การเตรียมถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัส *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh.
โดยการกระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำร้อนยวดยิ่ง

นาย วิจิตร จินดาพันธ์ไพโรจน์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2543

ISBN 974-13-1174-5

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

PREPARATION OF ACTIVATED CARBON FROM *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh. BY ACTIVATION WITH CARBON DIOXIDE AND SUPERHEATED STEAM

Mr. Vijit Jindaphunphairoth

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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 2000
ISBN 974-13-1174-5

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การเตรียมถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัส *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh. โดยการกระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำร้อนยวดยิ่ง

โดย นาย วิจิตร จินดาพันธ์ไพโรจน์
สาขาวิชา เคมีเทคนิค
อาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์.ดร.ธราพงษ์ วิทิตศานต์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

.... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.วันชัย โพธิ์พิจิตร)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.... ประธานกรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร. ภัทรพรรณ ประศาสน์สารกิจ)

.... อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์.ดร.ธราพงษ์ วิทิตศานต์)

.... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์.ดร.สมเกียรติ งามประเสริฐสิทธิ์)

.... กรรมการ
(อาจารย์ ดร. เก็จวลี พฤกษาทร)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิจิตร จินดาพันธ์ไพโรจน์ : การผลิตถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัส *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh. โดยการกระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำร้อนยวดยิ่ง. (PREPARATION OF ACTIVATED CARBON FROM *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh. BY ACTIVATION WITH CARBON DIOXIDE AND SUPERHEATED STEAM) อ. ที่ปรึกษา : ผศ.ดร. ธราพงษ์ วิทิตศานต์, 111 หน้า. ISBN 974-13-1174-5.

งานวิจัยนี้เป็นการผลิตถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัส *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh. ด้วยวิธีการกระตุ้นทางกายภาพ โดยนำส่วนที่เป็นกิ่งซึ่งเป็นเศษเหลือทิ้งมาใช้ การศึกษาในงานวิจัยนี้ ทำการเปรียบเทียบคุณภาพของถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัส อายุ 4 ปี และอายุ 5 ปี ซึ่งในขั้นตอนแรก เป็นขั้นตอนการคาร์บอไนซ์ ศึกษาถึงผลของอุณหภูมิและเวลา พบว่า ภาวะที่เหมาะสมในการคาร์บอไนซ์ของไม้ทั้งสองชนิด อยู่ที่ภาวะเดียวกัน คือ ที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส เวลา 45 นาที ขั้นตอนที่สองเป็นการกระตุ้นถ่านชาร์ โดยศึกษาถึงผลของอุณหภูมิ เวลา ขนาดอนุภาค และชนิดของแก๊สในการกระตุ้น ภาวะที่เหมาะสมในการกระตุ้นของถ่านชาร์จากไม้ยูคาลิปตัส อายุ 4 ปี และอายุ 5 ปี อยู่ที่สภาวะเดียวกัน คือ ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 150 นาที ขนาดอนุภาค 0.3 – 0.6 มิลลิเมตร และใช้ไอน้ำเป็นสารกระตุ้น สมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ได้คือ ค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตร 0.1809 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ร้อยละปริมาณเถ้า 6.37 ร้อยละผลิตภัณฑ์ 33.14 ค่าการดูดซับไอโอดีน 1233 มิลลิกรัมต่อกรัม ค่าการดูดซับเมทิลีนบลู 242 มิลลิกรัมต่อกรัม พื้นที่ผิวแบบแลงเมียร์($S_{Langmuir}$) 1497.32 ตารางเมตรต่อกรัม พื้นที่ผิวแบบบีอีที(S_{BET}) 1076.15 ตารางเมตรต่อกรัม พบว่าจากค่าวิเคราะห์ สมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากงานวิจัยนี้มีค่าใกล้เคียงกับถ่านกัมมันต์เกรดการค้า ดังนั้น ผลของงานวิจัยนี้จึงสามารถใช้เป็นแนวทางในการผลิตถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัสได้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา เคมีเทคนิค	ลายมือชื่อนิสิต ....
สาขาวิชา เคมีเทคนิค	ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ....
ปีการศึกษา 2543	ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ....

4272395023 : MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY
KEY WORD: ACTIVATED CARBON / EUCALYPTUS WOOD / ACTIVATION / ADSORPTION

Mr. Vijit Jindaphunphairoth : PREPARATION OF ACTIVATED CARBON FROM *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh.BY ACTIVATION WITH CARBON DIOXIDE AND SUPERHEATED STEAM THESIS ADVISOR : ASSIST.PROF THARAPONG VITIDSANT, Ph.D., 111 pp. ISBN 974-13-1174-5.

This research was production of activated carbon from *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh. wood by physical activation. The four and five years of wood were used as raw material. The experiment was composed of two steps : the first step was carbonization .The studied variables were temperature and time. The optimum condition was found to be 450^0C and 45 min.. The second step was activation . The investigated variables were effect of temperature, time, particle size and activating agents. The results showed that the optimum condition was 0.3-0.6 mm. of wood at 900^0C for 150 min. using steam as an activating agent. The characteristics prepared activated carbon was bulk density 0.1809 g/cm^3, ash content 6.37 %, yield 33.14%, iodine adsorption 1233 mg/g, methylene blue adsorption number 242 mg/g, Langmuir surface area 1497.52 m^2/g and BET surface area 1076.15 m^2/g. Both of four and five years of wood had the same carbonization and activation optimum - condition. The characteristics of resulting activated carbon closed to the commercial activated carbon. It is concluded that *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh. wood could a suitable precursor for activated carbon production by using this research as a guideline.

Department………………………………… Student's signature……………………………..
Field of study………………………………….. Advisor's signature ……………………………..
Academic year……………………………….... Co-Advisor's signature………………………….

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จไปได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธราพงษ์ วิทิตศานต์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งท่านได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆในงานวิจัยมาด้วยดีตลอด ขอบคุณ คุณสัญญา บัวสุวรรณ ที่ได้ช่วยนำวัตถุดิบ และทุนวิจัย มาให้ในงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณ คุณ ณรงค์ ชัยพันธ์ คุณประเสริฐ ช่วยศรีนวล คุณสุวิทย์ คิ้วงาม ที่ได้ช่วยอำนวยความสะดวกและช่วยเหลือสิ่งต่างๆในการใช้ห้องปฏิบัติการ ขอขอบคุณคำแนะนำและกำลังใจจากเพื่อนๆ พี่ๆและน้องๆในภาควิชาเคมีเทคนิคทุกคนที่ได้ช่วยเหลือข้าพเจ้ามาตลอด

ท้ายนี้ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ซึ่งสนับสนุนในด้านการเงินและให้กำลังใจผู้วิจัยเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย..ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..จ
กิตติกรรมประกาศ..ฉ
สารบัญ...ช
สารบัญตาราง...ญ
สารบัญรูป..ง
สัญลักษณ์และคำย่อ..ง
บทที่
1. บทนำ...1
1.1 ความสำคัญและที่มาของโครงการ..1
1.2 วัตถุประสงค์..2
1.3 ขอบเขตการวิจัย..2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย..2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ...3
2. วารสารปริทรรศน์..4
2.1 ความหมายของถ่านกัมมันต์...4
2.2 วัตถุดิบสำหรับใช้ในกระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์.............................4
2.3 กระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์...5
2.3.1 การคาร์บอไนเซชั่น...5
2.3.2 การกระตุ้น...7
2.4 โครงสร้างรูพรุนของถ่านกัมมันต์..14
2.5 การศึกษาการดูดซับที่เกี่ยวกับเคมีพื้นผิว..17
2.6 ถ่านกัมมันต์ในทางการค้า..19
2.7 การวิเคราะห์คุณสมบัติของถ่านกัมมันต์...22
2.7.1 สมบัติในการดูดซับ...22

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.7.2 สมบัติด้านเคมีฟิสิกส์ ……………………………………..………………….23
2.7.3 พื้นที่ผิว…………………………………………………………………….24
2.8 ประโยชน์ของถ่านกัมมันต์…………………………………………...……………29
2.9 ไม้ยูคาลิปตัส คามาลดูเลนซิส……………………………………...……………..30
2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง……………………………………………………………….33
2.10.1 งานวิจัยในประเทศ………………………………………………………….33
2.10.2 งานวิจัยต่างประเทศ…………………………..……………………………37
3 การดำเนินงานทดลอง…………………………………………………………………….43
3.1 รูปแบบการศึกษา……………………………………………………………………..43
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย………………………...…………………43
3.3 สารเคมี………………………………………………………………………...……….44
3.4 วัตถุดิบ……………………..……………………………………………………….45
3.5 ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง…………………………………………………..46
4 ผลการวิจัย……………………………………………………………………………………..48
4.1 สมบัติของวัตถุดิบ………………………………………………………………….48
4.1.1 สมบัติเบื้องต้นของไม้ยูคาลิปตัส……………………...…………………48
4.1.2 ลักษณะถ่านไม้ยูคาลิปตัส……………………………………………………48
4.2 ภาวะที่เหมาะสมในการคาร์บอไนซ์ไม้ยูคาลิปตัส……………………………………49
4.3 ภาวะที่เหมาะสมในการกระตุ้น……………………...……………………………59
4.3.1 ผลของอุณหภูมิ และเวลาในการกระตุ้น……………………….…….……59
4.3.2 ผลของการแปรขนาดอนุภาคของถ่านชาร์…………………………..……..73
4.3.3 ผลจากการแปรชนิดแก๊สในการกระตุ้น………………………………………76
4.4 รูปลักษณะพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นที่ภาวะต่างๆ………………77
5 อภิปรายและวิจารณ์ผลการทดลอง……………...……………………………………82
5.1 ผลการศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการคาร์บอไนซ์……………………………………82
5.2 ผลการศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการกระตุ้น……………...………………………83

สารบัญ (ต่อ)

บทที่ หน้า

5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดซับไอโอดีนและพื้นที่ผิวแบบบีอีที…………..……….90

6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ……………………………………………………………92

6.1 สรุปผลงานวิจัย……………………………………………………………………..92

6.2 ข้อเสนอแนะ……………………...………………………………………………93

รายการอ้างอิง……………………………..…………………………………………..94

ภาคผนวก…………………………………………………………………………………98

ประวัติผู้เขียน…………………………………………………………………...….111

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตาราง หน้า

2.1 การนำถ่านกัมมันต์ไปประยุกต์ใช้ในระบบต่างๆ..21

2.2 แสดงสมบัติของถ่านกัมมันต์ของ Arriagada..37

2.3 ผลของการกระตุ้นถ่านกัมมันต์ที่ได้จากเปลือกลูกนัท..40

2.4 แสดงสมบัติของถ่านกัมมันต์ของ Mameri..41

4.1 แสดงค่าประมาณของถ่านไม้ยูคาลิปตัสอายุ 4 ปี ที่ได้จากการคาร์บอไนซ์ ณ ภาวะต่างๆ..49

4.2 แสดงค่าประมาณของถ่านไม้ยูคาลิปตัสอายุ 5 ปี ที่ได้จากการคาร์บอไนซ์ ณ ภาวะต่างๆ..50

4.3 สมบัติของถ่านกัมมันต์จากถ่านไม้ยูคาลิปตัสอายุ 4 ปี ที่อุณหภูมิ และเวลาต่างๆ ปริมาณป้อนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 700 cm^3/min ปริมาณการป้อนไอน้ำ 20 cm^3/min และปริมาณการป้อนอากาศ 5 cm^3/min................59

4.4 สมบัติของถ่านกัมมันต์จากถ่านไม้ยูคาลิปตัสอายุ 5 ปี ที่อุณหภูมิ และเวลาต่างๆ ปริมาณป้อนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 700 cm^3/min ปริมาณการป้อนไอน้ำ 20 cm^3/min และปริมาณการป้อนอากาศ 5 cm^3/min................60

4.5 สมบัติของถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัสอายุ 5 ปี เมื่อกระตุ้นขนาดต่างๆ ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 150 นาที ปริมาณป้อนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 700 cm^3/min ปริมาณการป้อนไอน้ำ 20 cm^3/min และปริมาณการป้อนอากาศ 5 cm^3/min..73

4.6 สมบัติของถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัสอายุ 5 ปีเมื่อกระตุ้นโดยใช้สารกระตุ้นชนิดต่างๆกัน..76

5.1 ค่าสมบัติของถ่านชาร์จากไม้ยูคาลิปตัสอายุ 4 ปีและ 5 ปีที่มีปริมาณสารระเหยอยู่ในช่วงร้อยละ 20 – 25..83

5.2 คุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่สภาวะอุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 150 นาที.......87

5.3 เปรียบเทียบงานวิจัย..90

6.1 สมบัติเบื้องต้นของไม้ยูคาลิปตัส..92

สารบัญภาพ

ภาพประกอบ หน้า

2.1 ตัวอย่างการกระบวนกระตุ้นทางเคมี……………….……………………………………….8
2.2 ตัวอย่างการกระบวนกระตุ้นทางกายภาพ……….……………..………………………13
2.3 โครงสร้างของกราไฟต์………………..……………………………………………….15
2.4 โครงสร้างของถ่านกัมมันต์…………………..……………………………………...15
2.5 รูปแสดงลักษณะของรูพรุนในถ่านกัมมันต์…………..……………………………..16
2.6 แสดงกลุ่มฟังก์ชันต่างๆที่ผิวคาร์บอน และอุณหภูมิต่างๆที่สลายตัวโดย TPD…………....18
2.7 โครงสร้างทางเคมีของเมทธิลีนบลู…………………..………………………………23
2.8 แสดงไอโซเทอมของการดูดซับทั้ง 5 ชนิด………………………………..……………25
3.1 แสดงชุดเครื่องมือการกระตุ้น…………………………………………………………..44
3.2 ลักษณะของชิ้นไม้ยูคาลิปตัส…………………………………………………………..45
4.1 ไม้ยูคาลิปตัสหลังการคาร์บอไนซ์……………………………………………………...48
4.2 ผลของเวลาการคาร์บอไนซ์ที่มีต่อค่าร้อยละของปริมาณผลิตภัณฑ์
ณ อุณหภูมิต่างๆ ของถ่านไม้ยูคาลิปตัสอายุ 4 ปี……………………………………….51
4.3 ผลของเวลาการคาร์บอไนซ์ที่มีต่อค่าร้อยละของปริมาณผลิตภัณฑ์
ณ อุณหภูมิต่างๆ ของถ่านไม้ยูคาลิปตัสอายุ 5 ปี………………………………………..51
4.4 ผลของเวลาการคาร์บอไนซ์ที่มีต่อค่าร้อยละของปริมาณเถ้า
ณ อุณหภูมิต่างๆ ของถ่านไม้ยู-คาลิปตัสอายุ 4 ปี………………………………………52
4.5 ผลของเวลาการคาร์บอไนซ์ที่มีต่อค่าร้อยละของปริมาณเถ้า
ณ อุณหภูมิต่างๆ ของถ่านไม้ยู-คาลิปตัสอายุ 5 ปี………………………………………52
4.6 ผลของเวลาการคาร์บอไนซ์ที่มีต่อค่าร้อยละของปริมาณสารระเหย
ณ อุณหภูมิต่างๆ ของถ่านไม้ยูคาลิปตัสอายุ 4 ปี………………………………………..53
4.7 ผลของเวลาการคาร์บอไนซ์ที่มีต่อค่าร้อยละของปริมาณสารระเหย ล
ณ อุณหภูมิต่างๆ ของถ่านไม้ยูคาลิปตัสอายุ 5 ปี………………………………………..53
4.8 ผลของเวลาการคาร์บอไนซ์ที่มีต่อค่าร้อยละของปริมาณคาร์บอนคงตัว
ณ อุณหภูมิต่างๆ ของถ่านไม้ยูคาลิปตัสอายุ 4 ปี………………………………………..54

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพประกอบ หน้า

4.9 ผลของเวลาการคาร์บอไนซ์ที่มีต่อค่าร้อยละของปริมาณคาร์บอนคงตัว ณ อุณหภูมิต่างๆ ของถ่านไม้ยูคาลิปตัสอายุ 5 ปี.....54

4.10 ผลของอุณหภูมิการคาร์บอไนซ์ที่มีต่อค่าร้อยละของปริมาณผลิตภัณฑ์ ณ เวลาต่างๆ ของถ่านไม้ยูคาลิปตัสอายุ 4 ปี.....55

4.11 ผลของอุณหภูมิการคาร์บอไนซ์ที่มีต่อค่าร้อยละของปริมาณผลิตภัณฑ์ ณ เวลาต่างๆ ของถ่านไม้ยูคาลิปตัสอายุ 5 ปี.....55

4.12 ผลของอุณหภูมิการคาร์บอไนซ์ที่มีต่อค่าร้อยละของปริมาณเถ้า ณ เวลาต่างๆ ของถ่านไม้ยูคาลิปตัสอายุ 4 ปี.....56

4.13 ผลของอุณหภูมิการคาร์บอไนซ์ที่มีต่อค่าร้อยละของปริมาณเถ้า ณ เวลาต่างๆ ของถ่านไม้ยูคาลิปตัสอายุ 5 ปี.....56

4.14 ผลของอุณหภูมิการคาร์บอไนซ์ที่มีต่อค่าร้อยละของปริมาณสารระเหย ณ เวลาต่างๆ ของถ่านไม้ยูคาลิปตัสอายุ 4 ปี.....57

4.15 ผลของอุณหภูมิการคาร์บอไนซ์ที่มีต่อค่าร้อยละของปริมาณสารระเหย ณ เวลาต่างๆ ของถ่านไม้ยูคาลิปตัสอายุ 5 ปี.....57

4.16 ผลของอุณหภูมิการคาร์บอไนซ์ที่มีต่อค่าร้อยละของปริมาณคาร์บอนคงตัว ณ เวลาต่างๆ ของถ่านไม้ยูคาลิปตัสอายุ 4 ปี.....58

4.17 ผลของอุณหภูมิการคาร์บอไนซ์ที่มีต่อค่าร้อยละของปริมาณคาร์บอนคงตัว ณ เวลาต่างๆ ของถ่านไม้ยูคาลิปตัสอายุ 5 ปี.....58

4.18 ผลของเวลาการกระตุ้นที่มีต่อค่าร้อยละของปริมาณผลิตภัณฑ์ ณ อุณหภูมิต่างๆ โดยใช้ถ่านไม้ยูคาลิปตัสอายุ 4 ปีปริมาณป้อนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 700 cm^3/min ปริมาณการป้อนไอน้ำ 20 cm^3/min และปริมาณการป้อนอากาศ 5 cm^3/min.....61

4.19 ผลของเวลาการกระตุ้นที่มีต่อค่าร้อยละของปริมาณผลิตภัณฑ์ ณ อุณหภูมิต่างๆ โดยใช้ถ่านไม้ยูคาลิปตัสอายุ 5 ปีปริมาณป้อนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 700 cm^3/min ปริมาณการป้อนไอน้ำ 20 cm^3/min และปริมาณการป้อนอากาศ 5 cm^3/min.....61

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพประกอบ หน้า

4.20 ผลของเวลาการกระตุ้นที่มีต่อค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตร ณ อุณหภูมิต่างๆ โดยใช้ถ่านไม้ยูคาลิปตัสอายุ 4 ปีปริมาณป้อนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 700 cm^3/min ปริมาณการป้อนไอน้ำ 20 cm^3/min และปริมาณการป้อนอากาศ 5 cm^3/min....................62

4.21 ผลของเวลาการกระตุ้นที่มีต่อค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตร ณ อุณหภูมิต่างๆ โดยใช้ถ่านไม้ยูคาลิปตัสอายุ 5 ปีปริมาณป้อนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 700 cm^3/min ปริมาณการป้อนไอน้ำ 20 cm^3/min และปริมาณการป้อนอากาศ 5 cm^3/min....................62

4.22 ผลของเวลาการกระตุ้นที่มีต่อร้อยละของปริมาณเถ้า ณ อุณหภูมิต่างๆ โดยใช้ถ่านไม้ยูคาลิปตัสอายุ 4 ปีปริมาณป้อนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 700 cm^3/min ปริมาณการป้อนไอน้ำ 20 cm^3/min และปริมาณการป้อนอากาศ 5 cm^3/min....................63

4.23 ผลของเวลาการกระตุ้นที่มีต่อร้อยละของปริมาณเถ้า ณ อุณหภูมิต่างๆ โดยใช้ถ่านไม้ยูคาลิปตัสอายุ 5 ปีปริมาณป้อนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 700 cm^3/min ปริมาณการป้อนไอน้ำ 20 cm^3/min และปริมาณการป้อนอากาศ 5 cm^3/min....................63

4.24 ผลของเวลาการกระตุ้นที่มีต่อค่าการดูดซับไอโอดีน ณ อุณหภูมิต่างๆ โดยใช้ถ่านไม้ยูคาลิปตัสอายุ 4 ปีปริมาณป้อนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 700 cm^3/min ปริมาณการป้อนไอน้ำ 20 cm^3/min และปริมาณการป้อนอากาศ 5 cm^3/min 64

4.25 ผลของเวลาการกระตุ้นที่มีต่อค่าการดูดซับไอโอดีน ณ อุณหภูมิต่างๆ โดยใช้ถ่านไม้ยูคาลิปตัสอายุ 5 ปีปริมาณป้อนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 700 cm^3/min ปริมาณการป้อนไอน้ำ 20 cm^3/min และปริมาณการป้อนอากาศ 5 cm^3/min....................64

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพประกอบ หน้า

4.26 ผลของเวลาการกระตุ้นที่มีต่อค่าการดูดซับเมทธิลีนบลู ณ อุณหภูมิต่างๆ โดยใช้ถ่านไม้ยูคาลิปตัสอายุ 4 ปีปริมาณป้อน แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 700 cm^3/min ปริมาณการป้อนไอน้ำ 20 cm^3/min และปริมาณการป้อนอากาศ 5 cm^3/min ……………………………………………65
4.27 ผลของเวลาการกระตุ้นที่มีต่อค่าการดูดซับเมทธิลีนบลู ณ อุณหภูมิต่างๆ โดยใช้ถ่านไม้ยูคาลิปตัสอายุ 5 ปีปริมาณป้อน แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 700 cm^3/min ปริมาณการป้อนไอน้ำ 20 cm^3/min และปริมาณการป้อนอากาศ 5 cm^3/min……………………………………………65
4.28 ผลของเวลาการกระตุ้นที่มีต่อพื้นที่ผิวแบบแลงเมียร์ ณ อุณหภูมิต่างๆ โดยใช้ถ่านไม้ยูคาลิปตัสอายุ 5 ปีปริมาณป้อน แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 700 cm^3/min ปริมาณการป้อนไอน้ำ 20 cm^3/min และปริมาณการป้อนอากาศ 5 cm^3/min……………………………………………66
4.29 ผลของเวลาการกระตุ้นที่มีต่อพื้นที่ผิวแบบบีอีที ณ อุณหภูมิต่างๆ โดยใช้ถ่านไม้ยูคาลิปตัสอายุ 5 ปีปริมาณป้อน แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 700 cm^3/min ปริมาณการป้อนไอน้ำ 20 cm^3/min และปริมาณการป้อนอากาศ 5 cm^3/min……………………………………………66
4.30 ผลของอุณหภูมิการกระตุ้นที่มีต่อค่าร้อยละของปริมาณผลิตภัณฑ์ ณ อุณหภูมิต่างๆ โดยใช้ถ่านไม้ยูคาลิปตัสอายุ 4 ปีปริมาณป้อน แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 700 cm^3/min ปริมาณการป้อนไอน้ำ 20 cm^3/min และปริมาณการป้อนอากาศ 5 cm^3/min……………………………………………67
4.31 ผลของอุณหภูมิการกระตุ้นที่มีต่อค่าร้อยละของปริมาณผลิตภัณฑ์ ณ อุณหภูมิต่างๆ โดยใช้ถ่านไม้ยูคาลิปตัสอายุ 5 ปีปริมาณป้อน แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 700 cm^3/min ปริมาณการป้อนไอน้ำ 20 cm^3/min และปริมาณการป้อนอากาศ 5 cm^3/min……………………………………………67

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพประกอบ หน้า

4.32 ผลของอุณหภูมิการกระตุ้นที่มีต่อค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตร ณ อุณหภูมิต่างๆ โดยใช้ถ่านไม้ยูคาลิปตัสอายุ 4 ปีปริมาณป้อนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 700 cm^3/min ปริมาณการป้อนไอน้ำ 20 cm^3/min และปริมาณการป้อนอากาศ 5 cm^3/min....68

4.33 ผลของอุณหภูมิการกระตุ้นที่มีต่อค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตร ณ อุณหภูมิต่างๆ โดยใช้ถ่านไม้ยูคาลิปตัสอายุ 5 ปีปริมาณป้อนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 700 cm^3/min ปริมาณการป้อนไอน้ำ 20 cm^3/min และปริมาณการป้อนอากาศ 5 cm^3/min....68

4.34 ผลของอุณหภูมิการกระตุ้นที่มีต่อค่าร้อยละของปริมาณเถ้า ณ อุณหภูมิต่างๆ โดยใช้ถ่านไม้ยูคาลิปตัสอายุ 4 ปีปริมาณป้อนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 700 cm^3/min ปริมาณการป้อนไอน้ำ 20 cm^3/min และปริมาณการป้อนอากาศ 5 cm^3/min....69

4.35 ผลของอุณหภูมิการกระตุ้นที่มีต่อค่าร้อยละของปริมาณเถ้า ณ อุณหภูมิต่างๆ โดยใช้ถ่านไม้ยูคาลิปตัสอายุ 5 ปีปริมาณป้อนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 700 cm^3/min ปริมาณการป้อนไอน้ำ 20 cm^3/min และปริมาณการป้อนอากาศ 5 cm^3/min....69

4.36 ผลของอุณหภูมิการกระตุ้นที่มีต่อค่าการดูดซับไอโอดีน ณ อุณหภูมิต่างๆ โดยใช้ถ่านไม้ยูคาลิปตัสอายุ 4 ปีปริมาณป้อนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 700 cm^3/min ปริมาณการป้อนไอน้ำ 20 cm^3/min และปริมาณการป้อนอากาศ 5 cm^3/min....70

4.37 ผลของอุณหภูมิการกระตุ้นที่มีต่อค่าการดูดซับไอโอดีน ณ อุณหภูมิต่างๆ โดยใช้ถ่านไม้ยูคาลิปตัสอายุ 5 ปีปริมาณป้อนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 700 cm^3/min ปริมาณการป้อนไอน้ำ 20 cm^3/min และปริมาณการป้อนอากาศ 5 cm^3/min....70

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพประกอบ หน้า

4.38 ผลของอุณหภูมิการกระตุ้นที่มีต่อค่าการดูดซับเมทธิลีนบลู ณ อุณหภูมิต่างๆ โดยใช้ถ่านไม้ยูคาลิปตัสอายุ 4 ปีปริมาณป้อนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 700 cm^3/min ปริมาณการป้อนไอน้ำ 20 cm^3/min และปริมาณการป้อนอากาศ 5 cm^3/min....................71

4.39 ผลของอุณหภูมิการกระตุ้นที่มีต่อค่าการดูดซับเมทธิลีนบลู ณ อุณหภูมิต่างๆ โดยใช้ถ่านไม้ยูคาลิปตัสอายุ 5 ปีปริมาณป้อนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 700 cm^3/min ปริมาณการป้อนไอน้ำ 20 cm^3/min และปริมาณการป้อนอากาศ 5 cm^3/min....................71

4.40 ผลของอุณหภูมิการกระตุ้นที่มีต่อพื้นที่ผิวแบบแลงเมียร์ ณ อุณหภูมิต่างๆ โดยใช้ถ่านไม้ยูคาลิปตัสอายุ 5 ปีปริมาณป้อนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 700 cm^3/min ปริมาณการป้อนไอน้ำ 20 cm^3/min และปริมาณการป้อนอากาศ 5 cm^3/min....................72

4.41 ผลของอุณหภูมิการกระตุ้นที่มีต่อพื้นที่ผิวแบบบีอีที ณ อุณหภูมิต่างๆ โดยใช้ถ่านไม้ยูคาลิปตัสอายุ 5 ปีปริมาณป้อนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 700 cm^3/min ปริมาณการป้อนไอน้ำ 20 cm^3/min และปริมาณการป้อนอากาศ 5 cm^3/min....................72

4.42 ผลของขนาดอนุภาคที่มีต่อค่าการดูดซับไอโอดีน จากถ่านกัมมันต์ไม้ยูคาลิปตัสอายุ 5 ปี ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 150 นาที ปริมาณป้อนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 700 cm^3/min ปริมาณการป้อนไอน้ำ 20 cm^3/min และปริมาณการป้อนอากาศ 5 cm^3/min....................74

4.43 ผลของขนาดอนุภาคที่มีต่อค่าการดูดซับเมทธิลีนบลู จากถ่านกัมมันต์ไม้ยูคาลิปตัสอายุ 5 ปี ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 150 นาที ปริมาณป้อนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 700 cm^3/min ปริมาณการป้อนไอน้ำ 20 cm^3/min และปริมาณการป้อนอากาศ 5 cm^3/min....................74

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพประกอบ หน้า

4.44 ผลของขนาดอนุภาคที่มีต่อพื้นที่ผิวแบบแลงเมียร์ จากถ่านกัมมันต์ ไม้ยูคาลิปตัสอายุ 5 ปี ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 150 นาที ปริมาณป้อนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 700 cm^3/min ปริมาณการป้อนไอน้ำ 20 cm^3/min และปริมาณการป้อนอากาศ 5 cm^3/min……………………………………..75

4.45 ผลของขนาดอนุภาคที่มีต่อพื้นที่ผิวแบบบีอีที จากถ่านกัมมันต์ ไม้ยูคาลิปตัสอายุ 5 ปี ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 150 นาที ปริมาณป้อนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 700 cm^3/min ปริมาณการป้อนไอน้ำ 20 cm^3/min และปริมาณการป้อนอากาศ 5 cm^3/min……………………………………..75

4.46 เป็นภาพถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัสอายุ 5 ปี ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 90 นาที ปริมาณป้อน แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 700 cm^3/min ปริมาณการป้อนไอน้ำ 20 cm^3/min และปริมาณการป้อนอากาศ 5 cm^3/min……………………………………………….…..77

4.47 เป็นภาพถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัสอายุ 5 ปีที่ ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 120 นาที ปริมาณป้อน แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 700 cm^3/min ปริมาณการป้อนไอน้ำ 20 cm^3/min และปริมาณการป้อนอากาศ 5 cm^3/min………………………………...……………77

4.48 เป็นภาพถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัสอายุ 5 ปีที่ ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 150 นาที ปริมาณป้อน แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 700 cm^3/min ปริมาณการป้อนไอน้ำ 20 cm^3/min และปริมาณการป้อนอากาศ 5 cm^3/min…………………………………………………...78

4.49 เป็นภาพถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัสอายุ 5 ปีที่ ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 180 นาที ปริมาณป้อน แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 700 cm^3/min ปริมาณการป้อนไอน้ำ 20 cm^3/min และปริมาณการป้อนอากาศ 5 cm^3/min…………………………………………………..78

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพประกอบ หน้า

4.50 เป็นภาพถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัสอายุ 5 ปีที่ ขนาดอนภาคถ่านชาร์ 0.3-0.6 มิลลิเมตร ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 150 นาที ปริมาณป้อนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 700 cm^3/min ปริมาณการป้อนไอน้ำ 20 cm^3/min และปริมาณการป้อนอากาศ 5 cm^3/min..........79

4.51 เป็นภาพถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัสอายุ 5 ปีที่ ขนาดอนภาคถ่านชาร์ 1.18-2.36 มิลลิเมตร ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 150 นาที ปริมาณป้อนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 700 cm^3/min ปริมาณการป้อนไอน้ำ 20 cm^3/min และปริมาณการป้อนอากาศ 5 cm^3/min..........79

4.52 เป็นภาพถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัสอายุ 5 ปีที่ ขนาดอนภาคถ่านชาร์ 2.36-4.75 มิลลิเมตร ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 150 นาที ปริมาณป้อนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 700 cm^3/min ปริมาณการป้อนไอน้ำ 20 cm^3/min และปริมาณการป้อนอากาศ 5 cm^3/min..........80

4.53 เป็นภาพถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัสอายุ 5 ปีที่ ขนาดอนภาคถ่านชาร์ 0.3-0.6 มิลลิเมตร ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 150 นาที ปริมาณการป้อนไอน้ำ 20 cm^3/min..........80

4.54 เป็นภาพถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัสอายุ 5 ปีที่ ขนาดอนภาคถ่านชาร์ 0.3-0.6 มิลลิเมตร ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 150 นาที ปริมาณป้อนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 200 cm^3/min และปริมาณการป้อนอากาศ 5 cm^3/min..........81

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สัญลักษณ์และคำย่อ

Ash = ค่าร้อยละของเถ้า

VM = ค่าร้อยละของสารระเหย

FC = ค่าร้อยละของคาร์บอนคงตัว

BD = ค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตร (กรัมต่อลูกบาศก์เซ็นติเมตร)

IA = ค่าการดูดซับไอโอดีน (มิลลิกรัมต่อกรัม)

MB = ค่าการดูดซับเมทธิลีนบลู (มิลลิกรัมต่อกรัม)

S_{BET} = พื้นที่ผิวแบบบีอีที (ตารางเมตรต่อกรัม)

$S_{Langmuir}$ = พื้นที่ผิวแบบแลงเมียร์ (ตารางเมตรต่อกรัม)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของโครงการ

ในภาวะปัจจุบันแนวโน้มการใช้ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) ภายในประเทศที่สูงขึ้นเรื่อยๆ โดยมีการนำเข้าที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ซึ่งจากปริมาณเพียง 2,707 ตันในปี พ.ศ.2535 เป็นปริมาณ 3,598 ตันในปี พ.ศ.2540 (รายงานประจำปีกรมศุลกากร, 2530-2540) เนื่องจากมีการนำเข้าถ่านกัมมันต์ไปใช้เป็นตัวดูดซับ (adsorbent) ในกระบวนการแยกสิ่งสกปรกและโลหะหนักทั้งที่อยู่ในสภาพของเหลวและสภาพของแข็ง รวมถึงกระบวนการบำบัดน้ำเสียด้วย โดยพิจารณาเห็นว่าวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์น่าจะเป็นวัตถุดิบที่หาง่าย ราคาถูก ซึ่งวัสดุที่เหมาะสมอย่างยิ่งคือวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรหรือเหลือทิ้งจากกระบวนการผลิต โดยจะนำมาเป็นวัตถุดิบเพื่อผลิตถ่านกัมมันต์ ซึ่งจะมีประโยชน์คือ ประการแรก จะสามารถนำของเสียที่ไม่ต้องการจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรนำมาใช้ประโยชน์ได้ จะเป็นการเพิ่มคุณค่าและไม่ต้องเสียค่าใช้จ่ายในการกำจัดของเสียเหล่านี้ ประการที่สองคือ ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้นำมาใช้ในการกำจัดสารเคมีและโลหะต่างๆในน้ำและของเสียที่ปล่อยจากแหล่งต่างๆ ซึ่งเมื่อคำนึงทางด้านเศรษฐศาสตร์แล้วจะประหยัดมากเนื่องจากได้ต้นทุนวัตถุดิบที่มีราคาถูก โดยจากการใช้วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรเป็นการแสดงถึงการได้แหล่งวัตถุดิบใหม่ที่มีศักยภาพ เนื่องจากเป็นการแก้ปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมในปัจจุบันได้อย่างมีประสิทธิภาพ และเมื่อนำไปประยุกต์ใช้งาน วัสดุเหล่านี้ล้วนมีเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบซึ่งเมื่อนำมาทำถ่านกัมมันต์จะมีสมบัติในการดูดซับสารเคมีและโลหะต่างๆในภาวะของแข็งและในภาวะของเหลวได้ดี และเนื้อถ่านกัมมันต์จะมีค่าความแข็งและความหนาแน่นปรากฏอยู่ในช่วงที่เหมาะสม [1]

งานวิจัยนี้ได้เห็นถึงการใช้ประโยชน์จากเศษไม้ยูคาลิปตัส ซึ่งในปัจจุบันไม้ยูคาลิปตัสสามารถใช้ประโยชน์ได้ในด้านต่างๆเช่น ในด้านพลังงาน อาจใช้ทำฟืนในครัวเรือน ทำฟืนในอุตสาหกรรม เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้า ทำถ่าน เป็นต้น ในด้านอุตสาหกรรม ทำเยื่อกระดาษ ทำไม้อัดแผ่นเรียบ ทำเฟอร์นิเจอร์เป็นต้น ดังนั้นเศษไม้จากอุตสาหกรรมจึงเป็นเศษเหลือทิ้ง จึงนำไปสู่แนวความคิดที่จะนำเศษไม้ยูคาลิปตัสจากอุตสาหกรรมการผลิตเยื่อกระดาษมาเป็นวัตถุดิบในการผลิตถ่านกัมมันต์ ซึ่งจะช่วยก่อให้เกิดประโยชน์ในทางอุตสาหกรรมที่ต่อเนื่องจากอุตสาหกรรมการผลิตเยื่อกระดาษได้

การศึกษาการผลิตถ่านกัมมันต์จากเศษไม้ยูคาลิปตัสในงานวิจัยนี้ ทำโดยผ่านกระบวนการคาร์บอไนซ์และกระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำร้อนยวดยิ่ง โดยกระบวนการคาร์บอไนซ์มีการแปรอุณหภูมิระหว่าง 350-500 องศาเซลเซียส และระยะเวลาในการคาร์บอไนซ์ 45-150 นาที โดยการกระตุ้นทางกายภาพมีการแปรเปลี่ยนอุณหภูมิ 800-950 องศาเซลเซียส เวลาตั้งแต่ 90 –180 นาที ขนาดอนุภาค 0.3 ถึง 4.75 มิลลิเมตร นอกจากนี้ยังพิจารณาผลของอายุไม้ที่แตกต่างกันด้วย

1.2 วัตถุประสงค์

1. ศึกษาความเป็นไปได้ในการนำเศษไม้ยูคาลิปตัส ซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมการทำเยื่อกระดาษ มาทดลองผลิตเป็นถ่านกัมมันต์โดยการกระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำร้อนยวดยิ่ง
2. ศึกษาตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้ รวมทั้งหาภาวะที่เหมาะสมในการผลิตถ่านกัมมันต์
3. ศึกษาความแตกต่างของสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากเศษไม้ยูคาลิปตัสที่มีอายุแตกต่างกัน

1.3 ขอบเขตการวิจัย

1. เป็นการศึกษาเชิงทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ
2. ศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการคาร์บอไนซ์ไม้ยูคาลิปตัสที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ โดยนำมาวิเคราะห์แบบประมาณ
3. นำถ่านที่ได้จากการคาร์บอไนซ์ ณ ภาวะที่เหมาะสมมาทำการกระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำร้อนยวดยิ่ง ตัวแปรที่ใช้ศึกษาได้แก่อุณหภูมิ เวลา ขนาดอนุภาคของถ่านชาร์ ชนิดของแก๊สกระตุ้น จากนั้นศึกษาสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของถ่านกัมมันต์และศึกษาค่าวิเคราะห์สมบัติต่างๆโดยพิจารณาว่าอายุไม้ที่แตกต่างกันมีผลมากน้อยเพียงใด

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1. รวบรวมเอกสารที่เกี่ยวข้องและงานวิจัยต่างๆจากหน่วยราชการหรือหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง

2. เก็บรวบรวมเศษไม้ยูคาลิปตัส และรวบรวมเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

3. วิเคราะห์สมบัติโดยประมาณของไม้ยูคาลิปตัส ได้แก่ เถ้า (Ash), สารระเหย(VM) และคาร์บอนคงตัว (FC)

4. ศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการคาร์บอไนซ์ไม้ยูคาลิปตัส โดยแปรอุณหภูมิตั้งแต่ 350 – 450 องศาเซลเซียส ที่เวลา 45 – 150 นาที

5. ศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการกระตุ้นถ่านด้วยแก๊สผสมของไอน้ำร้อนยวดยิ่งกับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ โดยแปรค่า

- เวลา 90, 120, 150, 180 นาที
- อุณหภูมิ 800, 850, 900, 950 องศาเซลเซียส
- ขนาดอนุภาค 0.3-0.6, 0.6-1.18, 1.18-2.36, 2.36-4.75 มิลลิเมตร

6. ศึกษาผลการแปรชนิดของแก๊สกระตุ้นได้แก่ ไอน้ำ และ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ โดยศึกษาที่อุณหภูมิต่างๆกัน

7. ศึกษาสมบัติทางเคมีของถ่านกัมมันต์ที่ได้ ได้แก่

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

และศึกษาสมบัติทางกายภาพได้แก่

- พื้นที่ผิวรูพรุนทั้งหมด (S_{BET}, m^2/g,ตร.ม./ก)
- ความหนาแน่นเชิงปริมาตร (g/cm^3, กรัม/ลูกบาศก์เซ็นติเมตร)

8. สรุปและวิจารณ์ผลการวิจัย

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ใช้ประโยชน์เหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมการผลิตเยื่อกระดาษ มาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์เพื่อเพิ่มมูลค่าและก่อให้เกิดประโยชน์ในการนำไปใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆมากยิ่งขึ้น

2. เป็นข้อมูลสำหรับกำหนดแนวทางในการนำไม้ยูคาลิปตัส มาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2
วารสารปริทรรศน์

2.1 ความหมายของถ่านกัมมันต์

ความหมายของถ่านกัมมันต์นั้นมีผู้ให้ความหมายไว้หลากหลายคือ

- Derbyshire [2] กล่าวว่า ถ่านกัมมันต์คือวัตถุที่มีพื้นที่ผิวภายในและมีความพรุนสูง ดังนั้นจึงมีความสามารถในการดูดซับสารเคมีจากแก๊สและของเหลวได้ในปริมาณสูง ซึ่งถ่านกัมมันต์นั้นสามารถใช้ประโยชน์ได้หลายด้านโดยอาจใช้ในกระบวนการทำสารเคมีให้บริสุทธิ์หรือในกระบวนการนำสารเคมีกลับมาใช้ใหม่ นอกจากนั้นถ่านกัมมันต์สามารถใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาหรือตัวรองรับของตัวเร่งปฏิกิริยาได้ด้วย จากคุณสมบัติที่เหมาะสมและมีราคาไม่แพงของถ่านกัมมันต์ทำให้ถ่านกัมมันต์เป็นตัวดูดซับที่ใช้กันมาก

- Jankowska [3] กล่าวว่า ถ่านกัมมันต์คือ การนำเอาวัตถุดิบที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบมาผ่านกระบวนการก่อกัมมันต์ ซึ่งทำให้วัตถุดิบนั้นมีโครงสร้างรูพรุนและมีพื้นที่ผิวภายในสูง ซึ่งหากดูพื้นที่หน้าตัดของถ่านกัมมันต์จะมีลักษณะคล้ายกับรังผึ้ง โดยถ่านกัมมันต์จะมีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก(87-90%) และมีธาตุอื่นที่เป็นองค์ประกอบคือ ไฮโดรเจน ออกซิเจน ซัลเฟอร์ และไนโตรเจน โดยจะมีปริมาณมากน้อยเท่าใดนั้นขึ้นกับปริมาณที่มีในวัตถุดิบและอาจเกิดขึ้นได้อีกในขั้นตอนการผลิต

- ตาม มอก. 900-2532[4] กล่าวว่า ถ่านกัมมันต์คือ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการนำวัตถุดิบธรรมชาติที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลักมาผ่านกรรมวิธีก่อกัมมันต์ จนได้ผลิตภัณฑ์สีดำ มีโครงสร้างที่มีลักษณะเป็นรูพรุน มีพื้นที่ผิวสูง มีสมบัติในการดูดซับสารต่างได้เป็นอย่างดี

2.2 วัตถุดิบสำหรับใช้ในกระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์[2, 3, 4, 5]

วัตถุดิบที่นำมาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์นั้นจะต้องมีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบโดยวัตถุดิบนั้นอาจ เกิดขึ้นโดยธรรมชาติหรือได้จากการสังเคราะห์ขึ้น วัตถุดิบที่นิยมนำมาผลิตถ่านกัมมันต์ในระดับอุตสาหกรรมคือ พีท ถ่านหิน ลิกไนต์ ไม้ และกะลามะพร้าว เนื่องจากสามารถผลิตถ่านกัม-มันต์ที่มีความสามารถในการดูดซับสูง และมีรูพรุนขนาดเล็กสูง ซึ่งวัตถุดิบที่นำมาผลิตเป็นถ่านกัม-มันต์ควรมีสมบัติดังต่อไปนี้

- มีปริมาณสารระเหยต่ำ
- มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบในปริมาณสูง
- มีราคาถูกและหาได้ง่าย
- มีคุณสมบัติคงที่

ในปัจจุบันของเสียเหลือทิ้งทางการเกษตรนำมาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์เป็นจำนวนมากเนื่องจากหาได้ง่ายและมีราคาถูก อย่างไรก็ตามปัญหาในการผลิตถ่านกัมมันต์จากของเสียเหลือทิ้งทางการเกษตรคือ วัตถุดิบมีคุณสมบัติไม่คงที่ แม้ว่าเป็นวัตถุดิบชนิดเดียวกัน ทำให้ยากในการควบคุมการกระจายขนาดของรุพรุนในขั้นตอนการผลิต แหล่งของวัตถุดิบที่นำมาศึกษาเพื่อผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ได้แก่

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

2.3 กระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์

ขั้นตอนการผลิตถ่านกัมมันต์จะประกอบด้วยการคาร์บอไนเซชั่น และขั้นตอนการกระตุ้นถ่านชาร์

2.3.1 <u>การคาร์บอไนเซชั่น</u>

กระบวนการคาร์บอไนซ์ เป็นการไพโรไรซิสซึ่งเกิดขึ้นในที่อับอากาศ เพื่อเพิ่มสัดส่วนคาร์บอนของสารอินทรีย์ ขณะเดียวกันก็ได้ผลิตภัณฑ์อื่นที่เป็นของเหลวและแก๊สออกมาด้วย โดยโครงสร้างวงแหวนอะโรมาติกหลักที่เหลือกลายเป็นโครงสร้างของถ่านชาร์ ส่วนกลุ่มโครงสร้างโมเลกุลหรือหมู่ที่มีขนาดเล็กกว่าจะกลั่นสลายตัวออกมาเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ ได้แก่ น้ำ แอมโมเนีย น้ำมันทาร์ และแก๊สต่างๆ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ขั้นตอนการคาร์บอไนเซชั่นจัดว่าเป็นขั้นตอนหนึ่งที่มีความสำคัญมากที่สุดในการผลิตถ่านกัม-มันต์ เนื่องจากในการคาร์บอไนซ์จะมีการเริ่มสร้างของโครงสร้างรูพรุน โดยในระหว่างการคาร์บอไนซ์ ธาตุและองค์ประกอบต่างๆที่ไม่ใช่คาร์บอนรวมถึงสารระเหยต่างๆ เช่น ไฮโดรเจน ออกซิเจน ไนโตรเจน และน้ำ จะถูกกำจัดออกจากโครงสร้างของวัตถุดิบในรูปของแก๊สและน้ำมันทาร์ จากนั้นก็จะได้ถ่านชาร์ซึ่งมีการจัดตัวของโครงสร้างผลึกที่ไม่เป็นระเบียบซึ่งจะมีช่องว่างรูพรุนระหว่างผลึก โดยจะมีสารอนินทรีย์ที่เป็นทาร์ไปอุดช่องว่างเหล่านั้น ซึ่งในส่วนประกอบของถ่านชาร์ที่ได้จะมีอัตราส่วนของคาร์บอนต่อไฮโดรเจน และคาร์บอนต่อออกซิเจน เพิ่มมากขึ้นจากวัตถุดิบในตอนแรกด้วย ขั้นตอนของกระบวนการคาร์บอไนเซชันแบ่งได้ชัดเจนเป็น 3 ขั้นคือ[7]

1. จะมีการสูญเสียน้ำออกจากโครงสร้างวัตถุดิบที่ช่วงอุณหภูมิ 27- 197 องศาเซลเซียส
2. เข้าสู่ขั้นตอนการไพโรไลซิสโดยเกิดแก๊สและนำมันทาร์ในโครงสร้างที่ช่วงอุณหภูมิ 197 – 497 องศาเซลเซียส
3. เป็นช่วงที่มีการเกาะตัวกันของโครงสร้างถ่านชาร์ โดยในช่วงนี้น้ำหนักของวัตถุดิบจะลดลงไปมาก ที่ช่วงอุณหภูมิ 497 – 847 องศาเซลเซียส

การคาร์บอไนซ์ให้ได้ถ่านที่มีสมบัติที่ต้องการทำได้โดยการปรับภาวะให้เหมาะสม โดยมีตัวแปรคือ[8]

1. <u>อุณหภูมิ</u>

อุณหภูมิจะมีผลต่อปริมาณของผลิตภัณฑ์มากที่สุด คือเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ปริมาณการเกิดถ่านชาร์จะลดลง ส่วนน้ำมันทาร์และแก๊สที่ได้เพิ่มมากขึ้น และคุณสมบัติของน้ำมันทาร์จะมีกลุ่มโครงสร้างเปลี่ยนแปลงไปด้วย เพราะการเพิ่มอุณหภูมิเป็นการเพิ่มพลังงานเพื่อทำลายพันธะภายในโครงสร้างของวัตถุดิบนั้น

2. <u>อัตราการให้ความร้อน</u>

อัตราการให้ความร้อนจะมีผลต่อคุณสมบัติและปริมาณของน้ำมันทาร์และสารระเหย การเพิ่มอัตราความร้อนอย่างรวดเร็วจะมีผลทำให้ปริมารสารระเหยถูกปลดปล่อยอย่างรวดเร็วทำให้ถ่านที่ได้มีรูพรุนขนาดใหญ่ ความว่องไวในการทำปฏิกิริยาสูงกว่าถ่านที่ได้จากการให้ความร้อนด้วยอัตราที่ต่ำกว่า เพราะถ่านที่ได้จากการคาร์บอไนซ์ด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิสูง คาร์บอนจะเรียงตัวเป็นระเบียบน้อยกว่า ทำให้เกิดช่องว่างเป็นรูพรุนขนาดใหญ่เมื่อทำการกระตุ้น สารกระตุ้นจะเข้าไปทำปฏิกิริยาได้ง่าย

3. ตัวกลางของปฏิกิริยา (Medium of reaction)

จะมีผลกระทบต่อปฏิกิริยา ถ้าแก๊สและไอที่เกิดระหว่างการไพโรไรซิสถูกพาออกไปอย่างรวดเร็ว โดยแก๊สที่เป็นตัวกลางเช่น แก๊สไนโตรเจน (เฉื่อยต่อปฏิกิริยาการเผาไหม้ของคาร์บอน) และแก๊สจากการเผาไหม้ ถ้าตัวกลางเป็นแก๊สที่ได้จากการเผาไหม้ ปริมาณถ่านที่ได้จะน้อยกว่าตัวกลางที่เป็นแก๊สไนโตรเจน แต่มีความว่องไวในการทำปฏิกิริยากับตัวกระตุ้นสูงกว่า

4. ธรรมชาติของวัตถุดิบ

วัตถุดิบแต่ละชนิดจะมีภาวะที่เหมาะสมแตกต่างกันในการคาร์บอไนซ์ โดยถ่านกัมมันต์จากวัตถุดิบที่ต่างกันอาจใช้วิธีกระตุ้นที่ต่างกัน เพื่อที่จะได้ถ่านกัมมันต์ที่มีคุณภาพดีที่สุด ซึ่งจะเหมาะกับการนำไปใช้ในระบบที่เหมาะสมต่อไป

จุดมุ่งหมายหลักของกระบวนการคาร์บอไนเซชั่นก็เพื่อผลิตให้ได้ถ่านที่มีรูพรุน และการจัดเรียงตัวของคาร์บอนอะตอมให้เป็นระเบียบมากกว่าวัตถุดิบ

2.3.2 การกระตุ้น

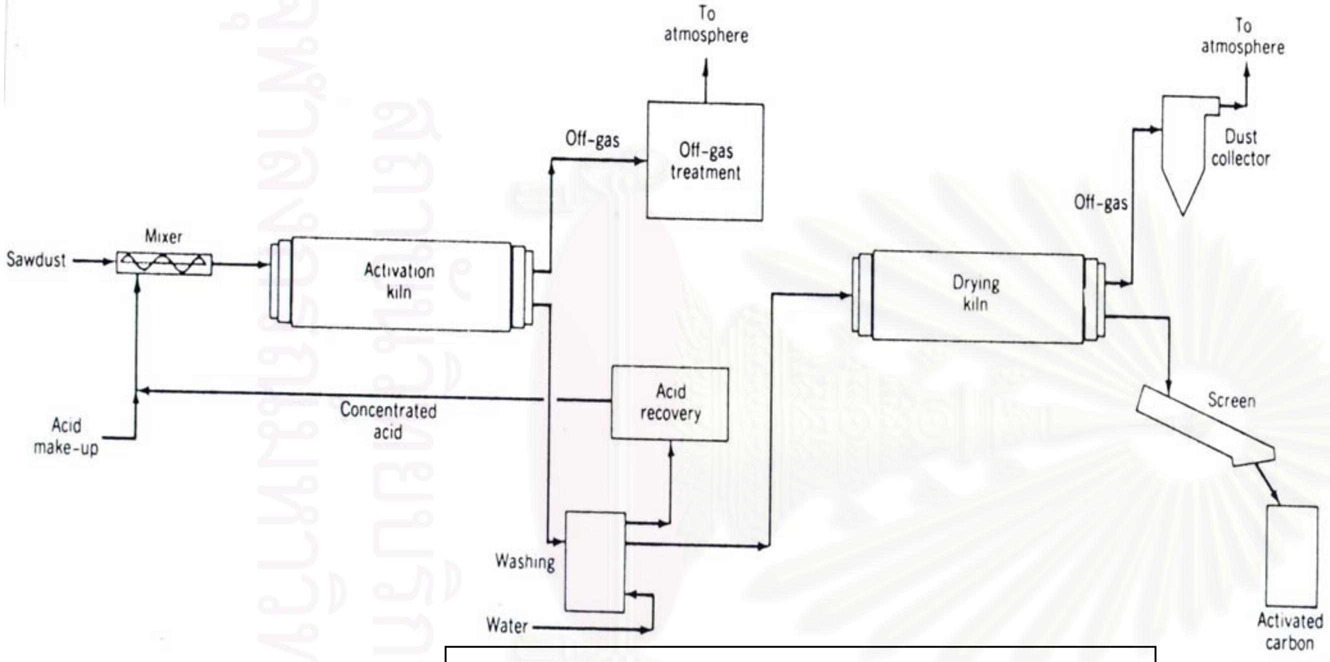
เป็นการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพสำหรับคาร์บอน ด้วยการเพิ่มพื้นที่ผิวให้มากขึ้นโดยการทำให้มีรูพรุนมากขึ้น หรือเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับสารอื่นๆของถ่านกัมมันต์ ปฏิกิริยาที่เกิดระหว่างการกระตุ้นยังไม่เป็นที่ทราบแน่ชัด เนื่องมาจากวิธีการกระตุ้นนั้นมีมากมายหลายวิธี และประสิทธิภาพของการกระตุ้นขึ้นกับลักษณะและชนิดของวัตถุดิบรวมถึงวิธีการอื่นๆก่อนการกระตุ้นด้วย

โดยทั่วไปแล้วมี 2 วิธีในการผลิตถ่านกัมมันต์คือ[3]

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

1. การกระตุ้นทางเคมี [3, 9, 10, 11]

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



<u>รูปที่ 2.1</u> ตัวอย่างกระบวนการกระตุ้นทางเคมี [9]

จากรูปที่ 2.1 เป็นตัวอย่างการผลิตถ่านกัมมันต์จากไม้ ซึ่งทำการผลิตถ่านกัมมันต์โดยจะเริ่มต้นด้วยนำขี้เลื่อยแช่ผสมกับกรดเข้มข้นและป้อนสู่เตาเผาแบบหมุน จะเป็นกระบวนการทำให้แห้ง จากนั้นจะเป็นการคาร์บอไนซ์และทำการกระตุ้นที่อุณหภูมิปานกลาง ซึ่งแก๊สที่ออกมาจากกระบวนการกระตุ้นจะทำการบำบัดก่อนปล่อยออกเพื่อไม่ก่อให้เกิดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อม จากนั้นนำถ่านที่ได้ไปล้างด้วยน้ำเพื่อกำจัดกรดออกจากเนื้อถ่าน และทำการแยกถ่านที่ได้ออกมา และนำน้ำนั้นไปผ่านกระบวนการนำกรดกลับมาใช้ใหม่ ซึ่งในส่วนนี้บางโรงงานที่ทำการผลิตก็มิได้นำกรดกลับมาใช้ใหม่ จากการล้างถ่านที่ได้นั้นควรล้างจนกว่าน้ำล้างจะเป็นกลาง (pH=7) และนำถ่านที่ได้ไปอบแห้ง จากนั้นนำถ่านไปแยกขนาดสำหรับการใช้งานแต่ละชนิดต่อไป ถ่านที่ได้จะมีร้อยละผลิตภัณฑ์สูงด้วยซึ่งเทียบกับน้ำหนักของวัตถุเริ่มต้น

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 เศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรและไม้ชนิดต่างๆ อย่างไรก็ตามกระบวนการกระตุ้นทางเคมีก็มีหลายกระบวนการที่แตกต่างกัน เพื่อ

ที่จะให้ได้ถ่านกัมมันต์ที่มีประสิทธิภาพในการดูดซับที่ดีขึ้น ซึ่งพบว่าสารกระตุ้นชนิดอื่นๆก็สามารถให้ถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวสูงได้ เช่น โปตัสเซียมไฮดรอกไซด์ อลูมิเนียมคลอไรด์ หรือ เฟอริกคลอไรด์ ซึ่งเราจะพบว่ามีปัจจัยที่มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของความพรุนของถ่านกัมมันต์ที่ได้คือ

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

จากการที่ใช้ไม้เป็นวัตถุดิบในการผลิตถ่านกัมมันต์โดยการกระตุ้นทางเคมีนี้คือจะได้คุณสมบัติของถ่านที่มีปริมาตรรูพรุนสูง และความหนาแน่นปรากฏต่ำ (ประมาณ 0.27 กรัม/ลูกบาศก์เซ็นติ-เมตร) โดยส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของถ่านกัมมันต์ผง ซึ่งนำมาใช้งานในการดูดซับสภาวะที่เป็นของเหลว เช่น ระบบการทำน้ำให้บริสุทธิ์ คุณสมบัติที่ดีของไม้และสารชีวมวลที่ใช้เป็นวัตถุดิบคือ มีปริมาณเถ้าต่ำ (0.3-1.1%โดยน้ำหนัก) ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณเถ้าในถ่านหินและลิกไนต์จะมีปริมาณสูงกว่า (2-15%โดยน้ำหนัก) และในไม้และสารชีวมวลจะมีปริมาณกำมะถันต่ำด้วย

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

เป็นวิธีการเพิ่มปริมาตรรูพรุนและพื้นที่ผิวโดยปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชั่น (gasification) ด้วยแก๊สออกซิไดซ์ที่ช่วงอุณหภูมิ 700-1000 องศาเซลเซียส แก๊สที่ใช้โดยทั่วไปคือ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ไอน้ำ และอากาศ โดยอาจใช้ชนิดใดชนิดหนึ่งหรือรวมแก๊สดังกล่าวก็ได้

ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการคาร์บอไนซ์ยังเป็นตัวดูดซับที่ไม่ดีต้องทำการกระตุ้นให้ได้ถ่านที่มีการดูดซับสูง โดยใช้การกระตุ้นให้ทำปฏิกิริยากับแก๊สที่เป็นตัวออกซิไดซ์ ดังตัวอย่าง [12]

$H_2O + C_X \longrightarrow H + CO + C_{x-1}$ (at 800-900 ^oC)

$CO_2 + C_x \longrightarrow 2CO + C_{x-1}$ (at 800-900 ^oC)

$O_2 + C_x \longrightarrow 2CO + C_{x-2}$ (at 800-900 ^oC)

$O_2 + C_x \longrightarrow CO_2 + C_{x-1}$ (below 600 ^oC)

ปัจจัยที่มีผลต่อลักษณะรูพรุนในขั้นตอนการกระตุ้นคือ [3, 5]

1. โครงสร้างของคาร์บอนหรือถ่านชาร์ที่นำมากระตุ้น
2. สารอนินทรีย์ปนเปื้อนที่อยู่ในเนื้อคาร์บอน

3. ชนิดของแก๊สออกซิไดซ์

4. อุณหภูมิขณะเกิดปฏิกิริยา

5. ความดันของแก๊ส

6. เวลาในการเกิดปฏิกิริยา

7. ขนาดอนุภาคของถ่านชาร์

ในกระบวนการกระตุ้น คาร์บอนทำปฏิกิกริยากับสารออกซิไดซ์เป็นคาร์บอนออกไซด์แพร่ออกจากผิวของคาร์บอน เกิดแก็สซิฟิเคชั่นบางส่วนของเม็ดถ่าน เป็นรูพรุนขึ้นในโครงสร้างของถ่าน ถ่านจากการคาร์บอไนซ์ประกอบด้วยรูพรุนเล็กๆจำนวนมากเกิดจากช่องว่างระหว่างผลึกในการจัดเรียงตัวของคาร์บอนอะตอม รูพรุนนี้มักจะถูกบรรจุไว้ด้วยทาร์ที่เกิดจากการสลายตัวด้วยความร้อนและถูกขวางด้วยคาร์บอนอสัณฐาน การกระตุ้นจึงเป็นทั้งการเปิดรูที่ถูกปิด และการสร้างรูใหม่ขึ้นด้วย

ตัวอย่างการกระตุ้นโดยวิธีทางกายภาพ คือ

- <u>การกระตุ้นด้วยไอน้ำ</u>[3,4] ไอน้ำนั้นถือได้ว่าเป็นสารกระตุ้นทางกายภาพที่มีการใช้กันมาก เนื่องจากโมเลกุลของน้ำนั้นมีขนาดเล็กกว่าโมเลกุลของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และในการกระตุ้นด้วยไอน้ำนั้นจะมีข้อดีคือ

1. โมเลกุลของน้ำจะแพร่เข้าไปได้อย่างรวดเร็วในโครงสร้างรูพรุน

2. เนื่องจากโมเลกุลที่เล็กจึงสามารถเข้าไปในรูพรุนขนาดเล็กได้

3. มีการเกิดปฏิกิริยาที่รวดเร็ว ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยาเร็วกว่าแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ถึงสามเท่าที่สภาวะความดัน 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> [3, 5]

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 ได้กล่าวว่าการเกิดขึ้นของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์นั้นจะมีผลดีคือ จะมีการกระตุ้นที่ให้รูพรุนขนาดเล็กที่ดี แต่ในขณะเดียวกันอัตราการเกิดปฏิกิริยาจะลดลง จากการทดลองโดยทั่วไปจะพบว่า การกระตุ้นโดยใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ จะต้องใช้อุณหภูมิในการกระตุ้นสูงกว่าการกระตุ้นโดยใช้ไอน้ำ แต่โดยทั่วไปมักจะใช้แก๊สผสมระหว่าง แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ร่วมกับไอน้ำ

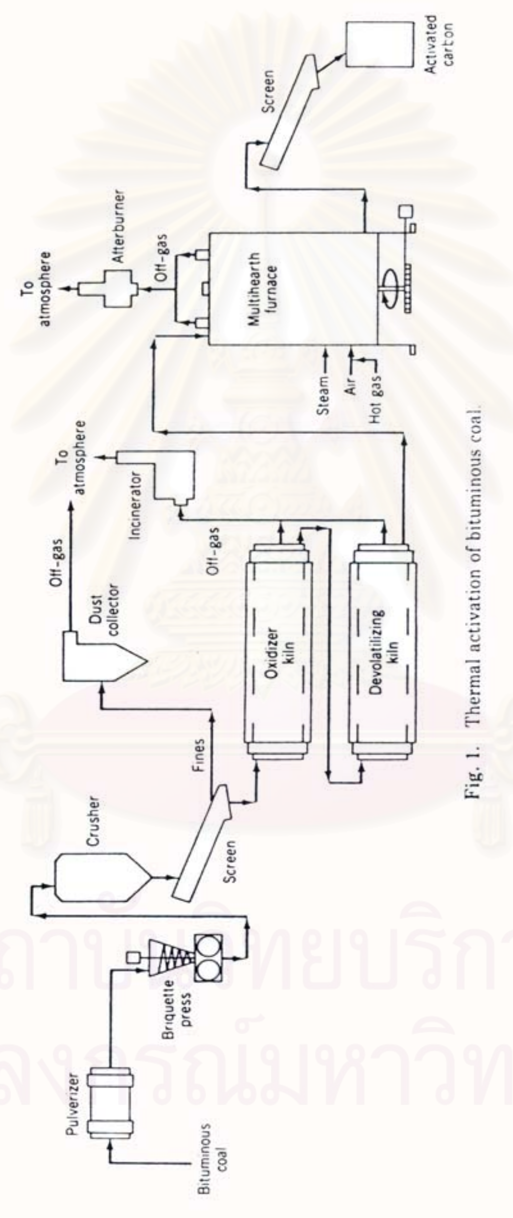


Fig. 1. Thermal activation of bituminous coal.

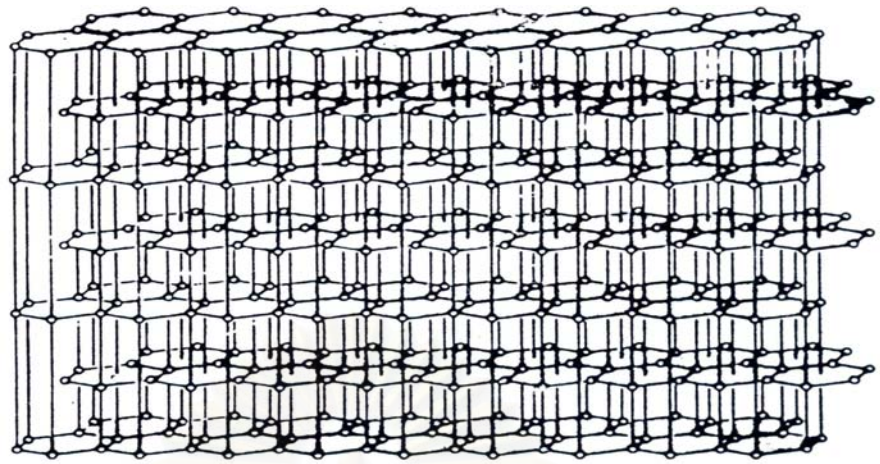
<u>รูปที่ 2.2</u> ตัวอย่างกระบวนการกระตุ้นทางกายภาพ [9]

ตัวอย่างของการกระตุ้นด้วยวิธีทางกายภาพ[9] แสดงดังรูปที่ 2.2 ซึ่งเป็นการผลิตถ่านกัมมันต์จากถ่านหินบิทูมินัส โดยนำถ่านหินบิทูมินัสที่ทำการบดแล้วมาทำการอัดก้อน ในบางครั้งอาจเติมตัวประสานเข้าไปก่อนทำการอัดก้อน จากนั้นจะนำก้อนถ่านหินมาทำการตัดและนำไปผ่านตะแกรงร่อนเพื่อเลือกขนาดก่อนนำไปเข้าสู่เตาเผาที่ทำการออกซิไดซ์ ที่จุดนี้สมบัติการเกิดโค้กของถ่านหินจะถูกทำลายที่จุดนี้โดยเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยอากาศที่อุณหภูมิปานกลาง จากนั้นสารระเหยจะถูกกำจัดออกไปที่เตาเผาที่สองซึ่งเป็นเตาเผาแบบหมุน โดยจะทำที่อุณหภูมิสูงกว่าเตาเผาแรก แก๊สที่ออกจากเตาเผาซึ่งมีผงฝุ่นและสารระเหยประกอบอยู่นั้นจะผ่านไปสู่เตาเผาที่จะเผาให้เป็นเถ้า (Incinerator)ก่อนปล่อยออกสู่บรรยากาศ จากนั้นถ่านหินที่ได้จะนำไปเข้าสู่เตาเผาต่อไปเพื่อทำการกระตุ้นที่อุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียส คุณภาพของถ่านกัมมันต์ที่ได้จะขึ้นกับการควบคุมอัตราการป้อนถ่านหิน และการควบคุมอุณหภูมิ เช่นเดียวกันแก๊สที่ประกอบด้วยฝุ่นผงที่ขั้นตอนนี้จะนำไปเข้าสู่เตาเผาเพื่อเผาให้เป็นเถ้าก่อนทำการปล่อยแก๊สออกสู่บรรยากาศ จากนั้นถ่านกัมมันต์เม็ดที่ได้จะนำไปผ่านตะแกรงร่อนเพื่อให้ได้ขนาดอนุภาคของถ่านกัมมันต์ที่ต้องการ ร้อยละของผลิตภัณฑ์ที่ได้อยู่ที่ 30-50 โดยน้ำหนัก ซึ่งเทียบกับน้ำหนักของวัตถุดิบเริ่มต้น

กระบวนการกระตุ้นในทางกายภาพนั้น อาจมีกระบวนการผลิตที่ต่างกันไปขึ้นกับลักษณะของวัถุดิบ ตัวอย่างเช่นการผลิตถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าว ไม่จำเป็นต้องผ่านกระบวนการอัดก้อนหรือกระบวนการปล่อยให้สารระเหยออกจากวัตถุดิบนั้น ในบางกระบวนการอาจมีขั้นตอนการนำวัตถุดิบล้างด้วยกรดก่อนเพื่อที่จะให้ได้ถ่านกัมมันต์ที่มีปริมาณเถ้าต่ำ

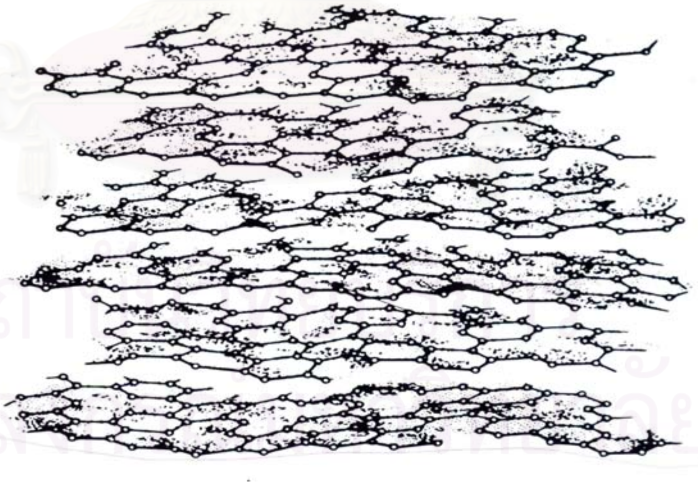
2.4 โครงสร้างรูพรุนของถ่านกัมมันต์ [12, 14]

ถ่านกัมมันต์ มีโครงสร้างเป็นกลุ่มของคาร์บอนซึ่งมีลักษณะคล้ายกราไฟต์ (Graphite) แต่แตกต่างกันที่พื้นที่ผิวภายในของถ่านกัมมันต์ซึ่งมีมากมาย กราไฟต์ประกอบด้วยแผ่นชั้นที่เกิดจากอะตอมของคาร์บอนซึ่งเรียงตัวกันแบบหกเหลี่ยมด้านเท่า (Regular Hexagons) ระยะห่างระหว่างอะตอมของคาร์บอนในแต่ละชั้นมีขนาด 3.35 อังสตรอม มี 3 อิเล็คตรอนของคาร์บอนจะสร้างพันธะโควาเลนต์ (Covalent Bond) กับอะตอมที่ติดกัน ขณะที่อิเล็คตรอนอีก 1 ตัวที่เหลือจะเคลื่อนที่ระหว่างโครงสร้างวาเลนซ์ ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 โครงสร้างของกราไฟต์ [11]

โครงสร้างของถ่านกัมมันต์แตกต่างจากกราไฟต์ ซึ่งจะมีโครงสร้างเป็นผลึกที่เล็กมาก (Microcrystallites) ประกอบด้วยวงหกเหลี่ยมด้านเท่าของอะตอมคาร์บอนผสมกัน เส้นผ่าศูนย์กลางของชั้นคาร์บอนที่สร้างผลึกเล็กๆมีขนาดประมาณ 150 อังสตรอม และระยะห่างระหว่างผลึกเล็กๆนี้มีค่าอยู่ระหว่าง 20-50 อังสตรอม ดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 โครงสร้างของถ่านกัมมันต์ [11]

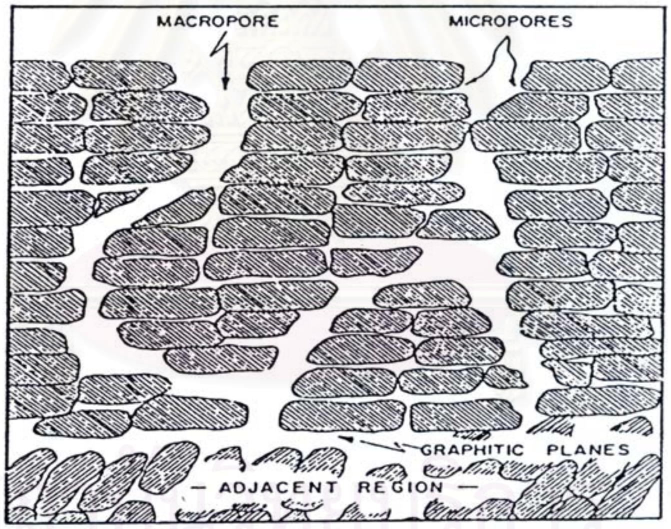
- <u>ความพรุน</u> (Porosity) [5, 13]

โดยปกติแล้วถ่านกัมมันต์โดยทั่วไปมีปริมาตรความพรุนอยู่ระหว่าง 0.5-1.5 ml/g จากลักษณและขนาดของรูพรุน สามารถแบ่งรูพรุนได้เป็น 3 ขนาด

ก. รูพรุนขนาดใหญ่ (Macropores) ขนาดของรูพรุนขนาดใหญ่ที่พบในถ่านกัมมันต์ มีค่าอยู่ระหว่าง 5,000-20,000 อังสตรอม ปริมาตรความพรุนมีค่าอยู่ระหว่าง 0.2-0.8 ml/g ส่วนพื้นที่ผิวจำเพาะของรูพรุนขนาดใหญ่นี้มักจะไม่ค่อยสนใจ สามารถตัดทิ้งได้เนื่องจากมีค่าน้อยกว่า 2 m^2/g

ข. รูพรุนขนาดกลาง (Transitional Pores) มีรัศมีอยู่ระหว่าง 20-1,000 อังสตรอม มีปริมาตรความพรุนอยู่ระหว่าง 0.02-0.1 ml/g มีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 5 เปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ผิวจำเพาะทั้งหมด

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



<u>รูปที่ 2.5</u> รูปแสดงลักษณะของรูพรุนในถ่านกัมมันต์ [11]

ในรูปที่ 2.5 แสดงลักษณะของรูพรุนในถ่านกัมมันต์ดังที่ได้กล่าวมาข้างต้น รูพรุนขนาดใหญ่จะเป็นรอยแตกที่ผิวของคาร์บอน รูพรุนขนาดกลางจะแตกสาขาออกมาจากรูพรุนขนาดใหญ่ และรูพรุนขนาดเล็ก ก็จะแตกสาขาออกมาจากรูพรุนขนาดกลาง

2.5 การศึกษาการดูดซับที่เกี่ยวกับเคมีพื้นผิว (Surface Chemistry) [14, 15]

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 จะมีผลึกคาร์บอนอยู่ที่บริเวณผิวและขอบของผลึกคาร์บอน โดยจะมีตำแหน่งวาเลนซ์ที่เหลืออยู่จึงทำให้บริเวณดังกล่าวเป็นตำแหน่งที่ว่องไว จะเห็นได้จากการดูดซับทางเคมีที่บริเวณผิวถ่าน ธาตุที่ถูกดูดซับเข้ามาอาจเป็น ออกซิเจน ไนโตรเจน ไฮโดรเจน คลอรีน โบรมีน ไอโอดีน และซัลเฟอร์ ซึ่งเป็นการดูดซับแบบซับซ้อนที่บริเวณผิวจึงไม่สามารถเขียนกลไกการดูดซับออกมาในรูปแบบของสมการเคมีได้

เมื่อพิจารณาหมู่ฟังก์ชันนัลที่บริเวณผิวของถ่านกัมมันต์ พบว่าหมู่ฟังก์ชันนัลที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบ มีความสำคัญมากที่สุด เมื่อตรวจสอบที่บริเวณผิวของคาร์บอนโดยใช้เอ็กซ์เรย์ อะตอมของออกซิเจนจะสร้างพันธะกับอะตอมของคาร์บอน ซึ่งจะมีเป็นจำนวนมากที่บริเวณขอบของโมเลกุลคาร์บอนที่เกาะตัวเป็นอะโรมาติก โดยพันธะระหว่างออกซิเจนและไฮโดรเจน จะมีอิทธิพลมากที่สุดต่อลักษณะพื้นผิวถ่านกัมมันต์ เช่น ความเป็นกรดที่บริเวณผิว การแลกเปลี่ยนไอออนบวก รวมถึงการดูดซับแก๊สและไอที่มีขั้วและไม่มีขั้ว

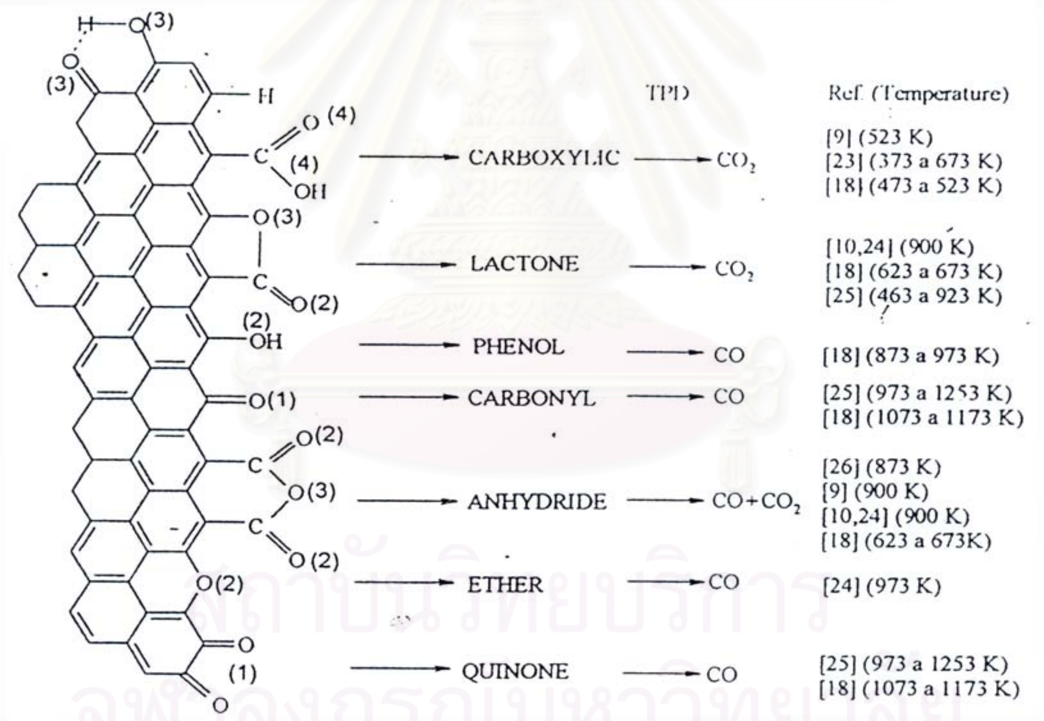
การที่จะให้เกิดหมู่ฟังก์ชันนัลที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบที่บริเวณผิวถ่านกัมมันต์ ทำได้โดยการออกซิไดซ์ถ่านกัมมันต์ ซึ่งทำได้ทั้งในภาวะแก๊สและภาวะของเหลว จากวิธีการดังกล่าวจะทำให้พื้นที่ผิวถ่านกัมมันต์เป็นได้ทั้ง กรด เบส และเป็นกลาง ตัวอย่างของพื้นผิวที่เป็นกรดเช่น

คาร์บอกซิล ฟีโนลิก ไฮดรอกซิล แล็คโทน และควิโนน ซึ่งจะได้แบบใดนั้นขึ้นอยู่กับวิธีการออกซิไดซ์

พบว่าเมื่อมีหมู่ที่แสดงความเป็นกรดที่บริเวณผิวของถ่านกัมมันต์ จะทำให้มีสมบัติในการซอบดูดน้ำมากขึ้น (hydrophilic) และจะมีผลต่อพื้นที่ผิว และลักษณะต่างๆของถ่านกัมมันต์ จากการมีหมู่ฟังก์ชันเหล่านี้จึงมีบทบาทที่สำคัญต่อสมบัติของถ่านกัมมันต์

