รายงานการวิจัย

การผลิตถ่านกัมมันต์จากถ่านหินลิกไนท์

(Production of Activated Carbon from Lignite Coals)

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

รองศาสตราจารย์ ดร.ชัยยศ ตั้งสถิตย์กุลชัย

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผู้ร่วมวิจัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มาลี ตั้งสถิตย์กุลชัย

สาขาวิชาเคมี สำนักวิชาวิทยาศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ.2542

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่สนับสนุนทุนอุดหนุนการวิจัยสำหรับโครงการวิจัยนี้ และการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยที่ให้ความอนุเคราะห์ตัวอย่างถ่านหินเพื่อใช้ในงานวิจัย

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์ซึ่งเป็นตัวดูดซับพื้นที่ผิวสูงจากถ่านหินลิกไนท์ โดยใช้กระบวนการกระตุ้นทางกายภาพซึ่งประกอบด้วยขั้นตอนการเตรียมถ่านชาร์โดยการให้ความร้อนแก่ถ่านหิน เพื่อไล่สารระเหยในบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจน (carbonization) ตามด้วยขั้นตอนการกระตุ้นถ่านชาร์ในเตาเผาแบบท่อด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำซึ่งเจือจางด้วยก๊าซไนโตรเจน สำหรับขั้นตอนการกระตุ้นตัวแปรที่ทำการศึกษาได้แก่ อุณหภูมิ (700-900 °C) เวลา (30-90 นาที) อัตราการเพิ่มความร้อน (5 และ 20 °C/นาที) ขนาดอนุภาคและแหล่งของถ่านหิน (แม่เมาะและลานนา) โดยถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จะนำไปวิเคราะห์องค์ประกอบโดยวิธี proximate analysis หาร้อยละผลผลิต หาลักษณะของเส้นไอโซเทอมการดูดซับ วัดพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนในช่วงขนาดต่าง ๆ รวมทั้งทดสอบความสามารถในการดูดซับฟีนอลจากสารละลายเทียบกับถ่านกัมมันต์การค้าซึ่งเตรียมจากกะลามะพร้าว

ผลการวิจัยพบว่าถ่านชาร์ที่เตรียมจากถ่านหินในช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 700 °C ถึง 800 °C จะให้ค่าคาร์บอนคงตัวสูงสุดประมาณ 50-55 % โดยน้ำหนัก ค่าร้อยละผลผลิตรวมของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้อยู่ในช่วง 20-50 % โดยน้ำหนัก โดยค่าร้อยละผลผลิตจะเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาและอุณหภูมิที่ใช้กระตุ้นมีค่าลดลง ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้มีค่าคาร์บอนคงตัวเพิ่มขึ้นถึงประมาณ 70% แต่ในขณะเดียวกันองค์ประกอบเถ้าก็มีค่ามากด้วย โดยมีค่าสูงสุดอยู่ที่ประมาณ 30% เมื่อกระตุ้นด้วย 25% ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะสูงสุดประมาณ 460 ตารางเมตรต่อกรัมที่ขนาดอนุภาคในช่วง 300-425 ไมโครเมตร สภาวะคาร์โบไนเซชันที่ 800 °C เป็นเวลา 60 นาทีและสภาวะการกระตุ้นที่ 900 °C เป็นเวลา 60 นาที ที่สภาวะนี้ถ่านกัมมันต์ที่ได้มีปริมาตรรูพรุนขนาดเล็ก 29% ขนาดกลาง 63% และขนาดใหญ่ 8% โดยมีปริมาตรรูพรุนรวมเท่ากับ 0.38 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัมและขนาดรูพรุนเฉลี่ยเท่ากับ 3.30 นาโนเมตร โดยรวมลักษณะรูพรุนของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้เป็นแบบรูพรุนขนาดเล็ก (micropores) คือขนาดเล็กกว่า 2 นาโนเมตร ซึ่งแสดงเส้นไอโซเทอมการดูดซับเป็นแบบ Type I แต่เมื่ออุณหภูมิการกระตุ้นเพิ่มจาก 800 °C เป็น 900 °C หรือใช้เวลาในการกระตุ้นนานขึ้นจะเกิดรูพรุนขนาดกลาง (mesopores) เพิ่มมากขึ้นทำให้ไอโซเทอมการดูดซับเปลี่ยนเป็นแบบ Type II นอกจากนั้นพบว่าเมื่ออุณหภูมิที่ใช้กระตุ้นสูงขึ้นค่าพื้นที่ผิวจำเพาะจะเพิ่มขึ้น แต่ที่อุณหภูมิคงที่พื้นที่ผิวจำเพาะจะเพิ่มขึ้นตามเวลาจนให้ค่าสูงสุดที่ประมาณ 60 นาที แต่ที่เวลานานกว่า 60 นาทีทั้งค่าพื้นผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนรวมจะมีค่าลดลง เป็นไปได้ว่าสาเหตุอาจเกิดจากการอุดตันของรูพรุนจากสารระเหยซึ่งอาจถูกปลดปล่อยออกมาเมื่อเวลานานขึ้น สำหรับผลของขนาดอนุภาคถ่านหินพบว่าเมื่อถ่านหินมีขนาดเล็กลงพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนรวมมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งอธิบายได้ว่าเป็นผลมาจากการเพิ่มขึ้นของ

พื้นที่ผิวต่อหน่วยน้ำหนักเมื่ออนุภาคมีขนาดเล็กลง ช่วยให้ปฏิกิริยาเคมีระหว่างคาร์บอนและสารกระตุ้นเกิดได้เร็วขึ้น สำหรับการกระตุ้นด้วยไอน้ำพบว่าให้ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะมากกว่า เมื่อกระตุ้นด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ประมาณ 10% และให้ขนาดรูพรุนเฉลี่ยใหญ่ขึ้นเล็กน้อย สำหรับผลของแหล่งถ่านหิน พบว่าถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากถ่านลานนาให้ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะสูงกว่าที่เตรียมจากถ่านหินแม่เมาะ โดยเฉพาะเมื่อใช้ 100%CO_2 ถ่านกัมมันต์จากลิกไนท์สามารถดูดจับฟีนอลจากสารละลายได้มากถึง 80% โดยน้ำหนัก หากความเข้มข้นเริ่มต้นของฟีนอลมีค่าน้อยกว่า 100 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อเทียบกับถ่านกัมมันต์การค้าที่นำมาทดสอบซึ่งเตรียมมาจากกะลามะพร้าว พบว่าถ่านกัมมันต์การค้ามีพื้นที่ผิวจำเพาะเท่ากับ 1197 ตารางเมตรต่อกรัมทำให้มีความสามารถในการดูดซับสารได้สูงกว่าถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากลิกไนท์ นอกจากนี้งานวิจัยนี้ได้เสนอวิธีการปรับสภาพโครงสร้างของถ่านหินลิกไนท์เพื่อช่วยให้การเตรียมถ่านกัมมันต์ด้วยกระบวนการทางกายภาพมีประสิทธิภาพในการเพิ่มพื้นที่ผิวจำเพาะสูงขึ้น

Abstract

This research project was aimed to study the preparation of activated carbon, a large surface area adsorbent, from lignite coal by physical activation process. The preparation method consisted of heating the raw coal under the nitrogen atmosphere, known as carbonization, followed by activating the char in a tube furnace using carbondioxide and water vapor mixed with nitrogen in appropriate proportions. The variables studied for the activation step were temperature in the range 700-900 °C , hold time from 30-90 minutes, heating rates of 5 and 20 °C/ min, particle size and two types of coals (Maemoh and Lanna seams). The activated carbon products were analyzed for the following : proximate analyses, percent yield, type of adsorption isotherm by gas adsorption method, specific surface area, and pore structure. Batch adsorption tests for removing phenol from solutions were also performed to compare the adsorptive capacity between activated carbon prepared from lignite and a commercial activated carbon prepared from coconut shell.

The results showed that coal char prepared under the temperature range from 700 to 800 °C gave the highest of percent fixed carbon of 50 to 55 weight percent. The overall product yield of activated carbon varied from 20 to 50 percent by weight and its value increased with decreasing the time and temperature of activation. On the quality of prepared activated carbon, its fixed-carbon content went up to about 70 percent but the ash content was also high with the maximum of about 30 percent. When activated with 25 % CO_2, maximum specific surface area of 460 m^2/g was obtained for coal with particle size of 300 to 425 micrometers, and for carbonization and activation conditions at 800 °C, 60 minutes and 900 °C, 60 minutes, respectively. In addition, the prepared activated carbon possessed the following pore volume distribution : 29% micropores, 63% mesopores and 8% macropores with total pore volume of 0.38 cm^3/g and the average pore size of 3.30 nanometers. Most of the activated carbon had pores of micropore sizes of smaller than two

nanometers, thus showing the type I - adsorption isotherm. However, as the activation temperature or the activation time were increased, the volume of mesopores tended to increase, causing the isotherm curve to change toward Type II isotherm.

Generally, increasing the activation temperature resulted in an increase in the specific area of activated carbon. The specific surface area was also found to increase with the time of activation up to about 60 minutes but decreased at longer times, possibly due to the blockage of pores caused by the additional release of volatile components. As to the effect of particle size, it was found that both specific surface area and total pore volume of activated carbon increased with decreasing particle size. This could be due to the corresponding increase in the surface area of coal particles which favored the gasification reaction during the activation step. The use of water vapor as an activating agent gave about 10% increase in the specific area of activated carbon as compared to the use of carbondioxide and also yielded slightly larger average pore size of the prepared carbon. Activated carbon prepared from Lanna coal gave higher specific area as compared to that from Maemoh coal, particularly when activated with pure CO_2. The adsorptive capacity of activated carbon prepared from lignite coal was able to remove phenol by as much as 80%, provided that the initial phenol concentration was lower than 80 mg/liter. The commercial activated carbon prepared from coconut shell had surface area of 1197 m^2/g which showed much higher adsorptive capacity as compared to activated carbon from coal. Methods of modifying the lignite coal structure prior to activation step were also proposed to achieve activated carbon with higher surface area.

สารบัญ

หน้า

กิตติกรรมประกาศ ..... ก
บทคัดย่อภาษาไทย ข1
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ค1
สารบัญ ง1
สารบัญตาราง ..... จ
สารบัญรูป ฉ1
บทที่ 1 บทนำ
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาการวิจัย 1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย 2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย 2
1.4 ระเบียบวิธีวิจัย 3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย 4
บทที่ 2 งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 5
2.2 โครงสร้างทางเคมีและรูพรุนของถ่านกัมมันต์ 7
2.3 วิธีการผลิตถ่านกัมมันต์ 11
2.4 กระบวนการดูดซับและการหาพื้นที่ผิว 19
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย
3.1 การเตรียมถ่านหินลิกไนท์ 27
3.2 การเตรียมถ่านชาร์ (carbonization) 27
3.3 การกระตุ้นถ่านชาร์ให้เป็นถ่านกัมมันต์โดยวิธีทางกายภาพ (physical activation) 27
3.4 การวัดสมบัติของถ่านหิน ถ่านชาร์ และถ่านกัมมันต์ 28
3.5 ความสามารถในการดูดซับของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้และของถ่านกัมมันต์ทางการค้า .. 29

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

4.1 ผลการวิเคราะห์แบบประมาณ 30
4.2 ผลของเวลาและอุณหภูมิต่อร้อยละผลผลิตรวม 32
4.3 ผลของเวลาและอุณหภูมิต่อลักษณะไอโซเทอมการดูดซับและลักษณะรูพรุน ของถ่านกัมมันต์ 32
4.4 ลักษณะพื้นผิวจากภาพถ่าย SEM 40
4.5 ผลของเวลาและอุณหภูมิ 40
4.6 ผลของอัตราการเพิ่มความร้อน 48
4.7 ผลของขนาดอนุภาคถ่านหิน 48
4.8 ผลของชนิดถ่านหิน 53
4.9 ผลของการกระตุ้นด้วยไอน้ำเทียบกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 53
4.10 ผลของร้อยละที่หายไปในช่วงกระตุ้นต่อค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ 53
4.11 ผลการดูดซับสารละลายฟีนอลของถ่านกัมมันต์ 60

บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลงานวิจัย 62
5.2 ข้อเสนอแนะ 64

บรรณานุกรม 65
ภาคผนวก ก. ประวัติผู้วิจัย 67

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 วัตถุดิบสำหรับการผลิตถ่านกัมมันต์ 13

ตารางที่ 2.2 สมบัติของวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์ 15

ตารางที่ 2.3 ลักษณะที่แตกต่างกันของการดูดซับทางกายภาพและทางเคมี 21

ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์แบบประมาณของถ่านหิน ถ่านชาร์ และถ่านกัมมันต์ 31

ตารางที่ 4.2 พื้นที่ผิวและลักษณะรูพรุนของถ่านชาร์ ถ่านกัมมันต์ และถ่านกัมมันต์ทางการค้า 41

ตารางที่ 4.3 สมบัติของถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยไอน้ำ (ไอน้ำ 50%+N_2 50%) และก๊าซ CO_2 (CO_2 25%+N_2 75%) อัตราการไหลรวมของก๊าซผสม 100 มิลลิลิตรต่อนาที อุณหภูมิการกระตุ้น 900 °C เวลาที่ใช้กระตุ้น 60 นาที อัตราการเพิ่มความร้อนของการกระตุ้น 20 °C/นาที สภาวะการเตรียมถ่านชาร์ 700 °C 40 นาที 58

ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบและเปรียบเทียบความสามารถการดูดซับสารละลายฟีนอลของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากลิกไนท์และถ่านกัมมันต์ทางการค้า 61

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1 โครงสร้างของผลึกแกรไฟต์แบบ hexagonal (a) และแบบ rhombohedral (b)..... 8

รูปที่ 2.2 โครงสร้างของถ่านกัมมันต์..... 9

รูปที่ 2.3 รูพรุนแบบต่าง ๆ ในถ่านกัมมันต์..... 10

รูปที่ 2.4 หมู่ฟังก์ชันต่าง ๆ บนผิวของถ่านกัมมันต์..... 12

รูปที่ 2.5 แผนผังสำหรับการผลิตถ่านกัมมันต์โดยทั่วไป..... 14

รูปที่ 2.6 แผนผังสำหรับการผลิตถ่านกัมมันต์แบบเป็นเม็ด..... 16

รูปที่ 2.7 แผนผังสำหรับการผลิตถ่านกัมมันต์ทั้งแบบกระตุ้นทางกายภาพ (แผนผังส่วนบน) และกระตุ้นทางเคมี (แผนผังส่วนล่าง)..... 18

รูปที่ 2.8 แผนผังสำหรับการผลิตถ่านกัมมันต์โดยวิธีกระตุ้นทางกายภาพ..... 20

รูปที่ 2.9 ชนิดของเส้นไอโซเทอมของการดูดซับทั้ง 6 แบบ..... 22

รูปที่ 4.1 ผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการกระตุ้นที่มีต่อร้อยละผลผลิตรวมของถ่านกัมมันต์ขนาดอนุภาค 20×30 mesh ที่สภาวะคาร์โบไนเซชัน : 700°C / 40 นาที / 20 °C / นาที และสภาวะกระตุ้น : 25 % CO_2 / 20°C / นาที..... 33

รูปที่ 4.2 เส้นไอโซเทอมการดูดซับของก๊าซไนโตรเจนที่ -196 °C บนถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากถ่านชาร์แม่เมาะ ขนาดอนุภาค 20×30 mesh ที่สภาวะคาร์โบไนเซชัน : 700 °C/40 นาที/20 °C / นาที และสภาวะกระตุ้น : (1) 800 °C/90 นาที (2) 800 °C /60 นาที (3) 900 °C/90 นาทีทั้งหมดใช้อัตราไหล CO_2 เท่ากับ 25 มิลลิลิตรต่อนาที (25% CO_2 +75% N_2).....34

รูปที่ 4.3 ผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการกระตุ้นที่มีต่อปริมาตรรูพรุนขนาดเล็ก ปริมาตรรูพรุนขนาดกลาง ปริมาตรรูพรุนขนาดใหญ่ และปริมาตรรูพรุนทั้งหมดของถ่านกัมมันต์ขนาดอนุภาค 20x30 mesh ที่สภาวะคาร์โบไนเซชัน : 700 °C/40 นาที / 20 °C/นาที และสภาวะกระตุ้น : 60 นาที/20 °C/นาที/25% CO_2..... 35

รูปที่ 4.4 ผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการกระตุ้นที่มีต่อปริมาตรรูพรุนขนาดเล็ก ปริมาตรรูพรุนขนาดกลาง ปริมาตรรูพรุนขนาดใหญ่ และปริมาตรรูพรุนทั้งหมดของถ่านกัมมันต์ขนาดอนุภาค 20x30 mesh ที่สภาวะคาร์โบไนเซชัน : 700 °C/40 นาที /20 °C / นาที และสภาวะกระตุ้น : 30 นาที/20 °C / นาที / 25 % CO_2..... 36

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.5 ผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการกระตุ้นที่มีต่อปริมาตรรูพรุนขนาดเล็ก ปริมาตรรูพรุนขนาดกลาง ปริมาตรรูพรุนขนาดใหญ่ และปริมาตรรูพรุนทั้งหมดของถ่านกัมมันต์ขนาดอนุภาค 20x30 mesh ที่สภาวะคาร์โบไนเซชัน : 700 °C/40 นาที /20 °C / นาที และสภาวะกระตุ้น : 90 นาที/20 °C / นาที / 25% CO_2..... 37

รูปที่ 4.6 ผลของเวลาที่ใช้ในการกระตุ้นที่มีต่อปริมาตรรูพรุนขนาดเล็ก ปริมาตรรูพรุนขนาดกลาง ปริมาตรรูพรุนขนาดใหญ่ และปริมาตรรูพรุนทั้งหมดของถ่านกัมมันต์ขนาดอนุภาค 20x30 mesh ที่สภาวะคาร์โบไนเซชัน : 700 °C / 40 นาที / 20 °C / นาที และสภาวะกระตุ้น : 800 °C/นาที / 20 °C / นาที / 25% CO_2..... 38

รูปที่ 4.7 ผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการกระตุ้นที่มีต่อปริมาตรรูพรุนขนาดเล็ก ปริมาตรรูพรุนขนาดกลาง ปริมาตรรูพรุนขนาดใหญ่ และปริมาตรรูพรุนทั้งหมดของถ่านกัมมันต์ขนาดอนุภาค 20x30 mesh ที่สภาวะคาร์โบไนเซชัน : 700 °C /40 นาที / 20 °C / นาที และสภาวะกระตุ้น : 900 °C/20 °C / นาที / 25% CO_2..... 39

รูปที่ 4.8 ภาพถ่าย SEM แสดงลักษณะพื้นผิวของ

(ก) ถ่านหินดิบแม่เมาะ

(ข) ถ่านชาร์แม่เมาะ ขนาดอนุภาค 20×30 mesh สภาวะคาร์โบไนเซชัน : 700 °C / 40 นาที/ 20 °C / นาที

(ค) ถ่านกัมมันต์แม่เมาะ ขนาดอนุภาค 20×30 mesh สภาวะคาร์โบไนเซชัน : 700°C/ 40 นาที / 20°C / นาที สภาวะกระตุ้น : 800°C / 60 นาที / 20°C / นาที / 25% CO_2..... 44

รูปที่ 4.9 ภาพถ่าย SEM แสดงลักษณะพื้นผิวของ

(ก) ถ่านหินดิบแม่เมาะ

(ข) ถ่านชาร์แม่เมาะ ขนาดอนุภาค 20×30 mesh สภาวะคาร์โบไนเซชัน : 800 °C 60 นาที 5 °C / นาที

(ค) ถ่านกัมมันต์แม่เมาะ ขนาดอนุภาค 20×30 mesh สภาวะคาร์โบไนเซชัน : 800°C 60 นาที 5°C / นาที สภาวะกระตุ้น : 900°C 60 นาที 5°C / นาที 25% CO_2..... 45

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.10 ภาพถ่าย SEM แสดงลักษณะพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ทางการค้า..... 46

รูปที่ 4.11 ผลของอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการกระตุ้นที่มีต่อพื้นที่ผิวจำเพาะของถ่านกัมมันต์จากถ่านชาร์แม่เมาะ ขนาดอนุภาค 20×30 mesh ที่สภาวะคาร์โบไนเซชัน : 700°C / 40 นาที /20 °C / นาที และสภาวะกระตุ้น : 20°C / นาที / 25% CO_2..... 47

รูปที่ 4.12 ผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการกระตุ้นที่มีต่อพื้นที่ผิวจำเพาะและค่าการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์ขนาดอนุภาค 20x30 mesh ที่สภาวะคาร์โบไนเซชัน : 700°C / 40 นาที / 20°C / นาที และสภาวะกระตุ้น : 60 นาที / 20°C / นาที / 25% CO_2..... 49

รูปที่ 4.13 ผลของอัตราการเพิ่มความร้อนที่มีต่อร้อยละผลผลิตรวมของถ่านกัมมันต์ขนาดอนุภาค 20x30 mesh ที่สภาวะคาร์โบไนเซชัน : 800°C / 60 นาที และสภาวะกระตุ้น : 900°C / 60 นาที /25% CO_2..... 50

รูปที่ 4.14 ผลของอัตราการเพิ่มความร้อนที่มีต่อพื้นที่ผิวจำเพาะของถ่านกัมมันต์ขนาดอนุภาค 20x30 meshที่สภาวะคาร์โบไนเซชัน : 800°C / 60 นาที และสภาวะกระตุ้น : 900°C / 60 นาที / 25% CO_2..... 51

รูปที่ 4.15 ผลของขนาดอนุภาคที่มีต่อร้อยละผลผลิตรวมของถ่านกัมมันต์ที่สภาวะคาร์โบไนเซชัน 800°C / 60 นาที / 5°C / นาที และ สภาวะกระตุ้น : 900°C /60 นาที / 5°C / นาที / 25% CO_2..... 52

รูปที่ 4.16 ผลของขนาดอนุภาคที่มีต่อพื้นที่ผิวจำเพาะของถ่านกัมมันต์ที่สภาวะคาร์โบไนเซชัน : 800°C / 60 นาที / 5°C / นาที และสภาวะกระตุ้น : 900°C / 60 นาที / 5°C / นาที /25% CO_2...54

รูปที่ 4.17 ผลของชนิดของถ่านหินที่มีต่อร้อยละผลผลิตรวมของถ่านกัมมันต์ขนาดอนุภาค 20x30 mesh ที่สภาวะคาร์โบไนเซชัน : 800°C / 60 นาที / 5°C / นาที และสภาวะกระตุ้น : 900°C/ 60 นาที/5 °C / นาที / 25% CO_2..... 55

รูปที่ 4.18 ผลของชนิดของถ่านหินที่มีต่อพื้นที่ผิวจำเพาะของถ่านกัมมันต์ขนาดอนุภาค 20x30 mesh ที่สภาวะคาร์โบไนเซชัน : 800°C / 60 นาที / 5 °C / นาที และสภาวะกระตุ้น : 900°C / 60 นาที / 5 °C / นาที /25% CO_2..... 56

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.19 ผลของชนิดของถ่านหินที่มีต่อพื้นที่ผิวจำเพาะของถ่านกัมมันต์ขนาดอนุภาค 20x30 mesh ที่สภาวะกระตุ้น : 800°C / 60 นาที / 5°C / นาที และสภาวะกระตุ้น : 900°C / 60 นาที / 5 °C/ นาที / 100% CO_2..... 57

รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละน้ำหนักที่หายไปในช่วงการกระตุ้นกับพื้นที่ผิวจำเพาะของถ่านกัมมันต์..... 59

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาการวิจัย

ถ่านกัมมันต์ (activated carbon) เป็นถ่านชนิดหนึ่งที่ผลิตได้จากกระบวนการทางเคมีความร้อน (thermochemical process) เป็นวัสดุที่มีความพรุนและพื้นที่ผิวสูง จึงเหมาะที่จะนำไปใช้ในการดูดสี ดูดกลิ่น รวมทั้งสารปนเปื้อนต่าง ๆ ตลอดจนใช้ในกระบวนการแยกสาร (separation process) ตัวอย่างอุตสาหกรรมที่ใช้ประโยชน์จากถ่านกัมมันต์ ได้แก่ อุตสาหกรรมอาหารและเครื่องดื่ม การทำน้ำให้บริสุทธิ์ อุตสาหกรรมผลิตไขมันและน้ำมัน โรงงานน้ำตาล อุตสาหกรรมผลิตเรซินสังเคราะห์ เป็นต้น

จากตัวเลขการนำเข้าถ่านกัมมันต์จากต่างประเทศรายงานโดยกรมศุลกากร[1] พบว่าสถิติการนำเข้ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องทุกปี ตัวอย่างปี พ.ศ. 2543 และ 2544 มีปริมาณการนำเข้าถ่านกัมมันต์ทั้งหมด คิดเป็นมูลค่าประมาณ 350 และ 475 ล้านบาทตามลำดับ ดังนั้นถ้าสามารถศึกษาวิจัยเพื่อผลิตถ่านกัมมันต์ที่มีคุณภาพจากวัสดุภายในประเทศได้ ในระยะยาวจะช่วยให้เกิดการพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตถ่านกัมมันต์ขึ้นใช้เองในประเทศได้อย่างพอเพียง เป็นการประหยัดเงินตราในการนำเข้าและสามารถสร้างขีดความสามารถในการพึ่งตนเองทางเทคโนโลยีได้อีกทางหนึ่ง

วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์ ได้แก่ วัสดุทุกชนิดที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ เช่น ไม้เนื้อแข็ง ไม้เนื้ออ่อน ซังข้าวโพด แกลบข้าว กะลามะพร้าว กะลาปาล์ม ชานอ้อย ขี้เลื่อย เปลือกและเมล็ดผลไม้ พีท ลิกไนท์ บิทูมินัส ยางมะตอย ถ่านไม้ น้ำมันดิบ และกากปิโตรเลียม เป็นต้น สำหรับประเทศไทยแหล่งวัตถุดิบสำคัญที่สามารถนำมาใช้ผลิตถ่านกัมมันต์ ได้แก่ วัสดุชีวมวลประเภทต่าง ๆ ซึ่งส่วนใหญ่เป็นวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรและถ่านหิน ข้อจำกัดของวัสดุชีวมวลคือ ปริมาณที่ผลิตได้จะไม่สม่ำเสมอขึ้นกับฤดูกาลอีกทั้งแหล่งของวัสดุชีวมวลเหล่านี้จะอยู่ค่อนข้างกระจัดกระจายไปตามพื้นที่เกษตรกรรมต่างๆ ทำให้มีปัญหาในการรวบรวมและขนส่งมาไว้ที่โรงงาน สำหรับถ่านหินนั้นประเทศไทยมีปริมาณถ่านหินสำรองรวมทั้งสิ้นประมาณ 1,400 ล้านตัน ในปี 2543 และ 2544 มีปริมาณการใช้ทั้งสิ้น 17.642 และ 19.93 ล้านตัน ตามลำดับ ในจำนวนนี้ 80% ใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้า 15% ใช้ในอุตสาหกรรมซีเมนต์ และอีก 5% ที่เหลือใช้ในอุตสาหกรรมอื่น เช่น กระดาษ, การผลิตเส้นใย, การผลิตปูนขาวและการบ่มใบยาสูบ เป็นต้น[2,3]

จะเห็นได้ว่าถ่านหินเป็นแหล่งพลังงานที่มีคุณค่าอย่างยิ่งต่อการพัฒนาประเทศโดยรวม ถือเป็นแหล่งพลังงานสำรองที่สำคัญและสามารถนำมาใช้ประโยชน์ต่อไปได้อีกเป็นเวลานาน อย่างไรก็ดี นอกเหนือจากการนำถ่านหินมาใช้ประโยชน์โดยการเผาไหม้เพื่อผลิตพลังงานความร้อนโดยตรงแล้ว ถ่านหินยังสามารถนำมาแปรสภาพเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ในด้านอื่น ๆ ได้อีกด้วย เช่น การผลิตถ่านหินโค้ก เพื่อใช้ในอุตสาหกรรมถลุงโลหะ การทำก๊าซเชื้อเพลิงและน้ำมันสังเคราะห์ และการทำถ่านกัมมันต์ เป็นต้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งการผลิตถ่านกัมมันต์จากถ่านหินเป็นเทคโนโลยีที่ไม่ยุ่งยากซับซ้อน แต่ต้องการวิธีการศึกษาที่เป็นระบบ เพื่อให้เข้าใจถึงสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการผลิตถ่านกัมมันต์ที่มีคุณภาพ งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาถึงการผลิตถ่านกัมมันต์จากถ่านหินลิกไนท์ เพื่อให้ได้ข้อมูลพื้นฐานที่จำเป็นต่อการผลิตในระดับอุตสาหกรรม ซึ่งเป็นเป้าหมายหลักของโครงการที่จะทำในขั้นตอนต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. ศึกษาการผลิตถ่านกัมมันต์จากถ่านลิกไนท์ โดยกระบวนการทางเคมีความร้อนและการกระตุ้นด้วยวิธีทางกายภาพในเตาเผาแบบท่อ (tube furnace)
2. ศึกษาผลของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีอิทธิพลต่อคุณภาพและปริมาณของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้ เช่น อุณหภูมิ ขนาดของอนุภาค และเวลาของการให้ความร้อน
3. ทดสอบสมบัติการดูดซับของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้ และเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ที่จำหน่ายในท้องตลาด

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. ติดตั้งเตาเผาแบบท่อพร้อมระบบป้อนก๊าซ N_2 , CO_2 และไอน้ำ และชุดวัดอุณหภูมิ
2. บดย่อยถ่านหินตัวอย่างและคัดขนาดออกเป็นช่วงขนาดต่าง ๆ โดยใช้ชุดตะแกรงร่อน
3. นำถ่านหินที่คัดขนาดแล้วมาเผาในเตาเผาแบบท่อ โดยปล่อยก๊าซ N_2 ให้ไหลผ่านอย่างสม่ำเสมอเพื่อให้ได้ถ่านชาร์ที่มีสัดส่วนคาร์บอนคงตัวสูงขึ้น
4. นำถ่านชาร์ที่เตรียมได้ในข้อ 3 มากระตุ้นต่อในบรรยากาศของก๊าซ CO_2 และไอน้ำเพื่อให้ได้ถ่านกัมมันต์ที่มีความพรุนและพื้นที่ผิวสูงขึ้น
5. เปลี่ยนตัวแปรที่ศึกษาได้แก่ แหล่งถ่านหิน (อย่างน้อย 2 แหล่ง) อัตราเร็วของการให้ความร้อน เวลาการให้ความร้อน อุณหภูมิ และขนาดของถ่านหิน
6. นำถ่านที่เตรียมได้จากขั้นตอนที่ 3 และ 4 มาวิเคราะห์หาค่าการดูดซับไอโอดีน ค่าร้อยละผลผลิต ค่าการวิเคราะห์แบบประมาณ และค่าพื้นที่ผิวจำเพาะตลอดจนโครงสร้างรูพรุน

7. ถ่ายภาพตัวอย่างของถ่านชาร์และถ่านกัมมันต์โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน เพื่อตรวจสอบลักษณะโครงสร้างของพื้นผิว
8. ทดสอบและเปรียบเทียบความสามารถการดูดซับของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้กับถ่านกัมมันต์ที่ขายในท้องตลาด

1.4 ระเบียบวิธีวิจัย

วิธีการศึกษาประกอบด้วยขั้นตอนหลัก 3 ขั้นตอนดังนี้

1. <u>ขั้นตอนการเตรียมถ่านชาร์</u> (Carbonization)

   ทำโดยการเผาถ่านหินในบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจน (N_2) โดยใช้เตาเผาแบบท่อเพื่อไล่สารระเหย (Volatite matter) ออกจากโครงสร้างของเนื้อถ่านหิน จะได้ถ่านที่มีองค์ประกอบคาร์บอนสูงขึ้นที่เรียกว่าถ่านชาร์ (Char)

2. <u>ขั้นตอนการกระตุ้นถ่าน</u> (Activation)

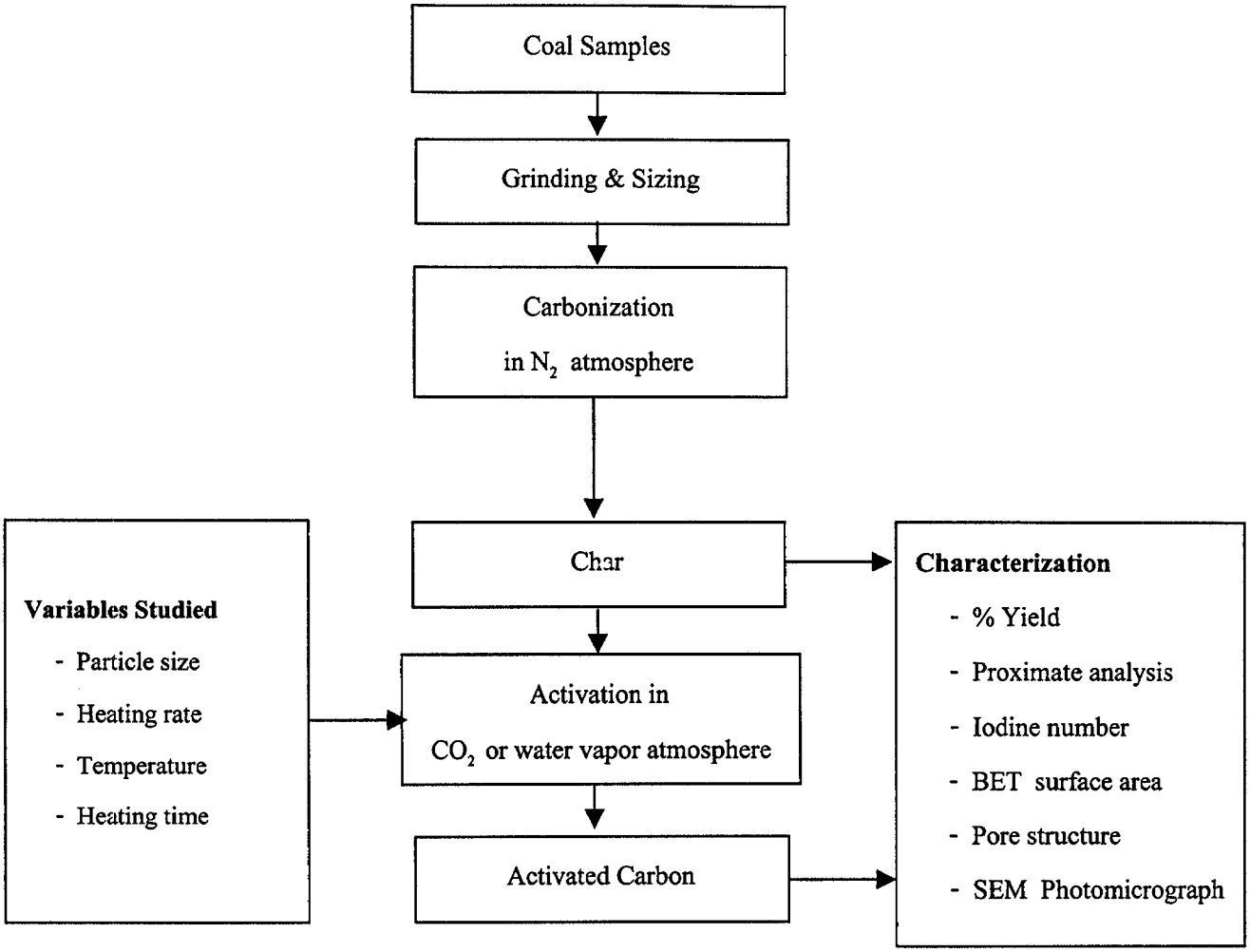
   ทำโดยการนำถ่านที่เตรียมไว้ในขั้นตอนที่ 1 มากระตุ้นต่อโดยการเผาให้ความร้อนในบรรยากาศของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และไอน้ำ ซึ่งเป็นการกระตุ้นทางกายภาพ เนื้อถ่านบางส่วนจะทำปฏิกิริยากับก๊าซ CO_2 และไอน้ำทำให้เกิดลักษณะรูพรุนภายในทำให้พื้นที่ผิวเพิ่มขึ้นกลายเป็นถ่านกัมมันต์ (activated carbon) ที่มีความสามารถในการดูดซับสาร

3. <u>การวัดสมบัติของถ่านชาร์และถ่านกัมมันต์</u> (Characterization of char and activated carbon)

   นำถ่านชาร์ในขั้นตอนที่ 1 และถ่านกัมมันต์ในขั้นตอนที่ 2 มาหาค่าต่าง ๆ ได้แก่

   - ร้อยละผลผลิต (%yield) ซึ่งเป็นเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักถ่านที่ได้เทียบกับน้ำหนักถ่านหินตั้งต้น
   - ค่าการดูดซับ (adsorption index) ในเทอมของตัวเลขไอโอดีน (Iodine number)
   - ค่าวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate analysis) เพื่อหา % เถ้า (ash), % ความชื้น (moisture), % คาร์บอนคงตัว (fixed carbon) และ % สารระเหย (volatile matter)
   - ลักษณะรูพรุนและค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ (specific surface area) เพื่อหาพื้นที่ผิวทั้งหมดต่อหน่วยน้ำหนักของถ่านกัมมันต์

ตัวแปรที่จะศึกษาโดยเฉพาะขั้นตอนการกระตุ้น ได้แก่ เวลาที่ใช้ในการเผา (heating time) ขนาดของอนุภาค (particle size) อัตราเร็วการให้ความร้อน (heating rate) และอุณหภูมิการเผา (temperature) แผนภูมิข้างล่างสรุปขั้นตอนการทดลอง



1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย

1. สร้างองค์ความรู้เพื่อให้เข้าใจถึงกระบวนการผลิตและสภาวะที่เหมาะสมเพื่อผลิตถ่านกัมมันต์ คุณภาพดีจากถ่านหินลิกไนท์
2. ช่วยบุกเบิกการใช้ประโยชน์จากถ่านหินในด้านอื่น นอกเหนือจากการเผาไหม้เพื่อผลิตพลังงานความร้อนเพียงอย่างเดียว
3. ได้ข้อมูลจำเป็นเพื่อใช้ในการศึกษาการผลิต ถ่านกัมมันต์ในระดับอุตสาหกรรมซึ่งจะส่งผลดีต่อการสร้างเทคโนโลยีการผลิตขึ้นใช้เองภายในประเทศ

บทที่ 2
งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เนื่องจากถ่านกัมมันต์สามารถผลิตได้จากวัตถุดิบชนิดต่าง ๆ มากมาย เช่น ถ่านหิน กะลามะพร้าว กะลาปาล์ม กะลาตาลโตนด เมล็ดในผลไม้ ยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์ เปลือกถั่ว และไม้ เป็นต้น และวัตถุดิบแต่ละชนิดยังแตกต่างกันไปตามแหล่งที่ได้มาอีกด้วย นอกจากนี้การผลิตถ่านกัมมันต์โดยวิธีกระตุ้นทางกายภาพยังสามารถใช้สารกระตุ้นหลายชนิด เช่น ไอน้ำ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ อากาศ ออกซิเจน และก๊าซเผาไหม้ โดยอาจใช้สารกระตุ้นเดี่ยว ๆ หรือใช้เป็นของผสมระหว่างก๊าซเหล่านี้ได้อีกด้วย งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการผลิตถ่านกัมมันต์โดยวิธีกระตุ้นทางกายภาพจึงได้มีผู้ศึกษาต่อเนื่องมาจนถึงปัจจุบันนี้ สำหรับงานวิจัยนี้ได้ศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์จากถ่านหิน โดยถ่านหินเป็นวัตถุดิบที่มีมากในธรรมชาติซึ่งทั่วโลกมีการใช้ถ่านหินในการผลิตถ่านกัมมันต์มากถึงประมาณ300,000 ตันต่อปี [4]

ถ่านหินมีหลายชนิดโดยแบ่งเป็นศักย์ต่างๆ ได้แก่ แอนทราไซท์ (anthracite) บิทูมินัส (bituminuous) และลิกไนท์ (lignite) เนื่องจากโครงสร้างทางเคมีและทางกายภาพของถ่านหินศักย์ต่าง ๆ เหล่านี้มีความแตกต่างกัน ขั้นตอนและรายละเอียดของการผลิตถ่านกัมมันต์จึงมีความแตกต่างกัน โดยทั่วไปถ่านหินบิทูมินัสนิยมใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตถ่านกัมมันต์ที่มีคุณภาพดี มีประสิทธิภาพการดูดซับสูง มีความหนาแน่นสูง และมีความแกร่งมากกว่า [5] แต่ถ่านหินบิทูมินัสมีสมบัติที่เรียกว่า caking ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อถ่านหินบิทูมินัสได้รับความร้อนในช่วงคาร์โบไนเซชัน (carbonization) ถ่านหินบิทูมินัสจะเกิดลักษณะมารวมกันและแสดงสถานะพลาสติก (plastic phase) ทำให้ถ่านชาร์ (char) ที่ได้มีรูพรุนน้อยกว่าที่ควรและเมื่อนำไปกระตุ้นก็จะได้ถ่านกัมมันต์ที่มีคุณภาพด้อยกว่าที่ควร ดังนั้นในกระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์จากถ่านหินบิทูมินัสรวมทั้งถ่านหินที่มีศักย์ใกล้เคียงกัน เช่น เซมิแอนทราไซด์ (semianthracite) และซับบิทูมินัส (subituminus) จึงได้มีผู้ศึกษาวิจัย [6-9] เกี่ยวกับการลดปัญหาของ caking ให้น้อยลงด้วยการทำออกซิเดชัน (preoxidation)ก่อนที่จะนำมาผ่านขั้นตอนการทำคาร์โบไนเซชันและการกระตุ้นในกระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์ พบว่าการทำออกซิเดชันก่อนซึ่งทำโดยการเผาวัตถุดิบในบรรยากาศของออกซิเจนหรืออากาศที่อุณหภูมิประมาณ 200 - 250 °C สามารถลดปัญหา caking ที่จะเกิดในขั้นตอนคาร์โบไนเซชันลงได้ มีผลทำให้ถ่านกัมมันต์ที่ได้มีสมบัติพื้นที่ผิวและรูพรุนดีขึ้นกว่าเมื่อเทียบกับถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากถ่านหินที่ไม่ได้ผ่านการทำออกซิเดชันก่อนการผลิต

สำหรับถ่านหินศักย์สูง เช่น แอนทราไซท์นั้นพบว่าถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้จากถ่านหินแอนทราไซท์มีสมบัติที่ดีพอใช้ โดยมีความแข็ง มีพื้นที่ผิวสูงและมีปริมาตรรูพรุนขนาดเล็ก (micropores) มาก แต่ต้องใช้สภาวะในการเตรียม เช่น อุณหภูมิ ที่ค่อนข้างสูงกว่าในกระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์จากถ่านหินศักย์ต่ำกว่าทั้งนี้เนื่องมาจากโครงสร้างถ่านหินแอนทราไซท์มีโครงสร้างแบบเป็นอะโรมาติกที่ติดแน่น (condensed aromatics) จำนวนมากจึงมีความแข็งแรงคล้ายโครงสร้างของแกรไฟต์ที่มีความเสถียร [8] ตรงกันข้ามกับถ่านหินศักย์ต่ำ เช่น ถ่านหินซับบิทูมินัส และถ่านหินลิกไนท์ที่มีโครงสร้างแบบที่มีอะโรมาติกติดแน่นที่มีความหนาแน่นน้อยกว่า และมีออกซิเจนในปริมาณมากกว่า ทำให้โครงสร้างของถ่านหินศักย์ต่ำไม่แข็งแรงมากและทำให้มีความว่องไวสูงกว่าถ่านหินศักย์สูง ดังนั้นจึงไม่ต้องใช้สภาวะในการผลิตถ่านกัมมันต์ที่รุนแรงมาก แต่สมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากถ่านหินศักย์ต่ำเหล่านี้มักมีความแข็งน้อยกว่าและได้พื้นที่ผิวตลอดจนปริมาตรรูพรุนที่น้อยกว่าถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้จากถ่านหินศักย์สูง [10,11]

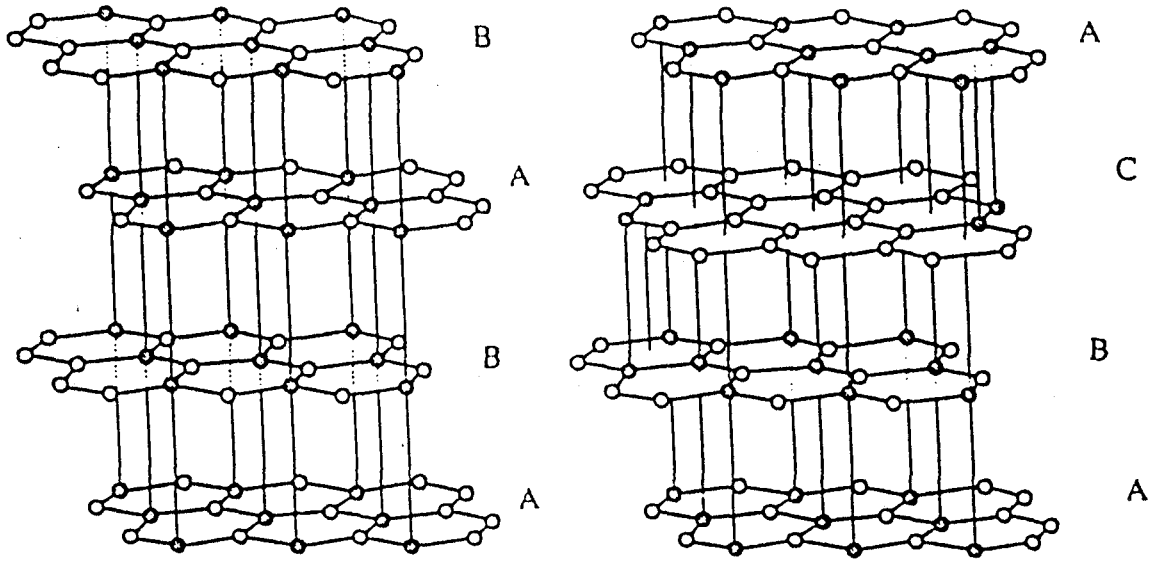
Munz-Guillena et al. [9], Oztas and Y.Yurum [12], Ceylan et al. [13] และ Marcilla et al. [14] ได้สนใจศึกษารายละเอียดในขั้นตอนการทำคาร์โบไนเซชันหรือไพโรไลซิส (Pyrolysis) ซึ่งเป็นขั้นตอนที่จะทำให้ได้ถ่านชาร์ (char) เพื่อจะได้นำไปทำการกระตุ้นต่อไป ถ่านชาร์ที่ได้นี้มีผลต่อสมบัติถ่านกัมมันต์ที่ได้ ดังนั้นรายละเอียดของขั้นตอนการศึกษาไพโรไลซิสซึ่งศึกษาถึงจลนศาสตร์ (kinetic study) ของไพโรไลซิสจึงมีประโยชน์ที่จะทำให้รู้ถึงสภาวะที่จะต้องใช้เพื่อให้ได้ถ่านชาร์ที่มีสมบัติที่ดี สำหรับเครื่องมือที่ใช้ศึกษามีทั้งแบบที่ใช้ pyrolysis reactor [14] และที่ใช้เครื่องมือ Thermogravimetric analysis (TGA) [9, 12, 13] ซึ่งผลการศึกษาพบว่าถ่านหินศักย์สูง เช่น แอนทราไซท์นั้นรูพรุนขนาดเล็กยังไม่มีการพัฒนาเกิดขึ้นมาในขั้นตอนไพโรไลซิส เนื่องจากมีพลังงานกระตุ้นที่สูงและมีค่า conversion ที่ต่ำมาก แต่ถ่านหินศักย์ต่ำกว่าจะพบว่ามีการพัฒนาเกิดรูพรุนขนาดเล็กและมีมากในขั้นตอนไพโรไลซิส อย่างไรก็ตามหากนำแอนทราไซท์ไปทำออกซิเดชันก่อนการทำไพโรไลซิสจะพบว่ามีรูพรุนขนาดเล็กเกิดขึ้นได้เช่นกัน นอกจากนี้ยังมีการศึกษาในด้านผลของอัตราการให้ความร้อนในขั้นตอนไพโรไลซิส[14] พบว่าในการทำไพโรไลซิสโดยการใช้อัตราการให้ความร้อนสูงทำให้ได้ถ่านชาร์ที่มีความว่องไวสูงกว่าและถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้นั้นมีพื้นที่ผิวสูงกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับการทำไพโรไลซิสโดยการใช้อัตราการให้ความร้อนต่ำกว่า

ปริมาณสารอนินทรีย์หรือสารแร่ (mineral matters) ที่อยู่ในถ่านหิน ซึ่งโดยทั่วไปวิเคราะห์เป็นปริมาณเถ้านั้น ได้มีผู้ทำการศึกษาผลของชนิดและปริมาณของสารอนินทรีย์ที่มีอยู่ในถ่านหินต่อปฏิกิริยาไพโรไลซิสและต่อสมบัติพื้นที่ผิวและรูพรุนของถ่านกัมมันต์ที่ได้ สำหรับ Oztas และ Yurum[12] ได้สรุปว่า calcium, iron และ magnesium ในรูปของแคทไอออนมีผลดีโดยทำหน้าที่เป็นตัวเร่ง (catalyst) ในปฏิกิริยาไพโรไลซิส แต่สารอนินทรีย์กลุ่ม silicates มีผลทำให้ปฏิกิริยาไพโรไลซิสเกิดช้าลง นอกจาก

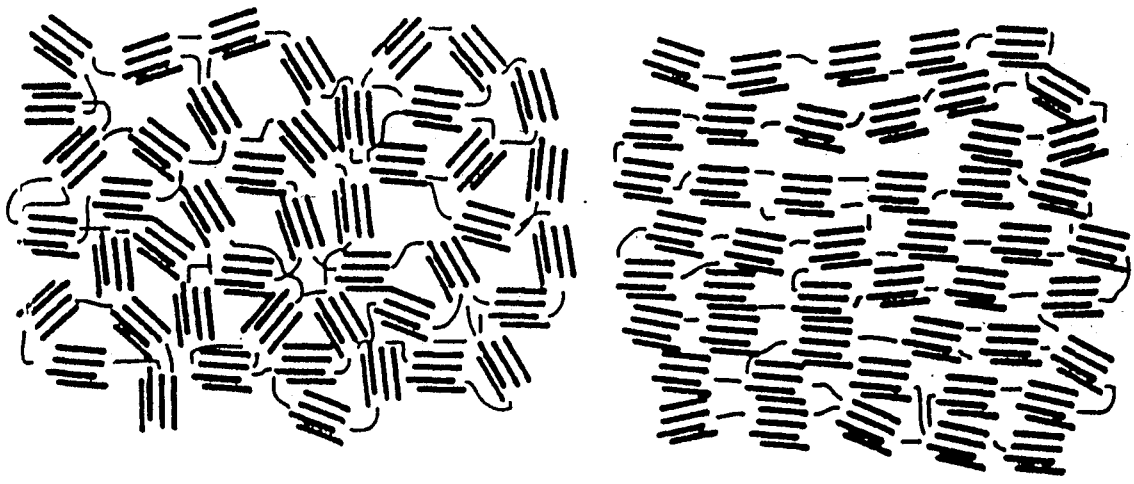
นี้จากการศึกษาของ Linares-Solano et. al [15] ได้ผลตรงกันกับของ Oztas และ Yurum [12] ในการสรุปว่าจากการลดปริมาณเถ้าในถ่านหินลงแล้วไม่ทำให้ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้มีสมบัติพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนต่างไปจากถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้จากถ่านหินดิบแต่อย่างใด อย่างไรก็ตามการมีสารอนินทรีย์ปนอยู่ในถ่านกัมมันต์ที่ได้ก็มีผลทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับต่อน้ำหนักลดลงไป

2.2 โครงสร้างทางเคมีและรูพรุนของถ่านกัมมันต์ [11,16]

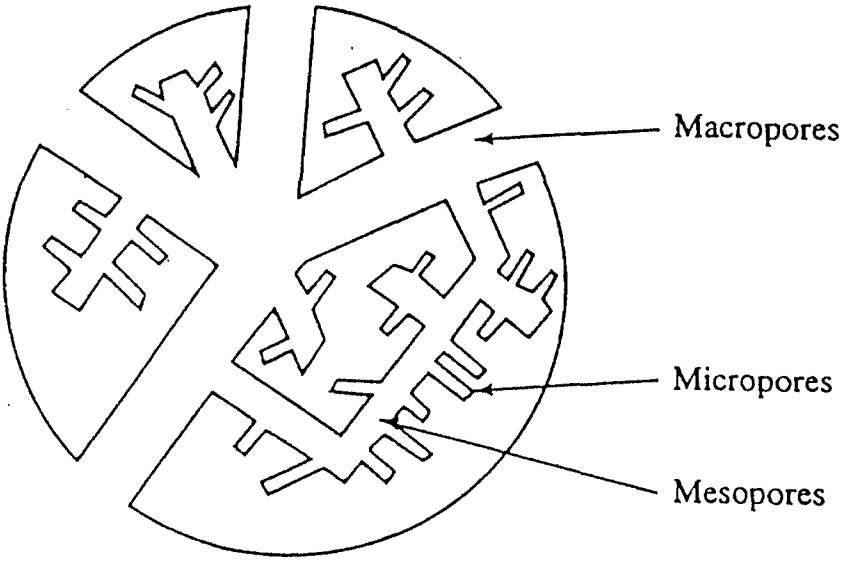
ถ่านกัมมันต์มีโครงสร้างเช่นเดียวกับแกรไฟต์แต่มีการจัดเรียงตัวเป็นระเบียบน้อยกว่าแกรไฟต์ แกรไฟต์มีโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 2.1 ซึ่งประกอบด้วยชั้นคาร์บอนอะตอมในรูปของวงเบนซีน (benzene ring) คาร์บอนอะตอมแต่ละอะตอมจะเกิดพันธะเดี่ยวกับคาร์บอนอีก 3 อะตอมในระนาบเดียวกัน อิเล็กตรอนของคาร์บอนอะตอมที่เหลืออีกหนึ่งอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ไปทั่วโครงสร้างเกิดเป็นเรโซแนนซ์ (resonance) เพื่อทำให้โครงสร้างของชั้นคาร์บอนเสถียรยิ่งขึ้น ส่วนแรงยึดเหนี่ยวระหว่างชั้นเป็นแรงแวนเดอร์วาลส์ (van der Waals) ซึ่งเป็นแรงที่อ่อนมาก ดังนั้น ในโครงสร้างของแกรไฟต์จะเกิดจุดบกพร่อง (defect) ในโครงสร้าง ณ จุดนี้ได้ง่าย โครงสร้างของถ่านกัมมันต์จึงมีโครงสร้างแกรไฟต์ที่ไม่สมบูรณ์โดยเกิดการเบี่ยงเบนในแนวฉากและซ้อนเหลื่อมในแนวระนาบที่มีทิศทางไม่แน่นอนและไม่เป็นระเบียบ ช่องว่างระหว่างชั้นจึงมีมาก (ดูรูปที่ 2.2) ช่องว่างนี้ทำให้เกิดโครงสร้างรูพรุน โดยลักษณะรูพรุนนั้นมีลักษณะไม่แน่นอน เช่น เป็นแบบคล้ายหลอดแคปิลารี (capillary pores) หรือแบบแผ่นขนาน (slit pores) บางรูพรุนมีลักษณะเปิดข้างหนึ่งปิดข้างหนึ่ง อาจมีรูปร่างรูพรุนเป็นรูปตัววี รูปคอขวด และรูพรุนที่มีอยู่ในถ่านกัมมันต์โดยทั่วไปจะมีขนาดต่าง ๆ กัน (ดูรูปที่ 2.3) รูพรุนที่มีขนาดใหญ่กว่า 50 นาโนเมตร (nm) เรียกว่า แมคโครพอร์ (macropores) หรือรูพรุนขนาดใหญ่พื้นที่ผิวน้อยกว่ารูพรุนที่มีขนาดอื่น แมคโครพอร์จึงเป็นเพียงทางส่งผ่านอนุภาคที่ถูกดูดซับเข้าไปในรูพรุนขนาดเล็กกว่าและมีผลต่ออัตราเร็วในการดูดซับ ส่วนรูพรุนที่มีขนาดอยู่ระหว่าง 2-50 นาโนเมตร เรียกว่า มีโซพอร์ (mesopores) หรือรูพรุนขนาดกลางมีพื้นที่ผิวมากกว่าแมคโครพอร์ และไมโครพอร์ (micropores) หรือรูพรุนขนาดเล็กซึ่งมีขนาดเล็กกว่า 2 นาโนเมตร มีพื้นที่ผิวมากที่สุด จึงมีความสำคัญที่สุดในการดูดซับ วัตถุดิบต่างชนิดกันและวิธีการผลิตถ่านกัมมันต์ที่แตกต่างกันจะทำให้เกิดการกระจายขนาดของรูพรุน (pore size distribution) แตกต่างกันไปด้วย



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของผลึกแกรไฟต์แบบ hexagonal (a) และแบบ rhombohedral (b)



รูปที่ 2.2 โครงสร้างของถ่านกัมมันต์



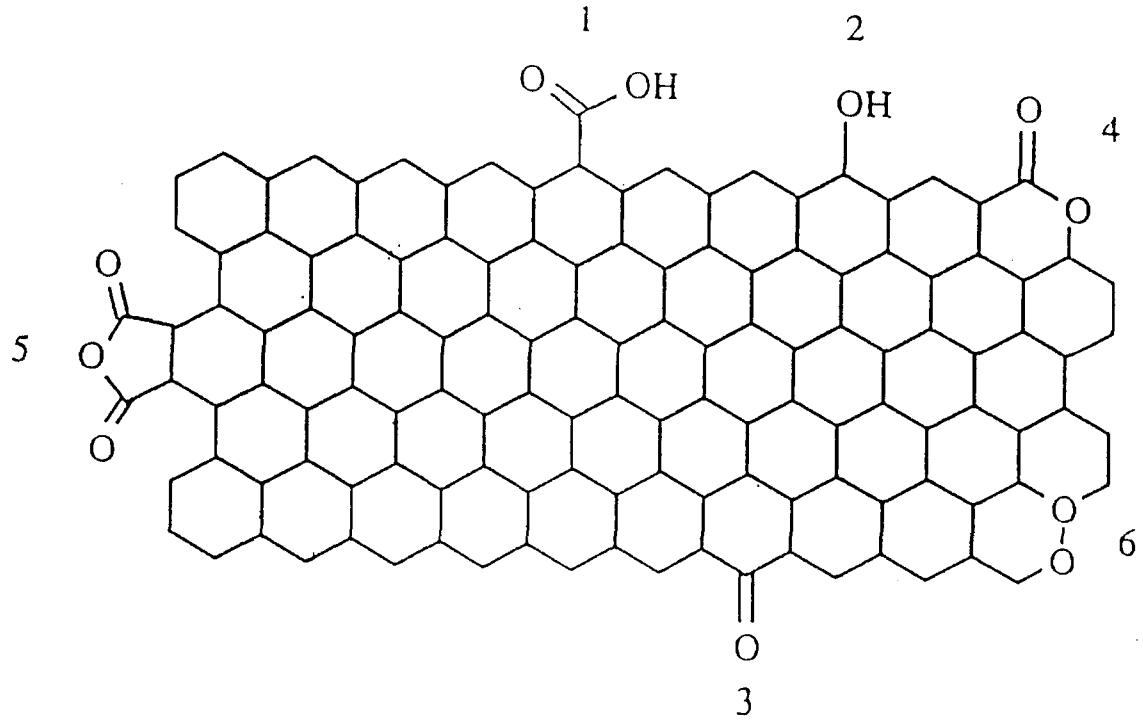
รูปที่ 2.3 รูพรุนแบบต่าง ๆ ในถ่านกัมมันต์

ความจุในการดูดซับนอกจากจะขึ้นกับพื้นที่ผิวแล้วยังขึ้นกับลักษณะและธรรมชาติของผิวด้วย ถ้าผิวของถ่านบริเวณดูดซับเป็นระนาบพื้นฐานซึ่งมีแต่คาร์บอนอะตอมไม่มีหมู่ฟังก์ชัน (functional group) อื่นๆ การดูดซับจะเกิดจากแรงแวนเดอร์วาลส์ หรืออาจเกิดจากไพอิเล็กตรอน (π electron) ซึ่งแรงยึดเหนี่ยวทั้งสองแบบนี้เป็นแรงที่ค่อนข้างอ่อน แม้ว่าจะดูดซับได้แต่โมเลกุลของสารถูกดูดซับจะหลุดออกได้ง่าย แต่ถ้าผิวของถ่านบริเวณดูดซับมีหมู่ฟังก์ชันอยู่ด้วยการดูดซับจะเกิดจากแรงยึดเหนี่ยวที่แข็งแรงกว่าโมเลกุลของสารถูกดูดซับจะหลุดออกยากกว่า รูปที่ 2.4 แสดงหมู่ฟังก์ชันบนผิวของถ่านกัมมันต์ซึ่งมีทั้งพวกออกไซด์ของกรด เช่น หมู่ carbonyls, phenols, lactones, aldehydes, ketones เป็นต้น และพวกออกไซด์ของเบส เช่น หมู่ hydroxide, carbonate เป็นต้น หมู่ฟังก์ชันที่เป็นออกไซด์ของกรด สามารถดูดซับโมเลกุลที่เป็นเบสได้ดี ส่วนหมู่ฟังก์ชันที่เป็นออกไซด์ของเบสสามารถดูดซับโมเลกุลที่เป็นกรดได้ดี การมีหมู่ฟังก์ชันบนผิวของถ่านกัมมันต์เกิดจากอิเล็กตรอนอิสระ ซึ่งอยู่ในสภาพที่ไม่เสถียรและมีเวเลนซี่ไม่อิ่มตัว (unsaturated valencies) จึงพยายามที่จะเกาะกับอะตอมหรือโมเลกุลอื่น เช่น ออกซิเจนในอากาศ หรือ อะตอมอื่น ๆ ที่มีอยู่ในสารตั้งต้น การเกาะกับอะตอมหรือโมเลกุลอื่นเป็นพันธะทางเคมี ที่แข็งแรงและกลายเป็นออกไซด์เกิดเป็นหมู่ฟังก์ชันต่าง ๆ บนผิวของถ่านกัมมันต์ดังกล่าวข้างต้น

2.3 วิธีการผลิตถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์ผลิตได้จากวัตถุที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ เช่น กะลามะพร้าว เปลือกถั่ว แกลบ เมล็ดผลไม้ ยาง และถ่านหิน เป็นต้น ตารางที่ 2.1 แสดงปริมาณของการใช้วัตถุดิบชนิดต่าง ๆ ในการผลิตถ่านกัมมันต์ โดยทั่วไปกรรมวิธีการผลิตถ่านกัมมันต์ประกอบด้วยขั้นตอนใหญ่ ๆ 3 ขั้นตอน หลังจากการเลือกชนิดของวัตถุดิบที่จะใช้ ได้แก่ การเตรียมวัตถุดิบ การคาร์โบไนเซชัน (Carbonization) และการกระตุ้น (Activation) รายละเอียดแสดงในรูปที่ 2.5

การเลือกวัตถุดิบต้องดูจากสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ต้องการ, สมบัติของวัตถุดิบ (ดูตารางที่ 2.2) ตลอดจนวิธีที่จะทำการผลิตด้วย ส่วนในขั้นตอนการเตรียมวัตถุดิบนั้น จะนำวัตถุดิบมาบดและคัดขนาดก่อนที่จะนำไปทำคาร์โบไนเซชัน แต่สำหรับวัตถุที่มีความแข็งและเหนียวมากทำให้การบดวัตถุดิบทำได้ยาก อาจนำวัตถุดิบนั้นไปคาร์โบไนซ์ก่อนแล้วจึงนำมาบดและคัดขนาดต่อไป ถ้าวัตถุดิบมีลักษณะเป็นผงอาจนำมาทำเป็นเม็ดก่อน โดยใช้ตัวประสานเป็นสารที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ เช่น แป้ง น้ำมันเตา หรือ ทาร์ (tar) ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากกระบวนการคาร์โบไนเซชัน เมื่อทำเป็นเม็ดแล้วจึงนำไปทำคาร์โบไนเซชันและทำการกระตุ้นต่อไป ขั้นตอนการผลิตแสดงในรูปที่ 2.6

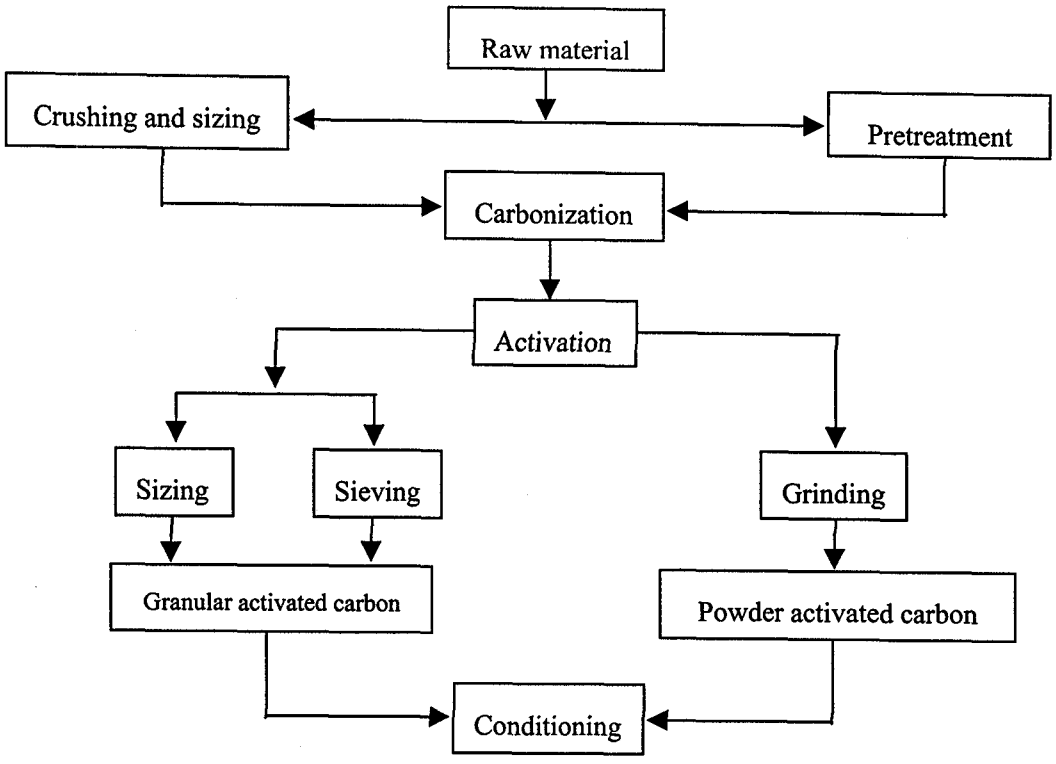


รูปที่ 2.4 หมู่ฟังก์ชันต่าง ๆ บนผิวของถ่านกัมมันต์

1. carboxylic acid
2. phenol
3. quinone
4. lactone
5. carboxyl anhydride
6. cyclic peroxide

ตารางที่ 2.1 วัตถุดิบสำหรับการผลิตถ่านกัมมันต์ [11]

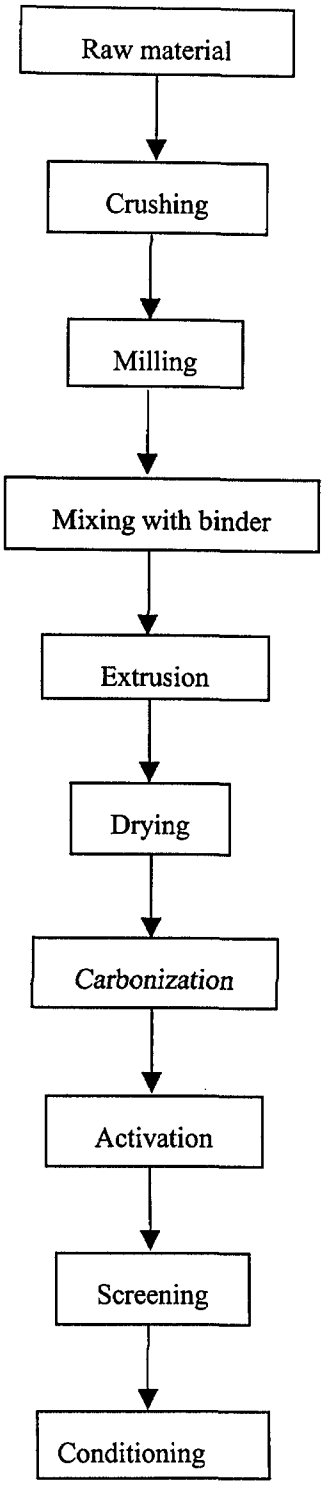
Activated carbon	**Raw Materials (tonnes per year)**
Wood	130,000
Coal	100,000
Lignite	50,000
Coconut Shell	35,000
Peat	35,000
Others	10,000



รูปที่ 2.5 แผนผังสำหรับการผลิตถ่านกัมมันต์โดยทั่วไป

ตารางที่ 2.2 สมบัติของวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์ [11]

Raw Material	Carbon (wt. %)	Volatiles (wt. %)	Density ($cm^3\ g^{-1}$)	Ash (wt. %)	Texture of Activated Carbon
Soft Wood	40-45	55-60	0.4-0.5	0.3-1.1	Soft, Large Pore Volume
Hard Wood	40-42	55-60	0.55-0.80	0.3-1.2	Soft, Large Pore Volume
Lignin	35-40	58-60	0.3-0.4	-	Soft, Large Pore Volume
Nutshells	40-45	55-60	1.4	-	Hard, Large Micropore Volume
Lignite	55-70	25-40	10.-1.35	5-6	Hard, Small Pore Volume
Soft Coal	65-80	20-30	1.25-1.50	2-12	Medium Hard Medium Pore Volume
Petroleum Coke	70-85	15-20	1.35	0.5-0.7	Medium Hard Medium Pore Volume
Semi-Hard Coal	70-75	10-15	1.45	5-15	Hard, Large Pore Volume
Hard Coal	85-95	5-10	1.5-1.8	2-15	Hard, Large Pore Volume



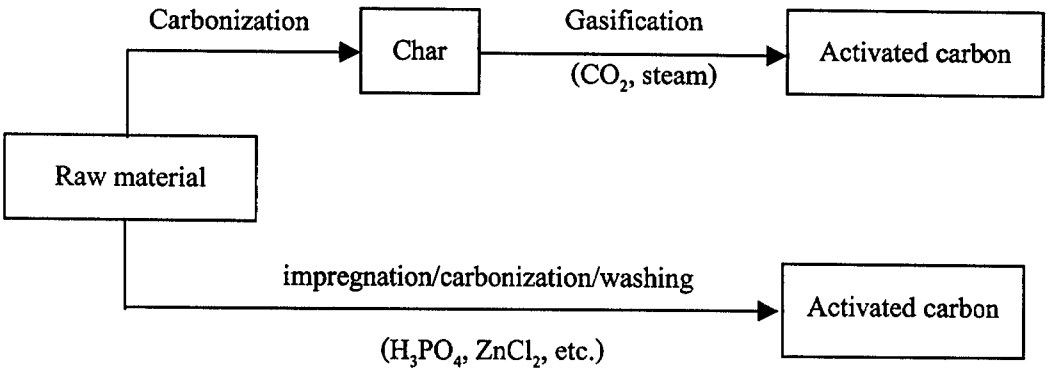
รูปที่ 2.6 แผนผังสำหรับการผลิตถ่านกัมมันต์แบบเป็นเม็ด

คาร์โบไนเซชันเป็นกระบวนการทางไพโรไลซิสทำโดยการเผาวัตถุดิบในที่อับอากาศที่อุณหภูมิ 200-500 °C ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์สามประเภทได้แก่ ถ่านที่มีลักษณะสีดำ เรียกว่า ชาร์ (char) ส่วนที่เป็นของเหลวเรียกว่าทาร์และก๊าซ คาร์โบไนเซชันเป็นขั้นตอนการพัฒนาโครงสร้างรูพรุนในวัตถุดิบโดยความร้อนทำให้เกิดการสลายตัวทางเคมีของสารที่ไม่ใช่คาร์บอน (เช่น ไฮโดรเจน, ออกซิเจน และไนโตรเจน) ออกมาในรูปของของเหลวและก๊าซมีผลให้ชาร์เป็นถ่านที่มีปริมาณคาร์บอนสูงขึ้นกว่าวัตถุดิบ แต่ยังมีความสามารถในการดูดซับต่ำเพราะยังมีทาร์ตกค้างอยู่ในช่วงรูพรุนหรือเกาะอยู่ตามผิวจึงจำเป็นต้องนำถ่านชาร์ไปผ่านกระบวนการกระตุ้นต่อไป ตัวแปรในการทำคาร์โบไนเซชันได้แก่ ธรรมชาติของวัตถุดิบ อุณหภูมิเวลาและอัตราการให้ความร้อน อุณหภูมิเป็นตัวแปรที่สำคัญเนื่องจากเป็นพลังงานที่ใช้ทำให้เกิดการแตกหักตรงบริเวณที่มีพันธะที่อ่อนหรือหมู่ที่หลุดออกได้ง่าย ทำให้ได้สารระเหยเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ที่มีโครงสร้างโมเลกุลหรือหมู่ที่มีขนาดเล็ก ๆ เช่น น้ำ แอมโมเนีย ทาร์ และก๊าซต่าง ๆ หลุดออกไป ส่วนที่เหลืออยู่เป็นถ่านชาร์ซึ่งมีโครงสร้างโมเลกุลแบบวงแหวนและอะโรมาติกหลักซึ่งคาร์บอนจะมีการจัดระเบียบของโครงสร้างมากขึ้นไปตามอุณหภูมิ ส่วนอัตราการให้ความร้อนนั้นมีความสำคัญต่อปริมาณและองค์ประกอบของสารระเหยที่ได้จากการทำคาร์โบไนเซชัน ถ้าอัตราการให้ความร้อนสูงปริมาณสารระเหยจะถูกปลดปล่อยอย่างรวดเร็ว คาร์บอนจะเรียงตัวเป็นระเบียบน้อยทำให้เกิดช่องว่างมากเป็นรูพรุนขนาดใหญ่กว่าเมื่อเทียบกับวัตถุดิบที่มีอัตราการให้ความร้อนต่ำ

โดยทั่วไปการกระตุ้นเป็นการทำให้คาร์บอนหรือถ่านมีความพรุนมากขึ้นและทำให้มีความสามารถในการดูดซับสูงขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจาก การเพิ่มพื้นที่ผิวและการทำให้ผิวมีความว่องไวมากขึ้น การเพิ่มพื้นที่ผิวนอกเหนือจากพลังงานความร้อนที่ทำให้เกิดการแตกหักพันธะหรือหมู่ที่หลุดออกได้ง่ายแล้ว ในปฏิกิริยาเคมีของการกระตุ้นยังกำจัดสารต่าง ๆ ที่ตั้งค้างอยู่ในช่องว่างระหว่างผลึกคาร์บอนออกไปจากบริเวณที่ทำหน้าที่ดูดซับอีกด้วย ส่วนการทำให้ผิวมีความว่องไวมากขึ้นเกิดจากปฏิกิริยาเคมีทำให้โมเลกุลบางกลุ่มหลุดออกไปและเกิดส่วนที่มีอำนาจดูดซับขึ้นมาแทน นอกจากนี้ปฏิกิริยาเคมีในการกระตุ้น ยังช่วยให้คาร์บอนจัดเปลี่ยนโครงสร้างใหม่ให้มีความว่องไวในการดูดซับสูงขึ้น

วิธีการกระตุ้นแบ่งออกเป็น 2 แบบ ได้แก่ วิธีกระตุ้นทางกายภาพ (physical activation) และวิธีกระตุ้นทางเคมี (chemical activation) รูปที่ 2.7 แสดงแผนผังของวิธีการผลิตทั้ง 2 แบบ

สำหรับวิธีกระตุ้นทางกายภาพซึ่งเป็นการผลิตถ่านกัมมันต์โดยที่ผิวคาร์บอนเกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ เช่น ให้มีรูพรุนขนาดต่าง ๆ ให้มีพื้นที่ผิวมากขึ้น และคาร์บอนมีการจัดเรียงโครงสร้างใหม่ซึ่งจะเพิ่มความสามารถในการดูดซับให้สูงขึ้น โดยทั่วไปสารที่ใช้ในการกระตุ้นทางกายภาพได้แก่ ไอน้ำ, CO_2, อากาศ, และ O_2 โดยใช้ร่วมกับการให้ความร้อน ตัวอย่างปฏิกิริยาเคมีของการกระตุ้นแสดงได้ดังนี้



รูปที่ 2.7 แผนผังสำหรับการผลิตถ่านกัมมันต์ทั้งแบบกระตุ้นทางกายภาพ (แผนผังส่วนบน) และกระตุ้นทางเคมี (แผนผังส่วนล่าง)

(i) $C_{(s)}+H_2O_{(g)} \rightarrow CO_{(g)}+H_{2_{(g)}}$ $\Delta H = +130.5\ kJ/mol$

(ii) $C_{(s)}+CO_{2_{(g)}} \rightarrow 2CO_{(g)}$ $\Delta H = +159\ kJ/mol$

(iii) $C_{(s)}+O_{2_{(g)}} \rightarrow CO_{2_{(g)}}$ $\Delta H = -406\ kJ/mol$

(iv) $2C_{(s)}+O_{2_{(g)}} \rightarrow 2CO_{(g)}$ $\Delta H = -123\ kJ/mol$

แผนผังขั้นตอนในการผลิตถ่านกัมมันต์โดยวิธีกระตุ้นทางกายภาพได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.8

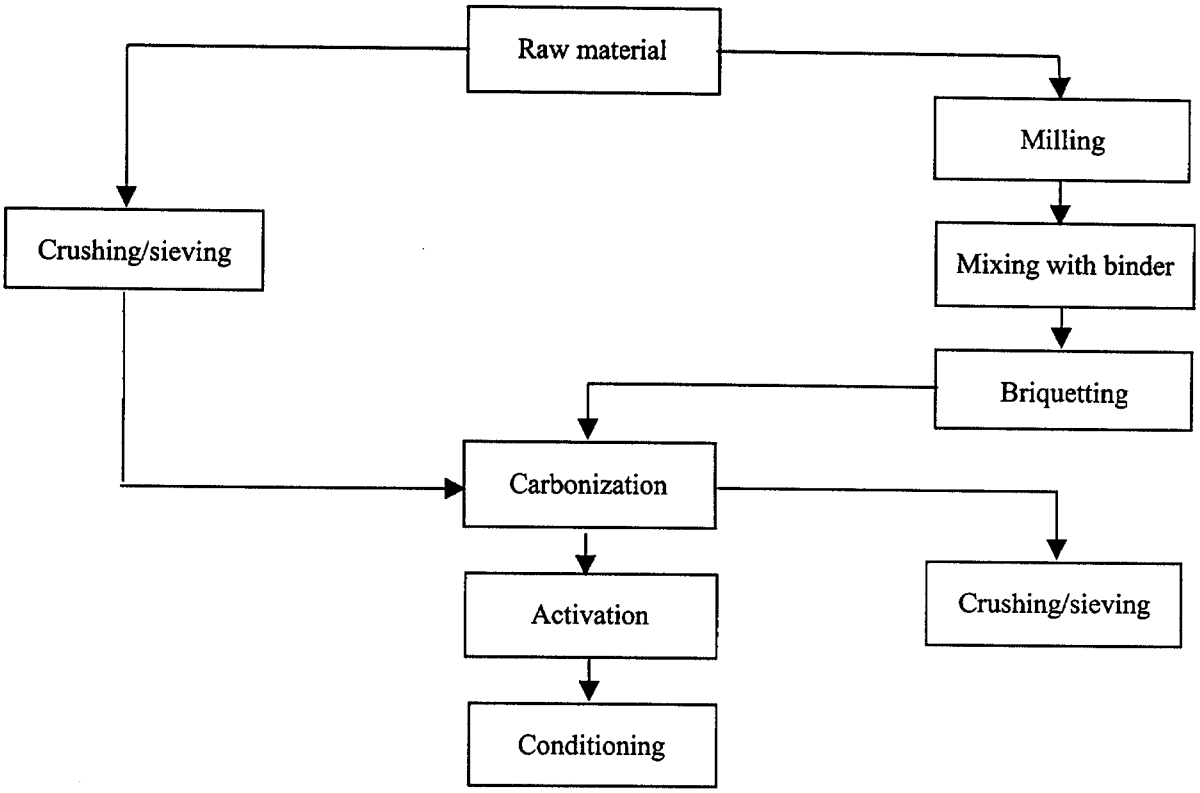
2.4 กระบวนการดูดซับและการหาพื้นที่ผิว [17,18]

โดยทั่วไปกระบวนการการดูดซับของก๊าซ แบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท ดังนี้

1. การดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption หรือ Physisorption)
2. การดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption หรือ Chemisorption)

1. <u>การดูดซับทางกายภาพ</u> เกิดจากแรงดึงดูดระหว่างอะตอมผิวหน้าของตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับ (adsorbate) ด้วยแรงยึดเหนี่ยวเป็นแบบ van der Waals จึงเป็นการจับกันที่อ่อนและไม่มีพันธะเคมีเกิดขึ้น ความร้อนของการดูดซับต่ำประมาณ 8.4 - 25.1 kJ/mol เป็นกระบวนที่คายความร้อน มีพลังงานกระตุ้นต่ำ (activation energy) และไม่มีการแตกหักของพันธะ ดังนั้นจึงสามารถเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็วในทันทีที่โมเลกุลเดินทางมาถึงผิวหน้า แต่กรณีที่ตัวดูดซับ (adsorbent) มีความพรุนสูง อัตราการดูดซับจะช้าลงเพราะถูกจำกัดด้วยอัตราเร็วของการแพร่ภายในรูพรุน ปริมาณของการดูดซับแบบนี้เป็นแบบไม่เฉพาะเจาะจง การดูดซับอาจเกิดขึ้นได้มากกว่าหนึ่งชั้นของโมเลกุลที่ถูกดูดซับ
2. <u>การดูดซับทางเคมี</u> มีพันธะเคมีเกิดขึ้นระหว่างอะตอมที่อยู่ผิวหน้ากับอะตอมหรือโมเลกุลที่ถูกดูดซับ จึงเป็นการจับที่แข็งแรง ความร้อนของการดูดซับมีค่า ประมาณ 62.8 - 83.7 kJ/mol การดูดซับแบบนี้เป็นแบบเฉพาะเจาะจง กล่าวคือ ขึ้นกับชนิดของก๊าซและชนิดของพื้นผิวของตัวดูดซับ การดูดซับก๊าซที่ผิวหน้าจะเป็นแบบชั้นเดียว monolayer การที่จะให้การดูดซับทางเคมีเข้าสู่สมดุล (equilibrium) นั้นจะต้องใช้เวลานานโดยเฉพาะที่อุณหภูมิต่ำ ผลของอุณหภูมิต่อปริมาณที่ดูดซับที่สภาวะสมดุลจะขึ้นกับชนิดของระบบ ปริมาณไอที่ถูกดูดซับจะมีค่ามากที่อุณหภูมิสูงกว่าจุดเดือดของสารนั้นมาก ปริมาณการดูดซับจะคงที่ในช่วงอุณหภูมิต่ำและมักจะมีค่าน้อยเนื่องจากอัตราเร็วของการดูดซับมีค่าต่ำทำให้ไม่เกิดการอิ่มตัว

ลักษณะที่แตกต่างกันของการดูดซับทางกายภาพและการดูดซับทางเคมีได้แสดงไว้ใน ตารางที่ 2.3



รูปที่ 2.8 แผนผังสำหรับการผลิตถ่านกัมมันต์โดยวิธีกระตุ้นทางกายภาพ

ตารางที่ 2.3 ลักษณะที่แตกต่างกันของการดูดซับทางกายภาพและทางเคมี

	Physical Adsorption	Chemical Adsorption
Heat of Asorption, kJ mol^{-1}	20 - 40 (comparable to heats of liquefaction)	> 80 (comparable to bulk-phase chemical reaction
Rate of Adsorption (at 273 K)	Fast	Slow
Temperature dependence with increasing temperature	Decreasess	Increase
Desorption	Easy by reducing, presure or increasing temperature	Difficult, high temperature is required to break bonds
Desorbed species	Non-specific	Very Specific
Monolayer coverage	Mono or multilayer dependening on condition	Monolayer

ไอโซเทอมของการดูดซับ (Adsorption isotherms) คือความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับในสารละลายกับปริมาณที่ดูดซับที่สมดุลเมื่ออุณหภูมิคงที่ สำหรับการดูดซับก๊าซไอโซเทอมของการดูดซับจะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปโดยเริ่มจากศูนย์เมื่อ $P/P^0 = 0$ จนถึง infinity เมื่อ $P/P^0 = 1$ ซึ่งเป็นจุดที่ผิวหน้าเปียกอย่างสมบูรณ์ นั่นคือ การเกิดการควบแน่นของไอของโมเลกุลที่ถูกดูดซับ

รูปร่างของไอโซเทอมจะขึ้นอยู่กับธรรมชาติของตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ ไอโซเทอมของการดูดซับเป็นการดูดซับบนพื้นผิวที่ขึ้นอยู่กับความดัน อุณหภูมิ และชนิดของสารที่ใช้เป็นตัวดูดซับ (adsorbent) และตัวถูกดูดซับ (adsorbate) ถ้าให้ n เป็นปริมาณของการดูดซับต่อน้ำหนักของตัวดูดซับจะแสดงความสัมพันธ์ตามสมการได้ดังนี้

$$n = f(P, T, \text{adsorbent, adsorbate}) \quad (2.1)$$

ถ้าให้อุณหภูมิคงที่ (Isothermal) และสำหรับตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับคู่หนึ่ง ๆ เขียนได้ว่า

$$n = f(P)_{T,\ \text{adsorbate, adsorbent}} \quad (2.2)$$

$$n = f(P/P^0)_{T,\ \text{adsorbate, adsorbent}} \quad (2.3)$$

เมื่อ P/P^0 = ความดันสัมพัทธ์ (Relative pressure)

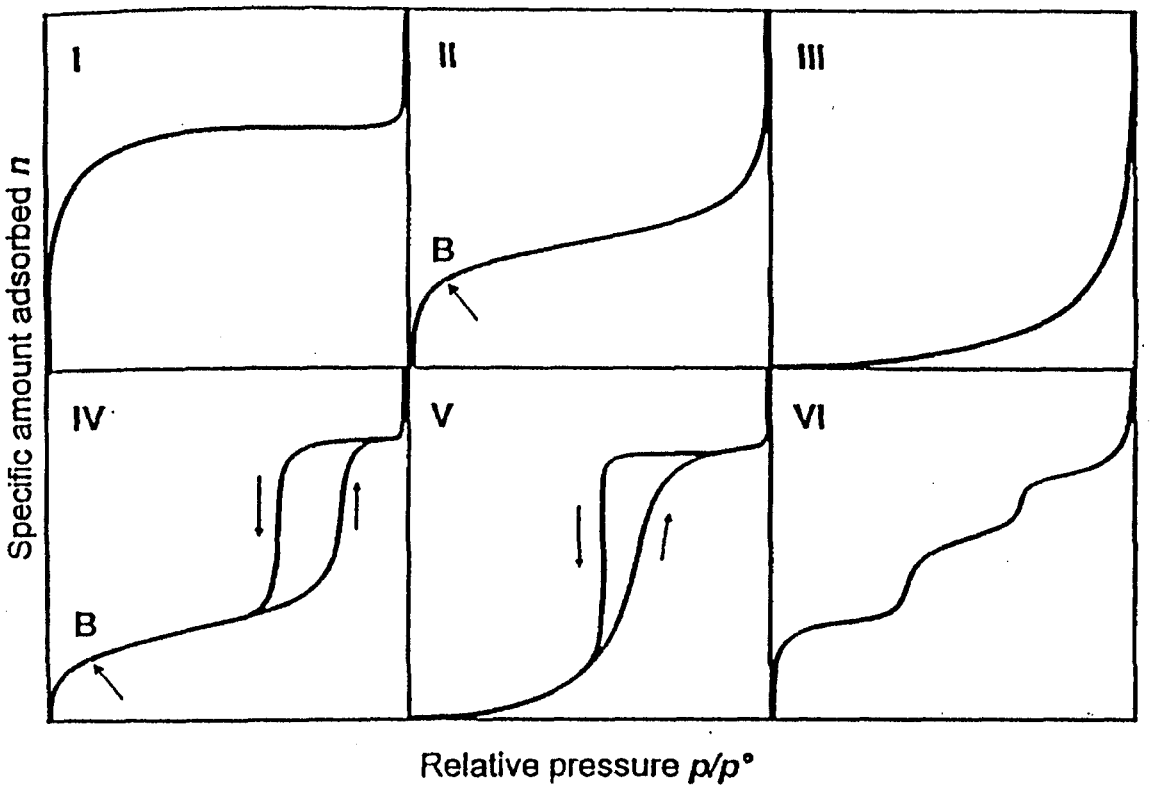
P = ความดันของก๊าซที่เป็นตัวถูกดูดซับ

P^0 = ความดันไออิ่มตัวของก๊าซที่เป็นตัวถูกดูดซับที่อุณหภูมินั้น ๆ

การวัดพื้นที่ผิวสามารถหาได้จากข้อมูลการดูดซับของก๊าซหรือของเหลวบนพื้นผิวของตัวดูดซับโดยใช้ประโยชน์จากการดูดซับแบบกายภาพ ซึ่งมีความหลากหลายขึ้นอยู่กับชนิดของตัวดูดซับ ชนิดของไอโซเทอมแบ่งออกได้เป็น 6 ชนิด โดย Brunauer, Deming, Deming and Teller (B.D.D.T system)[19] รูปที่ 2.9 แสดงไอโซเทอมการดูดซับประเภทต่าง ๆ

<u>ชนิดที่ 1 (Type I)</u> เรียกว่าแบบ Langmuir สำหรับการดูดซับที่เป็นแบบชั้นเดียว (monolayer) เป็นแบบที่ง่ายที่สุดแต่มักเกิดขึ้นกับวัสดุที่มีความพรุนต่ำหรือพบในตัวดูดซับที่มีพื้นที่ผิวภายนอกต่ำแต่มีรูพรุนส่วนใหญ่เป็นไมโครพอร์ เช่น ถ่านกัมมันต์ หรือ ซีโอไลต์ กรณีเช่นนี้ ปริมาตรของรูพรุนจะมีค่ามากกว่าปริมาตรที่ทำให้เกิดการดูดซับแบบ Monolayer การดูดซับแบบนี้จะพบได้ในการดูดซับที่ย้อนกลับได้ เป็นของแข็งที่มีโครงสร้างรูพรุนแบบไมโครพอร์ โดยก๊าซจะถูกดูดซับจนเต็มรูพรุนอย่างรวดเร็ว ตั้งแต่ $P/P^0 < 1$ รูพรุนมีขนาด < 2 nm

<u>ชนิดที่ 2 (Type II)</u> บางครั้งเรียกว่า Sigmoid หรือ S-Shaped isotherm มักจะเกิดกับวัสดุที่ไม่มีความพรุนหรือมีความพรุนขนาดใหญ่ (Macroporous) ตำแหน่ง B ซึ่งแสดงลักษณะคล้ายหัวเข่า (knee) เป็นตำแหน่งที่ผิวหน้าถูกคลุมแบบ Monolayer แล้ว และเริ่มการดูดซับแบบ Multilayer ที่ความดันสูง



รูปที่ 2.9 ชนิดของเส้นไอโซเทอมของการดูดซับทั้ง 6 แบบ

ขึ้นไป ตัวดูดซับเป็นแบบของแข็งที่ไม่มีรูพรุนหรือที่มีรูพรุนแบบแมคโครพอร์ ซึ่งจะเกิดการดูดซับแบบหลายชั้น โดยจะเกิด monolayer ก่อน ตามด้วย Multilayer ที่ P/P^0 ที่มีค่าสูง

ชนิดที่ 3 (Type III) มีรูปร่างเหมือนกระจกเว้า และไม่มีตำแหน่งที่เหมือนหัวเข่า (knee) ไอโซเทอมแบบนี้ไม่ค่อยพบมากนัก จะเกิดกับการดูดซับที่อ่อน ขนาดรูพรุนเป็นแบบของแข็งไม่มีรูพรุน (nonporous solid)และของแข็งที่มีไมโครพอร์แต่เป็นพวกที่มีแรงดึงดูดระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับที่อ่อนมากทำให้ดูดซับได้น้อย (curve เว้าเข้า) เกิด monolayer ที่ P/P^0 ต่ำ แต่เมื่อเกิด Multilayer จะเกิดแรงดึงดูดระหว่างตัวถูกดูดซับด้วยกันเองทำให้ดูดซับได้มากขึ้นที่ P/P^0 ที่มีค่าสูง

ชนิดที่ 4 (Type IV) มักจะพบในวัสดุที่มีขนาดรูพรุนระหว่าง 2 ถึง 50 นาโนเมตร ซึ่งจัดว่าเป็นมีโซพอร์ ในช่วงแรกซึ่งมีค่า P/P^0 ต่ำจะเหมือนกับไอโซเทอมชนิดที่ 2 แต่หลังจากนั้นค่าการดูดซับจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อค่า P/P^0 มาก ซึ่งเกิดจากการที่เกิดการควบแน่นแคปิลารี (Capillary Condensation) ขึ้นในรูพรุน ซึ่งทำให้เกิด Hysteresis loop ในช่วง desorption ซึ่งข้อมูลของการเกิดการควบแน่นในช่องคาปิลลารีสามารถนำมาคำนวณหาการกระจายขนาดของรูพรุน (pore-size distribution) ในของแข็งแบบมีโซพอร์ ได้ การควบแน่นแคปิลารีทำให้ desorption มีปริมาณดูดซับที่สูงกว่าการเกิด adsorption ที่ความดันเท่ากัน

ชนิดที่ 5 (Type V) เหมือนชนิดที่ 4 ต่างกันเพียงเกิดการควบแน่นในรูพรุน (มี hysteresis loop)ในกรณีนี้เกิดขึ้นเมื่อค่า P/P^0 สูงกว่า ไอโซเทอมแบบนี้จะพบไม่บ่อยนัก

ชนิดที่ 6 (Type VI) หรือที่เรียก stepped isotherm เกิดในของแข็งที่ไม่มีรูพรุนแบบเนื้อเดียว (homogeneous nonporous solid) โดยเกิด monolayer สมบูรณ์ก่อนแล้วจึงเกิดชั้นต่อ ๆ ไปจนสมบูรณ์

การดูดซับมีปัจจัยที่เกี่ยวข้องได้แก่ความดันหรือความเข้มข้นและชนิดของสารถูกดูดซับและสารดูดซับ การดูดซับโดยทั่วไปมักทำภายใต้อุณหภูมิคงที่และศึกษาถึงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของสารดูดซับกับความดันที่สภาวะสมดุลของการดูดซับ เส้นความสัมพันธ์ที่ได้เรียกว่า ไอโซเทอมของการดูดซับ (adsorption isotherm) ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะที่ขึ้นกับขนาดของรูพรุนของสารดูดซับ ข้อมูลจากไอโซเทอมของการดูดซับสามารถนำมาคำนวณหาพื้นที่ผิวและปริมาตรของรูพรุนและการกระจายขนาดของรูพรุนได้

ในกรณีการดูดซับแบบชั้นเดียว (monolayer adsorption) Langmuir[20]ได้เสนอสมการการดูดซับในรูป

$$\frac{P}{n} = \frac{P}{n_m} + \frac{1}{bn_m} \qquad (2.4)$$

เมื่อ P = ความดันของสารถูกดูดซับ

n = ปริมาณของสารถูกดูดซับที่สมดุลต่อหน่วยน้ำหนักของสารดูดซับที่ความดัน P (mole/g)

n_m = ปริมาณของสารถูกดูดซับที่เรียงแบบชั้นเดียวในลักษณะปกคลุมผิวของสารดูดซับ (mole/g)

b = สัมประสิทธิ์ของการดูดซับซึ่งขึ้นกับอุณหภูมิและมีลักษณะเฉพาะขึ้นกับชนิดของสารถูกดูดซับและสารดูดซับ

เมื่อพล็อตกราฟระหว่าง P/n กับ P จะได้กราฟเส้นตรงซึ่งจากค่าความชันจะหา n_m ได้ และนำค่า n_m มาหาพื้นที่ผิวจำเพาะ (S) ได้จากสมการ

$$S = n_m A_m L \tag{2.5}$$

เมื่อ S = พื้นที่ผิวจำเพาะ (m^2/g)

A_m = พื้นที่เฉลี่ยที่ถูกปกคลุมด้วยสารถูกดูดซับหนึ่งโมเลกุล, m^2

L = ค่าคงที่อะโวกาโดร (6.022×10^{23} molecules/mole)

สำหรับการดูดซับที่มีการดูดซับของสารถูกดูดซับเป็นแบบหลายชั้น (multilayer adsorption) นิยมใช้สมการของ Brunauer-Emmett-Teller (BET)[21] ดังนี้

$$\frac{P}{n(P^0 - P)} = \frac{1}{n_m C} + \frac{(C-1)}{n_m C} \cdot \frac{P}{P^0} \tag{2.6}$$

เมื่อ P^0 = ความดันไออิ่มตัวของสารถูกดูดซับ

n = ปริมาณสารถูกดูดซับที่ความดัน P (mole/g)

n_m = ปริมาณสารถูกดูดซับแบบชั้นเดียวที่ปกคลุมผิวทั้งหมดของสารดูดซับ

C = ค่าคงที่ไร้หน่วยที่มีความสัมพันธ์กับพลังงานการดูดซับโดยที่

$$C = \exp\left[\frac{\Delta H_A - \Delta H_L}{RT}\right] \tag{2.7}$$

เมื่อ ΔH_A = ความร้อนของการดูดซับแบบชั้นเดียว

ΔH_L = ความร้อนของการดูดซับแบบหลายชั้น (นั่นคือค่า molar heat of condensation)

R = ค่า gas constant

T = อุณหภูมิสัมบูรณ์

ดังนั้น $\Delta H_A - \Delta H_L$ = ความร้อนสุทธิของการดูดซับ

โดยการพล็อต $\frac{P}{n(P^0 - P)}$ กับ $\frac{P}{P^0}$ จะได้กราฟเส้นตรงที่มีค่าความชัน = $\frac{C-1}{n_m C}$ และมีค่าจุดตัด $\frac{1}{n_m C}$ ดังนั้นจะหาค่า C และ n_m ซึ่งสามารถนำไปคำนวณหาพื้นที่ผิวได้เหมือนในกรณีของ Langmuir

ในกรณีที่ต้องการหาปริมาตรและการกระจายขนาดของรูพรุนที่มีขนาดต่าง ๆ ในถ่านกัมมันต์จะต้องอาศัยข้อมูลจากไอโซเทอมของการดูดซับเพื่อนำไปคำนวณหาด้วยวิธีการต่าง ๆ เช่น t-plot, BJH, Horvath-Kawazoe, Dubinin, MP และ DFT เป็นต้น[18,22]

บทที่ 3
วิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 การเตรียมถ่านหินลิกไนท์

1. นำถ่านหินลิกไนท์จากเหมืองแม่เมาะมาบดหยาบด้วยเครื่องบดหยาบชนิด jaw crusher จากนั้นนำถ่านหินที่บดหยาบแล้วไปบดละเอียดด้วยเครื่องบดละเอียด แบบ ball mill
2. นำถ่านหินที่บดละเอียดแล้วมาคัดขนาดให้ได้ช่วงขนาด 20x30 mesh และ 40x50 mesh ด้วยเครื่องเขย่าตะแกรง (sieve shaker)
3. อบถ่านหินที่คัดขนาดแล้วที่อุณหภูมิ 110 °C (องศาเซลเซียส) จนกระทั่งน้ำหนักคงที่ แล้วทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้น (dessicator)

สำหรับถ่านหินลิกไนท์จากเหมืองลานนาได้เตรียมโดยวิธีเดียวกัน แต่คัดให้ได้ขนาด 20x30 mesh (850x600 ไมโครเมตร)

3.2 การเตรียมถ่านชาร์ (Carbonization)

1. ชั่งถ่านหินแม่เมาะขนาด 20x30 mesh และที่อบแห้งแล้วจำนวน 15 กรัม ใส่ในภาชนะเซรามิกสำหรับเผา
2. นำไปเผาในเตาเผาแบบท่อ (tube furnace รุ่น CTF 12/75 - ยี่ห้อ Carbolite, UK) ภายใต้บรรยากาศการไหลของก๊าซไนโตรเจน โดยใช้อัตราการไหลของก๊าซ 100 มิลลิลิตรต่อนาที โดยมีตัวแปรที่ศึกษา ได้แก่ อุณหภูมิและเวลาของการคาร์บอไนซ์
3. เมื่อครบตามเวลาที่กำหนด ปิดเตาโดยยังผ่านก๊าซไนโตรเจนแล้วรอจนกระทั่งอุณหภูมิภายในเตาลดลงต่ำกว่า 200°C จากนั้นจึงนำถ่านหินที่ผ่านการเผาให้เป็นถ่านชาร์แล้วออกจากเตา ทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้น จากนั้นนำมาชั่งน้ำหนักเพื่อนำไปหาร้อยละน้ำหนักที่หายไปและร้อยละผลผลิตที่ได้

3.3 การกระตุ้นถ่านชาร์ให้เป็นถ่านกัมมันต์โดยวิธีทางกายภาพ (Physical Activation)

1. นำถ่านชาร์ที่เตรียมโดยใช้ถ่านหินลิกไนท์จากเหมืองแม่เมาะด้วยวิธีการเตรียมถ่านในข้อ 3.2 มาชั่งน้ำหนัก จำนวน 6 กรัม แล้วเกลี่ยบาง ๆ วางบนตะแกรงสำหรับเผา

2. นำตะแกรงไปวางในเตาเผาแบบท่อโดยใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์หรือไอน้ำเป็นสารกระตุ้นจากนั้น ปรับอัตราไหลของสารกระตุ้นและก๊าซไนโตรเจนให้ได้องค์ประกอบที่ต้องการ สำหรับการกระตุ้นด้วย CO_2 และไอน้ำจะใช้อยู่ในรูปของก๊าซผสมได้แก่ 25% CO_2+75%N_2 และ 50%ไอน้ำ+50%N_2 ตามลำดับ เนื่องจากพบว่าสำหรับถ่านหินจากแหล่งเดียวกันความเข้มข้นของสารกระตุ้นมีผลค่อนข้างน้อยต่อคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ เช่น พื้นที่ผิวต่อหน่วยน้ำหนัก ก๊าซไนโตรเจนที่ใช้มีความบริสุทธิ์ 99.99% และ CO_2 มีความบริสุทธิ์ 99.8% อัตราการไหลรวมของก๊าซผสมคงที่ที่ 100 มิลลิลิตรต่อนาที ตัวแปรที่ศึกษา ได้แก่ อุณหภูมิ 700, 800 และ 900 °C อัตราการเพิ่มของอุณหภูมิ : 5 และ 20 °C ต่อนาที และเวลา : 30, 60 และ 90 นาที
3. เมื่อครบตามเวลาที่กำหนด ปิดเตา หยุดอัตราการไหลของสารกระตุ้น แล้วปรับอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจนเป็น 100 มิลลิลิตรต่อนาที รอจนกระทั่งอุณหภูมิภายในเตาลดลงต่ำกว่า 200 °C จึงนำถ่านที่ผ่านการกระตุ้นแล้วออกจากเตา ทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้น จากนั้นนำมาชั่งน้ำหนัก เพื่อนำไปคำนวณหาร้อยละน้ำหนักที่หายไปหรือร้อยละผลผลิตที่ได้

สำหรับถ่านชาร์ที่เตรียมได้จากถ่านหินแม่เมาะขนาด 40x50 mesh (300 - 425 ไมโครเมตร) และถ่านชาร์ที่เตรียมโดยใช้ถ่านหินลิกไนท์จากเหมืองลานนา ได้กระตุ้นโดยวิธีเดียวกันที่ 900 °C เป็นเวลา 60 นาที โดยใช้อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 5 °C ต่อนาที

3.4 การวัดสมบัติของถ่านหิน ถ่านชาร์ และถ่านกัมมันต์

การคำนวณและวัดสมบัติต่างๆ ของวัตถุดิบซึ่งได้แก่ถ่านหินและผลิตภัณฑ์ซึ่งได้แก่ถ่านชาร์และถ่านกัมมันต์มีดังนี้

1. การคำนวณหาร้อยละผลผลิตรวมของถ่านกัมมันต์ที่ได้ซึ่งมีค่าเท่ากับ $\frac{\text{น้ำหนักถ่านกัมมันต์}}{\text{น้ำหนักถ่านหินดิบ}} \times 100$ ส่วนร้อยละน้ำหนักรวมที่หายไปมีค่าเท่ากับ (100 - ร้อยละผลผลิตรวม)
2. การหาค่าการดูดซับไอโอดีน ใช้วิธีการวิเคราะห์ตามมาตรฐาน ASTM D4607
3. การวิเคราะห์แบบประมาณ (proximate analysis) เพื่อหาร้อยละปริมาณความชื้น ร้อยละปริมาณสารระเหย ร้อยละปริมาณเถ้าและร้อยละปริมาณคาร์บอนคงตัว วิเคราะห์โดยใช้เครื่อง Thermogravimatric analyzer (TGA) ยี่ห้อ Perkin Elmer รุ่น TGA7 โดยอิงวิธีวิเคราะห์ตามเอกสารอ้างอิง (23)

4. การหาพื้นที่ผิวจำเพาะและลักษณะรูพรุน วิเคราะห์โดยใช้เครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิวแบบอัตโนมัติ ยี่ห้อ Micromeritrics รุ่น ASAP2010 โดยใช้ก๊าซไนโตรเจนเป็นตัวถูกดูดซับที่อุณหภูมิ -196 °C ซึ่งค่าพื้นที่ผิวจำเพาะสามารถคำนวณได้จากสมการการดูดซับแบบ BET, ค่าปริมาตรรูพรุนขนาดเล็ก (micropore) คำนวณจากสมการการดูดซับแบบ t-plot, ค่าปริมาตรรูพรุนขนาดกลาง (mesopore) คำนวณจากสมการการดูดซับแบบ BJH, ค่าปริมาตรรูพรุนขนาดใหญ่ (macropore) คำนวณจากการหักผลรวมของปริมาตรรูพรุนขนาดเล็กกับปริมาตรรูพรุนขนาดกลางออกจากปริมาตรรูพรุนทั้งหมด, ค่าปริมาตรรูพรุนทั้งหมดหาได้จากปริมาตรที่ถูกดูดซับของตัวถูกดูดซับในสภาวะของเหลวที่ความดันสัมพัทธ์ 0.98 และขนาดรูพรุนเฉลี่ยคำนวณจากสมการ 4V/A โดยที่ V คือ ปริมาตรรูพรุนทั้งหมด A คือ พื้นที่ผิวจำเพาะจากสมการการดูดซับแบบ BET
5. การวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของถ่านหิน ถ่านชาร์ และถ่านกัมมันต์ใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน (Scanning Electron Microscope : SEM) ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM6400

3.5 ความสามารถในการดูดซับของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้และของถ่านกัมมันต์ทางการค้า

นำถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้และถ่านกัมมันต์ทางการค้าอย่างละ 0.3 กรัม มาทดสอบและเปรียบเทียบความสามารถการดูดซับสารละลายฟีนอลที่ความเข้มข้น 100, 200 และ 300 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้วิธีการดูดซับแบบกะ (Batch adsorption) ที่อุณหภูมิ 30 °C จนกระทั่งเข้าสู่สมดุลจากนั้นวัดค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายฟีนอลที่เหลือด้วยเครื่อง UV/visible spectrophotometer ยี่ห้อ Varian รุ่น Cary 1E แล้วนำไปเทียบกับกราฟมาตรฐานเพื่อหาความเข้มข้นของสารละลายฟีนอลที่เหลือ นำข้อมูลมาคำนวณประสิทธิภาพการกำจัดฟีนอลจากสารละลาย

<u>หมายเหตุ</u> ถ่านกัมมันต์ทางการค้าที่นำมาทดสอบความสามารถในการดูดซับเป็นถ่านกัมมันต์ที่เตรียมมาจากกะลามะพร้าว โดยใช้ไอน้ำเป็นสารกระตุ้น โดยได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท ซี.ไจแกนติคคาร์บอน จำกัด ซึ่งตั้งอยู่ที่ 67 หมู่ 2 ตำบลหนองบัวศาลา อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา

บทที่ 4
ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

ขั้นตอนแรกของการผลิตถ่านกัมมันต์โดยวิธีการกระตุ้นทางกายภาพ ประกอบด้วยการเตรียมถ่านชาร์จากถ่านหิน โดยนำมาให้ความร้อนในบรรยากาศของก๊าซ N_2 จากนั้นจึงนำถ่านชาร์ไปทำการกระตุ้นด้วย CO_2 หรือไอน้ำต่อไป จากการศึกษาการเตรียมถ่านชาร์ ในช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 500°-800 °C พบว่าร้อยละของน้ำหนักถ่านที่หายไปจะลดลงอย่างรวดเร็วในช่วง 20 นาทีแรก หลังจากนั้นน้ำหนักของถ่านจะมีค่าค่อนข้างคงที่ โดยร้อยละของน้ำหนักที่หายไปมีค่าเท่ากับ 38, 42, 46 และ 48 % สำหรับการทำคาร์โบไนเซชันที่อุณหภูมิ 500, 600, 700 และ 800 °C ตามลำดับ จากการวิเคราะห์องค์ประกอบของถ่านชาร์ โดยวิธีวิเคราะห์แบบประมาณ (proximate analysis) พบว่าค่าร้อยละของคาร์บอนคงตัว (% fixed carbon) มีค่ามากที่สุดในช่วงอุณหภูมิ 700-800 °C งานวิจัยนี้ได้ใช้ถ่านชาร์ที่เตรียมที่อุณหภูมิ 700 °C เวลา 40 นาที สำหรับการศึกษาผลของอุณหภูมิและเวลาในกระบวนการการกระตุ้นและได้ใช้ถ่านชาร์ที่เตรียมที่อุณหภูมิ 800°C เวลา 60 นาที สำหรับการศึกษาผลของอัตราการเพิ่มความร้อน ขนาดอนุภาคของถ่านชาร์และชนิดของถ่านหิน

4.1 ผลการวิเคราะห์แบบประมาณ

ตารางที่ 4.1 แสดงตัวอย่างผลการวิเคราะห์แบบประมาณของถ่านหิน ถ่านชาร์ และถ่านกัมมันต์ภายใต้สภาวะต่าง ๆ เห็นได้ว่าเมื่อเทียบกับถ่านหินดิบและถ่านชาร์ ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากถ่านหินแม่เมาะและถ่านหินลานนามีปริมาณคาร์บอนคงตัวเพิ่มขึ้นแต่มีปริมาณสารระเหยลดลง โดยสำหรับข้อมูลชุดนี้ ถ่านกัมมันต์จากถ่านหินลานนาให้ค่าร้อยละคาร์บอนคงตัวสูงสุดเท่ากับ 68% ส่วนร้อยละสารระเหยของถ่านกัมมันต์เตรียมที่สภาวะกระตุ้นต่าง ๆ มีค่าตั้งแต่ 8-10% โดยน้ำหนัก เมื่อเปรียบเทียบถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จากถ่านหินของงานวิจัยนี้กับถ่านกัมมันต์ทางการค้าซึ่งเตรียมจากกะลามะพร้าวแล้ว พบว่ามีสมบัติต่างกันมากดังจะเห็นได้ว่าถ่านกัมมันต์จากงานวิจัยนี้มีปริมาณคาร์บอนคงตัวต่ำกว่าและมีปริมาณเถ้าสูงกว่ามาก ขณะที่ปริมาณสารระเหยและความชื้นมีค่าใกล้เคียงกัน ปริมาณคาร์บอนและปริมาณเถ้าที่ต่างกันเนื่องมาจากความแตกต่างในธรรมชาติของโครงสร้างทางเคมีและทางกายภาพของถ่านหินและกะลามะพร้าวที่ใช้เตรียมถ่านกัมมันต์ เป็นที่สังเกตว่าปริมาณเถ้าในถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้มีค่าสูงสุดถึง 32% ซึ่งมีผลทำให้องค์ประกอบ

ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์แบบประมาณของถ่านหิน ถ่านชาร์ และถ่านกัมมันต์

ชนิดของตัวอย่าง	ร้อยละปริมาณความชื้น	ร้อยละปริมาณสารระเหย	ร้อยละปริมาณเถ้า	ร้อยละปริมาณคาร์บอนคงตัว
ถ่านหินแม่เมาะ	5	37	23	35
ถ่านหินลานนา	6	34	30	30
ถ่านชาร์ จากถ่านหินแม่เมาะ ขนาด 20×30 mesh เตรียมที่สภาวะ700°C 40นาที 20°C/นาที	2	20	28	50
ถ่านชาร์ จากถ่านหินแม่เมาะ ขนาด 20×30 mesh เตรียมที่สภาวะ800°C 60นาที 5°C/นาที	2	11	30	57
ถ่านกัมมันต์ จากถ่านชาร์แม่เมาะ ขนาด 20×30 mesh กระตุ้นที่สภาวะ800°C 30นาที 20°C/นาที 25%CO_2	3	8	29	60
ถ่านกัมมันต์ จากถ่านชาร์แม่เมาะ ขนาด 20×30 mesh กระตุ้นที่สภาวะ900°C 30นาที 20°C/นาที 25%CO_2	2	7	32	59
ถ่านกัมมันต์ จากถ่านชาร์แม่เมาะ ขนาด 20×30 mesh กระตุ้นที่สภาวะ900°C 60นาที 5°C/นาที 25%CO_2	2	8	16	44
ถ่านกัมมันต์ จากถ่านชาร์แม่เมาะ ขนาด 40×50 mesh กระตุ้นที่สภาวะ900°C 60นาที 5°C/นาที 25%CO_2	2	10	32	56
ถ่านกัมมันต์ จากถ่านชาร์ลานนา ขนาด 20×30 mesh กระตุ้นที่สภาวะ900°C 60นาที 5°C/นาที 25%CO_2	2	9	21	68
ถ่านกัมมันต์ทางการค้า*	4	6	2	88

*วัตถุดิบจากกะลามะพร้าว และใช้ไอน้ำเป็นตัวกระตุ้น

<u>หมายเหตุ</u> การวิเคราะห์แบบประมาณ (proximate analysis) ของถ่านหิน ถ่านชาร์ ถ่านกัมมันต์ และถ่านกัมมันต์ทางการค้าวิเคราะห์ตามมาตรฐาน ASTM โดยใช้เครื่อง Thermogravimetric analyzer (TGA)

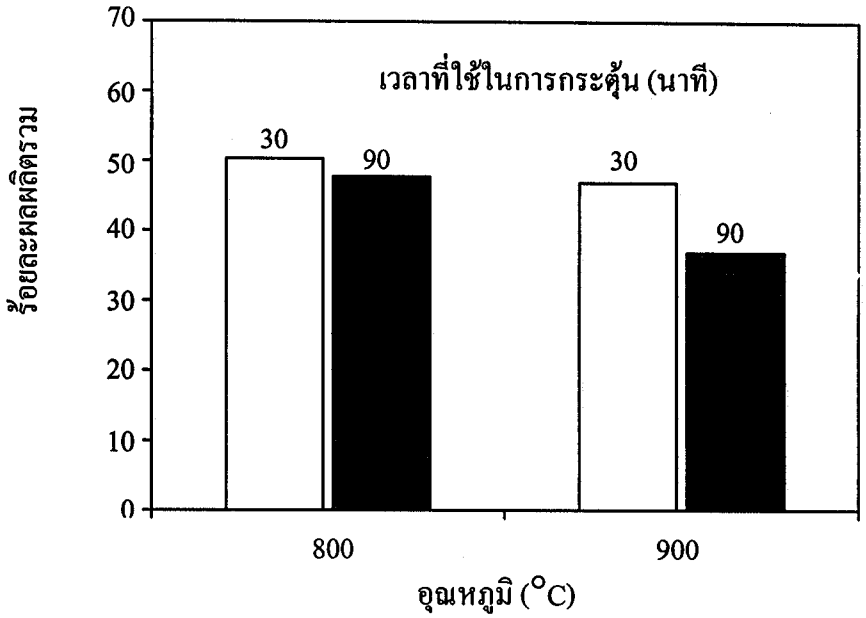
คาร์บอนต่อน้ำหนักน้อยกว่าที่ควรจะเป็น ดังนั้นวัสดุชีวมวล เช่น กะลามะพร้าว ซึ่งมีปริมาณเถ้าอยู่น้อยจึงมีข้อได้เปรียบในการนำไปใช้เตรียมเป็นถ่านดูดซับ

4.2 ผลของเวลาและอุณหภูมิต่อร้อยละผลผลิตรวม

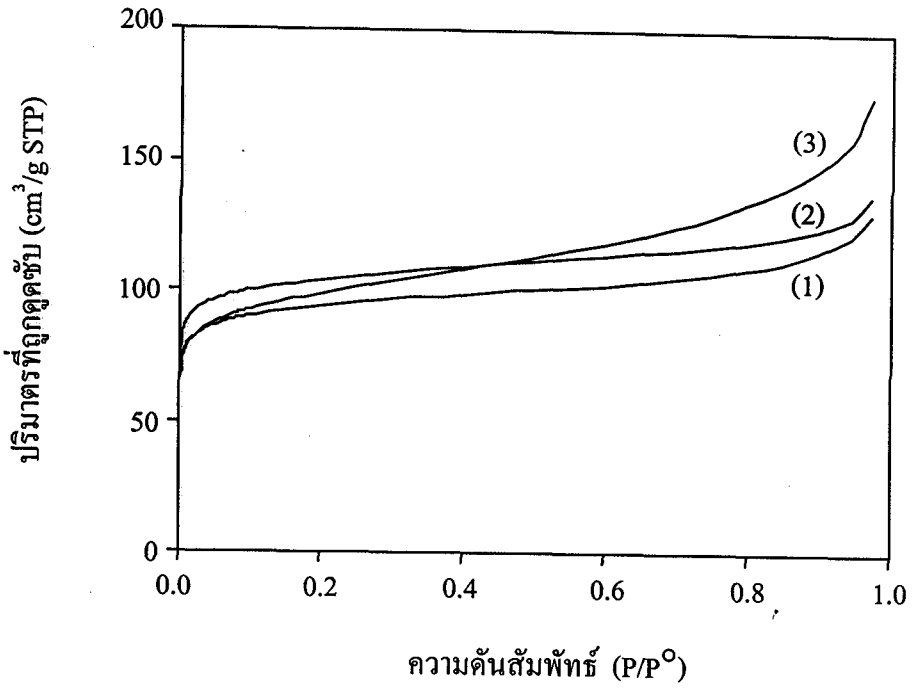
ค่าร้อยละผลผลิตรวมซึ่งเป็นร้อยละของอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ต่อน้ำหนักถ่านหินแสดงไว้ในรูปที่ 4.1 พบว่าที่สภาวะเวลาของการกระตุ้นคงที่ การกระตุ้นที่อุณหภูมิต่ำได้ร้อยละผลผลิตมากกว่าการกระตุ้นที่อุณหภูมิสูง และถ้าอุณหภูมิของการกระตุ้นคงที่การกระตุ้นที่เวลาสั้นจะมีร้อยละผลผลิตมากกว่าการกระตุ้นที่เวลานานกว่า ทั้งนี้เนื่องมาจากที่อุณหภูมิการกระตุ้นสูงและการใช้เวลาการกระตุ้นนาน จะทำให้เกิดปฏิกิริยาการกระตุ้น gasification ได้มาก ร้อยละน้ำหนักที่หายไปจึงมีมาก เป็นผลให้ร้อยละผลผลิตมีค่าน้อย ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่า การกระตุ้นที่อุณหภูมิต่ำกว่าและเวลาสั้นกว่ามีผลให้ได้ถ่านกัมมันต์ที่มีร้อยละผลผลิตสูงกว่า

4.3 ผลของเวลาและอุณหภูมิต่อลักษณะไอโซเทอมการดูดซับและลักษณะรูพรุนของถ่านกัมมันต์

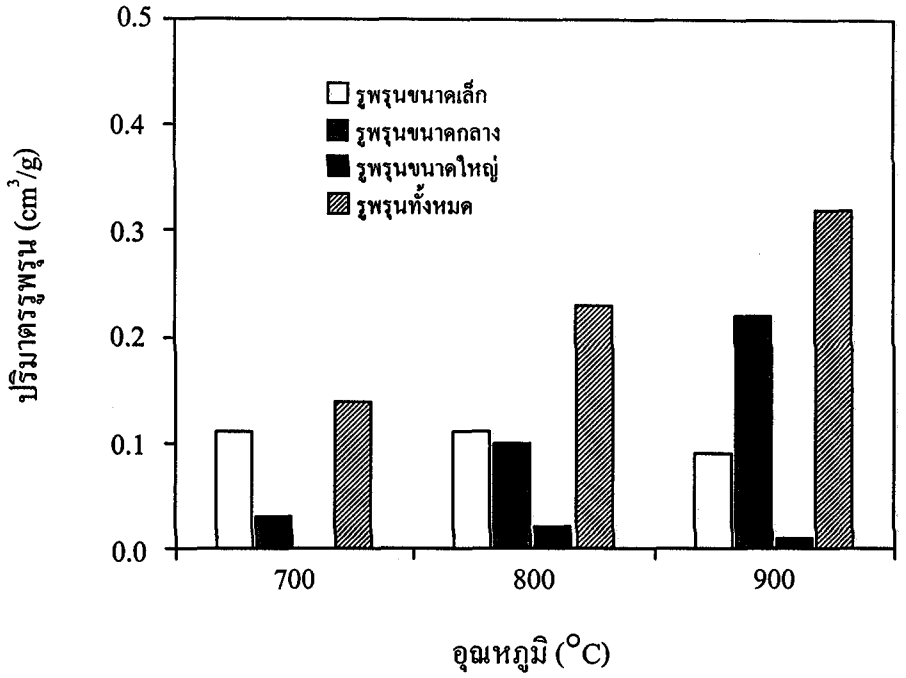
จากรูปที่ 4.2 ซึ่งแสดงลักษณะเส้นไอโซเทอมการดูดซับก๊าซไนโตรเจนบนถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ที่อุณหภูมิการดูดซับ -196°C พบว่าถ่านกัมมันต์เตรียมที่สภาวะกระตุ้นที่ 800°C มีลักษณะไอโซเทอมการดูดซับเป็นแบบ Type I เนื่องจากมีปริมาตรรูพรุนส่วนใหญ่เป็นแบบ micropores ส่วนถ่านกัมมันต์ที่มีสภาวะกระตุ้นที่ 900 °C มีลักษณะไอโซเทอมการดูดซับเป็นแบบ Type II เนื่องจากการที่อุณหภูมิกระตุ้นสูงขึ้นจะทำให้ถ่านกัมมันต์ที่ได้มีปริมาตรรูพรุนแบบ mesopores เพิ่มมากขึ้น ซึ่งปริมาตรรูพรุนแบบต่าง ๆ รวมทั้งปริมาตรรูพรุนทั้งหมดที่ได้จากถ่านกัมมันต์ที่มีสภาวะเวลาการกระตุ้นคงที่ (60 นาที) และอุณหภูมิต่างกันได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.3 จะเห็นได้ว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นปริมาตรรูพรุนแบบ micropores ค่อนข้างคงที่แต่ปริมาตรรูพรุนแบบ mesopores และปริมาตรรูพรุนทั้งหมดมีค่ามากขึ้น ในกรณีที่สภาวะเวลาการกระตุ้นคงที่ ที่เวลา 30 นาทีและ 90 นาทีพบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกัน (ดูรูปที่ 4.4 และ 4.5 ตามลำดับ) สำหรับรูปที่ 4.6 และ 4.7 แสดงผลของเวลาต่อปริมาตรรูพรุนแบบต่าง ๆ รวมทั้งปริมาตรรูพรุนทั้งหมดที่ได้จากถ่านกัมมันต์เตรียมที่สภาวะอุณหภูมิคงที่ 800°C และ 900°C ตามลำดับ เห็นได้ว่าเมื่อเวลานานขึ้นปริมาตรรูพรุนแบบ micropores ค่อนข้างคงที่ ส่วนปริมาตรรูพรุนแบบ mesopores และปริมาตรรูพรุนทั้งหมดมีแนวโน้มสูงขึ้นจากช่วงเวลา 30 นาทีถึง 60 นาที และลดลงเล็กน้อยเมื่อเพิ่มเวลาจาก 60 นาทีเป็น 90 นาที ซึ่งแสดงว่าเมื่อเวลาของการกระตุ้นนานขึ้นอาจเกิดการอุดตันของรูพรุนขนาดกลางด้วยสาเหตุบางอย่าง ทำให้ปริมาตรรูพรุนโดยรวมลดลงด้วย



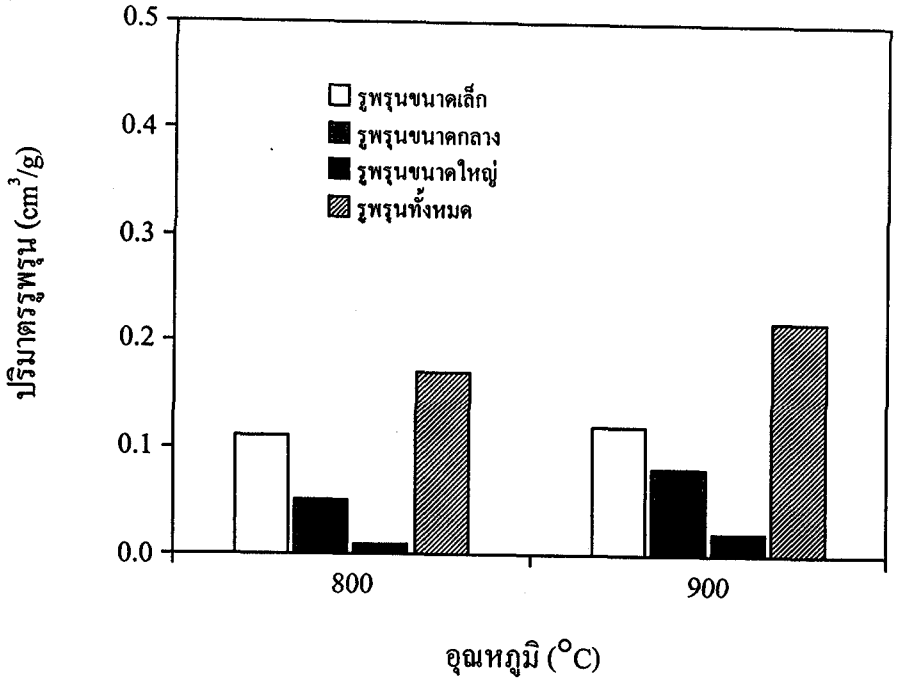
รูปที่ 4.1 ผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการกระตุ้นที่มีต่อร้อยละผลผลิตรวมของถ่านกัมมันต์ขนาดอนุภาค 20×30 mesh ที่สภาวะคาร์โบไนเซชัน : 700°C / 40 นาที / 20 °C / นาที และสภาวะกระตุ้น : 25 % CO_2 / 20°C / นาที



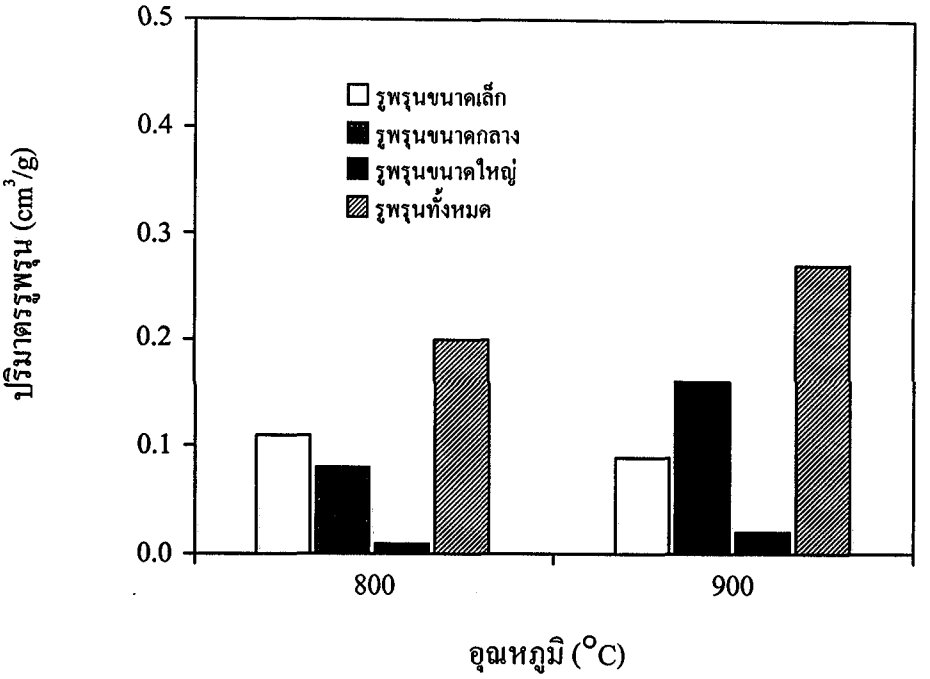
รูปที่ 4.2 เส้นไอโซเทอมการดูดซับของก๊าซไนโตรเจนที่ -196°C บนถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากถ่านชาร์แม่เมาะ ขนาดอนุภาค 20×30 mesh ที่สภาวะคาร์โบไนเซชัน : 700 °C/40 นาที/ 20 °C / นาที และสภาวะกระตุ้น : (1) 800 °C/90 นาที (2) 800 °C /60 นาที (3) 900 °C/ 90 นาที ทั้งหมดใช้อัตราไหล CO_2 เท่ากับ 25 มิลลิลิตรต่อนาที (25% CO_2 +75% N_2)



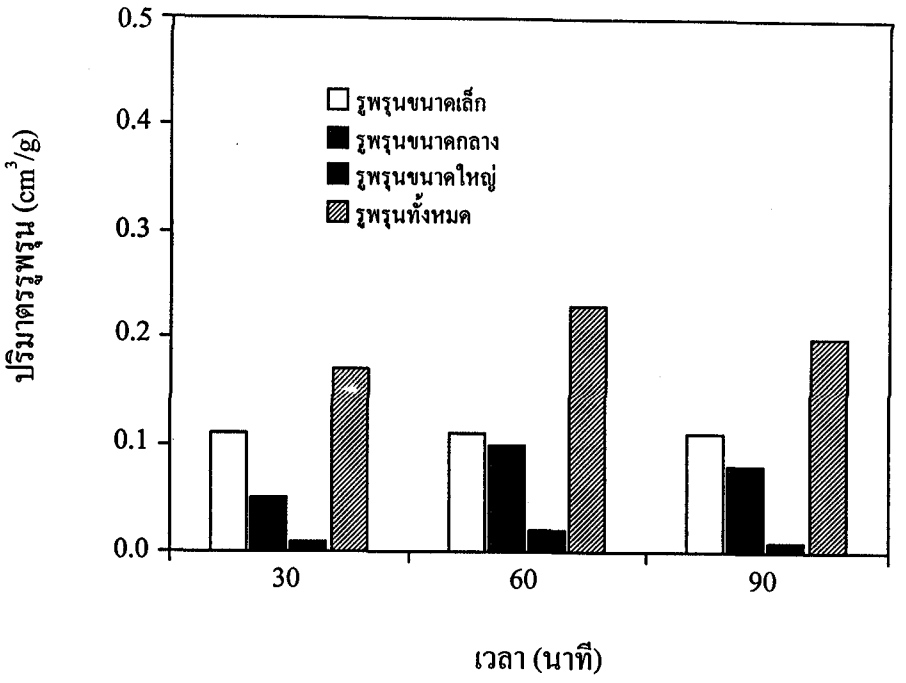
รูปที่ 4.3 ผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการกระตุ้นที่มีต่อปริมาตรรูพรุนขนาดเล็ก ปริมาตรรูพรุนขนาดกลาง ปริมาตรรูพรุนขนาดใหญ่ และปริมาตรรูพรุนทั้งหมดของถ่านกัมมันต์ขนาดอนุภาค 20x30 mesh ที่สภาวะคาร์โบไนเซชัน : 700 °C/40 นาที / 20 °C/นาที และสภาวะกระตุ้น : 60 นาที/ 20 °C/นาที/25% CO_2



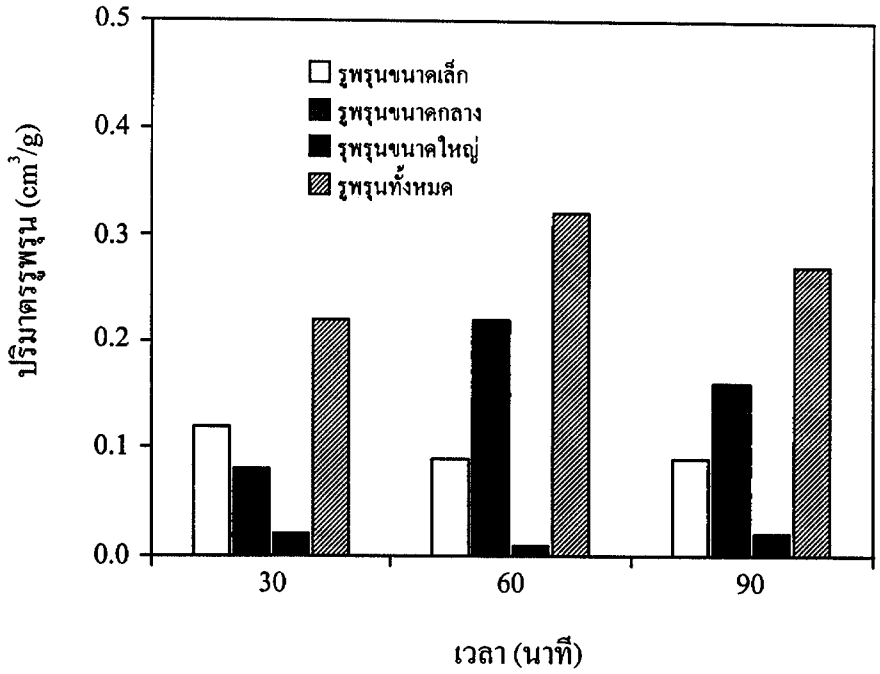
รูปที่ 4.4 ผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการกระตุ้นที่มีต่อปริมาตรรูพรุนขนาดเล็ก ปริมาตรรูพรุนขนาดกลาง ปริมาตรรูพรุนขนาดใหญ่ และปริมาตรรูพรุนทั้งหมดของถ่านกัมมันต์ขนาดอนุภาค 20x30 mesh ที่สภาวะคาร์โบไนเซชัน : 700 °C/40 นาที /20 °C / นาที และสภาวะกระตุ้น : 30 นาที/ 20 °C / นาที / 25 % CO_2



รูปที่ 4.5 ผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการกระตุ้นที่มีต่อปริมาตรรูพรุนขนาดเล็ก ปริมาตรรูพรุนขนาดกลาง ปริมาตรรูพรุนขนาดใหญ่ และปริมาตรรูพรุนทั้งหมดของถ่านกัมมันต์ขนาดอนุภาค 20x30 mesh ที่สภาวะคาร์โบไนเซชัน : 700 °C/40 นาที /20 °C / นาที และสภาวะกระตุ้น : 90 นาที/ 20 °C / นาที / 25% CO_2



รูปที่ 4.6 ผลของเวลาที่ใช้ในการกระตุ้นที่มีต่อปริมาตรรูพรุนขนาดเล็ก ปริมาตรรูพรุนขนาดกลาง ปริมาตรรูพรุนขนาดใหญ่ และปริมาตรรูพรุนทั้งหมดของถ่านกัมมันต์ขนาดอนุภาค 20x30 mesh ที่สภาวะคาร์โบไนเซชัน : 700 °C / 40 นาที / 20 °C / นาที และสภาวะกระตุ้น : 800 °C/ นาที / 20 °C / นาที / 25% CO_2



รูปที่ 4.7 ผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการกระตุ้นที่มีต่อปริมาตรรูพรุนขนาดเล็ก ปริมาตรรูพรุนขนาดกลาง ปริมาตรรูพรุนขนาดใหญ่ และปริมาตรรูพรุนทั้งหมดของถ่านกัมมันต์ขนาดอนุภาค 20x30 mesh ที่สภาวะคาร์โบไนเซชัน : 700 °C /40 นาที / 20 °C / นาที และสภาวะกระตุ้น : 900 °C/ 20 °C / นาที / 25% CO_2

จากข้อมูลในตารางที่ 4.2 พบว่าถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากถ่านหินของงานวิจัยนี้มีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะอยู่ในช่วงประมาณ 300 - 460 m^2/g ซึ่งมีค่าต่ำกว่าถ่านกัมมันต์ทางการค้าเกือบสองเท่า ขนาดรูพรุนเฉลี่ยของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากถ่านหินลิกไนท์มีขนาดใหญ่กว่าของถ่านกัมมันต์ทางการค้าที่ทุกสภาวะโดยสภาวะการกระตุ้นที่ 900 °C เวลา 60 นาที อัตราให้ความร้อน 5 °C/ นาที และขนาดอนุภาค 20x30 mesh (850x600 ไมโครเมตร) ให้ขนาดรูพรุนเฉลี่ยมากที่สุดเท่ากับ 3.78 นาโนเมตร ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากถ่านหินแม่เมาะขนาด 40x50 mesh (300x425 μm) และกระตุ้นที่ 900°C เป็นเวลา 60 นาที ให้ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนรวมมากที่สุดเท่ากับ 459 m^2/g และ 0.38 cm^3/g ตามลำดับ

4.4 ลักษณะพื้นผิวจากภาพถ่าย SEM

รูปที่ 4.8 และ 4.9 แสดงตัวอย่างลักษณะพื้นผิวของอนุภาคถ่านหิน ถ่านชาร์ และถ่านกัมมันต์ภายใต้สภาวะต่าง ๆ จะเห็นว่าเมื่อผ่านการกระตุ้นแล้วถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากถ่านหินแม่เมาะ จะเกิดรูพรุนขนาดประมาณ 1-2 ไมโครเมตร กระจายอยู่ทั่วไปบนพื้นผิวแต่จะเห็นไม่ชัดเจนนัก ยกเว้น ในรูปที่ 4.9 (ค) รูพรุนเหล่านี้เป็นรูพรุนในช่วง macropore ซึ่งจะเป็นทางผ่านของตัวกระตุ้นเข้าสู่โครงสร้างภายในเพื่อทำปฏิกิริยากับเนื้อถ่านเกิดเป็นรูพรุนขนาดเล็กขึ้นภายใน รูปที่ 4.10 แสดงลักษณะพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ทางการค้า จะเห็นว่ามีจำนวนรูพรุนเกิดขึ้นมากกว่า เมื่อเทียบกับถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จากถ่านหิน ซึ่งทำให้พื้นที่ผิวจำเพาะของถ่านกัมมันต์ทางการค้ามีค่ามากกว่าของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากถ่านหิน

4.5 ผลของเวลาและอุณหภูมิ

ผลของสภาวะการกระตุ้นต่อพื้นที่ผิวจำเพาะได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.11 พบว่าที่สภาวะเวลาของการกระตุ้นคงที่ เมื่อการกระตุ้นทำที่อุณหภูมิสูงขึ้นจาก 800°C ถึง 900°C มีแนวโน้มทำให้พื้นที่ผิวจำเพาะมีค่ามากขึ้น เนื่องมาจากการกระตุ้นที่อุณหภูมิสูงจะเกิดปฏิกิริยากระตุ้น gasification ได้ดีกว่า ทำให้มีปริมาตรรูพรุนทั้งหมดมากขึ้น เหตุผลเดียวกันนี้อธิบายได้กับสภาวะที่อุณหภูมิของการกระตุ้นคงที่ที่ 800°C แต่ใช้เวลานานขึ้นจาก 30 เป็น 60 นาที ซึ่งมีแนวโน้มทำให้ถ่านกัมมันต์มีพื้นที่ผิวจำเพาะมากขึ้นเช่นกัน แต่สำหรับสภาวะการกระตุ้นที่อุณหภูมิสูงกว่านั้น (900°C) เมื่อใช้เวลานานขึ้นจาก 30 นาทีเป็น 60 นาที จะมีผลทำให้พื้นที่ผิวจำเพาะมีค่าลดลงเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยากระตุ้น gasification ที่มากขึ้นทำให้รูพรุน micropores ที่มีอยู่บางส่วนรวมกันกลายเป็นรูพรุน mesopores ที่มีขนาดปริมาตรมากขึ้น (ดูรูปที่ 4.7) ส่งผลให้มีพื้นที่ผิวจำเพาะลดลง เนื่องจากในกรณีนี้ mesopores บางส่วนเกิดมาจากการรวมตัวของ micropores แต่เมื่อเพิ่มเวลาจาก 60 นาทีเป็น 90 นาที กลับพบว่าพื้นที่ผิวจำเพาะมีค่าลดลงซึ่งจากรูปที่ 4.7 อธิบายว่าปริมาตรรู

ตารางที่ 4.2 พื้นที่ผิวและลักษณะรูพรุนของถ่านชาร์ ถ่านกัมมันต์ และถ่านกัมมันต์ทางการค้า

ตัวอย่างที่	ชนิดของตัวอย่าง	พื้นที่ผิวจำเพาะ (m^2/g)	ปริมาตรรูพรุนขนาดเล็ก (cm^3/g)	ปริมาตรรูพรุนขนาดกลาง (cm^3/g)	ปริมาตรรูพรุนขนาดใหญ่ (cm^3/g)	ปริมาตรรูพรุนทั้งหมด (cm^3/g)	ขนาดรูพรุนเฉลี่ย (nm)
1	ถ่านชาร์จากถ่านหินแม่เมาะขนาด20×30mesh เตรียมที่สภาวะ700°C 40นาที 20°C/นาที	125	0.04 (50%)	0.03 (38%)	0.01 (13%)	0.08	2.52
2	ถ่านชาร์จากถ่านหินแม่เมาะขนาด20×30mesh เตรียมที่สภาวะ800°C 60นาที 5°C/นาที	125	0.05 (83%)	0.01 (17%)	0.00 (0%)	0.06	2.05
3	ถ่านกัมมันต์ จากถ่านชาร์แม่เมาะ(20×30 mesh) สภาวะการคาร์บอไนซ์ : 700°C 40นาที 20°C/นาที สภาวะการกระตุ้น : 700°C 60นาที 20°C/นาที 25%CO_2	286	0.11 (79%)	0.03 (21%)	0.00 (0%)	0.14	2.02
4	ถ่านกัมมันต์ จากถ่านชาร์แม่เมาะ(20×30 mesh) สภาวะการคาร์บอไนซ์ : 700°C 40นาที 20°C/นาที สภาวะการกระตุ้น : 800°C 60นาที 20°C/นาที 25%CO_2	368	0.11 (48%)	0.10 (43%)	0.02 (9%)	0.23	2.46
5	ถ่านกัมมันต์ จากถ่านชาร์แม่เมาะ(20×30 mesh) สภาวะการคาร์บอไนซ์ : 700°C 40นาที 20°C/นาที สภาวะการกระตุ้น : 900°C 60นาที 20°C/นาที 25%CO_2	372	0.09 (28%)	0.22 (69%)	0.01 (3%)	0.32	3.43

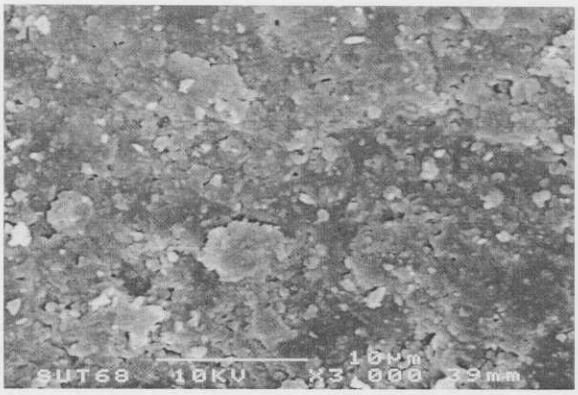
ตารางที่ 4.2 (ต่อ)

ตัวอย่างที่	ชนิดของตัวอย่าง	พื้นที่ผิวจำเพาะ (m^2/g)	ปริมาตรรูพรุนขนาดเล็ก (cm^3/g)	ปริมาตรรูพรุนขนาดกลาง (cm^3/g)	ปริมาตรรูพรุนขนาดใหญ่ (cm^3/g)	ปริมาตรรูพรุนทั้งหมด (cm^3/g)	ขนาดรูพรุนเฉลี่ย (nm)
6	ถ่านกัมมันต์ จากถ่านชาร์แม่เมาะ(20×30 mesh) สภาวะการคาร์บอไนซ์ : 700°C 40นาที 20°C/นาที สภาวะการกระตุ้น : 800°C 30นาที 20°C/นาที 25%CO_2	318	0.11 (65%)	0.05 (29%)	0.01 (6%)	0.17	2.12
7	ถ่านกัมมันต์ จากถ่านชาร์แม่เมาะ(20×30 mesh) สภาวะการคาร์บอไนซ์ : 700°C 40นาที 20°C/นาที สภาวะการกระตุ้น : 800°C 90นาที 20°C/นาที 25%CO_2	341	0.11 (55%)	0.08 (40%)	0.01 (5%)	0.20	2.37
8	ถ่านกัมมันต์ จากถ่านชาร์แม่เมาะ(20×30 mesh) สภาวะการคาร์บอไนซ์ : 700°C 40นาที 20°C/นาที สภาวะการกระตุ้น : 900°C 30นาที 20°C/นาที 25%CO_2	384	0.12 (55%)	0.08 (36%)	0.02 (9%)	0.22	2.27
9	ถ่านกัมมันต์ จากถ่านชาร์แม่เมาะ(20×30 mesh) สภาวะการคาร์บอไนซ์ : 700°C 40นาที 20°C/นาที สภาวะการกระตุ้น : 900°C 90นาที 20°C/นาที 25%CO_2	355	0.09 (33%)	0.16 (59%)	0.02 (7%)	0.27	3.06

ตารางที่ 4.2 (ต่อ)

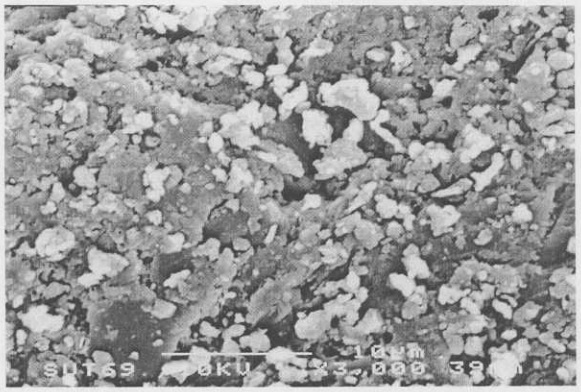
ตัวอย่างที่	ชนิดของตัวอย่าง	พื้นที่ผิวจำเพาะ (m^2/g)	ปริมาตรรูพรุนขนาดเล็ก (cm^3/g)	ปริมาตรรูพรุนขนาดกลาง (cm^3/g)	ปริมาตรรูพรุนขนาดใหญ่ (cm^3/g)	ปริมาตรรูพรุนทั้งหมด (cm^3/g)	ขนาดรูพรุนเฉลี่ย (nm)
10	ถ่านกัมมันต์ จากถ่านชาร์แม่เมาะ(20×30 mesh) สภาวะการคาร์บอไนซ์ : 800°C 60นาที 20°C/นาที สภาวะการกระตุ้น : 900°C 60นาที 20°C/นาที 25%CO_2	300	0.08 (33%)	0.14 (58%)	0.02 (8%)	0.24	3.14
11	ถ่านกัมมันต์ จากถ่านชาร์แม่เมาะ(20×30 mesh) สภาวะการคาร์บอไนซ์ : 800°C 60นาที 5°C/นาที สภาวะการกระตุ้น : 900°C 60นาที 5°C/นาที 25%CO_2	354	0.08 (24%)	0.23 (70%)	0.02 (6%)	0.33	3.78
12	ถ่านกัมมันต์ จากถ่านชาร์แม่เมาะ(40×50 mesh) สภาวะการคาร์บอไนซ์ : 800°C 60นาที 5°C/นาที สภาวะการกระตุ้น : 900°C 60นาที 5°C/นาที 25%CO_2	459	0.11 (29%)	0.24 (63%)	0.03 (8%)	0.38	3.30
13	ถ่านกัมมันต์ จากถ่านชาร์ลานนา(20×30 mesh) สภาวะการคาร์บอไนซ์ : 800°C 60นาที 5°C/นาที สภาวะการกระตุ้น : 900°C 60นาที 5°C/นาที 25%CO_2	350	0.09 (31%)	0.19 (66%)	0.01 (3%)	0.29	3.36
14	ถ่านกัมมันต์ทางการค้า*	1197	0.39 (71%)	0.10 (18%)	0.06 (11%)	0.55	1.83

*วัตถุดิบจากกะลามะพร้าวและใช้ไอน้ำเป็นตัวกระตุ้น



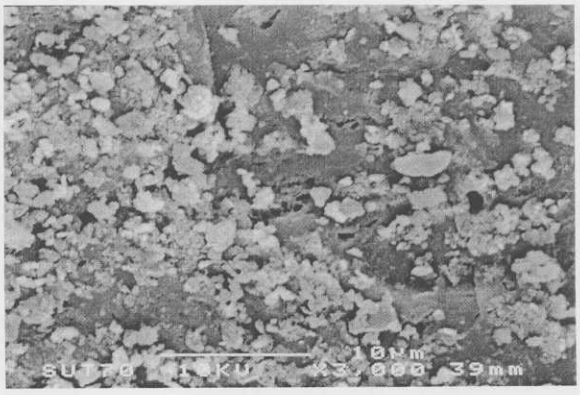
Coal

(ก)



Char

(ข)



Activated Carbon

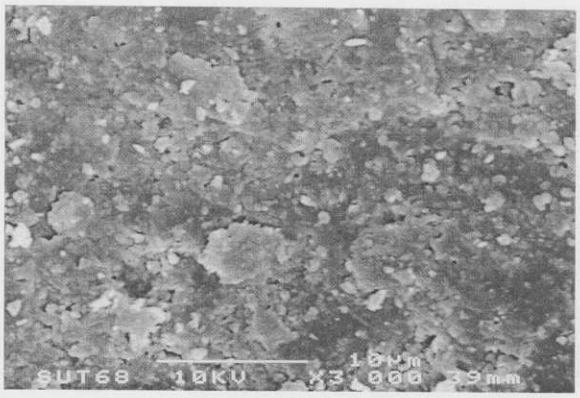
(ค)

รูปที่ 4.8 ภาพถ่าย SEM แสดงลักษณะพื้นผิวของ

(ก) ถ่านหินดิบแม่เมาะ

(ข) ถ่านชาร์แม่เมาะ ขนาดอนุภาค 20×30 mesh สภาวะคาร์โบไนเซชัน : 700 °C /40 นาที/ 20 °C / นาที

(ค) ถ่านกัมมันต์แม่เมาะ ขนาดอนุภาค 20×30 mesh สภาวะคาร์โบไนเซชัน : 700°C/ 40 นาที / 20°C / นาที สภาวะกระตุ้น : 800°C / 60 นาที / 20°C / นาที / 25% CO_2

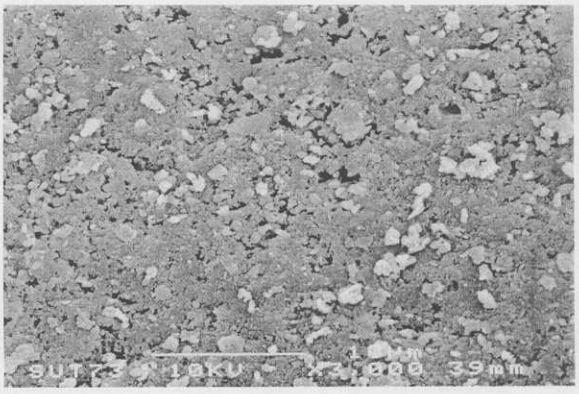


Coal

(ก)

Char

(ข)



Activated Carbon

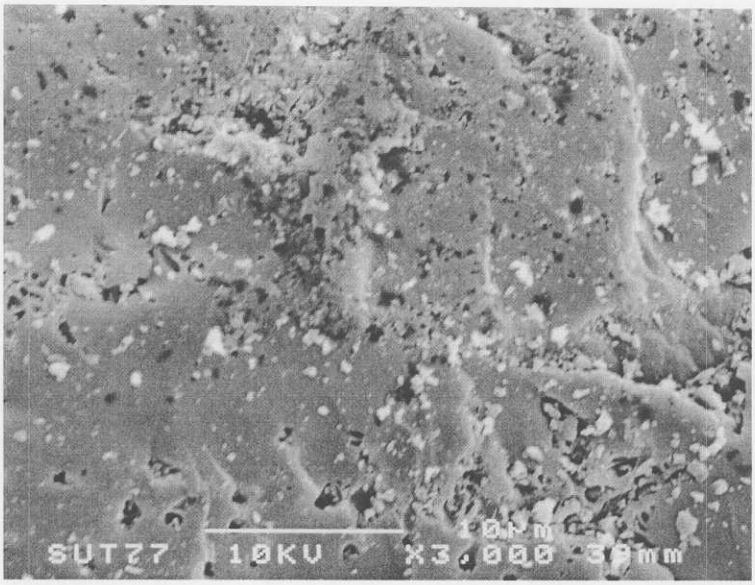
(ค)

รูปที่ 4.9 ภาพถ่าย SEM แสดงลักษณะพื้นผิวของ

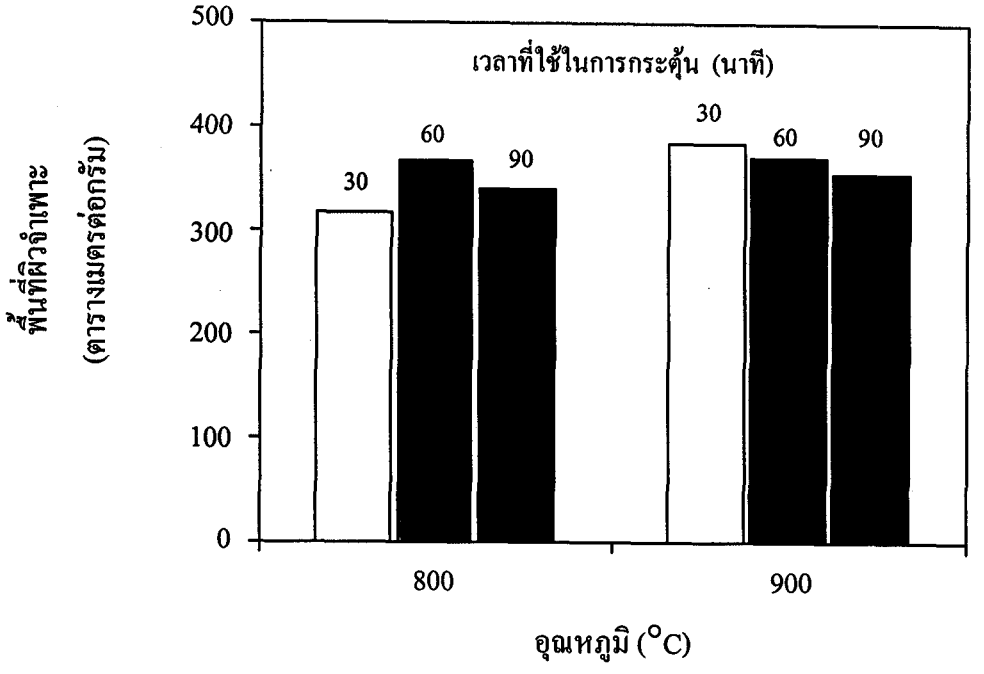
(ก) ถ่านหินดิบแม่เมาะ

(ข) ถ่านชาร์แม่เมาะ ขนาดอนุภาค 20×30 mesh สภาวะคาร์โบไนเซชัน : 800 °C 60 นาที 5 °C / นาที

(ค) ถ่านกัมมันต์แม่เมาะ ขนาดอนุภาค 20×30 mesh สภาวะคาร์โบไนเซชัน : 800°C 60 นาที 5°C / นาที สภาวะกระตุ้น : 900°C 60 นาที 5°C / นาที 25% CO_2



รูปที่ 4.10 ภาพถ่าย SEM แสดงลักษณะพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ทางการค้า



รูปที่ 4.11 ผลของอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการกระตุ้นที่มีต่อพื้นที่ผิวจำเพาะของถ่านกัมมันต์จากถ่านชาร์แม่เมาะ ขนาดอนุภาค 20×30 mesh ที่สภาวะคาร์โบไนเซชัน : 700°C / 40 นาที / 20 °C / นาที และสภาวะกระตุ้น : 20°C / นาที / 25% CO_2

พรุนขนาดกลางลดลงในขณะที่ปริมาตรรูพรุนขนาดเล็กยังคงที่ ซึ่งอาจเป็นไปได้ว่าเมื่อเวลาการกระตุ้นที่อุณหภูมิสูงนานขึ้นอาจเกิดการอุดตันของรูพรุนจาก devolatilization ของสารระเหย ซึ่งต้องทำการศึกษาต่อไปเพื่อตรวจสอบสมมติฐานนี้

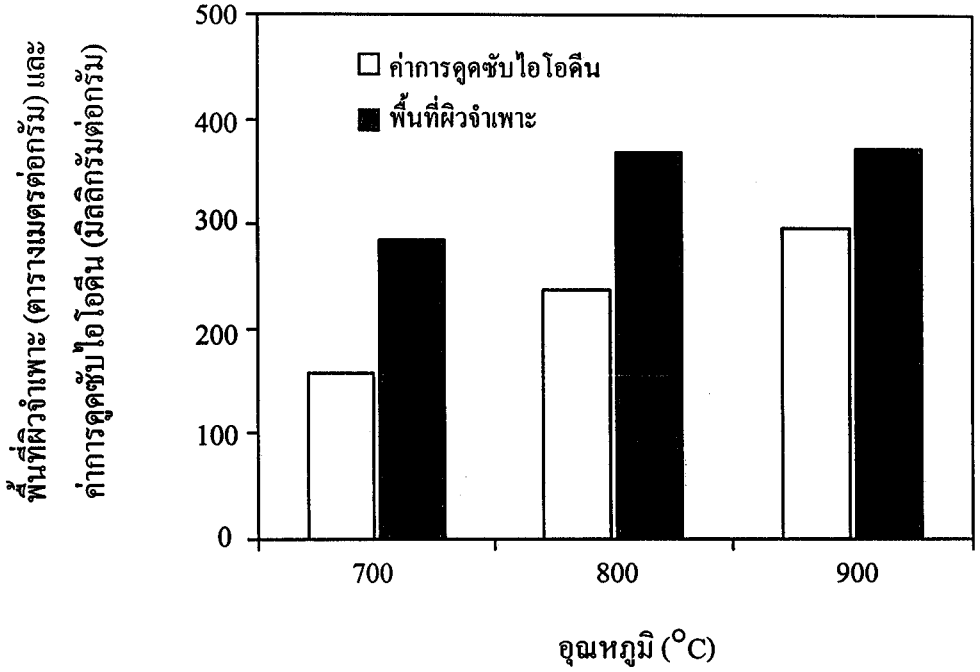
การวัดค่าการดูดซับไอโอดีนจัดเป็นวิธีการหนึ่งในการหาประสิทธิภาพการดูดซับของถ่านกัมมันต์ ซึ่งโดยทั่วไปแล้วค่าการดูดซับไอโอดีนมีแนวโน้มไปในทางเดียวกันกับค่าพื้นที่ผิวจำเพาะแต่สัดส่วนการเปลี่ยนแปลงจะไม่เท่ากัน ผลการวัดค่าดูดซับไอโอดีนเทียบกับค่าพื้นที่ผิวจำเพาะในงานวิจัยนี้ก็พบอย่างเดียวกันดังแสดงไว้ในรูปที่ 4.12 ซึ่งแสดงสภาวะที่เวลาการกระตุ้นคงที่ (60 นาที) เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ค่าดูดซับไอโอดีนและค่าพื้นที่ผิวจำเพาะมีค่าสูงขึ้นตามอุณหภูมิ และจะเห็นว่าค่าดูดซับไอโอดีนมีค่าน้อยกว่าค่าพื้นที่ผิวจำเพาะโดยที่อัตราส่วนตัวเลขไอโอดีนต่อพื้นที่ผิวจำเพาะมีค่าเฉลี่ยประมาณ 0.70

4.6 ผลของอัตราการเพิ่มความร้อน

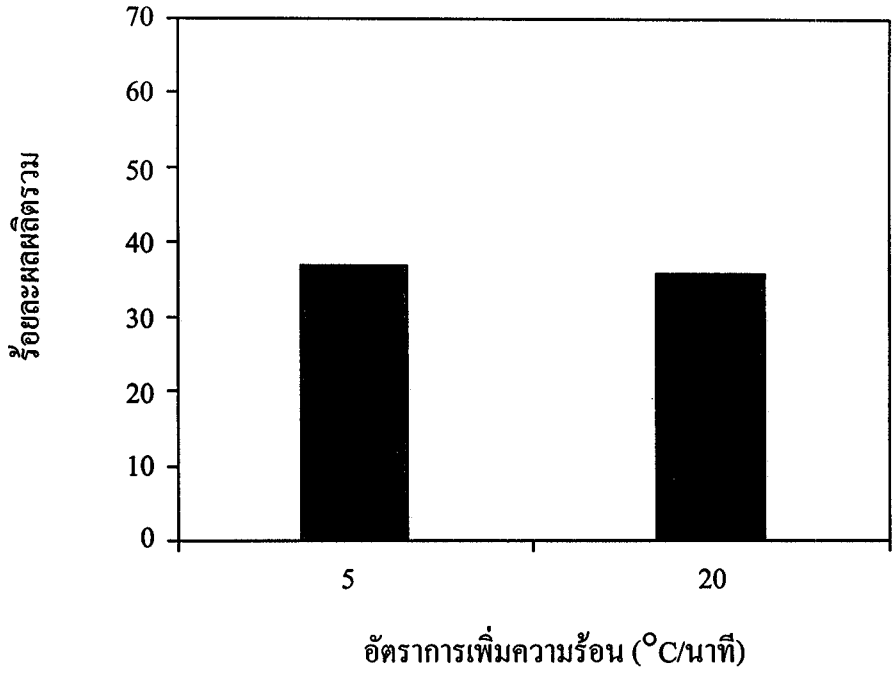
รูปที่ 4.13 แสดงผลของอัตราการเพิ่มความร้อนที่มีต่อร้อยละผลผลิตรวม พบว่าการเปลี่ยนแปลงอัตราการเพิ่มความร้อนในขั้นตอนการกระตุ้นไม่มีผลต่อร้อยละผลผลิตที่ได้ เพราะเวลาที่ต่างกันอันเนื่องมาจากการใช้อัตราความร้อนไม่เท่ากันนั้น เป็นเวลาที่ใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิจากต่ำไปสูงซึ่งยังอยู่ในช่วงที่ยังไม่ได้ป้อนก๊าซ CO_2 เข้าไปทำปฏิกิริยากระตุ้น จึงเป็นการแตกต่างกันเฉพาะของช่วงเวลาของการทำคาร์โบไนซ์ ซึ่งมีผลทำให้ร้อยละผลผลิตไม่แตกต่างกัน แต่สำหรับรูปที่ 4.14 เป็นผลของอัตราการเพิ่มความร้อนที่มีต่อพื้นที่ผิวจำเพาะของถ่านกัมมันต์ พบว่าสภาวะที่ใช้อัตราการเพิ่มความร้อนมากขึ้น ส่งผลให้ได้ถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะน้อยลง เนื่องมาจากการแตกต่างกันของช่วงเวลาการทำคาร์โบไนซ์ แม้ว่าจะไม่ทำให้ร้อยละผลผลิตต่างกันแต่สามารถทำให้เกิดรูพรุนในปริมาตรแตกต่างกันขึ้นได้ โดยสภาวะที่เวลานานกว่า (อัตราการเพิ่มความร้อนน้อยกว่า) นั้นจะช่วยให้เกิดรูพรุนได้มากกว่า (ดูตารางที่ 4.2) ซึ่งอาจเป็นไปได้ว่าการให้ความร้อนอย่างรวดเร็วอาจทำให้เกิดการแตกหักของโครงสร้างเพิ่มมากขึ้น ซึ่งเป็นอุปสรรคต่อการแพร่ของสารกระตุ้นในช่วงการเกิดปฏิกิริยา gasification เพื่อเพิ่มพื้นผิวของรูพรุน

4.7 ผลของขนาดอนุภาคถ่านหิน

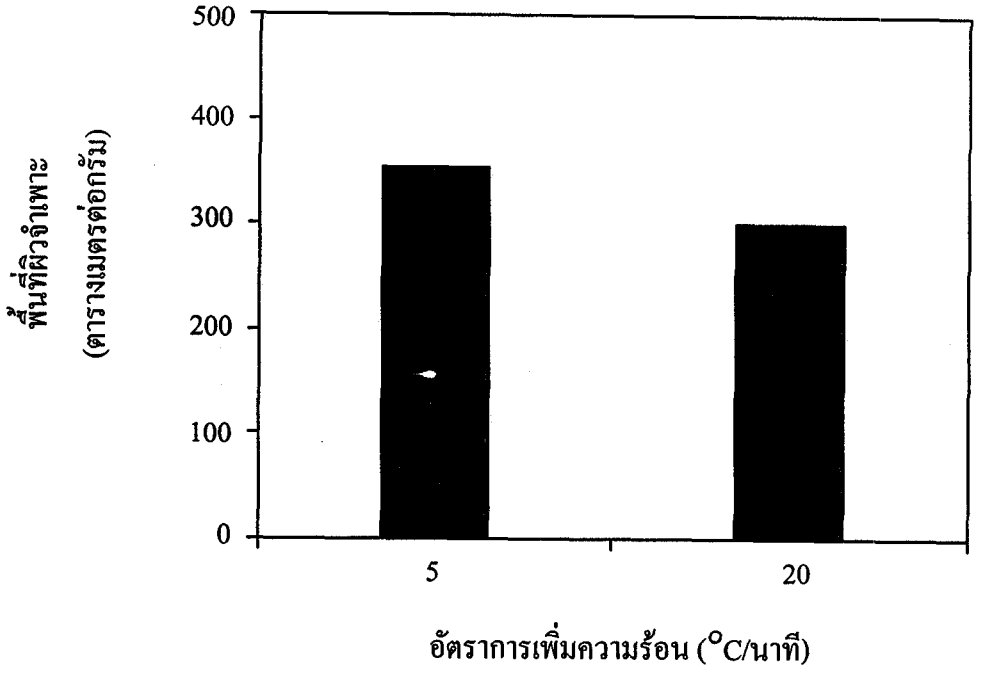
รูปที่ 4.15 แสดงผลของอนุภาคถ่านหินที่มีต่อร้อยละผลผลิตของถ่านกัมมันต์ที่ได้ พบว่าขนาดอนุภาคเล็กจะเกิดร้อยละผลผลิตน้อยเนื่องมาจากอนุภาคขนาดเล็กสามารถเกิดปฏิกิริยากระตุ้น gasification ได้ดีกว่าอนุภาคขนาดใหญ่ เนื่องจากมีพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาเคมีได้มากกว่าเมื่อเทียบน้ำหนักเท่ากัน จึงมีร้อยละน้ำหนักที่หายไปมาก ส่งผลให้ร้อยละผลผลิตน้อยลง



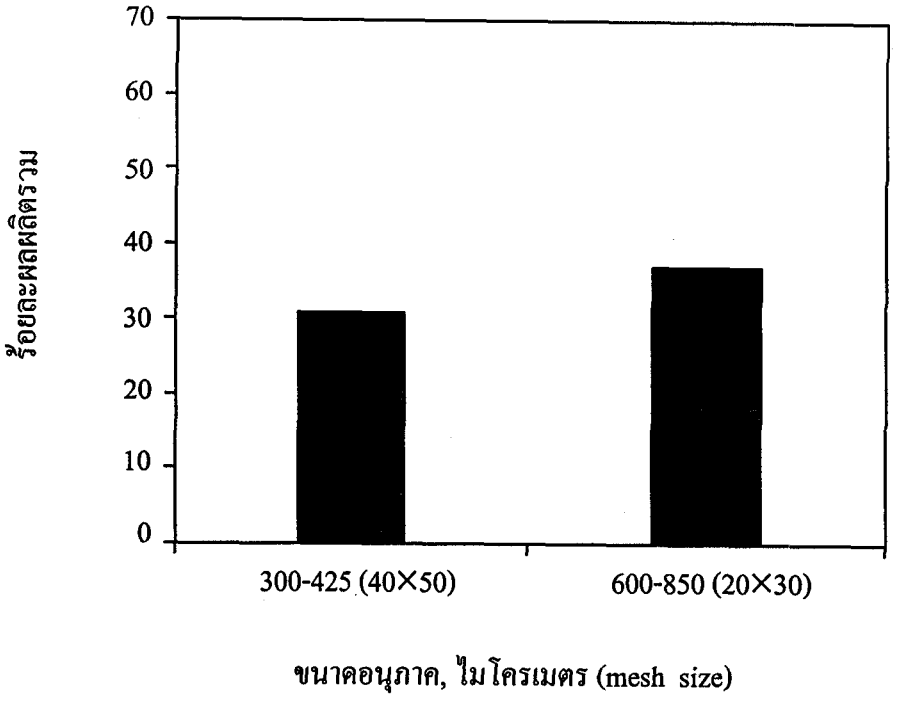
รูปที่ 4.12 ผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการกระตุ้นที่มีต่อพื้นที่ผิวจำเพาะและค่าการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์ขนาดอนุภาค 20x30 mesh ที่สภาวะคาร์โบไนเซชัน : 700°C / 40 นาที / 20°C / นาที และสภาวะกระตุ้น : 60 นาที / 20°C / นาที / 25% CO_2



รูปที่ 4.13 ผลของอัตราการเพิ่มความร้อนที่มีต่อร้อยละผลผลิตรวมของถ่านกัมมันต์ขนาดอนุภาค 20x30 mesh ที่สภาวะคาร์โบไนเซชัน : 800°C / 60 นาที และสภาวะกระตุ้น : 900°C / 60 นาที / 25% CO_2



รูปที่ 4.14 ผลของอัตราการเพิ่มความร้อนที่มีต่อพื้นที่ผิวจำเพาะของถ่านกัมมันต์ขนาดอนุภาค 20x30 mesh ที่สภาวะคาร์โบไนเซชัน : 800°C / 60 นาที และสภาวะกระตุ้น : 900°C / 60 นาที / 25% CO_2



รูปที่ 4.15 ผลของขนาดอนุภาคที่มีต่อร้อยละผลผลิตรวมของถ่านกัมมันต์ที่สภาวะคาร์โบไนเซชัน 800°C / 60 นาที / 5°C / นาที และ สภาวะกระตุ้น : 900°C / 60 นาที / 5°C / นาที / 25% CO_2

สำหรับผลของขนาดอนุภาคของถ่านหินที่มีต่อพื้นที่ผิวจำเพาะของถ่านกัมมันต์ได้แสดงไว้ใน รูปที่ 4.16 พบว่าเมื่อขนาดอนุภาคถ่านหินมีขนาดเล็กจะได้ถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะมากกว่าขนาดอนุภาคใหญ่ เพราะอนุภาคขนาดเล็กสามารถเกิดปฏิกิริยากระตุ้น gasification ได้ดีกว่าอนุภาคขนาดใหญ่จึงเกิดรูพรุนได้มากกว่า ซึ่งอธิบายได้ด้วยเหตุผลของการมีพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยามากกว่าเช่นเดียวกัน

4.8 ผลของชนิดถ่านหิน

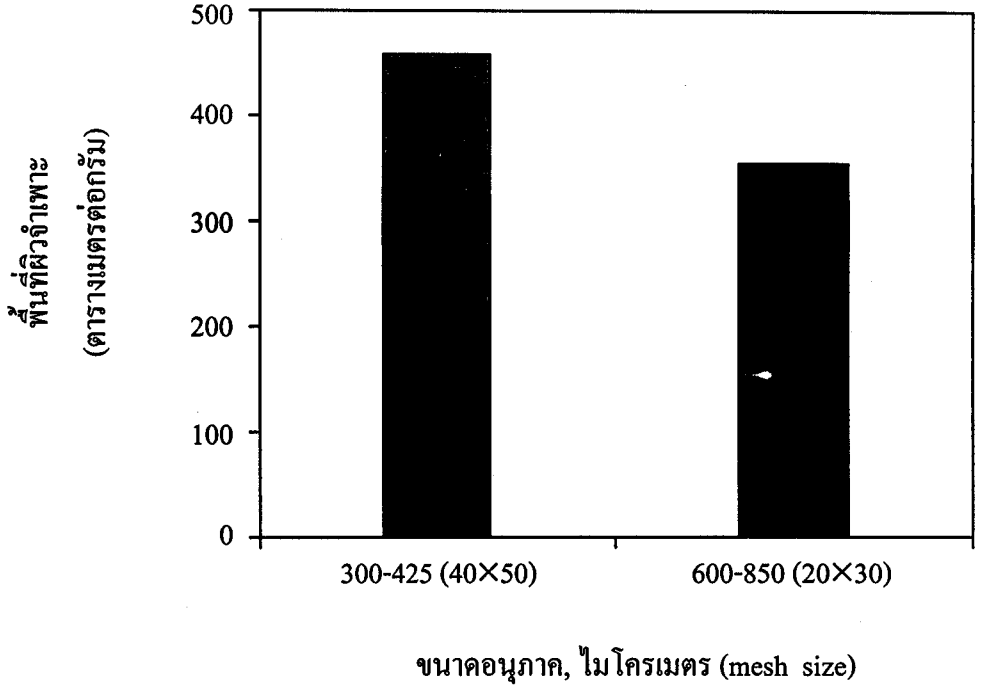
รูปที่ 4.17 แสดงถึงผลของชนิดถ่านหินที่มีต่อร้อยละผลผลิต พบว่าสำหรับร้อยละผลผลิตของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากถ่านหินแม่เมาะมีค่ามากกว่าถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากถ่านหินลานนา เนื่องมาจากถ่านหินทั้งสองมาจากแหล่งต่างกันจึงมีโครงสร้างทางกายภาพและทางเคมีต่างกัน การที่ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากถ่านหินลานนามีร้อยละผลผลิตน้อยกว่าแสดงว่าถ่านหินลานนาเกิดปฏิกิริยากระตุ้น gasification ได้ดีกว่าจึงมีร้อยละการหายไปของน้ำหนักมากกว่า อย่างไรก็ดี รูปที่ 4.18 แสดงว่าพื้นที่ผิวจำเพาะของถ่านกัมมันต์จากถ่านหินทั้งสองแหล่งเตรียมภายใต้สภาวะเดียวกัน มีค่าไม่ต่างกันมากนัก ประมาณ 350 m^2/g รูปที่ 4.19 เปรียบเทียบพื้นที่ผิวจำเพาะเมื่อกระตุ้นด้วย 100%CO_2 พบว่าถ่านกัมมันต์จากถ่านหินลานนาให้ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะเท่ากับ 436 m^2/g ซึ่งมากกว่าที่เตรียมจากถ่านหินแม่เมาะ ซึ่งมีค่าเพียง 306 m^2/g ซึ่งอาจจะสรุปได้ว่าความเข้มข้นของสารกระตุ้นมีผลต่อการเกิดรูพรุนสำหรับถ่านหินแต่ละแหล่งได้ไม่เหมือนกัน

4.9 ผลของการกระตุ้นด้วยไอน้ำเทียบกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

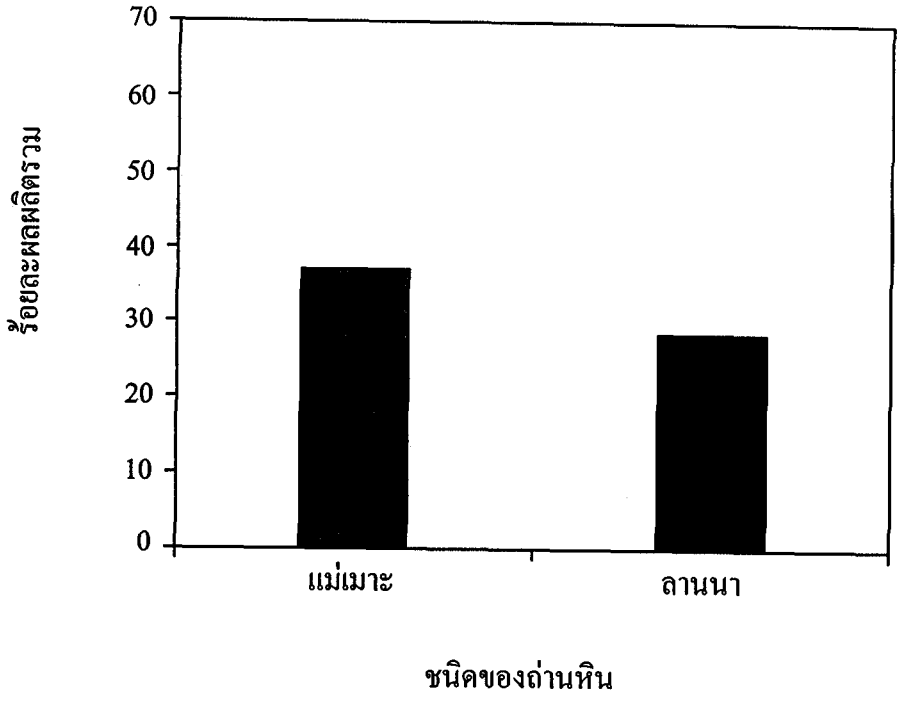
ตารางที่ 4.3 เปรียบเทียบสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยไอน้ำและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ จะเห็นว่าถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นด้วยไอน้ำจะให้พื้นที่ผิวมากกว่าประมาณ 10% และมีปริมาตรของรูพรุนขนาดกลางมากกว่าประมาณ 18% เมื่อเทียบกับการกระตุ้นด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในขณะที่ปริมาตรรูพรุนขนาดเล็กมีค่าเท่ากัน ขนาดรูพรุนเฉลี่ยเมื่อกระตุ้นด้วยไอน้ำมีค่ามากกว่า เมื่อกระตุ้นด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (3.68 nm เทียบกับ 3.34 nm)

4.10 ผลของร้อยละที่หายไปในช่วงกระตุ้นต่อค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ

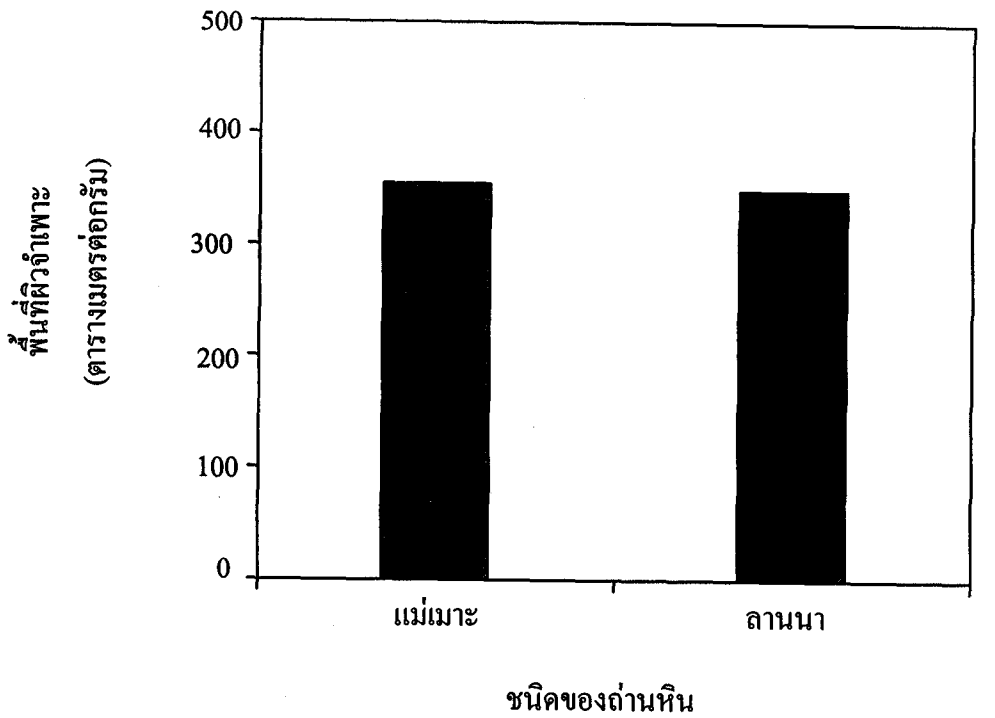
รูปที่ 4.20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละของน้ำหนักที่หายไปของเนื้อถ่านในช่วงกระตุ้นและค่าพื้นที่ผิวจำเพาะของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ ภายใต้สภาวะการกระตุ้นต่าง ๆ กัน เช่น อุณหภูมิ เวลา อัตราการเพิ่มความร้อน ขนาดอนุภาค และชนิดของตัวกระตุ้นทั้งหมดประมาณ 22 สภาวะ จะเห็นได้ว่าร้อยละโดยน้ำหนักที่หายไปในช่วงกระตุ้นมีความสัมพันธ์โดยประมาณกับพื้นที่ผิวจำเพาะในลักษณะเชิงเส้นดังนี้



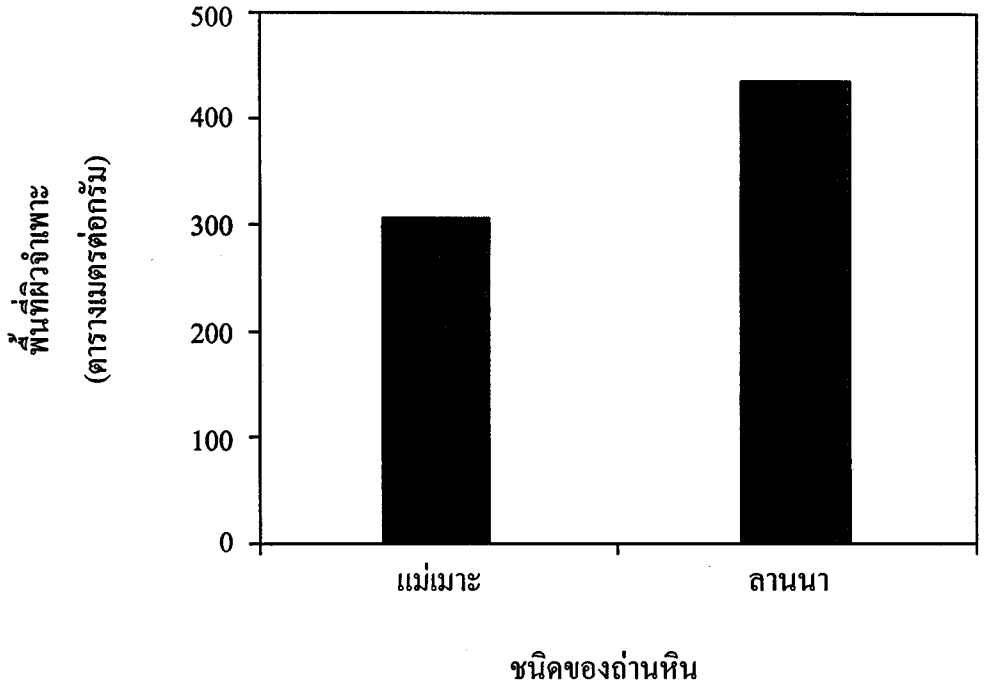
รูปที่ 4.16 ผลของขนาดอนุภาคที่มีต่อพื้นที่ผิวจำเพาะของถ่านกัมมันต์ที่สภาวะคาร์โบไนเซชัน : 800°C / 60 นาที / 5°C / นาที และสภาวะกระตุ้น : 900°C / 60 นาที / 5°C / นาที / 25% CO_2



รูปที่ 4.17 ผลของชนิดของถ่านหินที่มีต่อร้อยละผลผลิตรวมของถ่านกัมมันต์ขนาดอนุภาค 20x30 mesh ที่สภาวะคาร์โบไนเซชัน : 800°C / 60 นาที / 5°C / นาที และสภาวะกระตุ้น : 900°C / 60 นาที/ 5°C / นาที / 25% CO_2



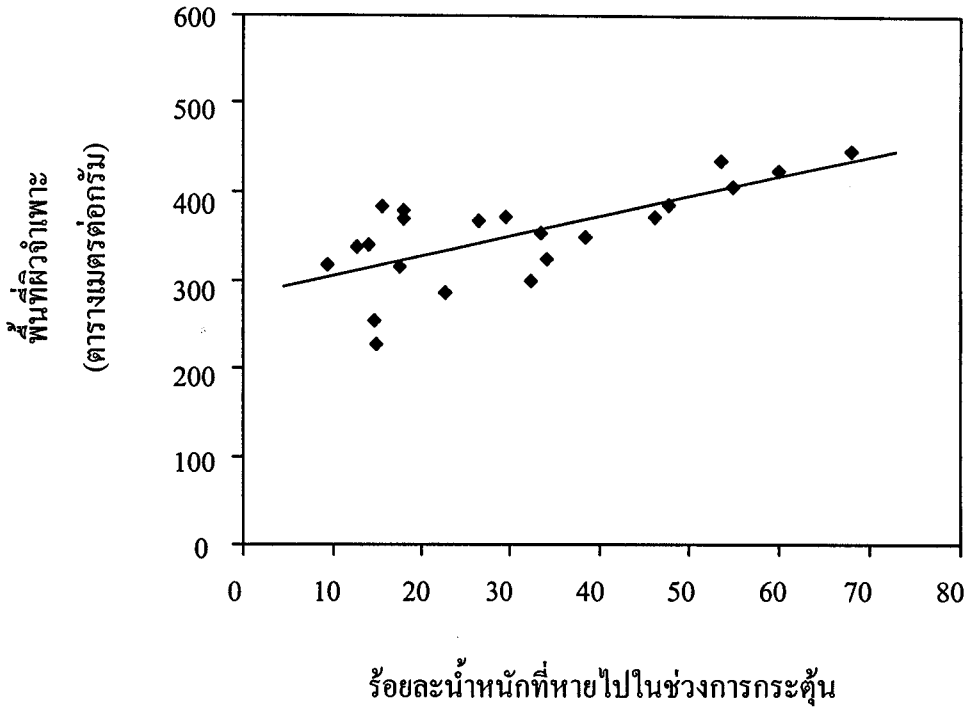
รูปที่ 4.18 ผลของชนิดของถ่านหินที่มีต่อพื้นที่ผิวจำเพาะของถ่านกัมมันต์ขนาดอนุภาค 20x30 mesh ที่สภาวะคาร์โบไนเซชัน : 800°C / 60 นาที / 5 °C / นาที และสภาวะกระตุ้น : 900°C / 60 นาที / 5 °C / นาที / 25% CO_2



รูปที่ 4.19 ผลของชนิดของถ่านหินที่มีต่อพื้นที่ผิวจำเพาะของถ่านกัมมันต์ขนาดอนุภาค 20x30 mesh ที่สภาวะกระตุ้น : 800°C / 60 นาที / 5°C / นาที และสภาวะกระตุ้น : 900°C / 60 นาที / 5 °C/ นาที / 100% CO_2

ตารางที่ 4.3 สมบัติของถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยไอน้ำ (ไอน้ำ 50%+N_2 50%) และก๊าซ CO_2 (CO_2 25%+N_2 75%) อัตราการไหลรวมของก๊าซผสม 100 มิลลิลิตรต่อนาที อุณหภูมิการกระตุ้น 900 °C เวลาที่ใช้กระตุ้น 60 นาที อัตราการเพิ่มความร้อนของการกระตุ้น 20 °C/นาที สภาวะการเตรียมถ่านชาร์ 700 °C 40 นาที

ชนิดของตัวกระตุ้น	พื้นที่ผิวจำเพาะ m^2/g	ปริมาตรรูพรุนขนาดเล็ก cm^3/g	ปริมาตรรูพรุนขนาดกลาง cm^3/g	ปริมาตรรูพรุนขนาดใหญ่ cm^3/g	ปริมาตรรูพรุนรวม cm^3/g	ขนาดรูพรุนเฉลี่ย nm
ไอน้ำ	405	0.09	0.26	0.02	0.37	3.68
ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์	372	0.09	0.22	0.01	0.32	3.43



รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละน้ำหนักที่หายไปในช่วงการกระตุ้นกับพื้นที่ผิวจำเพาะของถ่านกัมมันต์

$$SA = a(WL) + b$$

เมื่อ SA คือพื้นที่ผิวจำเพาะในหน่วย m^2/g, WL คือ ร้อยละของน้ำหนักที่หายไปในช่วงกระตุ้นซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 10-70% และ a และ b เป็นค่าคงที่ของสมการ

4.11 ผลการดูดซับสารละลายฟีนอลของถ่านกัมมันต์

ตารางที่ 4.4 แสดงผลการดูดซับสารละลายฟีนอล ความเข้มข้นเริ่มต้น 100-300 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิการดูดซับ 30 °C เปรียบเทียบระหว่างการใช้ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากลิกไนท์ที่ใช้ก๊าซ CO_2 เป็นตัวกระตุ้นและถ่านกัมมันต์ทางการค้าซึ่งเตรียมมาจากกะลามะพร้าว โดยใช้ไอน้ำเป็นตัวกระตุ้น จะเห็นว่าถ้าสารละลายฟีนอลมีความเข้มข้นเริ่มต้นน้อยกว่า 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ในงานวิจัยนี้มีความสามารถในการกำจัดฟีนอลในน้ำ หรือมีประสิทธิภาพการดูดซับฟีนอลได้เกือบเท่าถ่านกัมมันต์ทางการค้า เนื่องจากขนาดพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ในงานวิจัยนี้ที่มีอยู่สามารถที่จะดูดซับฟีนอลในปริมาณดังกล่าวได้ดี แต่เมื่อความเข้มข้นมากขึ้น ถ่านกัมมันต์จากงานวิจัยนี้มีประสิทธิภาพการดูดซับที่ลดลงมากกว่าถ่านกัมมันต์ทางการค้า เนื่องจากถ่านกัมมันต์ในงานวิจัยนี้มีพื้นที่ผิวน้อยกว่ามาก มีรูพรุนน้อยกว่าจึงดูดซับได้มากที่สุดเพียงปริมาณหนึ่งเท่านั้น แต่ไม่สามารถดูดซับฟีนอลที่มีความเข้มข้นมาก ๆ ได้ดีเท่ากับถ่านกัมมันต์ทางการค้า อย่างไรก็ตามปริมาณฟีนอลในสารละลายของน้ำเสียจากอุตสาหกรรมโดยทั่วไปมีค่าน้อยกว่านี้มาก (~10 มิลลิกรัมต่อลิตร)[24] จึงสรุปได้ว่าถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ในงานวิจัยนี้สามารถนำไปใช้กำจัดฟีนอลในน้ำได้ดี

ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบและเปรียบเทียบความสามารถการดูดซับสารละลายฟีนอลของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากลิกไนท์ และถ่านกัมมันต์ทางการค้า

ความเข้มข้นเริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ถ่านกัมมันต์จากลิกไนท์ (พื้นที่ผิวจำเพาะ 368 ตารางเมตรต่อกรัม)		ถ่านกัมมันต์ทางการค้า (พื้นที่ผิวจำเพาะ 1197 ตารางเมตรต่อกรัม)	
	ความเข้มข้นที่เหลือ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ร้อยละความสามารถการกำจัดฟีนอลในน้ำ	ความเข้มข้นที่เหลือ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ร้อยละความสามารถการกำจัดฟีนอลในน้ำ
100	20	80	2	98
200	74	63	14	93
300	150	50	38	87

บทที่ 5
สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลงานวิจัย

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์หลักเพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการนำถ่านหินลิกไนท์มาผลิตเป็นสารดูดซับที่เรียกถ่านกัมมันต์ (activated carbon) โดยใช้กระบวนการเตรียมทางกายภาพซึ่งประกอบด้วยขั้นตอนการเตรียมถ่านชาร์ (char) โดยกระบวนการให้ความร้อนในบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนที่เรียกกระบวนการคาร์โบไนเซชัน (carbonization) และต่อด้วยขั้นตอนการกระตุ้น (activation) ด้วยสารกระตุ้น ได้แก่ ไอน้ำและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ผสมกับก๊าซไนโตรเจน ตัวแปรที่ศึกษาซึ่งมีผลต่อคุณภาพของถ่านกัมมันต์ ได้แก่ ขนาดอนุภาค แหล่งถ่านหิน ระดับอุณหภูมิ อัตราการให้ความร้อน ชนิดของสารกระตุ้นและเวลาที่ใช้กระตุ้น ตัวอย่างถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จะนำมาวิเคราะห์องค์ประกอบโดยวิธีวิเคราะห์แบบประมาณ (proximate analysis) และวัดสมบัติทางการดูดซับ เช่นพื้นที่ผิวจำเพาะ ลักษณะและขนาดของรูพรุน เป็นต้น จากผลของการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้

1. กระบวนการผลิตถ่านชาร์จากถ่านหิน โดยการให้ความร้อนในบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจน ในช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 500°C - 800 °C พบว่าน้ำหนักถ่านจะมีค่าคงที่หลังจากเผาไปได้ประมาณ 20 นาที โดยที่อุณหภูมิ 800 °C จะมีค่าร้อยละของน้ำหนักที่หายไปมากที่สุดเท่ากับ 48% ร้อยละของคาร์บอนคงตัวมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 35% เป็น 57% ที่สภาวะคาร์โบไนเซชัน 800°C เป็นเวลา 60 นาที และอัตราการให้ความร้อน 5°C/ นาที ซึ่งเป็นค่าสูงสุด ในขณะที่สภาวะเดียวกันนี้ค่าร้อยละของสารระเหยจะลดลงจาก 37% เป็น 11% โดยน้ำหนัก
2. ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ที่สภาวะกระตุ้น 800°C-900°C โดยใช้ 25% CO_2+75%N_2 เป็นสารกระตุ้น พบว่ามีค่าร้อยละคาร์บอนคงตัวอยู่ในช่วงประมาณ 40-70% โดยน้ำหนักแต่มีค่าร้อยละปริมาณเถ้าในบางสภาวะสูงถึง 30% โดยน้ำหนัก ทำให้ความสามารถในการดูดซับของถ่านกัมมันต์ต่อน้ำหนักมีค่าน้อยกว่าที่ควรจะเป็น
3. ร้อยละผลผลิตของการผลิตถ่านกัมมันต์เทียบกับน้ำหนักถ่านหินดิบขึ้นกับเวลาและอุณหภูมิของการกระตุ้น การกระตุ้นโดยใช้เวลาสั้นและอุณหภูมิต่ำได้ค่าร้อยละผลผลิตสูงเนื่องจากปริมาณเนื้อถ่านที่ถูกทำปฏิกิริยาไป โดยปฏิกิริยา gasification จะเพิ่มตามอุณหภูมิและเวลา

4. เส้นไอโซเทอมของการดูดซับสำหรับถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้เป็นแบบ Type I ที่อุณหภูมิการกระตุ้น 800°C แต่มีแนวโน้มจะเปลี่ยนเป็น Type II ที่อุณหภูมิสูงขึ้นจาก 800 °C เป็น 900 °C ซึ่งแสดงว่ามีการเพิ่มของปริมาตรรูพรุนขนาดกลางมากขึ้น ผลการทดลองนี้สอดคล้องกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์การกระจายขนาดรูพรุนในช่วงต่าง ๆ นอกจากนั้นยังมีแนวโน้มว่าเมื่อเวลาการกระตุ้นนานขึ้นจะเกิดการเพิ่มของปริมาตรรูพรุนขนาดกลางเช่นเดียวกันแต่ผลของเวลาไม่ชัดเจนเท่ากับผลของการเพิ่มอุณหภูมิ
5. ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากลิกไนท์มีค่าไม่สูงมากนัก อยู่ในช่วงประมาณ 300-460 m^2/g ซึ่งมีค่าน้อยกว่าของถ่านกัมมันต์ทางการค้าที่เตรียมจากกะลามะพร้าวประมาณสองเท่า
6. เมื่อเวลาการกระตุ้นคงที่การเพิ่มอุณหภูมิการกระตุ้นโดยทั่วไปจะทำให้พื้นที่ผิวจำเพาะของถ่านกัมมันต์มีค่ามากขึ้นในขณะที่พื้นที่ผิวจำเพาะของถ่านกัมมันต์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามเวลาที่อุณหภูมิ 800 °C แต่กลับลดลงตามเวลาที่อุณหภูมิสูงขึ้นที่ 900 °C อย่างไรก็ดีผลของเวลาและอุณหภูมิต่อการเปลี่ยนแปลงของพื้นที่ผิวจำเพาะมีไม่มากนักและพบว่าตัวเลขการดูดซับไอโอดีนสามารถใช้เป็นดัชนีในการวัดความสามารถในการดูดซับของถ่านกัมมันต์ได้เช่นเดียวกับค่าพื้นที่ผิวจำเพาะแต่จะมีค่าน้อยกว่าเป็นอัตราส่วนประมาณ 0.7 : 1
7. อัตราการเพิ่มความร้อน (heating rate) ในช่วงการกระตุ้นไม่มีผลต่อร้อยละผลผลิตรวมแต่พื้นที่ผิวจำเพาะของถ่านกัมมันต์มีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มอัตราการให้ความร้อนจาก 5 เป็น 20 °C/นาที
8. เมื่ออนุภาคถ่านหินมีขนาดเล็กลงทั้งร้อยละการหายไปของน้ำหนักถ่านและพื้นที่ผิวจำเพาะของถ่านกัมมันต์จะมีค่าเพิ่มมากขึ้น ทั้งนี้เป็นผลมาจากพื้นที่ผิวในการทำปฏิกิริยามีค่ามากขึ้น
9. ถ่านหินแม่เมาะและถ่านหินลานนาซึ่งเป็นถ่านหินศักย์ลิกไนท์ พบว่าเมื่อนำมากระตุ้นเป็นถ่านกัมมันต์ ถ่านหินลานนาจะให้ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะที่มากกว่า เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ CO_2 จาก 25% เป็น 100% ทั้งนี้อาจอธิบายได้ว่าเกิดจากความแตกต่างทางโครงสร้างทางเคมีของถ่านหินทั้งสองแหล่ง ซึ่งถ่านหินจากแหล่งลานนาจะมีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยา gasification ได้มากกว่า โดยเฉพาะเมื่อถูกกระตุ้นด้วยสารกระตุ้นที่มีความเข้มข้นสูง
10. การกระตุ้นด้วยไอน้ำ เมื่อเทียบกับการใช้ก๊าซ CO_2 พบว่าไอน้ำจะให้ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะของถ่านกัมมันต์มากกว่า รวมทั้งมีขนาดรูพรุนเฉลี่ยใหญ่กว่าด้วย
11. ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากลิกไนท์มีความสามารถในการดูดซับฟีนอลได้ถึง 80% ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายฟีนอลไม่เกิน 100 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อเทียบกับถ่านกัมมันต์ทางการค้าที่มีความสามารถในการดูดซับได้เกือบ 100% เมื่อความเข้มข้นของฟีนอลในสารละลายเพิ่มมากขึ้นความ

สามารถในการดูดซับของถ่านกัมมันต์จากลิกไนท์จะลดลงอย่างรวดเร็ว เนื่องจากมีพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนที่จำกัด

12. ผลงานวิจัยนี้แสดงว่ามีความเป็นไปได้ในการนำถ่านหินลิกไนท์ซึ่งเป็นถ่านหินศักย์ต่ำมาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์เพื่อใช้เป็นตัวดูดซับ ถึงแม้จะมีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะไม่สูงมากนัก ประมาณ 460 m^2/g แต่อาจเพิ่มค่าพื้นที่ผิวให้สูงกว่านี้ได้บ้าง โดยต้องเตรียมที่ขนาดอนุภาคละเอียด เช่น -100 mesh เป็นต้น เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวของการเกิดปฏิกิริยาและช่วยปลดปล่อยสารอนินทรีย์ออกจากเนื้อถ่านหินได้มากขึ้น

5.2 ข้อเสนอแนะ

เนื่องจากถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากถ่านหินลิกไนท์ยังมีความสามารถในการดูดซับที่ต่ำกว่าถ่านกัมมันต์ทางการค้าซึ่งกำหนดไว้ว่าค่าตัวเลขไอโอดีนต้องไม่ต่ำกว่า 600 mg/g [25] งานวิจัยในขั้นตอนต่อไปจึงควรจะมีการศึกษาถึงวิธีการที่จะเพิ่มความว่องไวในการเกิดรูพรุนจากปฏิกิริยา gasification ซึ่งสามารถใช้กระบวนการต่าง ๆ ก่อนนำไปผ่านการกระตุ้น ตัวอย่างเช่น การทำ preoxidation โดยเผาในอากาศที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดติดไฟ เช่น ต่ำกว่า 300°C การแช่ถ่านหินในสารเคมี เช่น KOH หรือ HCl ทั้งนี้เพื่อเปลี่ยนสภาพโครงสร้างภายในให้ง่ายต่อการแพร่ของสารกระตุ้นเพื่อเข้าไปทำปฏิกิริยา การลดปริมาณเถ้าโดยการบดถ่านหินและแยกอนุภาคที่มีอนินทรีย์วัตถุออกจากอนุภาคที่มีองค์ประกอบคาร์บอนสูงโดยใช้สารละลายหรือตัวกลางของเหลวที่มีความหนาแน่นต่าง ๆ เป็นต้น นอกจากนั้นยังอาจศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์จากถ่านหินศักย์สูงที่มีในประเทศไทย เช่น ถ่านหินบิทูมินัส หรือแอนทราไซท์ เป็นต้น เพื่อให้ได้ข้อมูลเกี่ยวกับการเตรียมถ่านกัมมันต์จากแหล่งถ่านหินที่หลากหลายและกว้างขวางยิ่งขึ้น แนวทางงานวิจัยอีกทางหนึ่งอาจขยายไปสู่การเตรียมถ่านกัมมันต์โดยใช้เตากระตุ้นที่ผลิตถ่านกัมมันต์ได้ในปริมาณมาก เช่น เตาแบบเบดนิ่ง (fixed bed) เตาระบบฟลูอิไดซ์เบด (fixed bed) แบบทรงกระบอกหมุน (rotary kiln) หรือแบบเบดเคลื่อนที่ (moving bed) เป็นต้น หัวข้องานวิจัยที่อาจศึกษาต่อไปได้แก่การเตรียมถ่านกัมมันต์จากลิกไนท์โดยวิธีกระตุ้นทางเคมี ซึ่งจะให้ผลดีกว่าการเตรียมโดยการกระตุ้นทางกายภาพเนื่องจากโมเลกุลของสารเคมีที่ใช้กระตุ้นสามารถแพร่และแทรกตัวเข้าไปอยู่ในโครงสร้างของเนื้อถ่านและการเตรียมจะมีเพียงขั้นตอนเดียวคือกระบวนการไพโรไลซิสในบรรยากาศของก๊าซเฉื่อย

บรรณานุกรม

1. กรมศุลกากร (2545) สถิติการนำเข้า-ส่งออก (ออนไลน์) ได้จาก : http : //www.customs.go.th/statistic-search.html
2. ปรีดา วิบูลย์สวัสดิ์ และศุภชาติ จงไพบูลย์วัฒนะ "สรุปและข้อเสนอแนะการพัฒนาพลังงาน" รายงานพลังงาน : สถานภาพและทิศทางอนาคต สวทช. กระทรวงวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม พ.ศ. 2543
3. สำนักงานคณะกรรมการนโยบายพลังงานแห่งชาติ สำนักนายกรัฐมนตรี (2545) ข้อมูลพลังงาน (ออนไลน์) ได้จาก http : //www.nepo.go.th/info/index.html
4. H. Jankowska, A. Swiatkowski and J. Choma, Active Carbon, Ellis Horwood, N.Y., 1991.
5. M. Greenbank and S. Spotts, Water Technology **16**, 56 (1993)
6. H. Teng, J. A Ho and Y. F. Hsu "Preparation of Activated Carbons from Bituminous Coals with CO_2 Activation - Influence of Coal Oxidation", Carbon, **35**(2), 275-283 (1997).
7. J.B. Parra, J.J.Pis, J.C. de Sousa, J.A.Pajares and R.C. Bansal "Effect of Coal Preoxidation on the Development of Microprosity in Activated Carbon", Carbon **34**(6), 783-787 (1996).
8. J. Sun, E.J. Hippo, H.Marsh, W.S.O'Brien and J.C. Crelling "Activated Carbon Produced from Illinois Basin Coal", Carbon **35**(3), 341-352 (1997).
9. M. J. Munoz - Guillena, M. J. Illan - Gomez, J. M. Martin - Martinez, A. Linares - Solano and C. Salinas - Martinez de Lecea "Activated Carbons from Spanish Coals : 1. Two - stage CO_2 Activation", Energy and Fuels **6**, 9 - 15 (1992).
10. Schobert, H. H., The Chemistry of Hydrocarbon Fuels, Butterworth - Heinemann Ltd, London, 1990.
11. Bansal, R. C., Donnet, J. and Stoeckli, F., Active Carbon, Marcel Dekker, New York, 1998.
12. N. A. Oztas, and Y. Yurum "Pyrolysis of Turkish Zonguldak Bituminuous Coal. Part 1 Effect of Mineral Matter" Fuel **79**, 1221 - 1227 (2000).
13. K. Ceylan, H. Karaca and Y. Onal "Thermogravimetric Analysis of Pretreated Turkish Lignite" Fuel **78**, 1109 - 1116 (1999).

14. A. Marcilla, M. Asensio and I. Martin - Gullon "Influence of the Carbonization Heating Rate on the Physical Properties of Activated Carbons from a Sub-Bituminuous Coal", Carbon, **34** (4), 449-456 (1996).
15. A. Linares-Solano, I. Martin-Gullon, C. Salinas-Martinez de Lecea, B. Serrano-Talavera "Activated Carbons from Bituminuous Coal : Effect of Mineral Matter Content", Fuel **79**, 635-643 (2000).
16. J.W. Patrick (editor), Porosity in Carbons : Characterization and Applications, Edward Arnold, 1995.
17. S.J. Gregg and K.S.W. Sing, Adsorption, Surface Area and Porosity, Academic Pres, 1982.
18. F. Rouquerol, J. Rouquerol and K.S.W. Sing, Adsorption by Powders and Porous Solids : Principles, Methodology and Applications, Academic Press, 1999.
19. S. Brunauer, L.S. Deming, W.S. Deming and E. Teller, J. Amer. Chem. Soc. **62**, 1723 (1940).
20. I. Langmuir, J. Amer. Chem. Soc. **40**, 1361 (1918).
21. S. Brunauer, P.H. Emmett and E. Teller, J. Amer. Chem. Soc. **60**, 309 (1938).
22. D.D.Do, Adsorption Analysis : Equilibria and Kinetics, Imperial College Press, 1998.
23. B.Basil Beamish "Proximate Analysis of New Zealand and Australian Coals by Thermogravimetry", New Zealand Journal of Geology and Geophysics **37**, 387-392 (1994).
24. บริษัท Denko จำกัด (2545) ข้อมูล Thailand Wastewater Effluent Standard of Industrial Estate (ออนไลน์) ได้จาก http://www.denkothai.com/raw_water_frame_4.htm
25. ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับที่ 1550 (พ.ศ. 2532) เรื่องกำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม : ถ่านกัมมันต์

ภาคผนวก ก
ประวัตินักวิจัย

ประวัติหัวหน้าโครงการวิจัยและผู้ร่วมวิจัย

ประวัติหัวหน้าโครงการวิจัย

นายชัยยศ ตั้งสถิตย์กุลชัย (Chaiyot Tangsathitkulchai)

ตำแหน่งปัจจุบัน รองศาสตราจารย์และหัวหน้าสาขาวิชาวิศวกรรมเคมี
สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ประวัติการศึกษา

ปีที่จบ	ระดับปริญญา	ชื่อปริญญา	สาขาวิชา	สถาบันที่จบ
พ.ศ. 2519	ตรี	วทบ.(เกียรตินิยม)	วิศวกรรมเคมี	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
พ.ศ. 2523	โท	M.App.Sc.	วิศวกรรมเคมี	University of Adelaide, Australia.
พ.ศ. 2529	เอก	Ph.D.	Mineral Processing	Pennsylvania State University, U.S.A.

สาขาวิชาที่มีความชำนาญพิเศษ

- เทคโนโลยีถ่านหิน
- การบดย่อยวัสดุ
- ถ่านกัมมันต์และการดูดซับ

ผลงานวิจัยที่ตีพิมพ์

มีผลงานวิจัยด้านถ่านหินและเทคโนโลยีอนุภาค จำนวน 40 เรื่อง (ดังแนบ)

ประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

งานวิจัยที่ทำเสร็จแล้ว

ชื่อเรื่อง	แหล่งทุน	ปีที่ทำเสร็จ	สถานภาพ
1. Improved Producer Gas Cleaning System	USAID	2533	ผู้ร่วมวิจัย
2. การพัฒนาระบบฟลูอิดไดซ์เบดหมุนเวียน	สภาวิจัยแห่งชาติ	2535	หัวหน้าโครงการ
3. ระบบผลิตพลังงานความร้อนจากแกลบข้าว	สภาวิจัยแห่งชาติ	2537	ผู้ร่วมวิจัย
4. การพัฒนาหม้อกำเนิดไอน้ำฟลูอิดไดซ์เบดสำหรับอุตสาหกรรมขนาดเล็ก	ASEAN-Australia	2537	ผู้ร่วมวิจัย
5. การจำแนกเถ้าลอยลิกไนต์ที่เหมาะสมจากแม่เมาะเพื่อใช้ในงานคอนกรีต	การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย	2538-2541	ผู้ร่วมวิจัย
6. กระบวนการซินเทอริงของเถ้าถ่านหินภายใต้สภาวะการเผาไหม้แบบฟลูอิดไดซ์เบด	เงินอุดหนุนการวิจัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี	2540-2542	หัวหน้าโครงการ

งานวิจัยที่กำลังดำเนินการ

เรื่อง	แหล่งทุน	ระยะเวลา	สถานภาพ
1. การผลิตถ่านกัมมันต์จากถ่านหินลิกไนท์	เงินอุดหนุนการวิจัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี	2541-2542	หัวหน้าโครงการ
2. การผลิตถ่านกัมมันต์จากถ่านหินลิกไนท์ด้วยวิธีกระตุ้นทางเคมี	เงินอุดหนุนการวิจัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี	2543-2544	หัวหน้าโครงการ
3. การเตรียมถ่านกัมมันต์จากวัสดุชีวมวลและการวัดสมบัติโครงสร้างรูพรุน	เงินอุดหนุนการวิจัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี	2545-2546	หัวหน้าโครงการ
4. สมดุลย์และจลนพลศาสตร์การดูดซับของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากเม็ดลำไย	ทุนโครงการปริญญาเอก กาญจนาภิเษก รุ่นที่ 3	2543-2547	หัวหน้าโครงการ
5. การเตรียมและวัดสมบัติของถ่านกัมมันต์จากกะลาและเส้นใยปาล์มน้ำมัน	ทุนโครงการปริญญาเอก กาญจนาภิเษก รุ่นที่ 4	2544-2548	หัวหน้าโครงการ
6. การปรับสภาพพื้นผิวของถ่านกัมมันต์จากไม้โตเร็ว	ทุนโครงการปริญญาเอก กาญจนาภิเษก รุ่นที่ 5	2545-2549	หัวหน้าโครงการ

<u>บทความวิจัย</u> (รศ.ดร.ชัยยศ ตั้งสถิตย์กุลชัย)

1. C. Tangsathitkulchai, and L.G. Austin, "The Effect of Slurry Density on Breakage Parameters of Quartz,Coal and Copper Ore in a Laboratory Ball Mill", Powder Technology, Vol. 42, 287-296 (1985).
2. C. Tangsathitkulchai, "The Rheological Behavior of Homogeneous Suspensions of Coal and Quartz Slurries", **KMITT** Research and Development Bulletin, No.1 vol.10, June 34-59 (1987).
3. L.G. Austin, and C. Tangsathitkulchai, "Comparison of Methods for Sizing Ball Mills Using Open-Circuit Wet Grinding of Phosphate ore as a Test Example", Ind. Eng. Chem. Res., vol.26, 997-1003 (1987).
4. T. Sakulpanich, P. Thitthiwong, D. Khummongkol, and C.Tangsathitkulchai, "Gasification of Coconut Shell with a Purpose of Charcoal Production", Proceedings of the Regional Symposium on Petrochemical Technology' 87, Chulalongkorn University Bangkok, Thailand, 14-17 December 1987.
5. C. Tangsathitkulchai, "Fluidized - Bed Cooling Tower" ,Proceedings of the Regional Symposium on Petrochemical Technology' 87, Chulalongkorn University Bangkok, Thailand, 14-17 December 1987.
6. C. Tangsathitkulchai, and L.G. Austin," Rheology of Concentrated Slurries of Particles of Natural Size Distribution Produced by Grinding ", Powder Technology, vol. 56, 293 -299,1988.
7. C. Tangsathitkulchai, " Slowing - Down Effect in Fine Wet Grinding ". paper presented at Joint Technical Seminar on Powder Technology (Thai - Japan), Technological Promotion Association (Thai - Japan), Bangkok, 21 Nov.,1988.
8. C. Tangsathitkulchai, and L.G. Austin, "Slurry Density Effects on Ball Milling in a Laboratory Ball Mill, Powder Tech. Vol. 59, No. 4,285 -289, 1989.
9. D. Khummongkol,and C. Tangsathitkulchai, " A Model for Tar - Removal Efficiency from Biomass - Produced Gas Impinging on a Water Surface", Energy, Vol. 14, No. 3, 113 -121, 1989.
10. C. Tangsathitkulchai, "Evaporative Cooling of Water in a Spouted Bed Contactor", Technical Meeting on Heat, Mass and Momentum Transfer, The Engineering Institute of Thailand, 12 -13 Dec. 1989.

11. C. Tangsathitkulchai, " Slowing - Down Effect in Fine Wet Grinding, TIZ International Powder Magazine, vol.113, No.10,802 -804, 1989.
12. C. Tangsathitkulchai, and D. Khummongkol, " Cleaning of Producer Gas from a Rice Husk Gasifier by Impingement on a Water Surface", International Conference on Energy & Environment, Tara Hotel,Bangkok, 27 - 30 Nov., 1990.
13. M. Tangsathitkulchai and C.Tangsathitkulchai "Study of Boiler Slag Deposit Formation Using a Vertical Externally - Heated Tube Furnace", International Conference on Energy & Environment, Tara Hotel, Bangkok, 27 - 30 Nov.,1990.
14. C. Tangsathitkulchai, "Water Cooling in a Three - Phase Spouted Bed", the First National Chemical Engineering Conference, Siam Intercontinental Hotel, Bangkok, 17-19 Dec,1990.
15. S.Suwanayuen, C. Tangsathitkulchai, S. Tia, and V.Kritpiphat, "A Multifuel Fluidized Bed Boiler for Small Scale Industrial Use: System Design", the First National Chemical Engineering Conferenec, Siam Intercontinental Hotel, Bangkok, 17 -19 Dec.,1990.
16. C. Tangsathitkulchai, "Sizing of Ball Mills Using a Size - Mass Balance Approach", 2nd Japan - Thailand Symposium on Powder Technology - Applications to Environmental Protection, New Material and Industrial Pharmacy, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, 22 - 23 Aug.,1991.
17. ชัยยศ ตั้งสถิตย์กุลชัย, บทความวิชาการ เรื่อง " ปัญหามลภาวะจากการใช้ลิกไนต์และการป้องกัน", วารสารเทคโนโลยี สจธ., ฉบับที่ 1 ปีที่ 4 เดือนตุลาคม 2534.
18. C. Tangsathitkulchai, S. Tia, S. Suwanayuen, A. Dararuja and P. Reungsin, "Mixing of Rice Husk in a Fluidized Bed of Sand", Conference on Advance in Chemical Engineering, B.P. Grand Tower Hotel, Songkla, Jun 25 -26,1991.
19. S. Suwanayuen, T. Chayawattana, Y. Surachpakorn, S. Tia, and C. Tangsathitkulchai, "Combustion of Rice Hull in a Fluidized Bed Furnace", ASEAN J. Sci & Tech., vol, no. 2, 107 - 115, 1992.
20. S. Suwanayuen, S. Tia, C. Tangsathitkulchai, P. Raungsin, and A. Dararuja, "Mixing of Fuel Particles in a Fluidized Bed of Sand, ASEAN J. Sci & Tech., Vol, no.2 143 -150, 1992.
21. S. Suwanayuen, S. Tia, C. Tangsathitkulchai, T. Pursakasemsug, and W. Promboon, "A Cold Model Study of Erosion in a Gas Fluidized Bed of Sand", Res. Dev. J. of Eng.Inst. Thailand, vol.3, No. 2, 1992.

22. S. Suwanayeun, C. Tangsathitkulchai, and S. Tia, "Lignite Fluidized Bed Combustor for Small - Scale Industrial Use", ASEAN FBC workshop, Bundung, Indonesia, 12-14 Apr, 1993.
23. C. Tangsathitkulchai et.al.,"Fluidized Bed Combustion of Rice Hull", proceeding of 1st Technical Meeting of Engineering Faculty, KMITT, 8 - 9 Jun 1993.
24. S. Suwanayeun, C. Tangsathitkulchai, and S. Tia. "Performance of KMITT - Prototype Fluidized Bed Boiler : Effects of Fuel Type & Size", the 5th ASEAN Conf. on. Energy Tech., Tara Hotel, Bangkok, 25 -27 Apr, 1994.
25. S. Suwanayeun, C. Tangsathitkulchai, and S. Tia, "Emission Characteristics of KMITT Prototype Fluidized Bed Boiler", the 5th ASEAN Conf. on Energy Tech, Tara Hotel, Bangkok, 25 -27 Apr, 1994.
26. C. Tangsathitkulchai, C. Kuvarananchareon, and M. Tangsathitkulchai, " Sintering Study of Thai Lignite Ashes", 2nd Technical Meeting of Engineering Faculty, KMITT, 7 - 8 Jun, 1994.
27. C. Tangsathitkulchai, S. Suwanayeun, and S. Tia "Evaluation of a 2MW Fluidized Bed Boiler Burning Thai Lignite", 4th ASIAN Conf. on Fluidized Bed and Three - Phase Reactors, Fukuoka, Japan, 28-30 Nov, 1994.
28. C. Tangsathitkulchai, "Acceleration of Particle Breakage Rate in a Laboratory Wet Ball Mill", Mining Engineering Conf., B.P. Grand Tower, Songkla, 24 - 25 Nov, 1994.
29. M. Tangsathitkulchai, and C. Tangsathitkulchai, "Sintering of Coal Ashes : Effects of Temperature and Atmosphere", 4th Chem. Eng. Conf., Khonkaen Univ., 20-21Oct,1994.
30. M. Tangsathitkulchai, and C. Tangsathitkulchai"Sintering of Coal Ashes : Effects of Extraction and Addition of Alkali Glass Materials, Suranaree J. Sci. Technol.,1, No.2,123 - 132, 1994.
31. C. Tangsathitkulchai, and M. Tangsathitkulchai, "Effect of Environment Atmosphere on the Sintering of Thai Lignite Fly Ashes", Eng. Found. Conf. on Application of Advanced Technologies to Ash - Related Problem in Boilers, New Hampshire, 16-21 July,1995.
32. S. Tia, C. Tangsathitkulchai, and P. Dumronglaohapun, "Continuous Drying of Slurry in a Jet Spouted Bed", Drying Technology, 13 (8&9), 1825 - 1840 (1995).
33. C. Tangsathitkulchai and M. Tangsathitkulchai, "Study of Slag Deposit Formation using Synthetic Coals", 7th APCCHE Congress, Taipei, Mar 4 - 6, 1996.
34. ไกรวุฒิ เกียรติโกมล, ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, เอนก ศิริพานิชกร, จารุรัตน์ วรนิสรากุล , พยูร เกตุกราย , สมิตร ส่งพิริยะกิจ , พิชัย นิมิตยงสกุล , ปริญญา จินดาประเสริฐ , ชัยยศ ตั้งสถิตย์กุลชัย ,

ทิน เกตุรัตนบวร "การคัดเลือกถ่านหินที่เหมาะสมสำหรับงานคอนกรีต (Classified Fly Ash for Concrete Utilization)", บทความเสนอในการประชุมใหญ่ทางวิชาการประจำปี 2539 สมาคมวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย , 15-18 สิงหาคม 2539, ศูนย์การประชุมแห่งชาติสิริกิติ์

35. S.Tia, S. Suwanayuen, C. Tangsatitkulchai, C. Phromvichit and W. Nimipal, " Heat Transfer Characteristics in a Small - Scale Fluidized Bed Boiler", Int. J. Energy Research, Vol.20, 521-530, 1996.
36. C. Tangsatitkulchai, and M. Tangsatitkulchai, "Sintering Behavior of Coal Ashes under Fluidized Bed Combustion Conditions", Proceedings of 8th Chemical Engineering Conference, Mahidol University, 17-18 Dec, 1998.
37. C. Tangsathitkulchai, and M. Tangsathitkulchai, "Effect of Fluidized Bed Materials on Sintering Behavior of Coal Ashes", Regional Symposium on Chemical Engineering, Prince of Songkla University, 22 - 24 Nov, 1999.
38. C. Tangsathitkulchai, and M. Tangsathitkulchai, "Effect of Bed Materials and Additives on the Sintering of Coal Ashes Relevant to Agglomeration in Fluidized Bed Combustion", Fuel Processing Technology, 72, 163-183, 2001.
39. C. Tangsathitkulchai, "Acceleration of Particle Breakage Rates in Wet Batch Ball Milling", Powder Technology, 124, 67-75, 2002.
40. C.Tangsathitkulchai,"The Effect of Slurry Rheology on Fine Grinding in a Laboratory Ball Mill", International Journal of Mineral Processing, in press (2002).

ประวัติผู้ร่วมงานวิจัย

นางมาลี ตั้งสถิตย์กุลชัย (Malee Tangsathitkulchai)

ตำแหน่งปัจจุบัน

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ประจำสาขาวิชาเคมี

สำนักวิชาวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ประวัติการศึกษา

ปีที่จบ	ระดับปริญญา	ชื่อปริญญา	สาขาวิชา	สถาบันที่จบ
พ.ศ. 2515	ตรี	วทบ.	เคมี	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
พ.ศ. 2517	โท	วทม.	เคมีอนินทรีย์	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
พ.ศ. 2523	โท	M.S.	Inorganic Chemistry	Flinders University, Australia.
พ.ศ. 2529	เอก	Ph.D.	Fuel Science	Pennsylvania state University, U.S.A.

สาขาวิชาที่มีความชำนาญพิเศษ

- เทคโนโลยีถ่านหิน
- ถ่านกัมมันต์และการดูดซับ

ประสบการณ์งานวิจัย

งานวิจัยที่ทำเสร็จแล้ว

(1) Reactions at Noble Metal/Ceramic Interfaces
(ผู้ร่วมวิจัย, พ.ศ. 2520-2523)

(2) Fundamental Studies of the Mechanisms of Slag Deposit Formation
(ผู้ร่วมวิจัย, พ.ศ. 2525-2529)

(3) Sintering and Slag Deposit Formation of Thai Lignite Ashes
(ผู้ร่วมวิจัย, พ.ศ. 2534-2537)

(4) กระบวนการซินเทอริงของเถ้าถ่านหินภายใต้สภาวะการเผาไหม้แบบฟลูอิดไดซ์เบด
(ผู้ร่วมวิจัย, ทุนอุดหนุนการวิจัยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปี 2540-2542)

งานวิจัยที่กำลังดำเนินการ

(1) การนำเถ้าลอยถ่านหินมาใช้ผลิตสาร Zeolite

(2) การศึกษาซินเทอริงของเถ้าชีวมวลภายใต้สภาวะการเผาไหม้แบบฟลูอิดไดซ์เบด

(3) การผลิตถ่านกัมมันต์จากถ่านหินลิกไนท์
(ผู้ร่วมวิจัย, ทุนอุดหนุนวิจัยปี 2542 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี)

(4) การผลิตถ่านกัมมันต์จากถ่านหินลิกไนท์โดยวิธีกระตุ้นทางเคมี
(ผู้ร่วมวิจัย, ทุนอุดหนุนวิจัยปี 2543-4 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี)

(5) การเตรียมถ่านกัมมันต์จากวัสดุชีวมวลและการวัดสมบัติโครงสร้างรูพรุน
(ผู้ร่วมวิจัย, ทุนอุดหนุนการวิจัยปี 2545-2546 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

<u>ผลงานวิจัยที่ตีพิมพ์</u>

มีผลงานวิจัยเกี่ยวกับการใช้ประโยชน์ถ่านหิน และซินเทอริง จำนวน 16 เรื่อง (ดังแนบ)

<u>บทความวิจัย</u> (ผศ.ดร.มาลี ตั้งสถิตย์กุลชัย)

1. Bruin, H.J. de., and Tangtreeratana, M., 1981, "Diffusion of Palladium Into MgO", Technical note, J. of Physics and Chemistry of Solids, Vol. 42(4), 333-334.
2. Austin, L.G., Kinnman, W.P., Abbott, M.F., and Tangsathitkulchai, M., 1984, Ash Deposition in Syngas Coolers of Slagging Gasifiers", Electric Power Research Institute Project 1654-11, Final Report.
3. Tangsathitkulchai, M., and Austin, L.G., 1985, " Studies of Sintering of Coal Ash Relevant to Pulverized Coal Utility Boilers: Part 2: Preliminary Studies of Compressive Strength of Fly Ash Sinters", Fuel, Vol 64., 86-92.
4. Tangsathitkulchai, M., and Austin, L.G., 1985, " Studies of Slag Deposit Formation Using a Laboratory Furnace", American Society of Mechanical Engineering Paper No. 85.- JPGC - Pwr-45 presented at the Jt. ASME/IEEE power generation conference, Milwaukee, wisconsin, USA, oct 20-24.
5. Tangsathitkulchai, M., and Austin, L.G., 1985", Nature of The Surface Involved in Fly Ash Adhesion on Boiler Steel", Short Communications, Fuel, Vol. 64, 1764-1765.
6. Benson, S.A., Tangsathitkulchai, M., and Austin, L.G., 1985, " Studies of Ash Deposit Formation Using a Laboratory Furnace", Proceeding of An Annual Pittsburgh Coal Conference, 689-694.
7. Austin, L.G., Benson, S.A., Schobert, H.H., and Tangsathitkulchai, M., 1987 "Fundamental Studies of the Mechanism of Slag Deposit Formation", U.S. Department of Energy Report DOE/FE-70770.
8. Tangsathitkulchai, M., and Tangsathitkulchai, C., 1990, " Studies of Boiler Slag Deposit Formation Using A Vertical Externally-Heated Tube Furnace", International Conference of Energy and Environment, Tara Hotel, Bangkok, November 27-30.
9. Tangsathitkulchai,C.,Kuvarananchareon,C.,and Tangsathitkulchai, M., 1994, Sintering Study of Thai Lignite Ashes, " 2nd Technical Meeting, Faculty of Engineering, King Mongkut Institute of Technology Thonburi, June 7-8.
10. Tangsathitkulchai, M., and Tangsathitkulchai, C., 1994 "Sintering of Coal Ashes: Effects of Temperature and Atmosphere," 4th National Chemical Engineering Conference, Khon Kaen University, October 20-21.

11. Tangsathitkulchai, M., and Tangsathitkulchai, C., 1994, "Sintering of Coal Ashes: Effects of Extraction and Addition of Alkali - Glass Materials," Suranaree Journal of Science and Technology, Vol. 1, No.2, July - December, 123-132.
12. Tangsathitkulchai, C., and Tangsathitkulchai, M., 1995, " Effect of Environment Atmosphere on The Sintering of Thai Lignite Fly Ashes," Presented at the Engineering Foundation Conference:Application of Advanced Technology to Ash - Related Problems in Boilers,16-22 July,New Hampshire, USA.
13. Tangsathitkulchai, C., and Tangsathitkulchai, M., "Study of Slag Deposit Formation Using Synthetic Coals," Presented at the 7th Asian Pacific Confederation of Chemical Engineers Congress of Taipei Chem Exhibition. Taipei, Taiwan, March 4-6, 1996.
14. Tangsathitkulchai, C., and Tangsathitkulchai, M., 1998 "Sintering Behavior of Coal Ashes under Fluidized Bed Combustion Conditions", 8th National Chemical Engineering Conference, Mahidol University, December 17-18.
15. Tangsathitkulchai, C., and Tangsathitkulchai, M., 1999 "Effect of Fluidized Bed Materials on the Sintering Behavior of Coal Ashes", Regional Symposium on Chemical Engineering, Prince of Sonkla University, Songkla, November 22-24.
16. C. Tangsathitkulchai, and M. Tangsathitkulchai, 2000, Effect of bed Materials and Additives on the Sintering of Coal Ashes Relevant to agglomeration in Fluidized Bed Combustion, Fuel Processing Technology, 72, 163-183, 2001.