# สมบัติของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากลิกไนต์โดยการกระตุ้น
# ทางเคมีและทางกายภาพ

นาย ธวัชชัย ตันเจริญทรัพย์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2544

ISBN 974-03-1018-4

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# PROPERTIES OF ACTIVATED CARBON PREPARED FROM LIGNITE BY CHEMICAL AND PHYSICAL ACTIVATION

Mr. Thawatchai Tuncharoensap

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 2001
ISBN 974-03-1018-4

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หัวข้อวิทยานิพนธ์ สมบัติของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากลิกไนต์โดยการกระตุ้นทางเคมีและทางกายภาพ

โดย นาย ธวัชชัย ต้นเจริญทรัพย์

สาขาวิชา เคมีเทคนิค

อาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ ดร.ธราพงษ์ วิทิตศานต์

---

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

…………………………………….. รองคณบดีฝ่ายบริหาร

(รองศาสตราจารย์ ดร.พิพัฒน์ การเที่ยง) รักษาราชการแทนคณบดี

คณะวิทยาศาสตร์

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

…………………………………….. ประธานกรรมการ

(ศาสตราจารย์ ดร.ภัทรพรรณ ประศาสน์สารกิจ)

…………………………………….. อาจารย์ที่ปรึกษา

(รองศาสตราจารย์ ดร.ธราพงษ์ วิทิตศานต์)

…………………………………….. กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ งามประเสริฐสิทธิ์)

…………………………………….. กรรมการ

(อาจารย์ ดร.สุชญา นิติวัฒนานนท์)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ชื่อ นายธวัชชัย ตันเจริญทรัพย์ : สมบัติของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากลิกไนต์โดยการกระตุ้นทางเคมีและทางกายภาพ (PROPERTIES OF ACTIVATED CARBON PREPARED FROM LIGNITE BY CHEMICAL AND PHYSICAL ACTIVATION) อ. ที่ปรึกษา : รศ.ดร.ธราพงษ์ วิทิตศานต์, จำนวนหน้า 131 หน้า. ISBN 974-03-1018-4.

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากลิกไนต์โดยการกระตุ้นทางเคมีและทางกายภาพ ในขั้นตอนแรกเป็นขั้นตอนการคาร์บอไนซ์ ศึกษาถึงผลของอุณหภูมิและเวลา พบว่า ภาวะที่เหมาะสมในการคาร์บอไนซ์ คือ ที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส เวลา 45 นาที ขั้นตอนที่สองเป็น เป็นการกระตุ้นถ่านชาร์ ซึ่งในงานวิจัยทำการเปรียบเทียบสมบัติของถ่านชาร์ที่ได้จากการกระตุ้นด้วยกัน 2 วิธี คือ วิธีแรกเป็นการกระตุ้นทางเคมี ใช้โปแตสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นสารกระตุ้น โดยศึกษาถึงผลของ อัตราส่วนสารกระตุ้นต่อถ่านชาร์ อุณหภูมิ เวลา และขนาดอนุภาค ภาวะที่เหมาะสมในการกระตุ้นทางเคมี คือ ที่อัตราส่วนสารกระตุ้นต่อถ่านชาร์ 0.7:1 อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เวลา 4 ชั่วโมง ที่ขนาดอนุภาค 0.50 – 0.85 มิลลิเมตร สมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ได้คือ ร้อยละผลิตภัณฑ์ 50.87 ความหนาแน่นเชิงปริมาตร 0.318 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ร้อยละปริมาณเถ้า 14.61 ค่าการดูดซับไอโอดีน 846 มิลลิกรัมต่อกรัม ค่าการดูดซับเมทิลีนบลู 229 มิลลิกรัมต่อกรัม ค่าพื้นที่ผิวบีอีที 1,292 ตารางเมตรต่อกรัม วิธีที่สองเป็นการกระตุ้นทางกายภาพ ใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์กับไอน้ำเป็นสารกระตุ้น โดยศึกษาถึงผลของอุณหภูมิ เวลา และขนาดอนุภาค ผลการทดลองแสดง ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส เวลา 4 ชั่วโมง ที่ขนาดอนุภาค 0.50 – 0.85 มิลลิเมตร เป็นภาวะที่เหมาะสมโดยมีสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ได้คือ ร้อยละผลิตภัณฑ์ 60.42 ความหนาแน่นเชิงปริมาตร 0.544 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ร้อยละปริมาณเถ้า 26.87 ค่าการดูดซับไอโอดีน 242 มิลลิกรัมต่อกรัม ค่าการดูดซับเมทิลีนบลู 41 มิลลิกรัมต่อกรัม

จากการเปรียบเทียบสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จากทั้งสองวิธี การเตรียมถ่านกัมมันต์จากลิกไนต์โดยการกระตุ้นทางเคมีจะให้สมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ดีกว่าการกระตุ้นทางกายภาพ และมีค่าใกล้เคียงกับถ่านกัมมันต์เกรดการค้า

ภาควิชา………เคมีเทคนิค……………… ลายมือชื่อนิสิต.......................................................
สาขาวิชา………เคมีเทคนิค………………ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา....................................
ปีการศึกษา…….2544…………………….

# # 4372281223 : MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY

KEY WORD: ACTIVATED CARBON / LIGNITE / ACTIVATION



THAWATCHAI TUNCHAROENSAP : PROPERTIES OF ACTIVATED CARBON PREPARED FROM LIGNITE BY CHEMICAL AND PHYSICAL ACTIVATION. THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. THARAPONG VITIDSANT, Ph.D, 131 pp. ISBN 974-03-1018-4.



The objective of this research is to study the properties of activated carbon, which was chemical and physical activated by using Thai lignite as raw material. The first step of an experimental process was carbonization. The temperature and time were investigated. It was found that the optimum condition was at 450$^{o}$C and 45 minute. The second step was to activate the char, which can be divided into two methods. For the first method, the potassium hydroxide solution was used in the chemical activation. The considered variables were ratio of reagent: : char, temperature, reaction time and particle size. The optimum condition was 0.7:1 of ratio reagent : char, temperature at 800$^{o}$C, reaction time 4 hours and particle size range between 0.50 – 0.85 mm. Properties of obtained activated carbon were 50.87% yield, bulk density 0.318 g/cc, 14.61% ash, 846 mg/g of iodine number, 229 mg/g methylene blue number and 1,292 $m^2$/g surface specific. Second method was physical activation that gave the suitable variables at 850$^{o}$C, 4 hours activation time and particle range from 0.50 – 0.85 mm, which was the optimum condition. The obtained activated carbon was 60.42% yield, 0.544g/cc bulk density, 26.87% ash, 242 mg/g iodine number and 41 mg/g methylene blue number.

The comparison of the two methods showed that the properties of activated carbon from chemical activated is better than that of physical activated. And the properties are closed to that of commercial grade.


Department.….Chemical Technology...... Student’s signature……………………………..

Field of study......Faculty of Science.........Advisor’s signature……………………………..

Academic year .......2001......................….

# กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของ รองศาตราจารย์ ดร.ธราพงษ์ วิทิตศานต์ อาจารย์ที่ปรึกษา ซึ่งได้กรุณาสละเวลาให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ ในงานวิจัยมาโดยตลอด

ผู้วิจัยขอขอบคุณประธานและคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่านที่ให้ความสนใจ พร้อมให้คำแนะนำต่องานวิจัยฉบับนี้ รวมทั้งคณาจารย์ภาควิชาเคมีเทคนิคทุกท่านที่ให้การอบรมสั่งสอนด้านวิชาการตลอดมา

ขอขอบคุณ คุณสันติ เมฆฉาย และ คุณณรงค์ ชัยพันธ์ ที่ให้ความช่วยเหลือในการซ่อมและสร้างเครื่องมือ และอำนวยความสะดวกสิ่งต่างๆในห้องปฏิบัติงาน และที่ขาดไม่ได้คือ กำลังใจจากเพื่อนๆพี่ๆและน้องๆในภาควิขาเคมีเทคนิคทุกคน ที่ให้คำแนะนำและช่วยเหลือข้าพเจ้ามาตลอด

ท้ายนี้ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่ให้กำลังใจและสนับสนุนในด้านการเงินด้วยดีเสมอมา จนสำเร็จการศึกษา

ธวัชชัย ตันเจริญทรัพย์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# สารบัญ


หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย......................................................................................ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..................................................................................จ

กิตติกรรมประกาศ.........................................................................................ฉ

สารบัญ.......................................................................................................ช

สารบัญตาราง..............................................................................................ญ

สารบัญภาพ.................................................................................................ฏ

สัญลักษณ์และคำย่อ......................................................................................ต

บทที่

1. บทนำ.....................................................................................................1

1.1 ความสำคัญและที่มาของโครงการ...............................................................1

1.2 วัตถุประสงค์...........................................................................................3

1.3 ขอบเขตการวิจัย.......................................................................................3

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย..........................................................................3

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ...........................................................................4

2. วารสารปริทัศน์.........................................................................................5

2.1 ความหมายของถ่านกัมมันต์........................................................................5

2.2 วัตถุดิบสำหรับใช้ในกระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์............................................5

2.3 กระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์......................................................................6

2.3.1 การคาร์บอไนเซชัน..............................................................................6

2.3.2 การกระตุ้น.........................................................................................8

2.4 โครงสร้างรูพรุนของถ่านกัมมันต์................................................................13

2.5 การศึกษาการดูดซับที่เกี่ยวข้องกับพื้นผิวเคมี................................................16

2.6 ถ่านกัมมันต์ในทางการค้า.........................................................................18

2.7 การวิเคราะห์สมบัติของถ่านกัมมันต์............................................................21

2.7.1 สมบัติในการดูดซับ.............................................................................21

2.7.2 สมบัติทางด้านเคมีฟิสิกส์......................................................................22

2.7.3 พื้นที่ผิว............................................................................................22

2.8 ประโยชน์ของถ่านกัมมันต์........................................................................27

# สารบัญ (ต่อ)


บทที่ หน้า

2.9 ถ่านหินและการกำเนิดถ่านหินลิกไนต์.....28

2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....30

2.10.1 งานวิจัยในประเทศ.....30

2.10.2 งานวิจัยต่างประเทศ.....33

3 การดำเนินงานทดลอง.....42

3.1 รูปแบบการศึกษา.....42

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย.....42

3.3 สารเคมี.....43

3.4 วัตถุดิบ.....43

3.5 ขั้นตอนการดำเนินงานทดลอง.....43

4 ผลและอภิปรายผลการวิจัย.....49

4.1 สมบัติของวัตถุดิบ.....49

4.1.1 สมบัติเบื้องต้นของลิกไนต์.....49

4.1.2 ลักษณะของถ่านหินลิกไนต์.....49

4.2 ผลการศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการคาร์บอไนซ์ลิกไนต์.....50

4.3 ผลการศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการกระตุ้น.....52

4.3.1 การกระตุ้นทางเคมี.....52

4.3.1.1 ผลของการแปรอัตราส่วนสารกระตุ้นต่อถ่านชาร์.....52

4.3.1.2 ผลของการแปรอุณหภูมิในการกระตุ้น.....61

4.3.1.3 ผลของการแปรเวลาในการกระตุ้น.....69

4.3.1.4 ผลของการแปรขนาดอนุภาคของลิกไนต์.....76

4.3.2 การกระตุ้นทางกายภาพ.....83

4.3.2.1 ผลของการแปรอุณหภูมิและเวลาในการกระตุ้น.....83

4.3.2.2 ผลของการแปรขนาดอนุภาคของลิกไนต์.....94

4.4 รูปลักษณะพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นที่ภาวะต่างๆ.....100

4.5 เปรียบเทียบสมบัติของถ่านกัมมันต์ในงานวิจัย.....105

5 สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะ.....107

5.1 สรุปผลงานวิจัย.....107

5.2 ข้อเสนอแนะ.....108

## สารบัญ (ต่อ)

บทที่ หน้า

รายการอ้างอิง……..……………………………………………………………….………….109

ภาคผนวก…..……………………………………………………………………………...…113

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์…………………………………………………………………131

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# สารบัญตาราง

ตาราง หน้า


1.1 สถิติการนำเข้าถ่านกัมมันต์ในประเทศไทย……………………………………………………..2

1.2 สถิติการส่งออกถ่านกัมมันต์ในประเทศไทย……………………………………………………2

2.1 การนำถ่านกัมมันต์ไปประยุกต์ใช้ในระบบต่างๆ…………………………………………….20

2.2 ผลการทดลองของ Johnson……………………………………………………………………...33

2.3 แสดงสมบัติของถ่านกัมมันต์ของ Arriagada…………………………...……………………34

2.4 แสดงสมบัติของถ่านกัมมันต์ของ Mameri………………………………...……………36

2.5 ผลของอัตราส่วนระหว่างโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์กับแอนทราไซต์ของ Lozano…………...39

2.6 ผลของการให้ความร้อนที่มีต่อโครงสร้างรูพรุนของ Lozano………...……………………...40

2.7 ผลของอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนที่มีต่อโครงสร้างรูพรุนของ Lozano……..……..41

4.1 แสดงค่าประมาณของถ่านหินลิกไนต์ ที่ได้จากการคาร์บอไนซ์ ณ ภาวะต่างๆ…………….50

4.2 ค่าสมบัติถ่านชาร์ที่มีปริมาณสารระเหยอยู่ในช่วงร้อยละ 20 – 25 ที่ได้จากการทดลอง…..51

4.3 สมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นที่อัตราส่วนสารกระตุ้นต่อถ่านชาร์ต่างๆ ขนาดอนุภาค 0.85 – 1.18 มม. อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 1,000 มล./นาที อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง…………………..………………………52

4.4 สมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นที่อัตราส่วนสารกระตุ้นต่อถ่านชาร์ต่างๆ ขนาดอนุภาค 0.85 – 1.18 มม. อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 1,000 มล./นาที อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง…………………..………………………53

4.5 สมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นที่อัตราส่วนสารกระตุ้นต่อถ่านชาร์ต่างๆ ขนาดอนุภาค 0.85 – 1.18 มม. อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 1,000 มล./นาที อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง……………………………………………...53

4.6 สมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นที่อัตราส่วนสารกระตุ้นต่อถ่านชาร์ต่างๆ ขนาดอนุภาค 0.85 – 1.18 มม. อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 1,000 มล./นาที อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง……………………………………………...54

4.7 สมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นที่อุณหภูมิต่างๆ ที่ความเข้มข้นของโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 70 ขนาดอนุภาค 0.85 -1.18 มม. อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 1,000 มล./นาที เป็นเวลา 1 ชั่วโมง…………………………………..…61

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตาราง หน้า

4.8 สมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นที่อุณหภูมิต่างๆ ที่อัตราส่วนสารกระตุ้นต่อถ่านชาร์ 0.7:1 ขนาดอนุภาค 0.85 -1.18 มม. อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 1,000 มล./นาที เป็นเวลา 4 ชั่วโมง.........................................61
4.9 สมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นที่เวลาต่างๆ ที่อัตราส่วนสารกระตุ้นต่อถ่านชาร์ 0.7:1 อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ขนาดอนุภาค 0.85 -1.18 มม. อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 1,000 มล./นาที............................69
4.10 สมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นที่ขนาดอนุภาคต่างๆ ที่อัตราส่วนสารกระตุ้นต่อถ่านชาร์ 0.7:1 อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 1,000 มล./นาที.................................................76
4.11 สมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆขนาดอนุภาค 0.85 – 1.18 มม. ปริมาณป้อนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 500 ลบ.ซม./นาที ปริมาณป้อนไอน้ำ 10 กรัม/นาที และปริมาณป้อนอากาศ 1.5 ลบ.ซม./นาที...........................83
4.12 สมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นที่ขนาดอนุภาคต่างๆ อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ปริมาณป้อนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 500 ลบ.ซม./นาที ปริมาณป้อนไอน้ำ 10 กรัม/นาที และปริมาณป้อนอากาศ 1.5 ลบ.ซม./นาที.................94
4.13 เปรียบเทียบสมบัติของถ่านกัมมันต์จากการกระตุ้นทางเคมีและทางกายภาพ.............105
4.14 เปรียบเทียบผลงานวิจัยนี้กับผลงานวิจัยต่างประเทศ..........................................106

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# สารบัญภาพ


ภาพประกอบ หน้า

2.1 โครงสร้างของกราไฟต์……………....……………………………………………………13

2.2 โครงสร้างของถ่านกัมมันต์…………………..…………………………………………...14

2.3 รูปแสดงลักษณะของรูพรุนในถ่านกัมมันต์………….……………………………………..15

2.4 แสดงกลุ่มฟังก์ชันต่างๆที่ผิวคาร์บอน และอุณหภูมิต่างๆที่สลายตัวโดย TPD……….......17

2.5 โครงสร้างทางเคมีของเมทิลีนบลู…………………..……...……………………...……21

2.6 แสดงไอโซเทอมของการดูดซับทั้ง 5 ชนิด…………………………...……..……………23

2.7 แสดงโครงสร้างจำลองของถ่านหิน ..…………………………………...…………………..29

2.8 แสดงการสูญเสียมวลของถ่านหินในระหว่างการคาร์บอไนซ์ของ Li-Yeh Hsu……………37

2.9 แสดงถึงผลของอุณหภูมิการคาร์บอไนซ์โดยใช้ขนาดอนุภาค 0.4 – 1.0 มิลลิเมตร ของ Li-Yeh Hsu…………………………………………………………………………………38

2.10 แสดงถึงผลของอุณหภูมิการคาร์บอไนซ์โดยใช้ขนาดอนุภาค 0.2 – 0.3 มิลลิเมตร ของ Li-Yeh Hsu…………………………………………………………………………………38

3.1 แสดงชุดเครื่องมือการกระตุ้น…………………………………………………………….48

3.2 เครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้ทำการกระตุ้น………………………………………………………….48

3.3 เตาให้ความร้อนแบบแนวตั้ง……………………………………………………………..48

4.1 ลักษณะของถ่านหินลิกไนต์ก่อนการคาร์บอไนซ์ (A) และบดคัดขนาดหลังการคาร์บอไนซ์ (B)…………………………………………………………………………49

4.2 ผลของอัตราส่วนสารกระตุ้นต่อถ่านชาร์ที่ใช้เตรียมถ่านกัมมันต์ต่อปริมาณร้อยละผลิตภัณฑ์ โดยใช้ลิกไนต์ 20 กรัม ขนาด 0.85 – 1.18 มม. อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 1,000 มล./นาที……………………...…………………………………..55

4.3 ผลของอัตราส่วนสารกระตุ้นต่อถ่านชาร์ที่ใช้เตรียมถ่านกัมมันต์ต่อค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตรโดยใช้ลิกไนต์ 20 กรัม ขนาด 0.85 – 1.18 มม. อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 1,000 มล./นาที……………………………………………………………56

4.4 ผลของอัตราส่วนสารกระตุ้นต่อถ่านชาร์ที่ใช้เตรียมถ่านกัมมันต์ต่อค่าการดูดซับไอโอดีน โดยใช้ลิกไนต์ 20 กรัม ขนาด 0.85 – 1.18 มม. อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 1,000 มล./นาที………...………………………………………….……………..57

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพประกอบ หน้า

4.5 ผลของอัตราส่วนสารกระตุ้นต่อถ่านชาร์ที่ใช้เตรียมถ่านกัมมันต์ต่อค่าการดูดซับเมทิลีนบลู โดยใช้ลิกไนต์ 20 กรัม ขนาด 0.85 – 1.18 มม. อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 1,000 มล./นาที........58

4.6 ผลของอัตราส่วนสารกระตุ้นต่อถ่านชาร์ที่ใช้เตรียมถ่านกัมมันต์ต่อปริมาณของเถ้า โดยใช้ลิกไนต์ 20 กรัม ขนาด 0.85 – 1.18 มม. อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 1,000 มล./นาที........59

4.7 ผลของอัตราส่วนสารกระตุ้นต่อถ่านชาร์ที่ใช้เตรียมถ่านกัมมันต์ต่อพื้นที่ผิวบีอีที โดยใช้ลิกไนต์ 20 กรัม ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ขนาด 0.85 – 1.18 มม. อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 1,000 มล./นาที........60

4.8 ผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการเตรียมถ่านกัมมันต์ต่อปริมาณร้อยละผลิตภัณฑ์ โดยใช้ลิกไนต์ 20 กรัม ขนาด 0.85 – 1.18 มม. อัตราส่วนสารกระตุ้นต่อถ่านชาร์ 0.7:1 อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 1,000 มล./นาที........62

4.9 ผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการเตรียมถ่านกัมมันต์ต่อค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตร โดยใช้ลิกไนต์ 20 กรัม ขนาด 0.85 – 1.18 มม. อัตราส่วนสารกระตุ้นต่อถ่านชาร์ 0.7:1 อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 1,000 มล./นาที........64

4.10 ผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการเตรียมถ่านกัมมันต์ต่อค่าการดูดซับไอโอดีน โดยใช้ลิกไนต์ 20 กรัม ขนาด 0.85 – 1.18 มม. อัตราส่วนสารกระตุ้นต่อถ่านชาร์ 0.7:1 อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 1,000 มล./นาที........65

4.11 ผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการเตรียมถ่านกัมมันต์ต่อค่าการดูดซับเมทิลีนบลู โดยใช้ลิกไนต์ 20 กรัม ขนาด 0.85 – 1.18 มม อัตราส่วนสารกระตุ้นต่อถ่านชาร์ 0.7:1 อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 1,000 มล./นาที........66

4.12 ผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการเตรียมถ่านกัมมันต์ต่อปริมาณของเถ้า โดยใช้ลิกไนต์ 20 กรัม ขนาด 0.85 – 1.18 มม. อัตราส่วนสารกระตุ้นต่อถ่านชาร์ 0.7:1 อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 1,000 มล./นาที........67

4.13 ผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการเตรียมถ่านกัมมันต์ต่อพื้นที่ผิวบีอีที โดยใช้ลิกไนต์ 20 กรัม เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ขนาด 0.85 – 1.18 มม. อัตราส่วนสารกระตุ้นต่อถ่านชาร์ 0.7:1 อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 1,000 มล./นาที........68

**สารบัญภาพ (ต่อ)**

ภาพประกอบ หน้า

4.14 ผลของเวลาที่ใช้ในการเตรียมถ่านกัมมันต์ต่อปริมาณร้อยละผลิตภัณฑ์ โดยใช้ลิกไนต์ 20 กรัม ขนาด 0.85 – 1.18 มม. อัตราส่วนสารกระตุ้นต่อถ่านชาร์ 0.7:1 อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 1,000 มล./นาที............70
4.15 ผลของเวลาที่ใช้ในการเตรียมถ่านกัมมันต์ต่อค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตร โดยใช้ลิกไนต์ 20 กรัม ขนาด 0.85 – 1.18 มม. อัตราส่วนสารกระตุ้นต่อถ่านชาร์ 0.7:1 อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 1,000 มล./นาที............71
4.16 ผลของเวลาที่ใช้ในการเตรียมถ่านกัมมันต์ต่อค่าการดูดซับไอโอดีน โดยใช้ลิกไนต์ 20 กรัม ขนาด 0.85 – 1.18 มม. อัตราส่วนสารกระตุ้นต่อถ่านชาร์ 0.7:1อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 1,000 มล./นาที.....................72
4.17 ผลของเวลาที่ใช้ในการเตรียมถ่านกัมมันต์ต่อค่าการดูดซับเมทิลีนบลูโดยใช้ลิกไนต์ 20 กรัม ขนาด 0.85 – 1.18 มม. อัตราส่วนสารกระตุ้นต่อถ่านชาร์ 0.7:1 อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 1,000 มล./นาที.....................73
4.18 ผลของเวลาที่ใช้ในการเตรียมถ่านกัมมันต์ต่อปริมาณของเถ้า โดยใช้ลิกไนต์ 20 กรัม ขนาด 0.85 – 1.18 มม. อัตราส่วนสารกระตุ้นต่อถ่านชาร์ 0.7:1 อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 1,000 มล./นาที..................................74
4.19 ผลของเวลาที่ใช้ในการเตรียมถ่านกัมมันต์ต่อค่าพื้นที่ผิวบีอีที โดยใช้ลิกไนต์ 20 กรัม อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ขนาด 0.85 – 1.18 มม. อัตราส่วนสารกระตุ้นต่อถ่านชาร์ 0.7:1อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 1,000 มล./นาที ...........................................................................75
4.20 ผลของขนาดอนุภาคที่ใช้ในการเตรียมถ่านกัมมันต์ต่อปริมาณร้อยละผลิตภัณฑ์ โดยใช้ลิกไนต์ 20 กรัม อัตราส่วนสารกระตุ้นต่อถ่านชาร์ 0.7:1 อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 1,000 มล./นาที............77
4.21 ผลของขนาดอนุภาคที่ใช้ในการเตรียมถ่านกัมมันต์ต่อค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตร โดยใช้ลิกไนต์ 20 กรัม อัตราส่วนสารกระตุ้นต่อถ่านชาร์ 0.7:1 อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 1,000 มล./นาที............78
4.22 ผลของขนาดอนุภาคที่ใช้ในการเตรียมถ่านกัมมันต์ต่อค่าการดูดซับไอโอดีน โดยใช้ลิกไนต์ 20 กรัม อัตราส่วนสารกระตุ้นต่อถ่านชาร์ 0.7:1 อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 1,000 มล./นาที.......................79

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพประกอบ หน้า

4.23 ผลของขนาดอนุภาคที่ใช้ในการเตรียมถ่านกัมมันต์ต่อค่าการดูดซับเมทิลีนบลู โดยใช้ลิกไนต์ 20 กรัม อัตราส่วนสารกระตุ้นต่อถ่านชาร์ 0.7:1 อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 1,000 มล./นาที............80
4.24 ผลของขนาดอนุภาคที่ใช้ในการเตรียมถ่านกัมมันต์ต่อปริมาณของเถ้า โดยใช้ลิกไนต์ 20 กรัม อัตราส่วนสารกระตุ้นต่อถ่านชาร์ 0.7:1 อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 1,000 มล./นาที............81
4.25 ผลของขนาดอนุภาคที่ใช้ในการเตรียมถ่านกัมมันต์ต่อค่าพื้นที่ผิวบีอีที โดยใช้ลิกไนต์ 20 กรัม อัตราส่วนสารกระตุ้นต่อถ่านชาร์ 0.7:1 อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 1,000 มล./นาที............82
4.26 ผลของอุณหภูมิการกระตุ้นที่มีต่อปริมาณร้อยละผลิตภัณฑ์ ณ เวลาต่างๆ โดยใช้ลิกไนต์ 20 กรัม ปริมาณป้อนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 500 ลบ.ซม./นาที ปริมาณป้อนไอน้ำ 10 กรัม/นาที และปริมาณป้อนอากาศ 1.5 ลบ.ซม./นาที..........................84
4.27 ผลของอุณหภูมิการกระตุ้นที่มีต่อค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตร ณ เวลาต่างๆ โดยใช้ลิกไนต์ 20 กรัม ปริมาณป้อนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 500 ลบ.ซม./นาที ปริมาณป้อนไอน้ำ 10 กรัม/นาที และปริมาณป้อนอากาศ 1.5 ลบ.ซม./นาที...............85
4.28 ผลของอุณหภูมิการกระตุ้นที่มีต่อค่าการดูดซับไอโอดีน ณ เวลาต่างๆ โดยใช้ลิกไนต์ 20 กรัม ปริมาณป้อนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 500 ลบ.ซม./นาที ปริมาณป้อนไอน้ำ 10 กรัม/นาที และปริมาณป้อนอากาศ 1.5 ลบ.ซม./นาที..........................86
4.29 ผลของอุณหภูมิการกระตุ้นที่มีต่อค่าการดูดซับเมทิลีนบลู ณ เวลาต่างๆ โดยใช้ลิกไนต์ 20 กรัม ปริมาณป้อนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 500 ลบ.ซม./นาที ปริมาณป้อนไอน้ำ 10 กรัม/นาที และปริมาณป้อนอากาศ 1.5 ลบ.ซม./นาที..........................87
4.30 ผลของอุณหภูมิการกระตุ้นที่มีต่อปริมาณร้อยละของเถ้า ณ เวลาต่างๆ โดยใช้ลิกไนต์ 20 กรัม ปริมาณป้อนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 500 ลบ.ซม./นาที ปริมาณป้อนไอน้ำ 10 กรัม/นาที และปริมาณป้อนอากาศ 1.5 ลบ.ซม./นาที..........................88
4.31 ผลของเวลาการกระตุ้นที่มีต่อปริมาณร้อยละผลิตภัณฑ์ ณ อุณหภูมิต่างๆ โดยใช้ลิกไนต์ 20 กรัม ปริมาณป้อนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 500 ลบ.ซม./นาที ปริมาณป้อนไอน้ำ 10 กรัม/นาที และปริมาณป้อนอากาศ 1.5 ลบ.ซม./นาที...............89

**สารบัญภาพ (ต่อ)**


ภาพประกอบ หน้า

4.32 ผลของเวลาการกระตุ้นที่มีต่อค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตร ณ อุณหภูมิต่างๆ โดยใช้ลิกไนต์ 20 กรัม ปริมาณป้อนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 500 ลบ.ซม./นาที ปริมาณป้อนไอน้ำ 10 กรัม/นาที และปริมาณป้อนอากาศ 1.5 ลบ.ซม./นาที.....................90

4.33 ผลของเวลาการกระตุ้นที่มีต่อค่าการดูดซับไอโอดีน ณ อุณหภูมิต่างๆ โดยใช้ลิกไนต์ 20 กรัม ปริมาณป้อนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 500 ลบ.ซม./นาที ปริมาณป้อนไอน้ำ 10 กรัม/นาที และปริมาณป้อนอากาศ 1.5 ลบ.ซม./นาที....................91

4.34 ผลของเวลาการกระตุ้นที่มีต่อค่าการดูดซับเมทิลีนบลู ณ อุณหภูมิต่างๆ โดยใช้ลิกไนต์ 20 กรัม ปริมาณป้อนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 500 ลบ.ซม./นาที ปริมาณป้อนไอน้ำ 10 กรัม/นาที และปริมาณป้อนอากาศ 1.5 ลบ.ซม./นาที...........................92

4.35 ผลของเวลาการกระตุ้นที่มีต่อปริมาณของเถ้า ณ อุณหภูมิต่างๆ โดยใช้ลิกไนต์ 20 กรัม ปริมาณป้อนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 500 ลบ.ซม./นาที ปริมาณป้อนไอน้ำ 10 กรัม/นาที และปริมาณป้อนอากาศ 1.5 ลบ.ซม./นาที..................................93

4.36 ผลของขนาดอนุภาคที่มีต่อปริมาณร้อยละผลิตภัณฑ์ ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง โดยใช้ลิกไนต์ 20 กรัม ปริมาณป้อนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 500 ลบ.ซม./นาที ปริมาณป้อนไอน้ำ 10 กรัม/นาที และปริมาณป้อนอากาศ 1.5 ลบ.ซม./นาที....................................................................95

4.37 ผลของขนาดอนุภาคที่มีต่อค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตร ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง โดยใช้ลิกไนต์ 20 กรัม ปริมาณป้อนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 500 ลบ.ซม./นาที ปริมาณป้อนไอน้ำ 10 กรัม/นาที และปริมาณป้อนอากาศ 1.5 ลบ.ซม./นาที....................................................................96

4.38 ผลของขนาดอนุภาคที่มีต่อค่าการดูดซับไอโอดีน ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง โดยใช้ลิกไนต์ 20 กรัม ปริมาณป้อนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 500 ลบ.ซม./นาที ปริมาณป้อนไอน้ำ 10 กรัม/นาที และปริมาณป้อนอากาศ 1.5 ลบ.ซม./นาที..........................................................................97

4.39 ผลของขนาดอนุภาคที่มีต่อค่าการดูดซับเมทิลีนบลู ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง โดยใช้ลิกไนต์ 20 กรัม ปริมาณป้อนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 500 ลบ.ซม./นาที ปริมาณป้อนไอน้ำ 10 กรัม/นาที และปริมาณป้อนอากาศ 1.5 ลบ.ซม./นาที..........................................................................98

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพประกอบ หน้า

4.40 ผลของขนาดอนุภาคที่มีต่อปริมาณของเถ้า ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง โดยใช้ลิกไนต์ 20 กรัม ปริมาณป้อนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 500 ลบ.ซม./นาที ปริมาณป้อนไอน้ำ 10 กรัม/นาที และปริมาณป้อนอากาศ 1.5 ลบ.ซม./นาที.....99

4.41 แสดงถ่านชาร์ที่ได้จากการคาร์บอไนซ์ลิกไนต์ (ก่อนการกระตุ้น).....100

4.42 แสดงถ่านกัมมันต์จากลิกไนต์ กระตุ้นที่ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง อัตราส่วนสารกระตุ้นต่อถ่านชาร์ 0.7:1 ขนาดอนุภาค 0.50 – 0.85 มิลลิเมตร.....100

4.43 แสดงถ่านกัมมันต์จากลิกไนต์ กระตุ้นที่ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง อัตราส่วนสารกระตุ้นต่อถ่านชาร์ 0.7:1 ขนาดอนุภาค 0.85 – 1.18 มิลลิเมตร.....101

4.44 แสดงถ่านกัมมันต์จากลิกไนต์ กระตุ้นที่ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง อัตราส่วนสารกระตุ้นต่อถ่านชาร์ 0.7:1 ขนาดอนุภาค 1.18 – 2.00 มิลลิเมตร.....101

4.45 แสดงถ่านกัมมันต์จากลิกไนต์ กระตุ้นที่ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง อัตราส่วนสารกระตุ้นต่อถ่านชาร์ 0.3:1 ขนาดอนุภาค 0.85 – 1.18 มิลลิเมตร.....102

4.46 แสดงถ่านกัมมันต์จากลิกไนต์ กระตุ้นที่ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง อัตราส่วนสารกระตุ้นต่อถ่านชาร์ 0.7:1 ขนาดอนุภาค 0.85 – 1.18 มิลลิเมตร.....102

4.47 แสดงถ่านกัมมันต์จากลิกไนต์ กระตุ้นที่ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง อัตราส่วนสารกระตุ้นต่อถ่านชาร์ 0.7:1 ขนาดอนุภาค 0.85 – 1.18 มิลลิเมตร.....103

4.48 แสดงถ่านกัมมันต์จากลิกไนต์ กระตุ้นที่ 850 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ปริมาณป้อน $CO_2$ 500 $cm^3$/min , $H_2O$ 10 g/min , $O_2$ 1.5 $cm^3$/min ขนาด 0.85 – 1.18 มม.....103

4.49 แสดงถ่านกัมมันต์จากลิกไนต์ กระตุ้นที่ 750 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ปริมาณป้อน $CO_2$ 500 $cm^3$/min , $H_2O$ 10 g/min , $O_2$ 1.5 $cm^3$/min ขนาด 0.85 – 1.18 มม.....104

4.50 แสดงถ่านกัมมันต์จากลิกไนต์ กระตุ้นที่ 850 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ปริมาณป้อน $CO_2$ 500 $cm^3$/min , $H_2O$ 10 g/min , $O_2$ 1.5 $cm^3$/min ขนาด 0.85 – 1.18 มม.....104

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สัญลักษณ์และคำย่อ

Ash = ค่าเถ้า (Ash) มีหน่วยเป็นร้อยละโดยน้ำหนัก

BD = ค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตร (Bulk density) มีหน่วยเป็นกรัมต่อลูกบาศก์เซ็นติเมตร

FC = ค่าคาร์บอนคงตัว (Fixed carbon) มีหน่วยเป็นร้อยละโดยน้ำหนัก

HCl = กรดไฮโดรคลอริก

$H_3PO_4$ = กรดฟอสฟอริก

IA = ค่าไอโอดีน (Iodine adsorption number) มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อกรัมของถ่านกัมมันต์

KOH = โปแตสเซียมไฮดรอกไซด์

M = ค่าความชื้น (Moisture) มีหน่วยเป็นร้อยละโดยน้ำหนัก

MB = ค่าเมทิลีนบลู (Methylene blue number) มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อกรัมของถ่านกัมมันต์

NaOH = โซเดียมไฮดรอกไซด์

$Na_2CO_3$ = โซเดียมคาร์โบเนต

$S_{BET}$ = พื้นที่ผิวจำเพาะของรูพรุนทั้งหมดแบบบีอีที (Total spacipic surface area) มีหน่วยเป็นตารางเมตรต่อกรัมของถ่านกัมมันต์

VM = ค่าสารระเหย (Volatile matter) มีหน่วยเป็นร้อยละโดยน้ำหนัก

YD = ปริมาณผลิตภัณฑ์ที่ได้ (Yield) มีหน่วยเป็นร้อยละโดยน้ำหนัก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# บทที่ 1
# บทนำ

## 1.1 ความสำคัญและที่มาของโครงการ

ในภาวะปัจจุบันแนวโน้มการใช้ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) ภายในประเทศที่สูงขึ้นเรื่อยๆ โดยมีการนำเข้าที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากมีการนำเข้าถ่านกัมมันต์ไปใช้เป็นตัวดูดซับ (Adsorbent) ในกระบวนการแยกสิ่งสกปรกและโลหะหนักทั้งที่อยู่ในสภาพของเหลวและสภาพของแข็ง รวมถึงกระบวนการบำบัดน้ำเสียด้วย โดยพิจารณาเห็นว่าวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์น่าจะเป็นวัตถุดิบที่หาง่าย ราคาถูก ซึ่งวัตถุดิบที่เหมาะสมอย่างหนึ่งคือถ่านหินลิกไนต์ โดยจะนำมาเป็นวัตถุดิบเพื่อเตรียมเป็นถ่านกัมมันต์ ซึ่งจะมีประโยชน์คือ ประการแรก เนื่องจากถ่านหินลิกไนต์มีเป็นจำนวนมาก พบได้มากทางภาคเหนือและภาคใต้ของประเทศไทย และมีปริมาณสำรองที่สามารถใช้ได้ไม่ต่ำกว่า 200 ปี จึงเหมาะสมอย่างยิ่งที่จะนำมาเป็นวัตถุดิบในการเตรียมถ่านกัมมันต์ ประการที่สอง ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จากถ่านหินลิกไนต์นี้ สามารถนำไปใช้ในอุตสาหกรรมกรองน้ำในการทำน้ำประปาได้ โดยที่ราคาถูกและสามารถผลิตได้เพียงพอต่อการใช้ภายในประเทศ และเมื่อใช้จนหมดประสิทธิภาพแล้ว ยังนำกลับมาใช้เป็นเชื้อเพลิงได้อีก ดังนั้นการแปรสภาพวัตถุดิบดังกล่าวมาเป็นถ่านกัมมันต์จึงนับว่าเป็นประโยชน์แก่สังคมอย่างยิ่ง แล้วยังเป็นการใช้ทรัพยากรธรรมชาติที่มีอยู่ให้เป็นประโยชน์สูงสุดแก่ประเทศ

โดยทั่วไปในการเตรียมถ่านกัมมันต์นั้น สามารถเตรียมได้ด้วยกันสองวิธีคือ การเตรียมโดยการกระตุ้นทางเคมี และ การเตรียมโดยการกระตุ้นทางกายภาพ เพื่อให้ได้ถ่านกัมมันต์ที่มีคุณภาพและมีความเหมาะสมที่สุดในการนำไปใช้งาน ในงานวิจัยจึงทำการเปรียบเทียบสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการเตรียมทั้งสองวิธี เพื่อเป็นแนวทางในการนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป

การเปรียบเทียบสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากลิกไนต์ ในงานวิจัยนี้จะทำโดยผ่านกระบวนการคาร์บอไนซ์แล้วกระตุ้นด้วยสารละลายโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ กับการกระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำร้อนยวดยิ่ง โดยกระบวนการคาร์บอไนซ์มีการแปรอุณหภูมิระหว่าง 350-500 องศาเซลเซียส และระยะเวลาในการคาร์บอไนซ์ 45-120 นาที การกระตุ้นทางเคมีมีการแปรเปลี่ยนอัตราส่วนสารกระตุ้นต่อถ่านชาร์ที่ 0.3:1 - 0.9:1 อุณหภูมิในการกระตุ้น 500 – 900 องศาเซลเซียส เวลาตั้งแต่ 1 – 4 ชั่วโมง ขนาดอนุภาค 0.50 ถึง 2.00 มิลลิเมตร การกระตุ้นทางกายภาพมีการแปรเปลี่ยนอุณหภูมิ 750 – 900 องศาเซลเซียส เวลาตั้งแต่ 1 – 4 ชั่วโมง ขนาดอนุภาค 0.50 ถึง 2.00 มิลลิเมตร

จากแนวโน้มการนำเข้าและส่งออกถ่านกัมมันต์ ดังตารางที่ 1.1–1.2

ตารางที่ 1.1 สถิติการนำเข้าถ่านกัมมันต์ในประเทศไทย

| ปี (พศ.) | ปริมาณการนำเข้า (ตัน) | มูลค่าการนำเข้า (ล้านบาท) | ราคาเฉลี่ย (บาท/ตัน) |
|---|---|---|---|
| 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 | 36,510.67 |
| 2542 | 2,891 | 99.21 | 34,316.85 |
| 2543 | 3,007 | 125.21 | 41,639.51 |
| 2544 | 3,120 | 156.11 | 50,035.26 |

ตารางที่ 1.2 สถิติการส่งออกถ่านกัมมันต์ในประเทศไทย

| ปี (พศ.) | ปริมาณการส่งออก (ตัน) | มูลค่าการส่งออก (ล้านบาท) | ราคาเฉลี่ย (บาท/ตัน) |
|---|---|---|---|
| 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 | 2,736 | 120.31 | 43,972.95 |
| 2542 | 315 | 11.52 | 36,571.43 |
| 2543 | 4,433 | 171.07 | 38,590.12 |
| 2544 | 3,652 | 161.06 | 44,101.86 |

ที่มา : รายงานประจำปีกรมศุลกากร (2535-2544)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากตารางที่ 1.1 ในช่วง 10 ปี ที่ผ่านมามีการนำเข้าถ่านกัมมันต์ อยู่ในช่วง ประมาณ 2,700 – 3,600 ตัน การนำเข้ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นทุกปี จากตารางที่ 1.2 เป็นการส่งออกในช่วง 10 ปี เปลี่ยนแปลงจากประมาณ 250 – 4,000 ตัน มูลค่าการนำเข้าส่วนใหญ่มากกว่าการส่งออก อาจเป็นเพราะว่าต้องการถ่านกัมมันต์ที่มีคุณภาพดีที่เราไม่สามารถผลิตได้ ดังนั้นถ้าเราสามารถผลิตถ่านกัมมันต์ที่มีคุณภาพดีตามความต้องการอาจสามารถลดปริมาณการนำเข้าได้

## 1.2 วัตถุประสงค์

1. เปรียบเทียบสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากถ่านหินลิกไนต์โดยการกระตุ้นทางเคมีและทางกายภาพ
2. ศึกษาอิทธิพลของตัวแปรที่มีผลต่อสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ รวมทั้งหาภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมถ่านกัมมันต์

## 1.3 ขอบเขตการวิจัย

1. เป็นการศึกษาเชิงทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ
2. ศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการคาร์บอไนซ์ถ่านหินลิกไนต์ที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ โดยนำมาวิเคราะห์แบบประมาณ
3. นำถ่านที่ได้จากการคาร์บอไนซ์ ณ ภาวะที่เหมาะสมมาทำการกระตุ้นทั้งทางเคมีและทางกายภาพ เพื่อศึกษาหาภาวะที่เหมาะสมของการกระตุ้นและเปรียบเทียบสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากทั้งสองวิธี โดยการวิเคราะห์สมบัติทางเคมีและทางกายภาพของถ่านกัมมันต์

## 1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1. รวบรวมเอกสาร ค้นคว้าทฤษฎี และหลักการที่เกี่ยวข้องกับการเตรียมถ่านกันมันต์
2. ขอความอนุเคราะห์ตัวอย่างถ่านหินลิกไนต์จากการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยและเตรียมเครื่องมือในงานวิจัย
3. วิเคราะห์สมบัติโดยประมาณของถ่านหินลิกไนต์ ได้แก่ เถ้า (Ash) ,สารระเหย (Volatile) และคาร์บอนคงตัว (Fixed Carbon)

4. ศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการคาร์บอไนซ์ถ่านหินลิกไนต์ โดยแปรอุณหภูมิตั้งแต่ 350-500 องศาเซลเซียส ที่เวลา 45-120 นาที

5. ศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการกระตุ้นทางเคมี โดยศึกษาค่าตัวแปรต่างๆ

- อัตราส่วนสารกระตุ้นต่อถ่านชาร์ (0.3:1–0.9:1)
- อุณหภูมิ (500-900 องศาเซลเซียส)
- เวลา (1-4 ชั่วโมง)
- ขนาดอนุภาค (0.5-2.0 มิลลิเมตร)

6. ศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการกระตุ้นทางกายภาพ โดยศึกษาค่าตัวแปรต่างๆ

- อุณหภูมิ (750-900 องศาเซลเซียส)
- เวลา (1-4 ชั่วโมง)
- ขนาดอนุภาค (0.5-2.0 มิลลิเมตร)

7. ศึกษาสมบัติทางเคมีของถ่านกัมมันต์ ได้แก่

- การดูดซับไอโอดีน (IA ,mg/g,มก./ก.)
- การดูดซับเมทิลีนบลู (MB ,mg/g,มก./ก.)
- เถ้า (Ash ,%ร้อยละ)

และศึกษาสมบัติทางกายภาพ ได้แก่

- พื้นที่ผิวรูพรุนทั้งหมด ($S_{BET}$ ,$m^2$/g,ตร.ม./ก.)
- ความหนาแน่นเชิงปริมาตร

8. วิเคราะห์ข้อมูล สรุปผล และเขียนวิทยานิพนธ์

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เป็นข้อมูลพื้นฐานในการขยายส่วนของเครื่องปฏิกรณ์ ที่จะผลิตในเชิงอุตสาหกรรม
2. เป็นแนวทางเลือกอีกทางในการนำถ่านหินลิกไนต์มาใช้ให้มีคุณค่า และเมื่อถ่านกัม-มันต์ ที่ใช้แล้วยังสามารถนำมาเป็นเชื้อเพลิงได้ในภายหลัง ซึ่งจะเป็นการใช้ทรัพยากรธรรมชาติที่มีอยู่ให้เป็นประโยชน์แก่ประเทศชาติ

# บทที่ 2
# วารสารปริทัศน์

## 2.1 ความหมายของถ่านกัมมันต์

ความหมายของถ่านกัมมันต์นั้นมีผู้ให้ความหมายไว้หลากหลายคือ

- Derbyshire [1] กล่าวว่า ถ่านกัมมันต์คือ วัตถุที่มีพื้นที่ผิวภายในและมีความพรุนสูง ดังนั้นจึงมีความสามารถในการดูดซับสารเคมีจากแก๊สและของเหลวได้ในปริมาณสูง ซึ่งถ่านกัมมันต์นั้นสามารถใช้ประโยชน์ได้หลายด้านโดยอาจใช้ในกระบวนการทำสารเคมีให้บริสุทธิ์หรือในกระบวนการนำสารเคมีกลับมาใช้ใหม่ นอกจากนั้นถ่านกัมมันต์สามารถใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาหรือตัวรองรับของตัวเร่งปฏิกิริยาได้ด้วย จากคุณสมบัติที่เหมาะสมและมีราคาไม่แพงของถ่านกัมมันต์ทำให้ถ่านกัมมันต์เป็นตัวดูดซับที่ใช้กันมาก

- Jankowska [2] กล่าวว่า ถ่านกัมมันต์คือ การนำเอาวัตถุดิบที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบมาผ่านกระบวนการก่อกัมมันต์ ซึ่งทำให้วัตถุดิบนั้นมีโครงสร้างรูพรุนและมีพื้นที่ผิวภายในสูง ซึ่งหากดูพื้นที่หน้าตัดของถ่านกัมมันต์จะมีลักษณะคล้ายกับรังผึ้ง โดยถ่านกัมมันต์จะมีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก (87-90%) และมีธาตุอื่นที่เป็นองค์ประกอบคือ ไฮโดรเจน ออกซิเจน ซัลเฟอร์ และไนโตรเจน โดยจะมีปริมาณมากน้อยเท่าใดนั้นขึ้นกับปริมาณที่มีในวัตถุดิบและอาจเกิดขึ้นได้อีกในขั้นตอนการผลิต

- ตาม มอก. 900-2532 [3] กล่าวว่า ถ่านกัมมันต์คือ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการนำวัตถุดิบธรรมชาติที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลักมาผ่านกรรมวิธีก่อกัมมันต์ จนได้ผลิตภัณฑ์สีดำ มีโครงสร้างที่มีลักษณะเป็นรูพรุน มีพื้นที่ผิวสูง มีสมบัติในการดูดซับสารต่างๆได้เป็นอย่างดี

## 2.2 วัตถุดิบสำหรับใช้ในกระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์ [1, 2, 3, 4]

วัตถุดิบที่นำมาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์นั้นจะต้องมีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบโดยวัตถุดิบนั้นอาจเกิดขึ้นโดยธรรมชาติหรือได้จากการสังเคราะห์ขึ้น วัตถุดิบที่นิยมนำมาผลิตถ่านกัมมันต์ในระดับอุตสาหกรรมคือ พีท ถ่านหิน ลิกไนต์ ไม้ และกะลามะพร้าว เนื่องจากสามารถผลิตถ่านกัมมันต์ที่มีความสามารถในการดูดซับสูง และมีรูพรุนขนาดเล็กสูง ซึ่งวัตถุดิบที่นำมาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ควรมีสมบัติดังต่อไปนี้

- มีปริมาณสารระเหยต่ำ
- มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบในปริมาณสูง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

- มีราคาถูกและหาได้ง่าย
- มีสมบัติคงที่

ในปัจจุบันของเสียเหลือทิ้งทางการเกษตรนำมาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์เป็นจำนวนมากเนื่องจากหาได้ง่ายและมีราคาถูก อย่างไรก็ตามปัญหาในการผลิตถ่านกัมมันต์จากของเสียเหลือทิ้งทางการเกษตรคือ วัตถุดิบมีคุณสมบัติไม่คงที่ แม้ว่าเป็นวัตถุดิบชนิดเดียวกัน ทำให้ยากในการควบคุมการกระจายขนาดของรูพรุนในขั้นตอนการผลิต แหล่งของวัตถุดิบที่นำมาศึกษาเพื่อผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ได้แก่

| | | |
|---|---|---|
| Bagasse | Corncobs | Lignin |
| Beat – Sugar sludges | Cottonseed hulls | Lignite |
| Bones | Distillery waste | Molasses |
| Carbohydrates | Fish | Nutshells |
| Cereals | Flue dust | Oil shale |
| Coal | Fruit pits | Peat |
| Coconut shells | Graphite | Petroleum |
| Coffee beans | Leather waste | Wood |

## 2.3 กระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์

ขั้นตอนการผลิตถ่านกัมมันต์จะประกอบด้วยการคาร์บอไนเซชัน และขั้นตอนการกระตุ้นถ่านชาร์

2.3.1 <u>การคาร์บอไนเซชัน</u>

กระบวนการคาร์บอไนซ์ เป็นกระบวนการไพโรไลซิสรูปแบบหนึ่งที่จะทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ในรูปของถ่านชาร์ (Char) ที่เป็นของแข็งมากกว่าน้ำมันทาร์ (Tar) หรือแก๊ส หรืออาจกล่าวได้ว่าคาร์บอไนซ์เป็นการเพิ่มปริมาณคาร์บอนให้สูงขึ้น โดยการเผาในที่อับอากาศที่อุณหภูมิ 200-500 องศาเซลเซียส ปฏิกิริยาไพโรไลซิสต้องการความร้อนทั้งทางตรงและทางอ้อมที่ได้จากการออกซิเดชันเพียงบางส่วนหรือจากปฏิกิริยาอื่นๆ ที่เกิดขึ้นภายในเครื่องปฏิกรณ์ ซึ่งในปัจจุบันกระบวนการสลายตัวทางความร้อนทำให้เกิดการไพโรไลซิสโดยตรงจากการเผาไหม้บางส่วนของถ่านชาร์และแก๊สเรียกได้ว่าเป็น “กระบวนการไพโรไลซิส” กระบวนการไพโรไลซิส เป็นเทคโนโลยีที่วัตถุที่ประกอบด้วยคาร์บอนที่เป็นองค์ประกอบหลักการเกิดสลายตัวด้วยความร้อน โดยมีอาณาเขตอย่างน้อยหนึ่งอาณาเขตที่เกิดการสลายตัวด้วยความร้อนในที่ที่ไม่มีออกซิเจน ความแตกต่างของเทอมไพโรไลซิส แก๊สซิฟิเคชัน และการเผาไหม้ ดูได้จากปริมาณอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ คือ

ปริมาณอากาศที่ใช้มีส่วนสัมพันธ์กับปริมาณเชื้อเพลิง ไพโรไลซิสโซนเป็นส่วนที่มีอากาศน้อยกว่าร้อยละ 20 ของอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ในทางทฤษฎี แก๊สซิฟิเคชันเป็นส่วนที่ใช้อากาศร้อยละ 25-50 ที่ใช้เผาไหม้ทางทฤษฎี และส่วนของการเผาไหม้ใช้อากาศมากกว่า 100 เปอร์เซ็นต์ ขึ้นไป การคาร์บอนไนซ์เป็นขั้นตอนที่สำคัญที่สุดในกระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์เพราะเป็นขั้นตอนเริ่มต้นของโครงสร้างที่เป็นรุพรุน โดยเกิดการสลายตัวของโครงสร้างให้ส่วนที่ระเหยง่าย เช่น ออกซิเจน ไนโตเจน และไฮโดรคาร์บอนเบา ออกมาอยู่ในรูปแก๊ส คาร์บอนอิสระที่มีอยู่ระรวมตัวในรูปของถ่านชาร์ ถ่านชาร์ที่ได้จากคาร์บอนไนซ์มีความสามารถในการดูดซับต่ำทั้งนี้เพราะว่าการทำถ่านชาร์ใช้ที่อุณหภูมิประมาณ 400-500 องศาเซลเซียส ซึ่งยังคงมีน้ำมันทาร์ตกค้างอยู่ภายในช่องว่าง (Pore) หรือเกาะอยู่ตามผิวจึงจำเป็นต้องนำถ่านชาร์นี้ไปผ่านกระบวนการกระตุ้นเพื่อเพิ่มความสามารถในการดูดซับ ดังนั้นการกระตุ้นจึงเป็นเพียงการพัฒนาโครงสร้างให้เป็นไปทางเดียวกับคาร์บอไนซ์

ขั้นตอนของกระบวนการคาร์บอไนเซชันแบ่งได้ชัดเจนเป็น 3 ขั้นคือ [5]

1. การสูญเสียน้ำออกจากโครงสร้างวัตถุดิบที่ช่วงอุณหภูมิ 27- 197 องศาเซลเซียส
2. การไพโรไลซิสโดยเกิดแก๊สและน้ำมันทาร์จากโครงสร้างที่ช่วงอุณหภูมิ 197 –497 องศาเซลเซียส
3. เป็นช่วงที่มีการเกาะตัวกันของโครงสร้างถ่านชาร์ โดยในช่วงนี้น้ำหนักของวัตถุดิบจะลดลงไปมาก ที่ช่วงอุณหภูมิ 497 – 847 องศาเซลเซียส

การคาร์บอไนซ์ให้ได้ถ่านที่มีสมบัติที่ต้องการทำได้โดยการปรับภาวะให้เหมาะสม โดยมีตัวแปรคือ [5]

1. <u>อุณหภูมิ</u>

กระบวนการคาร์บอไนซ์เป็นการกลั่นสลายของสารอินทรีย์เพื่อเพิ่มปริมาณคาร์บอนในสารอินทรีย์ โดยจะเกิดการหักออกตรงบริเวณที่มีพันธะอ่อน หรือมีโมเลกุลที่หลุดออกได้ง่าย ทำให้กลุ่มโมเลกุลที่มีวงแหวนแตกออกจากกันเป็นกลุ่มๆจำนวนมาก โครงสร้างวงแหวนอะโรแมติก หลักที่เหลือเป็นโครงสร้างของถ่านชาร์ ซึ่งการจัดเรียงตัวของคาร์บอนอะตอมจะเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิที่เผา ส่วนโครงสร้างโมเลกุลขนาดเล็กจะกลั่นสลายตัวออกมาเป็นที่ผลิตภัณฑ์ต่างๆที่อุณหภูมิห้อง ได้แก่ น้ำแอมโมเนีย น้ำมันทาร์ และแก๊สต่างๆ

