

การเตรียมถ่านกัมมันต์จากกะลาแมคาเดเมียโดยกระตุ้นทางกายภาพ



นางสาวอลิสรา นิติวัดนะ

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต


สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2553

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

PREPARATION OF ACTIVATED CARBON FROM MACADAMIA NUTSHELL  
BY PHYSICAL ACTIVATION



Miss Alissara Nitiwattana

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Science Program in Chemical Technology

Department of Chemical Technology

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2010

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การเตรียมถ่านกัมมันต์จากกะลาแมคาเดเมียโดยการกระตุ้น  
ทางกายภาพ

โดย

นางสาวอลิสรา นิติวัดมะ

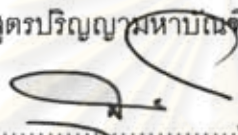
สาขาวิชา

เคมีเทคนิค


อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

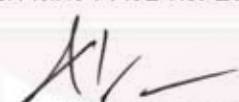
รองศาสตราจารย์ ดร. ธราพงษ์ วิจิตตาคานต์


คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง  
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโท

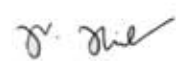
  
..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ หารหนองบัว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

  
..... ประธานกรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ)

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(รองศาสตราจารย์ ดร.ธราพงษ์ วิจิตตาคานต์)

  
..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชวลิต งามจรัสศรีวิชัย)

  
..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(อาจารย์ ดร. นิชรี นิลนนท์)

อลิสรา นิติวัดมณะ : การเตรียมถ่านกัมมันต์จากกะลาแมคาเดเมียโดยการกระตุ้นทางกายภาพ. (PREPARATION OF ACTIVATED CARBON FROM MACADAMIA NUTSHELL BY PHYSICAL ACTIVATION) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : รศ.ดร. ธารพงษ์ วิจิตรศานต์, 113 หน้า.

งานวิจัยนี้มุ่งพัฒนาการใช้ประโยชน์จากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร โดยทำการศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์จากกะลาแมคาเดเมียแบบ 2 ขั้นตอนด้วยวิธีการกระตุ้นทางกายภาพขั้นตอนแรกเป็นการคาร์บอนไนซ์กะลาแมคาเดเมียในเตาเผาให้ความร้อนสูง ขั้นตอนที่สองเป็นการกระตุ้นถ่านชาร์กะลาแมคาเดเมียภายในเครื่องปฏิกรณ์เบดนิ่งโดยใช้ไอน้ำและใช้ไอน้ำแบบใช้อากาศเป็นแก๊สออกซิไดซ์ เพื่อทำการเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับของถ่านกัมมันต์ ตัวแปรที่ศึกษาเพื่อหาภาวะที่เหมาะสม ได้แก่ อุณหภูมิในการคาร์บอนไนซ์ (375 400 450 และ 500 องศาเซลเซียส) เวลาในการคาร์บอนไนซ์ (30 45 60 และ 90 นาที) อุณหภูมิในการกระตุ้น (650 700 750 และ 800 องศาเซลเซียส) และเวลาในการกระตุ้น (30 60 และ 90 นาที) จากผลการทดลอง พบว่าภาวะเหมาะสมของขั้นตอนคาร์บอนไนซ์ขั้นต้นคือ อุณหภูมิในการคาร์บอนไนซ์ 500 องศาเซลเซียส เวลาในการคาร์บอนไนซ์ 60 นาที ถ่านชาร์มีร้อยละสารระเหย 24.21 ร้อยละคาร์บอนคงตัว 68.26 และมีร้อยละผลได้ 34.97 โดยน้ำหนัก นอกจากนี้พบว่าอุณหภูมิและเวลาในการกระตุ้นมีผลต่อการพัฒนาโครงสร้างรูพรุนของถ่านกัมมันต์ ถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยไอน้ำแบบใช้อากาศมีพื้นที่ผิวรูพรุนและความสามารถในการดูดซับมากกว่าถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยไอน้ำ การกระตุ้นด้วยไอน้ำแบบใช้อากาศสามารถพัฒนาโครงสร้างทางเคมีบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ โดยการเพิ่มความเป็นกรดบนหมู่ฟังก์ชันของถ่านกัมมันต์ ค่าความเป็นกรดเบสที่พื้นผิวประจุเป็นศูนย์ของถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยไอน้ำแบบใช้อากาศเท่ากับ 3.0 ถึง 3.7 และสามารถสรุปได้ว่ากะลาแมคาเดเมียเป็นวัตถุดิบที่มีศักยภาพในการผลิตถ่านกัมมันต์ด้วยวิธีการกระตุ้นทางกายภาพ โดยถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกะลาแมคาเดเมียมีพื้นที่ผิวรูพรุนสูง พื้นที่ผิวรูพรุนของถ่านกัมมันต์จากกะลาแมคาเดเมียมีค่าอยู่ระหว่าง 476.7 ถึง 1022.0 ตารางเมตรต่อกรัม

ภาควิชา.....เคมีเทคนิค.....ลายมือชื่อ นิสิต.....อลิสรา นิติวัดมณะ.....  
 สาขาวิชา.....เคมีเทคนิค.....ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....  
 ปีการศึกษา.....2553.....

## 5172547323 : MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY

KEYWORDS : ACTIVATED CARBON / CARBONIZATION / STEAM ACTIVATION /  
MACADAMIA NUTSHELL

ALISSARA NITIWATTANA : PREPARATION OF ACTIVATED CARBON FROM  
MACADAMIA NUTSHELL BY PHYSICAL ACTIVATION. ADVISOR :  
ASSOC.PROF. THARAPONG VITIDSANT, Ph.D.,113 pp.

This study is aimed to develop the utilization agricultural residues to produce activated carbon on macadamia nutshell via physical activation by two step processes. The first step, macadamia nutshell carbonized in muffle furnace. The second step, macadamia nutshell char was activated in a fixed bed reactor by using steam and the mixture of steam and air as oxidizing agent to compare in term of adsorption capacity of activated carbon. The effects of operating parameters such as carbonization time, carbonization temperature, activation time and activation temperature were studied in order to evaluate the optimum condition. From the experimental results, the optimum condition of carbonization was 500 °C and 60 min and this condition provided volatile matter, fixed carbon and yield of char were 24.16 wt.%, 68.26 wt.% and 34.97 wt.%, respectively. Furthermore, it was found that both of activation temperature and activation time have more developed pore structure and adsorption capacity of activated carbon. The BET surface area and adsorption capacity of activated carbon by steam activation with air is higher than activated carbon by steam activation. In addition, steam activation with air can significantly modify the textural properties of activated carbon. These enhance the acidic surface functional groups on activated carbon with  $pH_{IEP}$  of 3.0 - 3.7. It was concluded that macadamia nutshell could produce high surface area of activated carbon by using physical activation with the BET surface area of ranging from 476.7 to 1022.0  $m^2/g$ .

Department : ..... Chemical Technology..... Student's Signature N. Alissara  
Field of Study : ..... Chemical Technology..... Advisor's Signature T. Vitidsant  
Academic Year : 2010.

## กิตติกรรมประกาศ

กราบขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร. ธราพงษ์ วิทิตสานต์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ได้กรุณาให้ความช่วยเหลือ คำปรึกษาและแนะนำโดยให้ความรู้ทางวิชาการในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ตลอดจนคณาจารย์ทุกท่านในภาควิชาเคมีเทคนิคที่ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ ในการทำวิจัยมาตลอด

ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชวลิต งามจรัสศรีวิชัย และอาจารย์ ดร.นิชชรี นิลนนท์ที่กรุณามาเป็นกรรมการสอบ ตลอดจนให้คำแนะนำและข้อเสนอแนะต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่ง

ขอขอบคุณคุณฤทธิมา ศรีตะปัญญะ คุณสุวีพร โรจน์วรรณท์ คุณเบญจพล นิธิเจริญวงศ์ และคุณอุเทน นันทพูลทรัพย์ที่ให้ความช่วยเหลือในการใช้เครื่องมือวิเคราะห์ผลการทดลองและอำนวยความสะดวกในการใช้ห้องปฏิบัติการทดลอง และขอขอบคุณคุณประเสริฐ ช่วยศรีนวลและคุณสุวิทย์ คิวงามที่ช่วยเหลือซ่อมสร้างเครื่องมือบางส่วนที่ใช้ในงานวิจัยจนทำให้วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบคุณบุคลากรในภาควิชาเคมีเทคนิคทุกท่านที่ให้ช่วยเหลือต่างๆ พร้อมทั้งอำนวยความสะดวกในการใช้อุปกรณ์เครื่องมือในการทดลองต่างๆ และขอขอบคุณ พี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆ ในภาควิชาเคมีเทคนิคและหลักสูตรปิโตรเคมีและพอลิเมอร์ที่ได้ให้ความช่วยเหลือและเป็นกำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ญาติพี่น้องรวมถึงผู้มีพระคุณทุกท่านที่ให้กำลังใจ ให้คำแนะนำ ความช่วยเหลือ และให้การสนับสนุนเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง .....	ฎ
สารบัญภาพ.....	ฏ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	4
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	4
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
1.5 วิธีดำเนินการวิจัย.....	5
2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1 ชีวมวล.....	6
2.1.1 องค์ประกอบหลักของชีวมวล.....	7
2.1.2 การวิเคราะห์สมบัติเบื้องต้นของชีวมวล .....	9
2.1.2.1 การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ.....	10
2.1.2.2 การวิเคราะห์แบบประมาณ.....	10
2.1.2.3 ค่าความร้อน.....	11
2.2 กระบวนการแปรรูปชีวมวล.....	11
2.2.1 การเผาไหม้ (Combustion).....	13
2.2.2 กระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis).....	13
2.2.2.1 ไพโรไลซิสแบบช้า.....	14
2.2.2.2 ไพโรไลซิสแบบเร็ว.....	15
2.2.2.3 ไพโรไลซิสแบบเร็วมาก.....	15
2.2.3 กระบวนการแก๊ซิฟิเคชัน (Gasification).....	16
2.3 ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon).....	16
2.3.1 ความหมายของถ่านกัมมันต์.....	16

2.3.2	การเตรียมวัตถุดิบ.....	18
2.3.2.1	การเลือกวัตถุดิบ.....	18
2.3.2.2	ขนาดของวัตถุดิบ.....	20
2.3.2.3	ความชื้น.....	20
2.3.3	คาร์บอนไนเซชัน (Carbonization).....	20
2.3.3.1	ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากคาร์บอนไนเซชัน.....	22
2.3.3.2	อัตราการให้ความร้อน.....	25
2.3.3.3	อุณหภูมิในการคาร์บอนไนซ์.....	25
2.3.3.4	เวลาในการคาร์บอนไนซ์.....	25
2.3.3.5	ตัวกลางปฏิกิริยา.....	26
2.3.3.6	ขนาดของอนุภาค.....	26
2.3.4	การกระตุ้น.....	26
2.3.4.1	วิธีการกระตุ้นทางเคมี (Chemical activation).....	27
2.3.4.2	วิธีการกระตุ้นทางกายภาพ (Physical activation).....	30
2.3.5	โครงสร้างและสมบัติของถ่านกัมมันต์.....	32
2.3.5.1	โครงสร้างของถ่านกัมมันต์.....	32
2.3.5.2	ความพรุน (Porosity).....	33
2.3.5.3	ความเป็นกรด-เบสของพื้นผิวถ่านกัมมันต์.....	34
2.3.5.4	สมบัติของถ่านกัมมันต์.....	35
2.3.5.5	ชนิดของถ่านกัมมันต์.....	36
2.3.6	ประโยชน์ของถ่านกัมมันต์.....	37
2.3.6.1	ถ่านกัมมันต์ประเภทที่ใช้กับการดูดติดผิวแก๊สหรือไอ.....	38
2.3.6.2	ถ่านกัมมันต์ประเภทที่ใช้กับการดูดติดของเหลว.....	38
2.4	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	39
3	เครื่องมือและวิธีการทดลอง.....	45
3.1	เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย.....	45
3.2	สารเคมีที่ใช้.....	46
3.3	ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย.....	47
3.3.1	การวิเคราะห์สมบัติเบื้องต้นของกะลาแมคาเดเมีย.....	47
3.3.2	การเตรียมตัวอย่างกะลาแมคาเดเมีย.....	47



3.3.3	คาร์บอนไอเซนชัน.....	48
3.3.4	การกระตุ้น.....	48
3.3.5	การวิเคราะห์สมบัติต่างๆ ของถ่านชาร์และถ่านกัมมันต์.....	50
3.3.6	การคำนวณร้อยละผลได้ของถ่านชาร์และถ่านกัมมันต์.....	51
4	ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	52
4.1	การวิเคราะห์สมบัติต่างๆ ของกะลาแมคาเดเมีย.....	52
4.1.1	การวิเคราะห์สมบัติเบื้องต้นของกะลาแมคาเดเมีย.....	53
4.1.2	การวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนของกะลาแมคาเดเมียด้วย เทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริก.....	53
4.2	การคาร์บอนไนซ์กะลาแมคาเดเมีย.....	54
4.2.1	ลักษณะทางกายภาพของถ่านชาร์จากกะลาแมคาเดเมีย.....	55
4.2.2	ผลของอุณหภูมิและเวลาในการคาร์บอนไนซ์กะลาแมคาเดเมีย.....	55
4.2.3	ภาวะที่เหมาะสมในการคาร์บอนไนซ์กะลาแมคาเดเมีย.....	61
4.3	การกระตุ้นถ่านชาร์จากกะลาแมคาเดเมีย.....	63
4.3.1	การกระตุ้นด้วยไอน้ำแบบไม่ใช้อากาศ.....	64
4.3.2	การกระตุ้นด้วยไอน้ำแบบใช้อากาศ.....	71
4.4	ลักษณะทางกายภาพและหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์.....	79
4.4.1	ลักษณะสัญญาณวิทยาของถ่านกัมมันต์.....	79
4.4.2	ลักษณะความพรุนและหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์.....	81
4.5	การศึกษาจลนพลศาสตร์การสลายตัวทางความร้อนของกะลาแมคาเดเมีย โดยใช้เทคนิควิเคราะห์เทอร์โมกราวิเมตริก.....	87
4.5.1	การสลายตัวทางความร้อนของกะลาแมคาเดเมีย.....	87
4.5.2	การศึกษาจลนพลศาสตร์การสลายตัวทางความร้อนของกะลา แมคาเดเมียโดยใช้แบบจำลอง DAEM.....	89
5	สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	94
5.1	สรุปผลการทดลอง.....	94
5.1.1	การคาร์บอนไนซ์กะลาแมคาเดเมีย.....	94
5.1.2	การกระตุ้นถ่านชาร์กะลาแมคาเดเมีย.....	94
5.1.3	จลนพลศาสตร์การสลายตัวทางความร้อนของกะลาแมคาเดเมียโดย ใช้แบบจำลอง DAEM.....	95

บทที่	หน้า
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	96
รายการอ้างอิง.....	97
ภาคผนวก.....	101
ภาคผนวก ก.....	102
ภาคผนวก ข.....	105
ภาคผนวก ค.....	109
ภาคผนวก ง.....	112
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	113



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า	
1.1	สถิติการนำเข้าถ่านกัมมันต์ในประเทศไทย.....	2
1.2	สถิติการส่งออกถ่านกัมมันต์ในประเทศไทย.....	2
2.1	รูปแบบกระบวนการไพโรไลซิส.....	15
2.2	คุณสมบัติของถ่านกัมมันต์จากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร.....	19
2.3	กรดและสารอินทรีย์ต่างๆ ที่เป็นส่วนประกอบในน้ำส้มควันไม้.....	24
2.4	ชนิดสารกระตุ้นในวิธีการกระตุ้นทางเคมี.....	28
2.5	คุณสมบัติถ่านกัมมันต์ชนิดผงและเม็ด.....	36
2.6	ข้อดีและข้อเสียของการใช้ถ่านกัมมันต์เป็นตัวดูดซับ.....	37
4.1	การวิเคราะห์สมบัติเบื้องต้นของกะลาแมคาเดเมีย.....	52
4.2	การวิเคราะห์แบบประมาณและร้อยละผลได้ของถ่านชาร์จากกะลาแมคาเดเมีย.....	56
4.3	การเปรียบเทียบสมบัติเบื้องต้นถ่านชาร์.....	62
4.4	ผลของขนาดของอนุภาคถ่านชาร์ต่อสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยไอน้ำแบบ ไม่ใช้อากาศ.....	70
4.5	ผลของขนาดของอนุภาคถ่านชาร์ต่อสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยไอน้ำแบบ ใช้อากาศ.....	78
4.6	สมบัติทางกายภาพของรูลงบนถ่านกัมมันต์.....	82
4.7	ชนิดและปริมาณหมู่ฟังก์ชันที่พบบนพื้นผิวถ่านกัมมันต์.....	86
4.8	การสลายตัวทางความร้อนของกะลาแมคาเดเมียที่อัตราการให้ความร้อนต่างๆ.....	89
4.9	ค่าพารามิเตอร์จลนพลศาสตร์ของการสลายตัวทางความร้อนกะลาแมคาเดเมีย.....	92

## สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1.1 การใช้ประโยชน์ผลิตภัณฑ์จากกระบวนการไพโรไลซิส.....	1
2.1 องค์ประกอบหลักของพีซีวีมวล.....	7
2.2 โครงสร้างของเซลลูโลส.....	8
2.3 โครงสร้างของน้ำตาลในเฮมิเซลลูโลส.....	8
2.4 องค์ประกอบของซีวีมวล.....	9
2.5 กระบวนการแปรรูปซีวีมวลและการนำไปใช้ประโยชน์.....	12
2.6 โครงสร้างรูปพูนบนถ่านกัมมันต์.....	17
2.7 หมู่ฟังก์ชันและอะตอมทั่วไปที่พบบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์.....	17
2.8 ผลิตภัณฑ์จากการสลายตัวขั้นปฐมภูมิและขั้นทุติยภูมิในกระบวนการไพโรไลซิส.....	22
2.9 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีจากกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์.....	29
2.10 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีจากกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก.....	30
2.11 โครงสร้างแกรไฟต์.....	32
2.12 ตำแหน่งของอิเล็กตรอนของคาร์บอนที่เกิดจาก $sp^2$ Hybridization.....	33
2.13 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีโดยการเตรียมถ่านจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร.....	33
2.14 ตัวอย่างหมู่ฟังก์ชันชนิดกรดที่เกิดขึ้นระกัวงแอโรแมติกบนโครงสร้างถ่านกัมมันต์.....	35
3.1 ภาวะบรรจุกะลาแมคาเดเมียในชั้นตอนคาร์บอนในเซชัน.....	47
3.2 ท่อแสดงเลขของเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง.....	48
3.3 แผนภาพเครื่องมือและอุปกรณ์ในขั้นตอนการกระตุ้นถ่านกัมมันต์.....	49
3.4 การกระตุ้นถ่านชาร์จากกะลาแมคาเดเมีย.....	50
4.1 การสลายตัวทางความร้อนของกะลาแมคาเดเมียภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริก.....	54
4.2 ลักษณะทางกายภาพของกะลาแมคาเดเมีย (ก) และถ่านชาร์กะลาแมคาเดเมีย (ข)	55
4.3 ผลของเวลาและอุณหภูมิในการคาร์บอนที่ต่อร้อยละผลได้ของถ่านชาร์กะลาแมคาเดเมีย.....	57
4.4 ผลของเวลาและอุณหภูมิในการคาร์บอนที่ต่อร้อยละสารระเหยของถ่านชาร์กะลาแมคาเดเมีย.....	57
4.5 ผลของเวลาและอุณหภูมิในการคาร์บอนที่ต่อร้อยละคาร์บอนคงตัวของถ่านชาร์กะลาแมคาเดเมีย.....	59

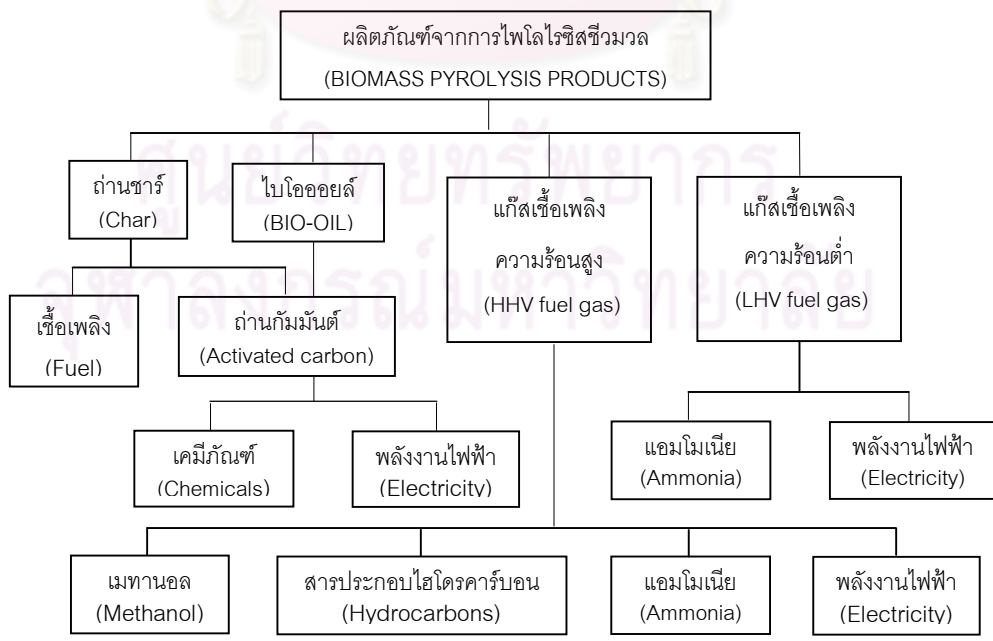


ต้นฉบับไม่มีหน้า  
NO PAGE IN ORIGINAL

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาพที่	หน้า
4.19 ลักษณะสัญญาณวิทยาของพื้นผิว (ก) กะลาแมคาเดเมีย (ข) และถ่านชาร์กะลาแมคาเดเมีย .....	79
4.20 ลักษณะสัญญาณวิทยาของพื้นผิวถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยไอน้ำแบบใช้อากาศ (ก) และ (ข) และพื้นผิวถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยไอน้ำแบบไม่ใช้อากาศ (ค) และ (ง).....	80
4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าซีต้าโพเทนเชียลกับค่าความเป็นกรดเบสของพื้นผิวบนถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยไอน้ำแบบใช้อากาศและไม่ใช้อากาศ.....	82
4.22 FT-IR สเปกตรัมของถ่านชาร์และถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยไอน้ำแบบใช้อากาศและไม่ใช้อากาศ.....	84
4.23 การสลายตัวทางความร้อนกะลาแมคาเดเมีย (TG) ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจน อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50 มิลลิลิตรต่อนาที อัตราการให้ความร้อน 5 10 และ 20 องศาเซลเซียสต่อนาที.....	87
4.24 อัตราการสลายตัวทางความร้อนกะลาแมคาเดเมีย (DTG) ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจน อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50 มิลลิลิตรต่อนาที อัตราการให้ความร้อน 5 10 และ 20 องศาเซลเซียสต่อนาที .....	88
4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับการเปลี่ยนแปลงของสารระเหย ( $v/v^*$ ) กับอุณหภูมิ (T) ที่อัตราการให้ความร้อน 5 10 และ 20 องศาเซลเซียสต่อนาที.....	91
4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับการเปลี่ยนแปลงของ $\ln(H/T^2)$ กับ $1/T(K^{-1})$ ที่อัตราการให้ความร้อน 5 10 และ 20 องศาเซลเซียสต่อนาที.....	91





**ตารางที่ 1.1 สถิติการนำเข้าถ่านกัมมันต์ในประเทศไทย**

ปี (พ.ศ.)	ปริมาณการนำเข้า (กิโลกรัม)	มูลค่าการนำเข้า (บาท)	ราคาเฉลี่ย (บาท/กิโลกรัม)
2544	3,120,594	156,116,706	50.03
2545	3,278,957	145,201,933	44.28
2546	3,493,984	145,810,837	41.73
2547	4,162,058	155,816,098	37.44
2548	4,802,834	204,881,304	42.66
2549	5,721,970	267,327,840	46.72
2550	4,435,887	223,121,035	50.30
2551	3,853,152	244,428,846	63.44

**ตารางที่ 1.2 สถิติการส่งออกถ่านกัมมันต์ในประเทศไทย**

ปี (พ.ศ.)	ปริมาณการส่งออก (กิโลกรัม)	มูลค่าการส่งออก (บาท)	ราคาเฉลี่ย (บาท/กิโลกรัม)
2544	3,651,904	161,221,372	44.15
2545	3,426,652	139,579,749	40.73
2546	4,752,756	179,769,321	37.82
2547	6,545,707	250,178,784	38.22
2548	8,225,942	320,056,852	38.91
2549	30,587,777	302,584,339	9.89
2550	9,309,014	263,440,875	28.30
2551	10,468,576	374,806,960	35.80

ที่มา กรมศุลกากร : [www.customs.go.th](http://www.customs.go.th) ; คำค้น HS 3802

จากข้อมูลทางสถิติการนำเข้าและส่งออกถ่านกัมมันต์ของประเทศไทยในปีพ.ศ.2544 ถึงปีพ.ศ. 2551 ดังตารางที่ 1.1 และ 1.2 พบว่าประเทศไทยมีการนำเข้าและส่งออกถ่านกัมมันต์เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากประเทศไทยไม่สามารถผลิตถ่านกัมมันต์ได้เพียงพอกับปริมาณความต้องการใช้งานถ่านกัมมันต์ภายในประเทศ ทำให้ต้องนำเข้าถ่านกัมมันต์จากต่างประเทศ ส่งผลให้ในแต่ละปีประเทศไทยเสียเปรียบดุลการค้าอย่างมาก และเมื่อพิจารณามูลค่าต่อหน่วยหรือราคาเฉลี่ยของถ่านกัมมันต์ พบว่าราคาเฉลี่ยของการนำเข้ามีมูลค่าสูงกว่าราคาเฉลี่ยของการส่งออก แสดงให้เห็นว่าถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้ภายในประเทศไทยมีคุณภาพไม่เหมาะสมกับการใช้งานซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญอีกประการที่ทำให้ประเทศไทยต้องนำเข้าถ่านกัมมันต์ที่มีราคาแพง ดังนั้นการพัฒนาถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้จากชีวมวลหรือวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรจึงเป็นเรื่องที่จำเป็นอย่างยิ่ง เพื่อช่วยลดการนำเข้าถ่านกัมมันต์จากต่างประเทศและพัฒนาถ่านกัมมันต์ให้มีคุณภาพดีขึ้น ข้อดีของการผลิตถ่านกัมมันต์จากชีวมวลหรือวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร คือ สามารถลดต้นทุนการผลิตถ่านกัมมันต์ เพิ่มมูลค่าของเหลือทิ้งทางการเกษตร และเป็นการใช้ทรัพยากรธรรมชาติอย่างคุ้มค่า นอกจากนี้การผลิตถ่านกัมมันต์จากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรจะไม่ก่อให้เกิดมลพิษรวมไปถึงผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

มะคาเดเมีย หรือแมคาเดเมียเป็นพืชที่มีคุณค่าทางเศรษฐกิจของประเทศไทย ประเทศไทยมีกำลังการผลิตผลแมคาเดเมียได้ 240 ตันต่อปีและปัจจุบันพบว่าการผลิตถั่วแมคาเดเมียสามารถสร้างรายได้ให้กับประเทศไทย ทำให้องค์กรและหน่วยงานของรัฐบาลที่เกี่ยวข้องพยายามเร่งขยายพื้นที่เพาะปลูกต้นแมคาเดเมีย เพื่อผลิตถั่วแมคาเดเมียเป็นสินค้าส่งออก ผลแมคาเดเมีย 100 กิโลกรัมสามารถผลิตเป็นถั่วแมคาเดเมียได้ไม่เกิน 30 กิโลกรัม ทำให้เปลือกและกะลาที่เป็นของเหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตถั่วแมคาเดเมียมีปริมาณมากและยังไม่มีนำไปใช้ประโยชน์อื่น กะลาแมคาเดเมียเป็นวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรที่เป็นของแข็งย่อยสลายยาก ทำให้สิ้นเปลืองพื้นที่และค่าใช้จ่ายในการกำจัด ดังนั้นการนำของเหลือทิ้งดังกล่าวมาผลิตเป็นเชื้อเพลิงชีวมวลหรือใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตถ่านกัมมันต์จัดเป็นวิธีการสำคัญในการแก้ปัญหาการจัดการขยะและของเหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตในระดับอุตสาหกรรมการเกษตร รวมทั้งเป็นการใช้ทรัพยากรธรรมชาติอย่างคุ้มค่าเพื่อเกิดประโยชน์สูงสุดและกะลาแมคาเดเมียอาจเป็นแหล่งเชื้อเพลิงชีวมวลใหม่ที่น่าสนใจ การนำกะลาแมคาเดเมียมาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ถือเป็นการใช้ประโยชน์จากชีวมวลโดยผ่านกระบวนการไพโรไลซิสซึ่งเป็นการแปรรูปชีวมวลทางความร้อนรูปแบบหนึ่งที่ได้รับคามนิยมและมีงานวิจัยจำนวนมากที่ศึกษาเกี่ยวกับการเตรียมถ่านกัมมันต์หรือกระบวนการไพโรไลซิสรูปแบบอื่น แต่ยังมีงานวิจัยจำนวนน้อยที่ศึกษาจนผลศาสตร์การสลายตัวทางความร้อนของชีวมวลซึ่งมีความสำคัญต่อการพัฒนาการแปรรูปชีวมวลทางความร้อน ดังนั้นงานวิจัยนี้ทำการศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์จากกะลาแมคาเดเมียโดยวิธีการกระตุ้นทาง

กายภาพซึ่งเป็นกระบวนการแปรรูปชีวมวลทางความร้อนเพื่อเพิ่มมูลค่าของเหลือทิ้งทางการเกษตรและศึกษาจลนพลศาสตร์การสลายตัวทางความร้อนของกะลาแมคาเดเมียโดยใช้เทคนิควิเคราะห์เทอร์โมกราวิเมตริก (Thermogravimetric analysis, TGA) เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานที่เป็นแนวทางสำคัญในการขยายขนาดการแปรรูปชีวมวลทางความร้อนและประยุกต์ใช้ในระดับอุตสาหกรรมต่อไป

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 ศึกษาและหาภาวะที่เหมาะสมของการเตรียมถ่านกัมมันต์จากกะลาแมคาเดเมียโดยวิธีการกระตุ้นทางกายภาพ

1.2.2 ศึกษาจลนพลศาสตร์การสลายตัวทางความร้อนของกะลาแมคาเดเมียโดยใช้เทคนิควิเคราะห์เทอร์โมกราวิเมตริก (Thermogravimetric analysis, TGA)

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 เป็นการศึกษาเชิงการทดลองในห้องปฏิบัติการเพื่อเป็นองค์ความรู้ในการพัฒนาการเตรียมถ่านกัมมันต์จากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร

1.3.2 ศึกษาภาวะที่เหมาะสมของขั้นตอนคาร์บอนในเซชัน ตัวแปรที่ศึกษาประกอบด้วย อุณหภูมิและเวลาในการคาร์บอนไนซ์

1.3.3 ศึกษาภาวะที่เหมาะสมของขั้นตอนการกระตุ้นถ่านชาร์จากกะลาแมคาเดเมียโดยวิธีการกระตุ้นทางกายภาพ ตัวแปรที่ศึกษาประกอบด้วย ชนิดของแก๊สออกซิไดซ์ ขนาดอนุภาคของถ่านชาร์ อุณหภูมิและเวลาในการกระตุ้น

1.3.4 ศึกษาลักษณะสมบัติทางกายภาพและความสามารถในการดูดซับของถ่านกัมมันต์จากถ่านชาร์กะลาแมคาเดเมีย

1.3.5 ศึกษาหาค่าพารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์การสลายตัวทางความร้อนของกะลาแมคาเดเมียโดยใช้เทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริก

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้ภาวะที่เหมาะสมของการเตรียมถ่านกัมมันต์จากแมคาเดเมียและค่าพารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์โดยใช้เทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริก เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานในการพัฒนาและประยุกต์ใช้ในระดับอุตสาหกรรมต่อไป

## 1.5 วิธีดำเนินการวิจัย

1.5.1 ค้นคว้าทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเตรียมถ่านกัมมันต์ด้วยวิธีการกระตุ้นทางกายภาพโดยใช้ไอน้ำ

1.5.2 ศึกษาวิธีการใช้เครื่องมือวิเคราะห์ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

1.5.3 ศึกษาสมบัติเบื้องต้นของกะลาแมคาเดเมียด้วยเครื่องมือและเทคนิควิเคราะห์ต่างๆ

1.5.4 ศึกษาวิธีการทดลองและปรับปรุงเครื่องปฏิกรณ์เบดนิ่งที่ใช้ในการเตรียมถ่านกัมมันต์

1.5.4 ออกแบบและวางแผนการทดลอง

1.5.5 ศึกษาผลของอุณหภูมิต่อการสลายตัวของความร้อนของกะลาแมคาเดเมียโดยเทคนิคเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริก

1.5.6 ศึกษาผลของอุณหภูมิและเวลาในการคาร์บอนไนซ์กะลาแมคาเดเมียภายในเตาเผาให้ความร้อนสูง

1.5.7 ศึกษาผลของขนาดอนุภาคของถ่านชาร์อุณหภูมิและเวลาในการกระตุ้นต่อการกระตุ้นด้วยวิธีทางกายภาพโดยใช้ไอน้ำแบบไม่ใช้และใช้อากาศ

1.5.8 ศึกษาสมบัติของถ่านกัมมันต์ได้จากการกระตุ้นถ่านชาร์กะลาแมคาเดเมียโดยใช้ไอน้ำแบบไม่ใช้และใช้อากาศ

1.5.9 ศึกษาจลนพลศาสตร์การสลายตัวของความร้อนของกะลาแมคาเดเมียโดยใช้เทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริก

1.5.10 วิเคราะห์ สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

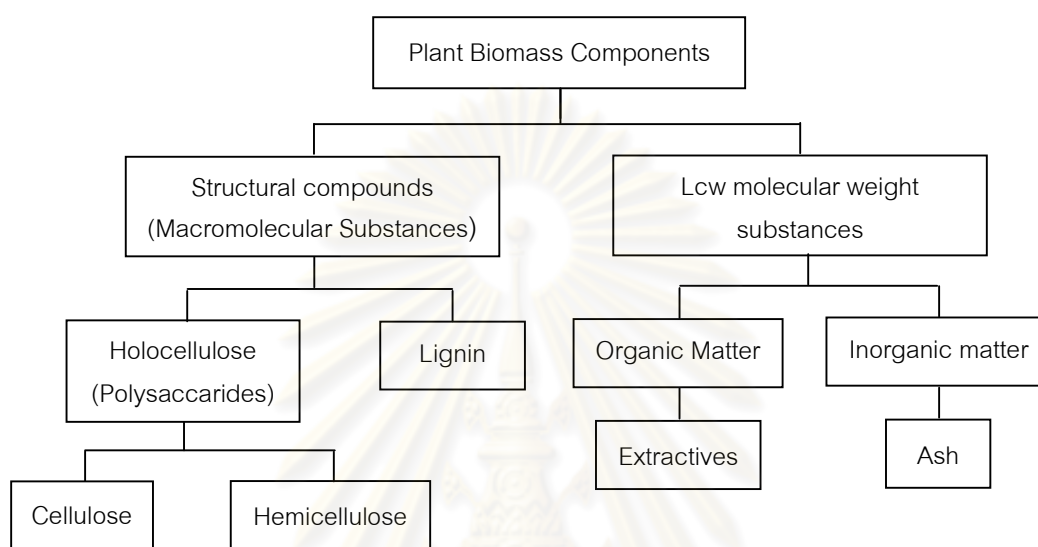
#### 2.1 ชีวมวล (Biomass)

ชีวมวล คือ สารอินทรีย์ที่ได้จากสิ่งมีชีวิต พืชและสัตว์หรือกระบวนการชีวภาพที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ เป็นแหล่งกักเก็บพลังงานจากธรรมชาติและสามารถนำมาใช้ผลิตพลังงานเพื่อทดแทนพลังงานเชื้อเพลิงประเภทฟอสซิล ได้แก่ ถ่านหิน น้ำมันและแก๊สธรรมชาติ เราสามารถแบ่งเชื้อเพลิงชีวมวลเป็น 3 ประเภท ตามแหล่งที่มาได้ดังนี้ (Goyal และคณะ, 2008)

1. ของเสียและเศษเหลือทิ้ง (Wastes) ได้แก่
  - วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร (Agricultural residues) เช่น กากหรือของเหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมการเกษตร
  - ของเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม เช่น เศษไม้จากโรงงานเลื่อยไม้เยื่อไม้จากโรงงานผลิตกระดาษ
  - ขยะและสิ่งปฏิกูลจากสัตว์
2. ผลิตภัณฑ์ป่าไม้ (Forest products) ได้แก่
  - เศษไม้จากการทำไม้ (logging residue)
  - เปลือกไม้ (bark)
  - ไม้ยืนต้น (trees)
  - ไม้พุ่ม (shrubs)
  - ไม้เนื้อแข็ง (hard wood)
3. พืชพลังงาน (Energy crops) ได้แก่
  - ไม้ล้มลุก (herbaceous woody crops)
  - ไม้เนื้ออ่อน (soft wood)
  - พืชน้ำมัน (oil seed crops)
  - วัชพืชจำพวกตระกูลหญ้า (grasses)
  - พืชจำพวกผลิตแป้ง (starch crops) เช่น ข้าวโพด ข้าวสาลี
  - พืชจำพวกผลิตน้ำตาล (sugar crops) เช่น อ้อย

- พืชไม้โตเร็ว (short rotation woody crops) เช่น ยูคาลิปตัส กระจินเทพาและ กระจินณรงค์ เป็นต้น

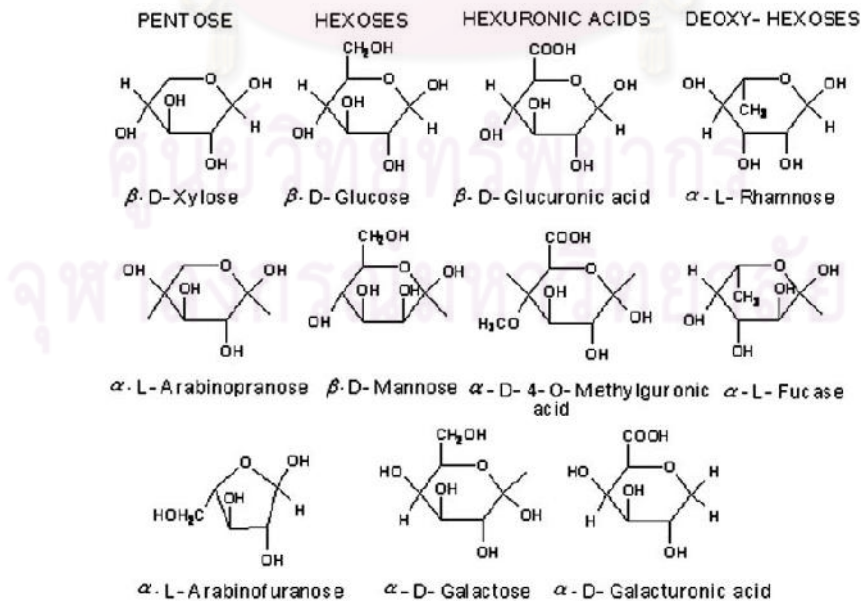
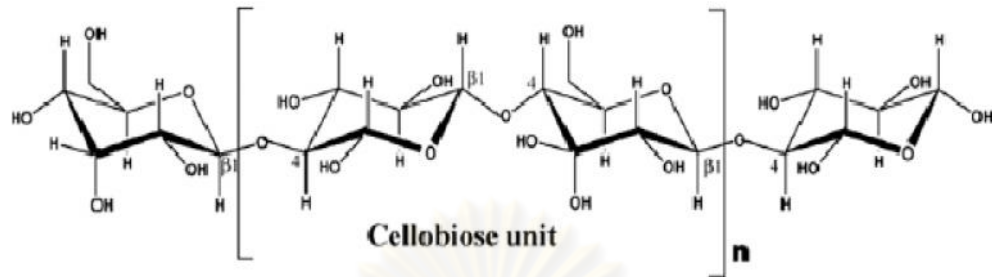
### 2.1.1 องค์ประกอบหลักของชีวมวล



รูปที่ 2.1 องค์ประกอบหลักของพืชชีวมวล (Demirbas, 2009)

โดยส่วนใหญ่ชีวมวลเป็นลิกโนเซลลูโลส (Lignocelluloses material) ที่เกิดจาก สารโมเลกุลขนาดใหญ่ (Macromolecular substances) ประกอบด้วย เซลลูโลส (Cellulose) เฮมิ เซลลูโลส (Hemicellulose) และลิกนิน (Lignin) นอกจากนี้ชีวมวลบางชนิดประกอบด้วยสารที่มี น้ำหนักโมเลกุลต่ำ (Low molecular weight substances) เช่น สารสกัดได้ (Extractives) และสารอนินทรีย์ในรูปของเถ้า (Ash) ลิกโนเซลลูโลสสามารถแบ่งเป็น 2 กลุ่มย่อย ตามชนิดของ โมเลกุลน้ำตาล ได้แก่ ไฮโดรเซลลูโลส (Holocellulose) และลิกนิน โดยไฮโดรเซลลูโลสเป็นน้ำตาลโพลีแซคคาไรด์ (Polysaccharides) ที่มีเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสอยู่รวมกลุ่มกัน ดังรูปที่ 2.1 ไฮโดรเซลลูโลสเป็นส่วนประกอบหลักของผนังเซลล์และเส้นใยของพืช ส่วนลิกนินไม่จัดเป็นน้ำตาลโพลีแซคคาไรด์ ไม้เนื้ออ่อนจะมีปริมาณลิกนินมากกว่าไม้เนื้อแข็งลิกนินเป็นส่วนประกอบอยู่ในเนื้อไม้ และเส้นใยของพืช