เทคนิคต่างๆในการหาลักษณะของหมู่ฟังก์ชันนัลต่างๆบนผิวของถ่านกัมมันต์ที่ใช้กันโดยทั่วไปเช่น

- Chemical titration method เป็นเทคนิคที่ใช้ร่วมกับเทคนิคแบบอื่น แต่ไม่สามรถใช้ได้เมื่อตัวอย่างมีปริมาณน้อย และถ้ามีหมู่ที่มีออกซิเจนในปริมาณมากก็ไม่สามารถให้ค่าที่ถูกต้องได้
- XPS เป็นเทคนิคที่จะสามารถบอกองค์ประกอบทางเคมีที่ผิวได้



รูปที่ 2.6 แสดงกลุ่มฟังก์ชันต่างๆที่ผิวคาร์บอน และอุณหภูมิต่างๆที่สลายตัวโดย TPD [15]

- Infra - red spectroscopic เป็นวิธีที่ใช้ในกรณีที่ถ่านมีหมู่ออกซิเจนมาก ไม่เช่นนั้นจะไม่สามารถตรวจสอบได้

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

จากรูปที่ 2.6 จะได้พีคของ CO_2 จากกรดคาร์บอกซิลิกที่อุณหภูมิต่ำ และหมู่แลคโทนที่อุณหภูมิสูงขึ้น หมู่คาร์บอกซิลิกแอนไฮไดร์ ได้จากพีคทั้ง CO และ CO_2 โดยหมู่ฟีนอล อีเทอร์ และคาร์บอนิล ได้จากพีคของ CO

ในปัจจุบัน ถ่านกัมมันต์จะมีเทคนิคต่างๆในการผลิตที่ต่างกัน เพื่อให้ได้ถ่านกัมมันต์ที่มีสมบัติต่างกัน โดยเทคนิคที่ใช้ต่างๆในการผลิตพยายามที่จะหาหมู่ฟังก์ชันบนผิวถ่านกัมมันต์

2.6 ถ่านกัมมันต์ในทางการค้า [2, 3, 9]

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 [5]

พบว่าใช้มากในระบบการทำอากาศให้บริสุทธิ์ การทำตัวทำละลายให้บริสุทธิ์ และกระบวนการบำบัดน้ำ และมีการใช้ในระบบใหม่ๆซึ่งเกี่ยวกับระบบการป้องกันมลภาวะจากสิ่งแวดล้อม ซึ่งระบบใช้ถ่านกัมมันต์ส่วนใหญ่ มีดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 การนำถ่านกัมมันต์ไปประยุกต์ใช้ในระบบต่างๆ [2]

ระบบที่เป็นของเหลว	
Decolorization	Industrial water treatment
Potable water reatment	Metals recovery (Gold)
Groundwater treatment	Chemicals and pharmaceutical purification
ระบบที่เป็นแก๊ส	
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 อย่างไรก็ตามเราสามารถเพิ่มประสิทธภาพระบบให้เท่าเดิมโดยการนำถ่านกัมมันต์ใหม่เข้ามาใส่เพิ่มเติมในระบบ ซึ่งรูปแบบการนำถ่านกัมมันต์กลับมาใช้ใหม่เป็นที่นิยมมากในอุตสาหกรรมเนื่องจากเสียค่าใช้จ่ายถูกกว่าที่จะซื้อถ่านกัมมันต์ใหม่ ตัวอย่างเช่นการนำถ่านกัมมันต์ที่ใช้แล้วมาทำการบำบัดโดยใช้เตาเผาแบบฟลูอิไดซ์เบด จะเสียค่าใช้จ่ายเพียง 35 เปอร์เซ็นต์ ของค่าใช้จ่ายที่จะซื้อถ่านกัมมันต์ใหม่ แต่ถ่านกัมมันต์แบบผงใช้ในปริมาณน้อยจึงมักนำถ่านกัมมันต์แบบผงที่ใช้แล้วนำไปกำจัดทิ้งโดยการฝังกลบ (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> [3]

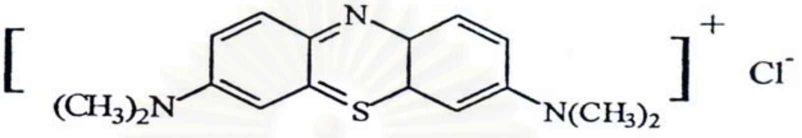
สมบัติในการดูดซับของถ่านกัมมันต์หาได้จากไอโซเทอมของการดูดซับของถ่านกัมมันต์เมื่อนำไปดูดซับของเหลว ตัวอย่างของสมบัติในการดูดซับคือ

- <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

- การดูดซับเมทิลีนบลู

ค่าการดูดซับเมทิลีนบลูจะสามารถบอกค่าการดูดซับของถ่านกัมมันต์ได้สำหรับโมเลกุลที่ถูกดูดซับมีขนาดใกล้เคียงกับโมเลกุลของเมทิลีนบลู ซึ่งจะมีค่าอยู่ในช่วงของรูพรุนขนาดกลางคือ จะมีขนาดใหญ่กว่า 1.5 นาโนเมตร โดยโครงสร้างของโมเลกุลเมทิลีนบลูแสดงดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 โครงสร้างทางเคมีของเมทธิลีนบลู[3]

2.7.2 สมบัติด้านเคมีฟิสิกส์ [3]

เป็นวิธีการตามแบบ Jankowska [3]

- ปริมาณสารระเหย

เป็นค่ามาตรฐานที่ใช้กำหนดค่าสารระเหยที่อยู่ในถ่านหินและโค้ก โดยนำมาประยุกต์ใช้กับถ่านกัมมันต์ได้ ทำการทดสอบได้โดยนำตัวอย่างมาบดให้มีขนาดเล็กกว่า 0.1 นาโนเมตร จากนั้นนำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 950$\pm$25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 นาที $\pm$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 โปตัสเซียม แมกนีเซียม และโลหะอื่นๆ ซึ่งจะมี

สารประกอบเหล่านี้อยู่ในปริมาณเท่าใดนั้นขึ้นกับชนิดของวัตถุดิบ โดยส่วนใหญ่แล้วมักจะประกอบด้วย ซิลิกอน ซึ่งวิธีการที่จะใช้ในการกำจัดเถ้าออกจากถ่านกัมมันต์นั้นจะใช้กรด หากมีเถ้าที่มีองค์-ประกอบที่ซับซ้อนมากจะใช้กรดที่ผสมกัน เช่นใช้กรดที่ผสมกันระหว่าง กรดไฮโดรฟลูโอริกและกรดไฮโดรคลอริก การหาปริมาณเถ้าสามารถทำโดยนำตัวอย่างใส่ในครูซิเบิล และนำใส่ในเตาเผาที่อุณหภูมิ 650$\pm$25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 – 16 ชั่วโมง ซึ่งมวลของเถ้าจะคงที่ที่เวลาเท่าใดนั้นจะขึ้นกับชนิดของวัตถุดิบ

2.7.3 <u>พื้นที่ผิว</u> (Surface area) [5, 16, 17, 18, 19]

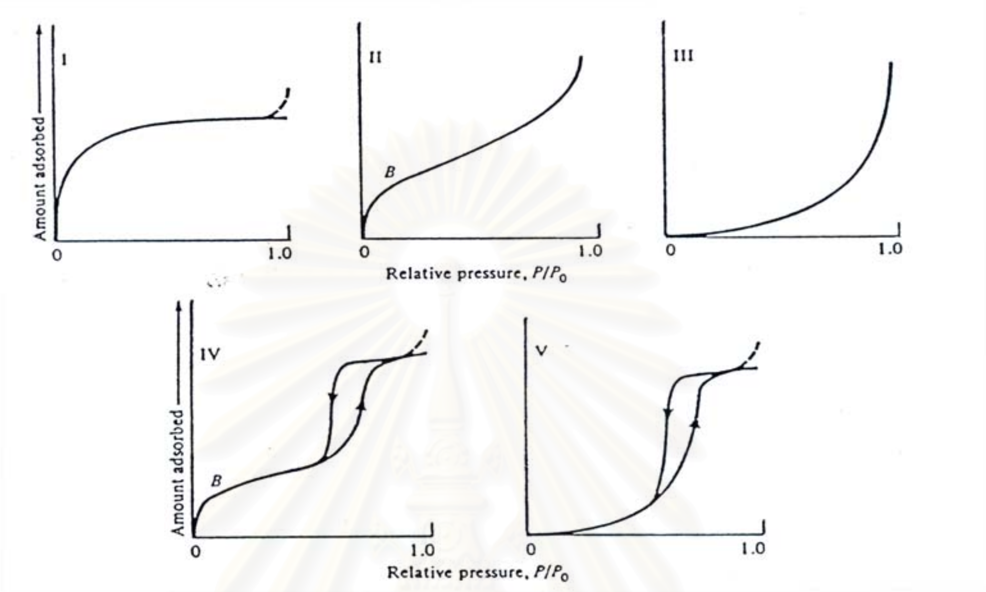
ในการวัดพื้นที่ผิวจะต้องใช้ไอโซเทอม (Isotherm) ของการดูดซับ ซึ่งไอโซเทอมนี้จะมีรูปแบบตามธรรมชาติของตัวดูดซับที่เป็นของแข็ง ซึ่งจะทำการทดลองที่อุณหภูมิคงที่ ที่ความดันย่อยต่างๆเพื่อสร้างไอโซเทอมของการดูดซับ จากไอโซเทอมของการดูดซับข้อมูลที่ได้คือ

- ค่าของพื้นที่ผิว
- ค่าของปริมาตรรูพรุน
- ทราบลักษณะเคมีพื้นผิว (surface chemistry) ของตัวดูดซับ
- ทราบข้อมูลพื้นฐานของการดูดซับ
- ทราบประสิทธิภาพของตัวดูดซับที่ใช้ในระบบการแยกหรือการทำให้บริสุทธิ์

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

- <u>ไอโซเทอมชนิดที่ 1</u>

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



รูปที่ 2.8 แสดงไอโซเทอมของการดูดซับทั้ง 5 ชนิด [17]

- ไอโซเทอมชนิดที่ 2

บางครั้งอาจเรียกว่าไอโซเทอมที่มีรูปแบบ ซิกมอยด์ หรือแบบเอส (sigmoid or S-shaped) เป็นรูปแบบไอโซเทอมการดูดซับของตัวดูดซับที่ไม่มีรูพรุนหรือตัวดูดซับที่มีรูพรุนขนาดใหญ่ ซึ่งอาจเกิดการดูดซับได้หลายชั้น (multilayer) จากไอโซเทอมตรงบริเวณจุด B จะแสดงถึงการดูดซับแบบชั้นเดียว (monolayer) นั้นเสร็จสมบูรณ์ จากนั้นที่ความดันสูงขึ้นจะเกิดการดูดซับที่ต่อเนื่องจากชั้นแรกต่อไป และจะเกิดการดูดซับเสร็จสมบูรณ์ที่ความดันย่อยสูงๆ

- ไอโซเทอมชนิดที่ 3

เป็นรูปแบบของการดูดซับที่มีแรงดึงดูดที่อ่อนระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ แต่แรงดึงดูดระหว่างตัวถูกดูดซับด้วยกันมีค่อนข้างมาก จากกรณีนี้จะทำให้เกิดการรวมตัวกันของตัวถูกดูดซับก่อนที่การดูดซับชั้นแรกจะเสร็จสมบูรณ์ ตัวอย่างการดูดซับของไอโซเทอมแบบที่ 3 คือ การดูดซับของไอน้ำบนผิวถ่านที่ไม่มีรูพรุน

- <u>ไอโซเทอมชนิดที่ 4</u>

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

- <u>ไอโซเทอมชนิดที่ 5</u>

จะพบในสารที่มีแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของแก๊สกับผิวของของแข็งน้อย มีลักษณะคล้ายชนิด 3 แต่ชนิด 5 จะสามารถเกิดการควบแน่นในรูพรุนได้สำหรับรูพรุนที่มีขนาดในช่วงเดียวกับชนิด 4 ตัวอย่างเช่น การดูดซับไอน้ำ (water vapor) บนถ่านหิน ที่อุณหภูมิ 373 องศาเคลวิน สำหรับไอโซ-เทอมชนิด 3 และชนิด 5 นี้จะคำนวณหาพื้นที่ผิวได้ยากเนื่องจากชั้นการดูดซับชั้นที่ 2 จะถูกสร้างขึ้นก่อนที่ชั้นแรกจะเสร็จสมบูรณ์

- <u>การคำนวณพื้นที่ผิวโดยสมการแลงเมียร์</u> (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

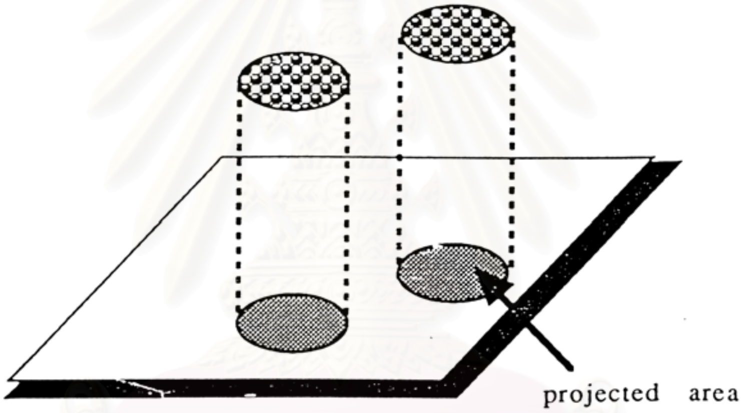
$$S = V_m L\sigma$$

ซึ่ง S คือ พื้นที่ผิว (m^2/g)

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

σ คือ พื้นที่ฉายเงาของโมเลกุลตัวถูกดูดซับ (m^2 $molecule^{-1}$) แสดงดังรูปที่ 2.9

สมการดังกล่าวมีประโยชน์มากที่ได้จากไอโซเทอม อย่างไรก็ตามสมการแลงเมียร์ซึ่งมีสมมุติฐานดังกล่าวอาจไม่เหมาะสมกับตัวดูดซับบางชนิด



รูปที่ 2.9 พื้นที่ฉายเงาของโมเลกุลตัวถูกดูดซับบนผิวของตัวดูดซับ [5]

- การคำนวณพื้นที่ผิวโดยวิธีบีอีที (BET)

เนื่องจากแรงในการเกิดการดูดซับทางกายภาพ จะคล้ายกับแรงในการเกิดการควบแน่น (liquefaction) คือเป็นแรงวานเดอร์วาลล์ (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, ΔH_{l}) ส่วนชั้นการดูดซับชั้นที่สองขึ้นไปจะใช้พลังงานการควบแน่น (heat of liquefaction, ΔH_{L}) ซึ่งสมการโดยทั่วไปของบีอี-ที (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 ≈ exp [(ΔH_L - ΔH_l) / (RT)]

เมื่อพลอตค่า {P / [V(P$_o$ – P)]} กับ P/P_O จะได้เส้นตรงความชัน [(C-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 = ∞

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 $[(C-1) / V_mC]$

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 ซี-โอไลต์ จะได้กราฟบีอีทีเป็นเส้นตรงที่ความดันสัมพัทธ์ต่ำประมาณ 0.01 หรือน้อยกว่านั้น ถ้ายอมรับความผิดพลาดเล็กน้อย เส้นกราฟบีอีทีสามารถประมาณเป็นเส้นตรงที่ผ่านจุดเริ่มต้น (origin) และคำนวณ V_m ได้จากการวัดปริมาตรของแก๊สที่ถูกดูดซับที่ความดันสัมพัทธ์ระหว่าง 0.2 ถึง 0.3ได้

2.8 <u>ประโยชน์ของถ่านกัมมันต์</u> [20, 21]

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

- อุตสาหกรรมน้ำตาล ใช้ถ่านกัมมันต์เพื่อฟอกสีและทำให้น้ำตาลดิบบริสุทธิ์ขึ้น

- อุตสาหกรรมน้ำมันและไขมันสำหรับบริโภค นอกจากใช้ในการฟอกสีแล้ว ยังใช้ในการแยกเอาสบู่และเปอร์ออกไซด์ออกจากน้ำมันและไขมันได้ด้วย
- อุตสาหกรรมอาหาร ใช้ถ่านกัมมันต์เพื่อดูดกลิ่นและฟอกสีของผลิตภัณฑ์อาหาร ซึ่งดีกว่าการใช้สารเคมีชนิดอื่นเพราะไม่เป็นอันตรายและไม่เกิดปฏิกิริยากับผลิตภัณฑ์อาหาร
- อุตสาหกรรมเครื่องดื่มแอลกอฮอล์ เช่น ไวน์ วิสกี้ มักใช้ถ่านกัมมันต์เพื่อดูดกลิ่นที่ไม่ต้องการทำให้เครื่องดื่มที่ได้มีรสชาติดีขึ้น
- อุตสาหกรรมเคมีและยา ถ่านกัมมันต์ใช้ในการผลิตสารเคมีและยาหลายชนิด
- อุตสาหกรรมการทำน้ำให้บริสุทธ์ โดยใช้เป็นตัวดูดกลิ่นและฟอกสี
- อุตสาหกรรมการแยกสารที่ต้องการ เช่น การแยกทองหลังการสกัดจากแร่ด้วยวิธีไซยาไนด์ การแยกไอโอดีนออกจากน้ำเกลือที่เกิดในหลุมน้ำมัน (petroleum oil – well brines) ตลอดจนการผลิตวิตามินและฮอร์โมนอีกหลายชนิด
- ขบวนการที่มีการใช้สารเร่ง (Catalytic Process) ถ่านจะทำหน้าที่เป็นตัวพาสารเร่ง (catalyst carrier) ในปฏิกิริยาที่มีการใช้สารเร่งหลายชนิด รวมทั้งทำหน้าที่เป็นตัวกระตุ้นการทำงานของตัวเร่งให้ดีขึ้นด้วย

2. <u>ประเภทที่ใช้ในการดูดแก๊สและไอ</u> (Gas Phase Carbon) ใช้ในอุตสาหกรรมต่อไปนี้

- อุตสาหกรรมทำหน้ากากป้องกันแก๊สพิษ ทั้งที่ใช้กันในการทหารและที่ใช้กันทั่วไป ทั้งนี้เพราะถ่านกัมมันต์สามารถดูดซับแก๊สพิษและไอของสารอินทรีย์ได้
- การนำไอระเหยของตัวทำละลายที่ใช้แล้วกลับมาใช้ใหม่ ถ่านกัมมันต์จะดูดซับไอระเหยเหล่านั้นที่อุณหภูมิห้อง และจะคายออกที่ความดันของไอระเหยต่ำๆ
- อุตสาหกรรมปรับอากาศ โดยถ่านกัมมันต์จะดูดแก๊สพิษในอากาศต่างๆ เช่น คาร์บอนไดออกไซด์ ไฮโดรเจน ไนโตรเจน และอะเซทิลีน
- อุตสาหกรรมบุหรี่ โดยใช้ถ่านกัมมันต์เป็นก้นกรองบุหรี่

2.9 ไม้ยูคาลิปตัส (*Eucalyptus camaldulensis* Dehnh.) [22, 23]

ไม้ยูคาลิปตัส มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh. อยู่ในวงศ์ Myrtaceae มีชื่อสามัญแตกต่างกันไปเช่น red river gum, red gum, murray red gum และ river gum เป็นไม้ขนาดกลางถึงขนาดใหญ่ มีความสูง 24-26 เมตร หรืออาจจะสูงถึง 50 เมตรก็มี ถ้าขึ้น

ในที่โล่งจะมีเรือนยอดโปร่งบาง แผ่กว้าง กล้าไม้และใบอ่อนเกิดเป็นคู่ตรงข้าม 3-4 คู่แล้วเรียงสลับกัน ลักษณะใบเรียวยาว ใบอ่อนมีสีเขียวปนเทา มีขน ใบแก่เรียงสลับกัน ลักษณะใบเป็นรูปหอก มีขนาดตั้งแต่ 12-2.5 × 0.3-0.8 นิ้ว ใบสีเขียวอ่อนอมสีเทาใบบางและห้อยลง เส้นใบมองเห็นได้ชัด เปลือกมีลักษณะเรียบ เป็นมัน สีเทาสลับขาวและน้ำตาลแดงเป็นบางแห่งสลับกันยาวตามลำดับ เปลือกนอกจะแตกร่อนเป็นแผ่นออกจากผิวของลำต้นเมื่อถึงฤดูแต่ละปี เปลือกนอกหนาประมาณ 0.5 เซนติเมตร เมล็ดมีขนาดประมาณ 1 มิลลิเมตร สีเหลือง เมล็ดจำนวน 1 กรัม มีเมล็ดประมาณ 773 เมล็ด ช่อดอกเกิดตรงระหว่างกิ่งกับใบ มีก้านดอกเรียวยาว ก้านดอกย้อย ตาดอกมีกลีบรองดอกที่มีโคนกลีบติดกันแบบรูปถ้วย ดอกมีสีขาวเหลือง และมีลักษณะครึ่งวงกลมหรือรูปถ้วย มีขนาด 0.2-0.3 × 0.2-0.3 นิ้ว ผิวนอกแข็ง เมื่อยังอ่อนอยู่จะมีสีเขียวและจะเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาล เมื่อผลแก่ฝาจะแยกออกทำให้เมล็ดที่อยู่ภายในร่วงหล่นออกมา ลักษณะเนื้อไม้มีสีน้ำตาลอ่อน น้ำตาลแดง กระพี้และแก่นสีต่างกัน เนื้อไม้ค่อนข้างละเอียด เสี้ยนสน (interlocked grain) มีความถ่วงจำเพาะประมาณ 0.9-1.0

ไม้ยูคาลิปตัส คามาลดูเลนซิส จัดว่าเป็นไม้โตเร็วชนิดหนึ่งที่นิยมปลูก เพราะมีผลตอบแทนทางเศรษฐกิจได้รวดเร็ว และมีลักษณะการใช้ประโยชน์หลายๆอย่าง ได้รับความนิยมและปลูกกันแพร่หลายกระจายตามภูมิภาคต่างๆของโลก เช่น ในออสเตรเลีย จีน แองโกลา บราซิล พม่า โค-ลัมเบีย เอธิโอเปีย ไลบีเรีย มาลาวี มาลากัลการ์ ไนเจอร์ ไนจีเรีย ปากีสถาน ศรีลังกา ซูดาน เวียดนาม อินเดีย สเปน โปรตุเกส อาร์เจนตินา สหรัฐอเมริกา และประเทศอื่นๆอีกมากมาย โดยปลูกเป็นสวนป่า ในพื้นที่แห้งแล้ง บางประเทศปลูกไว้ริมสองข้างทาง นำมาใช้ประโยชน์ด้านพลังงาน ไม้ใช้สอย และเพื่ออุตสาหกรรม ซึ่งการปลูกไม้ชนิดนี้สามารถขยายพันธุ์ได้ดี เติบโตเร็วในเกือบทุกประเทศ เป็นไม้สำคัญชนิดหนึ่งที่แก้ปัญหาการขาดแคลนไม้เพื่อทำเป็นเชื้อเพลิงได้ นอกจากนั้นยังเป็นแนวป้องกันลมและปกคลุมดิน เป็นที่อยู่อาศัยของสัตว์ จากการที่ได้รับความนิยมปลูกกันกว้างขวาง ทำให้เกิดปัญหาการบุกรุกพื้นป่า พื้นที่การเกษตร นำมาปลูกยูคาลิปตัสคามาลดูเลนซิส ก่อให้เกิดผลกระทบต้องสิ่งแวดล้อม ทำให้เกิดการต่อต้านการปลูกยูคาลิปตัสคามาลดูเลนซิส โดยมีเหตุผลต่างๆเช่น เป็นพืชใช้น้ำมาก ทำให้ดินสูญเสียธาตุอาหาร ทำให้มีผลกระทบต่อการเจริญเติบโตของพืชข้างเคียง ทำลายสภาพแวดล้อมเป็นต้น เหตุผลดังกล่าวนี้ได้มีนักวิชาการทำการศึกษาและชี้แจงให้เห็นข้อเท็จจริงแล้ว และถ้าหากทำการปลูกไม้ยูคาลิปตัสคามาลดูเลนซิส ในพื้นที่ดินทราม พื้นที่บริเวณน้ำท่วม พื้นที่ดินเค็ม พื้นที่ดินเปรี้ยว พื้นที่หินปูนเป็นต้น จะให้คุณประโยชน์มากกว่าการปลูกพืชชนิดอื่น เพราะสภาพพื้นที่ดังกล่าวไม้ยูคาลิปตัสคามาลดูเลนซิส สามารถเจริญเติบโตได้ดี

สำหรับในประเทศไทยไม้ยูคาลิปตัสคามาลดูเลนซิส ได้รับการสนับสนุนและได้รับความนิยมนำมาปลูกเป็นสวนป่า ทั้งภาครัฐบาลและภาคเอกชน กระจายทั่วทุกภาคของประเทศ เช่นโครงการปรับปรุงป่าสงวนแห่งชาติที่ 4 อำเภอกันทรารมย์ จังหวัดศรีษะเกษ ของกรมป่าไม้ สวนป่าลาดกระทิง จังหวัดฉะเชิงเทรา ของบริษัทไม้อัดไทย สวนป่าพิบูลมังสาหาร จังหวัดอุบลราชธานี สวนป่าคลองท่อมจังหวัดกระบี่ ขององค์การอุตสาหกรรมป่าไม้ สวนป่ากิตติจังหวัดฉะเชิงเทราของบริษัทเกษตรรุ่ง-เรืองจำกัด สวนป่าของบริษัท สหวิริยาจำกัด ในจังหวัด ราชบุรีและจังหวัดปราจีนบุรี นอกจากนั้นยังมีการปลูกเป็นรายย่อย รวมถึงการปลูกป่าชุมชน การปลูกไม้ใช้สอยตามหัวไร่ปลายนา เป็นต้น

- <u>การใช้ประโยชน์</u>

ไม้ยูคาลิปตัสคามาลดูเลนซิส จัดว่าเป็นไม้เนื้อแข็งขนาดใหญ่พอที่จะใช้ประโยชน์มากกว่าที่ใช้ทำไม้ฟืนและเผาถ่านเพียงอย่างเดียว เมื่ออายุครบ 5 ปีโดยประมาณ มากกว่า 25 เปอร์เซ็นต์ของจำนวนที่ปลูกทั้งหมด จะมีเส้นผ่านศูนย์กลางที่ความสูงระดับอกมากกว่า 15 เซนติเมตร ซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลายด้านด้วยกันดังนี้ ด้านพลังงาน ใช้ทำฟืนในครัวเรือน ทำฟืนในอุตสาหกรรม เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้า ทำถ่าน เป็นต้น ด้านอุตสาหกรรมที่ใช้ไม้ทำผลิตภัณฑ์ใช้ทำเยื่อกระดาษและกระดาษ ไม้อัดแผ่นเรียบ ไม้บาง เป็นต้น ด้านการก่อสร้าง ใช้ทำเสาบ้านเสาไฟฟ้า ทำพื้นบ้าน นอกจากนั้นยังใช้ทำเครื่องมือเกษตร ใช้เป็นอาหาร ทำน้ำมันระเหยจากใบดอกใช้เลี้ยงผึ้ง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.10งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.10.1 งานวิจัยในประเทศ

จักริน นิธิจันทร์ (2537) [20] ได้นำพีตจากพรุบาเจาะ จังหวัดนราธิวาส นำมาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์โดยการคาร์บอไนเซชั่นและกระตุ้นด้วยไอน้ำในฟลูอิไดซ์เบด โดยแบ่งการทดลองเป็น 2 ขั้นตอน ขั้นแรก คาร์บอไนซ์ในฟลูอิไดซ์เบด ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 150 มิลลิเมตร ความสูง 1,100 มิลลิเมตร มีตัวแปรที่ศึกษาคือ ความเร็วอากาศ 1.2-2.1 เท่าของความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิไดเซ-ชั่น หรือ 0.94-1.64 เมตรต่อวินาที (ที่ 200 องศาเซลเซียส) เวลาในการคาร์บอไนซ์ 3-8 นาที พบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการคาร์บอไนซ์ในฟลูอิไดซ์เบด คือ ขนาดของเมล็ดพีต 0.5-2.0 มิลลิเมตร ความเร็วอากาศ 0.94 เมตรต่อวินาที หรือ 1.2 เท่าของความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิไดเซชั่น ปริมาณการป้อนเม็ดพีต 2.0 กิโลกรัม อุณหภูมิเริ่มต้นของเบด 400 องศาเซลเซียส เวลาในการคาร์-บอไนซ์ 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 พบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการกระตุ้นด้วยไอน้ำในฟลูอิไดซ์เบด 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 ค่าการดูดซับเมทธิลีนบลู 354.5 มิลลิกรัมต่อกรัม

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บุญชัย ตระกูลมหชัย (2537) [8] 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 ค่าการดูดซับเมทธิลีนบลู 250 ถึง 350 มิลลิกรัมต่อกรัม ค่าเถ้าร้อยละ 10 – 15 โดยน้ำหนัก ค่าร้อยละของผลิตภัณฑ์ที่ได้ 30 – 40

พงศธร โค้วคชาภรณ์ (2538) [21] ได้ทำการเตรียมถ่านกัมมันต์จากซังข้าวโพดและศึกษาสมบัติรวมทั้งการใช้งานของถ่านกัมมันต์ที่ได้

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

จากผลการทดลองพบว่า ซังข้าวโพดสามารถที่จะเปลี่ยนเป็นถ่านกัมมันต์ได้เมื่อถูกกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ ปริมาณร้อยละของผลผลิตและสมบัติขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ เวลา และ อัตราส่วนของวัตถุดิบต่อซิงค์คลอไรด์ ที่อัตราส่วน 1:2 อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เวลาการเผา 3 ชั่วโมง มีปริมาณร้อยละของผลผลิตคือ 62.82 ค่าไอโอดีนอยู่ในเกณฑ์ 800-900 มิลลิกรัมต่อกรัม ค่าการฟอกสีเมทิลีนบลู 120-180 มิลลิกรัมต่อกรัม พื้นที่ผิว 1,000 ตารางเมตรต่อกรัม ประสิทธิภาพการฟอกสีปานกลาง สำหรับอุณหภูมิการกระตุ้น 600 และ 800 องศาเซลเซียส จะได้ถ่านซึ่งมีสมบัติดีกว่าถ่านที่ถูกกระตุ้นที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส แต่ปริมาณร้อยละของผลผลิตต่ำกว่าที่ 400 องศาเซลเซียส การเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส จะสิ้นเปลืองเวลาและพลังงานมากกว่าที่ 600 องศาเซลเซียส เมื่อกระตุ้นถ่านด้วยอุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส อัตราส่วนของวัตถุดิบต่อซิงค์คลอไรด์ 1:4 ถ่านกัมมันต์ที่ได้จะมีค่าไอโอดีน 960-1,075 มิลลิกรัมต่อกรัม ค่าการฟอกสีเมทิลีนบูล 230-300 มิลลิกรัมต่อกรัม พื้นที่ผิว 1,140-1,300 ตารางเมตรต่อกรัม ประสิทธิภาพการฟอกสีดีกว่าที่ 400 องศาเซลเซียส มีปริมาณร้อยละผลผลิต 52.41

นิชชรี นิลนนท์ (2541) [24] ศึกษาถึงการผลิตถ่านกัมมันต์จากไม้โกงกาง โดยกระตุ้นด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งกับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ พบว่าภาวะที่เหมาะสมในการคาร์บอไนซ์คือที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ได้ผลิตภัณฑ์เป็นถ่านไม้ร้อยละ 38.07 มีปริมาณคาร์บอนคงตัวร้อยละ 71.44 สารระเหยร้อยละ 23.02 และเถ้าร้อยละ 5.54 จากนั้นจึงนำถ่านชาร์ที่ได้ไปทำการกระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำร้อนยวดยิ่ง โดยตัวแปรที่ศึกษาคือ อุณหภูมิ เวลา และขนาดอนุภาค พบว่าภาวะที่เหมะสมในการกระตุ้นคือ 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 ค่าการดูดซับเมทธิลีนบลู 254.73 มิลลิกรัมต่อกรัม และเมื่อนำถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้จากภาวะที่เหมาะสมนี้ไปทำการดูดซับไดโครเมตไอออน พบว่ามีความจุในการดูดซับ 66.23 และ 59.52 มิลลิกรัมต่อกรัม ที่ pH = 1 และ pH= 2 ตามลำดับ

วราวุฒิ ประชาศิริสกุล (2541) [25] ได้ทำการผลิตถ่านกัมมันต์จากกะลาปาล์มน้ำมัน โดยทำการกระตุ้นโดยใช้พลังงานไมโครเวฟ 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 และไอน้ำอิ่มตัวยิ่งยวด 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 ความสามารถในการดูดซับเมทธิลีนบลู 174.94±4.59 มิลลิกรัมต่อกรัม ค่าความหนาแน่นปรากฏ 0.524±0.03 กรัมต่อลูกบาศก์เซ็นติเมตร ค่าความเป็นกรดด่าง 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 ลูกบาศก์เซ็นติเมตรต่อกรัม ร้อยละของเถ้า 4.28±0.12 และร้อยละของสารระเหย 5.90±0.05

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.10.2 งานวิจัยต่างประเทศ

Renan Arriagada and others (1994) [26] ทำการผลิตถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัส *Eucalyptus globulus* ด้วยวิธีการกระตุ้นทางกายภาพ คือใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำร้อนยวดยิ่งเป็นสารกระตุ้น ซึ่งจะศึกษาถึงผลของเวลาและอุณหภูมิในการกระตุ้น เพื่อที่จะทำการเปรียบเทียบสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากสารกระตุ้นที่เป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำอิ่มตัวยิ่งยวดและหาภาวะที่เหมาะสม

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

ตารางที่ 2.2 แสดงสมบัติของถ่านกัมมันต์ของ Arriagada [26]

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 จากผลการทดลองจะเห็นความแตกต่างของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากคาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำอิ่มตัวยิ่งยวด โดยพบว่าถ่านกัมมันต์ที่ได้จากไอน้ำร้อนยวดยิ่งมีค่ารูพรุนขนาดกลางและรูพรุนขนาดใหญ่ที่สูงกว่า แต่ในขณะเดียวกันก็มีรูพรุนขนาดเล็กที่สูงด้วย ซึ่งพบว่าไอน้ำอิ่มตัวยิ่งยวดจะผลิตถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวที่สูงกว่าซึ่งดูได้จากผลการทดลอง ทั้งนี้เนื่องจากความว่องไวของไอน้ำที่มีความว่องไวในการทำปฏิกิริยาที่สูงกว่านั่นเอง ซึ่งสามารถดูผลการวิจัยที่สอดคล้องกันจากงานวิจัยอื่นได้

Nestor Tancredi and others (1996) [27] งานวิจัยนี้เป็นการผลิตถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคา-ลิปตัส *Eucalyptus grandis* จากประเทศอุรุกวัย โดยลักษณะของวัตถุดิบที่ใช้จะเป็นขี้เลื่อยของไม้ยูคาลิปตัส โดยทำการกระตุ้นด้วยวิธีทางกายภาพ ซึ่งใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ไอน้ำอิ่มตัวยิ่งยวด และแก๊สผสมระหว่างแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และออกซิเจน

ขั้นตอนการทดลองนั้นเริ่มโดยทำการคาร์บอไนซ์โดยให้มีแก๊สไนโตรเจนไหลผ่านในอัตรา 100 มิลลิลิตรต่อนาที ซึ่งให้อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที เมื่อทำการกระตุ้นจะให้อัตราการไหลของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ หรือ แก๊สผสมระหว่างแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และออกซิเจนที่อัตราการไหล 200 มิลลิลิตรต่อนาที ส่วนของไอน้ำนั้นมีอัตราการไหล 0.144 มิลลิลิตรต่อนาที

ผลการทดลองในส่วนการคาร์บอไนซ์พบว่าที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส จะให้ค่าพื้นที่ผิวของถ่านชาร์ที่มีค่าสูงถึง 490 ตารางเมตรต่อกรัม ซึ่งเหมาะที่จะนำไปทำการกระตุ้นต่อไป Tancredi พบว่าถ่านชาร์จากไม้ยูคาลิปตัสจะให้รูพรุนขนาดใหญ่มากกว่าถ่านไม้ชนิดอื่นๆ

เมื่อทำการกระตุ้นโดยใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ที่ค่าร้อยละผลิตภัณฑ์เท่ากับ 53 จะให้ค่าพื้นที่ผิวถึง 1,190 ตารางเมตรต่อกรัม ค่าปริมาตรรูพรุนขนาดกลาง 0.26 ตารางเซ็นติเมตรต่อกรัม ค่าปริมาตรรูพรุนขนาดใหญ่ 1.17 ตารางเซ็นติเมตรต่อกรัม จะเห็นได้ว่าค่าที่ได้ของรูพรุนขนาดกลางและรูพรุนขนาดใหญ่นั้นค่อนข้างสูง จึงเหมาะกับการนำไปใช้ในการดูดซับสภาวะของเหลว เช่นใช้ในกระบวนการบำบัดน้ำเสียและกระบวนการผลิตน้ำดื่ม ซึ่งถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการใช้ไม้ยูคาลิปตัสเป็นวัตถุดิบ จะให้ค่ารูพรุนขนาดกลางและขนาดใหญ่มากกว่าวัตถุดิบที่มีเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบชนิดอื่นๆ และจากการที่ใช้แก๊สผสมเพิ่มเข้าไปในการกระตุ้นวัตถุดิบคือแก๊สออกซิเจนจะทำให้ได้ปฏิกิริยาที่เกิดเร็วขึ้น ซึ่งจะใช้เวลาในการกระตุ้นลดลง โดยจะให้ค่าปริมาตรรูพรุนขนาดเล็กและปริมาตรรูพรุนขนาดใหญ่มากกว่าที่ใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์กระตุ้นเพียงชนิดเดียว แต่ปริมาตรรูพรุนขนาดกลาง

ไม่มีความแตกต่างระหว่างการกระตุ้นทั้งสองแบบ เมื่อทำการกระตุ้นโดยใช้ไอน้ำเป็นสารกระตุ้น ซพบว่าไอน้ำนั้นมีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาดีกว่าแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากไม้ยูคาลิปตัส เหมาะที่จะนำไปใช้กับการดูดซับที่เป็นสภาวะของเหลวคือกระบวนการบำบัดน้ำเสียและกระบวนการผลิตน้ำดื่ม

Mittchell M Johns and others (1999) [14] ได้ศึกษาการผลิตถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ดจากเปลือกลูกนัท โดยวิธีการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก, แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และ ไอน้ำ และเลือกถ่านกัมมันต์บางส่วนที่ได้จากการกระตุ้นด้วยไอน้ำ และ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ มาทำการออกซิไดซ์เพื่อเพิ่มความสามารถในการดูดซับไอออนของโลหะ

ภาวะในการทดลองนั้น ใช้ภาวะที่ 750 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมงโดยผ่านแก๊สไน-โตรเจนเข้ามาด้วย ซึ่งถ่านชาร์ที่ได้ถูกนำมากระตุ้นด้วยไอน้ำโดยมีอัตราการไหล 61-157 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง ที่เวลา 3.6-6.5 ชั่วโมง และเมื่อกระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ใช้สภาวะที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง เมื่อกระตุ้นด้วยอากาศใช้อัตรการไหล 6 ลูกบาศก์ลิตรต่อชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 370,410 องศาเซลเซียส เวลา 5.5 ชั่วโมง

จากตารางที่ 2.3 เราจะสังเกตค่าเปอร์เซ็นต์ burn –off ได้ว่าค่าจะมีค่าเพิ่มขึ่นเรื่อยๆ ซึ่งในขณะที่เพิ่มขึ้นนั้น แนวโน้มปริมาตรรูพรุน (Pore volume),อัตราส่วนของมีโซพอร์และไมโครพอร์ (Meso / Micro), ค่าพื้นที่ผิว (BET surface area) จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามเปอร์เซ็นต์ burn –off เช่นกัน โดยสามารถดูแนวโน้มค่าต่างๆที่เพิ่มตามเปอร์เซ็นต์ burn –off จากตารางที่ 2.3 ถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นด้วยแก็สคาร์บอนไดออกไซด์ ก็มีผลลักษณะเช่นเดียวกับการกระตุ้นโดยใช้ไอน้ำ ซึ่งผลการวิเคราะห์ออกมาเป็นไปในแนวโน้มเดียวกัน เหตุผลจากตารางที่ 2.3 ในส่วนของการกระตุ้นทางกายภาพ คือการกระตุ้นด้วยไอน้ำและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ คือเมื่อเปอร์เซ็นต์ burn –off เพิ่มมากขึ้นจะทำให้สารระเหยต่างๆนั้นระเหยออกไปอย่างรวดเร็ว เนื่องจากการแพร่เข้าไปในรูพรุนของสารกระตุ้นเข้าไปไล่พวกสารระเหย และพวกน้ำมันทาร์ โดยสารที่ทำให้รูพรุนต่างๆ เกิดการอุดตันโดยอาจจะเป็นพวก heteroatoms และพวก minerals ต่างๆ และสารกระตุ้นจะเข้าไปทำปฏิกิริยา กับผิวถ่าน จึงมีรูพรุนใหม่บางส่วนเกิดขึ้น จากสาเหตุนี้จึงทำให้โครงสร้างรูพรุนซึ่งมีความพรุนมากขึ้นของถ่านทำให้มีพื้นที่ผิวมากขึ้น ปริมาตรรูพรุนมากขึ้น

ตารางที่ 2.3 ผลของการกระตุ้นถ่านกัมมันต์ที่ได้จากเปลือกลูกนัท [14]

Sample ID Activation type	Activation Burn-off(%)	Pore Volume <96 pore diameter (cm^3g^{-1})	Meso/Micro(pore) Volume ratio	BET surface area (m^2g^{-1})
Steam-activated				
S1	24.5	0.377	0.480	618
S2	24.8	0.389	0.652	654
S3	28.3	0.490	0.705	747
S4	29.0	0.433	0.570	688
S5	32.8	0.473	0.701	721
S6	37.1	0.570	0.831	842
S7	38.7	0.555	0.792	828
S8	40.1	0.536	0.652	821
S9	41.1	0.618	0.887	894
S10	49.0	0.764	1.234	993
S11	50.0	0.687	1.278	872
S12	51.0	0.756	1.196	991
S13	63.0	0.868	1.173	1149
CO_2 – Activated				
C1	15.0	0.278	0.257	500
C2	26.0	0.413	0.437	680
C3	39.0	0.525	0.428	877
C4	51.2	0.490	0.405	826
H_3PO_4 Activated				
P1	-	1.099	0.975	1561

Mameri and others (2000) [28] งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการผลิตถ่านกัมมันต์จากเศษมะกอกบดที่ได้จากประเทศแอลจีเรีย ซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร นำมาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์โดยทำการกระตุ้นด้วยไอน้ำ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และอากาศ ซึ่งจะผลิตโดยการนำเอาวัตถุดิบมาทำการคาร์บอไนซ์ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เวลา 2 ชั่วโมง โดยจะให้มีการไหลผ่านของแก๊สไนโตรเจนด้วยที่อัตรา 80 มิลลิลิตรต่อนาที จากนั้นจึงนำถ่านชาร์มาทำการกระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และอากาศที่อัตราการไหล 20 มิลลิลิตรต่อนาที ที่อุณหภูมิต่างๆกันคือ 800 – 950 องศาเซลเซียส และที่เวลาช่วง 30 – 240 นาที

จากสภาวะของการทดลองจะมีข้อจำกัดของเวลาในกรณีการกระตุ้นด้วยอากาศ เนื่องจากจะเกิดปฏิกิริยาอย่างรวดเร็ว จึงจำกัดเวลาไว้ที่ 30 นาที ผลการทดลองที่ได้แสดงในตารางที่ 2.4

<u>ตารางที่</u> 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(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 จากการ

ทดลองพบว่าไอน้ำมีประสิทธิภาพดีที่สุดในการกระตุ้น ซึ่งเวลาที่เหมาะสมในการกระตุ้นคือประมาณ 2 ชั่วโมง

Jiaan Xia and others (1998) [29] งานวิจัยนี้ได้พยายามผลิตถ่านกัมมันต์จากชานอ้อยซึ่งเป็นการใช้ประโยชน์จากวัสดุเหลือทิ้งที่เกิดจากโรงงานน้ำตาลด้วยวิธีที่แตกต่างกัน โดยในขั้นตอนแรกนั้นทำการคาร์บอไนซ์ที่อุณหภูมิช่วง 800 – 1000 องศาเซลเซียส ซึ่งที่ช่วงนี้จะให้ค่าพื้นที่ผิวอยู่ในช่วง 405 – 600 ตารางเมตรต่อกรัม และมีปริมาตรรูพรุน 0.2 – 0.3 มิลลิกรัมต่อกรัม จากนั้นจึงนำถ่านชาร์ที่ได้มาทำการกระตุ้นโดยจะนำถ่านชาร์มาอัดเป็นก้อน ซึ่งตัวแปรที่ศึกษาในช่วงการกระตุ้นคืออุณหภูมิและปริมาณสารกระตุ้น พบว่าการกระตุ้นที่ใช้สภาวะที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมง โดยให้อัตรการป้อนไอน้ำที่ 3 กรัมของไอน้ำต่อ 1 กรัมของชานอ้อย จะสามารถให้ถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวสูงถึง 878 ตารางเมตรต่อกรัม และมีค่าความแข็ง 2.5×10^{-3} กิโลกรัมต่อตารางเซ็นติเมตร

Man S. Tam and others (1999) [30] ได้ทำการผลิตถ่านกัมมันต์โดยในงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาถึงผลของตัวแปรที่สำคัญคือ อุณหภูมิซึ่งจะทำการผลิตที่ช่วงอุณหภูมิต่ำ ใช้อากาศเป็นสารกระตุ้น และจะดูผลของถ่านชาร์ที่ได้จากขั้นตอนการคาร์บอไนซ์ ซึ่งจะทำการผลิตโดยใช้วิธีใหม่คือจะเป็นกระบวนการที่มี 3 ขั้นตอน จะสามารถผลิตถ่านกัมมันต์ที่มีค่าร้อยละของผลิตภัณฑ์ที่สูง และจะให้ค่าพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากสารชีวมวลในช่วงปานกลาง ขั้นตอนแรกคือ ทำการคาร์บอไนซ์ที่อุณหภูมิสูงโดยให้ความร้อนเริ่มจากอุณหภูมิที่ต่ำก่อนแล้วเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้นเรื่อยๆ ขั้นที่สอง ทำการออกซิไดซ์ด้วยอากาศโดยตั้งอัตราการให้ความร้อนตั้งแต่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียสไปจนถึงอุณหภูมิ 660 องศาเซลเซียส ขั้นที่สาม ทำการให้ความร้อนต่อที่อุณหภูมิสูงแต่ในเครื่องปฏิกรณ์นั้นจะเป็นระบบที่เฉื่อยซึ่งอาจทำโดยให้มีการไหลผ่านของแก๊สไนโตรเจนด้วยวิธีการดังกล่าวจะสามารถผลิตถ่านกัมมันต์ให้มีพื้นที่ผิวสูงถึง 1000 ตารางเมตรต่อกรัม และให้ร้อยละของผลิตภัณฑ์มากกว่า 15 เปอร์เซ็นต์ (เทียบกับวัตถุดิบเริ่มต้น)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3
การดำเนินงานทดลอง

3.1 รูปแบบการศึกษา

งานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยเชิงทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ เพื่อศึกษาหาภาวะที่เหมาะสมในการผลิตถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัส *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh. โดยการกระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำร้อนยวดยิ่ง ในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง (fixed bed) เพื่อศึกษาสมบัติและประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้ โดยอาจนำมาเป็นข้อมูลสำหรับการผลิตหรือใช้ประโยชน์ในกรณีศึกษาต่อและเป็นข้อมูลในระดับขยายสเกลต่อไป

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

1. เตาเผาไฟฟ้า (Muffle furnace) ชนิด ESF 12/23 ยี่ห้อ Carbolite
2. เดซิเคเตอร์
3. เครื่องชั่งละเอียด
4. นาฬิกาจับเวลา
5. Tube furnace ชนิด 21100
6. ชุดวัดอัตราการไหลของแก๊ส (bubble flow)
7. ครูซิเบิลพอร์ซเลน ความจุ 20 มิลลิลิตร พร้อมฝา
8. กระดาษกรอง
9. Regulator สำหรับปรับความดันของแก๊ส
10. ตู้อบ (Oven) ยี่ห้อ WT bider
11. เครื่องเขย่าตามแนวราบ
12. เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง
13. Scanning Electron Microscope(SEM) รุ่น JSM-6400
14. เครื่องวัดพื้นที่ผิวของ Micromeritics รุ่น Flow SorbII 2300
15. ชุดกระตุ้นแบบเบดนิ่ง เป็นลักษณะเตาให้ความร้อนแบบรีทอร์ต (retort) แนวตั้ง (vertical) สามารถปรับอุณหภูมิได้สูงถึง 1200 องศาเซลเซียส ตรงส่วนกลางจะเป็นส่วน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ของเครื่องปฏิกรณ์เพื่อใส่ตัวอย่างเป็นท่อทรงกระบอกมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.02 เมตร ยาว 0.40เมตร

รูปที่3.1 แสดงชุดเครื่องมือการกระตุ้น

3.3 สารเคมี

1. กรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น (HCl)
2. โปตัสเซียมฟอสเฟต (KH_2PO_3)
3. โซเดียมฟอสเฟต (Na_2HPO_3)
4. เมทิลีนบลู

5. แป้ง (Starch)

6. โซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3)

7. โปตัสเซียมไอโอเดต (KIO_3)

8. โปตัสเซียมไอโอไดด์ (KI)

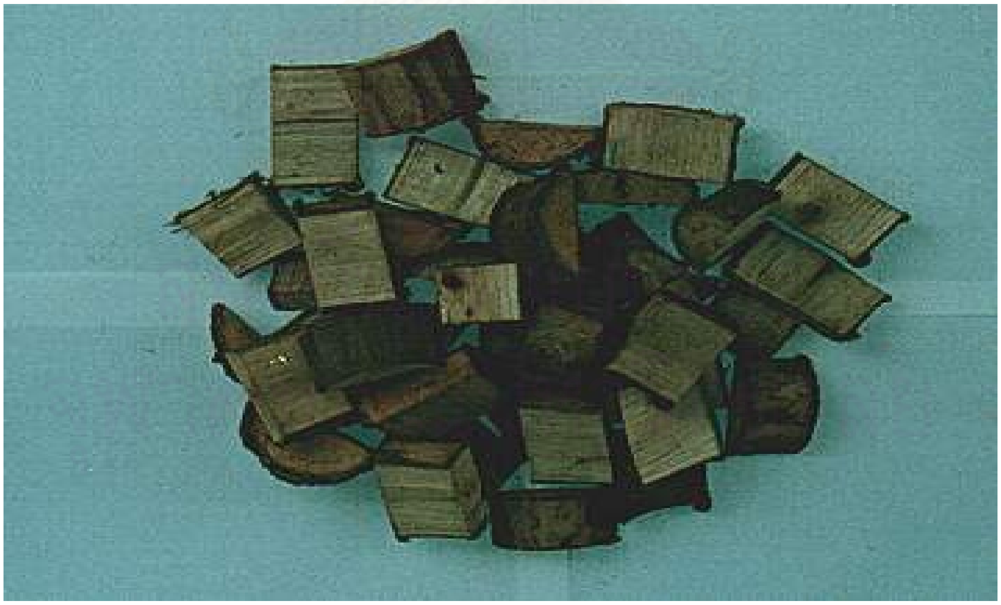
9. ไอโอดีน (I_2)

10. โซเดียมไทโอซัลเฟต ($Na_2S_2O_3.5H_2O$)

3.4 วัตถุดิบ

วัตถุดิบที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้เป็นไม้ยูคาลิปตัส *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh. โดยนำส่วนที่เป็นกิ่งมาใช้ ซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรจากการนำส่วนลำต้นไปใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตกระดาษ ซึ่งไม้ยูคาลิปตัสที่นำมาศึกษานี้มีอายุ 4-5 ปี

ลักษณะของชิ้นวัตถุดิบ จะตัดเป็นท่อนสั้นหนาประมาณ 1 นิ้ว มีลักษณะเป็นทรงกลมมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1-2 นิ้ว



<u>รูปที่</u> 3.2 ลักษณะของชิ้นไม้ยูคาลิปตัส

3.5 ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง

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

    ทำการวิเคราะห์ตาม ASTM D 1762-84

2. การคาร์บอไนซ์ตัวอย่าง
    - ทำการทดลองโดยศึกษาอุณหภูมิที่ 350 –500 องศาเซลเซียส ที่เวลา 45 – 150 นาที
    - ชั่งตัวอย่างหนักประมาณ 10 มิลลิกรัม ใส่ในถ้วยครูซิเบิล
    - เมื่ออุณหภูมิของเตา Muffle Furnace ถึงจุดที่ตั้งไว้นำถ้วยครูซิเบิลพร้อมตัวอย่างใส่ในเตาเผา เมื่อครบเวลาที่ต้องการเอาออกจากเตา ทิ้งให้เย็นในเดซิเคเตอร์ จากนั้นนำออกมาชั่งเพื่อหาปริมาณผลิตภัณฑ์ และเก็บตัวอย่างใส่ถุงและปิดปากถุงให้สนิท
    - ทำการวิเคราะห์สมบัติโดยประมาณของถ่านชาร์ตาม ASTM D 1762-84 เพื่อหาภาวะที่เหมาะสมในการคาร์บอไนซ์ของตัวอย่างไม้ยูคาลิปตัส ทั้ง 2 อายุคือ 4 ปี และ 5 ปี
    - ทำการคาร์บอไนซ์ตัวอย่างไม้ยูคาลิปตัส โดยใช้ภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากการคาร์บอไนซ์ เพื่อนำถ่านที่ได้ไปทำการกระตุ้นเพื่อหาภาวะที่เหมาะสมในการกระตุ้นต่อไป

3. การกระตุ้นถ่านชาร์

นำถ่านชาร์ที่ได้มาบดด้วยเครื่องบดหยาบและเครื่องบดละเอียด จากนั้นนำถ่านมากระตุ้น โดยศึกษาถึงตัวแปร คือ อุณหภูมิ 800 –950 องศาเซลเซียส เวลา 90 – 180 นาที ขนาดอนุภาคของถ่านชาร์ 0.3-4.75 มิลลิเมตร และศึกษาชนิดของแก๊สในการกระตุ้น โดยในการกระตุ้นมีขั้นตอนคือ

- นำตัวอย่างถ่านที่ชั่งมาประมาณ 10 กรัม ใส่ในเครื่องปฏิกรณ์

- เมื่ออุณหภูมิของเตารีทอร์ตถึงจุดที่ต้องการนำเครื่องปฏิกรณ์ที่ใส่ตัวอย่างใส่ในเตารีทอร์ต
- ในขณะทำการกระตุ้นจะให้มีการไหลของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และไอน้ำผ่านจากด้านล่างสู่ด้านบนของเครื่องปฏิกรณ์
- เมื่อถึงเวลาที่ต้องการนำเครื่องปฏิกรณ์ออกจากเตารีทอร์ต แล้วปล่อยให้เย็นจากนั้นนำถ่านกัมมันต์ที่ได้เก็บในที่ใส่ตัวอย่าง
- ทำการวิเคราะห์สมบัติของถ่านกัมมันต์ต่างๆดังนี้
    1. สมบัติการดูดซับไอโอดีน
    2. สมบัติการดูดซับเมทิลีนบลู
    3. ปริมาณเถ้า
    4. ความหนาแน่นเชิงปริมาตร
    5. พื้นที่ผิวรูพรุน
    6. ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็คตรอน

สามารถดูวิธีการวิเคราะห์ได้จากภาคผนวกท้ายเล่ม

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4
ผลการทดลอง

จากการดำเนินการทดลองในห้องปฏิบัติการตามที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 3 ผู้วิจัยได้นำเสนอและวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้ในรูปแบบของตารางและกราฟเรียงตามลำดับ ดังนี้

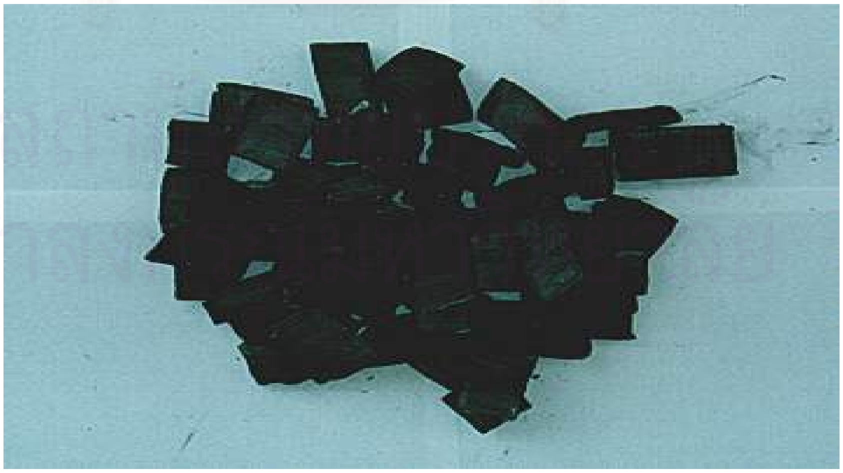
4.1 สมบัติของวัตถุดิบ

4.1.1 สมบัติเบื้องต้นของไม้ยูคาลิปตัสจากแหล่งกบินทร์บุรี (dry basis) มีดังต่อไปนี้

สมบัติ	ไม้อายุ 4 ปี	ไม้อายุ 5 ปี
เถ้า (ash, %)	0.98	1.00
สารระเหย (VM, %)	83.60	80.10
คาร์บอนคงตัว (FC, %)	15.42	18.89

4.1.2 ลักษณะถ่านไม้ยูคาลิปตัส

ไม้ยูคาลิปตัสหลังการคาร์บอไนซ์จะเป็นถ่านสีดำ มีลักษณะมันเป็นวาว เปราะ ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ไม้ยูคาลิปตัสหลังการคาร์บอไนซ์

4.2 ภาวะที่เหมาะสมในการคาร์บอไนซ์ไม้ยูคาลิปตัส

จากการวิเคราะห์สมบัติโดยประมาณ ได้แก่ ปริมาณเถ้า (ash) ปริมาณสารระเหย (VM) และปริมาณคาร์บอนคงตัว (FC) ผลที่ได้ของการคาร์บอไนซ์ ตัวอย่างไม้ยูคาลิปตัสที่อุณหภูมิ 350, 400, 450 และ 500 องศาเซลเซียส ที่เวลา 45, 60, 90, 120 และ 150 นาที ตามลำดับ โดยผลจากการวิเคราะห์ถ่านไม้ยูคาลิปตัสอายุ 4 ปี แสดงดังตารางที่ 4.1 ผลจากการวิเคราะห์ถ่านไม้ยูคาลิปตัสอายุ 5 ปี แสดงดังตารางที่ 4.2 และจากข้อมูลที่ได้นำมาสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ของผลของอุณหภูมิและผลของเวลา ดังรูปที่ 4.2 – 4.17

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าประมาณของถ่านไม้ยูคาลิปตัสอายุ 4 ปี ที่ได้จากการคาร์บอไนซ์ ณ ภาวะต่างๆ

ภาวะการเตรียมวัตถุดิบ		Y(%wt)	On dry basis		
อุณหภูมิ(C)	เวลา(min)		Ash(%wt)	VM(%wt)	FC(%wt)
350	45	28.76	2.49	30.14	67.37
	60	27.04	2.40	28.58	69.02
	90	25.32	2.41	29.11	68.48
	120	25.75	2.56	28.44	69.00
	150	22.78	2.31	28.15	69.54
400	45	26.11	2.06	32.48	65.46
	60	24.66	3.01	30.05	66.49
	90	22.87	2.72	30.34	66.94
	120	20.38	2.41	31.24	66.35
	150	20.52	2.57	29.38	68.05
450	45	23.08	3.15	21.76	75.09
	60	22.32	3.17	20.52	76.31
	90	20.71	3.12	21.06	75.82
	120	19.52	3.05	19.52	77.43
	150	19.05	3.57	18.46	77.97
500	45	23.19	2.99	20.66	76.35
	60	20.96	2.93	16.82	80.25
	90	20.14	3.50	17.30	76.97
	120	17.64	3.99	14.19	81.82
	150	17.01	4.11	14.75	81.14

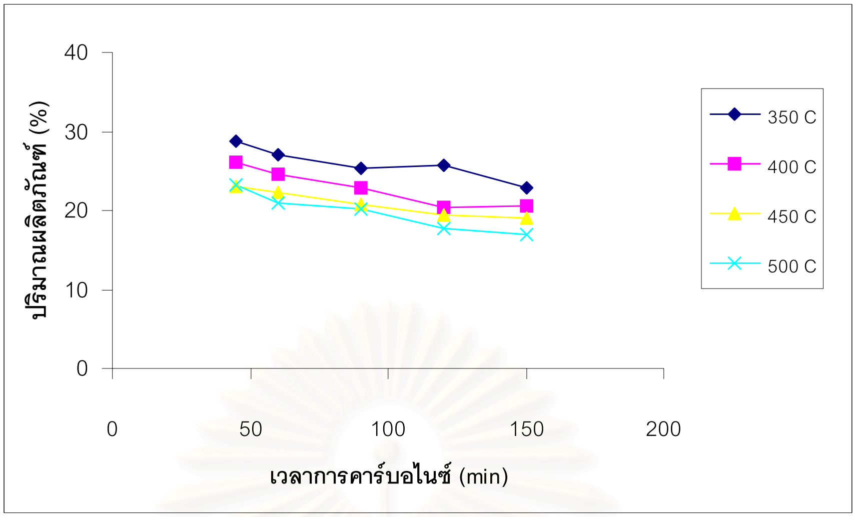
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

<u>ตารางที่</u> 4.2 แสดงค่าประมาณของถ่านไม้ยูคาลิปตัสอายุ 5 ปี ที่ได้จากการคาร์บอไนซ์ ณ ภาวะต่างๆ

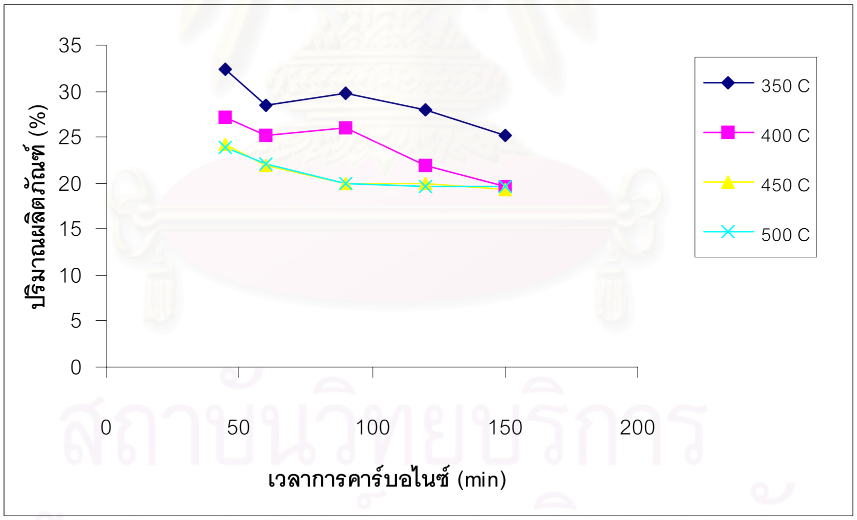
ภาวะการเตรียมวัตถุดิบ		Y(%wt)	On dry basis		
อุณหภูมิ(C)	เวลา(min)		Ash(%wt)	VM(%wt)	FC(%wt)
350	45	32.43	2.98	33.96	63.06
	60	28.42	2.65	30.51	66.84
	90	29.82	3.44	30.58	65.98
	120	27.89	2.50	30.41	67.09
	150	25.13	2.60	27.96	69.44
400	45	27.12	2.10	30.25	67.65
	60	25.21	2.91	29.58	67.51
	90	25.96	1.99	30.84	67.17
	120	21.96	2.69	28.65	68.66
	150	19.57	2.80	30.64	66.56
450	45	24.20	2.79	24.85	72.36
	60	21.96	3.06	21.57	75.37
	90	20.03	3.28	21.39	75.33
	120	20.02	3.62	19.25	77.13
	150	19.32	3.55	19.78	76.67
500	45	23.90	3.47	22.49	74.04
	60	22.08	3.53	16.15	80.32
	90	20.00	3.49	16.37	80.14
	120	19.58	3.32	15.38	81.30
	150	19.59	3.40	15.43	81.17

<u>หมายเหตุ</u> Y คือผลิตภัณฑ์, ash คือปริมาณเถ้า, VM คือปริมาณสารระเหย, FC คือคาร์บอนคงตัว

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

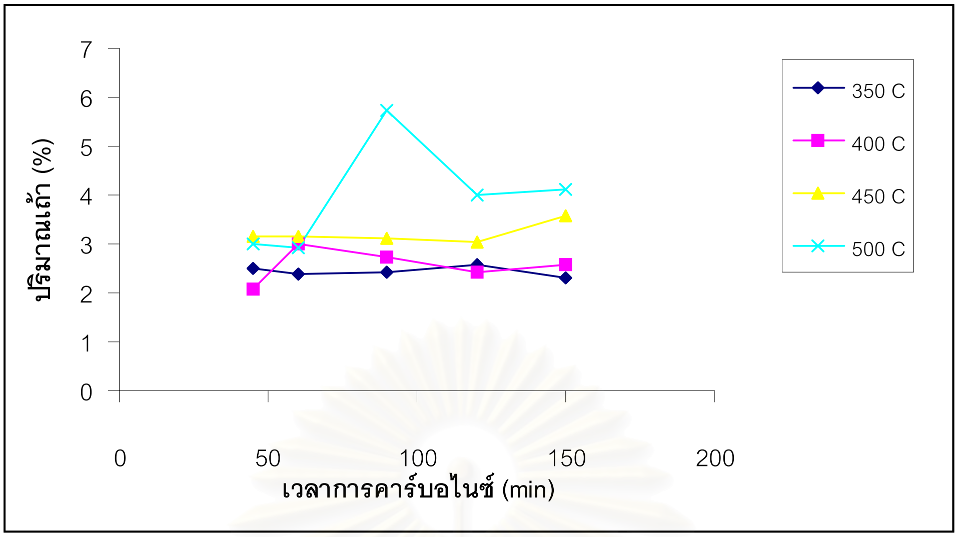


<u>รูปที่</u> 4.2 ผลของเวลาการคาร์บอไนซ์ที่มีต่อค่าร้อยละของปริมาณผลิตภัณฑ์ ณ อุณหภูมิต่างๆ ของถ่านไม้ยูคาลิปตัสอายุ 4 ปี

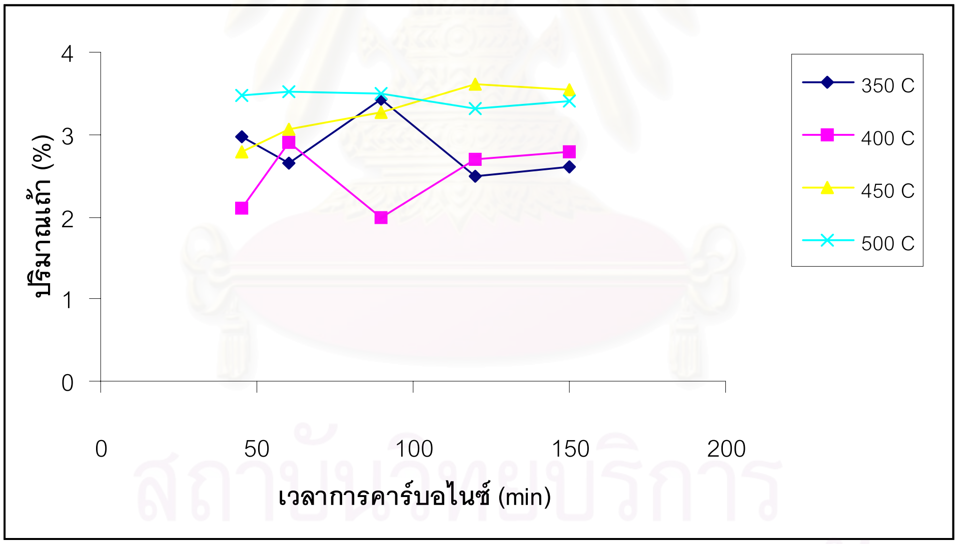


สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

<u>รูปที่</u> 4.3 ผลของเวลาการคาร์บอไนซ์ที่มีต่อค่าร้อยละของปริมาณผลิตภัณฑ์ ณ อุณหภูมิต่างๆ ของถ่านไม้ยูคาลิปตัสอายุ 5 ปี

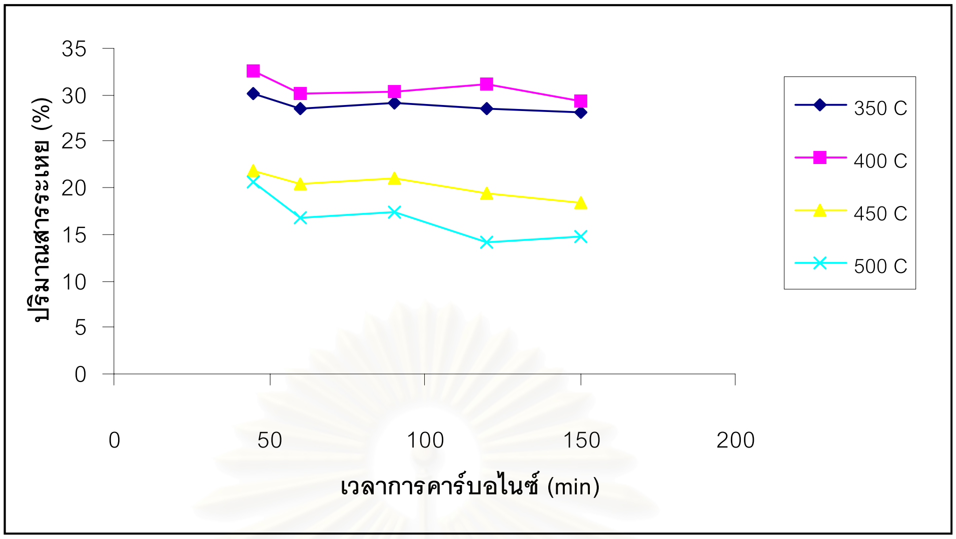


<u>รูปที่</u> 4.4 ผลของเวลาการคาร์บอไนซ์ที่มีต่อค่าร้อยละของปริมาณเถ้า ณ อุณหภูมิต่างๆ ของถ่านไม้ยู-คาลิปตัสอายุ 4 ปี

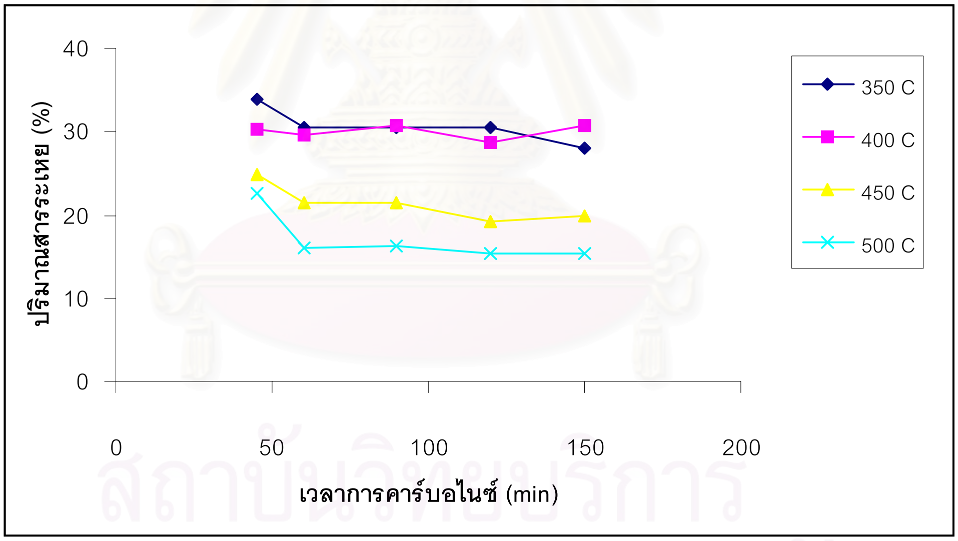


<u>รูปที่</u> 4.5 ผลของเวลาการคาร์บอไนซ์ที่มีต่อค่าร้อยละของปริมาณเถ้า ณ อุณหภูมิต่างๆ ของถ่านไม้ยู-คาลิปตัสอายุ 5 ปี

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

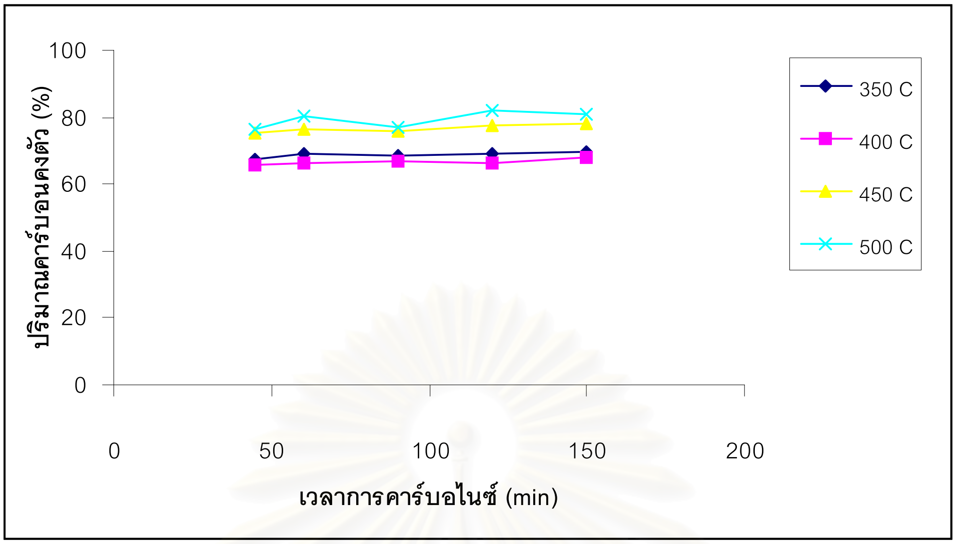


รูปที่ 4.6 ผลของเวลาการคาร์บอไนซ์ที่มีต่อค่าร้อยละของปริมาณสารระเหย ณ อุณหภูมิต่างๆ ของถ่านไม้ยูคาลิปตัสอายุ 4 ปี

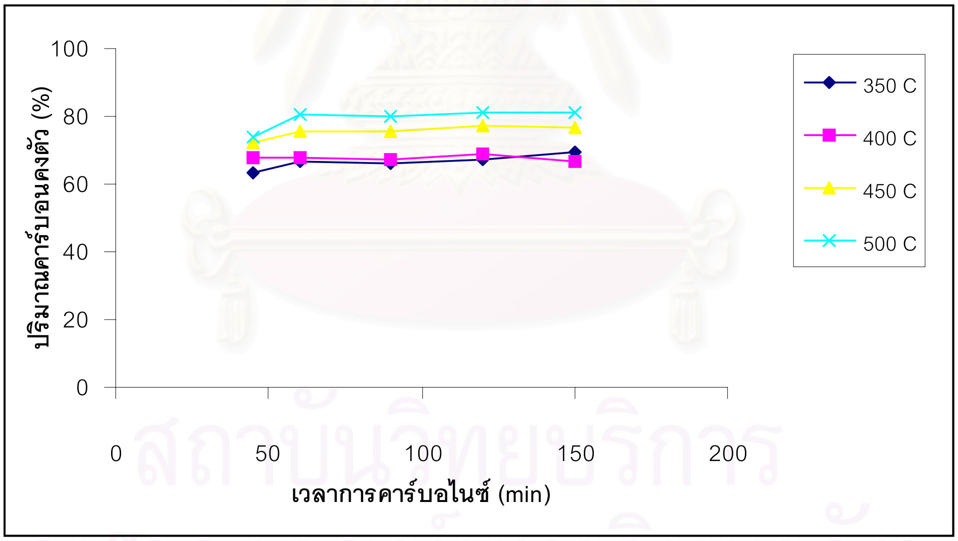


รูปที่ 4.7 ผลของเวลาการคาร์บอไนซ์ที่มีต่อค่าร้อยละของปริมาณสารระเหย ณ อุณหภูมิต่างๆ ของถ่านไม้ยูคาลิปตัสอายุ 5 ปี

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

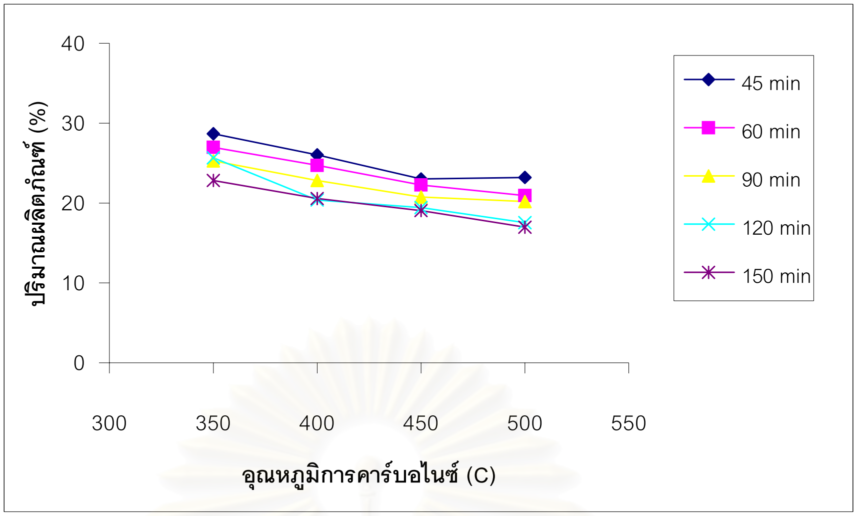


<u>รูปที่</u> 4.8 ผลของเวลาการคาร์บอไนซ์ที่มีต่อค่าร้อยละของปริมาณคาร์บอนคงตัว ณ อุณหภูมิต่างๆ ของถ่านไม้ยูคาลิปตัสอายุ 4 ปี

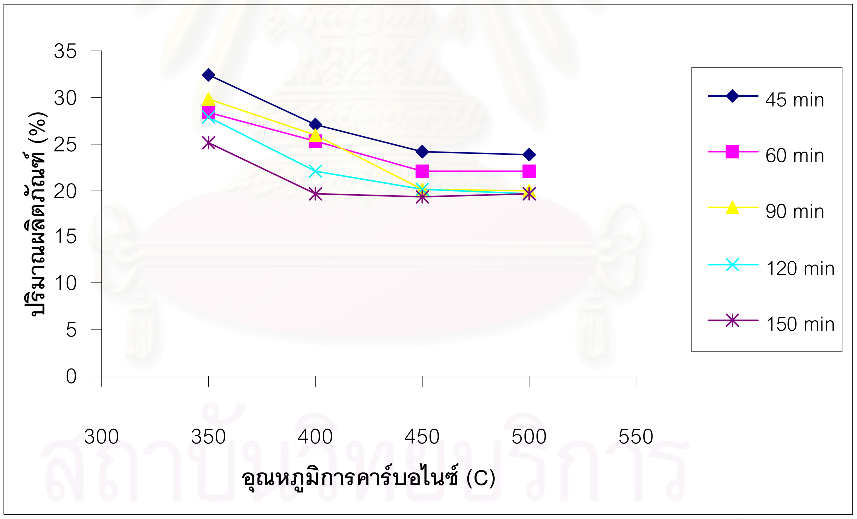


สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

<u>รูปที่</u> 4.9 ผลของเวลาการคาร์บอไนซ์ที่มีต่อค่าร้อยละของปริมาณคาร์บอนคงตัว ณ อุณหภูมิต่างๆ ของถ่านไม้ยูคาลิปตัสอายุ 5 ปี

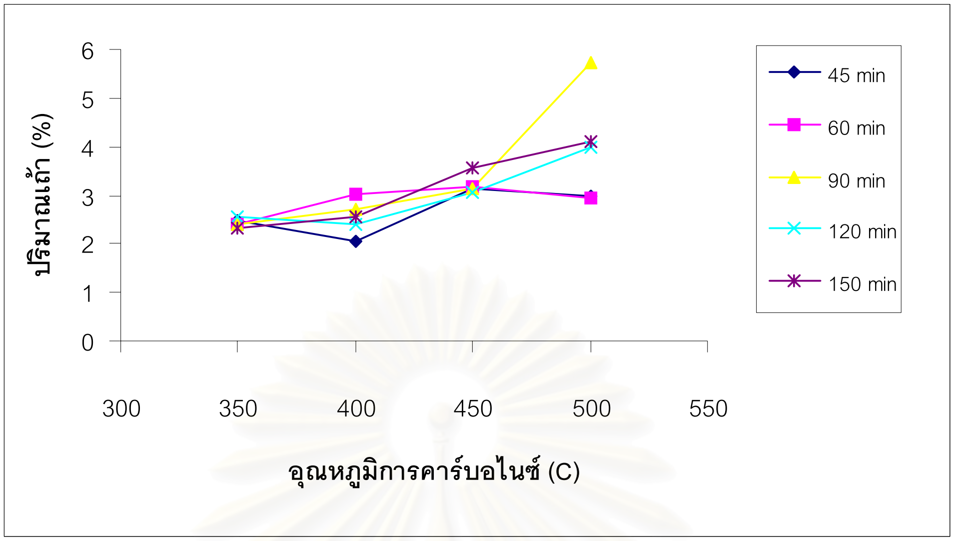


<u>รูปที่</u> 4.10 ผลของอุณหภูมิการคาร์บอไนซ์ที่มีต่อค่าร้อยละของปริมาณผลิตภัณฑ์ ณ เวลาต่างๆ ของถ่านไม้ยูคาลิปตัสอายุ 4 ปี

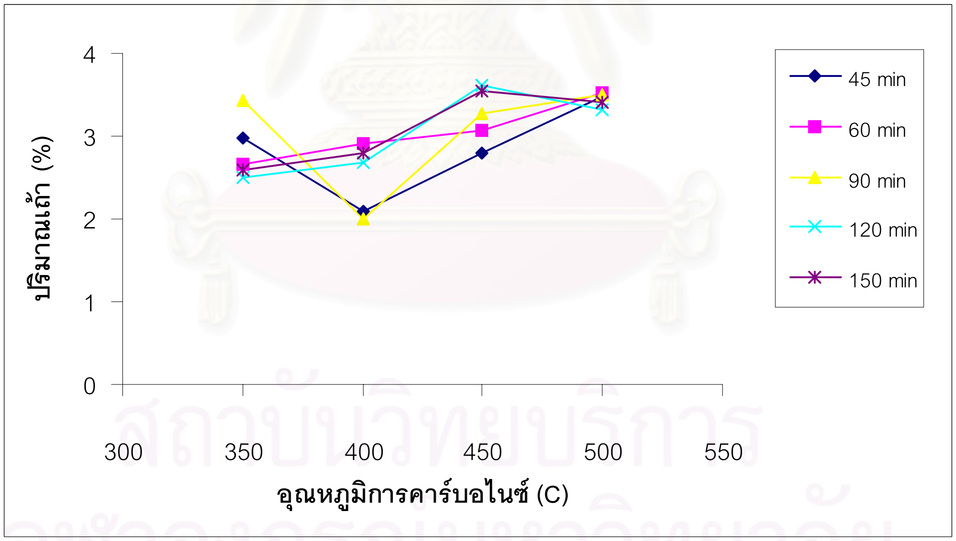


<u>รูปที่</u> 4.11 ผลของอุณหภูมิการคาร์บอไนซ์ที่มีต่อค่าร้อยละของปริมาณผลิตภัณฑ์ ณ เวลาต่างๆ ของถ่านไม้ยูคาลิปตัสอายุ 5 ปี

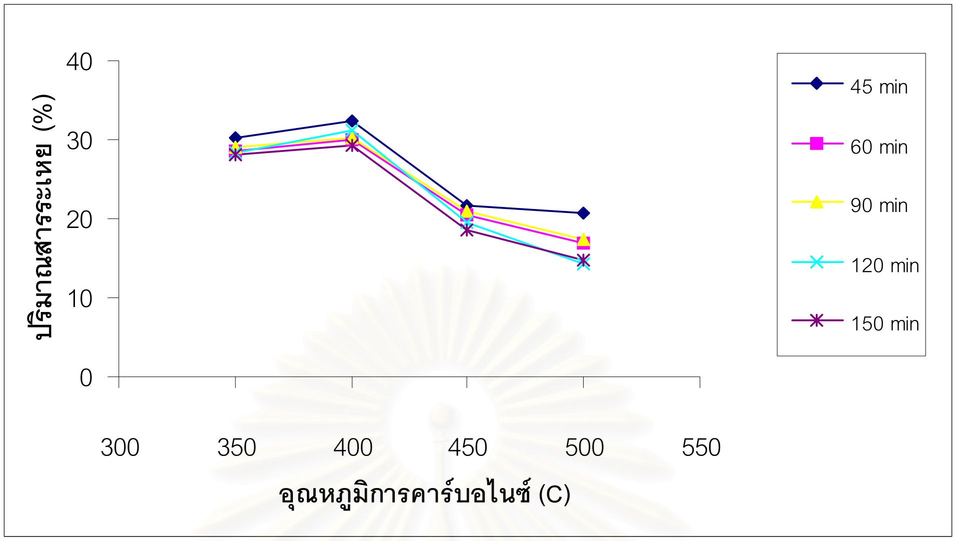
]



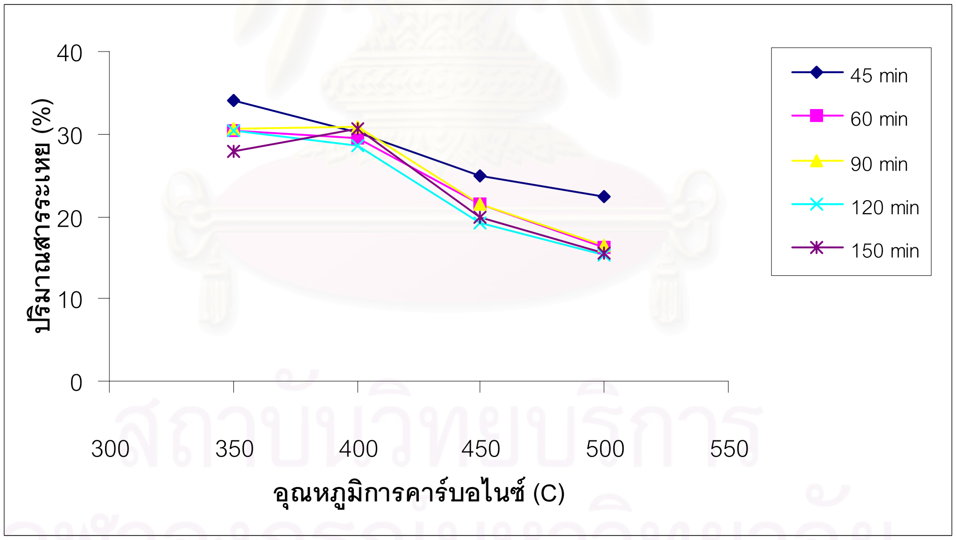
รูปที่ 4.12 ผลของอุณหภูมิการคาร์บอไนซ์ที่มีต่อค่าร้อยละของปริมาณเถ้า ณ เวลาต่างๆ ของถ่านไม้ยูคาลิปตัสอายุ 4 ปี



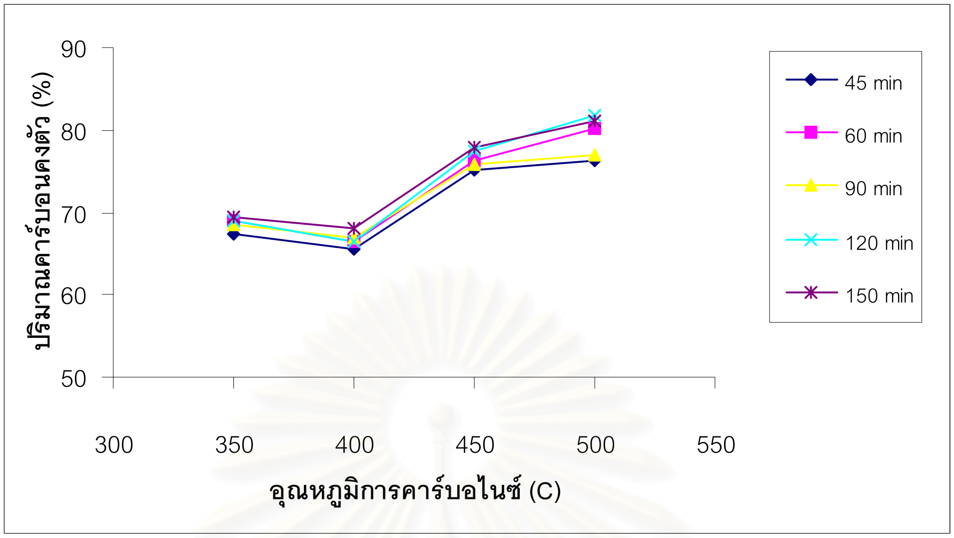
รูปที่ 4.13 ผลของอุณหภูมิการคาร์บอไนซ์ที่มีต่อค่าร้อยละของปริมาณเถ้า ณ เวลาต่างๆ ของถ่านไม้ยูคาลิปตัสอายุ 5 ปี



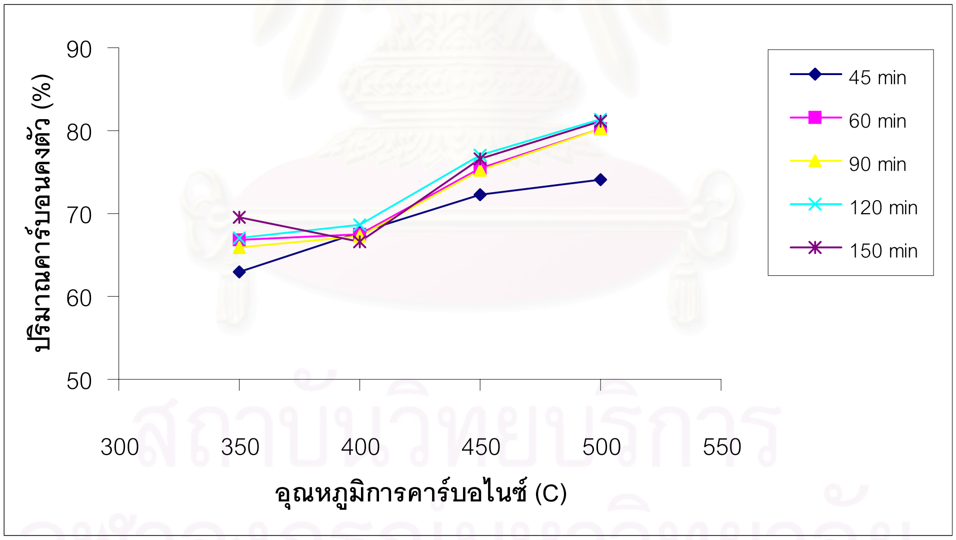
<u>รูปที่</u> 4.14 ผลของอุณหภูมิการคาร์บอไนซ์ที่มีต่อค่าร้อยละของปริมาณสารระเหย ณ เวลาต่างๆ ของถ่านไม้ยูคาลิปตัสอายุ 4 ปี



<u>รูปที่</u> 4.15 ผลของอุณหภูมิการคาร์บอไนซ์ที่มีต่อค่าร้อยละของปริมาณสารระเหย ณ เวลาต่างๆ ของถ่านไม้ยูคาลิปตัสอายุ 5 ปี



<u>รูปที่</u> 4.16 ผลของอุณหภูมิการคาร์บอไนซ์ที่มีต่อค่าร้อยละของปริมาณคาร์บอนคงตัว ณ เวลาต่างๆ ของถ่านไม้ยูคาลิปตัสอายุ 4 ปี



<u>รูปที่</u> 4.17 ผลของอุณหภูมิการคาร์บอไนซ์ที่มีต่อค่าร้อยละของปริมาณคาร์บอนคงตัว ณ เวลาต่างๆ ของถ่านไม้ยูคาลิปตัสอายุ 5 ปี

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.3 ภาวะที่เหมาะสมในการกระตุ้น

4.3.1 ผลของอุณหภูมิ และเวลาในการกระตุ้น

นำถ่านกัมมันต์ที่ได้จากภาวะต่างๆมาทำการวิเคราะห์เพื่อหาภาวะที่เหมาะสมในการกระตุ้น ที่อุณหภูมิ 800, 850 , 900 และ 950 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 90, 120, 150 และ180 นาที โดยวิเคราะห์ค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตร (BD) ปริมาณเถ้า (ash) ค่าการดูดซับไอโอดีน (IA) ค่าการดูดซับเมทิลีนบลู (MB) พื้นที่ผิวแบบแลงเมียร์ ($S_{Langmuir}$) และพื้นที่ผิวแบบบีอีที (S_{BET}) ผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.3 และ 4.4 โดยดูผลของเวลาและอุณหภูมิในการกระตุ้น ในรูปที่ 4.18 - 4.41

<u>ตารางที่</u> 4.3 สมบัติของถ่านกัมมันต์จากถ่านไม้ยูคาลิปตัสอายุ 4 ปี ขนาดอนุภาค 0.6 –1.18 มิลลิเมตร ที่อุณหภูมิ และเวลาต่างๆ ปริมาณป้อนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 700 cm^3/min ปริมาณการป้อนไอน้ำ 20 cm^3/min และปริมาณการป้อนอากาศ 5 cm^3/min

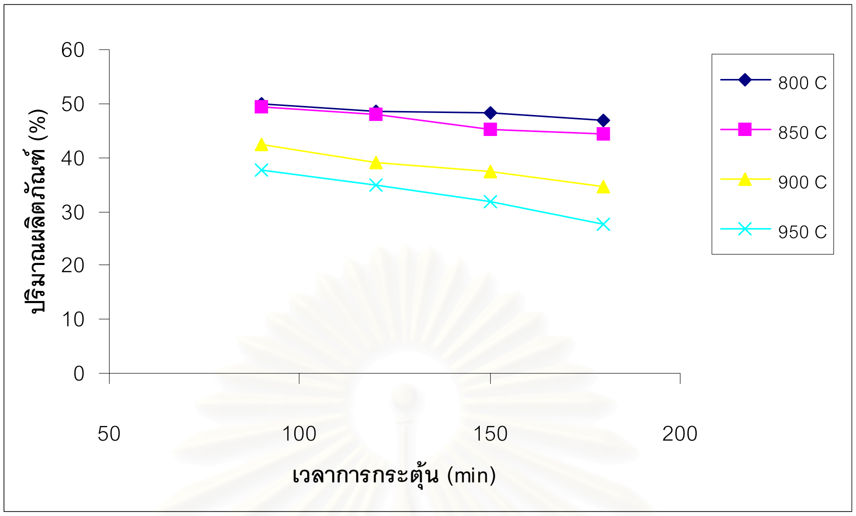
ภาวะการกระตุ้น			On dry basis			
อุณหภูมิ (^{O}C)	เวลา (min)	Y (%)	BD (g/cm^3)	ash (%)	IA (mg/g)	MB (mg/g)
800	90	50.08	0.2291	4.92	382	210
	120	48.46	0.2250	4.98	416	214
	150	48.32	0.2012	5.17	476	218
	180	46.90	0.1994	5.24	552	220
850	90	49.36	0.2159	4.79	425	215
	120	47.39	0.2087	4.91	469	219
	150	45.31	0.1851	5.12	492	228
	180	44.30	0.1846	5.68	545	232
900	90	42.42	0.1907	5.09	688	227
	120	39.14	0.1894	5.23	745	230
	150	37.53	0.1855	5.92	825	234
	180	34.66	0.1823	6.41	851	235
950	90	37.76	0.1840	6.20	818	232
	120	34.98	0.1817	6.79	796	241
	150	31.75	0.1798	6.93	732	243
	180	27.62	0.1790	7.38	672	241

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

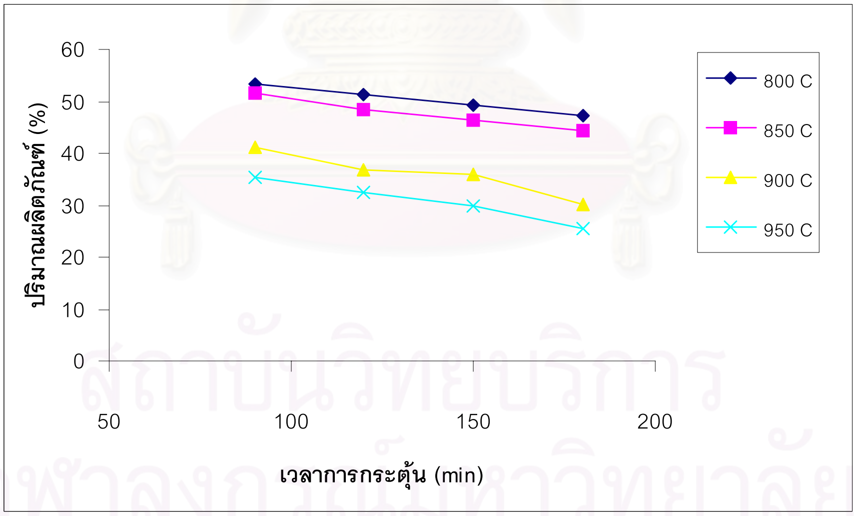
ตารางที่ 4.4 สมบัติของถ่านกัมมันต์จากถ่านไม้ยูคาลิปตัสอายุ 5 ขนาดอนุภาค 0.6 –1.18 มิลลิเมตร ที่อุณหภูมิ และเวลาต่างๆ ปริมาณป้อนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 700 cm^3/min ปริมาณการป้อนไอน้ำ 20 cm^3/min และปริมาณการป้อนอากาศ 5 cm^3/min

ภาวะการกระตุ้น			On dry basis					
อุณหภูมิ (^{O}C)	เวลา (min)	Y (%)	BD (g/cm^3)	ash (%)	IA (mg/g)	MB (mg/g)	$S_{Langmuir}$ (m^2/g)	S_{BET} (m^2/g)
800	90	53.29	0.2326	4.53	401	216	503.11	368.96
	120	51.16	0.2232	4.71	433	217	506.60	371.00
	150	49.35	0.1982	4.98	499	220	593.55	441.23
	180	47.23	0.1904	5.05	596	221	711.68	524.05
850	90	51.47	0.1974	4.84	411	220	530.04	388.60
	120	48.37	0.1947	5.02	480	223	578.03	424.39
	150	46.30	0.1876	5.21	525	229	644.75	467.76
	180	44.49	0.1866	5.79	601	230	721.03	531.73
900	90	41.14	0.1923	5.25	726	220	882.03	645.18
	120	36.94	0.1903	5.78	768	225	942.01	691.30
	150	35.93	0.1837	6.28	892	230	1127.07	816.60
	180	30.28	0.1821	6.39	879	233	1059.46	766.44
950	90	35.32	0.1919	6.13	854	227	1001.11	729.82
	120	32.39	0.1885	6.14	796	233	863.89	633.36
	150	29.87	0.1880	7.02	758	236	803.54	587.05
	180	25.64	0.1792	6.99	510	238	797.44	580.85

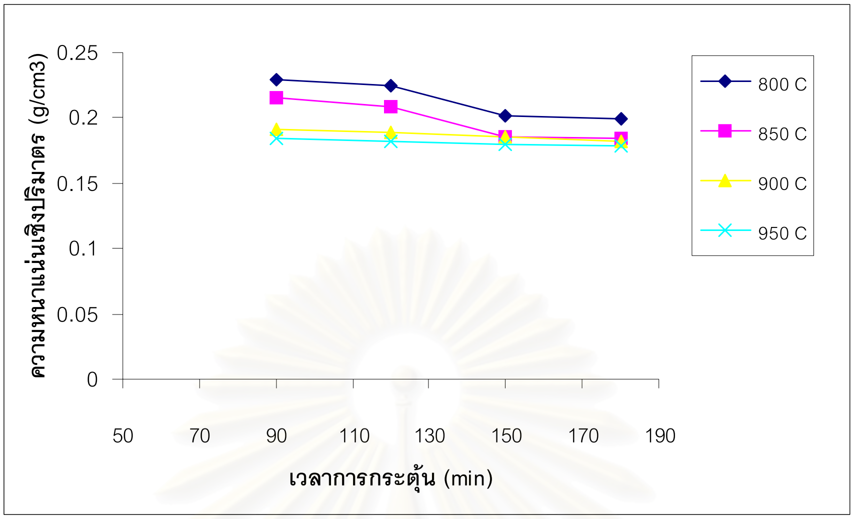
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



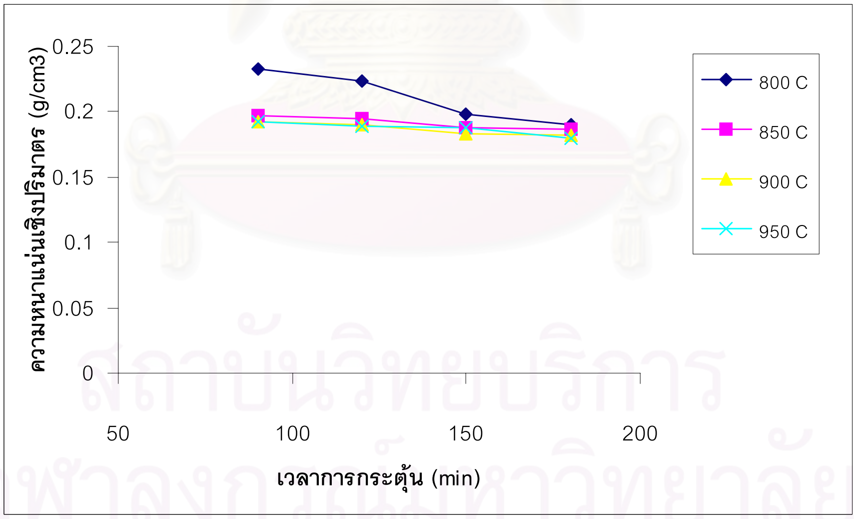
รูปที่ 4.18 ผลของเวลาการกระตุ้นที่มีต่อค่าร้อยละของปริมาณผลิตภัณฑ์ ณ อุณหภูมิต่างๆ โดยใช้ถ่านไม้ยูคาลิปตัสอายุ 4 ปีปริมาณป้อนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 700 cm^3/min ปริมาณการป้อนไอน้ำ 20 cm^3/min และปริมาณการป้อนอากาศ 5 cm^3/min



รูปที่ 4.19 ผลของเวลาการกระตุ้นที่มีต่อค่าร้อยละของปริมาณผลิตภัณฑ์ ณ อุณหภูมิต่างๆ โดยใช้ถ่านไม้ยูคาลิปตัสอายุ 5 ปีปริมาณป้อนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 700 cm^3/min ปริมาณการป้อนไอน้ำ 20 cm^3/min และปริมาณการป้อนอากาศ 5 cm^3/min

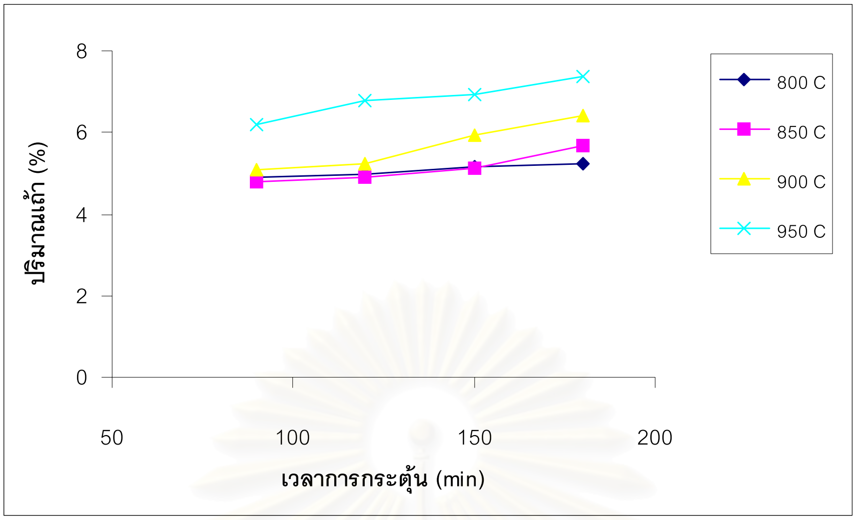


รูปที่ 4.20 ผลของเวลาการกระตุ้นที่มีต่อค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตร ณ อุณหภูมิต่างๆ โดยใช้ถ่านไม้ยูคาลิปตัสอายุ 4 ปีปริมาณป้อนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 700 cm^3/min ปริมาณการป้อนไอน้ำ 20 cm^3/min และปริมาณการป้อนอากาศ 5 cm^3/min

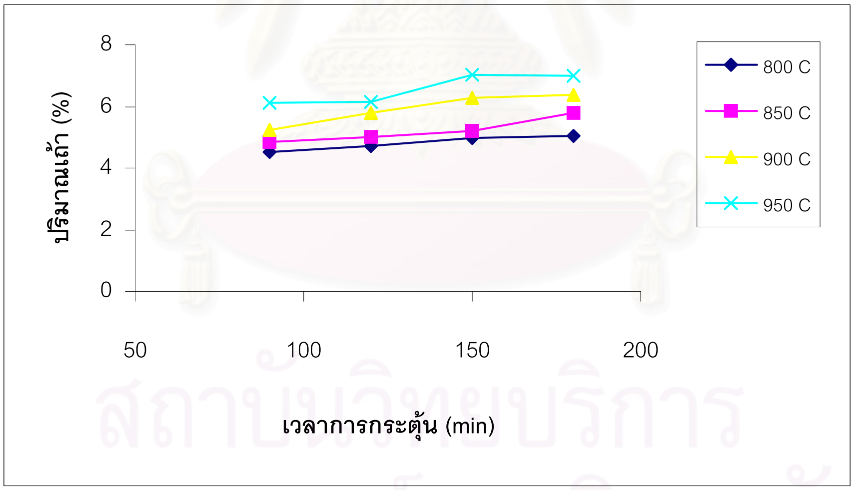


รูปที่ 4.21 ผลของเวลาการกระตุ้นที่มีต่อค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตร ณ อุณหภูมิต่างๆ โดยใช้ถ่านไม้ยูคาลิปตัสอายุ 5 ปีปริมาณป้อนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 700 cm^3/min ปริมาณการป้อนไอน้ำ 20 cm^3/min และปริมาณการป้อนอากาศ 5 cm^3/min

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

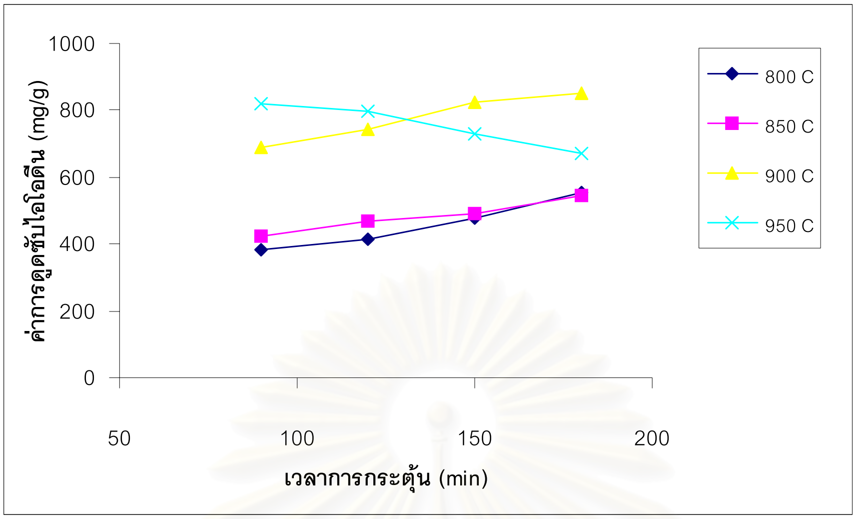


<u>รูปที่</u> 4.22 ผลของเวลาการกระตุ้นที่มีต่อร้อยละของปริมาณเถ้า ณ อุณหภูมิต่างๆ โดยใช้ถ่านไม้ยูคาลิปตัสอายุ 4 ปีปริมาณป้อนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 700 cm^3/min ปริมาณการป้อนไอน้ำ 20 cm^3/min และปริมาณการป้อนอากาศ 5 cm^3/min

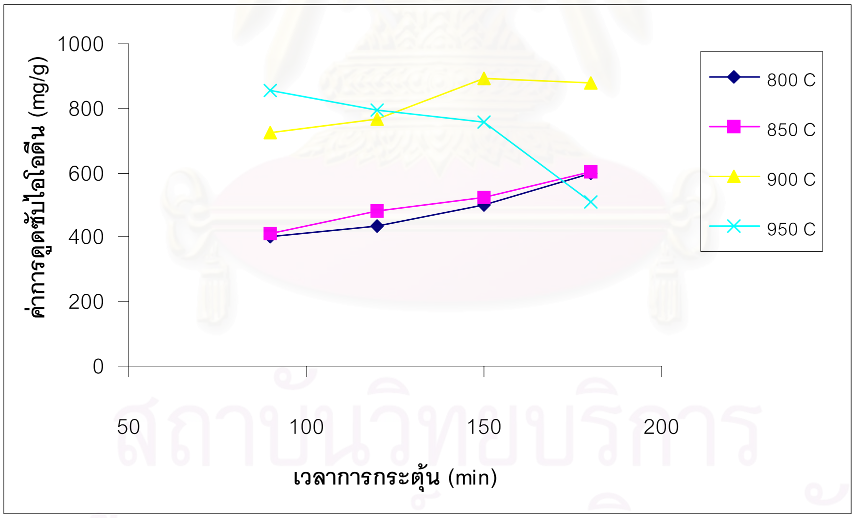


<u>รูปที่</u> 4.23 ผลของเวลาการกระตุ้นที่มีต่อร้อยละของปริมาณเถ้า ณ อุณหภูมิต่างๆ โดยใช้ถ่านไม้ยูคาลิปตัสอายุ 5 ปีปริมาณป้อนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 700 cm^3/min ปริมาณการป้อนไอน้ำ 20 cm^3/min และปริมาณการป้อนอากาศ 5 cm^3/min

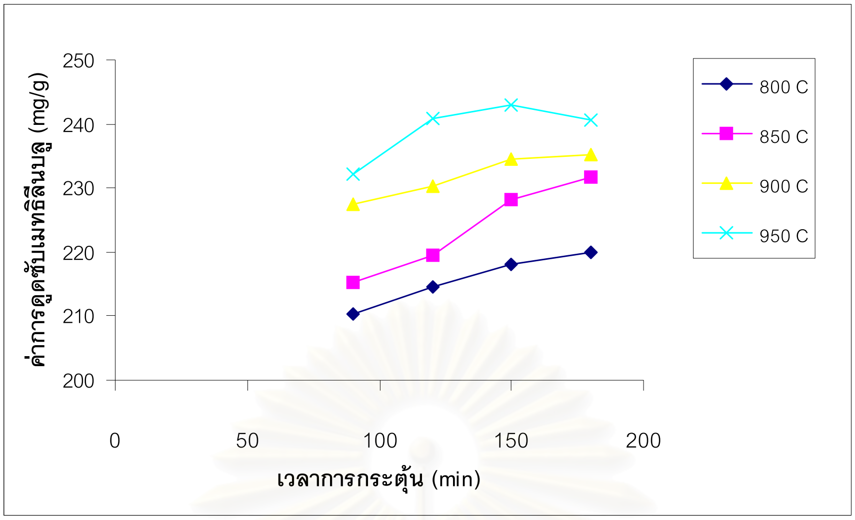
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



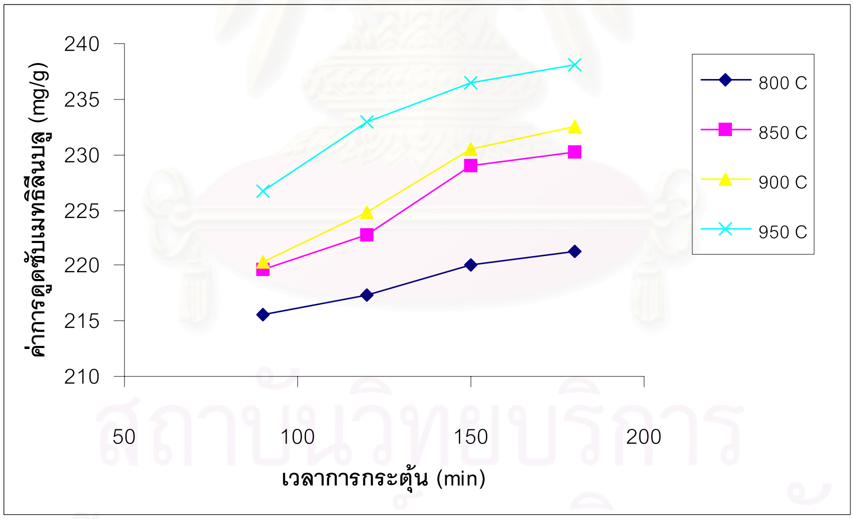
รูปที่ 4.24 ผลของเวลาการกระตุ้นที่มีต่อค่าการดูดซับไอโอดีน ณ อุณหภูมิต่างๆ โดยใช้ถ่านไม้ยูคาลิปตัสอายุ 4 ปีปริมาณป้อนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 700 cm^3/min ปริมาณการป้อนไอน้ำ 20 cm^3/min และปริมาณการป้อนอากาศ 5 cm^3/min



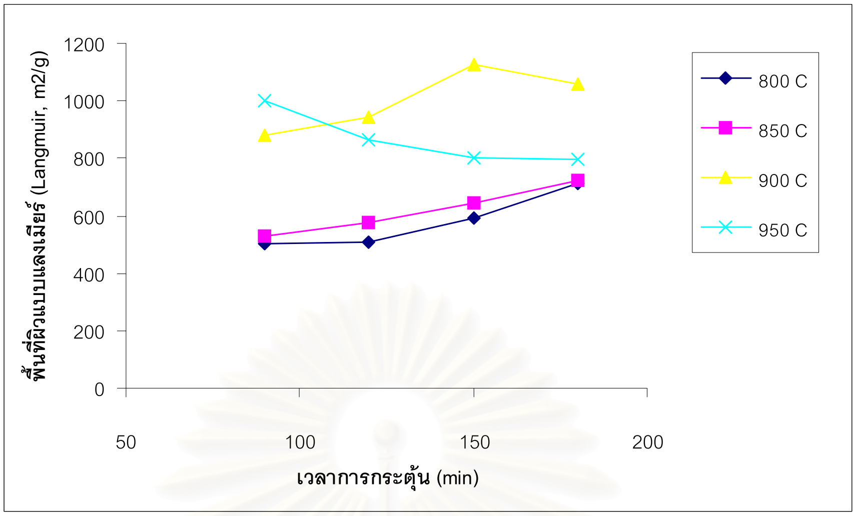
รูปที่ 4.25 ผลของเวลาการกระตุ้นที่มีต่อค่าการดูดซับไอโอดีน ณ อุณหภูมิต่างๆ โดยใช้ถ่านไม้ยูคาลิปตัสอายุ 5 ปีปริมาณป้อนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 700 cm^3/min ปริมาณการป้อนไอน้ำ 20 cm^3/min และปริมาณการป้อนอากาศ 5 cm^3/min



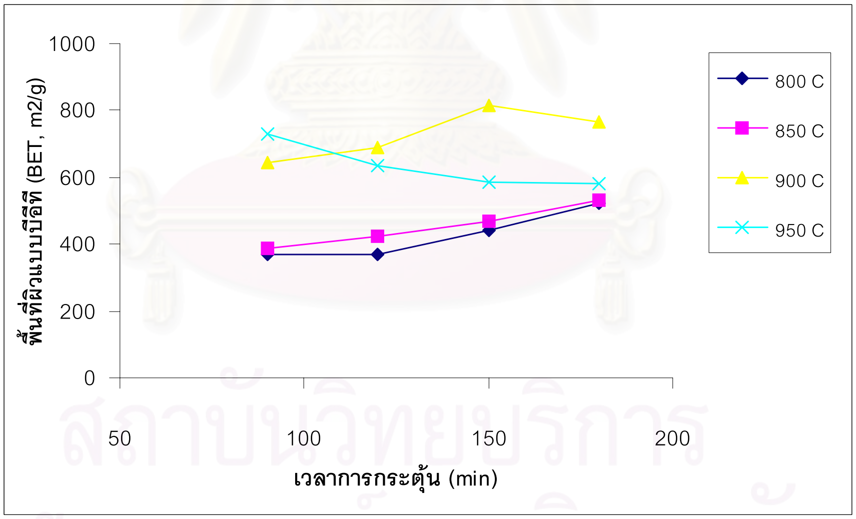
<u>รูปที่</u> 4.26 ผลของเวลาการกระตุ้นที่มีต่อค่าการดูดซับเมทธิลีนบลู ณ อุณหภูมิต่างๆ โดยใช้ถ่านไม้ยูคาลิปตัสอายุ 4 ปีปริมาณป้อนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 700 cm^3/min ปริมาณการป้อนไอน้ำ 20 cm^3/min และปริมาณการป้อนอากาศ 5 cm^3/min



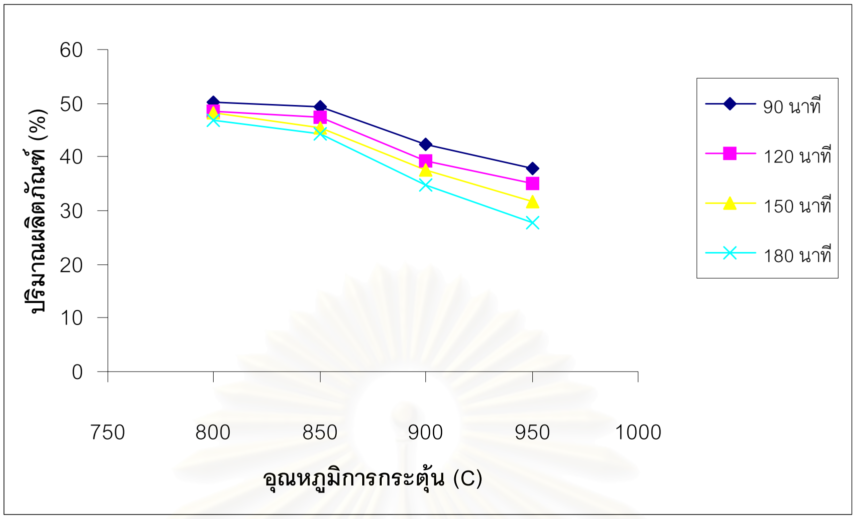
<u>รูปที่</u> 4.27ผลของเวลาการกระตุ้นที่มีต่อค่าการดูดซับเมทธิลีนบลู ณ อุณหภูมิต่างๆ โดยใช้ถ่านไม้ยูคาลิปตัสอายุ 5 ปีปริมาณป้อนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 700 cm^3/min ปริมาณการป้อนไอน้ำ 20 cm^3/min และปริมาณการป้อนอากาศ 5 cm^3/min



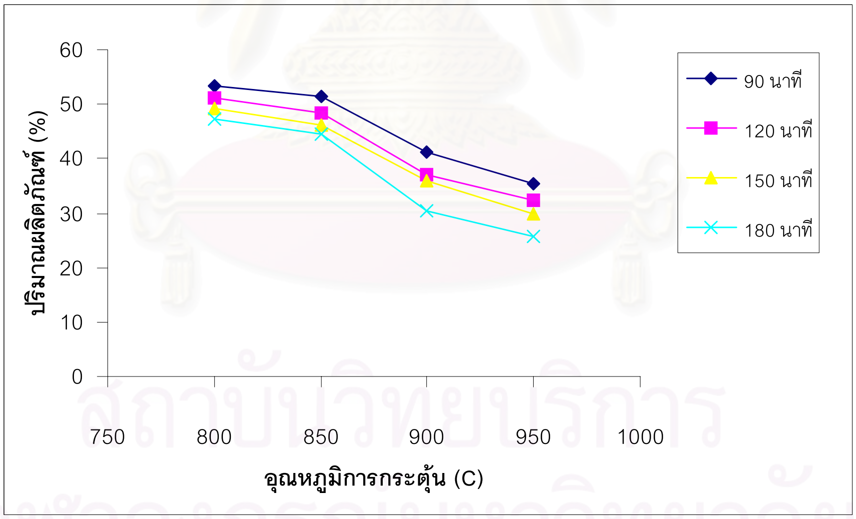
รูปที่ 4.28 ผลของเวลาการกระตุ้นที่มีต่อพื้นที่ผิวแบบแลงเมียร์ ณ อุณหภูมิต่างๆ โดยใช้ถ่านไม้ยูคาลิปตัสอายุ 5 ปีปริมาณป้อนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 700 cm^3/min ปริมาณการป้อนไอน้ำ 20 cm^3/min และปริมาณการป้อนอากาศ 5 cm^3/min



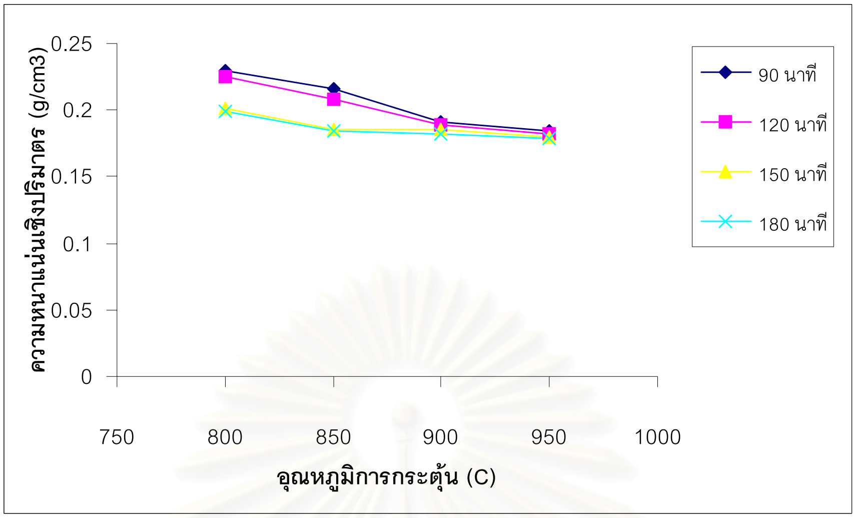
รูปที่ 4.29 ผลของเวลาการกระตุ้นที่มีต่อพื้นที่ผิวแบบบีอีที ณ อุณหภูมิต่างๆ โดยใช้ถ่านไม้ยูคาลิปตัสอายุ 5 ปีปริมาณป้อนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 700 cm^3/min ปริมาณการป้อนไอน้ำ 20 cm^3/min และปริมาณการป้อนอากาศ 5 cm^3/min



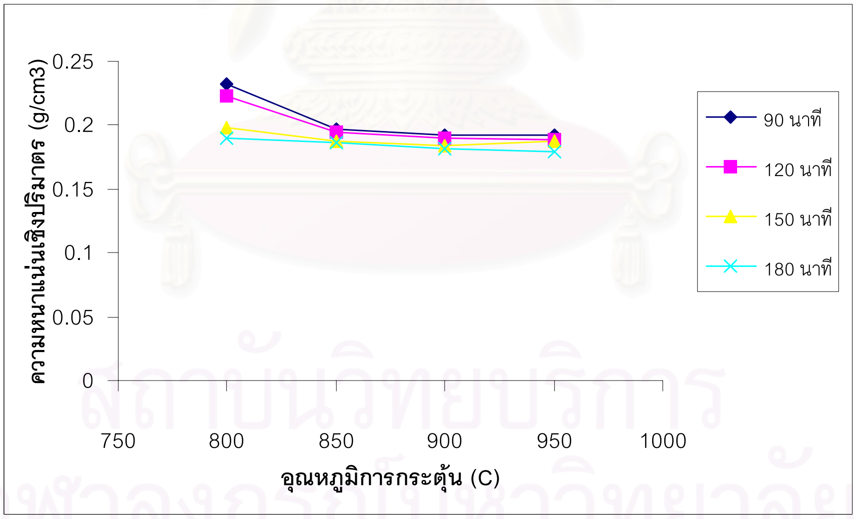
<u>รูปที่</u> 4.30 ผลของอุณหภูมิการกระตุ้นที่มีต่อค่าร้อยละของปริมาณผลิตภัณฑ์ ณ อุณหภูมิต่างๆ โดยใช้ถ่านไม้ยูคาลิปตัสอายุ 4 ปีปริมาณป้อนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 700 cm^3/min ปริมาณการป้อนไอน้ำ 20 cm^3/min และปริมาณการป้อนอากาศ 5 cm^3/min



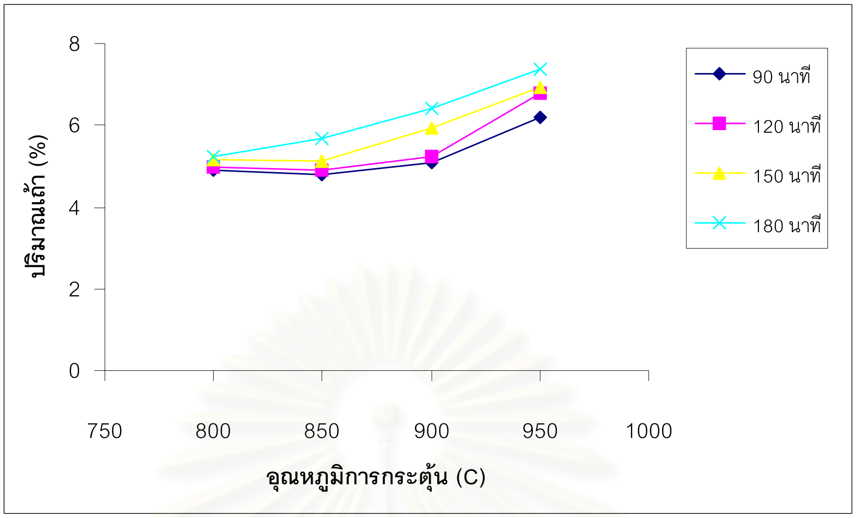
<u>รูปที่</u> 4.31 ผลของอุณหภูมิการกระตุ้นที่มีต่อค่าร้อยละของปริมาณผลิตภัณฑ์ ณ อุณหภูมิต่างๆ โดยใช้ถ่านไม้ยูคาลิปตัสอายุ 5 ปีปริมาณป้อนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 700 cm^3/min ปริมาณการป้อนไอน้ำ 20 cm^3/min และปริมาณการป้อนอากาศ 5 cm^3/min



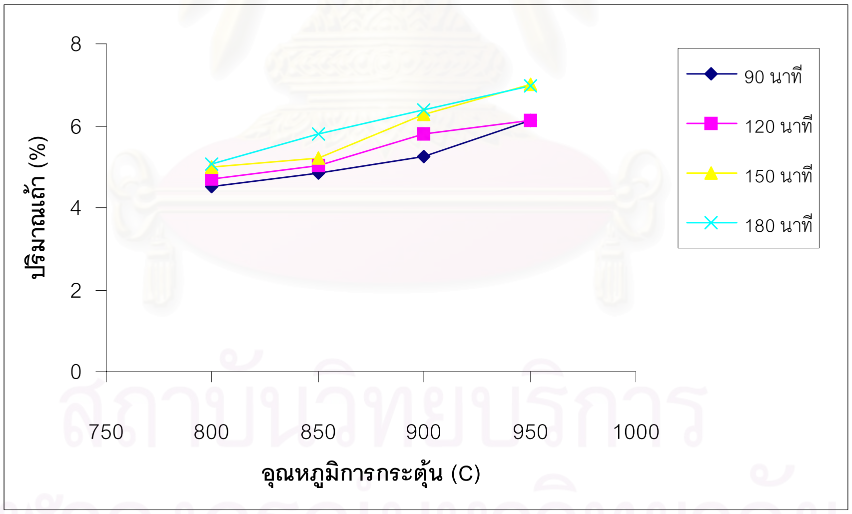
รูปที่ 4.32 ผลของอุณหภูมิการกระตุ้นที่มีต่อค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตร ณ อุณหภูมิต่างๆ โดยใช้ถ่านไม้ยูคาลิปตัสอายุ 4 ปีปริมาณป้อนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 700 cm^3/min ปริมาณการป้อนไอน้ำ 20 cm^3/min และปริมาณการป้อนอากาศ 5 cm^3/min



รูปที่ 4.33 ผลของอุณหภูมิการกระตุ้นที่มีต่อค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตร ณ อุณหภูมิต่างๆ โดยใช้ถ่านไม้ยูคาลิปตัสอายุ 5 ปีปริมาณป้อนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 700 cm^3/min ปริมาณการป้อนไอน้ำ 20 cm^3/min และปริมาณการป้อนอากาศ 5 cm^3/min

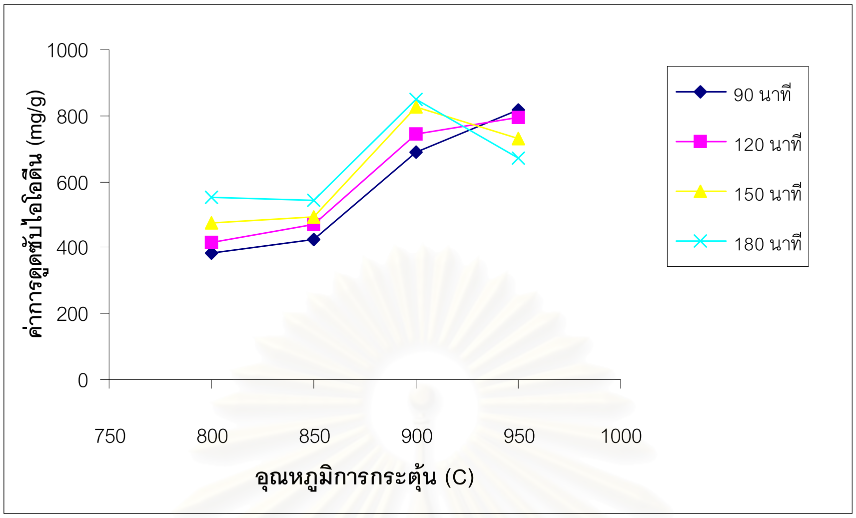


<u>รูปที่</u> 4.34 ผลของอุณหภูมิการกระตุ้นที่มีต่อค่าร้อยละของปริมาณเถ้า ณ อุณหภูมิต่างๆ โดยใช้ถ่านไม้ยูคาลิปตัสอายุ 4 ปีปริมาณป้อนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 700 cm^3/min ปริมาณการป้อนไอน้ำ 20 cm^3/min และปริมาณการป้อนอากาศ 5 cm^3/min

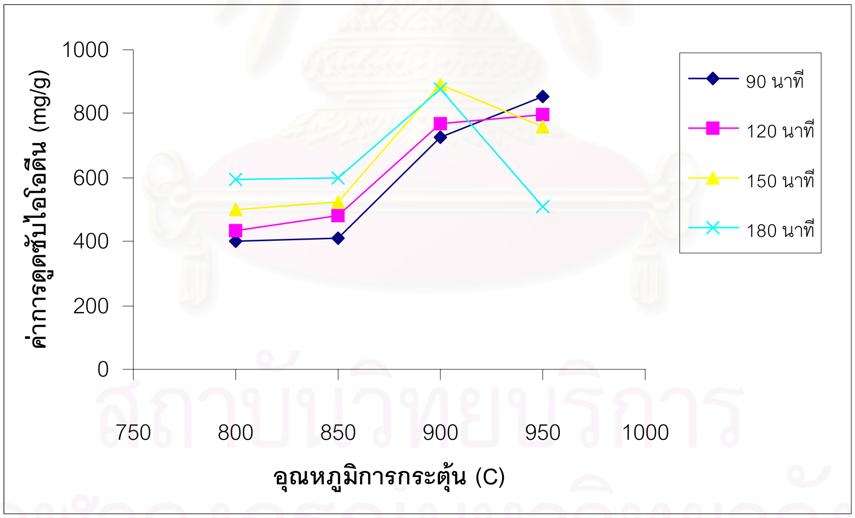


<u>รูปที่</u> 4.35 ผลของอุณหภูมิการกระตุ้นที่มีต่อค่าร้อยละของปริมาณเถ้า ณ อุณหภูมิต่างๆ โดยใช้ถ่านไม้ยูคาลิปตัสอายุ 5 ปีปริมาณป้อนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 700 cm^3/min ปริมาณการป้อนไอน้ำ 20 cm^3/min และปริมาณการป้อนอากาศ 5 cm^3/min

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

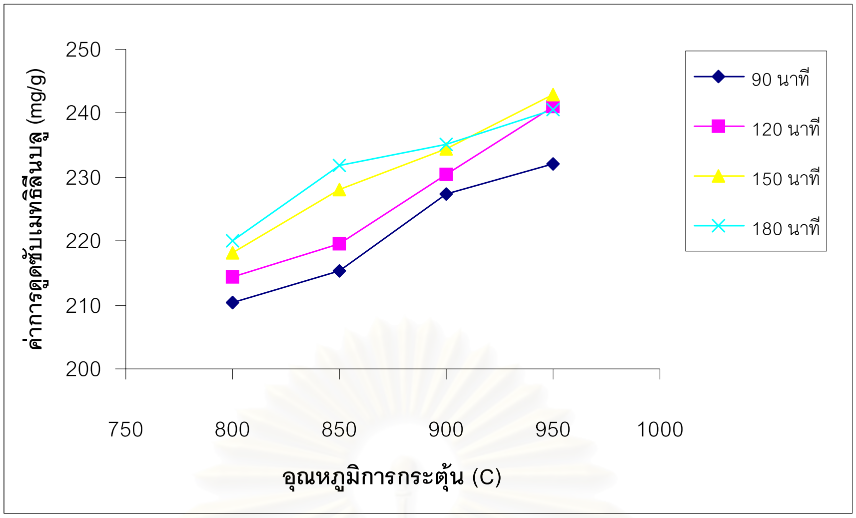


รูปที่ 4.36 ผลของอุณหภูมิการกระตุ้นที่มีต่อค่าการดูดซับไอโอดีน ณ อุณหภูมิต่างๆ โดยใช้ถ่านไม้ยูคาลิปตัสอายุ 4 ปีปริมาณป้อนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 700 cm^3/min ปริมาณการป้อนไอน้ำ 20 cm^3/min และปริมาณการป้อนอากาศ 5 cm^3/min

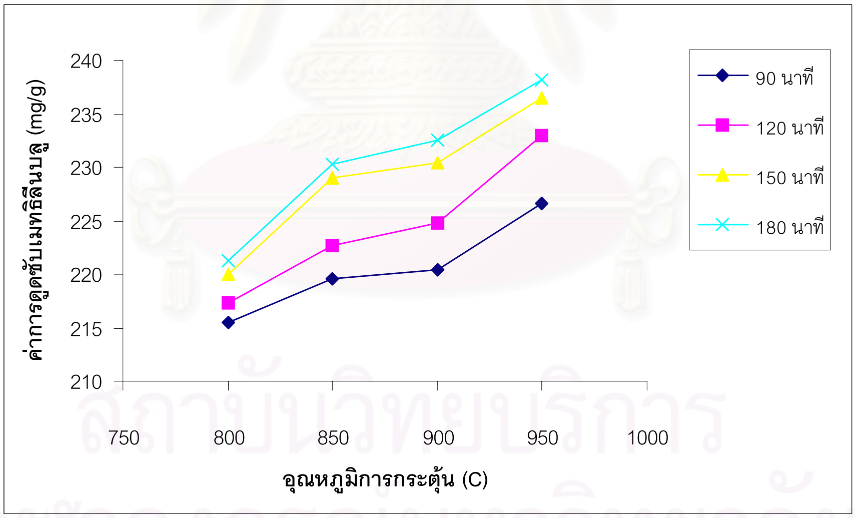


สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

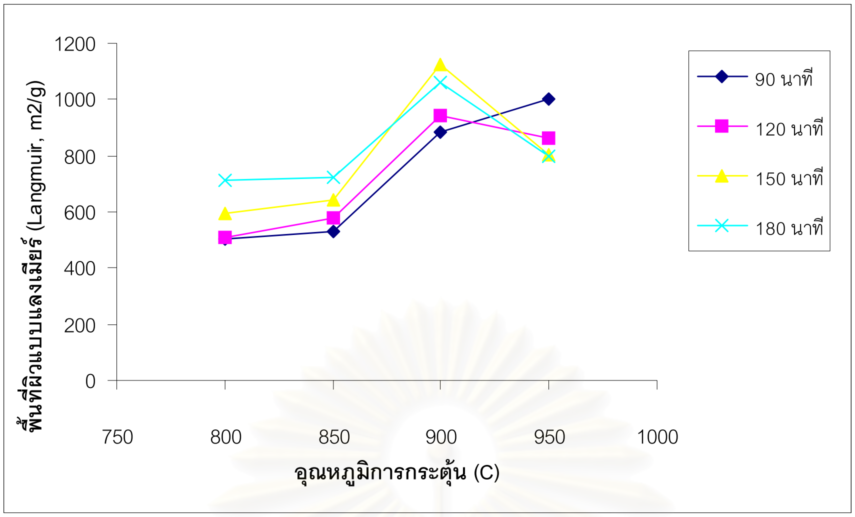
รูปที่ 4.37 ผลของอุณหภูมิการกระตุ้นที่มีต่อค่าการดูดซับไอโอดีน ณ อุณหภูมิต่างๆ โดยใช้ถ่านไม้ยูคาลิปตัสอายุ 5 ปีปริมาณป้อนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 700 cm^3/min ปริมาณการป้อนไอน้ำ 20 cm^3/min และปริมาณการป้อนอากาศ 5 cm^3/min



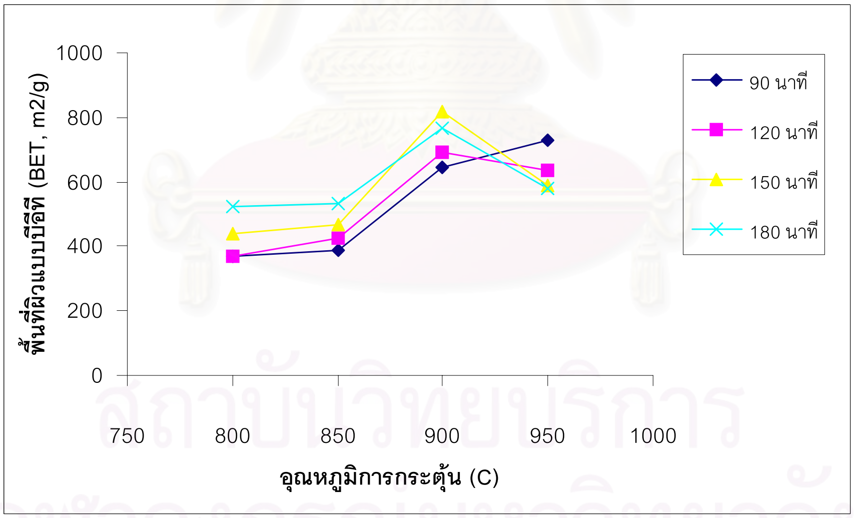
รูปที่ 4.38 ผลของอุณหภูมิการกระตุ้นที่มีต่อค่าการดูดซับเมทธิลีนบลู ณ อุณหภูมิต่างๆ โดยใช้ถ่านไม้ยูคาลิปตัสอายุ 4 ปีปริมาณป้อนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 700 cm^3/min ปริมาณการป้อนไอน้ำ 20 cm^3/min และปริมาณการป้อนอากาศ 5 cm^3/min



รูปที่ 4.39 ผลของอุณหภูมิการกระตุ้นที่มีต่อค่าการดูดซับเมทธิลีนบลู ณ อุณหภูมิต่างๆ โดยใช้ถ่านไม้ยูคาลิปตัสอายุ 5 ปีปริมาณป้อนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 700 cm^3/min ปริมาณการป้อนไอน้ำ 20 cm^3/min และปริมาณการป้อนอากาศ 5 cm^3/min



รูปที่ 4.40 ผลของอุณหภูมิการกระตุ้นที่มีต่อพื้นที่ผิวแบบแลงเมียร์ ณ อุณหภูมิต่างๆ โดยใช้ถ่านไม้ยูคาลิปตัสอายุ 5 ปีปริมาณป้อนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 700 cm^3/min ปริมาณการป้อนไอน้ำ 20 cm^3/min และปริมาณการป้อนอากาศ 5 cm^3/min



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 4.41 ผลของอุณหภูมิการกระตุ้นที่มีต่อพื้นที่ผิวแบบบีอีที ณ อุณหภูมิต่างๆ โดยใช้ถ่านไม้ยูคาลิปตัสอายุ 5 ปีปริมาณป้อนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 700 cm^3/min ปริมาณการป้อนไอน้ำ 20 cm^3/min และปริมาณการป้อนอากาศ 5 cm^3/min

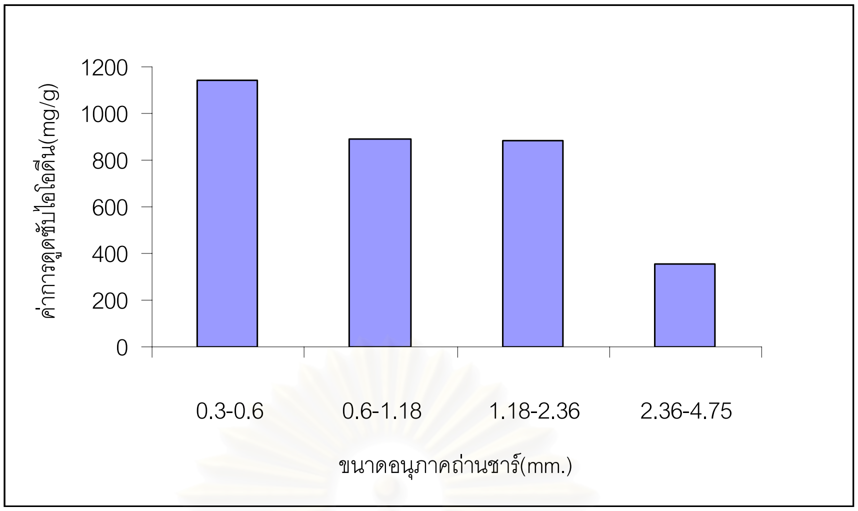
4.3.2 ผลของการแปรขนาดอนุภาคของถ่านชาร์

เมื่อได้อุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมในการกระตุ้น จากขั้นตอนที่ 4.3.1 นำภาวะที่ได้มาศึกษาถึงผลของขนาดอนุภาคของถ่าน ต่อความสามารถในการดูดซับไอโอดีน การดูดซับเมทิลีนบลู พื้นที่ผิวแบบแลงเมียร์ พื้นที่ผิวแบบบีอีที ความหนาแน่นเชิงปริมาตร ร้อยละของปริมาณเถ้าและผลิตภัณฑ์

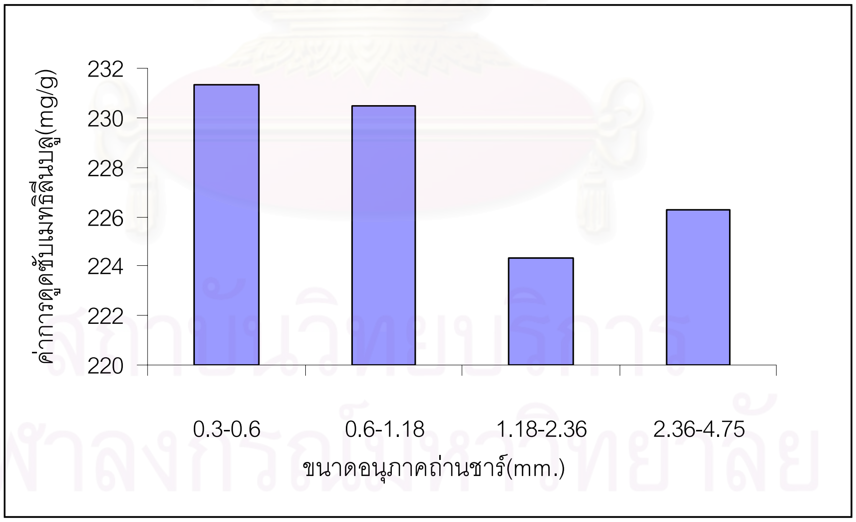
ตารางที่ 4.5 สมบัติของถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัสอายุ 5 ปี เมื่อกระตุ้นขนาดต่างๆที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 150 นาที ปริมาณป้อนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 700 cm^3/min ปริมาณการป้อนไอน้ำ 20 cm^3/min และปริมาณการป้อนอากาศ 5 cm^3/min

สมบัติ	ขนาดอนุภาคเม็ดถ่าน(มิลลิเมตร)			
	0.3-0.6	0.6-1.18	1.18-2.36	2.36-4.75
ร้อยละผลิตภัณฑ์	28.95	35.93	35.62	36.74
ความหนาแน่นเชิงปริมาตร (g/cm^3)	0.1623	0.1837	0.1916	0.2204
ร้อยละของปริมาณเถ้า	9.42	6.28	6.13	4.24
ค่าการดูดซับไอโอดีน (mg/g)	1142	892	883	353
ค่าการดูดซับเมทิลีนบลู (mg/g)	231	230.46	224	226
พื้นที่ผิวแบบแลงเมียร์ ($S_{Langmuir}$)	1226.34	1127.07	1107.23	424.97
พื้นที่ผิวแบบบีอีที (S_{BET})	893.76	816.60	807.75	309.56

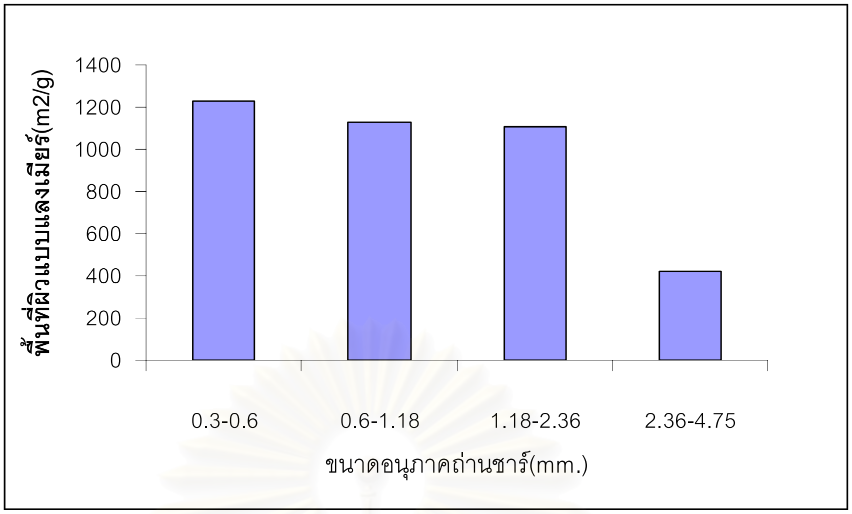
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



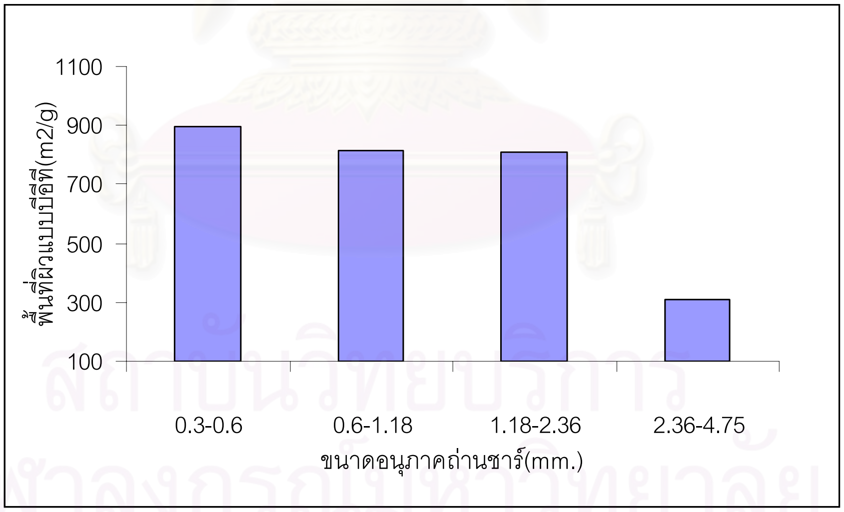
รูปที่ 4.42 ผลของขนาดอนุภาคที่มีต่อค่าการดูดซับไอโอดีน จากถ่านกัมมันต์ไม้ยูคาลิปตัส อายุ 5 ปี ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 150 นาที ปริมาณป้อนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 700 cm^3/min ปริมาณการป้อนไอน้ำ 20 cm^3/min และปริมาณการป้อนอากาศ 5 cm^3/min



รูปที่ 4.43 ผลของขนาดอนุภาคที่มีต่อค่าการดูดซับเมทิลีนบลู จากถ่านกัมมันต์ไม้ยูคาลิปตัสอายุ 5 ปี ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 150 นาที ปริมาณป้อนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 700 cm^3/min ปริมาณการป้อนไอน้ำ 20 cm^3/min และปริมาณการป้อนอากาศ 5 cm^3/min



<u>รูปที่</u> 4.44 ผลของขนาดอนุภาคที่มีต่อพื้นที่ผิวแบบแลงเมียร์ จากถ่านกัมมันต์ไม้ยูคาลิปตัสอายุ 5 ปี ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 150 นาที ปริมาณป้อนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 700 cm^3/min ปริมาณการป้อนไอน้ำ 20 cm^3/min และปริมาณการป้อนอากาศ 5 cm^3/min



<u>รูปที่</u> 4.45 ผลของขนาดอนุภาคที่มีต่อพื้นที่ผิวแบบบีอีที จากถ่านกัมมันต์ไม้ยูคาลิปตัสอายุ 5 ปี ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 150 นาที ปริมาณป้อนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 700 cm^3/min ปริมาณการป้อนไอน้ำ 20 cm^3/min และปริมาณการป้อนอากาศ 5 cm^3/min

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.3.3 ผลจากการแปรชนิดแก๊สในการกระตุ้น

เมื่อศึกษาถึงผลของชนิดของแก๊สกระตุ้นต่อสมบัติที่ได้ของถ่านกัมมันต์ ผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 สมบัติของถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัสอายุ 5 ปีเมื่อกระตุ้นโดยใช้สารกระตุ้นชนิดต่างๆกัน

สมบัติ	ชนิดของแก๊สในการกระตุ้น			
	Steam[1]	Steam[2]	$[CO_2$+Air$]$[3]	$[CO_2$+Air$]$[4]
ร้อยละผลิตภัณฑ์	38.29	33.14	46.34	42.13
ความหนาแน่นเชิงปริมาตร (g/cm^3)	0.1834	0.1809	0.1067	0.1083
ร้อยละของปริมาณเถ้า	5.26	6.37	4.14	4.82
ค่าการดูดซับไอโอดีน (mg/g)	514	1233	259	274
ค่าการดูดซับเมทิลีนบลู (mg/g)	238	242	238	240
พื้นที่ผิวแบบแลงเมียร์ ($S_{Langmuir}$)	457.33	1497.32	228.61	246.43
พื้นที่ผิวแบบบีอีที (S_{BET})	334.59	1076.15	168.23	179.62

หมายเหตุ ตัวยก 1 คือ กระตุ้นด้วยไอน้ำโดยป้อนอัตรา 20 cm^3/min ที่อุณหภูมิ 800 ^{0}Cเวลา 150 min.

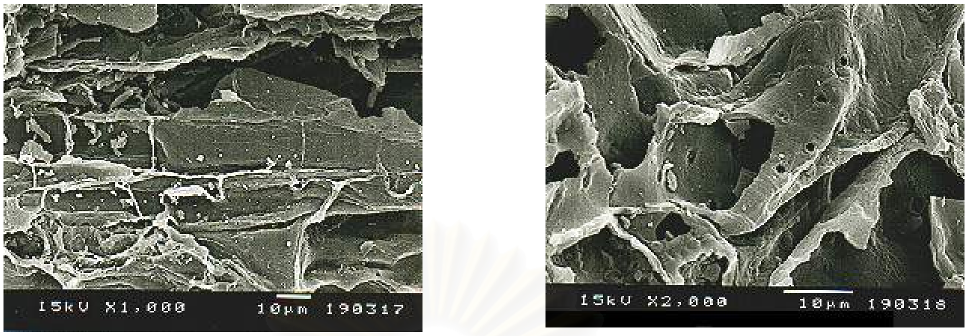
ตัวยก 2 คือ กระตุ้นด้วยไอน้ำโดยป้อนอัตรา 20 cm^3/min ที่อุณหภูมิ 900 ^{0}Cเวลา 150 min.

ตัวยก 3 คือ กระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 200 cm^3/min ปริมาณการป้อนอากาศ 5 cm^3/min ที่อุณหภูมิ 800 ^{0}Cเวลา 150 min.

ตัวยก 4 คือ กระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 200 cm^3/min ปริมาณการป้อนอากาศ 5 cm^3/min ที่อุณหภูมิ 900 ^{0}Cเวลา 150 min.

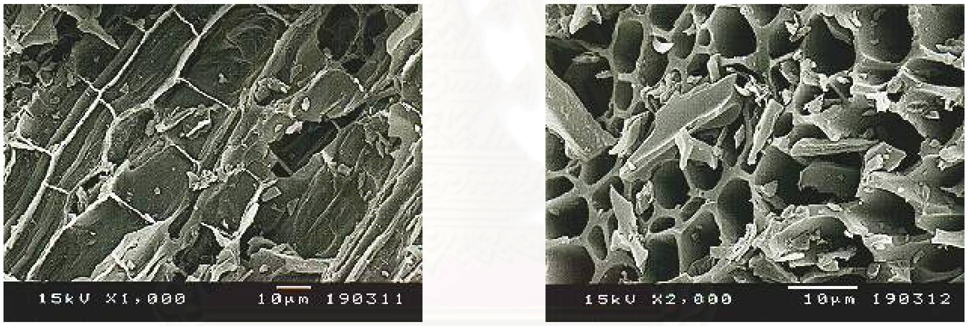
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.4 รูปลักษณะพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นที่ภาวะต่าง ๆ



(ก) (ข)

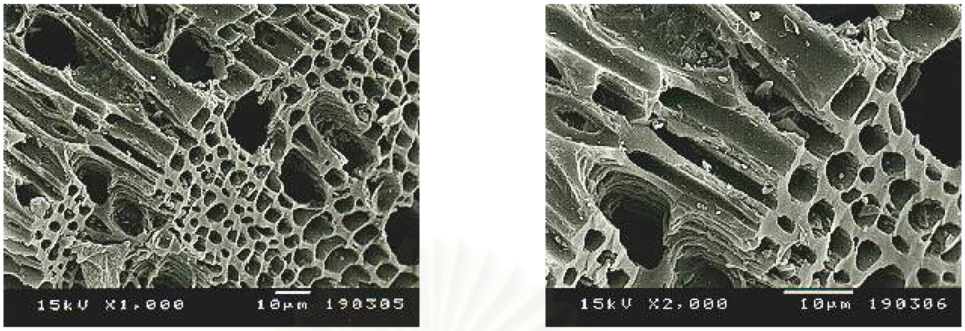
รูปที่ 4.46 ก,ข เป็นภาพถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัสอายุ 5 ปี กระตุ้นที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 90 นาที ปริมาณป้อนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 700 cm^3/min ปริมาณการป้อนไอน้ำ 20 cm^3/min และปริมาณการป้อนอากาศ 5 cm^3/min



(ก) (ข)

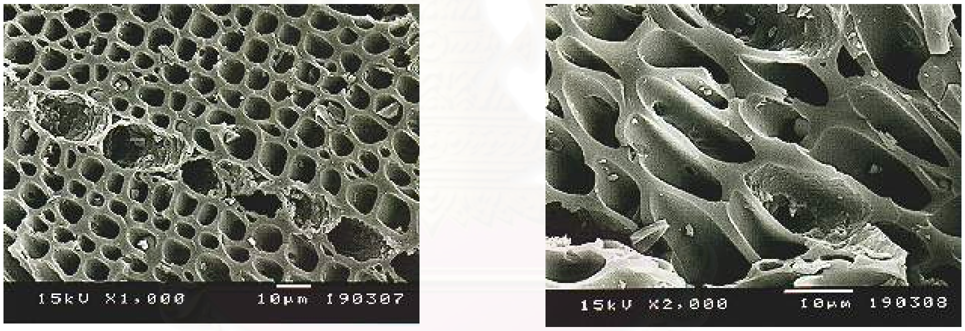
รูปที่ 4.47 ก,ข เป็นภาพถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัสอายุ 5 ปี กระตุ้นที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 120 นาที ปริมาณป้อนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 700 cm^3/min ปริมาณการป้อนไอน้ำ 20 cm^3/min และปริมาณการป้อนอากาศ 5 cm^3/min

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



(ก) (ข)

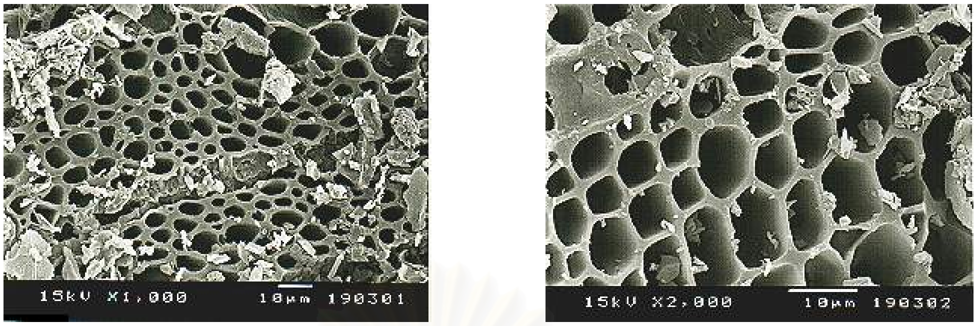
<u>รูปที่ 4.48 ก,ข</u> เป็นภาพถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัสอายุ 5 ปี กระตุ้นที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 150 นาที ปริมาณป้อนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 700 cm^3/min ปริมาณการป้อนไอน้ำ 20 cm^3/min และปริมาณการป้อนอากาศ 5 cm^3/min



(ก) (ข)

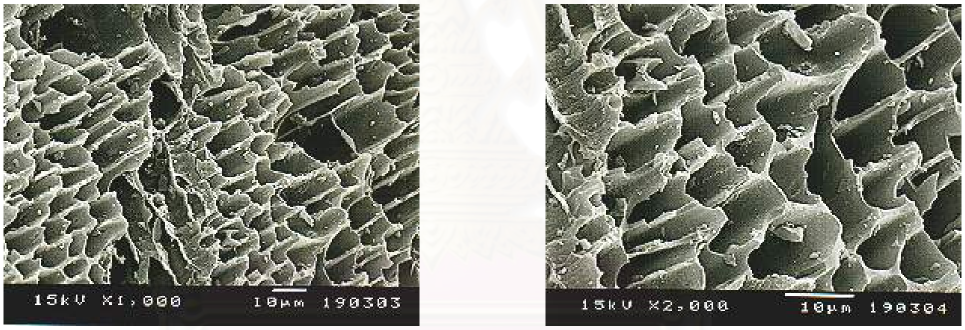
<u>รูปที่ 4.49 ก,ข</u> เป็นภาพถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัสอายุ 5 ปี กระตุ้นที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 180 นาที ปริมาณป้อนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 700 cm^3/min ปริมาณการป้อนไอน้ำ 20 cm^3/min และปริมาณการป้อนอากาศ 5 cm^3/min

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



(ก) (ข)

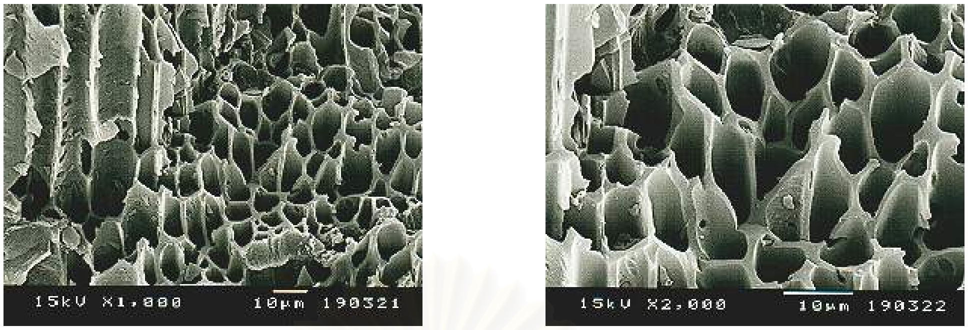
<u>รูปที่ 4.50 ก,ข</u> เป็นภาพถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัสอายุ 5 ปีที่ ขนาดอนุภาคถ่านชาร์ 0.3-0.6 มิลลิเมตร กระตุ้นที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 150 นาที ปริมาณป้อนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 700 cm^3/min ปริมาณการป้อนไอน้ำ 20 cm^3/min และปริมาณการป้อนอากาศ 5 cm^3/min



(ก) (ข)

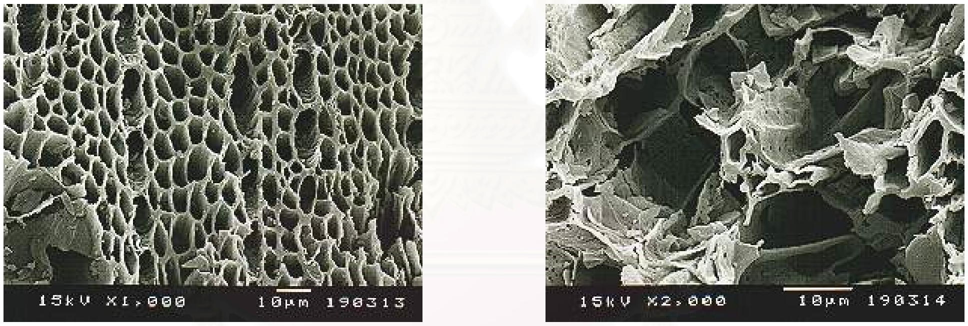
<u>รูปที่ 4.51 ก,ข</u> เป็นภาพถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัสอายุ 5 ปีที่ ขนาดอนุภาคถ่านชาร์ 1.18-2.36 มิลลิเมตร กระตุ้นที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 150 นาที ปริมาณป้อนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 700 cm^3/min ปริมาณการป้อนไอน้ำ 20 cm^3/min และปริมาณการป้อนอากาศ 5 cm^3/min

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



(ก) (ข)

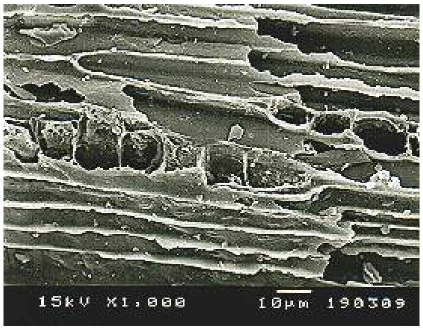
รูปที่ 4.52 ก,ข เป็นภาพถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัสอายุ 5 ปีที่ ขนาดอนุภาคถ่านชาร์ 2.36-4.75 มิลลิเมตร กระตุ้นที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 150 นาที ปริมาณป้อนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 700 cm^3/min ปริมาณการป้อนไอน้ำ 20 cm^3/min และปริมาณการป้อนอากาศ 5 cm^3/min



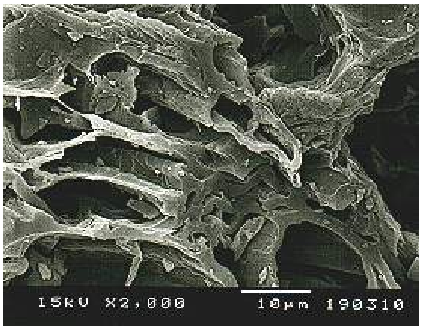
(ก) (ข)

รูปที่ 4.53 ก,ข เป็นภาพถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัสอายุ 5 ปีที่ ขนาดอนุภาคถ่านชาร์ 0.3-0.6 มิลลิเมตร กระตุ้นที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 150 นาที ปริมาณการป้อนไอน้ำ 20 cm^3/min

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



(ก)



(ข)

<u>รูปที่ 4.54 ก,ข</u> เป็นภาพถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัสอายุ 5 ปีที่ ขนาดอนภาคถ่านขาร์ 0.3-0.6 มิลลิเมตร กระตุ้นที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 150 นาที ปริมาณป้อนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 200 cm^3/min และปริมาณการป้อนอากาศ 5 cm^3/min

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5
อภิปรายและวิจารณ์ผลการทดลอง

5.1 ผลการศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการคาร์บอไนซ์

ตัวแปรที่ใช้ศึกษาคืออุณหภูมิและเวลา ซึ่งมีผลต่อสมบัติของถ่านชาร์ที่ได้คือ ร้อยละของผลิตภัณฑ์ ปริมาณเถ้า (Ash) ปริมาณสารระเหย(VM) และปริมาณคาร์บอนคงตัว(FC)

5.1.1 ผลของอุณหภูมิการคาร์บอไนซ์

จากตารางที่ 4.1, 4.2 และรูปที่ 4.10 – 4.17 จะเห็นได้ว่า แนวโน้มของทุกค่าวิเคราะห์ของถ่านไม้ยูคาลิปตัสอายุ 4 ปีและอายุ 5 ปีมีแนวโน้มที่ใกล้เคียงกัน โดยจะเห็นว่า เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นปริมาณสารระเหยจะลดลง เนื่องจากที่อุณหภูมิสูงทาร์และสารระเหยที่อยู่ในโครงสร้างของถ่านจะหลุดออกมาจากโครงสร้าง ทำให้ปริมาณสารระเหยที่เหลือมีค่าลดน้อยลง

ปริมาณผลิตภัณฑ์มีแนวโน้มลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น เนื่องจากความร้อนที่เพิ่มขึ้นทำให้เนื้อไม้เกิดการเผาไหม้กลายเป็นเถ้าและสารระเหยในเนื้อไม้หลุดออกไป จึงทำให้ร้อยละของผลิตภัณฑ์ที่ได้ลดน้อยลงที่อุณหภูมิสูงและจากการที่ร้อยละของปริมาณผลิตภัณฑ์ลดน้อยลง ร้อยละของคาร์บอนคงตัวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยจะมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น จากกราฟรูปที่ 4.16 และ 4.17 ในช่วงท้ายที่อุณหภูมิสูงพบว่าร้อยละของคาร์บอนคงตัวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย อาจเนื่องจากเกิดการอุดตันของรูพรุนทำให้สารระเหยไม่สามารถหลุดออกไปจากโครงสร้างของถ่านได้อีก [6]

5.1.2 ผลของเวลาการคาร์บอไนซ์

จากกราฟรูปที่ 4.2 – 4.9 และตารางที่ 4.1และ 4.2 จะพบว่า เมื่อเวลามากขึ้นทำให้วัตถุดิบได้รับความร้อนมากขึ้น จึงทำให้สารระเหยในเนื้อถ่านหลุดออกไป จากรูปที่ 4.6และ4.7 จะเห็นได้ว่า ร้อยละของสารระเหยที่เวลาต่างๆจะลดลงแต่ลดลงไม่มากนัก ด้วยเหตุผลเดียวกันกับความร้อนที่เพิ่มขึ้นจากการเพิ่มอุณหภูมิ ดังรูปที่ 4.2 และ 4.3 ที่เวลามากขึ้นวัตถุดิบก็จะได้รับความร้อนมากขึ้นทำให้ปริมาณผลิตภัณฑ์มีแนวโน้มลดลง เช่นกันเปอร์เซ็นต์คาร์บอนคงตัวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น แสดงดังรูปที่ 4.8 และ 4.9

ในการพิจารณาภาวะที่เหมาะสมในการคาร์บอไนซ์ถ่านชาร์นั้น จะพิจารณาถึงปริมาณสารระเหย ควบคู่ไปกับปริมาณผลิตภัณฑ์และคาร์บอนคงตัว จากข้อมูลของ บุญชัย ตระกูลมหชัย[6] (2536) พบว่าถ่านที่เหมาะสมสำหรับการกระตุ้นควรมีปริมาณสารระเหยไม่มากและไม่น้อยเกินไป คืออยู่ในช่วงร้อยละ 20 – 25 และจากงานวิจัยนี้จะหาภาวะที่เหมาะสมจากตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 ค่าสมบัติของถ่านชาร์จากไม้ยูคาลิปตัสอายุ 4 ปีและ 5 ปีที่มีปริมาณสารระเหยอยู่ในช่วงร้อยละ 20 – 25

ภาวะในการคาร์บอไนซ์		สมบัติที่พิจารณา	
อุณหภูมิ (^{o}C)	เวลา (min)	ร้อยละของสารระเหย	ร้อยละของผลิตภัณฑ์
450	45	21.76 / 24.85	23.08 / 24.20
450	60	20.52 / 21.57	22.32 / 21.96
450	90	21.06 / 21.39	20.71 / 20.03
500	45	20.66 / 22.49	23.19 / 23.90

หมายเหตุ ตัวเลขหน้าเครื่องหมาย (/) คือ ค่าของถ่านชาร์ที่ได้จากไม้ยูคาลิปตัสอายุ 4 ปี
ตัวเลขหลังเครื่องหมาย (/) คือ ค่าของถ่านชาร์ที่ได้จากไม้ยูคาลิปตัสอายุ 5 ปี

พบว่าภาวะที่เหมาะสมในการคาร์บอนไนซ์ของถ่านชาร์จากไม้ยูคาลิปตัสอายุ 4 และ 5 ปี คือที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 45 นาที เนื่องจากใช้เวลาและอุณหภูมิไม่สูงมากนักรวมทั้งให้ร้อยละของผลิตภัณฑ์ที่สูงสุดด้วย สมบัติของถ่านชาร์จากไม้ยูคาลิปตัสอายุ 4 ปีจากภาวะที่เหมาะสมคือ มีปริมาณร้อยละของผลิตภัณฑ์ เท่ากับ 23.08 ร้อยละของสารระเหยเท่ากับ 21.76 ปริมาณเถ้าร้อยละ 3.15 ปริมาณคาร์บอนคงตัวร้อยละ 75.09 ค่าการดูดซับไอโอดีน 80 มิลลิกรัม/กรัม และสมบัติของถ่านชาร์จากไม้ยูคาลิปตัสอายุ 5 ปีจากภาวะที่เหมาะสมคือ มีปริมาณร้อยละของผลิตภัณฑ์ เท่ากับ 24.20 ร้อยละของสารระเหยเท่ากับ 24.85 ปริมาณเถ้าร้อยละ 2.79 ปริมาณคาร์บอนคงตัวร้อยละ 72.36 ค่าการดูดซับไอโอดีน 89 มิลลิกรัม/กรัม

5.2 ผลการศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการกระตุ้น

จากสมบัติของถ่านชาร์ที่ได้จากการคาร์บอไนซ์ ถ่านที่ได้จากไม้ยูคาลิปตัสอายุ 5 ปีที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส เวลา 45 นาที พบว่า พื้นที่ผิวแบบแลงเมียร์มีค่าเท่ากับ 40.9 ตารางเมตร/กรัม และพื้นที่ผิวแบบบีอีทีมีค่าเท่ากับ 27.63 ตารางเมตร/กรัม จะเห็นได้ว่าสมบัติดังกล่าวมีความ

สามารถในการดูดซับต่ำ เนื่องจากพื้นที่ผิวมีค่าน้อยมาก ดังนั้นจึงทำการศึกษาถึงภาวะที่เหมาะสมในการกระตุ้น โดยศึกษาตัวแปรคือ อุณหภูมิ เวลา ขนาดอนุภาคของถ่านชาร์ และชนิดของแก๊สที่ใช้ในการกระตุ้น ซึ่งการพิจารณาหาภาวะที่เหมาะสมในการกระตุ้นจะพิจารณาจาก ค่าการดูดซับไอโอดีน (IA) ค่าการดูดซับเมทิลีนบลู(MB) ความหนาแน่นเชิงปริมาตร(BD) ปริมาณเถ้า(Ash) พื้นที่ผิวแบบแลงเมียร์($S_{Langmuir}$) พื้นที่ผิวแบบบีอีที(S_{BET}) และปริมาณผลิตภัณฑ์ (Y)

5.2.1 ผลของเวลาในการกระตุ้น

จากตารางที่ 4.3 , 4.4 และจากรูปที่ 4.18 , 4.19 จะเห็นว่าจากกราฟนั้นเมื่อเวลาในการกระตุ้นเพิ่มมากขึ้นจาก 90 นาที เพิ่มเป็น 120 , 150 และ 180 นาที ปริมาณผลิตภัณฑ์จะมีค่าลดลงโดยตลอด เนื่องจากเมื่อเวลามากขึ้นถ่านจะได้รับความร้อนมากขึ้น ทำให้สารระเหยที่อยู่ในโครงสร้างของถ่านหลุดออก ทำให้ปริมาณสารระเหยที่อยู่ในโครงสร้างของถ่านลดลง และเนื้อถ่านเกิดการเผาไหม้บางส่วนกับอากาศกลายเป็นเถ้าจึงเป็นสาเหตุให้ปริมาณผลิตภัณฑ์ลดลง เมื่อเวลาในการกระตุ้นมากขึ้นจากกราฟรูปที่ 4.18 และ 4.19 แนวโน้มของปริมาณผลิตภัณฑ์ในการกระตุ้นถ่านชาร์ที่ได้จากไม้ยูคาลิปตัสอายุ 4 ปี และอายุ 5 ปี เป็นไปในทิศทางเดียวกันและมีค่าร้อยละของปริมาณผลิตภัณฑ์ใกล้เคียงกันด้วย

จากกราฟรูปที่ 4.24 และ 4.25 พบว่าเมื่อเวลาเพิ่มมากขึ้นถ่านกัมมันต์จากการกระตุ้น ทั้งถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัสอายุ 4 ปีและอายุ 5 ปี ที่อุณหภูมิ 800 , 850 และ 900 องศาเซลเซียส มีค่าการดูดซับไอโอดีนมากขึ้น เนื่องจากการที่มีเวลามากขึ้นนั้นสารระเหยจะถูกกำจัดออกไปได้มากและสารกระตุ้นคือแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำจะสามารถแพร่เข้ามาได้มาก ทำให้เกิดปฏิกิริยากับผิวถ่านซึ่งจะช่วยให้ถ่านมีรูพรุนมากขึ้นอันเนื่องมาจากมีการขยายรูพรุนที่มีอยู่แล้วและสร้างรูพรุนขึ้นใหม่ ทำให้สมบัติในการดูดซับไอโอดีนเพิ่มมากขึ้น แต่จากกราฟ 4.24 และ 4.25 ที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส เมื่อเวลาเพิ่มขึ้นค่าการดูดซับไอโอดีนมีค่าลดลง เนื่องจากที่อุณหภูมินี้เมื่อเวลาเพิ่มมากขึ้นทำให้ผนังระหว่างรูพรุนขนาดเล็กหรือรูพรุนขนาดกลางในโครงสร้างเกิดการเผาไหม้บางส่วนกลายเป็นเถ้า ทำให้รูพรุนขนาดเล็กกลายเป็นรูพรุนขนาดกลางหรือรูพรุนขนาดใหญ่ทำให้ค่าการดูดซับไอโอดีนเมื่อเวลามากขึ้นคือมีความร้อนมากขึ้นด้วยนั้น มีค่าลดลงจาก 90-180 นาทีเพราะถ่านกัมมันต์มีรูพรุนขนาดใหญ่มากจะทำให้ค่าการดูดซับไอโอดีนลดลง เนื่องจากรูพรุนขนาดเล็กนั้นเป็นพื้นที่ผิวส่วนใหญ่ของอนุภาคถ่านกัมมันต์ดังนั้นหากรูพรุนขนาดเล็กลดน้อยลงจะทำให้การดูดซับไอโอดีนลดลง เพราะการดูดซับไอโอดีนอยู่ในช่วงรูพรุนขนาดเล็ก จากรูปที่ 4.24 และ 4.25 จะเห็นว่าแนวโน้มการดูดซับของถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัสอายุ 4 ปีและอายุ 5 ปีมีค่าใกล้เคียงกัน

จากรูปที่ 4.26 และ 4.27 แสดงค่าการดูดซับเมทิลีนบลูมีค่าเพิ่มขึ้นโดยตลอดเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่อเวลามากถ่านจะได้รับความร้อนมากซึ่งจะไปไล่ทาร์และสารระเหยออกไปมากขึ้นด้วย ทำให้สารกระตุ้นแพร่เข้าไปได้ง่ายซึ่งจะเกิดรูพรุนในโครงสร้างมากขึ้น จากเหตุผลดังกล่าวทำให้ค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตรของถ่านกัมมันต์มีค่าลดลงด้วยเมื่อเวลาเพิ่มมากขึ้นดังกราฟรูปที่ 4.20 และรูปที่ 4.21 จากกราฟรูปที่ 4.26 และ 4.27 เป็นค่าการดูดซับเมทิลีนบลูและรูปที่ 4.20 และ 4.21 เป็นกราฟแสดงความหนาแน่นเชิงปริมาตรพบว่าแนวโน้มของถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัสอายุ 4 ปี และอายุ 5 ปีใกล้เคียงกัน

เนื่องจากสมบัติการดูดซับของถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัสอายุ 4 ปีและอายุ 5 ปีใกล้เคียงกัน แต่ถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัสอายุ 5 ปี มีสมบัติการดูดซับที่ดีกว่าเล็กน้อยจึงเลือกถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัสอายุ 5 ปี มาวิเคราะห์ค่าพื้นที่ผิว ซึ่งค่าพื้นที่ผิวเป็นค่าวิเคราะห์ที่สำคัญมากในการผลิตถ่านกัมมันต์

จากกราฟรูปที่ 4.28 และ 4.29 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ของพื้นที่ผิวแบบแลงเมียร์และแบบบีอีทีกับเวลาตามลำดับ โดยเป็นกราฟของถ่านกัมมันต์อายุ 5 ปี ซึ่งจะเห็นว่าเมื่อเวลาการกระตุ้นมากขึ้น ถ่านที่ได้รับความร้อนมากสารระเหยจะออกไปมากและจะมีการทำปฏิกิริยาของสารกระตุ้นมากด้วยทำให้ถ่านมีรูพรุนมากขึ้น ถ่านกัมมันต์จากการกระตุ้นที่อุณหภูมิ 800 และ 850 องศาเซลเซียสมีค่าพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้นโดยตลอดเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น ถ่านกัมมันต์จากการกระตุ้นที่ 900 องศาเซลเซียสมีค่าพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้นในช่วงเวลา 90 นาทีถึง 150 นาทีและมีค่าพื้นที่ผิวลดลงในช่วง 150 นาทีถึง 180 นาทีเนื่องจากถ่านกัมมันต์ในช่วงท้ายนั้นได้รับความร้อนมากจึงทำให้เกิดการเผาไหม้บางส่วนที่ผนังรูพรุนขนาดเล็กทำให้รูพรุนขนาดเล็กรวมตัวกันกลายเป็นรูพรุนขนาดกลางและขนาดใหญ่ตามลำดับทำใหสูญเสียพื้นที่ผิวจากรูพรุนขนาดเล็กไป จากสาเหตุดังกล่าวถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียสมีค่าพื้นที่ผิวลดลงโดยตลอดเมื่อเวลาเพิ่มมากขึ้น

5.2.2 ผลของอุณหภูมิในการกระตุ้น

จากตารางที่ 4.3 , 4.4 และ จากกราฟรูปที่ 4.30 , 4.31 เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 800 องศาเซลเซียสถึง 950 องศาเซลเซียส ปริมาณผลิตภัณฑ์ลดลงเนื่องจากที่อุณหภูมิสูง ทาร์และสารระเหยที่อุดรูพรุนจะหลุดออกไป ทำให้สารกระตุ้นแพร่เข้าไปได้มากขึ้น และเมื่อถ่านนั้นถูกเผาไหม้บางส่วนจะกลายเป็นเถ้าไป จากกราฟรูปที่ 4.30, 4.31 พบว่า การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิมีผลมากกว่าการเปลี่ยนแปลงเวลา เพราะเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นแนวโน้มปริมาณผลิตภัณฑ์มีค่าลดลงมากกว่าการเพิ่มเวลา และจากเหตุผลที่ถ่านกัมมันต์มีแนวโน้มผลิตภัณฑ์ลดลงเมื่อเวลามากขึ้น ทำให้ปริมาณเถ้ามากขึ้น

เมื่ออุณหภูมิเพิ่ม สังเกตจากกราฟรูปที่ 4.34 และ 4.35 ซึ่งแนวโน้มของปริมาณผลิตภัณฑ์และปริมาณเถ้าของถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัสอายุ 4 ปีและ 5 ปีมีแนวโน้มใกล้เคียงกัน

จากกราฟรูปที่ 4.32 และ 4.33 เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 800 ถึง 950 องศาเซลเซียส โครงสร้างของถ่านมีความพรุนมากขึ้นตามอุณหภูมิ เนื่องจากการไล่สารระเหยออกไปและมีการสร้างรูพรุนเพิ่มจากการที่สารกระตุ้นแพร่เข้าไปในโครงสร้างของถ่าน ทำให้ความหนาแน่นเชิงปริมาตรมีแนวโน้มลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นเชิงปริมาตรของถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัสอายุ 4 ปีและ 5 ปีมีค่าใกล้เคียงกัน

จากตารางที่ 4.3, 4.4 และกราฟรูปที่ 4.36 ,4.37 จะพบว่า เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 800 – 850 องศาเซลเซียส ค่าการดูดซับไอโอดีนมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเนื่องจากอุณหภูมิในช่วงนี้ให้ความร้อนไม่เพียงพอที่จะช่วยไล่สารระเหยและทาร์ให้ออกไปจากโครงสร้าง จากการที่ทาร์และสารระเหยอุดตามรูพรุนทำให้สารกระตุ้นแพร่เข้าไปในโครงสร้างได้ไม่สะดวกโดยจะไหลผ่านผิวถ่านด้านนอกมากกว่าที่จะแพร่เข้าไปในโครงสร้างของถ่าน ดังนั้นการสร้างรูพรุนที่ช่วงอุณหภูมินี้จึงน้อย แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 850 – 900 องศาเซลเซียสค่าการดูดซับไอโอดีนมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เนื่องจากสารระเหยและทาร์ที่อุดรูพรุนถูกไล่ออกไปอย่างรวดเร็ว และส่งผลให้สารกระตุ้นแพร่เข้าไปในโครงสร้างของถ่านได้ดีขึ้น โดยจะเกิดการสร้างรูพรุนขึ้นใหม่และมีการขยายรูพรุนเดิม ทำให้มีการดูดซับไอโอดีนได้ดีขึ้นมาก จากอุณหภูมิ 900 – 950 องศาเซลเซียสค่าการดูดซับไอโอดีนมีค่าลดลงเนื่องจากเมื่ออุณหภูมิสูงมากขึ้นทำให้รูพรุนขนาดเล็กรวมตัวกลายเป็นรูพรุนขนาดกลางและขนาดใหญ่ จากการเผาไหม้บางส่วนที่ผนังรูพรุนขนาดเล็กหรือรูพรุนขนาดกลาง ส่งผลให้ค่าการดูดซับไอโอดีนมีค่าลดลง เนื่องจากการดูดซับไอโอดีนไม่เหมาะสมกับถ่านกัมมันต์ในช่วงรูพรุนขนาดใหญ่ ซึ่งเหตุผลดังกล่าวเมื่อรูพรุนขนาดกลางมีค่าเพิ่มมากขึ้นทำให้สมบัติการดูดซับเมทิลีนบลูมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง สังเกตได้จากกราฟรูปที่ 4.38 และ 4.39 จากกราฟแนวโน้มของการดูดซับไอโอดีนและเมทิลีนบลูของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากไม้ยูคาลิปตัสอายุ 4 ปีและ 5 ปีมีค่าใกล้เคียงกัน

จากกราฟรูปที่ 4.40 และ 4.41 เป็นภาพของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากไม้ยูคาลิปตัสอายุ 5 ปี แสดงค่าพื้นที่ผิวแบบแลงเมียร์และพื้นที่ผิวแบบบีอีทีมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น แต่พื้นที่ผิวในช่วงอุณหภูมิในช่วง 800 – 850 องศาเซลเซียสมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย แต่เมื่ออุณหภูมิสูงถึง 900 องศาเซลเซียสค่าพื้นที่ผิวจะเพิ่มขึ้นมากและมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นถึง 950 องศาเซลเซียส สาเหตุดังกล่าวนั้นเป็นเช่นเดียวกับในส่วนการดูดซับไอโอดีน

ดังนั้นเมื่อพิจารณาค่าการดูดซับไอโอดีน ค่าพื้นที่ผิวแบบแลงเมียร์ ค่าพื้นที่ผิวแบบบีอีที รวมถึงค่าการดูดซับเมทิลีนบลู นำมาพิจารณาเลือกภาวะที่เหมาะสมในการกระตุ้นคือที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 150 นาที เพราะให้ค่าดังกล่าวที่พิจารณาสูงที่สุด โดยถ่านกัมมันต์ทั้งที่ได้จากไม้ยูคาลิปตัสอายุ 4 ปีและ 5 ปีมีค่าวิเคราะห์ใกล้เคียงกัน ภาวะที่เหมาะสมจึงเป็นภาวะเดียวกัน

ตารางที่ 5.2 สมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ภาวะอุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 150 นาที

สมบัติ	ถ่านกัมมันต์จากไม้ยู-คาลิปตัสอายุ 4 ปี	ถ่านกัมมันต์จากไม้ยู-คาลิปตัสอายุ 5 ปี
ร้อยละผลิตภัณฑ์	37.53	35.93
ความหนาแน่นเชิงปริมาตร (g/cm^3)	0.1855	0.1837
ปริมาณเถ้า (%)	5.92	6.28
ค่าการดูดซับไอโอดีน (mg/g)	825	892
ค่าการดูดซับเมทิลีนบลู (mg/g)	234	230
พื้นที่ผิวแบบแลงเมียร์ ($S_{Langmuir}$, m^2/g)	-	1127.07
พื้นที่ผิวแบบบีอีที (S_{BET}, m^2/g)	-	816.60

5.2.3 ผลของการแปรขนาดอนุภาคของถ่านชาร์ในการกระตุ้น

เนื่องจากสมบัติต่างๆของถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัสอายุ 4 ปีและ 5 ปี ในการศึกษาหาภาวะที่เหมาะสมของอุณหภูมิและเวลาในการกระตุ้น พบว่า มีค่าใกล้เคียงกันมาก จึงเลือกถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัสอายุ 5 ปีมาศึกษาต่อ เนื่องจากมีสมบัติในการดูดซับไอโอดีนและเมทิลีนบลูที่ดีกว่าเล็กน้อย ในการกระตุ้นด้วยวิธีที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นปฏิกิริยาระหว่าง ของแข็งและแก๊ส ซึ่งขนาดอนุภาคต่าง ๆ จะเป็นข้อจำกัดหนึ่งในการแพร่ของแก๊สที่ใช้เป็นสารกระตุ้น

จากตารางที่ 4.5 และกราฟที่ 4.42 ถึง 4.45 พบว่าเมื่อขนาดอนุภาคของถ่านชาร์เท่ากับ 0.3 – 0.6 มิลลิเมตร จะมีค่าการดูดซับไอโอดีนเท่ากับ 1143 มิลลิกรัม/ลิตร ค่าการดูดซับเมทิ-ลีนบลูมีค่าเท่ากับ 231 มิลลิกรัม/ลิตร พื้นที่ผิวแบบแลงเมียร์มีค่าเท่ากับ 1226.34 ตารางเมตร/กรัม พื้นที่ผิวแบบบีอีทีเท่ากับ 893.76 ตารางเมตร/กรัม ซึ่งสังเกตุจากตารางที่ 4.5 พบว่าเมื่อขนาดอนุภาคมีค่าเพิ่มขึ้นแนวโน้มของค่าการดูดซับไอโอดีนดังรูปที่ 4.42 พื้นที่ผิวแบบดีอีทีดังรูปที่

4.45 พื้นที่ผิวแบบแลงเมียร์ดังรูปที่ 4.44 มีแนวโน้มลดลง อย่างไรก็ตามเมื่อขนาดอนุภาคเพิ่มขึ้น จาก 0.3 – 0.6 มิลลิเมตร เป็น 0.6 – 1.18 มิลลิเมตร และ 1.18 – 2.36 มิลลิเมตร มีค่าลดลงเพียงเล็กน้อยสาเหตุเนื่องจากเมื่อขนาดอนุภาคใหญ่ขึ้นทำให้เมื่อแก๊สกระตุ้นไหลผ่านนั้นสารกระตุ้นจะแพร่ผ่านผิวของถ่านมากกว่าที่จะแพร่เข้าไปในอนุภาค ทำให้ในโครงสร้างของถ่านมีการเกิดรูพรุนน้อยเมื่ออนุภาคถ่านใหญ่ขึ้น และเมื่ออนุภาคใหญ่จะมีช่องว่างในเบด (bed) ของเครื่องปฏิกรณ์มากแก๊สจึงผ่านไปได้เร็วกว่าเบดที่มีถ่านอนุภาคขนาดเล็ก เพราะเมื่อแก๊สผ่านไปเร็วเวลาที่สัมผัสกับผิวถ่านจึงน้อย

ดังนั้นขนาดอนุภาคที่เหมาะสมในการกระตุ้นคือ ขนาด 0.3 – 0.6 มิลลิเมตร โดยมีค่าร้อยละผลิตภัณฑ์เท่ากับ 28.95 ความหนาแน่นเชิงปริมาตรเท่ากับ 0.1623 กรัม/ตารางเซนติเมตร ร้อยละของปริมาณเถ้า 9.42 ค่าการดูดซับไอโอดีน 1142 มิลลิกรัม/กรัม ค่าการดูดซับเมทิลีนบลูเท่ากับ 231 มิลลิกรัม/กรัม พื้นที่ผิวแบบแลงเมียร์เท่ากับ 1226.34 ตารางเมตร/กรัม พื้นที่ผิวแบบบีอีทีเท่ากับ 893.76 ตารางเมตร/กรัม

5.2.4 ผลของการแปรชนิดของแก๊สในการกระตุ้น

เนื่องจากการศึกษาการผลิตถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัสคามาลดูเลนซีสอายุ 5 ปี ในงานวิจัยนี้มีความตั้งใจที่จะศึกษาถึงการหาภาวะที่เหมาะสมในการกระตุ้นเพื่อให้ได้ถ่านกัมมันต์ที่มีความสามารถในการดูดซับสูง โดยทำการกระตุ้นใช้แก๊สผสมระหว่างแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำ เพราะเป็นวิธีที่ใช้ทั่วไปในการผลิตถ่านกัมมันต์ในระดับอุตสาหกรรม อย่างไรก็ตามในงานวิจัยนี้ก็ต้องการที่จะศึกษาต่อไปถึงแก๊สที่เหมาะสมที่สุดในการกระตุ้นเพื่อให้ได้ถ่านกัมมันต์ที่มีสมบัติในการดูดซับที่ดีที่สุด

จากตารางที่ 4.6 จะเห็นว่ามีการศึกษาถึงการกระตุ้นโดยใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำที่อุณหภูมิต่างกัน แต่ในขณะที่กระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์นั้นได้ผสมอากาศเข้าไปด้วยเพื่อช่วยให้เกิดปฏิกิริยาเร็วขึ้นและเพิ่มเปอร์เซ็นต์การเผาไหม้ในเนื้อถ่านด้วย

เมื่อเปรียบเทียบการกระตุ้นที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส พบว่าการกระตุ้นด้วยไอน้ำจะให้ค่าการดูดซับไอโอดีน 513.74 มิลลิกรัม/กรัม ค่าพื้นที่ผิวแบบแลงเมียร์เท่ากับ 457.33 ตารางเมตร/กรัม ค่าพื้นที่ผิวแบบบีอีทีเท่ากับ 334.59 ตารางเมตร/กรัม และการกระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ จะให้ค่าการดูดซับไอโอดีน 259 มิลลิกรัม/กรัม ค่าพื้นที่ผิวแบบแลงเมียร์เท่ากับ 228.61 ตารางเมตร/กรัม ค่าพื้นที่ผิวแบบบีอีทีเท่ากับ 168.23 ตารางเมตร/กรัม

สังเกตได้ว่าที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส การกระตุ้นด้วยไอน้ำจะให้สมบัติในการดูดซับและค่าพื้นที่ผิวแบบบีอีทีและแบบแลงเมียร์ที่ดีกว่ากระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ เช่นเดียวกันเมื่อกระตุ้นที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส พบว่ากระตุ้นด้วยไอน้ำให้สมบัติสมบัติในการดูดซับและค่าพื้นที่ผิวแบบบีอีทีและแบบแลงเมียร์ที่ดีกว่ากระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ดีกว่าคือ ค่าการดูดซับไอโอดีน 1233 มิลลิกรัม/กรัม ค่าพื้นที่ผิวแบบแลงเมียร์เท่ากับ 1497.32 ตารางเมตร/กรัม ค่าพื้นที่ผิวแบบบีอีทีเท่ากับ 1076.15 ตารางเมตร/กรัม ซึ่งเป็นสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ดีที่สุดที่ผลิตได้

เมื่อเปรียบเทียบที่อุณหภูมิและเวลาเดียวกัน พบว่าการกระตุ้นด้วยไอน้ำจะให้สมบัติการดูดซับและพื้นที่ผิวที่มากกว่าการกระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มาก ซึ่ง Rodriguez-Reinoso[27] ได้กล่าวว่าที่สภาวะเดียวกันไอน้ำจะมีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยามากกว่าแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ เนื่องจากน้ำมีโมเลกุลที่เล็กกว่าจึงสามารถแพร่เข้าไปในโครงสร้างรูพรุนที่ดีกว่า และมีการเกิดปฏิกิริยากับผิวถ่านเร็วกว่าด้วย ซึ่งสอดคล้องกับผลงานวิจัยนี้ Gergova[31] กล่าวว่าที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ไอน้ำจะมีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยามากกว่าแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ถึง 3 เท่า ดังนั้นหากต้องการกระตุ้นด้วยไอน้ำและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ให้ได้ถ่านกัมมันต์ที่มีสมบัติการดูดซับและพื้นที่ผิวใกล้เคียงกัน การกระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จะใช้อุณหภูมิและเวลามากกว่าการกระตุ้นด้วยไอน้ำ

ชนิดของแก๊สที่เหมาะสมในการกระตุ้นคือ การกระตุ้นโดยใช้ไอน้ำที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 150 นาที โดยได้ถ่านกัมมันต์ที่มีค่าร้อยละผลิตภัณฑ์เท่ากับ 33.14 ค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตร 0.1809 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร ร้อยละของปริมาณเถ้า 6.37 การดูดซับไอโอดีน 1233 มิลลิกรัม/กรัม ค่าการดูดซับเมทิลีนบลู 242 มิลลิกรัม/กรัม พื้นที่ผิวแบบแลงเมียร์ 1497.32 ตารางเมตร/กรัม พื้นที่ผิวแบบบีอีที 1076.15 ตารางเมตร/กรัม

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

โดยทำการเปรียบเทียบงานวิจัยนี้กับงานวิจัยในอดีต

ตารางที่ 5.3 เปรียบเทียบงานวิจัย

ข้อมูลเปรียบเทียบ	Renan Arrigada[26](2539)	Nestor Tancredi[27](2539)	วิจิตร จินดาพันธ์ไพโรจน์ (2543)
วัตถุดิบ	ไม้ยูคาลิปตัสโกลบู-ลัส(E.globulus)	ไม้ยูคาลิปตัสแกรน-ดิส(E.grandis)	ไม้ยูคาลิปตัสคามาลดูเลน-ซิส(E.camaldulensis)
เครื่องปฏิกรณ์	เบดนิ่ง	เบดนิ่ง	เบดนิ่ง
ภาวะในการคาร์บอไนซ์	-	800^0C	450^0C , 45 min.
ภาวะในการกระตุ้น	870^0C , 270 min	800^0C	900^0C , 150 min
สารกระตุ้น	ไอน้ำ	ไอน้ำ	ไอน้ำ
ร้อยละผลิตภัณฑ์	21	44	33.14
ค่าการดูดซับไอโอดีน(mg/g)	968	-	1233
ค่าการดูดซับเมทิลีนบลู (mg/g)	311	-	242
พื้นที่ผิวแบบบีอีที(m^2/g)	1193	1190	1076.15

5.3 **ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดซับไอโอดีนและพื้นที่ผิวแบบบีอีที**(S_{BET})

จากการทดลองในส่วนการหาอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมในการกระตุ้น ค่าการดูดซับไอโอดีนและพื้นที่ผิวแบบบีอีทีมีความสัมพันธ์กัน ซึ่งสังเกตุว่ามีแนวโน้มไปในแนวทางเดียวกัน เมื่อถ่านกัมมันต์มีการดูดซับไอโอดีนเพิ่ม ค่าพื้นที่ผิวแบบบีอีทีก็เพิ่มขึ้นเช่นกัน โดยการดูดซับของไอโอดีนจะเป็นการดูดซับของถ่านกัมมันต์ในช่วงรูพรุนขนาดเล็ก ซึ่งพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์นั้นขึ้นอยู่กับพื้นที่ผิวจากรูพรุนขนาดเล็กมากเพราะเมื่อเทียบกับโครงสร้างของถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวมากแล้วนั้น รูพรุนส่วนใหญ่จะเป็นรูพรุนขนาดเล็ก ส่วนรูพรุนขนาดกลางและขนาดใหญ่จะมีน้อยกว่ามาก จากแนวโน้มความสัมพันธ์ดังกล่าวจะเป็นของวัตถุดิบและสภาวะที่ทำในงานวิจัยนี้เท่านั้น

สมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดซับไอโอดีนและพื้นที่ผิวแบบบีอีทีคือ

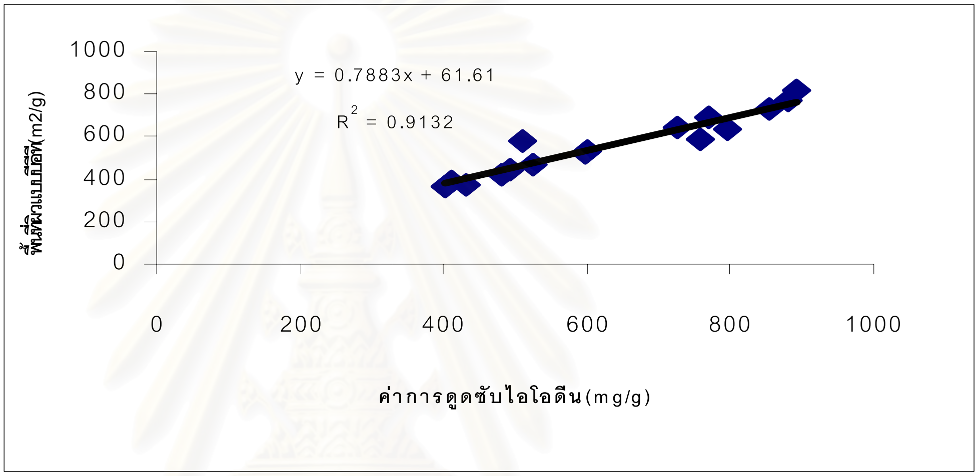
$$y = 0.7883x + 61.61$$

โดย

y คือ พื้นที่ผิวแบบบีอีที (S_{BET} , m^2/g)

x คือ ค่าการดูดซับไอโอดีน (IA , mg/g)

R^2 คือ 0.9132



รูปที่ 5.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพื้นที่ผิวแบบบีอีที(S_{BET})และค่าการดูดซับไอโอดีน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 6
สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลงานวิจัย

- สมบัติเบื้องต้นของไม้ยูคาลิปตัสอายุ 4 ปีและอายุ 5 ปี

ตารางที่ 6.1 สมบัติเบื้องต้นของไม้ยูคาลิปตัส

สมบัติ	ไม้จากแหล่งกบินทร์บุรี 4 ปี	ไม้จากแหล่งกบินทร์บุรี 5 ปี
เถ้า (ash, %)	0.98	1.00
สารระเหย (VM, %)	83.60	80.10
คาร์บอนคงตัว (FC, %)	15.42	18.89

- *ภาวะที่เหมาะสมในการผลิตถ่านกัมมันต์*

ภาวะที่เหมาะสมในการผลิตถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัสอายุ 5 ปี ที่ได้จากการกระตุ้นโดยใช้ไอน้ำเป็นสารกระตุ้นโดยป้อนไอน้ำในอัตรา 20 ลูกบาศก์เซนติเมตร/นาที เป็นเวลา 150 นาที ถ่านชาร์มีขนาดอนุภาค 0.3 – 0.6 มิลลิเมตร ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส มีสมบัติดังนี้

ค่าการดูดซับไอโอดีน	1233	มิลลิกรัม/กรัม
ค่าการดูดซับเมทธิลีนบลู	242	มิลลิกรัม/กรัม
ความหนาแน่นเชิงปริมาตร	0.1809	กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร
ร้อยละของผลิตภัณฑ์	33.14	
ร้อยละของปริมาณเถ้า	6.37	
พื้นที่ผิวแบบแลงเมียร์	1497.32	ตารางเมตร/กรัม
พื้นที่ผิวแบบบีอีที	1076.15	ตารางเมตร/กรัม

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากการวิเคราะห์ค่าต่าง ๆ ออกมา พบว่ามีความเป็นไปได้ที่จะผลิตถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัส *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh. ทั้งอายุ 4 ปี และอายุ 5 ปี เนื่องจากเป็นระยะตัดไม้ของไม้ยูคาลิปตัสที่เหมาะสมพอดีในการนำมาใช้ในอุตสาหกรรมกระดาษ ซึ่งเป็นการเพิ่มคุณค่าของเศษไม้ยูคาลิปตัสได้อย่างดี หรืออาจจะเป็นการช่วยกำจัดของเสียเหลือทิ้งทางการเกษตร และดีกว่าที่จะนำเศษไม้เหล่านี้ไปทำเป็นเชื้อเพลิง โดยค่าวิเคราะห์ที่ได้พบว่าสมบัติการดูดซับไอโอดีนและพื้นที่ผิวมีค่าอยู่ในระดับเดียวกับถ่านกัมมันต์เกรดการค้า จึงสามารถที่จะนำไปเป็นแนวทางในการผลิตถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัสได้

6.2 **ข้อเสนอแนะ**

1. เนื่องจากในการทดลองของงานวิจัยนี้เป็นเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งซึ่งความร้อนในแต่ละตำแหน่งของเบดจะมีอุณหภูมิไม่เท่ากัน เพราะมีการกระจายความร้อนที่ไม่สม่ำเสมอ ดังนั้นหากทำการศึกษาในเครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิไดซ์เบดจะทำให้ถ่านกัมมันต์ที่ได้มีคุณสมบัติที่สม่ำเสมอ
2. ถ่านชาร์ที่ได้จากไม้ยูคาลิปตัสมีลักษณะเปราะมาก ดังนั้นหากนำถ่านนี้มาบดและทำการอัดก้อนโดยใช้ตัวประสาน (binder) หลังจากนั้นจึงนำมาตัดเป็นชิ้นเล็กก่อนทำการกระตุ้นจะทำให้ได้ถ่านกัมมันต์ที่มีความหนาแน่นเชิงปริมาตรที่สูงกว่าในงานวิจัยนี้
3. วัตถุดิบในงานวิจัยนี้เป็นไม้ดังนั้นจึงควรทำการศึกษาเปรียบเทียบการกระตุ้นด้วยวิธีทางเคมีด้วย เนื่องจากการกระตุ้นทางเคมีนั้นเหมาะกับวัตถุดิบที่เป็นไม้และจะใช้อุณหภูมิในการกระตุ้นที่ต่ำกว่าการกระตุ้นทางกายภาพ โดยสามารถให้พื้นที่ผิวที่มากด้วย
4. ตัวแปรที่ควรศึกษาเพิ่มเติมคือ การตั้งอัตราการให้ความร้อน (Heating Rate) ในการคาร์บอไนซ์ และในขณะทำการกระตุ้น นอกจากนั้นควรศึกษาถึงอัตราการไหลของแก๊สกระตุ้นด้วย
5. ควรศึกษาการทำการบำบัดก่อนทำการกระตุ้น (Pretreatment) โดยอาจนำวัตถุดิบแรกเริ่มหรือถ่านชาร์ที่ได้หลังจากการคาร์บอไนซ์นำมาแช่ในสารละลายกรด เช่น กรดฟอสฟอริก เพื่อกำจัดสารอนินทรีย์ สารต่าง ๆ ที่ไม่ใช่คาร์บอนหรือธาตุบางชนิดที่อาจเป็นตัวหน่วงปฏิกิริยาในขณะทำการกระตุ้นออกไป

รายการอ้างอิง

1. Gergova K. A Comparison of Adsorption Characteristics of Various Activated Carbon.J.Chem.Tech.Biotechnol . 56(1993):77-82
2. Derbyshire,F., Jagtoyen,M., Thwaites,M. Activated Carbons – Production and Application .In Patrick,John W., Porosity in Carbons:Characterization and Application, pp.227-252. Great Britain : Edward Arnold, 1995.
3. Jankowska,H., Swiatkowski,A. and Choma,J. Active Carbon . Poland : Ellis Horwood Limited, 1991.
4. กระทรวงอุตสาหกรรม. มาตรฐานผลิตภัณฑ์อตสาหกรรมถ่านกัมมันต์ กรุงเทพมหานคร : สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2532
5. 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.
6. Hassler,John W. Purification with Activated Carbon: Industrial Commercial Environmental .2nd ed. New York :Chemical Publishing Co.,Inc, 1974.
7. วิเชียร ตรงจิตธรรม. การคาร์บอไนซ์ของถ่านหินในฟลูอิไดซ์เบด . วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยา-ศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2532
8. บุญชัย ตระกูลมหชัย. การผลิตกะลาตาลโตนดในฟลูอิไดซ์เบด . วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2537
9. Baker,Frederick S., Miller,Charles E., Repik,Albert J. and Tolles,Donald E. Activated Carbon. Ruthven,Douglas M., Encyclopedia of Separation Technology ,pp.72-93 USA : John Wiley&Sons, 1997.
10. 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.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

11. Faust,Samuel D. and Aly,Osman M. Adsorption Processes for Water treatment .Butter Worth, 1987.

12. John T. Cookson,Jr. Adsorption Mechanisms:The Chemistry of Organic Adsorption on Activated Carbon. In Cheremisinoff,Paul N. and Ellerbusch,F., Carbon Adsorption Handbook , pp.241-279. Michigan:Ann Arbor Science, 1978.

13. อธิชัย นพแก้ว. การใช้ถ่านกัมมันต์ในการดูดติดผิวโลหะหนักจากน้ำชะมูลฝอยที่ผ่านบ่อเก็บกัก. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2539.

14. Johns,Mitchell M.,Marshall,Wayne E. and Toles,Christopher A. The Effect of Activation Method on The Properties of Pecan Shell Activated Carbon. J.Chem.Tech.Biotechnol . 74(1999):1,037-1,044.

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

16. วุฒิชัย ใช้เทียมวงศ์ และ อาสา ชินธรรมมิตร์. ผลของค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายตั้งต้นที่มีต่อโครงสร้างของเพนตาซิลซีโอไลต์. ปริญญานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์,2539.

17. Satterfirld,Charles N. Heterogeneous Catalysis in Industrial Practice .2nd .Singapore: McGraw-Hill, 1993.

18. ประวิทย์ ตันจงนาวิน. เอกสารประกอบคำสอนวิชาเคมีคะตะลิสต์. คณะวิชาเทคนิคเคมี วิทยาเขตเทคนิคกรุงเทพฯ, สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล. กรุงเทพฯ: 2540.

19. ธราธร มงคลศรี. เอกสารประกอบคำสอนวิชาพื้นฐานคะตะลิสต์ในทางวิศวกรรม. ภาควิชาวิศวกรรมเคมี, คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

20. จักริน นิธิจันทร์. การผลิตถ่านกัมมันต์ระดับขยายส่วนจากพีตโดยคาร์บอไนเซชันและการกระตุ้น ด้วยไอน้ำในฟลูอิไดซ์เบด. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต , ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2537.

21. พงศธร โคว้คชาภรณ์. ถ่านกัมมันต์จากซังข้าวโพด. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2538.

22. กสิกรไทย,ธนาคาร. ไม้อเนกประสงค์. ส่วนวิจัยเกษตรกรรมฝ่านวิชาการ. 2538.

23. โกวิท สันตจิตร. ผลผลิตของสวนป่าไม้ยูคาลิปตัสคามาลดูเลนซิส. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต คณะวนศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2534.

24. นิชชรี นิลนนท์.การผลิตถ่านกัมมันต์จากไม้โกงกางด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและคาร์บอนไดออกไซด์. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2540.

25. วราวุฒิ ประชาศิริสกุล. การผลิตถ่านกัมมันต์จากกะลาปาล์มน้ำมันโดยการกระตุ้นด้วยพลังงานไมโครเวฟ. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2541.

26. Arrigada,R.,Garcia,R. and Reyes,P. Steam and Carbon Dioxide Activation of *Eucalyptus globulus* Charcoal. J.Chem.Tech.Biotechnol. 60(1994):427-438.

27. Tancredi,N.,Cordero,T.,Rodriguez-Mirasol,J. and Rodriguez,Juan J. Activated Carbons from Uruguayan Eucalyptus Wood. Fuel. 75(1996):1,701-1,706.

28. Mameri,N.,Aioueche,F.,Belhocine,D.Grib,H. and Lounici,H. Preparation of Activated Carbon from Olive Mill Solid Residue. J.Chem.Tech.Biotechnol. 75(2000):625-631.

29. Xia,J.,Noda,K. and Kagawa,S. Production of Activated Carbon from Bagasse (Waste) of Sugacrane Grown in Brazil. Journal of Chemical Engineering of Japan. 31,No.6(1998): 987-990.

30. 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):4,268-4276.

31. Gergova,K.,Galusko,A.,Prtrov,N. and Minkova,V. Investigation of The Porous Structure Of Activated Carbons Prepared by Pyrolysis of Agricultural by-products in a Steam of Water Vapor. Carbon 30(1992):721-727.

32. American Standard of Testing Material. Standard Test Method for Chemical Analysis of Wood Charcoal ASTM 1762-84. (1996):281-282.

33. American Standard of Testing Material. Standard Test Method for Total Ash Content of Activated Carbon ASTM 2866-94. (1996):498-499.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

34. American Standard of Testing Material. Standard Test Method for Apparent Density of Activated Carbon ASTM 2854-89. (1996):491-493.

35. Japanese Industrial Standard. Standard Test Method for Activated Carbon JIS K 1474-1991. (1991):1-13.

36. American Standard of Testing Material. Standard Test Method for Determination of Iodine Number of Activated Carbon ASTM 4607-86. (1991):397-400.

37. ณรงค์ จึงเสมือนญาติ. หลักการและเทคนิคเกี่ยวกับกล้องจุลทรรศน์ วิทยาเขตกำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2538.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก.
วิธีวิเคราะห์สมบัติโดยประมาณของไม้ยูคาลิปตัสและถ่านไม้ยูคาลิปตัส

วิธีวิเคราะห์สมบัติโดยประมาณ [32]

วิธีวิเคราะห์สมบัติโดยประมาณของไม้ยูคาลิปตัสและถ่านไม้ยูคาลิปตัส ตามวิธี ASTM D1762-84 โดยวิเคราะห์สารที่แห้งในอากาศ และคำนวณเพื่อรายงานค่าที่ได้เทียบกับน้ำหนักของสารที่ไม่มีความชื้น(Dry basis) ยกเว้นค่าความชื้นที่รายงานเทียบน้ำหนักของสารที่แห้งในอากาศ(Air dry basis) วิธีวิเคราะห์ครอบคลุมการ วิเคราะห์หาค่าความชื้น สารระเหย และเถ้า รายละเอียดการวิเคราะห์มีดังต่อไปนี้

การเตรียมสารตัวอย่าง

- บดตัวอย่างอย่างรวดเร็วและคัดขนาดของตัวอย่างให้ผ่านตะแกรงร่อนขนาด No.20 mesh (850 μm) โดยการบดต้องไม่ใช้เวลามากนักเพราะอาจทำให้มีความร้อนขึ้นทำให้มีการสูญเสียของความชื้นและสารระเหยได้ นอกจากนั้นยังทำให้ตัวอย่างมีขนาดเล็กลง ซึ่งถ้ามีขนาดเล็กมากๆ(ต่ำกว่า 150 μm) จะทำให้เกิดความผิดพลาดในการวิเคราะห์ได้เนื่องจากอาจมีการสูญเสียไปจากถ้วยกระเบื้องในระหว่างการไล่สารละลาย
- นำตัวอย่างที่บดได้มาผสมรวมกันและเก็บไว้ในภาชนะที่ป้องกันความชื้นได้

1. วิธีหาค่าความชื้น (Moisture, M)
   - เผาถ้วยกระเบื้องพร้อมฝาในเตาเผาที่ 750 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นทิ้งให้เย็นในหม้อดูดความชื้น
   - ชั่งน้ำหนักที่แน่นอนของถ้วยกระเบื้องพร้อมฝา จากนั้นใส่ตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์ประมาณ 1 กรัมให้ละเอียดถึงทศนิยมตำแหน่งที่ 4 (คือมีความผิดพลาดน้อยกว่า 0.1 มิลลิกรัม) ในถ้วยกระเบื้องพร้อมฝา บันทึกน้ำหนักของตัวอย่างที่ได้ก่อนอบแห้งรวมน้ำหนักของขวดชั่งและฝา(A)
   - นำไปอบแห้งในเตาอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นทิ้งให้เย็นในหม้อดูดความชื้น
   - ชั่งและบันทึกน้ำหนักของตัวอย่างที่ได้หลังอบแห้ง รวมน้ำหนักของถ้วยกระเบื้องพร้อมฝา(B)
   - คำนวณค่าความชื้นดังนี้
   - ความชื้น(ร้อยละโดยน้ำหนัก) (Moisture% = [(A-B)/A]*100)

2.วิธีหาปริมาณสารระเหย (Volatile matter, VM)

- เผาเตาเผาไว้ที่ 950 องศาเซลเซียส ทำการให้ความร้อนกับถ้วยกระเบื้องพร้อมฝาและตัวอย่างที่ใช้ในการหาความชื้นในขั้นตอนที่ 1 ดังนี้ คือวางไว้หน้าเตาเผาเป็นเวลา 2 นาที (อุณหภูมิประมาณ 300 องศาเซลเซียส) จากนั้นวางไว้ที่ขอบเตาเผาเป็นเวลา 3 นาที (อุณหภูมิประมาณ 500 องศาเซลเซียส) จากนั้นนำเข้าเตาเผาเป็นเวลา 6 นาที
- นำออกจากเตาเผาทิ้งให้เย็นในหม้อดูดความชื้น
- ชั่งและบันทึกน้ำหนักตัวอย่างที่ได้หลังอบเผา รวมน้ำหนักของถ้วยกระเบื้องพร้อมฝา (C)
- คำนวณหาค่าสารระเหยดังนี้
- สารระเหย (ร้อยละโดยน้ำหนัก) (Volatile matter % = [(B-C)/B]*100)

3. ค่าเถ้า (Ash)

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

4. ค่าถ่านคงตัว (Fixed carbon, FC)

FC(ร้อยละโดยน้ำหนัก) = 100-A-VM-M

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข.

วิธีวิเคราะห์ค่าเถ้าของถ่านกัมมันต์

วิเคราะห์ปริมาณเถ้าในถ่านกัมมันต์ตามวิธี ASTM D 2866-94 [33] โดยวิเคราะห์ และรายงานค่าที่ได้เทียบกับน้ำหนักของที่ไม่มีความชื้น (Dry basis) รายละเอียดการวิเคราะห์มีดังต่อไปนี้

- บดและคัดขนาดตัวอย่างให้ละเอียดให้ผ่านตะแกรงร่อนขนาด No.20 mesh (850 μm)
- เผาถ้วยกระเบื้องทนความร้อนที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส จนมีน้ำหนักคงที่
- นำออกมาตั้งทิ้งไว้บนอิฐทนไฟ 10 นาที แล้วทำให้เย็นในหม้อดูดความชื้น
- ชั่ง ถ้วยกระเบื้องทนความร้อน และบันทึกน้ำหนักที่คงที่ไว้ (X_0)
- ชั่งตัวอย่างที่อบแห้งที่ 150$\pm$5 องศาเซลเซียส จนมีน้ำหนักคงที่ (ประมาณ 3 ชั่วโมง ใส่ในถ้วยกระเบื้องทนความร้อน ให้มีน้ำหนักประมาณ 1 กรัม ให้ละเอียดถึงทศนิยมตำแหน่งที่ 4 (คือมีความผิดพลาดน้อยกว่า 0.1 มิลลิกรัม) บันทึกน้ำหนักของตัวอย่างที่ได้ รวมน้ำหนักของถ้วยกระเบื้องทนความร้อน (X_1)
- นำไปเผาที่อุณหภูมิ 650$\pm$25 องศาเซลเซียส จนมีน้ำหนักคงที่ใช้เวลาประมาณ 3-16 ชั่วโมง
- นำออกมาตั้งทิ้งไว้บนอิฐทนไฟ 10 นาที แล้วทำให้เย็นในหม้อดูดความชื้น
- ค่อยๆเปิดฝาหม้อดูดความชื้นเพื่อป้องกันไม่ให้เถ้าที่ได้ฟุ้งกระจาย ชั่งและบันทึกตัวอย่างที่ได้ของตัวอย่างหลังเผา รวมน้ำหนักของถ้วยกระเบื้องทนความร้อน (X_2)
- คำนวณค่าเถ้าดังนี้

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

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ค.
วิธีวิเคราะห์ค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตรของถ่านกัมมันต์

วิเคราะห์ความหนาแน่นเชิงปริมาตรของถ่านกัมมันต์ (Bulk density,BD) ตามวิธี ASTM D 2854-89[34] รายละเอียดการวิเคราะห์มีดังต่อไปนี้

- อบตัวอย่างให้แห้งที่อุณหภูมิ 110-120 องศาเซลเซียส ตั้งทิ้งไว้ให้เย็นในหม้อดูดความชื้น
- ชั่งกระบอกตวงที่มีความจุ 10 มิลลิลิตร ให้มีความละเอียดถึงทศนิยมตำแหน่งที่ 2 (คือมีความผิดพลาดน้อยกว่า 0.01 กรัม บันทึกผล (X_0)
- ใส่ตัวอย่างลงในกระบอกตวงจนเกือบเต็ม กระแทกก้นกระบอกตวงบนแผ่นยางจนกระทั่งระดับของตัวอย่างในกระบอกตวงคงที่
- ถ้าระดับที่คงที่นั้นไม่เท่ากับ 10 มิลลิลิตร ให้ตักตัวอย่างเข้าหรือออกจากกระบอกตวงแล้วกระแทกก้นกระบอกตวงใหม่ จนกว่าจะได้ระดับที่คงที่เป็น 10 มิลลิลิตร
- ชั่งน้ำหนักของตัวอย่างพร้อมกระบอกตวง บันทึกผล (X_1)
- คำนวณหาความหนาแน่นเชิงปริมาตรได้จาก

ความหนาแน่นปรากฏ (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร) = $(X_1 – X_0) / 10$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ง.
วิธีวิเคราะห์ค่าการดูดซับเมทิลีนบลูของถ่านกัมมันต์

วิเคราะห์ความสามารถในการดูดซับสีน้ำเงินในน้ำตามวิธี JIS K 1474-1991[35] รายละเอียดของการวิเคราะห์มีดังต่อไปนี้

เครื่องมือที่ใช้

1. เครื่องเขย่าตามแนวราบ
2. เครื่องวัดการดูดกลืนแสง

วิธีเตรียมสารละลาย

1. การเตรียมสารละลายบัฟเฟอร์ (Buffer solution)

- อบโพแทสเซียมไฮโดรเจนฟอสเฟต (KH_2PO_4) ให้แห้งที่อุณหภูมิ 110 ถึง 120 องศาเซลเซียส นาน 2 ชั่วโมง และทิ้งให้เย็นในเดสิเคเตอร์นาน 20 นาที
- ชั่งมา 9.08 กรัม แล้วละลายด้วยน้ำกลั่นให้มีปริมาตรรวมเป็น 1,000 มิลลิลิตร ด้วยขวดวัดปริมาตร สารละลายที่ได้นี้คือ A
- อบไดโซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟต (Na_2HPO_4) ให้แห้งที่อุณหภูมิ 110 ถึง 120 องศาเซลเซียส นาน 2 ชั่วโมง และทิ้งให้เย็นในเดสิเคเตอร์นาน 20 นาที
- ชั่งมา 23.88 กรัม แล้วละลายด้วยน้ำกลั่นให้มีปริมาตรรวมเป็น 1,000 มิลลิลิตร ด้วยขวดวัดปริมาตร สารละลายที่ได้นี้คือ B
- นำสารละลาย A จำนวน 400 มิลลิลิตร ผสมกับสารละลาย B จำนวน 600 มิลลิลิตร กวนให้เข้ากันจะได้สารละลายบัฟเฟอร์ที่มีความเป็นกรดด่างเท่ากับ 7

2. สารละลายเมทิลีนบูล

2.1 การเตรียม อบสารเมทิลีนบลูให้แห้งที่อุณหภูมิ 110-120 องศาเซลเซียส นาน 2 ชั่วโมง และทิ้งให้เย็นในเดสิเคเตอร์ นาน 20 นาที ชั่งมา 1.200 กรัม ละลายด้วยสารละลายบัฟเฟอร์ในข้อ 1 จนมีปริมาตรเป็น 1,000 มิลลิลิตร

2.2 การสร้างกราฟมาตรฐาน ดูดสารละลายเมทธิลีนบลูที่เตรียมได้มา 1.0 มิลลิลิตร เจือจางด้วยสารละลายบัฟเฟอร์ จนมีปริมาตรเป็น 50 มิลลิลิตรในขวดปรับปริมาตร จากนั้นดูดสารละลายที่เตรียมได้มา 0.5 มิลลิลิตร 1 มิลลิลิตร 2 มิลลิลิตร 5 มิลลิลิตร 10 มิลลิลิตร ตามลำดับใส่ในขวดปรับปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร ซึ่งจะได้สารละลายเมทิลีนบลูมีความเข้มข้นเท่ากับ 0.12 มิลลิกรัมต่อลิตร 0.24 มิลลิกรัมต่อลิตร 0.48 มิลลิกรัมต่อลิตร 1.2

มิลลิกรัมต่อลิตร และ 2.4 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ นำสารละลายที่ได้ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่มีความยาวคลื่น 665 นาโนเมตร บันทึกค่าการดูดกลืนแสง แล้วนำไปสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแกนราบคือความเข้มข้นในหน่วย มิลลิกรัมต่อลิตร แกนตั้งฉากคือค่าการดูดกลืนแสง จะได้ความสัมพันธ์เป็นเส้นตรง

<u>วิธีวิเคราะห์</u>

- บดและคัดขนาดตัวอย่างให้ละเอียดน้อยกว่า 60 เมช (0.246 มิลลิเมตร)
- ชั่งและบันทึกน้ำหนักตัวอย่าง ให้ละเอียดถึงทศนิยมตำแหน่งที่ 4 (คือมีความละเอียด 0.1 มิลลิกรัม) ในขวดรูปชมพู่ขนาด 300 มิลลิลิตรซึ่งมีจุกปิด
- ใส่สารละลายเมทธิลีนบลู 25 มิลลิลิตร ปิดจุกแล้วนำไปเขย่า 30 นาที
- ดูดสารละลายมา 1 มิลลิลิตร เจือจางด้วยสารละลายบัฟเฟอร์ จนมีปริมาตรเป็น 50 มิลลิลิตร จากนั้นดูดสารละลายที่ได้มา 1 มิลลิลิตร เจือจางด้วยสารละลายบัฟเฟอร์ จนมีปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตร ในกรณีนี้เป็นความเข้มข้นเมทิลีนบลูที่ 0.24 มิลลิกรัมต่อลิตร
- นำสารละลายที่ได้ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่มีความยาวคลื่น 665 นาโนเมตร โดยใช้สารละลายบัฟเฟอร์ เป็นตัวเปรียบเทียบ
- ค่าเมทธิลีนบลู (Methylene Blue adsorption,MB) คำนวณได้จาก

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

โดย C คือ ความเข้มข้นที่เหลืออยู่ของสารละลาย เมทิลีนบลู (มิลลิกรัมต่อกรัม)

S คือ น้ำหนักของตัวอย่าง (กรัม)

1200 คือ ความเข้มข้นของสารละลาย เมทิลีนบลูเริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อกรัม)

Q คือ จำนวนค่าเมทิลีนบลูที่ถูกดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)

2.3 การวิเคราะห์ค่าการดูดซับเมทิลีนบลู

นำค่าการดูดซับที่ได้จากการคำนวณข้างต้น (Q) และค่าความเข้มข้นของสารเมทิลีนบลูที่เหลือ (C) อยู่มาสร้างกราฟแบบ ลอกซ์ จะได้เส้นไอโซเทอมของการดูดซับ จากเส้นไอโซเทอมจะได้ค่าการดูดซับเมทิลีนบลู โดยลากจุดความเข้มข้นของสารละลายที่เหลืออยู่เท่ากับ 0.24 มิลลิกรัมต่อลิตร ไปตัดเส้นไอโซเทอม แล้วลากไปหาค่าการดูดซับ

ภาคผนวก จ.
การวิเคราะห์ค่าไอโอดีนของถ่านกัมมันต์

การวิเคราะห์ความสามารถในการดูดซับไอโอดีน ซึ่งสมมุติว่าเป็นสารพิษในน้ำตามวิธี ASTM D4607-86[36] มีรายละเอียดของการวิเคราะห์ดังต่อไปนี้

สารเคมีที่ใช้

- 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 เตรียมโดยละลายโซเดียมไธโอซัลเฟต ($Na_2S_2O_3.5H_2O$) 24.820 กรัมในน้ำ 75 มิลลิลิตร เติมโซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) 0.1 กรัม และเติมน้ำกลั่นให้มีปริมาตร 1000 มิลลิลิตรด้วยขวดวัดปริมาตร
- สารละลายไอโอดีนเข้มข้น 0.100 $\pm$ 0.001 นอร์มัล เตรียมโดยละลายไอโอดีน 12.700 กรัมและโปตัสเซียมไอโอไดด์ (KI) 19.10 กรัมด้วยน้ำ 50 มิลลิลิตร ตั้งทิ้งไว้ 4 ชั่วโมงจนผลึกไอโอดีนละลายหมด แล้วจึงเติมน้ำกลั่นให้มีปริมาตร 1000 มิลลิลิตรด้วยขวดวัดปริมาตร
- สารละลายโปตัสเซียมไอโอเดตเข้มข้น 0.100 นอร์มัล เตรียมโดยอบโปตัสเซียมไอโอเดตที่ 110 องศาเซลเซียส นาน 2 ชั่วโมง ทำให้เย็นในเดซิเคเตอร์ แล้วชั่งมา 3.5667 กรัม ละลายด้วยน้ำกลั่น 1000 มิลลิลิตร

<u>กรรมวิธีเทียบมาตรฐานสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต</u>

- ปิเปตสารละลายโปตัสเซียมไอโอเดต 25 มิลลิลิตรใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร เติมโปตัสเซียมไอโอไดด์(KI) 2 กรัม เขย่าให้ละลายเติมกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นปริมาณ 5 มิลลิลิตร
- ไตเตรตด้วยสารละละลายโซเดียมไธโอซัลเฟต โดยใช้น้ำแป้งเป็นอินดิเคเตอร์ จุดยุติคือจุดที่สารละลายไม่มีสี

คำนวณความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟตจาก

$$N_1 = (P*R)/S$$

โดย N_1 คือ ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต(นอร์มัล)

P คือ ปริมาตรของสารละลายโปตัสเซียมไอโอเดต(มิลลิลิตร)

R คือ ความเข้มข้นของสารละลายโปตัสเซียมไอโอเดต(นอร์มัล)

S คือ ปริมาตรของสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟตที่ใช้ไตเตรต(มิลลิลิตร)

<u>กรรมวิธีเทียบมาตรฐานของสารละลายไอโอดีน</u>

- ปิเปตสารละลายไอโอดีน 25 มิลลิลิตรใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร ไตเตรตด้วยสารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟต โดยใช้น้ำแป้งเป็นอินดิเคเตอร์ จุดยุติ คือ จุดที่สารละลายไม่มีสี

คำนวณความเข้มข้นของสารละลายไอโอดีนจาก

$$N_2 = (P*R)/S$$

โดย N_2 คือ ความเข้มข้นของสารละลายไอโอดีน(นอร์มัล)

P คือ ปริมาตรของสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต(มิลลิลิตร)

R คือ ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต(นอร์มัล)

S คือ ปริมาตรของสารละลายไอโอดีนที่ใช้ไตเตรต(มิลลิลิตร)

<u>กรรมวิธีวิเคราะห์</u>

- บดและคัดขนาดให้ละเอียดน้อยกว่า 60 เมซ (0.246 มิลลิลิตร)
- อบตัวอย่างให้แห้งที่อุณหภูมิ 110-120 องศาเซลเซียส 2 ชั่วโมง ตั้งทิ้งไว้ให้เย็นในเดซิเคเตอร์
- ชั่งและบันทึกน้ำหนักตัวอย่างเท่ากับ M ให้ละเอียดถึงทศนิยมตำแหน่งที่ 4 (คือมีความละเอียด 0.1 มิลลิกรัม) ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตรซึ่งมีจุกปิด

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

- ใส่สารละลายกรดไฮโดรคลอริกจำนวน 10 มิลลิลิตร (ตวงด้วยปิเปตขนาด 10 มิลลิลิตร) ต้มให้เดือดประมาณ 10 วินาที แกว่งขวดเบาๆเพื่อให้ผงถ่านกัมมันต์ทุกส่วนชุ่มด้วยสารละลาย เพื่อกำจัดเถ้าหรือซัลเฟอร์ออกจากผิวของถ่านกัมมันต์
- ใส่สารละลาย 100 มิลลิลิตร ปิดจุกแล้วเขย่าแรงๆเป็นเวลา 30 วินาที
- กรองด้วยกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42 ทิ้งสารละลายที่กรองได้ 20 มิลลิลิตรแรก
- ดูดสารละลายที่กรองได้ 50 มิลลิลิตรด้วยปิเปต
- ติเตรตด้วยสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต 0.1 นอร์มัล โดยใช้น้ำแป้งเป็นอินดิเคเตอร์ จุดยุติ คือ จุดที่สารละลายไม่มีสี บันทึกปริมาตรของสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟตที่ใช้เป็นมิลลิลิตร (S)
- คำนวณค่าการดูดซับจำเพาะ (X/M) และความเข้มข้นที่สมดุลย์ของสารละลายไอโอดีน (C) ได้จาก

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

$$C = (N_2*S) / 50$$

X/M คือ มิลลิกรัมของไอโอดีนที่ถูกดูดซับต่อกรัมของถ่านที่ใช้ดูดซับ

N_1 คือ ความเข้มข้นของสารละลายไอโอดีน

N_2 คือ ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต

A คือ N1*12693.0

B คือ N2*126.93

C คือ ความเข้มข้นของสารละลายที่กรองได้

W คือ น้ำหนักของตัวอย่างที่ใช้

S คือ ปริมาตรของสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟตที่ใช้

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

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

ตารางที่ จ.1 น้ำหนักประมาณของตัวอย่างที่ใช้วิเคราะห์ค่าไอโอดีน

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
ความรู้เกี่ยวกับกล้องจุลทรรศน์อิเล็คตรอนแบบลำแสงส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM)

- ชนิดของกล้องจุลทรรศน์อิเล็คตรอนที่พัฒนาขึ้นมาใช้กันทั่วไปมีดังนี้คือ [37]

1. กล้องจุลทรรศน์อิเล็คตรอนแบบลำแสงส่องผ่าน (Transmission Electron Microscope; TEM)
2. กล้องจุลทรรศน์อิเล็คตรอนแบบส่องกราดผ่าน (Scanning Tranmission Electron Microsope; STEM)
3. กล้องจุลทรรศน์อิเล็คตรอนแบบลำแสงส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM)
4. เครื่องวิเคราะห์รังสีเอ็กซเรย์ที่เกิดจากอิเล็คตรอนวิ่งชน (Electron Probe X-Ray Microanalyser; EXMA)

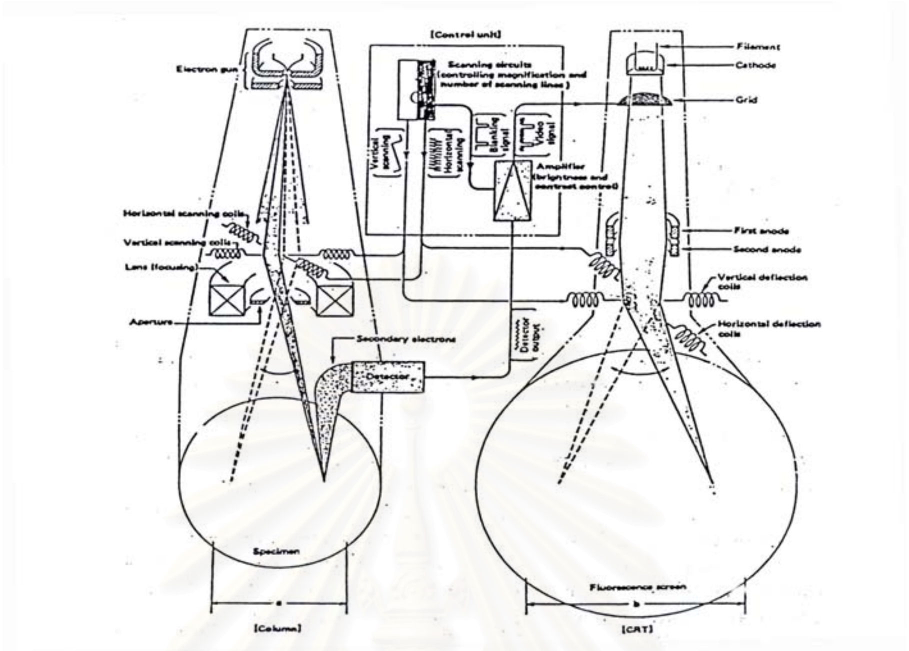
ในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะ SEM เนื่องจากเป็นกล้องจุลทรรศน์ที่ใช้วิเคราะห์สารในงานวิจัยนี้

- กล้องจุลทรรศน์อิเล็คตรอนแบบลำแสงส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็คตรอนแบบลำแสงส่องกราด เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็คตรอนที่ใช้ลำแสงอิเล็คตรอนที่มีความเร็วสูงเคลื่อนส่องกราดไปบนผิวตัวอย่างที่อยู่ในท่อสูญญากาศในลักษณะ Raster เมื่ออิเล็คตรอนกระทบผิวตัวอย่าง จะมีอิเล็คตรอนสะท้อนกลับขึ้นมา (reflected electron) ซึ่งจะถูกจับด้วย Detector และทำให้เกิดภาพบน Synchronous display tube

1. การทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็คตรอนแบบลำแสงส่องกราด

ในสภาพสูญญากาศ เมื่อให้กระแสไฟฟ้าแรงสูงขนาด 1-40 KV ผ่านไปยัง filament ทังสเตน ทำให้ filament ร้อนแดง ปล่อยอิเล็คตรอนออกมา อิเล็คตรอนเหล่านี้ถูกบังคับให้เป็นลำแสงอิเล็คตรอนที่มีความเข้มสูงและความเร็วคงที่วิ่งผ่านสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของ Condensor lens ซึ่งทำหน้าที่รวบรวมลำแสงให้มีความเข้มสูงสุดผ่าน Objective lens ไปตกลงบนตัวอย่าง ลำแสงอิเล็คตรอนที่ตกลงบนตัวอย่างนั้น จะถูกสนามแม่เหล็กดึงให้เคลื่อนส่องกราดไปบนตัวอย่างจากซ้ายไปขวาอีก ในทำนองเดียวกันนี้จนทั่วทั้งผิวตัวอย่าง ลักษณะแบบของเส้นลำแสงที่ส่องกราดไปบนตัวอย่างนี้เรียกว่า Raster ซึ่งเราสามารถเห็นลักษณะ Raster ได้จากจอทีวีเมื่อเวลาอยู่ใกล้ ๆ ในขณะที่ลำแสงถูกดึงให้ส่องกราดไปบนตัวอย่างนั้นจะมีอิเล็คตรอนสะท้อนกลับขึ้นมา และถูกตรวจจับเอาไว้ด้วย Scintillation



<u>รูปที่</u> ฉ.1 ไดอะแกรมแสดงจุดลำแสงอิเล็คตรอน ขนาดเล็ก (Probe spot)

detector สัญญาณอิเล็คตรอนที่ detector ตรวจจับได้จะถูกขยายใน Photomultiplier (PMT) และแปลงเป็นสัญญาณ Video ส่องกราดไปบนจอ Cathode Ray Tube (CRT) สัมพันธ์กับลำแสงที่เคลื่อนส่องกราดบนตัวอย่าง ด้วยการทำงานของ Scan Generator (Control unit of scanning) ตัวเดียวกันเป็นตัวควบคุมกระแสไฟฟ้าที่จะเข้า Probe scan coil และ Display scan coil เพื่อทำให้เกิดสนามแม่เหล็กดึงจุดแสงสว่างให้เคลื่อนไปพร้อมกัน โดย Probe scan coil จะทำหน้าที่ดึงลำแสงอิเล็คตรอนให้เคลื่อนผ่านไปบนตัวอย่าง และในขณะเดียวกัน Display scan coil ที่จะทำหน้าที่ดึงลำแสงในจอทีวีให้เคลื่อนไปบน Fluorescence screen เช่นกัน จึงทำให้เห็นภาพผิวของตัวอย่างที่ลำแสงอิเล็คตรอนส่องกราดอยู่ในขณะนั้นบนจอทีวี (Display Cathode-Ray Tube) ได้

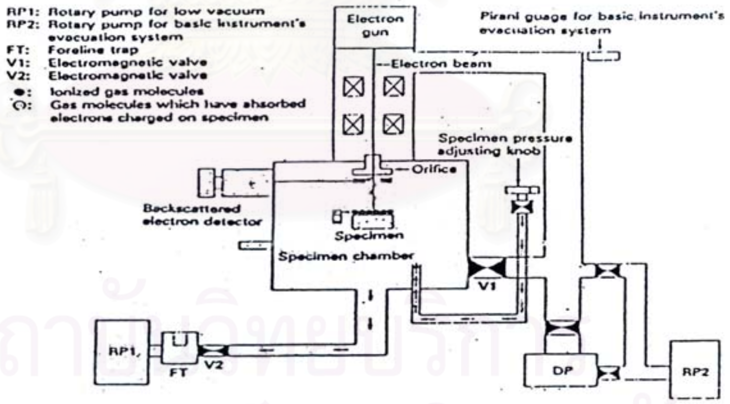
- Low Vacuum SEM (LV SEM)

  เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็คตรอนแบบลำส่องกราด ที่ช่องว่างภายในกล้องส่วน electron gun และ lens systems เป็นสูญญากาศสูง ตามปกติทั่วไปของกล้องจุลทรรศน์อิเล็คตรอน แต่ในช่องใส่ตัวอย่าง (spiecimen chamber) จะเป็นสูญญากาศต่ำประมาณ 0.1 และ 1 ทอร์ เมื่อลำแสงอิเล็คตรอนผ่านช่องแคบ ๆ เข้ามาในช่องใส่ตัวอย่าง

อิเล็คตรอนจะชนกับโมเลกุลของอากาศที่เหลืออยู่ ทำให้โมเลกุลของอากาศแตกตัวไปเกาะจับกับอิเล็คตรอนที่ผิวของตัวอย่างที่จะเกิด charge-up ดังนั้นจึงใช้เพื่อศึกษา

1. ตัวอย่างที่ไม่ต้องผ่านขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างด้วยสารเคมี ซึ่งจะมีผลต่อรูปร่างของตัวอย่าง และถ้าเตรียมไม่ดีก็จะทำให้ตัวอย่างเสียรูปร่างได้ในขณะที่ตัวอย่างถูกใส่เข้าไปดูในกล้องซึ่งเป็นสูญญากาศสูงและเกิด charge-up ได้ในหลายตัวอย่าง
2. ตัวอย่างพวก fibers ที่ไม่เป็นตัวนำไฟฟ้า ซึ่งต้องเคลือบด้วยโลหะ แต่มักจะเคลือบได้ไม่สมบูรณ์ ทำให้เกิด charge-up ถ้าดูด้วย high vacuum SEM (conventional SEM)
3. ตัวอย่างพวก plaster, cement และพวกที่มีน้ำมันซึ่งจะเกิดแก๊สมากมายในสูญญากาศ ทำให้กล้องไม่สามารถเป็นสูญญากาศพอที่จะทำงานได้ และตัวอย่างเหล่านี้ไม่เป็นตัวนำไฟฟ้า จึงเกิด charge-up ได้ง่าย

ในสภาพสูญญากาศต่ำของกล้อง LV SEM นั้น ไม่สามารถดูดจับ secondary electron ได้เนื่องจากมีพลังงานต่ำ ดังนั้นจึงดูดจับ backscattered electron ซึ่งมีพลังงานสูงกว่ามาแปลงให้เกิดภาพของตัวอย่าง



<u>รูปที่</u> ฉ.2 ไดอะแกรมแสดงระบบสูญญากาศของ LV SEM

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียน

นายวิจิตร จินดาพันธ์ไพโรจน์ เกิดวันที่ 10 มิถุนายน พ.ศ. 2521 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ในปีการศึกษา 2541 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2542

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย