

การเตรียมถ่านกัมมันต์จากไบโอชาร์และถ่านหินซบปิทูมินัส



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค  
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ปีการศึกษา 2562  
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

PREPARATION OF ACTIVATED CARBON FROM BIOCHER AND SUBBITUMINOUS COAL



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 2019

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การเตรียมถ่านกัมมันต์จากไบโอชาร์และถ่านหินซับปิทูนีส์
โดย	น.ส.นริศา เฉิดกุล
สาขาวิชา	เคมีเทคนิค
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ศาสตราจารย์ ดร.ธราพงษ์ วิทิตสานต์

---

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร.พลกฤษณ์ แสงวณิช)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(ศาสตราจารย์ ดร.ธราพงษ์ วิทิตสานต์)

..... กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.ชวลิต งามจรัสศรีวิชัย)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิชชากร จารุศิริ)

นริศา เฉิดกุล : การเตรียมถ่านกัมมันต์จากไบโอชาร์และถ่านหินซับบิทูมินัส. ( PREPARATION OF ACTIVATED CARBON FROM BIOCHER AND SUBBITUMINOUS COAL) อ.ที่ปรึกษาหลัก : ศ. ดร.ธราพงษ์ วิทิตศานต์

การเตรียมถ่านกัมมันต์จากวัตถุดิบต่างชนิดกัน สามารถจำแนกได้สองประเภทคือไบโอชาร์ และถ่านหินซับบิทูมินัส ซึ่งไบโอชาร์ที่ทำการศึกษาประกอบด้วย 2 ชนิด ได้แก่ กะลาปาล์ม (องค์ประกอบลิกนินสูง) และไม้ไผ่ (องค์ประกอบเซลลูโลสสูง) ที่ผ่านกระบวนการเผาเป็นถ่านชาร์ แล้ว โดยตัวแปรที่ทำการศึกษาสำหรับการกระตุ้นไบโอชาร์ที่ส่งผลต่อสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ได้ คือ อุณหภูมิที่ใช้กระตุ้นในช่วง 800 – 900 องศาเซลเซียสและเวลาที่ใช้กระตุ้น 1 – 4 ชั่วโมง ภายใต้ไอน้ำร้อนยิ่งยวด ในส่วนของถ่านหินซับบิทูมินัสใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นสารกระตุ้น โดยตัวแปรที่ทำการศึกษา ได้แก่ อัตราส่วนระหว่างโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อถ่านหินที่ 0.2:1 0.4:1 และ 0.6:1 ที่อุณหภูมิในการกระตุ้นต่างกันในช่วง 650 – 850 องศาเซลเซียส เวลา 1 – 4 ชั่วโมง จากผลการทดลอง พบว่าภาวะที่เหมาะสมในการกระตุ้นถ่านกะลาปาล์ม ได้พื้นที่ผิวสูงสุด 441.02 ตารางเมตรต่อกรัม ที่อุณหภูมิที่ใช้กระตุ้น 1000 องศาเซลเซียสและเวลาที่ใช้กระตุ้น 4 ชั่วโมง ในขณะที่การกระตุ้นจากถ่านไม้ไผ่ ได้พื้นที่ผิวสูงสุด 712 ตารางเมตรต่อกรัม ที่อุณหภูมิที่ใช้กระตุ้น 900 องศาเซลเซียสและเวลาที่ใช้กระตุ้น 2 ชั่วโมง ในส่วนการกระตุ้นถ่านหินซับบิทูมินัสที่ อัตราส่วนระหว่างโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อถ่านหินซับบิทูมินัส 0.6:1 อุณหภูมิที่ใช้กระตุ้น 850 องศาเซลเซียสและเวลาที่ใช้กระตุ้น 3 ชั่วโมง ได้พื้นที่ผิวสูงสุดอยู่ที่ 1,107.39 ตารางเมตรต่อกรัม ซึ่งพบว่าอุณหภูมิที่ใช้กระตุ้น เวลาที่ใช้กระตุ้นในส่วนของไบโอชาร์ และอัตราส่วนระหว่าง โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อถ่านหินซับบิทูมินัส มีผลต่อการพัฒนาโครงสร้างรูพรุนของถ่านกัมมันต์ นอกจากนี้ยังพบว่าวัตถุดิบต่างชนิดกันส่งผลให้ถ่านกัมมันต์ที่ได้มีสมบัติต่างกัน

สาขาวิชา เคมีเทคนิค

ปีการศึกษา 2562

ลายมือชื่อนิสิต .....

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

# # 6171982723 : MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY

KEYWORD: Activated carbon, Subbituminous coal, Biochar, Plam shell char,  
Bamboo char

Narisa Cherdkun : PREPARATION OF ACTIVATED CARBON FROM BIOCHER AND  
SUBBITUMINOUS COAL. Advisor: Prof. THARAPONG VITIDSANT, Ph.D.

The preparation of activated carbon from different sources were investigated. Two sources of raw material were biochar and subbituminous coal and two types of biochar such as palm shell (high lignin) and bamboo (high content of cellulose) were used as raw materials to prepare char. The effects of variable parameter for biochar activation on activated carbon property were activation temperature range of 800-900°C and activation time 1 - 4 hr. under superheated steam. In case of activation condition of subbituminous coal was needed KOH as activation agent by using KOH : coal as 0.2 : 1, 0.4 : 1 and 0.6 : 1 at the different activation temperature of 650 to 850°C for 1 to 4 hr. Experimental results showed that the optimum condition of activation palm shell char giving highest surface area 441.02 m<sup>2</sup>/g was at activation temperature 1000°C and activation time 4 hr., while bamboo char giving 712.00 m<sup>2</sup>/g at activation temperature 900°C and activation time 2 hr., while activation subbituminous coal at KOH : subbituminous coal 0.6:1 activation temperature 850°C and activation time 3 hr. had highest surface area 1,107.39 m<sup>2</sup>/g. It was found that activation temperature activation time in case of biochar and ratio of KOH : subbituminous coal have the influence to develop pore structure of activated carbon. The different of raw materials affect to the different properties of activated carbon.

Field of Study: Chemical Technology

Student's Signature .....

Academic Year: 2019

Advisor's Signature .....

## กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณศาสตราจารย์ ดร. ธราพงษ์ วิจิตตานต์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้กรุณาให้ความรู้ คำแนะนำ ตลอดจนให้ความเห็นเพื่อปรับปรุงงานวิจัยให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี รวมทั้งคณาจารย์ทุกท่านในภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ขอกราบขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร. ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญศรี ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ศาสตราจารย์ ดร. ขวสิต งามจรัสศรีวิชัย และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิชชากร จารุศิริ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ที่กรุณาให้ความเห็น รวมถึงคำแนะนำในการจัดทำวิทยานิพนธ์ให้มีความสมบูรณ์

ขอขอบคุณโรงงานหีบปาล์ม จังหวัดสุราษฎร์ธานี ที่อนุเคราะห์ถ่านกะลาปาล์มที่ใช้ในงานวิจัย ขอขอบคุณวิสาหกิจชุมชนหนองมนถ่านอัดแท่งไม้ไผ่ อำเภอหนองมน จังหวัดชลบุรี ที่อนุเคราะห์ถ่านไม้ไผ่ที่ใช้ในงานวิจัย

ขอขอบคุณโรงงาน RBC จังหวัดพระนครศรีอยุธยา ที่อนุเคราะห์ถ่านหินซับบิทูมินัสที่ใช้ในงานวิจัย

ขอขอบคุณ คุณศิริชัย รัตนวราหะ และนักวิทยาศาสตร์ผู้ดูแลและควบคุมห้องเครื่องมือของศูนย์เชื้อเพลิงและพลังงานชีวมวล คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จังหวัดสระบุรีทุกท่าน ที่คอยรับฟังคำปรึกษาให้คำแนะนำตลอดจนการช่วยเหลือทุก ๆ อย่างเกี่ยวกับการทำวิจัยด้วยความเต็มใจเสมอมา และภาควิชาเคมีเทคนิค ที่ได้ให้ความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือวิเคราะห์ต่าง ๆ

ขอขอบคุณ นางสาวรรัตน์ มาตราช และเพื่อน ๆ พี่ ๆ ในภาควิชาเคมีเทคนิคที่คอยรับฟังคำปรึกษาให้คำแนะนำตลอดจนการช่วยเหลือทุก ๆ อย่างเกี่ยวกับการทำวิจัยด้วยความเต็มใจเสมอมา และเป็นกำลังใจในการทำวิจัยให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ผู้เป็นที่รักยิ่ง และเคารพยิ่ง ที่อบรมสั่งสอน ให้กำลังใจ และสนับสนุน จนสำเร็จการศึกษา

นริศา ฉีดกุล

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูปภาพ.....	ฐ
บทที่ 1 บทนำ .....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ .....	2
1.3 ขอบเขตงานวิจัย .....	2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon).....	4
2.2 วิวัฒนาการของถ่านกัมมันต์ .....	4
2.3 วัสดุดิบที่นำมาใช้สำหรับกระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์ .....	5
2.3.1 ชีวมวล (Biomass) .....	6
2.3.1.1 องค์ประกอบหลักของชีวมวล .....	6
2.3.1.2 องค์ประกอบทางเคมีของชีวมวล .....	9
2.3.2 ถ่านหิน.....	10
2.3.2.1 ความหมายของถ่านหิน .....	10

2.3.2.2 ลักษณะการเกิดของถ่านหิน .....	11
2.4 กระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์.....	14
2.4.1 การเตรียมวัตถุดิบ.....	14
2.4.2 การคาร์บอนไนเซชัน (Carbonization) .....	15
2.4.3 กระบวนการการกระตุ้น (Activation).....	17
2.4.3.1 การกระตุ้นทางเคมี (Chemical Activation).....	17
2.4.3.2 การกระตุ้นทางกายภาพ (Physical Activation) .....	19
2.5 ลักษณะและโครงสร้างถ่านกัมมันต์ .....	23
2.5.1 โครงสร้างผลึกของถ่านกัมมันต์ .....	24
2.5.2 โครงสร้างรูพรุนของถ่านกัมมันต์ .....	25
2.5.3 โครงสร้างทางเคมีของผิวถ่านกัมมันต์ (Chemical structure) .....	26
2.6 การวิเคราะห์สมบัติของถ่านกัมมันต์ .....	28
2.6.1 ปริมาณร้อยละของเถ้า (%Ash).....	28
2.6.2 ปริมาณร้อยละความชื้น (%Moisture) .....	28
2.6.3 ปริมาณสารระเหย (%Volatile matter).....	28
2.6.4 ความหนาแน่นปรากฏ (Apparent Density) .....	28
2.6.5 ความแข็งแรงและความทนต่อการขัดถู (Hardness and Abrasion Number).....	29
2.6.6 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคถ่าน (Particle Size Distribution).....	29
2.6.7 พื้นที่ผิว (Surface area).....	29
2.6.7.1 การคำนวณพื้นที่ผิว .....	32
2.6.8 การดูดซับไอโอดีน (Iodine adsorption).....	35
2.6.9 การดูดซับเมทิลีนบลู (Methylene blue adsorption) .....	35
2.6.10 โมลาสซัมเบอร์ (Molass number) .....	35
2.6.11 แทนนิน (Tannin).....	36



2.7 การใช้ประโยชน์จากถ่านกัมมันต์.....	36
2.7.1 ถ่านกัมมันต์ประเภทที่ใช้กับการดูดซับก๊าซหรือไอ (Gas – phase application).....	36
2.7.2 ประเภทที่ใช้กับของเหลว.....	37
2.8 ปาล์มน้ำมัน.....	37
2.8.1 ข้อมูลทั่วไปของปาล์มน้ำมัน (Oil palm) .....	37
2.8.2 ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ของปาล์มน้ำมัน.....	39
2.8.3 พันธุ์ปาล์มน้ำมัน.....	42
2.9 ไม้ (Bamboo).....	42
2.9.1 นิเวศวิทยาและการกระจายพันธุ์.....	43
2.9.2 ปัจจัยแวดล้อมที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโต.....	43
2.9.3 ประเภทของไม้ .....	44
2.10 ถ่านหินในประเทศไทย.....	49
2.10.1 แหล่งถ่านหินที่พบในประเทศไทย.....	50
2.10.2 การใช้ประโยชน์จากถ่านหิน.....	51
2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	52
บทที่ 3 การดำเนินงานทดลอง.....	56
3.1 รูปแบบการศึกษา.....	56
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย .....	56
3.3 เครื่องมือวิเคราะห์ที่ใช้ในการวิเคราะห์.....	59
3.4 สารเคมีที่ใช้.....	62
3.5 วัสดุดิบ.....	62
3.6 ขั้นตอนการเตรียมวัสดุดิบ .....	62
3.7 ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง.....	63
3.7.1 การวิเคราะห์สมบัติเบื้องต้นของไปโอซาร์และถ่านหินซัพพิทูนัส .....	63

3.7.2 การกระตุ้นไปโอซาร์และถ่านหินซัพบิทูมินัส .....	64
3.7.2.1 การกระตุ้นไปโอซาร์โดยวิธีการกระตุ้นทางกายภาพ .....	64
3.7.2.2 การกระตุ้นถ่านหินซัพบิทูมินัส โดยวิธีการกระตุ้นทางเคมี .....	64
3.8 การวิเคราะห์สมบัติของถ่านกัมมันต์.....	65
บทที่ 4 ผลและอภิปรายผลงานวิจัย .....	66
4.1 การวิเคราะห์สมบัติเบื้องต้นของไปโอซาร์และถ่านหินซัพบิทูมินัส.....	66
4.1.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบโดยประมาณ (Proximate analysis) และองค์ประกอบ แบบแยกธาตุ (Ultimate analysis).....	66
4.1.2 การวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุน และขนาดรูพรุนเฉลี่ย (Textural properties) ของไปโอซาร์ และถ่านหินซัพบิทูมินัส.....	68
4.2 ภาวะที่เหมาะสมในการกระตุ้น .....	68
4.2.1 การกระตุ้นไปโอซาร์เป็นถ่านกัมมันต์ด้วยวิธีทางกายภาพด้วยไอน้ำร้อนยิ่งยวด.....	69
4.2.1.1 ผลของอุณหภูมิที่ใช้กระตุ้นต่อปริมาณร้อยละผลิตภัณฑ์ที่ใช้เตรียมถ่านกัมมันต์ จากถ่านกะลาปาล์มและถ่านไม้ไผ่.....	69
4.2.1.2 ผลของเวลาที่ใช้กระตุ้นต่อปริมาณร้อยละผลิตภัณฑ์ที่ใช้เตรียมถ่านกัมมันต์จาก ถ่านกะลาปาล์มและถ่านไม้ไผ่ .....	71
4.2.1.3 การวิเคราะห์พื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุนทั้งหมด และขนาดรูพรุนเฉลี่ย (Textural properties) ของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากถ่านกะลาปาล์มและถ่านไม้ไผ่.....	72
4.2.2 การกระตุ้นถ่านหินซัพบิทูมินัสด้วยวิธีทางเคมีด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ...	74
4.2.2.1 ผลของการแปรอัตราส่วนโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (สารกระตุ้น) ต่อถ่านหิน ซัพบิทูมินัส.....	75
4.2.2.3 ผลของเวลาที่ใช้กระตุ้นต่อปริมาณร้อยละผลิตภัณฑ์ที่ใช้เตรียมถ่านกัมมันต์จาก ถ่านหินซัพบิทูมินัส.....	79
4.2.2.4 การวิเคราะห์พื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุนทั้งหมด และขนาดรูพรุนเฉลี่ยของถ่านกัม มันต์ที่เตรียมจากถ่านหินซัพบิทูมินัส .....	81
4.3 สมบัติของถ่านกัมมันต์ .....	85

4.3.1 การวิเคราะห์สมบัติเบื้องต้นของถ่านกัมมันต์.....	85
4.3.2 การวิเคราะห์โครงสร้างของไบโอชาร์ ถ่านหินซับิทูมินัสและถ่านกัมมันต์ด้วยเทคนิค วิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffractometer, XRD).....	87
4.3.3 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของไบโอชาร์ ถ่านหินซับิทูมินัสและถ่านกัมมันต์ ด้วยเทคนิควิเคราะห์ฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (Fourier transform Infrared Spectroscopy, FTIR).....	90
4.3.4 ลักษณะสัณฐานวิทยาของไบโอชาร์และถ่านหินซับิทูมินัสและถ่านกัมมันต์ ที่ภาวะ เหมาะสมที่สุดด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิ่ง (Scanning electron microscope, SEM) .....	93
บทที่ 5 สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	95
5.1 สรุปผลงานวิจัย.....	95
5.1.1 ปัจจัยที่ส่งผลต่อการกระตุ้นในงานวิจัย .....	95
5.1.2 ภาวะที่เหมาะสมในการผลิตถ่านกัมมันต์ .....	96
5.1.3 ข้อเสนอแนะ.....	97
บรรณานุกรม.....	98
ภาคผนวก.....	102
ภาคผนวก ก. วิธีวิเคราะห์ห้องค์ประกอบโดยประมาณ .....	103
ภาคผนวก ข. วิธีวิเคราะห์ห้องค์ประกอบแบบแยกธาตุ.....	106
ภาคผนวก ค. ข้อมูลการทดลอง .....	108
ภาคผนวก ง. สมบัติของถ่านกัมมันต์ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม .....	113
ภาคผนวก จ. ตัวอย่างสมบัติของถ่านกัมมันต์เกรดการค้า.....	116
ประวัติผู้เขียน.....	119

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบทางเคมีของชีวมวล .....	9
ตารางที่ 2.2 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบโดยประมาณ (Proximate analysis) และองค์ประกอบแบบแยกธาตุ (Ultimate analysis) .....	10
ตารางที่ 2.3 เปรียบเทียบสมบัติต่าง ๆ ของถ่านหินแต่ละชนิด .....	14
ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบโดยประมาณ (Proximate analysis) ของไบโอชาร์และถ่านหินซับปิทุมินัส .....	66
ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุ (Ultimate analysis) ของไบโอชาร์และถ่านหินซับปิทุมินัส .....	67
ตารางที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์หาพื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุนทั้งหมด และขนาดรูพรุนเฉลี่ยของไบโอชาร์และถ่านหินซับปิทุมินัส.....	68
ตารางที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์หาพื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุนทั้งหมด และขนาดรูพรุนเฉลี่ยของถ่านกัมมันต์จากถ่านกะลาปาล์ม .....	72
ตารางที่ 4.5 ผลการวิเคราะห์หาพื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุนทั้งหมด และขนาดรูพรุนเฉลี่ยของถ่านกัมมันต์จากถ่านไม้ไผ่.....	73
ตารางที่ 4.6 ผลการวิเคราะห์หาพื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุนทั้งหมด และขนาดรูพรุนเฉลี่ยของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากถ่านหินซับปิทุมินัส ที่อัตราส่วนโดยมวลระหว่างโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อถ่านหิน ซับปิทุมินัส 0.2:1.....	81
ตารางที่ 4.7 ผลการวิเคราะห์หาพื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุนทั้งหมด และขนาดรูพรุนเฉลี่ยของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากถ่านหินซับปิทุมินัส ที่อัตราส่วนโดยมวลระหว่างโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อถ่านหิน ซับปิทุมินัส 0.4:1.....	82
ตารางที่ 4.8 ผลการวิเคราะห์หาพื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุนทั้งหมด และขนาดรูพรุนเฉลี่ยของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากถ่านหินซับปิทุมินัส ที่อัตราส่วนโดยมวลระหว่างโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อถ่านหิน ซับปิทุมินัส 0.6:1.....	83

ตารางที่ 4.9	ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบโดยประมาณ (Proximate analysis) ของถ่านกัมมันต์ .....	85
ตารางที่ 4.10	ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุ (Ultimate analysis) ของถ่านกัมมันต์ .....	85
ตารางที่ ก.1	สมการการคำนวณองค์ประกอบโดยประมาณ.....	105
ตารางที่ ค.1	ปริมาณร้อยละผลิตภัณฑ์ที่ได้จากถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากถ่านกะลาปาล์ม .....	108
ตารางที่ ค.2	ปริมาณร้อยละผลิตภัณฑ์ที่ได้จากถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากถ่านไม้ไผ่ .....	109
ตารางที่ ค.3	ปริมาณร้อยละผลิตภัณฑ์ที่ได้จากถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากถ่านหินซับบิทูมินัส ที่อัตราส่วนระหว่างโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อถ่านหิน 0.2:1 .....	110
ตารางที่ ค.4	ปริมาณร้อยละผลิตภัณฑ์ที่ได้จากถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากถ่านหินซับบิทูมินัส ที่อัตราส่วนระหว่างโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อถ่านหิน 0.4:1 .....	111
ตารางที่ ค.5	ปริมาณร้อยละผลิตภัณฑ์ที่ได้จากถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากถ่านหินซับบิทูมินัส ที่อัตราส่วนระหว่างโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อถ่านหิน 0.6:1 .....	112
ตารางที่ จ.1	สมบัติของผงถ่านกัมมันต์เกรดการค้า .....	116
ตารางที่ จ.2	สมบัติของเม็ดถ่านกัมมันต์เกรดการค้า .....	117

## สารบัญรูปภาพ

	หน้า
ภาพที่ 2.1 องค์ประกอบหลักของพืชชีวมวล .....	6
ภาพที่ 2.2 องค์ประกอบของลิกโนเซลลูโลส (lignocellulose materials) .....	7
ภาพที่ 2.3 โครงสร้างของน้ำตาลโพลีแซคคาไรด์ (Polysaccharides) .....	7
ภาพที่ 2.4 โครงสร้างของเซลลูโลส (Cellulose structure).....	8
ภาพที่ 2.5 โครงสร้างของลิกนิน (Lignin structure).....	8
ภาพที่ 2.6 แสดงขั้นตอนการกำเนิดถ่านหินของแหล่งที่มีการสะสมตัวอยู่กับที่ .....	12
ภาพที่ 2.7 แผนภูมิแสดงสัดส่วนขององค์ประกอบในกระบวนการแปรสภาพเป็นถ่านหิน .....	12
ภาพที่ 2.8 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจากการกระตุ้นด้วยไอน้ำ.....	20
ภาพที่ 2.9 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจากการกระตุ้นทางกายภาพโดยกำจัดพีนอลและน้ำ .....	20
ภาพที่ 2.10 โครงสร้างแกรไฟท์ (Graphite structure) .....	24
ภาพที่ 2.11 การจัดเรียงตัวของคาร์บอนอะตอมในผลึกของแกรไฟท์.....	24
ภาพที่ 2.12 โครงสร้างของถ่านกัมมันต์ (Activated carbon structure).....	25
ภาพที่ 2.13 ลักษณะรูพรุนของถ่านกัมมันต์.....	26
ภาพที่ 2.14 กลุ่มหมู่ฟังก์ชันนอลแบบกรดบนพื้นผิวถ่านกัมมันต์ (a) Carboxyl (b) Phenolichydroxyl (c) Quinonoid (d) Normal lactones (e) Fluorescein-type lactone (f) Carboxylic acid anhydrides .....	27
ภาพที่ 2.15 รูปแบบของไอโซเทอมตามการจำแนกประเภทของบรูไนร์ .....	30
ภาพที่ 2.16 รูปแบบของไอโซเทอมตามการจำแนกแบบ IUPAC .....	31
ภาพที่ 2.17 โครงสร้างทางพฤกษศาสตร์ของปาล์มน้ำมัน .....	42
ภาพที่ 3.1 เครื่องบดชีวมวลประเภทหยาบและละเอียด .....	56
ภาพที่ 3.2 เครื่องคัดขนาดวัตถุบดถ่านชาร์ที่ขนาด 2 – 5 มิลลิเมตร .....	57
ภาพที่ 3.3 เตาเผาให้ความร้อนแบบแนวตั้ง .....	57

ภาพที่ 3.4	เครื่องปฏิกรณ์สำหรับการกระตุ้น .....	58
ภาพที่ 3.5	ภาพแสดงชุดกระตุ้น .....	59
ภาพที่ 3.6	เครื่องวัดพื้นที่ผิวและความเป็นรูพรุนด้วยเทคนิคการวัดการดูดซับไนโตรเจน .....	59
ภาพที่ 3.7	เครื่องวิเคราะห์ห้องค์ประกอบแบบแยกธาตุ (Ultimate analysis) .....	60
ภาพที่ 3.8	เครื่องวิเคราะห์ห้องค์ประกอบโดยประมาณ (Proximate analysis).....	60
ภาพที่ 3.9	เครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโคปี (Fourier transform Infrared spectroscopy, FTIR).....	61
ภาพที่ 3.10	ถ่านกะลาปาล์มที่ใช้ในการทดลอง ขนาด 3 – 5 มิลลิเมตร.....	62
ภาพที่ 3.11	ถ่านไม้ไผ่ที่ใช้ในการทดลอง ขนาด 3 – 5 มิลลิเมตร .....	63
ภาพที่ 3.12	ถ่านหินซับบิทูมินัสที่ใช้ในการทดลอง ขนาด 3 – 5 มิลลิเมตร .....	63
ภาพที่ 4.1	ผลของอุณหภูมิที่ใช้กระตุ้นต่อปริมาณร้อยละผลิตภัณฑ์ที่ใช้เตรียมถ่านกัมมันต์ จากถ่านกะลาปาล์ม .....	69
ภาพที่ 4.2	ผลของอุณหภูมิที่ใช้กระตุ้นต่อปริมาณร้อยละผลิตภัณฑ์ที่ใช้เตรียมถ่านกัมมันต์ จากถ่านไม้ไผ่ .....	70
ภาพที่ 4.3	ผลของเวลาที่ใช้กระตุ้นต่อปริมาณร้อยละผลิตภัณฑ์ที่ใช้เตรียมถ่านกัมมันต์ จากถ่านกะลาปาล์ม .....	71
ภาพที่ 4.4	ผลของเวลาที่ใช้กระตุ้นต่อปริมาณร้อยละผลิตภัณฑ์ที่ใช้เตรียมถ่านกัมมันต์ จากถ่านไม้ไผ่ .....	71
ภาพที่ 4.5	ผลของอัตราส่วนโดยมวลระหว่างโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (สารกระตุ้น) ต่อถ่านหินซับบิทูมินัสที่ใช้เตรียมถ่านกัมมันต์ต่อปริมาณร้อยละผลิตภัณฑ์ .....	76
ภาพที่ 4.6	ผลของอุณหภูมิที่ใช้กระตุ้นต่อปริมาณร้อยละผลิตภัณฑ์ที่ใช้เตรียมถ่านกัมมันต์ จากถ่านหินซับบิทูมินัส ที่อัตราส่วนโดยมวลระหว่างโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (สารกระตุ้น) ต่อถ่านหินซับบิทูมินัส 0.2:1 .....	77
ภาพที่ 4.7	ผลของอุณหภูมิที่ใช้กระตุ้นต่อปริมาณร้อยละผลิตภัณฑ์ที่ใช้เตรียมถ่านกัมมันต์ จากถ่านหินซับบิทูมินัส ที่อัตราส่วนโดยมวลระหว่างโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (สารกระตุ้น) ต่อถ่านหินซับบิทูมินัส 0.4:1 .....	77

<b>ภาพที่ 4.8</b>	ผลของอุณหภูมิที่ใช้กระตุ้นต่อปริมาณร้อยละผลิตภัณฑ์ที่ใช้เตรียมถ่านกัมมันต์จากถ่านหินซับบิทูมินัส ที่อัตราส่วนโดยมวลระหว่างโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (สารกระตุ้น) ต่อถ่านหินซับบิทูมินัส 0.6:1 .....	78
<b>ภาพที่ 4.9</b>	ผลของเวลาที่ใช้กระตุ้นต่อปริมาณร้อยละผลิตภัณฑ์ที่ใช้เตรียมถ่านกัมมันต์จากถ่านหินซับบิทูมินัสที่อัตราส่วนโดยมวลระหว่างโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (สารกระตุ้น) ต่อถ่านหินซับบิทูมินัส 0.2:1 .....	79
<b>ภาพที่ 4.10</b>	ผลของเวลาที่ใช้กระตุ้นต่อปริมาณร้อยละผลิตภัณฑ์ที่ใช้เตรียมถ่านกัมมันต์จากถ่านหินซับบิทูมินัสที่อัตราส่วนโดยมวลระหว่างโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (สารกระตุ้น) ต่อถ่านหินซับบิทูมินัส 0.4:1 .....	80
<b>ภาพที่ 4.11</b>	ผลของเวลาที่ใช้กระตุ้นต่อปริมาณร้อยละผลิตภัณฑ์ที่ใช้เตรียมถ่านกัมมันต์จากถ่านหินซับบิทูมินัสที่อัตราส่วนโดยมวลระหว่างโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (สารกระตุ้น) ต่อถ่านหินซับบิทูมินัส 0.6:1 .....	80
<b>ภาพที่ 4.12</b>	ผลการวิเคราะห์ XRD ของถ่านกะลาปาล์ม (Palm shell char) และถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากถ่านกะลาปาล์มที่ภาวะเหมาะสมที่สุด (PSAC).....	87
<b>ภาพที่ 4.13</b>	ผลการวิเคราะห์ XRD ของถ่านไม้ไผ่ (Bamboo char) และถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากถ่านไม้ไผ่ที่ภาวะเหมาะสมที่สุด (BBAC).....	87
<b>ภาพที่ 4.14</b>	ผลการวิเคราะห์ XRD ของถ่านหินซับบิทูมินัส (Subbituminous coal) และถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากถ่านหินซับบิทูมินัสที่ภาวะเหมาะสมที่สุด (SCAC).....	88
<b>ภาพที่ 4.15</b>	ผลการวิเคราะห์ FTIR ของถ่านกะลาปาล์ม (Palm shell char) และถ่านกัมมันต์จากถ่านกะลาปาล์มที่ภาวะเหมาะสมที่สุด (PSAC).....	90
<b>ภาพที่ 4.16</b>	ผลการวิเคราะห์ FTIR ของถ่านไม้ไผ่ (Bamboo char) และถ่านกัมมันต์จากถ่านไม้ไผ่ที่ภาวะเหมาะสมที่สุด (BBAC).....	90
<b>ภาพที่ 4.17</b>	ผลการวิเคราะห์ FTIR ของถ่านหินซับบิทูมินัส (Subbituminous coal) และถ่านกัมมันต์จากถ่านหินซับบิทูมินัส (SCAC).....	91
<b>ภาพที่ 4.18</b>	ลักษณะสัณฐานวิทยาของ (a) ถ่านกะลาปาล์ม กำลังขยาย 250 เท่า (b) ถ่านกัมมันต์จากถ่านกะลาปาล์มที่ภาวะกระตุ้นเหมาะสม (PSAC) กำลังขยาย 250 เท่า (c) ถ่านกัมมันต์จากถ่านกะลาปาล์มที่ภาวะกระตุ้นเหมาะสม (PSAC) กำลังขยาย 10000 เท่า (d) ถ่านไม้ไผ่ กำลังขยาย 250 เท่า (e) ถ่านกัมมันต์จากถ่านไม้ไผ่ที่ภาวะกระตุ้น	



เหมาะสม (BBAC) กำลังขยาย 250 เท่า (f) ถ่านกัมมันต์จากถ่านไม้ไผ่ที่ภาวะกระตุ้น  
 เหมาะสม (BBAC) กำลังขยาย 10000 เท่า (g) ถ่านหินซัลฟิวรีนีส กำลังขยาย 250 เท่า  
 (h) ถ่านกัมมันต์จากถ่านหินซัลฟิวรีนีสที่ภาวะกระตุ้นเหมาะสม (SCAC) กำลังขยาย  
 250 เท่า และ (i) ถ่านกัมมันต์จากถ่านหินซัลฟิวรีนีสที่ภาวะกระตุ้นเหมาะสม (SCAC)  
 กำลังขยาย 10000 เท่า ตามลำดับ..... 93

ภาพที่ ก.1 เครื่อง Thermogravimetric analyzer (TGA) ..... 104

ภาพที่ ก.2 การใส่ตัวอย่างลงในถ้วยเผา ..... 105



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรอุตสาหกรรมและเป็นแหล่งผลิตและส่งออกสินค้าเกษตรที่สำคัญแห่งหนึ่งของ มีโรงงานอุตสาหกรรมมากมายที่มีวัสดุเหลือทิ้งจากทางโรงงานที่ยังไม่ได้ถูกนำมาใช้ประโยชน์มากนัก อีกทั้งยังมีการจัดการของเสียชีวมวลโดยการเผาทิ้งในที่โล่ง เป็นสาเหตุหนึ่งของการปล่อยก๊าซเรือนกระจกและมลภาวะทางอากาศ ซึ่งพบว่าประเทศไทยมีปริมาณวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรมากถึง 5.95 ล้าน (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2558) ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้นำวัสดุเหลือทิ้งมาแปรสภาพเป็นถ่านกัมมันต์ให้มีมูลค่าและคุณค่าเพิ่มขึ้น ด้วยการแปรสภาพวัตถุดิบให้เป็นถ่านกัมมันต์ซึ่งถือว่าเป็นประโยชน์อย่างยิ่ง และยังเป็นการใช้ทรัพยากรธรรมชาติที่มีอยู่ให้เกิดประโยชน์สูงสุดอีกด้วย โดยวัตถุดิบที่นำมาศึกษานั้น ได้แก่ กะลาปาล์ม ไม่น้ำและถ่านหินซบพิทูมินัสที่ผ่านการคาร์บอนไนซ์แล้ว ซึ่งวัตถุดิบทั้งสามชนิดนั้นถือว่าเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากทางโรงงาน โดยกะลาปาล์มมีปริมาณเหลือทิ้ง 100,000 ตันในแต่ละปี เนื่องจากอุตสาหกรรมปาล์มน้ำมันมีแนวโน้มของอัตราเติบโตที่สูงขึ้นในแต่ละปี เนื่องจากความต้องการนำไปใช้ผลิตน้ำมันไบโอดีเซล โดยในปัจจุบันประเทศไทยมีผลผลิตน้ำมันปาล์มประมาณ 5 ล้านตันต่อปี ทำให้มีวัสดุเหลือทิ้งจำนวนมาก [1] ไม่น้ำเป็นวัสดุเหลือทิ้งมากในแถบจังหวัดชลบุรี ถูกนำไปใช้ประโยชน์เพียงแคร์้อยละ 35 ทำให้มีปริมาณเหลือทิ้งถึง 5 ตันต่อวัน [2] ส่วนถ่านหินซบพิทูมินัส โดยทั่วไปนำไปใช้เป็นพลังงานเชื้อเพลิงโดยนิยมใช้ถ่านหินซบพิทูมินัสที่มีขนาดใหญ่ เนื่องจากให้ค่าความร้อนสูง ในขณะที่ถ่านหินซบพิทูมินัสขนาดเล็กไม่สามารถนำไปใช้งานได้ เนื่องจากให้ค่าความร้อนต่ำ จึงกลายเป็นวัสดุเหลือทิ้ง

ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) เป็นวัสดุที่ผลิตจากชีวมวลหรือวัสดุเหลือทิ้งที่มีองค์ประกอบคาร์บอนสูง ส่งผลให้สมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ได้ คือ มีความสามารถในการดูดซับที่ดี เนื่องจากมีพื้นที่ผิวหรือรูพรุนสูง ซึ่งนิยมใช้ถ่านกัมมันต์เป็นตัวดูดซับสารที่เป็นของเหลวหรือก๊าซ ในอุตสาหกรรมประเภทต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมการฟอกสี อุตสาหกรรมอาหาร อุตสาหกรรมยา อุตสาหกรรมผลิตน้ำดื่มและการทำให้ก๊าซบริสุทธิ์ เป็นต้น เหตุที่ในอุตสาหกรรมนิยมใช้ถ่านกัมมันต์เนื่องจากมีรูพรุนสูง หาง่าย และราคาถูก ซึ่งถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้นั้นจะมีสมบัติและความเหมาะสมในการใช้งานที่แตกต่างกัน ดังนั้นในงานวิจัยจึงได้ศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์จากวัตถุดิบที่แตกต่างกันเพื่อหาภาวะที่เหมาะสมและศึกษาสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ได้

## 1.2 วัตถุประสงค์

- (1) เพื่อศึกษาหาภาวะที่เหมาะสมของการเตรียมถ่านกัมมันต์จากไบโอชาร์และถ่านหินซับบิทูมินัส
- (2) เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากไบโอชาร์และถ่านหินซับบิทูมินัส

## 1.3 ขอบเขตงานวิจัย

- (1) ศึกษาภาวะที่เหมาะสมจากการกระตุ้นถ่านกะลาปาล์มและถ่านไม้ไผ่ที่อุณหภูมิ และเวลาที่ใช้กระตุ้นต่าง ๆ
- (2) ศึกษาภาวะที่เหมาะสมจากการกระตุ้นถ่านหินซับบิทูมินัสที่อัตราส่วนโดยมวลระหว่างโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อถ่านหินซับบิทูมินัส อุณหภูมิ และเวลาที่ใช้กระตุ้นต่าง ๆ
- (3) ศึกษาสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ได้

## 1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

- (1) ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
- (2) ศึกษาการใช้งานเครื่องปฏิกรณ์ เครื่องมือและเครื่องทดสอบพร้อมทั้งตรวจสอบความพร้อมในการใช้งาน
- (3) เตรียมวัตถุดิบ โดยนำถ่านกะลาปาล์ม ถ่านไม้ไผ่ และถ่านหินซับบิทูมินัส บดและคัดขนาดด้วยเครื่องร่อน ให้มีขนาด 3 - 5 มิลลิเมตร
- (4) วิเคราะห์สมบัติเบื้องต้นของถ่านด้วยเทคนิคต่าง ๆ ดังต่อไปนี้
  - วิเคราะห์องค์ประกอบโดยประมาณ (Proximate analysis) ของถ่านกะลาปาล์ม ถ่านไม้ไผ่และถ่านหินซับบิทูมินัส
  - วิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุ (Ultimate analysis) ของถ่านกะลาปาล์ม ถ่านไม้ไผ่และถ่านหินซับบิทูมินัส
  - วิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุนและขนาดรูพรุนเฉลี่ย (Textural properties) ของถ่านกะลาปาล์ม ถ่านไม้ไผ่และถ่านหินซับบิทูมินัส
  - วิเคราะห์โครงสร้างผลึกของไบโอชาร์และถ่านหินซับบิทูมินัสด้วยเทคนิควิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffractometer, XRD)
  - วิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันของไบโอชาร์และถ่านหินซับบิทูมินัสด้วยเทคนิคเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (Fourier transform Infrared spectroscopy, FTIR)

- วิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยาของไบโอชาร์และถ่านหินซับบิทูมินัสด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิ่ง (Scanning electron microscope, SEM)
- (5) ออกแบบการทดลองสำหรับการผลิตถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากถ่านกะลาปาล์ม และถ่านไม้ไผ่ โดยตัวแปรที่ทำการศึกษา ประกอบด้วย
- อุณหภูมิที่ใช้กระตุ้น 800, 900 และ 1000 องศาเซลเซียส
  - เวลาที่ใช้กระตุ้น 1, 2, 3 และ 4 ชั่วโมง
- (6) ออกแบบการทดลองสำหรับการผลิตถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากถ่านหินซับบิทูมินัส โดยตัวแปรที่ทำการศึกษา ประกอบด้วย
- อัตราส่วนโดยมวลระหว่างโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อถ่านหินซับบิทูมินัส 0.2:1 0.4:1 และ 0.6:1
  - อุณหภูมิที่ใช้กระตุ้น 650, 750 และ 850 องศาเซลเซียส
  - เวลาที่ใช้กระตุ้น 1, 2, 3 และ 4 ชั่วโมง
- (7) ทำการทดลองที่ได้ออกแบบไว้สำหรับการผลิตถ่านกัมมันต์จากถ่านกะลาปาล์ม ถ่านไม้ไผ่และถ่านหินซับบิทูมินัส
- (8) หาภาวะที่เหมาะสมสำหรับถ่านกัมมันต์ที่มาจากถ่านกะลาปาล์ม ถ่านไม้ไผ่ และถ่านหินซับบิทูมินัสโดยการวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุนและขนาดรูพรุนเฉลี่ย (Textural properties)
- (9) วิเคราะห์สมบัติผลิตภัณฑ์ถ่านกัมมันต์ที่ได้
- วิเคราะห์องค์ประกอบโดยประมาณ (Proximate analysis) ของถ่านกัมมันต์
  - วิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุ (Ultimate analysis) ของถ่านกัมมันต์
  - วิเคราะห์โครงสร้างผลึกของถ่านกัมมันต์ด้วยเทคนิควิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffractometer, XRD)
  - วิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันของถ่านกัมมันต์ด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี (Fourier transform Infrared spectroscopy, FTIR)
  - วิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยาถ่านกัมมันต์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิ่ง (Scanning electron microscope, SEM)

### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้ภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมถ่านกัมมันต์และศึกษาสมบัติของถ่านกัมมันต์จากวัตถุดิบต่างชนิดกัน

## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon)

ความหมายของถ่านกัมมันต์

Suhas และคณะ [3] กล่าวว่า ถ่านกัมมันต์เป็นวัสดุที่มีคาร์บอนสูง ส่งผลให้มีพื้นที่ผิวภายในสูงในช่วง 500 ถึง 2000 ตารางเมตรต่อกรัม นอกจากนี้ถ่านกัมมันต์มีความสามารถการดูดซับได้ดี สามารถกำจัดสิ่งปนเปื้อนได้อย่างกว้างขวางทั้งสารที่เป็นอินทรีย์และอนินทรีย์จากของเหลวและก๊าซ

Jankowska และคณะ [4] กล่าวว่า เมื่อนำวัสดุที่มีปริมาณคาร์บอนสูงในโครงสร้างมาผ่านกระบวนการกระตุ้น จะได้ถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวและรูพรุนสูง โดยมีองค์ประกอบคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลักประมาณ 87 – 90% นอกจากนี้ยังมีธาตุอื่น ๆ ประกอบด้วย แต่จะมีปริมาณมากน้อยเพียงใดขึ้นอยู่กับปริมาณที่มีในวัสดุก่อนการกระตุ้น และเมื่อพิจารณาพื้นที่หน้าตัดของถ่านกัมมันต์ พบว่ารูพรุนที่เกิดขึ้นมีลักษณะคล้ายรังผึ้ง

มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (2547) [5] กล่าวว่า ผลิตภัณฑ์ถ่านกัมมันต์ที่ได้เป็นการนำวัสดุที่มีองค์ประกอบคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก ที่อาจเป็นวัสดุทางธรรมชาติที่เกิดขึ้นเองหรือจากการสังเคราะห์ขึ้น โดยนำวัสดุไปผ่านกระบวนการเผาในที่อับอากาศเพื่อทำให้เป็นถ่านชาร์ก่อน (Carbonization) หลังจากนั้นนำมากระตุ้น (Activation) เพื่อให้มีพื้นที่ผิวและรูพรุนเพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อถ่านชาร์ถูกกระตุ้นเป็นถ่านกัมมันต์แล้วทำให้ความว่องไวในการทำปฏิกิริยากับสารเร็วมากขึ้น สามารถดูดซับสารที่เป็นก๊าซและของเหลวได้ดี จากสมบัติและราคาที่ไม่แพงของถ่านกัมมันต์ที่ได้ ทำให้นิยมใช้ในอุตสาหกรรม

#### 2.2 วิวัฒนาการของถ่านกัมมันต์

ในคริสต์ศตวรรษที่ 15 ได้มีการผลิตถ่านกัมมันต์จากไม้ โดยนำไม้มาเผาในที่อับอากาศเพื่อนำมาใช้ดูดสีในของเหลว แต่ในการดูดก๊าซเพิ่งมีผู้บันทึกไว้ในปี ค.ศ. 1785 แต่ก็ไม่มีผู้สนใจจนกระทั่งในปี ค.ศ. 1811 มีนักวิทยาศาสตร์ท่านหนึ่งคิดค้นการผลิตถ่านกัมมันต์จากกระดูก พบว่าสามารถดูดสีได้มากกว่าถ่านไม้ จึงนิยมนำถ่านกระดูกมาใช้ในการฟอกสีน้ำตาลทรายให้ขาวสะอาด จากนั้นจึงได้มีการค้นคว้าและพัฒนาการผลิตถ่านกัมมันต์มาเรื่อย ๆ จนกระทั่งปี ค.ศ. 1822 พบว่าถ่านกัมมันต์จากเลือดกับซีเถ้า มีสมบัติในการดูดสีมากกว่าถ่านกัมมันต์จากกระดูก 20-50 เท่า แต่สามารถผลิตได้น้อย จึงไม่สามารถนำมาใช้ในอุตสาหกรรม จากจุดนี้เองทำให้มีการพัฒนาและ

ปรับปรุง ความสามารถในการดูดซับของถ่านกัมมันต์ให้ดีขึ้น โดยผ่านกระบวนการการเพิ่มพื้นที่ผิว ต่อมาในช่วงปี ค.ศ.1900 มีนักวิทยาศาสตร์ชื่อ Ostreyko ชาวโปแลนด์ ได้คิดค้นวิธีการผลิตถ่านกัมมันต์ขึ้นใหม่ โดยเผาถ่านภายใต้บรรยากาศของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และอีกวิธีหนึ่งคือ ใช้คลอไรด์ของโลหะผสมกับถ่านแล้วนำไปเผา ซึ่งนับเป็นผู้ริเริ่มให้เกิดอุตสาหกรรมการผลิตถ่านกัมมันต์ชื่อต่าง ๆ ขึ้น ซึ่งได้มีการปรับปรุงและเปลี่ยนชื่อเรียกใหม่ ๆ ไปเรื่อย ๆ ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตขึ้นเหล่านี้ได้ทดสอบนำไปใช้ในการดูดสี ฟอกสีในโรงงานผลิตน้ำตาลทรายเป็นส่วนใหญ่ พบว่าใช้ได้ดีกว่า ถ่านกระดูกมาก

ความสามารถในการดูดกลืนและก๊าซของถ่านกัมมันต์จึงเริ่มเป็นที่สนใจกันในระหว่าง สงครามโลกครั้งที่ 1 โดยเฉพาะการนำไปใช้ทำหน้าที่ปกป้องกันก๊าซพิษ ทำให้นักวิทยาศาสตร์สนใจ ความสามารถในการดูดกลืนและก๊าซของถ่านกัมมันต์มากขึ้น จึงได้มีการทดลองด้วยวิธีต่าง ๆ และ พบว่าถ่านกัมมันต์สำหรับฟอกสีน้ำตาลไม่เหมาะในการนำไปใช้ทำหน้าที่ปกป้องกันก๊าซพิษ เนื่องจาก น้ำหนักเบา พองง่าย จึงมีการค้นคว้าวิจัยการผลิตถ่านกัมมันต์โดยใช้วัสดุชนิดอื่นแทน โดยผลิต ถ่านกัมมันต์ชนิดใหม่ให้มีความหนาแน่นมากขึ้น เพื่อให้มีความสามารถในการดูดซับที่ดีขึ้น ทำให้มี การพัฒนาถ่านกัมมันต์โดยใช้วัสดุชนิดอื่น ๆ เรื่อยมา การค้นคว้าก็บรรลุผลสำเร็จเมื่อสงครามสิ้นสุด และมีผู้นำไปใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น การดูดไอเบนซินจากก๊าซอื่น การดูดไอของสารระเหย เป็นต้น [6]

### 2.3 วัตถุดิบที่นำมาใช้สำหรับกระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์

การผลิตถ่านกัมมันต์ จะต้องใช้วัตถุดิบที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบโดยวัตถุดิบนั้นอาจ เกิดขึ้นโดยธรรมชาติหรือได้จากการสังเคราะห์ขึ้น ซึ่งวัตถุดิบที่นำมาผลิตถ่านกัมมันต์ ควรจะมีสมบัติ ดังต่อไปนี้

- (1) องค์ประกอบคาร์บอนสูง
- (2) ปริมาณสารระเหยต่ำ
- (3) ราคาถูกและหาได้ง่าย
- (4) สะดวกในการใช้งาน ไม่สลายตัวหรือเสื่อมสภาพได้ง่าย

สำหรับวัตถุดิบที่ใช่มักเป็นในรูปของถ่านที่ได้จากการคาร์บอนไนเซชันอินทรีย์วัตถุ หรือเรียกว่า ถ่านสังเคราะห์ (Artificial char) หรืออาจเป็นถ่านที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ (Natural char) โดย ถ่านสังเคราะห์แบ่งตามอินทรีย์วัตถุที่ใช้เป็น 2 ประเภท คือ

- ถ่านสังเคราะห์เนื้อแข็ง (Hard artificial char) เช่น ถ่านหินน้ำมัน ถ่านไม้ที่จากการคาร์- บอนไนซ์ที่ความดันสูง

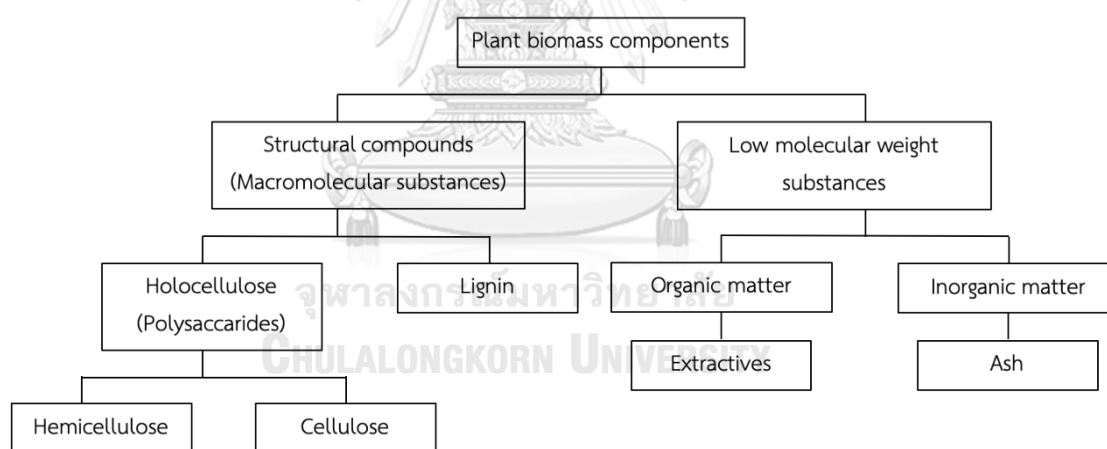
- ถ่านสังเคราะห์เนื้ออ่อน (Soft artificial char) เช่น ถ่านไม้ ถ่านชานอ้อย ถ่านแกลบ ถ่านน้ำตาล

โดยทฤษฎีแล้วอินทรีย์วัตถุทุกชนิดที่เป็นวัตถุดิบสามารถนำมาผลิตถ่านกัมมันต์ได้ [5] โดยสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ ๆ ดังนี้

### 2.3.1 ชีวมวล (Biomass)

ชีวมวล คือ สารอินทรีย์ที่ได้จากสิ่งมีชีวิต พืชและสัตว์หรือกระบวนการชีวภาพที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ เป็นแหล่งกักเก็บพลังงานจากธรรมชาติและสามารถนำมาใช้ผลิตพลังงานเพื่อทดแทนพลังงานเชื้อเพลิงประเภทฟอสซิล ได้แก่ ถ่านหิน น้ำมันและแก๊สธรรมชาติ เป็นต้น [7] โดยองค์ประกอบหลักของชีวมวล แสดงดังภาพที่ 2.1

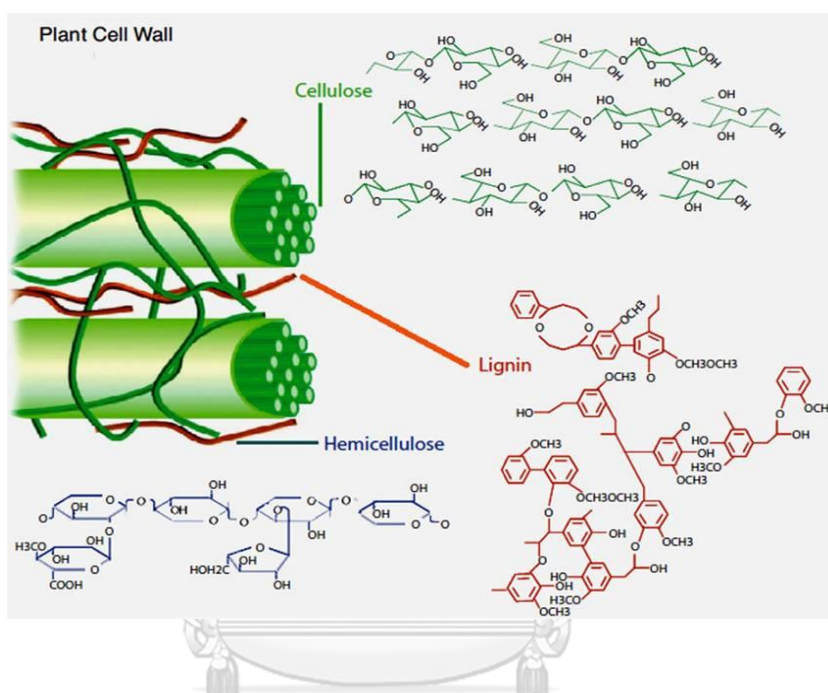
#### 2.3.1.1 องค์ประกอบหลักของชีวมวล



ภาพที่ 2.1 องค์ประกอบหลักของพืชชีวมวล

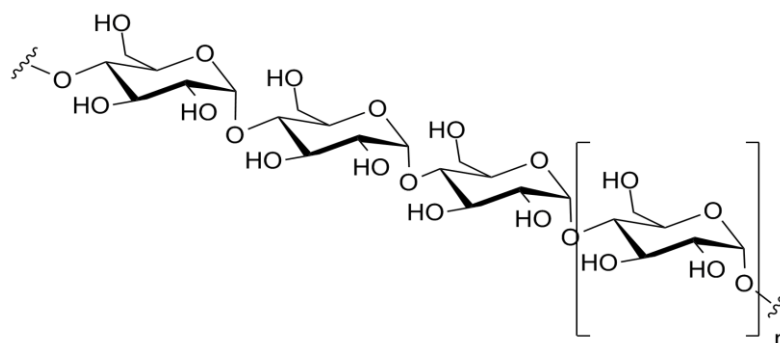
โดยส่วนใหญ่ชีวมวลเป็นลิกโนเซลลูโลส (Lignocelluloses material) ที่เกิดจากสารโมเลกุลขนาดใหญ่ (Macromolecular substances) ที่ประกอบด้วย เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) เซลลูโลส (Cellulose) และลิกนิน (Lignin) ดังภาพที่ 2.2 นอกจากนี้ยังพบว่าชีวมวลบางชนิดประกอบด้วยสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ (Low molecular weight substances)

เช่น สารสกัด (Extractives) และเถ้า (Ash) ซึ่งลิกโนเซลลูโลสสามารถแบ่งเป็น 2 กลุ่มย่อยตามชนิดของโมเลกุลน้ำตาล ได้แก่ โฮโลเซลลูโลส (Holocellulose) และลิกนิน โดยโฮโลเซลลูโลสเป็นน้ำตาลโพลีแซคคาไรด์ (Polysaccharides) ที่มีเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสอยู่รวมกลุ่มกัน ดังภาพที่ 2.3 โฮโลเซลลูโลสเป็นส่วนประกอบหลักของผนังเซลล์และเส้นใยของพืช ส่วนลิกนินไม่จัดเป็นน้ำตาลโพลีแซคคาไรด์



ภาพที่ 2.2 องค์ประกอบของลิกโนเซลลูโลส (lignocellulose materials) [8]

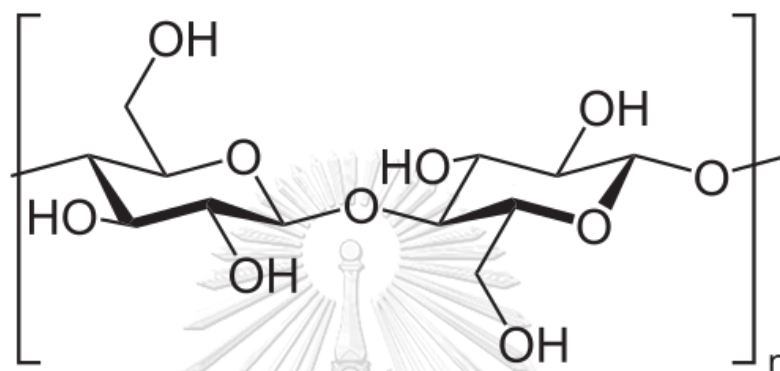
CHULALONGKORN UNIVERSITY



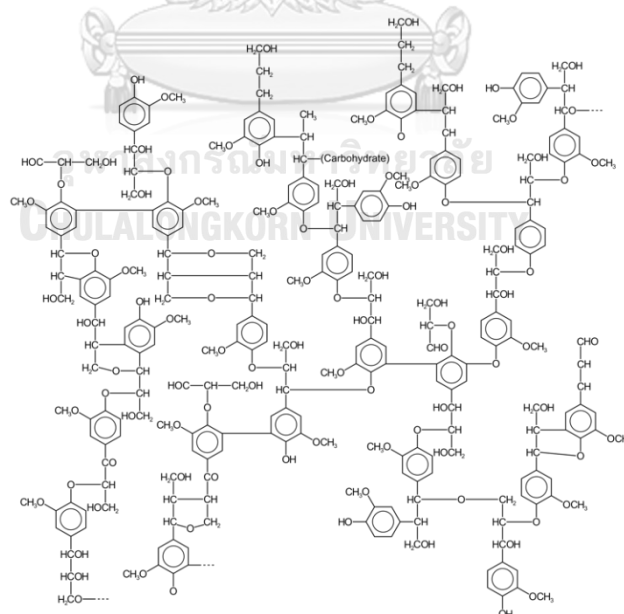
ภาพที่ 2.3 โครงสร้างของน้ำตาลโพลีแซคคาไรด์ (Polysaccharides) [9]



เซลลูโลส (Cellulose) มีสูตรโมเลกุลอย่างง่าย คือ  $(C_6H_{10}O_5)_n$  และเซลลูโลสเป็นโพลิเมอร์ (Polymer) ที่เกิดจากเซลโลบิโอสหลายหน่วยเรียงต่อกัน โดยแต่ละหน่วยของเซลโลบิโอสประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิล (-OH group) 3 หมู่ ดังภาพที่ 2.4 หมู่ฟังก์ชันนี้เกิดพันธะไฮโดรเจนทำให้เกิดแรง



ภาพที่ 2.4 โครงสร้างของเซลลูโลส (Cellulose structure) [10]



ภาพที่ 2.5 โครงสร้างของลิกนิน (Lignin structure) [11]

ลิกนิน (Lignin) มีสูตรโมเลกุลอย่างง่าย คือ  $[12]_n$  และลิกนินมีโครงสร้างเป็นสามมิติที่ซับซ้อนเกิดจากกลุ่มพอลิเมอร์ที่เป็นสารประกอบแอโรแมติก ทำให้โครงสร้างของลิกนินมีขนาดโมเลกุลใหญ่ และจัดเรียงกลุ่มกันอย่างไม่เป็นระเบียบ (Amorphous) ดังภาพที่ 2.5 ทำให้สลายตัวทางความร้อนยาก เนื่องจากมีความเสถียรภาพทางความร้อนสูง โดยสารประกอบอะโรแมติกในลิกนิน เป็นวงแหวนอนุพันธ์เบนซีนที่ประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชันเมทอกซี (Methoxy group,  $-OCH_3$ ) หมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl group,  $-OH$ ) และหมู่ฟีนอลิก (Phenolic group) เป็นต้น

### 2.3.1.2 องค์ประกอบทางเคมีของชีวมวล

ซึ่งพบว่าวัตถุดิบจากชีวมวลแต่ละชนิดที่สามารถนำมาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ได้มีปริมาณองค์ประกอบทางเคมีที่แตกต่างกัน ดังตารางที่ 2.1 และ 2.2 ส่งผลให้ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้มีสมบัติที่แตกต่างกัน โดยมีพื้นที่ผิวและการกระจายขนาดรูพรุนต่างกัน แต่อย่างไรก็ตามสมบัติของถ่านกัมมันต์ยังขึ้นอยู่กับปัจจัยอื่น ๆ อีก เช่น วิธีการผลิตหรือภาวะที่ใช้ เป็นต้น จึงเป็นการยากที่จะระบุให้แน่นอนว่าวัตถุดิบชนิดใดสามารถใช้ผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ที่เหมาะสมกับงานแบบใด

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบทางเคมีของชีวมวล [13]

ชนิดของชีวมวล	เซลลูโลส (%wt.)	เฮมิเซลลูโลส (%wt.)	ลิกนิน (%wt.)
กะลาปาล์ม	29.0	47.7	53.4
กะลามะพร้าว	15.0	35.0	50.0
เปลือกอัลมอนด์	32.5	25.5	24.8
เปลือกมะกอก	30.8	17.1	32.6
ไยมะพร้าว	0.52	23.70	3.54
ผลโกโก้	41.52	35.26	0.95
ไม้เนื้ออ่อน	36.0	18.5	30.5
ชานอ้อย	42.16	36.0	19.30

ตารางที่ 2.2 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบโดยประมาณ (Proximate analysis) และองค์ประกอบแบบแยกธาตุ (Ultimate analysis) [13]

ชนิดของ ชีวมวล	การวิเคราะห์องค์ประกอบ แบบประมาณ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)			การวิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)				
	ความชื้น	เถ้า	สารระเหย	C	H	N	S	O
กะลาปาล์ม	7.96	1.10	72.47	50.01	6.90	1.90	0	41.00
กะลามะพร้าว	8.21	0.10	73.09	48.63	6.51	0.14	0.08	44.64
เปลือกอัลมอนต์	10.00	0.60	80.30	50.50	6.60	0.20	0.01	42.69
เปลือกมะกอก	10.40	1.40	74.40	44.80	6.00	0.10	0.01	49.09
ซังข้าวโพด	4.3	0.90	78.70	46.80	6.00	0.90	-	46.30
ชานอ้อย	6.20	0.90	-	47.30	6.20	0.30	-	46.20
ฟางข้าว	3.30	3.23	-	46.50	6.30	0.90	-	46.30
ไม้ไผ่	-	3.90	80.6	43.8	6.60	0.40	0	-
ไม้เบิร์ช	6.60	0.20	81.20	48.40	5.60	0.20	-	45.80

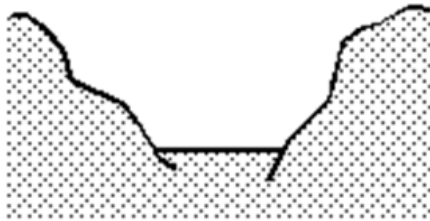
### 2.3.2 ถ่านหิน

#### 2.3.2.1 ความหมายของถ่านหิน

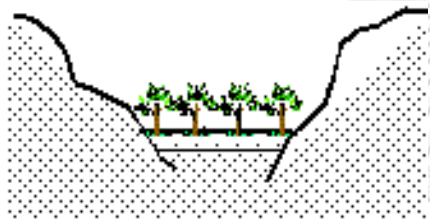
ถ่านหิน เป็นเชื้อเพลิงธรรมชาติ เกิดจากการสะสมตัวตามธรรมชาติของซากพืชในแอ่งตะกอนน้ำตื้น ถ่านหินเป็นหินตะกอนชนิดหนึ่งซึ่งสามารถติดไฟได้ มีส่วนประกอบที่สำคัญคือ สารประกอบของคาร์บอน ซึ่งจะมีอยู่ไม่น้อยกว่าร้อยละ 50 โดยปริมาณ ถ่านหินมีกำเนิดมาจากการเปลี่ยนแปลงตามธรรมชาติของพืชพันธุ์ไม้ต่าง ๆ ที่สลายตัวและสะสมอยู่ในลุ่มน้ำหรือแอ่งน้ำต่าง ๆ นับเป็นเวลาหลายร้อยล้านปี เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงของผิวโลกเช่น เกิดแผ่นดินไหว ภูเขาไฟระเบิด หรือมีการทับถมของตะกอนมากขึ้น ทำให้แหล่งสะสมตัวนั้นได้รับความกดดันและความร้อนที่มีอยู่ภายในโลกเพิ่มขึ้น ซากพืชเหล่านั้นก็จะเกิดการเปลี่ยนแปลงกลายเป็นถ่านหินชนิดต่าง ๆ [14]

### 2.3.2.2 ลักษณะการเกิดของถ้ำหิน

ตัวอย่างขั้นตอนกระบวนการเกิดของถ้ำหินแสดงดังภาพที่ 2.6 พร้อมคำอธิบาย ดังนี้



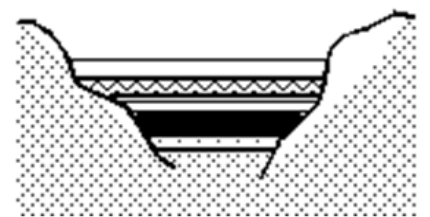
**ลำดับที่ 1** ถ้ำหินเกิดขึ้นบริเวณที่เป็นหนอง บึง แอ่ง น้ำ หรือที่ชื้นแฉะ ที่มีระดับต่ำกว่าบริเวณรอบข้าง ซึ่งเกิดจากการยุบตัวลง หรือบริเวณรอบ ๆ ยกตัวสูงขึ้น จากผิวโลก และส่วนต่าง ๆ ปรับตัวเพื่อให้เข้าสู่สภาวะสมดุล



**ลำดับที่ 2** บริเวณนี้มีสภาพแวดล้อมที่อำนวยให้พืชเกิดขึ้นและอาศัยอยู่อย่างหนาแน่น มีวงจรชีวิตที่ทั้งเกิดขึ้นล้มตายลงติดต่อกันหรือเป็นช่วง ๆ ส่งผลให้ซากต่าง ๆ จะสะสมทับถมกันเป็นจำนวนมาก



**ลำดับที่ 3** บริเวณนี้มีการผุพังเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของผิวโลก ทำให้มีตะกอนดินมาทับถมซากพืชและซากสิ่งมีชีวิตอื่น รวมทั้งมีการเปลี่ยนแปลงสภาพสิ่งแวดล้อม เช่น น้ำท่วม การแตกแยกของแผ่นดิน ภาวะแห้งแล้ง การผุพังทำลายการเคลื่อนไหวของผิวโลก เป็นต้น ทำให้ซากต่าง ๆ ที่สะสมอยู่ที่แอ่งได้รับแรงกดดันและได้รับความร้อนภายในโลก ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีและฟิสิกส์ในพื้นที่ดังกล่าว ทำให้ซากเหล่านี้แปรสภาพไปเป็นถ้ำหิน



**ลำดับที่ 4** อิทธิพลจากแรงกดดันและความร้อนภายในโลกที่เป็นเวลานาน ส่งผลให้ถ้ำหินที่ถูกอัดตัวกลายเป็นถ้ำหิน ที่มีคุณลักษณะแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับลักษณะและชนิดของพันธุ์ไม้ การเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพของเนื้อไม้รวมทั้งการทับถมใน

ระยะแรกไปจนถึงการเปลี่ยนแปลงเป็นเนื้อถ่านหินใน  
ระยะต่อมา

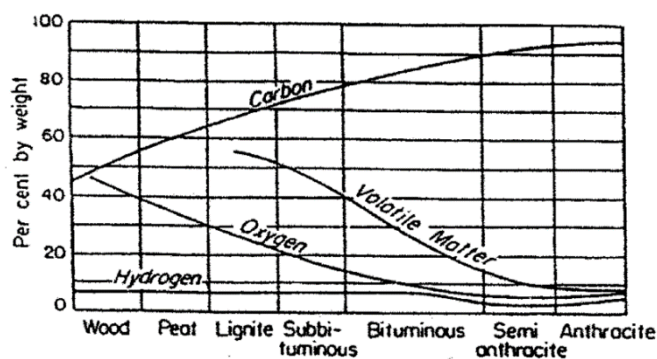


ลำดับที่ 5 ต่อมาชั้นดินและหินมาทับถมคลุมชั้นถ่าน  
หินจนอยู่ในสภาพปัจจุบัน นอกจากในบางชั้นถ่านหิน  
เอียงตัวทะเลขึ้นมาใกล้ผิวดิน เกิดจากการกัดกร่อน  
ตามธรรมชาติในภายหลัง พบว่ากระบวนการทั้งหมด  
ที่เกิดขึ้น ถ้าเกิดหลายครั้งจะทำให้มีถ่านหินหลายชั้น  
บริเวณเดียวกัน

ภาพที่ 2.6 แสดงขั้นตอนการกำเนิดถ่านหินของแหล่งที่มีการสะสมตัวอยู่กับที่ [15]

### 2.3.2.3 ชนิดของถ่านหิน

การจำแนกถ่านหินมีนั้นหลายแบบ ซึ่งจะแบ่งตามวัตถุประสงค์ในการนำไปใช้งาน  
เช่น ระบบยุโรป (Europe International) ระบบอังกฤษ (Great Britain) ระบบออสเตรเลีย  
(Australia) และระบบอเมริกาเหนือ (North America) เป็นต้น ซึ่งพบว่าระบบที่นิยมใช้กันมากใน  
ปัจจุบัน คือ ระบบของสมาคมทดสอบและวัสดุแห่งสหรัฐอเมริกา (American society for testing  
and materials, ASTM) โดยจำแนกถ่านหินตามลำดับชั้น (Rank) ทำให้มีความชัดเจนและง่ายต่อการ  
ใช้งาน วิธีการจำแนกถ่านหินนั้นพิจารณาจากความสมบูรณ์ของซากพืชไปเป็นถ่านหิน (Degree of  
coalification and metamorphism) และพิจารณาการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนปริมาณของ  
องค์ประกอบในกระบวนการจนกลายเป็นถ่านหิน แสดงไว้ในภาพที่ 2.7 ซึ่งจะเห็นว่าเมื่อกระบวนการ  
นี้ดำเนินไป ปริมาณของคาร์บอนในถ่านหินจะเพิ่มขึ้นแต่ปริมาณองค์ประกอบอื่นจะลดลง



ภาพที่ 2.7 แผนภูมิแสดงสัดส่วนขององค์ประกอบในกระบวนการแปรสภาพเป็นถ่านหิน

ระบบของสมาคมทดสอบและวัสดุแห่งสหรัฐอเมริกาได้จำแนกถ่านหินเป็น 4 ลำดับชั้น โดยสมบัติทั่วไปของถ่านหินที่อยู่ในลำดับสูงคือ จะมีปริมาณคาร์บอนมาก ให้ความร้อนสูงและมีองค์ประกอบออกซิเจนและไฮโดรเจนอยู่น้อย ในขณะที่ถ่านหินที่อยู่ในลำดับต่ำ ๆ จะมีปริมาณคาร์บอนน้อย แต่มีองค์ประกอบออกซิเจนและไฮโดรเจนมาก ซึ่งแต่ละลำดับชั้นถูกแบ่งย่อยลงไปอีกตามสมบัติทางเคมีและค่าความร้อนที่ต่างกันไป ลักษณะทั่วไปของถ่านหินในแต่ละลำดับชั้นสามารถสรุปได้ ดังนี้

#### ถ่านหินแอนทราไซต์

ถ่านหินแอนทราไซต์ (Anthracite) เป็นถ่านหินที่ถูกจัดอยู่ในลำดับสูงสุดและคุณภาพดีสุด มีลักษณะดำเป็นเงามัน มีความวาวสูง มีปริมาณคาร์บอนสูงถึง 90 เปอร์เซ็นต์ขึ้นไป มีปริมาณความชื้นต่ำมากและมีค่าความร้อนสูง มีควันน้อยแต่จุดไฟติดยาก มักนำไปใช้เป็นแหล่งเชื้อเพลิงให้ความร้อนภายในบ้าน อุตสาหกรรมเคมีและอุตสาหกรรมแก้ว เป็นต้น

#### ถ่านหินบิทูมินัส

ถ่านหินบิทูมินัส (Bituminous) มีลักษณะแข็ง เนื้อแน่น มักประกอบไปด้วยชั้นถ่านหินสีดำสนิทที่มีลักษณะเป็นมันวาว มีปริมาณคาร์บอน 80 – 90 เปอร์เซ็นต์และมีปริมาณความชื้นต่ำสามารถแบ่งย่อยได้เป็น 3 ประเภท คือ ประเภทที่มีความสามารถในการระเหยสูง กลางและต่ำ โดยถ่านหินชนิดนี้เหมาะสำหรับการใช้เพื่อถลุงโลหะ หรืออาจใช้เป็นเชื้อเพลิงผลิตกระแสไฟฟ้าได้ซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณคาร์บอนและความสามารถในการระเหย

#### ถ่านหินซับบิทูมินัส

ถ่านหินซับบิทูมินัส (Sub-Bituminous) เนื้อถ่านหินจะมีความอ่อนตัวคล้ายขี้ผึ้ง ไม่แข็งมาก มีลักษณะสีน้ำตาลเข้มจนถึง มีปริมาณคาร์บอนประมาณ 71 – 77 เปอร์เซ็นต์และมีความชื้นประมาณ 10 – 20 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งส่วนใหญ่ถ่านหินประเภทนี้ใช้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้าหรือใช้ในอุตสาหกรรม

### ถ่านหินลิกไนต์

ถ่านหินลิกไนต์ (Lignite) เป็นถ่านหินที่ถูกจัดลำดับอยู่ต่ำสุด เนื่องจากยังมีซากพืชเหลือปรากฏให้เห็นอยู่เล็กน้อย มีลักษณะสีน้ำตาลเข้มจนถึงดำ มีปริมาณคาร์บอนค่อนข้างต่ำและมีปริมาณความชื้นสูง 30 - 70 เปอร์เซ็นต์ ส่วนใหญ่ถูกใช้เป็นเชื้อเพลิงและถือว่าเป็นถ่านหินที่มีคุณภาพต่ำ

### ตารางที่ 2.3 เปรียบเทียบสมบัติต่าง ๆ ของถ่านหินแต่ละชนิด

ชนิดของถ่านหิน	ปริมาณความร้อน	ปริมาณความชื้น	ปริมาณเถ้า	ปริมาณกำมะถัน
แอนทราไซต์	สูงมาก	ต่ำ	ต่ำ	ต่ำ
บิทูมินัส	สูง	ต่ำ	ต่ำ	ต่ำ
ซับบิทูมินัส	ปานกลาง-สูง	ปานกลาง	ปานกลาง	ปานกลาง
ลิกไนต์	ต่ำ-ปานกลาง	สูง	สูง	ต่ำ-สูง

## 2.4 กระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์

### 2.4.1 การเตรียมวัตถุดิบ[16]

การเตรียมวัตถุดิบเพื่อเข้ากระบวนการการผลิตถ่านกัมมันต์เป็นขั้นตอนที่สำคัญ โดยมีปัจจัยที่ต้องพิจารณา ดังนี้

#### ความชื้น

ความชื้นของวัตถุดิบก่อนเข้าขั้นตอนการคาร์บอนไนซ์ควรควบคุมให้มีค่าต่ำสุด เพื่อเป็นการลดเวลาและลดมลภาวะในรูปของควัน อีกทั้งสามารถลดพลังงานในการคาร์บอนไนซ์ การลดความชื้นสามารถทำได้โดยการอบด้วยเตาอบโดยตรง หรือการตากแดด โดยวิธีการตากแดดเป็นวิธีที่นิยมเพราะสะดวกและราคาถูก

#### การลดขนาด

การลดขนาดของวัตถุดิบบางประเภทมีความจำเป็นเนื่องจากต้องให้ความร้อนกระจายตัวเข้าไปในวัตถุดิบอย่างทั่วถึง เช่น การลดขนาดของถ่านหิน ส่วนชีวมวลที่มีลำต้นขนาดใหญ่หรือกะลามะพร้าวที่มีลักษณะไม่สม่ำเสมอ การลดขนาดทำโดยนำวัตถุดิบผ่านเครื่องลดขนาด

### การกักเก็บวัตถุดิบ

วัตถุดิบที่พร้อมผ่านขั้นตอนการคาร์บอนไนซ์จะต้องนำไปเก็บในที่มิดชิดป้องกันความชื้นเพิ่มขึ้น อันเนื่องจากฝนตกหรือเก็บในที่ที่มีอากาศถ่ายเทได้ เพื่อป้องกันการติดไฟด้วยตัวเอง ในกรณีเก็บวัตถุดิบไว้นานในภาวะอากาศร้อน

#### 2.4.2 การคาร์บอนไนเซชัน (Carbonization)[17]

กระบวนการคาร์บอนไนเซชันเป็นการไพโรไลซิสในที่อับอากาศ เพื่อให้ได้สัดส่วนคาร์บอนของสารอินทรีย์เพิ่มขึ้น ในขณะที่เดียวกันก็ได้ของเหลวและก๊าซที่เป็นผลิตภัณฑ์อื่นออกมาด้วย ซึ่งพบว่าโครงสร้างวงแหวนอะโรมาติกหลักที่เหลือจากวัตถุดิบชีวมวลจะกลายเป็นโครงสร้างของถ่านชาร์ ส่วนกลุ่มโครงสร้างโมเลกุลหรือหมู่ที่มีขนาดเล็กกว่าจะเกิดการสลายตัวออกมาเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ได้แก่ น้ำ แอมโมเนีย น้ำมันหัตถ์ และก๊าซต่าง ๆ ซึ่งขั้นตอนการคาร์บอนไนเซชันถือว่าเป็นขั้นตอนแรกของการสร้างรูพรุน เนื่องจากถ่านชาร์ที่ได้จะมีการจัดเรียงตัวของโครงสร้างผลึกที่ไม่เป็นระเบียบ ซึ่งจะมีช่องว่างรูพรุนระหว่างผลึก โดยจะมีทาร์หรือสารระเหยไปปกคลุมอยู่ที่ช่องว่างหรือรูพรุนเหล่านั้น ขั้นตอนการคาร์บอนไนเซชัน สามารถแบ่งได้เป็น 3 ขั้นตอน ดังนี้

- (1) ขั้นตอนการสูญเสียน้ำออกจากโครงสร้างวัตถุดิบจะเกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมิ 27 – 197 องศาเซลเซียส เนื่องจากที่อุณหภูมิในช่วงนี้ชีวมวลจะคายน้ำที่ดูดซับอยู่ในช่องว่างระหว่างเซลล์ (Free water) และน้ำที่อยู่ในผนังเซลล์ (Bound water) ออกมา
- (2) ขั้นตอนการไล่สารระเหยเกิดขึ้นที่อุณหภูมิประมาณ 180 - 270 องศาเซลเซียส พบว่าโครงสร้างเฮมิเซลลูโลส (Hemicelluloses) จะสลายตัวจนหมดที่อุณหภูมิประมาณ 270 องศาเซลเซียส
- (3) ขั้นตอนการเปลี่ยนวัตถุดิบชีวมวลเป็นถ่านชาร์เกิดขึ้นที่อุณหภูมิประมาณ 270 – 400 องศาเซลเซียส ช่วงนี้วัตถุดิบชีวมวลจะสลายด้วยตัวเองจากปฏิกิริยาคายความร้อน (Exothermic reaction) ที่เกิดจากความร้อนสะสม โดยเซลลูโลสเริ่มสลายตัวอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิประมาณ 275 องศาเซลเซียส ส่วนลิกนิน (Lignin) เริ่มสลายตัวที่อุณหภูมิประมาณ 310 องศาเซลเซียส จนถึงอุณหภูมิประมาณ 400 องศาเซลเซียส หลังจากกระบวนการนี้วัตถุดิบชีวมวลจะกลายเป็นถ่านทั้งหมดแล้ว
- (4) ขั้นตอนที่มีการเกาะตัวกันของโครงสร้างถ่านชาร์ ช่วงอุณหภูมิ 497 – 847 องศาเซลเซียส โดยในช่วงนี้น้ำหนักของวัตถุดิบชีวมวลจะลดลงอย่างมาก



การคาร์บอไนเซชันเพื่อให้ได้ถ่านชาร์ที่มีสมบัติตามที่ต้องการสามารถทำได้โดยการปรับภาวะให้เหมาะสมซึ่งมีตัวแปรที่สำคัญ ดังนี้

#### อุณหภูมิและเวลา (Temperature and time)

อุณหภูมิมิมีผลต่อปริมาณผลิตภัณฑ์ที่ได้มากที่สุด และเป็นปัจจัยที่สำคัญที่สุดในการคาร์บอไนเซชัน โดยเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น น้ำหนักถ่านชาร์จะลดลง ส่วนน้ำมันทาร์และก๊าซที่ได้มีปริมาณเพิ่มมากขึ้น สมบัติของน้ำมันทาร์มีกลุ่มของสารประกอบที่มีโครงสร้างเปลี่ยนแปลงไปด้วย เพราะการเพิ่มอุณหภูมิเป็นการเพิ่มพลังงานเพื่อทำลายพันธะภายในโครงสร้างของวัตถุดิบ

#### อัตราการให้ความร้อน (Heat of carbonization)

อัตราการให้ความร้อนมีผลต่อสมบัติของถ่านชาร์และปริมาณของน้ำมันทาร์และสารระเหยที่ออกมาด้วย การเพิ่มอัตราการให้ความร้อนอย่างรวดเร็วจะทำให้ปริมาณสารระเหยถูกปลดปล่อยออกมาอย่างรวดเร็วทำให้ถ่านที่ได้มีรูพรุนขนาดใหญ่ ทำให้ความว่องไวในการทำปฏิกิริยาสูงกว่าถ่านที่ได้จากการให้ความร้อนที่อัตราให้ความร้อนต่ำ เนื่องจากถ่านที่ได้จากการคาร์บอไนซ์ด้วยอัตราความร้อนที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จะทำให้คาร์บอนเรียงตัวเป็นระเบียบน้อยกว่า เกิดช่องว่างเป็นรูพรุนขนาดใหญ่

#### ตัวกลางของปฏิกิริยาการคาร์บอไนเซชัน (Medium of reaction)

ตัวกลางที่เป็นก๊าซมีผลกระทบต่อปฏิกิริยาการคาร์บอไนเซชัน เนื่องจากก๊าซและไอที่เกิดจะถูกพาออกไปอย่างรวดเร็ว โดยปกติก๊าซที่ใช้เป็นตัวกลาง เช่น ไนโตรเจน (เป็นก๊าซเฉื่อยต่อปฏิกิริยาการเผาไหม้ของคาร์บอน) และก๊าซที่ได้จากการเผาไหม้

#### ธรรมชาติของวัตถุดิบ (Nature of material)

วัตถุดิบแต่ละชนิดมีภาวะที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการคาร์บอไนเซชันที่แตกต่างกัน เนื่องจากมีปริมาณองค์ประกอบทางเคมีที่แตกต่างกัน

จุดมุ่งหมายหลักของกระบวนการคาร์บอไนเซชันเพื่อเตรียมถ่านชาร์ในการเข้าสู่การกระตุ้น เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวและรูพรุนให้สูงขึ้น นอกจากนี้ยังกำจัดทาร์และสารระเหยออกจากโครงสร้างอีกด้วย

### 2.4.3 กระบวนการการกระตุ้น (Activation)

กระบวนการการกระตุ้นเป็นการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างคาร์บอนแบบทางกายภาพด้วยการเพิ่มพื้นที่ผิวให้มากขึ้น โดยการทำให้เกิดรูพรุนมากขึ้น ซึ่งเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับสารอื่น ๆ ที่ผิวของถ่านกัมมันต์ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างการกระตุ้นยังไม่เป็นที่ทราบแน่ชัด เนื่องจากวิธีการกระตุ้นนั้นมีหลายวิธีและประสิทธิภาพของการกระตุ้นยังขึ้นกับลักษณะและชนิดของวัสดุโดยรวมถึงวิธีการเตรียมถ่านกัมมันต์การกระตุ้นด้วย

วัตถุประสงค์ของการกระตุ้น เพื่อ

- (1) เพิ่มพื้นที่ผิวที่ว่องไว (Active surface area) โดยโมเลกุลบางกลุ่มจะหลุดออกไป ในขณะที่เกิดปฏิกิริยาเคมี ทำให้มีพื้นที่ที่สามารถดูดซับได้ขึ้นมาแทน
- (2) เพิ่มความว่องไวในการดูดซับให้กับพื้นที่ผิวที่มีอยู่แล้วจากกระบวนการคาร์บอนในเซชัน
- (3) กำจัดสารอินทรีย์หรือสารอนินทรีย์ต่าง ๆ ที่ปนเปื้อนหรือปกคลุมออกจากพื้นผิวหรือรูพรุน ที่ทำหน้าที่ในการดูดซับ

โดยทั่วไปการผลิตถ่านกัมมันต์ด้วยวิธีการกระตุ้นมี 2 วิธี คือ การกระตุ้นทางเคมี (Chemical activation) เป็นการนำวัสดุดิบจากแหล่งหรือวัตถุดิบที่ผ่านกระบวนการคาร์บอนในเซชันแล้วมากระตุ้นโดยใช้สารกระตุ้น เช่น  $ZnCl_2$ ,  $CaCl_2$  และ  $H_3PO_4$  เป็นต้น อีกวิธีเป็นการกระตุ้นทางกายภาพ (Physical activation) เป็นการนำวัตถุดิบที่ผ่านกระบวนการคาร์บอนในเซชันแล้วมาทำปฏิกิริยากับก๊าซที่ใช้ในการออกซิไดซ์ โดยอาจใช้ไอน้ำ คาร์บอนไดออกไซด์ และออกซิเจน เป็นต้น

#### 2.4.3.1 การกระตุ้นทางเคมี (Chemical Activation)[5]

วิธีการกระตุ้นทางเคมีสามารถทำได้ 2 วิธี ดังต่อไปนี้

- (1) นำวัตถุดิบมาทำการเผาในที่อับอากาศก่อนเพื่อทำให้วัตถุดิบกลายเป็นถ่านชาร์ แล้วจึงนำไปแช่หรือผสมกับสารเคมีที่ใช้กระตุ้น จากนั้นจึงทำการกระตุ้นแบบไพโรไลซิสอีกครั้งหนึ่ง
- (2) นำวัตถุดิบมาแช่หรือผสมกับสารเคมีที่ใช้กระตุ้นแล้วจึงทำการกระตุ้นแบบไพโรไลซิสควบคู่ไปกับการทำให้วัตถุดิบเป็นถ่านในขั้นตอนเดียว

กระบวนการกระตุ้นทางเคมี เป็นกระบวนการกระตุ้นที่ใช้สารเคมีเป็นตัวกระตุ้น ซึ่งสารเคมีที่ใช้ส่วนใหญ่เป็นสารละลายกรดหรือเกลือของโลหะ เช่น ซิงค์คลอไรด์ ( $ZnCl_2$ ), กรดฟอสฟอ

ริก ( $H_3PO_4$ ), โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH), โพแทสเซียมซัลเฟต ( $K_2SO_4$ ), โพแทสเซียมคาร์บอเนต ( $K_2CO_3$ ) เป็นต้น โดยนำวัตถุดิบหรือถ่านคาร์บอนไปแช่ในสารเคมีก่อนนำมากระตุ้นด้วยความร้อน ซึ่งพบว่าวัตถุดิบหรือถ่านชาร์จะดูดซับเอาสารละลายนั้นเข้าไปแทรกตัวอยู่ตามรูพรุนบนผิวของ วัตถุดิบหรือถ่านชาร์ เมื่อนำไปกระตุ้นด้วยความร้อนที่อุณหภูมิสูงประมาณ 500 – 800 องศาเซลเซียส สารประกอบเหล่านี้จะเกิดการสลายตัวออกเปลี่ยนเป็นก๊าซและสารระเหยออกไป ทำให้ รูพรุนเกิดขึ้นเป็นจำนวนมาก การกระตุ้นด้วยสารเคมีจะใช้อุณหภูมิในการเผากระตุ้นที่ต่ำกว่าการ กระตุ้นทางกายภาพ จึงเป็นการประหยัดพลังงานมากกว่าและสารเคมีสามารถแทรกซึมลงไปยังผิว ถ่านชาร์ได้อย่างทั่วถึงทำให้เกิดรูพรุนเกิดขึ้นมาก นอกจากนี้ยังลดขั้นตอนการผลิตได้มาก แต่มีข้อเสีย คือ การล้างเอาสารเคมีที่ตกค้างทำได้ยาก สารเคมีที่ใช้มีราคาแพงและอาจเป็นพิษต่อร่างกาย

ตัวอย่างการกระตุ้นด้วยวิธีทางเคมี ได้แก่

#### การกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ ( $ZnCl_2$ )

กระบวนการกระตุ้นทางเคมีโดยใช้ซิงค์คลอไรด์เป็นวิธีที่นิยมวิธีหนึ่ง โดยใช้ สารละลายซิงค์คลอไรด์ผสมกับวัตถุดิบ โดยที่อุณหภูมิประมาณ 130 องศาเซลเซียส มีผลอย่างมากต่อ สมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ได้ หลังจากนั้นนำไปคาร์บอนไนซ์ที่อุณหภูมิ 600 – 850 องศาเซลเซียส ซึ่งใน กระบวนการผลิตระดับอุตสาหกรรมนั้น ต้องคำนึงถึงประสิทธิภาพในการนำเอาซิงค์คลอไรด์กลับมา ใช้ใหม่เป็นอย่างมาก เนื่องจากประสิทธิภาพการนำซิงค์คลอไรด์กลับมาใช้ใหม่ที่ค่อนข้างจำกัด ประกอบกับปัญหาการกัดกร่อนต่อเครื่องปฏิกรณ์ ทำให้การใช้ซิงค์คลอไรด์เป็นสารกระตุ้นในระยะ หลังจึงลดลง

#### การกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก ( $H_3PO_4$ )

กระบวนการกระตุ้นทางเคมีโดยใช้กรดฟอสฟอริกเป็นสารกระตุ้น จะใช้อุณหภูมิใน การกระตุ้นค่อนข้างต่ำ ประมาณ 400 – 500 องศาเซลเซียส ซึ่งพบว่าการใช้กรดฟอสฟอริกสามารถ ผ่านกระบวนการนำกลับมาใช้ใหม่ได้ โดยยังได้กรดฟอสฟอริกที่มีความเข้มข้นสูงอยู่ และเมื่อใช้น้ำ กรดฟอสฟอริกมาใช้กับวัตถุดิบที่ประเภทเศษไม้หรือเศษขี้เลื่อย พบว่าสามารถผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ที่ ให้สมบัติที่ดี

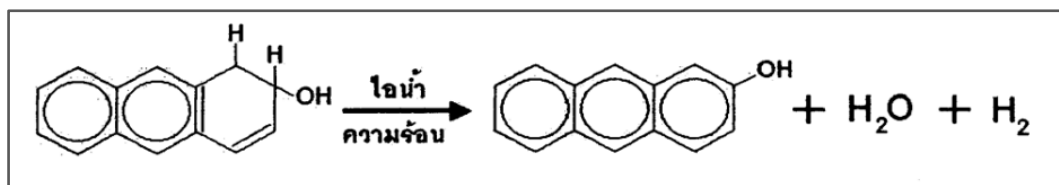
### การกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์หรือโซเดียมไฮดรอกไซด์ (KOH, NaOH)

กระบวนการกระตุ้นทางเคมีโดยใช้สารละลายที่มีไอออนของโพแทสเซียมหรือโซเดียม ( $K^+$  หรือ  $Na^+$ ) กับวัตถุดิบที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบแล้วให้ความร้อน พบว่าไอออนของโลหะเหล่านี้จะเข้าไปแทรกอยู่ระหว่างชั้นของผลึกโครงสร้างของถ่านกัมมันต์ที่อุณหภูมิสูงกว่า 700 องศาเซลเซียส โดยโมเลกุลคาร์บอนไดออกไซด์ของน้ำและออกซิเจนเกิดการหลุดออกไปจากโครงสร้างทำให้ได้ถ่านกัมมันต์ตามที่ต้องการ

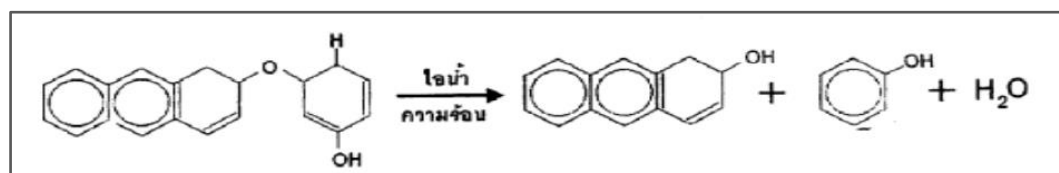
สารเคมีแต่ละชนิดจะไปช่วยกระตุ้นเพื่อทำลายโครงสร้างของวัตถุดิบและ ในขณะที่ทำการคาร์บอนไนซ์จะเกิดการสลายตัวของสารอินทรีย์ในวัตถุดิบ ทำให้เกิดการเชื่อมไขว้กัน (Cross-link) อย่างไม่เป็นระเบียบของโครงสร้าง เกิดช่องว่างรูพรุนขึ้น พบว่าสารระเหยบางตัวในโครงสร้างของวัตถุดิบไม่สามารถหลุดออกไปได้ เนื่องจากเกิดการเชื่อมไขว้กันนี้ ส่งผลให้ปริมาณคาร์บอนที่ได้เพิ่มขึ้นและเกิดการลดลง ซึ่งการเชื่อมไขว้ประกอบกับสารเคมีที่ใช้มีความคงทนต่อการสลายตัวที่อุณหภูมิสูง ๆ ทำให้ยังคงสภาพหุ้มอยู่รอบ ๆ และแทรกตัวอยู่ภายในทำให้เกิดการหดตัวน้อย เมื่อนำถ่านที่ได้มาล้างสารเคมีออกด้วยน้ำหรือกรด จะทำให้เกิดช่องว่างหรือรูพรุนเพิ่มขึ้นอีก [12]

#### 2.4.3.2 การกระตุ้นทางกายภาพ (Physical Activation)[16]

เป็นวิธีการเพิ่มปริมาตรรูพรุนและพื้นที่ผิวด้วยปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชัน (Gasification) ด้วยก๊าซออกซิไดซ์ ในช่วงอุณหภูมิประมาณ 700 – 1000 องศาเซลเซียส ก๊าซที่ใช้โดยทั่วไปคือ ไอน้ำ อากาศและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยอาจใช้ชนิดใดชนิดหนึ่งหรือรวมก๊าซดังกล่าวก็ได้ ซึ่งถ่านชาร์ที่ได้จากการกระบวนการคาร์บอนไนซ์ยังเป็นตัวดูดซับที่ไม่ดีต้องทำการกระตุ้นให้ได้ถ่านที่มีการดูดซับสูง โดยใช้การกระตุ้นเพื่อให้ถ่านชาร์ทำปฏิกิริยากับก๊าซที่เป็นตัวออกซิไดซ์ พบว่าบนผิวของคาร์บอนเกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ แสดงดังภาพที่ 2.8 และ 2.9 โดยเกิดการจัดเรียงตัวขึ้นใหม่ในโครงสร้าง ซึ่งเป็นการเพิ่มความสามารถในการดูดซับของถ่าน การกระตุ้นด้วยความร้อนเพียงอย่างเดียวจะต้องใช้ปริมาณความร้อนสูงถึง 1200 องศาเซลเซียส และสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ได้คือ คุณภาพต่ำกว่าถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากการกระตุ้นด้วยก๊าซออกซิไดซ์



ภาพที่ 2.8 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจากการกระตุ้นด้วยไอน้ำ



ภาพที่ 2.9 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจากการกระตุ้นทางกายภาพโดยกำจัดฟินอลและน้ำ

ซึ่งข้อดีของการกระตุ้นด้วยวิธีนี้ คือ ไม่มีสารเคมีตกค้าง สามารถนำถ่านกัมมันต์ไปใช้งานได้โดยไม่ต้องมาล้างสารเคมีตกค้างที่เป็นอันตราย แต่มีข้อเสีย คือ ต้องใช้อุณหภูมิสูงกว่าวิธีการกระตุ้นทางเคมี

ปัจจัยที่มีผลต่อลักษณะรูพรุนในขั้นตอนการกระตุ้น คือ

- โครงสร้างของคาร์บอนหรือถ่านชาร์ที่นำมากระตุ้น
- สารอินทรีย์ปนเปื้อนที่อยู่ในเนื้อคาร์บอน
- ชนิดของก๊าซออกซิไดซ์
- อุณหภูมิขณะเกิดปฏิกิริยา
- ความดันของก๊าซ
- เวลาในการเกิดปฏิกิริยา
- ขนาดอนุภาคของถ่านชาร์

กระบวนการกระตุ้นทางกายภาพ พบว่าคาร์บอนทำปฏิกิริยากับสารออกซิไดซ์ได้เป็นคาร์บอนออกไซด์แพร่ออกจากผิวของคาร์บอน เกิดแก๊สซิฟิเคชันบางส่วนของเม็ดถ่านเป็นรูพรุนขึ้นในโครงสร้าง ซึ่งถ่านชาร์ที่ได้จากการคาร์บอนไนซ์จะประกอบด้วยรูพรุนเล็ก ๆ จำนวนมาก ซึ่งเกิดจากช่องว่างระหว่างโครงสร้างจากการจัดเรียงตัวของคาร์บอนอะตอม รูพรุนนี้มักจะถูกปกคลุมด้วยทาร์หรือสารระเหยที่เกิดจากการสลายตัวด้วยความร้อน และถูกขวางด้วยคาร์บอนอสัณฐาน ดังนั้นการกระตุ้นจึงเป็นทั้งการเปิดรูที่ถูกปกคลุมและการสร้างรูใหม่ขึ้นด้วย

ตัวอย่างการกระตุ้นด้วยวิธีทางกายภาพ มีดังนี้

### การกระตุ้นด้วยไอน้ำ

ไอน้ำนั้นถือได้ว่าเป็นสารกระตุ้นที่มีการใช้กันมาก เนื่องจากโมเลกุลของน้ำมีขนาดเล็กกว่าโมเลกุลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และในการกระตุ้นด้วยไอน้ำนั้นมีข้อดี คือ

- (1) โมเลกุลของน้ำสามารถแพร่เข้าไปในโครงสร้างรูพรุนได้อย่างรวดเร็ว
- (2) โมเลกุลของน้ำมีขนาดเล็ก จึงสามารถแพร่เข้าไปในรูพรุนที่มีขนาดเล็กได้
- (3) เกิดปฏิกิริยาอย่างรวดเร็ว ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยาเร็วกว่าก๊าซคาร์บอนไดร้ออกไซด์ถึงสามเท่า

ที่ภาวะความดัน 10 กิโลพาสคัลและอุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส รูปแบบของปฏิกิริยาในการกระตุ้นโดยใช้ไอน้ำ ซึ่งการใช้ไอน้ำในที่นี้ หมายถึง การใช้ไอน้ำร้อนยิ่งยวด (Superheated steam) โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน ดังสมการที่ 1



นอกจากนี้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์บางส่วนที่ได้สามารถทำปฏิกิริยากับไอน้ำ (Exothermic water-gas formation reaction) แล้วเกิดเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ควบคู่ไปด้วย ซึ่งเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน ดังสมการที่ 2



ในช่วงการกระตุ้นต่ำจะมีการสร้างรูพรุนขนาดเล็กเท่านั้นและเมื่อร้อยละน้ำหนักที่หายไปในช่วงการกระตุ้นเพิ่มขึ้น ส่งผลให้มีรูพรุนเพิ่มขึ้นและขนาดรูพรุนต่าง ๆ ขยายใหญ่ขึ้น ทำให้มีการกระจายขนาดรูพรุน (Pore size distribution) ที่กว้างและมีปริมาตรรูพรุนทั้งหมด (Total pore volume) สูงขึ้น โดยทั่วไปเมื่อร้อยละน้ำหนักที่หายไปทั้งหมด (% Weight loss) มีค่าสูงกว่าร้อยละ 50 พบว่าพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์จะไม่เพิ่มขึ้น ดังนั้นการกระตุ้นด้วยไอน้ำจำเป็นต้องใช้อุณหภูมิสูงมากพอที่จะทำให้เกิดการออกซิไดส์อย่างรวดเร็ว แต่ไม่ควรเกิน 1000 องศาเซลเซียส เนื่องจากแก๊สซิฟิเคชันส่วนใหญ่เป็นการทำให้รูพรุนมีขนาดใหญ่ขึ้นเท่านั้น จะส่งผลให้มีความสามารถในการดูดซับลดลง ดังนั้นอัตราการเกิดปฏิกิริยา (r) แบบ Langmuir – Hinshelwood แสดงดังนี้

$$r = \frac{k_1 P_{\text{H}_2\text{O}}}{1 + k_2 P_{\text{H}_2\text{O}} + k_3 P_{\text{H}_2}}$$

ซึ่ง	$P_{H_2O}$	คือ	ความดันย่อยของไอน้ำ
	$P_{H_2}$	คือ	ความดันย่อยของก๊าซไฮโดรเจน
	$k_1, k_2, k_3$	คือ	ค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยา

### การกระตุ้นด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

การกระตุ้นด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นการเกิดแก๊สซิฟิเคชันระหว่างก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์กับคาร์บอนอะตอมในถ่านชาร์ ซึ่งอุณหภูมิที่เหมาะสมอยู่ที่ประมาณ 800 – 900 องศาเซลเซียส ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาคูดความร้อนเช่นเดียวกับการกระตุ้นด้วยไอน้ำ



การเกิดแก๊สซิฟิเคชันด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต้องใช้พลังงานในการเกิดปฏิกิริยามากกว่าการเกิดแก๊สซิฟิเคชันด้วยไอน้ำ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้อุณหภูมิในการกระตุ้นสูงกว่าการกระตุ้นด้วยไอน้ำ และโมเลกุลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีขนาดโมเลกุลที่ใหญ่กว่าโมเลกุลของน้ำ ทำให้อัตราการเกิดแก๊สซิฟิเคชัน (Rate of gasification) ช้ากว่า โดยส่วนใหญ่รูพรุนที่ได้จากการกระตุ้นด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นรูพรุนขนาดเล็กตลอดช่วง ซึ่งร้อยละน้ำหนักที่หายไปอยู่ประมาณร้อยละ 70 ของปริมาตรรูพรุนทั้งหมด และมากกว่าร้อยละ 90 ของพื้นที่ผิวทั้งหมด ทำให้มีการกระจายขนาดรูพรุนน้อย นอกจากนี้ถ่านกัมมันต์ที่ได้จะมีปริมาตรรูพรุนน้อยกว่าถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยไอน้ำแต่มีพื้นที่ผิวใกล้เคียงกันซึ่งอัตราการเกิดปฏิกิริยาแสดงดังต่อไปนี้

CHULALONGKORN UNIVERSITY

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

โดย	$p_{CO_2}$	คือ	ความดันย่อยของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์
	$P_{CO}$	คือ	ความดันย่อยของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์
	$K_1, K_2$ และ $K_3$	คือ	ค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยา

การผลิตถ่านกัมมันต์ทางการค้าส่วนใหญ่นิยมใช้ไอน้ำเป็นสารกระตุ้น เนื่องจากไอน้ำสามารถแพร่เข้าไปในรูพรุนได้ดี ส่งผลให้อัตราการเกิดแก๊สซิฟิเคชันเร็ว อุณหภูมิที่ใช้ในการกระตุ้นต่ำกว่าการใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นสารกระตุ้น อีกทั้งต้นทุนยังต่ำกว่าอีกด้วย

#### การกระตุ้นด้วยก๊าซออกซิเจนหรืออากาศ

การกระตุ้นด้วยก๊าซออกซิเจนหรืออากาศ เป็นปฏิกิริยาคายความร้อนที่ใช้อุณหภูมิต่ำกว่า 600 องศาเซลเซียส เกิดแก๊สซิฟิเคชันได้ขึ้นง่ายและเร็วกว่าการกระตุ้นด้วยไอน้ำและด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ดังสมการที่ 4 และ 5



พบว่าปฏิกิริยาทั้งสองเป็นปฏิกิริยาแบบคายความร้อนและอัตราส่วนระหว่างก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์กับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ได้เป็นผลพลอยได้จะเพิ่มขึ้น โดยเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นถ่านคาร์บอนที่ถูกกระตุ้นด้วยอากาศที่มีก๊าซออกซิเจนปนอยู่จะเกิดหมู่ฟังก์ชันขึ้นที่ผิวของถ่านชาร์เป็นจำนวนมาก แต่ในการกระตุ้นด้วยก๊าซออกซิเจนหรืออากาศมีการเผาไหม้สมบูรณ์เกิดขึ้นจึงทำให้ควบคุมปฏิกิริยายากเพราะเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน จึงไม่สามารถรักษาอุณหภูมิในเตาให้คงที่ได้ จึงไม่นิยมใช้เป็นตัวกระตุ้นทั้งนี้เพราะออกซิเจนเป็นตัวออกซิไดซ์ที่รุนแรงมาก

#### การกระตุ้นด้วยก๊าซไอเสีย

ในก๊าซไอเสียจะมีก๊าซที่มีความสามารถในการกระตุ้นถ่านเป็นถ่านกัมมันต์ได้ เช่น ก๊าซออกซิเจนที่เหลืออยู่ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำ ซึ่งการกระตุ้นด้วยก๊าซไอเสียเป็นการนำเอาก๊าซที่ปล่อยทิ้งไปกลับมาใช้ให้เกิดประโยชน์ ทำให้ประหยัด แต่ถ่านกัมมันต์ที่ได้จะมีคุณภาพที่ไม่ดีนัก เนื่องจากก๊าซไอเสียมีอุณหภูมิไม่สูงมาก และถ่านกัมมันต์ที่ได้อาจดูดซับก๊าซไอเสียไว้ด้วย

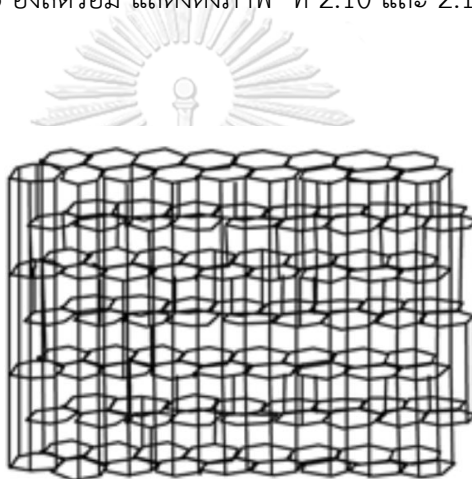
## 2.5 ลักษณะและโครงสร้างถ่านกัมมันต์[5]

โครงสร้างของถ่านกัมมันต์ เป็นโครงสร้างกลุ่มคาร์บอนซึ่งมีลักษณะคล้ายโครงสร้างแกรไฟต์ (Graphite) พบว่าถ่านกัมมันต์มีพื้นที่ผิวภายในมากกว่า



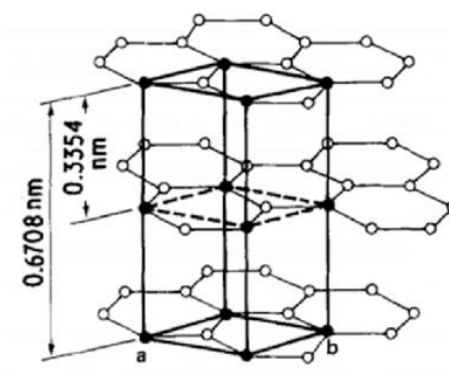
### 2.5.1 โครงสร้างผลึกของถ่านกัมมันต์

โครงสร้างของถ่านกัมมันต์มีการจัดเรียงตัวคล้ายกับโครงสร้างแกรไฟต์ (Graphite) แต่มีการจัดเรียงตัวเป็นระเบียบน้อยกว่า ซึ่งประกอบกลุ่มอะตอมคาร์บอนที่มีโครงสร้างคล้ายรูปหกเหลี่ยมด้านเท่า (Regular-hexagon) หรือชั้นของคาร์บอนอะตอมในรูปวงแหวนเบนซีน (Benzene ring) โดยคาร์บอน 3 อิเล็กตรอนในแต่ละอะตอมจะสร้างพันธะโควาเลนต์ (Covalent bond) กับอะตอมที่ติดกัน ความยาวระหว่างอะตอมภายในชั้นประมาณ 1.42 อังสตรอม และอิเล็กตรอนอีกหนึ่งตัวที่เหลืออยู่เป็นไพอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ไปทั่วระหว่างโครงสร้างวาเลนซ์เกิดเป็นเรโซแนนซ์ (Resonance) เพื่อให้โครงสร้างเสถียรมากขึ้น ซึ่งระยะห่างระหว่างอะตอมของคาร์บอนในแต่ละชั้นมีขนาด 3.35 อังสตรอม แสดงดังภาพ ที่ 2.10 และ 2.11



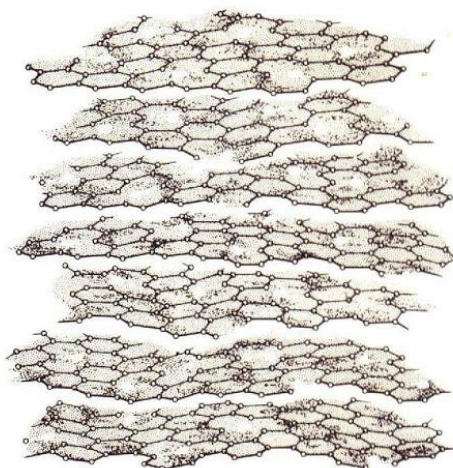
ภาพที่ 2.10 โครงสร้างแกรไฟต์ (Graphite structure) [18]

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY



ภาพที่ 2.11 การจัดเรียงตัวของคาร์บอนอะตอมในผลึกของแกรไฟต์ [19]

โครงสร้างของถ่านกัมมันต์มีความแตกต่างจากโครงสร้างของแกรไฟท์ โดยโครงสร้างของถ่านกัมมันต์จะมีผลึกที่เล็กมาก (Micro crystallites) ประกอบด้วยวงหกเหลี่ยมด้านเท่าของอะตอมคาร์บอนผสมกัน เส้นผ่านศูนย์กลางของชั้นคาร์บอนที่สร้างผลึกเล็ก ๆ มีขนาดประมาณ 150 อังสตรอม และระยะห่างระหว่างผลึกเล็ก ๆ นี้มีค่าอยู่ระหว่าง 20-50 อังสตรอม ดังแสดงในภาพที่ 2.12



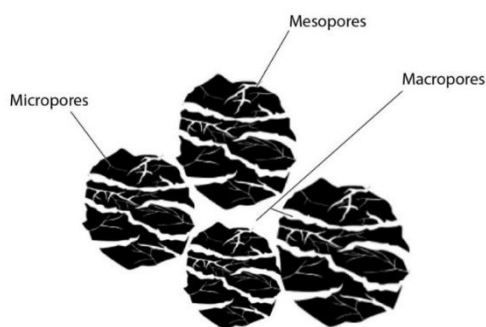
ภาพที่ 2.12 โครงสร้างของถ่านกัมมันต์ (Activated carbon structure)

### 2.5.2 โครงสร้างรูพรุนของถ่านกัมมันต์[20, 21]

โดยปกติแล้วถ่านกัมมันต์โดยทั่วไปมีปริมาตรความพรุนอยู่ระหว่าง 0.5 – 1.5 มิลลิลิตรต่อกรัม จากลักษณะและขนาดของรูพรุน สามารถแบ่งรูพรุนได้เป็น 3 แบบ คือ

- (1) รูพรุนขนาดใหญ่ (Macropores) ขนาดของรูพรุนขนาดใหญ่ที่พบในถ่านกัมมันต์ มีค่าอยู่ระหว่าง 5,000 – 20,000 อังสตรอม ปริมาตรความพรุนมีค่าอยู่ระหว่าง 0.2 – 0.8 มิลลิลิตรต่อกรัม เมื่อเปรียบเทียบกับรูพรุนประเภทอื่นแล้ว รูพรุนขนาดใหญ่มีพื้นที่ผิวจำเพาะน้อยกว่ามาก ดังนั้นรูพรุนประเภทนี้จึงไม่มีความสำคัญต่อการดูดซับ เพียงแต่ทำหน้าที่เป็นทางผ่านอนุภาคเข้าไปในรูที่เล็กกว่า
- (2) รูพรุนขนาดกลาง (Mesopores) มีค่าอยู่ระหว่าง 20 – 5,000 อังสตรอม มีปริมาตรความพรุนอยู่ในช่วง 0.02 – 0.1 มิลลิลิตรต่อกรัมและมีพื้นที่ผิวประมาณ 5 เปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ผิวทั้งหมด
- (3) รูพรุนขนาดเล็ก (Micropores) มีรัศมีน้อยกว่า 20 อังสตรอม ซึ่งมีค่าเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 6 – 8 อังสตรอม ปริมาตรความพรุนมีอยู่ระหว่าง 0.15 – 0.05 มิลลิลิตรต่อกรัม และมี

พื้นที่ผิวจำเพาะอย่างน้อยที่สุด 95 เปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ผิวจำเพาะทั้งหมด พลังงานในการดูดซับของรูพรุนขนาดเล็กมากกว่ารูพรุนขนาดกลาง หรือพื้นที่ผิวไม่มีรูพรุน ดังนั้นรูพรุนขนาดเล็กจึงมีความสำคัญในการดูดซับ เนื่องจากพื้นที่ในการดูดซับและพลังงานดูดซับ (Adsorption energy) มากที่สุด ทำให้การดูดซับเพิ่มมากขึ้นที่ความกดดันต่ำ ๆ รูพรุนขนาดเล็กมีความสัมพันธ์กับพื้นที่ผิวจำเพาะ เชื่อกันว่าปริมาณรูพรุนแต่ละขนาดหรือที่เรียกว่าการกระจายตัวขนาดรูพรุน จะขึ้นกับชนิดของวัตถุดิบและวิธีการกระตุ้น



ภาพที่ 2.13 ลักษณะรูพรุนของถ่านกัมมันต์

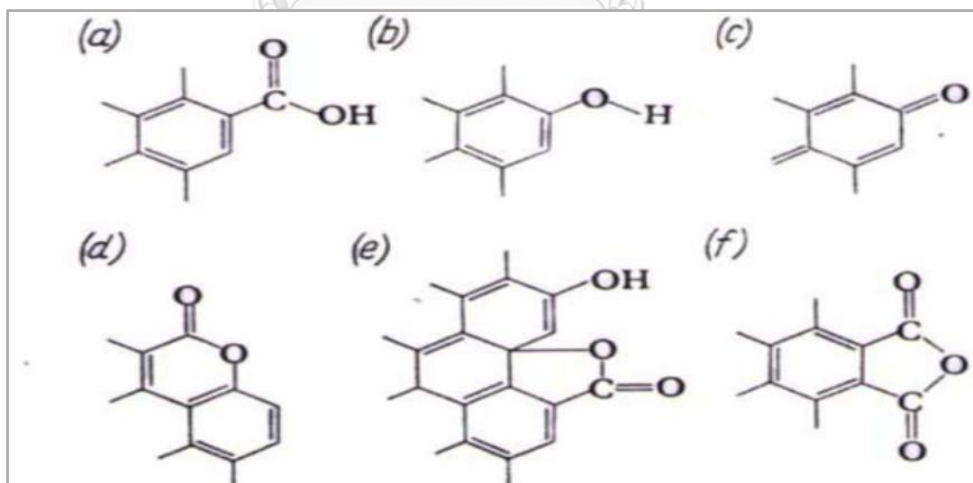
ลักษณะรูพรุนของถ่านกัมมันต์ที่เกิดขึ้น ดังภาพที่ 2.13 พบว่ารูพรุนส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นในช่วงการออกซิไดซ์ ซึ่งเป็นช่วงการกระตุ้นและการกำจัดสารอินทรีย์ต่าง ๆ ออกจากพื้นผิวหรือรูพรุนของถ่านชาร์ แล้วเกิดการจัดเรียงและเคลื่อนย้ายอะตอมหรือกลุ่มอะตอมเพื่อให้เกิดช่องว่างที่มีความสามารถในการดูดซับ ซึ่งรูพรุนขนาดใหญ่จะทำหน้าที่เป็นเพียงทางผ่านของสารดูดซับเข้าไปยัง รูพรุนขนาดเล็กจึงไม่มีผลต่อการดูดซับ แต่จะมีผลต่ออัตราเร็วในการดูดซับ ส่วนรูพรุนขนาดกลางนั้น มีผลต่อการดูดซับโมเลกุลของเหลวได้บ้าง ในขณะที่รูพรุนขนาดเล็กมีหน้าที่ในการดูดซับ โดยเฉพาะการดูดซับที่ความดันสัมพัทธ์ต่ำ

### 2.5.3 โครงสร้างทางเคมีของผิวถ่านกัมมันต์ (Chemical structure)[22]

ถ่านกัมมันต์ที่ถูกเตรียมการคาร์บอนในเซชันในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่า 1000 องศาเซลเซียส ซึ่งในขณะนั้นความร้อน ส่งผลให้อะตอมต่าง ๆ ที่ไม่ใช่คาร์บอน เช่น ออกซิเจน ไนโตรเจน และไฮโดรเจน ถูกกำจัดออกในรูปก๊าซ และอะตอมคาร์บอนที่เหลือเกิดการจัดเรียงตัวเป็นชั้น ๆ แต่ละชั้นประกอบด้วยวงแหวนเหลี่ยมอะโรมาติก (Aromatic ring) เชื่อมโยงกันอย่างไม่เป็นระเบียบ ทำให้เกิดโพรงหรือช่องว่างชั้นที่มีทาร์และสารอื่นที่ได้จากการสลายด้วยความร้อนปกคลุมอยู่ โดยช่องว่าง

เหล่านี้กลายเป็นรูปพหุที่มีความสามารถในการดูดติดผิวจากกระบวนการกระตุ้น ดังนั้นความสามารถในการดูดติดผิวของถ่านกัมมันต์ จึงเป็นผลสืบเนื่องจากโครงสร้างทางเคมีด้วย

ความสามารถในการดูดติดผิวของถ่านกัมมันต์เกิดจากอิเล็กตรอนอิสระที่ไม่เสถียร คือ วาเลนซ์ไม่อิ่มตัว (Unsaturated valencies) พยายามที่จะเกาะกับอะตอมหรือโมเลกุลอื่น ๆ เช่น ออกซิเจนในอากาศหรืออะตอมต่าง ๆ ที่อยู่ในสารตั้งต้น เมื่อทำการกระตุ้น พบว่าการเกาะของอะตอมคาร์บอนกับอะตอมอื่นจะเชื่อมด้วยพันธะเคมีที่แข็งแรง ซึ่งมักจะเกิดกับอะตอมคาร์บอนที่อยู่ที่ขอบของวงอะโรมาติกหรือวงหกเหลี่ยม ซึ่งถ่านกัมมันต์สามารถดูดติดผิวกับออกซิเจนแบบเคมี (Chemisorption) ได้ในช่วงอุณหภูมิ 400-500 องศาเซลเซียส เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะกลายเป็นออกไซด์ นอกจากนี้ยังพบว่าสามารถสร้างพันธะที่แข็งแรงกับอะตอมไฮโดรเจน ซึ่งจะไม่หลุดออกมาแม้จะใช้อุณหภูมิสูงถึง 1000 องศาเซลเซียส และสามารถดึงอะตอมไนโตรเจนออกจากโมเลกุลของแอมโมเนีย สามารถดึงซัลเฟอร์ออกจากโมเลกุลไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้ และสามารถดึงอะตอมฮาโลเจนออกจากโมเลกุลฮาโลเจนได้ ทั้งที่อยู่ในสภาพของเหลวหรือก๊าซก็ได้ ส่งผลให้เกิดหมู่ฟังก์ชันต่าง ๆ บนผิวของถ่านกัมมันต์ ซึ่งกลุ่มของหมู่ฟังก์ชันที่พบบนพื้นผิวของคาร์บอนประกอบด้วย กลุ่ม Carboxyl, Phenolic hydroxyl, Quinone type carbonyl, Normal lactone, Fluorescein type lactone และ Carboxylic Acid Anhydride ดังภาพที่ 2.14



ภาพที่ 2.14 กลุ่มหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวถ่านกัมมันต์

- (a) Carboxyl (b) Phenolic hydroxyl (c) Quinonoid (d) Normal lactones  
(e) Fluorescein-type lactone (f) Carboxylic acid anhydrides

นอกจากนี้ยังพบว่า การเติมถ่านกัมมันต์ลงไปในการละลายส่งผลให้ค่าความเป็นกรด - เบสของสารละลายเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งถ่านกัมมันต์ที่มีอะตอมออกซิเจนบนพื้นผิวมาก จะแสดงความเป็นกรดมาก โดยสามารถนำไปใช้ในการแลกเปลี่ยนประจุบวกได้ ในขณะที่ถ่านกัมมันต์ที่พื้นผิวมีออกซิเจนน้อย จะแสดงความเป็นเบสมาก สามารถนำไปใช้ในการแลกเปลี่ยนประจุลบได้

## 2.6 การวิเคราะห์สมบัติของถ่านกัมมันต์[23]

การวิเคราะห์สมบัติของถ่านกัมมันต์สามารถวิเคราะห์ได้ทั้งสมบัติทางเคมีและสมบัติทางกายภาพ โดยมีรายละเอียด ดังต่อไปนี้

### 2.6.1 ปริมาณร้อยละของเถ้า (%Ash)

ปริมาณเถ้าในถ่านกัมมันต์อาจมีค่าแตกต่างกันตามชนิดของวัตถุดิบ ถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นที่อุณหภูมิสูงและเวลานาน ปริมาณร้อยละของเถ้าก็จะเพิ่มขึ้นด้วย พบว่าเถ้าโดยส่วนใหญ่ประกอบด้วยออกไซด์ นอกจากนี้ยังเป็นสารประกอบพวกซิลิเกต คาร์บอนเนต และสารประกอบอื่น ๆ ของเหล็ก อะลูมิเนียม แคลเซียม โซเดียม โพแทสเซียม แมกนีเซียม และโลหะอื่น ๆ ซึ่งจะมีสารประกอบเหล่านี้อยู่ในปริมาณเท่าใดนั้นขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุดิบ โดยส่วนใหญ่แล้วมักจะประกอบด้วย ซิลิกอน เป็นต้น

### 2.6.2 ปริมาณร้อยละความชื้น (%Moisture)

ปริมาณความชื้นมีค่าแตกต่างกันไปตามชนิดของวัตถุดิบ โดยความชื้นที่เกิดขึ้นเกิดจากน้ำที่มีอยู่ในถ่านกัมมันต์

### 2.6.3 ปริมาณสารระเหย (%Volatile matter)

ปริมาณสารระเหยมีค่าแตกต่างกันไปตามชนิดของวัตถุดิบ เมื่อถ่านถูกกระตุ้นเป็นถ่านกัมมันต์จะเกิดการเกิดสารระเหยเกิดขึ้น

### 2.6.4 ความหนาแน่นปรากฏ (Apparent Density)

เป็นการทดสอบหาน้ำหนักของถ่านกัมมันต์ต่อหน่วยปริมาตร โดยปริมาตรในที่นี้หมายถึง ปริมาตรของช่องว่างระหว่างอนุภาค ปริมาตรของรูพรุนของถ่านกัมมันต์และปริมาตรของเนื้อถ่านกัมมันต์ ดังนั้นค่านี้จึงขึ้นอยู่กับขนาดและความพรุนของถ่านกัมมันต์ โดยทั่วไปถ่านกัมมันต์เกรดการค้าจะมีค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตรอยู่ระหว่าง 0.3 ถึง 0.5 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ในการ

วิเคราะห์ที่กำหนดให้ขนาดของอนุภาคคงที่พบว่า ถ่านกัมมันต์ที่มีความหนาแน่นเชิงปริมาตรต่ำ จะมีปริมาณรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมาก และยังพบว่าค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตรขึ้นอยู่กับความชื้นอีกด้วย โดยอนุภาคที่มีค่าความชื้นสูง จะมีค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตรต่ำลง

### 2.6.5 ความแข็งแรงและความทนต่อการขัดถู (Hardness and Abrasion Number)

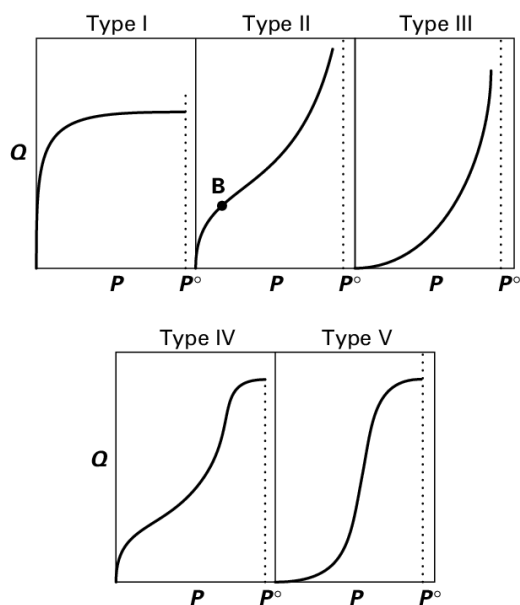
แสดงถึงความต้านทานการสึกกร่อนต่อแรงเสียดสีและความคงสภาพของถ่านกัมมันต์ต่อกระบวนการล้างวัสดุกรอง (Backwashing) ค่าความแข็งแรงและความทนต่อการขัดถูจะขึ้นอยู่กับของวัสดุที่นำมาใช้และภาวะในการกระตุ้น

### 2.6.6 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคถ่าน (Particle Size Distribution)

ขึ้นอยู่กับความละเอียดของผงถ่าน ถ้าว่านมีความละเอียดมากส่งผลให้พื้นที่ผิวที่ได้ก็มากด้วยเช่นกัน ทำให้ถ่านกัมมันต์มีความสามารถดูดซับโมเลกุลขนาดเล็กของก๊าซได้อย่างรวดเร็วและทำให้ความดันของก๊าซในระบบลดลงแต่ไม่มาก เป็นต้น

### 2.6.7 พื้นที่ผิว (Surface area)

การวิเคราะห์สมดุลของการดูดซับจะอาศัยความสัมพันธ์ที่ภาวะสมดุลของสมดุลมวลสาร เป็นความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับในเฟสของเหลวกับความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับบนเฟสของแข็ง ความสัมพันธ์ดังกล่าวนี้จะถูกเขียนเป็นกราฟไอโซเทอมการดูดซับ (Adsorption Isotherm) ซึ่งอธิบายถึงการกระจายตัวของตัวถูกดูดซับระหว่างเฟสของเหลวและตัวถูกดูดซับ หรือสมบัติของตัวถูกดูดซับเมื่อเกิดการดูดซับโมเลกุลตัวถูกดูดซับจะเข้าครอบคลุมทุกตำแหน่งที่เกิดการดูดซับจนเต็มทุกตำแหน่ง และจะทำให้แรงดึงดูดของผิวตัวดูดซับนั้นอ่อนลงแต่อาจยังคงสามารถดูดซับโมเลกุลตัวถูกดูดซับต่อไปได้ ก่อให้เกิดเป็นชั้นที่สอง สาม สี่ ต่อไปเรื่อย ๆ ซึ่งในความจริงแล้วอาจจะมีการดูดซับชั้นที่สองก่อนชั้นแรกจะเต็มและในบางตำแหน่งอาจจะดูดซับต่อหลายชั้นซ้อนสูงขึ้นไป รูปร่างไอโซเทอมการดูดซับจะให้ข้อมูลเกี่ยวกับกระบวนการดูดซับและปริมาณของสารถูกดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับ



ภาพที่ 2.15 รูปแบบของไอโซเทอมตามการจำแนกประเภทของบรูน่าวอร์

รูปแบบพื้นฐานไอโซเทอมการดูดซับมี 5 แบบ ดังรูปที่ 2.15 ตามการจัดประเภทของบรูน่าวอร์ (Brunauer classification) โดยไอโซเทอมที่นิยมใช้ในการอธิบายมากที่สุด คือ ไอโซเทอมแบบ I ซึ่งใช้ในการจัดรูปสมการเพื่ออธิบายพฤติกรรมกรรมการดูดซับ นอกจากนี้ไอโซเทอมแบบ II และ IV ยังพบมากเช่นกัน โดยแต่ละแบบแสดงถึงลักษณะการดูดซับ ดังนี้

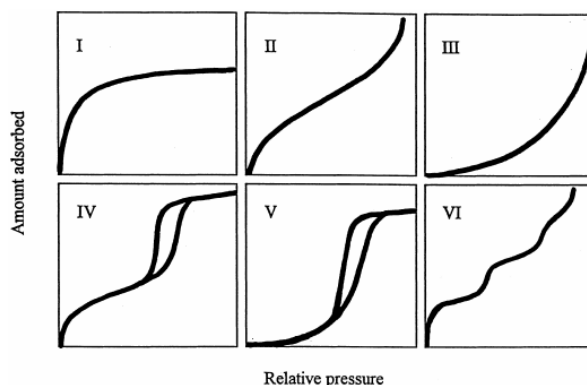
ไอโซเทอมแบบ I หมายถึง ไอโซเทอมที่เกิดการดูดซับตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวถูกดูดซับแบบชั้นเดียวอย่างสมบูรณ์ มักพบในการดูดซับก๊าซบนตัวดูดซับของแข็งที่มีรูพรุนขนาดเล็ก (Microporous) ซึ่งมีขนาดใหญ่กว่าโมเลกุลของตัวถูกดูดซับไม่มากนัก

ไอโซเทอมแบบ II หมายถึง ไอโซเทอมที่ไม่แสดงจุดอิมิตัวของการดูดซับ โดยมีจุดโค้งของการดูดซับที่เกิดขึ้นภายหลังเกิดการดูดซับแบบชั้นเดียว ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการดูดซับที่เกิดขึ้นในชั้นที่ถัดจากการดูดซับชั้นแรกบนพื้นผิวของตัวดูดซับ ตัวดูดซับที่มีไอโซเทอมการดูดซับแบบนี้มักมีการกระจายตัวของขนาดรูพรุนกว้าง เกิดการควบแน่นไอของตัวถูกดูดซับเกิดขึ้นขึ้นภายในรูพรุนที่มีขนาดใหญ่กว่า ตัวดูดซับจึงแสดงให้เห็นถึงศักยภาพในการดูดซับตัวถูกดูดซับได้ดีเมื่อความดันเข้าใกล้ความดันอิมิตัวของตัวถูกดูดซับ

ไอโซเทอมแบบ III หมายถึงไอโซเทอมที่มีลักษณะโค้งออก (Convex) ตามความดันย่อย ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความสามารถของการดูดซับที่เพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของความดันย่อย

ไอโซเทอม IV คล้ายคลึงกับไอโซเทอมแบบ II ยกเว้นที่ความดันสัมพัทธ์มีค่าเข้าใกล้ 1

ไอโซเทอมแบบ V คล้ายคลึงกับไอโซเทอมแบบ III เมื่อความดันสัมพัทธ์มีค่าต่ำ จนกระทั่งเกิดการอิมิตัวของการดูดซับเมื่อความดันสัมพัทธ์มีค่าสูง [24]



ภาพที่ 2.16 รูปแบบของไอโซเทอมตามการจำแนกแบบ IUPAC

นอกจากนี้ยังมีการแบ่งประเภทของไอโซเทอมตามการจำแนก International Union of Pure and Applied Chemist (IUPAC) เมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการดูดซับมีค่าต่ำกว่าจุดวิกฤตของสาร ปริมาณก๊าซที่ถูกดูดซับในรูพรุนเพิ่มขึ้นตามความดันสัมพัทธ์ที่มีค่าเพิ่มขึ้นดังแสดงในภาพที่ 2.16 ซึ่งมีรายละเอียด ดังนี้

ไอโซเทอมแบบ I เป็นลักษณะของตัวดูดซับที่มีรูพรุนขนาดเล็ก (Micro-porous substances) ซึ่งมีความดันต่ำ ไอโซเทอมจะมีลักษณะชันมาก หลังจากนั้นปริมาตรการดูดซับจะคงที่ เนื่องจากพื้นที่ผิวของตัวดูดซับถูกปกคลุมจนเต็มด้วยตัวถูกดูดซับ เรียกว่า การดูดซับแบบชั้นเดียวหรือการดูดซับแบบแลงเมียร์ (Langmuir type)

ไอโซเทอมแบบ II แสดงถึงการดูดซับแบบหลายชั้นภายหลังภายหลังจากการเกิดการดูดซับแบบชั้นเดียว (จุด B) และจะก่อให้เกิดการควบแน่นเมื่อความดันสัมพัทธ์  $P/P_0 = 1$

ไอโซเทอมแบบ III และ V แสดงการเพิ่มขึ้นของปริมาตรการดูดซับเมื่อความดันสัมพัทธ์มีค่าสูง แสดงให้เห็นถึงอันตรกิริยาอย่างอ่อน (Weak Interaction) ระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ

ไอโซเทอมแบบ VI แสดงให้เห็นถึงการเกิดการดูดซับเป็นหลาย ๆ ชั้น ที่แยกออกจากกันซึ่งพบในตัวถูกดูดซับที่มีการกระจายขนาดรูพรุนหลายขนาด (Multimodal Pore Distribution)



ซึ่งไอโซเทอมแบบ IV และ V แสดงให้เห็นถึงการเกิดวงฮีสเทอรีซิส (Hysteresis Loop) ของรูพรุนขนาดกลาง ส่วนไอโซเทอมแบบ II และ IV มีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้ในการวิเคราะห์เพื่อหาพื้นที่ผิวโดยรวม (Total Surface Area) ไอโซเทอมแบบ I และ III มักพบในตัวดูดซับที่มีรูพรุนซึ่งต่างจากไอโซเทอมแบบ II ที่มักพบในตัวดูดซับที่ไม่มีรูพรุน (Non-Porous Structure) ส่วนไอโซเทอมแบบ III และ V ไม่ค่อยพบในระบบทั่วไป แต่จะพบในระบบที่มีการสร้างพันธะของการดูดซับไม่แข็งแรง ไอโซเทอมเหล่านี้ไม่นิยมนำมาใช้ในการวิเคราะห์พื้นที่ผิวของตัวดูดซับเนื่องจากชั้นของโมเลกุลของตัวถูกดูดซับถัดจากชั้นแรกซึ่งเป็นชั้นระหว่างโมเลกุลของตัวถูกดูดซับและพื้นผิวของตัวดูดซับอาจเกิดก่อนที่การดูดซับในชั้นแรกจะเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ [24]

### 2.6.7.1 การคำนวณพื้นที่ผิว

#### การคำนวณพื้นที่ผิวโดยสมการแลงเมียร์ (Langmuir Equation)

โดยสมการแลงเมียร์มีสมมติฐาน คือ

- (1) เป็นการดูดซับแบบชั้นเดียวเท่านั้น
- (2) เป็นการดูดซับที่ไม่เกิดปฏิกิริยาระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ
- (3) แต่ละตำแหน่งของผิวการดูดซับมีลักษณะเหมือนกันหมด

เราสามารถหาพื้นที่ผิวได้จากสมการของแลงเมียร์โดยมีรูปแบบจากไอโซเทอมชนิดที่สมการมีรูปแบบ คือ

$$\frac{p}{V(p + P)} = \frac{1}{V_m B} + p$$

ซึ่ง	V	คือ	ปริมาตรการดูดซับของก๊าซที่ถูกดูดซับ (mmol/g) ต่อหน่วยมวลของตัวดูดซับที่ความดันย่อย (p/p <sub>0</sub> ) ต่าง ๆ
	V <sub>m</sub>	คือ	ปริมาตรการดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayer capacity, mmol/g)
	B	คือ	ค่าคงที่
	P	คือ	ความดัน

ค่าพื้นที่ผิวจะได้จากความสัมพันธ์ของสมการ

$$S = V_m L \sigma$$

ซึ่ง	S	คือ	พื้นที่ผิว ( $m^2/g$ )
	L	คือ	เลขอโวกาโตร (Avogadro's number, $6.02 \times 10^{23}$ )
	$\sigma$	คือ	พื้นที่ฉายเงาของโมเลกุลตัวถูกดูดซับ ( $m^2/molecule$ )

สมการดังกล่าวมีประโยชน์มากที่ได้จากไอโซเทอม อย่างไรก็ตามสมการแลงเมียร์ซึ่งมีสมมติฐานดังกล่าวอาจไม่เหมาะสมกับตัวดูดซับบางชนิด

### การคำนวณพื้นที่ผิวโดยวิธีบีอีที (BET)

เนื่องจากแรงในการเกิดการดูดซับทางกายภาพจะคล้ายกับแรงในการเกิดการควบแน่น (Liquefaction) คือเป็นแรงวานเดอร์วาลส์ (Van der Waals force) ดังนั้นการดูดซับทางกายภาพ (ทั้งบนพื้นผิวแบนและพื้นผิวโค้ง) จึงไม่จำกัดเฉพาะการดูดซับแบบชั้นเดียว (Monomolecular layer) แต่สามารถเกิดต่อไปจนเป็นการดูดซับแบบหลายชั้น (Multimolecular layer) ของของเหลวปกคลุมพื้นผิวได้

ทฤษฎีของบีอีที (Branauer Emmett and Teller, BET) จะเพิ่มเติมจากทฤษฎีของแลงเมียร์ คือ สามารถเกิดการดูดซับแบบหลายชั้น บนพื้นผิวที่ไม่มีรูพรุนได้โดยสมการบีอีที โดยมีสมมติฐานว่า ชั้นการดูดซับชั้นบนสุดจะอยู่ในสภาพสมดุลกับไอของก๊าซ นั่นคืออัตราการระเหยของชั้นโมเลกุลต่าง ๆ เท่ากับอัตราการควบแน่น และมีสมมติฐานอย่างง่ายว่าสำหรับการดูดซับชั้นแรก (First monolayer) จะใช้พลังงานการดูดซับ (Heat of adsorption,  $\Delta H_1$ ) ในส่วนการดูดซับชั้นที่สองขึ้นไปจะใช้พลังงานการควบแน่น (Heat of liquefaction,  $\Delta H_L$ ) ซึ่งสมการโดยทั่วไปของบีอีที (BET) คือ

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

เมื่อ	$P_0$	คือ	ความดันไออิ่มตัว
	$V_m$	คือ	ปริมาตรการดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayer capacity)
	C	คือ	ค่าคงที่ ( $C \approx \exp [\Delta H_L - \Delta H_1] / (RT)$ )

เมื่อพล็อตค่า  $\{P / [V(P_0 - P)]\}$  กับ  $P/P_0$  จะได้เส้นตรงความชัน  $[(C - 1) / V_m C]$  และตัดแกน  $\{P / [V(P_0 - P)]\}$  และตัดแกนที่จุด  $1/(V_m C)$  ซึ่งจะหา  $V_m$  ได้

จุดประสงค์หลักของสมการบีอีที คือ เพื่ออธิบายไอโซเทอมชนิดที่ 2 นอกจากนี้ยังลดรูปลงเป็นสมการแลงเมียร์ได้ที่ความดันต่ำ ๆ และสามารถอธิบายไอโซเทอมชนิดที่ 3 ได้ในกรณีที่มีการดูดซับชั้นแรก (Monolayer adsorption) คายความร้อนน้อยกว่าการควบแน่น (Liquefaction) ( $C < 1$ ) นั่นคือ สามารถใช้คำนวณหาพื้นที่ผิวจากข้อมูลไอโซเทอมได้แม้ว่าการดูดซับชั้นแรกจะเกิดได้ไม่สมบูรณ์

สมการบีอีที (BET) สามารถใช้กับสารที่มีรูพรุนได้ ถ้าการดูดซับเกิดขึ้น  $n$  ชั้น ( $n$  สัมพันธ์กับขนาดรูพรุน) จะได้ดังสมการ

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

เมื่อ  $X = P/P_0$

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

วิธีบีอีที (BET) เป็นวิธีที่นิยมใช้กันมากที่สุดในการคำนวณพื้นที่ผิว โดยใช้หลักการคำนวณเหมือนกับวิธีแลงเมียร์ แต่การคำนวณ  $V_m$  จะต่างกันโดยกราฟบีอีทีจะเป็นการพล็อตระหว่าง  $\{P / [V(P_0 - P)]\}$  กับ  $P/P_0$  ซึ่งมักจะได้เส้นตรงในช่วงความดันสัมพัทธ์  $P/P_0$  ระหว่าง 0.05 ถึง 0.35

$$\text{ความชัน} \quad \text{คือ} \quad [(C - 1) / V_m C]$$

$$\text{จุดตัด} \quad \text{คือ} \quad [1/V_m C]$$

จากสมการของจุดตัดและความชัน จะได้

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

และจากค่า  $V_m$  ก็จะมาคำนวณหาพื้นที่ผิวของสารตัวอย่างได้เช่นเดียวกับวิธีแลงเมียร์

ในความจริงการดูดซับทางกายภาพจะไม่มี การดูดซับในชั้นแรกเต็มพื้นที่อย่างสมบูรณ์ เนื่องจากแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของก๊าซกับผิวของแข็งไม่เท่ากับการดูดซับทางเคมี แต่สมการบีอีทีก็สามารถคำนวณค่าจำนวนโมเลกุลที่ใช้ในการปกคลุมพื้นที่ผิวของแข็งให้เต็ม 1 ชั้นได้ แม้ว่าการดูดซับชั้นแรกอย่างเต็มพื้นที่ผิวจะเกิดเฉพาะในการดูดซับทางเคมีเท่านั้น

แม้ว่าสมการบีอีที่จะใช้อย่างกว้างขวางเนื่องจากความง่ายของรูปแบบสมมติฐาน และยังสอดคล้องกับผลการทดลองที่เป็นการดูดซับแบบหลายชั้น โดยเฉพาะที่ความดันสัมพัทธ์ระหว่าง 0.05 ถึง 0.35 ซึ่งเป็นช่วงความดันที่เกิด  $V_m$  ได้ อย่างไรก็ตามสำหรับสารที่มีรูพรุนซึ่งมักจะเกิดปรากฏการณ์ช่องว่าง (Hysteresis) จากการควบแน่นในรูพรุน (Pore condensation) หรือเมื่อจุด B บนกราฟไอโซเทอมไม่เด่นชัด ค่าของ  $V_m$  ที่คำนวณจากสมการบีอีที่จะมีความน่าเชื่อถือน้อยลง เช่น ซีโอไลต์ จะได้กราฟบีอีที่สามารถประมาณเป็นเส้นตรงที่ผ่านจุดเริ่มต้น (Origin) และคำนวณ  $V_m$  ได้จากการวัดปริมาตรของก๊าซที่ถูกดูดซับที่ความดันสัมพัทธ์ระหว่าง 0.2 ถึง 0.3 ได้

### 2.6.8 การดูดซับไอโอดีน (Iodine adsorption)

การดูดซับไอโอดีน เป็นการบ่งบอกถึงประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์ เนื่องจากสามารถหาพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์จากการดูดซับไอโอดีนได้ โดยวัดน้ำหนักของไอโอดีนเป็นมิลลิกรัมต่อน้ำหนักถ่าน 1 กรัม ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐาน American Society for Testing and Material (ASTM) กำหนดความเข้มข้นของไอโอดีนที่ภาวะสมดุล 0.02 นอร์มัล อาจจะมีค่าแตกต่างจาก 0.02 นอร์มัลโดยให้อยู่ในช่วง 0.007 – 0.03 นอร์มัล ซึ่งสามารถควบคุมได้จากน้ำหนักของถ่านกัมมันต์ในทางปฏิบัติการวิเคราะห์ต้องใช้น้ำหนักถ่านกัมมันต์ 3 ค่าเพื่อให้ได้ความเข้มข้นไอโอดีนที่ภาวะสมดุลมากกว่า ไกล่เคียง และน้อยกว่า 0.02 นอร์มัลแล้วนำมาเฉลี่ยด้วยวิธีลอการิทึม เพื่อให้ได้ค่าการดูดซับถูกต้องยิ่งขึ้น โดยบางครั้งค่าการดูดซับไอโอดีนต่ำ อาจเกิดจากรูพรุนมีขนาดเล็กกว่า 1 นาโนเมตร เนื่องจากขนาดโมเลกุลของไอโอดีนอยู่ที่ 10 อังสตรอม

### 2.6.9 การดูดซับเมทิลีนบลู (Methylene blue adsorption)

การดูดซับเมทิลีนบลูเป็นการบ่งบอกถึงความสามารถในการดูดซับโมเลกุลในช่วงรูพรุนขนาดกลาง 20 – 500 อังสตรอม เนื่องจากขนาดโมเลกุลของเมทิลีนบลูจะใกล้เคียงกับขนาดรูพรุนขนาดกลาง ทำให้เกิดการดูดซับได้ดี

### 2.6.10 โมลาสนัมเบอร์ (Molass number)

เป็นค่าที่บอกปริมาณของรูพรุนขนาดใหญ่ สามารถใช้บอกความสามารถในการดูดซับสารโมเลกุลขนาดใหญ่ของถ่านกัมมันต์ได้ โดยถ่านกัมมันต์ที่มีรูพรุนขนาดใหญ่จำนวนมากจะมีค่าโมลาสนัมเบอร์ที่มาก

### 2.6.11 แทนนิน (Tannin)

เป็นสารผสมที่ประกอบด้วยสารโมเลกุลขนาดกลางและขนาดใหญ่ สามารถใช้บอกความสามารถในการดูดซับสารโมเลกุลขนาดกลางและขนาดใหญ่ของถ่านกัมมันต์ได้ หน่วยที่ใช้รายงาน คือ พีพีเอ็ม (ppm : part per million คือ ส่วนในล้าน)

## 2.7 การใช้ประโยชน์จากถ่านกัมมันต์[25, 26]

ถ่านกัมมันต์ส่วนใหญ่ถูกนำไปใช้ในการดูดซับ เนื่องจากมีพื้นที่ผิวสูงและมีความสามารถในการดูดซับได้ดี โดยนำไปใช้ในอุตสาหกรรมอย่างแพร่หลาย ซึ่งพบว่าการใช้ประโยชน์จากถ่านกัมมันต์ในการดูดซับ สามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ ใช้กับประเภทของเหลวและก๊าซ มีรายละเอียดดังนี้

### 2.7.1 ถ่านกัมมันต์ประเภทที่ใช้กับการดูดซับก๊าซหรือไอ (Gas – phase application)

ถ่านกัมมันต์ที่ถูกใช้กับก๊าซต้องมีลักษณะแข็ง มีรูพรุนขนาดเล็ก พื้นที่ผิว 1000 – 2000 ตารางเมตรต่อกรัมและการดูดซับจะต้องเลือกก๊าซหรืออินทรีย์ระเหย ซึ่งสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่จะสามารถใช้กับก๊าซได้ คือ มีความสามารถในการดูดซับสูงต่อหนึ่งปริมาตร สามารถดูดซับก๊าซที่มีความเข้มข้นสูงได้ ต้านทานต่ำเมื่ออยู่ในการไหลของก๊าซ และสามารถเป็นตัวดูดซับได้ดีเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นหรือความดันลดลง ตัวอย่างของการไปใช้งาน ดังนี้

- (1) ใช้แยกก๊าซโซลีนออกจากก๊าซธรรมชาติ
- (2) กำจัดกลิ่นจากอากาศในเครื่องปรับอากาศทำให้กลิ่นเหม็นลดน้อยลง
- (3) ใช้ในอุตสาหกรรมทำหน้ากากป้องกันก๊าซพิษทั้งนี้เพราะถ่านกัมมันต์สามารถดูดซับก๊าซพิษและไอของสารอินทรีย์ได้
- (4) ใช้แยกไอระเหยของตัวทำละลายที่ใช้แล้วเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ โดยถ่านกัมมันต์จะดูดซับไอระเหยเหล่านี้ที่อุณหภูมิห้องและคายออกที่ความดันของไอต่ำ
- (5) กำจัดก๊าซเจือปนออก เช่น ไฮโดรเจนไนโตรเจน ฮีเลียม อะเซทิลีน แอมโมเนีย คาร์บอนไดออกไซด์ คาร์บอนมอนอกไซด์ สารประกอบออร์แกนิกซัลเฟอร์
- (6) ใช้ดูดซับกัมมันตภาพรังสีออกมาจากปฏิกิริยานิวเคลียร์สำหรับหน่วยปฏิบัติการให้การสลายตัวเกิดขึ้น สมบูรณ์ขณะที่ยังถูกจับไว้ในเบตตั้งของถ่านกัมมันต์ (Activated carbon bed)

## 2.7.2 ประเภทที่ใช้กับของเหลว

ส่วนใหญ่จะใช้ฟอกสีหรือทำให้ของเหลวบริสุทธิ์ โดยใช้ในอุตสาหกรรมหลายประเภท เช่น

- (1) ใช้ในทางการแพทย์อุตสาหกรรมเคมี และยา
- (2) ใช้ในอุตสาหกรรมน้ำตาล อุตสาหกรรมผลิตอาหารเครื่องดื่มแอลกอฮอล์
- (3) ใช้แยกโลหะจากสารละลายที่ต้องการ เช่น การแยกทองหลังการสกัดจากแร่ด้วยวิธีไฮยาไนต์ เป็นต้น ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา หรือเป็นตัวรองรับสารเร่งปฏิกิริยา (Catalyst support) เช่น ตัวรองรับสารเร่งปฏิกิริยาสำหรับปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชัน (Hydrogenation) เป็นต้น
- (4) ใช้ทำน้ำดื่มให้บริสุทธิ์เป็นการกำจัดรส สี และกลิ่น นอกจากนี้ยังใช้ในการบำบัดน้ำเสียอีกด้วย

## 2.8 ปาล์มน้ำมัน

### 2.8.1 ข้อมูลทั่วไปของปาล์มน้ำมัน (Oil palm)[27]

ปาล์มน้ำมัน มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Elaeis guineensis* Jacq เป็นพืชที่มีถิ่นกำเนิดอยู่ในแถบแอฟริกาตะวันตกจากเซียร์ราลีโอนไลบีเรียไอวอรีโคสต์กานาและแคเมอรูนตลอดจนแถบเส้นศูนย์สูตรของสาธารณรัฐคองโกและซาอีร์ ปาล์มน้ำมันจัดเป็นพืชตระกูลปาล์มใบเลี้ยงเดี่ยวเป็นไม้ยืนต้นให้ผลผลิตตลอดทั้งปีและมีอายุยืนยาว

ปาล์มน้ำมันเริ่มมีผู้นำเข้ามาปลูกในสวนพฤกษชาติโบกอร์บนเกาะชวาประเทศอินโดนีเซียซึ่งเป็นปาล์มน้ำมันพันธุ์ดูรา ต่อมาในปีพ.ศ. 2484 เกิดปาล์มน้ำมันพันธุ์เทเนอราซึ่งเป็นพันธุ์ที่ผสมกันระหว่างพันธุ์ดูราและพันธุ์ฟิลิเฟอราและยังมีลูกผสมใหม่เกิดขึ้นระหว่างพันธุ์ดูรากับเทเนอรา แต่พันธุ์เทเนอร่ากลับให้ผลผลิตน้ำมันต่อขนาดพื้นที่ปลูกสูงกว่าพันธุ์ลูกผสมดูรากับเทเนอร่าจึงทำให้พันธุ์เทเนอร่าได้รับความนิยม

จุดกำเนิดของการปลูกปาล์มน้ำมันในประเทศไทยมีการสันนิษฐานว่าในปี พ.ศ. 2480 พระยาประดิพัทธ์ภูบาลเป็นผู้นำเข้ามาจากประเทศมาเลเซียโดยเป็นปาล์มน้ำมันพันธุ์เทเนอรา ต่อมาหม่อมเจ้าอมรสมานลักษณ์ได้ขยายพันธุ์ไปปลูกเพื่อการค้าที่ตำบลบ้านปริก อำเภอสะเดา จังหวัดสงขลา ปาล์มน้ำมันจึงได้ขยายพื้นที่การปลูกอย่างรวดเร็วทำให้เกิดโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มแห่งแรกของประเทศไทยขึ้นในปีพ.ศ. 2515 และถือเป็นพระมหากษัตริย์คุณอย่างสูงสำหรับประชาชนคนไทยที่พระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัวภูมิพลอดุลยเดชมีพระกระแสรับสั่งเมื่อวันที่ 2 ตุลาคม พ.ศ. 2526 กับพันเอกวีระวะนะสุขหัวหน้าโครงการพัฒนาคลองหอยโข่งและคลองจาไหล ณ ตำบล

ทักษิณราชนิเวศน์โดยทรงมีพระประสงค์ให้มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ดำเนินโครงการส่งเสริมอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์มขนาดเล็กก่อนที่ปาล์มน้ำมันจะถูกรักษาอยู่ในแผนพัฒนาประเทศต่อไป

ปาล์มน้ำมันให้ผลเป็นทะลายปาล์ม ประกอบด้วย ผลปาล์มซึ่งมีลักษณะคล้ายหมากตามิขนาดเล็กกว่า สีของเปลือกเป็นสีแดงกว่าหรือมีสีเหลืองส้ม โดยปาล์มทั้งทะลายมีน้ำหนักอยู่ในช่วงประมาณ 3 - 50 กิโลกรัม ขึ้นอยู่กับอายุต้นปาล์มและความสมบูรณ์ของต้นปาล์ม ปาล์มน้ำมันให้ผลผลิตเก็บเกี่ยวได้ตลอดปี ช่วงเวลาที่มีผลปาล์มออกสู่ตลาดมากมีอยู่ 2 ช่วง ได้แก่ ช่วงต้นปีราวเดือนมีนาคม - พฤษภาคม และช่วงปลายปีราวเดือนกันยายน - พฤศจิกายน ปาล์มน้ำมันเริ่มให้ผลเมื่อมีอายุประมาณ 3.5 - 4 ปี และให้ผลสูงสุดเมื่ออายุประมาณ 8 - 12 ปี หลังจากนั้นผลผลิตค่อยลดลง แต่ยังคงมีความคุ้มค่าในการลงทุนจนถึงอายุประมาณ 25 ปี

ปาล์มน้ำมันจัดอยู่ในพืชตระกูลปาล์ม (Palmea หรือ Recaceae) ซึ่งมีอยู่ 3 ชนิด คือ

(1) *Elaeis guineensis* เป็นปาล์มน้ำมันชนิดที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจ เนื่องจากเป็นพันธุ์ที่นิยมปลูกเป็นการค้าปัจจุบัน มีถิ่นกำเนิดดั้งเดิมอยู่ในประเทศต่าง ๆ ในทวีปแอฟริกาบริเวณตอนกลางและตะวันตกของทวีป อาจเรียกปาล์มน้ำมันพวกนี้ว่า African oil palm พันธุ์หรือสายพันธุ์ปาล์มของปาล์มน้ำมันชนิดนี้สามารถจำแนกออกได้ 3 แบบ คือแบบดูรา แบบเทนเอนรา และแบบฟิลิเฟอรา โดยอาศัยความแตกต่างของลักษณะความหนาของกะลาปาล์ม การปรากฏของเส้นใยสีน้ำตาลบริเวณเนื้อปาล์มชั้นนอกรอบ ๆ กะลาและความหนาของเนื้อนอกปาล์ม

(2) *Elaeis oleifera* (เดิมคือ *E.melanocca* หรือ *Corozo oleifera*) กลุ่มพันธุ์ปาล์มพวกนี้มีถิ่นกำเนิดอยู่แถบประเทศต่าง ๆ ทางภาคเหนือของกลุ่มแม่น้ำอะเมซอนของทวีปอเมริกาใต้ยาวติดต่อไปถึงทวีปอเมริกากลางบริเวณคอซตาริกา อาจเรียกปาล์มน้ำมันพวกนี้ว่า American oil palm ไม่นิยม ปลูกเป็นการค้า เนื่องจากมีการเจริญเติบโตช้า ผลมีขนาดเล็กและให้ผลผลิตน้ำมันต่ำกว่าปาล์มน้ำมันชนิด *Elaeis guineensis*

(3) *Elaeis odora* (ชื่อเดิมคือ *Barcella odora*) มีรายงานพบปาล์มน้ำมันพวกนี้บริเวณเดียวกับ *Elaeis oleifera* คือแถบกลุ่มแม่น้ำอะเมซอน บทบาทและความสำคัญของปาล์มน้ำมันในกลุ่มนี้ยังไม่มีรายงาน

## 2.8.2 ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ของปาล์มน้ำมัน

### ราก

ปาล์มน้ำมันมีระบบรากแบบรากฝอย ประกอบด้วยรากชุดต่าง ๆ ประมาณ 4 ชุด รากชุดแรก ที่อยู่ในระดับแนวนอนยาว 3 - 4 เมตรจากต้น ส่วนรากชุดแรกที่อยู่แนวตั้งยาว 1 - 2 เมตร จากผิวดิน สำหรับรากชุดที่สอง สาม และสี่ จะเกิดเรียงตามลำดับ โดยทั่วไปรากจะเกิดมากและสามารถดูดซับน้ำและธาตุอาหารที่ปาล์มน้ำมันมาใช้ประโยชน์ที่ระดับความลึก ประมาณ 30 - 50 เซนติเมตรจากผิวดิน

### ลำต้น

ลำต้นของปาล์มน้ำมันมีลักษณะตั้งตรง ไม่มีกิ่งแขนง ประกอบด้วยข้อและปล้องที่ถี่มากแต่ละข้อมีหนึ่งทางใบเกิดเวียนรอบลำต้น ในระยะที่ปาล์มอายุยังน้อย (น้อยกว่า 3 ปี) จะสังเกตเห็นทางใบอยู่ติดกับลำต้นมากกว่า 40 ทางใบ เมื่อปาล์มมีอายุมากขึ้นและเริ่มมีการตัดแต่งทางใบ จะสังเกตเห็นที่ฐานทางใบที่เป็นรอยตัดแต่งติดอยู่รอบ ๆ ลำต้น รอยแผลที่ฐานใบติดกับลำต้นก็คือข้อของลำต้นและส่วนที่อยู่ระหว่างข้อคือปล้อง ต้นปาล์มที่เก่าแก่มาก (อายุมากกว่า 20 ปี) อาจมีความ สูงถึง 15 - 18 เมตร มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางลำต้น 45 - 60 เซนติเมตร โดยทั่วไปความสูงของต้นปาล์มจะเพิ่มขึ้นปีละครึ่งเมตร

### ใบ หรือทางใบ

ใบ หรือทางใบ ประกอบด้วย แกนทางใบ ก้านใบ และใบย่อย ซึ่งเกิดจากการพัฒนาของเนื้อเยื่อเจริญปลายยอดของลำต้น บริเวณดังกล่าวจะมีจุดกำเนิดตาใบอยู่มากกว่า 50 ตาใบ ในปาล์มที่มีอายุ 5 - 6 ปี จำนวนใบหรือทางใบของปาล์มน้ำมันที่ผลิตในแต่ละปีอยู่ระหว่าง 30 - 40 ทางใบ หลังจากนั้นจะลดลงเป็น 20 - 25 ทางใบต่อปี เมื่อต้นปาล์มโตเต็มที่ทางใบอาจยาวมากกว่า 9 เมตร ซึ่งขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อม แต่ละทางใบมีจำนวนใบย่อย 250 - 400 ใบย่อย ทางใบจะเกิดลักษณะ เป็นเกลียวรอบลำต้นโดยลักษณะการเวียนของทางใบปาล์มน้ำมันมี 2 แบบ ซึ่งสามารถสังเกตได้จากรอยแผลที่ฐานใบติดกับลำต้นหลังจากการตัดแต่งทางใบของต้นปาล์มแล้ว แบบแรกคือ การเกิดทางใบแบบเวียนซ้าย แบบที่สอง คือ การเกิดทางใบแบบเวียนขวา การสังเกตการเวียนของทางใบจะมีประโยชน์สำหรับการนับทางใบที่เกิดขึ้น โดยทางใบล่างหนึ่ง ๆ จะรองรับทางใบบนจำนวน 2 ทางใบ ทางใบบนหนึ่งที่มีลักษณะการเวียนของทางใบชัดเจน (เวียนซ้ายหรือขวา) จะนับจำนวนทางใบห่าง จากทางใบล่าง ที่รองรับจำนวน 8 ทางใบ ส่วนทางใบบนอีกด้านหนึ่งที่รองรับด้วยทางใบล่าง



จะนับจำนวนทางใบห่างจากทางใบล่างจำนวน 5 ทางใบ การประมาณอายุของปาล์มน้ำมันหลังจากปลูก สามารถสังเกตได้จากจำนวนรอยแผลที่ฐานใบติดกับลำต้นหลังการตัดแต่งนี้ โดยประมาณว่าชั้นทางใบจำนวน 3 - 4 ชั้น ใช้เวลาประมาณ 1 ปี และการเก็บตัวอย่างใบจากทางใบที่ 17 อย่างถูกต้องเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณธาตุอาหาร ก็จำเป็นต้องสังเกตการณ์เวียนของทางใบเช่นกัน

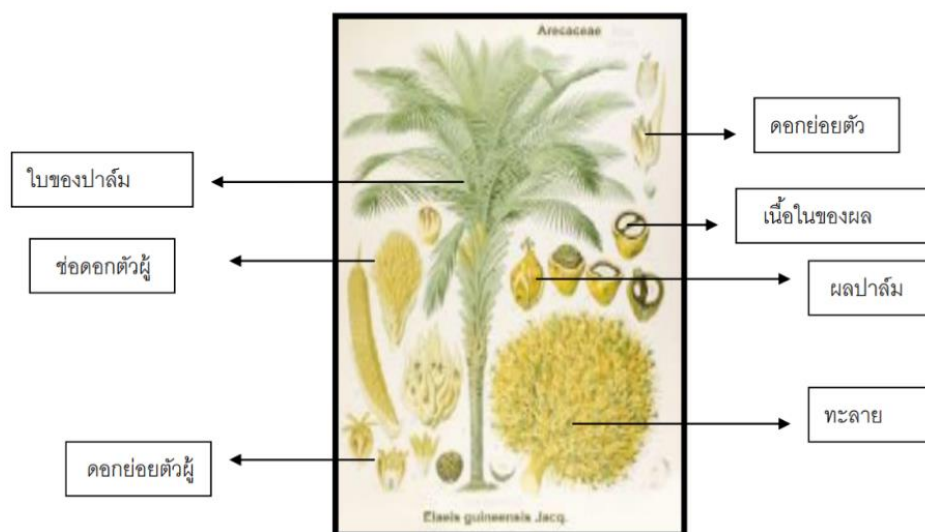
### ช่อดอก

ช่อดอกปาล์มน้ำมันเกิดจากตาดอกที่บริเวณซอกทางใบที่ติดกับต้น ตาดอกอาจพัฒนาเป็นช่อดอกตัวเมียหรือช่อดอกตัวผู้ ดังนั้นปาล์มน้ำมันจึงมีทั้งช่อดอกตัวเมียและช่อดอกตัวผู้อยู่บนต้นเดียวกัน แต่เกิดในตำแหน่งของทางใบที่แตกต่างกัน และบางครั้งในปาล์มที่มีอายุน้อยอาจสังเกตพบช่อดอกแบบกะเทย คือมีทั้งดอกตัวผู้และดอกตัวเมียในช่อเดียวกัน ในปาล์มที่มีอายุประมาณ 8 ปี ช่อ ดอกตัวเมียหนึ่ง ๆ ประกอบด้วยช่อดอกย่อย (จำนวนมากกว่า 110 ช่อดอกย่อย) และดอกตัวเมีย (จำนวนมากกว่า 4000 ดอกต่อช่อดอก) ส่วนช่อดอกตัวผู้หนึ่ง ๆ ประกอบด้วยช่อดอกย่อย (จำนวน มากกว่า 160 ช่อดอกย่อย) และดอกตัวผู้ (จำนวนโดยเฉลี่ย 785 ดอกต่อช่อดอกย่อยหรือประมาณ 126000 ดอกต่อช่อดอก) สามารถผลิตละอองเรณูโดยประมาณถึง 900 ล้านละอองเรณู คิดเป็นน้ำหนักละอองเรณูสดโดยเฉลี่ย 25 - 50 กรัมต่อช่อดอก ในสภาพธรรมชาติความมีชีวิตของละอองเรณูสดมี ระยะเวลาประมาณ 7 วัน การเก็บรักษาละอองเรณูในระยะเวลาสั้น ๆ อาจทำได้โดยการทำให้ละออง เรณูแห้งที่อุณหภูมิ 35 - 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมงแล้วเก็บรักษาในห้องเย็นหรือในภาชนะที่ มีแคลเซียมคลอไรด์ ความมีชีวิตรอดของละอองเรณูจะลดลงตามระยะเวลาที่เก็บรักษา หากเก็บ รักษานานถึง 6 - 8 สัปดาห์ จะทำให้ความมีชีวิตรอดของละอองเรณูลดลงเหลือประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นในการปรับปรุงพันธุ์จึงมีความจำเป็นต้องเก็บรักษาละอองเรณูจากต้นพ่อเป็น เวลานานเพื่อนำมาใช้ผสมกับต้นแม่ที่ผ่านการคัดเลือกแล้ว วิธีการเก็บละอองเรณูให้คงสภาพความมีชีวิตรอดได้นานกว่า 1 ปี ทำได้โดยการลดความชื้นของละอองเรณูให้เหลือน้อยกว่า 5 เปอร์เซ็นต์ และการเก็บรักษาในสภาพอุณหภูมิต่ำที่ -15 องศาเซลเซียส

การพัฒนาของช่อดอกตั้งแต่ระยะตาดอกที่อยู่ในซอกทางใบจนถึงระยะเก็บเกี่ยว ทะลาย ปาล์มได้ใช้ระยะเวลานานประมาณ 44 เดือน หรือประมาณ 3 ปี ครึ่ง ปัจจัยที่มีผลต่อการกำหนดเพศของช่อดอก นอกจากขึ้นกับลักษณะประจำพันธุ์แล้ว ยังมีปัจจัยของสภาพแวดล้อมและการจัดการสวนเข้ามาเกี่ยวข้องด้วย เช่น ความสมดุลของธาตุอาหารทั้งในดินและในปาล์ม ปริมาณ การ กระจายของฝน ความชื้นดิน และการตัดแต่งทางใบ เป็นต้น โดยทั่วไปสัดส่วนเพศระหว่างช่อดอกตัว เมียต่อช่อดอกตัวผู้สำหรับปาล์มที่เริ่มให้ผลผลิต (อายุน้อย) ประมาณ 3 : 2 และสัดส่วนนี้จะเปลี่ยนแปลงเป็น 1 : 2 หรือ 1 : 3 เมื่อปาล์มมีอายุมากขึ้นตามลำดับ

### ผลและเมล็ด

หลังจากที่ช่อดอกตัวเมียได้รับการผสมเรียบร้อยแล้ว ประมาณ 5.5 - 8 เดือน (โดยเฉลี่ยประมาณ 6 เดือน) ผลปาล์มในทะเลทรายจึงจะสุกพร้อมเก็บเกี่ยวได้ การสุกของผลจะเริ่มจากฐานช่อดอกขึ้นมา โดยทั่วไปปาล์มน้ำมันสามารถผลิตทะเลทรายปาล์มได้ไม่ควรต่ำกว่า 12 ทะลายต่อต้นต่อปี น้ำหนักต่อหนึ่งทะเลทรายควรประมาณ 10 - 30 กิโลกรัม จำนวนผลทั้งหมด 500 - 4000 ผลต่อทะเลทรายรวม ผลควรมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางตั้งแต่ 2 - 5 เซนติเมตร ขึ้นอยู่กับพันธุ์และควรมีน้ำหนัก 3 - 30 กรัมต่อผล อย่างไรก็ตามลักษณะดังกล่าวข้างต้นขึ้นอยู่กับอายุของปาล์มน้ำมัน โดยพบว่าปาล์มที่มีอายุน้อยจะมีจำนวนทะเลทรายต่อต้นมากแต่ทะเลทรายมีขนาดเล็ก และเมื่อปาล์มมีอายุมากขึ้นจะมีจำนวนทะเลทรายต่อต้นน้อยลงแต่ขนาดทะเลทรายจะใหญ่ขึ้น ผลปาล์มประกอบด้วย เปลือกผลชั้นนอก เนื้อปาล์มชั้นนอก (Mesocarp) กะลา เนื้อปาล์มชั้นในและเอมบริโอ ส่วนของผลปาล์มที่นำมาหีบเพื่อสกัดน้ำมันมาใช้ประโยชน์มี 2 ส่วน คือ ส่วนแรกจากเปลือกผลชั้นนอกและเนื้อผลชั้นนอก และส่วนที่สองจากเนื้อผลชั้นในและเอมบริโอ น้ำมันที่หีบออกได้จาก 2 ส่วนนี้ มีสมบัติทางเคมีที่แตกต่างกันมาก โดยส่วนแรกนิยมนำมาใช้เพื่อการบริโภค ส่วนที่สองนิยมนำมาใช้เพื่อการอุปโภค เมล็ดปาล์มประกอบด้วย กะลา เนื้อปาล์มชั้นในและเอมบริโอ ใช้สำหรับการขยายพันธุ์ กะลาเป็นส่วนของที่แข็งมีความหนาตามลักษณะประจำพันธุ์ ทางปลายด้านหนึ่งของกะลาสักเกตเห็น เป็นรู 3 รู ซึ่งมีกระจุกเส้นใยอุดอยู่ ทำหน้าที่ดูดซับน้ำในระยะที่ทำการเพาะเมล็ด จำนวนรูบนกะลาจะสอดคล้องกับจำนวนพูของเนื้อผลชั้นในและเอมบริโอ ดังนั้นในการเพาะเมล็ดปาล์มอาจได้ จำนวนต้นกล้าปาล์ม 1 - 3 ต้นต่อเมล็ด (ปกติได้เพียง 1 ต้นกล้า) โดยเนื้อผลชั้นในจะทำหน้าที่เป็น แหล่งอาหารแก่ต้นกล้าในระยะแรกของการพัฒนาและเอมบริโอจะพัฒนาเป็นต้นกล้าปาล์ม โดยปกติเมล็ดปาล์มมีระยะพักตัวหากปล่อยให้มีการงอกในสภาพธรรมชาติ จะต้องใช้เวลานาน 3 - 6 เดือน และมีระดับเปอร์เซ็นต์ความงอกเพียง 50 เปอร์เซ็นต์ แต่หากมีการควบคุมปัจจัยสภาพแวดล้อม จะใช้เวลานานเพียง 40 วัน โดยมีระดับเปอร์เซ็นต์ความงอกประมาณ 85 - 90 เปอร์เซ็นต์



ภาพที่ 2.17 โครงสร้างทางพฤกษศาสตร์ของปาล์มน้ำมัน

### 2.8.3 พันธุ์ปาล์มน้ำมัน[28]

อาจแบ่งตามชนิดของผลได้ 3 ชนิดคือ

(1) พันธุ์ดูรา (Dura) พวกนี้กะลาหนาเมล็ดโตให้เปอร์เซ็นต์น้ำมันต่อน้ำหนักทะลายประมาณ ร้อยละ 19 ไม่นิยมปลูกเป็นการค้า แต่ใช้เป็นพันธุ์แม่ในการผลิตพันธุ์ปาล์ม พวกเทนอรา (Tenera)

(2) พันธุ์พิซิเฟอรา (Pisifera) มีเปลือกนอกหนากว่า พวกดูรา เมล็ดเล็ก มีผลขนาดเล็กมาก ช่อดอกตัวเมียมักเป็นหมัน จึงไม่เหมาะแก่การปลูกเป็นการค้า มักใช้เป็นพันธุ์พ่อในการผลิตลูกผสม ดอกย่อยตัว เมียเนื้อในของผลปาล์ม ผลปาล์มสด ทะลายปาล์มใบของปาล์มน้ำมัน ช่อดอกตัวผู้ ดอกย่อยตัวผู้

(3) พันธุ์เทนอรา (Tenera) เป็นลูกผสมระหว่างพันธุ์ดูราและพิซิเฟอรา นำเอาข้อดีคือลักษณะผลโตของพันธุ์ดูราและเปลือกหนา เมล็ดเล็กจากพันธุ์พิซิเฟอรามารวมกัน จึงได้พันธุ์ที่ดีเหมาะสมสำหรับปลูกเป็นการค้า

### 2.9 ไม้ (Bamboo)

ไม้ (bamboo) เป็นพืชใบเลี้ยงเดี่ยว (monocotyledon) จัดอยู่ในวงศ์หญ้า Poaceae (เดิมคือ Gramineae) วงศ์ย่อย Bambusoideae และครอบครัว Bambusaceae เนื่องจากไม้มีลักษณะทางชีววิทยาและสัณฐานวิทยาคลายคลึงกับหญ้าทั่วไป แต่ความแตกต่างของไม้กับหญ้าทั่วไป

คือ ไม้มีระบบเหง้าที่ชัดเจน มีก้านใบเทียม (Pseudo petiole) และใบที่ค่อนข้างกว้าง การเจริญเป็นกิ่ง (branch complement) ชับซ้อนและแข็งแรง รวมไปถึงลักษณะช่อดอกและส่วนประกอบต่าง ๆ ของดอกที่ซับซ้อน ยังพบว่าไม้มีลักษณะที่คล้ายกับการมีเนื้อไม้ (woody bamboo) ส่งผลให้ไม้ส่วนมากมีลำต้นสูงใหญ่และมีอายุยืนนานหลายปี

### 2.9.1 นิเวศวิทยาและการกระจายพันธุ์[29]

ไม้ไผ่ มีถิ่นกำเนิดและการกระจายพันธุ์อย่างกว้างขวางในบริเวณเขตร้อนและเขตอบอุ่นบางส่วน เราสามารถ พบไม้เกือบทุกภูมิภาคของโลก ยกเว้นทวีปยุโรป ขั้วโลกเหนือและขั้วโลกใต้ ไม้ไผ่มีการกระจายพันธุ์มากที่สุดในแถบร้อนทางตอนใต้ และตะวันออกเฉียงใต้ของทวีปเอเชีย คือ มีการกระจายพันธุ์ถึง 45 สกุล 750 ชนิดในขณะที่ทั่วโลกมีประมาณ 80-90 สกุล ประมาณ 1500 ชนิด อีกทั้งไผ่เป็นไม้โตเร็ว หาง่าย เป็นพืชเอนกประสงค์ ทำให้ไผ่เข้ามาเกี่ยวข้องกับชีวิตประจำวันของผู้คนโดยเฉพาะในทวีปเอเชีย อเมริกา และแอฟริกา

สำหรับประเทศไทยซึ่งตั้งอยู่บริเวณเขตร้อน ตามรายงานการสำรวจพบไผ่ในเมืองไทยประมาณ 13 สกุล 69 ชนิด แบ่งเป็นไผ่พื้นเมืองของประเทศไทยกว่า 42 ชนิด และไผ่พื้นเมืองจากต่างประเทศ โดยเฉพาะจากประเทศจีนที่นำมาปลูกเพื่อการผลิตหน่อเป็นส่วนใหญ่ 17 ชนิดพบกระจายอยู่ ทั่วทุกภูมิภาคของไทย ตั้งแต่ภาคเหนือจรดภาคใต้ ตะวันออกจรดตะวันตก รวมทั้งตามบริเวณเกาะต่าง ๆ ส่วนมาก พบขึ้นกระจายตามป่าเบญจพรรณหรือป่าผสมผลัดใบ และป่าดิบชื้น จากรายงานของกรมป่าไม้ ปี พ.ศ. 2545 พบว่า ภาคตะวันตกและภาคเหนือมีการกระจายของพื้นที่ป่าไผ่ล้วน (bamboo forest) สูงสุด มีพื้นที่ทั้งสิ้น 939,687 ไร่ หรือ 1503 ตารางกิโลเมตร คิดเป็นร้อยละ 0.29 ของพื้นที่ป่าทั้งหมด

### 2.9.2 ปัจจัยแวดล้อมที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโต

ไม้ไผ่ เป็นพันธุ์ไม้ที่มีการเจริญเติบโตผิดแปลกกว่าไม้ชนิดอื่น หน่อไม้ไผ่จะพุ่งตัวเจริญเติบโตทางความ สูงเต็มที่ภายในปีเดียว โดยเริ่มเจริญในช่วงต้นฤดูฝนและสิ้นสุด เมื่อหมดฝน หลังจากนั้นจะไม่มีการเจริญเติบโตทางความสูงเพิ่มขึ้น แต่จะมีการเปลี่ยนแปลงทางด้านอื่น เช่น การแตกกิ่ง แขนงและใบ เพื่อเตรียมการสะสมอาหารต่อไป ไผ่ในธรรมชาติจะเจริญเติบโตได้ดีในป่าผสมผลัดใบในป่า เขตร้อนหรือในป่าที่ไม่ผลัดใบ เช่น ป่าดงดิบเขา โดยเฉพาะพื้นที่ซึ่งมีปริมาณฝนตกอยู่ระหว่าง 1000 มิลลิเมตรต่อปี เป็นต้น

### 2.9.3 ประเภทของไม้

การแบ่งประเภทของไม้ได้เป็น 3 กลุ่มใหญ่ ๆ ดังนี้ คือ

- (1) ไม้ที่ใช้อยู่ในการ อุปโภค-บริโภค
- (2) ไม้ที่หลากหลายสี เช่น ดำ เหลือง ทอง แดง ม่วง ชมพู
- (3) ไม้ที่สวยงามแปลกตา เช่น ไม้เท้า ไม้เท้าลาย-ทอง

การจำแนกสายพันธุ์ไม้ที่พบในเมืองไทย [30]

- (1) สกุลอะรันดินาเรีย มีอยู่ 2 ชนิด คือ ไม้โจด และไม้เพ็ก (หญ้าเพ็ก)

ไม้โจด พบมากในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ลำต้นมีสีเขียวอมเทา มีความสูงประมาณ 5 เมตร ปล้องค่อนข้างสั้น 10-20 ซม. มีเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 7-10 มม. ไม่มีหนามหน่อมีสีเทาแกมเหลือง ลำต้นใช้ทำด้ามไม้กวาด จุดเด่นคือเหง้ามีลักษณะเด่นแปลกตา จึงนิยมมาทำเครื่องประดับภายในบ้าน อาจปลูกเป็นแนวรั้วและปลูกเป็นไม้ประดับในบริเวณบ้าน หน่อใช้รับประทานได้

ไม้เพ็กหรือหญ้าเพ็ก ไม้ชนิดนี้พบได้ในไทย เวียดนามและกัมพูชา ส่วนในประเทศไทยพบมากทางอีสาน เจริญได้ดีในเขตแห้งแล้ง จึงเกิดไฟไหม้ป่าไม้ชนิดนี้อยู่เป็นประจำ ลำต้นสูงไม่เกิน 3 เมตร มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 5-7 มม. ขนาดของปล้องมีความยาว 20-30 ซม. ขึ้นรวมเป็นกอ นิยมเอามาทำแผงตากสาหร่ายทะเล

- (2) สกุลแบบมูซ่า

แบ่งออกได้ 11 ชนิด คือ ไม้บง ไม้ป่า (ไม้หนาม) ไม้ลำมะลอก ไม้เหลือง (ไม้จันทน์) ไม้หอบ (ไม้หอม) ไม้เลียง ไม้สีสุก ไม้บงหวาน ไม้คันร่ม (ไม้เปร็ง) ไม้ดำ (ไม้ตาดำ) และไม้เท้า

ไม้บง พบได้ทั่วไปตามป่าดงดิบ เป็นไม้ขนาดใหญ่ เส้นผ่าศูนย์กลางของปล้อง 6-10 ซม. ความยาวปล้อง 20-30 ซม. สูงประมาณ 9-12 เมตร ลำต้นนิยมใช้ทำเสื่อลำแพนและเยื่อกระดาษ หน่ออ่อนนิยมมารับประทาน แม้จะมีรสขมอยู่บ้าง

ไม้ป่า หรือไม้หนาม พบได้ทุกภูมิภาคของประเทศ ต้นอ่อนมีสีเขียวเข้ม เมื่อแก่จัดมีสีเขียวมเหลือง เป็นไม้ขนาดใหญ่ มีหนามคมและขนมาก เส้นผ่าศูนย์กลางของปล้อง 10-15 เซนติเมตร ลำต้นใช้ทำนั้งร้านในการก่อสร้างหรือทาสีอาคาร และทำเครื่องจักสานอื่น หน่อใช้รับประทานได้

ไผ่ล่ำมะลอก พบได้ในทุกภูมิภาคของประเทศ แต่ในภาคใต้จะพบน้อยกว่าภาคอื่น ลำต้นมีสีเขียวเข้ม ไม่มีหนาม ข้อเรียบ กิ่งก้านและใบเกิดที่บริเวณลำต้น สูงจากพื้นดิน 6-7 เมตร เส้นผ่าศูนย์กลาง 7-10 เซนติเมตร สูงเฉลี่ย 10-15 เมตร ลำต้นค่อนข้างไม่อัดแน่น นิยมนำมาใช้ทำนั้งร้านในการก่อสร้าง ทำเสาโป๊ะ เฟอร์นิเจอร์ และงานจักสารที่ไม่ต้องการความประณีต หน่อใช้รับประทานได้

ไผ่เหลือง หรือ ไผ่จีน ไผ่ชนิดนี้สันนิษฐานว่านำเข้ามาจากประเทศจีน จึงไม่พบทั่วไป ลำต้นมีสีเหลือง มีลายเส้นเป็นแถบสีเขียว พากตามความยาวของปล้อง ผิวเกลี้ยง มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 5-10 เซนติเมตร ความยาวปล้องประมาณ 20-25 เซนติเมตร ความสูงเฉลี่ย 10-15 เมตร หน่อมีสีเหลืองอ่อน นิยมนำมาปลูกเป็นไม้ประดับ เนื่องจากลำต้นมีสีเขียวงาม หน่อใช้บริโภคได้แต่ไม่เป็นที่นิยม

ไผ่หอบ หรือ ไผ่หอม พบมากที่จังหวัดเชียงราย ลำต้นสูงประมาณ 10 เมตร มีเส้นผ่าศูนย์กลางของปล้อง 7.5-15 เซนติเมตร และยาว 40 เซนติเมตร ใบมีขน เมื่อสัมผัสผิวหนังจะรู้สึกระคายเคืองและคัน ลำต้นใช้ประโยชน์ได้น้อย หน่อมีรสขม จึงไม่มีการนำมารับประทาน

ไผ่เลี้ยง พบมากในภาคกลาง ลำต้นมีสีเขียวสด เป็นไผ่ขนาดเล็ก ปล้องมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 2-3 เซนติเมตร และยาว 20-25 เซนติเมตร ลำต้นไม่มีหนาม นิยมใช้ทำคั้นเบ็ดและส่วนประกอบของเฟอร์นิเจอร์ ลำต้นแข็งแรง เนื้อตันเกือบไม่มีช่องว่างภายใน บางแห่งนิยมปลูกเป็นไม้ประดับ หน่อรับประทานได้ แต่ไม่นิยมรับประทาน

ไผ่สีสุก พบได้ทั่วไป แต่พบมากในบริเวณภาคกลางของประเทศ เป็นไผ่ชนิดที่สูงใหญ่ ลำต้นสีเขียวสด หน่อสีเทาอมเขียว ปล้องมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 7-10 เซนติเมตร ยาว 10-30 เซนติเมตร บริเวณข้อมีกิ่งคล้ายหนามหน่อมีขนาดใหญ่ มีขนสีน้ำตาล น้ำหนักหน่อประมาณ 3-4 กิโลกรัม ไผ่ชนิดนี้มีเนื้อหนาแข็งแรง ทนทานและเหนียว จึงนิยมนำไปใช้ประโยชน์มากกว่าไผ่ชนิดอื่น ๆ ไม่ว่าจะทำเครื่องจักสาร เฟอร์นิเจอร์ นั้งร้านในการก่อสร้าง และนอกจากนี้ส่วนโคนของลำต้นยังนิยมใช้ทำไม้คานสำหรับหาบหามได้ดีมาก

ไผ่บงหวาน พบได้ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ และพบมากที่สุดที่จังหวัดเลย ลำต้นอ่อนมีสีเขียวใบไม้ เมื่อแก่มีสีเขียวเข้ม เส้นผ่าศูนย์กลางของปล้อง 5-8 เซนติเมตร สูง 5-10 เมตร มีหน่อสีเขียว น้ำหนักประมาณครึ่งกิโลกรัม ลำต้นนิยมนำมาทำดอกมัดสิ่งของ ทำไม้ค้ำยัน บันไดและเครื่องจักสาน หน่อมีรสหวานหอมอร่อย นิยมนำมาประกอบอาหารได้หลากชนิด

ไผ่คั่นร่ม หรือ ไผ่เปรี้ง พบมากที่จังหวัดปราจีนบุรี ตราด และระยอง ลำต้นอ่อนมีสีเขียวไปไม้ เมื่อแก่จัดสีเขียวเข้ม เส้นผ่าศูนย์กลางของปล้อง 3-5 เซนติเมตร ต้นสูง 8-10 เมตร หน่อมีสีเขียวอมเทา แต่เลือกหน่อจะมีสีแดง ลำต้นมีเนื้อหนา จึงนิยมนำมาทำบันไดโป๊ะ และหลักของการเลี้ยงหอยแมลงภู

ไผ่ดำ หรือ ไผ่ตาดำ พบมากในป่าดิบ แถบจังหวัดกาญจนบุรี และจันทบุรี ต้นมีสีเขียวคล้ำเกือบเป็นสีดำ ไม่มีหนาม เส้นผ่าศูนย์กลางของปล้อง 7-10 เซนติเมตร และยาว 30-40 เซนติเมตร สูง 10-12 เมตร มีเนื้อหนา นิยมนำลำต้นไปใช้ทำนั้งร้านก่อสร้างและเครื่องจักสานต่าง ๆ หน่อใช้รับประทานได้

ไผ่น้ำเต้า พบได้ทั่วไป เป็นไผ่ที่มีปล้องสั้น ลำมีสีเขียว อาจมีแถบสีเหลืองตามปล้อง และจะโป่งออกตอนกลางปล้องและตอนกลางของกิ่ง ปล้องมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 4-8 เซนติเมตร สูง 3-4 เมตร แขนงแตกออกจากต้นที่สูงจากระดับพื้นดินประมาณ 1.5 เมตร หน่อมีสีเหลือง ไผ่ชนิดนี้เชื่อว่านำเข้ามาจากประเทศจีน ไผ่น้ำเต้าส่วนใหญ่นิยมปลูกเป็นไม้ประดับในบริเวณบ้านหรือปลูกในกระถางไว้โชว์

(3) สกุลเซฟาโลสทาคียม มี 2 ชนิด คือ ไผ่ข้าวหลาม ไผ่เฮียะ หรือ ไผ่เหียะ

ไผ่ข้าวหลาม พบมากบริเวณตอนเหนือของจังหวัดกาญจนบุรีและภาคตะวันออกเฉียงเหนือบางส่วน มีปล้องยาว 30 เซนติเมตร เส้นผ่าศูนย์กลางของลำไผ่เฉลี่ย 5-7.5 เซนติเมตร ลำไผ่มีสีเขียวอมเทา มีความสูงเฉลี่ยระหว่าง 7-8 เมตร หน่อมีขนาดใหญ่ กาบน้ำสีหมากสุก ต้นไผ่นิยมนำมาทำกระบอกรับข้าวหลาม หน่อรับประทานได้แต่ไม่เป็นที่นิยม

ไผ่เฮียะ หรือ ไผ่เหียะ ลำไผ่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 5-10 เซนติเมตร ปล้องยาว 50-70 เซนติเมตร ข้อเรียบ มีกิ่งเพียงเล็กน้อย เนื้อหนาประมาณ 1-2 เซนติเมตร มีความสูง 10-18 เมตร ลำต้นนำไปทำโครงสร้างบ้านเรือนและเครื่องจักสานต่าง ๆ หน่อรับประทานได้แต่ไม่เป็นที่นิยมกัน

(4) สกุลเดนโตรคาลัส ได้แก่ ไผ่ชาง หรือ ไผ่ฉาว หรือ ไผ่ปล้อง ไผ่หก หรือ ไผ่ฉาวใหญ่ ไผ่เปาะ หรือ ไผ่เปราะ ไผ่ตง

ไผ่ชาง หรือ ไผ่ฉาว หรือ ไผ่ปล้อง พบในป่าดิบทั่วไป ลำต้นมีสีเขียวฉาว ปล้องยาว 50-70 เซนติเมตร มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 3-12 เซนติเมตร ลำต้นสูง 8-10 เมตร ไม่มีหนาม หน่อมีสีน้ำตาลปนส้มและมีขนสีน้ำตาล ไผ่ชนิดนี้เนื้ออ่อนและเหนียว สามารถจักตอกเป็นเส้นเล็ก ๆ ได้ จึงนิยมนำมาใช้ทำเครื่องจักสานที่ต้องการรายละเอียดสูง หน่อรับประทานได้ ไผ่ชางหรือไผ่ฉาว พบมากที่สุด

ภาคเหนือ และภาคกลางของประเทศ ลำต้นใช้ทำนั้งร้านก่อสร้าง ทำเครื่องจักสาน และเยื่อกระดาษ หน่อใช้รับประทานได้

ไผ่หก หรือ ไผ่वलใหญ่ พบมากในภาคเหนือและจังหวัดกาญจนบุรี ไผ่ชนิดนี้ลำต้นมีสีเขียวมเทา และมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 15-20 เซนติเมตร ปล้องมีความยาว 40-50 เซนติเมตร ลำต้นสูงประมาณ 10-15 เมตร ลำต้นนำมาทำเพื่อกระดาษ และเครื่องจักสานต่าง ๆ หน่อใช้รับประทานได้แม้มีรสขมอยู่บ้าง

ไผ่เปาะ หรือ ไผ่เปราะ พบที่ภาคเหนือและภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ลำต้นมีสีเขียว มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 10-20 เซนติเมตร เนื้อแข็งเปราะ ข้อเรียบ ปล้องยาวประมาณ 30 เซนติเมตร ลำต้นสูงถึง 30 เมตร หน่อมีขนาดใกล้เคียงกับลำต้นและมีสีเหลืองอมขาว ไผ่ชนิดนี้นิยมนำมาทำกระบอกข้าวหลาม ไม่นิยมนำมาทำเครื่องจักสาน เนื่องจากมีเนื้อแข็งและเปราะ

ไผ่ตง มีมากในจังหวัดปราจีนบุรี ไผ่ตงเป็นไผ่ขนาดใหญ่ ลำต้นมีเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 6-15 เซนติเมตร ปล้องยาว 20 เซนติเมตร ปล้องยาว 20 เซนติเมตร ไม่มีหนาม โคนต้นมีลายสีขาวสลับเทา ลำต้นมีขนสั้น ๆ ขึ้นอยู่ หน่อมีน้ำหนักประมาณ 3-10 กิโลกรัม ไผ่ตงแบ่งออกเป็น ไผ่ตงเขียว ไผ่ตงดำ ไผ่ตงหม้อ และไผ่ตงหนู เนื้อไม้นิยมนำมาใช้ทำเครื่องจักสานและไม่จิ้มฟัน หน่อนิยมนำมาปรุงอาหารได้หลากชนิด

(5) สกกุลไดโนเคลลา ได้แก่ ไผ่ลาน หรือไผ่เลื้อย

ไผ่ลาน หรือ ไผ่เลื้อย พบมากในภาคใต้ของประเทศ ลำต้นมีลักษณะคล้ายเถาวัลย์ เลื้อยหรือพาดไปตามต้นไม้ที่อยู่ใกล้เคียง ลำต้นมีสีเขียว เส้นผ่าศูนย์กลางองต้นไผ่ประมาณ 1 เซนติเมตร เนื้อบาง ใบและลำต้นมีขนสีน้ำตาลเป็นจำนวนมาก ปล้องยาว 10 -20 เซนติเมตร ไผ่ชนิดนี้นิยมนำไปใช้เป็นส่วนประกอบสมุนไพรรักษาโรค

(6) สกกุลจิกแอนโทเคลลา ได้แก่ ไผ่มัน หรือไผ่เปาะ ไผ่ไร่ ไผ่โล่ ไผ่แฉะ หรือไผ่คาย ไผ่ภาค ไผ่คายดำ ไผ่บงคาย

ไผ่มัน หรือ ไผ่เปาะ พบมากในภาคใต้ของประเทศ ลำต้นมีสีเขียวมัน ไม่มีหนาม เส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ย 8-10 เซนติเมตร ปล้องยาว 30-40 เซนติเมตร ทรงกอโปร่ง ลำต้นสูง 10 -15 เมตร หน่อมีสีน้ำตาลแก มีน้ำหนักเฉลี่ย 3-4 กิโลกรัม ลำไผ่ใช้ทำส่วนประกอบโครงสร้างบ้านเรือน และเครื่องจักรสานต่าง ๆ หน่อใช้รับประทานได้



ไผ่ไร่ พบได้ทุกภาคของประเทศ ลำต้นมีสีเขียวปนเทา ผิดสาก แต่ไม่มีหนาม มีขนทั่วลำต้น เป็นไผ่ขนาดเล็ก มีเส้นผ่าศูนย์กลางของลำต้นเพียง 1.5-2.5 เซนติเมตร ปล้องยาว 30 เซนติเมตร การแตกกอหนาแน่นมาก นิยมนำมาใช้ค้ำยัน หรือทำเสาหลักในการเกษตรบางชนิด

ไผ่ไล่ล่อ ลำต้นสีเขียวอ่อน พบมากที่ภาคเหนือ ขณะแทงกิ่งผลิบ ใบ ต้นไผ่กาบจะหลุดออกมาหมด มีเส้นผ่านศูนย์กลางของลำต้น 3-8 เซนติเมตร และมีปล้องยาว 14-50 เซนติเมตร ลำไผ่ นิยมนำมาทำรั้วบ้าน คอกสัตว์ และทำเครื่องเรือนได้ดี หน่อใช้รับประทานได้ แต่ไม่เป็นที่นิยมกัน

ไผ่แนะ หรือ ไผ่ค้าย พบมากในป่าดิบภาคใต้ มีลำต้นสีเขียว เส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 2-3 เซนติเมตร ปล้องยาว 30-35 เซนติเมตร มีความสูงเพียง 3-4 เมตร หน่อมีสีเหลือง ลำไผ่ใช้ทำเฟอร์นิเจอร์ หน่อใช้รับประทานได้ ไผ่ตากวาง พบในป่าดิบภาคใต้ ผิวลำต้นเกลี้ยง สีเขียวอมเหลือง มีเส้นผ่านศูนย์กลางของลำไผ่ 4-6 เซนติเมตร ปล้องยาว 30-40 เซนติเมตร สูงประมาณ 5 เมตร ลำต้นใช้ทำเฟอร์นิเจอร์ หน่อใช้รับประทานได้

ไผ่ผาก พบมากที่ภาคใต้และจังหวัดกาญจนบุรี มีลำต้นสีเขียว ไม่มีหนาม ไผ่ชนิดนี้เป็นไผ่ขนาดใหญ่ มีเส้นผ่านศูนย์กลางของลำไผ่ 10-13 เซนติเมตร มีหน่อขนาดใหญ่ มีน้ำหนัก 2-3 กิโลกรัม ลำไผ่ทำแข่งใส่ถ่านเพื่อจำหน่าย เครื่องใช้ในครัวและเยื่อกระดาษ หน่อมีรสขม ก่อนนำมาประกอบอาหารต้องต้มในน้ำร้อนและเททิ้ง 1-2 ครั้ง ก็ใช้ได้

ไผ่ค้ายดำ พบที่จังหวัดกาญจนบุรีและระนอง ลำต้นมีสีเขียวเข้ม ปล้องห่าง ข้อใหญ่ ไม่มีหนาม เป็นไผ่ที่มีลำต้นสูงใหญ่ เส้นผ่านศูนย์กลางของลำไผ่ประมาณ 7-10 เซนติเมตร หน่อมีสีเขียว ไผ่ชนิดนี้ใช้ประโยชน์ได้น้อย ไม่เหมาะนำมาใช้ประโยชน์ เนื่องจากเนื้อไผ่เปราะหักง่าย หน่อมีรสขม จำไม่นิยมนำมาประกอบอาหาร

ไผ่บงค้าย พบมาที่จังหวัดเชียงราย ลำต้นมีสีเขียวอ่อน ข้อปล้องมี 2 ชั้น ชั้นล่างเรียบ ส่วนชั้นบนมีปมราก ข้อต่อมีสีเขียวหม่น เส้นผ่านศูนย์กลางของลำไผ่ 5-8 เซนติเมตร และยาว 40-50 เซนติเมตร ลำต้นสูงประมาณ 10-13 เมตร ลำต้นใช้ทำเครื่องจักสานได้ดี หน่อไม่นิยมนำมาประกอบอาหารเนื่องจากมีรสขม

#### (7) สกุลมีโกลแคนนา

ไผ่เกรียบ พบในป่าดิบทั่วไป เป็นไผ่มีลำต้นขนาดใหญ่ เส้นผ่านศูนย์กลาง 8-15 เซนติเมตร ปล้องยาว 50-120 เซนติเมตร เนื้อหนาเฉลี่ยครึ่งเซนติเมตร ข้อเรียบ แขนงเล็ก ต้นสูง

10 - 15 เมตร หน่อมี่ขนาดใหญ่ สีเขียวกาบสีเหลืองอมส้ม บริเวณข้อมีสีแดง ใฝ่ชนิดนี้นำมาใช้ประโยชน์ได้น้อย ส่วนใหญ่ปลูกไว้ประดับสวน

(8) สกุลนีโอฮูซัว

ใฝ่หลุด พบที่จังหวัดตราด ลำต้นสีเขียวเป็นมัน ใฝ่ชนิดนี้เป็นใฝ่ขนาดเล็ก ปล้องยาว 10-15 เซนติเมตร มีความสูงเพียง 4 เมตร หน่อมี่ขนาดเล็ก สีเทาในอดีตนิยมนำมาทำหลอดด้าย แต่เนื่องจากมีการนำสารสังเคราะห์มาใช้ทดแทน ปัจจุบันจึงไม่มีการนำมาทำหลอดด้ายอีก

(9) สกุลชูโตซาซา พบมาในจังหวัดเพชรบูรณ์ มีเพียงชนิดเดียว แต่ยังไม่มีการศึกษาในรายละเอียด

(10) สกุลไซโซสตาเคียม มี 3 ชนิด คือ ใฝ่โป และใฝ่เฮียะ พบมากที่จังหวัดนครศรีธรรมราช และจังหวัดตรัง แต่ยังไม่มีการศึกษาในรายละเอียด

(11) สกุลเทียโนสตาเคียม มี 2 ชนิด คือ ใฝ่เฮียะเครือ และใฝ่บงเลื้อย พบที่จังหวัดแม่ฮ่องสอน และจังหวัดใกล้เคียง ยังไม่มีการศึกษาในรายละเอียด

(12) กสกุลไซโซสตาซัส มี 2 ชนิด คือ ใฝ่รวก พบมากที่จังหวัดกาญจนบุรี เป็นใฝ่ที่มีลำต้นขนาดเล็ก มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 2-7 เซนติเมตร สูงประมาณ 5-10 เมตร แตกกอเป็นพุ่มแน่นพอประมาณ ลำต้นนิยมนำวัสดุก่อสร้าง ไม้ค้ำยันต้นไม้และใช้ทำเอื้องกระดาษ หน่อใช้รับประทานได้ ส่วนใหญ่เก็บถนอมด้วยวิธีทำหน่อไม้ปิบ และใฝ่รวกดำ พบมากในภาคเหนือ ลำต้นมีสีเขียวเข้ม ผิวเรียบเป็นมัน มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 4-7 เซนติเมตร ปล้องยาว 23-30 เซนติเมตร ลำต้นสูง 10-15 เมตร เนื่องจากลำต้นมีเนื้อไม้แข็งแรง ทนทาน จึงนิยมนำมาทำโครงรถกระบะและพัด เครื่องประดับอื่น ๆ และเฟอร์นิเจอร์ หน่อรับประทานได้ แต่ไม่นิยม

## 2.10 ถ่านหินในประเทศไทย

ถ่านหิน (coal) เป็นเชื้อเพลิงธรรมชาติ ที่ประกอบด้วยสารคาร์บอนไม่น้อยกว่าร้อยละ 50 โดยปริมาณ ซึ่งเกิดจากซากพืชหรือการเปลี่ยนแปลงตามธรรมชาติของพันธุ์ไม้ต่าง ๆ ที่สะสมตัวอยู่ในแอ่งตะกอน นับเป็นเวลาหลายร้อยล้านปี เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงของผิวโลก เช่น ภูเขาไฟระเบิด เกิดแผ่นดินไหว หรือมีการทับถมของตะกอนมากขึ้น ส่งผลให้แหล่งสะสมตัวได้รับความกดดันและ

ความร้อนที่มีอยู่ภายในโลกเพิ่มขึ้น ซากพืชเหล่านั้นก็จะเกิดการเปลี่ยนแปลงกลายเป็นถ่านหินชนิดต่าง ๆ

### 2.10.1 แหล่งถ่านหินที่พบในประเทศไทย[31]

พีต (Peat) มีคาร์บอน 60%

ลักษณะ : เป็นลำดับแรกของการเกิดถ่านหิน เป็นถ่านหินที่ยังเห็นเป็นลักษณะซากพืช เมื่อแห้งจะติดไฟได้ดี เช่นเดียวกับถ่านไม้

แหล่งที่พบ : ส่วนมากจะพบในที่ราบน้ำขึ้นถึง ป่าชายเลนพรุ และหนองน้ำ พีตที่เป็นชั้นหนามักจะพบในป่าพรุ เช่น พรุท่าสะท้อน จังหวัดสุราษฎร์ธานี พรุที่อำเภอเชียรใหญ่ จังหวัดนครศรีธรรมราช และพรุโต๊ะแดง จังหวัดนราธิวาส

ลิกไนต์ (Lignite) มีคาร์บอน 55-60%

ลักษณะ : ซากพืชในพีตสลายตัวหมด ไม่เห็นโครงสร้างของพืช มีสีเข้ม เนื้อแข็ง มีความชื้นต่ำ ใช้เป็นเชื้อเพลิงในโรงงานผลิตปูนซีเมนต์ โรงงานไฟฟ้า ใช้บ่มใบยา

แหล่งที่พบ : แหล่งลิกไนต์ที่ทำการผลิตแล้ว ได้แก่ที่อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ที่คลองขนาน อำเภอเมือง จังหวัดกระบี่ นอกจากนี้ยังพบที่อำเภอสะบ้าย้อย จังหวัดสงขลา อำเภอเวียงแหง จังหวัดเชียงใหม่ และอำเภอเคียนซา จังหวัดสุราษฎร์ธานี

ซับบิทูมินัส (Subbituminous)

ลักษณะ : เป็นถ่านหินที่ใช้เวลาในการเกิดนานกว่าลิกไนต์ มีสีน้ำตาลถึงสีดำ ผิวมีทั้งด้านและเป็นมัน มีทั้งเนื้ออ่อนและเนื้อแข็ง มีความชื้นประมาณร้อยละ 25 - 30 มีคาร์บอนสูงกว่าลิกไนต์ เป็นเชื้อเพลิงที่มีคุณภาพเหมาะสมในการผลิตกระแสไฟฟ้าและงานอุตสาหกรรม

บิทูมินัส (Bituminous) มีคาร์บอน 80-90%

ลักษณะ : คุณภาพดีกว่าลิกไนต์ และเมื่อเผาไหม้แล้วจะให้ค่าความร้อนสูง แต่มีสารระเหยติดอยู่ด้วย ใช้เป็นเชื้อเพลิงในโรงงานอุตสาหกรรม และโรงงานไฟฟ้า

แหล่งที่พบ : พบที่อำเภอสี จังหวัดลำพูน และอำเภอแม่ระมาด จังหวัดตาก

แอนทราไซต์ (Anthracite) มีคาร์บอนมากกว่า 86%

ลักษณะ : เป็นถ่านหินที่มีการแปรสภาพสูงสุด เนื่องจากแรงกดดันและความร้อนภายใต้ผิวโลก ทำให้น้ำและสารระเหยต่าง ๆ ในพีชหมดไป เหลือแต่คาร์บอน มีเนื้อแข็งสีดำ วาวแบบกึ่งโลหะ มันแตกแบบก้นหอย ติดไฟยาก เมื่อเผาไหม้จะให้ค่าความร้อนสูง ให้เปลวไฟสีน้ำเงิน ไม่มีควัน ใช้เป็นเชื้อเพลิงในอุตสาหกรรมต่าง ๆ

แหล่งที่พบ : ในประเทศไทยส่วนมากเป็นเขมิแอนทราไซต์ พบที่อำเภอนาด่าง และอำเภอนากลาง จังหวัดเลย

### 2.10.2 การใช้ประโยชน์จากถ่านหิน[32]

ถ่านหินที่นำมาใช้ในภาคอุตสาหกรรมใช้ภายในประเทศไทยมี 2 ภาค ได้แก่ การผลิต คือ ภาคการผลิตไฟฟ้า (Power Sector) และภาคอุตสาหกรรม (Non-power Sector or Industrial Sector) เชื้อเพลิงถ่านหินจะถูกนำไปเผาไหม้ในหม้อไอน้ำเพื่อนำความร้อนไปผลิตไฟฟ้าหรือผลิตไอน้ำเช่น อุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ โรงบ่มยาสูบ อุตสาหกรรมสิ่งทอ เคมีภัณฑ์ ฯลฯ

ในการใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงมักเกิดปัญหาในเรื่องของสิ่งแวดล้อมตามมา เนื่องจากเชื้อเพลิงถ่านหินยังไม่เป็นที่ยอมรับจากประชาชน ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องหาเทคโนโลยีที่มีช่วยทำให้มลพิษการใช้ถ่านหินลดลง ปัจจุบันมีเทคโนโลยีใหม่ที่เรียกว่า เทคโนโลยีถ่านหินสะอาด (Clean coal technology : CCT) เทคโนโลยีแต่ละชนิดอาจมีความเหมาะสมต่อสมบัติถ่านหินแตกต่างกันไป บางเทคโนโลยีสามารถประยุกต์ใช้ได้กับถ่านหินคุณภาพต่ำและสูง ในขณะที่บางเทคโนโลยีสามารถใช้ได้เฉพาะถ่านหินที่มีคุณภาพค่อนข้างดี ดังนั้นการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีถ่านหินสะอาดจึงเป็นสิ่งจำเป็นและสามารถ เลือกใช้เทคโนโลยีรองรับที่เหมาะสมตามสมบัติของถ่านหินที่มีได้

## 2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

วัลยา วิศาลบรรณวิทย์ [5] ศึกษาการผลิตถ่านกัมมันต์จากเปลือกทุเรียนและเปลือกมังคุด ชั้นแรกนำเปลือกทุเรียนและเปลือกมังคุดไปคาร์บอนไนซ์ในเตาเผาที่ให้ความร้อนสูง แล้วนำไปกระตุ้น โดยใช้ไอน้ำร้อนยิ่งยวดเป็นสารกระตุ้น ผลการทดลองพบว่าภาวะที่เหมาะสมของการคาร์บอนไนซ์เปลือกทุเรียนและเปลือกมังคุดเป็นถ่านชาร์ คือ ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที และที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เวลา 60 นาที ตามลำดับ และภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการกระตุ้นถ่านกัมมันต์จากเปลือกทุเรียน คือ ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เวลา 60 นาที ส่วนเปลือกมังคุดได้ภาวะที่เหมาะสมที่สุด คือ ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เวลา 90 นาที ซึ่งพบว่าทั้งอุณหภูมิและเวลาในการกระตุ้นมีผลต่อการพัฒนาโครงสร้างรูพรุนของถ่านกัมมันต์ ดังนั้นถ่านกัมมันต์จากเปลือกทุเรียนและถ่านกัมมันต์จากเปลือกมังคุดมีค่าการดูดซับไอโอดีน 787.48 และ 824.57 มิลลิกรัมต่อกรัม ค่าการดูดซับเมทิลีนบลู 237.16 และ 243.89 มิลลิกรัมต่อกรัม มีค่าพื้นที่ผิว 979.42 และ 992.71 ตารางเมตรต่อกรัม และได้ค่าการกำจัดสีในโมลาส 95.88 และ 98.60 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งผลการทดลองครั้งนี้ได้ค่าที่สูงกว่าถ่านกัมมันต์ทางการค้า

ณัฐวิภา จงรัก [6] ศึกษาการผลิตถ่านกัมมันต์จากเมล็ดลำไยซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากโรงงานผลิตลำไยอบแห้งในประเทศไทย จากผลการทดลอง พบว่า ภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมถ่านกัมมันต์จากเมล็ดลำไย คือ ที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักของเมล็ดลำไยต่อซิงค์คลอไรด์ เท่ากับ 1:2 ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียสและเวลา 180 นาที ที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักของเมล็ดลำไยต่อโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 1:3 ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 120 นาที จากภาวะที่เหมาะสมทำให้ได้ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากเมล็ดลำไยโดยใช้ซิงค์คลอไรด์เป็นสารกระตุ้นและใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นสารกระตุ้น ได้ค่าการดูดซับไอโอดีนสูงสุด เท่ากับ 826.95 และ 839.62 มิลลิกรัมต่อกรัม ค่าการดูดซับเมทิลีนบลูสูงสุด เท่ากับ 225.65 และ 243.37 มิลลิกรัมต่อกรัม และมีค่าพื้นที่ผิวสัมผัส เท่ากับ 1032.75 และ 1098.62 ตารางเมตรต่อกรัม ตามลำดับ สำหรับการทดสอบไอโซเทอมการดูดซับแบบพุนดลิตซ์ พบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ของถ่านกัมมันต์จากเมล็ดลำไยที่กระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ สามารถกำจัดได้สูงสุดที่ค่าพีเอช เท่ากับ 7 ซึ่งมีค่า เท่ากับ 67.08 และ 67.85 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าสูงกว่าถ่านกัมมันต์ทางการค้า

อลิสรา นิติวัดนะ [7] ศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์จากกะลาแมคาเดเมีย เมื่อศึกษาการสลายตัวทางความร้อนของกะลาแมคาเดเมีย พบว่าเกิดการสลายตัวทางความร้อน 3 ช่วง ในช่วงอุณหภูมิ 100 - 180 องศาเซลเซียส เป็นการกำจัดน้ำออกจากโครงสร้าง ช่วงที่ 2 และ 3 แสดงถึงการสลายตัวขององค์ประกอบทางเคมีของชีวมวล ที่ช่วงอุณหภูมิ 220 ถึง 315 องศาเซลเซียส แสดงการสลายตัวของเฮมิเซลลูโลส ช่วงที่ 315 - 400 องศาเซลเซียส แสดงการสลายตัวของเซลลูโลสและช่วง

อุณหภูมิตั้งแต่ 160 - 900 องศาเซลเซียส แสดงการสลายตัวของลิกนิน และเมื่อทำการกระตุ้น พบว่า ถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยไอน้ำแบบใช้อากาศมีพื้นที่ผิวและความสามารถในการดูดซับที่ดีกว่าถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยไอน้ำ ซึ่งถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยไอน้ำแบบใช้อากาศ พบว่าโครงสร้างทางเคมีบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์แสดงความเป็นกรดบนหมู่ฟังก์ชันของถ่านกัมมันต์ ค่าความเป็นกรดเบสที่พื้นผิวประจุเป็นศูนย์ของถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยไอน้ำแบบใช้อากาศเท่ากับ 3.0 - 3.7 ดังนั้น จึงสรุปได้ว่ากะลาแมคาเดเมียเป็นวัตถุดิบที่มีศักยภาพในการผลิตถ่านกัมมันต์ด้วยวิธีการกระตุ้นทางกายภาพ โดยถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกะลาแมคาเดเมียมีพื้นที่ผิวรูพรุนสูง โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 476.7 ถึง 1022.0 ตารางเมตรต่อกรัม

รัชชัย ต้นเจริญทรัพย์ [23] ศึกษาสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากลิกไนต์โดยการกระตุ้นทางเคมีและทางกายภาพ โดยวิธีแรกเป็นการกระตุ้นทางเคมี ใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นสารกระตุ้น โดยศึกษาถึงผลของอัตราส่วนสารกระตุ้นต่อถ่านซาร์ 0.7:1 อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เวลา 4 ชั่วโมง ที่ขนาดอนุภาค 0.50-0.85 มิลลิเมตร สมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ได้ คือ ร้อยละผลิตภัณฑ์ 50.87 ความหนาแน่นเชิงปริมาตร 0.318 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ร้อยละปริมาณเถ้า 14.61 ค่าการดูดซับไอโอดีน 846 มิลลิกรัมต่อกรัม ค่าการดูดซับเมทิลีนบลู 229 มิลลิกรัมต่อกรัม ค่าพื้นที่ผิวบีอีที 1292 ตารางเมตรต่อกรัม วิธีที่สองเป็นการกระตุ้นทางกายภาพ ใช้ก๊าซคาบอนไดร็อกไซด์กับไอน้ำเป็นสารกระตุ้น พบว่าที่ที่ขนาดอนุภาค 0.50 -0.85 มิลลิเมตร อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส และเวลา 4 ชั่วโมง เป็นภาวะที่เหมาะสมโดยมีสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ได้ คือ ร้อยละผลิตภัณฑ์ 60.42 ความหนาแน่นเชิงปริมาตร 0.544 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ร้อยละปริมาณเถ้า 26.87 ค่าการดูดซับไอโอดีน 242 มิลลิกรัมต่อกรัม ค่าการดูดซับเมทิลีนบลู 41 มิลลิกรัมต่อกรัม จากการเปรียบเทียบสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จากทั้งสองวิธี พบว่าการเตรียมถ่านกัมมันต์จากลิกไนต์โดยการกระตุ้นทางเคมีจะให้สมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ดีกว่าการกระตุ้นทางกายภาพและมีค่าใกล้เคียงกับถ่านกัมมันต์เกรดการค้า

Terachai Suravattanasakul [33] ศึกษาการผลิตถ่านกัมมันต์จากกะลาปาล์มน้ำมันโดยไพโรไลซิสและการกระตุ้นด้วยไอน้ำในขั้นตอนเดียว ในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง ผลการทดลองพบว่าภาวะที่เหมาะสมในการผลิต คือ ใช้กะลาปาล์มน้ำมันขนาด 1.18 - 2.36 มิลลิเมตร ที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส เวลาที่ใช้กระตุ้น 2 ชั่วโมงและอัตราการไหลของอากาศ 0.72 ลิตรต่อนาที โดยใช้ไอน้ำเป็นสารกระตุ้น ซึ่งถ่านกัมมันต์ที่ได้มีร้อยละผลิตภัณฑ์ 19.66 ความหนาแน่นเชิงปริมาตร 0.5160 มิลลิกรัมต่อกรัม ค่าเถ้า 6.03% ค่าการดูดซับไอโอดีน 620.16 มิลลิกรัมต่อกรัม ค่าการดูดซับเมทิลีนบลู 176.75 มิลลิกรัมต่อกรัมและพื้นที่ผิวรูพรุน 559.48 ตารางเมตรต่อกรัม

Yan และคณะ [34] ศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์จากถ่านหินบิทูมินัสที่ถูกกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ซึ่งพบว่าตัวแปร (อัตราส่วนโดยมวลระหว่างโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์

ไซต์ต่อถ่านหินปิโตรลิมัส, อุณหภูมิกระตุ้น, เวลาที่ใช้ในการกระตุ้น และอัตราการไหลไนโตรเจน) ส่งผลต่อกระบวนการกระตุ้นถ่านกัมมันต์ ซึ่งพบว่าภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมถ่านกัมมันต์จากถ่านหินปิโตรลิมัส คือ อัตราส่วนโดยมวลระหว่างโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์/ถ่านหินปิโตรลิมัส 4:1, อุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการกระตุ้น 800 องศาเซลเซียส, เวลาที่เหมาะสมในการกระตุ้น 2 ชั่วโมงและอัตราการไหลไนโตรเจน 400 มิลลิลิตรต่อนาที ซึ่งพบว่ามีพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนสูงสุด

Li-Yeh Hsu และคณะ [35] ศึกษาการผลิตถ่านกัมมันต์จากถ่านหินปิโตรลิมัสด้วยวิธีการกระตุ้นทางเคมี โดยใช้สารกระตุ้น ดังนี้ ซิงค์คลอไรด์ ( $ZnCl_2$ ) กรดซัลฟิวริก ( $H_2SO_4$ ) และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) พบว่าการกระตุ้นโดยใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นสารกระตุ้นปริมาณร้อยละผลิตภัณฑ์ที่ได้ลดลงมากกว่าการใช้สารกระตุ้นจากซิงค์คลอไรด์และกรดซัลฟิวริก เนื่องจากขณะกระตุ้นโครงสร้างเกิดการสลายตัวหรือแตกตัว ทำให้เกิดการจัดเรียงโครงสร้างใหม่ที่มีรูพรุนขึ้น โดยเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น รูพรุนก็เพิ่มขึ้นเช่นกัน ทำให้ได้พื้นที่ผิวสูงขึ้น จากกระบวนการกระตุ้นโดยใช้สารกระตุ้นเป็นซิงค์คลอไรด์ กรดซัลฟิวริกและโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ได้พื้นที่ผิวสูงสุดอยู่ที่ 960 770 และ 3300 ตารางเมตรต่อกรัม ตามลำดับ จึงสรุปได้ว่าซิงค์คลอไรด์และกรดซัลฟิวริกนั้นไม่เหมาะสมกับการนำมากระตุ้นกับถ่านหินปิโตรลิมัส ในขณะที่การใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นสารกระตุ้นที่มีความเป็นเบส พบว่าสามารถทำปฏิกิริยากับโครงสร้างได้ดี ทำให้รูพรุนเพิ่มขึ้น พื้นที่ผิวก็เพิ่มขึ้นเช่นกัน

Mui และคณะ [36] ศึกษาถ่านกัมมันต์ที่เตรียมด้วยไม้ไผ่ด้วยวิธีการกระตุ้นทางเคมีด้วยกรดไฮโดรคลอริก (HCl), กรดไนตริก ( $HNO_3$ ), กรดซัลฟิวริก ( $H_2SO_4$ ) งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาตัวแปรดังต่อไปนี้ อุณหภูมิที่ใช้กระตุ้น, สัดส่วนการอิมเพรกเนชัน (สัดส่วนโดยมวลระหว่างไม้ไผ่/กรด) และเวลาที่ใช้กระตุ้น ซึ่งผลการทดลองพบว่าปริมาณคาร์บอนที่ได้ทราบจาก ร้อยละผลิตภัณฑ์, พื้นที่ผิวและการกระจายตัวของขนาดรูพรุน ซึ่งพบว่าอัตราส่วนการอิมเพรกเนชัน ของสารกระตุ้นกรดซัลฟิวริกที่ 1 ณ อุณหภูมิกระตุ้น 1173 เคลวิน ถ่านกัมมันต์ที่ได้มีพื้นที่ผิวบีอีทีและปริมาตรรูพรุนขนาดเล็กสูง 553 ตารางเมตรต่อกรัม และ 0.239 คิวบิกเซนติเมตรต่อกรัมตามลำดับ ซึ่งพบว่าอัตราส่วนการอิมเพรกเนชันต่ำและเวลาการกระตุ้นน้อย จะส่งผลต่อร้อยละผลิตภัณฑ์และพื้นที่ผิวบีอีที ในขณะที่อัตราส่วนการอิมเพรกเนชันเพิ่มขึ้นส่งผลให้รูพรุนขนาดกลางมีมากขึ้น ซึ่งเกิดจากรูพรุนขนาดเล็กเปลี่ยนแปลงเป็นรูพรุนขนาดกลาง

Zhang และคณะ [37] ศึกษาผลการกระตุ้นด้วยไอน้ำที่มีผลต่อโครงสร้างรูพรุนและพื้นที่ผิวเคมีของถ่านกัมมันต์จากไม้ไผ่ เมื่อวิเคราะห์ไอโซเทอมการดูดซับ - คายซับก๊าซไนโตรเจน พบว่าเมื่ออุณหภูมิกระตุ้นหรือเวลาที่ใช้ในการกระตุ้นเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้พื้นที่ผิวมีรูพรุนเพิ่มมากขึ้นและรูพรุนขนาดเล็กเกิดการขยายตัวกว้างขึ้น โดยผลที่ตามมาจากรูพรุนขนาดเล็กเกิดการขยายตัว คือ พื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนลดลง ภาวะที่เหมาะสมสำหรับถ่านกัมมันต์จากไม้ไผ่ คือ อุณหภูมิกระตุ้น

850 องศาเซลเซียส เวลาที่ใช้กระตุ้น 120 นาที อัตราการไหลของไอน้ำ 0.2 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อ นาที ซึ่งภายใต้ภาวะเหล่านี้พบว่าถ่านกัมมันต์มีพื้นที่ผิว 1210 ตารางเมตรต่อกรัม ปริมาตรรูพรุน ทั้งหมด 0.542 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม เมื่อวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยาของถ่านกัมมันต์ที่ได้ จากภาวะที่เหมาะสม พบว่าถ่านกัมมันต์มีความสามารถในการดูดซับเมทิลีนบลูแบบชั้นเดียว 330 มิลลิกรัมต่อกรัม ซึ่งแสดงให้เห็นว่าถ่านกัมมันต์ที่ได้จากภาวะที่เหมาะสมมีศักยภาพในการใช้งาน สำหรับการดูดซับเมทิลีนบลู

Rugayah และคณะ [38] ศึกษาการผลิตถ่านกัมมันต์จากกะลาปาล์ม ซึ่งกะลาปาล์ม ที่ทำการศึกษา มีสัดส่วนองค์ประกอบทางเคมี ดังนี้ เซลลูโลส 27.7% เฮมิเซลลูโลส 21.6% และลิกนิน 44% นอกจากนี้ยังมีปริมาณร้อยละเถ้าต่ำ (23%wt.) แต่มีปริมาณคาร์บอนและสารระเหยสูง 23%wt. และ 61.7%wt. ตามลำดับ เมื่อทำการกระตุ้น พบว่าพื้นที่ผิวบีอีทีเพิ่มสูงขึ้นกว่าก่อนกระตุ้น จาก 541.76 เป็น 607.76 ตารางเมตรต่อกรัม จากนั้นนำถ่านกัมมันต์ที่ได้ไปทดสอบการดูดซับ ซึ่งถ่านกัมมันต์ที่ได้สามารถกำจัดองค์ประกอบออกซิเจนที่เป็นพิษได้ 80.7% ความสามารถในการดูดซับ 8.83 มิลลิกรัมต่อกรัม ดังนั้นในงานวิจัยนี้ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้นั้นจากกะลาปาล์มมีคุณภาพที่ดีกว่า ถ่านกัมมันต์จากเกรดการค้า



### บทที่ 3

#### การดำเนินงานทดลอง

##### 3.1 รูปแบบการศึกษา

งานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยเชิงทดลองในห้องปฏิบัติการ เพื่อศึกษาหาภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมถ่านกัมมันต์จากไบโอชาร์โดยการกระตุ้นด้วยวิธีทางกายภาพและถ่านกัมมันต์จากถ่านหินซับปิทมินัส โดยการกระตุ้นด้วยวิธีทางเคมี พร้อมทั้งศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อสมบัติของถ่านกัมมันต์

##### 3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

(1) เครื่องบดวัตถุดิบถ่านชาร์ประเภทหยาบและละเอียด ยี่ห้อสปริงกรีนอีโวลูชัน รุ่น PG1500 แสดงดังภาพที่ 3.1



ภาพที่ 3.1 เครื่องบดชีวมวลประเภทหยาบและละเอียด

(2) เครื่องคัดขนาดวัตถุบดผ่านซาร์ที่ขนาด 2 – 5 มิลลิเมตร แสดงดังภาพที่ 3.2



ภาพที่ 3.2 เครื่องคัดขนาดวัตถุบดผ่านซาร์ที่ขนาด 2 – 5 มิลลิเมตร

(3) เตาเผาให้ความร้อนแบบแนวตั้ง (Vertical furnace) สามารถปรับอุณหภูมิได้สูงถึง 1200 องศาเซลเซียส ตรงส่วนกลางสำหรับวางเครื่องปฏิกรณ์ (Reactor) แสดงดังภาพที่ 3.3



ภาพที่ 3.3 เตาเผาให้ความร้อนแบบแนวตั้ง

(4) เครื่องปฏิกรณ์สำหรับการกระตุ้น (Reactor) แสดงดังภาพที่ 3.4



ภาพที่ 3.4 เครื่องปฏิกรณ์สำหรับการกระตุ้น

(5) หม้อต้มไอน้ำ (Boiler)

(6) ตะแกรงร่อนขนาด 2 มิลลิเมตร

(7) ตะแกรงร่อนขนาด 250 ไมโครเมตร

(8) ตู้อบ (Oven) ยี่ห้อ Binder

(9) ตู้ดูดความชื้น (Desiccator)

(10) เครื่องชั่งละเอียด ทศนิยม 4 ตำแหน่ง ยี่ห้อ Mettler Toledo

(11) ชุดกรองสูญญากาศ และกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 40 และเบอร์ 42

(12) อุปกรณ์วัดอัตราการไหลของก๊าซ (Flow meter)

(13) เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple)

(14) เครื่องแก้วที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ

(15) กระดาษกรอง Whatman เบอร์ 40 ขนาด 110 มิลลิเมตร

(16) เครื่องกรองสูญญากาศ ยี่ห้อ Vacuubrand รุ่น ME 1 C



ภาพที่ 3.5 ภาพแสดงชุดกระตุ่น

### 3.3 เครื่องมือวิเคราะห์ที่ใช้ในการวิเคราะห์

(1) เครื่องวัดพื้นที่ผิวและความเป็นรูพรุนด้วยเทคนิคการวัดการดูดซับไนโตรเจน รุ่น ASAP2020 ยี่ห้อ Micromeritic ปริมาณก๊าซไนโตรเจนที่ถูกดูดซับและความดันย่อยที่เปลี่ยนแปลงไปจะถูกบันทึกเพื่อสร้างเป็นไอโซเทอมของการดูดและการคายซับที่ความดันสัมพัทธ์ในช่วง  $10^{-7}$  ถึง 1 โดยการคำนวณพื้นที่ผิวสามารถหาได้จากสมการของ Brunauer-Emmett-Teller (BET) ส่วนปริมาตรรูพรุนและขนาดรูพรุนเฉลี่ยสามารถหาได้จากสมการ Berret-Joyner-Halenda (BJH pore size distribution) แสดงดังภาพที่ 3.6

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
Chulalongkorn University



ภาพที่ 3.6 เครื่องวัดพื้นที่ผิวและความเป็นรูพรุนด้วยเทคนิคการวัดการดูดซับไนโตรเจน

(2) เครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุ (Ultimate analysis) รุ่น CHN628 ยี่ห้อ Leco เป็นเครื่องที่วิเคราะห์หาปริมาณคาร์บอน ไฮโดรเจน และไนโตรเจน โดยอาศัยหลักการเผาไหม้สารตัวอย่างด้วยความร้อนสูงเพื่อให้สารอยู่ในสภาพก๊าซแล้ววัดปริมาณธาตุด้วยตัวตรวจวัดชนิด Thermal conductivity detector และ IR detector แสดงดังภาพที่ 3.7



ภาพที่ 3.7 เครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุ (Ultimate analysis)

(3) เครื่องสำหรับวิเคราะห์องค์ประกอบโดยประมาณ (Proximate analysis) ด้วย Thermogravimetric Analysis (TGA) รุ่น TGA701 ยี่ห้อ Leco เป็นเครื่องที่วิเคราะห์หาปริมาณคาร์บอนคงที่ ความชื้นและสารระเหย แสดงดังภาพที่ 3.8



ภาพที่ 3.8 เครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบโดยประมาณ (Proximate analysis)

(4) เครื่องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) สำหรับศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยา รุ่น JSM-6610LV ยี่ห้อ JEOL ใช้วิเคราะห์ลักษณะสัณฐานของถ่านชาร์และถ่านกัมมันต์ที่ได้ โดยลำอิเล็กตรอนปฐมภูมิถูกยิงไปบนตัวอย่าง จากนั้นอิเล็กตรอนทุติยภูมิจะหลุดออกมาและถูกตรวจจับสัญญาณด้วยดีเทคเตอร์แปรผลเป็นภาพที่มีกำลังขยายต่าง ๆ

(5) เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโทมิเตอร์ (X-ray diffractometer, XRD) รุ่น D8 Discover ยี่ห้อ Bruker ใช้ความยาวคลื่นรังสีเอกซ์ชนิด  $\text{Cu K}\alpha$  (ความยาวคลื่นเท่ากับ 1.5406 อังสตรอม) แรงดันไฟฟ้า 40 กิโลโวลต์ กระแสไฟฟ้า 40 มิลลิแอมแปร์ อัตราการสแกน 0.01 ดีกรีต่อวินาที และมุม  $2\theta$  ในช่วง 10 ถึง  $60^\circ$

(6) เครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโคปี (Fourier transform Infrared spectroscopy, FTIR) สำหรับวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิว รุ่น Nicolet iS5 ยี่ห้อ Thermo Fisher ช่วงความยาวคลื่นที่สแกน  $500 - 4000 \text{ cm}^{-1}$  แสดงดังภาพที่ 3.9



ภาพที่ 3.9 เครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโคปี  
(Fourier transform Infrared spectroscopy, FTIR)



### 3.4 สารเคมีที่ใช้

- (1) กรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 37%
- (2) กรดไฮโดรคลอริก (HCl) เข้มข้นร้อยละ 10 โดยปริมาตร
- (3) ก๊าซไนโตรเจน ( $N_2$ ) 99.99%
- (4) โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH)
- (5) น้ำกลั่น

### 3.5 วัตถุดิบ

วัตถุดิบที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้เป็นถ่านกะลาปาล์ม ถ่านไม้ไผ่ และถ่านหินซบิพูมินัส

### 3.6 ขั้นตอนการเตรียมวัตถุดิบ

นำไบโอชาร์และถ่านหินซบิพูมินัส มาบดและคัดขนาดให้มีขนาด 3 ถึง 5 มิลลิเมตร ด้วยเครื่องร่อนขนาด 2 ถึง 5 มิลลิเมตรและใช้ตะแกรงร่อนขนาด 2 มิลลิเมตร จากนั้นล้างด้วยน้ำกลั่นแล้วอบแห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วเก็บไว้ในตู้ดูดความชื้น จะได้วัตถุดิบดังภาพที่ 3.10 3.11 และ 3.12 ตามลำดับ เพื่อนำไปทำการทดลองในขั้นตอนต่อไป



ภาพที่ 3.10 ถ่านกะลาปาล์มที่ใช้ในการทดลอง ขนาด 3 – 5 มิลลิเมตร



ภาพที่ 3.11 ถ่านไม้ไฟที่ใช้ในการทดลอง ขนาด 3 – 5 มิลลิเมตร



ภาพที่ 3.12 ถ่านหินซับบิทูมินัสที่ใช้ในการทดลอง ขนาด 3 – 5 มิลลิเมตร

### 3.7 ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง

#### 3.7.1 การวิเคราะห์สมบัติเบื้องต้นของไบโอชาร์และถ่านหินซับบิทูมินัส

- (1) การวิเคราะห์องค์ประกอบโดยประมาณ (Proximate analysis, ASTM D7582)
- (2) การวิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุ (Ultimate analysis, ASTM 3176)
- (3) วิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุน และขนาดรูพรุนเฉลี่ย



### 3.7.2 การกระตุ้นไบโอชาร์และถ่านหินซบิโทมินัส

ในงานวิจัยศึกษาการกระตุ้นด้วยกัน 2 วิธี คือการกระตุ้นทางกายภาพและการกระตุ้นทางเคมี โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

#### 3.7.2.1 การกระตุ้นไบโอชาร์โดยวิธีการกระตุ้นทางกายภาพ

สารกระตุ้นที่ใช้ คือ ไอน้ำร้อนยิ่งยวด โดยจะมีการแปรค่าอุณหภูมิในการกระตุ้นที่ 800 ถึง 1000 องศาเซลเซียส เวลาที่ใช้ในการกระตุ้น 1 ถึง 4 ชั่วโมง มีขั้นตอนการกระตุ้นดังต่อไปนี้

##### ศึกษาตัวแปรอุณหภูมิและเวลาที่ใช้กระตุ้น

- (1) ชั่งถ่านชาร์ขนาด 3 – 5 มิลลิเมตร จำนวน 30 กรัม บรรจุใส่ในเครื่องปฏิกรณ์ (Reactor)
- (2) นำมากระตุ้นในเตาเผาให้ความร้อนแบบแนวตั้ง บ้อนไอน้ำร้อนยิ่งยวดที่ด้านล่างของเครื่องปฏิกรณ์
- (3) ปรับอุณหภูมิที่ต้องการ คือ 800 900 และ 1000 องศาเซลเซียส
- (4) เมื่อถึงอุณหภูมิที่กำหนด จับเวลาตั้งแต่ 1 2 3 และ 4 ชั่วโมง
- (5) นำเครื่องปฏิกรณ์หลังการกระตุ้นมาทำให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง
- (6) ล้างถ่านกัมมันต์ที่ได้ด้วยน้ำกลั่นเพื่อกำจัดเถ้าออก จากนั้นอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง
- (7) นำถ่านกัมมันต์ที่ได้ไปวิเคราะห์สมบัติต่าง ๆ

#### 3.7.2.2 การกระตุ้นถ่านหินซบิโทมินัส โดยวิธีการกระตุ้นทางเคมี

สารกระตุ้นที่ใช้ คือ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ที่อัตราส่วนสารกระตุ้นต่อถ่านหินซบิโทมินัส 0.2:1 ถึง 0.6:1 อุณหภูมิที่ใช้กระตุ้น 650 ถึง 850 องศาเซลเซียสและเวลาที่ใช้กระตุ้น 1 ถึง 4 ชั่วโมง มีขั้นตอนการกระตุ้น ดังต่อไปนี้

##### ศึกษาตัวแปรความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ อุณหภูมิและเวลาในการกระตุ้น

- (1) ชั่งถ่านหินซบิโทมินัส ขนาด 3 ถึง 5 มิลลิเมตร จำนวน 30 กรัม ใส่ในปีกเกอร์

- (2) ชั่งโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์จำนวน 6 12 และ 18 กรัม ตามลำดับ ใส่ใน ปีกเกอร์ เติมน้ำกลั่นจำนวน 40 มิลลิลิตรใช้แท่งแก้วคนจนสารละลายหมด
- (3) เทสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ลงในปีกเกอร์ที่บรรจุถ่านหินซับบิทูมินัส ทำการกวนเบา ๆ ด้วยแท่งแม่เหล็กกวนสาร เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จะได้อัตราส่วน สารกระตุ้นต่อถ่านหินซับบิทูมินัส 0.2:1 0.4:1 และ 0.6:1 ตามลำดับ
- (4) นำไปอบเพื่อระเหยน้ำออกที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
- (5) บรรจุสารที่ได้ลงในเครื่องปฏิกรณ์ แล้วนำไปกระตุ้นในเตาเผาให้ความร้อน แนวตั้ง ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจน ด้วยอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจนคงที่ 200 มิลลิลิตรต่อนาที
- (6) ปรับตั้งอุณหภูมิที่ใช้กระตุ้น คือ 650 750 และ 850 องศาเซลเซียส
- (7) เมื่อถึงอุณหภูมิที่กำหนด จับเวลาตั้งแต่ 1 2 3 และ 4 ชั่วโมง
- (8) นำเครื่องปฏิกรณ์หลังการกระตุ้นมาทำให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง
- (9) นำผลิตภัณฑ์ที่ได้มาล้างบนเครื่องกรองสุญญากาศ ใช้กระดาษกรองเบอร์ 40 ล้างด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นร้อยละ 10 โดยปริมาตร จำนวน 100 มิลลิลิตร 3 ครั้ง โดยนำไปต้มให้ร้อนแล้วล้างตามด้วยน้ำร้อน จนกว่า ถ่านกัมมันต์ที่ได้มีค่า pH เป็นกลาง
- (10) อบให้แห้งที่ตู้อบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เวลา 24 ชั่วโมง
- (11) นำถ่านกัมมันต์ที่ได้ไปวิเคราะห์สมบัติต่าง ๆ

### 3.8 การวิเคราะห์สมบัติของถ่านกัมมันต์

- (1) การวิเคราะห์องค์ประกอบโดยประมาณ (Proximate analysis, ASTM D7582)
- (2) การวิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุ (Ultimate analysis, ASTM 3176)
- (3) วิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุน และขนาดรูพรุนเฉลี่ย
- (4) การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกถ่านกัมมันต์ด้วยเทคนิควิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffractometer, XRD)
- (5) การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวถ่านกัมมันต์ด้วยเทคนิควิเคราะห์เทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (Fourier transform Infrared Spectroscopy, FTIR)
- (6) ศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาถ่านกัมมันต์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิ่ง (Scanning electron microscope, SEM)

## บทที่ 4

### ผลและอภิปรายผลงานวิจัย

จากการดำเนินการทดลองในห้องปฏิบัติการตามที่ได้อธิบายมาแล้วในบทที่ 3 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทดลองได้นำเสนอในรูปแบบของตารางและกราฟ ตามลำดับดังนี้

#### 4.1 การวิเคราะห์สมบัติเบื้องต้นของไบโอชาร์และถ่านหินซบิโทมินัส

การวิเคราะห์สมบัติเบื้องต้นของถ่านกะลาปาล์ม จากโรงงานหีบปาล์ม จ.สุราษฎร์ธานี

การวิเคราะห์สมบัติเบื้องต้นของถ่านไม้ไผ่ จากวิสาหกิจชุมชนหนองมนถ่านอัดแท่งไม้ไผ่ จ.ชลบุรี

การวิเคราะห์สมบัติเบื้องต้นของถ่านหินซบิโทมินัส จากโรงงานสหโคเจน จ.ลำพูน

##### 4.1.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบโดยประมาณ (Proximate analysis) และองค์ประกอบแบบแยกธาตุ (Ultimate analysis)

ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบโดยประมาณ (Proximate analysis) ของไบโอชาร์และถ่านหินซบิโทมินัส

วัตถุดิบ	การวิเคราะห์องค์ประกอบแบบประมาณ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)		
	สารระเหย (VM, %)	เถ้า (Ash, %)	คาร์บอนคงตัว (FC, %)
ถ่านกะลาปาล์ม	46.81	3.74	49.46
ถ่านไม้ไผ่	26.06	6.26	67.68
ถ่านหินซบิโทมินัส	46.11	5.14	48.75

หมายเหตุ \* ร้อยละโดยน้ำหนักมาตรฐานแห้ง (%dry basis)

**ตารางที่ 4.2** ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุ (Ultimate analysis) ของไบโอชาร์และถ่านหินซัพบิทูมินัส

วัตถุดิบ	การวิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)			
	คาร์บอน (C, %)	ไฮโดรเจน (H, %)	ไนโตรเจน (N, %)	ออกซิเจน (O, %)
ถ่านกะลาปาล์ม	65.20	4.54	0.61	29.65
ถ่านไม้ไผ่	76.23	3.38	0.67	19.73
ถ่านหินซัพบิทูมินัส	64.81	4.67	1.04	29.49

หมายเหตุ \* ออกซิเจน = 100 - ผลรวมของธาตุแต่ละชนิดยกเว้นธาตุออกซิเจน

จากการวิเคราะห์สมบัติเบื้องต้นของไบโอชาร์ที่ได้จากกระบวนการคาร์บอนไนซ์ที่อุณหภูมิในช่วง 350 ถึง 450 องศาเซลเซียส เวลา 3 ชั่วโมง และถ่านหินซัพบิทูมินัส จากตารางที่ 4.1 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบโดยประมาณของไบโอชาร์และถ่านหินซัพบิทูมินัสที่ได้นำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการทดลองนี้ พบว่า ถ่านกะลาปาล์ม มีค่าสารระเหย เถ้า และคาร์บอนคงตัว ร้อยละ 46.81, 3.74 และ 49.46 ตามลำดับ ถ่านไม้ไผ่ มีค่าสารระเหย เถ้า และคาร์บอนคงตัว ร้อยละ 26.06, 6.26 และ 67.68 ตามลำดับ และถ่านหินซัพบิทูมินัส มีค่าสารระเหย เถ้า และคาร์บอนคงตัวร้อยละ 46.11 5.14 48.75 ตามลำดับ จากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบแบบประมาณของวัตถุดิบทั้ง 3 ชนิด พบว่ามีสมบัติเบื้องต้นที่ดี สามารถนำมาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ได้ เนื่องจากมีปริมาณคาร์บอนคงที่สูง ปริมาณเถ้าต่ำ ซึ่งถือว่าเป็นข้อดีในการนำมาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ แต่วัตถุดิบทั้ง 3 ชนิดมีปริมาณสารระเหยมาก ขณะเกิดการคาร์บอนไนซ์ โครงสร้างของถ่านชาร์จะจัดเรียงตัวเป็นโครงสร้างผลึกที่ไม่เป็นระเบียบพร้อมทั้งสลายโครงสร้างในส่วนที่เป็นสารระเหยหรือทาร์ออกมาปกคลุมที่พื้นผิวหรือรูพรุนที่เกิดขึ้นส่งผลให้ปริมาณสารระเหยมาก

เมื่อวิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุของไบโอชาร์และถ่านหินซัพบิทูมินัส ดังตารางที่ 4.2 พบว่า ถ่านกะลาปาล์ม มีธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน และออกซิเจนร้อยละ 65.20 4.54 0.61 29.65 ตามลำดับ ถ่านไม้ไผ่ มีธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน และออกซิเจนร้อยละ 76.23 3.38 0.67 19.73 ตามลำดับ และถ่านหินซัพบิทูมินัส มีธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน และออกซิเจนร้อยละ 64.81 4.67 1.04 29.49 ตามลำดับ ซึ่งพบว่าวัตถุดิบทั้ง 3 ชนิดมีธาตุคาร์บอนเป็นองค์ประกอบมากที่สุด รองลงมา คือ ธาตุออกซิเจน ธาตุไฮโดรเจนและธาตุไนโตรเจน ตามลำดับ เนื่องจากองค์ประกอบทางเคมี ได้แก่ เฮมิเซลลูโลส เซลลูโลสและลิกนิน เกิดการสลายตัวในระหว่างการคาร์บอนไนซ์ ส่งผลให้สารประกอบอินทรีย์ เช่น คาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) หรือก๊าซมีเทน (CH<sub>4</sub>)

หลุดออกจากโครงสร้าง นอกจากนี้คาร์และสารระเหยบางส่วนหลุดออกจากโครงสร้างเช่นกัน ส่งผลให้สัดส่วนองค์ประกอบคาร์บอนเพิ่มขึ้น แต่สัดส่วนออกซิเจนและไฮโดรเจนลดลง [39]

#### 4.1.2 การวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุน และขนาดรูพรุนเฉลี่ย (Textural properties) ของไบโอชาร์ และถ่านหินซบิโทมินัส

ตารางที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์หาพื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุนทั้งหมด และขนาดรูพรุนเฉลี่ยของไบโอชาร์ และถ่านหินซบิโทมินัส

วัตถุดิบ	พื้นที่ผิว (m <sup>2</sup> /g)	ปริมาตรรูพรุนทั้งหมด (cm <sup>3</sup> /g)	ขนาดรูพรุนเฉลี่ย (A°)
ถ่านกะลาปาล์ม	38.52	0.0111	15.30
ถ่านไม้ไผ่	42.90	0.0189	16.63
ถ่านหินซบิโทมินัส	6.88	0.0092	49.26

จากผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุนทั้งหมด และขนาดรูพรุนเฉลี่ยของไบโอชาร์และถ่านหินซบิโทมินัส ดังตารางที่ 4.3 พบว่าวัตถุดิบทั้ง 3 ชนิดมีพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนทั้งหมดต่ำ เนื่องจากขณะเกิดการคาร์บอไนซ์ โครงสร้างเกิดการสลายตัวแล้วจัดเรียงตัวขึ้นใหม่ ในขณะเดียวกัน สารระเหยบางส่วนและทาร์จะปกคลุมอยู่ที่พื้นผิวและรูพรุนของถ่านชาร์ นอกจากนี้ยังพบว่าถ่านไม้ไผ่มีพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนสูงสุด เนื่องจากไม้ไผ่มีองค์ประกอบทางเคมีที่เป็นเซลลูโลสสูง เมื่อนำมาคาร์บอไนซ์เป็นถ่านชาร์ ส่งผลให้โครงสร้างเซลลูโลสเกิดการสลายตัว ซึ่งเซลลูโลสสามารถสลายตัวได้ง่ายกว่ากะลาปาล์มที่มีลิกนินเป็นองค์ประกอบสูงและถ่านหินซบิโทมินัสที่โครงสร้างมีความหนาแน่นมากที่สุด

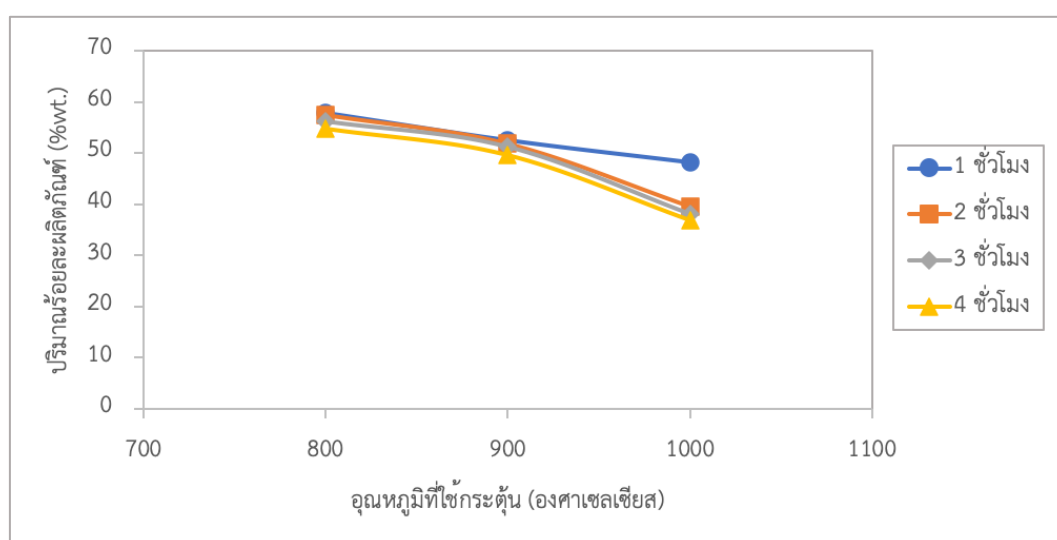
#### 4.2 ภาวะที่เหมาะสมในการกระตุ้น

จากสมบัติเบื้องต้นของถ่านกะลาปาล์ม ถ่านไม้ไผ่และถ่านหินซบิโทมินัส พบว่ามีพื้นที่ผิว 38.52 42.90 และ 6.88 ตารางเมตรต่อกรัม และปริมาตรรูพรุนทั้งหมด 0.0111, 0.0189 และ 0.0092 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม ตามลำดับ ซึ่งเป็นค่าที่น้อยมาก ดังนั้นจึงต้องนำไบโอชาร์และถ่านหินซบิโทมินัสมากระตุ้นเพื่อให้มีพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนทั้งหมดเพิ่มสูงขึ้น โดยไบโอชาร์จะถูกนำมากระตุ้นด้วยวิธีทางกายภาพ (Physical activation) ส่วนถ่านหินซบิโทมินัสกระตุ้นด้วยวิธีเคมี (Chemical activation)

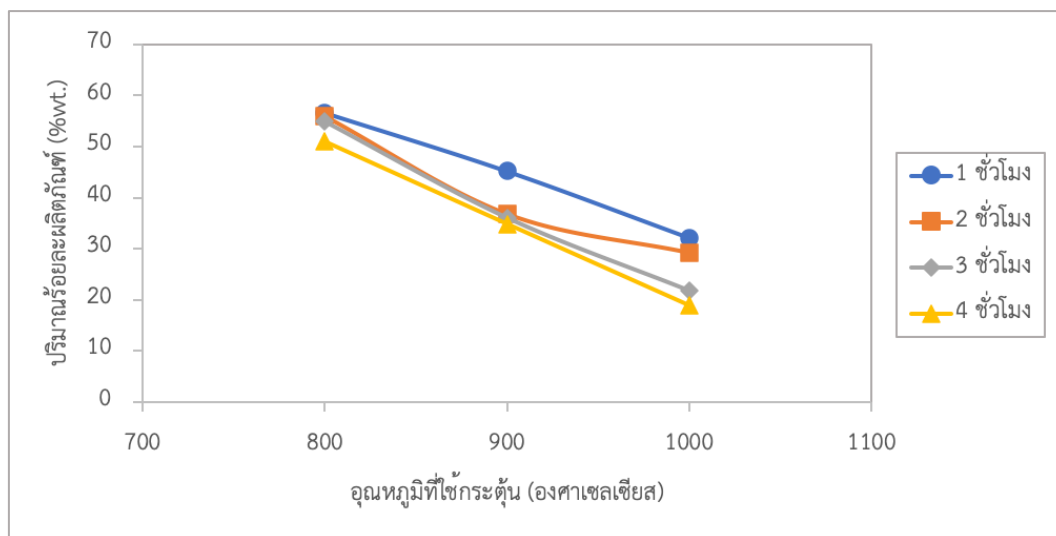
#### 4.2.1 การกระตุ้นไบโอชาร์เป็นถ่านกัมมันต์ด้วยวิธีทางกายภาพด้วยไอน้ำร้อนยิ่งยวด

นำถ่านกะลาปาล์มและถ่านไม้ไผ่ มาทำการศึกษาหาภาวะที่เหมาะสมของการกระตุ้น คือ ผลของอุณหภูมิและเวลาในการกระตุ้นด้วยวิธีทางกายภาพ เพื่อพิจารณาสมบัติต่าง ๆ ของถ่านกัมมันต์ที่ได้

4.2.1.1 ผลของอุณหภูมิที่ใช้กระตุ้นต่อปริมาณร้อยละผลิตภัณฑ์ที่ใช้เตรียมถ่านกัมมันต์จากถ่านกะลาปาล์มและถ่านไม้ไผ่



ภาพที่ 4.1 ผลของอุณหภูมิที่ใช้กระตุ้นต่อปริมาณร้อยละผลิตภัณฑ์ที่ใช้เตรียมถ่านกัมมันต์จากถ่านกะลาปาล์ม

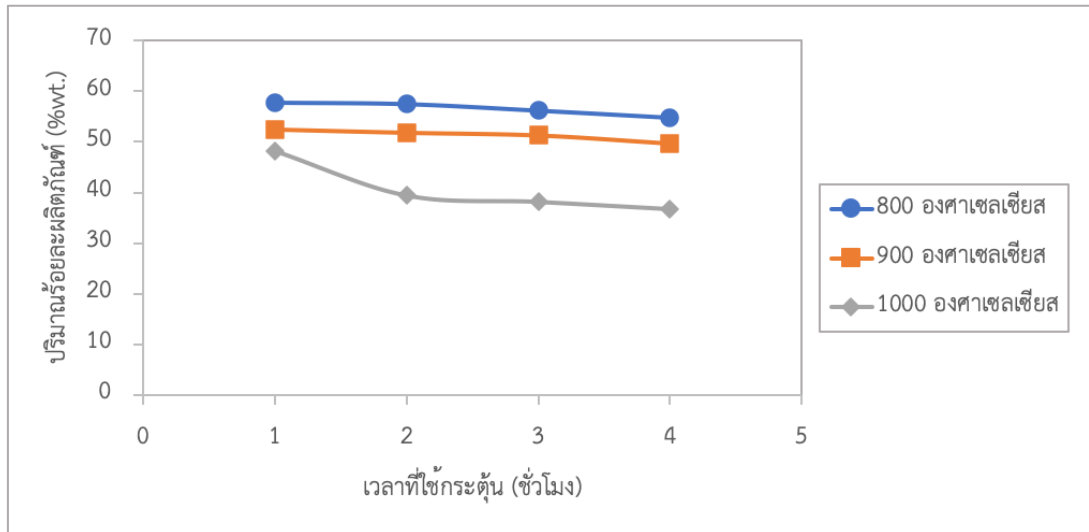


ภาพที่ 4.2 ผลของอุณหภูมิที่ใช้กระตุ้นต่อปริมาณร้อยละผลิตภัณฑ์ที่ใช้เตรียม ถ่านกัมมันต์จากถ่านไม้ไผ่

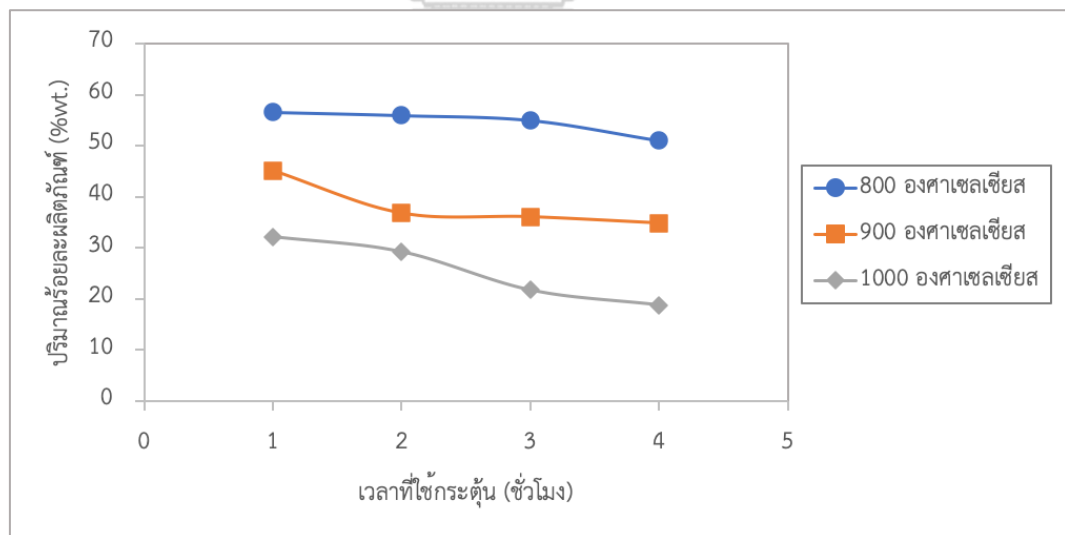
จากภาพที่ 4.1 และ 4.2 แสดงผลของอุณหภูมิที่ใช้กระตุ้นต่อปริมาณร้อยละผลิตภัณฑ์ที่ใช้เตรียมถ่านกัมมันต์จากถ่านกะลาปาล์มและถ่านไม้ไผ่ ตามลำดับ พบว่าเมื่ออุณหภูมิในการกระตุ้นสูงขึ้น ค่าปริมาณร้อยละผลิตภัณฑ์ที่ได้ลดลง เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิเป็นการเพิ่มปริมาณความร้อนให้สูงขึ้น ทำให้ทาร์และสารระเหยที่ปกคลุมอยู่ที่พื้นผิวและรูพรุนของถ่านชาร์จากกระบวนการคาร์บอนเนชันหลุดออกจากโครงสร้าง ทำให้อุณหภูมิที่ยาวตที่เป็นสารกระตุ้นสามารถแพร่เข้าไปในโครงสร้างถ่านได้มากขึ้น ซึ่งทำให้ถ่านชาร์ถูกเผาไหม้และบางส่วนจะกลายเป็นเถ้า ปริมาณร้อยละผลิตภัณฑ์ที่ได้จึงลดลง [33]

เมื่อเปรียบเทียบปริมาณร้อยละผลิตภัณฑ์ของถ่านกัมมันต์จากถ่านกะลาปาล์มและถ่านไม้ไผ่ พบว่าเมื่ออุณหภูมิในการกระตุ้นเพิ่มสูงขึ้น ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากถ่านกะลาปาล์มมีแนวโน้มปริมาณร้อยละผลิตภัณฑ์ลดลงน้อยกว่าปริมาณร้อยละผลิตภัณฑ์ของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากถ่านไม้ไผ่ โดยสมบัติทางกายภาพของถ่านกะลาปาล์มที่ผ่านการคาร์บอนเนชันพบว่ามีความแข็งและโครงสร้างมีความหนาแน่นมากกว่าถ่านไม้ไผ่ ซึ่งแสดงถึงการมีอยู่ของปริมาณลิกนินที่มาก ดังนั้นเมื่อนำมากระตุ้นพบว่าอุณหภูมียาวตที่เป็นสารกระตุ้นจะแพร่เข้าไปในเนื้อถ่านได้ยาก ทำให้เกิดการเผาไหม้ได้น้อย ส่งผลให้ปริมาณร้อยละผลิตภัณฑ์ลดลงต่ำ ในขณะที่ถ่านไม้ไผ่ โครงสร้างมีความหนาแน่นและแข็งน้อยกว่า ทำให้อุณหภูมิแพร่เข้าไปในเนื้อถ่านได้ง่ายกว่า ส่งผลให้ปริมาณร้อยละผลิตภัณฑ์ที่ได้ลดลงมากกว่า

4.2.1.2 ผลของเวลาที่ใช้กระตุ้นต่อปริมาณร้อยละผลิตภัณฑ์ที่ใช้เตรียมถ่านกัมมันต์จากถ่าน  
กะลาปาล์มและถ่านไม้ไผ่



ภาพที่ 4.3 ผลของเวลาที่ใช้กระตุ้นต่อปริมาณร้อยละผลิตภัณฑ์ที่ใช้เตรียม  
ถ่านกัมมันต์จากถ่านกะลาปาล์ม



ภาพที่ 4.4 ผลของเวลาที่ใช้กระตุ้นต่อปริมาณร้อยละผลิตภัณฑ์ใช้เตรียม  
ถ่านกัมมันต์จากถ่านไม้ไผ่



จากภาพที่ 4.3 และ 4.4 แสดงผลของเวลาที่ใช้กระตุ้นต่อปริมาณร้อยละผลิตภัณฑ์ที่ใช้เตรียม ถ่านกัมมันต์จากถ่านกะลาปาล์มและถ่านไม้ไผ่ ตามลำดับ พบว่าเมื่อเพิ่มเวลาในการกระตุ้นให้นานขึ้น ค่าปริมาณร้อยละผลิตภัณฑ์ที่ได้ลดลง เนื่องจากการเพิ่มเวลาที่ใช้กระตุ้นให้นานขึ้น จะทำให้ปริมาณ ความร้อนเพิ่มสูงขึ้น ส่งผลให้ทาร์และสารระเหยที่ปกคลุมอยู่ที่พื้นผิวและรูพรุนของถ่านชาร์เกิดการ หลุดออกไปมากขึ้น ทำให้ไอน้ำร้อนยิ่งยวดที่เป็นสารกระตุ้นแพร่เข้าไปในโครงสร้างถ่านได้มากขึ้น เกิดปฏิกิริยากับผิวถ่านชาร์อย่างต่อเนื่อง เป็นผลให้ปริมาณร้อยละผลิตภัณฑ์ลดลง

4.2.1.3 การวิเคราะห์พื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุนทั้งหมด และขนาดรูพรุนเฉลี่ย (Textural properties) ของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากถ่านกะลาปาล์มและถ่านไม้ไผ่

**ตารางที่ 4.4** ผลการวิเคราะห์หาพื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุนทั้งหมด และขนาดรูพรุนเฉลี่ยของถ่าน กัมมันต์จากถ่านกะลาปาล์ม

อุณหภูมิกระตุ้น (°C)	เวลากระตุ้น (hr.)	พื้นที่ผิว (m <sup>2</sup> /g)	ปริมาตรรูพรุนทั้งหมด (cm <sup>3</sup> /g)	ขนาดรูพรุนเฉลี่ย (A°)
800	1	96.48	0.0544	22.55
	2	152.83	0.0862	22.56
	3	153.91	0.0862	21.82
	4	83.23	0.0441	21.21
900	1	269.64	0.1434	21.28
	2	320.36	0.1804	22.52
	3	330.16	0.1834	22.22
	4	169.77	0.0827	19.49
1000	1	384.33	0.2127	22.14
	2	428.59	0.2358	22.01
	3	434.97	0.2400	21.83
	4	441.02	0.2458	22.29

ตารางที่ 4.5 ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุนทั้งหมด และขนาดรูพรุนเฉลี่ยของถ่านกัมมันต์จากถ่านไม้ไผ่

อุณหภูมิกระตุ้น (°C)	เวลากระตุ้น (hr.)	พื้นที่ผิว (m <sup>2</sup> /g)	ปริมาตรรูพรุนทั้งหมด (cm <sup>3</sup> /g)	ขนาดรูพรุนเฉลี่ย (A°)
800	1	252.08	0.1386	22.00
	2	261.55	0.1442	22.05
	3	266.83	0.1435	21.51
	4	270.39	0.1467	21.47
900	1	410.31	0.2208	21.52
	2	712.00	0.3991	22.42
	3	531.75	0.2889	21.73
	4	431.76	0.2392	22.16
1000	1	386.79	0.2114	21.87
	2	376.06	0.2079	21.90
	3	367.31	0.2019	21.99
	4	300.72	0.1069	22.21

จากตารางที่ 4.4 และ 4.5 แสดงผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุนทั้งหมด และขนาดรูพรุนเฉลี่ยของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากถ่านกะลาปาล์มและถ่านไม้ไผ่ ตามลำดับ พบว่าเมื่ออุณหภูมิและเวลาในการกระตุ้นเพิ่มขึ้น พื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนทั้งหมดเพิ่มขึ้นด้วย เนื่องจากทาร์และสารระเหยถูกกำจัดออกจากพื้นที่ผิวและรูพรุนของถ่านชาร์ ส่งผลให้อุณหภูมิยิ่งยวดที่เป็นสารกระตุ้นสามารถแพร่เข้าไปในเนื้อถ่านแล้วเกิดปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันกับอะตอมคาร์บอนในโครงสร้างถ่านชาร์ได้มากขึ้น ทำให้อะตอมคาร์บอนเกิดการจัดเรียงตัวเป็นโครงสร้างผลึกที่มีช่องว่างหรือรูพรุนเพิ่มขึ้น ดังนั้นรูพรุนที่เกิดขึ้นจึงเกิดจากทาร์หรือสารระเหยที่ปกคลุมอยู่หลุดออกและรูพรุนที่เกิดขึ้นใหม่ [40] ซึ่งสมการแก๊สซิฟิเคชัน แสดงดังสมการที่ 1



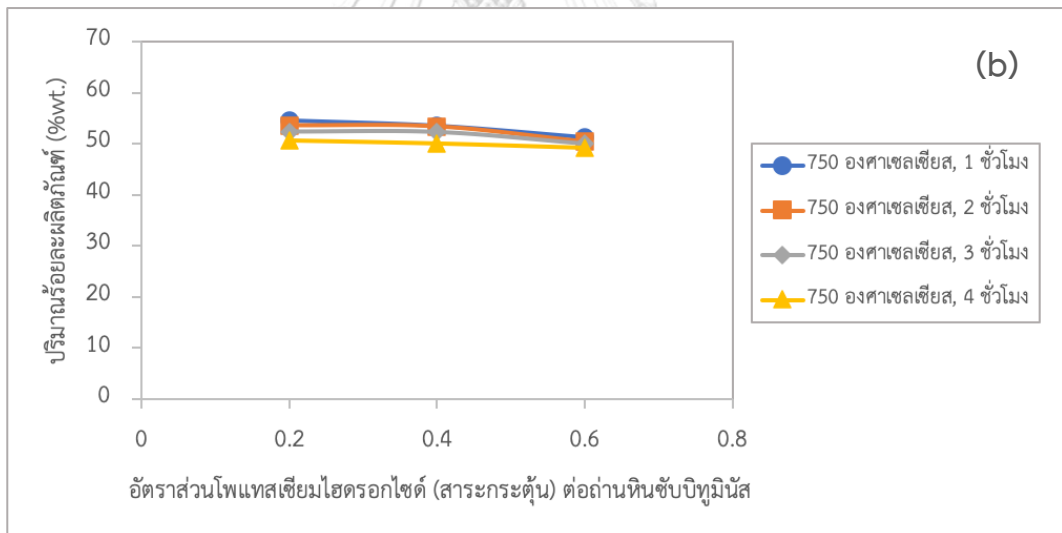
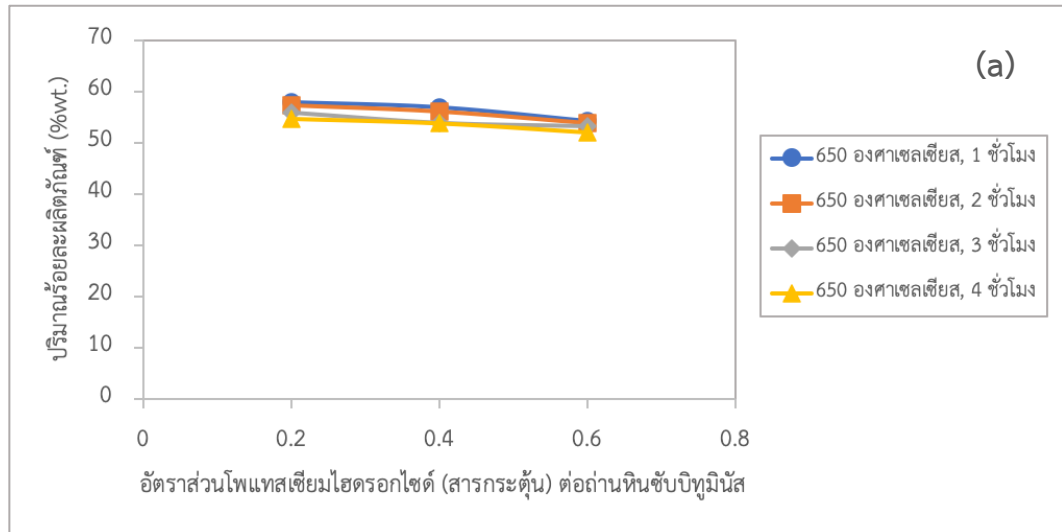
เมื่อพิจารณาภาวะการกระตุ้นของถ่านกัมมันต์จากถ่านกะลาปาล์มและถ่านไม้ไผ่ พบว่าถ่านกัมมันต์จากถ่านกะลาปาล์มมีภาวะที่เหมาะสมในการกระตุ้น 1000 องศาเซลเซียส เวลา 4 ชั่วโมง ได้พื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนทั้งหมดสูงสุด 441.02 ตารางเมตรต่อกรัม และ 0.2458 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม ตามลำดับ ส่วนภาวะที่เหมาะสมในการกระตุ้นเป็นถ่านกัมมันต์จากถ่านไม้ไผ่ ที่อุณหภูมิที่ใช้กระตุ้น 900 องศาเซลเซียส เวลาที่ใช้กระตุ้น 2 ชั่วโมง ได้พื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนทั้งหมดสูงสุด 712.00 ตารางเมตรต่อกรัม และ 0.3991 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม ตามลำดับ ซึ่งพบว่าภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมถ่านกัมมันต์จากถ่านกะลาปาล์ม ต้องใช้อุณหภูมิและเวลาในการกระตุ้นสูงกว่าภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากถ่านไม้ไผ่ เนื่องจากถ่านกะลาปาล์มโครงสร้างมีความหนาแน่นและแข็งมากกว่า ทำให้ต้องใช้อุณหภูมิและเวลาในการกระตุ้นสูง เพื่อให้โครงสร้างเกิดการแตกตัวหรือสลายออกแล้วไอน้ำร้อนยิ่งยวดหรือสารกระตุ้นสามารถแพร่เข้าไปในเนื้อถ่านได้ง่าย ส่วนถ่านไม้ไผ่โครงสร้างหนาแน่นและแข็งน้อยกว่า ทำให้ใช้อุณหภูมิและเวลาในการกระตุ้นต่ำกว่า เนื่องจากไอน้ำร้อนยิ่งยวดสามารถแพร่เข้าไปในโครงสร้างแล้วเกิดรูพรุนได้ง่ายกว่า พื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนทั้งหมดจึงมากกว่า แต่เมื่อพิจารณาอุณหภูมิที่ใช้กระตุ้นสูงกว่า 900 องศาเซลเซียส และเวลาในการกระตุ้นมากกว่า 2 ชั่วโมงของถ่านกัมมันต์จากถ่านไม้ไผ่ พบว่า พื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนทั้งหมดลดลง เนื่องจากใช้อุณหภูมิกระตุ้นสูงเกินไปและเวลากระตุ้นนานเกินไป ส่งผลให้ผนังของรูพรุนขนาดเล็กเกิดการพังทลาย ทำให้ผนังรูพรุนเกิดการขยายใหญ่ขึ้น [41]

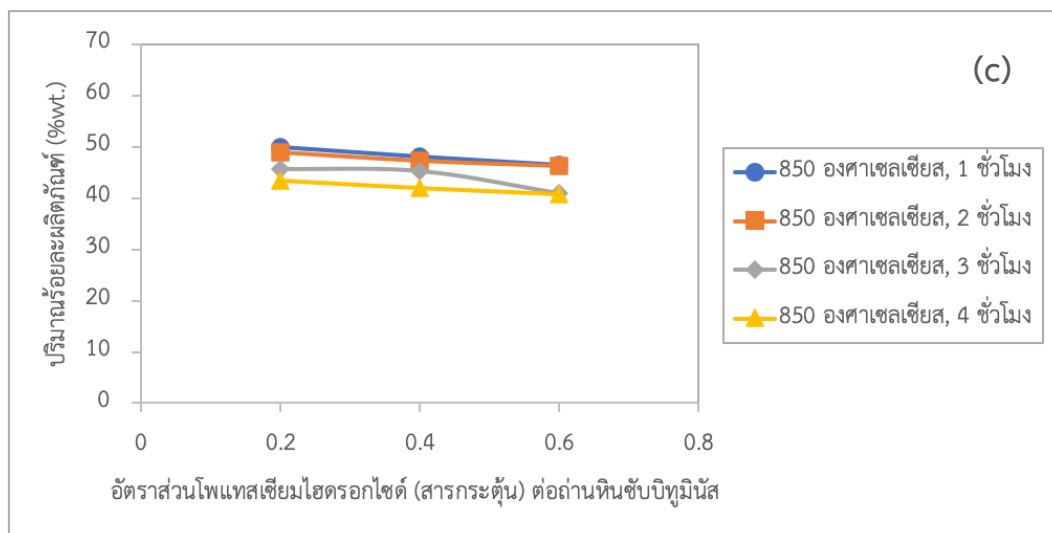
ผลการวิเคราะห์ขนาดรูพรุนเฉลี่ยของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากถ่านกะลาปาล์มและถ่านไม้ไผ่ พบว่าขนาดรูพรุนเฉลี่ยของถ่านกัมมันต์ทั้ง 2 ชนิด มีขนาดรูพรุนเฉลี่ยที่ใกล้เคียง

#### 4.2.2 การกระตุ้นถ่านหินซับบิทูมินัสด้วยวิธีทางเคมีด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH)

นำถ่านหินซับบิทูมินัส มาทำการศึกษาหาภาวะที่เหมาะสมของการกระตุ้น คือ ผลของการแปรอัตราส่วนโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (สารกระตุ้น) ต่อถ่านหินซับบิทูมินัส ผลของอุณหภูมิและเวลาที่ใช้กระตุ้นด้วยวิธีทางเคมี เพื่อพิจารณาสมบัติต่าง ๆ ของถ่านกัมมันต์

4.2.2.1 ผลของการแปรอัตราส่วนโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (สารกระตุ้น) ต่อถ่านหิน  
 ชับปิทูมินัส





ภาพที่ 4.5 ผลของอัตราส่วนโดยมวลระหว่างโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (สารกระตุ้น) ต่อถ่านหินซบิพูมินัสที่ใช้เตรียมถ่านกัมมันต์ต่อปริมาณร้อยละผลิตภัณฑ์

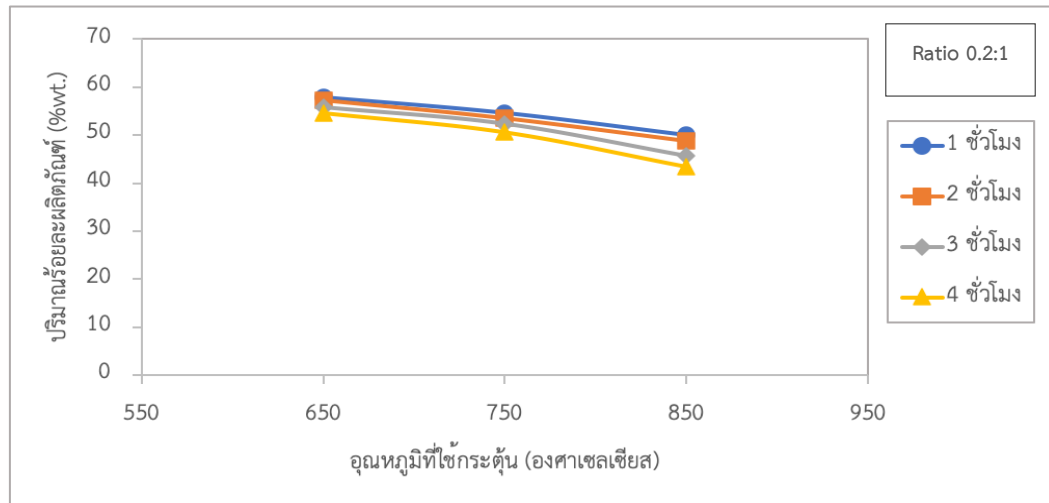
จากภาพที่ 4.5 แสดงผลของอัตราส่วนโดยมวลระหว่างโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (สารกระตุ้น) ต่อถ่านหินซบิพูมินัสที่ใช้เตรียมถ่านกัมมันต์ต่อปริมาณร้อยละผลิตภัณฑ์ พบว่า เมื่ออัตราส่วนโดยมวลระหว่างสารกระตุ้นต่อถ่านหินซบิพูมินัสเพิ่มขึ้น ปริมาณร้อยละผลิตภัณฑ์ที่ลดลง เนื่องจากสารกระตุ้นสามารถแพร่เข้าไปในเนื้อถ่านได้มากขึ้น ทำให้เกิดปฏิกิริยาระหว่างโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (สารกระตุ้น) กับอะตอมคาร์บอนได้มากขึ้น ระหว่างการเกิดปฏิกิริยายังพบว่าการปลดปล่อยสารต่าง ๆ ออกมาจากโครงสร้างถ่าน ผลทำให้ถ่านชาร์เกิดการสูญเสียน้ำหนักมากขึ้น ซึ่งการสูญเสียน้ำหนักส่วนใหญ่ของถ่านชาร์ เกิดจากการค่อย ๆ ปลดปล่อยน้ำและไฮโดรเจนออกมา จากการแทนที่ของ -H group ในโครงสร้างถ่านด้วย -OK group นอกจากนี้การปลดปล่อยไฮโดรเจนยังสามารถเกิดได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่างถ่านหินซบิพูมินัสกับโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ไปเป็น  $K_2CO_3$  และ  $K_2O$  ดังสมการที่ 2



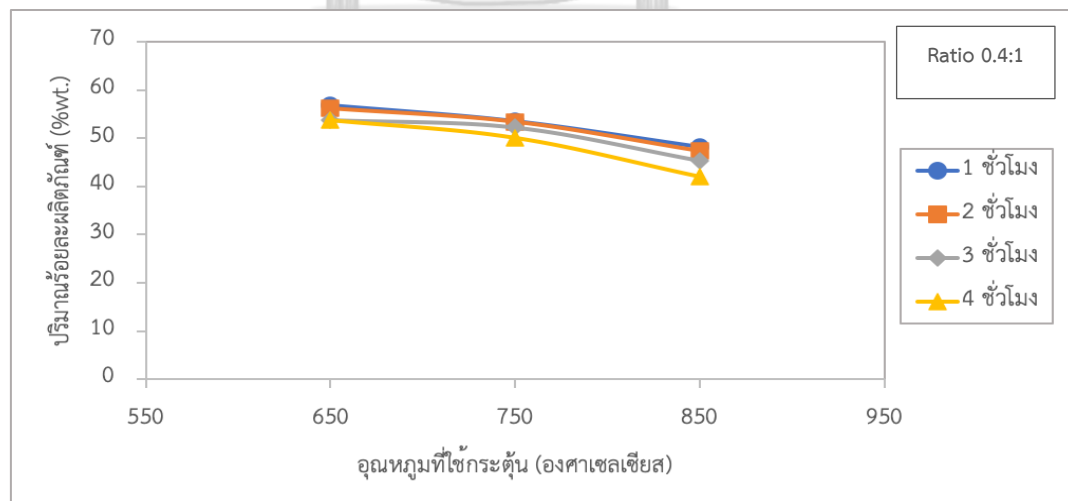
เมื่อพิจารณาภาพที่ 4.5 (a) แสดงภาวะที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียสและชั่วโมงในการกระตุ้นเพิ่มขึ้น พบว่า เมื่ออัตราส่วนโดยมวลระหว่างสารกระตุ้นและถ่านหินซบิพูมินัสเพิ่มขึ้น ส่งผลต่อปริมาณร้อยละผลิตภัณฑ์เพียงเล็กน้อย เนื่องจากที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส โพแทสเซียม

ไฮดรอกไซด์ยังมีบทบาทน้อยต่อการเกิดปฏิกิริยากับอะตอมคาร์บอน ทำให้การสูญเสียน้ำหนักส่วนใหญ่เกิดจากการปลดปล่อยออกมาของน้ำและไฮโดรเจนเท่านั้น

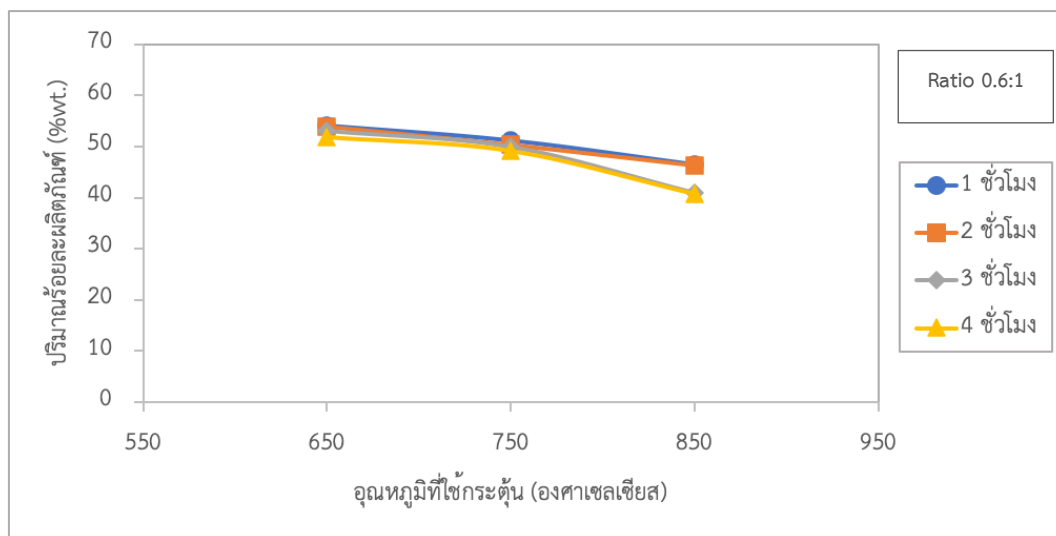
4.2.2.2 ผลของอุณหภูมิที่ใช้กระตุ้นต่อปริมาณร้อยละผลิตภัณฑ์ที่ใช้เตรียมถ่านกัมมันต์จากถ่านหินซับปิทูมินัส



ภาพที่ 4.6 ผลของอุณหภูมิที่ใช้กระตุ้นต่อปริมาณร้อยละผลิตภัณฑ์ที่ใช้เตรียมถ่านกัมมันต์จากถ่านหินซับปิทูมินัส ที่อัตราส่วนโดยมวลระหว่างโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (สารกระตุ้น) ต่อถ่านหินซับปิทูมินัส 0.2:1



ภาพที่ 4.7 ผลของอุณหภูมิที่ใช้กระตุ้นต่อปริมาณร้อยละผลิตภัณฑ์ที่ใช้เตรียมถ่านกัมมันต์จากถ่านหินซับปิทูมินัส ที่อัตราส่วนโดยมวลระหว่างโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (สารกระตุ้น) ต่อถ่านหินซับปิทูมินัส 0.4:1



**ภาพที่ 4.8** ผลของอุณหภูมิที่ใช้กระตุ้นต่อปริมาณร้อยละผลิตภัณฑ์ที่ใช้เตรียมถ่านกัมมันต์จากถ่านหินซบิพูมินัส ที่อัตราส่วนโดยมวลระหว่างโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (สารกระตุ้น) ต่อถ่านหินซบิพูมินัส 0.6:1

จากภาพที่ 4.6 – 4.8 แสดงผลของอุณหภูมิที่ใช้กระตุ้นต่อปริมาณร้อยละผลิตภัณฑ์ที่ใช้เตรียมถ่านกัมมันต์จากถ่านหินซบิพูมินัส ที่อัตราส่วนโดยมวลระหว่างโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (สารกระตุ้น) ต่อถ่านหินซบิพูมินัส 0.2:1 0.4:1 และ 0.6:1 ตามลำดับ พบว่า เมื่ออุณหภูมิในการกระตุ้นเพิ่มขึ้น ปริมาณร้อยละผลิตภัณฑ์ลดลง เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิที่ใช้กระตุ้น ทำให้ทาร์และสารระเหยที่อยู่ในโครงสร้างของถ่านชาร์หลุดออกไปได้มากขึ้น จึงทำให้น้ำหนักของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากถ่านหินซบิพูมินัสที่ได้ลดลง ปริมาณร้อยละผลิตภัณฑ์ก็ลดลงด้วยเช่นกัน นอกจากนี้ที่อุณหภูมิในการกระตุ้นต่ำกว่า 750 องศาเซลเซียส พบว่าปริมาณร้อยละผลิตภัณฑ์ลดลงเพียงเล็กน้อยทุกอัตราส่วน เนื่องจากน้ำหนักที่หายไปส่วนใหญ่ของถ่านกัมมันต์ที่ได้เกิดจากการหลุดออกของสารระเหยกับไฮโดรเจนเท่านั้น โดยเฉพาะการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่างโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์กับถ่านหินซบิพูมินัส ดังสมการที่ 3

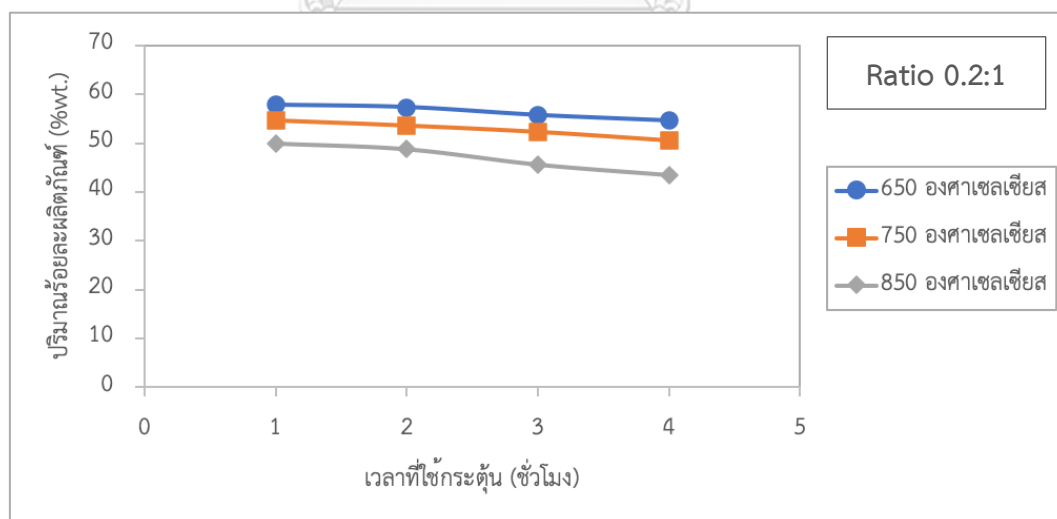


ซึ่งจะเกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 150 ถึง 450 องศาเซลเซียส ส่งผลให้ทาร์และสารระเหยยังคงอยู่ในโครงสร้างถ่านชาร์มาก เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในช่วง 450 ถึง 750 องศาเซลเซียส พบว่าทาร์และสาร

ระเหยที่ปกคลุมอยู่ที่พื้นผิวและรูปทรงของถ่านจะหยุดการหลุดออก เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาระหว่าง -H group และ -OK group ที่อยู่บนคนละสายของพอลิเมอร์ในถ่านชาร์ ส่งผลให้เกิดการ Cross-link อย่างรวดเร็ว แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิการกระตุ้นมากกว่า 750 องศาเซลเซียส พบว่าปริมาณร้อยละผลิตภัณฑ์ที่ได้ลดลงอย่างมากทุกอัตราส่วนของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่เป็นสารกระตุ้นต่อถ่านหินซับิบูมินัส เนื่องจากที่อุณหภูมิในการกระตุ้นสูง จะเกิดปฏิกิริยาระหว่างอะตอมคาร์บอนในโครงสร้างถ่านกับสารประกอบโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ที่นำไปสู่การเกิดแก๊สซิฟิเคชันของคาร์บอน และการเกิดคาร์บอนออกไซด์ (Carbon oxide) กับโลหะโพแทสเซียม (Potassium metal) เป็นผลทำให้ถ่านกัมมันต์ที่ได้มีการสูญเสียน้ำหนักอย่างมาก ซึ่งการสูญเสียน้ำหนักที่อุณหภูมิสูง ๆ สามารถอธิบายได้จากการปลดปล่อยของคาร์บอนออกไซด์ และโลหะโพแทสเซียมบริสุทธิ์ ดังสมการที่ 4 และ 5 ดังนี้

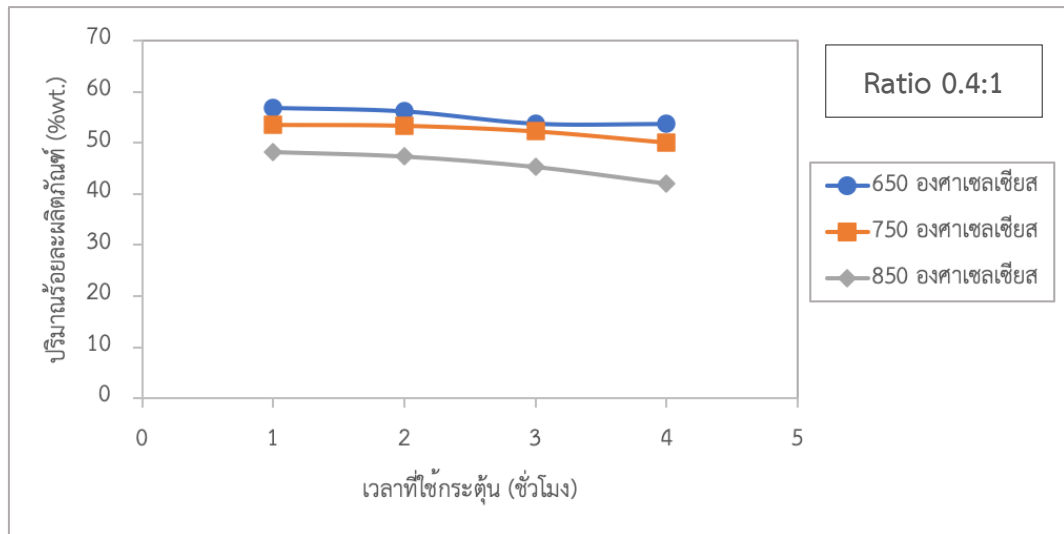


#### 4.2.2.3 ผลของเวลาที่ใช้กระตุ้นต่อปริมาณร้อยละผลิตภัณฑ์ที่ใช้เตรียมถ่านกัมมันต์จากถ่านหินซับิบูมินัส

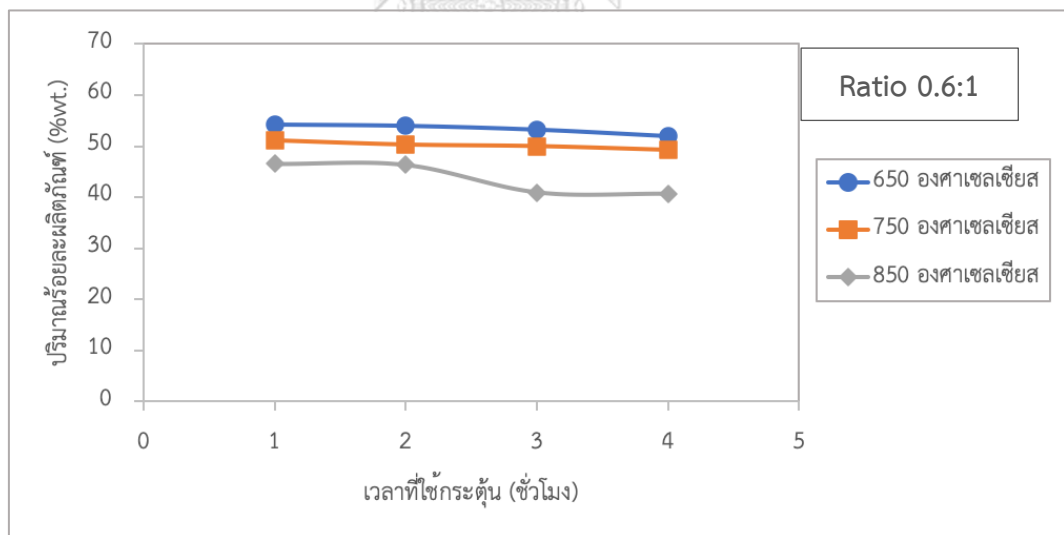


ภาพที่ 4.9 ผลของเวลาที่ใช้กระตุ้นต่อปริมาณร้อยละผลิตภัณฑ์ที่ใช้เตรียมถ่านกัมมันต์จากถ่านหินซับิบูมินัสที่อัตราส่วนโดยมวลระหว่างโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (สารกระตุ้น) ต่อถ่านหินซับิบูมินัส 0.2:1





ภาพที่ 4.10 ผลของเวลาที่ใช้กระตุ่นต่อปริมาณร้อยละผลิตภัณฑ์ที่ใช้เตรียมถ่านกัมมันต์จากถ่านหินซับบิทูมินัสที่อัตราส่วนโดยมวลระหว่างโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (สารกระตุ่น) ต่อถ่านหินซับบิทูมินัส 0.4:1



ภาพที่ 4.11 ผลของเวลาที่ใช้กระตุ่นต่อปริมาณร้อยละผลิตภัณฑ์ที่ใช้เตรียมถ่านกัมมันต์จากถ่านหินซับบิทูมินัสที่อัตราส่วนโดยมวลระหว่างโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (สารกระตุ่น) ต่อถ่านหินซับบิทูมินัส 0.6:1

จากภาพที่ 4.9 4.10 และ 4.11 แสดงผลของเวลาที่ใช้กระตุ้นต่อปริมาณร้อยละผลิตภัณฑ์ที่ใช้เตรียมถ่านกัมมันต์จากถ่านหินซับปิทูนีส ที่อัตราส่วนโดยมวลระหว่างโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (สารกระตุ้น) ต่อถ่านหินซับปิทูนีส 0.2: 1 0.4: 1 และ 0.6: 1 ตามลำดับ พบว่า เมื่อเวลาที่ใช้ในการกระตุ้นนานขึ้น ปริมาณร้อยละผลิตภัณฑ์ที่ได้จะลดลงทุกอัตราส่วนโดยมวลระหว่างโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ที่เป็นสารกระตุ้นต่อถ่านหินซับปิทูนีส เนื่องจากเวลาในการกระตุ้นนานขึ้น ส่งผลให้ปริมาณความร้อนเพิ่มสูงขึ้นด้วย โดยปริมาณความร้อนที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ทาร์และสารระเหยบางส่วนที่อยู่ในโครงสร้างหลุดออกมากขึ้น ทำให้สารกระตุ้นสามารถแพร่เข้าไปในโครงสร้างถ่านได้ทั่วทั้งพื้นผิวถ่านและเกิดปฏิกิริยากับโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ได้มากขึ้น จึงเกิดการสูญเสียน้ำหนักของถ่านกัมมันต์เพิ่มมากขึ้น

4.2.2.4 การวิเคราะห์พื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุนทั้งหมด และขนาดรูพรุนเฉลี่ยของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากถ่านหินซับปิทูนีส

**ตารางที่ 4.6** ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุนทั้งหมด และขนาดรูพรุนเฉลี่ยของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากถ่านหินซับปิทูนีส ที่อัตราส่วนโดยมวลระหว่างโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อถ่านหินซับปิทูนีส 0.2:1

KOH : Coal	อุณหภูมิ (°C)	เวลา (hr.)	พื้นที่ผิว (m <sup>2</sup> /g)	ปริมาตรรูพรุนทั้งหมด (cm <sup>3</sup> /g)	ขนาดรูพรุนเฉลี่ย (°A)
0.2:1	650	1	40.35	0.0222	26.54
		2	40.50	0.0248	26.17
		3	42.25	0.0281	26.61
		4	40.45	0.0268	26.52
	750	1	62.53	0.0396	25.32
		2	67.84	0.0400	23.56
		3	166.02	0.0874	21.05
		4	167.76	0.0925	22.07
	850	1	155.35	0.0877	22.58
		2	249.95	0.1372	21.96
		3	317.37	0.1721	21.69
		4	453.12	0.2508	22.14

ตารางที่ 4.7 ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุนทั้งหมด และขนาดรูพรุนเฉลี่ยของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากถ่านหินซับบิทูมินัส ที่อัตราส่วนโดยมวลระหว่างโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อถ่านหินซับบิทูมินัส 0.4:1

KOH : Coal	อุณหภูมิ (°C)	เวลา (hr.)	พื้นที่ผิว (m <sup>2</sup> /g)	ปริมาตรรูพรุนทั้งหมด (cm <sup>3</sup> /g)	ขนาดรูพรุนเฉลี่ย (°A)
0.4:1	650	1	139.11	0.0548	23.93
		2	152.84	0.0774	23.76
		3	168.81	0.0936	22.18
		4	260.34	0.1509	23.18
	750	1	268.56	0.1567	23.34
		2	310.22	0.1782	22.97
		3	419.54	0.2389	22.78
		4	377.26	0.2135	22.64
	850	1	571.02	0.3196	22.39
		2	799.81	0.4464	22.32
		3	897.99	0.5020	22.36
		4	615.85	0.3407	22.13

**ตารางที่ 4.8** ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุนทั้งหมด และขนาดรูพรุนเฉลี่ยของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากถ่านหินซับบิทูมินัส ที่อัตราส่วนโดยมวลระหว่างโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อถ่านหินซับบิทูมินัส 0.6:1

KOH : Coal	อุณหภูมิ (°C)	เวลา (hr.)	พื้นที่ผิว (m <sup>2</sup> /g)	ปริมาตรรูพรุนทั้งหมด (cm <sup>3</sup> /g)	ขนาดรูพรุนเฉลี่ย (°A)
0.6:1	650	1	101.28	0.0746	29.45
		2	158.54	0.1076	27.14
		3	291.85	0.1864	25.54
		4	357.72	0.2112	23.62
	750	1	401.90	0.2500	24.88
		2	406.52	0.2525	24.84
		3	466.26	0.2858	24.52
		4	589.34	0.3446	23.39
	850	1	521.50	0.3083	23.65
		2	1035.91	0.6101	23.56
		3	1107.39	0.6522	23.56
		4	899.01	0.5164	22.98

### จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากตารางที่ 4.6 4.7 และ 4.8 แสดงผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุนทั้งหมด และขนาดรูพรุนเฉลี่ยของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากถ่านหินซับบิทูมินัส ที่อัตราส่วนโดยมวลระหว่างโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์กับถ่านหินซับบิทูมินัส 0.2:1 0.4:1 และ 0.6:1 ตามลำดับ พบว่าภาวะที่เหมาะสมสำหรับการเตรียมถ่านกัมมันต์จากถ่านหินซับบิทูมินัส คือ ที่อัตราส่วนโดยมวลระหว่างโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อถ่านหินซับบิทูมินัส 0.6:1 อุณหภูมิที่ใช้กระตุ้น 850 องศาเซลเซียสและเวลาที่ใช้กระตุ้น 3 ชั่วโมง ได้พื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนสูงสุด 1107.39 ตารางเมตรต่อกรัม และ 0.6522 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม ตามลำดับ ที่ภาวะเหมาะสมนี้พบว่าอัตราส่วนโดยมวลที่ 0.6:1 แสดงถึงปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่เป็นสารกระตุ้นที่แพร่เข้าไปในเนื้อถ่านได้มาก โดยอาจจะแพร่ไปได้ทั่วทั้งผิวถ่านซาร์ และเมื่อนำมากระตุ้นเป็นถ่านกัมมันต์ พบว่าที่อุณหภูมิและเวลาที่ใช้กระตุ้นที่ภาวะเหมาะสม ส่งผลให้สารกระตุ้นสามารถทำปฏิกิริยากับอะตอมคาร์บอนได้ทั่วทั้งโครงสร้าง เกิดการสร้างรูพรุนขึ้นมาก ทำให้ได้พื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนสูงสุด

เมื่อพิจารณาขนาดรูพรุนเฉลี่ยของถ่านหินซับบิทูมินัสที่กระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่อัตราส่วนโดยมวลต่าง ๆ พบว่าขนาดรูพรุนมีขนาดเฉลี่ยใกล้เคียงกัน

จากการศึกษาผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุนทั้งหมด และขนาดรูพรุนเฉลี่ยของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากไบโอชาร์และถ่านหินซับบิทูมินัส พบว่าภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการเตรียมถ่านกัมมันต์ มีดังนี้

- 1) ถ่านกัมมันต์จากถ่านกะลาปาล์ม คือ อุณหภูมิที่ใช้ในกระตุ้น 1000 องศาเซลเซียส เวลาที่ใช้ในกระตุ้น 4 ชั่วโมง มีพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนทั้งหมดสูงสุด คือ 441.02 ตารางเมตรต่อกรัม และ 0.2458 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม ตามลำดับ โดยจะใช้สัญลักษณ์เป็น **PSAC**
- 2) ถ่านกัมมันต์จากถ่านไม้ไผ่ คือ อุณหภูมิที่ใช้ในกระตุ้น 900 องศาเซลเซียส เวลาที่ใช้ในกระตุ้น 2 ชั่วโมง มีพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนทั้งหมดสูงสุด คือ 712.00 ตารางเมตรต่อกรัม และ 0.3991 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม ตามลำดับ โดยจะใช้สัญลักษณ์เป็น **BBAC**
- 3) ถ่านกัมมันต์จากถ่านหินซับบิทูมินัส คือ อัตราส่วนโดยมวลระหว่างโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์กับถ่านหินซับบิทูมินัสที่ 0.6:1 อุณหภูมิที่ใช้ในกระตุ้น 850 องศาเซลเซียส เวลาที่ใช้ในกระตุ้น 3 ชั่วโมง มีพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนทั้งหมดสูงสุด 1107.39 ตารางเมตรต่อกรัม และ 0.6522 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม ตามลำดับ โดยจะใช้สัญลักษณ์เป็น **SCAC**

จึงนำถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากไบโอชาร์และถ่านหินซับบิทูมินัสที่ภาวะเหมาะสมที่สุดมาศึกษาสมบัติต่อ

### 4.3 สมบัติของถ่านกัมมันต์

#### 4.3.1 การวิเคราะห์สมบัติเบื้องต้นของถ่านกัมมันต์

4.3.1.1 การวิเคราะห์หึ่งค์ประกอบโดยประมาณ (Proximate analysis) และองค์ประกอบแบบแยกธาตุ (Ultimate analysis)

ตารางที่ 4.9 ผลการวิเคราะห์หึ่งค์ประกอบโดยประมาณ (Proximate analysis) ของถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์	การวิเคราะห์หึ่งค์ประกอบแบบประมาณ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)		
	สารระเหย (VM, %)	เถ้า (Ash, %)	คาร์บอนคงตัว (FC, %)
PSAC	0.13	5.71	94.16
BBAC	6.69	9.84	83.47
SCAC	4.01	5.11	90.88

หมายเหตุ \* ร้อยละโดยน้ำหนักมาตรฐานแห้ง (%dry basis)

ตารางที่ 4.10 ผลการวิเคราะห์หึ่งค์ประกอบแบบแยกธาตุ (Ultimate analysis) ของถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์	การวิเคราะห์หึ่งค์ประกอบแบบแยกธาตุ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)			
	คาร์บอน (C, %)	ไฮโดรเจน (H, %)	ไนโตรเจน (N, %)	ออกซิเจน (O, %)
PSAC	84.47	1.29	0.88	13.37
BBAC	81.77	1.35	0.71	16.17
SCAC	88.88	0.76	0.99	9.37

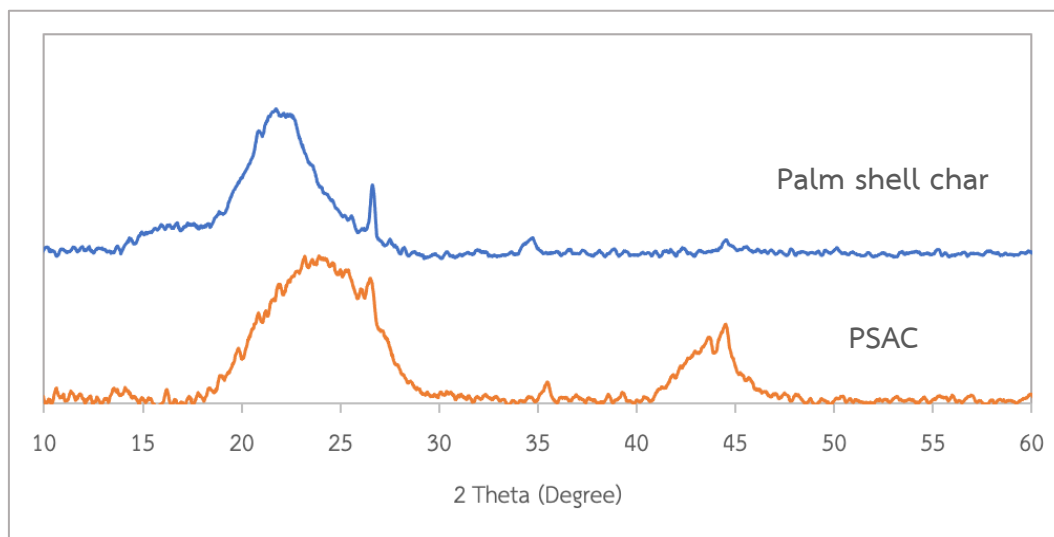
หมายเหตุ \* ออกซิเจน = 100 - ผลรวมของธาตุแต่ละชนิดยกเว้นธาตุออกซิเจน

จากการวิเคราะห์สมบัติเบื้องต้นของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากถ่านกะลาปาล์ม (PSAC) ถ่านไม้ไผ่ (BBAC) และถ่านหินซับพิทูนีส (SCAC) ที่ภาวะเหมาะสมที่สุด โดยตารางที่ 4.9 แสดงผลการวิเคราะห์หึ่งค์ประกอบโดยประมาณของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากไบโอชาร์และถ่านหินซับพิทูนีสตามลำดับ พบว่าถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากถ่านกะลาปาล์ม มีค่าสารระเหย เถ้า และคาร์บอนคงตัวร้อยละ 0.13, 5.71 และ 94.16 ตามลำดับ ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากถ่านไม้ไผ่ มีค่าสารระเหย เถ้า และคาร์บอนคงตัว ร้อยละ 6.69, 9.84 และ 83.47 ตามลำดับ และถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากถ่านหินซับพิทูนีส มีค่าสารระเหย เถ้า และคาร์บอนคงตัว ร้อยละ 4.01, 5.11 และ 90.88 ตามลำดับ โดย

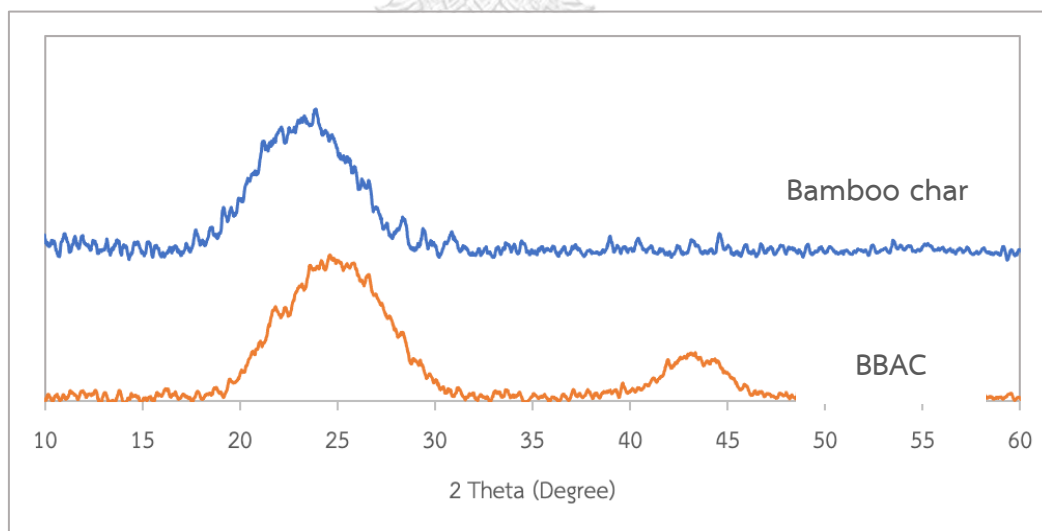
พบว่าถ่านกัมมันต์ทั้ง 3 ชนิดนั้นมีค่าคาร์บอนคงตัวเพิ่มสูงขึ้นเมื่อผ่านกระบวนการการกระตุ้น โดยมีปริมาณสูงกว่าถ่านที่ผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชัน เนื่องจากมีสารกระตุ้นและความร้อน โดยสารกระตุ้นจะช่วยทำให้รูพรุนเกิดขึ้นจากการเกิดปฏิกิริยากับอะตอมคาร์บอน และความร้อนที่ใช้กระตุ้นยังสามารถทำให้โครงสร้างของถ่านชาร์เกิดการสลายหรือแตกตัว แล้วเกิดการจัดเรียงโครงสร้างใหม่ที่มีความเป็นอะโรมาติกเพิ่มขึ้น ในขณะที่เดียวกันยังปลดปล่อยทาร์และสารระเหยออกจากพื้นผิวและรูพรุนที่ปกคลุมไว้ ทำให้ค่าสารระเหยลดลง

เมื่อวิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากถ่านกะลาปาล์ม (PSAC) ถ่านไม้ไผ่ (BBAC) และถ่านหินซับพิทูนีส (SCAC) ที่ภาวะเหมาะสมที่สุด ตามลำดับ ดังตารางที่ 4.10 พบว่า ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากถ่านกะลาปาล์ม มีธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน และออกซิเจนร้อยละ 84.47 1.29 0.88 13.37 ตามลำดับ ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากถ่านไม้ไผ่ มีธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน และออกซิเจนร้อยละ 81.77 1.35 0.71 16.17 ตามลำดับ และถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากถ่านหินซับพิทูนีส มีธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน และออกซิเจนร้อยละ 88.88 0.76 0.99 9.37 ตามลำดับ พบว่าถ่านกัมมันต์ทั้ง 3 ชนิดมีองค์ประกอบคาร์บอนที่เพิ่มขึ้นจากถ่านก่อนการกระตุ้น เนื่องจากกระบวนการกระตุ้น จะทำให้อะตอมคาร์บอนเกิดการจัดเรียงตัวเป็นชั้น ๆ เพิ่มขึ้น โดยแต่ละชั้นประกอบด้วยกลุ่มอะตอมคาร์บอนที่มีโครงสร้างเป็นวงอะโรมาติกประกอบอยู่ การที่โครงสร้างที่เกิดการจัดเรียงตัวเป็นวงอะโรมาติกมากขึ้น ทำให้องค์ประกอบไฮโดรเจนและออกซิเจนลดลง

4.3.2 การวิเคราะห์โครงสร้างของไบโอชาร์ ถ่านหินซบปิทูนีสและถ่านกัมมันต์ด้วยเทคนิค  
วิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffractometer, XRD)

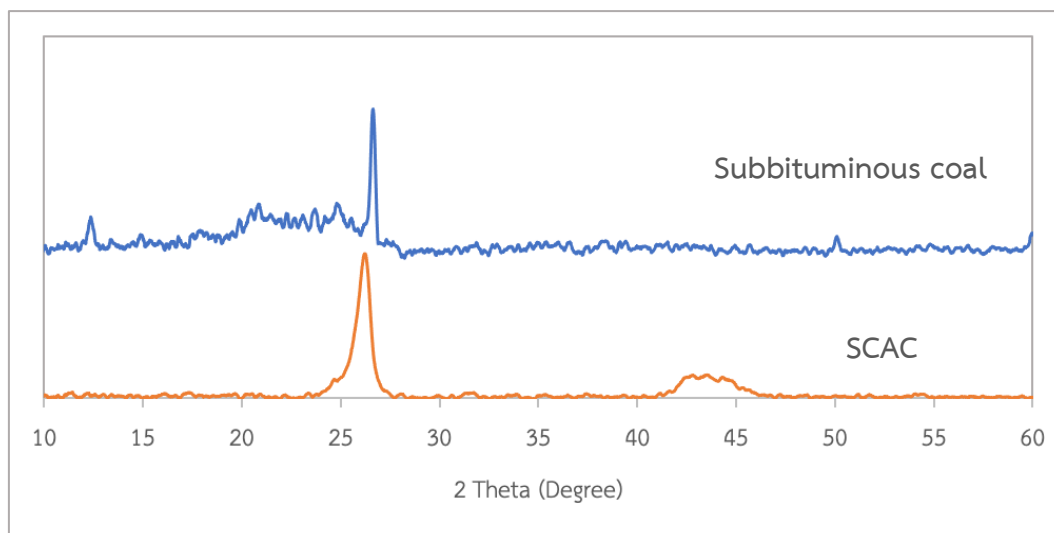


ภาพที่ 4.12 ผลการวิเคราะห์ XRD ของถ่านกะลาปาล์ม (Palm shell char) และถ่านกัมมันต์  
ที่เตรียมจากถ่านกะลาปาล์มที่ภาวะเหมาะสมที่สุด (PSAC)



ภาพที่ 4.13 ผลการวิเคราะห์ XRD ของถ่านไม้ไผ่ (Bamboo char) และถ่านกัมมันต์  
ที่เตรียมจากถ่านไม้ไผ่ที่ภาวะเหมาะสมที่สุด (BBAC)





ภาพที่ 4.14 ผลการวิเคราะห์ XRD ของถ่านหินซับบิทูมินัส (Subbituminous coal) และถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากถ่านหินซับบิทูมินัสที่ภาวะเหมาะสมที่สุด (SCAC)

จากภาพที่ 4.12 แสดงผลการวิเคราะห์ XRD ของถ่านกะลาปาล์มและถ่านกัมมันต์ที่ภาวะเหมาะสมที่สุด (PSAC) ตามลำดับ ซึ่งผลการวิเคราะห์ XRD ของถ่านกะลาปาล์ม พบว่าพีค XRD ที่  $2\theta$  เท่ากับ  $22^\circ$  ถึง  $25^\circ$  แสดงลักษณะเฉพาะของโครงสร้างคาร์บอนอสัณฐาน (Amorphous carbon) และ  $2\theta$  เท่ากับ  $26.6^\circ$  (002) แสดงลักษณะโครงสร้างของแกรไฟท์ที่เป็นผลึก เนื่องจากกะลาปาล์มเมื่อผ่านการคาร์บอนไนซ์เป็นถ่านชาร์ ความร้อนจะเข้าไปสลายโครงสร้างทางเคมีของวัตถุดิบและอะตอมอื่นๆ ที่ไม่ใช่อะตอมคาร์บอน ทำให้อะตอมคาร์บอนที่เหลืออยู่ในถ่านจัดเรียงตัวเป็นชั้นๆ แต่ชั้นประกอบด้วยวงหกเหลี่ยม (Aromatic ring) คล้ายโครงสร้างของแกรไฟท์ ดังนั้นเมื่อทำการวิเคราะห์ XRD จึงพบพีคที่แสดงลักษณะโครงสร้างแกรไฟท์ที่เป็นผลึก เมื่อนำถ่านกะลาปาล์มไปทำการกระตุ้นให้เป็นถ่านกัมมันต์ พบว่าที่  $2\theta$  ในช่วง  $22^\circ$  ถึง  $25^\circ$  พีคมีความกว้างขึ้น (Broaden) แสดงถึงการลดลงของความเป็นคาร์บอนอสัณฐาน (Amorphous carbon) เนื่องจากเกิดการจัดเรียงตัวใหม่คล้ายผลึกในโครงสร้างแกรไฟท์เพิ่มขึ้น ดังนั้นที่  $2\theta$  เท่ากับ  $26.6^\circ$  พีคจึงสูงขึ้น [12] นอกจากนี้ยังปรากฏพีคที่  $2\theta$  เท่ากับ  $44^\circ$  (100) ซึ่งแสดงถึงลักษณะโครงสร้างของแกรไฟท์ที่เป็นผลึกด้วยเช่นกัน [42]

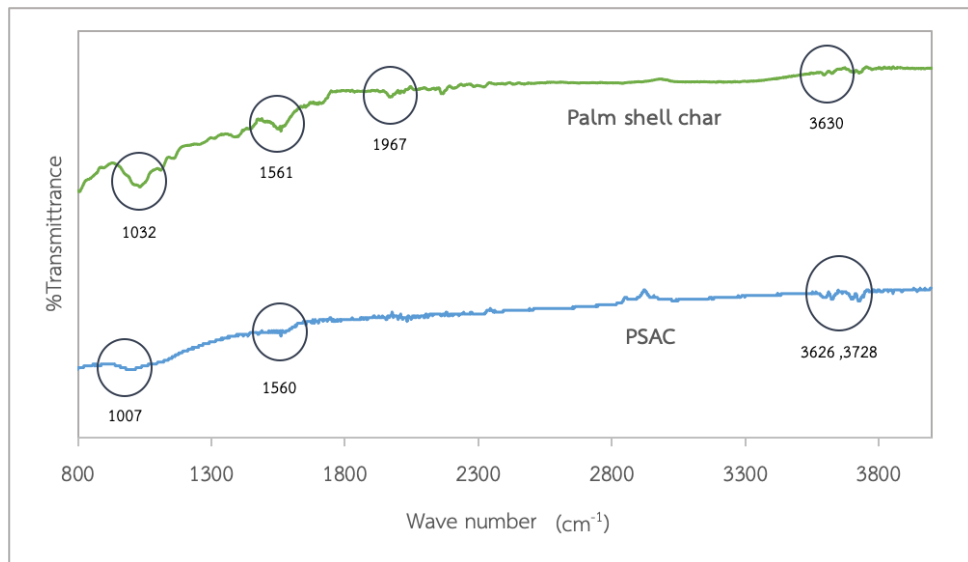
จากภาพที่ 4.13 แสดงผลการวิเคราะห์ XRD ของถ่านไม้ไผ่และถ่านกัมมันต์ที่ภาวะเหมาะสมที่สุด (BBAC) ตามลำดับ พบว่าผลการวิเคราะห์ XRD ของถ่านไม้ไผ่ที่พีคกว้างในช่วง  $2\theta$  เท่ากับ  $20^\circ$  ถึง  $28^\circ$  แสดงลักษณะเฉพาะของโครงสร้างคาร์บอนอสัณฐาน (Amorphous carbon) และโครงสร้าง

ของแกรไฟท์ที่เป็นผลึก โดยพีค 2 $\theta$  ที่แสดงความเป็นผลึกในโครงสร้างแกรไฟท์ จะปรากฏที่ 26.6° [43] แต่ผลการวิเคราะห์ XRD นี้ไม่สามารถแยกได้ เนื่องจากพีคเกิดการรวมตัวกัน เมื่อนำถ่านไม้ไฟไปกระตุ้นเป็นถ่านกัมมันต์ พบว่าพีคที่แสดงถึงโครงสร้างคาร์บอนอสัณฐาน (Amorphous carbon) และความเป็นผลึกในโครงสร้างแกรไฟท์ ยังคงรวมเป็นพีคเดียวกันที่กว้างอยู่ แต่ปรากฏพีคกว้างที่ 44° ขึ้นมาด้วย ซึ่งแสดงถึงลักษณะถึงความเป็นผลึกในโครงสร้างแกรไฟท์เช่นกัน

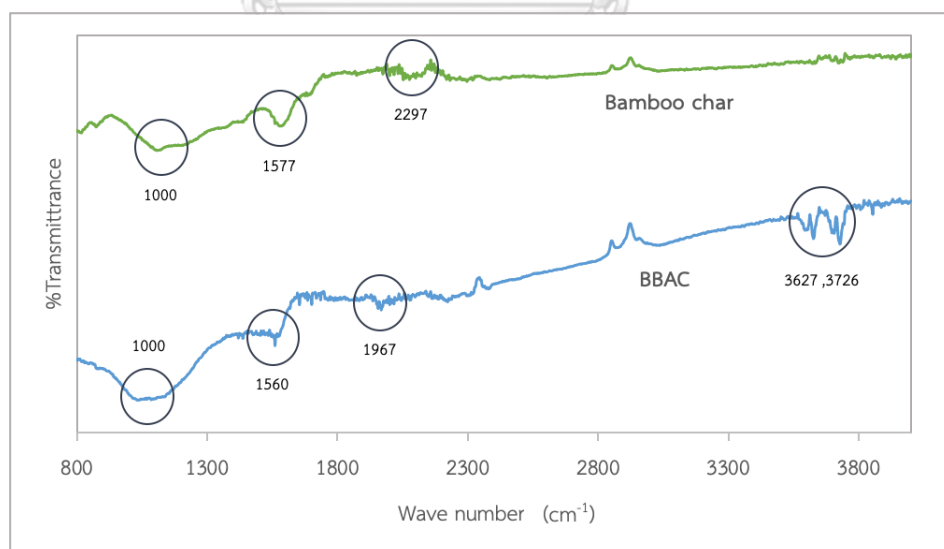
จากภาพที่ 4.14 แสดงผลการวิเคราะห์ XRD ของถ่านซัลไฟฟิวรีนและถ่านกัมมันต์ที่ภาวะเหมาะสมที่สุด (SCAC) ตามลำดับ พบว่าถ่านหินซัลไฟฟิวรีนก่อนการกระตุ้น ปรากฏพีคกว้างในช่วง 2 $\theta$  เท่ากับ 20° ถึง 26° ซึ่งแสดงถึงแร่ธาตุในถ่านหินซัลไฟฟิวรีน เช่น ดินขาว (K), แมกนีไทต์ (M), ควอตซ์ (Q), อิลไลต์ (I) และ ซิเดอไรต์ (S) และปรากฏพีคที่ 27° แสดงถึงความเป็นผลึกในโครงสร้างของซิลิกา เมื่อนำถ่านหินซัลไฟฟิวรีนไปกระตุ้นเป็นถ่านกัมมันต์ พบว่าพีคกว้างในช่วงที่ปรากฏ 20° ถึง 26° ในถ่านหินซัลไฟฟิวรีนหายไป และพีคเกิดการเลื่อนไปที่ตำแหน่ง 26.6° แสดงให้เห็นว่าเมื่อถ่านหินซัลไฟฟิวรีนถูกกระตุ้น โครงสร้างเกิดการจัดเรียงตัวใหม่เป็นโครงสร้างที่มีลักษณะคล้ายโครงสร้างแกรไฟท์ นอกจากนี้ยังปรากฏพีคกว้างที่ 44° แสดงถึงความเป็นผลึกในโครงสร้างแกรไฟท์เช่นกัน [44]

ดังนั้น พบว่าเมื่อนำไปโอซาร์และถ่านหินซัลไฟฟิวรีนมากระตุ้นเป็นถ่านกัมมันต์ ความเป็นผลึกในโครงสร้างของถ่านกัมมันต์ที่ได้มีลักษณะคล้ายกับผลึกในโครงสร้างของแกรไฟท์ เนื่องจากปรากฏพีคที่ตำแหน่งเดียวกัน นอกจากนี้ยังพบว่าถ่านหินซัลไฟฟิวรีนเมื่อนำมากระตุ้นเป็นถ่านกัมมันต์ พีคที่ได้มีความแคบมากกว่าถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากไปโอซาร์ แสดงว่าโครงสร้างเกิดการจัดเรียงตัวเป็นวงอะโรมาติกมากกว่า นอกจากนี้ยังพบว่าพีคที่ปรากฏในช่วง 20 - 30° และช่วง 40 - 45° ของถ่านซาร์และถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากวัตถุดิบทั้ง 3 ชนิดนั้นมีพีคที่กว้างและต่ำอยู่ ซึ่งแสดงถึงการมีลักษณะโครงสร้างคาร์บอนอสัณฐานปนอยู่ เนื่องจากความร้อนที่ได้จากกระบวนการคาร์บอนไนซ์และกระบวนการกระตุ้น ส่งผลให้เกิดการจัดเรียงตัวของคาร์บอนเป็นชั้นระนาบแกรไฟต์และในระหว่างการให้ความร้อนจะมีการกระจายตัวของโครงสร้างแกรไฟต์แบบสุ่มในถ่านซาร์และถ่านกัมมันต์ ทำให้ไม่มีความสมบูรณ์ของโครงสร้างผลึกคาร์บอน [45]

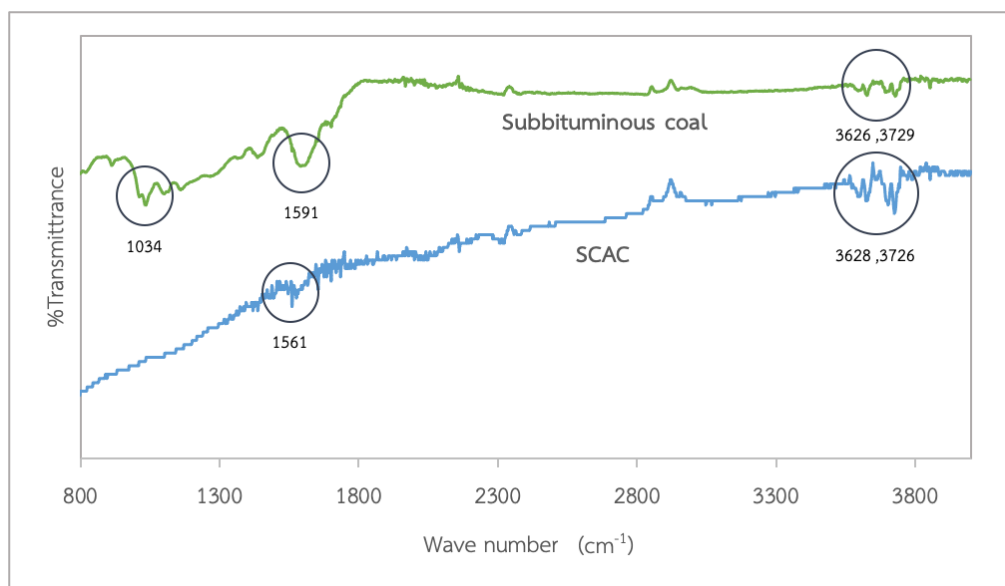
4.3.3 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของไบโอชาร์ ถ่านหินซัปปิทมินัสและถ่านกัมมันต์ ด้วยเทคนิควิเคราะห์ฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโคปี (Fourier transform Infrared Spectroscopy, FTIR)



ภาพที่ 4.15 ผลการวิเคราะห์ FTIR ของถ่านกะลาปาล์ม (Palm shell char) และถ่านกัมมันต์ จากถ่านกะลาปาล์มที่ภาวะเหมาะสมที่สุด (PSAC)



ภาพที่ 4.16 ผลการวิเคราะห์ FTIR ของถ่านไม้ไผ่ (Bamboo char) และถ่านกัมมันต์ จากถ่านไม้ไผ่ที่ภาวะเหมาะสมที่สุด (BBAC)



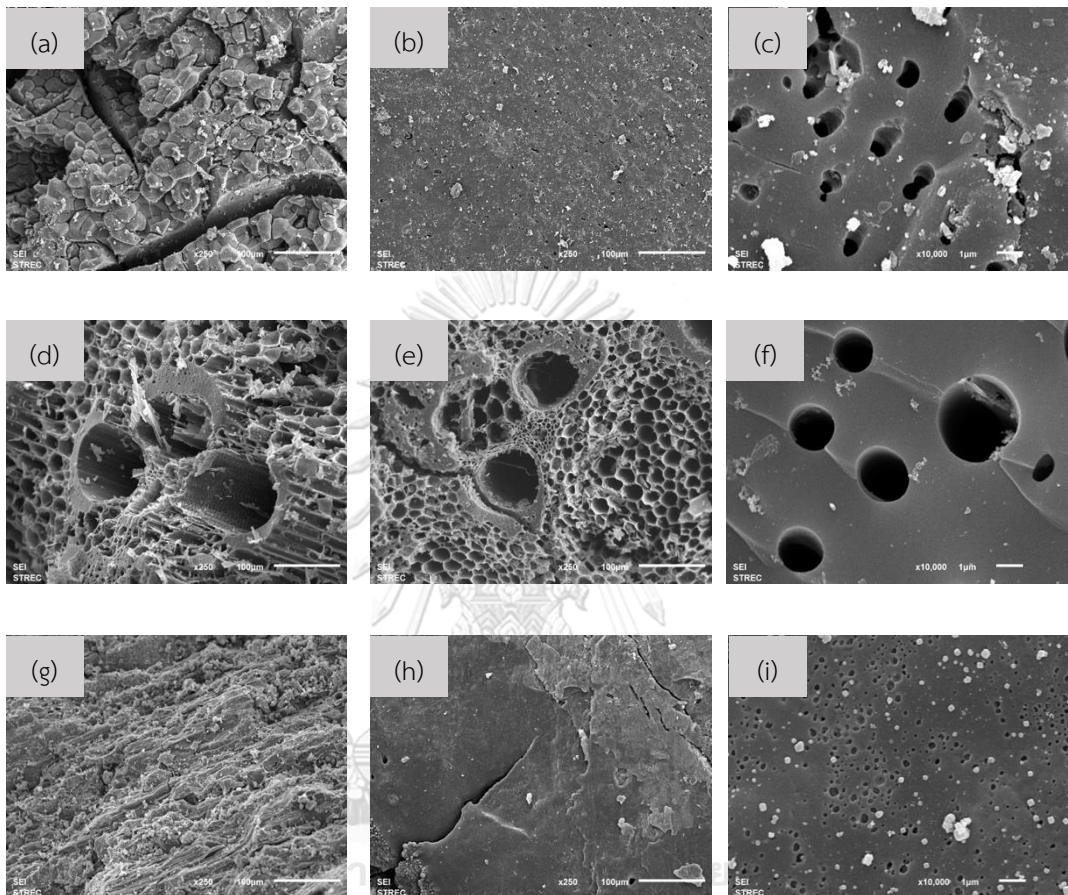
ภาพที่ 4.17 ผลการวิเคราะห์ FTIR ของถ่านหินซับบิทูมินัส (Subbituminous coal) และถ่านกัมมันต์จากถ่านหินซับบิทูมินัส (SCAC)

จากภาพที่ 4.15 4.16 และ 4.17 แสดงผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของถ่านกะลาปาล์ม ถ่านไม้ไฟ ถ่านหินซับบิทูมินัสและถ่านกัมมันต์ที่ภาวะที่เหมาะสมที่สุด ตามลำดับ พบว่าถ่านชาร์และถ่านกัมมันต์พบสเปกตรัมเลขคลื่นในช่วง  $3600 - 3800 \text{ cm}^{-1}$  แสดงถึงแถบการยืดของหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ในหมู่ฟังก์ชันแอลกอฮอล์ ฟีนอลและในโมเลกุลของน้ำที่อาจเกิดความชื้นขึ้นในถ่าน แต่จะไม่พบสเปกตรัมเลขคลื่นในช่วง  $2100 - 2260 \text{ cm}^{-1}$  แต่จะพบสเปกตรัมที่เลขคลื่นประมาณ  $1560 \text{ cm}^{-1}$  ซึ่งแสดงถึงพันธะ C=C ในวงอะโรมาติก เนื่องจากถ่านชาร์และถ่านกัมมันต์มีความเป็นอะโรมาติกมากขึ้น (Aromaticity) หลังผ่านกระบวนการคาร์บอนและกระบวนการกระตุ้น พบว่าโครงสร้างของสารไฮโดรคาร์บอนที่ไม่อิ่มตัวที่เป็นพันธะคู่ (C=C) และพันธะสาม (C≡C) เกิดการสลายตัวหรือแตกตัวส่งผลให้เกิดการจัดเรียงตัวใหม่เป็นวงเบนซินหรือวงอะโรมาติกมากขึ้น นอกจากนี้ยังพบสเปกตรัมเลขคลื่นประมาณ  $1000 \text{ cm}^{-1}$  แสดงถึงแถบการยืดพันธะ C-O ในหมู่ฟังก์ชันของแอลกอฮอล์ กรดคาร์บอกซิลิก เอสเทอร์และอีเทอร์ แต่ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากถ่านหินซับบิทูมินัสไม่พบสเปกตรัมที่เลขคลื่นนี้ เนื่องจากโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่เป็นสารกระตุ้นเข้าไปทำลายโครงสร้างของลิกนินที่มีหมู่ฟังก์ชันของเอสเทอร์และอีเทอร์หลงเหลืออยู่จากการคาร์บอนไนซ์ เมื่อพิจารณาการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของถ่านกะลาปาล์มและถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากถ่านกะลาปาล์ม ดังภาพที่ 4.15 ตามลำดับ พบว่าถ่านกะลาปาล์มพบสเปกตรัมที่เลขคลื่น  $1967 \text{ cm}^{-1}$  แสดงถึงแถบสเปกตรัมพันธะ C=O ในหมู่ฟังก์ชันคีโตน คิวโนนและแลกโทน เมื่อถ่านกะลาปาล์มถูกกระตุ้นเป็นถ่านกัมมันต์กลับไม่พบแถบสเปกตรัมที่เลขคลื่นนี้ เนื่องจากหมู่ฟังก์ชันเหล่านี้มี

ออกซิเจนเป็นองค์ประกอบทำให้มีความว่องไวและสลายตัวได้ง่ายที่อุณหภูมิสูง เมื่อพิจารณาการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของถ่านไม้ไผ่และถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากถ่านไม้ไผ่ ดังภาพที่ 4.16 ตามลำดับ พบว่าถ่านไม้ไผ่ปรากฏแถบสเปกตรัมที่เลขคลื่น  $2296 \text{ cm}^{-1}$  ซึ่งแสดงถึงพันธะสาม ( $\text{C}\equiv\text{C}$ ) ในหมู่อัลคิล (Alkyl group) แต่เมื่อถ่านไม้ไผ่ถูกกระตุ้นเป็นถ่านกัมมันต์ ไม่พบแถบสเปกตรัมที่เลขคลื่นนี้ แสดงว่าเกิดการสลายตัวและเกิดการจัดเรียงตัวเป็นวงอะโรมาติกมากขึ้น [46]



4.3.4 ลักษณะสัณฐานวิทยาของไบโอชาร์และถ่านหินซบปิทูมินัสและถ่านกัมมันต์ ที่ภาวะเหมาะสมที่สุดด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิ่ง (Scanning electron microscope, SEM)



CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาพที่ 4.18 ลักษณะสัณฐานวิทยาของ (a) ถ่านกะลาปาล์ม กำลังขยาย 250 เท่า (b) ถ่านกัมมันต์จากถ่านกะลาปาล์มที่ภาวะกระตุ้นเหมาะสม (PSAC) กำลังขยาย 250 เท่า (c) ถ่านกัมมันต์จากถ่านกะลาปาล์มที่ภาวะกระตุ้นเหมาะสม (PSAC) กำลังขยาย 10000 เท่า (d) ถ่านไม้ไผ่กำลังขยาย 250 เท่า (e) ถ่านกัมมันต์จากถ่านไม้ไผ่ที่ภาวะกระตุ้นเหมาะสม (BBAC) กำลังขยาย 250 เท่า (f) ถ่านกัมมันต์จากถ่านไม้ไผ่ที่ภาวะกระตุ้นเหมาะสม (BBAC) กำลังขยาย 10000 เท่า (g) ถ่านหินซบปิทูมินัส กำลังขยาย 250 เท่า (h) ถ่านกัมมันต์จากถ่านหินซบปิทูมินัสที่ภาวะกระตุ้นเหมาะสม (SCAC) กำลังขยาย 250 เท่า และ (i) ถ่านกัมมันต์จากถ่านหินซบปิทูมินัสที่ภาวะกระตุ้นเหมาะสม (SCAC) กำลังขยาย 10000 เท่า ตามลำดับ

ผลการวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยาของถ่านกะลาปาล์ม ถ่านไม้ไผ่และถ่านหินซบิพูมินัส ก่อนการกระตุ้นและหลังการกระตุ้น ที่กำลังขยาย 250 เท่า พบว่าพื้นผิวถ่านชาร์ทั้ง 3 ชนิดก่อนการกระตุ้น ดังภาพที่ 4.18 (a) (d) (g) มีลักษณะขรุขระ ไม่เรียบ มีลักษณะชั้น (layer) หรือช่อง (Chanel) เกิดขึ้น มีรูพรุนเกิดขึ้นต่ำ เมื่อพิจารณาลักษณะสัณฐานวิทยาของถ่านไม้ไผ่ ดังภาพที่ 4.18(d) พบว่ามีรูพรุนเกิดขึ้นบ้าง เนื่องจากไม้ไผ่โครงสร้างมีความหนาแน่นและแข็งน้อย ทำให้เมื่อผ่านการคาร์บอนไนซ์ จึงเกิดรูพรุนขึ้นได้ง่าย ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์สมบัติความพรุน โดยผลการวิเคราะห์พบว่า ถ่านไม้ไผ่มีพื้นที่ผิวสูงสุด

เมื่อนำถ่านชาร์ทั้ง 3 ชนิดมากระตุ้นเป็นถ่านกัมมันต์ แล้ววิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยา ที่กำลังขยาย 250 เท่า ดังภาพที่ 4.18(b) (e) และ (h) ตามลำดับ พบว่าพื้นผิวของถ่านกัมมันต์จาก ถ่านกะลาปาล์มและถ่านหินซบิพูมินัสที่ภาวะกระตุ้นเหมาะสม มีลักษณะเรียบ แสดงว่ามีการยุบตัวของชั้นหรือช่องเกิดขึ้น ทำให้มองเห็นลักษณะพื้นผิวเป็นเนื้อเดียวกัน แสดงดังภาพที่ 4.18(b) และ 4.18(h) ตามลำดับ แต่เมื่อพิจารณาที่กำลังขยาย 10000 เท่า ดังภาพที่ 4.18(c) และ 4.18(i) แสดงลักษณะสัณฐานวิทยาของถ่านกัมมันต์จากถ่านกะลาปาล์มที่ภาวะกระตุ้นเหมาะสม (PSAC) และ ถ่านกัมมันต์จากถ่านหินซบิพูมินัสที่ภาวะกระตุ้นเหมาะสม (SCAC) ตามลำดับ พบว่ามีรูพรุนเกิดขึ้นที่บริเวณพื้นผิวและกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ ซึ่งแสดงว่าชั้นหรือช่องเกิดการยุบตัวเมื่อผ่านกระบวนการกระตุ้นแล้วมีการจัดเรียงเป็นรูพรุนขึ้น ส่วนลักษณะสัณฐานวิทยาของถ่านกัมมันต์จาก ถ่านไม้ไผ่ ที่กำลังขยาย 250 เท่า ดังภาพที่ 4.18(e) พบว่าลักษณะพื้นผิวเรียบขึ้นและมีรูพรุนเพิ่มขึ้นมากกว่าก่อนการกระตุ้น เมื่อพิจารณาที่กำลังขยาย 10000 เท่า ดังภาพที่ 4.18(f) พบว่ารูพรุนเกิดขึ้นสม่ำเสมอและกระจายทั่วทั้งพื้นผิวและรูพรุนที่เกิดขึ้นมีลักษณะค่อนข้างใหญ่ เนื่องจากผนังรูพรุนเกิดการพังทลายส่งผลให้ผนังของรูพรุนเกิดการขยาย

## บทที่ 5

### สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยเพื่อศึกษาหาภาวะที่เหมาะสมในการผลิตถ่านกัมมันต์จากไบโอชาร์โดยวิธีการกระตุ้นทางกายภาพและถ่านหินซัลฟิวไรด์โดยวิธีการกระตุ้นทางเคมี และศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติของถ่านกัมมันต์ พร้อมทั้งเปรียบเทียบสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากถ่านกะลาปาล์ม ถ่านไม้ไผ่และถ่านหินซัลฟิวไรด์ โดยสามารถสรุปเป็นข้อ ได้ดังนี้

##### 5.1.1 ปัจจัยที่ส่งผลต่อการกระตุ้นในงานวิจัย

###### อุณหภูมิที่ใช้กระตุ้น

อุณหภูมิที่ใช้กระตุ้นเป็นปัจจัยที่สำคัญที่ส่งผลต่อการผลิตถ่านกัมมันต์เป็นอย่างมาก เมื่ออุณหภูมิในการกระตุ้นเพิ่มสูงขึ้น ทำให้ปริมาณร้อยละผลิตภัณฑ์ที่ได้ลดลง เนื่องจากทาร์และสารระเหยที่ปกคลุมอยู่ที่ผิวของถ่านและรูพรุนจะหลุดออก ทำให้สารกระตุ้นสารระเหยแพร่เข้าไปในโครงสร้างถ่านได้มากขึ้น เมื่อถ่านได้รับความร้อนจะถูกเผาไหม้กลายเป็นถ่านบางส่วน ทำให้สูญเสียน้ำหนักของถ่านชาร์ นอกจากนี้ยังพบว่า การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ใช้กระตุ้นยังส่งผลต่อปริมาณร้อยละผลิตภัณฑ์มากกว่าเวลาที่ใช้กระตุ้น เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิในการกระตุ้น จะทำให้เกิดการจัดเรียงตัวเป็นโครงสร้างผลึกที่มีช่องว่างหรือรูพรุนขึ้น จากการไล่สารระเหยหรือทาร์ออก ทำให้สารกระตุ้นแพร่เข้ามาในโครงสร้างถ่านง่ายและเกิดปฏิกิริยากับอะตอมคาร์บอน

###### เวลาที่ใช้กระตุ้น

เวลาที่ใช้กระตุ้นก็เป็นปัจจัยหนึ่ง ที่ส่งผลต่อการกระตุ้นเช่นกัน เนื่องจากเมื่อเวลาในการกระตุ้นเพิ่มขึ้น ปริมาณร้อยละผลิตภัณฑ์ที่ได้ลดลงตลอด โดยเวลาการกระตุ้นเพิ่มสูงขึ้นส่งผลให้ถ่านได้รับความร้อนเพิ่มขึ้นเช่นกัน ทำให้ทาร์และสารระเหยหลุดออก ปริมาณสารระเหยที่อยู่ในโครงสร้างถ่านลดลงและถ่านบางส่วนถูกเผาไหม้กลายเป็นถ่าน เกิดการสูญเสียน้ำหนักของถ่านชาร์ขึ้น ปริมาณร้อยละผลิตภัณฑ์ที่ได้จึงลดลง นอกจากนี้เมื่อเวลาในการกระตุ้นนานขึ้น ทำให้สารระเหยและทาร์ถูกกำจัดออก ส่งผลให้สารกระตุ้นแพร่เข้าไปทำปฏิกิริยา



### อัตราส่วนระหว่างโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อถ่านหินซับบิทูมินัส

อัตราส่วนระหว่างโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อถ่านหินซับบิทูมินัสเป็นปัจจัยที่สำคัญสำหรับกระบวนการการกระตุ้นด้วยเคมี เนื่องจากในขั้นตอนการเตรียม จะมีการอิมเพกเนชันสารกระตุ้นกับถ่านชาร์ เพื่อให้ถ่านชาร์แพร่เข้าไปในโครงสร้างถ่านก่อนนำไปกระตุ้น ดังนั้นถ้าอัตราส่วนระหว่างโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อถ่านหินซับบิทูมินัสมาก ทำให้สารกระตุ้นแพร่เข้าไปในโครงสร้างมาก เมื่อถูกกระตุ้นส่งผลให้ทาร์และสารระเหยหลุดไปมาก เกิดการสูญเสียน้ำหนักและทำให้เกิดรูพรุนขนาดเล็กมากขึ้นเช่นกัน

#### 5.1.2 ภาวะที่เหมาะสมในการผลิตถ่านกัมมันต์

การศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์จากถ่านกะลาปาล์ม ถ่านไม้ไผ่และถ่านหินซับบิทูมินัส เพื่อหาภาวะที่เหมาะสมในการผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ พบว่า ภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมถ่านกัมมันต์จากถ่านกะลาปาล์มด้วยวิธีการกระตุ้นทางกายภาพ โดยใช้ไอน้ำร้อนยิ่งยวดเป็นสารกระตุ้น คือ ที่อุณหภูมิในการกระตุ้น 1000 องศาเซลเซียส เวลา 4 ชั่วโมง ได้ปริมาณผลิตภัณฑ์ร้อยละ 36.76 พื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนสูงสุด 441.02 ตารางเมตรต่อกรัม และ 0.2458 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม ตามลำดับ ภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมถ่านกัมมันต์จากถ่านไม้ไผ่ด้วยวิธีการกระตุ้นทางกายภาพ โดยใช้ไอน้ำร้อนยิ่งยวดเป็นสารกระตุ้น คือ ที่อุณหภูมิที่ใช้กระตุ้น 900 องศาเซลเซียส เวลาที่ใช้กระตุ้น 2 ชั่วโมง ได้ปริมาณผลิตภัณฑ์ร้อยละ 36.82 พื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนสูงสุด 712.00 ตารางเมตรต่อกรัม และ 0.3991 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม ตามลำดับ ส่วนภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมถ่านกัมมันต์จากถ่านหินซับบิทูมินัสด้วยวิธีการกระตุ้นทางเคมี โดยใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นสารกระตุ้น คือ ที่อัตราส่วนระหว่างโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อถ่านหินซับบิทูมินัส 0.6 : 1 อุณหภูมิที่ใช้กระตุ้น 850 องศาเซลเซียสและเวลาที่ใช้กระตุ้น 3 ชั่วโมง ได้ปริมาณผลิตภัณฑ์ร้อยละ 40.94 พื้นที่ผิวจำเพาะสูงสุด 1107.39 ตารางเมตรต่อกรัม และปริมาตรรูพรุนสูงสุด 0.6522 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม ตามลำดับ พบว่าถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากถ่านกะลาปาล์ม ต้องใช้อุณหภูมิสูงและเวลานานเพื่อให้รูพรุนเกิดทั่วทั้งผิวถ่านชาร์ เนื่องจากถ่านกะลาปาล์มโครงสร้างมีความหนาแน่นและแข็งกว่าเมื่อเทียบกับถ่านไม้ไผ่ ซึ่งเมื่อพิจารณาภาวะที่เหมาะสมของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากถ่านไม้ไผ่ พบว่าใช้อุณหภูมิและเวลาในการกระตุ้นต่ำกว่า เนื่องจากถ่านไม้ไผ่โครงสร้างมีความหนาแน่นและแข็งน้อยที่สุด ผลการวิเคราะห์ XRD แสดงความเป็นผลึกของเซลลูโลสที่มาก สำหรับถ่านหินซับบิทูมินัส เมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์ XRD ของถ่านหินซับบิทูมินัส โดยปรากฏพิคที่แสดงความเป็นผลึกของโครงสร้างแกรไฟต์ที่มีการจัดเรียงตัวของผลึกแบบ Hexagonal และ Tetrahedral อย่างเป็นระเบียบที่แคบกว่าถ่านชาร์ชนิด

อื่น แสดงว่าโครงสร้างเกิดการจัดเรียงตัวเป็นวงอะโรมาติกมาก ส่งผลให้โครงสร้างมีความหนาแน่น และแข็งมากที่สุด วิธีการเตรียมถ่านกัมมันต์จากถ่านหินซับบิทูมินัสด้วยวิธีการกระตุ้นทางเคมี เนื่องจากวิธีการกระตุ้นทางกายภาพได้พื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนต่ำ

จากการวิเคราะห์สมบัติความพรุน พบว่าการเตรียมถ่านกัมมันต์จากถ่านไม้ไผ่และถ่านหินซับบิทูมินัส ให้ค่าพื้นที่ผิวที่ต่ำกว่าถ่านกัมมันต์ในเชิงการค้า ส่วนถ่านกัมมันต์จากถ่านกะลาปาล์มยังให้พื้นที่ผิวต่ำกว่าถ่านกัมมันต์ในเชิงการค้า ดังนั้นถ่านกัมมันต์จากถ่านไม้ไผ่และถ่านหินซับบิทูมินัส สามารถนำไปเป็นตัวเลือกในการผลิตถ่านกัมมันต์ในเชิงอุตสาหกรรมต่อไปได้

### 5.1.3 ข้อเสนอแนะ

- (1) ศึกษาการผลิตถ่านกัมมันต์จากวัตถุดิบที่ผ่านการคาร์บอนไนซ์ที่เมืองค์ประกอบทางเคมีที่ต่างกัน
- (2) ศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับจากถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากไบโอชาร์และถ่านหินซับบิทูมินัส
- (3) ศึกษาการผลิตถ่านกัมมันต์จากถ่านกะลาปาล์มโดยใช้เตาเผาแบบหมุน (Rotary kiln) เพื่อให้ได้พื้นที่ผิวที่สูงขึ้น

## บรรณานุกรม

1. คักยภาพชีวมวลในประเทศไทย. Available from:  
<http://www.iscisaraburee.sc.chula.ac.th/2017/index.php/2016/06/06/i-sink-under-the-weight-of-the-splendour/>.
2. การแปรรูปวัสดุเหลือทิ้งให้เป็นพลังงานทางเลือก. Available from:  
<https://www.research.chula.ac.th/energy-from-waste/>.
3. Suhas, P.J. Carrott, and M.M. Ribeiro Carrott, *Lignin--from natural adsorbent to activated carbon: a review*. Bioresour Technol, 2007. 98(12): p. 2301-12.
4. ประเสริฐ, ช., เทคโนโลยีการทำเหมืองถ่านหิน. 1995: ฝ่ายกิจการเหมือง การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย.
5. วัลลยา, ว., V. Wallaya, and ว. ธราพงษ์, ภาวะที่เหมาะสมในการผลิตถ่านกัมมันต์จากเปลือกทุเรียนและเปลือกมังคุดเพื่อใช้กำจัดสีในโมลาส. 2011.
6. ณัฐวิภา, จ., C. Nattavipa, and ว. ธราพงษ์, การผลิตถ่านกัมมันต์จากเมล็ดลำไย โดยการกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์. 2011.
7. อลิสราน, น., N. Alissara, and ว. ธราพงษ์, การเตรียมถ่านกัมมันต์จากกะลาแมคาเดเมียโดยการกระตุ้นทางกายภาพ. 2010.
8. Bamdad, H., et al., *A review on common adsorbents for acid gases removal: focus on biochar*. 2018. 81: p. 1705-1720.
9. โครงสร้างของน้ำตาลโพลีแซคคาไรด์ (*Polysaccharide structure*). Available from:  
<https://en.wikipedia.org/wiki/Polysaccharide>.
10. โครงสร้างของเซลลูโลส (*Cellulose structure*). Available from:  
<https://en.wikipedia.org/wiki/Cellulose>.
11. โครงสร้างของลิกนิน (*Lignin structure*). Available from:  
<https://en.wikipedia.org/wiki/Lignin>.
12. Bai, C.-X., F. Shen, and X.-H. Qi, *Preparation of porous carbon directly from hydrothermal carbonization of fructose and phloroglucinol for adsorption of tetracycline*. Chinese Chemical Letters, 2017. 28(5): p. 960-962.
13. Yahya, M.A., Z. Al-Qodah, and C.W.Z. Ngah, *Agricultural bio-waste materials as potential sustainable precursors used for activated carbon production: A review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015. 46: p. 218-235.

14. ความหมายของถ่านหิน. Available from:  
<https://dmf.go.th/public/list/data/index/menu/630/mainmenu/630/>.
15. ลักษณะการเกิดของถ่านหิน. Available from:  
[http://119.46.166.126/self\\_all/selfaccess12/m6/703/lesson2.php](http://119.46.166.126/self_all/selfaccess12/m6/703/lesson2.php).
16. ธีราพงษ์, ว., ถ่านกัมมันต์การผลิตและการนำไปใช้. พิมพ์ครั้งที่ 2. ed. 2011: คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
17. วิวัฒน์, ต., ช. รัชชัย, and ส. สิทธิเดช, การเตรียมและการกำหนดลักษณะสมบัติของถ่านกัมมันต์ จากผงถ่านหินแอนทราไซต์ : รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์. 2003: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
18. Schimmelpfennig, S. and B. Glaser, *One Step Forward toward Characterization: Some Important Material Properties to Distinguish Biochars*. Journal of Environmental Quality, 2012. 41(4): p. 1001-1013.
19. Renda, C.G., et al., *Influence of the mixing process on the graphitization of phenolic resins*. Ceramics International, 2019. 45(9): p. 12196-12204.
20. Patrick, J.W., *Porosity in Carbons: Characterization and Applications*. 1995: Wiley.
21. Mattson, J.S. and H.B. Mark, *Activated Carbon: Surface Chemistry and Adsorption from Solution*. 1971: M. Dekker.
22. Nakamura, I. and K. Fujimoto, *Development of new disposable catalyst for waste plastics treatment for high quality transportation fuel*. Catalysis Today, 1996. 27(1): p. 175-179.
23. รัชชัย, ต., T. Thawatchai, and ว. ธีราพงษ์, สมบัติของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากลิกไนต์โดยการ กระตุ้นทางเคมีและทางกายภาพ. 2001.
24. นพิตา, ห. and ง. ขวลิขิต, เทคโนโลยีตัวเร่งปฏิกิริยา = *Catalyst technology*. 2014: โรงพิมพ์ แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
25. Tsai, W.T., et al., *Cleaner production of carbon adsorbents by utilizing agricultural waste corn cob*. Resources, Conservation and Recycling, 2001. 32(1): p. 43-53.
26. Ahmedna, M., et al., *The use of nutshell carbons in drinking water filters for removal of trace metals*. Water Research, 2004. 38(4): p. 1062-1068.
27. ข้อมูลทั่วไปของปาล์มน้ำมัน. Available from:  
<http://webkc.dede.go.th/testmax/node/2529>.

28. พันธุ์ปาล์มน้ำมัน. Available from:  
[http://www.lib.kps.ku.ac.th/SpecialProject/Agricultural\\_Biotechnology/2550/Bs/WanpenSu/chapter2.pdf](http://www.lib.kps.ku.ac.th/SpecialProject/Agricultural_Biotechnology/2550/Bs/WanpenSu/chapter2.pdf).
29. นิเวศวิทยาและการกระจายพันธุ์. Available from:  
<https://www.recoftc.org/sites/default/files/public/publications/resources/recoftc-0000255-0001-th.pdf>.
30. การจำแนกสายพันธุ์เห็ดที่พบในเมืองไทย. Available from:  
<https://sites.google.com/site/maneeratsurisa1317/home/chnid-prapheth-khxng-phi>.
31. แหล่งถ่านหินที่พบในประเทศไทย. Available from:  
<https://sites.google.com/site/onepiece280941/home/haelng-khxng-thanhin-tangthi-phb-ni-prathesthiy>.
32. การใช้ประโยชน์จากถ่านหิน. Available from: [http://projects-pdp2010.egat.co.th/projects1/index.php?option=com\\_content&view=article&id=2:thailand-and-coal-utilization&catid=1:introduction-of-coal](http://projects-pdp2010.egat.co.th/projects1/index.php?option=com_content&view=article&id=2:thailand-and-coal-utilization&catid=1:introduction-of-coal).
33. Terachai, S., ส. ชีระชัย, and V. Tharapong, *Production of activated carbon from palm-oil shell by pyrolysis and steam activation in a fixed bed reactor*. 1998.
34. Yan, L. and G.A. Sorial, *Chemical activation of bituminous coal for hampering oligomerization of organic contaminants*. *J Hazard Mater*, 2011. 197: p. 311-9.
35. Hsu, L.-Y. and H. Teng, *Influence of different chemical reagents on the preparation of activated carbons from bituminous coal*. *Fuel Processing Technology*, 2000. 64(1): p. 155-166.
36. Mui, E.L.K., et al., *Activated carbons from bamboo scaffolding using acid activation*. *Separation and Purification Technology*, 2010. 74(2): p. 213-218.
37. Zhang, Y.-J., et al., *Effects of steam activation on the pore structure and surface chemistry of activated carbon derived from bamboo waste*. *Applied Surface Science*, 2014. 315: p. 279-286.
38. RUGAYAH, A.F.A., A A and NORZITA,N, *Preparation and characterization of activated carbon from palm kernel shell by physical activation with steam*. *Journal of Oil Palm Research*, 2014. 26 (3).

39. Yek, P.N.Y., et al., *Microwave steam activation, an innovative pyrolysis approach to convert waste palm shell into highly microporous activated carbon*. Journal of Environmental Management, 2019. 236: p. 245-253.
40. Karaman, I., et al., *The effect of process parameters on the carbon dioxide based production of activated carbon from lignite in a rotary reactor*. Fuel Processing Technology, 2014. 118: p. 34-41.
41. Jung, S.-H., et al., *Production and characterization of microporous activated carbons and metallurgical bio-coke from waste shell biomass*. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2014. 109: p. 123-131.
42. Ma, Z., et al., *Evolution of the chemical composition, functional group, pore structure and crystallographic structure of bio-char from palm kernel shell pyrolysis under different temperatures*. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2017. 127: p. 350-359.
43. Zhang, Y., et al., *Comparison of the physicochemical characteristics of bio-char pyrolyzed from moso bamboo and rice husk with different pyrolysis temperatures*. 2017. 12(3): p. 4652-4669.
44. Wang, D., S.H. Vijapur, and G.G. Botte. *Coal char derived few-layer graphene anodes for lithium ion batteries*. in *Photonics*. 2014. Multidisciplinary Digital Publishing Institute.
45. Small, C.C., Z. Hashisho, and A.C. Ulrich, *Preparation and characterization of activated carbon from oil sands coke*. Fuel, 2012. 92(1): p. 69-76.
46. Yang, T. and A.C. Lua, *Characteristics of activated carbons prepared from pistachio-nut shells by physical activation*. Journal of Colloid and Interface Science, 2003. 267(2): p. 408-417.



ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
**CHULALONGKORN UNIVERSITY**

## ภาคผนวก ก.

### วิธีวิเคราะห์องค์ประกอบโดยประมาณ

#### การวิเคราะห์องค์ประกอบโดยประมาณ

เป็นการวิเคราะห์เพื่อทราบค่า ปริมาณความชื้น สารระเหย คาร์บอนคงตัวและปริมาณเถ้า การวัดสมบัติของวัตถุดิบหรือถ่านชาร์ อาจใช้วิธีวิเคราะห์สมบัติโดยประมาณของถ่านหินด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ Macro thermogravimetric analysis ซึ่งเป็นไปตามวิธี ASTM D7582 – 10

#### หลักการ

เป็นเทคนิคที่ใช้วิเคราะห์ความเสถียรของวัสดุเมื่อได้รับความร้อนโดยการวัดน้ำหนักของวัสดุที่เปลี่ยนแปลงในแต่ละช่วง อุณหภูมิด้วยเครื่องชั่งที่มีความไวสูง เทคนิคนี้เหมาะสำหรับการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสภาพของวัสดุที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับก๊าซหรือระเหยของน้ำ การตกผลึก (Crystallization) อันเนื่องมาจากการเปลี่ยนเฟส การแตกตัวของวัสดุ (Decomposition) ศึกษาการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชันหรือปริมาณสารสัมพันธ์ (Stoichiometry)

ในการวิเคราะห์ตัวอย่าง ตัวอย่างจะถูกวางบนถ้วยเผา (Crucible) ซึ่งเชื่อมต่อกับเครื่องชั่งละเอียดที่มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงสูง โดยที่ทั้งหมดจะอยู่ในเตาที่สามารถควบคุมอุณหภูมิและบรรยากาศได้ บรรยากาศภายในอาจจะเป็นก๊าซเฉื่อย เช่น ไนโตรเจน หรือก๊าซที่มีความว่องไว เช่น อากาศหรือออกซิเจน โดยน้ำหนักของตัวอย่างที่เปลี่ยนแปลงจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิเฉพาะของสารแต่ละชนิด โดยน้ำหนักที่หายไปนั้นเกิดมาจากการระเหย การย่อยสลาย หรือการเกิดปฏิกิริยาต่าง ๆ

CHULALONGKORN UNIVERSITY

#### ข้อมูลจำเพาะ (Specifications)

ช่วงอุณหภูมิ อุณหภูมิห้อง	-1,600 °C
อัตราการให้ความร้อนตั้งแต่อุณหภูมิห้อง	-1,100 °C 10 นาที
อัตราการทำความเย็นตั้งแต่ 1,000	-100 °C 25 นาที
ความถูกต้องของอุณหภูมิ	+ 0.5 °C
ความแม่นยำของอุณหภูมิ	+ 0.3 °C



### การเตรียมตัวอย่าง

ตัวอย่างที่จะใช้วิเคราะห์ต้องมีขนาดอนุภาคสม่ำเสมอ สามารถนำเครื่องบดแบบกลไกมาใช้ได้ เช่น ใช้ครกบด เครื่องปั่น จากนั้นนำมาร่อนด้วยตะแกรงร่อนขนาด 250 ไมโครเมตร

### ขั้นตอนการวิเคราะห์

- (1) จากเมนู Samples ให้คลิก Analyze หรือคลิกปุ่ม F5 Analyze บน Toolbar
- (2) ฝาเตาเผาจะเปิดออกใส่ถ้วยเผา (Crucible) เปล่า (รวมทั้งถ้วยเผาอ้างอิง) ลงไปในจานหมุน ดังภาพที่ ก.1



ภาพที่ ก.1 เครื่อง Thermogravimetric analyzer (TGA)

- (3) ปิดฝาเตาเผาโดยกดปุ่ม Actuator (สีเขียว) ที่ฝาด้านหน้าเครื่อง
- (4) ระบบจะทำการชั่งน้ำหนักถ้วยเผาเปล่า โดยฝาเตาเผาจะเปิดออก และจานหมุนจะหมุนมายังตำแหน่งแรกสุด จากนั้นจะทำการลดระดับลงไปยังตำแหน่งเครื่องชั่ง
- (5) ใส่ตัวอย่างลงในถ้วยเผา ที่น้ำหนัก 1.00X กรัม ดังภาพที่ ก.2 จากนั้นกดปุ่ม Actuator ที่ฝาด้านหน้าเครื่องเพื่อหมุนจานหมุน ไปยังถ้วยเผาถัดไป และทำซ้ำในขั้นตอน 3 – 4 จนกระทั่งใส่ตัวอย่างครบทุกถ้วยเผา



ภาพที่ ก.2 การใส่ตัวอย่างลงในถ้วยเผา

- (6) หลังจากใส่ตัวอย่างสุดท้ายลงในถ้วยเผาให้กดปุ่ม Actuator การวิเคราะห์จะเริ่มขึ้นอัตโนมัติ

#### สมการวิธีการทดสอบ (Method equations)

สมการที่ใช้เพื่อคำนวณซึ่งแสดงเป็นเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักที่หายไป

ตารางที่ ก.1 สมการการคำนวณองค์ประกอบโดยประมาณ

Volatile	$\frac{([Moisture\ mass] - [Volatile\ mass])}{[Initial\ mass]} * 100$
Ash	$\frac{[Ash\ mass]}{[Initial\ mass]} * 100$
Fixed carbon	$100 - ([Moisture] + [Volatile] + [45])$
Ash dry	$[45] * (100/100 - ([Moisture]))$
Moisture	$\frac{([Initial\ mass] - [Moisture])}{[Initial\ mass]} * 100$
Volatile dry	$[Volatile] * (100/100 - [Moisture])$
Fixed carbon dry	$100 - ([Volatile\ dry] + [Ash\ dry])$

## ภาคผนวก ข.

### วิธีวิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุ

#### การวิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุ

เป็นการวิเคราะห์เพื่อทราบค่าธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจนและไนโตรเจน ใช้วิธีวิเคราะห์สมบัติองค์ประกอบแยกธาตุของถ่านหินด้วยเครื่อง CHN Analysis ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM D 5373 โดยตัวอย่างในบรรยากาศของออกซิเจน ซึ่งจะได้ก๊าซคาร์บอนไดร็อกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) ก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ ( $\text{NO}_x$ ) และน้ำ โดยที่ก๊าซไนโตรเจนออกไซด์จะถูกรีดิวส์เป็น ก๊าซไนโตรเจน ( $\text{N}_2$ ) จากนั้นปริมาณของก๊าซคาร์บอนไดร็อกไซด์และไอน้ำจะถูกคำนวณเป็นปริมาณคาร์บอนและไฮโดรเจน โดยมี IR (Infrared) cells เป็นตรวจวัด (Detector) สำหรับก๊าซไนโตรเจนจะถูกตรวจสอบโดย TC (Thermal conductivity) cell แล้วคำนวณเป็นปริมาณไนโตรเจน

#### ทฤษฎี

ใช้หลักการเผาไหม้อย่างรวดเร็ว (Flash combustion) เพื่อเปลี่ยนธาตุที่เป็นองค์ประกอบของสารอินทรีย์ในตัวอย่างให้กลายเป็นก๊าซ เมื่ออยู่ในสถานะก๊าซที่สัมพันธ์กับธาตุนั้น ๆ อย่างมีวัดสัดส่วนที่แน่นอน

#### สารตัวอย่างที่ใช้ทดสอบ

- (1) สารตัวอย่างที่ใช้ทดสอบมีปริมาณ 0 - 250 มิลลิกรัม เป็นระดับไมโคร
- (2) บดสารให้ละเอียด
- (3) สารตัวอย่างที่เป็นน้ำมันใส่ thin foil ส่วนตัวอย่างที่เป็น นม ใส่ capsule
- (4) ตัวอย่างที่หยาบ ๆ เช่น ถั่วเหลือง ภายนอกให้เร็วไป ด้านในไม่สุก ถ้าของมันเป็นคาร์บอนไปล้อมรอบข้างในไว้เป็น barrier ดังนั้นตัวอย่างไม่ให้เกิน 150 มิลลิกรัม วิธีแก้ไขให้ทำดังนี้คือ
  - เพิ่มตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) และออกซิเจนลงไป
  - เพิ่มอุณหภูมิ
  - ลดอัตราการไหลของก๊าซให้อยู่ในช่วงการเผาไหม้ (Combustion zone) ได้นานขึ้น
  - ใช้อัตราการไหลน้อย ๆ
  - ลดปริมาณตัวอย่าง

### ลักษณะตัวอย่างสำหรับการวิเคราะห์

- (1) Air dry basis คือ ตัวอย่างจะต้องแห้งโดยการผึ่งลมทิ้งไว้ โดยไม่ใช้ความร้อนช่วย ก่อนที่จะทำการทดสอบจนน้ำออกหมด แล้วชั่งน้ำหนักจนคงที่ โดยใช้ความร้อน 40 องศาเซลเซียส ไม่เกิน 18 ชั่วโมง อ้างอิงตามมาตรฐานการวิเคราะห์ของถ่านหิน
- (2) Dry basis คือ ตัวอย่างต้องแห้งโดยใช้วิธีให้ความร้อนเช่นการอบ วิเคราะห์ตาม ASTM 3173
- (3) As received basis คือ ทดสอบตัวอย่างนั้นตามสภาพของตัวอย่างที่ได้รับมาโดยไม่ผ่านวิธีการทำให้ตัวอย่างแห้งก่อน

### ขั้นตอนการวิเคราะห์

- (1) ทำการ Run Blank (เลือก method ที่จะรันตัวอย่างในวันนั้น ๆ)
- (2) เลือก F3 (login) เวลาเลือกชื่อสารให้เลือกจากชื่อ software
- (3) รันจนค่านี้ เลือก 3 ค่าสุดท้ายให้ได้ STD ไม่เกิน 0.001% แล้วกด Configuration < Blank (การ set blank เป็นการ set background ค่า C,H,N ของก๊าซในระบบก่อนทำการวิเคราะห์ เครื่องจะทำการหักค่าเหล่านี้ที่แฝงมากับเครื่องทุกครั้งก่อนรันสารมาตรฐานหรือตัวอย่าง)
- (4) Run สารมาตรฐาน EDTA (เลือก method ที่จะรันตัวอย่างในวันนั้น ๆ)
- (5) ถ้าต้องการทราบว่าต้องชั่งน้ำหนัก EDTA เท่าไร ให้ไปที่ Calibration < view calibration เลือกชั่งน้ำหนักตามจุดที่ drift ไว้ ถ้าชั่งเกินไว้จะ drift ไม่ได้
- (6) Run จนค่าใกล้เคียงกัน เลือกมา 2 - 3 ค่า จากนั้นกด Configuration < Drift < OK
- (7) Run สารตัวอย่างซ้ำ 3 - 5 การทดลอง
- (8) การเตรียมตัวอย่างให้ชั่ง 1 กรัมลงใน thin foil

ภาคผนวก ค.  
ข้อมูลการทดลอง

ตารางที่ ค.1 ปริมาณร้อยละผลิตภัณฑ์ที่ได้จากถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากถ่านกะลาปาล์ม

อุณหภูมิกระตุ้น (°C)	เวลากระตุ้น (hr.)	น้ำหนักถ่านกัมมันต์ (g)	ปริมาณร้อยละผลิตภัณฑ์ (%wt.)
800	1	17.35	57.84
	2	17.26	57.54
	3	16.88	56.25
	4	16.45	54.84
900	1	15.75	52.50
	2	15.55	51.83
	3	15.38	51.28
	4	14.88	49.61
1000	1	14.45	48.18
	2	11.83	39.44
	3	11.45	38.18
	4	11.03	36.76

ตารางที่ ค.2 ปริมาณร้อยละผลิตภัณฑ์ที่ได้จากถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากถ่านไม้ไผ่

อุณหภูมิกระตุ้น (°C)	เวลากระตุ้น (hr.)	น้ำหนักของถ่านกัมมันต์ (g)	ปริมาณร้อยละ ผลิตภัณฑ์ (%wt.)
800	1	16.96	56.54
	2	16.78	55.92
	3	16.49	54.97
	4	15.31	51.04
900	1	13.55	45.16
	2	11.04	36.82
	3	10.82	36.07
	4	10.45	34.85
1000	1	9.65	32.18
	2	8.77	29.23
	3	6.53	21.76
	4	5.64	18.81

ตารางที่ ค.3 ปริมาณร้อยละผลิตภัณฑ์ที่ได้จากถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากถ่านหินซับบิทูมินัสที่อัตราส่วนระหว่างโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อถ่านหิน 0.2:1

KOH : Coal	อุณหภูมิกระตุ้น (°C)	เวลากระตุ้น (hr.)	น้ำหนักถ่านกัมมันต์ (g)	ปริมาณร้อยละผลิตภัณฑ์ (%wt.)
	650	1	17.35	57.83
		2	17.21	57.36
		3	16.74	55.79
		4	16.40	54.68
0.2:1	750	1	16.38	54.59
		2	16.07	53.58
		3	15.70	52.34
		4	15.20	50.67
	850	1	15.01	50.03
		2	14.65	48.83
		3	13.70	45.67

ตารางที่ ค.4 ปริมาณร้อยละผลิตภัณฑ์ที่ได้จากถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากถ่านหินซับบิทูมินัสที่อัตราส่วนระหว่างโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อถ่านหิน 0.4:1

KOH : Coal	อุณหภูมิกระตุ้น (°C)	เวลากระตุ้น (hr.)	น้ำหนักถ่านกัมมันต์ (g)	ปริมาณร้อยละผลิตภัณฑ์ (%wt.)
0.4:1	650	1	17.05	56.82
		2	16.85	56.15
		3	16.15	53.83
		4	16.13	53.76
	750	1	16.06	53.52
		2	16.00	53.35
		3	15.67	52.25
		4	15.02	50.06
	850	1	14.46	48.19
		2	14.19	47.30
		3	13.57	45.24
		4	12.59	41.96



ตารางที่ ค.5 ปริมาณร้อยละผลิตภัณฑ์ที่ได้จากถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากถ่านหินซับบิทูมินัสที่อัตราส่วนระหว่างโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อถ่านหิน 0.6:1

KOH : Coal	อุณหภูมิกระตุ้น (°C)	เวลากระตุ้น (hr.)	น้ำหนักถ่านกัมมันต์ (g)	ปริมาณร้อยละผลิตภัณฑ์ (%wt.)
	650	1	16.25	54.17
		2	16.18	53.93
		3	15.96	53.19
		4	15.58	51.94
0.6:1	750	1	15.37	51.24
		2	15.10	50.35
		3	15.00	50.01
		4	14.76	49.20
	850	1	13.97	46.56
		2	13.90	46.34
		3	12.28	40.94
		4	12.20	40.67

## ภาคผนวก ง.

### สมบัติของถ่านกัมมันต์ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม

มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 900-2547 นี้ครอบคลุมถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ หลายประเภท เช่น ใช้ในอุตสาหกรรมเคมีและเภสัชกรรม ใช้ฟอกสีในอุตสาหกรรมน้ำตาล น้ำมันพืช อาหาร น้ำอัดลม โมโนโซเดียมแอล-กลูตาเมต (Monosodium L – glutamate) ใช้ดูดก๊าซในกันกรองบุหรี่ เครื่องทำให้อากาศบริสุทธิ์ในโรงงานและใช้ในการกรองน้ำ โดยสมบัติของถ่านกัมมันต์ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 900-2547 มีดังต่อไปนี้

#### 1. ชนิดและชั้นคุณภาพของถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์แบ่งออกเป็น 4 ชนิด คือ

1.1 ถ่านกัมมันต์ชนิดผง (Powdered activated carbon)

1.2 ถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ด (Granular activated carbon) แบ่งออกเป็น 2 ชั้นคุณภาพ คือ

1.2.1 ชั้นคุณภาพพิเศษ (Premium grade)

1.2.2 ชั้นคุณภาพที่ 1 (First grade)

1.3 ถ่านกัมมันต์ชนิดอัดเม็ด (Pelletised activated carbon)

1.4 ถ่านกัมมันต์ชนิดอัดแท่ง (Block activated carbon)

#### 2. ขนาดของถ่านกัมมันต์

2.1 ถ่านกัมมันต์ชนิดผง

- ปริมาณที่ผ่านร่ง 150 ไมโครเมตร ต้องไม่น้อยกว่าร้อยละ 99 โดยน้ำหนัก

2.2 ถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ดและชนิดอัดเม็ด

- ปริมาณที่ผ่านร่ง 150 ไมโครเมตร ต้องไม่น้อยกว่าร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก

### 3. คุณสมบัติที่ที่ต้องการ

#### 3.1 ลักษณะทั่วไป

##### 3.1.1 ถ่านกัมมันต์ชนิดผง

- ต้องเป็นผงสีดำ ปราศจากสิ่งแปลกปลอมที่มองเห็นได้

##### 3.1.2 ถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ดและชนิดอัดเม็ด

- ต้องเป็นเม็ดสีดำ ปราศจากสิ่งแปลกปลอมที่มองเห็นได้

##### 3.1.3 ถ่านกัมมันต์ชนิดแท่ง

- ต้องเป็นแท่ง ปราศจากสิ่งแปลกปลอมที่มองเห็นได้

#### 3.2 คุณสมบัติทางฟิสิกส์และทางเคมี

##### 3.2.1 ถ่านกัมมันต์ชนิดผง ต้องมีสมบัติดังนี้

- ค่าไอโอดีนไม่น้อยกว่า 600
- ความหนาแน่นปรากฏ 0.20 ถึง 0.75 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

##### 3.2.2 ถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ด ต้องมีสมบัติ ดังนี้

- ค่าไอโอดีน สำหรับถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ด ชั้นคุณภาพพิเศษ ไม่น้อยกว่า 1000
- ค่าไอโอดีน สำหรับถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ด ชั้นคุณภาพที่ 1 ไม่น้อยกว่า 600
- ความชื้น ไม่เกินร้อยละ 8
- ความหนาแน่นปรากฏ ไม่น้อยกว่า 0.20 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
- ความแข็ง (Abrasion resistance) ไม่น้อยกว่าร้อยละ 70

##### 3.2.3 ถ่านกัมมันต์ชนิดอัดเม็ด ต้องมีสมบัติ ดังนี้

- ค่าไอโอดีน ไม่น้อยกว่า 600
- ความชื้น ไม่เกินร้อยละ 8
- ความหนาแน่นปรากฏ ไม่น้อยกว่า 0.20 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

- ความแข็ง (Abrasion resistance) ไม่น้อยกว่าร้อยละ 70

3.2.4 ถ่านกัมมันต์ชนิดผง ต้องมีสมบัติ ดังนี้

- ค่าไอโอดีน ไม่น้อยกว่า 600

- ความชื้น ไม่เกินร้อยละ 8



## ภาคผนวก จ.

## ตัวอย่างสมบัติของถ่านกัมมันต์เกรดการค้า

ตารางที่ จ.1 สมบัติของผงถ่านกัมมันต์เกรดการค้า

ชื่อตัวอย่าง	วัตถุดิบ	Ash (โดย น้ำหนัก)	BD (กรัมต่อ ลูกบาศก์ เซนติเมตร)	S <sub>BET</sub> (ตาราง เมตรต่อ กรัม)	MB (มิลลิกรัม ต่อกรัม)	IA (มิลลิกรัม ต่อกรัม)
UPD CHEMICAL (Thailand) MDP1-7325	กะลามะพร้าว	3	0.40-0.55	1200-1300	230	1050
PN3	ขี้เลื่อย	8	0.46	-	-	800
Taiko PKW	ขี้เลื่อย	2	-	-	-	-
Shirasagi KW	-	3	-	-	-	-
900	-	3-5	0.37-0.40	-	-	900
Nuchar SN	-	3-5	0.37-0.40	-	-	900
PITTSBURGH ACTIVATED CARBONS						
RB	บิทูมินัส	23	-	1250-1400	-	1200
RC	บิทูมินัส	21	-	1100-1300	-	1100
BL	บิทูมินัส	8.5	-	1000-1100	300	1000
C	บิทูมินัส	14	-	1000-1100	-	900
GW	บิทูมินัส	12	-	1000-1100	180	700

ที่มา : เอกสารประกอบการประชุมคณะกรรมการร่างมาตรฐานถ่านกัมมันต์ สำนักงานมาตรฐาน  
อุตสาหกรรมไทย กระทรวงอุตสาหกรรม

ตารางที่ จ.2 สมบัติของเม็ดถ่านกัมมันต์เกรดการค้า

ชื่อตัวอย่าง	วัตถุดิบ	Ash (โดย น้ำหนัก)	BD (กรัมต่อ ลูกบาศก์ เซนติเมตร)	S <sub>BET</sub> (ตารางเมตร ต่อกรัม)	MB (มิลลิกรัม ต่อกรัม)	IA (มิลลิกรัม ต่อกรัม)
UPD CHEMICAL (Thailand)						
MDG7746	กะลามะพร้าว	3	0.40-0.45	1100-1200	200	1050
MD-W 7830	กะลามะพร้าว					
SUTLIFFE SPRAKMAN (Eng)						
	ถ่านหิน	6-16	0.40-0.56	600-1250	-	-
	กะลามะพร้าว	1-4	0.40-0.59	700-1500	-	-
NORIT ACTIVATED. CARBON						
PK1-3	พีท	6	-	800	-	800
Nuchar 681	บิทูมินัส	-	0.43	1100-1300	-	1100
AG-5	-	6				
PJAC (JAPAN)						
CG-4X10	กะลามะพร้าว	5	0.42-0.47	1200-1300	170	1050
CG-6X8	กะลามะพร้าว	5	0.42-0.47	1200-1300	170	1100
CW-8X30	กะลามะพร้าว	5	0.45-0.50	1050-1150	170	1050
SYBRON	บิทูมินัส	-	0.50-0.55	900	220	900

ตารางที่ จ.2 สมบัติของเม็ดถ่านกัมมันต์เกรดการค้า (ต่อ)

ชื่อตัวอย่าง	วัตถุดิบ	Ash (โดย น้ำหนัก)	BD (กรัมต่อ ลูกบาศก์ เซนติเมตร)	S <sub>BET</sub> (ตารางเมตร ต่อกรัม)	MB (มิลลิกรัม ต่อกรัม)	IA (มิลลิกรัม ต่อ กรัม)
IONAC P-50 (USA)						
CALGON SGL	บิทูมินัส	10	0.48	950-1050	-	900
PITTSBURGH ACTIVATED CARBON Vapor phase						
- PCB	บิทูมินัส	4.0	0.44	-	-	1200
- SGL	บิทูมินัส	8.0	0.48	-	-	900
Nuchar WV-G	-	-	0.43-0.46	-	-	1050

ที่มา : เอกสารประกอบการประชุมคณะกรรมการร่างมาตรฐานถ่านกัมมันต์ สำนักงานมาตรฐาน  
อุตสาหกรรมไทย กระทรวงอุตสาหกรรม

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นริศา เฉิดกุล
วัน เดือน ปี เกิด	3 ตุลาคม 2538
สถานที่เกิด	ลพบุรี
วุฒิการศึกษา	ปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาปิโตรเคมีและวัสดุพอลิเมอร์ คณะ วิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร
ที่อยู่ปัจจุบัน	204/11 หมู่ 2 หมู่บ้านชื่นสุขนิเวศน์ ตำบลท่าแค อำเภอเมือง จังหวัดลพบุรี 15000



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY