

การเตรียมถ่านกัมมันต์จากต้นปาล์มน้ำมันโดยการกระตุ้นด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง
ในฟลูอิด์เบด

ว่าที่ รต. สุรัชย์ สุวรรณแสงชูโต



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค

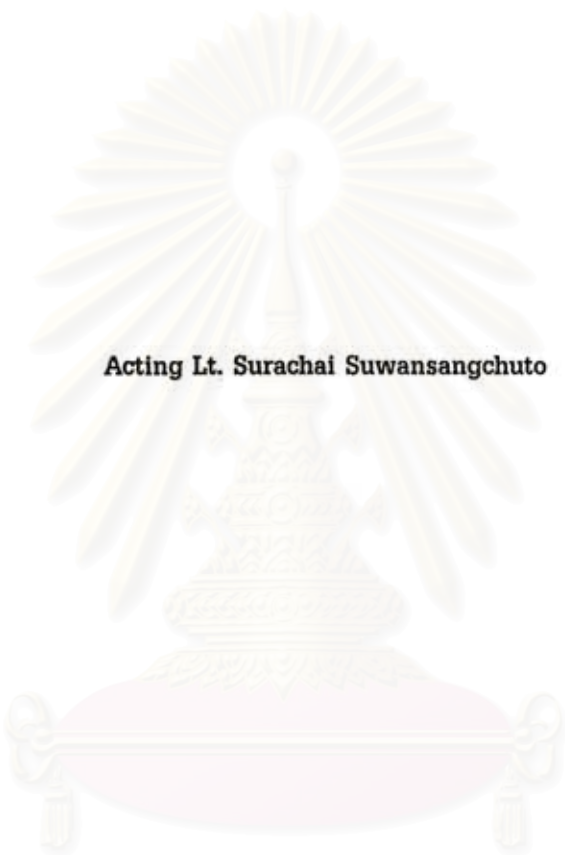
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2542

ISBN 974-333-348-7

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**PREPARATION OF ACTIVATED CARBON FROM PALM-OIL TRUNK BY SUPERHEATED STEAM
ACTIVATION IN FLUIDIZED BED**



Acting Lt. Surachai Suwansangchuto

สถาบันวิทยบริการ

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science in Chemical Technology**

Department of Chemical Technology

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 1999

ISBN 974-333-348-7

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การเตรียมถ่านกัมมันต์จากต้นปาล์มน้ำมันโดยการกระตุ้นด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง
ในฟลูอิด์เบด

โดย

ว่าที่ รต. สุรัชย์ สุวรรณแสงชูโต

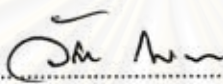
สาขาวิชา

เคมีเทคนิค

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ธราพงษ์ วิทิตกานต์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต



คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

(รองศาสตราจารย์ ดร. วันชัย โพธิ์พิจริต)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



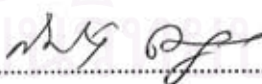
ประธานกรรมการ

(ศาสตราจารย์ ดร. ภัทรพรรณ ประศาสน์สารกิจ)



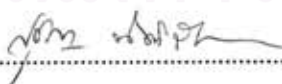
อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ธราพงษ์ วิทิตกานต์)



กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สมเกียรติ งามประเสริฐสิทธิ์)



กรรมการ

(อาจารย์ ดร. สุชญา นิติวฒนานนท์)

สุรัชย์ สุวรรณแสงชูโต, ว่าที่ รต. : การเตรียมถ่านกัมมันต์จากต้นปาล์มน้ำมันโดยการกระตุ้นด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งในฟลูอิดิซ์เบด. (PREPARATION OF ACTIVATED CARBON FROM PALM-OIL TRUNK BY SUPERHEATED STEAM ACTIVATION IN FLUIDIZED BED). อ. ที่ปรึกษา : ผศ. ดร. ธราพงษ์ วิทิตตานต์, 103 หน้า. ISBN 974-333-348-7.

การเตรียมถ่านกัมมันต์จากต้นปาล์มน้ำมันได้ดำเนินการ 2 ขั้นตอนคือ การคาร์บอนไนซ์ไม้ปาล์มน้ำมัน และการกระตุ้นถ่านคาร์บอนที่ได้ด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง การคาร์บอนไนซ์ทำในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 เซนติเมตร สูง 110 เซนติเมตร ตัวแปรที่ศึกษา คือ อุณหภูมิและเวลาการคาร์บอนไนซ์ พบว่าภาวะที่เหมาะสมสำหรับการคาร์บอนไนซ์ไม้ปาล์มน้ำมันขนาด 2.54×2.54×2.54 เซนติเมตร ปริมาณ 500 กรัม คือ คาร์บอนไนซ์ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส 30 นาที ได้ผลิตถ่านคาร์บอนร้อยละ 23.81 ปริมาณคาร์บอนคงตัวร้อยละ 74.86 สารระเหยร้อยละ 21.78 และเถ้าร้อยละ 3.36

ขั้นตอนการกระตุ้นด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งทำในเครื่องแอคติเวเตอร์แบบฟลูอิดิซ์เบด ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 11 เซนติเมตร สูง 30 เซนติเมตร ตัวแปรที่ศึกษา คือ อุณหภูมิและเวลาการกระตุ้น ขนาดถ่านที่ใช้กระตุ้น และอัตราส่วน U/U_{mf} พบว่าภาวะที่เหมาะสมสำหรับการกระตุ้นถ่านที่ได้จากการคาร์บอนไนซ์ความสูง 5.0 เซนติเมตร คือใช้ถ่านขนาด 1.18-2.36 มิลลิเมตร กระตุ้นที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส 6 นาที โดยมีอัตราส่วน U/U_{mf} เท่ากับ 1.5 ได้ผลิตถ่านกัมมันต์ร้อยละ 5.63 ของน้ำหนักไม้ปาล์มน้ำมัน มีพื้นที่ผิว 284.36 ตารางเมตรต่อกรัม ค่าไอโอดีน 403.99 มิลลิกรัมต่อกรัม ค่าเมทิลีนบลู 161.54 มิลลิกรัมต่อกรัม ค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตร 0.548 กรัมต่อซีซี และค่าเถ้าร้อยละ 5.49

สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา เคมีเทคนิค
สาขาวิชา เคมีเทคนิค
ปีการศึกษา 2542

ลายมือชื่อนิสิต.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

3972245023 : MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY

KEY WORD : ACTIVATED CARBON / PALM-OIL TRUNK / FLUIDIZED BED /
SUPERHEATED STEAM ACTIVATION /

SURACHAI SUWANSANGCHUTO, ACTING LT. : PREPARATION OF ACTIVATED
CARBON FROM PALM-OIL TRUNK BY SUPERHEATED STEAM ACTIVATION IN
FLUIDIZED BED. THESIS ADVISOR : ASST. PROF. THARAPONG VITIDSANT, Ph.D.
, 103 pp. ISBN 974-333-348-7.

Preparation of activated carbon from palm-oil trunk was investigated in two parts: palm-oil trunk carbonization and superheated steam activation. Carbonization part was conducted in a fixed bed reactor, 15 cm. id. and 110 cm. in height. The studied variables were temperature and carbonization period. It was found that the optimum condition for 500 g. of palm-oil trunk, 2.54×2.54×2.54 cm. in dimension, was at 300 °C and 30 minutes. The char product yield was 23.81 % which consisted of 74.86 % fixed carbon, 21.78 % volatile matter and 3.36 % ash.

The superheated steam activation part was operated in a fluidized bed reactor, 11.0 cm. id. and 30.0 cm. in height. The studied variables were temperature and time of activation, char particle size, and U/Umf ratio. It was found that the optimum condition for 5.0 cm. in height of carbonized char were char particle size of 1.18-2.36 mm., temperature and time of activation at 850 °C and 6 minutes, and U/Umf ratio at 1.5 times. The product yield was 5.63 % activated carbon from palm-oil trunk. The activated carbon obtained had the surface area of 284.25 m²/g, iodine adsorption 403.99 mg/g, methylene blue adsorption 161.54 mg/g, bulk density 0.548 g/cc., and ash content 5.49 %

ภาควิชา เคมีเทคนิค
สาขาวิชา เคมีเทคนิค
ปีการศึกษา 2542

ลายมือชื่อนิสิต.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....



กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของ ผู้ช่วยศาสตราจารย์. ดร. ธราพงษ์ วิทิตตานต์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งท่านได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆของการวิจัยมาด้วยดีตลอด

ขอขอบคุณ คุณสังข์ ชมชื่น และเจ้าหน้าที่ทุกท่านของภาควิชาเคมีเทคนิค จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความช่วยเหลือในการสร้างและซ่อมเครื่องมือ และอำนวยความสะดวกในการวิจัย และขอขอบคุณกองทุน ศาสตราจารย์. ดร. ประสม สถาปิตานนท์ และบัณฑิตวิทยาลัยที่สนับสนุนทุนอุดหนุนการวิจัยมา ณ ที่นี้ด้วย

ท้ายสุดนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ญาติพี่น้อง ที่ให้ความช่วยเหลือ เป็นกำลังใจอย่างดีและให้การสนับสนุนจนสำเร็จการศึกษา รวมทั้งขอขอบคุณเพื่อนๆ และน้องๆ ชาวเคมีเทคนิคทุกคนที่ให้กำลังใจ ช่วยเหลือและให้คำแนะนำด้วยดีเสมอมา



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญตาราง	ญ
สารบัญรูป	ฉ
บทที่ 1. บทนำ	1
บทที่ 2. วารสารปริทัศน์	6
2.1. ความหมายของถ่านกัมมันต์	6
2.2. วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์	6
2.3. ชนิดของถ่านกัมมันต์	7
2.4. กระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์	8
2.5. โครงสร้างรูพรุนของถ่านกัมมันต์	16
2.6. โครงสร้างทางเคมีของถ่านกัมมันต์	18
2.7. การดูดซับทางกายภาพและทางเคมี	21
2.8. ประโยชน์ของถ่านกัมมันต์	23
2.9. เทคนิคฟลูอิดไอเซชัน	26
2.9.1. การเกิดและชนิดของฟลูอิดไอเซชัน	26
2.9.2. ปัจจัยที่มีผลต่อการฟลูอิดไอเซชันในแก๊ส	28
2.9.3. การหาความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไอเซชัน	29
2.9.4. การถ่ายโอนมวลในแก๊สฟลูอิดไอเซชันเบด	32
2.9.5. การถ่ายโอนความร้อนในฟลูอิดไอเซชันเบด	33
2.9.6. การใช้ฟลูอิดไอเซชันในอุตสาหกรรม	35
2.10. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	37
2.10.1. งานวิจัยในประเทศ	37
2.10.2. งานวิจัยต่างประเทศ	38

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3. การดำเนินงานทดลอง	46
3.1. แนวทางการศึกษา	46
3.2. เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย	46
3.3. ขั้นตอนดำเนินการทดลอง	52
บทที่ 4. ผลการทดลอง วิเคราะห์และวิจารณ์ผล	54
4.1. สมบัติของวัตถุดิบ	54
4.2. ภาวะที่เหมาะสมในการคาร์โบไนซ์ไม้ปาล์มน้ำมัน	55
4.3. ภาวะที่เหมาะสมในการกระตุ้นถ่านจากไม้ปาล์มน้ำมันด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง ในฟลูอิด์เบด	60
4.4. รูปลักษณะพื้นผิวของไม้ปาล์มน้ำมัน ถ่านชาร์และถ่านกัมมันต์ที่ได้จาก การกระตุ้นที่ภาวะต่าง ๆ โดยใช้กล่องอิเล็กตรอนไมโครสโคป	68
4.5. วิเคราะห์และวิจารณ์ผล	70
4.5.1. การคาร์โบไนซ์ไม้ปาล์มน้ำมัน	70
4.5.1.1. ระยะเวลาการคาร์โบไนซ์	70
4.5.1.2. อุณหภูมิในการคาร์โบไนซ์	71
4.5.2. การกระตุ้น	71
4.5.2.1. อุณหภูมิการกระตุ้น	71
4.5.2.2. ระยะเวลาการกระตุ้น	72
4.5.2.3. ขนาดของถ่านที่ใช้กระตุ้น	72
4.5.2.4. ความเร็วของแก๊สตัวกลาง	72
บทที่ 5. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	74
5.1. สรุปผลการวิจัย	74
5.2. ข้อเสนอแนะ	76
รายการอ้างอิง	77
ภาคผนวก	80
ก. วิธีวิเคราะห์สมบัติโดยประมาณของไม้ปาล์มน้ำมันและถ่านจากไม้ปาล์มน้ำมัน	81
ข. วิธีวิเคราะห์สมบัติของถ่านกัมมันต์	83
ค. วิธีการทดสอบการดูดซับไอโอดีน	87
ง. วิธีวิเคราะห์ค่าการดูดซับเมทิลีนบลูของถ่านกัมมันต์	90
จ. วิธีวิเคราะห์ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะของรูพรุนทั้งหมดของถ่านกัมมันต์	93

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก ฉ. การออกแบบการทดลองแบบ บอกซ์ วิลสัน	95
ช. การเปรียบเทียบมาตรวัดอัตราการไหลของแก๊ส	98
ซ. ความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดซ์	100
ฅ. สมบัติของถ่านกัมมันต์ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม	102
ประวัติผู้เขียน	103



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

		หน้า
ตารางที่	1.1. พื้นที่ปลูกปาล์มน้ำมันของไทย	1
	1.2. สถิติการนำเข้าถ่านกัมมันต์ในประเทศไทย	2
	1.3. สถิติการส่งออกถ่านกัมมันต์ของประเทศไทย	2
	2.1. ผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการคาร์ไบไนซ์ถ่านหินต่อสมบัติของถ่านชาร์ที่เตรียมได้	10
	2.2. ผลของอัตราการให้ความร้อนที่มีต่อสมบัติของเม็ดถ่านชาร์	10
	2.3. การดูดซับของถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้น ณ ภาวะต่าง ๆ กัน	16
	2.4. ส่วนประกอบหมู่ฟังก์ชันัลของออกซิเจนบนผิวของถ่านกัมมันต์ที่ ผลิตจากวัตถุดิบที่เหลือจากการเกษตรต่างชนิดกัน	21
	2.5. ตัวอย่างอุตสาหกรรมที่ใช้ถ่านกัมมันต์ในการดูดตัวทำละลายกลับมาใช้ใหม่	25
	2.6. เปรียบเทียบเทคนิคต่าง ๆ ที่ใช้ในปฏิกิริยาระหว่างแก๊สกับของแข็ง	35
	2.7. การประยุกต์เทคนิคฟลูอิดไอเซนในอุตสาหกรรม	36
	2.8. ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวและรูพรุนของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ จากไม้ปาล์มน้ำมันโดยการกระตุ้นด้วย $ZnCl_2/CO_2$	39
	2.9. ตัวแปรที่ใช้ในการทดลองของ Kirubakaran, C.J. (1991)	40
	2.10. สมบัติการดูดซับของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากวัสดุเหลือทิ้งจากการเกษตร	43
	2.11. องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบชนิดต่าง ๆ ที่ใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์	43
	2.12. คุณลักษณะของรูพรุนและความสามารถในการดูดซับของถ่านลิกนินกับถ่านเซลลูโลส	44
	2.13. ลักษณะโครงสร้างรูพรุนของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นถ่านชาร์จากไม้ยูคาลิปตัส ที่ผ่านการคาร์ไบไนซ์ที่ 800 องศาเซลเซียสด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์	44
	2.14. ลักษณะโครงสร้างรูพรุนของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นถ่านชาร์จากไม้ยูคาลิปตัส ที่ผ่านการคาร์ไบไนซ์ที่ 800 องศาเซลเซียสด้วยแก๊สผสมระหว่าง แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์กับแก๊สออกซิเจน	45
	2.15. ลักษณะโครงสร้างรูพรุนของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นถ่านชาร์จากไม้ยูคาลิปตัส ที่ผ่านการคาร์ไบไนซ์ที่ 800 องศาเซลเซียสด้วยไอน้ำ	45
	4.1. ค่าการวิเคราะห์โดยประมาณของถ่านชาร์ที่ได้จากการคาร์ไบไนซ์ไม้ปาล์มน้ำมัน ณ ภาวะต่าง ๆ	55

สารบัญตาราง(ต่อ)

	หน้า
ตารางที่ 4.2. ภาวะที่ใช้ทดลองตามวิธีการออกแบบการทดลองแบบบอกซ์ วิลสัน และ ค่าการดูดซับไอโอดีน	60
4.3. ข้อมูลวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณเชิงเส้นของค่าการดูดซับไอโอดีน	62
4.4. สมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นด้วยไอน้ำร้อนนวดยิ่ง ณ ภาวะต่าง ๆ	64
4.5. ผลของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีต่อค่าเฉลี่ยค่าการดูดซับไอโอดีน	65
4.6. เปรียบเทียบสมบัติของไม้ปาล์มน้ำมัน ถ่านชาร์และถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ จากอุณหภูมิต่าง ๆ เวลา 6 นาที ความเร็วแก๊สตัวกลาง 1.5 เท่าของความเร็วต่ำสุด ในการเกิดฟลูอิดซ์ และอนุภาคขนาด 1.18-2.36 มิลลิเมตร	67
5.1. เปรียบเทียบภาวะที่เหมาะสมในการผลิตและคุณภาพของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้จาก งานวิจัยนี้กับงานวิจัยของ Mohd Zobir Hussein and coworker (1995)	76
ฉ.1. จำนวนการทดลองทั้งหมดสำหรับ 4 ตัวแปร โดยวิธี บอกซ์ วิลสัน	97



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1. การเปลี่ยนแปลงการจัดเรียงของคาร์บอนอะตอมตามอุณหภูมิที่เผา	9
2.2. การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีโดยการเตรียมถ่านชาร์จากวัสดุทางการเกษตร	12
2.3. การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีของปฏิกิริยาการกระตุ้นด้วยแก๊สออกซิไดซ์	12
2.4. ผลของปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีต่อปฏิกิริยาการกระตุ้นด้วยไอน้ำ	15
2.5. การจัดเรียงตัวของคาร์บอนอะตอมในผลึกของแกรไฟต์	17
2.6. ตัวอย่างหมู่ฟังก์ชันัลที่เป็นการตบนิเวถ่านกัมมันต์	19
2.7. ตัวอย่างปฏิกิริยาของถ่านกัมมันต์ที่มีผิวเป็นกรด	19
2.8. ตัวอย่างหมู่ฟังก์ชันัลที่เป็นเบสบนผิวถ่านกัมมันต์	20
2.9. ตัวอย่างปฏิกิริยาการดูดซับโมเลกุลกรด ด้วยถ่านกัมมันต์ที่มีผิวเป็นต่าง	20
2.10. เส้นไอโซเทอมของถ่านกัมมันต์ชนิดต่าง ๆ	22
2.11. สภาวะต่าง ๆ ของฟลูอิดเซชัน	27
2.12. เครื่องมือหาความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดซ์	30
2.13. กราฟหาความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดซ์	30
2.14. โมเดลการเกิดปฏิกิริยาอย่างต่อเนื่อง	32
2.15. ผลการทดลองของ Resnick และ White	33
2.16. ภาพถ่ายลักษณะพื้นผิวของ (ก) ซินไ้ปาล์มน้ำมัน (ข) ซินไ้ปาล์มที่ตกผลึกด้วย 15%w ZnCl ₂ (ค) ถ่านกัมมันต์ที่กำลังขยาย 300 เท่า (ง) ถ่านกัมมันต์ที่กำลังขยาย 3000 เท่า	40
2.17. เครื่องแอดติเวเตอร์แบบฟลูอิดซ์เบดของ Kirubakaran, C.J. (1991)	41
2.18. เครื่องแอดติเวเตอร์แบบเบตนิ่งของ Kirubakaran, C.J. (1991)	41
3.1. เครื่องคาร์บอนไนเซอร์แบบเบตนิ่งของภาควิชาเคมีเทคนิค	48
3.2. เครื่องแอดติเวเตอร์แบบฟลูอิดซ์เบด	49
3.3. เครื่องคาร์บอนไนเซอร์แบบเบตนิ่ง (ลักษณะทั่วไป)	50
3.4. เครื่องแอดติเวเตอร์แบบฟลูอิดซ์เบด (ลักษณะทั่วไป)	50
3.5. เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง UV/VIS Spectrophotometer Jasco Model 7800 ของภาควิชาเคมีเทคนิค	51
3.6. เครื่องวัดพื้นที่ผิว Micromeritics ASAP 2000 ของภาควิชาวิศวกรรมเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	51

สารบัญรูป(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.1. ภาพถ่ายแสดงลักษณะทั่วไปของ (ก) ถ่านไม้ปาล์มน้ำมันที่คาร์โบไนซ์ที่ 300 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที (ข) ขึ้นไม้ปาล์มน้ำมันก่อนการคาร์โบไนซ์	54
4.2. ผลของเวลาการคาร์โบไนซ์ต่อค่าร้อยละสารระเหยที่อุณหภูมิต่าง ๆ	56
4.3. ผลของเวลาการคาร์โบไนซ์ต่อค่าร้อยละเถ้าที่อุณหภูมิต่าง ๆ	56
4.4. ผลของเวลาการคาร์โบไนซ์ต่อค่าร้อยละคาร์บอนคงตัวที่อุณหภูมิต่าง ๆ	57
4.5. ผลของเวลาการคาร์โบไนซ์ต่อค่าร้อยละผลิตภัณฑ์ที่อุณหภูมิต่าง ๆ	57
4.6. ผลของอุณหภูมิการคาร์โบไนซ์ต่อค่าร้อยละสารระเหยที่เวลาต่าง ๆ	58
4.7. ผลของอุณหภูมิการคาร์โบไนซ์ต่อค่าร้อยละเถ้าที่เวลาต่าง ๆ	58
4.8. ผลของอุณหภูมิการคาร์โบไนซ์ต่อค่าร้อยละคาร์บอนคงตัวที่เวลาต่าง ๆ	59
4.9. ผลของอุณหภูมิการคาร์โบไนซ์ต่อค่าร้อยละผลิตภัณฑ์ที่เวลาต่าง ๆ	59
4.10. ลักษณะถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่ 850 องศาเซลเซียส นาน 9 นาที ความเร็วแก๊สตัวกลาง 2 เท่าของความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิด์ ขนาดอนุภาคถ่าน 2.36 - 4.75 มิลลิเมตร	63
4.11. ผลของอุณหภูมิที่มีต่อการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง ณ ความเร็วแก๊สตัวกลาง 2.0 เท่าของความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิด์ เวลาและอนุภาคขนาดต่างๆ	65
4.12. ผลของเวลาที่มีต่อการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง ณ ความเร็วแก๊สตัวกลาง 2.0 เท่าของความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิด์ อุณหภูมิและอนุภาคขนาดต่างๆ	66
4.13. ผลของขนาดอนุภาคที่มีต่อการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง ณ ความเร็วแก๊สตัวกลาง 2.0 เท่าของความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิด์ อุณหภูมิและเวลาต่างๆ	66
4.14. ผลของความเร็วของแก๊สตัวกลางที่มีต่อการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง ณ เวลา 9 นาที อุณหภูมิและอนุภาคขนาดต่างๆ	67
4.15. ผิวไม้ปาล์มน้ำมัน	68
4.16. ผิวถ่านชาร์ที่ได้จากการคาร์โบไนซ์ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที	68
4.17. ผิวถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง ที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส เวลา 6 นาที ความเร็วแก๊สตัวกลาง 1.5 เท่าของความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิด์ อนุภาคขนาด 1.18 - 2.36 มิลลิเมตร	69

สารบัญรูป(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.18. ผิวถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง ที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส เวลา 6 นาที ความเร็วแก๊สตัวกลาง 1.5 เท่าของความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไรซ์อนุภาคขนาด 1.18 - 2.36 มิลลิเมตร	69
4.19. ผิวถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส เวลา 6 นาที ความเร็วแก๊สตัวกลาง 1.5 เท่าของความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไรซ์อนุภาคขนาด 1.18 - 2.36 มิลลิเมตร	70
5.1. แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าพื้นที่ผิวจำเพาะกับค่าการดูดซับไอโอดีนและค่าการดูดซับเมทิลีนบลูของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นถ่านขนาด 1.18-2.36 มิลลิเมตร เวลา 6 นาที และความเร็วแก๊ส 1.5 เท่าของความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไรซ์ ณ อุณหภูมิต่าง ๆ	75
ข.1. แสดงลักษณะของเครื่องมือหาค่าความหนาแน่นของถ่านกัมมันต์	86
ค.1. ตัวอย่างกราฟแสดงการหาค่าความสามารถในการดูดซับไอโอดีน	89
ง.1. ตัวอย่างกราฟแสดงการหาค่าความสามารถในการดูดซับเมทิลีนบลูของถ่านกัมมันต์	92
ช.1. แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วอากาศที่ไหลผ่านเบดกับมาตรวัดอัตราการไหล ณ อุณหภูมิห้อง	98
ช.2. แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วในการป้อนไอน้ำกับจำนวนรอบที่เปิดวาล์ว	99
ซ.1. แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันลดและความเร็วแก๊สภายในเครื่องแอดติเวเตอร์ ...	100

บทที่ 1
บทนำ



ปาล์มน้ำมันจัดอยู่ในพืชตระกูลปาล์ม (Palmae หรือ Arecaceae) ตระกูลย่อย (sub-family) เดียวกับมะพร้าวคือ Coccoideae สกุล *Elaeis* ซึ่งมีอยู่ 3 ชนิด คือ *E.quineensis* (ชื่อสามัญภาษาอังกฤษคือ african oil palm) *E.deifera* (ชื่อสามัญคือ south african oil palm) และ *E.odora*

การปลูกปาล์มน้ำมัน ปาล์มน้ำมันชอบสภาพภูมิอากาศที่มีฝนตกชุก และสม่ำเสมอตลอดปี ความชื้นสูงและแสงแดดจัด พื้นที่ทางภาคใต้หลายจังหวัดมีสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมแก่การปลูกปาล์มน้ำมัน ปาล์มน้ำมันจะเริ่มให้ผลผลิตตั้งแต่ปีที่ 3 หลังจากปลูก ผลผลิตจะเพิ่มขึ้นเป็นลำดับ และสูงสุดในปีที่ 10 หลังจากนั้นผลผลิตจะคงที่หรือลดลง ขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมและการจัดการ แต่หลังจากอายุ 25 ปี ผลผลิตที่ได้รับจะไม่คุ้มกับการลงทุน จำเป็นต้องโค่นทิ้ง

พื้นที่ปลูกปาล์มน้ำมันของประเทศไทย จากข้อมูลของกรมส่งเสริมการเกษตรเมื่อสิ้นปี 2536 พื้นที่ปลูกปาล์มน้ำมันของประเทศไทยมีทั้งหมด 1,116,259 ไร่ ซึ่งสามารถแบ่งตามอายุและจังหวัดที่ปลูกได้ดังในตารางที่ 1.1

ตารางที่ 1.1 พื้นที่ปลูกปาล์มน้ำมันของไทย (กรมส่งเสริมการเกษตร, 2536)

จังหวัด	พื้นที่ปลูกปาล์มน้ำมันแยกตามอายุ (ไร่)				
	0-5 ปี	5-15 ปี	มากกว่า 15 ปี	รวม	ร้อยละ
ประจวบคีรีขันธ์	6,823	13,020	4,500	24,343	2.18
ระนอง	998	3,929	100	5,027	0.45
กระบี่	100,846	272,624	42,990	416,460	37.31
สุราษฎร์ธานี	88,197	234,408	165	322,770	28.92
ชุมพร	113,824	94,003	5,253	213,080	19.09
ตรัง	12,125	32,405	4,499	49,029	4.39
นราธิวาส	15	15	35	65	0.01
สงขลา	5,442	6,709	-	12,151	1.09
สตูล	4,151	20,043	25,647	49,841	4.47
พังงา	14,093	6,682	410	21,185	1.90
นครศรีธรรมราช	1,231	1,077	-	2,308	0.21
รวม	347,745	684,915	83,599	1,116,259	100.00

ตารางที่ 1.2 สถิติการนำเข้าถ่านกัมมันต์ในประเทศไทย (กรมศุลกากร, 2530-2542)

ปี (พศ.)	ปริมาณการนำเข้า (ตัน)	มูลค่าการนำเข้า (ล้านบาท)	ราคาเฉลี่ย (บาท/ตัน)
2530	2,092	51.48	24,608.03
2531	1,932	52.31	27,075.57
2532	2,650	72.24	27,260.38
2533	2,322	75.31	32,433.25
2534	2,642	75.95	28,747.16
2535	2,707	101.42	37,465.83
2536	2,908	96.31	33,118.98
2537	2,816	103.19	36,644.18
2538	2,883	124.61	43,222.34
2539	3,047	100.84	33,094.85
2540	3,598	127.14	35,336.30
2541	3,141	114.68	36,511.09
2542	2,646	90.26	34,111.48

ตารางที่ 1.3 สถิติการส่งออกถ่านกัมมันต์ของประเทศไทย (กรมศุลกากร, 2530-2542)

ปี (พศ.)	ปริมาณการส่งออก (ตัน)	มูลค่าการส่งออก (ล้านบาท)	ราคาเฉลี่ย (บาท/ตัน)
2530	358	10.13	28,269.09
2531	261	8.12	31,111.11
2532	775	27.66	35,690.32
2533	664	25.00	37,650.60
2534	1,056	36.45	34,517.05
2535	1,027	34.01	33,115.87
2536	479	15.89	33,173.28
2537	522	18.25	34,961.69
2538	1,765	48.26	27,342.78
2539	2,937	75.68	25,767.79
2540	2,807	99.37	35,400.78
2541	2,737	120.32	43,958.72
2542	2,777	98.66	35,527.98

1.1 ความสำคัญและที่มาของโครงการ

ในภาวะปัจจุบันประเทศไทยต้องเสียเปรียบดุลการค้ากับต่างประเทศ ซึ่งปัจจัยสำคัญที่ทำให้ประเทศไทยต้องเสียเปรียบดุลการค้าคือ เทคโนโลยี (Technology) ประเทศไทยเป็นประเทศที่อุดมสมบูรณ์ไปด้วยทรัพยากรธรรมชาติมากมาย รวมทั้งผลิตผลทางการเกษตร แต่ประเทศไทยกลับต้องสั่งซื้อผลิตภัณฑ์ที่แปรรูปมาจากผลผลิตทางการเกษตรในอัตราที่สูงมาก ผลผลิตทางการเกษตรที่ถูกแปรรูปไปเป็นผลิตภัณฑ์เหล่านั้นมีมากมายภายในประเทศ ดังนั้นประเทศไทยจึงควรพยายามนำเทคโนโลยีการผลิตมาพัฒนาผลผลิตทางการเกษตรให้เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่า เพื่อลดการเสียเปรียบดุลการค้ากับต่างประเทศ

ถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในอุตสาหกรรมส่วนใหญ่เป็นผลิตภัณฑ์ที่นำเข้ามาจากต่างประเทศดังสถิติการนำเข้าถ่านกัมมันต์ที่แสดงในตารางที่ 1.2 ซึ่งคิดเป็นมูลค่าที่สูงพอสมควร หากเราสามารถผลิตถ่านกัมมันต์จากวัสดุเหลือใช้ เพื่อทดแทนการนำเข้าและส่งออกถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้ดังแสดงในตารางที่ 1.3 จะทำให้เราสามารถลดการขาดดุลการค้าได้พอสมควร วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร เช่น กะลามะพร้าว กะลาปาล์ม น้ำมัน ต้นปาล์ม น้ำมัน เป็นต้น เป็นวัสดุที่เหมาะสมในการผลิตถ่านกัมมันต์ เนื่องจากประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรมจึงมีวัสดุเหล่านี้อยู่ในปริมาณมาก รวมทั้งองค์ประกอบของวัสดุที่เหมาะสมกับการผลิตถ่านกัมมันต์จากตารางที่ 1.1 พบว่ามีต้นปาล์ม น้ำมันจำนวนหลายหมื่นไร่ที่จะหมดอายุการให้ผลผลิตและจะถูกโค่นทิ้ง หากสามารถนำต้นปาล์ม น้ำมันเหล่านี้มาแปรรูปเป็นถ่านกัมมันต์ได้จะเป็นการเพิ่มมูลค่าของต้นปาล์ม น้ำมัน แทนการนำไปทำเป็นเชื้อเพลิง

ดังนั้นต้นปาล์ม น้ำมันจึงถูกเลือกมาเพื่อทดลองผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ในการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้ ซึ่งการนำต้นปาล์ม น้ำมันมาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์จะเป็นการเพิ่มมูลค่าทางเศรษฐกิจแทนการทำเป็นเชื้อเพลิงใช้ภายในโรงงานน้ำมันปาล์มและทำปุ๋ยในการเกษตร การกระตุ้นด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งในฟลูอิด์ไคซ์เบด เป็นขั้นตอนหนึ่งในกระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์ที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมผลิตถ่านกัมมันต์และมีข้อมูลงานวิจัยอยู่มากมาย ดังนั้นจึงถูกนำมาใช้ผลิตถ่านกัมมันต์ในงานวิทยานิพนธ์นี้เพื่อให้สอดคล้องกับความเป็นจริงในอุตสาหกรรมผลิตถ่านกัมมันต์ ซึ่งจะก่อให้เกิดผลดีต่อเศรษฐกิจ สังคม และสิ่งแวดล้อม อีกทั้งยังเป็นการพัฒนาหาเทคโนโลยีการผลิตใหม่ๆ เพื่อปรับปรุงการผลิตในอนาคตต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์

1. ศึกษาความเป็นไปได้ในการนำต้นปาล์ม น้ำมันมาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์เพื่อเพิ่มมูลค่าและก่อให้เกิดประโยชน์ในการนำไปใช้ในอุตสาหกรรม
2. ศึกษาตัวแปรต่าง ๆ ที่มีผลต่อสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้จากกระบวนการกระตุ้นด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งในฟลูอิด์ไคซ์เบดเพื่อหาภาวะที่เหมาะสมในการผลิตถ่านกัมมันต์

3. ศึกษาสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้ ซึ่งจะเป็นส่วนสนับสนุนความเป็นไปได้ของกระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์

1.3 ขอบเขตการวิจัย

1. ศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการคาร์บอนไนซ์ไม้ต้นปาล์มน้ำมันที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ
2. ศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการกระตุ้นถ่านชาร์ที่ได้จากการคาร์บอนไนซ์ ณ ภาวะที่เหมาะสมด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งในฟลูอิด์เบด ในระดับห้องปฏิบัติการ โดยตัวแปรที่ใช้ศึกษา ได้แก่
 - ความเร็วของแก๊สตัวกลาง (อากาศผสมไอน้ำร้อนยวดยิ่ง)
 - อุณหภูมิในการกระตุ้น
 - เวลาที่ใช้ในการกระตุ้น
 - ขนาดของอนุภาคถ่านชาร์

จากนั้นนำมาศึกษาสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของถ่านกัมมันต์

1.4 ขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัย

1. ศึกษาค้นคว้าทฤษฎีและรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย
2. ปรับปรุงและซ่อมแซมเครื่องคาร์บอนไนซ์
3. เตรียมชิ้นต้นปาล์มน้ำมันและศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการคาร์บอนไนซ์ ตัวแปรที่ศึกษาคือ อุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการคาร์บอนไนซ์
4. วิเคราะห์สมบัติของถ่านชาร์ที่ได้จากการคาร์บอนไนซ์
5. ปรับปรุงเปลี่ยนแปลงเครื่องกระตุ้นแบบเบตนิงให้เป็นเครื่องกระตุ้นแบบฟลูอิด์เบด
6. ศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการกระตุ้นและปรับปรุงเครื่องกระตุ้น ตัวแปรที่ศึกษาคือ
 - ความเร็วของแก๊สตัวกลาง (อากาศผสมไอน้ำร้อนยวดยิ่ง)
 - อุณหภูมิในการกระตุ้น
 - เวลาที่ใช้ในการกระตุ้น
 - ขนาดของอนุภาคถ่านชาร์
7. วิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้
 - การวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate Analysis), ASTM D 1762-84
 - การวิเคราะห์หาค่าความชื้น (Moisture), ASTM D3173-87 (1994)
 - การวิเคราะห์หาค่าเถ้า (Ash), ASTM D3174-93 (1994)

- การวิเคราะห์หาสารระเหยที่เผาไหม้ได้ (Volatile matter), ASTM D3175-93 (1994)
 - การวิเคราะห์หาค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตร (Bulk density), ASTM D2854-89
 - การวิเคราะห์หาค่าการดูดซับไอโอดีน (Iodine adsorption), ASTM D4607-86
 - การวิเคราะห์หาค่าการดูดซับเมทิลีนบลู (Methylene blue adsorption), JIS K1470-1975
 - การวิเคราะห์หาค่าพื้นที่ผิวจำเพาะของรูพรุน (Surface area), ASTM C819-77
8. วิเคราะห์ข้อมูล สรุป วิเคราะห์ผลการวิจัย และจัดทำวิทยานิพนธ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับการวิจัย

1. ส่งเสริมให้เกิดการนำเศษวัสดุที่เหลือจากอุตสาหกรรมการเกษตรมาผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ใหม่เพื่อลดการสูญเสียทรัพยากรธรรมชาติไปโดยไร้ค่า
2. สามารถผลิตถ่านกัมมันต์ในระดับอุตสาหกรรมโดยใช้เศษวัสดุที่เหลือจากอุตสาหกรรมการเกษตรและเทคโนโลยีที่พัฒนาขึ้นในประเทศไทย
3. ลดการขาดดุลทางเศรษฐกิจ อันเนื่องจากการนำเข้าถ่านกัมมันต์ในปริมาณที่สูงจากต่างประเทศ

บทที่ 2 วารสารปริทัศน์

2.1 ความหมายของถ่านกัมมันต์ (Activated carbon)

หมายถึง ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการนำเอาวัตถุดิบที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลักมาผ่านกระบวนการถ่านกัมมันต์ (โดยการใช้ความร้อน) จนได้ผลิตภัณฑ์สีดำ มีโครงสร้างเป็นรูพรุน มีพื้นที่ผิวสูง มีสมบัติดูดซับสูง

2.2 วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์

วัตถุดิบนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตถ่านกัมมันต์ ควรมีสมบัติดังต่อไปนี้

- เป็นของเหลือทิ้ง หรือมีราคาถูก
- มีปริมาณคาร์บอนสูง
- มีปริมาณสารอินทรีย์ต่ำ
- มีความสะดวกในการนำมาใช้งาน เช่น ไม่สลายตัวเมื่อเก็บ
- สามารถผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ที่มีคุณภาพสูงได้

วัตถุดิบใช้เป็นวัตถุดิบมักเป็นพวกอินทรีย์วัตถุ สามารถแบ่งออกได้เป็นชนิดต่างๆ ดังนี้

- พวกเซลลูโลสที่มาจากพืช เช่น แกลบ กะลามะพร้าว ชานอ้อยหรือ ชังข้าวโพด เป็นต้น
- พวกถ่านหิน เช่น ลิกไนต์ พีท เป็นต้น
- ส่วนต่างๆของสัตว์ เช่น กระดุก เป็นต้น

สำหรับวัตถุดิบใช้เป็นวัตถุดิบในรูปถ่านชาร์ มักเป็นถ่านชาร์ที่ได้จากการคาร์บอนไนซ์ อินทรีย์วัตถุหรือที่เรียกว่าถ่านสังเคราะห์ (Artificial char) หรืออาจเป็นถ่านที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ (Natural char) เช่น ถ่านหิน โดยปกติส่วนมากวัตถุดิบที่นิยมใช้เตรียมถ่านกัมมันต์มักจะมีค่าต่ำ อย่างไรก็ตามสมบัติของถ่านกัมมันต์ยังขึ้นกับชนิดของวัตถุดิบที่ใช้ กล่าวคือวัสดุที่มีความหนาแน่นต่ำและปริมาณสารระเหยสูง เช่น ไม้ ลิกนิน เป็นต้น มักจะให้ถ่านกัมมันต์ที่มีปริมาตรของรูพรุน (Pore volume) สูง และความหนาแน่นต่ำ ซึ่งมักใช้ในการดูดซับสารละลายได้ดีแต่ดูดซับแก๊สได้ไม่ดี ส่วนวัสดุที่มีความหนาแน่นสูงและมีสารระเหยสูง เช่น กะลามะพร้าว กะลาตาลโดนด ซึ่งมีค่าปริมาณสารระเหยร้อยละ 80.1 และ 80.8 ตามลำดับ (บุญชัย ตระกูล มหชัย, 2537) จะทำให้ได้ถ่านกัมมันต์ที่ได้มีปริมาตรของรูพรุนขนาดเล็ก (Micropore volume) สูงสามารถดูดซับได้ทั้งในสารละลายและแก๊ส นอกจากนี้สมบัติของถ่านกัมมันต์ ยังขึ้นกับปัจจัยอื่นๆ เช่น วิธีการผลิต

เครื่องมือที่ใช้ในการผลิตและภาวะที่ใช้ในการผลิต เป็นต้น ดังนั้นจึงเป็นการยากที่จะระบุให้แน่นอนว่าวัสดุชนิดใดจะใช้ผลิตถ่านกัมมันต์ที่เหมาะสมกับงานแบบใด

2.3 ชนิดของถ่านกัมมันต์

สามารถแบ่งออกได้โดยใช้หลักต่างๆ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับ ความสะดวกของผู้ใช้ ตัวอย่างการแบ่งชนิดของถ่านกัมมันต์ ได้แก่

2.3.1 แบ่งตามชนิดของตัวกระตุ้น

ก. กระตุ้นทางเคมี (Chemical activation)

เป็นถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการใช้สารเคมีทำปฏิกิริยากับผิวคาร์บอน มักเป็นถ่านกัมมันต์ที่มีรูพรุนขนาดใหญ่ ตัวกระตุ้นที่ใช้ ได้แก่ $ZnCl_2$ และ $NaCl$ เป็นต้น

ข. กระตุ้นทางกายภาพ (Physical activation)

เป็นถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการใช้แก๊สออกซิไดซ์ เช่น ไอน้ำ คาร์บอนไดออกไซด์ อากาศ ถ่านกัมมันต์ที่ได้จะมีรูพรุนขนาดเล็ก นิยมใช้ในการดูดซับแก๊สและไอระเหย

2.3.2 แบ่งตามขนาดรูพรุนของถ่านกัมมันต์

ก. ขนาดเล็ก (Micropore) คือถ่านกัมมันต์ที่มีรัศมีของรูพรุนเล็กกว่า 1.5 นาโนเมตร มักใช้ในการดูดซับแก๊สหรือไอระเหย

ข. ขนาดกลาง (Mesopore) คือถ่านกัมมันต์ที่มีรัศมีรูพรุนประมาณ 1.5 ถึง 200 นาโนเมตร มักใช้ประโยชน์ในปฏิกิริยาที่มีตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalytic reaction) ใช้ดูดซับสารที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ เช่น การฟอกสี

ค. ขนาดใหญ่ (Macropore) คือถ่านกัมมันต์ที่มีรัศมีของรูพรุนมากกว่า 200 นาโนเมตร โดยปกติไม่มีความสำคัญในการดูดซับสารต่างๆ แต่เป็นตัวช่วยให้สารที่ถูกดูดซับสามารถเคลื่อนที่ผ่านไป ยังรูพรุนเล็กได้ง่ายขึ้นมักนำไปใช้ประโยชน์ในการฟอกสี และการผลิตยา

2.3.3 แบ่งตามลักษณะของรูปร่าง

ก. ประเภทผง (Powder) เป็นถ่านกัมมันต์ที่ผ่านตะแกรงร่อนขนาด 150 นาโนเมตร ไม่น้อยกว่าร้อยละ 99 โดยน้ำหนัก มีลักษณะเป็นผง ใช้สำหรับฟอกสีและดูดกลิ่นในของเหลว

ข. ประเภทเม็ด (Pellet) เป็นถ่านกัมมันต์ที่ผ่านตะแกรงร่อนขนาด 150 นาโนเมตร ไม่เกินกว่าร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก มีลักษณะเป็นเม็ดซึ่งได้จากการอัดผ่านเครื่องอัด หรืออาจทำเป็นเกล็ดใช้สำหรับทำแก๊สให้บริสุทธิ์หรือการทำตัวทำละลายที่ใช้แล้วให้บริสุทธิ์ นอกจากนี้ยังใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการปฏิกิริยาของแก๊ส และใช้ทำหน้าที่กักป้องกันแก๊สและไอพิษต่างๆ

2.3.4 แบ่งตามความหนาแน่นของถ่านกัมมันต์

- ก. ความหนาแน่นต่ำ มักใช้ประโยชน์ในภาวะที่เป็นสารละลาย เช่น ฟอกสีน้ำตาลดิบหรือทำน้ำให้บริสุทธิ์
- ข. ความหนาแน่นสูง ใช้ในการดูดซับแก๊ส หรือ ไอระเหย

2.4 กระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์

กรรมวิธีการผลิตถ่านกัมมันต์ มีมากมายหลายวิธี ซึ่งขึ้นกับชนิดของวัตถุดิบและสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ต้องการ แต่โดยทั่วไปประกอบด้วยขั้นตอน 3 ขั้นตอนดังนี้ คือ การเตรียมวัตถุดิบ การคาร์ไบไนซ์ และการกระตุ้น

2.4.1 การเตรียมวัตถุดิบ ถ่านกัมมันต์ผลิตได้จากวัตถุดิบที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ ได้แก่ ชี้อัลเลียงกะลามะพร้าว แกลบ เปลือกถั่ว ยางรถยนต์เก่า ถ่านหิน พีท เป็นต้น ซึ่งการผลิตถ่านกัมมันต์สามารถเริ่มจากวัตถุดิบโดยตรง หรือเริ่มจากวัตถุดิบที่เป็นถ่านชาร์แล้วก็ได้ ขึ้นอยู่กับการผลิต แต่โดยทั่วไปมักนำวัตถุดิบมาบดและคัดขนาดก่อนที่จะนำมาคาร์ไบไนซ์ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการคาร์ไบไนซ์ แล้วจึงนำมาบดและคัดขนาดเพื่อนำไปกระตุ้นต่อไป

2.4.2 คาร์ไบไนเซชัน (Carbonization) เป็นกระบวนการไพโรไลซิสรูปแบบหนึ่งที่จะทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ในรูปของถ่านชาร์ (Char) ที่เป็นของแข็งมากกว่าน้ำมันทาร์ (Tar) หรือแก๊ส หรืออาจกล่าวได้ว่าการคาร์ไบไนซ์เป็นการเพิ่มปริมาณคาร์บอนให้สูงขึ้น โดยการเผาในที่อับอากาศที่อุณหภูมิ 200-500 องศาเซลเซียส

ปฏิกิริยาไพโรไลซิสต้องการความร้อนทั้งทางตรงและทางอ้อมที่ได้จากการออกซิเดชันเพียงบางส่วน หรือจากปฏิกิริยาอื่นๆ ที่เกิดขึ้นภายในเครื่องปฏิกรณ์ ซึ่งในปัจจุบันกระบวนการสลายตัวทางความร้อนในภาวะที่ออกซิเจนน้อยหรือในที่ที่มีการถ่ายเทความร้อนทำให้เกิดการไพโรไลซิสโดยตรงจากการเผาไหม้บางส่วน ของถ่านชาร์และแก๊สเรียกได้ว่าเป็น "กระบวนการไพโรไลซิส" กระบวนการไพโรไลซิส เป็นเทคโนโลยีที่วัตถุดิบที่ประกอบด้วยคาร์บอนที่เป็นองค์ประกอบหลักเกิดการสลายตัวด้วยความร้อน โดยมีอาณาเขตอย่างน้อยหนึ่งอาณาเขตที่เกิดการสลายตัวทางความร้อนในที่ที่ไม่มีออกซิเจน

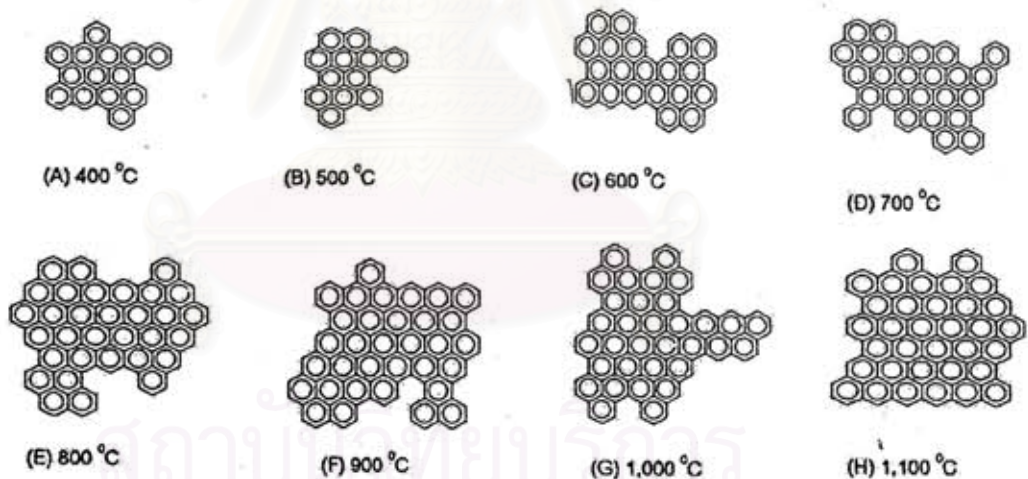
ความแตกต่างของเทอมไพโรไลซิส แก๊สซิฟิเคชัน และการเผาไหม้ ดูได้จากปริมาณอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ คือ ปริมาณอากาศที่ใช้มีส่วนสัมพันธ์กับปริมาณเชื้อเพลิง ไพโรไลซิโซนเป็นส่วนที่มีอากาศน้อยกว่าร้อยละ 20 ของอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ทางทฤษฎี แก๊สซิฟิเคชันเป็นส่วนที่ใช้อากาศระหว่างร้อยละ 25-50 ที่ใช้เผาไหม้ทางทฤษฎี และส่วนของการเผาไหม้ใช้อากาศมากกว่า 100 เปอร์เซ็นต์ ขึ้นไป การคาร์ไบไนซ์เป็นขั้นตอนที่สำคัญที่สุดในกระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์เพราะเป็นขั้นตอนเริ่มต้นของโครงสร้างที่เป็นรูพรุน โดยเกิดการสลายตัวของโครงสร้างให้ส่วนที่ระเหยง่าย เช่น ออกซิเจน ไนโตรเจน และไฮโดรเจนคาร์บอนเบา ออกมาในรูปของแก๊ส คาร์บอนอิสระที่มีอยู่จะรวมตัวกันในรูปของถ่านชาร์ ถ่านชาร์ที่ได้จากการคาร์ไบไนซ์มีความสามารถในการดูดซับต่ำทั้งนี้เพราะการทำถ่านชาร์ใช้อุณหภูมิประมาณ 400-500 องศาเซลเซียส ซึ่งยังคงมีน้ำมันทาร์ตกค้างอยู่ในช่องว่าง (Pore) หรือเกาะอยู่ตามผิวจึงจำเป็นต้องนำถ่านชาร์นี้ไปผ่านกระบวนการ

กระตุ้นเพื่อเพิ่มความสามารถในการดูดซับ ดังนั้นการกระตุ้นจึงเป็นเพียงการพัฒนาโครงสร้างให้เป็นไปทางเดียวกับการคาร์ไบไนซ์เท่านั้น

การคาร์ไบไนซ์มีความจำเป็นอย่างยิ่งในการปรับภาวะในการไพโรไลซิสให้เหมาะสม ซึ่งปัจจัยที่มีผลต่อการคาร์ไบไนซ์คือ

2.4.2.1 อุณหภูมิ กระบวนการคาร์ไบไนซ์เป็นการกลั่นสลายของสารอินทรีย์เพื่อเพิ่มปริมาณคาร์บอนในสารอินทรีย์ โดยจะเกิดการหักออกตรงบริเวณที่มีพันธะอ่อน หรือมีหมู่โมเลกุลที่หลุดออกได้ง่าย ทำให้กลุ่มโมเลกุลที่เป็นวงแหวนแตกออกจากกันเป็นกลุ่มๆ จำนวนมาก โครงสร้างวงแหวนอะโรแมติกหลักที่เหลือกลายเป็นโครงสร้างของถ่านชาร์ ซึ่งการจัดเรียงตัวของคาร์บอนอะตอมจะเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิที่เผา ส่วนโครงสร้างโมเลกุลขนาดเล็กจะกลั่นสลายตัวออกมาเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ ที่อุณหภูมิห้อง ได้แก่ น้ำแอมโมเนีย น้ำมันชาร์ และแก๊สต่างๆ

อย่างไรก็ตามสิ่งที่สำคัญที่สุดของกระบวนการนี้คือ อุณหภูมิสุดท้ายของการคาร์ไบไนซ์ ซึ่งมีความสัมพันธ์กับพลังงานที่ใช้ในการสลายพันธะเคมีในวัตถุดิบออกมาเป็นสารระเหย ที่อุณหภูมิสูงถ่านชาร์จะมีการจัดระเบียบของโครงสร้างมากกว่า เช่นถ่านหินเกรดสูงจะหดตัวมากขึ้น เมื่อเพิ่มอุณหภูมิของการคาร์ไบไนซ์เป็นผลทำให้ปริมาณของรูพรุนเล็กๆ ทั้งหมดที่เกิดขึ้นในชั้นแรกของการคาร์ไบไนซ์ลดลง และเม็ดถ่านหินมีความแข็งแรงมากขึ้น ส่งผลให้ความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาลดลง



รูปที่ 2.1 การเปลี่ยนแปลงการจัดเรียงของคาร์บอนอะตอมตามอุณหภูมิที่เผา (Hassler, 1974)

ตารางที่ 2.1 ผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการคาร์บอนไนซ์ถ่านหินต่อสมบัติของถ่านชาร์ที่เตรียมขึ้นได้ (Jankowska, 1991)

Final carbonization temperature (°C)	Mechanical strength of the granules (%)	Bulk density of granules (g cm ⁻³)	Rate of oxidation with CO ₂ at 820 °C g(g min) ⁻¹	Activation energy of the granules (kJ mol ⁻¹)
400	Unstable	0.62	-	-
500	72.7	0.60	-	-
600	93.8	0.61	0.00194	212
700	98.0	0.65	0.00156	237
800	98.4	0.69	0.00134	256

2.4.2.2 อัตราการให้ความร้อน เป็นปัจจัยที่สำคัญต่อปริมาณและองค์ประกอบของสารระเหยที่ได้จากการไพโรไลซิส กล่าวคือ ถ้าอัตราการให้ความร้อนสูงปริมาณสารระเหยจะถูกปลดปล่อยอย่างรวดเร็ว ถ่านชาร์ที่ได้จะมีรูพรุนขนาดใหญ่ ความว่องไวในการทำปฏิกิริยาสูงกว่าถ่านชาร์ที่ได้จากการให้ความร้อนด้วยอัตราที่ต่ำกว่าเพราะว่าถ่านที่ได้จากการคาร์บอนไนซ์ด้วยอัตราเพิ่มอุณหภูมิสูงคาร์บอนจะเรียงตัวเป็นระเบียบน้อยกว่า ทำให้เกิดช่องว่างเป็นรูพรุนขนาดใหญ่ เมื่อทำการกระตุ้นสารกระตุ้นจะเข้าไปทำปฏิกิริยาได้ง่าย

ตารางที่ 2.2 ผลของอัตราการให้ความร้อนที่มีต่อสมบัติของเม็ดถ่านชาร์ (Jankowska, 1991)

Heating rate (°C min ⁻¹)	Mechanical strength of granules (%)	Bulk density of granules (g cm ⁻³)	Pore volume of granules (cm ³ g ⁻¹)			
			Total	Micro-pore	Meso-pore	Macro-pore
1	93.0	0.71	0.24	-	-	-
5	94.0	0.70	0.22	0.12	0.01	0.09
8	94.1	0.72	0.23	-	-	-
20	91.5	0.62	0.28	-	-	-
stepwise growth	60.0	0.28	1.09	0.11	0.03	0.95

2.4.2.3 ตัวกลางของปฏิกิริยา (Medium of reaction) จะมีผลกระทบต่อปฏิกิริยา ถ้าแก๊สและไอที่เกิดขึ้นระหว่างการไพโรไลซิสถูกพาออกไปอย่างรวดเร็ว โดยแก๊สที่เป็นตัวกลาง เช่น แก๊สไนโตรเจน

(เฉื่อยต่อปฏิกิริยาการเผาไหม้ของคาร์บอน) หรือแก๊สจากการเผาไหม้ ถ้าตัวกลางเป็นแก๊สที่ได้จากการเผาไหม้ ปริมาณถ่านชาร์ที่ได้จะน้อยกว่าตัวกลางที่เป็นแก๊สไนโตรเจน แต่มีความหวังใจในการทำปฏิกิริยากับตัวกระตุ้นสูงกว่า เนื่องจากการเผาไหม้มีส่วนช่วยสร้างรูพรุนขนาดใหญ่ขึ้น เมื่อนำไปกระตุ้นมีผลทำให้แก๊สกระตุ้นสามารถแทรกตัวเข้าไปในอนุภาคถ่านชาร์ได้ง่าย

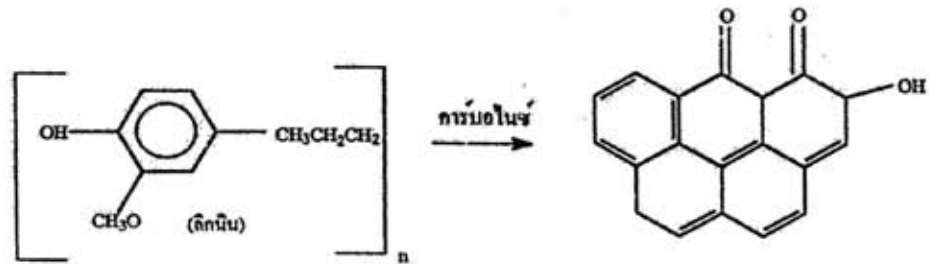
โดยทั่วไปการคาร์โบไนซ์จะมีการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ 2 ช่วง คือ ช่วงอ่อนตัว (Softening period) และ ช่วงหลังการอ่อนตัว (After softening period) ในช่วงการอ่อนตัวควรให้ความร้อนด้วยอัตราที่ต่ำเพื่อ ให้แก๊สหลุดออกจากโพรงภายในได้ โดยไม่สลายตัวหรือเปลี่ยนรูปเป็นของแข็งอัดแน่นภายในโพรง และถ่านชาร์ที่ได้จะแน่นและแข็งด้วย (Bansel and Coworker, 1988)

2.4.3 การกระตุ้น (Activation) หมายถึง การทำให้คาร์บอนหรือถ่านชาร์มีความสามารถในการดูดซับสูงขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการเพิ่มพื้นที่ผิวและการทำให้ผิวถ่านชาร์มีความหวังใจมากขึ้น (นิชชรี นิลนนท์, 2541) พิจารณาความหมายของการกระตุ้นไว้ 3 ลักษณะ คือ

- เป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวหวังใจ (Active surface area) โดยเกิดปฏิกิริยาทางเคมีทำให้โมเลกุลบางโมเลกุลหลุดออกไป ทำให้เกิดส่วนที่มีอำนาจดูดซับขึ้นมากแทน
- เป็นการเพิ่มความหวังใจในการดูดซับให้กับผิวที่มีอยู่แล้ว หมายถึงทำให้อะตอมของคาร์บอนมีพลังงานศักย์สูงขึ้นโดยจัดเปลี่ยนโครงสร้างใหม่ เพื่อให้มีความหวังใจในการดูดซับสูงขึ้น
- เป็นการกำจัดสารอินทรีย์วัตถุหรืออนินทรีย์วัตถุต่างๆซึ่งเป็นสารปนเปื้อนออกจากบริเวณที่ทำหน้าที่ดูดซับ (Active center)

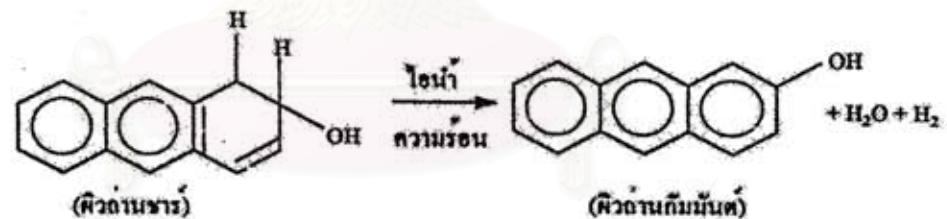
วัตถุดิบที่ใช้ผลิตถ่านกัมมันต์ส่วนใหญ่เป็นวัตถุดิบเหลือทิ้งทางเกษตรคือเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนทั้งที่เป็นโซ่ยาวและเป็นวง เช่น ลิกนิน เซลลูโลส เป็นต้น เมื่อนำมาคาร์โบไนซ์จะเกิดการสร้างวงอะโรแมติก (Aromatization) ดังแสดงในรูปที่ 2.2 เช่นการเกิดวงเบนซีนจากลิกนิน ซึ่งเป็นสารไฮโดรคาร์บอนที่มีโซ่ยาวมากและมักพบในวัสดุทางการเกษตรที่มีความแข็งและเหนียว การผลิตถ่านกัมมันต์ด้วยซิงค์คลอไรด์จะป้องกันไม่ให้เกิดปฏิกิริยากับออกซิเจน โดยการห่อหุ้มโครงสร้างของวัตถุดิบด้วยซิงค์คลอไรด์ตั้งแต่ก่อนที่จะนำไปคาร์โบไนซ์ ซึ่งจะช่วยระงับการเกิดน้ำมันห้ำ แต่จะเกิดหมู่ฟังก์ชันที่เป็นกรด เช่น $-Cl$, $-COOH$ เป็นต้น (Calurla et al., 1991) จึงทำให้ได้ถ่านกัมมันต์ที่มีความสามารถในการดูดซับสูง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



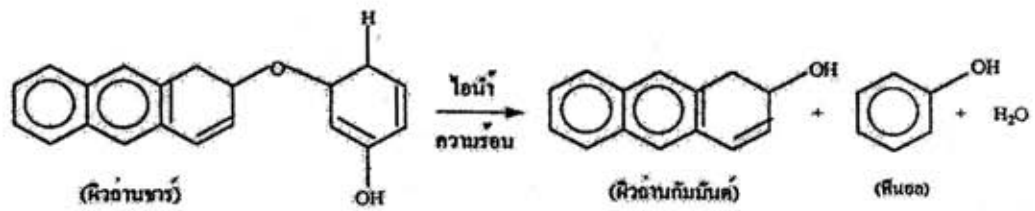
รูปที่ 2.2 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีโดยการเตรียมถ่านชาร์จากวัสดุทางการเกษตร (Calurla et al., 1991)

สำหรับการผลิตถ่านกัมมันต์ด้วยแก๊สออกซิไดซ์ เป็นการจัดเรียงโครงสร้างถ่านชาร์ที่มีเสถียรภาพแล้ว แต่อ่านาจากการดูดซับต่ำ ดังรูปที่ 2.3 (ก) เป็นภาพจำลองของการเกิดปฏิกิริยาการกระตุ้นด้วยแก๊สออกซิไดซ์ เมื่อเกิดปฏิกิริยากับไอน้ำ โดยใช้ความร้อนเป็นตัวเร่งจะเกิดการกำจัดอะตอมไฮโดรเจนออกจากโครงสร้างทำให้เกิดวงเบนซิน ปฏิกิริยาการกระตุ้นด้วยแก๊สออกซิไดซ์ยังหมายถึงการล้างโมเลกุลแปลกปลอมต่างๆ เช่น ทาร์ ออกจากบริเวณที่ใช้ในการดูดซับซึ่งเกิดในช่วงคาร์บอไนซ์ ดังรูปที่ 2.3 (ข) เป็นภาพจำลองการกำจัดโมเลกุลฟีนอล ออกจากโครงสร้างของถ่านชาร์ ซึ่งฟีนอลเป็นสารชนิดหนึ่งในน้ำมันหัตถ์ ปฏิกิริยาการกระตุ้นด้วยไอน้ำและความร้อนจะช่วยทำให้ฟีนอลหลุดออก



(ก) การจัดเรียงโครงสร้าง

รูปที่ 2.3 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมี ของปฏิกิริยาการกระตุ้นด้วยแก๊สออกซิไดซ์ (นิชชี นิลนนท์, 2541)



(ข) การกำจัดโมเลกุลแปลกล้อม

รูปที่ 2.3(ต่อ) การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมี ของปฏิกิริยาการกระตุ้นด้วยแก๊สออกซิไดซ์ (นิชรี นิลนนท์, 2541)

2.4.3.1 วิธีการกระตุ้นทางเคมี (Chemical Activation) เป็นวิธีการผลิตถ่านกัมมันต์โดยให้สารกระตุ้นทำปฏิกิริยาเคมีกับผิวคาร์บอน มีความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา สารเคมีที่นิยมใช้ ได้แก่ ซิงค์คลอไรด์ ($ZnCl_2$) นอกจากนี้ยังมีสารเคมีตัวอื่นๆ เช่น แคลเซียมคลอไรด์ ($CaCl_2$) กรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) ข้อดีของการกระตุ้นด้วยวิธีนี้คือใช้อุณหภูมิไม่สูงมาก (400-600 องศาเซลเซียส) แต่มีข้อเสียคือมีสารเคมีตกค้างในถ่านกัมมันต์ทำให้ต้องเสียเวลาและค่าใช้จ่ายในการล้างสารเคมีออก อีกทั้งอุปกรณ์ที่ใช้ก็ต้องเป็นชนิดพิเศษที่สามารถทนทานต่อการกัดกร่อนได้

2.4.3.2 วิธีการกระตุ้นทางกายภาพ (Physical Activation) เป็นวิธีการผลิตถ่านกัมมันต์โดยที่ผิวของคาร์บอนเกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ เช่นการจัดเรียงตัวใหม่ ซึ่งจะทำให้ถ่านซาร์เพิ่มความสามารถในการดูดซับสูงขึ้น แก๊สที่นิยมใช้ในการออกซิไดซ์ ได้แก่ ไอน้ำร้อนยวดยิ่ง แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และแก๊สออกซิเจน โดยใช้ร่วมกับความร้อนปฏิกิริยาการกระตุ้นอาจเกิดจากการใช้ความร้อนเพียงอย่างเดียว แต่ต้องใช้อุณหภูมิสูงมากถึง 1,200 องศาเซลเซียส แต่ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้จะมีคุณภาพต่ำกว่าถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้โดยการกระตุ้นด้วยแก๊สออกซิไดซ์

ปัจจัยที่มีผลต่อการกระตุ้นด้วยแก๊สออกซิไดซ์ คือ (Hassler, 1974)

- สมบัติทางเคมีและความเข้มข้นของแก๊สออกซิไดซ์ที่ใช้
- อุณหภูมิขณะเกิดปฏิกิริยา
- ระยะเวลาของปฏิกิริยา
- ชนิดและปริมาณของวัสดุที่ใส่

อุณหภูมิที่ใช้ไม่สามารถกำหนดได้แน่นอน แต่มักไม่เกิน 1,000 องศาเซลเซียส เพราะถ้าใช้อุณหภูมิสูงกว่า 1,000 องศาเซลเซียส จะทำให้อำนาจการดูดซับของถ่านกัมมันต์ลดน้อยลง อุณหภูมิที่ใช้ทั่วไปอยู่ในช่วง 800-900 องศาเซลเซียส แต่ก็มีบ้างที่ใช้อุณหภูมิต่ำกว่า 600 องศาเซลเซียส

ข้อดีของการกระตุ้นด้วยแก๊สออกซิไดซ์คือ ไม่มีสารเคมีตกค้าง ข้อเสียคือต้องใช้อุณหภูมิสูงกว่าการกระตุ้นด้วยสารเคมี

การกระตุ้นคาร์บอนอะตอมจะทำปฏิกิริยากับแก๊สออกซิไดซ์ เกิดเป็นแก๊สออกซิไดซ์ของคาร์บอน แพร่ออกจากผิวของคาร์บอน เกิดแก๊สซิฟิเคชันบางส่วนของเม็ดถ่านชาร์เป็นรูพรุนขึ้นในโครงสร้างของถ่านชาร์ประกอบด้วยรูพรุนจำนวนมาก ซึ่งเกิดจากช่องว่างระหว่างผลึกในการจัดเรียงตัวของคาร์บอนอะตอม รูพรุนเหล่านี้ถูกอุดตันไว้ด้วยน้ำมันที่ที่เกิดจากการสลายตัวด้วยความร้อน และถูกขัดขวางด้วยอะมอฟสคาร์บอน ดังนั้นการกระตุ้นจึงเป็นการเปิดรูพรุนที่ถูกปิด และสร้างรูพรุนขึ้นมาใหม่ด้วย การกระตุ้นด้วยถ่านชาร์หลายตัวอย่างพบว่า การกระตุ้นด้วยไอน้ำให้ผลดีกว่าการกระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และการกระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ดีกว่าการกระตุ้นด้วยอากาศ การกระตุ้นด้วยไอน้ำต้องใช้อุณหภูมิสูงพอที่จะทำให้เกิดการออกซิไดซ์อย่างรวดเร็ว แต่ไม่ควรเกิน 1,000 องศาเซลเซียส เพราะจะทำให้ถ่านกัมมันต์ที่ได้มีสมบัติในการดูดซับลดลง การกระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ใช้อุณหภูมิ 800-900 องศาเซลเซียส ส่วนการกระตุ้นด้วยอากาศใช้อุณหภูมิต่ำกว่า 600 องศาเซลเซียส เนื่องจากการที่อากาศสามารถทำให้เกิดการเผาไหม้ได้ จึงไม่นิยมใช้ในการกระตุ้น เพราะทำให้ควบคุมอุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาได้ลำบาก

ปฏิกิริยาออกซิเดชันของคาร์บอนขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของตัวออกซิไดซ์ และอุณหภูมิ ที่อุณหภูมิต่ำ อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างคาร์บอนกับตัวออกซิไดซ์ต่ำ จึงเป็นผลให้ได้รูพรุนที่ต้องการช้า แต่ที่อุณหภูมิสูงเกินไปปฏิกิริยาออกซิเดชันจะเกิดที่ผิวนอกของอนุภาค ทำให้เกิดการสูญเสียคาร์บอนแต่ไม่ทำให้เกิดรูพรุนขึ้น

การกระตุ้นด้วยไอน้ำ การใช้ไอน้ำในที่นี้หมายถึงการใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่ง (Superheated steam) ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นแบบดูดความร้อน และเป็นปฏิกิริยาเคมีที่ซับซ้อน แต่โดยทั่วไปจะสมมติเป็นปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชัน (Gasification) ของถ่านชาร์

ดังสมการที่ (2.1) และ (2.2) (Rodriguez-Reinoso and Lanires-Solano, 1965)

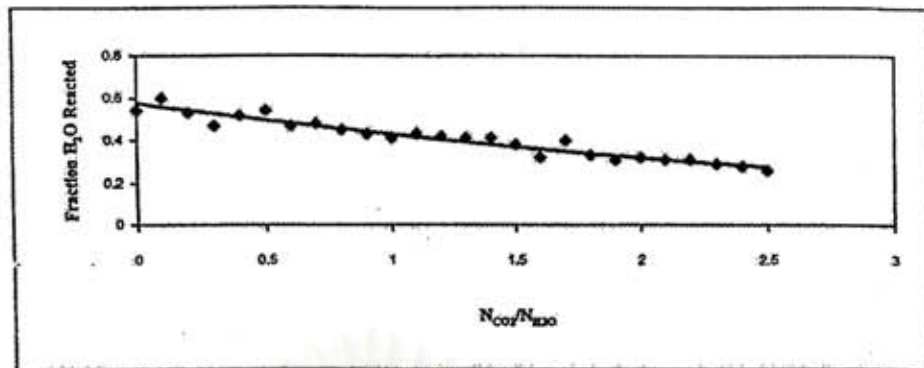


อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี (r) สามารถเขียนแบบ Langmuir-Hinshelwood ได้ดังนี้

$$r = \frac{k_1 P_{H_2O}}{1 + k_2 P_{H_2O} + k_3 P_{H_2}} \quad (2.2)$$

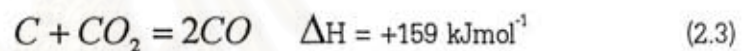
โดยที่ P_{H_2O} และ P_{H_2} = ความดันย่อยของแก๊ส H_2O และ H_2
 k_1, k_2, k_3 = ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาหาได้จากการทดลอง

ส่วนการใช้ไอน้ำที่มีแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ผสมอยู่ด้วยในการกระตุ้นไอน้ำจะเกิดปฏิกิริยาลดลง ทั้งนี้เพราะแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีอยู่จะเกิดปฏิกิริยาแข่งขันกับไอน้ำ



รูปที่ 2.4 ผลของปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีต่อปฏิกิริยา การกระตุ้นด้วยไอน้ำ(Ergun et al., 1965)

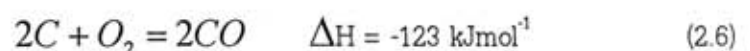
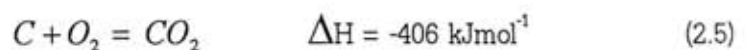
การกระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ อุณหภูมิที่ใช้อยู่ในช่วงระหว่าง 800 ถึง 900 องศาเซลเซียส วัสดุที่ใช้ควรถูกเผาเป็นถ่านชาร์เสียก่อน ส่วนวิธีการผลิตนั้นคล้ายกับการกระตุ้นด้วยไอน้ำและปฏิกิริยาเป็นแบบดูดความร้อน ดังสมการ (2.3) และ (2.4)



$$r = \frac{k_1 p_{CO_2}}{1 + k_2 p_{CO} + k_3 p_{CO_2}} \quad (2.4)$$

โดยที่ p_{CO_2} และ p_{CO} = ความดันย่อยของแก๊ส CO_2 และ CO
 k_1, k_2, k_3 = ค่าคงที่อัตราที่เกิดปฏิกิริยาหาได้จากการทดลอง

การกระตุ้นด้วยแก๊สออกซิเจน (หรืออากาศ) เป็นปฏิกิริยาคายความร้อนที่เกิดขึ้นง่าย และเร็วกว่าการกระตุ้นด้วยไอน้ำ หรือการกระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ คาดว่าขั้นตอนของการเกิดปฏิกิริยาอาจเป็นดังสมการ



ปฏิกิริยาทั้งสองเป็นแบบคายความร้อนและอัตราส่วนระหว่างคาร์บอนมอนนอกไซด์กับคาร์บอนไดออกไซด์จะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ถ่านชาร์ที่ถูกกระตุ้นด้วยอากาศที่มีออกซิเจนปนอยู่จะเกิด

หมู่ฟังก์ชันเอสที่มีออกซิเจนขึ้นที่ผิวของถ่านชาร์จำนวนมาก แต่อากาศไม่นิยมใช้เป็นตัวกระตุ้นเพราะควบคุมได้ยาก และเป็นปฏิกิริยาคายความร้อนจึงไม่สามารถรักษาอุณหภูมิในเตาให้คงที่ได้ ทั้งนี้เพราะออกซิเจนเป็นตัวออกซิไดซ์ที่แรงเกินไป

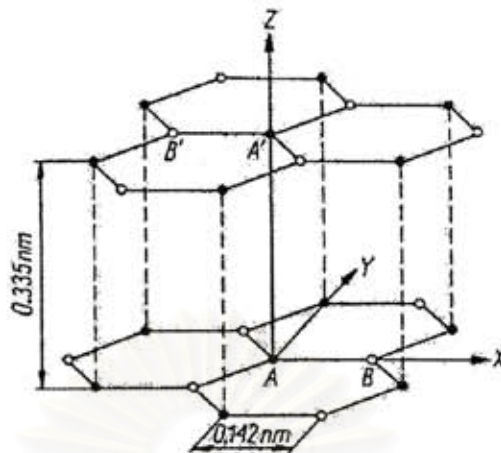
ตารางที่ 2.3 การดูดซับของถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้น ณ ภาวะต่างๆกัน (Hassler, 1974)

Activated condition		Chrysolidine, R	Substance adsorbed (g/g carbon)		
Gas	Temp (°C)		Poncean R	Aniline blue	Iodine
Air	600	0.34	0.10	0.05	0.36
Air	740	0.16	0.08	0.05	0.40
Air	790	0.15	0.08	0.06	0.42
Air	860	0.14	0.08	0.06	0.42
Air	910	0.13	0.10	0.06	0.40
Steam	770	0.37	0.19	0.16	0.60
Steam	825	0.37	0.16	0.17	0.60
Steam	880	0.36	0.17	0.21	0.62
CO ₂	880	0.32	0.12	-	-

2.5 โครงสร้างรูพรุนของถ่านกัมมันต์ (Structure of Activated carbon)

ในการกระตุ้นจะทำให้ถ่านชาร์ที่ได้จากการคาร์บอนไชน์มีความพรุนมากขึ้นเนื่องจากการสูญเสียสารประกอบคาร์บอนระหว่างช่องว่างผลึกคาร์บอน รูพรุนทำให้เกิดพื้นที่ผิวสัมผัสมากขึ้น เพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับ การกระตุ้นที่เหมาะสม คือการทำให้มีความพรุนไม่ใช่เป็นการกระตุ้นให้ขนาดของรูใหญ่

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



Ordering of carbon atoms in a crystal of graphite.

รูปที่ 2.5 การจัดเรียงตัวของคาร์บอนอะตอมในผลึกของแกรไฟต์ (Jankowska, 1991)

โครงสร้างรูพรุนของถ่านกัมมันต์ขึ้นอยู่กับภาวะการผลิต ได้แก่ อุณหภูมิ และเวลาในการให้ความร้อน นอกจากนี้ยังขึ้นกับชนิด และความบริสุทธิ์ของวัตถุดิบที่ใช้ ผลึกของแกรไฟต์มีสมบัติใกล้เคียงกับถ่านกัมมันต์ มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1 ถึง 10 นาโนเมตร พบว่าอุณหภูมิเป็นปัจจัยสำคัญต่อการเรียงตัวของผลึก โดยทั่วไปถ่านกัมมันต์จะมีพื้นที่ผิวจำเพาะ 1,000 ตารางเมตรต่อกรัมและบางครั้งมีจำนวนมากถึง 1,500 ตารางเมตรต่อกรัม ขึ้นอยู่กับความแตกต่างของรูปร่างและขนาดของความพรุนจึงทำให้มีผลต่อกลไกการดูดซับ ดังนั้นจึงได้จำแนกชนิดของรูพรุนตามขนาดรัศมีรูพรุนออกเป็น 3 ประเภทดังนี้

- รูพรุนขนาดใหญ่ (Macropores) มีรัศมีรูพรุนมากกว่าหรือเท่ากับ 100-200 นาโนเมตร มีปริมาตรของรูพรุนขนาดใหญ่อยู่ระหว่าง 0.2-0.8 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม และมีพื้นที่ผิวจำเพาะไม่เกิน 0.5 ตารางเมตรต่อกรัม เมื่อเปรียบเทียบกับรูพรุนประเภทอื่นแล้ว รูพรุนขนาดใหญ่มีพื้นที่ผิวจำเพาะน้อยมาก ดังนั้นรูพรุนประเภทนี้จึงไม่มีความสำคัญต่อการดูดซับ เพียงแต่ทำหน้าที่เป็นทางส่งผ่านอนุภาคเข้าไปในรูที่เล็กกว่า

- รูพรุนขนาดกลาง (Mesopores) หรือที่เรียกกันว่า Transitional pores มีรัศมีรูพรุนอยู่ในช่วงระหว่าง 1.5-1.6 ถึง 100-200 นาโนเมตร โดยเฉลี่ยถ่านกัมมันต์มีปริมาตรของรูพรุนขนาดกลางประมาณ 0.1-0.5 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม และมีพื้นที่ผิวจำเพาะระหว่าง 20-100 ตารางเมตรต่อกรัม ตัวอย่างสารดูดซับ ที่มีรูพรุนขนาดกลาง ได้แก่ ซิลิกาเจล (Silica gel) อะลูมินาเจล (Alumina gel) และ อะมิโนซิลิเกตคะตะลิสต์ (Amino silicate catalyst)

- รูพรุนขนาดเล็ก (Micropores) ปกติมีขนาดรัศมีรูพรุนน้อยกว่า 1.5-1.6 นาโนเมตร โดยเฉลี่ยถ่านกัมมันต์มีปริมาตรอยู่ระหว่าง 0.2-0.6 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม มีพื้นที่ผิวจำเพาะมากกว่า 100 ตารางเมตรต่อกรัม พลังงานในการดูดซับของรูพรุนขนาดเล็กมีมากกว่าในรูพรุนขนาดกลาง หรือผิวอื่นที่ไม่มีรูพรุน

ดังนั้นรูพรุนขนาดเล็กจึงมีความสำคัญที่สุดในการดูดซับ เนื่องจากมีพื้นที่การดูดซับและพลังงานดูดซับ (Adsorption energy) มากที่สุด ทำให้การดูดซับเพิ่มขึ้นมากที่ความกดดันต่ำๆ รูพรุนขนาดเล็กมีความสัมพันธ์กับพื้นที่ผิวจำเพาะ เชื่อกันว่าปริมาณของรูพรุนแต่ละขนาดหรือที่เรียกกันว่า การกระจายขนาดของรูพรุน จะขึ้นกับชนิดของวัตถุดิบและวิธีการกระตุ้น

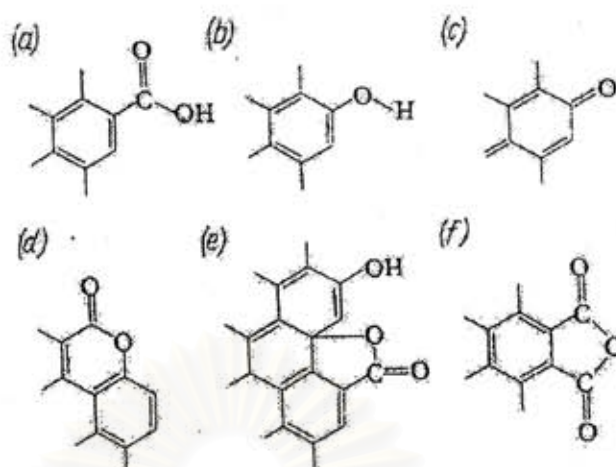
รูพรุนส่วนใหญ่จะเกิดในช่วงการออกซิไดซ์ ซึ่งเป็นการกำจัดสารอินทรีย์ต่างๆ ออกจากช่องว่างของถ่านชาร์ที่ใช้เป็นวัตถุดิบเริ่มต้น รวมทั้งเกิดการจัดเรียงและเคลื่อนย้ายอะตอมหรือกลุ่มอะตอมเพื่อให้เกิดช่องว่างที่มีอำนาจในการดูดซับ รูพรุนที่มีขนาดใหญ่จะทำหน้าที่เป็นเพียงทางผ่านของสารถูกดูดซับเข้าไปยังรูพรุนขนาดเล็ก (Redriguez-Reinoso et al., 1965) จึงไม่มีผลต่อการดูดซับ แต่จะมีผลต่ออัตราเร็วในการดูดซับ ส่วนรูพรุนขนาดกลางนั้นสามารถดูดซับโมเลกุลของของเหลวเหลวได้บ้าง รูพรุนขนาดเล็กมีหน้าที่ในการดูดซับ จึงมีผลต่อความจุในการดูดซับโดยเฉพาะการดูดซับที่ความดันสัมพัทธ์ต่ำ

2.6 โครงสร้างทางเคมีของถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์เตรียมจากถ่านชาร์ที่ได้จากการเผาผลาญสารอินทรีย์ด้วยความร้อน (Pyrolysis) ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 1,000 องศาเซลเซียส ซึ่งเรียกกระบวนการนี้ว่าคาร์บอนไนเซชัน อะตอมต่างๆที่ไม่ใช่คาร์บอน ได้แก่ ออกซิเจน ไนโตรเจน และไฮโดรเจน จะถูกกำจัดออกในรูปของแก๊ส อะตอมคาร์บอนที่เหลือจะจัดเรียงเป็นชั้นๆแต่ละชั้นจะประกอบด้วยวงแหวนอะโรมาติก (Aromatic ring) เชื่อมโยงกันอย่างไม่เป็นระเบียบ ทำให้เกิดช่องว่างหรือโพรง ซึ่งเป็นที่อยู่ของพวกพหุและสารอื่นๆที่ได้จากการเผาผลาญ ช่องว่างรูพรุนเหล่านี้จะกลายเป็นรูพรุนที่มีความสามารถในการดูดซับโดยการกระตุ้น ซึ่งจะเป็นการล้างพวกพหุและสารต่างๆที่ได้จากการเผาผลาญออกจากช่องว่างหรือโพรง แล้วจะสร้างหมู่ฟังก์ชันขึ้นมาแทน ดังนั้นโครงสร้างทางเคมีของถ่านกัมมันต์มีผลต่อความสามารถในการดูดซับด้วย

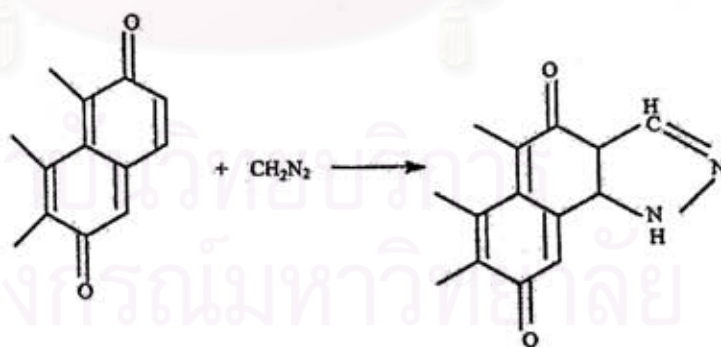
โดยทั่วไปผิวของถ่านกัมมันต์เกิดเป็นหมู่ฟังก์ชันลต่าง ๆ ซึ่งเกิดจากอะตอมของคาร์บอนกับออกซิเจน ที่เรียกว่า ฝิวออกไซด์ มีอยู่ 2 ชนิด คือ

2.6.1 ชนิดที่เป็นกรด มักเกิดในถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นที่อุณหภูมิไม่สูงมากนัก คือ ประมาณ 400 ถึง 500 องศาเซลเซียส หมู่ฟังก์ชันลที่เกาะอยู่บนผิวถ่านกัมมันต์จะมีสมบัติคล้ายกรด ได้แก่ Carbonyls, Phenols, Lactones, Aldehyde, Ketones, Quinones, Hydroquinone, Anhydride เป็นต้น ดังแสดงในรูปที่ 2.6 โครงสร้างทางเคมีของถ่านกัมมันต์แบบนี้ค่อนข้างเสถียรแม้จะอยู่ในสภาวะอากาศ โดยทั่วไปจะเสถียรที่อุณหภูมิต่ำกว่า 200 องศาเซลเซียส ถ้าอุณหภูมิสูงกว่านี้เล็กน้อยจะสลายตัวเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และไอน้ำ และถ้าอุณหภูมิสูงกว่านี้มากๆจะเกิดการสลายตัวให้แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์และแก๊สไฮโดรเจน



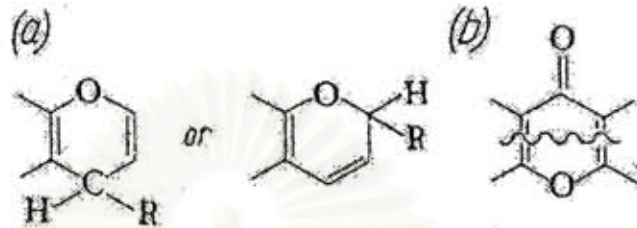
Principal types of acidic oxygen surface functional groups:
 (a) carboxyl, (b) phenolic, (c) quinonoid, (d) normal lactone, (e) fluorescein-type lactone, (f) anhydride originating from neighbouring carboxyl groups

รูปที่ 2.6 ตัวอย่างหมู่ฟังก์ชันัลที่เป็นกรดบนผิวถ่านกัมมันต์ (Jankowska, 1991)



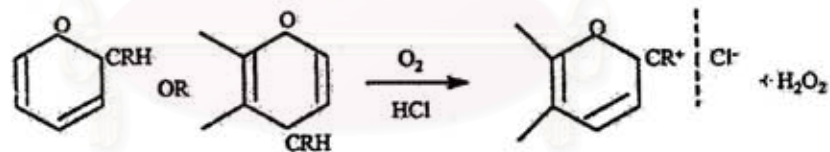
รูปที่ 2.7 ตัวอย่างปฏิกิริยาของถ่านกัมมันต์ที่มีผิวเป็นกรด (Mattson, 1971)

2.6.2 ชนิดที่เป็นต่าง เป็นถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นที่อุณหภูมิ 800 ถึง 900 องศาเซลเซียส หมู่ฟังก์ชันนัลที่เกาะอยู่บนผิวของถ่านกัมมันต์สามารถดูดซับโมเลกุลของกรดได้ดี ได้แก่ Hydroxide, Carbonate เป็นต้น



Functional groups of basic character: (a) chromene
(b) pyrone-like

รูปที่ 2.8 ตัวอย่างหมู่ฟังก์ชันนัลที่เป็นเบสบนผิวถ่านกัมมันต์ (Jankowska, 1991)



รูปที่ 2.9 ตัวอย่างปฏิกิริยาการดูดซับโมเลกุลกรด ด้วยถ่านกัมมันต์ที่มีผิวเป็นต่าง (Bansel and Coworker, 1988)

จากการศึกษาของ Gergova (1993) พบว่าถึงแม้จะทำการผลิตถ่านกัมมันต์ด้วยวิธีการเดียวกันจากวัตถุดิบต่างชนิดกัน หมู่ฟังก์ชันนัลของออกซิเจนบนผิวของถ่านกัมมันต์จะมีความแตกต่างกันด้วย ดังแสดงในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ส่วนประกอบหมู่ฟังก์ชันนัลของออกซิเจนบนผิวของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากวัตถุดิบที่เหลือจากการเกษตรต่างชนิดกัน (Gergova, 1993)

วัตถุดิบ	Content of surface functional groups (mg-eq g ⁻¹)	
	C-O ± 0.03	O-H ± 0.05
Apricot stones	3.27	0.02
Grape seeds	1.32	2.05
Cherry stones	1.42	1.90

2.7 การดูดซับทางกายภาพและทางเคมี (Physical and Chemical Adsorption)

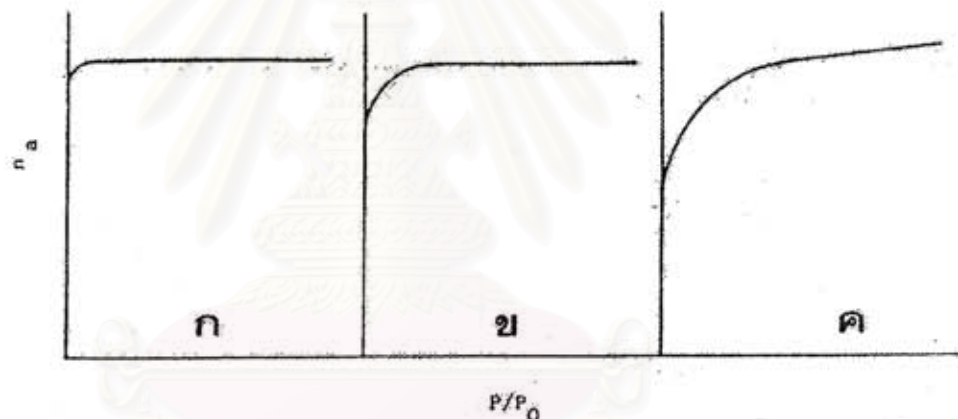
โดยทั่วไปการดูดซับมี 2 ชนิด คือการดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption) เกิดขึ้นโดยพันธะที่ดึงดูดระหว่างสารถูกดูดซับกับตัวดูดซับ เช่น แรงแวนเดอร์วาลส์ เป็นแรงที่อ่อน ดังนั้นสารถูกดูดซับอาจหลุดจากกันได้ได้ง่าย อันเป็นกระบวนการย้อนกลับ ส่วนการดูดซับอีกชนิดหนึ่งคือการดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption) เกิดขึ้นโดยมีพันธะที่เชื่อมระหว่างสารถูกดูดซับเป็นพันธะที่แข็งแรง และจึงไม่เกิดกระบวนการย้อนกลับ การดูดซับเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน ปริมาณของสารถูกดูดซับที่ถูกยึดโดยตัวดูดซับขึ้นกับความเข้มข้นของสารถูกดูดซับ อุณหภูมิ ชนิดของตัวดูดซับและสารถูกดูดซับ โดยทั่วไปการศึกษาหาปริมาณสารถูกดูดซับ จะทำการวัดที่อุณหภูมิคงที่ ซึ่งความสัมพันธ์ที่ได้นี้เรียกว่า ไอโซเทอมของการดูดซับ สมการที่ใช้อธิบายข้อมูลไอโซเทอม ได้แก่ Freundlich, Langmuir และ Brunauer, Emmet & Teller หรือ ที่เรียกกันว่า BET Isotherm ไอโซเทอมนี้ได้พัฒนาโดย Freundlich และ Langmuir ซึ่งเป็นสมการที่นำมาประยุกต์ใช้มากที่สุดในการใช้หาพื้นที่ผิวถ่านกัมมันต์ ข้อแตกต่างระหว่างการดูดซับทั้งสองแบบ คือ

1. ขนาดความร้อนของการดูดซับ เมื่อแก๊สดูดซับผิวของสารดูดซับ จะมีความร้อนถูกปล่อยออกมา ถ้าเป็นการดูดซับทางกายภาพจะมีขนาดพอกับความร้อนที่ปล่อยออกมาในการกลั่นตัวจากแก๊สเป็นของเหลว ประมาณกิโลแคลอรีต่อโมล ถ้าเป็นการดูดซับทางเคมีความร้อนของการดูดซับประมาณ 10⁴ ถึง 10⁵ แคลอรีต่อโมล
2. อุณหภูมิการดูดซับ การดูดซับทางกายภาพเกิดภายใต้ภาวะ อุณหภูมิ และความดันที่เหมาะสม ขณะที่การดูดซับทางเคมีเกิดขึ้นเฉพาะเมื่อสารสามารถเกิดพันธะเคมีกับผิวของตัวดูดซับ
3. โมเลกุลที่ถูกดูดซับทางกายภาพ สามารถทำให้หลุดออกจากผิวของตัวดูดซับได้ด้วยวิธีลดความดันที่อุณหภูมิเดียวกับการดูดซับโดยโมเลกุลไม่เปลี่ยนแปลง การกำจัดชั้นโมเลกุลที่ถูกดูดซับโดยวิธีเคมีทำยาก

4. จำนวนชั้นที่ถูกดูดซับ การดูดซับทางกายภาพสามารถเกิดขึ้นโมเลกุลที่ถูกดูดซับบนผิวซ้อนกัน ได้หลายชั้น แต่การดูดซับทางเคมีมักเกิดโมเลกุลที่ถูกดูดซับเพียงชั้นเดียว บางกรณีการดูดซับทางกายภาพ อาจเกิดบนชั้นโมเลกุลที่ถูกดูดซับทางเคมี

5. พลังงานกระตุ้น การดูดซับทางกายภาพเกิดได้อย่างรวดเร็วไม่ต้องอาศัยพลังงานกระตุ้น การดูดซับทางเคมีอาจเกิดได้ทันทีโดยทั่วไปแต่ต้องอาศัยพลังงานกระตุ้น

กระบวนการดูดซับเป็นกระบวนการหนึ่งซึ่งสารประกอบต่างๆ เคลื่อนย้ายจากสารละลายจนกระทั่งเข้าสู่ภาวะสมดุลระหว่าง ความเข้มข้นของสารละลายกับปริมาณผิวของตัวดูดซับ การแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ปริมาณสารที่ถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักคาร์บอนและความเข้มข้นของสารละลายที่เหลืออยู่ ซึ่งเส้นความสัมพันธ์ นี้เราเรียกว่า "ไอโซเทอมของการดูดซับ" สำหรับถ่านกัมมันต์จะมีลักษณะของไอโซเทอมแตกต่างกันไปตาม ชนิดของรูพรุน ดังแสดงในรูปที่ 2.10



Different types of adsorption isotherms (N_2 at 77 K) on microporous carbons. (Reprinted with permission from Ref. 20.)

รูปที่ 2.10 เส้นไอโซเทอมของถ่านกัมมันต์ชนิดต่างๆ (Rodriguez-Reinoso, 1965)

(ก) ถ่านกัมมันต์ที่มีแต่รูพรุนขนาดเล็ก ที่มีขนาดไม่แตกต่างกันมากเส้นความสัมพันธ์จะขนานกับ แกนราบ

(ข) ถ่านกัมมันต์ที่มีรูพรุนขนาดเล็ก และมีขนาดแตกต่างกันมากกว่าแบบแรก เส้นความสัมพันธ์จะ ขนานกับแกนราบ แต่ก่อนที่จะเข้าสู่ช่วงแนวราบเส้นความสัมพันธ์จะมีความโค้งมนมากกว่าและความชันขั้นที่ สมดุลของสารถูกดูดซับสูงกว่า

(ค) ถ่านกัมมันต์จะประกอบด้วยรูพรุนขนาดเล็กที่มีขนาดแตกต่างกันมาก และมีรูพรุนขนาดกลาง มักพบในถ่านกัมมันต์เกรดการค้า

อัตราเร็วของการดูดซับขึ้นกับขั้นตอนต่างๆ ดังนี้ (Jankowska, 1991)

- การพหุโมเลกุลสารถูกดูดซับผ่านชั้นฟิล์มซึ่งอยู่รอบๆ สารดูดซับ
- การแพร่กระจายเข้าไปในรูพรุน และผ่านไปตามผนังของผิวรูพรุนของสารดูดซับ
- การยึดติดกับโมเลกุลของสารดูดซับด้วยผิวว่องไว อีกทั้งยังเกิดพันธะระหว่างสารถูกดูดซับกับผิวถ่านกัมมันต์

2.8 ประโยชน์ของถ่านกัมมันต์

เนื่องจากถ่านกัมมันต์มีสมบัติเกี่ยวกับการฟอกสี และแต่งรสสารได้หลายชนิด ดังนั้นจึงมีการใช้ถ่านกัมมันต์อย่างแพร่หลายในโรงงานอุตสาหกรรมหลายประเภทดังนี้

1. โรงงานน้ำตาล

- การฟอกสีน้ำตาล เป็นวัตถุประสงค์หลักในการนำถ่านกัมมันต์มาใช้
- ใช้ดูดสารพวกไนโตรจีนัส และไลอะฟิลลิก คอลลอยด์ (Nitrogenous and Lyophilic Colloids) จากน้ำอ้อยและสารละลายน้ำตาล โดยตรวจสอบได้จากการวัดปริมาณ Gum และ Pectin การวัดค่าความหนืดของสารละลายน้ำตาล และการทดสอบการย้อมสี

2. อุตสาหกรรมการผลิตน้ำตาลและ syrup จากแป้ง

- ใช้ในการดูดซับสารพวกโปรตีน, Hydroxy Methyl Furfural, เทลิก, ทินนูน และฟอสเฟต ออกจากองค์ประกอบของ Dextrin, Maltose และ Dextrose ทำให้สีของ syrup อยู่คงทน ไม่เปลี่ยนเป็นสีคล้ำ

- ใช้ในการเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายให้สูงขึ้น

3. โรงงานไขมันและน้ำมัน

- ใช้ดูดสิ่งปลอมปนที่อยู่ในน้ำมันพืช
- ใช้ดูดซับตัวยับยั้งปฏิกิริยา โดยไม่ดูดสี
- ใช้ร่วมกับดินฟอกสี เพื่อให้ไขมันได้สีตามต้องการและได้รสที่ดีขึ้น

4. โรงงานเครื่องดื่มที่มีแอลกอฮอล์

- วิสกี้ ใช้ในการกำจัดรสและกลิ่นที่ไม่ต้องการโดยการนำถ่านกัมมันต์มาทำเป็นชั้นวิสกี้ไหลผ่าน (คล้ายการกรอง) หรือนำถ่านกัมมันต์ผสมเข้ากับวิสกี้โดยตรงประมาณร้อยละ 0.1-0.5 แล้วจึงกรองออกภายหลัง
- เบียร์ เพื่อกำจัดตะกอนที่เกิดขึ้นจากการแช่เย็นโดยถ่านกัมมันต์จะทำหน้าที่ดูดซับตะกอนโปรตีนที่เอนไซม์ย่อยไม่ได้ และยังใช้ในการเตรียมน้ำให้สะอาดก่อนนำไปต้มเพื่อผลิตเบียร์

5. การทำน้ำให้บริสุทธิ์

- ใช้ถ่านกัมมันต์ดูดคลอรีนและสารที่เป็นพิษอื่นๆ ที่ติดมากับน้ำประปาหรือน้ำบาดาล ซึ่งอาจทำได้สองทาง คือ ชนิดผง จะนำผสมลงในน้ำแล้วกรองออก ชนิดเม็ด ทำเป็นชั้นให้น้ำไหลผ่าน จากหลักการดังกล่าว ได้มีการดัดแปลงให้เป็นเครื่องกรองน้ำ เพื่อทำให้น้ำบริสุทธิ์

6. ผลิตภัณฑ์ด้านอาหาร

- เจลลาติน ใช้เพื่อดูดสีและกลิ่นที่ไม่พึงประสงค์
- เพคติน ที่ได้จากการสกัดสารนี้จากผลไม้หลายๆชนิด มักจะมีลักษณะมีตุ่มๆมั่วๆ และมีกลิ่นเฉพาะตัวที่ไม่ค่อยดี ลักษณะเช่นนี้สามารถแก้ไขโดยการปรับสภาพด้วยถ่านกัมมันต์
- น้ำผลไม้ ที่ได้จากการคั้นอาจมีลักษณะขุ่นมัว ซึ่งแก้ไขโดยการเติมถ่านกัมมันต์ลงไปเล็กน้อยแล้วกรองออก แต่ถ้าเติมปริมาณมากจะทำให้รสและกลิ่นของน้ำผลไม้เปลี่ยน

7. การทำให้ตัวทำละลายบริสุทธิ์ เพื่อนำกลับมาใช้ใหม่

เราสามารถใช้ประโยชน์ของถ่านกัมมันต์ได้ ดังตัวอย่างแสดงในตารางที่ 2.5

8. สารอินทรีย์และโลหะ

นำถ่านกัมมันต์มาประยุกต์ใช้ในการทำสารอินทรีย์และโลหะให้มีความบริสุทธิ์สูงเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ตามต้องการ และเพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาที่จะเกิดขึ้นได้เนื่องจากสารปลอมปน แต่ไม่นิยมใช้เท่าไรนัก นอกจากไม่สามารถเลือกใช้วิธีอื่นได้แล้ว

9. สารอินทรีย์

ใช้ถ่านกัมมันต์ในการปรับสภาพ เพื่อประโยชน์ต่าง ๆ กันตามชนิดของสารอินทรีย์ เช่น

- แลคเตส (Lactase) และกรดแลคติก (Lactic acid) ซึ่งผ่านการปรับสภาพให้เป็นกลางโดยการเติมต่างลงไป จะมีผลข้างเคียงทำให้สารโปรตีนพวกอัลบูมิน (Albumin) ตกตะกอน ผลที่เกิดขึ้นนี้สามารถแก้ไขได้โดยการเติมถ่านกัมมันต์เพื่อลดกลิ่น, สีให้น้อยลง
- เบต้าอิน (Betaine) มีอยู่ในน้ำหึ่งของโรงงานน้ำตาลที่ใช้หัว beet เป็นวัตถุดิบทำให้น้ำหึ่งมีค่า BOD สูง และเสียสารเบต้าอินไปโดยเปล่าประโยชน์ การแก้ปัญหานี้ทำได้โดยการเติมถ่านกัมมันต์ลงไปดูดซับผลิตภัณฑ์นี้กลับมาได้ ทำให้ประหยัดค่าใช้จ่าย

10. การประยุกต์ใช้ในงานวิเคราะห์ และการใช้งานในด้านอื่น ๆ

- ถ่านกัมมันต์เป็น absorbent column ชนิดหนึ่งที่ใช้ในเครื่อง GC (Gas Chromatography)
- ประยุกต์ใช้กับสารพวก organic colloid
- ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (catalyst) ในกระบวนการทำปฏิกิริยาของก๊าซหรือในปฏิกิริยาการผลิตฟอสฟิน
- ใช้ผสมลงในสีเพื่อป้องกันการกัดกร่อน
- ประยุกต์ใช้ในงานอุตสาหกรรมทำหน้ากากหรือเครื่องนุ่งห่มป้องกันก๊าซและไอพิษต่าง ๆ
- ประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมบุหรี โดยใส่ถ่านกัมมันต์ลงในก้นกรองของบุหรีบางชนิด

- ใช้ถ่านกัมมันต์ดูดควันหรือกลิ่นไอเสียไม่ต้องการตามห้องปรับอากาศหรือตู้เย็น
- ใช้ถ่านกัมมันต์ฟอกสีในอุตสาหกรรมทำผงชูรส
- ใช้ถ่านกัมมันต์ดูดสิ่งสกปรก จับน้ำมันจากก๊าซธรรมชาติ หรือกำจัดพวกสารประกอบ

อินทรีย์ที่มีกำมะถันเป็นองค์ประกอบ ในโรงงานแยกก๊าซธรรมชาติ

ใช้ถ่านกัมมันต์ช่วยกำจัดสารอินทรีย์ที่ไม่ต้องการออกจากสารละลายที่ใช้ในการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า (electroplating solution)

- ประยุกต์ใช้ในการทำน้ำอัดลมหรือน้ำหวานบรรจุขวด โดยถ่านกัมมันต์จะเข้ามาเกี่ยวข้องกับกระบวนการทำน้ำและน้ำตาลที่ใช้ผสมให้มีความบริสุทธิ์ปราศจากกลิ่น รส

นอกจากนี้ ถ่านกัมมันต์ยังประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอื่น ๆ อีกหลายชนิด เช่น ภาชนะบรรจุ ซีเมนต์ในเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู ถ่านกัมมันต์ก็มีส่วนเข้าไปเกี่ยวข้องกับอยู่ด้วย

ตารางที่ 2.5 ตัวอย่างอุตสาหกรรมที่ใช้ถ่านกัมมันต์ในการดูดตัวทำละลายกลับมาใช้ใหม่

ชนิดของอุตสาหกรรม	ตัวทำละลายที่ดูดกลับมาใช้ใหม่
การผลิตดินปืนชนิดไม่มีควัน	Alcohol, ether, acetone
การพิมพ์	Xylene, toluene, benzene
การชักแห้ง	Petrol, benzene, trichloroethylene, trichloro methane
การผลิตเรยอง	Ether, alcohol, acetone, carbondisulphide
อุตสาหกรรมยาง ผ้าเคลือบยาง สีนํ้ายางแอสเบสตอส	Petrol, benzene, toluene
โรงพ่นสี	Thinners for nitrocellulose lacquers
การผลิตเซลล์ลอยตัว	Alcohol
การผลิตพลาสติกและหนังเทียม	Alcohol, ether, acetone, esters
กรรมวิธีการสกัด	Petrol, benzene, trichloroethylene
อุตสาหกรรมการผลิตฟิล์มและแผ่นโลหะบาง	Ether, alcohol, acetone, methylene chloride
การทำแผ่นกาวสำหรับติด	Petrol
อุตสาหกรรมเคลือบผ้าและกระดาษ	alcohol, acetate, ketone, lacquers, น้ำมันชักเงา
อุตสาหกรรมทำแก๊สให้บริสุทธิ์	benzol, hydrocarbon
อุตสาหกรรมยาง	benzol, trichloroethylene, ethylene dichloride, carbon disulphide
อุตสาหกรรมใยสังเคราะห์	ketone, benzene

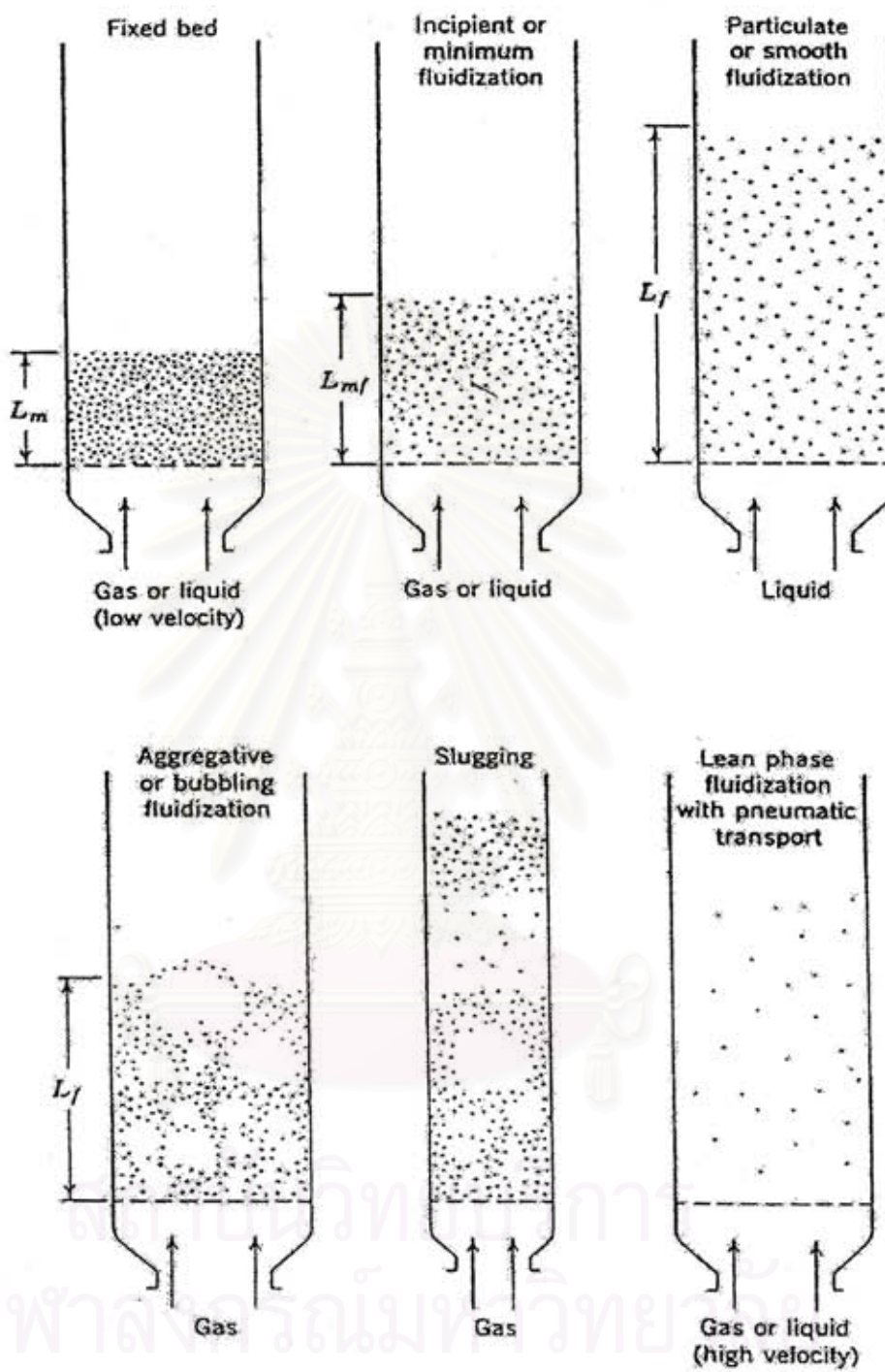
2.9 เทคนิคฟลูอิดิเซชัน (Fluidization)

2.9.1 การเกิดและชนิดของฟลูอิดิเซชัน

ฟลูอิดิเซชัน หมายถึงกระบวนการที่ของแข็งสัมผัสของไหลแล้วสมบัติบางอย่างคล้ายของไหล โดยทำให้ลอยอยู่ในตัวกลางที่เป็นของไหล ฟลูอิดิเซชันมี 2 ประเภทคือ

- การฟลูอิดิเซชันด้วยแก๊ส (Gas Fluidization)
- การฟลูอิดิเซชันด้วยของเหลว (Liquid Fluidization)

พิจารณาเบดซึ่งมีกลุ่มอนุภาคหนึ่งบรรจุอยู่ (รูปที่ 2.11) และผ่านตัวกลางเข้าเบดทางด้านล่างด้วยความเร็วต่างๆ กลุ่มอนุภาคจะไม่เคลื่อนไหว เรียกว่าภาวะเบดนิ่ง (Fixed Bed) เมื่อความเร็วของตัวกลางเพิ่มขึ้นจนกระทั่งอนุภาคเริ่มเคลื่อนไหว แสดงว่าอนุภาคกำลังเข้าสู่ภาวะฟลูอิดิเซชัน เรียกว่าภาวะการฟลูอิดิเซชันต่ำสุด (Minimum Fluidization) และความเร็วของตัวกลางที่ภาวะนี้เรียกว่า ความเร็วต่ำสุดการฟลูอิดิเซชัน (Minimum Fluidization Velocity, U_{mf}) ถ้ายังคงเพิ่มความเร็วของตัวกลางขึ้นเรื่อยๆ จะพบว่าสำหรับตัวกลางที่เป็นของเหลวจะทำให้อนุภาคลอยตัวเบดอย่างสม่ำเสมอ เรียกว่า ภาวะการฟลูอิดิเซชันแบบราบเรียบ (Smooth Fluidization) แต่สำหรับอนุภาคในตัวกลางที่เป็นแก๊สจะกระจายตัวไม่สม่ำเสมอโดยมีช่องว่างคล้ายฟองอากาศในเบด จึงเรียกว่า ภาวะการฟลูอิดิเซชันแบบฟอง (Bubbling Fluidization) และถ้าฟองอากาศมีขนาดใหญ่เท่าเส้นผ่านศูนย์กลางของเบดจะทำให้กลุ่มอนุภาคแยกออกเป็นชั้นเรียกว่า ภาวะการฟลูอิดิเซชันแบบสลัดจ์ (Slugging Fluidization)



รูปที่ 2.11 สภาวะต่าง ๆ ของฟลูอิดเซชัน (Kunii, 1969)

2.9.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการฟลูอิด์ในแก๊ส

2.9.2.1 อัตราส่วนของช่องว่างภายในกลุ่มอนุภาคต่อปริมาตรทั้งหมดของเบด (e) ช่องว่างมากแก๊สจะไหลผ่านได้สะดวก จึงต้องใช้ความเร็วของตัวกลางสูงเพื่อทำให้เกิดการฟลูอิด์ ซึ่งจะทำให้สูญเสียความร้อน

2.9.2.2 แฟคเตอร์รูปร่าง (Shape Factor, ϕ) เป็นตัวแปรที่พบมากในการศึกษาการถ่ายเทมวลและความร้อนจากระบบไปยังของแข็ง ซึ่งมักมีรูปร่างที่ไม่แน่นอน หาได้จากความสัมพันธ์ต่อไปนี้

$$\phi = \frac{\text{พื้นที่ของอนุภาคที่สมมติว่าเป็นทรงกลม}}{\text{พื้นที่ผิวจริงของอนุภาค}} \quad (2.7)$$

2.9.2.3 ความเร็วต่ำสุดของการฟลูอิด์ (U_{mf}) หมายถึง ความเร็วต่ำสุดที่ทำให้กลุ่มของแข็งเริ่มขยับตัว ของแข็งที่มีค่า U_{mf} ต่ำ จะทำให้เกิดการฟลูอิด์ได้ง่าย ค่า U_{mf} สามารถหาจากการทดลองหรือได้จากการคำนวณ ดังจะกล่าวต่อไป

2.9.2.4 ความสูงทั้งหมดของเบด

ถ้าใช้ความเร็วของตัวกลางสูงกว่าความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิด์ กลุ่มอนุภาคของแข็งจะขยายตัว ทำให้ช่องว่างระหว่างของแข็งเพิ่มขึ้น ถ้าพื้นที่หน้าตัดของเบดคงที่ ช่องว่างภายในเบดจะขึ้นกับความสูงของเบด ดังนี้

$$L_i = \frac{Wm}{A(1 - e_o)\rho_m} = \text{ความสูงก่อนการฟลูอิด์} \quad (2.8)$$

$$L_f = \frac{La + (U_f^2 - U_i^2)}{2g} = \text{ความสูงขณะเกิดการฟลูอิด์} \quad (2.9)$$

2.9.2.5 ความดันลดในฟลูอิด์เบด

เมื่อกลุ่มของแข็งเข้าสู่ภาวะฟลูอิด์ได้เซชัน ความดันลดของเบดจะสมดุลกับแรงโน้มถ่วงของเม็ดของแข็งลบด้วยแรงลอยตัวของตัวกลาง สุดท้ายจะได้สมการที่ใช้คำนวณค่าความดันลดดังนี้

$$-(\Delta P/L) = (g/g_c)(1 - e)(\rho_o - \rho) \quad (2.10)$$

โดย ΔP คือ ความดันลดของเบต, L คือ ความสูงของเบต, g คือ ค่าคงที่แรงโน้มถ่วง, e คือ สัดส่วนช่องว่างในเบต, ρ_o คือ ความหนาแน่นของของแข็ง, ρ คือ ความหนาแน่นของตัวกลาง

2.9.3 การหาความเร็วต่ำสุดของการฟลูอิด์

สามารถหาความเร็วต่ำสุดของการฟลูอิด์จากการทดลองหรือจากการคำนวณด้วยสมการ วิธีที่สะดวกและเป็นที่ยอมรับคือ จากการทดลอง เนื่องจากการคำนวณจากสมการจะต้องทราบสมบัติต่างๆของระบบก่อน ซึ่งสมบัติบางอย่างอาจไม่สามารถหาค่าที่ถูกต้องได้ ต้องใช้การประมาณค่า เช่น แฟคเตอร์รูปร่าง ฯลฯ หรือหาได้ลำบาก เช่น ความหนาแน่นจริงของเม็ดอนุภาค รวมทั้งสมการก็ได้จากการทดลองของระบบแต่ละระบบ ยังไม่มีสมการที่สามารถใช้ได้กับระบบทั่วไป รายละเอียดของการหาความเร็วต่ำสุดของการฟลูอิด์มีดังนี้

2.9.3.1 จากการทดลอง เป็นการหาความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิด์ที่ได้ค่าที่ถูกต้องที่สุดสำหรับระบบที่ทำการศึกษา การหาค่า U_{mf} สามารถทำได้ด้วยเครื่องมือ ดังแสดงในรูปที่ 2.12 โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

- ผ่านแก๊สเข้าเบตที่บรรจุอนุภาคด้วยอัตราการไหลที่ทราบค่า

$$V(m/sec) = Q/A \quad (2.11)$$

โดย Q = อัตราการไหล, ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที

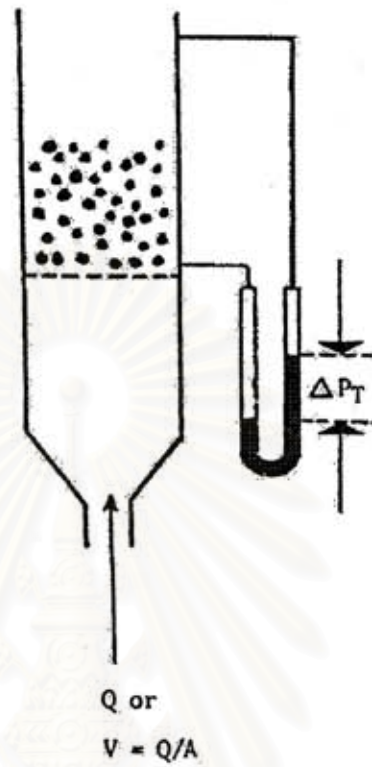
A = พื้นที่หน้าตัดของเบต, ตารางเมตร

- วัดความดันลดทั้งหมดที่มาโนมิเตอร์ (ΔP_T)
- คำนวณความดันลดของการไหลผ่านกลุ่มอนุภาค (ΔP_B) จาก

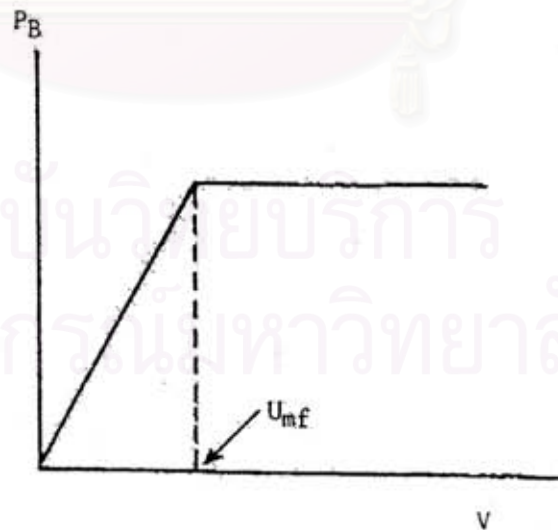
$$\Delta P_B = \Delta P_T + \Delta P_C \quad (2.12)$$

โดย ΔP_C = ความดันลดเมื่อไม่มีอนุภาค

- สร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแกนราบคือ ความเร็ว (V) แกนตั้งฉากคือ ความดันลดของเบต (ΔP_B) ดังแสดงในรูปที่ 2.13
- ความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิด์ หาจากความเร็วที่ความดันลดของเบตเริ่มคงที่



รูปที่ 2.12 เครื่องมือหาความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไรซ์ (บุญชัย ตระกูลมหชัย, 2537)



รูปที่ 2.13 กราฟหาความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไรซ์ (บุญชัย ตระกูลมหชัย, 2537)

2.9.3.2 จากการคำนวณ สมการที่ใช้ในการคำนวณมีหลายสมการ การเลือกใช้สมการใดขึ้นอยู่กับค่าที่ได้ถูกต้องหรือไม่ ซึ่งเป็นการยากที่จะบอกได้ว่าควรใช้สมการใดในการคำนวณ ดังนั้นเมื่อได้คำนวณค่า U_{mf} แล้วควรทำการทดลองเพื่อหาค่าที่ถูกต้องด้วย ตัวอย่างสมการการหาค่า U_{mf} ทั่วไปคือ

$$\frac{(\Delta P)(g)}{L} = 150 \frac{(1-e)^2}{e^3} * \frac{\mu U_{mf}^2}{(\phi D_p)^2} + 1.75 \frac{(1-e)}{e^3} * \frac{\mu_x U_{mf}^2}{\phi D_p} \quad (2.13)$$

สมการเฉพาะสำหรับการหาความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไลซ์

$Re < 5$

$$U_{mf} = \frac{668 D_p^{1.82} [\rho_x (\rho_p - \rho_x)]^{0.04}}{\mu^{0.88}} \quad (\text{Leva, 1956})$$

$D_p < 0.1$ มิลลิเมตร

$$U_{mf} = \frac{(\rho_p - \rho_x)^{0.034} (g^{0.034}) (D_p^{1.82})}{1111 (\mu^{0.87}) (\rho_x^{0.66})} \quad (\text{Geldart, 1981})$$

$D_p > 0.1$ มิลลิเมตร

$$U_{mf} = \frac{\mu}{\rho_x d_v} [(1135.7 + 0.0408 Ar)^{0.5} - 33.7] \quad (\text{Wen and Yu, 1966})$$

$Re < 20$ หรือ $D_p < 0.5$ มิลลิเมตร

$$U_{mf}^2 = \frac{D_p^2 (\rho_p - \rho_x) g}{1650 \mu} \quad (\text{Wen and Yu, 1960})$$

$Re > 1000$ หรือ $D_p > 2$ มิลลิเมตร

$$U_{mf}^2 = \frac{D_p (\rho_p - \rho_x) g}{24.7 \rho_x} \quad (\text{Wen and Yu, 1960})$$

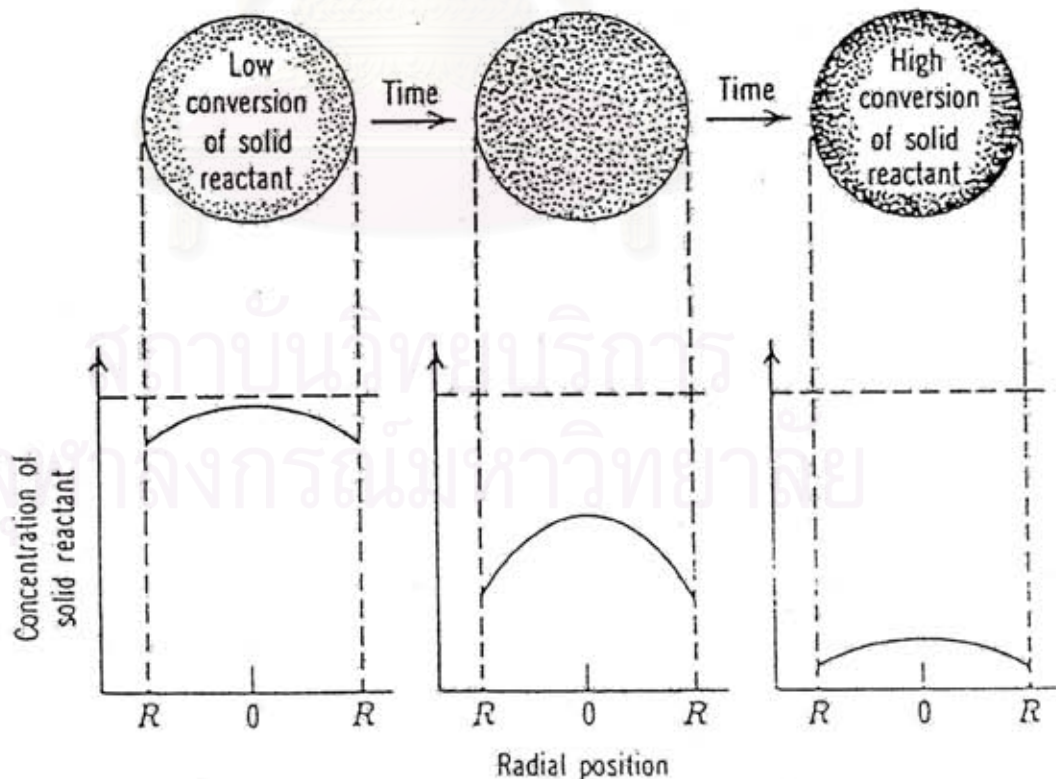
$$U_{mf} = \frac{0.00125 D_p^2 (\rho_p - \rho_x)^{0.9} (\rho_x^{0.1}) (g)}{\mu} \quad (\text{Miller \& Logwinuk, 1951})$$

- โดย ΔP = ความดันตกที่เกิดจากกลุ่มอนุภาค
 L = ความสูงของกลุ่มอนุภาค
 g = ความเร่งโน้มถ่วงของโลก
 e = อัตราส่วนของช่องว่างภายในกลุ่มอนุภาคต่อที่ว่างในเบด (Void fraction)
 μ = ความหนืดของของไหล
 D_p = เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของอนุภาค
 ρ_x = ความหนาแน่นของของไหล
 ρ_p = ความหนาแน่นของของแข็ง
 d_v = เส้นผ่านศูนย์กลางของทรงกลมที่มีปริมาตรเท่ากับปริมาตรจริงของอนุภาค
 Ar = Archimedes Number

$$= \frac{(\rho_x)(d_v^3)(\rho_p - \rho_x)(g)}{\mu^2}$$

2.9.4 การถ่ายโอนมวลในแก๊สฟลูอิด์เบด

โมเดลที่ใช้อธิบายการผลิตถ่านกัมมันต์สามารถใช้โมเดลของการเกิดปฏิกิริยาอย่างต่อเนื่อง (Continuous-reaction model) ดังแสดงในรูปที่ 2.14

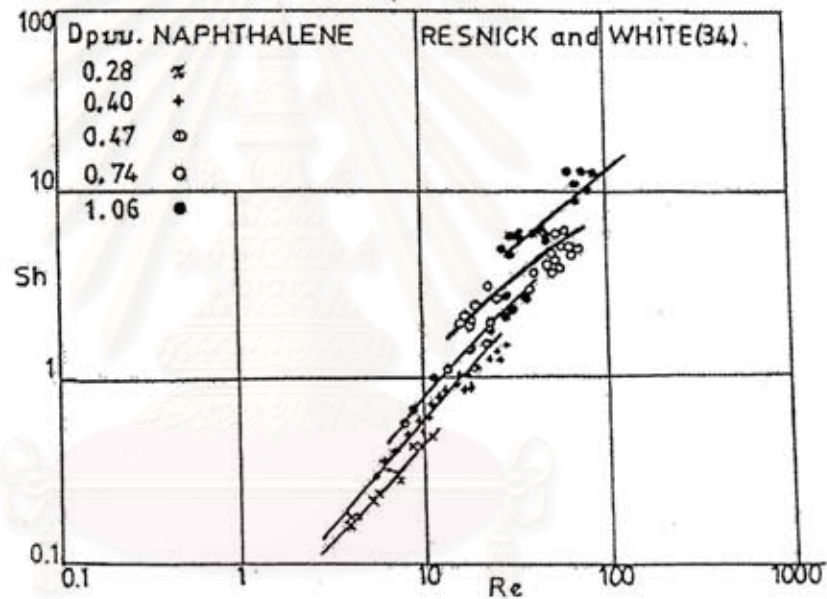


รูปที่ 2.14 โมเดลการเกิดปฏิกิริยาอย่างต่อเนื่อง (Kunii, 1969)

กรณีที่เกิดการดูดซับด้วยเม็ดของแข็ง สามารถเขียนสมการที่ใช้ในการอธิบายการถ่ายเทมวลได้ดังนี้

$$N_A = kaV(P - P_1) \quad (2.14)$$

โดย N_A คือ ปริมาณของสาร A ที่เกิดการถ่ายเท, k คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล, a คือ พื้นที่จำเพาะของอนุภาคที่เกิดการสัมผัส, V คือ ปริมาตรของเครื่องปฏิกรณ์, P คือ สัดส่วนความดันไอของสารที่ถูกดูดซับ, P_1 คือ สัดส่วนความดันไอของสารที่ถูกดูดซับที่ผิวของเม็ดของแข็ง จากการทดลองวัดอัตราการระเหยของเนเปทาลีนในแก๊สไฮโดรเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ พบว่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลมีแนวโน้มคงที่เมื่อความเร็วของตัวกลางเพิ่มขึ้น และพบว่าของแข็งที่มีขนาดใหญ่จะมีสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลมากกว่าของแข็งขนาดเล็ก ดังแสดงในรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 ผลการทดลองของ Resnick และ White (สมศักดิ์ ตำรงค์เลิศ, 2528)

2.9.5 การถ่ายโอนความร้อนในฟลูอิดซ์เบด

การถ่ายโอนความร้อนจะเกิดขึ้นได้ 2 ลักษณะ

1. การถ่ายเทความร้อนระหว่างเม็ดของแข็งกับของไหล กลไกของกระบวนการนี้แบ่งเป็นกระบวนการย่อย 2 ประเภทคือ ความร้อนจากของไหลถ่ายเทให้กับเม็ดของแข็งและความร้อนจากเม็ดของแข็งถ่ายเทให้กับของไหล ซึ่งกระบวนการนี้กระทำต่อเนื่องทั้งของไหลและเม็ดของแข็ง
2. การถ่ายเทความร้อนจากผิวของท่อทดลองให้แก่เม็ดของแข็ง กลไกที่เกิดขึ้นสำหรับการถ่ายเทความร้อนแบบนี้มีอยู่ 3 สมมติฐานคือ

ก. ระหว่างผนังของท่อทดลองกับเม็ดยางแข็งที่เคลื่อนที่อยู่ในเบต มีชั้นของของไหลเป็นฟิล์มบางๆ ทำหน้าที่เหมือนเบาะ ความร้อนจากผนังจะต้องผ่านชั้นนี้ก่อนถึงจะเดินทางไปถึงเม็ดยางแข็ง โดยสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจะเป็นสัดส่วนผกผันกับความหนาของฟิล์ม

ข. จากการเคลื่อนที่ของเม็ดยางแข็ง ซึ่งบางครั้งเม็ดยางแข็งวิ่งเข้าไปกระทบกับผนังเอง โดยตรงในช่วงเวลาสั้นๆ ความร้อนจากผนังผ่านเข้ามาในเม็ดยางแข็งด้วยวิธี การนำความร้อนทั้งเกิดจากอุณหภูมิต่างระหว่างผนังกับเม็ดยางแข็ง

ค. ฟองแก๊สลอยผ่านเบตตรงบริเวณใกล้ผนัง เมื่อฟองแก๊สลอยผ่านไป กลุ่มเม็ดยางแข็งกลุ่มหนึ่งก็เข้ามาแทนที่ กลุ่มเม็ดยางแข็งนี้ก็จะรับความร้อนจากผนังแล้วหลุดไปเพราะฟองแก๊สที่ลอยตามหลังดันกลุ่มเม็ดยางแข็งให้อยู่ในส่วนอื่นของเบต ความร้อนทั้งหมดก็จะมาสะสมอยู่ในเบตหนาแน่น

ระบบฟลูอิดไอเซนจะมีทั้งข้อดี และข้อเสีย ดังนี้

ข้อดี

1. จากสมบัติที่เม็ดยางแข็งมีพฤติกรรมเคลื่อนที่คล้ายของไหล ทำให้สามารถควบคุมระบบได้ง่าย และสามารถทำงานแบบต่อเนื่องได้
2. เม็ดยางแข็งมีการผสมกันอย่างรวดเร็ว และสม่ำเสมอ ทำให้อุณหภูมิภายในเบตมีค่าคงที่เท่ากันทุกจุด
3. เนื่องจากการผสมของเม็ดยางแข็งอย่างรวดเร็ว และสม่ำเสมอทำให้ระบบนี้ เหมาะสมในกรณี ที่ปฏิบัติการที่มีการดูด หรือคายความร้อนเป็นปริมาณมากๆ
4. การที่เม็ดยางของไหลหมุนเวียนอยู่ภายในเบต เม็ดยางแข็งนี้สามารถที่จะเป็นตัวนำความร้อนจากผนังแหล่งความร้อนให้กับของไหลได้มากกว่า เพราะมีสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนได้สูงกว่า เมื่อเปรียบเทียบที่ความเร็วของไหลเดียวกัน
5. พื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างเม็ดยางแข็ง กับของไหลมีมากกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับเบตหนึ่งที่ใช้ฟองเม็ดยางแข็งเท่ากันจึงมีประโยชน์กับงานที่มีการถ่ายเทความร้อน และมวลสาร
6. การทำงานด้วยฟลูอิดเบตจะเสียพลังงานน้อยกว่า เพราะแรงเสียดทาน และความดันตกของเบตน้อยกว่าในเบตหนึ่ง

ข้อเสีย

1. เกิดการขัดสีระหว่างเม็ดยางแข็ง และผนัง ทำให้เกิดการสึกกร่อนของเม็ดยางแข็งทำให้มีขนาดเล็กลง
2. เวลาที่ของไหลสัมผัสกับเม็ดยางแข็งสั้นมาก จึงต้องใช้เบตสูงๆหรือเบตหลายชั้นทำให้เปลืองเงินลงทุนมาก
3. การทำงานมีข้อจำกัดเพราะทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยามีขนาดเล็กลง ต้องคอยปรับความเร็วของแก๊สเพื่อไม่ให้ตัวเร่งปฏิกิริยาปลิวออกไป ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์น้อยลง

4. การทำงานของระบบให้ได้ผลมีข้อจำกัดซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะของตัวกระจายของไหล ชนิด รูปร่างของเบด ความเร็วของของไหลที่ใช้ ขนาด และชนิดของเม็ดของแข็ง
5. การใช้แก๊สเป็นตัวกลาง ทำให้ต้องเปลืองพลังงานในการเพิ่มอุณหภูมิแก๊สนั้น ทำให้ต้นทุนในการทำงานสูงขึ้น

2.9.6 การใช้ฟลูอิดเซชันในอุตสาหกรรม

จุดเด่นของเทคนิคฟลูอิดเซชันที่สำคัญ คือ สามารถที่จะทำงานต่อเนื่องได้อย่างมีประสิทธิภาพ รวมทั้งผลิตภัณฑ์ที่ได้ก็มีคุณภาพสม่ำเสมอ เพราะผิวของอนุภาคทุกส่วนมีโอกาสเกิดปฏิกิริยาได้เท่ากัน สามารถเปรียบเทียบเทคนิคต่างๆที่ใช้ในอุตสาหกรรมได้จากตารางที่ 2.6 จึงนำไปใช้ประโยชน์ได้อย่างกว้างขวางตัวอย่างอุตสาหกรรมประเภทต่างๆที่ประยุกต์เทคนิคฟลูอิดเซชันในกระบวนการผลิตแสดงในตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.6 เปรียบเทียบเทคนิคต่างๆ ที่ใช้ในปฏิกริยาระหว่างแก๊สกับของแข็ง (Kunii, 1969)

	ลักษณะทั่วไป	การกระจายอุณหภูมิในเบด
Fixed Bed	<ul style="list-style-type: none"> - ทำงานแบบต่อเนื่องไม่ได้ - ขนาดของผลิตภัณฑ์ไม่สม่ำเสมอ 	<ul style="list-style-type: none"> - อุณหภูมิแตกต่างกันมาก - ไม่สามารถควบคุมอุณหภูมิได้
Moving Bed	<ul style="list-style-type: none"> - สารป้อนต้องมีขนาดใกล้เคียงกันและไม่เล็กจนเกินไป - เป็นระบบที่ใช้ในอุตสาหกรรมได้ 	<ul style="list-style-type: none"> - สามารถควบคุมได้ง่ายด้วยการปรับเปลี่ยนอัตราการไหลหรือการหมุนเวียนของอนุภาคขนาดใหญ่ที่เหมาะสม
Fluidized Bed	<ul style="list-style-type: none"> - สารป้อนจะมีขนาดเท่าไรก็ได้ - เป็นระบบที่ใช้ในอุตสาหกรรมได้ - ขนาดของผลิตภัณฑ์สม่ำเสมอ 	<ul style="list-style-type: none"> - อุณหภูมิคงที่และสม่ำเสมอ โดยการทดแทนกันระหว่างวัตถุดิบที่ป้อนเข้ากับผลิตภัณฑ์ที่ไหลออก
Cocurrent Pnematic Transport	<ul style="list-style-type: none"> - เหมาะสำหรับปฏิกิริยาที่เกิดรวดเร็ว 	<ul style="list-style-type: none"> - อุณหภูมิจะเปลี่ยนแปลงตามการไหลของอนุภาค ซึ่งแก้ไขให้อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงน้อยลงได้ด้วยการปรับเปลี่ยนอัตราการไหลของอนุภาค

ตารางที่ 2.7 การประยุกต์เทคนิคฟลูอิดเซชันในอุตสาหกรรม (Kunii, 1969)

ประเภท	กลไก	อุตสาหกรรม
ฟิลิกส์	การถ่ายเทมวลหรือความร้อนระหว่างแก๊ส-อนุภาค	<ul style="list-style-type: none"> การอบแห้ง การดูดซับแก๊ส การแช่แข็งอาหาร
	การถ่ายเทมวลหรือความร้อนระหว่างอนุภาค-อนุภาค หรือ อนุภาค-ผิว	<ul style="list-style-type: none"> การเคลือบผิวด้วยพลาสติก การเคลือบเม็ดยา การกรองฝุ่น
	การถ่ายเทมวลหรือความร้อนระหว่างเบด-ผิวอนุภาค	<ul style="list-style-type: none"> เครื่องให้ความร้อนในงานเส้นใย, ยางหรือกระดาษ อ่างให้ความร้อนที่อุณหภูมิคงที่
เคมี	ปฏิกิริยาแก๊ส-แก๊สที่ใช้ของแข็งเป็นตัวเร่ง	<ul style="list-style-type: none"> Oil Cracking Oil Reforming การผลิต Acrylonitrile, Phthalic anhydride, Polyethylene
	ปฏิกิริยาแก๊ส-ของแข็ง	<ul style="list-style-type: none"> Coal Combustion Coal Gasification การผลิตถ่านกัมมันต์ การผลิต UF_6, AlF_3 การผลิต UO_2, UO_3

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.10.1 งานวิจัยในประเทศ

บุญชัย ตระกูลมหัย (2537) ทำการผลิตถ่านกัมมันต์จากกะลาตาลโตนดด้วยวิธีทางกายภาพ ภาวะที่เหมาะสมคือใช้ถ่านชาร์เตรียมจากกะลาตาลโตนด คาร์บอนไนซ์ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส นาน 2 ชั่วโมง มีขนาดของอนุภาค 1.19 ถึง 1.68 มิลลิเมตร กระตุ้นด้วยแก๊สผสมที่ได้จากการเผาไหม้น้ำมันดีเซลกับไอน้ำอิ่มตัวยิ่งยวด ที่มีความเร็ว 6.44 เมตรต่อวินาที ในฟลูอิดไคซ์เบด อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส นาน 7 นาที ขนาดของอนุภาค 1.19 ถึง 1.68 มิลลิเมตร ได้ถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิว 1,800 ถึง 1,900 ตารางเมตรต่อกรัม ค่าการดูดซับไอโอดีน 1,000 ถึง 1,300 มิลลิกรัมต่อกรัม ค่าการดูดซับเมทิลีนบลู 250 ถึง 350 มิลลิกรัมต่อกรัม ค่าแก็ร้อยละ 10 ถึง 15 โดยน้ำหนัก ค่าร้อยละของผลิตภัณฑ์ที่ได้ 30 ถึง 40

จักริน นิธิจันทร์ (2537) ได้ทำการผลิตถ่านกัมมันต์จากพีตโดยการคาร์บอนไนซ์และการกระตุ้นด้วยไอน้ำในฟลูอิดไคซ์เบด การทดลองแบ่งเป็น 2 ขั้นตอน ขั้นแรกคาร์บอนไนซ์ในฟลูอิดไคซ์เบด ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 150 มิลลิเมตร ความสูง 1,100 มิลลิเมตร ศีรษะตัวแปร: ความเร็วอากาศ 1.2-2.1 เท่าของความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไคซ์ เวลาในการคาร์บอนไนซ์ 3-8 นาที พบว่าภาวะที่เหมาะสมในการคาร์บอนไนซ์ในฟลูอิดไคซ์เบด คือ ขนาดของเม็ดพีต 0.5-2.0 มิลลิเมตร ความเร็วอากาศ 1.2 เท่าของความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไคซ์ (0.94 เมตรต่อวินาที) ปริมาณการป้อนเม็ดพีต 2.0 กิโลกรัม อุณหภูมิเริ่มต้นของเบด 400 องศาเซลเซียส เวลาในการคาร์บอนไนซ์ 5 นาที ได้ผลิตภัณฑ์เป็นถ่านชาร์ร้อยละ 34.0 มีปริมาณคาร์บอนคงตัวร้อยละ 83.6 สารระเหยร้อยละ 10.9 แก็ร้อยละ 4.0 ขั้นตอนที่สอง กระตุ้นด้วยไอน้ำในฟลูอิดไคซ์เบด ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 120 มิลลิเมตร ความสูง 770 มิลลิเมตร ศีรษะตัวแปร ร้อยละของสารระเหยในวัตถุดิบ 3.6-61.8 ขนาดพีต 0.5-2.0 มิลลิเมตร เวลาในการกระตุ้นด้วยไอน้ำ 3-10 นาที อุณหภูมิของเบด 700-925 องศาเซลเซียส ปริมาณการป้อนถ่านพีต 0.5-2.0 กิโลกรัม พบว่าภาวะที่เหมาะสมในการกระตุ้นด้วยไอน้ำในฟลูอิดไคซ์เบด คือ ถ่านพีต ขนาด 1.0-2.0 มิลลิเมตร ปริมาณการป้อนถ่านพีต 2.0 กิโลกรัม ความเร็วอากาศ 1.4 เท่า ของความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไคซ์ อุณหภูมิเบด 700 องศาเซลเซียส เวลาในการกระตุ้น 7 นาที แก๊สออกซิไดซ์เป็นของผสมระหว่างไอน้ำกับอากาศโดยมีอัตราส่วนระหว่างไอน้ำกับอากาศ 7.6 เปอร์เซ็นต์ ได้ผลิตภัณฑ์เป็นถ่านกัมมันต์ร้อยละ 59.1 ของน้ำหนักถ่านพีต ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ 1,023 ตารางเมตรต่อกรัม ค่าไอโอดีนแอมเบอร์ 1,053 มิลลิกรัมต่อกรัม ค่าการดูดซับเมทิลีนบลู 354.5 มิลลิกรัมต่อกรัม

ภัทรา ปัญญาวัฒน์กิจ (2540) ทำการผลิตถ่านกัมมันต์จากกะลาปาล์มน้ำมันโดยกระตุ้นด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง พบว่าภาวะที่เหมาะสมในการคาร์บอนไนซ์คือที่ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ถ่านที่ได้มีสมบัติดังนี้ ปริมาณผลิตภัณฑ์ร้อยละ 31.50 ปริมาณแก็ร้อยละ 6.24 ปริมาณสารระเหยร้อยละ 27.76 และปริมาณคาร์บอนคงตัวเท่ากับ 64.48 ส่วนภาวะที่เหมาะสมในการกระตุ้นคือที่ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ใช้ขนาดถ่านชาร์ 0.35-0.85 มิลลิเมตร มีร้อยละผลิตภัณฑ์ 19.31 ความหนาแน่นเชิงปริมาตร 0.53 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ค่าการดูดซับไอโอดีนและเมทิลีนบลูเท่ากับ 779 และ 137

มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ พื้นที่ผิวรูพรุนทั้งหมดเท่ากับ 670 ตารางเมตรต่อกรัม ประสิทธิภาพในการดูดซับไดโครเมตไอออนที่ pH 1 และ 2 เท่ากับ 147 และ 117 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ

นิชรี นิลนนท์ (2541) ศึกษาถึงการผลิตถ่านกัมมันต์จากไม้โกงกาง โดยกระตุ้นด้วยไอน้ำ ร้อนยวดยิ่งกับคาร์บอนไดออกไซด์ พบว่าภาวะที่เหมาะสมในการคาร์ไบไนซ์คือที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ซึ่งมีอุณหภูมิต่ำกว่าของกัทธา ปัญญาวัฒน์กิจ (2540) เนื่องจากสภาวะเหยงในไม้โกงกางสามารถล่อออกได้ง่ายกว่ากะลาปาล์ม จึงใช้อุณหภูมิต่ำกว่า และทำการกระตุ้นที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ขนาดอนุภาค 0.6-1.18 มิลลิเมตร โดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งกับคาร์บอนไดออกไซด์ในอัตรา 5 ลิตรต่อนาที พบว่าถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้มีสมบัติดังนี้ ค่าการดูดซับไอโอดีน 675 มิลลิกรัมต่อกรัม ค่าการดูดซับเมทิลีนบลู 254 มิลลิกรัมต่อกรัม ค่าความหนาแน่น 0.323 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ค่าพื้นที่ผิว 640 ตารางเมตรต่อกรัม ร้อยละผลิตถ่าน 27.47

2.10.2 งานวิจัยต่างประเทศ

Satya Sai and others (1997) ทำการศึกษาการผลิตถ่านกัมมันต์จากถ่านกะลามะพร้าว โดยใช้ไอน้ำหรือแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นแก๊สกระตุ้นปฏิกิริยาในเครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไอดีซ์เบดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร เขาทำการศึกษาตัวแปรต่าง ๆ ที่มีผลกระทบต่อกระบวนการผลิตอันได้แก่ ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา ความเร็วในการเกิดการฟลูอิดไอดีซ์ ขนาดของอนุภาค ความสูงของเบตนิ่ง อุณหภูมิในการเกิดการกระตุ้น ตัวกลางที่ทำให้เกิดการฟลูอิดไอดีซ์ จากการศึกษาเขาพบว่าภาวะที่เหมาะสมที่สุดโดยพิจารณาจากค่าไอโอดีนนัมเบอร์สูงสุด (1,328 มิลลิกรัมต่อกรัม) คือ ความเร็วของการเกิดการฟลูอิดไอดีซ์ 24.7 เซนติเมตร/วินาที ขนาดอนุภาค 1.55 มิลลิเมตร ความสูงของเบตนิ่ง 100 มิลลิเมตร อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส เวลาในการกระตุ้น 1.5 ชั่วโมง และใช้ไอน้ำเป็นตัวกลางที่ทำให้เกิดการฟลูอิดไอดีซ์ การใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไอดีซ์เบดในการเตรียมถ่านกัมมันต์ พบว่ามีประสิทธิภาพดี การเพิ่มขึ้นของเวลาในการทำปฏิกิริยา ความเร็วของแก๊สตัวกลาง ขนาดของอนุภาคและอุณหภูมิ ช่วยให้ผลดีต่อการกระตุ้น แต่การเพิ่มขึ้นของเวลามากๆ ก็มีสาเหตุทำให้เกิดการขยายตัวของรูพรุน และการรวมตัวของรูพรุนเป็นผลทำให้ค่าการดูดซับไอโอดีนลดลง ผลของความสูงของเบต พบว่าเมื่อเบตมีความสูงมากกว่า เส้นผ่านศูนย์กลางมากๆ ทำให้ค่าไอโอดีนลดต่ำลง เนื่องมาจากการเกิด สลักกิ้ง (Slugging) มีผลทำให้การสัมผัสกันระหว่างแก๊สกับของแข็ง เป็นไปได้ไม่ดี และผลของแก๊สตัวกลางที่ใช้ พบว่าการใช้ไอน้ำจะมีประสิทธิภาพดีที่สุด รองลงมาคือแก๊สผสมระหว่างแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์กับไอน้ำ และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ตามลำดับ

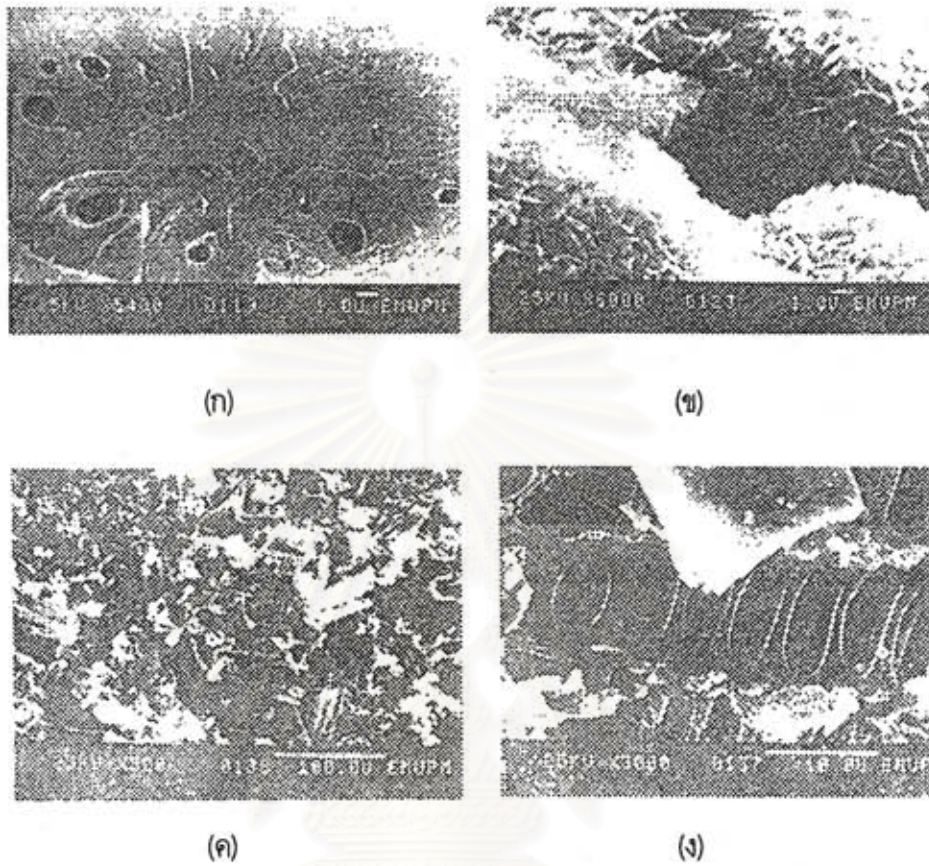
Mohd Zobir Hussein and others (1995) ทำการเตรียมถ่านกัมมันต์จากเศษไม้ของต้นปาล์มน้ำมัน โดยการกระตุ้น $ZnCl_2/CO_2$ เพื่อทำการศึกษาพื้นที่ผิวของรูพรุน เขาทำการทดลองโดยนำเศษไม้ต้นปาล์มน้ำมันปริมาณ 10 กรัม ผสมกับสารละลาย $ZnCl_2$ ปริมาณ 100 มิลลิลิตร ความเข้มข้น 1-30% (w/w) นำไปประเหยน้ำออกโดยใส่ในอ่างควบคุมอุณหภูมิที่ 70 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นนำส่วนใหญ่ประเหยไปแล้วนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียสตลอดคืน สารตัวอย่างที่ได้นำไปทำการกระตุ้นที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส โดยใส่ในเครื่องปฏิกรณ์แบบทอสแตนเลส ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 47 มิลลิเมตร ยาว

150 มิลลิเมตร ทำการป้อนแก๊สไนโตรเจนนาน 3 ชั่วโมง ก่อนป้อนด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์นาน 1 ชั่วโมง จากผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 2.8 พบว่าจะได้พื้นที่ผิวมากที่สุด 1,892 ตารางเมตรต่อกรัม เมื่อใช้สารละลาย $ZnCl_2$ ความเข้มข้น 25%(w/w) ลักษณะรูพรุนที่ได้เป็นแบบไมโครพอร์เมื่อใช้สารละลาย $ZnCl_2$ ความเข้มข้น 0-10%(w/w) และแบบเมโซพอร์เมื่อใช้สารละลาย $ZnCl_2$ ความเข้มข้น 15-30%(w/w) ภาพถ่ายลักษณะพื้นผิวของไม้ปาล์มน้ำมัน ไม้ปาล์มที่ตกผลึกด้วย 15%w $ZnCl_2$ และถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้จากการทดลองของ Mohd Zobir Hussein and others สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.16

ตารางที่ 2.8 ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวและรูพรุนของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จากไม้ปาล์มน้ำมันโดยการกระตุ้นด้วย $ZnCl_2/CO_2$ (Mohd Zobir Hussein and others, 1995)

ZnCl ₂ (% (w/w))	pH	Surface area (m ² g ⁻¹)			Type of Isotherm	Micropore volume (cm ³ g ⁻¹)
		BET	Langmuir	Micropore		
0	10.0	239	287	167	I	0.0697
1	6.5	469	521	407	I	0.1617
5	6.6	1102	1278	803	I	0.3274
10	6.75	1622	2024	476	I	0.1931
15	6.6	1673	-	-	II	-
20	6.55	1738	-	-	II	-
25	6.4	1892	-	-	II	-
30	-	1649	2616	139	II	0.1285

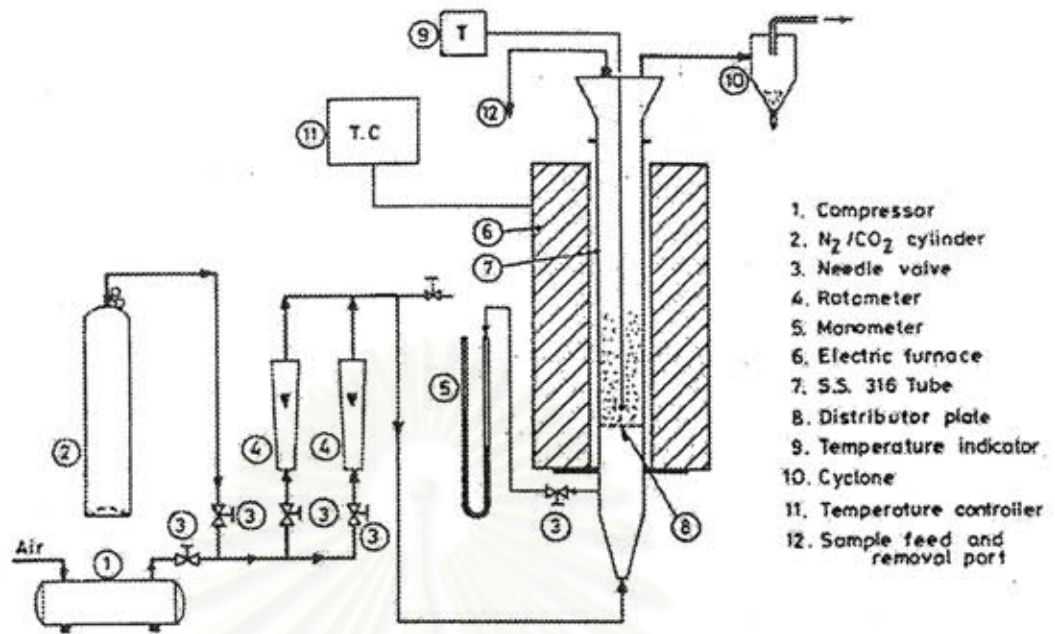
Kirubakaran, C. John, Krishnaiah, K. and Seshadri S. K. (1991) ได้ทดลองผลิตถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าวโดยใช้ $ZnCl_2$ หรือ H_3PO_4 เป็นสารกระตุ้นในเครื่องแอกติเวเตอร์แบบฟลูอิดไดซ์เบดและแบบเบดนิ่ง (ดูรูปที่ 2.17 และ 2.18) เพื่อศึกษาตัวแปรต่าง ๆ ที่ผลต่อสมบัติในการดูดซับได้แก่ ชนิดและปริมาณของสารกระตุ้น, อุณหภูมิและเวลาในการกระตุ้น, ขนาดอนุภาค และตัวกลางที่ใช้ในการทำให้เกิดฟลูอิดซ์ ภาวะในการทดลองแสดงไว้ในตารางที่ 2.9 ขั้นตอนการทดลองคือ แช่กะลามะพร้าวขนาดที่ต้องการในสารกระตุ้น นำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส แล้วนำไปกระตุ้นในเครื่องแอกติเวเตอร์โดยใช้ความเร็วของตัวกลาง 1 ถึง 2 เท่าของความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดซ์ สำหรับเครื่องแอกติเวเตอร์แบบเบดนิ่งใช้อัตราการไหลของตัวกลาง 200 ลิตรต่อชั่วโมง



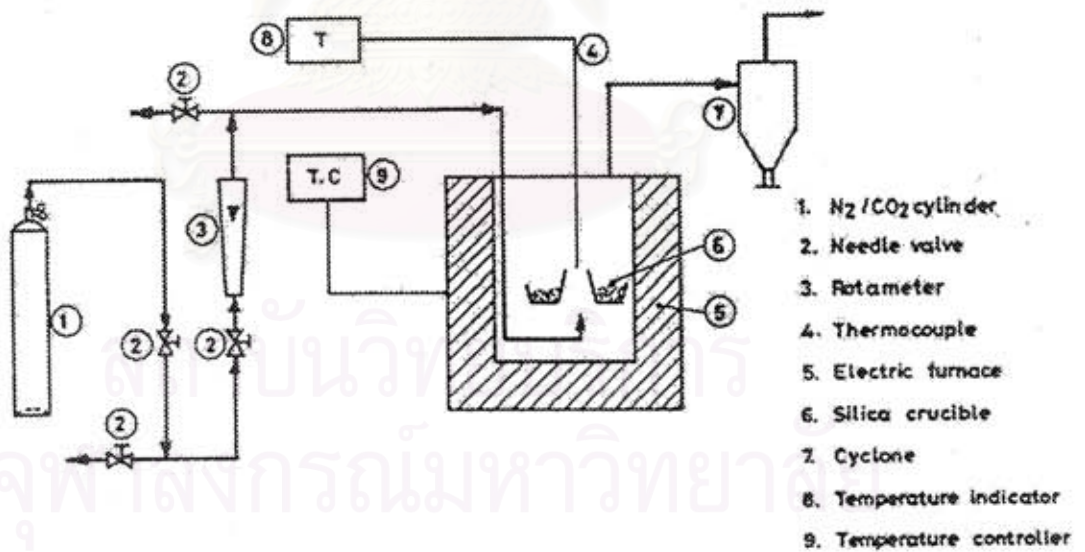
รูปที่ 2.16.ภาพถ่ายลักษณะพื้นผิวของ (ก) ชันไม้ปาล์มน้ำมัน (ข) ชันไม้ปาล์มที่ตกผลึกด้วย 15%w ZnCl₂ (ค) ถ่านกัมมันต์ที่กำลังขยาย 300 เท่า (ง) ถ่านกัมมันต์ที่กำลังขยาย 3000 เท่า (Mohd Zobir Hussein and others, 1995)

ตารางที่ 2.9 ตัวแปรที่ใช้ในการทดลองของ Kirubakaran, C. J. (1991)

Variable	Static bed	Fluidized bed
1. particle size (d_p), mm.	0.25-0.4, 0.4-0.63, 0.63-0.8, 0.8-1.0, 1.0-1.2	0.25-0.4, 0.4-0.63, 0.63-0.8, 0.8-1.0, 1.0-1.2
2. activation temp (T), °C	300, 400, 500, 600, 700, 800	300, 400, 500, 600, 700, 800
3. activation time (t), min	30, 60, 90, 120, 150, 180	30, 60, 90, 120, 150, 180
4. reagent selection	H ₃ PO ₄ /ZnCl ₂	H ₃ PO ₄ /ZnCl ₂
5. impregnation ratio, (I.R.), wt%	25, 50, 100, 150, 200	25, 50, 100, 150, 200
6. medium	air/N ₂ /CO ₂	air/N ₂ /CO ₂



รูปที่ 2.17 เครื่องแอตติเวเตอร์แบบฟลูอิด์เบดของ Kirubakaran, C. J (1991)



รูปที่ 2.18 เครื่องแอตติเวเตอร์แบบเบตนิ่งของ Kirubakaran, C. J (1991)

ผลการทดลองสรุปได้ว่า

ผลของเวลา การกระตุ้นในฟลูอิด์เบตจะได้ถ่านกัมมันต์ที่มีสมบัติในการดูดซับไอโอดีน และการดูดซับฟีนอล สูงขึ้นอย่างรวดเร็วใน 30 นาทีแรก จากนั้นจะค่อย ๆ สูงขึ้นอย่างช้า ๆ และลดลงเมื่อใช้เวลาในการกระตุ้นมากกว่า 120 นาที สำหรับการกระตุ้นในเบตหนึ่งพบว่า สมบัติในการดูดซับไอโอดีน และฟีนอล จะค่อย ๆ สูงขึ้นอย่างช้า ๆ และสรุปได้ว่าเวลาที่เหมาะสมคือ 2 ชั่วโมง เมื่อเปรียบเทียบถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการผลิตทั้งสองวิธีพบว่า การดูดซับของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตในฟลูอิด์เบตสูงกว่าในเบตหนึ่ง

ผลของขนาดอนุภาค ในเครื่องแอกติเวเตอร์แบบฟลูอิด์เบต สามารถกระตุ้นวัตถุบิขนาดใหญ่มากกว่าในเบตหนึ่ง ทั้งนี้เพราะทุก ๆ ส่วนของผิววัตถุบิสามารถใช้ในการเกิดปฏิกิริยาได้ จากการทดลองพบว่า ในเครื่องแอกติเวเตอร์แบบฟลูอิด์เบต ควรใช้วัตถุบิที่มีขนาด 0.515 มิลลิเมตร

ผลของอุณหภูมิ ถ้าพิจารณาถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้ที่มีสมบัติในการดูดซับเท่ากันจะพบว่า การผลิตถ่านกัมมันต์ในเครื่องแอกติเวเตอร์แบบฟลูอิด์เบตใช้อุณหภูมิต่ำกว่าในเบตหนึ่ง ทั้งนี้เพราะสามารถถ่ายเทมวลและความร้อนได้ดีกว่า สำหรับการกระตุ้นด้วย H_3PO_4 ถ้าอุณหภูมิสูงกว่า 500 องศาเซลเซียส ค่าการดูดซับฟีนอลจะลดลง ซึ่งอาจเกิดจากรูพรุนขนาดเล็ก (micropore) ถูกทำลายไป แต่ไม่มีผลกับค่าการดูดซับไอโอดีน สำหรับการกระตุ้นด้วย $ZnCl_2$ พบว่า เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นค่าการดูดซับไอโอดีนและฟีนอลจะสูงขึ้น ซึ่งจะตรงข้ามกับการกระตุ้นด้วย H_3PO_4 ทั้งนี้เชื่อว่าเกิดจากการที่ $ZnCl_2$ (732 องศาเซลเซียส) มีจุดเดือดสูงกว่า H_3PO_4 (213 องศาเซลเซียส)

ผลของชนิดและปริมาณสารกระตุ้น ปริมาณสารกระตุ้นเพิ่มขึ้น ถ่านกัมมันต์ที่ได้จะมีสมบัติในการดูดซับเพิ่มขึ้น ทั้งในเครื่องแอกติเวเตอร์แบบฟลูอิด์เบตและเบตหนึ่งทั้งนี้ สมบัติในการดูดซับเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อความเข้มข้นไม่เกินร้อยละ 25 จากนั้นสมบัติในการดูดซับเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ เมื่อปริมาณสารกระตุ้นเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่า การกระตุ้นด้วย $ZnCl_2$ จะได้ถ่านกัมมันต์ที่มีสมบัติในการดูดซับสูงกว่าถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นด้วย H_3PO_4 ประมาณ 2 เท่า

ผลของตัวกลางที่ใช้ในการฟลูอิด์เบต พบว่าการใช้ก๊าซไนโตรเจน หรือก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นตัวกลางจะช่วยให้ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้ มีสมบัติในการดูดซับสูงกว่าการใช้อากาศเป็นตัวกลาง เช่น เมื่อใช้ $ZnCl_2$ เป็นสารกระตุ้น พบว่าการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์เมื่อใช้ก๊าซไนโตรเจนมีค่า 1,100 เมื่อใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีค่า 1,000 และเมื่อใช้อากาศเท่ากับ 800 มิลลิกรัมต่อกรัม

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Gergova, K. and others (1993) ได้ทำการทดลองผลิตถ่านกัมมันต์จากวัสดุที่เหลือจากการเกษตร เช่น Apricot stone, Cherry stone และ Grape seeds ด้วยขั้นตอนเดียวคือ รวมกระบวนการคาร์บอนไนเซชัน และกระบวนการกระตุ้นด้วยไอน้ำเข้าด้วยกัน ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส 650 องศาเซลเซียส และ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง 2 ชั่วโมง และ 3 ชั่วโมง ตามลำดับ ผลการศึกษาแสดงดังตารางที่ 2.10 ถึง 2.12

ตารางที่ 2.10 สมบัติการดูดซับของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากวัสดุเหลือทิ้งจากการเกษตร

(Gergova et al., 1993)

วัตถุดิบ	ร้อยละถ่านกัมมันต์ ที่ผลิตได้	พื้นที่ผิวจำเพาะ (ตารางเมตรต่อกรัม)	การดูดซับไอโอดีน (มิลลิกรัมต่อกรัม)	การดูดซับเมทิลีนบลู (มิลลิกรัมต่อกรัม)
Apricot stones	18.16	1175	894	285
Grape seeds	26.23	487	607	192
Cherry stones	11.17	836	907	185

จากการศึกษาพบว่าถ่านกัมมันต์ที่ได้จาก Apricot stones ได้โครงสร้างรูพรุนชนิด ไมโครพอร์ และมีความเหมาะสมในการดูดซับโมเลกุลขนาดเล็ก ส่วนถ่านกัมมันต์ที่ได้จาก Grape seeds กับ Cherry stones โครงสร้างรูพรุนของถ่านกัมมันต์ที่ได้จะเป็นชนิด มีโซพอร์ และ แมโครพอร์ จึงมีความเหมาะสมในการดูดซับสารที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่

ดังนั้นวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์ เป็นปัจจัยสำคัญต่อสมบัติของถ่านกัมมันต์ ทั้งนี้เนื่องจากวัตถุดิบแต่ละชนิดมีองค์ประกอบทางเคมีที่แตกต่างกัน และนอกจากนี้ปริมาณของลิกนินและเซลลูโลส ก็เป็นปัจจัยที่ควรนำมาพิจารณาในการเลือกวัตถุดิบในการผลิตถ่านกัมมันต์

ตารางที่ 2.11 องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบชนิดต่างๆ ที่ใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์

(Gergova et al., 1993)

วัตถุดิบ	ร้อยละ เซลลูโลส	ร้อยละ ลิกนิน	ร้อยละไฮโดร เซลลูโลส	อัตราส่วนลิกนิน ต่อเซลลูโลส
Apricot stones	30	37	58	1.23
Grape seeds	30	49	48	1.63
Cherry stones	28	40	55	1.43

ตารางที่ 2.12 คุณลักษณะของรูพรุน และความสามารถในการดูดซับของถ่านลิกนินกับถ่านเซลลูโลส (Gergova et al., 1993)

วัตถุดิบ	ร้อยละถ่าน ที่เตรียมได้	การดูดซับไอโอดีน (มิลลิกรัมต่อกรัม)	V_{total} (cm^3/g)	V_{1micro} (cm^3/g)	V_{2meso} (cm^3/g)	V_{3macro} (cm^3/g)
เซลลูโลส	12.0	415	0.74	0.34	0.05	0.35
ลิกนิน	8.5	311	1.56	0.33	0.16	1.07

Nestor Tancredi and others (1996) ศึกษาการผลิตถ่านกัมมันต์จากเศษไม้ยูคาลิปตัส โดยกระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แก๊สผสมระหว่างแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์กับแก๊สออกซิเจน และไอน้ำเพื่อศึกษาถึงผลของสารกระตุ้นที่มีต่อผลิตภัณฑ์ที่ได้ จากการศึกษาพบว่าคาร์บอนช่วยไล่สารระเหยในเนื้อไม้และทำให้เกิดรูพรุนขนาดเล็กขึ้นแต่มีค่อนข้างจำกัด

ผลของการกระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

การเพิ่มขึ้นของการเผาไหม้ช่วยให้มีการพัฒนาของรูพรุนมากขึ้นเห็นได้จากรูพรุนขนาดกลางเพิ่มขึ้นดังตารางที่ 2.13 ส่วนรูพรุนขนาดใหญ่โดยทั่วไปมักมีอยู่แล้วในเนื้อไม้ ผลจากการกระตุ้นในกรณีนี้จะมีผลในกรณีการเผาไหม้สูงๆ

ตารางที่ 2.13 ลักษณะโครงสร้างรูพรุนของถ่านกัมมันต์ ที่ได้จากการกระตุ้นถ่านชาร์จากไม้ยูคาลิปตัสที่ผ่านการคาร์บอนไนซ์ที่ 800 องศาเซลเซียส ด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

(Nestor Tancredi and others, 1996)

Burn off (wt%)	A_{BET} (m^2/g)	$V_{DR}CO_2$ (m^2/g)	$V_{DR}N_2$ (m^2/g)	V_t (cm^3/g)	V_{meso} (cm^3/g)	V_{macro} (cm^3/g)
13	780	0.3	0.31	0.32	0.07	0.95
26	970	0.34	0.39	0.40	0.06	0.96
35	1040	0.35	0.41	0.44	0.15	0.99
47	1190	0.35	0.48	0.52	0.26	1.17

ผลของแก๊สออกซิเจนในแก๊สกระตุ้น

พบว่าการศึกษาที่มีแก๊สออกซิเจนผสมอยู่ด้วยปริมาณเล็กน้อยในแก๊สกระตุ้นทำให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้เร็ว แต่เมื่อเปรียบเทียบผลของปริมาตรรูพรุน ที่มีค่าการเผาไหม้เดียวกันกับการใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์กระตุ้น (burn off 47% ตารางที่ 2.13 และ burn off 48% ตารางที่ 2.14) พบว่ามีการเพิ่มขึ้นของรูพรุนใหญ่เท่านั้น ในขณะที่รูพรุนขนาดเล็กและกลางมีจำนวนลดลง

ตารางที่ 2.14 ลักษณะโครงสร้างรูพรุนของถ่านกัมมันต์ ที่ได้จากการกระตุ้นถ่านชาร์จากไม้ยูคาลิปตัสที่ผ่านการคาร์ไบไนซ์ที่ 800 องศาเซลเซียส ด้วยแก๊สผสมระหว่างแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์กับแก๊สออกซิเจน (Nestor Tancredi and others, 1996)

O ₂ (vol.%)	Burn off (wt%)	A _{BET} (m ² /g)	V _{DR} CO ₂ (m ² /g)	V _{DR} N ₂ (m ² /g)	V _t (cm ³ /g)	V _{meso} (cm ³ /g)	V _{macro} (cm ³ /g)
3.4	48	1240	0.39	0.53	0.46	0.2	1.36
5.2	61	1440	0.41	0.62	0.48	0.27	1.69

ผลของการกระตุ้นด้วยไอน้ำ

การใช้ไอน้ำกระตุ้น ช่วยเพิ่มอัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยาให้เร็วขึ้น นอกจากนั้นทำให้เกิดรูพรุนขนาดกลางและใหญ่มากขึ้น การกระตุ้นด้วยไอน้ำมีผลโดยเฉพาะกับรูพรุนขนาดใหญ่ค่อนข้างมากเนื่องจากไอน้ำมีความสามารถในการเกิดปฏิกิริยากับคาร์บอนได้ดีกว่าแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แต่เนื่องจากมีข้อจำกัดจากการแพร่ผ่านของไอน้ำ ปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชัน (Gasification) จึงทำให้เกิดการขยายตัวของรูพรุนเกิดเป็นรูพรุนขนาดกลางและขนาดใหญ่ ซึ่งผลที่ได้จะสอดคล้องกับค่าในตารางที่ 2.15

ตารางที่ 2.15 ลักษณะโครงสร้างรูพรุนของถ่านกัมมันต์ ที่ได้จากการกระตุ้นถ่านชาร์จากไม้ยูคาลิปตัสที่ผ่านการคาร์ไบไนซ์ที่ 800 องศาเซลเซียส ด้วยไอน้ำ (Nestor Tancredi and others, 1996)

Temp. (oC)	Burn off (wt%)	A _{BET} (m ² /g)	V _{DR} CO ₂ (m ² /g)	V _{DR} N ₂ (m ² /g)	V _t (cm ³ /g)	V _{meso} (cm ³ /g)	V _{macro} (cm ³ /g)
800	26	870	0.29	0.36	0.39	0.24	1.59
800	40	1,030	0.31	0.43	0.41	0.36	1.97
800	56	1,190	0.31	0.5	0.39	0.49	2.38
750	20	810	0.28	0.34	0.36	0.11	1.37
750	37	940	0.29	0.39	0.4	0.26	1.63
750	47	1,070	0.31	0.45	0.42	0.36	2.04

บทที่ 3

การดำเนินงานทดลอง

3.1 แนวทางการศึกษา

งานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยเชิงทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ เพื่อศึกษาหาภาวะที่เหมาะสมในการผลิต ถ่านกัมมันต์จากต้นปาล์มน้ำมันโดยการกระตุ้นด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งในฟลูอิด์เบด เพื่อศึกษาสมบัติและ ประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้ และนำมาเป็นข้อมูลสำหรับการผลิต และใช้ประโยชน์อย่างเหมาะสมต่อไป

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

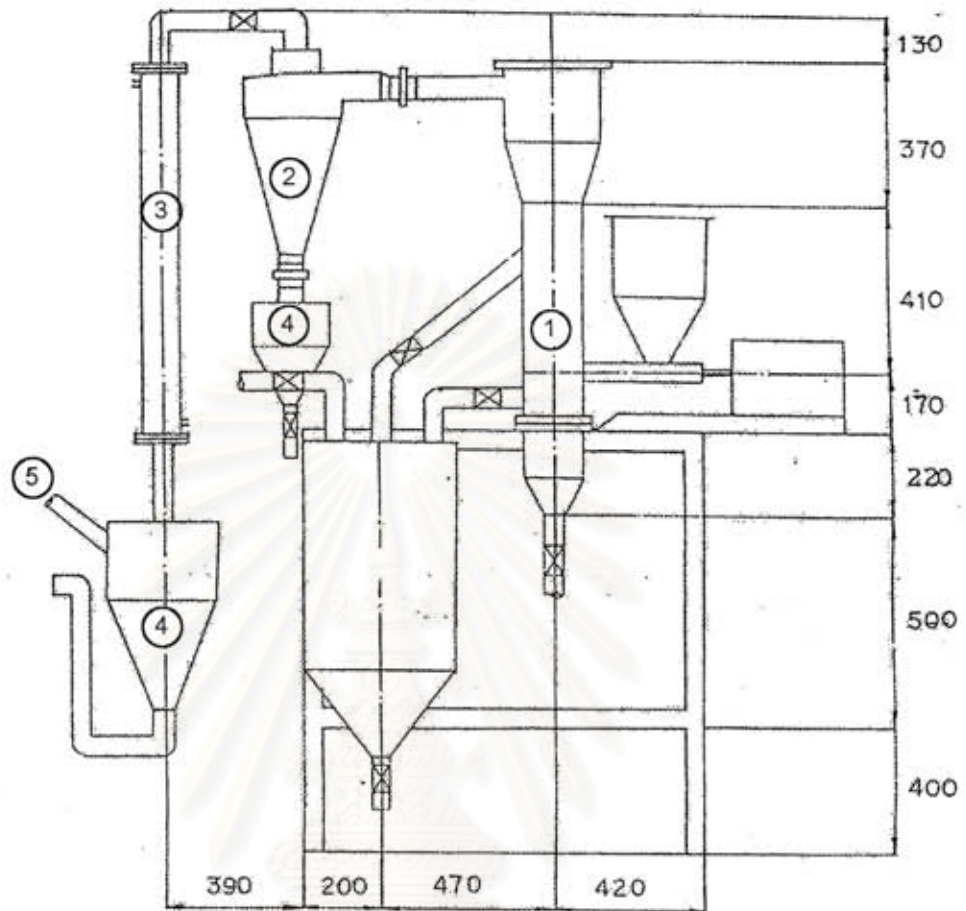
1. เครื่องบดหยาบ (Hammer mill)
2. เครื่องบดละเอียดรุ่น AEG.Lbi 07,220 V,1.5 KW (Germany)
3. เครื่องเขย่าตะแกรงร่อน (Seive shaker) EFL 1 mk3
4. ตะแกรงร่อนแยกขนาด มีขนาดต่าง ๆ ดังนี้ 0.15 มิลลิเมตร 0.25 มิลลิเมตร 0.85 มิลลิเมตร 1.18 มิลลิเมตร 2.36 มิลลิเมตร และ 4.75 มิลลิเมตร
5. เครื่องชั่งละเอียด 0.1 mg Sartorius รุ่น 1702 MP8 หมายเลข 35090125
6. เตาเผาไฟฟ้า (Muffle furnace) ยี่ห้อ Cabolit 0-1,200 °F
7. ตู้อบ (Oven) ของ WT binder ช่วงอุณหภูมิ 0-250 °C
8. ANEMOMETER ยี่ห้อ DIGICON รุ่น DA-43
9. เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง UV/VIS Spectrophotometer Jasco Model 7800
10. ครูซิเบิลพอร์ซเลน ความจุ 20 มิลลิลิตร พร้อมฝา
11. กระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42
12. เครื่องผลิตไอน้ำ (Boiler) ด้วยน้ำมันดีเซล ของภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
13. เครื่องอัดอากาศ (Compressor air) ของภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
14. ชุดเครื่องแก้วที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ
15. Scanning Electron Microscope (SEM) รุ่น JSM-6400

16. เครื่องวัดพื้นที่ผิวของบริษัท Micromeritics รุ่น ASAP 2000

17. เครื่องคาร์โบไนเซอร์แบบเบตนิ่ง ตัวเต้ามักลักษณะเป็นทรงกระบอก ทำด้วยเหล็กกล้าไร้สนิม SS.316 หนา 4 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 15.0 เซนติเมตร สูง 110.0 เซนติเมตร มีขดลวดความร้อนขนาดกำลังไฟฟ้า 2,000 W. พันรอบตัวเตา ควบคุมอุณหภูมิด้วยชุดควบคุมอุณหภูมิอัตโนมัติแบบเข็ม ในการวัดอุณหภูมิใช้เทอร์โมคัปเปิล ชนิด เค (โครเมต-อลูมินेत)

18. เครื่องแอกติเวเตอร์แบบฟลูอิดซ์เบต ซึ่งประกอบด้วยส่วนสำคัญดังนี้ ส่วนของเบตที่ใช้สำหรับการเกิดปฏิกิริยา เป็นเบตทรงกระบอกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 11.0 เซนติเมตร ความสูงของเบต 30.0 เซนติเมตร ผนังฉาบด้วยคอนกรีตทนไฟ หนา 8 เซนติเมตร ซึ่งภายในคอนกรีตมีขดลวดความร้อนขนาดกำลังไฟฟ้า 1,000 วัตต์ ยาวประมาณ 4 เมตร ฝังตัวอยู่ ด้านนอกสุดหุ้มด้วยเหล็กหนา 0.5 มิลลิเมตร และปลายทั้ง 2 ข้างของขดลวดความร้อนต่อเข้ากับเครื่องจ่ายไฟ (A.C Arc Welder Model KR 250) ซึ่งเครื่องจ่ายไฟถูกควบคุมการทำงานด้วยชุดควบคุมอุณหภูมิที่แผงควบคุม นอกจากนี้ด้านข้างของตัวเบตมีตัวเทอร์โมคัปเปิล ซึ่งทำหน้าที่ตรวจวัดอุณหภูมิภายในเบต แล้วส่งสัญญาณเข้าเครื่องวัดอุณหภูมิชนิดเข็ม 0-1,200 องศาเซลเซียส ด้านบนของส่วนเกิดปฏิกิริยาทำด้วยเหล็กชนิดเดียวกัน มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับเหล็กแผ่นทรงกระบอกที่หุ้มตัวเบต สูง 20 เซนติเมตร และต่อเข้ากับไซโคลน ส่วนด้านล่างทำด้วยแผ่นเหล็กชนิดเดียวกันกับตัวเบต มีลักษณะเป็นรูปกรวยสามเหลี่ยมมีความสูงประมาณ 60 เซนติเมตร ปากกรวยมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 28 เซนติเมตร ซึ่งมีขนาดเท่ากับตัว reactor และมีแผ่นกระจายก๊าซ (Distributor) เส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 13 เซนติเมตร มีความกว้างของรู 0.40 มิลลิเมตร และมีท่อทำด้วยสแตนเลส ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1/2 นิ้ว จำนวน 1 เส้นเป็นท่อส่งไอน้ำร้อนยวดยิ่งจากส่วนอุ่นไอน้ำเข้าเครื่องแอกติเวเตอร์ ส่วนท่อด้านล่างเป็นท่อส่งอากาศทำจากท่อแป๊ปประปาขนาด 2 1/2 นิ้ว ต่อมาจากตั้งอุ่นอากาศ ส่วนช่องนำผลิตภัณฑ์ออกจากเบตทำจากท่อสแตนเลสขนาด 1 นิ้ว มีแท่งสแตนเลสปลายปิดที่ต่อท่อวัดความดันลงภายในเบต สอดปิดช่องทางออกของผลิตภัณฑ์ไว้ ท่อทางออกของผลิตภัณฑ์ถูกต่อเข้ากับไซโคลนของส่วนเก็บผลิตภัณฑ์ ส่วนเก็บผลิตภัณฑ์ประกอบด้วยถังเก็บผลิตภัณฑ์ ไซโคลน และพัดลมดูดอากาศ

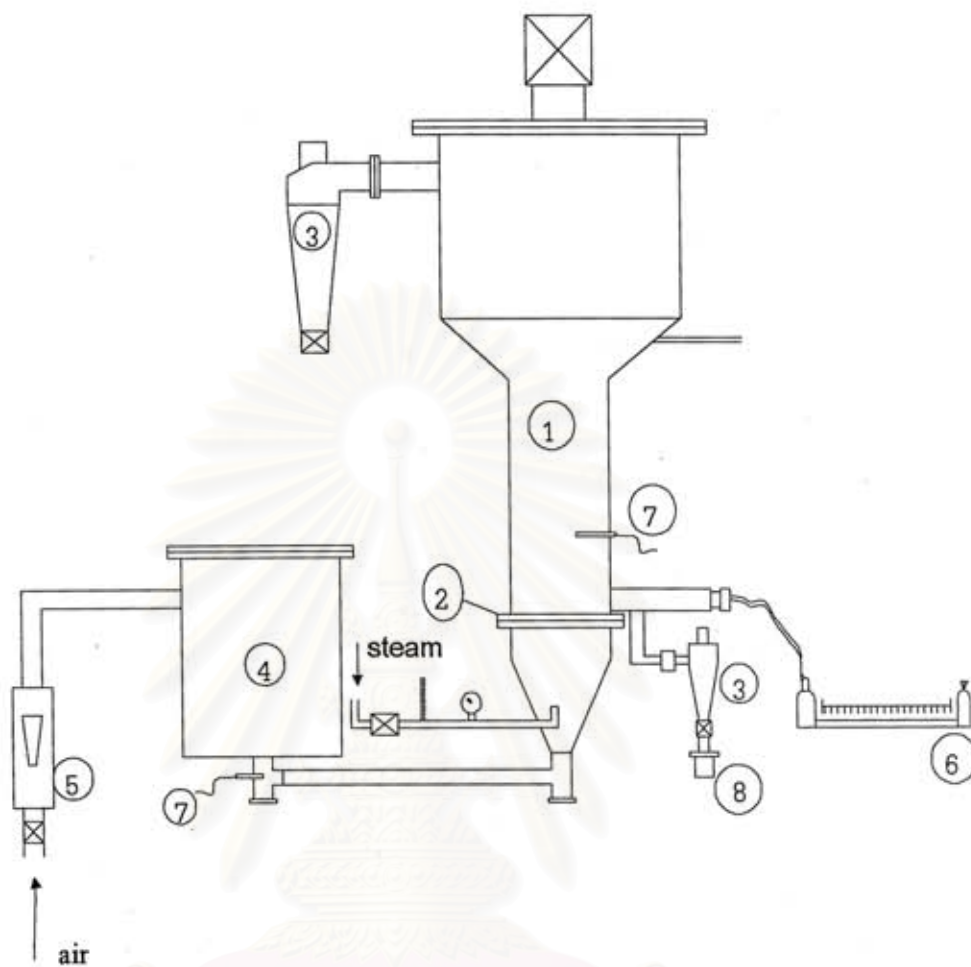
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



- | | |
|---------------------------------------|----------------------|
| 1. คอลัมน์เบตนิ่ง | 2. ไชโคลน |
| 3. คอลัมน์ควบแน่น | 4. ถังเก็บน้ำมันหาร์ |
| 5. ท่อต่อกับเครื่องกำจัดแก๊สแบบดูดซึม | |

รูปที่ 3.1 เครื่องคาร์โบไฮเดรตแบบเบตนิ่งของภาควิชาเคมีเทคนิค (จักริน นิธิจันทร์, 2537)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



- | | |
|-----------------------|---------------------|
| 1. ฟลูอิดซ์เบตคอลัมน์ | 2. แผ่นกระจายอากาศ |
| 3. ไซโคลน | 4. ถังอุ่นอากาศร้อน |
| 5. โรตاميเตอร์ | 6. มานอมิเตอร์ |
| 7. เทอร์โมคัปเปิล | 8. ถังเก็บผลิตภัณฑ์ |

รูปที่ 3.2 เครื่องแอกติเวเตอร์แบบฟลูอิดซ์เบต



รูปที่ 3.3 เครื่องคาร์ไมโซเนอร์แบบเบตนิ่ง(ลักษณะทั่วไป)



รูปที่ 3.4 เครื่องแอกติเวเตอร์แบบฟลูอิด์เบด (ลักษณะทั่วไป)



รูปที่ 3.5 เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง UV/VIS Spectrophotometer Jasco Model 7800 ของภาควิชาเคมีเทคนิค



รูปที่ 3.6 เครื่องวัดพื้นที่ผิว Micromeritics ASAP 2000 ของภาควิชาวิศวกรรมเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.3 ขั้นตอนดำเนินการทดลอง

การทดลองการเตรียมถ่านกัมมันต์จากต้นปาล์มน้ำมันด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งในฟลูอิด์เบดนี้ได้แบ่งการทดลองออกเป็นขั้นตอนดังนี้

3.3.1. การเตรียมวัตถุดิบ

วัตถุดิบในงานวิจัย เป็นต้นปาล์มน้ำมันที่ได้จากจังหวัดประจวบคีรีขันธ์ ทำการตัดทอนให้เป็นท่อน ๆ ยาวประมาณ 1 เมตร ด้วยเครื่องเลื่อยยนต์ของเกษตรกรในละแวกนั้น ก่อนทำการตัดทอนให้มีความหนาประมาณ 20 เซนติเมตรด้วยเครื่องเลื่อยยนต์ของกองงานสวน จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย หลังจากนั้นนำมาตัดให้เป็นชิ้นขนาด 2.54x2.54x2.54 เซนติเมตรด้วยเครื่องเลื่อยวงเดือนของภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย วิเคราะห์สมบัติเบื้องต้นของไม้ปาล์มน้ำมัน ได้แก่ ปริมาณสารระเหย (VM) ปริมาณคาร์บอนคงตัว (FC) ปริมาณเถ้า (A) และ ปริมาณความชื้น (M) ตาม ASTM D 1762-84

3.3.2 การคาร์ไบไนซ์ในเครื่องคาร์ไบไนเซอร์แบบเบดนิ่ง (รูปที่ 3.1)

- เปิดสวิตช์ไฟหลักของเครื่องคาร์ไบไนเซอร์ เปิดสวิตช์ไฟของพัดลมดูดอากาศและปั๊มน้ำของส่วนกำจัดแก๊สแบบดูดซึม และเครื่องจ่ายไฟสำหรับขดลวดให้ความร้อนแก่เบด ตั้งอุณหภูมิของเครื่องควบคุมขดลวดให้ความร้อนแก่เบดที่ 200, 250, 300, 350 และ 400 องศาเซลเซียส ตามต้องการ รอจนกระทั่งอุณหภูมิภายในเบดเท่ากับอุณหภูมิที่ตั้งค่าไว้

- ชั่งต้นปาล์มน้ำมันที่เตรียมได้จากขั้นตอนการเตรียมวัตถุดิบ 500 กรัม ใส่ในตะแกรงสแตนเลสทรงกระบอก นำไปใส่ในเครื่องคาร์ไบไนซ์แบบเบดนิ่ง

- อุณหภูมิภายในเบดจะลดลงประมาณ 50 องศาเซลเซียส รอจนกระทั่งอุณหภูมิภายในเบดเท่ากับอุณหภูมิที่ต้องการ เริ่มนับเวลาเมื่อได้เวลาตามต้องการคือ 30, 45 และ 60 นาที นำถ่านที่ได้ออกจากเครื่องคาร์ไบไนซ์ ปล่อยให้เย็นในถังอับอากาศ

- ชั่งน้ำหนักของผลิตภัณฑ์ที่ได้ ก่อนนำไปวิเคราะห์สมบัติโดยประมาณ

3.3.3 การกระตุ้นในเครื่องแอกติเวเตอร์แบบฟลูอิด์เบด (รูปที่ 3.2)

- เปิดสวิตช์ไฟหลักของเครื่องแอกติเวเตอร์ และเครื่องจ่ายไฟสำหรับขดลวดให้ความร้อนแก่เบด และส่วนอุ่นความร้อน (Preheater) ของอากาศเข้า ตั้งอุณหภูมิของเครื่องควบคุมขดลวดให้ความร้อนแก่เบดที่ 650, 750 และ 850 องศาเซลเซียส ตามต้องการ ส่วนอุ่นความร้อน 200 องศาเซลเซียส

- เมื่ออุณหภูมิภายในเบดเท่ากับอุณหภูมิที่ตั้งไว้ จุดหัวเตาแก๊สเพื่อให้ความร้อนแก่ส่วนอุ่นไอน้ำเข้า รอจนกระทั่งอุณหภูมิของไอน้ำเท่ากับ 200 องศาเซลเซียส เปิดวาล์วป้อนไอน้ำเข้าเครื่องแอกติเวเตอร์เล็กน้อย

- ป้อนถ่านเข้าเครื่องแอกติเวเตอร์ผ่านวาล์วทางด้านบน โดยให้เบดนิ่งสูงประมาณ 5.0 เซนติเมตร ปรับวาล์วป้อนไอน้ำเข้าให้ได้ความเร็วประมาณ 1/2 เท่าของความเร็วที่ต้องการ ปรับวาล์วป้อน

อากาศเข้าเครื่องแอดติเวเตอร์เพื่อปรับให้ได้ความเร็ว 1.0, 1.5 และ 2.0 เท่าของความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชัน และอุณหภูมิภายในฟลูอิด์เบดเท่ากับอุณหภูมิที่ต้องการ

- เมื่ออุณหภูมิภายในฟลูอิด์เบดเท่ากับอุณหภูมิที่ต้องการ เริ่มนับเวลาเมื่อได้เวลาตามต้องการ คือ 3, 6 และ 9 นาที เปิดสวิตช์เครื่องดูดอากาศ เลื่อนแกนเหล็กที่ปิดทางออกของผลิตภัณฑ์ออก ผลิตภัณฑ์จะไหลเข้าไซโคลนลงสู่ถังเก็บผลิตภัณฑ์ ปิดวาล์วระหว่างไซโคลนกับถังเก็บผลิตภัณฑ์ ปิดสวิตช์เครื่องดูดอากาศ

- ทิ้งให้ผลิตภัณฑ์เย็นในถังเก็บประมาณ 3-5 นาที ถอดถังเก็บผลิตภัณฑ์ออกแล้วรีบปิดฝาถังเก็บ ปล่องให้ผลิตภัณฑ์เย็นลงจนถึงอุณหภูมิห้อง ก่อนชั่งน้ำหนักผลิตภัณฑ์และนำไปวิเคราะห์หาสมบัติทางฟิสิกส์และทางเคมี



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

ผลการทดลอง วิเคราะห์และวิจารณ์ผล

จากการดำเนินการทดลองตามขั้นตอนที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 3 ผู้วิจัยได้นำเสนอและวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้ในรูปแบบของตารางและกราฟเรียงลำดับดังนี้

4.1 สมบัติของวัตถุดิบ

4.1.1 ลักษณะทั่วไปของถ่านไม้ปาล์มน้ำมัน

ไม้ปาล์มน้ำมันที่ถูกคาร์บอนไนซ์แล้วจะมีลักษณะทั่วไปเหมือนเดิม นอกจากเปลี่ยนเป็นสีดำ เพราะและน้ำหนักเบามากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ภาพถ่ายแสดงลักษณะทั่วไปของ (ก) ถ่านไม้ปาล์มน้ำมันที่คาร์บอนไนซ์ที่ 300 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที (ข) ชิ้นไม้ปาล์มน้ำมันก่อนการคาร์บอนไนซ์

4.1.2 สมบัติโดยประมาณ (Proximate) ของไม้ปาล์มน้ำมัน

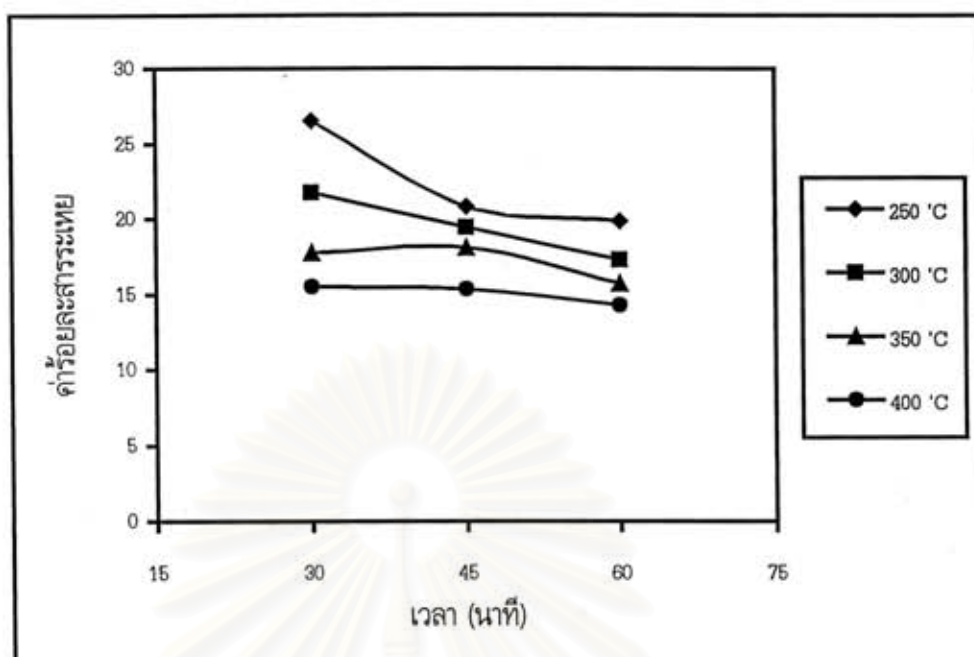
ความชื้น (M)	ร้อยละ	10.49 ± 0.06
ปริมาณเถ้า (A)	ร้อยละ	6.39 ± 0.35
ปริมาณสารระเหย (VM)	ร้อยละ	77.94 ± 2.96
ปริมาณคาร์บอนคงตัว	ร้อยละ	5.18 ± 2.90

4.2 ภาวะที่เหมาะสมในการคาร์โบไนซ์ไม้ปาล์มน้ำมัน

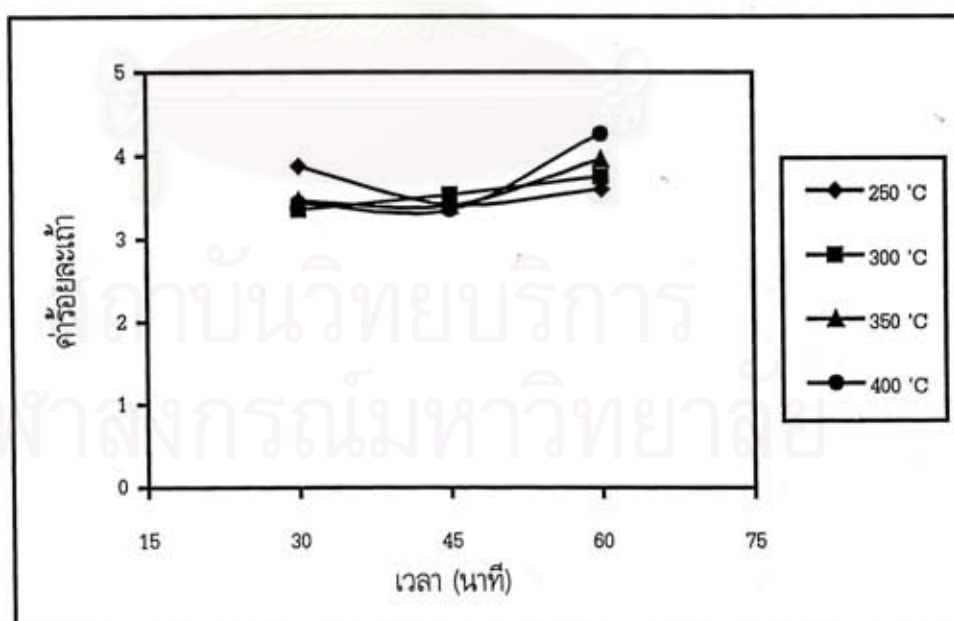
ผลจากการคาร์โบไนซ์ไม้ปาล์มน้ำมันที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ ในเครื่องคาร์โบไนซ์แบบเบตนิ่ง แล้วทำการวิเคราะห์สมบัติของถ่านชาร์ ได้แก่ปริมาณความชื้น (M) ปริมาณเถ้า (A) ปริมาณสารระเหย (VM) และปริมาณคาร์บอนคงตัว (FC) สามารถแสดงรายละเอียดดังตารางที่ 4.1 และจากข้อมูลที่ได้นำมาสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ของผลของเวลาและอุณหภูมิที่มีต่อสมบัติของถ่านชาร์ที่ได้ ดังรูปที่ 4.2 ถึง 4.9

ตารางที่ 4.1 ค่าการวิเคราะห์โดยประมาณของถ่านชาร์ที่ได้จากการคาร์โบไนซ์ไม้ปาล์มน้ำมัน ณ ภาวะต่างๆ

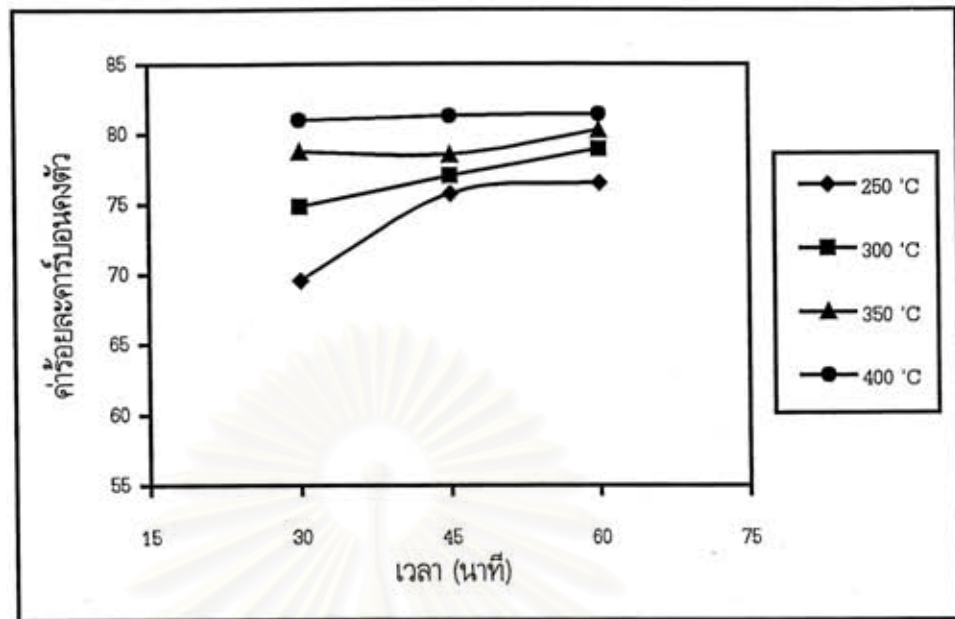
ภาวะการเตรียม วัตถุดิบ		YC (% wt)	M (% wt)	On dry basis		
อุณหภูมิ (°ซ)	ระยะเวลา (นาที.)			A (% wt)	VM (% wt)	FC (% wt)
200	30	65.71	-	-	-	-
	45	69.47	-	-	-	-
	60	28.48	-	-	-	-
250	30	29.75	5.87±0.02	3.88±0.40	26.55±1.35	69.57±1.68
	45	21.94	5.95±0.15	3.42±0.16	20.83±1.29	75.75±1.15
	60	21.58	5.92±0.12	3.61±0.10	19.85±0.86	76.54±0.83
300	30	23.81	5.60±0.45	3.36±0.15	21.78±0.95	74.86±1.04
	45	22.89	5.68±0.05	3.54±0.32	19.45±0.91	77.01±1.01
	60	19.12	5.74±0.14	3.76±0.02	17.29±1.17	78.95±1.16
350	30	23.30	5.79±0.10	3.47±0.02	17.77±1.09	78.76±1.11
	45	21.66	5.76±0.06	3.41±0.16	18.08±1.69	78.51±1.83
	60	14.48	6.01±0.08	3.96±0.15	15.76±1.61	80.28±1.75
400	30	22.80	6.30±0.06	3.44±0.19	15.54±0.66	81.02±0.85
	45	18.51	6.16±0.09	3.36±0.02	15.34±2.77	81.30±2.76
	60	16.08	6.48±0.09	4.26±0.24	14.32±0.48	81.42±0.59



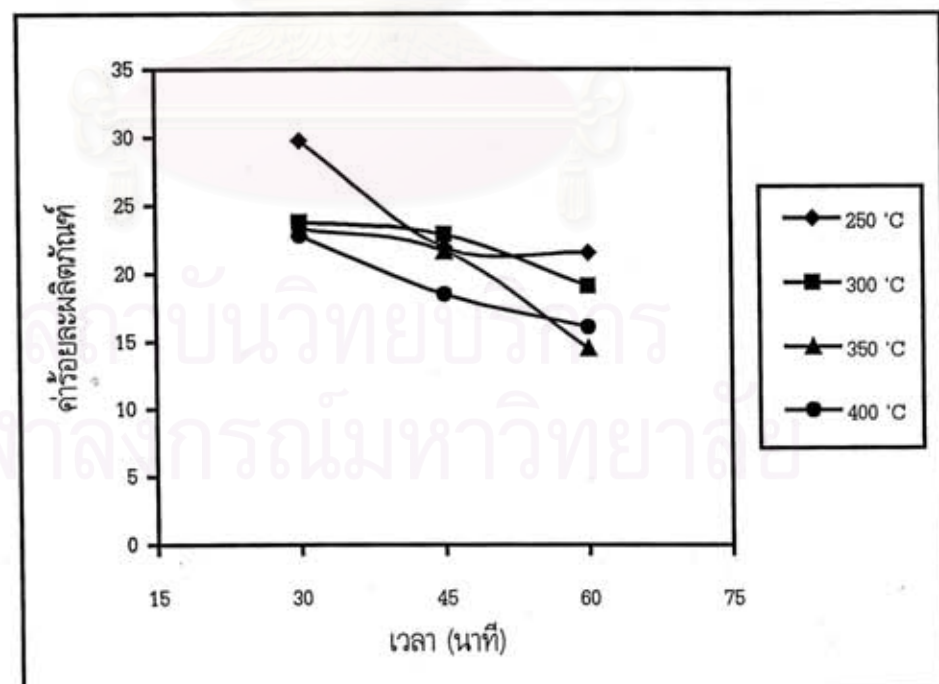
รูปที่ 4.2 ผลของเวลาการคาร์โบไนซ์ต่อค่าร้อยละสารระเหยที่อุณหภูมิต่างๆ



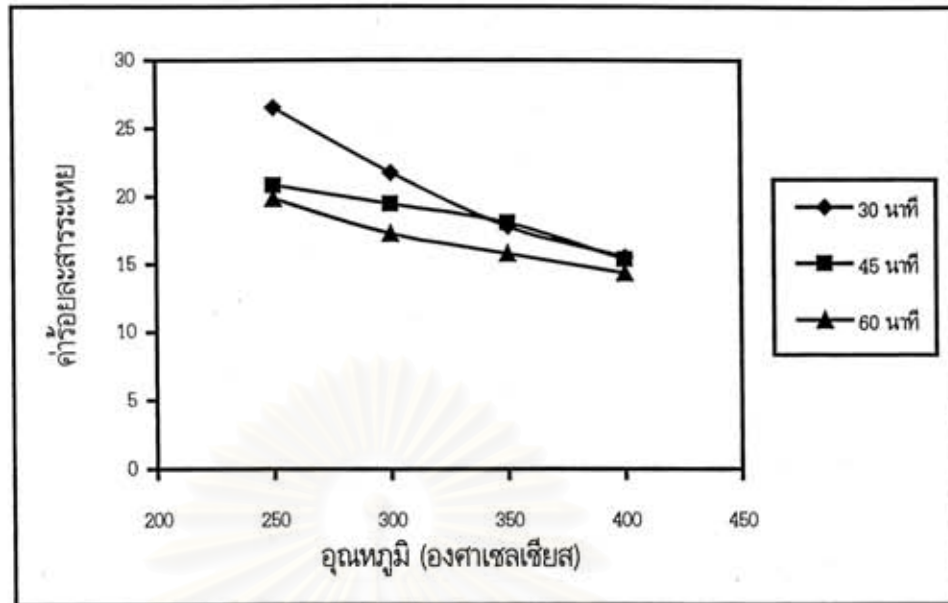
รูปที่ 4.3 ผลของเวลาการคาร์โบไนซ์ ต่อค่าร้อยละเถ้าที่อุณหภูมิต่างๆ



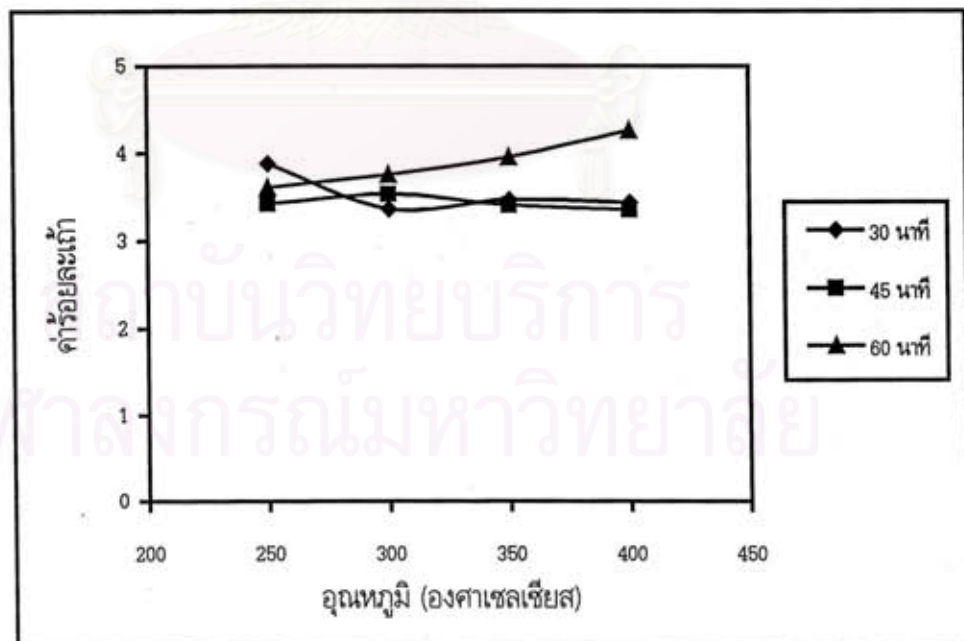
รูปที่ 4.4 ผลของเวลาการคาร์ไบไนซ์ต่อค่าร้อยละคาร์บอนคงตัวที่อุณหภูมิต่างๆ



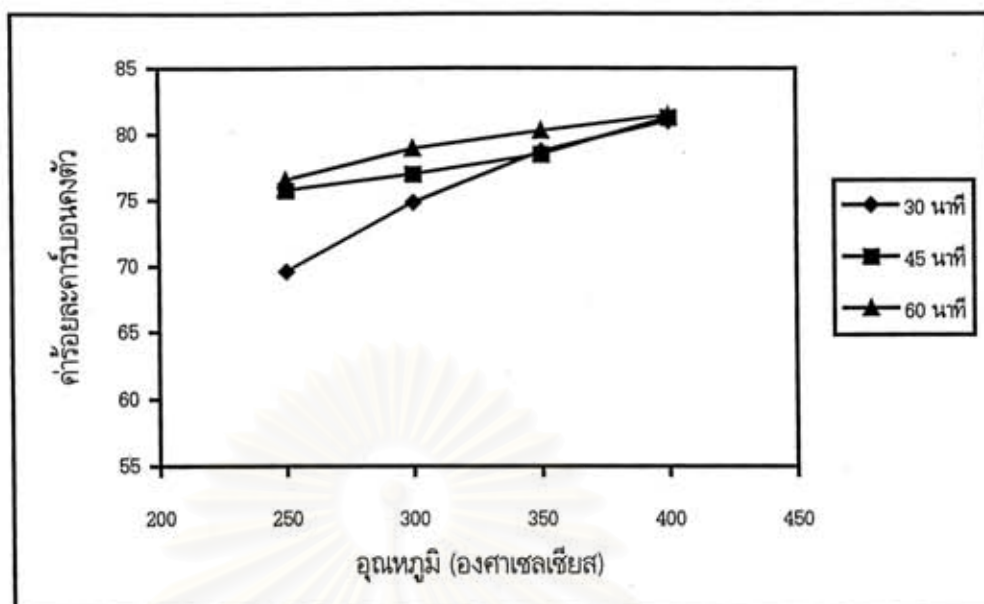
รูปที่ 4.5 ผลของเวลาการคาร์ไบไนซ์ต่อค่าร้อยละผลิตภัณฑ์ที่อุณหภูมิต่างๆ



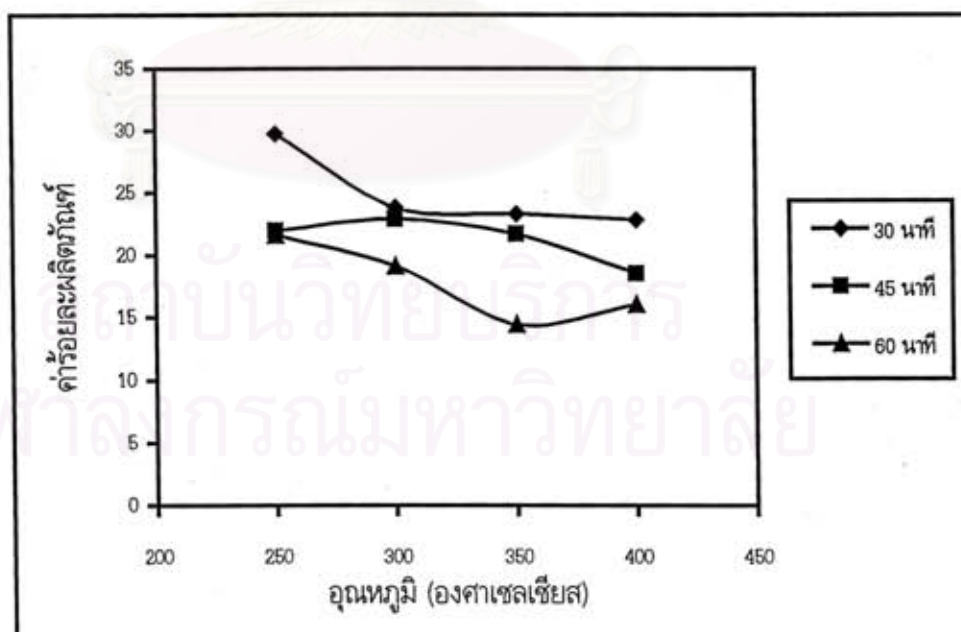
รูปที่ 4.6 ผลของอุณหภูมิการคาร์บอนไดออกไซด์ต่อค่าร้อยละสภาวะเหยยที่เวลาต่างๆ



รูปที่ 4.7 ผลของอุณหภูมิการคาร์บอนไดออกไซด์ต่อค่าร้อยละเก้ที่เวลาต่างๆ



รูปที่ 4.8 ผลของอุณหภูมิจากคาร์บอนไดออกไซด์ต่ออัตราการตรึงคาร์บอนทั้งหมดที่เวลาต่างๆ



รูปที่ 4.9 ผลของอุณหภูมิจากคาร์บอนไดออกไซด์ต่ออัตราการตรึงคาร์บอนทั้งหมดที่เวลาต่างๆ

4.3 ภาวะที่เหมาะสมในการกระตุ้นถ่านจากต้นปาล์มน้ำมันด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งในฟลูอิดไธด์เบด

เมื่อพิจารณาถ่านชาร์ที่ได้จากการคาร์ไบไนซ์ที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ พบว่าภาวะที่เหมาะสมในการคาร์ไบไนซ์คือ อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที มีปริมาณร้อยละสารระเหยเท่ากับ 21.78 นำถ่านชาร์ที่ได้มาบดและคัดขนาดจากนั้นนำไปกระตุ้นโดยศึกษาตัวแปรดังนี้ เวลาที่ใช้ในการกระตุ้น 3, 6 และ 9 นาที ความเร็วแก๊สตัวกลางเท่ากับ 1, 1.5, และ 2.0 เท่าของความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไธด์ อุณหภูมิที่ใช้ในการกระตุ้น 650 , 750 และ 850 องศาเซลเซียส ขนาดอนุภาคถ่านชาร์ 0.85-1.18, 1.18-2.36 และ 2.36-4.75 มิลลิเมตร

ในงานวิจัยนี้ทำการศึกษาการกระตุ้นถ่านชาร์จากต้นปาล์มน้ำมันด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งในฟลูอิดไธด์เบด โดยศึกษาผลของตัวแปร คือ อุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการกระตุ้น ขนาดของถ่านชาร์ และอัตราส่วน U/U_{mf} เนื่องจากตัวแปรเหล่านี้เป็นตัวแปรปริมาณ (Quantitative factors) เพื่อความกระชับและความเหมาะสมของการทดลอง จึงเลือกใช้วิธีการออกแบบการทดลองของบ็อกซ์วิลสัน (Box-Wilson design) หรือ Central Composite Design (CCD) ในการออกแบบการทดลองในส่วนนี้ ดังวิธีการออกแบบในภาคผนวก จ. ผลการออกแบบการทดลองสามารถแสดงดังตารางที่ 4.2 ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้จะนำไปวิเคราะห์สมบัติค่าการดูดซับไอโอดีน (IA) ค่าการดูดซับเมทิลีนบลู (MB) ค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตร (BD) ปริมาณถ่าน (A) ดังแสดงในตารางที่ 4.4 และจากข้อมูลในตารางนำไปเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ผลของตัวแปรต่อค่าการดูดซับไอโอดีน (IA) ของถ่านกัมมันต์ ดังแสดงในรูปที่ 4.11 ถึง 4.15

ตารางที่ 4.2 ภาวะที่ใช้ทดลองตามวิธีการออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์วิลสัน และค่าการดูดซับไอโอดีน

การทดลองที่	ภาวะในการทดลอง				ค่าการดูดซับไอโอดีน (มิลลิกรัม/กรัม)
	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลา (นาที)	ขนาดอนุภาค (มิลลิเมตร)	ความเร็วไอน้ำ (U/U_{mf})	
1	850	9	2.36-4.75	2	397.77
2	850	9	2.36-4.75	1	384.55
3	850	9	0.85-1.18	2	291.87
4	850	9	0.85-1.18	1	294.16
5	850	3	2.36-4.75	2	295.31
6	850	3	2.36-4.75	1	287.09
7	850	3	0.85-1.18	2	307.91
8	850	3	0.85-1.18	1	296.70
9	650	9	2.36-4.75	2	230.26
10	650	9	2.36-4.75	1	219.96

ตารางที่ 4.2(ต่อ) ภาวะที่ใช้ทดลองตามวิธีการออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์วิลสัน และค่าการดูดซับไอโอดีน

การทดลองที่	ภาวะในการทดลอง				ค่าการดูดซับไอโอดีน (มิลลิกรัม/กรัม)
	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลา (นาที)	ขนาดอนุภาค (มิลลิเมตร)	ความเร็วไอน้ำ (U/U _{mf})	
11	650	9	0.85-1.18	2	168.98
12	650	9	0.85-1.18	1	167.45
13	650	3	2.36-4.75	2	173.96
14	650	3	2.36-4.75	1	170.85
15	650	3	0.85-1.18	2	193.43
16	650	3	0.85-1.18	1	181.06
17	750	6	1.18-2.36	1.5	296.74
18	750	6	1.18-2.36	1.5	299.29
19	750	6	1.18-2.36	1.5	303.21
20	650	6	1.18-2.36	1.5	200.69
21	850	6	1.18-2.36	1.5	403.99
22	750	3	1.18-2.36	1.5	255.24
23	750	9	1.18-2.36	1.5	338.83
24	750	6	0.85-1.18	1.5	285.52
25	750	6	2.36-4.75	1.5	312.79
26	750	6	1.18-2.36	1	291.20
27	750	6	1.18-2.36	2	309.36

จากตารางที่ 4.2 เนื่องจากเป็นการทดลองที่อาศัยหลักการออกแบบการทดลองจึงสามารถนำผลการทดลองไปวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณเชิงเส้นได้ดังตารางที่ 4.3

เมื่อ

Temp	คือ อุณหภูมิที่ใช้ในการกระตุ้น, องศาเซลเซียส
Time	คือ เวลาที่ใช้ในการกระตุ้น, นาที
Size	คือ ขนาดของถ่านชาร์, มิลลิเมตร
Flow	คือ อัตราส่วน U/U_{mf}

ความหมายของการวิเคราะห์ข้อมูลสรุปได้ดังนี้

1) ตัวแปรอิสระทั้งหมดมีความสัมพันธ์กับค่าการดูดซับไอโอดีนค่อนข้างสูงคือร้อยละ 86.87 ซึ่งจะพิจารณาว่าตัวแปรอิสระใดควรใช้ในสมการพยากรณ์ต่อไป

2) การวิเคราะห์ความแปรปรวนเพื่อทดสอบว่าตัวแปรอิสระทั้งหมดจะนำมาพยากรณ์ค่าการดูดซับไอโอดีนได้หรือไม่ โดยการตั้งสมมติฐานดังนี้

H_0 : ตัวแปรอิสระทุกตัวไม่มีผลต่อค่าการดูดซับไอโอดีน

H_1 : ตัวแปรอิสระบางตัวมีผลต่อค่าการดูดซับไอโอดีน

กำหนดระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.05

จากตารางพบว่าค่าสถิติ F ที่คำนวณได้มีค่าสูงกว่าค่าสถิติ F ที่เปิดจากตารางแสดงว่าปฏิเสธสมมติฐาน H_0 กล่าวคือ ตัวแปรอิสระบางตัวมีผลต่อค่าการดูดซับไอโอดีนที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

ตารางที่ 4.3 ข้อมูลวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณเชิงเส้นของค่าการดูดซับไอโอดีน

SUMMARY OUTPUT

Regression Statistics	
Multiple R	0.8687
R Square	0.7547
Adjusted R Square	0.7101
Standard Error	37.4098
Observations	27

ANOVA					
	df	SS	MS	F	Significance F
Regression	4	94721.09	23680.27	16.9206	1.8E-06
Residual	22	30788.86	1399.494		
Total	26	125509.9			

	Coefficients	Standard Error	t Stat	P-value	Lower 95%	Upper 95%
Intercept	-313.3178	75.49944	-4.149936	0.000418	-469.8942	-156.7414
Temp	0.695944	0.088176	7.892693	7.38E-08	0.513079	0.87881
Time	6.153148	2.939192	2.093483	0.04805	0.057631	12.24867
Size	9.789312	11.10704	0.881361	0.387651	-13.24531	32.82394
Flow	8.426667	17.63515	0.477834	0.637482	-28.14644	44.99977

ขั้นตอนต่อไปคือการทดสอบค่าสถิติและความน่าจะเป็นของตัวทดสอบ T เพื่อทดสอบว่าควรจะใช้ค่าคงที่ และตัวแปรอิสระใด ในสมการพยากรณ์โดยตั้งสมมติฐานดังนี้

H_0 : ตัวแปรอิสระตัวที่ i ไม่มีผลต่อค่าการดูดซับไอโอดีน

H_1 : ตัวแปรอิสระตัวที่ i มีผลต่อค่าการดูดซับไอโอดีน

การวิเคราะห์อาจดูจากค่าสถิติ T-Stat เทียบกับการเปิดจากตารางสถิติหรือค่าความน่าจะเป็น P-Value ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ในที่นี้จะวิเคราะห์จากค่าความน่าจะเป็นโดยเลือกค่าความน่าจะเป็นที่มีค่าน้อยกว่าระดับนัยสำคัญ สรุปตัวแปรที่นำมาใช้ในสมการพยากรณ์ได้ดังนี้

ตัวแปรอิสระ Temp มีค่าสัมประสิทธิ์เท่ากับ 0.696

ตัวแปรอิสระ Time มีค่าสัมประสิทธิ์เท่ากับ 6.153

จุดตัดมีค่าสัมประสิทธิ์เท่ากับ -313.318

สรุปสมการพยากรณ์ได้ดังนี้

$$IA = 0.696Temp + 6.153Time - 313.318 \quad (4.1)$$

เมื่อ IA คือค่าการดูดซับไอโอดีน, มิลลิกรัมต่อกรัม

4.3.1. ลักษณะทั่วไปของผลิตภัณฑ์ถ่านกัมมันต์



รูปที่ 4.10 ลักษณะถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่ 850 องศาเซลเซียส นาน 9 นาที ความเร็วแก๊สตัวกลาง 2 เท่าของความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชัน ขนาดอนุภาคถ่าน 2.36-4.75 มิลลิเมตร

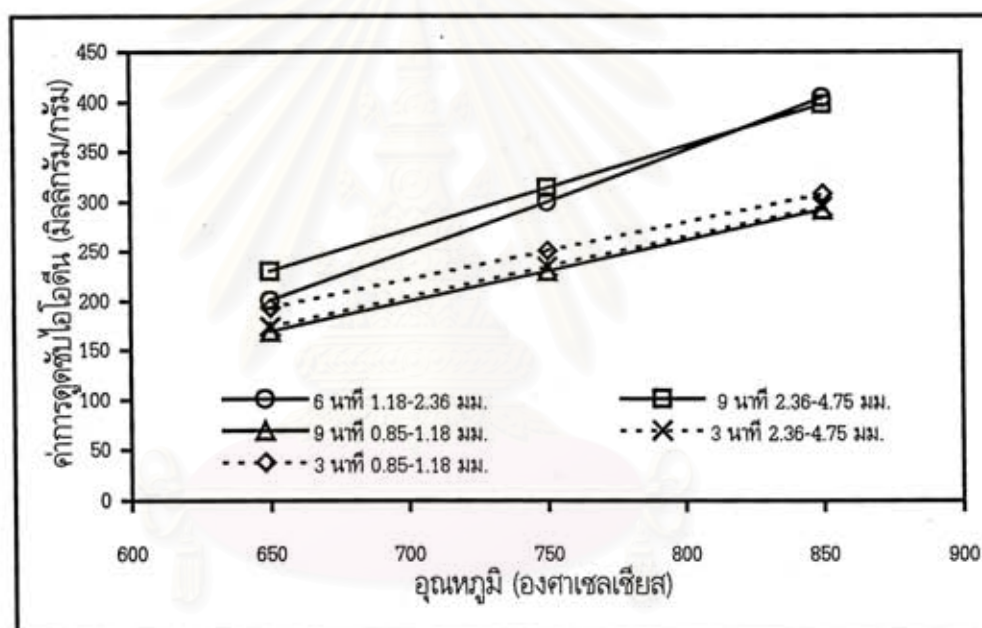
4.3.2.สมบัติของถ่านกัมมันต์จากการทดลอง

ตารางที่ 4.4 สมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นด้วยไอน้ำร้อนนวดยั้ง ณ. ภาวะต่าง ๆ

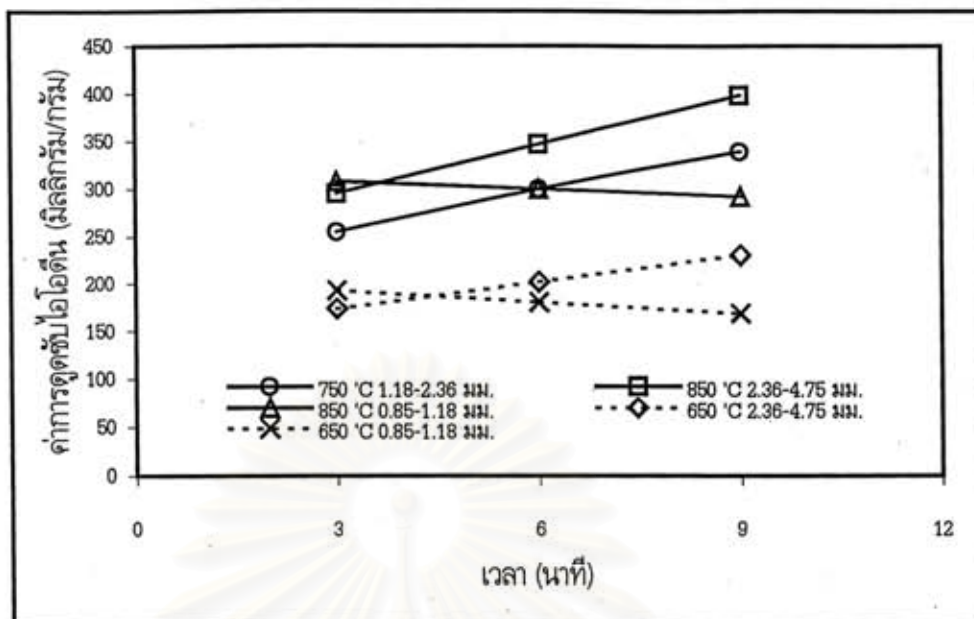
การทดลองที่	YC(% wt)	On dry basis			
		BD (g/cm ³)	A (% wt)	IA (mg/g)	MB (mg/g)
1	29.76	0.492	9.04	397.77	161.16
2	32.34	0.493	7.30	384.55	160.36
3	12.83	0.548	7.02	291.87	155.03
4	14.20	0.549	5.90	294.16	154.83
5	38.89	0.502	7.24	295.31	154.90
6	42.79	0.506	7.01	287.09	154.40
7	27.30	0.550	5.30	307.91	155.67
8	29.72	0.550	5.13	296.70	154.98
9	35.67	0.477	8.17	230.26	151.10
10	55.17	0.477	6.85	219.96	150.29
11	39.44	0.582	6.96	168.98	148.53
12	52.27	0.582	4.55	167.45	147.08
13	48.71	0.498	9.00	173.96	147.48
14	60.78	0.499	5.85	170.85	147.29
15	58.50	0.589	5.40	193.43	148.67
16	62.83	0.590	4.99	181.06	147.92
17	31.90	0.554	5.45	296.74	154.99
18	30.10	0.554	5.46	299.29	155.14
19	30.59	0.554	5.45	303.21	155.38
20	59.98	0.554	6.35	200.69	149.12
21	23.64	0.548	5.49	403.99	161.54
22	50.78	0.557	5.45	255.24	152.45
23	29.06	0.550	5.50	338.83	157.56
24	25.46	0.562	7.11	285.52	156.07
25	67.16	0.508	5.03	312.79	155.97
26	47.04	0.554	5.44	291.20	154.65
27	29.62	0.555	5.45	309.36	155.76

ตารางที่ 4.5 ผลของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีต่อค่าเฉลี่ยค่าการดูดซับไอโอดีน

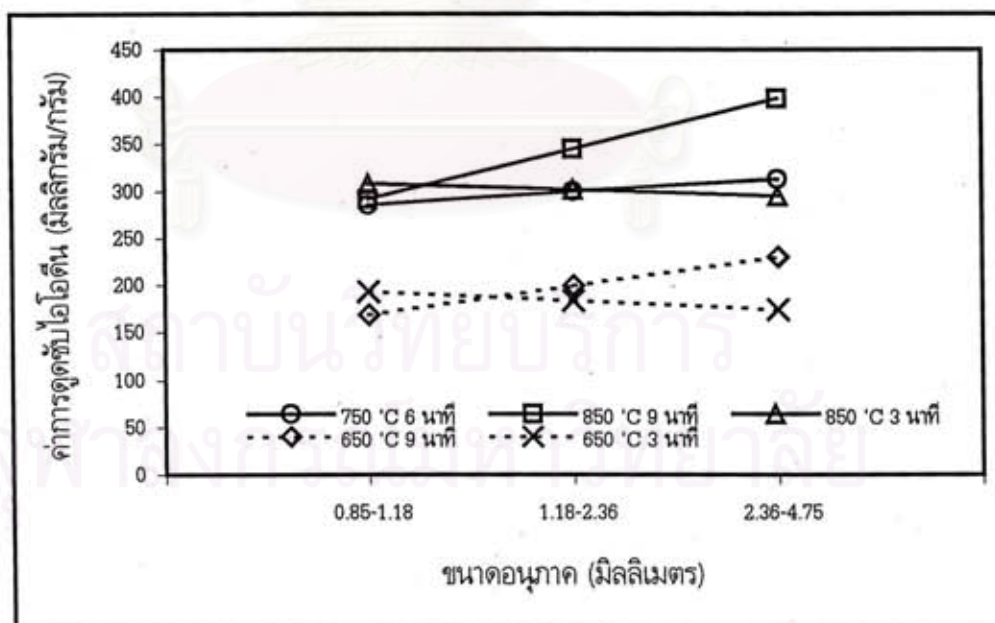
	ค่าเฉลี่ยค่าการดูดซับไอโอดีน			
	อุณหภูมิ	เวลา	ขนาดอนุภาค	อัตราส่วน U/U _{mf}
Avg @ Low.	189.63	240.17	243.01	254.78
Avg @ Mid.	299.13	300.31	299.84	299.59
Avg @ Hi.	328.82	277.09	274.73	263.21



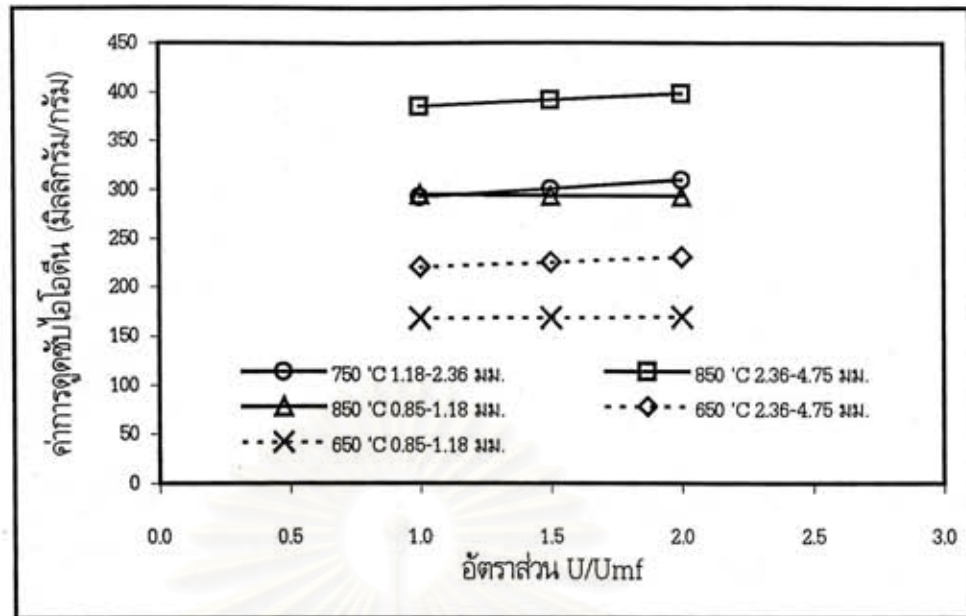
รูปที่ 4.11 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อค่าการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นด้วยไอน้ำร้อนขนาด ยิ่ง ณ ความเร็วแก๊สตัวกลาง 2.0 เท่าของความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดซ์ เวลาและอนุภาคขนาดต่างๆ



รูปที่ 4.12 ผลของเวลาที่มีต่อค่าการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง ณ ความเร็วแก๊สตัวกลาง 2.0 เท่าของความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดซ์ อุณหภูมิและอนุภาคขนาดต่างๆ



รูปที่ 4.13 ผลของขนาดอนุภาคที่มีต่อค่าการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง ณ ความเร็วแก๊สตัวกลาง 2.0 เท่าของความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดซ์ อุณหภูมิและเวลาต่างๆ



รูปที่ 4.14 ผลของความเร็วของแก๊สตัวกลางที่มีต่อค่าการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง ณ เวลา 9 นาที อุณหภูมิและอนุภาคขนาดต่างๆ

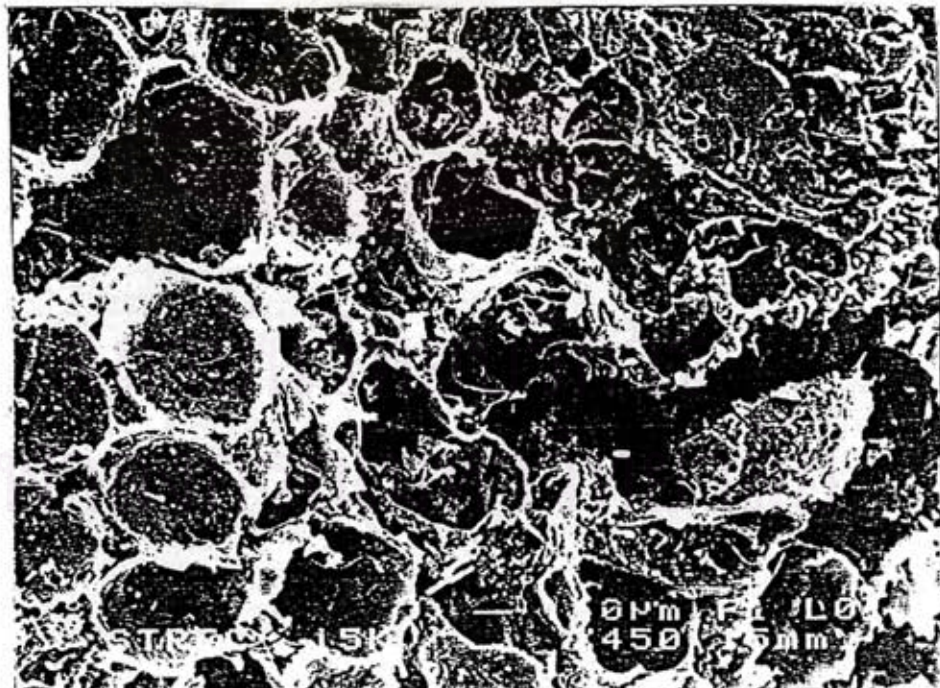
ตารางที่ 4.6 เปรียบเทียบสมบัติของไม้ปาล์มน้ำมัน ถ่านชาร์ และถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จากอนุภาคต่างๆ เวลา 6 นาที ความเร็ว 1.5 เท่าของความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดซ์ และอนุภาคขนาด 1.18-2.36 มิลลิเมตร

ชนิดของวัสดุ	Y (% wt)	On dry basis				
		BD (g/cm ³)	A (% wt)	IA (mg/g)	MB (mg/g)	S _{BET} (m ² /g)
ไม้ต้นปาล์ม	-	0.220	6.39	-	-	1.02±0.00
ถ่านชาร์	23.81	0.573	3.36	76.41	-	7.24±0.10
ถ่านกัมมันต์ ที่ 650 °ซ	59.98	0.554	6.35	200.69	149.12	81.60±1.59
ถ่านกัมมันต์ ที่ 750 °ซ	30.86	0.553	5.45	299.75	155.17	164.26±2.61
ถ่านกัมมันต์ ที่ 850 °ซ	23.64	0.548	5.49	403.99	161.54	284.95±4.72

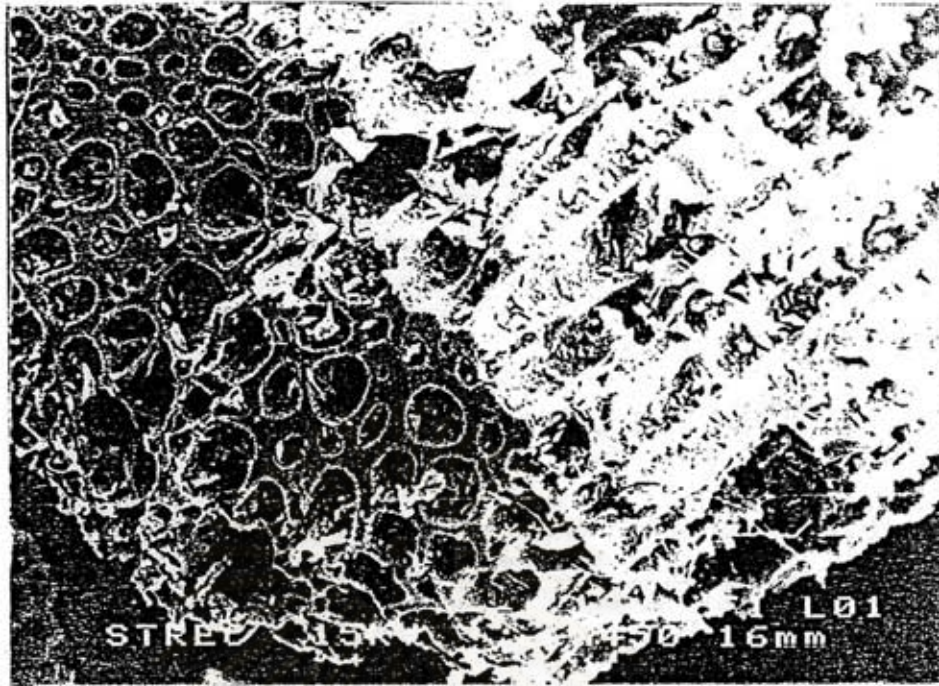
4.4 รูปลักษณะพื้นผิวของไม้ปาล์มน้ำมัน ถ่านชาร์ และถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นที่ภาวะต่างๆ โดยใช้กล้องอิเล็กตรอนไมโครสโคป(Electron Scanning Microscope)



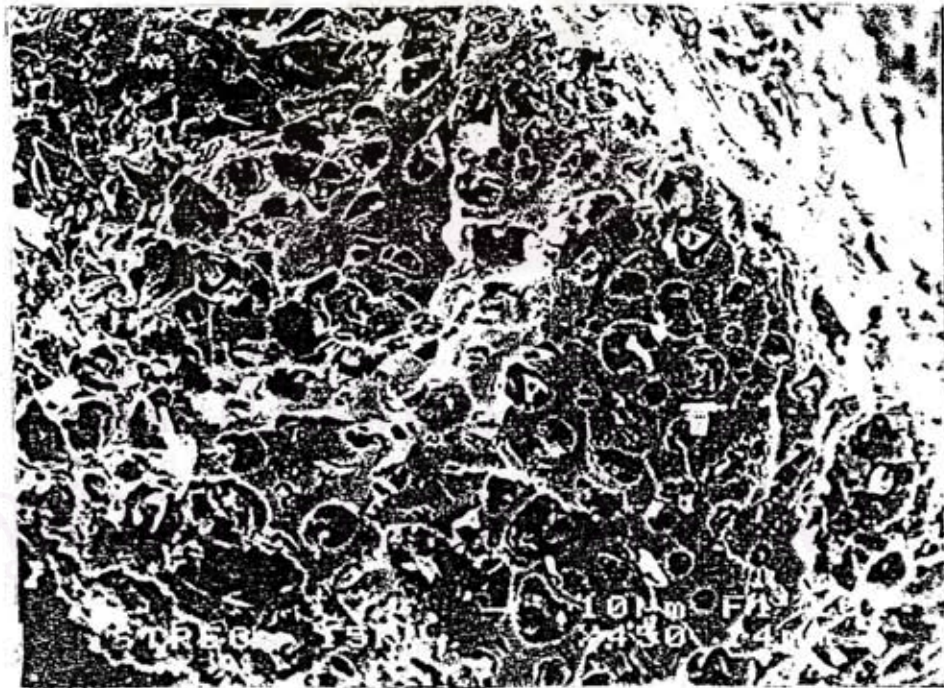
รูปที่ 4.15 ผิวไม้ปาล์มน้ำมัน



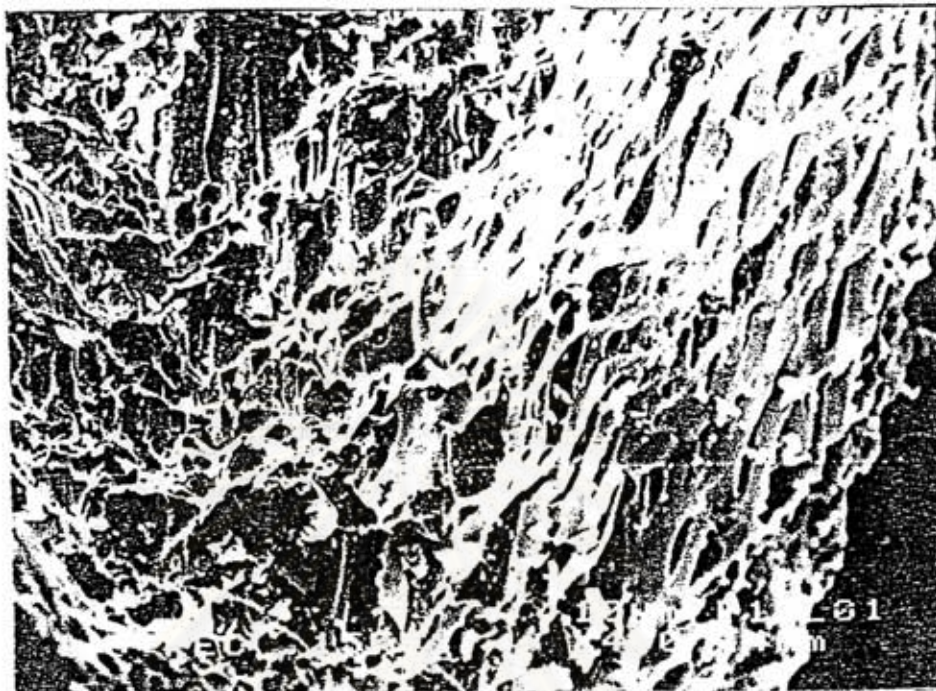
รูปที่ 4.16 ผิวถ่านชาร์ที่ได้จากการคาร์บอนไชน์ ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที



รูปที่ 4.17 ผิวน้ำกันมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นด้วยไอน้ำร้อนขนาดยี่ง ที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส เวลา 6 นาที ความเร็วแก๊สตัวกลาง 1.5 เท่าของความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดซ์ อนุภาคขนาด 1.18-2.36 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.18 ผิวน้ำกันมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นด้วยไอน้ำร้อนขนาดยี่ง ที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส เวลา 6 นาที ความเร็วแก๊สตัวกลาง 1.5 เท่าของความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดซ์ อนุภาคขนาด 1.18-2.36 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.19 ผิวถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส เวลา 6 นาที ความเร็วแก๊สตัวกลาง 1.5 เท่าของความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไอซ์ อนุภาคขนาด 1.18-2.36 มิลลิเมตร

4.5 วิเคราะห์และวิจารณ์ผลการทดลอง

4.5.1 การคาร์บอนไซส์ไม้ปาล์มน้ำมัน

การทดลองใช้ไม้ปาล์มน้ำมันเป็นชิ้น ซึ่งมีขนาดประมาณ 2.54 x 2.54 x 2.54 เซนติเมตร ปริมาณ 500 กรัม ทำการคาร์บอนไซส์ในเครื่องคาร์บอนไซส์แบบเบดนิ่ง โดยศึกษาตัวแปรอุณหภูมิ และระยะเวลาการคาร์บอนไซส์

4.5.1.1 ระยะเวลาการคาร์บอนไซส์

พิจารณาผลการทดลองที่แสดงในตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.2 ถึง 4.5 พบว่าระยะเวลาการคาร์บอนไซส์มีผลต่อการปลดปล่อยปริมาณสารระเหยออกจากไม้ปาล์มน้ำมันกล่าวคือ เมื่อใช้ระยะเวลาการคาร์บอนไซส์นานขึ้นมีผลทำให้ร้อยละของปริมาณสารระเหยลดลง ปริมาณร้อยละของคาร์บอนคงตัวและปริมาณร้อยละของเถ้าสูงขึ้น สำหรับการเพิ่มระยะเวลาการคาร์บอนไซส์ ณ อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงสมบัติต่าง ๆ ของผลิตภัณฑ์ถ่านชาร์เพียงเล็กน้อย เนื่องจาก ณ อุณหภูมินี้มีปริมาณพลังงานความร้อน

มากพอที่จะปลดปล่อยความชื้นและปริมาณสารระเหยส่วนใหญ่ออกจากไม้ปาร์เล่มน้ำมันในระยะเวลาอันสั้น ระยะเวลาที่มากขึ้นจึงไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณสารระเหย เนื่องจากสารระเหยส่วนที่เหลือ ในไม้ปาร์เล่มน้ำมัน จะอยู่ลึกเข้าไปภายในรูพรุน ซึ่งยากต่อการแพร่ออกมาสู่ภายนอก อีกทั้งเกิดการอุดตันของรูพรุนจากเถ้า อันจะสังเกตได้จากการมีเถ้าสีขาวติดอยู่ที่ผิวของถ่านชาร์

4.5.1.2 อุณหภูมิในการคาร์โบไนซ์

พิจารณาผลการทดลองในตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.6 ถึง 4.9 เมื่ออุณหภูมิการคาร์โบไนซ์เพิ่มขึ้น ที่เวลาการคาร์โบไนซ์เดียวกันคือ 30, 45 และ 60 นาที พบว่าค่าร้อยละสารระเหยมีแนวโน้มลดลงทุกระยะเวลาการคาร์โบไนซ์โดย ค่าร้อยละสารระเหยจะมีค่าต่ำสุดที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เนื่องจากการปลดปล่อยสารระเหยออกจากชั้นไม้ปาร์เล่มน้ำมันมีความสัมพันธ์กับพลังงานที่ใช้ในการสลายพันธะ ชนิดของสารระเหยที่ถูกปล่อยออก น้ำหนักโมเลกุล และจุดเดือดของสารระเหยที่ปล่อยออก แต่ในทางกลับกันค่าร้อยละคาร์บอนคงตัวมีการเปลี่ยนแปลงที่เพิ่มขึ้นโดยจะมีค่าสูงสุดที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสเช่นกัน เนื่องจากเมื่อสารระเหยถูกปลดปล่อยออกจากไม้ปาร์เล่มน้ำมัน ส่วนที่เหลือจะเป็นของแข็งที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลักที่เรียกว่า ถ่านชาร์ และ เถ้า ค่าร้อยละผลิตภัณฑ์มีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ในขณะที่ปริมาณเถ้ามีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยจนถึงค่อนข้างคงที่โดยมีค่าเถ้าเฉลี่ยประมาณ 3.49 เปอร์เซ็นต์ ที่เวลาการคาร์โบไนซ์ 30 และ 45 นาทีส่วนที่เวลาการคาร์โบไนซ์ 60 นาที ปริมาณเถ้ามีอัตราเพิ่มขึ้นประมาณ 18.00 เปอร์เซ็นต์

เมื่อพิจารณาสมบัติของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ปริมาณเถ้า สารระเหยและคาร์บอนคงตัวของถ่านที่ได้จากการคาร์โบไนซ์ที่อุณหภูมิและเวลาต่าง ๆ ในตารางที่ 4.1 ถ่านที่มีสมบัติเหมาะสมสำหรับนำไปกระตุ้นด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง โดยพิจารณาจากถ่านที่มีปริมาณคาร์บอนคงตัวสูง และมีปริมาณร้อยละของสารระเหยอยู่ในช่วง 20-25 (จักริน นิธิจันทร์, 2536) จะเห็นได้ว่าการคาร์โบไนซ์ที่อุณหภูมิ 250 และ 300 องศาเซลเซียส ได้ผลิตภัณฑ์ถ่านชาร์ที่เหมาะสม แต่เนื่องจากขณะทำการทดลองพบว่า ณ อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียสที่ตั้งค่าไว้ ในความเป็นจริงแล้วอุณหภูมิในเครื่องคาร์โบไนซ์แบบเบดนิ่งมีอุณหภูมิสูงถึง 270-280 องศาเซลเซียส ดังนั้นภาวะการคาร์โบไนซ์ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ได้ปริมาณร้อยละของผลิตภัณฑ์ 23.81 ค่าร้อยละปริมาณคาร์บอนคงตัว 74.86 ค่าร้อยละปริมาณสารระเหย 21.78 และค่าร้อยละปริมาณเถ้า 3.36 ซึ่งมีสมบัติเหมาะสมในการนำไปกระตุ้นในขั้นตอนต่อไป

4.5.2 การกระตุ้น

การกระตุ้นใช้ถ่านชาร์ที่ได้จากการคาร์โบไนซ์ที่ 300 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที โดยกำหนดให้เบดนิ่งมีความสูงประมาณ 5.0 เซนติเมตร ทำการกระตุ้นโดยวิเคราะห์ตัวแปรที่มีผลต่อสมบัติของผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ดังนี้

4.5.2.1 อุณหภูมิการกระตุ้น

พิจารณาผลการทดลองที่แสดงในตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.11 เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจาก 650 ถึง 850 องศาเซลเซียส ที่เวลาการกระตุ้นเดียวกันคือ 3, 6 และ 9 นาที ขนาดอนุภาคถ่านชาร์ 0.85-1.18 มิลลิเมตร และ 2.36-4.75 มิลลิเมตร พบว่าค่าการดูดซับไอโอดีนจะมีค่าสูงขึ้น แสดงว่าปฏิกิริยาสตริมแก๊ส

ชีพิเคชันเกิดได้ดีเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งเป็นไปตามหลักทฤษฎีของปฏิกิริยาแบบดูดความร้อน จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่าที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส เป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุดในการกระตุ้น

4.5.2.2 ระยะเวลาการกระตุ้น

พิจารณาผลการทดลองที่แสดงในตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.12 ที่อุณหภูมิการกระตุ้นเดียวกัน เมื่อเวลาการกระตุ้นนานขึ้น จะทำให้ค่าการดูดซับไอโอดีนสูงขึ้น สำหรับถ่านขนาด 1.18-2.36 มิลลิเมตร และ 2.36-4.75 มิลลิเมตร แต่จะมีค่าลดลง สำหรับถ่านขนาด 0.85-1.18 มิลลิเมตร แสดงให้เห็นว่าเมื่อเวลานานขึ้น ไออน้ำมีโอกาสแพร่เข้าไปทำปฏิกิริยากับคาร์บอนภายในรูพรุนได้ลึกมากขึ้น แต่เนื่องจากถ่านขนาด 0.85-1.18 มิลลิเมตรมีขนาดเล็กความลึกของรูพรุนไม่มาก ไออน้ำสามารถแพร่เข้าไปทำปฏิกิริยาได้ทั่วทั้งก้อนถ่าน เมื่อเวลานานขึ้นจึงทำให้รูพรุนขนาดเล็กเกิดการขยายตัวและรวมกันเป็นรูพรุนขนาดกลางและขนาดใหญ่ ค่าการดูดซับไอโอดีนจึงลดลง เมื่อพิจารณาค่าการดูดซับไอโอดีนเฉลี่ยในตารางที่ 4.5 พบว่าที่เวลา 6 นาทีจะได้ค่าการดูดซับไอโอดีนเฉลี่ยสูงกว่าที่เวลาอื่นๆ ดังนั้นเวลาที่ 6 นาที จึงเหมาะสมสำหรับงานวิจัยนี้

4.5.2.3 ขนาดของถ่านที่ใช้กระตุ้น

พิจารณาผลการทดลองที่แสดงในตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4.13 ที่เวลาการกระตุ้น 3 นาที อุณหภูมิการกระตุ้นต่าง ๆ พบว่าถ่านขนาด 0.85-1.18 มิลลิเมตร มีค่าการดูดซับไอโอดีนสูงกว่าถ่านขนาด 2.36-4.75 มิลลิเมตร แสดงให้เห็นว่าถ่านขนาด 0.85-1.18 มิลลิเมตร มีรูพรุนที่ตื้นกว่าถ่านขนาด 2.36-4.75 มิลลิเมตร ทำให้ไออน้ำแพร่เข้าไปทำปฏิกิริยาได้ทั่วทั้งชั้นมากกว่าในเวลาอันสั้น จึงทำให้มีค่าการดูดซับไอโอดีนสูงกว่า แต่ที่เวลา 9 นาที ถ่านขนาด 2.36-4.75 มิลลิเมตร มีค่าการดูดซับไอโอดีนสูงกว่าถ่านขนาด 0.85-1.18 มิลลิเมตร เนื่องจากเวลานานขึ้นไออน้ำมีโอกาสแพร่เข้าไปทำปฏิกิริยาภายในรูพรุนของถ่านขนาด 2.36-4.75 มิลลิเมตร มากขึ้น แต่รูพรุนขนาดเล็กของถ่านขนาด 0.85-1.18 มิลลิเมตร เกิดการขยายตัวและรวมกันเป็นรูพรุนขนาดกลางและขนาดใหญ่ ทำให้ค่าการดูดซับไอโอดีนต่ำกว่า เมื่อพิจารณาค่าการดูดซับไอโอดีนเฉลี่ยในตารางที่ 4.5 พบว่าที่ขนาดอนุภาค 1.18-2.36 มิลลิเมตร จะได้ค่าการดูดซับไอโอดีนเฉลี่ยสูงกว่าที่ขนาดอนุภาคอื่นๆ ดังนั้นขนาดอนุภาค 1.18-2.36 มิลลิเมตร จึงเหมาะสมสำหรับงานวิจัยนี้

4.5.2.4 ความเร็วของแก๊สตัวกลาง

พิจารณาผลการทดลองที่แสดงในตารางที่ 4.2, 4.4, 4.5 และรูปที่ 4.14 ที่อุณหภูมิการกระตุ้น และอนุภาคขนาดต่าง ๆ พบว่าค่าการดูดซับไอโอดีนมีการเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก และค่าการดูดซับเมทิลีนบลูมีค่าอยู่ในช่วง 147-161 มิลลิกรัมต่อกรัม แสดงให้เห็นว่ารูพรุนส่วนใหญ่ของถ่านกัมมันต์เป็นรูพรุนขนาดกลางและขนาดใหญ่ ซึ่งเป็นโครงสร้างรูพรุนพื้นฐานของไม้ปาล์มน้ำมัน แก๊สออกซิไดซ์จึงสามารถแพร่เข้าไปทำปฏิกิริยาภายในรูพรุนได้ง่าย ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงค่าความเร็วของแก๊สตัวกลางจึงส่งผลกระทบต่อค่าการเปลี่ยนแปลงของค่าการดูดซับไอโอดีนไม่มากนัก และจากผลงานวิจัยเกี่ยวกับฟลูอิดซ์ของผู้วิจัยหลายท่าน พบว่าค่าอัตราส่วน U/U_{mf} ที่เหมาะสมในการใช้งานคือ 1.5 เมื่อพิจารณาค่าการดูดซับไอโอดีนเฉลี่ยในตารางที่ 4.5 พบว่าที่อัตราส่วน U/U_{mf} เท่ากับ 1.5 จะได้ค่าการดูดซับไอโอดีนเฉลี่ยสูงกว่าที่อัตราส่วนอื่นๆ ดังนั้นอัตราส่วน U/U_{mf} ที่ 1.5 จึงเหมาะสมสำหรับงานวิจัยนี้

จากผลการทดลองสรุปได้ว่า ภาวะที่เหมาะสมในการกระตุ้นถ่านไม้ปาล์มน้ำมันด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งในฟลูอิด์เบด คือ อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส เวลาการกระตุ้น 6 นาที ขนาดอนุภาคถ่าน 1.18–2.36 มิลลิเมตร และความเร็วแก๊สตัวกลาง 1.5 เท่าของความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิด์ (1.23 เมตรต่อวินาที) ได้ผลิตถ่านกัมมันต์ร้อยละ 23.64 ของน้ำหนักถ่านชาร์ พื้นที่ผิวจำเพาะ 284.95 ± 4.72 ตารางเมตรต่อกรัม ค่าการดูดซับไอโอดีน 403.99 มิลลิกรัมต่อกรัม ค่าการดูดซับเมทิลีนบลู 161.54 มิลลิกรัมต่อกรัม ค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตร 0.548 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และค่าเข้าร้อยละ 5.49

จากการออกแบบการทดลองตามวิธีของ บอกซ์ วิลสัน เพื่อทำการศึกษความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระ คือ อุณหภูมิ เวลา ขนาดอนุภาค และอัตราส่วน U/U_{mf} กับตัวแปรตาม คือ ค่าการดูดซับไอโอดีน และการวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณเชิงเส้น สามารถสรุปได้ว่า

- ตัวแปรอิสระทั้งหมดมีความสัมพันธ์กับค่าการดูดซับไอโอดีน ค่อนข้างสูง คือ ร้อยละ 86.87
- ตัวแปรอุณหภูมิ และเวลา มีความสำคัญต่อการเปลี่ยนแปลงค่าการดูดซับไอโอดีน มากกว่า ตัวแปรขนาดอนุภาค และอัตราส่วน U/U_{mf}
- สมการที่ใช้พยากรณ์ค่าการดูดซับไอโอดีน คือ

$$IA = 0.696 \text{ Temp} + 6.153 \text{ Time} - 313.318$$

เมื่อ IA คือค่าการดูดซับไอโอดีน, มิลลิกรัมต่อกรัม

Temp คือ อุณหภูมิ, องศาเซลเซียส

Time คือ เวลา, นาที

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้แบ่งขั้นตอนการเตรียมถ่านกัมมันต์จากต้นปาล์มน้ำมันออกเป็น 3 ขั้นตอนหลัก คือ การเตรียมไม้ปาล์มน้ำมัน การคาร์โบไนซ์ และการกระตุ้น โดยขั้นตอนแรกจะทำการตัดทอนต้นปาล์มน้ำมันให้ได้ขนาด $2.54 \pm 2.54 \pm 2.54$ เซนติเมตร การคาร์โบไนซ์จะทำการศึกษาตัวแปรอุณหภูมิและระยะเวลาการคาร์โบไนซ์ไม้ปาล์มน้ำมัน ซึ่งมีผลต่อแนวโน้มสมบัติของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการวิเคราะห์โดยประมาณ คือ ปริมาณแถก ปริมาณสารระเหย และคาร์บอนคงตัว เพื่อเลือกภาวะที่เหมาะสมในการคาร์โบไนซ์ไม้ปาล์มน้ำมันสำหรับนำไปกระตุ้นด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งในขั้นตอนการกระตุ้น เพื่อผลิตเป็นถ่านกัมมันต์โดยศึกษาตัวแปรต่าง ๆ ในการกระตุ้น ได้แก่ อุณหภูมิและระยะเวลาในการกระตุ้น ขนาดของถ่านที่จะนำมากระตุ้น และอัตราการป้อนแก๊สตัวกลาง(ไอน้ำผสมอากาศ)

5.1 สรุปผลการวิจัย

ภาวะที่เหมาะสมในการคาร์โบไนซ์ไม้ปาล์มน้ำมันขนาด $2.54 \times 2.54 \times 2.54$ เซนติเมตร ปริมาณ 500 กรัม คือ อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที ได้ถ่านชาร์ปริมาณร้อยละ 23.81 ค่าร้อยละปริมาณคาร์บอนคงตัว 74.86 ค่าร้อยละปริมาณสารระเหย 21.78 และค่าร้อยละปริมาณแถก 3.36

ภาวะที่เหมาะสมในการกระตุ้นถ่านชาร์ที่ความสูงของเบตนิ่ง 5.0 เซนติเมตร ด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งในฟลูอิดไคซ์เบด คือ อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส เวลา 6 นาที ขนาดอนุภาค 1.18-2.36 มิลลิเมตร และความเร็วแก๊สตัวกลาง 1.5 เท่าของความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไคซ์ (1.23 เมตรต่อวินาที) ได้ผลิตภัณฑ์ถ่านกัมมันต์ปริมาณร้อยละ 23.64 ของน้ำหนักถ่านชาร์ หรือ 5.63 ของน้ำหนักไม้ปาล์มน้ำมัน ค่าการดูดซับไอโอดีน 403.99 มิลลิกรัมต่อกรัม ค่าการดูดซับเมทิลีนบลู 161.54 มิลลิกรัมต่อกรัม ค่าปริมาณแถกร้อยละ 5.49 ค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตร 0.548 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ 284.95 ± 4.72 ตารางเมตรต่อกรัม

จากภาพถ่ายผิวถ่านกัมมันต์ด้วยกล้องอิเล็กตรอนไมโครสโคป แสดงให้เห็นว่ารูพรุนส่วนใหญ่ของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้เป็นรูพรุนขนาดใหญ่และขนาดกลาง ซึ่งสอดคล้องกับค่าการดูดซับเมทิลีนบลูที่วิเคราะห์ได้ คือ มีค่าประมาณ 147-161 มิลลิกรัมต่อกรัม ซึ่งแสดงว่ามีรูพรุนขนาดกลางปริมาณมาก จากสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้พบว่าค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตรอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม(มอก.900-2532) คืออยู่ในช่วง 0.20-0.75 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร แต่ค่าการดูดซับไอโอดีนยังต่ำกว่าค่าที่กำหนดคือน้อยกว่า 600 มิลลิกรัมต่อกรัม

จากการออกแบบการทดลองตามวิธีของ บอกซ์ วิลสัน เพื่อทำการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระ คือ อุณหภูมิ เวลา ขนาดอนุภาค และอัตราส่วน U/U_{mf} กับตัวแปรตาม คือ ค่าการดูดซับไอโอดีน และการวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณเชิงเส้น สามารถสรุปได้ว่า

- ตัวแปรอิสระทั้งหมดมีความสัมพันธ์กับค่าการดูดซับไอโอดีน ค่อนข้างสูง คือ ร้อยละ 86.87
- ตัวแปรอุณหภูมิ และเวลา มีความสำคัญต่อการเปลี่ยนแปลงค่าการดูดซับไอโอดีนมากกว่าตัวแปรขนาดอนุภาค และอัตราส่วน U/U_{mf}
- สมการที่ใช้พยากรณ์ค่าการดูดซับไอโอดีน คือ

$$IA = 0.696 \text{ Temp} + 6.153 \text{ Time} - 313.318$$

เมื่อ IA คือค่าการดูดซับไอโอดีน, มิลลิกรัมต่อกรัม

Temp คือ อุณหภูมิ, องศาเซลเซียส

Time คือ เวลา, นาที

จากตารางที่ 4.6 สามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าพื้นที่ผิวจำเพาะกับค่าการดูดซับไอโอดีนและค่าการดูดซับเมทิลีนบลู ดังรูปที่ 5.1 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าค่าการดูดซับไอโอดีนและค่าการดูดซับเมทิลีนบลูมีความสัมพันธ์กับค่าพื้นที่ผิวจำเพาะในเชิงเส้นตรง ดังสมการความสัมพันธ์ต่อไปนี้

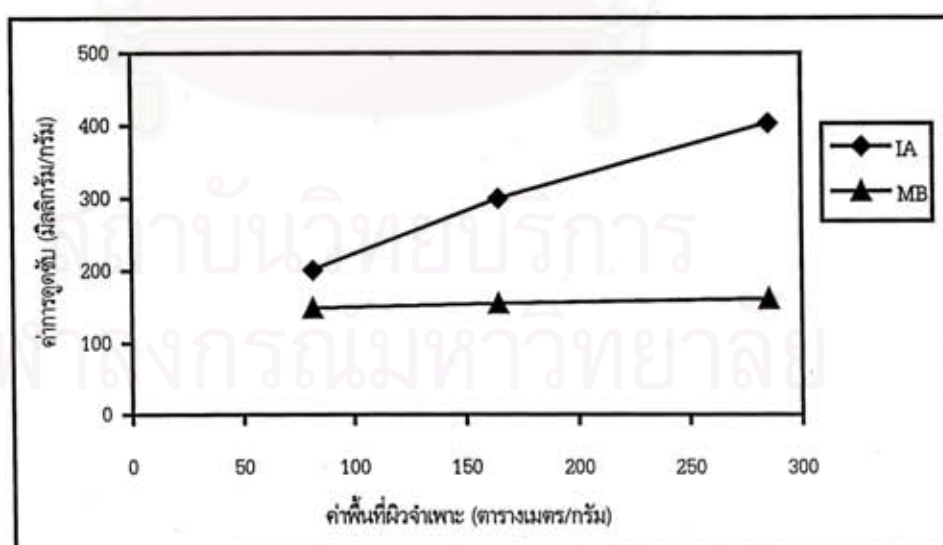
$$IA = 0.9898S + 126.34 \quad R^2 = 0.9914 \quad (5.1)$$

$$MB = 0.0605S + 144.58 \quad R^2 = 0.9914 \quad (5.2)$$

เมื่อ IA คือ ค่าการดูดซับไอโอดีน, มิลลิกรัมต่อกรัม

MB คือ ค่าการดูดซับเมทิลีนบลู, มิลลิกรัมต่อกรัม

S คือ ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ, ตารางเมตรต่อกรัม



รูปที่ 5.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าพื้นที่ผิวจำเพาะกับค่าการดูดซับไอโอดีนและค่าการดูดซับเมทิลีนบลู ของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นถ่านขนาด 1.18-2.36 มิลลิเมตร เวลา 6 นาที และความเร็วแก๊ส 1.5 เท่าของความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไดซ์ ณ อุณหภูมิต่าง ๆ

ตารางที่ 5.1 เปรียบเทียบภาวะที่เหมาะสมในการผลิตและคุณภาพของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้จากงานวิจัยนี้กับงานวิจัยของ Mohd Zobir Hussein and coworker (1995)

รายละเอียดของงานวิจัย	งานวิจัยของ Mohd Zobir Hussein and coworker (1995)	งานวิจัยนี้
วัตถุดิบ	ต้นปาล์มน้ำมัน	ต้นปาล์มน้ำมัน
ลักษณะการผลิต	การกระตุ้นทางเคมี	การคาร์โบไนซ์และการกระตุ้นทางฟิสิกส์
สารกระตุ้นที่ใช้	ซิงค์คลอไรด์และ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์	ไอน้ำร้อนยวดยิ่งและอากาศ
ภาวะการกระตุ้นที่เหมาะสม	ความเข้มข้นของซิงค์คลอไรด์ 25% โดยน้ำหนัก อุณหภูมิการกระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 500 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมง	อุณหภูมิการกระตุ้น 850 องศาเซลเซียส เวลา 6 นาที ขนาดอนุภาคถ่านชาร์ 1.18-2.36 มิลลิเมตร ความเร็วแก๊ส 1.5 เท่าของความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไรส์ (1.23 เมตรต่อวินาที)
ร้อยละของผลิตภัณฑ์	ไม่ได้รายงานไว้	23.64 ของถ่านชาร์
ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะของผลิตภัณฑ์	1892 ตารางเมตรต่อกรัม.	284.95 ตารางเมตรต่อกรัม.
ค่าการดูดซับไอโอดีน	ไม่ได้รายงานไว้	403.99 มิลลิกรัมต่อกรัม.

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรออกแบบเครื่องแอกติเวเตอร์โดยแยกส่วนของคอลัมน์เบดและส่วนให้ความร้อนออกจากกัน เพื่อป้องกันการออกซิไดซ์ของขดลวดความร้อนจนเกิดการชำรุดเสียหาย
2. ควรออกแบบเครื่องแอกติเวเตอร์ให้ความสูงของคอลัมน์เบดมีความสูงมากพอที่จะป้องกันการปลิวออกจากคอลัมน์ของอนุภาคขนาดเล็ก
3. ควรทำการบำรุงรักษาอุปกรณ์และเครื่องมืออย่างสม่ำเสมอ เพื่อความพร้อมในการใช้งานและความปลอดภัยของผู้ปฏิบัติงาน
4. ควรปรับปรุงระบบการให้ความร้อนของส่วนอุ่นอากาศและส่วนอุ่นไอน้ำให้สามารถนำความร้อนที่เหลือจากการอุ่นอากาศและไอน้ำไปใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิของคอลัมน์เบด
5. ควรจะมีการศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์จากต้นปาล์มน้ำมันในกระบวนการแบบขั้นตอนเดียว ซึ่งรวมการคาร์โบไนซ์และการกระตุ้นไว้ในขั้นตอนเดียวกันต่อไป

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

- จักริน นิธิจันทร์. การผลิตถ่านกัมมันต์ระดับขยายส่วนโดยคาร์บอนในเซชันและการกระตุ้นด้วยไอน้ำในฟลูอิด์เบด. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2537.
- นิชชรี นิลนนท์. การผลิตถ่านกัมมันต์จากไม้โกงกางโดยกระตุ้นด้วยไอน้ำอิมพัลส์ด้วยไฟฟ้า และคาร์บอนไดออกไซด์. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2541.
- บุญชัย ตระกูลมหชัย. การผลิตถ่านกัมมันต์จากกะลาตาลโตสดในฟลูอิด์เบด. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2537.
- ภัทรา ปัญญาวัฒน์กิจ. การผลิตถ่านกัมมันต์จากกะลาปาล์มน้ำมันโดยกระตุ้นด้วยไอน้ำอิมพัลส์ด้วยไฟฟ้า. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีที่เหมาะสมเพื่อการพัฒนาทรัพยากร คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล, 2540.
- มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, สำนักงาน. ถ่านกัมมันต์. กองมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม, 2532:2-4.
- ศิริชัย พงษ์วิชัย. การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติด้วยคอมพิวเตอร์. พิมพ์ครั้งที่ 9. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2540.
- ศุภชัย ใช้เทียมวงศ์. เคมีวิเคราะห์. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2536.
- ศุลกากร, กรม. สถิติการนำเข้าและส่งออกของกรมศุลกากร. กรุงเทพมหานคร : กรมศุลกากร, 2530-2542.
- ส่งเสริมการเกษตร, กรม. ปาล์มน้ำมัน. กรุงเทพมหานคร : กรมส่งเสริมการเกษตร, 2537.
- สมศักดิ์ ดำรงค์เลิศ. ฟลูอิด์เบดเซชัน. กรุงเทพมหานคร : คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2528.

ภาษาอังกฤษ

- Aik Chong Lua. and Jia Guo. Preparation and Characterization of chars from oil palm waste. *Carbon*. 36(1998): 1663-1670.
- Ajay, K. Dalai, Jasimuz Zaman, Stanley, E. Hall and Eric, L. Tollefson. Preparation of Activated carbon from Canadian coals using a fixed bed reactor and a spouted bed - kiln system, *Fuel* 75 (1996) : 227-237.
- American Standard of Testing Material. Standard test method for Apparent Density of activated Carbon ASTM D 2854 - 89. (1996) : 491-493.

- American Standard of Testing Material. Standard test method for Chemical Analysis of Wood Charcoal ASTM D 1762-84. (1996) : 281-282.
- American Standard of Testing Material . Standard test method for Determination of Iodine Number of Activated Carbon ASTM D 4607 - 94. (1996) : 542 - 545.
- American Standard of Testing Material. Standard test method for moisture in activated carbon ASTM D 2867 - 95. (1996) : 500-502.
- American Standard of Testing Material. Standard test method for pH of activated carbon ASTM D 3838 - 80. (1996) : 531-532.
- American Standard of Testing Material. Standard test method for Surface area of Activated carbon ASTM C 819-77. (1996) : 379-382.
- American Standard of Testing Material. Standard test method for total ash content of activated carbon ASTM D 2866 - 94. (1996) : 498-499.
- American Standard of Testing Material. Standard test method for Volatile Matter Content of Activated Carbon Samples ASTM D 5832-95. (1996) : 570-571.
- Carrott, P.J.M., Ribeiro Carrott, M.M.L. and Lima, R.P. Preparation of activated carbon "membranes" by physical and chemical activation of cork. Carbon. 37(1999): 515-517.
- Fan, L.T., Huang, Y.W. and Yutani, N. Determination of the lower bound of minimum fluidization velocity: application at elevated temperatures. Chemical Engineering Science. 41(1986): 189-192.
- Gergova, K., Petrov, N. and Minkova, V. A Comparison of Adsorption Characteristics of Various Activated Carbons. J.Chem. Tech. Biotechnol. 56(1993) : 77-82.
- Jankowska Helena, Andrzej Swiatkowski and Jerzy Choma, Active Carbon. 1sted. English : Ellis Horwood limited, 1991.
- Japanese Industrial Standard. Standard test method for Activated Carbon JIS K 1474-1991. (1991) : 1-47.
- Jun' ichi Hayashi. Preparaing molecular sieve carbon from palm oil shell. Carbon. 37(1999): 524-526.
- Kawabata, Jun-Ichi., Yonesiro Tazaki., Shigeo Mitsul. and Kazuhiko Niikawa. Method for manufacture of activated carbon and apparatus therefor. United States Patent 3,910,849 : 1975
- Kirubakaran, C. John, Krishnaiah, K., and Seshadri, S.K. Experimental Study of the Production of Activated Carbon from Coconut Shells in Fluidized Bed Reactor. Ind. Eng. Chem. Res. 30(1991) :2,411-2,416.

- Kunii, D. and Levenspiel, O. Fluidization engineering. New York : John Wiley and Sons Inc, 1969.
- Mohd Zobir Hussein, Zulkarnain Zainal, Ramli Ibrahim, and Khor K. Kheong. The Preparation of Activated Carbons from Chips of Oil Palm Trunk Catalysed by $ZnCl_2 / CO_2$: Surface Area and Porosity Studies. J.Chem.Tech. Biotechnol. 64(1995) : 35-40.
- Nestor Tancredi, Tomas Cordero, et al. Activated Carbons from Uruguayan eucalyptus wood. Fuel 75(1996): 1701-1706
- Nobutaka Ninomiya and Daizo Kunii. Process for producing coarse particles of active carbon in a fluidized bed with added inert particles. United States Patent 3,852,216 : 1974
- Patrick, John W. Porosity in Carbons: Characterization and Applications. London : Edward Arnold, 1995
- Renan Arriagada, Rafael Garcia, and Patricio Reyes. Steam and Carbon Dioxide Activation of Eucalyptus globulus Charcoal. J.Chem.Tech. Biotechnol. 60(1994) : 427-435.
- Repik, Albert J., Miller, Charles E. and Johnson, Homer R. Fluidized Bed Process for Making Activated Carbon Including Heating by Conduction through the distributor plate. United States Patent 3,976,597 : 1976
- Satya Sai,P.m. and Jaleel Ahmed. Production of Activated Carbon from Coconut Shell Char in a Fluidized Bed Reactor. Ind. Eng.Chem. Res. 36(1997) : 3,625-3,630.
- Schmidt, Stephen R. and Launsby, Robert G. Understanding Industrial Designed Experiments. 4THed. Colorado : Air Academy press, 1994.



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก.

วิธีวิเคราะห์สมบัติโดยประมาณของไม้ปาล์มน้ำมันและถ่านไม้ปาล์มน้ำมัน

วิเคราะห์สมบัติโดยประมาณ (Proximate analysis) ของไม้ปาล์มน้ำมันและถ่านจากไม้ปาล์มน้ำมัน ตามวิธี ASTM D 1762-84 โดยวิเคราะห์สารที่แห้งในอากาศ และคำนวณเพื่อรายงานค่าที่ได้เทียบกับน้ำหนักของสารที่ไม่มีน้ำ (Dry basis) ยกเว้นค่าความชื้นที่รายงานเทียบน้ำหนักของสารที่แห้งในอากาศ (Air dry basis) วิธีวิเคราะห์ครอบคลุมการวิเคราะห์หาความชื้น สารระเหย และเถ้า รายละเอียดการวิเคราะห์ มีดังต่อไปนี้

การเตรียมตัวอย่าง

- บดตัวอย่างอย่างรวดเร็วและคัดขนาดของตัวอย่างให้ผ่านตระแกรงร่อนขนาด No. 20 mesh (850 μm) โดยการบดต้องไม่ใช้เวลานานนักเพราะอาจทำให้เกิดความร้อนขึ้นทำให้มีการสูญเสียของความชื้นและสารระเหยได้ นอกจากนั้นยังทำให้ตัวอย่างมีขนาดเล็กลงซึ่งถ้ามีขนาดเล็กมากๆ (ต่ำกว่า 150 μm) จะทำให้เกิดความผิดพลาดในการวิเคราะห์ได้ เนื่องจากอาจมีการสูญเสียไปจากถ้วยกระเบื้องในระหว่างการไล่สารระเหย
- นำตัวอย่างที่บดได้มาผสมรวมกันและเก็บไว้ในภาชนะที่ป้องกันความชื้นได้

วิธีหาความชื้น (Moisture, M)

- เมาถ้วยกระเบื้องพร้อมฝาในเตาเผาที่ 750 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นทิ้งให้เย็นในหม้อดูดความชื้น
- ชั่งน้ำหนักที่แน่นอนของถ้วยกระเบื้องพร้อมฝา จากนั้นใส่ตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์ประมาณ 1 กรัม ให้ละเอียดถึงทศนิยมตำแหน่งที่ 4 (คือมีความผิดพลาดน้อยกว่า 0.1 มิลลิกรัม) ในถ้วยกระเบื้องพร้อมฝา บันทึกน้ำหนักที่ได้ของตัวอย่างก่อนอบแห้ง (A)
- นำไปอบแห้งในเตาอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นทิ้งให้เย็นในหม้อดูดความชื้น
- ชั่งและบันทึกน้ำหนักที่ได้ของตัวอย่างหลังอบแห้ง (B)

- กำหนดค่าความชื้นดังนี้

$$\text{ความชื้น (ร้อยละโดยน้ำหนัก) Moisture \%} = [(A-B)/A]*100$$

วิธีหาปริมาณสารระเหย (Volatile matter, VM)

- เผาเตาเผาไว้ที่ 950 องศาเซลเซียส ทำการให้ความร้อนกับถ้วยกระเบื้องพร้อมฝาและตัวอย่างที่ใช้ในการหาความชื้นในขั้นตอนที่ 1 ดังนี้
 - วางไว้หน้าเตาเผาเป็นเวลา 2 นาที (อุณหภูมิประมาณ 300 องศาเซลเซียส) จากนั้นวางไว้ที่ขอบเตาเผา เป็นเวลา 3 นาที (อุณหภูมิประมาณ 500 องศาเซลเซียส) จากนั้นนำเข้าเตาเผา เป็นเวลา 6 นาที
 - นำออกจากเตาเผาทิ้งให้เย็นในหม้อดูดความชื้น
 - ชั่งและบันทึกน้ำหนักที่ได้ของตัวอย่างหลังอบเผา (C)
 - กำหนดค่าสารระเหยดังนี้
 - สารระเหย (ร้อยละโดยน้ำหนัก) Volatile matter \% = [(B-C)/B]*100

ค่าเถ้า (Ash content, A)

- ทำการให้ความร้อนกับถ้วยกระเบื้องพร้อมฝาและตัวอย่างที่ใช้ในการหาสารระเหยในขั้นตอนที่ 2 ในเตาเผา ที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ทิ้งให้เย็นในหม้อดูดความชื้น
 - ชั่งและบันทึกน้ำหนักที่ได้ของตัวอย่างหลังอบเผา (D)
 - กำหนดค่าเถ้าดังนี้
 - ค่าเถ้า (ร้อยละโดยน้ำหนัก) Ash \% = [D/B]*100

ค่าคาร์บอนคงตัว (Fixed carbon, FC)

$$\text{FC (ร้อยละโดยน้ำหนัก)} = 100 - A - \text{VM} - M$$

ภาคผนวก ข.
วิธีวิเคราะห์สมบัติของถ่านกัมมันต์

วิธีวิเคราะห์ค่าความชื้น (Moisture, M)

วิเคราะห์ปริมาณความชื้นในถ่านกัมมันต์ตามวิธี ASTM D 2867-95 มีรายละเอียดการวิเคราะห์มีดังต่อไปนี้

- บดและคัดขนาดของตัวอย่างให้ละเอียดให้ผ่านตระแกรงร่อนขนาด No. 20 mesh (850 μ m)
- เมาด้วยกระเบื้องทนความร้อน ที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส นาน 10 นาที
- ปลอ่ยให้เย็นในหม้อดูดความชื้น
- ชั่งด้วยกระเบื้องทนความร้อน และบันทึกน้ำหนักที่คงที่ไว้ (B)
- ชั่งตัวอย่างถ่าน 1 กรัม ให้มีความละเอียดถึงทศนิยมตำแหน่งที่ 4 ในถ้วยกระเบื้องพร้อมฝาปิดที่อบแห้งและรู้น้ำหนักที่แน่นอนแล้ว (C)

- อบแห้งตัวอย่างในเตาอบที่อุณหภูมิ 145-155 องศาเซลเซียส จนกระทั่งน้ำหนักคงที่ (ประมาณ 3 ชั่วโมง) ทิ้งให้เย็นในหม้อดูดความชื้น ชั่งน้ำหนัก (D) และคำนวณความชื้นได้จากสูตร

$$\text{ความชื้น (ร้อยละโดยน้ำหนัก)} = [(C-D)/(C-B)]*100$$

โดยที่ B คือ น้ำหนักของถ้วยกระเบื้องพร้อมฝาปิด (กรัม)

C คือ น้ำหนักของถ้วยกระเบื้องพร้อมฝาปิดรวมกับน้ำหนักถ่าน (กรัม)

D คือ น้ำหนักของถ้วยกระเบื้องพร้อมฝาปิดรวมกับน้ำหนักถ่านหลังอบแห้ง (กรัม)

วิธีวิเคราะห์ค่าสารระเหย (Volatile matter, VM)

วิเคราะห์ปริมาณสารระเหยในถ่านกัมมันต์ตามวิธี ASTM D 5832-95 มีรายละเอียดการวิเคราะห์มีดังต่อไปนี้

- บดและคัดขนาดของตัวอย่างให้ละเอียดให้ผ่านตระแกรงร่อนขนาด No. 20 mesh (850 μ m)
- เมาด้วยกระเบื้องทนความร้อน ที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที
- ปลอ่ยให้เย็นในหม้อดูดความชื้น
- ชั่งด้วยกระเบื้องทนความร้อน และบันทึกน้ำหนักที่คงที่ไว้ (B)
- ชั่งตัวอย่างถ่าน 1 กรัม ให้มีความละเอียดถึงทศนิยมตำแหน่งที่ 4 ในถ้วยกระเบื้องพร้อมฝาปิดที่อบแห้งและรู้น้ำหนักที่แน่นอนแล้ว (C)

- วางถ้วยกระเบื้องพร้อมฝาปิดที่บรรจุถ่านในเตาเผาที่อุณหภูมิ 950 ± 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 นาที ± 10 วินาที

- นำออกจากเตาเผาและทิ้งให้เย็นในหม้อดูดความชื้นซึ่งน้ำหนัก (D) และคำนวณร้อยละสารระเหยได้จากสูตร

$$\text{ร้อยละโดยน้ำหนักที่สูญเสียไป} = [(C-D)/(C-B)]*100$$

โดยที่ B คือ น้ำหนักของถ้วยกระเบื้องพร้อมฝาปิด (กรัม)

C คือ น้ำหนักของถ้วยกระเบื้องพร้อมฝาปิดรวมกับน้ำหนักถ่าน (กรัม)

D คือ น้ำหนักของถ้วยกระเบื้องพร้อมฝาปิดรวมกับน้ำหนักถ่านหลังให้ความร้อน (กรัม)

$$\text{สารระเหย (ร้อยละโดยน้ำหนัก)} = \text{ร้อยละโดยน้ำหนักที่สูญเสียไป} - \text{ร้อยละความชื้น}$$

วิธีวิเคราะห์ค่าแฉา (Ash, A)

วิเคราะห์ปริมาณแฉาในถ่านกัมมันต์ตามวิธี ASTM D 2866-94 โดยวิเคราะห์ และรายงานค่าที่ได้เทียบกับน้ำหนักของที่ไม่มี ความชื้น (Dry basis) รายละเอียดการวิเคราะห์มีดังต่อไปนี้

- บดและคัดขนาดของตัวอย่างให้ละเอียดให้ผ่านตระแกรงร่อนขนาด No. 20 mesh (850 μ m)
- เเผาถ้วยกระเบื้องทนความร้อน ที่อุณหภูมิ 650 ± 25 องศาเซลเซียส จนมีน้ำหนักคงที่
- นำออกมาตั้งทิ้งไว้บนอิฐทนไฟ 10 นาที แล้วทำให้เย็นในหม้อดูดความชื้น
- ชั่งถ้วยกระเบื้องทนความร้อน และบันทึกน้ำหนักที่คงที่ไว้ (B)
- ชั่งตัวอย่างที่อบแห้งที่ 150 ± 5 องศาเซลเซียส จนมีน้ำหนักคงที่ ประมาณ 3 ชั่วโมง ใส่ในถ้วย

กระเบื้องทนความร้อน ให้มีน้ำหนักประมาณ 1 กรัม ให้มีความละเอียดถึงเทคนิคตำแหน่งที่ 4 (คือมีความ ผิดพลาดน้อยกว่า 0.1 มิลลิกรัม) บันทึกน้ำหนักของตัวอย่างที่ได้ รวมน้ำหนักของถ้วยกระเบื้องทนความร้อน (C)

- นำไปเผาที่อุณหภูมิ 650 ± 25 องศาเซลเซียส จนมีน้ำหนักคงที่ใช้เวลาประมาณ 3-16 ชั่วโมง
- นำออกมาตั้งทิ้งไว้บนอิฐทนไฟ 10 นาที แล้วทำให้เย็นในหม้อดูดความชื้น
- ค่อยๆ เปิดฝาหม้อดูดความชื้น เพื่อป้องกันไม่ให้แฉาที่ได้ฟุ้งกระจาย ซึ่งบันทึกน้ำหนักที่ได้ของ ตัวอย่างหลังเผา รวมน้ำหนักของถ้วยกระเบื้องทนความร้อน (D)

- คำนวณค่าแฉาดังนี้

$$\text{แฉา (ร้อยละโดยน้ำหนัก)} = [(D - B)/(C - B)]*100$$

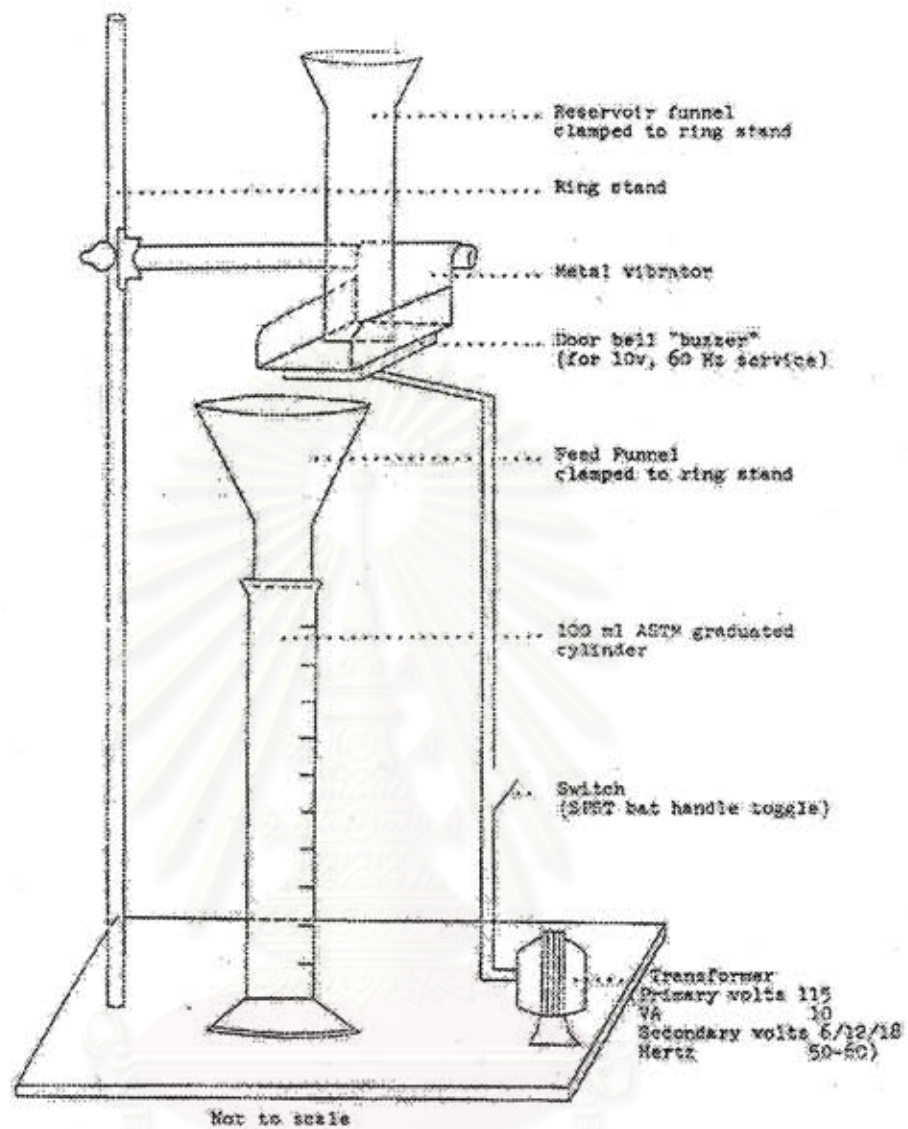
วิธีวิเคราะห์ค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตร (Bulk density, BD)

วิเคราะห์ความหนาแน่นของถ่านกัมมันต์ตามวิธี ASTM D 2854-89 มีรายละเอียดการวิเคราะห์มีดังต่อไปนี้

- อบตัวอย่างให้แห้งที่อุณหภูมิ 145-155 องศาเซลเซียส นาน 3 ชั่วโมงปล่อยให้เย็นในหม้อดูดความชื้น
- ชั่งน้ำหนักกระบอกตวงที่มีความจุ 100 มิลลิเมตร ให้มีความละเอียดถึงทศนิยมตำแหน่งที่ 2 (คือมีความผิดพลาดน้อยกว่า 0.01 กรัม) บันทึกผล (X_0)
- จัดเครื่องมือทดลองดังรูปที่ ข.1
- ใส่ตัวอย่างลงใน reservoir funnel เปิดสวิทช์ให้ metal vibrator ทำงาน
- ทำการปรับความชื้นของ metal vibrator หรือความสูงของ reservoir funnel เพื่อให้อัตราการตกของตัวอย่างอยู่ที่ 0.75-1.0 มิลลิลิตรต่อวินาที
- ถ้าระดับความสูงสุดท้ายของตัวอย่างนั้นไม่เท่ากับ 100 มิลลิเมตร ให้ตักตัวอย่างเข้าหรือออกจากกระบอกตวงแล้วป้อนตัวอย่างเพิ่มจนกว่าจะได้ระดับความสูงสุดท้ายเป็น 100 มิลลิเมตร
- ชั่งน้ำหนักของตัวอย่างพร้อมกระบอกตวง บันทึกผล (X_1)
- คำนวณความหนาแน่นเชิงปริมาตรได้จาก

$$\text{ความหนาแน่นปรากฏ (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)} = (X_1 - X_0)/100$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



สถาบันวิทยบริการ
รูปที่ ๑.1 แสดงลักษณะของเครื่องมือหาค่าความหนาแน่นของถ่านกัมมันต์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ค.

วิธีการทดสอบการดูดซับไอโอดีน

การทดสอบการดูดซับไอโอดีน (Iodine number) [ASTM D 4607-86]

ค่า Iodine number หมายถึง ปริมาณเป็นมิลลิกรัมของไอโอดีนที่ถูกดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์แห้ง 1 กรัม โดยความเข้มข้นของไอโอดีนในสารละลายเมื่อสิ้นสุดการดูดซับ (residual iodine concentration) มีค่าเท่ากับ 0.02 N ซึ่งการทดลองทำได้ดังนี้

1. บดตัวอย่างถ่านกัมมันต์ที่ต้องการทดสอบให้มีขนาดเล็กกว่า 45 μm (325 mesh) อย่างน้อย 95% ประมาณ 10 กรัม
 2. อบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 145-155 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ทิ้งไว้ให้เย็นในหม้อดูดความชื้น
 3. ชั่งน้ำหนักถ่านกัมมันต์ 2 กรัม (มีความผิดพลาดน้อยกว่า 0.1 มิลลิกรัม) ใส่ในขวดรูปชมภูขนาด 250 มิลลิลิตร ปิดตกรดไฮโดรคลอริก 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก 10.0 มิลลิลิตร ใส่ลงไป ปิดปากขวดด้วยจุกยางและเชย่าเบาๆ จนกระทั่งถ่านกัมมันต์เปียกทั่วหมด
 4. นำขวดไปวางบน hot plate ที่อยู่ในตู้ควัน เปิดจุกยางออก ต้มจนเดือดประมาณ 30 ± 2 วินาที เพื่อไล่สารประกอบซัลเฟอร์ซึ่งเป็นสารมลทินทิ้งไปจากนั้นจึงยกลงและทิ้งไว้ให้เย็นจนเท่ากับอุณหภูมิห้อง
 5. ปิดตกละลายไอโอดีนความเข้มข้น 0.100 N 100.0 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวด ปิดด้วยจุกยางและเชย่าแรงๆ เป็นเวลา 30 ± 1 วินาที จากนั้นรีบกรองเอาถ่านกัมมันต์ออกด้วยเครื่องกรองสูญญากาศผ่านกระดาษกรอง Whatman No. 42 หรือเทียบเท่า โดยปล่อยให้ส่วนใสไหลลงสู่บีกเกอร์
 6. นำ 20-30 มิลลิลิตร ของส่วนใสที่ได้จากการกรองในตอนแรกๆ มากลับไปเปิด แล้วเททิ้งไป นอกนั้นก็เก็บไว้ทั้งหมด จากนั้นทำการปิดตกละลายใส 50.0 มิลลิลิตร ใส่ในขวดรูปชมภู 250 มิลลิลิตร ไตเตรทด้วยสารละลายมาตรฐานโซเดียมไฮโอซัลเฟต 0.100 N จนสารละลายเป็นสีเหลืองจางๆ จึงเติมน้ำแบ่งสุกลงไป 2 มิลลิลิตร เพื่อเป็นอินดิเคเตอร์ แล้วทำการไตเตรทต่อไปจนได้สารละลายใสไม่มีสี บันทึกปริมาตรของสารละลายมาตรฐานโซเดียมไฮโอซัลเฟตที่ใช้ทั้งหมด (S)
- จากนั้นทำการคำนวณความเข้มข้นสุดท้ายของสารละลายไอโอดีนหลังการดูดซับของถ่านกัมมันต์ ; C จากสูตร

$$C = (N_1 \times S) / F$$

เมื่อ N_1 คือ ความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลายมาตรฐานโซเดียมไฮโอซัลเฟต ; N
 F คือ ปริมาตรของสารละลายใสที่ใช้ไตเตรท

ค่า C ที่ได้ต้องมีค่าอยู่ในช่วง 0.008-0.040 N มิฉะนั้นต้องทำการทดลองใหม่โดยการเปลี่ยนน้ำหนักของตัวอย่างถ่านกัมมันต์ กล่าวคือถ้าค่า C น้อยก็ต้องลดปริมาณถ่านกัมมันต์ลง ถ้าค่า C มากก็ต้องเพิ่มปริมาณถ่านกัมมันต์ให้มากขึ้นจนได้ค่า C อยู่ในช่วง 0.008-0.040 N

7. ทำการทดลองตามข้อ 1 ถึง ข้อ 6 อีก 2 ครั้ง โดยเปลี่ยนน้ำหนักของตัวอย่างถ่านกัมมันต์ เพื่อให้ได้ค่า C อีก 2 ค่าที่อยู่ในช่วงความเข้มข้นดังกล่าว โดยค่า C ที่ได้ควรกระจายกันพอสมควร

8. ทำ blank test โดยทำการทดลองตามข้อ 1 ถึงข้อ 6 แต่ไม่ต้องใส่ตัวอย่างถ่านกัมมันต์

การหาค่า Iodine number ทำได้จากการใช้ three-point adsorption isotherm โดยการพล็อตกราฟระหว่างค่า X/M กับค่า C บน log-log scale แล้วประมาณเป็นเส้นตรง ดังตัวอย่างในรูปที่ ค.1 เมื่อค่า X/M ทำได้จากสมการ

$$\begin{aligned} A &= N_2 (126.93) \\ B &= N_1 (126.93) \\ DF &= (I+H) / F \\ X/M &= [A-(DF) (B) (S)] / M \end{aligned}$$

เมื่อ A คือ น้ำหนักทั้งหมดของไอโอดีนในสารละลายไอโอดีนเริ่มต้น; มิลลิกรัม

B คือ น้ำหนักของไอโอดีนเป็นมิลลิกรัมที่ทำปฏิกิริยาสมมูลย์พอดีกับสารละลายมาตรฐานโซเดียมไฮโอซัลเฟต 1 มิลลิลิตร

DF คือ dilution factor เป็นสัดส่วนระหว่างปริมาตรของสารละลายทั้งหมดตอนเริ่มต้นกับปริมาตรสารละลายที่นำมาไตเตรท

X/M คือ ปริมาณไอโอดีนที่ถูกดูดซับต่อกรัมของถ่านกัมมันต์; มิลลิกรัมต่อกรัม

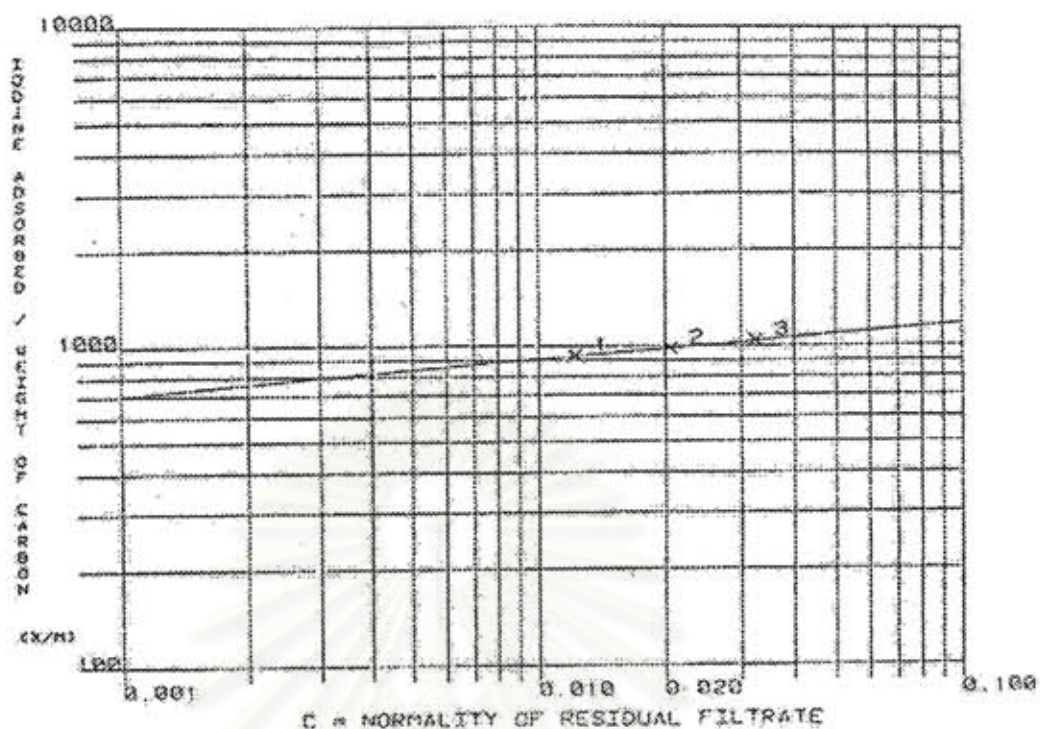
I คือ ปริมาณของไอโอดีนที่ใส่ในตอนเริ่มต้น; มิลลิลิตร

N_2 คือ ความเข้มข้นของสารละลายไอโอดีน; N

H คือ ปริมาตรกรดไฮโดรคลอริก 5 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก ที่ใช้ ; มิลลิลิตร

M คือ น้ำหนักของตัวอย่างถ่านกัมมันต์ที่ใช้ ; กรัม

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



LAB NO. 4 OCT '83-3
TDB NO. 604 PAGE 22
TECH. PRP

POINT 1		
X/M	--	932
C	--	0.012
POINT 2		
X/M	--	964
C	--	0.020
POINT 3		
X/M	--	1040
C	--	0.032
IODINE NO.	--	964
SLOPE	--	0.111
CORR. COEF.	--	0.999

รูปที่ ค.1 ตัวอย่างกราฟแสดงการหาค่าความสามารถในการดูดซับไอโอดีนจากผลการทดลอง

ค่า Iodine number จะเป็นค่า X/M ที่อ่านได้จากกราฟเมื่อความเข้มข้น C = 0.02 N

หมายเหตุ

ถ้าทราบค่าอย่างคร่าวๆของ Iodine number จะสามารถคำนวณหาปริมาณถ่านกัมมันต์ทั้ง 3 ค่าที่ใช้ในการทดลองได้จาก

$$M = [A - (DF) (C) (F) (126.93)] / E$$

เมื่อ E คือ ค่า Iodine number ที่ทราบ ส่วนค่า C โดยทั่วไปนิยมใช้ค่า 0.01, 0.02 และ 0.03 N ตามลำดับ

ภาคผนวก ง.

วิธีวิเคราะห์ค่าการดูดซับเมทิลีนบลูของถ่านกัมมันต์

วิเคราะห์ความสามารถในการดูดซับเมทิลีนบลูในน้ำตามวิธี JIS K 1474-1991 มีรายละเอียดของการวิเคราะห์มีดังต่อไปนี้

เครื่องมือที่ใช้

1. เครื่องวิเคราะห์การดูดกลืนแสง UV/VIS Spectrophotometer Jasco Model 7800
2. เครื่องเขย่าตามแนวราบ

วิธีเตรียมสารละลาย

1. การเตรียมสารละลายบัฟเฟอร์ (Buffer solution)
 - ออปโทแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (KH_2PO_4) ให้แห้งที่อุณหภูมิ 100 ถึง 120 องศาเซลเซียส นาน 2 ชั่วโมง และทิ้งให้เย็นในหม้อดูดความชื้นนาน 20 นาที
 - ชั่งมา 9.08 กรัม แล้วละลายด้วยน้ำกลั่นให้มีปริมาตรรวมเป็น 1,000 มิลลิลิตร ด้วยขวดวัดปริมาตร สารละลายที่ได้นี้คือ A
 - ออปโตโซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟต (Na_2HPO_4) ให้แห้งที่อุณหภูมิ 100 ถึง 120 องศาเซลเซียส นาน 2 ชั่วโมง และทิ้งให้เย็นในหม้อดูดความชื้นนาน 20 นาที
 - ชั่งมา 23.88 กรัม แล้วละลายด้วยน้ำกลั่นให้มีปริมาตรรวมเป็น 1,000 มิลลิลิตร ด้วยขวดวัดปริมาตร สารละลายที่ได้นี้คือ B
 - นำสารละลาย A จำนวน 400 มิลลิลิตร ผสมกับสารละลาย B จำนวน 600 มิลลิลิตร กวนให้เข้ากันจะได้สารละลายบัฟเฟอร์ที่มีความเป็นกรดต่างเท่ากับ 7

2. สารละลายเมทิลีนบลู

- การเตรียม ออบสารเมทิลีนบลู ให้แห้งที่อุณหภูมิ 100 ถึง 120 องศาเซลเซียส นาน 2 ชั่วโมง และทิ้งให้เย็นในหม้อดูดความชื้นนาน 20 นาที ชั่งมา 1.2000 กรัม ละลายด้วยสารละลายบัฟเฟอร์ในข้อ 1 จนมีปริมาตรเป็น 1,000 มิลลิลิตร

- การสร้างกราฟมาตรฐาน ดูดสารละลายเมทิลีนบลูที่เตรียมได้มา 1.0 มิลลิลิตร เจือจางด้วยสารละลายบัฟเฟอร์ จนมีปริมาตรเป็น 50 มิลลิลิตร ในขวดปรับปริมาตร จากนั้นดูดสารละลายที่เตรียมได้มา 0.5 มิลลิลิตร 1.0 มิลลิลิตร 2.5 มิลลิลิตร และ 5.0 มิลลิลิตร ตามลำดับใส่ในขวดปรับปริมาตรขนาด 50 มิลลิลิตร ซึ่งจะได้สารละลายมีความเข้มข้นเท่ากับ 0.24 มิลลิกรัมต่อลิตร 0.48 มิลลิกรัมต่อลิตร 1.2 มิลลิกรัมต่อลิตร และ 2.4 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ นำสารละลายที่ได้ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่มีความยาวคลื่น 665 นาโนเมตร บันทึกค่าการดูดกลืนแสง แล้วนำไปสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแกนราบคือค่าการดูดกลืนแสง แกนตั้งฉากคือ ความเข้มข้นในหน่วย มิลลิกรัมต่อลิตร จะได้เส้นความสัมพันธ์เป็นเส้นตรง

วิธีวิเคราะห์

1. บดและคัดขนาดของตัวอย่างให้ละเอียดน้อยกว่า No. 60 mesh (246 μm)
2. ชั่งและบันทึกน้ำหนักตัวอย่าง ให้มีความละเอียดถึงทศนิยมตำแหน่งที่ 4 (คือมีความละเอียด 0.1 มิลลิกรัม) ในขวดรูปชมภูขนาด 250 มิลลิลิตร ซึ่งมีจุกปิด
3. ใส่สารละลายเมทิลีนบลู 25 มิลลิลิตร ปิดจุกแล้วนำไปเขย่า 30 นาที
4. ดูดสารละลายเมทิลีนบลูความเข้มข้นเริ่มต้นมา 1 มิลลิลิตร เจือจางด้วยสารละลายบัฟเฟอร์ จนมีปริมาตรเป็น 50 มิลลิลิตร จากนั้นดูดสารละลายที่ได้มา 1 มิลลิลิตร เจือจางด้วยสารละลายบัฟเฟอร์ จนมีปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตร ในกรณีนี้เป็นความเข้มข้นของเมทิลีนบลูจะเท่ากับ 0.24 มิลลิกรัมต่อลิตร
5. นำกระดาษกรองที่จะใช้กรองถ่านกัมมันต์มาทำให้ชุ่มด้วยสารละลายเมทิลีนบลูความเข้มข้น 0.24 มิลลิกรัมต่อลิตร ก่อนนำไปกรองถ่านกัมมันต์
6. กรองถ่านกัมมันต์ออกจากสารละลายเมทิลีนบลู นำสารละลายเมทิลีนบลูที่ได้ไปวัดค่าการดูดกลืนแสง โดยใช้ สารละลายบัฟเฟอร์ เป็นตัวเปรียบเทียบ
7. ค่าเมทิลีนบลู (Methylene blue adsorption, MB) คำนวณได้จาก

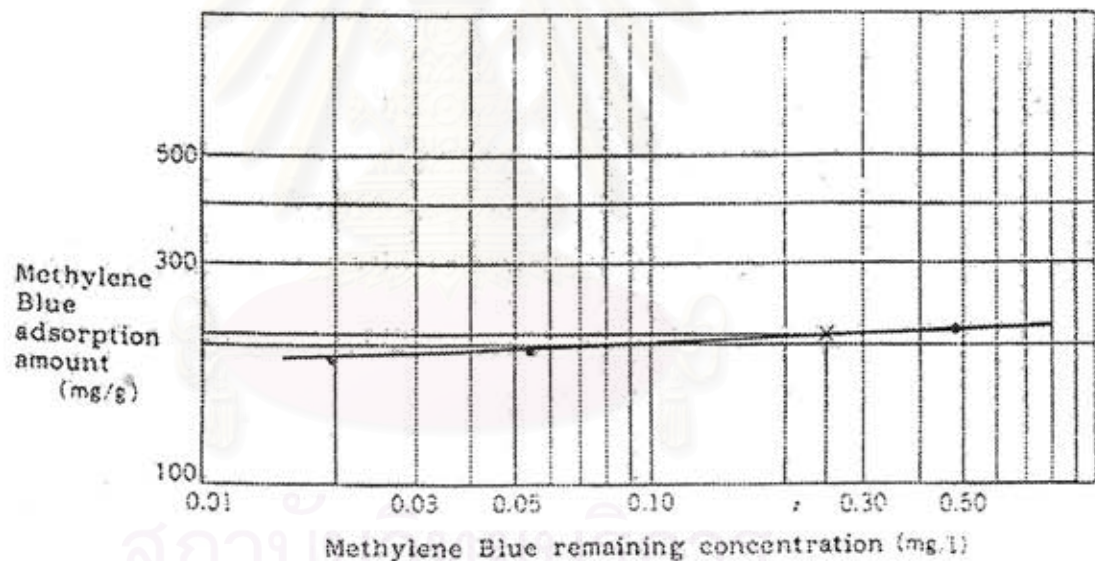
$$Q = [(1200-C) \times 0.025] / S$$

โดย C คือ ความเข้มข้นที่เหลืออยู่ของสารละลายเมทิลีนบลู (มิลลิกรัมต่อกรัม)

- S คือ น้ำหนักของตัวอย่าง (กรัม)
 1200 คือ ความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลูเริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อกรัม)
 Q คือ จำนวนค่าเมทิลีนบลูที่ถูกดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)

การวิเคราะห์ค่าการดูดซับเมทิลีนบลู

นำค่าการดูดซับเมทิลีนบลูที่ได้จากการคำนวณข้างต้น (Q) และค่าความเข้มข้นของเมทิลีนบลูที่เหลือ (C) อยู่มาสร้างกราฟแบบล็อกซ์ จะได้เส้นไอโซเทอมของการดูดซับ จากเส้นไอโซเทอมจะได้ ค่าการดูดซับเมทิลีนบลู โดยลากจุดจากความเข้มข้นของสารละลายที่เหลืออยู่เท่ากับ 0.24 มิลลิกรัมต่อลิตร ไปตัดเส้นไอโซเทอมแล้วลากไปหาค่าการดูดซับ ดังรูปที่ ง.1



รูปที่ ง.1 ตัวอย่างกราฟแสดงการหาค่าความสามารถในการดูดซับเมทิลีนบลูของถ่านกัมมันต์

ภาคผนวก จ.

วิธีวิเคราะห์ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะของรูพรุนทั้งหมดของถ่านกัมมันต์

การวิเคราะห์ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะของรูพรุนทั้งหมดของถ่านกัมมันต์ตามวิธี ASTM C 819-77 และคู่มือการใช้เครื่องหาพื้นที่ผิว โดยเลือกการคำนวณแบบ "Multipoints" มีหลักการที่สำคัญของการวิเคราะห์มีดังต่อไปนี้

เครื่องมือที่ใช้

1. เครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิวรู ASAP 2,000 ของบริษัท Micromeritics
2. เครื่องคอมพิวเตอร์ พร้อมโปรแกรมการคำนวณ

การเตรียมตัวอย่าง

1. บดและคัดขนาดของตัวอย่างให้ละเอียดน้อยกว่า No. 60 mesh (246 μm)
2. ชั่งและบันทึกน้ำหนักของหลอดใส่ตัวอย่าง ให้มีความละเอียดถึงทศนิยมตำแหน่งที่ 4 (คือมีความละเอียด 0.1 มิลลิกรัม)
3. ใส่ตัวอย่างลงในหลอด ให้มีน้ำหนักประมาณ 0.1-0.3 กรัม สำหรับถ่านกัมมันต์ และ 0.5-1 กรัม สำหรับเศษไม้ปาล์มน้ำมันและถ่านปาล์มน้ำมัน
4. นำไปล้างโมเลกุลปนเปื้อนที่อยู่บนผิวถ่านกัมมันต์ (Outgas) ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส นาน 2 ชั่วโมง ภายใต้ความดันสุญญากาศ
5. ชั่งน้ำหนักของตัวอย่างและหลอดและหักน้ำหนักหลอด เพื่อให้ทราบน้ำหนักของตัวอย่างซึ่งจะนำไปใช้ในการคำนวณ (W)

การวิเคราะห์ค่าพื้นที่ผิวของรูพรุน

1. กำหนดความดันสัมพัทธ์ที่ภาวะสมดุล (P/P_0) ทั้งหมด 10 จุด
2. ผ่านไนโตรเจนที่ปราศจากออกซิเจน ซึ่งมีความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.5 จนกระทั่งความดันสัมพัทธ์ที่ภาวะสมดุลเท่ากับที่กำหนด บันทึกปริมาตรของแก๊สไนโตรเจนที่ใช้

การคำนวณการหาพื้นที่ผิวจำเพาะทั้งหมด

นำค่าที่ได้จากการวิเคราะห์มาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแกนราบ คือความดันสัมพัทธ์ (P/P_0) แกนตั้งฉาก คือปริมาณของแก๊สไนโตรเจนที่ถูกดูดซับที่ความดันสัมพัทธ์ในเทอมของ $[W (P_0/P) - 1]^{-1}$ จะได้ความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ s จุดตัดบนแกนตั้งฉากคือ i คำนวณค่าพื้นที่ผิว (S_{BET}) ได้ดังนี้

$$S_{BET} \text{ (ตารางเมตรต่อกรัม)} = NA_{CS} / [(s + i) \times (Mw)]$$

- โดย N = เลขอาโวกาโดร = 6.023×10^{23} โมเลกุลต่อโมล
 A_{CS} = พื้นที่หน้าตัดของโมเลกุลไนโตรเจน เท่ากับ 16.2 ตารางอังสตรอม
 Mw = น้ำหนักโมเลกุลของไนโตรเจน

สถาบันวิทยบริการ
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ฉ

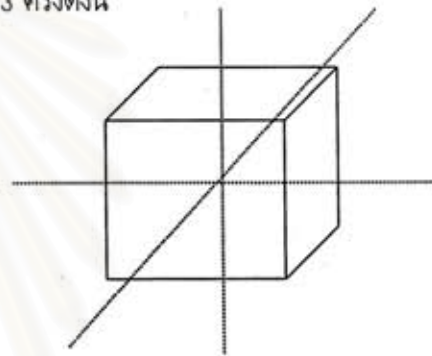
การออกแบบการทดลองแบบ บอกซ์ วิลสัน

การออกแบบการทดลองโดยวิธีนี้สามารถวิเคราะห์ผลกระทบเชิงเส้นตรงทั้งหมด ความสัมพันธ์ลำดับสอง และข้อผิดพลาดจากการทดลอง เป็นวิธีที่เหมาะสมกับการทดลองสำหรับตัวแปรปริมาณที่มีการปรับเปลี่ยนตัวแปร 3 ระดับ เพื่อลดจำนวนครั้งในการทดลองให้กระชับขึ้น เช่นการทดลองมี 3 ตัวแปร และในแต่ละตัวแปรมีการปรับเปลี่ยนค่า 3 ค่า ดังนั้นการทดลองทั้งหมดที่ต้องทำคือ $p^k = 3^3 = 27$ ครั้ง

เมื่อ p คือ จำนวนระดับของตัวแปร

k คือ จำนวนตัวแปร

แต่การออกแบบการทดลองวิธีนี้ช่วยให้การทดลองเหลือ 13 ครั้งดังนี้



RUN	A	B	C
1	-1	-1	-1
2	-1	+1	+1
3	+1	-1	+1
4	+1	+1	-1
5	0	0	0
6	0	0	0
7	0	0	0
8	α	0	0
9	$-\alpha$	0	0
10	0	α	0
11	0	$-\alpha$	0
12	0	0	α
13	0	0	$-\alpha$

} F

} C

A

จากรูปเส้นตรงแต่ละเส้นที่ผ่านลูกบาศก์เปรียบเสมือนตัวแปร 1 ตัวแปร ตัวแปรในการทดลองนี้ได้แบ่งการทดลองออกเป็น 3 กลุ่ม คือ

กลุ่ม 1 คือ กลุ่มที่ทำการทดลองในการปรับเปลี่ยนค่า 2 ระดับ (F) จำนวนครั้งของการทดลองเท่ากับ 2^{k-1}

กลุ่ม 2 คือ กลุ่มที่ทดลองที่ค่ากลางของทุกตัวแปร จำนวนครั้งของการทดลองเท่ากับ

$$n_c = 4\sqrt{n_r + 1} - 2k$$

กลุ่ม 3 คือ กลุ่มที่ทดลองห่างจากค่าของตัวแปรที่น้อยและมากที่สุด เท่ากับ α

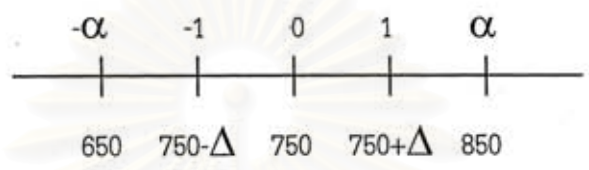
$$\alpha = (n_r)^{1/4}$$

ตัวอย่างการคำนวณในงานวิจัยนี้ใช้ตัวแปรในงานทดลอง 4 ตัวแปร แต่ละตัวปรับเปลี่ยนค่า 3 ค่า
 ดังนั้น $p = 3$ และ $k = 4$ จำนวนการทดลองทั้งหมดเท่ากับ $3^4 = 81$ ครั้ง

การคำนวณการออกแบบการทดลองจึงเป็นดังนี้

- กลุ่มที่ 1 จำนวนครั้งในการทดลอง $n_p = 2^{4-1} = 8$
- กลุ่มที่ 2 จำนวนครั้งในการทดลองเท่ากับ 3 ครั้ง
- กลุ่มที่ 3 จำนวนครั้งในการทดลองเท่ากับ 8 ครั้ง ค่า $\alpha = (8)^{1/4} = 1.68 = 1.7$

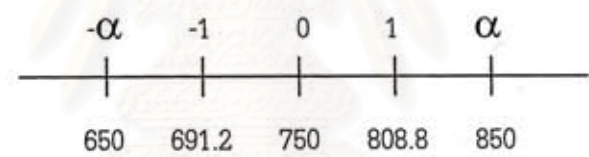
ตัวอย่างเช่นการคำนวณการออกแบบอุณหภูมิจะปรับเปลี่ยนตัวแปร 3 ระดับ ดังนี้ คือ อุณหภูมิ 650, 750 และ 850 องศาเซลเซียส วิธีการหาอุณหภูมิในตำแหน่ง -1 และ 1 ทำได้ดังนี้



จากข้างต้น $\alpha = 1.7$

หาค่า Δ โดยการเทียบอัตราส่วนดังนี้ $\frac{850 - 750}{1.7} = \frac{\Delta}{1}$
 $\Delta = 58.8$

ดังนั้นค่าที่ใช้ทดลองเป็นดังนี้



แต่เนื่องจากตัวแปรบางตัวไม่สามารถทำการแบ่งค่า ณ ตำแหน่ง -1 และ 1 ได้เนื่องจากยากต่อการควบคุมหรือการปฏิบัติ เช่น ขนาดของอนุภาคถ่านชาร์ และความเร็วแก๊สตัวกลาง จึงกำหนดให้ α มีค่าเท่ากับ 1 หลังจากการคำนวณการออกแบบแล้วจะได้ภาวะการทดลองดังตารางที่ ๑1 โดยภาวะการทดลองในกลุ่ม 1 ทำการปรับเปลี่ยนค่า 2 ระดับ (F^2) จะทำการเพิ่มจำนวนครั้งของการทดลองเป็น 2^k เพื่อให้ข้อมูลที่ได้มีความถูกต้องมากขึ้น

สถาบันวิทยบริการ
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ๑1 จำนวนการทดลองทั้งหมดสำหรับ 4 ตัวแปร โดยวิธี บอกซ์ วิลสัน

การทดลองที่	ภาวะในการทดลอง			
	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลา (นาที)	ขนาดอนุภาค (มิลลิเมตร)	ความเร็วไอ้่น้ำ (U/Umf)
1	850	9	2.36-4.75	2
2	850	9	2.36-4.75	1
3	850	9	0.85-1.18	2
4	850	9	0.85-1.18	1
5	850	3	2.36-4.75	2
6	850	3	2.36-4.75	1
7	850	3	0.85-1.18	2
8	850	3	0.85-1.18	1
9	650	9	2.36-4.75	2
10	650	9	2.36-4.75	1
11	650	9	0.85-1.18	2
12	650	9	0.85-1.18	1
13	650	3	2.36-4.75	2
14	650	3	2.36-4.75	1
15	650	3	0.85-1.18	2
16	650	3	0.85-1.18	1
17	750	6	1.18-2.36	1.5
18	750	6	1.18-2.36	1.5
19	750	6	1.18-2.36	1.5
20	650	6	1.18-2.36	1.5
21	850	6	1.18-2.36	1.5
22	750	3	1.18-2.36	1.5
23	750	9	1.18-2.36	1.5
24	750	6	0.85-1.18	1.5
25	750	6	2.36-4.75	1.5
26	750	6	1.18-2.36	1
27	750	6	1.18-2.36	2

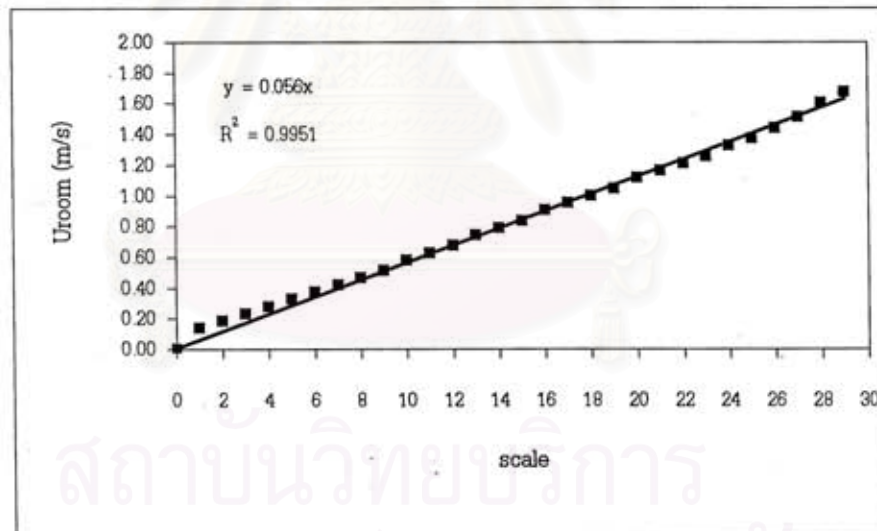
ภาคผนวก ข.

การเปรียบเทียบมาตรฐานอัตราการไหลของแก๊ส

มาตรฐานอัตราการไหลของอากาศของเครื่องแอกติเวเตอร์แบบฟลูอิดไซเบด

ใช้เครื่องวัดความเร็วลมทำการวัดความเร็วลมที่ปลายท่อส่งอากาศเข้าเครื่องแอกติเวเตอร์ที่มีพื้นที่หน้าตัด 22.07 ตารางเซนติเมตร แล้วนำมาคำนวณหาความเร็วอากาศที่ไหลผ่านคอลัมน์เบดที่มีพื้นที่หน้าตัด 95.03 ตารางเซนติเมตร ความเร็วอากาศที่อุณหภูมิต่าง ๆ สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ดังสมการที่ (ข.1) ในรูปที่ ข.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วในการป้อนอากาศไหลผ่านเบดกับค่าที่อ่านได้จากมาตรฐานอัตราการไหล ณ อุณหภูมิห้อง

$$U_b = U_{room} (273 + T_b) / (273 + T_{room}) \quad (ข.1)$$

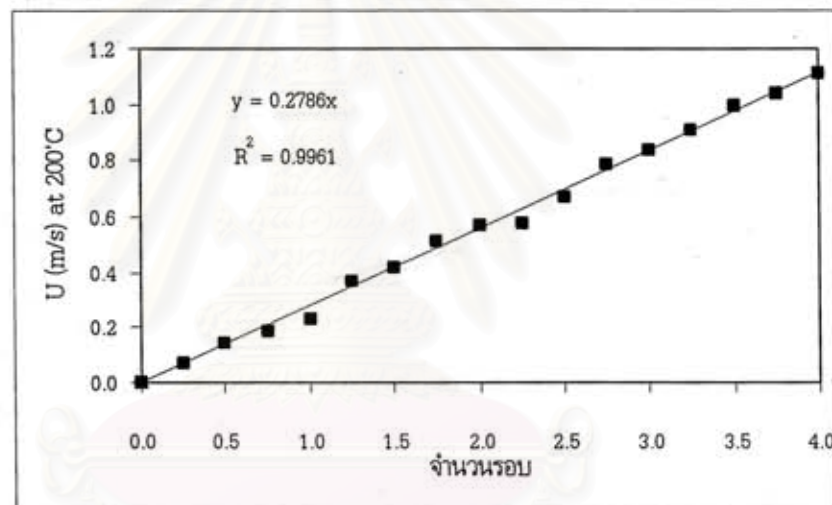


รูปที่ ข.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วอากาศที่ไหลผ่านเบด กับมาตรฐานอัตราการไหล ณ อุณหภูมิห้อง

การปรับเทียบอัตราการไหลของไอน้ำ

ใช้วิธีการปรับเทียบจำนวนรอบการเปิดวาล์วที่ควบคุมการไหลของไอน้ำกับมาตรวัดอัตราการไหลของอากาศ โดยใช้ไอน้ำที่มีอุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ไหลผ่านมาตรวัดอัตราการไหลของอากาศในรูปที่ ช.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วในการป้อนไอน้ำกับจำนวนรอบที่เปิดวาล์ว ความเร็วไอน้ำที่อุณหภูมิต่าง ๆ สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ดังสมการที่ (ช.2)

$$U_b = U_{200}(273+T_p)/(473) \quad (\text{ช.2})$$

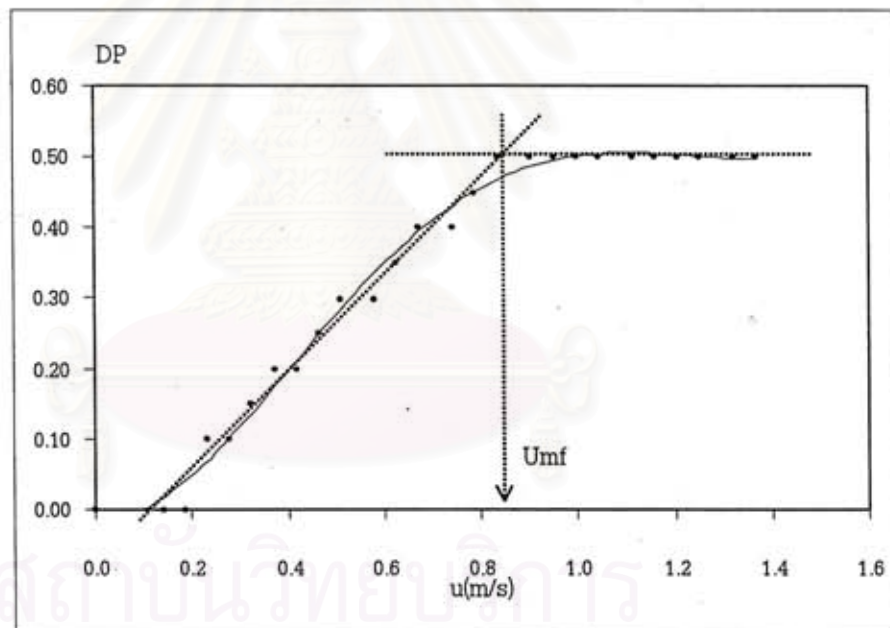


รูปที่ ช.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วในการป้อนไอน้ำกับจำนวนรอบที่เปิดวาล์ว

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ช. ความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชัน

ความเร็วต่ำสุดที่ทำให้อนุภาคของแข็งภายในเบดเริ่มขยับตัว และมีคุณสมบัติคล้ายของไหล มีความสำคัญต่อกระตุ้นในระบบฟลูอิดเซชันมาก โดยสามารถหาได้จากการทดลองผ่านแก๊สให้ไหลผ่านเบด ซึ่งจะทำให้เกิดความดันลดขึ้น ความดันลดนี้จะเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วแก๊สที่ผ่านเบดมีค่าสูงขึ้น จนถึงจุดหนึ่งที่มีความดันลดมีค่าคงที่ กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของแก๊สกับค่าความดันลดจะทำให้ทราบค่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชัน ในรูปที่ ช.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันลด และความเร็วอากาศของถ่านขนาด 1.18-2.36 มิลลิเมตร โดยเบดนิ่งสูง 5.0 เซนติเมตร ที่อุณหภูมิห้อง



รูปที่ ช.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันลดและความเร็วแก๊สภายในเครื่องแอกติเวเตอร์

ค่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูออไดเซชันของถ่านชาร์จากไม้ต้นปาล์มน้ำมัน
 เป็นการหาความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูออไดเซชัน โดยใช้ถ่านชาร์ขนาด 0.85-1.18 มิลลิเมตร
 1.18-2.36 มิลลิเมตร และ 2.36-4.75 มิลลิเมตร ตามลำดับ โดยใช้เบตนิ่งที่มีความสูง 5.0 เซนติเมตรและ
 ใช้อากาศ ณ อุณหภูมิห้องเป็นตัวกลางที่ทำให้เกิดฟลูออไดซ์ ผลการหาความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูออไดซ์ของ
 ถ่านขนาดต่างๆ แสดงค่าได้ดังนี้

สำหรับถ่านที่มีขนาด 0.85-1.18 มม. $U_{mf} = 0.32$ เมตรต่อวินาที

สำหรับถ่านที่มีขนาด 1.18-2.36 มม. $U_{mf} = 0.82$ เมตรต่อวินาที

สำหรับถ่านที่มีขนาด 2.36-4.75 มม. $U_{mf} = 1.35$ เมตรต่อวินาที



สถาบันวิทยบริการ
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ฉ.

สมบัติของถ่านกัมมันต์ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก.900-2532)

1. ชนิดของถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์แบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ

1. ถ่านกัมมันต์ผง (powdered activated carbon)
2. ถ่านกัมมันต์เม็ด (granular activated carbon)

2. ขนาดของถ่านกัมมันต์

1. ถ่านกัมมันต์ผง ปริมาณที่ผ่านร่อน 150 ไมโครเมตร ต้องไม่น้อยกว่าร้อยละ 99 โดยน้ำหนัก
2. ถ่านกัมมันต์เม็ด ปริมาณที่ผ่านร่อน 150 ไมโครเมตร ต้องไม่เกินร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก

3. สมบัติทางฟิสิกส์และทางเคมีของถ่านกัมมันต์

1. ถ่านกัมมันต์ผง ต้องมีสมบัติดังนี้
ค่าไอโอดีน ไม่น้อยกว่า 600
ความหนาแน่นปรากฏ 0.20 ถึง 0.75 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
2. ถ่านกัมมันต์เม็ด ต้องมีสมบัติดังนี้
ค่าไอโอดีน ไม่น้อยกว่า 600
ความหนาแน่นปรากฏ ไม่น้อยกว่า 0.36 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
ความชื้น ไม่เกินร้อยละ 8
ความแข็ง ไม่น้อยกว่าร้อยละ 70

ประวัติผู้วิจัย

ว่าที่ รต. สุรัชย์ สุวรรณแสงชูโต เกิดวันที่ 24 กันยายน พ.ศ. 2514 สำเร็จการศึกษาปริญญาตรี วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมและเทคโนโลยีการเกษตร สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล ในปีการศึกษา 2538 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ที่ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2539



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย