



การผลิตถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟโดยใช้ฟลูอิดิเซชันไอน้ำ

Production of Activated Carbon from Coffee Residue using Steam Fluidization

ดร. ไชยยันต์ ไชยยะ

RMUTK - CARIT



3 2000 00100704 8

ประจำปีงบประมาณ 2548



การผลิตถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟโดยใช้ฟลูอิดิเซชันไอน้ำ

Production of Activated Carbon from Coffee Residue using Steam Fluidization

ดร. ไชยยันต์ ไชยยะ

RMUTK - CARIT



ประจำปีงบประมาณ 2548

การผลิตถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟโดยใช้ฟลูอิโดเซชันไอน้ำ

Production of Activated Carbon from Coffee Residue using Steam Fluidization

ดร. ไชยยันต์ ไชยยะ
สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม
คณะวิชาเทคโนโลยีเคมี

สนับสนุนโดยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ ที่ได้สนับสนุนทุนวิจัยงบประมาณเงินผลประโยชน์ประจำปี 2548 และขอขอบคุณ บริษัท ซาราลิ คอฟฟี่ แอนท์ที จำกัด ที่เอื้อเฟื้อกากกาแฟเพื่อใช้เป็นตัวอย่างในการนำมาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์

Abstract

The production of activated carbon coffee residue by steam fluidization, contained two steps of carbonization and steam activation. Coffee residue was carbonized by varied temperature as 400, 500 and 600°C at time 1, 2 and 3 h. The gas sorption analyzer results showed that the highest surface area of carbon was 143 m²/g, at the temperature 600°C for 1 h. This carbon was selected in 971 µm of average diameter and activated at 0.62 m/s of steam velocity by varied temperature as 700, 800 and 900°C and time 3, 5 and 7 h. The results showed that the highest yield of activated carbon was 82.57% at the temperature 700°C for 3 h. While, the highest surface area was 1,067 m²/g at the condition of 900°C for 5 h. The FT-IR results demonstrated that the functional groups of activated carbon were Phenol (O-H), Alkane (C-H), Aromatic (C=C) and Methyl groups (CH₃).



สารบัญ

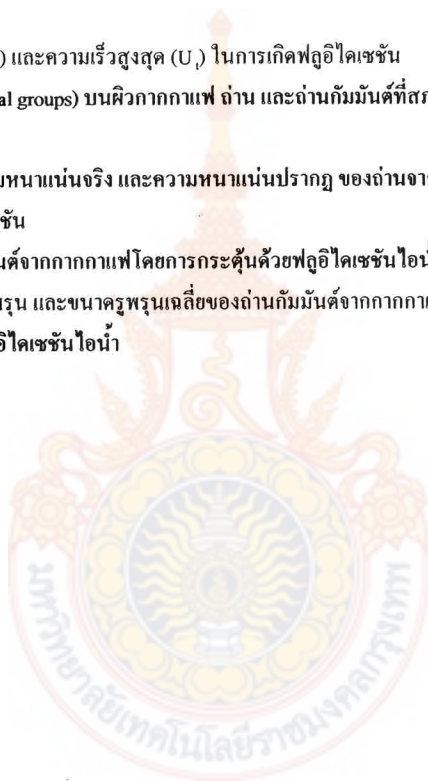
	หน้า
บทคัดย่อ	ค
ABSTRACT	ง
สารบัญ	จ
รายการตาราง	ช
รายการรูป	ช
ประมวลคำศัพท์และคำย่อ	ญ
 บทที่	
1. บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	1
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 วิธีการทำงานวิจัย	2
1.5 ประโยชน์ที่จะได้รับจากงานวิจัย	2
2. วารสารปริทัศน์	3
2.1 กากกาแฟ	3
2.2 ถ่านกัมมันต์	4
2.3 ฟลูอิดเซชัน	12
3. วิธีการทำงานวิจัย	23
3.1 อุปกรณ์และสารเคมี	23
3.2 ขั้นตอนการผลิตถ่านกัมมันต์	25
3.3 วิธีการทดสอบสมบัติถ่านกัมมันต์	31

สารบัญ (ต่อ)

4. ผลการทดลองและอภิปรายผล	32
4.1 อิทธิพลของอุณหภูมิคาร์โบไนซ์ที่มีต่อผลได้ และพื้นที่ผิวของถ่านกากาแฟ	32
4.2 ศึกษาผลของความเร็วต่ำสุด (U_{mf}) และความเร็วสูงสุด (U_p) ในการเกิดฟลูอิดเซชันในการผลิตถ่านกัมมันต์	33
4.3 อิทธิพลของเวลาการกระตุ้นที่มีต่อผลได้ และพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์	34
4.4 อิทธิพลของเวลาการกระตุ้นที่มีต่อปริมาณคาร์บอนของถ่านกัมมันต์	36
4.5 อิทธิพลของเวลาการกระตุ้นที่มีต่อขนาดรูพรุนเฉลี่ยของถ่านกัมมันต์	36
4.6 การศึกษาโครงสร้างของกากกาแฟ ถ่าน และถ่านกัมมันต์โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM)	38
4.7 การวิเคราะห์หมู่หน้าที่ (functional groups) โดยเครื่องฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์ (Fourier transform infrared, FT-IR)	40
5. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	45
5.1 ผลของอุณหภูมิและเวลาการคาร์โบไนซ์ที่มีต่อผลได้ และพื้นที่ผิวถ่านกากาแฟ	45
5.2 ผลของอุณหภูมิและเวลาการกระตุ้นที่มีต่อผลได้ และพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์	45
5.3 ผลการวิเคราะห์หมู่หน้าที่บนผิวถ่านกัมมันต์	45
5.4 ข้อเสนอแนะ	46
เอกสารอ้างอิง	47
ภาคผนวก	50
ก. ตัวอย่างการคำนวณ	51
ข. เครื่องมือวิเคราะห์	58
ค. ข้อมูลการทดลอง	64
ประวัตินักวิจัย	67

รายการตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 ความเร็วต่ำสุด (U_{mr}) และความเร็วสูงสุด (U) ในการเกิดฟลูอิดไอเซชัน	34
4.2 หมู่หน้าที่ (Functional groups) บนผิวกากกาแฟ ถ่าน และถ่านกัมมันต์ที่สภาวะการกระตุ้นต่างๆ	43
ค.1 ผลได้ พื้นที่ผิว ความหนาแน่นจริง และความหนาแน่นปรากฏ ของถ่านจากกากกาแฟจากการคาร์บอนเซชัน	64
ค.2 ผลได้ของถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟโดยการกระตุ้นด้วยฟลูอิดไอเซชันไอน้ำ	65
ค.3 พื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน และขนาดรูพรุนเฉลี่ยของถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟโดยการกระตุ้นด้วยฟลูอิดไอเซชันไอน้ำ	65



รายการรูป

รูป	หน้า
2.1 กระบวนการผลิตกาแฟสำเร็จรูป	3
2.2 โครงสร้างของแกรไฟท์	4
2.3 โครงสร้างของถ่านกัมมันต์	5
2.4 ตัวอย่างหมู่บ้านที่บนผิวถ่านกัมมันต์	11
2.5 ปฏิกิริยาการฟลูออไรด์แบบต่างๆ	13
2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันลดกับความเร็วในการฟลูออไรด์	13
2.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง C_uRe^2 กับ Re	17
3.1 ลักษณะของกากกาแฟ	24
3.2 อุปกรณ์ต่างๆ สำหรับสร้างชุดทดลองฟลูออไรด์ใช้น้ำ	25
3.3 เครื่องคัดขนาดอนุภาค (Sieve Analysis)	27
3.4 Bubble flow meter	28
3.5 ลักษณะถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟโดยการกระตุ้นด้วยฟลูออไรด์ใช้น้ำ	28
3.6 ส่วนประกอบของชุดทดลองฟลูออไรด์ใช้น้ำ	29
3.7 ชุดทดลองฟลูออไรด์ใช้น้ำ	30
4.1 อิทธิพลของอุณหภูมิที่มีต่อผลได้ของถ่านกากกาแฟที่เวลาต่างๆ	32
4.2 อิทธิพลของอุณหภูมิที่มีต่อพื้นที่ผิวของถ่านกากกาแฟที่เวลาต่างๆ	33
4.3 อิทธิพลของเวลาการกระตุ้นที่มีต่อผลได้ของถ่านกัมมันต์ที่อุณหภูมิต่างๆ	35
4.4 อิทธิพลของเวลาการกระตุ้นที่มีต่อพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ที่อุณหภูมิต่างๆ	35
4.5 อิทธิพลของเวลาการกระตุ้นที่มีต่อปริมาตรรูพรุนของถ่านกัมมันต์ที่อุณหภูมิต่างๆ	36
4.6 อิทธิพลของเวลาการกระตุ้นที่มีต่อขนาดรูพรุนเฉลี่ยของถ่านกัมมันต์ที่อุณหภูมิต่างๆ	37
4.7 โครงสร้างของกากกาแฟ ถ่าน และถ่านกัมมันต์ ที่กำลังขยาย 500 เท่า	39
4.8 โครงสร้างของกากกาแฟ ถ่าน และถ่านกัมมันต์ ที่กำลังขยาย 1,500 เท่า	40
4.9 สเปกตรัมของ (functional groups) กากกาแฟ ถ่าน และถ่านกัมมันต์	42

รายการรูป (ต่อ)

รูป	หน้า
ข.1 แบบจำลองการดูดซับโมเลกุลหลายชั้น	58
ข.2 The BET model for adsorption	58



ประมวลคำศัพท์และคำย่อ

atm	=	ความดันบรรยากาศ
°C	=	องศาเซลเซียส
cm ³ /s	=	ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที
D _p	=	เส้นผ่านศูนย์กลาง
h	=	ชั่วโมง
K	=	องศาเคลวิน
L	=	ลิตร
g	=	กรัม
g/cm ³	=	กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
g/min	=	กรัมต่อนาที
g/mL	=	กรัมต่อมิลลิลิตร
g/s	=	กรัมต่อวินาที
kg	=	กิโลกรัม
kg/m ³	=	กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร
kg/ms	=	กิโลกรัมต่อเมตรวินาที
L/min	=	ลิตรต่อนาที
m ²	=	ตารางเมตร
m ² /g	=	ตารางเมตรต่อกรัม
mg	=	มิลลิกรัม
mL	=	มิลลิลิตร
mL/g	=	มิลลิลิตรต่อกรัม
mm	=	มิลลิเมตร
mg/g	=	มิลลิกรัมต่อกรัม
m/s	=	เมตรต่อวินาที
nm	=	นาโนเมตร
μm	=	ไมโครเมตร

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ถ่านกัมมันต์เป็นวัสดุที่ถูกนำไปใช้ในกระบวนการอุตสาหกรรมอย่างหลากหลาย เนื่องจากถ่านกัมมันต์มีประสิทธิภาพในการดูดซับสูงทั้งในสถานะของเหลวและสถานะแก๊ส เช่น การฟอกสี กลั่น แคล้วคลั่งสิ่งปลอมปนที่ไม่ต้องการ เป็นต้น ซึ่งภายในประเทศยังมีการผลิตถ่านกัมมันต์ไม่เพียงพอต่อความต้องการดังกล่าวจึงทำให้ต้องนำเข้าถ่านกัมมันต์จากต่างประเทศ ในขณะที่ประเทศไทยยังมีวัตถุดิบที่สามารถผลิตถ่านกัมมันต์ได้มากมาย และมีราคาถูก เช่น กะลามะพร้าว ชังข้าวโพด กากน้ำตาล เป็นต้น การผลิตถ่านกัมมันต์เพื่อใช้เองในประเทศนี้เป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่ออุตสาหกรรมประเภทต่างๆ นอกจากจะช่วยลดต้นทุนในการผลิตแล้วยังสามารถนำขยะเหลือทิ้งมาใช้ให้เกิดประโยชน์และไม่ต้องนำไปทำลายทิ้งเพื่อให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม โดยวัตถุดิบอย่างหนึ่งที่ควรให้ความสนใจศึกษา คือ กากกาแฟ

เนื่องจากปัจจุบันอุตสาหกรรมด้านการผลิตกาแฟได้แผ่ขยายเพิ่มขึ้นมากทั้งผลิตเพื่อบริโภคและจัดจำหน่ายภายในประเทศแล้วยังส่งออกไปจำหน่ายยังต่างประเทศ เมื่อมีการบริโภคกาแฟมากขึ้น จึงทำให้มีการเพิ่มการผลิตกาแฟมากขึ้นและอุตสาหกรรมด้านการผลิตกาแฟก็เพิ่มขึ้นด้วย ส่งผลให้กากกาแฟที่เหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมเหล่านี้เป็นจำนวนมาก กากกาแฟที่เหลือจากกระบวนการผลิตนี้จะถูกนำมาทำลายทิ้ง ด้วยวิธีการเผาและผลิตเป็นปุ๋ยธรรมชาติ จึงมีแนวคิดที่จะนำกากกาแฟไปผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ เพื่อเพิ่มมูลค่าและเป็นประโยชน์ต่อโรงงานอุตสาหกรรมที่มีความต้องการใช้ถ่านกัมมันต์ โดยปกติแล้ว การศึกษาวิจัยเพื่อพัฒนาการผลิตถ่านกัมมันต์ที่มีคุณภาพจากวัสดุเหลือทิ้งภายในประเทศในระยะยาวจะช่วยให้เกิดเทคโนโลยีการผลิตถ่านกัมมันต์เพิ่มมากขึ้นและเพียงพอต่อความต้องการใช้ถ่านกัมมันต์ แต่เนื่องจากการผลิตถ่านกัมมันต์ที่มีคุณภาพนั้นจะต้องมีสภาวะที่เหมาะสมในการผลิต งานวิจัยนี้ จึงต้องมีการศึกษาตัวแปรต่างๆ ที่เหมาะสมต่อการผลิตถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟ ตัวแปรที่ศึกษา เช่น อุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการคาร์บอนไรเซชัน อุณหภูมิของไอน้ำ อุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการกระตุ้น

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาวิธีการผลิตถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟโดยใช้ฟลูอิดไรเซชันไอน้ำ

1.2.2 เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟ

1.2.3 เพื่อศึกษาสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากระบบ

ฟลูอิดไรเซชันไอน้ำ

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 ออกแบบและสร้างชุดทดลองฟลูอิดเซชันด้วยไอน้ำ

1.3.2 แปรผันสภาวะที่ใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟ ได้แก่ อุณหภูมิคาร์บอนไนซ์ 400, 500 และ 600°C เวลาคาร์บอนไนซ์ 1, 2 และ 3 ชั่วโมง อุณหภูมิในการกระตุ้น 700, 800 และ 900°C และเวลาในการกระตุ้น 3, 5 และ 7 ชั่วโมง

1.3.3 วิเคราะห์ข้อมูลเชิงกายภาพของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้โดยเครื่อง Gas sorption analyzer, กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) และข้อมูลเชิงเคมีโดยเครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์ม อินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (Fourier transform infrared, FT-IR)

1.4 วิธีการทำงานวิจัย

1.4.1 ออกแบบและสร้างชุดทดลองฟลูอิดเซชันด้วยไอน้ำในการผลิตถ่านกัมมันต์

1.4.2 นำกากกาแฟที่ได้มาอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 110°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

1.4.3 นำกากกาแฟที่อบแล้วไปคาร์บอนไนซ์ที่อุณหภูมิ 400, 500 และ 600°C เป็นเวลา 1, 2 และ 3 ชั่วโมง

1.4.4 นำถ่านที่คาร์บอนไนซ์ไปวิเคราะห์เพื่อเลือกสภาวะที่เหมาะสมที่จะนำไปกระตุ้น

1.4.5 คาร์บอนไนซ์กากกาแฟที่เหลือที่สภาวะเหมาะสมเพื่อเตรียมกระตุ้น

1.4.6 กระตุ้นกากกาแฟที่อุณหภูมิการกระตุ้น 700, 800 และ 900°C เป็นเวลา 3, 5 และ 7 ชั่วโมง

1.4.7 นำถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้ไปวิเคราะห์สมบัติเชิงกายภาพ และเชิงเคมี

1.5 ประโยชน์ที่จะได้รับจากงานวิจัย

1.5.1 สามารถนำวัสดุเหลือทิ้งจากกระบวนการอุตสาหกรรมมาแปรรูปให้เกิดมูลค่า

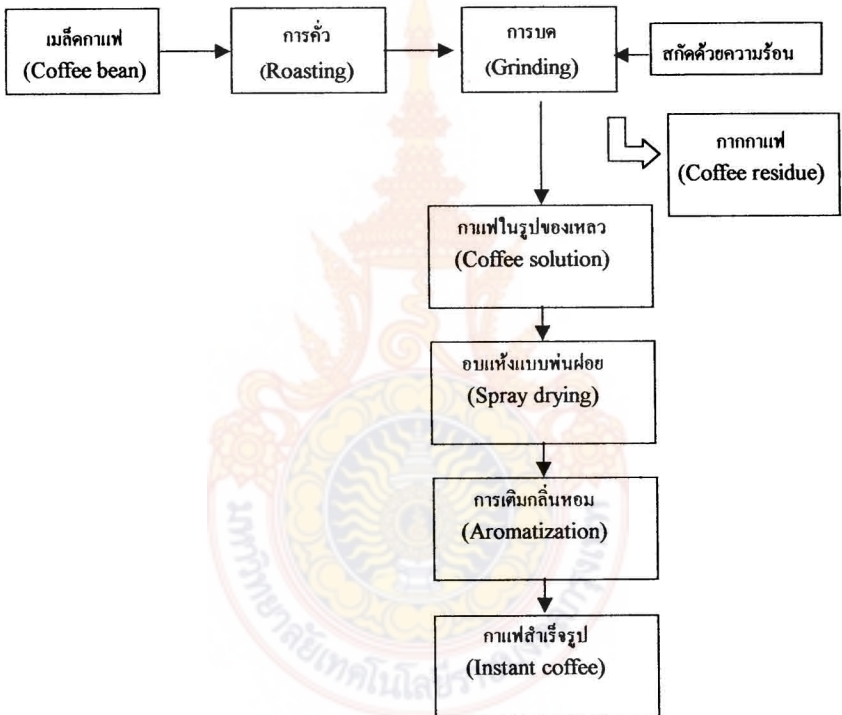
1.5.2 นำถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้ไปใช้ให้เกิดประโยชน์ต่อกระบวนการอุตสาหกรรมประเภทต่างๆ ได้

บทที่ 2

วารสารปริทัศน์

2.1 กาแฟกาแฟ

ในงานวิจัยนี้ได้ใช้กาแฟที่ผ่านจากขั้นตอนการผลิตกาแฟสำเร็จรูป ซึ่งขั้นตอนการผลิตแสดงดังรูปที่ 2.1



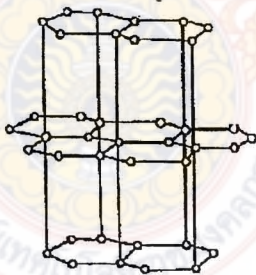
รูปที่ 2.1 กระบวนการผลิตกาแฟสำเร็จรูป [2]

กระบวนการนี้เริ่มต้นจากการนำเมล็ดกาแฟที่กะเทาะเปลือกออกแล้วมาผ่านการคั่ว (Roasting) แล้วจึงบดขยี้ขนาด (Grinding) จากนั้นผ่านขั้นตอนการสกัด (Extraction) ด้วยน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 180°C ภายใต้อุณหภูมิสูงโดยเครื่องปฏิกรณ์ที่มี 6 คอลัมน์ เพื่อให้ได้ผลผลิตของเนื้อกาแฟ

มากที่สุด แล้วจึงกรองแยกออก ซึ่งของแข็งที่เหลืออยู่ คือกากกาแฟซึ่งจะนำมาใช้แปรรูปเป็นถ่านกัมมันต์ในงานวิจัยนี้ ส่วนของเหลวที่ได้ เรียกว่า น้ำกาแฟ นำไปพักไว้ที่ถังพัก แล้วนำไปผ่านขั้นตอนการอบแห้งแบบฉีดพ่นโดยการพ่นน้ำกาแฟออกมาเป็นสาย โดยใช้วาล์วที่หมุนได้ ซึ่งอุณหภูมิถูกควบคุมไว้ที่ 250°C จะทำให้เกิดการระเหยจนกลายเป็นของแข็ง แล้วจึงผ่านการระเหิด (Evaporation) อีกครั้ง เพื่อนำน้ำส่วนเกินออกอีกในขั้นตอนการอบแห้งแบบแช่แข็ง จนท้ายสุดจะได้กากแฟซึ่งสามารถขังคัมได้ทันที แต่ในระหว่างขั้นตอนการสกัดจนถึงการอบแห้งแบบแช่แข็งจะมีการสูญเสียสารระเหยที่มีกลิ่น ซึ่งทำให้กลิ่นหอมหายไปบางส่วน จึงต้องผ่านกระบวนการเติมกลิ่นเพื่อเติมสารเหล่านี้อีกครั้ง ก่อนที่จะมีการบรรจุลงถุงพร้อมกับเติมแก๊สเฉื่อย เช่น คาร์บอนไดออกไซด์ เพื่อลดความเสี่ยงต่อปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation reaction)

2.2 ถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon) [3]

ถ่านกัมมันต์มีโครงสร้างเป็นกลุ่มของคาร์บอน ซึ่งมีลักษณะคล้ายแกรไฟท์ (graphite) ประกอบด้วยแผ่นชั้นที่เกิดจากอะตอมของคาร์บอนเรียงตัวในลักษณะหกเหลี่ยมด้านเท่า (regular hexagonals) ระยะห่างระหว่างอะตอมของคาร์บอนในแต่ละชั้นมีขนาด 1.42 อังสตรอม โดยในแต่ละชั้นเรียงตัวขนานกัน และมีระยะห่างระหว่างชั้น 3.35 อังสตรอม อิเล็กตรอนสามในสี่ของคาร์บอนจะสร้างพันธะโควาเลนต์ (covalent bond) กับอะตอมที่อยู่ติดกัน ในขณะที่อิเล็กตรอนตัวที่สี่จะเคลื่อนที่ระหว่างโครงสร้างวาเลนซ์ ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 โครงสร้างของแกรไฟท์ [3]

โครงสร้างของถ่านกัมมันต์ต่างจากแกรไฟท์ คือ มีโครงสร้างเป็นผลึกที่เล็กมาก (micro crystallites) ประกอบด้วยวงหกเหลี่ยมด้านเท่าของอะตอมคาร์บอน ชั้นคาร์บอนที่เป็นผลึกเล็กๆ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 150 อังสตรอม และมีระยะห่างระหว่างผลึกเท่ากับ 20-50 อังสตรอม ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 โครงสร้างของถ่านกัมมันต์ [4]

ถ่านกัมมันต์มีองค์ประกอบหลักเป็นคาร์บอนที่ผ่านกระบวนการทำโครงสร้างให้มีรูพรุนสูงและมีพื้นที่ผิวจำเพาะ (specific surface) มาก โดยทั่วไปถ่านกัมมันต์ประกอบด้วยธาตุคาร์บอนประมาณ 87-97% และธาตุอื่นๆ เช่น ออกซิเจน ไฮโดรเจน ซัลเฟอร์ และไนโตรเจน เป็นต้น

2.2.1 การผลิตถ่านกัมมันต์ [5]

วิธีการผลิตถ่านกัมมันต์สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 วิธี คือการผลิตถ่านกัมมันต์โดยวิธีทางฟิสิกส์ และการผลิตถ่านกัมมันต์โดยวิธีทางเคมีหรือวิธีผสม (เคมี-ฟิสิกส์)

2.2.1.1 การผลิตถ่านกัมมันต์โดยวิธีทางฟิสิกส์

การผลิตถ่านกัมมันต์วิธีนี้แบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน ขั้นแรกเป็นการแปรสภาพอินทรีชวัตดูให้เป็นถ่านหรือที่เรียกว่าการคาร์ไบโอไนเซชัน (Carbonization) และขั้นที่ 2 เป็นการกระตุ้นถ่านที่ได้ให้เป็นถ่านกัมมันต์ (Activation) ดังมีรายละเอียดดังนี้

2.2.1.1.1 การแปรสภาพอินทรีชวัตดูให้เป็นถ่าน (Carbonization)

วัตถุประสงค์ ของขั้นตอนนี้ก็เพื่อขับไล่ธาตุต่างๆ ที่ไม่ใช่คาร์บอนในอินทรีชวัตดูออกไป ถ่านที่ได้จะมีปริมาณร้อยละของคาร์บอนสูงขึ้น หลักการที่ใช้จะใช้หลักการของกระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis) ซึ่งเป็นการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนด้วยความร้อน ทำให้โดยการเผาอินทรีชวัตดูหรือวัตถุดิบในที่อับอากาศ ให้อากาศเข้าไปไม่มากนัก การย่อยสลายนี้จะทำให้อาณูส่วนใหญ่ที่ไม่ใช่คาร์บอน เช่น ไฮโดรเจน ออกซิเจน เกิดการแยกตัวออกกลายเป็นก๊าซ และบางส่วนของคาร์บอนจะกลายเป็นคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) กรดน้ำส้ม น้ำมันดิน เมทานอล ฯลฯ ทำให้ได้ถ่าน โดยในระยะแรกวัตถุดิบจะถูกทำให้แห้งโดยการไล่ความชื้นหรือน้ำออกไป จนกระทั่งอุณหภูมิสูงถึง 170°C อินทรีชวัตดูจะเริ่มแตกสลายบางส่วน พร้อมกับมีก๊าซ CO , CO_2 และกรดน้ำส้มออกมา จากนั้นที่อุณหภูมิประมาณ $270\text{--}280^{\circ}\text{C}$ จะมีการแตกสลายสารอินทรีย์พร้อมทั้งให้ความร้อนออกมา ระหว่างนี้จะเกิดน้ำมันดิน (Tar) เมทานอล และสารอื่นๆ เป็นจำนวนมาก จากนั้นที่อุณหภูมิสูงกว่า 350°C สีของไม้จะเริ่ม

เปลี่ยนเป็นสีดำโดยปฏิกิริยาคาร์โบไนเซชัน (Carbonization) ของเซลลูโลสและลิกนินเป็นหลัก ซึ่งปฏิกิริยานี้เกิดจากแร็คคอลลิสระเป็นสำคัญ โดยมวลของเซลลูโลสจะสูญเสียมากที่สุดอย่างรวดเร็วในระหว่างอุณหภูมิ 300-400°C ส่วนมวลของลิกนินจะค่อยๆ สูญเสียทีละน้อยอย่างช้าๆ เมื่อเทียบกับเซลลูโลส โดยจากการทดลองพบว่า ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 400°C การสูญเสียมวลส่วนใหญ่ยังไม่สามารถขจัดไฮโดรเจนและออกซิเจนออกจากวัสดุได้อย่างเต็มที่ ทำให้ได้ถ่านที่มีคุณภาพไม่ดีหรือที่เรียกว่าหัวถ่าน แต่ถ้าทำถ่านที่อุณหภูมิสูงกว่า 600°C จะพบว่า ปริมาณร้อยละของคาร์บอนของถ่านที่ได้เพิ่มขึ้นจากการทำถ่านที่อุณหภูมิสูงกว่า 600°C มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับถ่านที่ทำได้ที่อุณหภูมิ 600°C แต่กลับมีผลเสียต่อปริมาณผลผลิตที่ได้อย่างมาก กล่าวคือจะได้ร้อยละผลผลิตต่ำกว่าการทำถ่านที่อุณหภูมิ 600°C อย่างมาก ดังนั้น ช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมในการผลิตถ่านเพื่อให้ได้ผลผลิตและประสิทธิภาพในการแปรสภาพวัสดุคิบหรืออินทรีชีวลูให้เป็นถ่านสูงสุด ก็คือ ช่วงอุณหภูมิ 400-600°C และควรเผาถ่านให้เกิดปฏิกิริยาการสลายตัวด้วยความร้อนที่สิ้นสุดโดยเร็ว เพื่อลดเวลาการสัมผัส (time of contact) ของการสลายตัวและควรควบคุมความสม่ำเสมอของความร้อนและอุณหภูมิของการทำคาร์โบไนเซชัน (Carbonization) ให้คงที่ด้วย จึงจะได้ถ่านที่มีคุณภาพดี ซึ่งถ่านที่ดีควรมีลักษณะดังนี้

- มีสีดำตลอด (uniform black)
- มีลักษณะแข็งแรงแรง ไม่แตกหักง่าย
- เมื่อหักดู ส่วนที่หักจะมีสีมันเงา (skinny surface)
- ปลายที่หักมีลักษณะแหลมคม (shape)
- เมื่อเคาะหรือตกกระทบพื้น ต้องมีเสียงดังกังวานคล้ายโลหะ
- ปราศจากฝุ่นผง และไม่มีขี้เถ้าและส่วนที่ยังไม่เป็นถ่านติดอยู่
- มีปริมาณคาร์บอนคงตัวอยู่มาก มีความชื้นต่ำ (5-10 %)

อย่างไรก็ตาม ถ่านที่ได้จากขั้นตอนนี้ยังมีความสามารถในการดูดซับต่ำ เพราะมีพื้นที่ผิวจำเพาะหรือรูพรุนอยู่น้อย และยังคงมีน้ำมันดินบางส่วนตกค้างอยู่ในรูพรุนหรือเกาะอยู่ตามผิว จึงจำเป็นต้องนำถ่านนี้ไปผ่านปฏิกิริยาการกระตุ้นเพื่อเพิ่มความสามารถในการดูดซับต่อไป

2.2.1.1.2 การกระตุ้นถ่านให้เป็นถ่านกัมมันต์ (Activation) เป็นการนำถ่านที่ได้จากการแปรสภาพอินทรีชีวลูมากระตุ้นด้วยสารที่เหมาะสมซึ่งส่วนใหญ่เป็นก๊าซหรือไอที่เรียกว่า Oxidizing Gas เพื่อไปทำปฏิกิริยากับน้ำมันดินและอะคอมคาร์บอนบางอะคอมในผลึกถ่านให้หลุดออกไป ทำให้ถ่านมีรูพรุนและมีพื้นที่ผิวที่มีอิเล็กตรอนอิสระมากขึ้น โดยรูพรุนที่ได้จากการกระตุ้นนี้จะมีขนาดเล็กที่เรียกว่า micropore ซึ่งเหมาะสำหรับการดูดกลืนไอและก๊าซพิษ Oxidizing Gas ที่นิยมใช้ได้แก่ ไออน้ำ, CO_2 , O_2 (จากอากาศ) ดังมีรายละเอียดดังนี้

ก. การกระตุ้นด้วยไอน้ำ

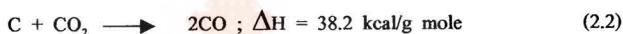
ต้องใช้ไอน้ำร้อนซวคถึง (Superheated Steam) ที่มีอุณหภูมิตั้งแต่ 600-950°C ไอน้ำจึงสามารถทำปฏิกิริยาการกระตุ้นได้ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน



ร้อยละของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากวิธีนี้จะมีค่าประมาณ 30% ของน้ำหนัก ถ่านเริ่มต้น อัตราการออกซิไดซ์จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิสูง แต่ไม่ควรสูงเกิน 1000°C เพราะอัตราการเกิดปฏิกิริยาจะถูกควบคุมด้วยความต้านทานการแพร่ (diffusion resistance controlled) ซึ่งอะตอมของคาร์บอนที่อยู่ชั้นนอกๆ จำนวนมากจะถูกเผาไหม้ ทำให้ขนาดของอนุภาคเล็กลง และความร้อนลดลง

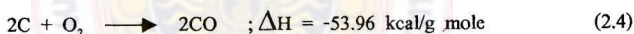
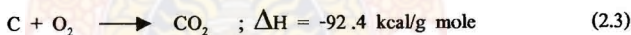
ข. การกระตุ้นด้วยคาร์บอนไดออกไซด์

ต้องใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ที่มีอุณหภูมิถึง $850-1100^\circ\text{C}$ โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะเป็นปฏิกิริยาคูลความร้อน ดังสมการ



ค. การกระตุ้นด้วยออกซิเจน (จากอากาศ)

ต้องใช้อากาศร้อน ที่มีอุณหภูมิสูงกว่า 80°C ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะคายความร้อนออกมา จึงไม่ค่อยนิยมใช้กันเพราะการควบคุมอุณหภูมิทำได้ยาก มักจะเกิดอันตรายได้ง่าย เนื่องจากความร้อนมากเกินไป (Overheat) อีกทั้งออกซิเจนยังจะทำให้ผิวของถ่านไหม้ไปทำให้เกิดการสูญเสียอย่างมาก ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นดังนี้



ส่วนก๊าซอื่น เช่น Cl_2 , CO , SO_2 , SO_3 , NH_3 , ไอกำมะถัน และออกไซด์ของไนโตรเจน ก็มีผลในการกระตุ้นเช่นกัน แต่ไม่ค่อยนิยมใช้กัน เพราะเป็นก๊าซมีพิษหรือเป็นอันตราย และบางตัวมีความเป็นกรดและมีอำนาจในการกัดกร่อนสูง และในทางเทคนิคการปฏิบัติแล้ว มักจะใช้ก๊าซทั้งที่ได้จากการเผาไหม้ก๊าซเชื้อเพลิง (flue gas) ซึ่งจะให้ทั้งไอน้ำ คาร์บอนไดออกไซด์ และออกซิเจนส่วนเกินบ้างเล็กน้อย หรืออาจมีการเติมไอน้ำเข้าไปด้วย เพื่อเป็นการกระตุ้นโดยใช้วิธีร่วมกัน

การผลิตด้วยวิธีนี้มีข้อดีคือ หลังจากการกระตุ้นจนได้ถ่านกัมมันต์แล้วสามารถนำไปใช้งานได้เลย ไม่ต้องมีปัญหาในการล้างสารที่เหลือตกค้าง เพราะไม่มีสารที่อาจจะเป็นอันตรายตกไป ส่วนข้อเสียก็คือ ต้องใช้อุณหภูมิในการกระตุ้นสูง ซึ่งเป็นการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงค่อนข้างมาก

2.2.1.2 การผลิตถ่านกัมมันต์โดยวิธีทางเคมีหรือวิธีผสม (เคมี-ฟิสิกส์)

เป็นวิธีที่นำเอาวัตถุดิบหรืออินทรียสารมาผสมกับสารเคมีที่เรียกว่า สารกระตุ้นหรือตัวทำให้เกิดปฏิกิริยากัมมันต์ (Activating agent) ทำให้เกิดปฏิกิริยาเข้าไปช่วยให้เกิดการเปลี่ยนแปลงเมื่อใช้ความร้อน (Pyrolysis) เช่น ปริมาณน้ำมันดิน (Tar) จะถูกกำจัดให้น้อยลง ปริมาณสารระเหยที่ได้ เช่น กรดน้ำส้ม เมทานอล และอื่นๆ ก็ลดปริมาณลงด้วย ซึ่งจะมีปริมาณน้อยกว่าเมื่อเผาให้เป็นถ่านธรรมชาติ ผลที่ได้จากการทำเช่นนี้จะทำให้ได้ร้อยละคาร์บอนคงตัวมากขึ้น ยิ่งกว่านั้น อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาก็ลดต่ำลงด้วย ตัวกระตุ้นดังกล่าวมักเป็นเกลืออินทรียจำพวกเกลือโลหะคลอไรด์ ได้แก่ CaCl_2 , MgCl_2 , และ ZnCl_2 โดยเฉพาะ ZnCl_2 เป็นที่นิยมใช้กันมาก

หลักการสำคัญของการทำถ่านกัมมันต์วิธีนี้ กล่าวคือ เมื่อนำอินทรียวัตถุดิบมาผสมกับเกลืออินทรียในอัตราส่วนหนึ่งให้ทั่ว แล้วนำไปเผาในที่อับอากาศ ณ อุณหภูมิที่ทำให้อินทรียวัตถุดิบสลายตัว เกลืออินทรียจะเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาการย่อยสลายอินทรียวัตถุ (เซลลูโลส, ลิกนิน ฯลฯ) ให้เกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำลง และยังคงปริมาณของน้ำมันดินและสารที่ระเหยได้น้อยลงด้วย อีกทั้งเกลืออินทรียเหล่านี้ มีความคงทนต่อการสลายตัว ณ อุณหภูมิสูงๆ จึงยังคงสภาพหุ้มอยู่รอบๆ ถ่านและแทรกอยู่ภายใน ทำให้การหดตัวของถ่านเกิดได้จำกัด เมื่อนำมาสกัดเอาอินทรียสารออก ก็จะเกิดช่องว่างหรือรูพรุนในถ่านขึ้น (ซึ่งเดิมเป็นที่ที่อินทรียสารเคยอยู่) ถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการผลิตวิธีนี้จึงมักเป็นถ่านกัมมันต์ที่มีรูพรุนขนาดใหญ่ที่เรียกว่า macropore

โดยหลักการแล้ว เกลืออินทรียสารทุกชนิดที่ทนต่อการเผาไหม้ได้ก็น่าจะใช้ได้ แต่จากการทดลองพบว่า คุณสมบัติการดูดกลืนและดูดสีของถ่านกัมมันต์ที่ได้จาก ZnCl_2 นั้นสูงกว่าเกลืออินทรียอื่นๆ ทั้งนี้เนื่องจาก ZnCl_2 มีความสามารถในการทำให้เซลลูโลสพองตัวได้มากกว่าเกลืออินทรียชนิดอื่นๆ ดังนั้น ZnCl_2 จึงสามารถแทรกเข้าไปในเซลลูโลสของวัสดุที่มีเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบได้ดีกว่าเกลืออื่นๆ อีกทั้งเมื่อวัสดุนั้นถูกเผาคด้วยความร้อน (Pyrolysis) ZnCl_2 จะยังคงกระจายอยู่ทั่วๆ ไปในถ่านได้มาก และค่อนข้างสม่ำเสมอกว่าเกลืออื่นๆ ครั้นสกัดเอา ZnCl_2 ออก จึงเกิดรูพรุนในถ่านสูงและขนาดของรูพรุนค่อนข้างจะสม่ำเสมอว่าการใช้สารอื่นๆ

จะเห็นได้ว่า ข้อดีของการใช้สารเคมีคือ ถ่านกัมมันต์ที่ได้จะมีรูพรุนแทรกซึมอยู่ทั่วเนื้อถ่าน และใช้อุณหภูมิในการผลิตไม่สูงมากนัก (ตั้งแต่ $400-1000^\circ\text{C}$ สำหรับ ZnCl_2 นั้น อุณหภูมิที่เหมาะสมคือ $600-700^\circ\text{C}$ ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ต่ำกว่ากรณีการผลิตถ่านกัมมันต์ด้วยวิธีทางฟิสิกส์ โดยมีนักค้นคว้าสังเกตพบว่า ถ่านกัมมันต์ที่ใช้ ZnCl_2 ที่ผลิตที่อุณหภูมิต่ำจะมีปฏิกิริยา (Active) มากกว่าถ่านกัมมันต์ที่ผลิตที่อุณหภูมิสูง แต่มันจะถูกทำให้ไม่มีปฏิกิริยา (Inactivated) เมื่อทำให้แห้งในอากาศ) อย่างไรก็ตามการผลิตถ่านกัมมันต์ด้วยวิธีนี้ก็มีข้อเสียตรงที่จะต้องล้างสารเคมีที่ใช้ในการกระตุ้นออกให้หมด ไม่ให้เหลือตกค้างอยู่เลย เพื่อความปลอดภัยในการนำไปใช้งาน จึงนับว่าเป็นการสิ้นเปลืองทั้งเวลา แรงงาน ตลอดจนค่าใช้จ่ายในการล้าง อบแห้ง และค่าสารกระตุ้น (ซึ่งเป็นค่าใช้จ่ายที่ค่อนข้างสูง ถ้าไม่สามารถนำสารกระตุ้นที่ล้างออกมานี้กลับไปใช้ได้ก็) นอกจากนี้ สารเคมีบางชนิดที่

ใช้ เช่น $ZnCl_2$ ยังมีฤทธิ์กัดกร่อนภาชนะบรรจุหรือเครื่องมือที่ใช้ในการผลิต เป็นเหตุให้อายุการใช้งานของเครื่องเหล่านั้นสั้น ดังนั้นการผลิตด้วยวิธีนี้จึงจำเป็นต้องเลือกใช้ภาชนะที่ผลิตด้วยวัสดุพิเศษที่ทนการกัดกร่อนที่อุณหภูมิสูง เช่น ดินทนไฟผสมแกรไฟต์ด้วยอัตราส่วน 4:1 เป็นต้น

นอกจากวิธีข้างต้นแล้ว ยังอาจผลิตถ่านกัมมันต์ด้วยวิธีการผสม โดยการนำถ่านกัมมันต์ข้างต้นไปกระตุ้นด้วยวิธีตาม 2.2.1.2 นอกจากนี้ ยังอาจทำถ่านกัมมันต์ได้โดยการแปรสภาพอินทรีย์วัตถุให้เป็นถ่านหรือการทำคาร์โบไนเซชัน (Carbonization) ของอินทรีย์วัตถุกับเกลือหรือกรดอนินทรีย์ จากนั้นก็นำถ่านที่ได้ๆ ไปกระตุ้นด้วยวิธีตามข้อ 2.2.1.2 ต่อไป โดยสารอนินทรีย์ที่ใช้กัน ได้แก่ K_2CO_3 , Na_2SO_4 , K_2SO_4 , KCNS, Dolomite ($CaCO_3 + MgCO_3$), H_3PO_4 , H_2SO_4 , ไส้กรองไคลซ์ของโลหะอัลคาไล ฯลฯ การผสมสารอนินทรีย์เหล่านี้ลงไป มีวัตถุประสงค์มุ่งไปยังขั้นตอนการกระตุ้นถ่าน โดยเกลือและกรดอนินทรีย์เหล่านี้จะกระจายตัวอยู่ทั่วๆ ไปในถ่าน บางจะเป็นตัวออกซิแดนท์โดยตรงของมันเอง บางตัวสลายให้ CO_2 ที่อุณหภูมิสูง และ CO_2 นี้จะออกซิไดส์คาร์บอนอีกต่อหนึ่ง วิธีการนี้จะมีข้อดีกว่าการกระตุ้นด้วยวิธีทางฟิสิกส์ธรรมดาตรงที่ออกซิแดนท์จะกระจายตัวอยู่ทั่วไปทั้งภายในและภายนอกของถ่านอย่างสม่ำเสมอ โดยสารที่นิยมใช้ไปในวิธีนี้คือ H_3PO_4 ซึ่งเป็นตัวที่สามารถทำให้เซลลูโลสเกิดการพองตัวได้ดี (ดีกว่า $ZnCl_2$) การแทรกตัวของ H_3PO_4 จึงค่อนข้างสม่ำเสมอกว่าสารอนินทรีย์อื่นๆ นอกจากนี้ H_3PO_4 ยังมีสมบัติเป็นตัวออกซิแดนท์ด้วย (ในขณะที่ $ZnCl_2$ ไม่มีคุณสมบัติเป็นตัวออกซิแดนท์ ดังนั้นการใช้ $ZnCl_2$ จึงต้องผสมกับวัตถุคิบหรืออินทรีย์วัตถุก่อนการทำคาร์โบไนเซชัน) ดังนั้นการใช้ H_3PO_4 จึงอาจจะเติมก่อนหรือหลังการทำคาร์โบไนเซชันก็ได้

2.2.2 ชนิดของถ่านกัมมันต์ [6, 7, 8]

ชนิดของถ่านกัมมันต์สามารถแบ่งออกได้โดยใช้หลักต่างๆ ขึ้นอยู่กับความสะอาดของผู้ใช้งาน ตัวอย่างการแบ่งชนิดของถ่านกัมมันต์ได้แก่

2.2.2.1 แบ่งตามชนิดของตัวกระตุ้น

ก. กระตุ้นทางเคมีเป็นถ่านที่ได้จากการใช้สารเคมีทำปฏิกิริยากับผิวของคาร์บอน มักเป็นถ่านกัมมันต์ที่มีรูพรุนขนาดใหญ่ สารกระตุ้นที่ใช้เช่น $ZnCl_2$

ข. กระตุ้นทางฟิสิกส์ เป็นถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการใช้แก๊สออกซิไดซ์ เช่น ไออน้ำและคาร์บอนไดออกไซด์ ถ่านกัมมันต์ที่ได้จะมีรูพรุนขนาดเล็กนิยมใช้ในการดูดซับแก๊สและไอระเหย

2.2.2.2 แบ่งตามขนาดของรูพรุน

ก. รูพรุนขนาดเล็ก เป็นถ่านกัมมันต์ที่มีรัศมีของรูพรุนประมาณ 1 nm มักนำไปใช้ในการดูดซับแก๊สหรือไอระเหย

ข. รูพรุนขนาดกลาง เป็นถ่านกัมมันต์ที่มีรัศมีของรูพรุนประมาณ 2-50 nm มักนำไปใช้ประโยชน์สำหรับดูดซับสารที่มีโมเลกุลใหญ่ เช่น การฟอกสี

ค. รูปพุนขนาดใหญ่ เป็นถ่านกัมมันต์ที่มีรัศมีของรูปพุนมากกว่า 100 nm โดยปกติไม่มีความสำคัญในการดูดซับสารต่างๆ แต่จะเป็นตัวช่วยให้สารที่ถูกดูดซับนั้นสามารถเคลื่อนที่ผ่านไปยังรูปพุนเล็กได้ง่ายขึ้น

2.2.2.3 แบ่งตามความหนาแน่นของถ่านกัมมันต์

ก. ความหนาแน่นต่ำ มักใช้ในสภาวะที่เป็นสารละลาย เช่น ฟอกสีน้ำยางดิบ หรือทำให้น้ำบริสุทธิ์

ข. ความหนาแน่นสูง ใช้ในการดูดซับแก๊สหรือไอระเหย

2.2.2.4 แบ่งตามชนิดของสารที่ถูกดูดซับ

ก. สารที่ถูกดูดซับเป็นแก๊ส เป็นถ่านกัมมันต์ที่ใช้ดูดแก๊สพิษ กลิ่นและไอของสารอินทรีย์

ข. สารที่ถูกดูดซับเป็นสี เป็นถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในการฟอกสี

ค. สารที่ถูกดูดซับเป็นโลหะ เป็นถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในการแยกพวกโลหะชนิดต่างๆ เช่น ถ่านที่ใช้ในการแยกทอง เงิน และแพลทินัมออกจากแร่

2.2.2.5 แบ่งตามสภาวะที่ใช้

ก. ประเภทที่ดูดซับแก๊ส โดยมากมักใช้ในการทำแก๊สให้บริสุทธิ์ เช่น การนำตัวทำละลายกลับมาใช้ใหม่ การแยกแก๊ส หรือการนำไปใส่ในคันกรอง

ข. ประเภทที่ดูดซับของเหลว ถูกนำมาใช้กับงานฟอกสีและสารที่มีลักษณะเหลว

2.2.2.6 แบ่งตามรูปร่างและขนาดของอนุภาค

ก. ประเภทเป็นผง มีลักษณะเป็นเม็ดละเอียดมาก ขนาดเล็กกว่า 100 μm โดยเฉลี่ยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 15-20 μm ด้วยเหตุนี้จึงมีพื้นที่ผิวภายนอกมาก ระยะทางการแพร่กระจายน้อย อัตราการดูดซับจึงมีมาก ซึ่งเตรียมได้จากขี้เลื่อย

ข. ประเภทเป็นเม็ด มีลักษณะเป็นเม็ดเล็กแต่มีขนาดใหญ่กว่าประเภทผงทำให้มีพื้นที่ผิวภายนอกน้อยกว่า การแพร่ของตัวดูดซับเป็นปัจจัยสำคัญของการดูดซับ ส่วนใหญ่แล้วนิยมใช้ในการบำบัดน้ำเสีย ซึ่งเตรียมได้จากผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียม เช่น นิฟูเมนและถ่านหินลิกไนต์

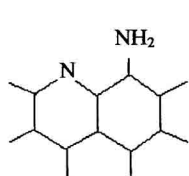
2.2.3 โครงสร้างและสมบัติทางเคมีของถ่านกัมมันต์

ลักษณะโครงสร้างและสมบัติทางเคมีของถ่านกัมมันต์คล้ายแกรไฟต์ คือ แบบ Microcrystalline โดยที่แต่ละอะตอมของคาร์บอนยึดเหนี่ยวกันด้วยพันธะโควาเลนต์ แต่จะมีความเป็นระเบียบในการจัดเรียงตัวต่ำกว่า และลักษณะโครงสร้างจะมีหลายลักษณะขึ้นอยู่กับวัตถุดิบที่นำมาผลิต และสิ่งปนเปื้อนที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการผลิต นอกจากอะตอมคาร์บอนแล้วยังพบว่ามีอะตอมธาตุอื่น เช่น ไฮโดรเจน ออกซิเจน และอาจมีคลอรีน ไนโตรเจน ซัลเฟอร์ที่สร้างพันธะเคมีกับคาร์บอน และมีความสำคัญกับสมบัติของถ่านกัมมันต์ เช่น ลักษณะความเป็นกรด-เบส ความมีขั้ว-ไม่มีขั้วซึ่งมีผล

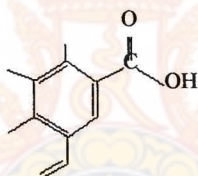
ต่อสมบัติการดูดซับด้วย อะตอมธาตุอื่นๆ เหล่านี้จะเรียกว่า หมู่หน้าที่บนผิวถ่านกัมมันต์แต่ละชนิดจะมี หลายๆ หมู่หน้าที่ที่แตกต่างกันไปโดยทั่วไปผิวของถ่านกัมมันต์เกิดเป็นหมู่หน้าที่ชนิดต่างๆ จะเกิด ระหว่างอะตอมคาร์บอนกับออกซิเจนที่เรียกว่า ผิวออกไซด์ มีอยู่ 2 ชนิด

2.2.3.1 ชนิดที่เป็นกรด มักจะเกิดในถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยอุณหภูมิไม่สูงมากนัก ประมาณ $400-500^{\circ}\text{C}$ หมู่หน้าที่ที่เกาะอยู่บนผิวของถ่านกัมมันต์นี้จะมีสมบัติคล้ายกรด ได้แก่ คาร์บอนิก ฟีนอลิก และคีโตน เป็นต้น ดังแสดงในรูป 2.4 โครงสร้างทางเคมีของถ่านกัมมันต์แบบนี้ค่อนข้างเสถียรแม้จะอยู่ในสภาวะอากาศ โดยทั่วไปจะเสถียรที่อุณหภูมิต่ำกว่า 200°C ถ้าอุณหภูมิสูงกว่า 200°C เล็กน้อย จะมีการสลายตัวเป็นแก๊สคาร์บอน ไดออกไซด์และไอน้ำหลุดออกไป และถ้าอุณหภูมิสูงกว่านี้มากๆ จะเกิดการสลายตัวให้แก๊สคาร์บอน ไดออกไซด์ และแก๊สไฮโดรเจน

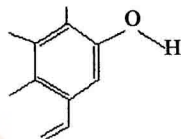
2.2.3.2 ชนิดที่เป็นด่าง มักจะเกิดในถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยอุณหภูมิ $800-900^{\circ}\text{C}$ หมู่หน้าที่ที่อยู่บนผิวถ่านกัมมันต์สามารถดูดซับโมเลกุลของกรดได้ดี ได้แก่ ไฮดรอกไซด์ และคาร์บอเนต เป็นต้น



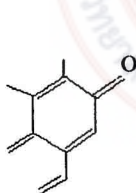
(a) Amine group



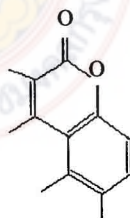
(b) Carboxylic group



(c) Phenolic group



(d) Carbonyl group



(e) Lactonic group

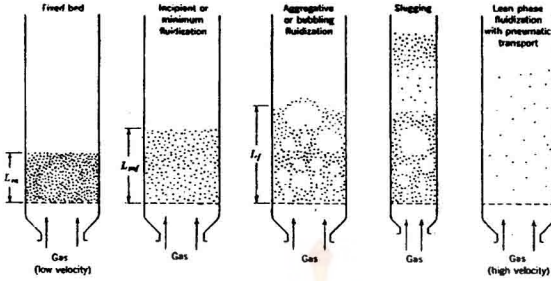
รูปที่ 2.4 ตัวอย่างหมู่หน้าที่บนผิวถ่านกัมมันต์ [4]

2.3 ฟลูอิดไลเซชัน (Fluidization) [3]

ฟลูอิดไลเซชันเป็นปรากฏการณ์ซึ่งของแข็งขนาดเล็กถูกทำให้ลอยในสภาพคล้ายของไหลโดยมีการพองให้สัมผัสกับแก๊สหรือของเหลวซึ่งอาจมีการถ่ายเทระหว่างของแข็งและของเหลวนั้นด้วย เทคนิคฟลูอิดไลเซชัน สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือฟลูอิดไลเซชันของของเหลว (liquid-liquid fluidization) และแก๊สฟลูอิดไลเซชัน (gas-liquid fluidization)

ลักษณะการเกิดฟลูอิดไลเซชันมีลำดับขั้นตอนดังต่อไปนี้ เมื่อให้ของไหลที่มีอัตราการไหลต่ำไหลผ่านช่องว่างระหว่างอนุภาคที่อยู่ชั้นเรียกว่า เบดนิ่ง (fixed bed) เมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้นอนุภาคเริ่มแยกตัวออกจากกัน จะพบว่าบางส่วนเริ่มลั่นและเคลื่อนที่ในบริเวณจำกัดเป็นแบบเบคซายด์ (expanded bed) เมื่ออัตราเร็วของของไหลสูงขึ้นไปอีกจนถึงจุดหนึ่งที่อนุภาคทั้งหมดแขวนลอยอยู่ในแก๊สหรือของเหลวไหลสวนขึ้นทางด้านบน ที่จุดนี้แรงเสียดทาน (friction force) ระหว่างอนุภาคกับของไหลจะสมดุลกับอนุภาคในส่วนนั้น ชั้นของของแข็งจะเริ่มถูกฟลูอิดไลซ์และมีสภาพปั่นป่วนเต็มที่ ซึ่งเรียกจุดนี้ว่า จุดต่ำในการฟลูอิดไลซ์ (minimum or incipient fluidization) ดังแสดงในรูปที่ 2.5

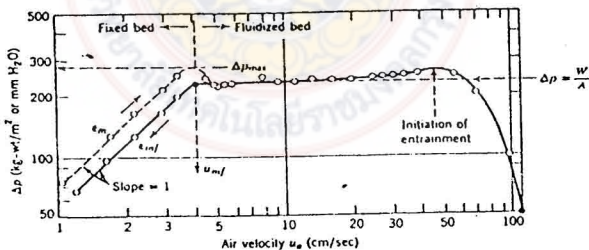
การเพิ่มขึ้นของอัตราไหลที่สูงกว่าค่าความเร็วต่ำสุดของการฟลูอิดไลซ์ในระบบแก๊ส-ของเหลว มักมีพฤติกรรมแตกต่างจากระบบของเหลว-ของแข็งคือ พบว่ามีการเกิดฟอง (bubble) ของแก๊สขึ้น เมื่ออัตราไหลสูงขึ้นความปั่นป่วนจะมีมากขึ้นและการเคลื่อนไหวของของแข็งก็จะเร็วมากขึ้น นอกจากนี้ชั้นของแข็งจะไม่ขยายตัวมากขึ้นเมื่อเทียบกับที่ความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไลซ์ ซึ่งสภาวะนี้เรียกว่า ฟลูอิดไลซ์แบบฟองอากาศ (bubble fluidization) หรือฟลูอิดไลซ์เบคของแก๊ส (gas-solid fluidization) ซึ่งความแตกต่างจากระบบฟลูอิดไลซ์ของของแข็งกับของเหลวซึ่งการเพิ่มขึ้นของอัตราไหลที่สูงกว่าค่าความเร็วต่ำสุดของการฟลูอิดไลซ์ จะทำให้เกิดการขยายตัวของชั้นของแข็งอย่างต่อเนื่อง และสม่ำเสมอ เรียกว่า ฟลูอิดไลซ์แบบสม่ำเสมอ (smooth fluidization) และเมื่ออัตราการไหลสูงขึ้นจนถึงความเร็วสุดท้ายของการฟลูอิดไลซ์ (terminal velocity) ของของแข็งแล้ว พื้นผิวชั้นบนของของแข็งจะหายไป และของแข็งจะถูกพัดพาออกไปจากเบคโดยติดไปกับของไหล ซึ่งจุดนี้เรียกว่า ฟลูอิดไลซ์แบบเบาบาง (lean-phase fluidization) ปรากฏการณ์ที่น่าสนใจอีกอย่างหนึ่งของฟลูอิดไลเซชันระบบของแข็ง-แก๊ส คือ การที่ฟองแก๊สเกิดการรวมตัวกันและมีขนาดใหญ่ขึ้นในขณะที่ลอยขึ้นมา จะทำให้ชั้นของของแข็งถูกผลักให้ลอยขึ้นไปและตกกลับลงมา เรียกปรากฏการณ์นี้ว่าการเกิด slugging ซึ่งในการใช้งานจริงมักไม่ต้องการให้เกิดปรากฏการณ์นี้ เนื่องจากจะเพิ่มปัญหาของการพัดพาอนุภาคออกไปจากเบคและลดประสิทธิภาพการทำงานของเบค มักพบปรากฏการณ์นี้ในฟลูอิดไลซ์เบคที่มีลักษณะแคบและยาว



รูปที่ 2.5 ปฏิกิริยาการฟลูอิดไลซ์แบบต่างๆ [3]

2.3.1 ความสัมพันธ์ของความดันกับความเร็วในการเกิดฟลูอิดไลซ์ [3]

จะเห็นได้ว่าในที่ความเร็วก๊าซที่แตกต่างกันจะมีลักษณะหนึ่งอยู่กับที่เรียกว่า เบนนิ่ง ในช่วงนี้ความดันของเบคจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเร็วในการฟลูอิดไลซ์ เมื่อความเร็วของแก๊สเพิ่มขึ้นจนถึงจุดที่เบคเปลี่ยนสภาพจากอนุภาคที่อยู่นิ่ง เป็นอนุภาคที่แขวนลอยอยู่ในของไหล ที่จุดนี้เบคเริ่มขยายตัวขึ้นและเริ่มเกิดการฟลูอิดไลซ์ ความเร็วที่เป็นจุดเริ่มเกิดฟลูอิดไลซ์จะเรียกว่า ความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไลซ์ (minimum fluidization, U_{mf}) ความชันของกราฟความดันจะลดลงหลังจากถึงจุดความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไลซ์ ที่จุดความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไลซ์ จะมีค่าความดันของเบคเท่ากับน้ำหนักของอนุภาคในเบคหารด้วยพื้นที่หน้าตัดของเบค และเมื่อเพิ่มความเร็วของแก๊สให้สูงขึ้นจนถึงจุดที่อนุภาคถูกพัดพาออกไปกับของไหล จุดนี้เป็นจุดที่ความเร็วของของไหล มีค่าเท่ากับความเร็วสุดท้ายของการฟลูอิดไลซ์ (terminal velocity, U_t)



รูปที่ 2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับความเร็วในการฟลูอิดไลซ์ [5]

2.3.2 การคำนวณความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดซ์ [3]

ในขณะที่อนุภาคของแข็งเริ่มลอยตัวเป็นอิสระอยู่นั้น อาจกล่าวได้ว่าอนุภาคของแข็งอยู่ในสภาวะสมดุลของแรง โดยแรงที่เกิดขึ้นบนอนุภาคของแข็งก็คือ แรงเนื่องจากน้ำหนักของอนุภาคของแข็งกับแรงพุงเนื่องจากแรงดันของแก๊ส ในการหาความเร็วต่ำสุดของแก๊สก็เพื่อต้องการอัตราการไหลหรือความเร็วต่ำ ที่จะทำให้อนุภาคของแข็งเกิดเป็นฟลูอิดซ์ได้ ซึ่งปกติจะเป็นการหาจุดที่อนุภาคของแข็งเกิดเป็นฟลูอิดซ์เบดแรกเกิด เพราะความเร็วของฟลูอิดซ์เบดหนาแน่นมีค่าเท่ากับ หรือมากกว่าความเร็วของฟลูอิดซ์เบดแรกเกิดเพียงเล็กน้อยดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น ซึ่งจุดนี้จะได้โดยการคำนวณหาความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดซ์ ซึ่งการคำนวณจะทำให้ได้โดยคิดว่สภาพฟลูอิดซ์จะเริ่มเกิดขึ้นเมื่อแรงเสียดทานระหว่างอนุภาคของแข็งกับของไหลจะสมดุลกับน้ำหนักของอนุภาคจากสมการของเออร์กิน (Ergun)

$$\frac{\Delta P}{L} = 150 \frac{(1 - e_{mf})^2 \mu U_o}{(\Phi_s D_p)^2 e_{mf}^3} + 1.75 \frac{(1 - e_{mf}) U_o^2 \rho_g}{F_s e_{mf}^3 D_p} \quad (2.5)$$

- เมื่อ ΔP คือ ค่าความดันลดตกคร่อมเบด
 L คือ ค่าความสูงของเบด
 e_{mf} คือ สัดส่วนช่องว่างของเบดที่ความเร็วต่ำสุดในการฟลูอิดซ์
 μ คือ ความหนืดแก๊ส
 U_o คือ ความเร็วต่ำสุดในการฟลูอิดซ์
 ρ_g คือ ความหนาแน่นแก๊ส
 Φ_s คือ ค่าความกลมของอนุภาค
 D_p คือ ขนาดอนุภาคเฉลี่ย

กรณีที่อนุภาคของแข็งขนาดเล็ก จะทำให้สามารถใช้ความเร็วของไหลเพียงเล็กน้อยก็ทำให้เกิดเป็นฟลูอิดซ์เบดได้แล้ว ดังนั้นสมการ

$$1.75 \frac{(1 - e_{mf}) U_o^2 \rho_g}{F_s e_{mf}^3 D_p} = 0 \quad (2.6)$$

ดังนั้นสมการที่ 2.5 ที่ใช้สำหรับอนุภาคขนาดเล็ก ($D_p < 0.5 \text{ mm}$)

$$U_{mf} = \frac{(\Phi_s D_p)^2 (\rho_p - \rho_g) e_{mf}^3 g}{150 (1 - e_{mf}) \mu} \quad (2.7)$$

- เมื่อ U_{mf} คือ ความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดซ์
 Φ_s คือ ค่าความกลบของอนุภาค
 D_p คือ ขนาดอนุภาคเฉลี่ย
 e_{mf} คือ สัดส่วนช่องว่างของเบดที่ความเร็วต่ำสุดในการฟลูอิดซ์
 μ คือ ความหนืดแก๊ส
 ρ_g คือ ความหนาแน่นแก๊ส
 ρ_p คือ ความหนาแน่นของอนุภาค
 g คือ ค่าคงที่ความโน้มถ่วง (Gravitational Constant)

ถ้าอนุภาคของแข็งมีขนาดมากกว่า 2 mm ($D_p > 0.2$ mm) ก็จะใช้สมการ 2.8

$$U_{mf}^2 = \frac{\Phi_s D_p (\rho_p - \rho_g) e_{mf}^3 g}{1.75 \mu} \quad (2.8)$$

เนื่องจากค่าแฟคเตอร์รูปร่าง (Φ_s) และสัดส่วนช่องว่าง (e_i) มักจะหาค่าได้ยากหรือไม่ทราบค่าเลย จึงได้มีการพยายามปรับสมการที่หลีกเลี่ยงการใช้ค่าทั้งสองนี้ จากการทดลองของเวนและยู (Wen and Yu) ดังสมการ 2.5

สำหรับอนุภาคนขนาดเล็ก ($D_p < 0.5$ mm)

$$U_{mf} = \frac{D_p^2 (\rho_p - \rho_g) g}{1650 \mu} \quad (2.9)$$

และสำหรับอนุภาคนขนาดขนาดมากกว่า 2 mm ($D_p > 0.2$ mm)

$$U_{mf}^2 = \frac{D_p (\rho_p - \rho_g) g}{245 \rho_g} \quad (2.10)$$

ดังนั้นจากสมการต่างๆ ข้างต้น ทำให้สามารถปรับความเร็วของแก๊สที่ไหลเข้าเบดเพื่อทำให้เกิดฟลูอิดซ์เบดขึ้นได้ โดยความเร็วแก๊สที่ใช้ต้องมีค่ามากกว่าความเร็วต่ำสุดที่หาได้

2.3.3 การคำนวณความเร็วสุดท้าย [5]

ในช่วงของฟลูอิดซ์เบคหนาแน่น จะมีความเร็วสูงสุดของแก๊สช่วงหนึ่งที่ยังสามารถทำให้เกิดฟลูอิดซ์เบคกระจายอยู่ในสถานะได้ ถ้าแก๊สมีความเร็วเกินค่าความเร็วสูงสุดนี้แล้ว ถ้าเป็นสถานะเปิดเบคจะลดยอกนอกภาชนะหรือเกิดการลดยไปกองกันอยู่ด้านบนหมด ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการคำนวณหาความเร็วสูงสุดหรือความเร็วหลุดลอยนี้ เพื่อเป็นขีดจำกัดสูงสุดของแก๊สที่ยังทำให้เกิดฟลูอิดซ์เบคหนาแน่นอยู่

จากการศึกษาทางกลศาสตร์ของไหล (fluid mechanics) ในเรื่องของแรงหน่วง เนื่องจากความดัน (pressure drag) นำมาประยุกต์หาความเร็วสูงสุดได้เป็นดังสมการ 2.7

$$U_t = \left[\frac{4gD_p(\rho_p - \rho_g)}{3\rho_g C_d} \right]^{0.5} \quad (2.11)$$

เมื่อ U_t คือ ความเร็วสุดท้ายในการเกิดฟลูอิดซ์
 C_d คือ ค่าคงที่ เรียกว่า Drag coefficient

การหาสัมประสิทธิ์ความหน่วงนับว่ามีความยุ่งยากมาก ดังนั้น จึงหลีกเลี่ยงมาใช้ในการตรวจจรรถโนลด์ (Reynolds number, Re)

$$Re = \frac{D_p \rho_g U_t}{\mu} \quad (2.12)$$

โดยค่าความเร็วสูงสุด U_t จะคำนวณจากสมการต่อไปนี้

$$U_t = \frac{g(\rho_p - \rho_g)D_p^2}{18\mu} \quad Re < 0.4 \quad (D_p < 0.2 \text{ mm}) \quad (2.13)$$

$$U_t = D_p \left[\frac{4(\rho_p - \rho_g)^2 g^2}{225\rho_g \mu} \right]^{0.5} \quad 0.4 < Re < 500 \quad (0.2 < D_p < 2.0 \text{ mm}) \quad (2.14)$$

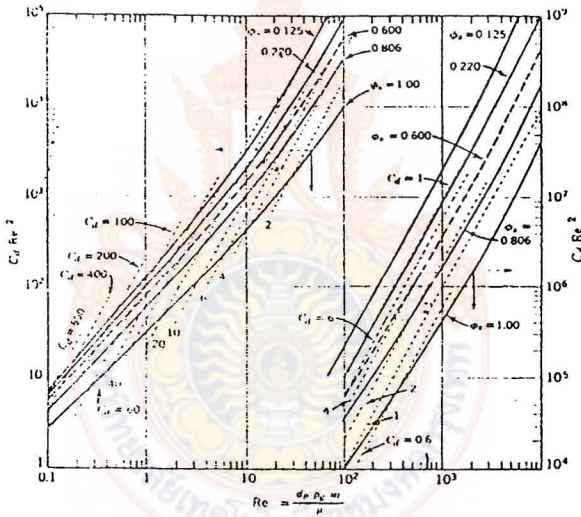
หรือ

$$U_t = \left[\frac{3.19(\rho_p - \rho_g)D_p}{\rho_g} \right]^{0.5} \quad \text{Re} > 500 \quad (D_p > 2.0 \text{ mm}) \quad (2.15)$$

ในกรณีต้องการคำนวณจากค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงโดยตรง ก็อาจหาได้จากเส้นกราฟในรูปที่ 2.7 โดย

$$C_d \text{Re}^2 = \frac{4D_p^2 \rho_g (\rho_p - \rho_g) g}{3\mu^2} \quad (2.16)$$

ซึ่งช่วงของค่า $C_d \text{Re}^2$ ที่หาได้จะเห็นว่าได้ค่า Re มากมายหลายค่า และจำเป็นต้องมีการตรวจสอบค่า Re กลับไปอีกจึงจะหาค่า C_d ที่ถูกต้องได้ นับว่ามีความยุ่งยากพอสมควร



รูปที่ 2.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $C_d \text{Re}^2$ กับ Re [5]

2.3.4 ขอบเขตของฟลูอิดเซชัน (Regime of fluidization) [3]

เมื่อเบดวางลงบนตะแกรงหรือตัวกระจายแก๊ส (gas distributor) และมีแก๊สไหลขึ้นโดยค่อยๆ เพิ่มความเร็วขึ้นเรื่อยๆ จะสามารถแบ่งชนิดของฟลูอิดเซชันตามความเร็วของของไหลได้ดังนี้

2.3.4.1 เบดบรรจุ (Packed bed) หรือเบดนิ่ง (Fixed bed)

เมื่อแก๊สไหลผ่านของแข็งที่วางตัวอยู่บนตัวกระจายแก๊สด้วยความเร็วต่ำ เบดจะวางตัวนิ่ง (Fixed bed) ไม่เคลื่อนไหว แก๊สจะไหลคลไคลไปตามช่องว่างที่อยู่ในเบด หรือเบดอาจมีการเคลื่อนที่สัมผัสกับผนัง แต่อนุภาคของแข็งในเบดไม่มีการเคลื่อนที่สัมผัสต่อกัน กรณีนี้เรียกว่า มูฟวี่ง (moving) เมื่อแก๊สเคลื่อนที่ผ่านเบดที่วางตัวนิ่ง จะมีแรงเนื่องจากการไหลของอนุภาคกระทำต่ออนุภาคในทิศทางของการไหล เรียกแรงนี้ว่าแรงเสียดทานเนื่องจากการไหล (drag force) ซึ่งจะก่อให้เกิดความดันตก (pressure drop) ตกคร่อมเบด ความดันตกตกคร่อมเบดตลอดความสูงของเบดบรรจุ ที่เกิดขึ้นจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามความเร็วแก๊สที่เพิ่มขึ้น

2.3.4.2 ฟลูอิดไรซ์เบดแบบฟองอากาศ (bubbling fluidized bed)

เมื่อความเร็วแก๊สที่เคลื่อนที่ผ่านเบดนิ่ง มีค่าเพิ่มขึ้นจนถึงความเร็วค่าหนึ่ง อนุภาคจะเริ่มเกิดการเคลื่อนที่ ความเร็วที่จุดนี้จะเรียกว่า ความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไรเซชัน (minimum fluidization velocity, U_{mf}) และจะเรียกเบด ณ จุดนี้ว่า minimum fluidized bed ซึ่งเป็นจุดที่อนุภาคเริ่มประทุติดตัวคล้ายของไหล สำหรับค่าความดันตกคร่อมเบด ณ จุดนี้จะมีค่าเท่ากับน้ำหนักของเบด ถ้าเพิ่มความเร็วของแก๊สจะพบว่าเริ่มเกิดฟองแก๊ส bubble phase อาจมีอนุภาคอยู่บ้างแต่น้อยมาก และส่วนที่ไม่ใช่ฟองแก๊สหรือส่วนที่มีอนุภาคอยู่นานแน่น เรียกว่า emulsion phase ขนาดของฟองแก๊สที่เกิดขึ้นนี้จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามขนาดของอนุภาค ความเร็วแก๊ส และตำแหน่งที่อยู่เหนือตะแกรงรองรับหรือตัวกระจายแก๊สที่เพิ่มขึ้น

ฟองแก๊สที่เกิดขึ้นจะเคลื่อนที่แทรกขึ้นไป และอาจมีการรวมตัวกัน เช่น emulsion phase โดยที่อาจจะมีของแข็งบางส่วนติดไปด้านบนของฟองแก๊ส และบางส่วนวิ่งตามฟองแก๊สขึ้นมาด้วยจนกระทั่งถึงผิวบนก็จะเคลื่อนที่หลุดออกไป แล้วแตกกระจายอยู่เหนือผิวหน้าของเบด อนุภาคของแข็งที่ติดอยู่ที่วิ่งตามฟองแก๊สเกือบทั้งหมดจะตกกลับลงมายังเบดใหม่ สำหรับบริเวณที่อยู่เหนือเบดขึ้นไป ซึ่งฟองแก๊สจะเกิดการแตกตัว และของแข็งที่ติดไปกับฟองแก๊สจะตกกลับลงมายังเบดอีกครั้งด้วยผลของแรงโน้มถ่วง เรียกว่า บริเวณอิสระ อย่างไรก็ตามอาจจะมีอนุภาคของแข็งบางส่วน ซึ่งขนาดเล็กจะถูกพัดพาเคลื่อนที่ไปกับแก๊สด้วย ณ ความสูงค่าหนึ่ง ซึ่งอนุภาคของแข็งเกือบทั้งหมดตกกลับลงมายังเบดจะเรียกความสูงนี้ว่า ความสูงหลุดลอย

2.3.4.3 เบดแบบสลัก (slugging bed)

ขนาดของฟองแก๊สจะมีขนาดเพิ่มตาม ความเร็วของแก๊ส และความสูงของเบด ถ้าเบดบรรจุอยู่ในหอซึ่งมีขนาดเล็กและยาว ฟองแก๊สที่เกิดขึ้นอาจจะมีขนาดใหญ่เกือบเท่ากับเส้นผ่านศูนย์กลางหรือความกว้างของเบด ในกรณีนี้จะสังเกตเห็นฟองแก๊สเคลื่อนที่ผ่านเบด และแยกอนุภาคออกเป็นชั้นๆ เรียกว่าเกิด สลักกิง (slugging)

2.3.4.4 เบดแบบปั่นป่วน (Turbulent bed)

เมื่อความเร็วของแก๊สที่เคลื่อนที่ผ่าน บับเบิล เบด (bubbling bed) เพิ่มขึ้นจนมีค่าสูงกว่า minimum bubbling velocity เบดจะเกิดการขยายตัว และเมื่อเพิ่มความเร็วขึ้นเรื่อยๆ จะเริ่มสังเกตเห็นรูปแบบการสัมผัสของอนุภาคกับแก๊สซึ่งเกิดการขยายตัวจะมีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นโดยฟองแก๊สที่เกิดขึ้นจะมีการรวมตัวและแตกกระจายออกจากกันอย่างรวดเร็ว จนดูเหมือนไม่มีฟองแก๊สอยู่ภายในเบด การเคลื่อนไหวภายในเบดจะมีลักษณะปั่นป่วน ที่เกิดขึ้นจะแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ dense phase ซึ่งบางส่วนของมีอนุภาคของแข็งอยู่หนาแน่น และ dilute phase ซึ่งเป็นส่วนที่มีอนุภาคของแข็งอยู่เบาบาง สำหรับช่วงในการเปลี่ยนสภาวะจาก bubbling bed ไปเป็น turbulent bed จะเกิดขึ้น เมื่อค่อยๆ เพิ่มความเร็วจนถึงค่าหนึ่ง เบดซึ่งเดิมอยู่ในสภาวะ bubbling bed นั้น บริเวณผิวหน้าของเบดจะเริ่มเปลี่ยนไปเป็น turbulent bed ตามลำดับ จนกระทั่งถึงความเร็วค่าหนึ่งเบดทั้งหมดก็อยู่สภาวะ turbulent bed โดยสมบูรณ์ เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของความดันคร่อมเบด ที่เกิดขึ้นในช่วงการเปลี่ยนสภาวะ

จากการที่ผู้วิจัยได้ทำการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ พบว่ามีผู้วิจัยหลายท่านได้ทำการทดลองไว้ก่อนหน้านี้ ได้แก่

กฤติกา จารุทะวีย์ และวรรณนิภา อมาตยกุล [9] ได้ศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์จากกะลาปาล์มโดยกระบวนการแตกตัวด้วยความร้อนและกระตุ้นด้วยไอน้ำในขั้นตอนเดียว ตัวแปรที่ทำการศึกษาคือ เวลาและขนาดของกะลาปาล์ม โดยนำกะลาปาล์มขนาด 2.36-4.75 mm มาทำการทดลอง สภาวะที่เหมาะสมที่ได้คือ อุณหภูมิ 750°C เวลา 2 ชั่วโมง ปริมาณไอน้ำร้อนยิ่งยวดมากเกินพอ และอัตราการไหลของอากาศ 0.66 นอร์มัลลิตร/นาฬิกา ถ่านกัมมันต์ที่ได้มีสมบัติดังนี้คือ ค่าร้อยละผลได้ 19.66 ค่าถ่วงร้อยละ 7.03 ค่าการดูดซับไอโอดีน 620.16 mg/g และค่าการดูดซับเมทธิลีนบลู 278.02 mg/g

จักริน นิธิจันทร์ [10] ได้ทดลองผลิตถ่านกัมมันต์โดยคาร์บอนในเข้ฉันทและการกระตุ้นด้วยไอน้ำในฟลูอิโดเบด การทดลองแบ่งเป็น 2 ขั้นตอน ขั้นแรก คาร์บอนในเข้ โดยตัวแปรที่ศึกษา คือ ความเร็วอากาศ เวลาในการคาร์บอนในเข้ พบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการคาร์บอนในเข้ คือ ขนาดของเม็ดฟิต 0.5-2.0 mm ความเร็วอากาศ 0.94 m/s อุณหภูมิเริ่มต้นของเบด 400°C เวลาในการคาร์บอนในเข้ 5 นาที ขั้นตอนที่สอง การกระตุ้นด้วยไอน้ำในฟลูอิโดเบด ตัวแปรที่ศึกษา คือ ร้อยละของสารละลายในวัตถุดิบ ขนาดของถ่านฟิต เวลาในการกระตุ้นด้วยไอน้ำ อุณหภูมิของเบดขณะเริ่มป้อนไอน้ำ ปริมาณการป้อนถ่านฟิต พบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการกระตุ้นด้วยไอน้ำในฟลูอิโดเบด คือ ถ่านฟิตขนาด 1.0-2.0 mm ปริมาณการป้อนถ่านฟิต 2.0 kg ความเร็วอากาศ 3.21 m/s อุณหภูมิเบดขณะเริ่มป้อนไอน้ำ 700°C เวลากระตุ้นด้วยไอน้ำ 7 นาที ได้ผลิตภัณฑ์เป็นถ่านกัมมันต์ร้อยละ 59.1 ของน้ำหนักถ่านฟิต มีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ 1,023 m²/g ค่าไอโอดีนนัมเบอร์ 1,053 mg/g ค่าดูดซับเมทธิลีนบลู 354.5 mg/g

นรศ จันทร์เทียน และคณะ [11] ได้ศึกษาความเป็นไปได้ที่จะนำกะลาตาลโดนผลิตถ่านกัมมันต์ โดยใช้ไอน้ำอิมพัลส์วูดในเครื่องแอคติเวเตอร์แบบฟลูอิโดเบด และใช้ขังกลอไรด์ในเครื่อง

แอคติเวเตอร์แบบเบคนิง การผลิตถ่านกัมมันต์ด้วยไอน้ำร้อนด้วยวิธีเครื่องแอคติเวเตอร์แบบฟลูอิซ์เบด ทดลองโดยการคาร์บอนไนซ์กะลาตาลโตนดในเตาเผาไฟฟ้า ที่อุณหภูมิ 300°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ขนาดอนุภาค 2-5 mm กระตุ้นด้วยไอน้ำร้อนด้วยวิธีเครื่องแอคติเวเตอร์แบบฟลูอิซ์เบด ซึ่งมีลักษณะเป็นทรงกระบอกที่จะทำจากสแตนเลส เบอร์ 316 หนา 4 mm เส้นผ่านศูนย์กลาง 12 cm สูง 50 cm ที่อุณหภูมิ 900°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ถ่านกัมมันต์ที่ได้มีสมบัติดังนี้คือ ค่าการดูดซับเมทธิลินบลู 0.2 mg/g ค่าการดูดซับไอโอดีน 600 mg/g ส่วนการผลิตถ่านกัมมันต์ด้วยซิงคลอไรด์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบคนิง ทดลองโดยการคาร์บอนไนซ์กะลาตาลโตนดในเครื่องคาร์บอนไนเซอร์ ที่อุณหภูมิ 300°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง นำมาคัดขนาด 2-5 mm แล้วใช้ในการละลายซิงคลอไรด์ เข้มข้นร้อยละ 50 โดยใช้ถ่าน 3 g ต่อสารละลายซิงคลอไรด์ 9 mL นำไปกระตุ้นในเตาเผา ที่อุณหภูมิ 500°C เป็นเวลา 30 นาที ถ่านกัมมันต์ที่ได้มีสมบัติดังนี้ คือ ค่าการดูดซับเมทธิลินบลู 362-376 mg/g ค่าการดูดซับไอโอดีน 1088-1117 mg/g

นิขรี นิลนนท์ [7] ได้ทดลองผลิตถ่านกัมมันต์จากไม้โกงกางด้วยวิธีกระตุ้นด้วยไอน้ำร้อน ขวดชั่งกับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ สภาวะที่เหมาะสมในการคาร์บอนไนซ์ คือ อุณหภูมิ 300°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และทำการกระตุ้นที่อุณหภูมิ 850°C เป็นเวลา 60 นาที ขนาดอนุภาค 0.6-1.2 mm โดยใช้ไอน้ำร้อนขวดชั่งกับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในอัตราการไหล 5 L/min ถ่านกัมมันต์ที่ได้มีสมบัติดังนี้ คือ ค่าการดูดซับไอโอดีน 675 mg/g ค่าการดูดซับเมทธิลินบลู 254 mg/g ความหนาแน่นปรากฏ 0.32 g/cm^3 และพื้นที่ผิว $640\text{ m}^2/\text{g}$

รติกร อิศระเสนีย์ [12] ได้ทดลองผลิตถ่านกัมมันต์จากยางรถยนต์ ได้ดำเนินการ 2 ขั้นตอนคือ การคาร์บอนไนซ์ยางรถยนต์ และการกระตุ้นถ่านที่ได้ด้วยไอน้ำร้อนยิ่งยวด ตัวแปรที่ศึกษาคืออุณหภูมิและเวลาการคาร์บอนไนซ์ พบว่าสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการคาร์บอนไนซ์ยางรถยนต์คือการคาร์บอนไนซ์ที่อุณหภูมิ 450°C 30 นาที ในบรรยากาศของแก๊สไนโตรเจน ได้ผลิตถ่านกัมมันต์เป็นถ่านชาร์ร้อยละ 47.20 ปริมาณคาร์บอนคงตัวร้อยละ 50.48 สารระเหยร้อยละ 23.11 และเถ้าร้อยละ 23.41 ขั้นตอนการกระตุ้นด้วยไอน้ำร้อนยิ่งยวดทำในเครื่องแอคติเวเตอร์แบบเบคนิง ตัวแปรที่ศึกษาคือ อุณหภูมิและเวลาการกระตุ้น ขนาดถ่านที่ใช้กระตุ้น และอัตราการป้อนไอน้ำ พบว่าสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการกระตุ้นถ่านที่ได้จากการคาร์บอนไนซ์ 50 กรัม คือใช้ถ่านขนาด 1.18-2.36 mm กระตุ้นที่อุณหภูมิ 900°C 30 นาที โดยมีอัตราการป้อนไอน้ำ 1.88 g/s และอัตราการป้อนอากาศ $43\text{ cm}^3/\text{s}$ ได้ผลิตถ่านกัมมันต์เป็นถ่านกัมมันต์ร้อยละ 17.35 ของน้ำหนักยางรถยนต์ใช้แล้ว มีพื้นที่ผิว $691.51\text{ m}^2/\text{g}$ ค่าไอโอดีน 891.11 mg/g ค่าเมทธิลินบลู 172.03 mg/g

วราวุฒิ ประชาศิริกุล [13] ได้ทดลองผลิตถ่านกัมมันต์จากกะลาปาล์มน้ำมันโดยกระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ พบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการคาร์บอนไนซ์ คือ อุณหภูมิ 400°C เป็นเวลา 60 นาที อัตราการไหลของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 0.2 L/min ขนาดอนุภาคของถ่าน 1.2-2.4 mm

ถ่านกัมมันต์ที่ได้มีสมบัติดังนี้ คือ ค่าการดูดซับไอโอดีน 411 mg/g ค่าการดูดซับเมทธิลินบลู 175 mg/g ความหนาแน่นปรากฏ 0.52 g/cm³ และพื้นที่ผิว BET 476 m²/g

ศุกลทิธิ กิตชัย และอรนุช ขาวเมื่อน้อย [14] ได้ทดลองผลิตถ่านกัมมันต์จากกะลาปาล์ม น้ำมันโดยการคาร์บอนไนซ์ และการกระตุ้นด้วยไอน้ำร้อนยิ่งยวดในเบคนิ่ง โดยทำการคาร์บอนไนซ์ ในช่วงอุณหภูมิ 400-500°C เป็นเวลา 5-11 ชั่วโมง พบว่าสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการคาร์บอนไนซ์ คือ อุณหภูมิเบค 400°C เป็นเวลา 9 ชั่วโมง ถ่านกัมมันต์ที่ได้มีสมบัติดังนี้ คือ ผลผลิตถ่านเป็นถ่านกะลา ร้อยละ 47 ปริมาณคาร์บอนคงตัวร้อยละ 68 ปริมาณสารระเหยร้อยละ 25 และปริมาณเถ้าร้อยละ 7

สุรางค์ รุกขอนันตกุล และอภิสิทธิ์ ปรีดาวรรณเลิศ [15] ได้ทดลองคาร์บอนไนซ์และกระตุ้นด้วยแก๊สออกซิไดซ์ โดยทำการคาร์บอนไนซ์ในเบคนิ่ง โดยการทดลองแบ่งเป็น 2 ขั้นตอนขั้นตอนแรก คาร์บอนไนซ์เบคนิ่ง พบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการคาร์บอนไนซ์ คือ อุณหภูมิ 400°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ขั้นตอนที่สอง เป็นการกระตุ้นด้วยแก๊สผสมในห้องฟลูอิดไอดีเบค แก๊สผสมเตรียมได้จากการเผาไหม้น้ำมันเตาเชลกับไอน้ำร้อนยิ่งยวด โดยอุณหภูมิ 800°C นาน 15 นาที โดยใช้ตัวอย่างถ่านชาร์อนุภาค 1.68-2.38 mm จะได้ถ่านกัมมันต์ที่มีคุณสมบัติดังต่อไปนี้ ค่าการดูดซับไอโอดีน 690.96 mg/g ค่าการดูดซับเมทธิลินบลู 77.98 mg/g ค่าเถ้าร้อยละ 14.65 ค่าร้อยละผลผลิตถ่านที่ได้ ร้อยละ 18.38

สมใจ ขจรชีพพันธุ์งาม [16] ได้ทดลองผลิตถ่านกัมมันต์จากแกลบโดยการกระตุ้นด้วยไอน้ำ และโซเดียมไฮดรอกไซด์ พบว่าสภาวะที่เหมาะสมของการกระตุ้นด้วยไอน้ำ คือ อุณหภูมิ 700°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ถ่านกัมมันต์ที่ได้มีสมบัติดังนี้ คือ พื้นที่ผิว 421 m²/g ปริมาณการดูดซับของเหลวโทลูอิน และไอระเหยโทลูอินร้อยละ 12 และ 8 โดยน้ำหนัก ส่วนสภาวะที่เหมาะสมที่ใช้ในการกระตุ้นด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ คือ อุณหภูมิ 500°C เป็นเวลา 30 นาที ถ่านกัมมันต์ที่ได้มีสมบัติดังนี้ คือ พื้นที่ผิว 347 m²/g ปริมาณการดูดซับของเหลวโทลูอินร้อยละ 26 และ 52 โดยน้ำหนัก จากการทดลองพบว่าจากแกลบโดยกระตุ้นด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์มีปริมาณการดูดซับไอระเหยโทลูอินสูงกว่าถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยไอน้ำ

อุไรวรรณ ธรรมรัตน์พคุณ [17] ได้ทดลองคาร์บอนไนซ์กะลามะพร้าวในถังน้ำมีขนาด 200 L แล้วนำมากระตุ้นด้วยไอน้ำร้อนยิ่งยวดในเตาเผาแบบหมุน ที่ทำด้วยเหล็ก ไร้สนิมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 cm ปลายแต่ละด้านปิดด้วยตะแกรงเพื่อป้องกันไม่ให้ถ่านหลุดออกไป ท่อหมุนในแนวนอนด้วยอัตรา 4 รอบต่อนาที สภาวะที่ใช้คือ ถ่านขนาด 4-10 เมช (2.00-4.76 mm) ครั้งละ 500 g อุณหภูมิ 700-1500°C ปรเวลาตั้งแต่ 30, 40, 45, 50, 55, 60, 90, 105, 110 และ 130 นาที จากการทดลอง พบว่าถ่านกัมมันต์ที่ได้มีสมบัติดังนี้ คือ ค่าการดูดซับไอโอดีน 1,540 mg/g ค่าการดูดซับเมทธิลินบลู 5-371 mg/g ค่าความแข็ง 30-42 และความหนาแน่นปรากฏ 0.31-0.59 g/cm³

J.E.Atwater และคณะ [18] ได้ทดลองเคลือบซิลิกอน-คาร์ไบด์ (SiC) บนถ่านกัมมันต์ โดยการผลิตจะใช้อุณหภูมิสูงในเครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไอดีเบคสำหรับการเคลือบซิลิกอน-คาร์ไบด์ (SiC)

ที่อุณหภูมิ 1350°C จะเกิดปฏิกิริยาบนพื้นผิวของคาร์บอนจาก i-SiC และคาร์บอนโมโนออกไซด์ ผลที่ได้จากการทดลองเคลือบทำให้ถ่านที่ได้มีพื้นที่ผิวสูงขึ้น

Juan F. Gonzalez และคณะ [19] ได้ทดลองเตรียมถ่านกัมมันต์จากยางรถยนต์โดยการกระตุ้นด้วยไอน้ำและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ วิธีการกระตุ้นแบ่งเป็น 2 ขั้นตอน (ไพโรไลซิส ที่ 800°C ในบรรยากาศของไนโตรเจน ร่วมกับไอน้ำ หรือคาร์บอนไดออกไซด์) ผลของการกระตุ้น ($750\text{-}900^{\circ}\text{C}$) และเวลาที่ใช้กระตุ้น (1-3 h) การทดสอบพื้นที่ผิวของถ่านโดยการดูดซับไอโซเทอมของไนโตรเจนที่ 77 K ทดสอบด้วยปริมาตรรูพรุนขนาดเมโซ, ปริมาตรรูพรุนไมโคร และ พื้นที่ผิวของ BET มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเป็นเชิงเส้น โดยการกระตุ้นด้วยไอน้ำจะให้รูพรุนขนาดไมโครสูงกว่า และการกระตุ้นด้วยคาร์บอนไดออกไซด์จะให้รูพรุนขนาดเมโซ

Martin-Gullon และคณะ [20] ได้ใช้โรงทดลองฟลูอิดไรซ์เบดเพื่อศึกษากระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์ จากถ่านบิทูมัสโดยการกระตุ้นด้วยไอน้ำ โรงทดลองจะสามารถผลิตถ่านได้มากกว่า 40 กิโลกรัมต่อวัน ซึ่งสภาวะที่ใช้ทดสอบการดูดซับ : (1) สภาวะการคาร์โบไนเซชัน, (2) อุณหภูมิกระตุ้น ($800\text{-}850^{\circ}\text{C}$) และ (3) ความเร็วของไอน้ำ ($1.5\text{-}3$ เท่าของความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไรซ์) จากการทดลองได้พบว่ากระบวนการผลิตทั้งสองขั้น (การคาร์โบไนเซชัน และการกระตุ้น) ผลของรูพรุนที่ได้ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและความเร็วของไอน้ำที่ใช้อย่างชัดเจน



บทที่ 3

วิธีการทำงานวิจัย

3.1 อุปกรณ์และสารเคมี

3.1.1 อุปกรณ์

1. กระบอกตวง (Cylinder) ขนาด 10 mL
2. ขวดเก็บตัวอย่าง (Vial)
3. เครื่องชั่ง (Balance)
4. จานเพาะเชื้อ (Peti disc)
5. ช้อนตักสาร (Spoon)
6. เครื่องเคาะ (Desicaior)
7. เตาอบ (Oven)
8. เตาเผา (Furnance)
9. ถ้วยทนความร้อน (Crucible)
10. บิวเรต (Burret)
11. บีกเกอร์ (Breaker) ขนาด 50 mL

3.1.2 อุปกรณ์ในการสร้างชุดทดลองฟลูอิดเซชันไอน้ำ

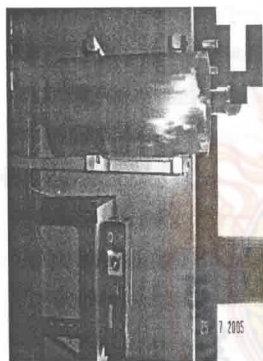
1. เตาเผาจากบริษัทสวนหลวง ฮีตเตอร์ จำกัด ดังรูปที่ 3.2
2. หม้อไอน้ำจากบริษัทสวนหลวง ฮีตเตอร์ จำกัด ดังรูปที่ 3.2
3. คอนถันบรรจตัวอย่าง ดังรูปที่ 3.2
4. ปั๊มน้ำจากบริษัทคอนโทล จำกัด ดังรูปที่ 3.2
5. ไนโตรเจนจากบริษัทไทยอินดัสเทียลแก๊ส จำกัด
6. ท่อสแตนเลสยาว 6 เมตร ขนาด $\varnothing 1/4$ นิ้ว
7. ถังน้ำ
8. ฮีตเตอร์บริษัทสวนหลวง ฮีตเตอร์ จำกัด ดังรูปที่ 3.2
9. Ball valve ชี่ห้อ Hylok ขนาด $\varnothing 1/4$ นิ้ว
10. Bubble flow meter
11. Metering valve ชี่ห้อ Swagelok ขนาด $\varnothing 1/4$ นิ้ว
13. Tee way ชี่ห้อ Hylok ขนาด $\varnothing 1/4$ นิ้ว
14. Union ชี่ห้อ Hylok ขนาด $\varnothing 1/4$ นิ้ว

3.1.3 วัตถุดิบและสารเคมี

1. ถากกาแฟจากบริษัทธาราดี คอฟฟี่ แอนด์ทีที จำกัด ดังรูปที่ 3.1
2. เฮปแทน Analytical reagent จากบริษัทฟิชเชอร์ เคมีคอล



รูปที่ 3.1 ลักษณะของกากกาแฟ



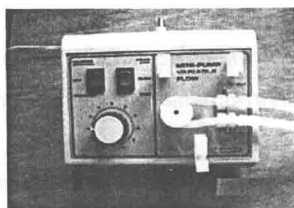
(ก) เตาเผาจากบริษัทสวนหลวง ซีสเตอร์ จำกัด



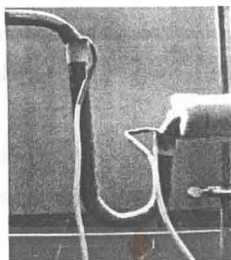
(ข) คอลัมน์บรรจุตัวอย่าง



(ค) หม้อไอน้ำจากบริษัทสวนหลวง ซีสเตอร์ จำกัด



(ง) ป้อนน้ำจากบริษัทคอนโทล จำกัด



จ) ฮีตเตอร์บริษัทสวนหลวง ฮีตเตอร์ จำกัด

รูปที่ 3.2 อุปกรณ์ต่างๆ สำหรับสร้างชุดทดลองฟลูอิดเซชันไอน้ำ

3.2 ขั้นตอนการผลิตถ่านกัมมันต์

3.2.1 ขั้นตอนการสร้างชุดทดลอง

3.2.1.1 ออกแบบชุดทดลองฟลูอิดเซชันไอน้ำ ดังรูปที่ 3.6

3.2.1.2 สร้างชุดทดลองฟลูอิดเซชันไอน้ำ ดังรูปที่ 3.7

3.2.2 ขั้นตอนการเตรียมกากกาแฟ

3.2.2.1 นำกากกาแฟมาอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 110°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง และปล่อยให้เย็นในเคชิกเคเตอร์

3.2.2.2 คัดขนาดของกากกาแฟโดยใช้ขนาดของตะแกรงเบอร์ 8

3.2.3 ขั้นตอนการทำกากกาแฟให้เป็นถ่าน

3.2.3.1 นำกากกาแฟที่ผ่านการอบแห้งมาชั่งปริมาณ 70-80 กรัม

3.2.3.2 นำมาใส่ถ้วยทนความร้อน ปิดฝา นำไปเผาที่อุณหภูมิ 400°C เป็นเวลา 1, 2 และ 3 ชั่วโมง และปล่อยให้เย็นในเคชิกเคเตอร์

3.2.3.3 จากนั้นชั่งน้ำหนักถ่านหลังการเผาและเก็บในภาชนะที่ป้องกันความชื้นได้

3.2.3.4 ทำการทดลองซ้ำในข้อ 3.4.3.1 ถึง 3.4.3.2 โดยเปลี่ยนอุณหภูมิเป็น 500 และ 600°C ตามลำดับ

3.2.3.5 นำถ่านกากกาแฟที่ได้จากการทั้งหมด 9 ตัวอย่างไปวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพโดยเครื่อง Gas sorption analyzer เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการกระตุ้นให้เป็นถ่านกัมมันต์ในขั้นตอนต่อไป

3.2.3.6 หลังจากทราบสภาวะที่เหมาะสมในการคาร์บอนไนซ์แล้ว ก็ทำการเตรียมวัตถุดิบสำหรับการกระตุ้นโดยการคาร์บอนไนซ์กากกาแฟที่สภาวะดังกล่าวให้เพียงพอสำหรับการกระตุ้น แล้วเก็บตัวอย่างที่ได้ในเคชิกเคเตอร์

3.2.4 ขั้นตอนการเตรียมก่อนการกระตุ่น

3.2.4.1 การคำนวณความหนาแน่นจริง

ก. บักทีกน้ำหนักกระบอกตวงก่อนใส่ถ่านและหลังใส่ถ่าน เพื่อหาน้ำหนักถ่านในกระบอกตวงปริมาตร 10 mL

ข. เติมเฮปเทนลงในบิวเรต บันทึกลำเริ่มต้น เปิดให้เฮปเทน ค่อยๆ ไหลลงสู่กระบอกตวงที่มีถ่านบรรจุอยู่ จนระดับ เฮปเทนท่วมถ่านในกระบอกตวงและขีดระดับของเหลวถึงขีด 10 mL ของกระบอกตวงบันทึกปริมาตรที่ใช้ไปของเฮปเทน

ค. จากนั้นคำนวณหาความหนาแน่นจริงดังแสดงในภาคผนวก ก.

3.2.4.2 การคำนวณความหนาแน่นปรากฏ

ก. อบถ่านกากกาแฟที่อุณหภูมิ 150°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ปลอ่ยให้เย็นในเดสซิกเคเตอร์

ข. ชั่งกระบอกตวงเปล่าขนาด 10 mL บันทึกน้ำหนักกระบอกตวง

ค. นำกระบอกตวงที่ชั่งแล้วมาใส่ถ่านกากกาแฟแล้วแล้วนำไปชั่งอีกครั้ง

ง. จากนั้นคำนวณหาความหนาแน่นปรากฏ ดังแสดงในภาคผนวก ก.

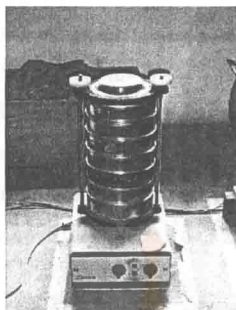
3.2.4.3 การคำนวณขนาดอนุภาคเฉลี่ยโดยน้ำหนัก

ก. ชั่งน้ำหนักตะแกรงร่อน ขนาด 10, 14, 40, 50, 60, 80 และถาดรองและฝาปิด ดังรูปที่ 3.3

ข. ชั่งตัวอย่าง 100 g เทลงบน ตะแกรงร่อน ชั้นบนสุด ซึ่งเรียงจากช่องเปิดขนาดใหญ่ไปขนาดเล็ก โดยให้ช่องเปิดขนาดใหญ่อยู่ด้านบน คือ 10, 14, 40, 50, 60, 80 และถาดรอง ตามลำดับ ปิดฝาครอบ

ค. เขย่าโดยใช้เครื่องหาขนาดอนุภาค (Sieve Analysis) เป็นเวลา 5 นาที นำตะแกรงร่อนแต่ละชั้นที่มีตัวอย่างค้างอยู่มาชั่งน้ำหนัก

ง. คำนวณขนาดอนุภาคเฉลี่ยโดยน้ำหนัก ดังแสดงในภาคผนวก ก.



รูปที่ 3.3 เครื่องหาขนาดอนุภาค (Sieve Analysis)

3.2.5 ขั้นตอนการกระตุ่นด้วยฟลูอิโดเซชันไอน้ำ

3.2.5.1 คำนวณสภาวะในการเกิดฟลูอิโดเซชันดังภาคผนวก ก.

3.2.5.2 เตรียมชุดทดลองสำหรับการกระตุ่น

ก. หุ้มฉนวนบริเวณที่เป็นทางผ่านของไอน้ำไปยังหอกระตุ่น

ข. เติมน้ำลงในถังน้ำและหม้อไอน้ำให้เพียงพอ

ค. วัดอัตราการไหลของไอน้ำที่จะใช้ในการกระตุ่น

ง. วัดอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนที่จะใช้ในการกระตุ่นโดยใช้อุปกรณ์

ดังรูปที่ 3.4

จ. ตรวจสอบเช็คทั่วทุกจุด

3.2.5.3 นำถาดกากกาแฟชั่งน้ำหนัก 50 g

3.2.5.4 นำถาดที่ชั่งน้ำหนักแล้วไปใส่ลงในคอลัมน์บรรจุตัวอย่างทางด้านบน แล้วปิด

ฝาครอบให้สนิท

3.2.5.5 จากนั้นเปิดสวิตช์ควบคุมการทำงานของหม้อไอน้ำ และปรับอุณหภูมิที่ 120°C หลังจากนั้นสังเกตเมื่ออุณหภูมิถึง 120°C จึงปรับอุณหภูมิของฮีตเตอร์ที่ 200°C เพื่อเปลี่ยนอุณหภูมิของไอน้ำเป็นไอน้ำร้อนยิ่งยวด

3.2.5.6 เปิดสวิตช์ควบคุมการทำงานของเตาเผาและปรับอุณหภูมิที่ 700°C พร้อมทั้งเปิดถังไนโตรเจนและปรับอัตราการไหลให้คงที่ตลอดการทดลอง

3.2.5.7 เริ่มจับเวลาหลังจากที่อุณหภูมิถึง 700°C โดยเวลาที่ใช้คือ 3, 5 และ 7 ชั่วโมง

3.2.5.8 สังเกตการณ์ตลอดการทดลอง และต้องคอยเติมน้ำลงในถังน้ำและหม้อไอน้ำ เพื่อป้องกันการไหม้ของหม้อไอน้ำ และป้องกันการรั่วจากข้อต่อต่างๆ ได้

3.2.5.9 เมื่อทำการกระตุ้นครบเวลาที่กำหนดแล้ว ทำการปิดสวิตช์ของเตาเผาฮีตเตอร์ หม้อไอน้ำ และถังไนโตรเจน

3.2.5.10 ทิ้งให้เครื่องเตาเผาเย็นลง แล้วจึงนำตัวอย่างออกจากคอลัมน์บรรจุ

3.2.5.11 นำถ่านกัมมันต์ที่ได้ไปชั่งน้ำหนัก และเก็บในภาชนะที่สามารถป้องกันความชื้นได้ จากนั้นนำไปไว้ในเคสซิเมนต์

3.2.5.12 ทำความสะอาดคอลัมน์บรรจุตัวอย่างเพื่อเตรียมการทดลองในครั้งต่อไป

3.2.5.13 ทำการทดลองซ้ำในข้อ 3.2.4.3 ถึง 3.2.4.11 โดยการเปลี่ยนอุณหภูมิเป็น 800 และ

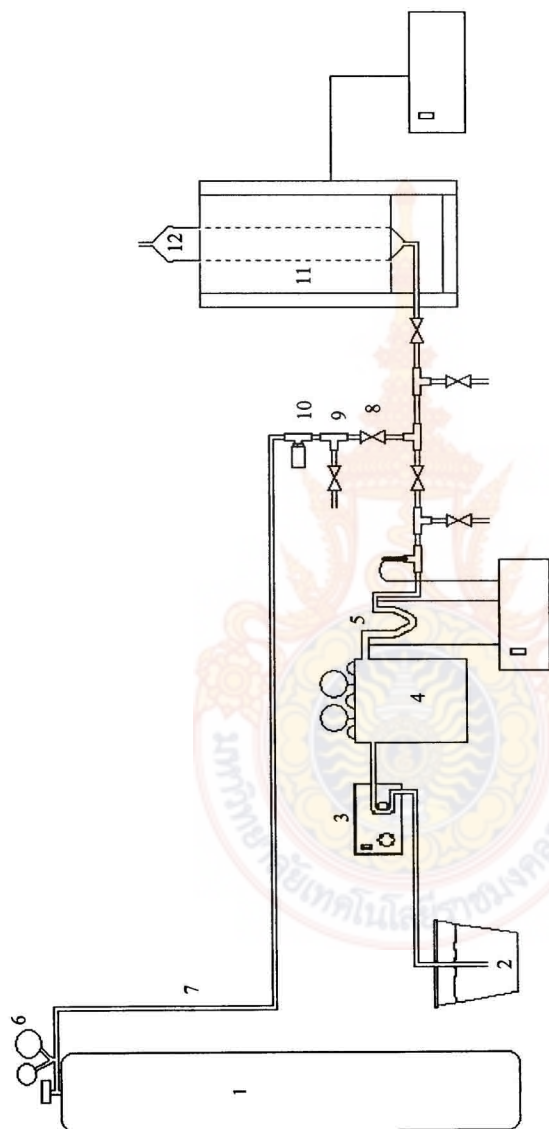
900°C



รูปที่ 3.4 Bubble flow meter

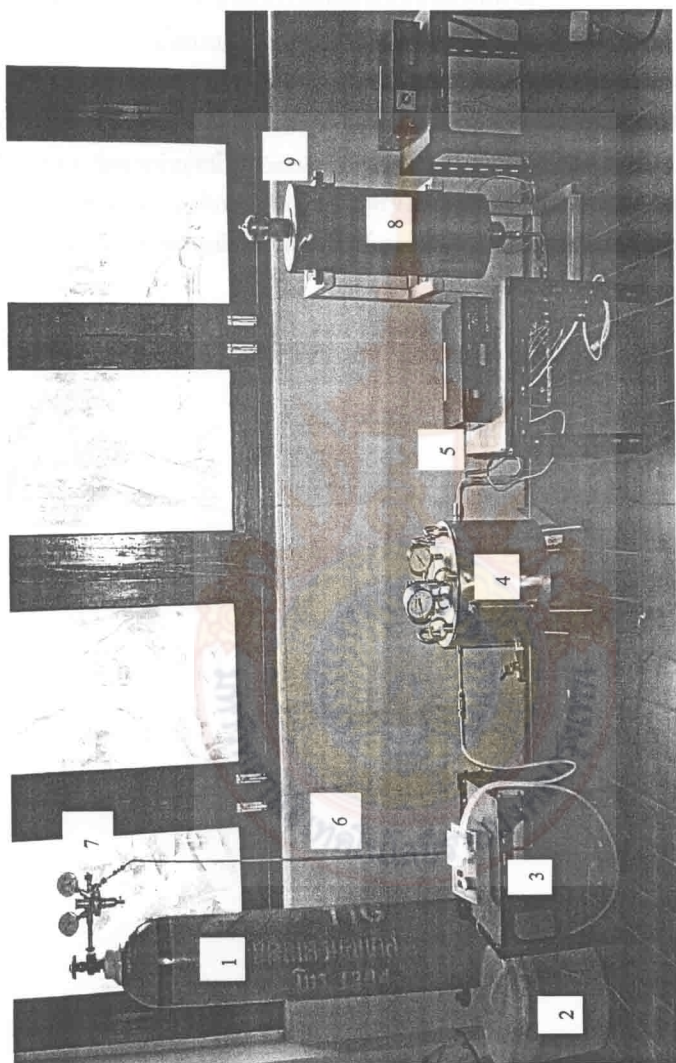


รูปที่ 3.5 ลักษณะถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟโดยการกระตุ้นด้วยฟลูอิดเซชันไอน้ำ



รูปที่ 3.6 ส่วนประกอบของชุดทดลองฟลูอิดเซชันไอน้ำ

- 1) แก๊สไนโตรเจน 2) ถังน้ำ 3) ปั๊มน้ำ 4) หม้อไอน้ำ 5) ฮีตเตอร์ 6) รีจูลเลเตอร์ 7) ท่อสเตนเลสยาว 6 เมตร ขนาด $\varnothing 1/4$ นิ้ว 8) Ball valve ขนาด $\varnothing 1/4$ นิ้ว 9) Tee way ขนาด $\varnothing 1/4$ นิ้ว 10) Metering valve ขนาด $\varnothing 1/4$ นิ้ว 11) เตาเผา 12) คอนเทนเนอร์ตัวอย่าง



รูปที่ 3.7 ชุดทดลองฟลูอิดเซชันไฮดรอลิก

- 1) แท็งก์ไฮดรอลิก 2) ท่อ 3) วาล์ว 4) หัววัดแรงดัน 5) วาล์วโซลินอยด์ 6) รีเลย์ 7) วาล์ว 8) ชุดแปลงสัญญาณ 9) คอมพิวเตอร์

3.3 วิธีการทดสอบสมบัติด้านกัมมันต์

3.3.1 วิเคราะห์ข้อมูลเชิงกายภาพของอานกัมมันต์ที่ผลิตได้

โดยเครื่อง Gas sorption analyzer ยี่ห้อ Quantachrom รุ่น Autosorb-1C ที่ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าคุณทหารลาดกระบัง

3.3.2 วิเคราะห์โครงสร้างของอานกัมมันต์ที่ผลิตได้

โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM-6400 ที่ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.3.3 วิเคราะห์หมู่หน้าที่ (Functional groups) ของอานกัมมันต์ที่ผลิตได้

โดยเครื่องฟูเรียร์ทรานฟอร์ม อินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (Fourier transform infrared, FT-IR) รุ่น 1670x ที่ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

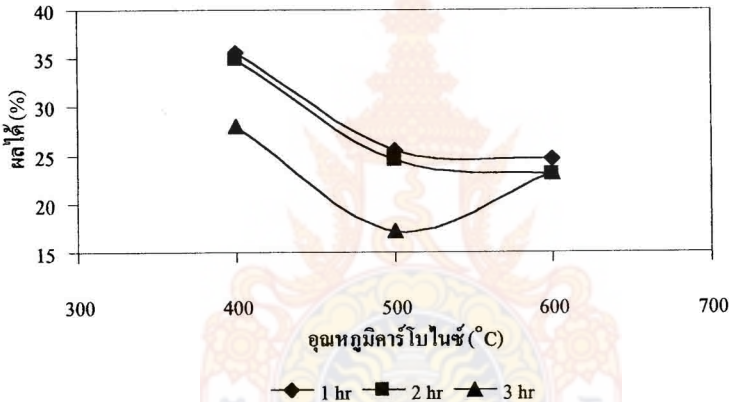


บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผล

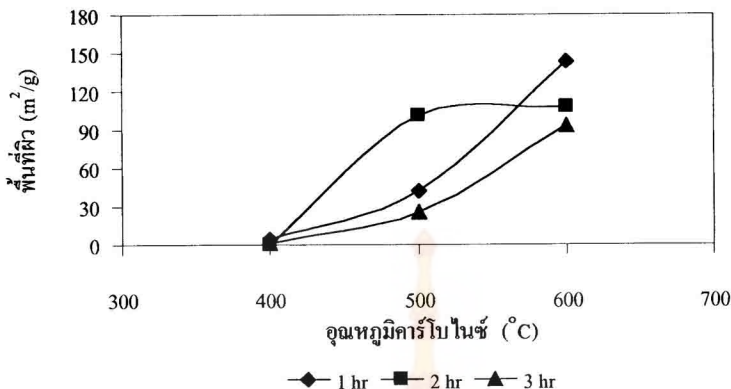
4.1 อิทธิพลของอุณหภูมิการโม่ไนซ์ที่มีต่อผลได้ และพื้นที่ผิวของถ่านกากาแฟ

จากการทดลองผลิตถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟโดยมีขั้นตอนแรก คือ การคาร์โบไนซ์ที่อุณหภูมิ 400, 500 และ 600°C เป็นเวลา 1, 2 และ 3 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำถ่านกากาแฟที่ผ่านการคาร์โบไนซ์มาทดสอบสมบัติของถ่านเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการกระตุ้น สามารถแสดงผลได้ดังนี้



รูปที่ 4.1 อิทธิพลของอุณหภูมิที่มีต่อผลได้ของถ่านกากาแฟที่เวลาต่างๆ

จากการทดลองคาร์โบไนซ์กากกาแฟที่อุณหภูมิ 400, 500 และ 600°C เป็นเวลา 1, 2 และ 3 ชั่วโมง ผลการทดลองดังแสดงดังรูปที่ 4.1 พบว่า เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นผลได้ของถ่านกากาแฟที่ผ่านการคาร์โบไนซ์แล้วมีแนวโน้มลดลง เช่น การคาร์โบไนซ์ที่อุณหภูมิ 400, 500 และ 600°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ผลได้ของถ่าน คือ 35.67, 25.51 และ 24.65% ตามลำดับ สำหรับที่อุณหภูมิและเวลาอื่นๆ ก็เป็นเช่นเดียวกันนี้ ยกเว้นที่การคาร์โบไนซ์ 600°C เวลา 3 ชั่วโมง เท่านั้นที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นจะเห็นได้ว่า อุณหภูมิและเวลาที่เพิ่มมีผลต่อการลดลงของปริมาณถ่านกากาแฟ



รูปที่ 4.2 อิทธิพลของอุณหภูมิที่มีต่อพื้นที่ผิวของถ่านากากาแฟที่เวลาต่างๆ

จากการทดลองคาร์บอนไนซ์จะได้ถ่านากากาแฟที่สภาวะต่างๆ ซึ่งถ่านากากาแฟที่ได้ทดสอบสมบัติทางกายภาพเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการนำไปผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ จากผลการทดสอบ ดังรูปที่ 4.2 จะเห็นได้ว่าพื้นที่ผิวของถ่านากากาแฟมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เช่น อุณหภูมิคาร์บอนไนซ์ 400, 500 และ 600°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จะมีพื้นที่ผิวของถ่านากากาแฟเท่ากับ 5, 43 และ 143 m²/g ตามลำดับ และที่อุณหภูมิ และเวลาการกระตุ้นอื่นก็เป็นเช่นเดียวกันนี้ ดังนั้น จะเห็นได้ว่า อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นมีผลต่อการเพิ่มขึ้นของพื้นที่ผิวถ่านากากาแฟ

จากรูปที่ 4.1-4.2 สรุปได้ว่าสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการกระตุ้นด้วยไอน้ำ คือ ที่อุณหภูมิคาร์บอนไนซ์ 600°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ซึ่งมีผลได้เท่ากับ 24.65% เนื่องจากพื้นที่ผิวของถ่านากากาแฟที่ได้มีค่าสูงสุดเท่ากับ 143 m²/g

4.2 ศึกษาผลของความเร็วต่ำสุด ($U_{\min}$) และความเร็วสูงสุด (U) ในการเกิดฟลูอิดไอเซชันในการผลิต ถ่านกัมมันต์

จากผลการทดลองผลิตถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟโดยการกระตุ้นด้วยไอน้ำ จะใช้ถ่านที่ผ่านการคาร์บอนไนซ์ที่อุณหภูมิ 600°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และมีขนาด 971 μm (ภาคผนวก ก.) โดยใช้อัตราการไหลของไอน้ำที่ 0.012 g/min เพื่อนำไปหาความเร็วของไอน้ำที่จะใช้คือ 0.62 m/s (ภาคผนวก ก.) ซึ่งความเร็วของไอน้ำที่ใช้นี้จะอยู่ในช่วงของการเกิดฟลูอิดไอเซชันของอุณหภูมิที่ใช้กระตุ้นคือ 700, 800 และ 900°C นอกจากใช้ความเร็วของไอน้ำแล้วยังใช้แก๊สไนโตรเจนช่วยในการเกิดฟลูอิดไอเซชันด้วยโดยใช้ที่อัตราการไหลที่ 0.57 L/min ทั้งนี้ถ้าความเร็วของไอน้ำที่ใช้มีค่าน้อยกว่าความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไอเซชัน จะมีผลทำให้ภายในคอลัมน์ไม่เกิดปรากฏการณ์ฟลูอิดไอเซชันของถ่าน หรือถ้าความเร็วของ

ไอน้ำมีค่ามากกว่าค่าความเร็วสูงสุดจะมีการสูญเสียของผลิตภัณฑ์ได้เช่นกัน ดังนั้นจึงมีการคำนวณความเร็วต่ำสุดและความเร็วสูงสุดในการเกิดฟลูอิดเซชันก่อนทำการทดลองกระตุ้นและผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ความเร็วต่ำสุด (U_{mf}) และความเร็วสูงสุด (U_c) ในการเกิดฟลูอิดเซชัน

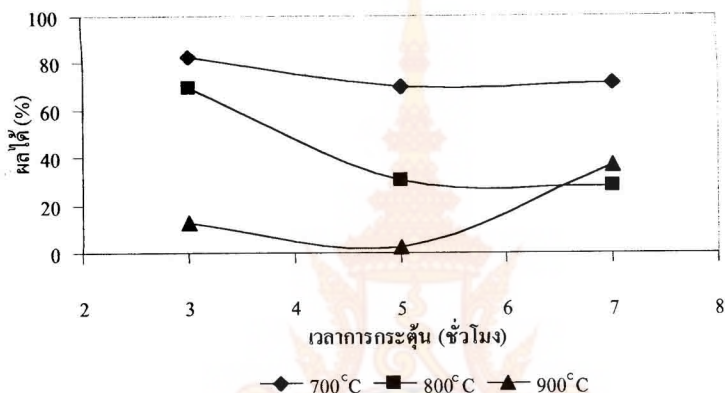
อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)	U_{mf} (m/s)	U_c (m/s)
700	0.16	1.83
800	0.14	1.69
900	0.13	1.52

จากผลในตารางที่ 4.1 แสดงให้เห็นว่าความเร็วของไอน้ำที่ใช้ในการกระตุ้นอยู่ระหว่างความเร็วต่ำและความเร็วสูงสุดของการเกิดฟลูอิดเซชัน จึงสามารถใช้ความเร็วของไอน้ำนี้ในการทดลองผลิตภัณฑ์น้ำมันได้ และทำให้เกิดปรากฏการณ์ฟลูอิดเซชันภายในคอลัมน์ด้วย

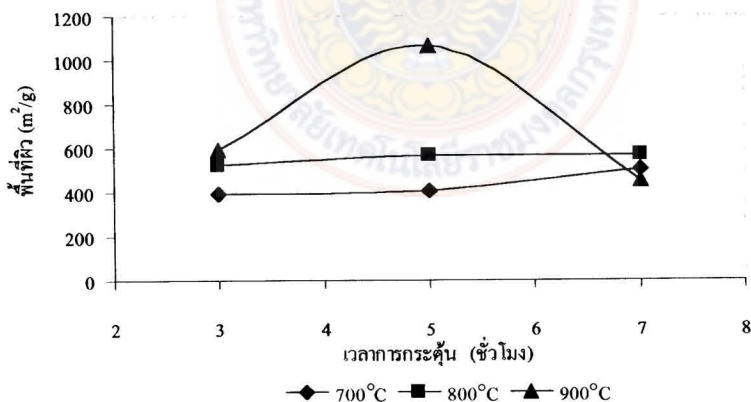
4.3 อิทธิพลของเวลาการกระตุ้นที่มีต่อผลได้ และพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์

จากผลการทดลองผลิตภัณฑ์น้ำมันจากกากกาแฟโดยการกระตุ้นด้วยไอน้ำจะใช้ถ่านที่คาร์บอนไนซ์ที่อุณหภูมิ 600°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง มีขนาด $971\ \mu\text{m}$ และความเร็วของไอน้ำที่ใช้คือ $0.62\ \text{m/s}$ ซึ่งความเร็วของไอน้ำที่ใช้นี้จะอยู่ในช่วงของการเกิดฟลูอิดเซชัน โดยที่อุณหภูมิกระตุ้นคือ 700 , 800 และ 900°C เป็นเวลา 3, 5 และ 7 ชั่วโมง ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.3-4.4 พบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ผลได้ของถ่านกัมมันต์ที่ได้มีแนวโน้มลดลง ในทางกลับกันพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์กลับมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นที่เวลา 3 ชั่วโมง อุณหภูมิกระตุ้น 700°C ผลได้ของถ่านกัมมันต์เท่ากับ 82.57% และพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์เท่ากับ $396\ \text{m}^2/\text{g}$ อุณหภูมิกระตุ้น 800°C ผลได้ของถ่านกัมมันต์เท่ากับ 69.65% และพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์เท่ากับ $521\ \text{m}^2/\text{g}$ อุณหภูมิกระตุ้น 900°C ผลได้ของถ่านกัมมันต์เท่ากับ 12.30% และพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์เท่ากับ $596\ \text{m}^2/\text{g}$ จะเห็นว่าการใช้อุณหภูมิที่สูงขึ้นมีผลต่อปริมาณพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์เนื่องจาก อุณหภูมิอาจไปทำลายพันธะ หรือไปลดสารระเหยที่มีโมเลกุลขนาดเล็กออกระหว่างการกระตุ้นจึงทำให้ปริมาณพื้นที่ผิวสูงขึ้น สำหรับ ที่เวลา 5 ชั่วโมงอุณหภูมิกระตุ้น 700°C ผลได้ของถ่านกัมมันต์เท่ากับ 70.22% และพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์เท่ากับ $405\ \text{m}^2/\text{g}$ อุณหภูมิกระตุ้น 800°C ผลได้ของถ่านกัมมันต์เท่ากับ 30.30% และพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์เท่ากับ $566\ \text{m}^2/\text{g}$ อุณหภูมิกระตุ้น 900°C ผลได้ของถ่านกัมมันต์เท่ากับ 2.64% และพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์เท่ากับ $1,067\ \text{m}^2/\text{g}$ จะเห็นว่าผลที่ได้มีแนวโน้มเช่นเดียวกับที่เวลา 3 ชั่วโมง แต่สำหรับที่เวลา 7 ชั่วโมง อุณหภูมิกระตุ้น 700°C ผลได้ของถ่านกัมมันต์เท่ากับ 71.60% และพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์เท่ากับ $505\ \text{m}^2/\text{g}$ อุณหภูมิกระตุ้น 800°C ผลได้ของถ่านกัมมันต์เท่ากับ 28.26% และพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์เท่ากับ $570\ \text{m}^2/\text{g}$ ยกเว้นที่อุณหภูมิ

กระตุ้น 900°C ผลได้ของถ่านกัมมันต์เท่ากับ 37.06% และพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์เท่ากับ $451 \text{ m}^2/\text{g}$ จะเห็นว่าแนวโน้มของถ่านกัมมันต์ที่เวลา 7 ชั่วโมง อุณหภูมิ 900°C นั้นมีผลได้มากขึ้นและมีพื้นที่ผิวลดลง เมื่อเทียบกับที่อุณหภูมิ 700 และ 800°C เนื่องจากจากอุณหภูมิที่ใช้ในการกระตุ้นมีการสะสมสูงกว่า 1000°C ทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะถูกควบคุมด้วยความต้านทานการแพร่ (diffusion resistance controlled) ซึ่งจะตอมของคาร์บอนที่อยู่ชั้นนอกๆ จำนวนมากจะถูกเผาไหม้ ทำให้ขนาดของอนุภาคเล็กลง และความพรุนน้อยลง [5]



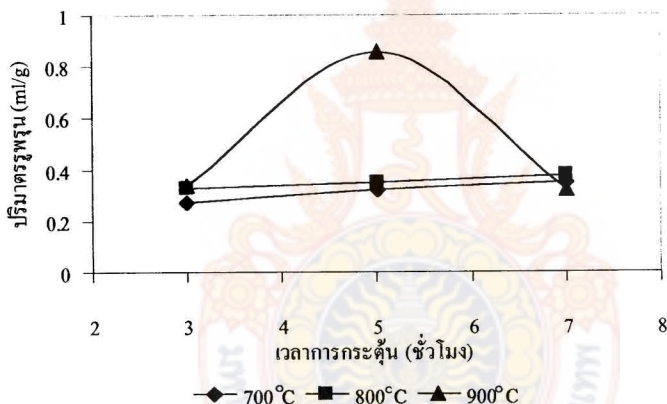
รูปที่ 4.3 อิทธิพลของเวลาการกระตุ้นที่มีต่อผลได้ของถ่านกัมมันต์ที่อุณหภูมิต่างๆ



รูปที่ 4.4 อิทธิพลของเวลาการกระตุ้นที่มีผลต่อพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ที่อุณหภูมิต่างๆ

4.4 อิทธิพลของเวลาการกระตุ้นที่มีต่อปริมาณรุกรานของถ่านกัมมันต์

จากผลการทดลองผลิตถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟโดยการกระตุ้นด้วยไอน้ำ ที่อุณหภูมิกระตุ้น 700, 800 และ 900°C เป็นเวลา 3, 5 และ 7 ชั่วโมง ผลการทดลองแสดงได้ดังรูปที่ 4.5 พบว่า เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ปริมาตรรุกรานของถ่านกัมมันต์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เช่น ที่เวลา 3 ชั่วโมง อุณหภูมิกระตุ้น 700°C ปริมาตรรุกรานของถ่านกัมมันต์เท่ากับ 0.27 ml/g อุณหภูมิกระตุ้น 800°C ปริมาตรรุกรานของถ่านกัมมันต์เท่ากับ 0.33 ml/g อุณหภูมิกระตุ้น 900°C ปริมาตรรุกรานของถ่านกัมมันต์เท่ากับ 0.34 ml/g สำหรับเวลาที่ใช้ในการกระตุ้น 5 และ 7 ชั่วโมง จะได้แนวโน้มเช่นเดียวกับการกระตุ้น 3 ชั่วโมง ยกเว้นที่เวลา 7 ชั่วโมง อุณหภูมิ 900°C จะมีปริมาตรรุกรานลดลงเมื่อเทียบกับอุณหภูมิอื่นที่เวลาเดียวกันทั้งเป็นผลมาจากการสะสมของความร้อนในการกระตุ้นมากเกินไปเช่นเดียวกับพื้นที่ผิว

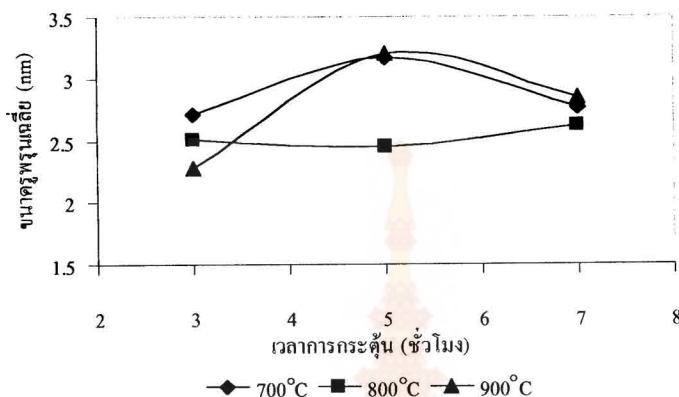


รูปที่ 4.5 อิทธิพลของเวลาการกระตุ้นที่มีต่อปริมาณรุกรานของถ่านกัมมันต์ที่อุณหภูมิต่างๆ

4.5 อิทธิพลของเวลาการกระตุ้นที่มีต่อขนาดรูพรุนเฉลี่ยของถ่านกัมมันต์

จากการทดลองผลิตถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟโดยการกระตุ้นด้วยไอน้ำ ที่อุณหภูมิกระตุ้น 700, 800 และ 900°C เป็นเวลา 3, 5 และ 7 ชั่วโมง ผลการทดลองแสดงได้ดังรูปที่ 4.6 พบว่า ความสัมพันธ์ของขนาดรูพรุนเฉลี่ยกับเวลาการกระตุ้นมีแนวโน้มที่ไม่ชัดเจน อย่างไรก็ตามก็ศึกษาขนาดรูพรุนโดยส่วนใหญ่แล้วเป็นรูพรุนขนาดกลาง (2-50 nm) [6] เช่น ที่เวลา 3 ชั่วโมง อุณหภูมิการกระตุ้น 700°C มีขนาดรูพรุนเท่ากับ 2.71 nm อุณหภูมิการกระตุ้น 800°C มีขนาดรูพรุน 2.51 nm อุณหภูมิการกระตุ้น 900°C มีขนาดรูพรุน 2.28 nm สำหรับเวลาที่ใช้ในการกระตุ้น 5 และ 7 ชั่วโมง จะได้แนวโน้มเช่นเดียวกับการกระตุ้นที่ใช้ใน

การกระตุ้น 3 ชั่วโมง จากผลการกระตุ้นด้วยไอน้ำแล้วทำให้ถ่านกัมมันต์ที่ได้มีรูพรุนขนาดกลางซึ่งสามารถบ่งบอกได้ว่าถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการผลิตนี้สามารถนำไปดูดซับสารที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่ได้



รูปที่ 4.6 อิทธิพลของเวลาการกระตุ้นที่มีต่อขนาดรูพรุนเฉลี่ยของถ่านกัมมันต์ที่อุณหภูมิต่างๆ

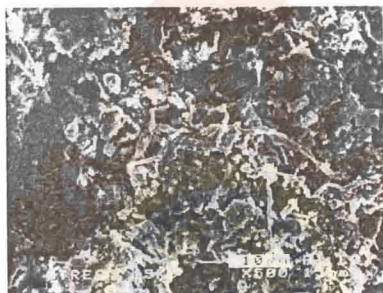
จากการทดลองผลิตถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟโดยการกระตุ้นด้วยไอน้ำ ที่อุณหภูมิกระตุ้น 700, 800 และ 900°C เป็นเวลา 3, 5 และ 7 ชั่วโมง สรุปได้ว่า เมื่ออุณหภูมิกระตุ้นเพิ่มขึ้น ผลได้ของถ่านกัมมันต์มีแนวโน้มลดลง ในทางกลับกันพื้นที่ผิวกลับมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ปริมาตรรูพรุนเพิ่มขึ้น ส่วนขนาดรูพรุนนั้นมีแนวโน้มไม่ชัดเจน จากแนวโน้มที่ได้ี้ อาจเนื่องมาจากการกระตุ้นที่อุณหภูมิสูงจะทำให้มีการเปลี่ยนแปลงระหว่างการเผา กล่าวคือ สารที่อยู่ภายในรูพรุนของถ่านกากกาแฟ เช่น น้ำ มันทิน ไออน อะตอมคาร์บอน เป็นต้น ซึ่งสารเหล่านี้สามารถหลุดออกไปได้ง่ายกว่าที่อุณหภูมิกระตุ้นต่ำ ส่งผลให้มีช่องว่างหรือรูพรุนเกิดขึ้นภายในโครงสร้างของถ่านกัมมันต์มากกว่าที่อุณหภูมิกระตุ้นต่ำ ซึ่งมีผลทำให้ผลได้ของถ่านกัมมันต์ที่ได้ลดลง และเมื่อนำถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้มาวิเคราะห์พื้นที่ผิว พบว่า ถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟที่ผลิตได้ที่อุณหภูมิสูงจะมีพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนสูงขึ้น ยกเว้นถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นด้วยอุณหภูมิ 900°C ที่เวลา 7 ชั่วโมง กลับมีพื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุนลดลง ซึ่งผลดังกล่าวนี้ก็มีความสัมพันธ์กับผลได้ที่เกิดขึ้น คือผลได้ของถ่านกัมมันต์ที่สภาวะดังกล่าวที่สูงขึ้นทั้งนี้เนื่องมาจากอุณหภูมิที่ใช้ในการกระตุ้นมีการสะสมสูงกว่า 1000°C ทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะถูกควบคุมด้วยความต้านทานการแพร่ (diffusion resistance controlled) ซึ่งจะยอมของคาร์บอนที่อยู่ชั้นนอกๆ จำนวนมากจะถูกเผาไหม้ ทำให้ขนาดของอนุภาคเล็กลง และความพรุนน้อยลง [5] สำหรับการเปลี่ยนแปลงขนาดรูพรุนเฉลี่ยจะมีแนวโน้มไม่ชัดเจน แต่จากช่วงขนาดรูพรุนที่ได้พบว่าเป็นขนาดรูพรุนอยู่ในช่วงขนาดเมโซ

จากรูปที่ 4.3-4.4 สรุปได้ว่าสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการผลิตถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟโดยการกระตุ้นด้วยไอน้ำ คือ ถ่านกัมมันต์ที่อุณหภูมิกระตุ้น 700°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ผลได้ของถ่านกัมมันต์สูงสุดเท่ากับ 82.57% แต่ถ้าพิจารณาในด้านพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ พบว่าถ่านกัมมันต์ที่อุณหภูมิกระตุ้น 900°C เป็นเวลา 5 ชั่วโมง พื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์สูงสุดเท่ากับ $1,067 \text{ m}^2/\text{g}$

4.6 การศึกษาโครงสร้างของกากกาแฟ ถ่าน และถ่านกัมมันต์โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน

แบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM)

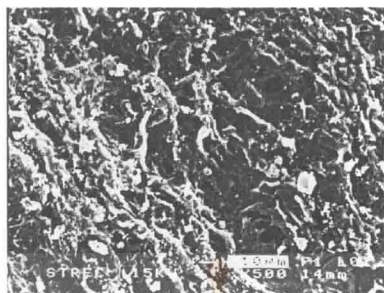
จากการศึกษาโครงสร้างรูพรุน โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของกากกาแฟ ถ่าน และถ่านกัมมันต์ ดังแสดงในรูป 4.7-4.8 โดยเลือกวิเคราะห์ถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นด้วยความเร็วของไอน้ำเท่ากับ 0.62 m/s อุณหภูมิ 900°C เวลา 5 ชั่วโมง ซึ่งเป็นถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวสูงสุดคือ $1,067 \text{ m}^2/\text{g}$ เพื่อพิจารณาการเปลี่ยนทางโครงสร้างตั้งแต่กากกาแฟเมื่อผ่านขั้นตอนการคาร์บอนไนซ์และการกระตุ้น



(ก) กากกาแฟ

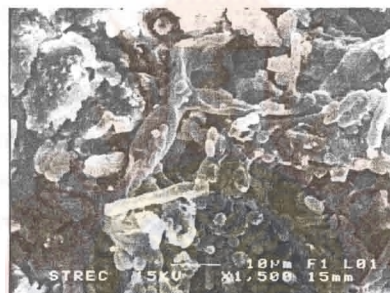


(ข) ถ่านที่อุณหภูมิ 600°C เวลา 1 ชั่วโมง

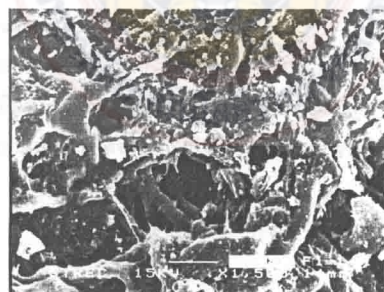


(ค) ถ่านกัมมันต์ที่อุณหภูมิ 900°C เวลา 5 ชั่วโมง

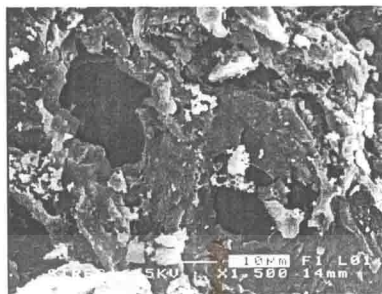
รูปที่ 4.7 โครงสร้างของถากกาแฟ ถ่าน และถ่านกัมมันต์ ที่กำลังขยาย 500 เท่า



(ก) ถากกาแฟ



(ข) ถ่านที่อุณหภูมิ 600°C เวลา 1 ชั่วโมง



(ค) ถ่านกัมมันต์ที่อุณหภูมิ 900°C เวลา 5 ชั่วโมง

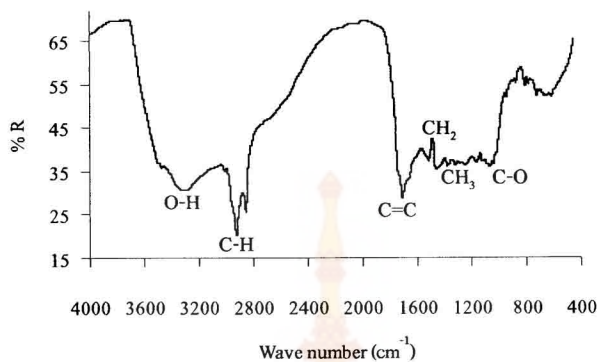
รูปที่ 4.8 โครงสร้างของกากกาแฟ ถ่าน และถ่านกัมมันต์ ที่กำลังขยาย 1,500 เท่า

จากรูปที่ 4.7-4.8 พบว่า สภาพพื้นผิวของกากกาแฟมีโครงสร้างของรูพรุนน้อย กากกาแฟที่ผ่านการคาร์โบไนซ์สภาพพื้นผิวจะมีสารจำพวกน้ำมันดินมาเกาะบนพื้นที่ผิว มีการเกิดรูพรุนเพิ่มขึ้นมากกว่าสภาพพื้นผิวของกากกาแฟ เมื่อผ่านการกระตุ้น พบว่าสภาพพื้นผิวมีการเปลี่ยนแปลงมากมีความขรุขระมากขึ้น มีการหดตัวของโครงสร้างมากขึ้นเนื่องจากสภาวะที่ยังคงเหลืออยู่สลายไปเพราะอุณหภูมิสูงขึ้น และปฏิกิริยาของไอน้ำกับน้ำมันดินและอะตอมคาร์บอนบางอะตอมในผลึกของถ่านหลุดออกไป ทำให้โครงสร้างภายในมีรูพรุนมากขึ้นด้วย ดังนั้นจะเห็นได้ว่าอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการกระตุ้นนั้นมีผลต่อโครงสร้างของรูพรุนของถ่านกัมมันต์รวมถึงปริมาณการดูดซับที่มากขึ้นจากโครงสร้างของรูพรุนที่มากขึ้นด้วย

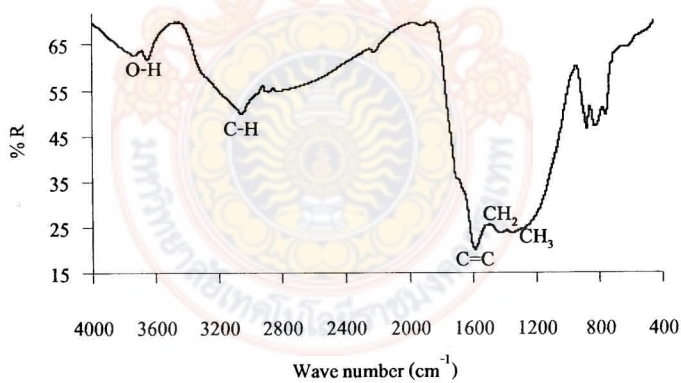
4.7 การวิเคราะห์หมู่หน้าที่ (functional groups) โดยเครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์ม อินฟราเรดสเปก

โทรมิเตอร์ (Fourier transform infrared, FT-IR)

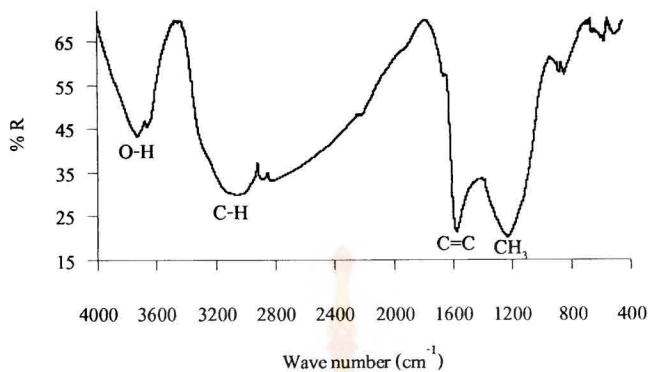
การวิเคราะห์หมู่หน้าที่ชนิดต่างๆ ของถ่านกัมมันต์ ในที่นี้เลือกศึกษาการเปลี่ยนแปลง หมู่หน้าที่โดยใช้ ฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์ม อินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์ (Fourier Transform Infrared Spectrometer, FT-IR) ในกากกาแฟ ถ่าน และถ่านกัมมันต์ ที่ได้จากการกระตุ้นที่อุณหภูมิ 900°C เวลา 5 ชั่วโมง ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.9



(ก) สเปกตรัมของกากกาแฟ



(ข) สเปกตรัมของถ่านที่อุณหภูมิ 600°C เวลา 1 ชั่วโมง



(ค) สเปกตรัมของถ่านกัมมันต์ที่อุณหภูมิ 900°C เวลา 5 ชั่วโมง

รูปที่ 4.9 สเปกตรัมของกากกาแฟ ถ่าน และถ่านกัมมันต์

การเปลี่ยนแปลงของหมู่หน้าที่ผลกากกาแฟเมื่อผ่านการคาร์ไบไนซ์ และการกระตุ้น สามารถอธิบายได้จากการส่องผ่านของรังสีอินฟราเรดโดยเครื่อง FT-IR จากรูปที่ 4.9 สามารถวิเคราะห์หมู่หน้าที่ของกากกาแฟ ถ่าน และถ่านกัมมันต์ พบว่าปรากฏหมู่หน้าที่ต่างๆ ดังนี้

ตารางที่ 4.2 หมู่หน้าที่ (Functional groups) บนผิวกากกาแฟ ถ่าน และถ่านกัมมันต์ที่สภาวะ
การกระตุ้นต่างๆ

ตัว อย่าง	อุณหภูมิ (°C)	เวลาการ กระตุ้น (hr)	หมู่หน้าที่ (Functional groups)					
			O-H Phenol	C-H alkane	C=C aromatic	C-H CH ₂ - methylene groups	C-H CH ₃ - methyl groups	C-O alcohol
1	กากกาแฟ		✓	✓	✓	✓	✓	✓
2	600	1	✓	✓	✓	✓	✓	-
3		3	✓	✓	✓	✓	✓	-
4	700	5	✓	✓	✓	✓	✓	-
5		7	✓	✓	✓	-	✓	-
6		3	✓	✓	✓	✓	✓	-
7	800	5	✓	✓	✓	-	✓	-
8		7	✓	✓	✓	-	✓	-
9		3	✓	✓	✓	✓	✓	-
10	900	5	✓	✓	✓	-	✓	-
11		7	✓	✓	✓	✓	✓	-

จากตารางที่ 4.2 พบว่า โดยปกติแล้วกากกาแฟจะพบหมู่หน้าที่ค่อนข้างมาก หลังจากนำไปคาร์บอนไจน์แล้วจะมีหมู่หน้าที่ บางหมู่หายไป หรือถูกทำลายไป ได้แก่ แอลกอฮอล์ (C-O) ส่วนที่เหลืออยู่ ได้แก่ ฟีนอล (O-H), แอลเคน (C-H), อะโรมาติก (C=C), Methylene groups (CH₂) และ Methyl groups (CH₃) ส่วนที่ถูกทำลายนั้นเนื่องมาจากความร้อนที่กากกาแฟได้รับจึงทำให้พันธะที่ไม่แข็งแรงหายไป

เมื่อมาพิจารณาหลังจากนำถ่านกากกาแฟที่ได้ไปกระตุ้นด้วยไอน้ำที่สภาวะต่างๆ แล้ว พบว่า เกิดปฏิกิริยาระหว่างไอน้ำกับคาร์บอน สารระเหย และน้ำมันดินที่เหลืออยู่ในโครงสร้าง ปฏิกิริยาเหล่านี้จะไปทำลายพันธะที่เป็นสาขาของโครงสร้างที่ไม่แข็งแรงขององค์ประกอบของถ่านกากกาแฟ ทำให้ได้ถ่านกัมมันต์ที่มีการเปลี่ยนแปลงหมู่หน้าที่ลดลงคือ Methylene groups (CH₂) หรืออีกสาเหตุหนึ่งของการลดลงของหมู่หน้าที่ในถ่านกัมมันต์ คือ เนื่องมาจากความร้อนที่มีการสะสมเป็นเวลานานภายในเตาปฏิกรณ์ไปทำลายพันธะของหมู่หน้าที่ดังกล่าวได้เช่นกัน จะเห็นได้จากเมื่อเตาเผามีประสิทธิภาพลดลง ดังตัวอย่างสุดท้ายที่กระตุ้นด้วยอุณหภูมิ 900°C เป็นเวลา 7 ชั่วโมง มีผลได้เพิ่มขึ้น แสดงว่าการสะสมของความร้อนภายในเตาปฏิกรณ์ลดลงจึงไม่สามารถลดผลผลิตให้ได้ทำให้มีผลต่อการทำลายพันธะและโครงสร้างของ

ถ่านกัมมันต์ด้วยจึงทำให้หมู่ Methylene groups (CH_2) ควรจะหายไปในสภาวะนี้เนื่องจากมีความร้อนสูง และใช้เวลานานมากที่สุด แต่กลับมีหมู่ Methylene groups (CH_2) นี้ปรากฏขึ้นมาอีกครั้งหลังจากหายไป ในสภาวะก่อนหน้านี้ ดังนั้นจะเห็นได้ว่า นอกจากปฏิกิริยาของคาร์บอนกับน้ำที่เกิดขึ้นแล้วทำให้พันธะหายไปแล้ว ยังมีผลของอุณหภูมิภายในเตาปฏิกิริยด้วย



สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

จากการทดลองผลิตถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟโดยวิธีฟลูอิดเซชันด้วยไอน้ำ โดยการแปรผันตัวแปรในการผลิตอันได้แก่ อุณหภูมิคาร์บอนไนซ์ เวลาคาร์บอนไนซ์ อุณหภูมิกระตุ้น และเวลากระตุ้น ตัวอย่างที่ได้ทุกสภาวะถูกนำไปวิเคราะห์สมบัติพื้นฐาน เช่น ผลได้ และพื้นที่ผิว นอกจากนี้ยังนำไปวิเคราะห์สมบัติทางเคมีบนพื้นที่ผิวของตัวอย่าง ซึ่งสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

5.1 ผลของอุณหภูมิและเวลาคาร์บอนไนซ์ที่มีต่อผลได้ และพื้นที่ผิวถ่านกากกาแฟ

จากการทดลองในขั้นตอนการนำกากกาแฟมาคาร์บอนไนซ์จากนั้นนำมาวิเคราะห์ผลได้และพื้นที่ผิว พบว่าถ่านกากกาแฟที่อุณหภูมิคาร์บอนไนซ์ 600°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ซึ่งมีผลได้เท่ากับ 24.65% ให้ค่าพื้นที่ผิวสูงสุดเท่ากับ $143 \text{ m}^2/\text{g}$ และสภาวะนี้เป็นสภาวะที่เหมาะสมสำหรับนำไปกระตุ้นเพื่อเป็นถ่านกัมมันต์ต่อไป

5.2 ผลของอุณหภูมิและเวลากระตุ้นที่มีต่อผลได้ และพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์

จากการทดลองการผลิตถ่านกัมมันต์จากนั้นนำมาวิเคราะห์ผลได้และพื้นที่ผิว พบว่าถ่านกัมมันต์ที่อุณหภูมิกระตุ้น 700°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จะให้ค่าเปอร์เซ็นต์ผลผลิตของถ่านกัมมันต์สูงสุดเท่ากับ 82.57% และถ่านกัมมันต์ที่อุณหภูมิกระตุ้น 900°C เป็นเวลา 5 ชั่วโมง จะให้ค่าพื้นที่ผิวสูงสุดเท่ากับ $1,067 \text{ m}^2/\text{g}$ ทั้งนี้ เนื่องมาจากการกระตุ้นที่อุณหภูมิสูงจะทำให้มีการเปลี่ยนแปลงระหว่างการเผา กล่าวคือ สารที่อยู่ภายในรูพรุนของถ่านกากกาแฟ เช่น น้ำมันดิน ไขมัน ลิกนิน และเซลลูโลส สามารถหลุดออกไปได้ง่ายกว่าที่อุณหภูมิกระตุ้นต่ำ ส่งผลให้มีช่องว่างหรือรูพรุนเกิดขึ้นภายในโครงสร้างของถ่านกัมมันต์มากกว่าที่อุณหภูมิกระตุ้นต่ำดังนั้นจะเห็นได้ว่าเมื่อเวลาและอุณหภูมิเพิ่มขึ้นพื้นที่ผิวจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น แต่ผลได้มีแนวโน้มลดลง

5.3 ผลการวิเคราะห์หมู่หน้าที่บนผิวถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้ทุกสภาวะถูกนำมาวิเคราะห์หมู่หน้าที่บนผิวโดยใช้ ฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรด สเปกโตรมิเตอร์ (Fourier Transform Infrared Spectrometer, FT-IR) พบว่าหลังจากนำกากกาแฟไปคาร์บอนไนซ์แล้วจะมีหมู่หน้าที่หายไป ได้แก่ แอลกอฮอล์ (C-O) ที่เหลืออยู่ได้แก่ ฟีนอล (O-H), แอลเคน (C-H), อะโรมาติก (C=C), Methylene groups (CH_2) และ Methyl groups (CH_3) และหลังจากนำถ่านกากกาแฟไปกระตุ้นด้วยไอน้ำ พบว่ามีหมู่หน้าที่ลดลงคือ Methylene groups (CH_2) ทำให้

เหลือหมู่น้ำที่ในด่างกันมันต์ คือ ฟีนอล (O-H), แอลเคน (C-H), อะโรมาติก (C=C), Methylene groups (CH_2) ทั้งนี้เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาระหว่างไอน้ำกับคาร์บอน สารระเหย และน้ำมันดินที่เหลืออยู่ในโครงสร้าง ปฏิกิริยาเหล่านี้จะไปทำลายพันธะที่เป็นสาขาของโครงสร้างที่ไม่แข็งแรงขององค์ประกอบกากกาแฟและด่างกากกาแฟจึงทำให้หมู่น้ำที่ดังกล่าวลดลง และอีกสาเหตุหนึ่งคือการสะสมของความร้อนไปทำลายพันธะที่ไม่แข็งแรงภายในโครงสร้างของกากกาแฟและด่างกากกาแฟ

5.4 ข้อเสนอแนะ

- 5.4.1 ควรมีการศึกษาอย่างละเอียดว่าการผลิตด่างกันมันต์จากกากกาแฟโดยใช้วิธีนี้ให้ผลคุ้มค่าหรือไม่
- 5.4.2 ค้นหาแหล่งวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตด่างกันมันต์เพิ่มเติม
- 5.4.3 ควรมีการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับระหว่างด่างกันมันต์จากกากกาแฟกับด่างกันมันต์ที่ใช้ในกระบวนการอุตสาหกรรม



เอกสารอ้างอิง

1. บรรจง นวลพลึง, 2530, กาแฟพืชเศรษฐกิจระหว่างประเทศ, สำนักพิมพ์ฐานเกษตรกรรม, สหมิตรออฟเซต, หน้า 8-10.
2. ไชยยันต์ ไชยยะ, 2542, การพัฒนาออกแบบเมล็ดดูดซับเขตรามกผลผลิตจากกากกาแฟ, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
3. เบญจมาศ กระจางฉาย, ปรีชา ตุ่นชา และเอื้อมพร ของดี, 2545, การดูดซับโครเมียมด้วยถ่านกัมมันต์ในฟลูอิดเบด, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
4. พัทธวัช โสภณกิจโกศล, 2544, การผลิตถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าวเพื่อใช้ดูดซับโครเมียม (IV), วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
5. วีระพงษ์ กริขพิพรรธ และสุกัญญา ศรีสถาพร, 2532, การผลิตถ่านกัมมันต์จากถ่านกะลามะพร้าวด้วยไอน้ำโดยฟลูอิดเซชัน, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
6. คณิต วุฒินะกิจ, นัตรชัย คงเชษฐคุณกุล และภาณุณ มงคลขจรศิลป์, 2540, การดูดซับโลหะหนักโดยใช้ถ่านกัมมันต์จากกากเมล็ดกาแฟ, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
7. นิชชรี นิลนนท์, 2540, การผลิตถ่านกัมมันต์จากไม้โกงกางด้วยไอน้ำร้อนยิ่งยวดและคาร์บอนไดออกไซด์, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
8. เฉลิม ชาวปิง, 2545, การปรับปรุงพื้นที่ผิวทางเคมีของถ่านกัมมันต์โดยการออกซิเดชันเพื่อศึกษาความสามารถในการดูดซับอะนิลีน สี้อม และโลหะหนักโครเมียม, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
9. กฤติกา จารุทะวีย์ และวรรณนิภา อมาตยกุล, 2540, การผลิตถ่านกัมมันต์จากกะลาปาล์มโดยกระบวนการแตกตัวด้วยความร้อนและกระตุ้นด้วยไอน้ำ, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

10. จักริน นิธิจันทร์, 2537, การผลิตถ่านกัมมันต์ระดับขยายส่วนจากพีตโดยคาร์บอนในเซชันและการกระตุ้นด้วยไอน้ำในฟลูอิไคซ์เบด, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
11. นเรศ จันทรเทียน, วัชรศักดิ์ อุทัยบุษย์ และวิทยา เจนจรัสโชติ, 2534, การศึกษาความน่าจะเป็นในการนำเอาตาลโตนดมาทำเป็นถ่านกัมมันต์, กรุงเทพฯ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
12. รติกร อิศระเสนีย์, 2539, การผลิตถ่านกัมมันต์จากยางรถยนต์ใช้แล้วโดยการกระตุ้นด้วยไอน้ำร้อนยิ่งยวด, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
13. วราวุฒิ ประชาศิริ, 2541, การผลิตถ่านกัมมันต์จากกะลาปาล์มน้ำมันโดยการกระตุ้นด้วยพลังงานไมโครเวฟ, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
14. สุกสิทิ กิตชัย และอรนุช ขาวเมื่อน้อย, 2538, การผลิตถ่านกัมมันต์จากกะลาปาล์มน้ำมันโดยกระบวนการกระตุ้นด้วยไอน้ำร้อนยิ่งยวดในเบดนิ่ง, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
15. สุรางค์ รุกขอนันตกุล และอภิสิทธิ์ ปรีदारวรรณเลิศ, 2537, การผลิตถ่านกัมมันต์จากกะลาปาล์มน้ำมันโดยวิธีการกระตุ้นด้วยไอน้ำอิมพัลส์ยิ่งยวดในฟลูอิไคซ์เบด, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
16. สมใจ ขจรชีพพันธุ์งาม, 2545, การศึกษาการผลิตถ่านกัมมันต์จากกะลา, วารสารเพื่อการเผยแพร่ผลงานทางวิชาการ งานด้านวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี, ปีที่ 29, ฉบับที่ 2, หน้า 1.
17. อุไรวรรณ ธรรมรัตคุณ, 2523, การทำถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าวโดยการกระตุ้นด้วยไอน้ำ, งานวิจัยเพื่อบริการอุตสาหกรรม กองวิจัย กระทรวงวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม.
18. J.E.Atwater, J.R.Akse and T.-C. Wang, 2001, "Preparation of silicon-carbide-coated activated carbon using a high-temperature fluidized bed reactor", *Journal of Chemical Engineering Science*, [Electronic], Vol. 56, No. 8., pp. 2685-2693, Available : Science Direct [2006, January 15].
19. Juan F. Gonzalez, Jose M. Encinar and Canmen M. Gonzalez-Garcia, 2005, "Preparation of activated carbon from used tyres by gasification with steam and carbon dioxide", *Journal of applied surface science*, [Electronic], Available : Science Direct [2006, January 15].
20. Martin-Gullon, M.Asensio R.Font and A.Marcilla, 1999, "Steam-activated carbon from a bituminous coal in a continuous multistage fluidized bed pilot plant", *Journal of carbon*, [Electronic], Vol. 34, No. 12., pp. 1515-1520, Available : Science Direct [2006, January 15].

21. เกศินี สวางโท, ภัทรนันท์ ชัยชนะ และวสันต์ พาราทิพย์เจริญ, 2546, การพัฒนาสารดูดความชื้นสังเคราะห์ด้วยวิธีโซล-เจล, วิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
22. ประวิทย์ ดันจงนาวิน, 2540, เอกสารประกอบคำสอน 09-320-286 เคมีตะตะลิสต์, แผนกเอกสารการพิมพ์, หน้า 33-34.
23. วีระศักดิ์ อุดมกิจเดชา และคณะ, 2543, “เครื่องมือวิจัยทางวิทยาศาสตร์ : ทฤษฎีและหลักการทำงานเบื้องต้น”, โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, หน้า 289-305.
24. แม้น อมรสิทธิ์, อมร เพชรสม, 2539, หลักการและเทคนิคการวิเคราะห์เชิงเครื่องมือ, ชวนพิมพ์, หน้า 108-136.



ภาคผนวก



ภาคผนวก ก.

ตัวอย่างการคำนวณ

งานวิจัยนี้ได้ใช้หลักการฟลูอิดเซชันไอน้ำในการผลิตถ่านกัมมันต์ ดังนั้น จำเป็นต้องทราบความเร็วต่ำสุด ความเร็วสูงสุด และความเร็วของไอน้ำที่ใช้ในการทดลอง ซึ่งได้กล่าวถึงวิธีการคำนวณไว้ในบทนี้

ก.1 การคำนวณความหนาแน่นจริงของถ่าน

$$\rho_p = \frac{A}{10 - B} \quad (\text{ก.1})$$

เมื่อ ρ_p คือ ความหนาแน่นจริง (kg/m^3)

A คือ น้ำหนักถ่าน (g)

B คือ ปริมาตรที่ใช้ไปของเฮปเทน (mL)

ตัวอย่างการคำนวณความหนาแน่นจริง

ในที่นี้จะยกตัวอย่างการคำนวณของถ่านที่อุณหภูมิ 600°C 1 ชั่วโมง เนื่องจากสภาวะนี้นำไปใช้เป็นวัตถุดิบในการกระตุ้นเป็นถ่านกัมมันต์

โดยที่ น้ำหนักถ่าน = 3.10 g

ปริมาตรที่ใช้ไปของเฮปเทน = 5.35 mL

ดังนั้น

ความหนาแน่นปรากฏ = 0.67 g/mL
 $= 0.67 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$

ก.2 การคำนวณความหนาแน่นปรากฏ

$$\rho_b = \frac{A}{C} \quad (\text{ก.2})$$

เมื่อ ρ_b คือ ความหนาแน่นปรากฏ (kg/m^3)

A คือ น้ำหนักถ่าน (g)

C คือ ปริมาตรของกระบอกตวง (mL)

ตัวอย่างการคำนวณความหนาแน่นปรากฏ

ในที่นี้จะยกตัวอย่างการคำนวณของถ่านที่อุณหภูมิ 600°C 1 ชั่วโมง เนื่องจากสภาวะนี้น้ำไปใช้เป็นวัตถุดิบในการกระตุ้นเป็นถ่านกัมมันต์

โดยที่ น้ำหนักถ่าน = 3.10 g

ปริมาตรกระบอกดวง = 10 mL

ดังนั้น ความหนาแน่นปรากฏ = 0.31 g/mL

$$= 0.31 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$$

ก. 3 การหาขนาดอนุภาคเฉลี่ยเทียบกับน้ำหนัก

$$\bar{D}_w = \sum_{i=1}^n \bar{D}_{pi} \cdot X_i \quad (\text{ก.3})$$

เมื่อ $\bar{D}_w$ คือ เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยเทียบกับน้ำหนัก

$\bar{D}_{pi}$ คือ เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของอนุภาค

X_i คือ สัดส่วนมวล

ตัวอย่างการคำนวณหาขนาดเฉลี่ยเทียบกับน้ำหนัก

ในที่นี้จะคำนวณเฉพาะถ่านที่อุณหภูมิ 600°C 1 ชั่วโมง เนื่องจากสภาวะนี้น้ำไปใช้เป็นวัตถุดิบในการกระตุ้นเป็นถ่านกัมมันต์

$$\begin{aligned} \text{โดยที่ } \sum \bar{D}_{pi} X_i &= 6.068 + 555.95 + 386.47 + 12.08 + 9.17 + 1.99 + 1.92 \\ &= 971 \text{ } \mu\text{m} \end{aligned}$$

ก. 4 การคำนวณความเร็วต่ำสุด

จากสมการของเออร์กัน (Ergun) สำหรับอนุภาคของแข็งขนาดเล็ก ($D_p < 0.5 \text{ mm}$) สามารถใช้ความเร็วของไหลเพียงเล็กน้อยก็ทำให้เกิดเป็นฟลูอิดไรเซชันได้แล้ว ดังนั้นสมการที่ใช้คือ

$$U_{mf} = \frac{(\Phi_s D_p)^2 (\rho_p - \rho_g) g}{150(1 - e_{mf}) \mu} \quad (\text{ก.4})$$

โดยที่ U_{mf} คือ ความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไรเซชัน

Φ_s คือ ค่าความกลมของอนุภาค

D_p คือ ขนาดอนุภาคเฉลี่ย

e_{mf} คือ สัดส่วนช่องว่างของเบดที่ความเร็วต่ำสุดในการฟลูอิดไรเซชัน

μ คือ ความหนืดแก๊ส

ρ_g คือ ความหนาแน่นแก๊ส

ρ_p คือ ความหนาแน่นของอนุภาค

g คือ ค่าคงที่ความโน้มถ่วง (Gravitational Constant)

ตัวอย่างการคำนวณความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดซ์

ในที่นี้จะยกตัวอย่างการคำนวณความเร็วต่ำสุดของถ่านกัมมันต์ที่ต้องผลิตด้วยสภาวะอุณหภูมิ

700°C เวลา 3 ชั่วโมง

โดยที่ ปริมาณถ่านกากาแฟที่บรรจุ ; W	=	50 g
พื้นที่หน้าตัดของหอคกระดุนเบด ; A	=	πr^2
เส้นผ่านศูนย์กลาง	=	$4.3 \times 10^{-2} \text{ m}$
ดังนั้น ; A	=	$1.45 \times 10^{-2} \text{ m}^2$
อุณหภูมิที่ใช้กระดุน	=	700°C
ความหนาแน่นจริงของอนุภาค ; ρ_p	=	$0.67 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$
ขนาดอนุภาคเฉลี่ย ; D_p	=	971 μm
ความหนาแน่นปรากฏของอนุภาค ; ρ_b	=	$0.31 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$
สัดส่วนช่องว่างขณะเริ่มต้น ; e_{mf}	=	$1 - (\rho_p / \rho_p)$
	=	$1 - (0.31/0.67)$
	=	0.54

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนช่องกับค่าความกลม (Sphericity ; Φ_s) ในกรณีการบรรจุแบบปกติ (Normal packing) ได้

$$\Phi_s = 0.63$$

$$\text{ความหนาแน่นของไอน้ำ ; } \rho_g = \frac{P(M_w)T_o}{P_o V_o T}$$

โดยที่	P	คือ ความดันไอน้ำที่ทำการทดลอง (1 atm)
	P_o	คือ ความดันไอน้ำที่สภาวะมาตรฐาน (1 atm)
	M_w	คือ มวลโมเลกุลของไอน้ำ (18 g)
	T	คือ อุณหภูมิที่ทำการทดลอง (973 K)
	T_o	คือ อุณหภูมิที่สภาวะมาตรฐาน (273 K)
	V_o	คือ ปริมาตรของไอน้ำที่สภาวะมาตรฐาน (22.4 L)

$$\begin{aligned}\text{แทนค่า} \quad \rho_g &= \frac{18 \times 273}{22.4 \times 973} \\ \rho_g &= 0.23 \text{ kg/m}^3\end{aligned}$$

ความหนืดของไอน้ำได้จากการเปิดกราฟที่อุณหภูมิ 700 °C

$$\text{ความหนืดของไอน้ำ; } \mu = 3.5 \times 10^{-5} \text{ kg/ms}$$

แทนค่า

$$U_{mf} = \frac{(0.63 \times 971 \times 10^{-6})^2 \times (0.67 \times 10^3 - 0.23) \times (0.54)^3 \times (9.81)}{150 \times (3.5 \times 10^{-5}) \times (1 - 0.54)}$$

$$U_{mf} = 0.16 \text{ m/s}$$

จากสมการเออร์กัน (Ergun) ด้านบนสามารถหาค่าความเร็วต่ำสุด (U_{mf}) จากนั้นทำการตรวจสอบค่าเรย์โนลด์ นัมเบอร์ (Reynolds number, Re) เนื่องจากอนุภาคเป็นขนาดเล็กดังนั้น $Re < 20$

$$Re = \frac{D_p \rho_g U_{mf}}{\mu} \quad (ก.5)$$

โดยที่ D_p คือ ขนาดอนุภาคเฉลี่ย (971 μm)
 ρ_g คือ ความหนาแน่นแก๊ส (0.23 kg/m^3)
 U_{mf} คือ ความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิไดซ์ (0.16 m/s)
 μ คือ ความหนืดแก๊ส (3.5×10^{-5} kg/ms)

แทนค่า

$$\begin{aligned}Re &= \frac{(971 \times 10^{-6}) \times 0.23 \times 0.16}{3.5 \times 10^{-5}} \\ Re &= 1.02 < 20\end{aligned}$$

จากการตรวจสอบค่าเรย์โนลด์ นัมเบอร์ (Reynolds number) พบว่าเป็นไปตามเงื่อนไขจึงสามารถใช้ค่าความเร็วต่ำสุดนี้ในการทดลองได้

ก.5 การคำนวณความเร็วสุดท้าย

สำหรับอนุภาคขนาดเล็กสามารถคำนวณหาความเร็วสูงสุด ได้จากสมการที่ 2.13 ในบทที่ 2 ดังนี้

$$U_t = \frac{g(\rho_p - \rho_g)D_p^2}{18\mu} \quad Re < 0.4 \quad (D_p < 0.2 \text{ m}) \quad (ก.6)$$

โดยที่ U_t คือ ความเร็วสุดท้ายในการเกิดฟลูอิไดซ์
 ρ_g คือ ความหนาแน่นแก๊ส

ρ_p คือ ความหนาแน่นจริงของอนุภาค

g คือ ค่าคงที่ความโน้มถ่วง (Gravitational Constant)

D_p คือ ขนาดอนุภาคเฉลี่ย

μ คือ ความหนืดแก๊ส

ตัวอย่างการคำนวณความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิไดซ์

ในที่นี้จะยกตัวอย่างการคำนวณความเร็วสูงสุดของถ่านกัมมันต์ที่ต้องผลิตด้วยสภาวะอุณหภูมิ 700°C เวลา 3 ชั่วโมง

โดยที่

ρ_g คือ ความหนาแน่นแก๊ส (0.23 kg/m^3)

ρ_p คือ ความหนาแน่นจริงของอนุภาค ($0.67 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$)

g คือ ค่าคงที่ความโน้มถ่วง (9.81 kg/ms^2)

D_p คือ ขนาดอนุภาคเฉลี่ย ($971 \mu\text{m}$)

μ คือ ความหนืดแก๊ส ($3.5 \times 10^{-5} \text{ kg/ms}$)

แทนค่า

$$U_t = \frac{9.81 \times ((0.67 \times 10^3) - 0.23) \times (971 \times 10^{-6})^2}{18 \times (3.5 \times 10^{-5})}$$

$$U_t = 9.85 \text{ m/s}$$

จากนั้น ทำการตรวจสอบค่าเรย์โนลด์ นัมเบอร์ (Reynolds number, Re) เนื่องจากอนุภาคเป็นขนาดเล็กดังนั้น

$$\text{Re} < 0.4$$

$$\text{Re} = \frac{D_p \rho_g U_t}{\mu}$$

โดยที่

D_p คือ ขนาดอนุภาคเฉลี่ย ($971 \mu\text{m}$)

ρ_g คือ ความหนาแน่นแก๊ส (0.23 kg/m^3)

U_t คือ ความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิไดซ์ (9.85 m/s)

μ คือ ความหนืดแก๊ส ($3.5 \times 10^{-5} \text{ kg/ms}$)

แทนค่า

$$\text{Re} = \frac{(971 \times 10^{-6}) \times 0.23 \times 9.85}{3.5 \times 10^{-5}}$$

$$\text{Re} = 61.57 > 0.4 \text{ ค่า } U_t \text{ จึงใช้ได้}$$

จากการตรวจสอบค่าเรย์โนลด์ นัมเบอร์ (Reynolds number) พบว่าไม่เป็นไปตามเงื่อนไขจึงใช้สมการที่ 2.11 ซึ่งมีค่าคงที่ เรียกว่า Drag coefficient มาเกี่ยวข้องด้วย และสามารถหาได้จากการนำค่าเรย์โนลด์ นัมเบอร์ (Reynolds number ; Re) ไปเปิดกราฟ ($C_d = 6.59$)

$$U_t = \left[\frac{4gD_p(\rho_p - \rho_g)}{3\rho_g C_d} \right]^{0.5} \quad (ก.7)$$

โดยที่ C_d คือ ค่าคงที่ เรียกว่า Drag coefficient

แทนค่า

$$U_t = \left[\frac{4 \times 9.81 \times (971 \times 10^{-6}) \times ((0.67 \times 10^3) - 0.23)}{3 \times 0.23 \times 6.59} \right]^{0.5}$$

$$U_t = 2.39 \text{ m/s}$$

คำนวณค่าเรย์โนลด์ นัมเบอร์ (Reynolds number, Re)

แทนค่า

$$Re = \frac{(971 \times 10^{-6}) \times 0.23 \times 2.39}{3.5 \times 10^{-5}}$$

$$Re = 14.97$$

จากค่าเรย์โนลด์ นัมเบอร์ (Reynolds number, Re) นำไปเปิดหาค่า Drag coefficient (C_d) ได้

$$C_d = 11.16$$

แทนค่า

$$U_t = \left[\frac{4 \times 9.81 \times (971 \times 10^{-6}) \times ((0.67 \times 10^3) - 0.23)}{3 \times 0.23 \times 11.16} \right]^{0.5}$$

$$U_t = 1.84 \text{ m/s}$$

การคำนวณหาความเร็วสูงสุด(U_t) สามารถทำเช่นเดียวกันนี้ไปเรื่อยๆ จนกระทั่งค่าความเร็วสูงสุดที่คำนวณได้เริ่มมีค่าคงที่หรือเปลี่ยนไปน้อยมาก

จากค่า $U_t = 1.84 \text{ m/s}$ สามารถคำนวณค่า $Re = 11.51$

ที่ $Re = 11.51$ สามารถเปิดกราฟหาค่า $C_d = 11.32$

จากค่า $U_t = 1.83 \text{ m/s}$ สามารถคำนวณค่า $Re = 11.43$

ที่ $Re = 11.43$ สามารถเปิดกราฟหาค่า $C_d = 11.32$

จากค่า $U_t = 1.83 \text{ m/s}$ สามารถคำนวณค่า $Re = 11.43$

ที่ $Re = 11.43$ ดังนั้น ค่า $U_t = 1.83 \text{ m/s}$

จากการคำนวณข้างต้นสามารถหาค่าความเร็วสุดท้ายที่ต้องใช้ในการทดลองสภาวะอุณหภูมิ 700°C เวลา 3 ชั่วโมง มีค่าเท่ากับ 1.83 m/s

ก.6 ความเร็วไอน้ำ

สำหรับอัตราการไหลของไอน้ำที่ใช้ในการทดลองในการทดลองจะต้องอยู่ระหว่างความเร็วต่ำสุดและความเร็วสุดท้ายในการเกิดฟลูอิดไอเซชัน และการทดลองนี้อัตราการไหลของไอน้ำเท่ากับ 0.012 g/min (0.90 mL/s)

$$U_w = \frac{\dot{m}}{\rho_g A} \quad (\text{ก.8})$$

โดยที่ U_w คือ ความเร็วไอน้ำ (m/s)
 $\dot{m}$ คือ อัตราการไหลของไอน้ำ (0.012 g/min)
 ρ_g คือ ความหนาแน่นแก๊ส (0.23 kg/m³)
 A คือ พื้นที่หน้าตัดของท่อกระตุ้น (1.45 x 10⁻² m²)

แทนค่า

$$U_w = \frac{0.012}{60 \times 0.23 \times (1.45 \times 10^{-2})}$$

$$U_w = 0.62 \text{ m/s}$$

ดังนั้น สรุปได้ว่าความเร็วไอน้ำที่ใช้ในการทดลองคือ 0.62 m/s

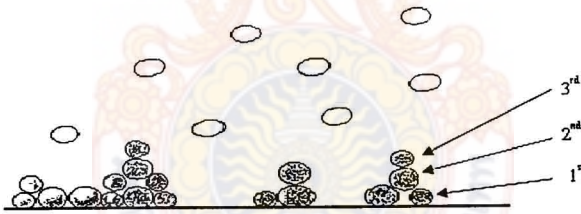
ภาคผนวก ข

เครื่องมือวิเคราะห์

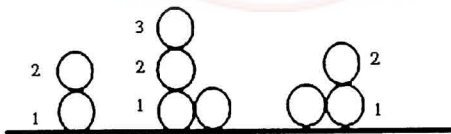
ในบทนี้จะกล่าวถึงหลักการเบื้องต้นของเครื่องมือวิเคราะห์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ และการเตรียมตัวอย่างก่อนวิเคราะห์

ข.1 สมการของ Brunauer-Emmett-Teller (BET) [21]

ในปี 1933 Brunauer-Emmett-Teller ได้ศึกษากลไกของการดูดซับต่อจาก Langmuir ในส่วนที่เกี่ยวกับการจัดเรียงโมเลกุลของสารดูดซับในชั้นที่สูงกว่า ทั้งนี้เพราะก่อนหน้านี้เขาได้หลักฐานจากการทดลองที่ยืนยันได้แน่ชัดว่า การดูดซับจะไม่เกิดขึ้นเพียงครั้งเดียว แต่จะมีการดูดซับในชั้นที่สองและชั้นที่สูงกว่าคิดตามมาด้วยเสมอ ตามแนวความคิดของ BET ถือว่าเมื่อระบบอยู่ในสมดุลที่ความดันย่อยในแต่ละฐานดูดซับบนพื้นที่ผิวจะมีโมเลกุลของสารถูกดูดซับจำนวนหนึ่งกลั่นตัวอยู่บนฐานดูดซับแต่ละฐาน มากน้อยต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ ข.1 และ รูปที่ ข.2



รูปที่ ข.1 แบบจำลองการดูดซับโมเลกุลหลายชั้น



รูปที่ ข.2 The BET model for adsorption

จากข้อสมมติฐานทั้งหมดจะให้สมการดังต่อไปนี้ [22]

$$\frac{P}{V(P_0 - P)} = \frac{1}{V_m C} + \frac{(C-1)P}{V_m C P_0} \quad (\text{ข.1})$$

โดยที่ V คือ ปริมาตรของแก๊สที่ถูกดูดซับที่ความดัน P
 V_m คือ ปริมาตรของแก๊สที่ถูกดูดซับเพื่อเกิดเป็นแบบชั้นเดียว (monolayer)
 P_0 คือ ความดันไออิ่มตัว (saturation pressure) ของแก๊สที่อุณหภูมิทดลอง
 C คือ ค่าคงที่ โดยมีความสัมพันธ์กับค่าความร้อนของการดูดซับ และค่าความร้อนของการกลายเป็นของเหลวของแก๊ส

$$C = e^{(q_1 - q_L)/RT} \quad (\text{ข.2})$$

โดยที่ q_1 คือ ค่าความร้อนของการดูดซับของการเกิดชั้นแรก
 q_L คือ ค่าความร้อนของการกลายเป็นของเหลวของแก๊สที่มาดูดซับบนชั้นอื่นๆ ทั้งหมด

ถ้า $q_1 > q_L$ จะสอดคล้องกับ adsorption isotherm ชนิดที่ 2 แต่ถ้า $q_1 < q_L$ จะสอดคล้องกับ adsorption isotherm ชนิดที่ 3

จากสมการ เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $P/V(P_0 - P)$ กับ P/P_0 จะให้กราฟเส้นตรงที่มีความชัน (slope) เท่ากับ $(C-1)/V_m C$ และจุดตัด (intercept) เท่ากับ $1/V_m C$ จากค่าความชันและจุดตัดสามารถใช้หาค่า V_m และ C ได้ สมการของ BET สามารถใช้ได้กับการดูดซับจำนวนมากที่มีค่า P/P_0 อยู่ระหว่าง 0.05 - 0.3 และช่วงนี้ปกติจะใช้สำหรับวัดค่าพื้นที่ผิว เมื่อค่า P/P_0 เพิ่มขึ้นจะเกิดการดูดซับแบบหลายชั้น (multilayer adsorption) และ pore condensation ทำให้เส้นกราฟไม่เป็นเส้นตรง สำหรับสารที่มีรูพรุนแคบมาก ตัวอย่างเช่น สารพวกซีโอไลต์ (Zeolite) ช่วงที่เป็นเส้นตรงที่ได้จากการพล็อตสมการของ BET จะเกิดที่ค่า P/P_0 ต่ำมาก ประมาณ 0.01 หรือน้อยกว่า

จากสมการ $V_m = 1/(S+I)$ เมื่อ S คือ ค่าความชันซึ่งมีค่าเท่ากับ $(C-1)/V_m C$ และ I คือ จุดตัด ที่มีค่าเท่ากับ $1/V_m C$

$$S+1 = \frac{1}{V_m C} [(C-1)+1] = \frac{1}{V_m} \quad (\text{ข.3})$$

ค่าพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถคำนวณได้จาก V_m ถ้ารู้พื้นที่โดยเฉลี่ยของโมเลกุลที่มาดูดซับ

inert vapor ใดๆ ก็ตามที่สามารถควบแน่นได้ สามารถใช้ในวิธีของ BET แต่เพื่อให้ได้ผลการวัดที่น่าเชื่อถือ โมเลกุลควรจะมีลักษณะเป็นทรงกลม จะใช้ไนโตรเจนเหลวเป็นตัวให้ความเย็นและ

ใช้แก๊สไนโตรเจนเป็นตัวดูดซับเนื่องจากมีราคาถูกและมีความบริสุทธิ์ ไนโตรเจนจะให้ลักษณะของ adsorption isotherm ชนิดที่ 2 บนผิวหน้าทั้งหมด

ความดันไอย่อยของของแก๊สไนโตรเจนจะมีค่าอยู่ในช่วงประมาณ 10 – 100 kPa เพื่อให้ได้ค่า P/P₀ อยู่ในช่วง 0.05- 0.30

ข.2 การวิเคราะห์โครงสร้างโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) [23]

ข.2.1 ส่วนประกอบและการทำงานของเครื่อง

ในเครื่อง SEM ประกอบไปด้วยส่วนประกอบหลักที่สำคัญ ดังต่อไปนี้

1. แหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน (Electron source)
2. อิเล็กโตรแมกเนติกเลนส์ (Electromagnetic lens) หรือขดลวดทำหน้าที่ควบคุมการส่องกราดของลำอิเล็กตรอน

3. ป้อนสุญญากาศและระบบควบคุมความดัน (Control pressure system)

4. ช่องใส่ตัวอย่าง (Specimen chamber)

5. ตัวตรวจวัดสัญญาณอิเล็กตรอน (Electron signal detector)

6. อุปกรณ์สร้างภาพ (Imaging devices)

ข.2.2 การเตรียมตัวอย่าง

ในการวิเคราะห์และการศึกษาการใช้เครื่อง SEM เพื่อให้ได้ภาพที่ชัดเจน นอกจากจะขึ้นกับประสิทธิภาพหรือความสามารถของเครื่องแล้วยังขึ้นกับชนิดของตัวอย่างและเทคนิคการเตรียมตัวอย่างที่เหมาะสมอีกด้วย ซึ่งสิ่งที่ควรคำนึงถึงในการเตรียมตัวอย่างเพื่อศึกษาโดยเครื่องSEM มีรายละเอียดโดยสังเขปดังนี้

ข.2.3 ประเภทตัวอย่าง

เป็นวัสดุตัวอย่างหรือผงวัสดุตัวอย่างที่เป็นของแข็งความดันต่ำกว่า 1 หรือเท่ากับ 10^{-3} ทอร์

ข.2.4 ขนาด

ขนาดของตัวอย่างถูกจำกัดโดยขนาดของช่องใส่ตัวอย่าง และตำแหน่งตัวอย่างของเครื่อง SEM ซึ่งแตกต่างกันแล้วแต่บริษัทและรุ่นที่ผลิต โดยในบางรุ่นอาจวางตัวอย่างขนาดใหญ่ได้ถึงประมาณ 15 ถึง 30cm อย่างไรก็ตามขอบเขตของการส่องกราดของลำอิเล็กตรอนจะจำกัดอยู่ในวงพื้นที่ไม่เกิน 4 ถึง 8cm

ข.2.5 การเตรียมตัวอย่าง

- การติดตัวอย่างบนแท่นวางตัวอย่าง

กรณีตัวอย่างเป็นชิ้นงานก่อนนำเข้าศึกษาในเครื่องต้องทำการตัดชิ้นงานเข้ากับก้านวางตัวอย่าง ซึ่งส่วนใหญ่ทำด้วยโลหะ มีลักษณะเป็นรูปทรงกลมมีก้านที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความสูงเหมาะสมใส่ได้พอดีกับช่องว่างในฐาน วางตัวอย่างและใช้สารยึดติดตัวอย่างเข้ากับก้านวางตัวอย่าง วิธีการทำโดยการทาหรือติดสารยึดติดตัวอย่างลงบนแผ่นหน้าของก้านวางตัวอย่างและติดตัวอย่างด้านที่ไม่ต้องการศึกษาลงบนแผ่นหน้าก้านวางตัวอย่าง ทั้งให้ติดสนิทหรือแห้งครึ่งๆหนึ่ง ในกรณีตัวอย่างไม่นำไฟฟ้า ต้องนำตัวอย่างนั้นไปผ่านขั้นตอนการฉาบด้วยโลหะก่อนนำไปศึกษา

กรณีตัวอย่างเป็นผงมักใช้สารยึดติดตัวอย่างจำพวกที่เป็นเทปขาวสองหน้า ติดด้านบนของก้านวางตัวอย่างและโรยผงตัวอย่างให้กระจายลงบนด้านหน้าของก้านวาง จากนั้นใช้ลงยางเป่าลม และปิดฝุ่นและเศษของผงตัวอย่างที่ไม่ยึดติดบนก้านวาง จากนั้นจึงนำเข้าเครื่อง SEM เพื่อทำการศึกษาคัดไป หรือทำการฉาบผิวด้วยโลหะ กรณีตัวอย่างไม่นำไฟฟ้า

- การเคลือบ (Coating) ผิวชิ้นงาน

ในการเคลือบหรือฉาบผิวตัวอย่างนิยมใช้สารตัวนำไฟฟ้าจำพวกโลหะหนักที่โมเลกุลขนาดเล็ก เช่น คาร์บอน ทอง และโลหะผสมทอง-พัลลาเดียม เป็นต้น โดยมีจุดประสงค์เพื่อเพิ่มสมบัติในการนำไฟฟ้าให้กับตัวอย่าง ทั้งนี้หลักการเบื้องต้นของการฉาบผิวคือ ต้องกระทำภายใต้ภาวะสุญญากาศ และให้กระแสไฟฟ้าที่เหมาะสม เพื่อให้โลหะหนักเปลี่ยนสภาพจากแท่งโลหะมาเป็น โมเลกุล และตกลงบนผิวตัวอย่างในอัตราส่วนเดียวกัน ทำให้โลหะฉาบผิวตัวอย่างได้เป็นเนื้อเดียวกัน

ข.3 การวิเคราะห์สมบัติทางเคมีโดยเครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์ม อินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์

(Fourier Transform Infrared Spectrometer, FT-IR) [24]

ข.3.1 หลักการทำงานของเครื่อง

ฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์ม อินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (Fourier Transform Infrared Spectrometer) ใช้วิธีวัดที่ต่างไปจากเครื่องมือสเปกโตรสโกปีทั่วไป คือ วัดความเข้มของแสงต่อความยาวคลื่น หรือ ถัดกันยาวที่ความยาวคลื่นต่างๆ กันอย่างต่อเนื่องเทียบกับเวลา เรียกว่า Time-domain Spectroscopy จากนั้น Time-domain spectrum จะถูกเปลี่ยนเป็น frequency-domain spectrum ด้วย fourier transform จากการใช้ดิฟเฟอเรนเชียลคอมพิวเตอรส์ สิ่งที่สเปกตรัมทั้งสองแตกต่างกันจริงๆ ก็คือ frequency-domain spectrum เป็นสเปกตรัมที่ได้จากการวัดการดูดกลืนแสงที่ความถี่ต่างๆ กันทีละครั้งในช่วงระยะเวลาอันหนึ่งแต่ Fourier transform spectrum ได้จากการวัดการดูดกลืนแสงที่ความถี่ต่างๆ กันพร้อมกันทั้งหมด ดังนั้น Fourier transform จึงช่วยให้การวิเคราะห์รวดเร็วขึ้น เพราะการวัดด้วยเครื่องธรรมดาจะเป็นแบบวัดทีละความถี่ (sequentially) แต่ FT-IR วัดที่ความถี่ต่างๆ อย่างต่อเนื่อง (simultaneously) เรียกว่า Fellgett's advantage สามารถใช้ circular entrance aperture แทน entrance slit ได้ ทำให้กำลังแสงสูงขึ้นด้วย ทำให้การแยกคลื่น และการวิเคราะห์ง่ายและสะดวกด้วยการใช้คอมพิวเตอร์ควบคุมการ

ทำงาน อย่างไรก็ดี เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์ม อินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์มีราคาแพงและต้องเสียค่าใช้จ่าย ในการบำรุงรักษาสูงเนื่องจากต้องเก็บในห้องควบคุมความชื้นตลอดเวลา

ข.3.2 การเตรียมตัวอย่าง

การวิเคราะห์สารตัวอย่างที่เป็นของแข็ง โดยไม่มีผลของตัวทำละลายหรือสารอื่นๆ ผสม อยู่เกี่ยวข้อง นั่นคือมีแต่เฉพาะตัวอย่างเท่านั้น จำเป็นจะต้องทำให้สารตัวอย่างมีลักษณะบางมากๆ เป็น ฟิล์มที่หนาประมาณ 0.01-0.1 mm เพื่อให้แสงผ่านได้ เทคนิคต่างๆ ที่เลือกใช้ขึ้นอยู่กับสมบัติทางกาย ภาพของสารนั้นด้วย เทคนิคต่างๆ มีดังต่อไปนี้

1. ใช้วิธีอัดและรีดให้เป็นแผ่นบางๆ ด้วยโลหะบนแผ่นโลหะเรียบ หรือแผ่นพลาสติก หรือบนแผ่นที่จับด้วยพวกพอลิเมอร์ที่ทนความร้อน เมื่อนำสารตัวอย่างไปอัดและรีดจนได้แผ่นบางๆ หรืออาจให้ความร้อนในขณะอัดและรีดด้วยก็ได้ เทคนิคนี้เหมาะที่จะใช้กับสารตัวอย่างที่เป็นพลาสติก ถ้า สารตัวอย่างไม่แข็งมากนัก อาจใช้ windows 2 แผ่น รีดสารตัวอย่างก็ได้ แต่จะต้องระวังการแตกของ windows ด้วย

2. ใช้วิธีหลอม ถ้าสารตัวอย่างมีมวลโมเลกุลต่ำ อาจหลอมเหลวได้ง่าย แล้วนำสารตัว อย่างที่หลอมเหลวเทลงไปในแผ่นโลหะเรียบให้เป็นแผ่นบางๆ หรือเทลงไปในระหว่างแผ่น windows 2 แผ่นประกบกัน แล้วทิ้งไว้ให้เย็น

3. ในกรณีที่สารตัวอย่างเป็นพวกชีวสาร พลาสติก หรือซีเมนต์ เป็นต้น อยู่ในรูปเป็นก้อน หรือเป็นแท่ง สามารถใช้ไมโคร โทมตัดให้เป็นแผ่นบางๆ ได้

4. ใช้วิธีทำให้เป็นสารละลาย โดยให้สารตัวอย่างละลายในตัวทำละลายที่ระเหยง่ายๆ แล้วนำสารละลายนั้นเทลงบนแผ่นกระจก หรือแผ่นโลหะที่ขัดมัน หรือแผ่นพลาสติก หลังจากตัวทำ ละลายระเหยออกไปแล้ว ใช้มีดตัดแผ่นฟิล์มออกมา ถ้าสารตัวอย่างนั้น ไม่ละลายน้ำ ให้หน้าแผ่นฟิล์มจมลง ในน้ำหลังจากทำให้แห้งแล้วสังเกตเห็นว่าแผ่นฟิล์มตรงกลางจะบางกว่าที่ขอบ เนื่องจากความเข้มข้นของ สารละลายไม่เป็นเนื้อเดียวกัน ซึ่งสามารถแก้ไขได้โดยใช้สารละลายที่มีความเข้มข้นมากที่สุดเท่าที่จะ ทำได้ อย่างไรก็ตาม วิธีนี้ยังคงมีตัวทำละลายหลงเหลืออยู่บ้างเล็กน้อย

5. ใช้ Mull technique วิธีนี้ได้รับความนิยมมากสำหรับการวิเคราะห์สารตัวอย่างที่เป็น ของแข็ง ใช้สารตัวอย่าง 2-3 mg บดให้ละเอียดด้วยโกร่งอะเกรต หรือ ball mill เล็กๆ แล้วหยด Nujol ลง ไป 1-2 หยด แล้วบดต่อไปจนเป็นเนื้อเดียวกัน แล้วนำสารตัวอย่างที่บดได้นี้ไปใส่ลงบน NaCl window หรือ window อย่างอื่นเพียงเล็กน้อย แล้วเอาอีกแผ่นประกบ ดูไปมาจนทั่วแผ่น นำไปใส่ใน sample holder เพื่อวิเคราะห์ต่อไป

6. ใช้ KBr-pellet technique นับว่าเป็นเทคนิคที่มีประโยชน์มากอีกเทคนิคหนึ่ง โดยใช้ สารพวกอัลคาไลเฮไลด์ เช่น KBr ที่เป็นของแข็งผสมกับสารตัวอย่าง บดให้เข้ากันในโกร่งอะเกรต แล้วนำ ไปอัดจะได้สารเป็นแผ่นใส สามารถนำไปวิเคราะห์ได้เลย ส่วนวิธีทำKBr-pellet ใช้สารตัวอย่างประมาณ 2.0 mg ผสมกับ KBr 100-200 mg ในโกร่งอะเกรต หรือ Ball mill แล้วบดให้ละเอียดจนเป็นเนื้อเดียวกัน

ตามปกติการทำ KBr-pellet ควรให้มีสารตัวอย่างเข้มข้นประมาณ 0.1-2 % แต่ก็อาจจะเปลี่ยนแปลงปริมาณได้ ขึ้นอยู่กับสารตัวอย่างนั้นดูคลื่นแสงอินฟราเรดได้ตีเพิงใด เมื่อบดดีแล้วนำไปใส่ในเครื่องอัดซึ่งเรียกว่า die หลังจากเปิดปั๊มดูดอากาศออกประมาณ 1 นาที ก็จะเริ่มอัดด้วยเครื่องอัด ซึ่งอาจเป็น hydraulic press อัดประมาณ 10 ตัน หลังจากลดความดันและปลดปั๊มออกจาก die แล้ว จึงนำตัวอย่างที่เป็น pellet ใส่บางออกมาอย่างระมัดระวัง เพราะอาจแตกหรือหักได้ จากนั้นใส่ลงใน disc holder เพื่อนำไปวิเคราะห์ต่อไป



ภาคผนวก ก

ข้อมูลการทดลอง

ตารางที่ ค.1 ผลได้ พื้นที่ผิว ความหนาแน่นจริง และความหนาแน่นปรากฏ ของถ่านจากกากกาแฟจากการคาร์บอนไเซชัน

ตัวอย่าง	อุณหภูมิ (°C)	เวลา คาร์บอนไเซชัน (hr)	น้ำหนัก กากกาแฟ (g)	น้ำหนัก ถ่าน (g)	ผลได้ (%)	พื้นที่ผิว (m ² /g)	ความ หนาแน่น จริง (g/mL)	ความ หนาแน่น ปรากฏ (g/mL)
1	400	1	89.91	32.07	35.67	4.80	0.75	0.45
2		2	84.32	29.38	34.84	0.36	0.76	0.46
3		3	82.93	21.27	28.06	1.31	0.74	0.38
4	500	1	82.81	21.13	25.51	42.74	0.70	0.39
5		2	80.25	19.66	24.50	100.89	0.72	0.37
6		3	80.52	13.80	17.14	25.07	0.69	0.38
7	600	1	80.50	19.84	24.65	143.16	0.67	0.31
8		2	84.09	19.92	22.98	107.46	0.65	0.29
9		3	87.57	17.71	20.22	93.35	0.64	0.30

ตารางที่ ค.2 ผลได้ของถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟโดยการกระตุ้นด้วยฟลูอิดเซชันไอน้ำ

ตัวอย่าง	อุณหภูมิ (°C)	เวลา การ กระตุ้น (hr)	น้ำหนักถ่าน (g)	น้ำหนัก ถ่านกัมมันต์ (g)	ผลได้ (%)
1	700	3	50.02	41.30	82.57
2		5	50.01	35.12	70.22
3		7	50.04	35.83	71.60
4	800	3	50.01	34.83	69.65
5		5	50.03	15.16	30.30
6		7	50.04	14.14	28.26
7	900	3	50.00	6.15	12.30
8		5	50.01	1.33	2.64
9		7	50.00	18.53	37.06

ตารางที่ ค.3 พื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน และขนาดรูพรุนเฉลี่ยของถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟโดยการคาร์บอนไนซ์และการกระตุ้นด้วยฟลูอิดเซชันไอน้ำ

ตัวอย่าง	อุณหภูมิ (°C)	เวลา กระตุ้น (hr)	พื้นที่ผิว			ปริมาตรรูพรุน			ขนาดรู พรุนเฉลี่ย (nm)
			S _{mi} (m ² /g)	S _{me} (m ² /g)	S _{Total} (m ² /g)	V _{mi} (mL/g)	V _{me} (mL/g)	V _{Total} (mL/g)	
1	600	1	0	159	159	0	0.20	0.20	5.10
2	700	3	193	203	396	0.10	0.17	0.27	2.71
3		5	168	237	405	0.09	0.23	0.32	3.17
4		7	256	249	505	0.13	0.22	0.35	2.77
5	800	3	163	358	521	0.08	0.25	0.33	2.51
6		5	330	236	566	0.17	0.18	0.35	2.45
7		7	313	257	570	0.16	0.21	0.37	2.62
8	900	3	321	275	596	0.17	0.17	0.34	2.28
9		5	358	709	1067	0.19	0.66	0.85	3.20
10		7	177	274	451	0.09	0.23	0.32	2.85

หมายเหตุ S_{mi} คือ พื้นที่ผิวขนาดไมโคร, S_{me} คือ พื้นที่ผิวขนาดเมโซ, S_{Total} คือ พื้นที่ผิวรวม
 V_{mi} คือ ปริมาตรรูพรุนขนาดไมโคร, V_{me} คือ ปริมาตรรูพรุนขนาดเมโซ,
 V_{Total} คือ ปริมาตรรูพรุนรวม



ประวัตินักวิจัย

- 1 ชื่อ และ นามสกุล นายไชยยันต์ ไชยยะ
MR. CHAIYAN CHAIYA
- 2 หมายเลขบัตรประชาชน 3-1202-00156-44-0
- 3 ตำแหน่งปัจจุบัน
ตำแหน่งทางวิชาการ อาจารย์ 1 ระดับ 5
สาขาที่ทำการวิจัย สาขาวิศวกรรมเคมี
- 4 สถานที่ติดต่อ
ที่ทำงานปัจจุบัน สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
2 ถนนนางลิ้นจี่ แขวงทุ่งมหาเมฆ เขตสาทร กรุงเทพฯ
รหัสไปรษณีย์ 10120 โทรศัพท์ 0 2286 3991-5 คอ 1195, 1210
ที่อยู่ปัจจุบัน 10/26 หมู่ 1 ต.บางกรวย อ.บางกรวย จ.นนทบุรี รหัสไปรษณีย์ 11130
E-mail address cchaiya@gmail.com

5 ประวัติการศึกษา

ระดับการศึกษา	อักษรย่อปริญญา	วิชาเอก	สถานศึกษา	ปีที่สำเร็จ	ประเทศ
ปริญญาเอก	Ph.D.	Environmental Technology	Joint Graduate school of Energy and Environment (JGSEE)	2547	ไทย
ปริญญาโท	วศ.ม.	วิศวกรรมเคมี	ม. เทคโนโลยีพระจอมเกล้า ธนบุรี	2543	ไทย
ปริญญาตรี	วศ.บ.	วิศวกรรมเคมี	ม. ศรีนครินทรวิโรฒ	2540	ไทย

- 6 สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ วิศวกรรมเคมี และเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม
- 7 ผลงานทางวิชาการที่เผยแพร่ บทความทางวิชาการ (ระบุชื่อเรื่อง แหล่งที่พิมพ์ ปีที่พิมพ์)

Boonamnuayvitaya V., Chaiya C. and Jarudilokkul S., Removal of heavy metals by adsorbent prepared from pyrolyzed coffee residues and clay, Separation and Purification Technology, 35, 11-22.

Boonamnuayvitaya V., Chaiya C. and Tanthapanichakoon W., The preparation and characterization of activated carbon from coffee residue, Journal of Chemical Engineering of Japan, 37, 1504-1512.

8 การประชุมวิชาการ

Chaiya, C. and Boonamnuyvitaya, V. 2000. The Adsorption of Heavy Metal Ions with Adsorbent Comprised of Coffee Residue, Proceedings of the 1st Asian Particle Technology Symposium, Bangkok, Thailand, 66.

Chaiya, C. and Boonamnuyvitaya, V. 2003. Adsorption of Toluene Vapor under Humid Condition by Activated Carbon Produced from Coffee Residue, Proceedings of the 2nd Regional Conference on Energy Technology Towards a Clean Environment, Phuket, Thailand, 2 : 1079-1085.

Chaiya, C. and Boonamnuyvitaya, V. 2003. Adsorption of Toluene Vapor under Humid Condition by Activated Carbon produced from Coffee Residue, proceedings of the Regional Conference on Advances in Petrochemicals and Polymers in the New Millennium, 22-25 July 2003, Le royal meridian hotel, Bangkok.

Chaiya, C. and Boonamnuyvitaya, V. 2003. Production and Characterization of Activated Carbon from Coffee Bean Residuals, Proceedings of the Materials Development and Particle Technology (MaDPart2003), The Center of the Excellence in Particle Technology, 14 Oct 2003, Mandarin hotel, Bangkok.

Chaiya, C. and Boonamnuyvitaya, V. 2003. Preparation of Activated Carbon from Coffee Residue : Characterization and Toluene Vapor Adsorption under Humidity, Proceedings of the 2nd Asian Particle Technology Symposium, Department of Chemical & Process Engineering, Universiti Kebangsaan, 16-19 Dec 2003, Penang, Malaysia.

ไชยยันต์ ไชยยะ และ วิโรจน์ บุญอำนวยวิทยา, การผลิตถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟเพื่อใช้ในการดูดซับสารโมเลกุลขนาดเล็กใหญ่, 2546, การประชุมวิชาการและงานแสดงผลิตภัณฑ์วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 29, 20-22 ตุลาคม 2546, ศูนย์ประชุมเอนกประสงค์กาญจนาภิเษก, มหาวิทยาลัยขอนแก่น, จังหวัดขอนแก่น

ไชยยันต์ ไชยยะ ทวีวรรณ เกษอินทร์ และอลิษา ใจเอื้อ, การสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟโดยใช้ซิงค์คลอไรด์, 2548, การประชุมสัมมนาทางวิชาการมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 21, 28-30 มีนาคม 2548, โรงแรมเชียงใหม่ภูคำ, จังหวัดเชียงใหม่