

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

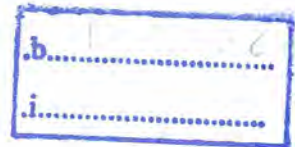
การผลิตผ่านกัมมันต์แบบเมคโดยเตรียมจากของเสียอุตสาหกรรมเยื่อกระดาษ



T104216



เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 104216
วัน,เดือน,ปี 30 ต.ค. 2552



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2551

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Granulated Activated Carbon from Pulp – Mill Waste



**A REPORT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT
FOR THE DEGREE OF BACHELOR IN CHEMICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSITUTUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2008**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปริญญานิพนธ์

นักศึกษา

ปริญญา

สาขาวิชา

พ.ศ.

อาจารย์ที่ปรึกษา

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

การผลิตถ่านกัมมันต์แบบเม็ด โดยเตรียมจากของเสียอุตสาหกรรมเยื่อกระดาษ

ชาดา สิริพัฒนานนท์ รหัสประจำตัว 48012278

ศิริพร ร่วมจินดา รหัสประจำตัว 48012296

วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

วิศวกรรมเคมี

2551

ดร. เกรียงศักดิ์ ไกรวัฒนวงศ์

ดร. สันติ วัฒนานูสรณ์

ปริญญานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี

คณะกรรมการตรวจสอบปริญญานิพนธ์

เสี่ยวศักดิ์ ไกรวัฒนวงศ์ ประธานกรรมการ
(ดร. เกรียงศักดิ์ ไกรวัฒนวงศ์)

.....กรรมการ
(ผศ. รุ่งฤดี เปญจางคประเสริฐ)

.....กรรมการ
(ดร. สันติ วัฒนานูสรณ์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปริญญานิพนธ์	การผลิตถ่านกัมมันต์แบบเม็ดโดยเตรียมจากของเสียอุตสาหกรรมเยื่อกระดาษ
นักศึกษา	ชาดา ศิริพัฒนานนท์ รหัสประจำตัว 48012278 ศิริพร ร่วมจินดา รหัสประจำตัว 48012296
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
พ.ศ.	2551
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร. เกรียงศักดิ์ ไกรวัฒนวงศ์
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ดร. สันติ วัฒนานูสรณ์

บทคัดย่อ

โครงการวิจัยนี้เป็นการศึกษาการสังเคราะห์คาร์บอนกัมมันต์จากของเสียที่มาจากโรงงานอุตสาหกรรมเยื่อกระดาษ โดยทำการเตรียมผงคาร์บอนซึ่งมีสัดส่วนปริมาณแห้งสำหรับตัวประสาน 5 ค่า (0.1 0.2 0.3 0.4 และ 0.5) นำมาเผาแบบอับอากาศภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจน ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 90 นาทีจากนั้นทำการกระตุ้นด้วยวิธีทางกายภาพโดยใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที แล้ววิเคราะห์ด้วยเครื่องทดสอบความแข็งแรง เครื่องดูดซับก๊าซไนโตรเจน กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด จากผลทดลองพบว่า ความหนาแน่นปรากฏจะลดลงหลังทำการเผาและกระตุ้น หลังทำการเผา ค่ามอดูลัสที่มีค่าสูงสุดเป็น 0.25 MPa และหลังทำการกระตุ้นพบว่าค่ามอดูลัสที่มีค่าสูงสุดมีค่าเป็น 0.22 ที่อัตราส่วน C/W = 0.167 และ B/C = 0.10 ความพรุนสูงสุดของวัสดุที่ได้เตรียมได้จาก C/W = 0.167 และ B/C = 0.05 โดยมีพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาณเมโซพอร์ เป็น 289.14 m²/g และ 0.36 cm³/g ตามลำดับ

Report Title	Granulated Activated Carbon from Pulp – Mill Waste
Student	Miss.Chada Siriphattananon Student ID. 48012278 Miss.Siriporn Rumjinda Student ID. 48012296
Degree	Bachelor of Engineering
Programme	Chemical Engineering
Year	2008
Thesis Advisor	Dr. Kriangsak Kraiwattanawong
Thesis Co – advisor	Dr.Santi Wattananusorn

ABSTRACT

This research is to study the synthesis of activated carbon from Pulp mill waste by the mixture of powder carbon and starch for five ratios (0.1 0.2 0.3 0.4 and 0.5), carbonized under nitrogen atmosphere at temperature of 700 °C for 90 minutes and physically activated by carbon dioxide at temperature of 900 °C for 30 minutes. The specimens are characterized by the universal testing machine, nitrogen adsorption apparatus and scanning electron microscope. The results showed that the apparent density decreased by carbonization and activation. The maximum modulus is 0.25 MPa by carbonization and 0.22 MPa by activation at C/W= 0.167 and B/C = 0.10. The maximum porosity of synthesized materials at C/W= 0.167 and B/C = 0.05 has 289.14 m²/g of specific surface area and 0.36 cm³/g of mesopore volume.

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ ศ.ดร.ปิยะสาร ประเสริฐธรรม หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่อง BET วิเคราะห์สมบัติของคาร์บอนกัมมันต์

ขอขอบพระคุณ คุณเพ็ญพิศ วงศ์มณีนิล นักศึกษาปริญญาเอก และนักศึกษา ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยทุกท่าน ที่ช่วยอำนวยความสะดวกและให้ความช่วยเหลือในการทำโครงการ

บริษัท แอ็ดวานซ์ อะโกร จำกัด (มหาชน) ที่ได้อนุเคราะห์ Dreg (ของเสียที่นำมาทำเป็นสารตั้งต้น)

คณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่าน ที่ให้ความรู้และคำแนะนำ ความช่วยเหลือ สั่งสอนในทุกๆ ด้านมาโดยตลอด

ขอขอบพระคุณอาจารย์ประกอบ กิจไชยา และคุณพิมพ์ใจ ภูษนะกิจ ที่ให้ความช่วยเหลือในเรื่องของสารที่นำมาทำเป็นสารตั้งต้น

สุดท้ายนี้ ขอขอบพระคุณ ดร.เกรียงศักดิ์ ไกรวัฒนวงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ และ ดร.สันติ วัฒนานุสรณ์ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการร่วม ที่ให้คำแนะนำ มอบความรู้และประสบการณ์ที่มีคุณค่าตลอดการทำโครงการนี้

หากโครงการนี้มีความผิดพลาดประการใด คณะผู้จัดทำต้องขออภัยมา ณ โอกาสนี้ด้วย

ชาดา ศิริพัฒนานนท์
ศิริพร ร่วมจินดา
ผู้จัดทำ

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	ก
สารบัญตาราง	ง
สารบัญรูป	ฉ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	1
1.3 ขอบเขตของโครงการ.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 คาร์บอนกัมมันต์.....	4
2.1.1 ความหมายของคาร์บอนกัมมันต์.....	4
2.1.2 วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตคาร์บอนกัมมันต์.....	4
2.1.3 ชนิดของคาร์บอนกัมมันต์.....	5
2.1.4 ประโยชน์ของคาร์บอนกัมมันต์.....	8
2.1.5 กระบวนการในการผลิตคาร์บอนกัมมันต์.....	9
2.1.6 ปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพของคาร์บอนกัมมันต์.....	12
2.2 การดูดซับ.....	12
2.2.1 ไอโซเทอมของการดูดซับ.....	13
2.2.2 การหาค่าพื้นที่ผิวของคาร์บอนกัมมันต์.....	16
2.3 ความแข็งแรงของถ่านกัมมันต์.....	19
2.4 Dreg.....	20
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 3 การทดลอง

3.1 การเตรียมวัตถุดิบ.....	25
3.1.1 กากคาร์บอน.....	25
3.1.2 การเตรียมตัวประสาน.....	25
3.1.3 การเตรียมเม็ดคาร์บอน.....	26
3.2 การคาร์บอนไนซ์.....	27
3.3 การกระตุ้น.....	28

บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง

4.1 การหาอุณหภูมิที่เหมาะสมในการกระตุ้น.....	29
4.2 ร้อยละมวลที่หายของคาร์บอนและค่าความหนาแน่น.....	30
4.3 การวิเคราะห์ค่าความแข็งแรง.....	32
4.4 การวิเคราะห์โครงสร้างของสารดูดซับ.....	33
4.5 การวิเคราะห์สภาพพื้นผิวของถ่านกัมมันต์โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	38

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย.....	50
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	51

ภาคผนวก

เอกสารอ้างอิง.....	52
ภาคผนวก ก ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง.....	55
ภาคผนวก ข ตัวอย่างการคำนวณ.....	76
ภาคผนวก ค มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมถ่านกัมมันต์	77
ภาคผนวก ง การหาค่าพื้นที่ผิวของคาร์บอนกัมมันต์โดยใช้วิธีวิเคราะห์มาตรฐาน BET.....	82

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

ภาคผนวก จ การวิเคราะห์ด้วยเครื่องทดสอบคุณสมบัติทางกล (Universal Testing Machine).....	83
ภาคผนวก ฉ การวิเคราะห์สภาพพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	84



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1	วัตถุดิบต่าง ๆ ที่มีการศึกษาเพื่อใช้ในการผลิตคาร์บอนกัมมันต์.....	5
ตารางที่ 2.2	การแบ่งกลุ่มขนาดของรูพรุนตาม International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC).....	6
ตารางที่ 2.3	ตารางแสดงค่าการดูดซับของสารตัวอย่าง SDG และ 2SKG.....	22
ตารางที่ 2.4	แสดงคุณสมบัติของคาร์บอนกัมมันต์ที่เตรียมขึ้น.....	24
ตารางที่ 4.1	อัตราส่วนตัวประสานต่อผงคาร์บอนในการสังเคราะห์สารดูดซับ.....	29
ตารางที่ 4.2	ผลของอุณหภูมิในการกระตุ้นต่อร้อยละมวลที่หาย.....	29
ตารางที่ 4.3	แสดงผลของร้อยละมวลที่หายและค่าความหนาแน่นที่เตรียมจากอัตราส่วนระหว่างตัวประสานกับผงคาร์บอน.....	30
ตารางที่ 4.4	ผลการตรวจสอบสมบัติของสารดูดซับคาร์บอนด้วยแบบจำลอง BET.....	34
ตารางที่ ก.1	แสดงลักษณะภายนอกของสารดูดซับที่เตรียมขึ้นเป็นเม็ดเมื่อทำการเผาและกระตุ้น.....	57
ตารางที่ ก.2	ข้อมูลแสดงความหนาแน่นจากการทดลองเมื่อทำการเผา.....	59
ตารางที่ ก.3	ข้อมูลการทดลองแสดงความหนาแน่นเมื่อทำการกระตุ้น.....	61
ตารางที่ ก.4	ข้อมูลการทดลองหาค่าร้อยละมวลหายของสารดูดซับ.....	63
ตารางที่ ก.5	ข้อมูลผลการทดสอบค่ามอดูลัสของสารดูดซับที่ทำการเผา.....	65
ตารางที่ ก.6	ข้อมูลผลการทดสอบค่ามอดูลัสของสารดูดซับที่ทำการกระตุ้น.....	66
ตารางที่ ก.7	ผลของร้อยละ โดยมวลเมื่อทำการกระตุ้นที่อุณหภูมิ.....	67
ตารางที่ ก.8	ข้อมูลการดูดซับก๊าซไนโตรเจนเพื่อนำไปสร้างไอโซเทอมของ $B/C = 0.05$ โดยทำการเผาที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 90 นาที.....	68

สารบัญตาราง(ต่อ)

หน้า

ตารางที่ ก.9	ข้อมูลการดูดซับก๊าซไนโตรเจนเพื่อนำไปสร้างไอโซโทมของ B/C = 0.05 โดยทำการกระตุ้นที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที.....	69
ตารางที่ ก.10	ข้อมูลการดูดซับก๊าซไนโตรเจนเพื่อนำไปสร้างไอโซโทมของ B/C = 0.15 โดยทำการเผาที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 90 นาที.....	70
ตารางที่ ก.11	ข้อมูลการดูดซับก๊าซไนโตรเจนเพื่อนำไปสร้างไอโซโทมของ B/C = 0.15 โดยทำการกระตุ้นที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที.....	71
ตารางที่ ก.12	ข้อมูลการกระจายขนาดของรูพรุนของ B/C = 0.05 โดยทำการเผาที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 90 นาที	73
ตารางที่ ก.13	ข้อมูลการกระจายขนาดของรูพรุนของ B/C = 0.05 โดยทำการกระตุ้นที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที	74
ตารางที่ ก.14	ข้อมูลการกระจายขนาดของรูพรุนของ B/C = 0.15 โดยทำการเผาที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 90 นาที	75
ตารางที่ ก.15	ข้อมูลการกระจายขนาดของรูพรุนของ B/C = 0.15 โดยทำการกระตุ้นที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที	76
ตารางที่ ค.1	คุณลักษณะทางฟิสิกส์และทางเคมีของคาร์บอนกัมมันต์ผง.....	79
ตารางที่ ค.2	คุณลักษณะทางฟิสิกส์และทางเคมีของคาร์บอนกัมมันต์เม็ด.....	79
ตารางที่ ค.3	แผนการชักตัวอย่างสำหรับการทดสอบการบรรจุ.....	80

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 1.1	ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	3
รูปที่ 2.1	การกระจายของปริมาตรจำเพาะและขนาดรูพรุนของถ่านกัมมันต์.....	7
รูปที่ 2.2	การกระจายตัวของรูพรุนของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากวัตถุดิบชนิดต่างๆ.....	7
รูปที่ 2.3	ไอโซเทอมของการดูดซับตามการจำแนกของ IUPAC.....	13
รูปที่ 2.4	ลักษณะของ Langmuir adsorption isotherm ในรูปแบบของกราฟเส้นตรง.....	16
รูปที่ 2.5	ของเสียที่นำมาทำเป็นวัตถุดิบ.....	20
รูปที่ 3.1	ภาพสำหรับขึ้นรูปแบบเม็ด.....	27
รูปที่ 4.1	แสดงความหนาแน่นของการเพิ่มอัตราส่วนผงคาร์บอนต่อตัวประสาน.....	31
รูปที่ 4.2	แสดงรอยแตกของชิ้นงานที่อัตราส่วน $C/W = 0.167$ มี $B/C = 0.25$	31
รูปที่ 4.3	ผลของร้อยละ โดยมวลที่หายไปของคาร์บอนกับอัตราส่วนผงคาร์บอนต่อตัวประสานเมื่อทำการเผาและการกระตุ้น.....	32
รูปที่ 4.4	แสดงค่ามอดูลัสกับค่าอัตราส่วนตัวประสานต่อผงคาร์บอน.....	33
รูปที่ 4.5	แสดงการกระจายตัวของขนาดรูพรุนของสารดูดซับที่มี $C/W = 0.167$, $B/C = 0.05$ $C/W = 0.167$, $B/C = 0.15$ และ $C/W = 0.167$, $B/C = 0.25$ เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียสใช้เวลา 90 นาที.....	34
รูปที่ 4.6	ไอโซเทอมการดูดซับและการคายซับของบนสารดูดซับที่ทำการเผา เมื่ออุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียสเวลา 90 นาที มี $C/W = 0.167$ $B/C = 0.05$ 0.15 และ 0.25	35
รูปที่ 4.7	แสดงการกระจายตัวของขนาดรูพรุนของสารดูดซับที่มี $C/W = 0.167$, $B/C = 0.05$ และ $C/W = 0.167$, $B/C = 0.15$ ทำการกระตุ้นที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียสเวลา 30 นาที.....	35
รูปที่ 4.8	ไอโซเทอมการดูดซับและการคายซับของบนสารดูดซับที่ทำการกระตุ้นที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียสเวลา 30 นาที มี $C/W = 0.167$ $B/C = 0.05$ และ 0.15	36
รูปที่ 4.9	แสดงการกระจายตัวของขนาดรูพรุนของสารดูดซับที่มี $C/W = 0.167$, $B/C = 0.05$ เผาที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียสเวลา 90 นาทีและกระตุ้นด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์.....	36

สารบัญรูป(ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.10	ไอโซเทอมการดูดซับและการคายซับของบนสารดูดซับที่อัตราส่วนตัวประสานต่อผงคาร์บอน ที่ $C/W = 0.167$ และ $B/C = 0.05$37
รูปที่ 4.11	แสดงการกระจายตัวของขนาดรูพรุนของสารดูดซับที่มี $C/W = 0.167$, $B/C = 0.15$ เหนือที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียสเวลา 90 นาทีและกระตุ้นด้วยก๊าซคาร์บอน ไดออกไซด์.....37
รูปที่ 4.12	ไอโซเทอมการดูดซับและการคายซับของบนสารดูดซับที่อัตราส่วนตัวประสานต่อผงคาร์บอน ที่ $C/W = 0.167$ และ $B/C = 0.15$38
รูปที่ 4.13	แสดงรูปสัณฐานวิทยาของผงคาร์บอนที่ไม่ได้เติมตัวประสาน (a) กำลังขยาย 2,000 เท่า (b)กำลังขยาย 5,000 เท่า (c)กำลังขยาย 10,000 เท่า (d) กำลังขยาย 20,000 เท่า.....39
รูปที่ 4.14	แสดงรูปสัณฐานวิทยาของผงคาร์บอนที่เติมตัวประสานอัตราส่วน $B/C = 0.05$ โดยทำการเผาแบบอับอากาศ (a) กำลังขยาย 2,000 เท่า (b)กำลังขยาย 5,000 เท่า (c)กำลังขยาย 10,000 เท่า (d) กำลังขยาย 20,000 เท่า.....40
รูปที่ 4.15	แสดงรูปสัณฐานวิทยาของผงคาร์บอนที่เติมตัวประสานอัตราส่วน $B/C = 0.10$ โดยทำการเผาแบบอับอากาศ(a) กำลังขยาย 2,000 เท่า (b)กำลังขยาย 5,000 เท่า (c)กำลังขยาย 10,000 เท่า (d) กำลังขยาย 20,000 เท่า41
รูปที่ 4.16	แสดงรูปสัณฐานวิทยาของผงคาร์บอนที่เติมตัวประสานอัตราส่วน $B/C = 0.15$ โดยทำการเผาแบบอับอากาศ(a) กำลังขยาย 2,000 เท่า (b)กำลังขยาย 5,000 เท่า (c)กำลังขยาย 10,000 เท่า (d) กำลังขยาย 20,000 เท่า.....42
รูปที่ 4.17	แสดงรูปสัณฐานวิทยาของผงคาร์บอนที่เติมตัวประสานอัตราส่วน $B/C = 0.20$ โดยทำการเผาแบบอับอากาศ (a) กำลังขยาย 2,000 เท่า (b) กำลังขยาย 10,000 เท่า (c) กำลังขยาย 20,000 เท่า.....43

สารบัญรูป(ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.18	แสดงรูปสัณฐานวิทยาของผงคาร์บอนที่เติมตัวประสานอัตราส่วน B/C = 0.25 โดยทำการเผาแบบอับอากาศ(a) กำลังขยาย 2,000 เท่า (b)กำลังขยาย 5,000 เท่า (c)กำลังขยาย 10,000 เท่า (d) กำลังขยาย 20,000 เท่า.....	44
รูปที่ 4.19	แสดงรูปสัณฐานวิทยาของผงคาร์บอนที่เติมตัวประสานอัตราส่วน B/C = 0.05 โดยทำการกระตุ้นด้วย ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (a) กำลังขยาย 2,000 เท่า (b)กำลังขยาย 5,000 เท่า (c)กำลังขยาย 10,000 เท่า (d) กำลังขยาย 20,000 เท่า.....	45
รูปที่ 4.20	แสดงรูปสัณฐานวิทยาของผงคาร์บอนที่เติมตัวประสานอัตราส่วน B/C = 0.10 โดยทำการกระตุ้นด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (a) กำลังขยาย 2,000 เท่า (b) กำลังขยาย 5,000 เท่า (c)กำลังขยาย 10,000 เท่า (d) กำลังขยาย 20,000 เท่า	46
รูปที่ 4.21	แสดงรูปสัณฐานวิทยาของผงคาร์บอนที่เติมตัวประสานอัตราส่วน B/C = 0.15 โดยทำการกระตุ้นด้วย ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (a) กำลังขยาย 2,000 เท่า (b) กำลังขยาย 5,000 เท่า (c) กำลังขยาย 10,000 เท่า (d) กำลังขยาย 20,000 เท่า.....	47
รูปที่ 4.22	แสดงรูปสัณฐานวิทยาของผงคาร์บอนที่เติมตัวประสานอัตราส่วน B/C = 0.20 โดยทำการกระตุ้นด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (a) กำลังขยาย 2,000 เท่า (b)กำลังขยาย 5,000 เท่า (c)กำลังขยาย 10,000 เท่า (d) กำลังขยาย 20,000 เท่า.....	48
รูปที่ 4.23	แสดงรูปสัณฐานวิทยาของผงคาร์บอนที่เติมตัวประสานอัตราส่วน B/C = 0.25 โดยทำการกระตุ้นด้วย ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (a) กำลังขยาย 2,000 เท่า (b) กำลังขยาย 5,000 เท่า (c)กำลังขยาย 10,000 เท่า (d) กำลังขยาย 20,000 เท่า.....	49
รูปที่ ก.1	แสดงการกระจายขนาดของรูพรุนของสารดูดซับ B/C = 0.05 โดยทำการเผาอุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียสเวลา 90นาที.....	73
รูปที่ ก.2	แสดงการกระจายขนาดของรูพรุนของสารดูดซับ B/C = 0.05 โดยทำการกระตุ้นที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30นาที.....	74

สารบัญรูป(ต่อ)

หน้า

รูปที่ ก.3	แสดงการกระจายขนาดของรูพรุนของสารดูดซับ B/C = 0.15 โดยทำการเผา ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 90 นาที.....75
รูปที่ ก.4	แสดงการกระจายขนาดของรูพรุนของสารดูดซับ B/C = 0.15 โดยทำการกระตุ้น ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที.....76
รูปที่ ง.1	เครื่อง Micromeritics Surface Area and porosity Analyzer รุ่น ASAP 202083
รูปที่ จ.1	เครื่องมือ Universal Testing Machine ของบริษัท LLOYD รุ่น LR 5K..... 84
รูปที่ ฉ.1	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด รุ่น LEO 1455 VP.....85

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมา

กระบวนการผลิตของโรงงานอุตสาหกรรมมักจะมีของเสียซึ่งจะก่อให้เกิดปัญหามลภาวะต่อสิ่งแวดล้อม โรงงานอุตสาหกรรมผลิตกระดาษเป็นโรงงานหนึ่งที่เกิดปัญหาเช่นนี้ ในกระบวนการผลิตกระดาษจะใช้กระบวนการแยกเยื่อกระดาษจากไม้ยูคาลิปตัส ของเสียที่มาจากกระบวนการนี้จะนำมาเผาไหม้ซึ่งไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้จึงต้องกำจัดด้วยวิธีการฝังกลบอย่างเดียว แต่ถ้านำ Dreg นี้มาใช้ให้เกิดประโยชน์จะสามารถช่วยเพิ่มมูลค่าของของเสียและช่วยลดการกำจัดของเสียจากกระบวนการผลิตที่อาจส่งผลกระทบต่อปัญหาสิ่งแวดล้อม

ในปัจจุบันตัวดูดซับที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย คือ ซิลิกาเจล ซีโอไลต์ และ คาร์บอนกัมมันต์ ตัวดูดซับเหล่านี้มีคุณสมบัติที่แตกต่างกันจึงมีความเหมาะสมที่จะใช้เพื่อการดูดซับที่ต่างกัน ในบรรดาตัวดูดซับเหล่านี้ ถ่านกัมมันต์ได้มีการใช้งานอย่างกว้างขวาง เช่น ใช้ในการดูดซับสีหรือกลิ่นในเครื่องกรองน้ำ การดูดซับสารจำพวกสารอะโรมาติก โลหะหนักหรือตัวทำละลายต่างๆ เป็นต้น คาร์บอนกัมมันต์สามารถสังเคราะห์จากของเสียซึ่งเป็นทางเลือกหนึ่งในการลดปัญหาสิ่งแวดล้อมพร้อมไปกับการเพิ่มมูลค่าให้กับของเสียที่ไม่สามารถนำกลับมาใช้ประโยชน์ได้ คาร์บอนกัมมันต์ที่อยู่ในลักษณะของผงเมื่อนำไปใช้งานจะนำกลับมาใช้ซ้ำไม่ได้แต่หากเปลี่ยนผงถ่านนี้ให้อยู่ในรูปของเม็ดจะสามารถนำมาใช้ประโยชน์ในการดูดซับได้และเมื่อผ่านการใช้งานแล้วจะสามารถนำกลับมาใช้ได้

การนำเข้าตัวดูดซับจากต่างประเทศจะทำให้ประเทศไทยต้องสูญเสียเงินตราไปไม่น้อย หากได้มีการพัฒนาและส่งเสริมการผลิตคาร์บอนในประเทศโดยมาจากวัตถุดิบที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลักจะช่วยลดการนำเข้าตัวดูดซับจากต่างประเทศได้อีกทางหนึ่ง คณะผู้ทำงานโครงการจึงมีความสนใจที่จะสังเคราะห์คาร์บอนกัมมันต์จากของเสียที่มาจากโรงงานผลิตเยื่อกระดาษขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 ศึกษาวิธีการสังเคราะห์คาร์บอนกัมมันต์ด้วยกากคาร์บอนที่ได้มาจากของเสียในโรงงานอุตสาหกรรมเยื่อกระดาษ
- 1.2.2 ศึกษา Binder ที่ใช้เป็นตัวประสานผงคาร์บอนให้เป็นเม็ดคาร์บอน
- 1.2.3 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์เม็ดถ่านกัมมันต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 1.2.4 ศึกษาคุณลักษณะของเม็ดถ่านกัมมันต์ที่สังเคราะห์ได้
- 1.2.5 ศึกษาคุณสมบัติด้านการดูดซับของเม็ดถ่านกัมมันต์ที่สังเคราะห์ได้

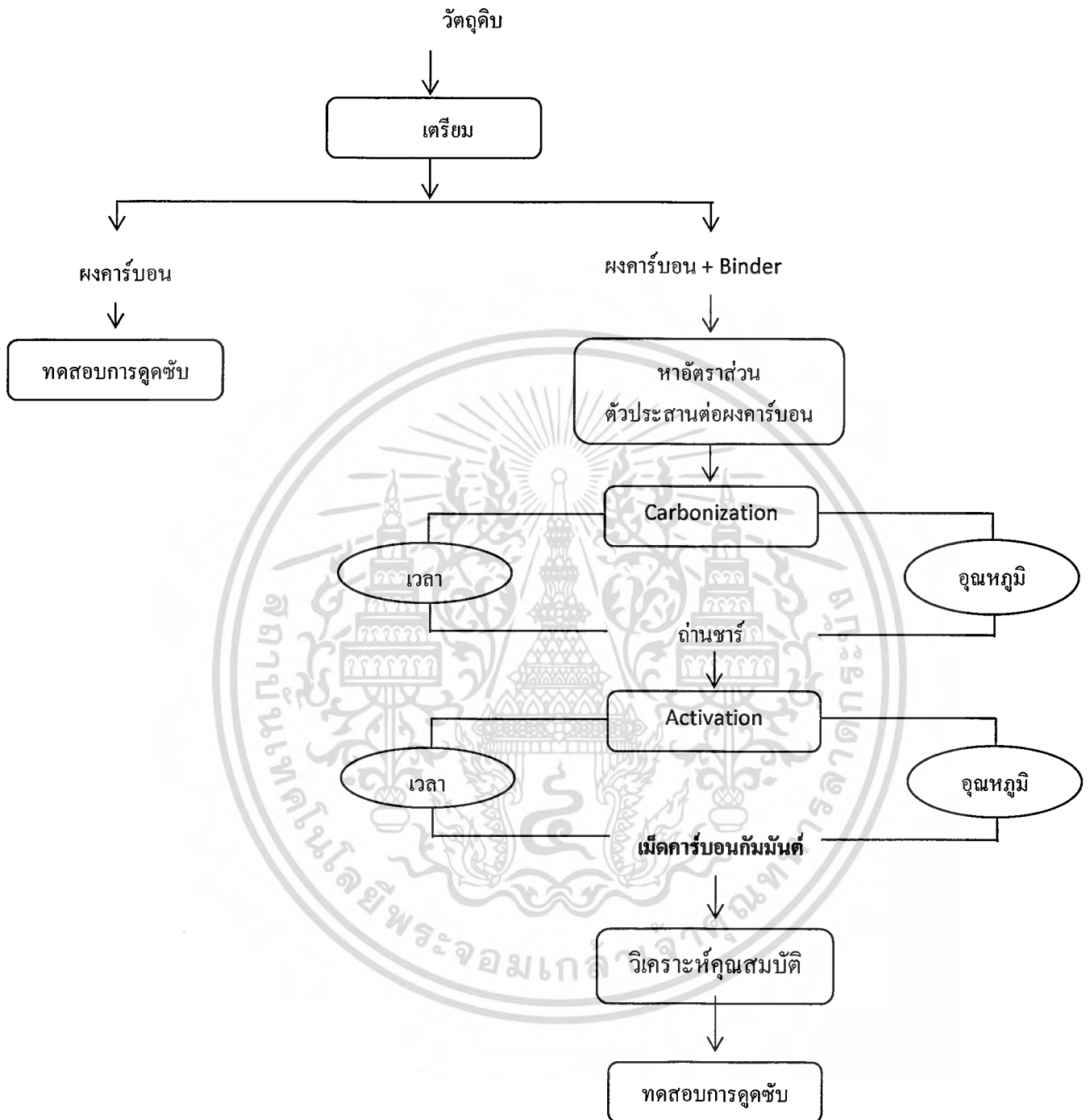
1.3 ขอบเขตของโครงการงาน

- 1.3.1 ทำการเตรียมคาร์บอนกัมมันต์แบบเม็ดโดยศึกษาอัตราส่วนตัวประสาน (แป้งมันสำปะหลัง) ต่อผงคาร์บอนโดยน้ำหนัก (B/C) ด้วย 5 อัตราส่วนคือ 0.05 0.10 0.15 0.20 และ 0.25
- 1.3.2 วิเคราะห์ค่าความแข็งแรงของคาร์บอนกัมมันต์แบบเม็ดโดยใช้เครื่องมือทดสอบคุณสมบัติทางกล (Universal Testing Machine)
- 1.3.3 วิเคราะห์สมบัติของคาร์บอนกัมมันต์แบบเม็ดที่เตรียมขึ้น โดยอาศัยแบบจำลองด้วยวิธี BET
- 1.3.4 การวิเคราะห์สภาพพื้นผิวของคาร์บอนกัมมันต์โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 ได้รับความรู้เกี่ยวกับวิธีการสังเคราะห์เม็ดคาร์บอนกัมมันต์
- 1.4.2 สามารถนำเม็ดคาร์บอนกัมมันต์ที่สังเคราะห์ได้ไปใช้ประโยชน์
- 1.4.3 เพิ่มมูลค่าและลดการกำจัดของเสียด้วยการนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการสังเคราะห์เม็ดคาร์บอนกัมมันต์
- 1.4.4 เป็นการนำตัวประสานที่เป็นวัสดุจากธรรมชาติมาใช้แทนวัสดุที่เป็นสารเคมี
- 1.4.5 ได้เรียนรู้การทำงานเป็นกลุ่ม ฝึกทักษะการคิดวางแผน ฝึกการแก้ปัญหา
- 1.4.6 ได้รับประสบการณ์การทำงานและได้นำไปใช้ในอนาคต

1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน



รูปที่ 1.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎี

2.1 คาร์บอนกัมมันต์ [1-3]

2.1.1 ความหมายของคาร์บอนกัมมันต์

คาร์บอนกัมมันต์ หมายถึง ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการนำวัตถุดิบธรรมชาติที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลักมาผ่านกระบวนการคาร์บอนไนซ์ (Carbonization) และกระบวนการกระตุ้น (Activation) จนได้ผลิตภัณฑ์ที่มีสีดำ มีโครงสร้างเป็นรูพรุน มีพื้นที่ผิวสูง และมีความสามารถในการดูดซับได้สูง

คาร์บอนกัมมันต์เป็นรูปอสัณฐานของถ่าน คือ มีรูปร่างที่ไม่แน่นอน จะถูกสังเคราะห์ขึ้นมาเป็นพิเศษเพื่อให้มีพื้นที่ผิวให้มากที่สุด โดยการทำให้มีรูพรุนหรือโพรงในเนื้อคาร์บอนมากที่สุดเท่าที่จะทำได้ พื้นที่ผิวของคาร์บอนที่ได้จะอยู่ในช่วงประมาณ 500-2000 ตารางเมตรต่อกรัม ใช้สำหรับในการดูดซับสี กลิ่น หรือ สารปนเปื้อนอื่นๆ

คาร์บอนกัมมันต์นิยมนำมาใช้เป็นตัวดูดซับสารทั้งที่อยู่ในสถานะก๊าซและของเหลวในโรงงานอุตสาหกรรมต่าง ๆ อย่างแพร่หลาย โดยแบ่งการใช้งานตามลักษณะรูปร่างของคาร์บอนกัมมันต์ คือ คาร์บอนกัมมันต์ชนิดที่เป็นผงละเอียดจะนำมาใช้ในงานที่เกี่ยวข้องกับสารละลายหรือของเหลว เช่น ใช้ในการฟอกสีน้ำตาลดิบ ใช้ในอุตสาหกรรมน้ำมันพืชเพื่อฟอกสีและทำให้มีรสดีขึ้น ใช้ดูดกลิ่นและสีของผลิตภัณฑ์อาหาร ใช้ในการดูดกลิ่นที่ไม่ต้องการในอุตสาหกรรมแอลกอฮอล์และเครื่องดื่ม และใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมทำน้ำดื่มให้บริสุทธิ์ เป็นต้น ส่วนคาร์บอนกัมมันต์ที่เป็นเม็ดหรือเกล็ดจะนิยมนำมาใช้ในอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับการทำก๊าซให้บริสุทธิ์ เช่น อุตสาหกรรมเครื่องปรับอากาศใช้คาร์บอนกัมมันต์ในการดูดก๊าซต่าง ๆ ที่เป็นอันตรายต่อร่างกาย และอุตสาหกรรมทำหน้ากากป้องกันก๊าซพิษทั้งที่ใช้ในกิจการทหารและที่ใช้ในงานทั่วไป เป็นต้น

2.1.2 วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตคาร์บอนกัมมันต์ [4 - 5]

วัตถุดิบที่นำมาใช้เป็นคาร์บอนกัมมันต์ควรมีปริมาณคาร์บอนสูงและมีเถ้า (Ash) ต่ำ โดยส่วนใหญ่ วัตถุดิบสำหรับการผลิตคาร์บอนกัมมันต์ คือ วัสดุที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบไม่ว่าจะได้จากสัตว์ พืช และแร่ธาตุ เช่น เลือด กระดูก กะลามะพร้าว ชังข้าว โปด ไม้เนื้อแข็ง ไม้เนื้ออ่อน ลิกนิน เนื่องจากสามารถผลิตคาร์บอนกัมมันต์ที่มีความสามารถในการดูดซับสูง และมีรูพรุนขนาดเล็ก วัตถุดิบที่นำมาผลิตเป็นคาร์บอนกัมมันต์ควรมีสมบัติดังต่อไปนี้

- มีปริมาณสารระเหยต่ำ
- มีปริมาณคาร์บอนเป็นองค์ประกอบสูง
- มีคุณสมบัติคงที่
- มีราคาถูกและหาง่าย

ตัวอย่างแหล่งของวัตถุดิบที่เคยมีผู้นำมาผลิตคาร์บอนกัมมันต์แสดงในตารางที่ 2.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 วัสดุคืบต่าง ๆ ที่ได้มีการศึกษาใช้ในการผลิตคาร์บอนกัมมันต์ [5]

ชานอ้อย (Bagasses)	ไม้ (Wood)
กากของบีท (Beet-sugar sludge)	เขม่า (Lampblack)
เลือด (Blood)	กากหนัง (Leather waste)
กระดูก (Bones)	ลิกนิน (Lignin)
สารจำพวกแป้ง (Carbohydrates)	ถ่านลิกไนต์ (Lignite)
เมล็ดพืช (Cereals)	กากน้ำตาล (Molasses)
ถ่านหิน (Coal)	เปลือกลูกนัท (Nut shell)
กะลามะพร้าว (Coconut shell)	หินน้ำมัน (Oil shale)
เมล็ดกาแฟ (Coffee beans)	ถ่านหินพีทรวน (Peat)
ซังข้าวโพด (Corncoobs and corn stalks)	กากกรดปิโตรเลียม (Petroleum acid sludge)
เปลือกเมล็ดฝ้าย (Cotton seed hull)	ถ่านหินน้ำมัน (Petroleum coke)
ของเสียโรงกลั่นสุรา (Distillery waste)	ของเสียจากเยื่อกระดาษ (Pulp-mill waste)
ขี้เลื่อย (Sawdust)	ของเสียจากยาง (Rubber waste)
ฝุ่นจากปล่องไฟ (Flue dust)	แกรไฟต์ (Graphite)

2.1.3 ชนิดของคาร์บอนกัมมันต์ [6]

สามารถแบ่งชนิดของคาร์บอนกัมมันต์ออกได้เป็นประเภทต่างๆ ได้ดังนี้ คือ

1.แบ่งตามลักษณะทางกายภาพ

สามารถแบ่งคาร์บอนกัมมันต์ตามลักษณะทางกายภาพได้ 2 ประเภท คือ

- (1) คาร์บอนกัมมันต์ชนิดผง (Powered activated carbon : PAC)
- (2) คาร์บอนกัมมันต์ชนิดเม็ด (Granular activated carbon : GAC)

(1). คาร์บอนกัมมันต์ชนิดผง (Powered activated carbon: PAC)

เป็นคาร์บอนกัมมันต์ที่ผ่านตะแกรงร่อนขนาด 150 นาโนเมตร ได้ไม่น้อยกว่าร้อยละ 99 ของน้ำหนักมีลักษณะเป็นผง ใช้สำหรับฟอกสีในของเหลว ดูดกลิ่นสารละลายเป็นต้น คาร์บอนกัมมันต์ชนิดผงมักจะผลิตจากวัสดุคืบจำพวกเศษไม้ เศษถ่าน หรือขี้เลื่อยผสมกับสารละลายซิงค์คลอไรด์ วิธีการบดคาร์บอนกัมมันต์จะมีผลต่อความสามารถในการดูดซับ

(2). คาร์บอนกัมมันต์ชนิดเม็ด (Granular activated carbon: GAC)

เป็นคาร์บอนกัมมันต์ที่ผ่านตะแกรงร่อนขนาด 150 นาโนเมตร ได้ไม่เกินร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก มีลักษณะเป็นเม็ด ซึ่งได้จากการอัดผ่านเครื่องอัด หรือ อาจทำเป็นเกล็ด ใช้สำหรับทำก๊าซให้บริสุทธิ์ และนำไปใช้ทำหน้าที่กักป้องกันก๊าซและไอพิษต่างๆได้

2. แบ่งตามลักษณะของการดูดซับ

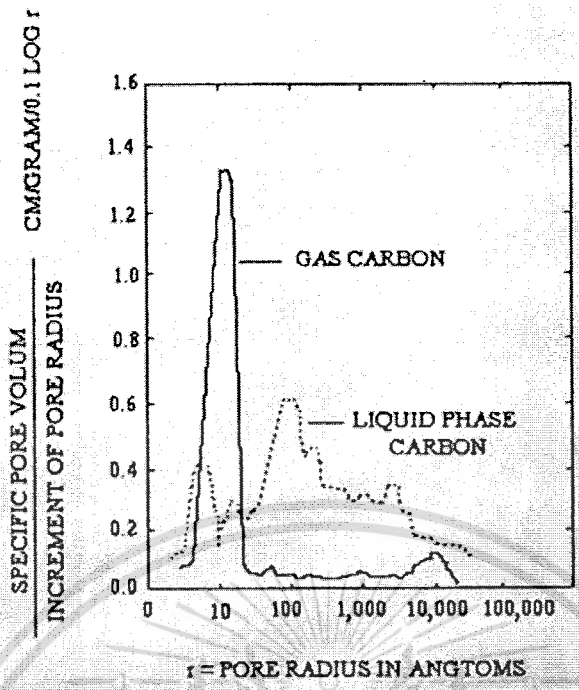
(1) Gas adsorption activated carbon คาร์บอนชนิดนี้ส่วนใหญ่ใช้ในการทำก๊าซให้บริสุทธิ์

(2) Liquid adsorption activated carbon คาร์บอนชนิดนี้มักใช้ในการฟอกสี หรือ การทำให้ของเหลวบริสุทธิ์

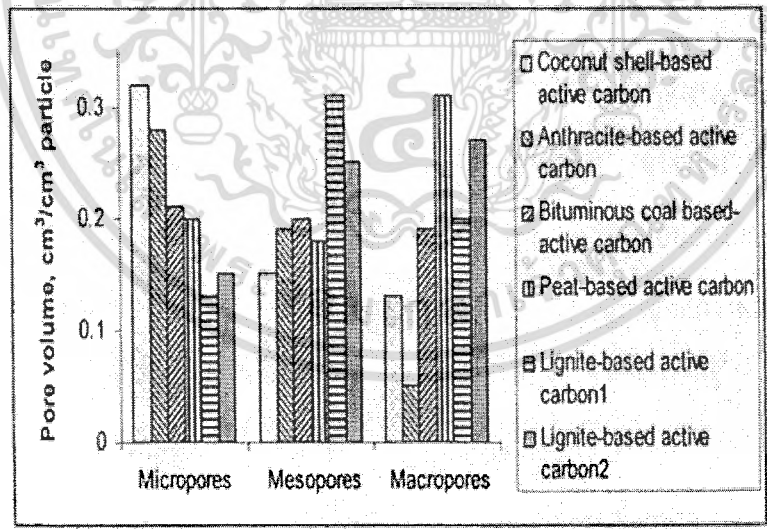
ข้อแตกต่างของถ่านกัมมันต์สองประเภทนี้คือการกระจายของปริมาตรจำเพาะและขนาดรูพรุน (Pore size distribution) การแบ่งขนาดของรูพรุน ดังตารางที่ 2.2 และจากรูปที่ 2.1 และรูปที่ 2.2 แสดงถึงการกระจายตัวของรูพรุนของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากวัตถุดิบชนิดต่างๆเช่น กะลามะพร้าว ถ่านหินประเภทแอนทราไซต์ บิทูมินัส พีท ลิกไนต์ เป็นต้น

ตารางที่ 2.2 การแบ่งกลุ่มขนาดของรูพรุนตาม International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC)[7]

ประเภทของรูพรุน	รัศมีรูพรุน(นาโนเมตร)	รัศมีรูพรุน(อังสตรอม)
Micropores	< 2	< 20
Mesopores	2- 50	20 - 500
Macropores	> 50	> 500



รูปที่ 2.1 แสดงการกระจายของปริมาณจำเพาะและขนาดรูพรุนของถ่านกัมมันต์ [7]



รูปที่ 2.2 แสดงการกระจายตัวของรูพรุนของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากวัตถุดิบชนิดต่างๆ [7]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. แบ่งตามชนิดของสารกระตุ้น [8]

(1) กระตุ้นทางเคมี (Chemical activated carbon) เป็นคาร์บอนกัมมันต์ที่ได้จากการใช้สารเคมีทำปฏิกิริยากับฟิวคาร์บอน คาร์บอนกัมมันต์ที่ได้มักจะมีรูพรุนขนาดใหญ่ สารกระตุ้นที่ใช้ เช่น ซิงค์คลอไรด์ กรดฟอสฟอริก เป็นต้น

(2) กระตุ้นทางกายภาพ (Physical activated carbon) เป็นคาร์บอนกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นด้วยก๊าซออกซิไดซ์ เช่น ไอน้ำ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ คาร์บอนกัมมันต์ที่ได้จากวิธีนี้จะมีขนาดเล็ก นิยมใช้ในการดูดซับก๊าซและไอระเหย

4. แบ่งตามขนาดรูพรุนของคาร์บอนกัมมันต์

(1) คาร์บอนกัมมันต์ที่มีรูพรุนแบบไมโครพอร์ (Micropores)

เป็นคาร์บอนกัมมันต์ที่มีรัศมีของรูพรุนเล็กกว่า 2 นาโนเมตร ใช้ในการดูดซับก๊าซหรือไอระเหย

(2) คาร์บอนกัมมันต์ที่มีขนาดรูพรุนแบบเมโซพอร์ (Mesopores)

เป็นคาร์บอนกัมมันต์ที่มีรัศมีของรูพรุนอยู่ในช่วง 2-50 นาโนเมตร ใช้ในการดูดซับของเหลวหรือสารที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่ เช่น การฟอกสี

(3) คาร์บอนกัมมันต์ที่มีขนาดรูพรุนแบบแมโครพอร์ (Macropores)

เป็นคาร์บอนกัมมันต์ที่มีรัศมีของรูพรุนใหญ่กว่า 50 นาโนเมตร ใช้ในการดูดซับสารที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่ เช่น การฟอกสีที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่กว่ารูพรุนแบบเมโซพอร์

2.1.4 ประโยชน์ของคาร์บอนกัมมันต์ [9]

คาร์บอนกัมมันต์ประมาณร้อยละ 60 ของที่ผลิตได้เป็นชนิดผง ซึ่งจะนำไปประยุกต์ใช้กับสารที่เป็นของเหลว ส่วนคาร์บอนกัมมันต์ชนิดเม็ดจะนำไปใช้ในการดูดซับก๊าซตัวอย่างของการนำคาร์บอนกัมมันต์ไปใช้ประโยชน์มีดังนี้

1.ใช้กับของเหลว

อุตสาหกรรมน้ำตาล วัตถุประสงค์หลักคือ ใช้คาร์บอนกัมมันต์เพื่อฟอกสีน้ำตาลในโรงงานผลิตน้ำตาล โดยจะใช้ในการดูดซับพวกโปรตีน เหล็ก หินปูน และฟอสเฟต ออกจากสารประกอบเด็กซ์ทริน (Dextrin) มอลโทส (Maltose) และเด็กซ์โทส (Dextrose) ทำให้สีของน้ำเชื่อมอยู่คงทนไม่เปลี่ยนแปลงเป็นสีคล้ำเมื่อเวลาผ่านไป

อุตสาหกรรมอาหาร วัตถุประสงค์หลักคือ ใช้คาร์บอนในการดูดสีและกลิ่นที่ไม่พึงประสงค์ออกจากเจลาติน ทำให้เจลาตินใสและสะอาด ใช้ดูดซับเพกติน (Pectin) ซึ่งเป็นสารที่สกัดจากผลไม้หลายชนิดและมักจะมีสีขาวขุ่น มีกลิ่นเฉพาะตัว หรือ ใช้คาร์บอนกัมมันต์ดูดซับสีและกลิ่นออกจากน้ำผลไม้ โดยการเติมเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คาร์บอนกัมมันต์แล้วกรองออก แต่จะต้องใช้คาร์บอนกัมมันต์ในปริมาณที่เหมาะสมมิฉะนั้นอาจจะทำให้รสและกลิ่นของน้ำผลไม้เปลี่ยนไปได้ เป็นต้น

อุตสาหกรรมการทำน้ำให้บริสุทธิ์ โดยใช้คาร์บอนกัมมันต์ในการดูดซับคลอรีนและสารอื่นๆที่อยู่ในน้ำประปาหรือน้ำบาดาล ซึ่งจะสามารถทำได้ 2 วิธี คือ (1.) ใส่คาร์บอนกัมมันต์ชนิดผงลงในน้ำแล้วกรองออก (2.) ใช้คาร์บอนกัมมันต์ชนิดเม็ดทำให้เป็นชั้นให้น้ำไหลผ่าน

2. ใช้ในการดูดก๊าซและไอ

อุตสาหกรรมผลิตหน้ากาก โดยใช้ในการผลิตหน้ากากป้องกันแก๊สพิษและสารอินทรีย์ ทั้งที่ใช้ในการทหาร และ ใช้กันทั่วไป ทั้งที่คาร์บอนกัมมันต์สามารถดูดซับก๊าซพิษ และ ไอของสารอินทรีย์ต่างๆ ได้เป็นอย่างดี

อุตสาหกรรมปรับอากาศ โดยใช้คาร์บอนกัมมันต์ในการดูดซับมลทินในอากาศ เช่น คาร์บอนไดออกไซด์ ไฮโดรเจน ในโตรเจน และ อะเซทิลีน เป็นต้น

อุตสาหกรรมแยกก๊าซธรรมชาติ โดยใช้ดูดซับสิ่งสกปรกออกจากก๊าซธรรมชาติ หรือกำจัดสารที่มีกำมะถันเป็นองค์ประกอบอยู่ในโรงแยกก๊าซธรรมชาติ

2.1.5 กระบวนการในการผลิตคาร์บอนกัมมันต์ [2, 10]

ในปัจจุบันคาร์บอนกัมมันต์สามารถผลิตได้หลากหลายวิธี ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของคาร์บอนกัมมันต์ที่ต้องการและวัตถุดิบในการผลิต แต่โดยทั่วไปจะประกอบไปด้วยสองวิธีหลักๆคือ การคาร์บอนไนซ์ และการกระตุ้น

2.1.5.1 การคาร์บอนไนซ์

การคาร์บอนไนซ์ เป็นการเผาวัตถุดิบในสภาวะที่มีออกซิเจนอยู่น้อย (Pyrolysis) ทำให้เกิดการแตกตัวทางเคมี สารที่ไม่ใช่คาร์บอน เช่น ไฮโดรเจน และ ออกซิเจนจะออกมาอยู่ในรูปของก๊าซ คาร์บอนอิสระที่มีอยู่จะรวมตัวกันเป็นผลึก (Microcrystalline) ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ในรูปของถ่าน ขนาดของผลึกขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่เผา องค์ประกอบ และ โครงสร้างของวัตถุดิบ เมื่อเผาวัตถุดิบอะตอมของคาร์บอนจะมีการจัดเรียงตัวเป็นผลึกโดยยึดเกาะกันในลักษณะหกเหลี่ยมด้วยพันธะ โควาเลนต์ มีลักษณะคล้ายผลึกแกรไฟต์และจะมี เซลลูโลสเป็นส่วนประกอบ

ขั้นตอนการคาร์บอนไนซ์จัดว่าเป็นขั้นตอนที่มีความสำคัญมากที่สุดในการผลิตคาร์บอนกัมมันต์เนื่องจากในการคาร์บอนไนซ์จะเป็นการสร้างโครงสร้างรูพรุน โดยกำจัดธาตุและองค์ประกอบต่างๆที่ไม่ใช่คาร์บอนรวมถึงสารระเหย เช่น ไฮโดรเจน ออกซิเจน ในโตรเจน และน้ำ ออกจากโครงสร้างของวัตถุดิบในรูปของก๊าซและน้ำมันาร์ จากนั้นจะได้ถ่านที่มีการจัดตัวของโครงสร้างผลึกที่ไม่เป็นระเบียบ โครงสร้างนี้จะมีเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ช่องว่างรูพรุนระหว่างผลึก โดยจะมีสารอินทรีย์ที่เป็นทาร์ไปอุดตันช่องว่างเหล่านั้น ซึ่งในส่วนประกอบของถ่านชาร์ที่ได้จะมีอัตราส่วนของคาร์บอนต่อไฮโดรเจนและคาร์บอนต่อออกซิเจนเพิ่มมากขึ้นจากวัตถุดิบ ขั้นตอนของการคาร์บอนไนซ์แบ่งออกได้เป็น 3 ขั้นตอน ดังนี้

1. การสูญเสียน้ำออกจากโครงสร้างของวัตถุดิบในช่วงอุณหภูมิห้องจนถึง 135 องศาเซลเซียส
2. เข้าสู่ขั้นตอนการไพโรไลซิส (Pyrolysis) โดยเกิดก๊าซและน้ำมันทาร์ในโครงสร้างในช่วงอุณหภูมิ 135-400 องศาเซลเซียส
3. มีการเกาะตัวกันของโครงสร้างถ่านชาร์ โดยในช่วงนี้น้ำหนักของวัตถุดิบจะลดลงไปมากในช่วงอุณหภูมิสูงกว่า 400 องศาเซลเซียส

ปัจจัยที่มีผลต่อการคาร์บอนไนซ์

1. องค์ประกอบของชีวมวล มีผลโดยตรงต่อผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการคาร์บอนไนซ์ โดยทั่วไปแล้วสารชีวมวลจะให้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นสารระเหยประมาณร้อยละ 60-70 โดยน้ำหนัก ทั้งนี้วัตถุดิบแต่ละชนิดจะมีภาวะการคาร์บอนไนซ์ที่แตกต่างกัน

2. ขนาดของวัสดุ มีผลต่อการกระตุ้น คือ วัสดุที่มีขนาดเล็กจะมีพื้นที่ผิวมาก การเกิดปฏิกิริยาเคมีจะเกิดได้เร็ว ในกรณีที่วัสดุมีขนาดใหญ่ การให้ความร้อนจะช้าทำให้อุณหภูมิเฉลี่ยต่ำกว่าวัสดุที่มีขนาดเล็ก การกระจายอุณหภูมิไม่สม่ำเสมอทำให้อัตราการสลายสารอินทรีย์ไม่คงที่และปริมาณสารระเหยที่ได้จะน้อยกว่า

3. อุณหภูมิ มีผลต่อปริมาณของผลผลิตมากที่สุด ทั้งนี้เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ปริมาณการเกิดถ่านชาร์จะลดลง ส่วนน้ำมันทาร์และก๊าซที่ได้จะเพิ่มขึ้น และคุณสมบัติของน้ำมันทาร์จะมีโครงสร้างเปลี่ยนแปลงไปด้วย เพราะการเพิ่มอุณหภูมิเป็นการเพิ่มพลังงานเพื่อทำลายโครงสร้างภายในของวัตถุดิบนั้น

4. อัตราการให้ความร้อน จะมีผลต่อคุณสมบัติ ปริมาณของน้ำมันทาร์และสารระเหยโดยการเพิ่มอัตราการให้ความร้อนอย่างรวดเร็วจะมีผลทำให้ปริมาณสารระเหยถูกปลดปล่อยอย่างรวดเร็ว ถ่านชาร์ที่ได้จะมีรูพรุนขนาดใหญ่ เมื่อทำการกระตุ้นสารกระตุ้นจะเข้าไปทำปฏิกิริยาได้โดยง่าย

5. ตัวกลางของปฏิกิริยา จะมีผลต่อปฏิกิริยา ถ้าก๊าซและไอน้ำที่เกิดระหว่างการคาร์บอนไนซ์ก็จะถูกพาออกไปอย่างรวดเร็วโดยก๊าซที่เป็นกลาง เช่น ก๊าซไนโตรเจน ซึ่งเกี่ยวข้องการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ของคาร์บอน ถ้าตัวกลางเป็นก๊าซที่ได้จากการเผาไหม้ ปริมาณถ่านชาร์ที่ได้จะน้อยกว่าในกรณีที่ใช้ตัวกลางเป็นก๊าซไนโตรเจน แต่มีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาต่อตัวกระตุ้นสูงกว่า

ถ่านชาร์ที่ได้จากการคาร์บอนไนซ์จะมีความสามารถในการดูดซับต่ำมาก เพราะกระบวนการดังกล่าวใช้อุณหภูมิประมาณ 300-700 องศาเซลเซียส จึงทำให้คาร์บอนยังคงมีน้ำมันทาร์ตกค้างอยู่ภายในรูพรุน หรือ

เกาะอยู่ตามพื้นผิวดังนั้นจึงจำเป็นต้องนำถ่านซาร์ที่ได้นี้มาผ่านกระบวนการกระตุ้นเพื่อเพิ่มความสามารถในการดูดซับของคาร์บอนให้มากยิ่งขึ้น

2.1.5.2 การกระตุ้น

การกระตุ้น เป็นขั้นตอนที่ทำให้วัสดุเกิดรูพรุน และพื้นที่ผิวเพิ่มมากขึ้นเป็นจำนวนมาก เนื่องจากน้ำมันทาร์ถูกกำจัดให้หลุดออกมาด้วยวิธีการทางกายภาพหรือทางเคมี ทำให้ผิวของคาร์บอนกัมมันต์ที่ได้มีอะตอมของคาร์บอนที่มีอิเล็กตรอนอิสระอยู่ด้วย จึงมีความสามารถในการดูดซับดียิ่งขึ้น การกระตุ้นมี 2 วิธี ดังนี้

1.การกระตุ้นด้วยวิธีทางกายภาพ

การกระตุ้นนี้จะใช้ก๊าซเป็นตัวออกซิไดซ์ เช่น ไอน้ำ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ หรืออากาศเพื่อไปออกซิไดส์น้ำมันทาร์ และคาร์บอนบางตัวในโครงสร้างของผลึก ก๊าซที่เป็นตัวออกซิไดซ์จะทำปฏิกิริยากับน้ำมันทาร์และอะตอมของคาร์บอน ทำให้น้ำมันทาร์ถูกกำจัดออกไปทำให้คาร์บอนกัมมันต์ที่ได้มีรูพรุนและพื้นที่ผิวมากขึ้น

ปัจจัยที่มีผลต่อการกระตุ้นด้วยวิธีนี้ คือ ชนิดและปริมาณขององค์ประกอบที่มีในวัสดุดิบ คุณสมบัติทางเคมีและอัตราส่วนของก๊าซที่ใช้ อุณหภูมิขณะเกิดปฏิกิริยา และ ระยะเวลาของการเกิดปฏิกิริยา

การกระตุ้นทางกายภาพมีข้อดีคือ หลังจากกระตุ้นสามารถนำคาร์บอนกัมมันต์ไปใช้ได้ทันที ส่วนข้อเสียคือ ต้องใช้อุณหภูมิสูงกว่าวิธีการกระตุ้นทางเคมี คาร์บอนกัมมันต์ที่ได้จะมีรูพรุนแบบไมโครพอร์เหมาะสำหรับการดูดกลืน ไอ หรือก๊าซพิษ

2.การกระตุ้นด้วยวิธีทางเคมี

เป็นวิธีที่นำเอาวัสดุดิบหรือสารอินทรีย์มาผสมกับสารเคมีที่เรียกว่า สารกระตุ้น หรือตัวที่ทำให้เกิดปฏิกิริยากัมมันต์เข้าไปช่วยให้เกิดมีการเปลี่ยนแปลงเมื่อใช้ความร้อน เช่น ปริมาณของน้ำมันทาร์จะถูกกำจัดให้น้อยลง ปริมาณของสารระเหยที่ได้เช่น กรดน้ำส้ม เมทานอล และอื่นๆก็จะลดปริมาณลงไปด้วย โดยจะมีปริมาณน้อยกว่าเมื่อเผาให้เป็นถ่านธรรมชาติ ซึ่งผลที่ได้จากการทำเช่นนี้จะทำให้ร้อยละของคาร์บอนคงตัวเพิ่มขึ้น นอกจากนี้อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาก็จะลดต่ำลงด้วย โดยการกระตุ้นดังกล่าวมักเป็นเกลืออินทรีย์จำพวกเกลือโลหะคลอไรด์ ได้แก่ แคลเซียมคลอไรด์ แมกนีเซียมคลอไรด์ แต่ที่นิยมใช้กันมากคือ ซิงค์คลอไรด์ ข้อเสียของการกระตุ้นด้วยวิธีทางเคมี คือ เมื่อกระตุ้นเสร็จแล้วคาร์บอนกัมมันต์ที่ได้นั้นจะมีสารเคมีตกค้างอยู่จึงไม่สามารถนำไปใช้งานได้ทันที ต้องนำไปกำจัดสารเคมีตกค้างออกก่อน

หลักการที่สำคัญของการทำคาร์บอนกัมมันต์ด้วยวิธีนี้ คือ เมื่อผสมอินทรีย์วัตถุกับเกลืออนินทรีย์ในอัตราส่วนหนึ่งให้ทั่วแล้วก็นำไปคาร์บอนไนซ์ ณ อุณหภูมิที่ทำให้อินทรีย์วัตถุสลายตัว เกลืออนินทรีย์จะเป็น

ตัวเร่งปฏิกิริยาการย่อยสลายอินทรีย์วัตถุให้เกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำและยังลดปริมาณของน้ำมันทาร์และสารระเหยให้น้อยลงด้วย อีกทั้งเกลืออนินทรีย์เหล่านี้ยังมีความคงทนต่อการสลายตัวได้ที่อุณหภูมิสูงๆ

โดยทั่วไปแล้ววัตถุดิบที่ใช้การกระตุ้นด้วยวิธีนี้มักเป็นไม้ประเภทต่างๆซึ่งอุณหภูมิที่ใช้ในการกระตุ้นมักจะอยู่ในช่วง 500-900 องศาเซลเซียส การกระตุ้นด้วยวิธีทางเคมีทำได้ 2 วิธี คือ

- ทำควบคู่ไปกับการคาร์บอนไนซ์ โดยการเติมสารเคมีที่เป็นตัวกระตุ้นลงไปผสมกับวัตถุดิบ

- ทำหลังจากการคาร์บอนไนซ์เสร็จเรียบร้อยแล้ว โดยนำวัตถุดิบที่ผ่านการคาร์บอนไนซ์แล้วมากระตุ้นด้วยสารเคมีอีกครั้งหนึ่ง

2.1.6 ปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพของคาร์บอนกัมมันต์ [11]

ก. ชนิดของวัตถุดิบ

คาร์บอนกัมมันต์สามารถผลิตได้จากวัตถุดิบหลายชนิดและคาร์บอนกัมมันต์ที่ได้จะมีคุณภาพแตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับโครงสร้าง ลักษณะ และองค์ประกอบของวัตถุดิบในแต่ละชนิด

ข. วิธีการในการกระตุ้น

ปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพของคาร์บอนกัมมันต์ในกระบวนการผลิตด้วยวิธีการทางเคมีมีดังนี้

- ชนิดและปริมาณของสารกระตุ้น

- เวลาในการกระตุ้น

- อุณหภูมิในการกระตุ้น

2.2 การดูดซับ [12-14]

การดูดซับมี 2 แบบ คือ การดูดซับเชิงทางกายภาพ(Physical Adsorption) และการดูดซับเชิงเคมี (Chemical Adsorption) โดยมีรายละเอียดดังนี้

ก. การดูดซับเชิงทางกายภาพ จะเกิดขึ้นที่ใดก็ได้โดยไม่เจาะจง ปฏิกิริยาการเกิดคล้ายกับการควบแน่นที่เกิดขึ้นได้ทุกจุดบนผิวของแข็ง แรงยึดเกาะระหว่าง โมเลกุลที่ผิวของแข็งมีไม่มาก ส่วนมากนั้นจะเป็นแรงแวนเดอร์วาลส์อันมีผลมาจากความร้อน เนื่องจากการดูดซับหรือพลังงานก่อกัมมันต์อยู่นั้นจะอยู่ในช่วงต่ำ ค่าประมาณ 4- 40 กิโลจูลต่อโมล การดูดซับเข้าสู่สมดุลได้เร็วและผันกลับได้ปริมาณการดูดซับของโมเลกุลก๊าซจะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นดังนั้นการดูดซับเชิงทางกายภาพจึงไม่สามารถใช้เป็นกลไกในการเกิดปฏิกิริยาของโมเลกุลที่มีความเสถียรได้ อีกทั้งพลังงานก่อกัมมันต์มีค่าต่ำเกินไปแต่อาจใช้ปฏิกิริยาของอะตอมหรืออนุมูลอิสระที่ไม่ต้องการพลังงานก่อกัมมันต์มากก็ได้ โดยทั่วไปแล้วนั้นอาจจะประยุกต์ใช้การดูดซับเชิงทางกายภาพในการศึกษาเชิงคุณสมบัติทางกายภาพ เช่น ปริมาตรรูพรุน พื้นที่ผิว เป็นต้น

ข. การดูดซับเชิงเคมี การดูดซับนี้เกิดขึ้นอย่างจำเพาะบนจุดกัมมันต์ของผิวของแข็ง โดยพันธะทางเคมี ความร้อนเนื่องจากการดูดซับหรือพลังงานก่อกัมมันต์อยู่ในช่วง 40-200 กิโลจูลต่อ โมลซึ่งมากกว่าการดูด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชั้นเชิงทางกายภาพเนื่องจากการดูดซับเกิดขึ้นเพียงชั้นเดียว(Monolayer) การดูดซับของถ่านกัมมันต์เป็นปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธ์ (Heterogeneous Reaction) คือสารที่ทำปฏิกิริยากันอยู่ในวัฏภาคที่ต่างกัน เช่น ปฏิกิริยาระหว่างก๊าซหรือของเหลวกับของแข็ง เป็นต้น

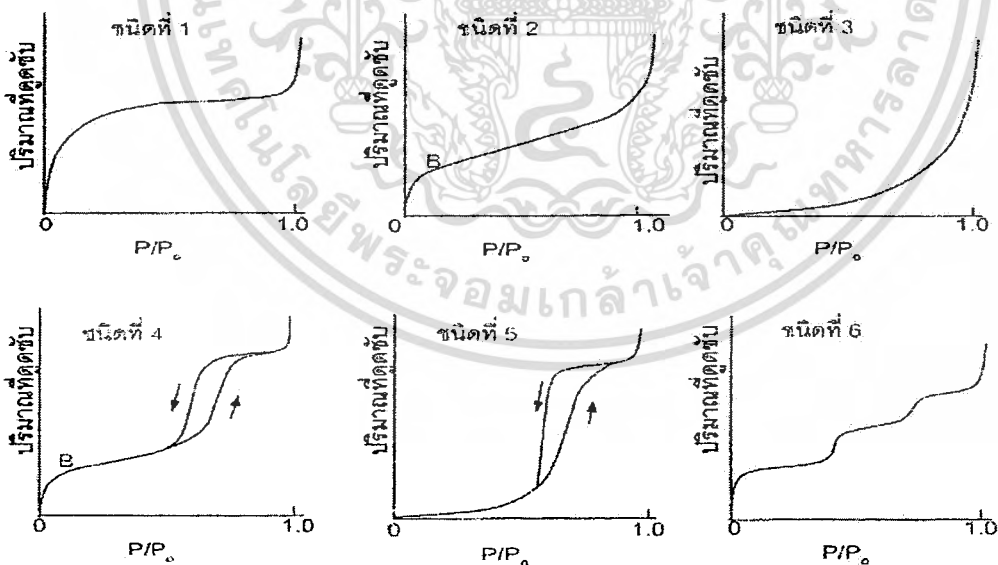
2.2.1 ไอโซเทอมของการดูดซับ (Adsorption isotherm)

เป็นความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของสารที่จะถูกดูดซับต่อน้ำหนักของตัวดูดซับ และความเข้มข้นของสารที่ถูกละลายที่เหลืออยู่ในสารละลายที่สภาวะสมดุลและที่อุณหภูมิคงที่หนึ่งๆ เมื่อนำความเข้มข้นของสารละลายที่เหลือไปพลอตกับปริมาณของสารที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักตัวดูดซับจะได้ไอโซเทอมของการดูดซับ ซึ่งสามารถนำไปใช้หาความสามารถของตัวดูดซับในการดูดซับสารและสามารถใช้เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการดูดซับของตัวดูดซับชนิดต่างๆ ได้

ไอโซเทอมของการดูดซับทางกายภาพสามารถแบ่งออกได้เป็น 6 กลุ่มดังนี้

1. Langmuir ได้มาจาก Langmuir equation isotherm รูปร่างของไอโซเทอมแบบนี้จะพบมากในตัวดูดซับที่มีรูพรุนขนาดเล็กมากและมีพื้นที่ผิวภายนอกน้อยมาก เช่น คาร์บอนกัมมันต์ ซิลิกาเจล และซีโอไลต์ การดูดซับจะเป็นแบบชั้นเดียว ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ชนิดที่ 1

2. Sigmoid หรือ S-shaped isotherm จะพบในตัวดูดซับที่ไม่มีรูพรุนหรือมีรูพรุนขนาดใหญ่ ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ชนิดที่ 2 ที่จุด B จะเป็นตำแหน่งที่มีการดูดซับแบบชั้นเดียวอย่างสมบูรณ์และเริ่มการดูดซับแบบหลายชั้น



รูปที่ 2.3 ไอโซเทอมของการดูดซับตามการจำแนกของ IUPAC [13]

3. Convex isotherm ที่ไม่มีจุด B จะเป็นแบบที่พบได้ยากเกิดขึ้นในกรณีที่มีการดูดซับระหว่างตัวดูดซับ และตัวถูกดูดซับมีแรงดึงดูดที่อ่อน ทำให้ตัวถูกดูดซับไม่เปียกผิวของตัวดูดซับ เช่น ไออน้ำบนแกรไฟต์ ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ชนิดที่ 3

4. ไอโซเทอมเหมือนกับแบบ Sigmoid จะพบในตัวดูดซับที่มีขนาดของรูพรุนอยู่ในช่วงประมาณ 2 - 50 นาโนเมตร ที่ค่า P/P₀ ต่ำ ลักษณะของเส้นไอโซเทอมจะเหมือนกับแบบ Sigmoid เมื่อค่า P/P₀ มีค่าเพิ่มมากขึ้นจะเกิด Capillary condensation ขึ้น ซึ่งจะทำให้เกิด Hysteresis effect ขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ชนิดที่ 4 ไอโซเทอมชนิดนี้จะพบกับตัวเร่งปฏิกิริยาในทางอุตสาหกรรม

5. ไอโซเทอมเหมือนกับแบบ Convex isotherm แต่จะเกิด Capillary condensation ที่ P/P₀ สูง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ชนิดที่ 5 ไอโซเทอมชนิดนี้พบได้ยาก

6. ไอโซเทอมลักษณะเหมือนขั้นบันได (Stepped isotherm) ซึ่งพบได้ไม่บ่อยนัก เกิดจากการดูดซับที่ละชั้นบนผิวหน้าที่มีหลายชั้นและความเป็นระเบียบสูง ความชันของเส้นกราฟจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ รูปที่ 2.3 ชนิดที่ 6

แบบจำลองการดูดซับที่อุณหภูมิต่ำ (Models for adsorption isotherm)

สามารถใช้ได้กับทั้งการดูดซับทางกายภาพและการดูดซับทางเคมี แต่มีข้อแม้ว่า

1. จะต้องถึงสมดุลอย่างแท้จริง
2. การดูดซับสามารถผันกลับได้ โดยที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงในตัวถูกดูดซับที่เกิดขึ้น เมื่อทำการดูดซับและการคายซับหลาย ๆ ครั้ง

แบบจำลองการดูดซับแลงเมียร์ (Langmuir adsorption isotherm)

สมมติฐานของทฤษฎีนี้มีแนวความคิดจากแบบจำลองชั้นเดียว ดังนี้

1. ที่ทุก ๆ ตำแหน่งผิวสัมผัส สามารถดูดซับโมเลกุลได้
2. ไม่มีแรงกระทำระหว่างตัวถูกดูดซับ
3. พลังงานและกลไกการดูดซับของทุก ๆ โมเลกุลบนผิวตัวดูดซับเกิดขึ้นเหมือนกัน
4. การดูดซับของโมเลกุลบนแต่ละพื้นผิวของตัวดูดซับ จะเกิดแบบชั้นเดียว

กำหนดให้

$$\theta = q/q_m \quad (2.1)$$

โดย q คือ สารเคมีที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักของตัวดูดซับที่สมดุล (mg/g)

q_m คือ สารเคมีที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักของตัวดูดซับที่อิ่มตัว (mg/g)

θ คือ สัดส่วนของพื้นที่ผิวที่ถูกปกคลุมด้วยโมเลกุลที่ถูกดูดซับ

อัตราการดูดซับต่อหน่วยพื้นที่ผิวทั้งหมด

$$r_a = k_a C(1-\theta) \quad (2.2)$$

โดย r_a คือ อัตราการดูดซับของตัวถูกดูดซับ

k_a คือ ค่าคงที่ของการดูดซับ

C คือ ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่สมดุล

อัตราการคายซับต่อหน่วยพื้นที่ทั้งหมด

$$r_d = k_d \theta \quad (2.3)$$

โดย k_d คือ ค่าคงที่ของการคายซับ

เมื่อคิดที่สภาวะสมดุล อัตราการดูดซับเท่ากับอัตราการคายซับ

$$k_a C(1-\theta) = k_d \theta \quad (2.4)$$

$$\theta = k_a C / (k_d + k_a C_x) \quad (2.5)$$

โดยกำหนดให้

$$K_A = k_a / k_d = \text{ค่าคงที่สมดุล} \quad (2.6)$$

จะได้สมการ

$$q = \frac{q_m K_A C}{1 + K_A C} \quad (2.7)$$

จัดให้อยู่ในรูปของสมการเส้นตรง

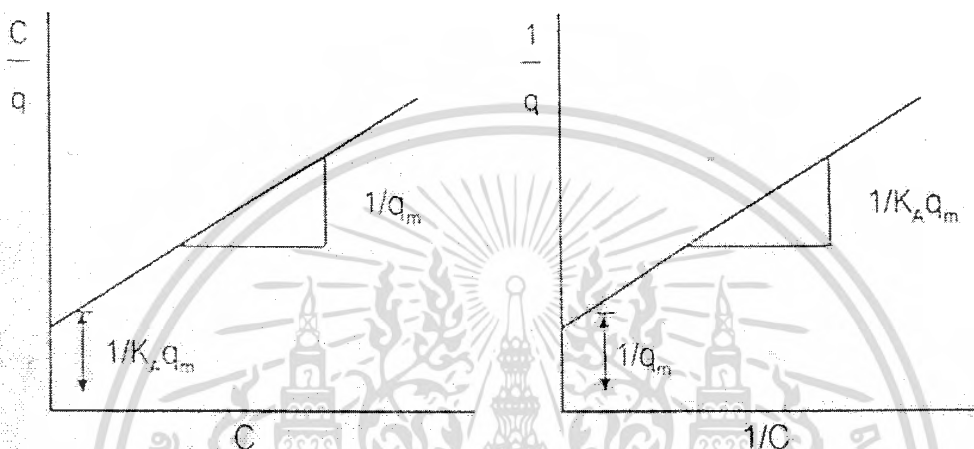
$$\frac{C}{q} = \frac{1}{K_A q_m} + \frac{C}{q_m} \quad (2.8)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หรือ

$$\frac{1}{q} = \frac{1}{q_m} + \frac{1}{(K_A q_m)C} \quad (2.9)$$

ค่า q_m และค่า K_A สามารถหาได้จากความชัน และจุดตัดแกนเมื่อเขียนกราฟดังรูป 2.4



รูปที่ 2.4 ลักษณะของ Langmuir adsorption isotherm ในรูปแบบของกราฟเส้นตรง [14]

2.2.2 การหาค่าพื้นที่ผิวของคาร์บอนกัมมันต์ [15]

การวัดพื้นที่ผิวจะใช้หลักการของการดูดซับก๊าซบนผิวของแข็ง ปกติจะใช้ก๊าซไนโตรเจนเป็นตัวถูกดูดซับที่จุดสมดุล ณ สภาวะมาตรฐาน (จุดเดือด -195.8 องศาเซลเซียส) ปริมาณของก๊าซที่ถูกดูดซับจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความดัน ซึ่งสามารถวัด และคำนวณหาค่าพื้นที่ผิวได้โดยใช้โมโนแกรม วิธีการคือใช้ Adsorption vessel 2 ใบ ที่มีปริมาตรเท่ากันโดยใบหนึ่งบรรจุตัวอย่าง อีกใบหนึ่งเป็นภาชนะเปล่า แล้วผ่านก๊าซไนโตรเจนลงไปใ้ภาชนะทั้งสองภายใต้ความดันปกติที่อุณหภูมิห้อง หลังจากนั้นทำให้ภาชนะทั้งสองเย็นจัดใน Cold bath ที่บรรจุไนโตรเจนเหลวไว้ การดูดซับก๊าซไนโตรเจนบนผิวของตัวอย่างจะทำให้เกิดความแตกต่างของความดันระหว่างภาชนะทั้งสองซึ่งสามารถวัดได้โดยมาโนมิเตอร์

ไอโซเทอมการดูดซับ เป็นตัวแทนที่ดีที่สุดสำหรับแสดงผลของข้อมูลจากการทดลอง โดยมีรูปแบบของสมการหลายสมการที่นิยมใช้ เช่น Langmuir isotherm, Freundlich isotherm และ BET isotherm

สำหรับก๊าซที่ถูกดูดซับบนผิวของแข็งแบบ Multi-molecular layer ซึ่งรู้จักกันในชื่อของ BET จะใช้หลักการดูดซับก๊าซไนโตรเจนที่จุดเดือดปกติ อุณหภูมิประมาณ 77.5 เคลวิน โดยกรณีนี้วัสดุที่นำมาวัดจะมีรูพรุนเล็ก คือ $10-100$ อังสตรอม ซึ่งก๊าซไนโตรเจนจะปล่อยให้ดูดซับที่ระดับความดันต่าง ๆ ต่ำกว่า 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

บรรยากาศ จนถึงสภาวะสมดุล แล้วทำการวิเคราะห์หาปริมาณของก๊าซใน โตรเจนที่ถูกดูดซับไป ที่ความดันต่าง ๆ BET isotherm มีรูปแบบของสมการ คือ

$$\frac{P}{V(P_0 - P)} = \frac{1}{V_m c} + \frac{(c-1)P}{V_m c P_0} \quad (2.10)$$

โดย V คือ ปริมาตรของก๊าซ N_2 ที่ดูดซับบนผิวรูพรุน (cm^3)

V_m คือ ปริมาตรของก๊าซ N_2 ที่ดูดซับบนผิวรูพรุนแบบ โมเลกุลชั้นเดียว

(Monomolecule layer) ปกคลุมทั่วผิวรูพรุน (cm^3)

P คือ ความดันที่สภาวะใด ๆ (mmHg)

P_0 คือ ความดันไอหรือความดันอิ่มตัว (Vapor or saturated vapor) (mmHg)

c คือ ค่าจำเพาะสำหรับการดูดซับของก๊าซแต่ละชนิด

เมื่อเขียนกราฟจากสมการที่ (2.14) จะได้ความสัมพันธ์เป็นเส้นตรง V_m, c คำนวณหาได้จากจุดตัดและความชันเส้นตรง ค่า V_m ที่ได้นำมาเทียบเป็นพื้นที่ผิวรูพรุน S (m^2) ดังสมการ

$$S = \frac{V_m N_{AV}}{22400} a \quad (2.11)$$

โดย S คือ พื้นที่ผิวรูพรุน (m^2)

N_{AV} คือ Avogadro Number (6.02×10^{23} molecules mol^{-1})

a คือ พื้นที่ต่อหน่วย โมเลกุลก๊าซ (cm^2 molecule $^{-1}$)

แต่ในกรณีที่รูพรุนขนาดใหญ่ จะใช้วิธีวัดแบบ Porosimeter โดยใช้หลักการอัดปรอทเข้าไปในรูพรุน จากปริมาตรของปรอทที่เข้าไปแทนที่รูพรุน ณ ความดันต่าง ๆ ก็จะคำนวณหาปริมาณการกระจายรูพรุนตามเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนได้ ดังนั้นเมื่อใช้วิธีการแบบ BET ร่วมกับวิธีการวัดแบบ Porosimeter ก็จะสามารถหาการกระจายปริมาตรรูพรุน ตั้งแต่เส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 10^{-10} ถึง 10^{-5} อังสตรอม ซึ่งการกระจายของรูพรุน อาจมีการกระจายตัวในช่วงของรัศมีรูพรุน หรือ หลายช่วงรัศมีรูพรุนก็ได้

ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ

อัตราเร็วและความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆดังนี้

1.ขนาดอนุภาคและปริมาณพื้นผิวของตัวดูดซับ

คุณสมบัติทางกายภาพของตัวดูดซับที่สำคัญ คือ ขนาดอนุภาคและปริมาณพื้นที่ผิว ขนาดอนุภาคของตัวดูดซับมีอิทธิพลต่ออัตราเร็วของการดูดซับ คือ อัตราการดูดซับเป็นสัดส่วนผกผันกับขนาดอนุภาคของตัวดูดซับ เช่น คาร์บอนกัมมันต์ชนิดผงมีอัตราเร็วในการดูดซับสูงกว่าคาร์บอนกัมมันต์ชนิดเม็ด ส่วนปริมาณพื้นที่ผิวของตัวดูดซับนั้นมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความสามารถในการดูดซับ ดังนั้นตัวดูดซับที่มีปริมาณพื้นที่ผิวมากจึงดูดซับโมเลกุลได้มากกว่าตัวดูดซับที่มีปริมาณพื้นที่ผิวน้อยกว่า เนื่องจากพื้นที่ผิวส่วนใหญ่ได้มาจากช่องว่างหรือรูพรุนภายในของตัวดูดซับ

2.ความสามารถในการละลายน้ำของตัวดูดซับ

เมื่อมีการดูดซับเกิดขึ้น โมเลกุลของตัวดูดซับจะถูกดึงออกจากน้ำและไปเกาะบนผิวของตัวดูดซับ สารที่ละลายน้ำได้หรือแตกตัวเป็นไอออนย่อมมีแรงยึดเหนี่ยวกับ โมเลกุลของน้ำได้อย่างเหนียวแน่นจึงยากต่อการดูดติดผิวตัวดูดซับ ในกรณีของคาร์บอนกัมมันต์พบว่า สารที่ไม่ละลายน้ำหรือละลายน้ำได้น้อยมากมักสามารถเกาะติดผิวของคาร์บอนกัมมันต์ได้เป็นอย่างดี แต่เกณฑ์ที่กล่าวมานี้ก็ไม่ได้เป็นจริงเสมอไป เพราะสารที่ละลายน้ำได้น้อยหลายชนิด เช่น น้ำมัน เกาะติดผิวคาร์บอนกัมมันต์ได้ยาก ในทางตรงข้ามการดูดติดผิวอาจเกิดขึ้นได้ง่ายกับสารที่ละลายน้ำได้ดี จึงไม่อาจกล่าวได้อย่างชัดเจนเกี่ยวกับความสัมพันธ์ในเชิงปริมาณระหว่างความสามารถในการดูดติดผิวคาร์บอนกัมมันต์กับความสามารถในการละลายน้ำของตัวดูดซับ

3.ขนาดของตัวดูดซับ

ขนาดของสารหรือ โมเลกุลของตัวดูดซับมีความสำคัญมากต่อการดูดติดผิว ซึ่งส่วนใหญ่เกิดขึ้นในรูพรุนของตัวดูดซับ พบว่าการดูดติดผิวจะเกิดขึ้นได้ดีที่สุดเมื่อ โมเลกุลของตัวดูดซับมีขนาดเล็กกว่ารูพรุนของตัวดูดซับ โดยโมเลกุลขนาดเล็กจะถูกดูดเข้าไปในรูพรุน จากนั้น โมเลกุลใหญ่จึงถูกดูดตามเข้าไป

4.ค่าความเป็นกรด-เบส (pH) ของตัวดูดซับ

ถ้าค่าความเป็นกรดของตัวดูดซับลดลง อัตราการดูดซับจะเร็วและสูงขึ้น เพราะค่าความเป็นกรดมีผลต่อการแตกตัวเป็นไอออนและการละลายน้ำของสารต่างๆ ดังนั้นจึงมีผลต่อการดูดติดผิวตามความสัมพันธ์ที่กล่าวมาแล้วในข้อ 2 นอกจากนี้ไฮโดรเจนไอออน ที่เพิ่มมากขึ้นจากการแตกตัวเป็นไอออนในน้ำของตัวดูดซับยังสามารถเกาะติดผิวคาร์บอนกัมมันต์ได้ดี ทำให้คาร์บอนกัมมันต์มีสภาพเป็นกลางเสมอ เนื่องจากคาร์บอนกัมมันต์เป็นโมเลกุลแบบไม่มีขั้ว จึงทำให้โมเลกุลของตัวดูดซับในน้ำมาเกาะผิวของคาร์บอนกัมมันต์ได้ดียิ่งขึ้นและทำให้การดูดซับเกิดขึ้น ได้ดียิ่งขึ้นอีกด้วย

5.อุณหภูมิ

ถ้าอุณหภูมิเพิ่มขึ้น อัตราเร็วในการดูดซับก็จะเพิ่มมากขึ้นด้วย ถ้ากระบวนการดูดซับเป็นปฏิกิริยาการคายความร้อน อัตราเร็วในการดูดซับจะลดลงเมื่ออุณหภูมิลดลง เนื่องจากค่าคงที่ของอัตราเร็วของการดูดซับจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ

2.3 ความแข็งแรงของถ่านกัมมันต์

การใช้งานของถ่านกัมมันต์มักจะถูกใช้ในสภาพที่ต้องรับแรงกระทำเช่นการใช้งานในคอลัมน์หอดูดซับ ถ้าเรานำสถานการณ์เหล่านี้มาพิจารณา ผู้ทำโครงการจึงต้องทราบถึงคุณลักษณะของถ่านกัมมันต์โดยสมบัติเชิงกลจะเป็นตัวบอกความสัมพันธ์ระหว่างผลของแรงกระทำ ซึ่งได้แก่ การแปรรูปที่เกิดขึ้นกับขนาดของแรงกระทำภายนอก คุณสมบัติทางกลที่สำคัญได้แก่ ความแข็งแรง(Strength) ความเหนียว(ductility) ความแข็ง (hardness) และความแข็งตึง (stiffness) หรือความสามารถในการคงรูป

ข้อมูลเกี่ยวกับสมบัติเชิงกล หาได้โดยการทดสอบด้วยอุปกรณ์ที่สามารถจำลองสภาวะให้ใกล้เคียงกับสภาพรับแรงกระทำในระหว่างการใช้งานจริง ปัจจัยที่ต้องพิจารณาได้แก่ ลักษณะของแรงกระทำ(การกรรมทางกล) นั้น ระยะเวลาและเงื่อนไขของสภาพแวดล้อม ในการทดสอบ สามารถให้แรงกระทำในรูปแบบของแรงดึง แรงอัด แรงเฉือน รวมทั้งสามารถกำหนดให้ขนาดของแรงมีค่าคงที่ หรืออาจจะแปรตามเวลาอย่างต่อเนื่องก็ได้ ระยะเวลาในการทดสอบ (ให้แรงกระทำต่อชิ้นงานทดสอบ)

การทดสอบแรงอัด[16]

การทดสอบแรงอัดเป็นการวิเคราะห์ค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น – ความเครียดการทดสอบแรงอัดคล้ายคลึงกับการทดสอบแรงดึง แต่ต่างกันที่แรงกระทำเป็นแรงอัดและชิ้นทดสอบจะถูกกดอัดให้หดตัวเข้าตามแนวของความเค้นนั้น ซึ่งสามารถคำนวณ ค่าความเค้นทางวิศวกรรม σ จากความสัมพันธ์

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (2.12)$$

โดยที่ F คือแรงกระทำซึ่งมีทิศทางตั้งฉากกับหน้าตัดของชิ้นทดสอบมีหน่วยเป็นนิวตัน (N) หรือปอนด์แรง (lb_f) และ A_0 คือพื้นที่หน้าตัดเดิมของชิ้นงานทดสอบก่อนถูกแรงกระทำ (หน่วย m^2 หรือ in^2) หน่วยของความเค้นทางวิศวกรรม จะมีหน่วยเป็นเมกะปาสคาล (MPa) ในระบบ SI โดย ($1 \text{ MPa} = 10^6 \text{ N/m}^2$) และเป็นปอนด์แรงต่อตารางนิ้ว (psi) ในระบบอังกฤษ

ความเครียดทางวิศวกรรม ϵ นิยามดังนี้

$$\epsilon = \frac{l_i - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (2.13)$$

โดยที่ l_0 คือความยาวเดิมก่อนที่จะถูกแรงกระทำ และ l_i คือความยาวขณะนั้น ในหลายกรณี ปริมาณ $l_0 - l_i$ จะถูกกำหนดให้เขียนเป็น Δl ซึ่งหมายถึงความยาวที่เปลี่ยนไป ความเครียดทางวิศวกรรม (ซึ่งต่อไปจะเรียกว่า ความเครียด) เป็นปริมาณไม่มีหน่วย แต่มักจะระบุหน่วยเป็น mm/mm หรือ in/in หรืออาจจะระบุเป็นเปอร์เซ็นต์ก็ได้

โดยหลักปฏิบัติแล้ว ค่าของแรงอัดมักแทนค่าเป็นลบ ทำให้ความเค้นที่ได้เป็นลบด้วย นอกจากนี้ เนื่องจาก l_0 ยาวกว่า l_i ดังนั้นค่าความเครียดที่ได้จากสมการข้างต้นจึงมีค่าเป็นลบด้วยเช่นกัน โดยการเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทดสอบแรงอัดมักใช้เมื่อต้องการศึกษาพฤติกรรมทางกลของวัสดุภายใต้ความเครียดถาวรมีค่าสูง(เช่นเกิดการแปรรูปถาวร) เช่น ในกระบวนการขึ้นรูปวัสดุ หรือในกรณีที่วัสดุนั้นมีพฤติกรรมทางกลที่เปราะ แตกหักง่ายภายใต้แรงดึง

2.4 Dreg [17-18]

Dreg คือ ของเสียที่เป็นกากตะกอนสีดำ ซึ่งจะได้มาจากหน่วยการทำด่างในกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษ (วงจรมานาสารเคมีกลับคืน) จากโรงงานกระดาษ ในหน่วยการทำด่างจะรับของเหลวดำที่มาจากกระบวนการในหม้อไอน้ำมานาสารเคมีกลับคืน โดยของเหลวดำจะกลายเป็นของแข็งหลอมเหลวที่มีส่วนประกอบของ Na_2CO_3 และ Na_2S เข้าสู่กระบวนการกรองและการตกตะกอนได้เป็นของเหลวเขียวเข้าสู่หน่วยการทำด่าง ซึ่งในหน่วยการทำด่างจะมีการนำของเหลวเขียวเข้าสู่เครื่องกรองกากปูน จะได้ส่วนของกากตะกอนปูนซึ่งเป็นกากของแข็งมีสีดำและมีการปะปนของโซเดียมและกากคาร์บอนผสมอยู่ [17] โดยลักษณะของ Dreg จะเป็นดังรูปที่ 2.5 ได้มีผู้ศึกษาวิเคราะห์ของเสียที่มาจากโรงงานอุตสาหกรรมเยื่อกระดาษพบว่า Dreg มีคุณสมบัติดังนี้มีค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดเท่ากับ 11 kN/m^3 (ค่าการบดอัด) ที่ปริมาณความชื้นเหมาะสม 43% [18]



รูปที่ 2.5 ของเสียที่นำมาทำเป็นวัตถุดิบ

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

กมลชนก ปานสง่า และคณะ[19] งานวิจัยนี้ศึกษาการสังเคราะห์คาร์บอนกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัสและกากคาร์บอน การสังเคราะห์คาร์บอนกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัสประกอบด้วย 2 ขั้นตอน คือ การเผาไม้ยูคาลิปตัสภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจน การกระตุ้นถ่านชาร์ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก แล้วนำมาทดสอบการดูดซับไอโอดีนและเมทิลีนบลู จากการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทดลองพบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการเผาไม้ยูคาลิปตัสภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจน คือ อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 45 นาที ที่อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที จะได้ร้อยละผลิตภัณฑ์ 25.49 และร้อยละคาร์บอนคงตัว 73.88 สำหรับการกระตุ้นทางเคมีด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก พบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการกระตุ้นถ่านชาร์ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก คือ อุณหภูมิในการกระตุ้น 500 องศาเซลเซียส และใช้เวลา 120 นาที ในส่วนการทดสอบการดูดซับไอโอดีนของคาร์บอนกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก คาร์บอนกัมมันต์ทางการค้า และกากคาร์บอน พบว่ามีค่าการดูดซับไอโอดีน 709, 715 และ 670 มิลลิกรัมไอโอดีนที่ดูดซับได้ต่อกรัมคาร์บอนกัมมันต์ตามลำดับ ส่วนการดูดซับเมทิลีนบลู พบว่ามีค่าการดูดซับเมทิลีนบลูเท่ากับ 196, 204 และ 112 มิลลิกรัมเมทิลีนบลูที่ดูดซับได้ต่อกรัมคาร์บอนกัมมันต์ ตามลำดับ จากการทดลองดังกล่าว จะเห็นได้ว่าคาร์บอนกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก มีความสามารถในการดูดซับไอโอดีนและเมทิลีนบลูใกล้เคียงกับคาร์บอนกัมมันต์ทางการค้า สำหรับกากคาร์บอนซึ่งไม่ได้ทำการกระตุ้นใด ๆ มีค่าการดูดซับน้อยกว่าคาร์บอนกัมมันต์ทางการค้าและคาร์บอนกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 40 โดยน้ำหนักไม่มาก

วิจิตร จินดาพันธุ์ไพโรจน์ และคณะ [20] ได้ศึกษาการผลิตคาร์บอนกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัสคามาเลกุลเลนซิส (*Eucalyptus Camaldulensis* Dehnh.) ที่มีอายุ 4-5 ปี โดยทำการกระตุ้นด้วยวิธีทางกายภาพซึ่งใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำเป็นสารกระตุ้น

สภาวะในการคาร์บอนไนซ์นั้น ใช้สภาวะที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 45 นาที โดยผ่านก๊าซไนโตรเจนเข้ามาด้วย ซึ่งถ่านชาร์ที่ได้ถูกนำมากระตุ้นด้วยไอน้ำ โดยมีอัตราการป้อนไอน้ำ 20 มิลลิลิตรต่อนาที ปริมาณการป้อนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 700 มิลลิลิตรต่อนาที และปริมาณการป้อนอากาศ 5 มิลลิลิตรต่อนาที

ผลการทดลองในส่วนการคาร์บอนไนซ์ พบว่าที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส ในเวลา 45 นาที เป็นสภาวะที่เหมาะสมในการคาร์บอนไนซ์ถ่านชาร์จากไม้ยูคาลิปตัสที่มีอายุ 4-5 ปี เนื่องจากใช้เวลาและอุณหภูมิไม่สูงมากนัก รวมทั้งให้ร้อยละผลิตภัณฑ์ที่สูงที่สุดด้วย

เมื่อทำการกระตุ้นโดยใช้ไอน้ำที่คาร์ร้อยละผลิตภัณฑ์เท่ากับ 33.14 จะให้ค่าพื้นที่ผิวถึง 1076.15 ตารางเมตรต่อกรัม ค่าการดูดซับไอโอดีน 1233 มิลลิกรัมต่อกรัม ค่าการดูดซับเมทิลีนบลู 242 มิลลิกรัมต่อกรัม

I.N.Malikov และคณะ [21] ได้ทำการศึกษาการรวมตัวกันของของเสียที่ได้มาจากไม้ไผ่ ไม้สนและเปลือกไม้ ใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตคาร์บอนกัมมันต์เพื่อใช้เป็นตัวดูดซับ นำเศษชิ้นไม้เหล่านี้มาเผาภายใต้อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ด้วยเวลา 30 นาที นำมาผสมกับของเสียที่มาจากของเหลวซัลไฟด์และเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

petroleum pitch(ใช้เป็นตัวประสาน) เมื่อนำมาผสมกันแล้วนำมาอบแห้ง เนื่องจากมีปริมาณความชื้นสูง จากนั้นนำเข้าเผาด้วยกระบวนการไพโรไลซิสโดยใช้อากาศเป็นตัวพาพวกไอและของระเหยออกไป โดยใช้ อุณหภูมิ 600 700 และ 800 องศาเซลเซียสที่เวลา 120 140 และ 160 นาทีตามลำดับ พบว่าที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส มีความแข็งแรงสูงสุดแต่จะมีปริมาณรูพรุนน้อยสุด คณะผู้วิจัยได้เลือกตัวอย่างที่เผาที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียสนำมาทำการกระตุ้นด้วยสภาวะอุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ที่เวลา 30 60 90 และ 120 นาที พบว่าเวลาการกระตุ้น 90 นาทีจะมีปริมาณรูพรุนมากที่สุด จากนั้นทำการทดสอบการดูดซับโดยสรุป เป็นตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ตารางแสดงค่าการดูดซับของสารตัวอย่าง SDG และ 2SKG

ตัวอย่าง	ปริมาณรูพรุน (cm ³ /g)	การทดสอบการดูดซับ			
		เบนซีน(cm ³ /g)	ฟีนอล(mg/g)	ไอโอดีน(%)	เมทิลีนบลู (mg/g)
SDG	1.25	0.32	45	63.6	230
2SKG	1.37	0.36	56	71.3	265

SDG มีส่วนผสมของ ไม้ไผ่และไม้สน

2SKG มีส่วนผสมของ เปลือกไม้

Mashimaro Shimada และคณะ [22] เสนอวิธีการเตรียมคาร์บอนกัมมันต์จากของเสียที่เป็น หนังสือพิมพ์เป็นการคืนสภาพของกระดาษมากกว่าการนำวัสดุขั้นต้นไปผลิตกระดาษ ในบทความนี้ คณะผู้วิจัยพิจารณาถึงโครงสร้างของรูพรุนของคาร์บอนกัมมันต์ โดยการเตรียมของเสียที่เป็นหนังสือพิมพ์ มา ตัดเป็นชิ้นเล็ก ๆ (ประมาณ 10 mm) โดยคัดเตอร์ ใช้ตัวประสานยางฟีนอลิก (8% ของน้ำหนักกระดาษ) โดยป็นแบบสเปรย์ เตรียมขึ้นกระดาษแบบใช้ความร้อน 150 องศาเซลเซียส 10 นาที ให้ได้อยู่ในรูปแบบ หน้า 6 mm โดยใช้ความหนาแน่นของแผ่นบอร์ด 3 ค่าคือ 0.5 0.7 และ 0.9 g/cm³ แผ่นกระดาษที่ได้เตรียม ขึ้นตัด ขนาด 25 mm X 25 mm นำมาเผาภายใต้อัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจน 70 ml/min อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส และคงอุณหภูมิไว้นาน 2 ชั่วโมง และกระตุ้นโดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์ ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียสใช้ พื้นที่ผิวจำเพาะของคาร์บอนกัมมันต์ที่เตรียมจากของเสียที่เป็นกระดาษหนังสือพิมพ์ คือ 839 m²/g ปริมาณไมโครพอร์ 0.368 ml/g และปริมาณเมโซพอร์ 0.138 ml/g ซึ่งได้คล้ายกับคาร์บอนกัมมันต์ ในทางการค้า คาร์บอนกัมมันต์ที่เตรียมจากของเสียที่เป็นหนังสือพิมพ์มีปริมาณเถ้าสูงซึ่งจะส่งผลกระทบต่อ คุณสมบัติด้านการดูดซับ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อทำการเทียบตัวรีเอเจนท์ของคาร์บอนกัมมันต์จะมีปริมาณ

ของ mesopores ขนาดรัศมีรูพรุนของ 3- 25 nm และ macropores ขนาดรัศมีของรูพรุนของ 25 - 250 nm คาร์บอนกัมมันต์ที่เตรียมจากของเสียที่เป็นหนังสือพิมพ์มีการพัฒนาโครงสร้างรูพรุน ในส่วนของช่วงของ เมโซพอร์และมาโครพอร์

Mashimaro Shimada และคณะ [23] ได้ทำการศึกษาเพิ่มเติมต่อจากงานวิจัยข้างต้นซึ่งเป็นเมื่อก่อนการผลิตคาร์บอนกัมมันต์จะใช้วัตถุดิบเป็นของเสียที่มาจากกระดาษ โดยเตรียมจากการเติมยางฟีนอล 8% เพื่อใช้ในการยึดเกาะและป้องกันการฉีกขาดของของเสียที่มาจากกระดาษหนังสือพิมพ์และเตรียมตัวอย่างให้เป็นลักษณะเป็นแท่ง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 มิลลิเมตรและยาว 10 มิลลิเมตร คาร์บอนกัมมันต์จะถูกผลิตโดยใช้การกระตุ้นจากแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์คุณสมบัติของคาร์บอนกัมมันต์เราจะยึดเรื่องโครงสร้างทางรูพรุนเป็นหลัก การดูดซับ ไอโอดีน การดูดซับ โทลูอิน ซึ่งคาร์บอนกัมมันต์นี้เตรียมโดยกระตุ้นที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที และได้พื้นที่ผิวจำเพาะ 1241 ตารางเมตรต่อกรัม และค่าการดูดซับ ไอโอดีน 1120 มิลลิกรัมต่อกรัมของคาร์บอนกัมมันต์ ผลที่ได้มามีความใกล้เคียงกับคาร์บอนกัมมันต์ที่ใช้ทางการค้าอยู่ 2 ชนิด คือ คาร์บอนกัมมันต์ที่มาจากกะลามะพร้าวและจาก wood based การดูดซับ โทลูอินจะมีความใกล้เคียงกับคาร์บอนกัมมันต์ทางการค้าอยู่ 2 ชนิดดังกล่าว โดยใช้ระยะเวลาในการกระตุ้น 130 นาที

Yasumitsu Uraki และคณะ [24] งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการทำคาร์บอนกัมมันต์แบบแผ่น โดยคาร์บอนกัมมันต์นี้ใช้วัตถุดิบที่มีส่วนผสมของลิกนินและของเสียที่เป็นกระดาษหนังสือพิมพ์โดยลิกนินนั้นได้นำมาจากไม้ประเภทเนื้ออ่อน ไม้เนื้อแข็ง กระบวนการต้มน้ำค้ำจากการต้มเยื่อแบบกราฟท์ และจากฟางข้าว โดยส่วนผสมเหล่านั้นได้ถูกนำมาขึ้นแบบ แล้วตัดเป็นแผ่นๆ นำมาผ่านกระบวนการคาร์บอนในเซชันและการกระตุ้นด้วยไอน้ำโดยส่วนผสมนั้นได้มีการศึกษาปริมาณของเยื่อหนังสือพิมพ์ที่เติมเข้าไปตั้งแต่ 20% - 100% โดยนำมาวัดค่าความแข็งแรงของคาร์บอนกัมมันต์แบบแผ่นที่เตรียมขึ้น และนำมาวัดค่าการดูดซับ ไอโอดีน และเมทิลีนบลู ค่าความแข็งแรงหลังเผาที่ดีที่สุดคือ 30 MPa โดยใช้วัตถุดิบที่ผสมปริมาณเยื่อลิกนินที่เตรียมจากไม้เนื้ออ่อน 40% ของน้ำหนัก ส่วนค่าความแข็งแรงหลังกระตุ้นที่ดีที่สุดคือ 10 MPa โดยใช้วัตถุดิบที่ผสมปริมาณเยื่อลิกนินที่เตรียมจากไม้เนื้ออ่อน 60% ของน้ำหนัก

Phussadee Patnukaol และคณะ [25] ได้ศึกษาการผลิตคาร์บอนกัมมันต์จากเปลือกไม้ยูคา-ลิปตัสดามาลดูเลนซิส (Eucalyptus Camaldulensis Dehn Bark.) ผ่านวิธีการกระตุ้นทางเคมีโดยใช้สารละลายกรดฟอสฟอริกที่ปริมาณต่างๆ กันการเตรียมเปลือกไม้ยูคา-ลิปตัสดามาลดูเลนซิส โดยการนำไปอบให้แห้งเป็นเวลา 4 ชั่วโมง อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส จากนั้นนำมาบดให้เป็นขนาดเล็ก โดยให้ผ่านตะแกรงเบอร์ 10 (ขนาดประมาณ 2 มิลลิเมตร) ผ่านกระบวนการเผาแบบอับอากาศอุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 60 นาที ใช้สภาวะการกระตุ้น 500 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 60 นาทีและทำการศึกษาคุณสมบัติของคาร์บอน

กัมมันต์ที่เตรียมขึ้น หาร้อยละน้ำหนักที่หายไป ค่าความหนาแน่น ทดสอบคุณสมบัติด้านการดูดซับ โดย สารละลายไอโอดีน สารละลายเมทิลีนบลู และวิเคราะห์ค่าการดูดซับไนโตรเจน โดยได้ผลดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 แสดงคุณสมบัติของคาร์บอนกัมมันต์ที่เตรียมขึ้น

ตัวแปรที่ศึกษา	อัตราส่วนผงคาร์บอนต่อสารละลายกรรพอฟอริก(น้ำหนัก)					
	1:0.3	1:0.5	1:0.8	1:1	1:2	1:3
ความหนาแน่น(g/cm ³)	0.255	0.252	0.252	0.251	0.251	0.250
ปริมาณเถ้า(%)	6.64	6.48	5.86	4.88	4.40	4.00
ร้อยละน้ำหนักที่หายไป(%)	52.8	53.1	53.5	54.6	55.5	56.6
ค่าการดูดซับไอโอดีน(mg/g)	610	821	929	1043	1004	595
ค่าการดูดซับเมทิลีนบลู(mg/g)	299	364	424	427	324	89.1
พื้นที่ผิวจำเพาะ(m ² /g)	545	991	1170	1239	-	-
ปริมาตรรูพรุน(cm ³ /g)	0.420	0.899	1.108	1.109	-	-
การกระจายขนาดรูพรุน						
● ปริมาณไมโครพอร์(%)	94.8	90.6	89.2	88.5	-	-
● ปริมาณเมโซพอร์(%)	5.18	9.36	10.78	11.48	-	-

- ไม่สามารถทำการวิเคราะห์ได้

บทที่ 3

การทดลอง

3.1 การเตรียมวัตถุดิบ

3.1.1 กากคาร์บอน

ขั้นตอนนี้เป็นการล้างของเสี่ย(Dreg) ให้เหลืออยู่ในรูปของกากคาร์บอนเนื่องจากวัตถุดิบมีปริมาณโซเดียมเจือปนอยู่เป็นจำนวนมาก

สารเคมี

1. ของเสี่ย(Dreg)
2. สารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นร้อยละ 37
3. น้ำ RO

อุปกรณ์

1. ขวดรุ่มพู่ขนาด 250 และ 1000 มิลลิลิตร
2. บีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร
3. กระดาษวัด pH
4. แท่งแก้วคนสาร
5. กรวยกรอง
6. กระดาษกรองวัดแมน เบอร์ 1
7. ตู้อบ

วิธีการทดลอง

1. นำกากคาร์บอนซึ่งเป็นของเสี่ยมาผสมน้ำเพื่อให้อยู่ในรูปของสเลอรี
2. นำกากคาร์บอนที่เตรียมแล้วมาล้างด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นร้อยละ 37 โดยปริมาตร
3. วัด pH ให้ได้ประมาณ 7
4. นำมาล้างด้วยน้ำ RO ประมาณ 6-7 ครั้ง เพื่อกำจัดโซเดียมออกไปให้ได้มากที่สุด
5. กรองสเลอรีที่ได้พร้อมนำเข้าเตาอบโดยใช้อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

3.1.2 การเตรียมตัวประสาน (ใช้แป้งมันสำปะหลังเป็นตัวประสาน)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากวัตถุดิบที่นำมาเตรียมเป็นถ่านกัมมันต์มีลักษณะเป็นผงจึงต้องทำการหาตัวประสานเพื่อให้ผงคาร์บอนมีการเกาะตัวกัน โดยเลือกใช้แป้งมันสำปะหลังเป็นตัวประสานเพราะเป็นวัตถุดิบจากธรรมชาติหาได้ง่าย และราคาถูก

สารเคมี

1. แป้งมันสำปะหลัง
2. น้ำ RO

อุปกรณ์

1. เครื่องชั่งอย่างละเอียดทศนิยม 4 ตำแหน่ง
2. บีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร
3. กระจกตวงขนาด 10 มิลลิลิตร
4. แผ่นให้ความร้อน (Hot plate)
5. แท่งแก้วคนสาร

วิธีการทดลอง

1. ชั่งแป้งมันซึ่งจะใช้เป็นตัวประสานใส่บีกเกอร์ในการทดลองนี้ ได้ศึกษาปริมาณแป้งมัน 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 และ 0.5 กรัม
2. เติมน้ำปริมาณ 12 กรัม
3. อุ่นสารละลายแป้งมันที่อุณหภูมิประมาณ 40-60 องศาเซลเซียสจนสารละลายเดือด
4. รอให้สารละลายเย็นตัวแล้วชั่งน้ำหนักเพื่อหาปริมาณน้ำที่ระเหยออกไป
5. เติมปริมาณน้ำที่ระเหยให้เท่ากับน้ำหนักก่อนอุ่นสารละลาย

3.1.3 การเตรียมเม็ดคาร์บอน

สารเคมี

1. ผงคาร์บอนที่ได้จากการเตรียมวัตถุดิบ
2. สารละลายแป้งมันที่ได้จากการเตรียมตัวประสาน

อุปกรณ์

1. เครื่องชั่งอย่างละเอียดทศนิยม 4 ตำแหน่ง
2. แท่งแก้วคนสาร
3. เตาอบ
4. ภาชนะการเตรียมขึ้นรูปแบบเม็ด ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ภาชนะสำหรับขึ้นรูปแบบเม็ด

วิธีการทดลอง

1. นำคาร์บอนที่ได้จากการเตรียมวัตถุดิบมาบดให้ละเอียด
2. นำสารละลายแป้งมันที่ได้จากการเตรียมตัวประสานมาผสมกับผงคาร์บอนที่เตรียมไว้โดยคลุกเคล้าผงคาร์บอนกับตัวประสานให้ทั่ว
3. นำส่วนผสมของผงคาร์บอนและตัวประสานขึ้นรูปบนภาชนะสำหรับขึ้นรูปแบบเม็ด
4. นำเข้าเตาอบอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที
5. เมื่อคาร์บอนแบบเม็ดเริ่มหดตัวจากภาชนะจึงทำการนำเม็ดคาร์บอนออกจากภาชนะสำหรับขึ้นรูปใส่บีกเกอร์
6. นำคาร์บอนแบบเม็ดเข้าเตาอบอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมงเพื่อทำการไล่ปริมาณน้ำออกจากตัวเม็ดคาร์บอน

3.2 การคาร์บอนไนซ์

สารเคมี

1. เม็ดคาร์บอน
2. ก๊าซไนโตรเจน

อุปกรณ์

1. เครื่องชั่งอย่างละเอียดทศนิยม 4 ตำแหน่ง
2. เตาเผา
3. ภาชนะสำหรับเผา
4. เครื่องปฏิบัติการการเผาแบบอับอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ภาชนะเก็บสาร

วิธีการทดลอง

1. นำเม็ดคาร์บอนที่ผ่านการอบเรียบร้อยแล้วผ่านกระบวนการคาร์บอนไนซ์
2. ศึกษาวิธีการคาร์บอนไนซ์โดยได้ทำการคาร์บอนไนซ์ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจน ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เวลา 90 นาที
3. นำเม็ดคาร์บอนที่ผ่านการการคาร์บอนไนซ์ ไปทดสอบคุณสมบัติด้านการดูดซับ

3.3 การกระตุ้น

สารเคมี

1. เม็ดถ่านคาร์บอน
2. ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

อุปกรณ์

1. เครื่องชั่งอย่างละเอียดชนิดนิยม 4 ตำแหน่ง
2. เตาเผา
3. ภาชนะสำหรับเผา
4. เครื่องปฏิบัติการเผาแบบอับอากาศ
5. ภาชนะเก็บสาร

วิธีการทดลอง

1. นำเม็ดถ่านคาร์บอนที่ผ่านการคาร์บอนไนซ์มาชั่งจำนวน 1 กรัม
2. บรรจุลงในเครื่องปฏิบัติการเผาแบบอับอากาศ
3. เริ่มเผาที่อุณหภูมิ 700 800 และ 900 องศาเซลเซียส
4. ผ่านก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ลงไปเครื่องปฏิบัติการเผาแบบอับอากาศเป็นเวลา 30 นาที
5. นำเม็ดถ่านกัมมันต์ที่ผ่านกระบวนการกระตุ้นไปทดสอบด้านการดูดซับ

บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง

ในโครงการนี้ได้ทำการเตรียมสารดูดซับขึ้นมาโดยมีการใช้ผงคาร์บอน 2 กรัมต่อปริมาณน้ำ 12 กรัมและทำการเติมตัวประสานคือ 0.1 0.2 0.3 0.4 และ 0.5 g โดยได้อัตราส่วนดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 อัตราส่วนตัวประสานต่อผงคาร์บอนในการสังเคราะห์สารดูดซับ

อัตราส่วนผงคาร์บอนต่อปริมาณน้ำ(C/W) (น้ำหนัก)	อัตราส่วนปริมาณตัวประสานที่เติมต่ออัตราส่วนผงคาร์บอน(B/C) (โดยน้ำหนัก)				
0.167	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25

4.1 การหาอุณหภูมิที่เหมาะสมในการกระตุ้น

ทำการกระตุ้นด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยศึกษาสภาวะของอุณหภูมิโดยใช้อุณหภูมิ 700 800 และ 900 องศาเซลเซียส ใช้เวลา 30 นาทีโดยศึกษาข้อมูลจากร้อยละมวลที่หายไปของสารดูดซับพบว่าจากการเพิ่มอุณหภูมิการกระตุ้น ค่าร้อยละมวลที่หายไปมีค่าเพิ่มขึ้นแสดงว่าเมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิจะทำให้เกิดการสูญเสียคาร์บอนมากขึ้น จึงได้ทำการเลือกอุณหภูมิในการกระตุ้น 900 องศาเซลเซียส ข้อมูลแสดงร้อยละมวลที่หายดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ผลของอุณหภูมิในการกระตุ้นต่อร้อยละมวลที่หาย

B/C	อุณหภูมิ	ร้อยละมวลที่หาย
0.05	700	24.30
	800	25.33
	900	32.74
0.10	700	25.67
	800	27.82
	900	33.91
0.15	700	27.67
	800	28.92
	900	34.11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 ร้อยละมวลที่หายและค่าความหนาแน่น

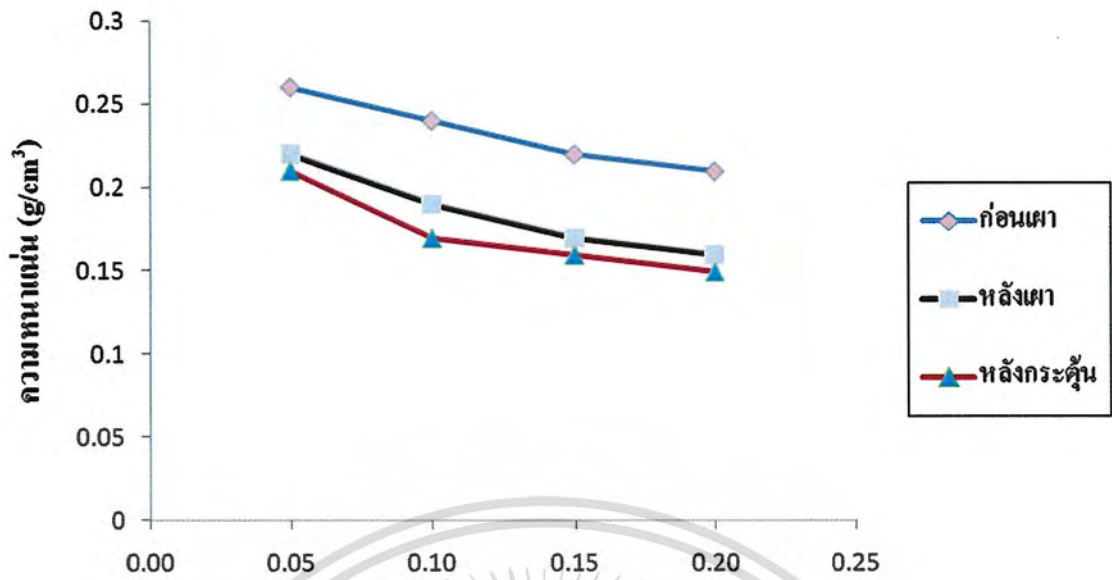
ในการทดลองผู้ทำการทดลองศึกษาสภาวะการเผาภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนโดยทำการเผาที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 90 นาที และทำการกระตุ้นที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที

ตารางที่ 4.3 แสดงผลของร้อยละมวลที่หายและค่าความหนาแน่นของอัตราส่วนระหว่างตัวประสานกับผงคาร์บอน

สภาวะ / ตัวแปร		อัตราส่วนระหว่างตัวประสานกับผงคาร์บอน(B/C)(น้ำหนัก)				
		0.1:2	0.2:2	0.3:2	0.4:2	0.5:2
ก่อนเผา	ค่าความหนาแน่น(g/cm^3)	0.26	0.24	0.22	0.21	***
หลังเผา	ค่าความหนาแน่น(g/cm^3)	0.22	0.19	0.17	0.16	***
	ร้อยละมวลที่หาย (% น้ำหนัก)	20.43	22.48	24.28	27.67	28.25
หลังกระตุ้น	ค่าความหนาแน่น(g/cm^3)	0.21	0.17	0.16	0.15	***
	ร้อยละมวลที่หาย (% น้ำหนัก)	31.08	32.53	35.39	35.83	36.62

*** ไม่สามารถเตรียมได้

ตารางที่ 4.3 แสดงค่าความหนาแน่น และร้อยละมวลที่หาย ที่การเผาแบบอับอากาศอุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 90 นาที และทำการกระตุ้นที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที จากตารางที่ 4.3 นำมาแสดงเป็นกราฟรูปที่ 4.1 โดยแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกับอัตราส่วนผงคาร์บอนต่อตัวประสาน พบว่าความหนาแน่นจะมีค่าลดลงเมื่ออัตราส่วนผงคาร์บอนต่อตัวประสาน มีค่าเพิ่มขึ้น ตัวอย่างที่ $B/C = 0.25$ ไม่สามารถทำการหาค่าความหนาแน่นได้เนื่องจากในขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานมีการหดตัวและแตกหักของชิ้นงานดังรูปที่ 4.2 และจากตารางที่ 4.3 นำมาแสดงเป็นกราฟรูป 4.3 โดยแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าร้อยละมวลที่หายกับอัตราส่วนผงคาร์บอนต่อตัวประสาน พบว่าร้อยละมวลที่หายมีค่าเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนผงคาร์บอนต่อตัวประสานที่มากขึ้น



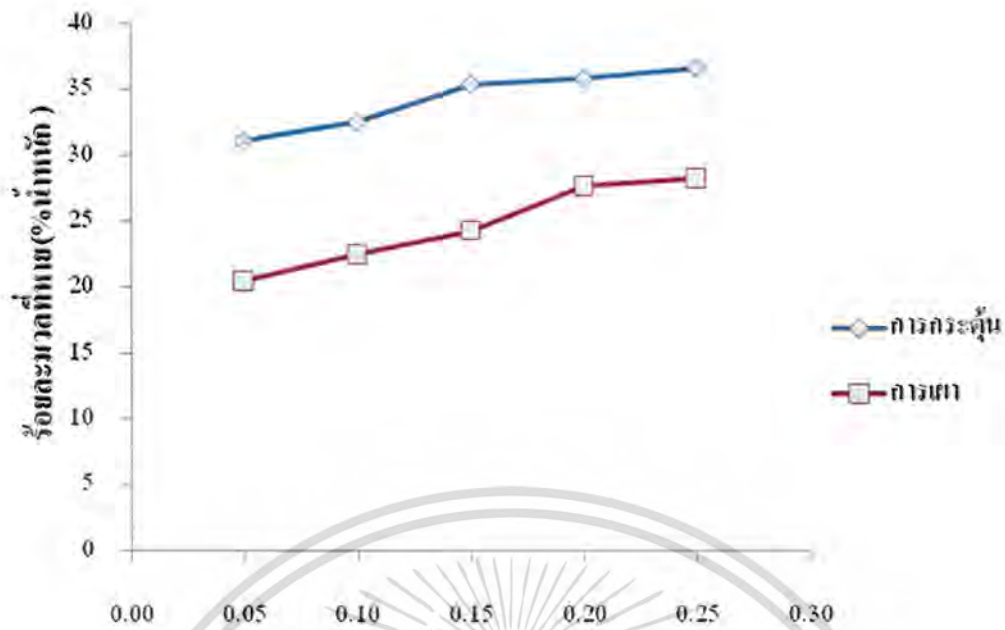
อัตราส่วนตัวประสานต่อผงคาร์บอน (น้ำหนัก)

รูปที่ 4.1 ผลความหนาแน่นของการเพิ่มอัตราส่วนผงคาร์บอนต่อตัวประสาน



รูปที่ 4.2 แสดงรอยแตกของชิ้นงานที่อัตราส่วน C/W = 0.167 มี B/C = 0.25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

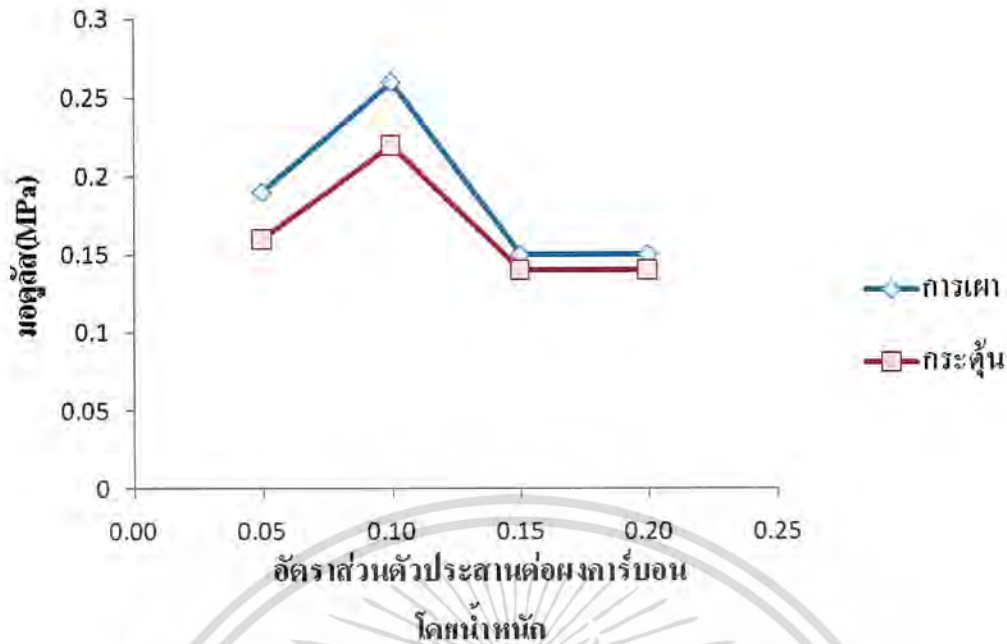


อัตราส่วนตัวประสานต่อตงการรับอน(กิโลกรัม)

รูปที่ 4.3 แสดงร้อยละโดยมวลที่หายไปของอัตราส่วนผงคาร์บอนต่อตัวประสานเมื่อทำการเผาและการกระตุ้น

4.3 การวิเคราะห์ค่าความแข็งแรง

ทำการขึ้นรูปชิ้นงานของตัวคูดซ์เป็นแบบวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 เซนติเมตร และหนา 0.5 เซนติเมตร จากนั้นนำมารเผาแบบอับอากาศอุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 90 นาที และทำการกระตุ้นที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที โดยทำการวัดค่ามอดุลัสของตัวคูดซ์ คือ ตัวคูดซ์เมื่อทำการเผาและตัวคูดซ์เมื่อผ่านการกระตุ้นขึ้นงานเพื่อดูค่าความแข็งแรงของตัวคูดซ์ ได้ผลแสดงดังรูปที่ 4.4 พบว่าเมื่อทำการกระตุ้นค่าความแข็งแรงจะมีค่าลดลงโดยตัวคูดซ์ $C/W = 0.167$ และ $B/C = 0.10$ มีมอดุลัสมากที่สุดคือ 0.25 MPa ส่วนค่ามอดุลัสที่มากที่สุดที่วัดได้เมื่อทำการกระตุ้นคือที่อัตราส่วนเดียวกันมีค่า 0.22 MPa



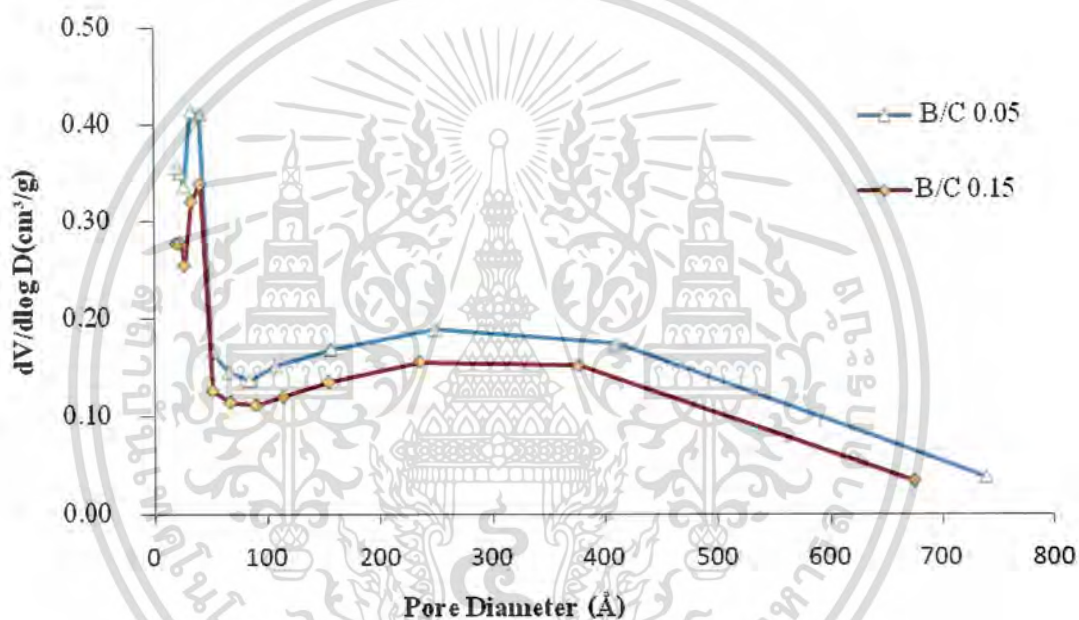
รูปที่ 4.4 แสดงค่าแอดซอร์ชันกับค่าอัตราส่วนตัวประสานต่อผงคาร์บอน

4.4 การวิเคราะห์โครงสร้างของสารดูดซับ

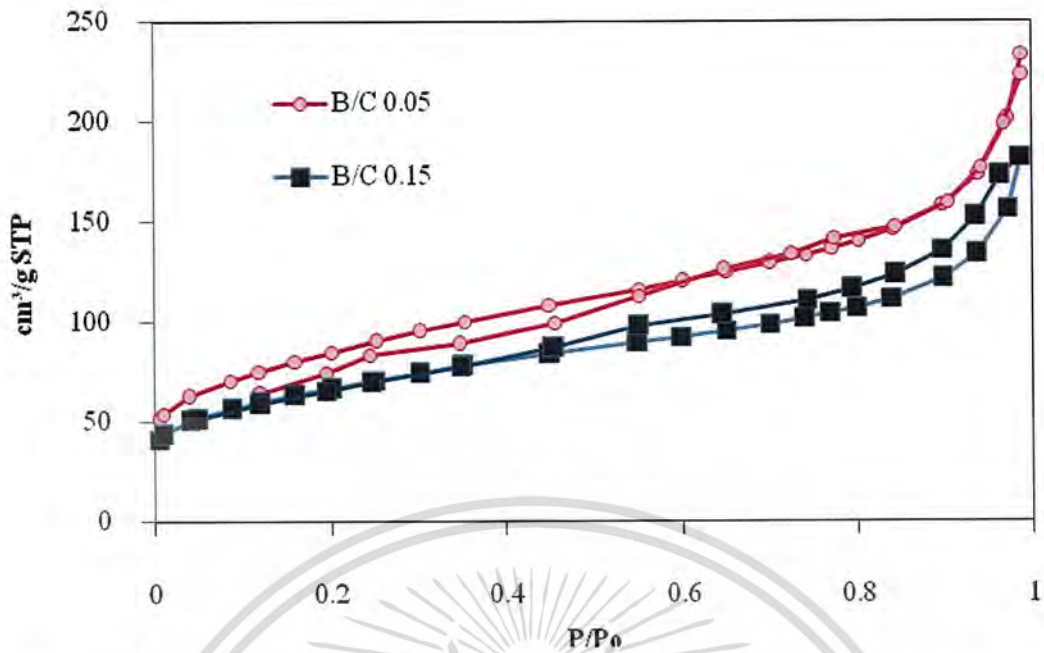
เมื่อนำผงคาร์บอนและตัวประสานที่เตรียมขึ้น 2 อัตราส่วนไปทดสอบด้านการดูดซับด้วยการดูดซับด้วยก๊าซไนโตรเจน โดยอาศัยแบบจำลองของ BET ได้ผลการวิเคราะห์ตามตารางที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์ $B/C = 0.05$ และ $B/C = 0.15$ ผลการกระจายตัวขนาดรูพรุนแสดงดังรูปที่ 4.5 จากอัตราส่วนทั้งสองค่าพิกมีค่าใกล้เคียงกันมากที่สุดที่ $B/C = 0.05$ มีพิกที่สูงกว่า $B/C = 0.15$ จากแบบจำลองนี้ทำให้เราได้กราฟแสดงไอโซเทอมการดูดซับก๊าซไนโตรเจนของทั้งสองอัตราส่วนดังรูปที่ 4.6 ซึ่งไอโซเทอมของทั้งสองอัตราส่วนเป็นไอโซเทอรัมของวัสดุที่มีรูพรุนแบบเมโซพอร์ โดยไอโซเทอมของทั้งสองมีค่าที่ใกล้เคียงกันมากที่สุดที่ผิวของ $B/C = 0.05$ มีค่าที่มากกว่า $B/C = 0.15$ อาจเนื่องมาจากการเพิ่มปริมาณตัวประสานทำให้ไปปิดขนาดของรูพรุนพื้นที่ผิวจึงมีค่าลดลงและเมื่อทำการกระตุ้นด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของทั้งสองอัตราส่วนผลการกระจายตัวขนาดรูพรุนแสดงดังรูปที่ 4.7 และ ไอโซเทอมการดูดซับก๊าซไนโตรเจนของทั้งสองอัตราส่วนดังรูปที่ 4.8 เมื่อทำการเปรียบเทียบการเผาและการกระตุ้นของแต่ละอัตราส่วน ที่อัตราส่วน $B/C = 0.05$ การกระจายตัวขนาดรูพรุนแสดงดังรูปที่ 4.9 พบว่าการกระจายตัวของสารดูดซับที่ทำการกระตุ้นพบว่าพิกต่ำกว่าการเผาและไอโซเทอมของทั้งสองสถานะแสดงดังรูปที่ 4.10 โดยไอโซเทอมของตัวดูดซับที่ทำการกระตุ้นมีค่าต่ำกว่าไอโซเทอมของตัวดูดซับที่ทำการเผา และที่อัตราส่วน $B/C = 0.15$ การกระจายตัวขนาดรูพรุนแสดงดังรูปที่ 4.11 มีพิกต่ำกว่าการเผา ไอโซเทอมของทั้งสองสถานะแสดงดังรูปที่ 4.12 จะเห็นได้ว่าไอโซเทอมของทั้งสองสถานะมีช่วงกว้างใกล้เคียงกัน โดยไอโซเทอมของสถานะที่ทำการเผามีช่วงกราฟกว้างกว่าการกระตุ้นดังจะเห็นผลของพื้นที่ผิว และปริมาณเมโซพอร์ในตารางที่ 4.4 ที่มีค่าใกล้เคียงกัน

ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบสมบัติของสารดูดซับคาร์บอนด้วยแบบจำลอง BET

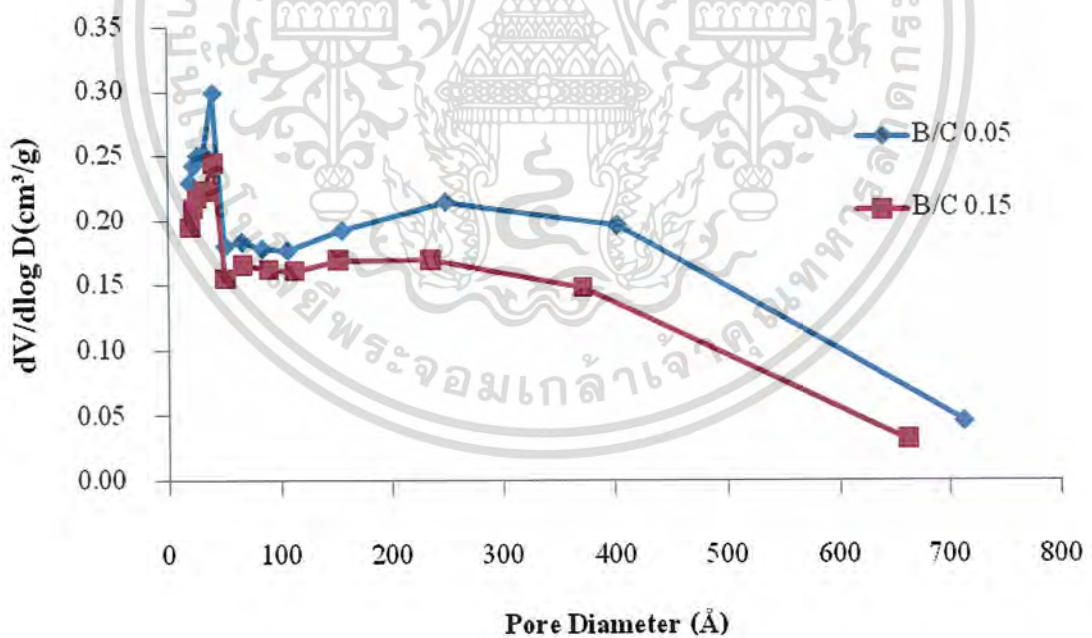
B/C	สถานะ	ปริมาณเมโซพอร์ (cm^3/g)	ปริมาณไมโคร พอร์(cm^3/g)	พื้นที่ผิว (m^2/g)	D_{peak} (\AA)
0.05	หลังเผา	0.36	0.014	289.14	41
	กระตุ้น	0.33	0.013	224.90	40
0.15	หลังเผา	0.28	0.016	225.89	41
	กระตุ้น	0.27	0.016	190.39	41



รูปที่ 4.5 แสดงการกระจายตัวของขนาดรูพรุนของสารดูดซับที่มี $C/W = 0.167$, $B/C = 0.05$ $C/W = 0.167$, $B/C = 0.15$ และ $C/W = 0.167$, $B/C = 0.25$ เมื่อการเผาที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เวลา 90 นาที

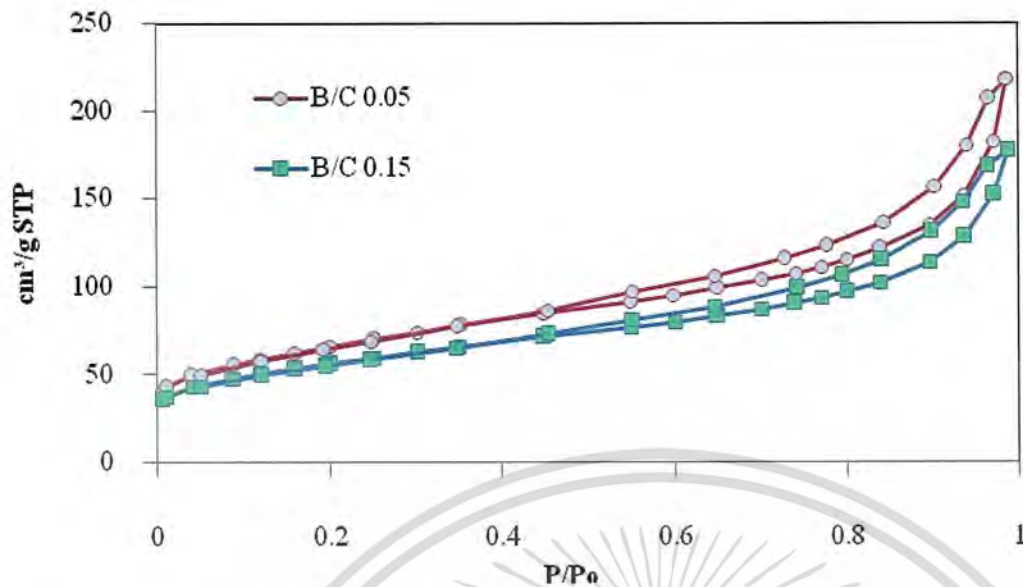


รูปที่ 4.6 ไอโซเทอร์มการดูดซับและการคายซับของบนสารดูดซับที่ทำการเผา เมื่ออุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียสเวลา 90 นาที มี $C/W = 0.167$ $B/C = 0.05$ 0.15 และ 0.25

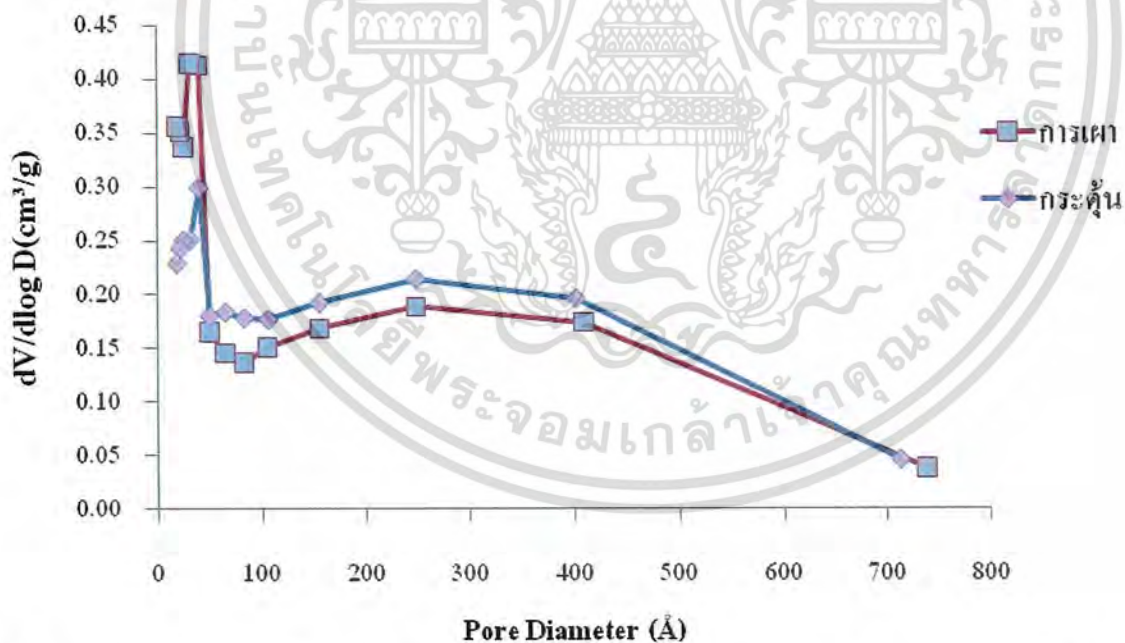


รูปที่ 4.7 แสดงการกระจายตัวของขนาดรูพรุนของสารดูดซับที่มี $C/W = 0.167$, $B/C = 0.05$ และ $C/W = 0.167$, $B/C = 0.15$ ที่ทำการกระตุ้นที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียสเวลา 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

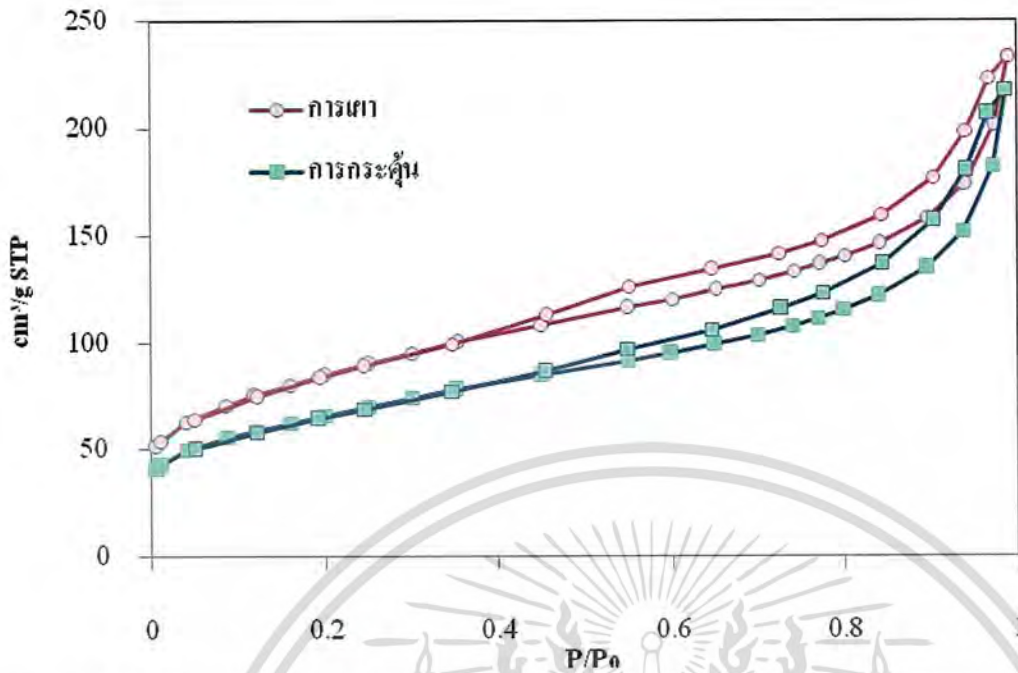


รูปที่ 4.8 ไอโซเทอมการดูดซับและการคายซับของบนสารดูดซับที่ทำการกระตุ้นที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียสเวลา 30 นาที มี $C/W = 0.167$ $B/C = 0.05$ และ 0.15

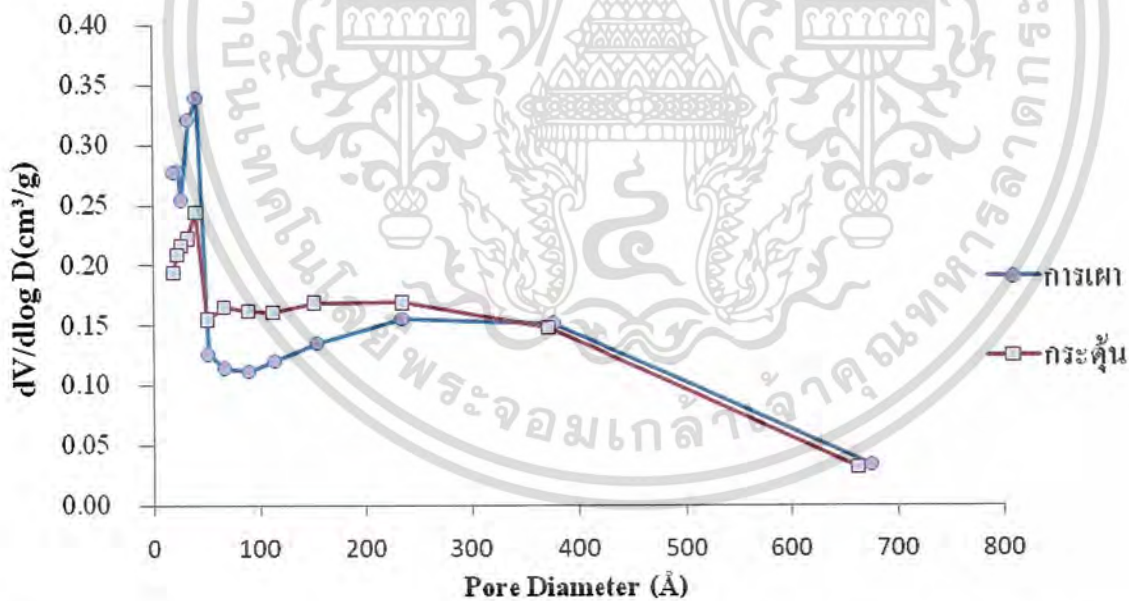


รูปที่ 4.9 แสดงการกระจายตัวของขนาดรูพรุนของสารดูดซับที่มี $C/W = 0.167$, $B/C = 0.05$ เผาที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียสเวลา 90 นาทีและกระตุ้นด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

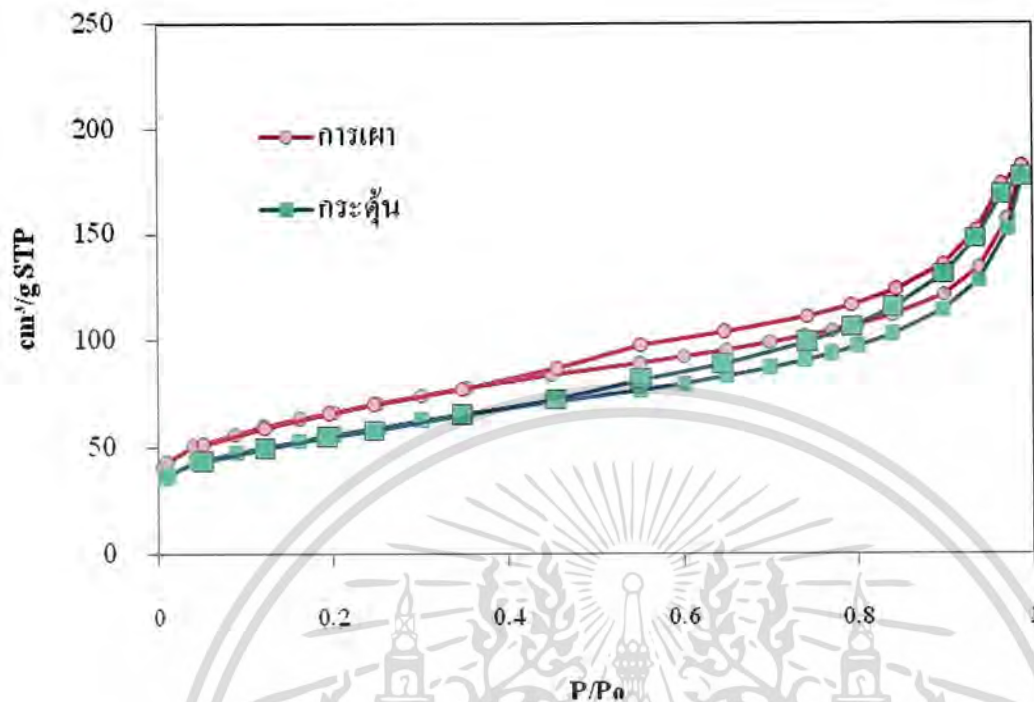


รูปที่ 4.10 ไอโซเทอร์มการดูดซับและการคายซับของบนสารดูดซับที่อัตราส่วนตัวประสานต่อผงคาร์บอน ที่ $C/W = 0.167$ และ $B/C = 0.05$



รูปที่ 4.11 แสดงการกระจายตัวของขนาดรูพรุนของสารดูดซับที่มี $C/W = 0.167$, $B/C = 0.15$ ทำการเผาที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียสเวลา 90 นาทีและกระตุ้นด้วยก๊าซคาร์บอน ไดออกไซด์

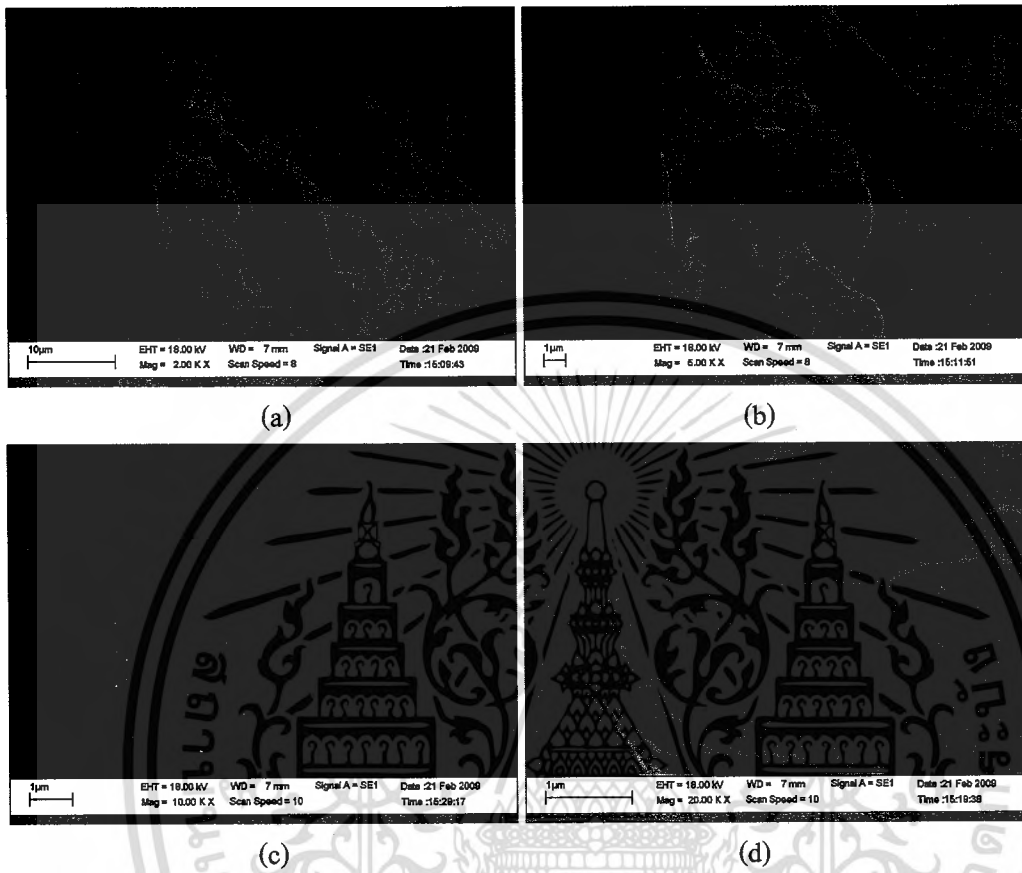
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



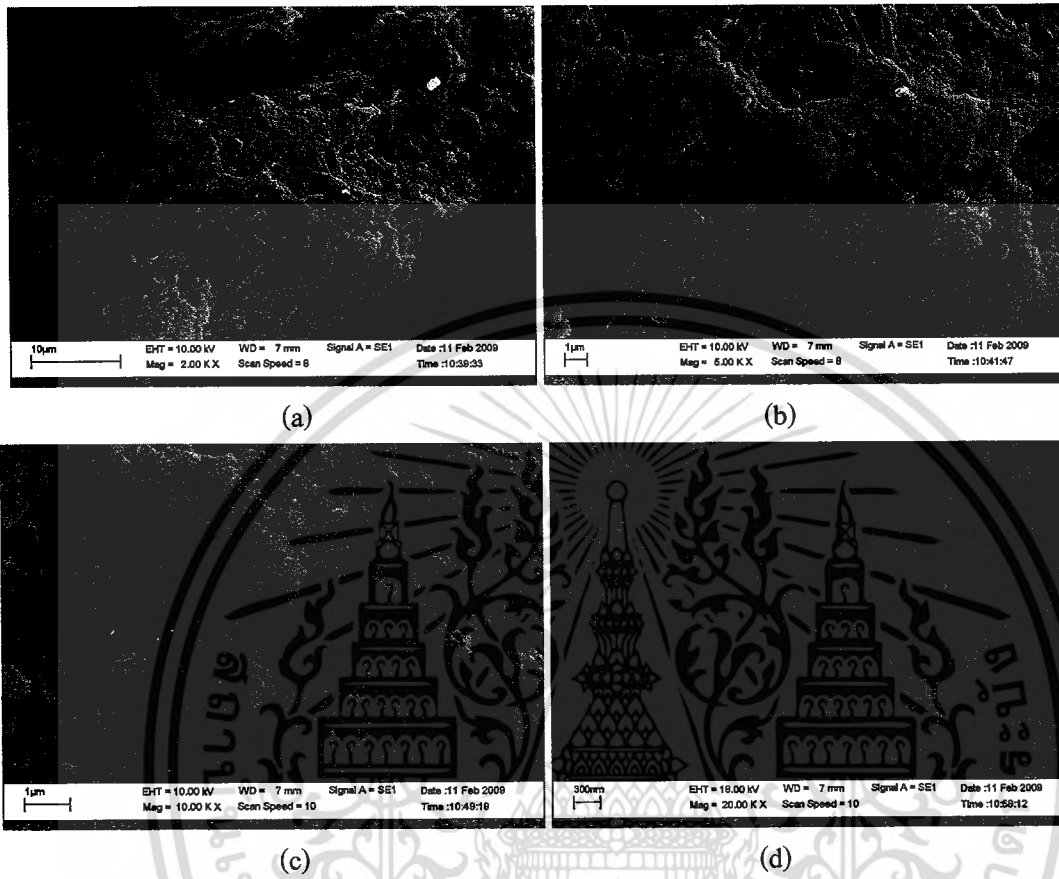
รูปที่ 4.12 ไอโซเทอมการดูดซับและการคายซับของบนสารดูดซับที่อัตราส่วนตัวประสานต่อผงคาร์บอน ที่ $C/W = 0.167$ และ $B/C = 0.15$

4.5 การวิเคราะห์สภาพพื้นผิวของถ่านกัมมันต์โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

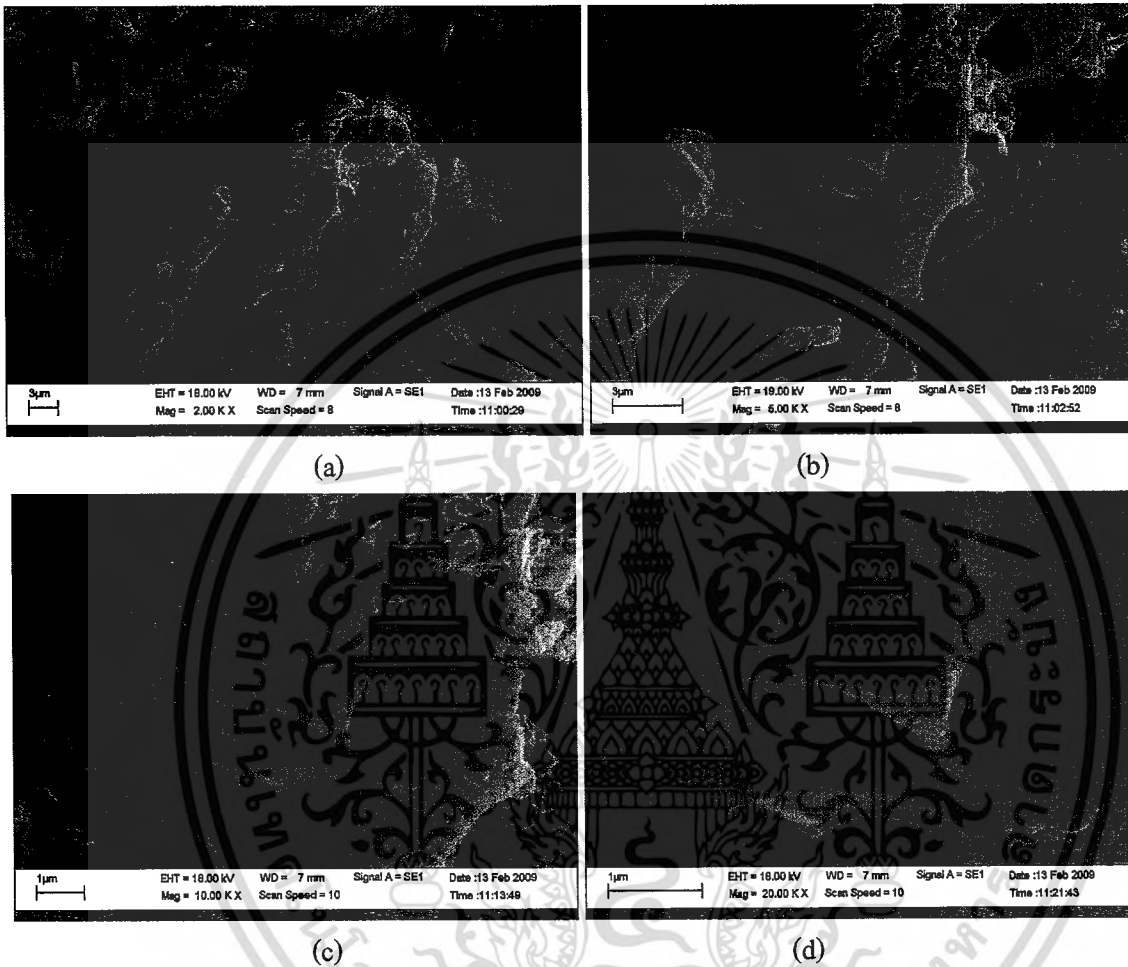
จากการทำการศึกษาพื้นที่ผิวดังได้ทำการเปรียบเทียบผงคาร์บอนกับสารดูดซับมีส่วนประกอบของผงคาร์บอนและตัวประสานที่ผ่านกระบวนการเผาและการกระตุ้น โดยรูปที่ 4.13 เป็นผงคาร์บอนที่ไม่ได้ทำการเติมตัวประสานพบว่าพื้นผิวของผงคาร์บอนมีลักษณะที่เรียบและมีขนาดของรูพรุนช่วงมาโครพอร์ รูปที่ 4.14 ถึงรูปที่ 4.18 แสดงถึงผงคาร์บอนที่มีการเติมตัวประสานที่ปริมาณต่างๆ และทำการเผาแบบอับอากาศที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียสใช้เวลา 90 นาทีพบว่าเมื่ออัตราส่วนของปริมาณตัวประสานต่อผงคาร์บอน (B/C) เพิ่มขึ้น พื้นผิวไม่เรียบเนื่องจากมีตัวประสานมาเกาะ ปริมาณตัวประสานไปปิดขนาดของรูพรุนขนาดมาโครพอร์ทำให้ขนาดของรูพรุนมีขนาดเล็กลงดังรูปที่ 4.18 และจากการกระตุ้นด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที รูปที่ 4.19 ถึงรูปที่ 4.23 พบว่าพื้นผิวของสารดูดซับไม่ได้แตกต่างจากการเผาซึ่งการวิเคราะห์พื้นผิว โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนเป็นการศึกษาสภาพพื้นผิวภายนอกเท่านั้นจึงไม่สามารถบอกปริมาณรูพรุนที่เกิดขึ้นได้



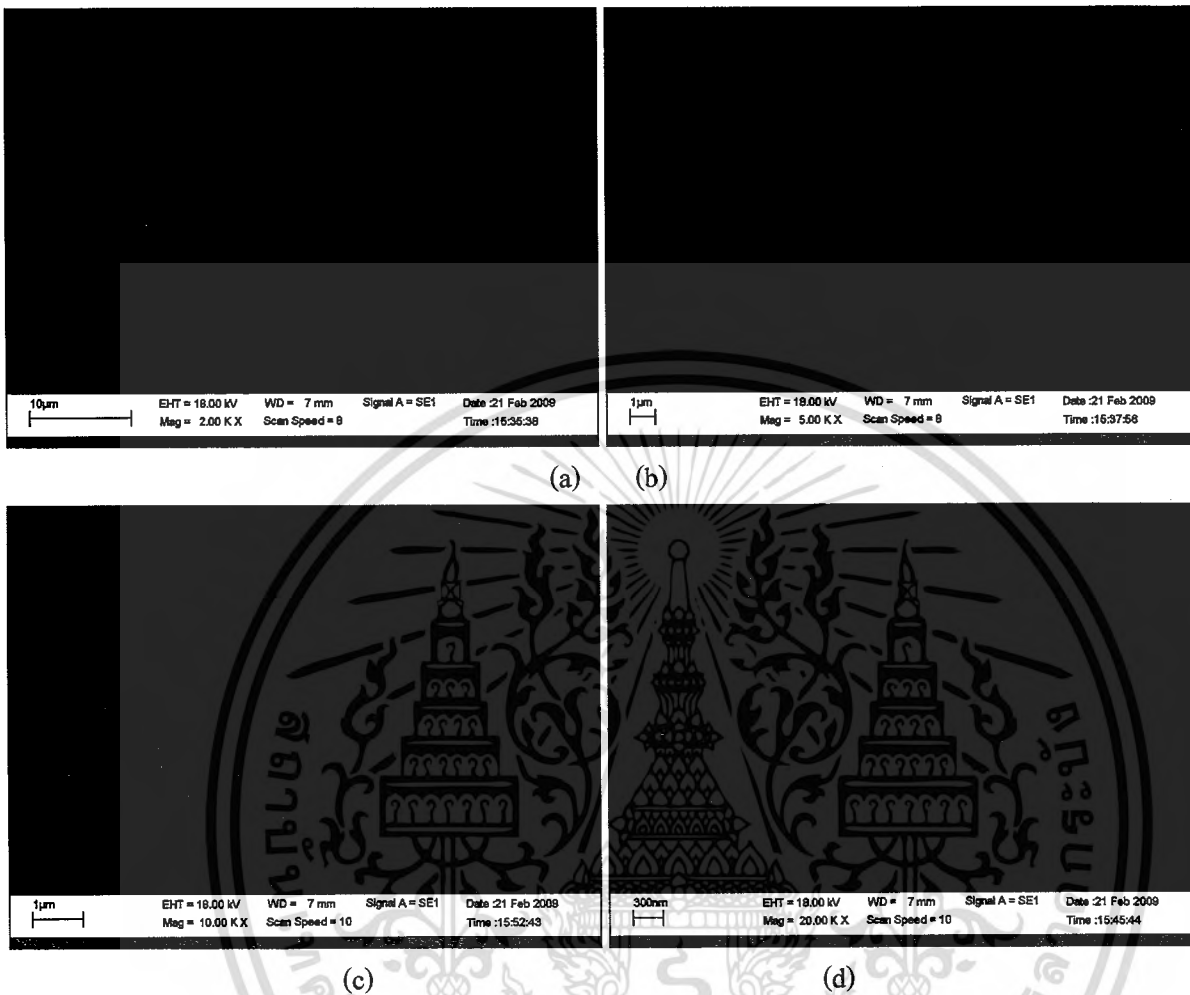
รูปที่ 4.13 แสดงสัณฐานวิทยาของฟองคาร์บอนที่ไม่ได้เติมตัวประสาน (a) กำลังขยาย 2,000 เท่า (b) กำลังขยาย 5,000 เท่า (c) กำลังขยาย 10,000 เท่า (d) กำลังขยาย 20,000 เท่า



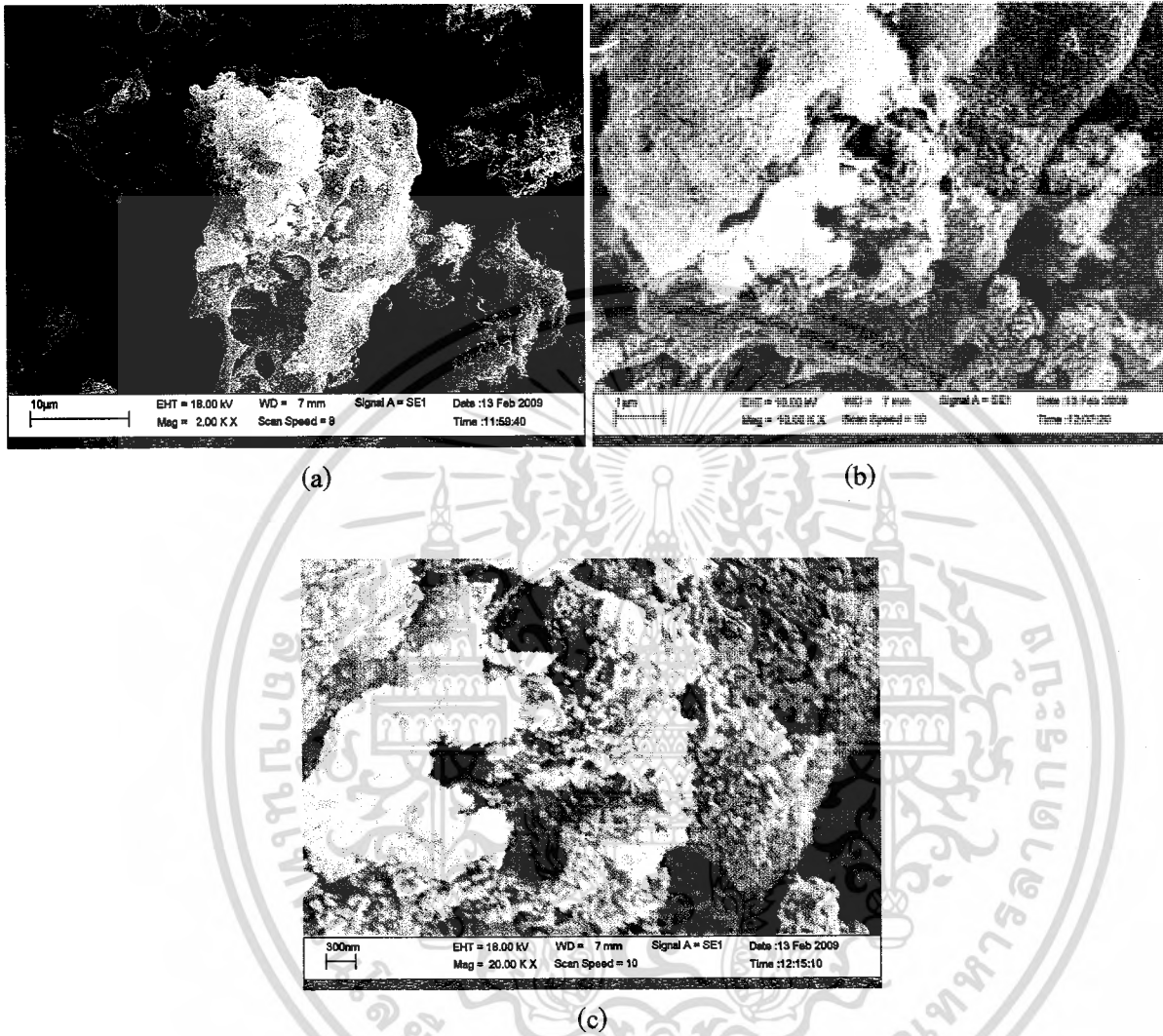
รูปที่ 4.14 แสดงลักษณะพื้นผิวของฟองคาร์บอนที่เติมตัวประสานอัตราส่วน B/C = 0.05 โดยทำการเผาแบบอับอากาศ (a) กำลังขยาย 2,000 เท่า (b)กำลังขยาย 5,000 เท่า (c)กำลังขยาย 10,000 เท่า (d) กำลังขยาย 20,000 เท่า



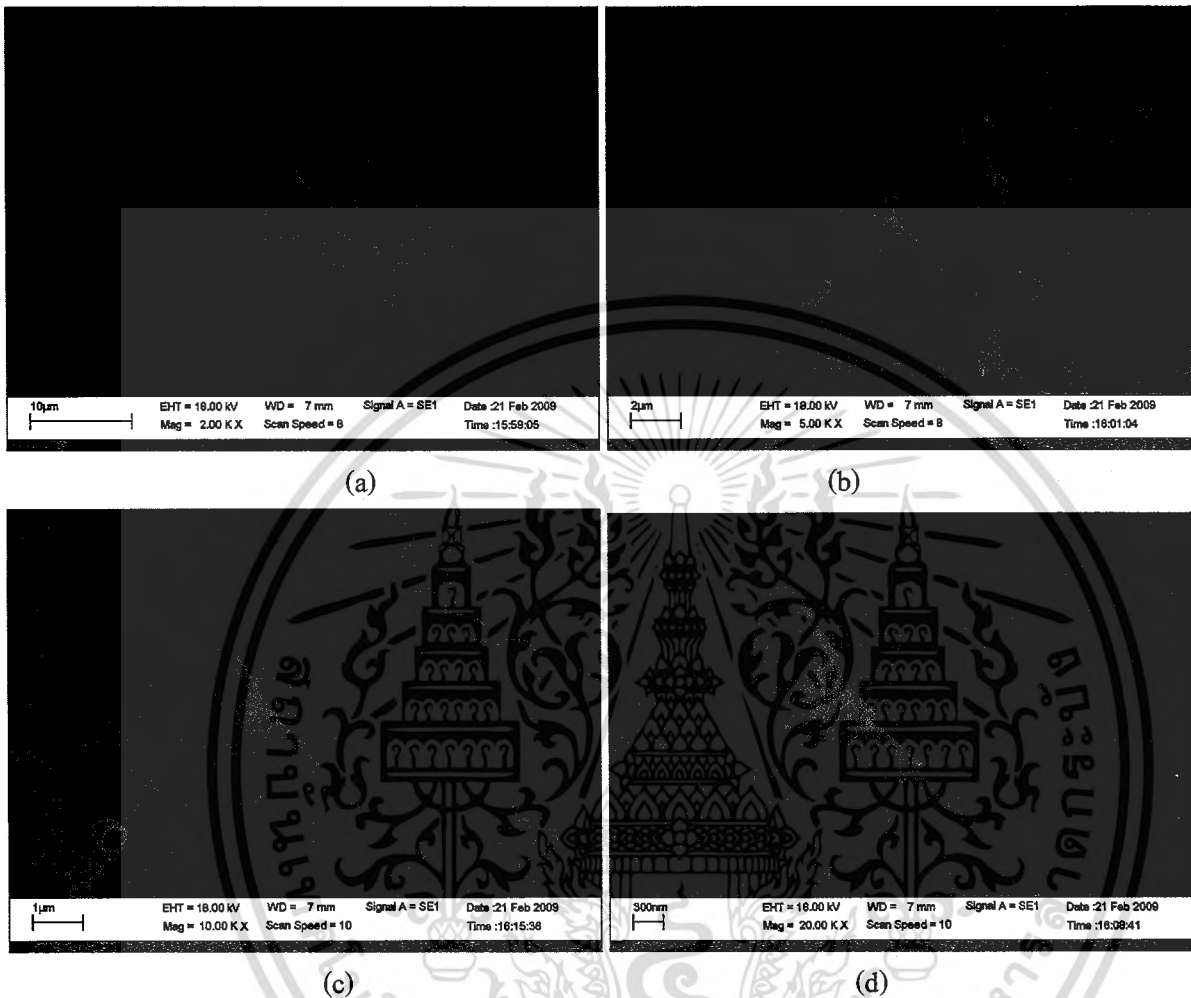
รูปที่ 4.15 แสดงลักษณะพื้นผิวของผงคาร์บอนที่เติมตัวประสานอัตราส่วน $B/C = 0.10$ โดยทำการเผาแบบอับอากาศ (a) กำลังขยาย 2,000 เท่า (b) กำลังขยาย 5,000 เท่า (c) กำลังขยาย 10,000 เท่า (d) กำลังขยาย 20,000 เท่า



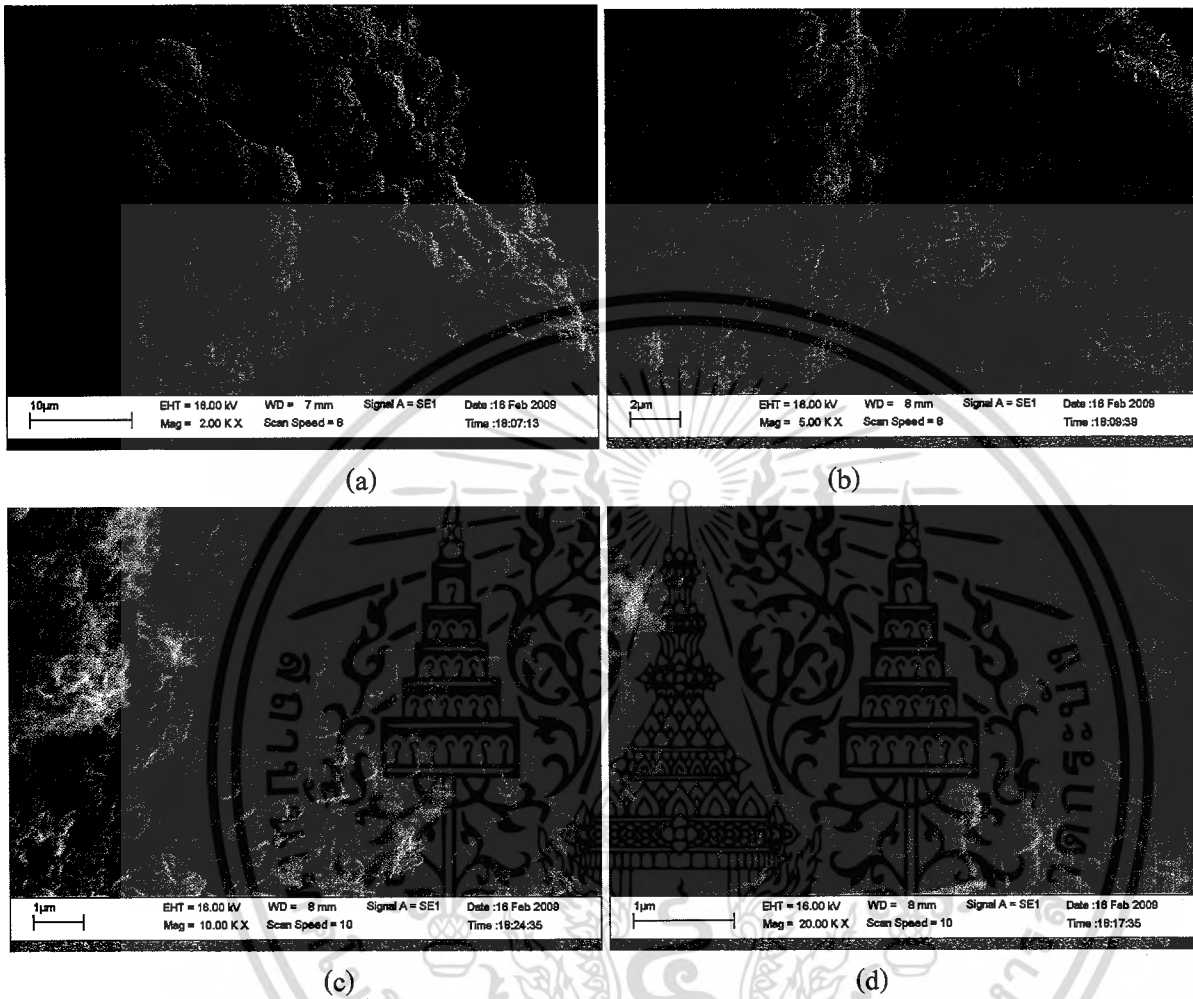
รูปที่ 4.16 แสดงสัณฐานวิทยาของผงคาร์บอนที่เติมตัวประสานอัตราส่วน $B/C = 0.15$ โดยทำการเผาแบบ อับอากาศ (a) กำลังขยาย 2,000 เท่า (b) กำลังขยาย 5,000 เท่า (c) กำลังขยาย 10,000 เท่า (d) กำลังขยาย 20,000 เท่า



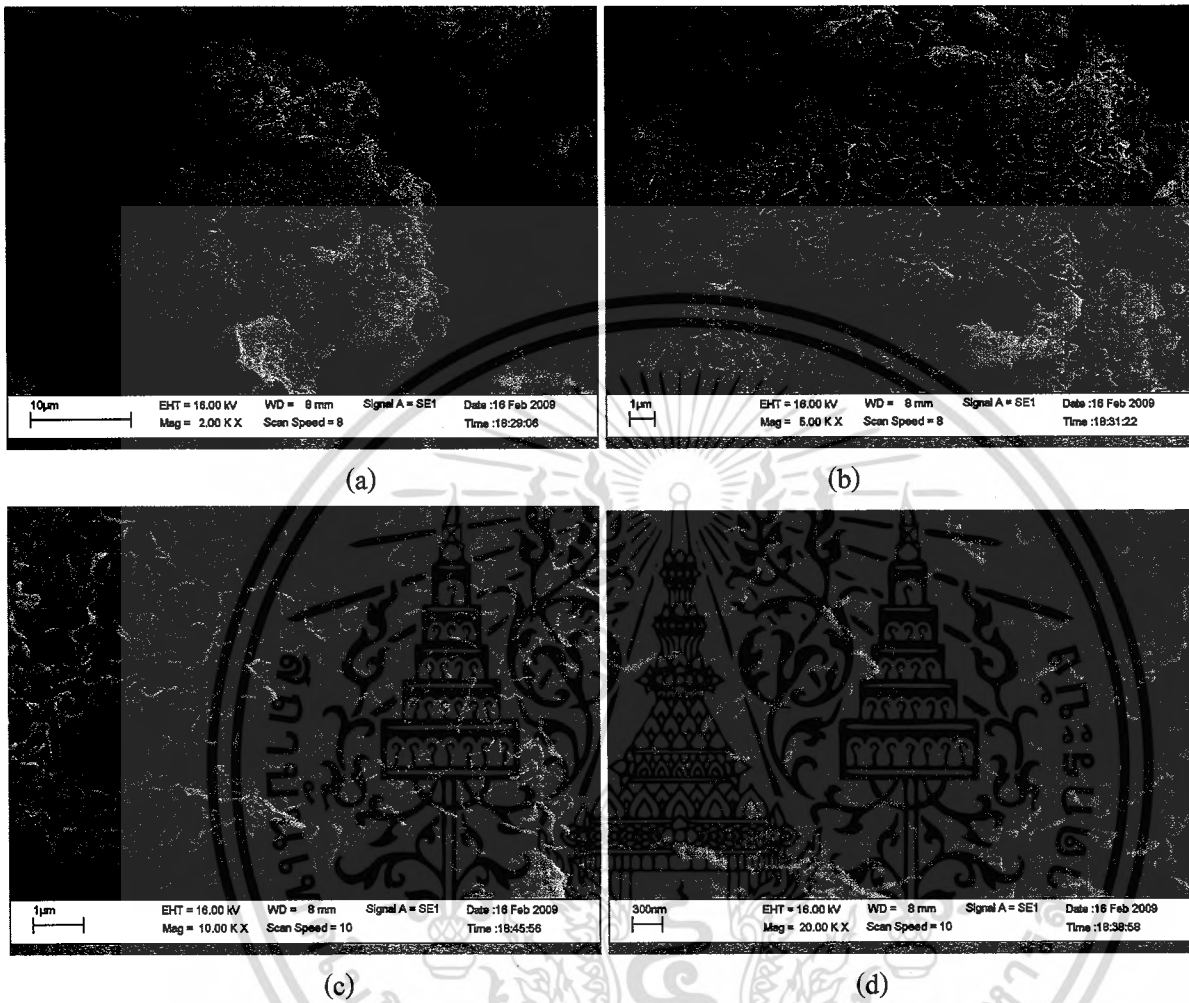
รูปที่ 4.17 แสดงลักษณะวิทยาของผงคาร์บอนที่เติมตัวประสานอัตราส่วน B/C = 0.20 โดยทำการเผาแบบอับอากาศ (a) กำลังขยาย 2,000 เท่า (b) กำลังขยาย 10,000 เท่า (c) กำลังขยาย 20,000 เท่า



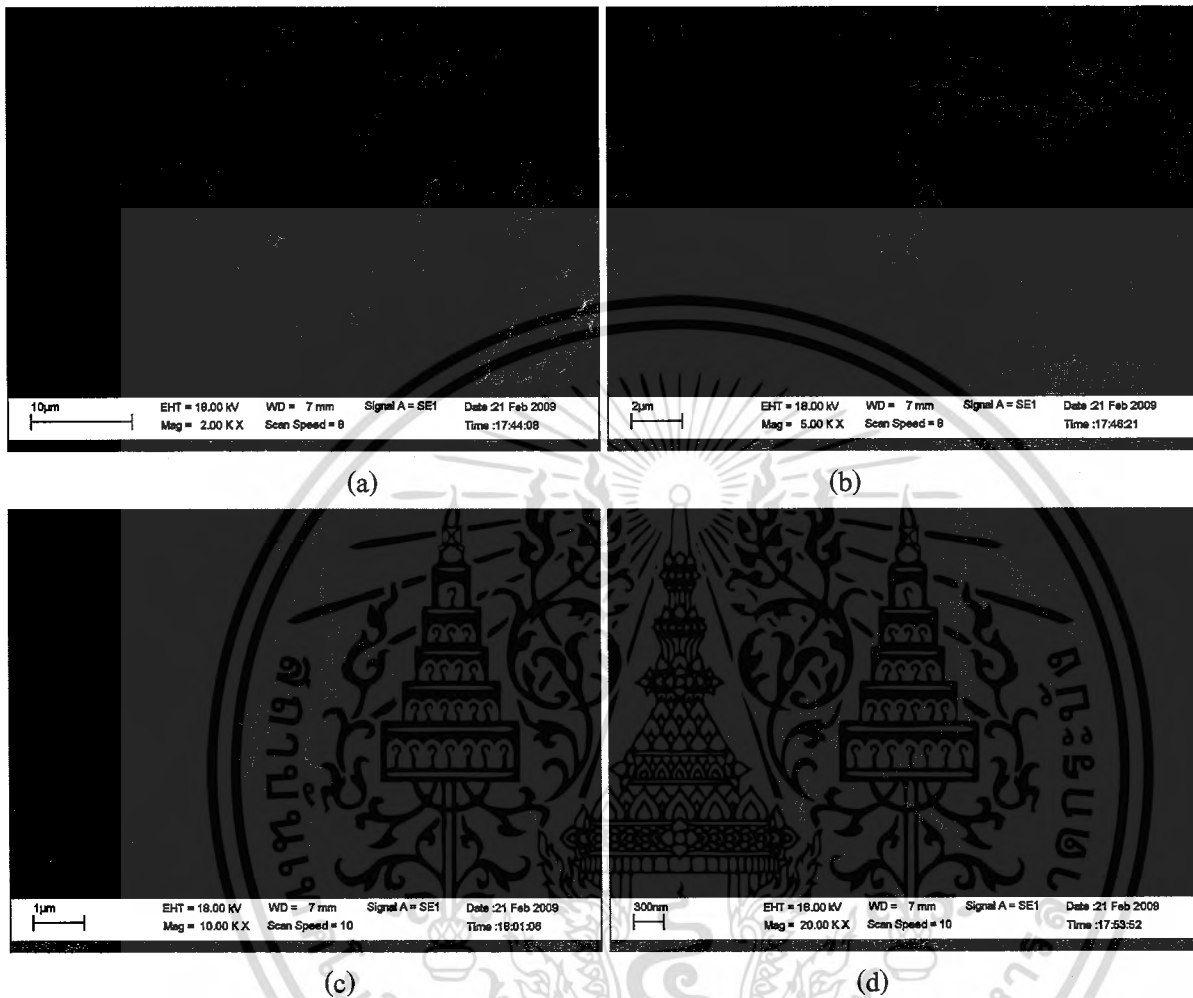
รูปที่ 4.18 แสดงสัณฐานวิทยาของผงคาร์บอนที่เติมตัวประสานอัตราส่วน $B/C = 0.25$ โดยทำการเผาแบบอับอากาศ (a) กำลังขยาย 2,000 เท่า (b) กำลังขยาย 5,000 เท่า (c) กำลังขยาย 10,000 เท่า (d) กำลังขยาย 20,000 เท่า



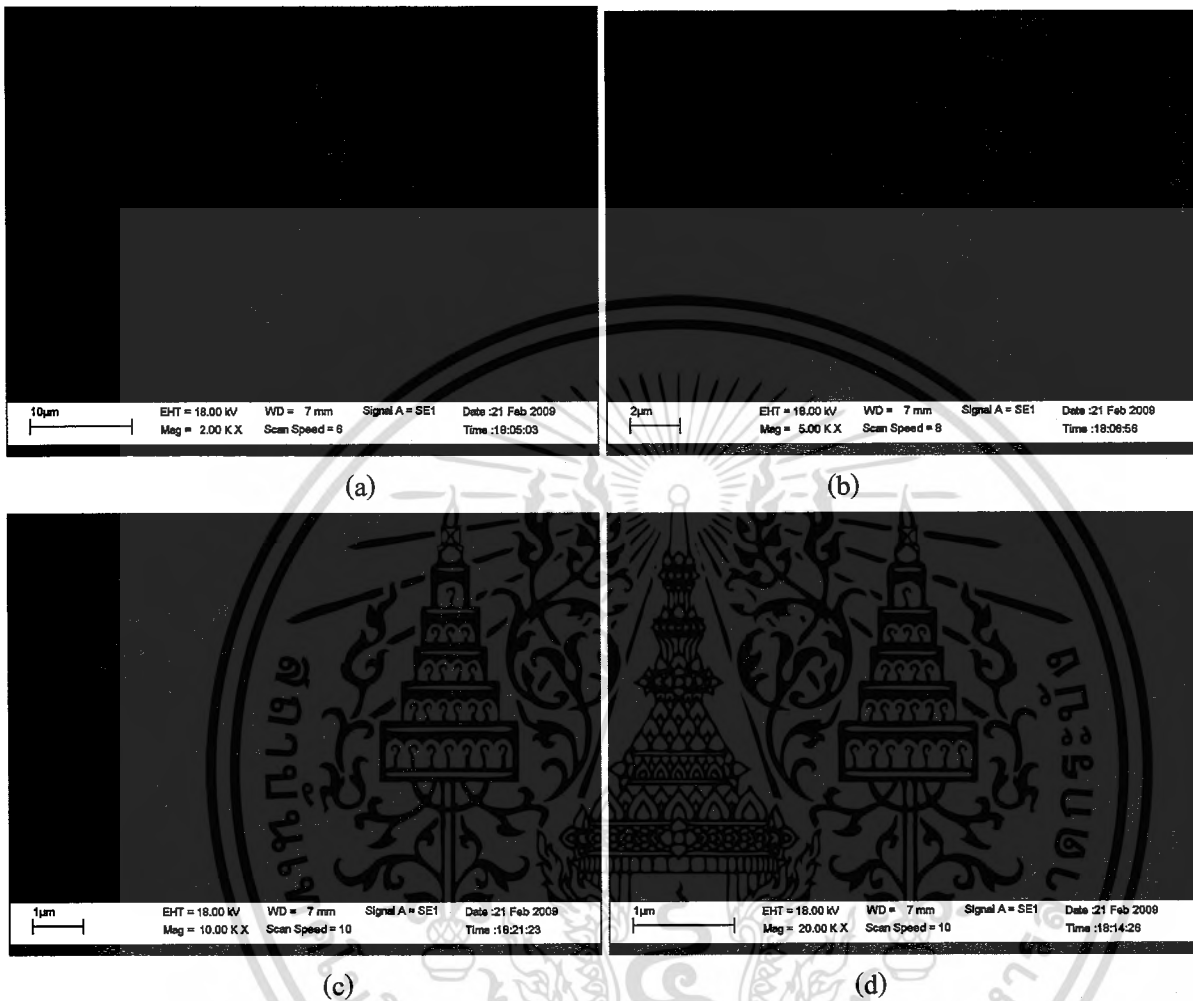
รูปที่ 4.19 แสดงสัณฐานวิทยาของพวงคาร์บอนที่เติมตัวประสานอัตราส่วน $B/C = 0.05$ โดยทำการกระตุ้นด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (a) กำลังขยาย 2,000 เท่า (b)กำลังขยาย 5,000 เท่า (c)กำลังขยาย 10,000 เท่า (d) กำลังขยาย 20,000 เท่า



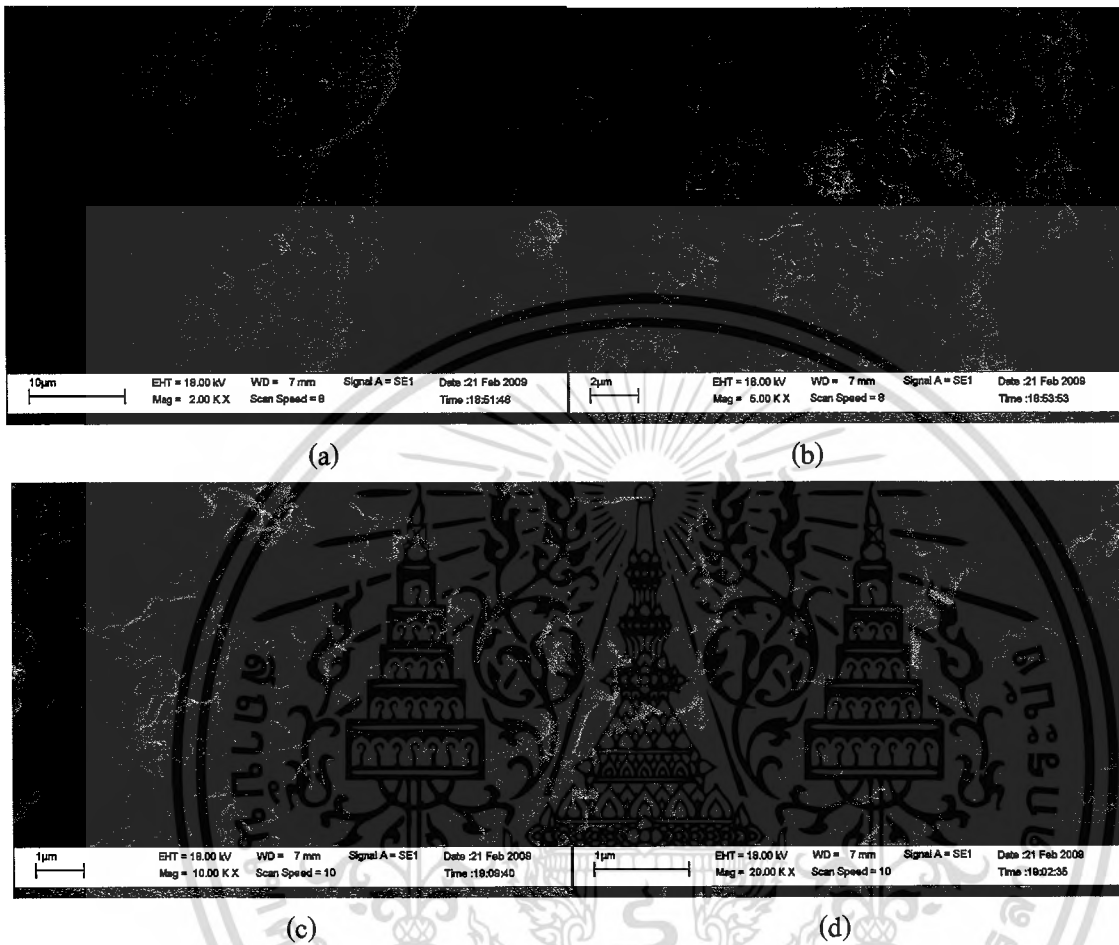
รูปที่ 4.20 แสดงลักษณะวิทย์ของฟงคาร์บอนที่เติมตัวประสานอัตราส่วน B/C = 0.10 โดยทำการกระตุ้นด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (a) กำลังขยาย 2,000 เท่า (b)กำลังขยาย 5,000 เท่า (c)กำลังขยาย 10,000 เท่า (d) กำลังขยาย 20,000 เท่า



รูปที่ 4.21 แสดงลักษณะพื้นผิวของผงคาร์บอนที่เติมตัวประสานอัตราส่วน $B/C = 0.15$ โดยทำการกระตุ้นด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (a) กำลังขยาย 2,000 เท่า (b) กำลังขยาย 5,000 เท่า (c) กำลังขยาย 10,000 เท่า (d) กำลังขยาย 20,000 เท่า



รูปที่ 4.22 แสดงสัณฐานวิทยาของผงคาร์บอนที่เติมตัวประสานอัตราส่วน $B/C = 0.20$ โดยทำการกระตุ้นด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (a) กำลังขยาย 2,000 เท่า (b)กำลังขยาย 5,000 เท่า (c)กำลังขยาย 10,000 เท่า (d) กำลังขยาย 20,000 เท่า



รูปที่ 4.23 แสดงลักษณะวิทยาของผงคาร์บอนที่เติมตัวประสานอัตราส่วน B/C = 0.25 โดยทำการกระตุ้นด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (a) กำลังขยาย 2,000 เท่า (b)กำลังขยาย 5,000 เท่า (c)กำลังขยาย 10,000 เท่า (d) กำลังขยาย 20,000 เท่า

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

โครงการนี้ศึกษาและเตรียมอัตราส่วนผงคาร์บอนต่อปริมาณน้ำ(C/W) 0.167 โดยมีอัตราส่วนปริมาณตัวประสานต่อผงคาร์บอน (B/C) 5 อัตราส่วนคือ 0.05 0.10 0.15 0.20 และ 0.25 มีข้อสรุปดังนี้

1. เม็ดสารดูดซับที่เตรียมขึ้นมามีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในช่วง 1.700 – 1.830 เซนติเมตร และความหนาช่วง 0.410 – 0.480 เซนติเมตร ก่อนทำการเผาพบค่าความหนาแน่นอยู่ในช่วง 0.21 – 0.26 g/cm³ เมื่อทำการเผาที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 90 นาที พบค่าความหนาแน่นอยู่ในช่วง 0.16 – 0.22 g/cm³ และเมื่อทำการกระตุ้นที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ค่าความหนาแน่นมีค่าลดลงอยู่ในช่วง 0.15 – 0.21 g/cm³ โดยค่าความหนาแน่นสูงสุดได้จากการเตรียมอัตราส่วนปริมาณตัวประสานต่อผงคาร์บอน (B/C) = 0.05

2. ค่าร้อยละมวลที่หายของสารดูดซับที่เปลี่ยนแปลงตามสภาวะพบว่าเมื่อทำการเพิ่มอัตราส่วนปริมาณตัวประสานต่อผงคาร์บอน (B/C) ให้มีค่าเพิ่มขึ้นร้อยละมวลที่หายของสารดูดซับ จะมีค่าเพิ่มมากขึ้นด้วย

3. ค่ามอดูลัสของสารดูดซับที่ทำการเตรียมขึ้น โดยทำการทดสอบเมื่อทำการเผา และหลังจากกระตุ้น พบว่าเมื่อทำการกระตุ้นค่ามอดูลัสจะมีค่าลดลง โดยตัวดูดซับ C/W= 0.167 มี B/C = 0.10 เมื่อทำการเผา ค่ามอดูลัสที่มีค่าสูงสุด คือ 0.25 MPa และในการกระตุ้นพบว่าค่ามอดูลัสที่มีค่าสูงสุด คือ 0.22 MPa

4. เมื่อทดสอบด้านการดูดซับด้วยการดูดซับด้วยก๊าซไนโตรเจน โดยอาศัยแบบจำลองของ BET ผลที่ได้คือไอโซเทอมการดูดซับที่ได้แสดงไอโซเทอมของวัสดุที่มีรูพรุนแบบเมโซพอร์ เมื่อศึกษาอัตราส่วนปริมาณตัวประสานต่อผงคาร์บอนที่เพิ่มขึ้นพบว่าพื้นที่ผิวจำเพาะมีค่าลดลง ปริมาณไมโครพอร์ และปริมาณเมโซพอร์ที่ได้มีช่วงใกล้เคียงกันมาก ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะสูงสุดคือ 289.14 m²/g และ ปริมาณเมโซพอร์ และ ปริมาณไมโครพอร์ สูงสุดคือ 0.36 cm³/g และ 0.021 cm³/g ตามลำดับ

5. จากการวิเคราะห์สภาพพื้นผิวของถ่านกัมมันต์โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดพบว่าผงคาร์บอนที่ไม่ได้เติมตัวประสานลักษณะพื้นผิวจะเรียบและมีขนาดรูพรุนใหญ่แต่เมื่อเติมตัวประสานเพิ่มอัตราส่วนปริมาณตัวประสานต่อผงคาร์บอน(B/C)ให้ มีค่าเพิ่มขึ้น ขนาดรูพรุนจะมีขนาดเล็กลงแต่เมื่อทำการเผาลักษณะพื้นผิวจะมีเว้าแหว่งและจากการกระตุ้นพบว่าลักษณะพื้นผิวไม่ได้ต่างจากการเผาแสดงว่าการกระตุ้นไม่มีผลมากนักต่อพื้นผิวของสารดูดซับ

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรทำการศึกษาเพิ่มอัตราส่วนผงคาร์บอนต่อปริมาณน้ำ (C/W) โดยปรับปริมาณน้ำเพิ่มขึ้นหรือทำการปรับปริมาณน้ำลดลง
2. ควรทำการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของการเผาและการกระตุ้น โดยมีตัวแปรคือ อุณหภูมิ และ เวลา
3. ควรทำการทดลองศึกษาตัวประสานอื่นๆ ที่ใช้ในการประสานผงคาร์บอน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] กรมวิทยาศาสตร์บริการ, **การศึกษาเรื่องการทำคาร์บอนกัมมันต์จากกะลามะพร้าวโดยการ กระตุ้นด้วย ไอ้ น้ำ**, รายงานกิจกรรมกรมวิทยาศาสตร์บริการ, ฉบับที่ 38, 2523 : 65-73.
- [2] Hassler J.W. Purification with Activated Carbon. New York. Chemical Publishing Co.Inc.n 1974. p. 87-191.
- [3] กมลชนก ปานสง่า และคณะ. **การสังเคราะห์คาร์บอนกัมมันต์จากกระดูกไก่**. ปรินญาณิพนธ์ ภาควิชา วิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2545 หน้า18-19
- [4] กระทรวงอุตสาหกรรม. **มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมถ่านกัมมันต์ กรุงเทพมหานคร : สำนักงาน มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2532.**
- [5] Jankowska, H., Swiatkowski, A. and Choma, J. **Active Carbon** . Poland : Eillis Horwood Limited, 1991.
- [6] เกศรา นุตาลัย และ คณะ. **การผลิตถ่านกัมมันต์จากดินพุดในห้องปฏิบัติการ**. วารสารวิทยาศาสตร์และ เทคโนโลยี วารสารการวิจัยและพัฒนา. ปีที่ 4 ฉบับที่ 3(2532) : 67-68.
- [7] Gregg S.J. and Sing K.S.W. Adsorption Surface Area and Porosity. 2nd ed. New York : John Wiley & Son 1978.vol.4 pp.561 - 569
- [8] กรมวิทยาศาสตร์บริการ **“ถ่านกัมมันต์” ข่าวกกรมวิทยาศาสตร์บริการ**. 1987, ฉบับที่ 107, หน้า 12 - 13
- [7] มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมถ่านกัมมันต์ สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวง อุตสาหกรรม.กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์กระทรวงอุตสาหกรรม. 2532.
- [9] วรณนิภา อมาตยกุล กฤติกา จารุทะวีย์, **การผลิตถ่านกัมมันต์จากกะลาปาล์มโดยกระบวนการแตกตัว ด้วยความร้อนและกระตุ้นด้วยไอ้ น้ำ** คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2540.
- [10] บุญชัย ตระกูลมหาชัย. **การผลิตกะลาตาลโตนคในฟลูอิดไคซ์เบค**. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศา- ศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2537
- [11] McGarry N.G., **The reclamation of dricking water**, New York, Nation Technical Information Service U.S., Department of Commerce, 1975 : 30-41.
- [12] Charles, N., Satterfield, 1981, **Heterogeneous Catalysis in Industrial Practice**. 2nd ed., New York : Mcgraw-Hill Book Company, 31-50.
- [13] Noll, K.E., Gounarios, V. and Hou, W., 1992, **Adsorption Technology for Air and Water Pollution Control**. Michigan, Lewis, 199-216.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [14] Oscik, J., **Adsorption**. New York, John Willey&Sons, pp.157-193.
- [15] วิโรจน์ บุญอำนวยการวิทย์. 2544. **จลนพลศาสตร์และการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์เคมี** : Chemical Kinetics and Reactor Design. กรุงเทพฯ. 312-319.
- [16] วิลเลียมส์ ดี, คาลิสเตอร์. เจ อาร์. **วัสดุศาสตร์และวิศวกรรมวัสดุพื้นฐาน**. กรุงเทพมหานคร : ทัอป.2548
- [17] Available: http://www.diw.go.th/EMS%20for%20SMEs%20Website/page%203_files/text/env/pulp-paper/thai/chap3.pdf.2008
- [18] Available :<http://cuir.car.chula.ac.th/handle/123456789/1347>.2008
- [19] กมลชนก ปานสง่า, ธนิษฐา ประสิทธิ์วิฑูตศักดิ์, ธนชนันท์ บุรกรณ. **การสังเคราะห์คาร์บอนกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัสและกากคาร์บอน** ปริมาณนิพนธ์ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2545.
- [20] ยุวดี เดชทวีทย์, สายใจ นารณสมบุรณ์. **ผลของสารละลายซิงค์คลอไรด์ โซเดียมไฮดรอกไซด์ และสารละลายผสมระหว่างซิงค์คลอไรด์กับโซเดียมไฮดรอกไซด์ ต่อการผลิตคาร์บอนกัมมันต์จากกะลามะพร้าว**. ปริมาณนิพนธ์ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2541.
- [21] I.N.Malikov, Yu.A.Noskova, M.S.Karaseva, and M.A.Perederii .**Granulated Sorbents from Wood Waste**.SolidFuel Chemistry.2007.Vol.41.No.2.pp 100 – 106
- [22] Mashimaro Shimada , Takahiko Iida, Kensuke Kawarada, Yoshifumi Chiba, Toshihiro Mamoto, Takayuki Okayama .**Porous structure of activated carbon prepared from waste newspaper**. J Mater Cycle Waste Manag 2000. pp 100 - 108
- [23] Mashimaro Shimada , Takahiko Iida, Kensuke Kawarada, Yoshifumi Chiba, Toshihiro Mamoto, Takayuki Okayama .**Porous structure and adsorption properties of activated carbon prepared from granular molded waste paper** . J Mater Cycle Waste Manag 2004. pp 111-118
- [24] Yasumitsu Uraki , Satoshi Kubo , Yoshihiro Sano.**Preparation of activated carbon moldings from the mixture of waste newspaper and isolated lignins: mechanical strength of thin sheet and adsorption property**. J Wood Sci 2002 .Vol48.pp 521 – 526
- [25] Phuusadee Patnukao , Prasert Pavasant.**Activated Carbon from Eucalytus camaldulensis Dehn bark**.Bioresource Technology 2008 pp 8540-8543
- [26] สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม 2547. **ถ่านกัมมันต์** : Standard of Activated Carbon. กรุงเทพฯ
- [27] Particle & Surface Sciences Pty. Limited. “ Micromeritics ASAP 2020 Accelerated Surface Area and Porosimetry analyzer”. [Online].

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Available : <http://www.pss.aus.net/products/micromeritics>

[/equip_surface_area/2010/2020.html](http://www.pss.aus.net/products/micromeritics/equip_surface_area/2010/2020.html).2008

[28] Available : http://www.chemtech.sc.chula.ac.th/Analytical_unit/universal_test.html.2008



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.1 แสดงลักษณะภายนอกของสารดูดซับที่เตรียมขึ้นเป็นเม็ดเมื่อทำการเผาและกระตุ่น

สัดส่วน ปริมาณตัว ประสาน ต่อผง การบด (B/C)	ก่อนเผา				หลังเผา				หลังกระตุ่น			
	เส้นผ่านศูนย์กลาง (cm)	เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย (cm)	ความหนา (cm)	ความหนาเฉลี่ย (cm)	เส้นผ่านศูนย์กลาง (cm)	เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย (cm)	ความหนา (cm)	ความหนาเฉลี่ย (cm)	เส้นผ่านศูนย์กลาง (cm)	เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย (cm)	ความหนา (cm)	ความหนาเฉลี่ย (cm)
0.05	1	1.840	1.835	0.482	1.830	1.818	0.482	0.459	1.786	1.783	0.446	0.429
	2	1.842	1.835	0.482	1.822	1.818	0.450	0.459	1.770	1.783	0.446	0.429
	3	1.814	1.835	0.490	1.800	1.818	0.462	0.459	1.788	1.783	0.410	0.429
	4	1.844	1.835	0.452	1.820	1.818	0.442	0.459	1.786	1.783	0.412	0.429
0.10	1	1.814	1.815	0.432	1.780	1.798	0.420	0.440	1.776	1.770	0.420	0.437
	2	1.810	1.815	0.452	1.796	1.798	0.440	0.440	1.790	1.770	0.440	0.437
	3	1.812	1.815	0.452	1.798	1.798	0.444	0.440	1.700	1.770	0.442	0.437
	4	1.822	1.815	0.462	1.818	1.807	0.454	0.440	1.812	1.770	0.446	0.437
0.15	1	1.840	1.833	0.444	1.800	1.807	0.442	0.445	1.720	1.746	0.432	0.428
	2	1.844	1.833	0.452	1.810	1.807	0.440	0.445	1.720	1.746	0.432	0.428
	3	1.824	1.833	0.452	1.818	1.807	0.444	0.445	1.800	1.746	0.436	0.428
	4	1.824	1.833	0.456	1.800	1.807	0.452	0.445	1.742	1.746	0.412	0.428

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่วารณใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.1 แสดงลักษณะภายนอกของสารดูดซับที่เตรียมขึ้นเป็นเม็ดเมื่อทำการเผาและกระตุ่น (ต่อ)

สัดส่วน ปริมาณตัว ประสาน ต่อผง คาร์บอน (B/C)	ก่อนเผา				หลังเผา				หลังกระตุ่น				
	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง (cm)	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง (cm)	ความ หนา เฉลี่ย (cm)	ความ หนา เฉลี่ย (cm)	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง (cm)	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง (cm)	ความ หนา เฉลี่ย (cm)	ความ หนา เฉลี่ย (cm)	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง (cm)	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง (cm)	ความ หนา เฉลี่ย (cm)	ความ หนา เฉลี่ย (cm)	ความ หนา เฉลี่ย (cm)
0.20	1	1.798	1.791	0.436	1.764	0.422	0.419	1.700	1.728	0.418	0.413		
	2	1.784	1.791	0.432	1.722	0.420	0.419	1.720	1.728	0.410	0.413		
	3	1.800	1.791	0.434	1.754	0.412	0.419	1.748	1.728	0.410	0.413		
	4	1.780	1.791	0.430	1.750	0.422	0.419	1.742	1.728	0.412	0.413		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.2 ข้อมูลการทดลองแสดงความหนาแน่นเมื่อทำการเผา

อัตราส่วน ปริมาณตัว ประสาน ต่อผง คาร์บอน (B/C)	Sample	ก่อนเผา						หลังเผา					
		น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก เฉลี่ย(g)	ปริมาตร (cm ³)	ปริมาตร เฉลี่ย (cm ³)	ความ หนาแน่น (g/cm ³)	ความ หนาแน่น เฉลี่ย (g/cm ³)	น้ำหนัก	น้ำหนัก เฉลี่ย(g)	ปริมาตร (cm ³)	ปริมาตร เฉลี่ย (cm ³)	ความ หนาแน่น (g/cm ³)	ความ หนาแน่น เฉลี่ย (g/cm ³)
0.05	1	0.3301	0.3275	1.2810	1.2592	0.26	0.26	0.2593	0.2605	1.2408	1.1844	0.21	0.22
	2	0.3241		1.2837		0.25		0.2498		1.1726		0.21	
	3	0.3215		1.2657		0.25		0.2673		1.1750		0.23	
	4	0.3341		1.2065		0.28		0.2657		1.1493		0.23	
0.10	1	0.2782	0.2734	1.1159	1.1618	0.25	0.25	0.2194	0.2119	1.0446	1.1158	0.21	0.19
	2	0.2746		1.1624		0.24		0.2093		1.1141		0.19	
	3	0.2709		1.1649		0.23		0.2071		1.1267		0.18	
	4	0.2698		1.2039		0.22		0.2119		1.1779		0.18	
0.15	1	0.2587	0.2574	1.1800	1.1895	0.22	0.22	0.1905	0.1949	1.1242	1.1394	0.17	0.17
	2	0.2554		1.2065		0.21		0.1972		1.1316		0.17	
	3	0.2551		1.1804		0.22		0.1954		1.1520		0.17	
	4	0.2603		1.1909		0.22		0.1963		1.1497		0.17	

ตารางที่ ก.2 ข้อมูลการทดลองแสดงความหนาแน่นเมื่อทำการเผา (ต่อ)

สัดส่วน ปริมาณตัว ประสานต่อ ผงคาร์บอน (B/C)	ก่อนเผา								หลังเผา			
	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก เฉลี่ย(g)	ปริมาตร (cm ³)	ปริมาตร เฉลี่ย (cm ³)	ความ หนาแน่น (g/cm ³)	ความ หนาแน่น เฉลี่ย (g/cm ³)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก เฉลี่ย(g)	ปริมาตร (cm ³)	ปริมาตร เฉลี่ย (cm ³)	ความ หนาแน่น (g/cm ³)	ความ หนาแน่น เฉลี่ย (g/cm ³)
1	0.2239		1.1065		0.20		0.1664		1.0308		0.16	
2	0.2187		1.0793		0.20		0.1584		0.9777		0.16	
3	0.2231	0.2239	1.1038	1.0898	0.20		0.1598	0.1619	0.9950	1.0045	0.16	0.16
4	0.2298		1.0694		0.21		0.1630		1.0146		0.16	

ตารางที่ ก.3 ข้อมูลการทดลองแสดงความหนาแน่นเมื่อทำการกระตุ้ม

สัดส่วน ปริมาณตัว ประสานต่อ ผงคาร์บอน (B/C)	Sample	ก่อนกระตุ้ม						หลังกระตุ้ม					
		น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก เฉลี่ย(g)	ปริมาตร (cm ³)	ปริมาตร เฉลี่ย (cm ³)	ความ หนาแน่น (g/cm ³)	ความ หนาแน่น เฉลี่ย (g/cm ³)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก เฉลี่ย(g)	ปริมาตร (cm ³)	ปริมาตร เฉลี่ย (cm ³)	ความ หนาแน่น (g/cm ³)	ความ หนาแน่น เฉลี่ย (g/cm ³)
0.05	1	0.2593		1.2408		0.21		0.2209		1.1167		0.20	
	2	0.2498	0.2605	1.1726	1.1844	0.21	0.2276	0.2256	1.0968	1.0685	0.21	0.21	
	3	0.2673		1.1750		0.23	0.2297		1.0289		0.22	0.21	
	4	0.2657		1.1493		0.23	0.2241		1.0316		0.22	0.22	
0.10	1	0.2194		1.0446		0.21	0.1825		1.0399		0.18		
	2	0.2093	0.2119	1.1141	1.1158	0.19	0.1812	0.1844	1.1066	1.0747	0.16	0.17	
	3	0.2071		1.1267		0.18	0.1804		1.0027		0.18	0.18	
	4	0.2119		1.1779		0.18	0.1935		1.1495		0.17	0.17	
0.15	1	0.1905		1.1242		0.17	0.1695		1.0032		0.17		
	2	0.1972	0.1949	1.1316	1.1394	0.17	0.1649	0.1663	1.0032	1.0242	0.16	0.16	
	3	0.1954		1.1520		0.17	0.1636		1.1089		0.15	0.16	
	4	0.1963		1.1497		0.17	0.1672		0.9814		0.17	0.17	

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการศึกษาเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.3 ข้อมูลการทดลองแสดงความหนาแน่นเมื่อทำการกระตุ้น (ต่อ)

สัดส่วน ปริมาณตัว ประสานต่อ ผงคาร์บอน (B/C)	ก่อนกระตุ้น						หลังกระตุ้น					
	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก เฉลี่ย(g)	ปริมาตร (cm ³)	ปริมาตร เฉลี่ย(cm ³)	ความ หนาแน่น (g/cm ³)	ความ หนาแน่น เฉลี่ย (g/cm ³)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก เฉลี่ย(g)	ปริมาตร (cm ³)	ปริมาตร เฉลี่ย (cm ³)	ความ หนาแน่น (g/cm ³)	ความ หนาแน่น เฉลี่ย (g/cm ³)
0.20	1	0.1664	1.0308	1.0045	0.16	0.16	0.1449	0.1436	0.9483	0.9663	0.15	0.15
	2	0.1584	0.9777	1.0045	0.16	0.16	0.1427	0.1436	0.9521	0.9663	0.15	0.15
	3	0.1598	0.9950	1.0045	0.16	0.16	0.1443	0.1436	0.9834	0.9663	0.15	0.15
	4	0.1630	1.0146	1.0045	0.16	0.16	0.1426	0.1436	0.9814	0.9663	0.15	0.15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกระใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.4 ข้อมูลการทดลองหาค่าร้อยละมวลหายของสารดูดซับ

สัดส่วนปริมาตร ตัวประสานต่อ ผงคาร์บอน (B/C)	Sample		ก่อนเผา		หลังเผา		% มวล หาย	% มวล หายเฉลี่ย	หลังการกระตุ้น		% มวล หาย	% มวล หายเฉลี่ย
	น้ำหนัก(๕)	น้ำหนัก เฉลี่ย(๕)	น้ำหนัก เฉลี่ย(๕)	น้ำหนัก(๕)	น้ำหนัก เฉลี่ย(๕)	น้ำหนัก(๕)			น้ำหนัก เฉลี่ย(๕)			
0.05	1	0.3301		0.2593		21.45	0.2209		33.08			
	2	0.3241		0.2498		22.93	0.2276		29.77			31.08
	3	0.3215	0.3275	0.2673	0.2605	16.86	0.2297	20.43	28.55	0.2256		
	4	0.3341		0.2657		20.47	0.2241		32.92			
0.10	1	0.2782		0.2194		21.14	0.1825		34.40			
	2	0.2746		0.2093		23.78	0.1812		34.01			32.53
	3	0.2709	0.2734	0.2071	0.2119	23.55	0.1804	22.48	33.41	0.1844		
	4	0.2698		0.2119		21.46	0.1935		28.28			
0.15	1	0.2587		0.1905		26.36	0.1695		34.48			
	2	0.2554		0.1972		22.79	0.1649		35.43			35.39
	3	0.2551	0.2574	0.1954	0.1949	23.40	0.1636	24.28	35.87	0.1663		
	4	0.2603		0.1963		24.59	0.1672		35.77			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบริการเชิงงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.4 ข้อมูลการทดลองหาค่าร้อยละมวลหายของสารดูดซับ (ต่อ)

สัดส่วนปริมาตร ตัวประสานต่อ ผงคาร์บอน (B/C)	Sample	ก่อนเผา		หลังเผา		% มวล หาย	% มวล หายเฉลี่ย	หลังการระเหิด		% มวล หาย	% มวล หายเฉลี่ย
		น้ำหนัก(๕)	น้ำหนัก เฉลี่ย(๕)	น้ำหนัก(๕)	น้ำหนัก เฉลี่ย(๕)			น้ำหนัก(๕)	น้ำหนัก เฉลี่ย(๕)		
0.20	1	0.2239	0.1664	0.1664	0.1619	25.68	0.1449	0.1449	0.1436	35.28	35.83
	2	0.2187	0.1584	0.1584	0.1619	27.57	0.1427	0.1427	0.1436	34.75	35.83
	3	0.2231	0.1598	0.1598	0.1619	28.37	0.1443	0.1443	0.1436	35.32	35.83
	4	0.2298	0.1630	0.1630	0.1619	29.07	0.1426	0.1426	0.1436	37.95	35.83
0.25	1	0.8648	0.6205	0.6205	0.6205	28.25	0.5481	0.5481	0.5481	36.62	36.62

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.5 ข้อมูลผลการทดสอบค่ามอดุลัสของสารดูดซับที่ทำกาการเผา

สัดส่วนปริมาตร ประสานต่อผงคาร์บอน (B/C) (น้ำหนัก)	Sample	Stress ($\times 10^4$ N/m ²)	Stress (เฉลี่ย) ($\times 10^4$ N/m ²)	Strain	Strain (เฉลี่ย)	มอดุลัส ($\times 10^4$ N/m ²)	มอดุลัสเฉลี่ย ($\times 10^4$ N/m ²)
0.05	1	20.29	20.005	1.03	1.04	19.70	19.33
	2	19.72		1.04		18.96	
0.10	1	28.79	30.32	1.16	1.18	24.82	25.68
	2	31.85		1.2		26.54	
0.15	1	18.81	18.81	1.25	1.24	15.05	15.17
	2	18.81		1.23		15.29	
0.20	1	17.92	18.38	1.2	1.23	14.93	15.00
	2	18.84		1.25		15.07	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.6 ข้อมูลผลการทดสอบค่ามอดุลัสของสารดูดซับที่ทำการกระตุ้น

สัดส่วนปริมาตร ประสานต่อผงคาร์บอน (B/C) (น้ำหนัก)	Sample	Stress ($\times 10^4$ N/m ²)	Stress (เฉลี่ย) ($\times 10^4$ N/m ²)	Strain	Strain (เฉลี่ย)	มอดุลัส ($\times 10^4$ N/m ²)	มอดุลัสเฉลี่ย ($\times 10^4$ N/m ²)
0.05	1	15.34	19.94	1.25	1.25	12.27	15.95
	2	24.54		1.25		19.63	
0.10	1	39.08	50	1.96	2.16	19.94	22.93
	2	60.92		2.35		25.92	
0.15	1	22.44	30.46	2.11	2.23	10.64	13.50
	2	38.48		2.35		16.37	
0.20	1	40.89	36.475	2.71	2.56	15.09	14.20
	2	32.06		2.41		13.30	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก. 7 ผลของร้อยละโดยมวลเมื่อทำการกระตุ้นที่สภาวะดังนี้

B/C	อุณหภูมิ	น้ำหนัก(กรัม)		ร้อยละโดยมวลที่หาย
		ก่อนเผา	หลังเผา	
0.05	700	1.2898	0.9764	24.29
	800	1.1179	0.8347	25.33
	900	1.2291	0.8267	32.74
0.1	700	1.1112	0.826	25.67
	800	1.099	0.7933	27.82
	900	1.2204	0.8066	33.91
0.15	700	1.2431	0.8991	27.67
	800	1.1156	0.793	28.92
	900	1.1042	0.7275	34.12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.8 ข้อมูลการดูดซับก๊าซไนโตรเจนเพื่อนำไปสร้างไอโซเทอมของ $B/C = 0.05$ โดยทำการเผาที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 90 นาที

Adsorption		Desorption	
P/Po	q (cm ³ /g STP)	P/Po	q (cm ³ /g STP)
0.005915	50.98289	0.98922	233.3439
0.009971	53.85948	0.967799	223.0072
0.039572	62.64226	0.941523	198.5464
0.086486	70.48831	0.903296	177.0779
0.119145	74.97653	0.844348	159.582
0.160551	80.05149	0.77428	147.5648
0.200931	84.63681	0.725855	141.8196
0.251508	90.00739	0.64717	134.1512
0.30209	95.17119	0.55098	126.1166
0.353168	100.0581	0.455487	112.7151
0.450577	108.3404	0.34729	99.34605
0.550498	116.2457	0.244827	88.84205
0.60042	120.3183	0.194863	83.37203
0.651024	124.6781	0.12098	74.46518
0.70084	129.2801	0.050832	63.88595
0.740956	133.2785		
0.771241	136.718		
0.801093	140.3477		
0.840623	146.1014		
0.898418	158.5019		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.8 ข้อมูลการดูดซับก๊าซไนโตรเจนเพื่อนำไปสร้างไอโซเทอมของ $B/C = 0.05$ โดยทำการเผาที่ อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 90 นาที (ต่อ)

Adsorption		Desorption	
P/Po	q (cm ³ /g STP)	P/Po	q (cm ³ /g STP)
0.939619	173.8015		
0.9734	201.1387		
0.98922	233.3439		

ตารางที่ ก.9 ข้อมูลการดูดซับก๊าซไนโตรเจนเพื่อนำไปสร้างไอโซเทอมของ $B/C = 0.05$ โดยทำการกระตุ้นที่ อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที

Adsorption		Desorption	
P/Po	q (cm ³ /g STP)	P/Po	q (cm ³ /g STP)
0.010297	42.78594	0.966456	206.5842
0.006091	40.44048	0.987415	217.8449
0.041122	49.57383	0.940556	180.2131
0.088015	55.34449	0.903688	156.8423
0.119815	58.55464	0.843635	136.5797
0.160425	62.26635	0.77571	122.9801
0.200699	65.71708	0.727173	115.6241
0.251114	69.85649	0.646529	105.8672
0.301141	73.9241	0.550444	96.93632
0.352078	77.87801	0.454007	86.21659
0.449829	84.65952	0.348042	77.0294
0.54985	91.23764	0.247307	68.74568
0.599396	94.83693	0.193372	64.20522

ตารางที่ ก.9 ข้อมูลการดูดซับก๊าซไนโตรเจนเพื่อนำไปสร้างไอโซเทอมของ $B/C = 0.05$ โดยทำการกระตุ้นที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที (ต่อ)

Adsorption		Desorption	
P/Po	q (cm ³ /g STP)	P/Po	q (cm ³ /g STP)
0.650068	98.82812	0.121338	57.73221
0.699782	103.3106	0.05041	49.79991
0.739772	107.4767		
0.76981	111.0848		
0.799759	115.2152		
0.839595	121.582		
0.896817	134.9139		
0.93746	151.8614		
0.971325	182.4387		
0.987415	217.8449		

ตารางที่ ก.10 ข้อมูลการดูดซับก๊าซไนโตรเจนเพื่อนำไปสร้างไอโซเทอมของ $B/C = 0.15$ โดยทำการเผาที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 90 นาที

Adsorption		Desorption	
P/Po	q (cm ³ /g STP)	P/Po	q (cm ³ /g STP)
0.005723	41.02259	0.987937	182.1841
0.010121	43.4882	0.964633	173.0741
0.041107	50.43777	0.93622	152.2762
0.08794	56.23161	0.898071	135.9592
0.119703	59.48595	0.843819	123.4522
0.160453	63.17727	0.794407	116.3679
0.200672	66.55436	0.742246	111.0166

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.10 ข้อมูลการดูดซับก๊าซไนโตรเจนเพื่อนำไปสร้างไอโซเทอมของ $B/C = 0.15$ โดยทำการเผาที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 90 นาที (ต่อ)

Adsorption		Desorption	
P/Po	q (cm ³ /g STP)	P/Po	q (cm ³ /g STP)
0.251184	70.52384	0.646617	103.6617
0.301525	74.29266	0.551251	97.69711
0.35214	77.85169	0.454839	87.10114
0.450219	83.85656	0.348264	77.32094
0.549796	89.4667	0.246071	69.71017
0.599644	92.43037	0.194737	65.55426
0.650028	95.52789	0.120866	59.06857
0.699993	98.90341	0.050484	51.16574
0.739961	101.919		
0.769846	104.4914		
0.799857	107.2729		
0.839409	111.7747		
0.897727	121.5279		
0.937984	133.7575		
0.972427	156.5602		
0.987937	182.1841		

ตารางที่ ก.11 ข้อมูลการดูดซับก๊าซไนโตรเจนเพื่อนำไปสร้างไอโซเทอมของ $B/C = 0.15$ โดยทำการกระตุ้นที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที

Adsorption		Desorption	
P/Po	q (cm ³ /g STP)	P/Po	q (cm ³ /g STP)
0.006258	35.51477	0.98808	176.7338
0.010594	37.59966	0.964025	168.1134

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

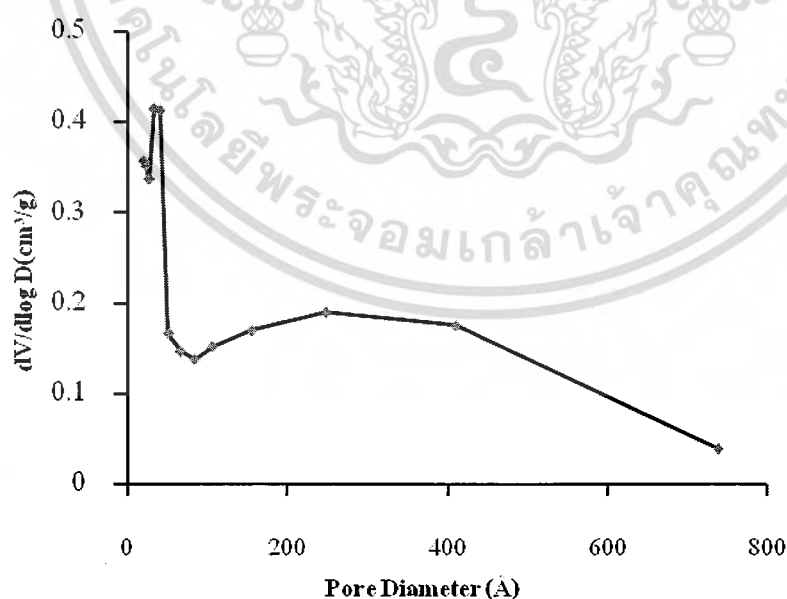
ตารางที่ ก.11 ข้อมูลการดูดซับก๊าซไนโตรเจนเพื่อนำไปสร้างไอโซเทอมของ $B/C = 0.15$ โดยทำการกระตุ้นที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที (ต่อ)

Adsorption		Desorption	
P/Po	q (cm ³ /g STP)	P/Po	q (cm ³ /g STP)
0.041887	43.22534	0.935481	148.0838
0.089002	47.78085	0.898375	130.9958
0.11983	50.23831	0.841124	114.9683
0.160748	53.19697	0.794016	106.2456
0.200734	55.93634	0.742237	98.84737
0.250755	59.24843	0.645893	88.54726
0.301051	62.57488	0.551096	81.21917
0.35049	65.74435	0.453562	72.61947
0.449673	71.29169	0.348633	65.04377
0.549347	76.65534	0.245929	58.15896
0.599666	79.62536	0.193899	54.61812
0.649592	82.95863	0.120705	49.36944
0.699479	86.73706	0.050818	43.20453
0.739523	90.29576		
0.769674	93.42319		
0.79975	96.85647		
0.839014	102.3538		
0.896771	114.0096		
0.937637	128.0733		
0.97221	152.1095		
0.98808	176.7338		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.12 ข้อมูลการกระจายขนาดของรูพรุนของ B/C = 0.05 โดยทำการเผาที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 90 นาที

Pore Diameter (Å)	dV/dlog D(cm ³ /g)
738.8294	0.03813
409.7391	0.1743
248.3886	0.188861
155.7043	0.168685
106.2377	0.151244
83.70112	0.137055
66.05259	0.145756
51.18443	0.165635
40.78999	0.41222
32.70892	0.41437
26.50331	0.336521
23.09141	0.350842
19.90489	0.355987

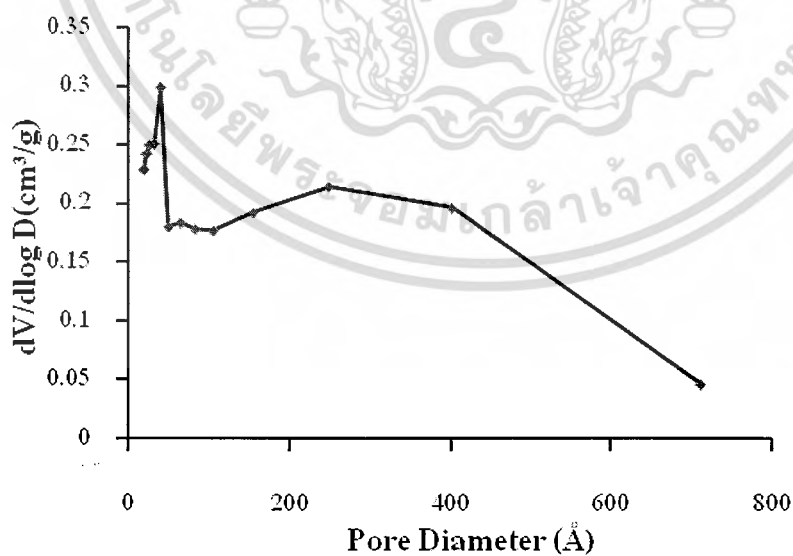


รูปที่ ก.1 แสดงการกระจายขนาดของรูพรุนของสารดูดซับ B/C = 0.05 โดยทำการเผาอุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียสเวลา 90 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.13 ข้อมูลการกระจายขนาดของรูพรุนของ B/C = 0.05 โดยทำการกระตุ้นที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที

Pore Diameter (Å)	Pore Volume (cm ³ /g)
712.952	0.04651
402.1455	0.196333
248.5626	0.214417
155.1433	0.192359
106.6051	0.176929
84.08297	0.178362
65.98631	0.183707
51.04817	0.180374
40.62115	0.298735
32.65345	0.251073
26.54875	0.249904
23.02738	0.242529
19.83601	0.229116

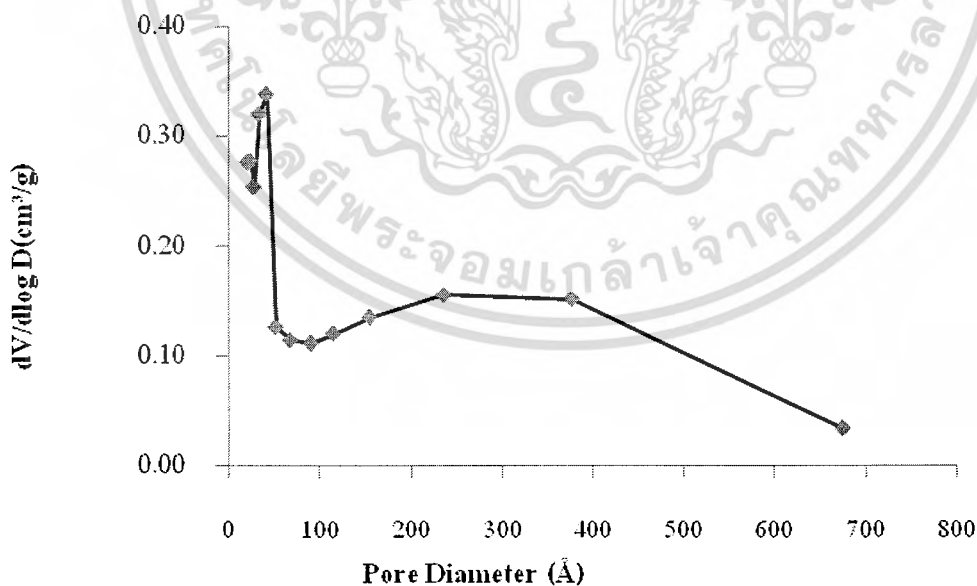


รูปที่ ก.2 แสดงการกระจายขนาดของรูพรุนของสารดูดซับ B/C = 0.05 โดยทำการกระตุ้นที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.14 ข้อมูลการกระจายขนาดของรูพรุนของ B/C = 0.15 โดยทำการเผาที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 90 นาที

Pore Diameter (Å)	Pore Volume (cm ³ /g)
675.233	0.034542
376.9165	0.152142
235.4617	0.156001
154.6208	0.135713
114.498	0.120665
90.52712	0.111967
67.64615	0.114852
51.84385	0.126639
41.41462	0.339224
33.39924	0.321372
27.22321	0.254799
23.76678	0.278434
20.55613	0.27731

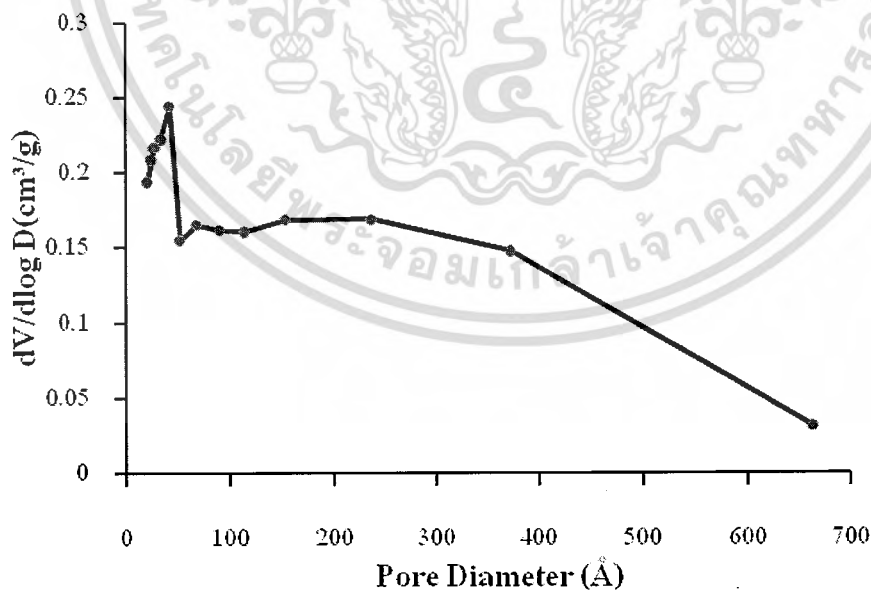


รูปที่ ก.3 แสดงการกระจายขนาดของรูพรุนของสารดูดซับ B/C = 0.15 โดยทำการเผาที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 90 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.15 ข้อมูลการกระจายขนาดของรูพรุนของ B/C = 0.15 โดยทำการกระตุ้นที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที

Pore Diameter (Å)	Pore Volume (cm ³ /g)
663.0684	0.031868
372.4444	0.14808
235.5246	0.169208
152.5252	0.169034
113.7497	0.16096
90.40937	0.161916
67.47155	0.16546
51.73659	0.155049
41.26693	0.244362
33.32727	0.222624
27.15912	0.217026
23.67424	0.208997
20.47528	0.19431



รูปที่ ก.4 แสดงการกระจายขนาดของรูพรุนของสารดูดซับ B/C = 0.15 โดยทำการกระตุ้นที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข
ตัวอย่างการคำนวณ

ข.1 ตัวอย่างการคำนวณค่าความหนาแน่น

จากการทดลองๆ ได้ทำการเตรียมสารดูดซับแบบเม็ดเพื่อหาค่าความแข็งแรง โดยที่สัดส่วนปริมาณตัวประสานต่อผงคาร์บอน 0.05 โดยน้ำหนัก คือ

น้ำหนักของเม็ดสารดูดซับ (m)	=	0.3301 กรัม
เส้นผ่าศูนย์กลาง (D)	=	1.830 เซนติเมตร
ความหนา (H)	=	0.482 เซนติเมตร

$$\begin{aligned}
 \text{ปริมาตรเม็ดสารดูดซับ (V)} &= \frac{\pi D^2}{4} H \\
 &= \pi \times \frac{(1.830)^2}{4} \times 0.482 \\
 &= 1.2810 \text{ ลูกบาศก์เซนติเมตร}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{ความหนาแน่น (ρ)} &= \frac{m}{V} \\
 &= \frac{0.3301}{1.2810} \\
 &= 0.26 \text{ กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร}
 \end{aligned}$$

ข.2 ตัวอย่างการคำนวณร้อยละมวลที่หายไป

$$\text{ร้อยละมวลที่หายไป} = \left[\frac{A-B}{A} \right] \times 100$$

เมื่อ $A =$ น้ำหนักของสารดูดซับที่ใช้ (กรัม)

$B =$ น้ำหนักของสารดูดซับที่ได้จากการเผา (กรัม)

$$\begin{aligned}
 \text{ร้อยละมวลที่หายไป} &= \left[\frac{0.3301 - 0.2593}{0.3301} \right] \times 100 \\
 &= 21.45
 \end{aligned}$$

ข.3 ตัวอย่างการคำนวณค่ามอดูลัส

$$\begin{aligned}
 \text{มอดูลัส(E)} &= \frac{\text{stress}(\Delta\sigma)}{\text{strain}(\Delta\epsilon)} \\
 \text{Stress} &= \frac{20.29 \times 10^4}{1.03} \\
 &= 19.70 \times 10^4 \text{ N/m}^2
 \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมถ่านกัมมันต์[26]

ก.1 ขอบข่าย

มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมนี้กำหนด ชนิด ขนาด คุณลักษณะที่ต้องการการบรรจุ เครื่องหมายและฉลาก การชักตัวอย่างและเกณฑ์ตัดสิน และการทดสอบคาร์บอนกัมมันต์

ก.2 บทนิยาม

ความหมายของคำที่ใช้ในมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมนี้ มีดังต่อไปนี้

1. คาร์บอนกัมมันต์ หมายถึง ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการนำวัตถุดิบธรรมชาติที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลักมาผ่านกรรมวิธีก่อกัมมันต์ จนได้ผลิตภัณฑ์สีดำ มีโครงสร้างที่มีลักษณะเป็นรูพรุน มีพื้นที่ผิวสูง มีสมบัติในการดูดซับสารต่างๆ ได้เป็นอย่างดี

2. ค่าไอโอดีน หมายถึง จำนวนมิลลิกรัมของไอโอดีนที่ดูดซับไว้ด้วยคาร์บอนกัมมันต์ 1 กรัม เมื่อความเข้มข้นของสารละลายไอโอดีนหลังจากถูกดูดซับ และผ่านการกรองแล้วเป็น 0.02 โมลต่อลูกบาศก์เดซิเมตร

ก.3 ชนิด

คาร์บอนกัมมันต์แบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ

1. คาร์บอนกัมมันต์ผง (Powdered Activated Carbon)
2. คาร์บอนกัมมันต์เม็ด (Granular Activated Carbon)

ก.4 ขนาด

1. คาร์บอนกัมมันต์ผง

ให้เป็นไปตามข้อตกลงระหว่างผู้ซื้อและผู้ขาย แต่ปริมาณที่ผ่านตะแกรง 150 ไมโครเมตร ต้องไม่น้อยกว่าร้อยละ 99 โดยน้ำหนัก

2. คาร์บอนกัมมันต์เม็ด

ให้เป็นไปตามข้อตกลงระหว่างผู้ซื้อและผู้ขาย แต่ปริมาณที่ผ่านตะแกรง 150 ไมโครเมตร ต้องไม่เกินร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก

ก.5 คุณลักษณะที่ต้องการ

1. ลักษณะทั่วไป

- คาร์บอนกัมมันต์ผง ต้องเป็นผงละเอียดสีดำ ปราศจากสิ่งแปลกปลอมใดๆ
- คาร์บอนกัมมันต์เม็ด ต้องเป็นเม็ดสีดำ ปราศจากสิ่งแปลกปลอมใดๆ

การทดสอบให้ทำโดยการตรวจพินิจ

2. คุณลักษณะทางฟิสิกส์และทางเคมี

- คาร์บอนกัมมันต์ผง ให้เป็นไปตามตารางที่ ก.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.1 คุณลักษณะทางฟิสิกส์และทางเคมีของคาร์บอนกัมมันต์ผง

รายการที่	คุณลักษณะ	เกณฑ์ที่กำหนด	วิธีทดสอบตาม
1	ค่าไอโอดีนนัมเบอร์ ไม่น้อยกว่า	600	AWWA B600
2	ความหนาแน่นปรากฏ กรัมต่อ ลูกบาศก์เซนติเมตร	0.20 ถึง 0.75	AWWA B600

- คาร์บอนกัมมันต์เม็ด ให้เป็นไปตามตารางที่ ค.2

ตารางที่ ค.2 คุณลักษณะทางฟิสิกส์และทางเคมีของคาร์บอนกัมมันต์เม็ด

รายการที่	คุณลักษณะ	เกณฑ์ที่กำหนด	วิธีทดสอบตาม
1	ค่าไอโอดีนนัมเบอร์ ไม่น้อยกว่า	600	AWWA B604
2	ความชื้น ร้อยละ ไม่เกิน	8	AWWA B604
3	ความหนาแน่นปรากฏ กรัมต่อ ลูกบาศก์เซนติเมตร ไม่น้อยกว่า	0.36	AWWA B604
4	ความแข็ง ร้อยละ ไม่น้อยกว่า	70	AWWA B604 RO-Tap Abrasion Test

ค.6 การบรรจุ

1. ให้บรรจุคาร์บอนกัมมันต์ในภาชนะบรรจุที่สะอาดแห้ง และปิดได้สนิท
2. น้ำหนักสุทธิของคาร์บอนกัมมันต์ในแต่ละภาชนะบรรจุ ต้องไม่น้อยกว่าที่ระบุไว้ที่ฉลาก

ค.7 เครื่องหมายและฉลาก

1. ที่ภาชนะบรรจุคาร์บอนกัมมันต์ทุกหน่วยอย่างน้อยต้องมีเลข อักษร หรือ เครื่องหมายแจ้งรายละเอียดต่อไปนี้ให้เห็นได้ง่าย ชัดเจน

- ชนิด
- น้ำหนักสุทธิ เป็นกิโลกรัม
- เดือน ปีที่ทำ หรือรหัสรุ่นที่ทำ
- ชื่อผู้ผลิต หรือ โรงงานที่ผลิต หรือ เครื่องหมายการค้าที่จดทะเบียน

ในกรณีที่ใช้ภาษาต่างประเทศ ต้องมีความหมายตรงกับภาษาไทยที่กำหนดไว้ข้างต้น

2. ผู้ผลิตผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมที่เป็นไปตามมาตรฐานนี้ จะแสดงเครื่องหมายมาตรฐานกับผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมนั้นได้ ต่อเมื่อได้รับใบอนุญาตจากคณะกรรมการมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมแล้ว

ค.8 การชักตัวอย่างและเกณฑ์การตัดสิน

1. รุ่นในที่นี้ หมายถึง คาร์บอนกัมมันต์ชนิดเดียวกัน ทำโดยกรรมวิธีเดียวกัน บรรจุในภาชนะชนิด และขนาดเดียวกัน ที่ทำหรือส่งมอบหรือซื้อขายในระยะเวลาเดียวกัน

2. การชักตัวอย่าง และการยอมรับ ให้เป็นไปตามแผนการชักตัวอย่างที่กำหนดต่อไปนี้ หรืออาจใช้แผนการชักตัวอย่างอื่นที่เทียบเท่ากับทางวิชาการกับแผนที่กำหนดไว้

2.1 การชักตัวอย่างและการยอมรับสำหรับการทดสอบการบรรจุ

- ให้ชักตัวอย่าง โดยวิธีการสุ่มจากรุ่นเดียวกัน ตามจำนวนที่กำหนดใน ตารางที่ ค.3

- ตัวอย่างทุกตัวอย่างต้องเป็นไปตามข้างต้น จึงจะถือว่าคาร์บอนกัมมันต์รุ่นนั้นเป็นไปตาม

เกณฑ์ที่กำหนด

2.2 การชักตัวอย่างและการยอมรับสำหรับการทดสอบขนาด และคุณลักษณะที่ต้องการ

- ให้ชักตัวอย่าง จากตัวอย่างที่ผ่านการทดสอบการบรรจุแล้ว มาภาชนะบรรจุละเท่าๆ กัน ให้ได้ตัวอย่างรวมกัน ไม่น้อยกว่า 1,500 กรัม ผสมตัวอย่างทั้งหมดเข้าด้วยกัน แล้วแบ่งออกเป็น 3 ส่วนเท่าๆ กัน บรรจุแต่ละส่วนลงในภาชนะที่สะอาด แห้ง และปิดได้สนิท พร้อมทั้งบันทึกรายละเอียดที่จำเป็นไว้ ตัวอย่างส่วนหนึ่งนำไปใช้ในการวิเคราะห์ อีก 2 ส่วน ที่เหลือให้ผู้ที่เกี่ยวข้องเก็บไว้เป็นหลักฐาน

ตารางที่ ค.3 แผนการชักตัวอย่างสำหรับการทดสอบการบรรจุ

ขนาดรุ่น หน่วยภาชนะบรรจุ	ขนาดตัวอย่าง หน่วยภาชนะบรรจุ
ไม่เกิน 25	3
26-50	4
51-100	5
101-300	6
301-500	7
501-800	8
801-1,000	9
ตั้งแต่ 1,001 ขึ้นไป	10

3. เกณฑ์ตัดสิน

ตัวอย่างคาร์บอนกัมมันต์ ต้องเป็นไปตามข้อกำหนดทุกข้อ จึงจะถือว่าคาร์บอนกัมมันต์รุ่นนั้นเป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค.9 การทดสอบ

1. ให้ใช้วิธีทดสอบที่กำหนดในมาตรฐานนี้ หรือวิธีอื่นใดที่ให้ผลเทียบเท่า ในกรณีที่มีข้อโต้แย้งให้ใช้วิธีที่กำหนดในมาตรฐานนี้

2. น้ำกลั่นและสารเคมีที่ใช้ ต้องมีความบริสุทธิ์เหมาะสมสำหรับใช้ในห้องปฏิบัติการวิทยาศาสตร์

3. การทดสอบขนาด

3.1 คาร์บอนกัมมันต์ผง

เครื่องมือ

- ตะแกรง 150 ไมโครเมตร
- กระจกชิวเบิล

วิธีทดสอบ

นำตัวอย่างประมาณ 25 กรัม ไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส ประมาณ 2 ชั่วโมง จนได้น้ำหนักคงที่ ปล่อยให้เย็นในเดสิคเคเตอร์ จากนั้นให้รีบชั่งให้ทราบน้ำหนักที่แน่นอนถึง 0.001 กรัม (m_0) เทตัวอย่างใส่บีกเกอร์ เติมน้ำ 600 ถึง 700 ลูกบาศก์เซนติเมตร คนให้เข้ากัน ทำตะแกรงให้เปียกก่อนแล้วค่อยเทตัวอย่างช้าๆ ผ่านตะแกรง ในขณะที่เทให้คนตัวอย่างเป็นครั้งคราว ล้างตัวอย่างที่ติดอยู่ในบีกเกอร์ออกให้หมด เมื่อเทตัวอย่างทั้งหมดลงบนตะแกรงแล้ว ใช้น้ำล้างตัวอย่าง อีกจนกระทั่งไม่มีตัวอย่างผ่านตะแกรงอีก ถ่ายตัวอย่างที่ค้างบนตะแกรง โดยใช้น้ำช่วยใส่ลงในบีกเกอร์แล้วกรองผ่านกระจกชิวเบิล ซึ่งทราบน้ำหนักแน่นอนแล้ว นำกระจกชิวเบิลไปอบที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียสประมาณ 2 ชั่วโมงจนได้น้ำหนักคงที่ ปล่อยให้เย็นในเดสิคเคเตอร์แล้วรีบชั่งทันที

วิธีคำนวณ

$$\frac{\text{ปริมาณที่ผ่าน}}{\text{ร้อยละโดย}} = \left(\frac{1 - m_1}{m_0} \right) > \quad (ค.1)$$

เมื่อ m_0 คือ น้ำหนักตัวอย่าง หลังจากอบแห้งครั้งแรก (กรัม)

m_1 คือ น้ำหนักตัวอย่าง หลังจากอบแห้งครั้งที่ 2 (กรัม)

3.2 คาร์บอนกัมมันต์เม็ด

เครื่องมือ

- ตะแกรง 150 ไมโครเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เครื่องเขย่า ที่มีอัตราการเขย่า 285 ± 5 รอบต่อนาที

วิธีทดสอบ

ชั่งตัวอย่างประมาณ 100 กรัม ให้ทราบน้ำหนักที่แน่นอนถึง 0.1 กรัม ใส่ในตะแกรงเขย่าด้วยเครื่องเขย่านาน 3 นาที ถ่ายส่วนที่ค้างบนตะแกรงทั้งหมดลงในภาชนะที่ทราบน้ำหนักแน่นอนแล้ว ชั่งและคำนวณส่วนที่ค้างบนตะแกรงเป็นร้อยละโดยน้ำหนัก

4. น้ำหนักสุทธิ

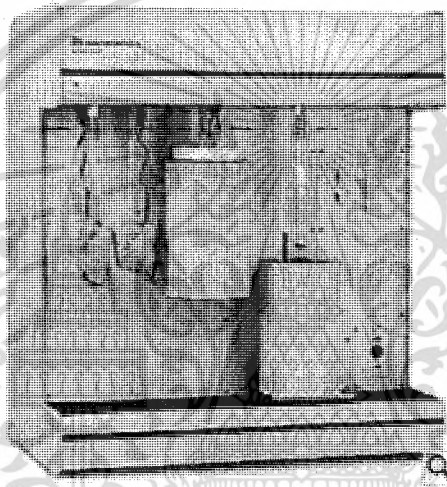
ชั่งตัวอย่างทั้งหมดพร้อมภาชนะบรรจุ แล้วเทคาร์บอนกัมมันต์ออก ชั่งภาชนะเปล่า แล้วเฉลี่ยผลต่างของน้ำหนักที่ชั่งได้เป็นน้ำหนักสุทธิต่อภาชนะบรรจุ



ภาคผนวก ง

การหาค่าพื้นที่ผิวของคาร์บอนกัมมันต์วิธีวิเคราะห์มาตรฐาน BET [27]

Surface area and porosity analyzer เป็นเทคนิคการวิเคราะห์หาค่าพื้นที่ผิว (Surface area) ของสารที่ต้องการวิเคราะห์ โดยอาศัยเทคนิคการแทนที่พื้นที่ผิว หรือรูพรุนด้วยแก๊สไนโตรเจน ผลที่ได้จากการวิเคราะห์คือไอโซเทอมเครื่องมือที่ใช้ทำการวิเคราะห์เป็นเครื่อง Micromeritics Surface Area and porosity Analyzer รุ่น ASAP 2020 แสดงในรูปที่ ง.1



รูปที่ ง.1 เครื่อง Micromeritics Surface Area and porosity Analyzer รุ่น ASAP 2020

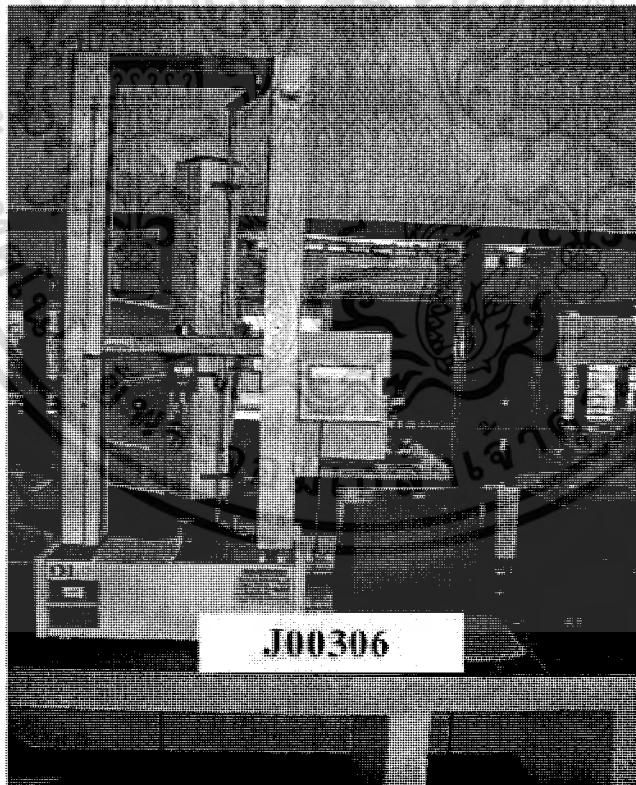
ภาคผนวก จ

การวิเคราะห์ด้วยเครื่องทดสอบคุณสมบัติทางกล (Universal Testing Machine)[28]

เครื่องทดสอบคุณสมบัติทางกลแบบเอนกประสงค์ชนิด Static สามารถทดสอบหาสมบัติเชิงกลของวัสดุได้หลายอย่างในเครื่องเดียว โดยแรงที่ใช้สำหรับทดสอบนั้นต้องอยู่ในลักษณะที่ควบคุมได้ และตามความเร็วที่ต้องการ ฟังก์ชันการใช้งาน สามารถทดสอบคุณสมบัติเชิงกลได้ดังนี้

- 1.ทดสอบแรงกด (Compressive Test)
- 2.ทดสอบแรงดึง (Tensile Test)
- 3.ทดสอบแรงบิด (Torsion Test)
- 4.ทดสอบแรงดัด (Bending Test)

สำหรับโครงการนี้ได้ทดสอบคุณสมบัติเชิงกลด้านแรงกด(Compressive Test) โดยใช้เครื่องมือ Universal Testing Machine ของบริษัท LLOYD รุ่น LR 5K ดังรูปที่ จ.1



รูปที่ จ.1 เครื่องมือ Universal Testing Machine ของบริษัท LLOYD รุ่น LR 5K

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ฉ

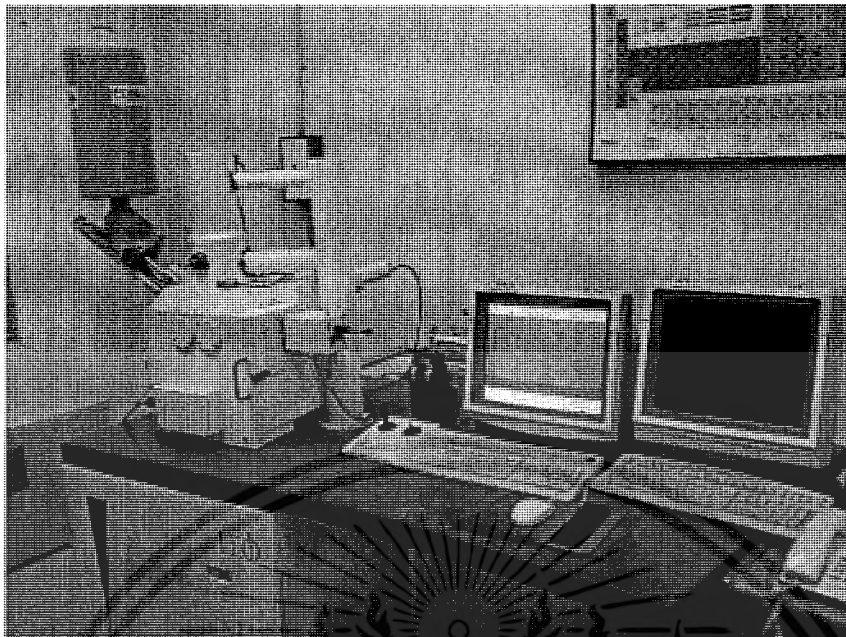
การวิเคราะห์สภาพพื้นผิวด้วย

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด[SEM]

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนจะช่วยให้สามารถมองเห็นรายละเอียดของพื้นผิวของสารที่ต้องการวิเคราะห์ มีกำลังขยายสูงสุดประมาณ 200,000 เท่า องค์กรประกอบของเครื่องมีดังนี้

1. คอลัมน์ประกอบด้วยปืนยิงอิเล็กตรอน (Electron gun) ซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดลำอิเล็กตรอน(Electron beam) ซึ่งจะรวมเป็นจุดเรียกว่า อิเล็กตรอนปฐมภูมิ (primary electron) และตกลงบนผิวของตัวอย่างตามต้องการด้วยเลนส์ใกล้วัตถุ(Objective Lens) การตกกระทบของอิเล็กตรอนปฐมภูมิบนผิวของตัวอย่างจะทำให้เกิดกลุ่มอิเล็กตรอนชุดที่ 2 ที่เรียกว่าอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary electron) ออกจากผิวของตัวอย่างเข้าสู่ตัวขยายสัญญาณ (Signal amplifier) แล้วแปรสัญญาณให้เกิดเป็นภาพทางจอภาพ ซึ่งสามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่าและบันทึกไว้ในฟิล์มได้
2. เครื่องทำระเหยสุญญากาศ(Vacuum evaporator) เป็นส่วนที่ใช้เตรียมตัวอย่าง โดยมีระบบสุญญากาศและหม้อแปลงไฟฟ้าที่สามารถปรับจำนวนกระแสไฟฟ้าให้สูงต่ำได้ตามต้องการ อุปกรณ์นี้จะใช้ในการกระจายธาตุหรือโมเลกุลของของแข็ง เช่น ทอง พลาตาเดียม เป็นต้น ให้การกระจายออกไปจับผิวของชิ้นงาน เป็นการฉาบผิวด้วยโมเลกุลของธาตุ
3. เครื่องหมุนเวียนน้ำเย็น (Water circulator and chiller) เป็นส่วนที่ทำหน้าที่กระจายระบบน้ำเย็นเพื่อลดความร้อนให้กับส่วนต่างๆ ของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน เช่นระบบเลนส์ ระบบสุญญากาศ น้ำที่หล่อเย็นจะมีอุณหภูมิ 18 – 20 องศาเซลเซียส
4. สำหรับวิธีการเตรียมตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษาด้วยเครื่อง SEM สามารถทำได้โดยการนำแท่งทองเหลืองต้นรูปทรงกระบอก (Stub) มาขัดด้วยกระดาษทรายให้เรียบและสะอาด นำภาวนำคาร์บอนทาบบนผิวรูปวงกลม แล้วโรยตัวอย่างผงคาร์บอนตามอัตราส่วนต่างๆ ที่เตรียมขึ้น แล้วนำตัวอย่างไปเคลือบด้วยโลหะทอง

ตัวอย่างที่ผ่านการเคลือบผิวแล้วพร้อมที่จะศึกษาด้วย SEM ทันทที ตัวอย่างที่เตรียมขึ้นสามารถเก็บได้นานแต่ต้องเก็บไว้ในที่แห้ง ปราศจากความชื้น และฝุ่นผง ต้องระวังไม่ให้มีสิ่งกระทบกระเทือนผิวของตัวอย่างเครื่อง SEM ที่ใช้ในการวิเคราะห์สภาพพื้นผิวเป็นเครื่องรุ่น LEO 1455 VP ดังในรูปที่ ฉ.1



รูปที่ ๑.1 เครื่อง SEM รุ่น LEO 1455 VP

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้