อย่างไรก็ตามสิ่งที่สำคัญของกระบวนการนี้คือ อุณหภูมิสุดท้ายของคาร์บอไนซ์ ซึ่งมีความสัมพันธ์กับพลังงานที่ใช้ในการสลายพันธะเคมีในวัตถุดิบออกมาเป็นสารระเหย ที่อุณหภูมิสูงถ่านชาร์จะมีการจัดระเบียบของโครงสร้างมากกว่า เช่น ถ่านหินเกรดสูงจะหอตัวมากขึ้น เมื่อเพิ่มอุณหภูมิของการคาร์บอไนซ์เป็นผลทำให้ปริมาณของรูพรุนเล็กๆทั้งหมดที่เกิดขึ้นในขั้นแรกของการ

คาร์บอไนซ์ลดลง และเม็ดถ่านหินมีความแข็งแรงมากขึ้น ส่งผลทำให้ความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาลดลง

2. <u>อัตราการให้ความร้อน</u>

เป็นปัจจัยที่สำคัญต่อปริมาณและองค์ประกอบของสารระเหยที่ได้จากการไพโรไลซิส กล่าวคือ ถ้าอัตราการให้ความร้อนสูงปริมาณสารระเหยจะถูกปลดปล่อยอย่างรวดเร็ว ถ่านชาร์ที่ได้จะมีรูพรุนขนาดใหญ่ ความว่องไวในการทำปฏิกิริยาสูงกว่าถ่านชาร์ที่ได้จากการให้ความร้อนด้วยอัตราที่ต่ำกว่าเพราะว่าถ่านชาร์ที่ได้จากคาร์บอไนซ์ด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิสูงคาร์บอนจะเรียงตัวเป็นระเบียบน้อยกว่า ทำให้เกิดช่องว่างเป็นรูพรุนขนาดใหญ่ เมื่อทำการกระตุ้นสารกระตุ้นจะเข้าไปทำปฏิกิริยาได้ง่าย

3. <u>ตัวกลางของปฏิกิริยา</u> ( Medium of reaction )

จะมีผลกระทบต่อปฏิกิริยา ถ้าแก๊สและไอที่เกิดระหว่างการไพโรไลซิสถูกพาออกไปอย่างรวดเร็ว โดยแก๊สที่เป็นตัวกลาง เช่น แก๊สไนโตรเจน (เฉื่อยต่อปฏิกิริยาการเผาไหม้ของคาร์บอน) หรือแก๊สจากการเผาไหม้ ถ้าตัวกลางเป็นแก๊สที่ได้จากการเผาไหม้ ปริมาณถ่านชาร์ที่ได้จะน้อยกว่าตัวกลางที่เป็นแก๊สไนโตรเจน แต่มีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยากับตัวกระตุ้นสูงกว่า เนื่องจากการเผาไหม้มีส่วนช่วยสร้างรูพรุนขนาดใหญ่ขึ้น เมื่อนำไปกระตุ้นมีผลทำให้แก๊สกระตุ้นสามารถแทรกตัวเข้าไปในอนุภาคถ่านชาร์ได้ง่าย โดยทั่วไปการคาร์บอไนซ์จะมีการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ 2 ช่วง คือ ช่วงที่อ่อน (Softening period) และช่วงหลังการอ่อนตัว (After softening period) ในช่วงการอ่อนตัวควรให้ความร้อนด้วยอัตราที่ต่ำเพื่อ ให้แก๊สหลุดออกจากโพรงภายในได้โดยไม่สลายตัวหรือเปลี่ยนรูปเป็นของแข็งอุดแน่นภายในโพรงและถ่านชาร์ที่ได้จะแน่นและแข็งด้วย Bansel and Coworker [6]

4. <u>ธรรมชาติของวัตถุดิบ</u>

วัตถุดิบแต่ละชนิดจะมีภาวะที่เหมาะสมแตกต่างกันในการคาร์บอไนซ์ โดยถ่านกัมมันต์จากวัตถุดิบที่ต่างกันอาจใช้วิธีกระตุ้นที่ต่างกัน เพื่อที่จะได้ถ่านกัมมันต์ที่มีคุณภาพดีที่สุด ซึ่งจะเหมาะกับการนำไปใช้ในระบบที่เหมาะสมต่อไป

จุดมุ่งหมายหลักของกระบวนการคาร์บอไนเซชันก็เพื่อผลิตให้ได้ถ่านที่มีรูพรุน และการจัดเรียงตัวของคาร์บอนอะตอมให้เป็นระเบียบมากกว่าวัตถุดิบ

2.3.2 <u>การกระตุ้น</u>

เป็นการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพสำหรับคาร์บอน ด้วยการเพิ่มพื้นที่ผิวให้มากขึ้นโดยการทำให้มีรูพรุนมากขึ้น หรือเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับสารอื่นๆของถ่านกัมมันต์ ปฏิกิริยาที่เกิดระหว่างการกระตุ้นยังไม่เป็นที่ทราบแน่ชัด เนื่องมาจากวิธีการกระตุ้นนั้นมีมากมาย

สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หลายวิธี และประสิทธิภาพของการกระตุ้นขึ้นกับลักษณะและชนิดของวัตถุดิบรวมถึงวิธีการอื่นๆ ก่อนการกระตุ้นด้วย

โดยทั่วไปแล้วมี 2 วิธีในการผลิตถ่านกัมมันต์คือ [2]

- นำวัตถุดิบหรือวัตถุดิบที่ผ่านการคาร์บอไนซ์แล้ว มากระตุ้นโดยใช้สารกระตุ้นเช่น $ZnCl_2$, $CaCl_2$, $H_3PO_4$ วิธีนี้โดยทั่วไปเรียกว่า “การกระตุ้นทางเคมี”
- นำวัตถุดิบที่ผ่านการคาร์บอไนซ์แล้วมาทำปฏิกิริยากับแก๊สที่ใช้ในการออกซิไดซ์ ซึ่งอาจเป็นไอน้ำ คาร์บอนไดออกไซด์ ออกซิเจน วิธีนี้โดยทั่วไปเรียกว่า “การกระตุ้นทางกายภาพ”

1. <u>การกระตุ้นทางเคมี</u> [2, 7, 8, 9]

เป็นวิธีการหนึ่งที่ใช้กันมากในการผลิตถ่านกัมมันต์ในทางการค้า โดยปกติแล้ววิธีการกระตุ้นแบบนี้มักใช้กับวัตถุดิบที่เป็นไม้ ซึ่งอุณหภูมิที่ใช้ในการกระตุ้นอยู่ในช่วง 500 – 900 องศาเซลเซียส สารกระตุ้นที่ใช้กันทั่วไปในทางอุตสาหกรรม คือ ซิงค์คลอไรด์และกรดฟอสฟอริก การกระตุ้นทางเคมีจะช่วยลดการเกิดทาร์และสารอื่นๆที่เกิดในกระบวนการ ดังนั้นร้อยละของผลิตภัณฑ์ที่ได้จึงค่อนข้างมีปริมาณสูง

ในการผลิตถ่านกัมมันต์ทางการค้าโดยใช้วิธีการกระตุ้นทางเคมี โดยทั่วไปจะใช้ซิงค์คลอไรด์และกรดฟอสฟอริก โดยมีรายละเอียดดังนี้

- <u>การกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์</u>

กระบวนการกระตุ้นทางเคมีโดยใช้ซิงค์คลอไรด์เป็นวิธีที่นิยมมากที่สุดวิธีหนึ่ง โดยใช้สารละลายซิงค์คลอไรด์ผสมกับวัตถุดิบโดยใช้สภาวะที่ อุณหภูมิประมาณ 130 องศาเซลเซียส การใช้อุณหภูมิที่ต่ำในช่วงนี้มีผลอย่างมากต่อสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้ หลังจากนี้จะนำไปทำการคาร์บอไนซ์ที่อุณหภูมิ 600-850 องศาเซลเซียส ซึ่งกระบวนการผลิตในระดับอุตสาหกรรมจะคำนึงถึงประสิทธิภาพในการนำเอาซิงค์คลอไรด์กลับมาใช้ใหม่เป็นอย่างมาก ด้วยประสิทธิภาพการนำซิงค์คลอไรด์กลับมาใช้ใหม่ที่ค่อนข้างจำกัด ประกอบกับปัญหาการกัดกร่อนต่อเครื่องปฏิกรณ์ ทำให้การใช้ซิงค์คลอไรด์เป็นสารกระตุ้นในระยะหลังจึงลดลงบ้าง

- <u>การกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก</u>

กระบวนการกระตุ้นทางเคมีโดยใช้กรดฟอสฟอริกเป็นสารกระตุ้น จะใช้อุณหภูมิในการกระตุ้นที่ค่อนข้างต่ำคือ 400-500 องศาเซลเซียส ซึ่งการใช้กรดฟอสฟอริกนั้นสามารถผ่านกระบวนการนำกลับมาใช้ใหม่โดยยังได้กรดฟอสฟอริกที่มีความเข้มข้นสูง พบว่าวัตถุดิบที่เป็นไม้สามารถผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ที่มีประสิทธิภาพดีโดยวิธีนี้

มีงานวิจัยจำนวนมากได้ศึกษาวิธีการผลิตถ่านกัมมันต์โดยใช้ซิงค์คลอไรด์และกรดฟอสฟอริกเป็นสารกระตุ้น ซึ่งวัตถุดิบที่ได้ทำการศึกษาคือเมล็ดถั่ว เปลือกถั่ว เศษวัสดุเหลือทิ้ง

ทางการเกษตรและไม้ชนิดต่างๆ อย่างไรก็ตามกระบวนการกระตุ้นทางเคมีก็มีหลายกระบวนการที่แตกต่างกัน เพื่อที่จะให้ได้ถ่านกัมมันต์ที่มีประสิทธิภาพในการดูดซับที่ดีขึ้น ซึ่งพบว่าสารกระตุ้นชนิดอื่นๆก็สามารถให้ถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวสูงได้ เช่น โปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ อลูมิเนียมคลอไรด์ หรือ เฟอริกคลอไรด์ ซึ่งเราจะพบว่ามีปัจจัยที่มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของความพรุนของถ่านกัมมันต์ที่ได้คือ

1. อัตราส่วนของลิกนินต่อเซลลูโลสในวัตถุดิบ
2. อัตราส่วนของสารกระตุ้นต่อวัตถุดิบ
3. อุณหภูมิที่ใช้ในการกระตุ้น
4. อัตราการให้ความร้อน

จากการที่ใช้ไม้เป็นวัตถุดิบในการผลิตถ่านกัมมันต์โดยการกระตุ้นทางเคมีนี้คือจะได้สมบัติของถ่านที่มีปริมาตรรูพรุนสูง และความหนาแน่นปรากฏต่ำ (ประมาณ 0.27 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร) โดยส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของถ่านกัมมันต์ผง ซึ่งนำมาใช้งานในการดูดซับสภาวะที่เป็นของเหลว เช่น ระบบการทำน้ำให้บริสุทธิ์ สมบัติที่ดีของไม้และสารชีวมวลที่ใช้เป็นวัตถุดิบคือมีปริมาณเถ้าต่ำ (0.3-1.1%โดยน้ำหนัก) ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณเถ้าในถ่านหินและลิกไนต์จะมีปริมาณสูงกว่า (2-15%โดยน้ำหนัก) และในไม้และสารชีวมวลจะมีปริมาณกำมะถันต่ำด้วย

2. <u>การกระตุ้นทางฟิสิกส์</u> (Physical activation)

เป็นวิธีการเพิ่มปริมาตรรูพรุนและพื้นที่ผิวโดยปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชัน (Gasification) ด้วยแก๊สออกซิไดซ์ที่ช่วงอุณหภูมิ 700-1000 องศาเซลเซียส แก๊สที่ใช้โดยทั่วไปคือ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ไอน้ำ และอากาศ โดยอาจใช้ชนิดใดชนิดหนึ่งหรือรวมแก๊สดังกล่าวก็ได้

ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการคาร์บอไนซ์ยังเป็นตัวดูดซับที่ไม่ดีต้องทำการกระตุ้นให้ได้ถ่านที่มีการดูดซับสูง โดยใช้การกระตุ้นให้ทำปฏิกิริยากับแก๊สที่เป็นตัวออกซิไดซ์ ดังตัวอย่าง [10]

$$H_2O + C_x \longrightarrow H_2 + CO + C_{x-1} \quad \text{(at 800-900 °C)}$$

$$CO_2 + C_x \longrightarrow 2CO + C_{x-1} \quad \text{(at 800-900 °C)}$$

$$O_2 + C_x \longrightarrow 2CO + C_{x-2} \quad \text{(at 800-900 °C)}$$

$$O_2 + C_x \longrightarrow CO_2 + C_{x-1} \quad \text{(below 600 °C)}$$

ปัจจัยที่มีผลต่อลักษณะรูพรุนในขั้นตอนการกระตุ้นคือ [2, 4]

1. โครงสร้างของคาร์บอนหรือถ่านชาร์ที่นำมากระตุ้น
2. สารอนินทรีย์ปนเปื้อนที่อยู่ในเนื้อคาร์บอน
3. ชนิดของแก๊สออกซิไดซ์

4. อุณหภูมิขณะเกิดปฏิกิริยา

5. ความดันของแก๊ส

6. เวลาในการเกิดปฏิกิริยา

7. ขนาดอนุภาคของถ่านชาร์

ในกระบวนการกระตุ้น คาร์บอนทำปฏิกิกริยากับสารออกซิไดซ์เป็นคาร์บอนออกไซด์แพร่ออกจากผิวของคาร์บอน เกิดแก๊สซิฟิเคชันบางส่วนของเม็ดถ่าน เป็นรูพรุนขึ้นในโครงสร้างของถ่าน ถ่านจากการคาร์บอไนซ์ประกอบด้วยรูพรุนเล็กๆจำนวนมากเกิดจากช่องว่างระหว่างผลึกในการจัดเรียงตัวของคาร์บอนอะตอม รูพรุนนี้มักจะถูกบรรจุไว้ด้วยทาร์ที่เกิดจากการสลายตัวด้วยความร้อน และถูกขวางด้วยคาร์บอนอสัณฐาน การกระตุ้นจึงเป็นทั้งการเปิดรูที่ถูกปิด และการสร้างรูใหม่ขึ้นด้วย

ตัวอย่างการกระตุ้นโดยวิธีทางกายภาพ คือ

- <u>การกระตุ้นด้วยไอน้ำ</u> [2,3] ไอน้ำนั้นถือได้ว่าเป็นสารกระตุ้นทางกายภาพที่มีการใช้กันมาก เนื่องจากโมเลกุลของน้ำนั้นมีขนาดเล็กกว่าโมเลกุลของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และในการกระตุ้นด้วยไอน้ำนั้นจะมีข้อดีคือ

1. โมเลกุลของน้ำจะแพร่เข้าไปได้อย่างรวดเร็วในโครงสร้างรูพรุน

2. เนื่องจากโมเลกุลที่เล็กจึงสามารถเข้าไปในรูพรุนขนาดเล็กได้

3. มีการเกิดปฏิกิริยาที่รวดเร็ว ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยาเร็วกว่าแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ถึงสามเท่า ที่สภาวะความดัน 10 กิโลพาสคัลและอุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส

รูปแบบของปฏิกิริยาในการกระตุ้นโดยใช้ไอน้ำคือ

$$C + H_2O = CO + H_2 \qquad \Delta H = +117 \text{ kJ mol}^{-1}$$

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาแบบดูดความร้อน และเป็นปฏิกิริยาที่ซับซ้อน แต่โดยทั่วไปจะสมมุติเป็นปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันของถ่านชาร์ อาจเขียนอัตราการเกิดปฏิริยาเคมี (r) แบบ Langmuir – Hinshellwood ได้ดังนี้

$$r = \frac{k_1 p_{H_2O}}{1 + k_2 p_{H_2O} + k_3 p_{H_2}}$$

ซึ่ง $P_{H2O}$ คือ ความดันย่อยของไอน้ำ

$P_{H2}$ คือ ความดันย่อยของแก๊สไฮโดรเจน

$k_1, k_2, k_3$ คือ ค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยา

อย่างไรก็ตามในปฏิกิริยาของการกระตุ้นด้วยไอน้ำ จะมีการยับยั้งปฏิกิริยาเกิดขึ้นอันเกิดจากจะมีไฮโดรเจนไปเกาะติดบนตำแหน่งว่องไวบนผิวของคาร์บอน ซึ่งจะทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาลดลงได้

- <u>การกระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์</u> [2, 4]

การกระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ มีกลไกในการเกิดคือ

$$C + CO_2 = 2CO \qquad \Delta H = +159 \text{ kJmol}^{-1}$$

ปฏิกิริยาดังกล่าวเป็นปฏิกิริยาแบบดูดความร้อน เช่นเดียวกับไอน้ำ ซึ่งอัตราการปฏิกิริยา

$$r = \frac{k_1 p_{CO_2}}{1 + k_2 p_{CO} + k_3 p_{CO_2}}$$

คือ

ซึ่ง $P_{CO2}$ คือ ความดันย่อยของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

$P_{CO}$ คือ ความดันย่อยของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์

$k_1, k_2, k_3$ คือ ค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยา

ในปฏิกิริยาการกระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ อุณหภูมิที่ใช้อยู่ในช่วง 800 – 900 องศาเซลเซียส ซึ่งกลไกในการเกิดปฏิกิริยานั้นมีการศึกษากันอย่างมากมาย ในปฏิกิริยานี้มีการยับยั้งปฏิกิริยาอันเกิดจาก คาร์บอนมอนอกไซด์และไฮโดรเจน โดยคาร์บอนมอนอกไซด์จะเกิดจากปฏิกิริยาย้อนกลับของปฏิกิริยา

$$C(O) + CO = C + CO_2$$

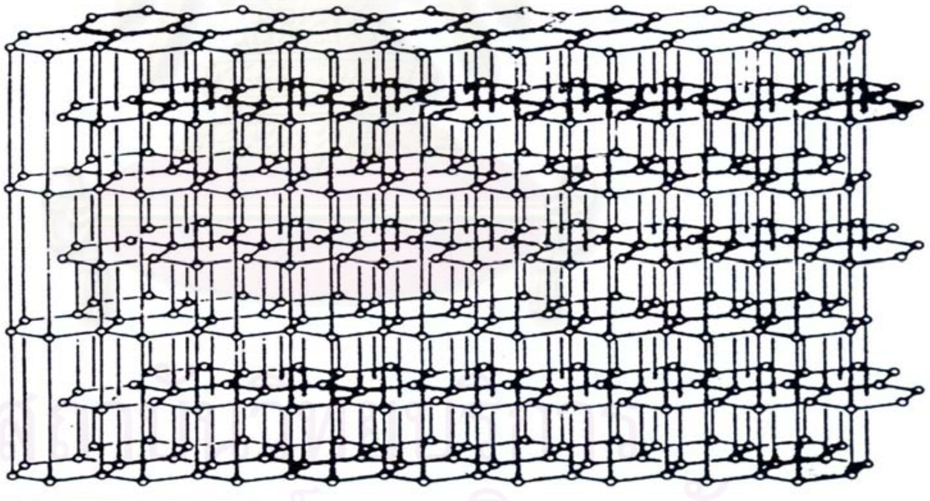
Rand and Marsh [4] ได้กล่าวว่าการเกิดขึ้นของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์นั้นจะมีผลดีคือจะมีการกระตุ้นที่ให้รูพรุนขนาดเล็กที่ดี แต่ในขณะเดียวกันอัตราการเกิดปฏิกิริยาจะลดลง จากการทดลองโดยทั่วไปจะพบว่า การกระตุ้นโดยใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ จะต้องใช้อุณหภูมิในการกระตุ้นสูงกว่าการกระตุ้นโดยใช้ไอน้ำ แต่โดยทั่วไปมักจะใช้แก๊สผสมระหว่าง แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ร่วมกับไอน้ำ

กระบวนการกระตุ้นในทางกายภาพนั้น อาจมีกระบวนการผลิตที่ต่างกันไปขึ้นกับลักษณะของวัตถุดิบ ตัวอย่างเช่นการผลิตถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าว ไม่จำเป็นต้องผ่านกระบวนการ

อัดก้อนหรือกระบวนการปล่อยให้สารระเหยออกจากวัตถุดิบนั้น ในบางกระบวนการอาจมีขั้นตอนการนำวัตถุดิบล้างด้วยกรดก่อนเพื่อที่จะให้ได้ถ่านกัมมันต์ที่มีปริมาณเถ้าต่ำ

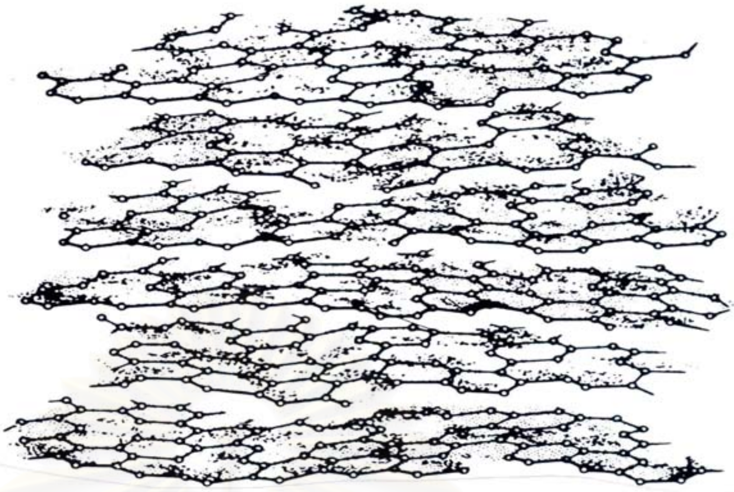
## 2.4 โครงสร้างรูพรุนของถ่านกัมมันต์ [10, 11]

ถ่านกัมมันต์ มีโครงสร้างเป็นกลุ่มของคาร์บอนซึ่งมีลักษณะคล้ายกราไฟต์ (Graphite) แต่แตกต่างกันที่พื้นที่ผิวภายในของถ่านกัมมันต์ซึ่งมีมากมาย กราไฟต์ประกอบด้วยแผ่นชั้นที่เกิดจากอะตอมของคาร์บอนซึ่งเรียงตัวกันแบบหกเหลี่ยมด้านเท่า (Regular Hexagons) ระยะห่างระหว่างอะตอมของคาร์บอนในแต่ละชั้นมีขนาด 3.35 อังสตรอม มี 3 อิเล็คตรอนของคาร์บอนจะสร้างพันธะโควาเลนต์ (Covalent Bond) กับอะตอมที่ติดกัน ขณะที่อิเล็คตรอนอีก 1 ตัวที่เหลือจะเคลื่อนที่ระหว่างโครงสร้างวาเลนซ์ ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของกราไฟต์ [8]

โครงสร้างของถ่านกัมมันต์แตกต่างจากกราไฟต์ ซึ่งจะมีโครงสร้างเป็นผลึกที่เล็กมาก (Microcrystallites) ประกอบด้วยวงหกเหลี่ยมด้านเท่าของอะตอมคาร์บอนผสมกัน เส้นผ่านศูนย์กลางของชั้นคาร์บอนที่สร้างผลึกเล็กๆมีขนาดประมาณ 150 อังสตรอม และระยะห่างระหว่างผลึกเล็กๆนี้มีค่าอยู่ระหว่าง 20-50 อังสตรอม ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 โครงสร้างของถ่านกัมมันต์ [8]

- ความพรุน ( Porosity ) [2]

โดยปกติแล้วถ่านกัมมันต์โดยทั่วไปมีปริมาตรความพรุนอยู่ระหว่าง 0.5-1.5 ml/g จากลักษณะและขนาดของรูพรุน สามารถแบ่งรูพรุนได้เป็น 3 ขนาด

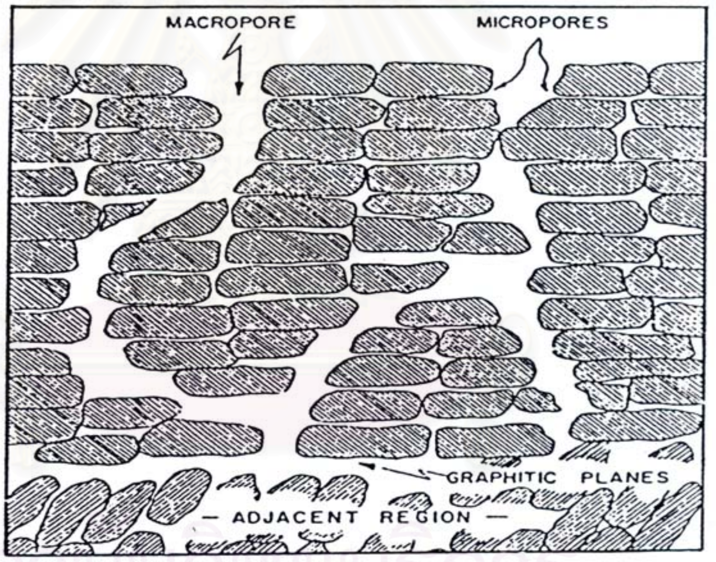
ก. รูพรุนขนาดใหญ่ (Macropores) ขนาดของรูพรุนขนาดใหญ่ที่พบในถ่านกัมมันต์ มีค่าอยู่ระหว่าง 5,000-20,000 อังสตรอม ปริมาตรความพรุนมีค่าอยู่ระหว่าง 0.2-0.8 ml/g เมื่อเปรียบเทียบกับรูพรุนประเภทอื่นแล้ว รูพรุนขนาดใหญ่มีพื้นผิวจำเพาะน้อยมาก ดังนั้นรูพรุนประเภทนี้จึงไม่มีความสำคัญต่อการดูดซับ เพียงแต่ทำหน้าที่เป็นทางส่งผ่านอนุภาคเข้าไปในรูที่เล็กกว่า

ข. รูพรุนขนาดกลาง ( Transitional Pores ) มีรัศมีอยู่ระหว่าง 20-1,000 อังสตรอม มีปริมาตรความพรุนอยู่ระหว่าง 0.02-0.1 ml/g มีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 5 เปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ผิวจำเพาะทั้งหมด ตัวอย่างสารดูดซับที่มีรูพรุนขนาดกลาง ได้แก่ ซิลิกาเจล (Silica gel) อะลูมินาเจล (Alumina gel) และ อะมิโมซิลิเกตคะตะลิส (Amino silicate catalyst)

ค. รูพรุนขนาดเล็ก (Micropores) มีรัศมีน้อยกว่า 20 อังสตรอม ซึ่งมีค่าเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 6-8 อังสตรอม ปริมาตรความพรุนมีอยู่ระหว่าง 0.15-0.5 ml/g และมีพื้นที่ผิวจำเพาะอย่างน้อยที่สุด 95 เปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ผิวจำเพาะทั้งหมด พลังงานในการดูดซับของรูพรุนขนาดเล็กมีมากกว่ารูพรุนในขนาดกลาง หรือพื้นผิวที่ไม่มีรูพรุน ดังนั้นรูพรุนขนาดเล็กจึงมีความสำคัญใน

การดูดซับ เนื่องจากมีพื้นที่ในการดูดซับและพลังงานดูดซับ (Adsorption energy) มากที่สุด ทำให้การดูดซับเพิ่มขึ้นมากที่ความกดดันต่ำๆ รูพรุนขนาดเล็กมีความสัมพันธ์กับพื้นที่ผิวจำเพาะ เชื่อกันว่าปริมาณของรูพรุนแต่ละขนาดหรือที่เรียกกันว่า การกระจายขนาดของรูพรุน จะขึ้นกับชนิดของวัตถุดิบและวิธีการกระตุ้น

รูพรุนส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นในช่วงการออกซิไดซ์ ซึ่งเป็นการกำจัดสารอินทรีย์ต่างๆ ออกจากช่องว่างของถ่านชาร์ที่ใช้เป็นวัตถุดิบเริ่มต้น รวมทั้งเกิดการจัดเรียงและเคลื่อนย้ายอะตอมหรือกลุ่มอะตอมเพื่อให้เกิดช่องว่างที่มีอำนาจในการดูดซับ รูพรุนที่มีขนาดใหญ่จะทำหน้าที่เป็นเพียงทางผ่านของสารดูดซับเข้าไปยังรูพรุนขนาดเล็ก Redriguez-Reinoso [9] จึงไม่มีผลต่อการดูดซับ แต่จะมีผลต่ออัตราเร็วในการดูดซับ ส่วนรูพรุนขนาดกลางนั้นมีผลต่อการดูดซับโมเลกุลของของเหลวได้บ้าง รูพรุนขนาดเล็กมีหน้าที่ในการดูดซับ จึงมีผลต่อความจุในการดูดซับโดยเฉพาะการดูดซับที่ความดันสัมพัทธ์ต่ำ




รูปที่ 2.3 รูปแสดงลักษณะของรูพรุนในถ่านกัมมันต์ [8]

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ในรูปที่ 2.3 แสดงลักษณะของรูพรุนในถ่านกัมมันต์ดังที่ได้กล่าวมาข้างต้น รูพรุนขนาดใหญ่จะเป็นรอยแตกที่ผิวของคาร์บอน รูพรุนขนาดกลางจะแตกสาขาออกมาจากรูพรุนขนาดใหญ่ และรูพรุนขนาดเล็ก ก็จะแตกสาขาออกมาจากรูพรุนขนาดกลาง

## 2.5 การศึกษาการดูดซับที่เกี่ยวกับเคมีพื้นผิว ( Surface Chemistry ) [11, 12]

ความจุของการดูดซับของถ่านกัมมันต์ ( Adsorption Capacity ) จะขึ้นกับ

- พื้นที่ผิวทั้งหมด ( Total surface area )
- โครงสร้างรูพรุนในเนื้อถ่าน
- การมีฟังก์ชันนัลกรุ๊ป (Functional group) ต่างๆบนผิวรูพรุนของถ่าน

ขนาดรูพรุนบริเวณผิวจะเป็นสิ่งหนึ่งที่กำหนดความจุในการดูดซับ โดยโครงสร้างทางเคมีที่ผิวถ่านกัมมันต์ จะมีผลต่อสารที่ถูกดูดซับในกรณีที่สารนั้นมีขั้วหรือไม่มีขั้ว นอกจากนั้นตำแหน่งที่ว่องไวบริเวณผิวถ่านกัมมันต์จะเป็นสิ่งกำหนดชนิดของปฏิกิริยาเคมีที่ผิวถ่านกับโมเลกุลอื่น

ดังนั้นในการดูดซับของถ่านกัมมันต์ จึงไม่ได้ขึ้นกับพื้นที่ผิวอย่างเดียว ซึ่งถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวเท่ากันแต่ได้จากการเตรียมที่มีวิธีต่างกัน อาจจะเป็นวิธีการกระตุ้นที่ต่างกันก็จะให้ลักษณะการดูดซับ ( Adsorption characteristics ) ที่ต่างกัน ดังนั้นถ่านกัมมันต์ที่ดีจึงควรมีพื้นที่ผิวมาก และมีขนาดรูพรุนที่เหมาะสมกับสปีชีย์ (Species) ที่ถูกดูดซับ

ที่บริเวณผิวของถ่านกัมมันต์ จะมีผลึกคาร์บอนอยู่ที่บริเวณผิวและขอบของผลึกคาร์บอนโดยจะมีตำแหน่งวาเลนซ์ที่เหลืออยู่จึงทำให้บริเวณดังกล่าวเป็นตำแหน่งที่ว่องไว จะเห็นได้จากการดูดซับทางเคมีที่บริเวณผิวถ่าน ธาตุที่ถูกดูดซับเข้ามาอาจเป็น ออกซิเจน ไนโตรเจน ไฮโดรเจน คลอรีน โบรมีน ไอโอดีน และซัลเฟอร์ ซึ่งเป็นการดูดซับแบบซับซ้อนที่บริเวณผิวจึงไม่สามารถเขียนกลไกการดูดซับออกมาในรูปแบบของสมการเคมีได้

เมื่อพิจารณาหมู่ฟังก์ชันนัลที่บริเวณผิวของถ่านกัมมันต์ พบว่าหมู่ฟังก์ชันนัลที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบ มีความสำคัญมากที่สุด เมื่อตรวจสอบที่บริเวณผิวของคาร์บอนโดยใช้เอ็กซ์เรย์ อะตอมของออกซิเจนจะสร้างพันธะกับอะตอมของคาร์บอน ซึ่งจะมีเป็นจำนวนมากที่บริเวณขอบ ของโมเลกุลคาร์บอนที่เกาะตัวเป็นอะโรมาติก โดยพันธะระหว่างออกซิเจนและไฮโดรเจน จะมีอิทธิพลมากที่สุดต่อลักษณะพื้นผิวถ่านกัมมันต์ เช่น ความเป็นกรดที่บริเวณผิว การแลกเปลี่ยนไอออนบวก รวมถึงการดูดซับแก๊สและไอที่มีขั้วและไม่มีขั้ว

การที่จะให้เกิดหมู่ฟังก์ชันนัลที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบที่บริเวณผิวถ่านกัมมันต์ ทำได้โดยการออกซิไดซ์ถ่านกัมมันต์ ซึ่งทำได้ทั้งในภาวะแก๊สและภาวะของเหลว จากวิธีการดังกล่าวจะทำให้พื้นที่ผิวถ่านกัมมันต์เป็นได้ทั้ง กรด เบส และเป็นกลาง ตัวอย่างของพื้นผิวที่เป็นกรดเช่น

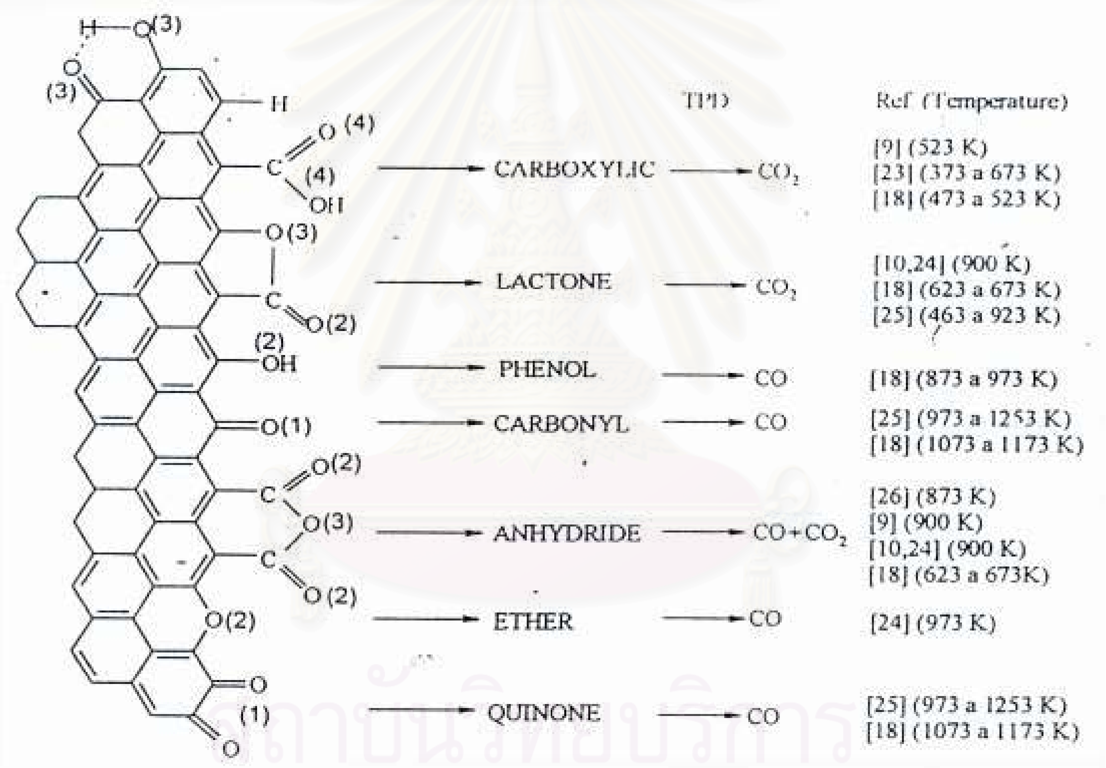
คาร์บอกซิล ฟีโนลิก ไฮดรอกซิล แล็คโทน และควิโนน ซึ่งจะได้แบบใดนั้นขึ้นอยู่กับวิธีการออกซิไดซ์

พบว่าเมื่อมีหมู่ที่แสดงความเป็นกรดที่บริเวณผิวของถ่านกัมมันต์ จะทำให้มีสมบัติในการชอบดูดน้ำมากขึ้น ( Hydrophilic ) และจะมีผลต่อพื้นที่ผิว และลักษณะต่างๆของถ่านกัมมันต์ จากการมีหมู่ฟังก์ชันเหล่านี้จึงมีบทบาทที่สำคัญต่อสมบัติของถ่านกัมมันต์

เทคนิคต่างๆในการหาลักษณะของหมู่ฟังก์ชันนัลต่างๆบนผิวของถ่านกัมมันต์ที่ใช้กันโดยทั่วไปเช่น

- Chemical titration method เป็นเทคนิคที่ใช้ร่วมกับเทคนิคแบบอื่น แต่ไม่สามารถใช้ได้เมื่อตัวอย่างมีปริมาณน้อย และถ้ามีหมู่ที่มีออกซิเจนในปริมาณมากก็ไม่สามารถให้ค่าที่ถูกต้องได้

- XPS เป็นเทคนิคที่จะสามารถบอกองค์ประกอบทางเคมีที่ผิวได้




รูปที่ 2.4 แสดงกลุ่มฟังก์ชันต่างๆที่ผิวคาร์บอน และอุณหภูมิต่างๆที่สลายตัวโดย TPD [12]

- Infra - red spectroscopic เป็นวิธีที่ใช้ในกรณีที่ถ่านมีหมู่ออกซิเจนมาก ไม่เช่นนั้นจะไม่สามารถตรวจสอบได้

- Temperature – programmed methods เป็นเทคนิคที่ได้รับความนิยมมากในปัจจุบัน โดยจะหาหมู่ฟังก์ชันได้จากการหลุดออกมาของ CO, $CO_2$ เมื่อให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่างๆ โดยงานวิจัยต่างๆบางครั้งจะมีผลไม่สอดคล้องกันทำให้ค่อนข้างสับสน

จากรูปที่ 2.4 จะได้พีคของ $CO_2$ จากกรดคาร์บอกซิลิกที่อุณหภูมิต่ำ และหมู่แลคโทนที่อุณหภูมิสูงขึ้น หมู่คาร์บอกซิลิกแอนไฮไดร์ ได้จากพีคทั้ง CO และ $CO_2$ โดยหมู่ฟีนอล อีเทอร์ และคาร์บอนิล ได้จากพีคของ CO

ในปัจจุบัน ถ่านกัมมันต์จะมีเทคนิคต่างๆในการผลิตที่ต่างกัน เพื่อให้ได้ถ่านกัมมันต์ที่มีสมบัติต่างกัน โดยเทคนิคที่ใช้ต่างๆในการผลิตพยายามที่จะหาหมู่ฟังก์ชันบนผิวถ่านกัมมันต์

## 2.6 ถ่านกัมมันต์ในทางการค้า [1, 2, 7]

ถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในทางการค้าแบ่งออกได้เป็น 2 รูปแบบคือ

1. ถ่านกัมมันต์ชนิดผง (Powdered Activated Carbon)
2. ถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ด (Granular Activated Carbon)

รายละเอียดของถ่านกัมมันต์ทั้งสองชนิดคือ

1. <u>ถ่านกัมมันต์ชนิดผง</u> (Powdered Activated Carbon)

ถ่านกัมมันต์ชนิดผงที่ใช้โดยทั่วไปผลิตจากขี้เลื่อยที่ได้จากไม้ ซึ่งมีขนาดโดยเฉลี่ยของอนุภาคในช่วง 15 – 25 ไมโครเมตร โดยอาจมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของลักษณะทางเรขาคณิตประมาณ 0.15 – 0.266 โดยในการออกแบบระบบการดูดซับจะคำนึงถึง

- การเลือกลักษณะของหอดูดซับ
- ลักษณะการผสมเม็ดถ่านกัมมันต์ผงกับของเหลว
- ลักษณะการแยกของถ่านกัมมันต์ผงหลังจากที่ดูดซับแล้ว
- วิธีในการนำกลับมาใช้ใหม่

ในทางอุตสาหกรรมถ่านกัมมันต์ผง โดยส่วนใหญ่จะนำไปใช้ในการกำจัดสีในกระบวนการผลิตอาหารเช่น ใช้ในการผลิตน้ำตาล ผลิตน้ำมัน ผลิตโซเดียมกลูตาเมต และผลิตไวน์

ในภาวะปัจจุบันมีการนำถ่านกัมมันต์ชนิดผงมาใช้กันอย่างมาก ใช้ในการบำบัดน้ำ ทั้งในการผลิตน้ำดื่มและการบำบัดน้ำเสีย

การใช้ถ่านกัมมันต์ชนิดผงในระบบของเหลวที่มีน้ำเป็นส่วนประกอบ จะพิจารณาถึงประจุที่ผิวของถ่านกัมมันต์ผงเป็นสิ่งสำคัญ เนื่องจากประจุที่ผิวจะมีผลต่อขั้นตอนการตกตะกอน ขั้นตอนการกรอง ในการแยกถ่านกัมมันต์ผงออกจากของเหลวหลังจากที่ได้ทำการดูดซับแล้ว โดยขั้นตอนที่นำถ่านกัมมันต์ผงกลับมาใช้ใหม่นั้นค่อนข้างทำได้ยาก จึงเป็นเหตุผลที่ทำให้ทิ้งถ่านกัมมันต์ผงมากกว่าที่จะผ่านกระบวนการนำกลับมาใช้ใหม่

2. <u>ถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ด</u> (Granular Activated Carbon)

ถ่านกัมมันต์เม็ดที่ใช้กันทั่วไปนั้นมีหลายขนาด โดยขึ้นกับการนำไปประยุกต์ใช้งาน ในการดูดซับระบบที่เป็นแก๊สมักใช้ถ่านกัมมันต์รูปทรงกระบอกขนาด 4 – 6 มิลลิเมตร ซึ่งการใช้ในระบบที่เป็นแก๊สนั้นคือระบบการนำตัวทำละลายกลับมาใช้ใหม่ (Solvent recovery) การทำอากาศให้บริสุทธิ์ การทำแก๊สให้บริสุทธิ์ การกำจัดกำมะถันออกจากแก๊ส และใช้ในการแยกระบบแก๊สอื่นๆ

ในระบบที่เป็นของเหลวนั้นมีการใช้ถ่านกัมมันต์เม็ดมากเช่นกันเนื่องจาก

- จัดการระบบได้ง่าย
- ในเครื่องปฏิกรณ์มีความดันลดต่ำ
- ทำการล้างเม็ดถ่านได้ง่าย

ซึ่งในสภาวะของเหลวนิยมใช้ถ่านกัมมันต์เม็ดในการกำจัดสี การผลิตน้ำตาล กำจัดสารอินทรีย์ กำจัดกลิ่นและสิ่งเจือปนในระบบการผลิตน้ำดื่ม และใช้กันอย่างมากที่สุดในการบำบัดน้ำเสีย

ถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ดมีการใช้งานมากกว่าถ่านกัมมันต์ชนิดผงเนื่องจากสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ โดยนำถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ดที่ใช้แล้วผ่านกระบวนการทางความร้อน หรือกระบวนการนำกลับมาใช้ใหม่แบบอื่นๆซึ่งสามารถทำได้ง่ายกว่าถ่านกัมมันต์ชนิดผง

มีการผลิตถ่านกัมมันต์ทุกแบบทั่วโลกประมาณปีละ 300,000 – 400,000 ตัน มีถ่านกัมมันต์ชนิดผงประมาณ 55 เปอร์เซ็นต์ ถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ดประมาณ 35 เปอร์เซ็นต์ โดยที่เหลือจะเป็นถ่านกัมมันต์ในรูปแบบอื่น ซึ่ง 80 เปอร์เซ็นต์ของถ่านกัมมันต์ทั้งหมดใช้กับระบบที่เป็นของเหลว และอีก 20 เปอร์เซ็นต์ใช้ในระบบที่เป็นแก๊ส ซึ่งประเทศที่มีการใช้กันมากที่สุดคือ ญี่ปุ่นและสหรัฐอเมริกา โดยมีอัตราการใช้ถ่านกัมมันต์เพิ่มขึ้นปีละประมาณ 7 เปอร์เซ็นต์ [25]

พบว่าใช้มากในระบบการทำอากาศให้บริสุทธิ์ การทำตัวทำละลายให้บริสุทธิ์ และกระบวนการบำบัดน้ำ และมีการใช้ในระบบใหม่ๆซึ่งเกี่ยวกับระบบการป้องกันมลภาวะจากสิ่งแวดล้อม ซึ่งระบบใช้ถ่านกัมมันต์ส่วนใหญ่ มีดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 การนำถ่านกัมมันต์ไปประยุกต์ใช้ในระบบต่างๆ [1]

| | |
|---|---|
| <u>ระบบที่เป็นของเหลว</u> | |
| Decolorization | Industrial water treatment |
| Potable water reatment | Metals recovery (Gold) |
| Groundwater treatment | Chemicals and pharmaceutical purification |
| <u>ระบบที่เป็นแก๊ส</u> | |
| Solvent recovery | Military : respiratory and suiting |
| Dechlorination | Gas purification |
| General air conditioning | Cigarette filters |
| Air purification | Cataysis |

ถ่านกัมมันต์เม็ดใช้กันมากในระบบปฏิบัติการที่เป็นเบดนิ่ง เช่นระบบการนำสารละลายกลับมาใช้ใหม่ หรือระบบการบำบัดน้ำ ซึ่งความดันลดในเบดสามารถควบคุมโดยการปรับการกระจายของอนุภาค ประกอบกับถ่านกัมมันต์เม็ดสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ โดยผ่านกระบวนการนำกลับมาใช้ใหม่ได้ง่ายจึงมีการใช้กันมาก ราคาขายถ่านกัมมันต์เม็ดโดยประมาณ คือ 1,500 – 4,000 ดอลลาร์ต่อตัน (ราคาในปี พ.ศ.2539) สำหรับถ่านกัมมันต์ผงราคาโดยประมาณคือ 500 – 1200 ดอลลาร์ต่อตัน (ราคาในปี พ.ศ.2539) ซึ่งราคาขายอาจเปลี่ยนแปลงได้ตามพื้นที่ผิว ความแข็ง และความทนทานต่อการขัดสีของถ่านกัมมันต์

อย่างไรก็ตามถ่านกัมมันต์เป็นวัสดุที่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ ดังนั้นในตลาดการผลิตถ่านกัมมันต์เม็ด อาจได้รับผลจากการที่ในอุตสาหกรรมบางส่วนได้ใช้ถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการผ่านกระบวนการนำกลับมาใช้ใหม่ ในการพิจารณาถึงการที่จะนำถ่านกัมมันต์กลับมาใช้ใหม่นั้นจะคำนึงถึง ค่าใช้จ่าย ปริมาณของถ่านกัมมันต์ ชนิดของตัวถูกดูดซับ และเกณฑ์ที่บังคับด้านสิ่งแวดล้อม ซึ่งถ่านกัมมันต์ที่ใช้จากกระบวนการผลิตน้ำดื่มและกระบวนการบำบัดน้ำเสีย มักจะนำถ่านกัมมันต์นั้นมาทำการบำบัดที่อุณหภูมิสูง ซึ่งอาจทำในเตาเผาแบบหมุน ในขณะที่ผ่านกระบวนการบำบัดเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ ถ่านกัมมันต์จะสูญเสียประสิทธิภาพไป 1 – 15 เปอร์เซ็นต์ อย่างไรก็ตามเราสามารถเพิ่มประสิทธิภาพระบบให้เท่าเดิมโดยการนำถ่านกัมมันต์ใหม่เข้ามาใส่เพิ่มเติมในระบบ ซึ่งรูปแบบการนำถ่านกัมมันต์กลับมาใช้ใหม่เป็นที่นิยมมากในอุตสาหกรรมเนื่องจากเสียค่าใช้จ่ายถูกกว่าที่จะซื้อถ่านกัมมันต์ใหม่ ตัวอย่างเช่นการนำถ่านกัมมันต์ที่ใช้แล้วมาทำการบำบัดโดยใช้เตาเผาแบบฟลูอิไดซ์เบด จะเสียค่าใช้จ่ายเพียง 35 เปอร์เซ็นต์ ของค่าใช้จ่ายที่จะซื้อถ่านกัมมันต์ใหม่ แต่ถ่านกัมมันต์แบบผงใช้ในปริมาณน้อยจึงมักนำถ่านกัมมันต์

แบบผงที่ใช้แล้วนำไปกำจัดทิ้งโดยการฝังกลบ (Landfill) อย่างไรก็ตามการฝังกลบก็มีข้อจำกัดด้านสิ่งแวดล้อม ดังนั้นปัจจุบันจึงมีงานวิจัยที่หาวิธีการบำบัดถ่านกัมมันต์แบบผง

## 2.7 การวิเคราะห์สมบัติของถ่านกัมมันต์

การวิเคราะห์หาสมบัติของถ่านกัมมันต์นั้นสามารถพิจารณาได้จากหลายสมบัติคือ พื้นที่ผิว สมบัติทางกายภาพ เช่น ค่าความหนาแน่นปรากฏ (Bulk density) สมบัติในการดูดซับเช่น การดูดซับไอโอดีน การดูดซับเมทิลีนบลู และสมบัติด้านเคมีฟิสิกส์ เช่น ปริมาณสารระเหย ปริมาณความชื้น และปริมาณเถ้า

2.7.1 <u>สมบัติในการดูดซับ</u> [2]

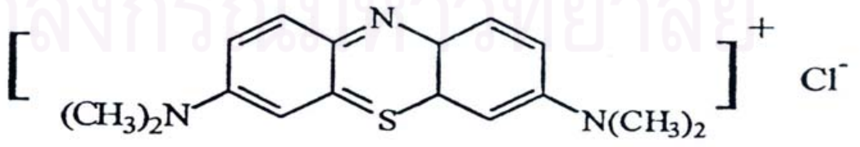
สมบัติในการดูดซับของถ่านกัมมันต์หาได้จากไอโซเทอมของการดูดซับของถ่านกัมมันต์เมื่อนำไปดูดซับของเหลว ตัวอย่างของสมบัติในการดูดซับคือ

- <u>การดูดซับไอโอดีน</u>

การศึกษาการดูดซับไอโอดีนเป็นวิธีที่ง่ายในการหาพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ โดยเป็นการหาจำนวนมิลลิกรัมของสารละลายไอโอดีนที่ถูกดูดซับ โดยใช้ถ่านกัมมันต์ 1 กรัมที่จุดซึ่งความเข้มข้นของสารละลายไอโอดีนที่เหลือเท่ากับ 0.02 นอร์มัล ซึ่งอาจมีค่าแตกต่างจาก 0.02 นอร์มัลได้โดยให้อยู่ในช่วง 0.007 – 0.03 นอร์มัล ในบางครั้งถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวรูพรุนขนาดเล็กสูง ค่าไอโอดีนอาจมีค่าต่ำ เนื่องจากโมเลกุลของไอโอดีนไม่สามารถเข้าไปสู่รูพรุนที่มีขนาดเล็กกว่า 1 นาโนเมตรได้

- <u>การดูดซับเมทิลีนบลู</u>

ค่าการดูดซับเมทิลีนบลูจะสามารถบอกค่าการดูดซับของถ่านกัมมันต์ได้สำหรับโมเลกุลที่ถูกดูดซับมีขนาดใกล้เคียงกับโมเลกุลของเมทิลีนบลู ซึ่งจะมีค่าอยู่ในช่วงของรูพรุนขนาดกลางคือจะมีขนาดใหญ่กว่า 1.5 นาโนเมตร โดยโครงสร้างของโมเลกุลเมทิลีนบลูแสดงดังรูปที่ 2.5




รูปที่ 2.5 โครงสร้างทางเคมีของเมทิลีนบลู [2]

2.7.2 สมบัติด้านเคมีฟิสิกส์

เป็นวิธีการตามแบบ Jankowska [2]

- ปริมาณสารระเหย

เป็นค่ามาตรฐานที่ใช้กำหนดค่าสารระเหยที่อยู่ในถ่านหินและโค้ก โดยนำมาประยุกต์ใช้กับถ่านกัมมันต์ได้ ทำการทดสอบได้โดยนำตัวอย่างมาบดให้มีขนาดเล็กกว่า 0.1 นาโนเมตร จากนั้นนำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 950±25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 นาที ±10 วินาที ค่าของปริมาณสารระเหยจะเป็นมวลที่หายไปอันเกิดจากการให้ความร้อนที่ภาวะดังกล่าวแก่ถ่านกัมมันต์

- ปริมาณความชื้น

เป็นการหาปริมาณน้ำที่มีในถ่านกัมมันต์ โดยการอบให้แห้งในเตาอบ ทำการวิเคราะห์โดยบดถ่านกัมมันต์ชนิดผงปริมาณ 1- 2 กรัม หรือชนิดเม็ด 5 – 10 กรัม นำไปทำการอบแห้งที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส จนกว่าน้ำหนักจะคงที่(ประมาณ 3 ชั่วโมง) สามารถคำนวณปริมาณความชื้นได้จากน้ำหนักที่หายไป

- ปริมาณเถ้า

ปริมาณเถ้าในถ่านกัมมันต์อาจมีค่าแตกต่างกันตามชนิดของวัตถุดิบ ถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นที่อุณหภูมิสูงและเวลาสูงปริมาณเถ้าของถ่านกัมมันต์ก็จะเพิ่มขึ้นด้วย เถ้าโดยส่วนใหญ่ประกอบด้วยออกไซด์ นอกจากนั้นจะเป็นสารประกอบพวกซัลเฟต คาร์บอเนต และสารประกอบอื่นๆของเหล็ก อะลูมิเนียม แคลเซียม โซเดียม โปแตสเซียม แมกนีเซียม และโลหะอื่นๆ ซึ่งจะมี สารประกอบเหล่านี้อยู่ในปริมาณเท่าใดนั้นขึ้นกับชนิดของวัตถุดิบ โดยส่วนใหญ่แล้วมักจะประกอบด้วย ซิลิกอน ซึ่งวิธีการที่จะใช้ในการกำจัดเถ้าออกจากถ่านกัมมันต์นั้นจะใช้กรด หากมีเถ้าที่มีองค์ประกอบที่ซับซ้อนมากจะใช้กรดที่ผสมกัน เช่นใช้กรดที่ผสมกันระหว่างกรดไฮโดรฟลูโอริกและกรดไฮโดรคลอริก การหาปริมาณเถ้าสามารถทำโดยนำตัวอย่างใส่ในครูซิเบิล และนำใส่ในเตาเผาที่อุณหภูมิ 650±25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 – 16 ชั่วโมง ซึ่งมวลของเถ้าจะคงที่ที่เวลาเท่าใดนั้นจะขึ้นกับชนิดของวัตถุดิบ

2.7.3 พื้นที่ผิว (Surface area) [4, 13, 14, 15, 16]

ในการวัดพื้นที่ผิวจะต้องใช้ไอโซเทอม (Isotherm) ของการดูดซับ ซึ่งไอโซเทอมนี้จะมีรูปแบบตามธรรมชาติของตัวดูดซับที่เป็นของแข็ง ซึ่งจะทำการทดลองที่อุณหภูมิคงที่ ที่ความดันย่อยต่างๆเพื่อสร้างไอโซเทอมของการดูดซับ จากไอโซเทอมของการดูดซับข้อมูลที่ได้คือ

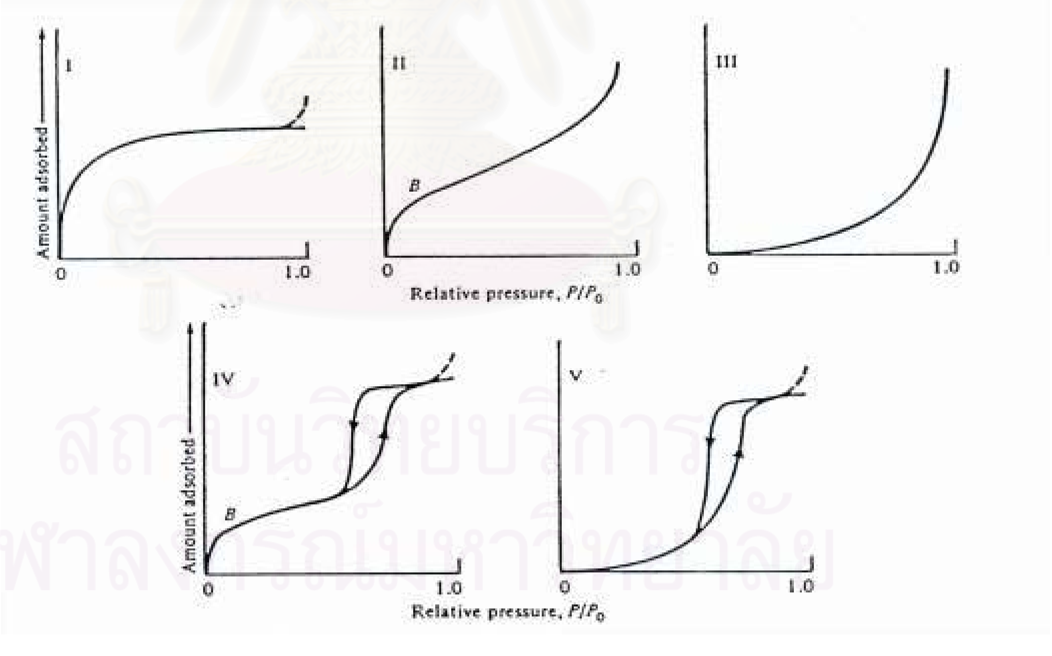
- ค่าของพื้นที่ผิว
- ค่าของปริมาตรรูพรุน
- ลักษณะเคมีพื้นผิว (Surface chemistry) ของตัวดูดซับ
- ข้อมูลพื้นฐานของการดูดซับ

