

ผลของอุณหภูมิคาร์บอนในเซชันต่อสมบัติของถ่านชาร์และถ่านกัมมันต์  
จากกะลามะพร้าว



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี  
ปีการศึกษา 2556

**EFFECTS OF CARBONIZATION TEMPERATURE ON  
PROPERTIES OF CHARS AND ACTIVATED CARBON  
FROM COCONUT SHELL**



**Juejun Katesa**

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

**Suranaree University of Technology**

**Academic Year 2013**

ผลของอนุภูมิภาคบ่อในเขชันต่อสมบัติของถ่านชาร์และถ่านกัมมันต์  
จากกะลามะพร้าว

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นักวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา  
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(อ. ดร.ธีระสุด สุขกำเนิด)

ประธานกรรมการ

(ศ. ดร.ชัยยศ ตั้งสฤตย์กุลชัย)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(อ. ดร.สุพรรณิ จันทร์ภิรมณ์)

กรรมการ

(ผศ. ดร.อดิชาติ วงศ์กอบลาภ)

กรรมการ

(ศ. ดร.ชูกิจ ทิมปีจางค์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

เจี๊ยนธน กฤษณา : ผลของอุณหภูมิคาร์บอนในเซชันต่อสมบัติของถ่านชาร์และถ่านกัมมันต์  
จากกะลามะพร้าว (EFFECTS OF CARBONIZATION TEMPERATURE ON  
PROPERTIES OF CHARS AND ACTIVATED CARBON FROM COCONUT SHELL)  
อาจารย์ที่ปรึกษา : ศาสตราจารย์ ดร.ชัยยศ ตั้งสถิตย์กุลชัย, 150 หน้า.

งานวิจัยของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีวัตถุประสงค์โดยรวมเพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าวให้มีความสามารถในการดูดซับสูง โดยมุ่งศึกษาผลของอุณหภูมิคาร์บอนในเซชันต่อสมบัติของถ่านชาร์และถ่านกัมมันต์ ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาโดยนำกะลามะพร้าวขนาด 2.1 มิลลิเมตร มาผ่านขั้นตอนการคาร์บอนไนซ์ภายใต้บรรยากาศการไหลของแก๊สไนโตรเจน ที่อุณหภูมิในช่วง 250-750 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 120 นาที จากนั้นนำถ่านชาร์ที่ได้ไปวิเคราะห์สมบัติความพรุน โดยวิธีการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส และกระตุ้นถ่านชาร์เพื่อผลิตถ่านกัมมันต์โดยวิธีกระตุ้นทางกายภาพด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 และ 120 นาที และที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 และ 90 นาที จากนั้นนำถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ไปวิเคราะห์สมบัติความพรุน โดยวิธีการดูดซับแก๊สไนโตรเจนที่อุณหภูมิ -196 องศาเซลเซียส ในงานวิจัยนี้ยังได้ศึกษาองค์ประกอบแบบประมาณและพฤติกรรมการสลายตัวทางความร้อนของสารระเหยในกะลามะพร้าวและถ่านชาร์ด้วยเครื่องมือวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน (Thermogravimetric analyzer, TGA) รวมถึงศึกษาจลนพลศาสตร์ของการเกิดปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันอีกด้วย

ผลการศึกษาพบว่าอุณหภูมิคาร์บอนในเซชันมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของถ่านชาร์สำหรับถ่านชาร์ที่ผ่านการคาร์บอนไนซ์ที่อุณหภูมิสูงให้ค่าปริมาณสัดส่วนของคาร์บอนคงตัวสูง ซึ่งเมื่อนำถ่านชาร์ตัวอย่างไปวิเคราะห์ความหนาแน่นจริง พบว่าถ่านชาร์ที่เตรียมที่อุณหภูมิสูงมีความหนาแน่นมาก ดังนั้น เมื่อนำไปทำปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ส่งผลให้การขยายขนาดและการพัฒนารูพรุนเกิดขึ้นได้ยากตามไปด้วย ทำให้ถ่านกัมมันต์ที่ได้มีพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนที่ใช้ในการดูดซับลดลง และเมื่อทำการศึกษาจลนพลศาสตร์ของการเกิดปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์พบว่า ถ่านชาร์ที่ผ่านการคาร์บอนไนซ์ที่อุณหภูมิสูงมีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันที่ลดลง เพื่อยืนยันผลของอุณหภูมิคาร์บอนในเซชันต่อความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยา จึงได้ทำการศึกษาสมบัติเคมีบนพื้นผิวของถ่านชาร์โดยการออกซิเดชันถ่านชาร์ก่อนการกระตุ้นด้วยอากาศและทำการวิเคราะห์ปริมาณและชนิดของหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของถ่านชาร์ด้วยวิธีการไทเทรตของโบห์ม (Boehm titration method) พบว่าปริมาณหมู่ฟังก์ชันกรดรวมบนพื้นผิวของถ่านชาร์มีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิคาร์บอนไนซ์เพิ่มขึ้น



ซึ่งบ่งชี้ว่าปริมาณตำแหน่งการเกิดปฏิกิริยาของถ่านชาร์มีค่าลดลงด้วย ส่งผลให้ถ่านชาร์มีความสามารถในการทำปฏิกิริยาช้าลง และจากการวิเคราะห์การสลายตัวของสารระเหยในถ่านชาร์ยังพบอีกว่า ปริมาณการสลายตัวของลิกโนเซลลูโลสในขั้นตอนการคาร์บอนไนซ์ที่อุณหภูมิสูงมีผลต่อการลดลงของอัตราการเกิดปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันของถ่านชาร์เนื่องจากการลดลงของตำแหน่งการเกิดปฏิกิริยาจากการสลายตัวของลิกโนเซลลูโลสที่คงเหลือเมื่อได้รับความร้อนในขั้นตอนการกระตุ้น สำหรับการศึกษาลงพลศาสตร์ของการเกิดปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันในขั้นตอนการกระตุ้น ถ่านชาร์พบว่า เมื่อเปรียบเทียบการอธิบายข้อมูลลงพลศาสตร์การเกิดปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันด้วยแบบจำลอง 4 แบบ คือ แบบจำลอง Volume-reaction (VRM) แบบจำลอง Shrinking-core (SCM) แบบจำลอง Random-pore (RPM) และแบบจำลอง Modified volume-reaction (MVRM) ข้อมูลลงพลศาสตร์ที่ได้จากการทดลองสามารถอธิบายได้ดีที่สุดด้วยแบบจำลอง MVRM สำหรับการศึกษสมบัติความพรุนของถ่านกัมมันต์ ได้แก่ พื้นที่ผิว ปริมาตรและขนาดรูพรุน ด้วยการดูดซับแก๊สไนโตรเจนที่อุณหภูมิ -196 องศาเซลเซียส พบว่ามีค่าลดลงเมื่อใช้อุณหภูมิคาร์บอนไนเซชันสูงขึ้น ซึ่งถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จากสภาวะการคาร์บอนไนซ์ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส และกระตุ้นที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 90 นาที ให้พื้นที่ผิวและปริมาตรสูงสุด 1,500 ตารางเมตรต่อกรัม และ 0.772 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม ตามลำดับ โดยรูพรุนที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่เป็นรูพรุนขนาดเล็ก คิดเป็นร้อยละ 70-77 ของปริมาตรรูพรุนรวม

สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี \_\_\_\_\_

ปีการศึกษา 2556

ลายมือชื่อนักศึกษา \_\_\_\_\_

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา \_\_\_\_\_

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม \_\_\_\_\_

JUEJUN KATESA : EFFECTS OF CARBONIZATION TEMPERATURE ON  
PROPERTIES OF CHARS AND ACTIVATED CARBON FROM COCONUT  
SHELL. THESIS ADVISOR : PROF. CHAIYOT TANGSATHITKULCHAI,  
Ph.D., 150 PP.

COCONUT SHELL CHARS/CARBONIZATION/ACTIVATED  
CARBON/POROUS PROPERTIES

The overall objective of this research is to study the effect of carbonization temperature on the properties of char and activated carbon from coconut shell. In this work, raw coconut shell of size 2.1 mm was carbonized under N<sub>2</sub> atmosphere at temperatures in the range of 250-750°C for 120 min, then the porous properties of char obtained were analyzed by CO<sub>2</sub> adsorption at 0°C. Further the derived chars were activated by physical activation with CO<sub>2</sub> at 850°C for 60 and 120 min and 900°C for 60 and 90 min, and the porous properties of activated carbon obtained were analyzed by N<sub>2</sub> adsorption at -196°C. The proximate analysis and thermal decomposition behavior of coconut shell and char were analyzed by using a thermogravimetric analyzer (TGA). The kinetics of char gasification with CO<sub>2</sub> was also investigated by following the char weight loss as a function of activation time.

It was found that the carbonization temperature has an important effect on the char structure and its reactivity toward the gasification reaction. The char prepared at a high temperature gave higher percentage of fixed carbon. Furthermore the true density of char was found to increase with increasing carbonization temperature, making the development and widening of pore size during activation more difficult.

On the kinetic study of char-CO<sub>2</sub> gasification, char reactivity was found to decrease with increasing in the carbonization temperature. To support this view, the char reactivity was indirectly determined by oxidizing the char with air at 300°C for 12 hr to introduce surface functional groups. The amount of oxygen functional groups presenting on the surface of activated carbon is assumed to proportionally indicate the char reactivity toward CO<sub>2</sub> gasification. By this way, it was found the total acidic groups decreased with the increase in the carbonization temperature, and hence the decrease in char reactivity. On comparing the four types of gasification kinetic models including volume-reaction model, shrinking-core model, random-pore model and modified volume-reaction, it was found that the kinetics data were best described by the modified volume-reaction model. In addition, it was found that porous properties of activated carbon produce decreased with increasing in carbonization temperature, from which the char prepared at carbonization temperature of 250°C for 90 min gave the highest surface area and pore volume of 1500 m<sup>2</sup>/g and 0.772 cm<sup>3</sup>/g, respectively. Also, most pores generated in activated carbon are micropores which accounts for 70-77% of total pore volume.

School of Chemical Engineering

Academic Year 2013

Student's Signature \_\_\_\_\_

Advisor's Signature \_\_\_\_\_

Co-advisor's Signature \_\_\_\_\_

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องจากได้รับความกรุณาในการให้คำปรึกษา แนะนำ และความช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทั้งด้านวิชาการและด้านการดำเนินงานวิจัย ผู้วิจัยขอกราบ ขอบพระคุณบุคคลและกลุ่มบุคคลต่างๆ ได้แก่

ศาสตราจารย์ ดร. ชัยยศ ตั้งสถิตย์กุลชัย อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ สาขาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี ที่ได้ให้โอกาสทางการศึกษา ให้แนวคิด ช่วยแก้ปัญหาและให้กำลังใจแก่ ผู้วิจัยมาโดยตลอด รวมทั้งช่วยตรวจทานและแก้ไขวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนเสร็จสมบูรณ์

อาจารย์ ดร. สุพรรณิ จันท์ภิรมณ์ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมวิทยานิพนธ์ สาขาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี ที่เมตตาให้การอบรมสั่งสอน ให้คำแนะนำปรึกษา และคอยให้ความช่วยเหลือในทุกๆ ด้านด้วยดีเสมอมา ตลอดจนให้คำแนะนำในการเขียนและตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ จนเสร็จสมบูรณ์

อาจารย์ ดร. ชีระสุด สุขกำเนิด หัวหน้าสาขาวิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้การแนะนำ คำปรึกษา ซึ่งแนะแนวทางการเขียนและให้กำลังใจมาโดยตลอด

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อติชาติ วงศ์กอบลาภ อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำปรึกษาด้านวิชาการและชี้แนะแนวทางการเขียน

ขอขอบคุณ ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ได้เอื้อเฟื้อสถานที่ เครื่องมือและวัสดุอุปกรณ์ต่างๆ รวมถึงบุคลากรทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือในการใช้อุปกรณ์ และเครื่องมือต่างๆ ในการทำวิจัยนี้

ขอขอบคุณ พี่น้องบัณฑิตศึกษาทุกท่าน ที่ให้คำปรึกษาด้านวิชาการ ให้ความช่วยเหลือในการทำงานวิจัย และให้กำลังใจที่ดีมาโดยตลอด

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ผู้วิจัยขอมอบให้กับบิดา มารดา และพี่สาว ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ที่คอยให้กำลังใจและให้โอกาสการศึกษาอันมีค่ายิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่าน ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ผู้วิจัยตลอดมา

เจือจันทร์ เกตษา

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ) .....	ค
กิตติกรรมประกาศ .....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป .....	ญ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ .....	ฐ
<b>บทที่</b>	
<b>1 บทนำ</b>	
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย .....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ .....	4
<b>2 ปรัชญาบรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</b> .....	5
2.1 กะลามะพร้าว .....	5
2.1.1 เชลลูโลส.....	5
2.1.2 เฮมิเชลลูโลส.....	6
2.1.3 ลิกนิน .....	7
2.2 ถ่านกัมมันต์.....	8
2.2.1 ประเภทของถ่านกัมมันต์.....	8
2.2.2 ขั้นตอนการผลิตถ่านกัมมันต์ .....	10
2.2.3 โครงสร้างและสมบัติพื้นผิวทางเคมีของถ่านกัมมันต์.....	12
2.2.4 สมบัติของถ่านกัมมันต์ .....	15

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.3	กระบวนการดูดซับ .....	17
2.3.1	ประเภทของการดูดซับ.....	17
2.3.2	กลไกการดูดซับ .....	18
2.3.3	สมดุลการดูดซับ .....	20
2.4	กระบวนการสลายตัวทางความร้อน .....	26
2.5	แบบจำลองจลนพลศาสตร์ระหว่างแก๊สและของแข็ง .....	27
2.6	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	28
3	วิธีการดำเนินการวิจัย .....	31
3.1	เครื่องมือและอุปกรณ์ในการทดลอง.....	31
3.1.1	เครื่องมือที่ใช้ในการเตรียมถ่านชาร์และถ่านกัมมันต์.....	31
3.1.2	เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ .....	31
3.2	วิธีการทดลอง .....	33
3.2.1	การเตรียมกะลามะพร้าว.....	33
3.2.2	การเตรียมถ่านชาร์.....	35
3.2.3	การกระตุ้นถ่านชาร์.....	35
3.2.4	การวิเคราะห์องค์ประกอบของกะลามะพร้าวและถ่านชาร์.....	36
3.2.5	การศึกษาพฤติกรรมการสลายตัวทางความร้อน ของกะลามะพร้าวและถ่านชาร์ .....	36
3.2.6	การวิเคราะห์สมบัติความพรุนของถ่านชาร์ .....	37
3.2.7	การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของถ่านชาร์.....	37
3.2.8	การวิเคราะห์ค่าความหนาแน่นของถ่านชาร์ที่สภาวะก่อนกระตุ้น.....	38
3.2.9	การวิเคราะห์สมบัติความพรุนของถ่านกัมมันต์.....	40
4	ผลการศึกษา และการวิเคราะห์ผล.....	41
4.1	สมบัติทางกายภาพเบื้องต้นของกะลามะพร้าว.....	41
4.1.1	ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของกะลามะพร้าว .....	41

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.1.2	การสลายตัวทางความร้อนของกะลามะพร้าว .....	42
4.2	สมบัติของถ่านชาร์จากกะลามะพร้าว .....	44
4.2.1	ร้อยละผลผลิตของถ่านชาร์ .....	44
4.2.2	การวิเคราะห์องค์ประกอบแบบประมาณของถ่านชาร์ .....	45
4.2.3	ภาพถ่ายลักษณะพื้นผิวของถ่านชาร์ .....	46
4.2.4	สมบัติความพรุนของถ่านชาร์ .....	47
4.2.5	การวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนของถ่านชาร์ .....	49
4.2.6	ความหนาแน่นของถ่านชาร์ที่สภาวะก่อนกระตุ้น .....	52
4.3	การผลิตถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าว .....	53
4.3.1	ผลของอุณหภูมิคาร์บอนในเซชันต่อจลนพลศาสตร์ ของการกระตุ้นถ่านชาร์ .....	53
4.3.2	ผลของอุณหภูมิคาร์บอนในเซชันต่อสมบัติของถ่านกัมมันต์ .....	65
5	สรุปผลและข้อเสนอแนะ .....	75
5.1	สรุปผล .....	75
5.2	ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยต่อไป .....	76
	รายการอ้างอิง .....	77
	ภาคผนวก .....	82
	ภาคผนวก ก ตารางข้อมูลพื้นฐาน .....	82
	ภาคผนวก ข บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ .....	119
	ประวัติผู้เขียน .....	150

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	สมบัติทั่วไปของถ่านกัมมันต์ (Harry, 2001) ..... 17
2.2	แบบจำลองจลนพลศาสตร์การเกิดปฏิกิริยาระหว่างแก๊สกับของแข็ง ..... 28
4.1	องค์ประกอบของกะลามะพร้าว ..... 42
4.2	สมบัติความพรุนของถ่านชาร์ที่สภาวะก่อนการกระตุ้น ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ..... 52
4.3	ค่าตัวแปรจลนพลศาสตร์การเกิดปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันของถ่านชาร์ที่อธิบาย ได้จากแบบจำลอง Volume-reaction และแบบจำลอง Shrinking-core ..... 61
4.4	ค่าตัวแปรจลนพลศาสตร์การเกิดปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันของถ่านชาร์ที่อธิบาย ได้จากแบบจำลอง Random-pore และแบบจำลอง Modified volume-reaction..... 61
4.5	ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานในการประมาณสำหรับประเมินค่าความแม่นยำ จากการทำนายจลนพลศาสตร์ด้วยแบบจำลองทั้ง 4 แบบ ..... 61
4.6	การปรับปรุงสมบัติเคมีบนพื้นผิวของถ่านชาร์โดยวิธีออกซิเดชัน ทางเคมีด้วยอากาศ ..... 64
4.7	ผลของอุณหภูมิคาร์บอนในเซชันต่อการกระจายขนาดรูพรุนของถ่านกัมมันต์ ที่สภาวะกระตุ้น 850 องศาเซลเซียส เวลา 120 นาที ..... 74



## สารบัญรูป

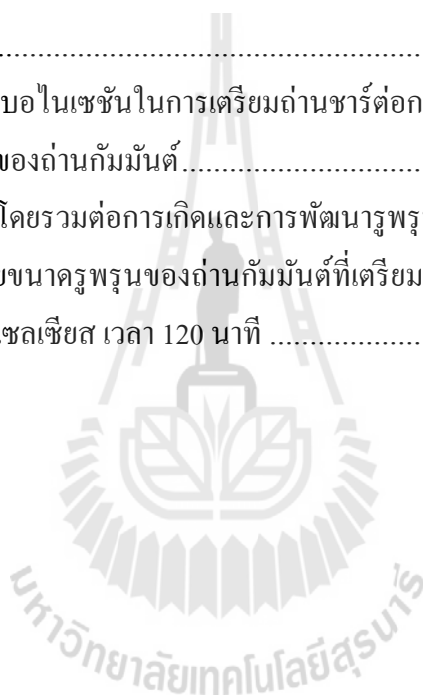
รูปที่	หน้า
2.1	โครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลส (Kögel-Knabner, 2002) ..... 6
2.2	โครงสร้างทางเคมีของเฮมิเซลลูโลส (Kögel-Knabner, 2002) ..... 6
2.3	โครงสร้างทางเคมีของลิกนิน (Kögel-Knabner, 2002) ..... 7
2.4	โครงสร้างผลึกแกรไฟต์แบบเฮกซะโกนัล (Hexagonal) (Reynolds, 1968)..... 13
2.5	โครงสร้างของถ่านกัมมันต์ (Rodriguez-Reinoso and Molina-Sabio, 1998)..... 13
2.6	การจัดเรียงคาร์บอนอะตอมของถ่านชาร์ที่แต่ละอุณหภูมิคาร์บอนในเซชัน (Hassler, 1974)..... 14
2.7	ตัวอย่างของหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวทางเคมีของถ่านกัมมันต์ (Leon y Leon and Radovic, 1994)..... 15
2.8	กลไกการดูดซับสารบนถ่านกัมมันต์ (ฐานความรู้การกำจัดกลิ่น กรมควบคุมมลพิษ, 2547) ..... 20
2.9	ไอโซเทิร์มของการดูดซับแก๊สที่สภาวะสมดุลที่จำแนกตามระบบ IUPAC (Sing et al., 1985) ..... 21
2.10	ระบบภายในเครื่องวิเคราะห์การสูญเสียน้ำหนักโดยใช้ความร้อน ..... 27
3.1	เตาเผาแนวอนแบบท่อสำหรับการคาร์บอนในเซชัน (ก) และการกระตุ้น (ข) ..... 32
3.2	เครื่องวัดพื้นที่ผิวจำเพาะและขนาดรูพรุน (ก) และเครื่องวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อน (ข) ..... 32
3.3	เครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนไมโครสโคปแบบส่องกราด (ก) และเครื่องวิเคราะห์การดูดซับเชิงน้ำหนัก (ข)..... 33
3.4	แผนผังแสดงกระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์และการวิเคราะห์ต่างๆ..... 34
4.1	พฤติกรรมการสลายตัวทางความร้อนของกะลามะพร้าว ..... 46
4.2	อุณหภูมิคาร์บอนในเซชันต่อการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของถ่านชาร์ ..... 45
4.3	อุณหภูมิคาร์บอนในเซชันต่อการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบของถ่านชาร์..... 46
4.4	อุณหภูมิคาร์บอนในเซชันต่อการเปลี่ยนแปลงลักษณะพื้นผิวของถ่านชาร์ ..... 47

## สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.5	ไอโซเทิร์มการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของถ่านชาร์ที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส..... 48
4.6	ปริมาตรรูพรุนของถ่านชาร์จากข้อมูลไอโซเทิร์มการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ 0 องศาเซลเซียส ..... 49
4.7	พฤติกรรมสลายตัวทางความร้อนของถ่านชาร์ในรูปการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนัก (TG curve) และอัตราการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนัก (DTG curve)..... 50
4.8	อุณหภูมิคาร์บอนไนเซชันต่อค่าความหนาแน่นของถ่านชาร์ที่สภาวะก่อนกระตุ้น..... 53
4.9	การสูญเสียน้ำหนักของถ่านชาร์ในระหว่างการเกิดปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส..... 54
4.10	สัดส่วนการเปลี่ยนแปลงของถ่านชาร์ในระหว่างการเกิดปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส..... 55
4.11	การอธิบายจลนพลศาสตร์ของการเกิดปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันด้วยแบบจำลอง Modified volume-reaction (MVRM) ..... 59
4.12	การอธิบายจลนพลศาสตร์ของการเกิดปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันด้วยแบบจำลอง Volume-reaction (a) แบบจำลอง Shrinking-core (b) และแบบจำลอง Random-pore (c) ..... 60
4.13	ผลของการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันของถ่านชาร์ (4.13(a)) และค่าคงที่อัตราปรากฏ (4.13(b)) สำหรับแบบจำลอง MVRM ..... 63
4.14	ผลของอุณหภูมิคาร์บอนไนเซชันในการเตรียมถ่านชาร์ต่อค่าดัชนีความว่างไว้ใน การเกิดปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันและหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของถ่านชาร์ ..... 65
4.15	ผลของอุณหภูมิคาร์บอนไนเซชันในการเตรียมถ่านชาร์ต่อการสูญเสียน้ำหนักในระหว่างการคาร์บอนไนซ์ (a) การกระตุ้น (b) และการสูญเสียน้ำหนักโดยรวม (c).....67
4.16	ไอโซเทิร์มการดูดซับไนโตรเจนของถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส..... 68

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.17 ไอโซเทอร์มการดูดซับไนโตรเจนของถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้น ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส.....	69
4.18 ผลของอุณหภูมิคาร์บอนในเซชันในการเตรียมถ่านชาร์ตต่อขนาดพื้นที่ผิว BET ของถ่านกัมมันต์ .....	70
4.19 ผลของอุณหภูมิคาร์บอนในเซชันในการเตรียมถ่านชาร์ตต่อการสูญเสียน้ำหนักโดยรวม และปริมาตรรูพรุนของถ่านกัมมันต์.....	71
4.20 การสูญเสียน้ำหนักโดยรวมต่อการเกิดและการพัฒนารูพรุนของถ่านกัมมันต์.....	72
4.21 ตัวอย่างการกระจายขนาดรูพรุนของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จากสภาวะกระตุ้น อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส เวลา 120 นาที .....	73



## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

$^{\circ}\text{C}$	=	องศาเซลเซียส
min	=	นาที
%	=	เปอร์เซ็นต์
mmol	=	มิลลิโมล
g	=	กรัม
$P/P^{\circ}$	=	ความดันสัมพัทธ์
$\text{cm}^3$	=	ลูกบาศก์เซนติเมตร
$\text{\AA}$	=	อังสตรอม
$\text{m}^2$	=	ตารางเมตร
STP	=	อุณหภูมิและความดันมาตรฐาน
t	=	เวลา
w	=	น้ำหนัก
Temp	=	อุณหภูมิ
DTG	=	อัตราการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักตามอุณหภูมิ
TG	=	การเปลี่ยนแปลงร้อยละของน้ำหนัก
$\sigma_{est}$	=	ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของการประมาณ
$k_m$	=	ดัชนีความว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยา
$R^2$	=	สัมประสิทธิ์การถดถอย
k	=	ค่าคงที่อัตรา

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon หรือ Activated charcoal) เป็นวัสดุดูดซับของแข็งที่มีความพรุนและพื้นที่ผิวภายในสูง เตรียมได้จากวัตถุดิบชีวมวลตามธรรมชาติ มีการใช้ประโยชน์มากมายหลายด้าน เช่น ใช้ในกำจัดสารเจือปนจากของเหลวหรือแก๊ส ทำให้ของเหลวหรือแก๊สนั้นมีความบริสุทธิ์สูงขึ้น อีกทั้งยังสามารถนำไปใช้ในการแยกสารได้อีกด้วย โดยการนำไปใช้งานแต่ละประเภทนั้นย่อมต้องการสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่แตกต่างกันออกไป โดยทั่วไปถ่านกัมมันต์เป็นวัสดุดูดซับที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลักโดยมีการจัดเรียงตัวเป็นโครงข่ายของแผ่นแกรฟีนอยู่อย่างไม่เป็นระเบียบ จากโครงสร้างที่ไม่เป็นระเบียบนี้ทำให้เกิดช่องว่างหรือรูพรุนขนาดต่างๆ กระจายอยู่ภายในอนุภาคอย่างมหาศาล ส่งผลให้ถ่านกัมมันต์มีสมบัติการดูดซับที่ดีและมีประสิทธิภาพในการดูดซับสูง ซึ่งคุณภาพของถ่านกัมมันต์ขึ้นกับปัจจัยหลายประการด้วยกัน ได้แก่ ชนิดของวัตถุดิบชีวมวล ขั้นตอนกระบวนการผลิต ชนิดและความเข้มข้นของสารกระตุ้น อุณหภูมิ การกระตุ้นและระยะเวลาการกระตุ้น เป็นต้น

ปัจจุบัน ถ่านกัมมันต์ถูกนำไปใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมต่างๆ หลายประเภท ทำให้ปริมาณความต้องการถ่านกัมมันต์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นต่อเนื่องทุกปี โดยจากข้อมูลของ The Freedonia group, Inc. (2008) กล่าวว่า ความต้องการถ่านกัมมันต์ทั่วโลกในปี พ.ศ. 2555 มีปริมาณ 1.15 ล้านตัน โดยคาดการณ์ว่าจะเพิ่มขึ้นเป็น 1.7 ล้านตัน ในปี พ.ศ. 2557 (The Freedonia group, Inc., 2010) และเพิ่มขึ้นเป็น 1.9 ล้านตัน ในปี พ.ศ. 2559 โดยกระจายตัวอยู่ตามภูมิภาคต่างๆ ได้แก่ เอเชียแปซิฟิก (ร้อยละ 39) อเมริกาเหนือ (ร้อยละ 33) ยุโรปตะวันตก (ร้อยละ 12) และภูมิภาคอื่นๆ (ร้อยละ 16) (The Freedonia group, Inc., 2012) สำหรับประเทศไทยการใช้ถ่านกัมมันต์ในการบำบัดหรือกำจัดสารปนเปื้อนในน้ำเสียเป็นที่นิยมอยู่มาก ซึ่งกำลังการผลิตในประเทศไทยที่มีอยู่ไม่เพียงพอกับความต้องการ จึงต้องมีการนำเข้าถ่านกัมมันต์จากต่างประเทศ ซึ่งจากข้อมูลของกรมอุตสาหกรรม ในปี พ.ศ. 2552 ประเทศไทยมีการนำเข้าถ่านกัมมันต์ 11,000 กิโลกรัม และเพิ่มขึ้นเป็น 65,800 กิโลกรัม ในปี พ.ศ. 2553 (กรมอุตสาหกรรม, 2550) จากข้อมูลดังกล่าว ทำให้เห็นถึงความต้องการถ่านกัมมันต์ที่เพิ่มขึ้นตลอดทุกปี เพื่อเป็นอีกแนวทางหนึ่งในการลดการนำเข้าจาก

ต่างประเทศ จึงได้เห็นถึงความสำคัญในการส่งเสริมการผลิตถ่านกัมมันต์ภายในประเทศเพื่อทดแทนการนำเข้าจากต่างประเทศ

ในการเลือกใช้วัสดุที่จะนำมาเป็นวัตถุดิบในการผลิตถ่านกัมมันต์ในทางการค้า ส่วนใหญ่จะเป็นของเหลือทิ้งหรือมีราคาถูกที่มีปริมาณคาร์บอนคงตัวสูง แต่มีปริมาณสารอนินทรีย์และเถ้าต่ำ ได้แก่ แกลบ กะลามะพร้าว ชานอ้อย กะลาปาล์ม ทะลายปาล์ม เศษไม้ หรือถ่านหินประเภทลิกไนต์ เป็นต้น ในการศึกษาครั้งนี้ ได้เลือกใช้กะลามะพร้าวเป็นวัตถุดิบในการผลิตถ่านกัมมันต์ เนื่องจาก มะพร้าวเป็นพืชผลจากการเกษตรของไทย อีกทั้งยังเป็นพืชเศรษฐกิจดั้งเดิมที่มีปริมาณผลิตผลสูงในภาคใต้ ซึ่งเมื่อนำเนื้อมะพร้าวไปใช้ในการประกอบอาหารในครัวเรือนหรือนำไปใช้ในอุตสาหกรรมอาหารแล้ว กะลามะพร้าวจึงเป็นส่วนที่เหลือจากการทำประโยชน์ที่มีปริมาณมาก โดยบางส่วนได้ถูกนำไปใช้ประโยชน์ในการประดิษฐ์สิ่งของ เช่น โคมไฟ กระบวย กระชอน ซอฮู้ หรือเครื่องประดับต่างๆ อีกทั้งยังสามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในการหุงต้มในครัวเรือนได้อีกด้วย และถ่านกัมมันต์ก็เป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่สามารถผลิตได้จากกะลามะพร้าว

ปัจจุบันมีกรรมวิธีการผลิตถ่านกัมมันต์หลายวิธีด้วยกัน ขึ้นกับวัตถุดิบและสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ต้องการ ซึ่งในกระบวนการผลิตโดยทั่วไปประกอบด้วย 2 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนการทำให้เป็นถ่านชาร์หรือที่เรียกว่าคาร์บอนในเซชันและขั้นตอนการกระตุ้น โดยในขั้นตอนการคาร์บอนไนซ์เป็นขั้นตอนการเพิ่มสัดส่วนปริมาณคาร์บอนให้กับวัตถุดิบ ซึ่งทำได้โดยการให้ความร้อนแก่วัตถุดิบที่สภาวะอับอากาศเพื่อไล่สารระเหย (volatile matter) ออกจากโครงสร้างของวัตถุดิบ ขั้นตอนนี้นับว่าเป็นขั้นตอนที่สำคัญที่สุดในการผลิตถ่านกัมมันต์ เนื่องจากเป็นขั้นตอนเริ่มต้นในการผลิตถ่านชาร์เพื่อเตรียมเข้าสู่ขั้นตอนการทำให้เกิดโครงสร้างรูพรุนที่สมบูรณ์ในขั้นตอนการกระตุ้นต่อไป ซึ่งในขั้นตอนการกระตุ้นนี้เป็นการเพิ่มความสามารถการดูดซับให้กับถ่านชาร์โดยการพัฒนาโครงสร้างรูพรุนทำให้ถ่านชาร์มีพื้นที่ผิวในการดูดซับมากขึ้น โดยผลิตภัณฑ์ของแข็งที่ได้จากกระบวนการนี้เรียกว่าถ่านกัมมันต์ ในงานวิจัยนี้ เป็นการศึกษาการผลิตถ่านกัมมันต์จากการแปรรูปกะลามะพร้าวให้เกิดประโยชน์สูงสุด ถึงแม้จะได้มีการศึกษาในเรื่องนี้เป็นจำนวนมากแล้ว แต่ในการผลิตถ่านกัมมันต์ให้มีประสิทธิภาพในการดูดซับสูงและสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมต่างๆ ได้อย่างกว้างขวางนั้นยังเป็นที่สนใจอยู่ไม่น้อย โดยวัตถุประสงค์หลักของงานวิจัยนี้คือ เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมต่อการผลิตถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าว ซึ่งมุ่งศึกษาผลของอุณหภูมิคาร์บอนไนเซชันในการเตรียมถ่านชาร์และสภาวะการกระตุ้นถ่านชาร์ต่อสมบัติต่างๆ ของถ่านกัมมันต์ โดยประโยชน์ที่คาดหวังจากงานวิจัยนี้คือการส่งเสริมการผลิตถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าวที่เป็นผลิตผลทางการเกษตรภายในประเทศ ทั้งในระดับท้องถิ่นและระดับภาคอุตสาหกรรม ให้มีประสิทธิภาพการดูดซับเป็นที่ยอมรับได้และคุ้มค่างบราคา

## 1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

ในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีวัตถุประสงค์โดยรวมเพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าวให้มีความสามารถในการดูดซับสูง โดยได้เน้นศึกษาในส่วนของการเตรียมถ่านชาร์ด้วยกระบวนการคาร์บอนในเซชันที่อุณหภูมิคาร์บอนในเซชันต่างๆ เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิคาร์บอนในเซชันต่อสมบัติของถ่านชาร์และถ่านกัมมันต์ ซึ่งวัตถุประสงค์ในการเตรียมถ่านกัมมันต์ในแต่ละขั้นตอนนั้นอธิบายได้ ดังนี้

1.2.1 เพื่อศึกษาองค์ประกอบแบบประมาณและพฤติกรรมการสลายตัวทางความร้อนของกะลามะพร้าวด้วยเครื่องวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน

1.2.2 เพื่อเตรียมถ่านชาร์ที่อุณหภูมิคาร์บอนในเซชันต่างกัน จากนั้นศึกษาผลของอุณหภูมิคาร์บอนในเซชันต่อสมบัติของถ่านชาร์และพฤติกรรมการสลายตัวทางความร้อนของถ่านชาร์

1.2.3 เพื่อเตรียมถ่านกัมมันต์จากถ่านชาร์ที่เตรียมจากสภาวะคาร์บอนในเซชันต่างกันด้วยวิธีการกระตุ้นทางกายภาพด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ จากนั้นนำถ่านกัมมันต์ที่ได้ไปวิเคราะห์สมบัติความพรุนและศึกษากลไกการเกิดขึ้นและการพัฒนาของรูพรุน

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

โดยทั่วไปนั้น สมบัติของถ่านกัมมันต์แต่ละชนิดย่อมแตกต่างกันขึ้นอยู่กับสภาวะและวิธีการที่ใช้ในการเตรียม และยังเป็นที่ยอมรับกันว่าชนิดของวัตถุดิบก็ส่งผลอย่างมากต่อคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์เนื่องจากวัตถุดิบแต่ละชนิดมีปริมาณองค์ประกอบที่แตกต่างกัน ซึ่งในงานวิจัยนี้เลือกใช้กะลามะพร้าวเป็นวัตถุดิบเริ่มต้นในการเตรียมถ่านกัมมันต์ด้วยวิธีการกระตุ้นทางกายภาพ โดยในงานวิจัยนี้ได้มุ่งเน้นศึกษาในส่วนของการเตรียมถ่านชาร์ที่สภาวะอุณหภูมิคาร์บอนในเซชันต่างๆ เนื่องจากถ่านชาร์ที่ได้จากการเตรียมที่แต่ละสภาวะเมื่อนำมากระตุ้นแล้วให้คุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่แตกต่างกัน ดังนั้นจึงได้ทำการศึกษาผลของอุณหภูมิคาร์บอนในเซชันต่อคุณสมบัติต่างๆ ของถ่านกัมมันต์ โดยการทดลองหลักๆ ในงานวิจัย มีดังนี้

1.3.1 วิเคราะห์องค์ประกอบแบบประมาณและพฤติกรรมการสลายตัวทางความร้อนขององค์ประกอบในกะลามะพร้าวด้วยเครื่องมือวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน

1.3.2 เตรียมถ่านชาร์จากกะลามะพร้าวที่อุณหภูมิคาร์บอนในเซชัน 250 350 450 550 650 และ 750 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศการไหลผ่านด้วยแก๊สไนโตรเจนในเตาเผาแบบท่อแนวนอน ที่อัตราการให้ความร้อน 5 องศาเซลเซียสต่อนาที เป็นเวลา 120 นาที จากนั้นทำการวิเคราะห์สมบัติความพรุนถ่านชาร์โดยวิธีการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส

1.3.3 กระตุ้นถ่านชาร์โดยการกระตุ้นทางกายภาพด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ที่สภาวะ กระตุ้นอุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 และ 120 นาที และกระตุ้นที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 และ 90 นาที

1.3.4 วิเคราะห์สมบัติความพรุนของถ่านกัมมันต์โดยวิธีการดูดซับแก๊สไนโตรเจน ที่ อุณหภูมิ -196 องศาเซลเซียส

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 เป็นการสร้างมูลค่าเพิ่มให้กับวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรและเป็นการใช้ทรัพยากร ภายในประเทศให้คุ้มค่าและเกิดประโยชน์สูงสุดโดยการนำกะลามะพร้าวมาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์

1.4.2 ทำให้ทราบสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าวที่มี ประสิทธิภาพและมีคุณภาพในการดูดซับสูงสุด

1.4.3 เมื่อมีการปรับปรุงพัฒนาประสิทธิภาพและคุณภาพของถ่านกัมมันต์ให้สูงขึ้นจะ สามารถผลิตเพื่อการส่งออกและทดแทนการนำเข้าได้

1.4.4 เป็นการส่งเสริมการผลิตถ่านกัมมันต์ทั้งในระดับท้องถิ่นและในภาคอุตสาหกรรม ได้มากขึ้น





## บทที่ 2

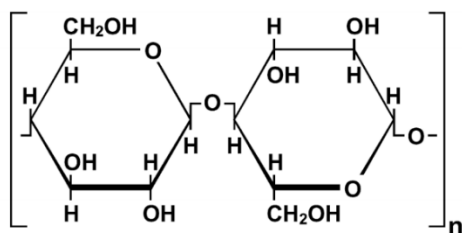
### ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 กะลามะพร้าว (coconut shell)

มะพร้าวเป็นพืชยืนต้นชนิดหนึ่งจัดอยู่ในตระกูลปาล์ม โดยมีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Cocos nucifera* ซึ่งคำว่า *cocos* เป็นคำในภาษาโปรตุเกส ลักษณะทั่วไปของผลกะลามะพร้าวประกอบไปด้วยเอพิการ์ป (epicarp) คือเปลือกนอก ถัดไปข้างในเป็นมีโซคาร์ป (mesocarp) หรือใยมะพร้าว ถัดไปข้างในเป็นส่วนเอนโดคาร์ป (endocarp) หรือกะลามะพร้าว และถัดจากส่วนเอนโดคาร์ปเข้าไปจะเป็นส่วนเอนโดสเปิร์ม (endosperm) หรือที่เรียกว่าเนื้อมะพร้าว ปริมาณส่วนประกอบเหล่านี้ขึ้นอยู่กับพันธุ์และอายุของมะพร้าว ซึ่งผลมะพร้าวเมื่อแก่จัดเปลือกนอกจะเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลและชั้นของกะลามะพร้าวจะแข็งขึ้น โดยมีองค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญคือ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ดังนี้

##### 2.1.1 เซลลูโลส (cellulose)

เซลลูโลสเป็นคาร์โบไฮเดรต (carbohydrate) ซึ่งเป็นสารประกอบอินทรีย์ชนิดหนึ่งประเภทโฮมโพลีแซ็กคาไรด์ (homopolysaccharide) ที่ไม่แตกกิ่งก้านสาขาและพบได้ในเซลล์พืช เซลลูโลสประกอบด้วยโมเลกุลของกลูโคสที่เชื่อมต่อกันเป็นสายยาวด้วยพันธะไกลโคไซด์ (glycosidic bond) ที่ตำแหน่ง  $\beta$  (1-4) โดยแต่ละสายจะเรียงตัวขนานกันไปและยึดเหนี่ยวกันด้วยแรงแผ่กระจาย (dispersion force) และพันธะไฮโดรเจน ทำให้มีลักษณะเป็นเส้นใย มีสูตรโมเลกุลคือ  $(C_6H_{10}O_5)_n$  และมีโครงสร้างดังรูปที่ 2.1 โดยทั่วไปโมเลกุลของเซลลูโลสจะเกาะกันเป็นคู่ตามยาวและเรียงขนานกันเป็นกลุ่ม 40 คู่ เรียกว่า ไมโครไฟบริล (microfibril) เพื่อให้ความแข็งแรงกับผนังเซลล์ของพืช (Fan et al., 1987) เซลลูโลสเมื่อย่อยจะแตกตัวออกให้น้ำตาลกลูโคส แต่ถ้าเกิดการย่อยสลายไม่สมบูรณ์จะได้เป็นน้ำตาลเซลโลไบโอส (cellobiose) เซลลูโลสไม่ละลายน้ำแต่จะละลายในกรดเข้มข้น เช่น กรดไฮโดรคลอริก กรดซัลฟูริก เป็นต้น โดยจะเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสอย่างรวดเร็วในสารละลายกรดที่อุณหภูมิห้องและจะหยุดปฏิกิริยาที่อุณหภูมิต่ำ

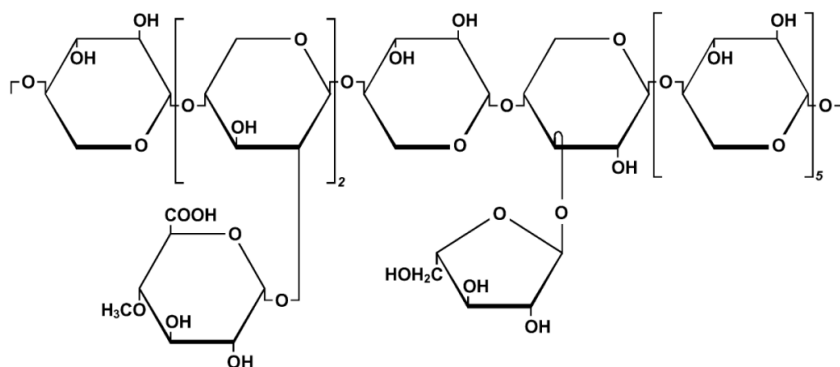


รูปที่ 2.1 โครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลส

Kögel-Knabner (2002)

### 2.1.2 เฮมิเซลลูโลส (hemicellulose)

เฮมิเซลลูโลสเป็นสารประกอบอินทรีย์ประเภทเฮเทอโรพอลิแซ็กคาไรด์ (heteropolysaccharide) มีโครงสร้างเป็นกิ่งและมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำกว่าเซลลูโลสมาก ในโมเลกุลของเฮมิเซลลูโลสประกอบด้วยน้ำตาลหลายชนิด โดยน้ำตาลกลุ่มใหญ่ที่สุดจะเป็นน้ำตาลที่มีคาร์บอน 5 อะตอม เช่น น้ำตาลไซโลส (xylose) ที่เชื่อมต่อกันด้วยพันธะไกลโคไซด์ที่ตำแหน่ง β (1-4) เป็นโครงสร้างหลัก ซึ่งอาจมีน้ำตาลแมนโนส (mannose) กาแล็กโทส (galactose) หรือกลูโคส ต่ออยู่กับโครงสร้างหลักด้วย โดยมีน้ำตาลชนิดอื่นมาต่อกันเป็นโซ่กิ่งหรือโซ่สาขา ได้แก่ น้ำตาลอะราบินโนส (arabinose) และกรดกลูคูโรนิก (glucuronic acid) เป็นต้น โครงสร้างของเฮมิเซลลูโลสแสดงดังรูปที่ 2.2 ซึ่งลักษณะโซ่โมเลกุลจะแตกต่างกันออกไปตามชนิดของน้ำตาลที่เป็นองค์ประกอบ เฮมิเซลลูโลสสามารถละลายได้ในสารละลายต่างเจือจาง โดยมีสมบัติทางกายภาพที่สำคัญคือ มีความสามารถในการอุ้มน้ำส่งผลต่อสมบัติของเซลลูโลสในการช่วยในการพองตัวของเส้นใยจากการอุ้มน้ำ อีกทั้งยังช่วยเชื่อม โครงสร้างของเซลลูโลสเพื่อประกอบกันเป็นเส้นใย

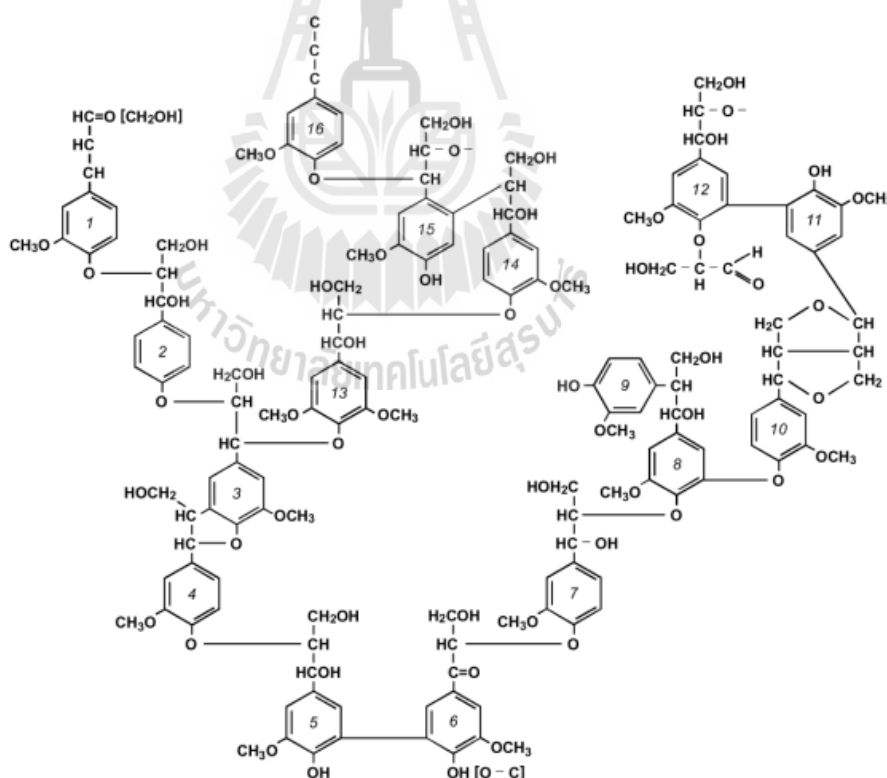


รูปที่ 2.2 โครงสร้างทางเคมีของเฮมิเซลลูโลส

Kögel-Knabner (2002)

### 2.1.3 ลิกนิน (lignin)

ลิกนินเป็นสารประกอบเชิงซ้อนไม่มีรูปผลึกประเภทพอลิแซ็กคาไรด์ที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่และมีน้ำหนักโมเลกุลสูง โครงสร้างพื้นฐานของลิกนินคือ phenylpropane ประกอบด้วยไซโมเลกุลของ oxygenated phenylpropane หรือสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีคาร์บอน 9 อะตอม สังเคราะห์ได้จากอนุพันธ์ของแอลกอฮอล์ชนิดต่างๆ ที่มีรูปร่างเป็นวงแหวน ได้แก่ คูมาริล (coumaryl) โคนิเฟอริล (coniferyl) ซินนามิล (cinnamyl) ซิงริงจิล (syringyl) กัวไอซิล (guaicyl) และไซนาพิล (sinapyl) เป็นต้น ลิกนินไม่ละลายในน้ำและในตัวทำละลายที่เป็นสารอินทรีย์ แต่จะเกิดการเปลี่ยนแปลงได้ง่ายเมื่ออยู่ในสารละลายเบสที่ร้อนหรือในตัวทำละลายประเภทสารออกซิไดซ์ (oxidizing agent) ด้วยสมบัติของลิกนินที่ไม่มีความยืดหยุ่น ดังนั้นจึงทำให้พืชที่มีลิกนินมากมีความแข็งแรงและทนต่อการย่อยสลายโดยแบคทีเรีย สำหรับพืชที่ตายแล้วนั้น ลิกนินจะถูกย่อยด้วยเอนไซม์ลิกเนส (Lignase) หรือลิกนินเนส (Ligninase) ซึ่งเป็นจุลินทรีย์ที่สำคัญในรา โดยโครงสร้างของลิกนินแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 โครงสร้างทางเคมีของลิกนิน

Kögel-Knabner (2002)

## 2.2 ถ่านกัมมันต์ (activated carbon)

ถ่านกัมมันต์เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากอินทรีย์วัตถุซึ่งมีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก โดยถูกผลิตขึ้นจากกระบวนการถ่านกัมมันต์ (activation) ทำให้ได้โครงสร้างที่มีลักษณะเป็นรูพรุนเล็กๆ เกิดขึ้นบนพื้นผิวเป็นจำนวนมาก ส่งผลให้การเกาะติดของอนุภาคของสารหรือโมเลกุลแก๊สบนพื้นผิวภายในของถ่านเกิดได้ในปริมาณมาก ถ่านกัมมันต์ที่ได้จึงมีความสามารถในการดูดซับสูง ซึ่งความสามารถในการดูดซับนี้เป็นปัจจัยสำคัญในการกำหนดสมรรถนะของถ่านกัมมันต์ โดยทั่วไปถ่านกัมมันต์น้ำหนักเพียง 1 กรัม มีพื้นที่ผิวภายในโดยรวมระหว่าง 500-1,500 ตารางเมตร (Al-Khateeb and Al-Mehemdy, 2011) ซึ่งถ่านกัมมันต์ทางการค้าชนิดเม็ดที่เตรียมได้จากกะลามะพร้าวขนาดอนุภาค 1.8-3.6 มิลลิเมตร (8x16 mesh) จากบริษัท ซี. ไซแกนติก คาร์บอน จำกัด (C. Gigantic Carbon Co., Ltd.) มีพื้นที่ผิวมากถึง 1,119 ตารางเมตรต่อกรัม โดยมีปริมาตรรูพรุนรูพรุนขนาดเล็กเท่ากับ 0.38 ตารางเซนติเมตรต่อกรัม และขนาดรูพรุนเฉลี่ยเท่ากับ 18.5 อังสตรอม ซึ่งสมบัติความพรุนของถ่านกัมมันต์เหล่านี้ขึ้นอยู่กับคุณภาพของถ่านกัมมันต์ ชนิดของวัตถุดิบ รวมถึงกระบวนการในการผลิต อีกทั้งยังสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับให้กับถ่านกัมมันต์ได้โดยการใช้สารเคมีปรับสภาพพื้นผิวภายในให้กับรูพรุน โดยทำให้บริเวณผิวของรูพรุนมีอิเล็กตรอนอิสระที่พร้อมจะแลกเปลี่ยนประจุและยึดเหนี่ยวโมเลกุลของสารต่างๆ ไว้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

### 2.2.1 ประเภทของถ่านกัมมันต์

ลักษณะและคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ ขึ้นอยู่กับวัตถุดิบและกระบวนการผลิตที่ใช้ วัตถุดิบที่ใช้มักเป็นพวกอินทรีย์สารซึ่งประกอบด้วยคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ โดยอาจเป็นพืชหรือถ่านหินก็ได้ เช่น แกลบ กะลามะพร้าว ไม้ยูคาลิปตัส บี้เลื่อย ถ่านหิน (เช่น ลิกไนต์ แอนทราไซต์ และพีท เป็นต้น) เป็นต้น และวัตถุดิบที่มาจากสัตว์นั้นมีไม่มาก เช่น กระดุก หรือ เขาสัตว์ เป็นต้น (Antal et al., 2000) ด้วยความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีทำให้ปัจจุบันผู้ผลิตสามารถผลิตถ่านกัมมันต์ออกมาได้หลากหลายรูปแบบ ซึ่งสะดวกและง่ายต่อการนำไปใช้ประโยชน์ โดยจะถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น

- ใช้ในการฟอกสีในอุตสาหกรรมน้ำตาล
- ใช้ในการทำให้ไขมันหรือน้ำมันปราศจากสีหรือมีสีอ่อนลง
- ใช้ในการกำจัดสีและกลิ่นในอุตสาหกรรมเครื่องดื่ม เบียร์ และไวน์
- ใช้ในการดูดซับสีและกลิ่นในการทำน้ำประปา หรือในเครื่องทำน้ำให้บริสุทธิ์

- ใช้ในการทำตัวละลายบริสุทธิ์เพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ในอุตสาหกรรมเส้นใยสังเคราะห์และอุตสาหกรรมการพิมพ์
- ใช้ในการทำแก๊สให้บริสุทธิ์ในอุตสาหกรรมยางและฟิล์มโปร่งแสง
- ใช้ในการทำแก๊สให้บริสุทธิ์ในอุตสาหกรรมเคลือบผ้า
- ทางการแพทย์นำไปใช้ในการกำจัดพิษ การฟอกเลือด และอื่นๆ

ในปัจจุบันได้มีการนำเสนอรูปแบบการใช้ประโยชน์จากถ่านกัมมันต์ได้หลากหลายมากขึ้น เช่น การทำผลิตภัณฑ์ฟอกอากาศ ใช้เป็นวัสดุทำหน้ากากป้องกันแก๊สพิษ เครื่องกันแก๊สพิษกันกรองบูหรี เป็นต้น โดยชนิดของถ่านกัมมันต์ที่นิยมผลิตมีดังนี้

### 2.2.1.1 ถ่านกัมมันต์ชนิดผงละเอียด (Powdered Activated Carbon, PAC)

โดยทั่วไปขนาดของผงถ่านจะมีเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ระหว่าง 0.15-0.25 มิลลิเมตร สามารถกระจายในน้ำได้ดีแต่ไม่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ จะถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับสารละลายหรือของเหลว เนื่องจากมีสัดส่วนของพื้นที่ผิวต่อปริมาตรมาก

### 2.2.1.2 ถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ด (Pellet)

โดยทั่วไปถ่านชนิดนี้จะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไม่เกิน 5 มิลลิเมตร ถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมการทำแก๊สให้บริสุทธิ์ในการดูดซับแก๊สหรือไอของสาร หรือการทำให้ตัวทำละลายที่ใช้แล้วบริสุทธิ์ขึ้นเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ ถ่านกัมมันต์ชนิดนี้เมื่อถูกใช้ไปแล้วนั้นจะสามารถนำกลับมาทำให้บริสุทธิ์และนำมาใช้ประโยชน์ใหม่ได้อีก โดยแบ่งได้ 2 แบบ ได้แก่

1) **ถ่านกัมมันต์แบบเม็ดอัด** (Compressed PAC) เป็นถ่านกัมมันต์ที่ถูกขึ้นรูปด้วยการนำผงถ่านกัมมันต์มาอัดให้เป็นแท่งหรือเป็นเม็ด ถ่านประเภทนี้เหมาะกับการกรองหรือดูดซับแก๊ส เนื่องจากทำให้ความดันตกคร่อม (pressure drop) น้อยกว่าถ่านกัมมันต์ประเภทอื่น นอกจากนี้ถ่านอัดยังมีความแข็งแรงเชิงกลสูง ทั้งยังทำให้เกิดละอองฝุ่นน้อยด้วย

2) **ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด** (Granular Activated Carbon, GAC) ซึ่งจะมีรูปร่างที่ไม่แน่นอน ขึ้นอยู่กับขนาดในการบดและกระบวนการในการผลิต โดยความสามารถในการกรองหรือดูดซับแก๊สก็จะแตกต่างกันออกไป

### 2.2.1.3 ถ่านกัมมันต์เคลือบผิว (Surface Coating-Activated Carbon)

เป็นถ่านกัมมันต์พิเศษที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวดูดซับให้กับสารดูดซับเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับโดยการเคลือบผิวถ่านกัมมันต์ด้วยสารอื่นๆ ได้แก่ สารประกอบเชิงซ้อนของโลหะบางประเภท สารพอลิเมอร์บางชนิด กรดหรือด่าง เป็นต้น แบ่งได้ 2 แบบ ดังนี้

1) **ถ่านกัมมันต์เคลือบอนุภาค** (Impregnated Carbon) เป็นถ่านกัมมันต์ที่ถูกเติมโมเลกุลสารอนินทรีย์ลงไปในโครงสร้าง เช่น อนุภาคโลหะเงิน ทองแดง โครเมียม และเหล็ก เป็นต้น

ทำให้ถ่านมีคุณสมบัติพิเศษในการฆ่าเชื้อโรคได้ ดังนั้นจึงมีการนำถ่านชนิดนี้มาใช้กับระบบกรองน้ำในเครื่องกรองน้ำ อีกทั้งยังใช้ในการทำหน้ากากป้องกันแก๊สพิษทางทหารด้วย

**2) ถ่านกัมมันต์เคลือบพอลิเมอร์ (Polymers Coated Carbon)** เป็นถ่านกัมมันต์ที่ถูกเคลือบด้วยสารพอลิเมอร์บางชนิดที่มีความเข้ากันได้ทางชีวภาพ (biocompatible polymer) โดยใช้เทคนิคพิเศษ ซึ่งพอลิเมอร์ที่จะนำมาเคลือบนี้ต้องมีสมบัติพิเศษในการยอมให้สารบางชนิดผ่านไปได้นั่นเอง ดังนั้นจึงมีการนำถ่านชนิดนี้มาใช้เป็นวัสดุดูดซับสารหรือไอของแก๊สพิษ หรือนำไปใช้เป็นยาในกระบวนการฟอกเลือดที่เรียกว่า ฮีโมเพอร์ฟิวชัน (Hemoperfusion)

### 2.2.2 ขั้นตอนการผลิตถ่านกัมมันต์

กระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์ โดยขั้นตอนหลักๆ คือการนำวัตถุดิบชีวมวลมาให้ความร้อน ซึ่งเป็นกระบวนการเปลี่ยนแปลงทางอุณหภูมิภายใต้การควบคุมปริมาณหรือในสภาพไร้ออกซิเจน ( $O_2$ ) ซึ่งในการผลิตถ่านกัมมันต์นั้น สามารถแบ่งได้เป็น 2 ขั้นตอนคือ ขั้นตอนการเผาวัตถุดิบให้เป็นถ่านชาร์หรือที่เรียกว่าการคาร์บอนไนเซชัน (Carbonization process) และขั้นตอนการนำถ่านชาร์ไปเพิ่มคุณภาพด้วยวิธีการกระตุ้น (Activation process) ซึ่งการกระตุ้นนี้แบ่งได้เป็น 2 วิธีคือ การกระตุ้นทางกายภาพ (Physical activation) และการกระตุ้นทางเคมี (Chemical activation) ดังนี้

#### 2.2.2.1 ขั้นตอนการคาร์บอนไนเซชัน (Carbonization process)

การคาร์บอนไนเซชันเป็นขั้นตอนการเปลี่ยนวัตถุดิบให้เป็นถ่านชาร์หรือการแยกสลายด้วยความร้อน (Pyrolysis) ซึ่งเป็นการให้ความร้อนแก่วัตถุดิบที่อุณหภูมิสูงในสภาพไร้ออกซิเจนหรือมีปริมาณออกซิเจนจำกัด เพื่อป้องกันไม่ให้ออกซิเจนเกิดการลุกไหม้และกลายสภาพเป็นเถ้า โดยในระหว่างการคาร์บอนไนเซชันธาตุที่ไม่ใช่คาร์บอน เช่น ไฮโดรเจนและออกซิเจนจะถูกขจัดออกไปอยู่ในสถานะแก๊ส จากขั้นตอนนี้จะได้แก๊สผสมไฮโดรคาร์บอน ของเหลวคล้ายน้ำมัน (น้ำมันดินหรือทาร์) กรดแอซิดิก แอซีโตน เมทานอล และของแข็งคาร์บอนหรือถ่านชาร์ ซึ่งถ่านชาร์ที่ได้นี้จะให้ค่าความร้อนสูงกว่าวัตถุดิบชีวมวลเริ่มต้นและไม่มีควัน แต่จะยังมีความสามารถในการดูดซับได้เพียงเล็กน้อย ดังนั้น จึงทำการเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับของถ่านชาร์ได้โดยวิธีการกระตุ้น

#### 2.2.2.2 ขั้นตอนการกระตุ้น (Activation process)

การกระตุ้นเป็นกระบวนการที่เปลี่ยนวัตถุดิบไปเป็นถ่านกัมมันต์ในสภาพที่มีปริมาณออกซิเจนจำกัด ซึ่งเป็นขั้นตอนการเพิ่มคุณภาพและประสิทธิภาพการดูดซับให้กับถ่านกัมมันต์ จะมีทั้งกระบวนการที่เปลี่ยนวัตถุดิบไปเป็นถ่านกัมมันต์โดยตรง และกระบวนการที่

เปลี่ยนวัตถุดิบไปเป็นถ่านชาร์ จากนั้นจึงเปลี่ยนถ่านชาร์ไปเป็นถ่านกัมมันต์ โดยทั่วไปการกระตุ้นทำได้ 2 วิธี คือ การกระตุ้นทางกายภาพ และการกระตุ้นทางเคมี (Ahmadpour and Do, 1996) ดังนี้

**1) การกระตุ้นทางกายภาพ (Physical activation)** เป็นขั้นตอนการทำให้ถ่านชาร์เกิดการพัฒนารูพรุนได้มากขึ้น โดยการออกซิไดซ์ด้วยแก๊ส เช่น แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) หรือไอน้ำ (H<sub>2</sub>O) เป็นต้น โดยใช้อุณหภูมิกระตุ้นค่อนข้างสูงในช่วง 800-1,100 องศาเซลเซียส ขึ้นกับชนิดของวัตถุดิบ ซึ่งในระหว่างการกระตุ้นจะเกิดปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชัน (gasification) ระหว่างแก๊สออกซิไดซ์กับสารระเหยที่ตกค้างอยู่ในถ่านชาร์และอะตอมคาร์บอน ทำให้มีการพัฒนารูพรุนเกิดขึ้น ในการกระตุ้นด้วยไอน้ำ ไอน้ำที่ใช้ต้องเป็นไอน้ำที่ร้อนยิ่งยวด (superheated steam) เพื่อให้สารอินทรีย์ต่างๆ สลายตัวไป โดยเมื่อไอน้ำสัมผัสกับถ่านชาร์จะเกิดปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันขึ้นระหว่างไอน้ำและอะตอมคาร์บอน ตามสมการปฏิกิริยาดังนี้



จากปฏิกิริยานี้ทำให้เกิดแก๊สผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สเชื้อเพลิง เรียกว่า Syngas ประกอบไปด้วยสารอินทรีย์ต่างๆ เช่น คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และไฮโดรเจน (H<sub>2</sub>) โดยแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ที่เกิดขึ้นบางส่วนนี้จะทำปฏิกิริยากับไอน้ำควบคู่ไปด้วย (ดังสมการ (2.2)) ทำให้มีแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เกิดขึ้นในระบบ ส่วนการกระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ สมการปฏิกิริยาแสดงได้ดังนี้



จากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนี้ได้แก๊สผลิตภัณฑ์เป็นแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ ซึ่งเมื่อแก๊สเชื้อเพลิงที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่นี้หลุดออกไป จะทำให้โครงสร้างภายในของถ่านชาร์เกิดการเปลี่ยนแปลง โดยมีลักษณะเป็นรูพรุนกระจายอยู่ทั่วไป แต่รูพรุนที่ได้จากการกระตุ้นด้วยวิธีนี้จะมีขนาดเล็กกว่าการกระตุ้นทางเคมี (Lua and Guo, 1998) ซึ่งส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับของถ่านกัมมันต์และจากการที่ไอน้ำหรือแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ทำปฏิกิริยากับคาร์บอนพร้อมทั้งดูดความร้อนจากผิวคาร์บอนนี้ ทำให้ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นแบบดูดความร้อน (endothermic reaction) ข้อดีของการ

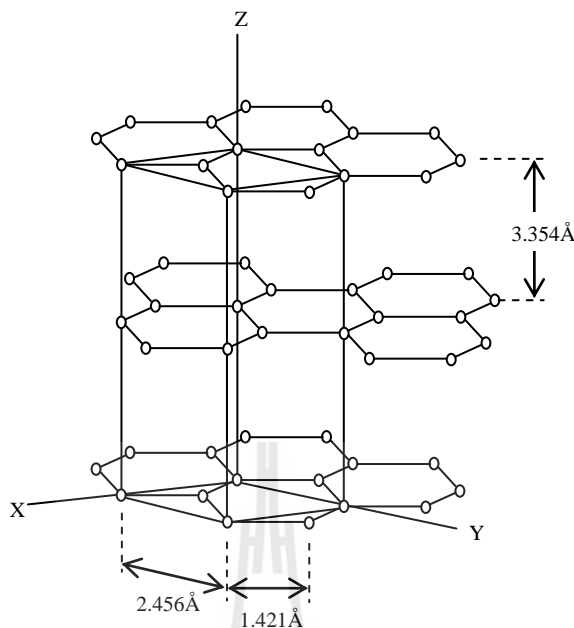
กระตุ้นถ่านกัมมันต์ด้วยวิธีนี้คือ ถ่านกัมมันต์ที่ได้ไม่มีสารเคมีตกค้างเหมือนการกระตุ้นทางเคมีจึงสามารถนำไปใช้งานได้ทันทีโดยไม่ต้องล้างสารเคมีที่ตกค้างออก (Karaosmanoglu et al., 2000)

2) การกระตุ้นด้วยสารเคมี (Chemical activation) เป็นการผลิตถ่านกัมมันต์โดยการผสมสารเคมีที่ทำหน้าที่เป็นสารกระตุ้นเข้ากับวัตถุดิบ จากนั้นนำวัตถุดิบที่ได้ไปผ่านกระบวนการคาร์บอนในเซชันที่อุณหภูมิแตกต่างกันในช่วงประมาณ 400-700 องศาเซลเซียส ขึ้นกับสารเคมีที่ใช้ในการกระตุ้น โดยสารเคมีที่นิยมใช้กันมากมักมีคุณสมบัติดูดน้ำได้ (dehydrating agent) เช่น แคลเซียมคลอไรด์ ( $\text{CaCl}_2$ ), ซิงค์คลอไรด์ ( $\text{ZnCl}_2$ ), โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{KOH}$ ), โพแทสเซียมซัลไฟด์ ( $\text{K}_2\text{S}$ ), โพแทสเซียมไทโอไซยาเนต ( $\text{KSCN}$ ), กรดฟอสฟอริก ( $\text{H}_3\text{PO}_4$ ) และกรดซัลฟิวริก ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) เป็นต้น ในการทำให้เกิดรูพรุนนั้นทำได้โดยให้ความร้อนแก่วัตถุดิบร่วมกับสารเคมี โดยสารเคมีนี้มีบทบาทในการทำลายโครงสร้างเดิมของวัตถุดิบ เมื่อนำไปผ่านกระบวนการคาร์บอนในเซชัน จะเกิดการสลายตัวของสารองค์ประกอบอินทรีย์บางชนิดบนผิวของวัตถุดิบ ทำให้โครงสร้างเกิดการเชื่อมโยงกันเกิดเป็นโครงข่ายรูพรุน ในการกระตุ้นด้วยวิธีนี้จะยังคงมีสารองค์ประกอบบางชนิดที่ไม่สามารถสลายตัวออกไปได้ ส่งผลให้ได้เนื้อถ่านเพิ่มขึ้นและเกิดทาร์หรือน้ำมันดินได้น้อยลง และจากการที่สารเคมีที่ใช้แทรกตัวอยู่ในโครงสร้างของถ่านกัมมันต์ทำให้ถ่านเกิดการหดตัวได้น้อย และเมื่อนำมาล้างสารเคมีออกจะทำให้ได้ถ่านกัมมันต์ที่มีรูพรุนเพิ่มขึ้น ซึ่งในการกระตุ้นด้วยวิธีนี้อาจมีปัญหาในเรื่องของสารตกค้างในถ่านกัมมันต์ได้

### 2.2.3 โครงสร้างและสมบัติพื้นผิวทางเคมีของถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์เป็นถ่านชนิดหนึ่งที่อยู่ในรูปคาร์บอนอสัณฐาน (Amorphous carbon) ที่โครงสร้างพื้นผิวมีลักษณะเป็นรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมาก โดยทั่วไปแล้วผิวหน้าของถ่านกัมมันต์นั้นไม่มีขั้ว แต่เนื่องจากมีสารประกอบออกไซด์เกิดขึ้นเสมอที่ผิวหน้า และการจัดเรียงของอะตอมอยู่ในลักษณะเฮกซะโกนัล (hexagonal) ทำให้ผิวหน้าของถ่านกัมมันต์มีพื้นที่ผิวสูงกว่าตัวดูดซับชนิดอื่นๆ เช่น ซิลิกาเจล (silica gel) ส่งผลให้สามารถดูดซับสารได้มากกว่า เมื่อทำการศึกษาลักษณะโครงสร้างของถ่านกัมมันต์จากการสะท้อนและการเบี่ยงเบนของรังสีเอ็กซ์เมื่อตกกระทบวัตถุ (X-ray diffraction) เห็นว่า ถ่านกัมมันต์มีโครงสร้างคล้ายกับแกรไฟต์แต่ไม่สมบูรณ์เหมือนกับแกรไฟต์ โดยที่โครงสร้างผลึกของแกรไฟต์แบบเฮกซะโกนัลประกอบไปด้วยชั้นอะตอมคาร์บอนที่ยึดโยงกันเป็นระนาบในรูปของวงเบนซีน (benzene ring) ที่เรียกว่าชั้นแกรฟีน (grapheme layer) ซึ่งแต่ละอะตอมจะเกิดพันธะเดี่ยวกับอีก 3 อะตอมในแผ่นราบในลักษณะสมมาตรกัน โดยยึดเหนี่ยวกันด้วยพันธะโคเวเลนต์ (covalent bond) ความยาวระหว่างอะตอมภายในชั้นประมาณ 1.421 อังสตรอม และชั้นแกรฟีนแต่ละแผ่นราบห่างกัน 3.354 อังสตรอม โดยมีแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals) เป็นแรงยึดเหนี่ยวระหว่างชั้น ซึ่งจัดเป็นแรงดึงดูดอย่างอ่อน ดังแสดงในรูปที่ 2.4

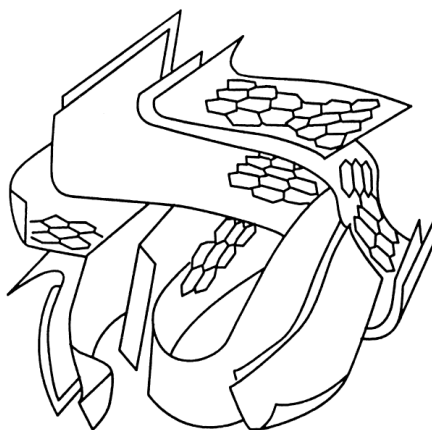




รูปที่ 2.4 โครงสร้างผลึกแกรไฟต์แบบเฮกซะโกนัล (Hexagonal)

Reynolds (1968)

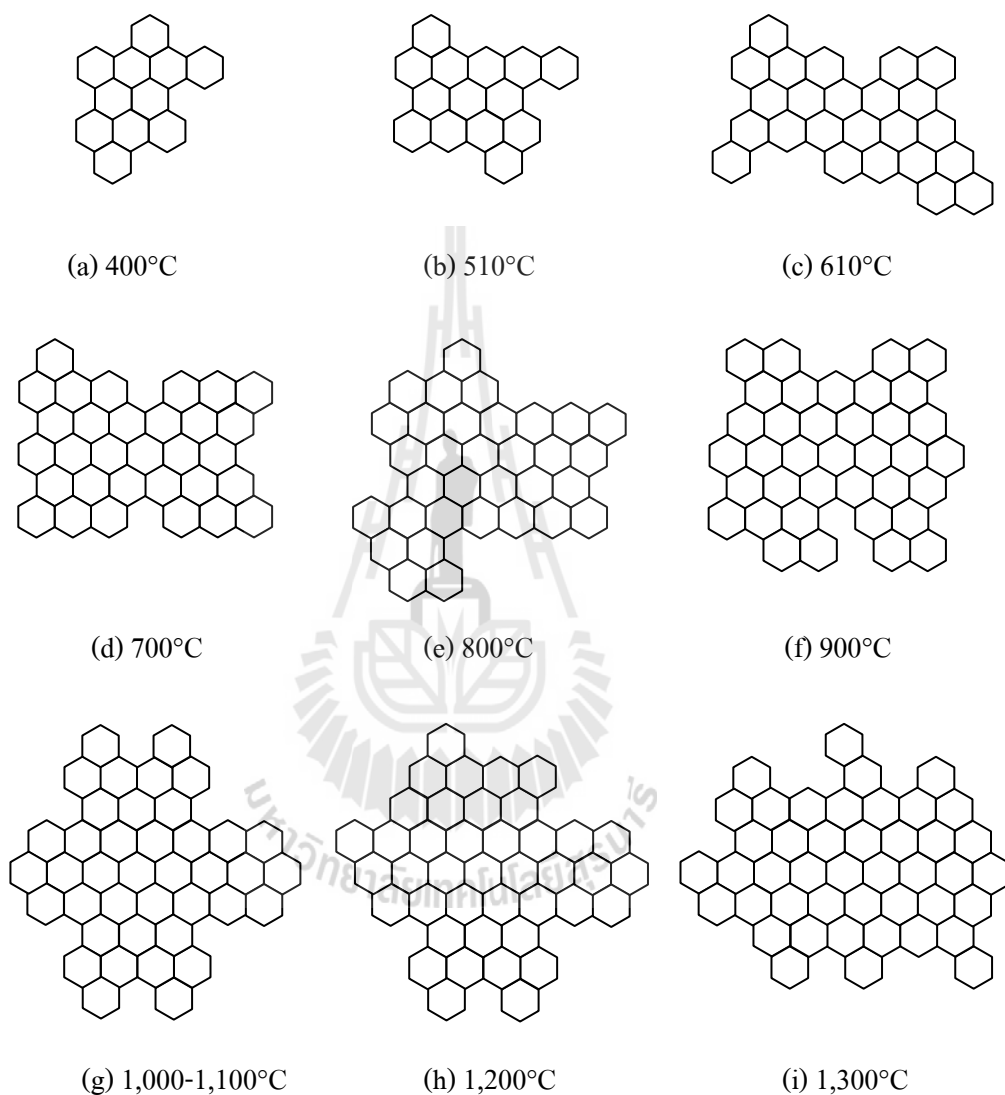
จากการที่โครงสร้างของถ่านกัมมันต์มีลักษณะคล้ายแกรไฟต์ แต่มีการจัดเรียงตัวที่เป็นระเบียบน้อยกว่า โดยการจัดเรียงตัวของผลึกเป็นไปในทิศทางที่ไม่แน่นอน มีการยึดโยงและซ้อนเหลื่อมกันอย่างไม่เป็นระเบียบและมีโครงสร้างของผลึกไม่สมบูรณ์ ทำให้การสลับตำแหน่งในทิศทางขนานกับแผ่นเกิดขึ้นง่ายและมีข้อบกพร่องเกิดขึ้นในโครงสร้างจำนวนมาก ส่งผลให้มีช่องว่างรูพรุนเกิดขึ้น โครงสร้างของถ่านกัมมันต์แสดงดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 โครงสร้างของถ่านกัมมันต์

Rodriguez-Reinoso and Molina-Sabio (1998)

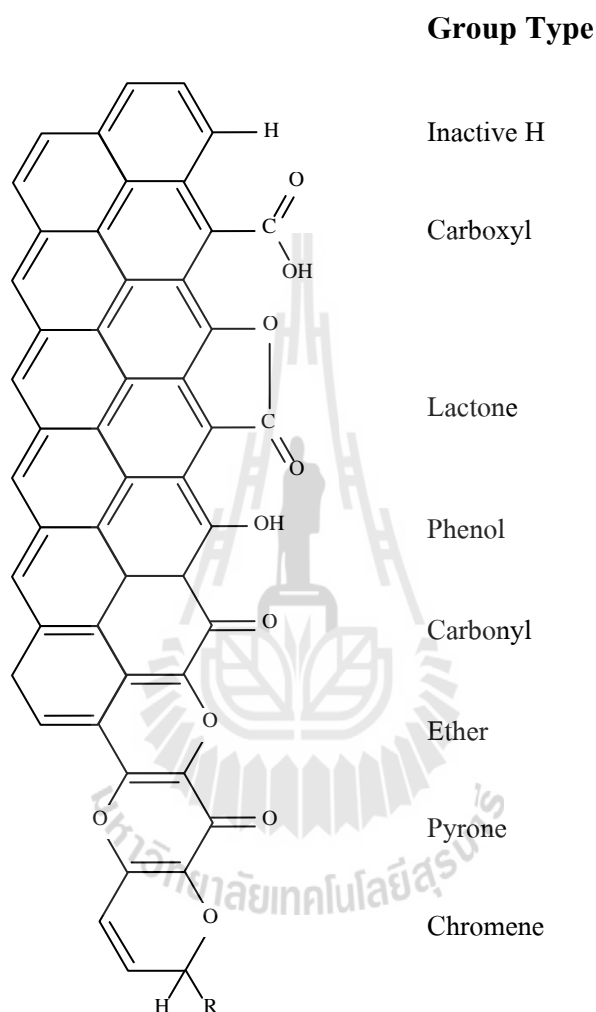
ในการผลิตถ่านกัมมันต์นั้น กระบวนการคาร์บอนในเซชันเป็นขั้นตอนที่สำคัญอีกขั้นตอนหนึ่งในการพัฒนาวัสดุพรุนเบื้องต้นของวัตถุดิบไปเป็นถ่านชาร์ โดยลักษณะการจัดเรียงตัวของอะตอมคาร์บอนของถ่านชาร์นี้ขึ้นกับอุณหภูมิที่ใช้ในการเตรียม ดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 การจัดเรียงคาร์บอนอะตอมของถ่านชาร์ที่แต่ละอุณหภูมิคาร์บอนในเซชัน  
Hassler (1974)

นอกจากนี้ จากการที่โครงสร้างของถ่านกัมมันต์มีลักษณะคล้ายแกรไฟต์โดยประกอบไปด้วยชั้นอะตอมคาร์บอนที่ยึดโยงกันเป็นระนาบในชั้นแกรไฟน์แล้ว ในระหว่างชั้นของแผ่นแกรไฟน์ ยังได้มีการเกาะติดของอะตอมต่างชนิดกันหลายชนิด ได้แก่ ไฮโดรเจน ออกซิเจน ไนโตรเจน

และซัลเฟอร์ เช่นเดียวกับสารอนินทรีย์ต่างๆ จำพวกโลหะออกไซด์และอนุภาคโลหะ อะตอมเหล่านี้พบได้ในรูปของหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวทางเคมีของถ่านกัมมันต์ เช่น คาร์บอกซิล แลคโตน ฟีนอล คาร์บอนิล อีเทอร์ ไพโรน และโครเมิน แสดงดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 ตัวอย่างของหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวทางเคมีของถ่านกัมมันต์

Leon y Leon and Radovic (1994)

#### 2.2.4 สมบัติของถ่านกัมมันต์

ลักษณะสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่เป็นตัวกำหนดประสิทธิภาพในการนำไปใช้งาน ทั้งในด้านการกำจัดสาร การแยกสาร หรือการทำสารให้บริสุทธิ์นั้น ย่อมมีสมบัติที่แตกต่างกันออกไป ขึ้นกับวัตถุประสงค์ของการนำไปใช้งาน ซึ่งสมบัติทั่วไปของถ่านกัมมันต์แสดงในตารางที่ 2.1 โดยการพิจารณาค่าสมบัติต่างๆ ของถ่านกัมมันต์ มีดังนี้

**ค่าไอโอดีน (Iodine Number)** เป็นค่าสำคัญที่ใช้ในการประเมินค่าความพรุนของรูพรุนขนาดเล็ก (microporosity) จากการดูดซับไอโอดีน (0.04-0.1 อังสตรอม) (Henning and Schäfer, 2007) โดยจะพิจารณาที่ค่าไอโอดีนนัมเบอร์เพื่อบอกถึงประสิทธิภาพในการดูดซับของถ่านกัมมันต์ ซึ่งถ้าค่าไอโอดีนนัมเบอร์สูงกว่า 1000 จะเห็นว่า ถ่านกัมมันต์มีรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมาก ส่งผลให้มีปริมาณพื้นที่ผิวในการดูดซับสูง ดังนั้นค่าการดูดซับไอโอดีนจึงถูกใช้เป็นตัววัดประสิทธิภาพของถ่าน โดยจะระบุในหน่วยมิลลิกรัมของไอโอดีนที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักถ่านกัมมันต์ 1 กรัม

**ค่าโมลาส (Molass Number)** เป็นค่าที่ใช้ในการประเมินปริมาณของรูพรุนขนาดใหญ่ (macropore) ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า 20 อังสตรอม โดยทั่วไปค่าโมลาสนัมเบอร์ควรมีค่ามากกว่า 400 ในการพิจารณาค่าโมลาสนัมเบอร์นี้ต่างจากค่าไอโอดีนนัมเบอร์ เนื่องจากเมื่อค่าโมลาสนัมเบอร์มีค่ามาก นั้นหมายถึงว่ามีรูพรุนขนาดใหญ่ปริมาณมาก ซึ่งส่งผลให้มีปริมาณพื้นที่ผิวในการดูดซับลดลง แต่ถ่านกัมมันต์ที่มีรูพรุนขนาดใหญ่จำนวนมากนี้ จะสามารถดูดซับสารที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่อย่างเช่น โมเลกุลสี ได้ดีกว่าถ่านที่มีรูพรุนเล็ก

**แทนนิน (Tannin)** เป็นสารโมเลกุลที่มีทั้งขนาดใหญ่และขนาดกลาง โดยมีโครงสร้างที่ซับซ้อน ค่าปริมาณการดูดซับสารแทนนินของถ่านกัมมันต์นั้น เป็นค่าที่ใช้บอกความสามารถในการดูดซับสารโมเลกุลขนาดใหญ่และขนาดกลางของถ่านกัมมันต์ ซึ่งควรมีค่าอยู่ในช่วง 200-362 พีพีเอ็ม

**เมทิลีนบลู (Methylene Blue)** เป็นสารให้สีที่มีโมเลกุลขนาดกลาง ถูกนำมาใช้เป็นสารดูดซับสำหรับถ่านกัมมันต์ชนิดที่มีรูพรุนขนาดไม่ใหญ่มากหรือมีรูพรุนขนาดกลาง ซึ่งค่าเมทิลีนบลูจะระบุในหน่วยน้ำหนักกรัมของเมทิลีนบลูที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักถ่านกัมมันต์ 100 กรัม

**ความหนาแน่น (Apparent Density)** เป็นค่าที่ใช้บอกถึงประสิทธิภาพในการดูดซับของถ่านกัมมันต์ โดยถ่านกัมมันต์ที่มีความหนาแน่นต่ำจะเป็นถ่านที่มีปริมาตรรูพรุนสูง ทำให้สามารถดูดซับสารได้ในปริมาณมากกว่า

**ค่าความแข็งและค่าการขัดถู (Hardness and Abrasion Number)** เป็นค่าที่ใช้บอกถึงความต้านทานการสึกกร่อนของถ่านกัมมันต์ ความสามารถในการทนต่อแรงเสียดสี และความสามารถในการคงสภาพของถ่านกัมมันต์ที่มีต่อกระบวนการล้างวัสดุกรอง (backwashing) ซึ่งค่านี้จะแตกต่างกันขึ้นกับชนิดของวัสดุดิบและสภาวะที่ใช้ในการกระตุ้นถ่านกัมมันต์ โดยส่วนใหญ่ ค่าความแข็งและค่าการขัดถูนี้จะใช้สำหรับคาร์บอนที่มีการใช้แบบใช้ซ้ำ โดยอาศัยกระบวนการฟื้นฟูสภาพ (reactivation) ของถ่านกัมมันต์

**ปริมาณเถ้า (Ash Content)** โดยทั่วไปในการผลิตถ่านกัมมันต์จะเลือกใช้วัสดุวัตถุดิบที่มีปริมาณเถ้าต่ำ ซึ่งเมื่อนำไปผ่านกระบวนการกระตุ้นแล้วจะทำให้ได้ถ่านกัมมันต์ที่มีค่าพื้นที่ผิวสูงเหมาะกับการนำไปใช้ดูดซับสาร

**ระดับคาร์บอนเตตระคลอไรด์ (Carbon Tetrachloride Activity)** คาร์บอนเตตระคลอไรด์จัดเป็นกลุ่มสารอินทรีย์อันตรายที่ระเหยง่าย ในการดูดซับไอของสารที่สถานะอิมตัวด้วยถ่านกัมมันต์นั้น จะทำให้ทราบสมบัติความพรุนของถ่านกัมมันต์

**ค่าการกระจายตัวของขนาดอนุภาค (Particle Size Distribution)** ค่าการกระจายตัวของขนาดอนุภาคถ่านนั้น เกี่ยวข้องกับขนาดความละเอียดของถ่านกัมมันต์ กล่าวคือ ถ่านมีขนาดอนุภาคละเอียดมากจะเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวของถ่านให้มากขึ้น ซึ่งมีผลทำให้โมเลกุลของสารถูกดูดซับเข้าไปในโครงสร้างถ่านกัมมันต์ได้เร็วขึ้น

ตารางที่ 2.1 สมบัติทั่วไปของถ่านกัมมันต์ (Harry, 2001)

สมบัติทั่วไปของถ่านกัมมันต์	ค่า
1) ไอโซเทิร์มการดูดซับไนโตรเจนที่อุณหภูมิ -196 องศาเซลเซียส - พื้นที่ผิวจำเพาะ ( $m^2/g$ ) - ปริมาตรรูพรุนขนาดเล็ก ขนาดกลาง และขนาดใหญ่ ( $cm^3/g$ )	500-2,500 0.5-2.5
2) ค่าความแข็ง	50-100
3) ปริมาณเถ้า (wt%)	1-20
4) ระดับคาร์บอนเตตระคลอไรด์	35-125
5) ค่าไอโอดีน	500-1,200
6) ค่าโมลาส	300-1,500
7) ความจุความร้อนที่ 100 องศาเซลเซียส ( $J/g-K$ )	0.84-1.3
8) การนำความร้อน ( $W/m-K$ )	0.05-0.1

## 2.3 กระบวนการดูดซับ

### 2.3.1 ประเภทของการดูดซับ

การดูดซับเป็นกระบวนการที่โมเลกุลสารถูกดูดซับ (adsorbate) ในสถานะแก๊สหรือของเหลวถูกดึงให้มาเกาะจับและติดที่บริเวณผิวของของแข็งที่ทำหน้าที่เป็นตัวดูดซับ (adsorbent) การดูดซับนี้นับเป็นกระบวนการแยกองค์ประกอบของสารออกจากสารละลายหรือแก๊สอีกวิธีหนึ่ง ความสามารถในการดูดซับสารที่ต่างกัน ขึ้นกับลักษณะและความมีขี้ของผิว โดยแบ่งตัวดูดซับ

ตามลักษณะข้าวของผิวได้ 2 ชนิด คือ ชนิดที่มีข้าว ได้แก่ ซีโอไลต์ ซิลิกาเจล และอะลูมินาออกไซด์ เป็นต้น และชนิดที่ไม่มีข้าว ได้แก่ ถ่านกัมมันต์ และพอลิเมอร์ดูดซับ เป็นต้น ดังนั้นในการที่จะแยก แยกสารองค์ประกอบใดๆ จึงควรเลือกใช้ตัวดูดซับให้เหมาะสมกับสารนั้นๆ

การพิจารณาแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลที่ถูกดูดซับกับผิวของตัวดูดซับ จะทำให้ทราบถึงชนิดของการดูดซับได้ เนื่องจากสารองค์ประกอบแต่ละชนิดในสารละลายหรือแก๊สมีแรงดึงดูดกับตัวดูดซับได้ไม่เท่ากันและมีความสามารถในการกระจายบนผิวที่ต่างกัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะโครงสร้างและสมบัติทางเคมีที่ผิวของตัวดูดซับ และสารที่เป็นตัวถูกดูดซับ โดยการดูดซับสามารถแบ่งตามความแตกต่างของแรงดึงดูดที่เกิดขึ้นในการดูดซับได้เป็น 2 ประเภท ดังนี้

1) **การดูดซับทางกายภาพ** (Physical adsorption) เป็นการดูดซับที่เกิดจากแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals) ซึ่งเป็นแรงดึงดูดอย่างอ่อน เป็นกระบวนการคายความร้อนที่มักเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำ มีค่าความร้อนของการดูดซับต่ำ ทำให้กระบวนการสามารถผันกลับ (reversible) ไปมาได้ ส่งผลให้ตัวดูดซับฟื้นฟูสภาพ (regenerate) ได้ง่ายขึ้น ที่ความดันสูงจะสามารถเกิดการดูดซับบนผิวของตัวดูดซับได้หลายชั้น ซึ่งจำนวนชั้นของสารถูกดูดซับจะเป็นสัดส่วนกับความเข้มข้นของสารถูกดูดซับ แต่ที่ความดันต่ำ โมเลกุลของตัวถูกดูดซับจะถูกดูดซับไว้แบบชั้นเดียว ดังนั้น การเพิ่มอุณหภูมิหรือลดความดันภายในระบบ จะทำให้ความสามารถในการดูดซับสารบนผิวของตัวดูดซับลดลง เกิดการปล่อยหรือคายสารที่ดูดซับออกมา (desorption) ซึ่งการปลดปล่อยนี้จะไม่ส่งผลทำให้ตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับเปลี่ยนแปลงไปแต่ประการใด

2) **การดูดซับทางเคมี** (Chemical adsorption) เป็นการดูดซับที่มักเกิดขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิวิกฤตของสารถูกดูดซับ มีการยึดเหนี่ยวกันด้วยแรงที่มากกว่าการดูดซับทางกายภาพ โดยเกิดจากการที่หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของตัวดูดซับทำปฏิกิริยาเคมีกับสารถูกดูดซับ เกิดการสร้างพันธะเคมีขึ้นระหว่างกัน ทำให้มีค่าพลังงานกระตุ้นเข้ามาเกี่ยวข้องส่งผลให้ความร้อนของการดูดซับมีค่าสูง การดูดซับจะเกิดขึ้นอย่างจำเพาะเจาะจงบนผิวตัวดูดซับเพียงชั้นเดียวเท่านั้น ซึ่งเมื่อเกิดการดูดซับแล้ว สารถูกดูดซับจะไม่สามารถหลุดออกมาจากผิวตัวดูดซับได้ ซึ่งจะไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาผันกลับได้

### 2.3.2 กลไกการดูดซับ

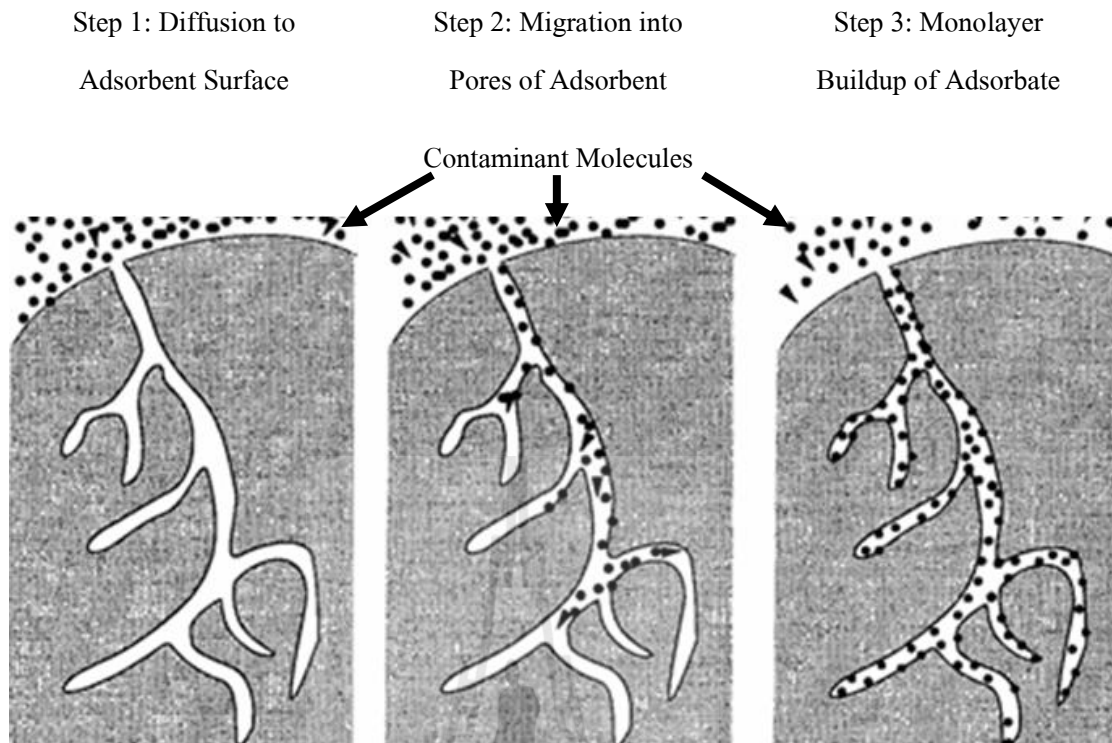
ในกระบวนการดูดซับโดยทั่วไปจะประกอบไปด้วยขั้นตอนของการดูดซับและขั้นตอนการคืนสภาพของตัวดูดซับหรือที่เรียกว่า การคายซับ (desorption) ในขั้นตอนการดูดซับนี้ สารละลายจะถูกส่งผ่านไปบนตัวดูดซับอย่างต่อเนื่องกระทั่งเข้าสู่สมดุลการดูดซับ ทั้งนี้เพื่อให้เกิดความคุ้มค่าในการใช้งานของตัวดูดซับจึงได้มีการคืนสภาพให้กับตัวดูดซับนั้น ซึ่งทำได้โดยการเพิ่ม

อุณหภูมิหรือลดความดันของระบบ ขั้นตอนของการดูดซับบนถ่านกัมมันต์สามารถแบ่งได้เป็น 3 ขั้นตอน (Kenneth et al., 1992) ดังนี้ โดยแสดงกลไกการดูดซับบนถ่านกัมมันต์ได้ดังรูปที่ 2.8

**ขั้นตอนที่ 1** ขั้นตอนการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของสารถูกดูดซับเข้าหาตัวดูดซับ เป็นการเคลื่อนที่ของสารถูกดูดซับให้เข้ามาติดกับผิวนอกของตัวดูดซับ โดยสารที่มีขนาดเล็กกว่า 1 ไมครอน จะเคลื่อนที่ตามธรรมชาติเข้าหาตัวดูดซับหรือเป็นการเคลื่อนที่แบบบราวเนียน (Brownian diffusion) ซึ่งการแพร่กระจายจะทำให้สารที่มีขนาดเล็กเคลื่อนที่ได้มากกว่าและมีโอกาสวิ่งเข้าหาถ่านกัมมันต์ได้มากกว่า แต่สำหรับสารที่มีขนาดใหญ่กว่า 1 ไมครอนนั้น สารจะเคลื่อนที่เข้าหาถ่านกัมมันต์ตามทิศทางกรไหลของของไหล การแพร่กระจายในระดับโมเลกุลจะเกิดขึ้นน้อยมาก โดยที่ขนาดและน้ำหนักของสารถูกดูดซับจะเข้ามามีบทบาทสำคัญในการสร้างกลไกแบบตะกอนและติดค้าง ซึ่งอาจทำให้เกิดการตกตะกอนในทิศทางที่กำลังเคลื่อนที่เข้าหาถ่านกัมมันต์ได้ ดังนั้นขนาดและการกระจายขนาด (size distribution) จึงมีความสำคัญอย่างมากต่อกลไกการเคลื่อนย้ายของสารถูกดูดซับ

**ขั้นตอนที่ 2** ขั้นตอน Pre-diffusion เป็นการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของสารถูกดูดซับเข้าสู่รูพรุนภายในของถ่านกัมมันต์ โดยปกติแล้วถ่านกัมมันต์จะมีฟิล์มของของไหลห่อหุ้มอยู่คล้ายเยื่อต่างๆ โดยรอบ เมื่อโมเลกุลของสารถูกดูดซับเคลื่อนที่เข้ามายังถ่านกัมมันต์ โมเลกุลของสารต้องทำการแทรกตัวผ่านฟิล์มของน้ำให้ได้จึงจะสามารถเข้าไปในผิวถ่านกัมมันต์ได้จึงจะมีการดูดซับเกิดขึ้น เนื่องจากถ่านกัมมันต์จะมีพื้นที่ผิวส่วนใหญ่อยู่ภายในโพรงที่เรียกว่า รูพรุน โดยภายในรูพรุนนี้จะมีช่องเป็นโพรงลัดเลี้ยวไปมา

**ขั้นตอนที่ 3** ขั้นตอนการเกาะติด โดยโมเลกุลของสารถูกดูดซับจะต้องเกาะติดบนผิวภายในของถ่านกัมมันต์ได้โดยไม่หลุดออกไป ซึ่งเป็นขั้นตอนที่รวดเร็วมากเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการแพร่ เมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการนี้ถือว่าเกิดการดูดซับที่ผิวภายในรูพรุนอย่างสมบูรณ์



รูปที่ 2.8 กลไกการดูดซับสารบนถ่านกัมมันต์  
ฐานความรู้การกำจัดกลิ่น กรมควบคุมมลพิษ (2547)

### 2.3.3 สมดุลการดูดซับ

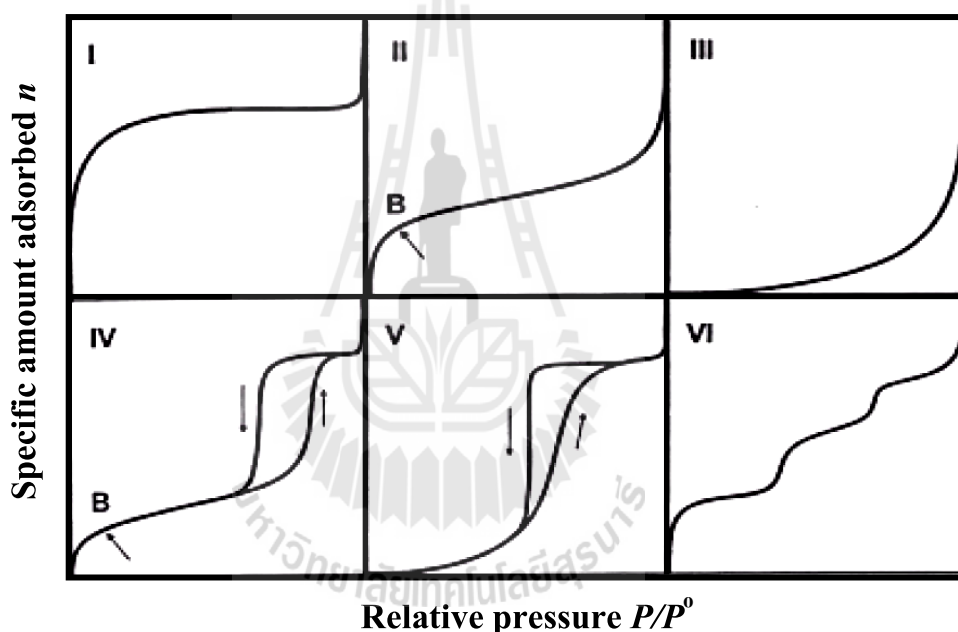
ในกระบวนการดูดซับเมื่อการดูดซับเข้าสู่สมดุล จำนวนโมเลกุลของสารถูกดูดซับที่มาคิดที่ผิวของตัวดูดซับมีค่าเท่ากับจำนวน โมเลกุลของตัวถูกดูดซับที่ออกจากผิวของตัวดูดซับ กล่าวได้ว่าที่สถานะสมดุลนี้เป็นสถานะที่มีปริมาณการดูดซับได้สูงสุด ตัวแปรที่มีผลต่อปริมาณการดูดซับมีหลายตัวแปรด้วยกัน เช่น ชนิดของตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ ตัวทำละลาย และค่าความเป็นกรด-ด่าง เป็นต้น แต่ตัวแปรหลักๆ ที่สำคัญ 2 ตัวแปร คือ อุณหภูมิและความดันสำหรับระบบดูดซับแก๊ส กราฟสมดุลที่นิยมนำมาใช้อธิบายระบบการดูดซับนี้ คือ กราฟไอโซเทิร์มที่อุณหภูมิคงที่ กราฟไอโซบาร์ที่ความดันคงที่ และกราฟไอโซสเทียร์ที่ปริมาณตัวถูกดูดซับคงที่

**2.3.3.1 ไอโซเทิร์มของการดูดซับ (Adsorption Isotherm)** ไอโซเทิร์มของการดูดซับเป็นข้อมูลเชิงฟิสิกส์พื้นฐานที่สถานะสมดุลการดูดซับที่สามารถอธิบายพฤติกรรมของการดูดซับได้ ซึ่งกราฟไอโซเทิร์มจะแสดงความสัมพันธ์ที่แตกต่างกันสำหรับระบบสถานะของเหลวและแก๊ส โดยในสถานะของเหลวจะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของสารตัวถูกดูดซับต่อน้ำหนักของตัวดูดซับเทียบกับความเข้มข้นของสารถูกดูดซับที่เหลืออยู่ในสารละลาย ส่วนในสถานะแก๊สจะ



แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของสารตัวถูกดูดซับต่อน้ำหนักของตัวดูดซับเทียบกับความดันย่อยของแก๊สที่เป็นสารที่ถูกดูดซับ หรือในรูปของความดันสัมพัทธ์ ( $p/p^0$ ) โดย  $p$  คือ ความดันจริงที่วัดได้ในระบบขณะทำการทดลอง และ  $p^0$  คือ ความดันไออิ่มตัวของสารถูกดูดซับที่อุณหภูมิของการดูดซับ ค่าความดันสัมพัทธ์นี้จะมีค่าในช่วง 0 ถึง 1

ชนิดของไอโซเทิร์มการดูดซับแก๊สจำแนกตามระบบ IUPAC ได้ 6 แบบ (Sing et al., 1985) ซึ่งก่อนนั้นได้มีการจำแนกตามแบบ BDDT (Brunauer, Deming, Deming and Teller) ออกเป็น 5 แบบ คือ แบบที่ 1 ถึงแบบที่ 5 (Type I ถึง Type V) (Brunauer et al., 1940) ต่อมาแบบที่ 6 (Type VI) ได้ถูกเสนอขึ้นโดย Sing ดังแสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 ไอโซเทิร์มของการดูดซับแก๊สที่สภาวะสมดุลที่จำแนกตามระบบ IUPAC  
Sing et al. (1985)

**แบบที่ 1 (Type I)** เป็นไอโซเทิร์มการดูดซับแบบที่ง่ายและพบมากที่สุด ซึ่งมีการดูดซับเพียงชั้นเดียว (monolayer adsorption) เรียกไอโซเทิร์มการดูดซับแบบแลงมัวร์ (Langmuir isotherm) เป็นการดูดซับที่เกิดขึ้นเมื่อขนาดรูพรุนของตัวดูดซับมีขนาดใหญ่กว่าโมเลกุลของสารถูกดูดซับไม่มากนัก การดูดซับในรูพรุนจึงเกิดจากการเรียงโมเลกุลของสารดูดซับได้เพียงชั้นเดียวจนเต็มรูพรุนพบได้ในการดูดซับของตัวถูกดูดซับที่มีรูพรุนขนาดเล็ก ในการดูดซับนี้ปริมาณการดูดซับจะเพิ่มขึ้นและเข้าสู่สมดุลอย่างรวดเร็วในตอนต้นหรือที่ความดันสัมพัทธ์ต่ำๆ

**แบบที่ 2 (Type II)** ลักษณะไอโซเทิร์มเป็นรูปตัว S (S-shaped isotherm) เป็นการดูดซับที่พบได้ในตัวดูดซับที่ไม่มีรูพรุนหรือมีรูพรุนขนาดใหญ่ (macroporous) จากการที่รูพรุนมีการกระจายขนาดในช่วงที่กว้าง การดูดซับจึงเกิดขึ้นได้อย่างต่อเนื่องกระทั่งเกิดการดูดซับแบบชั้นเดียวขึ้นอย่างสมบูรณ์ที่จุดเปลี่ยนกราฟ B (inflection point or knee of isotherm) จากนั้นจำนวนชั้นของการดูดซับจะเริ่มมากขึ้นหรือเรียกว่าแบบหลายชั้น (multilayer adsorption) เมื่อความดันสัมพัทธ์มีค่าสูงขึ้น

**แบบที่ 3 (Type III)** ลักษณะกราฟของไอโซเทิร์มเป็นแบบโค้งหงาย ไม่มีจุดเปลี่ยนกราฟพบได้ในตัวดูดซับที่ไม่มีรูพรุนหรือมีรูพรุนขนาดใหญ่ แต่การดูดซับในระบบนี้แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลสารดูดซับด้วยกันเองมีค่ามากกว่าของสารดูดซับกับตัวดูดซับ ทำให้ปริมาณการดูดซับเกิดขึ้นได้น้อยที่ความดันสัมพัทธ์ต่ำ แต่เมื่อความดันสัมพัทธ์มีค่าสูงขึ้น ความสามารถในการดูดซับจะมากขึ้น เนื่องจากเกิดการดูดซับระหว่างโมเลกุลของสารดูดซับที่มากขึ้น

**แบบที่ 4 (Type IV)** ไอโซเทิร์มการดูดซับลักษณะนี้พบได้ในตัวดูดซับที่มีรูพรุนขนาดกลางเป็นหลัก ในช่วงแรกทีความดันสัมพัทธ์ต่ำ ไอโซเทิร์มจะมีลักษณะคล้ายกับในแบบที่ 2 แต่เมื่อความดันสัมพัทธ์มีค่าสูงขึ้นปริมาณการดูดซับโมเลกุลแก๊สจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและเริ่มคงที่เมื่อความดันสัมพัทธ์มีค่าเข้าใกล้ 1 ในไอโซเทิร์มของการดูดซับแบบนี้ในช่วงที่มีการลดความดันเพื่อคายซับ (desorption) จะมีวงฮิสเทอรีซิส (hysteresis loop) เกิดขึ้น เนื่องจากในขั้นตอนการดูดซับมีการควบแน่นแคปิลารี (capillary condensation) ในรูพรุน ทำให้มีสถานะคล้ายของเหลวและมีแรงตึงผิวเกิดขึ้น ดังนั้นในการคายซับจึงต้องทำการลดความดันของระบบให้ต่ำกว่าความดันในช่วงการดูดซับเพื่อเอาชนะแรงตึงผิวนั้น ทำให้เส้นไอโซเทิร์มในช่วงของการดูดซับและการคายซับไม่ซ้อนทับกัน

**แบบที่ 5 (Type V)** ในช่วงแรกทีความดันสัมพัทธ์มีค่าต่ำ ไอโซเทิร์มของการดูดซับนี้จะคล้ายกับแบบที่ 3 แต่จะมีวงฮิสเทอรีซิสเกิดขึ้นเมื่อโมเลกุลของแก๊สเกิดการควบแน่นในรูพรุนเช่นเดียวกับไอโซเทิร์มการดูดซับแบบที่ 4 พบได้ทั้งในตัวดูดซับที่มีรูพรุนขนาดกลางและขนาดเล็ก

**แบบที่ 6 (Type VI)** เป็นไอโซเทิร์มแบบขั้นบันได (stepped isotherm) ที่จะเกิดการดูดซับโมเลกุลของแก๊สบนชั้นผิวการดูดซับแบบขั้นต่อขั้นด้วยแรงที่สม่ำเสมอ โดยบันไดแต่ละขั้นจะแสดงถึงลักษณะการดูดซับในแต่ละชั้น

### 2.3.3.2 แบบจำลองสมดุลการดูดซับ

#### สมการแลงมัวร์ (Langmuir equation)

สมการการดูดซับแลงมัวร์ได้ถูกเสนอขึ้นโดย เออร์วิง แลงมัวร์ (Irving Langmuir) (Langmuir, 1916) สำหรับใช้อธิบายการดูดซับแก๊สแบบชั้นเดียวที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวราบ (monolayer adsorption) บนสมมติฐานที่ว่า

- โมเลกุลของสารถูกดูดซับจะถูกดูดซับในปริมาณที่แน่นอน และตำแหน่งที่แน่นอน
- ตัวดูดซับแต่ละโมเลกุลจะดูดซับโมเลกุลของสารถูกดูดซับได้เพียงหนึ่งโมเลกุลเท่านั้น
- ค่าความร้อนของการดูดซับจะเท่ากันและคงที่ตลอดพื้นที่การดูดซับ
- ไม่มีแรงกระทำระหว่างกันสำหรับโมเลกุลที่อยู่ในตำแหน่งใกล้เคียงกัน

โดยพิจารณาว่าที่สภาวะสมดุล อัตราการควบแน่น (ดูดซับ) จากการชนกระทบของโมเลกุลบนพื้นผิวจะเท่ากับอัตราการระเหย (คายสาร) ออกจากพื้นผิวการดูดซับ จากสมมติฐานดังกล่าวสามารถแสดงความสัมพันธ์ของปริมาณการดูดซับและความดันที่อุณหภูมิคงที่ได้สมการไอโซเทิร์มของแลงมัวร์ดังนี้

$$\frac{V}{V_m} = \frac{bP}{1 + bP} \quad (2.4)$$

เขียนในรูปสมการเส้นตรงได้

$$\frac{P}{V} = \frac{1}{bV_m} + \frac{P}{V_m} \quad (2.5)$$

เมื่อ  $V$  = ปริมาณของสารถูกดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)

$V_m$  = ปริมาณของสารถูกดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับสูงสุดแบบชั้นเดียว (monolayer capacity) (มิลลิกรัมต่อกรัม)

$b$  = ค่าคงที่ของสมการแลงมัวร์ (ลิตรต่อมิลลิกรัม)

$P$  = ความดันสมดุลของตัวดูดซับ

เมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\frac{P}{V}$  กับ  $P$  จะได้กราฟเส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ  $\frac{1}{V_m}$  และจุดตัดแกน  $y$  ที่  $\frac{1}{bV_m}$  ทำให้สามารถหาค่า  $V_m$  และ  $b$  ได้ และจาก  $V_m$  ที่ได้นี้สามารถนำไปคำนวณหาพื้นที่ผิวจำเพาะได้จากสมการ

$$S = V_m A_m L \quad (2.6)$$

เมื่อ  $S$  = พื้นที่ผิวจำเพาะ (ตารางเมตรต่อกรัม)  
 $A_m$  = พื้นที่เฉลี่ยที่ถูกปกคลุมด้วยสารดูดซับหนึ่งโมเลกุล (ตารางเมตร)  
 $L$  = ค่าคงที่อะโวกาโดร ( $6.02 \times 10^{23}$  โมเลกุลต่อโมล)  
 $V_m$  = ปริมาณการดูดซับขั้นเดียว (โมลต่อกรัม)

#### สมการฟรุนด์ลิช (Freundlich equation)

สมการการดูดซับฟรุนด์ลิชถูกเสนอขึ้นโดย ฟินเลย์ ฟรุนด์ลิช (Finlay Freundlich) (Freundlich, 1906) ภายใต้สมมติฐานที่ว่า การดูดซับเกิดขึ้นบนพื้นผิวที่มีลักษณะไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (heterogeneous) นั่นคือ มีการกระจายของพลังงานการดูดซับ โดยมีการจัดเรียงตัวของโมเลกุลของสารดูดซับบนพื้นผิวดูดซับเป็นแบบชั้นเดียว ที่บริเวณการดูดซับแบ่งเป็นกลุ่มๆ โดยค่าความร้อนของการดูดซับที่เกิดขึ้นในแต่ละกลุ่มที่เกิดการดูดซับมีการกระจายตัวแบบเอกซ์โพเนนเชียล รูปแบบสมการแสดงได้ดังนี้

$$n = KP^{1/m} \quad (2.7)$$

เขียนในรูปของสมการเส้นตรงได้

$$\log n = \log K + \frac{1}{m} \log P \quad (2.8)$$

เมื่อ  $K$  = ค่าคงที่การดูดซับฟรุนด์ลิช  
 $m$  = ค่าคงที่ (Freundlich intensity parameter)

เมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\log n$  กับ  $\log P$  จะได้กราฟเป็นเส้นตรง โดยมีความชันเท่ากับ  $\frac{1}{m}$  ซึ่งค่า  $m$  เป็นค่ากำหนดโค้งของไอโซเทิร์ม และมีจุดตัดแกน  $y$  ที่  $\log K$  ทำให้สามารถคำนวณหาค่า  $m$  และ  $K$  ได้

### สมการ BET (BET equation)

สตีเฟน บรูเนาเออร์, พอล แอมเมทท์ และ เอ็ดเวิร์ด เทลเลอร์ (Stephen Brunauer, Paul Emmett และ Edward Teller) (Brunauer et al., 1938) ได้พัฒนาสมการจากแนวความคิดของแลงมัวร์เพื่อการดูดซับโมเลกุลแบบหลายชั้น (multilayer adsorption) โดยมีรูปแบบสมการดังนี้

$$\frac{V}{V_m} = \frac{CP}{(P^o - P)[1 + (C - 1)(P/P^o)]} \quad (2.9)$$

เขียนในรูปของสมการเส้นตรงได้

$$\frac{P}{V(P^o - P)} = \frac{1}{V_m C} + \frac{C - 1}{V_m C} \left( \frac{P}{P^o} \right) \quad (2.10)$$

- เมื่อ
- $P$  = ความดันไออิ่มตัวของสารถูกดูดซับ ที่สภาวะสมดุล
  - $P^o$  = ความดันไออิ่มตัวของสารถูกดูดซับ ที่อุณหภูมิของการดูดซับ
  - $V$  = ปริมาณสารถูกดูดซับที่ความดัน  $P$  (โมลต่อกรัม)
  - $V_m$  = ปริมาณตัวถูกดูดซับที่เรียงแบบชั้นเดียวบนผิวของตัวดูดซับ (โมลต่อกรัม)
  - $C$  = ค่าคงที่ที่ขึ้นกับพลังงานการที่ใช้ในการดูดซับ โดยที่

$$C = \exp \left[ \frac{\Delta H_A - \Delta H_L}{RT} \right] \quad (2.11)$$

- โดยที่
- $\Delta H_A$  = ความร้อนของการดูดซับระหว่างการเกิดการดูดซับแบบชั้นเดียว
  - $\Delta H_L$  = ความร้อนของการควบแน่น
  - $R$  = ค่าคงที่ของแก๊ส (8.314 จูลต่อ โมลเคลวิน)
  - $T$  = อุณหภูมิสัมบูรณ์

เมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\frac{P}{V(P^o - P)}$  กับ  $\frac{P}{P^o}$  จะได้กราฟเส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ  $\frac{C-1}{V_m C}$  ตัดแกน y ที่  $\frac{1}{V_m C}$  ทำให้สามารถคำนวณหาค่า  $C$  และ  $V_m$  ได้ โดยจากค่า  $V_m$  นี้ สามารถนำไปคำนวณหาพื้นที่ผิวจำเพาะของสารได้โดยใช้สมการ (2.6)

## 2.4 กระบวนการสลายตัวทางความร้อน

การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของวัสดุ เป็นวิธีการวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของวัสดุต่างๆ เช่น โพลีเมอร์ สารอินทรีย์หรือสารอนินทรีย์ เซรามิก โลหะ และวัสดุอื่นๆ โดยการวิเคราะห์นี้เป็นการศึกษาน้ำหนักที่หายไปเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิหรือเวลา ซึ่งจะใช้การวัดน้ำหนักอย่างต่อเนื่องด้วยเครื่องชั่งที่มีความไวสูง (Thermobalance) ในระหว่างการวิเคราะห์ อุณหภูมิของตัวอย่างซึ่งอยู่ในบรรยากาศปกติ หรือแก๊สเฉื่อยจะถูกทำให้เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์คือ Thermogravimetric Analyzer (TGA) และข้อมูลการวิเคราะห์จะถูกบันทึกเป็นเทอร์โมแกรมที่แสดงการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของตัวอย่างตามเวลาหรืออุณหภูมิ ข้อมูลเหล่านี้ทำให้ทราบเกี่ยวกับความเสถียรต่ออุณหภูมิของวัสดุ ที่สามารถนำไปวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของสารตัวอย่างที่ทดสอบได้ เช่น การสลายตัวขององค์ประกอบ (Decomposition) หรือการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างเป็นสารใหม่ (Formation) อีกทั้งยังสามารถนำไปวิเคราะห์หาสารที่ระเหยหรือสารเติมแต่งในวัสดุได้อีกด้วย

ระบบการทำงานภายใน TGA ถูกแบ่งเป็น 3 ส่วนคือ

1. เตาเผา (Furnace system หรือ Thermal part) เป็นส่วนที่มีโปรแกรมควบคุมอุณหภูมิ (Temperature Programmer) ควบคุมบรรยากาศและความดัน อุณหภูมิที่เปลี่ยนไปนั้นจะถูกวัดด้วยเทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple)

2. ระบบการชั่งน้ำหนัก (Balance system หรือ Gravimetric part) ภายในระบบนี้จะมี Ultra microbalance ซึ่งทำหน้าที่วัดน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงของสารในขณะที่สารได้รับความร้อน และน้ำหนักมีการเปลี่ยนแปลง ตำแหน่งที่ Balance arm ยื่นออกมาจากเครื่องชั่งนั้นเป็นรูเปิดที่เชื่อมต่อกันระหว่างตัวเครื่องชั่งกับเตาเผา ดังนั้นเพื่อป้องกันไม่ให้แก๊สที่เกิดจากการเผาไหม้เข้าไปรบกวนการวัดหรือทำความเสียหายต่ออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ของระบบการชั่ง จึงต้องทำการป้องกันบริเวณส่วนนี้ด้วยการป้อนแก๊สเฉื่อย (purge gas) ตลอดเวลาที่ทำการวิเคราะห์ โดยแก๊สที่เกิดจากการสลายตัวของสารตัวอย่างนี้จะถูกระบายออกไปทางด้านรูระบาย (vent gas)

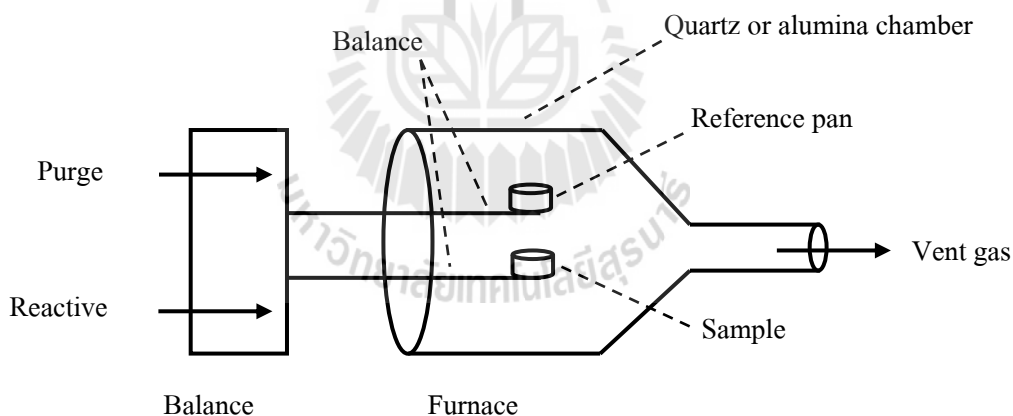
3. ส่วนควบคุม (Control system) เป็นส่วนที่ทำหน้าที่ควบคุมการทำงานของเครื่อง ส่วนควบคุมนี้อาจเป็นอุปกรณ์ตัวหนึ่งที่ติดมากับตัวเครื่อง หรือเป็นเครื่องไมโครคอมพิวเตอร์ที่ควบคุมผ่านทางซอฟต์แวร์ก็ได้

กลไกของการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักตัวอย่างเมื่อทดสอบด้วยเครื่อง TGA  
กรณีน้ำหนักลดลง

- การสลายพันธะ (decomposition)
- การระเหยของสารภายใต้อุณหภูมิช่วงที่ทำการทดสอบ (evaporation)
- สารตัวอย่างทำปฏิกิริยากับ reducing atmosphere (reduction)
- เกิดการคายสาร (desorption)
- เกิดปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชัน (gasification)

กรณีน้ำหนักเพิ่มขึ้น

- สารตัวอย่างทำปฏิกิริยากับ oxidizing atmosphere (oxidation)
- เกิดการดูดซับ (Adsorption)



รูปที่ 2.10 ระบบภายในเครื่องวิเคราะห์การสูญเสียน้ำหนักโดยใช้ความร้อน  
(Thermogravimetric Analyzer, TGA)

## 2.5 แบบจำลองจลนพลศาสตร์ระหว่างแก๊สและของแข็ง

ในการอธิบายจลนพลศาสตร์ของการเกิดปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันระหว่างแก๊สและของแข็ง โดยทั่วไปสามารถอธิบายได้ด้วยแบบจำลองจลนพลศาสตร์ 4 แบบ คือ (1) แบบจำลอง Volume-reaction (VRM) (Ishida and Wen, 1971) สำหรับอธิบายปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นอย่างสม่ำเสมอตลอด

บริเวณพื้นผิวทั่วทั้งอนุภาคของแข็ง (2) แบบจำลอง Shrinking-core (SCM) (Szekely and Evans, 1970) สำหรับอธิบายปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวภายนอกและค่อยๆ เคลื่อนเข้าไปภายในอนุภาคทำให้เกิดการหดตัวของบริเวณเกิดปฏิกิริยาบนอนุภาคของแข็งเมื่อปฏิกิริยาดำเนินไป (3) แบบจำลอง Random-pore (RPM) (Bhatia and Perlmutter, 1980) สำหรับอธิบายถึงการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางกายภาพในการเกิดและการทับซ้อนกันของปริมาตรรูพรุนในขณะที่ปฏิกิริยาดำเนินไป และ (4) แบบจำลอง Modified volume-reaction (MVRM) (Kasaoka et al., 1985) ซึ่งพัฒนามาจากแบบจำลอง Volume-reaction สำหรับอธิบายปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นบริเวณพื้นผิวของอนุภาคของแข็ง โดยพิจารณาให้ค่าคงที่อัตราปรากฏเปลี่ยนแปลงไปตามสัดส่วนการเปลี่ยนแปลงของของแข็ง สรุปได้ดังตารางที่ 2.2 ดังนี้

ตารางที่ 2.2 แบบจำลองจลนพลศาสตร์การเกิดปฏิกิริยาระหว่างแก๊สกับของแข็ง

Model	Assumption	Rate Equation	Conversion Equation
Volume-reaction (VRM)	Homogeneous reaction of a reactant solid	$\frac{dX}{dt} = k_v(1-X)$	$X = 1 - \exp(-k_v t)$
Shrinking-core (SCM)	Shrinking core of nonporous grains as reaction proceeds	$\frac{dX}{dt} = k_s(1-X)^{2/3}$	$X = 1 - (1 - k_s t / 3)^3$
Random-pore (RPM)	Creating and overlapping of pore surfaces as reaction progresses	$\frac{dX}{dt} = k_r(1-X)[1 - \psi \ln(1-X)]^{1/2}$	$X = 1 - \exp\left\{\left[1 - (1 + k_r \psi t / 2)^2\right] / \psi\right\}$
Modified volume-reaction (MVRM)	Apparent rate constant change with solid conversion	$\frac{dX}{dt} = k(X)(1-X)$	$X = 1 - \exp(-k(X)t)$

## 2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Li et al. (2008) ได้ทำการศึกษาผลของสภาวะในการเตรียมถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าว โดยการทำการคาร์บอนไนซ์กะลามะพร้าวที่อุณหภูมิต่างๆ ได้แก่ 400 600 800 และ 1,000 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วนำถ่านชาร์ที่ได้ประมาณ 30 กรัม ไปทำการกระตุ้นในเตาเผาโดยใช้ไอน้ำที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการให้ความร้อน 50 องศาเซลเซียสต่อนาที และอัตราการไหลของไอน้ำ 1.35 กรัมต่อนาที แล้วทำการกระตุ้นที่เวลา 30 60 90 และ 120 นาที ตามลำดับ และจากการกระตุ้นถ่านชาร์ที่เวลาแตกต่างกัน พบว่า ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส ถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการคาร์บอนไนซ์



ที่อุณหภูมิสูงๆ ให้พื้นที่ผิวปริมาตรรวม ปริมาตรรูพรุนขนาดเล็ก และผลผลิตของถ่านกัมมันต์ที่ได้สูงกว่าถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการคาร์บอนไนซ์ที่อุณหภูมิต่ำๆ โดยถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จากการคาร์บอนไนซ์ที่อุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียส และเวลาการกระตุ้น 120 นาที จะมีพื้นที่ผิวเท่ากับ 1,926 ตารางเมตรต่อกรัม ส่วนปริมาตรรวมและปริมาตรรูพรุนขนาดเล็กของถ่านกัมมันต์ คือ 1.26 และ 0.931 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม ตามลำดับ

Guo et al. (2009) ได้ทำการศึกษาสมบัติของถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าวที่ได้จากการทำคาร์บอนไนซ์ชั้นที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจน และในการกระตุ้นนั้น ถ่านชาร์ประมาณ 30 กรัม ถูกนำมาให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 750 800 850 900 และ 950 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการให้ความร้อน 50 องศาเซลเซียสต่อนาที โดยใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในการกระตุ้น ด้วยอัตราการไหลของแก๊ส 200 400 600 800 และ 1,000 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที เป็นเวลา 120 180 240 300 และ 360 นาที ผลกระทบจากอุณหภูมิและเวลาในการกระตุ้น และอัตราการไหลแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีต่อพื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุนรวม ปริมาตรรูพรุนขนาดเล็ก และผลผลิตของถ่านกัมมันต์ที่ได้ พบว่า (i) ที่อุณหภูมิการกระตุ้นที่สูงขึ้นจะส่งผลให้มีการเกิดขึ้นของรูพรุน การขยายขนาดของรูพรุน และการเพิ่มขึ้นของรูพรุนขนาดกลาง (ii) ที่เวลาการกระตุ้นที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้เกิดรูพรุนขนาดเล็กและรูพรุนขนาดกลางขึ้น แต่เมื่อเวลามากขึ้นจะทำให้รูพรุนเกิดการยุบตัว (iii) อัตราการไหลของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้ที่ทุกพื้นที่ผิวกระตุ้นและทำให้เกิดรูพรุน แต่ถ้าอัตราการไหลของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าสูงขึ้นจนเกินไป ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อรูพรุนที่เกิดขึ้น โดยระดับความขรุขระบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ที่ถูกเตรียมขึ้นวัดได้จากสัดส่วนซึ่งคำนวณได้จากทฤษฎี FHH (Frenkel-Halsey-Hill) มีค่าสูงกว่า 2.6 แสดงให้เห็นว่าถ่านกัมมันต์นี้มีโครงสร้างที่ไม่เป็นระเบียบสูงมาก

Lua and Guo (1998) ได้ทำการศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการเตรียมถ่านกัมมันต์จากใยและกะลาปาล์ม ในเบื้องต้นได้ดำเนินการเพื่อศึกษาอิทธิพลของปัจจัยต่างๆ ในการทำไพโรไลซิสที่แตกต่างกัน เช่น ขนาดวัสดุเริ่มต้น อัตราการไหลของแก๊สเฉื่อย อัตราการให้ความร้อน อุณหภูมิและเวลาในการทำไพโรไลซิส โดยถ่านชาร์ที่ได้นี้จะถูกนำไปวิเคราะห์องค์ประกอบแบบประมาณ (Proximate analysis) และศึกษาจลนพลศาสตร์ของการไพโรไลซิส (Pyrolysis kinetic) ซึ่งจากการทดลองนี้สามารถหาพื้นที่ผิว BET พื้นที่ผิวรูพรุนขนาดเล็ก และการกระจายขนาดของรูพรุนได้จากพื้นที่ผิวที่ถูกกระตุ้นและรูพรุนที่เกิดขึ้น ในการทำไพโรไลซิสนั้นทำได้โดยการนำเส้นใยปาล์มประมาณ 15 กรัม มาให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 450 550 650 750 850 และ 950 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศการไหลของไนโตรเจน เป็นเวลา 0.5 1.5 2.5 3.5 และ 4.5 ชั่วโมง ด้วยอัตราการให้ความ

ร้อน 5-20 องศาเซลเซียสต่อนาที และอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 100-250 มิลลิลิตรต่อนาที โดยสภาวะที่เหมาะสมในการทำไพโรไลซิสนั้น พบว่าขนาดวัตต์อุคิบ 0.5-1 มิลลิลิตร ไพโรไลซิสที่ อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3.5 ชั่วโมง ที่อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อ นาที และอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 150 มิลลิลิตรต่อนาที ให้พื้นที่ผิว BET มีค่าสูงสุดที่ 521 ตารางเมตรต่อกรัม



## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินการวิจัย

การวิจัยเรื่อง ผลของสภาวะคาร์บอนในเซชันและการกระตุ้นต่อสมบัติของถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าว มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าว ให้มีความสามารถในการดูดซับสูง โดยเน้นศึกษาในส่วนของขั้นตอนการเตรียมถ่านชาร์ด้วยกระบวนการคาร์บอนที่อุณหภูมิคาร์บอนในเซชันต่างๆ เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิคาร์บอนในเซชันต่อสมบัติของถ่านกัมมันต์ ซึ่งในการดำเนินงานวิจัยนี้ ได้เริ่มตั้งแต่การเตรียมวัตถุดิบจากกะลามะพร้าว จากนั้นนำมาผ่านกระบวนการคาร์บอนในเซชันและการกระตุ้นที่เวลาและอุณหภูมิต่างๆ ได้ผลิตภัณฑ์เป็นถ่านกัมมันต์ โดยมีวิธีการดำเนินการวิจัยดังนี้

#### 3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ในการทดลอง

การผลิตถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าว ในงานวิจัยนี้ประกอบด้วยขั้นตอนการเตรียมและการวิเคราะห์ต่างๆ โดยจำแนกอุปกรณ์และเครื่องมือในขั้นการเตรียมและการวิเคราะห์หลักๆ ดังนี้

##### 3.1.1 เครื่องมือที่ใช้ในการเตรียมถ่านชาร์และถ่านกัมมันต์

- ชุดเครื่องบดย่อยละเอียด
- เครื่องเขย่าพร้อมชุดตะแกรงร่อน
- ตู้อบไล่ความชื้น
- ตู้ดูดความชื้นสุญญากาศ
- เตาเผาแบบท่อแนวนอน (CTF 12/75-Carbolite, UK) (รูปที่ 3.1)

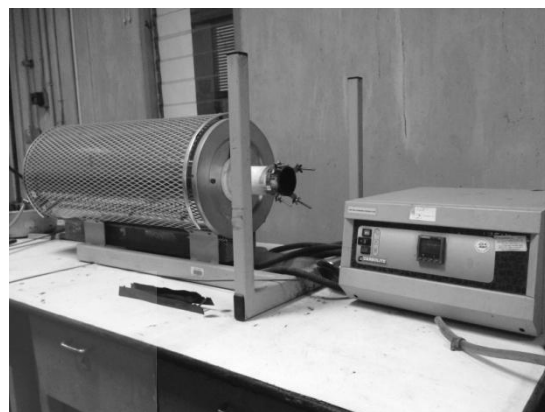
##### 3.1.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์

- เครื่องวัดพื้นที่ผิวจำเพาะและขนาดรูพรุน (micromeritics, ASAP 2010) (รูปที่ 3.2(ก))
- เครื่องวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนชนิด Thermogravimetric analyzer, TGA (SDT 2960 simultaneous DSC-TGA model, TA Instruments) (รูปที่ 3.2(ข))
- เครื่องวิเคราะห์พื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนไมโครสโคปแบบส่องกราด Scanning Electron Microscopic, SEM (JEOL JSM-6400 Scanning Microscope) (รูปที่ 3.3(ก))

- เครื่องวิเคราะห์การดูดซับเชิงน้ำหนัก Intelligent Gravimetric Analyser, IGA (Hiden Isochema Intelligent Gravimetric Analyser, Hiden Analytical) (รูปที่ 3.3(ข))



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.1 เตาเผาแวนอนแบบท่อสำหรับการคาร์บอนไนเซชัน (ก) และการกระตุ้น (ข)



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.2 เครื่องวัดพื้นที่ผิวจำเพาะและขนาดรูพรุน (ก) และเครื่องวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อน (ข)



รูปที่ 3.3 เครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนไมโครสโคปแบบส่องกราด (ก) และเครื่องวิเคราะห์การดูดซับเชิงน้ำหนัก (ข)

### 3.2 วิธีการทดลอง

ในการทดลองนี้ได้ทำการผลิตถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าว โดยเริ่มการทดลองตั้งแต่ขั้นตอนการเตรียมกะลามะพร้าว การทำให้เป็นถ่านชาร์ และการกระตุ้นถ่านชาร์ให้เป็นถ่านกัมมันต์ ซึ่งในการทดลองนี้ยังรวมถึงการวิเคราะห์สมบัติต่างๆ ของกะลามะพร้าว ถ่านชาร์ และถ่านกัมมันต์ โดยกระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์และการวิเคราะห์ต่างๆ แสดงดังรูปที่ 3.4

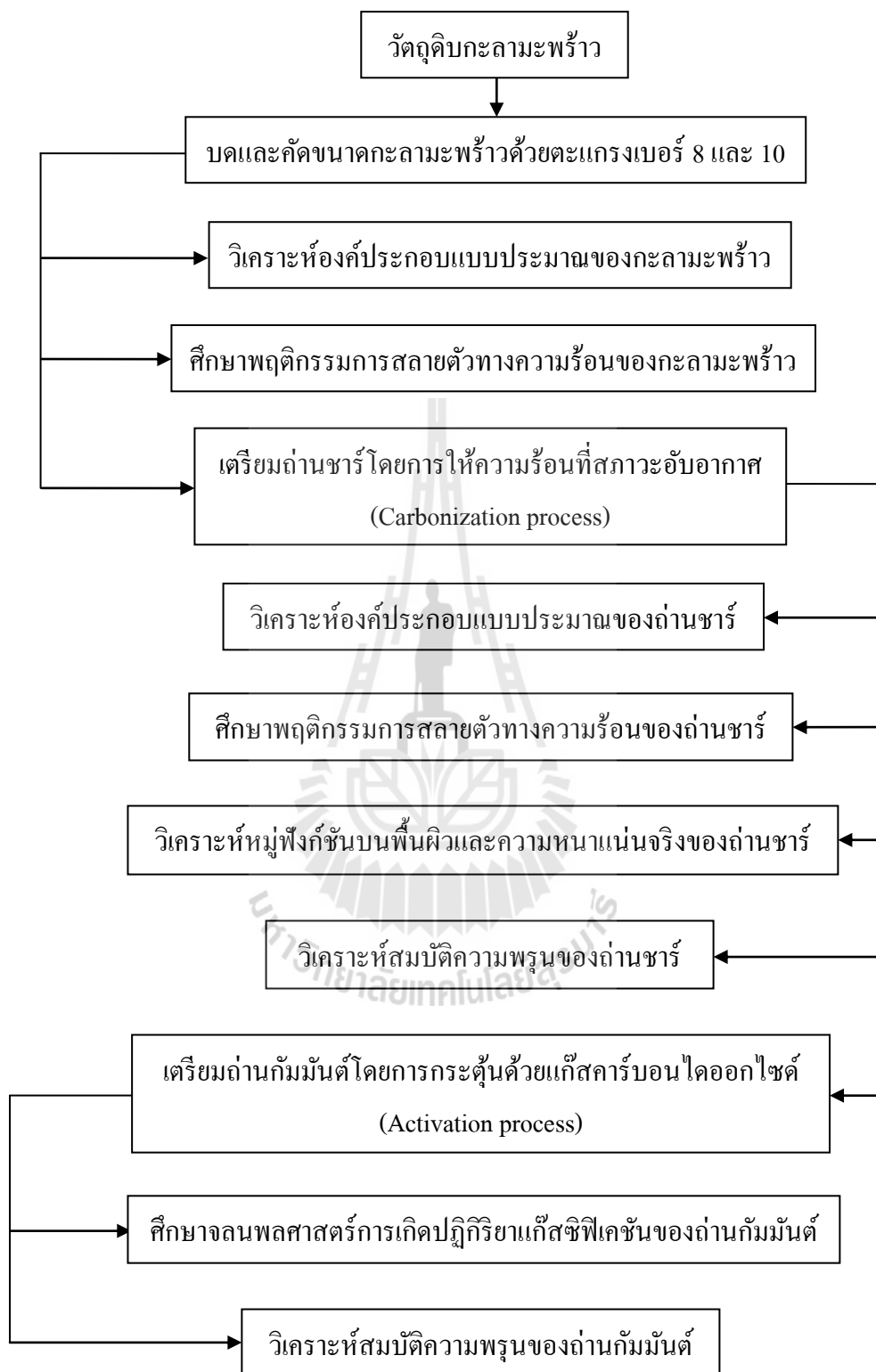
#### 3.2.1 การเตรียมกะลามะพร้าว

กะลามะพร้าวเป็นส่วนเปลือกแข็งอยู่ระหว่างเนื้อมะพร้าวและเปลือกนอกมะพร้าว เมื่อแก่จัดจะมีสีน้ำตาลเหมาะสมแก่การนำมาเป็นวัตถุดิบในการเตรียมถ่านกัมมันต์ โดยวิธีการเตรียมกะลามะพร้าวมีดังนี้

1. นำกะลามะพร้าวมาขูดเส้นใยตรงผิวนอกออกให้หมดแล้วล้างทำความสะอาด จากนั้นนำไปอบไล่ความชื้นในตู้อบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง เพื่อให้กะลามะพร้าวแห้งสนิท

2. บดกะลามะพร้าวในเครื่องบด แล้วนำมาร้อนเพื่อคัดขนาดโดยใช้ตะแกรงเบอร์ 8 และ 10 ( $2.36 \times 2.00$  มิลลิเมตร) จะได้เม็ดกะลามะพร้าวขนาดเฉลี่ยประมาณ 2.1 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นขนาดที่เหมาะสมในการดูดซับสาร (Blanco-Castro et al., 2000; Jagtoyen and Derbyshire, 1998)

3. นำกะลามะพร้าวที่คัดขนาดแล้วไปอบเพื่อไล่ความชื้นอีกครั้งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง จากนั้นนำมาเก็บไว้ในตู้ดูดความชื้นสุญญากาศเพื่อรอการวิเคราะห์ต่อไป



รูปที่ 3.4 แผนผังแสดงกระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์และการวิเคราะห์ต่างๆ

### 3.2.2 การเตรียมถ่านชาร์

ในการเตรียมถ่านชาร์จากกะลามะพร้าวนี้เป็นขั้นตอนการนำกะลามะพร้าวมาให้ความร้อนที่สภาพไร้อากาศในเตาเผาแบบท้อเพื่อเพิ่มปริมาณสัดส่วนองค์ประกอบคาร์บอนให้กับถ่านชาร์ ซึ่งนับว่าเป็นขั้นตอนที่สำคัญในการเริ่มต้นการพัฒนาโครงสร้างรูพรุนเบื้องต้นของถ่านกัมมันต์ โดยมีวิธีการทดลองดังนี้

1. นำเม็ดกะลามะพร้าวประมาณ 15 กรัม ไปให้ความร้อนในเตาเผาแบบท้อแบบท้อที่อุณหภูมิที่ศึกษา (250 350 450 550 650 และ 750 องศาเซลเซียส) ภายใต้บรรยากาศการไหลของแก๊สไนโตรเจน ที่อัตราการไหลของแก๊ส 100 มิลลิลิตรต่อนาที และอัตราการให้ความร้อน 5 องศาเซลเซียสต่อนาที เมื่อถึงอุณหภูมิสุดท้ายที่ต้องการ ปล่อยให้เย็นลงอย่างช้าๆ ที่อุณหภูมินี้ต่อไปอีกเป็นเวลา 120 นาที จากนั้นปิดเตาและปล่อยให้ถ่านชาร์เย็นตัวภายใต้บรรยากาศการไหลของแก๊สไนโตรเจน กระทั่งอุณหภูมิลดลงจนถึงอุณหภูมิห้อง

2. นำถ่านชาร์ที่เย็นตัวแล้วไปเก็บไว้ในตู้ดูดความชื้นสูญญากาศเพื่อรอการวิเคราะห์และนำไปกระตุ้นเป็นถ่านกัมมันต์ต่อไป

3. คำนวณหาร้อยละผลผลิตที่ได้จากสมการ

$$\text{ร้อยละผลผลิต} = \frac{\text{น้ำหนักถ่านชาร์} \times 100}{\text{น้ำหนักวัตถุดิบ}} \quad (3.1)$$

### 3.2.3 การกระตุ้นถ่านชาร์

ในขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนการผลิตถ่านกัมมันต์ด้วยวิธีกระตุ้นทางกายภาพด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในเตาเผาแบบท้อแบบท้อ โดยใช้ถ่านชาร์ที่เตรียมจากขั้นตอนการคาร์บอนไนซ์ที่อุณหภูมิในช่วง 250-750 องศาเซลเซียส โดยมีขั้นตอนการกระตุ้นดังนี้

1. นำถ่านชาร์น้ำหนัก 3 กรัม ไปเผาในเตาเผาแบบท้อแบบท้อที่อุณหภูมิ 850 และ 900 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศการไหลผ่านของแก๊สไนโตรเจน ที่อัตราการไหลของแก๊ส 100 มิลลิลิตรต่อนาที และอัตราการให้ความร้อน 5 องศาเซลเซียสต่อนาที

2. เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นถึงอุณหภูมิกระตุ้นที่ต้องการ (850 หรือ 900 องศาเซลเซียส) เปลี่ยนการไหลผ่านของแก๊สไนโตรเจนไปเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ โดยใช้เวลาในการกระตุ้น 60 และ 120 นาที สำหรับอุณหภูมิกระตุ้นที่ 850 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ส่วนที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส ใช้เวลาในการกระตุ้น 60 และ 90 นาที

3. เมื่อครบกำหนดเวลาที่ต้องการแล้ว ทำการปิดเตาและเปลี่ยนการไหลผ่านของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เป็นแก๊สไนโตรเจน จากนั้นปล่อยให้อุณหภูมิลดลงจนถึง

อุณหภูมิห้อง จึงนำถ่านกัมมันต์ที่ได้ออกจากเตาเผา แล้วนำมาเก็บไว้ในตู้ดูดความชื้นสุญญากาศ เพื่อรอการวิเคราะห์ต่อไป

4. นำถ่านกัมมันต์ที่ได้ไปชั่งน้ำหนักเพื่อคำนวณหาร้อยละน้ำหนักที่หายไป และนำไปวิเคราะห์สมบัติต่างๆ ของถ่านกัมมันต์ต่อไป

### 3.2.4 การวิเคราะห์องค์ประกอบของกะลามะพร้าวและถ่านชาร์

ในการวิเคราะห์องค์ประกอบแบบประมาณของกะลามะพร้าวและถ่านชาร์ด้วยเครื่องวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน (TGA) ทำโดยการวางตัวอย่างกะลามะพร้าวหรือถ่านชาร์ลงในถ้วยรับตัวอย่างในเครื่องวิเคราะห์และทำการปรับตั้งค่าต่างๆ ในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ซึ่งใช้ควบคุมการทำงานของเครื่อง จากนั้นเริ่มทำการวิเคราะห์ โดยในระหว่างการวิเคราะห์นี้ระบบจะทำการบันทึกค่าน้ำหนักของถ่านชาร์ที่เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิและเวลา โดยมีวิธีและขั้นตอนในการวิเคราะห์ ดังนี้

1. บรรจุกะลามะพร้าวหรือถ่านชาร์ปริมาณ 30 มิลลิกรัม ลงในถ้วยอะลูมินาสำหรับใส่ตัวอย่างที่วางอยู่บนแขนตาชั่งของเครื่องวิเคราะห์ จากนั้นให้ความร้อนที่อัตรา 5 องศาเซลเซียสต่อนาที ภายใต้การไหลของแก๊สไนโตรเจนที่อัตราการไหล 100 มิลลิลิตรต่อนาที จากอุณหภูมิห้องถึงอุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส โดยคงไว้ที่อุณหภูมินี้เป็นเวลา 30 นาที

2. ปรับเพิ่มอัตราการให้ความร้อนเป็น 10 องศาเซลเซียสต่อนาที จนถึงอุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส และคงไว้ที่อุณหภูมินี้เป็นเวลา 7 นาที

3. เปลี่ยนการไหลของแก๊สไนโตรเจนเป็นอากาศที่อัตราการไหล 100 มิลลิลิตรต่อนาที พร้อมทั้งปรับลดอุณหภูมิลงมาที่ 800 องศาเซลเซียส และคงไว้ที่อุณหภูมินี้เป็นเวลา 60 นาที เพื่อให้แน่ใจว่าน้ำหนักไม่มีการเปลี่ยนแปลงแล้ว จากนั้นทำการปิดเตาและปล่อยให้ระบบเย็นตัวจนถึงอุณหภูมิห้อง

4. นำผลการวิเคราะห์มาพิจารณาค่าการสูญเสียน้ำหนักในแต่ละช่วงอุณหภูมิ ซึ่งจากการวิเคราะห์ทำให้ทราบปริมาณองค์ประกอบแบบประมาณของกะลามะพร้าวหรือถ่านชาร์ ได้แก่ ความชื้น สารระเหย คาร์บอนคงตัว และเถ้า

### 3.2.5 การศึกษาพฤติกรรมการสลายตัวทางความร้อนของกะลามะพร้าวและถ่านชาร์

ในการศึกษาพฤติกรรมการสลายตัวทางความร้อนของกะลามะพร้าวและถ่านชาร์ด้วยเครื่องวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน (TGA) เป็นการให้ความร้อนกับกะลามะพร้าวหรือถ่านชาร์ในอัตราการให้ความร้อนคงที่เพื่อติดตามผลการสูญเสียน้ำหนักขณะให้ความร้อนในแต่ละช่วงอุณหภูมิภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจน โดยมีวิธีและขั้นตอนในการวิเคราะห์ ดังนี้



1. บรรจุกะลามะพร้าวหรือถ่านชาร์ปริมาณ 30 มิลลิกรัม ลงในถ้วยอะลูมินาสำหรับใส่ตัวอย่างที่วางอยู่บนแขนตาชั่งของเครื่องวิเคราะห์ จากนั้นให้ความร้อนที่อัตรา 5 องศาเซลเซียสต่อนาที ภายใต้การไหลของแก๊สไนโตรเจนที่อัตราการไหล 100 มิลลิลิตรต่อนาที จากอุณหภูมิห้องถึงอุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส จากนั้นทำการปิดเตาและปล่อยให้ระบบเย็นตัวจนถึงอุณหภูมิห้อง โดยในระหว่างการวิเคราะห์นี้ระบบจะทำการบันทึกค่าน้ำหนักของถ่านชาร์ที่เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิและเวลา

2. นำผลการวิเคราะห์มาศึกษาพฤติกรรมการสลายตัวขององค์ประกอบลิกโนเซลลูโลส ซึ่งได้แก่ เฮมิเซลลูโลส เซลลูโลส และลิกนิน ตามอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไป

### 3.2.6 การวิเคราะห์สมบัติความพรุนของถ่านชาร์

สำหรับการวิเคราะห์สมบัติความพรุนของถ่านชาร์ ทำได้โดยการวิเคราะห์การดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส ด้วยเครื่องวิเคราะห์ Intelligent Gravimetric Analyser (IGA) ซึ่งในการวิเคราะห์นี้แบ่งการทดลองออกเป็นสองขั้นตอนด้วยกันคือ ขั้นตอนการไล่แก๊ส (degassing) และขั้นตอนการวิเคราะห์ โดยมีวิธีการทดลองดังนี้

1. นำตัวอย่างถ่านชาร์ที่จะทำการวิเคราะห์ประมาณ 0.2 กรัม ใส่ลงในกรวยแขนตาชั่ง แล้วประกอบชุดให้ความร้อนเข้ากับเครื่องวิเคราะห์ จากนั้นทำการไล่แก๊สที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการให้ความร้อน 5 องศาเซลเซียสต่อนาที เป็นเวลา 5 ชั่วโมง

2. เมื่อไล่แก๊สเสร็จแล้ว จากนั้นเริ่มการวิเคราะห์การดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ โดยควบคุมอุณหภูมิการดูดซับที่ 0 องศาเซลเซียส ที่ความดันสูงสุด 5 บาร์

3. หลังจากการวิเคราะห์ ระบบจะทำการบันทึกข้อมูลต่างๆ เช่น ค่าน้ำหนักและความดันที่เพิ่มขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป รวมทั้งแสดงข้อมูลไอโซเทอรั่มการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

### 3.2.7 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของถ่านชาร์

การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของถ่านชาร์นั้นเป็นการศึกษาความว่องไวของถ่านชาร์ต่อการเกิดปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันในขั้นตอนการกระตุ้นเป็นถ่านกัมมันต์โดยการสร้างหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบบนพื้นผิวของถ่านชาร์ ทำได้โดยวิธีออกซิเดชันถ่านชาร์ด้วยอากาศที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดติดไฟ โดยปริมาณและชนิดของหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวจะเป็นตัวบ่งชี้ทางอ้อมถึงความว่องไว (Reactivity) ของถ่านชาร์ ซึ่งสามารถวิเคราะห์ปริมาณหมู่ฟังก์ชันได้ด้วยวิธีการไทเทรตของโบห์ม (Boehm titration method) โดยหมู่ฟังก์ชันที่ได้จากการวิเคราะห์ ได้แก่ หมู่ฟังก์ชันเบส หมู่ฟังก์ชันกรดรวม หมู่ฟังก์ชัน carboxylic หมู่ฟังก์ชัน lactonic และหมู่ฟังก์ชัน phenolic อธิบายวิธีการทดลองได้ดังนี้

1. นำถ่านชาร์ประมาณ 7 กรัม ไปให้ความร้อนที่อัตรา 5 องศาเซลเซียสต่อนาที ภายในเตาเผาแบบท่อแนวนอน ภายใต้บรรยากาศการไหลของอากาศที่อัตราการไหล 100 มิลลิลิตรต่อนาที จนถึงอุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส และคงไว้ที่ค่าอุณหภูมินี้เป็นเวลา 12 ชั่วโมง เพื่อเพิ่มหมู่ฟังก์ชันออกซิเจนบนพื้นผิว จากนั้นปล่อยให้ถ่านชาร์เย็นตัวแล้วนำไปเก็บไว้ในตู้ดูดความชื้นสุญญากาศ

2. แบ่งการทดลองออกเป็น 4 ชุด โดยการเตรียมสารละลาย 4 ชนิด ดังนี้

(1) สารละลายเบส NaOH เข้มข้น 0.1 โมลาร์ ปริมาตร 50 มิลลิลิตร สำหรับการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันกรวม

(2) สารละลายเบส  $\text{NaHCO}_3$  เข้มข้น 0.1 โมลาร์ ปริมาตร 50 มิลลิลิตร สำหรับการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน carboxylic

(3) สารละลายเบส  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  เข้มข้น 0.05 โมลาร์ ปริมาตร 50 มิลลิลิตร สำหรับการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน carboxylic และ lactonic

(4) สารละลายกรด HCL เข้มข้น 0.1 โมลาร์ ปริมาตร 50 มิลลิลิตร สำหรับการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันเบสรวม

3. แخذถ่านชาร์ที่ผ่านการออกซิไดซ์แล้วปริมาณ 1 กรัม ในสารละลายแต่ละชุด พร้อมทั้งเขย่าสารละลายกับถ่านชาร์เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นทำการกรองเอาถ่านชาร์ออกจากสารละลายที่ได้

4. นำสารละลายที่ได้แต่ละชุดมาทำการไทเทรตโดยสารละลายชุดที่ (1) (2) และ (3) ไทเทรตกับสารละลายกรด HCL เข้มข้น 0.1 โมลาร์ และสารละลายชุดที่ (4) ไทเทรตกับสารละลายเบส NaOH เข้มข้น 0.1 โมลาร์ จากนั้นคำนวณหาปริมาณหมู่ฟังก์ชันกรดและเบสได้จากปริมาณสารละลายกรด HCL และสารละลายเบส NaOH ที่ใช้ในการไทเทรต

### 3.2.8 การวิเคราะห์ค่าความหนาแน่นของถ่านชาร์ที่สภาวะก่อนกระตุ้น

ในการวิเคราะห์ค่าความหนาแน่นจริง (True density) ของถ่านชาร์ที่สภาวะก่อนกระตุ้นที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส โดยอ้างอิงการคำนวณจากสมบัติความพรุนของถ่านชาร์ที่สภาวะก่อนกระตุ้นด้วยการวิเคราะห์ไอโซเทอรั่มการดูดซับแก๊สไนโตรเจนที่อุณหภูมิ -196 องศาเซลเซียส ซึ่งมีวิธีการวิเคราะห์สำหรับถ่านชาร์ที่เตรียมขึ้นจากอุณหภูมิคาร์บอนในเซชันต่างๆ ดังนี้

1. นำถ่านชาร์ที่สภาวะก่อนกระตุ้นที่จะทำการทดลองบรรจุลงในกระบอกตวงให้ได้ปริมาตรทั้งหมด 1 ลูกบาศก์เซนติเมตร จากนั้นนำถ่านชาร์นี้ไปชั่งน้ำหนักพร้อมบันทึกน้ำหนักของถ่านชาร์ ซึ่งในการทดลองนี้ น้ำหนักของถ่านชาร์ที่เตรียมจากอุณหภูมิคาร์บอนในเซชันในช่วง 250-650 องศาเซลเซียส มีค่าอยู่ในช่วง 0.45-0.64 กรัม

2. เติมน้ำปริมาตร 1 ลูกบาศก์เซนติเมตร ลงในกระบอกตวงที่บรรจุถ่านชาร์ จากนั้นทำการบันทึกค่าระดับน้ำที่อ่านได้จากกระบอกตวง ในขั้นตอนนี้จะใช้หลักการแทนที่ด้วยน้ำของถ่านกัมมันต์ โดยค่าระดับน้ำที่สูงขึ้นจากระดับเดิมของถ่านกัมมันต์ที่ปริมาตร 1 ลูกบาศก์เซนติเมตร เทียบกับค่านี้หนักของถ่านชาร์ก่อนการแทนที่ด้วยน้ำเป็นค่าปริมาตรปรากฏ (apparent volume) ของถ่านชาร์ ซึ่งสามารถนำไปคำนวณค่าความหนาแน่นปรากฏ (apparent density) ได้

3. นำค่าปริมาตรรูพรุนของถ่านชาร์ที่สภาวะก่อนกระตุ้นที่ได้จากการวิเคราะห์ไอโซเทิร์มการดูดซับแก๊สไนโตรเจนที่อุณหภูมิ -196 องศาเซลเซียส มาคำนวณร่วมกับค่าปริมาตรปรากฏที่ได้จากการทดลองเพื่อหาค่าความหนาแน่นจริง (true density) ของถ่านชาร์ที่สภาวะก่อนกระตุ้นในหน่วยกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร โดยใช้สมการคำนวณดังนี้

$$\varepsilon_p = 1 - (\rho_p / \rho_s) \quad (3.2)$$

โดยที่

$$\varepsilon_p = V_{tot} / V_{app} \quad (3.3)$$

เมื่อ	$\varepsilon_p$	คือ	ความพรุนของอนุภาค
	$\rho_p$	คือ	ความหนาแน่นปรากฏของอนุภาค
	$\rho_s$	คือ	ความหนาแน่นจริงของอนุภาค
	$V_{tot}$	คือ	ปริมาตรรูพรุนรวม
	$V_{app}$	คือ	ปริมาตรปรากฏของอนุภาค

จากสมการ (3.1) ได้

$$\rho_s = \frac{\rho_p}{1 - \varepsilon_p} = \frac{W_s / V_{app}}{1 - \varepsilon_p} \quad (3.4)$$

เมื่อ	$W_s$	คือ	น้ำหนักของอนุภาค
	$\rho_s$	คือ	ความหนาแน่นจริงของอนุภาค

### 3.2.9 การวิเคราะห์สมบัติความพรุนของถ่านกัมมันต์

ในการวิเคราะห์สมบัติความพรุนของถ่านกัมมันต์ ทำได้โดยการวิเคราะห์การดูดซับแก๊สไนโตรเจนที่อุณหภูมิ -196 องศาเซลเซียส ด้วยเครื่องวัดพื้นที่ผิวจำเพาะและขนาดรูพรุน จากนั้นนำข้อมูลไอโซเทิร์มการดูดซับที่ได้มาคำนวณสมบัติความพรุนของถ่านกัมมันต์ โดยใช้ทฤษฎีต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง สำหรับขั้นตอนในการวิเคราะห์นี้จะถูกแบ่งออกเป็นสองขั้นตอนด้วยกัน คือในขั้นตอนแรกจะเป็นการไล่แก๊ส (degassing) จากนั้นจึงเริ่มเข้าสู่ขั้นตอนการวิเคราะห์ ดังนี้

1. ชั่งตัวอย่างถ่านกัมมันต์ที่จะทำการวิเคราะห์ใส่ลงไปในหลอดบรรจุตัวอย่าง ประมาณ 0.27-0.28 กรัม แล้วประกอบเข้ากับเครื่องวิเคราะห์ในส่วนของการไล่แก๊ส จากนั้นทำการไล่แก๊สที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส กระทั่งค่าความดันในหลอดบรรจุตัวอย่างต่ำกว่า 50 ไมโครเมตรปรอท ซึ่งจะใช้เวลาประมาณ 4-5 ชั่วโมง

2. เมื่อไล่แก๊สเสร็จแล้ว ทำการชั่งน้ำหนักของถ่านกัมมันต์ที่เหลือและบันทึกข้อมูลลงในโปรแกรม พร้อมทั้งตั้งค่าสภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์ให้สอดคล้องกับตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์ จากนั้นจึงเริ่มการวิเคราะห์ตัวอย่างถ่านกัมมันต์ โดยค่าความดันสัมพัทธ์สูงสุด 0.98

3. หลังจากการวิเคราะห์ ระบบจะทำการบันทึกข้อมูลการวิเคราะห์สมบัติความพรุนต่างๆ ของถ่านกัมมันต์ รวมทั้งแสดงข้อมูลไอโซเทิร์มการดูดซับแก๊สไนโตรเจนด้วย ซึ่งข้อมูลที่ได้นำมาใช้คำนวณสมบัติความพรุนต่างๆ ดังนี้

- ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะคำนวณด้วยสมการ BET
- ปริมาตรรูพรุนทั้งหมดคำนวณจากปริมาตรการดูดซับที่ค่าความดันสัมพัทธ์  $(P/P^0)$  เท่ากับ 0.98 แล้วแปลงให้เห็นปริมาตรของ  $N_2$  ที่สถานะของเหลว
- ปริมาตรรูพรุนขนาดเล็กด้วยสมการ Dubinin-Radushkevich (DR)
- ปริมาตรรูพรุนขนาดกลางจากการพิจารณาการกระจายขนาดรูพรุน (pore size distribution) โดยใช้ทฤษฎี Density functional theory (DFT) (Olivier, 1995)
- ขนาดรูพรุนเฉลี่ยคำนวณด้วยสมการ  $4V/A$

เมื่อ  $V$  = ปริมาตรรูพรุนทั้งหมด (ลูกบาศก์เมตรต่อกรัม)

$A$  = เท่ากับพื้นที่ผิวจำเพาะ ( $S_{BET}$ , ตารางเมตรต่อกรัม)

## บทที่ 4

### ผลการศึกษา และการวิเคราะห์ผล

งานวิจัยนี้ได้ศึกษากระบวนการเตรียมถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าวด้วยวิธีการกระตุ้นทางกายภาพเพื่อให้มีความสามารถในการดูดซับสูง โดยมุ่งศึกษาผลของอุณหภูมิคาร์บอนในเซชันในการเตรียมถ่านชาร์ตต่อสมบัติของถ่านกัมมันต์ ซึ่งในบทนี้จะนำเสนอผลการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพเบื้องต้นของกะลามะพร้าว และผลการวิเคราะห์สมบัติของถ่านชาร์ตและถ่านกัมมันต์ โดยถ่านชาร์ตที่นำมาวิเคราะห์นี้ถูกเตรียมขึ้นที่อุณหภูมิคาร์บอนในเซชันต่างๆ ได้แก่ 250 350 450 550 650 และ 750 องศาเซลเซียส จากนั้นนำถ่านชาร์ตที่ได้ไปกระตุ้นที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 และ 120 นาที และ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 และ 90 นาที ซึ่งข้อมูลจากงานวิจัยนี้สามารถอธิบายการเกิดขึ้นและการพัฒนาของรูพรุนในถ่านกัมมันต์ อีกทั้งยังทำให้ทราบสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าว เพื่อให้ได้ถ่านกัมมันต์ที่มีสมบัติเหมาะสมที่สุดในการนำไปใช้งานในกระบวนการดูดซับ

#### 4.1 สมบัติทางกายภาพเบื้องต้นของกะลามะพร้าว

กะลามะพร้าวเป็นส่วนหนึ่งที่ได้จากเปลือกแข็งด้านในของลูกมะพร้าว โดยความหนาและความแข็งของกะลามะพร้าวขึ้นกับอายุของลูกมะพร้าว ซึ่งสังกะถมะพร้าวแก่ได้จากสีของเปลือกนอกที่จะเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาล ในการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพเบื้องต้นของกะลามะพร้าวนี้ ได้ทำการวิเคราะห์ในส่วนของการวิเคราะห์องค์ประกอบแบบประมาณ (Proximate analysis) และการสลายตัวทางความร้อน (Thermal analysis) ของกะลามะพร้าว ได้ผลดังนี้

##### 4.1.1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของกะลามะพร้าว

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบของกะลามะพร้าวที่สภาวะแห้ง (dry basis) ดังแสดงในตารางที่ 4.1 จะเห็นว่าปริมาณคาร์บอนคงตัว (fixed carbon) ของกะลามะพร้าว มีค่าร้อยละ 23.64 และปริมาณเถ้าค่อนข้างต่ำ โดยคาร์บอนคงตัวของกะลามะพร้าวมีปริมาณมากกว่าของชีวมวลชนิดอื่นๆ เช่น เมล็ดลำไย (Junpirom et al., 2006) ไม้ยูคาลิปตัส (Ngernyen et al., 2006) และเส้นใยปาล์ม (Lua and Guo, 1998) ที่มีร้อยละปริมาณคาร์บอนคงตัวอยู่ที่ 19.6 18.3 และ 18.23 ตามลำดับ โดยทั่วไป สารชีวมวลชนิดต่างๆ รวมถึงกะลามะพร้าวนั้น ประกอบด้วยธาตุองค์ประกอบคาร์บอน

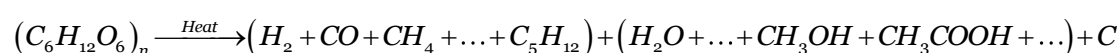
ไฮโดรเจน และออกซิเจน เป็นธาตุองค์ประกอบหลักทางเคมี ซึ่งในการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบแบบแยกธาตุ (Ultimate analysis) นั้น จากการศึกษาของ Weerachanchai et al. (2010) พบว่าธาตุคาร์บอนในกะลามะพร้าวมีปริมาณสูงกว่าธาตุองค์ประกอบอื่นๆ ดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบของกะลามะพร้าว

การวิเคราะห์	ร้อยละโดยน้ำหนัก (dry basis)
<b>องค์ประกอบแบบประมาณ</b>	
สารระเหยได้	76.23
คาร์บอนคงตัว	23.64
เถ้า	0.13
<b>องค์ประกอบแบบแยกธาตุ</b>	
คาร์บอน (C)	49.76
ไฮโดรเจน (H)	5.60
ออกซิเจน (O)	44.30
ไนโตรเจน (N)	0.35

#### 4.1.2 การสลายตัวทางความร้อนของกะลามะพร้าว

ชีวมวลโดยทั่วไปมีองค์ประกอบทางเคมีเป็นวัสดุประเภทลิกโนเซลลูโลส มีโมเลกุลสารอินทรีย์ที่เป็นองค์ประกอบหลัก ได้แก่ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน โดยในชีวมวลต่างชนิดกันจะมีปริมาณขององค์ประกอบเหล่านี้ต่างกันและความสามารถในการสลายตัวเมื่อได้รับความร้อนที่อุณหภูมิต่างๆ ในสภาพไร้อากาศต่างกัน เนื่องจากในแต่ละองค์ประกอบมีโครงสร้างที่ไม่เหมือนกัน ซึ่งองค์ประกอบลิกนินจะเริ่มสลายตัวได้ที่อุณหภูมิต่ำ โดยจะเกิดขึ้นอย่างช้าๆ ในช่วงอุณหภูมิที่กว้าง ส่วนเฮมิเซลลูโลสและเซลลูโลสจะเริ่มสลายตัวได้เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ตามลำดับผลิตภัณฑ์ของแข็งจากกระบวนการนี้เรียกว่าถ่านชาร์ ซึ่งกระบวนการการสลายตัวทางความร้อนนี้สามารถเขียนอธิบายด้วยสมการปฏิกิริยาเคมีเพื่อให้เข้าใจง่ายขึ้น ได้ดังนี้



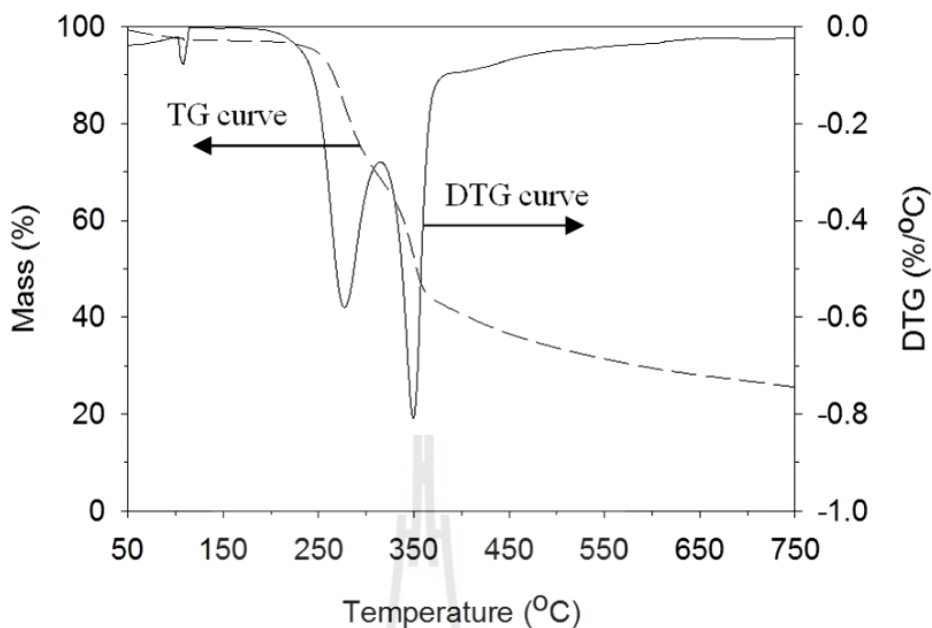
ชีวมวล

แก๊ส

ของเหลว

ถ่าน

จากการวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนของกะลามะพร้าวด้วยเทคนิคการวิเคราะห์เชิงน้ำหนักเมื่อได้รับความร้อน (Thermogravimetric Analysis, TGA) แสดงดังรูปที่ 4.1 โดยในรูปนี้ได้แสดงทั้งผลของการเปลี่ยนแปลงร้อยละของน้ำหนัก (TG curve) และอัตราการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักตามอุณหภูมิ (DTG curve) พบว่า ที่อุณหภูมิในช่วง 100-120 องศาเซลเซียส มีอัตราการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นเนื่องจากการระเหยของความชื้น คิดเป็นร้อยละ 2.8 จากนั้น เมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นในช่วง 200-385 องศาเซลเซียส พบว่ามีอัตราการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นเป็นสองช่วงเนื่องจากการสลายตัวของลิกโนเซลลูโลส ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Antal (1983) ที่กล่าวว่า การสลายตัวของลิกโนเซลลูโลสเริ่มเกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมิ 200-400 องศาเซลเซียส ส่วนการสลายตัวที่พบทั้งสองช่วงในรูปที่ 4.1 นั้น ได้แก่ ช่วงอุณหภูมิระหว่าง 200-315 องศาเซลเซียส และ 315-385 องศาเซลเซียส ซึ่งจากผลการรายงานของ Yang et al. (2007) ระบุว่า การสลายตัวของเฮมิเซลลูโลส เซลลูโลส และลิกนินเกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมิ 220-315 315-400 และ 160-900 องศาเซลเซียส ตามลำดับ เมื่อพิจารณาผลการทดลองกับงานวิจัยดังกล่าว สามารถอธิบายได้ว่า ที่ช่วงอุณหภูมิแรกของการสลายตัวนั้นเป็นการสลายตัวของเฮมิเซลลูโลสและช่วงอุณหภูมิที่สองเป็นการสลายตัวของเซลลูโลส โดยเกิดการสลายตัวมากที่สุดในแต่ละช่วงของการสลายตัวที่อุณหภูมิ 280 และ 350 องศาเซลเซียส ตามลำดับ และมีการสูญเสียน้ำหนักในแต่ละช่วงของการสลายตัวคิดเป็นร้อยละ 28.5 และ 26.6 ตามลำดับ การสลายตัวของลิกนินนั้น จากการรายงานของ Brebu M. and Vasile C. (2010) ระบุว่า ลิกนินเกิดการสลายตัวอย่างช้าๆ ในช่วงอุณหภูมิกว้างกว่าของเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส คือ 200-500 องศาเซลเซียส โดยที่ Gasparovic et al. (2009) ระบุว่า ลิกนินเกิดการสลายตัวได้ในช่วงอุณหภูมิที่กว้างตั้งแต่ 180 จนถึง 900 องศาเซลเซียส ดังนั้น จากการทดลองนี้จึงกล่าวได้ว่า การสลายตัวของลิกนินเกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมิต่ำจนถึงอุณหภูมิสุดท้ายที่ 750 องศาเซลเซียส ซึ่งให้น้ำหนักของถ่านชาร์มีค่าคงเหลือประมาณร้อยละ 26



รูปที่ 4.1 พฤติกรรมการสลายตัวทางความร้อนของอะคราไมด์

## 4.2 สมบัติของถ่านชาร์จากอะคราไมด์

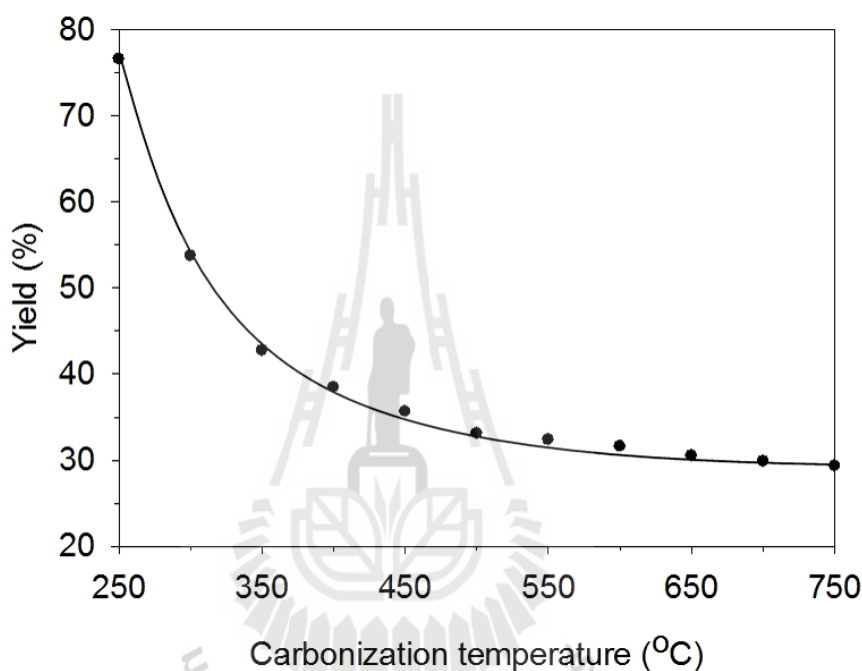
ถ่านชาร์เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการนำอะคราไมด์มาผ่านการคาร์บอนไนซ์ภายใต้บรรยากาศการไหลของแก๊สไนโตรเจน เมื่ออะคราไมด์ได้รับความร้อนสูงขึ้น สารระเหยต่างๆ จะเกิดการสลายตัวตามอุณหภูมิ กระทั่งสิ้นสุดกระบวนการตามอุณหภูมิคาร์บอนไนเซชันที่ต้องการ ผลิตภัณฑ์ของแข็งสุดท้ายที่ได้เรียกว่า ถ่านชาร์ โดยถ่านชาร์ที่ได้นี้ถูกนำไปวิเคราะห์สมบัติต่างๆ รวมถึงการสลายตัวทางความร้อนของถ่านชาร์ต่อไป

### 4.2.1 ร้อยละผลผลิตของถ่านชาร์

ในการศึกษาร้อยละผลผลิตของถ่านชาร์นั้น เป็นขั้นตอนการทดลองในช่วงแรกของการเตรียมถ่านชาร์ โดยการนำอะคราไมด์มาผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชันในเตาเผาแบบท่อ แนวนอนที่อุณหภูมิต่างๆ ในช่วง 250-750 องศาเซลเซียส ผลของอุณหภูมิการ์บอนไนเซชันต่อน้ำหนักของถ่านชาร์ที่เหลือ แสดงดังรูปที่ 4.2 พบว่า เมื่ออุณหภูมิการ์บอนไนเซชันเพิ่มขึ้น น้ำหนักของถ่านชาร์ที่เหลือมีค่าลดลง เนื่องจากสารระเหยต่างๆ ภายในอะคราไมด์เกิดการสลายตัวออกไปในปริมาณมาก โดยในช่วงแรกเกิดการสูญเสียน้ำหนักของอะคราไมด์อย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิในช่วง 250-350 องศาเซลเซียส และสูญเสียน้ำหนักอย่างช้าๆ เมื่ออุณหภูมิมีค่ามากกว่า 350 องศาเซลเซียส กระทั่งเข้าสู่ค่าคงที่ที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส จากความสามารถในการสลายตัวที่ไม่เท่ากันของสารระเหยในแต่ละช่วงอุณหภูมินั้น ทำให้ได้ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักคงเหลือ



กับอุณหภูมิคาร์บอนไนเซชันในลักษณะที่ไม่เป็นเส้นตรงและมีแนวโน้มเข้าสู่ค่าคงที่เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น เมื่อทำการวิเคราะห์ผลที่ได้ร่วมกับการสลายตัวทางความร้อนของกะลามะพร้าว อธิบายได้ว่าในช่วงต้นที่มีการสูญเสียน้ำหนักอย่างรวดเร็วในปริมาณมากนั้นเป็นการสลายตัวของเฮมิเซลลูโลส ซึ่งมีช่วงอุณหภูมิในการสลายตัวที่ต่ำ จากนั้นเป็นการสลายตัวของเซลลูโลส โดยที่ลิกนินสลายตัวได้อย่างช้าๆ ในช่วงอุณหภูมิที่กว้างกว่าตั้งแต่อุณหภูมิต่ำจนถึงอุณหภูมิสุดท้าย

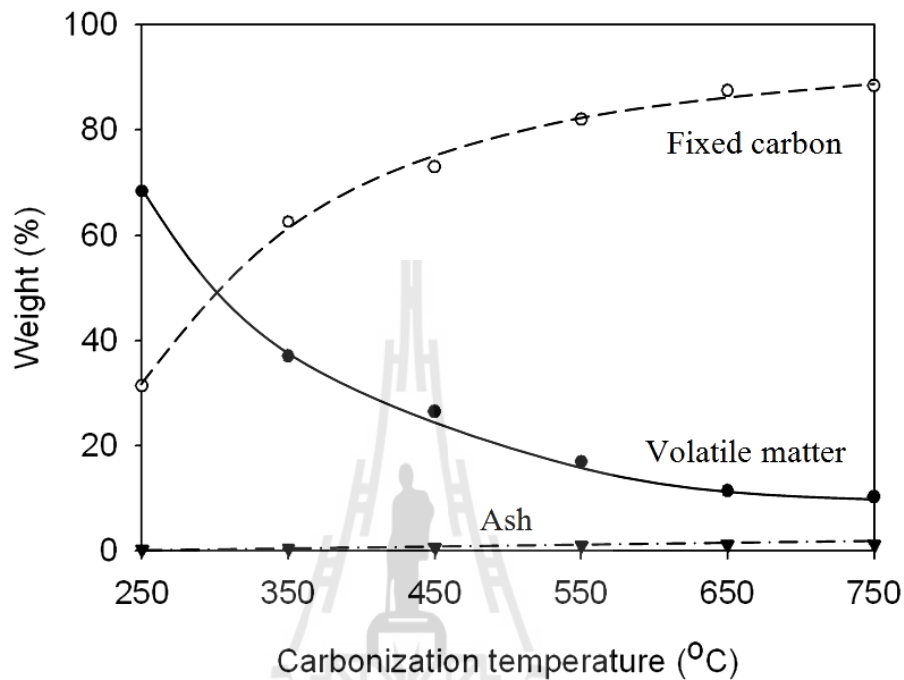


รูปที่ 4.2 อุณหภูมิคาร์บอนไนเซชันต่อการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของถ่านชาร์

#### 4.2.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบแบบประมาณของถ่านชาร์

ในการทดลองส่วนนี้ ได้ทำการวิเคราะห์องค์ประกอบของถ่านชาร์ที่เตรียมได้จากอุณหภูมิคาร์บอนไนเซชันต่างๆ ในช่วง 250-750 องศาเซลเซียส โดยอ้างอิงการคำนวณองค์ประกอบแบบประมาณโดยไม่คิดความชื้น (dry basis) ได้ผลดังแสดงในรูป 4.3 พบว่า องค์ประกอบต่างๆ ของถ่านชาร์มีปริมาณแตกต่างกันตามอุณหภูมิคาร์บอนไนเซชัน โดยเมื่ออุณหภูมิคาร์บอนไนเซชันสูงขึ้นปริมาณคาร์บอนคงตัวและเถ้ามีค่าสูงขึ้นคิดเป็นร้อยละ 31.41-88.42 และ 0.23-1.32 ตามลำดับ ในขณะที่ปริมาณสารระเหยมีค่าลดลงคิดเป็นร้อยละ 68.35-10.26 จากการทดลองนี้กล่าวได้ว่า ที่อุณหภูมิคาร์บอนไนเซชันต่ำ น้ำหนักที่เหลือของถ่านชาร์ส่วนใหญ่เป็นน้ำหนักของสารระเหย ซึ่งเมื่ออุณหภูมิคาร์บอนไนเซชันเพิ่มขึ้น สารระเหยเหล่านี้จะเกิดการสลายตัว ทำให้มีปริมาณ

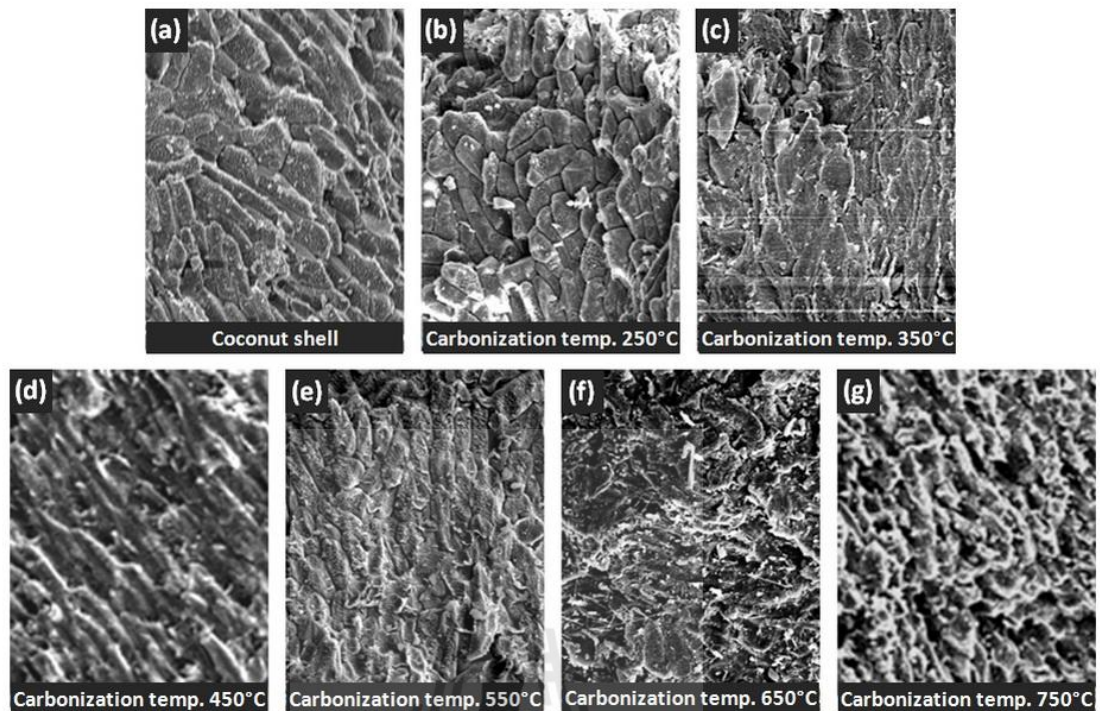
สัดส่วนของคาร์บอนคงตัวเพิ่มมากขึ้น ซึ่งอัตราการลดลงของสารระเหยนี้คล้ายกับผลของร้อยละผลผลิตของถ่านชาร์ เนื่องจากองค์ประกอบส่วนใหญ่ของกะลามะพร้าวเป็นสารระเหยนั่นเอง



รูปที่ 4.3 อุณหภูมิคาร์บอนไนเซชันต่อการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบของถ่านชาร์

#### 4.2.3 ภาพถ่ายลักษณะพื้นผิวของถ่านชาร์

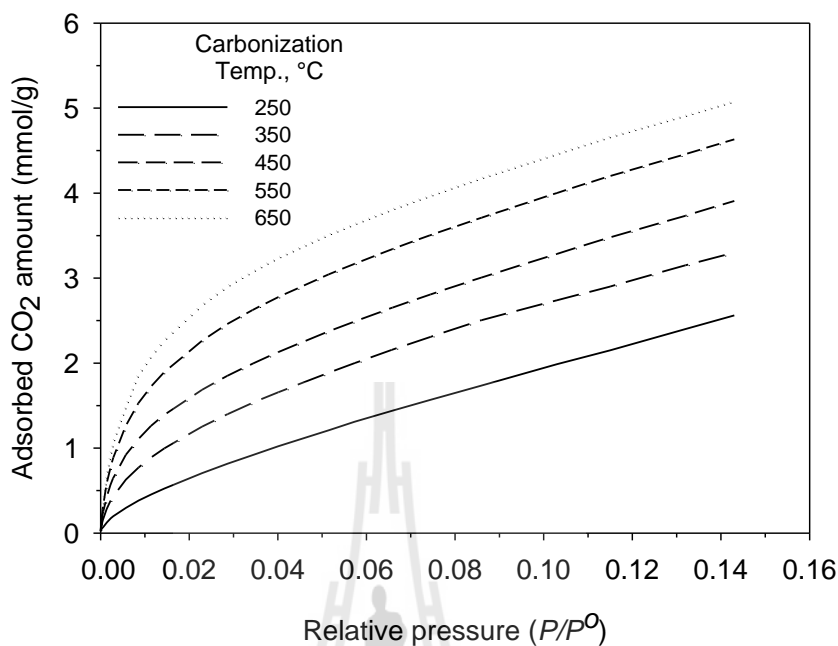
ในการทดลองเพื่อวิเคราะห์ว่าอุณหภูมิคาร์บอนไนเซชันนอกจากจะส่งผลต่อองค์ประกอบถ่านชาร์แล้ว จะส่งผลต่อลักษณะพื้นผิวอย่างไร จึงได้ทำการวิเคราะห์ถ่านชาร์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนไมโครสโคปแบบส่องกราด ให้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.4 โดยรูปที่ 4.4a เป็นภาพถ่ายพื้นผิวของกะลามะพร้าว และรูปที่ 4.4b-4.4g เป็นภาพถ่ายพื้นผิวของถ่านชาร์ที่เตรียมได้จากอุณหภูมิคาร์บอนไนเซชันตั้งแต่ 250 ถึง 750 องศาเซลเซียส ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบลักษณะพื้นผิวของกะลามะพร้าวกับถ่านชาร์ที่ได้ พบว่าพื้นผิวภายนอกของกะลามะพร้าวมีลักษณะเป็นเกล็ด บนพื้นผิวเกล็ดค่อนข้างเรียบวางเรียงซ้อนกันเป็นชั้นๆ และเมื่อนำกะลามะพร้าวมาผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชันที่อุณหภูมิต่างๆ พบว่าพื้นผิวของถ่านชาร์เริ่มขรุขระและไม่เป็นผิวเรียบ โดยความขรุขระเพิ่มมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิคาร์บอนไนเซชันสูงขึ้น ซึ่งความขรุขระของพื้นผิวนี้อาจเกิดขึ้นเนื่องจากการแตกหักของโครงสร้างชีวมวลจากการสลายตัวของสารระเหยต่างๆ เมื่อใช้อุณหภูมิคาร์บอนไนเซชันที่สูงขึ้น



รูปที่ 4.4 อุณหภูมิคาร์บอนไนเซชันต่อการเปลี่ยนแปลงลักษณะพื้นผิวของถ่านชาร์

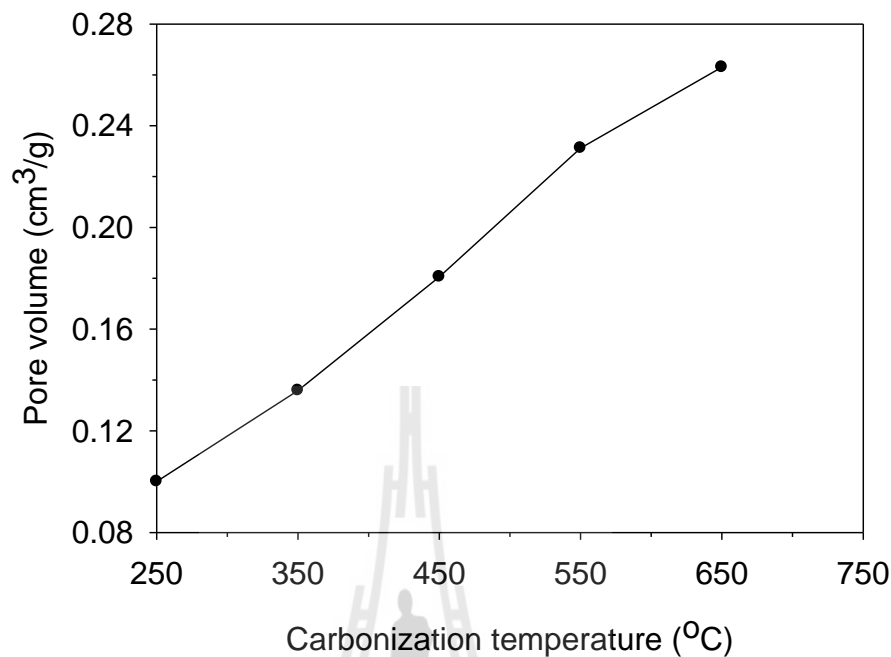
#### 4.2.4 สมบัติความพรุนของถ่านชาร์

ในการวิเคราะห์สมบัติของถ่านชาร์นั้น โดยทั่วไปแล้วถ่านชาร์ที่ถูกเตรียมขึ้นที่อุณหภูมิคาร์บอนไนเซชันต่างกันจะให้สมบัติความพรุนของถ่านชาร์ต่างกัน ในการทดลองนี้จึงได้ทำการวิเคราะห์สมบัติความพรุนของถ่านชาร์ด้วยวิธีการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส เพื่อใช้ตรวจสอบหาปริมาณรูพรุนของถ่านชาร์แทนการวิเคราะห์ด้วยวิธีการดูดซับแก๊สไนโตรเจนมาตรฐาน เนื่องจากรูพรุนของถ่านชาร์มีขนาดเล็กมาก ซึ่งยังไม่มีมีการพัฒนารูพรุนที่สมบูรณ์ ส่งผลให้ไม่สามารถดูดซับแก๊สไนโตรเจนที่อุณหภูมิ -196 องศาเซลเซียส ได้ดีเท่าที่ควร จากการทดลองนี้ ได้ไอโซเทิร์มการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ดังแสดงในรูปที่ 4.5 พบว่าที่อุณหภูมิคาร์บอนไนเซชันสูงขึ้นความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.5 ไอโซเทิร์มการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของถ่านชาร์ที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส

จากข้อมูลไอโซเทิร์มการดูดซับนี้ สามารถนำไปคำนวณหาปริมาณรูพรุนของถ่านชาร์ได้โดยใช้สมการ Dubinin–Radushkevich (DR) (Nguyen and Do, 2001) โดยผลการคำนวณแสดงในรูปที่ 4.6 จากการทดลองพบว่า ปริมาตรรูพรุนเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องเมื่ออุณหภูมิคาร์บอนไนเซชันสูงขึ้น ซึ่งจากข้อมูลไอโซเทิร์มการดูดซับแสดงให้เห็นว่า ปริมาตรรูพรุนมีผลต่อปริมาณการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ โดยเมื่อมีปริมาตรรูพรุนมากความสามารถในการดูดซับก็มากขึ้นด้วย ซึ่งสอดคล้องกับผลการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในรูปที่ 4.5

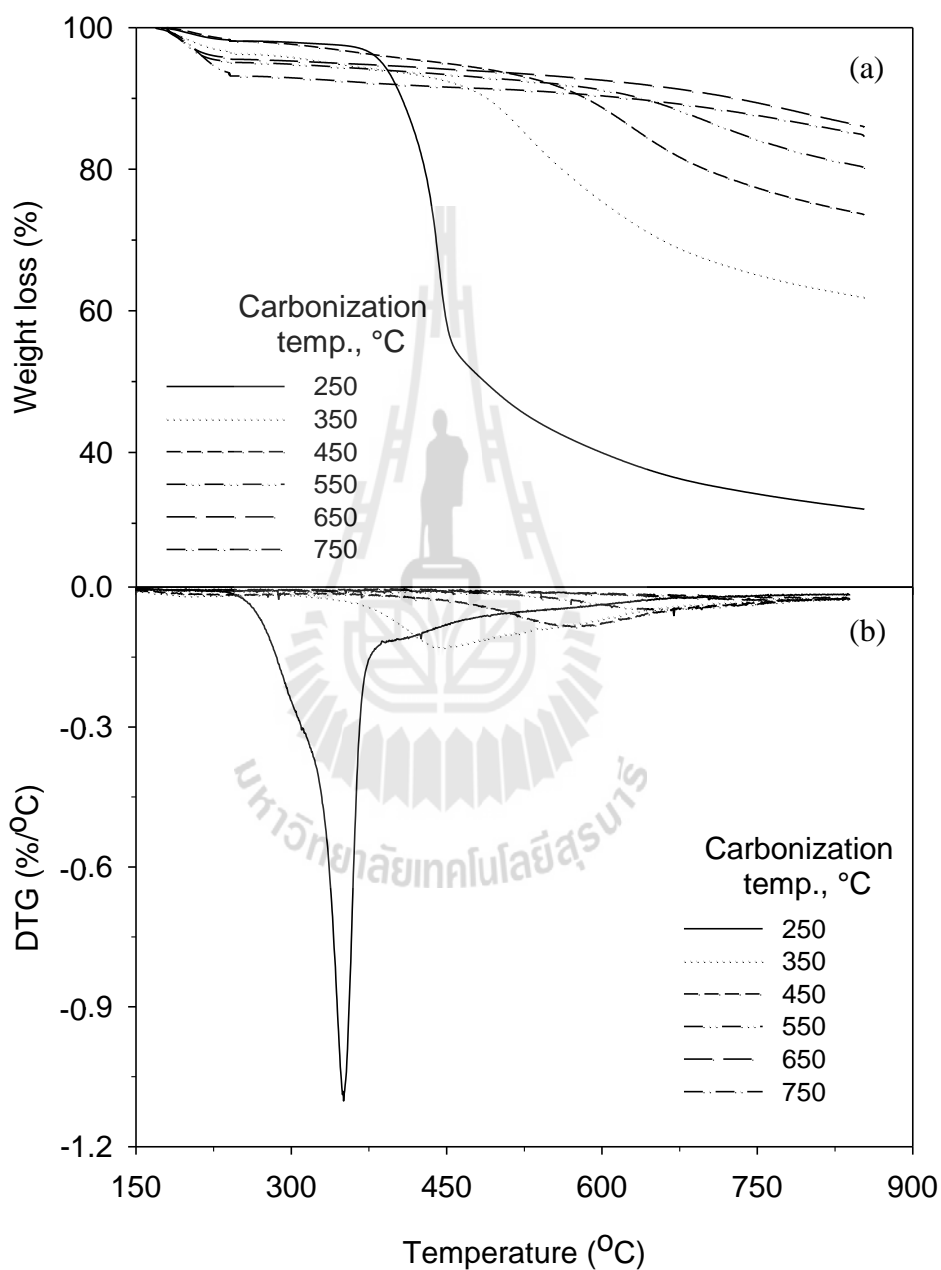


รูปที่ 4.6 ปริมาตรรูพรุนของถ่านชาร์จากข้อมูลไอโซเทิร์มการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ 0 องศาเซลเซียส

#### 4.2.5 การวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนของถ่านชาร์

นอกจากการวิเคราะห์สมบัติความพรุนของถ่านชาร์นี้แล้ว ยังได้ทำการศึกษาพฤติกรรมการสลายตัวทางความร้อนของถ่านชาร์ที่เตรียมได้จากการคาร์บอนไนซ์ที่อุณหภูมิในช่วง 250-750 องศาเซลเซียส จากเทคนิคการวิเคราะห์การสูญเสียน้ำหนักเมื่อได้รับความร้อน แสดงผลดังรูปที่ 4.7 โดยในรูปนี้ได้แสดงผลของการเปลี่ยนแปลงร้อยละของน้ำหนัก (TG curve) (รูปที่ 4.7(a)) และอัตราการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักตามอุณหภูมิ (DTG curve) (รูปที่ 4.7(b)) พบว่า ถ่านชาร์ที่เตรียมได้จากอุณหภูมิคาร์บอนไนเซชันต่างกันให้ค่าการสลายตัวทางความร้อนที่แตกต่างกัน เนื่องจากมีปริมาณสารระเหยตั้งต้นที่เหลือในถ่านชาร์ก่อนนำไปวิเคราะห์ทางความร้อนมีค่าไม่เท่ากัน เมื่อนำถ่านชาร์เหล่านี้มาผ่านกระบวนการให้ความร้อนอีกครั้งจะทำให้สารระเหยต่างๆ ที่เหลือเกิดการสลายตัว โดยจะสลายตัวได้มากสำหรับถ่านชาร์ที่เตรียมจากอุณหภูมิคาร์บอนไนเซชันต่ำและลดลงเมื่ออุณหภูมิคาร์บอนไนเซชันเพิ่มขึ้น ซึ่งอัตราการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักตามอุณหภูมิสูงสุดพบได้ในถ่านชาร์ที่เตรียมจากอุณหภูมิคาร์บอนไนเซชัน 250 องศาเซลเซียส ที่อุณหภูมิการ

สลายตัวประมาณ 350 องศาเซลเซียส โดยที่อัตราการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักตามอุณหภูมิสูงสุดมีค่าลดลงและอุณหภูมิที่ให้อัตราการสลายตัวสูงสุดมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิคาร์บอนไนเซชันเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.7 พฤติกรรมการสลายตัวทางความร้อนของถั่วเขียว ในรูปการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนัก (TG curve) (a) และอัตราการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักตามอุณหภูมิ (DTG curve) (b)

จากผลการวิเคราะห์การสลายตัวของถ่านชาร์นี้ กล่าวได้ว่า เนื่องจากองค์ประกอบของสารระเหยที่อยู่ในถ่านชาร์นั้นประกอบไปด้วยสารเฮมิเซลลูโลส เซลลูโลส และลิกนิน ในปริมาณที่ไม่เท่ากันและสารแต่ละชนิดมีความสามารถในการสลายตัวที่อุณหภูมิต่างกัน เป็นไปได้ว่าถ่านชาร์ที่เตรียมได้ที่อุณหภูมิลำดับในเซชันต่ำนั้น เฮมิเซลลูโลสเกิดการสลายตัวออกไปในปริมาณมากทำให้ปริมาณสารระเหยที่เหลือส่วนใหญ่ประกอบไปด้วยเซลลูโลสและลิกนิน โดยที่ปริมาณของเซลลูโลสและลิกนินจะลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่ออุณหภูมิในเซชันเพิ่มขึ้น กระทั่งหมดไปที่อุณหภูมิการสลายตัวที่สูงกว่า 750 องศาเซลเซียส

นอกจากนี้ เนื่องจากถ่านชาร์ที่ถูกเตรียมขึ้นจากการคาร์บอนไนซ์จะถูกนำไปผ่านกระบวนการกระตุ้นเพื่อผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ ซึ่งขั้นตอนในการกระตุ้นนั้นทำได้โดยการนำถ่านชาร์มาให้ความร้อนภายใต้การไหลของแก๊สไนโตรเจนจนถึงอุณหภูมิกระตุ้น จากนั้นคงไว้ที่อุณหภูมินี้ในช่วงเวลากระตุ้นค่าหนึ่งภายใต้การไหลของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ หลังจากนั้นปล่อยให้เย็นตัวภายใต้บรรยากาศแก๊สไนโตรเจน โดยในช่วงต้นที่มีการให้ความร้อนนี้นับว่าเป็นการนำถ่านชาร์ที่เคยผ่านการคาร์บอนไนซ์แล้วมาผ่านการให้ความร้อนอีกครั้ง ซึ่งเป็นไปได้ว่าในช่วงของการให้ความร้อนอีกครั้งจนถึงสภาวะก่อนกระตุ้นนี้อาจส่งผลต่อสมบัติความพรุนของถ่านชาร์ได้ ดังนั้น เพื่อเป็นการวิเคราะห์สมบัติความพรุนของถ่านชาร์ที่สภาวะก่อนกระตุ้น จึงได้ทำการทดลองโดยการนำถ่านชาร์ที่ได้จากการคาร์บอนไนซ์ที่อุณหภูมิต่างกันมาให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ภายใต้การไหลของแก๊สไนโตรเจน จากนั้นนำถ่านชาร์ที่ได้นี้ไปวิเคราะห์สมบัติความพรุนด้วยวิธีการดูดซับแก๊สไนโตรเจนที่อุณหภูมิ -196 องศาเซลเซียส ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.2 พบว่า สมบัติความพรุนของถ่านชาร์ที่ได้มีค่าไม่ต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ โดยพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุน มีค่าอยู่ในช่วง 499-551 ตารางเมตรต่อกรัม และ 0.239-0.264 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม ตามลำดับ เนื่องจากถ่านชาร์เหล่านี้ได้ถูกนำมาผ่านกระบวนการให้ความร้อนอีกครั้งที่อุณหภูมิสูงเท่ากัน โดยที่อุณหภูมิสูงนี้สารระเหยต่างๆ เกิดการสลายตัวออกไปในปริมาณมาก ซึ่งเป็นไปได้ว่าทั้งเฮมิเซลลูโลสและเซลลูโลสเกิดการสลายตัวออกไปจนหมด ส่วนลิกนินอาจจะยังมีเหลืออยู่บ้างเล็กน้อย ทำให้สมบัติความพรุนของถ่านชาร์ที่ได้จากสภาวะก่อนกระตุ้นนี้มีค่าไม่ต่างกันมากนัก

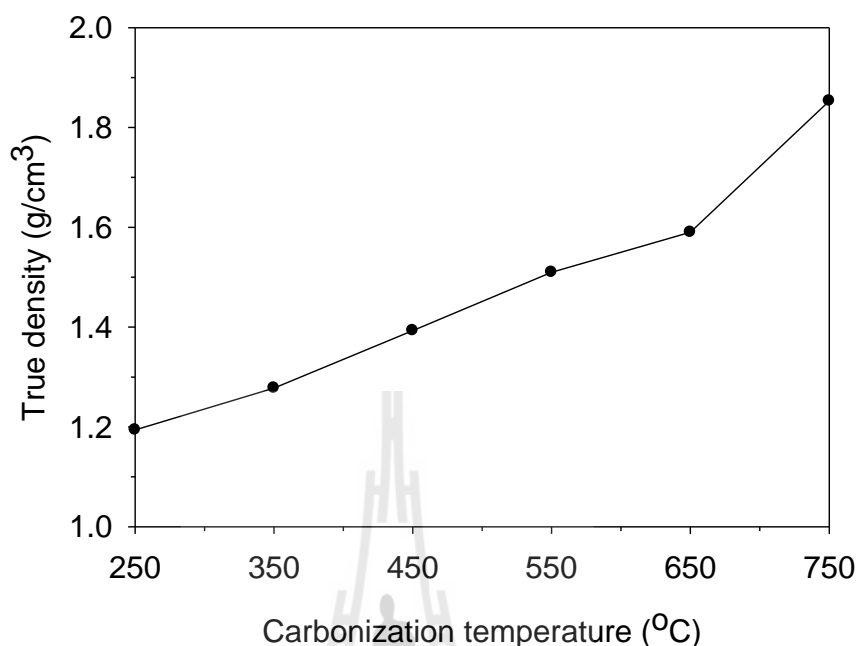
ตารางที่ 4.2 สมบัติความพรุนของถ่านชาร์ที่สภาวะก่อนการกระตุ้นที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส

Carbonization temperature (°C)	True density (g/cm <sup>3</sup> )	BET surface area (m <sup>2</sup> /g)	Total pore volume (cm <sup>3</sup> /g)	Average pore diameter (Å)
250	1.19	546	0.260	19.04
350	1.28	551	0.264	19.19
450	1.39	537	0.258	19.19
550	1.51	507	0.251	19.80
650	1.59	447	0.193	17.29
750	1.85	499	0.239	19.16

#### 4.2.6 ความหนาแน่นของถ่านชาร์ที่สภาวะก่อนกระตุ้น

จากการวิเคราะห์สมบัติของถ่านชาร์ดังที่กล่าวมาในตอนต้นนั้น ได้มีการกล่าวถึงผลของอุณหภูมิคาร์บอนในเซชันต่อการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบของถ่านชาร์ โดยถ่านชาร์ที่เตรียมได้จากอุณหภูมิคาร์บอนในเซชันต่ำมีปริมาณสารระเหยคงเหลือสูงกว่าถ่านชาร์ที่เตรียมได้จากอุณหภูมิคาร์บอนในเซชันสูง อีกทั้งยังมีปริมาณคาร์บอนคงตัวที่ต่ำกว่า ซึ่งเมื่อนำถ่านชาร์เหล่านี้ไปผ่านกระบวนการกระตุ้นเพื่อผลิตเป็นถ่านกัมมันต์จะให้สมบัติความพรุนของถ่านกัมมันต์ที่ต่างกัน จากผลการทดลองดังกล่าว ได้นำมาเป็นแนวทางในการศึกษาค่าความหนาแน่นจริง (true density) ของถ่านชาร์ที่สภาวะก่อนกระตุ้น ซึ่งอาจจะมีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันในขั้นตอนการกระตุ้นได้ จึงได้ทำการศึกษาโดยอ้างอิงการคำนวณจากสมบัติความพรุนของถ่านชาร์ที่สภาวะก่อนกระตุ้นด้วยการวิเคราะห์ไอโซเทอรั่มการดูดซับแก๊สไนโตรเจนที่อุณหภูมิ -196 องศาเซลเซียส โดยใช้สมการ (3.4) โดยความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นจริงกับอุณหภูมิคาร์บอนในเซชันแสดงดังในรูปที่ 4.8 พบว่า ค่าความหนาแน่นจริงของถ่านชาร์ที่สภาวะก่อนกระตุ้นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิคาร์บอนในเซชัน โดยเพิ่มจาก 1.19 เป็น 1.85 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร เมื่ออุณหภูมิคาร์บอนในเซชันเพิ่มขึ้นจาก 250 เป็น 750 องศาเซลเซียส ซึ่งอธิบายได้ว่าที่อุณหภูมิคาร์บอนในเซชันสูง สารระเหยต่างๆ เกิดการสลายตัวออกไปได้มาก ส่งผลให้โครงสร้างของถ่านชาร์เกิดการแตกหักและมีการหดตัวขึ้น ถ่านชาร์ที่ได้จึงมีปริมาณสัดส่วนคาร์บอนคงตัวสูงและมีโครงสร้างที่หนาแน่นขึ้น กล่าวคือ ถ่านชาร์ที่เตรียมได้จากอุณหภูมิคาร์บอนในเซชันสูงมีความหนาแน่นของโครงสร้างมากกว่าถ่านชาร์ที่เตรียมได้จากอุณหภูมิคาร์บอนในเซชันต่ำนั่นเอง





รูปที่ 4.8 อุณหภูมิคาร์บอนไนเซชันต่อค่าความหนาแน่นของถ่านชาร์ที่สภาวะก่อนกระตุ้น

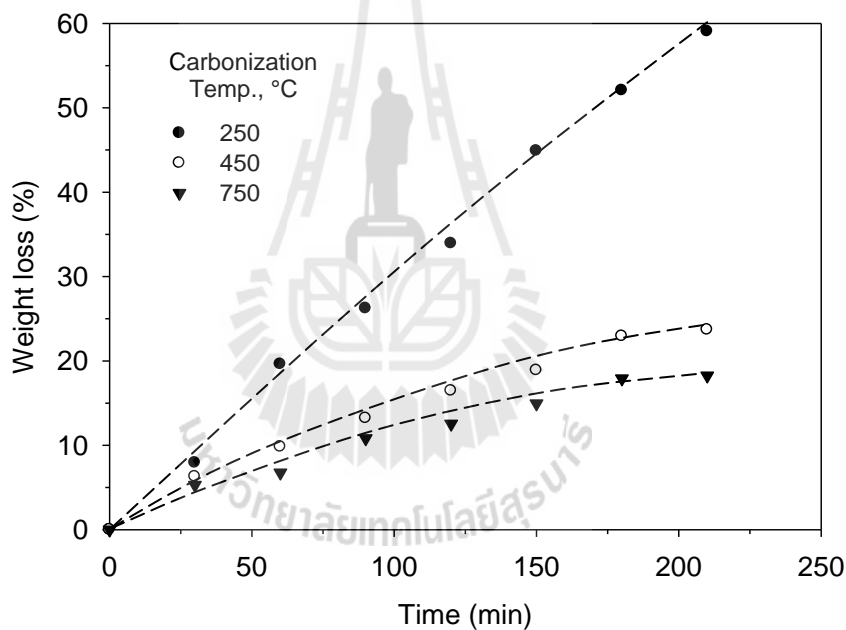
### 4.3 การผลิตถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าว

ถ่านกัมมันต์เป็นวัสดุดูดซับชนิดหนึ่งที่เกิดจากอินทรีย์วัตถุซึ่งมีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก โดยโครงสร้างมีลักษณะเป็นรูพรุน มีพื้นผิวสูง ทำให้มีสมบัติในการดูดซับสารต่างๆ ได้ดี ซึ่งในการทดลองนี้ได้ทำการผลิตถ่านกัมมันต์โดยการนำกะลามะพร้าวมาผ่านขั้นตอนการคาร์บอนไนซ์โดยการให้ความร้อนที่สภาพไร้อากาศภายใต้การไหลของแก๊สไนโตรเจนทำให้ได้เป็นถ่านชาร์ จากนั้นนำถ่านชาร์ทั้งหมดนี้ไปกระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชัน ได้ผลิตภัณฑ์ของแข็งคือถ่านกัมมันต์ ซึ่งจะถูกนำไปวิเคราะห์สมบัติความพรุน เพื่ออธิบายผลของอุณหภูมิคาร์บอนไนเซชันต่อการพัฒนารูพรุน นอกจากนี้ยังได้ศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันในขั้นตอนการผลิตถ่านกัมมันต์อีกด้วย

#### 4.3.1 ผลของอุณหภูมิคาร์บอนไนเซชันต่อจลนพลศาสตร์ของการกระตุ้นถ่านชาร์

ในการศึกษาจลนพลศาสตร์ของการกระตุ้นถ่านชาร์ ได้ทำการทดลองในเตาเผาแบบท่อแนวนอน โดยใช้ถ่านชาร์ที่เตรียมขึ้นจากการคาร์บอนไนซ์โดยใช้อุณหภูมิ 3 ค่า ได้แก่ 250 450 และ 750 องศาเซลเซียส โดยศึกษาปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งทำหน้าที่เป็นแก๊สออกซิไดซ์ ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ผลจากการทดลองในเตาเผาทำให้ทราบน้ำหนักของถ่านชาร์ที่สูญเสียไปเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น ซึ่งจะพิจารณาน้ำหนักที่สูญเสียไปเฉพาะในช่วง

การเกิดปฏิกิริยาเท่านั้น โดยผลการสูญเสียน้ำหนักเมื่อปฏิกิริยาดำเนินไปแสดงดังรูปที่ 4.9 พบว่า ถ่านชาร์มีการสูญเสียน้ำหนักอย่างต่อเนื่องในลักษณะไม่เป็นเส้นตรงเมื่อเวลาผ่านไป ซึ่งจะเกิด อัตราการสูญเสียน้ำหนักมากในช่วงเวลาเริ่มต้นจากนั้นจะเริ่มลดลงเมื่อเวลาผ่านไป โดยถ่านชาร์ที่ เตรียมจากอุณหภูมิคาร์บอนไนเซชันต่ำมีการสูญเสียน้ำหนักมากกว่าถ่านชาร์ที่เตรียมจากอุณหภูมิ คาร์บอนไนเซชันสูง ซึ่งการสูญเสียน้ำหนักของถ่านชาร์นี้เกิดขึ้นเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชัน โดยการทำปฏิกิริยาระหว่างคาร์บอนที่เป็นโครงสร้างของถ่านชาร์กับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ดังนั้น ถ่านชาร์ที่เตรียมจากอุณหภูมิคาร์บอนไนเซชันต่ำจึงมีความสามารถในการทำปฏิกิริยาได้ มากกว่าหรือมีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันมากกว่า ซึ่งเหตุผลในการอธิบาย พฤติกรรมนี้จะได้กล่าวถึงในลำดับถัดไป

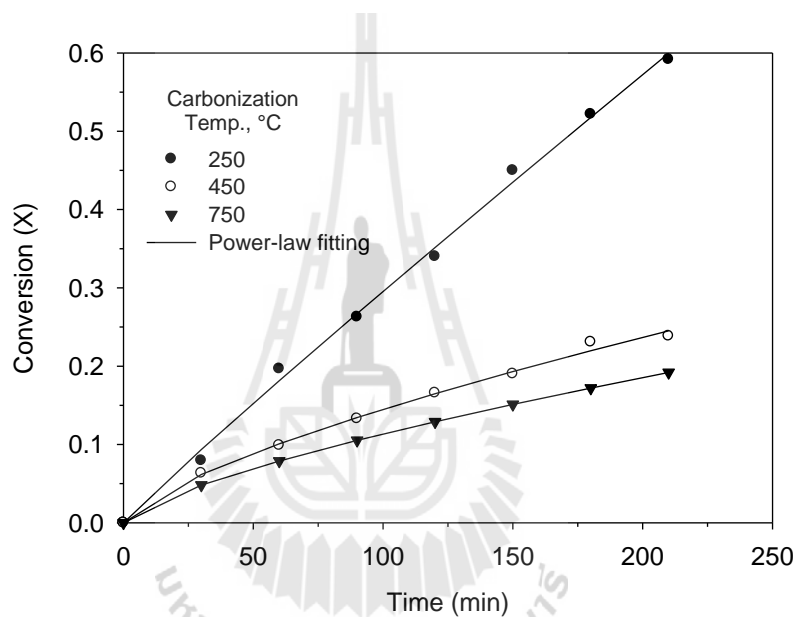


รูปที่ 4.9 การสูญเสียน้ำหนักของถ่านชาร์ในระหว่างการเกิดปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันด้วยแก๊ส คาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส

จากข้อมูลวิเคราะห์การสูญเสียน้ำหนักของถ่านชาร์ สามารถนำมาคำนวณสัดส่วนการ เปลี่ยนแปลงของถ่านชาร์ (reaction conversion,  $X$ ) ในช่วงของการเกิดปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันได้ดัง สมการ 4.1

$$X = \frac{(W_o - W)}{(W_o - W_{ash})} \quad (4.1)$$

เมื่อ  $W_0$ ,  $W$  และ  $W_{ash}$  เป็นน้ำหนักเริ่มต้นของถ่านชาร์ก่อนการแก๊สซิฟิเคชัน น้ำหนักของถ่านชาร์ที่เวลาใดๆ และน้ำหนักถ่านชาร์ตามลำดับ โดยสัดส่วนการเปลี่ยนแปลง ( $X$ ) เทียบกับเวลาของถ่านชาร์แสดงดังรูปที่ 4.10 พบว่า สัดส่วนการเปลี่ยนแปลงของถ่านชาร์มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องในลักษณะไม่เป็นเส้นตรงเมื่อเวลามากขึ้น โดยมีแนวโน้มที่คล้ายกันกับรูปที่ 4.9 ซึ่งค่าสัดส่วนการเปลี่ยนแปลงของถ่านชาร์เกิดขึ้นได้มากที่สุดในช่วงเวลาเริ่มต้นของการเกิดแก๊สซิฟิเคชันและเกิดขึ้นในอัตราที่ลดลงเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น โดยถ่านชาร์ที่เตรียมได้จากอุณหภูมิคาร์บอนไนเซชันต่ำค่าสัดส่วนการเปลี่ยนแปลงมากกว่าถ่านชาร์ที่เตรียมได้จากอุณหภูมิคาร์บอนไนเซชันสูง



รูปที่ 4.10 สัดส่วนการเปลี่ยนแปลงของถ่านชาร์ในระหว่างการเกิดปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส

โดยทั่วไป การเกิดปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันจะทำให้เกิดการพัฒนารูพรุนในโครงสร้างของถ่านชาร์ได้เป็นถ่านกัมมันต์ ซึ่งค่าอัตราเร็วการเกิดปฏิกิริยาระหว่างแก๊สและถ่านชาร์ขึ้นกับอัตราเร็วของปฏิกิริยาเคมีและอัตราเร็วของการถ่ายโอนมวลของแก๊สออกซิไดซ์ในอนุภาคของถ่านชาร์ โดยผลกระทบของการถ่ายโอนมวลจะมีค่าน้อยมากเมื่ออนุภาคถ่านชาร์มีขนาดเล็กประมาณ 0.5-1.0 มิลลิเมตร (Kasaoka et al., 1985; Irfan et al., 2011) ซึ่งในการทดลองนี้ได้ทำการศึกษาถ่านชาร์ที่มีอนุภาคขนาดประมาณ 1 มิลลิเมตร ดังนั้น ในการศึกษาการเกิดปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันจึงไม่พิจารณาถึงความต้านทานการถ่ายโอนมวลในอนุภาคของถ่านชาร์ ค่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาจึงถูกกำหนดโดยปฏิกิริยาเคมีบนพื้นผิวของถ่านชาร์ ซึ่งอธิบายได้ด้วยสมการ ดังนี้

$$\frac{dX}{dt} = kf(X) \quad (4.2)$$

เมื่อ  $k$  คือค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาที่ขึ้นกับอุณหภูมิการเกิดปฏิกิริยาและความดันย่อยของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และ  $f(X)$  คือฟังก์ชันที่แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของถ่านชาร์ระหว่างการเกิดปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชัน ในงานวิจัยนี้ ใช้คาร์บอนไดออกไซด์บริสุทธิ์ ดังนั้น ค่าคงที่  $k$  จะขึ้นกับอุณหภูมิของการเกิดปฏิกิริยาเท่านั้น

ในการอธิบายจลนพลศาสตร์ของการเกิดปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันระหว่างแก๊สและของแข็ง ในงานวิจัยนี้จะพิจารณาแบบจำลองจลนพลศาสตร์ 4 แบบ ดังแสดงในตารางที่ 2.2 คือ แบบจำลอง Volume-reaction (VRM) แบบจำลอง Shrinking-core (SCM) แบบจำลอง Random-pore (RPM) และแบบจำลอง Modified volume-reaction (MVRM) โดยจากสมการอัตรา (Rate equation) ของแบบจำลองในตารางที่ 2.2 สามารถจัดให้อยู่ในรูปสมการเส้นตรงได้ เพื่อนำไปใช้วิเคราะห์หาค่าตัวแปรจลนพลศาสตร์ได้โดยใช้ข้อมูลจากการทดลอง โดยสมการแบบจำลองในรูปเส้นตรงแสดงได้ดังนี้

$$\text{สำหรับ VRM :} \quad -\ln(1-X) = k_v t \quad (4.3)$$

$$\text{สำหรับ SCM :} \quad 3 \left[ 1 - (1-X)^{1/3} \right] = k_s t \quad (4.4)$$

$$\text{สำหรับ RPM :} \quad (2/\psi) \left[ \sqrt{(1-\psi \ln(1-X))} - 1 \right] = k_R t \quad (4.5)$$

$$\text{สำหรับ MVRM :} \quad -\ln(1-X) = k(X)t \quad (4.6)$$

ในงานวิจัยนี้ แบบจำลองดังกล่าวได้ถูกนำมาอธิบายร่วมกับข้อมูลจลนพลศาสตร์ ( $X$  กับ  $t$ ) ของถ่านชาร์ในขั้นตอนการกระตุ้น อย่างไรก็ตาม แบบจำลองเหล่านี้ไม่สามารถอธิบายสัดส่วนการเปลี่ยนแปลงของถ่านชาร์ได้ตลอดช่วงการเปลี่ยนแปลง เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงนี้ไม่ได้เป็นไปในลักษณะเชิงเส้น และสำหรับแบบจำลอง MVRM นั้น ไม่สามารถนำมาใช้อธิบายได้โดยตรงกับข้อมูลจลนพลศาสตร์ เนื่องจากค่าคงที่อัตราปรากฏ ( $k(X)$ ) (ดังในสมการ 4.6) เป็นฟังก์ชันที่เปลี่ยนแปลงไปตามสัดส่วนการเปลี่ยนแปลงของถ่านชาร์ จึงได้มีการนำสมการยกกำลัง

(Power-law model) มาใช้อธิบายสัดส่วนการเปลี่ยนแปลงของถ่านชาร์เมื่อเวลามากขึ้น โดยรูปแบบสมการแสดงได้ดังสมการ 4.7

$$X = at^b \quad (4.7)$$

ในการอธิบายสัดส่วนการเปลี่ยนแปลงของถ่านชาร์ด้วยสมการยกกำลังอย่างง่ายนี้ แสดงได้ดังรูปที่ 4.10 พบว่า ข้อมูลสัดส่วนการเปลี่ยนแปลง ( $X$ ) สามารถอธิบายได้ค่อนข้างดีโดยใช้สมการยกกำลัง ซึ่งจากสมการ 4.7 สามารถจัดรูปให้เป็นสมการเชิงเส้นได้โดยการแทนค่าลอการิทึมในสมการ แสดงได้ดังนี้

$$\ln[X] = \ln[a] + b\ln[t] \quad (4.8)$$

จากการที่สมการยกกำลังสามารถอธิบายจลนพลศาสตร์การเกิดปฏิกิริยาได้อย่างชัดเจนนั้น จึงได้มีการนำสมการดังกล่าวไปประยุกต์ใช้ร่วมกับแบบจำลอง MVRM ในการวิเคราะห์ข้อมูลจลนพลศาสตร์การเกิดปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชัน ซึ่งจากสมการยกกำลังอย่างง่าย (สมการ 4.7) สามารถเขียนให้อยู่ในรูปอนุพันธ์ที่เกี่ยวข้องกับเวลาได้ดังนี้

$$\frac{dX}{dt} = abt^{b-1} \quad (4.9)$$

จากสมการอัตราของแบบจำลอง MVRM ดังแสดงในตารางที่ 4.3 เมื่อนำมาวิเคราะห์ร่วมกับสมการ 4.7 และ 4.9 ให้ค่าคงที่อัตราปรากฏที่เป็นฟังก์ชันกับสัดส่วนการเปลี่ยนแปลงดังนี้

$$k(X) = \frac{a^{1/b} b X^{(b-1)/b}}{(1-X)}, \quad X \neq 1 \quad (4.10)$$

เนื่องจาก ค่าคงที่อัตราปรากฏในแบบจำลอง MVRM นี้ เปลี่ยนแปลงไปตามสัดส่วนการเปลี่ยนแปลงของถ่านชาร์เมื่อปฏิกิริยาดำเนินไป ซึ่งเกี่ยวข้องกับความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาดังนั้น จึงสามารถอธิบายการเกิดปฏิกิริยานี้ได้ด้วยดัชนีความว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาของถ่านชาร์ (The char reactivity index,  $k_m$ ) โดยการอินทิเกรตค่าคงที่อัตราปรากฏ ดังแสดงในสมการ 4.11

$$k_m = \int_0^X k(X) dX = \int_0^X \frac{a^{1/b} b X^{(b-1)/b}}{(1-X)} dX, \quad X \neq 1 \quad (4.11)$$

ในสมการ 4.10 นั้น สามารถหาค่าดัชนีความว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาของถ่านชาร์ ได้จากการอินทิเกรต  $X$  ตั้งแต่ 0 ถึง 0.99 ดังนั้น จากสมการ 4.11 จึงเขียนได้ว่า

$$k_m = a^{1/b} b \int_0^{0.99} \frac{X^{(b-1)/b}}{(1-X)} dX, \quad X \neq 1 \quad (4.12)$$

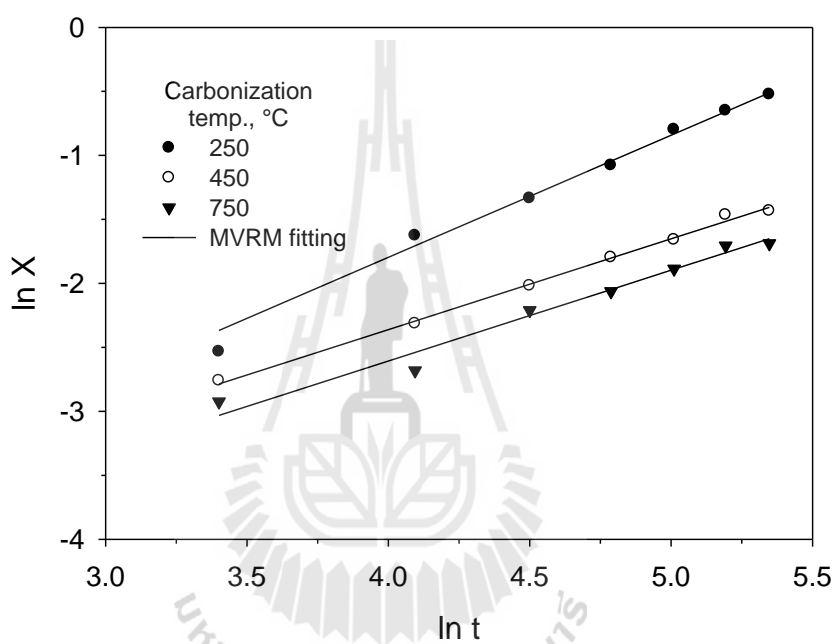
นอกจากนี้ จากการศึกษาจลนพลศาสตร์ของการกระตุ้นถ่านชาร์โดยการอธิบายข้อมูลจลนพลศาสตร์ที่ได้จากการทดลองร่วมกับแบบจำลองดังกล่าวนั้น ทำให้ทราบค่าสัดส่วนการเปลี่ยนแปลงที่ได้จากการทำนายด้วยแบบจำลองทั้ง 4 แบบ ซึ่งความแม่นยำในการทำนายสามารถประเมินได้จากค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของการประมาณ (Standard Error of Estimate: SEE,  $\sigma_{est}$ ) ดังแสดงในสมการ 4.13 (Lane, D. M., 2012)

$$\sigma_{est} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N [(X_{pred} - X_{exp}) / X_{pred}]^2}{N-2}} \quad (4.13)$$

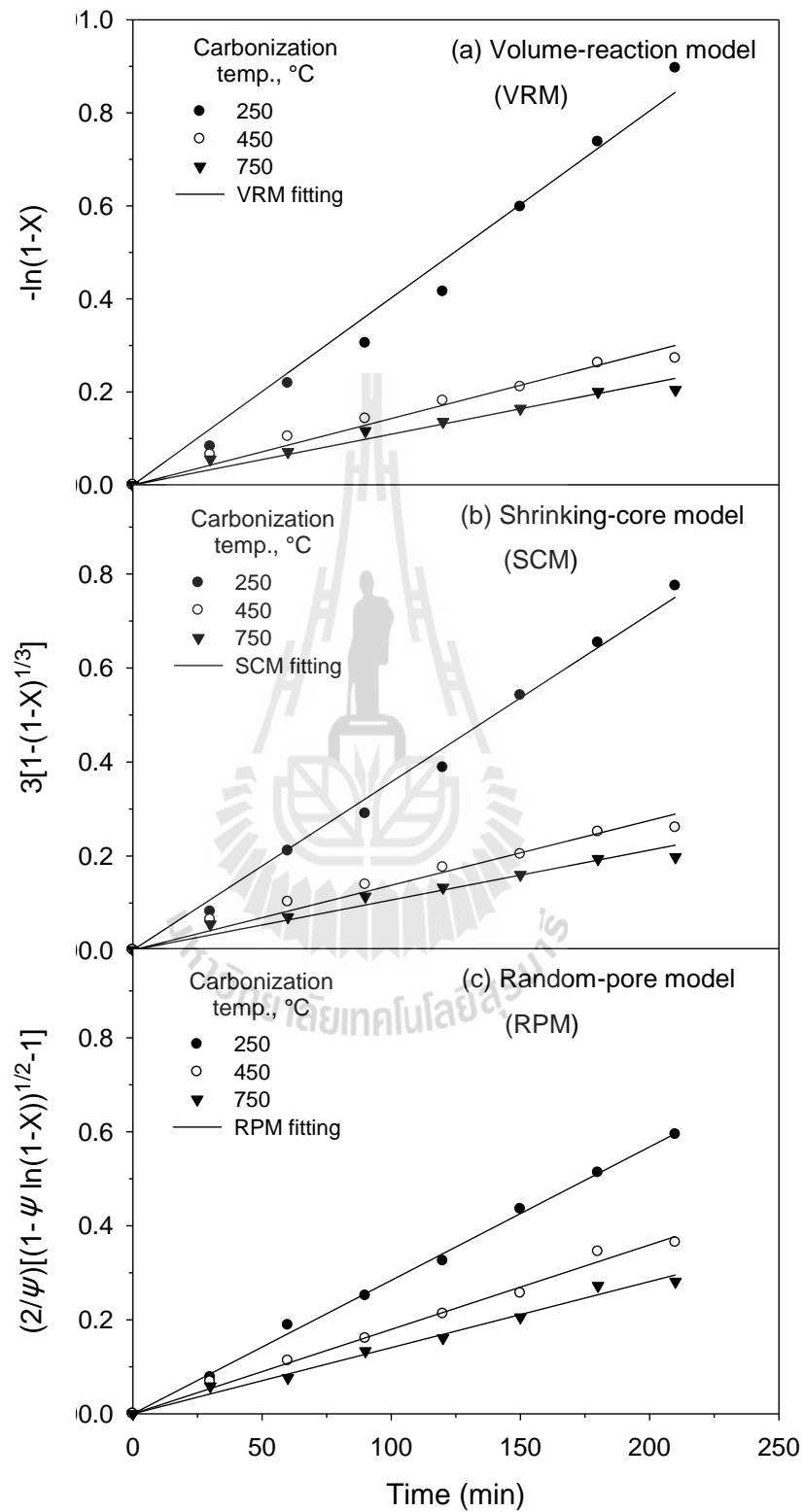
เมื่อ  $X_{pred}$  และ  $X_{exp}$  คือสัดส่วนการเปลี่ยนแปลงของถ่านชาร์ที่ได้จากการทำนายและจากข้อมูลการทดลอง ตามลำดับ และ  $N$  คือจำนวนข้อมูลของสัดส่วนการเปลี่ยนแปลงของถ่านชาร์ต่อเวลา

ดังนั้น จากการวิเคราะห์จลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันด้วยแบบจำลองทั้ง 4 แบบนั้น เมื่อเปรียบเทียบข้อมูลจลนพลศาสตร์ที่ได้จากการทดลองกับข้อมูลที่ได้จากการทำนายตามสมการเชิงเส้นของแบบจำลองทั้งสิ้น ได้ผลดังรูปที่ 4.11 และ 4.12 โดยค่าตัวแปรจลนพลศาสตร์ของการเกิดปฏิกิริยาและสัมประสิทธิ์การถดถอย ( $R^2$ ) ที่ได้จากการทำนาย แสดงในตารางที่ 4.4 และ 4.5 และค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานในการประมาณ แสดงในตารางที่ 4.6 จากผลการทดลอง ในการอธิบายจลนพลศาสตร์การเกิดแก๊สซิฟิเคชันจากข้อมูลของถ่านชาร์ที่ได้จากการแก๊สซิฟิเคชันด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ด้วยแบบจำลอง VRM SCM RPM และ MVRM นั้น พบว่า แบบจำลอง VRM และ SCM ให้ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานในการประมาณที่ใกล้เคียงกันในช่วง 0.142-0.396 โดยแบบจำลอง RPM ให้ค่าในช่วง 0.081-0.199 และแบบจำลอง

MVRM ให้ค่าในช่วง 0.097-0.103 ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานในการประมาณที่ได้จากการอธิบายด้วยแบบจำลองทั้งสี่ พบว่า ค่าที่ได้จากการอธิบายด้วยแบบจำลอง MVRM มีค่าน้อยที่สุด จากการวิเคราะห์นี้จึงบอกได้ว่า ข้อมูลจลนพลศาสตร์จากการทดลองของการเกิดแก๊สซิฟิเคชันสามารถอธิบายได้ดีที่สุดด้วยแบบจำลอง MVRM รองลงมาคือแบบจำลอง RPM



รูปที่ 4.11 การอธิบายจลนพลศาสตร์ของการเกิดปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันด้วยแบบจำลอง Modified volume-reaction



รูปที่ 4.12 การอธิบายจลนพลศาสตร์ของการเกิดปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันด้วยแบบจำลอง

Volume-reaction (a) แบบจำลอง Shrinking-core (b) และแบบจำลอง Random-pore (c)



ตารางที่ 4.3 ค่าตัวแปรจลนพลศาสตร์การเกิดปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันของถ่านชาร์ที่อธิบายได้จากแบบจำลอง Volume-reaction และแบบจำลอง Shrinking-core

Carbonization Temperature (°C)	VRM		SCM	
	$k_V$ (min <sup>-1</sup> )	$R^2$	$k_S$ (min <sup>-1</sup> )	$R^2$
250	0.0040	0.9756	0.0036	0.9890
450	0.0014	0.9473	0.0014	0.9352
750	0.0011	0.9283	0.0011	0.9182

ตารางที่ 4.4 ค่าตัวแปรจลนพลศาสตร์การเกิดปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันของถ่านชาร์ที่อธิบายได้จากแบบจำลอง Random-pore และแบบจำลอง Modified volume-reaction

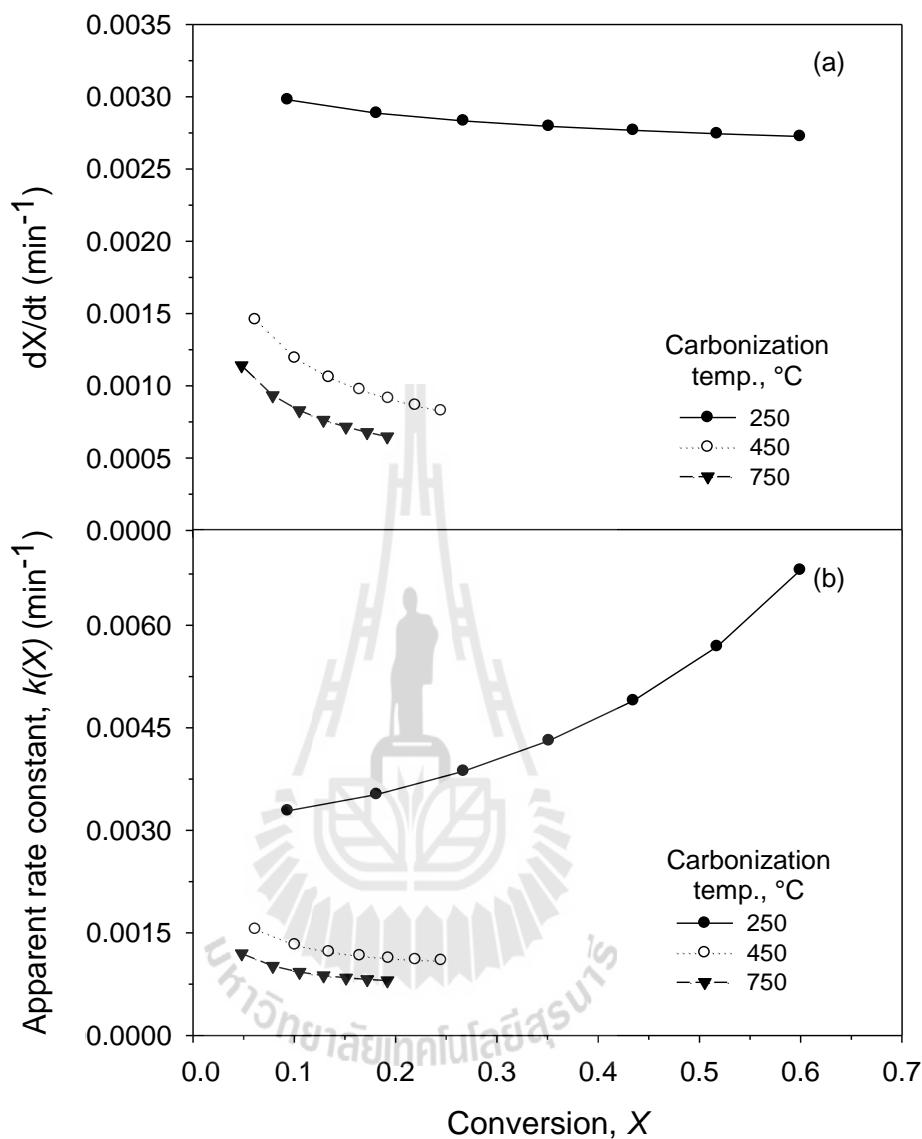
Carbonization temperature (°C)	RPM			MVRM			
	$k_R$ (min <sup>-1</sup> )	$\psi$	$R^2$	a	b	$k_m$ (min <sup>-1</sup> )	$R^2$
250	0.0028	3.4179	0.9963	0.0036	0.9542	0.0018	0.9913
450	0.0018	1.7768	0.9861	0.0055	0.7092	0.0002	0.9967
750	0.0014	0.8846	0.9780	0.0043	0.7099	0.0001	0.9732

ตารางที่ 4.5 ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานในการประมาณสำหรับประเมินค่าความแม่นยำจากการทำนายจลนพลศาสตร์ด้วยแบบจำลองทั้ง 4 แบบ

Carbonization temperature (°C)	Number of data point (N)	Standard Error of Estimate, SEE ( $\sigma_{est}$ )			
		VRM	SCM	RPM	MVRM
250	7	0.193	0.142	0.081	0.097
450	7	0.301	0.330	0.139	0.037
750	7	0.374	0.396	0.199	0.103

ในการอธิบายข้อมูลจลนพลศาสตร์การเกิดปฏิกิริยาด้วยแบบจำลอง MVRM นั้น สามารถอธิบายได้จากความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิดปฏิกิริยาหรือสัดส่วนการเปลี่ยนแปลงของถ่านชาร์ต่อเวลาและค่าคงที่อัตราปรากฏที่คำนวณได้จากสมการ 4.11 กับสัดส่วนการเปลี่ยนแปลงของถ่านชาร์ แสดงความสัมพันธ์ได้ดังรูปที่ 4.13 พบว่า อัตราการเกิดปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันของถ่านชาร์ (รูปที่ 4.13(a)) มีค่าลดลงเมื่อสัดส่วนการเปลี่ยนแปลงมากขึ้น โดยถ่านชาร์ที่เตรียมจากอนุภูมิภาคคาร์บอไนเซชัน 250 องศาเซลเซียส มีค่าลดลงเพียงเล็กน้อยก่อนข้างคงที่ ส่วนถ่านชาร์ที่เตรียมจากอนุภูมิภาคคาร์บอไนเซชัน 450 และ 750 องศาเซลเซียส จะมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงเริ่มต้นของการเปลี่ยนแปลงจากนั้นจะลดลงอย่างช้าๆ เมื่อสัดส่วนมีการเปลี่ยนแปลงมากขึ้น โดยถ่านชาร์ที่เตรียมได้จากอนุภูมิภาคคาร์บอไนเซชันต่ำมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่สูงกว่าถ่านชาร์ที่เตรียมได้จากอนุภูมิภาคคาร์บอไนเซชันสูง และจากรูปที่ 4.13(b) พบว่า ถ่านชาร์ที่เตรียมจากอนุภูมิภาคคาร์บอไนเซชันต่ำมีค่าคงที่อัตราปรากฏที่สูงกว่าถ่านชาร์ที่เตรียมจากอนุภูมิภาคคาร์บอไนเซชันสูง โดยมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อสัดส่วนการเปลี่ยนแปลงของถ่านชาร์มากขึ้น แต่ในทางตรงข้ามสำหรับถ่านชาร์ที่เตรียมได้จากอนุภูมิภาคคาร์บอไนเซชันสูงกลับพบว่า ค่าคงที่อัตราปรากฏมีแนวโน้มลดลงเมื่อสัดส่วนการเปลี่ยนแปลงของถ่านชาร์มากขึ้น





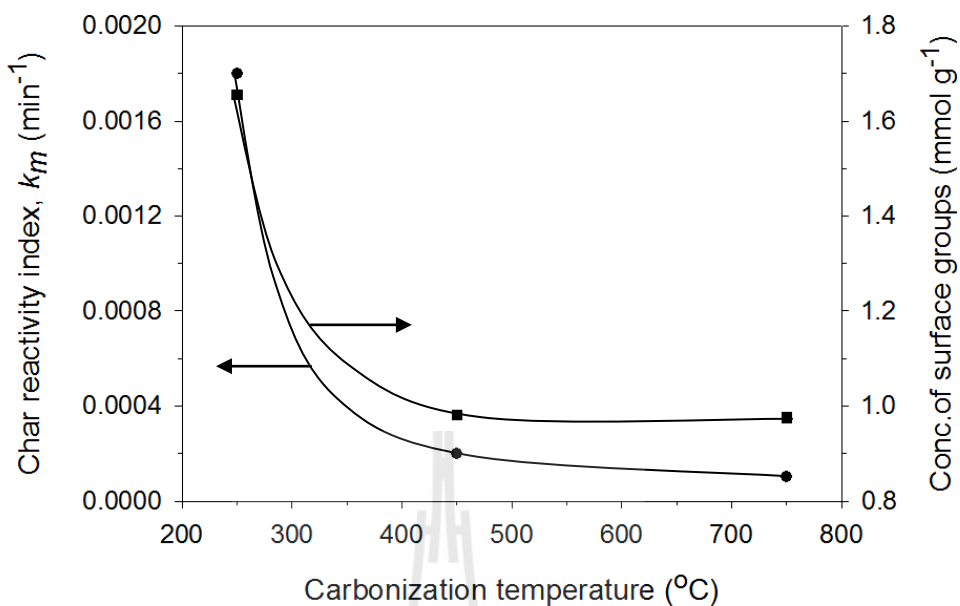
รูปที่ 4.13 ผลของการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันของถ่านชาร์ (4.13(a)) และค่าคงที่อัตราปรากฏ (4.13(b)) สำหรับแบบจำลอง MVRM

จากผลการศึกษาจลนพลศาสตร์การเกิดปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันของถ่านชาร์ดังกล่าวมานั้น ทำให้ทราบผลของอุณหภูมิคาร์บอนในเซชันต่ออัตราและความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยา ดังนั้น เพื่อเป็นการสนับสนุนผลของอุณหภูมิคาร์บอนในเซชันต่อความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาของถ่านชาร์ จึงได้ศึกษาเพิ่มเติมในส่วนของสมบัติเคมีบนพื้นผิวของถ่านชาร์ โดยการออกซิเดชันทางเคมี ด้วยอากาศเพื่อเพิ่มหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบบนพื้นผิวของถ่านชาร์ โดยปริมาณ

และชนิดของหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวสามารถวิเคราะห์ด้วยวิธีการไทเทรตของโบห์ม (Boehm titration method) ในการทดลองนี้ได้เลือกทำการทดลองสำหรับถ่านชาร์ที่เตรียมจากอนุหุมิคาร์บอนในเซชัน 250 450 และ 750 องศาเซลเซียส ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.7 พบว่า หลังการออกซิเดชันมีค่าหมู่ฟังก์ชันกรดและเบสเกิดขึ้นบนพื้นผิวของถ่านชาร์ ซึ่งปริมาณและชนิดของหมู่ฟังก์ชันจะแตกต่างกันตามอนุหุมิในการคาร์บอนไนซ์ โดยถ่านชาร์ที่เตรียมที่อนุหุมิคาร์บอนไนซ์ต่ำกว่าให้ปริมาณหมู่กรดรวมในปริมาณที่สูงกว่า ซึ่งเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างผลของอนุหุมิคาร์บอนไนซ์ต่อหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของถ่านชาร์ร่วมกับค่าดัชนีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาดังรูปที่ 4.14 พบว่า การเพิ่มขึ้นของอนุหุมิคาร์บอนไนซ์มีผลทำให้ปริมาณหมู่ฟังก์ชันกรดรวมบนพื้นผิวของถ่านชาร์และค่าดัชนีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยามีค่าลดลง โดยจะลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงอนุหุมิ 250-350 องศาเซลเซียส และจะช้าลงที่อนุหุมิสูงขึ้นไป จากความสัมพันธ์นี้ กล่าวได้ว่า การมีปริมาณหมู่ฟังก์ชันกรดรวมบนพื้นผิวของถ่านชาร์มากเป็นการแสดงให้เห็นว่าถ่านชาร์มีตำแหน่ง (active site) ของการเกิดปฏิกิริยามากส่งผลให้มีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยามากนั่นเอง ซึ่งยืนยันได้ว่าความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาของถ่านชาร์มีค่าลดลงตามอนุหุมิคาร์บอนไนซ์ที่เพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4.6 การปรับปรุงสมบัติเคมีบนพื้นผิวของถ่านชาร์โดยวิธีออกซิเดชันทางเคมีด้วยอากาศ

Carbonization temperature (°C)	Functional group (mmol/g)				
	Carboxylic value	Lactonic value	Phenol value	Total base	Total Acid
250	0.330	0	1.037	0.288	1.367
450	0	0.357	0.237	0.387	0.594
750	0	0.342	0.201	0.433	0.543



รูปที่ 4.14 ผลของอุณหภูมิคาร์บอนเซชันในการเตรียมถ่านชาร์ต่อค่าดัชนีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันและหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของถ่านชาร์

#### 4.3.2 ผลของอุณหภูมิคาร์บอนเซชันต่อสมบัติของถ่านกัมมันต์

โดยทั่วไป ในกระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์ประกอบด้วย 2 ขั้นตอนหลักๆ โดยในขั้นตอนแรกเป็นการเพิ่มปริมาณองค์ประกอบคาร์บอนให้กับถ่านชาร์ด้วยการคาร์บอนไชน์ภายใต้การไหลของแก๊สไนโตรเจน จากนั้นเข้าสู่ขั้นตอนการสร้างและเพิ่มขนาดรูพรุนให้กับถ่านชาร์โดยวิธีการกระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ โดยได้มีการสูญเสียน้ำหนักของผลิตภัณฑ์ถ่านเกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการทั้งสองขั้นตอน ซึ่งน้ำหนักที่สูญเสียไปนั้นแสดงถึงขอบเขตของปฏิกิริยาเคมีที่เกี่ยวข้องที่ส่งผลต่อสมบัติของผลิตภัณฑ์ถ่านกัมมันต์ ในการสูญเสียน้ำหนักของถ่านชาร์นั้นจะคำนวณเทียบกับน้ำหนักเริ่มต้นของกะลามะพร้าว ส่วนน้ำหนักที่สูญเสียไปในช่วงการกระตุ้นนั้นคำนวณเทียบกับน้ำหนักเริ่มต้นของถ่านชาร์ โดยถ่านชาร์ที่เตรียมได้จากอุณหภูมิคาร์บอนเซชันต่างกันจะมีสมบัติและลักษณะจำเพาะที่ต่างกัน ซึ่งมีผลต่อถ่านชาร์ในขั้นตอนการกระตุ้นต่อไป ในการเปรียบเทียบผลของถ่านชาร์ที่เตรียมได้จากอุณหภูมิคาร์บอนเซชันต่างกันต่อสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ได้ จึงได้มีการพิจารณาการสูญเสียน้ำหนักโดยรวมตลอดการคาร์บอนไชน์กระทั่งเสร็จสิ้นกระบวนการกระตุ้น แสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\text{สัดส่วนการสูญเสียน้ำหนักโดยรวม} = 1 - \frac{W_{ac}}{W_r} = 1 - (1 - W_{L,car})(1 - W_{L,act}) \quad (4.14)$$

เมื่อ  $W_{L,car}$  และ  $W_{L,act}$  คือน้ำหนักที่สูญเสียไประหว่างการคาร์บอนไนซ์และการกระตุ้น ตามลำดับ อธิบายในแต่ละส่วนได้ดังนี้

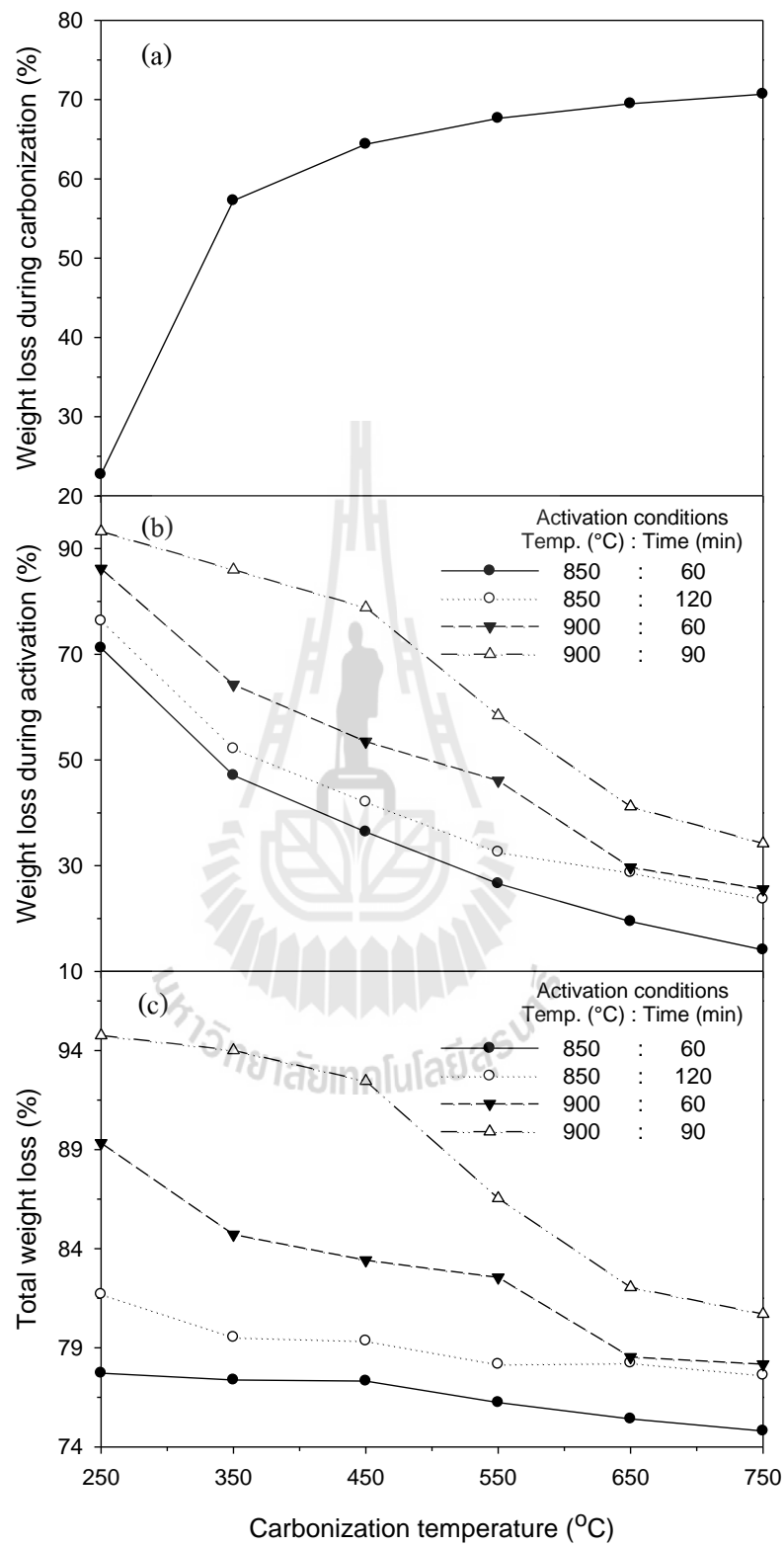
$$W_{L,car} = 1 - \frac{W_{car}}{W_r} \quad (4.15)$$

และ

$$W_{L,act} = 1 - \frac{W_{ac}}{W_{car}} \quad (4.16)$$

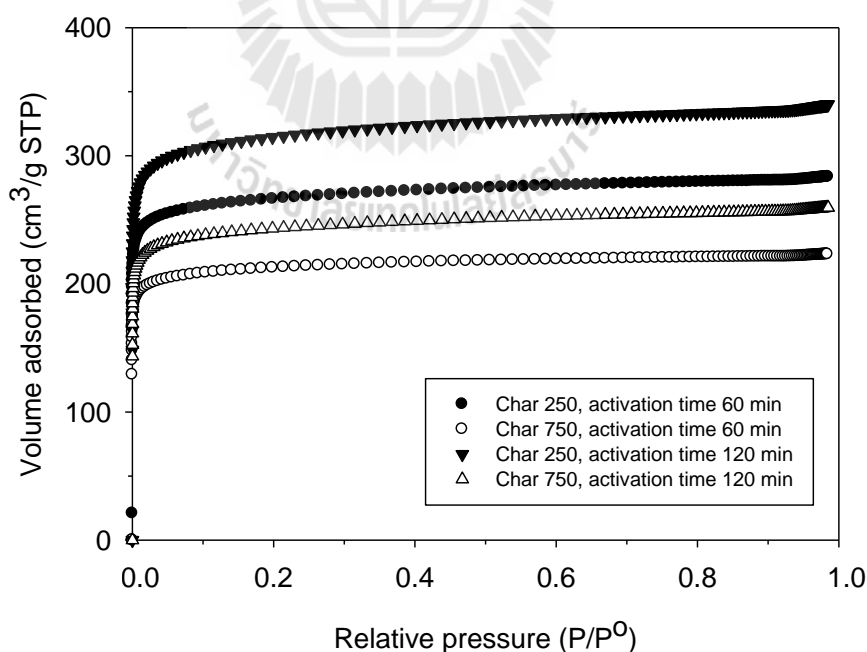
เมื่อ  $W_r$   $W_{car}$  และ  $W_{ac}$  คือน้ำหนักเริ่มต้นของกะลามะพร้าว น้ำหนักที่เหลือหลังการคาร์บอนไนซ์ หรือน้ำหนักก่อนการกระตุ้น และน้ำหนักที่เหลือภายหลังการกระตุ้น ตามลำดับ

ผลของอุณหภูมิคาร์บอนไนเซชันในการเตรียมถ่านชาร์ต่อร้อยละการสูญเสียน้ำหนักระหว่างการคาร์บอนไนเซชัน การกระตุ้น และการสูญเสียน้ำหนักโดยรวม ที่อุณหภูมิและเวลาในการกระตุ้นต่างกัน แสดงผลได้ดังรูปที่ 4.15 ซึ่งเมื่ออุณหภูมิคาร์บอนไนเซชันสูงขึ้น ร้อยละการสูญเสียน้ำหนักระหว่างการคาร์บอนไนเซชันมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ในขณะที่การสูญเสียน้ำหนักโดยรวมและการสูญเสียน้ำหนักระหว่างการกระตุ้นมีแนวโน้มลดลง จากการทดลองนี้ชี้ว่าในการสลายตัวของสารระเหยในขั้นตอนการคาร์บอนไนซ์มีผลต่อการสลายตัวของสารระเหยในขั้นตอนกระตุ้น เนื่องจากถ่านชาร์ที่เตรียมได้จากอุณหภูมิคาร์บอนไนเซชันต่ำมีปริมาณสารระเหยคงเหลือในปริมาณที่สูง ทำให้สามารถเกิดการสลายตัวได้มากในขั้นตอนกระตุ้น ซึ่งในการสลายตัวของสารระเหยที่เหลือนี้ส่งผลต่อการเกิดแก๊สซิฟิเคชันกับแก๊สคาร์บอน ไดออกไซด์ เนื่องจาก การสลายตัวของสารระเหยในระหว่างการให้ความร้อนก่อนถึงอุณหภูมิกระตุ้นอาจมีส่วนช่วยในการเพิ่มจำนวนตำแหน่งการเกิดแก๊สซิฟิเคชันบนพื้นผิวของถ่านชาร์ โดยถ่านชาร์ที่เตรียมจากอุณหภูมิคาร์บอนไนเซชันต่ำให้ค่าอัตราการเกิดแก๊สซิฟิเคชันที่สูงกว่าถ่านชาร์ที่เตรียมจากอุณหภูมิคาร์บอนไนเซชันสูง เป็นที่สังเกตว่าอุณหภูมิคาร์บอนไนเซชันที่ 250 องศาเซลเซียส ซึ่งให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงสุดเป็นอุณหภูมิที่ให้อัตราการสลายตัวเชิงความร้อนของกะลามะพร้าวสูงสุดด้วย สำหรับการสลายตัวที่มากที่สุดในช่วงอุณหภูมิแรกของค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักตามอุณหภูมิ (DTG curve) ในรูปที่ 4.1 ซึ่งอยู่ในช่วงอุณหภูมิที่สารเฮมิเซลลูโลสในกะลามะพร้าวเกิดการสลายตัว โดยมีรายงานในงานวิจัยที่ผ่านมาว่าเฮมิเซลลูโลสมีความว่องไวต่อการสลายตัวมากที่สุดเมื่อเทียบกับองค์ประกอบเซลลูโลสและลิกนิน (Cagnon et al., 2009)



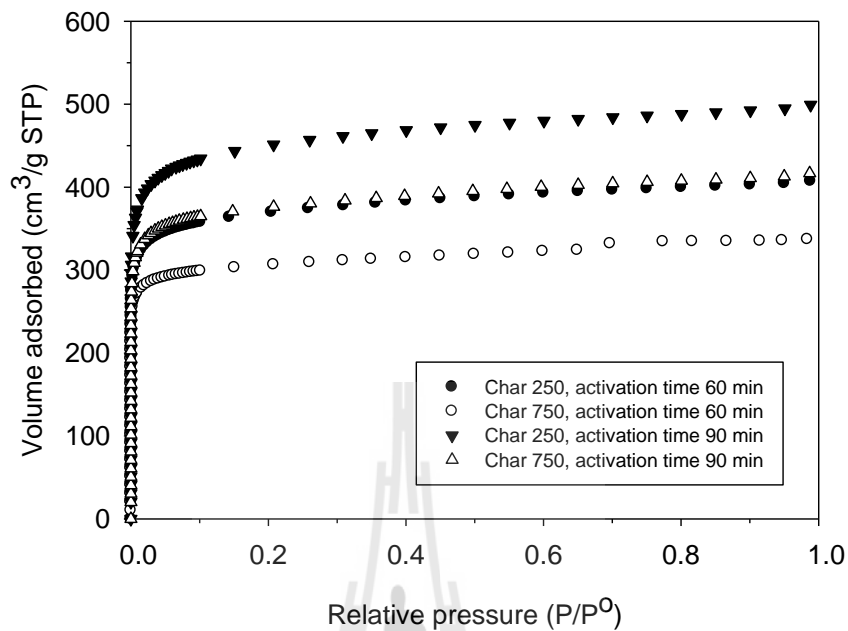
รูปที่ 4.15 ผลของอุณหภูมิคาร์บอนไนเซชันในการเตรียมถ่านชาร์ต่อการสูญเสียน้ำหนักในระหว่างการคาร์บอนไนซ์ (a) การกระตุ้น (b) และการสูญเสียน้ำหนักโดยรวม (c)

ในการวิเคราะห์สมบัติความพรุนของถ่านกัมมันต์สามารถวิเคราะห์ได้ด้วยไอโซเทอรั่มการดูดซับไนโตรเจนที่อุณหภูมิ -196 องศาเซลเซียส ซึ่งผลการวิเคราะห์ไอโซเทอรั่มการดูดซับไนโตรเจนของถ่านกัมมันต์เปรียบเทียบกับอุณหภูมิคาร์บอนในเซชัน 250 และ 750 องศาเซลเซียสที่อุณหภูมิกระตุ้น 850 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 และ 120 นาที และ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 และ 90 นาที ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.16 และ 4.17 ตามลำดับ พบว่า ไอโซเทอรั่มการดูดซับแก๊สไนโตรเจนเป็นแบบ Type 1 ตามการจำแนกของ BDDT (Brunauer-Deming-Deming-Teller) (Gregg and Sing, 1982) โดยรูพรุนส่วนใหญ่ที่พบเป็นรูพรุนขนาดเล็ก และความสามารถในการดูดซับแก๊สไนโตรเจนขึ้นอยู่กับอุณหภูมิคาร์บอนในเซชันและสภาวะในการกระตุ้น ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบสภาวะในการเตรียมถ่านกัมมันต์แล้ว พบว่าที่อุณหภูมิคาร์บอนในเซชันต่ำให้ปริมาณการดูดซับที่สูงกว่าอุณหภูมิคาร์บอนในเซชันสูง เช่นเดียวกับสภาวะกระตุ้น กล่าวคือที่อุณหภูมิและเวลาในการกระตุ้นสูง ความสามารถในการดูดซับก็จะสูงตามไปด้วย แต่ยังมีข้อจำกัดในเรื่องของอุณหภูมิและเวลาในการกระตุ้นอยู่บ้าง ซึ่งเมื่ออุณหภูมิและเวลาที่สูงถึงจุดหนึ่งจะเกิดการแตกหักของโครงสร้างและผนังของรูพรุนเกิดการยุบตัวอุดปิดรูพรุนบางส่วนของถ่านกัมมันต์ (Sun et al., 1997) ทำให้ความสามารถในการดูดซับแก๊สไนโตรเจนมีค่าลดลง



รูปที่ 4.16 ไอโซเทอรั่มการดูดซับไนโตรเจนของถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส

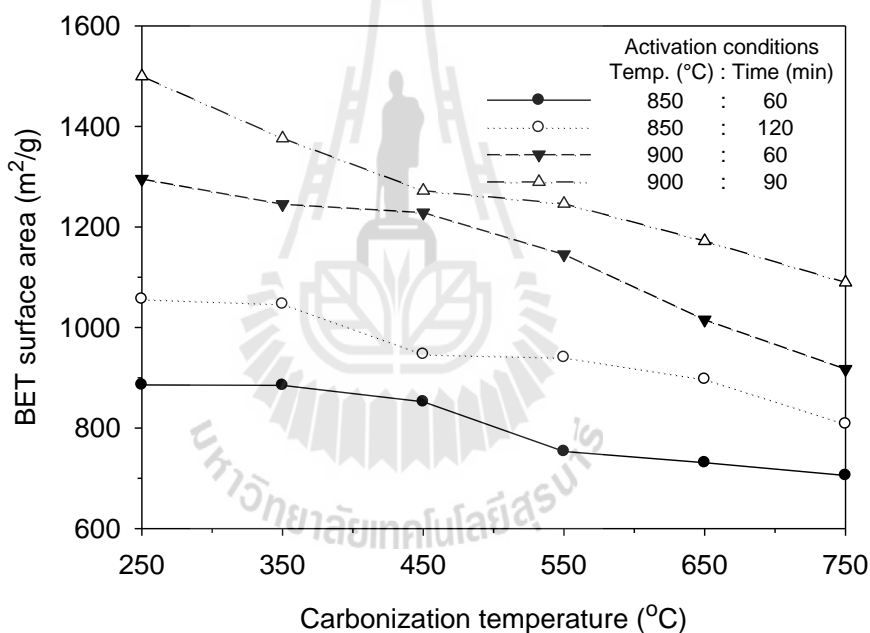




รูปที่ 4.17 ไอโซเทิร์มการดูดซับไนโตรเจนของถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส

ในการศึกษาผลของอุณหภูมิคาร์บอนในเซชันต่อสมบัติความพรุนของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จากสถานะกระตุ้นต่างกันนัน แสดงผลของอุณหภูมิคาร์บอนในเซชันต่อขนาดพื้นที่ผิว BET และปริมาตรรูพรุนของถ่านกัมมันต์ ดังรูปที่ 4.18 และ 4.19 จากการทดลองนี้ เห็นว่า ทั้งพื้นที่ผิว BET ปริมาตรรูพรุนรวม และปริมาตรรูพรุนขนาดเล็กมีขนาดลดลงเมื่ออุณหภูมิคาร์บอนในเซชันสูงขึ้น กล่าวได้ว่า อุณหภูมิคาร์บอนในเซชันมีผลอย่างมากต่อการเกิดปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันและการพัฒนา รูพรุน เมื่อเปรียบเทียบกับถ่านชาร์ที่เตรียมได้จากแต่ละสถานะแล้ว พบว่า ถ่านชาร์ที่เตรียมได้จาก อุณหภูมิคาร์บอนในเซชันต่ำที่ 250 องศาเซลเซียส และกระตุ้นที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 90 นาที ให้ขนาดพื้นที่ผิว BET และปริมาตรรูพรุนรวมที่สูงสุดที่ 1,500 ตารางเมตรต่อกรัม และ 0.772 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมาของ Toda et al. (2012) ที่ได้ทำการวิเคราะห์สมบัติความพรุนของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จากลิกนิน โดยการเพิ่ม อุณหภูมิคาร์บอนในเซชันจาก 400 เป็น 800 องศาเซลเซียส พบว่า สมบัติความพรุนของถ่านกัมมันต์ มีค่าลดลง โดยค่าพื้นที่ผิวจำเพาะลดลงจาก 2,290 เป็น 1,140 ตารางเมตรต่อกรัม โดยที่ปริมาตรรูพรุน รวมและปริมาตรรูพรุนขนาดเล็กลดลงจาก 1.97 เป็น 0.61 และ 1.49 เป็น 0.48 ลูกบาศก์เซนติเมตร ต่อกรัม ตามลำดับ จากการทดลองนี้กล่าวได้ว่า ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากอุณหภูมิคาร์บอนในเซชันสูง เกิดการแตกหักทับซ้อนของปริมาตรรูพรุน ทำให้โครงสร้างรูพรุนเกิดการหดตัวและมีความ หนาแน่นในอนุภาคสูงขึ้น ส่งผลให้สมบัติความพรุนของถ่านกัมมันต์มีค่าลดลง แต่จากงานวิจัยของ

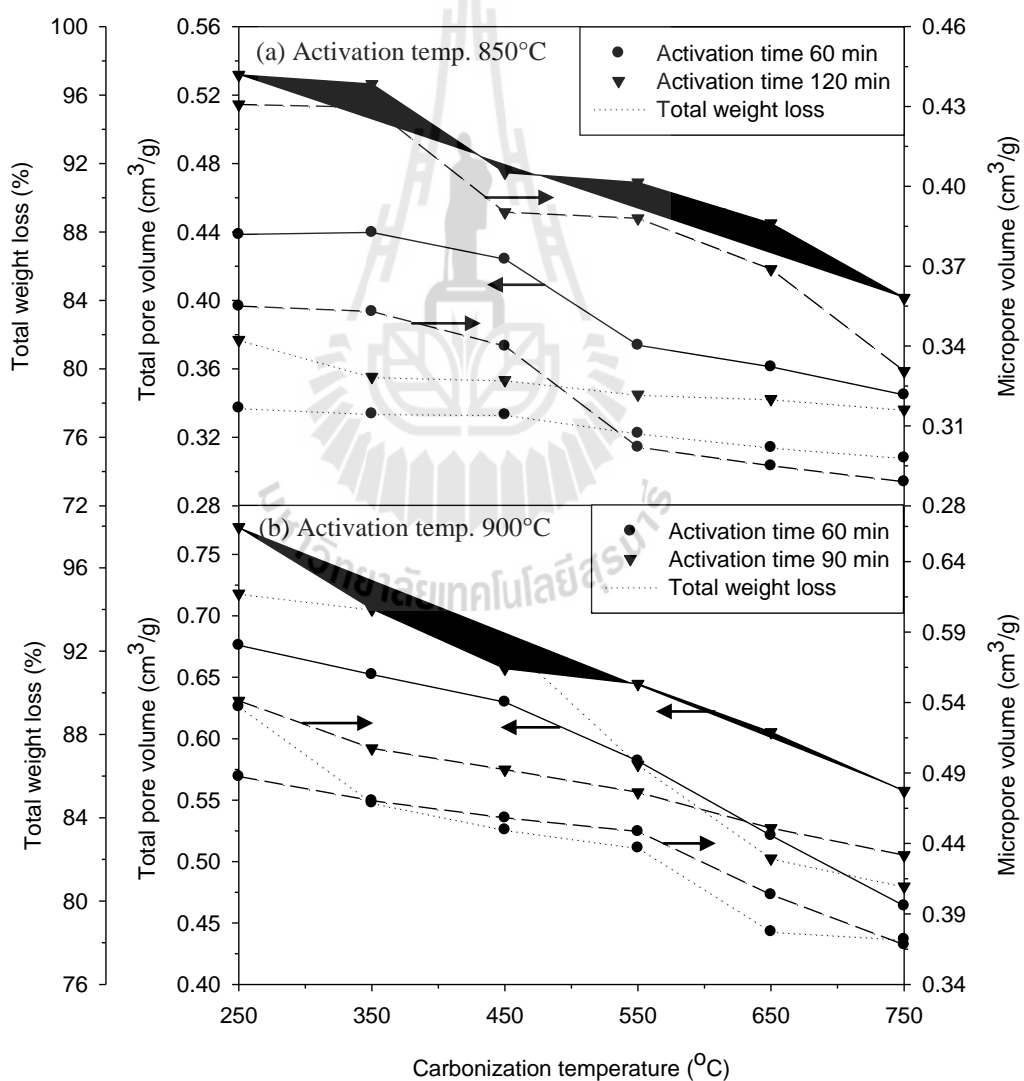
Li et al. (2008) ที่ได้ทำการศึกษาสมบัติความพรุนของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จากกะลามะพร้าวโดยการคาร์บอนไนซ์ที่อุณหภูมิต่างๆ ในช่วง 400-1,000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 120 นาที และกระตุ้นด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลาในช่วง 30-120 นาที กลับพบว่า สมบัติความพรุนของถ่านกัมมันต์มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิคาร์บอนไนซ์เพิ่มขึ้น โดยมีค่าสูงสุดที่อุณหภูมิคาร์บอนไนซ์ 1,000 องศาเซลเซียส และเวลากระตุ้น 120 นาที ได้ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะเท่ากับ 1,926 ตารางเมตรต่อกรัม ส่วนปริมาตรรูพรุนรวมและรูพรุนขนาดเล็กมีค่าเท่ากับ 1.26 และ 0.931 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม ตามลำดับ เป็นไปได้ว่า สารกระตุ้นที่ต่างชนิดกัน (ไอน้ำเทียบกับแก๊สคาร์บอน ไดออกไซด์) อาจมีผลต่อปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันที่ต่างกัน ส่งผลให้แนวโน้มของสมบัติความพรุนเป็นไปในทิศทางตรงข้ามกับผลที่ได้จากการศึกษาในงานวิจัยนี้ ซึ่งจะได้อ่านการศึกษาต่อไป



รูปที่ 4.18 ผลของอุณหภูมิคาร์บอนไนซ์ในการเตรียมถ่านชาร์ตต่อขนาดพื้นที่ผิว BET ของถ่านกัมมันต์

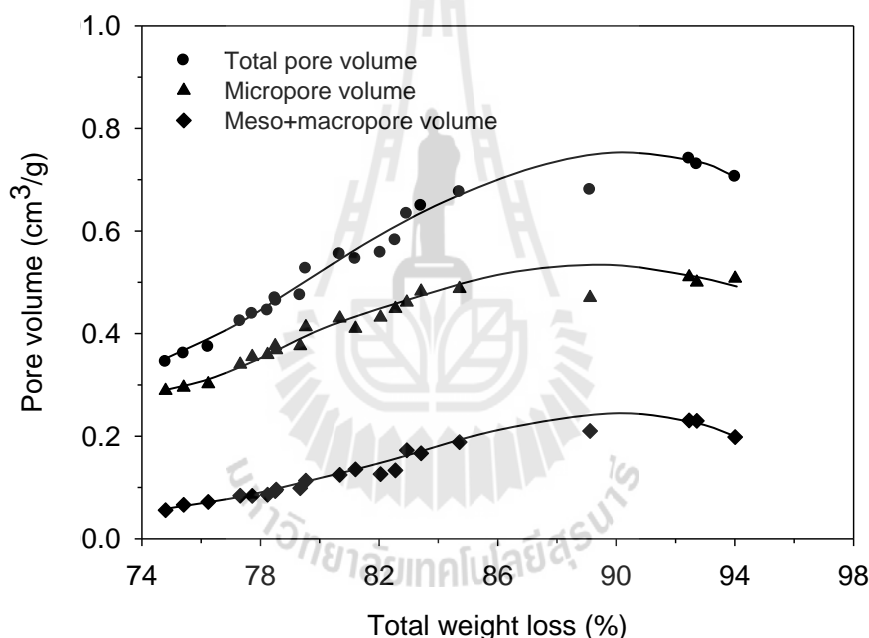
จากค่าสมบัติความพรุนของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จากการคาร์บอนไนซ์ที่อุณหภูมิต่างๆ นั้น จึงว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการเตรียมถ่านชาร์ตในขั้นตอนการคาร์บอนไนซ์มีผลอย่างมากต่อการเกิดปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันในขั้นตอนการกระตุ้น ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาการเกิดปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันด้วยเครื่องวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อน (Tangsathitkulchai et al., 2012) โดยจากผลการศึกษาจลนพลศาสตร์ของการเกิดแก๊สซิฟิเคชันนี้ พบว่า การเกิดปฏิกิริยาของถ่านชาร์ตมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิคาร์บอนไนซ์สูงขึ้น เป็นไปได้ว่าการสลายตัวของเฮมิเซลลูโลสในขั้นตอนการคาร์บอนไนซ์

ที่อุณหภูมิต่ำ มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของอัตราการเกิดปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันของถ่านชาร์ในขั้นตอนการกระตุ้น เนื่องจากการเพิ่มตำแหน่งความว่องไวการเกิดปฏิกิริยาจากการสลายตัวของลิกโนเซลลูโลส ที่คงเหลือเมื่อได้รับความร้อนในขั้นตอนกระตุ้น นอกจากนี้ จากการทดลองยังพบอีกว่าที่อุณหภูมิการคาร์บอนไนซ์สูง โครงสร้างของกะลามะพร้าวส่วนใหญ่ถูกพัฒนาไปเป็นถ่านชาร์ที่มีปริมาณคาร์บอนคงตัวสูง โดยถ่านชาร์ที่ได้นี้มีโครงสร้างที่หนาแน่นขึ้นเนื่องจากการหดตัวของโครงสร้างถ่านชาร์ขณะที่มีการสลายตัวของลิกโนเซลลูโลส ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่ออัตราการแพร่ของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ไปยังตำแหน่งการเกิดปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันบนพื้นผิวภายในในระหว่างขั้นตอนการกระตุ้นเกิดได้ช้าลง



รูปที่ 4.19 ผลของอุณหภูมิคาร์บอนไนซ์ในการเตรียมถ่านชาร์ต่อการสูญเสียน้ำหนักโดยรวม และปริมาตรรูพรุนของถ่านกัมมันต์

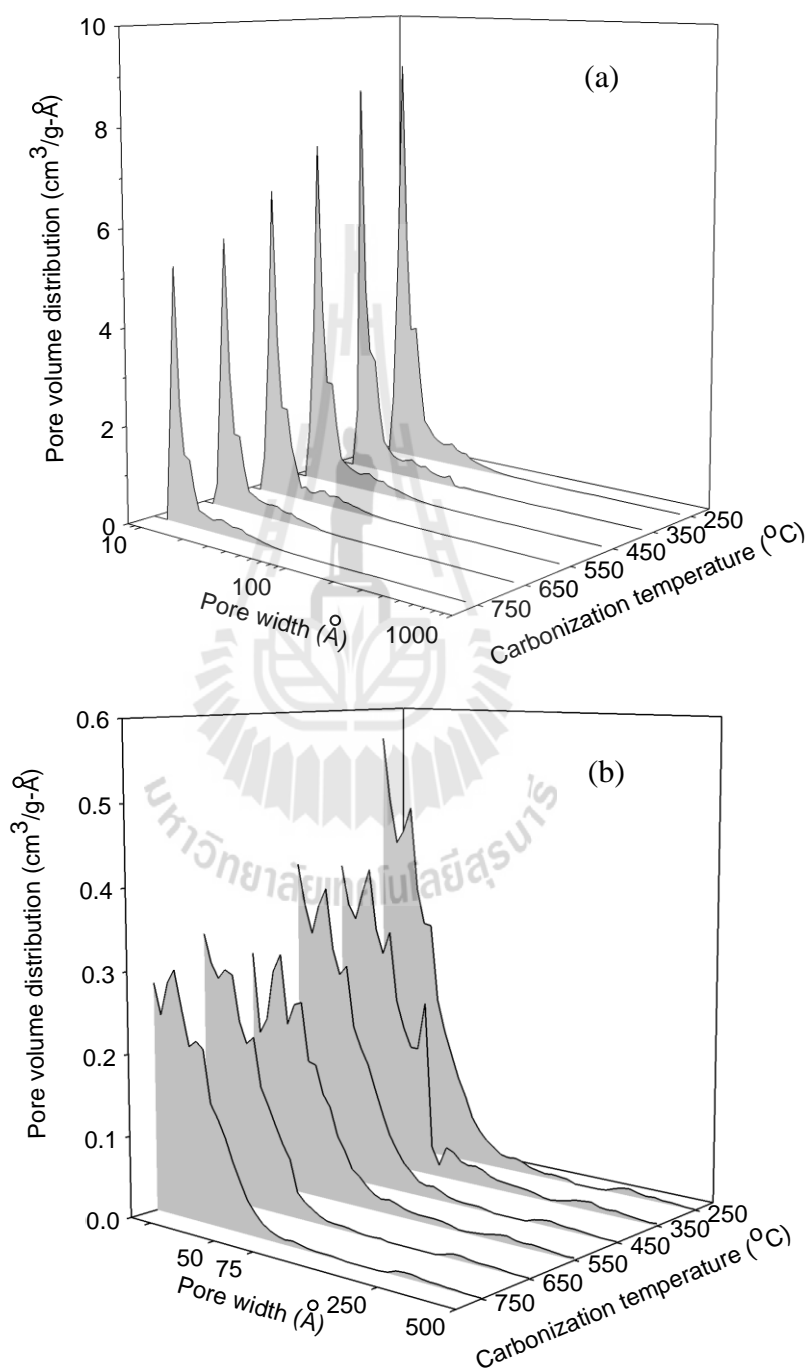
ในการศึกษาผลของอุณหภูมิคาร์บอนไนเซชันต่อสมบัติความพรุนของถ่านกัมมันต์นี้ยังสามารถอธิบายได้ในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างการสูญเสียน้ำหนักโดยรวม ซึ่งจะมีค่าต่างกันตามสถานะในการเตรียมถ่านกัมมันต์ ได้แก่ อุณหภูมิคาร์บอนไนเซชัน และอุณหภูมิและเวลาในการกระตุ้น ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.20 พบว่า เมื่อการสูญเสียน้ำหนักโดยรวมของถ่านกัมมันต์มีค่าเพิ่มขึ้น จะมีการเกิดขึ้นและการพัฒนาารูพรุนมากขึ้น โดยรูพรุนมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องในลักษณะเชิงเส้นในช่วงเริ่มต้นของการสูญเสียน้ำหนักโดยรวมที่ต่ำกว่าร้อยละ 76 จากนั้นรูพรุนมีการพัฒนาเพิ่มขึ้นเมื่อการสูญเสียน้ำหนักมากขึ้น โดยความสัมพันธ์มีลักษณะโค้งงอและมีค่าความพรุนสูงสุดที่ค่าการสูญเสียน้ำหนักโดยรวมประมาณร้อยละ 90



รูปที่ 4.20 การสูญเสียน้ำหนักโดยรวมต่อการเกิดและการพัฒนาารูพรุนของถ่านกัมมันต์

ในการอธิบายผลของอุณหภูมิคาร์บอนไนเซชันต่อการกระจายขนาดรูพรุนของถ่านกัมมันต์สามารถอธิบายได้ดังรูปที่ 4.21 ซึ่งเป็นตัวอย่างการกระจายขนาดรูพรุนของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จากสถานะกระตุ้นอุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส เวลา 120 นาที จากการทดลอง พบว่า การกระจายตัวของขนาดรูพรุนเกิดขึ้นในช่วงแคบๆ โดยมีค่าการกระจายตัวสูงสุดอยู่ที่ขนาดรูพรุนประมาณ 11.3 อังสตรอม ซึ่งชี้ว่า ขนาดรูพรุนส่วนใหญ่ที่พบในถ่านกัมมันต์นี้เป็นรูพรุนขนาดเล็กที่มีขนาดรูพรุนน้อยกว่า 20 อังสตรอม (รูปที่ 4.21(a)) ส่วนการกระจายขนาดรูพรุนขนาดกลางของถ่านกัมมันต์เกิดขึ้นในช่วงที่กว้าง (20-500 อังสตรอม) แสดงดังรูปที่ 4.21(b) เมื่อพื้นที่ใต้กราฟแสดงถึงปริมาตร

รูพรุน จึงเห็นได้อย่างชัดเจนว่าปริมาณรูพรุนขนาดเล็กและรูพรุนขนาดกลางลดลงเมื่ออุณหภูมิคาร์บอนในเซชันสูงขึ้นในช่วง 250 ถึง 750 องศาเซลเซียส ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองที่แสดงในรูปที่ 4.19



รูปที่ 4.21 ตัวอย่างการกระจายขนาดรูพรุนของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จากสภาวะกระตุ้นอุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส เวลา 120 นาที

จากการศึกษาผลของอุณหภูมิคาร์บอนไนเซชันต่อการกระจายขนาดรูพรุนของถ่านกัมมันต์ดังที่กล่าวมานั้น แสดงรายละเอียดปริมาณรูพรุนของถ่านกัมมันต์ได้ในตารางที่ 4.8 จากตารางพบว่า ปริมาตรรูพรุนขนาดใหญ่ที่ได้มีค่าน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาตรรูพรุนขนาดเล็กและรูพรุนขนาดกลาง ซึ่งปริมาตรรูพรุนขนาดเล็กที่ได้มีค่าสูงขึ้นเมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิคาร์บอนไนเซชันโดยร้อยละการเพิ่มขึ้นของปริมาตรรูพรุนขนาดเล็กจาก 77.84 เป็น 80.95 เมื่ออุณหภูมิคาร์บอนไนเซชันเพิ่มขึ้นจาก 250 ถึง 750 องศาเซลเซียส ในขณะที่ปริมาตรรูพรุนขนาดกลางมีแนวโน้มในทิศทางตรงข้ามกันคือมีการลดลงของปริมาตรรูพรุนขนาดกลางจากร้อยละ 22.12 เป็น 18.89

ตารางที่ 4.7 ผลของอุณหภูมิคาร์บอนไนเซชันต่อการกระจายขนาดรูพรุนของถ่านกัมมันต์ ที่สภาวะกระตุ้น 850 องศาเซลเซียส เวลา 120 นาที

Carbonization temperature (°C)	Total pore volume (cm <sup>3</sup> /g)	Micropore volume		Mesopore Volume		Macropore volume		Average pore size (Å)
		(cm <sup>3</sup> /g)	%	(cm <sup>3</sup> /g)	%	(cm <sup>3</sup> /g)	%	
250	0.532	0.414	77.84	0.118	22.12	0.00021	0.04	20.14
350	0.526	0.413	78.45	0.113	21.45	0.00053	0.10	20.12
450	0.475	0.376	79.20	0.098	20.66	0.00062	0.14	20.05
550	0.469	0.376	80.18	0.092	19.69	0.00059	0.13	19.94
650	0.445	0.359	80.67	0.085	19.19	0.00063	0.14	19.84
750	0.401	0.325	80.95	0.076	18.89	0.00067	0.16	19.86

จากผลการทดลองดังกล่าวนี้ แสดงให้เห็นว่า อุณหภูมิคาร์บอนไนเซชันนอกจากจะส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยาของถ่านชาร์ในขั้นตอนกระตุ้นที่ให้สมบัติความพรุนของถ่านกัมมันต์ที่ต่างกันแล้วยังส่งผลต่อ โครงสร้างทางกายภาพของถ่านชาร์ที่ผ่านการให้ความร้อนในขั้นตอนการคาร์บอนไนเซชัน ทำให้ถ่านกัมมันต์ที่ได้มีการกระจายขนาดรูพรุนที่ต่างกัน ซึ่งเป็นไปได้ว่าถ่านชาร์ที่ถูกเตรียมขึ้นที่อุณหภูมิคาร์บอนไนเซชันสูงมีการสลายตัวของสารระเหยในปริมาณที่มาก ถ่านชาร์ที่เตรียมได้จึงมีโครงสร้างที่หนาแน่นขึ้น ทำให้ยากต่อการขยายขนาดรูพรุนของถ่านชาร์เมื่อนำไปกระตุ้นโดยปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

## บทที่ 5

### สรุปผลและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผล

จากผลการศึกษาสภาพที่เหมาะสมในการเตรียมถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าวให้มีความสามารถในการดูดซับสูง โดยได้เน้นศึกษาในส่วนของขั้นตอนการเตรียมถ่านชาร์ด้วยกระบวนการคาร์บอนไนซ์ที่อุณหภูมิคาร์บอนไนเซชันต่างๆ ในช่วง 250-750 องศาเซลเซียส เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิคาร์บอนไนเซชันต่อสมบัติของถ่านชาร์และถ่านกัมมันต์ โดยในการทดลองนี้ได้ทำการกระตุ้นถ่านชาร์ที่สภาวะอุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 และ 120 นาที และที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เวลา 60 และ 90 นาที ซึ่งสามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

1. ร้อยละผลผลิต (yield) ของถ่านชาร์ที่ผ่านการคาร์บอนไนเซชันที่อุณหภูมิสูงมีค่าลดลงเนื่องจากสภาวะเร่งเกิดการสลายตัวได้มาก ส่งผลให้ถ่านชาร์ที่ได้มีปริมาณสัดส่วนของคาร์บอนคงตัวเพิ่มขึ้น โดยมีค่าสูงสุดที่ร้อยละ 88.42 สำหรับถ่านชาร์ที่เตรียมโดยใช้อุณหภูมิคาร์บอนไนเซชัน 750 องศาเซลเซียส

2. อุณหภูมิคาร์บอนไนเซชันมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของถ่านชาร์ โดยถ่านชาร์ที่สภาวะก่อนกระตุ้นมีความหนาแน่นมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิคาร์บอนไนซ์สูงขึ้น ซึ่งเมื่อนำถ่านชาร์ไปผ่านกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ส่งผลให้การขยายขนาดรูพรุนของถ่านชาร์เกิดได้ยากขึ้น ทำให้ปริมาตรรูพรุนของถ่านกัมมันต์ที่ได้มีพื้นที่ผิวในการดูดซับที่ลดลง

3. การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิคาร์บอนไนเซชันทำให้ปริมาณหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของถ่านชาร์และค่าดัชนีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยามีค่าลดลง ส่งผลให้ถ่านชาร์มีความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันในขั้นตอนการกระตุ้นได้น้อยลง

4. ข้อมูลจลนพลศาสตร์การเกิดปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันในขั้นตอนการกระตุ้นถ่านชาร์เพื่อผลิตถ่านกัมมันต์สามารถอธิบายได้ดีที่สุดโดยใช้แบบจำลอง modified volume-reaction (MVRM) ซึ่งให้ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานในการประมาณ ( $\sigma_{est}$ ) น้อยที่สุด

5. การสลายตัวของเฮมิเซลลูโลสในขั้นตอนการคาร์บอนไนซ์ที่อุณหภูมิต่ำ มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของอัตราการเกิดปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันของถ่านชาร์ในขั้นตอนการกระตุ้น เนื่องจากช่วยเพิ่มตำแหน่งว่องไว (active sites) ในการเกิดปฏิกิริยาบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์

6. สมบัติความพรุนของถ่านกัมมันต์ ได้แก่ พื้นที่ผิว ปริมาตรและขนาดรูพรุน มีค่าลดลงเมื่อใช้อุณหภูมิคาร์บอนไนเซชันที่สูงขึ้น ซึ่งถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จากถ่านชาร์ที่ผ่านการคาร์บอนไนซ์ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส และกระตุ้นที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 90 นาที ให้พื้นที่ผิวและปริมาตรสูงสุดเท่ากับ 1,500 ตารางเมตรต่อกรัม และ 0.772 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม ตามลำดับ โดยรูพรุนที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่เป็นรูพรุนขนาดเล็ก คิดเป็นร้อยละ 70-77 ของปริมาตรรูพรุนรวมทั้งหมด

## 5.2 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยต่อไป

1. เพิ่มการศึกษาผลของตัวแปรต่างๆ ที่อาจส่งผลกระทบต่อสมบัติความพรุนและความสามารถในการดูดซับของถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าวให้ครอบคลุมมากขึ้น เช่น ผลของขนาดกะลามะพร้าว ผลของเวลาในขั้นตอนการคาร์บอนไนซ์ ผลของอัตราการให้ความร้อนในขั้นตอนการคาร์บอนไนซ์ และการกระตุ้น เป็นต้น

2. ควรศึกษากระบวนการเตรียมถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าวด้วยวิธีการกระตุ้นทางเคมี และการกระตุ้นทางกายภาพด้วยไอน้ำ เพื่อเปรียบเทียบสมบัติและประสิทธิภาพในการดูดซับของถ่านกัมมันต์

3. ควรศึกษาเพิ่มเติมสำหรับชีวมวลที่มีศักยภาพชนิดอื่นๆ เช่น กะลาปาล์ม ไม้ เมล็ดลำไย เป็นต้น เพื่อพิสูจน์ว่าถ่านกัมมันต์ที่มีสมบัติความพรุนสูงได้จากการเตรียมถ่านชาร์ที่อุณหภูมิคาร์บอนไนซ์ต่ำ

4. ควรศึกษาเพิ่มเติมในส่วนของ การวิเคราะห์สมบัติเชิงกล (mechanical properties) เช่น ความแข็ง (hardness) และความแข็งแรง (strength) เพื่อให้ทราบว่าถ่านกัมมันต์ที่ได้มีความทนทานมากน้อยเพียงใด



## รายการอ้างอิง

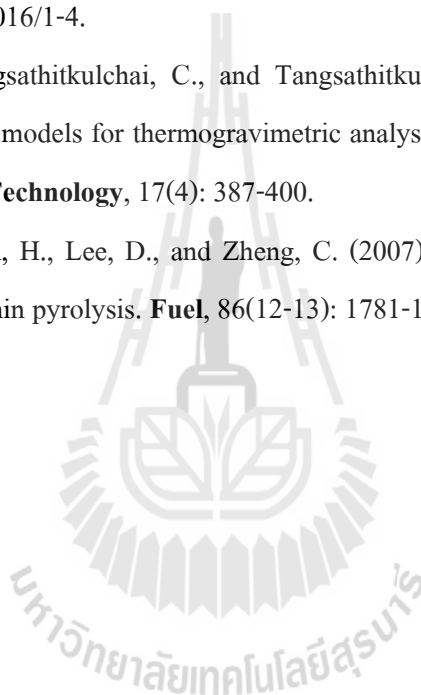
- กรมศุลกากร (2550). สถิติการนำเข้า - ส่งออก. กรุงเทพมหานคร: กรมศุลกากร. แหล่งข้อมูล:  
<http://internet1.customs.go.th/ext/Statistic/StatisticIndex2550.jsp>.
- กรมควบคุมมลพิษ (2547). ฐานความรู้การกำจัดกลิ่น - การออกแบบการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์.  
กรุงเทพมหานคร: กรมควบคุมมลพิษร่วมกับสถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์  
มหาวิทยาลัย. แหล่งข้อมูล: [http://www.pcd.go.th/info\\_serv/Datasmell/design\\_absorbtion.htm](http://www.pcd.go.th/info_serv/Datasmell/design_absorbtion.htm)
- Ahmadpour, A., and Do, D.D. (1996). The preparation of active carbons from coal by chemical and physical activation. **Carbon**, 34(4): 471-479.
- Al-Khateeb, I.I., and Al-Mehemdy, A. (2011). Adsorption of orange II dye using activated carbon produced from Iraqi date-palm stones. **Journal of Chemistry and Chemical Engineering**, 5: 715-719.
- Antal, M.J. (1983). Biomass pyrolysis: A review of the literature. Part I-Carbohydrate pyrolysis. In: Boer, K.W., Duffie, J.A., editors. **Advances in Solar Energy**. **American Solar Energy Society**, Boulder, Colorado, 1: 61-111.
- Antal, M.J., Anlen S.G., Dai, X., Shimizu, B., Tam, M.S., and Gronli, M. (2000). Attainment of the Theoretical Yield of Carbon from Biomass. **Industrial and Engineering Chemistry Research**, 11: 4024-4031.
- Bhatia, S.K., and Perlmutter, D.D. (1980). A random pore model for fluid-solid reactions: I. Isothermal, kinetic control. **AIChE Journal**, 26: 379-386.
- Blanco-Castro, J., Bonelli, P.R., Cerrella, E.G., and Cukierman, A.L. (2000). Phosphoric acid activation of agricultural residues and bagasse from sugar cane: Influence of the experimental conditions on adsorption characteristics of activated carbons. **Industrial and Engineering Chemistry Research**, 39(11): 4166-4172.

- Brebu M., and Vasile C. (2010). Thermal degradation of lignin – A review. **Cellulose Chemistry and Technology**, 44(9): 353-363.
- Brunauer S., Deming L.S., Deming W.S., and Teller E.A. (1940). Theory of the van der Waals adsorption of gases. **Journal of the American Chemical Society**, 62: 1723–1732.
- Brunauer, S., Emmett, P.H., and Teller, E. (1938). Adsorption of gases in multimolecular layers. **Journal of the American Chemical Society**, 60(2): 309-319.
- Cagnon, B., Py, X., Guillot, A., Stoeckli, F., and Chambat, G. (2009). Contribution of hemicellulose, cellulose and lignin to the mass and the porous properties of chars and steam activated carbons from various lignocellulosic precursors. **Bioresource technology**, 100(1): 292-298.
- Fan, L.T., Gharpuray, M.M., and Lee, Y.H. (1987). Cellulose Hydrolysis Biotechnology Monographs. **Springer**, Berlin. 57p.
- The Freedonia Group, Inc. (2008). **World activated carbon**. Cleveland, Ohio: The Freedonia Group. Available from: <http://www.freedoniagroup.com>. Accessed date: May, 2008.
- The Freedonia Group, Inc. (2010). **World activated carbon**. Cleveland, Ohio: The Freedonia Group. Available from: <http://www.freedoniagroup.com>. Accessed date: June, 2010.
- The Freedonia Group, Inc. (2012). **World activated carbon**. Cleveland, Ohio: The Freedonia Group. Available from: <http://www.freedoniagroup.com>. Accessed date: April, 2012.
- Freundlich, H.M.F. (1906). Über die adsorption in losungen. **Zeitschrift für Physikalische Chemie**, 57(A): 385–470.
- Gasparovic, L., Korenova, Z., and Jelemensky, L. (2010). Kinetic study of wood chips decomposition by TGA. **Chemical Papers**, 64(2): 174-181.
- Gregg, S.J., and Sing, K.S.W. (1982). Adsorption, surface area, and porosity. 2<sup>nd</sup> edition. **Academic Press**, New York. 303p.
- Guo, S.H., Peng, J.H., Li, W., Yang, K.B., Zhang, L., Zhang, S.M., and Xia, H.Y. (2009). Effects of CO<sub>2</sub> activation on porous structures of coconut shell-based activated carbons. **Applied Surface Science**, 255(20): 8443-8449.
- Hassler, J.W. (1974). Purification with activated carbon: Industrial, Commercial and Environmental. **Chemical Publishing Co., Inc.**, New York.

- Henning, K.D., and Schäfer, S. (2007). Impregnated activated carbon for environmental protection. Wigan, Lancashire: CPL Carbon Link. Available from: <http://www.activated-carbon.com/enviro.html>. Accessed date: June 25, 2007.
- Irfan, M.F., Usman, M.R., and Kusakabe, K. (2011). Coal gasification in CO<sub>2</sub> atmosphere and its kinetics since 1948: A brief review. **Energy**, 36: 12-40.
- Ishida, M., and Wen, C.Y. (1971). Comparison of zone-reaction model and unreacted-core shrinking model in solid-gas reactions. **Chemical Engineering Science**, 26: 1031-1041.
- Jagtøyen, M., and Derbyshire, F. (1998). Activated carbons from yellow poplar and white oak by H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> activation. **Carbon**, 36: 1085-1097.
- Junpirom, S., Tangsathitkulchai, C., and Tangsathitkulchai, M. (2006). Preparation of activated carbons from longan seed by physical and chemical activation method. **Suranaree Journal of Science and Technology**, 14(1): 63-76.
- Karaosmanoglu, F., Iagur-Ergudenler, A.I., and Sever, A. (2000). Biochar from the straw-stall of rapeseed plant. **Energy and Fuels**, 14: 336-339
- Kasaoka, S., Sakata, Y., and Tong, C. (1985). Kinetics evaluation of the reactivity of various coal chars for gasification with carbon dioxide in comparison with steam. **International Journal of Chemical Engineering**, 25: 160-175.
- Kenneth, E.N., Gounaris, V., and Hou, W.S. (1992). Adsorption Technology for Air and Water Pollution Control. **Lewis publishers, Inc.**, Chelsea, Michigan.
- Kögel-Knabner, I. (2002). The macromolecular organic composition of plant and microbial residues as inputs to soil organic matter. **Soil Biology and Biochemistry**. 34:139-162.
- Lane, D.M. (2012). **Standard error of the estimate**. Online Statistics Education: A Multimedia Course of Study, Ch. 14. Available from: <http://onlinestatbook.com./2/regression/accuracy.html>. Accessed date: 2012.
- Langmuir, I. (1916). The constitution and fundamental properties of solids and liquids part i. solids, **Journal of the American Chemical Society**, 38: 2221–2295.
- Leon y Leon, C.A., and Radovic, L.R. (1994). Interfacial chemistry and electrochemistry of carbon surfaces. In: Thrower, P. A., editor. Chemistry and Physics of Carbon. **Marcel Dekker, Inc.**, New York.

- Li, W., Yang, K.B., Peng, J.H., Zhang, L., Guo, S.H., and Xia H.Y. (2008). Effects of carbonization temperatures on characteristics of porosity in coconut shell chars and activated carbons derived from carbonized coconut shell chars. **Industrial Crops and Products**, 28(2): 190-198.
- Lua, A.C., and Guo, J. (1998). Preparation and characterization of chars from oil palm waste. **Carbon**, 36(11): 1663-1670.
- Harry M. (2001). Activated carbon compendium. 1<sup>st</sup> edition. **Elsevier Science**, Amsterdam, New York.
- Moreno, A.H., Arenillas, A., Calvo, E.G., Bermúdez, J.M., Menéndez, J.A. (2013). Carbonisation of resorcinol–formaldehyde organic xerogels: Effect of temperature, particle size and heating rate on the porosity of carbon xerogels. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, 100: 111–116.
- Ngernyen, Y., Tangsathitkulchai, C., and Tangsathitkulchai, M. (2006). Porous properties of activated carbon produced from eucalyptus and wattle wood by carbon dioxide activation. **Korean Journal of Chemical Engineering**, 23(6): 1046-1054.
- Nguyen, C., and Do, D.D. (2001). The Dubinin–Radushkevich equation and the underlying microscopic adsorption description. **Carbon**, 39: 1327–1336.
- Olivier, J.P. (1995). Modeling physical adsorption on porous and nonporous solids using density functional theory. **Journal of Porous Materials**, 2(1): 9-17.
- Reynolds, W.K. (1968). Physical properties of graphite. Materials Science Series, **Elsevier Publishing Co.**, New York.
- Rodriguez-Reinoso, F., Molina-Sabio, M. (1998). Textural and chemical characterization of microporous carbons. **Advances in Colloid and Interface Science**, 76–77: 271–294.
- Sing K.S.W., Everett D.H., Haul R.A.W., Mosoul L., Pierotti R.A., Rouguerol J., and Siemieniewska T. (1985). Reporting physisorption data to the determination of surface area and porosity. **Pure and Applied Chemistry**, 57(4): 603–619.
- Sun, J., Hippo, E.J., Marsh, H., O'Brien, W.S., and Crelling, J.C. (1997). Activated carbon produced from an Illinois basin coal. **Carbon**, 35(3): 341-352.

- Szekely, J., and Evans, J.W. (1970). A structural model for gas-solid reactions with a moving boundary. **Chemical Engineering Science**, 25: 1091-1107.
- Tangsathitkulchai, C., Junpirom, S., and Katesa, J. (2012). Comparison of kinetic models for CO<sub>2</sub> gasification of coconut-shell chars: carbonization temperature effects on char reactivity and porous properties of produced ctivated Carbons. **Engineering Journal**, 17(1): 13-27.
- Toda, I., Toda, H., Ohshio, S., Akasaka, H., Himeno, S., Nakaishi, M., and Saitoh, H. (2012). Hydrogen storage property of activated carbon fabricated with lignin. **Transactions on GIGAKU**, 1: 01016/1-4.
- Weerachanchai, P., Tangsathitkulchai, C., and Tangsathitkulchai, M. (2010). Comparison of pyrolysis kinetic models for thermogravimetric analysis of biomass. **Suranaree Journal of Science and Technology**, 17(4): 387-400.
- Yang, H., Yan, R., Chen, H., Lee, D., and Zheng, C. (2007). Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis. **Fuel**, 86(12-13): 1781-1788.





ภาคผนวก ก

ตารางข้อมูลพื้นฐาน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ก.1 ข้อมูลการวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนของกะลามะพร้าว

Time (min)	Temp. (°C)	Weight (%)	Time (min)	Temp. (°C)	Weight (%)	Time (min)	Temp. (°C)	Weight (%)
0.0000	25.9240	99.9977	1.5125	27.0193	99.9347	3.0375	34.3037	99.8190
0.0333	25.9229	99.9976	1.5625	27.1657	99.9329	3.0917	34.6086	99.8125
0.0875	25.9250	99.9958	1.6125	27.3203	99.9306	3.1458	34.9100	99.8051
0.1375	25.9237	99.9924	1.6625	27.4860	99.9276	3.1958	35.1930	99.7984
0.1875	25.9217	99.9901	1.7125	27.6560	99.9259	3.2458	35.4727	99.7918
0.2375	25.9273	99.9877	1.7667	27.8506	99.9240	3.2958	35.7463	99.7848
0.2875	25.9257	99.9857	1.8208	28.0533	99.9212	3.3458	36.0263	99.7774
0.3375	25.9267	99.9836	1.8708	28.2493	99.9188	3.3958	36.3030	99.7706
0.3875	25.9253	99.9810	1.9208	28.4540	99.9163	3.4458	36.5783	99.7637
0.4417	25.9237	99.9789	1.9708	28.6730	99.9131	3.4958	36.8597	99.7565
0.4958	25.9230	99.9766	2.0208	28.8970	99.9098	3.5500	37.1646	99.7480
0.5458	25.9220	99.9735	2.0708	29.1263	99.9064	3.6042	37.4617	99.7395
0.5958	25.9287	99.9709	2.1208	29.3630	99.9034	3.6542	37.7357	99.7321
0.6458	25.9310	99.9691	2.1708	29.6067	99.9002	3.7042	38.0100	99.7242
0.6958	25.9370	99.9675	2.2250	29.8737	99.8962	3.7542	38.2827	99.7162
0.7458	25.9453	99.9653	2.2792	30.1453	99.8927	3.8042	38.5567	99.7079
0.7958	25.9620	99.9635	2.3292	30.4037	99.8890	3.8542	38.8273	99.6992
0.8458	25.9830	99.9616	2.3792	30.6697	99.8850	3.9042	39.0947	99.6912
0.9000	26.0109	99.9591	2.4292	30.9360	99.8808	3.9542	39.3613	99.6831
0.9542	26.0470	99.9569	2.4792	31.2083	99.8763	4.0083	39.6537	99.6739
1.0042	26.0833	99.9550	2.5292	31.4900	99.8721	4.0625	39.9373	99.6645
1.0542	26.1373	99.9533	2.5792	31.7723	99.8682	4.1125	40.2013	99.6564
1.1042	26.1980	99.9514	2.6292	32.0507	99.8636	4.1625	40.4630	99.6475
1.1542	26.2643	99.9496	2.6833	32.3457	99.8578	4.2125	40.7210	99.6384
1.2042	26.3420	99.9477	2.7375	32.6387	99.8524	4.2625	40.9797	99.6299
1.2542	26.4273	99.9452	2.7875	32.9123	99.8467	4.3125	41.2323	99.6211
1.3042	26.5263	99.9434	2.8375	33.1883	99.8411	4.3625	41.4887	99.6113
1.3583	26.6400	99.9411	2.8875	33.4693	99.8357	4.4167	41.7617	99.6015
1.4125	26.7633	99.9388	2.9375	33.7427	99.8301	4.4708	42.0360	99.5923
1.4625	26.8860	99.9369	2.9875	34.0210	99.8245	4.5208	42.2900	99.5833

ตารางที่ ก.1 ข้อมูลการวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนของกะลามะพร้าว (ต่อ)

Time (min)	Temp. (°C)	Weight (%)	Time (min)	Temp. (°C)	Weight (%)	Time (min)	Temp. (°C)	Weight (%)
4.5708	42.5403	99.5742	6.0958	49.7267	99.2946	7.6292	57.0240	99.0148
4.6208	42.7907	99.5652	6.1458	49.9503	99.2856	7.6792	57.2783	99.0052
4.6708	43.0413	99.5557	6.2000	50.1929	99.2753	7.7292	57.5267	98.9959
4.7208	43.2860	99.5460	6.2542	50.4417	99.2653	7.7792	57.7757	98.9871
4.7708	43.5330	99.5375	6.3042	50.6660	99.2565	7.8292	58.0290	98.9783
4.8208	43.7753	99.5291	6.3542	50.8937	99.2478	7.8792	58.2817	98.9692
4.8750	44.0366	99.5190	6.4042	51.1233	99.2380	7.9292	58.5387	98.9599
4.9292	44.2980	99.5089	6.4542	51.3547	99.2289	7.9833	58.8160	98.9500
4.9792	44.5427	99.4999	6.5042	51.5880	99.2198	8.0375	59.0950	98.9401
5.0292	44.7807	99.4908	6.5542	51.8163	99.2105	8.0875	59.3507	98.9305
5.0792	45.0193	99.4814	6.6042	52.0497	99.2017	8.1375	59.6023	98.9211
5.1292	45.2620	99.4724	6.6583	52.3026	99.1923	8.1875	59.8603	98.9122
5.1792	45.5030	99.4632	6.7125	52.5620	99.1824	8.2375	60.1170	98.9031
5.2292	45.7393	99.4537	6.7625	52.7973	99.1732	8.2875	60.3717	98.8936
5.2792	45.9767	99.4442	6.8125	53.0317	99.1642	8.3375	60.6260	98.8846
5.3333	46.2354	99.4348	6.8625	53.2683	99.1551	8.3917	60.9109	98.8736
5.3875	46.4903	99.4251	6.9125	53.5090	99.1462	8.4458	61.1897	98.8635
5.4375	46.7257	99.4161	6.9625	53.7483	99.1370	8.4958	61.4457	98.8551
5.4875	46.9580	99.4067	7.0125	53.9917	99.1276	8.5458	61.7057	98.8464
5.5375	47.1973	99.3971	7.0667	54.2520	99.1176	8.5958	61.9623	98.8372
5.5875	47.4320	99.3881	7.1208	54.5150	99.1078	8.6458	62.2180	98.8276
5.6375	47.6670	99.3785	7.1708	54.7580	99.0988	8.6958	62.4740	98.8184
5.6875	47.8910	99.3693	7.2208	55.0017	99.0899	8.7458	62.7297	98.8091
5.7417	48.1326	99.3595	7.2708	55.2483	99.0804	7.6292	57.0240	99.0148
5.7958	48.3767	99.3492	7.3208	55.4920	99.0708	7.6792	57.2783	99.0052
5.8458	48.6013	99.3395	7.3708	55.7363	99.0621	7.7292	57.5267	98.9959
5.8958	48.8250	99.3308	7.4208	55.9827	99.0534	7.7792	57.7757	98.9871
5.9458	49.0497	99.3217	7.4708	56.2353	99.0441	7.8292	58.0290	98.9783
5.9958	49.2717	99.3123	7.5250	56.5017	99.0336	7.8792	58.2817	98.9692
6.0458	49.5017	99.3035	7.5792	56.7703	99.0238	7.9292	58.5387	98.9599



ตารางที่ ก.1 ข้อมูลการวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนของกะลามะพร้าว (ต่อ)

Time (min)	Temp. (°C)	Weight (%)	Time (min)	Temp. (°C)	Weight (%)	Time (min)	Temp. (°C)	Weight (%)
7.9833	58.8160	98.9500	8.5958	61.9623	98.8372	10.1208	69.5530	98.5640
8.0375	59.0950	98.9401	8.6458	62.2180	98.8276	10.1750	69.8237	98.5544
8.0875	59.3507	98.9305	8.6958	62.4740	98.8184	10.2292	70.0993	98.5448
8.1375	59.6023	98.9211	8.7458	62.7297	98.8091	10.2792	70.3520	98.5361
8.1875	59.8603	98.9122	8.7958	62.9737	98.8004	10.3292	70.6087	98.5276
8.2375	60.1170	98.9031	8.8500	63.2397	98.7906	10.3792	70.8590	98.5190
8.2875	60.3717	98.8936	8.9042	63.5027	98.7810	10.4292	71.1127	98.5096
8.3375	60.6260	98.8846	8.9542	63.7500	98.7722	10.4792	71.3687	98.5013
8.3917	60.9109	98.8736	9.0042	63.9987	98.7636	10.5292	71.6233	98.4926
8.4458	61.1897	98.8635	9.0542	64.2437	98.7546	10.5792	71.8780	98.4838
8.4958	61.4457	98.8551	9.1042	64.4910	98.7450	10.6333	72.1543	98.4748
8.5458	61.7057	98.8464	9.1542	64.7377	98.7356	10.6875	72.4303	98.4655
8.5958	61.9623	98.8372	9.2042	64.9843	98.7267	10.7375	72.6893	98.4564
8.6458	62.2180	98.8276	9.2542	65.2290	98.7183	10.7875	72.9487	98.4477
8.6958	62.4740	98.8184	9.3083	65.4969	98.7088	10.8375	73.2030	98.4394
8.7458	62.7297	98.8091	9.3625	65.7633	98.6991	10.8875	73.4583	98.4311
8.7958	62.9737	98.8004	9.4125	66.0110	98.6903	10.9375	73.7170	98.4230
8.8500	63.2397	98.7906	9.4625	66.2587	98.6810	10.9875	73.9727	98.4151
7.9833	58.8160	98.9500	9.5125	66.5093	98.6720	11.0417	74.2497	98.4051
8.0375	59.0950	98.9401	9.5625	66.7593	98.6634	11.0958	74.5290	98.3962
8.0875	59.3507	98.9305	9.6125	67.0073	98.6545	11.1458	74.7903	98.3876
8.1375	59.6023	98.9211	9.6625	67.2560	98.6455	11.1958	75.0467	98.3796
8.1875	59.8603	98.9122	9.7167	67.5263	98.6353	11.2458	75.3060	98.3714
8.2375	60.1170	98.9031	9.7708	67.7943	98.6259	11.2958	75.5653	98.3630
8.2875	60.3717	98.8936	9.8208	68.0443	98.6172	11.3458	75.8207	98.3549
8.3375	60.6260	98.8846	9.8708	68.2923	98.6082	11.3958	76.0750	98.3469
8.3917	60.9109	98.8736	9.9208	68.5433	98.5991	11.4458	76.3367	98.3390
8.4458	61.1897	98.8635	9.9708	68.7947	98.5902	11.5000	76.6177	98.3297
8.4958	61.4457	98.8551	10.0208	69.0470	98.5814	11.5542	76.8970	98.3206
8.5458	61.7057	98.8464	10.0708	69.3003	98.5726	11.6042	77.1490	98.3126

ตารางที่ ก.1 ข้อมูลการวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนของกะลามะพร้าว (ต่อ)

Time (min)	Temp. (°C)	Weight (%)	Time (min)	Temp. (°C)	Weight (%)	Time (min)	Temp. (°C)	Weight (%)
11.6542	77.3970	98.3045	13.1792	85.0687	98.0670	14.7125	92.8987	97.8517
11.7042	77.6437	98.2963	13.2292	85.3260	98.0592	14.7625	93.1483	97.8449
11.7542	77.8880	98.2879	13.2833	85.6023	98.0514	14.8125	93.4017	97.8387
11.8042	78.1383	98.2794	13.3375	85.8800	98.0436	14.8625	93.6497	97.8323
11.8542	78.3873	98.2715	13.3875	86.1360	98.0364	14.9125	93.9020	97.8260
11.9042	78.6363	98.2631	13.4375	86.3947	98.0290	14.9625	94.1553	97.8198
11.9583	78.9080	98.2544	13.4875	86.6507	98.0219	15.0167	94.4246	97.8133
12.0125	79.1790	98.2459	13.5375	86.9097	98.0149	15.0708	94.6987	97.8065
12.0625	79.4253	98.2383	13.5875	87.1640	98.0074	15.1208	94.9523	97.8005
12.1125	79.6733	98.2304	13.6375	87.4200	97.9996	15.1708	95.2043	97.7947
12.1625	79.9240	98.2219	13.6917	87.7011	97.9919	15.2208	95.4563	97.7888
12.2125	80.1740	98.2143	13.7458	87.9787	97.9843	15.2708	95.7090	97.7825
12.2625	80.4230	98.2065	13.7958	88.2347	97.9771	15.3208	95.9617	97.7762
12.3125	80.6723	98.1989	13.8458	88.4933	97.9699	15.3708	96.2197	97.7699
12.3667	80.9431	98.1900	13.8958	88.7527	97.9630	15.4208	96.4703	97.7638
12.4208	81.2190	98.1816	13.9458	89.0123	97.9560	15.4750	96.7483	97.7572
12.4708	81.4700	98.1744	13.9958	89.2690	97.9490	15.5292	97.0273	97.7510
12.5208	81.7237	98.1666	14.0458	89.5270	97.9424	15.5792	97.2823	97.7448
12.5708	81.9757	98.1584	14.0958	89.7873	97.9355	15.6292	97.5403	97.7389
12.6208	82.2297	98.1514	14.1500	90.0669	97.9275	15.6792	97.7980	97.7330
12.6708	82.4817	98.1432	14.2042	90.3430	97.9202	15.7292	98.0530	97.7269
12.7208	82.7367	98.1354	14.2542	90.6053	97.9132	15.7792	98.3093	97.7216
12.7708	82.9897	98.1278	14.3042	90.8603	97.9063	15.8292	98.5697	97.7166
12.8250	83.2631	98.1196	14.3542	91.1070	97.8996	15.8792	98.8273	97.7105
12.8792	83.5377	98.1115	14.4042	91.3553	97.8923	15.9333	99.1063	97.7038
12.9292	83.7933	98.1039	14.4542	91.6047	97.8857	15.9875	99.3840	97.6978
12.9792	84.0480	98.0968	14.5042	91.8557	97.8790	16.0375	99.6393	97.6922
13.0292	84.3020	98.0896	14.5542	92.1080	97.8729	16.0875	99.8967	97.6866
13.0792	84.5593	98.0820	14.6083	92.3774	97.8660	16.1375	100.1550	97.6815
13.1292	84.8147	98.0748	14.6625	92.6477	97.8586	16.1875	100.4177	97.6760

ตารางที่ ก.1 ข้อมูลการวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนของกะลามะพร้าว (ต่อ)

Time (min)	Temp. (°C)	Weight (%)	Time (min)	Temp. (°C)	Weight (%)	Time (min)	Temp. (°C)	Weight (%)
16.2375	100.6730	97.6704	17.7708	107.5510	97.5202	19.2958	108.2693	97.4225
16.2875	100.9303	97.6652	17.8208	107.6677	97.5165	19.3458	108.2357	97.4202
16.3417	101.2129	97.6591	17.8708	107.7813	97.5120	19.3958	108.2047	97.4175
16.3958	101.4900	97.6531	17.9208	107.8847	97.5078	19.4500	108.1648	97.4153
16.4458	101.7520	97.6486	17.9708	107.9777	97.5039	19.5042	108.1283	97.4135
16.4958	102.0053	97.6435	18.0208	108.0620	97.5001	19.5542	108.0986	97.4111
16.5458	102.2603	97.6377	18.0708	108.1393	97.4967	19.6042	108.0677	97.4097
16.5958	102.5243	97.6317	18.1250	108.2146	97.4928	19.6542	108.0374	97.4085
16.6458	102.7807	97.6264	18.1792	108.2813	97.4886	19.7042	108.0053	97.4066
16.6958	103.0393	97.6213	18.2292	108.3363	97.4851	19.7542	107.9730	97.4048
16.7458	103.2957	97.6163	18.2792	108.3840	97.4818	19.8042	107.9467	97.4028
16.8000	103.5766	97.6108	18.3292	108.4224	97.4779	19.8542	107.9200	97.4010
16.8542	103.8553	97.6052	18.3792	108.4580	97.4743	19.9083	107.8926	97.3991
16.9042	104.1137	97.6003	18.4292	108.4857	97.4710	19.9625	107.8633	97.3977
16.9542	104.3640	97.5953	18.4792	108.5040	97.4675	20.0125	107.8427	97.3959
17.0042	104.6087	97.5905	18.5292	108.5216	97.4645	20.0625	107.8234	97.3941
17.0542	104.8490	97.5853	18.5833	108.5320	97.4611	20.1125	107.8043	97.3920
17.1042	105.0887	97.5808	18.6375	108.5353	97.4577	20.1625	107.7867	97.3903
17.1542	105.3210	97.5762	18.6875	108.5320	97.4544	20.2125	107.7720	97.3886
17.2042	105.5460	97.5716	18.7375	108.5257	97.4518	20.2625	107.7577	97.3870
17.2583	105.7883	97.5664	18.7875	108.5177	97.4489	20.3167	107.7472	97.3857
17.3125	106.0150	97.5614	18.8375	108.5026	97.4460	20.3708	107.7380	97.3842
17.3625	106.2184	97.5565	18.8875	108.4887	97.4433	20.4208	107.7337	97.3827
17.4125	106.4150	97.5518	18.9375	108.4687	97.4409	20.4708	107.7307	97.3815
17.4625	106.6000	97.5475	18.9917	108.4480	97.4378	20.5208	107.7290	97.3801
17.5125	106.7773	97.5429	19.0458	108.4213	97.4346	20.5708	107.7283	97.3791
17.5625	106.9474	97.5384	19.0958	108.3953	97.4322	20.6208	107.7334	97.3778
17.6125	107.1037	97.5342	19.1458	108.3626	97.4297	20.6708	107.7400	97.3766
17.6667	107.2677	97.5294	19.1958	108.3357	97.4275	20.7208	107.7453	97.3750
17.7208	107.4187	97.5244	19.2458	108.3016	97.4252	20.7750	107.7571	97.3735

ตารางที่ ก.1 ข้อมูลการวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนของกะลามะพร้าว (ต่อ)

Time (min)	Temp. (°C)	Weight (%)	Time (min)	Temp. (°C)	Weight (%)	Time (min)	Temp. (°C)	Weight (%)
20.8292	107.7717	97.3726	22.3542	108.5416	97.3409	23.8833	109.0157	97.3165
20.8792	107.7847	97.3714	22.4042	108.5690	97.3395	23.9375	109.0210	97.3153
20.9292	107.7986	97.3697	22.4542	108.5960	97.3385	23.9875	109.0213	97.3146
20.9792	107.8137	97.3685	22.5042	108.6203	97.3380	24.0375	109.0216	97.3136
21.0292	107.8316	97.3676	22.5583	108.6452	97.3366	24.0875	109.0237	97.3131
21.0792	107.8457	97.3666	22.6125	108.6713	97.3355	24.1375	109.0230	97.3127
21.1292	107.8640	97.3654	22.6625	108.6943	97.3347	24.1875	109.0240	97.3118
21.1792	107.8847	97.3637	22.7125	108.7200	97.3341	24.2375	109.0274	97.3111
21.2333	107.9091	97.3630	22.7625	108.7434	97.3330	24.2917	109.0252	97.3105
21.2875	107.9363	97.3622	22.8125	108.7673	97.3317	24.3458	109.0250	97.3099
21.3375	107.9610	97.3611	22.8625	108.7837	97.3311	24.3958	109.0240	97.3094
21.3875	107.9840	97.3598	22.9125	108.8090	97.3303	24.4458	109.0223	97.3086
21.4375	108.0107	97.3581	22.9667	108.8263	97.3297	24.4958	109.0217	97.3069
21.4875	108.0370	97.3567	23.0208	108.8453	97.3287	24.5458	109.0217	97.3064
21.5375	108.0630	97.3559	23.0708	108.8597	97.3275	24.5958	109.0163	97.3062
21.5875	108.0907	97.3549	23.1208	108.8773	97.3268	24.6458	109.0166	97.3059
21.6417	108.1197	97.3538	23.1708	108.8914	97.3265	24.6958	109.0150	97.3054
21.6958	108.1527	97.3530	23.2208	108.9050	97.3255	24.7500	109.0134	97.3048
21.7458	108.1850	97.3516	23.2708	108.9164	97.3245	24.8042	109.0093	97.3045
21.7958	108.2140	97.3503	23.3208	108.9304	97.3234	24.8542	109.0066	97.3043
21.8458	108.2434	97.3500	23.3708	108.9430	97.3228	24.9042	109.0066	97.3041
21.8958	108.2747	97.3490	23.4250	108.9566	97.3222	24.9542	109.0027	97.3037
21.9458	108.3033	97.3478	23.4792	108.9650	97.3215	25.0042	109.0004	97.3025
21.9958	108.3350	97.3468	23.5292	108.9724	97.3210	25.0542	108.9987	97.3018
22.0458	108.3663	97.3463	23.5792	108.9833	97.3202	25.1042	108.9984	97.3018
22.1000	108.3991	97.3452	23.6292	108.9873	97.3198	25.1542	108.9967	97.3015
22.1542	108.4283	97.3442	23.6792	108.9950	97.3191	25.2083	108.9932	97.3007
22.2042	108.4597	97.3430	23.7292	109.0010	97.3188	25.2625	108.9910	97.3004
22.2542	108.4850	97.3425	23.7792	109.0040	97.3186	25.3125	108.9867	97.2997
22.3042	108.5143	97.3419	23.8292	109.0107	97.3177	25.3625	108.9817	97.2988

ตารางที่ ก.1 ข้อมูลการวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนของกะลามะพร้าว (ต่อ)

Time (min)	Temp. (°C)	Weight (%)	Time (min)	Temp. (°C)	Weight (%)	Time (min)	Temp. (°C)	Weight (%)
25.4125	108.9776	97.2986	26.9417	109.0026	97.2868	27.8042	109.0570	97.2812
25.4625	108.9770	97.2982	26.9958	109.0066	97.2866	27.8583	109.0623	97.2804
25.5125	108.9757	97.2979	27.0458	109.0050	97.2863	27.9125	109.0690	97.2800
25.5625	108.9720	97.2980	27.0958	109.0117	97.2861	27.9625	109.0687	97.2794
25.6167	108.9706	97.2969	27.1458	109.0130	97.2853	28.0125	109.0703	97.2790
25.6708	108.9666	97.2966	27.1958	109.0146	97.2846	28.0625	109.0726	97.2790
25.7208	108.9686	97.2964	27.2458	109.0183	97.2841	28.1125	109.0753	97.2788
25.7708	108.9680	97.2959	27.2958	109.0203	97.2841	28.1625	109.0787	97.2785
25.8208	108.9663	97.2954	27.3458	109.0240	97.2838	28.2125	109.0820	97.2776
25.8708	108.9653	97.2944	27.4000	109.0286	97.2834	28.2667	109.0837	97.2773
25.9208	108.9653	97.2939	27.4542	109.0340	97.2832	28.3208	109.0843	97.2768
25.9708	108.9627	97.2939	27.5042	109.0360	97.2825	28.3708	109.0837	97.2766
26.0208	108.9590	97.2938	27.5542	109.0356	97.2824	28.4208	109.0820	97.2762
26.0750	108.9617	97.2930	26.9417	109.0026	97.2868	28.4708	109.0850	97.2757
26.1292	108.9670	97.2925	26.9958	109.0066	97.2866	28.5208	109.0813	97.2761
26.1792	108.9673	97.2926	27.0458	109.0050	97.2863	28.5708	109.0837	97.2759
26.2292	108.9677	97.2919	27.0958	109.0117	97.2861	28.6208	109.0854	97.2747
26.2792	108.9667	97.2910	27.1458	109.0130	97.2853	28.6708	109.0873	97.2740
26.3292	108.9693	97.2907	27.1958	109.0146	97.2846	28.7250	109.0908	97.2744
26.3792	108.9720	97.2910	27.2458	109.0183	97.2841	28.7792	109.0920	97.2744
26.4292	108.9737	97.2904	27.2958	109.0203	97.2841	28.8292	109.0947	97.2737
26.4792	108.9794	97.2903	27.3458	109.0240	97.2838	28.8792	109.0984	97.2736
26.5333	108.9831	97.2902	27.4000	109.0286	97.2834	28.9292	109.1000	97.2734
26.5875	108.9817	97.2892	27.4542	109.0340	97.2832	28.9792	109.1033	97.2728
26.6375	108.9830	97.2886	27.5042	109.0360	97.2825	29.0292	109.1026	97.2723
26.6875	108.9860	97.2883	27.5542	109.0356	97.2824	29.0792	109.1040	97.2728
26.7375	108.9893	97.2881	27.6042	109.0413	97.2823	29.1292	109.1070	97.2729
26.7875	108.9910	97.2880	27.6542	109.0447	97.2822	29.1833	109.1083	97.2717
26.8375	108.9977	97.2877	27.7042	109.0480	97.2818	29.2375	109.1126	97.2713
26.8875	108.9990	97.2868	27.7542	109.0503	97.2814	29.2875	109.1173	97.2713

ตารางที่ ก.1 ข้อมูลการวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนของกะลามะพร้าว (ต่อ)

Time (min)	Temp. (°C)	Weight (%)	Time (min)	Temp. (°C)	Weight (%)	Time (min)	Temp. (°C)	Weight (%)
29.3375	109.1150	97.2707	30.8625	109.0820	97.2662	32.3958	109.0743	97.2594
29.3875	109.1196	97.2703	30.9167	109.0814	97.2657	32.4458	109.0734	97.2591
29.4375	109.1207	97.2707	30.9708	109.0816	97.2653	32.4958	109.0730	97.2590
29.4875	109.1234	97.2707	31.0208	109.0787	97.2654	32.5458	109.0734	97.2593
29.5375	109.1240	97.2706	31.0708	109.0794	97.2653	32.5958	109.0720	97.2592
29.5917	109.1248	97.2700	31.1208	109.0780	97.2650	32.6458	109.0753	97.2588
29.6458	109.1257	97.2696	31.1708	109.0784	97.2653	32.7000	109.0714	97.2586
29.6958	109.1263	97.2696	31.2208	109.0763	97.2648	32.7542	109.0720	97.2583
29.7458	109.1266	97.2699	31.2708	109.0773	97.2645	32.8042	109.0730	97.2579
29.7958	109.1237	97.2704	31.3208	109.0784	97.2642	32.8542	109.0750	97.2574
29.8458	109.1237	97.2700	31.3750	109.0740	97.2635	32.9042	109.0763	97.2571
29.8958	109.1260	97.2696	31.4292	109.0760	97.2636	32.9542	109.0776	97.2572
29.9458	109.1230	97.2696	31.4792	109.0743	97.2641	33.0042	109.0790	97.2575
29.9958	109.1224	97.2694	31.5292	109.0746	97.2638	33.0542	109.0794	97.2575
30.0500	109.1240	97.2692	31.5792	109.0734	97.2630	33.1042	109.0850	97.2574
30.1042	109.1220	97.2686	31.6292	109.0720	97.2628	33.1583	109.0837	97.2568
30.1542	109.1210	97.2678	31.6792	109.0747	97.2626	33.2125	109.0847	97.2570
30.2042	109.1180	97.2681	31.7292	109.0727	97.2622	33.2625	109.0867	97.2577
30.2542	109.1157	97.2682	31.7792	109.0763	97.2617	33.3125	109.0887	97.2569
30.3042	109.1130	97.2676	31.8333	109.0766	97.2617	33.3625	109.0916	97.2554
30.3542	109.1127	97.2675	31.8875	109.0776	97.2615	33.4125	109.0916	97.2549
30.4042	109.1087	97.2678	31.9375	109.0773	97.2609	33.4625	109.0963	97.2552
30.4542	109.1073	97.2674	31.9875	109.0793	97.2606	33.5125	109.0967	97.2552
30.5083	109.1034	97.2663	32.0375	109.0823	97.2604	33.5667	109.1012	97.2549
30.5625	109.0990	97.2659	32.0875	109.0813	97.2601	33.6208	109.1037	97.2549
30.6125	109.0963	97.2665	32.1375	109.0794	97.2603	33.6708	109.1030	97.2547
30.6625	109.0934	97.2669	32.1875	109.0807	97.2601	33.7208	109.1040	97.2540
30.7125	109.0923	97.2669	32.2417	109.0803	97.2601	33.7708	109.1050	97.2533
30.7625	109.0900	97.2661	32.2958	109.0743	97.2599	33.8208	109.1037	97.2533
30.8125	109.0857	97.2661	32.3458	109.0747	97.2596	33.8708	109.1060	97.2534

ตารางที่ ก.1 ข้อมูลการวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนของกะลามะพร้าว (ต่อ)

Time (min)	Temp. (°C)	Weight (%)	Time (min)	Temp. (°C)	Weight (%)	Time (min)	Temp. (°C)	Weight (%)
33.9208	109.1087	97.2533	35.4542	109.0996	97.2486	36.9792	109.0870	97.2435
33.9708	109.1080	97.2530	35.5042	109.1003	97.2486	37.0292	109.0850	97.2433
34.0250	109.1057	97.2532	35.5542	109.0974	97.2487	37.0792	109.0837	97.2430
34.0792	109.1066	97.2530	35.6042	109.0970	97.2487	37.1333	109.0831	97.2424
34.1292	109.1063	97.2519	35.6542	109.0950	97.2481	37.1875	109.0803	97.2424
34.1792	109.1087	97.2521	35.7042	109.0977	97.2484	37.2375	109.0787	97.2424
34.2292	109.1050	97.2523	35.7542	109.0943	97.2486	37.2875	109.0784	97.2423
34.2792	109.1040	97.2521	35.8083	109.0960	97.2479	37.3375	109.0794	97.2421
34.3292	109.1033	97.2519	35.8625	109.0940	97.2472	37.3875	109.0800	97.2420
34.3792	109.1037	97.2521	35.9125	109.0953	97.2472	37.4375	109.0807	97.2419
34.4292	109.1037	97.2521	35.9625	109.0930	97.2468	37.4875	109.0813	97.2422
34.4833	109.1069	97.2523	36.0125	109.0937	97.2461	37.5417	109.0797	97.2427
34.5375	109.1060	97.2516	36.0625	109.0916	97.2459	37.5958	109.0800	97.2425
34.5875	109.1033	97.2511	36.1125	109.0890	97.2459	37.6458	109.0816	97.2419
34.6375	109.1026	97.2510	36.1625	109.0876	97.2450	37.6958	109.0830	97.2417
34.6875	109.1017	97.2515	36.2167	109.0909	97.2452	37.7458	109.0830	97.2417
34.7375	109.1034	97.2517	36.2708	109.0934	97.2457	37.7958	109.0837	97.2412
34.7875	109.1040	97.2512	36.3208	109.0913	97.2448	37.8458	109.0837	97.2410
34.8375	109.1033	97.2509	36.3708	109.0897	97.2447	37.8958	109.0820	97.2411
34.8917	109.1026	97.2509	36.4208	109.0873	97.2450	37.9458	109.0854	97.2412
34.9458	109.1026	97.2509	36.4708	109.0860	97.2449	38.0000	109.0843	97.2405
34.9958	109.1013	97.2505	36.5208	109.0870	97.2442	38.0542	109.0857	97.2404
35.0458	109.1017	97.2500	36.5708	109.0870	97.2442	38.1042	109.0863	97.2407
35.0958	109.1000	97.2499	36.6208	109.0887	97.2442	38.1542	109.0883	97.2400
35.1458	109.0973	97.2500	36.6750	109.0872	97.2439	38.2042	109.0897	97.2397
35.1958	109.0973	97.2498	36.7292	109.0870	97.2438	38.2542	109.0910	97.2394
35.2458	109.0953	97.2497	36.7792	109.0863	97.2440	38.3042	109.0907	97.2395
35.2958	109.0970	97.2490	36.8292	109.0860	97.2436	38.3542	109.0927	97.2397
35.3500	109.0988	97.2486	36.8792	109.0833	97.2434	38.4042	109.0920	97.2397
35.4042	109.1004	97.2486	36.9292	109.0830	97.2437	38.4583	109.0957	97.2393

ตารางที่ ก.1 ข้อมูลการวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนของกะลามะพร้าว (ต่อ)

Time (min)	Temp. (°C)	Weight (%)	Time (min)	Temp. (°C)	Weight (%)	Time (min)	Temp. (°C)	Weight (%)
38.5125	109.0947	97.2392	40.0375	109.1157	97.2343	41.5708	109.0937	97.2308
38.5625	109.0934	97.2387	40.0875	109.1150	97.2344	41.6208	109.0927	97.2308
38.6125	109.0936	97.2380	40.1375	109.1150	97.2337	41.6708	109.0920	97.2303
38.6625	109.0930	97.2380	40.1917	109.1137	97.2335	41.7208	109.0903	97.2308
38.7125	109.0957	97.2385	40.2458	109.1150	97.2342	41.7708	109.0903	97.2313
38.7625	109.0940	97.2386	40.2958	109.1093	97.2343	41.8208	109.0907	97.2309
38.8125	109.0953	97.2382	40.3458	109.1113	97.2334	41.8708	109.0893	97.2301
38.8667	109.0972	97.2377	40.3958	109.1097	97.2334	41.9208	109.0896	97.2299
38.9208	109.0993	97.2376	40.4458	109.1093	97.2338	41.9750	109.0871	97.2301
38.9708	109.1023	97.2375	40.4958	109.1127	97.2336	42.0292	109.0810	97.2303
39.0208	109.0993	97.2376	40.5458	109.1090	97.2331	42.0792	109.0830	97.2301
39.0708	109.1013	97.2374	40.5958	109.1130	97.2326	42.1292	109.0817	97.2300
39.1208	109.1023	97.2370	40.6500	109.1100	97.2324	42.1792	109.0793	97.2297
39.1708	109.1010	97.2369	40.7042	109.1053	97.2324	42.2292	109.0770	97.2293
39.2208	109.1053	97.2374	40.7542	109.1053	97.2326	42.2792	109.0800	97.2292
39.2708	109.1050	97.2374	40.8042	109.1057	97.2324	42.3292	109.0816	97.2293
39.3250	109.1072	97.2372	40.8542	109.1037	97.2320	42.3792	109.0843	97.2290
39.3792	109.1117	97.2370	40.9042	109.1053	97.2320	42.4333	109.0848	97.2287
39.4292	109.1144	97.2363	40.9542	109.1043	97.2322	42.4875	109.0834	97.2283
39.4792	109.1107	97.2363	41.0042	109.1030	97.2320	42.5375	109.0847	97.2285
39.5292	109.1117	97.2364	41.0542	109.1020	97.2315	42.5875	109.0837	97.2285
39.5792	109.1150	97.2363	41.1083	109.0994	97.2311	42.6375	109.0854	97.2280
39.6292	109.1150	97.2358	41.1625	109.0997	97.2309	42.6875	109.0863	97.2281
39.6792	109.1153	97.2355	41.2125	109.0986	97.2303	42.7375	109.0883	97.2282
39.7292	109.1157	97.2355	41.2625	109.0977	97.2303	42.7875	109.0890	97.2284
39.7833	109.1148	97.2351	41.3125	109.0963	97.2307	42.8417	109.0906	97.2279
39.8375	109.1160	97.2346	41.3625	109.0973	97.2312	42.8958	109.0900	97.2279
39.8875	109.1160	97.2346	41.4125	109.0953	97.2312	42.9458	109.0937	97.2279
39.9375	109.1190	97.2344	41.4625	109.0943	97.2302	42.9958	109.0937	97.2272
39.9875	109.1177	97.2344	41.5167	109.0969	97.2301	43.0458	109.0943	97.2276



ตารางที่ ก.1 ข้อมูลการวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนของกะลามะพร้าว (ต่อ)

Time (min)	Temp. (°C)	Weight (%)	Time (min)	Temp. (°C)	Weight (%)	Time (min)	Temp. (°C)	Weight (%)
43.0958	109.0957	97.2275	44.6250	109.1126	97.2238	46.1542	109.1023	97.2212
43.1458	109.0967	97.2271	44.6792	109.1104	97.2238	46.2042	109.1013	97.2209
43.1958	109.0993	97.2273	44.7292	109.1090	97.2234	46.2542	109.1000	97.2211
43.2458	109.1013	97.2275	44.7792	109.1093	97.2225	46.3042	109.0996	97.2210
43.3000	109.1023	97.2266	44.8292	109.1133	97.2225	46.3542	109.0957	97.2207
43.3542	109.1020	97.2263	44.8792	109.1154	97.2231	46.4083	109.0920	97.2201
43.4042	109.1013	97.2268	44.9292	109.1146	97.2234	46.4625	109.0920	97.2200
43.4542	109.1037	97.2269	44.9792	109.1173	97.2234	46.5125	109.0916	97.2207
43.5042	109.1037	97.2267	45.0292	109.1157	97.2232	46.5625	109.0943	97.2207
43.5542	109.1073	97.2260	45.0833	109.1174	97.2232	46.6125	109.0913	97.2204
43.6042	109.1070	97.2263	45.1375	109.1163	97.2231	46.6625	109.0927	97.2201
43.6542	109.1080	97.2265	45.1875	109.1133	97.2233	46.7125	109.0907	97.2202
43.7042	109.1057	97.2258	45.2375	109.1123	97.2234	46.7625	109.0897	97.2203
43.7583	109.1049	97.2257	45.2875	109.1123	97.2231	46.8167	109.0866	97.2200
43.8125	109.1053	97.2257	45.3375	109.1130	97.2225	46.8708	109.0880	97.2199
43.8625	109.1007	97.2257	45.3875	109.1106	97.2223	46.9208	109.0897	97.2200
43.9125	109.0974	97.2257	45.4375	109.1097	97.2225	46.9708	109.0967	97.2196
43.9625	109.1030	97.2257	45.4917	109.1094	97.2225	47.0208	109.1070	97.2190
44.0125	109.1037	97.2256	45.5458	109.1093	97.2223	47.0708	109.1307	97.2192
44.0625	109.1053	97.2256	45.5958	109.1117	97.2224	47.1208	109.1566	97.2194
44.1125	109.1053	97.2254	45.6458	109.1113	97.2222	47.1708	109.1943	97.2193
44.1667	109.1043	97.2252	45.6958	109.1110	97.2214	47.2208	109.2477	97.2188
44.2208	109.1060	97.2253	45.7458	109.1077	97.2212	47.2750	109.3203	97.2188
44.2708	109.1090	97.2249	45.7958	109.1057	97.2218	47.3292	109.4100	97.2192
44.3208	109.1097	97.2243	45.8458	109.1057	97.2219	47.3792	109.5093	97.2190
44.3708	109.1084	97.2237	45.8958	109.1084	97.2211	47.4292	109.6240	97.2189
44.4208	109.1073	97.2232	45.9500	109.1080	97.2211	47.4792	109.7577	97.2186
44.4708	109.1104	97.2237	46.0042	109.1060	97.2211	47.5292	109.9097	97.2184
44.5208	109.1093	97.2236	46.0542	109.1063	97.2208	47.5792	110.0790	97.2183
44.5708	109.1097	97.2236	46.1042	109.1030	97.2208	47.6292	110.2710	97.2185

ตารางที่ ก.1 ข้อมูลการวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนของกะลามะพร้าว (ต่อ)

Time (min)	Temp. (°C)	Weight (%)	Time (min)	Temp. (°C)	Weight (%)	Time (min)	Temp. (°C)	Weight (%)
47.6792	110.4860	97.2177	49.2125	124.2896	97.1964	50.7375	140.7803	97.1499
47.7333	110.7363	97.2170	49.2625	124.8710	97.1954	50.7917	141.2986	97.1482
47.7875	111.0097	97.2172	49.3125	125.4500	97.1940	50.8458	141.8144	97.1464
47.8375	111.2823	97.2167	49.3625	126.0307	97.1924	50.8958	142.2870	97.1448
47.8875	111.5727	97.2162	49.4125	126.6107	97.1915	50.9458	142.7446	97.1432
47.9375	111.8860	97.2163	49.4667	127.2477	97.1903	50.9958	143.2023	97.1417
47.9875	112.2143	97.2161	49.5208	127.8757	97.1882	51.0458	143.6584	97.1401
48.0375	112.5630	97.2157	49.5708	128.4567	97.1866	51.0958	144.1117	97.1387
48.0875	112.9257	97.2151	49.6208	129.0316	97.1854	51.1458	144.5603	97.1375
48.1417	113.3391	97.2145	49.6708	129.6043	97.1841	51.1958	145.0087	97.1358
48.1958	113.7753	97.2138	49.7208	130.1704	97.1824	51.2500	145.4951	97.1336
48.2458	114.1957	97.2126	49.7708	130.7307	97.1804	51.3042	145.9767	97.1311
48.2958	114.6310	97.2120	49.8208	131.2837	97.1788	51.3542	146.4203	97.1295
48.3458	115.0807	97.2119	49.8708	131.8363	97.1773	51.4042	146.8626	97.1284
48.3958	115.5437	97.2113	49.9250	132.4294	97.1761	51.4542	147.3040	97.1265
48.4458	116.0203	97.2109	49.9792	133.0190	97.1743	51.5042	147.7443	97.1249
48.4958	116.5080	97.2102	50.0292	133.5587	97.1721	51.5542	148.1837	97.1231
48.5458	117.0070	97.2094	50.0792	134.0980	97.1709	51.6042	148.6257	97.1210
48.6000	117.5531	97.2090	50.1292	134.6333	97.1696	51.6542	149.0710	97.1198
48.6542	118.1073	97.2085	50.1792	135.1624	97.1681	51.7083	149.5472	97.1185
48.7042	118.6290	97.2068	50.2292	135.6876	97.1666	51.7625	150.0267	97.1170
48.7542	119.1584	97.2061	50.2792	136.2060	97.1646	51.8125	150.4703	97.1154
48.8042	119.6934	97.2055	50.3292	136.7244	97.1627	51.8625	150.9157	97.1135
48.8542	120.2357	97.2040	50.3833	137.2783	97.1610	51.9125	151.3573	97.1114
48.9042	120.7887	97.2029	50.4375	137.8300	97.1592	51.9625	151.8024	97.1102
48.9542	121.3477	97.2021	50.4875	138.3306	97.1577	52.0125	152.2504	97.1090
49.0042	121.9097	97.2011	50.5375	138.8286	97.1568	52.0625	152.7003	97.1076
49.0583	122.5211	97.2003	50.5875	139.3207	97.1555	52.1167	153.1849	97.1063
49.1125	123.1380	97.1992	50.6375	139.8120	97.1534	52.1708	153.6710	97.1047
49.1625	123.7110	97.1978	50.6875	140.2966	97.1518	52.2208	154.1224	97.1031

ตารางที่ ก.1 ข้อมูลการวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนของกะลามะพร้าว (ต่อ)

Time (min)	Temp. (°C)	Weight (%)	Time (min)	Temp. (°C)	Weight (%)	Time (min)	Temp. (°C)	Weight (%)
52.2708	154.5686	97.1015	53.7958	169.2600	97.0535	55.3292	184.9310	96.9911
52.3208	155.0206	97.1000	53.8458	169.7690	97.0519	55.3792	185.4400	96.9883
52.3708	155.4703	97.0984	53.9000	170.3180	97.0499	55.4292	185.9470	96.9855
52.4208	155.9266	97.0970	53.9542	170.8673	97.0484	55.4792	186.4556	96.9828
52.4708	156.3820	97.0947	54.0042	171.3790	97.0464	55.5292	186.9583	96.9802
52.5208	156.8353	97.0939	54.0542	171.8866	97.0443	55.5792	187.4666	96.9778
52.5750	157.3354	97.0927	54.1042	172.3987	97.0427	55.6292	187.9720	96.9748
52.6292	157.8380	97.0906	54.1542	172.9090	97.0412	55.6833	188.5209	96.9713
52.6792	158.3020	97.0894	54.2042	173.4220	97.0393	55.7375	189.0700	96.9683
52.7292	158.7706	97.0882	54.2542	173.9366	97.0379	55.7875	189.5737	96.9654
52.7792	159.2423	97.0867	54.3042	174.4523	97.0362	55.8375	190.0710	96.9623
52.8292	159.7134	97.0851	54.3583	175.0088	97.0343	55.8875	190.5684	96.9590
52.8792	160.1883	97.0833	54.4125	175.5700	97.0319	55.9375	191.0636	96.9559
52.9292	160.6690	97.0814	54.4625	176.0840	97.0295	55.9875	191.5640	96.9523
52.9792	161.1514	97.0799	54.5125	176.5986	97.0275	56.0375	192.0627	96.9489
53.0333	161.6726	97.0790	54.5625	177.1167	97.0261	56.0917	192.6003	96.9457
53.0875	162.1987	97.0771	54.6125	177.6340	97.0240	56.1458	193.1383	96.9425
53.1375	162.6877	97.0752	54.6625	178.1453	97.0218	56.1958	193.6377	96.9391
53.1875	163.1804	97.0736	54.7125	178.6543	97.0194	56.2458	194.1373	96.9354
53.2375	163.6743	97.0722	54.7667	179.2049	97.0171	56.2958	194.6337	96.9318
53.2875	164.1707	97.0712	54.8208	179.7570	97.0147	56.3458	195.1330	96.9281
53.3375	164.6647	97.0693	54.8708	180.2650	97.0121	56.3958	195.6313	96.9243
53.3875	165.1640	97.0666	54.9208	180.7774	97.0100	56.4458	196.1287	96.9200
53.4417	165.7091	97.0651	54.9708	181.2853	97.0078	56.4958	196.6260	96.9158
53.4958	166.2550	97.0641	55.0208	181.7950	97.0059	56.5500	197.1660	96.9114
53.5458	166.7494	97.0627	55.0708	182.3024	97.0038	56.6042	197.7050	96.9072
53.5958	167.2490	97.0605	55.1208	182.8120	97.0011	56.6542	198.2040	96.9033
53.6458	167.7500	97.0589	55.1708	183.3213	96.9984	56.7042	198.7017	96.8984
53.6958	168.2510	97.0569	55.2250	183.8720	96.9955	56.7542	199.2014	96.8938
53.7458	168.7540	97.0550	55.2792	184.4220	96.9934	56.8042	199.7016	96.8896

ตารางที่ ก.1 ข้อมูลการวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนของกะลามะพร้าว (ต่อ)

Time (min)	Temp. (°C)	Weight (%)	Time (min)	Temp. (°C)	Weight (%)	Time (min)	Temp. (°C)	Weight (%)
56.8542	200.2044	96.8849	58.3875	215.5320	96.6647	59.9125	230.9677	96.1553
56.9042	200.7023	96.8800	58.4375	216.0380	96.6544	59.9625	231.4740	96.1307
56.9542	201.2003	96.8758	58.4875	216.5413	96.6437	60.0125	231.9837	96.1060
57.0083	201.7377	96.8702	58.5375	217.0504	96.6321	60.0667	232.5340	96.0784
57.0625	202.2740	96.8646	58.5875	217.5534	96.6203	60.1208	233.0844	96.0501
57.1125	202.7683	96.8596	58.6375	218.0590	96.6080	60.1708	233.5913	96.0231
57.1625	203.2637	96.8540	58.6875	218.5674	96.5959	60.2208	234.0930	95.9954
57.2125	203.7603	96.8483	58.7417	219.1137	96.5820	60.2708	234.5960	95.9673
57.2625	204.2590	96.8426	58.7958	219.6594	96.5675	60.3208	235.1007	95.9387
57.3125	204.7574	96.8367	58.8458	220.1660	96.5534	60.3708	235.6040	95.9093
57.3625	205.2520	96.8307	58.8958	220.6716	96.5393	60.4208	236.1066	95.8791
57.4167	205.7894	96.8237	58.9458	221.1823	96.5249	60.4708	236.6090	95.8483
57.4708	206.3313	96.8166	58.9958	221.6913	96.5096	60.5250	237.1537	95.8139
57.5208	206.8306	96.8104	59.0458	222.2004	96.4940	60.5792	237.6967	95.7776
57.5708	207.3306	96.8043	59.0958	222.7084	96.4786	60.6292	238.2030	95.7435
57.6208	207.8313	96.7978	59.1458	223.2150	96.4627	60.6792	238.7100	95.7091
57.6708	208.3316	96.7908	59.2000	223.7634	96.4448	60.7292	239.2144	95.6730
57.7208	208.8344	96.7830	59.2542	224.3053	96.4267	60.7792	239.7180	95.6362
57.7708	209.3380	96.7758	59.3042	224.8140	96.4098	60.8292	240.2254	95.5979
57.8208	209.8400	96.7683	59.3542	225.3186	96.3905	60.8792	240.7294	95.5589
57.8750	210.3840	96.7597	59.4042	225.8223	96.3709	60.9292	241.2363	95.5183
57.9292	210.9287	96.7509	59.4542	226.3250	96.3524	60.9833	241.7848	95.4727
57.9792	211.4333	96.7425	59.5042	226.8296	96.3330	61.0375	242.3340	95.4254
58.0292	211.9387	96.7339	59.5542	227.3340	96.3129	61.0875	242.8406	95.3799
58.0792	212.4414	96.7256	59.6042	227.8410	96.2930	61.1375	243.3467	95.3334
58.1292	212.9424	96.7167	59.6583	228.3897	96.2702	61.1875	243.8516	95.2856
58.1792	213.4444	96.7067	59.7125	228.9390	96.2468	61.2375	244.3627	95.2362
58.2292	213.9447	96.6969	59.7625	229.4453	96.2250	61.2875	244.8674	95.1843
58.2792	214.4444	96.6868	59.8125	229.9530	96.2023	61.3375	245.3713	95.1304
58.3333	214.9889	96.6761	59.8625	230.4600	96.1793	61.3917	245.9200	95.0694

ตารางที่ ก.1 ข้อมูลการวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนของกะลามะพร้าว (ต่อ)

Time (min)	Temp. (°C)	Weight (%)	Time (min)	Temp. (°C)	Weight (%)	Time (min)	Temp. (°C)	Weight (%)
61.4458	246.4680	95.0066	62.9708	262.0437	91.6013	64.5000	277.8097	83.5760
61.4958	246.9734	94.9463	63.0208	262.5586	91.4121	64.5542	278.3627	83.2546
61.5458	247.4814	94.8837	63.0708	263.0753	91.2165	64.6042	278.8706	82.9598
61.5958	247.9897	94.8188	63.1208	263.5870	91.0156	64.6542	279.3814	82.6645
61.6458	248.4990	94.7516	63.1750	264.1455	90.7916	64.7042	279.8910	82.3703
61.6958	249.0056	94.6821	63.2292	264.7076	90.5601	64.7542	280.3984	82.0794
61.7458	249.5133	94.6097	63.2792	265.2263	90.3410	64.8042	280.9050	81.7913
61.7958	250.0250	94.5338	63.3292	265.7433	90.1157	64.8542	281.4126	81.5040
61.8500	250.5763	94.4486	63.3792	266.2596	89.8835	64.9042	281.9177	81.2153
61.9042	251.1283	94.3599	63.4292	266.7764	89.6455	64.9583	282.4643	80.9099
61.9542	251.6390	94.2745	63.4792	267.2906	89.4032	65.0125	283.0110	80.6102
62.0042	252.1514	94.1867	63.5292	267.8070	89.1547	65.0625	283.5143	80.3322
62.0542	252.6626	94.0943	63.5792	268.3200	88.8999	65.1125	284.0166	80.0516
62.1042	253.1737	93.9974	63.6333	268.8772	88.6182	65.1625	284.5200	79.7677
62.1542	253.6870	93.8979	63.6875	269.4350	88.3306	65.2125	285.0220	79.4946
62.2042	254.2006	93.7948	63.7375	269.9510	88.0591	65.2625	285.5250	79.2326
62.2542	254.7153	93.6878	63.7875	270.4713	87.7822	65.3125	286.0264	78.9768
62.3083	255.2717	93.5664	63.8375	270.9877	87.5018	65.3667	286.5654	78.6999
62.3625	255.8240	93.4394	63.8875	271.5060	87.2176	65.4208	287.1050	78.4291
62.4125	256.3320	93.3186	63.9375	272.0237	86.9299	65.4708	287.6024	78.1831
62.4625	256.8380	93.1924	63.9875	272.5396	86.6400	65.5208	288.0973	77.9384
62.5125	257.3463	93.0604	64.0417	273.0986	86.3230	65.5708	288.5940	77.6989
62.5625	257.8580	92.9231	64.0958	273.6570	86.0044	65.6208	289.0863	77.4625
62.6125	258.3676	92.7807	64.1458	274.1730	85.7080	65.6708	289.5803	77.2310
62.6625	258.8777	92.6340	64.1958	274.6927	85.4093	65.7208	290.0750	77.0004
62.7167	259.4337	92.4681	64.2458	275.2060	85.1095	65.7708	290.5710	76.7731
62.7708	259.9890	92.2951	64.2958	275.7236	84.8054	65.8250	291.1034	76.5416
62.8208	260.5023	92.1300	64.3458	276.2393	84.5016	65.8792	291.6406	76.3111
62.8708	261.0156	91.9602	64.3958	276.7537	84.2009	65.9292	292.1344	76.0975
62.9208	261.5287	91.7839	64.4458	277.2600	83.9001	65.9792	292.6270	75.8897

ตารางที่ ก.1 ข้อมูลการวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนของกะลามะพร้าว (ต่อ)

Time (min)	Temp. (°C)	Weight (%)	Time (min)	Temp. (°C)	Weight (%)	Time (min)	Temp. (°C)	Weight (%)
66.0292	293.1206	75.6850	67.5542	308.2360	70.5619	69.0875	323.5066	66.2251
66.0792	293.6146	75.4807	67.6083	308.7740	70.4061	69.1375	324.0094	66.0735
66.1292	294.1090	75.2841	67.6625	309.3120	70.2512	69.1875	324.5117	65.9211
66.1792	294.6006	75.0907	67.7125	309.8080	70.1094	69.2375	325.0110	65.7669
66.2292	295.0954	74.9014	67.7625	310.3073	69.9678	69.2875	325.5117	65.6109
66.2833	295.6291	74.6944	67.8125	310.8037	69.8266	69.3417	326.0525	65.4407
66.3375	296.1670	74.4882	67.8625	311.2990	69.6869	69.3958	326.5960	65.2669
66.3875	296.6646	74.3023	67.9125	311.7970	69.5479	69.4458	327.0974	65.1044
66.4375	297.1587	74.1209	67.9625	312.2930	69.4083	69.4958	327.5970	64.9398
66.4875	297.6490	73.9416	68.0167	312.8328	69.2570	69.5458	328.0953	64.7723
66.5375	298.1400	73.7639	68.0708	313.3724	69.1061	69.5958	328.5956	64.6027
66.5875	298.6350	73.5908	68.1208	313.8717	68.9665	69.6458	329.0937	64.4303
66.6375	299.1296	73.4202	68.1708	314.3680	68.8272	69.6958	329.5953	64.2555
66.6917	299.6620	73.2362	68.2208	314.8667	68.6897	69.7458	330.0950	64.0771
66.7458	300.2000	73.0539	68.2708	315.3663	68.5520	69.8000	330.6391	63.8797
66.7958	300.6940	72.8868	68.3208	315.8663	68.4136	69.8542	331.1847	63.6794
66.8458	301.1896	72.7234	68.3708	316.3676	68.2748	69.9042	331.6850	63.4910
66.8958	301.6876	72.5619	68.4208	316.8673	68.1358	69.9542	332.1873	63.2982
66.9458	302.1847	72.4003	68.4750	317.4082	67.9849	70.0042	332.6930	63.1013
66.9958	302.6830	72.2407	68.5292	317.9450	67.8337	70.0542	333.1970	62.9000
67.0458	303.1793	72.0840	68.5792	318.4424	67.6931	70.1042	333.7016	62.6950
67.0958	303.6760	71.9290	68.6292	318.9367	67.5528	70.1542	334.2060	62.4862
67.1500	304.2163	71.7624	68.6792	319.4363	67.4122	70.2042	334.7100	62.2714
67.2042	304.7570	71.5972	68.7292	319.9320	67.2700	70.2583	335.2588	62.0331
67.2542	305.2540	71.4462	68.7792	320.4300	67.1270	70.3125	335.8080	61.7890
67.3042	305.7520	71.2961	68.8292	320.9300	66.9830	70.3625	336.3137	61.5568
67.3542	306.2493	71.1471	68.8792	321.4287	66.8393	70.4125	336.8220	61.3186
67.4042	306.7480	70.9998	68.9333	321.9697	66.6812	70.4625	337.3303	61.0750
67.4542	307.2460	70.8532	68.9875	322.5077	66.5222	70.5125	337.8380	60.8245
67.5042	307.7404	70.7066	69.0375	323.0056	66.3744	70.5625	338.3454	60.5675

ตารางที่ ก.1 ข้อมูลการวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนของกะลามะพร้าว (ต่อ)

Time (min)	Temp. (°C)	Weight (%)	Time (min)	Temp. (°C)	Weight (%)	Time (min)	Temp. (°C)	Weight (%)
70.6125	338.8544	60.3026	72.1458	354.5974	48.7883	73.6708	369.5820	43.8102
70.6667	339.4057	60.0072	72.1958	355.1020	48.4478	73.7208	370.0820	43.7418
70.7208	339.9560	59.7031	72.2458	355.6044	48.1231	73.7750	370.6206	43.6702
70.7708	340.4646	59.4133	72.2958	356.1060	47.8143	73.8292	371.1567	43.6007
70.8208	340.9740	59.1148	72.3458	356.6044	47.5220	73.8792	371.6570	43.5384
70.8708	341.4853	58.8073	72.3958	357.0993	47.2461	73.9292	372.1570	43.4769
70.9208	341.9954	58.4906	72.4500	357.6294	46.9664	73.9792	372.6597	43.4162
70.9708	342.5080	58.1642	72.5042	358.1630	46.7051	74.0292	373.1624	43.3563
71.0208	343.0237	57.8280	72.5542	358.6506	46.4792	74.0792	373.6663	43.2973
71.0708	343.5363	57.4823	72.6042	359.1397	46.2671	74.1292	374.1680	43.2387
71.1250	344.0922	57.0966	72.6542	359.6263	46.0684	74.1792	374.6747	43.1804
71.1792	344.6496	56.6999	72.7042	360.1123	45.8831	74.2333	375.2206	43.1188
71.2292	345.1647	56.3217	72.7542	360.5960	45.7096	74.2875	375.7680	43.0577
71.2792	345.6817	55.9337	72.8042	361.0790	45.5468	74.3375	376.2694	43.0026
71.3292	346.1990	55.5367	72.8542	361.5597	45.3953	74.3875	376.7720	42.9482
71.3792	346.7187	55.1306	72.9083	362.0840	45.2419	74.4375	377.2754	42.8943
71.4292	347.2363	54.7162	72.9625	362.6086	45.0986	74.4875	377.7790	42.8405
71.4792	347.7534	54.2943	73.0125	363.0947	44.9752	74.5375	378.2826	42.7868
71.5292	348.2704	53.8665	73.0625	363.5780	44.8582	74.5875	378.7856	42.7340
71.5833	348.8272	53.3981	73.1125	364.0597	44.7478	74.6417	379.3340	42.6769
71.6375	349.3864	52.9265	73.1625	364.5447	44.6440	74.6958	379.8820	42.6199
71.6875	349.9030	52.4903	73.2125	365.0327	44.5450	74.7458	380.3876	42.5682
71.7375	350.4164	52.0552	73.2625	365.5296	44.4515	74.7958	380.8920	42.5167
71.7875	350.9330	51.6240	73.3167	366.0654	44.3547	74.8458	381.3963	42.4652
71.8375	351.4484	51.1988	73.3708	366.5933	44.2617	74.8958	381.9053	42.4146
71.8875	351.9617	50.7789	73.4208	367.0874	44.1797	74.9458	382.4113	42.3640
71.9375	352.4723	50.3679	73.4708	367.5746	44.1010	74.9958	382.9196	42.3138
71.9917	353.0286	49.9353	73.5208	368.0787	44.0254	75.0458	383.4276	42.2639
72.0458	353.5817	49.5166	73.5708	368.5820	43.9516	75.1000	383.9760	42.2098
72.0958	354.0900	49.1446	73.6208	369.0804	43.8801	75.1542	384.5244	42.1559

ตารางที่ ก.1 ข้อมูลการวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนของกะลามะพร้าว (ต่อ)

Time (min)	Temp. (°C)	Weight (%)	Time (min)	Temp. (°C)	Weight (%)	Time (min)	Temp. (°C)	Weight (%)
75.2042	385.0326	42.1061	76.7292	400.3437	40.6460	78.2625	415.6103	39.2605
75.2542	385.5406	42.0564	76.7792	400.8410	40.5998	78.3125	416.1070	39.2173
75.3042	386.0447	42.0077	76.8292	401.3420	40.5531	78.3625	416.6044	39.1740
75.3542	386.5516	41.9586	76.8833	401.8803	40.5029	78.4125	417.1006	39.1307
75.4042	387.0580	41.9092	76.9375	402.4204	40.4533	78.4625	417.6004	39.0876
75.4542	387.5630	41.8606	76.9875	402.9204	40.4072	78.5125	418.0984	39.0446
75.5042	388.0656	41.8118	77.0375	403.4194	40.3608	78.5625	418.5956	39.0010
75.5583	388.6134	41.7587	77.0875	403.9190	40.3149	78.6167	419.1388	38.9547
75.6125	389.1610	41.7059	77.1375	404.4190	40.2693	78.6708	419.6770	38.9086
75.6625	389.6656	41.6572	77.1875	404.9170	40.2237	78.7208	420.1774	38.8662
75.7125	390.1704	41.6084	77.2375	405.4167	40.1775	78.7708	420.6744	38.8243
75.7625	390.6750	41.5606	77.2917	405.9535	40.1280	78.8208	421.1757	38.7814
75.8125	391.1760	41.5132	77.3458	406.4930	40.0785	78.8708	421.6730	38.7386
75.8625	391.6787	41.4651	77.3958	406.9883	40.0327	78.9208	422.1720	38.6962
75.9125	392.1826	41.4169	77.4458	407.4834	39.9879	78.9708	422.6694	38.6544
75.9667	392.7272	41.3653	77.4958	407.9824	39.9425	79.0208	423.1644	38.6133
76.0208	393.2717	41.3139	77.5458	408.4803	39.8972	79.0750	423.7034	38.5683
76.0708	393.7737	41.2669	77.5958	408.9813	39.8521	79.1292	424.2413	38.5229
76.1208	394.2744	41.2194	77.6458	409.4796	39.8070	79.1792	424.7393	38.4809
76.1708	394.7760	41.1716	77.6958	409.9746	39.7617	79.2292	425.2330	38.4387
76.2208	395.2787	41.1243	77.7500	410.5106	39.7128	79.2792	425.7256	38.3971
76.2708	395.7783	41.0772	77.8042	411.0507	39.6649	79.3292	426.2220	38.3559
76.3208	396.2766	41.0297	77.8542	411.5487	39.6207	79.3792	426.7150	38.3151
76.3708	396.7737	40.9821	77.9042	412.0480	39.5755	79.4292	427.2090	38.2744
76.4250	397.3137	40.9319	77.9542	412.5476	39.5316	79.4792	427.7024	38.2338
76.4792	397.8507	40.8814	78.0042	413.0444	39.4877	79.5333	428.2380	38.1897
76.5292	398.3487	40.8345	78.0542	413.5450	39.4434	79.5875	428.7726	38.1458
76.5792	398.8470	40.7875	78.1042	414.0440	39.3990	79.6375	429.2674	38.1060
76.6292	399.3433	40.7401	78.1542	414.5373	39.3551	79.6875	429.7594	38.0658
76.6792	399.8447	40.6929	78.2083	415.0377	39.3080	79.7375	430.2544	38.0257



ตารางที่ ก.1 ข้อมูลการวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนของกะลามะพร้าว (ต่อ)

Time (min)	Temp. (°C)	Weight (%)	Time (min)	Temp. (°C)	Weight (%)	Time (min)	Temp. (°C)	Weight (%)
79.7875	430.7440	37.9860	81.3208	445.8670	36.8401	82.8458	460.9484	35.8336
79.8375	431.2400	37.9464	81.3708	446.3600	36.8052	82.8958	461.4467	35.8020
79.8875	431.7350	37.9071	81.4208	446.8560	36.7698	82.9458	461.9390	35.7712
79.9417	432.2706	37.8645	81.4708	447.3460	36.7350	82.9958	462.4296	35.7409
79.9958	432.8037	37.8217	81.5208	447.8413	36.7003	83.0500	462.9657	35.7072
80.0458	433.2944	37.7828	81.5708	448.3367	36.6659	83.1042	463.5030	35.6742
80.0958	433.7852	37.7439	81.6208	448.8294	36.6321	83.1542	463.9996	35.6438
80.1458	434.2790	37.7059	81.6708	449.3197	36.5979	83.2042	464.4940	35.6127
80.1958	434.7690	37.6684	81.7250	449.8526	36.5609	83.2542	464.9903	35.5817
80.2458	435.2606	37.6304	81.7792	450.3883	36.5237	83.3042	465.4860	35.5520
80.2958	435.7566	37.5924	81.8292	450.8810	36.4906	83.3542	465.9813	35.5224
80.3458	436.2484	37.5540	81.8792	451.3743	36.4571	83.4042	466.4774	35.4921
80.4000	436.7806	37.5122	81.9292	451.8724	36.4238	83.4542	466.9746	35.4618
80.4542	437.3146	37.4718	81.9792	452.3672	36.3904	83.5083	467.5111	35.4294
80.5042	437.8080	37.4341	82.0292	452.8617	36.3570	83.5625	468.0473	35.3975
80.5542	438.2990	37.3959	82.0792	453.3563	36.3240	83.6125	468.5434	35.3676
80.6042	438.7924	37.3575	82.1292	453.8453	36.2910	83.6625	469.0403	35.3387
80.6542	439.2824	37.3198	82.1833	454.3826	36.2554	83.7125	469.5380	35.3096
80.7042	439.7734	37.2830	82.2375	454.9176	36.2202	83.7625	470.0326	35.2799
80.7542	440.2710	37.2464	82.2875	455.4134	36.1881	83.8125	470.5287	35.2505
80.8042	440.7644	37.2100	82.3375	455.9076	36.1565	83.8625	471.0240	35.2209
80.8583	441.3017	37.1703	82.3875	456.4020	36.1242	83.9167	471.5604	35.1897
80.9125	441.8380	37.1306	82.4375	456.8974	36.0915	83.9708	472.0960	35.1585
80.9625	442.3340	37.0942	82.4875	457.3933	36.0592	84.0208	472.5926	35.1300
81.0125	442.8280	37.0581	82.5375	457.8913	36.0276	84.0708	473.0880	35.1011
81.0625	443.3226	37.0228	82.5917	458.4272	35.9936	84.1208	473.5840	35.0726
81.1125	443.8130	36.9876	82.6458	458.9674	35.9593	84.1708	474.0774	35.0443
81.1625	444.3047	36.9520	82.6958	459.4630	35.9276	84.2208	474.5750	35.0154
81.2125	444.7976	36.9165	82.7458	459.9570	35.8962	84.2708	475.0717	34.9871
81.2667	445.3316	36.8780	82.7958	460.4533	35.8648	84.3208	475.5676	34.9588

ตารางที่ ก.1 ข้อมูลการวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนของกะลามะพร้าว (ต่อ)

Time (min)	Temp. (°C)	Weight (%)	Time (min)	Temp. (°C)	Weight (%)	Time (min)	Temp. (°C)	Weight (%)
84.3750	476.1066	34.9281	85.9042	491.2956	34.1030	87.4292	506.4576	33.3450
84.4292	476.6453	34.8975	85.9542	491.7924	34.0772	87.4833	506.9977	33.3186
84.4792	477.1413	34.8690	86.0042	492.2900	34.0513	87.5375	507.5350	33.2925
84.5292	477.6373	34.8409	86.0542	492.7863	34.0258	87.5875	508.0343	33.2690
84.5792	478.1320	34.8128	86.1042	493.2820	34.0007	87.6375	508.5326	33.2455
84.6292	478.6260	34.7848	86.1583	493.8194	33.9730	87.6875	509.0303	33.2213
84.6792	479.1190	34.7575	86.2125	494.3576	33.9459	87.7375	509.5247	33.1976
84.7292	479.6170	34.7303	86.2625	494.8556	33.9207	87.7875	510.0250	33.1741
84.7792	480.1133	34.7027	86.3125	495.3537	33.8948	87.8375	510.5250	33.1502
84.8333	480.6500	34.6728	86.3625	495.8510	33.8693	87.8917	511.0631	33.1248
84.8875	481.1900	34.6431	86.4125	496.3477	33.8444	87.9458	511.6030	33.0994
84.9375	481.6874	34.6162	86.4625	496.8424	33.8199	87.9958	512.0976	33.0765
84.9875	482.1840	34.5890	86.5125	497.3396	33.7949	88.0458	512.5957	33.0538
85.0375	482.6803	34.5614	86.5667	497.8803	33.7683	88.0958	513.0900	33.0291
85.0875	483.1776	34.5340	86.6208	498.4196	33.7414	88.1458	513.5850	33.0045
85.1375	483.6766	34.5067	86.6708	498.9170	33.7163	88.1958	514.0860	32.9812
85.1875	484.1717	34.4801	86.7208	499.4153	33.6915	88.2458	514.5856	32.9580
85.2417	484.7080	34.4515	86.7708	499.9107	33.6668	88.2958	515.0854	32.9346
85.2958	485.2430	34.4231	86.8208	500.4034	33.6420	88.3500	515.6243	32.9092
85.3458	485.7416	34.3967	86.8708	500.9023	33.6178	88.4042	516.1646	32.8835
85.3958	486.2397	34.3694	86.9208	501.3990	33.5931	88.4542	516.6637	32.8600
85.4458	486.7380	34.3424	86.9708	501.8940	33.5679	88.5042	517.1590	32.8371
85.4958	487.2344	34.3161	87.0250	502.4314	33.5418	88.5542	517.6570	32.8140
85.5458	487.7353	34.2894	87.0792	502.9710	33.5154	88.6042	518.1560	32.7909
85.5958	488.2334	34.2622	87.1292	503.4687	33.4908	88.6542	518.6516	32.7673
85.6458	488.7330	34.2364	87.1792	503.9653	33.4661	88.7042	519.1500	32.7441
85.7000	489.2711	34.2087	87.2292	504.4640	33.4420	88.7542	519.6470	32.7214
85.7542	489.8083	34.1801	87.2792	504.9624	33.4181	88.8083	520.1828	32.6969
85.8042	490.3030	34.1544	87.3292	505.4613	33.3938	88.8625	520.7200	32.6723
85.8542	490.8007	34.1289	87.3792	505.9600	33.3694	88.9125	521.2160	32.6497

ตารางที่ ก.1 ข้อมูลการวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนของกะลามะพร้าว (ต่อ)

Time (min)	Temp. (°C)	Weight (%)	Time (min)	Temp. (°C)	Weight (%)	Time (min)	Temp. (°C)	Weight (%)
88.9625	521.7120	32.6271	90.4875	536.8550	31.9549	92.0208	552.0463	31.3006
89.0125	522.2094	32.6039	90.5417	537.3912	31.9315	92.0708	552.5457	31.2806
89.0625	522.7094	32.5808	90.5958	537.9240	31.9081	92.1208	553.0450	31.2605
89.1125	523.2050	32.5579	90.6458	538.4172	31.8865	92.1708	553.5437	31.2404
89.1625	523.7026	32.5354	90.6958	538.9176	31.8646	92.2208	554.0430	31.2202
89.2167	524.2411	32.5110	90.7458	539.4133	31.8431	92.2708	554.5418	31.1995
89.2708	524.7793	32.4872	90.7958	539.9104	31.8218	92.3250	555.0820	31.1776
89.3208	525.2790	32.4647	90.8458	540.4072	31.8004	92.3792	555.6184	31.1558
89.3708	525.7763	32.4425	90.8958	540.9018	31.7756	92.4292	556.1147	31.1357
89.4208	526.2710	32.4206	90.9458	541.3984	31.7492	92.4792	556.6113	31.1158
89.4708	526.7666	32.3984	91.0000	541.9348	31.7251	92.5292	557.1096	31.0962
89.5208	527.2650	32.3758	91.0542	542.4722	31.7019	92.5792	557.6084	31.0761
89.5708	527.7640	32.3535	91.1042	542.9710	31.6807	92.6292	558.1076	31.0560
89.6208	528.2597	32.3313	91.1542	543.4687	31.6595	92.6792	558.6076	31.0365
89.6750	528.8000	32.3073	91.2042	543.9648	31.6380	92.7292	559.1070	31.0175
89.7292	529.3380	32.2829	91.2542	544.4580	31.6172	92.7833	559.6455	30.9956
89.7792	529.8360	32.2607	91.3042	544.9526	31.5966	92.8375	560.1853	30.9740
89.8292	530.3313	32.2387	91.3542	545.4467	31.5755	92.8875	560.6817	30.9545
89.8792	530.8280	32.2170	91.4042	545.9397	31.5544	92.9375	561.1800	30.9347
89.9292	531.3253	32.1952	91.4583	546.4730	31.5321	92.9875	561.6757	30.9150
89.9792	531.8220	32.1733	91.5125	547.0078	31.5096	93.0375	562.1730	30.8952
90.0292	532.3203	32.1518	91.5625	547.4996	31.4887	93.0875	562.6738	30.8754
90.0792	532.8137	32.1300	91.6125	547.9930	31.4682	93.1375	563.1693	30.8561
90.1333	533.3526	32.1066	91.6625	548.4868	31.4476	93.1917	563.7066	30.8352
90.1875	533.8904	32.0844	91.7125	548.9780	31.4266	93.2458	564.2383	30.8143
90.2375	534.3852	32.0632	91.7625	549.4722	31.4062	93.2958	564.7336	30.7946
90.2875	534.8770	32.0414	91.8125	549.9690	31.3865	93.3458	565.2293	30.7755
90.3375	535.3704	32.0195	91.8667	550.5069	31.3640	93.3958	565.7230	30.7562
90.3875	535.8646	31.9983	91.9208	551.0470	31.3415	93.4458	566.2187	30.7367
90.4375	536.3584	31.9767	91.9708	551.5470	31.3209	93.4958	566.7140	30.7177

ตารางที่ ก.1 ข้อมูลการวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนของกะลามะพร้าว (ต่อ)

Time (min)	Temp. (°C)	Weight (%)	Time (min)	Temp. (°C)	Weight (%)	Time (min)	Temp. (°C)	Weight (%)
93.5458	567.2106	30.6991	95.0792	582.4482	30.1227	96.6042	597.6580	29.5782
93.5958	567.7043	30.6801	95.1292	582.9467	30.1043	96.6542	598.1576	29.5612
93.6500	568.2412	30.6595	95.1792	583.4448	30.0861	96.7042	598.6600	29.5438
93.7042	568.7734	30.6382	95.2292	583.9426	30.0678	96.7583	599.1992	29.5253
93.7542	569.2676	30.6189	95.2792	584.4434	30.0492	96.8125	599.7387	29.5072
93.8042	569.7620	30.6004	95.3292	584.9457	30.0315	96.8625	600.2416	29.4903
93.8542	570.2630	30.5813	95.3792	585.4473	30.0133	96.9125	600.7407	29.4729
93.9042	570.7607	30.5621	95.4333	585.9922	29.9931	96.9625	601.2426	29.4564
93.9542	571.2550	30.5434	95.4875	586.5400	29.9734	97.0125	601.7416	29.4393
94.0042	571.7544	30.5241	95.5375	587.0426	29.9552	97.0625	602.2410	29.4221
94.0542	572.2520	30.5052	95.5875	587.5426	29.9368	97.1125	602.7387	29.4059
94.1083	572.7880	30.4849	95.6375	588.0460	29.9189	97.1667	603.2768	29.3877
94.1625	573.3266	30.4649	95.6875	588.5457	29.9007	97.2208	603.8132	29.3694
94.2125	573.8190	30.4456	95.7375	589.0450	29.8818	97.2708	604.3086	29.3531
94.2625	574.3146	30.4264	95.7875	589.5432	29.8642	97.3208	604.8074	29.3364
94.3125	574.8100	30.4080	95.8417	590.0815	29.8452	97.3708	605.3030	29.3198
94.3625	575.3110	30.3897	95.8958	590.6207	29.8258	97.4208	605.7990	29.3029
94.4125	575.8120	30.3712	95.9458	591.1170	29.8078	97.4708	606.2954	29.2867
94.4625	576.3110	30.3523	95.9958	591.6143	29.7900	97.5208	606.7913	29.2700
94.5167	576.8489	30.3315	96.0458	592.1050	29.7723	97.5708	607.2883	29.2510
94.5708	577.3887	30.3110	96.0958	592.5994	29.7544	97.6250	607.7828	29.2321
94.6208	577.8853	30.2924	96.1458	593.0937	29.7366	97.6792	608.2766	29.2150
94.6708	578.3853	30.2734	96.1958	593.5894	29.7190	97.7292	608.7700	29.1994
94.7208	578.8843	30.2554	96.2458	594.0843	29.7018	97.7792	609.2634	29.1828
94.7708	579.3828	30.2377	96.3000	594.5792	29.6826	97.8292	609.7568	29.1660
94.8208	579.8818	30.2194	96.3542	595.0741	29.6637	97.8792	610.2502	29.1501
94.8708	580.3808	30.2005	96.4042	595.5690	29.6465	97.9292	610.7436	29.1348
94.9208	580.8780	30.1816	96.4542	596.0639	29.6297	97.9792	611.2370	29.1194
94.9750	581.4180	30.1614	96.5042	596.5588	29.6127	98.0292	611.7304	29.1034
95.0292	581.9543	30.1412	96.5542	597.0537	29.5953	98.0833	612.2238	29.0862

ตารางที่ ก.1 ข้อมูลการวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนของกะลามะพร้าว (ต่อ)

Time (min)	Temp. (°C)	Weight (%)	Time (min)	Temp. (°C)	Weight (%)	Time (min)	Temp. (°C)	Weight (%)
98.1375	612.8996	29.0699	99.6625	628.0766	28.6216	101.1958	643.3090	28.2139
98.1875	613.3976	29.0543	99.7125	628.5710	28.6078	101.2458	643.8106	28.2010
98.2375	613.8960	29.0387	99.7625	629.0653	28.5944	101.2958	644.3118	28.1886
98.2875	614.3957	29.0235	99.8167	629.6050	28.5794	101.3458	644.8127	28.1764
98.3375	614.8924	29.0084	99.8708	630.1457	28.5642	101.3958	645.3193	28.1637
98.3875	615.3904	28.9927	99.9208	630.6464	28.5501	101.4458	645.8280	28.1511
98.4375	615.8890	28.9777	99.9708	631.1463	28.5368	101.4958	646.3322	28.1395
98.4917	616.4309	28.9606	100.0208	631.6430	28.5227	101.5458	646.8370	28.1273
98.5458	616.9697	28.9443	100.0708	632.1420	28.5089	101.6000	647.3805	28.1137
98.5958	617.4653	28.9290	100.1208	632.6396	28.4956	101.6542	647.9216	28.1005
98.6458	617.9630	28.9139	100.1708	633.1356	28.4823	101.7042	648.4213	28.0883
98.6958	618.4607	28.8992	100.2208	633.6313	28.4689	101.7542	648.9243	28.0756
98.7458	618.9566	28.8850	100.2750	634.1686	28.4549	101.8042	649.4243	28.0631
98.7958	619.4520	28.8699	100.3292	634.7057	28.4401	101.8542	649.9203	28.0505
98.8458	619.9500	28.8549	100.3792	635.2034	28.4264	101.9042	650.4156	28.0378
98.8958	620.4480	28.8403	100.4292	635.6990	28.4133	101.9542	650.9070	28.0261
98.9500	620.9854	28.8244	100.4792	636.1963	28.3999	102.0042	651.4010	28.0137
99.0042	621.5250	28.8088	100.5292	636.6954	28.3864	102.0583	651.9346	28.0001
99.0542	622.0210	28.7943	100.5792	637.1916	28.3732	102.1125	652.4707	27.9865
99.1042	622.5153	28.7798	100.6292	637.6890	28.3604	102.1625	652.9653	27.9745
99.1542	623.0117	28.7652	100.6792	638.1844	28.3471	102.2125	653.4600	27.9618
99.2042	623.5078	28.7507	100.7333	638.7222	28.3320	102.2625	653.9557	27.9493
99.2542	623.9996	28.7364	100.7875	639.2623	28.3181	102.3125	654.4476	27.9377
99.3042	624.4967	28.7213	100.8375	639.7603	28.3054	102.3625	654.9397	27.9254
99.3542	624.9946	28.7071	100.8875	640.2553	28.2919	102.4125	655.4363	27.9138
99.4083	625.5351	28.6923	100.9375	640.7510	28.2797	102.4667	655.9722	27.9011
99.4625	626.0777	28.6770	100.9875	641.2434	28.2670	102.5208	656.5120	27.8883
99.5125	626.5787	28.6629	101.0375	641.7407	28.2539	102.5708	657.0066	27.8757
99.5625	627.0793	28.6490	101.0875	642.2283	28.2413	102.6208	657.5040	27.8633
99.6125	627.5800	28.6355	101.1417	642.7678	28.2273	102.6708	657.9984	27.8512

ตารางที่ ก.1 ข้อมูลการวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนของกะลามะพร้าว (ต่อ)

Time (min)	Temp. (°C)	Weight (%)	Time (min)	Temp. (°C)	Weight (%)	Time (min)	Temp. (°C)	Weight (%)
102.7208	658.4900	27.8389	104.2500	673.6578	27.4722	105.7792	688.9296	27.1039
102.7708	658.9810	27.8266	104.3042	674.1990	27.4591	105.8292	689.4250	27.0919
102.8208	659.4687	27.8144	104.3542	674.6997	27.4472	105.8792	689.9197	27.0799
102.8708	659.9630	27.8024	104.4042	675.2007	27.4350	105.9292	690.4140	27.0673
102.9250	660.4978	27.7891	104.4542	675.6974	27.4230	105.9792	690.9094	27.0549
102.9792	661.0343	27.7759	104.5042	676.1968	27.4110	106.0334	691.4478	27.0424
103.0292	661.5332	27.7634	104.5542	676.6913	27.3988	106.0875	691.9847	27.0296
103.0792	662.0306	27.7510	104.6042	677.1887	27.3861	106.1375	692.4800	27.0166
103.1292	662.5280	27.7387	104.6542	677.6816	27.3742	106.1875	692.9722	27.0041
103.1792	663.0274	27.7267	104.7083	678.2186	27.3612	106.2375	693.4706	26.9922
103.2292	663.5256	27.7147	104.7625	678.7550	27.3480	106.2875	693.9674	26.9798
103.2792	664.0220	27.7025	104.8125	679.2490	27.3361	106.3375	694.4634	26.9675
103.3292	664.5176	27.6907	104.8625	679.7444	27.3243	106.3875	694.9576	26.9548
103.3833	665.0551	27.6780	104.9125	680.2403	27.3132	106.4416	695.4969	26.9411
103.4375	665.5907	27.6647	104.9625	680.7413	27.3012	106.4958	696.0306	26.9274
103.4875	666.0866	27.6530	105.0125	681.2420	27.2891	106.5458	696.5256	26.9149
103.5375	666.5813	27.6412	105.0625	681.7440	27.2770	106.5958	697.0220	26.9022
103.5875	667.0766	27.6290	105.1166	682.2898	27.2638	106.6458	697.5142	26.8897
103.6375	667.5728	27.6168	105.1708	682.8387	27.2513	106.6958	698.0093	26.8769
103.6875	668.0670	27.6055	105.2208	683.3450	27.2394	106.7458	698.5087	26.8641
103.7375	668.5624	27.5938	105.2708	683.8506	27.2271	106.7958	699.0056	26.8519
103.7917	669.1003	27.5813	105.3208	684.3560	27.2150	106.8458	699.5050	26.8393
103.8458	669.6353	27.5685	105.3708	684.8580	27.2031	106.9000	700.0466	26.8256
103.8958	670.1324	27.5562	105.4208	685.3613	27.1906	106.9542	700.5893	26.8118
103.9458	670.6290	27.5436	105.4708	685.8606	27.1785	107.0042	701.0870	26.7987
103.9958	671.1274	27.5312	105.5208	686.3584	27.1671	107.0542	701.5857	26.7857
104.0458	671.6253	27.5197	105.5750	686.9020	27.1540	107.1042	702.0830	26.7731
104.0958	672.1224	27.5085	105.6292	687.4386	27.1403	107.1542	702.5804	26.7601
104.1458	672.6194	27.4968	105.6792	687.9368	27.1284	107.2042	703.0844	26.7476
104.1958	673.1172	27.4849	105.7292	688.4344	27.1165	107.2542	703.5876	26.7354

ตารางที่ ก.1 ข้อมูลการวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนของกะลามะพร้าว (ต่อ)

Time (min)	Temp. (°C)	Weight (%)	Time (min)	Temp. (°C)	Weight (%)	Time (min)	Temp. (°C)	Weight (%)
107.3042	704.0910	26.7227	108.8375	719.4326	26.3321	110.3625	734.7860	25.9482
107.3583	704.6402	26.7086	108.8875	719.9334	26.3193	110.4167	735.3318	25.9343
107.4125	705.1874	26.6949	108.9375	720.4303	26.3061	110.4708	735.8747	25.9217
107.4625	705.6913	26.6817	108.9875	720.9297	26.2933	110.5208	736.3750	25.9093
107.5125	706.1950	26.6684	109.0375	721.4326	26.2802	110.5708	736.8764	25.8969
107.5625	706.6990	26.6557	109.0916	721.9782	26.2666	110.6208	737.3776	25.8847
107.6125	707.2016	26.6433	109.1458	722.5256	26.2532	110.6708	737.8796	25.8725
107.6625	707.7053	26.6304	109.1958	723.0318	26.2403	110.7208	738.3790	25.8601
107.7125	708.2094	26.6181	109.2458	723.5343	26.2272	110.7708	738.8843	25.8476
107.7667	708.7566	26.6044	109.2958	724.0374	26.2151	110.8208	739.3910	25.8361
107.8208	709.3037	26.5909	109.3458	724.5397	26.2027	110.8750	739.9394	25.8233
107.8708	709.8068	26.5784	109.3958	725.0450	26.1899	110.9292	740.4890	25.8104
107.9208	710.3074	26.5656	109.4458	725.5500	26.1769	110.9792	740.9937	25.7984
107.9708	710.8080	26.5522	109.4958	726.0574	26.1639	111.0292	741.4976	25.7858
108.0208	711.3087	26.5395	109.5500	726.5995	26.1506	111.0792	742.0000	25.7733
108.0708	711.8076	26.5275	109.6042	727.1450	26.1373	111.1292	742.5024	25.7613
108.1208	712.3043	26.5145	109.6542	727.6484	26.1247	111.1792	743.0050	25.7489
108.1708	712.8013	26.5011	109.7042	728.1516	26.1118	111.2292	743.5061	25.7367
108.2250	713.3403	26.4867	109.7542	728.6624	26.0991	111.2792	744.0061	25.7249
108.2792	713.8784	26.4735	109.8042	729.1703	26.0865	111.3333	744.5520	25.7126
108.3292	714.3754	26.4611	109.8542	729.6747	26.0739	111.3875	745.0976	25.7003
108.3792	714.8706	26.4488	109.9042	730.1804	26.0617	111.4375	745.6026	25.6880
108.4292	715.3682	26.4358	109.9542	730.6826	26.0493	111.4875	746.1106	25.6762
108.4792	715.8650	26.4227	110.0084	731.2243	26.0358	111.5375	746.6200	25.6649
108.5292	716.3640	26.4099	110.0625	731.7647	26.0222	111.5875	747.1294	25.6536
108.5792	716.8613	26.3971	110.1125	732.2680	26.0093	111.6375	747.6360	25.6423
108.6292	717.3620	26.3840	110.1625	732.7676	25.9970	111.6875	748.1453	25.6305
108.6834	717.8970	26.3701	110.2125	733.2696	25.9847	111.7416	748.6943	25.6177
108.7375	718.4356	26.3568	110.2625	733.7756	25.9725	111.7958	749.2460	25.6051
108.7875	718.9340	26.3445	110.3125	734.2824	25.9606	111.8458	749.7539	25.5931

ตารางที่ ก.1 ข้อมูลการวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนของกะลามะพร้าว (ต่อ)

Time (min)	Temp. (°C)	Weight (%)	Time (min)	Temp. (°C)	Weight (%)	Time (min)	Temp. (°C)	Weight (%)
111.8958	750.2620	25.5817	113.4208	765.8243	25.2494	114.9542	781.3456	24.9664
111.9458	750.7700	25.5703	113.4708	766.3334	25.2396	115.0042	781.8566	24.9583
111.9958	751.2797	25.5587	113.5250	766.8794	25.2291	115.0542	782.3608	24.9499
112.0458	751.7864	25.5473	113.5792	767.4282	25.2182	115.1042	782.8630	24.9416
112.0958	752.2937	25.5358	113.6292	767.9306	25.2082	115.1542	783.3670	24.9332
112.1458	752.8026	25.5248	113.6792	768.4347	25.1985	115.2042	783.8720	24.9245
112.2000	753.3543	25.5126	113.7292	768.9397	25.1886	115.2542	784.3766	24.9159
112.2542	753.9082	25.5002	113.7792	769.4440	25.1789	115.3084	784.9234	24.9073
112.3042	754.4212	25.4892	113.8292	769.9510	25.1691	115.3625	785.4712	24.8981
112.3542	754.9314	25.4776	113.8792	770.4566	25.1592	115.4125	785.9730	24.8896
112.4042	755.4413	25.4666	113.9292	770.9634	25.1493	115.4625	786.4744	24.8816
112.4542	755.9540	25.4558	113.9833	771.5109	25.1391	115.5125	786.9788	24.8732
112.5042	756.4650	25.4442	114.0375	772.0593	25.1291	115.5625	787.4782	24.8645
112.5542	756.9753	25.4335	114.0875	772.5653	25.1198	115.6125	787.9800	24.8564
112.6042	757.4860	25.4229	114.1375	773.0730	25.1108	115.6625	788.4810	24.8482
112.6584	758.0375	25.4112	114.1875	773.5800	25.1025	115.7166	789.0230	24.8395
112.7125	758.5876	25.3988	114.2375	774.0874	25.0933	115.7708	789.5632	24.8307
112.7625	759.0976	25.3877	114.2875	774.5930	25.0841	115.8208	790.0587	24.8224
112.8125	759.6100	25.3768	114.3375	775.0980	25.0749	115.8708	790.5553	24.8141
112.8625	760.1200	25.3662	114.3917	775.6446	25.0653	115.9208	791.0564	24.8063
112.9125	760.6330	25.3555	114.4458	776.1926	25.0555	115.9708	791.5587	24.7981
112.9625	761.1457	25.3451	114.4958	776.7026	25.0466	116.0208	792.0584	24.7896
113.0125	761.6570	25.3345	114.5458	777.2106	25.0378	116.0708	792.5587	24.7809
113.0666	762.2116	25.3223	114.5958	777.7163	25.0286	116.1208	793.0596	24.7725
113.1208	762.7684	25.3111	114.6458	778.2256	25.0197	116.1750	793.5962	24.7636
113.1708	763.2788	25.3011	114.6958	778.7324	25.0112	116.2292	794.1363	24.7551
113.2208	763.7913	25.2909	114.7458	779.2374	25.0024	116.2792	794.6350	24.7465
113.2708	764.3030	25.2806	114.7958	779.7422	24.9939	116.3292	795.1324	24.7385
113.3208	764.8126	25.2703	114.8500	780.2894	24.9844	116.3792	795.6294	24.7304
113.3708	765.3190	25.2602	114.9042	780.8376	24.9751	116.4292	796.1318	24.7216



ตารางที่ ก.1 ข้อมูลการวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนของกะลามะพร้าว (ต่อ)

Time (min)	Temp. (°C)	Weight (%)	Time (min)	Temp. (°C)	Weight (%)	Time (min)	Temp. (°C)	Weight (%)
116.4792	796.6320	24.7138	118.0125	811.9897	24.4670	119.5375	827.2176	24.2251
116.5292	797.1337	24.7058	118.0625	812.4876	24.4590	119.5875	827.7168	24.2177
116.5792	797.6353	24.6975	118.1125	812.9868	24.4508	119.6375	828.2174	24.2099
116.6334	798.1751	24.6889	118.1625	813.4826	24.4429	119.6916	828.7606	24.2006
116.6875	798.7157	24.6795	118.2125	813.9774	24.4349	119.7458	829.2988	24.1912
116.7375	799.2180	24.6715	118.2625	814.4763	24.4270	119.7958	829.7957	24.1838
116.7875	799.7228	24.6638	118.3125	814.9730	24.4187	119.8458	830.2938	24.1761
116.8375	800.2244	24.6564	118.3666	815.5132	24.4098	119.8958	830.7906	24.1680
116.8875	800.7276	24.6486	118.4208	816.0561	24.4012	119.9458	831.2870	24.1596
116.9375	801.2313	24.6405	118.4708	816.5576	24.3932	119.9958	831.7844	24.1520
116.9875	801.7332	24.6322	118.5208	817.0584	24.3855	120.0458	832.2820	24.1443
117.0417	802.2814	24.6238	118.5708	817.5603	24.3775	120.0958	832.7782	24.1362
117.0958	802.8284	24.6147	118.6208	818.0630	24.3693	120.1500	833.3163	24.1280
117.1458	803.3350	24.6063	118.6708	818.5613	24.3615	120.2042	833.8526	24.1193
117.1958	803.8410	24.5983	118.7208	819.0610	24.3539	120.2542	834.3536	24.1116
117.2458	804.3460	24.5903	118.7708	819.5594	24.3462	120.3042	834.8524	24.1036
117.2958	804.8484	24.5822	118.8250	820.0986	24.3376	120.3542	835.3497	24.0958
117.3458	805.3507	24.5741	118.8792	820.6410	24.3291	120.4042	835.8478	24.0878
117.3958	805.8520	24.5657	118.9292	821.1430	24.3215	120.4542	836.3418	24.0795
117.4458	806.3544	24.5576	118.9792	821.6460	24.3132	120.5042	836.8410	24.0715
117.5000	806.8970	24.5491	119.0292	822.1484	24.3053	120.5542	837.3407	24.0634
117.5542	807.4376	24.5407	119.0792	822.6472	24.2975	120.6083	837.8837	24.0547
117.6042	807.9387	24.5330	119.1292	823.1474	24.2891	120.6625	838.4320	24.0460
117.6542	808.4374	24.5247	119.1792	823.6490	24.2809	120.7125	838.9328	24.0379
117.7042	808.9316	24.5167	119.2292	824.1486	24.2734	120.7625	839.4374	24.0300
117.7542	809.4303	24.5088	119.2834	824.6871	24.2647	120.8125	839.9387	24.0223
117.8042	809.9247	24.5005	119.3375	825.2260	24.2558	120.8625	840.4328	24.0146
117.8542	810.4216	24.4921	119.3875	825.7240	24.2478	119.5375	827.2176	24.2251
117.9042	810.9163	24.4841	119.4375	826.2226	24.2405	119.5875	827.7168	24.2177
117.9583	811.4524	24.4756	119.4875	826.7189	24.2331	119.6375	828.2174	24.2099

ตารางที่ ก.1 ข้อมูลการวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนของกะลามะพร้าว (ต่อ)

Time (min)	Temp. (°C)	Weight (%)	Time (min)	Temp. (°C)	Weight (%)	Time (min)	Temp. (°C)	Weight (%)
119.6916	828.7606	24.2006	121.2208	843.2400	23.9566	122.7458	845.8453	23.7206
119.7458	829.2988	24.1912	121.2708	843.5047	23.9488	122.8000	845.9058	23.7126
119.7958	829.7957	24.1838	121.3208	843.7387	23.9405	122.8542	845.9687	23.7046
119.8458	830.2938	24.1761	121.3708	843.9446	23.9328	122.9042	846.0256	23.6974
119.8958	830.7906	24.1680	121.4208	844.1234	23.9246	122.9542	846.0824	23.6896
119.9458	831.2870	24.1596	121.4750	844.2914	23.9159	123.0042	846.1380	23.6817
119.9958	831.7844	24.1520	121.5292	844.4376	23.9077	123.0542	846.1920	23.6745
120.0458	832.2820	24.1443	121.5792	844.5530	23.9000	123.1042	846.2462	23.6668
120.0958	832.7782	24.1362	121.6292	844.6561	23.8921	123.1542	846.3016	23.6592
120.1500	833.3163	24.1280	121.6792	844.7464	23.8845	123.2042	846.3559	23.6519
120.2042	833.8526	24.1193	121.7292	844.8250	23.8770	123.2584	846.4142	23.6434
120.2542	834.3536	24.1116	121.7792	844.8944	23.8694	123.3125	846.4722	23.6352
120.3042	834.8524	24.1036	121.8292	844.9580	23.8614	123.3625	846.5278	23.6277
120.3542	835.3497	24.0958	121.8792	845.0160	23.8537	123.4125	846.5800	23.6199
120.4042	835.8478	24.0878	121.9334	845.0711	23.8452	123.4625	846.6281	23.6123
120.4542	836.3418	24.0795	121.9875	845.1230	23.8364	123.5125	846.6750	23.6053
120.5042	836.8410	24.0715	122.0375	845.1672	23.8293	123.5625	846.7207	23.5981
120.5542	837.3407	24.0634	122.0875	845.2108	23.8222	123.6125	846.7638	23.5903
120.6083	837.8837	24.0547	122.1375	845.2553	23.8147	123.6667	846.8131	23.5818
120.6625	838.4320	24.0460	122.1875	845.2978	23.8072	123.7208	846.8586	23.5740
120.7125	838.9328	24.0379	122.2375	845.3420	23.7993	123.7708	846.9003	23.5665
120.7625	839.4374	24.0300	122.2875	845.3860	23.7915	123.8208	846.9397	23.5594
120.8125	839.9387	24.0223	122.3416	845.4328	23.7830	123.8708	846.9790	23.5524
120.8625	840.4328	24.0146	122.3958	845.4804	23.7746	123.9208	847.0172	23.5445
120.9125	840.9097	24.0070	122.4458	845.5262	23.7672	123.9708	847.0526	23.5365
120.9625	841.3657	23.9990	122.4958	845.5762	23.7593	124.0208	847.0913	23.5287
121.0167	841.8294	23.9896	122.5458	845.6300	23.7522	124.0708	847.1290	23.5216
121.0708	842.2543	23.9808	122.5958	845.6837	23.7441	124.1250	847.1703	23.5140
121.1208	842.6153	23.9730	122.6458	845.7343	23.7355	124.1792	847.2126	23.5059
121.1708	842.9452	23.9647	122.6958	845.7907	23.7282	124.2292	847.2514	23.4985

ตารางที่ ก.1 ข้อมูลการวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนของกะลามะพร้าว (ต่อ)

Time (min)	Temp. (°C)	Weight (%)	Time (min)	Temp. (°C)	Weight (%)	Time (min)	Temp. (°C)	Weight (%)
124.2792	847.2876	23.4911	125.8042	848.1250	23.2636	127.3375	848.5704	23.0367
124.3292	847.3243	23.4837	125.8542	848.1439	23.2567	127.3875	848.5837	23.0295
124.3792	847.3616	23.4760	125.9084	848.1602	23.2494	127.4375	848.5984	23.0224
124.4292	847.3969	23.4684	125.9625	848.1769	23.2410	127.4875	848.6113	23.0152
124.4792	847.4301	23.4603	126.0125	848.1934	23.2335	127.5375	848.6254	23.0076
124.5292	847.4650	23.4529	126.0625	848.2126	23.2265	127.5875	848.6399	23.0001
124.5833	847.5046	23.4453	126.1125	848.2309	23.2190	127.6417	848.6525	22.9921
124.6375	847.5399	23.4375	126.1625	848.2480	23.2113	127.6958	848.6674	22.9838
124.6875	847.5726	23.4300	126.2125	848.2656	23.2041	127.7458	848.6830	22.9766
124.7375	847.6053	23.4225	126.2625	848.2840	23.1967	127.8166	848.6960	22.9663
124.7875	847.6343	23.4151	126.3166	848.3055	23.1882	127.8500	848.2945	22.9613
124.8375	847.6647	23.4077	126.3708	848.3281	23.1805	127.9042	847.4598	22.9528
124.8875	847.6937	23.4000	126.4208	848.3457	23.1731	127.9542	846.3766	22.9458
124.9375	847.7226	23.3925	126.4708	848.3663	23.1654	128.0042	845.0543	22.9392
124.9916	847.7522	23.3850	126.5208	848.3844	23.1581	128.0542	843.5469	22.9321
125.0458	847.7806	23.3770	126.5708	848.4016	23.1501	128.1042	841.8930	22.9252
125.0958	847.8094	23.3696	126.6208	848.4171	23.1427	128.1542	840.1247	22.9188
125.1458	847.8370	23.3622	126.6708	848.4344	23.1355	128.2042	838.2628	22.9117
125.1958	847.8644	23.3545	126.7208	848.4543	23.1284	128.2583	836.1734	22.9041
125.2458	847.8906	23.3468	126.7750	848.4715	23.1199	128.3125	834.0348	22.8962
125.2958	847.9147	23.3393	126.8292	848.4856	23.1118	128.3625	832.0234	22.8893
125.3458	847.9407	23.3318	126.8792	848.4994	23.1044	128.4125	829.9903	22.8828
125.3958	847.9632	23.3240	126.9292	848.5103	23.0960	128.4625	827.9390	22.8760
125.4500	847.9874	23.3161	126.9792	848.5199	23.0891	128.5125	825.8782	22.8692
125.5042	848.0132	23.3084	127.0292	848.5280	23.0827	128.5625	823.8131	22.8628
125.5542	848.0344	23.3010	127.0792	848.5368	23.0751	128.6125	821.7410	22.8568
125.6042	848.0549	23.2932	127.1292	848.5420	23.0673	128.6625	819.6770	22.8508
125.6542	848.0731	23.2861	127.1792	848.5468	23.0601	128.7166	817.4458	22.8446
125.7042	848.0918	23.2789	127.2333	848.5551	23.0515	128.7708	815.2353	22.8378
125.7542	848.1070	23.2715	127.2875	848.5620	23.0436	128.8208	813.2363	22.8321

ตารางที่ ก.1 ข้อมูลการวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนของกะลามะพร้าว (ต่อ)

Time (min)	Temp. (°C)	Weight (%)	Time (min)	Temp. (°C)	Weight (%)	Time (min)	Temp. (°C)	Weight (%)
128.8708	811.3032	22.8266	130.3958	797.9893	22.4021	131.9292	809.3847	18.2258
128.9208	809.4614	22.8205	130.4458	798.3397	22.3487	131.9792	809.7203	18.0012
128.9708	807.7200	22.8147	130.5000	798.7331	22.2855	132.0292	810.0532	17.7714
129.0208	806.0953	22.8088	130.5542	799.1382	22.2158	132.0792	810.3900	17.5369
129.0708	804.5962	22.8026	130.6042	799.5157	22.1453	132.1292	810.7264	17.2964
129.1208	803.2294	22.7962	130.6542	799.9006	22.0692	132.1792	811.0610	17.0512
129.1750	801.8988	22.7893	130.7042	800.2850	21.9871	132.2334	811.4245	16.7798
129.2292	800.7189	22.7824	130.7542	800.6674	21.8993	132.2875	811.7837	16.5029
129.2792	799.7637	22.7761	130.8042	801.0524	21.8048	132.3375	812.1132	16.2425
129.3292	798.9282	22.7697	130.8542	801.4376	21.7055	132.3875	812.4384	15.9769
129.3792	798.2100	22.7633	130.9083	801.8534	21.5917	132.4375	812.7600	15.7068
129.4292	797.5960	22.7539	130.9625	802.2680	21.4695	132.4875	813.0776	15.4321
129.4792	797.0843	22.7421	131.0125	802.6487	21.3508	132.5375	813.3937	15.1530
129.5292	796.6613	22.7341	131.0625	803.0310	21.2267	132.5875	813.7066	14.8688
129.5833	796.2971	22.7302	131.1125	803.4163	21.0981	132.6375	814.0174	14.5797
129.6375	796.0180	22.7260	131.1625	803.7988	20.9663	132.6916	814.3509	14.2619
129.6875	795.8303	22.7200	131.2125	804.2176	20.8329	132.7458	814.6788	13.9395
129.7375	795.7050	22.7131	131.2625	804.6038	20.7016	132.7958	814.9776	13.6367
129.7875	795.6340	22.7056	131.3125	804.9776	20.5547	132.8458	815.2763	13.3304
129.8375	795.6184	22.6963	131.3666	805.3800	20.3842	132.8958	815.5697	13.0202
129.8875	795.6500	22.6864	131.4208	805.7800	20.2072	132.9458	815.8610	12.7055
129.9375	795.7300	22.6747	131.4708	806.1416	20.0382	132.9958	816.1497	12.3874
129.9875	795.8530	22.6605	131.5208	806.5047	19.8629	133.0458	816.4306	12.0646
130.0417	796.0278	22.6414	131.5708	806.8657	19.6823	133.0958	816.7080	11.7371
130.0958	796.2413	22.6185	131.6208	807.2239	19.4966	133.1500	816.9988	11.3780
130.1458	796.4750	22.5934	131.6708	807.5863	19.3043	133.2042	817.2876	11.0145
130.1958	796.7356	22.5644	131.7208	807.9397	19.1067	133.2542	817.5510	10.6749
130.2458	797.0200	22.5310	131.7708	808.2930	18.9033	133.3042	817.8124	10.3319
130.2958	797.3243	22.4930	131.8250	808.6694	18.6770	133.3542	818.0647	9.9845
130.3458	797.6511	22.4503	131.8792	809.0450	18.4450	133.4042	818.3126	9.6333

ตารางที่ ก.1 ข้อมูลการวิเคราะห์การสลายตัวของกะลามะพร้าว (ต่อ)

Time (min)	Temp. (°C)	Weight (%)	Time (min)	Temp. (°C)	Weight (%)	Time (min)	Temp. (°C)	Weight (%)
133.4542	818.5550	9.2783	133.8625	820.3747	6.2450	134.3208	821.8087	2.8039
133.5042	818.7906	8.9198	133.9125	820.5962	5.8647	134.3708	821.8900	2.4317
133.5584	819.0406	8.5271	133.9625	820.8038	5.4876	134.4208	821.9320	2.0658
133.6125	819.2876	8.1299	134.0166	821.0018	5.0835	134.4750	821.8431	1.6810
133.6625	819.5084	7.7591	134.0708	821.1703	4.6805	134.5292	821.5168	1.3153
133.7125	819.7320	7.3839	134.1208	821.3124	4.3080	134.5792	820.8094	1.0001
133.7625	819.9500	7.0058	134.1708	821.4490	3.9341	134.6292	819.8447	0.7099
133.8125	820.1637	6.6257	134.2208	821.5786	3.5583	134.6792	818.9837	0.4396



ตารางที่ ก.2 ข้อมูลการกระจายขนาดรูพรุนของถ่านกัมมันต์ที่สภาวะกระตุ้นอุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส เวลา 120 นาที

Carbonization temperature (°C)											
250		350		450		550		650		750	
Pore width (Å)	Pore volume distribution (cm <sup>3</sup> /g- Å)	Pore width (Å)	Pore volume distribution (cm <sup>3</sup> /g- Å)	Pore width (Å)	Pore volume distribution (cm <sup>3</sup> /g- Å)	Pore width (Å)	Pore volume distribution (cm <sup>3</sup> /g- Å)	Pore width (Å)	Pore volume distribution (cm <sup>3</sup> /g- Å)	Pore width (Å)	Pore volume distribution (cm <sup>3</sup> /g- Å)
8.04	0.000	8.04	0.000	8.04	0.000	8.04	0.000	8.04	0.000	8.04	0.000
8.58	0.000	8.58	0.000	8.58	0.000	8.58	0.000	8.58	0.000	8.58	0.000
9.29	0.000	9.29	0.000	9.29	0.000	9.29	0.000	9.29	0.000	9.29	0.000
10.01	1.228	10.01	0.000	10.01	1.037	10.01	0.728	10.01	0.419	10.01	0.000
10.90	4.501	10.90	1.219	10.90	3.308	10.90	3.166	10.90	3.023	10.90	2.547
11.79	8.904	11.79	8.425	11.79	7.316	11.79	6.474	11.79	5.631	11.79	5.227
12.69	4.974	12.69	4.026	12.69	3.775	12.69	3.297	12.69	2.818	12.69	2.431
13.58	2.929	13.58	2.662	13.58	2.193	13.58	1.892	13.58	1.590	13.58	1.431
14.83	2.981	14.83	2.444	14.83	2.183	14.83	1.874	14.83	1.564	14.83	1.356
15.91	1.852	15.91	1.397	15.91	1.271	15.91	1.094	15.91	0.917	15.91	0.786
17.16	0.876	17.16	0.673	17.16	0.578	17.16	0.674	17.16	0.446	17.16	0.368
18.59	0.722	18.59	0.521	18.59	0.470	18.59	0.245	18.59	0.394	18.59	0.330
20.02	0.560	20.02	0.394	20.02	0.403	20.02	0.297	20.02	0.331	20.02	0.281
21.62	0.478	21.62	0.343	21.62	0.351	21.62	0.196	21.62	0.296	21.62	0.243
23.41	0.420	23.41	0.325	23.41	0.315	23.41	0.215	23.41	0.278	23.41	0.284

ตารางที่ ก.2 ข้อมูลการกระจายขนาดรูพรุนของถ่านกัมมันต์ที่สภาวะกระตุ้นอุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส เวลา 120 นาที (ต่อ)

Carbonization temperature (°C)											
250		350		450		550		650		750	
Pore width (Å)	Pore volume distribution (cm <sup>3</sup> /g- Å)	Pore width (Å)	Pore volume distribution (cm <sup>3</sup> /g- Å)	Pore width (Å)	Pore volume distribution (cm <sup>3</sup> /g- Å)	Pore width (Å)	Pore volume distribution (cm <sup>3</sup> /g- Å)	Pore width (Å)	Pore volume distribution (cm <sup>3</sup> /g- Å)	Pore width (Å)	Pore volume distribution (cm <sup>3</sup> /g- Å)
25.20	0.436	25.20	0.359	25.20	0.351	25.20	0.277	25.20	0.290	25.20	0.301
27.34	0.468	27.34	0.392	27.34	0.375	27.34	0.300	27.34	0.285	27.34	0.253
29.49	0.359	29.49	0.314	29.49	0.298	29.49	0.213	29.49	0.228	29.49	0.211
31.81	0.314	31.81	0.283	31.81	0.266	31.81	0.239	31.81	0.203	31.81	0.219
34.31	0.312	34.31	0.312	34.31	0.278	34.31	0.243	34.31	0.212	34.31	0.211
36.99	0.212	36.99	0.223	36.99	0.201	36.99	0.170	36.99	0.152	36.99	0.147
40.03	0.171	40.03	0.188	40.03	0.175	40.03	0.167	40.03	0.131	40.03	0.130
43.25	0.140	43.25	0.164	43.25	0.155	43.25	0.132	43.25	0.108	43.25	0.109
46.64	0.110	46.64	0.164	46.64	0.125	46.64	0.117	46.64	0.087	46.64	0.083
50.40	0.087	50.40	0.225	50.40	0.096	50.40	0.083	50.40	0.070	50.40	0.061
54.33	0.060	54.33	0.037	54.33	0.070	54.33	0.067	54.33	0.032	54.33	0.041
58.80	0.044	58.80	0.015	58.80	0.052	58.80	0.045	58.80	0.022	58.80	0.028
63.44	0.033	63.44	0.040	63.44	0.037	63.44	0.038	63.44	0.016	63.44	0.018
68.45	0.026	68.45	0.036	68.45	0.028	68.45	0.028	68.45	0.010	68.45	0.012
73.99	0.018	73.99	0.026	73.99	0.018	73.99	0.020	73.99	0.006	73.99	0.008

ตารางที่ ก.2 ข้อมูลการกระจายขนาดรูพรุนของถ่านกัมมันต์ที่สภาวะกระตุ้นอุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส เวลา 120 นาที (ต่อ)

Carbonization temperature (°C)											
250		350		450		550		650		750	
Pore width (Å)	Pore volume distribution (cm <sup>3</sup> /g- Å)	Pore width (Å)	Pore volume distribution (cm <sup>3</sup> /g- Å)	Pore width (Å)	Pore volume distribution (cm <sup>3</sup> /g- Å)	Pore width (Å)	Pore volume distribution (cm <sup>3</sup> /g- Å)	Pore width (Å)	Pore volume distribution (cm <sup>3</sup> /g- Å)	Pore width (Å)	Pore volume distribution (cm <sup>3</sup> /g- Å)
79.88	0.016	79.88	0.023	79.88	0.015	79.88	0.016	79.88	0.005	79.88	0.006
86.32	0.017	86.32	0.024	86.32	0.016	86.32	0.018	86.32	0.005	86.32	0.007
93.11	0.014	93.11	0.021	93.11	0.012	93.11	0.015	93.11	0.004	93.11	0.005
100.61	0.009	100.61	0.015	100.61	0.007	100.61	0.011	100.61	0.002	100.61	0.003
108.66	0.007	108.66	0.012	108.66	0.005	108.66	0.009	108.66	0.001	108.66	0.002
117.23	0.005	117.23	0.011	117.23	0.004	117.23	0.008	117.23	0.001	117.23	0.002
126.53	0.006	126.53	0.010	126.53	0.004	126.53	0.008	126.53	0.002	126.53	0.002
136.71	0.005	136.71	0.009	136.71	0.004	136.71	0.008	136.71	0.000	136.71	0.001
147.61	0.004	147.61	0.008	147.61	0.002	147.61	0.007	147.61	0.000	147.61	0.000
159.41	0.000	159.41	0.006	159.41	0.000	159.41	0.005	159.41	0.000	159.41	0.000
172.10	0.000	172.10	0.003	172.10	0.000	172.10	0.002	172.10	0.000	172.10	0.000
185.86	0.000	185.86	0.002	185.86	0.000	185.86	0.002	185.86	0.000	185.86	0.000
200.69	0.000	200.69	0.004	200.69	0.000	200.69	0.003	200.69	0.000	200.69	0.000
216.60	0.001	216.60	0.006	216.60	0.000	216.60	0.004	216.60	0.000	216.60	0.001
233.93	0.005	233.93	0.009	233.93	0.004	233.93	0.006	233.93	0.003	233.93	0.005



ตารางที่ ก.2 ข้อมูลการกระจายขนาดรูพรุนของถ่านกัมมันต์ที่สภาวะกระตุ้นอุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส เวลา 120 นาที (ต่อ)

Carbonization temperature (°C)											
250		350		450		550		650		750	
Pore width (Å)	Pore volume distribution (cm <sup>3</sup> /g- Å)	Pore width (Å)	Pore volume distribution (cm <sup>3</sup> /g- Å)	Pore width (Å)	Pore volume distribution (cm <sup>3</sup> /g- Å)	Pore width (Å)	Pore volume distribution (cm <sup>3</sup> /g- Å)	Pore width (Å)	Pore volume distribution (cm <sup>3</sup> /g- Å)	Pore width (Å)	Pore volume distribution (cm <sup>3</sup> /g- Å)
252.52	0.008	252.52	0.010	252.52	0.006	252.52	0.008	252.52	0.006	252.52	0.006
272.71	0.009	272.71	0.011	272.71	0.007	272.71	0.009	272.71	0.006	272.71	0.006
294.51	0.006	294.51	0.007	294.51	0.005	294.51	0.006	294.51	0.004	294.51	0.004
317.92	0.004	317.92	0.006	317.92	0.004	317.92	0.005	317.92	0.003	317.92	0.003
343.30	0.005	343.30	0.007	343.30	0.004	343.30	0.006	343.30	0.003	343.30	0.003
370.64	0.003	370.64	0.005	370.64	0.003	370.64	0.005	370.64	0.003	370.64	0.002
400.31	0.003	400.31	0.004	400.31	0.002	400.31	0.004	400.31	0.002	400.31	0.002
432.30	0.002	432.30	0.003	432.30	0.001	432.30	0.003	432.30	0.001	432.30	0.001
466.79	0.001	466.79	0.002	466.79	0.001	466.79	0.002	466.79	0.001	466.79	0.001
503.96	0.001	503.96	0.003	503.96	0.001	503.96	0.003	503.96	0.001	503.96	0.001
544.17	0.000	544.17	0.002	544.17	0.001	544.17	0.002	544.17	0.001	544.17	0.001
587.60	0.000	587.60	0.001	587.60	0.000	587.60	0.001	587.60	0.000	587.60	0.000
634.42	0.000	634.42	0.001	634.42	0.000	634.42	0.001	634.42	0.000	634.42	0.000
684.99	0.000	684.99	0.001	684.99	0.000	684.99	0.001	684.99	0.000	684.99	0.000
739.68	0.000	739.68	0.001	739.68	0.000	739.68	0.001	739.68	0.000	739.68	0.000

ตารางที่ ก.2 ข้อมูลการกระจายขนาดรูพรุนของถ่านกัมมันต์ที่สภาวะกระตุ้นอุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส เวลา 120 นาที (ต่อ)

Carbonization temperature (°C)											
250		350		450		550		650		750	
Pore width (Å)	Pore volume distribution (cm <sup>3</sup> /g- Å)	Pore width (Å)	Pore volume distribution (cm <sup>3</sup> /g- Å)	Pore width (Å)	Pore volume distribution (cm <sup>3</sup> /g- Å)	Pore width (Å)	Pore volume distribution (cm <sup>3</sup> /g- Å)	Pore width (Å)	Pore volume distribution (cm <sup>3</sup> /g- Å)	Pore width (Å)	Pore volume distribution (cm <sup>3</sup> /g- Å)
798.65	0.000	798.65	0.001	798.65	0.000	798.65	0.001	798.65	0.000	798.65	0.000
862.45	0.000	862.45	0.001	862.45	0.000	862.45	0.001	862.45	0.000	862.45	0.000

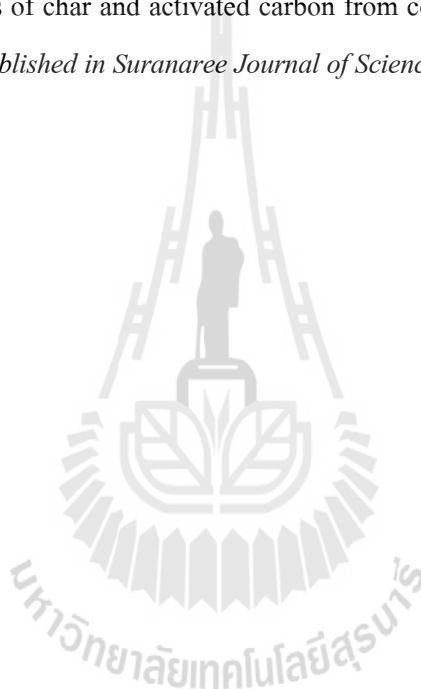




## รายชื่อบทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างการศึกษา

Katesa, J., Junpirom, S., and Tangsathitkulchai, C. (2011). Effects of carbonization temperature on porous properties of coconut shell based activated carbon, Poster presentation in The 21<sup>st</sup> Thai Institute of Chemical Engineering and Applied Chemistry (**TIChE International Conference 2011**). 10<sup>th</sup>-11<sup>th</sup> November 2011, Songkhla, Thailand.

Katesa, J., Junpirom, S., and Tangsathitkulchai, C. (2013). Effect of carbonization temperature on porous properties of char and activated carbon from coconut shell. *(This article has been accepted to be published in Suranaree Journal of Science and Technology)*



1 **EFFECT OF CARBONIZATION TEMPERATURE ON**  
2 **PROPERTIES OF CHAR AND ACTIVATED CARBON**  
3 **FROM COCONUT SHELL**

4  
5 **Running head: Carbonization Temperature Effect on Activated Carbon**  
6 **Properties**

7  
8 **Juejun Katesa, Supunee Junpirom and Chaiyot**

9 **Tangsathitkulchai\***

10  
11 *School of Chemical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of*  
12 *Technology, Nakhon Ratchasima, 30000, Thailand. Tel. 0-4422-4263; Fax. 0-4422-4609;*

13 *E-mail: [chaiyot@sut.ac.th](mailto:chaiyot@sut.ac.th)*

14 *\*Corresponding author*

15  
16 **Abstract**

17 **This research focused on investigating the effect of carbonization**  
18 **temperature on the porous properties (surface area, pore volume and mean**  
19 **pore size) of coconut shell based activated carbon prepared by physical**  
20 **activation with carbon dioxide. The carbonization temperature was varied in**  
21 **the range from 250-750°C and the derived chars were activated in CO<sub>2</sub> at**  
22 **850°C for 60 and 120 min. The porous properties of activated carbons**

23 obtained including Brunauer-Emmett-Teller (BET) surface area, pore  
24 volume, pore size distribution and average pore diameter were determined  
25 by nitrogen adsorption isotherms at  $-196^{\circ}\text{C}$ . The experimental results showed  
26 that most pores occurred during the activation predominantly as micropores  
27 with a small proportion of mesopores. The porous properties of activated  
28 carbon decreased with the increase in carbonization temperature, with the  
29 char prepared at the lowest carbonization temperature of  $250^{\circ}\text{C}$  and  
30 activated at  $850^{\circ}\text{C}$  for 120 min giving activated carbon with the highest BET  
31 surface area and pore volume of  $1056\text{ m}^2/\text{g}$  and  $0.533\text{ cm}^3/\text{g}$ , respectively.  
32 From the obtained results, it is feasible to produce activated carbon with high  
33 porous properties from coconut shell by selecting the appropriate conditions  
34 for the carbonization and activation steps.

35  
36 **Keywords:** Coconut shell chars, Carbonization, Activated carbon, Porous  
37 properties

### 39 **Introduction**

40 Activated carbon is one of the most widely used adsorbent for separation and  
41 purification processes. It can be produced from a variety of carbonaceous materials  
42 such as coals, polymers, and biomass and with proper control of the preparation  
43 conditions, a wide range of adsorbent porous properties can be well achieved.  
44 Nowadays, the demand for activated carbon in industries has increased steadily,  
45 with the majority being used in liquid-phase adsorption systems. Worldwide

46 demand for virgin activated carbon for the year 2010 amounts to 1.2 million metric  
47 tons with the following market shares: Asia/Pacific 50%, North America 26%,  
48 Western Europe 14% and other region 10% (The Freedonia Group, Inc., 2006).

49 Coconut shell was chosen as the starting carbonaceous material in this  
50 study because it is the by-product from coconut palm which is an important  
51 economic crop of Thailand. In addition, its relatively large amount left from  
52 coconut fruit utilization in the order of 150000 tons/year (National Food Institute,  
53 2012) is considered to be a potential precursor for industrial production of  
54 activated carbon. Coconut shell is a carbonaceous material which has inherently  
55 strong structure and contains a high fixed carbon content (about 21%) with very  
56 low ash content (less than 1.0 wt%) (Li *et al.*, 2008). Moreover, its contaminant is  
57 less harmful compared with activated carbon that is produced from the raw coal.  
58 In the production of activated carbon, there are two general methods, namely  
59 physical activation and chemical activation. In physical activation, a raw material  
60 is first carbonized and then activated with an oxidizing gas such as steam or  
61 carbon dioxide to develop internal porosity by gasification reaction. In chemical  
62 activation, a raw precursor is impregnated with an inorganic additive and  
63 carbonized in an inert atmosphere. This work is focused on physical activation  
64 since it is widely adopted in commercial production and is friendly to the  
65 environment. Generally, the porous properties of activated carbon are dependent  
66 on both the conditions of carbonization and activation. Most researches have  
67 mainly focused on studying the activation conditions such as activation temperature  
68 and activation time. However, the present study was directed towards studying the

69 effect of carbonization temperature on the resulting porosity of produced activated  
70 carbons, the topic of which is not widely investigated in details. There have been  
71 some previous works reporting on the effect of carbonization temperature but  
72 mostly were performed at the high temperature range of 400-800°C (Guo *et al.*,  
73 2009; Wan Daud *et al.*, 2000). To study the effect of carbonization temperature in  
74 more detail, a wider range of carbonization temperature from 250-750°C is  
75 specifically focused and investigated in the present work.

76

#### 77 **Materials and Methods**

78 Raw material preparation was first commenced by drying the as-received coconut  
79 shell in an oven at 110°C for 48 h to remove excess moisture and was crushed and  
80 sieved to obtain a sample of 2.1 mm in average screen size. The pre-dried coconut  
81 shell was kept for the proximate and thermal analyses and the subsequent char  
82 preparation.

83

#### 84 **Proximate and Thermal Analyses of Coconut Shell**

85 The proximate analysis and thermal decomposition behavior of coconut  
86 shell sample were analyzed using a thermogravimetric analyzer (SDT 2960 TA-  
87 Instrument). The proximate analysis was performed using the procedure as  
88 outlined by Luo and Guo (1998). About 30 mg of sample were placed in an  
89 alumina crucible of the analyzer and the heating was carried out at the rate of  
90 5°C/min from room temperature to 110°C under an inert atmosphere of nitrogen  
91 flowing at the rate of 100 cm<sup>3</sup>/min until the dehydration was completed. Then the



92 temperature was increased to 850°C at a constant heating rate and held for 7 min  
93 to determine the volatile matters from the weight loss. After that, the temperature  
94 was lowered to 800°C and the inert gas was changed to air flowing at 100  
95 cm<sup>3</sup>/min, and the sample was maintained at this temperature until the weight  
96 remained constant due to complete combustion. This final weight is the amount of  
97 ash residue and the fixed carbon content in the analyzed sample is calculated by  
98 mass balance (%FC = 100 - %ash - %VM, on a dry basis). For the thermal analysis,  
99 coconut shell weighing 30 mg was placed in an alumina crucible and the heating  
100 scheme was carried out at the rate of 5°C/min from room temperature to 800°C  
101 with nitrogen flowing at 100 ml/min. The weight of sample was automatically  
102 collected as a function of heating time and temperature.

103

#### 104 **Carbonization of Coconut Shells**

105 A batch of 15 g of pre-dried coconut shell was loaded into a ceramic boat  
106 which was placed in an electrically heated horizontal tube furnace (CTF 12/75-  
107 Carbolite, UK) and then heated up to the desired carbonization temperature of  
108 250, 350, 450, 550, 650, and 750°C, at a heating rate of 5°C/min and held at that  
109 temperature for 120 min under the flow of nitrogen at 100 cm<sup>3</sup>/min. The  
110 proximate analyses of resulting char samples were also determined by the  
111 thermogravimetric technique previously outlined and the surface characteristics of  
112 the char products were studied by SEM (Scanning electron microscopic) instrument  
113 (JEOL JSM-6400 Scanning Microscope).

114

#### 115 **Activation of the Carbonized Chars**

116 About 3 g of char from the carbonization step were loaded on a wire-mesh  
117 boat and placed in the tube furnace, then heated up to the required activation  
118 temperature (850°C) at a heating rate of 5°C/min under the nitrogen flow at 100  
119 cm<sup>3</sup>/min. When the final activation temperature of 850°C was reached, nitrogen  
120 flow was switched to CO<sub>2</sub> flowing at the rate of 100 cm<sup>3</sup>/min and the system was  
121 kept at this temperature for the activation times of 60 and 120 min. When the  
122 activation was completed, the sample was cooled down to room temperature  
123 under the nitrogen flow. The obtained sample was then kept in a desiccator for  
124 further analysis. Carbon dioxide rather than steam was employed as an oxidizing  
125 gas for activated carbon production in this work because both gases are commonly  
126 used by a number of investigators but CO<sub>2</sub> can be supplied and regulated  
127 conveniently from a gas cylinder without the need to include a steam generator  
128 and a metering pump for the case of using steam.

129 The structural and porous properties of prepared activated carbons were  
130 characterized by nitrogen adsorption at -196°C using an accelerated surface area  
131 and porosimetry system (ASAP-2010, Micromeritics). Prior to the measurements,  
132 the activated carbon was degassed at 200°C under high vacuum (< 0.05 torr) for 5  
133 h. The BET surface area was calculated from the derived isotherms by applying  
134 the well known Brunauer-Emmett-Teller (BET) equation (Brunauer *et al.*, 1938).  
135 The Dubinin–Astakhov (DA) equation (Dubinin and Astakhov, 1971) was used to  
136 calculate the micropore volume. The total pore volume was determined from the

137 amount of nitrogen adsorbed at a relative pressure ( $P/P^0$ ) of 0.98 and converted to  
138 nitrogen volume in liquid state.

139

## 140 **Results and discussion**

### 141 **Proximate and Thermal Analyses of Coconut Shell**

142 The result of proximate analysis of coconut shell is shown in Table 1. As  
143 can be seen, the fixed carbon content of coconut shell has a value of 23.64%,  
144 which is higher than those of some biomass precursors such as longan seed  
145 (19.6%) (Junpirom et al., 2007), oil palm fibers (18.23%) (Lua and Guo, 1998)  
146 and eucalyptus wood (18.3%) (Ngernyen *et al.*, 2006).

147 In general, biomass contains three main cellulosic components, that is,  
148 hemicellulose, cellulose and lignin. During the carbonization of biomass, the  
149 hemicellulose and cellulose will decompose mostly into volatile products, while  
150 lignin content is more difficult to decompose and contributes to the formation of a  
151 solid residue called char. For thermal analysis, the thermal degradation of  
152 lignocellulosic materials was investigated using the technique of  
153 thermogravimetric analysis (TGA). The pyrolysis results obtained as reported in  
154 weight percent remaining of coconut shell (TG curve) and its corresponding first  
155 derivative (DTG curve) are shown in Figure 1. For DTG curve, the small peak  
156 occurring at the temperature below 120°C corresponds to the removal of water  
157 (dehydration), giving the weight loss of about 2.8%. As the temperature was  
158 increased, the main pyrolysis decomposition of lignocelluloses occurred as two  
159 peaks in the range of 200-385°C, which agreed with the result of Antal (1983) in

160 that lignocelluloses decomposition usually occurs over a wide range of  
161 temperature from 200-400°C. For the two-peak characteristic of the  
162 decomposition curve, the first peak appeared in the range of 200-315°C and the  
163 second peak occurred in the range of 315-385°C. As reported by Yang *et al.*  
164 (2007) and Gašparovič *et al.* (2009), the decomposition of hemicellulose and  
165 cellulose started over the range from 200-380°C and 250-400°C, respectively,  
166 while the decomposition of lignin occurred over a wider range of 160-900°C.  
167 Therefore, the appearance of the first-peak decomposition should correspond to  
168 the decomposition of hemicellulose with the weight loss of about 28.5%, followed  
169 by the decomposition of cellulose which occurred as the second peak, giving the  
170 weight loss of about 26.6%. Lignin should decompose over the wider range of  
171 temperature, by starting to decompose at the lowest temperature and continue up  
172 to the final temperature of around 750°C at which the weight remaining becomes  
173 almost constant.

174

#### 175 **Effect of Carbonization Temperature on Physical Properties of Char**

176 Coconut shell was carbonized at temperatures in the range from 250-750°C.  
177 The effect of carbonization temperature on char yield is delineated in Figure 2. It  
178 was found that the char yield decreased with an increasing in the carbonization  
179 temperature. The yield significantly decreased from 250 to 350°C and then  
180 gradually decreased at temperatures higher than 350°C. This result indicates that  
181 the lower yield obtained at a higher temperature is caused by much larger release  
182 of volatile matters, thus giving the lower content of volatile matters in the derived

183 char as can be seen in Figure 3. This figure also shows the proximate analyses of  
184 chars prepared at different carbonization temperatures. It is observed that the fixed  
185 carbon and ash content increased with increasing in carbonization temperature  
186 over the range from 31.41-88.42% and 0.23-1.32%, respectively, while the  
187 volatile content decreased from 68.35 to 10.26%.

188 In addition, the effect of carbonization temperature on the surface  
189 morphology of chars by SEM is presented in Figure 4. The raw coconut shell  
190 result (Figure 4(a)) is also included for the sake of comparison. It is observed that  
191 the external surface of raw coconut shell is quite smooth, and appears to consist of  
192 a stack of ordered layering flakes. When the coconut shell is carbonized, the  
193 external surface shows an increase in the degree of surface roughness as the  
194 carbonization temperature is increased, as displayed in Figure 4(b) to 4(g). The  
195 increased surface roughness is attributed to the rupture of biomass structure  
196 resulting from the release of more volatile species as the heat treatment  
197 temperature is increased.

198

#### 199 **Effect of Carbonization Temperature on Weight Loss**

200 In general, the production of activated carbon consists of the carbonization  
201 of a raw precursor to increase the carbon content, followed by the activation step  
202 to generate adsorbent internal porosity. The weight loss of each process indicates  
203 the extent of chemical reaction involved, which in turn affects the property of  
204 carbon product in each step. The weight loss of char is defined based on the initial  
205 weight of raw coconut shell whereas that of the activation step is defined based on

206 the weight of initial char prior to activation. The char derived at each carbonization  
 207 temperature has different yield and characteristics which will affect the later stage  
 208 of char activation with CO<sub>2</sub>. As a result, in order to compare the effect of chars  
 209 prepared at different carbonization temperatures on the properties of produced  
 210 activated carbon, it is logical to use the total weight loss for the activation step  
 211 based on the initial weight of coconut shell. That is,

$$212 \quad \text{Total fractional weight loss} = 1 - \frac{W_{ac}}{W_r} = 1 - (1 - W_{L,car})(1 - W_{L,act}) \quad (1)$$

213 where  $W_{L,car}$  and  $W_{L,act}$  are the weight losses during carbonization and activation,  
 214 respectively, which are defined in terms of weight fraction as

$$215 \quad W_{L,car} = 1 - \frac{W_{car}}{W_r} \quad (2)$$

$$216 \quad \text{and} \quad W_{L,act} = 1 - \frac{W_{ac}}{W_{car}} \quad (3)$$

217 where  $W_r$ ,  $W_{car}$ , and  $W_{ac}$  are the weight of the starting raw material, the weight of  
 218 char after carbonization or before activation, and the weight of the obtained activated  
 219 carbon, respectively.

220 Figure 5 shows the percent weight loss during carbonization and activation  
 221 and total weight loss versus carbonization temperature at two activation times (60  
 222 and 120 min). For a given activation time, the total weight loss and the weight loss  
 223 during activation tended to decrease with increasing in the carbonization  
 224 temperature, while the opposite trend was found for the carbonization step. This  
 225 result implies that the char obtained from a lower carbonization temperature  
 226 which contains higher amount of volatile matter favors the production of char

227 with higher reactivity toward CO<sub>2</sub> gasification in the activation step. It is  
228 hypothesized that the release of more volatiles of this char at a high activation  
229 temperature could create more reactive sites for gasification on the carbon surface,  
230 hence giving higher weight loss during the activation step. As to the effect of  
231 activation time, the extent of char gasification would be increased with increasing  
232 activation time from 60 to 120 min, giving rise to the consequent increase for both  
233 the total weight loss and weight loss for the activation process.

234

#### 235 **Effect of Carbonization Temperature on Porous Properties of Activated** 236 **Carbon**

237 The porous properties of activated carbon were characterized by using  
238 nitrogen adsorption isotherms at -196°C. Figure 6 shows the typical adsorption  
239 isotherms of the activated carbon produced from chars carbonized at temperatures  
240 of 250 and 750°C and at activation temperature of 850°C. From these results, it is  
241 seen that the nitrogen adsorption isotherms display Type I isotherm, according to  
242 BDDT (Brunauer–Deming–Deming–Teller) classification (Gregg and Sing, 1982).  
243 The rapid rising of N<sub>2</sub> adsorbed over a low range of relative pressure followed by  
244 a plateau of almost constant adsorbed amount clearly indicates that the derived  
245 activated carbon contains predominantly micropores, by which the adsorption takes  
246 place by pore-filling mechanism. Evidently, the adsorbed amount of N<sub>2</sub> molecules  
247 by the activated carbon is dependent both on the carbonization temperature and  
248 activation time.

249 Figure 7 and 8 shows the effect of carbonization temperature on the porous  
250 properties of produced activated carbon. It was found that both BET surface area  
251 and pore volume (total and micropores) decreased with an increase in carbonization  
252 temperature. Based on the investigated results, it can be concluded that the extent  
253 of gasification and pore development are strongly dependent on the carbonization  
254 temperature. The char prepared at the lowest carbonization temperature of 250°C  
255 and activated at temperature of 850°C and time of 120 min gave the activated  
256 carbon with the highest BET surface area and pore volume of 1056 m<sup>2</sup>/g and  
257 0.533 cm<sup>3</sup>/g, respectively. Both the surface area and pore volume decreased  
258 slightly from 250 to 350°C but dropped significantly from 350 to 550°C followed  
259 by a gradual decrease at higher carbonization temperatures. The highest porous  
260 properties of activated carbon from char prepared at the lowest carbonization  
261 temperature indicates that this char is most reactive towards gasification reaction  
262 of the activation step. Similar gasification study on coconut shell chars was  
263 previously performed in a thermogravimetric analyzer and the kinetic results also  
264 indicated that char reactivity decreased with increasing of carbonization  
265 temperature, with the largest decrease occurring between 250 and 350°C  
266 (Tangsathitkulchai *et al.*, 2012). It was hypothesized that the decomposition of  
267 hemicellulose over this low carbonization temperature range could be responsible  
268 for this increase of char reactivity (number of active sites) for gasification reaction.  
269 In addition, it has been reported that at high carbonization temperatures, a more  
270 ordered structure is likely to be developed in the char, leading to a slower rate of  
271 gasification during the activation step (Li *et al.*, 2008).



272 It is discovered that the total weight loss (see Equation (1) for the definition)  
273 can be used to represent the combined effect of carbonization temperature and  
274 activation condition (temperature and time) on the porous properties of activated  
275 carbons, as displayed in Figure 9. The results show that within the range of total  
276 weight loss investigated, as the total weight loss increases the porous properties  
277 increases initially almost linearly for total weight loss less than 76%. For higher  
278 weight loss the pore volume rises with increasing slope, approaching a maximum  
279 near the 81% weight loss. It is further noted that the values of total weight loss  
280 vary over a rather narrow range from around 75 to 82 wt%. This is attributed to  
281 the compensation effect between the increase of weight loss during carbonization  
282 and the decrease of weight loss during activation as the carbonization temperature  
283 is increased, as seen in Figure 9.

284 Figure 10 shows the effect of carbonization temperature on the developed  
285 pore size distribution of activated carbons. It is clear that the distribution of pore  
286 size is relatively narrow, with the presence of a sharp peak near the pore width of  
287  $11.3\text{\AA}$ , and confined mainly in the micropore size range of less than  $20\text{\AA}$  (Figure  
288 10(a)). The pore volume distribution data in the mesopore size ( $20\text{-}500\text{\AA}$ ) is  
289 enlarged and displayed in Figure 10(b). Since the area under the curve represents  
290 the value of pore volume, it is obvious that micropore and mesopore volume  
291 decrease with increasing in the carbonization temperature over the range from 250  
292 to  $750^{\circ}\text{C}$ , in agreement with the results shown in Figure 8.

293 Further examination of Table 2 indicates that the contribution of macropores  
294 in terms of pore volume is insignificant, as compared to the micropores and

295 mesopores. The percentage of created micropores increases with increased  
296 carbonization temperature from 77.84 to 80.95%, while the development of  
297 mesopores gives the opposite trend; it drops from 22.12 to 18.89%. In addition,  
298 the average pore size of activated carbon appears to decrease from 20.14 to 19.86Å  
299 as the carbonization temperature is increased. These results tend to suggest that  
300 carbonization temperature not only has an effect on char reactivity, which results in  
301 different values of porous properties, but also on the physical structure of char  
302 upon heat treating during the carbonization step, giving activated carbons with  
303 different distribution of pore size. It is probable that the char prepared at a high  
304 carbonization temperature, due to a greater loss of volatiles, possesses a more  
305 densely packed structure from which it is difficult to enlarge the small pores to  
306 larger pores by gasification with the activating gas. From our measured results,  
307 this structural change of char is confirmed by the continued increase of char  
308 density from 1.194 to 1.853 g/cm<sup>3</sup> as the carbonization temperature is increased  
309 from 250 to 750°C.

310

### 311 **Conclusions**

312 The effect of carbonization temperature in the range from 250 to 750°C on the  
313 properties of char and activated carbon from coconut shell was investigated in this  
314 work. It was found that char yield decreased with increasing carbonization  
315 temperature due to the increased amount of volatile being released, giving the  
316 corresponding increasing of fixed carbon content. Porous properties of activated  
317 carbon including surface area, pore volume and mean pore size were found to

318 decrease with the increase in carbonization temperature, with activated carbon  
319 produced from char prepared at the lowest temperature of 250°C giving the largest  
320 surface area and pore volume of 1,056 cm<sup>2</sup>/g and 0.533 cm<sup>3</sup>/g, respectively. Most  
321 pores generated in activated carbon are micropores (pore size smaller than 20Å)  
322 which accounts for 78-81% of total pore volume. Carbonization temperature has a  
323 profound effect on chemical reactivity and structural change of resulting char  
324 which in turn affect the porous texture of produced activated carbons.

325

### 326 **References**

- 327 Antal, M.J. (1983). Biomass pyrolysis: A review of the literature. Part I-  
328 Carbohydrate pyrolysis. In: Boer, K.W., Duffie, J.A., editors. Advances in  
329 Solar Energy, American Solar Energy Society, Boulder, CO, 1:61-111.
- 330 Brunauer, S., Emmett, P.H., and Teller, E. (1938). Adsorption of gases in  
331 multimolecular layers. J. Am. Chem. Soc., 60(2):309-319.
- 332 Dubinin, M.M. and Astakhov, V.A. (1971). Description of adsorption equilibria  
333 of vapors on zeolites over wide ranges of temperature and pressure. Adv.  
334 Chem. Ser., 102:69-85.
- 335 The Freedonia Group, Inc. (2006). World activated carbon. Cleveland, OH:  
336 The Freedonia Group. Available from: <http://www.freedoniagroup.com>.  
337 Accessed date: July, 2006.
- 338 Gašparovič, L., Koreňová, Z., and Jelemenský, E. (2010). Kinetic study of wood  
339 chips decomposition by TGA. Chem. Pap., 64(2):174-181.

- 340 Gregg, S.J. and Sing, K.S.W. (1982). Adsorption, surface area, and porosity. 2<sup>nd</sup>  
341 ed. Academic Press, NY, 303p.
- 342 Guo, S.H., Peng, J.H., Li, W., Yang, K.B., Zhang, L., Zhang, S.M. and Xia, H.Y.  
343 (2009). Effects of CO<sub>2</sub> activation on porous structures of coconut shell-based  
344 activated carbons. *Appl. Surf. Sci.*, 255(20):8443-8449.
- 345 Junpirom, S., Tangsathitkulchai, C., and Tangsathitkulchai, M. (2007).  
346 Preparation of activated carbons from longan seed by physical and  
347 chemical activation method. *Suranaree J. Sci. Technol.*, 14(1):63-76.
- 348 Li, W., Yang, K.B., Peng, J.H., Zhang, L., Guo, S.H., and Xia H.Y. (2008).  
349 Effects of carbonization temperatures on characteristics of porosity in  
350 coconut shell chars and activated carbons derived from carbonized  
351 coconut shell chars. *J. Ind. Crop Prod.*, 28(2):190-198.
- 352 Lua, A.C. and Guo, J. (1998). Preparation and Characterization of Chars from oil  
353 palm waste. *Carbon*, 36(11):1663-1670.
- 354 National Food Institute (NFI). (2012). Thailand food industry profiles. Bangplad,  
355 BKK: NFI. Available from: <http://fic.nfi.or.th>. Accessed date: March, 2012.
- 356 Ngernyen, Y., Tangsathitkulchai, C., and Tangsathitkulchai, M. (2006). Porous  
357 properties of activated carbon produced from eucalyptus and wattle Wood  
358 by carbon dioxide activation. *Korean J. Chem. Eng.*, 23(6):1046-1054.
- 359 Tangsathitkulchai, C., Junpirom, S., and Katesa, J. (2012). Comparison of Kinetic  
360 Models for CO<sub>2</sub> Gasification of Coconut-Shell Chars: Carbonization  
361 Temperature Effects on Char Reactivity and Porous Properties of  
362 Produced Activated Carbons. *Engineering J.*, 17(1):13-27.

- 363 Wan Daud, M.A.W., Ali, W.S.W. and Sulaiman, M.Z. (2000). The effects of  
364 carbonization temperature on pore development in palm-shell-based  
365 activated carbon. *Carbon*, 38(14):1925-1932.
- 366 Yang, H., Yan, R., Chen, H., Lee, D., and Zheng, C. (2007). Characteristics of  
367 hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis. *Fuel*, 86(12-13):1781-1788.

368

369

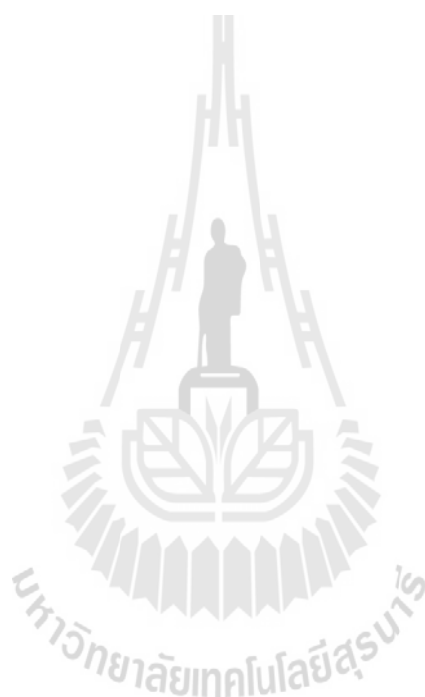


370 **Table 1. Proximate analysis of coconut shell (dry basis)**

	wt% (dry basis)
Volatile matter	76.23
Fixed carbon	23.64
Ash	0.13

371

372

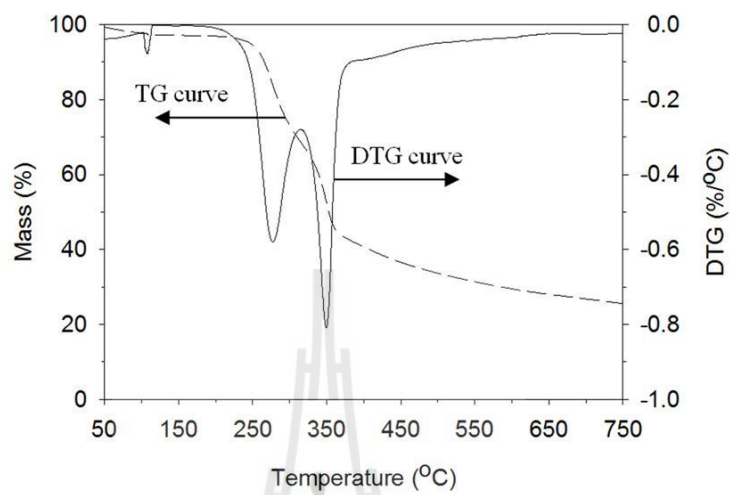


373 **Table 2. Effect of carbonization temperature on pore size distribution of**  
 374 **activated carbon (activation temperature = 850°C and activation time = 120**  
 375 **min)**

Carbonization temperature (°C)	Total pore volume (cm <sup>3</sup> /g)	Micropore volume		Mesopore volume		Macropore volume		Average pore size (Å)
		(cm <sup>3</sup> /g)	%	(cm <sup>3</sup> /g)	%	(cm <sup>3</sup> /g)	%	
250	0.532	0.414	77.84	0.118	22.12	0.00021	0.04	20.14
350	0.526	0.413	78.45	0.113	21.45	0.00053	0.10	20.12
450	0.475	0.376	79.20	0.098	20.66	0.00062	0.14	20.05
550	0.469	0.376	80.18	0.092	19.69	0.00059	0.13	19.94
650	0.445	0.359	80.67	0.085	19.19	0.00063	0.14	19.84
750	0.401	0.325	80.95	0.076	18.89	0.00067	0.16	19.86

376

377



378

379

380

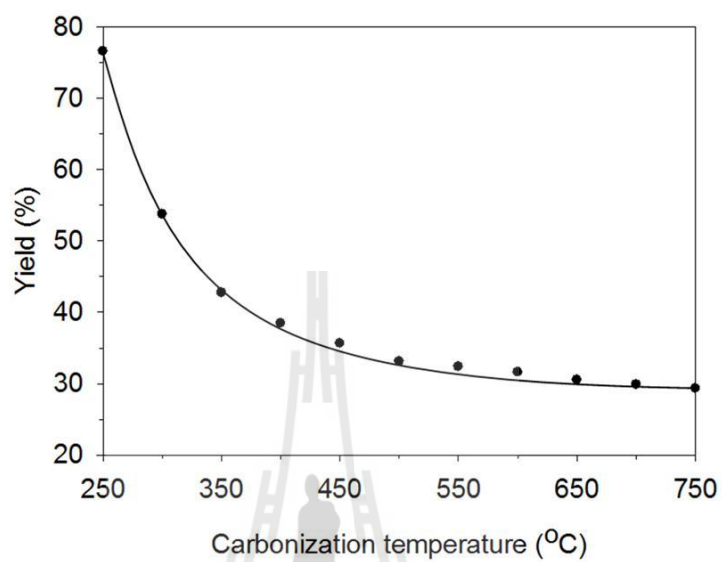
381

382

Figure 1. TG/DTG curves of raw coconut shell

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี





383

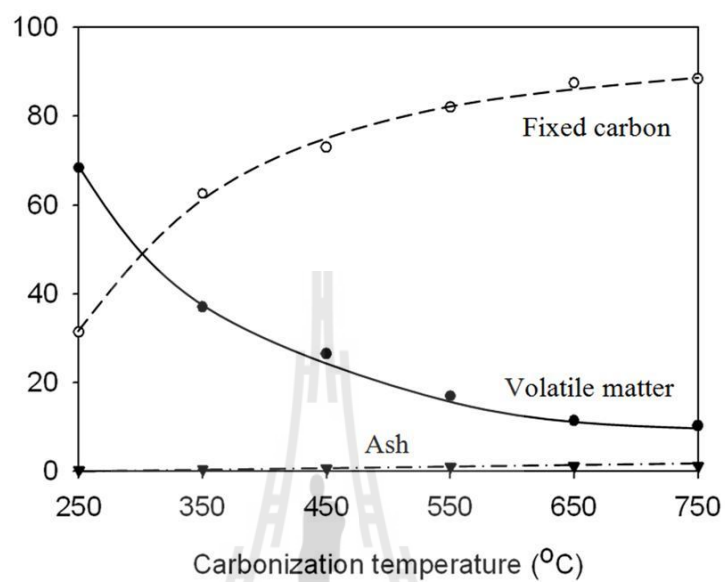
384

385 **Figure 2. Effect of carbonization temperature on the yield of coconut shell char**

386

387

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



388

389

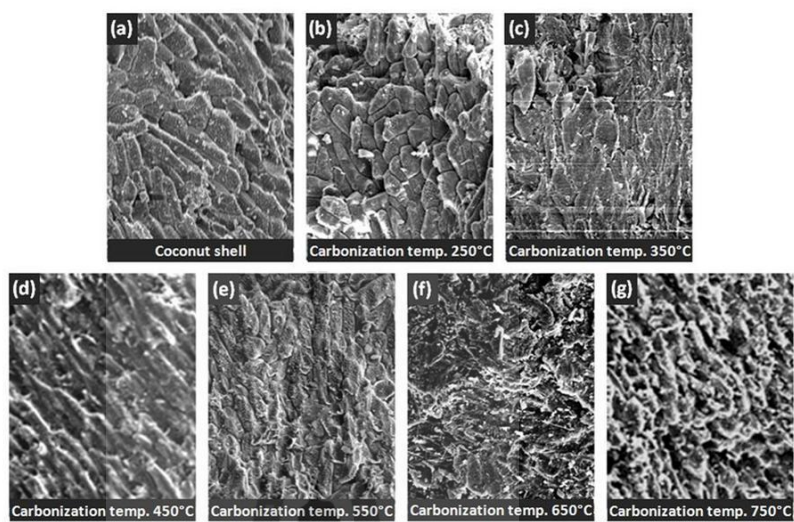
390 **Figure 3. Effect of carbonization temperature on the proximate analysis of coconut**  
391 **shell chars prepared at various carbonization temperatures**

392

393

394

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



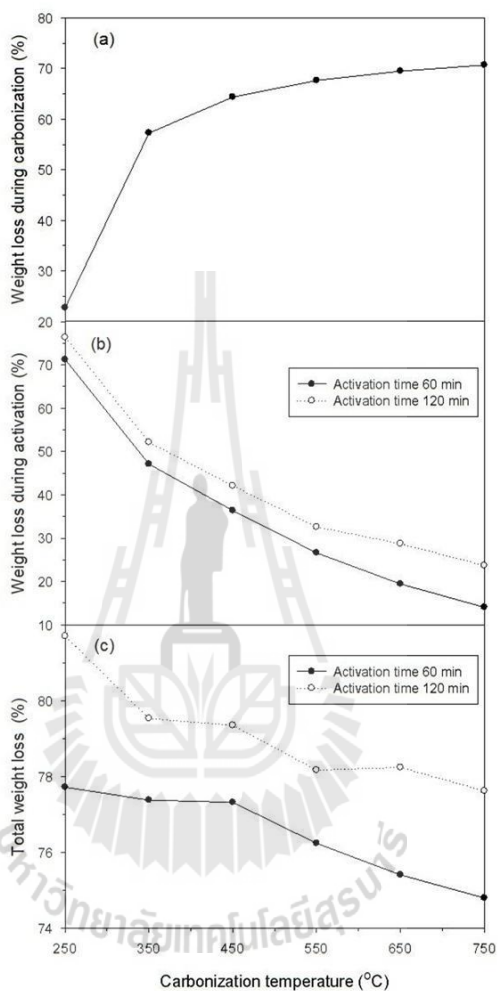
395

396 **Figure 4. SEM images of coconut shell and coconut shell chars at various**  
397 **carbonization temperatures**

398

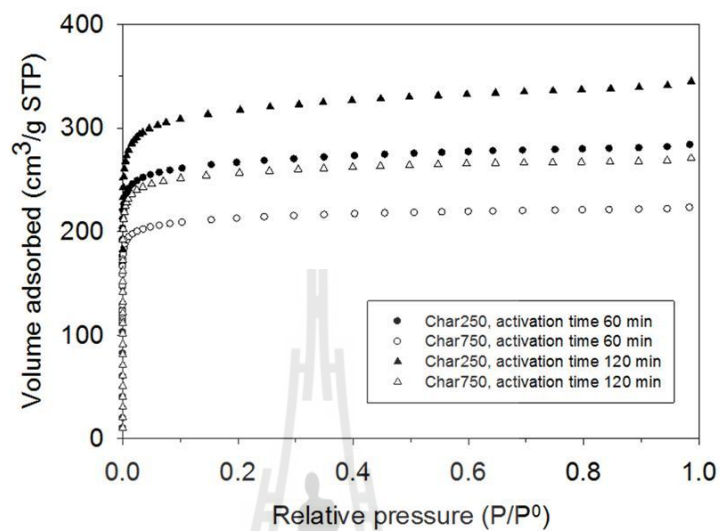
399





400

401 **Figure 5. Effect of carbonization temperature on (a) the weight loss of coconut shell**  
 402 **during carbonization, (b) weight loss of char during activation, and (c) total weight**  
 403 **loss of coconut shell for carbonization and activation (activation temperature 850°C,**  
 404 **activation time 60 and 120 min)**

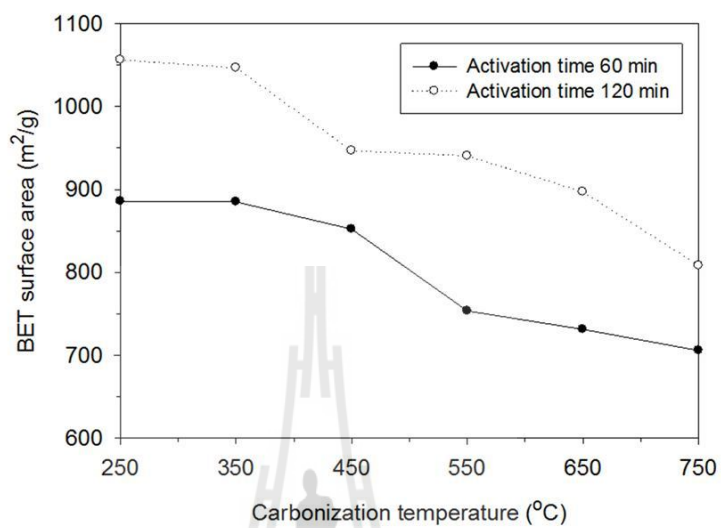


405

406 **Figure 6.** Effects of carbonization temperature and activation time on nitrogen  
407 **adsorption isotherms of prepared activated carbon from coconut shell at activation**  
408 **temperature of 850°C**

409



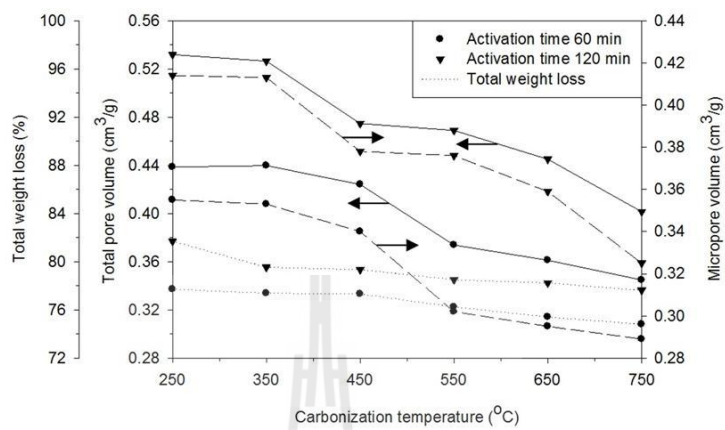


410

411 **Figure 7. Effect of carbonization temperature on BET surface area of activated**  
412 **carbons from coconut shell at activation temperature 850°C**

413

414

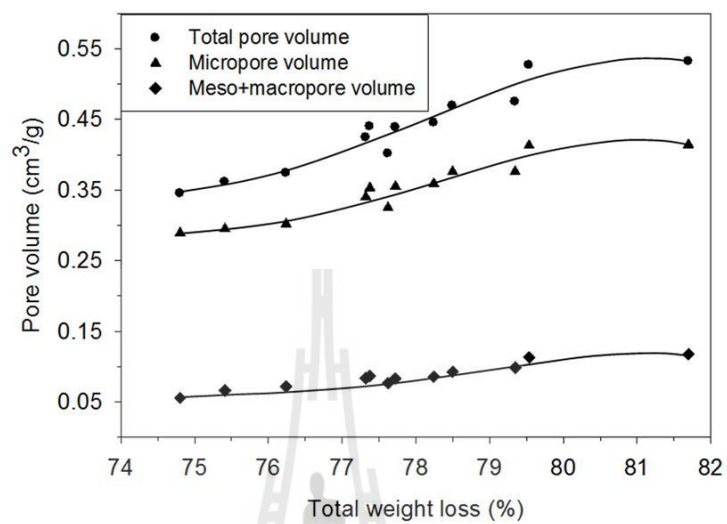


415

416 **Figure 8. Effect of carbonization temperature on the pore volumes of activated**417 **carbons from coconut shell at activation temperature 850°C**

418

419



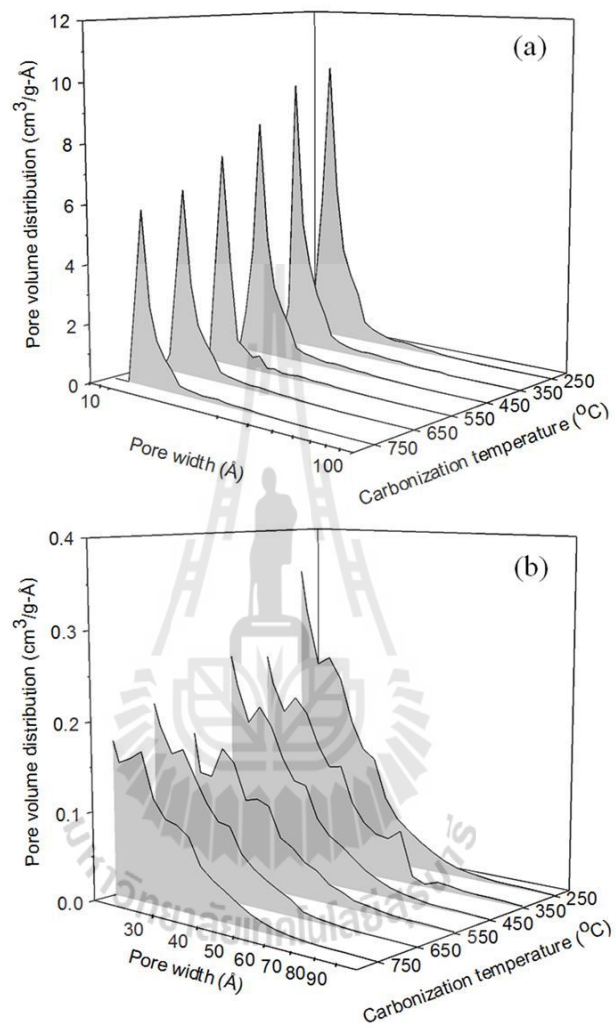
420

421 **Figure 9. Correlation between total weight loss and pore volume of activated carbon**  
422 **from coconut shell**

423

424





425

426 **Figure 10. Pore size distribution of activated carbons from coconut shell chars**  
427 **prepared at different carbonization temperatures ( activation conditions of 850°C**  
428 **and 120 min)**

## ประวัติผู้เขียน

นางสาวเจ็จจันท์ เกตษา เกิดเมื่อวันที่ 15 เดือนมีนาคม พ.ศ. 2529 ณ จังหวัดมหาสารคาม สำเร็จการศึกษาระดับชั้นประถมศึกษาจากโรงเรียนศรีโกสุมวิทยามิตรภาพที่ 209 อำเภอโกสุมพิสัย จังหวัดมหาสารคาม ในปีการศึกษา 2541 ระดับชั้นมัธยมศึกษาจากโรงเรียนขอนแก่นวิทยายน อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น ในปีการศึกษา 2547 ระดับปริญญาตรีจากสาขาวิชาวิศวกรรมเคมี สำนักวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา ในปีการศึกษา 2552 และระดับปริญญาโทจากสาขาวิชาวิศวกรรมเคมี สำนักวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา ในปีการศึกษา 2556

ในระหว่างการศึกษาระดับปริญญาตรีได้เป็นนักศึกษาสหกิจศึกษาที่ บริษัท เซลล์แห่งประเทศไทย จำกัด และในระหว่างการศึกษาระดับปริญญาโทได้มีโอกาสนำเสนอผลงานวิจัยใน The 21<sup>st</sup> Thai Institute of Chemical Engineering and Applied Chemistry (TIChE International Conference 2011) ณ หอประชุมนานาชาติ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ และได้เข้าร่วมโครงการ The 2<sup>nd</sup> Cern School Thailand 2012 ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อีกทั้งยังได้เป็นนักศึกษาแลกเปลี่ยนนานาชาติด้วยทุน Ernst Grant Mach ณ University of Applied Sciences Upper Austria (Wels Campus) ประเทศออสเตรีย