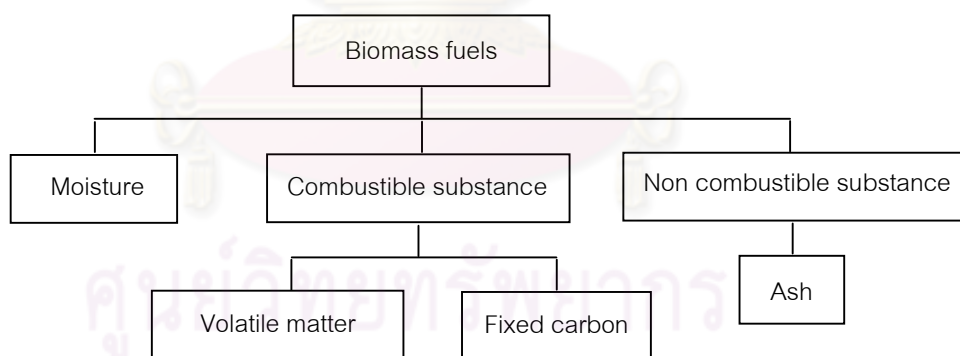
เซลลูโลสมีสูตรโมเลกุลอย่างง่าย คือ  $(C_6H_{10}O_5)_m$  และเซลลูโลสเป็นโพลิเมอร์ (Polymer) ที่เกิดจากเซลโลบิโอสหลายหน่วยเรียงต่อกัน แต่ละหน่วยของเซลโลบิโอสประกอบด้วย หมู่ไฮดรอกซิล (-OH group) 3 หมู่ ดังรูปที่ 2.2 หมู่ฟังก์ชันนี้เกิดพันธะไฮโดรเจนทำให้เกิดแรง



ลิกนินมีสูตรโมเลกุลอย่างง่าย คือ  $[C_9H_{10}O_3(OCH_3)_{0.9-1.7}]_m$  และลิกนินมีโครงสร้างเป็นสามมิติที่ซับซ้อน โดยเกิดจากกลุ่มพอลิเมอร์ที่เป็นสารประกอบแอโรแมติก ทำให้โครงสร้างของลิกนินมีโมเลกุลขนาดใหญ่และจัดเรียงกลุ่มกันอย่างไม่เป็นระเบียบ (Amorphous) (Goyal และคณะ, 2008) ลิกนินมีเสถียรภาพทางความร้อนสูง ยากต่อการสลายตัวทางความร้อน (Yang และคณะ, 2005) สารประกอบแอโรแมติกในลิกนินเป็นวงแหวนอนุพันธ์เบนซีนที่ประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชันเมทอกซี (Methoxy group,  $-OCH_3$ ) หมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl group,  $-OH$ ) และหมู่ฟีนอลิก (Phenolic group) ลิกนินไม่ละลายน้ำ

### 2.1.2 การวิเคราะห์สมบัติเบื้องต้นของชีวมวล

ชีวมวลเป็นแหล่งพลังงานที่มีความหลากหลาย องค์ประกอบของชีวมวลจะแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับชนิดของชีวมวล ชีวมวลเป็นสารอินทรีย์ที่เกิดจากธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจนและธาตุอื่นๆ ในรูปของเถ้า โดยเถ้าเป็นสารประกอบออกไซด์ของโลหะ เช่น สารประกอบออกไซด์ของแอลคาไล ออกไซด์ของซิลิกาและอะลูมินา เป็นต้น องค์ประกอบของชีวมวลแบ่งเป็น 3 ส่วนหลัก คือ ความชื้น (Moisture) ส่วนที่เผาไหม้ได้ (Combustible substance) และส่วนที่เผาไหม้ไม่ได้ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 องค์ประกอบของชีวมวล (biomass composition)

องค์ประกอบของชีวมวล 3 ส่วนดังกล่าวเป็นสมบัติเบื้องต้นของชีวมวลที่มีอิทธิพลต่อการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการแปรรูปชีวมวล เช่น ชีวมวลที่มีปริมาณสารระเหยมากเมื่อสลายตัวทางความร้อนจะมีโอกาสเกิดผลิตภัณฑ์เป็นของเหลวและแก๊สได้มากกว่า ดังนั้นการนำชีวมวลมาแปรรูปเพื่อผลิตพลังงานจึงจำเป็นต้องพิจารณาสมบัติเบื้องต้น



ของชีวมวล เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพและเกิดประสิทธิภาพสูงสุด การวิเคราะห์สมบัติเบื้องต้นของชีวมวลต่างๆ ที่นิยมใช้กัน ได้แก่

### 2.1.2.1 การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ

การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate analysis) เป็นการแสดงสมบัติเบื้องต้นของชีวมวล โดยระบุปริมาณธาตุต่างๆ ในเชื้อเพลิงชีวมวล ธาตุที่วิเคราะห์ ได้แก่ คาร์บอน (C) ไฮโดรเจน (H) และออกซิเจน (O) เป็นธาตุหลัก นอกจากนี้ยังมีการวิเคราะห์หาปริมาณกำมะถัน (S) และไนโตรเจน (N) เครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์แบบแยกธาตุจะเผาสารตัวอย่างให้เป็นสารประกอบออกไซด์ แล้วใช้สารเคมีดูดซับโดยหาน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นเป็นหลักเพื่อวิเคราะห์หาปริมาณธาตุต่างๆ แต่ธาตุออกซิเจนจะหาปริมาณได้จากผลต่างของธาตุที่เหลือหรืออาจวิเคราะห์โดยใช้กระบวนการทางเคมีในเครื่องมือเฉพาะ

### 2.1.2.2 การวิเคราะห์แบบประมาณ

การวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate analysis) เป็นการแสดงสมบัติเบื้องต้นของชีวมวล โดยระบุเป็นหน่วยร้อยละของน้ำหนักความชื้น (Moisture, MC) สารระเหย (Volatile matter, VM) คาร์บอนคงตัว (Fixed carbon, FM) และเถ้า (Ash) การวิเคราะห์นี้ทำได้โดยอบหรือให้ความร้อนกับชีวมวลที่อุณหภูมิต่าง ๆ เพื่อหาน้ำหนักที่หายไปสำหรับความชื้นและสารระเหย ส่วนเถ้าคำนวณได้โดยหาจากน้ำหนักของชีวมวลหลังจากกาเผาไหม้สมบูรณ์และคาร์บอนคงตัวสามารถคำนวณได้จากสมการ (2.1)

$$\%FM = 100 - (\%Ash + \%VM + \%MC) \quad (2.1)$$

นอกจากนี้การวิเคราะห์แบบประมาณสามารถวิเคราะห์ได้โดยใช้เทคนิควิเคราะห์เทอร์โมกราวิเมตริก (Thermogravimetric analysis, TGA) ซึ่งรายละเอียดและอุณหภูมิที่ใช้วิเคราะห์ขึ้นอยู่กับวิธีมาตรฐาน ASTM ที่เลือกใช้ การวิเคราะห์แบบประมาณแบ่งเป็น 2 แบบตามสภาพของเชื้อเพลิง ได้แก่ หลักพื้นฐานแบบแห้ง (Dry basis) และหลักพื้นฐานแบบเปียก (Wet basis) หรือแบบพื้นฐานที่รับมา (as-received basis) โดยแบบพื้นฐานแห้งจะแตกต่างกับแบบพื้นฐานเปียก คือ ต้องทำการอบแห้งเชื้อเพลิงเพื่อกำจัดความชื้นในเชื้อเพลิงให้หมดก่อนนำมาวิเคราะห์แบบประมาณ

### 2.1.2.3 ค่าความร้อน

ค่าความร้อน (Heating value) คือ ปริมาณความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ต่อหน่วยน้ำหนัก โดยแบ่งเป็น 2 ประเภท ได้แก่ ค่าความร้อนสูง (High heating value, HHV) และค่าความร้อนต่ำ (Low heating value, LHV) ค่าความร้อนต่ำ คือ ปริมาณความร้อนที่ปล่อยออกมาหลังการเผาไหม้สมบูรณ์ เมื่อน้ำที่อยู่ในเชื้อเพลิงและที่เกิดจากการเผาไหม้อยู่ในรูปของไอ ค่าความร้อนสูง คือ ปริมาณความร้อนที่ปล่อยออกมาหลังการเผาไหม้สมบูรณ์ เมื่อน้ำที่อยู่ในเชื้อเพลิงและที่เกิดจากการเผาไหม้อยู่ในรูปของเหลว ค่าความร้อนต่ำสามารถหาได้จากค่าความร้อนสูงโดยมีความสัมพันธ์ดังสมการ (2.2)

$$\text{HHV (MJ/kg)} = \text{LHV (MJ/kg)} + 0.02395(9\text{H} + \text{MC}) \quad (2.2)$$

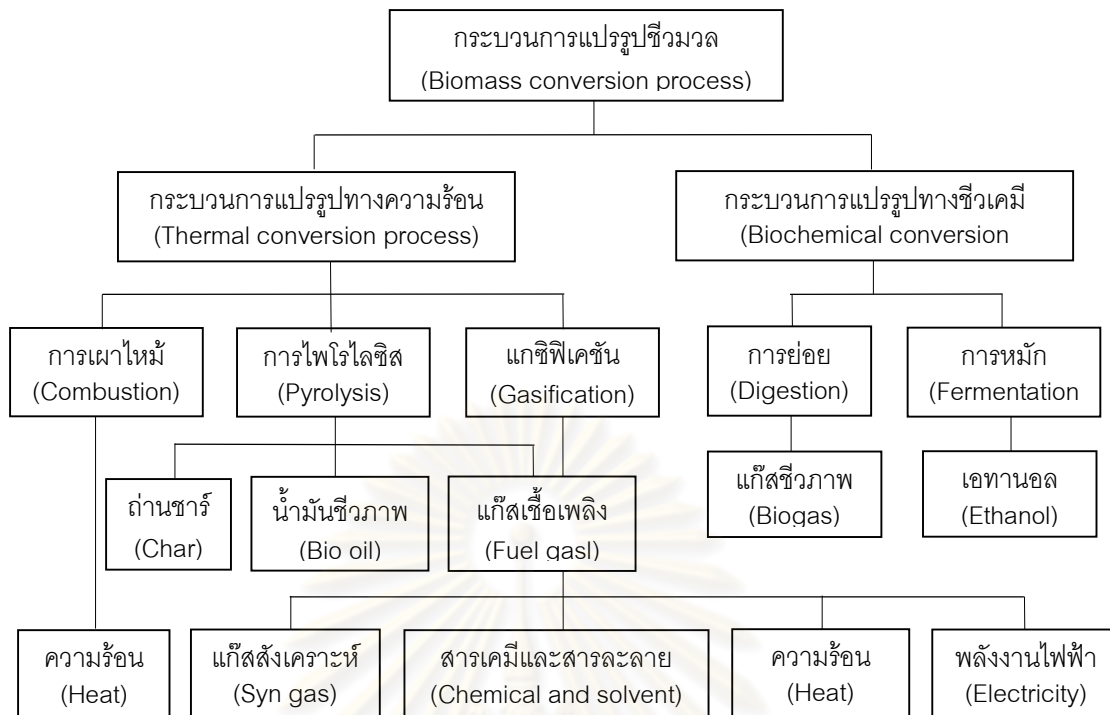
ค่าความร้อนสามารถวิเคราะห์ได้โดยใช้บอมบ์แคลอรีมิเตอร์หรือคำนวณหาโดยใช้สูตรอย่างง่ายของเดเมียบาส (Demirbas, 1997) และดูลอง (Dulong formula) เป็นต้น ค่าความร้อนขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของเชื้อเพลิงชีวมวลซึ่งอยู่ในรูปของคาร์บอน (C) ไฮโดรเจน (H) ออกซิเจน (O) ไนโตรเจน (N) และกำมะถัน (S) หรืออาจอยู่ในรูปของสัดส่วนคาร์บอนคงตัว (FC) สารระเหย (VM) ความชื้น (MC) และเถ้า (Ash) ดังสมการ (2.3) และ (2.4) ตามลำดับ

$$\text{HHV (MJ/kg)} = 33.5\text{C} + 142.3\text{H} - 15.4\text{O} - 24.5\text{N} \quad (2.3)$$

$$\text{HHV (MJ/kg)} = 31.2\text{FC} + 15.34\text{VM} \quad (2.4)$$

## 2.2 กระบวนการแปรรูปชีวมวล

กระบวนการแปรรูปชีวมวลมีหลายกระบวนการ เช่น กระบวนการแปรรูปทางกายภาพ (Physical conversion process) กระบวนการแปรรูปทางชีวเคมี (Biochemical conversion process) และกระบวนการแปรรูปทางความร้อนเคมี (Thermochemical conversion process) เป็นต้น กระบวนการแปรรูปชีวมวลที่นิยมและพัฒนาอย่างต่อเนื่องเพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงคุณภาพและปริมาณของผลิตภัณฑ์ที่ได้ มี 2 กระบวนการหลัก คือ กระบวนการแปรรูปทางชีวเคมีและกระบวนการแปรรูปทางความร้อน ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 กระบวนการแปรรูปชีวมวลและการนำไปใช้ประโยชน์

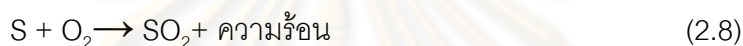
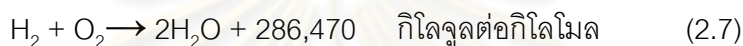
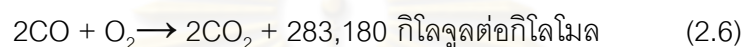
1. กระบวนการแปรรูปทางชีวเคมี คือ กระบวนการเปลี่ยนองค์ประกอบทางเคมีของชีวมวลโดยวิธีชีวเคมี เช่น การหมัก (Fermentation) และการย่อยสลายแบบไร้อากาศ (Anaerobic digestion)

2. กระบวนการแปรรูปทางความร้อน คือ กระบวนการเปลี่ยนองค์ประกอบทางเคมีของชีวมวลโดยใช้ความร้อนหรืออาจเรียกกระบวนการนี้ว่า การแปรรูปชีวมวลทางความร้อน (Biomass thermal conversion) สามารถแบ่งย่อยได้เป็น 3 กระบวนการ คือ การเผาไหม้ กระบวนการไพโรไลซิสและกระบวนการแก๊ซิฟิเคชัน ความแตกต่างของแต่ละกระบวนการนั้นขึ้นอยู่กับภาวะที่ใช้วัตถุดิบหรือผลิตภัณฑ์หลักที่ต้องการ ตัวแปรที่มีผลต่อภาวะที่ใช้ในกระบวนการนี้ ได้แก่ อุณหภูมิ เวลา อัตราการให้ความร้อน ชนิดของแก๊สที่ใช้ทำปฏิกิริยา และขนาดของวัตถุดิบ เป็นต้น

ถึงแม้ว่ากระบวนการแปรรูปทางชีวเคมีจะเป็นกระบวนการที่มีต้นทุนต่ำ ใช้พลังงานน้อยกว่ากระบวนการแปรรูปทางความร้อน แต่กระบวนการแปรรูปทางชีวเคมีค่อนข้างเกิดผลิตภัณฑ์ที่ไม่แน่นอน ยากต่อการควบคุมและยังขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีของชีวมวล ดังนั้น กระบวนการแปรรูปทางความร้อนจึงเป็นที่น่าสนใจและได้รับความเชื่อถือมากกว่าทั้งในแง่ของปริมาณและคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้ นอกจากนี้ผลิตภัณฑ์ต่างๆ ที่ได้จากกระบวนการแปรรูปทางความร้อนมีความหลากหลายกว่ากระบวนการแปรรูปทางชีวเคมี

### 2.2.1 การเผาไหม้ (Combustion)

การเผาไหม้หรือการสับดาษ คือ ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วระหว่างสารเผาไหม้ได้ (Combustible substance) กับออกซิเจนในภาวะที่มีออกซิเจนในอากาศมากเพียงพอ (Excess air) การเผาไหม้เป็นกระบวนการคายความร้อน โดยเปลี่ยนพลังงานเคมีเป็นพลังงานความร้อน สารเผาไหม้หลักที่พบในเชื้อเพลิงทั่วไป คือ คาร์บอน ไฮโดรเจนและซัลเฟอร์ การเผาไหม้ของซัลเฟอร์จะคายพลังงานความร้อนต่ำสุด ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นในกระบวนการเผาไหม้ได้แก่



การเผาไหม้เป็นกระบวนการแปรรูปชีวมวลที่ง่ายที่สุดแต่ไม่นิยมใช้เพราะประสิทธิภาพและผลิตภัณฑ์ที่ได้มีน้อยกว่ากระบวนการแปรรูปชีวมวลอื่นและชีวมวลบางชนิดมีข้อจำกัด คือ ความหนาแน่นต่ำ มีความชื้นและเถ้ามาก ทำให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้ต่ำ เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการอื่นและการเผาไหม้อาจทำให้เกิดมลพิษทางอากาศ

### 2.2.2 กระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis)

กระบวนการไพโรไลซิส คือ กระบวนการสลายตัวทางความร้อนของสารอินทรีย์ในภาวะที่ไม่มีออกซิเจนหรือจำกัดปริมาณออกซิเจน โดยเกิดจากการแตกตัวของพันธะในสารอินทรีย์จากโมเลกุลใหญ่กลายเป็นโมเลกุลเล็ก ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ในรูปของแก๊ส ของเหลวที่ควบแน่นได้ (Condensable liquids) เช่น น้ำมันทาร์ (Tar) และน้ำมันชีวภาพและได้ผลิตภัณฑ์ในรูปของแข็ง คือ ถ่านชาร์ (Char)

กลไกและปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการไพโรไลซิสสามารถสรุปได้ดังนี้ (Demirbas, 2001, Mohan และ Pittman, 2006, Balat, 2009 และBlasi, 2008)

- มีการถ่ายโอนความร้อนจากแหล่งพลังงานความร้อนไปยังผิวและภายในของวัตถุดิบโดยการพา (Convection) และการนำ (Conduction) ความร้อนทำให้วัตถุดิบเริ่มมีการปลดปล่อยความชื้น

- เกิดปฏิกิริยาไพโรไลซิสขั้นปฐมภูมิ (Primary reaction) โดยเกิดการแตกตัวของพันธะต่างๆ ในวัตถุดิบและวัตถุดิบเริ่มมีการปลดปล่อยสารระเหยซึ่งประกอบด้วย สารระเหยโมเลกุลใหญ่ที่สามารถควบแน่นเป็นของเหลวได้ เช่น น้ำมันทาร์และน้ำมันชีวภาพ เป็นต้น เกิดแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และไฮโดรคาร์บอนต่างๆ เช่น มีเทน อีเทน ไฮโดรเจน ซึ่งเป็นสารระเหยโมเลกุลขนาดเล็กที่ไม่สามารถควบแน่นได้ (Uncondensable gas) และเกิดผลิตภัณฑ์ของแข็ง คือ ถ่านชาร์
- เกิดปฏิกิริยาไพโรไลซิสที่มีการคายความร้อนของสารระเหยอย่างต่อเนื่อง ทำให้เกิดการถ่ายโอนความร้อนภายในวัตถุดิบสารระเหยมีการปลดปล่อยเพิ่มขึ้นและได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สมากขึ้นไอสารระเหยที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่บางส่วนที่ยังไม่มีการควบแน่นเป็นผลิตภัณฑ์ของเหลวจะเกิดปฏิกิริยาไพโรไลซิสขั้นทุติยภูมิ (Secondary reaction) ทำให้มีการรวมตัวขึ้นใหม่ (Repolymerization) กลายเป็นถ่านชาร์หรืออาจแตกตัวต่อไปกลายเป็นโมเลกุลขนาดเล็กและได้ผลิตภัณฑ์ในรูปของผลิตภัณฑ์แก๊ส
- ที่อุณหภูมิสูงอาจเกิดปฏิกิริยาคู่ขนานระหว่างปฏิกิริยาไพโรไลซิสขั้นทุติยภูมิกับปฏิกิริยาไพโรไลซิสขั้นปฐมภูมิโดยมีการแข่งขันกันใช้สารตั้งต้นในการเกิดปฏิกิริยาและในขณะเดียวกันอาจมีปฏิกิริยาอื่นๆ เกิดขึ้นร่วมด้วย เช่น ปฏิกิริยารีฟอร์มมิงแก๊ส ปฏิกิริยาการเปลี่ยนโมเลกุลของแข็งเป็นแก๊สด้วยน้ำ ปฏิกิริยาการรวมตัวของสารอนุมูลและปฏิกิริยากำจัดน้ำซึ่งขึ้นอยู่กัเวลา อุณหภูมิและความดันในปฏิกิริยา

### 2.2.2.1 ไพโรไลซิสแบบช้า

กระบวนการไพโรไลซิสแบบช้า (Slow pyrolysis) หรือแบบเดิม (Conventional pyrolysis) เป็นกระบวนการที่นิยมใช้ผลิตถ่าน (Carbonization) ชีวมวลจะถูกให้ความร้อนที่อุณหภูมิไม่เกิน 500 องศาเซลเซียส ไอของสารระเหยมีระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยานาน 5 ถึง 30 นาที ทำให้องค์ประกอบของไอสารระเหยเกิดปฏิกิริยาอย่างต่อเนื่อง เป็นผลให้เกิดผลิตภัณฑ์เป็นถ่านชาร์และของเหลวออกมา (Bahng และคณะ, 2009) แต่ถ้ากระบวนการไพโรไลซิสแบบช้าเกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูงจะได้ผลิตภัณฑ์ทั้งสามสถานะและหากควบคุมให้กระบวนการเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำและมีอัตราการให้ความร้อนช้าจะส่งผลให้เกิดถ่านชาร์มากขึ้น

ตารางที่ 2.1 รูปแบบกระบวนการไพโรไลซิส (Demirbas, 2009)

ตัวแปรดำเนินการ	รูปแบบกระบวนการไพโรไลซิส		
	แบบช้า (Slow pyrolysis)	แบบเร็ว (Fast pyrolysis)	แบบเร็วมาก (Flash pyrolysis)
อุณหภูมิ (เคลวิน)	550-900	850-1250	1050-1300
อัตราการให้ความร้อน (เคลวินต่อวินาที)	ช้า (0.01-10)	เร็ว (10-200)	เร็วมาก (มากกว่า 1000)
ระยะเวลาในปฏิกิริยา (วินาที)	300-3600	น้อยกว่า 1	น้อยกว่า 0.5
ขนาดของอนุภาค (มิลลิเมตร)	5-50	น้อยกว่า 1	น้อยกว่า 0.2
ผลิตภัณฑ์	ถ่านชาร์ น้ำมันชีวภาพ และแก๊ส	น้ำมันชีวภาพ และแก๊ส	น้ำมันชีวภาพ และแก๊ส

### 2.2.2.2 ไพโรไลซิสแบบเร็ว

กระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็ว (Fast pyrolysis) เกิดขึ้นโดยมีอัตราการให้ความร้อนสูงและไอสารระเหยมีระยะเวลาในปฏิกิริยาสั้น (Short gas residence time) เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ในรูปของเหลวและแก๊สมากขึ้น ผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้เป็นน้ำมันชีวภาพ น้ำมันทาร์ และน้ำมันเชื้อเพลิงเหลวอื่นๆ โดยทั่วไปกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วจะได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพประมาณร้อยละ 60 ถึง 70 โดยน้ำหนัก ถ่านชาร์ประมาณร้อยละ 15 ถึง 25 โดยน้ำหนัก กระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วสามารถกำหนดผลิตภัณฑ์หลักให้อยู่ในรูปของแก๊สได้ โดยควบคุมกระบวนการให้เกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูง โดยมีอัตราการให้ความร้อนต่ำและไอสารระเหยมีระยะเวลาในปฏิกิริยายาวนาน (Long gas residence time) (Balat และคณะ, 2009)

### 2.2.2.3 ไพโรไลซิสแบบเร็วมาก

กระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วมาก (Flash pyrolysis) มีอัตราการให้ความร้อนสูงกว่ากระบวนการไพโรไลซิสแบบอื่น อัตราการให้ความร้อนอาจสูงถึง 1,000 องศาเซลเซียสต่อวินาที

ส่งผลให้เกิดการยับยั้งการเกิดถ่านชาร์ (Char formation) ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่ คือ น้ำมันชีวภาพและแก๊ส กระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วมากมีอัตราการให้ความร้อนสูงและใช้ระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาสั้นกว่ากระบวนการอื่น ดังตารางที่ 2.1 ขนาดของอนุภาคมีความสำคัญต่อกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วมาก เนื่องจากอัตราการถ่ายโอนมวลและความร้อนมีผลมากต่อกระบวนการไพโรไลซิสรูปแบบนี้ ดังนั้นขนาดของอนุภาคที่ใช้ควรมีขนาดเล็กและเล็กกว่ากระบวนการไพโรไลซิสรูปแบบอื่น

### 2.2.3 กระบวนการแกซิฟิเคชัน (Gasification)

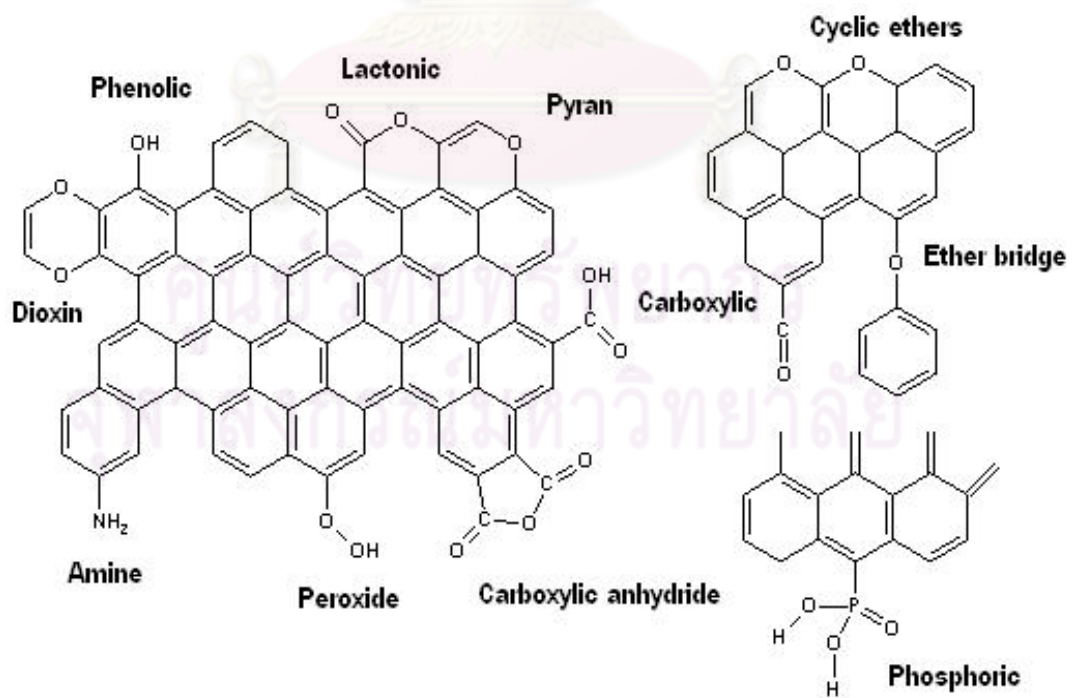
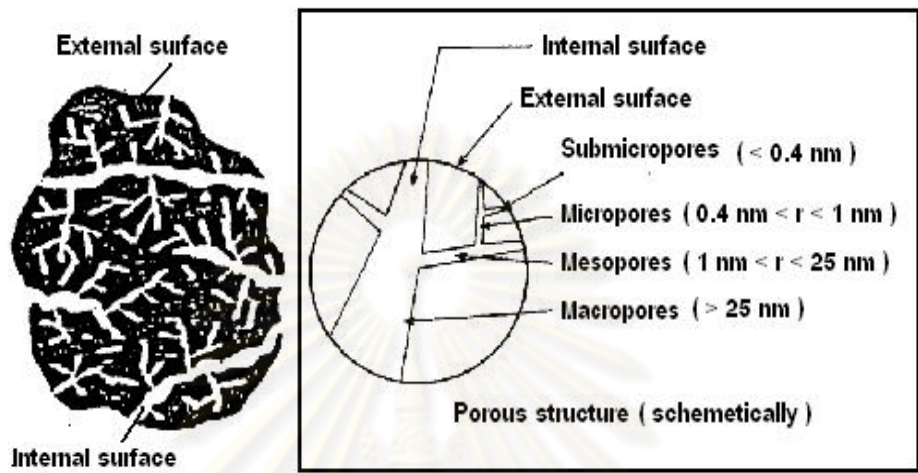
กระบวนการแกซิฟิเคชัน คือ กระบวนการสลายตัวทางความร้อนของสารอินทรีย์ในช่วงอุณหภูมิสูงประมาณ 800 ถึง 900 องศาเซลเซียส ในภาวะที่ควบคุมออกซิเจนในสัดส่วนที่ต่ำกว่าปริมาณออกซิเจนที่ทำให้เกิดการเผาไหม้สมบูรณ์ (Partial oxidation) กระบวนการนี้จะเปลี่ยนเชื้อเพลิงชีวมวลให้เป็นเชื้อเพลิงแก๊สหรือแก๊สสังเคราะห์ (Synthesis gas) ซึ่งเป็นแก๊สที่ให้ค่าความร้อนสูง (HHV fuel gas) ผลิตภัณฑ์หลักที่ได้จากกระบวนการแกซิฟิเคชันจะอยู่ในรูปของแก๊ส ได้แก่ คาร์บอนมอนอกไซด์ ไฮโดรเจนและมีเทน เป็นต้น และมีผลิตภัณฑ์อื่นๆ เช่น ถ่านชาร์และน้ำมันทาร์ เป็นต้น

## 2.3 ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon)

### 2.3.1 ความหมายของถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์ คือ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการนำวัสดุธรรมชาติที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลักมาผ่านกรรมวิธีก่อถ่านกัมมันต์ จนได้ผลิตภัณฑ์สีดำ มีโครงสร้างที่มีรูพรุน มีพื้นที่ผิวสูง มีสมบัติในการดูดซับสารต่างๆได้เป็นอย่างดี (ตาม มอก. 900-2532)

ถ่านกัมมันต์เป็นวัสดุที่ใช้เป็นตัวดูดซับที่มีรูพรุนขนาดเล็ก (microporous adsorbent) ชนิดหนึ่งที่สำคัญในระดับอุตสาหกรรม มีโครงสร้างซับซ้อน (Ismadji และคณะ, 2005) เป็นวัสดุที่มีโครงสร้างเป็นแกรไฟต์แบบเรียงตัวไม่แน่นอนหรือมีโครงสร้างเป็นอสัณฐาน (amorphous structure) มีความพรุนสูง (highly porous) และเกิดรูพรุนหลายขนาดจากรอยแตกที่มองเห็นได้ (visible cracks) หรือรอยแยก (crevices) และช่องว่างระหว่างโมเลกุล (slits of molecular dimensions) (Mohan และ Pittman, 2006) ทำให้ถ่านกัมมันต์มีพื้นที่ผิวภายในและภายนอกสูง ดังรูปที่ 2.6 รูพรุนที่เกิดขึ้นในถ่านกัมมันต์มีหลายขนาดตั้งแต่รูพรุนขนาดเล็กที่มีขนาด





กระบวนการผลิตหรือการเตรียมถ่านกัมมันต์ประกอบด้วยวิธีการมากมายหลายวิธีทั้งนี้ขึ้นอยู่กับวัตถุดิบและสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ต้องการ โดยทั่วไปเราสามารถแบ่งวิธีการผลิตถ่านกัมมันต์เป็น 3 ขั้นตอนหลัก ได้แก่ การเตรียมวัตถุดิบ คาร์บอนไนเซชันและการกระตุ้นซึ่งมีรายละเอียดตามหัวข้อดังนี้

## 2.3.2 การเตรียมวัตถุดิบ

### 2.3.2.1 การเลือกวัตถุดิบ

วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์ต้องมีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลักซึ่งอาจเกิดขึ้นเองโดยธรรมชาติ หรือได้จากการสังเคราะห์ สามารถแบ่งเป็น 3 ชนิดดังนี้ (เกศรา นุตาลัย และคณะ, 2532)

- พวกเซลลูโลสที่มาจากพืช เช่น แกลบกะลามะพร้าวขี้เลื่อย ชานอ้อย ชังข้าวโพด เปลือกและเมล็ดในของพืช เป็นต้น
- พวกถ่านหิน เช่น ลิกไนท์ (lignite) พีท (peat) และบิทูมินัส (bituminous)
- วัตถุดิบที่มาจากสัตว์ เช่น กระดูกและเลือด

วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์เชิงพาณิชย์ในระดับอุตสาหกรรมเป็นถ่านหินและไม่เนื้อแข็งบางชนิด แต่ในปัจจุบันพบว่าวัตถุดิบดังกล่าวมีปริมาณจำกัด ดังนั้นวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์ส่วนใหญ่เป็นชีวมวลหรือวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร จากตารางที่ 2.2 แสดงให้เห็นว่าชีวมวลหรือวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรจำนวนมากสามารถพัฒนาเป็นวัตถุดิบในการผลิตถ่านกัมมันต์ที่มีคุณภาพได้

วัตถุดิบที่เลือกใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์ควรมีสมบัติดังนี้

- เป็นสารอินทรีย์ที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก
- มีสารอินทรีย์ต่ำ เช่น มีปริมาณเถ้า มีซิลเฟอไรด์ต่ำ
- มีสารระเหยและมีความชื้นน้อย
- เป็นของเหลือทิ้งที่มีราคาถูกและมีปริมาณมาก
- มีความสะดวกในการนำมาใช้งาน เช่น ไม่สลายตัวเมื่อเก็บ มีรูปร่างและขนาดเหมาะสม
- มีสมบัติคงที่
- สามารถผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ที่มีคุณภาพสูง

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติของถ่านกัมมันต์จากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร

วัตถุดิบ	ร้อยละ ผลได้ (%Yield)	ลักษณะรูพรุน		ที่มา
		พื้นที่ผิว	ปริมาตรรูพรุน	
		จำเพาะ ( $S_{\text{BET}}$ , $\text{m}^2/\text{g}$ )	ทั้งหมด ( $V_{\text{total}}$ , $\text{m}^3/\text{g}$ )	
กากมะกอก	-	523-1106	0.298-0.607	Demiral และคณะ, 2010
ไม้ไผ่**	48	1432	0.696	Liu และคณะ, 2010
กะลามะพร้าว**	39.1	1926	1.260	Li และคณะ, 2008
ลิกนิน	-	1400-1600	0.5-0.6*	Carrott และคณะ, 2008
รำข้าว	20-24	652	0.137	Suzuki และคณะ, 2007
ไม้	-	1371-2821	0.810-1.730	Wu และ Tseng, 2006
ซีลี้อยไม้สัก	-	1150	0.430	Ismadji และคณะ, 2005
ยางไข่แล้ว	11.2	1177	0.540*	Ariyadejwanich และคณะ, 2003
เปลือกพี้นัท	22-36	240-1177	0.036-0.570	Girgis, Yunis และ Soliman, 2002
เปลือกอัลมอนด์	17.8	998	0.400	Savova และคณะ, 2001
เปลือกถั่ว	17.9	743	0.210	Savova และคณะ, 2001
เมล็ดองุ่น	26.2	497	0.120	Savova และคณะ, 2001
ซังข้าวโพด	28.8	960	0.486	Tsai, Chang และ Lee, 2001
ยูคาลิปตัส	33.14	1076.15	-	วิจิตร จินดาพันธ์ไพโรจน์, 2543

\* ปริมาตรรูพรุนขนาดเล็ก

\*\*การเตรียมถ่านกัมมันต์โดยใช้พลังงานไมโครเวฟ

สมบัติของวัตถุดิบในการผลิตถ่านกัมมันต์มีผลต่อคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ วัตถุดิบที่มีความหนาแน่นต่ำและมีปริมาณสารระเหยมาก เช่น ไม้เนื้ออ่อน เปลือกไม้ และลิกนิน เป็นต้น ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้จะมีปริมาตรรูพรุนสูง (pore volume) และมีความหนาแน่นต่ำ ถ่านกัมมันต์ประเภทนี้มีความสามารถในการดูดซับแก๊สไม่ดี ส่วนวัตถุดิบที่มีความหนาแน่นสูงและมีปริมาณสารระเหยมาก เช่น กะลามะพร้าว และถ่านหิน เป็นต้น ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้จะมีปริมาตรรูพรุนขนาดเล็กสูง (micropore volume) และมีความหนาแน่นสูง ถ่านกัมมันต์ประเภทนี้มี

ความสามารถในการดูดซับแก๊สและสารละลายได้ดี นอกจากการพิจารณาสมบัติของวัตถุดิบที่เลือกใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์ขั้นต้นก่อนการเตรียมวัตถุดิบก่อนการผลิตถ่านกัมมันต์เป็นสิ่งสำคัญ เนื่องจากการผลิตถ่านกัมมันต์เป็นรูปแบบหนึ่งของกระบวนการแปรรูปทางความร้อน ดังนั้น ความชื้นและขนาดของวัตถุดิบในการผลิตถ่านกัมมันต์เป็นตัวแปรที่ต้องควบคุมเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีสมบัติตามต้องการและมีต้นทุนการผลิตต่ำ

### 2.3.2.2 ขนาดของวัตถุดิบ

วัตถุดิบในการผลิตถ่านกัมมันต์อาจเริ่มต้นจากวัตถุดิบโดยตรงหรือเริ่มจากถ่านชาร์ วัตถุดิบบางชนิดมีขนาดใหญ่และมีขนาดไม่สม่ำเสมอ หรืออาจมีความแข็งและเหนียว ทำให้ต้องบดและคัดขนาดให้ได้ขนาดของวัตถุดิบที่เหมาะสม เพื่อให้ความร้อนสามารถกระจายตัวเข้าไปใน วัตถุดิบได้อย่างทั่วถึง ขนาดของวัตถุดิบที่เหมาะสมสามารถเพิ่มประสิทธิภาพและลดค่าใช้จ่ายใน การผลิตถ่านกัมมันต์ วัตถุดิบหรือชีวมวลบางชนิดอาจมีลักษณะเป็นผงหรือมีขนาดเล็กมาก จำเป็นต้องนำมาอัดเป็นเม็ดก่อนผ่านกระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์โดยใช้ตัวประสาน เช่น แป้ง น้ำมันเตาและน้ำมันทาร์ เป็นต้น

### 2.3.2.3 ความชื้น

วัตถุดิบในการผลิตถ่านกัมมันต์มีความชื้นไม่เท่ากันทั้งขึ้นอยู่กับแหล่งที่มา ลักษณะและชนิดของวัตถุดิบ ความชื้นในวัตถุดิบอาจเกิดขึ้นระหว่างการขนส่งและการจัดเก็บ ความชื้นในวัตถุดิบไม่ควรเกินร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ดังนั้นจำเป็นต้องควบคุมความชื้นก่อนการ ผลิตถ่านกัมมันต์ เพื่อลดการเกิดควันจากไอน้ำและลดพลังงานความร้อนที่ใช้ระหว่างการผลิต ถ่านกัมมันต์ วิธีการลดความชื้น (Dehydration) ของวัตถุดิบที่นิยมใช้กันทั่วไป คือ การตากแดด (Sun drying) เป็นวิธีที่ง่ายและไม่สิ้นเปลืองค่าใช้จ่าย แต่วิธีการตากแดดอาจไม่สะดวก ขึ้นอยู่กับ สภาพอากาศ ทำให้ต้องใช้การอบแห้งโดยตรง (Oven drying) ควบคู่กัน

### 2.3.3 คาร์บอนไนเซชัน (Carbonization)

คาร์บอนไนเซชัน คือ การผลิตถ่านโดยผ่านกระบวนการไพโรไลซิสหรือเป็นการเผาไหม้ในภาวะจำกัดอากาศเพื่อป้องกันการสับดาษของวัตถุดิบกับออกซิเจนในอากาศ โดยมี ผลิตภัณฑ์หลักเป็นถ่านชาร์ การไพโรไลซิสรูปแบบนี้เป็นกระบวนการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นในที่อับอากาศด้วย

อัตราการให้ความร้อนต่ำ โดยใช้ความร้อนเพื่อกำจัดความชื้น น้ำ สารระเหยต่างๆ และน้ำมันที่ออกจากวัตถุดิบ ทำให้สัดส่วนของคาร์บอนในถ่านชาร์เพิ่มขึ้น คุณหมุมิในการคาร์บอนไนซ์ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของวัตถุดิบ โดยทั่วไปคุณหมุมิในการคาร์บอนไนซ์ประมาณ 200 ถึง 500 องศาเซลเซียส

ถ่านชาร์จากขั้นตอนคาร์บอนไนเซชันควรมีลักษณะดังต่อไปนี้

- มีสีดำตลอด (Uniformly black)
- เมื่อหักดูส่วนที่หักจะมีผิวที่เป็นมันเงา (Shiny surface)
- ปลายที่หักจะแหลมคม (Sharp)
- ปราศจากผงฝุ่นและเถ้า

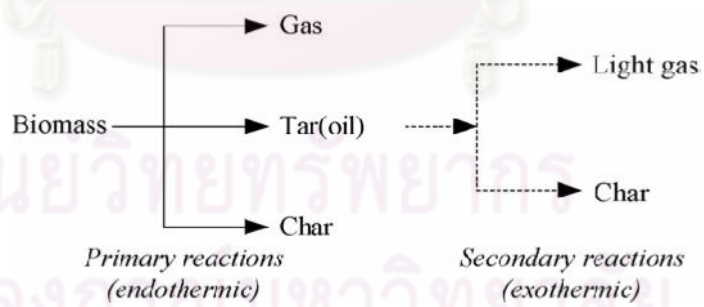
การผลิตถ่านเป็นกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้า (Slow pyrolysis) ที่รู้จักกันมาเป็นเวลานาน โดยส่วนใหญ่คุณหมุมิในการผลิตถ่านไม้ไม่เกิน 500 องศาเซลเซียส (Bahng และคณะ, 2009) ไม้เป็นสารประกอบลิกโนเซลลูโลส ดังนั้นกระบวนการไพโรไลซิสไม้ (Wood pyrolysis) แบ่งเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนแรกเป็นการไพโรไลซิสไฮโดรเซลลูโลสซึ่งเป็นสารโพลีแซคคาไรด์และส่วนที่สองเป็นการไพโรไลซิสลิกนิน โดยไฮโดรเซลลูโลสเริ่มเกิดการสลายตัวหรือเกิดกระบวนการไพโรไลซิสที่คุณหมุมิต่ำประมาณ 180 องศาเซลเซียส เซลลูโลสจะเกิดกระบวนการไพโรไลซิสอย่างรวดเร็วที่คุณหมุมิประมาณ 275 องศาเซลเซียส ส่วนลิกนินจะเริ่มการไพโรไลซิสอย่างรวดเร็วที่คุณหมุมิประมาณ 310 องศาเซลเซียสและสิ้นสุดที่คุณหมุมิประมาณ 500 องศาเซลเซียส (นคร ทิพยาวงศ์, 2552) แต่อย่างไรก็ตามคุณหมุมิในการผลิตถ่านไม้สามารถเปลี่ยนแปลงได้ ขึ้นอยู่กับสัดส่วนขององค์ประกอบหลักของชีวมวล

เราสามารถแบ่งขั้นตอนการผลิตถ่านจากไม้ได้เป็น 4 ขั้นตอนดังนี้

1. การไล่ความชื้นเป็นการให้ความร้อนกับชีวมวลเพื่อกำจัดน้ำออกจากชีวมวลในช่วงคุณหมุมิห้องถึง 180 องศาเซลเซียส น้ำในช่องว่างระหว่างเซลล์ (free water) และผนังเซลล์ (bound water) ของชีวมวลมีการระเหยและถูกกำจัดออกในรูปของควันที่มีลักษณะสีขาวปนน้ำเงินอ่อน

2. การไล่สารระเหิดเป็นขั้นตอนที่ไฮโดรเซลลูโลสมีการสลายตัวอย่างสมบูรณ์และคายความร้อนออกมาโดยเกิดขึ้นที่คุณหมุมิประมาณ 180 ถึง 270 องศาเซลเซียส ผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้ คือ คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) กรดน้ำส้ม (CH<sub>3</sub>COOH) และเมทานอล (CH<sub>3</sub>OH)

3. การเปลี่ยนชีวมวลเป็นถ่าน หรือการเกิดถ่านเป็นขั้นตอนที่เกิดขึ้นที่คุณหมุมิประมาณ 270 ถึง 400 องศาเซลเซียส ชีวมวลมีการสลายตัวทางความร้อนจากความร้อนที่สะสมไว้ของปฏิกิริยาคายความร้อน (exothermic reaction) ที่เกิดขึ้นในระหว่างการผลิตถ่าน โดย



ศูนย์วิทยุโทรพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

คงตัวมาก ร้อยละสารระเหย 20 ถึง 30 โดยน้ำหนัก ร้อยละเถ้า 0.5 ถึง 10 โดยน้ำหนัก คุณภาพ และสมบัติของถ่านขึ้นอยู่กับวัตถุดิบและขั้นตอนคาร์บอนไนเซชัน ถ่านส่วนใหญ่ที่เกิดขึ้นจากการคาร์บอนไนส์จะถูกนำไปใช้ประโยชน์ โดยการผลิตเป็นเชื้อเพลิงแข็ง (Solid fuel) เพื่อให้ความร้อนในระดับครัวเรือนและระดับอุตสาหกรรม หรืออาจนำไปผลิตถ่านไม้อัดแท่ง (Charcoal briquette) นอกจากนี้เราสามารถเพิ่มมูลค่าถ่านได้โดยใช้เป็นวัตถุดิบเพื่อผลิตถ่านกัมมันต์ เนื่องจากถ่านมีความพรุน ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาและมีพื้นที่ผิวสูง แต่อย่างไรก็ตามการนำไปใช้งานและใช้ประโยชน์จากถ่านขึ้นอยู่กับคุณภาพและสมบัติของถ่านผลิตได้

การนำไปใช้และการใช้ประโยชน์ถ่านมีดังต่อไปนี้

- ใช้ผลิตเป็นเชื้อเพลิงแข็ง (solid fuel)
- ใช้เป็นวัตถุดิบผลิตถ่านกัมมันต์ (activated carbon)
- ใช้ผสมกับปุ๋ยเพื่อปรับปรุงคุณภาพดิน
- ใช้ฟอกสีเส้น
- ใช้ดูดซับสารเคมีและปุ๋ยที่มีมากเกินไป
- ใช้หมักหญ้าเพื่อเป็นอาหารของสัตว์
- ใช้ผลิตเป็นสารเติมแต่ง (filling agent) ในอุตสาหกรรมเคมี
- ใช้เป็นวัตถุดิบผลิตเป็นคาร์บอนนาโน (carbon-nano-tubes)

### ผลิตภัณฑ์ของเหลว

กรดไพโรลิกเนียส (Pyrolygneous acid) เป็นผลิตภัณฑ์ของเหลวที่เกิดขึ้นจากขั้นตอนคาร์บอนไนเซชัน กรดไพโรลิกเนียสประกอบด้วย น้ำส้มควันไม้ (Wood vinegar) และน้ำมันทาร์ (Tar) หรือเรียกกันว่า น้ำมันดิน น้ำส้มควันไม้เป็นของเหลวสีเหลืองปนน้ำตาล มีความเป็นกรดมากโดยมีค่ากรด-เบส (pH) เท่ากับ 3 และมีความหนาแน่นจำเพาะประมาณ 1.007 ถึง 1.013 น้ำส้มควันไม้ประกอบด้วยเมทานอลร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก (Yaman, 2004) กรดอะซิติกประมาณร้อยละ 3 โดยน้ำหนักและกรดสารอินทรีย์หลากหลายชนิด ดังตารางที่ 2.3

การใช้งานและใช้ประโยชน์น้ำส้มควันไม้มีดังนี้

- ใช้เป็นยารักษาแผลสด น้ำร้อนและไฟลวก
- ใช้ฉีดเพื่อป้องกันเชื้อจุลินทรีย์และฆ่าเชื้อราที่ทำลายพืช
- ใช้ผลิตเป็นสารระงับกลิ่น
- ใช้พ่นและฉีดพืชเพื่อให้พืชออกผลและโตเร็วขึ้น
- ใช้ผสมอาหารสัตว์เพื่อปรับปรุงคุณภาพเนื้อสัตว์

### ตารางที่ 2.3 กรดและสารอินทรีย์ต่างๆ ที่เป็นส่วนประกอบในน้ำส้มควันไม้

ชนิดของสารอินทรีย์	ส่วนประกอบ
Organic acid	Formic acid, Acetic acid, Propionic acid, Butyric acid, Isobutyric acid, valeric acid, isovalenic acid, etc.
Phenol	Phenol, o-cresol, m-cresol, 2, 4-xyleneol, 3, 5-xyleneol, 4-ethylphenol, 4-propylphenol, catechol, etc.
Carbonyl compound	Formaldehyde, acetaldehyde, isobutylaldehyde, butylaldehyde, glyoxal, acrolein, acetone, methylethylketone, etc.
Alcohol	Methanol, ethanol, propanol, isopropanol, allyl alcohol, etc.
Neutral ingredients	Acetol, maltol, 4-methyl veratrole, 4-ethyl veratrole, 4-propyl veratrole, 3, 4-benzopyrene, etc.
Basic ingredients	Ammonia, methylamine, dimethylamine, pyridine, etc.

น้ำมันทาร์เป็นผลิตภัณฑ์ผลพลอยได้จากกระบวนการการผลิตถ่านโดยมีร้อยละผลได้ของน้ำมันทาร์ประมาณ 2.5 ถึง 4 โดยน้ำหนักของวัตถุดิบตั้งต้น มีองค์ประกอบเป็นสารประกอบแอโรแมติกไฮโดรเจนตั้งแต่ 1 ถึง 8 วง หรือสารโพลีไซคลิกแอโรแมติกไฮโดรเจน (polycyclic aromatic hydrocarbon, PAH) น้ำมันทาร์สามารถนำมาประยุกต์ใช้เพื่อผลิตเป็นพลังงานเชื้อเพลิงได้ (Li และ Suzuki, 2010) แต่ น้ำมันทาร์ที่เกิดขึ้นในกระบวนการการผลิตถ่านมีคุณภาพต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันเชื้อเพลิง เนื่องจากน้ำมันทาร์ที่ได้จากขั้นตอนคาร์บอนไนเซชันมีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบมากและมีอัตราส่วนอะตอมไฮโดรเจนต่อคาร์บอนสูง

#### ผลิตภัณฑ์แก๊ส

ผลิตภัณฑ์แก๊สที่เกิดขึ้นจากขั้นตอนคาร์บอนไนเซชัน ได้แก่ คาร์บอนมอนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ ไฮโดรเจน แอมโมเนีย มีเทน อีเทนและเอทิลีน เป็นต้น ผลิตภัณฑ์แก๊สบางชนิดสามารถนำไปใช้เป็นแก๊สเชื้อเพลิงเพื่อให้ความร้อนหรือผลิตไฟฟ้าได้ แต่อย่างไรก็ตาม ผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้จากขั้นตอนคาร์บอนไนเซชันมีปริมาณน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการแปรรูปชีวมวลทางความร้อนอื่น จึงไม่นิยมนำผลิตภัณฑ์แก๊สที่เกิดขึ้นมาใช้ประโยชน์

### 2.3.3.2 อัตราการให้ความร้อน

อัตราการให้ความร้อน (Heating rate) มีผลต่อความว่องไวและการจัดเรียงตัวของอะตอมคาร์บอนในถ่านชาร์ อัตราการให้ความร้อนสูง สารระเหยถูกปลดปล่อยอย่างรวดเร็ว ทำให้คาร์บอนในถ่านชาร์มีการจัดเรียงตัวไม่เป็นระเบียบ หรือมีความเป็นระเบียบน้อย เกิดช่องว่างและรูพรุนขนาดใหญ่ สารเคมีหรือสารกระตุ้นสามารถเข้าไปทำปฏิกิริยาได้ง่าย ถ่านชาร์ที่ได้จึงมีความว่องไวในการทำปฏิกิริยาสูงกว่าถ่านชาร์ที่ได้จากอัตราการให้ความร้อนต่ำ นอกจากนี้อัตราการให้ความร้อนมีผลต่อสมบัติเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพของน้ำมันทาร์ อัตราการให้ความร้อนต่ำเป็นการให้ความร้อนอย่างช้าที่อุณหภูมิใดๆ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะอยู่ในสมดุลกันตลอดเวลา ขณะที่อัตราการให้ความร้อนสูงเป็นการให้ความร้อนอย่างรวดเร็วโอกาสที่จะเกิดปฏิกิริยาขณะเพิ่มอุณหภูมिन้อยมาก ดังนั้นการคาร์บอนไนซ์ด้วยอัตราการให้ความร้อนสูงจะไม่มีโอกาสเกิดการสลายตัวทุติยภูมิ (Secondary decomposition) ของผลิตภัณฑ์ทำให้น้ำมันทาร์ไม่มีโอกาสเกิดการรวมตัวกลายเป็นถ่านชาร์หรือมีการสลายตัวเป็นแก๊สต่อไปผลิตภัณฑ์ที่ได้จึงมีปริมาณน้ำมันทาร์มากและน้ำมันทาร์ที่ได้มีมวลโมเลกุลมากกว่าน้ำมันทาร์ที่ได้จากอัตราการให้ความร้อนต่ำ

### 2.3.3.3 อุณหภูมิในการคาร์บอนไนซ์

อุณหภูมิในการคาร์บอนไนซ์ (Carbonization temperature) มีผลต่อปริมาณและองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ทั้งถ่านชาร์ น้ำมันทาร์และแก๊ส เมื่ออุณหภูมิในการคาร์บอนไนซ์เพิ่มขึ้น ปริมาณการเกิดถ่านชาร์ลดลง น้ำมันทาร์และแก๊สที่ได้เพิ่มขึ้น องค์ประกอบของน้ำมันทาร์จะมีโครงสร้างเปลี่ยนแปลงไป เพราะการเพิ่มอุณหภูมิเป็นการเพิ่มพลังงานเพื่อทำลายพันธะภายในโครงสร้างของวัตถุดิบการคาร์บอนไนซ์ที่อุณหภูมิสูงหรือมากกว่า 500 องศาเซลเซียส ทำให้เกิดแก๊สที่ไม่สามารถควบแน่นได้ (Noncondensable gases) ปริมาณมาก โดยส่วนใหญ่เป็นไฮโดรเจน ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาเซกันดารีดีแก๊สฟิเคชัน (Secondary degasification) ซึ่งมีผลต่อการเปลี่ยนรูปเป็นถ่านชาร์ถ่านชาร์ที่ได้มีจึงปริมาณลดลง

### 2.3.3.4 เวลาในการคาร์บอนไนซ์

การเพิ่มเวลาในการคาร์บอนไนซ์ (Carbonization time) สามารถทำให้เกิดปฏิกิริยาการสลายตัวขั้นทุติยภูมิอย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้ได้ถ่านชาร์มากขึ้น ส่วนน้ำมันทาร์จะเกิดการแตกตัวต่อไป ทำให้น้ำมันทาร์มีปริมาณลดลงและนำไปสู่การเกิดแก๊สมีเทนหรือไฮโดรเจน



เพิ่มขึ้น เวลาในการคาร์บอนไนซ์มีผลต่อองค์ประกอบของถ่านชาร์ โดยถ่านชาร์ที่ได้มีสัดส่วนคาร์บอนเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการคาร์บอนไนซ์

### 2.3.3.5 ตัวกลางปฏิกิริยา

ตัวกลางปฏิกิริยา (Medium of reaction) มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาการสลายตัวในขั้นตอนคาร์บอนไนเซชัน ถ้าแก๊สและไอที่เกิดขึ้นระหว่างการคาร์บอนไนซ์ถูกพาออกไปอย่างรวดเร็วโดยมีแก๊สเฉื่อยเป็นตัวกลางปฏิกิริยา ปริมาณถ่านชาร์ที่ได้จะมีปริมาณมากกว่าตัวกลางปฏิกิริยาที่เป็นแก๊สอื่น แก๊สเฉื่อยที่นิยมใช้โดยทั่วไป คือ แก๊สไนโตรเจนและฮีเลียม ซึ่งเป็นแก๊สเฉื่อยต่อการเผาไหม้ หรือเฉื่อยต่อการสันดาษกับออกซิเจน แต่ถ่านชาร์ที่มีแก๊สเฉื่อยเป็นตัวกลางปฏิกิริยาจะมีความว่องไวในการทำปฏิกิริยาน้อยกว่าตัวกลางปฏิกิริยาชนิดอื่น

### 2.3.3.6 ขนาดของอนุภาค

ขนาดของอนุภาค (Particle size) มีอิทธิพลต่อการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์และมีอิทธิพลต่อสมบัติเชิงคุณภาพของถ่านชาร์ เพราะขนาดของอนุภาคมีความสัมพันธ์โดยตรงกับอัตราการถ่ายโอนความร้อน อนุภาคขนาดเล็กจะมีรูพรุนน้อยและนำความร้อนได้ดี ความร้อนสามารถกระจายตัวได้อย่างทั่วถึงและสม่ำเสมอ ถ่านชาร์ที่เกิดขึ้นจากอนุภาคขนาดเล็กจึงมีคุณภาพดีและอนุภาคขนาดเล็กมีอัตราการถ่ายโอนความร้อนสูงกว่าอนุภาคขนาดใหญ่ ทำให้อนุภาคขนาดเล็กเกิดการสลายตัวทางความร้อนและปลดปล่อยสารระเหยได้มากกว่าอนุภาคขนาดใหญ่ เป็นผลให้ถ่านชาร์ที่เกิดขึ้นจากอนุภาคขนาดเล็กมีปริมาณสารระเหยเป็นองค์ประกอบน้อยกว่า แต่อย่างไรก็ตามขนาดอนุภาคที่เล็กเกินไปจะเกิดการสลายตัวขั้นที่สอง (Secondary decomposition) ได้อย่างรวดเร็ว ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สมากขึ้น ถ่านชาร์จะมีปริมาณลดลง

## 2.3.4 การกระตุ้น (Activation)

การกระตุ้น คือ การทำให้คาร์บอนหรือถ่านชาร์มีความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้น โดยทำให้คาร์บอนเกิดรูพรุน หรือทำให้รูพรุนและพื้นผิวของถ่านชาร์ที่มีอยู่แล้วมีความว่องไวในการดูดซับมากขึ้น เนื่องจากถ่านชาร์ที่ผ่านขั้นตอนคาร์บอนไนเซชันที่อุณหภูมิ 400 ถึง 600 องศาเซลเซียส ถ่านชาร์จะมีการจัดเรียงตัวของโครงสร้างผลึกไม่เป็นระเบียบ เกิดช่องว่างและรูพรุนระหว่างผลึก ทำให้สารอินทรีย์และสารอินทรีย์จำพวกน้ำมันทาร์เข้าไปอุดและตกค้างบริเวณ

ช่องว่างและรูพรุนดังกล่าว ถ่านชาร์ที่ผ่านขั้นตอนการคาร์บอนไนเซชันจึงมีความสามารถในการดูดซับต่ำ ดังนั้นการผลิตถ่านกัมมันต์จากถ่านชาร์จำเป็นต้องผ่านขั้นตอนการกระตุ้น

วัตถุประสงค์และลักษณะต่างๆ ที่เกิดขึ้นในขั้นตอนการกระตุ้นมีดังนี้ (Mukherjee และคณะ, 1947, Yang และคณะ, 2010)

- เป็นการสร้างรูพรุนขึ้นใหม่ (new pore creation)
- เป็นการกำจัดสารอินทรีย์หรืออนินทรีย์ต่างๆ ออกจากบริเวณที่ทำหน้าที่ดูดซับ (active center)
- เป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวว่องไว (active surface area) โดยเกิดปฏิกิริยาทางเคมี ทำให้โมเลกุลบางกลุ่มหลุดออกไปและเกิดส่วนที่มีอำนาจดูดซับขึ้นมาแทน
- เป็นการเพิ่มความว่องไวการดูดซับให้กับผิวที่มีอยู่แล้วซึ่งหมายถึง การทำให้อะตอมของคาร์บอนมีพลังงานศักย์สูงขึ้น โดยจัดเปลี่ยนโครงสร้างใหม่เพื่อให้มีความว่องไวในการดูดซับสูงขึ้น
- เป็นการขยายขนาดของรูพรุนโดยการสลายตัวของรูพรุนที่มีอยู่ เพื่อให้ทำให้อำนาจดูดซับกว้างขึ้น (pore widening)

การผลิตถ่านกัมมันต์มีหลายวิธีและสามารถแบ่งได้เป็น 2 แบบหลัก ได้แก่ แบบ 2 ขั้นตอน (Two step) และแบบขั้นตอนเดียว (Single step) การผลิตถ่านกัมมันต์แบบ 2 ขั้นตอน ประกอบด้วย ขั้นตอนคาร์บอนไนเซชันและการกระตุ้น การผลิตถ่านกัมมันต์แบบขั้นตอนเดียว ประกอบด้วย ขั้นตอนการกระตุ้น การผลิตถ่านกัมมันต์แบบนี้จะไม่ผ่านขั้นตอนคาร์บอนไนเซชัน ซึ่งมีข้อดี คือ ลดต้นทุนและค่าใช้จ่ายในการผลิตถ่านกัมมันต์ แต่วิธีนี้ไม่สามารถใช้กับวัตถุดิบได้ทุกชนิด ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของวัตถุดิบและสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ต้องการผลิต ดังนั้นการกระตุ้นจึงเป็นขั้นตอนที่สำคัญในการผลิตถ่านกัมมันต์ทั้ง 2 แบบ โดยมีจุดประสงค์เพื่อพัฒนาและปรับปรุงโครงสร้างรูพรุนของถ่านกัมมันต์ให้มีความเหมาะสมกับการใช้งาน ขั้นตอนการกระตุ้นสามารถแบ่งได้เป็น 2 วิธีดังนี้

#### 2.3.4.1 วิธีการกระตุ้นทางเคมี (Chemical activation)

การกระตุ้นทางเคมีเป็นวิธีการกระตุ้นที่ใช้สารเคมีทำปฏิกิริยาเคมีกับอะตอมคาร์บอนที่ผิวถ่านและอะตอมคาร์บอนภายในโครงสร้างของถ่าน สารเคมีที่ใช้เป็นสารกระตุ้น (Oxidizing agent) ได้แก่ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ซิงค์คลอไรด์ (ZnCl<sub>2</sub>) และกรดฟอสฟอริก (H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>) เป็นต้น อุณหภูมิในการกระตุ้นประมาณ 450 ถึง 700 องศาเซลเซียส

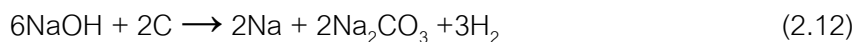
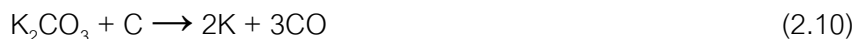
(Martinez, 2006) ขึ้นอยู่กับชนิดของสารกระตุ้นและวัตถุประสงค์ที่เลือกใช้ ข้อดีของวิธีการกระตุ้นทางเคมี คือ อุณหภูมิในการกระตุ้นต่ำ และวิธีการกระตุ้นทางเคมียังสามารถช่วยลดการเกิดน้ำมันหาร์ท์ และสารประกอบไฮโดรคาร์บอนอื่นๆ ในระหว่างขั้นตอนการกระตุ้น เป็นผลให้ถ่านกัมมันต์มีร้อยละผลได้ค่อนข้างสูง (Jibrilic และคณะ, 2009) รูปพรุนที่เกิดขึ้นเป็นรูปพรุนขนาดเล็กและมีปริมาตรรูพรุนสูง ดังนั้นจึงนิยมนำถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยวิธีนี้ไปใช้ประโยชน์เพื่อเป็นตัวดูดซับและแยกสารต่างๆ ในสารละลาย (Suhaz และคณะ, 2007) นอกจากนี้วิธีการกระตุ้นทางเคมียังมีข้อดี คือ พื้นผิวของถ่านกัมมันต์จะมีความว่องไวมาก เพราะการกระตุ้นทางเคมีเป็นวิธีที่สามารถเพิ่มหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ได้ แต่วิธีการกระตุ้นทางเคมีมีข้อเสีย คือ ต้นทุนการผลิตสูง เป็นวิธีที่ซับซ้อนและเพิ่มของเสียในกระบวนการผลิต เนื่องจากมีสารเคมีตกค้างในถ่านกัมมันต์ ทำให้ต้องเสียเวลาและค่าใช้จ่ายในการกำจัดสารเคมีออก รวมถึงเครื่องมือที่ใช้ต้องทำจากวัสดุพิเศษที่สามารถทนต่อการกัดกร่อน สารกระตุ้นในวิธีการกระตุ้นทางเคมีเป็นสารประกอบของโพแทสเซียมหรือโซเดียม และสารจำพวกดูดน้ำ (Dehydrating agent) ซึ่งสามารถแบ่งเป็น 3 กลุ่ม ดังตารางที่ 2.5

#### ตารางที่ 2.4 ชนิดสารกระตุ้นในวิธีการกระตุ้นทางเคมี

ชนิดสารกระตุ้น	สารกระตุ้น (Activating agent)
กรด	กรดซัลฟูริก ( $H_2SO_4$ ) กรดไนตริก ( $HNO_3$ ) กรดฟอสฟอริก ( $H_3PO_4$ ) และกรดบอริก ( $H_3BO_3$ )
เบส	โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $CaOH_2$ )
เกลือ	ซิงค์คลอไรด์ ( $ZnCl_2$ ) แคลเซียมคลอไรด์ ( $CaCl_2$ ) เฟอริกคลอไรด์ ( $FeCl_2$ ) โพแทสเซียมซัลไฟด์ ( $K_2S$ ) โพแทสเซียมไทโอไซยาเนต (KSCN) โพแทสเซียมคาร์บอเนต ( $K_2CO_3$ ) และแคลเซียมฟอสเฟต ( $Ca_3(PO_4)_2$ )

การผลิตถ่านกัมมันต์โดยวิธีการกระตุ้นทางเคมีในระดับอุตสาหกรรมส่วนใหญ่มีการใช้สารกระตุ้นซิงค์คลอไรด์ กรดฟอสฟอริกและโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ เนื่องจากสารกระตุ้นเหล่านี้มีราคาถูกและมีประสิทธิภาพในการผลิตถ่านกัมมันต์สูง

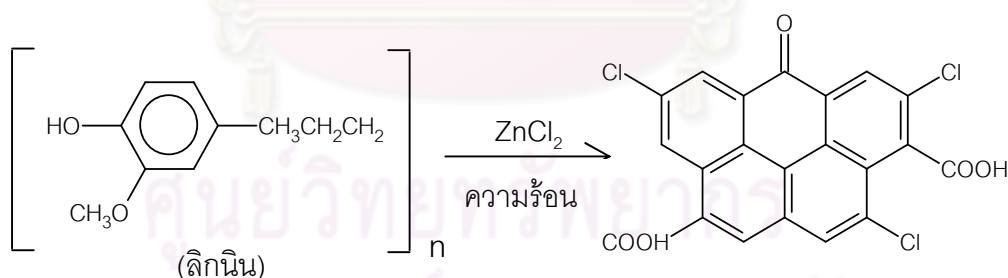
ปฏิกิริยาต่อไปนี้เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในการผลิตถ่านกัมมันต์โดยวิธีการกระตุ้นทางเคมี



ปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมโดยวิธีการกระตุ้นทางเคมี ได้แก่

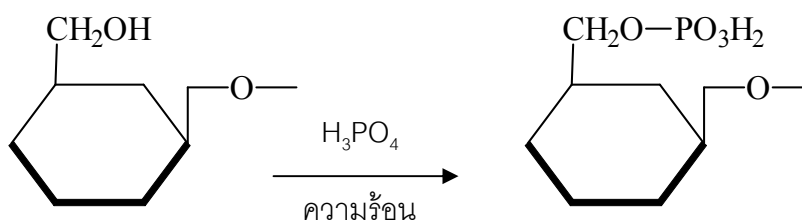
- องค์ประกอบ ของวัตถุดิบ เช่น ปริมาณลิกนินและเซลลูโลสในวัตถุดิบ
- อัตราส่วนของสารกระตุ้นต่อวัตถุดิบ
- ชนิดของสารกระตุ้น
- อุณหภูมิและเวลาในการกระตุ้น
- อัตราการให้ความร้อน

การกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์เป็นวิธีการกระตุ้นทางเคมีที่นิยมมากวิธีหนึ่งในการผลิตถ่านกัมมันต์ โดยใช้สารละลายซิงค์คลอไรด์ผสมกับวัตถุดิบที่อุณหภูมิประมาณ 130 องศาเซลเซียส การใช้อุณหภูมิที่ต่ำในช่วงนี้มีผลอย่างมากต่อสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้ หลังจากนั้นนำไปคาร์บอนไนซ์ที่อุณหภูมิประมาณ 600 ถึง 850 องศาเซลเซียส การผลิตถ่านกัมมันต์ในระดับอุตสาหกรรมต้องคำนึงถึงประสิทธิภาพในการนำเอาซิงค์คลอไรด์กลับมาใช้ใหม่ ด้วยประสิทธิภาพการนำซิงค์คลอไรด์กลับมาใช้ใหม่ที่ค่อนข้างจำกัดและปัญหาการกัดกร่อนของเครื่องปฏิกรณ์ ทำให้การใช้ซิงค์คลอไรด์เป็นสารกระตุ้นลดลง



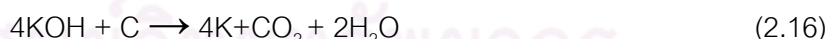
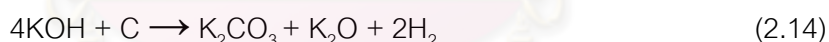
รูปที่ 2.9 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีจากกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์

การกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกเป็นวิธีการกระตุ้นทางเคมีที่ใช้กรดฟอสฟอริกเป็นสารกระตุ้น ซึ่งมีข้อดี คือ อุณหภูมิในการกระตุ้นต่ำ ร้อยละผลได้ของถ่านกัมมันต์สูงกว่าสารกระตุ้นอื่นและถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกจะไม่มีสารประกอบฟอสเฟตตกค้าง นอกจากนี้กรดฟอสฟอริกที่ใช้กระตุ้นแล้วสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ โดยได้กรดฟอสฟอริกที่มีความเข้มข้นสูง การกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกเหมาะสำหรับวัตถุดิบประเภทไม้



รูปที่ 2.10 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีจากกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก

การกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นวิธีการกระตุ้นทางเคมีโดยใช้สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์มาผสมกับวัตถุดิบ สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์จะแทรกเข้าไปในวัตถุดิบ เมื่อให้ความร้อนโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์จากสมการ (2.13) จะสลายตัวเป็นโพแทสเซียมออกไซด์และน้ำ ในขณะเดียวกันโพแทสเซียมคาร์บอเนตซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์จากสมการ (2.14) และ (2.17) จะทำปฏิกิริยากับอะตอมคาร์บอนและโพแทสเซียมออกไซด์ เกิดผลิตภัณฑ์เป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และโลหะโพแทสเซียม ดังสมการ (2.16) โลหะโพแทสเซียมที่เกิดขึ้นเป็นกลไกสำคัญที่สามารถเพิ่มจำนวนรูพรุนในโครงสร้างของถ่านกัมมันต์ได้และอะตอมคาร์บอนในโครงสร้างของถ่านบางส่วนจะเกิดปฏิกิริยาเคมีโดยผ่านกระบวนการแกซิฟิเคชัน ทำให้เกิดรูพรุนจำนวนมากในโครงสร้างของถ่านกัมมันต์ (Jibril และคณะ, 2007)

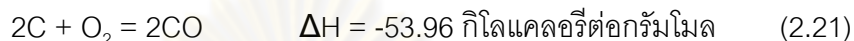
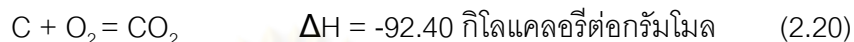
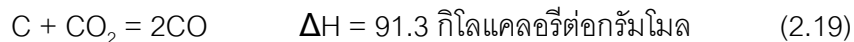
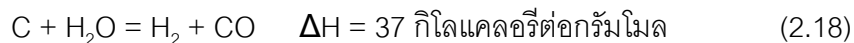


#### 2.3.4.2 วิธีการกระตุ้นทางกายภาพ (Physical activation)

วิธีการกระตุ้นทางกายภาพเป็นการกระตุ้นที่ใช้แก๊สออกซิไดซ์ทำปฏิกิริยากับอะตอมคาร์บอนเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนของถ่านกัมมันต์ โดยเกิดผ่านกระบวนการแกซิฟิเคชัน (Gasification) อุณหภูมิในการกระตุ้น 600 ถึง 1200 องศาเซลเซียส (Suhas และคณะ, 2007) อุณหภูมิในการกระตุ้นที่เลือกใช้ขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุดิบและแก๊สออกซิไดซ์ แก๊สออกซิไดซ์ที่ใช้ทั่วไป ได้แก่ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ไอน้ำและอากาศ การผลิต

ถ่านกัมมันต์โดยวิธีการกระตุ้นทางกายภาพอาจใช้แก๊สออกซิไดซ์ชนิดใดชนิดหนึ่งหรือใช้แก๊สออกซิไดซ์ร่วมกัน

ปฏิกิริยาต่อไปนี้เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในการผลิตถ่านกัมมันต์โดยวิธีการกระตุ้นทางกายภาพ



ปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมโดยวิธีการกระตุ้นทางกายภาพได้แก่

- โครงสร้างของคาร์บอนในวัตถุดิบหรือถ่านชาร์ที่นำมากระตุ้น
- สารอนินทรีย์ปนเปื้อนในวัตถุดิบ
- ชนิดของแก๊สออกซิไดซ์
- อุณหภูมิในการกระตุ้น
- ความดันของแก๊ส
- เวลาในการกระตุ้น
- ขนาดอนุภาคของถ่านชาร์

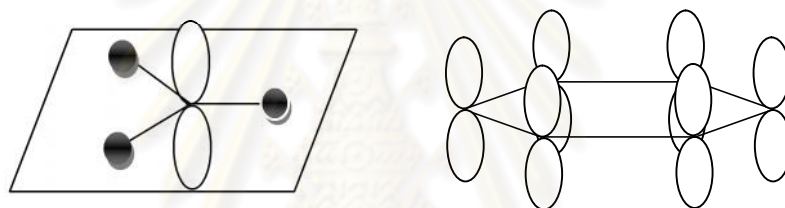
การกระตุ้นด้วยไอน้ำเป็นการกระตุ้นโดยใช้ไอน้ำเป็นตัวออกซิไดซ์อะตอมคาร์บอนในถ่านและเป็นปฏิกิริยาคูดความร้อนดังสมการ (2.18) ดังนั้นการกระตุ้นด้วยไอน้ำจะใช้อุณหภูมิสูง อุณหภูมิในการกระตุ้น 700 ถึง 950 องศาเซลเซียส ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดวัตถุดิบ สภาวะในการกระตุ้นและการออกแบบของเครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้ แต่อุณหภูมิในการกระตุ้นไม่ควรเกิน 1,000 องศาเซลเซียส เพราะปฏิกิริยาจะถูกควบคุมโดยอัตราการแพร่ของแก๊สออกซิไดซ์ (diffusion controlled rate) อะตอมคาร์บอนบริเวณผิวนอกอาจถูกเผาไหม้ (external burn-off) ทำให้ขนาดและพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ลดลงโดยรูปทรงส่วนใหญ่ของถ่านกัมมันต์ที่เกิดขึ้นจากการกระตุ้นด้วยไอน้ำเป็นรูพรุนขนาดเล็ก (micro pore) เนื่องจากโมเลกุลของน้ำมีขนาดเล็กกว่าโมเลกุลของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และแก๊สออกซิไดซ์อื่น (San Miguel, Fowler และ Sollars, 2003)

การกระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เป็นการกระตุ้นโดยใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เป็นตัวออกซิไดซ์อะตอมคาร์บอนในถ่านและเป็นปฏิกิริยาคูดความร้อนเช่นเดียวกับการกระตุ้นด้วยไอน้ำดังสมการ (2.19) แต่การกระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จะ

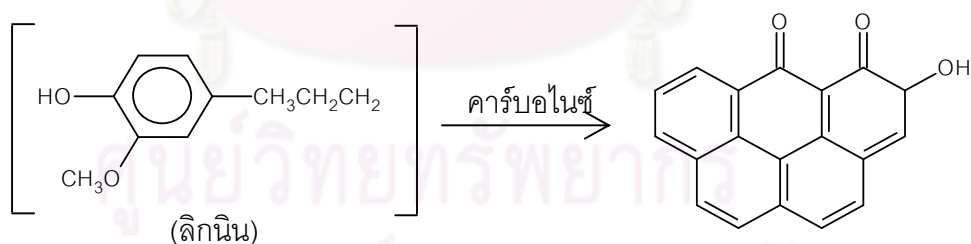


ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

อิเล็กตรอนอิสระจากชั้น 2p อีก 1 ตัว ( $sp^2$  Hybridization) จึงเกิดพันธะแบบซิกมา (Sigma bond) กับคาร์บอนอะตอมที่อยู่ข้างเคียง 3 ตัวเรียงกันเป็นรูปสามเหลี่ยมในระนาบ (plane) เดียวกันและอิเล็กตรอนอิสระที่เหลือจะโคจรอยู่บนและล่างระนาบ พร้อมทั้งเกิดพันธะแบบไพ ( $\pi$ -bond) ดังรูปที่ 2.12 เกิดเป็นวงแหวนเหลี่ยมที่มีอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ (Resonance) ได้ทั่วโครงสร้างที่เรียกว่า วงเบนซิน (Benzene ring) หรือ วงแอมโรแมติก (Aromatic ring) วงเบนซินแต่ละวงจะเชื่อมติดกันจนมีลักษณะเป็นแผ่น สำหรับโครงสร้างถ่านจะมีแผ่นวงเบนซินนี้อยู่หลายแผ่นเรียงตัวกันเป็นชั้นๆ อย่างไม่มีระเบียบ ซึ่งการเรียงตัวในลักษณะนี้จะเกิดแรงผลักระหว่างชั้นจากไพอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ที่อยู่บนและล่างของแต่ละชั้น ถ่านจะสร้างเสถียรภาพด้วยการใช้ไพอิเล็กตรอนสร้างพันธะกับอะตอมอื่น เช่น ไนโตรเจน ฟอสฟอรัสและออกซิเจน เป็นต้น แต่การสร้างพันธะกับอะตอมออกซิเจนในบรรยากาศจะง่ายที่สุด ดังนั้นจึงมักพบออกซิเจนในโครงสร้างถ่านเสมอ ตัวอย่างดังแสดงในรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.12 ตำแหน่งของอิเล็กตรอนของคาร์บอนที่เกิดจาก  $sp^2$  Hybridization



รูปที่ 2.13 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีโดยการเตรียมถ่านจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร

### 2.3.5.2 ความพรุน (Porosity)

โดยทั่วไปถ่านกัมมันต์มีปริมาตรรูพรุน 0.5 ถึง 1.5 มิลลิเมตรต่อกรัม ลักษณะความพรุนและขนาดของรูพรุนสามารถแบ่งเป็น 3 ขนาด ตามขนาดของรูพรุน ได้ดังนี้



1. รูพรุนขนาดใหญ่ (Macropores) คือ รูพรุนบนถ่านกัมมันต์ที่มีขนาดของรัศมี 5,000 ถึง 20,000 อังสตรอม ปริมาตรรูพรุน 0.2 ถึง 0.8 มิลลิลิตรต่อกรัมและมีพื้นที่ผิว 0.2 ถึง 5.0 ตารางเมตรต่อกรัม รูพรุนขนาดใหญ่เป็นทางส่งผ่านอนุภาคของสารเพื่อเข้าไปในรูพรุนอื่น ดังนั้นรูพรุนขนาดใหญ่จึงไม่มีบทบาทต่อการดูดซับ

2. รูพรุนขนาดกลาง (Mesopores) คือ รูพรุนบนถ่านกัมมันต์ที่มีขนาดของรัศมี 20 ถึง 1,000 อังสตรอม ปริมาตรรูพรุน 0.02 ถึง 0.10 มิลลิลิตรต่อกรัมและมีพื้นที่ผิวร้อยละ 5 ของพื้นที่ผิวทั้งหมด ตัวอย่างสารหรือตัวดูดซับที่มีรูพรุนขนาดกลาง ได้แก่ ซิลิกา (Silica gel) อะลูมินา ซิลิกาเจล (Alumina gels)

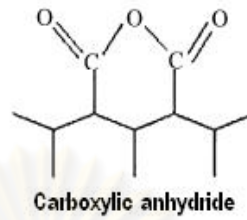
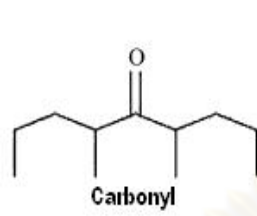
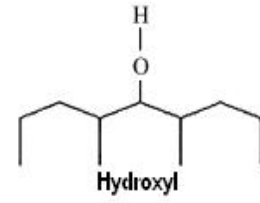
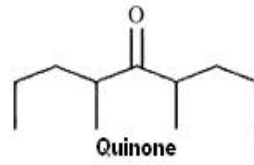
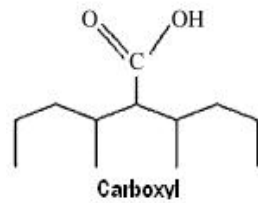
3. รูพรุนขนาดเล็ก (Micropores) คือ รูพรุนบนถ่านกัมมันต์ที่มีขนาดของรัศมีน้อยกว่า 20 อังสตรอมหรือมีขนาดเฉลี่ยของรัศมี 6 ถึง 8 อังสตรอม ปริมาตรรูพรุน 0.15 ถึง 0.50 มิลลิลิตรต่อกรัมและมีพื้นที่ผิวมากกว่าร้อยละ 95 ของพื้นที่ผิวทั้งหมด

### 2.3.5.3 ความเป็นกรด-เบสของพื้นผิวถ่านกัมมันต์

พื้นผิวของถ่านกัมมันต์โดยส่วนใหญ่ไม่มีขั้ว (Non polar) หรือมีความเป็นขั้วน้อย ความเป็นขั้วที่พื้นผิวของถ่านกัมมันต์เกิดจากสารประกอบออกไซด์หรือหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวถ่านกัมมันต์ สมบัติดังกล่าวมีผลต่อความสามารถในการดูดซับสารของถ่านกัมมันต์ เราสามารถแบ่งถ่านกัมมันต์เป็น 2 ชนิด ตามสภาพความเป็นกรดเบสของพื้นผิวถ่านกัมมันต์ เมื่อผสมหรือกระจายตัวในสารละลายได้ดังนี้ (Mohan และ Pittman, 2006)

1. ถ่านกัมมันต์ชนิด L (L carbons) คือ ถ่านกัมมันต์ที่มีสภาพเป็นกรด เมื่อกระจายตัวในสารละลาย โดยมีค่าศักย์ไฟฟ้าโพเทนเชียลน้อยกว่าศูนย์ (Negative zeta potential) ใช้ดูดซับสารที่ความเป็นเบสและสารที่มีขั้วหรือสารที่ชอบน้ำ (Hydrophilic) ถ่านกัมมันต์ชนิดนี้เกิดจากการกระตุ้นที่อุณหภูมิ 200 ถึง 400 องศาเซลเซียสและมีสารประกอบออกไซด์บนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ที่เป็นกรด

2. ถ่านกัมมันต์ชนิด H (H carbons) คือ ถ่านกัมมันต์ที่มีสภาพเป็นเบส เมื่อกระจายตัวในสารละลาย โดยมีค่าศักย์ไฟฟ้าโพเทนเชียลมากกว่าศูนย์ (Positive zeta potential) ถ่านกัมมันต์ชนิดนี้เกิดจากการกระตุ้นที่อุณหภูมิ 800 ถึง 1000 องศาเซลเซียสและมีสารประกอบออกไซด์บนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ที่เป็นเบส



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5. แทนนิน (Tannin) เป็นสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่บ่งบอกถึงประสิทธิภาพและความสามารถในการดูดซับสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลใหญ่และขนาดกลาง มีหน่วยเป็นส่วนในล้านส่วนหรือพีพีเอ็ม (parts per million, ppm) ถ่านกัมมันต์ควรมีค่าแทนนิน 200 ถึง 362 พีพีเอ็ม

6. ความหนาแน่น (Apparent Density)

7. ปริมาณเถ้า (Ash Content)

8. ค่าความแข็ง/ค่าการขัดถู (Hardness/Abrasion number) บ่งบอกความต้านทานการสึกกร่อนและความสามารถในการทนทานต่อแรงเสียดสีของถ่านกัมมันต์

9. ค่าการกระจายตัวของขนาดอนุภาคถ่าน (Particle size distribution) เป็นสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่บ่งบอกถึงความละเอียดของผงและมีผลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับ

#### ตารางที่ 2.5 คุณสมบัติถ่านกัมมันต์ชนิดผงและเม็ด (มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2537)

คุณสมบัติของถ่านกัมมันต์	ค่ามาตรฐาน*
<u>ถ่านกัมมันต์ชนิดผง</u>	
- ค่าการดูดซับไอโอดีน	> 600
- ความหนาแน่น (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)	0.20-0.75
<u>ถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ด</u>	
- ค่าการดูดซับไอโอดีน	> 600
- ความหนาแน่น (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)	0.36
- ความชื้น (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	8
- ความแข็ง	>70

\*ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (2537)

#### 2.3.4.5 ชนิดของถ่านกัมมันต์

ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (2537) ได้กำหนดชนิดของถ่านกัมมันต์ไว้ 2 ชนิด ดังตารางที่ 2.6 ได้แก่

1. ถ่านกัมมันต์ชนิดผง (Powder Activated Carbon, PAC) เป็นถ่านที่มีขนาดปริมาณที่ร่อนผ่านร่อน 150 ไมโครเมตร ต้องไม่น้อยกว่าร้อยละ 99 โดยน้ำหนักใช้สำหรับฟอกสีและดูดกลิ่นในสารละลาย

2. ถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ด (Granular Activated Carbon, GAC) เป็นถ่านที่มีขนาดปริมาณที่ร่อนผ่านแรง 150 ไมโครเมตร ต้องไม่เกินร้อยละ 5 โดยน้ำหนักใช้สำหรับทำแก๊สหรือตัวทำสารละลายให้บริสุทธิ์ (Purification)

ตารางที่ 2.6 ข้อดีและข้อเสียของการใช้ถ่านกัมมันต์เป็นตัวดูดซับ (Mohan และ Pittman, 2006)

ข้อดี	ข้อเสีย
1. เป็นตัวดูดซับที่มีประสิทธิภาพสูงโดยเฉพาะสีและสีย้อม เมื่อเปรียบเทียบกับตัวดูดซับอื่น	1. ราคาแพงเนื่องจากต้นทุนการผลิตสูง และคุณภาพของถ่านกัมมันต์ขึ้นอยู่กับราคาของถ่านกัมมันต์
2. เป็นตัวดูดซับที่มีพื้นที่ผิวสูง	2. ไม่จำเพาะต่อสารถูกดูดซับ (Non-selective)
3. ความสามารถและความจุในการดูดซับสูง	3. มีข้อจำกัดในการดูดซับสารที่มีขั้วหรือสารที่ชอบน้ำ (hydrophilic substances)
4. มีอัตราการดูดซับสูงและจลนพลศาสตร์ของการดูดซับว่องไวและรวดเร็ว	4. การฟื้นฟูถ่านกัมมันต์ (reactivation) มีค่าใช้จ่ายสูง
5. มีความยืดหยุ่นสูง ดูดซับสารได้หลายชนิด	5. ถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการฟื้นฟูอาจมีสมบัติเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณลดลง
6. มีความทนทานต่อความเป็นกรด-เบส	
7. รักษาสมบัติเชิงคุณภาพของสารถูกดูดซับ	
8. สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้	

### 2.3.6 ประโยชน์ของถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์เป็นตัวดูดซับ (adsorbent) ที่มีข้อดีหลายอย่างเมื่อเปรียบเทียบกับตัวดูดซับอื่น ดังตารางที่ 2.7 ถ่านกัมมันต์มีประสิทธิภาพในการดูดซับสูงและสามารถแยกสารได้หลายชนิด ใช้กำจัดสารอินทรีย์หรืออนินทรีย์ที่หลากหลายออกจากตัวกลางที่เป็นสารละลายและแก๊สโดยอาศัยหลักการดูดซับ (adsorption) ถ่านกัมมันต์มีพื้นที่ผิวและมีความพรุนสูง โดยมีพื้นที่ผิวประมาณ 500 ถึง 1500 ตารางเมตรต่อกรัม มีโครงสร้างภายในเป็นรูพรุนขนาดเล็กและมีหมู่ฟังก์ชันมากมายบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ถ่านกัมมันต์จึงเป็นตัวดูดซับที่ใช้แพร่หลายในการบำบัดน้ำเสีย (Yin และคณะ, 2007) และสามารถพัฒนาเพื่อประยุกต์ใช้ประโยชน์ต่างๆ ได้ในระดับอุตสาหกรรม การใช้งานและใช้ประโยชน์ของถ่านกัมมันต์มีหลายรูปแบบขึ้นอยู่กับสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้

### 2.3.6.1 ถ่านกัมมันต์ประเภทที่ใช้กับการดูดติดผิวก๊าซหรือไอ

- ใช้เป็นวัสดุติดทำหน้ากากเพื่อป้องกันก๊าซพิษโดยสามารถดูดติดผิวก๊าซพิษและไอของสารอินทรีย์ระเหยง่ายได้
- ใช้แยกก๊าซโซลีนออกจากก๊าซธรรมชาติ
- ใช้แยกไอของสารระเหยจากตัวทำละลายที่ใช้แล้วเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ โดยถ่านกัมมันต์จะดูดติดผิวไอระเหยเหล่านั้นที่อุณหภูมิห้องและคายออกที่ความดันของไอต่ำ
- ใช้กำจัดสิ่งเจือปนออกจากก๊าซเช่นไฮโดรเจนไนโตรเจนฮีเลียมอะเซทิลีน แอมโมเนียคาร์บอนไดออกไซด์คาร์บอนมอนอกไซด์สารประกอบอินทรีย์ของซัลเฟอร์ เป็นต้น
- ใช้กำจัดกลิ่นจากอากาศในเครื่องปรับอากาศทำให้กลิ่นเหม็นลดน้อยลง
- ใช้ดูดติดผิวกัมมันตภาพรังสีออกมาจากปฏิกิริยานิวเคลียร์สำหรับหน่วยปฏิบัติการให้การสลายตัวเกิดขึ้นสมบูรณ์ขณะที่ยังถูกจับไว้ในเบดของถ่านกัมมันต์ (activated carbon bed)

### 2.3.6.2 ถ่านกัมมันต์ประเภทที่ใช้กับการดูดติดของเหลว

- ใช้แยกสารอินทรีย์ออกจากของเหลวในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมน้ำตาลอุตสาหกรรมผลิตอาหารเครื่องดื่มแอลกอฮอล์
- ใช้ทางการแพทย์ อุตสาหกรรมเคมีและยา
- ใช้ทำน้ำดื่มให้บริสุทธิ์เป็นการกำจัดรสสีและกลิ่น
- ใช้ในการบำบัดน้ำเสีย
- ใช้แยกโลหะจากสารละลายที่ต้องการเช่นการแยกทองหลังการสกัดจากแร่ด้วยวิธีไซยาไนด์ เป็นต้น
- ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาหรือเป็นตัวพาสารเร่งปฏิกิริยา (Catalyst carrier) เช่นตัวพาสารเร่งปฏิกิริยาสำหรับปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชัน (Hydrogenation) เป็นต้น

## 2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

**วราวุฒิ ประชาศิริสกุล (2541)** ศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์จากกะลาปาล์มน้ำมันแบบ 2 ขั้นตอน ประกอบด้วย ขั้นตอนคาร์บอนไนเซชันและการกระตุ้นโดยใช้พลังงานไมโครเวฟ ตัวแปรที่ศึกษา ได้แก่ อุณหภูมิในการคาร์บอนไนซ์ 350 ถึง 450 องศาเซลเซียส เวลาในการคาร์บอนไนซ์ 60 ถึง 180 นาที อัตราการไหลของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 0.2 ถึง 1.5 ลิตรต่อนาที เวลาในการกระตุ้น 30 ถึง 90 นาที และขนาดอนุภาคของถ่านชาร์ 0.65 ถึง 4.75 มิลลิเมตร พบว่าอุณหภูมิในการคาร์บอนไนซ์ 400 องศาเซลเซียส เวลาในการคาร์บอนไนซ์ 60 นาทีเป็นภาวะที่เหมาะสมในการคาร์บอนไนซ์และภาวะที่เหมาะสมในการกระตุ้น คือ อัตราการไหลของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 0.2 ลิตรต่อนาที เวลาในการกระตุ้น 90 นาที ขนาดของอนุภาคถ่านชาร์ 1.18 ถึง 2.36 มิลลิเมตร ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้มีค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตร 0.524 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ร้อยละของเถ้า 4.28 ค่าการดูดซับไอโอดีน 411.27 มิลลิกรัมต่อกรัม ค่าการดูดซับเมทิลีนบลู 174.94 มิลลิกรัมต่อกรัม พื้นที่ผิว 476.64 ตารางเมตรต่อกรัม พื้นที่ผิวรูพรุนขนาดเล็ก 365.93 ตารางเมตรต่อกรัม และปริมาตรรูพรุนขนาดเล็ก 0.1696 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม

**วิจิตร จินดาพันธ์ไพโรจน์ (2543)** ศึกษาการผลิตถ่านกัมมันต์จากกิ่งไม้ยูคาลิปตัสโดยวิธีการกระตุ้นทางกายภาพแบบ 2 ขั้นตอน จากผลการทดลองพบว่าภาวะที่เหมาะสมของขั้นตอนคาร์บอนไนเซชัน คือ อุณหภูมิในการคาร์บอนไนซ์ 450 องศาเซลเซียส เวลาในการคาร์บอนไนซ์ 45 นาที ถ่านชาร์มีร้อยละผลได้ 24.20 และภาวะที่เหมาะสมของขั้นตอนการกระตุ้นถ่านชาร์จากกิ่งไม้ยูคาลิปตัส คือ อุณหภูมิในการกระตุ้น 900 องศาเซลเซียส เวลาในการกระตุ้น 150 นาที ขนาดของอนุภาคถ่านชาร์ 0.3 ถึง 0.6 มิลลิเมตร ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้มีความหนาแน่นเชิงปริมาตร 0.1809 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ร้อยละของเถ้า 6.37 ร้อยละผลได้ของถ่านกัมมันต์ 33.14 ค่าการดูดซับไอโอดีน 1233 มิลลิกรัมต่อกรัม ค่าการดูดซับเมทิลีนบลู 242 มิลลิกรัมต่อกรัมและมีพื้นที่ผิว 1076.15 ตารางเมตรต่อกรัม นอกจากนี้พบว่าสมบัติของถ่านกัมมันต์จากกิ่งไม้ยูคาลิปตัสที่ผลิตได้มีคุณภาพเทียบเท่ากับถ่านกัมมันต์เกรดการค้า

**ดุขฎิ บัณฑิตย์ (2553)** ศึกษาและปรับปรุงถ่านชาร์จากยางรถยนต์ใช้แล้วด้วยกรดเพื่อออกซิเดทีฟดีซัลเฟอร์เซชันของกำมะถันในแนฟทา กรดที่ใช้ปรับสภาพผิวถ่านชาร์จากยางรถยนต์ใช้ ได้แก่ ไนตริกไฮโดรคลอริก ฟอรั่มิกและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ จากการทดลองพบว่า การใช้ถ่านชาร์ในกระบวนการออกซิเดทีฟดีซัลเฟอร์เซชันสามารถกำจัดกำมะถันในแนฟทาได้ร้อยละ 60 และการใช้กรดฟอรั่มิกร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์โดยมีค่าความเป็นกรด-เบสที่ 0 ถึง 4 พบว่าสามารถกำจัดกำมะถันในไพโรไลซิสแนฟทาได้ถึงร้อยละ 70 เนื่องจากกรดฟอรั่มิกเกิดปฏิกิริยากับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์กลายเป็นเปอร์ฟอรั่มิกซึ่งเป็นสารออกซิแดนซ์ที่แรงจึงสามารถเพิ่มการ

กำจัดกำมะถันได้ และพบว่าการปรับสภาพพื้นผิวของถ่านชาร์ด้วยกรดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ร่วมกับการใช้กรดฟอสฟอริกสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการลดปริมาณกำมะถันในไพโรไลซิส แนนฟาได้สูงถึงร้อยละ 75

**Ahmadroup และDo (1997)** ศึกษาการผลิตถ่านกัมมันต์จากกะลาแมคาเดเมียโดยใช้ โฟแทสเซียมไฮดรอกไซด์และซิงค์คลอไรด์เป็นสารเคมีในการกระตุ้น อุณหภูมิในการกระตุ้น 500 ถึง 800 องศาเซลเซียส จากผลการทดลองพบว่า อุณหภูมิและสารเคมีในการกระตุ้นมีบทบาท สำคัญต่อโครงสร้างรูพรุนของถ่านกัมมันต์ ถ่านกัมมันต์จากกะลาแมคาเดเมียที่กระตุ้นด้วย โฟแทสเซียมไฮดรอกไซด์มีพื้นที่ผิวรูพรุนน้อยกว่าถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ ภาวะที่ เหมาะสมในการกระตุ้น คือ อุณหภูมิในการกระตุ้น 500 องศาเซลเซียส เวลาในการกระตุ้น 60 นาที ถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นโดยใช้ซิงค์คลอไรด์เป็นสารเคมีกระตุ้นมีพื้นที่ผิวสูงสุด 1,718 ตาราง เมตรต่อกรัมและปริมาตรรูพรุน 0.732 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม

**Ariyadejwanich และคณะ (2003)** ศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์จากยางรถยนต์แบบ 2 ชั้นตอน ประกอบด้วยชั้นตอนคาร์บอนไนเซชันและการกระตุ้น โดยทำการคาร์บอนไนเซชันภายใต้ บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจน อุณหภูมิในคาร์บอนไนซ์ 500 องศาเซลเซียส เวลาในการคาร์บอนไนซ์ 1 ชั่วโมง และนำถ่านชาร์ที่ได้มากระตุ้นด้วยไอน้ำ อุณหภูมิในการกระตุ้น 850 องศาเซลเซียส พบว่ารูพรุนของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้เป็นรูพรุนขนาดกลาง โดยมีปริมาตรรูพรุนขนาดกลาง 1.09 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่ออนาที่และมีพื้นที่ผิว 737 ตารางเมตรต่อกรัม และทำการพัฒนาโครงสร้างรู พรุนของถ่านกัมมันต์โดยการแช่ถ่านชาร์ด้วยกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 1 โมลาร์ เป็นเวลา 24 ชั่วโมงก่อนการกระตุ้นด้วยไอน้ำ พบว่าการแช่กรดไฮโดรคลอริกก่อนการกระตุ้นสามารถปรับปรุง สมบัติความพรุนของถ่านกัมมันต์ ถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการแช่กรดไฮโดรคลอริกก่อนการกระตุ้นด้วย ไอน้ำมีปริมาตรรูพรุนขนาดกลาง 1.62 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัมและมีพื้นที่ผิว 1119 ตาราง เมตรต่อกรัม และงานวิจัยนี้ทำการเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับฟีนอลและสีย้อมผ้า Black 5 ของถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการแช่กรดไฮโดรคลอริกก่อนการกระตุ้นด้วยไอน้ำกับถ่านกัมมันต์ เชิงพาณิชย์ พบว่าถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการแช่กรดไฮโดรคลอริกก่อนการกระตุ้นด้วยไอน้ำมีการดูด ซักฟีนอลได้น้อยกว่า แต่สามารถดูดซับสีย้อมผ้า Black 5 ได้มากกว่าถ่านกัมมันต์เชิงพาณิชย์ เพราะถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการแช่กรดไฮโดรคลอริกก่อนมีรูพรุนขนาดกลางมากกว่า

**Williams และคณะ (2006)** ศึกษาและพัฒนาโครงสร้างรูพรุนของถ่านกัมมันต์จากเส้นใย เหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมสิ่งทอด้วยวิธีการกระตุ้นทางกายภาพและทางเคมี พบว่าถ่านกัมมันต์ที่ เตรียมด้วยวิธีการกระตุ้นทางเคมีที่ใช้ซิงค์คลอไรด์เป็นสารกระตุ้นมีโครงสร้างของรูพรุนดีกว่า ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมด้วยวิธีการกระตุ้นทางกายภาพที่ใช้ไนโตรเจนและไอน้ำเป็นแก๊สออกซิไดซ์ ร่วมกัน ที่อุณหภูมิในการกระตุ้น 800 องศาเซลเซียส โครงสร้างรูพรุนของถ่านกัมมันต์ที่เกิดขึ้นด้วย

วิธีการกระตุ้นทางเคมีเป็นรูปพูนขนาดเล็กและมีการกระจายตัวของขนาดรูปพูนสม่ำเสมอ นอกจากนี้พบว่าอุณหภูมิและอัตราส่วนของซิงค์คลอไรด์ต่อถ่านชาร์โดยน้ำหนักเป็นปัจจัยสำคัญต่อการพัฒนาโครงสร้างรูปพูนของถ่านกัมมันต์ด้วยวิธีการกระตุ้นทางเคมี อุณหภูมิในการกระตุ้น 450 องศาเซลเซียสและอัตราส่วนของซิงค์คลอไรด์ต่อถ่านชาร์โดยน้ำหนักเท่ากับ 2:1 เป็นภาวะที่เหมาะสม ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้มีพื้นที่ผิวรูปพูนสูงสุด 2,400 ตารางเมตรต่อกรัม

**Aworn และคณะ (2008)** ศึกษาการผลิตถ่านกัมมันต์จากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร 5 ชนิด ได้แก่ ช้างข้าวโพด ชี้อ้อย ชานอ้อย กะลาแมคาเดเมียและข้าวเปลือก โดยวิธีการกระตุ้นทางกายภาพ พบว่าวัตถุดิบ อุณหภูมิในการกระตุ้น ชนิดของแก๊สออกซิไดซ์และร้อยละของสารระเหยในถ่านชาร์มีผลต่อสมบัติและโครงสร้างรูปพูนของถ่านกัมมันต์ เมื่อเปรียบเทียบชนิดของแก๊สออกซิไดซ์ระหว่างไนโตรเจนและไอน้ำ ( $N_2/H_2O$ ) กับไนโตรเจนกับคาร์บอนไดออกไซด์ ( $N_2/CO_2$ ) พบว่าอุณหภูมิในการกระตุ้น 800 องศาเซลเซียส การกระตุ้นด้วยไนโตรเจนและไอน้ำเหมาะสมสำหรับชานอ้อยและกะลาแมคาเดเมีย รูปพูนของถ่านกัมมันต์ที่เกิดขึ้นเป็นรูปพูนขนาดกลาง ส่วนการกระตุ้นด้วยไนโตรเจนและคาร์บอนไดออกไซด์เหมาะสมสำหรับช้างข้าวโพดและชี้อ้อย รูปพูนของถ่านกัมมันต์ที่เกิดขึ้นเป็นรูปพูนขนาดเล็ก นอกจากนี้พบว่าข้าวเปลือกเป็นวัตถุดิบไม่เหมาะสมกับการผลิตถ่านกัมมันต์โดยวิธีการกระตุ้นทางกายภาพที่อุณหภูมิ 500 ถึง 800 องศาเซลเซียส เนื่องจากข้าวเปลือกมีร้อยละคาร์บอนคงตัวต่ำและเถ้าสูง

**Bouchelta และคณะ (2008)** ศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์จากการไพโรไลซิสและการกระตุ้นด้วยวิธีทางกายภาพโดยใช้ไอน้ำของ Date stone ภายใต้เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง (Fixed bed reactor) อุณหภูมิในการไพโรไลต์ 500 ถึง 800 องศาเซลเซียส ถ่านชาร์จากการไพโรไลซิสภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจน อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 100 มิลลิลิตรต่อนาที อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาทีและอุณหภูมิในการไพโรไลต์ 700 องศาเซลเซียส เป็นภาวะที่เหมาะสม โดยมีร้อยละผลได้ของถ่านชาร์ 22.31 และนำถ่านชาร์จากการไพโรไลต์ที่ภาวะเหมาะสมมากระตุ้นด้วยไอน้ำเพื่อศึกษาผลของขนาดอนุภาคของถ่านชาร์ อุณหภูมิและเวลาในการกระตุ้นต่อลักษณะและสมบัติรูปพูนของถ่านกัมมันต์ พบว่าอุณหภูมิในการกระตุ้น 700 องศาเซลเซียส ไอน้ำสามารถแพร่เข้าไปทำปฏิกิริยากับอะตอมคาร์บอนของลิกนินที่เป็นองค์ประกอบหลักอยู่ในโครงสร้างของถ่านชาร์ได้ง่ายและรวดเร็ว เป็นผลให้เกิดรูปพูนจำนวนมาก และถ่านกัมมันต์มีพื้นที่ผิวรูปพูนเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มเวลาในการกระตุ้น นอกจากนี้พบว่าถ่านกัมมันต์ชนิดผง (powder activated carbon, PAC) ที่เตรียมจากถ่านชาร์ขนาดอนุภาคน้อยกว่า 0.5 มิลลิเมตร มีพื้นที่ผิวรูปพูนและปริมาตรรูปพูนขนาดเล็กมากกว่าถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ด (granular activated carbon, GAC) ที่เตรียมจากถ่านชาร์ขนาดอนุภาค 1 ถึง 3 มิลลิเมตร ภาวะที่เหมาะสมของการกระตุ้น คือ อุณหภูมิในการกระตุ้น 700 องศาเซลเซียส เวลาในการกระตุ้น 60 นาที รูปพูน



บนถ่านกัมมันต์ชนิดผงที่เกิดขึ้นเป็นรูพรุนขนาดเล็กที่มีพื้นที่ผิวสูงสุด 635 ตารางเมตรต่อกรัมและปริมาตรรูพรุนขนาดเล็ก 0.716 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม

**Carrott และคณะ (2008)** ศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์ด้วยวิธีการกระตุ้นทางกายภาพของแก๊สออกซิไดซ์ 2 ชนิด คือ ไอน้ำและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ภายในเตาเผาให้ความร้อนชนิดท่อแนวนอน โดยทำการเปรียบเทียบชนิดของลิกนินที่เป็นวัตถุดิบในการเตรียมถ่านกัมมันต์ระหว่าง kraft lignins กับ hydrolytic lignins จากผลการทดลองพบว่า สารประกอบอินทรีย์ใน kraft lignins มีผลต่อกระบวนการไพโรไลซิสและการกระตุ้นของแก๊สออกซิไดซ์ทั้งสองชนิด ถ่านชาร์จาก kraft lignins มีร้อยละหายไปของน้ำหนักลดลงอย่างรวดเร็วและถ่านกัมมันต์จาก kraft lignins มีพื้นที่ผิวและรูพรุนขนาดเล็กน้อยกว่าถ่านกัมมันต์จาก hydrolytic lignins เนื่องจากโซเดียมคาร์บอเนต ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) และโซเดียมซัลเฟต ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) ซึ่งเป็นสารอินทรีย์ในถ่านของ kraft lignins จะทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการสลายตัวทางความร้อนที่อุณหภูมิสูง ส่งผลให้ยับยั้งการเกิดรูพรุนขนาดเล็ก และพบว่าถ่านชาร์จาก kraft lignins มีความไวต่อการกระตุ้นมากกว่าถ่านชาร์จาก hydrolytic lignins เป็นผลให้ถ่านชาร์จาก kraft lignins เกิดการเผาไหม้ได้ดีและรวดเร็วกว่าถ่านชาร์จาก hydrolytic lignins รูพรุนของถ่านกัมมันต์จาก kraft lignins จึงมีขนาดใหญ่กว่า นอกจากนี้พบว่าร้อยละการเผาไหม้ของอะตอมคาร์บอน (% burn-out) เท่ากับ 50 การกระตุ้นด้วยไอน้ำมีความไวมากกว่าการกระตุ้นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เป็น 5 เท่า

**Li และคณะ (2008)** ศึกษาผลของอุณหภูมิในการคาร์บอนไต์และเวลาในการกระตุ้นต่อลักษณะรูพรุนของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกะลามะพร้าวโดยวิธีการกระตุ้นทางกายภาพแบบ 2 ขั้นตอน โดยใช้ไอน้ำเป็นแก๊สออกซิไดซ์ อัตราการไหลของไอน้ำ 1.35 กรัมต่อนาที กะลามะพร้าวจะถูกคาร์บอนไต์ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจน อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที เวลาในการคาร์บอนไต์ 2 ชั่วโมง อุณหภูมิในการคาร์บอนไต์ 400 600 800 และ 1000 องศาเซลเซียส และนำถ่านชาร์กะลามะพร้าวมากระตุ้นที่อุณหภูมิในการกระตุ้น 900 องศาเซลเซียส เพื่อศึกษาผลของเวลาในการกระตุ้น เวลาในการกระตุ้นที่ศึกษา ได้แก่ 30 60 90 และ 120 นาที จากผลการทดลองพบว่าอุณหภูมิในการคาร์บอนไต์มีผลต่อรูพรุนของถ่านชาร์และถ่านกัมมันต์ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการคาร์บอนไต์ ถ่านชาร์และถ่านกัมมันต์มีพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนเพิ่มขึ้น โดยรูพรุนในโครงสร้างถ่านชาร์และถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าวมีขนาดเล็กลงเนื่องจากการคาร์บอนไต์ที่อุณหภูมิสูง ก่อให้เกิดการสลายตัวของสารระเหยและเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน (Polymerization reaction) ทำให้ถ่านชาร์และถ่านกัมมันต์เกิดรูพรุนขึ้นใหม่ที่มีขนาดเล็ก นอกจากนี้พบว่า การเพิ่มเวลาในการกระตุ้นสามารถพัฒนาโครงสร้างรูพรุนของถ่านกัมมันต์ได้ ทำให้ถ่านกัมมันต์มีพื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุนทั้งหมดและปริมาตรรูพรุนขนาดเล็กเพิ่มขึ้น และรูพรุนของถ่านกัมมันต์มีขนาดเล็กลงเช่นเดียวกับการเพิ่มอุณหภูมิในการคาร์บอนไต์ อุณหภูมิในการคาร์

บอไนซ์ 1000 องศาเซลเซียส อุณหภูมิในการกระตุ้น 900 องศาเซลเซียสและเวลาในการกระตุ้น 120 นาทีเป็นภาวะที่เหมาะสม ถ่านกัมมันต์ที่เกิดขึ้นมีพื้นที่ผิวสูงสุด 1926 ตารางเมตรต่อกรัม ปริมาตรรูพรุนทั้งหมด 1.26 มิลลิลิตรต่อกรัมและปริมาตรรูพรุนขนาดเล็ก 0.931 มิลลิลิตรต่อกรัม

**Song และคณะ (2010)** ศึกษาการพัฒนาพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์โดยการออกซิเดชันด้วยกรดไนตริก ( $\text{HNO}_3$ ) และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) เพื่อใช้แยกไอออนของตะกั่ว (Pb) ออกจากสารละลาย พบว่าที่อุณหภูมิห้องการปรับปรุงพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์โดยการออกซิเดชันด้วยกรดทั้งสองชนิดไม่มีผลต่อพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนของถ่านกัมมันต์ แต่การออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 363 เคลวิน พื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนของถ่านกัมมันต์ลดลง เนื่องจากการออกซิเดชันที่อุณหภูมิสูงจะเกิดขึ้นอย่างรุนแรง แต่อย่างไรก็ตามการออกซิเดชันด้วยกรดทั้งสองชนิดของถ่านกัมมันต์สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการแยกไอออนตะกั่วออกจากสารละลาย เมื่อเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ที่ไม่มีการออกซิเดชัน เพราะการออกซิเดชันด้วยกรดเป็นการปรับปรุงพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์โดยการเพิ่มหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิล (carboxyl,  $\text{C}=\text{O}$ ) ซึ่งมีสมบัติความเป็นกรดและมีสภาพเป็นประจุลบเมื่อกระจายตัวในน้ำ ทำให้ดูดซับไอออนตะกั่วได้ดีนอกจากนี้พบว่าความสามารถในการดูดซับไอออนของตะกั่วมีผลโดยตรงกับความเป็นกรดของพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ ที่อุณหภูมิ 363 เคลวิน ถ่านกัมมันต์ที่ออกซิเดชันด้วยกรดไนตริก 10 โมลาร์ มีความจุของการดูดซับ ( $Q_0$ ) ไอออนตะกั่วสูงสุดเท่ากับ 40.12 มิลลิกรัมต่อกรัม

**Sun และ Jiang (2010)** ทำการศึกษาผลของอัตราการป้อนเข้าของน้ำ อุณหภูมิและเวลาในการกระตุ้นต่อความสามารถในการดูดซับไอโอดีนและเมทิลีนบลูของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากเปลือกยางพารา โดยใช้ไอน้ำเป็นแก๊สออกซิไดซ์ อัตราการป้อนเข้าของน้ำ 4 6 และ 8 กิโลกรัมต่อชั่วโมง อุณหภูมิในการกระตุ้น 820 850 และ 880 องศาเซลเซียสและเวลาในการกระตุ้น 40 60 และ 80 นาที พบว่าอัตราการป้อนเข้าของน้ำ อุณหภูมิและเวลาในการกระตุ้นมีผลต่อการดูดซับไอโอดีนและเมทิลีนบลูของถ่านกัมมันต์ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการกระตุ้นเป็น 880 องศาเซลเซียส ถ่านกัมมันต์มีการดูดซับไอโอดีนและเมทิลีนบลูเพิ่มขึ้น แต่การดูดซับไอโอดีนและเมทิลีนบลูจะลดลง เมื่อเพิ่มอัตราการป้อนเข้าของน้ำเป็น 8 กิโลกรัมต่อชั่วโมงและเพิ่มเวลาในการกระตุ้นเป็น 80 นาที เพราะที่อุณหภูมิในการกระตุ้นสูง การเพิ่มอัตราการป้อนเข้าของน้ำและเวลาในการกระตุ้นจะทำให้ไอน้ำทำปฏิกิริยากับอะตอมคาร์บอนในโครงสร้างของถ่านอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้เกิดการสลายตัวของโครงสร้างรูพรุนขนาดเล็กและกลายเป็นรูพรุนขนาดใหญ่ อัตราการป้อนเข้าของน้ำ อุณหภูมิและเวลาในการกระตุ้นที่เหมาะสม คือ 6 กิโลกรัมต่อชั่วโมง 880 องศาเซลเซียส และ 80 นาที ตามลำดับ ถ่านกัมมันต์มีค่าการดูดซับไอโอดีนและเมทิลีนบลูสูงสุดเท่ากับ 1326 และ 265 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ โดยมีพื้นที่ผิวสูงสุด 948 ตารางเมตรต่อกรัม ปริมาตรรูพรุน

ทั้งหมด 0.988 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม ปริมาตรรูพรุนขนาดเล็ก 0.615 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม และขนาดของรูพรุนเฉลี่ย 3.65 นาโนเมตร

**Yang และคณะ (2010)** ศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าวด้วยวิธีการกระตุ้นทางกายภาพแบบขั้นตอนเดียว โดยทำการกระตุ้นกะลามะพร้าวด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในเตาเผาชนิดท่อแนวนอน อุณหภูมิในการกระตุ้น 750 ถึง 950 องศาเซลเซียส เวลาในการกระตุ้น 60 ถึง 160 นาที อัตราการป้อนเข้าของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 60 ถึง 600 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาทีและอัตราการให้ความร้อน 5 ถึง 50 องศาเซลเซียสต่อนาที พบว่าการเพิ่มอัตราการป้อนเข้าของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ อุณหภูมิและเวลาในการกระตุ้นสามารถพัฒนาโครงสร้างรูพรุนของถ่านกัมมันต์ แต่การเพิ่มอุณหภูมิและเวลาในการกระตุ้นที่สูงเกินไปจะส่งผลต่อสัดส่วนของปริมาณแก้วในถ่านชาร์ ทำให้พื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์มีค่าลดลง เนื่องจากแคลเซียม (Ca) และโซเดียม (Na) ในถ่านทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาระหว่างคาร์บอนกับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาระหว่างคาร์บอนกับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สูงขึ้น ร้อยละผลได้ของถ่านกัมมันต์ลดลงอย่างรวดเร็ว เป็นผลให้เกิดการสลายตัวของผนังรูพรุนขนาดเล็ก ภาวะที่เหมาะสมของการกระตุ้น คือ อุณหภูมิในการกระตุ้น 900 องศาเซลเซียส เวลาในการกระตุ้น 140 นาที อัตราการป้อนเข้าแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 200 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาทีและอัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ถ่านกัมมันต์มีพื้นที่ผิวสูงสุด 1667 ตารางเมตรต่อกรัมและปริมาตรรูพรุนขนาดเล็ก 0.8949 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 3

### เครื่องมือและวิธีการทดลอง

งานวิจัยนี้ศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์จากกะลาแมคาเดเมียโดยวิธีการกระตุ้นทางกายภาพในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งขนาดทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ เพื่อศึกษาผลของตัวแปรดำเนินการต่างๆ และภาวะที่เหมาะสมของการเตรียมถ่านกัมมันต์จากกะลาแมคาเดเมีย โดยแบ่งการทดลองเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกเป็นการเตรียมถ่านกัมมันต์จากกะลาแมคาเดเมียโดยวิธีการกระตุ้นทางกายภาพแบบ 2 ขั้นตอน ขั้นตอนแรก คือ คาร์บอนไนเซชัน ตัวแปรที่ศึกษา ได้แก่ อุณหภูมิและเวลาในการคาร์บอนไนซ์ ขั้นตอนที่สอง คือ การกระตุ้นด้วยวิธีทางกายภาพ ตัวแปรที่ศึกษา ได้แก่ ชนิดของแก๊สออกซิไดซ์ ขนาดของอนุภาคถ่านชาร์ อุณหภูมิและเวลาในการกระตุ้น ส่วนที่สองเป็นการศึกษาจลนพลศาสตร์การสลายตัวทางความร้อนของกะลาแมคาเดเมียโดยใช้เทคนิควิเคราะห์เทอร์โมกราวิเมตริก (Thermogravimetric analysis, TGA)

#### 3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

1. ตะแกรงร่อนขนาด 0.250 - 4.750 มิลลิเมตร
2. เครื่องบดชีวมวลชนิดหยาบ KMAC รุ่น 3801
3. เครื่องบดชีวมวลชนิดละเอียด Retsch GMBH wesa-Germany รุ่น 5657 HAAN
4. เครื่องคัดขนาด Endecott SHAKER รุ่น EF.1-1M411
5. ตู้อบ (Oven)
6. โถดูดความชื้น (Desiccator)
7. เตาเผาความร้อนสูง (Muffle furnace) Carbolite รุ่น ESF 12/23
8. เตาเผาให้ความร้อนแบบท่อ (Tubular furnace) Carbolite รุ่น Eurotherm 2416 CG
9. เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง (Fixed bed reactor) ทำจากท่อสแตนเลส 304 เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.02 เมตรและความยาว 0.50 เมตร
10. เครื่องควบคุมอุณหภูมิ (Temperature controller)
11. เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) ชนิด K
12. เครื่องผลิตไอน้ำ (Steam generator)
13. อุปกรณ์การกรองพร้อมกระดาษกรอง Whatman Glass Microfibre Filters (GF/C)
14. กรวยกรองแบบสุญญากาศ (Buchner funnel )

15. กระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42 และ เบอร์ 1
16. เครื่องเขย่าแนวราบ
17. เครื่องวัดการดูดกลืนแสงยูวี (UV Spectrometer)
18. เครื่องวิเคราะห์เทอร์โมกราวิเมตริก (Thermalgravimetric analyzer, TGA) Perkin Elmer รุ่น Pyris diamond เพื่อวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนของกะลาแมคาเดเมีย (Thermogravimetric Analysis, TGA)
19. เครื่องวิเคราะห์ธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน LECO รุ่น CHN 2000

### 3.2 สารเคมีที่ใช้

1. กะลาแมคาเดเมีย
2. แก๊สไนโตรเจน ( $N_2$ ) 99.99%
3. โพแทสเซียมไอโอเดต ( $KIO_3$ )
4. โพแทสเซียมไอโอไดด์ (KI)
5. ไอโอดีน ( $I_2$ )
6. เมทิลีนบลู (Methylene Blue)
7. โซเดียมไทโอซัลเฟต ( $Na_2S_2O_3 \cdot 5H_2O$ )
8. โซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟต ( $Na_2HPO_4$ )
9. แป้ง (Starch)
10. กรดไฮโดรคลอริก (HCl)
11. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)
12. โซเดียมคาร์บอเนต ( $Na_2CO_3$ )
13. โซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต ( $NaHCO_3$ )
14. เอทานอล ( $C_2H_5OH$ )
15. โซเดียมเอทอกไซด์ ( $C_2H_5ONa$ )
16. น้ำปราศจากไอออน (DI water)

### 3.3 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

#### 3.3.1 การวิเคราะห์สมบัติเบื้องต้นของกะลาแมคาเดเมีย

1. การวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate analysis, ASTM D3172-3175)
2. การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate analysis, ASTM D 3176-89)
3. การวิเคราะห์ปริมาณกำมะถัน (ASTM D 3177 Method B)
4. การวิเคราะห์ค่าความร้อน (ASTM D 2015)
5. การวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อน โดยใช้เทคนิควิเคราะห์เทอร์โมกราวิเมตริก (Thermogravimetric Analysis, TGA) ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจน อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50 มิลลิลิตรต่อนาทีและอัตราการให้ความร้อน 5 องศาเซลเซียสต่อนาที เพื่อวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนของกะลาแมคาเดเมีย

#### 3.3.2 การเตรียมตัวอย่างกะลาแมคาเดเมีย

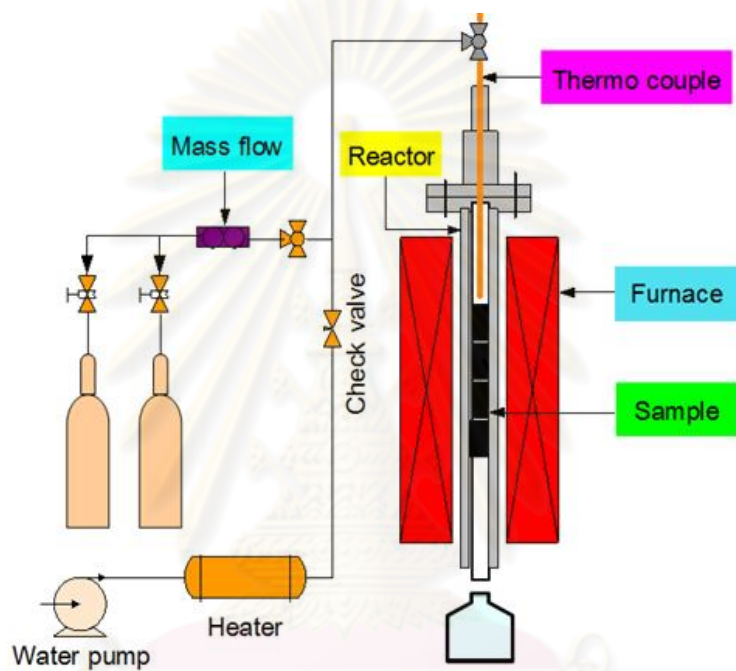
นำกะลาแมคาเดเมียซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรมาบดและคัดขนาดให้มีขนาด 2.36 ถึง 4.75 มิลลิเมตรด้วยตะแกรงเบอร์ 8 และ 4 ล้างด้วยน้ำกลั่นแล้วอบแห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นเก็บไว้ในโถสุญญากาศเพื่อป้องกันการดูดความชื้น เพื่อนำไปทำการทดลองในขั้นตอนต่อไป



รูปที่ 3.1 ภาชนะบรรจุกะลาแมคาเดเมียในขั้นตอนคาร์บอนเซชัน



ศูนย์วิจัยและพัฒนา  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย





ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สูญญากาศ เพื่อให้ถ่านชาร์และถ่านกัมมันต์มีสภาพนำได้ (Conductivity) และทำให้เกิดอิเล็กตรอน นำตัวอย่างที่เคลือบผิวแล้วมาวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนเพื่อดูลักษณะพื้นผิวของถ่านชาร์และถ่านกัมมันต์

5. การวิเคราะห์ค่าการดูดซับไอโอดีน (Iodine number, ASTM D4607-94)
6. การวิเคราะห์ค่าการดูดซับเมทิลีนบลู (JIS 1474-1991)
7. การวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันของถ่านกัมมันต์ โดยใช้เทคนิค Fourier Transform Infrared spectroscopy (FT-IR) นำถ่านชาร์และถ่านกัมมันต์มาบดและคัดขนาดให้มีขนาด 0.5 ไมโครเมตรแล้วนำไปผสมกับโพแทสเซียมโบรไมด์ (KBr) ความเข้มข้นประมาณร้อยละ 0.01 โดยน้ำหนัก จากนั้นอัดเป็นแผ่นวงกลมโดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12.7 มิลลิเมตรและความหนาประมาณ 1 มิลลิเมตร แล้วนำไปวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันโดยใช้ความยาวคลื่นประมาณ 4000 ถึง 400 เซนติเมตร<sup>-1</sup>
8. วิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันบนถ่านชาร์ด้วยเทคนิค Boehm's titration (Boehm, 1994)
9. วิเคราะห์หาพื้นที่ผิว (BET surface area,  $S_{BET}$ ) โดยใช้การวัดการดูดซับและการคายแก๊สไนโตรเจนด้วยเครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิวและรูพรุน (Surface area and porosity analyzer) ASAP รุ่น 2020

### 3.3.6 การคำนวณร้อยละผลได้ของถ่านชาร์และถ่านกัมมันต์

ก่อนนำถ่านชาร์และถ่านกัมมันต์มาซึ่งเพื่อคำนวณร้อยละผลได้ของถ่านชาร์และถ่านกัมมันต์ต้องอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมงเพื่อกำจัดความชื้น

$$- \text{ร้อยละผลได้ของถ่านชาร์} = 100 \times \left[ \frac{W_{CS}}{W_{MAC}} \right]$$

เมื่อ  $W_{CS}$  = น้ำหนักของแข็งที่เหลือหลังจากการคาร์บอนไนซ์  
 $W_{MAC}$  = น้ำหนักของกะลาแมคาเดเมีย

$$- \text{ร้อยละผลได้ของถ่านกัมมันต์} = 100 \times \left[ \frac{W_{AC}}{W_C} \right]$$

เมื่อ  $W_{AC}$  = น้ำหนักของแข็งที่เหลือจากการกระตุ้น  
 $W_C$  = น้ำหนักของถ่านชาร์ที่เริ่มต้น

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

#### 4.1 การวิเคราะห์สมบัติต่างๆ ของกะลาแมคาเดเมีย

ตารางที่ 4.1 การวิเคราะห์สมบัติเบื้องต้นของกะลาแมคาเดเมีย

การวิเคราะห์สมบัติเบื้องต้น	
การวิเคราะห์แบบประมาณ*	
(ร้อยละโดยน้ำหนัก)	
- สารระเหย	74.55
- คาร์บอนคงตัว	21.45
- เถ้า	2.31
- ความชื้น	1.68
การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ	
(ร้อยละโดยน้ำหนัก)	
- คาร์บอน	51.61
- ไฮโดรเจน	6.08
- ไนโตรเจน	0.71
- กำมะถัน	0.03
- ออกซิเจน**	41.57
พื้นที่ผิว (ตารางเมตร/กรัม)	10.65
ค่าความร้อน (กิโลแคลอรี/กิโลกรัม)	4447.80
ความหนาแน่นเชิงปริมาตร	0.57
(กรัม/ตารางลูกบาศก์เซนติเมตร)	

\*หลักพื้นฐานที่รับมา (as-received basis)

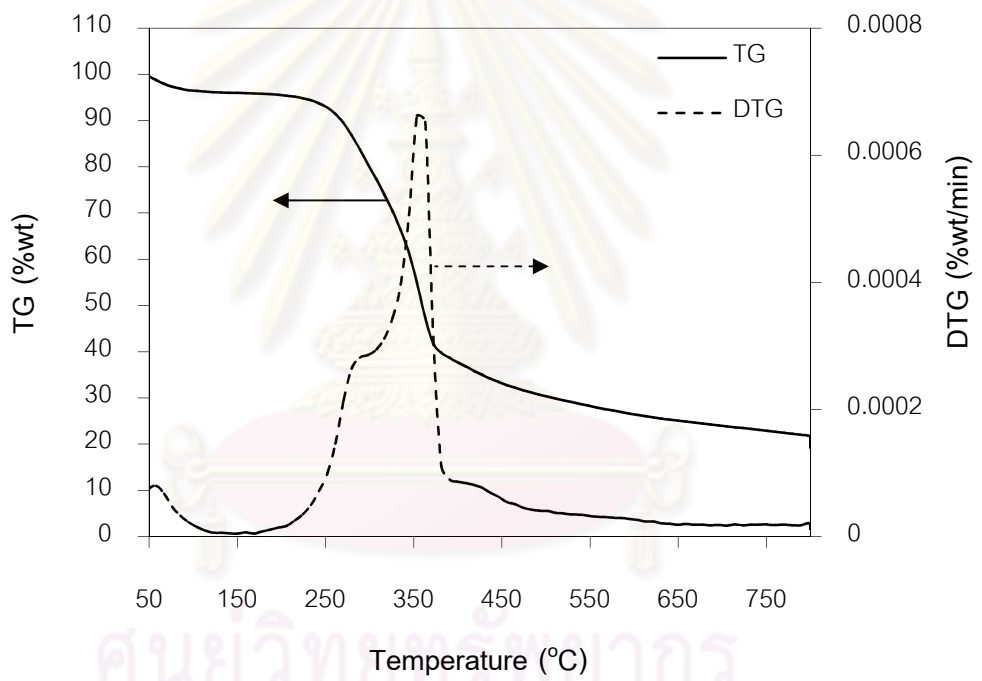
\*\*ออกซิเจน = 100-ผลรวมของธาตุแต่ละชนิดยกเว้นออกซิเจน

#### 4.1.1 การวิเคราะห์สมบัติเบื้องต้นของกะลาแมคาเดเมีย

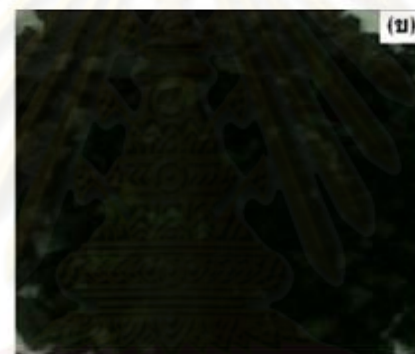
ตารางที่ 4.1 แสดงสมบัติเบื้องต้นของกะลาแมคาเดเมียที่ใช้เป็นวัตถุดิบในการทดลอง จากผลการวิเคราะห์แบบประมาณ กะลาแมคาเดเมียมีร้อยละคาร์บอนคงตัว 21.45 ร้อยละสารระเหย 74.55 ร้อยละขี้เถ้า 2.31 และร้อยละความชื้น 1.68 เมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ กะลาแมคาเดเมียประกอบด้วยร้อยละคาร์บอน 51.61 ร้อยละไฮโดรเจน 6.08 ร้อยละไนโตรเจน 0.71 ร้อยละออกซิเจน 41.57 และร้อยละกำมะถัน 0.03 นอกจากนี้พบว่า กะลาแมคาเดเมียมีความหนาแน่นเชิงปริมาตรประมาณ 0.57 กรัมต่อตารางลูกบาศก์เซนติเมตร และมีค่าความร้อนประมาณ 4447.80 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม จากข้อมูลดังกล่าวแสดงให้เห็นได้ว่ากะลาแมคาเดเมียมีสมบัติเป็นเชื้อเพลิงชีวมวลที่น่าสนใจและเป็นวัตถุดิบที่มีศักยภาพที่สามารถนำมาแปรรูปชีวมวลทางความร้อนได้ นอกจากนี้กะลาแมคาเดเมียมีคุณสมบัติเหมาะสมในการเลือกใช้เป็นวัตถุดิบในการเตรียมถ่านกัมมันต์ เนื่องจากกะลาแมคาเดเมียมีปริมาณคาร์บอนสูง มีปริมาณความชื้น เถ้าและซัลเฟอร์ต่ำ ซึ่งจัดเป็นข้อดีของวัตถุดิบในการเตรียมถ่านกัมมันต์ (Ioannidou, O. และ Zabaniotou, A., 2007) แต่อย่างไรก็ตามกะลาแมคาเดเมียมีปริมาณสารระเหยสูงจึงจำเป็นต้องผ่านขั้นตอนคาร์บอนไนเซชันก่อนขั้นตอนการกระตุ้นเพื่อกำจัดสารระเหยออกไป ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเป็นการเตรียมถ่านกัมมันต์แบบ 2 ขั้นตอน คือ คาร์บอนไนเซชันและการกระตุ้น

#### 4.1.2 การวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนของกะลาแมคาเดเมียด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริก (Thermogravimetric analysis, TGA)

เมื่อนำกะลาแมคาเดเมียมาวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริกภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50 มิลลิลิตรต่อนาที อัตราการให้ความร้อน 5 องศาเซลเซียสต่อนาที ดังรูปที่ 4.1 พบว่ากะลาแมคาเดเมียมีการสลายตัวทางความร้อน 3 ช่วง ช่วงแรกเป็นการขจัดน้ำที่ช่วงอุณหภูมิ 100 ถึง 180 องศาเซลเซียส ช่วงที่ 2 และ 3 เป็นการสลายตัวของเฮมิเซลลูโลส เซลลูโลสและลิกนินซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของชีวมวลหรือวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร เฮมิเซลลูโลสมีการสลายตัวที่ช่วงอุณหภูมิ 220 ถึง 315 องศาเซลเซียส เซลลูโลสมีการสลายตัวที่ช่วงอุณหภูมิ 315 ถึง 400 องศาเซลเซียสและลิกนินมีการสลายตัวที่ช่วงอุณหภูมิ 160 ถึง 900 องศาเซลเซียส (Yang และคณะ, 2007) ลิกนินเป็นองค์ประกอบที่มีช่วงอุณหภูมิในการสลายตัวกว้างและมีอัตราการสลายตัวช้า เนื่องจากโครงสร้างส่วนใหญ่ของลิกนินเป็นสารแอโรแมติกเชิงซ้อนที่มีน้ำหนักมวลโมเลกุลสูง ทำให้ลิกนินเป็น



ศูนย์วิจัยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

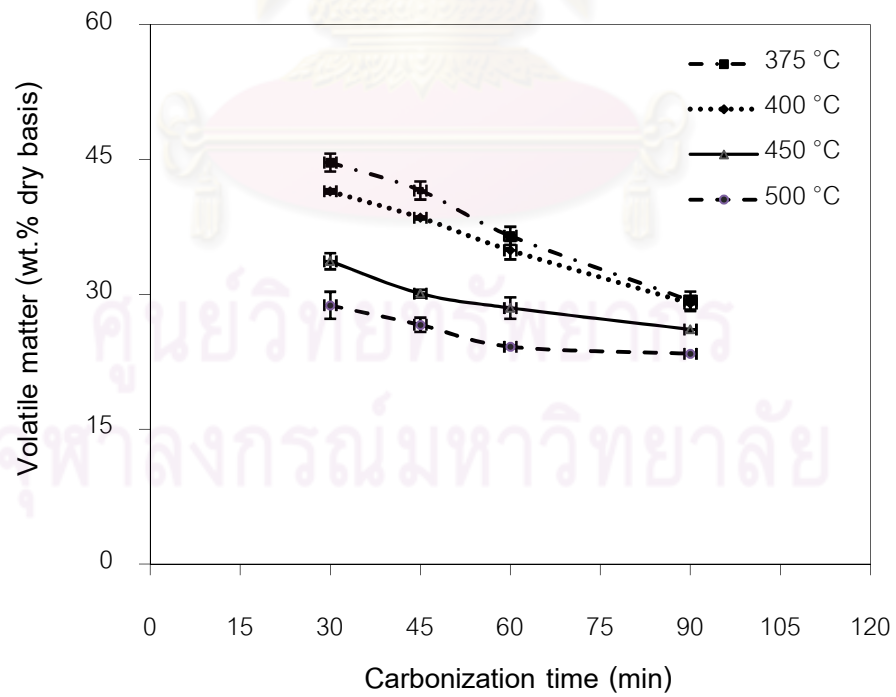
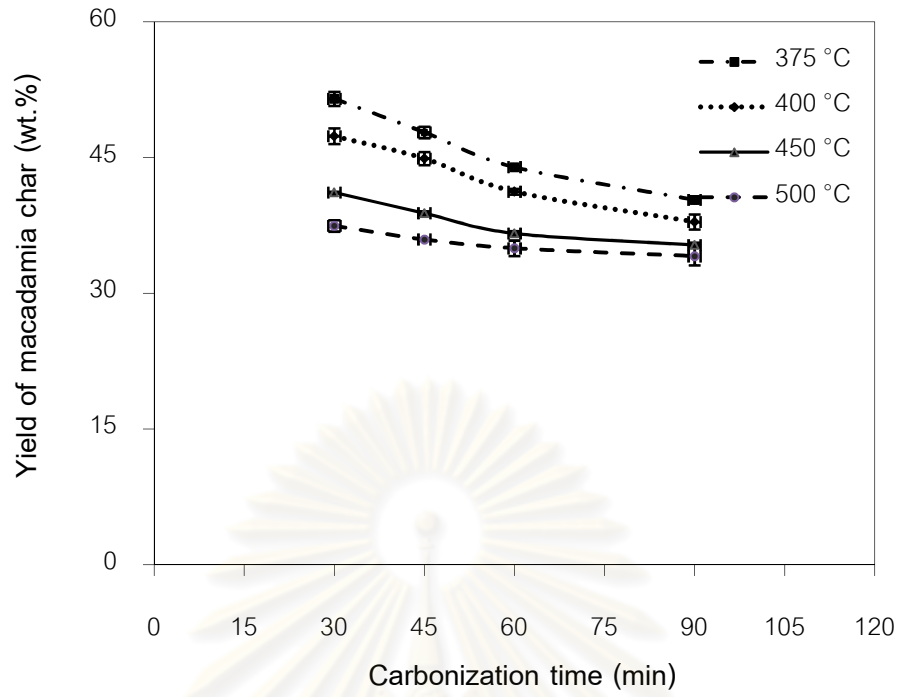
การคาร์บอนไนซ์ 375 400 450 และ 500 องศาเซลเซียส เวลาในการคาร์บอนไนซ์ 30 45 60 และ 90 นาที อัตราการให้ความร้อน 5 องศาเซลเซียสต่อนาที พบว่าทั้งอุณหภูมิและเวลาในการคาร์บอนไนซ์ มีผลต่อองค์ประกอบและร้อยละผลได้ของถ่านชาร์จากกะลาแมคาเดเมีย

**ตารางที่ 4.2** การวิเคราะห์แบบประมาณและร้อยละผลได้ของถ่านชาร์จากกะลาแมคาเดเมีย

คาร์บอนไนเซชัน		การวิเคราะห์แบบประมาณ*			ร้อยละ*
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลา (นาที)	(ร้อยละโดยน้ำหนัก)			ผลได้ ถ่านชาร์
		สารระเหย	คาร์บอนคงตัว**	เถ้า	
375	30	44.65	50.77	4.57	51.49
	45	41.54	53.85	4.61	47.79
	60	36.51	58.89	4.61	43.95
	90	29.29	66.17	4.54	40.32
400	30	41.46	53.26	5.28	47.36
	45	38.51	55.85	5.64	44.89
	60	34.90	59.42	5.68	41.23
	90	28.98	65.33	5.69	37.88
450	30	33.67	60.82	5.51	41.14
	45	30.07	63.79	6.14	38.85
	60	28.47	65.33	6.21	36.62
	90	26.09	67.35	6.56	35.33
500	30	28.78	64.17	7.05	37.45
	45	26.61	66.23	7.17	35.95
	60	24.16	68.26	7.58	34.97
	90	23.37	68.47	8.16	34.08

\*ข้อมูลที่แสดงในตารางที่ 4.2 เป็นข้อมูลเฉลี่ยทางสถิติจากการวิเคราะห์แบบประมาณโดยหลักพื้นฐานแบบแห้ง

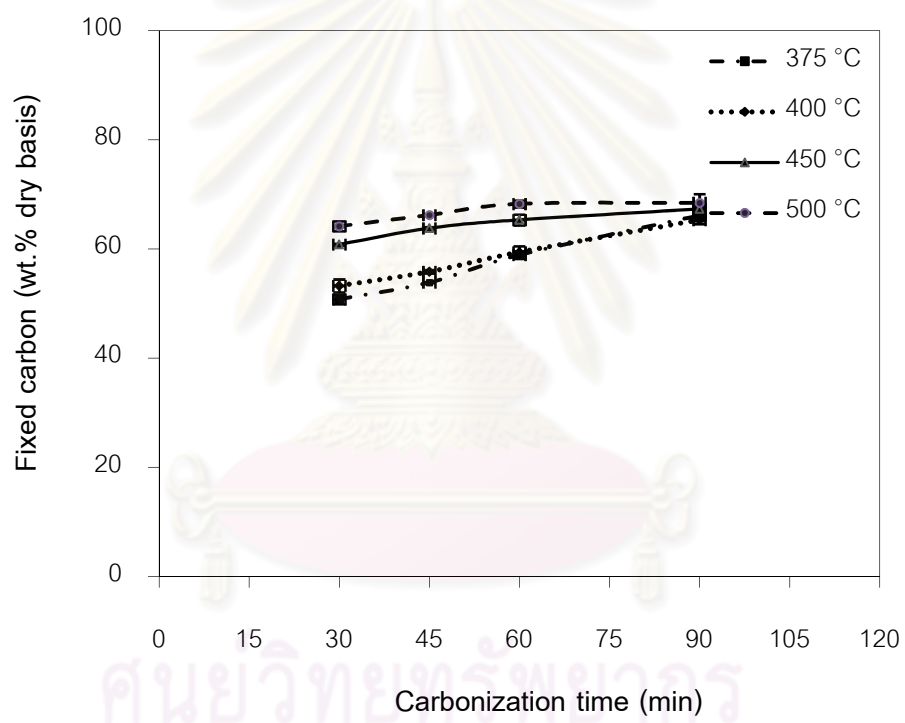
\*\*คาร์บอนคงตัวเป็นค่าเฉลี่ยที่เกิดจากการคำนวณ 100-ผลรวมขององค์ประกอบแต่ละชนิดยกเว้นคาร์บอนคงตัว





รูปที่ 4.3 แสดงผลของเวลาและอุณหภูมิในการคาร์บอนไนซ์ต่อร้อยละผลได้ของถ่านชาร์กะลาแมคาเดเมีย อุณหภูมิในการคาร์บอนไนซ์ 375 400 450 และ 500 องศาเซลเซียส เวลาในการคาร์บอนไนซ์ 30 45 60 และ 90 นาที อัตราการให้ความร้อน 5 องศาเซลเซียสต่อนาที พบว่าเวลาในการคาร์บอนไนซ์มีผลต่อร้อยละผลได้ของถ่านชาร์กะลาแมคาเดเมีย การเพิ่มเวลาในการคาร์บอนไนซ์จาก 30 เป็น 90 นาที ทำให้ร้อยละผลได้ของถ่านชาร์กะลาแมคาเดเมียลดลง เนื่องจากการเพิ่มเวลาในการคาร์บอนไนซ์เป็นการเพิ่มพลังงานความร้อนในการสลายตัวของกะลาแมคาเดเมีย ทำให้พันธะต่างๆ ของคาร์บอนในกะลาแมคาเดเมียมีการแตกตัวเพิ่มขึ้น ปริมาณสารระเหยบางส่วนถูกกำจัดออกมากขึ้น น้ำหนักของถ่านชาร์กที่ได้เป็นผลิตภัณฑ์จึงลดลง และสามารถสังเกตได้ว่า เมื่อเพิ่มเวลาในการคาร์บอนไนซ์จาก 60 เป็น 90 นาที ที่อุณหภูมิในการคาร์บอนไนซ์ 375 400 450 และ 500 องศาเซลเซียส ร้อยละผลได้ของถ่านชาร์กะลาแมคาเดเมียมีการเปลี่ยนแปลงไม่มาก ดังนั้นเวลาในการคาร์บอนไนซ์ที่ศึกษาได้แก่ 30 45 60 และ 90 นาที เมื่อพิจารณาผลของอุณหภูมิในการคาร์บอนไนซ์ พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิในการคาร์บอนไนซ์จาก 375 เป็น 500 องศาเซลเซียส ร้อยละผลได้ของถ่านชาร์กะลาแมคาเดเมียลดลง เนื่องจากอุณหภูมิในการคาร์บอนไนซ์สูงขึ้น กะลาแมคาเดเมียมีการสลายตัวทางความร้อนเพิ่มขึ้น เฮมิเซลลูโลส เซลลูโลส และลิกนินบางส่วนเกิดการสลายตัวและถูกกำจัดออกในรูปของแก๊สที่ควบแน่นได้ (condensable gas) ได้แก่ กรดอะซิติก เมทานอลและน้ำมันทาร์ และแก๊สที่ควบแน่นไม่ได้ (uncondensable gas) ได้แก่ คาร์บอนมอนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ มีเทนและไฮโดรเจน (Yaman, 2004, Sun และ Jiang, 2010) นอกจากนี้พบว่าอุณหภูมิในการคาร์บอนไนซ์ 375 และ 400 องศาเซลเซียส ร้อยละผลได้ของถ่านชาร์กะลาแมคาเดเมียมีการเปลี่ยนแปลงลดลงตามเวลาในการคาร์บอนไนซ์มาก (พิจารณาจากความชันของกราฟในรูปที่ 4.3) เมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิในการคาร์บอนไนซ์ 450 และ 500 องศาเซลเซียส ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนของกะลาแมคาเดเมียด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริก ดังรูปที่ 4.1 ที่อุณหภูมิ 375 และ 400 องศาเซลเซียส กะลาแมคาเดเมียมีอัตราการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักต่อเวลา (DTG) น้อยกว่าอุณหภูมิ 450 และ 500 องศาเซลเซียส

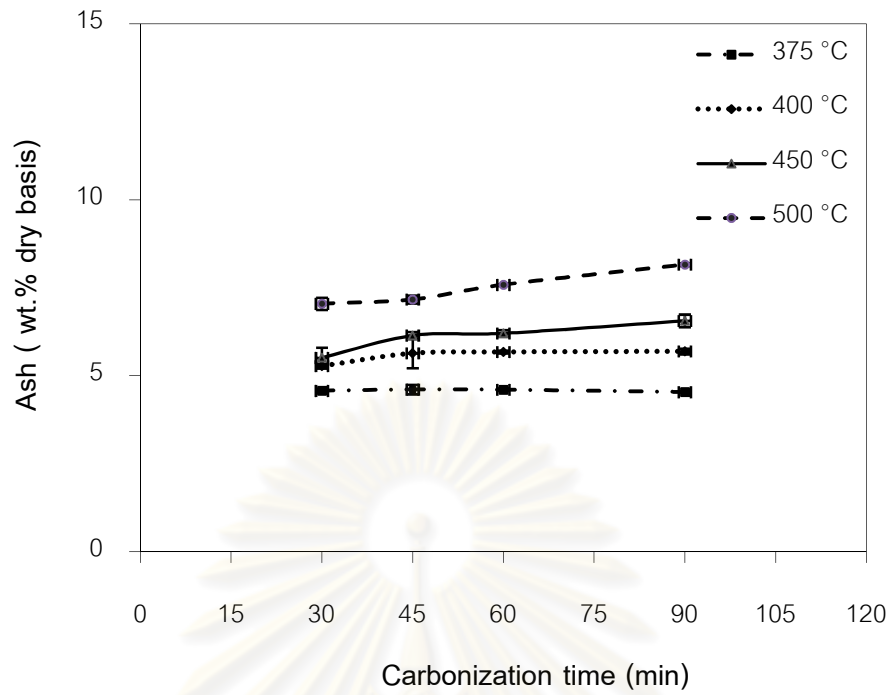
รูปที่ 4.4 แสดงผลของเวลาและอุณหภูมิในการคาร์บอนไนซ์ต่อร้อยละสารระเหยของถ่านชาร์กะลาแมคาเดเมีย อุณหภูมิในการคาร์บอนไนซ์ 375 400 450 และ 500 องศาเซลเซียส เวลาในการคาร์บอนไนซ์ 30 45 60 และ 90 นาที อัตราการให้ความร้อน 5 องศาเซลเซียสต่อนาที พบว่าร้อยละสารระเหยของถ่านชาร์กะลาแมคาเดเมียลดลง เมื่อเพิ่มเวลาในการคาร์บอนไนซ์ การเพิ่มเวลาในการคาร์บอนไนซ์จาก 30 เป็น 90 นาที ที่อุณหภูมิในการคาร์บอนไนซ์ 375 องศาเซลเซียส ร้อยละสารระเหยของถ่านชาร์กลดลงจาก 44.65 เป็น 29.29 คิดเป็นร้อยละการเปลี่ยนแปลง 34.40 ที่อุณหภูมิในการคาร์บอนไนซ์ 400 องศาเซลเซียส ร้อยละสารระเหยของถ่านชาร์กลดลงจาก 41.46



ศูนย์วิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

มีร้อยละคาร์บอนคงตัว 21.45 เมื่อผ่านขั้นตอนคาร์บอนในเซชันที่อุณหภูมิในการคาร์บอนไนซ์ 375 400 450 และ 500 องศาเซลเซียส เวลาในการคาร์บอนไนซ์ 30 45 60 และ 90 นาที ถ่านชาร์กทะเลแมคาเดเมียมีร้อยละคาร์บอนคงตัว 50.77 ถึง 68.47 (ตารางที่ 4.2) ซึ่งร้อยละคาร์บอนคงตัวของถ่านชาร์กทะเลแมคาเดเมียเพิ่มขึ้นเป็น 2 ถึง 3 เท่าของร้อยละคาร์บอนคงตัวในทะเลแมคาเดเมีย แสดงให้เห็นชัดเจนว่าขั้นตอนคาร์บอนในเซชันเป็นการเพิ่มสัดส่วนคาร์บอนในถ่านชาร์ก (Li และคณะ, 2009, Ioannidou, O. และ Zabaniotou, A., 2007) จากรูปที่ 4.5 สามารถสังเกตเห็นได้ว่าอุณหภูมิในการคาร์บอนไนซ์ 450 และ 500 องศาเซลเซียส เมื่อเพิ่มเวลาในการคาร์บอนไนซ์จาก 30 เป็น 90 นาที ร้อยละคาร์บอนคงตัวมีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาในการคาร์บอนไนซ์ลดลงซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ของร้อยละสารระเหยของถ่านชาร์กทะเลแมคาเดเมียและที่อุณหภูมิในการคาร์บอนไนซ์ 500 องศาเซลเซียส การเพิ่มเวลาในการคาร์บอนไนซ์จาก 60 เป็น 90 นาที ร้อยละคาร์บอนคงตัวของถ่านชาร์กเพิ่มขึ้นจาก 68.26 เป็น 68.47 คิดเป็นร้อยละการเปลี่ยนแปลงเท่ากับ 0.33 ซึ่งมีร้อยละการเปลี่ยนแปลงของร้อยละคาร์บอนคงตัวต่ำสุด เพราะที่อุณหภูมิประมาณ 500 องศาเซลเซียส เฮมิเซลลูโลสและเซลลูโลสมีการสลายตัวอย่างสมบูรณ์ (Yang และคณะ, 2007) ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักในถ่านชาร์กจึงขึ้นอยู่กับอัตราการสลายตัวของลิกนินที่เหลืออยู่ในถ่านชาร์กและลิกนินมีความสัมพันธ์กับร้อยละคาร์บอนคงตัวในถ่านชาร์ก (Demirbas, 2003) โดยลิกนินเป็นสารแอมโรแมติกเชิงซ้อนที่มีการสลายตัวยากและมีความเสถียรทางความร้อนสูง (Suh as และคณะ, 2007) การเพิ่มเวลาในการคาร์บอนไนซ์ที่อุณหภูมิในการคาร์บอนไนซ์ 500 องศาเซลเซียสจะไม่มีผลต่อการสลายตัวของลิกนินในถ่านชาร์กอย่างชัดเจน เมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิในการคาร์บอนไนซ์ 375 400 และ 450 องศาเซลเซียส ดังนั้นที่อุณหภูมิในการคาร์บอนไนซ์ 500 องศาเซลเซียส เวลาในการคาร์บอนไนซ์ 30 45 60 และ 90 นาที ร้อยละคาร์บอนคงตัวของถ่านชาร์กทะเลแมคาเดเมียจึงมีค่าใกล้เคียงกันและถ่านชาร์กทะเลแมคาเดเมียมีร้อยละคาร์บอนคงตัวสูง เมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิในการคาร์บอนไนซ์ 375 400 และ 450 องศาเซลเซียส

เมื่อพิจารณาร้อยละเถ้าของถ่านชาร์กทะเลแมคาเดเมีย อุณหภูมิในการคาร์บอนไนซ์ 375 400 450 และ 500 องศาเซลเซียส เวลาในการคาร์บอนไนซ์ 30 45 60 และ 90 นาที ดังรูปที่ 4.6 พบว่าถ่านชาร์กทะเลแมคาเดเมียมีเถ้าเป็นองค์ประกอบสูงขึ้น เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการคาร์บอนไนซ์ ที่อุณหภูมิในการคาร์บอนไนซ์ 500 องศาเซลเซียสและเวลาในการคาร์บอนไนซ์ 90 นาที ถ่านชาร์กทะเลแมคาเดเมียมีร้อยละเถ้าสูงสุด 8.16 เถ้าในถ่านชาร์กทะเลแมคาเดเมียที่ได้มีปริมาณมาก แต่อย่างไรก็ตามปริมาณเถ้าในถ่านชาร์กทะเลแมคาเดเมียมีค่าไม่เกินร้อยละ 10 ซึ่งอยู่ในค่ามาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (เถ้าในถ่านไม่เกินร้อยละ 10)



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ระเหยเท่ากับ 24.16 และ 23.37 ตามลำดับ ซึ่งถ่านซาร์กะลาแมคาเดเมียที่เกิดขึ้นทั้งสองภาวะนี้มีร้อยละสารระเหยอยู่ในช่วงที่เหมาะสม เมื่อพิจารณาร้อยละคาร์บอนคงตัวและร้อยละผลได้ของถ่านซาร์กะลาแมคาเดเมีย พบว่าร้อยละคาร์บอนคงตัวของถ่านซาร์กะลาแมคาเดเมียที่เกิดขึ้นทั้งสองภาวะมีค่าใกล้เคียงกัน แต่อุณหภูมิในการคาร์บอนไนซ์ 500 องศาเซลเซียส เวลาในการคาร์บอนไนซ์ 60 นาที ถ่านซาร์กะลาแมคาเดเมียมีร้อยละผลได้มากกว่า ดังนั้นอุณหภูมิในการคาร์บอนไนซ์ 500 องศาเซลเซียส เวลาในการคาร์บอนไนซ์ 60 นาทีเป็นภาวะที่เหมาะสมในขั้นตอนคาร์บอนไนเซชัน ถ่านซาร์กะลาแมคาเดเมียที่ได้มีร้อยละผลได้ 34.97 ร้อยละคาร์บอนคงตัว 68.26 ร้อยละสารระเหย 24.16 และร้อยละซีเถ้า 7.58 โดยน้ำหนัก

#### ตารางที่ 4.3 การเปรียบเทียบสมบัติเบื้องต้นของถ่านซาร์

การวิเคราะห์สมบัติเบื้องต้น	คาร์บอนไนเซชัน	
	เตาเผาให้ความร้อนสูง	บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจน
ร้อยละผลได้ของถ่านซาร์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	34.97	37.23
การวิเคราะห์แบบประมาณ* (ร้อยละโดยน้ำหนัก)		
- สารระเหย	24.97	24.39
- คาร์บอนคงตัว	68.26	68.3
- ซีเถ้า	7.58	7.31
การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)		
- คาร์บอน	74.77	75.02
- ไฮโดรเจน	3.20	3.17
- ไนโตรเจน	0.52	0.58
- ออกซิเจน**	21.51	21.23
- ออกซิเจน/คาร์บอน	3.48	3.53
ความหนาแน่นเชิงปริมาตร	0.47	0.46
(กรัม/ตารางลูกบาศก์เซนติเมตร)		

\* หลักพื้นฐานแบบแห้ง

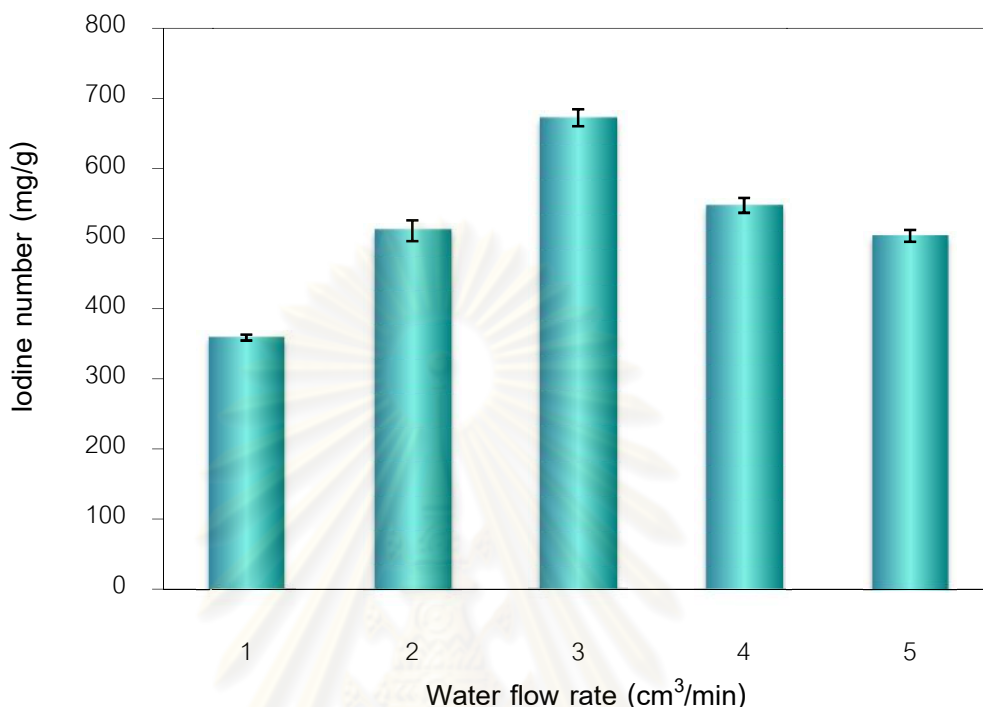
\*\* 100-ผลรวมขององค์ประกอบธาตุแต่ละชนิดยกเว้นออกซิเจน

แต่อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้ทำการคาร์บอนไนซ์กะลาแมคาเดเมียภายในเตาเผาให้ความร้อนสูงซึ่งเป็นภาวะอับอากาศที่ไม่สามารถควบคุมปริมาณออกซิเจนที่มีอยู่ได้จริงในทางปฏิบัติ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงทำการเปรียบเทียบสมบัติเบื้องต้นและองค์ประกอบของถ่านชาร์ที่ได้ระหว่างการคาร์บอนไนซ์ภายในเตาเผาให้ความร้อนสูงกับถ่านชาร์ที่ได้จากการคาร์บอนไนซ์ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจน อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 100 มิลลิลิตรต่อนาที อุณหภูมิในการคาร์บอนไนซ์ 500 องศาเซลเซียส เวลาในการคาร์บอนไนซ์ 60 นาที จากตารางที่ 4.3 พบว่าสมบัติเบื้องต้นของถ่านชาร์ที่เกิดขึ้นจากการคาร์บอนไนซ์ในเตาเผาให้ความร้อนสูงมีค่าใกล้เคียงกับถ่านชาร์ที่เกิดขึ้นจากการคาร์บอนไนซ์ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจน เมื่อพิจารณาร้อยละผลได้ของถ่านชาร์ ถ่านชาร์ที่เกิดขึ้นจากการคาร์บอนไนซ์ในเตาเผาให้ความร้อนสูงมีร้อยละผลได้เท่ากับ 34.97 และถ่านชาร์จากการคาร์บอนไนซ์ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนมีร้อยละผลได้ 37.23 ซึ่งผลที่ได้มีค่าไม่แตกต่างกันมาก ทั้งนี้เนื่องจากกะลาแมคาเดเมียเป็นวัสดุดิบเริ่มต้นที่มีปริมาณออกซิเจนเป็นองค์ประกอบไม่มากนัก โดยกะลาแมคาเดเมียมีอัตราส่วนของออกซิเจนต่อคาร์บอน (O/C) เท่ากับ 0.805 และกะลาแมคาเดเมียปริมาณ 50 กรัมที่ทำการคาร์บอนไนซ์ภายในเตาเผาให้ความร้อนสูงมีปริมาณคาร์บอนมากเกินไปสัดส่วนของปริมาณออกซิเจนที่มีอยู่ หรืออธิบายได้ว่าปริมาณออกซิเจนในระหว่างการคาร์บอนไนซ์ภายในเตาเผาให้ความร้อนสูงมีสัดส่วนที่ต่ำกว่าปริมาณออกซิเจนที่ทำให้เกิดการเผาไหม้สมบูรณ์ (partial oxidation) ส่งผลให้ถ่านชาร์ที่เกิดขึ้นจากขั้นตอนคาร์บอนไนซ์แบบใช้เตาเผาให้ความร้อนสูงมีสมบัติใกล้เคียงกับถ่านชาร์ที่เกิดขึ้นจากขั้นตอนคาร์บอนไนซ์ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจน

#### 4.3 การกระตุ้นถ่านชาร์จากกะลาแมคาเดเมีย

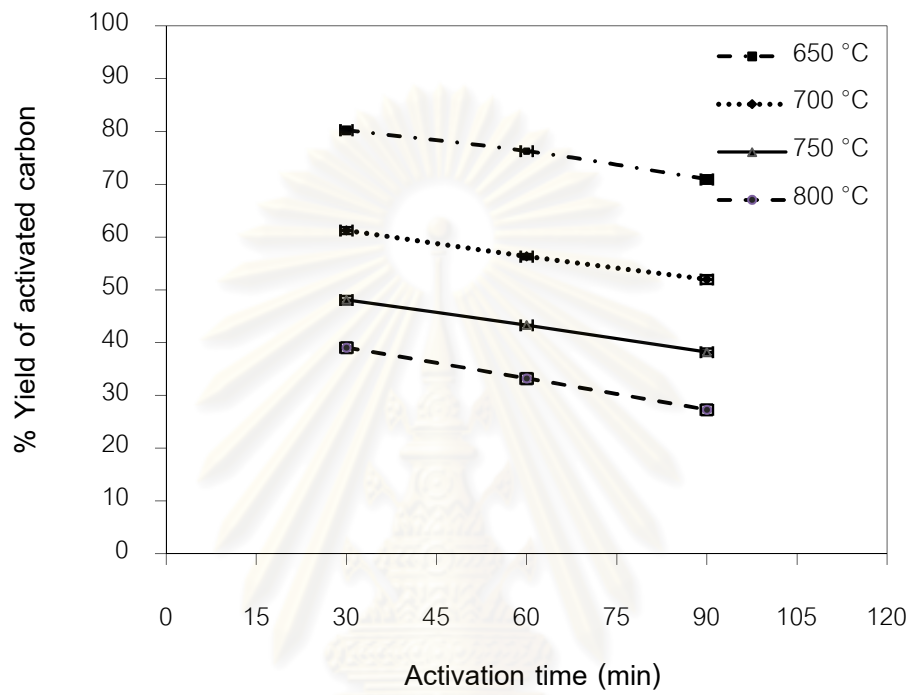
ศึกษาผลของขนาดอนุภาคของถ่านชาร์ อุณหภูมิและเวลาในการกระตุ้นโดยวิธีการกระตุ้นทางกายภาพต่อสมบัติต่างๆ ของถ่านกัมมันต์จากถ่านชาร์กะลาแมคาเดเมียโดยทำการเปรียบเทียบระหว่างการกระตุ้นด้วยไอน้ำแบบไม่ใช้และใช้อากาศ สมบัติของถ่านกัมมันต์ที่วิเคราะห์และศึกษา ได้แก่ ร้อยละผลได้ของถ่านกัมมันต์ (% Yield of activated carbon) ค่าการดูดซับไอโอดีน (Iodine adsorption/Iodine number) ค่าการดูดซับเมทิลีนบลู (Methylene blue adsorption) ความหนาแน่นเชิงปริมาตร (Bulk density) พื้นที่ผิวของรูพรุน ( $S_{BET}$ ) ลักษณะและสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของพื้นผิวบนถ่านกัมมันต์

#### 4.3.1 การกระตุ้นด้วยไอน้ำแบบไม่ใช้อากาศ



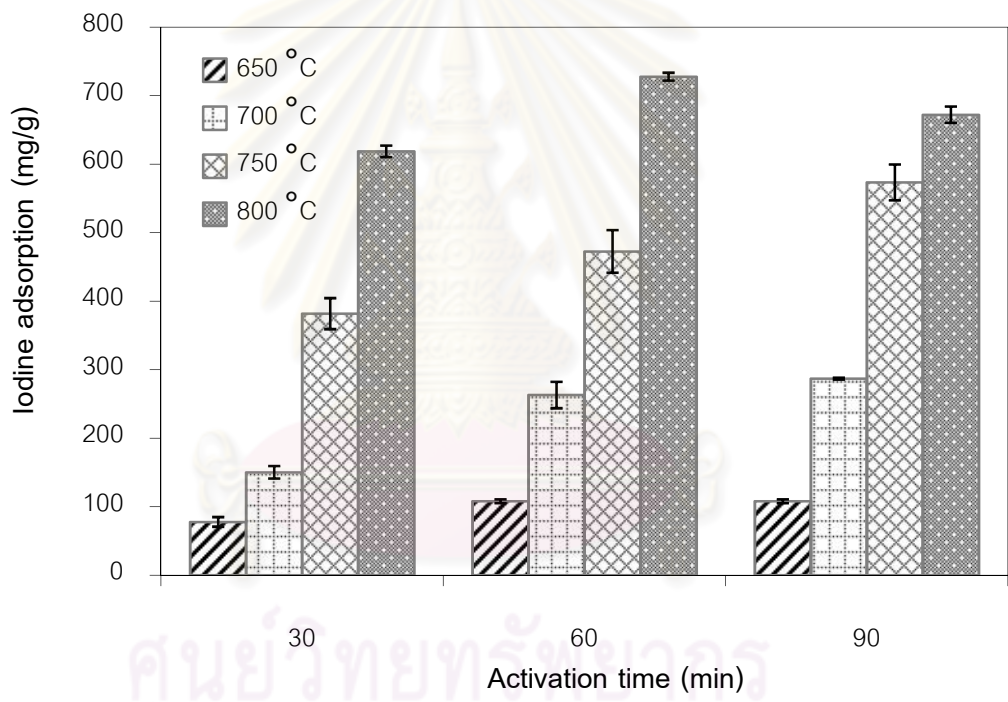
**รูปที่ 4.7** ผลของอัตราการป้อนเข้าของน้ำต่อค่าการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์จากถ่านชาร์กทะเลาแมคาเดเมียโดยการกระตุ้นด้วยไอน้ำแบบไม่ใช้อากาศ

รูปที่ 4.7 แสดงผลของอัตราการป้อนเข้าของน้ำต่อค่าการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์จากถ่านชาร์กทะเลาแมคาเดเมียปริมาณ 10 กรัมโดยวิธีการกระตุ้นด้วยไอน้ำแบบไม่ใช้อากาศ อุณหภูมิในการกระตุ้น 800 องศาเซลเซียส เวลาในการกระตุ้น 90 นาที อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที พบว่าอัตราการป้อนเข้าของน้ำมีผลต่อค่าการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์ เมื่อเพิ่มอัตราการป้อนเข้าของน้ำจาก 1 เป็น 3 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที ค่าการดูดซับไอโอดีนเพิ่มขึ้นจาก 359.0 เป็น 672.5 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ การเพิ่มอัตราการป้อนเข้าของน้ำ ทำให้ปริมาณน้ำกลายเป็นไอน้ำมากขึ้น ไอน้ำสามารถกระจายตัวทั่วถึงภายในเนื้อถ่านและสามารถเข้าไปทำปฏิกิริยากับอะตอมคาร์บอนในโครงสร้างของถ่านได้เพิ่มขึ้น ทำให้เกิดรูพรุนขนาดเล็กเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเพิ่มอัตราการป้อนเข้าของน้ำจาก 3 เป็น 5 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที ค่าการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์กลับลดลงจาก 672.5 เป็น 547.5 มิลลิกรัมต่อกรัม เพราะไอน้ำที่ทำปฏิกิริยากับอะตอมคาร์บอนในโครงสร้างของถ่านมีมากเกินไปทำให้เกิดปฏิกิริยาอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้โครงสร้างรูพรุนของถ่านกัมมันต์ที่เกิดขึ้นเป็นรูพรุนขนาดใหญ่มากกว่ารูพรุน



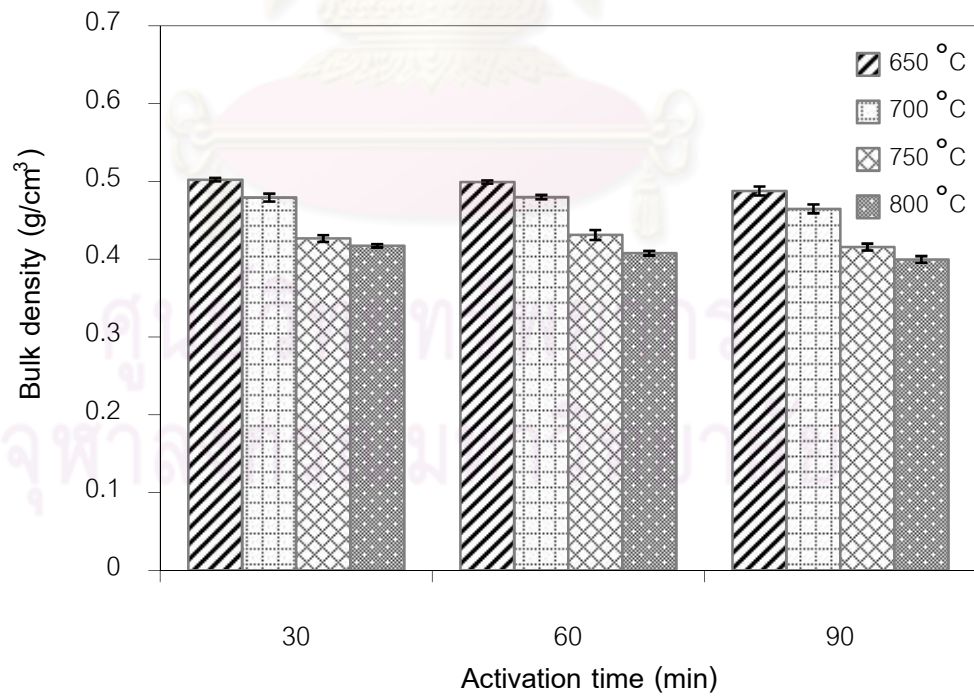
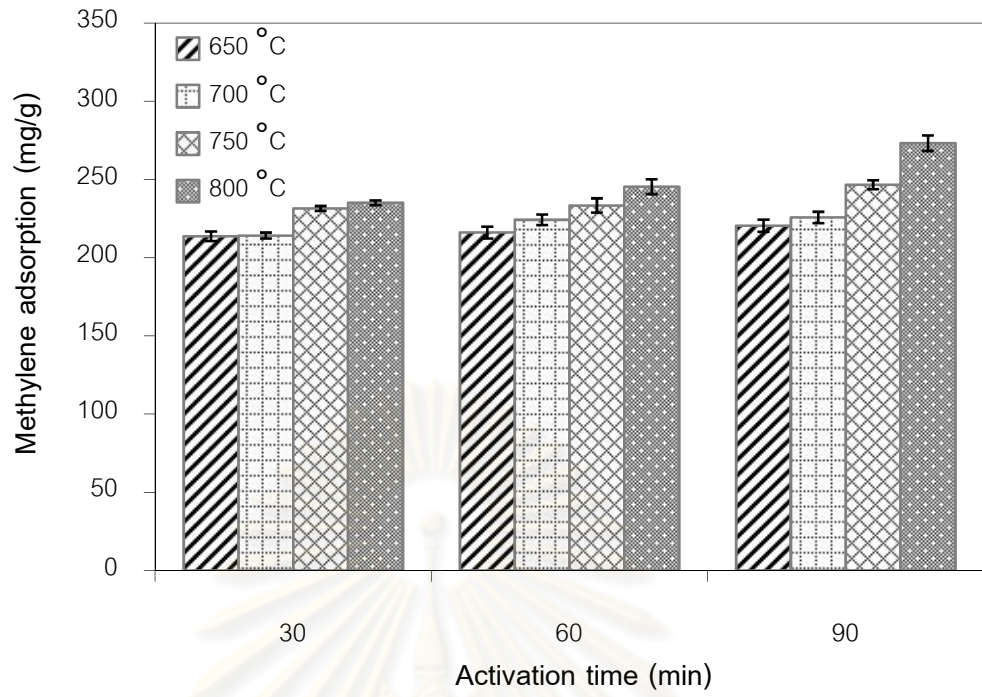
ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

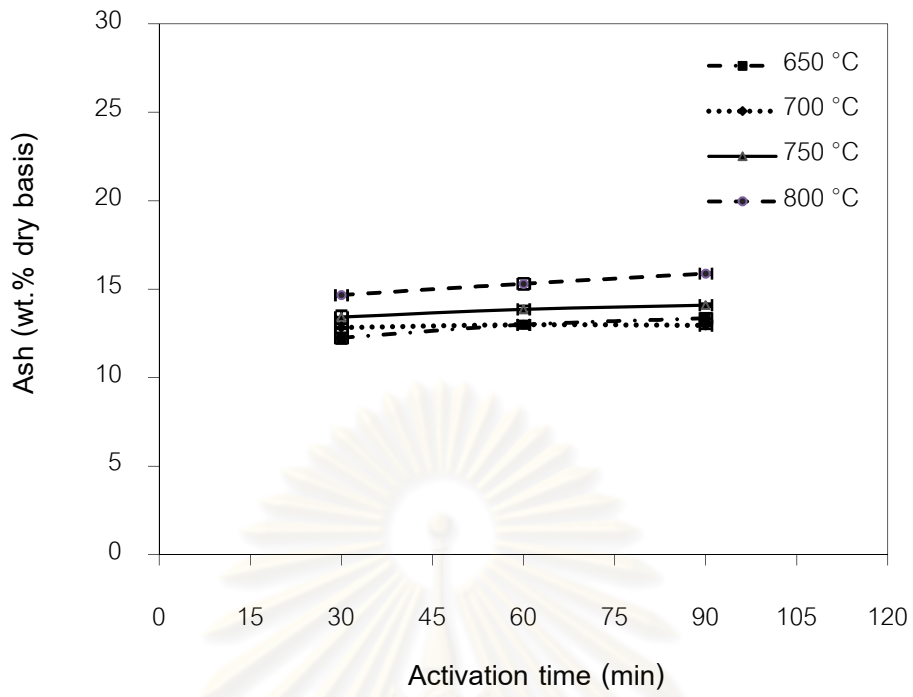




ศูนย์วิทยาศาสตร์  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์เพิ่มขึ้นเพราะการเพิ่มเวลาและอุณหภูมิในการกระตุ้น ทำให้สารระเหยในโครงสร้างของถ่านบางส่วนถูกกำจัดออกไปเพิ่มขึ้น เมื่อสารระเหยถูกกำจัดออกไปจะเกิดช่องว่างและรูพรุนขึ้นใหม่ในโครงสร้างของถ่านกัมมันต์ ไอน้ำซึ่งเป็นแก๊สออกซิไดซ์สามารถแพร่ผ่านช่องว่างและรูพรุนที่เกิดขึ้นดังกล่าวเพื่อเข้าไปภายในเนื้อถ่านได้ง่ายขึ้น ทำให้ไอน้ำทำปฏิกิริยากับอะตอมคาร์บอนในโครงสร้างถ่านได้เพิ่มขึ้น เป็นผลให้เกิดรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมาก ถ่านกัมมันต์จึงมีความสามารถในการดูดซับไอโอดีนได้เพิ่มขึ้น นอกจากนี้พบว่าอุณหภูมิในการกระตุ้น 800 องศาเซลเซียส เมื่อเพิ่มเวลาในการกระตุ้นจาก 60 เป็น 90 นาที ถ่านกัมมันต์กลับมีค่าการดูดซับไอโอดีนลดลงจาก 728.00 เป็น 672.50 มิลลิกรัมต่อกรัม เนื่องจากอุณหภูมิในการกระตุ้น 800 องศาเซลเซียส อะตอมคาร์บอนในโครงสร้างของถ่านเกิดปฏิกิริยากับไอน้ำได้ดีและการเพิ่มเวลาในการกระตุ้นจาก 60 เป็น 90 นาทีเป็นการเพิ่มระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาระหว่างอะตอมคาร์บอนกับไอน้ำตามสมการ (4.1) (4.2) และสมการ (4.3) ทำให้อะตอมคาร์บอนในโครงสร้างของถ่านเกิดปฏิกิริยากับไอน้ำเพิ่มขึ้นและเกิดการสลายตัวทางความร้อนอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิสูงส่งผลให้รูพรุนขนาดเล็กเกิดการสลายตัวและกลายเป็นรูพรุนที่มีขนาดใหญ่กว่าซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับค่าการดูดซับเมทิลีนบลูดังรูปที่ 4.10 ที่อุณหภูมิในการกระตุ้น 800 องศาเซลเซียส เมื่อเพิ่มเวลาในการกระตุ้นจาก 60 เป็น 90 นาที ถ่านกัมมันต์มีค่าการดูดซับเมทิลีนบลูเพิ่มขึ้นจาก 245.48 เป็น 273.36 มิลลิกรัมต่อกรัม แสดงให้เห็นว่ารูพรุนขนาดเล็กที่เกิดขึ้นจากการกระตุ้นด้วยไอน้ำมีการสลายตัวและกลายเป็นรูพรุนขนาดกลางเพิ่มขึ้น จากรูปที่ 4.10 ถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยไอน้ำมีค่าการดูดซับเมทิลีนบลูประมาณ 213.82 ถึง 273.34 มิลลิกรัมต่อกรัมและสามารถสังเกตได้ว่าที่อุณหภูมิในการกระตุ้น 800 องศาเซลเซียส การเพิ่มเวลาในการกระตุ้นจาก 30 เป็น 90 นาที ถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยไอน้ำแบบไม่ใช้อากาศมีค่าการดูดซับเมทิลีนบลูเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน เพราะที่อุณหภูมิในการกระตุ้น 800 องศาเซลเซียส ไอน้ำมีความว่องไวต่อการกระตุ้น ทำให้อะตอมคาร์บอนเกิดปฏิกิริยากับไอน้ำอย่างรวดเร็ว เป็นผลให้เกิดรูพรุนขนาดเล็กและขนาดกลางเพิ่มขึ้น ถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยไอน้ำแบบไม่ใช้อากาศจึงมีค่าการดูดซับไอโอดีนและเมทิลีนบลูสูงขึ้น เมื่อพิจารณาค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตรของถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยไอน้ำแบบไม่ใช้อากาศ อัตราการป้อนเข้าของน้ำ 3 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที เวลาในการกระตุ้น 30 60 และ 90 นาที อุณหภูมิในการกระตุ้น 650 700 750 และ 800 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 4.11 พบว่าความหนาแน่นเชิงปริมาตรของถ่านกัมมันต์ลดลง เมื่อเพิ่มเวลาและอุณหภูมิในการกระตุ้น เพราะการเพิ่มเวลาและอุณหภูมิในการกระตุ้นเป็นการพัฒนาโครงสร้างของรูพรุนบนถ่านกัมมันต์ ทำให้เกิดช่องว่างและรูพรุนจำนวนมากภายในโครงสร้างของถ่านกัมมันต์ ดังนั้นโครงสร้างของถ่านกัมมันต์จะมีความพรุนเพิ่มขึ้น เป็นผลให้ความหนาแน่นเชิงปริมาตรของถ่านกัมมันต์ลดลง





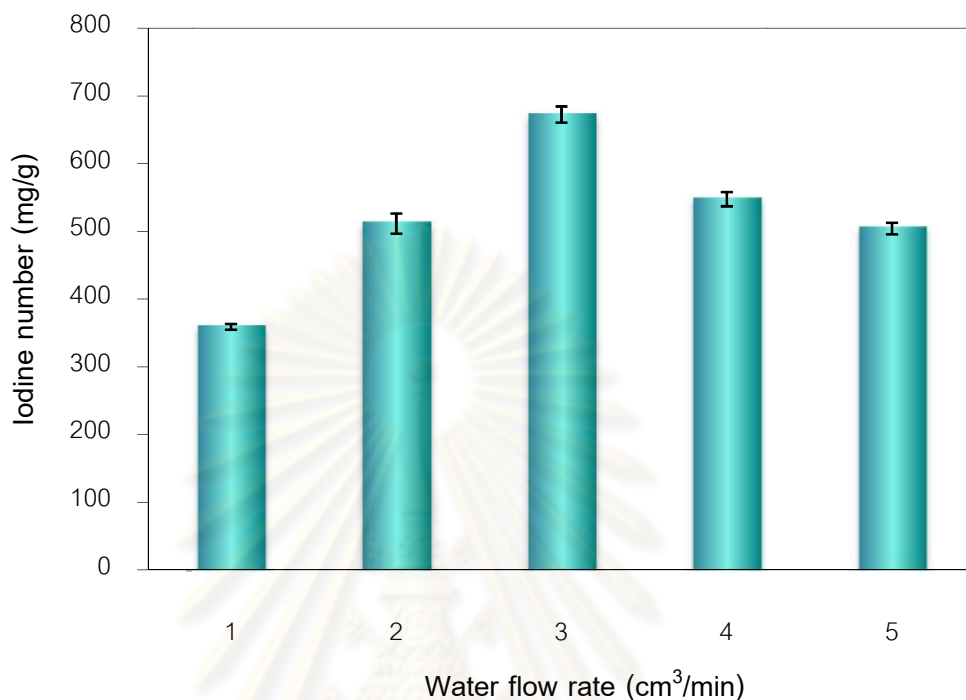
ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

คาร์บอนในโครงสร้างของถ่านสูงขึ้นไป น้ำสามารถแพร่เข้าไปทำปฏิกิริยากับอะตอมคาร์บอนในโครงสร้างของถ่านที่มีขนาดเล็กได้รวดเร็วกว่าถ่านที่มีขนาดใหญ่ ทำให้อะตอมคาร์บอนบางส่วนในโครงสร้างของถ่านที่มีขนาดเล็กเกิดการเผาไหม้และกลายเป็นเถ้าได้มากกว่าถ่านที่มีขนาดใหญ่ ซึ่งเถ้าที่เกิดขึ้นจะไปขัดขวางการกระตุ้นและในขณะเดียวกันสารประกอบออกไซด์ของโลหะหรือออกไซด์ของแอลคาไลด์ในเถ้าจะทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการกระตุ้น อะตอมคาร์บอนเกิดการเผาไหม้และสลายตัวได้อย่างรวดเร็ว ทำให้ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากถ่านขนาดเล็กจึงมีรูพรุนขนาดใหญ่มากกว่ารูพรุนขนาดเล็ก ดังนั้นถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากถ่านซาร์กะลาแมคาเดเมียขนาด 1.18 ถึง 2.36 มิลลิเมตรมีความสามารถในการดูดซับไอโอดีนและเมทิลีนบลูน้อยกว่าถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากถ่านซาร์กะลาแมคาเดเมียขนาด 2.36 ถึง 4.35 มิลลิเมตร เมื่อพิจารณาร้อยละเถ้าของถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยไอน้ำแบบไม่ใช้อากาศ พบว่าถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากถ่านซาร์กะลาแมคาเดเมียขนาด 1.18 ถึง 2.36 มิลลิเมตรมีร้อยละเถ้าสูงกว่าถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากถ่านซาร์กะลาแมคาเดเมียขนาด 2.36 ถึง 4.35 มิลลิเมตร ผลการวิเคราะห์เถ้าในถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยไอน้ำแบบไม่ใช้อากาศสามารถยืนยันได้ว่าถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากถ่านซาร์กะลาแมคาเดเมียขนาดเล็กเกิดการเผาไหม้และกลายเป็นเถ้าได้มากกว่าถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากถ่านซาร์กะลาแมคาเดเมียขนาดใหญ่ ซึ่งเถ้าจะไปยับยั้งการพัฒนาโครงสร้างรูพรุนของถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยไอน้ำแบบไม่ใช้อากาศ ทำให้ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้มีรูพรุนขนาดใหญ่เพิ่มขึ้น เป็นผลให้ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากถ่านซาร์กะลาแมคาเดเมียขนาดใหญ่มีค่าการดูดซับไอโอดีนและเมทิลีนบลูน้อยกว่าถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากถ่านซาร์กะลาแมคาเดเมียขนาดเล็ก

#### ตารางที่ 4.4 ผลของขนาดของอนุภาคถ่านซาร์ต่อสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยไอน้ำแบบไม่ใช้อากาศ

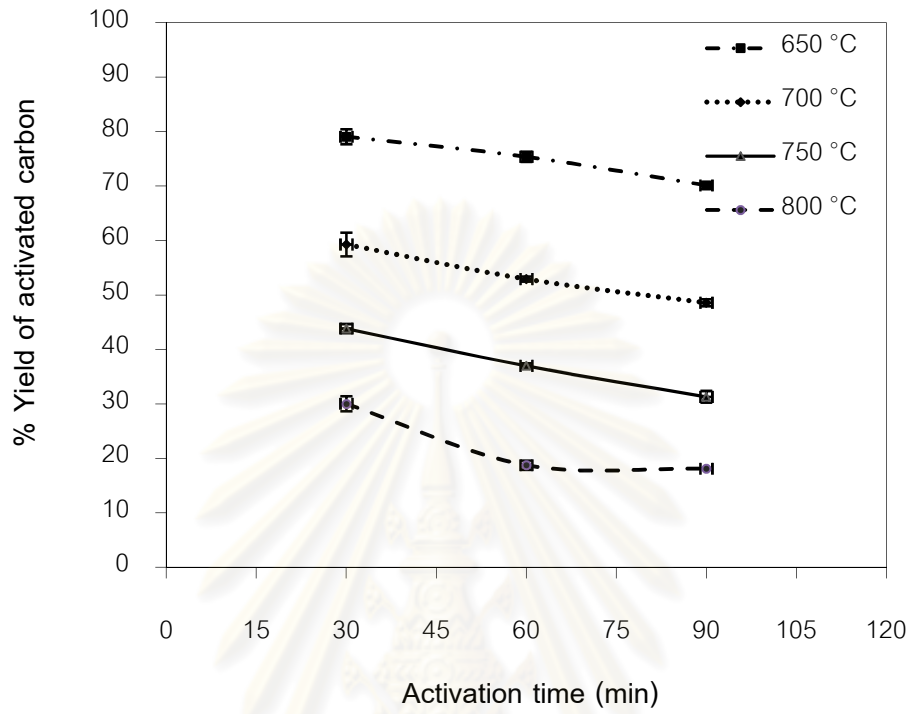
สมบัติของถ่านกัมมันต์	ขนาดของอนุภาคถ่านซาร์ (มิลลิเมตร)	
	1.18-2.36	2.36-4.75
ร้อยละผลได้	30.02	33.23
ร้อยละเถ้า	17.62	15.31
ค่าการดูดซับไอโอดีน (มิลลิกรัมต่อกรัม)	602.37	728.00
ค่าการดูดซับเมทิลีนบลู (มิลลิกรัมต่อกรัม)	231.32	245.49
ความหนาแน่นเชิงปริมาตร (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)	0.396	0.402

#### 4.3.2 การกระตุ้นด้วยไอน้ำแบบใช้อากาศ



**รูปที่ 4.13** ผลของอัตราการป้อนเข้าของน้ำต่อค่าการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์จากถ่านชาร์กะลาแมคาเดเมียโดยการกระตุ้นด้วยไอน้ำแบบใช้อากาศ

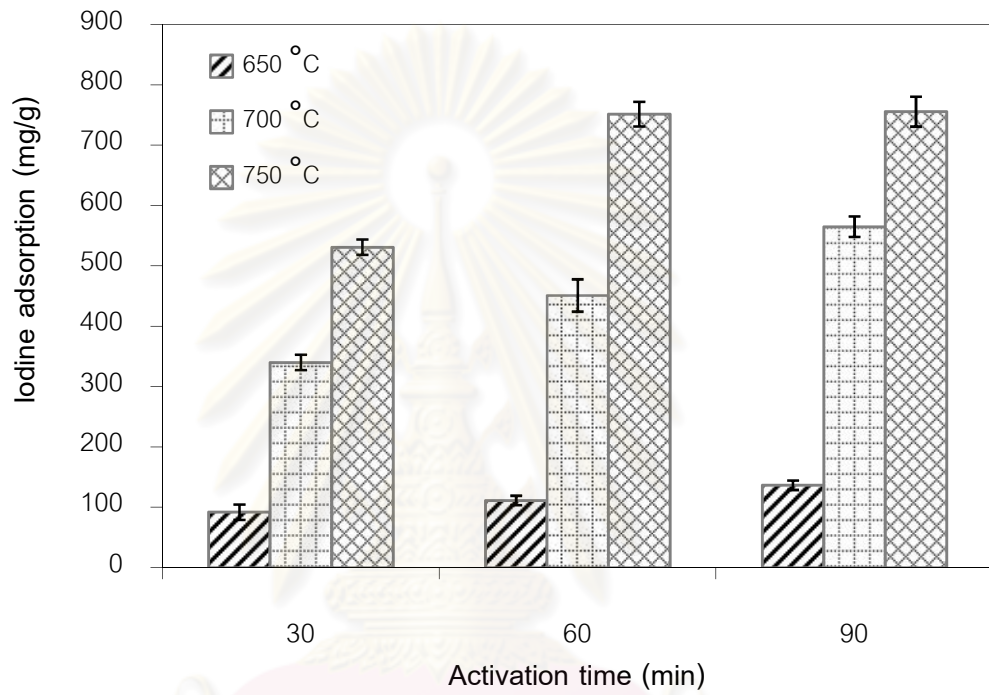
รูปที่ 4.13 แสดงผลของอัตราการป้อนเข้าของน้ำต่อค่าการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์จากถ่านชาร์กะลาแมคาเดเมียปริมาณ 10 กรัม โดยใช้ไอน้ำและอากาศเป็นแก๊สออกซิไดซ์ร่วมกันอัตราการไหลของอากาศ 100 มิลลิเมตรต่อวินาที อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อวินาที อุณหภูมิในการกระตุ้น 750 องศาเซลเซียส เวลาในการกระตุ้น 90 นาที พบว่าผลของอัตราการป้อนเข้าของน้ำต่อค่าการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์ที่การกระตุ้นด้วยไอน้ำแบบใช้อากาศและไม่ใช้อากาศมีแนวโน้มคล้ายกัน คือ เมื่อเพิ่มอัตราการป้อนเข้าของน้ำจาก 1 เป็น 3 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที ค่าการดูดซับไอโอดีนเพิ่มขึ้นจาก 420.00 เป็น 755.50 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ แต่เมื่อเพิ่มอัตราการป้อนเข้าของน้ำเป็น 4 และ 5 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที ค่าการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์กลับลดลงเป็น 705.00 และ 583.50 มิลลิกรัมต่อกรัมตามลำดับ ดังนั้นอัตราการป้อนเข้าของน้ำที่เหมาะสมของถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยไอน้ำแบบใช้อากาศ คือ 3 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที นอกจากนี้พบว่ากระตุ้นด้วยไอน้ำแบบใช้



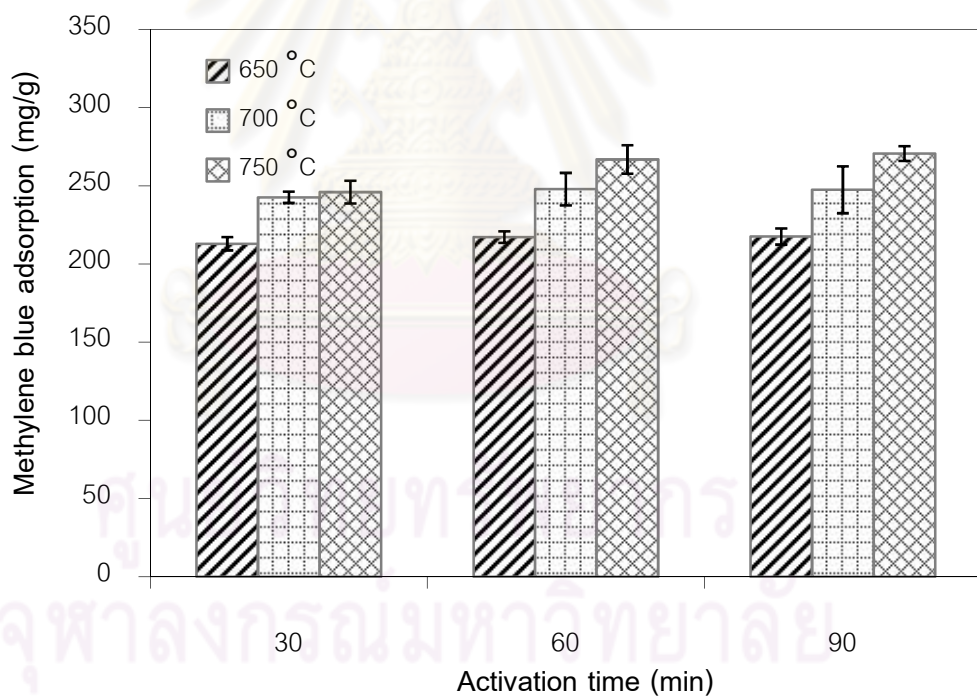
ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

อะตอมคาร์บอนโครงสร้างของถ่านเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและเกิดการสลายตัวทางความร้อนได้มากกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับถ่านที่กระตุ้นด้วยไอน้ำแบบไม่ใช้อากาศ (รูปที่ 4.8) นอกจากนี้พบว่า อุณหภูมิในการกระตุ้น 800 องศาเซลเซียส เวลาในการกระตุ้น 30 60 และ 90 นาที ถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยไอน้ำแบบใช้อากาศมีร้อยละผลได้เท่ากับ 30.98 18.74 และ 18.09 ตามลำดับ การเพิ่มเวลาในการกระตุ้นจาก 30 เป็น 60 และ 90 นาที ร้อยละผลได้ของถ่านกัมมันต์ลดลงอย่างชัดเจนและสามารถสังเกตเห็นได้ชัดเจนว่าถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยไอน้ำแบบใช้อากาศ อุณหภูมิในการกระตุ้น 800 องศาเซลเซียส มีค่าซึ่งมีลักษณะเป็นของแข็งสีขาวปนเปื้อนอยู่จำนวนมาก ทั้งนี้เนื่องจากถ่านซาร์กะลาแมคาเดเมียที่นำมากระตุ้นมีค่าเป็นองค์ประกอบสูง (ตารางที่ 4.3) และถ่านในถ่านซาร์กะลาแมคาเดเมียมีองค์ประกอบเป็นสารประกอบออกไซด์ของโลหะหรือออกไซด์ของแอลคาไลด์ สารประกอบออกไซด์เหล่านี้ทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการสลายตัวทางความร้อน (Carrott และคณะ, 2008, Yang และคณะ, 2010) และการกระตุ้นด้วยไอน้ำแบบใช้อากาศมีความว่องไวต่อการกระตุ้นมากที่อุณหภูมิสูง เป็นผลให้อะตอมคาร์บอนในโครงสร้างของถ่านเกิดการเผาไหม้แล้วกลายเป็นเถ้าจำนวนมาก ดังนั้นอุณหภูมิในการกระตุ้น 800 องศาเซลเซียสจะไม่ทำทดลองและศึกษาต่อไป จากรูปที่ 4.14 และรูปที่ 4.15 สามารถสังเกตเห็นได้ว่าการพัฒนาโครงสร้างของรูพรุนในถ่านกัมมันต์มีความสัมพันธ์กับร้อยละผลได้ของถ่านกัมมันต์ เพราะการลดลงของร้อยละผลได้ของถ่านกัมมันต์ เป็นผลมาจากอะตอมคาร์บอนภายในโครงสร้างของถ่านเกิดปฏิกิริยากับแก๊สออกซิไดซ์ที่ใช้ในการกระตุ้น อะตอมคาร์บอนที่ทำปฏิกิริยากับไอน้ำและอากาศจะถูกกำจัดออกในรูปของแก๊สและเกิดเป็นรูพรุนขึ้นใหม่ภายในโครงสร้างของถ่าน ทำให้ถ่านกัมมันต์มีความสามารถในการดูดซับสารต่างๆ ได้ดีขึ้น ดังนั้นการเพิ่มเวลาและอุณหภูมิในการกระตุ้น ร้อยละผลได้ของถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยไอน้ำแบบใช้อากาศมีค่าลดลง ถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยไอน้ำแบบใช้อากาศจึงมีค่าการดูดซับไอโอดีนเพิ่มขึ้นดังรูปที่ 4.16 และเมื่อทำการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์การดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยไอน้ำแบบใช้และไม่ใช้อากาศ พบว่าที่เวลาและอุณหภูมิในการกระตุ้นเดียวกันถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยไอน้ำแบบใช้อากาศมีค่าการดูดซับไอโอดีนมากกว่า ทั้งนี้เนื่องจากอัตราการไหลที่มากขึ้นของแก๊สออกซิไดซ์ผสมกันระหว่างไอน้ำกับอากาศ ส่งผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาของอะตอมคาร์บอนในโครงสร้างของถ่านเพิ่มขึ้น นอกจากนี้การกระตุ้นด้วยไอน้ำแบบใช้อากาศจะมีออกซิเจนเป็นแก๊สออกซิไดซ์ที่ว่องไวทำหน้าที่เป็นตัวออกซิไดซ์อะตอมคาร์บอนร่วมกับไอน้ำ ทำให้เกิดรูพรุนขึ้นใหม่จำนวนมากภายในโครงสร้างของถ่านกัมมันต์และแก๊สออกซิเจนในอากาศมีความว่องไวต่อการกระตุ้นมากกว่าไอน้ำ ทำให้น้ำมันที่อุดหรือตกค้างอยู่ในรูพรุนของถ่านกัมมันต์เกิดการแตกตัวและสลายตัวออกไปได้ง่ายกว่า ถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยไอน้ำแบบใช้อากาศจึงมีความสามารถในการดูดซับไอโอดีนมากกว่าถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยไอน้ำแบบไม่ใช้อากาศ อุณหภูมิในการกระตุ้น



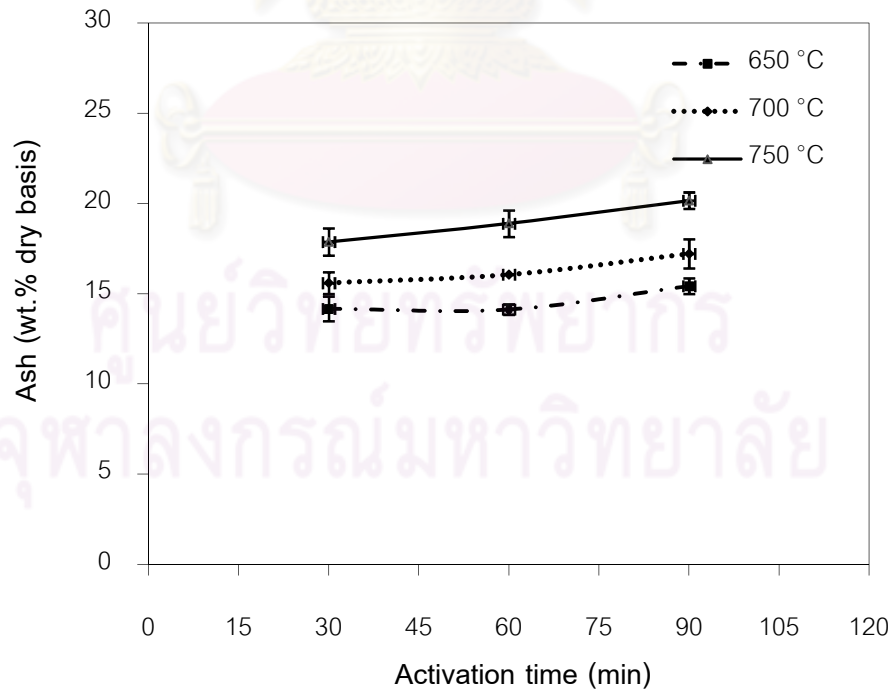
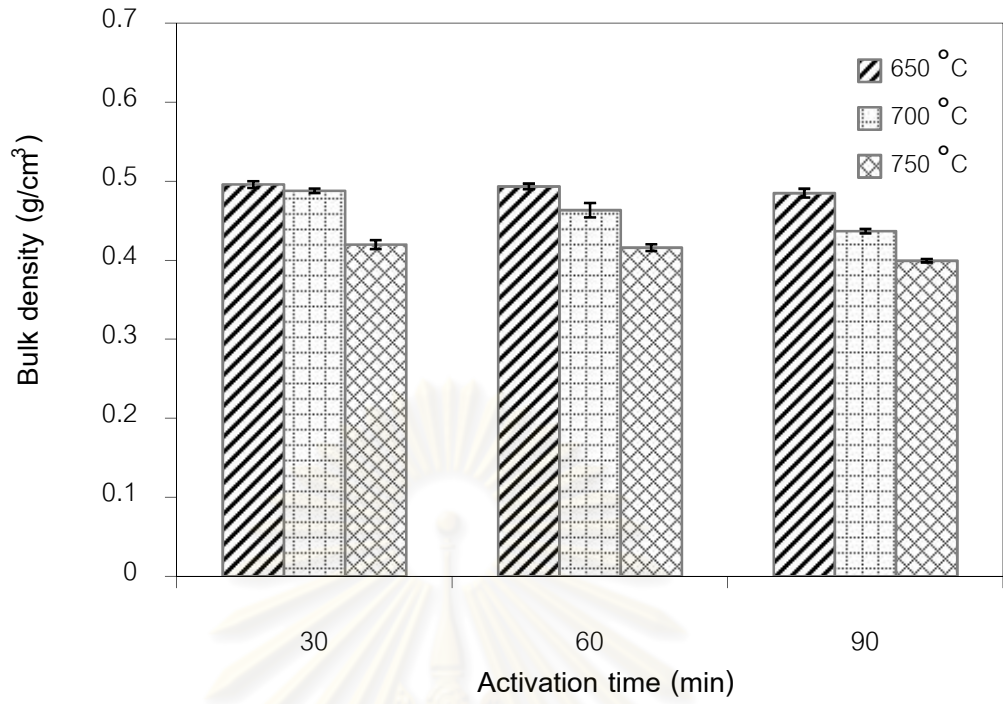


ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ปริมาตรของถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยไอน้ำแบบใช้อากาศมีแนวโน้มคล้ายกับถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยไอน้ำแบบไม่ใช้อากาศ (รูปที่ 4.11) คือ เมื่อเพิ่มเวลาและอุณหภูมิในการกระตุ้น ถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยไอน้ำแบบใช้อากาศมีความหนาแน่นเชิงปริมาตรลดลง ความหนาแน่นเชิงปริมาตรของถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยไอน้ำแบบใช้อากาศมีค่าน้อยกว่าถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยไอน้ำแบบไม่ใช้อากาศ ถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยไอน้ำแบบใช้อากาศมีความหนาแน่นเชิงปริมาตรอยู่ระหว่าง 0.399 ถึง 0.496 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม ซึ่งความหนาแน่นเชิงปริมาตรของถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยไอน้ำแบบใช้อากาศมีค่าอยู่ในช่วงความหนาแน่นเชิงปริมาตรของถ่านกัมมันต์เชิงพาณิชย์ที่ใช้ในระดับอุตสาหกรรม (0.3-0.5 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม)

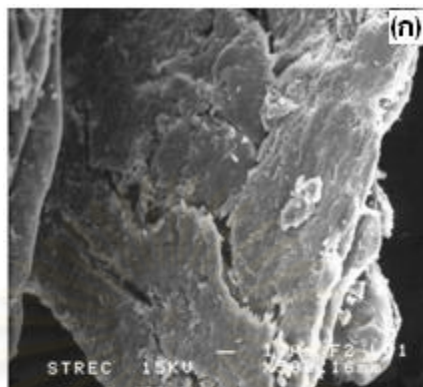
รูปที่ 4.18 แสดงผลของเวลาและอุณหภูมิในการกระตุ้นต่อร้อยละเถ้าในถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยไอน้ำแบบใช้อากาศ พบว่าถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยไอน้ำแบบใช้อากาศมีร้อยละเถ้าเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มเวลาและอุณหภูมิในการกระตุ้น โดยถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยไอน้ำแบบใช้อากาศมีร้อยละเถ้า 14.16 ถึง 20.16 ร้อยละเถ้าของถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยไอน้ำแบบใช้อากาศมีค่าสูงกว่าถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยไอน้ำแบบไม่ใช้อากาศ (รูปที่ 4.12) ทั้งนี้เนื่องจากถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยไอน้ำแบบใช้อากาศมีออกซิเจนเป็นแก๊สออกซิไดซ์ที่ว่องไว ทำให้โลหะหรือสารประกอบของโลหะที่มีอยู่ในถ่านซาร์กะลาแมคาเดเมียเกิดการออกซิไดซ์กับออกซิเจนในอากาศแล้วเปลี่ยนรูปเป็นสารประกอบออกไซด์ของโลหะซึ่งอยู่ในรูปของเถ้าเพิ่มขึ้น สารประกอบออกไซด์ของโลหะนั้นจะทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการสลายตัวทางความร้อน ส่งผลให้อะตอมคาร์บอนในโครงสร้างของถ่านเกิดปฏิกิริยากับไอน้ำและอากาศเพิ่มขึ้น อะตอมคาร์บอนบางส่วนในโครงสร้างของถ่านมีการสลายตัวและเกิดปฏิกิริยากลายเป็นแก๊ส ทำให้สัดส่วนของเถ้าในถ่านกัมมันต์เพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตามปริมาณเถ้าที่มากเกินไปก็อาจนำไปสู่การเผาไหม้ของอะตอมคาร์บอนในโครงสร้างของถ่าน ทำให้รูพรุนของถ่านกัมมันต์กลายเป็นรูพรุนขนาดใหญ่ ความสามารถในการดูดซับสารของถ่านกัมมันต์ลดลง (Carrott และคณะ, 2008, Yang และคณะ, 2010) ดังนั้นปริมาณสารอินทรีย์หรือเถ้าในวัตถุดิบเริ่มต้น เวลาและอุณหภูมิในการกระตุ้นจึงมีบทบาทสำคัญต่อคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้ หากปริมาณเถ้าในวัตถุดิบเริ่มต้นมีปริมาณมากจะไม่ควรใช้อุณหภูมิในการกระตุ้นสูงและเวลาในการกระตุ้นมาก เพราะอะตอมคาร์บอนในโครงสร้างของถ่านจะเกิดการเผาไหม้จำนวนมาก เป็นผลให้เกิดการยับยั้งการเกิดรูพรุนขนาดเล็กและขนาดกลางในโครงสร้างของถ่านกัมมันต์ ซึ่งจะเห็นได้จากผลการทดลองว่า อุณหภูมิในการกระตุ้น 800 องศาเซลเซียส ถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยไอน้ำแบบใช้อากาศมีเถ้าเป็นองค์ประกอบสูง ร้อยละผลได้ของถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยไอน้ำแบบใช้อากาศมีค่าเท่ากับ 18.74 และ 18.09 ที่เวลาในการกระตุ้น 60 และ 90 นาที ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าอะตอมคาร์บอนในโครงสร้างของถ่านส่วนใหญ่เกิดการเผาไหม้กลายเป็นเถ้าจำนวนมากจนสามารถสังเกตเห็นได้อย่างชัดเจน



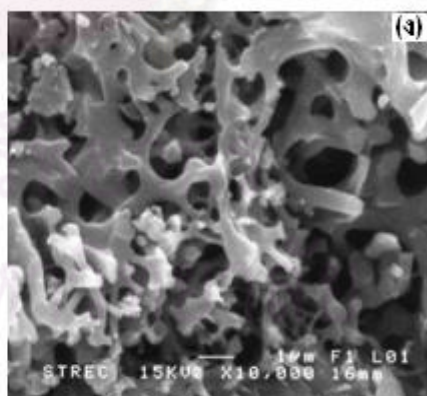
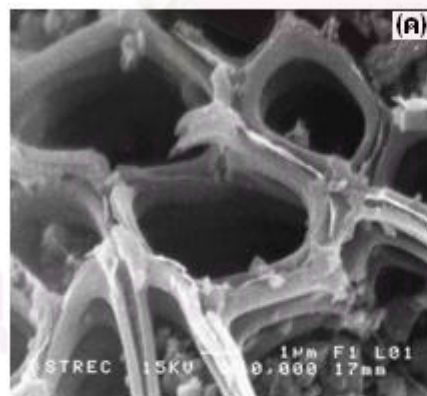
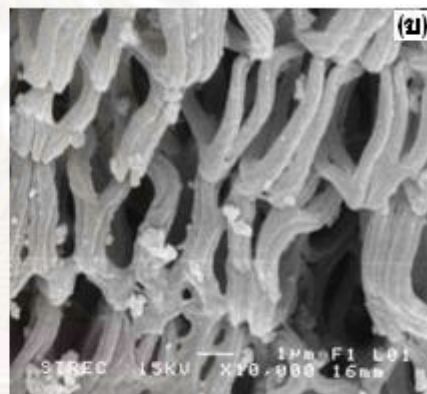
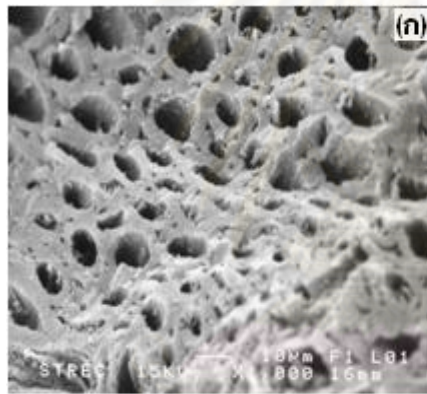
เมื่อพิจารณาผลของขนาดของอนุภาคถ่านชาร์ตต่อสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยไอน้ำแบบใช้อากาศ อัตราการป้อนเข้าของน้ำ 3 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที อัตราการไหลของอากาศ 100 มิลลิลิตรต่อนาที อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที อุณหภูมิในการกระตุ้น 750 องศาเซลเซียสและเวลาในการกระตุ้น 90 นาที ดังตารางที่ 4.5 พบว่าขนาดของอนุภาคถ่านชาร์ตมีผลต่อค่าการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยไอน้ำแบบใช้อากาศมากกว่าถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยไอน้ำแบบไม่ใช้อากาศ (ตารางที่ 4.4) เมื่อขนาดของอนุภาคของถ่านชาร์ตลดลง ค่าการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยไอน้ำแบบใช้อากาศมีค่าลดลงมากกว่า 755.50 เป็น 578.50 มิลลิกรัมต่อกรัม แต่ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากถ่านชาร์ตขนาดเล็กกลับมีค่าการดูดซับเมทธิลีนบลูสูงกว่าถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากถ่านชาร์ตขนาดใหญ่ เพราะถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยไอน้ำแบบใช้อากาศ อะตอมคาร์บอนในโครงสร้างของถ่านเกิดปฏิกิริยากับไอน้ำและอากาศซึ่งเป็นแก๊สออกซิไดซ์ได้ง่ายและรวดเร็ว ไอน้ำและอากาศทำปฏิกิริยากับอะตอมคาร์บอนในโครงสร้างของถ่านที่มีขนาดเล็กได้ง่ายกว่าถ่านที่มีขนาดใหญ่ อะตอมคาร์บอนในโครงสร้างของถ่านที่มีขนาดเล็กจึงเกิดปฏิกิริยากับไอน้ำและอากาศได้อย่างรวดเร็วกว่าถ่านที่มีขนาดใหญ่ ทำให้อะตอมคาร์บอนในโครงสร้างของถ่านที่มีขนาดเล็กเกิดการเผาไหม้และกลายเป็นเถ้าได้มากกว่าถ่านที่มีขนาดใหญ่ ซึ่งการเผาไหม้และเถ้าที่เกิดขึ้นในถ่านที่มีขนาดเล็กจะไปยับยั้งการเกิดรูพรุนขนาดเล็ก เป็นผลให้ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากถ่านชาร์ตที่มีขนาดเล็กมีรูพรุนขนาดใหญ่และขนาดกลางมากกว่า ดังนั้นถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากถ่านชาร์ตลาแมคาเดเมียขนาด 1.18 ถึง 2.36 มิลลิเมตรมีค่าการดูดซับเมทธิลีนบลูมากกว่าถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากถ่านชาร์ตลาแมคาเดเมียขนาด 2.36 ถึง 4.75 มิลลิเมตร

**ตารางที่ 4.5** ผลของขนาดของอนุภาคถ่านชาร์ตต่อสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยไอน้ำแบบใช้อากาศ

สมบัติของถ่านกัมมันต์	ขนาดของอนุภาคถ่านชาร์ต (มิลลิเมตร)	
	1.18-2.36	2.36-4.75
ร้อยละผลได้	26.32	31.28
ร้อยละเถ้า	26.49	20.16
ค่าการดูดซับไอโอดีน (มิลลิกรัมต่อกรัม)	578.50	755.50
ค่าการดูดซับเมทธิลีนบลู (มิลลิกรัมต่อกรัม)	281.32	270.68
ความหนาแน่นเชิงปริมาตร (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)	0.374	0.399



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



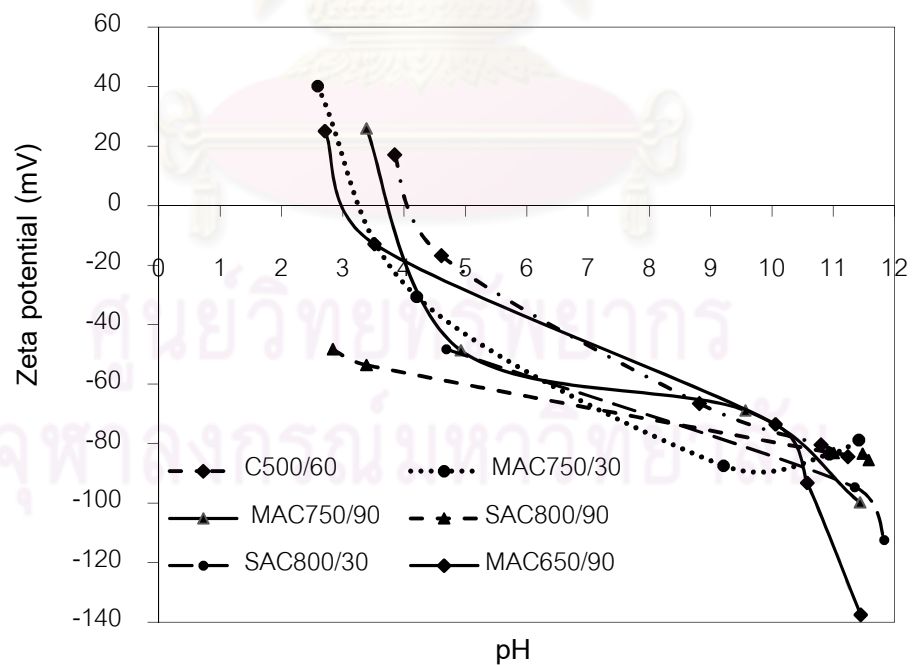
#### 4.4.2 พื้นที่ผิวและหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของรูพรุนบนถ่านกัมมันต์

ผลการทดลองส่วนนี้จะแสดงสมบัติทางกายภาพและโครงสร้างทางเคมีหรือหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของรูพรุนบนถ่านกัมมันต์จากถ่านชาร์กะลาแมคาเดเมียที่กระตุ้นด้วยไอน้ำแบบใช้และไม่ใช้อากาศ สมบัติทางกายภาพของรูพรุนบนถ่านกัมมันต์ที่ศึกษา ได้แก่ พื้นที่ผิวจำเพาะของรูพรุนหรือพื้นที่ผิวรูพรุน (BET surface area,  $S_{\text{BET}}$ ) และค่าการดูดซับไอโอดีน (Iodine number) สมบัติทางเคมีหรือโครงสร้างทางเคมีบนพื้นผิวของรูพรุนบนถ่านกัมมันต์ที่ศึกษา ได้แก่ ค่าความเป็นกรดเบสของพื้นผิวถ่านกัมมันต์ เมื่อกระจายตัวในสารละลาย ชนิดและปริมาณหมู่ฟังก์ชันต่างๆ บนพื้นผิวของรูพรุนบนถ่านกัมมันต์ เทคนิคที่ใช้วิเคราะห์สมบัติต่างๆ มีดังนี้ การวัดซีต้าโพเทนเชียล (Zeta potential measurement) เพื่อวัดค่าความเป็นกรดเบสที่พื้นผิวประจุเป็นศูนย์ (Isoelectric point,  $\text{pH}_{\text{IEP}}$ ) เทคนิควิเคราะห์ฟลูเรียทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโคปี (Fourier Transform Infrared spectroscopy, FT-IR) เพื่อหาหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ และหาปริมาณและหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์โดยใช้การไตเตรตด้วยกรดและเบส (Boehm's titration)

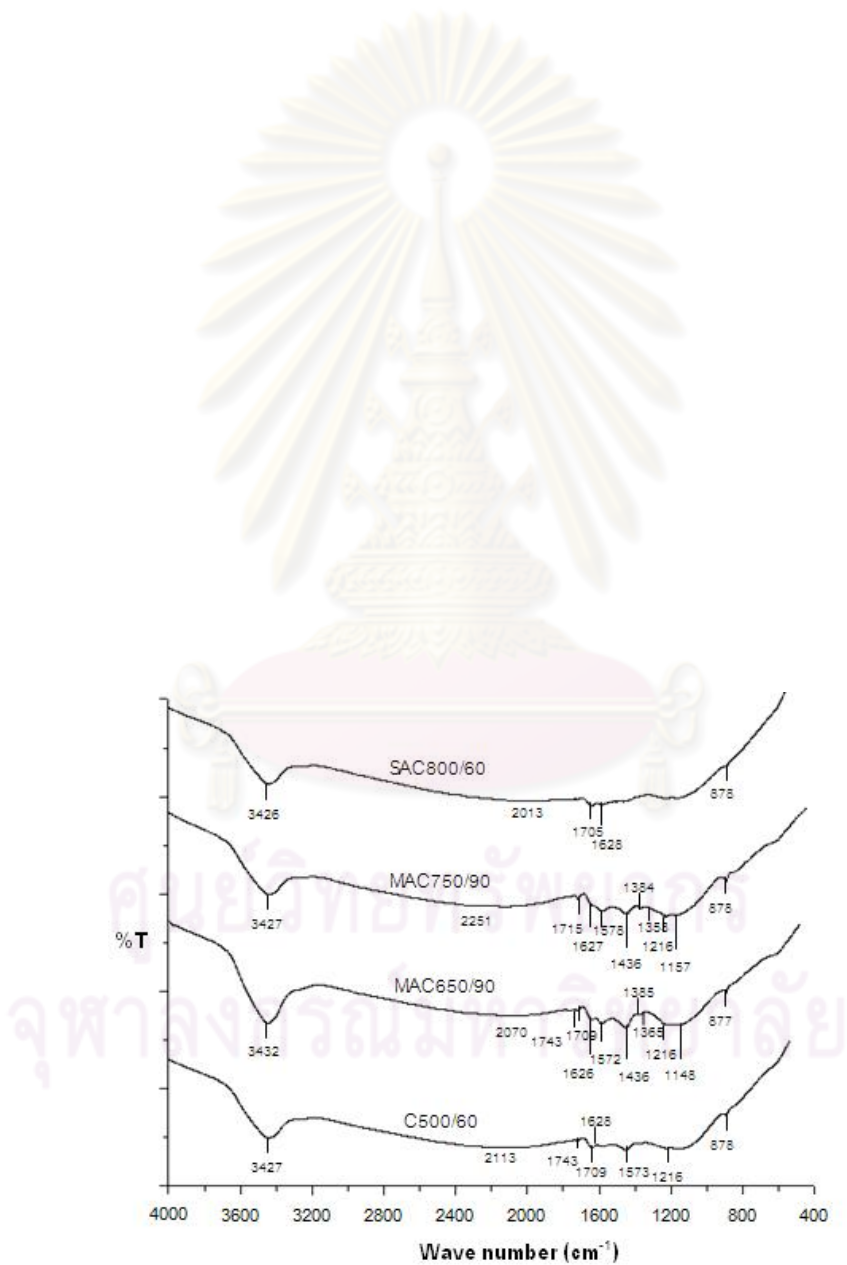
การแสดงผลการวิเคราะห์และผลการทดลองของงานวิจัยในส่วนนี้จะทำการกำหนดสัญลักษณ์เพื่อแสดงผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคต่างๆ ของถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยไอน้ำแบบใช้และไม่ใช้อากาศที่ภาวะในการกระตุ้นต่างๆ โดยถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยไอน้ำแบบใช้อากาศจะแทนเป็นสัญลักษณ์ MAC650/90 โดยตัวเลขแรกหมายถึง อุณหภูมิในการกระตุ้น และตัวเลขหลังหมายถึงเวลาในการกระตุ้น สำหรับถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยไอน้ำแบบไม่ใช้อากาศจะแทนเป็นสัญลักษณ์ SAC650/90 โดยตัวเลขแรกหมายถึง อุณหภูมิในการกระตุ้น และตัวเลขหลังหมายถึง เวลาในการกระตุ้นและถ่านชาร์กะลาแมคาเดเมียจะแทนเป็นสัญลักษณ์ C500/60 โดยตัวเลขแรกหมายถึง อุณหภูมิในการคาร์บอนไนซ์ และตัวเลขหลังหมายถึง เวลาในการคาร์บอนไนซ์



ตัวอย่าง	สมบัติทางกายภาพของรูพรุน		ค่าความเป็นกรดเบส
	พื้นที่ผิวรูพรุน	ค่าการดูดซับไอโอดีน	ที่พื้นผิวประจุเป็นศูนย์
	( $S_{BET}$ , $m^2/g$ )	(mg/g)	( $pH_{IEP}$ )
C500/60	109.0	86.0	4.0
MAC650/90	591.2	324.5	3.0
MAC750/30	731.1	650.5	3.2
MAC750/90	1022.0	755.5	3.7
SAC650/90	476.7	108.0	-
SAC800/30	623.3	608.0	-
SAC800/60	809.8	672.5	-



เมื่อพิจารณาพื้นที่ผิวรูปทรงและค่าการดูดซับไอโอดีนของของถ่านกัมมันต์จากถ่านชาร์กะลาแมคาเดเมียที่กระตุ้นด้วยไอน้ำแบบใช้และไม่ใช้อากาศ ดังตารางที่ 4.4 พบว่า คุณภาพและเวลาในการกระตุ้นมีผลต่อการพัฒนาโครงสร้างรูปทรงของถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยไอน้ำแบบใช้และไม่ใช้อากาศ โดยสามารถยืนยันผลได้จากค่าพื้นที่ผิวรูปทรงของถ่านกัมมันต์ เมื่อเพิ่มคุณภาพในการกระตุ้น ถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยไอน้ำแบบใช้และไม่ใช้อากาศมีพื้นที่ผิวรูปทรงเพิ่มขึ้น ที่เวลาในการกระตุ้น 90 นาที เมื่อเพิ่มคุณภาพในการกระตุ้นจาก 650 เป็น 750 องศาเซลเซียส ถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยไอน้ำแบบใช้อากาศมีพื้นที่ผิวรูปทรงเพิ่มขึ้นจาก 591.2 เป็น 1022.0 ตารางเมตรต่อกรัม เมื่อพิจารณาผลของเวลาในการกระตุ้น พบว่าการเพิ่มเวลาในการกระตุ้นจาก 30 เป็น 90 นาที ที่คุณภาพในการกระตุ้น 750 องศาเซลเซียส ถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยไอน้ำแบบใช้อากาศมีพื้นที่ผิวรูปทรงเพิ่มขึ้นจาก 731.1 เป็น 1022.0 ตารางเมตรต่อกรัมซึ่งผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวรูปทรงของถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยไอน้ำแบบไม่ใช้อากาศมีแนวโน้มคล้ายกับถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยไอน้ำแบบใช้อากาศ คือ เมื่อเพิ่มเวลาและคุณภาพในการกระตุ้นถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยไอน้ำแบบไม่ใช้อากาศมีพื้นที่ผิวรูปทรงเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มเวลาและคุณภาพในการกระตุ้นเป็นการเพิ่มการสลายตัวของสารระเหยในถ่านและทำให้อะตอมคาร์บอนในโครงสร้างถ่านเกิดปฏิกิริยากับไอน้ำเพิ่มขึ้นแล้วนำไปสู่การสลายตัวของอะตอมคาร์บอนในโครงสร้างถ่าน ทำให้การเกิดรูปทรงเพิ่มขึ้นจำนวนมาก ส่งผลให้ถ่านกัมมันต์มีพื้นที่ผิวสูง (Dermiral และคณะ, 2010) โดยถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยไอน้ำแบบไม่ใช้อากาศมีพื้นที่ผิวรูปทรง 476.7 ถึง 809.8 ตารางเมตรต่อกรัม เมื่อเปรียบเทียบพื้นที่ผิวรูปทรงของถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยไอน้ำแบบใช้และไม่ใช้อากาศที่คุณภาพในการกระตุ้น 650 องศาเซลเซียส เวลาในการกระตุ้น 90 นาที พบว่าถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยไอน้ำแบบใช้อากาศมีพื้นที่ผิวรูปทรงมากกว่าถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยไอน้ำแบบไม่ใช้อากาศ ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับผลของการวิเคราะห์ค่าการดูดซับไอโอดีน ดังตารางที่ 4.6 และสามารถอธิบายได้จากการกระตุ้นด้วยอากาศเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน ดังนั้นคุณภาพในการกระตุ้นที่มีอากาศเป็นแก๊สออกซิไดซ์จะใช้คุณภาพในการกระตุ้นต่ำกว่าการกระตุ้นที่ใช้ไอน้ำแบบไม่ใช้อากาศ นอกจากนี้การกระตุ้นที่มีอากาศเป็นแก๊สออกซิไดซ์ผสมจะมีความว่องไวในการกระตุ้นมากกว่า ส่งผลให้ถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยไอน้ำแบบใช้อากาศจึงมีพื้นที่ผิวรูปทรงและค่าการดูดซับไอโอดีนสูงกว่า รูปที่ 4.21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าซีตาโพเทนเชียลกับค่าความเป็นกรดเบสของพื้นผิวบนถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยไอน้ำแบบใช้อากาศและไม่ใช้อากาศ พบว่าถ่านชาร์และถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยไอน้ำแบบใช้อากาศสามารถวัดค่า isoelectric point ได้หรือมีค่ากรดเบส ( $pH_{IEP}$ ) ที่สามารถวัดค่าซีตาโพเทนเชียลเท่ากับศูนย์ ซึ่งค่า  $pH_{IEP}$  เป็นค่าที่บ่งบอกประจุภายนอกของพื้นผิวบนอนุภาคถ่าน (external charges of carbon particles) ที่กระจายตัวอยู่ในสารละลาย (Song และคณะ, 2010) จากผลการวิเคราะห์ค่า  $pH_{IEP}$  ถ่านชาร์



ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของถ่านชาร์และถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยไอน้ำแบบใช้และไม่ใช้อากาศโดยใช้เทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี (FT-IR) ดังรูปที่ 4.22 พบว่าผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของถ่านชาร์และถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยไอน้ำแบบใช้และไม่ใช้อากาศมีแนวโน้มที่สอดคล้องและสามารถยืนยันผลการวิเคราะห์ค่า  $pH_{IEP}$  โดยหมู่ฟังก์ชันที่พบบนพื้นผิวของถ่านชาร์และถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยไอน้ำแบบใช้อากาศเป็นหมู่ฟังก์ชันที่ความเป็นกรดและมีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบ เช่น คาร์บอนิล คาร์บอกซิลและฟีนอลิก เป็นต้น โดยเลขคลื่นที่สำคัญและหมู่ฟังก์ชันที่พบในแถบสเปกตรัมมีดังนี้ หมู่ฟังก์ชัน -OH ที่เลขคลื่น 3300-3800  $cm^{-1}$  C=C ในวงแอโรแมติกที่เลขคลื่น 1500-1600  $cm^{-1}$  C=O ที่เลขคลื่น 1300-1500  $cm^{-1}$  C-O ที่เลขคลื่น 1000-1260  $cm^{-1}$  และ C-H ในวงแอโรแมติกที่เลขคลื่น 870  $cm^{-1}$  จากรูปที่ 4.22 พบว่าถ่านชาร์และถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยไอน้ำแบบใช้อากาศและไม่ใช้อากาศจะไม่พบสเปกตรัมที่เลขคลื่น 2100-2260  $cm^{-1}$  แต่จะพบสเปกตรัมที่เลขคลื่นที่ประมาณ 877-878  $cm^{-1}$  และ 1500-1600  $cm^{-1}$  แสดงให้เห็นว่าถ่านชาร์ (C500/60) และถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยไอน้ำแบบใช้อากาศ (MAC650/90 และ MAC750/90) และไม่ใช้อากาศ (SAC800/60) มีความเป็นแอโรแมติกเพิ่มขึ้น (aromaticity) หลังจากผ่านขั้นตอนคาร์บอนไนเซชันและการกระตุ้นซึ่งอาจเกิดจากสลายตัวและแตกตัวของสารไฮโดรคาร์บอนที่ไม่อิ่มตัวที่เป็นพันธะคู่ (C=C) หรือพันธะสาม (C≡C) และมีการจัดเรียงตัวใหม่เป็นวงเบนซินหรือวงแอโรแมติก (aromatization) เพิ่มขึ้น (Yang และ Lua, 2003) ดังนั้นถ่านชาร์และถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยไอน้ำแบบใช้อากาศและไม่ใช้อากาศจึงไม่พบหมู่แอลไคน์ (alkyne groups, C≡C) ที่มีสเปกตรัมเลขคลื่น 2100-2260  $cm^{-1}$  แต่จะพบสเปกตรัมที่เลขคลื่น 877-878  $cm^{-1}$  และ 1500-1600  $cm^{-1}$  ซึ่งสเปกตรัมทั้งสองแถบจะแสดงถึง C-H และ C=C ในวงแอโรแมติกของถ่านชาร์และถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยไอน้ำแบบใช้อากาศและไม่ใช้อากาศ นอกจากนี้ถ่านชาร์และถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยไอน้ำแบบใช้อากาศและไม่ใช้อากาศมีแถบสเปกตรัมที่เลขคลื่น 3300-3800  $cm^{-1}$  เลขคลื่นนี้จะแสดงแถบการยืดของหมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl, -OH) ในโมเลกุลของน้ำซึ่งอาจเกิดจากความชื้นในถ่านกัมมันต์ ถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยไอน้ำแบบไม่ใช้อากาศมีแถบสเปกตรัมลดลงหรือแถบสเปกตรัมที่มีอยู่ปรากฏไม่ค่อยชัดเจนเมื่อเปรียบเทียบกับถ่านชาร์กะลาแมคาเดเมียและถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยไอน้ำแบบใช้อากาศ ซึ่งผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันโดยใช้เทคนิค FT-IR นี้มีความสอดคล้องและสามารถยืนยันผลของการวัดค่า  $pH_{IEP}$  ซึ่งแสดงให้เห็นได้ชัดเจนว่าการกระตุ้นด้วยไอน้ำแบบใช้อากาศสามารถพัฒนาโครงสร้างทางเคมีบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ โดยพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยไอน้ำแบบใช้อากาศมีหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบ ได้แก่ หมู่คาร์บอนิลของฟีนอลซึ่งปรากฏแถบการยืด C-O ของหมู่คาร์บอนิลที่มีสเปกตรัมอยู่ในช่วงเลขคลื่น 1000-1260  $cm^{-1}$  นอกจากนี้ถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยไอน้ำแบบใช้อากาศยังมีหมู่ฟังก์ชันคีโตน คิวโนนและแลกโตน

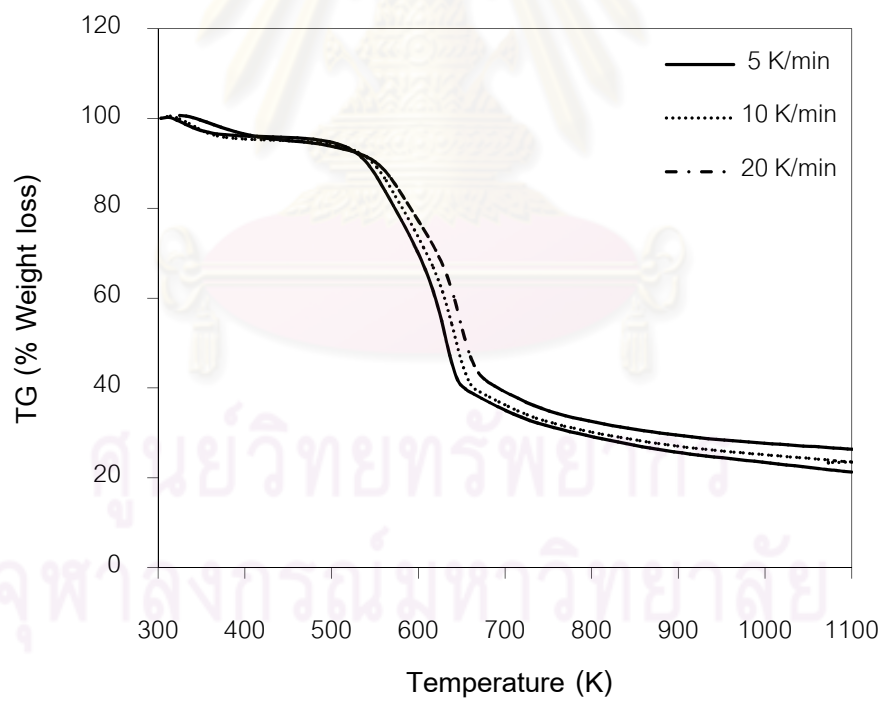
บนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ โดยปรากฏแถบสเปกตรัมของ C=O ที่ช่วงเลขคลื่นประมาณ 1700-1900  $\text{cm}^{-1}$  แต่อย่างไรก็ตามแถบสเปกตรัมที่ช่วงเลขคลื่นดังกล่าวจะปรากฏไม่ชัดเจน เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการกระตุ้นจาก 650 เป็น 750 องศาเซลเซียส เนื่องจากหมู่ฟังก์ชันเหล่านี้เป็นหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบซึ่งมีความว่องไวและสลายตัวได้ง่ายที่อุณหภูมิสูง (Yang และ Lua, 2003) เป็นผลให้ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมด้วยวิธีการกระตุ้นทางกายภาพโดยส่วนใหญ่จะมีหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบลดลง (Yin และคณะ, 2007) และมีความเป็นกรดลดลงจนไม่สามารถวิเคราะห์ค่า  $\text{pH}_{\text{IEP}}$  เช่นเดียวกับถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยไอ้่น้ำแบบไม่ใช้อากาศ

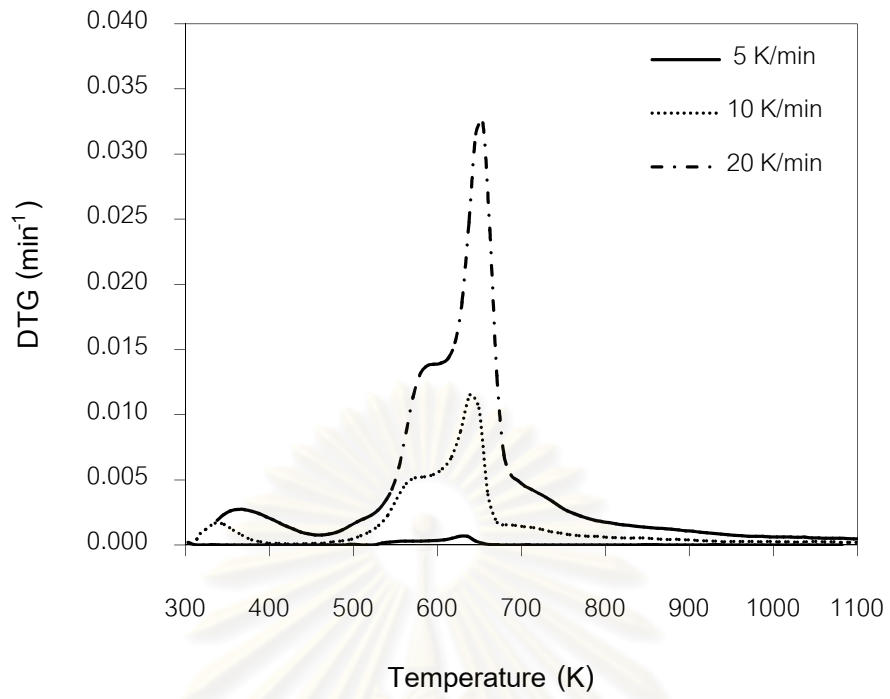
จากการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ที่ใช้เทคนิค FT-IR พบว่าถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยไอ้่น้ำแบบไม่ใช้อากาศมีแถบสเปกตรัมที่แสดงถึงหมู่ฟังก์ชันที่เป็นกรดปรากฏอยู่ที่เลขคลื่นต่างๆ แต่ไม่ชัดเจน ทั้งนี้เนื่องจากสัดส่วนระหว่างความเข้มข้นของหมู่ฟังก์ชันที่เป็นกรดกับอะตอมคาร์บอนในโครงสร้างของถ่านมีน้อยและวิธีการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของเทคนิค FT-IR เป็นวิธีการทดสอบหาหมู่ฟังก์ชันซึ่งเป็นวิธีทางกายภาพที่ไม่สามารถบอกปริมาณของหมู่ฟังก์ชันที่พบได้ ดังนั้นจึงทำการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันที่พบบนพื้นผิวถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยไอ้่น้ำแบบไม่ใช้อากาศโดยใช้เทคนิคการไตเตรทด้วยกรดเบส (Boehm's titration) ซึ่งเป็นวิธีการที่บอกปริมาณหมู่ฟังก์ชันที่พบบนพื้นผิวถ่านกัมมันต์ จากตารางที่ 4.7 พบว่าถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยไอ้่น้ำแบบไม่ใช้อากาศมีปริมาณคาร์บอนิล 0.335 มิลลิโมลต่อลิตร คาร์บอกซิลิก 0.041 มิลลิโมลต่อลิตร ฟีนอลิก 0.013 มิลลิโมลต่อลิตรและแลกโทนิค 0.045 มิลลิโมลต่อลิตร ผลการวิเคราะห์ชนิดและปริมาณหมู่ฟังก์ชันที่พบบนพื้นผิวถ่านกัมมันต์จากเทคนิค Boehm's titration มีความสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันที่ใช้เทคนิค FT-IR คือ ถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยไอ้่น้ำแบบไม่ใช้อากาศมีแถบสเปกตรัมที่ช่วงเลขคลื่นประมาณ 1700-1900 และ 1300-900  $\text{cm}^{-1}$  ซึ่งแสดงถึงหมู่ฟังก์ชันคาร์บอนิล คาร์บอกซิลิก และฟีนอล ในผลการวิเคราะห์ Boehm's titration

**ตารางที่ 4.7** ชนิดและปริมาณหมู่ฟังก์ชันที่พบบนพื้นผิวถ่านกัมมันต์\*

หมู่ฟังก์ชันที่พบบนพื้นผิวถ่านกัมมันต์	(มิลลิโมล/กรัม)
คาร์บอนิล (Carbonyl)	0.335
คาร์บอกซิลิก (Carboxylic )	0.041
ฟีนอลิก (Phenolic )	0.013
แลกโทนิค (Lactonic)	0.049

\*Boehm's titration





ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.7 การสลายตัวทางความร้อนของกะลาแมคาเดเมียที่อัตราการให้ความร้อนต่างๆ

อัตราการให้ความร้อน (K/min)	ช่วงอุณหภูมิในการสลายตัว (K)	อุณหภูมิในการสลายตัวสูงสุด (K)	อัตราการสลายตัวสูงสุด (min <sup>-1</sup> )
5	455.00-710.45	626.75	6.25 x 10 <sup>-4</sup>
10	464.67-790.50	638.83	1.15 x 10 <sup>-2</sup>
20	462.67-805.56	640.18	3.25 x 10 <sup>-2</sup>

#### 4.5.2 การศึกษาจลนพลศาสตร์การสลายตัวทางความร้อนของกะลาแมคาเดเมียโดยใช้แบบจำลอง DAEM (distributed activation energy model, DAEM)

แบบจำลองจลนพลศาสตร์ DAEM เป็นที่รู้จักแพร่หลายและนิยมใช้เพื่อวิเคราะห์กลไกและปฏิกิริยาต่างๆที่เกิดขึ้นจากการสลายตัวทางความร้อนที่ซับซ้อน (complex reactions) เช่น กระบวนการไพโรไลซิสของถ่านหินและชีวมวล, กลไกการเกิดปฏิกิริยาทางความร้อนของถ่านกัมมันต์ เป็นต้น กระบวนการไพโรไลซิสเป็นกระบวนการแปรรูปทางความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาซับซ้อนและผลิตภัณฑ์ที่ได้เป็นผลิตภัณฑ์ที่หลากหลาย เช่น แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ น้ำและสารประกอบไฮโดรคาร์บอน เป็นต้น แบบจำลองจลนพลศาสตร์ DAEM จึงตั้งสมมติฐานไว้ว่าเป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่งแบบขนานหลายปฏิกิริยาซึ่งผันกลับไม่ได้ (irreversible first-order parallel reactions) ที่มี rate parameter ต่างๆกันเกิดขึ้นพร้อมกัน แบบจำลองนี้ใช้วิเคราะห์กระบวนการไพโรไลซิสของถ่านหินและชีวมวลเพื่อหาค่า  $f(E)$  และ  $k_0(E)$  โดยใช้ข้อมูลการทดลองที่มีอัตราการให้ความร้อนแตกต่างกันอย่างน้อย 3 ค่าและสมการที่ประยุกต์ใช้แบบจำลอง DAEM ในกระบวนการไพโรไลซิส สามารถแสดงดังนี้ (Miura และ Maki, 1998, Wang และคณะ, 2008, Sonobe และคณะ, 2008)

$$1 - v/v^* = \int_0^\infty \exp(-k \int_0^t e^{-E/RT} dt) f(E) dE \quad (4.4)$$

เมื่อ  $v$  คือ ปริมาณสารระเหยที่อุณหภูมิใดๆ  $v^*$  คือ ปริมาณรวมทั้งหมดของสารระเหยที่สิ้นสุดในการเกิดปฏิกิริยาการสลายตัวทางความร้อน  $f(E)$  คือ ฟังก์ชันการกระจายตัวของพลังงานกระตุ้น (Distribution function of activation energy)  $k_0$  คือ บัญญัติความถี่ (frequency



factor) ซึ่งขึ้นอยู่กับค่าพลังงานกระตุ้นที่อุณหภูมิต่างๆ และสามารถหาความสัมพันธ์ของค่าพลังงานกระตุ้นกับเวลาได้ดังนี้

$$\phi(E,T) = \exp \int_0^t k_0 e^{-E/RT} dt = \exp(-k_0/a) \int_0^T e^{-E/RT} dT \quad (4.5)$$

$$\phi(E,T) = \exp [(-k_0 RT^2 / aE) e^{-E/RT}] \quad (4.6)$$

$$dV/dT = d(\Delta v) / dt = k_0 e^{-E/RT} (\Delta v^* - \Delta v) \quad (4.7)$$

อินทิเกรตสมการที่ (4.7) โดยค่า  $k_0$  และค่า  $E$  เป็นค่าคงที่ของแต่ละปฏิกิริยาแล้ว เปลี่ยนรูปสมการให้อยู่ในรูปของอัตราการใช้ความร้อน (a) ได้ดังนี้

$$1 - (\Delta v^* - \Delta v) = \exp(-k_0 \int e^{-E/RT} dt) = \exp[(-k_0 RT^2 / aE) e^{-E/RT}] \quad (4.8)$$

สมการที่ (4.8) สามารถจัดรูปใหม่ได้ดังนี้

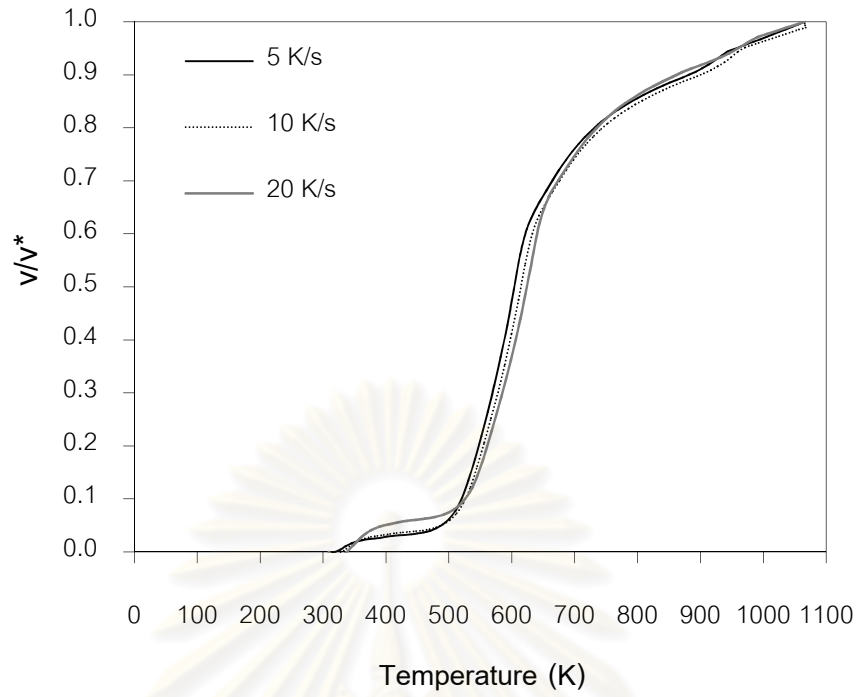
$$\ln[(\Delta v^* - \Delta v) dt] = \ln [k_0 |(\Delta v^* - \Delta v) (1 - (\Delta v^* - \Delta v))|] - E/R(1/T) \quad (4.9)$$

$$\ln(a/T^2) = \ln(k_0 R/E) - \ln |-\ln (1 - (\Delta v^* - \Delta v))| - E/R(1/T) \quad (4.10)$$

สมการที่ (4.10) แทนค่าพจน์  $|-\ln (1 - (\Delta v^* - \Delta v))| = \phi(E,T) = 0.58$  จะได้

$$\ln(a/T^2) = \ln(k_0 R/E) + 0.6075 - E/R(1/T) \quad (4.11)$$

สมการที่ (4.11) สามารถคำนวณหาค่าพารามิเตอร์จลนพลศาสตร์ ค่าพลังงานกระตุ้น (E) และค่าปัจจัยความถี่ ( $k_0$ ) โดยการเขียนกราฟเส้นตรงความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln (a/T^2)$  กับ  $1/T$  ที่อัตราให้ความร้อนต่างกันอย่างน้อย 3 ค่า โดยอัตราให้ความร้อนที่ต่างกันสามารถนำมาประยุกต์ใช้คำนวณหาระดับการเปลี่ยนแปลงของสารระเหย (Conversion level,  $v/v^*$ ) ที่อุณหภูมิต่างๆ เพื่อใช้หาค่าความชันจากกราฟเส้นตรงความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln (a/T^2)$  กับ  $1/T$  ที่ระดับการเปลี่ยนแปลงของสารระเหยต่างๆ ซึ่งใช้คำนวณหาค่าพลังงานกระตุ้น (E) ซึ่งเป็นพจน์  $E/R$  ในสมการที่ (4.11) และสามารถหาค่าปัจจัยความถี่ ( $k_0$ ) ได้จากจุดตัดแกน y ซึ่งเป็นพจน์  $\ln (k_0 R/E)$  ในสมการที่ (4.11)



**ตารางที่ 4.8** ค่าพารามิเตอร์จลนพลศาสตร์ของการสลายตัวทางความร้อนกะลาแมคาเดเมีย

ระดับการเปลี่ยนแปลง สารระเหย (conversion level, v/v*)	ค่าพารามิเตอร์จลนพลศาสตร์ (Kinetic parameter)		ค่าความ คลาดเคลื่อน (R <sup>2</sup> )
	พลังงานกระตุ้น	ปัจจัยความถี่	
	(E, KJ/mol)	(k <sub>0</sub> , s <sup>-1</sup> )	
0.15	256.88	3.39 × 10 <sup>24</sup>	0.995
0.20	260.79	2.18 × 10 <sup>24</sup>	0.985
0.25	240.59	7.78 × 10 <sup>24</sup>	0.998
0.30	233.92	6.72 × 10 <sup>24</sup>	0.998
0.35	225.30	4.50 × 10 <sup>19</sup>	0.998
0.40	218.15	4.81 × 10 <sup>18</sup>	0.998
0.45	212.22	7.41 × 10 <sup>17</sup>	0.999
0.50	205.99	1.20 × 10 <sup>17</sup>	0.998
0.55	215.28	4.48 × 10 <sup>17</sup>	0.990
0.60	240.00	2.87 × 10 <sup>19</sup>	0.982
0.65	303.56	1.46 × 10 <sup>24</sup>	0.862

ตารางที่ 4.8 แสดงค่าพารามิเตอร์จลนพลศาสตร์ของการสลายตัวทางความร้อนกะลาแมคาเดเมีย ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจน อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50 มิลลิลิตรต่อนาทีและอัตราการให้ความร้อน 5 10 และ 20 นาที พบว่าพลังงานการกระตุ้น (E) ของกะลาแมคาเดเมียมีค่าอยู่ในช่วง 205.99 ถึง 303.56 กิโลจูล และมีค่าปัจจัยความถี่ (k<sub>0</sub>) ประมาณ 1.20 × 10<sup>17</sup> ถึง 7.78 × 10<sup>24</sup> ต่อวินาที ซึ่งค่าพลังงานการกระตุ้นของกะลาแมคาเดเมียที่ได้จากแบบจำลองจลนพลศาสตร์ DAEM มีค่ามากกว่าค่าพลังงานการกระตุ้นของซีลี้อย ซึ่ง Wong และคณะได้ทำการศึกษาและหาค่าพารามิเตอร์จลนพลศาสตร์ของซีลี้อยโดยใช้แบบจำลองจลนพลศาสตร์ DAEM ที่อัตราการให้ความร้อน 5 10 15 และ 20 องศาเซลเซียสต่อนาที พบว่าซีลี้อยมีค่าพลังงานการกระตุ้นอยู่ในช่วง 161.9 ถึง 202.3 กิโลจูลต่อกิโลโมล แสดงให้เห็นได้ว่ากะลาแมคาเดเมียน่าจะมีพฤติกรรมการสลายตัวทางความร้อนที่ช่วงอุณหภูมิสูงกว่าซีลี้อยหรือสลายตัวได้ยากและช้ากว่าซีลี้อย เนื่องจากซีลี้อยมีค่าพลังงานการกระตุ้นต่ำ

นอกจากนี้ Sonobe และคณะได้ทำการศึกษาการสลายตัวทางความร้อนของซีวมวล 3 ชนิด ได้แก่ ซัง ข้าวโพด รำข้าวและซีลี้อยู่เพื่อเปรียบเทียบกับ การสลายตัวทางความร้อนของเซลลูโลส โดยใช้แบบจำลองจลนพลศาสตร์ DAEM ที่อัตราการให้ความร้อน 2 5 และ 10 เคลวินต่อนาที พบว่าซีวมวล 3 ชนิดมีค่าพลังงานกระตุ้น 120 ถึง 250 กิโลจูล และพบว่าธาตุของแอลคาไลด์และแอลคาไลด์เอริทีนในซีวมวลมีบทบาทสำคัญต่อการสลายตัวทางความร้อนของซีวมวล นอกเหนือจากองค์ประกอบหลักของซีวมวล (เฮมิเซลลูโลส เซลลูโลสและลิกนิน) แสดงให้เห็นได้ว่าการศึกษาค่าพารามิเตอร์จลนพลศาสตร์โดยใช้แบบจำลองจลนพลศาสตร์ DAEM สามารถคาดคะเนพฤติกรรมการสลายตัวทางความร้อนของกะลาแมคาเดเมียได้และยังใช้อธิบายกลไกและตัวแปรต่างๆ ที่เกิดขึ้นในกระบวนการสลายตัวทางความร้อนได้ โดยพิจารณาจากค่าพลังงานการกระตุ้นซึ่งเป็นค่าพารามิเตอร์ที่ใช้บ่งชี้พฤติกรรมการสลายตัวทางความร้อนของซีวมวล จากค่าพลังงานการกระตุ้นและค่าปัจจัยความถี่ของกะลาแมคาเดเมียแสดงให้เห็นได้ว่า กะลาแมคาเดเมียมีความไวในการสลายตัว (Reactivity) ต่ำ เนื่องจากกะลาแมคาเดเมียมีค่าพลังงานการกระตุ้นและค่าปัจจัยความถี่สูง



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

##### 5.1.1 การคาร์บอนในซ์กะลาแมคาเดเมีย

เวลาและอุณหภูมิในการคาร์บอนในซ์มีผลต่อสมบัติเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณของถ่านซาร์กะลาแมคาเดเมียที่คาร์บอนในซ์ภายในเตาเผาให้ความร้อนสูง การเพิ่มเวลาในการคาร์บอนในซ์สามารถเพิ่มสัดส่วนคาร์บอนในถ่านซาร์ได้ แต่อย่างไรก็ตามการเพิ่มเวลาในการคาร์บอนในซ์จะไม่ค่อยมีผลต่อร้อยละคาร์บอนคงตัวในถ่านซาร์ เมื่ออุณหภูมิในการคาร์บอนในซ์สูงกว่าช่วงอุณหภูมิในการสลายตัวสมบูรณ์ของเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสในกะลาแมคาเดเมีย ภาวะที่เหมาะสมของขั้นตอนคาร์บอนในซ์ขั้น คือ อุณหภูมิในการคาร์บอนในซ์ 500 องศาเซลเซียส เวลาในการคาร์บอนในซ์ 60 นาที ถ่านซาร์มีร้อยละผลได้ของถ่านซาร์ 34.97 ร้อยละคาร์บอนคงตัว 68.26 ร้อยละสารระเหย 24.16 และร้อยละซีเถ้า 7.58 ถ่านซาร์กะลาแมคาเดเมียที่เกิดขึ้นจัดเป็นเชื้อเพลิงแข็งที่มีคุณภาพดี โดยมีความหนาแน่นเชิงปริมาตร 0.572 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม และมีค่าความร้อนสูงประมาณ 9.418 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม ซึ่งค่าความร้อนของถ่านซาร์ที่ได้มีค่าสูงกว่าค่ามาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (ค่าความร้อนของถ่านที่ใช้เป็นเชื้อเพลิงแข็งต้องไม่น้อยกว่า 5,000 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม) นอกจากนี้พบว่ากะลาแมคาเดเมียเป็นวัสดุที่มีศักยภาพในการแปรรูปชีวมวลทางความร้อน เนื่องจากกะลาแมคาเดเมียเป็นชีวมวลที่มีปริมาณซิลเฟอร์ต่ำ มีความหนาแน่นและมีค่าความร้อนสูง

##### 5.1.2 การกระตุ้นถ่านซาร์กะลาแมคาเดเมีย

เวลาและอุณหภูมิในการกระตุ้นมีผลต่อความสามารถในการดูดซับไอโอดีนและเมทิลีนบลูของถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยไอน้ำแบบไม่ใช้และใช้อากาศ ภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยไอน้ำแบบใช้อากาศ อัตราการป้อนเข้าของน้ำ 3 มิลลิลิตรต่อนาที อัตราการไหลของอากาศ 100 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาทีและอัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียส คือ อุณหภูมิในการกระตุ้น 750 องศาเซลเซียส เวลาในการกระตุ้น 90 นาที และขนาดอนุภาคถ่านซาร์ 2.36 ถึง 4.75 มิลลิเมตร ถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยไอน้ำแบบใช้อากาศมีร้อยละ

ผลได้ 31.28 ค่าการดูดซับไอโอดีน 755.50 มิลลิกรัมต่อกรัม ค่าการดูดซับเมทิลีนบลู 270.68 มิลลิกรัมต่อกรัมและมีค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตร 0.399 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร สำหรับภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยไอน้ำแบบไม่ใช้อากาศ อัตราการป้อนเข้าของน้ำ 3 มิลลิลิตรต่อนาทีและอัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียส คือ อุณหภูมิในการกระตุ้น 800 องศาเซลเซียส เวลาในการกระตุ้น 60 นาที และขนาดอนุภาคถ่านชาร์ 2.36 ถึง 4.75 มิลลิเมตร ถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยไอน้ำแบบไม่ใช้อากาศมีร้อยละผลได้ 33.23 ค่าการดูดซับไอโอดีน 728.00 มิลลิกรัมต่อกรัม ค่าการดูดซับเมทิลีนบลู 245.49 มิลลิกรัมต่อกรัมและมีค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตร 0.402 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร เมื่อทำการเปรียบเทียบสมบัติทางกายภาพและความสามารถในการดูดซับของถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยไอน้ำแบบใช้อากาศและไม่ใช้อากาศ สามารถสรุปได้ว่าการกระตุ้นด้วยไอน้ำแบบใช้อากาศ หรือการใช้อากาศร่วมกับไอน้ำในการกระตุ้นถ่านกัมมันต์จากถ่านชาร์กะลาแมคาเดเมียสามารถพัฒนาสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของถ่านกัมมันต์โดยใช้อุณหภูมิในการกระตุ้นที่ต่ำกว่าการกระตุ้นด้วยไอน้ำแบบไม่ใช้อากาศ นอกจากนี้การกระตุ้นด้วยไอน้ำแบบใช้อากาศสามารถพัฒนาโครงสร้างทางเคมีบนพื้นผิวรูพรุนของถ่านกัมมันต์จากถ่านชาร์กะลาแมคาเดเมีย โดยการเพิ่มหมู่ฟังก์ชันที่มีความเป็นกรดบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ ทำให้ค่าความเป็นกรดเบสที่พื้นผิวประจุเป็นศูนย์ ( $pH_{IEP}$ ) เท่ากับ 3.0 ถึง 3.7 ปริมาณและหมู่ฟังก์ชันชนิดกรดที่พบบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ ได้แก่ หมู่คาร์บอกซิล 0.335 มิลลิโมลต่อลิตร หมู่คาร์บอกซิลิก 0.041 มิลลิโมลต่อลิตร หมู่ฟีนอลิก 0.013 มิลลิโมลต่อลิตรและหมู่แลกโทนิค 0.045 มิลลิโมลต่อลิตร นอกจากนี้พบว่าถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกะลาแมคาเดเมียด้วยวิธีการกระตุ้นทางกายภาพที่ใช้ไอน้ำเป็นแก๊สออกซิโดซ์ทั้งแบบใช้และไม่ใช้อากาศมีค่าการดูดซับไอโอดีนมากกว่าค่ามาตรฐานอุตสาหกรรม (มากกว่า 600 มิลลิกรัมต่อกรัม) และถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จากกะลาแมคาเดเมียมีพื้นที่ผิว ( $S_{BET}$ ) 476.7 ถึง 1022 ตารางเมตรต่อกรัม แสดงให้เห็นว่ากะลาแมคาเดเมียเป็นวัตถุดิบที่มีศักยภาพและมีความเป็นไปได้ในการเป็นแหล่งวัตถุดิบในการผลิตถ่านกัมมันต์ที่มีคุณภาพ นอกจากนี้พบว่าถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกะลาแมคาเดเมียโดยการกระตุ้นด้วยไอน้ำแบบใช้อากาศสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการดูดซับโลหะ (metal removal) ได้ เนื่องจากถ่านกัมมันต์จากกะลาแมคาเดเมียโดยการกระตุ้นด้วยไอน้ำแบบใช้อากาศที่เตรียมได้มีสมบัติทางกายภาพที่เหมาะสมและมีค่าความเป็นกรดเบสที่พื้นผิวประจุเป็นศูนย์ ( $pH_{IEP}$ ) ที่น้อยกว่า 7 เป็นผลให้พื้นผิวของถ่านกัมมันต์มีความเป็นประจุลบมากซึ่งสามารถดูดซับโลหะได้ดี เมื่อกระจายตัวอยู่ในสารละลาย

### 5.1.3 การศึกษาจลนพลศาสตร์การสลายตัวทางความร้อนของกะลาแมคาเดเมีย

กะลาแมคาเดเมียมีการสลายตัวทางความร้อน ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจน อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50 มิลลิลิตรต่อนาที ที่อัตราการให้ความร้อน 5 10 20 เคลวินต่อนาทีที่มีอัตราการสลายตัวสูงสุดเท่ากับ  $6.25 \times 10^{-4}$   $1.15 \times 10^{-2}$  และ  $3.25 \times 10^{-2}$  ต่อนาที ตามลำดับ โดยมีช่วงอุณหภูมิในการสลายตัวประมาณ 455.00 ถึง 805.56 เคลวิน (ประมาณ 180 ถึง 532 องศาเซลเซียส) และมีค่าน้ำหนักที่เหลือประมาณร้อยละ 23.5 ถึง 26.2 ซึ่งสามารถสรุปได้ว่ากะลาแมคาเดเมียมีความว่องไว (Reactivity) ในการสลายตัวต่ำ ซึ่งสอดคล้องกับข้อมูลจากกราฟ TG ปริมาณร้อยละน้ำหนักที่เหลือของกะลาแมคาเดเมียมีปริมาณมากและผลที่ได้สอดคล้องกับข้อมูลที่ได้จากแบบจำลองจลนพลศาสตร์ DAEM ค่าพลังงานการกระตุ้นของกะลาแมคาเดเมียเท่ากับ 205.99 ถึง 303.56 กิโลจูล และมีค่าปัจจัยความถี่ ( $k_0$ ) ประมาณ  $1.20 \times 10^{17}$  ถึง  $7.78 \times 10^{24}$  ต่อวินาที เพราะค่าพลังงานการกระตุ้นของกะลาแมคาเดเมียที่ได้มีค่าสูง แสดงว่าเกิดการสลายตัวทางความร้อนยาก เป็นผลให้ร้อยละน้ำหนักที่เหลือของกะลาแมคาเดเมียมีมาก

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ศึกษาการสลายตัวทางความร้อนของชีวมวลและวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรอื่นๆ ที่มีศักยภาพในการนำมาใช้เป็นแหล่งพลังงานชีวมวล โดยใช้แบบจำลองจลนพลศาสตร์ DAEM เพื่อทำการเปรียบเทียบและดูแนวโน้มของค่าพารามิเตอร์จลนพลศาสตร์ที่ได้และนำค่าพารามิเตอร์จลนพลศาสตร์ที่ได้มาประยุกต์ใช้เพื่อพัฒนาการออกแบบเตาเผาและเครื่องปฏิกรณ์ทางความร้อนให้มีความเหมาะสมกับการใช้งานและชนิดของชีวมวลที่เลือกใช้
2. ศึกษาและพิจารณาผลขององค์ประกอบหลัก เช่น เฮมิเซลลูโลส เซลลูโลสและลิกนินของชีวมวลที่ใช้ในการผลิตถ่านชาร์และถ่านกัมมันต์ต่อสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของถ่านชาร์และถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้ เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานในการพัฒนากระบวนการผลิตถ่านชาร์และถ่านกัมมันต์ในระดับอุตสาหกรรม
3. ศึกษาองค์ประกอบ ของแก๊สและของเหลวที่ได้จากขั้นตอนคาร์บอนในเซชัน เช่น น้ำส้มควันไม้ เพื่อนำผลิตภัณฑ์ที่ได้ดังกล่าวมาใช้ประโยชน์เพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุด
4. นำวิธีการเตรียมถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยไอน้ำแบบใช้อากาศไปประยุกต์ใช้กับชีวมวลอื่นๆ เพื่อใช้พัฒนากระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์ให้มีต้นทุนต่ำ
5. ศึกษาผลขององค์ประกอบในเตาต่อการสลายตัวทางความร้อนของชีวมวล





- Bacaoui, A., et al. Optimization of conditions for the preparations of activated carbons from olive-waste cakes. Carbon 39(2001): 425–32.
- Bahng, M-K., Mukarakate, C., Robichaud, D.J., and Nimlos, M.R. Current technologies for analysis of biomass thermochemical processing: A review. Analytica Chimica Acta 651 (2009): 117–138
- Balat, M. Mechanisms of Thermochemical Biomass Conversion Processes. Part 1: Reactions of Pyrolysis. Energy Sources 30 (2008): 620-635.
- Brennan, J.K., Bandosz, T.J., Thomson, K.T., and Gubbins, K.E. Water in porous carbons. Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects 187–188 (2001): 539–568
- Bouchelta, C., Mohamed S.M., Bertrand, O., and Bellat, JP. Preparation and characterization of activated carbon from date stones by physical activation with steam. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis 82 (2008): 70–77.
- Carrott, P.J.M., Suhas, Carrott, M.M.L. Ribeiro, Guerrero, C.I., and Delgado, L.A. Reactivity and porosity development during pyrolysis and physical activation in CO<sub>2</sub> or steam of kraft and hydrolytic lignins. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis 82 (2008): 264–271.
- Demirbas, A. Biorefineries: Current activities and future developments. Energy Conversion and Management 50 (2009): 2782-2801.
- Di Blasi, C. Modeling chemical and physical processes of wood and biomass pyrolysis Progress in Energy and Combustion Science 34 (2008): 47–90.
- Girgis, BS., Yunis, SS., and Soliman, AM. Characteristics of activated carbon from peanut hulls in relation to conditions of preparation. Mater Lett 57(2002): 164–72.
- Girio, F.M., Fonseca, C., Carvalheiro, F., Duarte, L.C. Marques, S., and Bogel-Lukasik, R. Hemicelluloses for fuel ethanol: A review. Bioresource Technology 101 (2010): 4775–4800
- Goyal, H.B., Diptendu Seal and Saxena, R.C. Bio-fuels from thermochemical conversion of renewable resources: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews 12 (2008): 504–517.

- Ioannidou, O., and Zabaniotou, A. Agricultural residues as precursors for activated carbon production-a review. Renewable Sustainable Energy Reviews 11 (2007) 1966-2005.
- Ismadji, S., Sudaryanto, Y., Hartono, S.B., Setiawan, L.E.K., and Ayucitra, A. Activated carbon from char obtained from vacuum pyrolysis of teak sawdust: pore structure development and characterization. Bioresource Technology 96 (2005): 1364–1369
- Henning, K.D. and Schlifer, S. Impregnated activated carbon for environmental protection. Gas Separation & Purification 7(1993): 235-240.
- Kawamoto, H., Morisaki, H., and Saka, S. Secondary decomposition of levoglucosan in pyrolysis production from cellulosic biomass. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis 85 (2009): 247-251.
- Li, W., et al. Effects of carbonization temperatures on characteristics of porosity in coconut shell chars and activated carbons derives from carbonized coconut shell chars. Industrial crops and products 28(2008): 190–198.
- Liu, Q.S., Zheng,T., Wang, P., and Guo,L. Preparation and characterization of activated carbon from bamboo by microwave-induced phosphoric acid activation. Industrial Crops and Products 31 (2010) 233–238
- Martinez, M.L., Torres, M.M., Guzman, C.A., and Maestri, D.M. Preparation and characteristics of activated carbon from olive stones and walnut shells. Industrial Crops and Products 23 (2006) 23–28.
- Mohan, D., Pittman, C.U., and Steele, P.H. Pyrolysis of wood/biomass for bio-oil a critical review. Energy and fuel 20 (2006): 848-889.
- Mohan, D., and Pittman, C.U. Activated carbons and low cost adsorbents for remediation of tri- and hexavalent chromium from waste. Journal of Hazardous Materials B137 (2006): 762–811.
- Savova, D., et al. Biomass conversion to carbon adsorbents and gas. Biomass Bioenergy 21(2001):133–42.
- Song, X., Liu, H., Cheng, L., and Qu, Y. Surface modification of coconut-based activated carbon by liquid-phase oxidation and its effects on lead ion adsorption. Desalination 255 (2010): 78-83.

- Sud, D., Mahajan, G., and Kaur, M.P. Agricultural waste material as potential adsorbent for sequestering heavy metal ions from aqueous solutions – A review. Bioresource Technology 99 (2008): 6017–6027.
- Sun, K., and Jiang, J.C. Preparation and characterization of activated carbon from rubber-seed shell by physical activation with steam. Biomass and Bioenergy 34 (2010): 539-544.
- Shen, D.K., Gu, S., and Bridgwater, A.V. The thermal performance of the polysaccharides extracted from hardwood: Cellulose and hemicellulose. Carbohydrate Polymers 82 (2010): 39-45.
- Tsai, WT., Chang, CY., and Lee, SL. A low cost adsorbent from agricultural waste corn cob by zinc chloride activation. Bioresource Technology 64(1998) 211–217.
- Yang, H., Yan, R., Chen, H., Lee, D. H., and Zheng, C. Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis. Fuel 86 (2007): 1781-1788.
- Yang, K., et al. Preparation of high surface area activated carbon from coconut shells using microwave heating. Bioresource Technology 101(2010): 6163-6169.
- Yin, C.Y., Aroua, M.K., and Daud, W.M.A.W. Review of modifications of activated carbon for enhancing contaminant uptakes from aqueous solutions. Separation and Purification Technology 52(2007): 403–415.
- Suzuki, R.M., Andrade, A.D., Sousa, J.C., and Rollemberg, M.C. Preparation and characterization of activated carbon from rice bran. Bioresource Technology 98 (2007): 1985–1991



ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ก

### วิธีวิเคราะห์คุณสมบัติเบื้องต้นของกะลาแมคาเมีย

#### 1. การวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate Analysis): ASTM D3172

##### 1.1 ความชื้น (Moisture): ASTM D3173

###### 1.1.1 วิธีการทดลอง

1. อบถาดอลูมิเนียมพร้อมฝาในเตาอบ (Drying oven) 104 - 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นนำเข้าเดสิเคเตอร์ (Desicator) ที่ตั้งไว้ประมาณ 15 นาที นำไปชั่งแล้วบันทึกน้ำหนัก
2. ชั่งตัวอย่างประมาณ 1 กรัม ลงในถาดอลูมิเนียมพร้อมฝาที่ทราบน้ำหนักแล้วบันทึกน้ำหนักตัวอย่าง
3. นำไปเข้าเตาอบที่อุณหภูมิ 104 - 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลาประมาณ 1 ชั่วโมงหรือจนน้ำหนักตัวอย่างคงที่
4. นำถาดอลูมิเนียมออกมาตั้งไว้ให้เย็นลง แล้วนำเข้าเดสิเคเตอร์ประมาณ 15 นาที แล้วชั่งถาดอลูมิเนียมพร้อมฝาที่มีตัวอย่างอบแล้วอยู่ภายในบันทึกผล

###### 1.1.2 สูตรที่ใช้ในการคำนวณ

$$M = 100 \times (W_1 - W_2) / W$$

เมื่อ M = ร้อยละของความชื้น

$W_1$  = น้ำหนักของถาดอะลูมิเนียมพร้อมฝารวมกับน้ำหนักตัวอย่างเริ่มต้นก่อนอบ (กรัม)

$W_2$  = น้ำหนักของถาดอะลูมิเนียมพร้อมฝารวมกับน้ำหนักตัวอย่างเริ่มต้นหลังอบ (กรัม)

W = น้ำหนักของตัวอย่าง (กรัม)

## 1.2 เถ้า (Ash): ASTM D3174

### 1.2.1 วิธีการทดลอง

1. เผาครุชชีเบลพร้อมฝาในเตาเผาให้ความร้อนสูง (Muffle Furnace) ที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง นำออกมาทำให้เย็นในเดสิเคเตอร์ ชั่งน้ำหนักครุชชีเบล (crucible) พร้อมฝา
2. ชั่งน้ำหนักตัวอย่างใส่ครุชชีเบลประมาณ 1 กรัม
3. นำไปเผาบนตะเกียงเบนเซนจนควันระเหยหมด
4. ใส่ครุชชีเบลพร้อมฝาในเตาเผาที่อุณหภูมิประมาณ 750 องศาเซลเซียส เป็นเวลาประมาณ 2 ชั่วโมง หรือจนน้ำหนักคงที่
5. นำครุชชีเบลออกจากเตาเผาวางทิ้งไว้ให้เย็น แล้วนำไปใส่ในเดสิเคเตอร์ แล้วชั่งน้ำหนักพร้อมบันทึกผล

### 1.2.2 สูตรที่ใช้ในการคำนวณ

$$A = 100 \times (W_3 - W_4) / W$$

เมื่อ

A = ร้อยละของเถ้า

$W_3$  = น้ำหนักของครุชชีเบลพร้อมฝาที่มีเถ้า (กรัม)

$W_4$  = น้ำหนักของครุชชีเบลพร้อมฝา (กรัม)

W = น้ำหนักของตัวอย่าง (กรัม)

## 1.3 ปริมาณสารระเหย (Volatile matter): ASTM D3175

### 1.3.1 วิธีการทดลอง

1. เผาครุชชีเบลพร้อมฝาในเตาเผาให้ความร้อนสูง ที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที นำออกจากเตาเผา ทำให้เย็นในเดสิเคเตอร์ แล้วชั่งน้ำหนักครุชชีเบลพร้อมฝา บันทึกผล
2. ชั่งตัวอย่างใส่ในครุชชีเบลประมาณ 1 กรัม แล้วปิดฝาให้เรียบร้อย
3. นำไปให้ความร้อนโดยอยู่ในท่อปากเตาเผา (Tube furnace) ที่อุณหภูมิประมาณ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 นาที

4. หย่อนครุฑิเบิลให้อยู่บริเวณปากเตา ที่อุณหภูมิประมาณ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 นาที
5. หย่อนครุฑิเบิลให้อยู่กึ่งกลางเตา ที่อุณหภูมิประมาณ 950 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 นาที
6. นำครุฑิเบิลออกมาทิ้งไว้ให้เย็น แล้วนำไปใส่ในเดสิเคเตอร์ประมาณ 15 นาที นำไปชั่งและบันทึกผล

### 1.3.2 สูตรที่ใช้ในการคำนวณ

$$VM = [100 \times (W_5 - W_6) / W] - M$$

เมื่อ

VM = ร้อยละของสารระเหย

$W_5$  = น้ำหนักของครุฑิเบิลพร้อมฝา รวมกับน้ำหนักตัวอย่างก่อนเผา (กรัม)

$W_6$  = น้ำหนักของครุฑิเบิลพร้อมฝา รวมกับน้ำหนักตัวอย่างหลังเผา (กรัม)

W = น้ำหนักของตัวอย่าง (กรัม)

M = ร้อยละของความชื้น

### 1.4 ปริมาณคาร์บอนคงตัว (Fixed Carbon)

$$\text{ร้อยละของคาร์บอนคงตัว} = 100 - M - A - VM$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ข

### วิธีวิเคราะห์การดูดซับของถ่านกัมมันต์

การวิเคราะห์ความสามารถในการดูดซับไอโอดีน ซึ่งสมมุติว่าเป็นสารพิษในน้ำ ตามวิธี ASTM D 4607-86 มีรายละเอียดของการวิเคราะห์ดังต่อไปนี้

#### 1.1 สารเคมีที่ใช้

- สารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก เตรียมโดยตวงกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นจำนวน 70 มิลลิลิตร เทใส่น้ำกลั่นที่มีปริมาตร 550 มิลลิลิตร
- น้ำแป้งเข้มข้นร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก เตรียมโดยชั่งแป้ง 1 กรัม ละลายด้วยน้ำร้อนจนมีน้ำหนักเป็น 10 กรัม น้ำแป้งที่เตรียมได้จะใช้ภายในวันที่เตรียมเท่านั้น
- สารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟตเข้มข้น  $0.100 \pm 0.001$  นอร์มัล เตรียมโดยละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ) 24.820 กรัมในน้ำ 75 มิลลิลิตร เติมโดยโซเดียมคาร์บอเนต ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) 0.1 กรัม และเติมน้ำกลั่นให้มีปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร ด้วยขวดวัดปริมาตร
- สารละลายไอโอดีนเข้มข้น  $0.100 \pm 0.001$  นอร์มัล เตรียมโดยละลายไอโอดีน 12.700 กรัมและโปแตสเซียมไอโอไดด์ (KI) 19.10 กรัมด้วยน้ำ 50 มิลลิลิตร ตั้งทิ้งไว้ 4 ชั่วโมงจนผลึกไอโอดีนละลายหมด แล้วจึงเติมน้ำกลั่นให้มีปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร ด้วยขวดวัดปริมาตร
- สารละลายโปแตสเซียมไอโอเดตเข้มข้น 0.100 นอร์มัล เตรียมโดยอบโปแตสเซียมไอโอเดตที่ 110 องศาเซลเซียส นาน 2 ชั่วโมง ทำให้เย็นในหม้อดูดความชื้น แล้วชั่งมา 3.5667 กรัม ละลายด้วยน้ำกลั่น 1,000 มิลลิลิตร

#### 1.2 กรรมวิธีเทียบมาตรฐานสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต

- ปิเปตสารละลายโปแตสเซียมไอโอเดต 25 มิลลิลิตรใส่ลงในขวดรูปชมพูนขนาด 250 มิลลิลิตร เติมโปแตสเซียมไอโอไดด์ (KI) 2 กรัม เขย่าให้ละลาย เติมกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นปริมาณ 5 มิลลิลิตร
- ไตเตรตด้วยสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต โดยใช้แป้งเป็นอินดิเคเตอร์ จุดยุติ คือ จุดที่สารละลายไม่มีสี



คำนวณความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟตจาก

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

- เมื่อ  $N_1$  = ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต (นอร์มัล)  
 $P$  = ปริมาตรของสารละลายไปแตสเซียมไอโอเดต (มิลลิลิตร)  
 $R$  = ความเข้มข้นของสารละลายไปแตสเซียมไอโอเดต (นอร์มัล)  
 $S$  = ปริมาตรของสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟตที่ใช้ไตเตรต (มิลลิลิตร)

### 1.3 กรรมวิธีเทียบมาตรฐานของสารละลายไอโอดีน

- ปิเปตสารละลายไอโอดีน 25 มิลลิลิตรใส่ในขวดชมพูขนาด 250 มิลลิลิตร ไตเตรตด้วยสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต โดยใช้น้ำแบ่งเป็นอินดิเคเตอร์ จุดยุติ คือ จุดที่สารละลายไม่มีสี

คำนวณความเข้มข้นของสารละลายไอโอดีนได้จาก

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

- เมื่อ  $N_2$  = ความเข้มข้นของสารละลายไอโอดีน (นอร์มัล)  
 $P$  = ปริมาตรของสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต (มิลลิลิตร)  
 $R$  = ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต (นอร์มัล)  
 $S$  = ปริมาตรของสารละลายไอโอดีนที่ใช้ไตเตรต (มิลลิลิตร)

### 1.4 กรรมวิธีวิเคราะห์

- บดและคัดขนาดตัวอย่างให้ละเอียดโดยมีขนาดน้อยกว่า 250  $\mu\text{m}$  (No. 60) แล้วนำมาอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 110 - 120 องศาเซลเซียส นาน 2 ชั่วโมง ตั้งทิ้งไว้ให้เย็นในหม้อดูดความชื้น
- ชั่งและบันทึกน้ำหนักตัวอย่างเท่ากับ  $M$  ให้ละเอียดถึงทศนิยมตำแหน่งที่ 4 (คือมีความละเอียด 0.1 มิลลิกรัม) ในขวดชมพูขนาด 250 มิลลิลิตร ซึ่งมีจุกปิด

**หมายเหตุ** ต้องชั่งน้ำหนักตัวอย่าง 2 ค่าต่อตัวอย่าง เพื่อให้ได้ค่า  $C$  มีค่าน้อยกว่า เท่ากับและมากกว่า 0.02 น้ำหนักประมาณของตัวอย่าง

- ใส่สารละลายกรดไฮโดรคลอริกจำนวน 10 มิลลิลิตร (ตวงด้วยปิเปตขนาด 10 มิลลิลิตร ต้มให้เดือดประมาณ 10 วินาที แกว่งขวดเบาๆ เพื่อให้ผงถ่านกัมมันต์ทุกส่วนชุ่มด้วยสารละลาย เพื่อกำจัดเถ้าหรือซัลเฟตออกจากผิวของถ่านกัมมันต์
- ใส่สารละลายไอโอดีน 100 มิลลิลิตรปิดจุกแล้วเขย่าแรงๆเป็นเวลา 30 วินาที
- กรองด้วยกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42 ที่ใส่สารละลายที่กรองได้ 20 มิลลิลิตรแรก
- ดูดสารละลายที่กรองได้ 50 มิลลิลิตรด้วยปิเปต
- ไตเตรตด้วยสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต 0.1 นอร์มัล โดยใช้น้ำแบ่งเป็นอินดิเคเตอร์ จุดยุติ คือ จุดที่สารละลายไม่มีสี บันทึกปริมาตรของสารละลายไทโอซัลเฟตที่ใช้เป็น มิลลิลิตร (S)

คำนวณค่าการดูดซับจำเพาะ (X/M) และความเข้มข้นที่สมดุลของสารละลายไอโอดีน (C) ได้จาก

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

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

เมื่อ  $X/M$  = มิลลิลิตรของไอโอดีนที่ถูกดูดซับต่อกรัมของถ่านที่ใช้ดูดซับ

$N_1$  = ความเข้มข้นของสารละลายไอโอดีน

$N_2$  = ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต

$$A = N_1 \times 1269.30$$

$$B = N_2 \times 12.693$$

C = ความเข้มข้นของสารละลายที่กรองได้

W = น้ำหนักของตัวอย่างที่ใช้

S = ปริมาตรของสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟตที่ใช้

- นำค่า X/M ที่ได้ทั้งสามค่ามาสร้างกราฟระหว่างแกนราบ คือ log C และแกนตั้งฉาก คือ log X/M ซึ่งจะได้ความสัมพันธ์เป็นเส้นตรง
- จากเส้นความสัมพันธ์ที่ตำแหน่ง C = 0.02 หรือ log C = -1.639 จะทราบค่าบนแกนตั้งฉากสมมุติเท่ากับ Y นำค่าที่ได้มาคำนวณหาค่า IA ดังนี้

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

ตารางที่ ข.1 น้ำหนักประมาณของตัวอย่างที่ใช้วิเคราะห์ไฮโดรคาร์บอนตาม ASTM D 4607-86

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

## ภาคผนวก ค

### วิธีวิเคราะห์ค่าการดูดซับเมทิลีนบลูของถ่านกัมมันต์

วิเคราะห์ความสามารถในการดูดซับสีน้ำเงินในน้ำตามวิธี JIS 1474-1991 มีรายละเอียดการวิเคราะห์ดังต่อไปนี้

#### 1. เครื่องมือที่ใช้

1. เครื่องเขย่าตามแนวราบ
2. เครื่องวัดการดูดกลืนแสงยูวี
3. เครื่องเซนติฟิวจ์

#### 2. วิธีเตรียมสารละลาย

##### 2.1 การเตรียมสารละลายบัฟเฟอร์ (Buffer solution)

- อบโปแตสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต ( $\text{KH}_2\text{PO}_4$ ) ให้แห้งที่อุณหภูมิ 110 - 120 องศาเซลเซียส นาน 2 ชั่วโมง และทิ้งให้เย็นในหม้อดูดความชื้นนาน 20 นาที
- ชั่งมา 9.0 กรัม แล้วละลายด้วยน้ำกลั่นให้มีปริมาตรรวมเป็น 1,000 มิลลิลิตร ด้วยขวดวัดปริมาตร สารละลายที่ได้นี้ คือ A
- อบโซเดียมโมโนฟอสเฟต ( $\text{Na}_2\text{HPO}_4$ ) ให้แห้งที่อุณหภูมิ 110 - 120 องศาเซลเซียส นาน 2 ชั่วโมง และทิ้งให้เย็นในหม้อดูดความชื้นนาน 20 นาที
- ชั่งมา 23.88 กรัม แล้วละลายด้วยน้ำกลั่นให้มีปริมาตรรวมเป็น 1,000 มิลลิลิตร ด้วยขวดวัดปริมาตร สารละลายที่ได้นี้ คือ B
- นำสารละลาย A จำนวน 400 มิลลิลิตรผสมกับสารละลาย B จำนวน 600 มิลลิลิตร กวนให้เข้ากัน จะได้สารละลายบัฟเฟอร์ที่มีค่าความเป็นกรดต่างเท่ากับ 7

##### 2.2 สารละลายเมทิลีนบลู

###### 2.2.1 การเตรียมสารละลายเมทิลีนบลู

อบสารเมทิลีนบลูให้แห้งที่อุณหภูมิ 110 - 120 องศาเซลเซียส นาน 2 ชั่วโมง และทิ้งให้เย็นในหม้อดูดความชื้นนาน 20 นาที ชั่งมา 1.2060 กรัม (สมมุติว่ามีความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.5) ละลายด้วยสารละลายบัฟเฟอร์ในข้อ 1. จนมีปริมาตรเป็น 4,000 มิลลิลิตร



- ใส่สารละลายเมทธิลีนบลู 50 มิลลิลิตร ปิดจุกแล้วเขย่าแรงๆ 10 วินาที สังเกตดูว่าสีของสารละลายเจือจางหรือไม่ ถ้าเจือจางให้ใส่สารละลายเมทธิลีนบลูลงไปอีกครึ่งละ 50 มิลลิลิตร
- เมื่อสีของสารละลายไม่เจือจาง ให้ใส่สารละลายเพิ่มอีก 50 มิลลิลิตร เพื่อให้ความเข้มข้นของสารละลายที่จุดสมดุลของการดูดซับเท่ากับ 0.3 มก./ก. แล้วนำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าด้วยความเร็ว 2,500 รอบต่อนาที นาน 30 นาที
- เทสารละลายส่วนบนลงในหลอดเซนติพิวจ์ แล้วนำไปเซนติพิวจ์ด้วยความเร็ว 3,000 รอบต่อนาที นาน 10 นาที
- ดูดสารละลายส่วนบนมา 0.5 มิลลิลิตร เจือจางด้วยน้ำกลั่นจนมีปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตร (ค่าคงที่ของการเจือจาง,  $C = 100/0.5 = 200$ ) ถ้าวัดการดูดกลืนแสงยูวีแล้วอยู่นอกช่วงของกราฟมาตรฐาน ให้เพิ่มปริมาตรหลังการเจือจาง เช่นเจือจางเป็น 200 มิลลิลิตร ( $C = 400$ ) เป็นต้น
- วัดค่าการดูดกลืนแสงที่มีความยาวคลื่น 663 นาโนเมตร

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

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

เมื่อ A = ปริมาตรของสารละลายเมทธิลีนบลูที่ใช้ตอนเริ่มต้น (มิลลิลิตร)

B = ค่าการดูดกลืนแสง

C = ค่าคงที่ของการเจือจาง = 200 (หรือ 400)

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ง

### วิธีวิเคราะห์ค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตรของถ่านกัมมันต์

วิเคราะห์ความหนาแน่นเชิงปริมาตรของถ่านกัมมันต์ (Bulk density, BD) ตามวิธี ASTM D 2854-89 รายละเอียดการวิเคราะห์มีดังนี้

- อบตัวอย่างให้แห้งที่อุณหภูมิ 110 -120 องศาเซลเซียส ตั้งทิ้งไว้ให้เย็นในหม้อดูดความชื้น
- ชั่งกระบอกตวงที่มีความจุ 10 มิลลิลิตร ให้มีความละเอียดถึงทศนิยมตำแหน่งที่ 2 (คือมีความผิดพลาดน้อยกว่า 0.01 กรัม บันทึกผล ( $X_0$ ))
- ใส่ตัวอย่างลงไปจนกระบอกตวงจนเกือบเต็ม กระแทกกันกระบอกตวงบนแผ่นยางจนกระทั่งระดับของตัวอย่างในกระบอกตวงคงที่
- ถ้าระดับที่คงที่นั้นไม่เท่ากับ 10 มิลลิลิตร ให้ตักตัวอย่างเข้าหรือออกจากกระบอกตวง แล้วกระแทกกันกระบอกตวงใหม่ จนกว่าจะได้ระดับที่คงที่เป็น 10 มิลลิลิตร
- ชั่งน้ำหนักตัวอย่างพร้อมกระบอกตวง บันทึกผล ( $X_1$ )

คำนวณค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตรได้จากสมการ

$$BD (g/cm^3) = (X_1 - X_0)/10$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวอลิสรา นิติวัดมนะ เกิดเมื่อวันที่ 13 ธันวาคม 2527 ที่กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเคมีวิศวกรรม ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2548 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิตสาขาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อ พ.ศ.2551



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย