

- ร้อยละปริมาณเถ้า

- ร้อยละคาร์บอนคงตัว

- วิเคราะห์องค์ประกอบด้วยวิธี (Ultimate Analysis)

- ร้อยละคาร์บอน

- ร้อยละไฮโดรเจน

- ร้อยละไนโตรเจน

- ร้อยละซัลเฟอร์

- วิเคราะห์โครงสร้างรูพรุนและพื้นที่ผิวจำเพาะโดยการทดสอบการดูดซับ

N₂

ทราบสภาวะที่เหมาะสมในการแปรรูปกากกล้วยซึ่งเป็นวัสดุชีวมวลเหลือใช้ (Biomass) ให้เป็นวัสดุแหล่งคาร์บอน (Carbon Source) โดยกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล (Hydrothermal Process)

ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินงาน

[illegible]

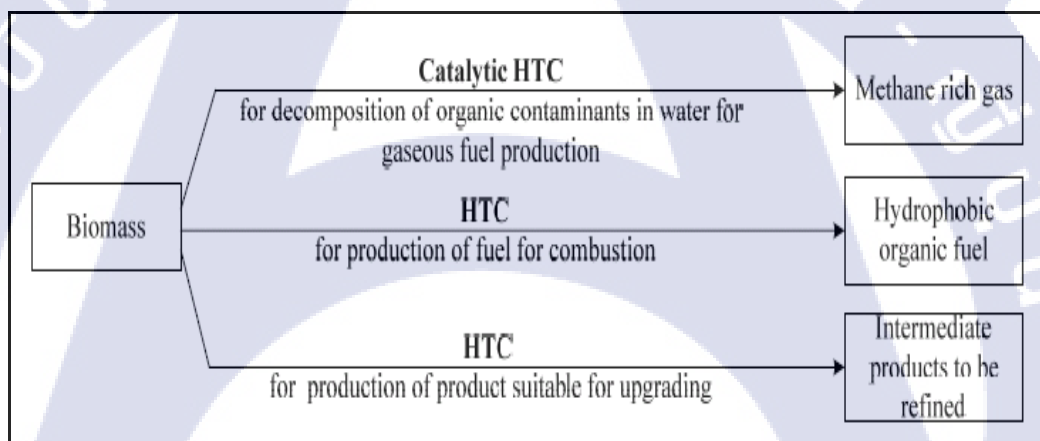
บทที่ 2

หลักการพื้นฐาน เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1.1 ไฮโดรเทอร์มัล (Hydrothermal)

กระบวนการไฮโดรเทอร์มัลเป็นกระบวนการเคมีความร้อน (Thermo-Chemical Conversion) ชนิดหนึ่ง โดยใช้น้ำเป็นตัวกลางในการทำปฏิกิริยาการแปรรูปวัสดุชีวมวล ซึ่งกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้หลากหลายวิธีและสามารถให้ผลิตภัณฑ์ที่แตกต่างกันออกไปตามความต้องการ เช่น ผลิตภัณฑ์ในรูปของก๊าซมีเทน เชื้อเพลิงในการเผาไหม้จากธรรมชาติ หรือ ผลิตภัณฑ์ที่สามารถนำไปพัฒนาเพื่อใช้ในด้านอื่นๆ ตามความเหมาะสม ดังรูปที่ 2.1 โดยสามารถเลือกที่จะใช้หรือไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาก็ได้ ขึ้นอยู่กับผลิตภัณฑ์หรือกระบวนการที่ต้องการ



รูปที่ 2.1 ตัวอย่างการแปรรูปชีวมวลกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลด้วยวิธีต่างๆ และผลิตภัณฑ์ที่ได้ [6]

สำหรับกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลนั้น ระหว่างการทำปฏิกิริยาจะนำวัสดุชีวมวลที่อยู่ในรูปของแข็งมาแช่อยู่ในน้ำ ซึ่งกระบวนการจะอยู่ในสถานะของเหลว และจะปล่อยให้ความดันเพิ่มสูงขึ้นในเตาปฏิกรณ์ความดันสูง เมื่อกระบวนการมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นสูงถึงประมาณ 220 °C ที่ความดันประมาณ 20 Bar จะเกิดก๊าซขึ้นประมาณ 1-5% และสารอินทรีย์เกือบทั้งหมดจะเปลี่ยนรูปอยู่ในสถานะของแข็ง เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นถึงประมาณ 400 °C โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจะได้ผลิตภัณฑ์ Liquid Hydrocarbons และก๊าซเพิ่มมากขึ้น ซึ่งจะเรียกกระบวนการนี้ว่า “Hydrothermal Liquefaction” และเมื่อปล่อยให้อุณหภูมิและความดันเพิ่มสูงขึ้นไปเรื่อยๆ ถึง Supercritical state จะได้ผลิตภัณฑ์หลักที่เป็นก๊าซ เรียกกระบวนการนี้ว่า “Hydrothermal Gasification” การเปรียบเทียบปฏิกิริยาที่

สภาวะต่างๆ และสัดส่วนของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากการแปรรูปผลิตภัณฑ์ให้เป็นถ่านโดยกระบวนการเคมีความร้อน (Thermo-Chemical) แสดงดังตารางที่ 2.1 [7]

ตารางที่ 2.1 การเปรียบเทียบปฏิกิริยาที่สภาวะต่างๆ และอัตราการเกิดผลิตภัณฑ์สำหรับการแปรรูปผลิตภัณฑ์ให้เป็นถ่านโดยกระบวนการเคมีความร้อน (Thermo-Chemical) [5]

Process	Reaction conditions (temperature [°C]; vapor residence time)	Product distribution (weight %)		
		Char	Liquid	Gas
Pyrolysis: slow	~400; h-week	0	30	35
Pyrolysis intermediate	~500; ~10-20 s	0	50	30
Pyrolysis: fast	~500; ~1 s	2	75	13
Gasification	~800; ~10-20 s	0	5	85
HTC	~180-250; no vapor residence time, ~1-12 h processing time	0-80	5-20% (dissolved in process water, TOC)	2-5

2.1.2 ผลกระทบจากปัจจัยต่างๆในการคาร์บอนเซชัน

ในการคาร์บอนเซชัน ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อผลิตภัณฑ์ที่สำคัญแบ่งเป็น 2 ปัจจัยด้วยกัน คือ ปัจจัยทางเคมี ได้แก่องค์ประกอบต่างๆของสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ที่มีในชีวมวลแต่ละชนิดที่มีคุณสมบัติแตกต่างกันออกไป และปัจจัยทางกายภาพได้แก่ อุณหภูมิ ระยะเวลา และอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ ซึ่งปัจจัยเหล่านี้เป็นปัจจัยที่สำคัญต่อผลกระทบในการคาร์บอนเซชันวัสดุชีวมวลโดยอธิบายลายละเอียดได้ดังนี้

2.1.2.1 องค์ประกอบของวัสดุชีวมวล

วัสดุชีวมวลเป็นวัสดุซับซ้อนไม่เป็นเนื้อเดียวกัน ซึ่งพืชแต่ละชนิดจะมีโครงสร้างและองค์ประกอบที่แตกต่างกันไปตามสัดส่วนต่างๆตามลักษณะของพืชชนิดนั้นๆ ซึ่งองค์ประกอบหลักของพืชได้แก่ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน องค์ประกอบเหล่านี้จะคุณสมบัติทางความร้อนที่แตกต่างกันออกไป มีการสลายตัวและเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีในช่วงอุณหภูมิที่แตกต่างกันส่งผลให้ ปริมาณสัดส่วนและลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความแตกต่างกันออกไป โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้จะอยู่ในรูปของ ของแข็ง (Char) ของเหลว (Tar) และก๊าซ (Gas)

ซึ่งจากงานวิจัยก่อนหน้านี้พบว่าวัสดุชีวมวลที่มีปริมาณสัดส่วนลิกนินในองค์ประกอบที่น้อยและมีปริมาณสัดส่วนเซลลูโลสในองค์ประกอบที่มาก มีแนวโน้มที่จะคาร์บอนในเซชันได้ดี เนื่องจากลิกนินมีหน้าที่ในการเสริมสร้างความแข็งแรงให้กับโครงสร้างผนังเซลล์ของพืช ดังนั้นพืชที่มีปริมาณลิกนินที่น้อยจะมีการสลายตัวขององค์ประกอบได้ง่ายกว่าพืชที่มีปริมาณลิกนินที่มาก

2.1.2.2 ปัจจัยด้านอุณหภูมิ

ช่วงอุณหภูมิมีผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงทางองค์ประกอบและทางปริมาณของผลผลิตที่ได้ ซึ่งจากงานวิจัยของ Zhengang Liu และคณะได้กล่าวไว้ว่า เซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสจะสลายตัวเกือบทั้งหมดที่อุณหภูมิไม่เกิน 250°C [8] โดยการสลายตัวในช่วงอุณหภูมิต่างๆจะมีการสลายตัวขององค์ประกอบในวัสดุชีวมวลที่แตกต่างกันไป กระบวนการคาร์บอนในเซชันเป็นการกลั่นสลายของสารอินทรีย์เพื่อเพิ่มปริมาณสัดส่วนของคาร์บอนของวัสดุชีวมวล ขณะเดียวกันก็ได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวและแก๊สออกมาด้วย โดยจะเกิดการสลายตัวในบริเวณที่มีพันธะที่ไม่แข็งแรงหรือหมู่ที่หลุดออกได้ง่ายทำให้กลุ่มโมเลกุลวงแหวนแตกออกจากกันเป็นกลุ่มๆ เป็นจำนวนมาก โครงสร้างวงแหวนอะโรมาติกหลักที่เหลือนกลายเป็นโครงสร้างของถ่าน (Char) ซึ่งการจัดเรียงตัวของคาร์บอนอะตอมจะเปลี่ยนไปตามช่วงของอุณหภูมิที่ใช้ ดังรูปที่ 2.2 เมื่อเพิ่มอุณหภูมิของการคาร์บอนในเซชัน เป็นผลให้ปริมาตรทั้งหมดของรูพรุนที่เกิดขึ้นในชั้นแรกของการคาร์บอนในเซชันลดลงและเม็ดถ่านมีความแข็งมากขึ้น อย่างไรก็ตามพบว่าถ่าน(Char) ที่ได้จากการคาร์บอนในเซชันที่อุณหภูมิ 300°C มีความว่องไวในการทำปฏิกิริยาน้อยกว่าถ่านที่ได้จากการคาร์บอนในเซชันที่อุณหภูมิ 600°C ซึ่งความว่องไวในการทำปฏิกิริยาจะลดลงเมื่อค่าคาร์บอนคงตัวลดลง [3]

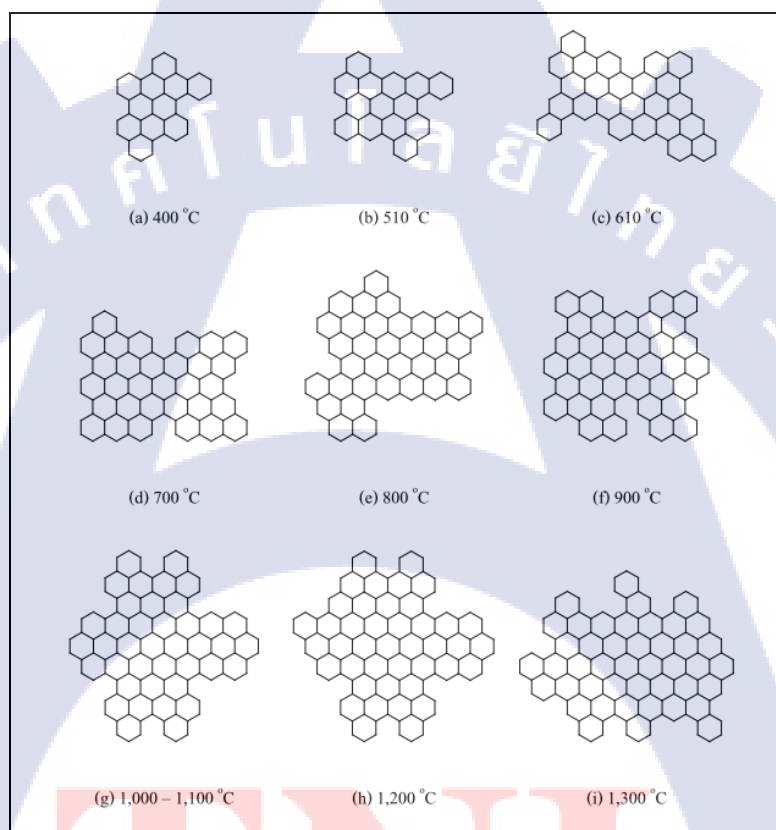
2.1.2.3 ปัจจัยด้านระยะเวลา

เวลาที่วัสดุชีวมวลใช้ในการคาร์บอนในเซชันต้องนานพอเพื่อที่จะได้เกิดการคาร์บอนในเซชันได้อย่างสมบูรณ์ หากใช้เวลาน้อยเกินไปการสลายตัวขององค์ประกอบต่างๆที่จะสลายตัวเป็นคาร์บอนของวัสดุชีวมวลอาจยังสลายตัวได้ไม่สมบูรณ์ หรือหากใช้เวลามากเกินไปอาจทำให้ผลิตภัณฑ์มีปริมาณเถ้าที่เพิ่มขึ้น และมีปริมาณค่าคาร์บอนคงตัว ปริมาณสารระเหย ที่ลดลงได้ [9] ดังนั้นควรเลือกใช้ระยะเวลาให้เหมาะสมกับชนิดของวัตถุดิบที่เลือกใช้ เนื่องจากวัสดุชีวมวลแต่ละชนิดมีองค์ประกอบและความแข็งแรงของโครงสร้างที่แตกต่างกันออกไป

2.1.2.4 ปัจจัยด้านอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ

ผลกระทบของอัตราการเพิ่มอุณหภูมิเป็นตัวแปรที่สำคัญต่อปริมาณและองค์ประกอบของสารระเหยที่ได้จากการคาร์บอนในเซชัน แต่เดิมสภาวะในการให้ความร้อนถูกแบ่งด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิประมาณ 20 องศาเซลเซียสต่อวินาที ซึ่งเป็นช่วงที่ทำให้เกิดการปลดปล่อยและสลายตัวของสารระเหยอย่างรวดเร็ว ถ้าอัตราการให้ความร้อนสูงปริมาณสารระเหยจะถูกปลดปล่อย

และสลายตัวได้อย่างรวดเร็ว ซึ่งส่งผลได้ผลิตภัณฑ์ที่มีรูพรุนขนาดใหญ่ และมีความว่องไวในการทำปฏิกิริยาที่สูงกว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการเพิ่มอุณหภูมิด้วยอัตราที่ต่ำกว่า เนื่องจากถ่านที่ได้จากการคาร์บอนเซชันด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิสูง คาร์บอนจะมีการเรียงตัวกันเป็นระเบียบน้อย ทำให้เกิดช่องว่างที่เป็นรูพรุนขนาดใหญ่จำนวนมาก เมื่อนำผลิตภัณฑ์ไปกระตุ้นด้วยปฏิกิริยากระตุ้น ตัวกระตุ้นจะเข้าไปทำปฏิกิริยาได้ง่าย แต่หากต้องการผลิตภัณฑ์ที่มีขนาดรูพรุนเล็ก และมีการเรียงตัวที่เป็นระเบียบมากขึ้นควรใช้อัตราการเพิ่มอุณหภูมิที่ต่ำกว่า



รูปที่ 2.2 การเปลี่ยนแปลงของการจัดเรียงคาร์บอนอะตอมตามอุณหภูมิที่เผา

2.1.3 วัสดุชีวมวล [10]

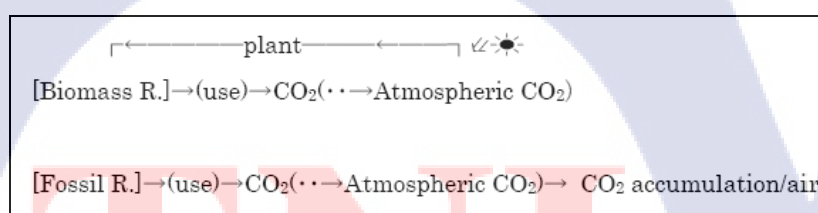
คู่มือสารชีวมวลเอเชียใต้ให้นิยามวัสดุชีวมวลไว้ว่า โดยทั่วไปวัสดุชีวมวลคือสารที่ได้มาจากพืชทั้งทางตรงและทางอ้อมซึ่งถูกนำไปใช้เป็นพลังงานหรืออื่นๆ ในปริมาณมาก นอกจากนี้วัสดุชีวมวลยังรวมไปถึง สิ่งปฏิกูลและของเสียจากสัตว์ ตลอดจนของเสียจากกระบวนการผลิตทางอุตสาหกรรม คำว่า “วัสดุชีวมวล” ปรากฏครั้งแรกในสิ่งตีพิมพ์ในวารสารสมาพันธ์ชีวภาพทางทะเล โดยนักวิทยาศาสตร์ชาวรัสเซียชื่อ Bogorov ซึ่งเขาได้ชั่งน้ำหนักแพลงตอนทะเล (Calanus

Finmarchicus) หลังจากทำให้แห้งเพื่อการศึกษาการเปลี่ยนแปลงการเจริญเติบโตของแพลงตอนตามฤดูกาล โดยเรียกแพลงตอนแห้งนี้ว่าเป็นวัสดุชีวมวล

วัสดุชีวมวลเป็นแหล่งพลังงานที่มีการหมุนเวียนไม่มีวันหมด ดังนั้นพลังงานที่ได้จากวัสดุชีวมวลจึงเป็นพลังงานทดแทนที่ไม่มีวันหมด ปัจจุบันมีการใช้งานจากพลังงานชีวมวลกันอย่างแพร่หลาย และจากรายงานพบว่า ปริมาณการใช้พลังงานชีวมวลในอนาคตมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นจึงต้องมีการจัดการการใช้พลังงานชีวมวลเพื่อให้เพียงพอต่อใช้งานและตลอดจนเพื่อการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อมด้วย

สารชีวมวลนั้นมีคุณสมบัติทางเคมี ทางกายภาพ ความชื้น และคุณสมบัติอื่นๆ ที่แตกต่างกันออกไป ซึ่งทำให้การที่จะแปรรูปสารชีวมวลไปเป็นพลังงานนั้น จะใช้วิธีที่แตกต่างกัน นักวิจัยจึงต้องศึกษาและพัฒนาเทคโนโลยีการแปรรูปวัสดุชีวมวลให้เป็นพลังงานชีวมวล เพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุด และไม่เป็นการทำลายสิ่งแวดล้อม เพื่อลดการใช้เชื้อเพลิงพลังงานและลดการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ ตลอดจนเป็นการกระตุ้นเศรษฐกิจทางการเกษตรอีกด้วย

คุณสมบัติพิเศษของสารชีวมวล แหล่งกำเนิดของสารชีวมวลสามารถใช้ได้ไม่มีวันหมด ตามพื้นฐานวัฏจักรการหมุนเวียนของคาร์บอนโดยกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงของพืช ในทางกลับกัน แหล่งกำเนิดของฟอสซิลนั้นมีปริมาณจำกัดและไม่ยั่งยืน นอกจากนั้นการเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิลยังปล่อยคาร์บอนมอนนอกไซด์ซึ่งส่งผลกระทบต่อสภาพภูมิอากาศของโลก การเปรียบเทียบวัฏจักรคาร์บอนระหว่างสารชีวมวลและฟอสซิลแสดงดังรูปที่ 2.3

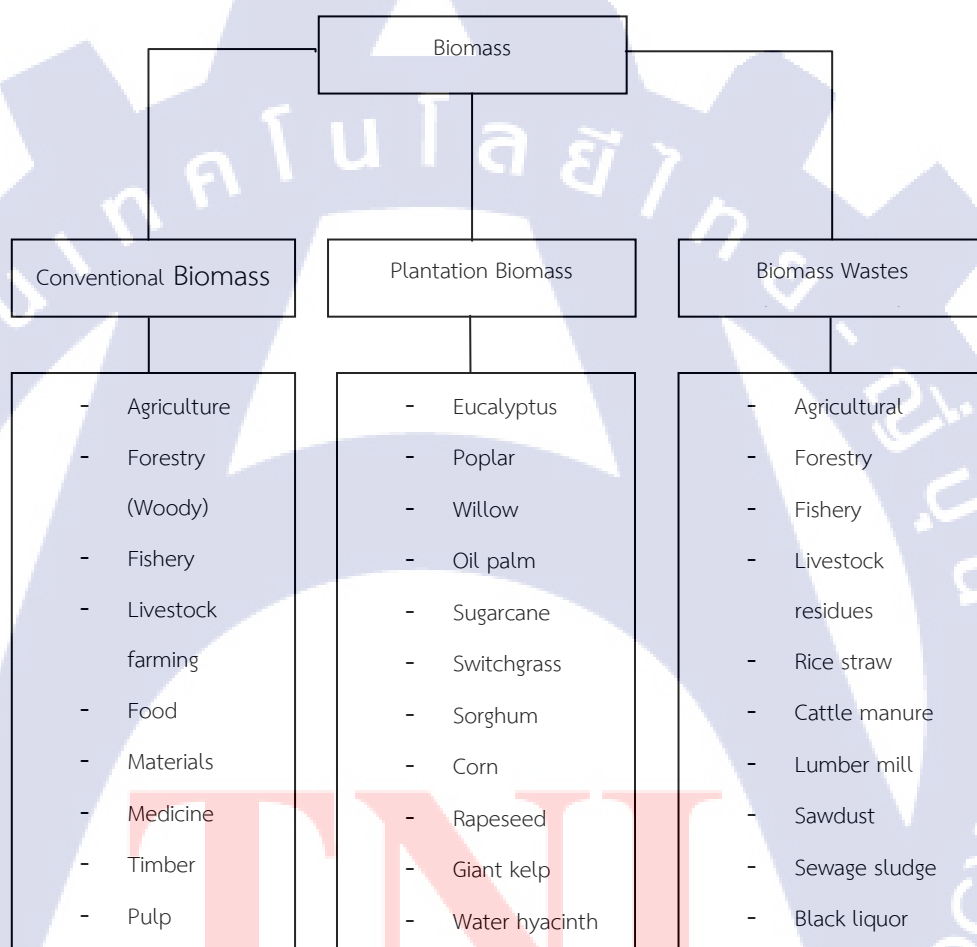


รูปที่ 2.3 การเปรียบเทียบวัฏจักรคาร์บอนระหว่างสารชีวมวลและฟอสซิล [10]

โดยเงื่อนไขของระบบชีวมวลคือ การรักษาสมดุลของการเก็บเกี่ยวเกี่ยวกับความเร็วในการเจริญเติบโตและระบบรักษาสิ่งแวดล้อมของพื้นที่ในการเพาะปลูก ถ้าเกิดความไม่สมดุลความยั่งยืนของระบบสารชีวมวลนั้นจะหายไป

2.1.3.1 ประเภทของวัสดุชีวมวล

ในปัจจุบันยังไม่มี การจัดประเภทของสารชีวมวลอย่างเป็นทางการ โดยทั่วไปมีวิธีการแบ่งประเภทสารชีวมวลสองแบบ แบบแรกคือ แบ่งประเภทตามชีววิทยาโดยอ้างอิงจากที่มีตัวตนในธรรมชาติ เช่น ตามระบบนิเวศวิทยาหรือชนิดของพืช แบบที่สองคือแบ่งตามการใช้งานในเชิงของการใช้พลังงานอย่างเกิดประสิทธิผล ตัวอย่างการแบ่งประเภทของสารชีวมวลในเชิงประยุกต์การใช้งาน แสดงดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ตัวอย่างการแบ่งประเภทของสารชีวมวลในเชิงประยุกต์การใช้งาน [10]

2.1.3.2 การแปรรูปและการใช้ประโยชน์

ในปัจจุบันมีเทคโนโลยีมากมายในการเปลี่ยนคุณสมบัติของสารชีวมวลเพื่อรองรับกับวัตถุประสงค์ในการใช้งานที่แตกต่างกันออกไป ทั้งทางกายภาพ ทางเคมีและทางชีวภาพ การแปรรูปวัสดุชีวมวลนั้นสามารถทำได้หลายวิธีซึ่งแต่ละวิธีจะให้ผลิตภัณฑ์ที่มีรูปแบบหรือสถานะที่แตกต่างกันออกไป เช่น เป็นของแข็ง ของเหลวหรือก๊าซ สำหรับปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อลักษณะและรูปแบบของผลิตภัณฑ์นั้นมีหลายปัจจัยด้วยกัน ซึ่งงานวิจัยของ Libra และคณะได้ทำการสรุปถึงปัจจัยหลักที่มีผลต่อผลิตภัณฑ์ดังนี้ ชนิดของวัตถุดิบ เช่น วัตถุดิบที่มาจากของเหลือใช้จากการเกษตร วัตถุดิบจากไม้หรือจากของเสียต่างๆ รูปแบบกระบวนการในการแปรรูป เช่น กระบวนการไพโรไลซิส กระบวนการก๊าซซิฟิเคชัน กระบวนการไฮโดรเทอร์มัล สภาวะในกระบวนการ เช่น อุณหภูมิ ระยะเวลาของกระบวนการ อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ ปัจจัยเหล่านี้ล้วนมีผลต่อลักษณะและรูปแบบของผลิตภัณฑ์ ดัง

รูปที่ 2.5

การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ หมายถึงการทำให้โครงสร้างทางกายภาพของวัตถุดิบสลายตัวซึ่งวิธีที่ทำให้โครงสร้างมีการเปลี่ยนแปลง ได้แก่ การบดหรือการใช้ไอน้ำเพื่อสลายโครงสร้างของสารชีวมวล ทำให้มีพื้นที่ผิวเพิ่มมากขึ้น เพื่อเร่งกระบวนการทางเคมีความร้อนและทางชีวภาพ ตลอดจนการแยกสกัดและการกลั่นเพื่อสกัดส่วนผสมที่สำคัญ การเพิ่มความหนาแน่น การอบแห้งและการควบคุมความชื้นเพื่อเพิ่มความเสถียรในการขนย้ายและการจัดเก็บ โดยการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพมักใช้ก่อนทำปฏิกิริยาเพื่อเร่งกระบวนการหลักเรียกว่าการบำบัดก่อน

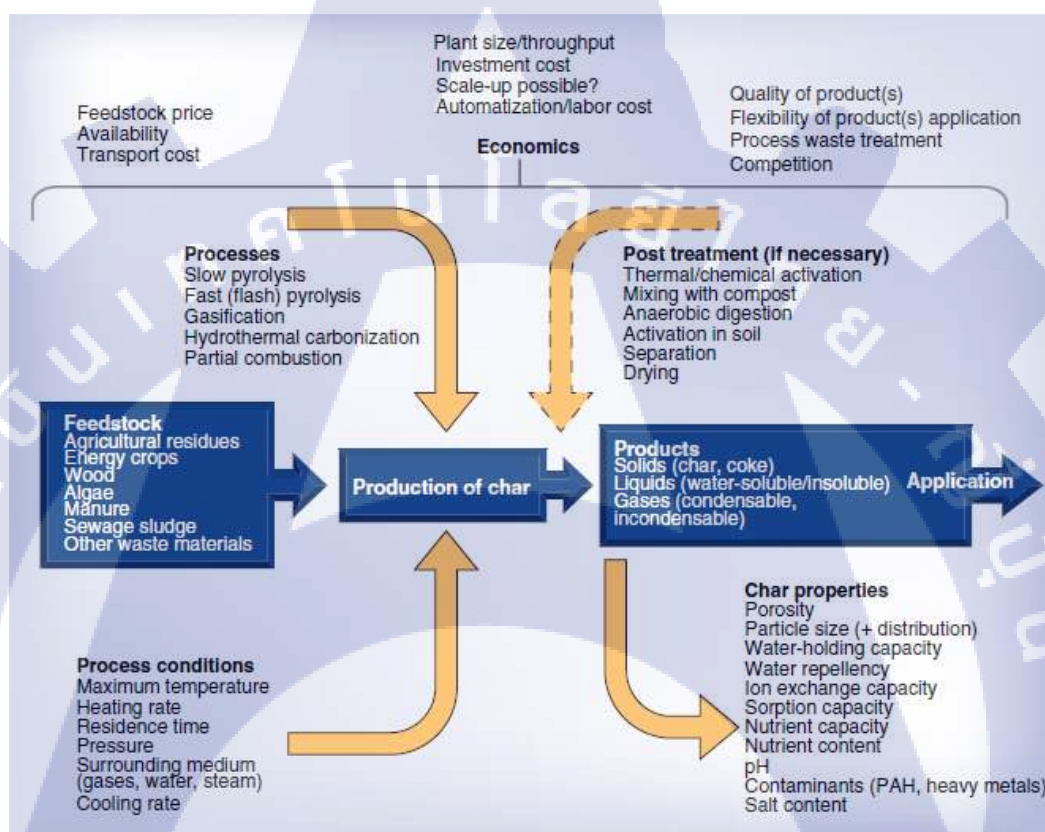
การเปลี่ยนแปลงทางเคมี หมายถึงการ ไฮโดรไลซิส การออกซิเดชันบางส่วน การเผาไหม้ การคาร์บอนไนเซชัน การไพโรไลซิส และปฏิกิริยาไฮโดรเทอร์มัลเพื่อสลายสารชีวมวล รวมถึงการสังเคราะห์ โพลีเมอร์โรเซชัน ไฮโดรจีเนชัน เพื่อสร้างโมเลกุลใหม่หรือปรับปรุงวัสดุชีวมวล การสร้างอิเล็กตรอนในกระบวนการออกซิเดชันของสารชีวมวลนั้นสามารถใช้สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงเพื่อสร้างกระแสไฟฟ้าได้

การเปลี่ยนแปลงทางชีวภาพ หมายถึงกระบวนการหมัก เช่น เอทานอล มีเทน อะซิโตนบิวทานอล ไฮโดรเจน เป็นต้น กระบวนการใช้เอนไซม์จะมีบทบาทสำคัญในการผลิตสารลำดับที่สองของไบโอเอทานอล โดยกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงและโฟโตไลซิสจะมีความสำคัญในการพัฒนาระบบวัสดุชีวมวล

2.1.3.3 ชีวมวลในประเทศไทย [11]

ทาง พพ. ซึ่งเป็นหน่วยงานหลักในด้านพลังงานหมุนเวียนของประเทศไทย ได้ทำการสำรวจศักยภาพของวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรของพืช 10 ชนิดของประเทศ โดยพิจารณาถึงความเป็นไปได้ในนำวัสดุเหล่านั้นกลับมาใช้ตามสภาพความเป็นจริง พบว่า ในปี 2543 ประเทศไทยมีปริมาณวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรรวม 63 ล้านตัน และมีการนำไปใช้งานเป็นเชื้อเพลิงและอื่นๆ

เพียง 16 ล้านตันเท่านั้น ส่วนที่ยังไม่ได้ถูกนำมาใช้และมีศักยภาพในการให้พลังงานนั้นมีสูงถึง 42 ล้านตัน และหากนับรวมถึงก๊าซชีวภาพที่ได้จากมูลสัตว์ ขยะ และน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม มาประกอบการประเมิน และได้คิดเผื่อถึงความเป็นไปได้ทุกอย่างในการนำพลังงานกลับมาใช้จริงแล้ว พบว่า ในปี 2543 เพียงปีเดียว ประเทศไทยมีศักยภาพของพลังงานชีวมวลถึง 650 เพตาจูล หรือ เท่ากับพลังงานที่ได้จากน้ำมันดิเซลหมุนเร็วปริมาณ 17,850 ล้านลิตร



รูปที่ 2.5 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการแปรรูปและลักษณะในการนำไปใช้งานต่างๆของถ่าน [5]

2.1.3.4.1 ข้อดีและข้อเสียของวัสดุชีวมวล [12]

ชีวมวลเป็นพลังงานที่มาจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรที่ไม่มีวันหมดไป เพราะวงจรการผลิตชีวมวลคือวงจรของพืชที่มีระยะเวลาสั้น อีกทั้งชีวมวลสามารถผลิตได้ภายในประเทศ ส่งผลให้เกษตรกรมีรายได้เพิ่มขึ้นจากการจำหน่ายชีวมวลอีกทางหนึ่ง และยังเป็นการช่วยลดการนำเข้าพลังงานจากต่างประเทศได้อีกด้วย แต่ก็เชื่อว่าชีวมวลจะไม่มีข้อเสียเลยทีเดียวซึ่งสามารถสรุปเป็นข้อดีและข้อเสียได้ดังนี้

- สรุปข้อดีการนำชีวมวลมาใช้เป็นพลังงาน

1. การใช้ชีวมวลในการผลิตไฟฟ้าไม่เพิ่มปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สู่บรรยากาศของโลก เพราะก๊าซที่ปล่อยจากการเผาไหม้จะถูกดูดกลืนกลับมาโดยการพืชอีกครั้งหนึ่ง
2. การไม่นำชีวมวลมาใช้ให้เกิดประโยชน์ โดยปล่อยให้ย่อยสลายเองตามธรรมชาติ จะส่งผลให้เกิดก๊าซมีเทนขึ้น ซึ่งเป็นก๊าซเรือนกระจกชนิดหนึ่ง โดยมีอันตรายมากกว่าก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ถึง 21 เท่า
3. ชีวมวลจะมีกำมะถันไม่เกิน 0.2% ดังนั้นการเผาไหม้ชีวมวลจะไม่เป็นการสร้างปัญหาการเกิดฝนกรด
4. ขี้เถ้าของชีวมวลเป็นต่างซึ่งสามารถที่จะไปใช้ในการปรับสภาพดินที่เป็นกรดได้ และยังสามารถนำไปใช้ในอุตสาหกรรมจำพวกการถลุงเหล็กและซีเมนต์ได้อีกด้วย
5. การนำชีวมวลมาใช้เป็นการเพิ่มรายได้และลดรายจ่ายในการกำจัดชีวมวล เช่น การเผา หรือ การฝังกลบ เป็นต้น
6. เป็นการลดการนำเข้าพลังงานและเชื้อเพลิงจากต่างประเทศ เช่น น้ำมันเตา และ ถ่านหิน เป็นต้น

- สรุปข้อเสียการนำชีวมวลมาใช้เป็นพลังงาน

1. การขนส่งค่อนข้างยุ่งยากเนื่องจากชีวมวลมีขนาดใหญ่แต่น้ำหนักที่เบา ทำให้ต้องขนส่งเป็นจำนวนหลายรอบ
2. ชีวมวลมีความชื้นสูง ทำให้ต้องติดตั้งอุปกรณ์ลดความชื้นในหม้อไอน้ำเพิ่มเติม ซึ่งเป็นการเพิ่มต้นทุนในการลงทุน อีกทั้งหากชีวมวลมีความชื้นมากเกินไปอาจทำให้หม้อไอน้ำทำงานได้ไม่เต็มประสิทธิภาพ
3. ขี้เถ้าชีวมวลมีจุดหลอมเหลวต่ำ ซึ่งถ้าอุณหภูมิการเผาไหม้สูงเกินไป อาจทำให้ขี้เถ้าหลอมละลายและเกิดการอุดตันภายในหม้อต้มได้
4. ชีวมวลบางประเภทอาจมีสารกรดกร่อนท่อน้ำในหม้อไอน้ำ ดังนั้นการเลือกใช้ชีวมวลต้องคำนึงถึงความปลอดภัยในการเลือกใช้วัสดุภายในหม้อต้มด้วย

2.1.4 ถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์เป็นถ่านที่อยู่ในรูปคาร์บอนอสัณฐาน (Amorphous Carbon) ชนิดหนึ่งแต่ถูกผลิตขึ้นมาเป็นพิเศษโดยกระบวนการก่อกัมมันต์ (Activation) ซึ่งทำให้พื้นที่ผิวภายใน (Internal Surface Area) เพิ่มขึ้นอันเนื่องมาจากโครงสร้างที่เป็นรูพรุนจำนวนมาก แต่ถ้าหากศึกษาด้วยเอ็กซเรย์ดิฟแฟรกชัน (X-ray Diffraction) หรือศึกษาโครงสร้างจากการสะท้อนและการเบี่ยงเบนของรังสีเอกซ์เมื่อตกกระทบวัตถุ โครงสร้างของถ่านกัมมันต์จะมีความเป็นผลึกอยู่บ้าง แต่ไม่สมบูรณ์

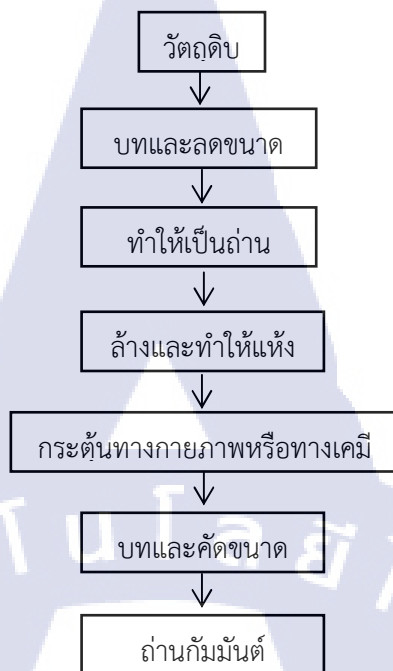
เหมือนกับแกรไฟต์ จากคุณสมบัติเหล่านี้ทำให้ถ่านกัมมันต์มีความสามารถในการดูดซับสูง อันเนื่องมาจากมีพื้นที่ผิวมาก มีความจุในการดูดซับสูง ผิวโครงสร้างเป็นแบบรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมาก (Microporous Structure) และมีความว่องไวในการดูดซับสูง โดยปกติแล้วผิวหน้าของถ่านกัมมันต์นั้นไม่มีขี้ แต่เนื่องจากมีสารประกอบออกไซด์เกิดขึ้นเสมอที่ผิวหน้า และการจัดเรียงของอะตอมอยู่ในลักษณะ เฮกซะโกนอล (Hexagonal) ทำให้ผิวหน้าของถ่านกัมมันต์มีพื้นที่ผิวสูงกว่าตัวดูดซับอื่นๆ เช่น ซิลิกาเจล (Silica Gel) ทำให้สามารถดูดซับสารได้มากกว่า ถ่านกัมมันต์เป็นถ่านที่เตรียมขึ้นเป็นพิเศษเพื่อให้มีพื้นที่ผิวมาก ซึ่งทำได้โดยการทำให้รูพรุนหรือโครงสร้างภายในเนื้อคาร์บอนมากที่สุดเท่าที่จะทำได้ ซึ่งรูพรุนมีขนาดตั้งแต่ 20 – 20,00 อังสตรอม (Angstrom) ดังนั้นจึงมีพื้นที่ผิวสูงและมีความสามารถในการดูดซับ (Adsorption Capacity) สูงด้วยเช่นกัน การวัดพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ทำได้โดยการหาปริมาณไนโตรเจนที่ถูกถ่านกัมมันต์ดูดไว้ วิธีวัดสมรรถนะของถ่านกัมมันต์อาจกระทำได้โดยการวิเคราะห์ ค่าการดูดซับไอโอดีน (Iodine Number) ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์โดยปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับได้แก่ ขนาดและพื้นที่ผิวของสารดูดซับ (Size and Surface Area) ลักษณะของสารดูดซับ (Nature of Adsorbate) ค่าความเป็นกรดต่าง (pH) อุณหภูมิ และระยะเวลาในการสัมผัส (Contact Time) [4]

2.1.4.1 การผลิตถ่านกัมมันต์ (Processing of Activated Carbon)

ในปัจจุบันกรรมวิธีการผลิตถ่านกัมมันต์มีมากมายหลายวิธี ขึ้นอยู่กับวัตถุดิบ ลักษณะและคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ต้องการ แต่โดยทั่วไปกระบวนการผลิตจะประกอบด้วยขั้นตอนใหญ่ๆ 3 ขั้นตอน ดังนี้ คือ ขั้นตอนวัตถุดิบ ขั้นตอนการทำให้เป็นถ่าน หรือ การคาร์บอนไนเซชัน และ ขั้นตอนการกระตุ้น

2.1.4.1.1 การเตรียมวัตถุดิบ

ถ่านกัมมันต์สามารถผลิตจากวัตถุดิบที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ เช่น ขี้เลื่อย กะลามะพร้าว แกลบ เปลือกถั่ว เมล็ดผลไม้ ยาง พลาสติก ถ่านหินและพีช เป็นต้น ซึ่งการผลิตถ่านกัมมันต์สามารถเริ่มจากวัตถุดิบโดยตรง หรือ เริ่มจากวัตถุดิบที่เป็นถ่านแล้วก็ได้ แต่โดยทั่วไปมักนำวัตถุดิบมาบด และคัดขนาดก่อนที่จะนำไปคาร์บอนไนเซชัน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ ดังรูปที่ 2.6 แต่บางครั้งวัตถุดิบอาจมีความแข็งและเหนียวทำให้การบดวัตถุดิบโดยตรงทำได้ยากก็อาจต้องนำวัตถุดิบนั้นไปคาร์บอนไนเซชันก่อน แล้วจึงนำมาบดคัดขนาดก็ได้ [13]



รูปที่ 2.6 กระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์

2.1.4.1.2 การทำให้เป็นถ่าน หรือ การคาร์บอนไนเซชัน

(Carbonization)

การคาร์บอนไนเซชัน เป็นกระบวนการเคมีความร้อนรูปแบบหนึ่งที่จะทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ในรูปของถ่าน (Char) ที่เป็นของแข็ง ในปริมาณที่มากกว่าของเหลวน้ำมัน (Tar) และก๊าซ (Gas) การคาร์บอนไนเซชันเป็นการเพิ่มปริมาณคาร์บอนให้สูงขึ้น โดยการเผาที่อับอากาศในช่วงอุณหภูมิ 200 – 500 °C

คาร์บอนไนเซชันเป็นขั้นตอนที่สำคัญที่สุดในกระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์ เพราะเป็นขั้นตอนเริ่มต้นของการทำให้โครงสร้างมีรูพรุน โดยทำให้เกิดการแตกตัวทางเคมีขององค์ประกอบหรือสารที่ไม่ใช่คาร์บอน (เช่น ไฮโดรเจน ออกซิเจน ไนโตรเจน) ออกมาในรูปของก๊าซ ซึ่งคาร์บอนอิสระที่มีอยู่จะรวมตัวกันอยู่ในรูปของถ่านซึ่งถ่านที่ได้จากการคาร์บอนไนเซชันควรมีลักษณะดังต่อไปนี้

- มีสีดำตลอด (Uniformly Black)
- เมื่อหักดู ส่วนที่หักจะมีผิวที่เป็นมันเงา (Shiny Surface)
- ปลายเป็นเหลี่ยมคม (Sharp)
- ปราศจากผงฝุ่นและขี้เถ้า

ถ่าน (Char) ที่ได้จากขั้นตอนการคาร์บอนเซชันนี้มีความสามารถในการดูดซับต่ำ เนื่องจากการทำให้เกิดถ่านจะใช้อุณหภูมิประมาณ 400 – 500 °C ซึ่งยังคงมีน้ำมัน (Tar) ตกค้างอยู่ภายในช่องว่างรูพรุน (Pore) หรือเกาะอยู่ตามพื้นผิว จึงจำเป็นต้องนำถ่านนี้ไปผ่านกระบวนการพัฒนาโครงสร้างไปในทิศทางเดียวกับการเกิดคาร์บอนเซชัน ซึ่งก็คือการทำการกระตุ้นนั่นเอง

วัสดุที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบเป็นวัตถุดิบสำหรับการผลิตถ่านกัมมันต์ โดยเฉพาะวิธีการกระตุ้นด้วยไอน้ำนั้นต้องการคุณสมบัติที่สำคัญดังนี้

- สารระเหยต่ำ
- ค่าคาร์บอนคงตัวสูง
- มีความพรุนสูง
- มีความแข็งแรง ไม่เปราะ แตกต่อการขัดสี

2.1.4.1.3 การกระตุ้น (Activation)

การกระตุ้น คือ การทำให้คาร์บอนหรือถ่านมีความสามารถในการดูดซับสูงขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการเพิ่มปริมาณพื้นที่ผิวและการทำให้ผิวมีความว่องไวทางเคมีมากยิ่งขึ้น

Mukherjee และ คณะ ได้พิจารณาความหมายของการถูกกระตุ้นไว้ 3 ความหมาย คือ

- เป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวให้มีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยา (Active Surface Area) โดยเกิดปฏิกิริยาทางเคมี ทำให้โมเลกุลบางกลุ่มหลุดออกไป และเกิดส่วนที่มีอำนาจความสามารถการดูดซับขึ้นมาแทน
- เป็นการเพิ่มความว่องไวในการดูดซับให้พื้นผิวที่มีอยู่แล้ว ซึ่งหมายถึงทำให้อะตอมของคาร์บอนมีพลังงานศักย์สูงขึ้นโดยจัดเปลี่ยนโครงสร้างใหม่ ให้มีความว่องไวในการดูดซับสูงขึ้น
- เป็นการกำจัดอินทรีย์วัตถุหรืออนินทรีย์วัตถุต่างๆ ซึ่งเป็นสารปนเปื้อนออกจากบริเวณที่ทำหน้าที่ในการดูดซับ (Active Centers)

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในการกระตุ้นไม่เป็นที่ทราบแน่ชัด สาเหตุหนึ่งเนื่องจากว่าวิธีการกระตุ้นนั้นมีมากมายหลายวิธี และประสิทธิภาพในการกระตุ้นยังขึ้นกับลักษณะและชนิดของวัตถุดิบ รวมถึงวิธีการอื่นๆ ก่อนการกระตุ้นด้วย การกระตุ้นถ่านกัมมันต์แบ่งตามกลไกที่เกิดขึ้นได้ 2 ประเภท คือ

วิธีการกระตุ้นทางเคมี (Chemical Activation) เป็นการผลิตถ่านกัมมันต์โดยให้สารกระตุ้นทำปฏิกิริยาเคมีกับผิวคาร์บอน โดยมีความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งขั้นตอนการกระตุ้นด้วยสารเคมีนั้น สามารถทำก่อนหรือหลังการคาร์บอนเซชันก็ได้ดังรูปที่ 2.7 ซึ่งข้อดีของ

วิธีการกระตุ้นด้วยเคมีคือใช้อุณหภูมิไม่สูงมาก ($400-600^{\circ}\text{C}$) แต่มีข้อเสียคือมีสารเคมีตกค้างในถ่านกัมมันต์ทำให้ต้องเสียเวลา และค่าใช้จ่ายในการล้างสารเคมีดังกล่าวออกเพิ่มขึ้น รวมทั้งเครื่องมือที่ใช้ต้องเป็นชนิดพิเศษที่สามารถต้านทานการกัดกร่อนของสารเคมีได้ เพราะสารเคมีเหล่านี้เป็นสารกัดกร่อน สารเคมีที่นิยมใช้เป็นตัวกระตุ้นส่วนใหญ่เป็นสารดูดน้ำ (Dehydrating Agent) ได้แก่ ซิงค์คลอไรด์ (ZnCl_2) โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) และ กรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) เป็นต้น [3]

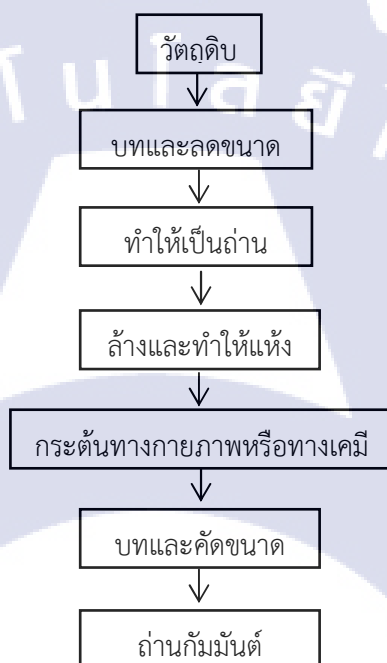


รูปที่ 2.7 ขั้นตอนการผลิตถ่านกัมมันต์ด้วยวิธีการกระตุ้นทางเคมี

วิธีกระตุ้นทางกายภาพ (Physical Activation) เป็นการผลิตถ่านกัมมันต์โดยที่ผิวคาร์บอนเกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ เช่น การจัดเรียงตัวใหม่ การเปิดรูพรุน ฯลฯ ซึ่งจะเพิ่มความสามารถในการดูดซับของถ่านให้สูงขึ้น นิยมใช้แก๊สออกซิไดซ์ต่างๆ เช่น ไอน้ำอิ่มตัวยิ่งยวด (Steam) แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) แก๊สออกซิเจน (O_2) และอากาศ (Air) เป็นต้น ร่วมกับการใช้ความร้อน ปฏิกิริยาการกระตุ้นอาจเกิดจากความร้อนเพียงอย่างเดียวก็ได้ แต่ต้องใช้อุณหภูมิที่สูงมากถึง $1,200^{\circ}\text{C}$ แต่พบว่าถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้จะมีคุณภาพต่ำกว่าถ่านกัมมันต์ที่ผลิตโดยการกระตุ้นด้วยแก๊สออกซิไดซ์ ซึ่งปัจจัยที่มีผลต่อการกระตุ้นด้วยวิธีนี้คือ [1]

- ชนิดและปริมาณขององค์ประกอบที่มีอยู่ในวัตถุดิบ
- คุณสมบัติทางเคมีและอัตราส่วนของก๊าซที่ใช้
- อุณหภูมิขณะเกิดปฏิกิริยา
- ระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยา

สำหรับข้อดีของการกระตุ้นทางกายภาพคือ ไม่มีสารเคมีตกค้าง แต่มีข้อเสีย คือ ต้องใช้อุณหภูมิสูงกว่าการกระตุ้นด้วยสารเคมี โดยใช้อุณหภูมิช่วง (700–1200 °C) ขั้นตอนการกระตุ้นทางกายภาพดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 ขั้นตอนการผลิตถ่านกัมมันต์ด้วยวิธีการกระตุ้นทางกายภาพ

2.1.4.2 โครงสร้างและคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์

2.1.4.2.1 โครงสร้างรูพรุนของถ่านกัมมันต์

ในการกระตุ้นจะทำให้ถ่านที่ได้จากการคาร์บอนไนเซชันมีความเป็นรูพรุนมากขึ้น เนื่องจากการสูญเสียสารประกอบระหว่างช่องของผลึกคาร์บอน ซึ่งรูพรุนทำให้เกิดพื้นที่ผิวสัมผัสมากขึ้น เป็นการช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับ โดยการกระตุ้นที่เหมาะสมคือการทำให้ความพรุนมากขึ้น ไม่ใช่ขนาดของรูใหญ่ขึ้น

เมื่อพิจารณาลักษณะผิวของถ่านกัมมันต์ จะพบว่ามีลักษณะเป็นรูพรุนจำนวนมาก มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางแตกต่างกัน รูพรุนเหล่านี้จะลึกเข้าไปในเนื้อของถ่านกัมมันต์

อย่างไม่เป็นระเบียบและความลึกไม่สม่ำเสมอ ลักษณะของรูปร่างของรูนั้นไม่สามารถบอกได้แน่นอน บางรูมีลักษณะเปิดข้างหนึ่งปิดข้างหนึ่ง บางครั้งรูพรุนอาจเป็นรูปตัว V ซึ่ง Dubinin [14] ได้ทำการจำแนกชนิดของรูพรุนตามขนาดรัศมีของรูพรุนออกเป็นดังนี้

- แมโครพอร์ (Macropores) รัศมีของรูพรุนมากกว่าหรือเท่ากับ 1000–2000 อังสตรอม (มากกว่า 50 นาโนเมตร) ปริมาตรอยู่ระหว่าง 0.2 – 0.8 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม พื้นที่ผิวไม่เกิน 0.5 ตารางเมตรต่อกรัม ซึ่งน้อยมากเมื่อเทียบกับรูพรุนประเภทอื่น ดังนั้นแมโครพอร์จึงไม่ค่อยมีความสำคัญในการดูดซับ เป็นเพียงทางส่งผ่านอนุภาคเข้าไปในรูที่เล็กกว่า
- มีโซพอร์ (Mesopores) หรือทรานซิชั่นัลพอร์ (Transitional pores) ขนาดรัศมีอยู่ระหว่าง 15 - 2,000 อังสตรอม (2-50 นาโนเมตร) ปริมาตรอยู่ระหว่าง 0.1–0.5 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม พื้นที่ผิว 20–100 ตารางเมตรต่อกรัม ตัวอย่างสารดูดซับที่มีขนาดของรูเป็นมีโซพอร์ ได้แก่ ซิลิกาเจล (Silica Gels) อะลูมินาเจล (Alumina Gels) อะมิโนซิลิเกตอะตาลีสท์ (Aminosilicate Catalyst)
- ไมโครพอร์ (Micropores) ขนาดรัศมีน้อยกว่า 15 – 16 อังสตรอม (น้อยกว่า 2 นาโนเมตร) ปริมาตร 0.2 – 0.6 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม พื้นที่ผิวจำเพาะมาก โดยมีค่าหลายร้อยตารางเมตรต่อกรัม บางครั้งถึง 1,500 ตารางเมตรต่อกรัม ไมโครพอร์มีความสำคัญที่สุดในการดูดซับ เนื่องจากพื้นที่การดูดซับ และพลังงานดูดซับ (Adsorption Energy) มากที่สุด ทำให้การดูดซับเพิ่มขึ้นมากที่ความดันต่ำๆ รูพรุนขนาดเล็กมีความสัมพันธ์กับค่าพื้นที่ผิวจำเพาะซึ่งเชื่อว่าปริมาณของรูพรุนแต่ละขนาด หรือที่เรียกกันว่า การกระจายขนาดของรูพรุน (Pore Size Distribution) จะขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุดิบที่ใช้ และวิธีการกระตุ้น ตัวอย่างของตัวดูดซับที่มีขนาดของรูเป็นไมโครพอร์ คือ ซีโอไลต์ (Zeolite)

2.1.4.2.2 โครงสร้างทางเคมีของผิวถ่านกัมมันต์

จากกระบวนการคาร์บอนในเซชัน อะตอมต่างๆที่ไม่ใช่คาร์บอนเช่น ออกซิเจน ไนโตรเจนและไฮโดรเจน จะถูกกำจัดออกในรูปของก๊าซ อะตอมคาร์บอนที่เหลือจะจัดเรียงตัวเป็นชั้นๆ ซึ่งแต่ละชั้นจะประกอบด้วยวงแหวนอะโรมาติก (Aromatic Ring) เชื่อมโยงกันอย่างไม่เป็นระเบียบและเกิดช่องว่างหรือโพรง ซึ่งจะเป็นที่อยู่ของพวกของเหลวจำพวกน้ำมัน (Tar) และสารอื่นที่ได้จากการเผาผลาญ ช่องว่างเหล่านี้จะกลายเป็นรูพรุนที่มีความสามารถในการดูดซับด้วยกระบวนการที่เรียกว่า การกระตุ้น โดยการล้างพวกน้ำมัน (Tar) และสารต่างๆที่ได้จากการเผาผลาญ ออกจากช่องว่างหรือโพรง และสร้างหมู่ฟังก์ชันนัลขึ้นมาแทน ความสามารถในการดูดซับของถ่านกัมมันต์จึงเป็นผลสืบเนื่องจากโครงสร้างทางเคมีด้วย

ความสามารถในการดูดซับของถ่านกัมมันต์เกิดจากอิเล็กตรอนอิสระ ซึ่งอยู่ในสภาพที่ไม่เสถียร คือ วาเลนซ์ไม่อิ่มตัว (Unsaturated Valencies) จึงพยายามที่จะยึดเกาะกับ

อะตอมหรือโมเลกุลอื่น เช่น ออกซิเจนในอากาศหรืออะตอมต่างๆที่อยู่ในสารตั้งต้น กระบวนการกระตุ้นจะช่วยให้การเกาะของอะตอมคาร์บอนกับอะตอมอื่นกลายเป็นพันธะเคมีที่แข็งแรง มักจะเกิดกับอะตอมคาร์บอนที่อยู่ที่ขอบของวงแหวนเหลี่ยม ถ่านกัมมันต์สามารถดูดซับแบบทางเคมี (Chemisorption) กับออกซิเจนที่อุณหภูมิ 400–500 °C และกลายสภาพเป็นออกไซด์เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น นอกจากนี้พบว่ายังสามารถสร้างพันธะที่แข็งแรงกับอะตอมไฮโดรเจน ซึ่งจะไม่หลุดออกมาแม้จะใช้อุณหภูมิสูงถึง 1000 °C และสามารถดึงอะตอมไนโตรเจนออกจากโมเลกุลแอมโมเนีย และซัลเฟอร์ออกจากโมเลกุลไฮโดรเจนซัลไฟด์ และดึงอะตอมกลุ่มฮาโลเจน (halogen) ออกจากโมเลกุลฮาโลเจน ทั้งที่อยู่ในสภาพก๊าซหรือของเหลวก็ได้

2.1.4.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ

- คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของตัวดูดซับ ได้แก่ พื้นที่ผิว ขนาดรูพรุน และส่วนประกอบทางเคมี
- คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของตัวถูกดูดซับ ได้แก่ ขนาดของโมเลกุล ประจุไฟฟ้าของโมเลกุล และส่วนประกอบทางเคมี
- ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับในสารละลาย
- ลักษณะของสารละลาย เช่น ค่าความเป็นกรดต่าง อุณหภูมิ เป็นต้น
- ระยะเวลาในการดูดซับ

2.1.4.4 การประเมินและการเลือกใช้ถ่าน

ในการนำถ่านกัมมันต์ไปใช้ในการดูดซับและบำบัดน้ำเสีย มีวิธีในการเลือกถ่านที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการใช้งานแต่ละประเภท โดยพิจารณาจากลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของถ่าน ลักษณะคุณสมบัติของน้ำเสีย รวมไปถึงความสะดวกในการควบคุมระบบบำบัด ลักษณะสมบัติของถ่านที่เป็นตัวกำหนดการใช้งานได้แก่

- พื้นที่ผิว (Surface area)
- ความหนาแน่นปรากฏ (Apparent density)
- ความหนาแน่นมวล (Bulk density)
- ขนาดการใช้งาน (Effective size)
- เส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ย (Mean particle diameter)
- สัมประสิทธิ์ของความเสมอกัน (Uniformity coefficient)
- ปริมาตรรูพรุน (Pore volume)
- การวิเคราะห์ขนาดอนุภาคโดยใช้ตะแกรงร่อน (Sieve analysis)
- ค่าความคงทนต่อการขัดสี (Abrasion number)
- ปริมาณร้อยละของเถ้า (% Ash)

- ความชื้น (Moisture)
- ไอโอดีนัมเบอร์ (Iodine number)
- โมลาสันัมเบอร์ (Molasses number)
- ขนาดของรูพรุน (Pore size)

2.1.5 การดูดซับ (Adsorption)

การดูดซับ (Adsorption) หมายถึง การเพิ่มความเข้มข้นของสารที่มีพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ (Adsorbent) หรือในทางกลับกันเป็นการลดลงของความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับ (Adsorbate) บนพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ สารซึ่งมีพลังงานอิสระที่ผิวต่ำ (Low Surface Free Energy) จะถูกดูดซับได้ดี ในขณะที่สารซึ่งมีพลังงานอิสระที่ผิวสูงกว่า (Higher Surface Free Energy) จะไม่ถูกดูดซับ ซึ่งพลังงานอิสระที่ผิวของตัวถูกดูดซับจะมีความสัมพันธ์กับแรงตึงผิว (Surface Tension) และ พื้นที่ผิว (Surface Area) ดังนี้

$$G_{sf} = \gamma A$$

เมื่อ G_{sf} เป็นพลังงานอิสระที่ผิว, γ เป็นแรงตึงผิวและ A เป็นพื้นที่ผิว

เมื่อแรงตึงผิวหรือพื้นที่ผิวเปลี่ยนแปลงไป จะเป็นผลทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของพลังงานซึ่งจะเป็น ΔS_{sf} แรงตึงผิวของของเหลวคือ แรงตึงผิวต่อหน่วยความยาว (ตั้งฉากกับแรง) ที่ถูกแรงนี้กระทำปกติ แรงตึงผิวจะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นเช่น ที่อุณหภูมิ 0°C น้ำจะมีแรงตึงผิวเท่ากับ 75.6×10^{-3} ต่อนิวตันเมตร และที่ $^{\circ}\text{C}$ น้ำจะมีแรงตึงผิวเท่ากับ 72.8×10^{-3} ต่อนิวตันเมตร ความตึงผิวของของเหลวเป็นค่าเฉพาะของของเหลวชนิดนั้น เช่น แรงตึงผิวของปรอทที่ 20°C องศาเซลเซียส มีแรงตึงผิวเท่ากับ 456×10^{-3} ต่อนิวตันเมตร ซึ่งแตกต่างจากค่าความตึงผิวของน้ำที่อุณหภูมิเดียวกัน การดูดซับจะเกิดได้ก็ต่อเมื่อมีการสัมผัสกันโดยตรงระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับ ตัวถูกดูดซับที่ใช้ศึกษาอาจเป็นโมเลกุลของก๊าซหรือตัวทำละลายในสารละลาย การดูดซับของก๊าซหรือตัวถูกละลายในสารละลายจะเกิดขึ้นจนกระทั่งเกิดสมดุลระหว่างโมเลกุลของแก๊สในสถานะก๊าซกับโมเลกุลของก๊าซที่ผิวของของแข็ง หรือ เกิดสมดุลระหว่างโมเลกุลของตัวละลายในสารละลายกับโมเลกุลของตัวถูกละลายที่ผิวของแข็ง

การดูดซับเป็นความสามารถของสารบางชนิดในการดึงดูดโมเลกุล หรือคอลลอยด์ ซึ่งอาจอยู่ในของเหลวหรือก๊าซให้มาเกาะและติดบนผิว ถือได้ว่าเป็นการเคลื่อนย้ายสารระหว่างสถานะต่างๆ ทั้ง 3 สถานะ ซึ่งมีได้ทั้งแบบของเหลว-ของเหลว ก๊าซ-ของแข็ง และของเหลว-ของแข็ง ในกรณีการดูดซับได้กำหนดนิยามที่เกี่ยวข้องไว้ดังนี้

- Adsorbate หมายถึง โมเลกุลของตัวถูกดูดซับโดยผิวของแข็งหรือผิวของตัวดูดซับ
- Adsorbent หมายถึง ตัวดูดซับหรือสารที่มีผิวเป็นที่ยึดเกาะจับของ Adsorbate
- Adsorption หมายถึง การดูดซับ
- Absorption หมายถึง การดูดซึม
- Solute หมายถึง โมเลกุลของสารหรือคอลลอยด์ที่อยู่ในของเหลว
- Sorption หมายถึง การดูดติดทั้งสองชนิด ได้แก่ adsorption และ absorption

สำหรับการดูดซับ หรือ การเคลื่อนย้ายสารจากของเหลวมายังผิวของของแข็งเกิดขึ้นในสองลักษณะด้วยกัน คือ

การไม่ชอบของเหลวของตัวถูกละลาย (Lyophobicity of Solute) ในกรณีที่ของเหลวเป็นน้ำ สารที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) จะพยายามแทรกตัวอยู่ระหว่างน้ำกับของแข็งและดูดติดที่ผิวของของแข็งในที่สุด

ความชอบของตัวถูกละลายที่จะไปเกาะติดที่ผิวของของแข็ง (High Affinity of Solute to Solid) โดยในการเกาะติดจะมีแรงอยู่ 3 แบบ ดังนี้

- แรงดึงดูดทางไฟฟ้า (Electrical Attraction Force) มีลักษณะเป็นการแลกเปลี่ยนไอออน โดยไอออนที่มีประจุ จะไปแลกเปลี่ยนติดกับโมเลกุลของสารอื่นได้ พวก ไดวาเลนต์ (divalent) จะดูดซับที่ผิวของวัตถุอื่นได้ดีกว่าพวกโมนาเลนต์ (Monovalent)
- แรงดึงดูดแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waal's Force) จะมีลักษณะเป็นการดูดซับทางกายภาพ (Physical Adsorption) โดยตัวถูกละลายจะไม่เลือกเกาะติดที่ส่วนใดส่วนหนึ่ง แต่สามารถเกาะติดได้อย่างอิสระ และ เคลื่อนที่ได้ในระหว่างผิวของสารทั้งสอง บางครั้งเรียกได้ว่า เป็นการดูดซับในอุดมคติ (Ideal Adsorption) การดูดซับแบบนี้ เกิดขึ้นได้ดีในที่มีอุณหภูมิต่ำ
- ธรรมชาติทางเคมี (Chemical Nature) คือตัวถูกดูดซับจะเกิดปฏิกิริยากับตัวดูดซับ การดูดซับจะเกิดได้ดีในที่ที่อุณหภูมิสูง ซึ่งเรียกชื่อปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นได้ว่า Chemical Adsorption, Activated Adsorption หรือ Chemisorption ซึ่งการดูดซับในลักษณะนี้ ตัวถูกดูดซับจะไม่สามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระในระหว่างผิวของสารทั้งสอง และเป็นได้เฉพาะการดูดซับแบบชั้นเดียวเท่านั้น

การดูดซับ เป็นกระบวนการแยกสารที่ต้องการออกจากสารละลายของเหลวหรือก๊าซ โดยให้สารละลายหรือก๊าซสัมผัสกับตัวดูดซับ สารแต่ละชนิดในสารละลายมีความสามารถในการกระจาย

บนผิว และเกิดแรงดึงดูดกับตัวดูดซับได้ต่างกัน ปรากฏการณ์ดูดซับขึ้นอยู่กับลักษณะโครงสร้างของตัวดูดซับ สมบัติทางเคมีที่ผิวของตัวดูดซับ และสารที่เป็นตัวถูกดูดซับ โดยกลไกการดูดซับมี 2 ประเภท

2.1.5.1 การดูดซับทางเคมี (Chemical Adsorption หรือ Chemisorption)

เป็นผลที่เกิดจากแรงกระทำระหว่างโมเลกุลที่สูงมากเมื่อเทียบกับการจัดเรียงตัวของสารประกอบทางเคมี การดูดซับแบบนี้จะอาศัยการสร้างพันธะทางเคมีระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับโดยมีการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนของทั้งสองฝ่าย มีความร้อนเกิดขึ้นสูง จากการศึกษาดูด้วยอาศัยเทคนิคอิเล็กตรอนสปินเรโซแนนซ์ (Electron Spin Resonance) และวัดค่าแม่เหล็กซึมซับพิบัติ (Magnetic Susceptibility) สามารถยืนยันได้ว่าการดูดซับทางเคมี โดยเกิดที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิวิกฤต (Critical Temperature) ของตัวดูดซับ ความร้อนของการดูดซับมีค่าประมาณ 60 - 70 กิโลจูลต่อโมล การดูดซับทางเคมีเป็นการดูดซับที่สารสามารถถูกดูดซับอยู่บนผิวตัวดูดซับได้เพียงชั้นเดียวเท่านั้น (Monomolecular Layer) และเกิดขึ้นอย่างจำเพาะเจาะจง คือ จะสามารถเกิดได้ก็ต่อเมื่อตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับทำปฏิกิริยากันได้เท่านั้นและการดูดซับทางเคมีไม่สามารถเกิดผ่นกลับได้ (Irreversible) หรือผ่นกลับได้แต่น้อยมาก มีระยะเวลาในการดูดซับนาน คือ เมื่อเกิดการดูดซับแล้วจะจะไม่มีการหลุดออกมาหรือถ้าหลุดออกมาก็อาจทำได้โดยวิธีที่ยุ่งยากและมักจะมีการเปลี่ยนแปลงหรือเสียรูปทรงไปจากเดิม จากการศึกษาหาต้องการให้เกิดการผ่นกลับทำได้ สามารถทำได้โดยการให้ความร้อนกับตัวดูดซับเพื่อขจัดตัวถูกดูดซับให้หลุดออกไปได้

2.1.5.2 การดูดซับทางกายภาพ (Physical Adsorption หรือ Physisorption)

เป็นการดูดซับที่มีแรงกระทำอย่างอ่อนๆ ระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับ โดยโมเลกุลของตัวถูกดูดซับจะอยู่ที่ผิวของตัวดูดซับโดยอาศัยแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals Force) ค่าความร้อนของการดูดซับจะมีค่าไม่เกิน 50 กิโลจูลต่อโมล ซึ่งการดูดซับทางกายภาพโมเลกุลของตัวถูกดูดซับจะถูกดูดซับไว้เป็นแบบการดูดซับชั้นเดียวที่ความดันต่ำ และเป็นแบบหลายชั้น (Multi Molecular Layer) ที่ความดันสูง หรือ ตัวถูกดูดซับ อาจเกิดการดูดซับในลักษณะของการดูดซับแบบหลายชั้นซ้อนกัน (Superimpose Layers) บนผิวของตัวดูดซับ ซึ่งการดูดซับแบบนี้ไม่สามารถเกิดขึ้นได้อย่างถาวร สามารถเกิดการผ่นกลับ (Reversible) ได้ง่าย การดูดซับทางกายภาพจะเกิดขึ้นได้เร็วกว่าการดูดซับทางเคมี เพราะไม่จำเป็นต้องใช้พลังงานกระตุ้น (Activation Energy) เหมือนการดูดซับทางเคมี ยกเว้นในกรณีที่รูพรุนของตัวดูดซับมีขนาดเล็กมากจะทำให้อัตราการดูดซับช้าลง การดูดซับแบบนี้เป็นการดูดซับที่เกิดขึ้นอย่างไม่จำเพาะเจาะจง คือสารต่างๆสามารถถูกดูดซับบนผิวได้และการแยกสารที่ถูกดูดซับออกจากตัวดูดซับทำได้โดยง่าย เช่น อาจทำได้โดยการเพิ่มอุณหภูมิหรือลดความดัน ซึ่งจะเกิดการปล่อยสารที่ดูดซับออกมา (Desorption) การปลดปล่อยดังกล่าวจะไม่มีผลทำให้ตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับเปลี่ยนแปลงลักษณะรูปทรงแต่ประการใด การดูด

ซับจะไม่ทำให้ตำแหน่งเฉพาะที่ทำหน้าที่ดูดซับหมดไป ซึ่งเป็นผลจากแรงดึงดูดประเภทแรงแวนเดอร์วาลส์และแรงดึงดูดระหว่างขั้วมากกว่าการเกิดพันธะ

2.1.5.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ

ขณะที่มีการดูดซับเกิดขึ้นโมเลกุลของสารที่ต้องการกำจัดออกจากน้ำหรือก๊าซ จะไปเกาะติดอยู่บนผิวของตัวดูดซับ โดยโมเลกุลส่วนใหญ่จะเกาะจับอยู่ภายในโพรงของตัวดูดซับ มีเพียงเล็กน้อยเท่านั้นที่เกาะติดอยู่ที่ผิวภายนอก การถ่ายเทโมเลกุลสารจากน้ำไปยังสารดูดซับเกิดขึ้นได้จนถึงจุดสมดุล และหยุด ณ จุดสมดุล [1] ซึ่งปัจจัยที่มีผลต่ออัตราเร็วและความสามารถในการดูดซับได้แก่

2.1.5.3.1 การถูกรบกวนของน้ำ

อัตราเร็วของการดูดซับ ขึ้นอยู่กับการส่งผ่านโมเลกุลของสารดูดซับผ่านฟิล์มที่ล้อมรอบตัวดูดซับหรือการแทรกตัวเข้าสู่ช่องว่างซึ่งแล้วแต่ความปั่นป่วนของระบบ ถ้าน้ำมีความปั่นป่วนต่ำ ฟิล์มที่ล้อมรอบสารดูดซับจะมีความหนามากเพราะไม่ถูกรบกวนและเป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลที่เข้าไปหาตัวดูดซับ ทำให้การส่งผ่านโมเลกุลของตัวถูกดูดซับผ่านฟิล์มที่ล้อมรอบตัวดูดซับเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ ในทางกลับกัน ถ้าน้ำมีความปั่นป่วนสูง จะส่งผลให้น้ำไม่สามารถสะสมตัวจนเป็นฟิล์มหนา เป็นผลให้โมเลกุลสามารถเคลื่อนที่ผ่านฟิล์มเข้าไปหาตัวถูกดูดซับเร็วกว่าการเคลื่อนที่เข้าไปในโพรง ในกรณีนี้การแทรกตัวเข้าสู่ช่องว่างจะเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ

2.1.5.3.2 ขนาดและพื้นที่ผิวของสารดูดซับ

ขนาดของตัวดูดซับจะเป็นสัดส่วนที่ผกผันกับอัตราเร็วของการดูดซับ ส่วนพื้นที่ผิวจะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความสามารถในการดูดซับ หมายความว่า ตัวดูดซับที่มีขนาดใหญ่จะมีอัตราเร็วในการดูดซับที่ต่ำกว่าตัวดูดซับที่มีขนาดเล็กและตัวดูดซับที่มีพื้นที่ผิวมากย่อมมีความสามารถในการดูดซับโมเลกุลได้มากกว่าตัวดูดซับที่มีพื้นที่ในการดูดซับน้อย

2.1.5.3.3 ขนาดของตัวถูกดูดซับ

ขนาดของโมเลกุลหรือขนาดอนุภาคของตัวถูกดูดซับมีความสำคัญมากต่อการดูดซับ จากการศึกษาพบว่า การดูดซับจะเกิดขึ้นได้ดีที่สุด เมื่อโมเลกุลหรืออนุภาคของสารที่ถูกดูดซับมีขนาดเล็กกว่าโพรงของตัวดูดซับเล็กน้อย หรือขนาดของโมเลกุลมีขนาดพอดีกับโพรงหรือรูพรุน เพราะแรงดึงดูดระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับจะมีค่ามากที่สุด โมเลกุลขนาดเล็กจะหลุดเข้าไปในโพรงก่อนจากนั้นโมเลกุลขนาดใหญ่จึงหลุดตามเข้าไปได้

2.1.5.3.4 ความสามารถในการละลายน้ำของตัวถูกดูดซับ

เมื่อมีการดูดซับโมเลกุลของสารจะถูกดึงออกจากน้ำและไปติดอยู่บนผิวของแข็งของตัวดูดซับ สารที่ละลายน้ำหรือแตกตัวเป็นไอออนย่อมมีแรงยึดเหนี่ยวกับน้ำได้อย่าง

หนาแน่นซึ่งยากต่อการดูดซับ ส่วนสารที่ไม่ละลายน้ำหรือสารที่ละลายน้ำได้น้อยจะสามารถดูดซับได้ง่ายกว่า อย่างไรก็ตามเหตุผลนี้ก็ไม่ได้จริงเสมอไป เพราะยังมีสารที่ละลายน้ำได้น้อยหลายชนิดที่ไม่สามารถเกาะติดผิวของตัวดูดซับได้

2.1.5.3.5 อุณหภูมิของระบบ

การดูดซับทางกายภาพ ความสามารถในการดูดซับจะเปลี่ยนไปตามค่าอุณหภูมิเนื่องจาก กระบวนการดูดซับเป็นกระบวนการคายพลังงานความร้อน (Exothermic) ดังนั้นความสามารถในการดูดซับจึงลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นและอุณหภูมิมิผลต่อค่าการละลายของตัวถูกดูดซับ สำหรับตัวถูกดูดซับบางชนิดจะมีค่าการละลายเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มของอุณหภูมิ ซึ่งความสามารถในการดูดซับของตัวถูกดูดซับประเภทนี้จะไม่เปลี่ยนแปลงตามค่าของอุณหภูมิ แต่มีตัวถูกดูดซับบางชนิด เช่น นอร์มอลบิวทานอล มีค่าการละลายในน้ำลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความสามารถของตัวถูกดูดซับประเภทหลังนี้จะเปลี่ยนไปเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ

2.1.5.3.6 ค่าความเป็นกรดต่าง (pH) ของสารละลาย

ค่าความเป็นกรดต่างของสารละลายมีผลต่อความเป็นขั้วของผิวตัวดูดซับและโมเลกุลของตัวถูกละลายซึ่งจะมีผลต่อความสามารถในการดูดซับของโมเลกุลต่างๆ

2.1.5.3.7 ระยะเวลาที่สารละลายสัมผัสกับตัวดูดซับ

ความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นตามระยะเวลา จนกระทั่งถึงเวลาที่ระบบเข้าสู่สมดุลซึ่งเป็นเวลาที่อัตราการดูดซับ (Rate of Adsorption) เท่ากับอัตราการคาย (Rate of Desorption) ความสามารถในการดูดซับจะมีค่ามากที่สุด จากนั้นจะมีค่าคงแม้จะมีระยะเวลาในการดูดซับที่เพิ่มขึ้นก็ตาม

2.1.5.4 ไอโซเทอร์มของการดูดซับ [3, 27]

การดูดซับเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน ซึ่งปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับคือ ความดันหรือความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับ อุณหภูมิ ชนิดของสารที่ถูกดูดซับและสารดูดซับ โดยในการดูดซับจะต้องคำนึงถึงปัจจัยเหล่านี้ด้วย โดยทั่วไปมักจะควบคุมให้อุณหภูมิของการดูดซับให้คงที่และศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของตัวถูกดูดซับกับความดันหรือความเข้มข้นของสารละลายที่สภาวะสมดุลของการดูดซับ โดยเส้นกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ดังกล่าวเรียกว่า ไอโซเทอร์ม (Isotherm) แสดงดังรูปที่ 2.9 ซึ่งเป็นการจำแนกไอโซเทอร์มการดูดซับแก๊สตามระบบ IUPAC โดยไอโซเทอร์ม 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

Type I เป็นไอโซเทอร์มสำหรับการดูดซับที่เป็นแบบชั้นเดียว (Monolayer Adsorption) หรือเรียกว่าแบบแลงเมียร์ (Langmuir) เป็นแบบที่ง่ายที่สุด เป็นปรากฏการณ์การดูดซับของสารที่ไม่มีความพรุนหรือมีรูพรุนขนาดเล็กเป็นจำนวนมาก เช่น ถ่านกัมมันต์ หรือซีโอไลต์ พบ

ทั้งในการดูดซับทางเคมีและการดูดซับทางกายภาพซึ่งปริมาณการดูดซับจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วที่ความดันสัมพัทธ์ (Relative Pressure) ต่ำและที่ความดันสัมพัทธ์สูงหรือเข้าใกล้ 1 จะมีการดูดซับเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อย

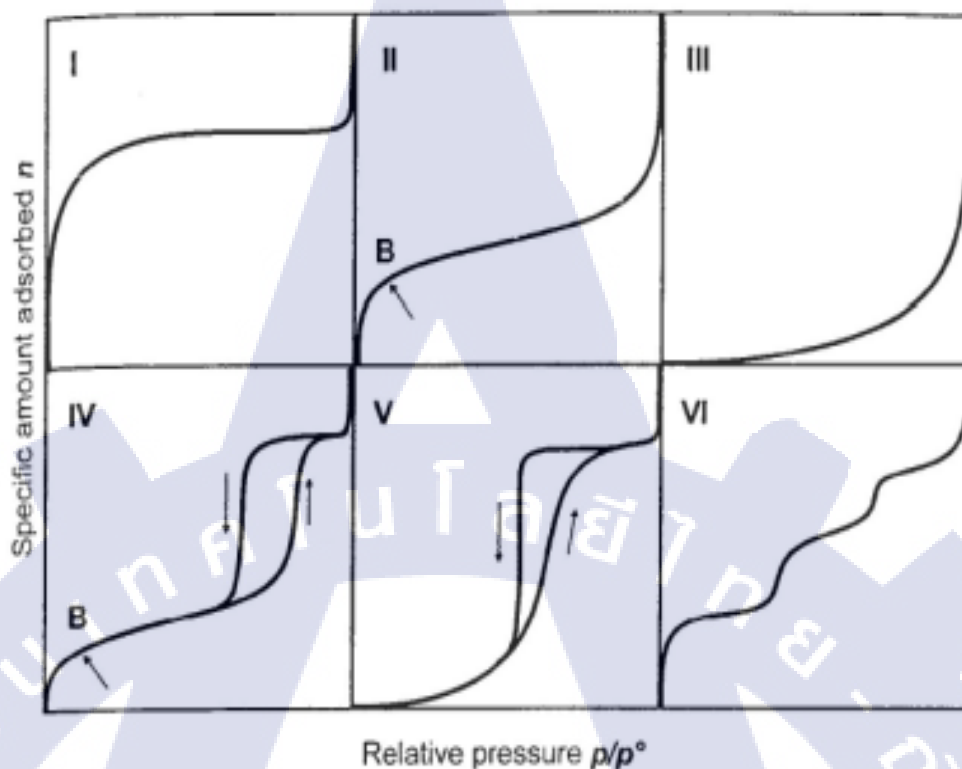
Type II ไอโซเทอร์มรูปร่างตัวเอส (S-shaped Isotherm) มักจะเกิดกับวัสดุที่ไม่มี ความพรุนหรือมีความพรุนขนาดใหญ่ (Macro-Porous) ที่จุดเปลี่ยนกราฟ (เป็นตำแหน่งที่ผิวหน้าถูกคลุมแบบชั้นเดียวเกือบสมบูรณ์แล้วเมื่อเพิ่มความดันจะทำให้การดูดซับเกิดขึ้นมากกว่าหนึ่งชั้น ดังนั้น การดูดซับแบบนี้ จึงเป็นการดูดซับแบบหลายชั้น (Multilayer Adsorption)

Type III เป็นไอโซเทอร์มที่ไม่มีจุดเปลี่ยนกราฟ มีรูปร่างคล้ายกระจกแก้ว ไอโซเทอ ร์มแบบนี้ไม่ค่อยพบมากนัก จะเกิดกับการดูดซับที่ไม่แข็งแรง เป็นการดูดซับที่เกิดขึ้นกับของแข็งที่ไม่มี รูพรุน (nonporous solid) และของแข็งที่มีรูพรุนขนาดเล็กเป็นส่วนใหญ่ แต่เป็นพวกที่มีแรงดึงดูด ระหว่างตัวดูดซับ และตัวถูกดูดซับที่ไม่แข็งแรงทำให้ดูดซับได้น้อย เกิดการดูดซับแบบชั้นเดียวที่ความ ดันสัมพัทธ์ต่ำ แต่เมื่อเกิดการดูดซับแบบหลายชั้นจะเกิดแรงดึงดูดระหว่างตัวถูกดูดซับด้วยกันเองทำ ให้ดูดซับได้มากขึ้นที่ความดันสัมพัทธ์ที่มีค่าสูง

Type IV เป็นไอโซเทอร์มที่พบมากในวัสดุที่มีรูพรุนส่วนใหญ่เป็นรูพรุนขนาดกลาง หรือมีโซพอร์ (ขนาดรูพรุนระหว่าง 2-50 นาโนเมตร) เช่นซิลิกาเจล ในช่วงแรกซึ่งมีค่าความดัน สัมพัทธ์ต่ำเส้นไอโซเทอร์มจะเหมือนกับไอโซเทอร์มชนิดที่ 2 จากนั้นการดูดซับเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เมื่อความดันสัมพัทธ์สูงขึ้นเนื่องจากเกิดการควบแน่นแคปิลลารี (Capillary Condensation) ขึ้นในรู พรุนทำให้เกิด Hysteresis Loop ในช่วงการคายตัว (Desorption) ซึ่งข้อมูลของการเกิดการ ควบแน่นในช่วงแคปิลลารีสามารถนำมาคำนวณหาการกระจายขนาดของรูพรุน (Pore Size Distribution) ในของแข็งที่มีรูพรุนขนาดกลางได้ การควบแน่นแคปิลลารีทำให้ช่วงการคายตัวจะมี ปริมาณดูดซับที่สูงกว่าการเกิดการดูดซับที่ความดันเท่ากัน

Type V เหมือนไอโซเทอร์มชนิด Type IV ต่างกันเพียงเกิดการควบแน่นในรูพรุน (มี Hysteresis loop) ไอโซเทอร์มแบบนี้จะพบไม่บ่อยนัก มักเกิดขึ้นกับตัวดูดซับประเภทที่มีความ พรุนและมีความสามารถในการดูดซับต่ำ

Type VI เป็นไอโซเทอร์มแบบขั้นบันได (Stepped Isotherm) ไอโซเทอร์มแบบนี้ จะพบไม่บ่อยนักโดยมากพบในระบบที่เป็นการดูดซับแบบขั้นบันไดบนพื้นที่ผิวที่ค่อนข้างคล้ายกัน (Uniform) โดยรูปร่างของไอโซเทอร์มจะขึ้นอยู่กับระบบ และอุณหภูมิในการดูดซับ



รูปที่ 2.9 ไอโซเทอมการดูดซับ Type I – Type VI

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

นคร วรสุวรรณรักษ์, ปฐมาภรณ์ โพธิศรี และวิวัฒน์ ตันตะพานิชกุล [14] ได้ทำการศึกษากระบวนการคาร์บอนในเซชันโดยการเผาชีวมวลในที่ที่ไม่อากาศ โดยได้ทำการศึกษาพฤติกรรมคาร์บอนในเซชันของชีวมวลในน้ำร้อนความดันสูง ที่อุณหภูมิ 350 °C ที่ความดัน 100-250 Bar (10-25 MPa) เพื่อศึกษาอิทธิพลของความดันที่มีผลต่อผลผลิต (Yield) และโครงสร้างรูพรุนของถ่าน จากการวิจัยพบว่าที่อุณหภูมิเดียวกัน ผลผลิตของถ่านจากกระบวนการคาร์บอนในเซชันในน้ำร้อนความดันสูงนั้นให้ผลผลิตที่มากกว่าการคาร์บอนในเซชันในบรรยากาศปกติ และได้นำถ่านที่ได้จากการคาร์บอนในเซชันในน้ำร้อนความดันสูงมาคาร์บอนในเซชันภายใต้บรรยากาศของไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 700 °C พบว่าพื้นที่ผิวจำเพาะของถ่านที่ได้จากการคาร์บอนในเซชันในน้ำร้อนความดันสูงนั้นมีค่าสูงกว่าพื้นที่ผิวจำเพาะของถ่านที่เตรียมจากกระบวนการคาร์บอนในเซชันในชั้นบรรยากาศปกติ

Bhaskar T.; et al. [15] ได้ทำการศึกษาการใช้กระบวนการไฮโดรเทอร์มัลในการปรับปรุงวัสดุชีวมวล ด้วยสารตัวเร่ง K_2CO_3 โดยใช้วัสดุชีวมวลตัวอย่าง 2 ชนิด คือ เซอร์ (ไม้เนื้อแข็ง) และไซเปรซ (ไม้เนื้ออ่อน) โดยทำการไฮโดรเทอร์มัลที่อุณหภูมิ 280 °C เป็นเวลา 15 นาที โดยใช้ตัวเร่ง K_2CO_3 ในความเข้มข้น (0-1 M) ซึ่งจะได้ผลิตภัณฑ์อยู่ในรูปของเหลว (Oil) จากการศึกษา

พบว่า วัสดุชีวมวลจากไม้เนื้ออ่อนมีปริมาณลิกนินที่มากกว่าไม้เนื้อแข็ง และพบว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้จาก เซอร์รี่จะมีปริมาณสัดส่วนของกรดอะซิติกมากกว่าไซเปรส และผลิตภัณฑ์ที่ได้จากไซเปรสจะมีสัดส่วน ปริมาณไฮโดรคาร์บอนมากกว่าจากเซอร์รี่

Asirvatham H.; et al. [16] ได้ทำการศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) จากดอกมะพร้าวโดยใช้ High temperature fluidized bed reactor โดยใช้ไอน้ำเป็นตัวกระตุ้น โดยใช้อุณหภูมิที่ทำการศึกษาคือ 650, 700, 750, 800 และ 850 °C และใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาที่ 30, 60, 120 และ 240 นาที และนำผลิตภัณฑ์มาทดสอบการดูดซับสารต่างๆ เช่น ไอโอดีน เมทิลีน บลู ฯลฯ และทำการหาพื้นที่ผิวด้วย SEM จากการศึกษาพบว่า ช่วงอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสม ที่สุดในการทำปฏิกิริยาคือ 850 °C ที่เวลา 60 นาที

Budinova T.; et al. [17] ได้ทำการศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์จากถั่วและเพื่อที่จะใช้ในการกำจัดสารโลหะหนัก โดยทำการทดสอบการดูดซับ อาร์เซนิก และ แมงกานีส ในงานวิจัยนี้ทำการ คาร์บอนไนเซชัน (Carbonization) ในชั้นบรรยากาศที่อุณหภูมิ 600 °C และทำการกระตุ้นด้วยไอน้ำที่ อุณหภูมิ 700 °C เป็นเวลา 60 นาที จากการทดลองพบว่าผลิตภัณฑ์สามารถดูดซับ อาร์เซนิก และ แมงกานีส ได้โดยมีปริมาณในการดูดซับสูงสุดที่ 1.01 และ 23.4 mg g⁻¹

Sun K.; and Jiang C. J. [18] ได้ทำการศึกษาการเตรียมการเตรียมถ่านกัมมันต์จาก เปลือกเมล็ดยางโดยการกระตุ้นด้วยไอน้ำ โดยผู้วิจัยได้นำเปลือกเมล็ดยางมาทำการคาร์บอนไนเซชัน ภายใต้สภาวะไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 400-650 °C และทำการกระตุ้นด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ 800-900 °C โดยใช้เวลาในการกระตุ้น 40-60 นาที และอัตราการป้อนไอน้ำที่ 4-8 กิโลกรัมต่อชั่วโมง จากการ ทดลองพบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการกระตุ้นอยู่ที่ 880 °C อัตราการป้อนไอน้ำที่ 6 กิโลกรัมต่อ ชั่วโมง เวลาในการกระตุ้นที่ 60 นาที โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้มีรูพรุนทั้ง ไมโครพอร์ และ เมโซพอร์ ซึ่ง เหมาะสมกับการดูดซับในสถานะของเหลวและก๊าซ

วิฑูรย์ จิรัฐพงศ์; และ กฤษณเวช ทรงรัตนศักดิ์ [19] ได้ทำการศึกษาปริมาณเซลลูโลส เฮมิ เซลลูโลส และลิกนินจากของเหลือทิ้งจากพืชเพื่อใช้ในการผลิตแผ่นฟิล์มพลาสติกชีวภาพ โดยของ เหลือทิ้งจากพืชที่นำมาศึกษา คือ ต้นกก ขาน้อย ช้างข้าวโพด ฟางข้าว และกาบมะพร้าว ในการสกัด และวิเคราะห์ปริมาณเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน จากนั้นทำการเลือกวัตถุดิบที่มีปริมาณ เซลลูโลสมากที่สุดมาทำการขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มพลาสติกชีวภาพโดยเปลี่ยนเซลลูโลสมาอยู่ในรูปของ คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส จากการทดลองพบว่า ก้านกล้วยมีปริมาณเซลลูโลสประมาณ 33.9% มี ปริมาณเฮมิเซลลูโลสคือ 9.4% และมีปริมาณลิกนิน 16.9%

Sevilla M.; Agullo M.J.; and Fuertes B.A. [20] ได้ทำการศึกษาผลกระทบของ กระบวนการไฮโดรเทอร์มัลต่อ ผงซีลี้อยูคาลิปตัสและฟางข้าวบาร์เลย์ โดยใช้ตัวอย่างประมาณ 8 กรัมแช่ในน้ำ 50 มิลลิลิตร ทำการไฮโดรเทอร์มัลที่อุณหภูมิ 250°C อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 4 °C ต่อ นาที ความดันประมาณ 40 Bar (4 MPa) เป็นเวลา 2 ชั่วโมง โดยเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่ทำการ คาร์บอนไนเซชันภายใต้สภาวะไฮโดรเจนที่อุณหภูมิ 400°C อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 3°C ต่อ นาที เป็น เวลา 2 ชั่วโมง จากการทดลองพบว่า ผลผลิตที่ได้นั้นมีส่วนประกอบที่เป็นคาร์บอนเพิ่มขึ้นเป็น 50-60% และพบว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้มีขนาดอนุภาคประมาณ 1-10 ไมโครเมตร และมีปริมาณผลผลิต (Yield) ที่ 400 และ 370 กรัมต่อกิโลกรัม

Xiao Ling-Ping; et al. [21] ได้ทำการศึกษา กระบวนการไฮโดรเทอร์มัลเพื่อแปรรูปวัสดุ ชีวมวลให้อยู่ในรูปของคาร์บอน (Hydrothermal Carbonization) เพื่อเป็นการเพิ่มคุณค่าของวัสดุ ชีวมวลให้มากยิ่งขึ้น โดยผู้วิจัยได้เลือกใช้วัสดุชีวมวลที่แตกต่างกันสองชนิดคือ ก้านข้าวโพด และ ต้น ทามาริกซ์ โดยก้านข้าวโพดมีส่วนประกอบที่เป็น เฮมิเซลลูโลส ลิกนินและปริมาณต่ำกว่า แต่จะมี เซลลูโลสที่น้อยกว่าโดยมีขั้นตอนการทดลองดังนี้

ขั้นตอนเตรียมวัตถุดิบ

- นำวัตถุดิบมาสกัดด้วยวิธี Soxhlet-extracted โดยใช้ ethanol/benzene เป็นเวลา 8 ชั่วโมง
- นำตัวอย่างที่สกัดแล้วมาอบแห้งที่อุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 16 ชั่วโมง และเก็บในที่ที่มีความชื้น

ขั้นตอนกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล

- ใช้ตัวอย่างจำนวน 10 g แช่ในน้ำกลั่น ที่อุณหภูมิห้องหนึ่งคืน
- ใส่ตัวอย่างในเตาปฏิกรณ์ที่อุณหภูมิ 250 °C ความดันประมาณ 40 Bar (580 psi) โดยให้ อัตราการเพิ่มอุณหภูมิประมาณ 4 °C ต่อ นาที เป็นระยะเวลา 4 ชั่วโมงและทำการกวนที่ 150 รอบต่อ นาที
- ทำการเก็บตัวอย่างและนำตัวอย่างที่เป็นของแข็งมาล้างด้วยน้ำกลั่นร้อน จากนั้นนำไปอบ ที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลาหนึ่งคืน

จากผลการทดลองพบว่า อัตราส่วนผลผลิตของวัสดุชีวมวลเท่ากับ 35.5 % และ 38.1 % และมีปริมาณคาร์บอนเพิ่มขึ้นจาก 46.8 %-48.0 % เป็น 71.4 %-72.1 % โดยผลผลิตที่ได้ในส่วน ของของแข็งจะมีส่วนประกอบหลักเป็นลิกนินในปริมาณที่สูง

Liu Z.; et al. [8] ได้ทำการศึกษาการคาร์บอนไนเซชันด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล เพื่อที่จะเพิ่มประสิทธิภาพการให้พลังงานแก่วัสดุชีวมวลเหลือใช้ โดยใช้ตัวอย่างในการทดลองคือ ใบมะพร้าวและใบยูคาลิปตัส โดยใช้ตัวอย่างประมาณ 10 กรัมแช่ในน้ำ 100 มิลลิลิตรทำการไฮโดรเทอร์มัลที่อุณหภูมิในช่วง 150-375 °C เป็นเวลา 30 นาที จากการทดลองพบว่า อุณหภูมิมีผลต่อปริมาณคาร์บอนของผลิตภัณฑ์โดยพบว่าอุณหภูมิที่สูงขึ้นจะส่งผลให้ผลิตภัณฑ์มีปริมาณคาร์บอนที่มากขึ้นโดยมีปริมาณคาร์บอนประมาณ 46.7-78.2% โดยเซลล์ลูโลสจะแตกตัวเกือบทั้งหมดที่อุณหภูมิต่ำกว่า 250 °C และที่สภาวะอุณหภูมิ 250 °C ผลิตภัณฑ์มีความเหมาะสมที่สุดที่ใช้สำหรับเป็นเชื้อเพลิงในการเผาไหม้

Román S; et al. [22] ได้ทำการศึกษาวิธีการ activated carbon เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับของถ่านที่ได้จากวัสดุชีวมวลที่ผ่านการแปรรูปโดยกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล โดยวัสดุชีวมวลตัวอย่างที่นำมาศึกษาทั้งหมดสามชนิดได้แก่ เปลือกวอลนัท ก้านดอกทานตะวันและผลมะกอก หลังจากการไฮโดรเทอร์มัลนำผลิตภัณฑ์ทำการกระตุ้นด้วยคาร์บอนไดออกไซด์และอากาศ สำหรับกระบวนการกระตุ้นนั้นทำการกระตุ้นภายใต้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 40 มิลลิลิตรต่อนาที ที่อุณหภูมิ 850 °C ระยะเวลา 30 นาที หรือ ในอากาศ 100 มิลลิลิตรต่อนาที ที่อุณหภูมิ 250 °C ระยะเวลา 30 นาที จากการศึกษาพบว่า ถ่านที่ได้จากการไฮโดรเทอร์มัลนั้นมีปริมาณผลผลิตที่สูงกว่า แต่มีความสามารถในการเพิ่มพื้นที่ผิวได้น้อย โดยมีพื้นที่ผิวประมาณ 22-31 ตารางเมตรต่อกรัม และหลังจากการกระตุ้นด้วยคาร์บอนไดออกไซด์และอากาศพบว่าถ่านกัมมันต์ที่ทำการกระตุ้นด้วยคาร์บอนไดออกไซด์มีพื้นที่ผิวเท่ากับ 379-438 ตารางเมตรต่อกรัม และถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยอากาศมีพื้นที่ผิวเท่ากับ 204-434 ตารางเมตรต่อกรัม

Ratchahat S; N. Viriya-empiku; and K Faungnawakij [23] ได้ทำการศึกษาการสักระห่อนุภาคคาร์บอนทรงกลมขนาดเล็กของแป้งข้าวโพด ด้วยการใช้ไฮโดรเทอร์มัล โดยทำการไฮโดรเทอร์มัลที่อุณหภูมิ 180 °C ระยะเวลา 12 ชั่วโมง จากนั้นนำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และนำไปคาร์บอนไนเซชันต่อ ภายใต้สภาวะไนโตรเจน อัตราการป้อนไนโตรเจนเท่ากับ 100 มิลลิลิตรต่อนาที ที่อุณหภูมิ 600 °C อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 1 °C ต่อนาที โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้มีอนุภาคขนาดเล็ก 0.4 - 4.0 ไมโครเมตร เป็นสาเหตุมาจากการละลายน้ำ และการไฮโดรไลซิสในระหว่างการใช้ไฮโดรเทอร์มัล

Asadullah M.; et al. [24] ได้ทำการศึกษาการดูดซับของถ่านกัมมันต์ จากการเตรียมด้วยวิธีการ ไพโรไลซิส และนำมากระตุ้นด้วยไอน้ำ โดยทำการศึกษาปัจจัยของอุณหภูมิ อัตราการป้อนไอน้ำ โดยพบว่าอุณหภูมิในการกระตุ้นที่ 750 °C และอัตราการป้อนไอน้ำเท่ากับ 75 มิลลิลิตรต่อนาที เป็นสภาวะที่ได้พื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์มากที่สุดโดยได้พื้นที่ผิวเท่ากับ 724 ตารางเมตรต่อกรัม

Gonzalez J.F.; et al. [25] ได้ทำการศึกษาศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์จากวัสดุชีวมวล ด้วยวิธีการไพโรไลซิส และทำการกระตุ้นด้วยไอน้ำ โดยใช้วัตถุดิบจาก เปลือกอัลมอนต์ เปลือกวอลนัท Almond Tree Prunning และ Olive Stone โดยพบว่า การกระตุ้นถ่านกัมมันต์ด้วยไอน้ำสามารถเพิ่มพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ได้มากที่สุดถึง 1080 ตารางเมตรต่อกรัม

ณัฐยา พูนสุวรรณ ; และ สุพรรณิ จันทรภิรมณ์ [26] ได้ทำการศึกษาศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์จากวัสดุชีวมวลโดยเลือกใช้วัสดุชีวมวลจากขานอ้อยซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้จากโรงงานน้ำตาล และเม็ดลำไย โดยใช้วิธีการกระตุ้นทางกายภาพด้วย ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำ และใช้การกระตุ้นทางเคมีด้วยกรดฟอสฟอริก พบว่าขานอ้อยจะมีพื้นที่ผิวมากที่สุดโดยการกระตุ้นด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สภาวะที่ได้ผลดีที่สุดที่สภาวะอุณหภูมิ 850-900 °C เป็นเวลา 60 นาที โดยได้พื้นที่ผิวสูงสุดประมาณ 1000 ตารางเมตรต่อกรัม และเม็ดลำไยการกระตุ้นด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้พื้นที่ผิวมากที่สุดประมาณ 1200 ตารางเมตรต่อกรัม ที่สภาวะอุณหภูมิ 900 °C ระยะเวลา 60 นาที สำหรับการกระตุ้นด้วยเคมีพบว่าขานอ้อยได้พื้นที่ผิวมากที่สุดเท่ากับ 1600 ตารางเมตรต่อกรัมและ เม็ดลำไยได้พื้นที่ผิวมากที่สุด 1000 ตารางเมตรต่อกรัม

Regmi P.; et al. [27] ได้ทำการศึกษาศึกษากำจัดทองแดงและแคดเมียมจากสารละลายด้วยต้นหญ้าที่เตรียมจากกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลคาร์บอนไนเซชัน โดยทำการไฮโดรเทอร์มัลที่อุณหภูมิ 300 °C อัตราการเพิ่มอุณหภูมิเท่ากับ 7°C ต่อนาที เป็นระยะเวลานาน 30 นาที จากนั้นนำผลิตภัณฑ์ที่ได้ไปทำการกระตุ้นด้วย KOH จากการศึกษาพบว่า ผลิตภัณฑ์มีความเป็นคาร์บอนเท่ากับ 70.5% และมีพื้นที่ผิวเท่ากับ 2.1 ตารางเมตรต่อกรัม หลังจากกระตุ้นด้วย KOH พบว่ามีพื้นที่เพิ่มขึ้นประมาณ 2.4 เท่า คือเพิ่มขึ้นเป็น 5.0 ตารางเมตรต่อกรัม และพบว่าผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการกระตุ้นด้วย KOH มีความสามารถในการดูดซับทองแดงและแคดเมียมได้ดีกว่าผลิตภัณฑ์ที่ไม่ได้ผ่านการกระตุ้นและดีกว่าผงถ่านกัมมันต์

Romero-Anaya A.J.; et al. [9] ได้ทำการศึกษาศึกษาการไฮโดรเทอร์มัลและการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกของใบพืชธรรมชาติสองชนิด โดยวัตถุดิบที่ใช้ได้แก่ Banana Pseudostem และ ใบมะพร้าว โดยใช้ตัวเร่งด้วยกรดฟอสฟอริกในการไฮโดรเทอร์มัลที่อุณหภูมิ 200 °C ระยะเวลา 24 ชั่วโมง จากการศึกษาพบว่า การกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกหลังการไฮโดรเทอร์มัลถ่านกัมมันต์มีพื้นที่ผิวมากที่สุดเท่ากับ 2244 ตารางเมตรต่อกรัม และ 1765 ตารางเมตรต่อกรัม สำหรับใบมะพร้าว และ Banana Pseudostem ตามลำดับ

Budinova T. et al. [28] ได้ทำการศึกษาคูณสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก และการกระตุ้นด้วยไอน้ำ โดยได้ทำการศึกษานี้ในวิธีการดังนี้ (ก) ทำการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกและไพโรไลซิสที่ 600 °C (ข) ทำตามวิธีเดียวกันกับวิธี (ก) จากนั้นทำการกระตุ้นด้วยไอน้ำต่อที่อุณหภูมิเดียวกัน (ค) ทำการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกและทำการไพโรไลซิสด้วยไอน้ำ

โดยตรงที่อุณหภูมิ 700 °C จากการศึกษาพบว่าถ่านกัมมันต์ที่ผ่านกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกและตามด้วยการกระตุ้นด้วยไอน้ำสามารถเพิ่มปริมาณพื้นที่ผิวได้มากที่สุดโดยมีพื้นที่ผิวมากที่สุดเท่ากับ 1360 ตารางเมตรต่อกรัม

Sevilla M.; and Fuetes A.B. [29] ได้ทำการศึกษาผลิตภัณท์ที่ได้จากการไฮโดรเทอร์มัลคาร์บอนในเซชันด้วยเซลลูโลส โดยได้ทำการศึกษาการไฮโดรเทอร์มัลในช่วงอุณหภูมิ 200-250 °C ระยะเวลา 2-4 ชั่วโมง จากการศึกษาพบว่าผลิตภัณท์ที่ได้จากการไฮโดรเทอร์มัลมีปริมาณคาร์บอนประมาณ 70.7-72.5% ขนาดพื้นที่ผิวประมาณ 26-30 ตารางเมตรต่อกรัม และมีอนุภาคเป็นทรงกลมขนาดประมาณ 2-10 ไมโครเมตร โดยเกิดภายใต้สภาวะอุณหภูมิ 210 °C และ 220 °C สาเหตุที่ทำให้ผลิตภัณท์มีอนุภาคทรงกลมขนาดเล็กเพราะการไฮโดรไลซิสของเซลลูโลส การพอลิเมอไรเซชัน หรือ การรวมตัวของผลิตภัณท์ที่อยู่ในรูปสารละลาย

Parshetti G.; et al. [30] ได้ทำการศึกษาโครงสร้างเคมีและคุณสมบัติค่าการเผาไหม้ของถ่านที่ได้จากการไฮโดรเทอร์มัลคาร์บอนในเซชันของปาล์ม โดยทำการศึกษาการไฮโดรเทอร์มัลที่อุณหภูมิ 150, 250 และ 350 °C จากการศึกษาพบว่าถ่านที่ได้จากการไฮโดรเทอร์มัลคาร์บอนในเซชันที่อุณหภูมิ 350 °C มีค่าการเผาไหม้มากที่สุดเท่ากับ 27 MJ/kg

Li W.H.; et al. [31] ได้ทำการศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์จากกากตะกอนน้ำเสียของโรงงานกระดาษเพื่อใช้ในการบำบัดน้ำเสียจากสีย้อมผ้า โดยทำการคาร์บอนในเซชัน และการกระตุ้นด้วยไอน้ำ โดยทำการคาร์บอนในเซชันที่อุณหภูมิ 300 °C ระยะเวลา 60 นาที และใช้อุณหภูมิในการกระตุ้นที่ 850 °C ระยะเวลา 40 นาที จากการศึกษาพบว่ากระตุ้นด้วยไอน้ำสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดน้ำเสียได้ดี โดยถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้มีค่าการดูดซับเมธิลินบลูประมาณ 130.7 mg/g

นฤมล บุญช่วง [10] ได้ทำการศึกษาผลขององค์ประกอบทางเคมี ได้แก่ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และ ลิกนิน จากชีวมวล 7 ชนิด ต่อพฤติกรรมสลายตัวในการไพโรไลซิสและการเผาไหม้ จากการศึกษาพบว่า องค์ประกอบที่สลายตัวง่ายที่สุดได้แก่ เฮมิเซลลูโลส เซลลูโลส และ ลิกนิน ตามลำดับ โดยชีวมวลที่มีลิกนินสูงจะมีอัตราการไพโรไลซิสที่ช้ากว่าชีวมวลที่มีลิกนินต่ำ

Boonamnuayvitaya V; Sae-ung S.; and Tanthapanichakoon W. [32] ได้ทำการศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์จากเมล็ดกาแฟเพื่อใช้ในการดูดซับฟอมาดีไฮด์ โดยทำการศึกษาวิธีการและสภาวะในการกระตุ้นที่ต่างกันออกไปดังนี้ ทำการไพโรไลซิสภายใต้สภาวะไนโตรเจน ไพโรไลซิสโดยการกระตุ้นด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภายใต้สภาวะไนโตรเจนและไพโรไลซิสโดยการกระตุ้นด้วยไอน้ำภายใต้สภาวะไนโตรเจน จากการศึกษาพบว่าถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีปริมาณผลผลิตและพื้นที่ผิวมากที่สุดเท่ากับ 914 ตารางเมตรต่อกรัม แต่มีความสามารถในการดูดซับฟอมาดีไฮด์น้อยกว่าถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยไนโตรเจน

ตารางที่ 2.2 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

No.	วัตถุดิบ	วิธีการ	Temp (°C)	Time	ผลที่ได้
[14]	ต้นเชอร์รี่/ต้นไซเปรส	HTC (ใช้ K_2CO_3 เป็นตัวเร่ง)	280	15m	ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากต้นไซเปรส (ไม้เนื้ออ่อน) มีอัตราส่วนปริมาณไฮโดรคาร์บอนมากกว่าจากเชอร์รี่ (ไม้เนื้อแข็ง)
[19]	ยูคาลิปตัส/ข้าวบาเลย์	HTC	250	2h	ผลิตภัณฑ์ที่มีปริมาณคาร์บอนเพิ่มขึ้นเป็น 50-60% และมีขนาดอนุภาคประมาณ 1-10 ไมโครเมตร ปริมาณผลผลิต 37%-40% กรัมต่อ กิโลกรัม
[20]	ก้านข้าวโพด/ต้นทามาริกซ์	HTC	250	4h	มีปริมาณคาร์บอนเพิ่มขึ้นเป็น 71.4-72.1% ปริมาณผลผลิต 35.5-38.1% ผลผลิตที่เป็นของแข็งจะมีปริมาณลิกนินเป็นส่วนประกอบหลัก
[21]	ไยมะพร้าว/ไบยูคาลิปตัส	HTC	150-375 °C	30m	อุณหภูมิยิ่งสูงจะส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ที่มีปริมาณคาร์บอนเพิ่มมากขึ้นโดยมีปริมาณคาร์บอนประมาณ 46.7-78.2% และที่สภาวะอุณหภูมิ 250 °C เป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการใช้ผลิตภัณฑ์เป็นเชื้อเพลิง
[22]	ก้าทานตะวัน/เปลือกวอลนัท/ผลมะกอก	HTC และ กระตุ้นด้วย CO_2 และอากาศ	220	20h	ผลิตภัณฑ์จากการไฮโดรเทอร์มัลมีปริมาณพื้นที่ผิวประมาณ 22-31 ตารางเมตรต่อกรัม หลังจากการกระตุ้นด้วย CO_2 และอากาศ มีพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้นเป็น 379-438 และ 204-304 ตารางเมตรต่อกรัม

ตารางที่ 2.2 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

No.	วัตถุดิบ	วิธีการ	Temp (°C)	Time	ผลที่ได้
[27]	ต้นหญ้า	HTC และ กระตุ้นด้วย KOH	300	30m	ผลิตภัณฑ์มีปริมาณคาร์บอน เพิ่มขึ้นประมาณ 70.5% และมี พื้นที่ผิวเท่ากับ 2.1 ตาราง เมตรต่อกรัม หลังจากนำ ผลิตภัณฑ์ไปกระตุ้นด้วย KOH พบว่าพื้นที่ผิวเท่ากับ 5.0 ตารางเมตรต่อกรัม
[28]	Banana pseudostem/ใบ มะพร้าว	HTC และ H ₃ PO ₄ เป็น ตัวเร่ง	200	24h	ผลิตภัณฑ์ที่ใช้ H ₃ PO ₄ เป็น ตัวเร่ง มีพื้นที่ผิวสูงสุดเท่ากับ 2244 และ 1765 ตารางเมตร ต่อกรัม สำหรับใบมะพร้าวและ pseudostem ตามลำดับ
[30]	เซลลูโลส	HTC	200-250	2-4h	ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไฮโดร เทอร์มัลมีขนาดพื้นที่ผิว ประมาณ 26-30 ตารางเมตร ต่อกรัม และมีอนุภาคเป็นทรง กลมขนาดประมาณ 2-10 ไมโครเมตร
[31]	ปาล์ม	HTC	150-350	-	ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไฮโดร เทอร์มัลคาร์บอนในเซชันที่ อุณหภูมิ 350 °C มีค่าการเผา ไหม้มากที่สุดเท่ากับ 27 MJ/kg

จากการศึกษาวิจัยก่อนหน้านี้พบว่ากระบวนการไฮโดรเทอร์มัลได้ผลดีและนิยมใช้อุณหภูมิในช่วง 200-250 °C เนื่องจากการใช้อุณหภูมิที่ต่ำกว่านี้ทำให้การคาร์บอนในเซชันทำได้ไม่ดี และหากใช้อุณหภูมิที่สูงเกินไปอาจทำให้เกิดอันตรายเนื่องจากความดันจะเพิ่มสูงมากขึ้นตามอุณหภูมิ ซึ่งตรงตามกับวัตถุประสงค์เบื้องต้นของงานวิจัยที่ต้องการใช้อุณหภูมิที่ไม่สูงมากในการคาร์บอนในเซชัน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกศึกษาอุณหภูมิในช่วง 180-240 °C สำหรับในส่วนปัจจัยด้านระยะเวลาจากการศึกษาพบว่ามีการใช้ช่วงเวลาที่ค่อนข้างหลากหลายตั้งแต่ 15 นาที ไปจนถึง 24 ชั่วโมง ในส่วนของงานวิจัยที่ใช้เวลาน้อยพบว่าจำเป็นต้องใช้ตัวเร่งที่เป็นสารเคมีจำพวก กรด หรือ เบส ในการทำปฏิกิริยา ซึ่งงานวิจัยของเราไม่ต้องการใช้ตัวเร่งที่เป็นสารเคมี ดังนั้นจึงเลือกใช้ระยะเวลาใน

การศึกษาช่วง 2-8 ชั่วโมง ในส่วนของปัจจัยปริมาณน้ำตั้งต้นจากการศึกษาพบว่ายังไม่มีงานวิจัยใดที่ศึกษาถึงปัจจัยในด้านของปริมาณน้ำตั้งต้นตั้งนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกที่จะศึกษาถึงผลกระทบของปริมาณน้ำ โดยจะทำการศึกษาปริมาณน้ำในช่วง 0-500% โดยน้ำหนัก จากการศึกษาทั้งหมดพบว่า ถ่านที่ได้จากการไฮโดรเทอร์มัลนั้นมีประสิทธิภาพในการดูดซับต่ำเนื่องจากมีพื้นที่ผิวน้อยมาก งานวิจัยนี้ต้องการศึกษาเพิ่มเติมในการพัฒนาการดูดซับของถ่านที่ได้จากการไฮโดรเทอร์มัลว่า สามารถพัฒนาการดูดซับให้ดีขึ้นได้หรือไม่ โดยจะทำการศึกษาการกระตุ้นถ่านที่ได้จากการไฮโดรเทอร์มัลด้วยไอน้ำ ในสภาวะ อุณหภูมิ 700 °C

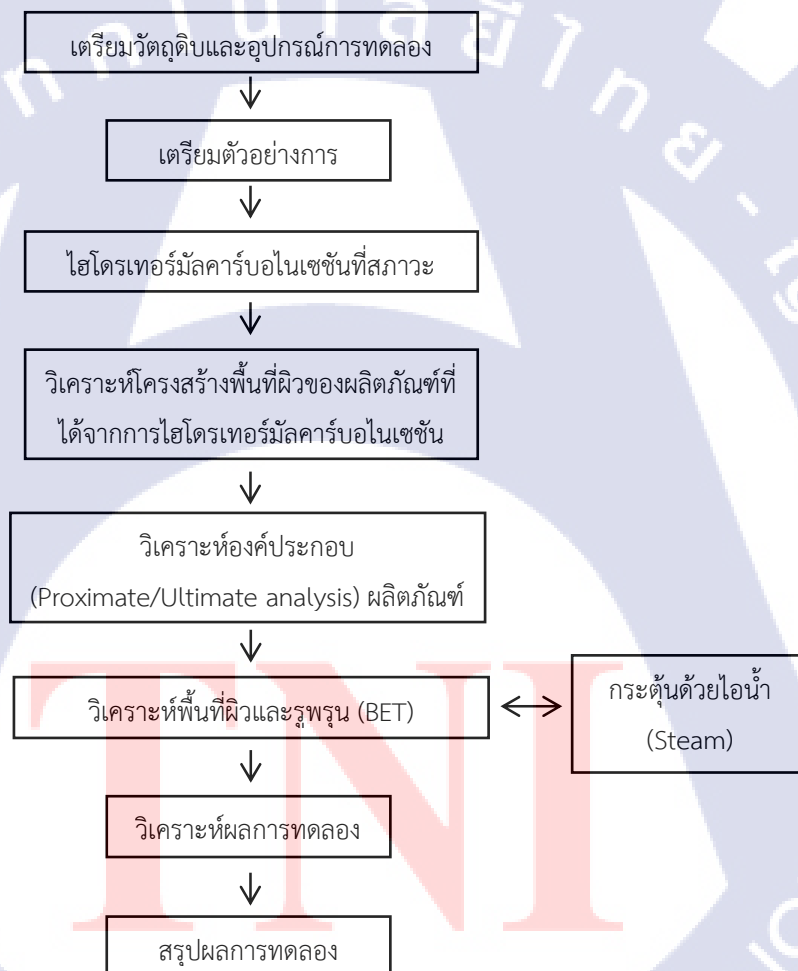


บทที่ 3

ระเบียบวิธีวิจัย

3.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน

การดำเนินงานวิจัยจะเริ่มจากการเตรียมวัตถุดิบและตัวอย่างการทดลองจากนั้นนำมาทดลองด้วยการไฮโดรเทอร์มัลและกระตุ้นด้วยไอน้ำเพื่อที่จะนำผลิตภัณฑ์ที่ได้ไปวิเคราะห์องค์ประกอบและโครงสร้าง และทำการวิเคราะห์และสรุปผลการทดลองต่อไป โดยมีขั้นตอนต่างๆ ดังรูปที่ 3.1

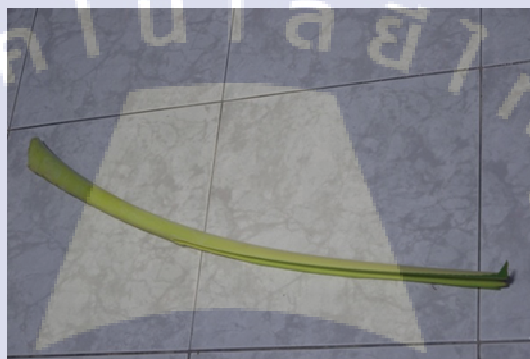


รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน

3.1.1 เตรียมวัตถุดิบและอุปกรณ์การทดลอง

วัตถุดิบและอุปกรณ์ประกอบด้วย

- ก้านกล้วย (กล้วยน้ำว้า) แสดงดังรูปที่ 3.2
- น้ำกลั่น (Deionized Water)
- เครื่องแก้วต่างๆที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ
- ตู้อบ ยี่ห้อ Redline รุ่น RF115 แสดงดังรูปที่ 3.3
- Hydrothermal Chamber แสดงดังรูปที่ 3.4
- เตาเผาอุณหภูมิสูง Thaiburner89 แสดงดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.2 ก้านกล้วย (กล้วยน้ำว้า)



รูปที่ 3.3 เตาอบรุ่น Redline RF115



รูปที่ 3.4 Hydrothermal Chamber



รูปที่ 3.5 เตาเผาอุณหภูมิสูง

3.1.2 เตรียมตัวอย่างการทดลอง

- นำก้านกล้วยตัวอย่างมาหั่นโดยใช้มีด ให้มีขนาดประมาณ 0.5-1.0 เซนติเมตร แสดงดัง

รูปที่ 3.6

- นำตัวอย่างก้านกล้วยไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 110 °C และชั่งน้ำหนักจนน้ำหนักไม่มีการเปลี่ยนแปลง เพื่อให้วัตถุดิบตั้งต้นไม่มีความชื้น แสดงดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.6 ก้านกล้วยขนาด 0.5-1.0 เซนติเมตร



รูปที่ 3.7 ก้านกล้วยหลังจากอบแห้งที่อุณหภูมิ 110 °C

3.1.3 ทำการทดลอง

- นำตัวอย่างวัตถุดิบผสมกับน้ำกลั่นในอัตราส่วนความชื้น 0-500% (10ml – 100ml)
- ทำการไฮโดรเทอร์มัลที่อุณหภูมิช่วง 180-240 °C เวลา 1-8 ชั่วโมง
- ทำการทดลองในสภาวะต่างๆ ซึ่งมีวิธีการออกแบบการทดลองโดยจะเลือกทำการทดลอง

จากปัจจัยในวงกว้างก่อนแล้วจึงค่อยศึกษาถึงผลกระทบของปัจจัยอื่นให้ละเอียดมากขึ้น โดยในขั้นต้น จะทำการทดลองโดยศึกษาจากปัจจัยด้านอุณหภูมิเป็นอันดับแรกเนื่องจากน่าจะเป็นปัจจัยที่สำคัญที่สุด โดยเลือกใช้อุณหภูมิที่ 200 °C จากนั้นจึงศึกษาในช่วงอุณหภูมิที่มากขึ้นและน้อยลงที่ 240 °C และ 180 °C ตามลำดับ ต่อมาศึกษาปัจจัยด้านระยะเวลาโดยทำการศึกษาระยะเวลาที่ช่วง 2, 4, 6 และ 8 ชั่วโมง โดยทำการศึกษาที่ช่วงอุณหภูมิสองช่วงคือ 200 °C และ 240 °C และสุดท้ายศึกษาปัจจัยในด้านปริมาณน้ำตั้งต้นโดยศึกษาปริมาณน้ำที่ 10 20 50 100 มิลลิลิตรในช่วงอุณหภูมิ 200 °C และ 240 °C ระยะเวลา 4 ชั่วโมงโดยการทดลองทั้งหมดแสดงดังตารางที่ 3.1

- นำตัวอย่างการทดลองออกจากเตาเผาและลดอุณหภูมิ โดยนำ Hydrothermal Chamber แช่น้ำแข็งทันทีหลังจากที่เสร็จสิ้นกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล
- ทำการอบตัวอย่างการทดลองเพื่อกำจัดน้ำที่ตกค้างภายในตัวอย่างที่อุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 6 ชั่วโมงหรือจนไม่มีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของตัวอย่าง
- หาปริมาณผลผลิต (Yield) โดยคำนวณจากน้ำหนักของตัวอย่างจากสมการที่ (4.1)

3.1.4 นำผลิตภัณฑ์ไปวิเคราะห์โครงสร้างพื้นผิว (Morphology)

- วิเคราะห์โครงสร้างพื้นผิว (Morphology) โดย Scanning Electron Microscopy (SEM)

3.1.5 วิเคราะห์คุณสมบัติและองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์

จากการวิเคราะห์โครงสร้างพื้นผิว (SEM) นำผลิตภัณฑ์ที่มีพื้นผิวโครงสร้างที่ดีที่สุดไปวิเคราะห์

- วิเคราะห์องค์ประกอบทั่วไป Proximate Analysis วิเคราะห์ตามวิธีมาตรฐานของ ASTM โดยทำการศึกษา ปริมาณความชื้น ปริมาณเถ้า ปริมาณสารระเหยและปริมาณคาร์บอนคงตัว
- วิเคราะห์องค์ประกอบธาตุโดย Ultimate Analysis วิเคราะห์เพื่อศึกษาหาองค์ประกอบธาตุที่มีอยู่ในตัวอย่าง โดยทำการศึกษาปริมาณธาตุ คาร์บอน ไนโตรเจน ไฮโดรเจน และ ซัลเฟอร์

3.16 วิเคราะห์คุณสมบัติโครงสร้างรูพรุนและการดูดซับ ของผลิตภัณฑ์ที่จากการไฮโดรเทอร์มัล

- ทดสอบการดูดซับไนโตรเจน (Nitrogen Adsorption) ด้วยสมการ BET เพื่อหาพื้นที่ผิวและปริมาณรูพรุน

3.17 กระตุ้นด้วยไอน้ำ จากการวิเคราะห์โครงสร้างพื้นผิว (SEM) นำผลิตภัณฑ์ที่มีพื้นผิวโครงสร้างที่ดีที่สุดไปทำการกระตุ้นด้วยไอน้ำ (Steam Activation) ที่สภาวะดังนี้

- อุณหภูมิ 700 °C
- Total Flow Rate ($H_2O + N_2$) = 100 ml/min
- อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 4 °C/min

3.18 วิเคราะห์พฤติกรรมการเผาไหม้ ของผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยไอน้ำ

- วิเคราะห์พฤติกรรมการเผาไหม้เพื่อหาค่าปริมาณการเผาไหม้ของผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการไฮโดรเทอร์มัลด้วย BOM Test

3.1.9 วิเคราะห์ผลการทดลอง

- วิเคราะห์ผลกระทบจากปัจจัยต่างๆต่อปริมาณผลผลิต
- วิเคราะห์ผลกระทบจากปัจจัยต่างๆต่อพื้นที่ผิวโครงสร้างของวัสดุแหล่งคาร์บอนที่ได้ เพื่อศึกษาถึงการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างที่สภาวะต่างๆ ทำให้ทราบว่าปัจจัยต่างๆมีผลกระทบต่อโครงสร้างพื้นผิวอย่างไร
- วิเคราะห์องค์ประกอบทั่วไป (Proximate Analysis) เพื่อศึกษาถึงองค์ประกอบของตัวอย่าง เพื่อดูถึงความเป็นไปได้ในการพัฒนาวัตถุดิบหรือตัวอย่างนั้นๆต่อไป
- วิเคราะห์องค์ประกอบธาตุ (Ultimate Analysis) เพื่อศึกษาถึงองค์ประกอบธาตุคาร์บอน ไนโตรเจน ไฮโดรเจน และซัลเฟอร์ในตัวอย่างเพื่อเป็นการยืนยันว่าตัวอย่างนั้นมีปริมาณอัตราส่วนคาร์บอนเป็นองค์ประกอบในปริมาณเท่าใด

ตารางที่ 3.1 การทดลองที่สภาวะต่างๆ

ตัวอย่าง	อุณหภูมิ (°C)	เวลาในการทำปฏิกิริยา (h)	ปริมาณน้ำตั้งต้น (ml)	อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ (°C/นาท)
A	180	4	10	4
B	180	4	100	4
C	200	2	10	4
D	200	4	10	4
E	200	6	10	4
F	200	8	10	4
G	200	4	20	4
H	200	4	50	4
I	200	4	100	4
J	240	2	10	4
L	240	4	10	4
M	240	6	10	4
N	240	8	10	4
O	240	4	20	4
P	240	4	50	4
Q	240	8	100	4

บทที่ 4

ผลการวิจัยและการวิเคราะห์ผลการทดลอง

4.1 ปริมาณผลผลิต (Yield) ของวัสดุแหล่งคาร์บอน

การหาปริมาณผลผลิตทำได้โดยการนำน้ำหนักของผลผลิตมาคำนวณโดยใช้สมการสมการที่ (4.1) ในการคำนวณ ซึ่งจะทำการทดลองหาปริมาณผลผลิตในสภาวะที่แตกต่างกันดังนี้ อุณหภูมิในการไฮโดรเทอร์มัลที่อุณหภูมิ 180, 200 และ 240 °C ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 2, 4, 6 และ 8 ชั่วโมง ปริมาณน้ำตั้งต้นในการทำปฏิกิริยาไฮโดรเทอร์มัลเท่ากับ 10, 20, 50, 100 มิลลิลิตร และกำหนดให้ค่าอัตราการเพิ่มอุณหภูมิกคงที่เท่ากับ 4 °C/นาที

$$\text{ปริมาณผลผลิต (Yield) ของวัสดุแหล่งคาร์บอน} = \frac{\text{น้ำหนักของวัสดุแหล่งคาร์บอน (กรัม)}}{\text{น้ำหนักของวัตถุดิบตั้งต้น (กรัม)}} \times 100 \quad (4.1)$$

จากตารางที่ 4.1 ปริมาณผลผลิตของวัสดุแหล่งคาร์บอนจากการศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิในการไฮโดรเทอร์มัลต่อปริมาณผลผลิตของวัสดุแหล่งคาร์บอนพบว่า การไฮโดรเทอร์มัลที่อุณหภูมิสูงจะได้ปริมาณผลผลิตของวัสดุแหล่งคาร์บอนต่ำกว่าการคาร์บอนในเซชันที่อุณหภูมิต่ำ เช่นเดียวกันผลกระทบของเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อปริมาณผลผลิตของวัสดุแหล่งคาร์บอนพบว่า ปริมาณผลผลิตของวัสดุแหล่งคาร์บอนมีแนวโน้มลดลงเมื่อเวลาในการทำปฏิกิริยาให้นานขึ้น สำหรับในส่วนของผลกระทบจากปริมาณน้ำตั้งต้นในการทำปฏิกิริยาไฮโดรเทอร์มัลต่อปริมาณผลผลิตของวัสดุแหล่งคาร์บอนพบว่า ปริมาณน้ำตั้งต้นส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของปริมาณผลผลิตในปริมาณที่น้อยมากหรือไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลง โดยสามารถสรุปปัจจัยต่างๆที่มีผลกระทบต่อปริมาณผลผลิตได้ดังนี้

4.1.1 ผลกระทบจากปัจจัยด้านอุณหภูมิต่อปริมาณผลผลิต

จากการศึกษาถึงผลกระทบจากปัจจัยด้านอุณหภูมิต่อปริมาณผลผลิตพบว่า ที่อุณหภูมิที่สูงขึ้นปริมาณผลผลิตมีแนวโน้มที่ลดลงอย่างต่อเนื่อง ทั้งนี้เป็นไปได้ว่าเป็นสาเหตุมาจากการสลายตัวขององค์ประกอบต่างๆของวัสดุชีวมวล เช่น สารระเหยต่างๆ รวมไปถึงการสลายตัวของ เซลลูโลส และ เฮมิเซลลูโลส ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทั่วไป (Proximate analysis) ซึ่งพบว่าสารระเหยมีปริมาณที่ลดลงหลังจากการไฮโดรเทอร์มัล และยังสอดคล้องกับ งานวิจัยของ

Liu Z; et al. [8] และคณะได้กล่าวไว้ว่า เซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสจะสลายตัวเกือบทั้งหมดที่ อุณหภูมิไม่เกิน 250 °C แนวโน้มการลดลงของปริมาณผลผลิตแสดงดังรูปที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ปริมาณผลผลิตของวัสดุแหล่งคาร์บอนที่สภาวะต่างๆ

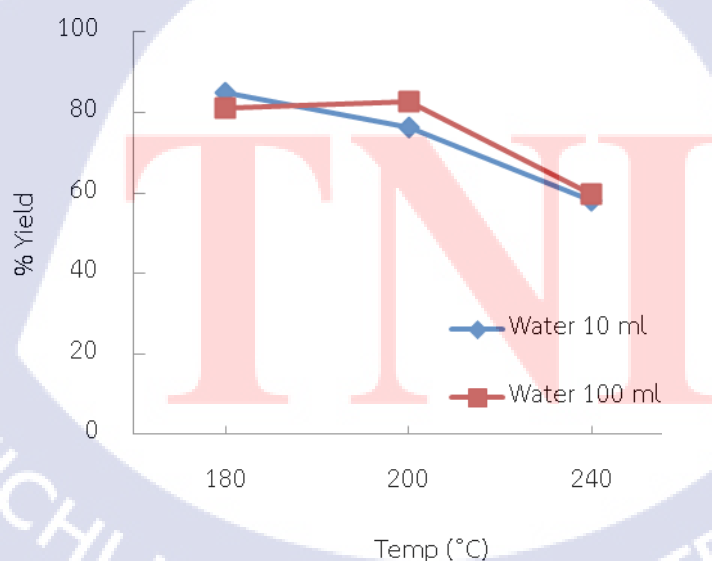
ตัวอย่าง	อุณหภูมิ (°C)	เวลาในการ ทำปฏิกิริยา (h)	ปริมาณ น้ำตั้งต้น (ml)	อัตราการเพิ่ม อุณหภูมิ (°C/นาที)	ปริมาณผลผลิตของ วัสดุแหล่งคาร์บอน %
A	180	4	10	4	85.0
B	180	4	100	4	81.0
C	200	2	10	4	76.9
D	200	4	10	4	76.4
E	200	6	10	4	70.6
F	200	8	10	4	69.4
G	200	4	20	4	83.1
H	200	4	50	4	78.6
I	200	4	100	4	82.8
J	240	2	10	4	75.3
L	240	4	10	4	59.8
M	240	6	10	4	58.7
N	240	8	10	4	62.1
O	240	4	20	4	62.0
P	240	4	50	4	58.8
Q	240	8	100	4	63.8

4.1.2 ผลกระทบจากปัจจัยด้านระยะเวลาต่อปริมาณผลผลิต

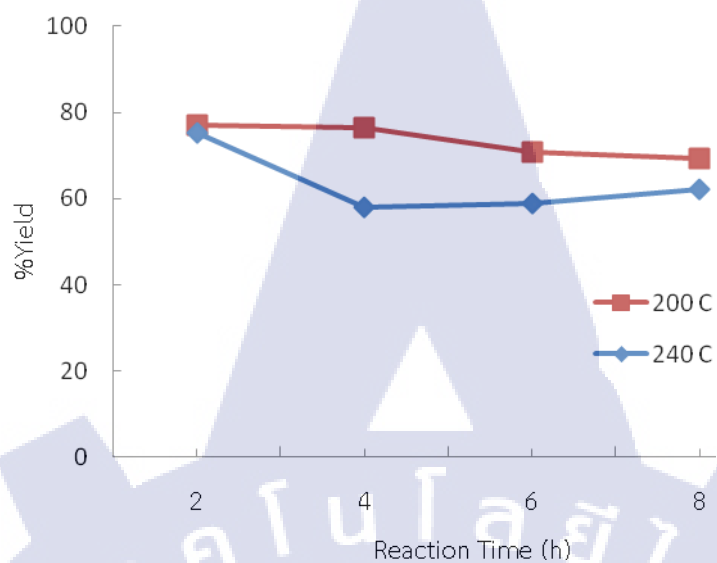
จากการศึกษาถึงผลกระทบจากปัจจัยด้านระยะเวลาต่อปริมาณผลผลิตพบว่าเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการไฮโดรเทอร์มัลให้นานขึ้นปริมาณผลผลิตมีแนวโน้มที่ลดลงอย่างต่อเนื่อง จนเมื่อถึงระยะเวลาช่วงที่ 6-8 ชั่วโมง แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของปริมาณผลผลิตไม่มีการเปลี่ยนแปลงมากนัก สาเหตุเพราะ องค์ประกอบที่สลายตัวในช่วงอุณหภูมิไม่เกิน 240°C เช่น ความชื้น สารระเหย ต่างๆ รวมถึง เฮมิเซลลูโลส และ เซลลูโลส สลายตัวไปจนเกือบหมดแล้ว ส่งผลให้น้ำหนักของผลิตภัณฑ์มีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Zhengang Liu และคณะที่ได้กล่าวไว้ว่า เซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสจะสลายตัวเกือบทั้งหมดที่อุณหภูมิไม่เกิน 250°C [8] แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของปริมาณผลผลิตต่อปัจจัยด้านระยะเวลาดังรูปที่ 4.2

4.1.3 ผลกระทบจากปัจจัยด้านปริมาณน้ำตั้งต้นต่อปริมาณผลผลิต

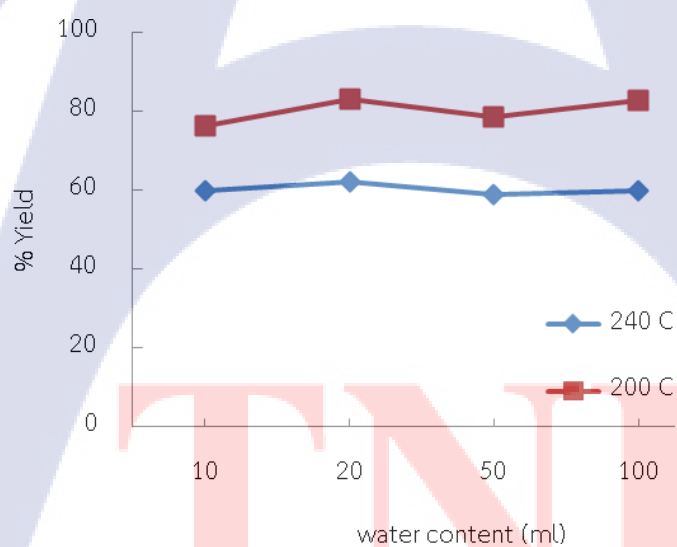
จากการศึกษาถึงผลกระทบจากปัจจัยด้านปริมาณน้ำตั้งต้นต่อปริมาณผลผลิตพบว่าปริมาณน้ำส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของปริมาณผลผลิตเพียงเล็กน้อย โดยมีการเปลี่ยนแปลงแบบไม่เป็นแนวโน้มที่ชัดเจน ซึ่งการเปลี่ยนแปลงในลักษณะนี้อาจจะเป็นผลมาจากความผิดพลาดของผู้ทำการทดลองเช่น เศษตัวอย่างการทดลองอาจตกค้างอยู่ในบีกเกอร์ ทำให้ได้น้ำหนักมีการคลาดเคลื่อนเล็กน้อย ดังนั้นจึงอาจจะสรุปได้ว่าปริมาณน้ำไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของปริมาณผลผลิต แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของปริมาณผลผลิตต่อปัจจัยด้านปริมาณน้ำดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.1 ผลกระทบของอุณหภูมิในการไฮโดรเทอร์มัลต่อปริมาณผลผลิตที่ได้ของวัสดุแหล่งคาร์บอน



รูปที่ 4.2 ผลกระทบของเวลาในการไฮโดรเทอร์มัลต่อปริมาณผลผลิตที่ได้ของวัสดุแหล่งคาร์บอน



รูปที่ 4.3 ผลกระทบของปริมาณน้ำตั้งต้นในการไฮโดรเทอร์มัลต่อปริมาณผลผลิตที่ได้ของวัสดุแหล่งคาร์บอน

4.2 พื้นผิวโครงสร้างของวัสดุแหล่งคาร์บอน

จากการศึกษาพื้นผิวโครงสร้างของวัสดุแหล่งคาร์บอนจากภาพถ่ายโดยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) ของพื้นผิวโครงสร้างของวัสดุแหล่งคาร์บอนที่เตรียมจากกากถ่านโค้ก โดยการไฮโดรเทอร์มัลในสภาวะต่างๆ เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของพื้นผิวโครงสร้างที่เกิดขึ้น โดยพบว่าที่สภาวะที่ต่างกันลักษณะพื้นผิวโครงสร้างจะมีลักษณะต่างกันอย่าง

4.2.1 ผลกระทบจากปัจจัยด้านอุณหภูมิต่อพื้นผิวโครงสร้างของวัสดุแหล่งคาร์บอน

จากการศึกษาปัจจัยด้านอุณหภูมิต่อพื้นผิวโครงสร้างของวัสดุแหล่งคาร์บอนพบว่า เมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้นพื้นผิวโครงสร้างมีแนวโน้มในการแตกตัวของผนังเซลล์มากยิ่งขึ้น จากรูปที่ 4.4 และ รูปที่ 4.7 เป็นการไฮโดรเทอร์มัลในสภาวะอุณหภูมิที่ 200 °C และ 240 °C โดยระยะเวลา และปริมาณน้ำตั้งต้นคงที่ จากรูปจะเห็นว่าเมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิ โครงสร้างผนังเซลล์จะมีการแตกตัวมากยิ่งขึ้น โดยที่อุณหภูมิ 200 °C ผนังเซลล์มีการแตกตัวเพียงเล็กน้อย และที่อุณหภูมิ 240 °C ผนังเซลล์มีการแตกตัวเกือบทั้งหมด ซึ่งน่าจะเป็นการสลายตัวของ เซลลูโลส และ เฮมิเซลลูโลส โดยจะเริ่มสลายตัวที่อุณหภูมิช่วง 200-240 °C ตามที่งานวิจัยของ Shinya, Liu และ Sevilla ได้กล่าวไว้ [8, 20, 29]

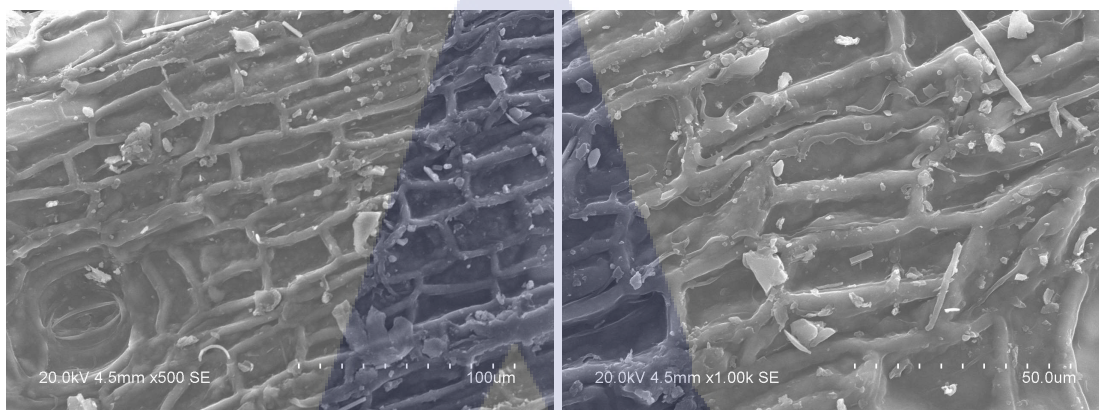
4.2.2 ผลกระทบจากปัจจัยด้านระยะเวลาต่อพื้นผิวโครงสร้างของวัสดุแหล่งคาร์บอน

จากการศึกษาปัจจัยด้านระยะเวลาต่อพื้นผิวโครงสร้างของวัสดุแหล่งคาร์บอนพบว่าเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการไฮโดรเทอร์มัลให้นานขึ้นโครงสร้างพื้นผิวมีแนวโน้มในการแตกตัวของผนังเซลล์มากยิ่งขึ้น จากรูปที่ 4.6 และ รูปที่ 4.7 เป็นการไฮโดรเทอร์มัลโดยมีปัจจัยในด้านของระยะเวลาที่ต่างกันคือ 2 และ 4 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิและปริมาณน้ำตั้งต้นคงที่ที่ 240 °C และ 10 มิลลิลิตร โดยที่ระยะเวลาที่ 2 ชั่วโมง ผนังเซลล์มีการแตกตัวเพียงเล็กน้อย แต่เมื่อเพิ่มระยะเวลาเป็น 4 ชั่วโมงพบว่า ผนังเซลล์มีการแตกตัวเกือบทั้งหมด แม้ว่าจากงานวิจัยก่อนหน้านี้จะกล่าวไว้ว่า เซลลูโลส และ เฮมิเซลลูโลสจะสลายตัวที่อุณหภูมิช่วง 200-240 °C แต่หากระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาไม่นานพอ องค์ประกอบเหล่านั้นก็ไม่สามารถที่จะสลายตัวได้อย่างสมบูรณ์

4.2.3 ผลกระทบจากปัจจัยด้านปริมาณน้ำตั้งต้นต่อพื้นผิวโครงสร้างของวัสดุแหล่งคาร์บอน

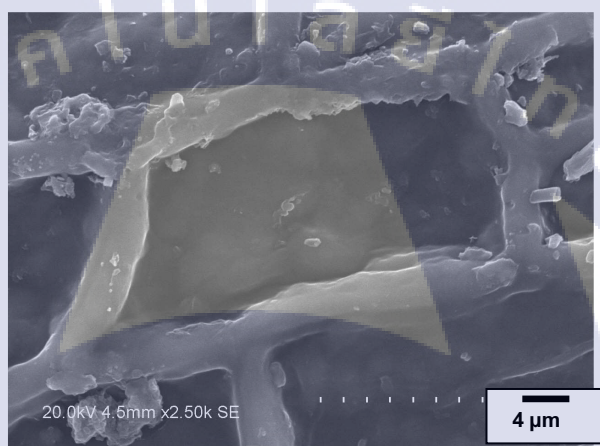
จากการศึกษาปัจจัยด้านปริมาณน้ำตั้งต้นต่อพื้นผิวโครงสร้างของวัสดุแหล่งคาร์บอนพบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณน้ำตั้งต้นในการไฮโดรเทอร์มัลให้มากขึ้นโครงสร้างพื้นผิวมีแนวโน้มในการแตกตัวของผนังเซลล์มากยิ่งขึ้น จากการเปรียบเทียบพื้นผิวโครงสร้างของ รูปที่ 4.4 กับ รูปที่ 4.5 และ รูปที่ 4.8

กับ รูปที่ 4.9 เป็นการไฮโดรเทอร์มัลที่มีปัจจัยปริมาณน้ำตั้งต้นในปริมาณที่ต่างกันที่ 10 และ 100 มิลลิลิตร โดยกำหนดให้อุณหภูมิและระยะเวลาคงที่ จากการเปรียบเทียบระหว่างรูปที่ 4.4 และ รูปที่ 4.5 จะเห็นว่าเมื่อเพิ่มปริมาณน้ำตั้งต้นโครงสร้างผนังเซลล์มีการแตกตัวมากยิ่งขึ้น และ จากการเปรียบเทียบระหว่างรูปที่ 4.8 และ รูปที่ 4.9 พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณน้ำอนุภาคที่แตกตัวแล้วจะมีขนาดการแตกตัวที่เล็กลงและมีความกลมมากยิ่งขึ้น โดยพบว่าที่สภาวะอุณหภูมิ 240 °C ระยะเวลา 8 ชั่วโมง ปริมาณน้ำตั้งต้น 100 มิลลิลิตร อนุภาคมีการแตกตัวเป็นขนาดเล็กที่สุดประมาณ 1 ไมโครเมตร ทำให้เราทราบว่าปริมาณน้ำมีผลต่อการแตกตัวของโครงสร้างพื้นผิวของวัสดุชีวมวล โดยส่งผลให้มีการแตกตัวได้ดีและมีความกลมมากยิ่งขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยของ Ratchachat ที่กล่าวไว้ว่า น้ำมีผลต่อขนาดอนุภาคในกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล โดยน้ำที่มากขึ้นจะทำให้อัตราการไฮโดรไลซิสสามารถทำได้ดียิ่งขึ้น และ [23, 28]



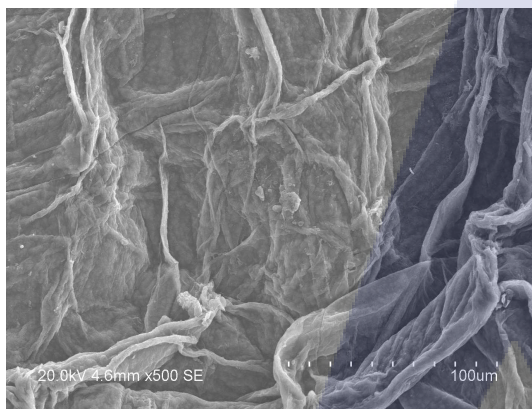
200 4h 10ml (ก)

200 4h 10ml (ข)

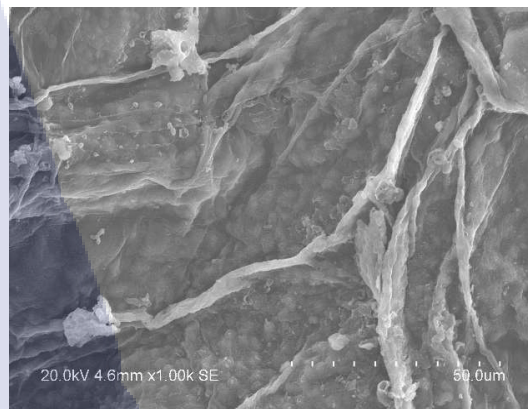


200 4h 10ml (ค)

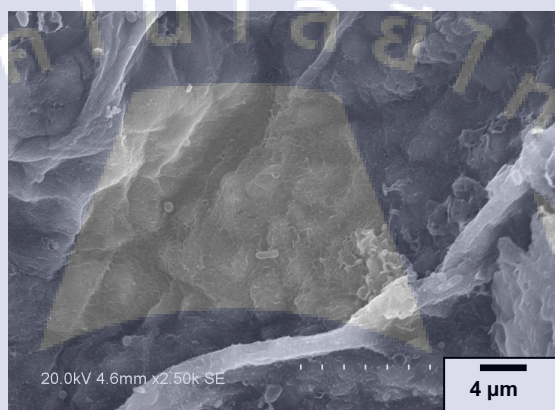
รูปที่ 4.4 ลักษณะพื้นผิวของวัสดุแหล่งคาร์บอนที่เตรียมจากกากกล้วยหลังจากไฮโดรเทอร์มัลที่
สภาวะ 200°C เวลาในการทำปฏิกิริยา 4 ชั่วโมง ปริมาณน้ำตั้งต้นที่ใช้ในการไฮโดรเทอร์มัล 10
มิลลิลิตร (ก) กำลังขยาย 500 เท่า (ข) กำลังขยาย 1000 เท่า (ค) กำลังขยาย 2500 เท่า



200 4h 100ml (ก)

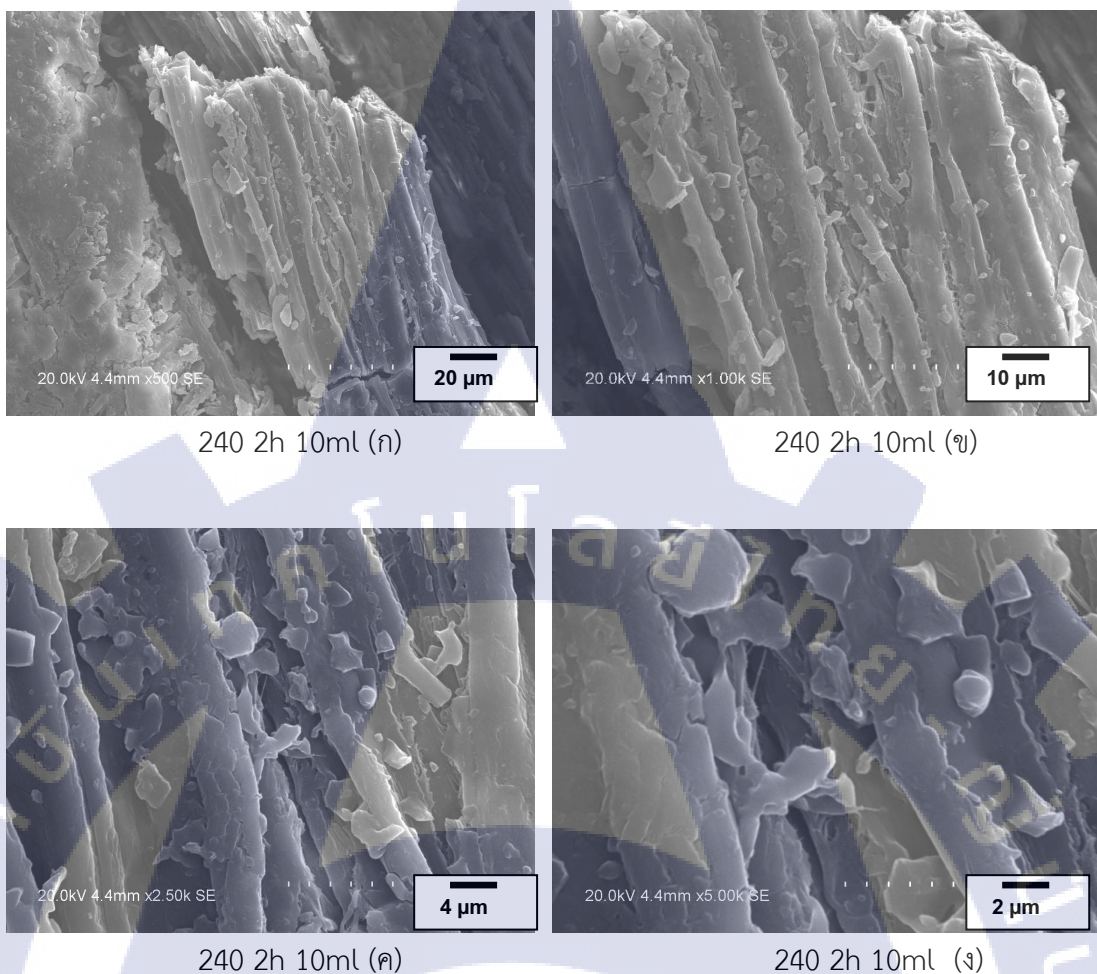


200 4h 100ml (ข)

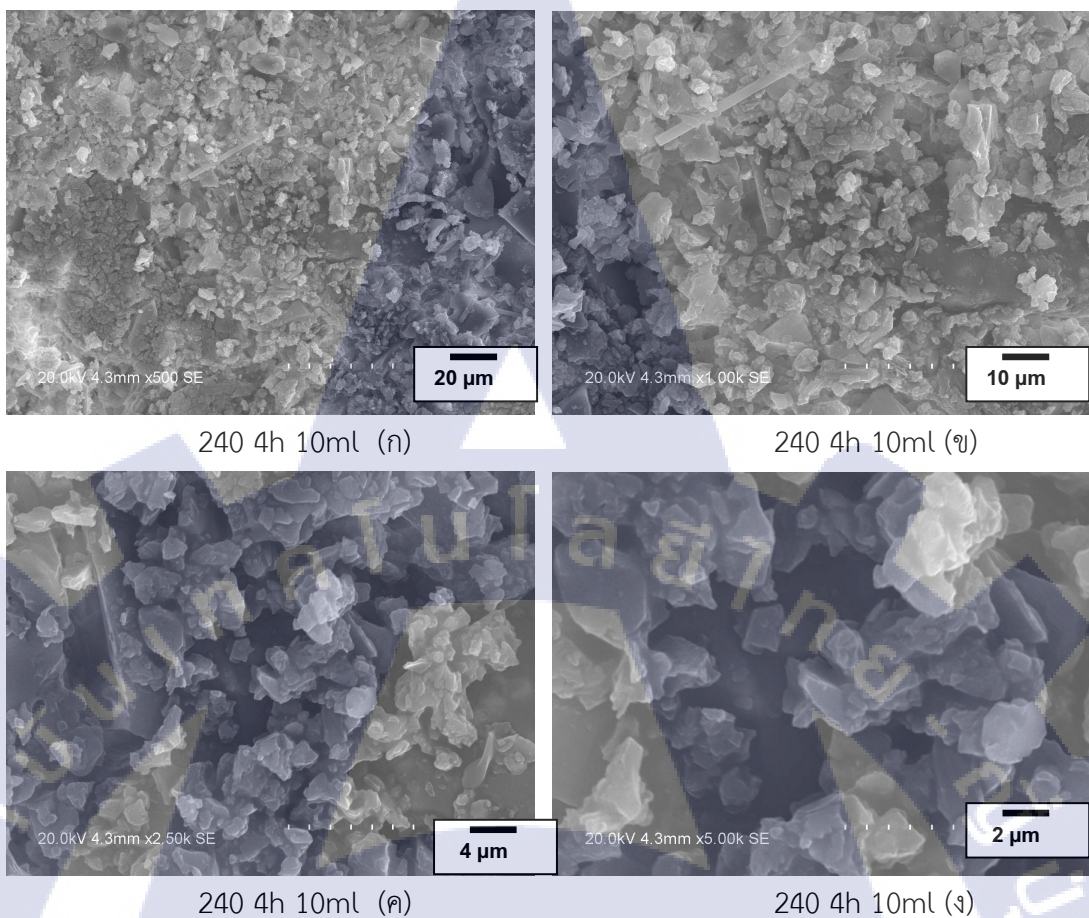


200 4h 100ml (ค)

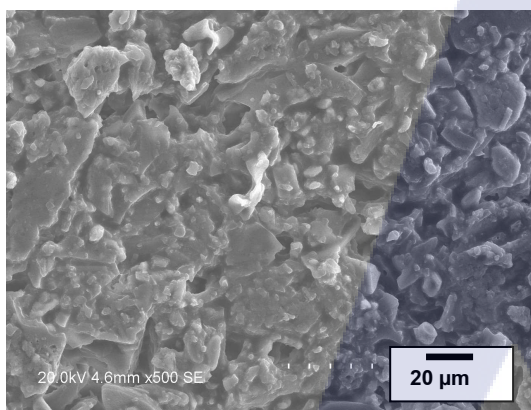
รูปที่ 4.5 ลักษณะพื้นผิวของวัสดุแหล่งคาร์บอนที่เตรียมจากกากกล้วยหลังจากไฮโดรเทอร์มัลที่สภาวะ 200°C เวลาในการทำปฏิกิริยา 4 ชั่วโมง ปริมาณน้ำตั้งต้นที่ใช้ในการไฮโดรเทอร์มัล 100 มิลลิลิตร (ก) กำลังขยาย 500 เท่า (ข) กำลังขยาย 1000 เท่า (ค) กำลังขยาย 2500 เท่า



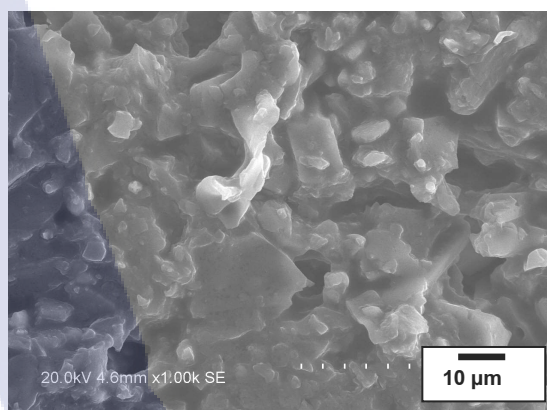
รูปที่ 4.6 ลักษณะพื้นผิวของวัสดุแหล่งคาร์บอนที่เตรียมจากก้านกล้วยหลังจากไฮโดรเทอร์มัลที่สภาวะ 240°C เวลาในการทำปฏิกิริยา 2 ชั่วโมง ปริมาณน้ำตั้งต้นที่ใช้ในการไฮโดรเทอร์มัล 10 มิลลิลิตร (ก) กำลังขยาย 500 เท่า (ข) กำลังขยาย 1000 เท่า (ค) กำลังขยาย 2500 เท่า (ง) กำลังขยาย 5000 เท่า



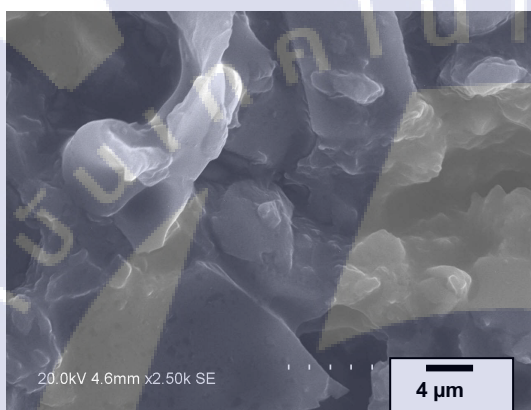
รูปที่ 4.7 ลักษณะพื้นผิวของวัสดุแหล่งคาร์บอนที่เตรียมจากกากกล้วยหลังจากไฮโดรเทอร์มัลที่สภาวะ 240°C เวลาในการทำปฏิกิริยา 4 ชั่วโมง ปริมาณน้ำตั้งต้นที่ใช้ในการไฮโดรเทอร์มัล 10 มิลลิลิตร (ก) กำลังขยาย 500 เท่า (ข) กำลังขยาย 1000 เท่า (ค) กำลังขยาย 0 เท่า (ง) กำลังขยาย 5000 เท่า



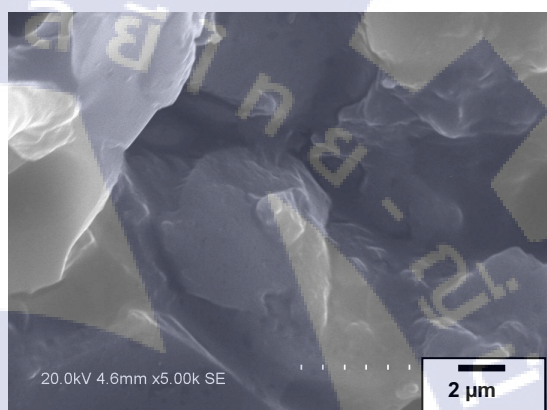
240 8h 10ml (ก)



240 8h 10ml (ข)

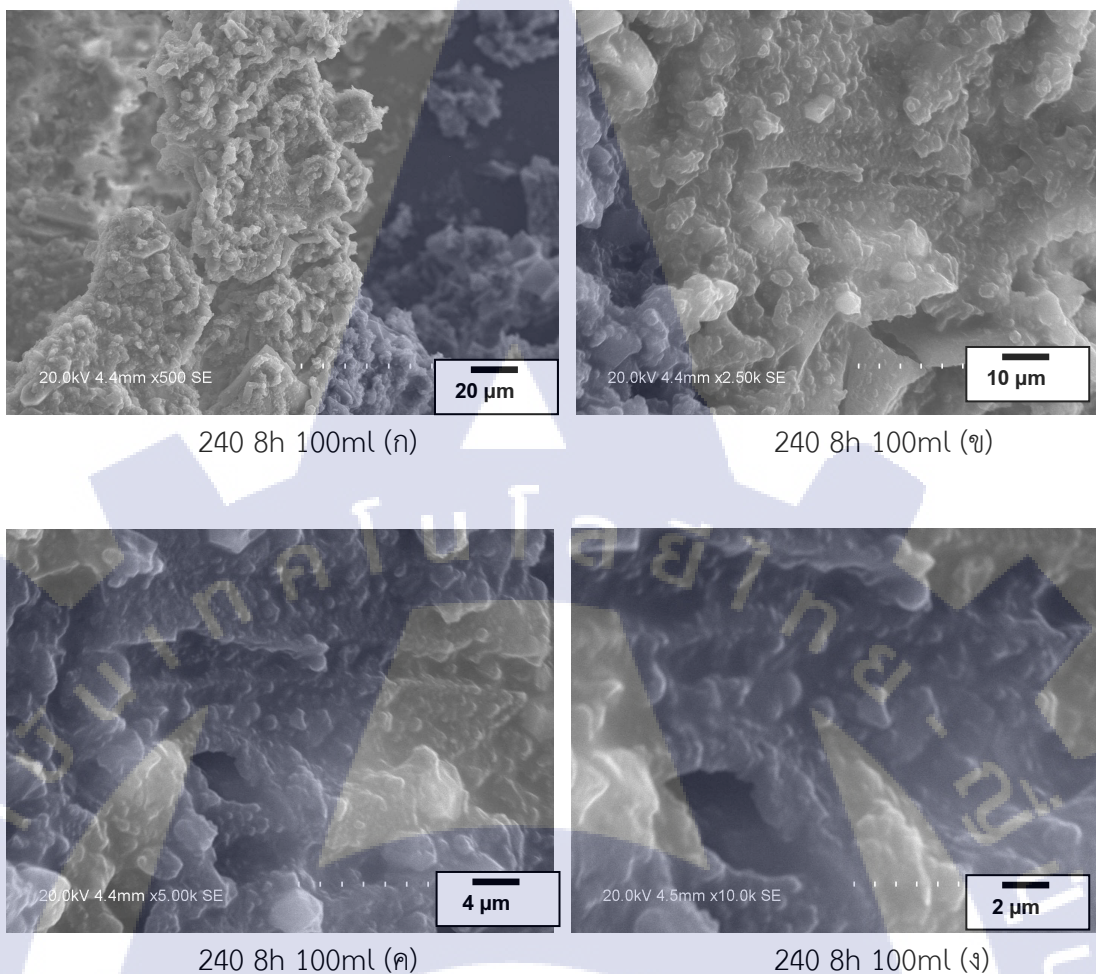


240 8h 10ml (ค)



240 8h 10ml (ง)

รูปที่ 4.8 ลักษณะพื้นผิวของวัสดุแหล่งคาร์บอนที่เตรียมจากกากกล้วยหลังจากไฮโดรเทอร์มัลที่สภาวะ 240°C เวลาในการทำปฏิกิริยา 8 ชั่วโมง ปริมาณน้ำตั้งต้นที่ใช้ในการไฮโดรเทอร์มัล 10 มิลลิลิตร (ก) กำลังขยาย 500 เท่า (ข) กำลังขยาย 1000 เท่า (ค) กำลังขยาย 2500 เท่า (ง) กำลังขยาย 5000 เท่า



รูปที่ 4.9 ลักษณะพื้นผิวของวัสดุแหล่งคาร์บอนที่เตรียมจากกากกล้วยหลังจากไฮโดรเทอร์มัลที่สภาวะ 240°C เวลาในการทำปฏิกิริยา 8 ชั่วโมง ปริมาณน้ำตั้งต้นที่ใช้ในการไฮโดรเทอร์มัล 100 มิลลิลิตร (ก) กำลังขยาย 500 เท่า (ข) กำลังขยาย 2500 เท่า (ค) กำลังขยาย 5000 เท่า (ง) กำลังขยาย 10000 เท่า

4.3 การวิเคราะห์องค์ประกอบทั่วไปด้วยวิธี Proximate Analysis

ผลการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของ วัตถุดิบตั้งต้น และ วัสดุแหล่งคาร์บอนจากการเตรียมด้วยการไฮโดรเทอร์มัลที่สภาวะ 240°C 8 ชั่วโมง 100 มิลลิลิตร แสดงในตารางที่ 4.2 พบว่า วัสดุแหล่งคาร์บอนมีค่าความชื้นเพิ่มขึ้น สาเหตุมาจาก น้ำที่ใช้ในการไฮโดรเทอร์มัลยังคงตกค้างอยู่ตามรูพรุนต่างๆของวัสดุแหล่งคาร์บอน ส่งผลให้วัสดุแหล่งคาร์บอนมีปริมาณค่าความชื้นเพิ่มมากขึ้น ซึ่งการไฮโดรเทอร์มัลสามารถลดปริมาณสารระเหยจากเดิม 78.5% เป็น 47.2% และเพิ่มปริมาณคาร์บอนคงตัวจากเดิม 5.9% เป็น 8.7% เนื่องจากระหว่างการไฮโดรเทอร์มัลอาจทำให้เกิดการสลายตัวของโครงสร้างหรือสารระเหยโดยสลายตัวไปในรูปของเถ้าและก๊าซต่างๆ ส่งผลให้วัสดุแหล่งคาร์บอนที่เตรียมจากกากกล้วยโดยการไฮโดรเทอร์มัลมีปริมาณคาร์บอนคงตัวมากยิ่งขึ้น

ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทั่วไปของวัตถุดิบตั้งต้นและวัสดุแหล่งคาร์บอน

ตัวอย่าง	ร้อยละความชื้น	องค์ประกอบแบบประมาณ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)		
		สารระเหย	เถ้า	คาร์บอนคงตัว
วัตถุดิบตั้งต้น	2.3	78.5	13.2	5.9
HTC 240°C 8h 100ml	13.9	47.2	30.2	8.7

4.4 การวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุด้วยวิธี Ultimate Analysis

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุของ วัตถุดิบตั้งต้น และ วัสดุแหล่งคาร์บอนจากการเตรียมด้วยการไฮโดรเทอร์มัลที่สภาวะ 240°C 8 ชั่วโมง 100 มิลลิลิตร โดยทำการศึกษาปริมาณองค์ประกอบธาตุ คาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน และ ซัลเฟอร์ ที่มีอยู่ในตัวอย่าง เพื่อให้ทราบความสามารถการคาร์บอนในเซชันโดยการไฮโดรเทอร์มัล และเป็นการยืนยันว่าผลิตภัณฑ์มีความเป็นคาร์บอนเท่าใด แสดงในตารางที่ 4.3 พบว่า ร้อยละปริมาณคาร์บอนมีปริมาณเพิ่มขึ้นจาก 33.3% เป็น 41.6% เนื่องจากการสลายตัวและการรวมตัวทางโครงสร้างของพืชได้แก่ เซลลูโลส และ เฮมิเซลลูโลส ส่งผลให้มีปริมาณคาร์บอนเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุของ วัตถุดิบตั้งต้นและวัสดุแหล่งคาร์บอน

ตัวอย่าง	ร้อยละคาร์บอน	ร้อยละไฮโดรเจน	ร้อยละไนโตรเจน	ร้อยละซัลเฟอร์
วัตถุดิบตั้งต้น	33.3	5.2	n/a	0.3
HTC 240°C 8h 100ml	41.6	5.0	n/a	2.8

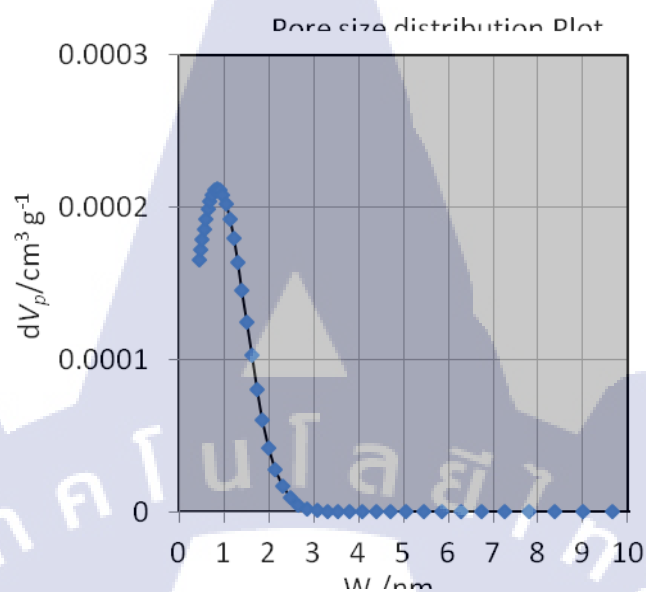
4.5 การทดสอบการดูดซับไนโตรเจน

ผลการศึกษาการดูดซับไนโตรเจนของวัสดุแหล่งคาร์บอนที่อุณหภูมิ -196°C พบว่าวัสดุแหล่งคาร์บอนมี ปริมาณพื้นที่ผิวเท่ากับ $6.45\text{ m}^2/\text{g}$ มีปริมาตรรูพรุนทั้งหมดเท่ากับ $0.007\text{ cm}^3/\text{g}$ โดยมีรูพรุนขนาดเล็กที่สุดเท่ากับ 0.4 nm แสดงดังรูปที่ 4.10 จากการเปรียบเทียบปริมาณพื้นที่ผิวจากงานวิจัยก่อนหน้านี้พบว่า Regmi P และคณะทำการวิจัยโดยการไฮโดรเทอร์มัลคาร์บอนเซชันต้นหญาโดยผลิตภัณฑ์ที่มีพื้นที่ผิวเท่ากับ 2.1 ตารางเมตรต่อกรัมและปริมาณพื้นที่ผิวผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการกระตุ้นด้วย KOH มีปริมาณพื้นที่ผิวเท่ากับ 5.0 ตารางเมตรต่อกรัม และจากงานวิจัยของ Sevilla และ Fuertes พบว่าเซลล์โลสที่ผ่านการคาร์บอนไนเซชันมีพื้นที่ผิวประมาณ 26-30 ตารางเมตรต่อกรัม ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยนี้พบว่าผลิตภัณฑ์มีปริมาณพื้นที่ผิวที่ไม่แตกต่างกันมากนัก [27, 30]

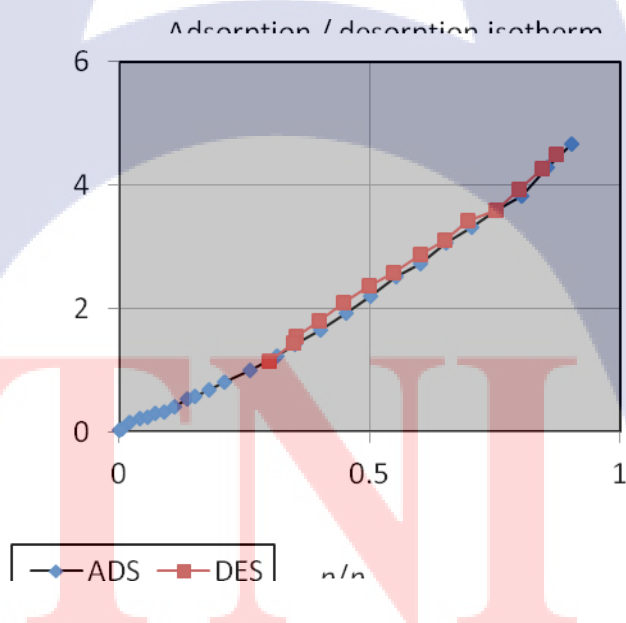
สำหรับการวิเคราะห์ไอโซเทอร์มการดูดซับหากเราดูจากรูปที่ 4.11 จะพบว่าวัสดุแหล่งคาร์บอนมีไอโซเทอร์มการดูดซับคล้ายกับกับ Type IV ซึ่งเป็นการดูดซับของตัวดูดซับฝัณลักษณะที่มีรูพรุนขนาดกลาง (Mesopore) มาก แต่หากเปรียบเทียบกับปริมาณพื้นที่ผิวและขนาดรูพรุนที่พบจะเห็นว่าพื้นที่ผิวในปริมาณที่น้อยมากและมีขนาดรูพรุนที่เล็กมากดังนั้นเราอาจสรุปได้ว่าวัสดุแหล่งคาร์บอนมีลักษณะไอโซเทอร์มการดูดซับแบบ Type III ตามการจำแนกของ IUPAC เนื่องจากมีพื้นที่ผิวที่น้อยและมีความสามารถในการดูดซับที่ค่อนข้างต่ำ

4.6 พฤติกรรมการเผาไหม้

จากการศึกษาพฤติกรรมการเผาไหม้ของวัสดุแหล่งคาร์บอนจะก้านกล้วยผมว่า ก้านกล้วยที่ผ่านการไฮโดรเทอร์มัลค่าการเผาไหม้ที่เพิ่มขึ้น โดยมีค่าการเผาไหม้เท่ากับ 22.17 MJ/Kg มีปริมาณผลผลิตเท่ากับ 62.1% ภายใต้การไฮโดรเทอร์มัลที่สภาวะ อุณหภูมิ 240°C ระยะเวลา 8 ชั่วโมง ปริมาณน้ำตั้งต้น 10 มิลลิลิตร ซึ่งจากเดิมก่อนการไฮโดรเทอร์มัลก้านกล้วยค่าการเผาไหม้เท่ากับ 13.6 MJ/Kg และจากเปรียบเทียบกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ พบว่ามีค่าการเผาไหม้ที่ใกล้เคียงกัน โดย Parshetti และคณะ ได้ศึกษาพฤติกรรมการเผาไหม้ของ วัสดุเหลือใช้จากโรงงานน้ำมันปาล์ม ที่ผ่านการไฮโดรเทอร์มัลที่อุณหภูมิ 350°C ระยะเวลา 20 นาที พบว่ามีค่าการเผาไหม้ที่มากที่สุดเท่ากับ 27 MJ/Kg โดยมีปริมาณผลผลิตเท่ากับ 49% และที่อุณหภูมิ 250°C มีค่าการเผาไหม้เท่ากับ 22.1 MJ/Kg ปริมาณผลผลิตเท่ากับ 62% [31]



รูปที่ 4.10 ขนาดและการกระจายตัวของรูพรุนของวัสดุแหล่งคาร์บอนจากกากกล้วย



รูปที่ 4.11 ไอโซเทอมการดูดซับไนโตรเจนที่อุณหภูมิ -196°C ของวัสดุแหล่งคาร์บอนจากกากกล้วย

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย

5.1 ปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณผลผลิตของวัสดุแหล่งคาร์บอน

จากการศึกษาการเตรียมวัสดุแหล่งคาร์บอนจากกากกล้วยด้วยวิธีการไฮโดรเทอร์มัลพบว่า ผลผลิตของวัสดุแหล่งคาร์บอนมีแนวโน้มที่ลดลง เมื่อเพิ่มอุณหภูมิและระยะเวลาในการไฮโดรเทอร์มัลให้มากขึ้น ในส่วนของปริมาณน้ำตั้งต้นนั้นจากการศึกษาพบว่าไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณผลผลิตของวัสดุแหล่งคาร์บอน

5.2 ปัจจัยที่มีผลต่อพื้นผิวโครงสร้างของวัสดุแหล่งคาร์บอน

จากการศึกษาการเตรียมวัสดุแหล่งคาร์บอนจากการกล้วยด้วยวิธีการไฮโดรเทอร์มัลพบว่า ปัจจัยที่มีผลต่อพื้นผิวโครงสร้างและอัตราส่วนผลผลิตได้แก่

5.2.1 อุณหภูมิ จากการศึกษปัจจัยด้านอุณหภูมิพบว่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลจะส่งผลให้พื้นผิวโครงสร้างของวัสดุดิบตั้งต้นเกิดการเปลี่ยนแปลง โดยโครงสร้างของพื้นผิวของกากกล้วยมีการแตกตัวของผนังเซลล์มากขึ้น โดยการไฮโดรเทอร์มัลที่สภาวะอุณหภูมิ 240 °C ระยะเวลา 4 ชั่วโมง ปริมาณน้ำตั้งต้น 10 มิลลิลิตร โครงสร้างผนังเซลล์ของกากกล้วยมีการแตกตัวเกือบทั้งหมด

5.2.2 เวลาในการไฮโดรเทอร์มัล จากการศึกษปัจจัยด้านเวลาในการไฮโดรเทอร์มัลพบว่า เมื่อเพิ่มระยะเวลาในการไฮโดรเทอร์มัลให้นานขึ้น โครงสร้างพื้นผิวของวัสดุแหล่งคาร์บอนเกิดการเปลี่ยนแปลง โดยโครงสร้างพื้นผิวของกากกล้วยมีการรวมตัวของอนุภาค โดยการไฮโดรเทอร์มัลที่สภาวะอุณหภูมิ 240 °C ระยะเวลา 8 ชั่วโมง ปริมาณน้ำตั้งต้น 10 มิลลิลิตร อนุภาคเริ่มมีการจับตัวเป็นก้อนทรงกลม

5.2.3 ปริมาณน้ำตั้งต้น จากการศึกษปัจจัยด้านปริมาณน้ำตั้งต้นพบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณน้ำตั้งต้นให้มากขึ้น โครงสร้างพื้นผิวของวัสดุแหล่งคาร์บอนเกิดการเปลี่ยนแปลง โดยโครงสร้างพื้นผิวของกากกล้วยมีการรวมตัวของอนุภาคเป็นทรงกลมขนาดเล็ก โดยการไฮโดรเทอร์มัลที่สภาวะอุณหภูมิ 240 °C ระยะเวลา 8 ชั่วโมง ปริมาณน้ำตั้งต้น 100 มิลลิลิตร อนุภาคมีการจับตัวกันเป็นก้อนทรงกลมมากยิ่งขึ้นโดยมีขนาดอนุภาคเล็กสุดประมาณ 1 ไมโครเมตร

5.3 สมบัติของผลิตภัณฑ์

5.3.1 วิเคราะห์องค์ประกอบทั่วไป Proximate analysis จากการศึกษาสมบัติทางกายภาพของวัสดุแหล่งคาร์บอนจากกากกล้วยด้วยการไฮโดรเทอร์มัลที่สภาวะ อุณหภูมิ 240 °C ระยะเวลา 8 ชั่วโมง ปริมาณน้ำตั้งต้น 100 มิลลิลิตร พบว่าวัสดุแหล่งคาร์บอนมีการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพดังนี้ ปริมาณความชื้นจากเดิม 2.3% เพิ่มขึ้นเป็น 13.9% ปริมาณสารระเหยจากเดิม 78.5% ลดลงเหลือ 47.2% ปริมาณเถ้าจากเดิม 13.2% เพิ่มขึ้นเป็น 30.2% และปริมาณคาร์บอนคงตัวจากเดิม 5.9% เพิ่มขึ้นเป็น 8.7%

5.3.2 วิเคราะห์องค์ประกอบธาตุ Ultimate analysis

จากการศึกษาสมบัติทางกายภาพของวัสดุแหล่งคาร์บอนจากกากกล้วยด้วยการไฮโดรเทอร์มัลที่สภาวะ อุณหภูมิ 240 °C เวลา 8 ชั่วโมง ปริมาณน้ำตั้งต้น 100 มิลลิลิตร พบว่าวัสดุแหล่งคาร์บอนมีการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบธาตุดังนี้ ปริมาณคาร์บอนจากเดิม 33.3% เพิ่มขึ้นเป็น 41.6% ปริมาณไฮโดรเจนจากเดิม 5.2% ลดลงเหลือ 4.9% ปริมาณไนโตรเจนไม่พบเดิม และปริมาณซัลเฟอร์จากเดิม 0.3% เพิ่มขึ้นเป็น 2.9%

5.3.3 วิเคราะห์โครงสร้างรูพรุนและพื้นที่ผิวจำเพาะ

จากการศึกษาโครงสร้างรูพรุนและพื้นที่ผิวจำเพาะของวัสดุแหล่งคาร์บอนที่เตรียมจากกากกล้วยด้วยการไฮโดรเทอร์มัลที่สภาวะ อุณหภูมิ 240 °C เวลา 8 ชั่วโมง ปริมาณน้ำตั้งต้น 100 มิลลิลิตร พบว่าวัสดุแหล่งคาร์บอนมีปริมาณพื้นที่ผิวเท่ากับ $6.4 \text{ m}^2/\text{g}$ มีปริมาตรรูพรุนทั้งหมดเท่ากับ $0.007 \text{ cm}^3/\text{g}$ และมีรูพรุนขนาดเล็กที่สุดเท่ากับ 0.4 nm

5.3.4 วิเคราะห์พฤติกรรมการเผาไหม้

จากการศึกษาพฤติกรรมการเผาไหม้ของวัสดุแหล่งคาร์บอนที่เตรียมจากกากกล้วยด้วยการไฮโดรเทอร์มัลที่สภาวะอุณหภูมิ 240 °C เวลา 8 ชั่วโมง ปริมาณน้ำตั้งต้น 10 มิลลิลิตร พบว่าวัสดุแหล่งคาร์บอนมีค่าการเผาไหม้เท่ากับ 22.17 MJ/Kg ซึ่งมีค่าการเผาไหม้เพิ่มขึ้น จากเดิมกากกล้วยที่ไม่ผ่านการไฮโดรเทอร์มัลมีค่าการเผาไหม้เท่ากับ 13.6 MJ/Kg

5.4 ข้อเสนอแนะ

5.4.1 ศึกษาการไฮโดรเทอร์มัลของวัสดุชีวมวลชนิดอื่นที่เหลือใช้ เช่น มูลสัตว์ต่างๆ เพื่อเป็นการลดค่าใช้จ่ายในการกำจัด และเป็นการสร้างมูลค่าให้กับวัสดุชีวมวลเหล่านั้น

5.4.2 วัสดุแหล่งคาร์บอนที่ได้จากการไฮโดรเทอร์มัลมีขนาดพื้นที่ผิวและปริมาณรูพรุนในปริมาณที่น้อยมาก หากต้องการนำไปใช้เป็นตัวดูดซับจำเป็นต้องทำการเพิ่มประสิทธิภาพในการดูให้มีขนาดพื้นที่ผิวและปริมาณรูพรุนให้มากขึ้น

5.4.2 ศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์โดยการกระตุ้นด้วยวิธีอื่นๆ เช่น การกระตุ้นด้วยไอน้ำ ในสถานะอื่นๆ การกระตุ้นทางกายภาพด้วย แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ หรือ กระตุ้นทางเคมีด้วย สารเคมีชนิดต่างๆ เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์และทราบถึงกลไกการกระตุ้นทางกายภาพและทางเคมีต่อการพัฒนาพื้นที่ผิวและรูพรุนของถ่านกัมมันต์

5.4.3 ไม่ควรใช้อุณหภูมิในการไฮโดรเทอร์มัลที่สูงเกิน 240°C เนื่องจากที่อุณหภูมิสูงจะมีแรงดันภายใน Hydrothermal Chamber ที่สูงมาก อาจส่งผลให้เกิดการระเบิด หรือ เกิดอันตรายขึ้นได้

บรรณานุกรม

TNI

บรรณานุกรม

- [1] ชีวมวล. (ม.ป.ป.). สืบค้นเมื่อ 30 เมษายน 2556, จาก <http://www.eppo.go.th/eng/Load/ET08.pdf>.
- [2] กองอาหารสัตว์ กรมปศุสัตว์. (ม.ป.ป.). การนำผลผลิตจากต้นกล้วยมาใช้เลี้ยงสัตว์. สืบค้นเมื่อ 11 เมษายน 2556, จาก http://nutrition.dld.go.th/Nutrition_Knowledge/article2539/a2539_3.pdf
- [3] ปรินทร์ เต็มญารศิลป์. (2008). การเตรียมและการวิเคราะห์คุณลักษณะเฉพาะของถ่านกัมมันต์จาก ไม้ตองและ ไม้หมาจู. วิทยานิพนธ์ วศ.ม. (วิศวกรรมเคมี). กรุงเทพฯ : บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- [4] พลังงานชีวมวล วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร : น้ำมันบนดิน. (ม.ป.ป.). สืบค้นเมื่อ 30 เมษายน 2556, จาก <http://202.44.52.249/thaienergynews/EnergyFocusDetail.aspx?id=2>.
- [5] Libra J.A.; et al. (2011). Hydrothermal Carbonization of Biomass Residuals: a Comparative Review of the Chemistry, Processes and Applications of Wet and Dry Pyrolysis. **Biofuels**. 2(1) : 89-124.
- [6] Xiao L.P.; Shi Z.J.; Xu F.; and Sun R. C. (2012). Hydrothermal Carbonization of Lignocellulosic Biomass. **Bioresource Technology**. (118) : 619-623.
- [7] Knežević D.; and Enschede. (2009). **Hydrothermal Conversion of Biomass**. Research Report (NWO-CW). Netherland : Netherlands Organization.
- [8] Liu Z.; et al. (2013). Production of Solid Biochar Fuel from Waste Biomass by Hydrothermal Carbonization. **Fuel**. (103) : 943-949.
- [9] Romero-Anaya A.J.; et al. (2012). Hydrothermal and Conventional H₃PO₄ Activation of Two Natural Bio-Fibers. **Sciverse Sciencedirect**. (50) : 3,158-3,169.
- [10] Shinya Y.; and Yukuhiko M. (2008). คู่มือสารชีวมวลเอเชีย แนวทางสำหรับการผลิตและการใช้สารชีวมวล. Tokyo : The Japan Institute of Energy.
- [11] วงกต วงศ์อภัย. (2004). ชีวมวล : อีกทางเลือกหนึ่งของพลังงานไทย. **มติชนสุดสัปดาห์**. 24 (1,238) : 31-34.

- [12] นฤมล บุษบัวทอง. (2550). **ผลขององค์ประกอบทางเคมีของชีวมวลต่อไพโรไลซิสและการเผาไหม้**. วิทยานิพนธ์ วท.ม. (เคมีเทคนิค). กรุงเทพฯ : บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [13] บุญชัย ตระกูลมหชัย; มนัส อาคมยะพันธ์; น้อมจิตต์ เกิดผล; ผาสุก คงชาติ; และเกศรา นุตาลัย. (2534). **การผลิตถ่านกัมมันต์จากพีทและการกระตุ้นด้วยไอน้ำในเตาฟลูอิดซ์เบด**. รายงานฉบับที่ 2 โครงการวิจัยที่ อ-ต 34-01. กรุงเทพฯ : สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย.
- [14] นคร วรสุวรรณรักษ์; ปฐมาภรณ์ โพธิศรี; และวิวัฒน์ ตัณฑะพานิชกุล. (2549). **การศึกษาพฤติกรรมคาร์บอนไนเซชันของชีวมวลในน้ำร้อนความดันสูง**. รายงานการประชุมวิชาการ. กรุงเทพฯ : สมาคมวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทย.
- [15] Bhaskar T.; et al. (2008). Hydrothermal Upgrading of Wood Biomass: Influence of the Addition of K_2CO_3 and Cellulose/Lignin Ration. **Fuel**. (87) : 2,236-2,242.
- [16] Asirvatham H.; et al. (2008). Steam Activated Carbon Preparation Using HTFBR from Biomass and Its Adsorption Characteristics. **Carbon letters**. (9) : 203-209.
- [17] Budinova T.; et al. (2009). Biomass Waste-Derived Activated Carbon for the Removal of Arsenic and Manganese Ions from Aqueous Solutions. **Applied Surface Science**. (255): 4,650-4,657.
- [18] Sun K.; and Jiang C. J. (2010). Preparation and Characterization of Activated Carbon from Rubber-seed Shell by Physical Activation with Steam. **Biomass and Bioenergy**. (34) : 539-544.
- [19] วิทวัส จิรัฐพงศ์; และ กฤษณเวช ทรงธนศักดิ์. (2011). **การศึกษาปริมาณเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินจากของเหลือทิ้งจากพืชเพื่อใช้ในการผลิตแผ่นฟิล์มพลาสติกชีวภาพ**. รายงานการประชุมวิชาการ. กรุงเทพฯ : สมาคมวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทย.
- [20] Sevilla M.; Agullo M.J.; and Fuertes B.A. (2011) Hydrothermal Carbonization of Biomass as a Route for the Sequestration of CO_2 : Chemical and Structural Properties of the Carbonized Products. **Biomass and Bioenergy**. (35) : 3,152-3,159.

- [21] Xiao L.P.; et al. (2012). Hydrothermal Carbonization of Lignocellulosic Biomass. **Bioresource Technology**. (118) : 619-623.
- [22] Romas S.; et al. (2013). Production of Low-Cost Adsorbents with Tunable Surface Chemistry by Conjunction of Hydrothermal Carbonization and Activation Processes. **Microporous and Mesoporous Materials**. (165) : 127-133.
- [23] Ratchahat S.; et al. (2010). Synthesis of Carbon Microspheres from Starch by Hydrothermal Process. **Sci. J. UBU**. (2) : 40-45.
- [24] Asadullah M.; et al. (2007). Adsorption Studies no Activated Carbon Derived From Steam Activation of Jute Stick Char. **J. surface sci. Technol**. (23) : 73-80.
- [25] Gonzalez J.F.; et al. (2009). Pyrolysis of Various Biomass Residues and Char Utilization for the Production of Activated Carbons. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**. (85) : 134-141.
- [26] ณัฐยา พูนสุวรรณ; และ สุพรรณิ จันทร์ภิรมณ์. (2546). **การเตรียมถ่านกัมมันต์จากวัสดุชีวมวลและวัสดุสมบัติโครงสร้างรูพรุน** รายงานการวิจัย. นครราชสีมา : มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- [27] Regmi P.; et al. (2012). Removal of Copper and Cadmium from Aqueous Solution Using Switchgrass Biochar Produced via Hydrothermal Carbonization Process. **Journal of Environmental Management**. (109) : 61-69.
- [28] Budinova T.; et al. (2006). Characterization and Application of Activated Carbon Produced by H_3PO_4 and Water Vapor Activation. **Fuel Processing Technology**. (87) : 899-905.
- [29] Sevilla M.; and Fuetes A. B. (2009). The Production of Carbon Materials by Hydrothermal Carbonization of Cellulose. **Sciencedirect**. (47) : 2,281-2,289.
- [30] Parshetti G.; et al. (2013). Chemical, Structural and Combustion Characteristics of Carbonaceous Products Obtained by Hydrothermal Carbonization of Palm Empty Fruit Bunches. **Biosource Technology**. (135) : 683-689.

- [31] Li W.H.; et al. (2011). Preparation of Sludge-Based Activated Carbon Made From Paper Mill Sewage Sludge by Steam Activation for Dye Wastewater Treatment. **Desalination**. (278) : 179-185.
- [32] Boonamnuyvitaya V.; Sae-ung S.; and Tanthapanichakoon. (2005). Preparation of Activated Carbons from Coffee Residue for the Adsorption of Formaldehyde. **Separation and Purification Technology**. (42) : 159-168.
- [33] Dubinin, M. M. (1966). **Chemistry and Physics of Carbon**. New York: P.L. Walker.



ภาคผนวก

TNI

ภาคผนวก ก.

การถ่ายภาพโครงสร้างพื้นผิวด้วย Scanning Electron Microscope

TNI

ภาคผนวก ก.

การถ่ายภาพโครงสร้างพื้นผิวด้วย Scanning Electron Microscope

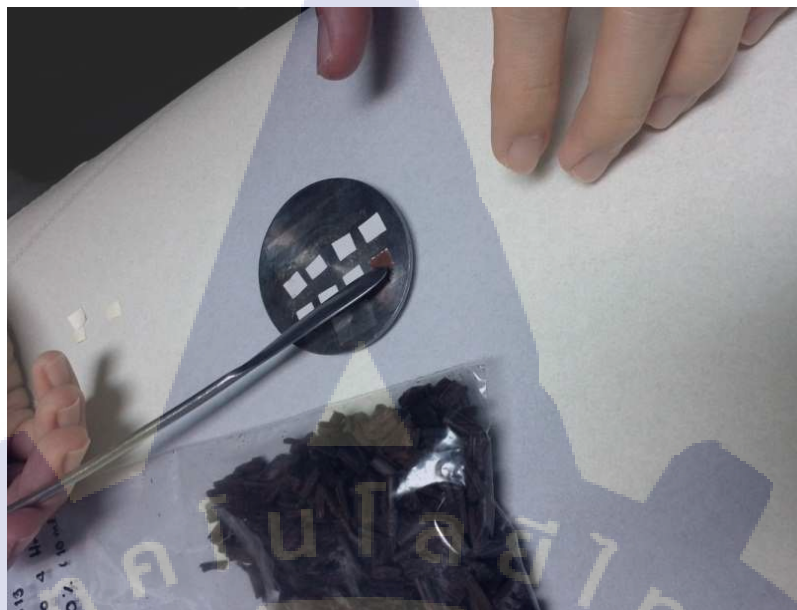
การถ่ายภาพโครงสร้างพื้นผิวด้วย Scanning Electron Microscope

1. ติดคอปเปอร์เทปเข้ากับแท่นวางตัวอย่าง แสดงในรูปที่ ก-1 และ รูปที่ ก-2
2. นำตัวอย่างมาวางลงบนคอปเปอร์เทป แสดงในรูปที่ ก-3
3. นำตัวอย่างที่ติดกับคอปเปอร์เทปโค้งด้วยทอง แสดงในรูปที่ ก-4 และ รูปที่ ก-5
4. นำแท่นวางตัวอย่างใส่เข้าไปในเครื่อง Scanning electron microscope แสดงในรูปที่

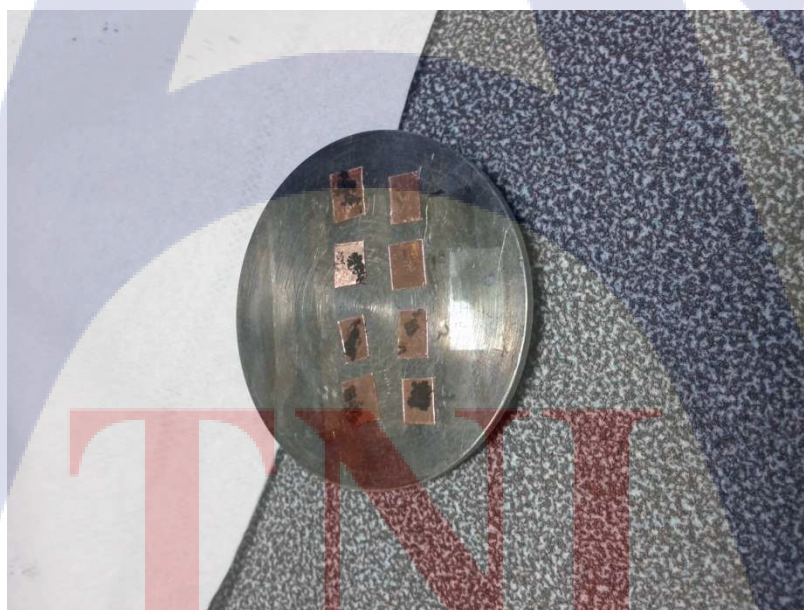
ก-6



รูปที่ ก-1 แปะคอปเปอร์เทปกับแท่นวาง



รูปที่ ก-2 แปะคอปเปอร์เทปกับแผ่นวาง



รูปที่ ก-3 นำตัวอย่างวางบนคอปเปอร์เทป



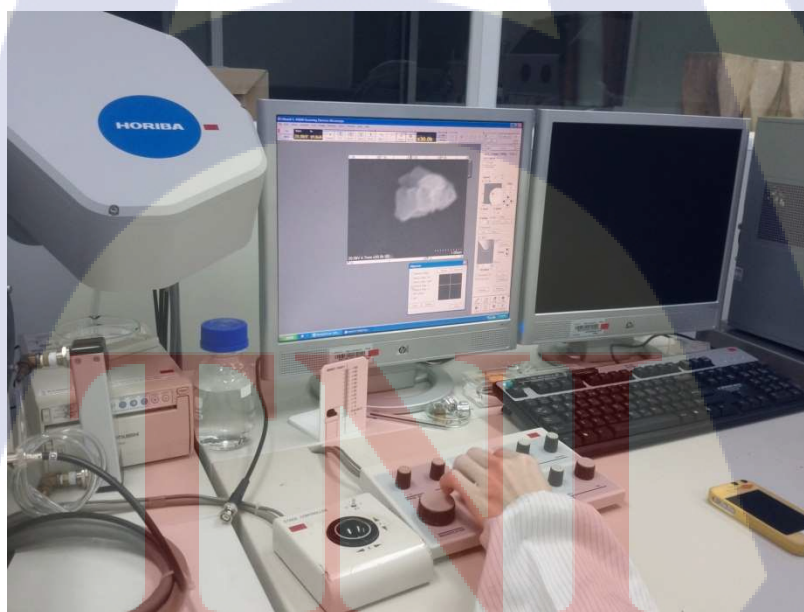
รูปที่ ก-4 โค้ทตัวอย่างด้วยทอง



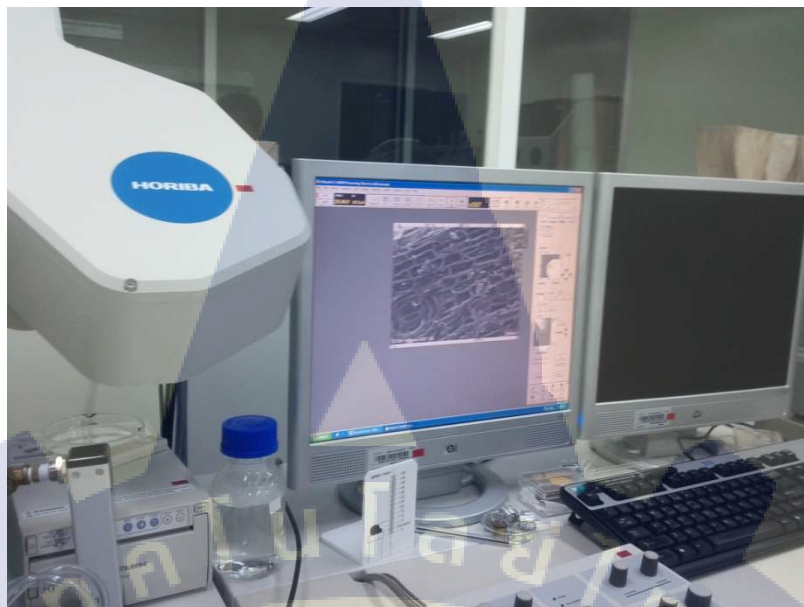
รูปที่ ก-5 โค้ทตัวอย่างด้วยทอง



รูปที่ ก-6 นำตัวอย่างใส่เข้าเครื่อง



รูปที่ ก-7 ปรับกำลังขยายและโฟกัสให้เหมาะสม



รูปที่ ก-8 ปรับกำลังขยายและโฟกัสให้เหมาะสม

TNI

THAI - NICHI INSTITUTE OF TECHNOLOGY

ภาคผนวก ข.

การหาค่าความชื้น (Moisture content) ของวัสดุดิบ

TNI

ภาคผนวก ข.
การหาค่าความชื้น (Moisture content) ของวัตถุดิบ

ตารางที่ ข-1 บันทึกผลการหาค่าความชื้นของวัตถุดิบ

ชั่งน้ำหนักครั้งที่	น้ำหนัก (กรัม)		
	Sample 1	Sample 2	Sample 3
1	124.991	124.052	124.968
2	105.746	105.897	106.537
3	105.673	105.866	106.232
4	105.706	105.895	106.253
5	105.658	105.857	106.221
6	105.672	105.87	106.236
7	105.666	105.851	106.22
8	105.667	105.868	106.232

การคำนวณค่าความชื้นคำนวณจากสูตร %ความชื้น

$$= \frac{\text{น้ำหนักก่อนอบแห้ง} - \text{น้ำหนักหลังอบแห้ง}}{\text{น้ำหนักหลังอบแห้ง}} \times 100 \quad (\text{ข-1})$$

ดังนั้นค่าความชื้นของ Sample 1 = 18.3%

ดังนั้นค่าความชื้นของ Sample 2 = 17.2%

ดังนั้นค่าความชื้นของ Sample 3 = 17.6%

%ความชื้นเฉลี่ย = 17.7%

ภาคผนวก ค.

ขั้นตอนการทดลองการไฮโดรเทอร์มัล

TNI

ภาคผนวก ค.

ขั้นตอนการทดลองการไฮโดรเทอร์มัล

1. นำวัตถุดิบผสมกับน้ำกลั่น (DI water) ในปริมาณที่กำหนด **รูปที่ ค-1**
2. ผสมน้ำกับวัตถุดิบให้เข้ากัน จากนั้นนำไปใส่ใน Hydrothermal chamber **รูปที่ ค-2**
และ **รูปที่ ค-3**
3. ทำการไฮโดรเทอร์มัลด้วยเตาเผาอุณหภูมิสูง โดยควบคุมอุณหภูมิและระยะเวลาตามที่กำหนด และกำหนดให้อัตราการเพิ่มอุณหภูมิเท่ากับ $4\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ **รูปที่ ค-4**
4. หลังจากไฮโดรเทอร์มัล Cooling down Hydrothermal chamber ด้วยน้ำแข็ง **รูปที่ ค-5**
5. อบตัวอย่างให้แห้งในเตาอบ ที่อุณหภูมิ $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ ระยะเวลาประมาณ 6 ชั่วโมงหรือจนน้ำหนักไม่มีการเปลี่ยนแปลง **รูปที่ ค-6**



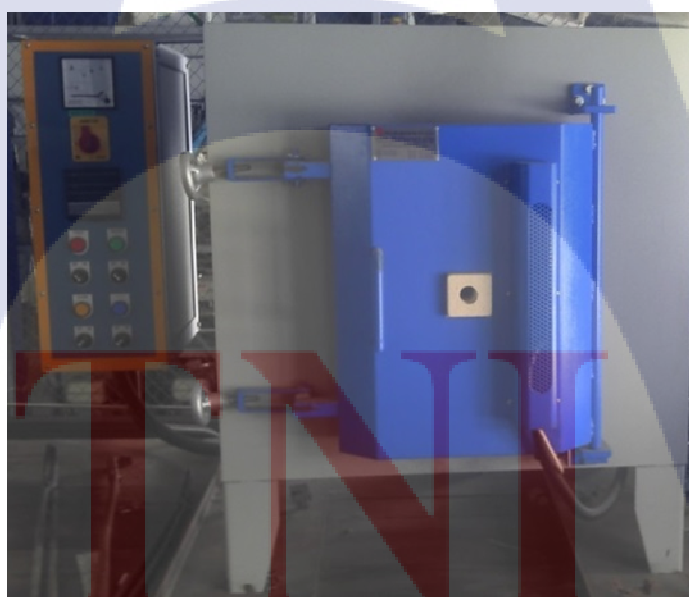
รูปที่ ค-1 ผสมวัตถุดิบกับน้ำกลั่น (DI water)



รูปที่ ค-2 ผสมน้ำกับวัตถุดิบให้เข้ากัน



รูปที่ ค-3 นำวัตถุดิบใส่ใน Hydrothermal Chamber



รูปที่ ค-4 ทำการไฮโดรเทอร์มัลด้วยเตาเผาอุณหภูมิสูง



รูปที่ ค-5 Cooling down Hydrothermal chamber ด้วยน้ำแข็ง



รูปที่ ค-6 อบตัวอย่างให้แห้งในเตาอบ ที่อุณหภูมิ 80 °C