- ประสิทธิภาพของตัวดูดซับที่ใช้ในระบบการแยกหรือการทำให้บริสุทธิ์

ไอโซเทอมของการดูดซับทางกายภาพ ทั้งหมดสามารถแบ่งออกได้เป็น 5 กลุ่ม โดยในตอนแรกเสนอโดย Brunauer, Deming, and Teller (BDDT) ในปัจจุบันการแบ่งกลุ่มได้ถูกเรียกว่า Brunauer, Emmett and Tellet (BET) classification ในทุกกรณีเมื่อค่าความดันย่อยมีค่าเพิ่มขึ้น ปริมาณการดูดซับก็จะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วยจนการดูดซับเป็นแบบชั้นเดียว หลังจากนั้นจะเพิ่มขึ้นเป็นแบบหลายชั้น รูปของชนิดไอโซเทอมแสดงที่รูป 2.8

- ไอโซเทอมชนิดที่ 1

เป็นการดูดซับของของแข็งที่มีลักษณะรูพรุนขนาดเล็กและการดูดซับส่วนใหญ่จะเป็นการดูดซับในรูพรุนขนาดเล็ก พื้นที่ผิวภายนอก (External surface area) จะต่ำ ที่ความดันย่อยต่ำ ($< 0.1$ $p/p_o$) ก็จะสามารถดูดซับได้มากแล้ว ซึ่งการดูดซับจะเสร็จสมบูรณ์ที่ความดันย่อยประมาณ 0.5 $p/p_o$ ตัวอย่างการดูดซับของไอโซเทอมแบบที่ 1 คือ การดูดซับของไนโตรเจนบนถ่านที่มีรูพรุนขนาดเล็กที่ อุณหภูมิ 77 องศาเคลวิน การดูดซับของแอมโมเนียบนผิวถ่านชาร์ที่อุณหภูมิ 273 องศาเคลวิน และการดูดซับบนซีโอไลต์




รูปที่ 2.6 แสดงไอโซเทอมของการดูดซับทั้ง 5 ชนิด [16]

- ไอโซเทอมชนิดที่ 2

บางครั้งอาจเรียกว่าไอโซเทอมที่มีรูปแบบซิกมอยด์ หรือแบบเอส (Sigmoid or S-shaped) เป็นรูปแบบไอโซเทอมการดูดซับของตัวดูดซับที่ไม่มีรูพรุนหรือตัวดูดซับที่มีรูพรุนขนาดใหญ่ ซึ่งอาจเกิดการดูดซับได้หลายชั้น (Multilayer) จากไอโซเทอมตรงบริเวณจุด B จะแสดงถึงการดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayer) นั้นเสร็จสมบูรณ์ จากนั้นที่ความดันสูงขึ้นจะเกิดการดูดซับที่ต่อเนื่องจากชั้นแรกต่อไป และจะเกิดการดูดซับเสร็จสมบูรณ์ที่ความดันย่อยสูงๆ

- ไอโซเทอมชนิดที่ 3

เป็นรูปแบบของการดูดซับที่มีแรงดึงดูดที่อ่อนระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ แต่แรงดึงดูดระหว่างตัวถูกดูดซับด้วยกันมีค่อนข้างมาก จากกรณีนี้จะทำให้เกิดการรวมตัวกันของตัวถูกดูดซับก่อนที่การดูดซับชั้นแรกจะเสร็จสมบูรณ์ ตัวอย่างการดูดซับของไอโซเทอมแบบที่ 3 คือ การดูดซับของไอน้ำบนผิวถ่านที่ไม่มีรูพรุน

- ไอโซเทอมชนิดที่ 4

จะพบในสารที่มีขนาดรูพรุนประมาณ 15 – 1,000 อังสตรอม ความชันของกราฟเพิ่มขึ้นอีกครั้งเมื่อความดันเพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่ากราฟเริ่มเข้าเติมในรูพรุน และการเปลี่ยนระดับของกราฟเมื่อความดันเพิ่มขึ้นอีกเป็นผลมาจากการควบแน่นภายในรูพรุนของของแข็ง (Capillary condensation in pores) โดยลักษณะกราฟในช่วงแรกจะเหมือนกับชนิด 2 ซึ่งจุดเปลี่ยนโค้งหรือจุด B จะแสดงถึงการดูดซับชั้นแรกอย่างสมบูรณ์ ตัวอย่างเช่น การดูดซับเบนซีน (Benzene) บนไอรอนออกไซด์เจล (Iron (III)oxide gel) ที่อุณหภูมิ 320 องศาเคลวิน

- ไอโซเทอมชนิดที่ 5

จะพบในสารที่มีแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของแก๊สกับผิวของของแข็งน้อย มีลักษณะคล้ายชนิด 3 แต่ชนิด 5 จะสามารถเกิดการควบแน่นในรูพรุนได้สำหรับรูพรุนที่มีขนาดในช่วงเดียวกับชนิด 4 ตัวอย่างเช่น การดูดซับไอน้ำ (Water vapor) บนถ่านหิน ที่อุณหภูมิ 373 องศาเคลวิน สำหรับไอโซเทอมชนิด 3 และชนิด 5 นี้จะคำนวณหาพื้นที่ผิวได้ยากเนื่องจากชั้นการดูดซับชั้นที่ 2 จะถูกสร้างขึ้นก่อนที่ชั้นแรกจะเสร็จสมบูรณ์

- การคำนวณพื้นที่ผิวโดยสมการแลงเมียร์ (Langmuir equation)

โดยสมการแลงเมียร์มีสมมติฐานคือ

1. เป็นการดูดซับแบบชั้นเดียวเท่านั้น
2. เป็นการดูดซับที่ไม่เกิดปฏิกิริยาระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ
3. แต่ละตำแหน่งของผิวการดูดซับมีลักษณะเหมือนกันหมด

เราสามารถหาพื้นที่ผิวได้จากสมการของแลงเมียร์โดยมีรูปแบบจากไอโซเทอมชนิดที่ 1 สมการมีรูปแบบคือ

$$\frac{p}{V} = \frac{p}{V_m} + \frac{1}{BV_m}$$

ซึ่ง V คือ ปริมาตรการดูดซับของแก๊สที่ถูกดูดซับ (mmol $g^{-1}$) ต่อหน่วยมวลของตัวดูดซับที่ความดันย่อย ($p/p_o$) ต่างๆ

$V_m$ คือ ปริมาตรการดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayer capacity, mmol $g^{-1}$)

B คือ ค่าคงที่

P คือ ความดัน

ค่าพื้นที่ผิวจะได้จากความสัมพันธ์ของสมการ

$$S = V_m L\sigma$$

ซึ่ง S คือ พื้นที่ผิว ($m^2/g$)

L คือ เลขอโวกาโดร (Avogadro's number, $6.02 \times 10^{23}$)

$\sigma$ คือ พื้นที่ฉายเงาของโมเลกุลตัวถูกดูดซับ ($m^2$ $molecule^{-1}$)

สมการดังกล่าวมีประโยชน์มากที่ได้จากไอโซเทอม อย่างไรก็ตามสมการแลงเมียร์ซึ่งมีสมมุติฐานดังกล่าวอาจไม่เหมาะสมกับตัวดูดซับบางชนิด

- การคำนวณพื้นที่ผิวโดยวิธีบีอีที (BET)

เนื่องจากแรงในการเกิดการดูดซับทางกายภาพ จะคล้ายกับแรงในการเกิดการควบแน่น (liquefaction) คือเป็นแรงวานเดอร์วาลส์ (Van der Waals force) ดังนั้นการดูดซับทางกายภาพ (ทั้งบนพื้นผิวแบนและบนพื้นผิวโค้ง) จึงไม่จำกัดเฉพาะการดูดซับแบบชั้นเดียว (monomolecular layer) แต่สามารถเกิดต่อไปจนเป็นการดูดซับแบบหลายชั้น (multimolecular layer) ของของเหลวปกคลุมพื้นผิวได้

ทฤษฎีของบีอีที (Braunauer Emmett and Teller,BET) จะเพิ่มเติมจากทฤษฎีของแลงเมียร์ คือจะสามารถเกิดการดูดซับแบบหลายชั้น บนพื้นผิวที่ไม่มีรูพรุน ได้โดยสมการบีอีที จะมีสมมติฐานว่า ชั้นการดูดซับชั้นบนสุดจะอยู่ในสภาพสมดุลกับไอของแก๊ส นั่นคืออัตราการระเหยของชั้นโมเลกุลต่างๆเท่ากับอัตราการควบแน่น และมีสมมุติฐานอย่างง่ายว่าสำหรับการดูดซับชั้นแรก (first monolayer) จะใช้พลังงานการดูดซับ (heat of adsorption, $\Delta H_l$) ส่วนชั้นการดูดซับชั้นที่สองขึ้นไปจะใช้พลังงานการควบแน่น (heat of liquefaction, $\Delta H_L$) ซึ่งสมการโดยทั่วไปของบีอีที (BET) คือ

$$\frac{P}{V(P_0 - P)} = \frac{1}{V_m C} + \frac{(C-1)P}{V_m C P_o}$$

เมื่อ $P_O$ คือ ความดันไออิ่มตัว

$V_m$ คือ ปริมาตรการดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayer capacity)

C คือ ค่าคงที่ $(C \approx \exp [(\Delta H_L - \Delta H_l) / (RT)]$

เมื่อพลอตค่า $\{P / [V(P_o - P)]\}$ กับ $P/P_O$ จะได้เส้นตรงความชัน $[(C\text{-}1) / V_mC]$ และตัดแกน $\{P / [V(P_O - P)]\}$ ที่จุด $1/(V_mC)$ ซึ่งจะหา $V_m$ ได้

จุดประสงค์หลักของสมการบีอีที คือ เพื่ออธิบายไอโซเทอมชนิดที่ 2 นอกจากนี้ยังลดรูปลงเป็นสมการแลงเมียร์ได้ที่ความดันต่ำๆ และสามารถอธิบายไอโซเทอมชนิดที่ 3 ได้ในกรณีที่การดูดซับชั้นแรก (Monolayer adsorption) คายความร้อนน้อยกว่าการควบแน่น (Liquefaction) $(C<1)$ นั่นคือ สามารถใช้คำนวณหาพื้นที่ผิวจากข้อมูลไอโซเทอมได้แม้ว่าการดูดซับชั้นแรกจะเกิดได้ไม่สมบูรณ์

สมการบีอีที (BET) สามารถใช้กับสารที่มีรูพรุนได้ ถ้าการดูดซับเกิดขึ้น n ชั้น (n สัมพันธ์กับขนาดของรูพรุน) จะได้ดังสมการ

$$V = \frac{V_m CX - (n+1)X^n + nX^{n+1}}{(1-X) + (C-1)X - CX^{n+1}}$$

เมื่อ $X = P/P_O$

สมการนี้เป็นรูปแบบทั่วไป ซึ่งจะลดรูปเป็นสมการแลงเมียร์ (Langmuir) เมื่อ n=1 และเป็นสมการบีอีที (BET) เมื่อ $n = \infty$

วิธีบีอีที (BET) เป็นวิธีที่นิยมใช้กันมากที่สุดในการคำนวณพื้นที่ผิว โดยใช้หลักการคำนวณเหมือนกับวิธีแลงเมียร์ แต่การคำนวณค่า $V_m$ จะต่างกันโดยกราฟบีอีทีจะเป็นการพลอตระหว่าง

$\{P / [V(P_O - P)]\}$ กับ $P/P_O$ ซึ่งมักจะได้เส้นตรงในช่วงความดันสัมพัทธ์ $P/P_O$ ระหว่าง 0.05 ถึง 0.35

ความชัน คือ $[(C\text{-}1) / V_mC]$

จุดตัด คือ $[1 / V_mC]$

จากสมการของจุดตัดและความชันจะได้

$$V_m = 1 / (\text{จุดตัด} + \text{ความชัน})$$

และจากค่า $V_m$ ก็จะมาคำนวณหาพื้นที่ผิวของสารตัวอย่างได้เช่นเดียวกับวิธีแลงเมียร์

ในความเป็นจริงการดูดซับทางกายภาพจะไม่มีการดูดซับในชั้นแรกเต็มพื้นที่ผิวอย่างสมบูรณ์ เนื่องจากแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของแก๊สกับผิวของแข็งไม่เท่ากับการดูดซับทางเคมี แต่สมการบีอีทีก็สามารถคำนวณค่าจำนวณโมเลกุลที่ใช้ในการปกคลุมพื้นที่ผิวของแข็งให้เต็ม 1 ชั้นได้ แม้ว่าการดูดซับชั้นแรกอย่างเต็มพื้นผิวจะเกิดเฉพาะในการดูดซับทางเคมีเท่านั้น

แม้ว่าสมการบีอีทีจะใช้อย่างกว้างขวางเนื่องจากความง่ายของรูปแบบสมมุติฐาน และยังสอดคล้องกับผลการทดลองที่เป็นการดูดซับแบบหลายชั้น โดยเฉพาะที่ความดันสัมพัทธ์ระหว่าง 0.05 ถึง 0.35 ซึ่งเป็นช่วงความดันที่เกิด $V_m$ ได้ อย่างไรก็ตามสำหรับสารที่มีรูพรุนซึ่งมักจะเกิดปรากฏการณ์ช่องว่าง (Hysteresis) จากการควบแน่นในรูพรุน (Pore condensation) หรือเมื่อจุด B บนกราฟไอโซเทอมไม่เด่นชัด ค่าของ $V_m$ ที่คำนวณจากสมการบีอีทีก็จะมีความน่าเชื่อถือน้อยลง เช่น ซีโอไลต์ จะได้กราฟบีอีทีเป็นเส้นตรงที่ความดันสัมพัทธ์ต่ำประมาณ 0.01 หรือน้อยกว่านั้น ถ้ายอมรับความผิดพลาดเล็กน้อย เส้นกราฟบีอีทีสามารถประมาณเป็นเส้นตรงที่ผ่านจุดเริ่มต้น (Origin) และคำนวณ $V_m$ ได้จากการวัดปริมาตรของแก๊สที่ถูกดูดซับที่ความดันสัมพัทธ์ระหว่าง 0.2 ถึง 0.3ได้

## 2.8 <u>ประโยชน์ของถ่านกัมมันต์</u> [17, 18]

1.<u>ประเภทใช้กับของเหลว</u> ( Liquid phase carbon ) อุตสาหกรรมที่นำถ่านกัมมันต์ไปใช้ในสารละลายหรือในของเหลว ได้แก่

- อุตสาหกรรมน้ำตาล ใช้ถ่านกัมมันต์เพื่อฟอกสีและทำให้น้ำตาลดิบบริสุทธิ์ขึ้น
- อุตสาหกรรมน้ำมันและไขมันสำหรับบริโภค นอกจากใช้ในการฟอกสีแล้ว ยังใช้ในการแยกเอาสบู่และเปอร์ออกไซด์ออกจากน้ำมันและไขมันได้ด้วย
- อุตสาหกรรมอาหาร ใช้ถ่านกัมมันต์เพื่อดูดกลิ่นและฟอกสีของผลิตภัณฑ์อาหาร ซึ่งดีกว่าการใช้สารเคมีชนิดอื่นเพราะไม่เป็นอันตรายและไม่เกิดปฏิกิริยากับผลิตภัณฑ์อาหาร
- อุตสาหกรรมเครื่องดื่มแอลกอฮอล์ เช่น ไวน์ วิสกี้ มักใช้ถ่านกัมมันต์เพื่อดูดกลิ่นที่ไม่ต้องการทำให้เครื่องดื่มที่ได้มีรสชาติดีขึ้น
- อุตสาหกรรมเคมีและยา ถ่านกัมมันต์ใช้ในการผลิตสารเคมีและยาหลายชนิด
- อุตสาหกรรมการทำน้ำให้บริสุทธิ์ โดยใช้เป็นตัวดูดกลิ่นและฟอกสี
- อุตสาหกรรมการแยกสารที่ต้องการ เช่น การแยกทองหลังการสกัดจากแร่ด้วยวิธีไซยาไนด์ การแยกไอโอดีนออกจากน้ำเกลือที่เกิดในหลุมน้ำมัน ( Petroleum oil – well brines ) ตลอดจนการผลิตวิตามินและฮอร์โมนอีกหลายชนิด

- กระบวนการที่มีการใช้สารเร่ง ( Catalytic Process ) ถ่านจะทำหน้าที่เป็นตัวพาสารเร่ง ( Catalyst carrier ) ในปฏิกิริยาที่มีการใช้สารเร่งหลายชนิด รวมทั้งทำหน้าที่เป็นตัวกระตุ้นการทำงานของตัวเร่งให้ดีขึ้นด้วย

2. ประเภทที่ใช้ในการดูดแก๊สและไอ ( Gas Phase Carbon ) ใช้ในอุตสาหกรรมต่อไปนี้

- อุตสาหกรรมทำหน้ากากป้องกันแก๊สพิษ ทั้งที่ใช้กันในการทหารและที่ใช้กันทั่วไปทั้งนี้ เพราะถ่านกัมมันต์สามารถดูดซับแก๊สพิษและไอของสารอินทรีย์ได้

- การนำไอระเหยของตัวทำละลายที่ใช้แล้วกลับมาใช้ใหม่ ถ่านกัมมันต์จะดูดซับไอระเหยเหล่านั้นที่อุณหภูมิห้อง และจะคายออกที่ความดันของไอระเหยต่ำๆ

- อุตสาหกรรมปรับอากาศ โดยถ่านกัมมันต์จะดูดแก๊สพิษในอากาศต่างๆ เช่น คาร์บอนไดออกไซด์ ไฮโดรเจน ไนโตรเจน และอะเซทิลีน

- อุตสาหกรรมบุหรี่ โดยใช้ถ่านกัมมันต์เป็นก้นกรองบุหรี่

## 2.9 ถ่านหินและการกำเนิดถ่านหิน [19, 20]

ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงแข็งธรรมชาติประกอบด้วยสารอินทรีย์หลายชนิด เกิดจากการผุพังและการสะสมตัวของซากพืชเป็นเวลานานนับล้านปี โดยมีการเปลี่ยนแลงทางเคมี และทางกายภาพซึ่งปฏิกิริยาที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงนี้ได้แก่ ปฏิกิริยาออกซิเดชัน, ปฏิกิริยารีดักชัน, ปฏิกิริยาย่อยสลาย และปฏิกิริยารวมตัว เป็นต้น ทำให้ซากพืชที่ทับถมกันนี้แปรสภาพเป็นถ่านหินลักษณะและคุณภาพต่างๆกันออกไป

การจัดแบ่งถ่านหินโดยคำนึงถึงคุณภาพในการให้พลังงาน โดยนักธรณีวิทยาได้ดังนี้

- พีต (Peat) ประกอบด้วยซากพืชบางส่วน ซึ่งได้สลายตัวไปแต่ยังปรากฏให้เห็นร่องรอยของเนื้อไม้อยู่ ลักษณะเป็นสีน้ำมัน มีรูพรุนคล้ายฟองน้ำ มีปริมาณออกซิเจน และน้ำค่อนข้างสูงให้ค่าความร้อนน้อย

- ลิกไนต์ (Lignite) หรือถ่านหินสีน้ำตาล (Brown coal) เป็นถ่านหินคุณภาพต่ำที่สุด วิวัฒนาการมาจากพีต และยังปรากฏร่องรอยของเนื้อไม้อยู่ มีสีน้ำตาลมีปริมาณออกซิเจนค่อนข้างสูง มีความชื้นสูง ให้ค่าความร้อนต่ำ ไม่สามารถขนส่งเป็นระยะทางไกลๆหรือกองเก็บไว้เป็นเวลานาน เพราะมีโอกาสเกิดการติดไฟได้เอง (Spontaneous combustion)

- ซับบิทูมินัส (Subbituminous) เป็นถ่านหินที่สีดำคล้ายขี้ผึ้ง ให้ค่าความร้อนสูงกว่าถ่านหินลิกไนต์ สามารถนำไปแปรสภาพเป็นเชื้อเพลิงเหลว หรือก๊าซ

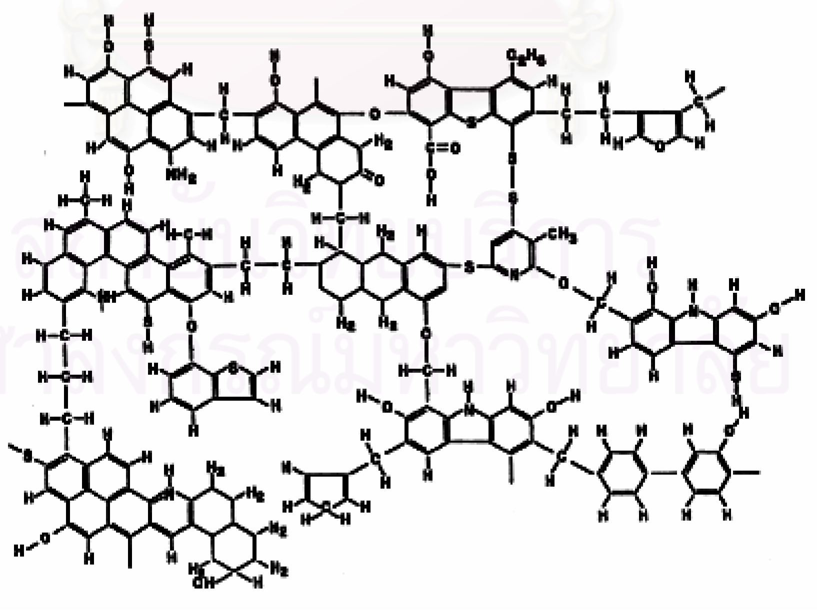
- บิทูมินัส (Bituminous) เป็นถ่านหินคุณภาพสูง ใช้เวลาในการแปรสภาพยาวนานกว่าลิกไนต์ เนื้อแน่นแข็ง มีสีดำ มักประกอบด้วยถ่านหินที่มีลักษณะมันวาว ไม่มีร่องรอยเนื้อไม้ปรากฏ

อยู่ มีเถ้าต่ำ ให้ควันน้อย ให้ค่าความร้อนสูง เหมาะสำหรับผลิตเป็นถ่านโค้ก นิยมใช้กันแพร่หลายในอุตสาหกรรมต่างๆ

- แอนทราไซต์ (Anthracite) เป็นถ่านหินคุณภาพดีที่สุด มีสีดำสนิทเป็นมันวาว มีความแข็งแรงมาก และคาร์บอนสูงมาก อาจถึงร้อยละ 90 ในขณะที่มีความชื้นต่ำ ติดไฟยายแต่ให้ความร้อนสูง ในระยะเวลาการเผาไหม้ยาวนาน

ถ่านหินลิกไนต์อยู่ในตระกูลถ่านหิน (Coal) ซึ่งมีกำเนิดมาจากซากพืชทับถมกันเมื่อหลายสิบล้านปีมาแล้ว ต่อมามีตะกอนดินทรายทับถมและมีการเปลี่ยนแปลงขแงพื้นผิวโลกรวมทั้งได้รับความร้อนจากภายในโลกเป็นเวลานาน ทำให้ซากพืชที่ทับถมกันนี้แปรสภาพไปเป็นถ่านพีต (Peat) ซึ่งเป็นลำดับเริ่มต้นของการเกิดถ่านหิน เมื่อเวลาผ่านไปอีกหลายร้อยล้านปีถ่านหินพีตก็แปรสภาพเป็นถ่านหิน การทับถมจนเกิดเป็นถ่านหินจะอยู่ที่ความลึก 7,000 เมตร อุณหภูมิประมาณ 200 องศาเซลเซียส และความดัน 1,500 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ระดับของถ่านหินที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับความดัน และอุณหภูมิของแหล่งกำเนิด

สำหรับถ่านหินลิกไนต์ในประเทศไทยส่วนใหญ่ที่พบจะเกิดในยุคเทอร์เชียรี (Tertiary Period) ที่มีช่วงอายุระหว่าง 1.8 ถึง 65 ล้านปีมาแล้ว และจัดเป็นถ่านหินประเภทคุณภาพต่ำสุดในบรรดาถ่านหินด้วยกัน ถ่านหินลิกไนต์ขุดได้จากเหมื่องแม่เมาะส่วนใหญ่จะมีส่วนผสมของกำมะถัน เถ้าถ่าน และความชื้นค่อนข้างสูง ซึ่งมีอายุระหว่าง 2.5 ถึง 35 ล้านปีมาแล้ว (วารสารการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, 2538)



รูปที่ 2.7 แสดงโครงสร้างจำลองของถ่านหิน [21]

## 2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.10.1 งานวิจัยในประเทศ

**จักริน นิธิจันทร์** (2537) [17] ได้นำพีตจากพรุบาเจาะ จังหวัดนราธิวาส นำมาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์โดยการคาร์บอไนเซชันและกระตุ้นด้วยไอน้ำในฟลูอิไดซ์เบด โดยแบ่งการทดลองเป็น 2 ขั้นตอน ขั้นแรก คาร์บอไนซ์ในฟลูอิไดซ์เบด ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 150 มิลลิเมตร ความสูง 1,100 มิลลิเมตร มีตัวแปรที่ศึกษาคือ ความเร็วอากาศ 1.2-2.1 เท่าของความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิไดเซชัน หรือ 0.94-1.64 เมตรต่อวินาที (ที่ 200 องศาเซลเซียส) เวลาในการคาร์บอไนซ์ 3-8 นาที พบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการคาร์บอไนซ์ในฟลูอิไดซ์เบด คือ ขนาดของเม็ดพีต 0.5-2.0 มิลลิเมตร ความเร็วอากาศ 0.94 เมตรต่อวินาที หรือ 1.2 เท่าของความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิไดเซชัน ปริมาณการป้อนเม็ดพีต 2.0 กิโลกรัม อุณหภูมิเริ่มต้นของเบด 400 องศาเซลเซียส เวลาในการคาร์บอไนซ์ 5 นาที ได้ผลิตภัณฑ์เป็นถ่านชาร์ร้อยละ 34.0 มีปริมาณคาร์บอนคงตัวร้อยละ 83.6 สารระเหยร้อยละ 10.9 เถ้าร้อยละ 4.0

ขั้นตอนที่สอง การกระตุ้นด้วยไอน้ำในฟลูอิไดซ์เบดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 120 มิลลิเมตร ความสูง 770 มิลลิเมตร มีตัวแปรที่ศึกษาคือ ร้อยละของสารระเหยในวัตถุดิบ 3.6, 16.2, 31.3, 41.9 และ 61.9 ขนาดถ่านพีต 0.5-1.0, 1.0-1.4 และ 1.4-2.0 มิลลิเมตร เวลาในการกระตุ้นด้วยไอน้ำ 3, 5, 7, 9 และ 10 นาที อุณหภูมิของเบดขณะเริ่มป้อนไอน้ำ 700 – 925 องศาเซลเซียส ปริมาณการป้อนถ่านพีต 0.5-2.0 กิโลกรัม พบว่าภาวะที่เหมาะสมในการกระตุ้นด้วยไอน้ำในฟลูอิไดซ์เบด คือ ถ่านพีตขนาด 1.0 – 2.0 มิลลิเมตร ปริมาณการป้อนถ่านพีต 2.0 กิโลกรัม ความเร็วอากาศ 3.21 เมตรต่อวินาที หรือ 1.4 เท่าของความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิไดเซชัน อุณหภูมิเบดขณะเริ่มป้อนไอน้ำ 700 องศาเซลเซียส แก๊สออกซิไดซ์เป็นของผสมระหว่างไอน้ำกับอากาศ โดยมีอัตราส่วนระหว่างไอน้ำกับอากาศ 7.6 เปอร์เซ็นต์ เวลากระตุ้นด้วยไอน้ำ 7 นาที ได้ผลิตภัณฑ์เป็นถ่านกัมมันต์ร้อยละ 59.1 ของน้ำหนักถ่านพีต หรือ ร้อยละ 20.1 ของน้ำหนักพีตแห้ง มีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ 1,023 ตารางเมตรต่อกรัม ค่าไอโอดีนนัมเบอร์ 1,053 มิลลิกรัมต่อกรัม ค่าการดูดซับเมทิลีนบลู 354.5 มิลลิกรัมต่อกรัม

**บุญชัย ตระกูลมหชัย** (2537) [22] ทำการผลิตถ่านกัมมันต์จากกะลาตาลโตนดด้วยวิธีทางกายภาพ ภาวะที่เหมาะสมคือใช้ถ่านชาร์เตรียมจากกะลาตาลโตนด คาร์บอไนซ์ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส นาน 2 ชั่วโมง มีขนาดของอนุภาค 1.19 ถึง 1.68 มิลลิเมตร กระตุ้นด้วยแก๊สผสมที่ได้จากการเผาไหม้น้ำมันดีเซลกับไอน้ำร้อนยวดยิ่ง ที่มีความเร็ว 6.44 เมตรต่อวินาที ในฟลูอิไดซ์เบดได้ถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิว 1,800 – 1,900 ตารางเมตรต่อกรัม ค่าการดูดซับไอโอดีน

1,000 – 1,300 มิลลิกรัมต่อกรัม ค่าการดูดซับเมทิลีนบลู 250 ถึง 350 มิลลิกรัมต่อกรัม ค่าเถ้าร้อยละ 10 – 15 โดยน้ำหนัก ปริมาณร้อยละผลิตภัณฑ์ที่ได้ 30 – 40

**พงศธร โค้วคชาภรณ์** (2538) [18] ได้ทำการเตรียมถ่านกัมมันต์จากซังข้าวโพดและศึกษา สมบัติรวมทั้งการใช้งานของถ่านกัมมันต์ที่ได้

วิธีที่ใช้เตรียมถ่านกัมมันต์คือวิธีการกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ ซึ่งมีตัวแปรที่ศึกษาคือ อุณหภูมิ เวลา และอัตราส่วนของวัตถุดิบต่อซิงค์คลอไรด์ที่ใช้กระตุ้น สมบัติของถ่านที่ทำการวิเคราะห์คือ ค่าไอโอดีน ค่าการฟอกเมทิลีนบลู ความชื้น ปริมาณร้อยละผลิตภัณฑ์ พื้นที่ผิว และมีการทดลองนำถ่านกัมมันต์ที่ได้ไปใช้ในการฟอกสีด้วย

จากผลการทดลองพบว่า ซังข้าวโพดสามารถที่จะเปลี่ยนเป็นถ่านกัมมันต์ได้เมื่อถูกกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ ปริมาณร้อยละของผลิตภัณฑ์และสมบัติขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ เวลา และอัตราส่วนของวัตถุดิบต่อซิงค์คลอไรด์ ที่อัตราส่วน 1:2 อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เวลาการเผา 3 ชั่วโมง มีปริมาณร้อยละผลิตภัณฑ์คือ 62.82 ค่าไอโอดีนอยู่ในเกณฑ์ 800-900 มิลลิกรัมต่อกรัม ค่าการฟอกสีเมทิลีนบลู 120-180 มิลลิกรัมต่อกรัม พื้นที่ผิว 1,000 ตารางเมตรต่อกรัม ประสิทธิภาพการฟอกสีปานกลาง สำหรับอุณหภูมิการกระตุ้น 600 และ 800 องศาเซลเซียส ได้ถ่านซึ่งมีสมบัติดีกว่าถ่านที่ถูกกระตุ้นที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส แต่ปริมาณร้อยละของผลผลิตต่ำกว่าที่ 400 องศาเซลเซียส การเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส จะสิ้นเปลืองเวลาและพลังงานมากกว่าที่ 600 องศาเซลเซียส เมื่อกระตุ้นถ่านที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส อัตราส่วนของวัตถุดิบต่อซิงค์คลอไรด์ 1:4 ถ่านกัมมันต์ที่ได้มีค่าไอโอดีน 960-1,075 มิลลิกรัมต่อกรัม ค่าการฟอกสีเมทิลีนบลู 230-300 มิลลิกรัมต่อกรัม พื้นที่ผิว 1,140-1,300 ตารางเมตรต่อกรัม ประสิทธิภาพการฟอกสีดีกว่าที่ 400 องศาเซลเซียส มีปริมาณร้อยละผลิตภัณฑ์ 52.41

**นิชชรี นิลนนท์** (2541) [23] ศึกษาการผลิตถ่านกัมมันต์จากไม้โกงกาง โดยกระตุ้นด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งกับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ พบว่าภาวะที่เหมาะสมในการคาร์บอไนซ์คือที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ได้ผลิตภัณฑ์เป็นถ่านไม้ร้อยละ 38.07 มีปริมาณคาร์บอนคงตัวร้อยละ 71.44 สารระเหยร้อยละ 23.02 และเถ้าร้อยละ 5.54 จากนั้นจึงนำถ่านชาร์ที่ได้ไปทำการกระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำร้อนยวดยิ่ง โดยตัวแปรที่ศึกษาคือ อุณหภูมิ เวลา และขนาดอนุภาค พบว่าภาวะที่เหมาะสมในการกระตุ้นคือ อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ที่เวลา 1 ชั่วโมง และขนาดอนุภาค 0.6 – 1.18 มิลลิเมตร ปริมาณการป้อนอากาศและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 5 ลิตรต่อนาที ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ความดัน 1 บรรยากาศ ด้วยปริมาณไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่มากเกินพอ ได้ผลิตภัณฑ์เป็นถ่านกัมมันต์ร้อยละ

27.47 มีพื้นที่ผิวจำเพาะทั้งหมด 639.74 ตารางเมตรต่อกรัม โดยแบ่งเป็นพื้นที่ผิวรูพรุนขนาดใหญ่ 156.50 ตารางเมตรต่อกรัม พื้นที่ผิวรูพรุนขนาดเล็ก 483.24 ตารางเมตรต่อกรัม ค่าการดูดซับไอโอดีน 675.14 มิลลิกรัมต่อกรัม ค่าการดูดซับเมทิลีนบลู 254.73 มิลลิกรัมต่อกรัม และเมื่อนำถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้จากภาวะที่เหมาะสมนี้ไปทำการดูดซับไดโครเมตไอออน พบว่ามีความจุในการดูดซับ 66.23 และ 59.52 มิลลิกรัมต่อกรัม ที่ pH = 1 และ pH = 2 ตามลำดับ

**วราวุฒิ ประชาศิริสกุล** (2541) [24] ได้ทำการผลิตถ่านกัมมันต์จากกะลาปาล์มน้ำมันโดยทำการกระตุ้นโดยใช้พลังงานไมโครเวฟ ซึ่งในขั้นตอนแรกนั้นทำการคาร์บอไนซ์ ในขั้นตอนนี้มีตัวแปรที่ใช้ศึกษาคือ อุณหภูมิในช่วง 350 – 450 องศาเซลเซียส เวลาที่ใช้คือช่วง 60 – 180 นาที ได้ภาวะที่เหมาะสมในการคาร์บอไนซ์ คือที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 60 นาที จากนั้นจึงนำถ่านชาร์ที่ได้มาทำการกระตุ้น โดยทำในเครื่องปฏิกรณ์ที่ทำจากหลอดแก้วทนไฟที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 32 มิลลิเมตร รูปตัวยูยาว 150 มิลลิเมตร กว้าง 100 มิลลิเมตร ติดตั้งอยู่ภายในเตาไมโครเวฟ โดยแก๊สที่ใช้ในการกระตุ้นคือ คาร์บอนไดออกไซด์ ออกซิเจน และไอน้ำร้อนยวดยิ่ง ตัวแปรที่ใช้ศึกษาในขั้นตอนนี้คือ เวลาในช่วง 30 – 90 นาที อัตราการไหลของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในช่วง 0.2 – 1.5 ลิตรต่อนาที ขนาดอนุภาคของถ่านชาร์ในช่วง 0.6 – 4.75 มิลลิเมตร และชนิดของแก๊สกระตุ้น ภาวะที่เหมาะสมในการกระตุ้นคือการใช้ถ่านขนาด 1.18 – 2.36 มิลลิเมตร กระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในอัตราการไหล 0.2 ลิตรต่อนาที เป็นเวลา 90 นาที ได้ผลิตภัณฑ์ของถ่านกัมมันต์ร้อยละ 81.23 โดยถ่านกัมมันต์ที่ได้มีสมบัติดังนี้ มีค่าความสามารถในการดูดซับไอโอดีน 411.27±2.81 มิลลิกรัมต่อกรัม ความสามารถในการดูดซับเมทิลีนบลู 174.94±4.59 มิลลิกรัมต่อกรัม ค่าความหนาแน่นปรากฏ 0.524±0.03 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ค่าความเป็นกรดเบส 9.84 ค่าพื้นที่ผิวแบบบีอีที ($S_{BET}$) 476.64±11.54 ตารางเมตรต่อกรัม ค่าพื้นที่ผิวแบบแลงเมียร์ ($S_{Langmuir}$) 628.86±2.05 ตารางเมตรต่อกรัม ค่าพื้นที่ผิวรูพรุนขนาดเล็ก 365.93 ตารางเมตรต่อกรัม ค่าปริมาตรรูพรุนขนาดเล็ก 0.1696 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม ร้อยละของเถ้า 4.28±0.12 และร้อยละของสารระเหย 5.90±0.05

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.10.2 งานวิจัยต่างประเทศ

**Johnson et al. (1977)** ได้ศึกษาการผลิตถ่านกัมมันต์จากผงถ่านหินขนาด 8x30 เมช ความหนาแน่นปรากฏเท่ากับ 0.735 โดยอบเม็ดถ่านหินให้แห้ง แล้วนำไปกระตุ้นด้วยแก๊สผสมระหว่างไอน้ำร้อนยวดยิ่งและแก๊สไนโตรเจนที่มีอัตราการไหล 2.5 และ 1,000 มิลลิลิตรต่อนาที ตามลำดับ ที่อุณหภูมิ 760 ถึง 860 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที นอกจากนี้ยังได้ทดลองล้างผงถ่านหินด้วยกรดไฮโดรคลอริกร้อยละ 10 ก่อนนำมากระตุ้น เพื่อปรับปรุงคุณภาพถ่านกัมมันต์ด้วย ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ผลการทดลองของ Johnson et al. (1977)

| การวิเคราะห์ | สมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ได้ | |
|---|---|---|
| | ไม่ล้าง | ล้าง |
| ค่าการดูดซับไอโอดีน,มิลลิลิตรต่อกรัม | 615 | 655 |
| ค่าการดูดซับโมลาส,มิลลิลิตรต่อกรัม | 315 | 299 |
| ค่าการดูดซับคาร์บอนเตตระคลอไรด์มิลลิลิตรต่อกรัม | 3.62 | 3 |
| ความหนาแน่นปรากฏ,กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร | 0.477 | 0.506 |
| ค่าเถ้า,ร้อยละโดยน้ำหนัก | 8.57 | 8.12 |

**Renan Arriagada and others (1994)** [25] ทำการผลิตถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัส *Eucalyptus globulus* ด้วยวิธีการกระตุ้นทางกายภาพ คือใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำร้อนยวดยิ่งเป็นสารกระตุ้น ซึ่งศึกษาถึงผลของเวลาและอุณหภูมิในการกระตุ้น เพื่อที่จะทำการเปรียบเทียบสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากสารกระตุ้นที่เป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำร้อนยวดยิ่งและหาภาวะที่เหมาะสม

ซึ่งภาวะที่ใช้ในการศึกษาการกระตุ้นคือใช้อัตราการไหลของไอน้ำเท่ากับ 140 มิลลิลิตรต่อนาที และอัตราการไหลของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เท่ากับ 200 มิลลิลิตรต่อนาที อุณหภูมิในช่วง 800 – 900 องศาเซลเซียส ที่เวลา 120 นาที เนื่องจากที่ช่วงภาวะนี้จะให้ค่าพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์อยู่ในช่วงประมาณ 1000 ตารางเมตรต่อกรัม จากการพิจารณาอุณหภูมิจะใช้อุณหภูมิ 820 องศาเซลเซียสเป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมในการกระตุ้น

ตารางที่ 2.3 แสดงสมบัติของถ่านกัมมันต์ของ Arriagada [25]

| สารกระตุ้น | เวลากระตุ้น (นาที) | ร้อยละที่เผาไหม้ไป | พื้นที่ผิวแบบบีอีที (ตร.ม./ก.) | ค่าการดูดซับไอโอดีน(มก./ก.) | ค่าการดูดซับเมทิลีนบลู(มก./ก.) |
|---|---|---|---|---|---|
| $CO_2$ | 10 | 25 | 380 | 286 | 16 |
| | 60 | 36 | 549 | 474 | 84 |
| | 120 | 46 | 678 | 640 | 125 |
| | 180 | 56 | 847 | 725 | 220 |
| | 270 | 75 | 994 | 929 | 318 |
| | 360 | 82 | 1089 | 936 | 345 |
| $H_2O$ | 10 | 30 | 466 | 471 | 14 |
| | 60 | 42 | 622 | 690 | 113 |
| | 120 | 51 | 778 | 819 | 221 |
| | 270 | 79 | 1193 | 968 | 311 |

ตามผลการทดลองที่ได้ พบว่าร้อยละของผลิตภัณฑ์อยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ และได้ถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวสูง จากผลการทดลองจะเห็นความแตกต่างของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากคาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำร้อนยวดยิ่ง โดยพบว่าถ่านกัมมันต์ที่ได้จากไอน้ำร้อนยวดยิ่งมีค่ารูพรุนขนาดกลางและรูพรุนขนาดใหญ่ที่สูงกว่า แต่ในขณะเดียวกันก็มีรูพรุนขนาดเล็กที่สูงด้วย ซึ่งพบว่าไอน้ำร้อนยวดยิ่งจะผลิตถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวที่สูงกว่าซึ่งดูได้จากผลการทดลอง ทั้งนี้เนื่องจากความว่องไวของไอน้ำที่มีความว่องไวในการทำปฏิกิริยาที่สูงกว่านั่นเอง ซึ่งสามารถดูผลการวิจัยที่สอดคล้องกันจากงานวิจัยอื่นได้

**Gergova et al. (1995)** [26] ได้ทำการทดลองผลิตถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) จาก Anthracite โดยใช้กระบวนการที่เรียกว่า " one-step steam pyrolysis – activation" ในขั้นตอน Pyrolysis – activation anthracite ปริมาณ 50 กรัม จะถูกทำให้ร้อนในเตาเผา (Tube furnace) ที่อัตรา 20 K/min ที่ความดันบรรยากาศ ตัวอย่างต่างๆที่มีขนาดอนุภาคน้อยกว่า 1 มิลลิเมตร จะถูกทำให้ร้อนด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส เป็นเวลาตั้งแต่ 3 ถึง 6 ชั่วโมง และที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 และ 4 ชั่วโมง ที่ความดันบรรยากาศ โดยจะมี 2 ตัวอย่างจากทั้งหมด จะถูกทำให้ร้อนในอากาศ (อบ) ที่อุณหภูมิ 300 และ 350 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 และ 2

ชั่วโมงตามลำดับ จากนั้นจะถูกนำมากระตุ้นด้วยไอน้ำ (Steam activation) ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ถ่านกัมมันต์ ที่ผลิตโดยการกระตุ้นด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง จะมีพื้นที่ผิวมากที่สุดและมีโครงสร้างรูพรุนที่ดีมาก Substantial activation ของพื้นผิว Anthracite และรูปแบบการเกิด ของความพรุนที่ขยายขึ้น เกิดขึ้นภายใต้สภาวะเดียวกันแต่ที่ความดันไอน้ำ 270 ปาสคาล แทนที่จะเป็นความดันบรรยากาศ และการอบ (Air treatment) ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ก่อนที่จะกระตุ้นด้วยไอน้ำเป็นเวลา 4ชั่วโมง ก็จะทำให้สามารถผลิตถ่านกัมมันต์ ที่มีความพรุนสูงเช่นกัน

Man et al. (1999) [27] ได้ทำการผลิตถ่านกัมมันต์โดยในงานวิจัยนี้ทำการศึกษาถึงผลของตัวแปรที่สำคัญคือ อุณหภูมิซึ่งจะทำการผลิตที่ช่วงอุณหภูมิต่ำ ใช้อากาศเป็นสารกระตุ้น และจะดูผลของถ่านชาร์ที่ได้จากขั้นตอนการคาร์บอไนซ์ ซึ่งทำการผลิตโดยใช้วิธีใหม่คือ เป็นกระบวนการที่มี 3 ขั้นตอน สามารถผลิตถ่านกัมมันต์ที่มีค่าร้อยละของผลิตภัณฑ์ที่สูง และให้ค่าพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากสารชีวมวลในช่วงปานกลาง ขั้นตอนแรกคือ ทำการคาร์บอไนซ์ที่อุณหภูมิสูงโดยให้ความร้อนเริ่มจากอุณหภูมิที่ต่ำก่อนแล้วเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้นเรื่อยๆ ขั้นที่สอง ทำการออกซิไดซ์ด้วยอากาศโดยตั้งอัตราการให้ความร้อนตั้งแต่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียสไปจนถึงอุณหภูมิ 660 องศาเซลเซียส ขั้นที่สาม ทำการให้ความร้อนต่อที่อุณหภูมิสูงแต่ในเครื่องปฏิกรณ์นั้นจะเป็นระบบที่เฉื่อยซึ่งอาจทำโดยให้มีการไหลผ่านของแก๊สไนโตรเจนด้วยวิธีการดังกล่าวจะสามารถผลิตถ่านกัมมันต์ให้มีพื้นที่ผิวสูงถึง 1000 ตารางเมตรต่อกรัม และให้ร้อยละของผลิตภัณฑ์มากกว่า 15 เปอร์เซ็นต์ (เทียบกับวัตถุดิบเริ่มต้น)

Mameri et al. (2000) [28] งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการผลิตถ่านกัมมันต์จากเศษมะกอกบด *Olive Mill Solid* ที่ได้จากประเทศแอลจีเรีย ซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร นำมาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์โดยทำการกระตุ้นด้วยไอน้ำ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และอากาศ ซึ่งจะผลิตโดยการนำเอาวัตถุดิบมาทำการคาร์บอไนซ์ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เวลา 2 ชั่วโมง โดยจะให้มีการไหลผ่านของแก๊สไนโตรเจนด้วยที่อัตรา 80 มิลลิลิตรต่อนาที จากนั้นจึงนำถ่านชาร์มาทำการกระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และอากาศที่อัตราการไหล 20 มิลลิลิตรต่อนาที ที่อุณหภูมิต่างๆกันคือ 800 – 950 องศาเซลเซียส และที่เวลาช่วง 30 – 240 นาที

จากภาวะของการทดลองมีข้อจำกัดของเวลาในกรณีการกระตุ้นด้วยอากาศ เนื่องจากจะเกิดปฏิกิริยาอย่างรวดเร็วจึงจำกัดเวลาไว้ที่ 30 นาทีผลการทดลองที่ได้แสดงในตารางที่ 2.4

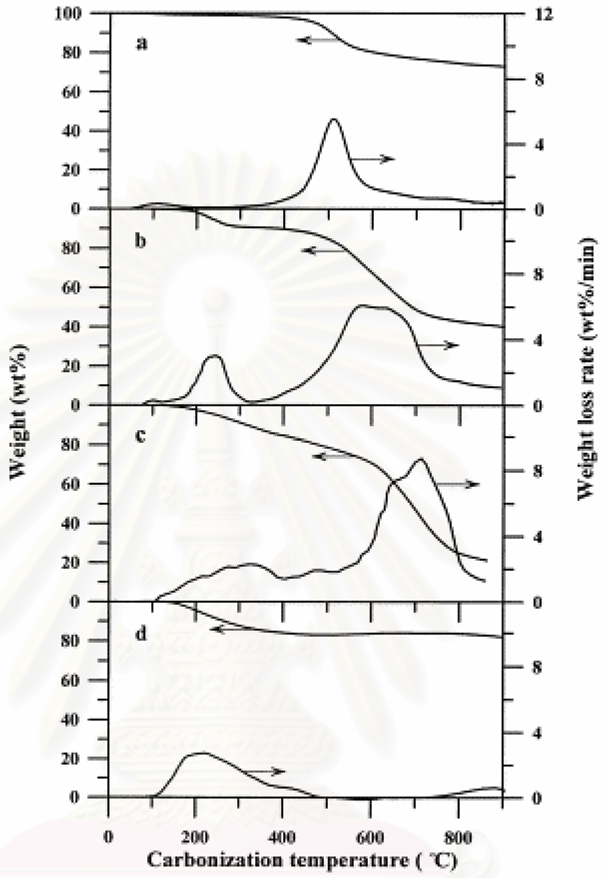
ตารางที่ 2.4 แสดงพื้นที่ผิวแบบบีอีที ($S_{BET}$)ของถ่านกัมมันต์ของ Mameri [28]

| Activator | Water vapour | | | Carbondioxide | | | Air(Oxygen) | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Time(min) | 30 | 120 | 240 | 30 | 120 | 240 | 10 | 15 | 30 |
| T($^{o}$C) | | | | | | | | | |
| 800 | 1,143 | 2,063 | 2,703 | 880 | 1,176 | 2,016 | 944 | 907 | 679 |
| 850 | 1,867 | 2,213 | 2,928 | 934 | 1,669 | 2,090 | 1,013 | 973 | - |
| 900 | 1,812 | 2,169 | 2,870 | 880 | 1,541 | 2,045 | 953 | 953 | - |
| 950 | 2,126 | 2,870 | - | 1,669 | 1,998 | - | 989 | 713 | - |

Mamari ได้กล่าวว่าในบางครั้งขณะทำการกระตุ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นและเวลานานขึ้นจะพบว่ารูพรุนขนาดเล็กนั้นลดลง ทั้งนี้มีสาเหตุจากเกิดการเปลี่ยนแปลงจากรูพรุนขนาดเล็กเปลี่ยนเป็นรูพรุนขนาดกลางและรูพรุนขนาดใหญ่ซึ่งเป็นเฉพาะในการกระตุ้นในอากาศโดยเฉพาะ แต่ถ้าเป็นการกระตุ้นโดยใช้ไอน้ำและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จะมีรูพรุนขนาดเล็กเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิและเวลาในการกระตุ้นสูงขึ้น ซึ่งไอน้ำจะให้รูพรุนขนาดเล็กได้ดีกว่าแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ เนื่องจากโมเลกุลของน้ำที่เล็กกว่าจึงสามารถแพร่เข้าไปในเนื้อถ่านได้ดีกว่า จากการที่มีพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้นเนื่องจากการแพร่เข้าไปของแก๊สกระตุ้น จะไปช่วยเปิดรูพรุนที่ปิดอยู่และไปขยายรูพรุนขนาดเล็กบางส่วน จากการทดลองพบว่าไอน้ำมีประสิทธิภาพดีที่สุดในการกระตุ้น ซึ่งเวลาที่เหมาะสมในการกระตุ้นคือประมาณ 2 ชั่วโมง

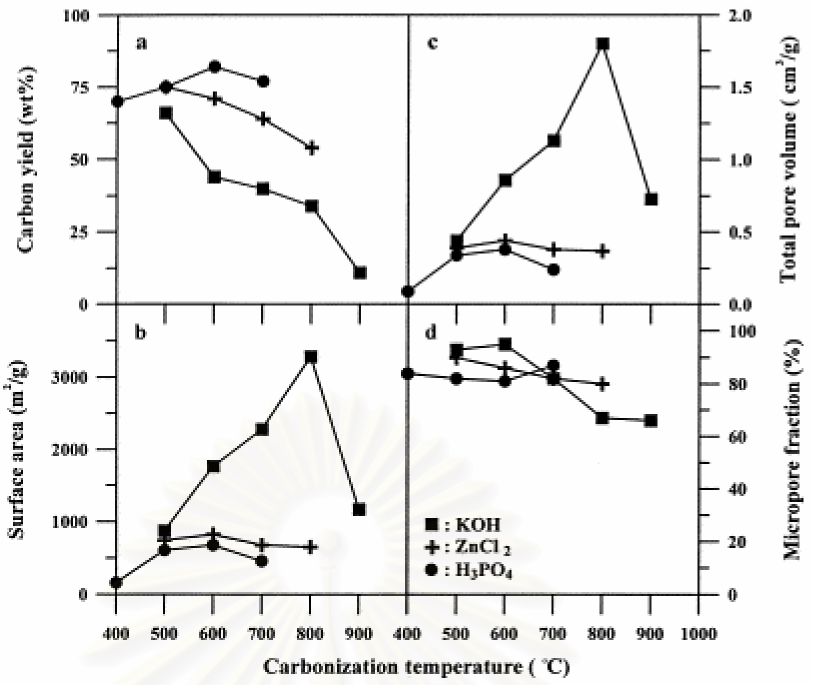
**Li-Yeh Hsu et al.(2000)** [29] ทำการศึกษาถ่านกัมมันต์ถูกเตรียมโดยการกระตุ้นทางเคมีจากถ่านหินบิทูมินัสด้วยสารเคมีที่ต่างกัน 3 ชนิด คือ $ZnCl_2$, $H_3PO_4$ และ KOH วิธี การกระตุ้นจะประกอบไปด้วยการทำให้อิ่มตัวด้วยสารเคมี แล้วทำการคาร์บอไนซ์ในบรรยากาศของไนโตรเจน (Carbonization in Nitrogen) ที่อุณหภูมิต่างๆกัน จากการศึกษาด้วย Thermogravimetric แสดงให้เห็นว่า สารเคมีที่ใช้ทำการทดลอง (Reagent) เหล่านี้มีความสามารถในการยับยั้งการปลดปล่อยทาร์ระหว่างการคาร์บอไนซ์ เนื่องจากกลไกการออกซิเดชัน และ แก๊สซิฟิเคชันของคาร์บอน การกระตุ้นด้วย KOH จะทำให้ได้ Carbon Yield ต่ำกว่าการกระตุ้นด้วย $ZnCl_2$ และ $H_3PO_4$ สำหรับแต่ละกระบวนการการกระตุ้น รูพรุนของคาร์บอนที่ได้เพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิ ของการคาร์บอไนซ์ถึงค่าสูงสุดค่าหนึ่ง และจะเริ่มลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นไปกว่านี้ โดยพื้นที่ผิวที่ได้จากการกระตุ้นด้วย $ZnCl_2$, $H_3PO_4$ และ KOH คือ 960, 770 และ 3300 $m^2$/g ตามลำดับ ผลของการใช้ $ZnCl_2$ และ $H_3PO_4$ซึ่งเป็น Reagent ที่มีสภาพเป็นกรด พบว่าไม่มีความเหมาะสมที่จะใช้สำหรับ

เตรียมถ่านกัมมันต์ที่มีรูพรุนสูง ในขณะที่ คาร์บอนที่มีรูพรุนสูงสามารถเตรียมได้จากการใช้เบส เช่น KOH การเพิ่มขนาดอนุภาคของถ่านหิน พบว่าจะทำให้ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้มี Yield และ รูพรุนลดลง ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 2.8 – 2.10

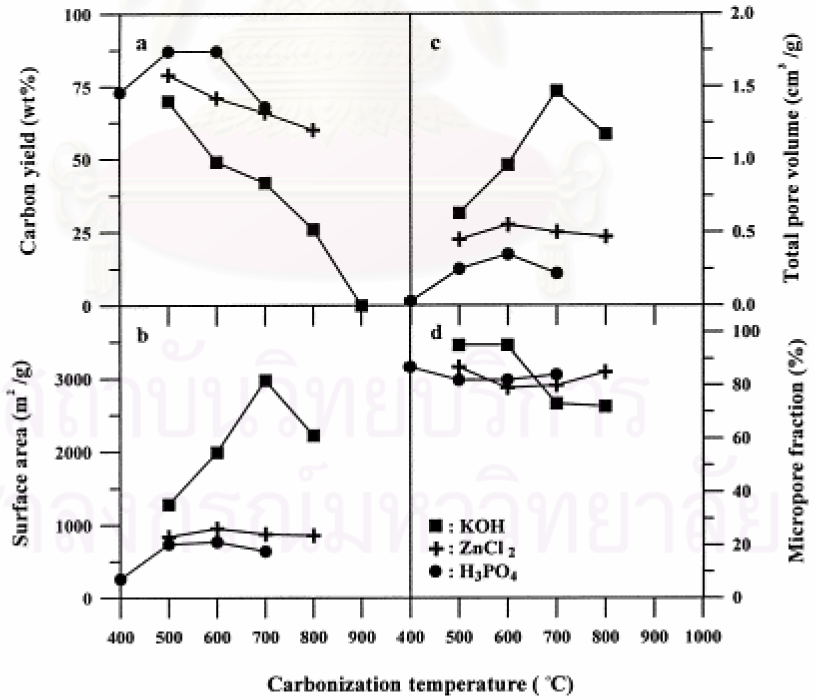



รูปที่ 2.8 แสดงการสูญเสียมวลของถ่านหินในระหว่างการคาร์บอไนซ์ (a) ถ่านหินที่ไม่ผ่านการแช่สารเคมี, (b) แช่ด้วย $ZnCl_2$, (c) แช่ด้วย $H_3PO_4$ , (d) แช่ด้วย KOH โดยใช้ขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 0.4–1 มิลลิเมตร (Li-Yeh Hsu , 2000)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย




รูปที่ 2.9 แสดงถึงผลของอุณหภูมิการคาร์บอไนซ์ที่มีต่อ (a) ผลิตภัณฑ์คาร์บอน, (b) พื้นที่ผิว, (c) ปริมาตรรูพรุน, (d) สัดส่วนรูพรุนขนาดเล็ก จากการกระตุ้นด้วยสารเคมีต่างๆกัน โดยใช้ขนาดอนุภาค 0.4 – 1.0 มิลลิเมตร (Li-Yeh Hsu , 2000)




รูปที่ 2.10 แสดงถึงผลของอุณหภูมิการคาร์บอไนซ์ที่มีต่อ (a) ผลิตภัณฑ์คาร์บอน, (b) พื้นที่ผิว, (c) ปริมาตรรูพรุน, (d) สัดส่วนรูพรุนขนาดเล็ก จากการกระตุ้นด้วยสารเคมีต่างๆกัน โดยใช้ขนาดอนุภาค 0.2 – 0.3 มิลลิเมตร (Li-Yeh Hsu , 2000)

**Lozano-Castello et al. (2001)** [30] ศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์จากแอนทราไซต์สเปน โดยการกระตุ้นทางเคมี ซึ่งใช้โปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ในกระบวนการไพโรไลซิสขั้นตอนเดียว (Single stage pyrolysis process) โดยศึกษาผลกระทบของตัวแปรต่างๆที่มีต่อลักษณะโครงสร้างรูพรุน ได้แก่ อัตราส่วนระหว่างโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์กับแอนทราไซต์ อัตราการให้ความร้อน อุณหภูมิ และ เวลาในการคาร์บอไนซ์ รวมทั้งศึกษาอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนเพิ่มเติม ซึ่งให้ผลเป็นถ่านกัมมันต์รูพรุนสูง ถ่านกัมมันต์ที่ได้มีปริมาตรรูพรุน (Micropore volume) 1.45 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม มีการกระจายตัวของขนาดรูพรุนที่แคบ ให้ค่าพื้นที่ผิวสูงถึง 3,290 ตารางเมตรต่อกรัม โดยใช้ภาวะที่ KOH/anthracite = 4/1 และผ่านไนโตรเจนที่ 800 องศาเซลเซียส พบโครงสร้างภายในของถ่านหินเป็น micropore ผลการทดลองแสดงดังตาราง 2.5 – 2.7

ตารางที่2.5 ผลของอัตราส่วนระหว่างโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์กับแอนทราไซต์ต่อโครงสร้างรูพรุน (Lozano-Castello et al, 2001)

| Sample | KOH/anthr Ratio | $V(CO_2)$ ($cm^3/g$) | $V(N_2)$ ($cm^3/g$) | $V(N_2)$-$V(CO_2)$ | BET surface Area ($m^2/g$) | Micropore Contribution |
|---|---|---|---|---|---|---|
| UAK1-800 | 1:1 | 0.37 | 0.33 | <0 | 726 | 0.92 |
| UAK2-800 | 2:1 | 0.89 | 8/9 | 0.03 | 2021 | 0.93 |
| UAK3-800 | 3:1 | 0.72 | 1.35 | 0.63 | 2758 | 0.81 |
| UAK4-800 | 4:1 | 0.81 | 1.45 | 0.64 | 3290 | 0.85 |
| UAK5-800 | 5:1 | 0.73 | 1.44 | 0.71 | 3183 | 0.77 |

ตารางที่2.5 แสดงถึงลักษณะโครงสร้างรูพรุน ซึ่งได้มาจากการใช้ BET equation ในการดูดซับแก๊สไนโตรเจนที่ 77 เคลวิน และการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ 273 เคลวิน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนขนาดเล็กเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องเมื่อเพิ่มอัตราส่วน และที่อัตราส่วนระหว่างโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์กับแอนทราไซต์ 4:1 จะให้ค่าสูงสุด

ตารางที่ 2.6 ผลของการให้ความร้อนที่มีต่อโครงสร้างรูพรุน (Lozano-Castello et al, 2001)

| Sample | Heating Rate ($C^{o}$/min) | Carbonization Temperature ($^{o}C$) | Carbonization Time (h) | V($CO_2$) ($cm^3/g$) | V($N_2$) ($cm^3/g$) | BET ($m^2/g$) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| UAK2-800 | 5 | 700 | 1.0 | 0.86 | 0.89 | 2021 |
| UAK2-800a | 20 | 700 | 1.0 | 0.77 | 0.85 | 1851 |
| UAK2-800c | 5 | 800 | 1.0 | 0.81 | 0.96 | 2085 |
| UAK2-800c | 5 | 700 | 0.5 | 0.80 | 0.80 | 1784 |
| UAK2-800d | 5 | 700 | 2.0 | 0.86 | 0.91 | 2111 |

ตารางที่2.6 แสดงผลของโครงสร้างรูพรุนของถ่านกัมมันต์ที่ตัวแปรต่างๆกัน ถ้าเปรียบเทียบผลของอัตราการให้ความร้อนระหว่างกระบวนการไพโรไลซิส พบว่า อัตราการให้ความร้อนที่ต่ำกว่าจะให้ค่าปริมาตรของรูพรุนขนาดเล็กที่สูงกว่า เนื่องจากในระหว่างการให้ความร้อน โปแตสเซียมไฮดรอกไซด์จะเกิดการหลอมเหลว ( จุดหลอมเหลว 360 องศาเซลเซียส ) และที่อัตราการให้ความร้อนต่ำ การสัมผัสกันระหว่างคาร์บอนและโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ที่หลอมเหลวจะเกิดได้ดีกว่า นอกจากนี้ในการกระตุ้นด้วยโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ จะเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับออกซิเจนขึ้นที่บริเวณพื้นผิว ซึ่งเป็นผลให้เกิดคาร์บอนแก๊สซิฟิเคชันขึ้น และปล่อยผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊ส เช่น แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ออกมา โดยที่อัตราการให้ความร้อนต่ำนี้ กระบวนการนี้จะเกิดขึ้นอย่างช้าๆ และสามารถควบคุมได้ดีกว่าที่อัตราการให้ความร้อนสูง ปริมาตรรูพรุนขนาดเล็กที่เกิดขึ้นมีมากกว่า นอกจากนี้ยังแสดงถึงผลของอุณหภูมิและเวลาในการกระตุ้น พบว่า ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส และที่เวลาในการกระตุ้นสูงกว่าจะได้ถ่านกัมมันต์ที่มีปริมาตรของรูพรุนสูงกว่า

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.7 ผลของอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนที่มีต่อโครงสร้างรูพรุน (Lozano-Castello et al, 2001)

| Sample | $N_2$ Flow Rate (ml/min) | $V(CO_2)$ ($cm^3/g$) | $V(N_2)$ ($cm^3/g$) | BET surface Area ($m^2/g$) |
|---|---|---|---|---|
| UAK2-80 | 80 | 0.43 | 0.43 | 945 |
| UAK2-200 | 200 | 0.61 | 0.58 | 1305 |
| UAK2-400 | 400 | 0.73 | 0.71 | 1580 |
| UAK2-800 | 800 | 0.86 | 0.89 | 2021 |
| UAK4-200 | 200 | 0.69 | 1.28 | 2637 |
| UAK4-400 | 400 | 0.70 | 1.34 | 2817 |
| UAK4-800 | 800 | 0.81 | 1.45 | 3290 |

ตารางที่2.7 แสดงอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนซึ่งเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญมากในการรเตรียมถ่านกัมมันต์โดยวิธีการกระตุ้นด้วยโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ ตัวแปรนี้มีผลต่อโครงสร้างรูพรุนสุดท้ายที่เกิดขึ้นของถ่านกัมมันต์ในทุกๆอัตราส่วนของโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์กับแอนทราไซต์ ปรากฏการณ์นี้สามารถอธิบายได้จากการเกิดโปแตสเซียมระหว่างกระบวนการไพโรไลซิส โปแตสเซียมจะเปลี่ยนแปลงอย่างช้าๆระหว่างการเกิดปฏิกิริยาระหว่างคาร์บอนและโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ ถ้าโปแตสเซียมถูกกำจัดออกจากปฏิกิริยา ( ใช้อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนสูง ) สมดุลของปฏิกิริยาจะถูกแทนที่ด้วยการผลิตโปแตสเซียมมากขึ้น เพื่อกลับเข้าสู่สมดุล ทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาระหว่างคาร์บอนและโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้น

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# บทที่ 3
# การดำเนินงานทดลอง

## 3.1 รูปแบบการศึกษา

งานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยเชิงทดลองในห้องปฏิบัติการ เพื่อศึกษาหาภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมถ่านกัมมันต์จากถ่านหินลิกไนต์ โดยการกระตุ้นทางเคมีและทางกายภาพ พร้อมทั้งเปรียบเทียบสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการเตรียมทั้งสองวิธี ในการกระตุ้นทางเคมีนั้นจะใช้สารละลายโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) เป็นสารเคมีที่ใช้กระตุ้น ส่วนทางกายภาพจะกระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ($CO_2$) กับไอน้ำร้อนยวดยิ่ง ($H_2O$) ซึ่งทั้งสองวิธีจะทำการกระตุ้นในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง (Fixed bed) โดยข้อมูลที่ได้จากการศึกษานี้อาจสามารถนำไปเป็นข้อมูลพื้นฐานในการขยายส่วนของเครื่องปฏิกรณ์ ที่จะผลิตในเชิงอุตสาหกรรมต่อไป

## 3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

1. ครูซิเบิลพอร์ซเลน ความจุ 20 มิลลิลิตร และ 250 มิลลิลิตร พร้อมฝา
2. เครื่องเขย่าตามแนวราบ
3. เครื่องชั่งละเอียด
4. เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง
5. เครื่องวัดพื้นที่ผิวของ Micromeritics รุ่น FlowSorb 2300
6. ชุดกรองสุญญากาศ และกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42
7. ชุดกระตุ้นแบบเบดนิ่ง เป็นลักษณะเตาให้ความร้อนแบบแนวตั้ง (vertical) สามารถปรับอุณหภูมิได้สูงถึง 1200 องศาเซลเซียส ตรงส่วนกลางจะเป็นส่วนของเครื่องปฏิกรณ์เพื่อใส่ตัวอย่างเป็นท่อทรงกระบอกมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.025 เมตร ยาว 0.40เมตร
8. เครื่องปฏิกรณ์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.02 เมตร ยาว 0.50 เมตร ทำจาก SS. 304
9. ชุดวัดอัตราการไหลของแก๊ส (bubble flow)
10. หม้อดูดความชื้น (desicator)
11. เตาเผาไฟฟ้า (Muffle furnace) ยี่ห้อ Carbolite รุ่น ESF 12/23
12. ตู้อบ (Oven) ยี่ห้อ WT binder
13. แร่งขนาดต่างๆ ดังนี้ 500 $\mu$m , 850 $\mu$m , 1.18 mm , 2.0 mm
14. Regulator สำหรับปรับความดันของแก๊ส
15. Scanning Electron Microscope(SEM) รุ่น JSM-5410 LV

16. Tube furnace ยี่ห้อ Carbolite รุ่น 21100

## 3.3 สารเคมีที่ใช้

1. กรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น (HCl)
2. โซเดียมคาร์บอเนต ($Na_2CO_3$)
3. โซเดียมฟอสเฟต ($Na_2HPO_4$)
4. โซเดียมไทโอซัลเฟต ($Na_2S_2O_3.5H_2O$)
5. แป้ง (Starch)
6. โปแตสเซียมฟอสเฟต ($KH_2PO_4$)
7. โปแตสเซียมไอโอเดต ($KIO_3$)
8. โปแตสเซียมไอโอไดด์ (KI)
9. โปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH)
10. เมทิลีนบลู
11. ไอโอดีน ($I_2$)

## 3.4 วัตถุดิบ

วัตถุดิบที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้เป็นถ่านหินลิกไนต์ ซึ่งได้ความอนุเคราะห์มาจาก เหมืองแม่เมาะ อ. แม่เมาะ จ. ลำปาง มีลักษณะเป็นก้อนแข็งขนาดใหญ่ สีดำเทา โดยจะนำมาทุบให้มีขนาดเล็กลงเหลือประมาณ 1 – 2 ซม.

## 3.5 ขั้นตอนการดำเนินงานทดลอง

1. วิเคราะห์สมบัติโดยประมาณของลิกไนต์ คือ
   - ปริมาณสารระเหย (VM)
   - ปริมาณเถ้า (Ash)
   - ปริมาณคาร์บอนคงตัว (FC)

   ทำการวิเคราะห์ตาม ASTM D 3172-86
2. การคาร์บอไนซ์ตัวอย่าง
   - ทำการทดลองโดยศึกษาอุณหภูมิที่ 350 –500 องศาเซลเซียส ที่เวลา 45 – 120 นาที
   - ชั่งตัวอย่างหนักประมาณ 50 กรัม ใส่ในถ้วยครูซิเบิลขนาด 250 มิลลิลิตร
   - เมื่ออุณหภูมิของเตา Muffle furnace ถึงจุดที่ตั้งไว้นำถ้วยครูซิเบิลพร้อมตัวอย่างใส่ในเตาเผา เมื่อครบเวลาที่ต้องการเอาออกจากเตา ทิ้งให้เย็นในหม้อ

ดูดความชื้น จากนั้นนำออกมาชั่งเพื่อหาปริมาณผลิตภัณฑ์ และเก็บตัวอย่างใส่กระป๋องปิดฝาให้สนิท

- ทำการวิเคราะห์สมบัติโดยประมาณของถ่านชาร์ตาม ASTM D 3172-86 เพื่อหาภาวะที่เหมาะสมในการคาร์บอไนซ์ของลิกไนต์
- ทำการคาร์บอไนซ์ลิกไนต์ โดยใช้ภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากการคาร์บอไนซ์ให้ได้ปริมาณผลิตภัณฑ์อย่างน้อย 2 กิโลกรัม
- นำถ่านที่ได้ไปคัดขนาดตามที่ต้องการ แล้วจึงนำไปกระตุ้นเพื่อหาภาวะที่เหมาะสมในการกระตุ้นต่อไป

3. การกระตุ้นถ่านชาร์

ในงานวิจัยศึกษาการกระตุ้นด้วยกัน 2 วิธี คือ การกระตุ้นทางเคมีและทางกายภาพ โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.1 การกระตุ้นทางเคมี ด้วยสารละลายโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ โดยจะมีการแปรอัตราส่วนสารกระตุ้นต่อถ่านชาร์ 0.3:1 – 0.9:1 อุณหภูมิ 500 – 900 องศาเซลเซียส เวลาตั้งแต่ 60 – 240 นาที และขนาดของอนุภาค 0.5 ถึง 2.0 มิลลิเมตร ขั้นตอนการกระตุ้นมีดังต่อไปนี้

3.1.1 ศึกษาตัวแปรความเข้มข้นของ KOH

- ชั่งถ่านตัวอย่าง 20 กรัม ขนาด 0.85 – 1.18 มิลลิเมตร ใส่ในขวดรูปชมพู่
- ชั่งโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์มาจำนวน 6, 8, 10, 12, 14, 16 และ 18 กรัม ใส่บีกเกอร์ เติมน้ำกลั่นจำนวน 100 มิลลิลิตร ใช้แท่งแก้วคนจนละลายหมด จะได้อัตราส่วนสารกระตุ้นต่อถ่านชาร์ 0.3:1, 0.4:1, 0.5:1, 0.6:1, 0.7:1, 0.8:1 และ 0.9:1 ตามลำดับ
- เทสารละลายโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ลงไปในขวดรูปชมพู่ เขย่าเบาๆให้เนื้อถ่านชุ่มไปด้วยสารละลาย ปิดฝาแล้วแช่ทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง
- นำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
- บรรจุสารที่ได้ในเครื่องปฏิกรณ์ แล้วนำไปกระตุ้นในเตาเผาแบบท่อ ในบรรยากาศของแก๊สไนโตรเจน ด้วยอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนคงที่ที่ 1,000 มิลลิลิตรต่อนาที
- ปรับตั้งอุณหภูมิ และกำหนดเวลาที่ต้องการ คือ ทำการกระตุ้นที่ 500 องศาเซลเซียส นาน 1 ชั่วโมง , 500 องศาเซลเซียส นาน 4 ชั่วโมง , 800 องศาเซลเซียส นาน 1 ชั่วโมง และ ที่ 800 องศาเซลเซียส นาน 4 ชั่วโมง
- นำเครื่องปฏิกรณ์หลังการกระตุ้นมาทำให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

- นำผลิตภัณฑ์ที่มาทำการล้างเถ้าบนเครื่องกรองสุญญากาศ ใช้กระดาษกรองเบอร์ 42 ล้างด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นร้อยละ 10 โดยปริมาตร จำนวน 100 มิลลิลิตร เตรียมได้โดยใช้กรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นจำนวน 10 มิลลิลิตร ค่อยๆเทใส่ลงไปในน้ำกลั่นจำนวน 90 มิลลิลิตร กวนผสมด้วยแท่งแก้ว แล้วต้มให้ร้อน นำไปล้างจำนวน 3 ครั้ง แล้วล้างตามด้วยน้ำร้อน 3 ครั้ง ครั้งละ 200 มิลลิลิตร
- อบให้แห้งในเตาอบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส
- นำไปวิเคราะห์สมบัติต่างๆ

3.1.2 ศึกษาตัวแปรอุณหภูมิที่ใช้ในการกระตุ้น

- ชั่งถ่านตัวอย่าง 20 กรัม ขนาด 0.85 – 1.18 มิลลิเมตร ใส่ในขวดรูปชมพู่
- เตรียมอัตราส่วนสารกระตุ้นต่อถ่านชาร์ 0.7:1
- กวนผสมแล้วแช่ไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
- อบให้แห้งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส
- บรรจุสารที่ได้ในเครื่องปฏิกรณ์ แล้วนำไปกระตุ้นในเตาเผาแบบท่อ ในบรรยากาศของแก๊สไนโตรเจน ด้วยอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนคงที่ที่ 1,000 มิลลิลิตรต่อนาที
- ปรับตั้งอุณหภูมิ และกำหนดเวลาที่ต้องการ คือ ที่ 500 , 600 , 700 , 800 และ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 และ 4 ชั่วโมง
- นำเครื่องปฏิกรณ์หลังการกระตุ้นมาทำให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง
- นำผลิตภัณฑ์ที่มาทำการล้างเถ้าบนเครื่องกรองสุญญากาศ ใช้กระดาษกรองเบอร์ 42 ล้างด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นร้อยละ 10 โดยปริมาตร ต้มให้ร้อน นำไปล้างจำนวน 3 ครั้ง ครั้งละ 100 มิลลิลิตร แล้วล้างตามด้วยน้ำร้อน 3 ครั้ง ครั้งละ 200 มิลลิลิตร
- อบให้แห้งในเตาอบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส
- นำไปวิเคราะห์สมบัติต่างๆ

3.1.3 ศึกษาตัวแปรเวลาที่ใช้กระตุ้น

- ชั่งถ่านตัวอย่าง 20 กรัม ขนาด 0.85 – 1.18 มิลลิเมตร ใส่ในขวดรูปชมพู่
- เตรียมอัตราส่วนสารกระตุ้นต่อถ่านชาร์ 0.7:1
- กวนผสมแล้วแช่ไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
- อบให้แห้งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

- บรรจุสารที่ได้ในเครื่องปฏิกรณ์ แล้วนำไปกระตุ้นในเตาเผาแบบท่อ ในบรรยากาศของแก๊สไนโตรเจน ด้วยอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนคงที่ที่ 1,000 มิลลิลิตรต่อนาที
- ปรับตั้งอุณหภูมิ และกำหนดเวลาที่ต้องการ คือ ที่ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 และ 4 ชั่วโมง
- นำเครื่องปฏิกรณ์หลังการกระตุ้นมาทำให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง
- นำผลิตภัณฑ์ที่มาทำการล้างเถ้าบนเครื่องกรองสุญญากาศ ใช้กระดาษกรองเบอร์ 42 ล้างด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นร้อยละ 10 โดยปริมาตร ต้มให้ร้อน นำไปล้างจำนวน 3 ครั้ง ครั้งละ 100 มิลลิลิตร แล้วล้างตามด้วยน้ำร้อน 3 ครั้ง ครั้งละ 200 มิลลิลิตร
- อบให้แห้งในเตาอบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส
- นำไปวิเคราะห์สมบัติต่างๆ

3.1.4 ศึกษาตัวแปรขนาดอนุภาค

- ชั่งถ่านตัวอย่าง 20 กรัม ขนาด 0.50 – 0.85 , 0.85 – 1.18 และ 1.18 – 2.00 มิลลิเมตร ใส่ในขวดรูปชมพู่
- เตรียมอัตราส่วนสารกระตุ้นต่อถ่านชาร์ 0.7:1
- กวนผสมแล้วแช่ไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
- อบให้แห้งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
- บรรจุสารที่ได้ในเครื่องปฏิกรณ์ แล้วนำไปกระตุ้นในเตาเผาแบบท่อ ในบรรยากาศของแก๊สไนโตรเจน ด้วยอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนคงที่ที่ 1,000 มิลลิลิตรต่อนาที
- ปรับตั้งอุณหภูมิ และกำหนดเวลาที่ต้องการ คือ ที่ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง
- นำเครื่องปฏิกรณ์หลังการกระตุ้นมาทำให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง
- นำผลิตภัณฑ์ที่มาทำการล้างเถ้าบนเครื่องกรองสุญญากาศ ใช้กระดาษกรองเบอร์ 42 ล้างด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นร้อยละ 10 โดยปริมาตร ต้มให้ร้อน นำไปล้างจำนวน 3 ครั้ง ครั้งละ 100 มิลลิลิตร แล้วล้างตามด้วยน้ำร้อน 3 ครั้ง ครั้งละ 200 มิลลิลิตร
- อบให้แห้งในเตาอบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส
- นำไปวิเคราะห์สมบัติต่างๆ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.2 การกระตุ้นทางกายภาพ ด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำร้อนยิ่งยวด โดยจะมีการแปรค่าอุณหภูมิในการกระตุ้นที่ 750 – 900 องศาเซลเซียส เวลาตั้งแต่ 1 – 4 ชั่วโมง และขนาดของอนุภาค 0.5 ถึง 2.0 มิลลิเมตร มีขั้นตอนการกระตุ้นดังต่อไปนี้

3.2.1 ศึกษาตัวแปรอุณหภูมิและเวลาในการกระตุ้น

- ชั่งถ่านตัวอย่าง 20 กรัม ขนาด 0.85 – 1.18 มิลลิเมตร บรรจุใส่ในเครื่องปฏิกรณ์
- นำมากระตุ้นในเตาเผาแบบท่อ ป้อนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ปริมาณ 500 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที และป้อนไอน้ำปริมาณ 10 กรัมต่อนาที
- ปรับตั้งอุณหภูมิ และกำหนดเวลาที่ต้องการ คือ 750 – 900 องศาเซลเซียส เวลาตั้งแต่ 1 – 4 ชั่วโมง
- นำเครื่องปฏิกรณ์หลังการกระตุ้นมาทำให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง
- นำถ่านกัมมันต์ที่ได้ไปวิเคราะห์สมบัติต่างๆ

3.2.2 ศึกษาตัวแปรขนาดอนุภาคของถ่าน

- ชั่งถ่านตัวอย่าง 20 กรัม ขนาด 0.50 – 0.85 , 0.85 – 1.18 และ 1.18 – 2.00 มิลลิเมตร บรรจุใส่ในเครื่องปฏิกรณ์
- นำมากระตุ้นในเตาเผาแบบท่อ ป้อนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ปริมาณ 500 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที และป้อนไอน้ำปริมาณ 10 กรัมต่อนาที
- ปรับตั้งอุณหภูมิ และกำหนดเวลาที่ต้องการ ตามภาวะที่เหมาะสมในขั้นตอน 3.2.1
- นำเครื่องปฏิกรณ์หลังการกระตุ้นมาทำให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง
- นำถ่านกัมมันต์ที่ได้ไปวิเคราะห์สมบัติต่างๆ

4. การวิเคราะห์สมบัติของถ่านกัมมันต์

ทำการวิเคราะห์สมบัติต่างๆของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ดังนี้

4.1 สมบัติการดูดซับไอโอดีน

4.2 สมบัติการดูดซับเมทิลีนบลู

4.3 ความหนาแน่นเชิงปริมาตร

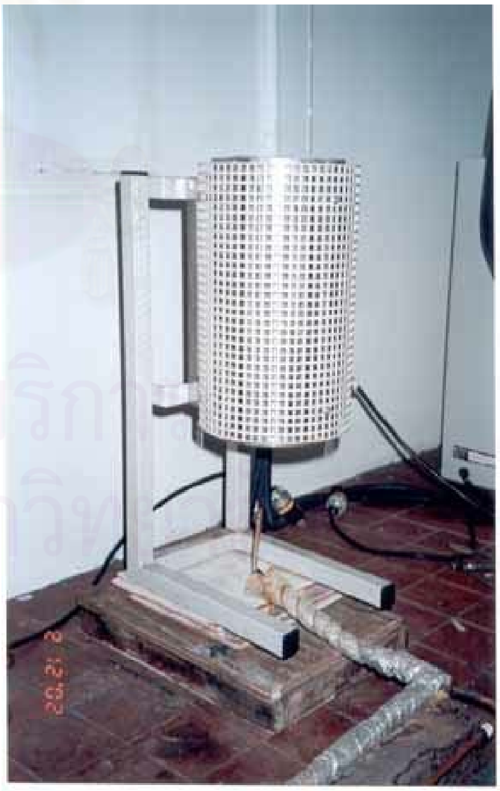
4.4 ปริมาณเถ้า

4.5 พื้นที่ผิวรูพรุน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 3.1 ภาพแสดงชุดเครื่องมือการกระตุ้น

รูปที่ 3.2 เครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้ทำการกระตุ้น



รูปที่ 3.3 เตาให้ความร้อนแบบแนวตั้ง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# บทที่ 4
# ผลและอภิปรายผลงานวิจัย

จากการดำเนินการทดลองในห้องปฏิบัติงานตามที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 3 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทดลองได้นำเสนอในรูปแบบของตารางและกราฟ ตามลำดับดังนี้

4.1 สมบัติของวัตถุดิบ

4.1.1 สมบัติเบื้องต้นของถ่านหินลิกไนต์ จากเหมืองแม่เมาะ อ.แม่เมาะ จ.ลำปาง (Dry basis) มีดังต่อไปนี้

| สมบัติ | ถ่านหินลิกไนต์ |
|---|---|
| เถ้า (Ash, %) | 24.89 |
| สารระเหย (VM, %) | 41.73 |
| คาร์บอนคงตัว (FC, %) | 33.38 |

จากสมบัติเบื้องต้นของถ่านหินลิกไนต์พบว่ามีเถ้าและสารระเหยมากซึ่งเป็นสมบัติเฉพาะของถ่านหินลิกไนต์ และจากค่าคาร์บอนคงตัวต่ำ การจะนำไปทำถ่านกัมมันต์จึงควรทำการคาร์บอไนซ์ก่อนเพื่อให้ได้ค่าคาร์บอนคงตัวสูง

4.1.2 ลักษณะของถ่านหินลิกไนต์

ถ่านหินลิกไนต์มีลักษณะ เป็นก้อนแข็ง สีดำเทา ดังรูปที่ 4.1(A) และเมื่อผ่านการคาร์บอไนซ์แล้วทำการบดคัดขนาด จะมีลักษณะเป็นสีดำ แข็ง เปราะ ดังรูปที่ 4.1(B)

(A) (B)

รูปที่ 4.1 ลักษณะของถ่านหินลิกไนต์ก่อนการคาร์บอไนซ์ (A) และบดคัดขนาดหลังการคาร์บอไนซ์ (B)

## 4.2 ภาวะที่เหมาะสมในการคาร์บอไนซ์ถ่านหินลิกไนต์

จากการวิเคราะห์สมบัติโดยประมาณ ได้แก่ ปริมาณความชื้น (M) เถ้า (Ash) สารระเหย (VM) และปริมาณคาร์บอนคงตัว (FC) ผลที่ได้จากการคาร์บอไนซ์ ตัวอย่างถ่านหินลิกไนต์ที่อุณหภูมิ 350, 400, 450 และ 500 องศาเซลเซียส ที่เวลา 45, 60, 90 และ 120 นาที ตามลำดับ แสดงรายละเอียดดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าวิเคราะห์โดยประมาณของถ่านหินลิกไนต์ ที่ได้จากการคาร์บอไนซ์ ณ ภาวะต่างๆ

| **ภาวะที่ใช้** | | | | On dry basis | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **อุณหภูมิ** ($^{o}C$) | **ระยะเวลา** (min) | YD (%wt) | M (%wt) | Ash (%wt) | VM (%wt) | FC (%wt) |
| 350 | 45 | 63.90 | 2.20 | 30.20 | 32.77 | 37.03 |
| 350 | 60 | 60.99 | 2.24 | 31.74 | 29.04 | 39.22 |
| 350 | 90 | 57.60 | 1.61 | 31.80 | 28.44 | 39.76 |
| 350 | 120 | 55.26 | 1.31 | 31.51 | 28.20 | 40.29 |
| 400 | 45 | 56.93 | 1.13 | 31.16 | 27.86 | 40.98 |
| 400 | 60 | 56.01 | 1.42 | 30.99 | 26.16 | 42.85 |
| 400 | 90 | 52.92 | 1.22 | 30.61 | 24.68 | 44.71 |
| 400 | 120 | 51.31 | 1.67 | 32.90 | 23.70 | 43.40 |
| 450 | 45 | 54.52 | 1.78 | 32.61 | 24.09 | 43.30 |
| 450 | 60 | 51.73 | 0.66 | 33.89 | 24.00 | 42.11 |
| 450 | 90 | 51.43 | 0.90 | 34.23 | 23.23 | 42.54 |
| 450 | 120 | 48.57 | 1.46 | 36.05 | 23.03 | 40.92 |
| 500 | 45 | 51.84 | 1.20 | 34.64 | 22.80 | 42.56 |
| 500 | 60 | 50.21 | 1.08 | 34.32 | 22.26 | 43.42 |
| 500 | 90 | 49.13 | 1.27 | 33.30 | 20.69 | 46.01 |
| 500 | 120 | 46.97 | 0.99 | 33.66 | 20.38 | 45.96 |

<u>หมายเหตุ</u> YD คือ ปริมาณผลิตภัณฑ์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ในการพิจารณาภาวะที่เหมาะสมในการคาร์บอไนซ์ถ่านชาร์นั้น จะพิจารณาถึงปริมาณสารระเหย ควบคู่ไปกับปริมาณผลิตภัณฑ์และคาร์บอนคงตัว จากข้อมูลของบุญชัย ตระกูลมหชัย (2537) [5] พบว่าถ่านที่เหมาะสมในการกระตุ้นควรมีสารระเหยไม่มากและไม่น้อยจนเกินไป คืออยู่ในช่วงประมาณร้อยละ 20 –25 นอกจากนี้ยังใช้ปริมาณผลิตภัณฑ์ (YD) ค่าคาร์บอนคงตัว (FC) และความประหยัดทางด้านพลังงาน มาพิจารณาควบคู่ไปด้วย จากการทดลองพบว่ามีหลายภาวะที่มีปริมาณสารระเหยอยู่ในช่วงร้อยละ 20 ถึง 25 ดังแสดงในตาราง 4.2

ตารางที่ 4.2 ค่าสมบัติถ่านชาร์ที่มีปริมาณสารระเหยอยู่ในช่วงร้อยละ 20–25 ที่ได้จากการทดลอง

| **ภาวะที่ใช้** | | | | On dry basis | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **อุณหภูมิ** ($^{o}$C) | **ระยะเวลา** (min) | YD (%wt) | M (%wt) | Ash (%wt) | VM (%wt) | FC (%wt) |
| 400 | 90 | 52.92 | 1.22 | 30.61 | 24.68 | 44.71 |
| 400 | 120 | 51.31 | 1.67 | 32.90 | 23.70 | 43.40 |
| 450 | 45 | 54.52 | 1.78 | 32.61 | 24.09 | 43.30 |
| 450 | 60 | 51.73 | 0.66 | 33.89 | 24.00 | 42.11 |
| 450 | 90 | 51.43 | 0.90 | 34.23 | 23.23 | 42.54 |
| 450 | 120 | 48.57 | 1.46 | 36.05 | 23.03 | 40.92 |

จะเห็นว่า ภาวะที่เหมาะสมในการคาร์บอไนซ์ถ่านหินลิกไนต์ คือที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 45 นาที เนื่องจากใช้เวลาและอุณหภูมิไม่สูงมากนักรวมทั้งให้ร้อยละผลิตภัณฑ์ที่สูงด้วย สมบัติที่ได้มีดังนี้ ปริมาณร้อยละผลิตภัณฑ์เท่ากับ 54.52 ร้อยละสารระเหยเท่ากับ 24.09 ร้อยละ ค่าคาร์บอนคงตัวเท่ากับ 43.30 และร้อยละ ปริมาณเถ้าเท่ากับ 32.61

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## 4.3 ภาวะที่เหมาะสมในการกระตุ้น

จากสมบัติของถ่านชาร์ที่ได้จากการคาร์บอไนซ์ถ่านหินลิกไนต์ ที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 45 นาที พบว่ามีพื้นที่ผิวบีอีที 3.37 ตารางเมตรต่อกรัม ซึ่งเป็นค่าที่น้อยมาก ดังนั้นจึงทำการศึกษาถึงภาวะที่เหมาะสมในการกระตุ้น เพื่อให้ถ่านชาร์มีพื้นที่ผิวสูงขึ้น โดยจะศึกษาวิธีการกระตุ้นด้วยกัน 2 วิธี คือการกระตุ้นทางเคมีและการกระตุ้นทางกายภาพ

### 4.3.1 การกระตุ้นทางเคมี

#### 4.3.1.1 ผลของการแปรอัตราส่วนสารกระตุ้นต่อถ่านชาร์

นำถ่านกัมมันต์ที่ได้จากภาวะต่างๆมาวิเคราะห์สมบัติ เพื่อหาภาวะที่เหมาะสมในการกระตุ้น ที่อัตราส่วนสารกระตุ้นต่อถ่านชาร์ 0.3:1, 0.4:1, 0.5:1, 0.6:1 ,0.7:1 ,0.8:1 และ 0.9:1 โดยวิเคราะห์ค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตร (BD) ปริมาณเถ้า (Ash) ค่าการดูดซับเมทิลีนบลู (MB) ค่าการดูดซับไอโอดีน (IA) พื้นที่ผิวบีอีที ($S_{BET}$) ผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.3 ถึง 4.6 โดยดูผลของการแปรอัตราส่วนสารกระตุ้นต่อถ่านชาร์ในการกระตุ้น ในรูปที่ 4.2 – 4.7

ตารางที่ 4.3 สมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นที่อัตราส่วนสารกระตุ้นต่อถ่านชาร์ต่างๆ ขนาดอนุภาค 0.85 – 1.18 มม. อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 1,000 มล./นาที อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

| KOH : char | Y (%) | BD g/cm$^3$ | Ash (%) | MB (mg/g) | IA (mg/g) | $S_{BET}$ (m$^2$/g) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 0.3 : 1 | 77.49 | 0.558 | 14.86 | 23 | 96 | * |
| 0.4 : 1 | 77.53 | 0.557 | 11.26 | 22 | 154 | * |
| 0.5 : 1 | 75.87 | 0.520 | 14.46 | 22 | 146 | * |
| 0.6 : 1 | 73.77 | 0.498 | 12.48 | 25 | 161 | * |
| 0.7 : 1 | 73.22 | 0.462 | 11.10 | 28 | 172 | * |

ตารางที่ 4.4 สมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นที่อัตราส่วนสารกระตุ้นต่อถ่านชาร์ต่างๆ ขนาดอนุภาค 0.85 – 1.18 มม. อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 1,000 มล./นาที อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

| KOH : char | Y (%) | BD $g/cm^3$ | Ash (%) | MB (mg/g) | IA (mg/g) | $S_{BET}$ ($m^2/g$) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 0.3 : 1 | 76.14 | 0.569 | 17.19 | 21 | 148 | * |
| 0.4 : 1 | 75.06 | 0.507 | 13.51 | 28 | 137 | * |
| 0.5 : 1 | 75.83 | 0.484 | 19.47 | 29 | 164 | * |
| 0.6 : 1 | 70.55 | 0.473 | 12.78 | 37 | 176 | * |
| 0.7 : 1 | 70.30 | 0.467 | 13.28 | 40 | 180 | * |

ตารางที่ 4.5 สมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นที่อัตราส่วนสารกระตุ้นต่อถ่านชาร์ต่างๆ ขนาดอนุภาค 0.85 – 1.18 มม. อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 1,000 มล./นาที อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

| KOH : char | Y (%) | BD $g/cm^3$ | Ash (%) | MB (mg/g) | IA (mg/g) | $S_{BET}$ ($m^2/g$) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 0.3 : 1 | 66.75 | 0.555 | 19.91 | 52 | 273 | * |
| 0.4 : 1 | 65.15 | 0.484 | 14.02 | 75 | 358 | * |
| 0.5 : 1 | 54.00 | 0.444 | 12.21 | 83 | 438 | * |
| 0.6 : 1 | 60.40 | 0.394 | 16.29 | 101 | 565 | * |
| 0.7 : 1 | 57.28 | 0.379 | 18.88 | 101 | 593 | * |
| 0.8 : 1 | 57.13 | 0.376 | 14.78 | 106 | 603 | * |
| 0.9 : 1 | 56.51 | 0.364 | 14.23 | 114 | 575 | * |

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

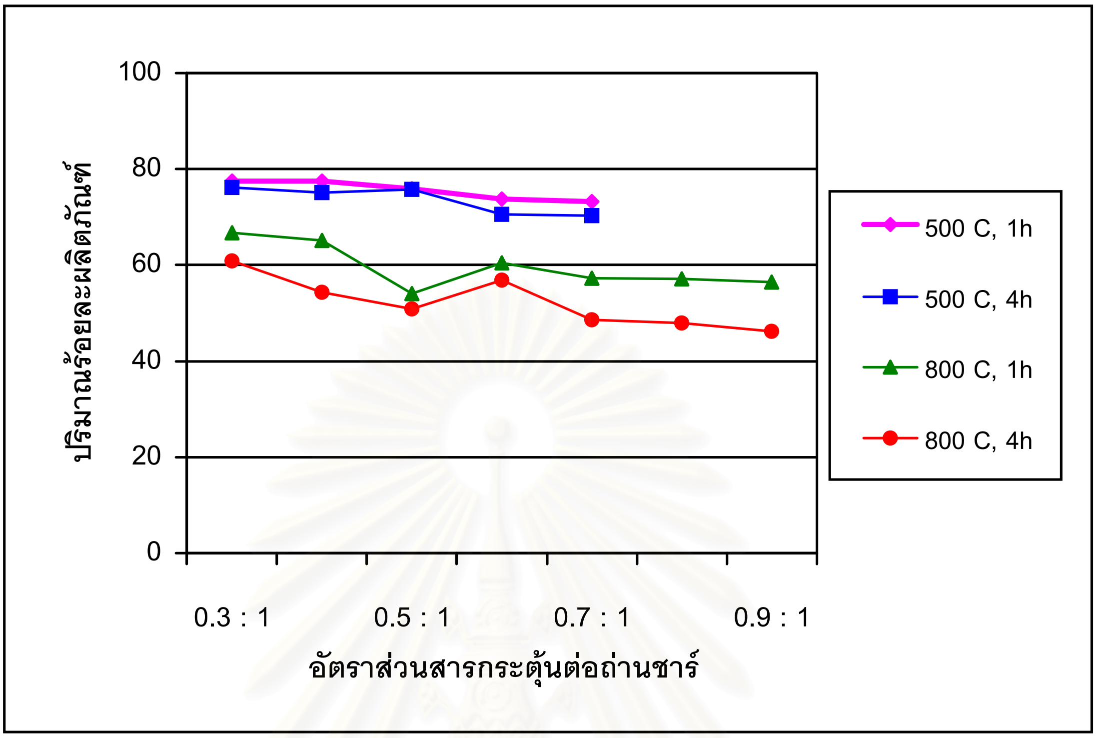
ตารางที่ 4.6 สมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นที่อัตราส่วนสารกระตุ้นต่อถ่านชาร์ต่างๆ ขนาดอนุภาค 0.85 – 1.18 มม. อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 1,000 มล./นาที อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

| KOH : char | Y (%) | BD $g/cm^3$ | Ash (%) | MB (mg/g) | IA (mg/g) | $S_{BET}$ ($m^2/g$) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 0.3 : 1 | 60.82 | 0.534 | 19.87 | 83 | 314 | 246 |
| 0.4 : 1 | 54.36 | 0.457 | 12.96 | 88 | 397 | * |
| 0.5 : 1 | 50.80 | 0.428 | 19.48 | 102 | 507 | 594 |
| 0.6 : 1 | 56.87 | 0.376 | 15.87 | 130 | 707 | * |
| 0.7 : 1 | 48.54 | 0.352 | 13.22 | 214 | 824 | 1069 |
| 0.8 : 1 | 47.95 | 0.341 | 12.69 | 216 | 844 | * |
| 0.9 : 1 | 46.21 | 0.338 | 15.32 | 221 | 836 | * |

หมายเหตุ * หมายถึง ไม่ได้ทำการวิเคราะห์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1. <u>ปริมาณร้อยละผลิตภัณฑ์</u>

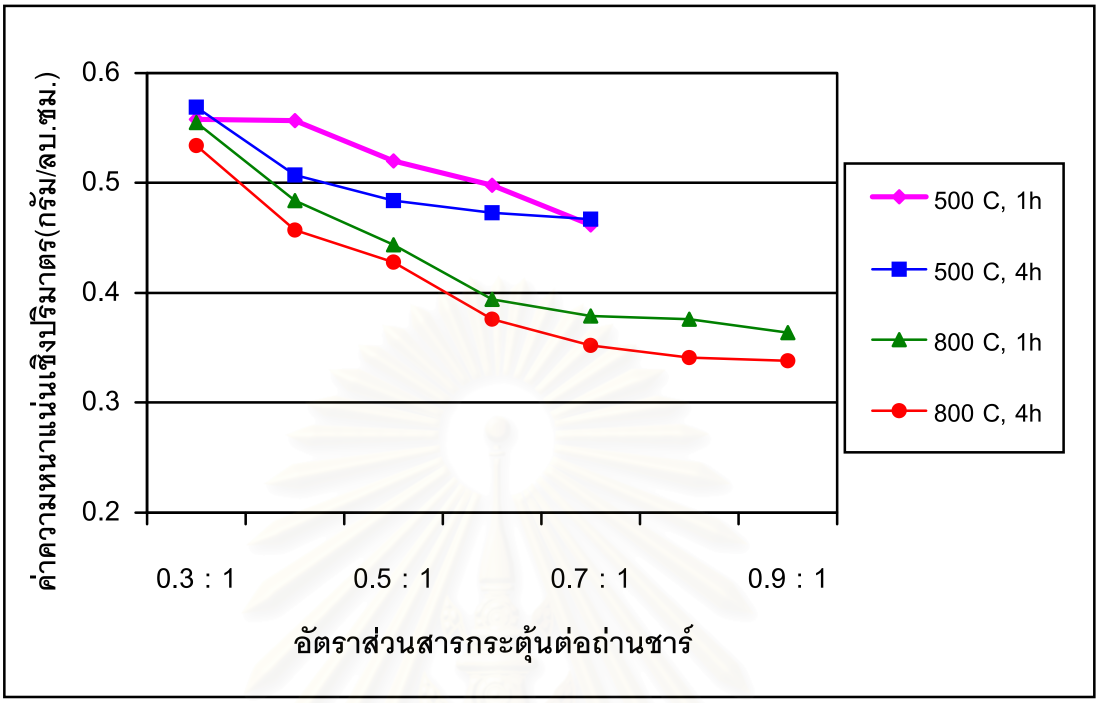



รูปที่ 4.2 ผลของอัตราส่วนสารกระตุ้นต่อถ่านชาร์ที่ใช้เตรียมถ่านกัมมันต์ต่อปริมาณร้อยละผลิตภัณฑ์ โดยใช้ลิกไนต์ 20 กรัม ขนาด 0.85 – 1.18 มม. อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 1,000 มล./นาที

จากรูปที่ 4.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณร้อยละผลิตภัณฑ์ของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้กับอัตราส่วนสารกระตุ้นต่อถ่านชาร์พบว่า เมื่อเพิ่มอัตราส่วนสารกระตุ้นต่อถ่านชาร์ปริมาณร้อยละผลิตภัณฑ์จะลดลง เนื่องจากมีจำนวน KOH แทรกเข้าไปในเนื้อถ่านมากขึ้น ส่งผลให้ปฏิกิริยาระหว่าง KOH กับผิวของคาร์บอนเกิดปฏิกิริยากันได้มากขึ้น แล้วจะมีการปลดปล่อยสารต่างๆออกมาจากโครงสร้างภายใน ซึ่งเป็นผลทำให้ถ่านชาร์เกิดการสูญเสียมวลขึ้น การสูญเสียมวลของถ่านชาร์ส่วนใหญ่มาจากการค่อยๆปลดปล่อยออกมาของน้ำและไฮโดรเจน เป็นผลมาจากการแทนที่ของ -H group ในโครงสร้างของถ่านหินด้วย –OK group นอกจากนี้การปลดปล่อยของไฮโดรเจนยังเกิดได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันของถ่านหินกับ KOH ไปเป็น $K_2CO_3$ และ $K_2O$ ดังสมการ $4KOH + CH_2 \longrightarrow K_2CO_3 + K_2O + 3H_2$

โดยที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส การเพิ่มอัตราส่วนสารกระตุ้นต่อถ่านชาร์ส่งผลเพียงเล็กน้อยต่อการลดลงของมวลในถ่านชาร์ เนื่องจากที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส KOH ยังมีบทบาทน้อยต่อปฏิกิริยาที่ผิวของคาร์บอน การสูญเสียมวลส่วนใหญ่เกิดเฉพาะการปลดปล่อยออกมาของน้ำและไฮโดรเจนเท่านั้น

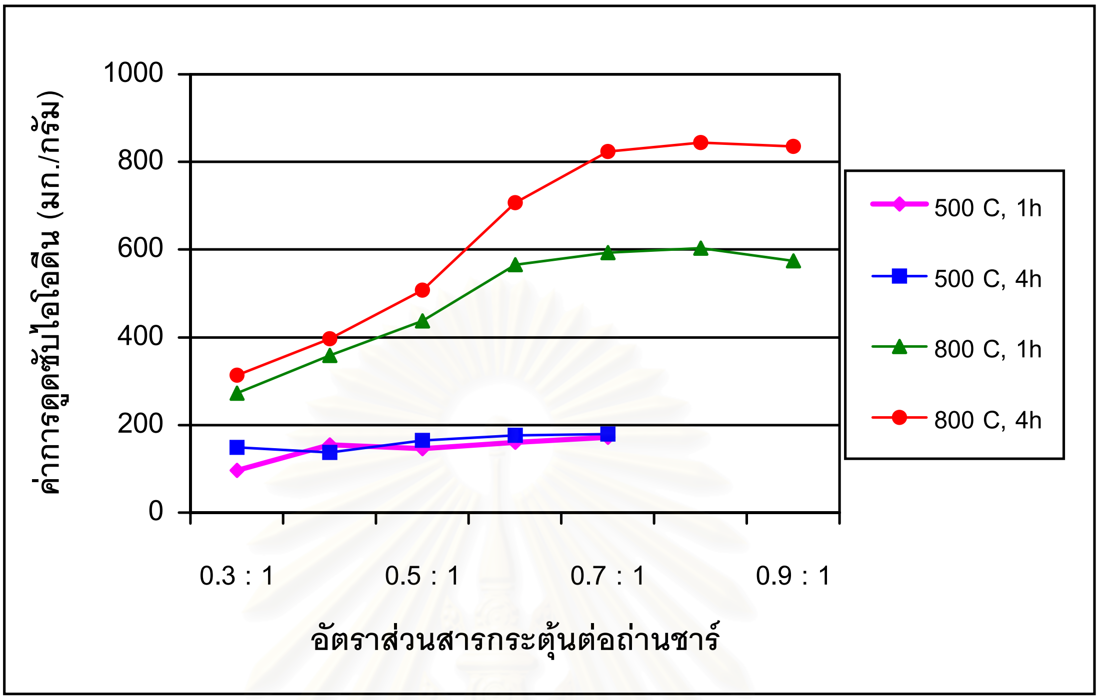
2. <u>ค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตร</u>




รูปที่ 4.3 ผลของอัตราส่วนสารกระตุ้นต่อถ่านชาร์ที่ใช้เตรียมถ่านกัมมันต์ต่อค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตร โดยใช้ลิกไนต์ 20 กรัม ขนาด 0.85 – 1.18 มม. อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 1,000 มล./นาที

จากรูปที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตรของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้กับอัตราส่วนสารกระตุ้นต่อถ่านชาร์ พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วนสารกระตุ้นต่อถ่านชาร์ ค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตรจะลดลงเป็นอย่างมาก โดยเฉพาะการกระตุ้นที่ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 และ 4 ชั่วโมง ที่อัตราส่วนสารกระตุ้นต่อถ่านชาร์ 0.6:1 ขึ้นไป ค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตรลดลงต่ำกว่า 0.4 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตรที่ลดลงนี้เนื่องจากการเพิ่มปริมาณ KOH มากขึ้น ปฏิกิริยาระหว่าง KOH กับผิวของคาร์บอนเกิดปฏิกิริยากันได้มากขึ้น จะมีการปลดปล่อยสารออกมาจากโครงสร้างภายใน ซึ่งโครงสร้างในส่วนนี้จะมีการพัฒนาไปเป็นโครงสร้างที่มีรูพรุน ทำให้ความหนาแน่นของถ่านลดลง แต่ที่อัตราส่วนสารกระตุ้นต่อถ่านชาร์มากกว่า 0.7:1 ขึ้นไป ค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตรจะลดลงเพียงเล็กน้อย เหตุผลเนื่องจากการเพิ่มปริมาณ KOH ที่มากเกินไป จะเกิดการอิ่มตัวของถ่านชาร์ที่ไม่สามารถดูดซึมสารละลายโปแตสเซียมเข้าไปได้อีก ทำให้ปฏิกิริยาของ KOH กับผิวของคาร์บอนเกิดขึ้นอย่างจำกัด โครงสร้างของถ่านไม่สามารถพัฒนาไปเป็นโครงสร้างที่มีรูพรุนเพิ่มขึ้นได้ ความหนาแน่นเชิงปริมาตรจึงไม่ลดลงไปอีก

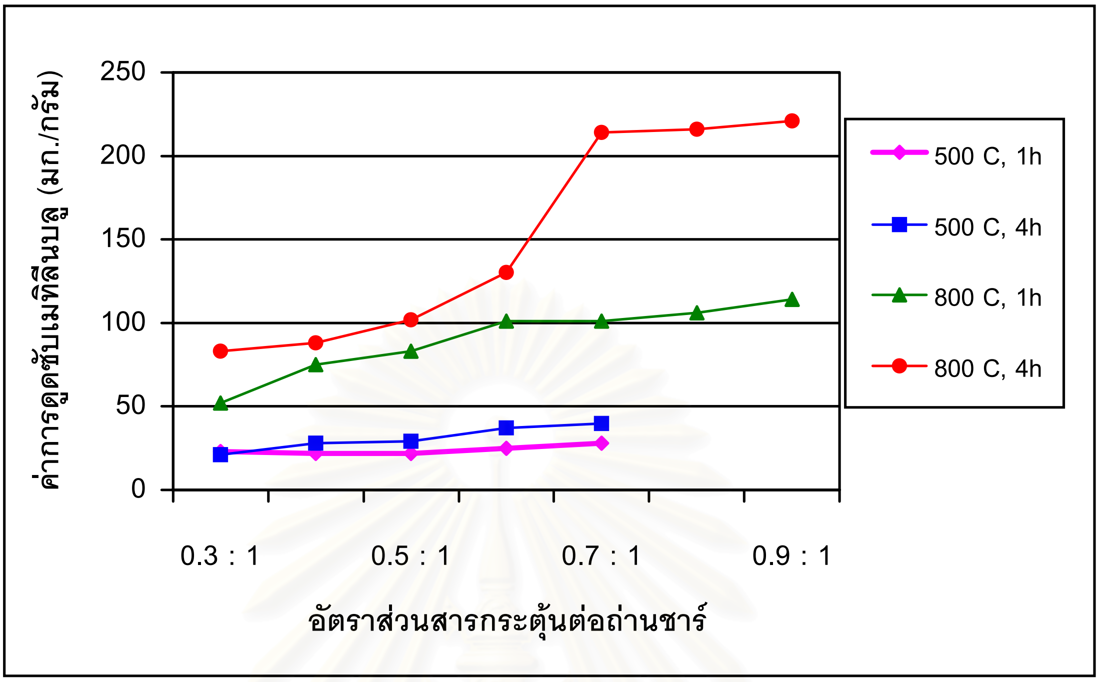
3. ค่าการดูดซับไอโอดีน




รูปที่ 4.4 ผลของอัตราส่วนสารกระตุ้นต่อถ่านชาร์ที่ใช้เตรียมถ่านกัมมันต์ต่อค่าการดูดซับไอโอดีน โดยใช้ลิกไนต์ 20 กรัม ขนาด 0.85 – 1.18 มม. อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 1,000 มล./นาที

จากรูปที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้กับอัตราส่วนสารกระตุ้นต่อถ่านชาร์ พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วนสารกระตุ้นต่อถ่านชาร์ในช่วง 0.3:1 ถึง 0.7:1 ค่าการดูดซับไอโอดีนจะสูงขึ้น แสดงให้เห็นว่าในโครงสร้างของถ่านมีรูพรุนขนาดเล็กเพิ่มมากขึ้นในช่วงนี้ อธิบายได้จากเหตุผลที่สอดคล้องกันจากการที่เมื่อเพิ่มปริมาณ KOH แล้วมีการปลดปล่อยสารต่างๆออกมามากขึ้น เกิดเป็นโครงสร้างที่มีรูพรุนมากขึ้นตาม ซึ่งจะส่งผลให้ถ่านชาร์สามารถดูดซับไอโอดีนได้มากขึ้นด้วย และเนื่องจากโปแตสเซียมเองมีโมเลกุลขนาดเล็ก จึงทำให้โครงสร้างของถ่านส่วนใหญ่เกิดเป็นรูพรุนขนาดเล็กขึ้นมาก และที่อัตราส่วนสารกระตุ้นต่อถ่านชาร์มากกว่า 0.7:1 ปริมาณการดูดซับของไอโอดีนเริ่มที่จะคงที่ (สังเกตได้จากการกระตุ้นที่ 800 องศาเซลเซียส ที่เวลา 1 และ 4 ชั่วโมง) เหตุผลเนื่องจากอัตราส่วนสารกระตุ้นต่อถ่านชาร์มากกว่า 0.7:1 ปริมาณรูพรุนขนาดเล็กไม่ได้เพิ่มขึ้นไปกว่านี้อีกแล้ว ค่าการดูดซับไอโอดีนจึงไม่สูงขึ้น

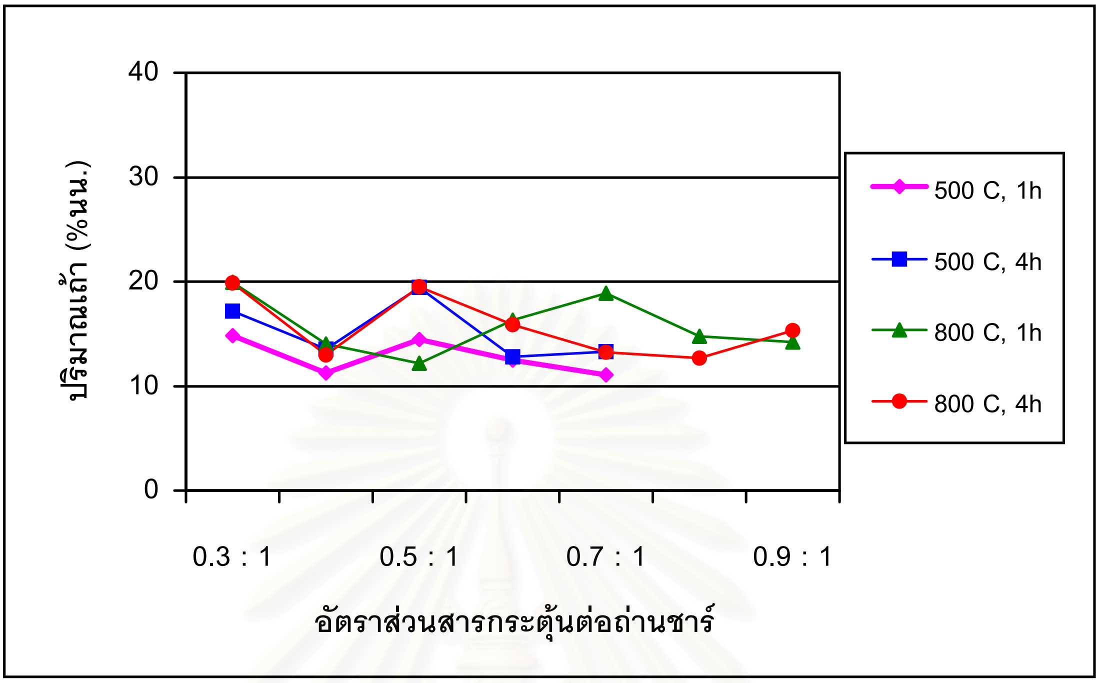
4. <u>ค่าการดูดซับเมทิลีนบลู</u>




รูปที่ 4.5 ผลของอัตราส่วนสารกระตุ้นต่อถ่านชาร์ที่ใช้เตรียมถ่านกัมมันต์ต่อค่าการดูดซับเมทิลีนบลู โดยใช้ลิกไนต์ 20 กรัม ขนาด 0.85 – 1.18 มม. อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 1,000 มล./นาที

จากรูปที่ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดซับเมทิลีนบลูของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้กับอัตราส่วนสารกระตุ้นต่อถ่านชาร์พบว่าเมื่ออัตราส่วนสารกระตุ้นต่อถ่านชาร์ ค่าการดูดซับเมทิลีนบลูจะสูงขึ้น แสดงว่าการเพิ่มปริมาณของ KOH ทำให้โครงสร้างถ่านมีรูพรุนขนาดกลางเพิ่มขึ้นมาด้วย สาเหตุเนื่องจากโครงสร้างของถ่านหินมีความแข็งแรงไม่เพียงพอ เมื่อเกิดรูพรุนขนาดเล็กมากขึ้น จะเกิดการแตกของโครงสร้างบางส่วน ทำให้รูพรุนขนาดเล็กนั้นแตกรวมกันเป็นรูพรุนขนาดกลาง และการกระตุ้นที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 และ 4 ชั่วโมง ค่าการดูดซับเมทิลีนบลูที่ได้ จะสูงมากกว่าและเห็นการเปลี่ยนแปลงได้ชัดเจนกว่าการกระตุ้นที่ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 และ 4 ชั่วโมง และที่อัตราส่วนสารกระตุ้นต่อถ่านชาร์มากกว่า 0.7:1 การดูดซับเมทิลีนบลูมีแนวโน้มคงที่ ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับการดูดซับไอโอดีน

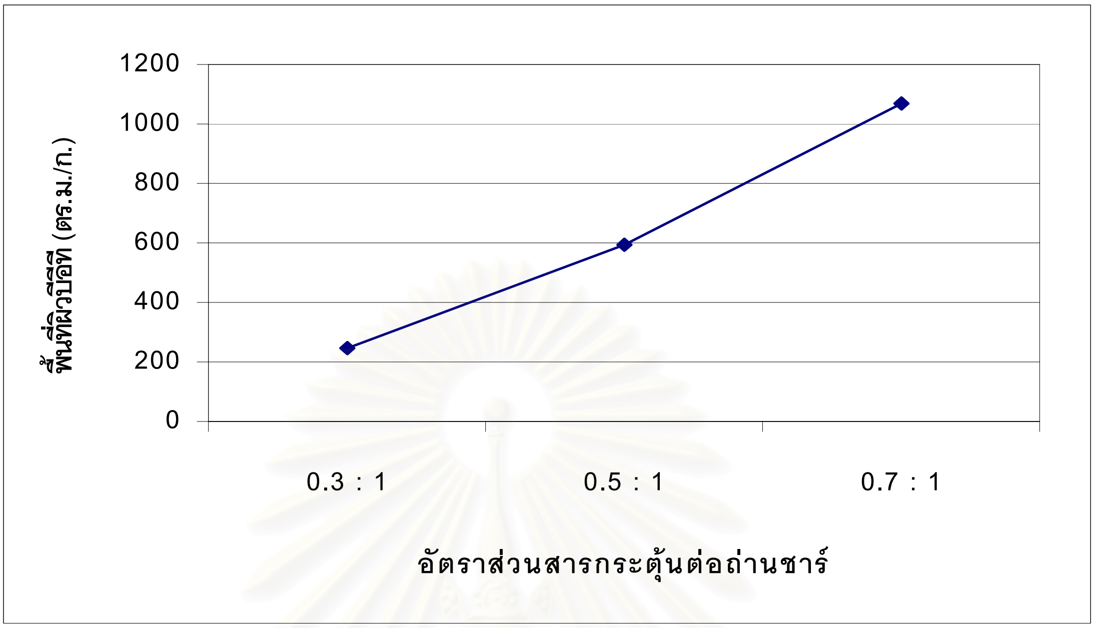
5. ปริมาณเถ้า




รูปที่ 4.6 ผลของอัตราส่วนสารกระตุ้นต่อถ่านชาร์ที่ใช้เตรียมถ่านกัมมันต์ต่อปริมาณของเถ้า โดยใช้ลิกไนต์ 20 กรัม ขนาด 0.85 – 1.18 มม. อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 1,000 มล./นาที

จากรูปที่ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเถ้าของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้กับอัตราส่วนสารกระตุ้นต่อถ่านชาร์ พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วนสารกระตุ้นต่อถ่านชาร์ ปริมาณของเถ้าที่ได้ไม่ค่อยมีความแตกต่างกันนัก ทั้งจากการกระตุ้นที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 และ 4 ชั่วโมง และการกระตุ้นที่ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 และ 4 ชั่วโมง แต่ปริมาณของเถ้าที่เกิดขึ้นจะอยู่ในช่วง 10 ถึง 20 % (โดยน้ำหนัก) ซึ่งปริมาณเถ้าในส่วนนี้จะมีปริมาณน้อยลงจากปริมาณเถ้าเดิมก่อนการกระตุ้น (เดิมร้อยละ 32.61) เนื่องจากในกระบวนการเตรียมถ่านกัมมันต์ทางเคมีจะมีขั้นตอนการล้างเถ้าหลังการกระตุ้นขึ้น ซึ่งขั้นตอนนี้สามารถลดปริมาณเถ้าให้น้อยลงได้

6. <u>ค่าพื้นที่ผิวบีอีที</u>




รูปที่ 4.7  ผลของอัตราส่วนสารกระตุ้นต่อถ่านชาร์ที่ใช้เตรียมถ่านกัมมันต์ต่อพื้นที่ผิวบีอีที โดยใช้ลิกไนต์ 20 กรัม ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ขนาด 0.85 – 1.18 มม.  อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 1,000 มล./นาที

จากรูปที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้กับอัตราส่วนสารกระตุ้นต่อถ่านชาร์ พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณของ KOH ค่าพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์สูงขึ้น  โดยสูงมากกว่า 1,000 ตร.ม./ก. ที่อัตราส่วนสารกระตุ้นต่อถ่านชาร์ 0.7:1

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

#### 4.3.1.2 ผลของการแปรอุณหภูมิที่ใช้ในการกระตุ้น

นำถ่านกัมมันต์ที่ได้ภาวะที่เหมาะสมในการแปรอัตราส่วนสารกระตุ้นต่อถ่านชาร์ มาทำการแปรอุณหภูมิ ที่ 500, 600, 700, 800 และ 900 องศาเซลเซียส เพื่อวิเคราะห์หาภาวะที่เหมาะสมในการกระตุ้นต่อไป โดยวิเคราะห์ค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตร (BD) ปริมาณเถ้า (Ash) ค่าการดูดซับเมทิลีนบลู (MB) ค่าการดูดซับไอโอดีน (IA) พื้นที่ผิวบีอีที ($S_{BET}$) ผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.7 และ 4.8 โดยดูผลของการแปรอุณหภูมิในการกระตุ้น ในรูปที่ 4.8 – 4.13

ตารางที่ 4.7 สมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นที่อุณหภูมิต่างๆ ที่อัตราส่วนสารกระตุ้นต่อถ่านชาร์ 0.7:1 ขนาดอนุภาค 0.85 -1.18 มม. อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 1,000 มล./นาที เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

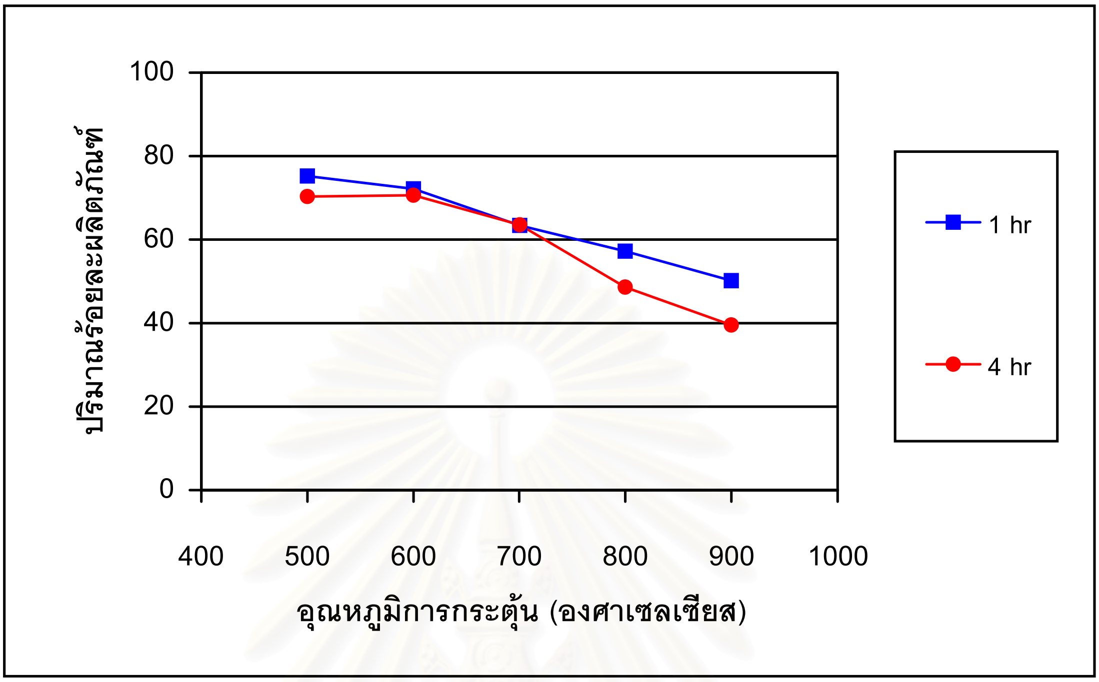
| Temperature ($^oC$) | Y (%) | BD $g/cm^3$ | Ash (%) | MB (mg/g) | IA (mg/g) | $S_{BET}$ ($m^2/g$) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 500 | 75.22 | 0.462 | 11.10 | 28 | 172 | * |
| 600 | 72.12 | 0.425 | 14.19 | 28 | 179 | * |
| 700 | 63.33 | 0.405 | 20.10 | 41 | 199 | * |
| 800 | 57.28 | 0.379 | 18.88 | 101 | 593 | * |
| 900 | 50.13 | 0.366 | 13.96 | 124 | 547 | * |

ตารางที่ 4.8 สมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นที่อุณหภูมิต่างๆ ที่อัตราส่วนสารกระตุ้นต่อถ่านชาร์ 0.7:1 ขนาดอนุภาค 0.85 -1.18 มม. อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 1,000 มล./นาที เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

| Temperature ($^oC$) | Y (%) | BD $g/cm^3$ | Ash (%) | MB (mg/g) | IA (mg/g) | $S_{BET}$ ($m^2/g$) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 500 | 70.30 | 0.467 | 13.28 | 40 | 180 | 27 |
| 600 | 70.63 | 0.410 | 15.98 | 77 | 325 | 174 |
| 700 | 63.47 | 0.390 | 19.33 | 89 | 393 | 358 |
| 800 | 48.54 | 0.352 | 13.22 | 214 | 824 | 1069 |
| 900 | 39.50 | 0.308 | 13.06 | 229 | 816 | 988 |

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1. <u>ปริมาณร้อยละผลิตภัณฑ์</u>




รูปที่ 4.8 ผลของอุณหภูมิที่ใช้เตรียมถ่านกัมมันต์ต่อปริมาณร้อยละผลิตภัณฑ์ โดยใช้ลิกไนต์ 20 กรัม ขนาด 0.85 – 1.18 มม. ที่อัตราส่วนสารกระตุ้นต่อถ่านชาร์ 0.7:1 อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 1,000 มล./นาที

จากรูปที่ 4.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณร้อยละผลิตภัณฑ์ของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้กับอุณหภูมิที่ใช้ในการกระตุ้น พบว่าเมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการกระตุ้นสูงขึ้น ปริมาณร้อยละผลิตภัณฑ์ลดลง เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิเป็นการทำให้ถ่านชาร์เกิดการสูญเสียมวลมากขึ้น ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 700 องศาเซลเซียส ปริมาณร้อยละผลิตภัณฑ์จะลดลงเพียงเล็กน้อย เนื่องจากการสูญเสียมวลส่วนใหญ่จะเกิดจากการปลดปล่อยของสารระเหยกับไฮโดรเจนเท่านั้น โดยเฉพาะปฏิกิริยาออกซิเดชันของถ่านหินกับ KOH ดังสมการที่ 1

$$4KOH + CH_2 \longrightarrow K_2CO_3 + K_2O + 3H_2 \qquad (1)$$

ซึ่งจะเกิดที่ช่วงอุณหภูมิระหว่าง 150 ถึง 450 องศาเซลเซียส และทาร์ในโครงสร้างส่วนใหญ่ยังคงเหลืออยู่ เนื่องจากที่อุณหภูมิ 450 ถึง 700 จะเกิดการหยุดการปลดปล่อยของทาร์ขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากการเกิด Cross-link อย่างรวดเร็วที่ถูกกระตุ้นให้เกิดโดยปฏิกิริยาระหว่าง –H group และ –OK group ที่อยู่บนคนละสายของพอลิเมอร์ในถ่านหิน แต่เมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการกระตุ้นสูงเกินกว่า 700 องศาเซลเซียส พบว่าปริมาณร้อยละผลิตภัณฑ์ลดลงอย่างมาก เป็นผลเนื่องจากที่อุณหภูมิสูงกว่า 700 องศาเซลเซียส ปฏิกิริยาระหว่างอะตอมของคาร์บอนกับสารประกอบโปแตส

เซียมจะมีความสำคัญซึ่งจะนำไปสู่การเกิดแก๊สซิฟิเคชันของคาร์บอนและการเกิดคาร์บอนออกไซด์ (Carbon Oxide) กับโลหะโปแตสเซียม (Potassium metal) ซึ่งเป็นผลทำให้เกิดการสูญเสียมวลอย่างมาก ในการสูญเสียมวลที่อุณหภูมิสูงๆ สามารถอธิบายได้จากการปลดปล่อยของคาร์บอนออกไซด์ และ โลหะโปแตสเซียมบริสุทธิ์ ดังสมการที่ 2 และ 3

$$K_2CO_3 + 2C \longrightarrow 2K + 3CO \quad (2)$$

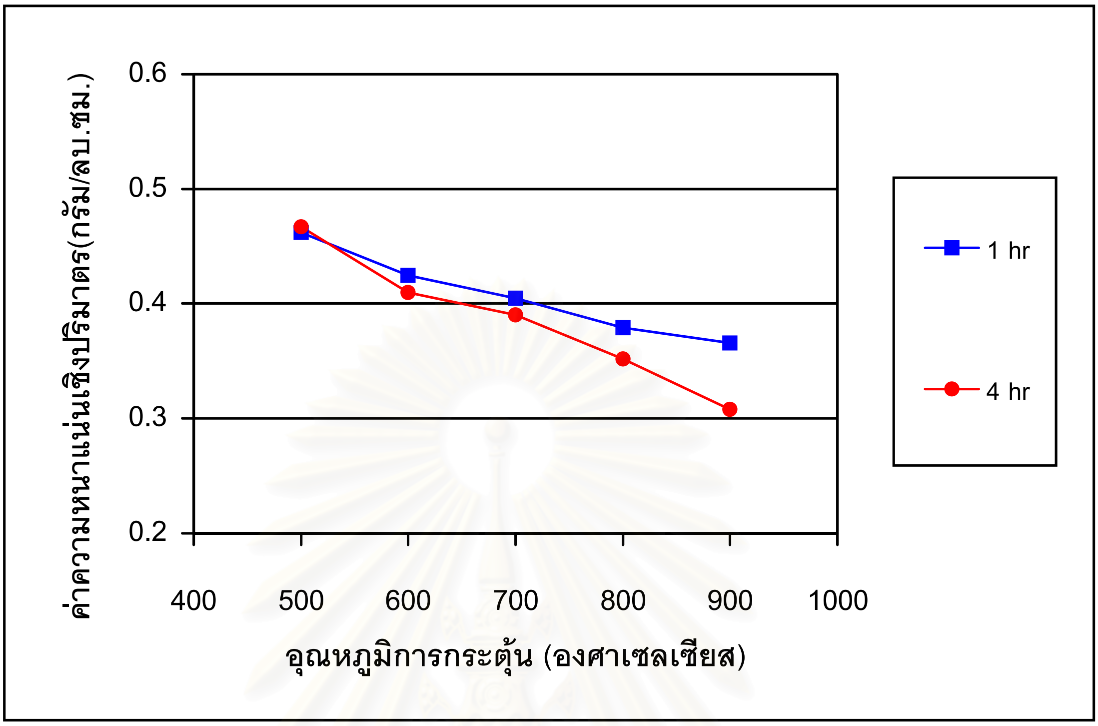
และ

$$K_2O + C \longrightarrow 2K + CO \quad (3)$$

โดยทั้งนี้ ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส จะเกิดการปลดปล่อยของโปแตสเซียมคาร์บอเนตเพิ่มขึ้นอีก เนื่องจาก โปแตสเซียมคาร์บอเนตมีจุดหลอมเหลวที่ 891 องศาเซลเซียส จึงทำให้มีการสูญเสียมวลเพิ่มขึ้น

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2. ค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตร

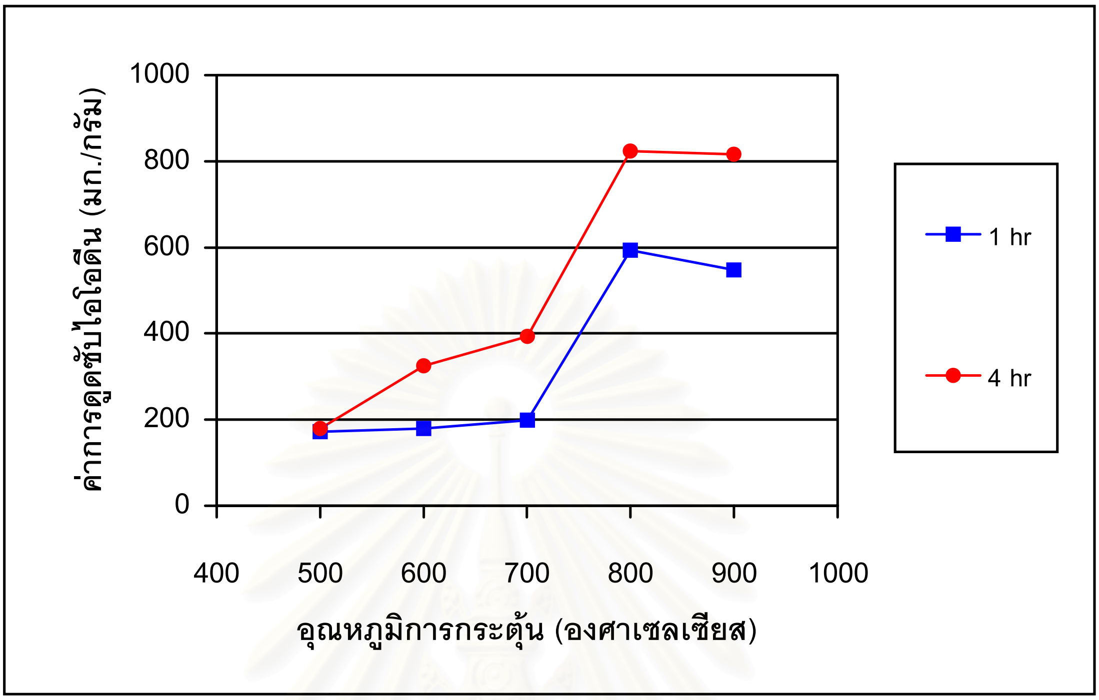



รูปที่ 4.9 ผลของอุณหภูมิที่ใช้เตรียมถ่านกัมมันต์ต่อค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตร โดยใช้ลิกไนต์ 20 กรัม ขนาด 0.85 – 1.18 มม. ที่อัตราส่วนสารกระตุ้นต่อถ่านชาร์ 0.7:1 อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 1,000 มล./นาที

จากรูปที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตรของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้กับอุณหภูมิที่ใช้ในการกระตุ้น พบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตรจะลดลง เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น จะมีการปลดปล่อยสารออกมาจากโครงสร้างภายในมากขึ้น ซึ่งโครงสร้างในส่วนนี้จะมีการพัฒนาไปเป็นโครงสร้างที่มีรูพรุนมากขึ้น ทำให้ความหนาแน่นเชิงปริมาตรของถ่านลดลง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

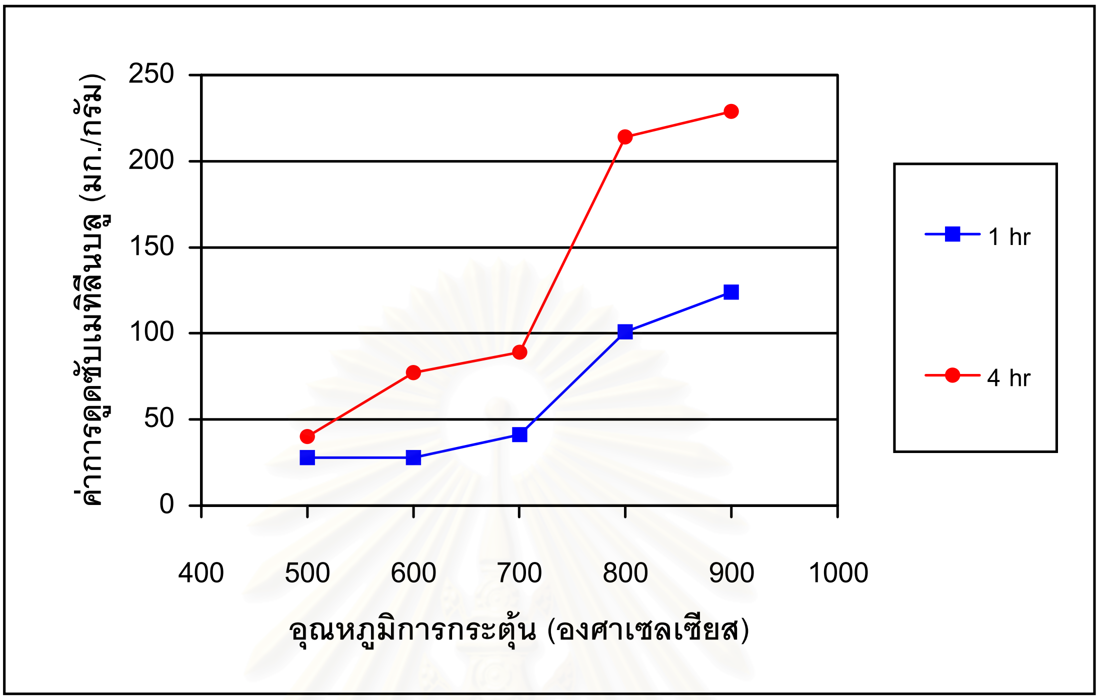
3. <u>ค่าการดูดซับไอโอดีน</u>




รูปที่ 4.10 ผลของอุณหภูมิที่ใช้เตรียมถ่านกัมมันต์ต่อค่าการดูดซับไอโอดีน โดยใช้ลิกไนต์ 20 กรัม ขนาด 0.85 – 1.18 มม. ที่อัตราส่วนสารกระตุ้นต่อถ่านชาร์ 0.7:1 อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 1,000 มล./นาที

จากรูปที่ 4.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้กับอุณหภูมิที่ใช้ในการกระตุ้น พบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการกระตุ้นจาก 500 ถึง 700 องศาเซลเซียส ค่าการดูดซับไอโอดีนเพิ่มขึ้นเล็กน้อย และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการกระตุ้นสูงถึง 800 องศาเซลเซียส ค่าการดูดซับไอโอดีนเพิ่มขึ้นอย่างมาก เนื่องจากที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส มีการพัฒนาโครงสร้างให้เกิดเป็นโครงสร้างที่มีรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมากที่สุด ซึ่งจะเป็นอุณหภูมิที่ทำให้ค่าการดูดซับไอโอดีนสูงสุด แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการกระตุ้นสูงขึ้นไปอีกที่ 900 องศาเซลเซียส ค่าการดูดซับไอโอดีนจะลดลง และแนวโน้มต่อไปที่อุณหภูมิสูงขึ้นกว่านี้คาดว่า ค่าการดูดซับของไอโอดีนจะลดลงอีก ผลเนื่องมาจากถ่านหินเริ่มเกิดการแตกสลายของโครงสร้างที่อุณหภูมิ สูงกว่า 800 องศาเซลเซียส ทำให้รูพรุนขนาดเล็กลดลง เกิดเป็นโครงสร้างที่มีรูพรุนขนาดกลางหรือขนาดใหญ่ขึ้นมาแทน ค่าการดูดซับไอโอดีนจึงลดลง

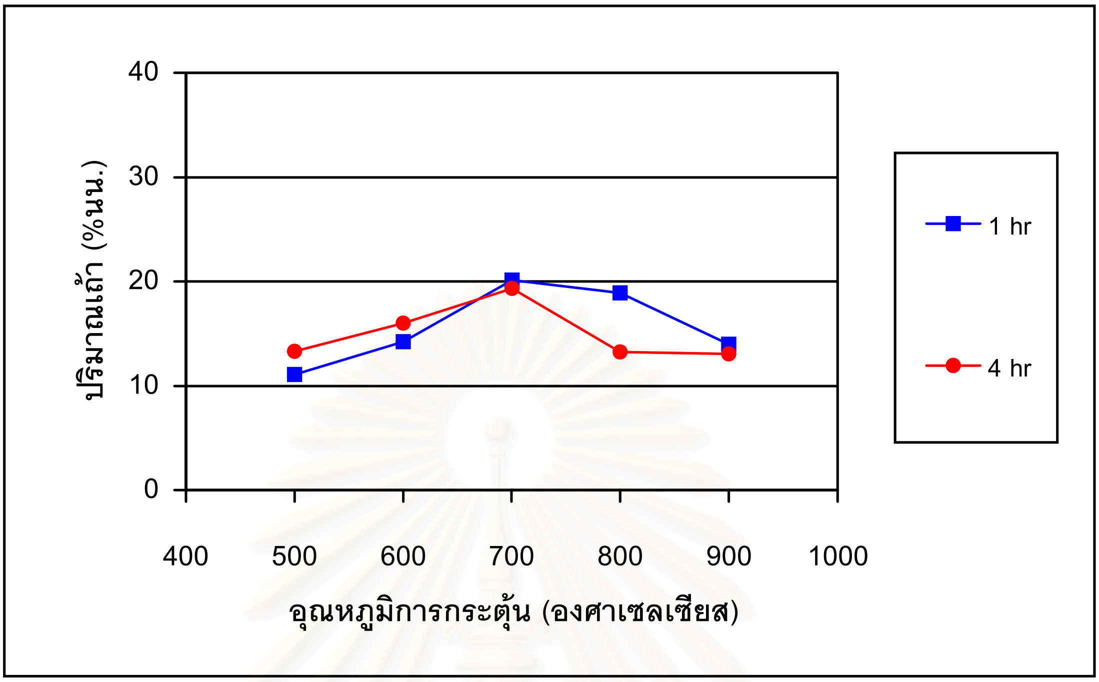
4. ค่าการดูดซับเมทิลีนบลู




รูปที่ 4.11 ผลของอุณหภูมิที่ใช้เตรียมถ่านกัมมันต์ต่อค่าการดูดซับเมทิลีนบลู โดยใช้ลิกไนต์ 20 กรัม ขนาด 0.85 – 1.18 มม. ที่อัตราส่วนสารกระตุ้นต่อถ่านชาร์ 0.7:1 อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 1,000 มล./นาที

จากรูปที่ 4.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดเมทิลีนบลูของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้กับอุณหภูมิที่ใช้ในการกระตุ้น พบว่าผลที่ได้คล้ายกับค่าการดูดซับไอโอดีน คือเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการกระตุ้นจาก 500 ถึง 700 องศาเซลเซียส ค่าการดูดซับเมทิลีนบลูเพิ่มขึ้นเล็กน้อย และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการกระตุ้นสูงถึง 800 องศาเซลเซียส ค่าการดูดซับเมทิลีนบลูเพิ่มขึ้นอย่างมาก เหตุผลเช่นเดียวกับการดูดซับไอโอดีน คือเนื่องจากโครงสร้างของถ่านหินไม่แข็งพอ เมื่อเกิดรูพรุนขนาดเล็กมากขึ้น ทำให้รูพรุนขนาดเล็กบางส่วนแตกรวมกันเป็นรูพรุนขนาดกลางขึ้นมา จึงทำให้ค่าการดูดซับเมทิลีนบลูเพิ่มขึ้นตามด้วย แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการกระตุ้นสูงขึ้นไปอีกที่ 900 องศาเซลเซียส ค่าการดูดซับเมทิลีนบลูจะเพิ่มขึ้นอีก ซึ่งจะตรงกันข้ามกับค่าการดูดซับไอโอดีน เพราะว่ารูพรุนขนาดเล็กจะไม่เพิ่มขึ้นอีก เนื่องจากเกิดการแตกสลายของโครงสร้างเมื่อได้รับปริมาณความร้อนที่มากเกินไป จนกลายมาเป็นรูพรุนขนาดกลาง ซึ่งสามารถที่จะดูดซับเมทิลีนบลูได้ จึงทำให้ค่าการดูดซับเมทิลีนบลูไม่ลดลงตาม

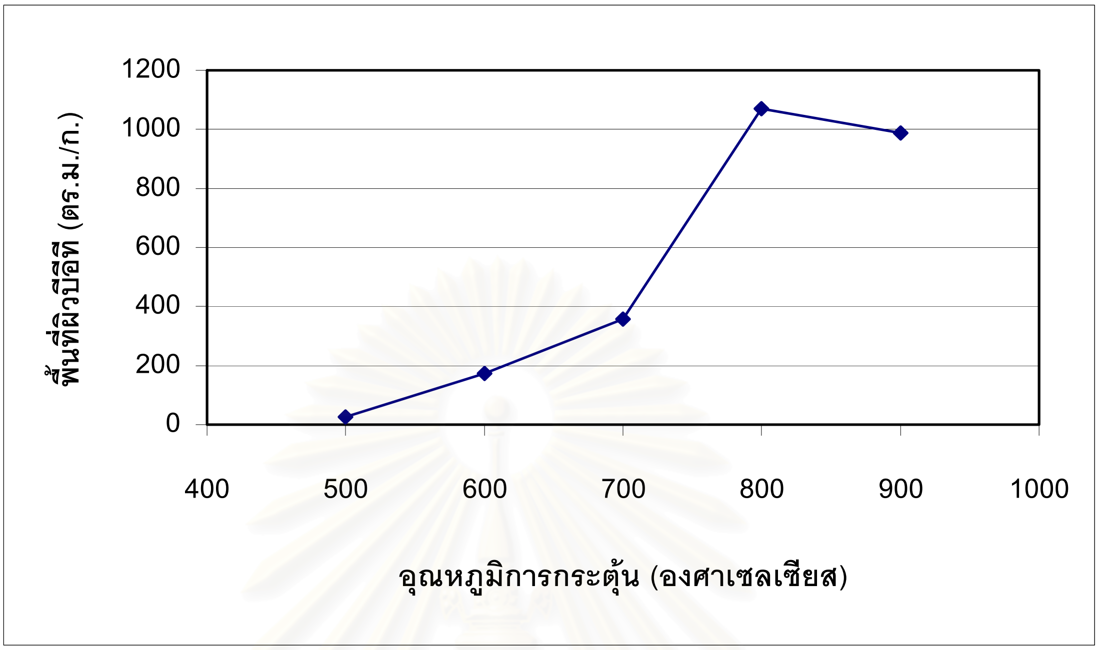
5. ปริมาณเถ้า




รูปที่ 4.12 ผลของอุณหภูมิที่ใช้เตรียมถ่านกัมมันต์ต่อปริมาณของเถ้า โดยใช้ลิกไนต์ 20 กรัม ขนาด 0.85 – 1.18 มม. ที่อัตราส่วนสารกระตุ้นต่อถ่านชาร์ 0.7:1 อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 1,000 มล./นาที

จากรูปที่ 4.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเถ้าของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้กับอุณหภูมิที่ใช้ในการกระตุ้น พบว่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิการกระตุ้น ปริมาณของเถ้ามีความแตกต่างกันเล็กน้อย ซึ่งความแตกต่างนี้อาจมาจากขั้นตอนการล้างเถ้าด้วยกรด ปริมาณของเถ้าที่เหลือจะอยู่ในช่วง10 ถึง 20 % (โดยน้ำหนัก)

6. ค่าพื้นที่ผิวบีอีที




รูปที่ 4.13 ผลของอุณหภูมิที่ใช้เตรียมถ่านกัมมันต์ต่อพื้นที่ผิวบีอีที โดยใช้ลิกไนต์ 20 กรัม เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ขนาด 0.85 – 1.18 มม. ที่อัตราส่วนสารกระตุ้นต่อถ่านชาร์ 0.7:1 อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 1,000 มล./นาที

จากรูปที่ 4.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้กับอุณหภูมิที่ใช้ในการกระตุ้น พบว่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิขึ้นในช่วง 500 – 800 องศาเซลเซียส ค่าพื้นที่ผิวสูงขึ้นตาม แต่จะลดลงเล็กน้อยเมื่อ เพิ่มอุณหภูมิขึ้นไปอีก ที่ 900 องศาเซลเซียส ซึ่งผลที่ได้จะสอดคล้องกับค่าการดูดซับไอโอดีน แต่การที่ค่าพื้นที่ผิวบีอีทีมีค่าสูงมากถึง 1069 ตารางเมตรต่อกรัม เฉพาะที่ 800 องศาเซลเซียส แต่ค่าการดูดซับไอโอดีน เพียง 826 มิลลิกรัมต่อกรัมเท่านั้น เนื่องจากการกระตุ้นด้วย KOH จะให้โครงสร้างที่มีรูพรุนขนาดเล็กมาก จนเล็กกว่าโมเลกุลของไอโอดีน รูพรุนบางส่วนนี้จึงไม่สามารถดูดซับไอโอดีนไว้ได้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.3.1.3 ผลของการแปรเวลาที่ใช้ในการกระตุ้น

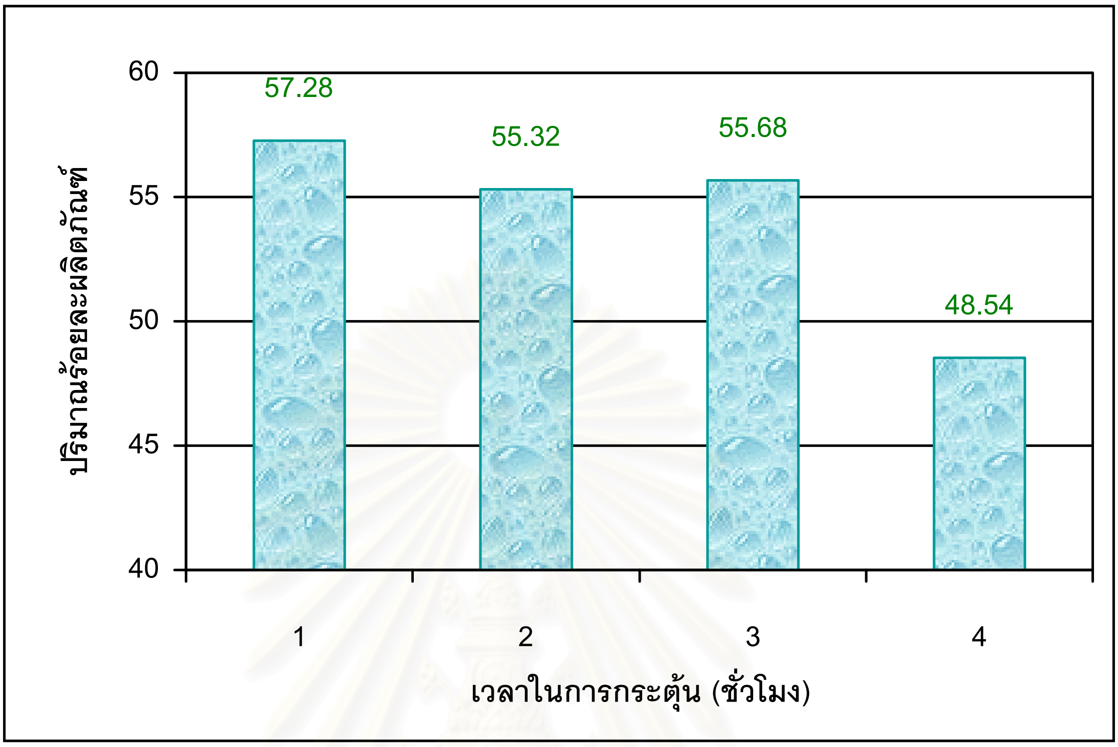
นำถ่านกัมมันต์ที่ได้ภาวะที่เหมาะสมในการแปรอุณหภูมิ มาทำการแปรเวลา ที่ 1, 2, 3 และ 4 ชั่วโมง เพื่อวิเคราะห์หาภาวะที่เหมาะสมในการกระตุ้นต่อไป โดยวิเคราะห์ค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตร (BD) ปริมาณเถ้า (Ash) ค่าการดูดซับเมทิลีนบลู (MB) ค่าการดูดซับไอโอดีน (IA) พื้นที่ผิวบีอีที ($S_{BET}$) ผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.9 โดยดูผลของการแปรเวลาในการกระตุ้นในรูปที่ 4.14 – 4.19

ตารางที่ 4.9 สมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นที่เวลาต่างๆ ที่อัตราส่วนสารกระตุ้นต่อถ่านชาร์ 0.7:1 อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ขนาดอนุภาค 0.85 -1.18 มม. อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 1,000 มล./นาที

| Time (hr) | Y (%) | BD $g/cm^3$ | Ash (%) | MB (mg/g) | IA (mg/g) | $S_{BET}$ ($m^2/g$) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 57.28 | 0.379 | 18.88 | 101 | 593 | 587 |
| 2 | 55.32 | 0.364 | 11.52 | 99 | 638 | 792 |
| 3 | 55.68 | 0.360 | 11.01 | 137 | 782 | 889 |
| 4 | 48.54 | 0.352 | 13.22 | 214 | 824 | 1069 |

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1. <u>ปริมาณร้อยละผลิตภัณฑ์</u>

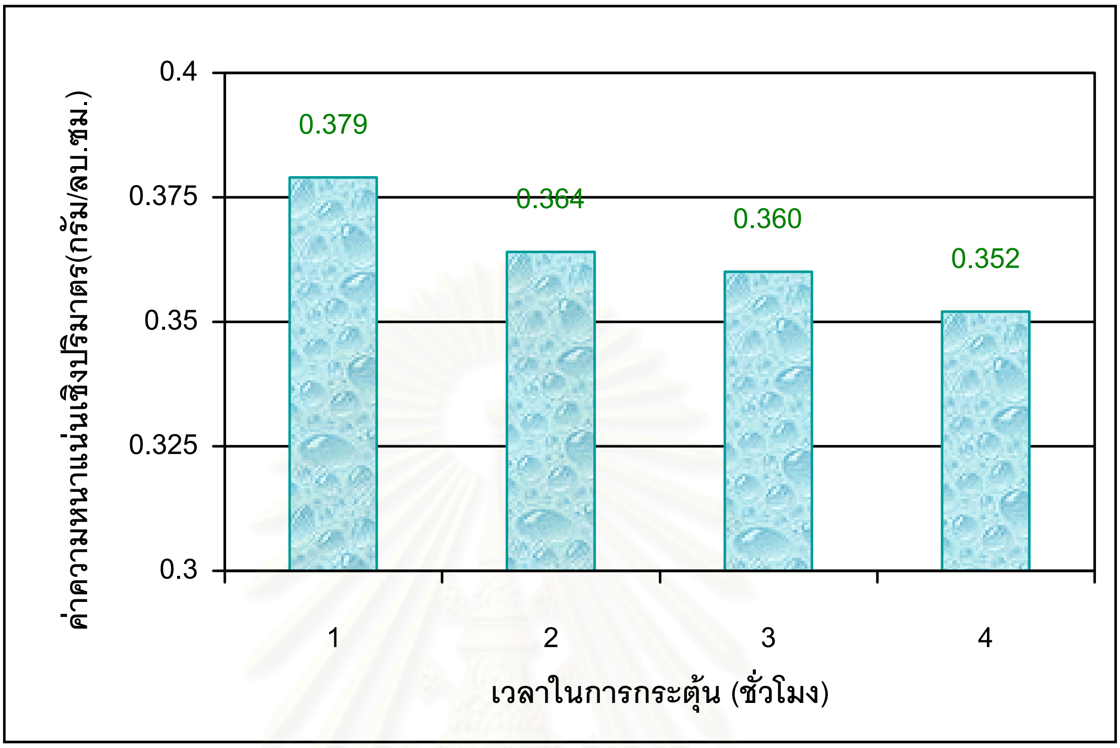



รูปที่ 4.14 ผลของเวลาที่ใช้เตรียมถ่านกัมมันต์ต่อปริมาณร้อยละผลิตภัณฑ์ โดยใช้ลิกไนต์ 20 กรัม ขนาด 0.85 – 1.18 มม. ที่อัตราส่วนสารกระตุ้นต่อถ่านชาร์ 0.7:1 อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 1,000 มล./นาที

จากรูปที่ 4.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณร้อยละผลิตภัณฑ์ของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้กับเวลาที่ใช้ในการกระตุ้น พบว่าเมื่อใช้เวลาในการกระตุ้นนานขึ้นปริมาณของผลิตภัณฑ์ที่ได้จะน้อยลง โดยที่เวลาในการกระตุ้น 4 ชั่วโมง ปริมาณผลิตภัณฑ์ที่ได้น้อยกว่า 50% เนื่องจากที่เวลานานขึ้นจะมีการปลดปล่อยสารต่างๆที่เกิดจากปฏิกิริยาระหว่าง KOH กับผิวของคาร์บอนเป็นไปอย่างต่อเนื่อง จึงเกิดการสูญเสียมวลเพิ่มขึ้นตามมา

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

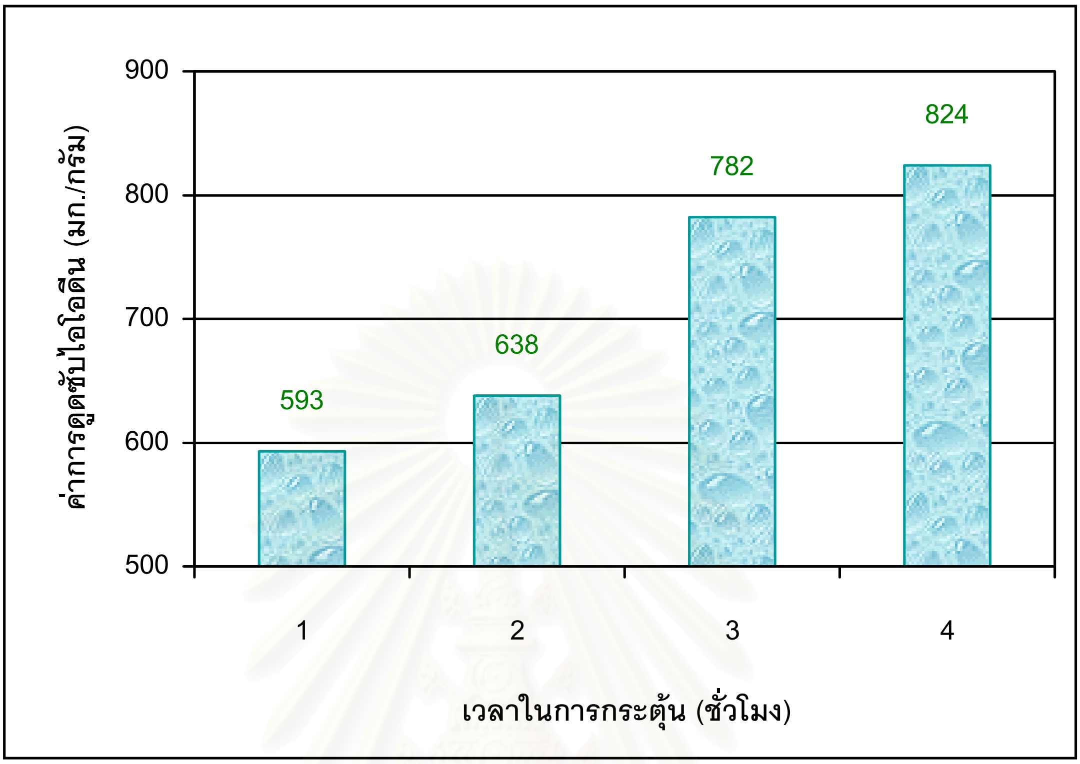
2. <u>ค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตร</u>




รูปที่ 4.15 ผลของเวลาที่ใช้เตรียมถ่านกัมมันต์ต่อค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตร โดยใช้ลิกไนต์ 20 กรัม ขนาด 0.85 – 1.18 มม. ที่อัตราส่วนสารกระตุ้นต่อถ่านชาร์ 0.7:1 อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 1,000 มล./นาที

จากรูปที่ 4.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตรของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้กับเวลาที่ใช้ในการกระตุ้น พบว่าเมื่อใช้เวลาในการกระตุ้นนานขึ้น ค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตรจะลดลง เนื่องจากเวลาที่ใช้กระตุ้นนานขึ้นจะมีการปลดปล่อยสารออกมาจากโครงสร้างภายในมากขึ้น ซึ่งโครงสร้างในส่วนนี้จะมีการพัฒนาไปเป็นโครงสร้างที่มีรูพรุนมากขึ้น ทำให้ความหนาแน่นของถ่านลดลง

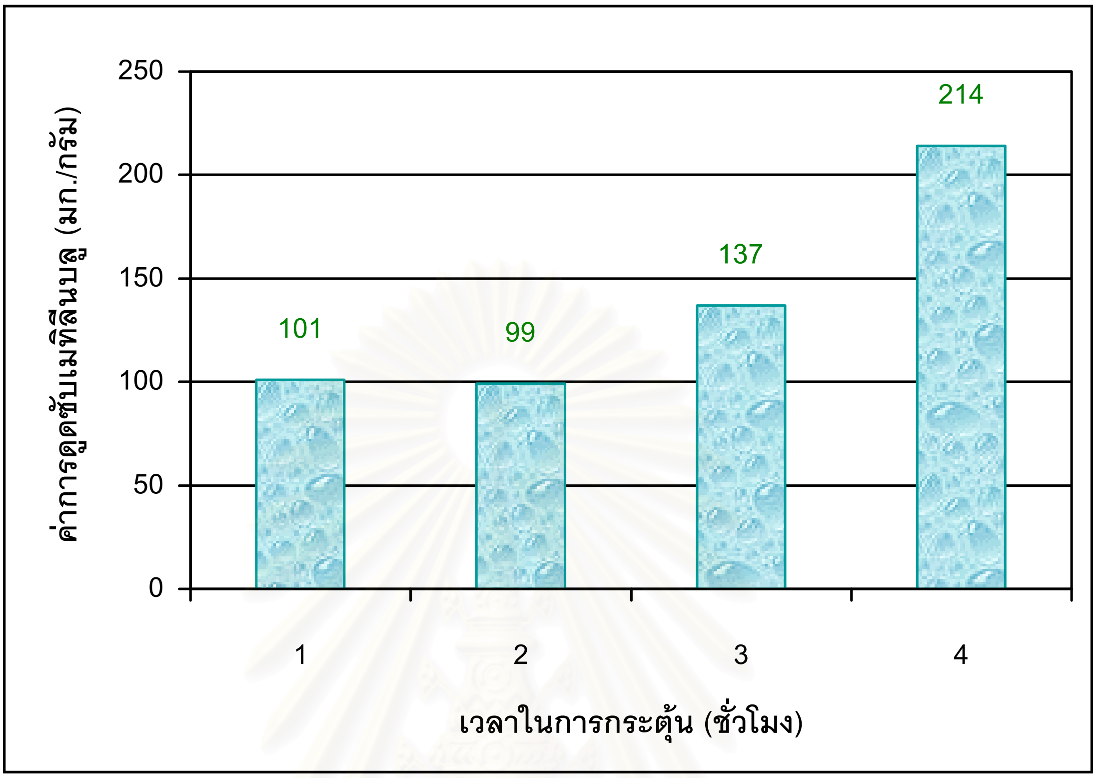
3. <u>ค่าการดูดซับไอโอดีน</u>




รูปที่ 4.16 ผลของเวลาที่ใช้เตรียมถ่านกัมมันต์ต่อค่าการดูดซับไอโอดีน โดยใช้ลิกไนต์ 20 กรัม ขนาด 0.85 – 1.18 มม. ที่อัตราส่วนสารกระตุ้นต่อถ่านชาร์ 0.7:1 อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 1,000 มล./นาที

จากรูปที่ 4.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้กับเวลาที่ใช้ในการกระตุ้น พบว่าเมื่อใช้เวลาในการกระตุ้นนานขึ้น ค่าการดูดซับไอโอดีนจะเพิ่มขึ้น ซึ่งที่เวลาในการกระตุ้น 4 ชั่วโมง ให้ค่าการดูดซับไอโอดีนสูงกว่า 800 มล./ก. แสดงให้เห็นว่าในโครงสร้างของถ่านมีรูพรุนขนาดเล็กเพิ่มมากขึ้นตามเวลาที่นานขึ้น

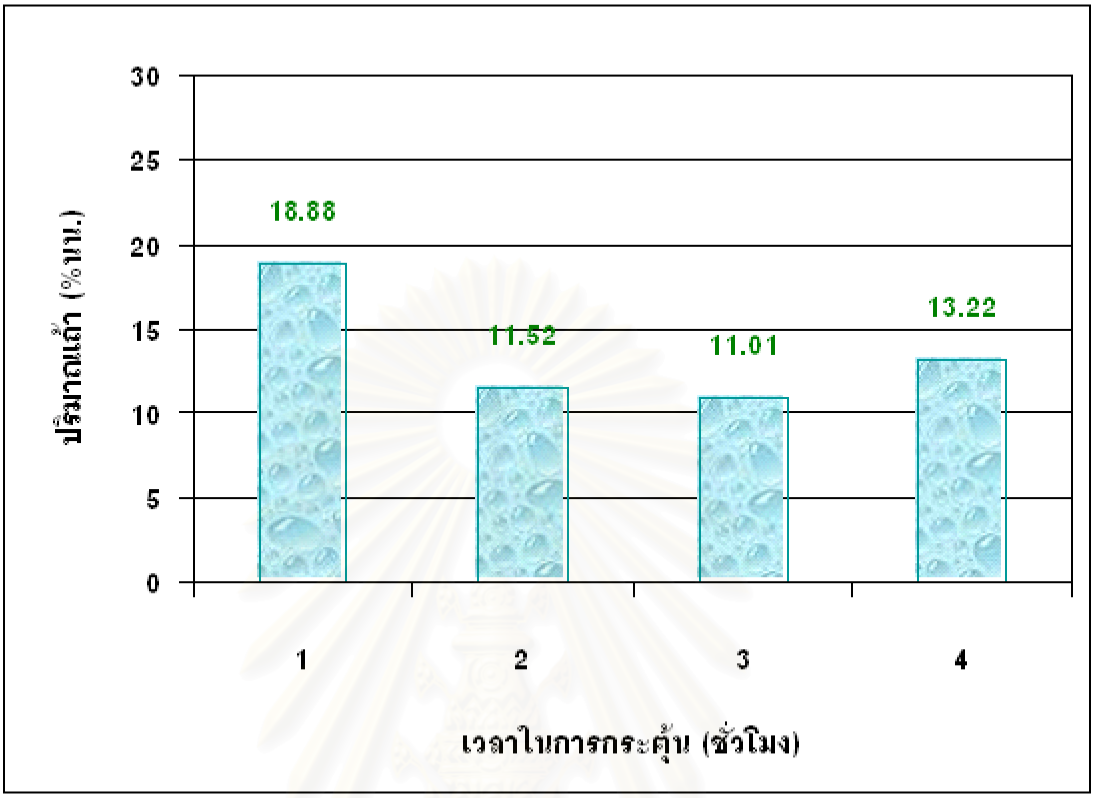
4. ค่าการดูดซับเมทิลีนบลู




รูปที่ 4.17 ผลของเวลาที่ใช้เตรียมถ่านกัมมันต์ต่อค่าการดูดซับเมทิลีนบลูโดยใช้ลิกไนต์ 20 กรัม ขนาด 0.85 – 1.18 มม. ที่อัตราส่วนสารกระตุ้นต่อถ่านชาร์ 0.7:1 อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 1,000 มล./นาที

จากรูปที่ 4.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดซับเมทิลีนบลูของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้กับเวลาที่ใช้ในการกระตุ้น พบว่าเมื่อใช้เวลาในการกระตุ้นนาน 1 หรือ 2 ชั่วโมง ค่าการดูดซับเมทิลีนบลูจะยังเปลี่ยนแปลงไม่มาก แล้วค่าการดูดซับเมทิลีนบลูจะเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนที่เวลาการกระตุ้น 3 ถึง 4 ชั่วโมง อาจเนื่องจากรูพรุนขนาดกลางนี้ส่วนมากเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของรูพรุนขนาดเล็กที่รวมตัวเป็นรูพรุนขนาดกลางขึ้นมา ซึ่งเมื่อใช้เวลาการกระตุ้นไม่นานนัก รูพรุนขนาดเล็กจึงยังแตกรวมตัวกันเป็นรูพรุนขนาดกลางไม่มาก ค่าการดูดซับเมทิลีนบลูจึงไม่ค่อยแตกต่างกันมากนัก แต่ที่เวลานานขึ้นการแตกตัวของรูพรุนขนาดเล็กเริ่มเห็นได้ชัดเจนขึ้นจากค่าการดูดซับเมทิลีนบลูที่สูงขึ้นมา

5. <u>ปริมาณเถ้า</u>

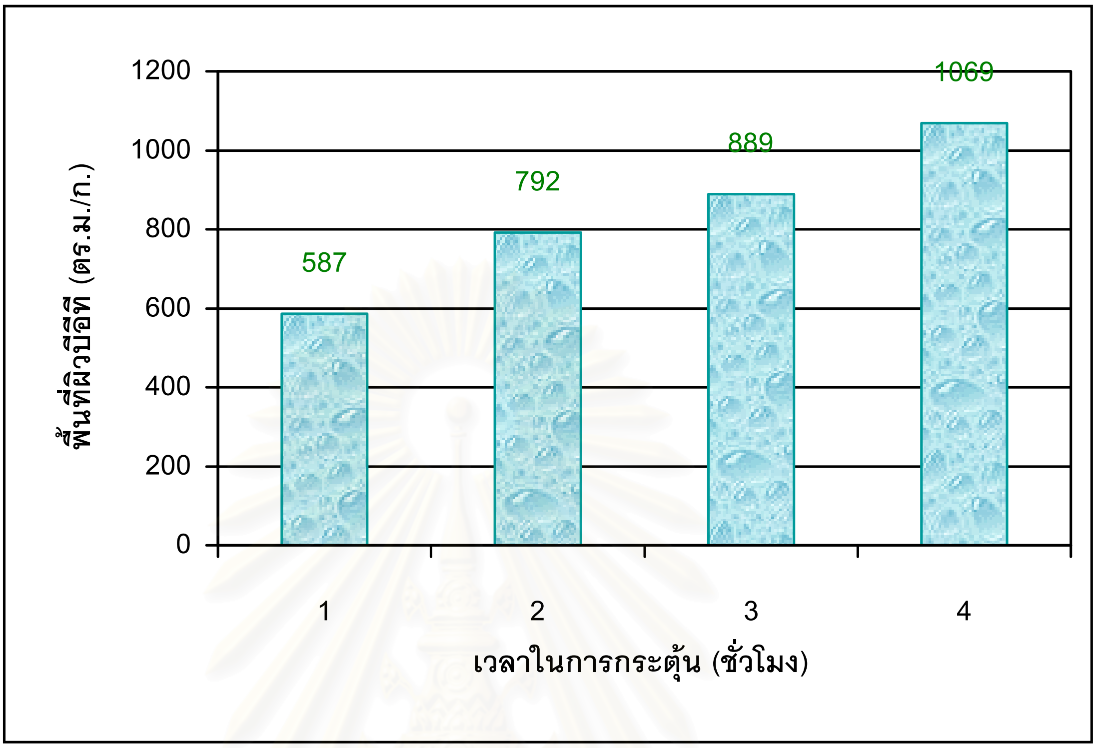



รูปที่ 4.18 ผลของเวลาที่ใช้เตรียมถ่านกัมมันต์ต่อปริมาณของเถ้า โดยใช้ลิกไนต์ 20 กรัม ขนาด 0.85 – 1.18 มม. ที่อัตราส่วนสารกระตุ้นต่อถ่านชาร์ 0.7:1 อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 1,000 มล./นาที

จากรูปที่ 4.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเถ้าของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้กับเวลาที่ใช้ในการกระตุ้น พบว่า ปริมาณของเถ้าที่เกิดขึ้นจะอยู่ในช่วง10 ถึง 20 % (โดยน้ำหนัก)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

6. <u>ค่าพื้นที่ผิว</u>




รูปที่ 4.19 ผลของเวลาที่ใช้เตรียมถ่านกัมมันต์ต่อค่าพื้นที่ผิวบีอีที โดยใช้ลิกไนต์ 20 กรัม อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ขนาด 0.85 – 1.18 มม. ที่อัตราส่วนสารกระตุ้นต่อถ่านชาร์ 0.7:1 อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 1,000 มล./นาที

จากรูปที่ 4.19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าพื้นทิ่ผิวของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้กับเวลาที่ใช้ในการกระตุ้น พบว่า ค่าพื้นที่ผิวสูงขึ้นตามเวลาที่ใช้ในการกระตุ้นเพิ่มขึ้น โดยที่เวลา 4 ชั่วโมงให้ค่าพื้นที่ผิวสูงมากกว่า 1,000 ตร.ม./ก. เวลาจึงเป็นตัวแปรหนึ่งที่สำคัญในการเตรียมถ่านกัมมันต์ โดยเวลาที่เหมาะสมในการกระตุ้นจึงอยู่ในช่วง 3 ถึง 4 ชั่วโมง ซึ่งถ้าใช้เวลานานกว่านี้ปริมาตรรูพรุนอาจสูงขึ้นอีก แต่ก็จะไม่เหมาะกับการนำไปประยุกต์ใช้ในเชิงอุตสาหกรรมเนื่องจากใช้เวลานานเกินไป

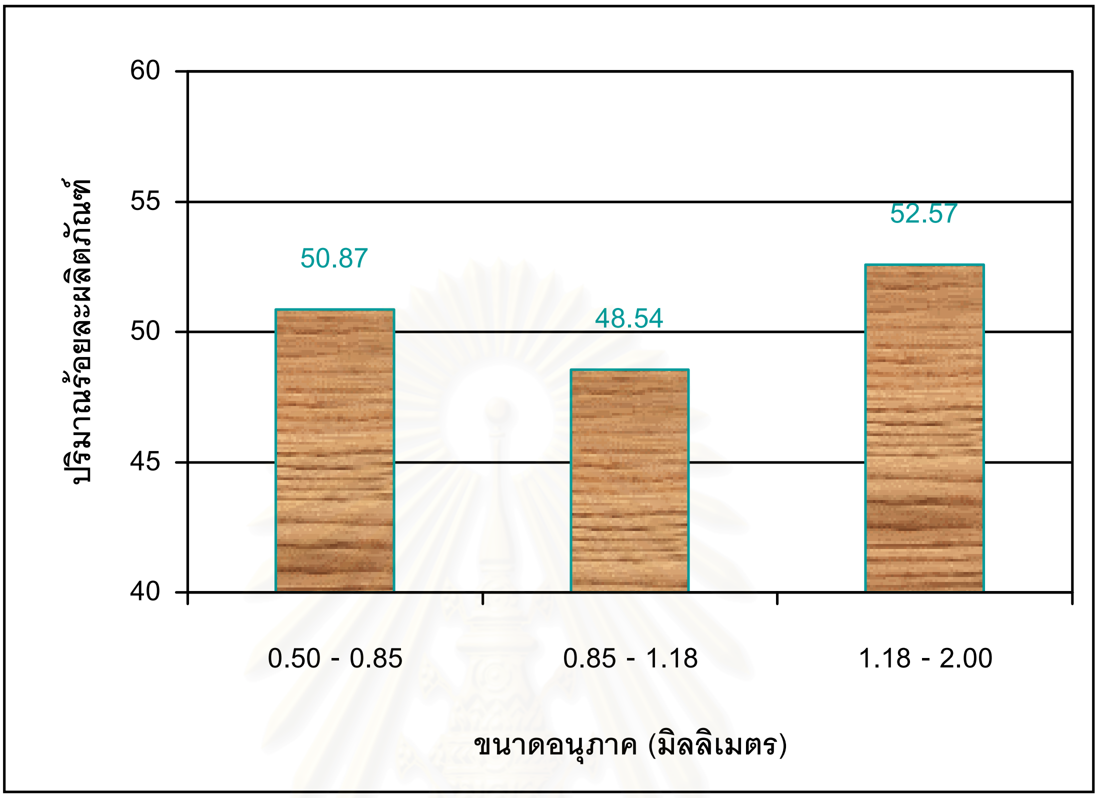
4.3.1.4 ผลของการแปรขนาดอนุภาค

นำถ่านกัมมันต์ที่ได้ภาวะที่เหมาะสมในการแปรเวลา มาทำการแปรขนาดอนุภาค ที่ 0.50 – 0.85, 0.85 – 1.18 และ 1.18 – 2.00 มม. เพื่อวิเคราะห์หาภาวะที่เหมาะสมในการกระตุ้นต่อไป โดยวิเคราะห์ค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตร (BD) ปริมาณเถ้า (Ash) ค่าการดูดซับเมทิลีนบลู (MB) ค่าการดูดซับไอโอดีน (IA) พื้นที่ผิวบีอีที ($S_{BET}$) ผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.10 โดยดูผลของการแปรขนาดอนุภาคในการกระตุ้น ในรูปที่ 4.20 – 4.25

ตารางที่ 4.10 สมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นที่ขนาดอนุภาคต่างๆ ที่อัตราส่วนสารกระตุ้นต่อถ่านชาร์ 0.7:1 อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 1,000 มล./นาที

| Size (mm) | YD (%) | BD g/cm$^3$ | Ash (%) | MB (mg/g) | IA (mg/g) | $S_{BET}$ (m$^2$/g) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 0.50 - 0.85 | 50.87 | 0.318 | 14.61 | 229 | 846 | 1292 |
| 0.85 - 1.18 | 48.54 | 0.352 | 13.22 | 214 | 824 | 1069 |
| 1.18 - 2.00 | 52.57 | 0.379 | 12.12 | 92 | 633 | 924 |

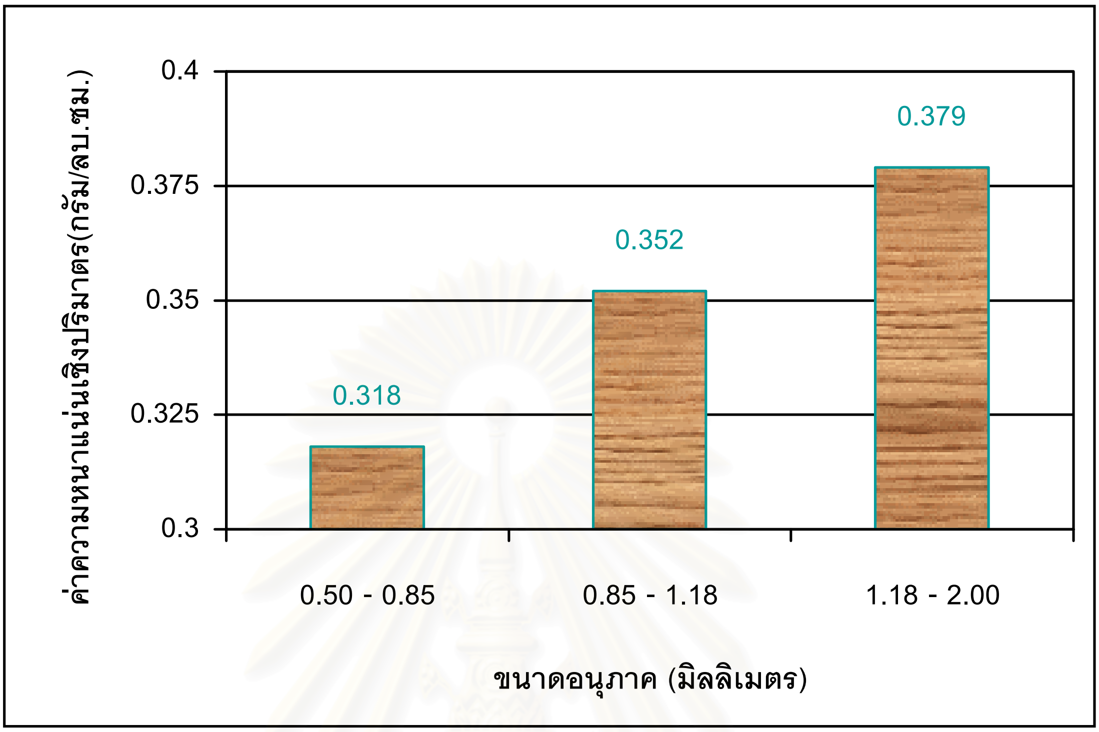
1. ปริมาณร้อยละผลิตภัณฑ์




รูปที่ 4.20 ผลของขนาดอนุภาคที่ใช้เตรียมถ่านกัมมันต์ต่อปริมาณร้อยละผลิตภัณฑ์ โดยใช้ลิกไนต์ 20 กรัม ที่อัตราส่วนสารกระตุ้นต่อถ่านชาร์ 0.7:1 อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 1,000 มล./นาที

จากรูปที่ 4.20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณร้อยละผลิตภัณฑ์ของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้กับขนาดอนุภาคที่ใช้ในการกระตุ้น พบว่าปริมาณร้อยละผลิตภัณฑ์ที่ได้ใกล้เคียงกันคือประมาณร้อยละ 50 แต่ไม่มีแนวโน้มที่เห็นได้อย่างชัดเจน ส่วนการใช้ลิกไนต์ที่มีขนาดอนุภาคใหญ่คือ 1.18 ถึง 2.00 มม. ปริมาณของผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมากกว่าการใช้ที่ขนาดอนุภาคเล็ก เนื่องจากการกระตุ้นด้วย KOH ที่อุณหภูมิสูง ปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชัน จะเกิดขึ้นไม่ทั่วถึงบนอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ จึงทำให้เกิดการสูญเสียน้ำหนักและการทำลายโครงสร้างของรูพรุนน้อยกว่า

2. <u>ค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตร</u>

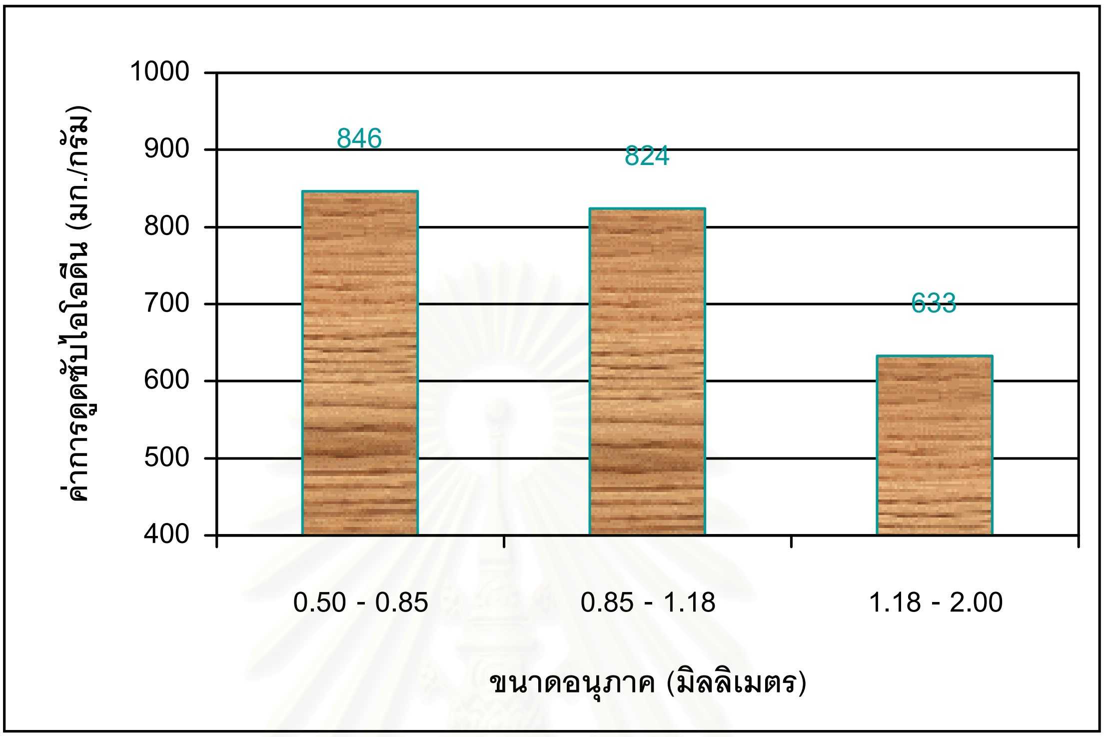



รูปที่ 4.21 ผลของขนาดอนุภาคที่ใช้เตรียมถ่านกัมมันต์ต่อค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตร โดยใช้ลิกไนต์ 20 กรัม ที่อัตราส่วนสารกระตุ้นต่อถ่านชาร์ 0.7:1 อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 1,000 มล./นาที

จากรูปที่ 4.21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตรของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้กับขนาดอนุภาคที่ใช้ในการกระตุ้น พบว่าเมื่อใช้ลิกไนต์ที่มีขนาดอนุภาคเล็กลง ค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตรจะลดลง เนื่องจากอนุภาคขนาดเล็กเกิดปฏิกิริยาระหว่าง KOH กับผิวของคาร์บอนได้ดีกว่า จึงมีโครงสร้างที่พัฒนาไปเป็นโครงสร้างที่มีรูพรุนมากกว่า ความหนาแน่นเชิงปริมาตรจึงลดต่ำกว่าการกระตุ้นด้วยอนุภาคขนาดใหญ่

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

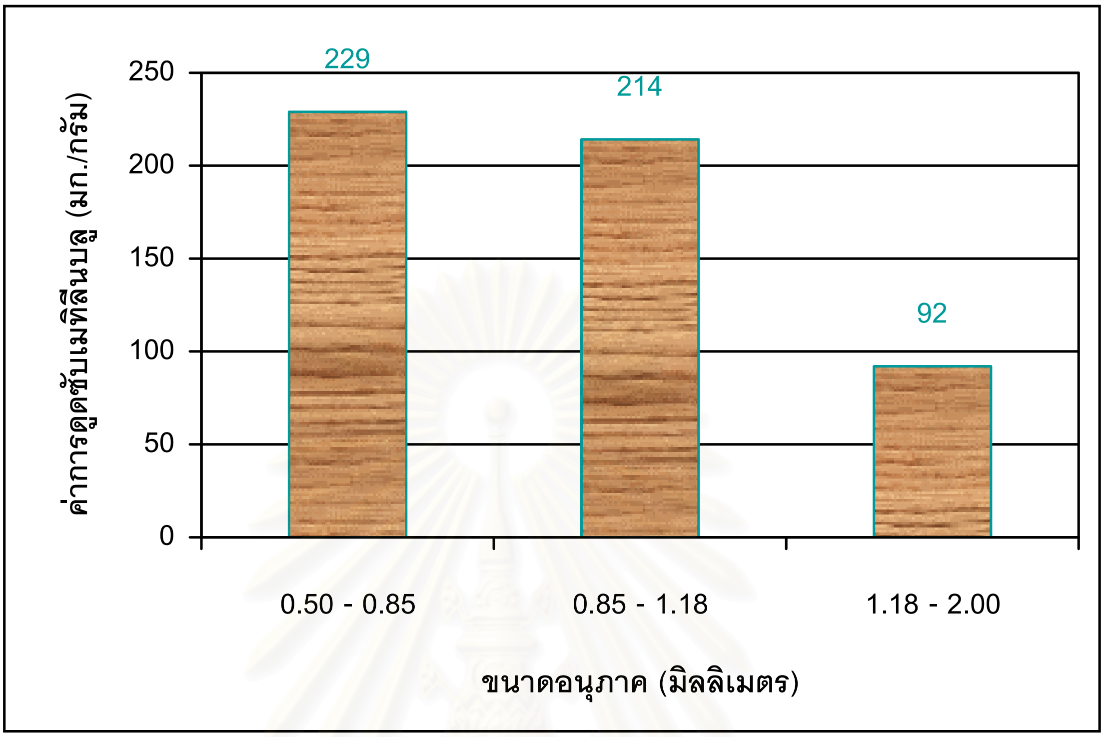
3. ค่าการดูดซับไอโอดีน




รูปที่ 4.22 ผลของขนาดอนุภาคที่ใช้เตรียมถ่านกัมมันต์ต่อค่าการดูดซับไอโอดีน โดยใช้ลิกไนต์ 20 กรัม ที่อัตราส่วนสารกระตุ้นต่อถ่านชาร์ 0.7:1 อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 1,000 มล./นาที

จากรูปที่ 4.22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้กับขนาดอนุภาคที่ใช้ในการกระตุ้น พบว่าเมื่อใช้ลิกไนต์ที่มีขนาดเล็กลง ค่าการดูดซับไอโอดีนจะเพิ่มขึ้น แสดงว่าการกระตุ้นด้วยอนุภาคขนาดเล็กจะให้โครงสร้างที่มีรูพรุนขนาดเล็กมากกว่า เป็นผลมาจากการเกิดปฏิกิริยาระหว่าง KOH กับผิวของคาร์บอนได้ดีกว่าที่ขนาดอนุภาคขนาดใหญ่

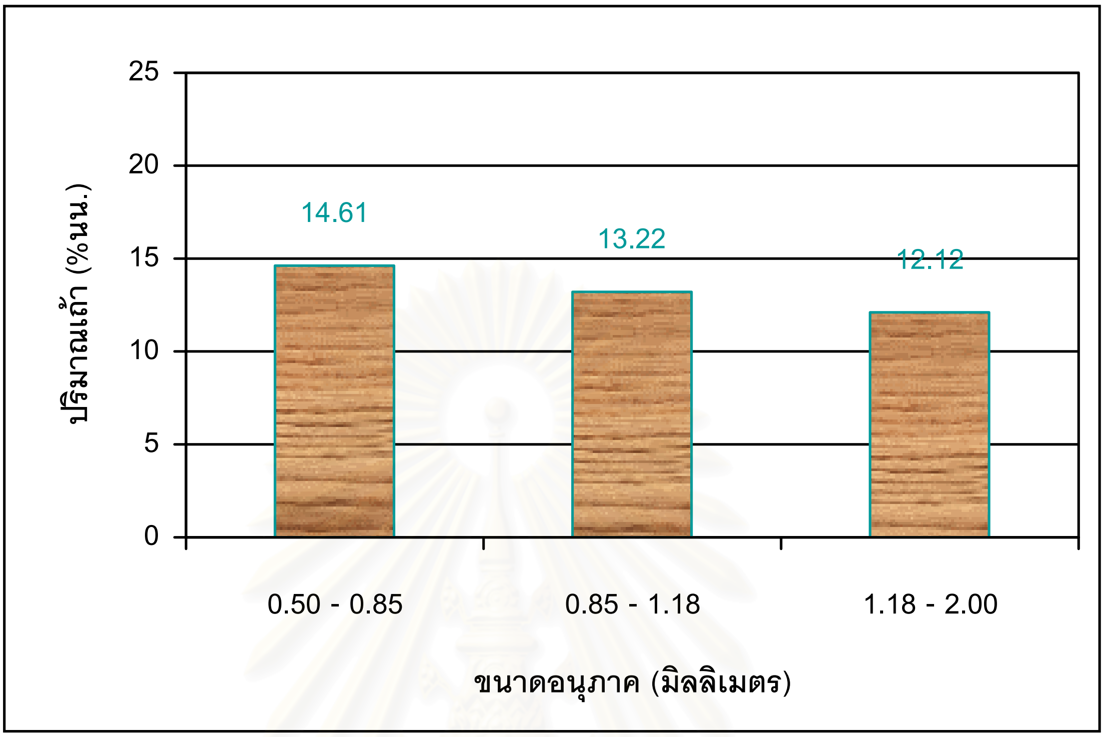
4. <u>ค่าการดูดซับเมทิลีนบลู</u>




รูปที่ 4.23 ผลของขนาดอนุภาคที่ใช้เตรียมถ่านกัมมันต์ต่อค่าการดูดซับเมทิลีนบลูโดยใช้ลิกไนต์ 20 กรัม ที่อัตราส่วนสารกระตุ้นต่อถ่านชาร์ 0.7:1 อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 1,000 มล./นาที

จากรูปที่ 4.23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดซับเมทิลีนบลูของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้กับขนาดอนุภาคที่ใช้ในการกระตุ้น พบว่าเมื่อใช้ลิกไนต์ที่มีขนาดเล็กลง ค่าการดูดซับเมทิลีนบลูจะเพิ่มขึ้น แสดงว่าการกระตุ้นด้วยอนุภาคขนาดเล็กก็ให้โครงสร้างรูพรุนที่มีขนาดกลางเพิ่มขึ้นมาด้วย เป็นผลมาจากการรวมตัวกันของรูพรุนขนาดเล็กกลางเป็นรูพรุนขนาดกลางเช่นกัน ค่าการดูดซับเมทิลีนบลูจึงเพิ่มขึ้นด้วย

5. ปริมาณเถ้า

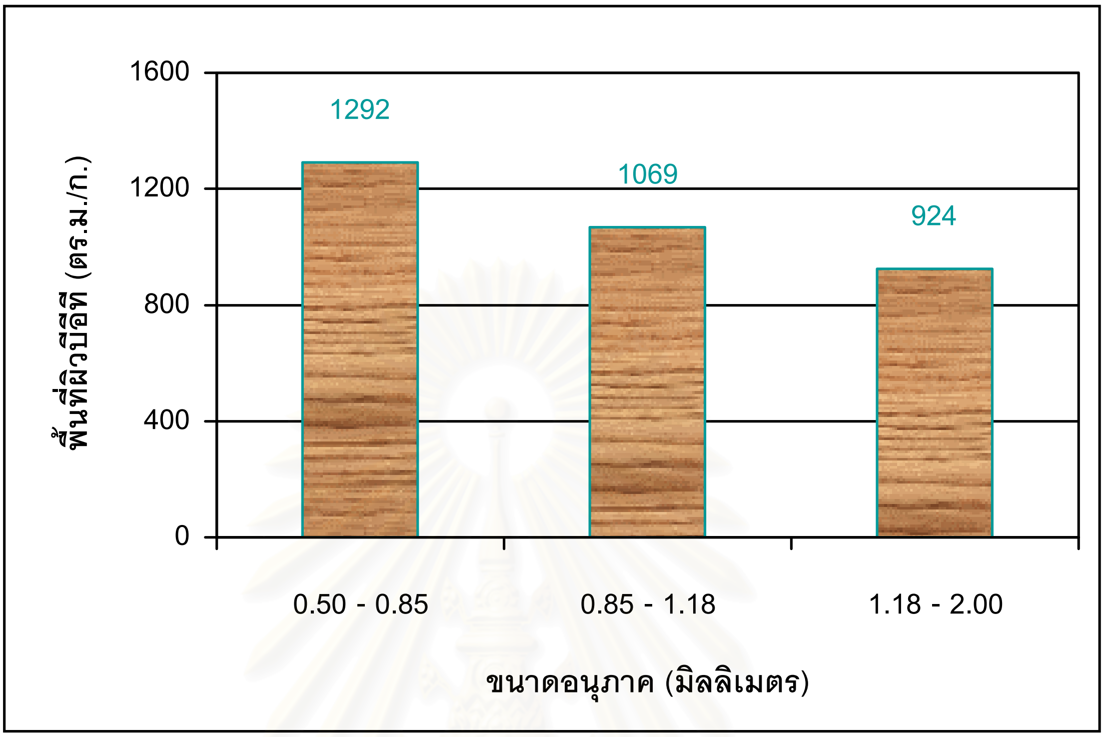



รูปที่ 4.24 ผลของขนาดอนุภาคที่ใช้เตรียมถ่านกัมมันต์ต่อปริมาณของเถ้า โดยใช้ลิกไนต์ 20 กรัม ที่อัตราส่วนสารกระตุ้นต่อถ่านชาร์ 0.7:1 อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 1,000 มล./นาที

จากรูปที่ 4.24 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเถ้าของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้กับขนาดอนุภาคที่ใช้ในการกระตุ้น พบว่า ขนาดอนุภาคที่แตกต่างกันให้ปริมาณเถ้าออกมาใกล้เคียงกัน โดยปริมาณของเถ้าที่เกิดขึ้นจะอยู่ในช่วง10 ถึง 15 % (โดยน้ำหนัก)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

6. ค่าพื้นที่ผิว




รูปที่ 4.25 ผลของขนาดอนุภาคที่ใช้เตรียมถ่านกัมมันต์ต่อค่าพื้นที่ผิวบีอีที โดยใช้ลิกไนต์ 20 กรัม ที่อัตราส่วนสารกระตุ้นต่อถ่านชาร์ 0.7:1 อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 1,000 มล./นาที

จากรูปที่ 4.25 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้กับขนาดอนุภาคที่ใช้ในการกระตุ้น พบว่า ค่าพื้นที่ผิวลดลง เมื่อขนาดอนุภาคของถ่านกัมมันต์มีขนาดใหญ่ขึ้น แสดงว่าการกระตุ้นด้วยอนุภาคขนาดเล็กจะให้พื้นที่ผิวสูงกว่าการกระตุ้นด้วยอนุภาคขนาดใหญ่ โดยพื้นที่ผิวสูงที่สุดในงานวิจัย เกิดจากการกระตุ้นด้วยขนาดอนุภาค 0.50 – 0.85 มิลลิเมตร คือมีค่าเท่ากับ 1,292 ตารางเมตรต่อกรัม

### 4.3.2 ผลการกระตุ้นทางกายภาพ

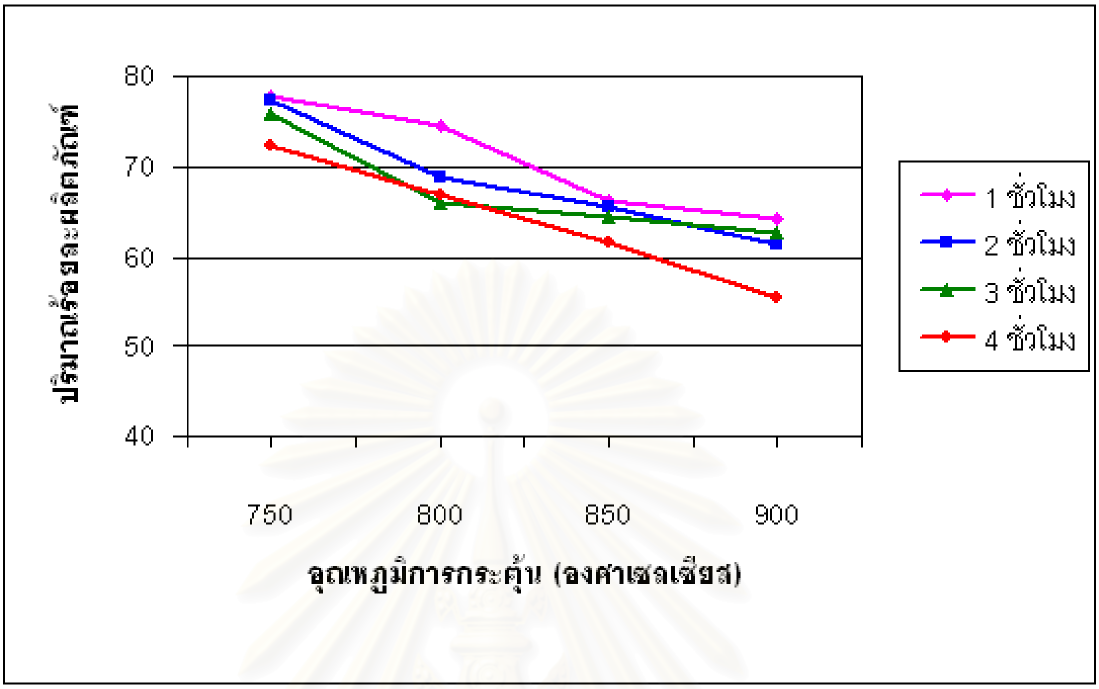
4.3.2.1 ผลของการแปรอุณหภูมิและเวลาในการกระตุ้น

นำถ่านกัมมันต์ที่ได้จากภาวะต่างๆมาทำการวิเคราะห์เพื่อหาภาวะที่เหมาะสมในการกระตุ้น ที่อุณหภูมิ 750, 800, 850 และ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1, 2 , 3 และ 4 ชั่วโมง โดยวิเคราะห์ค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตร (BD) ปริมาณเถ้า (Ash) ค่าการดูดซับเมทิลีนบลู (MB) ค่าการดูดซับไอโอดีน (IA) ผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.11 โดยดูผลของการแปรอุณหภูมิและเวลาในการกระตุ้น ในรูปที่ 4.34 – 4.43

ตารางที่ 4.11 สมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆขนาดอนุภาค 0.85 – 1.18 มม. ปริมาณป้อนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 500 ลบ.ซม./นาที ปริมาณป้อนไอน้ำ 10 กรัม/นาที และปริมาณป้อนอากาศ 1.5 ลบ.ซม./นาที

| ภาวะการกระตุ้น | | YD | BD | Ash | MB | IA |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Temp ($^{o}C$) | Time (hr) | (%) | $g/cm^3$ | (%) | (mg/g) | (mg/g) |
| 750 | 1 | 77.80 | 0.667 | 18.64 | 10 | 76 |
| 750 | 2 | 77.43 | 0.658 | 20.29 | 13 | 86 |
| 750 | 3 | 75.95 | 0.641 | 20.15 | 13 | 82 |
| 750 | 4 | 72.27 | 0.620 | 22.03 | 14 | 110 |
| 800 | 1 | 74.57 | 0.635 | 26.86 | 15 | 101 |
| 800 | 2 | 68.93 | 0.630 | 26.03 | 17 | 158 |
| 800 | 3 | 66.12 | 0.616 | 24.05 | 19 | 205 |
| 800 | 4 | 66.80 | 0.591 | 27.71 | 29 | 196 |
| 850 | 1 | 66.30 | 0.628 | 26.81 | 22 | 179 |
| 850 | 2 | 65.50 | 0.619 | 25.95 | 31 | 180 |
| 850 | 3 | 64.39 | 0.560 | 26.47 | 31 | 207 |
| 850 | 4 | 61.54 | 0.549 | 25.48 | 37 | 232 |
| 900 | 1 | 64.19 | 0.577 | 32.34 | 36 | 168 |
| 900 | 2 | 61.53 | 0.562 | 36.52 | 30 | 121 |
| 900 | 3 | 62.76 | 0.544 | 39.13 | 37 | 90 |
| 900 | 4 | 55.46 | 0.501 | 40.50 | 36 | 94 |

1. <u>ปริมาณร้อยละผลิตภัณฑ์</u>

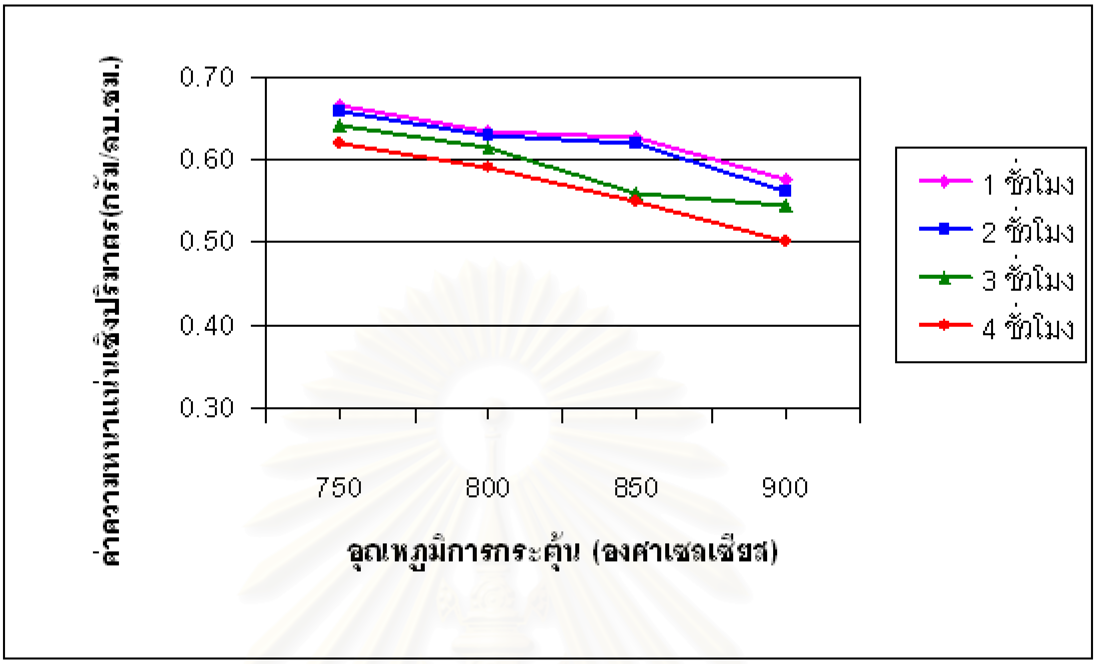



รูปที่ 4.26 ผลของอุณหภูมิการกระตุ้นที่มีต่อปริมาณร้อยละผลิตภัณฑ์ ณ เวลาต่างๆ โดยใช้ลิกไนต์ 20 กรัม ปริมาณป้อนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 500 ลบ.ซม./นาที ปริมาณป้อนไอน้ำ 10 กรัม/นาที และปริมาณป้อนอากาศ 1.5 ลบ.ซม./นาที

จากรูปที่ 4.26 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณร้อยละผลิตภัณฑ์ของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้กับอุณหภูมิที่ใช้ในการกระตุ้น พบว่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการกระตุ้นสูงขึ้น ค่าปริมาณร้อยละผลิตภัณฑ์ของทุกๆที่ใช้เวลาในการกระตุ้นจะลดลง เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิการกระตุ้นให้สูงขึ้น เป็นการเพิ่มปริมาณความร้อนให้สูงขึ้น ทำให้ทาร์และสารระเหยจะหลุดออกไปจากโครงสร้างถ่าน ทำให้สารกระตุ้นแพร่เข้าไปได้มากขึ้น ถ่านจะถูกเผาไหม้และบางส่วนจะกลายเป็นเถ้าจนเกิดเป็นโครงสร้างที่มีรูพรุนขึ้นมา ดังนั้นปริมาณผลิตภัณฑ์จึงลดลงตามอุณหภูมิที่สูงขึ้น

<u>หมายเหตุ</u> ในการกระตุ้นด้วยแก๊สกระตุ้นนี้ ที่อุณหภูมิสูงกว่า 900 องศาเซลเซียส ถ่านกัมมันต์ที่ได้ส่วนใหญ่จะถูกเผาไหม้จนกลายเป็นเถ้าเกือบหมด เนื่องจากในโครงสร้างถ่านมีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบอยู่มาก การได้รับความร้อนที่มากเกินไปเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดเถ้าขึ้น

2. ค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตร

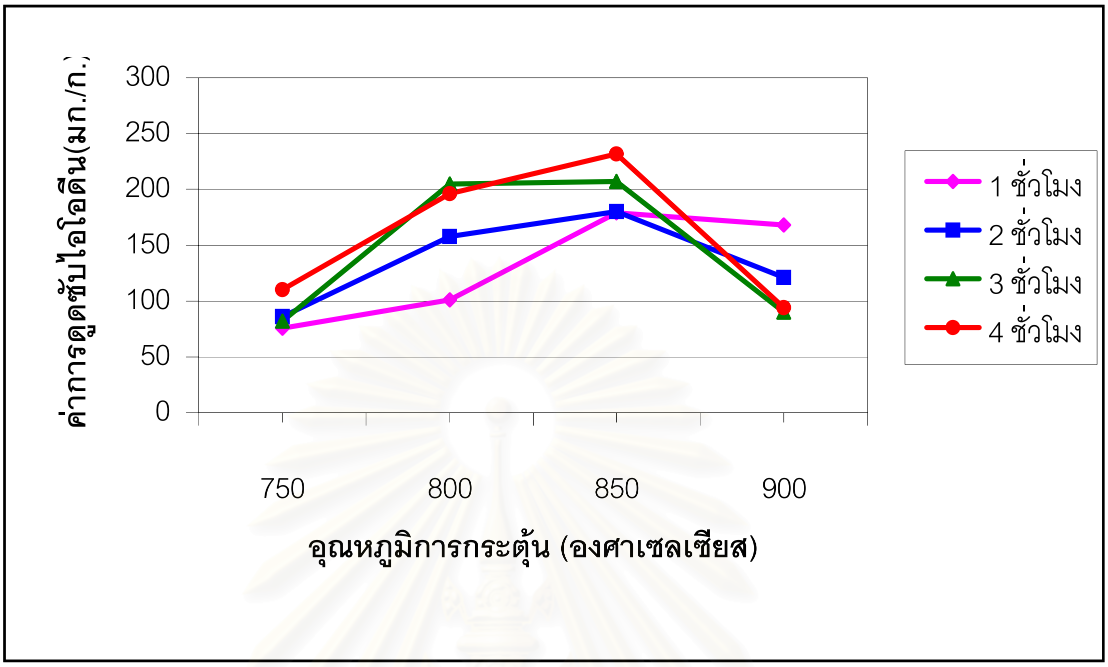



รูปที่ 4.27 ผลของอุณหภูมิการกระตุ้นที่มีต่อค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตร ณ เวลาต่างๆ โดยใช้ลิกไนต์ 20 กรัม ปริมาณป้อนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 500 ลบ.ซม./นาที ปริมาณป้อนไอน้ำ 10 กรัม/นาที และปริมาณป้อนอากาศ 1.5 ลบ.ซม./นาที

จากรูปที่ 4.27 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตรของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้กับอุณหภูมิที่ใช้ในการกระตุ้น พบว่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการกระตุ้นสูงขึ้น ค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตร ของทุกๆที่ใช้เวลาในการกระตุ้นจะลดลง ซึ่งเป็นผลมาจากโครงสร้างเดิมของถ่านเกิดการพัฒนามาเป็นโครงสร้างที่มีรูพรุน และรูพรุนเกิดมากขึ้นตามอุณหภูมิที่สูงขึ้น ทำให้ความหนาแน่นเชิงปริมาตรลดลง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3. <u>ค่าการดูดซับไอโอดีน</u>




รูปที่ 4.28 ผลของอุณหภูมิการกระตุ้นที่มีต่อค่าการดูดซับไอโอดีน ณ เวลาต่างๆ โดยใช้ลิกไนต์ 20 กรัม ปริมาณป้อนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 500 ลบ.ซม./นาที ปริมาณป้อนไอน้ำ 10 กรัม/นาที และปริมาณป้อนอากาศ 1.5 ลบ.ซม./นาที

จากรูปที่ 4.28 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้กับอุณหภูมิที่ใช้ในการกระตุ้น พบว่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการกระตุ้นสูงขึ้นในช่วง 750 – 850 องศาเซลเซียส ค่าการดูดซับไอโอดีน ของทุกๆที่ใช้เวลาในการกระตุ้นจะค่อยๆสูงขึ้น เนื่องจากสารกระตุ้นทำปฏิกิริยากับผิวถ่านได้ดีขึ้นตามอุณหภูมิที่สูงขึ้นโดยเฉพาะช่วงอุณหภูมิ 800 ถึง 900 องศาเซลเซียส จะเกิดปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันระหว่างสารกระตุ้นกับผิวของคาร์บอน

ดังสมการ

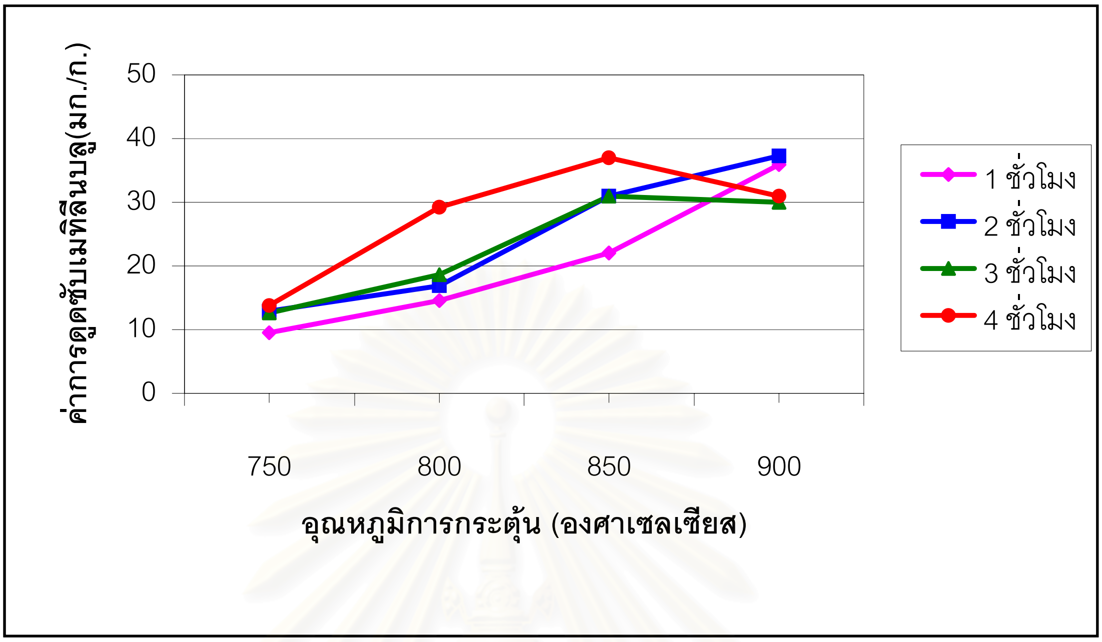
$$\left.\begin{aligned} H_2O + C_x &\longrightarrow H_2 + CO + C_{x-1} \\ CO_2 + C_x &\longrightarrow 2CO + C_{x-1} \\ O_2 + C_x &\longrightarrow 2CO + C_{x-2} \end{aligned}\right\} \text{เกิดที่ } 800 - 900^{\circ}C$$

และ

$$O_2 + C_x \longrightarrow CO_2 + C_{x-1} \qquad \text{เกิดต่ำกว่า } 600^{\circ}C$$

จากปฏิกิริยาเป็นผลให้เกิดรูพรุนขึ้น ค่าการดูดซับไอโอดีนจึงเพิ่มขึ้นตาม แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้นอีกที่ 900 องศาเซลเซียส ค่าการดูดซับไอโอดีนกลับลดลง เนื่องจากถ่านหินมีขีดจำกัดทางความร้อนเมื่อได้รับมากเกินไป โครงสร้างที่เป็นรูพรุนขนาดเล็กนั้นจะเกิดการแตกสลายจนอาจกลายเป็นโครงสร้างที่เป็นรูพรุนขนาดกลางและใหญ่ขึ้นแทน จึงทำให้ค่าการดูดซับไอโอดีนลดลง

4. <u>ค่าการดูดซับเมทิลีนบลู</u>

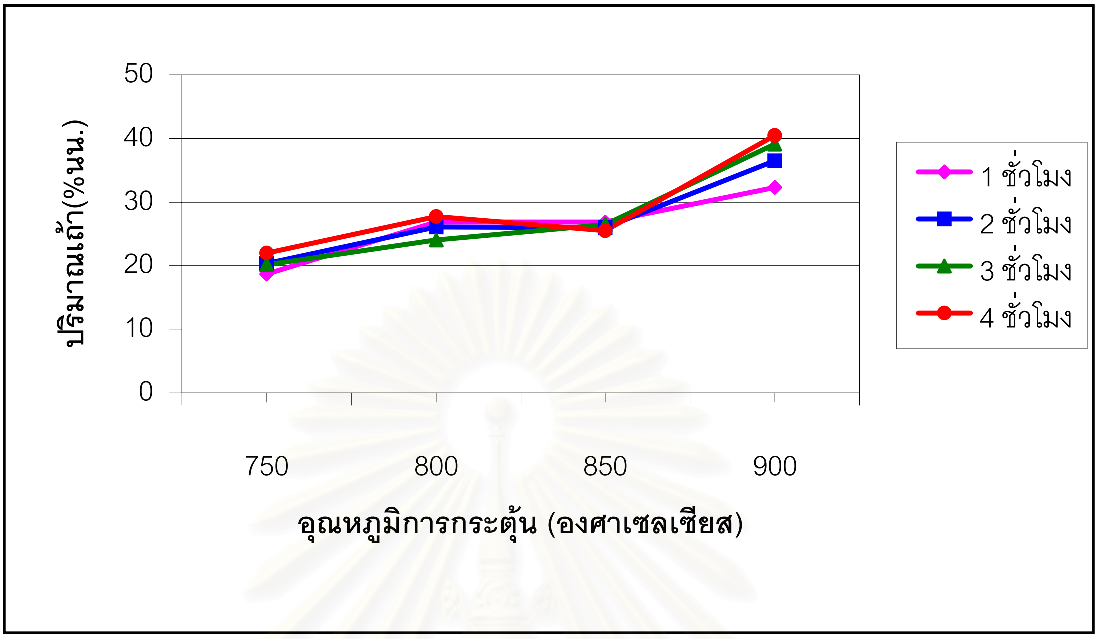



รูปที่ 4. 29 ผลของอุณหภูมิการกระตุ้นที่มีต่อค่าการดูดซับเมทิลีนบลู ณ เวลาต่างๆ โดยใช้ลิกไนต์ 20 กรัม ปริมาณป้อนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 500 ลบ.ซม./นาที ปริมาณป้อนไอน้ำ 10 กรัม/นาที และปริมาณป้อนอากาศ 1.5 ลบ.ซม./นาที

จากรูปที่ 4.29 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดซับเมทิลีนบลูของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้กับอุณหภูมิที่ใช้ในการกระตุ้น พบว่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการกระตุ้นสูงขึ้น แนวโน้มค่าการดูดซับเมทิลีนบลูจะเพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่ามีรูพรุนขนาดกลางเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิการกระตุ้นที่สูงขึ้นด้วย อาจเนื่องจากเกิดเผาไหม้บางส่วนของผนังรูพรุนขนาดเล็กอันเนื่องจากการได้รับปริมาณความร้อนที่สูงขึ้น ทำให้รูพรุนขนาดเล็กขยายกว้างขึ้นจนกลายเป็นรูพรุนขนาดกลางหรือขนาดใหญ่ขึ้นมา ซึ่งจะเกิดควบคู่ไปกับการเกิดรูพรุนขึ้นมาใหม่ด้วย ทำให้ค่าการดูดซับเมทิลีนบลูสูงขึ้น

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

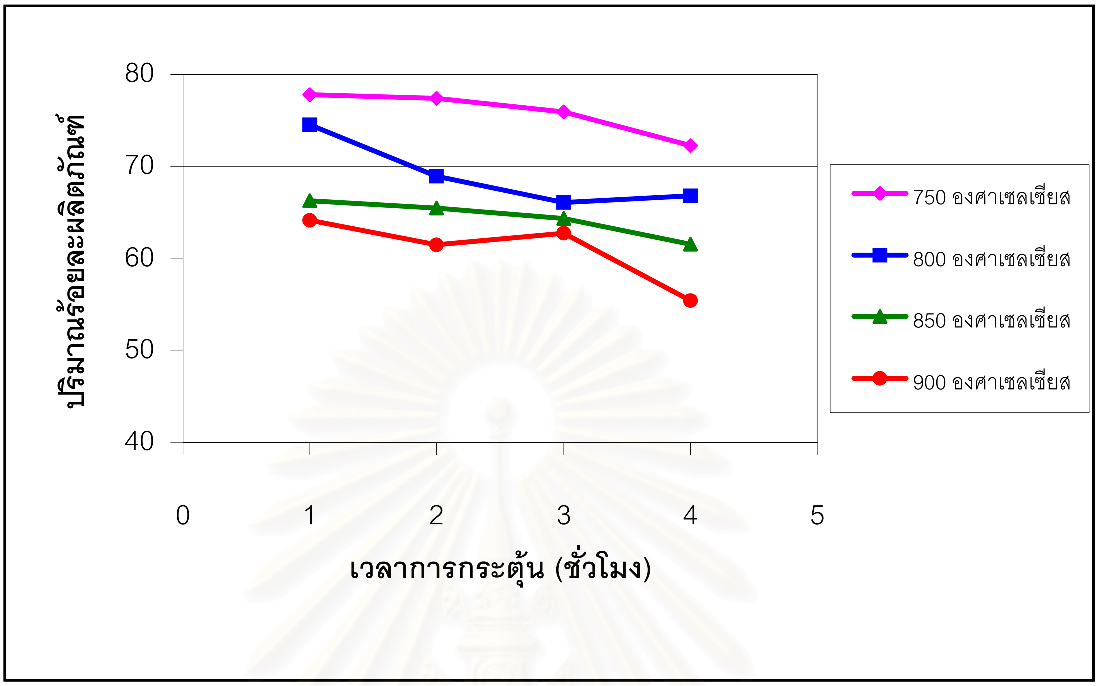
5. <u>ปริมาณเถ้า</u>




รูปที่ 4.30 ผลของอุณหภูมิการกระตุ้นที่มีต่อปริมาณร้อยละของเถ้า ณ เวลาต่างๆ โดยใช้ลิกไนต์ 20 กรัม ปริมาณป้อนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 500 ลบ.ซม./นาที ปริมาณป้อนไอน้ำ 10 กรัม/นาที และปริมาณป้อนอากาศ 1.5 ลบ.ซม./นาที

จากรูปที่ 4.30 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาณร้อยละเถ้าของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้กับอุณหภูมิที่ใช้ในการกระตุ้น พบว่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการกระตุ้นสูงขึ้น ปริมาณร้อยละของเถ้า ทุกๆเวลาที่ใช้ในการกระตุ้นมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นผิวของถ่านจะเกิดการเผาไหม้มากขึ้นด้วย ส่งผลให้เกิดเถ้ามากขึ้นตามมา โดยเฉพาะที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส ปริมาณเถ้าขึ้นสูงถึง 40%

1. <u>ปริมาณร้อยละผลิตภัณฑ์</u>

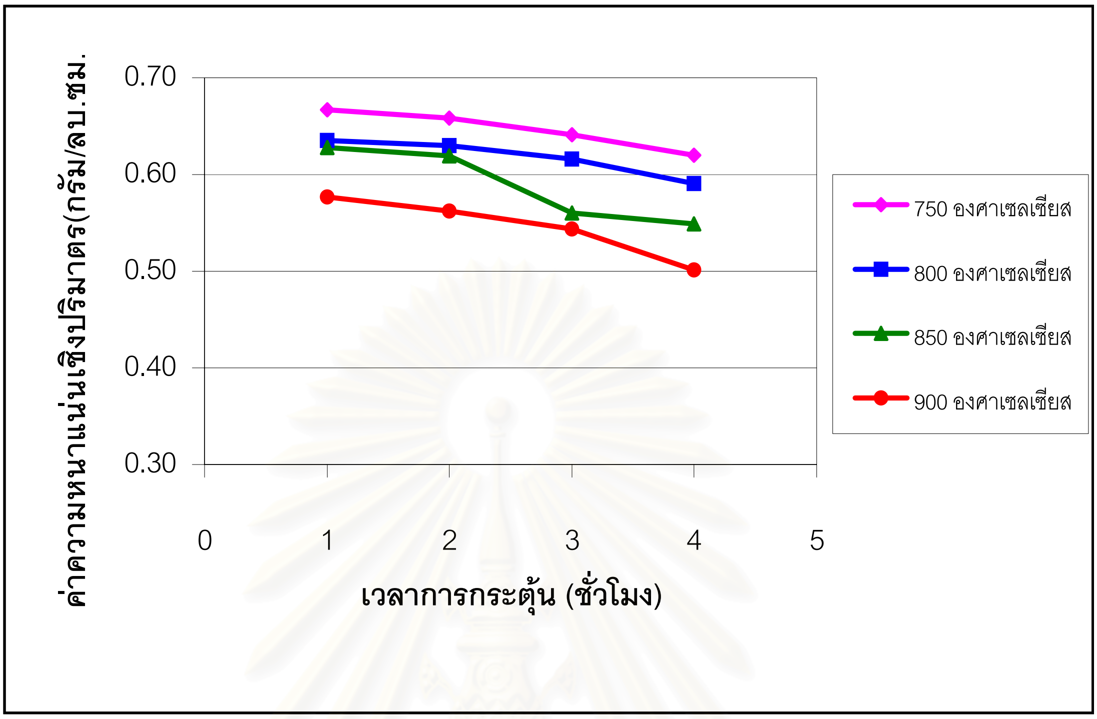



รูปที่ 4.31 ผลของเวลาการกระตุ้นที่มีต่อปริมาณร้อยละผลิตภัณฑ์ ณ อุณหภูมิต่างๆ โดยใช้ลิกไนต์ 20 กรัม ปริมาณป้อนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 500 ลบ.ซม./นาที ปริมาณป้อนไอน้ำ 10 กรัม/นาที และปริมาณป้อนอากาศ 1.5 ลบ.ซม./นาที

จากรูปที่ 4.31 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาณร้อยละผลิตภัณฑ์ของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้กับเวลาที่ใช้ในการกระตุ้น พบว่า เมื่อเพิ่มเวลาในการกระตุ้นมากขึ้น ปริมาณร้อยละผลิตภัณฑ์มีแนวโน้มที่ลดลงตามเวลาที่นานขึ้น เนื่องจากการใช้เวลากระตุ้นนาน ทำให้ถ่านได้รับปริมาณความร้อนที่นานขึ้น ทาร์และสารระเหยจะหลุดออกไปจากโครงสร้างมากขึ้น ปฏิกิริยาระหว่างผิวคาร์บอนกับสารกระตุ้นเป็นไปอย่างต่อเนื่อง เป็นผลให้ปริมาณผลิตภัณฑ์ลดลง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

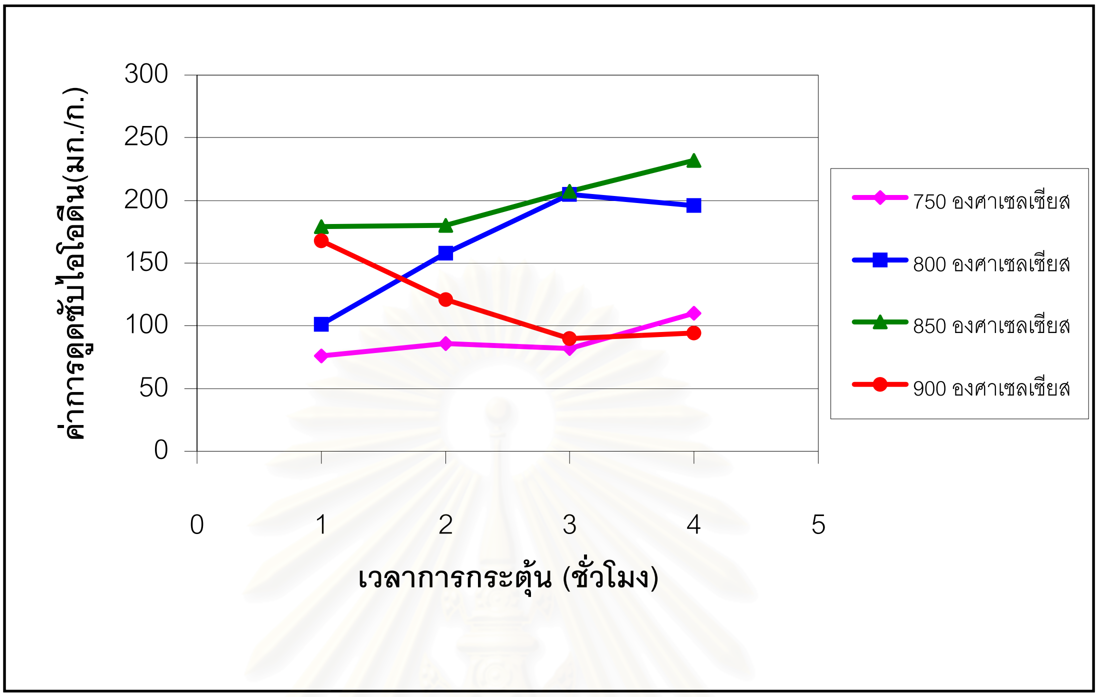
2. <u>ค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตร</u>




รูปที่ 4.32 ผลของเวลาการกระตุ้นที่มีต่อค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตร ณ อุณหภูมิต่างๆ โดยใช้ลิกไนต์ 20 กรัม ปริมาณป้อนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 500 ลบ.ซม./นาที ปริมาณป้อนไอน้ำ 10 กรัม/นาที และปริมาณป้อนอากาศ 1.5 ลบ.ซม./นาที

จากรูปที่ 4.32 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตรของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้กับเวลาที่ใช้ในการกระตุ้น พบว่า เมื่อเพิ่มเวลาในการกระตุ้นมากขึ้น ค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตรมีแนวโน้มที่ลดลงตามเวลาที่นานขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากการปลดปล่อยของทาร์และสารระเหยที่อยู่ในโครงสร้างของถ่าน และการเกิดปฏิกิริยาต่างๆระหว่างผิวคาร์บอนกับสารกระตุ้นมากขึ้น ซึ่งเป็นเหตุให้เกิดการสูญเสียมวลและโครงสร้างมีการพัฒนาเกิดเป็นรูพรุนมากขึ้น ค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตรจึงลดลง

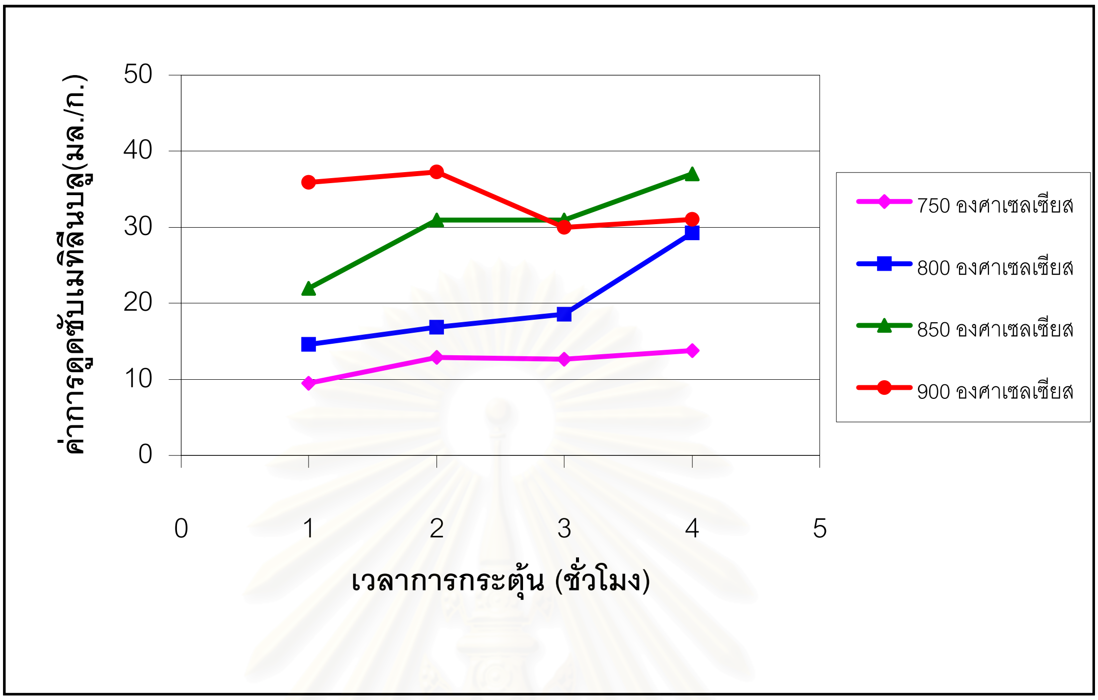
3. ค่าการดูดซับไอโอดีน




รูปที่ 4.33 ผลของเวลาการกระตุ้นที่มีต่อค่าการดูดซับไอโอดีน ณ อุณหภูมิต่างๆ โดยใช้ลิกไนต์ 20 กรัม ปริมาณป้อนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 500 ลบ.ซม./นาที ปริมาณป้อนไอน้ำ 10 กรัม/นาที และปริมาณป้อนอากาศ 1.5 ลบ.ซม./นาที

จากรูปที่ 4.33 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้กับเวลาที่ใช้ในการกระตุ้น พบว่า เมื่อเพิ่มเวลาในการกระตุ้นมากขึ้น ที่อุณหภูมิ 750 – 850 องศาเซลเซียส ค่าการดูดซับไอโอดีนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามเวลาที่นานขึ้น เนื่องจากอุณหภูมิในช่วงนี้ โครงสร้างของถ่านมีการพัฒนากลายเป็นรูพรุนมากขึ้น เมื่อใช้เวลาการกระตุ้นนาน เป็นผลให้โครงสร้างเกิดเป็นรูพรุนอย่างต่อเนื่อง ค่าการดูดซับไอโอดีนจะเพิ่มขึ้น แต่จะลดลงที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เนื่องจากโครงสร้างรูพรุนส่วนใหญ่เกิดการแตกสลาย การเพิ่มเวลาให้นานขึ้นจะส่งเสริมให้มีการแตกสลายของรูพรุนมากขึ้น รูพรุนขนาดเล็กจึงลดลง เป็นผลให้ค่าการดูดซับไอโอดีนลดลงด้วย

4. <u>ค่าการดูดซับเมทิลีนบลู</u>

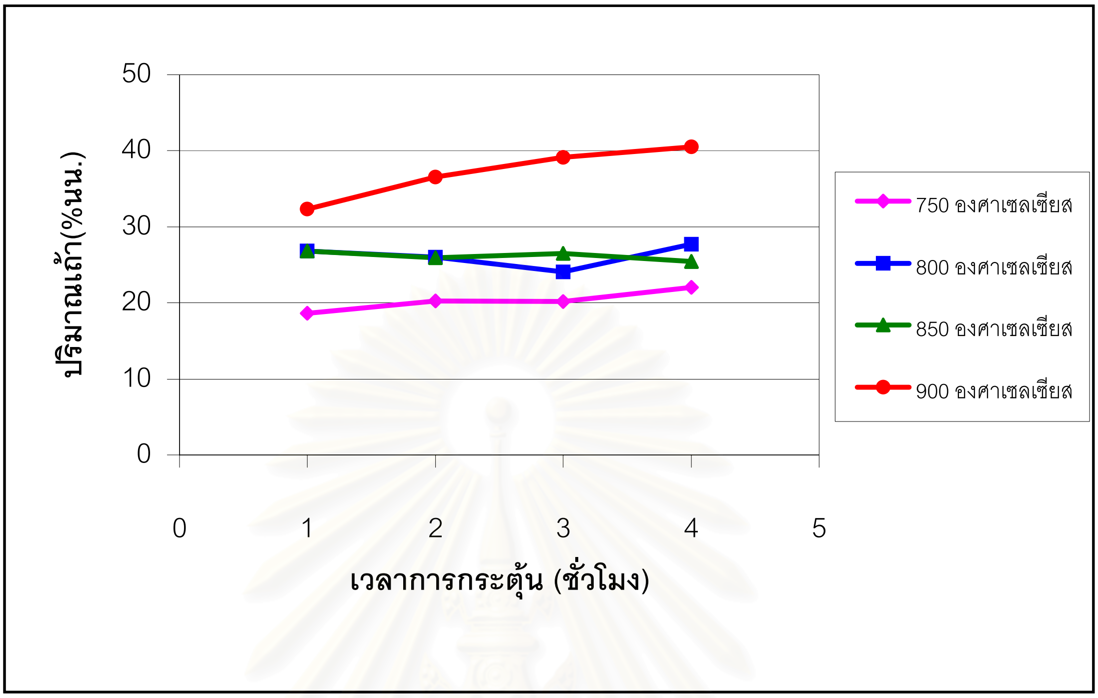



รูปที่ 4.34 ผลของเวลาการกระตุ้นที่มีต่อค่าการดูดซับเมทิลีนบลู ณ อุณหภูมิต่างๆ โดยใช้ลิกไนต์ 20 กรัม ปริมาณป้อนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 500 ลบ.ซม./นาที ปริมาณป้อนไอน้ำ 10 กรัม/นาที และปริมาณป้อนอากาศ 1.5 ลบ.ซม./นาที

จากรูปที่ 4.34 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดซับเมทิลีนบลูของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้กับเวลาที่ใช้ในการกระตุ้น พบว่า เมื่อเพิ่มเวลาในการกระตุ้นมากขึ้น ที่อุณหภูมิ 750 – 850 องศาเซลเซียส ค่าการดูดซับเมทิลีนบลูมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามเวลาที่นานขึ้น เนื่องจากอุณหภูมิในช่วงนี้ โครงสร้างของถ่านมีการพัฒนากลายเป็นรูพรุนมากขึ้น เมื่อใช้เวลาการกระตุ้นนาน เป็นผลให้โครงสร้างเกิดเป็นรูพรุนอย่างต่อเนื่อง ค่าการดูดซับเมทิลีนบลูจะเพิ่มขึ้น แต่จะลดลงที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส ซึ่งจะมีคล้ายกับลักษณะการดูดซับไอโอดีน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5. ปริมาณเถ้า




รูปที่ 4.35 ผลของเวลาการกระตุ้นที่มีต่อปริมาณของเถ้า ณ อุณหภูมิต่างๆ โดยใช้ลิกไนต์ 20 กรัม ปริมาณป้อนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 500 ลบ.ซม./นาที ปริมาณป้อนไอน้ำ 10 กรัม/นาที และปริมาณป้อนอากาศ 1.5 ลบ.ซม./นาที

จากรูปที่ 4.35 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของเถ้าของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้กับเวลาที่ใช้ในการกระตุ้น พบว่า เมื่อเพิ่มเวลาในการกระตุ้นมากขึ้น ในช่วงอุณหภูมิ 750 –850 องศาเซลเซียส ปริมาณเถ้าค่อนข้างที่จะคงที่ เนื่องจากอุณหภูมิที่ใช้ในช่วงนี้เวลายังมีผลกระทบต่อปริมาณเถ้าไม่มาก แต่จะส่งผลให้เห็นอย่างชัดเจนที่ อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส ปริมาณเถ้าจะเกิดสูงขึ้นตามเวลาที่ใช้กระตุ้นนานขึ้น เนื่องจากมีถ่านได้รับความร้อนที่สูงมากเป็นเวลานาน เป็นเหตุให้ถ่านเกิดการเผาไหม้ไปเป็นเถ้ามากขึ้น

4.3.2.2 ผลของการแปรขนาดอนุภาคของถ่าน

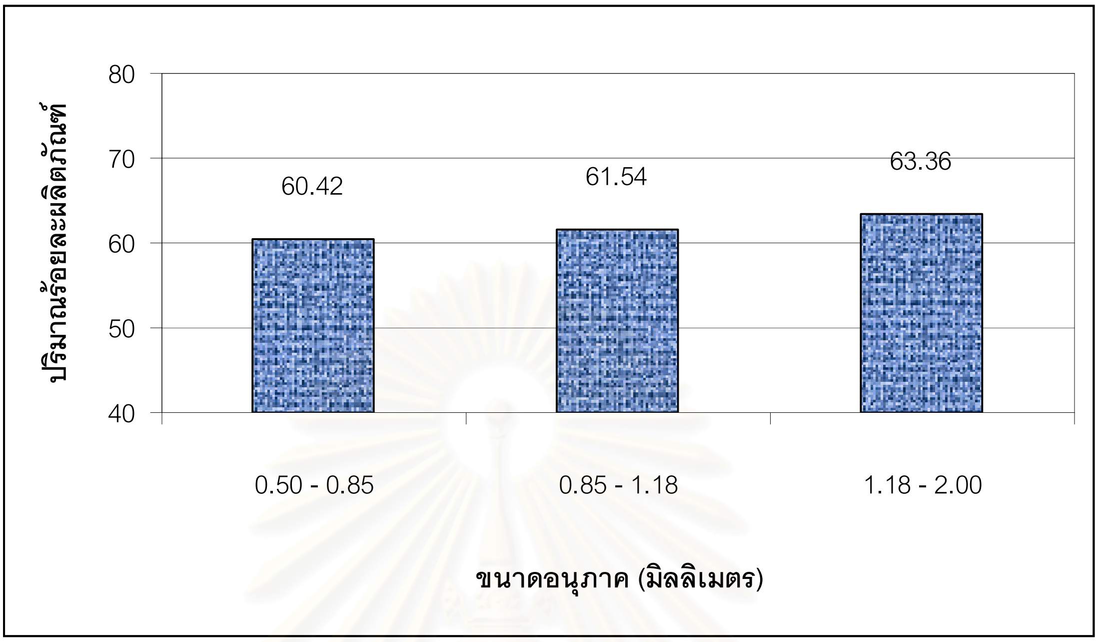
เมื่อได้อุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมในการกระตุ้น จากขั้นตอนที่ 4.3.2.1 นำภาวะที่ได้มาศึกษาถึงผลของขนาดอนุภาคของถ่านต่อ ค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตร (BD) ปริมาณเถ้า (Ash) ค่าการดูดซับเมทิลีนบลู (MB) ค่าการดูดซับไอโอดีน (IA) ผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.12 โดยดูผลของการแปรขนาดอนุภาคของถ่าน ในรูปที่ 4.44 – 4.48

ตารางที่ 4.12 สมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นที่ขนาดอนุภาคต่างๆ อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ปริมาณป้อนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 500 ลบ.ซม./นาที ปริมาณป้อนไอน้ำ 10 กรัม/นาที และปริมาณป้อนอากาศ 1.5 ลบ.ซม./นาที

| Size | YD | BD | Ash | MB | IA |
|---|---|---|---|---|---|
| (mm) | (%) | $g/cm^3$ | (%) | (mg/g) | (mg/g) |
| 0.50 - 0.85 | 60.42 | 0.544 | 26.87 | 41 | 242 |
| 0.85 - 1.18 | 61.54 | 0.549 | 25.48 | 37 | 232 |
| 1.18 - 2.00 | 63.36 | 0.562 | 26.15 | 35 | 210 |

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

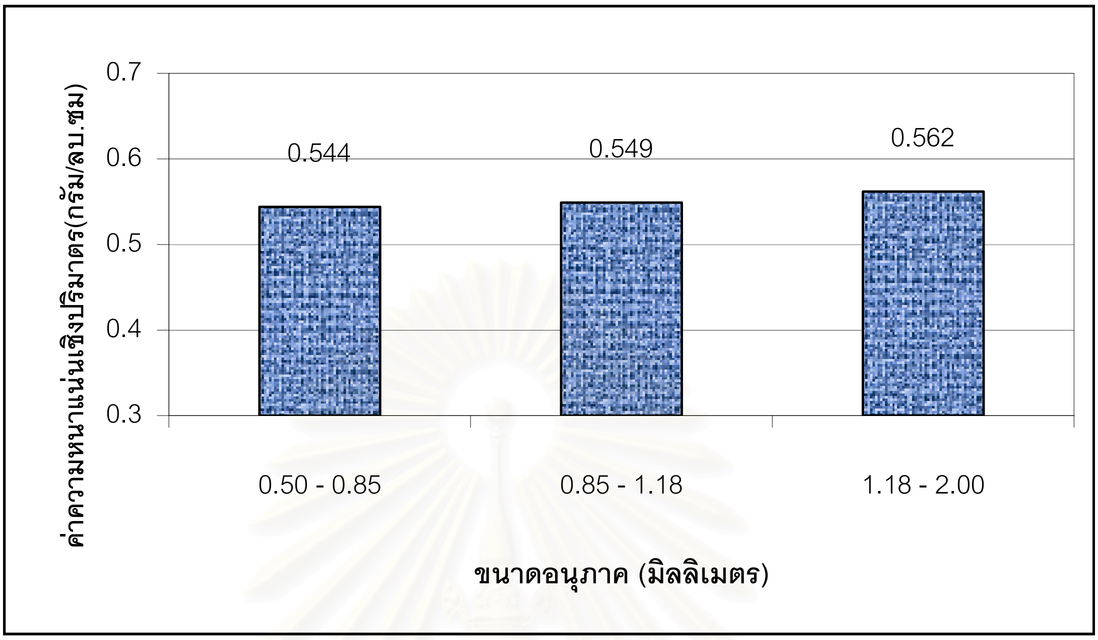
1. <u>ปริมาณร้อยละผลิตภัณฑ์</u>




รูปที่ 4.36 ผลของขนาดอนุภาคที่มีต่อปริมาณร้อยละผลิตภัณฑ์ ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง โดยใช้ลิกไนต์ 20 กรัม ปริมาณป้อนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 500 ลบ.ซม./นาที ปริมาณป้อนไอน้ำ 10 กรัม/นาที และปริมาณป้อนอากาศ 1.5 ลบ.ซม./นาที

จากรูปที่ 4.36 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณร้อยละผลิตภัณฑ์ของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้กับขนาดอนุภาคของถ่านที่ใช้ในการกระตุ้น พบว่า เมื่อเพิ่มขนาดอนุภาคของถ่านใหญ่ขึ้น ปริมาณร้อยละผลิตภัณฑ์จะเพิ่มขึ้นตาม เนื่องจากเมื่อขนาดอนุภาคใหญ่ขึ้นทำให้เมื่อแก๊สกระตุ้นไหลผ่านนั้น สารกระตุ้นจะแพร่ผ่านผิวของถ่านมากกว่าที่จะแพร่เข้าไปในเนื้อถ่าน และเมื่อใช้อนุภาคขนาดใหญ่จะมีช่องว่างในเบด (Bed) ของเครื่องปฏิกรณ์มาก แก๊สจึงผ่านไปได้เร็วกว่าเบดที่มีถ่านอนุภาคขนาดเล็ก เพราะเมื่อแก๊สผ่านไปเร็วเวลาที่สัมผัสกับผิวถ่านจึงน้อย ปฏิกิริยาที่เกิดส่วนใหญ่จึงเกิดที่ผิวของถ่าน ทำให้เกิดการสูญเสียมวลน้อยกว่าอนุภาคขนาดเล็ก

2. <u>ค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตร</u>

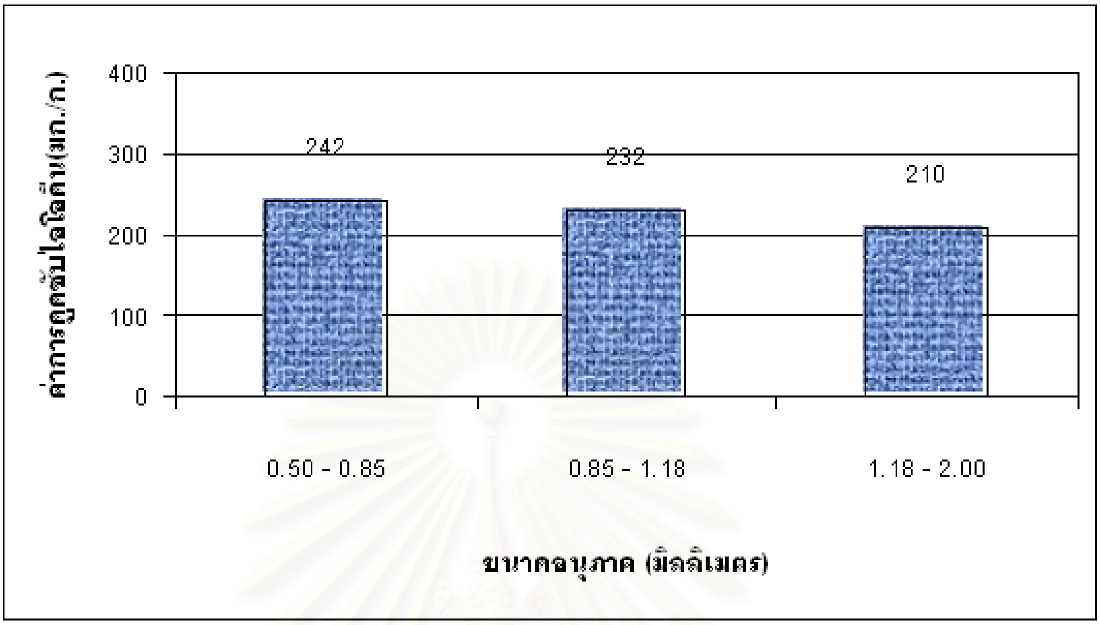



รูปที่ 4.37 ผลของขนาดอนุภาคที่มีต่อค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตร ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง โดยใช้ลิกไนต์ 20 กรัม ปริมาณป้อนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 500 ลบ.ซม./นาที ปริมาณป้อนไอน้ำ 10 กรัม/นาที และปริมาณป้อนอากาศ 1.5 ลบ.ซม./นาที

จากรูปที่ 4.37 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตรของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้กับขนาดอนุภาคของถ่านที่ใช้ในการกระตุ้น พบว่า เมื่อลดขนาดอนุภาคของถ่านลง ค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตรจะลดลงตามขนาดอนุภาคที่เล็กลงด้วย เนื่องจากขนาดอนุภาคขนาดเล็กจะเกิดปฏิกิริยาได้ดีกว่าที่อนุภาคขนาดใหญ่ โครงสร้างจะเกิดเป็นรูพรุนที่มากกว่า ทำให้ค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตรลดลง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3 <u>ค่าการดูดซับไอโอดีน</u>

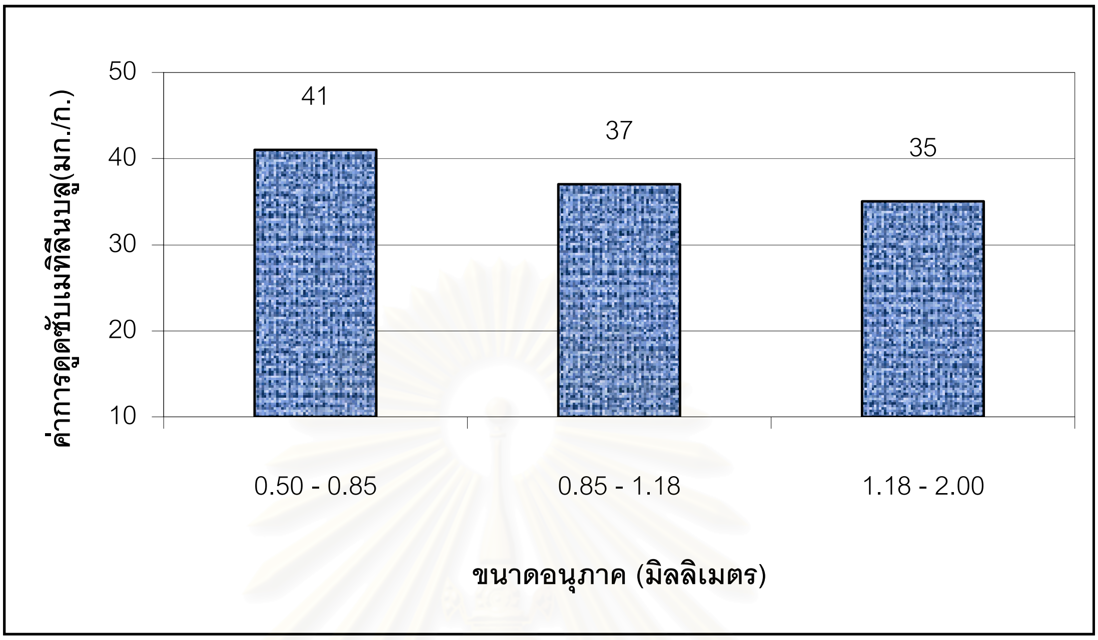



รูปที่ 4.38 ผลของขนาดอนุภาคที่มีต่อค่าการดูดซับไอโอดีน ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง โดยใช้ลิกไนต์ 20 กรัม ปริมาณป้อนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 500 ลบ.ซม./นาที ปริมาณป้อนไอน้ำ 10 กรัม/นาที และปริมาณป้อนอากาศ 1.5 ลบ.ซม./นาที

จากรูปที่ 4.38 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้กับขนาดอนุภาคของถ่านที่ใช้ในการกระตุ้น พบว่า ขนาดอนุภาคที่เล็กกว่าจะสามารถดูดซับไอโอดีนได้มากกว่า เนื่องจากอนุภาคขนาดเล็กมีโครงสร้างที่เป็นรูพรุนขนาดเล็กมากกว่าทำให้สามารถดูดซับไอโอดีนไว้ได้มากกว่า

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4. <u>ค่าการดูดซับเมทิลีนบลู</u>

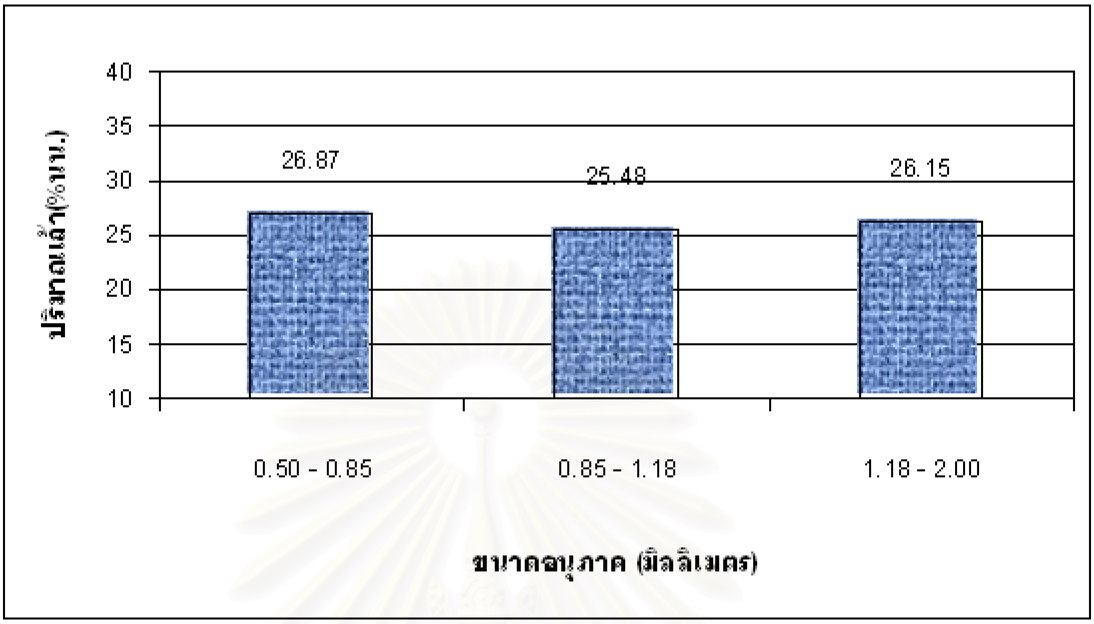



รูปที่ 4.39 ผลของขนาดอนุภาคที่มีต่อค่าการดูดซับเมทิลีนบลู ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง โดยใช้ลิกไนต์ 20 กรัม ปริมาณป้อนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 500 ลบ.ซม./นาที ปริมาณป้อนไอน้ำ 10 กรัม/นาที และปริมาณป้อนอากาศ 1.5 ลบ.ซม./นาที

จากรูปที่ 4.39 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดซับเมทิลีนบลูของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้กับขนาดอนุภาคของถ่านที่ใช้ในการกระตุ้น พบว่า เมื่อลดขนาดอนุภาคของถ่านเล็กลง ค่าการดูดซับเมทิลีนบลูจะเพิ่มขึ้น และคล้ายกับผลของการดูดซับไอโอดีน เป็นผลมาจากการเกิดโครงสร้างที่เป็นรูพรุนขนาดกลางเพิ่มขึ้นตามรูพรุนขนาดเล็กด้วย ทำให้ค่าการดูดซับเมทิลีนบลูสูงขึ้นตาม

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5. <u>ปริมาณเถ้า</u>

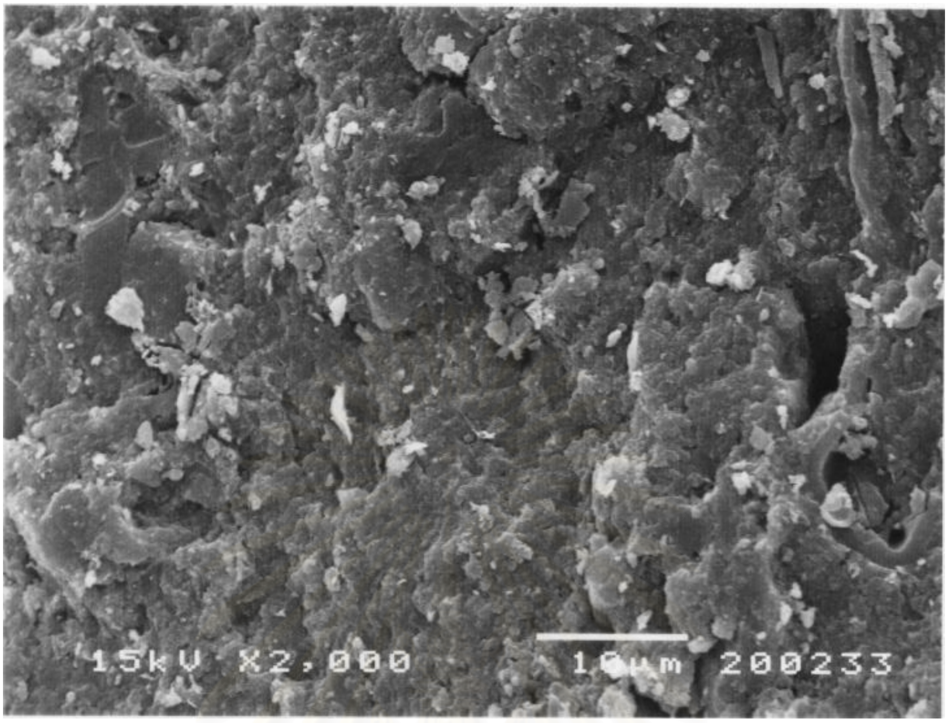



รูปที่ 4.40 ผลของขนาดอนุภาคที่มีต่อปริมาณของเถ้า ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง โดยใช้ลิกไนต์ 20 กรัม ปริมาณป้อนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 500 ลบ.ซม./นาที ปริมาณป้อนไอน้ำ 10 กรัม/นาที และปริมาณป้อนอากาศ 1.5 ลบ.ซม./นาที

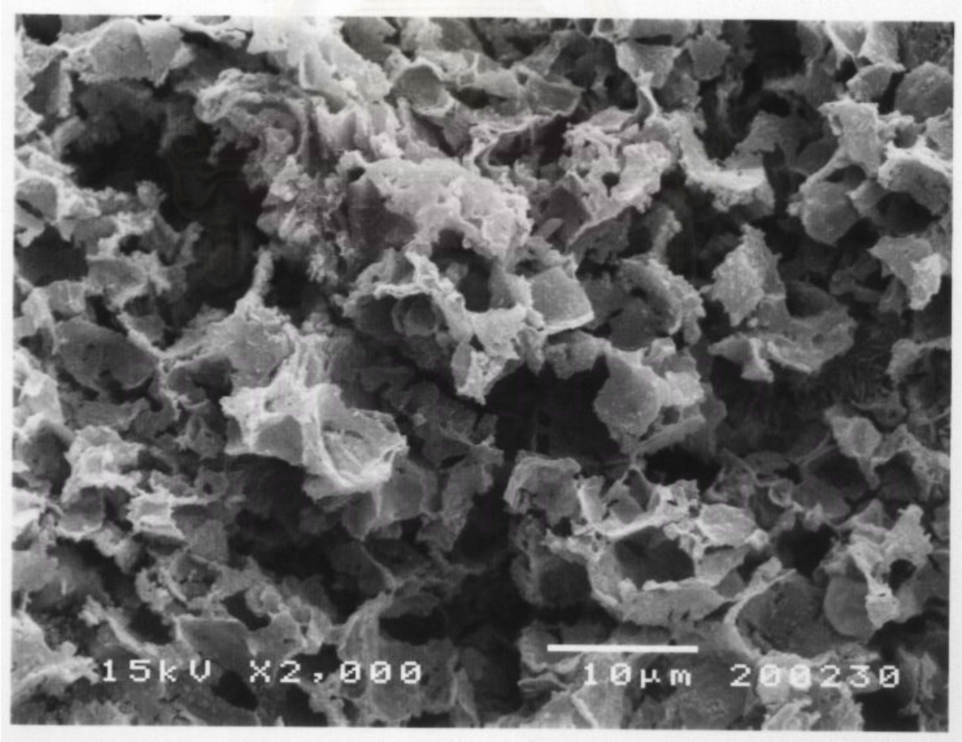
จากรูปที่ 4.40 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเถ้าของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้กับขนาดอนุภาคของถ่านที่ใช้ในการกระตุ้น พบว่า เมื่อเพิ่มขนาดอนุภาคของถ่านใหญ่ขึ้น ปริมาณเถ้าที่เกิดเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย ซึ่งค่อนข้างจะคงที่ เนื่องจากเถ้าที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่เกิดจากการเผาไหม้ด้วยความร้อน เนื่องจากเป็นการกระตุ้นที่ 850 องศาเซลเซียสเท่ากัน เถ้าที่เกิดขึ้นจึงใกล้เคียงกัน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

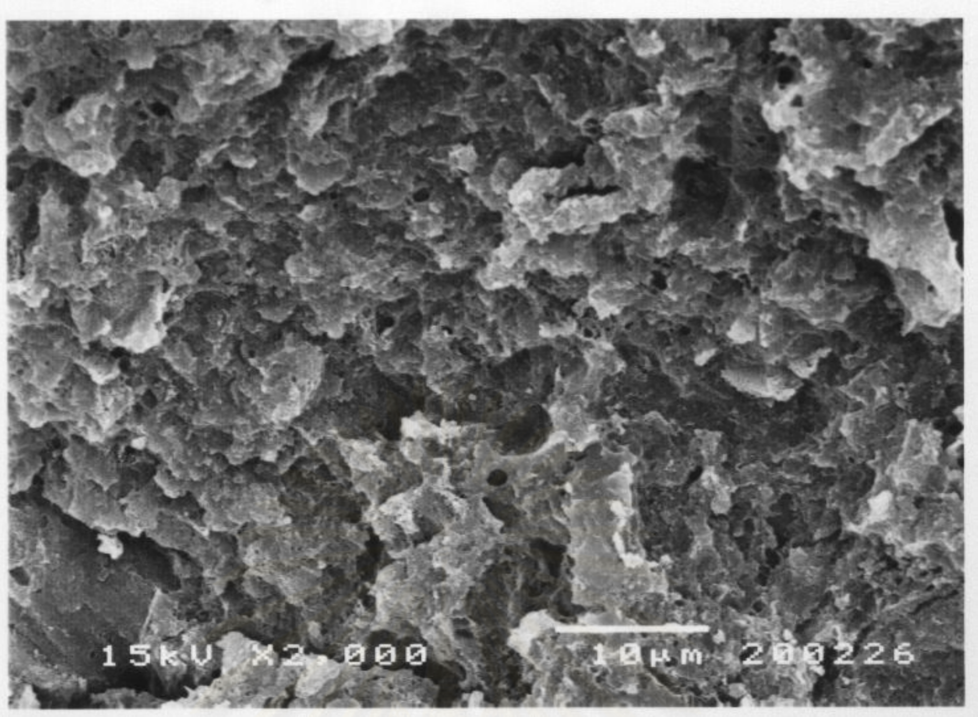
## 4.4 รูปลักษณะพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จากการกระตุ้นที่ภาวะต่าง ๆ



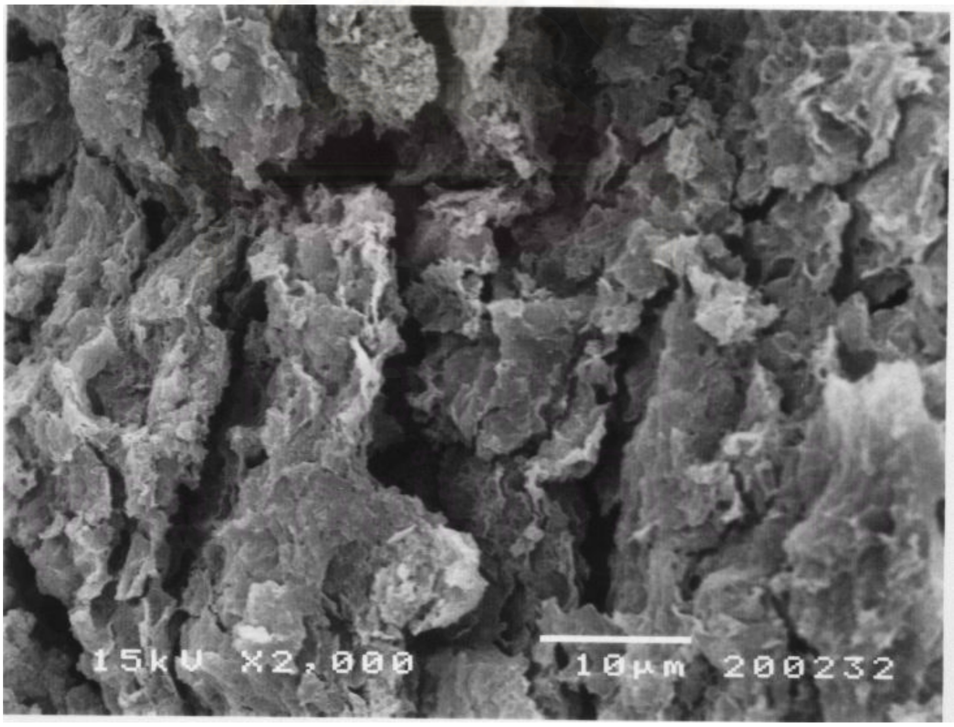

รูปที่ 4.41 ภาพแสดงถ่านชาร์ที่ได้จากการคาร์บอไนซ์ลิกไนต์ (ก่อนการกระตุ้น)



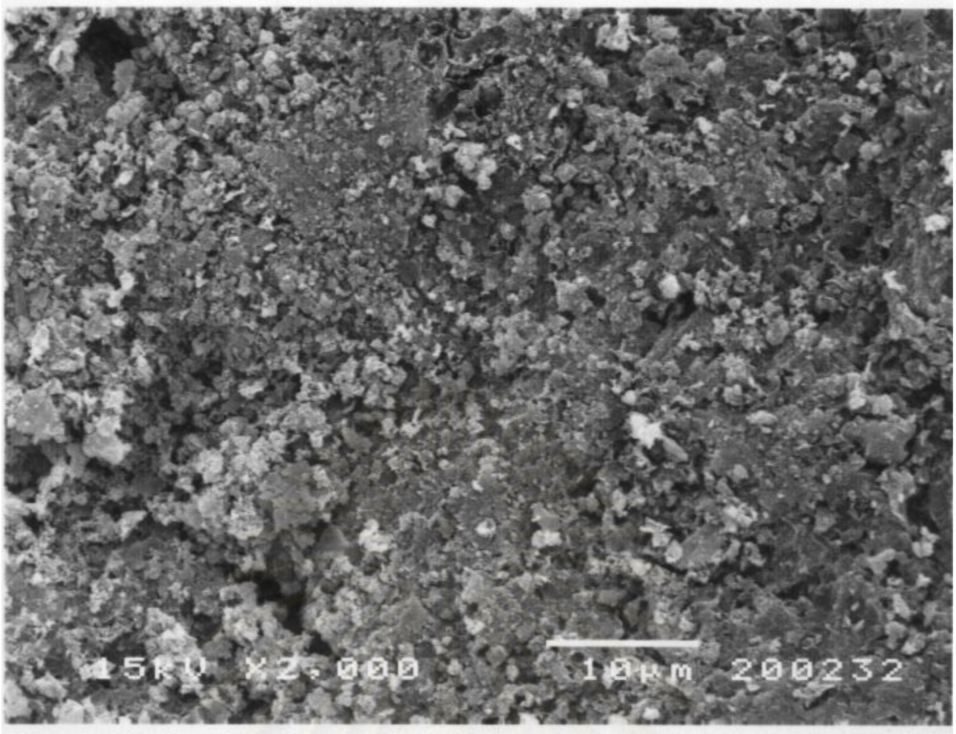

รูปที่ 4.42 ภาพแสดงถ่านกัมมันต์จากลิกไนต์ กระตุ้นที่ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง อัตราส่วนสารกระตุ้นต่อถ่านชาร์ 0.7:1 ขนาดอนุภาค 0.50 – 0.85 มิลลิเมตร



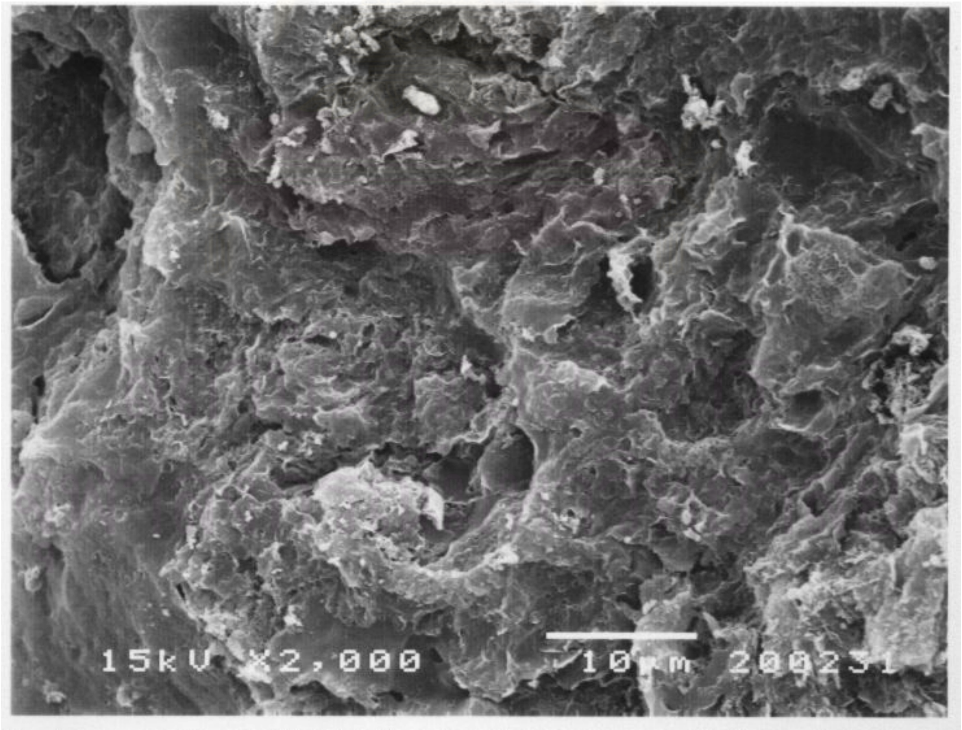

รูปที่ 4.43 ภาพแสดงถ่านกัมมันต์จากลิกไนต์ กระตุ้นที่ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง อัตราส่วนสารกระตุ้นต่อถ่านชาร์ 0.7:1 ขนาดอนุภาค 0.85 – 1.18 มิลลิเมตร



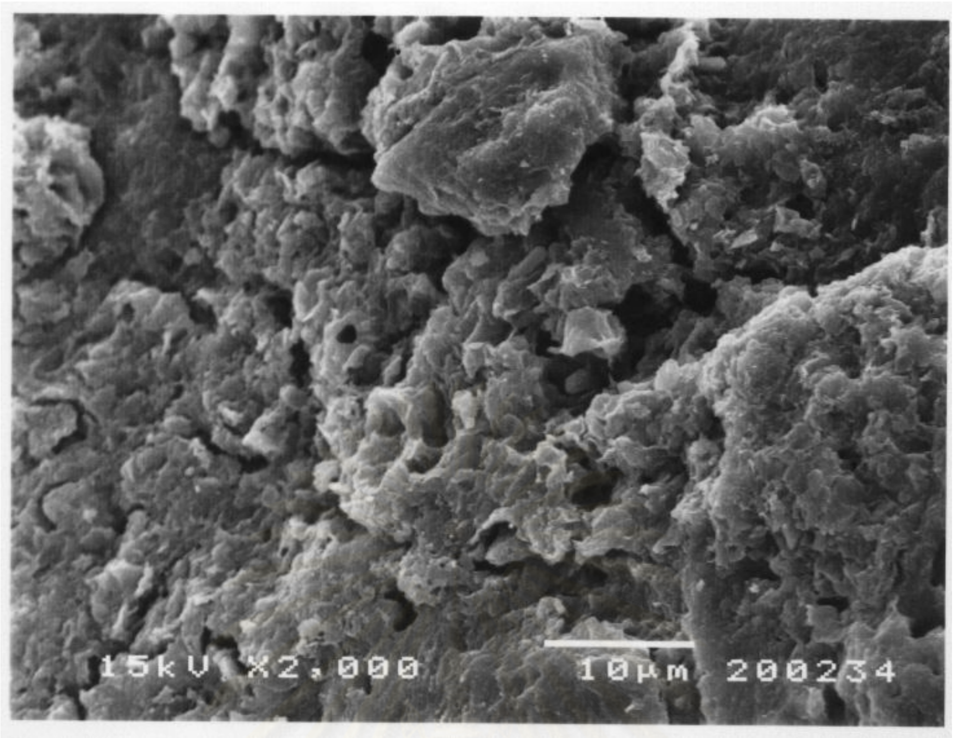

รูปที่ 4.44 ภาพแสดงถ่านกัมมันต์จากลิกไนต์ กระตุ้นที่ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง อัตราส่วนสารกระตุ้นต่อถ่านชาร์ 0.7:1 ขนาดอนุภาค 1.18 – 2.00 มิลลิเมตร



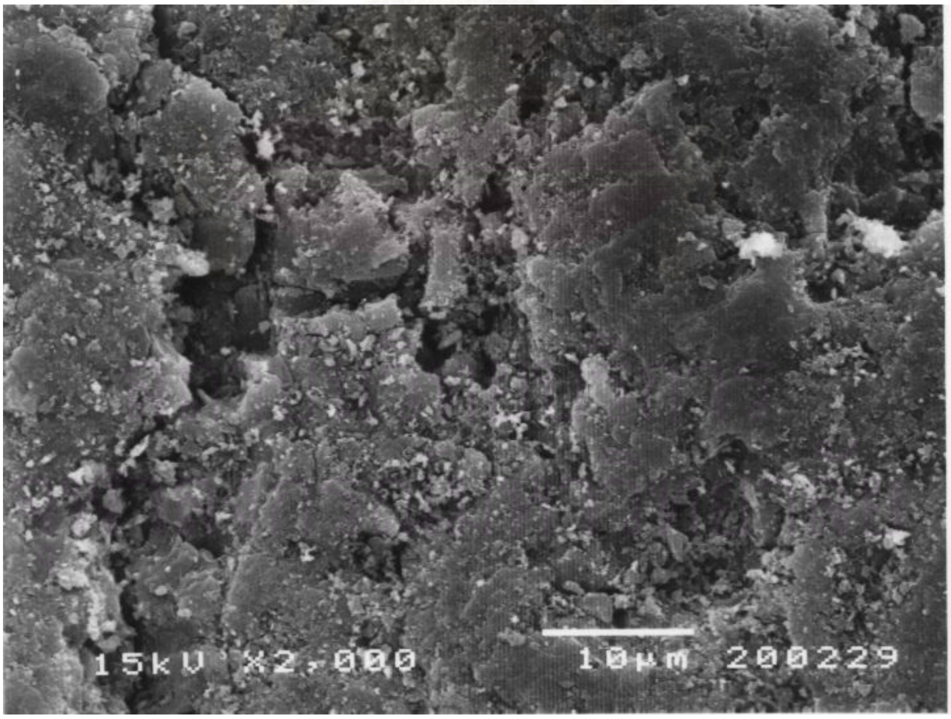

รูปที่ 4.45 ภาพแสดงถ่านกัมมันต์จากลิกไนต์ กระตุ้นที่ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง อัตราส่วนสารกระตุ้นต่อถ่านชาร์ 0.3:1 ขนาดอนุภาค 0.85 – 1.18 มิลลิเมตร



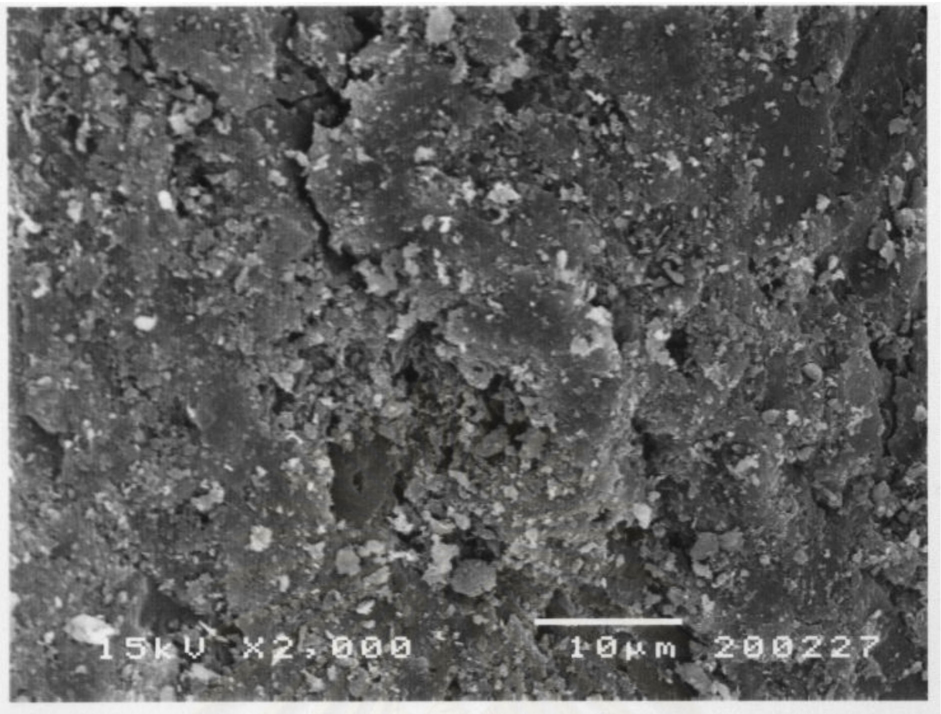

รูปที่ 4.46 ภาพแสดงถ่านกัมมันต์จากลิกไนต์ กระตุ้นที่ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง อัตราส่วนสารกระตุ้นต่อถ่านชาร์ 0.7:1 ขนาดอนุภาค 0.85 – 1.18 มิลลิเมตร



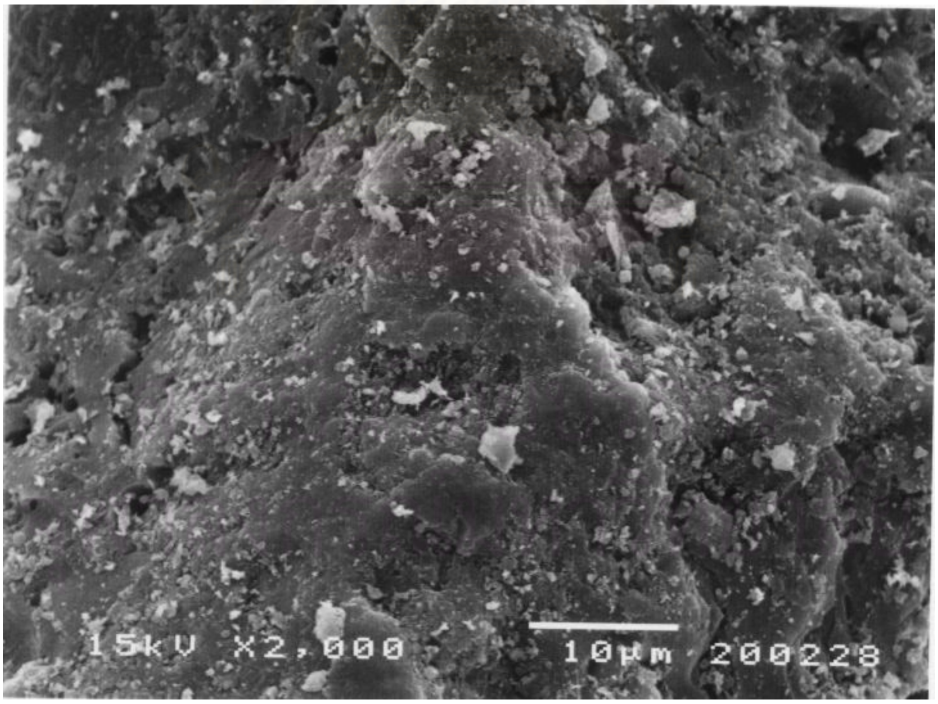

รูปที่ 4.47 ภาพแสดงถ่านกัมมันต์จากลิกไนต์ กระตุ้นที่ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง อัตราส่วนสารกระตุ้นต่อถ่านชาร์ 0.7:1 ขนาดอนุภาค 0.85 – 1.18 มิลลิเมตร




รูปที่ 4.48 ภาพแสดงถ่านกัมมันต์จากลิกไนต์ กระตุ้นที่ 850 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ปริมาณป้อน $CO_2$ 500 $cm^3$/min , $H_2O$ 10 g/min , $O_2$ 1.5 $cm^3$/min ขนาด 0.85 – 1.18 มม.




รูปที่ 4.49 ภาพแสดงถ่านกัมมันต์จากลิกไนต์ กระตุ้นที่ 750 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ปริมาณป้อน $CO_2$ 500 $cm^3$/min , $H_2O$ 10 g/min , $O_2$ 1.5 $cm^3$/min ขนาด 0.85 – 1.18 มม.




รูปที่ 4.50 ภาพแสดงถ่านกัมมันต์จากลิกไนต์ กระตุ้นที่ 850 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ปริมาณป้อน $CO_2$ 500 $cm^3$/min , $H_2O$ 10 g/min , $O_2$ 1.5 $cm^3$/min ขนาด 0.85 – 1.18 มม.

## 4.5 การเปรียบเทียบสมบัติของถ่านกัมมันต์ในงานวิจัย

ตารางที่ 4.13 เปรียบเทียบสมบัติของถ่านกัมมันต์จากการกระตุ้นทางเคมีและทางกายภาพ

| ข้อมูลเปรียบเทียบ | กระตุ้นทางเคมี | กระตุ้นทางกายภาพ |
|---|---|---|
| วัตถุดิบ | ลิกไนต์ | ลิกไนต์ |
| ชนิดเครื่องปฏิกรณ์ | เบดนิ่ง | เบดนิ่ง |
| สารที่ใช้กระตุ้น | KOH | $CO_2 + H_2O$ |
| อุณหภูมิที่ใช้กระตุ้น (องศาเซลเซียส) | 800 | 850 |
| เวลาที่ใช้กระตุ้น (ชม.) | 4 | 4 |
| ขนาดอนุภาค (มม.) | 0.5 – 0.85 | 0.5 – 0.85 |
| ปริมาณร้อยละผลิตภัณฑ์ | 50.87 | 60.42 |
| ความหนาแน่นเชิงปริมาตร (ก./ลบ.ซม.) | 0.318 | 0.544 |
| ค่าการดูดซับไอโอดีน (มก./ก.) | 846 | 242 |
| ค่าการดูดซับเมทิลีนบลู (มก./ก.) | 229 | 41 |
| ปริมาณร้อยละของเถ้า | 14.61 | 26.87 |
| พื้นที่ผิวแบบบีอีที (ตร.ม./ก.) | 1,292 | 151 |

จากการเปรียบเทียบสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากการกระตุ้นทางเคมีและทางกายภาพ ดังตารางที่ 4.13 พบว่าการกระตุ้นทางเคมีจะให้ปริมาณร้อยละผลิตภัณฑ์และความหนาแน่นเชิงปริมาตรน้อยกว่าการกระตุ้นทางกายภาพ เนื่องจากวัตถุดิบที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นถ่านหินลิกไนต์ ซึ่งมีโครงสร้างที่เป็นรูพรุนอยู่น้อยมาก ปฏิกิริยาระหว่างแก๊สที่ใช้กระตุ้นกับคาร์บอน ในการกระตุ้นทางกายภาพ ส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นที่ผิวภายนอกของถ่านเท่านั้น แก๊สไม่สามารถทะลุเข้าไปทำปฏิกิริยาถึงภายในเนื้อถ่านได้ ซึ่งต่างกับการกระตุ้นทางเคมี จะทำการแช่สารเคมีไว้ เพื่อให้สารเคมีที่ใช้กระตุ้นซึมเข้าไปในเนื้อถ่านก่อน แล้วจึงทำการกระตุ้น ทำให้สามารถเกิดปฏิกิริยาเข้าไปถึงภายในเนื้อถ่านได้ ส่งผลให้เกิดการสูญเสียมวลของถ่านที่มากขึ้น ปริมาณผลิตภัณฑ์และความหนาแน่นเชิงปริมาตรจากการกระตุ้นทางเคมีจึงน้อยกว่า เป็นเหตุให้โครงสร้างของถ่านมีการพัฒนาไปเป็นโครงสร้างที่มีรูพรุนมากขึ้น ค่าการดูดซับไอโอดีน ค่าการดูดซับเมทิลีนบลู รวมถึงค่าพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ในการกระตุ้นทางเคมีจึงสูงกว่า อีกทั้งปริมาณเถ้าของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากการกระตุ้นทางเคมีต่ำกว่า เนื่องจากผ่านขั้นตอนการล้างเถ้ามา จึงเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ได้ค่าพื้นที่ผิวที่สูงกว่า

ตารางที่ 4.14 เปรียบเทียบผลงานวิจัยนี้กับผลงานวิจัยต่างประเทศ

| ข้อมูลเปรียบเทียบ | Li–Yeh Hsu (2543) | Lozano-Castello (2544) | ธวัชชัย ต้นเจริญทรัพย์ (2544) |
|---|---|---|---|
| วัตถุดิบ | บิทูมินัส | แอนทราไซต์ | ลิกไนต์ |
| ชนิดเครื่องปฏิกรณ์ | เบดนิ่ง | เบดนิ่ง | เบดนิ่ง |
| ขนาดเตาเผา | 60 mm i.d. | 65 mm i.d. | 25 mm i.d. |
| สารที่ใช้กระตุ้น | KOH | KOH | KOH |
| อัตราส่วนสารกระตุ้น : ถ่าน | 4.25 : 1 | 4 : 1 | 0.7 : 1 |
| อุณหภูมิที่ใช้กระตุ้น ($^{o}$C) | 800 | 800 | 800 |
| เวลาที่ใช้กระตุ้น (h) | 1 | 2 | 4 |
| ขนาดอนุภาค (mm) | 0.4 – 1.0 | 0.6 – 1.0 | 0.5 – 0.85 |
| อัตราการป้อนแก๊สไนโตรเจน (ml/min) | 100 | 800 | 1,000 |
| ปริมาณร้อยละผลิตภัณฑ์ | - | - | 50.87 |
| ปริมาณร้อยละเถ้า | - | 1.0 | 14.61 |
| พื้นที่ผิวแบบบีอีที ($m^2$/g) | 3,300 | 3,290 | 1,292 |

จากการเปรียบเทียบสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากการกระตุ้นทางเคมีโดยใช้ KOH ดังตารางที่ 4.14 พบว่า งานของ Li–Yeh Hsu ที่ใช้บิทูมินัส และงานของ Lozano-Castello ที่ใช้แอนทราไซต์ เป็นวัตถุดิบให้ค่าพื้นที่ผิวแบบบีอีที มากกว่าประมาณ 2.5 เท่าของงานวิจัยนี้ อาจเป็นเพราะสมบัติของบิทูมินัส และแอนทราไซต์ ที่มีคาร์บอนคงตัวสูงและเถ้าต่ำจึงทำให้เกิดจำนวนรูพรุนต่อน้ำหนักมากกว่าการใช้ลิกไนต์ซึ่งมีเถ้าสูงที่ไม่เป็นประโยชน์ต่อการเกิดรูพรุน จึงทำให้เกิดจำนวนรูพรุนต่อน้ำหนักน้อยกว่า ประกอบกับอัตราส่วนของสารกระตุ้นที่ใช้ในปริมาณที่มากกว่า เนื่องจากในงานวิจัยนี้จะทำการทดลองเพียงให้สารกระตุ้นซึมเข้าไปในเนื้อถ่านจนอิ่มตัวพอดี แต่ในงานของ Li–Yeh Hsu และงานของ Lozano-Castello จะเติมสารกระตุ้นเข้าไปจนมากเกินพอ ซึ่งอาจส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาระหว่างสารกระตุ้นกับถ่านชาร์เพิ่มขึ้นได้อีกในขั้นตอนการกระตุ้น

# บทที่ 5
# สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะ

## 5.1 สรุปผลงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยเพื่อศึกษาหาภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมถ่านกัมมันต์จากถ่านหินลิกไนต์ โดยการกระตุ้นทางเคมีและทางกายภาพ พร้อมทั้งเปรียบเทียบสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการเตรียมทั้งสองวิธี ในการกระตุ้นทางเคมีนั้นจะใช้สารละลายโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) เป็นสารเคมีที่ใช้กระตุ้น ส่วนทางกายภาพจะกระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ($CO_2$) กับไอน้ำร้อนยวดยิ่ง ($H_2O$) ซึ่งทั้งสองวิธีจะทำการกระตุ้นในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง (Fixed bed) โดยผลสรุปแบ่งเป็นข้อๆดังต่อไปนี้

<u>ขั้นตอนการคาร์บอไนซ์</u>

สมบัติเบื้องต้นของถ่านหินลิกไนต์ที่ได้จากการคาร์บอไนซ์ที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 45 นาที

| | |
|---|---|
| ปริมาณผลิตภัณฑ์ | 54.52 % |
| ปริมาณสารระเหย | 24.09 % |
| ปริมาณคาร์บอนคงตัว | 43.30 % |
| ปริมาณเถ้า | 32.61 % |
| พื้นที่ผิวบีอีที | 3.37 ตารางเมตรต่อกรัม |

<u>ขั้นตอนการกระตุ้น</u>

1. วิธีการกระตุ้นทางเคมี

ภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมถ่านกัมมันต์จากการกระตุ้นทางเคมี คือ การกระตุ้นถ่านหินลิกไนต์ขนาดอนุภาค 0.50 – 0.85 มิลลิเมตร จำนวน 20 กรัม ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง โดยอัตราส่วนสารกระตุ้นต่อถ่านชาร์ 0.7:1 และมีอัตราการป้อนของแก๊สไนโตรเจนที่ 1,000 มิลลิลิตรต่อนาที ถ่านกัมมันต์ที่ได้มีสมบัติดังนี้

| | | |
|---|---|---|
| ปริมาณผลิตภัณฑ์ | 50.87 | % |
| ความหนาแน่นเชิงปริมาตร | 0.318 | กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร |
| ค่าการดูดซับไอโอดีน | 846 | มิลลิกรัมต่อกรัม |
| ค่าการดูดซับเมทิลีนบลู | 229 | มิลลิกรัมต่อกรัม |
| ปริมาณเถ้า | 14.61 | % |
| พื้นที่ผิวบีอีที | 1,292 | ตารางเมตรต่อกรัม |

2. วิธีการกระตุ้นทางกายภาพ

ภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมถ่านกัมมันต์จากการกระตุ้นทางกายภาพ คือ การกระตุ้นถ่านหินลิกไนต์ขนาดอนุภาค 0.50 – 0.85 มิลลิเมตร จำนวน 20 กรัม ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง โดยป้อนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยอัตรา 500 มิลลิลิตรต่อนาที กับ ไอน้ำ 10 มิลลิลิตรต่อนาที ถ่านกัมมันต์ที่ได้มีสมบัติดังนี้

| | | |
|---|---|---|
| ปริมาณผลิตภัณฑ์ | 60.42 | % |
| ความหนาแน่นเชิงปริมาตร | 0.544 | กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร |
| ค่าการดูดซับไอโอดีน | 242 | มิลลิกรัมต่อกรัม |
| ค่าการดูดซับเมทิลีนบลู | 41 | มิลลิกรัมต่อกรัม |
| ปริมาณเถ้า | 26.87 | % |
| พื้นที่ผิวบีอีที | 151 | ตารางเมตรต่อกรัม |

จากการวิเคราะห์สมบัติต่างๆ พบว่าการเตรียมถ่านกัมมันต์จากถ่านหินลิกไนต์โดยการกระตุ้นทางเคมีจะให้สมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ดีกว่าการกระตุ้นทางกายภาพ และสมบัติที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับเกรดการค้า ดังนั้นผลงานวิจัยนี้สามารถนำไปเป็นแนวทางในการผลิตถ่านกัมมันต์ในเชิงอุตสาหกรรมต่อไปได้

คุณภาพถ่านกัมมันต์เกรดการค้ามีสมบัติดังนี้

| | | |
|---|---|---|
| ความหนาแน่นเชิงปริมาตร | 0.3 – 0.5 | กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร |
| ค่าการดูดซับไอโอดีน | >600 | มิลลิกรัมต่อกรัม |
| ค่าการดูดซับเมทิลีนบลู | 200 - 350 | มิลลิกรัมต่อกรัม |
| ปริมาณเถ้า | <10 | % |
| พื้นที่ผิวบีอีที | 700 - 1200 | ตารางเมตรต่อกรัม |

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

- วัตถุดิบที่ใช้ในงานวิจัยเป็นถ่านหินลิกไนต์ ที่มีปริมาณเถ้าสูง ซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ถ่านกัมมันต์ที่ได้มีค่าพื้นที่ผิวไม่สูงมากนัก ถ้าเปลี่ยนวัตถุดิบให้เป็นถ่านหินที่มีศักดิ์สูงขึ้น เช่น บิทูมินัส หรือ แอนทราไซด์ ที่มีปริมาณเถ้าน้อยลง อาจทำให้ได้ถ่านกัมมันต์ที่มีคุณภาพที่ดียิ่งขึ้นและได้ค่าพื้นที่ผิวที่สูงมาก
- นำวิธีการกระตุ้นทางทางเคมีและทางกายภาพมาประยุกต์ใช้ร่วมกัน โดยให้ถ่านชาร์แช่สารละลายโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์แล้วทำการกระตุ้นด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งแทนการป้อนแก๊สไนโตรเจน

# รายการอ้างอิง


1. Derbyshire, F., Jagtoyen, M., Thwaites, M. Activated Carbon – Production and Application. In Patrick,John W., Porosity in Carbons:Characterization and Application, pp227-252. Great Britain : Edward Arnold, 1995.
2. Jankowska,H.,Swiatkowski, A. and Choma,J. Activate Carbon. Poland : Ellis Horwood Limited, 1991
3. มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, สำนักงาน ถ่านกัมมันต์. กองมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม, 2532:2-4
4. Byrne,Jane F. and Marsh,H. Introductory Overview. In Patrick, John W., Porosity in Carbons:Characterization and Application, pp.227-252. Great Britain : Edward Arnold, 1995.
5. วิเชียร ตรงจิตธรรม. การคาร์บอไนซ์ของถ่านหินในฟลูอิไดซ์เบด. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2532.
6. Bansal R.C; Donnet J.B; Stoeckli F. Activated carbon, New York, Marcel Dekker, 1988.
7. Baker,Frederick S., Miller,Charles E.,Repik,Albert J. and Tolles,Donald E. Activated Carbon. Ruthven,Douglas M., Encyclopedia of Separation Technology, pp. 77-93 USA:John Wiley&Sons, 1997.
8. Faust, Samuel D. and Aly,Osman M. Adsorption Processes for Water treatment. Butter Worth, 1987.
9. Rodriguez-Reiniso, F. and Molina-Sabio,M.Activated Carbon from Lignocellulosic Materials by Chemical and/or Physical Activation : An Overview. Carbon. 30, (1992): 1,111-1,118.
10. John T. Cookson, Jr. Adsorption Mechanisms:The Chemistry of Organic Adsorption on Activated Carbon. In Cheremisnoff,Paul N. and Ellerbusch, F., Carbon Adsorption Handbook, pp.241-279. Michigan:Ann Arbor Science, 1978
11. John, Mitchell M.,Marshell, Wayne E. and Toles, Christopher A. The Effect of Activated Method on The Properties of Pecan Shell Activated Carbon. J.Chem.Tech. Biotechnol. 74, (1999) : 1,037-1,044.


สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

12. Figueriedo,H.L., Pereira,M.F.R.,Freitas,M.M.A. and Orifao,J.J.M. Modification of The Surface Chemistry of Activated Carbon. Carbon. 37, (1999) :1,379-1,389.

13. ธราธร มงคลศรี. เอกสารประกอบคำสอนวิชาเคมีคะตะลิสต์ในทางวิศวกรรม. ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

14. ประวิทย์ ตันจงนาวิน. เอกสารประกอบคำสอนวิชาเคมีคะตะลิสต์ คณะวิชาเทคนิคเคมี วิทยาเขตเทคนิคกรุงเทพฯ สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล. กรุงเทพฯ: 2540.

15. วุฒิชัย ใช้เทียมวงศ์ และ อาสา ชินธรรมมิตร์. ผลของค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายตั้งต้นที่มีต่อโครงสร้างของเพนตาซิลซีโอไลต์. ปริญญานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตร ศาสตร์, 2539.

16. Satterfirld,Charles N. Heterogeneous catalysis in Industrial Practies.2nd. Singapore : McGrew-Hill, 1993.

17. จักริน นิธิจันทร์. การผลิตถ่านกัมมันต์ระดับขยายส่วนโดยคาร์บอไนเซชันและการกระตุ้นด้วยไอน้ำในฟลูอิไดซ์เบด. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2537.

18. พงศธร โค้วคชาภรณ์ ถ่านกัมมันต์จากซังข้าวโพด. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย, 2538.

19. ฉัตรชัย ธนศรีสุข. การกำจัดกำมะถันจากถ่านหินโดยไพโรไลซิสที่อุณหภูมิต่ำ. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2541.

20. สมพร บรรลือศรีเรือง. แกลิฟีเคชันของถ่านชาร์ที่ล้างสารอนินทรีย์โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแอลคาไลคาร์บอเนต. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2537.

21. Eliot ,R ,C. Coal Desulfurization Prior to Combustion . 1st ed. New Jersy : Noyes Data Corporation , 1978.

22. บุญชัย ตระกูลมหชัย. การผลิตถ่านกัมมันต์จากกระลาตาลโตนดในฟลูอิไดซ์เบด. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2537.

23. นิชชรี สันติจิตร. การผลิตถ่านกัมมันต์จากไม้โกงกางด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและคาร์บอนไดออกไซด์. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2540.
24. วราวุฒิ ประชาศิริสกุล. การเตรียมถ่านกัมมันต์จากกะลาปาล์มน้ำมันโดยการกระตุ้นด้วยพลังงานไมโครเวฟ. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2541.
25. Arrigada,R.,Garcia,R. and Reyes,P. Steam and Carbon Dioxide Activated of Eucalyptus globulus Charcoal. J.Chem.Tech.Biotechnol. 60,(1994):427-438.
26. Gergova, K., Eser, S.Schobert, Klimkiewicz H. and Brown, M.Pw. Environmental Scanning Electron Microscopy of Activated Carbon Production from Anthracite by one step Pyrolysis Activation.Fuel 74(1995): 1,042-1,047.
27. Tam,Man S. and Michael Jerry Antal,Jr. Preparation of Activated Carbons from Macadamia Nutshell and Coconut Shell by Air Activation. Ind.Engchem.Res.38,(1999): 4,268-4,276.
28. Mameri,N.,Aioueche,F.,Belhocine,D.Grib,H. and Lounici,H. Preparetion Activated from Olive Mill Solid Residue. J.Chem.Tech.Biotechnol. 75(2000):625-631.
29. Li-Yeh, H; Hsisheng; T. Influence of different chemical reagents on the preparation of activated carbons from bituminous coal, Fuel Processing Technology, 64, (2000), 155-166.
30. Lozano-Castello, D; Lillo-Rodenas, M.A; Cazorla-Amoros, D; Linares-Solono, A. Preparation of activated carbons from Spanish anthracite activation by KOH, Carbon, 39, (2001): 741-749.
31. American Standard of Testing Material. Standard Practice for Proximate Analysis of Coal and Coke ASTM D 3172-89.1993.
32. American Standard of Testing Material. Standard Testing Method for Moisture in the Analysis Sample of Coal and Coke ASTM D 3173-87.1993.
33. American Standard of Testing Material. Standard Testing Method for Volatile Matter in the Analysis Sample of Coal and Coke ASTM D 3175-89a.1993.
34. American Standard of Testing Material. Standard Testing Method for Ash in the Analysis Sample of Coal and Coke ASTM D 3174-93.1993.

35. American Standard of Testing Material. Standard Testing Method for Total Ash Content of Activated Carbon ASTM D 2866-94.1983.
36. American Standard of Testing Material. Standard Testing Method for Apparent Density of Activated Carbon ASTM D 2854-89.1996.
37. American Standard of Testing Material. Standard Testing Method for Determination of Methylene Blue Number of Activated Carbon JIS K 1470-1991.1991.
38. American Standard of Testing Material. Standard Testing Method for Determination of Iodine Number of Activated Carbon ASTM D 4607-94.1995.
39. American Standard of Testing Material. Standard Testing Method for Carbon Black Surface Area by Multi-points B.E.T. Nitrogen Adsorption ASTM D 4820-95.1995.
40. Gergova, K., Petrov, N. and Minova, V. A Comparison of Adsorption Characteristics of Various Activated Carbons. J.Chem. Tech. Biotechnol. 56(1993): 77-82.
41. Hassler,John W. Purification with Activated Carbon: Industrial Commercial Environment 2$^{th}$ ed. New York: Chemical Publish Co., Inc, 1974.
42. Hsisheng, T; Tien-Sheng, Yeh. “Preparation of activated carbons from bituminous coals with zinc chloride activation,” Ind.Eng.Chem.Res., 37, (1998): 58-65.


สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# ภาคผนวก ก.

# วิธีวิเคราะห์สมบัติโดยประมาณของถ่านหิน

## วิธีวิเคราะห์สมบัติโดยประมาณ

วิธีวิเคราะห์สมบัติโดยประมาณของถ่านหิน ตามวิธี ASTM D3172-89 [31] โดยวิเคราะห์สารที่แห้งในอากาศ และคำนวณค่าที่ได้เพื่อรายงานค่าที่ได้เทียบกับน้ำหนักของสารที่ไม่มีความชื้น (Dry basis) ยกเว้นค่าความชื้นที่รายงานเทียบน้ำหนักกับสารที่แห้งในอากาศ (Air dry basis) วิธีวิเคราะห์ครอบคลุมการวิเคราะห์หาค่าความชื้น สารระเหย และเถ้า รายละเอียดการวิเคราะห์มีดังต่อไปนี้

<u>การเตรียมสารตัวอย่าง</u>

- บดตัวอย่างอย่างรวดเร็วและคัดขนาดของตัวอย่างให้ผ่านตะแกรงร่อนขนาด 250 $\mu$m (No. 60) โดยการบดต้องใช้เวลาไม่มากนักเพราะอาจทำให้มีความร้อนขึ้นทำให้เกิดการสูญเสียความชื้นและสารระเหยได้
- นำตัวอย่างที่บดได้มาผสมรวมกันและเก็บไว้ในภาชนะที่ป้องกันความชื้นได้

1. <u>วิธีหาค่าความชื้น</u> [32] (Moisture, M)
   - เผาถ้วยกระเบื้องพร้อมฝาในเตาเผาที่ 750 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นทิ้งให้เย็นในหม้อดูดความชื้นเป็นเวลาประมาณ 15 – 30 นาที
   - ชั่งน้ำหนักที่แน่นอนของถ้วยกระเบื้องพร้อมฝา จากนั้นใส่ตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์ประมาณ 1 กรัม ให้ละเอียดถึงทศนิยมตำแหน่งที่ 4 (คือมีความผิดพลาดน้อยกว่า 0.1 มิลลิกรัม) ในถ้วยกระเบื้องพร้อมฝา บันทึกน้ำหนักของตัวอย่างที่ได้ก่อนอบแห้งรวมน้ำหนักของขวดชั่งและฝา
   - นำไปอบแห้งในเตาอบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นทิ้งให้เย็นในหม้อดูดความชื้น
   - ชั่งและบันทึกน้ำหนักของตัวอย่างที่ได้หลังอบแห้ง รวมน้ำหนักของถ้วยกระเบื้องพร้อมฝา

คำนวณค่าความชื้นดังนี้

$$M = [(A - B)/A] \times 100$$

เมื่อ M = ร้อยละของปริมาณความชื้น

A = น้ำหนักของตัวอย่างที่ใช้เริ่มต้น (กรัม)

B = น้ำหนักของตัวอย่างหลังการอบแห้ง (กรัม)

2. <u>วิธีหาปริมาณร้อยละสารระเหย</u> [33] (Volatile matter, VM)

- เผาถ้วยกระเบื้องพร้อมฝาที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นทิ้งให้เย็นในหม้อดูดความชื้น
- ชั่งน้ำหนักที่แน่นอนของถ้วยกระเบื้องพร้อมฝา จากนั้นใส่ตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์ประมาณ 1 กรัม ให้ละเอียดถึงทศนิยมตำแหน่งที่ 4 (คือมีความผิดพลาดน้อยกว่า 0.1 มิลลิกรัม) ในถ้วยกระเบื้องพร้อมฝา และปิดฝา
- นำไปเผาในเตาเผาแบบท่อ โดยวางไว้หน้าเตาเผาเป็นเวลา 2 นาที (อุณหภูมิประมาณ 300 องศาเซลเซียส) จากนั้นวางไว้ที่ขอบเตาเผาเป็นเวลา 3 นาที (อุณหภูมิประมาณ 600 องศาเซลเซียส) จากนั้นนำเข้าไปเผาที่กึ่งกลางของเตาเผาเป็นเวลา 6 นาที (อุณหภูมิประมาณ 950 องศาเซลเซียส)
- นำออกจากเตาเผาทิ้งให้เย็นในหม้อดูดความชื้น
- ชั่งและบันทึกน้ำหนักตัวอย่างที่ได้หลังการเผา รวมน้ำหนักของถ้วยกระเบื้องพร้อมฝา

คำนวณหาค่าสารระเหยดังนี้

Weight loss, % = [(A – B)/A] x 100

เมื่อ A = น้ำหนักของตัวอย่างที่ใช้เริ่มต้น (กรัม)

B = น้ำหนักของตัวอย่างหลังการเผา (กรัม)

VM = C – D

เมื่อ VM = ร้อยละของสารระเหย

C = Weight loss, %

D = ร้อยละของความชื้น

3. <u>ค่าเถ้า</u> [34] (Ash, A)

- เผาถ้วยกระเบื้องพร้อมฝาที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นทิ้งให้เย็นในหม้อดูดความชื้น
- ชั่งน้ำหนักที่แน่นอนของถ้วยกระเบื้องพร้อมฝา จากนั้นใส่ตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์ประมาณ 1 กรัม ให้ละเอียดถึงทศนิยมตำแหน่งที่ 4 (คือมีความผิดพลาดน้อยกว่า 0.1 มิลลิกรัม) ในถ้วยกระเบื้องพร้อมฝา
- นำเข้าเตาเผาที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส จนน้ำหนักคงที่ ประมาณ 3 ชั่วโมง
- นำออกจากเตาเผาทิ้งให้เย็นในหม้อดูดความชื้น
- ชั่งและบันทึกน้ำหนักตัวอย่างที่ได้หลังการเผา รวมน้ำหนักของถ้วยกระเบื้องพร้อมฝา

คำนวณค่าเถ้าดังนี้

Ash = [(A – B)/C] x 100

เมื่อ A = น้ำหนักของถ้วยกระเบื้องพร้อมฝาและตัวอย่างหลังการเผา (กรัม)

B = น้ำหนักของถ้วยกระเบื้องพร้อมฝา (กรัม)

C = น้ำหนักของถ้วยกระเบื้องพร้อมฝาและตัวอย่างก่อนการเผา (กรัม)

4. ค่าคาร์บอนคงตัว (Fixed carbon, FC)

$$FC = 100 - (M + A + VM)$$

เมื่อ FC = ร้อยละของคาร์บอนคงตัว

M = ร้อยละของความชื้น

A = ร้อยละของเถ้า

VM = ร้อยละของสารระเหย

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ข.

## วิธีวิเคราะห์ค่าเถ้าของถ่านกัมมันต์

วิเคราะห์ปริมาณเถ้าในถ่านกัมมันต์ตามวิธี ASTM D 2866-83 [35] โดยวิเคราะห์ และรายงานค่าที่ได้เทียบกับน้ำหนักของที่ไม่มีความชื้น (Dry basis) รายละเอียดการวิเคราะห์มีดังต่อไปนี้

- บดและคัดขนาดตัวอย่างให้ละเอียดให้ผ่านตะแกรงร่อนขนาด 250 $\mu$m (No. 60)
- เผาถ้วยกระเบื้องทนความร้อนที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส จนมีน้ำหนักคงที่
- นำออกมาตั้งทิ้งไว้บนอิฐทนไฟ 10 นาที แล้วทำให้เย็นในหม้อดูดความชื้น
- ชั่งถ้วยกระเบื้องทนความร้อน และบันทึกน้ำหนักที่คงที่ไว้ ($X_0$)
- ชั่งตัวอย่างที่อบแห้งที่ 150$\pm$5 องศาเซลเซียส จนมีน้ำหนักที่คงที่ ประมาณ 3 ชั่วโมง ใส่ถ้วยกระเบื้องทนความร้อน ให้มีน้ำหนักประมาณ 1 กรัม ให้ละเอียดถึงทศนิยมตำแหน่งที่ 4 (คือมีความผิดพลาดน้อยกว่า 0.1 มิลลิกรัม) บันทึกน้ำหนักของตัวอย่างที่ได้ รวมน้ำหนักของถ้วยกระเบื้องทนความร้อน ($X_1$)
- นำไปเผาที่อุณหภูมิ 650$\pm$25 องศาเซลเซียส จนมีน้ำหนักคงที่ใช้เวลาประมาณ 3 ชั่วโมง
- นำออกมาตั้งทิ้งไว้บนอิฐทนไฟ 10 นาที แล้วทำให้เย็นในหม้อดูดความชื้น
- ค่อยๆเปิดฝาหม้อดูดความชื้นเพื่อป้องกันไม่ให้เถ้าที่ได้ฟุ้งกระจาย ชั่งและบันทึกตัวอย่างที่ได้ของตัวอย่างหลังเผา รวมน้ำหนักของถ้วยกระเบื้องทนความร้อน ($X_2$)

คำนวณค่าเถ้าดังนี้

$$\text{เถ้า (ร้อยละโดยน้ำหนัก)} = [(X_2 - X_0) / (X_1 - X_0)] \times 100$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ค.

## วิธีวิเคราะห์ค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตรของถ่านกัมมันต์

วิเคราะห์ความหนาแน่นเชิงปริมาตรของถ่านกัมมันต์ (Bulk density, BD) ตามวิธี ASTM D 2854-89 [36] รายละเอียดการวิเคราะห์มีดังต่อไปนี้

- อบตัวอย่างให้แห้งที่อุณหภูมิ 110 – 120 องศาเซลเซียส ตั้งทิ้งไว้ให้เย็นในหม้อดูดความชื้น
- ชั่งกระบอกตวงที่มีความจุ 10 มิลลิลิตร ให้มีความละเอียดถึงทศนิยมตำแหน่งที่ 2 (คือมีความผิดพลาดน้อยกว่า 0.01 กรัม บันทึกผล ($X_0$)
- ใส่ตัวอย่างลงไปในกระบอกตวงจนเกือบเต็ม กระแทกก้นกระบอกตวงบนแผ่นยางจนกระทั้งระดับของตัวอย่างในกระบอกตวงคงที่
- ถ้าระดับที่คงที่นั้นไม่เท่ากับ 10 มิลลิลิตร ให้ตักตัวอย่างเข้าหรือออกจากกระบอกตวงแล้วกระแทกก้นกระบอกตวงใหม่ จนกว่าจะได้ระดับที่คงที่เป็น 10 มิลลิลิตร
- ชั่งน้ำหนักตัวอย่างพร้อมกระบอกตวง บันทึกผล ($X_1$)

คำนวณค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตรได้จาก

$$\text{ความหนาแน่นเชิงปริมาตร (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)} = (X_1 - X_0) / 10$$

# ภาคผนวก ง.

## วิธีวิเคราะห์ค่าการดูดซับเมทิลีนบลูของถ่านกัมมันต์

วิเคราะห์ความสามารถในการดูดซับสีน้ำเงินในน้ำตามวิธี JIS 1470-1975 [37] มีรายละเอียดการวิเคราะห์ดังต่อไปนี้

<u>เครื่องมือที่ใช้</u>

1. เครื่องเขย่าตามแนวราบ
2. เครื่องวัดการดูดกลืนแสง
3. เครื่องเซนติฟิวจ์

<u>วิธีเตรียมสารละลาย</u>

1. การเตรียมสารละลายบัฟเฟอร์ (Buffer solution)

- อบโปแตสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต ($KH_2PO_4$) ให้แห้งที่อุณหภูมิ 110 – 120 องศาเซลเซียส นาน 2 ชั่วโมง และทิ้งให้เย็นในหม้อดูดความชื้นนาน 20 นาที
- ชั่งมา 9.0 กรัม แล้วละลายด้วยน้ำกลั่นให้มีปริมาตรรวมเป็น 1,000 มิลลิลิตร ด้วยขวดวัดปริมาตร สารละลายที่ได้นี้คือ A
- อบโซเดียมโมโนฟอสเฟต ($Na_2HPO_4$) ให้แห้งที่อุณหภูมิ 110 – 120 องศาเซลเซียส นาน 2 ชั่วโมง และทิ้งให้เย็นในหม้อดูดความชื้นนาน 20 นาที
- ชั่งมา 23.88 กรัม แล้วละลายด้วยน้ำกลั่นให้มีปริมาตรรวมเป็น 1,000 มิลลิลิตร ด้วยขวดวัดปริมาตร สารละลายที่ได้นี้คือ B
- นำสารละลาย A จำนวน 400 มิลลิลิตรผสมกับสารละลาย B จำนวน 600 มิลลิลิตร กวนให้เข้ากัน จะได้สารละลายบัฟเฟอร์ที่มีค่าความเป็นกรดด่างเท่ากับ 7

2. สารละลายเมทิลีนบลู

2.1 การเตรียม อบสารเมทิลีนบลูให้แห้งที่อุณหภูมิ 110 – 120 องศาเซลเซียส นาน 2 ชั่วโมง และทิ้งให้เย็นในหม้อดูดความชื้นนาน 20 นาที ชั่งมา 1.2060 กรัม (สมมุติว่ามีความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.5) ละลายด้วยสารละลายบัฟเฟอร์ในข้อ 1. จนมีปริมาตรเป็น 4,000 มิลลิลิตร สารละลายที่ได้นี้มีความเข้มข้น 0.3000 มิลลิกรัมต่อกรัม กวนสารละลายอย่างน้อย 3 วัน ก่อนนำไปใช้

2.2 การสร้างกราฟมาตรฐาน ดูดสารละลายเมทิลีนบลูที่เตรียมได้มา 5.0 มิลลิลิตร เจือจางด้วยน้ำกลั่นจนมีปริมาตรเป็น 50 มิลลิลิตร ให้สารละลายนี้คือ M ซึ่งมีความเข้มข้น 0.3000 มิลลิกรัมต่อกรัม เจือจางสารละลาย M ให้มีความเข้มข้นต่างๆ ดังนี้

ดูดมา 1.0 มล. เจือจางเป็น 100 มล. ความเข้มข้น = 0.00030 มก./มล.

ดูดมา 1.5 มล. เจือจางเป็น 100 มล. ความเข้มข้น = 0.00045 มก./มล.

ดูดมา 2.0 มล. เจือจางเป็น 100 มล. ความเข้มข้น = 0.00060 มก./มล.

ดูดมา 2.5 มล. เจือจางเป็น 100 มล. ความเข้มข้น = 0.00075 มก./มล.

ดูดมา 3.0 มล. เจือจางเป็น 100 มล. ความเข้มข้น = 0.00090 มก./มล.

วัดค่าการดูดกลืนแสงที่มีความยาวคลื่น 663 นาโนเมตร บันทึกค่าการดูดกลืนแสง แล้วนำไปสร้างกราฟระหว่างแกนราบคือความเข้มข้นในหน่อย 100 มก./มล. แกนตั้งฉากคือค่าการดูดกลืน จะได้ความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงมีความชันเท่ากับ tan $\theta$

<u>หมายเหตุ</u> ค่า tan $\theta$ เป็นค่าที่แสดงถึงความเข้มข้นของสารละลายที่เตรียมได้ ในการทดลองนี้กำหนดว่าค่าดังกล่าวต้องอยู่ในช่วง 2.0 ถึง 2.2 เท่านั้น ถ้าไม่ได้ค่าตามนี้ให้ถือว่าสารละลายที่เตรียมมาใช้ไม่ได้

<u>กรรมวิธีวิเคราะห์</u>

- บดและคัดขนาดตัวอย่างให้ละเอียดน้อยกว่า 250 $\mu$m (No. 60)
- อบตัวอย่างให้แห้งที่อุณหภูมิ 110 – 120 องศาเซลเซียส นาน 2 ชั่วโมง ทิ้งให้เย็นในหม้อดูดความชื้นนาน 20 นาที
- ชั่งและบันทึกน้ำหนักเท่ากับ D ให้ละเอียดถึงทศนิยมตำแหน่งที่ 4 (คือมีความละเอียด 0.1 มิลลิกรัม) ในขวดชมพูขนาด 300 มิลลิลิตร ซึ่งมีจุกปิด
- ใส่สารละลายเมทิลีนบลู 50 มิลลิลิตร ปิดจุกแล้วเขย่าแรงๆ 10 วินาที สังเกตดูว่าสีของสารละลายเจือจางหรือไม่ ถ้าเจือจางให้ใส่สารละลายเมทิลีนบลูลงไปอีกครั้งละ 50 มิลลิลิตร
- เมื่อสีของสารละลายไม่เจือจาง ให้ใส่สารละลายเพิ่มอีก 50 มิลลิลิตร เพื่อให้ความเข้มข้นของสารละลายที่จุดสมดุลของการดูดซับเท่ากับ 0.3 มก./ก. แล้วนำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าด้วยความเร็ว 2,500 รอบต่อนาที นาน 30 นาที
- เทสารละลายส่วนบนลงในหลอดเซนติฟิวจ์ แล้วนำไปเซนติฟิวจ์ด้วยความเร็ว 3,000 รอบต่อนาที นาน 10 นาที
- ดูดสารละลายส่วนบนมา 0.5 มิลลิลิตร เจือจางด้วยน้ำกลั่นจนมีปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตร (ค่าคงที่ของการเจือจาง, C = 100/0.5 = 200) ถ้าวัดการดูดกลืนแสงแล้วอยู่นอกช่วงของกราฟมาตรฐาน ให้เพิ่มปริมาตรหลังการเจือจาง เช่น เจือจางเป็น 200 มิลลิลิตร (C = 400) เป็นต้น
- วัดค่าการดูดกลืนแสงที่มีความยาวคลืน 663 นาโนเมตร

ค่าการดูดกลืนแสง (Methylene blue adsorption, MB) (มิลลิกรัมต่อกรัม)คำนวณได้จาก

$$MB\ (mg/g) = [0.3000A/D] - [ABC/100D\tan\theta]$$

โดย A = ปริมาตรของสารละลายเมทิลีนบลูที่ใช้ตอนเริ่มต้น, มิลลิลิตร

B = ค่าการดูดกลืนแสง

C = ค่าคงที่ของการเจือจาง = 200 (หรือ 400)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# ภาคผนวก จ.

## การวิเคราะห์ค่าการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์

การวิเคราะห์ความสามารถในการดูดซับไอโอดีน ซึ่งสมมุติว่าเป็นสารพิษในน้ำตามวิธี ASTM D 4607-86 [38] มีรายละเอียดของการวิเคราะห์ดังต่อไปนี้

<u>สารเคมีที่ใช้</u>

- สารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก เตรียมโดยตวงกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นจำนวน 70 มิลลิลิตร เทใส่น้ำกลั่นที่มีปริมาตร 550 มิลลิลิตร
- น้ำแป้งเข้มข้นร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก เตรียมโดยชั่งแป้ง 1 กรัม ละลายด้วยน้ำร้อนจนมีน้ำหนักเป็น 10 กรัม น้ำแป้งที่เตรียมได้จะใช้ภายในวันที่เตรียมเท่านั้น
- สารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟตเข้มข้น 0.100 $\pm$ 0.001 นอร์มัล เตรียมโดยละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต ($Na_2S_2O_3.5H_2O$) 24.820 กรัมในน้ำ 75 มิลลิลิตร เติมโดยโซเดียมคาร์บอเนต ($Na_2CO_3$) 0.1 กรัม และเติมน้ำกลั่นให้มีปริมาตร 1,000 มิลลิลิตรด้วยขวดวัดปริมาตร
- สารละลายไอโอดีนเข้มข้น 0.100 $\pm$ 0.001 นอร์มัล เตรียมโดยละลายไอโอดีน 12.700 กรัมและโปแตสเซียมไอโอไดด์ (KI) 19.10 กรัมด้วยน้ำ 50 มิลลิลิตร ตั้งทิ้งไว้ 4 ชั่วโมงจนผลึกไอโอดีนละลายหมด แล้วจึงเติมน้ำกลั่นให้มีปริมาตร 1,000 มิลลิลิตรด้วยขวดวัดปริมาตร
- สารละลายโปแตสไอโอเดตเข้มข้น 0.100 นอร์มัล เตรียมโดยอบโปแตสเซียมไอโอเดตที่ 110 องศาเซลเซียส นาน 2 ชั่วโมง ทำให้เย็นในหม้อดูดความชื้น แล้วชั่งมา 3.5667 กรัม ละลายด้วยน้ำกลั่น 1,000 มิลลิลิตร

<u>กรรมวิธีเทียบมาตรฐานสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต</u>

- ปิเปตสารละลายโปแตสเซียมไอโอเดต 25 มิลลิลิตรใส่ลงในขวดรูปชมพูขนาด 250 มิลลิลิตร เติมโปแตสเซียมไอโอไดด์ (KI) 2 กรัม เขย่าให้ละลาย เติมกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นปริมาณ 5 มิลลิลิตร
- ไตเตรตด้วยสารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟต โดยใช้น้ำแป้งเป็นอินดิเคเตอร์ จุดยุติ คือ จุดที่สารละลายไม่มีสี

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

คำนวณความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟตจาก

$$N_1 = (P \times R) / S$$

โดย $N_1$ คือ ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต (นอร์มัล)

P คือ ปริมาตรของสารละลายโปแตสเซียมไอโอเดต (มิลลิลิตร)

R คือ ความเข้มข้นของสารละลายโปแตสเซียมไอโอเดต (นอร์มัล)

S คือ ปริมาตรของสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟตที่ใช้ไตเตรต (มิลลิลิตร)

<u>กรรมวิธีเทียบมาตรฐานของสารละลายไอโอดีน</u>

- ปิเปตสารละลายไอโอดีน 25 มิลลิลิตรใส่ในขวดชมพูขนาด 250 มิลลิลิตร ไตเตรตด้วยสารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟต โดยใช้น้ำแป้งเป็นอินดิเคเตอร์ จุดยุติ คือ จุดที่สารละลายไม่มีสี

คำนวณความเข้มข้นของสารละลายไอโอดีนได้จาก

$$N_2 = (P \times R) / S$$

โดย $N_2$ คือ ความเข้มข้นของสารละลายไอโอดีน (นอร์มัล)

P คือ ปริมาตรของสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต (มิลลิลิตร)

R คือ ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต (นอร์มัล)

S คือ ปริมาตรของสารละลายไอโอดีนที่ใช้ไตเตรต (มิลลิลิตร)

<u>กรรมวิธีวิเคราะห์</u>

- บดและคัดขนาดให้ละเอียดน้อยกว่า 250 $\mu$m (No. 60)
- อบตัวอย่างให้แห้งที่อุณหภูมิ 110 – 120 องศาเซลเซียส นาน 2 ชั่วโมง ตั้งทิ้งไว้ให้เย็นในหม้อดูดความชื้น
- ชั่งและบันทึกนำหนักตัวอย่างเท่ากับ M ให้ละเอียดถึงทศนิยมตำแหน่งที่ 4 (คือมีความละเอียด 0.1 มิลลิกรัม) ) ในขวดชมพูขนาด 250 มิลลิลิตร ซึ่งมีจุกปิด

<u>หมายเหตุ</u> ต้องชั่งน้ำหนักตัวอย่าง 2 ค่าต่อตัวอย่าง เพื่อให้ได้ค่า C มีค่าน้อยกว่าเท่ากับและมากกว่า 0.02 น้ำหนักประมาณของตัวอย่าง ดูจากตารางที่ จ.1

- ใส่สารละลายกรดไฮโดรคลอริกจำนวน 10 มิลลิลิตร (ตวงด้วยปิเปตขนาด 10 มิลลิลิตร ต้มให้เดือดประมาณ 10 วินาที แกว่งขวดเบาๆเพื่อให้ผงถ่านกัมมันต์ทุกส่วนชุ่มด้วยสารละลาย เพื่อกำจัดเถ้าหรือซัลเฟอร์ออกจากผิวของถ่านกัมมันต์
- ใส่สารละลายไอโอดีน 100 มิลลิลิตรปิดจุกแล้วเขย่าแรงๆเป็นเวลา 30 วินาที

- กรองด้วยกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42 ทิ้งสารละลายที่กรองได้ 20 มิลลิลิตรแรก
- ดูดสารละลายที่กรองได้ 50 มิลลิลิตรด้วยปิเปต
- ไตเตรตด้วยสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต 0.1 นอร์มัล โดยใช้น้ำแป้งเป็นอินดิเคเตอร์ จุดยุติ คือ จุดที่สารละลายไม่มีสี บันทึกปริมาตรของสารละลายไทโอซัลเฟตที่ใช้เป็นมิลลิลิตร (S)

คำนวณค่าการดูดซับจำเพาะ (X/M) และความเข้มข้นที่สมดุลย์ของสารละลายไอโอดีน (C) ได้จาก

$$X/M\ (mg/g) = [A - (2.2 \times B \times S)] / W$$

$$C = (N_2 \times S) / 50$$

X/M คือ มิลลิลิตรของไอโอดีนที่ถูกดูดซับต่อกรัมของถ่านที่ใช้ดูดซับ

$N_1$ คือ ความเข้มข้นของสารละลายไอโอดีน

$N_2$ คือ ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต

A คือ $N_1 \times 1269.30$

B คือ $N_2 \times 12.693$

C คือ ความเข้มข้นของสารละลายที่กรองได้

W คือ น้ำหนักของตัวอย่างที่ใช้

S คือ ปริมาตรของสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟตที่ใช้

- นำค่า X/M ที่ได้ทั้งสามค่ามาสร้างกราฟระหว่างแกนราบคือ log C แกนตั้งฉากคือ log X/M จะได้ความสัมพันธ์เป็นเส้นตรง
- จากเส้นความสัมพันธ์ที่ตำแหน่ง C = 0.02 หรือ log C = -1.639 จะทราบค่าบนแกนตั้งฉาก สมมุติเท่ากับ Y นำค่าที่ได้มาคำนวณหาค่า IA ดังนี้

$$IA\ (\text{มิลลิกรัม/กรัม}) = 10^Y$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ จ.1 น้ำหนักประมาณของตัวอย่างที่ใช้วิเคราะห์ไอโอดีน

FIND M FOR CALCULATE IODINE NUMBER BY USING ASTM D 4607-86

| | M | | | | M | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| E | C = 0.01 | C = 0.02 | C = 0.03 | E | C = 0.01 | C = 0.02 | C = 0.03 |
| 300 | 3.766 | 3.300 | 2.835 | 1550 | 0.729 | 0.639 | 0.549 |
| 350 | 3.228 | 2.829 | 2.430 | 1600 | 0.706 | 0.619 | 0.531 |
| 400 | 2.824 | 2.475 | 2.126 | 1650 | 0.684 | 0.600 | 0.515 |
| 450 | 2.510 | 2.200 | 1.890 | 1700 | 0.664 | 0.582 | 0.500 |
| 500 | 2.259 | 1.980 | 1.701 | 1750 | 0.645 | 0.566 | 0.486 |
| 550 | 2.054 | 1.800 | 1.546 | 1800 | 0.628 | 0.550 | 0.472 |
| 600 | 1.883 | 1.650 | 1.417 | 1850 | 0.610 | 0.535 | 0.460 |
| 650 | 1.738 | 1.523 | 1.308 | 1900 | 0.594 | 0.521 | 0.447 |
| 700 | 1.614 | 1.414 | 1.215 | 1950 | 0.579 | 0.508 | 0.436 |
| 750 | 1.506 | 1.320 | 1.134 | 2000 | 0.565 | 0.495 | 0.425 |
| 800 | 1.412 | 1.237 | 1.063 | 2050 | 0.551 | 0.483 | 0.415 |
| 850 | 1.329 | 1.164 | 1.000 | 2100 | 0.538 | 0.471 | 0.405 |
| 900 | 1.255 | 1.100 | 0.945 | 2150 | 0.525 | 0.460 | 0.396 |
| 950 | 1.189 | 1.042 | 0.895 | 2200 | 0.513 | 0.450 | 0.388 |
| 1000 | 1.130 | 0.990 | 0.850 | 2250 | 0.502 | 0.440 | 0.378 |
| 1050 | 1.076 | 0.943 | 0.810 | 2300 | 0.491 | 0.430 | 0.370 |
| 1100 | 1.027 | 0.900 | 0.773 | 2350 | 0.481 | 0.421 | 0.362 |
| 1150 | 0.982 | 0.861 | 0.739 | 2400 | 0.471 | 0.412 | 0.354 |
| 1200 | 0.941 | 0.825 | 0.709 | 2450 | 0.461 | 0.404 | 0.347 |
| 1250 | 0.904 | 0.792 | 0.680 | 2500 | 0.452 | 0.396 | 0.340 |
| 1300 | 0.869 | 0.761 | 0.654 | 2550 | 0.443 | 0.388 | 0.333 |
| 1350 | 0.837 | 0.733 | 0.630 | 2600 | 0.434 | 0.381 | 0.327 |
| 1400 | 0.807 | 0.707 | 0.607 | 2650 | 0.426 | 0.374 | 0.321 |
| 1450 | 0.779 | 0.683 | 0.586 | 2700 | 0.418 | 0.367 | 0.315 |
| 1500 | 0.753 | 0.666 | 0.567 | 2750 | 0.411 | 0.360 | 0.309 |

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ฉ.

## การวิเคราะห์ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะของรูพรุนทั้งหมดของถ่านกัมมันต์

การวิเคราะห์ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะของรูพรุนของถ่านกัมมันต์ตามวิธี ASTM C 819-77 [39] และคู่มือการใช้เครื่องหาพื้นที่ผิว โดยเลือกการคำนวณแบบ “Multipoints” มีหลักการที่สำคัญของการวิเคราะห์มีดังต่อไปนี้

<u>การเตรียมตัวอย่าง</u>

- บดและคัดขนาดให้ละเอียดน้อยกว่า 250 μm (No. 60)
- ชั่งและบันทึกน้ำหนักตัวอย่างเท่ากับ M ให้ละเอียดถึงทศนิยมตำแหน่งที่ 4 (คือมีความละเอียด 0.1 มิลลิกรัม)
- ใส่ตัวอย่างลงในหลอด ให้มีน้ำหนักประมาณ 0.1 กรัม สำหรับถ่านกัมมันต์ และ 1 กรัม สำหรับถ่านจากการคาร์บอไนซ์ยางรถยนต์ (แปรน้ำหนักเพื่อให้พื้นที่ผิวในการวิเคราะห์ประมาณ 20 ถึง 50 ตารางเมตร
- นำไปล้างโมเลกุลปนเปื้อนที่อยู่ของบนผิวถ่านกัมมันต์ (Outgas) ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส นาน 2 ชั่วโมง ภายใต้ความดันสุญญากาศ
- ชั่งน้ำหนักของตัวอย่างและหลอด และหักน้ำหนักของหลอด เพื่อให้ทราบน้ำหนักของตัวอย่าง ซึ่งจะนำไปใช้ในการคำนวณ

<u>การวิเคราะห์</u>

- กำหนดความดันสัมพัทธ์ที่สมดุลย์ ($P/P_0$) ทั้งหมด 4 จุด ดังนี้ 0.0490, 0.1177, 0.1765, 0.2354
- ล้างโมเลกุลปนเปื้อนที่อยู่บนผิวถ่านกัมมันต์ (Outgas) อีกครั้งที่อุณหภูมิห้อง นานประมาณ 5 นาที
- ผ่านไนโตรเจนที่ปราศจากออกซิเจนซึ่งมีความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.5 จนกระทั่งความดันสัมพัทธ์ที่สมดุลย์เท่ากับที่กำหนด บันทึกปริมาตรของแก๊สไนโตรเจนที่ใช้

<u>การคำนวณ</u>

นำค่าที่ได้จากการวิเคราะห์มาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแกนราบ คือ ความดันสัมพันธ์ ($P/P_0$) แกนตั้งฉากคือ ปริมาณของแก๊สไนโตรเจนที่ถูกดูดซับ ที่ความดันสมพัทธ์ในเทอมของ $[W(P_0/P)-1]^{-1}$ จะได้ความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงที่มีความดันเท่ากับ s จุดตัดบนแกนตั้งฉากคือ i คำนวณค่าพื้นที่ผิว ($S_{BET}$) (ตารางเมตรต่อกรัม) ได้ดังนี้

$$S_{BET} = NA_{CS}/(s+i)(Mw)$$

โดย N = เลขอาโวกาโดร = 6.023 x 1023

$A_{CS}$ = พื้นที่หน้าตัดของโมเลกุลไนโตรเจน = 1.62 ตารางอังสตรอม

Mw = น้ำหนักโมเลกุลของไนโตรเจน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ช.

## สมบัติของถ่านกัมมันต์ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม

สมบัติของถ่านกัมมันต์ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก.900-2532 [3] มีดังต่อไปนี้

1. ชนิดของถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์แบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ

1.1 ถ่านกัมมันต์ผง (powdered activated carbon)

1.2 ถ่านกัมมันต์เม็ด (granular activated carbon)

2. ขนาดของถ่านกัมมันต์

2.1 ถ่านกัมมันต์ผง ปริมาณที่ผ่านแร่ง 150 ไมโครเมตร ต้องไม่น้อยกว่าร้อยละ 99 โดยน้ำหนัก

2.2 ถ่านกัมมันต์เม็ด ปริมาณที่ผ่านแร่ง 150 ไมโครเมตร ต้องไม่เกินร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก

3. สมบัติทางฟิสิกส์และทางเคมีของถ่านกัมมันต์

3.1 ถ่านกัมมันต์ผง ต้องมีสมบัติดังนี้

ค่าไอโอดีนไม่น้อยกว่า 600

ความหนาแน่นปรากฏ 0.20 ถึง 0.75 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

3.2 ถ่านกัมมันต์เม็ด ต้องมีสมบัติดังนี้

ค่าไอโอดีนไม่น้อยกว่า 600

ความหนาแน่นปรากฏไม่น้อยกว่า 0.36 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

ความชื้นไม่เกินร้อยละ 8

ความแข็งไม่น้อยกว่าร้อยละ 70

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ซ.
## ตัวอย่างสมบัติของถ่านกัมมันต์เกรดการค้า

ผงถ่านกัมมันต์

ตารางที่ ซ.1 สมบัติของถ่านกัมมันต์เกรดการค้า

| ชื่อตัวอย่าง | วัตถุดิบ | Ash (wt%) | BD ($g/cm^3$) | $S_{BET}$ ($m^2/g$) | MB (mg/g) | IA (mg/g) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| UPD CHEMICAL (Thailand) | | | | | | |
| MDP1-7325 | กะลามะพร้าว | 3 | 0.400-0.55 | 1200-1300 | 230 | 1050 |
| PN3 | ขี้เลื่อย | 8 | 0.46 | - | - | 800 |
| Taiko PKW | ขี้เลื่อย | 2 | - | - | - | - |
| Shirasagi KW | - | 3 | - | - | - | - |
| 900 | - | 3 - 5 | 0.37-0.40 | - | - | 900 |
| Nuchar SN | - | 3 - 5 | 0.37-0.40 | - | - | 900 |
| PITTSBURGH ACTIVAED CARBONS | | | | | | |
| RB | บิทูมินัส | 23 | - | 1250-1400 | - | 1200 |
| RC | บิทูมินัส | 21 | - | 1100-1300 | - | 1100 |
| BL | บิทูมินัส | 8.5 | - | 1000-1100 | 300 | 1000 |
| C | บิทูมินัส | 14 | - | 1000-1100 | - | 900 |
| GW | บิทูมินัส | 12 | - | 1000-1100 | 180 | 700 |

ที่มา : เอกสารประกอบการประชุมคณะกรรมการร่างมาตรฐาน ”ถ่านกัมมันต์” สำนักงานมาตรฐานอุตสาหกรรมไทย กระทรวงอุตสาหกรรม

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

<u>เม็ดถ่านกัมมันต์</u>

ตารางที่ ซ.2 คุณสมบัติของเม็ดถ่านกัมมันต์เกรดการค้า

| ชื่อตัวอย่าง | วัตถุดิบ | Ash (wt%) | BD ($g/cm^3$) | $S_{BET}$ ($m^2/g$) | MB (mg/g) | IA (mg/g) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| UPD CHEMICAL | | | | | | |
| MDG7746 | กะลามะพร้าว | 3 | 0.40-0.45 | 1100-1200 | 200 | 1050 |
| MD-W 7830 | กะลามะพร้าว | | | | | |
| SUTLIFFE | | | | | | |
| SPRAKMAN (Eng) | | | | | | |
| | ถ่านหิน | 6-16 | 0.40-0.56 | 600-1250 | - | - |
| | กะลามะพร้าว | 1-4 | 0.40-0.59 | 700-1500 | - | - |
| NORIT ACTIVAED | | | | | | |
| CARBON | | | | | | |
| PK1-3 | พีท | 6 | - | 800 | - | 800 |
| Nuchar 681 | บิทูมินัส | - | 0.43-0.46 | 1100 | - | - |
| AG-5 | - | 6 | 0.38-0.45 | 900-1000 | - | - |
| PJAC (JAPAN) | | | | | | |
| CG-4X10 | กะลามะพร้าว | 5 | 0.42-0.47 | 1200-1300 | 170 | 1050 |
| CG-6X8 | กะลามะพร้าว | 5 | 0.42-0.47 | 1200-1300 | 170 | 1100 |
| CW-8X30 | กะลามะพร้าว | 5 | 0.45-0.50 | 1050-1150 | 170 | 1050 |
| SYBRON | บิทูมินัส | - | 0.50-0.55 | 900 | 220 | 900 |
| IONAC P-50 (USA) | | | | | | |
| Calgon Filtrasorb | บิทูมินัส | - | - | 850-900 | - | 850 |
| 100-200 | | | | | | |
| CALGON SGL | บิทูมินัส | 10 | 0.48 | 950-1050 | - | 900 |
| PITTSBURGH | | | | | | |
| ACTIVATED | | | | | | |
| CARBON | | | | | | |
| Vapor phase | | | | | | |
| -PCB | บิทูมินัส | 4.0 | 0.44 | - | - | 1200 |
| -BPL | บิทูมินัส | 8.0 | 0.48 | - | - | 1050 |
| Liquid phase | | | | | | |
| -CAL | บิทูมินัส | 8.5 | 0.44 | - | - | 1000 |
| -OL | บิทูมินัส | 8.0 | 0.44 | - | - | 1000 |
| -SGL | บิทูมินัส | 8.0 | 0.48 | - | - | 900 |
| Nuchar WV-G | - | - | 0.43-0.46 | - | - | 1050 |

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นาย ธวัชชัย ตันเจริญทรัพย์ เกิดเมื่อวันที่ 17 ตุลาคม พ.ศ. 2521 ที่กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเคมีวิศวกรรม คณะวิทยาศาสตร์ ในปีการศึกษา 2542 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2543

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย