

การเตรียมและวัดสมบัติถ่านกัมมันต์จากถ่านหินลิกไนต์
โดยวิธีการกระตุ้นทางกายภาพและทางเคมี

นางสาวนภรัตน์ จิวลักษณ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2545
ISBN 974-533-240-2

**PREPARATION AND CHARACTERIZATION OF ACTIVATED CARBON
FROM LIGNITE COAL BY PHYSICAL AND CHEMICAL ACTIVATION**

Miss Naparat Jiwalak

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of

Master of Engineering in Chemical Engineering

Suranaree University of Technology

Academic Year 2002

ISBN 974-533-240-2

การเตรียมและวัดสมบัติต้านกัมมันต์จากถ่านหินลิกไนต์
โดยวิธีการกระตุ้นทางกายภาพและทางเคมี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้หน่วยวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารธุรกิจ

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....*โศภณวรรณ*.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. รัตนวรรณ เกียรติโกมล)
ประธานกรรมการ

.....*ชัยยศ ตั้งสติกุลชัย*.....
(รองศาสตราจารย์ ดร. ชัยยศ ตั้งสติกุลชัย)
กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

.....*มาลี ตั้งสติกุลชัย*.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. มาลี ตั้งสติกุลชัย)
กรรมการ

.....*ทวิช จิตรสมบูรณ์*.....
(รองศาสตราจารย์ ดร. ทวิช จิตรสมบูรณ์)
รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

.....*วรพจน์ ข้าพิศ*.....
(รองศาสตราจารย์ น.อ. ดร. วรพจน์ ข้าพิศ)
คณบดี สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

นภรัตน์ จิวลักษณ์ : การเตรียมและวัดสมบัติด้านกัมมันต์จากถ่านหินลิกไนต์โดยวิธีการกระตุ้นทางกายภาพและทางเคมี (Preparation and characterization of activated carbon from lignite coal by physical and chemical activation)

อ.ที่ปรึกษา : รศ. ดร. ชัยยศ ตั้งสติกุลชัย

อ.ที่ปรึกษาร่วม : ผศ. ดร. มาลี ตั้งสติกุลชัย, 141 หน้า

ISBN 974-533-240-2

งานวิจัยนี้ศึกษาการเตรียมและวิเคราะห์สมบัติของถ่านกัมมันต์จากถ่านหินลิกไนต์โดยวิธีการกระตุ้นทางกายภาพและทางเคมี ตัวแปรที่ศึกษาได้แก่ อุณหภูมิ เวลา ชนิดของสารกระตุ้น ความเข้มข้นของสารกระตุ้น อัตราการเพิ่มความร้อน ขนาดอนุภาค ชนิดของถ่านหิน และปริมาณเถ้าในถ่านหิน ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้นำมาวิเคราะห์องค์ประกอบและวัดสมบัติต่างๆ เช่น พื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรและขนาดรูพรุน ความสามารถในการดูดซับ เป็นต้น สำหรับสภาวะของการเตรียมถ่านกัมมันต์โดยวิธีการกระตุ้นทางกายภาพพบว่า อุณหภูมิสูง เวลาสั้น ขนาดอนุภาคเล็ก และปริมาณเถ้าที่น้อยทำให้ถ่านกัมมันต์ที่ได้มีค่าพื้นที่ผิวสูงขึ้น ส่วนการทดลองที่ใช้สารกระตุ้นต่างชนิดกัน(CO_2 และ H_2O) และการใช้ถ่านหินต่างชนิดกัน (แม่เมาะและลานนา) นั้นพบว่าเมื่อผลทำให้ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้มีสมบัติไม่ต่างกันมากนัก โดยถ่านกัมมันต์ที่ให้พื้นที่ผิวจำเพาะมากที่สุด 460 ตารางเมตรต่อกรัม ได้จากการใช้ถ่านหินขนาด 40×50 mesh อุณหภูมิ 900°C และเวลา 60 นาที ส่วนในการทดลองเตรียมถ่านกัมมันต์โดยวิธีการกระตุ้นทางเคมีพบว่า อุณหภูมิ เวลา และอัตราส่วนความเข้มข้นของสารกระตุ้น(KOH: ถ่านหิน)มีอิทธิพลมาก โดยสภาวะที่ทำให้ถ่านกัมมันต์มีพื้นที่ผิวมากที่สุด 2236 ตารางเมตรต่อกรัม อยู่ที่ 900°C เวลา 60 นาที และอัตราส่วนความเข้มข้น 1.0:1.0 เส้น ไอโซเทอมของการดูดซับสำหรับถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากถ่านหินทั้ง 2 วิธี เป็นแบบชนิดที่ 1 (Type I) การเตรียมถ่านกัมมันต์โดยวิธีการกระตุ้นทางเคมีมีการกระจายขนาดรูพรุนเกิดขึ้นมากซึ่งทำให้มีพื้นที่ผิวจำเพาะมากกว่าถ่านกัมมันต์ที่เตรียมโดยวิธีการกระตุ้นทางกายภาพซึ่งส่วนใหญ่มีรูพรุนขนาดเล็ก ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมโดยวิธีการกระตุ้นทางเคมีมีความสามารถในการดูดซับฟินอลได้ดีกว่าถ่านกัมมันต์ทางกายภาพและการค้าและที่เตรียมโดยวิธีการกระตุ้นทางกายภาพ การดูดซับฟินอลเกิดขึ้นได้ดีเมื่อค่า pH ของสารละลายอยู่ระหว่าง 2 – 7 โดยมีกระบวนการดูดซับเป็นแบบคายความร้อน ซึ่งสมมูลการดูดซับสามารถอธิบายได้ด้วยแบบจำลองการดูดซับของ Langmuir BET และ Freundlich

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

ปีการศึกษา 2545

ลายมือชื่อนักศึกษา.....นภรัตน์ จิวลักษณ์.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....ดร. ชัยยศ ตั้งสติกุลชัย.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....ผศ. ดร. มาลี ตั้งสติกุลชัย.....

NAPARAT JIWALAK : PREPARATION AND CHARACTERIZATION OF ACTIVATED
CARBON FROM LIGNITE COAL BY PHYSICAL AND CHEMICAL ACTIVATION
THESIS ADVISER : ASSOC. PROF. CHAIYOT TANGSATHITKULCHAI, Ph.D.
THESIS CO-ADVISER : ASSIST. PROF. MALEE TANGSATHITKULCHAI, Ph.D.
141 PP. ISBN 974-533-240-2

ACTIVATED CARBON/PHYSICAL ACTIVATION/CHEMICAL ACTIVATION/ADSORPTION/COAL

This research was aimed to study the preparation and characterization of activated carbon from lignite coal by physical activation and chemical activation. The variables studied were temperature, holding time, type and amount of activating agent, heating rate, particle size, type of coal and coal ash content. Various properties of activated carbon products such as specific surface area, pore volume and adsorption capacity were analyzed. The results showed that, for the physical activation process, higher temperature, shorter activation time, smaller particle size and lower ash content gave activated carbon with higher specific surface area. Different activating agent (CO_2 and H_2O) and different type of coal (Maemoh and Lanna) had relatively little effect on the properties of prepared activated carbon. Activation temperature of 900°C , a duration of 60 min. and 40×50 mesh coal particles have been found to give a maximum specific surface area of $460\text{ m}^2/\text{g}$ for the physical activation method. In the chemical activation process, the $\text{KOH}:\text{coal}$ ratio as well as temperature and hold time had strong influence on activated carbon properties. The highest specific surface area of $2236\text{ m}^2/\text{g}$ was obtained under the activation temperature of 900°C , a duration of 60 min. and $\text{KOH}:\text{coal}$ ratio 1.0:1.0. Adsorption isotherms of activated carbons from both physical and chemical activation showed type I isotherm. The activated carbons from chemical activation exhibited wider range of pore size distributions and hence higher specific surface area as compared to those obtained from physical activation which gave mainly microporosity. Activated carbon from chemical activation was able to remove phenol better than those activated carbons from commercial and physical activation. The best phenol removal occurred in solution with pH 2-7. The phenol adsorption process is exothermic and follows the Langmuir, BET and Freundlich isotherm equations.

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี
ปีการศึกษา 2545

ลายมือชื่อนักศึกษา..... นกัฒน จิตลิกษณ.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา..... วิชาญ วัฒนกุล.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม..... มล วัฒนกุล.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้ดำเนินการสำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ด้วยดี ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ บุคคล และกลุ่มบุคคลต่างๆ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ ช่วยเหลือ อย่างดียิ่ง ทั้งในด้านวิชาการและด้านการดำเนินงานวิจัย กล่าวคือ

- รองศาสตราจารย์ ดร.ชัยยศ ตั้งสติย์กุลชัย หัวหน้าสาขาวิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มาลี ตั้งสติย์กุลชัย หัวหน้าสาขาวิชาเคมี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ได้กรุณาให้โอกาสทางการศึกษา ให้ความรู้อันเป็นประโยชน์ต่อการทำวิทยานิพนธ์เป็นอย่างมาก และแนะนำการเขียนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ทำให้วิทยานิพนธ์มีความถูกต้องสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

- ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รัตนวรรณ เกียรติโกมล ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และคณาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่าน

- การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย จังหวัดลำปาง ที่ให้ความอนุเคราะห์ตัวอย่างถ่านหินเพื่อใช้ในงานวิจัย

- มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่สนับสนุนทุนอุดหนุนในการวิจัย และในการเผยแพร่ผลงานวิจัย

- ครู-อาจารย์ทุกท่าน ที่ได้กรุณาให้ความรู้ทางด้านวิชาการทั้งในอดีตและปัจจุบัน (โรงเรียนโยธินนุกูล โรงเรียนสุรนารีวิทยา และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี)

- เจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี และเจ้าหน้าที่ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ทุกท่าน โดยเฉพาะอย่างยิ่ง คุณรุ่งเรือง นวน โปธิ์ และคุณอัมพร ลาดหนองขุ่น

- นักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษสาขาวิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่าน โดยเฉพาะอย่างยิ่งคุณสุพรรณิ คุณณัฐยา และคุณอารียา (สาขาวิชาจุลชีววิทยา)

ท้ายที่สุดนี้ ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และญาติพี่น้องทุกท่าน ที่ให้การเลี้ยงดูอบรม และให้กำลังใจด้วยความรัก ความอบอุ่น และส่งเสริมทางการศึกษาเป็นอย่างดีมาโดยตลอด ทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิตตลอดมา

นภรัตน์ จิวลักษณ์

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ฉ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ด
บทที่	
1. บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตของการศึกษา.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
2. ทัศนวิสัยวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ความหมายและโครงสร้างของถ่านหิน.....	4
2.2 การจำแนกถ่านหิน.....	4
2.3 การวิเคราะห์ถ่านหิน.....	6
2.4 การลดปริมาณเถ้าในถ่านหิน.....	7
2.5 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับถ่านหินลิกไนต์ในประเทศไทย.....	8
2.6 ความหมายของถ่านกัมมันต์.....	10
2.7 วัตถุดิบที่นำมาใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์.....	11
2.8 วิธีการผลิตถ่านกัมมันต์.....	13
2.9 ชนิดของถ่านกัมมันต์.....	17
2.10 ประโยชน์ของถ่านกัมมันต์.....	18

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.11	โครงสร้างทางเคมีและรูปทรงของถ่านกัมมันต์.....	21
2.12	กระบวนการดูดซับและการหาพื้นที่ผิว.....	24
2.13	การดูดซับและปัจจัยที่มีต่อการดูดซับของเหลวบนถ่านกัมมันต์.....	31
2.14	การดูดซับฟีนอลในน้ำ.....	34
2.15	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	40
3.	วิธีดำเนินงานวิจัย	44
3.1	การเตรียมถ่านกัมมันต์โดยวิธีการกระตุ้นทางกายภาพ	44
3.2	การเตรียมถ่านกัมมันต์โดยวิธีการกระตุ้นทางเคมี.....	52
3.3	การวัดสมบัติของถ่านหิน ถ่านชาร์ และถ่านกัมมันต์.....	55
3.4	การทดสอบและเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับฟีนอลในสารละลาย ของถ่านกัมมันต์และถ่านกัมมันต์ทางค้า.....	58
4.	ผลและการอภิปรายผล.....	62
4.1	ผลการวิเคราะห์วัตถุคิบ.....	62
4.2	การเตรียมถ่านกัมมันต์โดยวิธีการกระตุ้นทางกายภาพ	62
4.2.1	ขั้นตอนการคาร์บอนไนซ์.....	62
4.2.2	ขั้นตอนการกระตุ้น	69
4.2.3	การลดปริมาณเถ้าในถ่านหินลิกไนต์	95
4.3	การเตรียมถ่านกัมมันต์โดยวิธีการกระตุ้นทางเคมี.....	104
4.4	การดูดซับฟีนอลในสารละลายโดยใช้ถ่านกัมมันต์.....	116
5.	สรุปและข้อเสนอแนะ	132
5.1	สรุปผลงานวิจัย.....	132
5.1.1	การเตรียมถ่านกัมมันต์โดยวิธีการกระตุ้นทางกายภาพ	132
5.1.2	การเตรียมถ่านกัมมันต์โดยวิธีการกระตุ้นทางเคมี.....	133
5.1.3	การดูดซับฟีนอลในสารละลายโดยใช้ถ่านกัมมันต์.....	134
5.2	ข้อเสนอแนะ	134

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

เอกสารอ้างอิง.....	136
ประวัติผู้เขียน	141

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 การผลิตและการใช้ถ่านหินลิกไนต์.....	9
2.2 คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตถ่านกัมมันต์และการใช้ประโยชน์	12
2.3 สถิติการนำเข้าและส่งออกถ่านกัมมันต์.....	20
2.4 คุณสมบัติทางกายภาพของฟีนอล.....	36
2.5 ความเข้มข้นของฟีนอล อุณหภูมิ และความเป็นกรด - เบสในน้ำทิ้งของนิคม อุตสาหกรรมต่างๆ	37
2.6 ประกาศของคณะกรรมการและกระทรวงต่างๆที่เกี่ยวกับฟีนอล.....	39
3.1 ภาวะที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัยในขั้นตอนการกระตุ้น	50
3.2 สมบัติต่างๆ ของถ่านกัมมันต์ทางการค้า.....	59
4.1 ผลการวิเคราะห์แบบประมาณของถ่านหินที่ศึกษา	63
4.2 ผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุของถ่านหินที่ศึกษา.....	63
4.3 ผลการคาร์บอนไนซ์และการวิเคราะห์แบบประมาณของถ่านหิน และถ่านชาร์	65
4.4 ผลการวิเคราะห์แบบประมาณของถ่านหิน ถ่านชาร์ และถ่านกัมมันต์.....	70
4.5 ผลการกระตุ้นและสมบัติของถ่านกัมมันต์แปรผันอุณหภูมิและเวลา.....	74
4.6 ผลการกระตุ้นและสมบัติของถ่านกัมมันต์เมื่อแปรผันชนิดของสารกระตุ้น.....	77
4.7 ผลการกระตุ้นและสมบัติของถ่านกัมมันต์เมื่อแปรผันความเข้มข้นของสารกระตุ้น	80
4.8 ผลการกระตุ้นและสมบัติของถ่านกัมมันต์เมื่อแปรผันอัตราการเพิ่มความร้อน	83
4.9 ผลการกระตุ้นและสมบัติของถ่านกัมมันต์เมื่อแปรผันขนาดอนุภาค	85
4.10 ผลการกระตุ้นและสมบัติของถ่านกัมมันต์เมื่อแปรผันชนิดของถ่านหิน.....	88
4.11 ชนิดและปริมาณสารอนินทรีย์ (เถ้า) หลักในถ่านหิน	96
4.12 ผลการวิเคราะห์แบบประมาณของถ่านหินและถ่านกัมมันต์ที่ได้จากถ่านหิน ที่ผ่านและไม่ผ่านการลดปริมาณเถ้าทั้ง 2 วิธี.....	98
4.13 ผลการกระตุ้นและสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากถ่านหินที่ผ่าน และไม่ผ่านการลดปริมาณเถ้าทั้ง 2 วิธี	101

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.14 ผลการวิเคราะห์แบบประมาณของถ่านหินและถ่านกัมมันต์.....	105
4.15 ผลการกระตุ้นและสมบัติของถ่านกัมมันต์.....	107
4.16 สมบัติของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จากถ่านหินลิกไนต์ และถ่านกัมมันต์ ทางการค้าที่ใช้ในการดูดซับฟีนอลในสารละลาย.....	116
4.17 ผลการทดสอบและเปรียบเทียบความสามารถการดูดซับฟีนอลในสารละลาย ของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากถ่านหินลิกไนต์ และถ่านกัมมันต์ทางการค้า.....	127
4.18 ค่าตัวแปรต่างๆของสมการ Langmuir BET และ Freundlich.....	130

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 โครงสร้างของถ่านหิน	5
2.2 โครงสร้างของผลึกแกรไฟต์	22
2.3 โครงสร้างของถ่านกัมมันต์	23
2.4 หมู่ฟังก์ชันต่างๆบนผิวของถ่านกัมมันต์	25
2.5 ชนิดของเส้นไอโซเทอมของการดูดซับ	28
2.6 สูตรโครงสร้างของฟีนอลและอนุพันธ์ของฟีนอล	35
3.1 เครื่องบดหยาบ (jaw crusher) ยี่ห้อ Retsch รุ่น BB1	46
3.2 เครื่องบดละเอียดแบบลูกบอล (ball mill) ยี่ห้อ Pascal engineering รุ่น 23790	46
3.3 เครื่องเขย่าตะแกรง (sieve shaker) ยี่ห้อ Retsch รุ่น AS200digit และตะแกรง ขนาด 0.3 มิลลิเมตร (50 mesh) 0.425 มิลลิเมตร (40 mesh) 0.60 มิลลิเมตร (30 mesh) และ 0.85 มิลลิเมตร (20 mesh) ยี่ห้อ Retsch รุ่น ASTM11	47
3.4 เตาเผาแบบท่อ (tube furnace) ยี่ห้อ Carbolite รุ่น CTF 12/75/700/2416	47
3.5 เตาเผาแบบท่อ (tube furnace) ยี่ห้อ Carbolite รุ่น CTF 12/75/700/201	49
3.6 เครื่องเขย่าแนวราบแบบควบคุมอุณหภูมิ (shaking water bath) ยี่ห้อ Labnet รุ่น SBD50	49
3.7 เตาเผาแบบท่อ (tube furnace) ยี่ห้อ Vectar รุ่น VC TF4	54
3.8 เครื่อง Thermogravimetric analyzer (TGA) ยี่ห้อ Perkin Elmer รุ่น TGA7	54
3.9 เครื่องวิเคราะห์ธาตุ ยี่ห้อ LECO รุ่น CHNS-932	56
3.10 เครื่องเรืองแสงรังสีเอกซ์ (Energy Dispersive X-ray Fluorescence Spectrometer, EDXRF) ยี่ห้อ Oxford รุ่น ED2000	56
3.11 เครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิวแบบอัตโนมัติ ยี่ห้อ Micromeritics รุ่น ASAP2010	57
3.12 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM6400	57

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.13 เครื่อง UV/visible spectrophotometer ยี่ห้อ Varian รุ่น Cary 1E.....	60
4.1 ผลของอุณหภูมิและเวลาต่อร้อยละน้ำหนักที่หายไปของถ่านชาร์ (ช่วงอุณหภูมิการคาร์บอไนซ์ 500 – 800°C ช่วงเวลาการคาร์บอไนซ์ 10 – 80 นาที อัตราการเพิ่มความร้อน 20°Cต่อนาที อัตราการป้อน แก๊สไนโตรเจน 100 มิลลิลิตรต่อนาที.....	66
4.2 (ก) ผลของอุณหภูมิและเวลาต่อร้อยละปริมาณความชื้นของถ่านชาร์ (ข) ผลของอุณหภูมิและเวลาต่อร้อยละปริมาณสารระเหยของถ่านชาร์ (ค) ผลของอุณหภูมิและเวลาต่อร้อยละปริมาณเถ้าของถ่านชาร์ (ง) ผลของอุณหภูมิและเวลาต่อร้อยละปริมาณคาร์บอนคงตัวของถ่านชาร์	67
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการหายไปของน้ำหนักของถ่านหินลิกไนต์ กับอุณหภูมิการคาร์บอไนซ์ (ช่วงอุณหภูมิการคาร์บอไนซ์ 25 – 950°C อัตราการเพิ่มความร้อน 20°Cต่อนาที ภายใต้บรรยากาศแก๊สไนโตรเจน วิเคราะห์ด้วยเครื่อง Thermogravimetric analyzer (TGA))	68
4.4 ผลของอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการกระตุ้นต่อร้อยละน้ำหนักที่หายไป ในช่วงการกระตุ้นของถ่านกัมมันต์ (ขนาดอนุภาค 20×30 mesh ที่สภาวะ การคาร์บอไนซ์ : 700°C 40นาที 20°Cต่อนาที และสภาวะการกระตุ้น : 25%CO ₂ + %N ₂).....	72
4.5 เส้นไอโซเทอมการดูดซับของถ่านกัมมันต์ขนาด 20×30 mesh ที่สภาวะ การคาร์บอไนซ์ : 700°C 40นาที 20°Cต่อนาที และสภาวะการกระตุ้น : (1) 800°C 90นาที (2) 800°C 60นาที (3) 900°C 90นาที ทั้งหมดใช้ อัตราการป้อน 25%CO ₂ + 75%N ₂	72
4.6 ผลของอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการกระตุ้นต่อพื้นที่ผิวจำเพาะของ ถ่านกัมมันต์ (ขนาดอนุภาค 20×30 mesh ที่สภาวะการคาร์บอไนซ์ : 700°C 40นาที 20°Cต่อนาที และสภาวะการกระตุ้น : 25%CO ₂ + 75%N ₂)	75

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.7 ผลของอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการกระตุ้นต่อปริมาตรรูพรุนของ ถ่านกัมมันต์ (ขนาดอนุภาค 20X30 mesh ที่สภาวะการคาร์บอนไนซ์ : 700°C 40นาที 20°Cต่อนาที และสภาวะการกระตุ้น : 25%CO ₂ + 75%N ₂)	75
4.8 ผลของอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการกระตุ้นต่อค่าการดูดซับ ไอ โอ ดิน และพื้นที่ผิวจำเพาะของถ่านกัมมันต์ (ขนาดอนุภาค 20X30 mesh ที่สภาวะการคาร์บอนไนซ์ :700°C 40นาที 20°Cต่อนาที และสภาวะ การกระตุ้น : 60นาที 25%CO ₂ + 75%N ₂).....	76
4.9 ผลของชนิดของสารกระตุ้นต่อพื้นที่ผิวจำเพาะของถ่านกัมมันต์ (ขนาด อนุภาค 20X30mesh ที่สภาวะการคาร์บอนไนซ์ :700°C 40นาที 20°Cต่อนาที และสภาวะการกระตุ้น : 900°C 60นาที 20°Cต่อนาที 100%สารกระตุ้น)	78
4.10 ผลของชนิดของสารกระตุ้นต่อปริมาตรรูพรุนของถ่านกัมมันต์ (ขนาด อนุภาค 20X30 mesh ที่สภาวะการคาร์บอนไนซ์ :700°C 40นาที 20°Cต่อนาที และสภาวะการกระตุ้น :900°C 60นาที 20°Cต่อนาที 100%สารกระตุ้น)	78
4.11 ผลของความเข้มข้นของสารกระตุ้น (แก๊สคาร์บอน ไดออกไซด์) ต่อพื้นที่ผิว จำเพาะของถ่านกัมมันต์ (ขนาดอนุภาค 20X30 mesh ที่สภาวะการคาร์บอนไนซ์ : 700°C 40นาที 20°Cต่อนาที และสภาวะการกระตุ้น : 900°C 60นาที 20°C ต่อนาที).....	81
4.12 ผลของความเข้มข้นของสารกระตุ้น (แก๊สคาร์บอน ไดออกไซด์) ต่อปริมาตร รูพรุนของถ่านกัมมันต์ (ขนาดอนุภาค 20X30 mesh ที่สภาวะการคาร์บอนไนซ์ : 700°C 40นาที 20°Cต่อนาที และสภาวะการกระตุ้น : 900°C 60นาที 20°Cต่อนาที).....	81
4.13 ผลของความเข้มข้นของสารกระตุ้น (ไอน้ำ) ต่อพื้นที่ผิวจำเพาะของ ถ่านกัมมันต์ (ขนาดอนุภาค 20X30 mesh ที่สภาวะการคาร์บอนไนซ์ : 700°C 40นาที 20°Cต่อนาที และสภาวะการกระตุ้น : 900°C 60นาที 20°Cต่อนาที).....	82

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.14 ผลของความเข้มข้นของสารกระตุ้น (ไอน้ำ) ต่อปริมาตรรูพรุนของ ถ่านกัมมันต์ (ขนาดอนุภาค 20×30 mesh ที่สภาวะการคาร์บอน : 700°C 40นาที่ 20°Cต่อนาที่ และสภาวะการกระตุ้น : 900°C 60นาที่ 20°Cต่อนาที่).....	82
4.15 ผลของอัตราการเพิ่มความร้อนต่อค่าพื้นที่ผิวจำเพาะของถ่านกัมมันต์ (ขนาดอนุภาค 20×30 mesh ที่สภาวะการคาร์บอน : 800°C 60นาที่ และสภาวะการกระตุ้น : 900°C 60นาที่ 25%CO ₂ + 75%N ₂)	84
4.16 ผลของอัตราการเพิ่มความร้อนต่อปริมาตรรูพรุนของถ่านกัมมันต์ (ขนาดอนุภาค 20×30 mesh ที่สภาวะการคาร์บอน : 800°C 60นาที่ และสภาวะการกระตุ้น : 900°C 60นาที่ 25%CO ₂ + 75%N ₂)	84
4.17 ผลของขนาดอนุภาคต่อพื้นที่ผิวจำเพาะของถ่านกัมมันต์ (สภาวะการ คาร์บอน : 800°C 60นาที่ 5°Cต่อนาที่ และสภาวะการกระตุ้น : 900°C 60นาที่ 5°Cต่อนาที่ 25%CO ₂ +75%N ₂).....	86
4.18 ผลของขนาดอนุภาคต่อปริมาตรรูพรุนของถ่านกัมมันต์ (สภาวะการ คาร์บอน : 800°C 60นาที่ 5°Cต่อนาที่ และสภาวะการกระตุ้น : 900°C 60นาที่ 5°Cต่อนาที่ 25%CO ₂ +75%N ₂).....	86
4.19 ผลของชนิดของถ่านหินต่อพื้นที่ผิวจำเพาะของถ่านกัมมันต์ (ขนาดอนุภาค 20×30 mesh ที่สภาวะการคาร์บอน : 800°C 60นาที่ 5°Cต่อนาที่ และสภาวะการกระตุ้น : 900°C 60นาที่ 5°Cต่อนาที่ 25%CO ₂ +75%N ₂).....	89
4.20 ผลของชนิดของถ่านหินต่อปริมาตรรูพรุนของถ่านกัมมันต์ (ขนาดอนุภาค 20×30 mesh ที่สภาวะการคาร์บอน : 800°C 60นาที่ 5°Cต่อนาที่ และสภาวะการกระตุ้น : 900°C 60นาที่ 5°Cต่อนาที่ 25%CO ₂ +75%N ₂).....	89
4.21 ผลของชนิดของถ่านหินต่อปริมาตรรูพรุนของถ่านกัมมันต์ (ขนาดอนุภาค 20×30 mesh ที่สภาวะการคาร์บอน : 800°C 60นาที่ 5°Cต่อนาที่ และสภาวะการกระตุ้น : 900°C 60นาที่ 5°Cต่อนาที่ 100%CO ₂).....	90

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.22 ภาพถ่าย SEM ที่กำลังขยาย 3000 เท่า แสดงลักษณะพื้นผิวของ	
(ก) ถ่านหินดิบแม่เมาะ ขนาดอนุภาค 20×30 mesh	
(ข) ถ่านชาร์แม่เมาะที่สภาวะการคาร์บอนไนซ์ : 700°C 40นาที่ 20°Cต่อนาที่	
(ค) ถ่านกัมมันต์แม่เมาะ ที่สภาวะการคาร์บอนไนซ์ : 700°C 40นาที่ 20°Cต่อนาที่	
และที่สภาวะการกระตุ้น : 800°C 60นาที่ 20°Cต่อนาที่ 25%CO ₂ + 75%N ₂	92
4.23 ภาพถ่าย SEM ที่กำลังขยาย 3000 เท่า แสดงลักษณะพื้นผิวของ	
(ก) ถ่านหินดิบแม่เมาะ ขนาดอนุภาค 20×30 mesh	
(ข) ถ่านชาร์แม่เมาะ ที่สภาวะการคาร์บอนไนซ์ : 800°C 60นาที่ 5°Cต่อนาที่	
(ค) ถ่านกัมมันต์แม่เมาะ ที่สภาวะการคาร์บอนไนซ์ : 800°C 60นาที่ 5°Cต่อนาที่	
และที่สภาวะการกระตุ้น : 900°C 60นาที่ 5°Cต่อนาที่ 25%CO ₂ + 75%N ₂	93
4.24 ภาพถ่าย SEM ที่กำลังขยาย 3000 เท่า แสดงลักษณะพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ทางการค้า.....	94
4.25 เส้นไอโซเทอมการดูดซับของถ่านกัมมันต์ (ขนาด 20×30 mesh ที่สภาวะ	
การคาร์บอนไนซ์ : 700°C 40 นาที่ 20°Cต่อนาที่ และสภาวะการกระตุ้น :	
800°C 60นาที่ 20°Cต่อนาที่ 25%CO ₂ + 75%N ₂)	100
4.26 ผลของการลดเข้าในถ่านหินต่อพื้นที่ผิวจำเพาะของถ่านกัมมันต์ (ขนาดอนุภาค	
20×30 mesh ที่สภาวะการคาร์บอนไนซ์ : 700°C 40นาที่ 20°Cต่อนาที่	
และสภาวะการกระตุ้น : 800°C 60นาที่ 20°Cต่อนาที่ 25%CO ₂ +75%N ₂)	102
4.27 ผลของการลดเข้าในถ่านหินต่อปริมาตรรูพรุนของถ่านกัมมันต์ (ขนาดอนุภาค	
20×30 mesh ที่สภาวะการคาร์บอนไนซ์ : 700°C 40นาที่ 20°Cต่อนาที่	
และสภาวะการกระตุ้น : 800°C 60นาที่ 20°Cต่อนาที่ 25%CO ₂ +75%N ₂)	102

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.28 ภาพถ่าย SEM ที่กำลังขยาย 3000 เท่า แสดงลักษณะพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ ที่สภาวะการคาร์บอนไนซ์ : 700°C 40นาที่ 20°Cต่อนาที่ และที่สภาวะการ กระตุ้น : 800°C 60นาที่ 20°Cต่อนาที่ 25%CO ₂ + 75%N ₂ (ก) ถ่านกัมมันต์ จากถ่านหินไม่ผ่านการลดเถ้า (ข) ถ่านกัมมันต์จากถ่านหินผ่านการลดเถ้าโดย การแยกอนุภาคในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ความหนาแน่น 1.4 กรัมต่อ มิลลิลิตร (ค) ถ่านกัมมันต์จากถ่านหินผ่านการลดเถ้าด้วยกรดไฮโดรคลอริก ความเข้มข้นร้อยละ 30 โดยปริมาตร.....	103
4.29 เส้นไอโซเทอมการดูดซับของถ่านกัมมันต์จากถ่านหินแม่เมาะขนาดอนุภาค 20×30 mesh โดยวิธีการกระตุ้นทางเคมี : (1) 600°C 60 นาที่ 1.0:1.0 (2) 800°C 60 นาที่ 0.5:1.0 (3) 800°C 60 นาที่ 1.0:1.0 (4) 800°C 120 นาที่ 1.0:1.0.....	108
4.30 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อร้อยละน้ำหนักที่หายไปของถ่านกัมมันต์จากถ่านหิน แม่เมาะขนาดอนุภาค 20×30 mesh โดยวิธีการกระตุ้นทางเคมี ที่สภาวะ : 60 นาที่ 1.0:1.0 (KOH:ถ่านหิน).....	108
4.31 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อค่าการดูดซับ ไอ โอซินและพื้นที่ผิวจำเพาะของ ถ่านกัมมันต์จากถ่านหิน แม่เมาะขนาดอนุภาค 20×30 mesh โดยวิธี การกระตุ้นทางเคมี ที่สภาวะ : 60 นาที่ 1.0:1.0 (KOH:ถ่านหิน).....	109
4.32 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อปริมาตรรูพรุนต่างๆของถ่านกัมมันต์จากถ่านหินแม่เมาะ ขนาดอนุภาค 20×30 mesh โดยวิธีการกระตุ้นทางเคมี ที่สภาวะ: 60 นาที่ 1.0:1.0 (KOH:ถ่านหิน).....	109
4.33 ผลของเวลาที่มีต่อพื้นที่ผิวจำเพาะของถ่านกัมมันต์จากถ่านหินแม่เมาะขนาด อนุภาค 20×30 mesh โดยวิธีการกระตุ้นทางเคมี ที่สภาวะ : 600 – 800°C 1.0:1.0 (KOH:ถ่านหิน).....	111

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.34 ผลของเวลาที่มีต่อปริมาณรูพรุนต่างๆของถ่านกัมมันต์จากถ่านหินแม่เมาะขนาดอนุภาค 20×30 mesh โดยวิธีการกระตุ้นทางเคมี ที่สภาวะ : 600 – 800°C 1.0:1.0 (KOH:ถ่านหิน).....	111
4.35 ผลของอัตราส่วนระหว่างสารกระตุ้นต่อวัตถุดิบที่มีต่อพื้นที่ผิวจำเพาะของถ่านกัมมันต์จากถ่านหินแม่เมาะขนาดอนุภาค 20×30 mesh โดยวิธีการกระตุ้นทางเคมี ที่สภาวะ : 600 – 800°C 60 นาที.....	112
4.36 ผลของอัตราส่วนระหว่างสารกระตุ้นต่อวัตถุดิบที่มีต่อปริมาณรูพรุนต่างๆของถ่านกัมมันต์จากถ่านหินแม่เมาะขนาดอนุภาค 20×30 mesh โดยวิธีการกระตุ้นทางเคมี ที่สภาวะ : 600 – 800°C 60 นาที.....	112
4.37 ภาพถ่าย SEM ที่กำลังขยาย 1000 เท่า แสดงลักษณะพื้นผิวของถ่านกัมมันต์แม่เมาะขนาด 20×30 mesh (ผลของอุณหภูมิและอัตราส่วนระหว่างKOHต่อถ่านหิน).....	113
4.38 ภาพถ่าย SEM ที่กำลังขยาย 1000 เท่า แสดงลักษณะพื้นผิวของถ่านกัมมันต์แม่เมาะขนาด 20×30 mesh (ผลของอุณหภูมิและเวลา).....	114
4.39 กราฟมาตรฐานของสารละลายฟีนอล (วัดค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายฟีนอลด้วยเครื่อง UV/visible spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 268.89 นาโนเมตร).....	118
4.40 ผลของปริมาณถ่านกัมมันต์ต่อปริมาณฟีนอลที่ถูกดูดซับบนถ่านกัมมันต์ที่เตรียมโดยวิธีการกระตุ้นทางเคมี (ความเข้มข้นของสารละลายฟีนอลเริ่มต้นเท่ากับ 100 mg/L ความเป็นกรด – เบสของสารละลายฟีนอลเท่ากับ 7 ปริมาตรสารละลายที่ใช้ 100 mL เวลาที่ใช้ในการเขย่า 24 ชั่วโมง อุณหภูมิการดูดซับ 30°C).....	120
4.41 ผลของเวลาที่ใช้ในการเข้าสู่สมดุลต่อปริมาณฟีนอลที่ถูกดูดซับบนถ่านกัมมันต์ที่เตรียมโดยวิธีการกระตุ้นทางเคมี (ความเข้มข้นของสารละลายฟีนอลเริ่มต้นเท่ากับ 100 500 และ 1000 mg/L ความเป็นกรด – เบสของสารละลายฟีนอลเท่ากับ 7 ปริมาตรสารละลายที่ใช้ 100 mL อุณหภูมิการดูดซับ 30°C).....	121

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.42 ผลของค่าความเป็นกรด – เบสของสารละลายฟีนอลต่อปริมาณฟีนอลที่ถูกดูดซับบนถ่านกัมมันต์ที่เตรียมโดยวิธีการกระตุ้นทางเคมี (ความเข้มข้นของสารละลายฟีนอลเริ่มต้นเท่ากับ 100 mg/L ปริมาตรสารละลายที่ใช้ 100 mL เวลาที่ใช้ในการเขย่า 24 ชั่วโมง อุณหภูมิการดูดซับ 30°C)	124
4.43 ผลของอุณหภูมิการดูดซับต่อปริมาณฟีนอลที่ถูกดูดซับบนถ่านกัมมันต์ที่เตรียมโดยวิธีการกระตุ้นทางเคมี (ความเข้มข้นของสารละลายฟีนอลเริ่มต้นเท่ากับ 100 mg/L ความเป็นกรด – เบสของสารละลายฟีนอลเท่ากับ 7 ปริมาตรสารละลายที่ใช้ 100 mL เวลาที่ใช้ในการเขย่า 24 ชั่วโมง)	125
4.44 ผลของชนิดของถ่านกัมมันต์ต่อปริมาณฟีนอลที่ถูกดูดซับบนถ่านกัมมันต์ (ความเข้มข้นของสารละลายฟีนอลเริ่มต้นในช่วง 0 – 1000 mg/L ความเป็นกรด – เบสของสารละลายฟีนอลเท่ากับ 7 ปริมาตรสารละลายที่ใช้ 100 mL เวลาที่ใช้ในการเขย่า 24 ชั่วโมง อุณหภูมิการดูดซับ 30°C)	126
4.45 เส้นไอโซเทอมการดูดซับฟีนอลบนถ่านกัมมันต์ที่เตรียมโดยวิธีการกระตุ้นทางเคมีจากการทดลองและจากสมการทางคณิตศาสตร์ (ความเข้มข้นของสารละลายฟีนอลเริ่มต้นในช่วง 0 – 1000 mg/L ความเป็นกรด – เบสของสารละลายฟีนอลเท่ากับ 7 ปริมาตรสารละลายที่ใช้ 100 mL เวลาที่ใช้ในการเขย่า 24 ชั่วโมง อุณหภูมิการดูดซับ 30°C).....	131

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

$^{\circ}\text{C}$	=	องศาเซลเซียส
P/P^0	=	ความดันสัมพัทธ์ (relative pressure)
P	=	ความดันของสารถูกดูดซับ
P^0	=	ความดันไออิ่มตัวของแก๊สที่เป็นตัวถูกดูดซับที่อุณหภูมินั้นๆ
n_m	=	ปริมาณของสารถูกดูดซับที่เรียงแบบชั้นเดียวในลักษณะปกคลุมผิวของสารดูดซับ
b	=	สัมประสิทธิ์ของการดูดซับซึ่งขึ้นกับอุณหภูมิและมีลักษณะเฉพาะขึ้นกับชนิดของสารถูกดูดซับและสารดูดซับ
S	=	พื้นที่ผิวจำเพาะ (ตารางเมตรต่อกรัม)
A_m	=	พื้นที่เฉลี่ยที่ถูกปกคลุมด้วยสารถูกดูดซับหนึ่งโมเลกุล (ตารางเมตร)
L	=	ค่าคงที่อะโวกาโดร (6.022×10^{23} โมเลกุลต่อโมล)
ΔH_A	=	ความร้อนของการดูดซับระหว่างการเกิดการดูดซับแบบชั้นเดียว
ΔH_L	=	ความร้อนของการควบแน่น
R	=	ค่าคงที่ของแก๊ส (gas constant)
T	=	อุณหภูมิสัมบูรณ์
Abs	=	ค่าการดูดกลืนแสง
X	=	ปริมาณฟินอลที่ถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของถ่านกัมมันต์ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
V	=	ปริมาตรของสารละลายฟินอล (มิลลิลิตร)
M	=	น้ำหนักของถ่านกัมมันต์ (กรัม)
X_m	=	ปริมาณของตัวถูกดูดซับที่เรียงแบบชั้นเดียวในลักษณะปกคลุมผิวของตัวดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับ
$C_{e(\text{obs})}$	=	ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่สมดุลที่ได้จากการทดลอง (มิลลิกรัมต่อลิตร)
$C_{e(\text{cal})}$	=	ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่สมดุลที่ได้จากการคำนวณ (มิลลิกรัมต่อลิตร)

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญของปัญหา

ถ่านกัมมันต์ (activated carbon) เป็นถ่านที่อยู่ในรูปของคาร์บอนอสัณฐาน (amorphous carbon) ชนิดหนึ่งที่เกิดได้โดยการกระตุ้น (activation) ทำให้เกิดโครงสร้างที่มีรูพรุนจำนวนมาก และมีพื้นที่ผิวภายใน (internal surface area) เพิ่มขึ้น จึงเป็นถ่านที่มีความสามารถในการดูดซับสูง เหมาะที่จะนำไปใช้ในการดูดซับ คอลลอยด์ รวมทั้งสารปนเปื้อนต่างๆตลอดจนใช้ในกระบวนการแยกสาร (separation process) ตัวอย่างอุตสาหกรรมที่ใช้ประโยชน์จากถ่านกัมมันต์ ได้แก่ อุตสาหกรรมน้ำตาล อุตสาหกรรมอาหาร และเครื่องดื่ม การทำน้ำให้บริสุทธิ์ อุตสาหกรรมผลิตไขมันและน้ำมัน อุตสาหกรรมชุบโลหะ เป็นต้น

ในปัจจุบันถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในประเทศส่วนใหญ่เป็นผลิตภัณฑ์นำเข้าจากต่างประเทศ โดยมีระดับราคาแบ่งตามประเภทของถ่านกัมมันต์ดังนี้ ถ่านกัมมันต์ชนิดผงราคาตันละประมาณ 1 แสนบาท และถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ดราคาตันละประมาณ 2 หมื่นบาท ถึง 6 หมื่นบาท (กรมส่งเสริมอุตสาหกรรม, ออนไลน์, 2545) และเมื่อพิจารณาสถิติการนำเข้าและการส่งออกของถ่านกัมมันต์ (ตามรหัสสินค้า 3802) พบว่าสถิติการนำเข้ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องทุกปี ตัวอย่างเช่น ในปี พ.ศ.2543 และ 2544 มีปริมาณการนำเข้าถ่านกัมมันต์ทั้งหมดคิดเป็นมูลค่า 350 และ 475 ล้านบาท ตามลำดับ ขณะที่สถิติการส่งออกมีแนวโน้มลดลง ตัวอย่างเช่น ในปี พ.ศ.2543 และ 2544 มีปริมาณการส่งออกถ่านกัมมันต์ทั้งหมดคิดเป็นมูลค่าประมาณ 171 และ 162 ล้านบาท ตามลำดับ (กรมศุลกากร, ออนไลน์, 2545) ทั้งนี้เนื่องจากบริษัทที่ผลิตถ่านกัมมันต์ในประเทศมีน้อยราย อีกทั้งถ่านกัมมันต์ที่ผลิตภายในประเทศเป็นถ่านกัมมันต์คุณภาพปานกลางใช้ในงานการดูดซับทั่วไป ดังนั้นการพัฒนางานวิจัยและเทคนิคต่างๆในการผลิตถ่านกัมมันต์ที่มีคุณภาพจากวัตถุดิบในประเทศ จะช่วยให้มีการผลิตถ่านกัมมันต์ขึ้นใช้เองภายในประเทศ เป็นการประหยัดเงินตราในการนำเข้าอีกทางหนึ่งด้วย

วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์ ได้แก่ วัสดุทุกชนิดที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ เช่น ไม้เนื้อแข็ง ไม้เนื้ออ่อน ช้างขา โปด แกลบข้าว กะลามะพร้าว กะลาปาล์ม ชานอ้อย ขี้เลื่อย เปลือกและเมล็ดผลไม้ ถ่านหิน ถ่านไม้ น้ำมันดิบ และกากปิโตรเลียม เป็นต้น สำหรับประเทศไทยแหล่งวัตถุดิบสำคัญที่สามารถนำมาใช้ผลิตถ่านกัมมันต์ ได้แก่ วัสดุชีวมวลประเภทต่างๆ ซึ่งส่วนใหญ่เป็นวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร และถ่านหินซึ่งส่วนใหญ่เป็นถ่านหินลิกไนต์ สำหรับถ่านหินนั้น ในปี พ.ศ.2544 ประเทศไทยมีปริมาณสำรองรวมทั้งสิ้นประมาณ 1,332 ล้านตัน และมีปริมาณการ

ใช้ถ่านหินทั้งสิ้น 24.5 ล้านตัน โดยร้อยละ 80 ใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้า และอีกร้อยละ 20 ใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมซีเมนต์ อุตสาหกรรมกระดาษ เป็นต้น (กรมเชื้อเพลิงธรรมชาติ, ออนไลน์, 2545) จะเห็นได้ว่าถ่านหินลิกไนต์เป็นวัตถุดิบที่น่าสนใจและมีศักยภาพที่สามารถนำมาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ได้ เนื่องจากมีปริมาณคาร์บอนเป็นองค์ประกอบสูงและมีปริมาณสำรองมาก นอกเหนือจากการใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้าและใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆดังกล่าวข้างต้น งานวิจัยนี้สนใจศึกษาการผลิตถ่านกัมมันต์จากถ่านหินลิกไนต์ทั้งโดยวิธีการกระตุ้นทางกายภาพ (physical activation) และวิธีการกระตุ้นทางเคมี (chemical activation) เพื่อให้เข้าใจถึงสถานะที่เหมาะสมที่สุดในการผลิตถ่านกัมมันต์ที่มีคุณภาพ และเพื่อสามารถใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานที่จำเป็นต่อการผลิตในระดับอุตสาหกรรมต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์จากถ่านหินลิกไนต์โดยวิธีการกระตุ้นทางกายภาพ และวิเคราะห์สมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ได้

1.2.2 เพื่อศึกษาผลของปริมาณถ่านหินที่มีต่อการเตรียมถ่านกัมมันต์จากถ่านหินลิกไนต์โดยวิธีการกระตุ้นทางกายภาพและวิเคราะห์สมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ได้

1.2.3 เพื่อศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์จากถ่านหินลิกไนต์ด้วยวิธีการกระตุ้นทางเคมีโดยใช้สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) เป็นสารกระตุ้น และวิเคราะห์สมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ได้

1.2.4 เพื่อทดสอบและเปรียบเทียบความสามารถการดูดซับฟีนอลในสารละลายของถ่านกัมมันต์ที่ได้ และของถ่านกัมมันต์ทางการค้า

1.3 ขอบเขตการศึกษา

1.3.1 ศึกษาผลกระทบของตัวแปรต่างๆที่มีต่อการเตรียมถ่านกัมมันต์จากถ่านหินลิกไนต์โดยวิธีการกระตุ้นทางกายภาพ โดยแบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ขั้นตอน ได้แก่ ขั้นตอนการคาร์บอนไนซ์ (carbonization) และขั้นตอนการกระตุ้น

1.3.2 ศึกษาผลของปริมาณถ่านหินที่มีต่อการเตรียมถ่านกัมมันต์จากถ่านหินลิกไนต์ โดยวิธีการกระตุ้นทางกายภาพ โดยแบ่งการศึกษาวิธีการลดปริมาณถ่านหินออกเป็น 2 วิธี ได้แก่ การล้างด้วยกรดไฮโดรคลอริก (HCl washing treatment) และการแยกอนุภาคในตัวกลางของเหลว (float – sink separation) โดยใช้สารละลายแคลเซียมคลอไรด์ (CaCl_2) เป็นตัวกลาง

1.3.3 ศึกษาผลกระทบของตัวแปรต่างๆที่มีต่อการเตรียมถ่านกัมมันต์จากถ่านหินลิกไนต์ด้วยวิธีการกระตุ้นทางเคมีโดยใช้สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นสารกระตุ้น

1.3.4 การวิเคราะห์สมบัติของถ่านหิน ถ่านกัมมันต์ และถ่านกัมมันต์ทางการค้า ได้แก่ ร้อยละน้ำหนักที่หายไป การวิเคราะห์แบบประมาณ ค่าการดูดซับไอโอดีน พื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุน และลักษณะพื้นผิวของถ่านกัมมันต์

1.3.5 การทดสอบและเปรียบเทียบความสามารถการดูดซับฟีนอลในสารละลายของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้และถ่านกัมมันต์ทางการค้า

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 สามารถสร้างมูลค่าเพิ่มให้กับถ่านหินและเพื่อเป็นการใช้ทรัพยากรภายในประเทศให้คุ้มค่าที่สุด

1.4.2 ข้อมูลที่ได้จากงานวิจัยนี้สามารถใช้เป็นข้อมูลเบื้องต้นในการผลิตถ่านกัมมันต์ที่มีคุณภาพจากถ่านหินลิกไนต์ ในระยะยาวจะช่วยให้เกิดการพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตถ่านกัมมันต์ขึ้นใช้เองได้ในประเทศ

บทที่ 2

ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ความหมายและโครงสร้างของถ่านหิน

ถ่านหิน คือ หินตะกอน(sedimentary rock)ชนิดหนึ่งซึ่งสามารถติดไฟได้ มีส่วนประกอบที่มีสารประกอบของคาร์บอน (carbonaceous material) ไม่น้อยกว่าร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก หรือ ร้อยละ 70 โดยปริมาตร (ประเสริฐ ชุมรม, 2538)

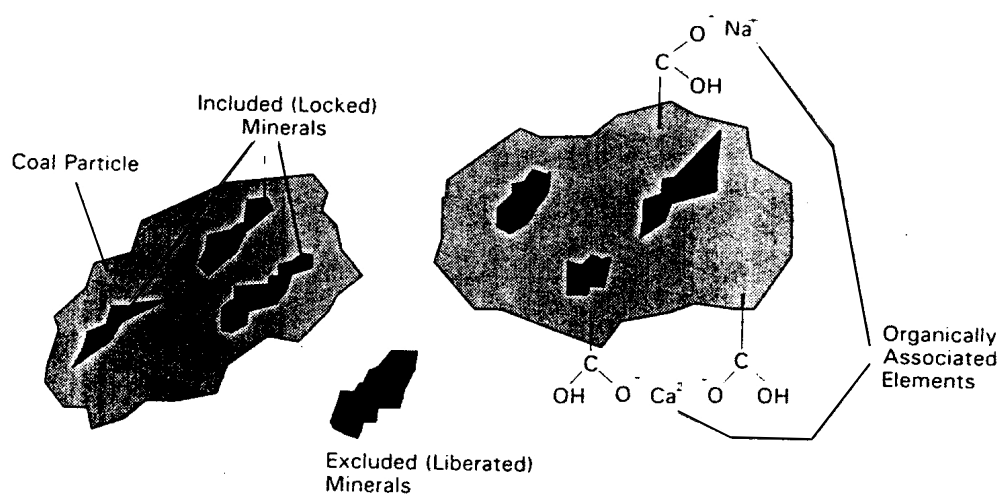
โครงสร้างของถ่านหิน (แสดงในรูปที่ 2.1) ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ

1) ส่วนที่เป็นสารประกอบอินทรีย์ (organic compounds) ซึ่งประกอบด้วย คาร์บอน (C) ไฮโดรเจน (H) ออกซิเจน (O) ไนโตรเจน (N) และซัลเฟอร์ (S)

2) ส่วนที่เป็นสารประกอบอนินทรีย์หรือสารแร่ (inorganic compounds หรือ minerals) ซึ่งเป็นสารที่เจือปนอยู่ในถ่านหินทั้งที่แทรกอยู่ในเนื้อถ่านหินและที่แทรกอยู่ในชั้นถ่านหินในแหล่งกำเนิดและที่เจือปนเข้ามาจากกระบวนการต่างๆในการทำเหมือง แบ่งออกเป็นกลุ่มหลัก 8 กลุ่ม คือ ส่วนที่เป็นดินเหนียว (สารประกอบไฮดรตเชิงซ้อนของอัลคาไลน์ ซิลิคอน และอะลูมิเนียม) สารประกอบซัลไฟด์โดยเฉพาะไพไรต์ สารประกอบคาร์บอเนต ซัลเฟต คลอไรด์ ซิลิเกต ออกไซด์และฟอสเฟต รวมกันมากกว่า 125 ชนิด (กัญจนา บุญเกียรติ, 2544)

2.2 การจำแนกถ่านหิน

การจำแนกถ่านหินกระทำได้สองลักษณะ คือ จำแนกตามชนิด (type) และจำแนกตามศักดิ์ (rank) (Speight, 1994) การศึกษาถ่านหินด้านธรณีวิทยาจำแนกถ่านหินตามชนิด ซึ่งแบ่งกลุ่มถ่านหินตามองค์ประกอบทางด้านสรีรวิทยา (petrography) เรียกว่า กลุ่มมาเซรัล (maceral groups) สามกลุ่มคือ วิทริไนต์ (vitrinite) เอกซิไนต์ (exinite) และอินเนอร์ติไนต์ (inertinite) สองกลุ่มแรกเป็นเนื้อถ่านหินที่ว่องไว กลุ่มหลังถือว่าเป็นส่วนที่ไม่ว่องไว แต่ละกลุ่มมีต้นกำเนิดจากพืชและสิ่งมีชีวิตขนาดเล็กต่างกัน (กัญจนา บุญเกียรติ, 2544) อย่างไรก็ตามการศึกษาถ่านหินด้านอื่นและการนำไปใช้งานใช้การจำแนกตามศักดิ์ ซึ่งบ่งถึงลำดับการเปลี่ยนเป็นถ่านหิน (coalification) ของถ่านหินนั้นๆ ลำดับการเปลี่ยนเป็นถ่านหินขึ้นอยู่กับทั้งอายุและอัตราการเปลี่ยนแปลงจากต้นกำเนิดถึงปัจจุบัน



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของถ่านหิน

หมายเหตุ จากหนังสือ Fundamentals of coal combustion for clean and efficient use, โดย Smoot, L. D., 1993, New York : Elsevier.

American Society for Testing Materials, ASTM ได้กำหนดเกณฑ์ในการจำแนกถ่านหินตาม สักย์เป็นลิกไนต์ (lignite) ซับบิทูมินัส (sub-bituminous) บิทูมินัส (bituminous) และแอนทราไซต์ (antracite) (ASTM, 1998) โดยมีลักษณะเฉพาะดังนี้

- ถ่านหินลิกไนต์ มีรากศัพท์มาจากภาษาละติน lignum ซึ่งหมายถึงไม้ ถ่านหิน ลิกไนต์มีความเป็นถ่านหินน้อยที่สุด จัดเป็นถ่านหินอ่อน (soft coal) จึงมีร่องรอยของเนื้อไม้ มีสีทึบ ดำน มีความชื้นและสารระเหยสูง มีค่าความร้อนต่ำใกล้เคียงกับเซลลูโลส

- ถ่านหินซับบิทูมินัส เป็นถ่านหินสักย์สูงถัดจากลิกไนต์ บางทีเรียกว่า ลิกไนต์ดำ (black lignite) จึงยังจัดเป็นถ่านหินอ่อนเช่นกัน แม้จะมีร้อยละคาร์บอนสูงกว่าลิกไนต์ มักจะมีความชื้น สูงและมีปริมาณเถ้าสูงด้วย แต่เนื่องจากมีคุณสมบัติจุดไฟติดง่าย และไม่เยิ้มเกาะเป็นก้อน จึงเป็นที่นิยม ใช้เป็นเชื้อเพลิงในระบบเผาไหม้ขนาดใหญ่

- ถ่านหินบิทูมินัส เป็นถ่านหินสักย์สูงขึ้นไปลำดับการเปลี่ยนเป็นถ่านหินมากขึ้น จัด เป็นถ่านหินแข็งชนิดหนึ่งมีความเป็นมันวาวมากขึ้น แต่ยังคงมีปริมาณสารระเหยสูงทำให้เผาไหม้ได้ดี และเป็นวัตถุดิบที่ดีในการผลิตเชื้อเพลิงสังเคราะห์ทั้งแก๊สและของเหลว ถ่านหินบิทูมินัสบางกลุ่มมี คุณสมบัติการเยิ้มเกาะเป็นก้อนเมื่อให้ความร้อนที่เหมาะสม สามารถนำไปผลิตถ่านโค้กคุณภาพดีที่ใช้ ถลุงเหล็กและโลหะอื่นๆ

- ถ่านหินแอนทราไซต์ เป็นถ่านหินสักย์สูงที่สุด มีความแข็งสูง มีสีดำเป็นเนื้อเดียวกัน มีปริมาณคาร์บอนสูงใกล้เคียงกับแกรไฟต์ และมีปริมาณซัลเฟอร์ต่ำ ถึงแม้จะมีคุณภาพดีแต่ติดไฟ ได้ยากกว่าและอัตราการเผาไหม้ช้าจึงไม่นิยมใช้เป็นเชื้อเพลิงโดยตรง แต่นิยมนำมาใช้ในการถลุงโลหะ

2.3 การวิเคราะห์ถ่านหิน

1. การวิเคราะห์แบบประมาณ (proximate analysis)

เป็นการวิเคราะห์กลุ่มองค์ประกอบในถ่านหินแบ่งออกเป็น ความชื้น เถ้า สารระเหย และคาร์บอนคงตัว มาตรฐานการวิเคราะห์ที่นิยมใช้กันในปัจจุบัน คือ ASTM (ASTM, 1998)

ความชื้น (moisture, M) เป็นน้ำหนักที่สูญเสียไปหลังจากการอบถ่านหินบดละเอียด ผ่านตะแกรงขนาด 250 ไมโครเมตร ภายใต้สภาวะที่กำหนดที่อุณหภูมิ 104–110°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง น้ำส่วนที่เป็นความชื้น (inherent moisture) จะระเหยออกมา ส่วนน้ำที่เป็นส่วนประกอบทั้งอินทรีย์ และอินทรีย์ (coherent moisture) ยังคงอยู่ในถ่านหิน

เถ้า (ash, A) เป็นน้ำหนักที่คงอยู่หลังจากการเผาถ่านหินบดละเอียดผ่านตะแกรง ขนาด 250 ไมโครเมตร ภายใต้สภาวะออกซิไดซ์ที่กำหนดที่อุณหภูมิ 700–750°C

เถ้า คือ ส่วนประกอบอนินทรีย์ที่มีอยู่เดิมในถ่านหินที่ถูกออกซิไดซ์จนสมบูรณ์ ดังนั้น น้ำหนักของเถ้าจึงน้อยกว่าน้ำหนักของส่วนประกอบอนินทรีย์ที่มีอยู่ในถ่านหินเดิม เพราะสารประกอบประเภทคาร์บอนेट ซัลไฟด์ และอื่นๆถูกออกซิไดซ์ไปเป็นสารประกอบออกไซด์ทั้งหมด ความสัมพันธ์ของร้อยละของสารแร่กับร้อยละของเถ้าโดยประมาณ คือ

$$\% \text{ สารแร่} = 1.08 (\% \text{ เถ้า}) + 0.55 (\% \text{ S}) \quad (2.1)$$

สารระเหย (volatile matter, VM) เป็นน้ำหนักที่สูญเสียไป (หักความชื้นออกแล้ว) หลังจากการอบถ่านหินบดละเอียดผ่านตะแกรงขนาด 250 ไมโครเมตรภายใต้สภาวะที่กำหนดที่อุณหภูมิ $950 \pm 20^\circ\text{C}$ เป็นเวลา 7 นาที โดยไม่ให้สัมผัสกับอากาศเพื่อกันสลายถ่านหินให้ส่วนที่ระเหยได้ออกมา คาร์บอนคงตัว (fixed carbon, FC) เป็นส่วนที่เหลือของโครงสร้างโมเลกุลของถ่านหินประกอบด้วยคาร์บอนเป็นส่วนใหญ่ ในการวิเคราะห์ที่ได้จากการคำนวณผลต่าง คือ

$$\% \text{ FC} = 100 - (\% \text{ M} + \% \text{ A} + \% \text{ VM}) \quad (2.2)$$

2. การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (ultimate analysis)

เป็นการวิเคราะห์ธาตุต่างๆที่สำคัญที่มีอยู่ในถ่านหิน คือ คาร์บอน ไฮโดรเจน ซัลเฟอร์ และไนโตรเจน บางครั้งวิเคราะห์ฟอสฟอรัสและคลอรีนด้วย ส่วนออกซิเจนเป็นผลต่างระหว่าง 100 กับผลรวมของร้อยละธาตุองค์ประกอบทั้งหมดกับร้อยละความชื้นและเถ้า การวิเคราะห์ธาตุกระทำโดยการกลั่นสลายถ่านหินในสภาวะออกซิไดซ์อย่างรุนแรงจนกระทั่งกลายเป็นสารประกอบออกไซด์ จากนั้นหาปริมาณออกไซด์ที่เกิดด้วยวิธีทางเคมีหรือทางกายภาพ ปัจจุบันใช้เครื่องมือที่วิเคราะห์ธาตุ คาร์บอน ไฮโดรเจน ซัลเฟอร์ และไนโตรเจน ได้พร้อมกัน คือ เครื่อง CHNS elemental analysis การรายงานผลแบบแยกธาตุแสดงเป็นร้อยละโดยมวลและรายงานร้อยละความชื้นและร้อยละเถ้ารวมด้วย

2.4 การลดปริมาณเถ้าในถ่านหิน

สำหรับการนำถ่านหินที่มีปริมาณเถ้าที่สูงมาเป็นวัตถุดิบในการเตรียมถ่านกัมมันต์นั้น การลดปริมาณเถ้าก่อนจะทำให้ได้วัตถุดิบที่มีปริมาณคาร์บอนสูงซึ่งจะมีผลทำให้ถ่านกัมมันต์ที่ได้มีคุณภาพดี โดยเถ้าในถ่านกัมมันต์ควรจะมียุทธศาสตร์ที่มีปริมาณน้อยเท่าที่จะเป็นไปได้ เนื่องจากปริมาณสารอนินทรีย์ (ปริมาณเถ้า) ในถ่านหินจะรวมกับน้ำหนักของถ่านกัมมันต์ ทำให้ความสามารถในการดูดซับของถ่านกัมมันต์ที่คิดต่อน้ำหนักของถ่านกัมมันต์มีค่าลดลง และเถ้าอาจจะอุดตันอยู่ในรูพรุนทำให้ถ่านกัมมันต์มีพื้นที่ในการดูดซับลดลง (Linares-Solano, Martin-Gullon, Salinas-Martinez de Lecea and Serrano-Talavera, 2000)

วิธีการลดปริมาณเถ้าในถ่านหินมีอยู่หลายวิธี เช่น

- การลดปริมาณเถ้าโดยวิธีการล้างด้วยกรดไฮโดรคลอริก เป็นการนำถ่านหินแช่

ในสารละลายกรดไฮโดรคลอริก ที่ความเข้มข้นต่างๆ เพื่อสกัดสารอินทรีย์บางชนิดออกจากถ่านหิน (Bolat, Saglam and Piskin, 1998)

- การลดปริมาณเถ้าโดยวิธีการแยกอนุภาคในตัวกลางของเหลว เป็นการใช้ความแตกต่างของความถ่วงจำเพาะของถ่านหินซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 1.23 – 1.70 ขึ้นอยู่กับศักย์ของถ่านหิน ปริมาณความชื้น และปริมาณเถ้า (Leonard (ed.), 1979) วิธีการลดปริมาณเถ้าทำโดยการนำถ่านหินผสมกับสารละลายที่ใช้เป็นตัวกลางที่มีความถ่วงจำเพาะต่างๆ อนุภาคถ่านหินที่มีปริมาณเถ้าต่ำจะอยู่ส่วนบนของสารละลาย สารละลายที่ใช้เป็นตัวกลางที่นิยมใช้โดยทั่วไป เช่น แคลเซียมคลอไรด์ ซิงค์คลอไรด์ โพแทสเซียมคาร์บอเนต และคาร์บอนเตตระคลอไรด์ เป็นต้น (Berkowitz, 1994)

- การลดปริมาณเถ้าโดยวิธีการแยกอนุภาคโดยใช้ฟองอากาศ (froth flotation) ซึ่งจะสร้างฟองอากาศโดยการผ่านอากาศเข้าสู่ของเหลวที่มีส่วนผสมของน้ำ สารลดแรงตึงผิวเพื่อให้ของเหลวเกิดฟองอากาศได้ง่ายขึ้น (frother) และสารเคลือบอนุภาคถ่านหินเพื่อให้ฟองอากาศสามารถยึดติดกับอนุภาคถ่านหินได้ (collector) ถ่านหินที่มีปริมาณเถ้าต่ำจะลอยขึ้นไปพร้อมกับฟองอากาศ (Rivera-Utrilla, Lopez-Romon, Carrasco-Marin, Maldonado-Hoder and Moreno-Castilla, 1996)

2.5 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับถ่านหินลิกไนต์ในประเทศไทย

ประเทศไทยมีการพัฒนาถ่านหินตั้งแต่ปี 2440 ในช่วงแรกมีการพัฒนาใช้ในปริมาณที่ไม่มากนัก ต่อมามีการนำถ่านหินมาใช้เป็นเชื้อเพลิงเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าจึงได้มีการพัฒนาแหล่งถ่านหินและการใช้ประโยชน์แพร่หลายยิ่งขึ้น ในปี 2544 ประเทศไทยใช้ถ่านหินรวมทั้งสิ้น 24.5 ล้านตัน เป็นถ่านหินที่ผลิตในประเทศ 19.6 ล้านตัน และถ่านหินนำเข้า 4.9 ล้านตัน ดังแสดงรายละเอียดในตารางที่ 2.1

แหล่งถ่านหินในประเทศไทยโดยส่วนใหญ่อยู่ในเขตภาคเหนือ ถ่านหินเกือบทั้งหมดเกิดจากการสะสมตัวในยุคเทอร์เชียรี ซึ่งมีช่วงอายุระหว่าง 1.8 – 65 ล้านปีมาแล้ว มีคุณภาพอยู่ในศักยภาพลิกไนต์และซับบิทูมินัส ให้ความร้อนไม่สูงนัก แหล่งถ่านหินในประเทศไทยบางแหล่งได้มีการทำเหมืองผลิตถ่านหินขึ้นมาใช้ประโยชน์แล้ว แต่อีกส่วนหนึ่งมีการสำรวจพบแล้วแต่ยังคงเป็นแหล่งถ่านหินที่ยังรอการพัฒนาเพื่อผลิตถ่านหินขึ้นมาใช้ประโยชน์ต่อไป สำหรับแหล่งถ่านหินที่มีการทำเหมืองแล้วมีปริมาณสำรองถ่านหินคงเหลือประมาณ 1,332 ล้านตัน โดยปริมาณสำรอง 1,310 ล้านตัน หรือร้อยละ 97 เป็นปริมาณสำรองของเหมืองแม่เมาะ และเหมืองกระบี่ ที่ดำเนินการโดยการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย อีกประมาณ 20 ล้านตัน หรือร้อยละ 3 อยู่ในส่วนของภาคเอกชน เช่น แหล่งแม่ทาน จังหวัดลำปาง แหล่งลิ จังหวัดลำพูน เป็นต้น (กรมเชื้อเพลิงธรรมชาติ, ออนไลน์, 2545)

ตารางที่ 2.1 การผลิตและการใช้ถ่านหินลิกไนต์ (หน่วย : พันตัน)

	2544	2545 (ม.ค.– มี.ค.)		
		ปริมาณ	อัตราเพิ่ม (%)	สัดส่วน(%)
การผลิตลิกไนต์	19,607	5,262	23.5	100.0
การไฟฟ้าฝ่ายผลิตฯ	15,447	3,957	20.2	75.2
เหมืองเอกชน	4,160	1,305	34.4	24.8
- บ้านปู	2,622	780	39.8	14.8
- ลานนา	979	224	-16.7	4.3
- อื่นๆ	559	301	109.2	5.7
การนำเข้าถ่านหิน	4,945	1,225	-5.1	
Supply	24,552	6,487	16.8	
การใช้ลิกไนต์	19,935	4,918	12.6	100.0
ผลิตกระแสไฟฟ้า	15,744	3,685	5.3	74.9
อุตสาหกรรม	4,190	1,233	42.4	25.1
การใช้ถ่านหินที่นำเข้า	4,945	1,225	-5.1	100.0
ผลิตกระแสไฟฟ้า	2,150	588	9.4	48.0
อุตสาหกรรม	2,795	637	-15.4	52.0
Demand	24,880	6,143	8.6	

หมายเหตุ จากสำนักงานคณะกรรมการนโยบายพลังงานแห่งชาติ, ออนไลน์, 2545.

ถ่านหินลิกไนต์ที่ขุดได้ในเหมืองแม่เมาะส่วนใหญ่จะมีส่วนผสมของซัลเฟอร์ เถ้า และความชื้นค่อนข้างสูงมีอายุประมาณ 2.5–35 ล้านปีมาแล้ว (การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, 2538) และมีรายงานว่าสารประกอบที่มีอยู่มากที่สุด คือ สารประกอบแคลไซต์ (CaCO_3) โดโลไมต์ ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) และซีเคอร์ไรต์ (FeCO_3) ร่วมกับควอตซ์ (SiO_2) เคโอลิไนต์ ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$) ยิปซัม ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) อิลไลต์ ($\text{K}(\text{Si}_3\text{Al}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_4$) และไพไรต์ (FeS_2) ตามลำดับ (กัญญา บุญเกียรติ, 2544) ซึ่งปริมาณและชนิดของสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ของถ่านหินลิกไนต์นั้นจะแตกต่างกันตามแหล่งต่างๆกัน แม้กระทั่งในแหล่งเดียวกันก็อาจมีส่วนประกอบไม่เหมือนหรือไม่เท่ากัน

การใช้ถ่านหินซึ่งมีปริมาณซัลเฟอร์สูง โดยเฉพาะในการผลิตกระแสไฟฟ้าทำให้เกิดการปลดปล่อยแก๊สกลุ่มซัลเฟอร์ออกไซด์ (SO_x emission) สูงมากตามไปด้วย ตัวอย่างเช่น ในปี 2539 มีการใช้ถ่านหินลิกไนต์ในประเทศไทยผลิตไฟฟ้า 16.078 ล้านตัน ถ้าวถ่านหินลิกไนต์มีซัลเฟอร์ร้อยละ 2.5 และร้อยละ 70 ของซัลเฟอร์ถูกเผาไหม้ก็กลายเป็นซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) จะมีการปลดปล่อยแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์สูงถึง 0.563 ล้านตัน (กัญญา บุญเกียรติ, 2544) นอกจากนี้การใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงเผาไหม้โดยตรงยังปลดปล่อยฝุ่นละออง แก๊สไนโตรเจนออกไซด์ และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เป็นต้น ซึ่งอาจก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมคือ อาจมีผลต่อสุขภาพอนามัย เกิดการกัดกร่อนต่ออาคารที่อยู่อาศัย และผลกระทบต่อระบบนิเวศน์ เช่น เพิ่มสภาวะการเป็นกรดในแหล่งน้ำ (กรมพัฒนาและส่งเสริมพลังงาน, 2544) ด้วยเหตุนี้ทำให้มีถ่านหินลิกไนต์เป็นจำนวนมากไม่สามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงได้โดยตรงต้องใช้ถ่านหินชนิดพิเศษ อื่นๆ ซึ่งยังต้องมีระบบควบคุมมลพิษที่ดีอีกด้วย

2.6 ความหมายของถ่านกัมมันต์

มีผู้ให้ความหมายของถ่านกัมมันต์หลากหลายด้วยกัน เช่น

ถ่านกัมมันต์เป็นถ่านที่อยู่ในรูปของคาร์บอนอสัญฐานชนิดหนึ่ง ซึ่งผลิตได้โดยการกระตุ้น ทำให้เกิดโครงสร้างที่มีรูพรุนเป็นจำนวนมาก และมีพื้นที่ผิวภายในเพิ่มขึ้น จึงเป็นถ่านที่มีความสามารถในการดูดซับสูง (Bansal, Donnet and Stoeckli, 1988)

ถ่านกัมมันต์ เป็นถ่านที่อยู่ในรูปแบบไม่เป็นคาร์บอนแกรไฟต์ (non-graphitic carbon) ซึ่งถูกพัฒนาให้มีพื้นที่ผิวภายในและรูพรุนสูงทำให้มีความสามารถในการดูดซับสารได้ทั้งที่เป็นแก๊สและของเหลว โดยถ่านกัมมันต์สามารถเตรียมได้จากวัตถุดิบที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติหรือสังเคราะห์ขึ้น (Jai, 1998)

แต่อย่างไรก็ดี สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (2532) ได้กำหนดความหมายของถ่านกัมมันต์ไว้ว่า ถ่านกัมมันต์ หมายถึง ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการนำวัตถุดิบธรรมชาติที่มีคาร์บอนเป็น

องค์ประกอบหลักมาผ่านกรรมวิธีก่อกัมมันต์จนได้ผลิตภัณฑ์สีดำ มีโครงสร้างที่มีลักษณะเป็นรูพรุน มีพื้นที่ผิวสูง มีสมบัติในการดูดซับสารต่างๆ ได้เป็นอย่างดี

2.7 วัตถุดิบที่นำมาใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์

วัสดุที่นำมาเป็นวัตถุดิบในการผลิตถ่านกัมมันต์มักมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้

- มีปริมาณคาร์บอนสูง
- มีปริมาณสารอินทรีย์ต่ำ
- เป็นของเหลือทิ้ง หรือมีราคาถูก
- มีความสะดวกในการนำมาใช้งาน เช่น ไม้สลายตัวเมื่อเก็บ เป็นต้น

วัตถุดิบธรรมชาติที่นิยมนำมาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ เช่น ไม้เนื้อแข็ง ไม้เนื้ออ่อน ชังข้าวโพด แกลบข้าว กะลามะพร้าว กะลาปาล์ม ชานอ้อย ชีลื้อย เปลือกและเมล็ดผลไม้ พีท ลิกไนต์ บิทุมินัส ยางมะตอย ถ่านไม้ น้ำมันดิบ และกากปิโตรเลียม เป็นต้น

ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากวัตถุดิบชนิดต่างๆ มีสมบัติที่แตกต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 2.2 จะเห็นว่ามักเลือกใช้วัสดุที่มีค่าต่ำ อนึ่งคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ขึ้นกับชนิดของวัสดุที่ใช้เป็นวัตถุดิบ Bansal et al. (1988) ได้ให้ข้อสังเกตไว้ว่า วัสดุที่มีความหนาแน่นต่ำและสารระเหยสูง เช่น ไม้ ลิกนิน เป็นต้น มักได้ถ่านกัมมันต์ที่มีปริมาตรรูพรุน (pore volume) สูง และความหนาแน่นต่ำ ซึ่งใช้ดูดซับในสารละลายได้ดี แต่ดูดซับแก๊สได้ไม่ดี ส่วนวัสดุที่มีความหนาแน่นสูงและมีสารระเหยสูง เช่น กะลามะพร้าว เป็นต้น จะทำให้ถ่านกัมมันต์ที่ได้มีปริมาตรของรูพรุนขนาดเล็ก (micropore volume) สูง สามารถใช้ดูดซับได้ทั้งในสารละลายและแก๊สได้ นอกจากนี้ ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากวัตถุดิบต่างชนิดกัน จะมีการกระจายขนาดรูพรุนต่างกัน แต่อย่างไรก็ตามคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ยังขึ้นอยู่กับปัจจัยอื่นๆอีก เช่น วิธีการผลิต สภาวะที่ใช้ เป็นต้น ดังนั้นจึงเป็นการยากที่จะระบุให้แน่นอนว่าวัสดุชนิดใดจะใช้ผลิตถ่านกัมมันต์ที่เหมาะสมกับงานแบบใด

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้เป็นวัสดุคืบในการผลิตถ่านกัมมันต์และการใช้ประโยชน์

วัสดุ	ร้อยละคาร์บอนคงตัว	ร้อยละสารระเหย	ความหนาแน่น (กิโลกรัมต่อลิตร)	ร้อยละปริมาณเต้า	การใช้ประโยชน์
ไม้เนื้ออ่อน	40-45	55-60	0.4-0.5	0.3-1.1	การดูดซับในสารละลาย
ไม้เนื้อแข็ง	40-42	55-60	0.55-0.80	0.3-1.2	การดูดซับในสารละลาย
ลิกไนต์	35-40	58-60	0.30-0.40	-	การดูดซับในสารละลาย
เปลือกถั่ว	40-45	55-60	1.4	-	การดูดซับไอ
ลิกไนต์	55-70	25-40	1.00-1.35	5-6	การบำบัดน้ำเสีย
ถ่านหินเนื้ออ่อน	65-80	20-30	1.25-1.50	2.0-1.2	การดูดซับในสารละลายและไอ
ปิโตรเลียมโค้ก	70-85	15-20	1.35	0.5-0.7	การบำบัดน้ำเสีย
ถ่านหินเนื้อแข็ง	70-75	10-15	1.45	5-15	การดูดซับไอ
ถ่านหินเนื้อแข็ง	85-95	5-10	1.5-1.8	2-15	การดูดซับไอ

หมายเหตุ จากหนังสือ Active carbon โดย Bansel, R. C. et al., 1988, New York : Marcel Dekker.

2.8 วิธีการผลิตถ่านกัมมันต์

วิธีการผลิตถ่านกัมมันต์มี 2 วิธี ได้แก่ วิธีการกระตุ้นทางกายภาพ และวิธีการกระตุ้นทางเคมี (Bansal et al., 1988)

1. วิธีการกระตุ้นทางกายภาพ

วิธีการกระตุ้นทางกายภาพ ประกอบด้วยขั้นตอนใหญ่ๆ 3 ขั้นตอน หลังจากการเลือกชนิดของวัตถุดิบที่จะใช้ ได้แก่ การเตรียมวัตถุดิบ การคาร์บอนไนซ์ และการกระตุ้น

1) การเตรียมวัตถุดิบ

ขั้นตอนการเตรียมวัตถุดิบนั้นจะนำวัตถุดิบมาบดและคัดขนาดก่อนที่จะนำไปทำการคาร์บอนไนซ์ แต่สำหรับวัตถุที่มีความแข็งและเหนียวมากทำให้การบดวัตถุดิบทำได้ยากอาจนำวัตถุดิบนั้นไปทำการคาร์บอนไนซ์ก่อนแล้วจึงนำมาบดและคัดขนาดต่อไป ถ้าวัตถุดิบมีลักษณะเป็นผงอาจนำมาทำเป็นเม็ดก่อนโดยใช้ตัวประสานเป็นสารที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ เช่น แป้ง น้ำมันเตา หรือ ทาร์ (tar) ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากกระบวนการการคาร์บอนไนซ์ เมื่อทำเป็นเม็ดแล้วจึงนำไปทำการคาร์บอนไนซ์และทำการกระตุ้นต่อไป

2) การคาร์บอนไนซ์

การคาร์บอนไนซ์เป็นกระบวนการทางไพโรไลซิส (pyrolysis) ทำโดยการเผาวัตถุดิบในที่ อับอากาศที่อุณหภูมิต่ำกว่า 800°C ขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุดิบ ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์สามประเภท ได้แก่ ถ่านที่มีลักษณะสีดำเรียกว่า ชาร์ (char) ส่วนที่เป็นของเหลวเรียกว่าทาร์ และส่วนที่เป็นแก๊ส การคาร์บอนไนซ์เป็นขั้นตอนการพัฒนาโครงสร้างรูพรุนในวัตถุดิบโดยความร้อนทำให้เกิดการสลายตัวทางเคมีของสารที่ไม่ใช่คาร์บอน เช่น ไฮโดรเจน ออกซิเจน และไนโตรเจน ออกมาในรูปของของเหลวและแก๊สมีผลให้ชาร์เป็นถ่านที่มีปริมาณคาร์บอนสูงเกินกว่าวัตถุดิบ

การคาร์บอนไนซ์มีการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพสองช่วง ได้แก่ ช่วงการอ่อนตัว (softening period) ควรให้ความร้อนด้วยอัตราที่ต่ำ เพื่อให้แก๊สและทาร์ที่สลายตัวหลุดออกได้โดยไม่สลายตัวหรือเปลี่ยนรูปไปเป็นของแข็งอุดแน่นในรูพรุน และช่วงหลังการอ่อนตัว (after softening period) อัตราการให้ความร้อนปกติเป็นช่วงที่คาร์บอนจัดเรียงตัวเป็นระเบียบกว่าช่วงการอ่อนตัว ถ่านชาร์ที่ได้จะแข็งและมีความหนาแน่นสูงขึ้น แต่ยังสามารถในการดูดซับต่ำเพราะยังมีทาร์ตกค้างอยู่ในรูพรุนหรือเกาะอยู่ตามผิวจึงจำเป็นต้องนำถ่านชาร์ไปผ่านกระบวนการการกระตุ้นต่อไป

ตัวแปรที่มีผลต่อสมบัติต่างๆของถ่านชาร์ ได้แก่ อุณหภูมิ เวลา อัตราการเพิ่มความร้อน และธรรมชาติของวัตถุดิบ อุณหภูมิเป็นตัวแปรที่สำคัญเนื่องจากเป็นพลังงานที่ใช้ทำให้เกิดการแตกหักตรงบริเวณที่มีพันธะที่อ่อนหรือหมู่ที่หลุดออกได้ง่าย ทำให้ได้สารระเหยเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ ที่มีโครงสร้างโมเลกุลหรือหมู่ที่มีขนาดเล็กๆ เช่น น้ำ แอมโมเนีย ทาร์ และแก๊สต่างๆหลุดออกไป

ส่วนที่เหลืออยู่เป็นถ่านชาร์ซึ่งมีโครงสร้างโมเลกุลแบบวงแหวนอะโรมาติกซึ่งคาร์บอนจะมีการจัดระเบียบของโครงสร้างมากขึ้นไปตามอุณหภูมิ ส่วนอัตราการเพิ่มความร้อนนั้นมีความสำคัญต่อปริมาณและองค์ประกอบของสารระเหยที่ได้จากการทำการคาร์บอนไนซ์ ถ้าอัตราการเพิ่มความร้อนสูงปริมาณสารระเหยจะถูกปลดปล่อยอย่างรวดเร็ว คาร์บอนจะเรียงตัวเป็นระเบียบน้อยทำให้เกิดช่องว่างมากเป็นรูพรุนขนาดใหญ่กว่าเมื่อเทียบกับวัตถุดิบที่มีอัตราการเพิ่มความร้อนต่ำ

3) การกระตุ้น

การกระตุ้นเป็นการทำให้คาร์บอนหรือถ่านชาร์มีรูพรุนมากขึ้น และทำให้มีความสามารถในการดูดซับสูงขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากการเพิ่มพื้นที่ผิวและการทำให้ผิวมีความว่องไวมากขึ้น การเพิ่มพื้นที่ผิวนอกเหนือจากพลังงานความร้อนที่ทำให้เกิดการแตกหักของพันธะหรือหมู่ที่หลุดออกได้ง่ายแล้ว ในปฏิกิริยาเคมีของการกระตุ้นยังกำจัดการต่างๆ ที่ค้างอยู่ในช่องว่างระหว่างผลึกคาร์บอนออกไปจากบริเวณที่ทำหน้าที่ดูดซับอีกด้วย ส่วนการทำให้ผิวมีความว่องไวมากขึ้นเกิดจากปฏิกิริยาเคมีทำให้โมเลกุลบางกลุ่มหลุดออกไปและเกิดส่วนที่มีอำนาจดูดซับขึ้นมาแทน นอกจากนี้ปฏิกิริยาเคมีในการกระตุ้นยังช่วยให้คาร์บอนจัดเปลี่ยนโครงสร้างใหม่ให้มีความว่องไวในการดูดซับสูงขึ้น วิธีกระตุ้นทางกายภาพเป็นการผลิตถ่านกัมมันต์โดยที่ผิวคาร์บอนเกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ เช่น ให้มีรูพรุนขนาดต่างๆ ให้มีพื้นที่ผิวมากขึ้น และคาร์บอนมีการจัดเรียงโครงสร้างใหม่ซึ่งจะเพิ่มความสามารถในการดูดซับให้สูงขึ้น โดยทั่วไปสารที่ใช้ในการกระตุ้นทางกายภาพ ได้แก่ ไออน้ำ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ อากาศ แก๊สออกซิเจน และแก๊สไฮโดรเจนจากการเผา ซึ่งเรียกสารดังกล่าวว่า แก๊สออกซิไดซ์ (oxidizing gas) โดยใช้ร่วมกับการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 800 – 1000 °C ขึ้นกับชนิดของวัตถุดิบ แก๊สพวกนี้จะไปทำปฏิกิริยากับทาร์ที่เหลืออยู่และคาร์บอนอะตอมในถ่านเกิดการแก๊สซิฟิเคชัน (gasification) บางส่วนของเม็ดถ่านทำให้คาร์บอนอะตอมหลุดออกไป ทำให้เกิดรูพรุนด้วยกลไกที่ต่างๆ กันคือ การเปิดรูพรุนที่ปิด การทำให้รูพรุนขนาดเล็กลใหญ่ขึ้น และการสร้างรูพรุนใหม่ ทำให้ถ่านมีรูพรุนและมีพื้นที่ผิวที่มีอิเล็กตรอนอิสระมากขึ้น จึงส่งผลให้มีความสามารถในการดูดซับสูงขึ้น

ข้อดีของการกระตุ้นวิธีนี้ คือ ไม่มีสารเคมีตกค้างอยู่ในถ่านกัมมันต์ แต่มีข้อเสียคือ ต้องใช้อุณหภูมิในการกระตุ้นสูง ตัวแปรที่มีผลต่อการกระตุ้นด้วยแก๊สออกซิไดซ์ ได้แก่ ชนิดและปริมาณขององค์ประกอบที่มีอยู่ในวัตถุดิบ ชนิดของแก๊สออกซิไดซ์ อัตราส่วนของแก๊สที่ใช้ อุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการกระตุ้น ตัวอย่างปฏิกิริยาเคมีของการกระตุ้นแสดงได้ดังนี้

- การกระตุ้นด้วยไออน้ำ

การกระตุ้นด้วยไออน้ำเป็นการแก๊สซิฟิเคชันของคาร์บอนอะตอมในถ่านชาร์โดยใช้ไออน้ำ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน ดังสมการที่ 2.3



นอกจากนี้ยังมีการเกิดปฏิกิริยาระหว่างไอน้ำและแก๊สที่เกิดขึ้น (exothermic water-gas formation reaction) ซึ่งเป็นปฏิกิริยาคายความร้อนควบคู่ไปด้วย ดังสมการที่ 2.4



สำหรับการกระตุ้นด้วยไอน้ำโดยส่วนใหญ่พบว่า เมื่อร้อยละน้ำหนักที่หายไปในช่วงการกระตุ้น (% burn off) ต่ำ จะมีการสร้างรูพรุนขนาดเล็กเท่านั้น และเมื่อร้อยละน้ำหนักที่หายไปในช่วงการกระตุ้นเพิ่มขึ้นจะมีผลทำให้มีรูพรุนเพิ่มขึ้นและรูพรุนขนาดต่างๆมีขนาดใหญ่ขึ้น ทำให้มีการกระจายขนาดรูพรุน (pore size distribution) กว้าง และมีปริมาตรรูพรุนทั้งหมด (total pore volume) สูงขึ้น โดยทั่วไปเมื่อร้อยละน้ำหนักที่หายไปทั้งหมด (% weight loss) มีค่าสูงกว่าร้อยละ 50 พื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์จะไม่เพิ่มขึ้น เนื่องจากการแก๊สซิฟิเคชันโดยส่วนใหญ่เป็นการทำให้รูพรุนมีขนาดใหญ่ขึ้นเท่านั้น (Jai, 1998)

- การกระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

การกระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เป็นการแก๊สซิฟิเคชันของคาร์บอนอะตอมในถ่านชาร์โดยใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน ดังสมการที่ 2.5



การแก๊สซิฟิเคชันด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต้องใช้พลังงานในการเกิดปฏิกิริยามากกว่าการแก๊สซิฟิเคชันด้วยไอน้ำ จึงต้องใช้อุณหภูมิในการกระตุ้นสูงกว่า และขนาดโมเลกุลของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ใหญ่กว่าน้ำ ทำให้อัตราการแก๊สซิฟิเคชัน (rate of gasification) ช้ากว่า โดยส่วนใหญ่รูพรุนที่ได้จากการกระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เป็นรูพรุนขนาดเล็กตลอดช่วงร้อยละน้ำหนักที่หายไปในช่วงการกระตุ้น ซึ่งมีประมาณร้อยละ 70 ของปริมาตรรูพรุนทั้งหมด และมากกว่าร้อยละ 90 ของพื้นที่ผิวทั้งหมด ทำให้มีการกระจายขนาดรูพรุนน้อย นอกจากนี้ถ่านกัมมันต์ที่ได้จะมีปริมาตรรูพรุนน้อยกว่าถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยไอน้ำ แต่มีพื้นที่ผิวใกล้เคียงกัน

การผลิตถ่านกัมมันต์ทางการค้าส่วนใหญ่ใช้ไอน้ำเป็นสารกระตุ้น เนื่องจากไอน้ำสามารถแพร่เข้าไปในรูพรุนได้ดีทำให้อัตราการแก๊สซิฟิเคชันเร็ว อุณหภูมิที่ใช้ในการกระตุ้นต่ำกว่าการใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เป็นสารกระตุ้น อีกทั้งต้นทุนในการใช้ไอน้ำเป็นสารกระตุ้นยังต่ำกว่าด้วย

- การกระตุ้นด้วยแก๊สออกซิเจนหรืออากาศ

การกระตุ้นด้วยแก๊สออกซิเจนหรืออากาศเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน ดังสมการที่ 2.6 และ 2.7



การกระตุ้นด้วยแก๊สออกซิเจนหรืออากาศมีการเผาไหม้เกิดขึ้น ทำให้ควบคุมปฏิกิริยา ยาก จึงไม่นิยมใช้

- การกระตุ้นด้วยแก๊สไอเสีย

การกระตุ้นด้วยแก๊สไอเสีย เนื่องจากแก๊สไอเสียมีแก๊สต่างๆ ปนอยู่เป็นจำนวนมาก โดยเฉพาะแก๊สที่มีคุณสมบัติในการกระตุ้นถ่านให้เป็นถ่านกัมมันต์ เช่น แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แก๊สออกซิเจนที่เหลืออยู่และไอน้ำ การกระตุ้นด้วยแก๊สไอเสียนี้เป็นการนำเอาแก๊สที่ทิ้งไปกลับมา มาใช้ประโยชน์ใหม่ทำให้ประหยัดในแง่เศรษฐศาสตร์

2. วิธีการกระตุ้นทางเคมี

วิธีการกระตุ้นทางเคมี เป็นการคาร์บอนในวัสดุถุคิบที่ผสมกับสารเคมีที่ใช้เป็นสารกระตุ้น ที่อุณหภูมิ 500 – 900°C ขึ้นกับชนิดของวัสดุถุคิบและสารเคมีที่ใช้ สารเคมีที่ใช้เป็นสารกระตุ้น โดยทั่วไปเป็นสารประเภทอัลคาไลน์ โลหะอัลคาไลน์ สารประกอบคาร์บอนเนต สารประเภทเบส และกรดบางชนิด เช่น โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) โพแทสเซียมคาร์บอนเนต (K₂CO₃) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ซิงค์คลอไรด์ (ZnCl₂) และ กรดฟอสฟอริก (H₃PO₄) เป็นต้น

สารเคมีที่เติมลงไปจะช่วยทำลายโครงสร้างของวัสดุถุคิบ และขณะที่ทำการคาร์บอนไซซ์ จะเกิดการสลายตัวของสารอินทรีย์ในวัสดุถุคิบ และเกิดการเชื่อมโยงกัน (cross-link) ของโครงสร้างทำให้ถ่านเกิดรูพรุนขึ้น สารระเหยบางตัวในโครงสร้างของวัสดุถุคิบไม่สามารถหลุดออกไปได้ เนื่องจากเกิดการเชื่อมโยงกันนี้ทำให้ปริมาณคาร์บอนที่ได้เพิ่มขึ้นและการเกิดทาร์ลดลง การเชื่อมโยงกัน ประกอบกับสารเคมีที่ใช้มีความคงทนต่อการสลายตัวที่อุณหภูมิสูงๆจึงยังคงสภาพหุ้มอยู่รอบๆและ แทรกตัวอยู่ภายในทำให้เกิดการหดตัวน้อย เมื่อนำถ่านที่ได้มาล้างสารเคมีออกด้วยน้ำหรือกรดจะ เกิดช่องว่างหรือรูพรุนเพิ่มขึ้นอีก

ข้อดีของวิธีนี้คือ ใช้อุณหภูมิไม่สูงมากนัก แต่มีข้อเสียคือ มีสารตกค้างในถ่านกัมมันต์ ทำให้ต้องเสียเวลาและค่าใช้จ่ายในการล้างสารเคมี รวมทั้งเครื่องมือที่ใช้ต้องเป็นชนิดพิเศษที่สามารถต้านทานการกัดกร่อนได้เพราะสารเคมีบางชนิดเป็นสารกัดกร่อน ตัวแปรที่มีผลต่อการกระตุ้นด้วยวิธีทางเคมี ได้แก่ ชนิดและปริมาณขององค์ประกอบที่มีอยู่ในวัสดุถุคิบ ชนิดของสารเคมี อัตราส่วนของสารเคมีต่อวัสดุถุคิบ อุณหภูมิ และเวลา

2.9 ชนิดของถ่านกัมมันต์

ชนิดของถ่านกัมมันต์สามารถแบ่งโดยอาศัยหลักต่างๆ มากมายขึ้นอยู่กับความสะดวกของผู้ใช้งาน ตัวอย่างการแบ่งชนิดของถ่านกัมมันต์ได้แก่

1. การแบ่งตามชนิดของสารกระตุ้น

- ถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยวิธีทางเคมี (chemical activated carbon) ถ่านกัมมันต์ที่ได้จากวิธีนี้มักจะมีรูพรุนขนาดใหญ่
- ถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยวิธีทางกายภาพ (physical activated carbon) ถ่านกัมมันต์ที่ได้จากวิธีนี้มักจะมีรูพรุนขนาดเล็ก นิยมใช้ดูดซับแก๊สและไอระเหย

2. การแบ่งตามขนาดอนุภาค

- ถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ด (granular activated carbon) เป็นถ่านกัมมันต์ที่ผ่านตะแกรงขนาด 150 ไมโครเมตร ไม่เกินร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก มีลักษณะเป็นเม็ด ซึ่งได้จากการอัดผ่านเครื่องอัดเป็นเส้นกลมๆแล้วตัดออกเป็นท่อนเท่าๆกัน หรืออาจทำเป็นเกล็ดที่ได้จากการย่อยอนุภาคขนาดใหญ่ ถ่านกัมมันต์ชนิดนี้มักใช้ในการดูดซับแก๊สและไอระเหย
- ถ่านกัมมันต์ชนิดผง (powdered activated carbon) เป็นถ่านกัมมันต์ที่ผ่านตะแกรงขนาด 150 ไมโครเมตร ไม่น้อยกว่าร้อยละ 99 โดยน้ำหนัก มีลักษณะเป็นผงซึ่งได้จากการบด ถ่านกัมมันต์ชนิดนี้มักใช้ในงานเกี่ยวกับการดูดซับในสถานะของเหลว

3. การแบ่งตามขนาดรูพรุนบนผิวของถ่านกัมมันต์ (แบ่งตามเกณฑ์ของ International Union of Pure and Applied Chemistry, IUPAC)

- ถ่านกัมมันต์รูพรุนขนาดเล็ก (micropore) เป็นถ่านกัมมันต์ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนเล็กกว่า 2 นาโนเมตร มีความสำคัญที่สุดในการดูดซับ นิยมใช้ประโยชน์เกี่ยวกับการดูดซับแก๊สและไอระเหย
- ถ่านกัมมันต์รูพรุนขนาดกลาง (mesopore) เป็นถ่านกัมมันต์ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนระหว่าง 2 – 50 นาโนเมตร มักนำไปใช้ดูดซับสารที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่ เช่น การฟอกสี
- ถ่านกัมมันต์รูพรุนขนาดใหญ่ (macropore) เป็นถ่านกัมมันต์ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนใหญ่กว่า 50 นาโนเมตร โดยปกติไม่มีความสำคัญในการดูดซับสารต่างๆ เป็นเพียงทางส่งผ่านอนุภาคที่ถูกดูดซับเข้าไปในรูพรุนขนาดเล็กและมีผลต่ออัตราเร็วในการดูดซับ

4. การแบ่งตามความหนาแน่นของถ่านกัมมันต์

- ถ่านกัมมันต์ความหนาแน่นต่ำ ถ่านกัมมันต์ประเภทนี้มักใช้เพื่อดูดซับในสารละลาย เช่น การฟอกสีของน้ำตาลดิบให้เป็นสีขาวบริสุทธิ์ หรือการให้น้ำให้บริสุทธิ์ เป็นต้น
- ถ่านกัมมันต์ความหนาแน่นสูง ถ่านกัมมันต์ประเภทนี้มักใช้ดูดซับพิษ หรือไอระเหย

5. การแบ่งตามชนิดสารที่ถูกดูดซับ

- ถ่านกัมมันต์ที่ใช้งานเกี่ยวกับแก๊ส (gas adsorbent) เป็นถ่านกัมมันต์ที่ใช้ประโยชน์สำหรับดูดแก๊สพิษ กลิ่น และไอของสารอินทรีย์ ส่วนมากเป็นถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นถ่านสังเคราะห์ชนิดแข็ง (hard artificial char) ซึ่งเป็นถ่านที่ได้จากเมล็ดในของผลไม้ ถ่านไม้ที่เผาด้วยความดันสูง เป็นต้น

- ถ่านกัมมันต์ที่ใช้ฟอกสี (color adsorbent) เป็นถ่านกัมมันต์ที่ใช้ประโยชน์ในการฟอกสีสารละลาย ส่วนมากเป็นถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นถ่านสังเคราะห์ชนิดอ่อน (soft artificial char) ซึ่งเป็นถ่านที่ได้จากถ่านไม้ ถ่านชานอ้อย ถ่านจากแกลบ ถ่านจากกากน้ำตาล เป็นต้น

- ถ่านกัมมันต์ที่แยกโลหะ (metal adsorbent) เป็นถ่านกัมมันต์ที่ใช้แยกโลหะต่างๆ เช่น ถ่านกัมมันต์ที่ใช้แยกเงิน ทองคำ แพลตทินัม จากแร่ที่ขุดได้

2.10 ประโยชน์ของถ่านกัมมันต์

เนื่องจากถ่านกัมมันต์มีสมบัติในการดูดซับได้ดี จึงมีการนำไปใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ ดังตัวอย่างต่อไปนี้

1. อุตสาหกรรมน้ำตาล ใช้ในการฟอกสี
2. อุตสาหกรรมเครื่องดื่มที่มีแอลกอฮอล์ ใช้ถ่านกัมมันต์ในการกำจัดรส และกลิ่นที่ไม่ต้องการออกจากวิสกี้ ใช้ถ่านกัมมันต์ทำให้ไวน์มีกรดดีขึ้น ใช้ถ่านกัมมันต์เติมลงในเบียร์ เพื่อกำจัดตะกอนที่เกิดขึ้นจากการแช่เย็น โดยถ่านกัมมันต์จะทำหน้าที่ดูดซับตะกอน โปรตีนที่เอนไซม์ย่อยไม่ได้และยังใช้ถ่านกัมมันต์ในการเตรียมน้ำสะอาดเพื่อนำไปต้มเบียร์อีกด้วย
3. การทำน้ำให้บริสุทธิ์ ใช้ถ่านกัมมันต์ดูดซับคลอรีนและสารที่เป็นพิษอื่นๆ ที่ติดมากับน้ำประปาหรือน้ำบาดาล
4. อุตสาหกรรมผลิตไขมันและน้ำมัน ใช้ดูดซับสิ่งปลอมปนในน้ำมันพืช ใช้ดูดซับตัวยับยั้งโดยไม่ดูดสี
5. อุตสาหกรรมอาหาร การผลิตเจลาติน ใช้สำหรับกัมมันต์เพื่อดูดซับสีและกลิ่น การผลิตเพคติน ซึ่งมีลักษณะขุ่นมัวและมีกลิ่นเฉพาะที่ไม่พึงประสงค์ จึงต้องกำจัดออกด้วยถ่านกัมมันต์
6. การทำตัวละลายให้บริสุทธิ์เพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ การพิมพ์ ใช้ถ่านกัมมันต์เพื่อนำโซลินเบนซิน กลับมาใช้ใหม่ การซักแห้ง ใช้ถ่านกัมมันต์เพื่อนำไตรคลอโรมีเทน กลับมาใช้ใหม่ การผลิตเรยของเพื่อนำอีเทอร์ แอลกอฮอล์ อะซิโตนกลับมาใช้ใหม่ การผลิตเซลลูโลสใช้ถ่านกัมมันต์

เพื่อนำแอลกอฮอล์กลับมาใช้ใหม่ อุตสาหกรรมเส้นใยสังเคราะห์ ใช้ถ่านกัมมันต์เพื่อนำคีโตนและเบนซินกลับมาใช้ใหม่

7. อุตสาหกรรมอื่นๆ ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาระหว่างออกซิเจนและไฮโดรซีน ใช้เป็นตัวพวงเมอร์คิวริกคลอไรด์ในอุตสาหกรรมผลิตไวนิลคลอไรด์จากอะเซทิลีนและกรดไฮโดรคลอริก ใช้เป็นตัวพวงทองคำขาวซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการไฮโดรเจน ใช้เป็นตัวแยกสารโดยการบรรจุถ่านกัมมันต์ลงในคอลัมน์ของเครื่องโครมาโตกราฟฟีแก๊ส ใช้ผสมในสีเพื่อป้องกันการกัดกร่อน ใช้เป็นตัวกรองให้น้ำอากาศกันแก๊สพิษและไอพิษต่าง ๆ ใช้ในก้นกรองของบู่หรือบางชนิด ใช้ดูดควันหรือกลิ่นที่ไม่พึงประสงค์ตามห้องปรับอากาศ ตู้เย็น ตู้เสื้อผ้า ใช้ฟอกสีในอุตสาหกรรมการผลิตผงชูรส

เนื่องจากถ่านกัมมันต์สามารถใช้ประโยชน์ได้หลากหลาย จึงมีการนำเข้าและส่งออกถ่านกัมมันต์ต่อปีเป็นจำนวนมาก ดังรายละเอียดในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 สถิติการนำเข้าและส่งออกถ่านกัมมันต์ (หน่วย : บาท)

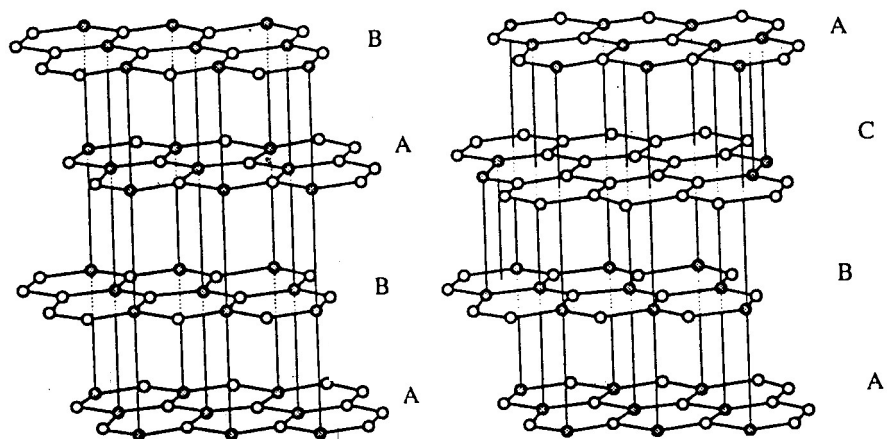
ประเทศ	ปี พ.ศ.2543		ปี พ.ศ.2544	
	นำเข้า	ส่งออก	นำเข้า	ส่งออก
ออสเตรเลีย	137,428	961,700	5,090,433	862,676
เบลเยียม	478,452	3,394,152	557,029	4,349,745
จีน	35,492,502	-	34,073,677	-
เยอรมนี	9,549,916	6,368,730	44,689,988	7,913,708
ฮ่องกง	794,422	281,311	3,070,264	-
อินโดนีเซีย	86,111,034	-	87,791,995	-
อิตาลี	3,157	2,500,068	59,214	2,363,247
ญี่ปุ่น	34,553,695	46,579,762	81,095,005	42,145,256
เกาหลี	15,268,901	16,255,795	8,054,760	8,116,149
มาเลเซีย	67,357,691	109,939	87,577,495	573,605
เนเธอร์แลนด์	4,050,787	-	4,342,103	-
ฟิลิปปินส์	4,568,955	-	4,640,526	28,318
สิงคโปร์	683,921	681,805	12,113	3,315,967
ศรีลังกา	71,392	-	1,289,859	-
สวีเดน	313,982	-	502,739	-
สวีตเซอร์แลนด์	1,685,792	-	65,484	-
ไต้หวัน	1,299,217	709,632	3,428,060	465,784
อังกฤษ	720,410	5,972,649	775,925	5,307,457
อเมริกา	85,459,904	83,698,329	104,879,937	79,920,996
อื่นๆ	652,370	3,856,539	2,634,343	6,443,487
รวม	349,253,928	171,370,516	474,993,418	161,806,395

หมายเหตุ จากกรมศุลกากร, ออนไลน์, 2545.

2.11 โครงสร้างทางเคมีและรูพรุนของถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์มีโครงสร้างเช่นเดียวกับแกรไฟต์แต่มีการจัดเรียงตัวเป็นระเบียบน้อยกว่าแกรไฟต์ แกรไฟต์มีโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 2.2 ซึ่งประกอบด้วยชั้นคาร์บอนอะตอมในรูปของวงเบนซีน (benzene ring) แต่ละชั้นห่างกันประมาณ 0.335 นาโนเมตร คาร์บอนอะตอมแต่ละอะตอมจะเกิดพันธะเดียวกับคาร์บอนอีกสามอะตอมในระนาบเดียวกัน ความยาวระหว่างอะตอมภายในชั้นประมาณ 0.144 นาโนเมตร อิเล็กตรอนของคาร์บอนอะตอมที่เหลืออีกหนึ่งอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ไปทั่วโครงสร้างเกิดเป็นเรโซแนนซ์ (resonance) เพื่อให้โครงสร้างของชั้นคาร์บอนเสถียรยิ่งขึ้น ส่วนแรงยึดเหนี่ยวระหว่างชั้นเป็นแรงแวนเดอร์วาลส์ (van der Waals) ซึ่งเป็นแรงที่อ่อนมาก ดังนั้นในโครงสร้างของแกรไฟต์จะเกิดจุดบกพร่อง (defect) ในโครงสร้าง ณ จุดนี้ได้ง่าย โครงสร้างของถ่านกัมมันต์เป็นโครงสร้างแกรไฟต์ที่ไม่สมบูรณ์โดยเกิดการเบี่ยงเบนในแนวฉากและซ้อนเหลื่อมในแนวระนาบที่มีทิศทางไม่แน่นอนและไม่เป็นระเบียบ ช่องว่างระหว่างชั้นจึงมีมาก ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ช่องว่างนี้ทำให้เกิดโครงสร้างรูพรุน โดยลักษณะรูพรุนนั้นมีลักษณะไม่แน่นอน เช่นเป็นแบบคล้ายหลอดแคปิลลารี (capillary pores) หรือแบบแผ่นขนาน (slit pores) บางรูพรุนมีลักษณะเปิดข้างหนึ่งปิดข้างหนึ่ง อาจมีรูปร่างรูพรุนเป็นรูปตัววี รูปคอกขวด รูพรุนเหล่านี้จะเกิดลึกเข้าไปในเนื้อของถ่านกัมมันต์อย่างไม่เป็นระเบียบและความลึกไม่สม่ำเสมอ และมีเส้นผ่านศูนย์กลางต่างกัน โดยทั่วไปจะเรียกรูพรุนเหล่านี้ตามขนาด คือ ขนาดเล็ก มีเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนเล็กกว่า 2 นาโนเมตร ขนาดกลาง มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 2 – 50 นาโนเมตร และรูพรุนขนาดใหญ่ มีเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า 50 นาโนเมตร รูพรุนขนาดเล็กมีความสัมพันธ์กับค่าพื้นที่ผิวจำเพาะจึงมีความสำคัญในการดูดซับ ปริมาณของรูพรุนแต่ละขนาดหรือที่เรียกกันว่าการกระจายขนาดของรูพรุน (pore size distribution) จะขึ้นกับชนิดของวัตถุดิบที่ใช้และวิธีการกระตุ้น (Bansal et al., 1988 ; Jai, 1998)

รูพรุนส่วนใหญ่จะเกิดในช่วงการกระตุ้นด้วยแก๊สออกซิโดซ์ ซึ่งเป็นการกำจัดสารอินทรีย์ต่างๆออกจากช่องว่างของถ่านที่ใช้เป็นวัตถุดิบเริ่มต้น รวมทั้งเกิดการจัดเรียงและเคลื่อนย้ายอะตอมหรือกลุ่มอะตอมเพื่อทำให้เกิดช่องว่างที่มีอำนาจในการดูดซับ รูพรุนที่มีขนาดใหญ่จะทำหน้าที่เป็นเพียงทางผ่านของสารถูกดูดซับเข้าไปยังรูพรุนขนาดเล็ก จึงไม่มีผลต่อความจุในการดูดซับ แต่จะมีผลต่ออัตราความเร็วในการดูดซับ สำหรับรูพรุนขนาดกลางนั้นสามารถดูดซับโมเลกุลของของเหลวได้ และมีความสำคัญมากขึ้นเมื่อดูดซับที่ความดันสัมพัทธ์สูงๆ สำหรับรูพรุนขนาดเล็กมีหน้าที่ในการดูดซับจึงมีผลต่อความจุในการดูดซับ โดยเฉพาะการดูดซับที่ความดันสัมพัทธ์ต่ำ ความจุในการดูดซับนอกจากจะขึ้นกับพื้นที่ผิวแล้วยังขึ้นกับลักษณะและธรรมชาติของผิวด้วย

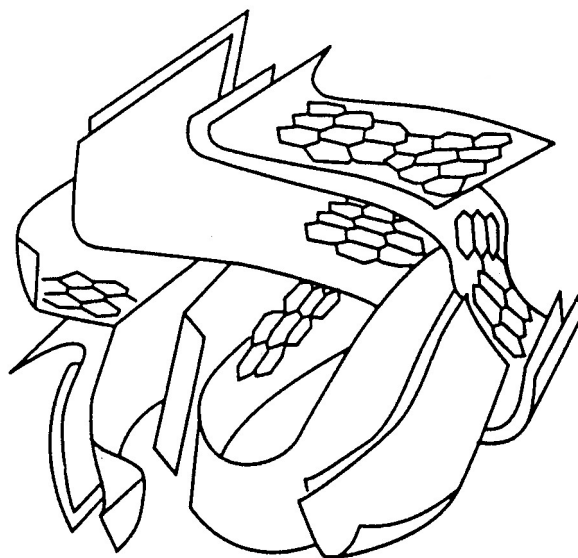
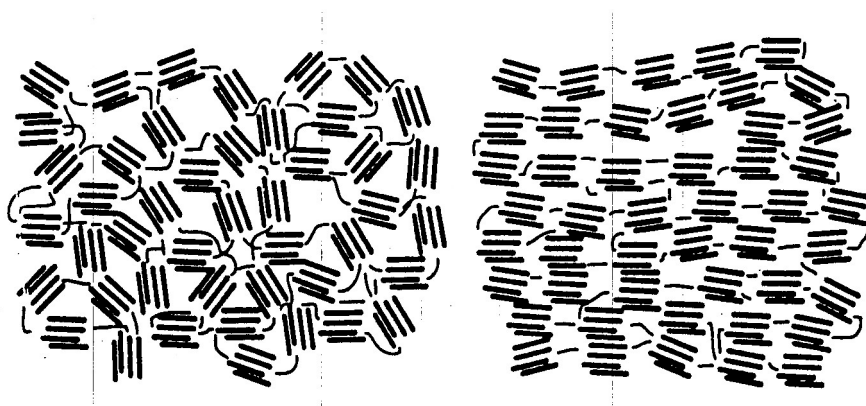


รูปที่ 2.2 โครงสร้างของผลึกแกรไฟต์

(ก) แบบ hexagonal

(ข) แบบ rhombohedral

หมายเหตุ จากหนังสือ Introduction to carbon technologies โดย Marsh, H., 1997, Spain : Secretariado.



รูปที่ 2.3 โครงสร้างของถ่านกัมมันต์

หมายเหตุ จากหนังสือ Introduction to carbon technologies โดย Marsh, H., 1997, Spain : Secretariado.

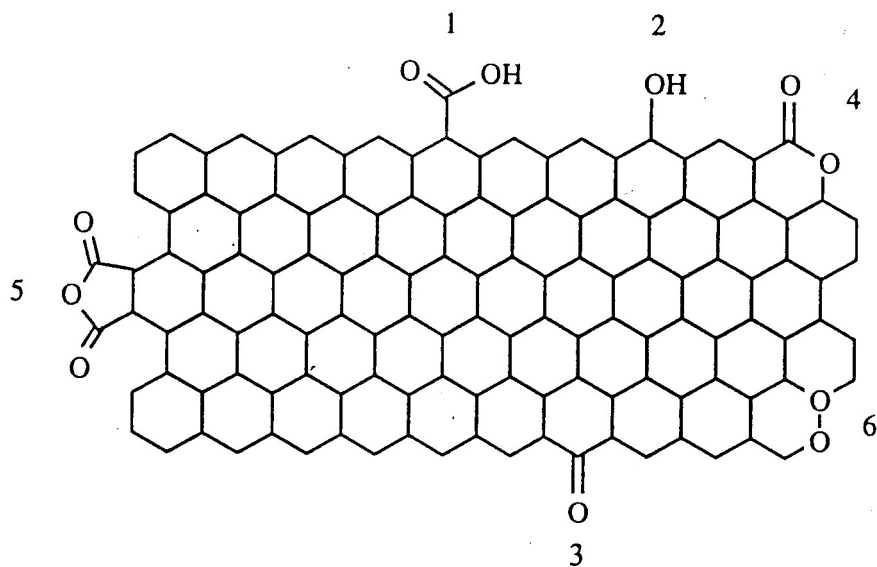
ถ้าผิวของถ่านบริเวณดูดซับเป็นระนาบพื้นฐานซึ่งมีแต่คาร์บอนอะตอมไม่มีหมู่ฟังก์ชัน (functional group) อื่นๆ การดูดซับจะเกิดจากแรงแวนเดอร์วาลส์ หรืออาจเกิดจากไพอิเล็กตรอน (π electron) ซึ่งแรงยึดเหนี่ยวทั้งสองแบบนี้เป็นแรงที่ค่อนข้างอ่อน แม้ว่าจะดูดซับได้แต่โมเลกุลของสารถูกดูดซับจะหลุดออกได้ง่าย แต่ถ้าผิวของถ่านบริเวณดูดซับมีหมู่ฟังก์ชันอยู่ด้วยการดูดซับจะเกิดจากแรงยึดเหนี่ยวที่แข็งแรงกว่าโมเลกุลของสารถูกดูดซับจะหลุดออกยากกว่า รูปที่ 2.4 แสดงหมู่ฟังก์ชันบนผิวของถ่านกัมมันต์ มีทั้งพวกออกไซด์ของกรดซึ่งพบมากบนถ่านกัมมันต์ที่ผลิตที่อุณหภูมิต่ำกว่า $400 - 500^{\circ}\text{C}$ เช่น หมู่คาร์บอนิล (carbonyls) ฟีนอล (phenols) แลกลาคโตน (lactones) อัลดีไฮด์ (aldehydes) คีโตน (ketones) เป็นต้น และพวกออกไซด์ของเบสซึ่งพบมากบนถ่านกัมมันต์ที่ผลิตที่อุณหภูมิประมาณ $800 - 1000^{\circ}\text{C}$ เช่น หมู่ไฮดรอกไซด์ (hydroxide) คาร์บอเนต (carbonate) เป็นต้น หมู่ฟังก์ชันที่เป็นออกไซด์ของกรด สามารถดูดซับโมเลกุลที่เป็นเบสได้ดี ส่วนหมู่ฟังก์ชันที่เป็นออกไซด์ของเบสสามารถดูดซับโมเลกุลที่เป็นกรดได้ดี การมีหมู่ฟังก์ชันบนผิวของถ่านกัมมันต์เกิดจากอิเล็กตรอนอิสระซึ่งอยู่ในสภาพที่ไม่เสถียรและมีเวเลนซ์ไม่เต็มตัว (unsaturated valencies) จึงพยายามที่จะเกาะกับอะตอมหรือโมเลกุลอื่น เช่น ออกซิเจนในอากาศ หรืออะตอมอื่นๆ ที่มีอยู่ในสารตั้งต้น การเกาะกับอะตอมหรือโมเลกุลอื่นเป็นพันธะทางเคมี ที่แข็งแรงและกลายเป็นออกไซด์ เกิดเป็นหมู่ฟังก์ชันต่างๆ บนผิวของถ่านกัมมันต์ (Patrick (ed.), 1995)

2.12 กระบวนการดูดซับและการหาพื้นที่ผิว

โดยทั่วไปกระบวนการการดูดซับของแก๊ส แบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท (Gregg and Sing, 1982) ดังนี้

1. การดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption หรือ Physisorption) เกิดจากแรงดึงดูดระหว่างอะตอมผิวหน้าของตัวดูดซับ (adsorbent) กับตัวถูกดูดซับ (adsorbate) ด้วยแรงยึดเหนี่ยวเป็นแบบแวนเดอร์วาลส์ จึงเป็นการจับกันที่อ่อนและไม่มีการเกิดพันธะเคมีเกิดขึ้น ความร้อนของการดูดซับต่ำประมาณ $8.4 - 25.1$ กิโลจูลต่อโมล เป็นกระบวนการคายความร้อนมีพลังงานกระตุ้น (activation energy) ต่ำ และไม่มีการแตกหักของพันธะ ดังนั้นจึงสามารถเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็วในทันทีที่โมเลกุลเดินทางมาถึงผิวหน้า แต่กรณีที่ตัวดูดซับมีความพรุนสูงอัตราการดูดซับจะช้าลงเพราะถูกจำกัดด้วยอัตราเร็วของการแพร่ภายในรูพรุน ปริมาณของการดูดซับแบบนี้เป็นแบบไม่เฉพาะเจาะจง การดูดซับอาจเกิดขึ้นได้มากกว่าหนึ่งชั้นของโมเลกุลที่ถูกดูดซับ

2. การดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption หรือ Chemisorption) มีพันธะเคมีเกิดขึ้นระหว่างอะตอมที่อยู่ผิวหน้ากับอะตอมหรือโมเลกุลที่ถูกดูดซับจึงเป็นการจับที่แข็งแรง ความร้อนของการดูดซับมีค่าประมาณ $62.8 - 83.7$ กิโลจูลต่อโมล การดูดซับแบบนี้เป็นแบบเฉพาะเจาะจง



รูปที่ 2.4 หมู่ฟังก์ชันต่างๆบนผิวของถ่านกัมมันต์

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

หมายเหตุ จากหนังสือ Introduction to carbon technologies โดย Marsh, H., 1997, Spain : Secretariado.

กล่าวคือ ขึ้นกับชนิดของแก๊สและชนิดของพื้นผิวของตัวดูดซับ การดูดซับแก๊สที่ผิวหน้าจะเป็นแบบชั้นเดียว (monolayer) การที่จะให้การดูดซับทางเคมีเข้าสู่สมดุล (equilibrium) นั้นจะต้องใช้เวลานาน โดยเฉพาะที่อุณหภูมิต่ำ ผลของอุณหภูมิต่อปริมาณที่ดูดซับที่สภาวะสมดุลจะขึ้นกับชนิดของระบบ ปริมาณไอที่ถูกดูดซับจะมีค่ามากที่อุณหภูมิสูงกว่าจุดเดือดของสารนั้นมาก ปริมาณการดูดซับจะคงที่ในช่วงอุณหภูมิต่ำ และมักจะมีค่าน้อยเนื่องจากอัตราเร็วของการดูดซับมีค่าต่ำทำให้เกิดการอึดตัว

การดูดซับมีปัจจัยที่เกี่ยวข้องได้แก่ ความดันหรือความเข้มข้น ชนิดของตัวถูกดูดซับและตัวดูดซับ การดูดซับโดยทั่วไปมักทำภายใต้อุณหภูมิกงที่และศึกษาถึงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของตัวดูดซับกับความดันที่สภาวะสมดุลของการดูดซับ เส้นความสัมพันธ์ที่ได้เรียกว่า ไอโซเทอมของการดูดซับ (adsorption isotherm) ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะที่ขึ้นกับขนาดของรูพรุนของตัวดูดซับ

ไอโซเทอมของการดูดซับ คือ ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับในสารละลายกับปริมาณที่ดูดซับที่สมดุลเมื่ออุณหภูมิกงที่ สำหรับการดูดซับแก๊ส ปริมาตรที่ถูกดูดซับจะมีค่าเปลี่ยนแปลงไป โดยเริ่มจากศูนย์เมื่อความดันสัมพัทธ์ (P/P^0) มีค่าเท่ากับศูนย์จนถึงอินฟินิตี้ (infinity) เมื่อความดันสัมพัทธ์ มีค่าเท่ากับหนึ่งซึ่งเป็นจุดที่ผิวหน้าเปียกอย่างสมบูรณ์นั่นคือ การเกิดการควบแน่นของไอของโมเลกุลที่ถูกดูดซับ

รูปร่างของไอโซเทอมจะขึ้นอยู่กับธรรมชาติของตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ ไอโซเทอมของการดูดซับเป็นการดูดซับบนพื้นผิวที่ขึ้นอยู่กับความดัน อุณหภูมิ และชนิดของสารที่ใช้เป็นตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ ถ้าให้ n เป็นปริมาณของการดูดซับต่อน้ำหนักของตัวดูดซับจะแสดงความสัมพันธ์ตามสมการได้ดังนี้

$$n = f(P, T, \text{adsorbent}, \text{adsorbate}) \quad (2.8)$$

ถ้าให้อุณหภูมิกงที่ (isothermal) และสำหรับตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับคู่หนึ่งๆ เขียนได้ว่า

$$n = f(P)_{T, \text{adsorbent}, \text{adsorbate}} \quad (2.9)$$

$$n = f(P/P^0)_{T, \text{adsorbate}, \text{adsorbent}} \quad (2.10)$$

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

P = ความดันของแก๊สที่เป็นตัวถูกดูดซับ

P^0 = ความดันไออิ่มตัวของแก๊สที่เป็นตัวถูกดูดซับที่อุณหภูมินั้นๆ

ชนิดของไอโซเทอมแบ่งออกได้เป็น 6 ชนิด โดย Brunauer Deming Deming and Teller, B.D.D.T system (Rouquerol, F., Rouquerol, J. and Sing, 1999) รูปที่ 2.5 แสดงไอโซเทอมการดูดซับประเภทต่างๆ

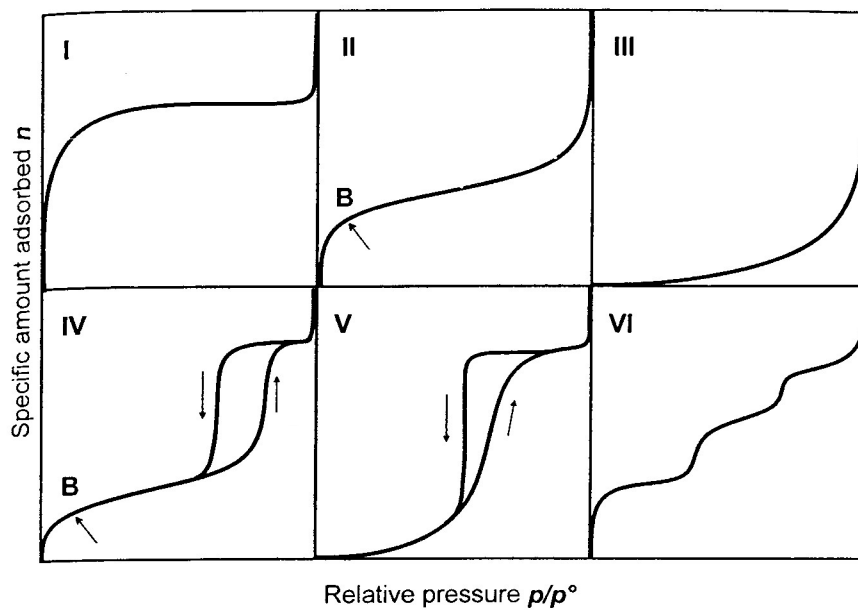
ชนิดที่ 1 (Type I) เรียกว่าแบบแลงเมียร์ (Langmuir) สำหรับการดูดซับที่เป็นแบบชั้นเดียว (monolayer) เป็นแบบที่ง่ายที่สุดแต่กลับเกิดขึ้นกับวัสดุที่มีความพรุนต่ำหรือพบในตัวดูดซับที่มีพื้นที่ผิวภายนอกต่ำแต่มีรูพรุนส่วนใหญ่เป็นรูพรุนขนาดเล็ก เช่น ถ่านกัมมันต์ หรือซีโอไลต์ กรณีเช่นนี้ ปริมาตรของรูพรุนจะมีค่ามากกว่าปริมาตรที่ทำให้เกิดการดูดซับแบบชั้นเดียว การดูดซับแบบนี้จะพบได้ในการดูดซับที่ย้อนกลับได้ เป็นของแข็งที่มีโครงสร้างรูพรุนขนาดเล็ก โดยแก๊สจะถูกดูดซับจนเต็มรูพรุนอย่างรวดเร็ว ตั้งแต่ความดันสัมพัทธ์น้อยกว่า 1 และรูพรุนมีขนาดเล็กกว่า 2 นาโนเมตร

ชนิดที่ 2 (Type II) บางครั้งเรียกว่าซิกมอยด์ (sigmoid) หรือ ไอโซเทอมรูปตัวเอส (s-shaped isotherm) มักจะเกิดกับวัสดุที่ไม่มีความพรุนหรือมีความพรุนขนาดใหญ่ ตำแหน่ง B ซึ่งแสดงลักษณะคล้ายหัวเข่า (knee) เป็นตำแหน่งที่ผิวหน้าถูกคลุมแบบชั้นเดียวแล้ว และเริ่มการดูดซับแบบหลายชั้น (multilayer) ที่ความดันสูงขึ้นไป ตัวดูดซับเป็นแบบของแข็งที่ไม่มีรูพรุนหรือที่มีรูพรุนขนาดใหญ่ ซึ่งเกิดการดูดซับแบบหลายชั้น โดยจะเกิดการดูดซับแบบชั้นเดียวก่อนตามด้วย การดูดซับแบบหลายชั้นที่ความดันสัมพัทธ์ที่มีค่าสูง

ชนิดที่ 3 (Type III) มีรูปร่างเหมือนกระจกแก้ว และไม่มีตำแหน่งที่เหมือนหัวเข่า (knee) ไอโซเทอมแบบนี้ไม่ค่อยพบมากนัก จะเกิดกับการดูดซับที่อ่อน ขนาดรูพรุนเป็นแบบของแข็งไม่มีรูพรุน (nonporous solid) และของแข็งที่มีรูพรุนขนาดเล็กแต่เป็นพวกที่มีแรงดึงดูดระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับที่อ่อนมากทำให้ดูดซับได้น้อยเกิดการดูดซับแบบชั้นเดียวที่ความดันสัมพัทธ์ต่ำ แต่เมื่อเกิดการดูดซับแบบหลายชั้นจะเกิดแรงดึงดูดระหว่างตัวถูกดูดซับด้วยกันเองทำให้ดูดซับได้มากขึ้นที่ความดันสัมพัทธ์ที่มีค่าสูง

ชนิดที่ 4 (Type IV) มักจะพบในวัสดุที่มีขนาดรูพรุนระหว่าง 2 – 50 นาโนเมตร ซึ่งจัดว่าเป็นรูพรุนขนาดกลาง ในช่วงแรกซึ่งมีค่าความดันสัมพัทธ์ต่ำจะเหมือนกับไอโซเทอมชนิดที่ 2 แต่หลังจากนั้นค่าการดูดซับจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อค่าความดันสัมพัทธ์มาก ซึ่งเกิดจากการที่เกิดการควบแน่นแคปิลลารี (capillary condensation) ขึ้นในรูพรุนซึ่งทำให้เกิด hysteresis loop ในช่วง desorption ซึ่งข้อมูลของการเกิดการควบแน่นในช่วงแคปิลลารีสามารถนำมาคำนวณหาการกระจายขนาดของรูพรุนในของแข็งที่มีรูพรุนขนาดกลางได้ การควบแน่นแคปิลลารีทำให้ desorption มีปริมาณดูดซับที่สูงกว่าการเกิดการดูดซับที่ความดันเท่ากัน

ชนิดที่ 5 (Type V) เหมือนชนิดที่ 4 ต่างกันเพียงเกิดการควบแน่นในรูพรุน (มี hysteresis loop) ไอโซเทอมแบบนี้จะพบไม่บ่อยนัก



รูปที่ 2.5 ชนิดของเส้นไอโซเทอมของการดูดซับ

หมายเหตุ จากหนังสือ Adsorption by powders and porous solids : Principles, methodology and applications โดย Rouquerol, F. et al., 1999, San Diego : Academic Press.

ชนิดที่ 6 (Type VI) หรือที่เรียกไอโซเทอมแบบขั้นบันได (stepped isotherm) ไอโซเทอมแบบนี้จะพบไม่บ่อยนัก และเป็นไอโซเทอมการดูดซับแบบขั้นต่อขั้นเกี่ยวเนื่องกัน บนตัวดูดซับที่มีพื้นที่ผิวสม่ำเสมอมาก ความชัดเจนของขั้นขึ้นอยู่กับระบบและอุณหภูมิการดูดซับ

ข้อมูลจากไอโซเทอมของการดูดซับสามารถนำมาคำนวณหาพื้นที่ผิวและปริมาตรของรูพรุนและการกระจายขนาดของรูพรุนได้

ในกรณีการดูดซับแบบชั้นเดียว Langmuir ได้เสนอสมการการดูดซับดังนี้ (Do, 1998 ; Gregg et al., 1982 ; Rouquerol et al., 1999)

$$\frac{P}{n} = \frac{P}{n_m} + \frac{1}{bn_m} \quad (2.11)$$

เมื่อ P = ความดันของสารถูกดูดซับ

n = ปริมาณของสารถูกดูดซับที่สมดุลต่อหน่วยน้ำหนักของสารดูดซับที่ความดัน P (โมลต่อกรัม)

n_m = ปริมาณของสารถูกดูดซับที่เรียงแบบชั้นเดียวในลักษณะปกคลุมผิวของสารดูดซับ (โมลต่อกรัม)

b = สัมประสิทธิ์ของการดูดซับซึ่งขึ้นกับอุณหภูมิและมีลักษณะเฉพาะขึ้นกับชนิดของสารถูกดูดซับและสารดูดซับ

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

$$S = n_m A_m L \quad (2.12)$$

เมื่อ S = พื้นที่ผิวจำเพาะ (ตารางเมตรต่อกรัม)

A_m = พื้นที่เฉลี่ยที่ถูกปกคลุมด้วยสารถูกดูดซับหนึ่งโมเลกุล (ตารางเมตร)

L = ค่าคงที่อะโวกาโดร (6.022×10^{23} โมเลกุลต่อโมล)

สำหรับการดูดซับที่มีการดูดซับของสารถูกดูดซับเป็นแบบหลายชั้น (multilayer adsorption) นิยมใช้สมการของ Brunauer-Emmett-Teller, BET (Do, 1998 ; Gregg et al., 1982 ; Rouquerol et al., 1999 ; Seader and Henley, 1998) ดังนี้

$$\frac{P}{n(P^0 - P)} = \frac{1}{n_m C} + \frac{(C-1)}{n_m C} \cdot \frac{P}{P^0} \quad (2.13)$$

เมื่อ P^0 = ความดันไออิ่มตัวของสารดูดซับ

n = ปริมาณสารดูดซับที่ความดัน P (โมลต่อกรัม)

n_m = ปริมาณสารดูดซับแบบชั้นเดียวที่ปกคลุมผิวทั้งหมดของสารดูดซับ

C = ค่าคงที่ไร้นิติยวที่มีความสัมพันธ์กับพลังงานการดูดซับ โดยที่

$$C = \exp \left[\frac{\Delta H_A - \Delta H_L}{RT} \right] \quad (2.14)$$

เมื่อ ΔH_A = ความร้อนของการดูดซับระหว่างการเกิดการดูดซับแบบชั้นเดียว

ΔH_L = ความร้อนของการควบแน่น

R = ค่าคงที่ของแก๊ส (gas constant)

T = อุณหภูมิสัมบูรณ์

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

เมื่อพล็อตกราฟระหว่าง $\frac{P}{n(P^0 - P)}$ กับ $\frac{P}{P^0}$ จะได้กราฟเส้นตรงที่มีค่าความชันเท่า

กับ $\frac{C-1}{n_m C}$ และมีค่าจุดตัดเท่ากับ $\frac{1}{n_m C}$ ดังนั้นจะหาค่า C และ n_m ซึ่งสามารถนำไปคำนวณ

หาพื้นที่ผิวได้เหมือนในกรณีของ Langmuir

ในกรณีที่ต้องการหาปริมาณและการกระจายขนาดของรูพรุนที่มีขนาดต่างๆในถ่านกัมมันต์ จะต้องอาศัยข้อมูลจากไอโซเทอมของการดูดซับเพื่อนำไปคำนวณหาด้วยวิธีการต่างๆ เช่น Dubinin t-plot BJH Horvath-Kawazoe MP และ DFT (Do, 1998 ; Gregg et al., 1982 ; Patrick (ed.), 1995 ; Rouquerol et al., 1999) เป็นต้น

สมการของ Dubinin เป็นสมการที่นิยมใช้ในการอธิบายการดูดซับแก๊สหรือไอน้ำของแข็งที่มีรูพรุนขนาดเล็ก (microporous solid) สมการนี้พัฒนาขึ้นโดยใช้พื้นฐานการดูดซับแบบ potential theory ซึ่งพิจารณาว่ามีสนามพลังงานเกิดขึ้นระหว่างตัวดูดซับในสถานะแก๊สกับพื้นผิวของตัวดูดซับที่เรียกว่า potential force field สนามพลังงานที่เกิดขึ้นนี้ในแต่ละเส้นจะมีพลังงานเท่ากัน และเพิ่มมากขึ้นเมื่อเส้นพลังงานห่างจากผิวของตัวดูดซับออกไป

t-plot เป็นสมการที่ใช้หาปริมาณรูพรุนขนาดเล็กหรือพื้นที่ผิวของรูพรุนขนาดเล็ก โดยใช้ความสัมพันธ์ว่าปริมาณที่ถูกดูดซับมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความหนา (thickness) ที่เกิดจากการดูดซับที่เพิ่มขึ้นในรูพรุน แต่ในความเป็นจริงไม่เป็นเช่นนั้น จึงมีการสร้างกราฟมาตรฐานการดูดซับ

ขึ้นซึ่งตัวดูดซับอ้างอิงที่ใช้เป็นประเภทของแข็งไม่มีรูพรุน (nonporous solid) การหาปริมาตรรูพรุนทำได้โดยการลากเส้นตรงสัมผัสกับกราฟการดูดซับที่ได้จากตัวดูดซับต่างๆเทียบกับกราฟมาตรฐาน เส้นตรงสองเส้นที่มีความชันต่างกันสามารถนำไปใช้ในการคำนวณหาพื้นที่ผิวภายใน (internal surface area) และพื้นที่ผิวภายนอก (external surface area) ได้

BJH (Barret, Joyner and Halenda) เป็นสมการที่ใช้หาการกระจายขนาดรูพรุนในของแข็งที่มีรูพรุนขนาดกลาง (pore size distribution of mesoporous solid) โดยใช้สมการของเคลวินสำหรับการควบแน่นแคปิลลารี (Kelvin equation for capillary condensation) ซึ่งรูปแบบสมการที่เสนอมีสองแบบคือ แบบที่ใช้กับรูพรุนที่มีลักษณะเป็นทรงกระบอก (cylindrical tube) และแบบที่ใช้กับรูพรุนที่มีลักษณะไม่เป็นทรงกระบอก (noncylindrical tube)

2.13 การดูดซับและปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับของเหลวบนถ่านกัมมันต์

1. การดูดซับของเหลวบนถ่านกัมมันต์

การดูดซับ เป็นการแยกองค์ประกอบที่ต้องการหรือไม่ต้องการออกจากสารละลายของเหลวโดยให้สารละลายสัมผัสกับตัวดูดซับ องค์ประกอบแต่ละชนิดในสารละลายมีความสามารถในการกระจายบนผิวและเกิดแรงดูดซับได้ต่างกัน ปรากฏการณ์การดูดซับขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายชนิด ได้แก่ ลักษณะโครงสร้างที่ซับซ้อนของตัวดูดซับ คุณสมบัติทางเคมีของตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ จำนวนชั้นของโมเลกุลของตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับบนพื้นผิว และขนาดของรูพรุนที่ทำหน้าที่ดูดซับได้ ดังนั้นการแยกองค์ประกอบที่ต้องการหรือไม่ต้องการออกต้องเลือกตัวดูดซับให้เหมาะกับองค์ประกอบนั้น สำหรับการดูดซับหรือการเคลื่อนย้ายสารของเหลว (ตัวถูกดูดซับ) มายังผิวของแข็ง (ตัวดูดซับ) เกิดขึ้นใน 2 ลักษณะได้แก่

1) การไม่ชอบของเหลวของตัวถูกละลาย (lyophobic of solute) ในกรณีของเหลวเป็นน้ำ จะเรียกว่า สารไฮโดรโฟบิก สารไฮโดรโฟบิกที่ไม่ชอบน้ำนี้ จะพยายามพาตัวเองเข้าสู่ชั้นที่อยู่ระหว่างน้ำกับของแข็งและดูดซับที่ผิวของแข็งในที่สุด

2) ความชอบของตัวถูกละลายที่จะไปเกาะติดที่ผิวของสารดูดซับ (high affinity of solute to solid) โดยในการเกาะติดจะมีแรงผลักดันอยู่สามแบบ ดังนี้ แรงดึงดูดทางไฟฟ้า แรงแวนเดอร์วาลส์ และแรงทางเคมี

การดูดซับของเหลวบนสารดูดซับของแข็ง (ถ่านกัมมันต์) ในระหว่างที่มีการดูดซับเกิดขึ้น โมเลกุลของสารละลายหรือสารแขวนลอยจะถูกกำจัดออกจากน้ำและไปเกาะติดอยู่บนถ่านกัมมันต์ โมเลกุลของสารส่วนใหญ่จะเกาะจับอยู่ภายในรูพรุนของถ่านกัมมันต์และมีเพียงส่วนน้อยเท่านั้นที่เกาะอยู่ที่ผิวภายนอก การถ่ายเทโมเลกุลจากน้ำไปหาถ่านกัมมันต์เกิดขึ้นได้จนกระทั่งถึงจุด

สมดุล ความเข้มข้นของโมเลกุลในน้ำจะเหลือน้อยลง เพราะโมเลกุลส่วนใหญ่เคลื่อนที่ไปเกาะจับบนถ่านกัมมันต์ ขั้นตอนที่เกิดขึ้นในระหว่างการดูดซับมีดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 ขั้นตอนการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของสารละลาย หรือ สารแขวนลอยเข้าหาถ่านกัมมันต์ โดยการเคลื่อนที่จะมีลักษณะคล้ายกับการกรองน้ำซึ่งเป็นการเคลื่อนย้ายของสารแขวนลอยในน้ำเข้ามาติดที่ถ่านกัมมันต์ ซึ่งโมเลกุลของสารจะเคลื่อนที่เข้าหาถ่านกัมมันต์ได้สองวิธี โดยวิธีแรกเป็นการเคลื่อนที่ตามธรรมชาติของสารที่มีขนาดเล็กกว่า 1 ไมโครเมตร ซึ่งเป็นการเคลื่อนที่แบบบราวเนียน (brownian diffusion) ส่วนวิธีที่สองเป็นการเคลื่อนที่ตามเส้นทางการไหลของน้ำของสารที่มีขนาดใหญ่กว่า 1 ไมโครเมตร นอกจากนี้สารแขวนลอยขนาดใหญ่ยังอาจตกตะกอนในทิศทางที่เคลื่อนที่เข้าหาถ่านกัมมันต์ได้ ขนาดและการกระจายขนาดของถ่านกัมมันต์มีความสำคัญต่อกลไกการเคลื่อนย้ายเป็นอย่างมาก

ขั้นตอนที่ 2 ขั้นตอนการแพร่ในฟิล์ม (film diffusion) เมื่อโมเลกุลของสารเข้ามาถึงถ่านกัมมันต์ซึ่งโดยปกติแล้วถ่านกัมมันต์จะมีฟิล์มของน้ำห่อหุ้มอยู่โดยรอบคล้ายเยื่อบางๆ โมเลกุลต้องทำการแทรกตัวผ่านฟิล์มของน้ำให้ได้จึงจะเข้าไปถึงผิวถ่านกัมมันต์ได้

ขั้นตอนที่ 3 ขั้นตอนการแพร่ในรูพรุน (pore diffusion) เนื่องจากถ่านกัมมันต์มีพื้นที่ผิวส่วนใหญ่อยู่ที่รูพรุน โมเลกุลของสารถูกดูดซับจะแทรกตัวเข้าไปในรูพรุนของถ่านกัมมันต์ให้ได้จึงจะมีการดูดซับเกิดขึ้น

ขั้นตอนที่ 4 ขั้นตอนนี้โมเลกุลของสารถูกดูดซับจะต้องเกาะติดบนผิวของถ่านกัมมันต์ได้โดยไม่หลุดออกไป จึงจะถือว่าเกิดการดูดซับอย่างสมบูรณ์

2. ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับของเหลวบนถ่านกัมมันต์

ในสารละลายทั่วไปจะมีองค์ประกอบที่เป็นสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ ตัวดูดซับจะสามารถดูดซับองค์ประกอบใดได้มากกว่ากันนั้น ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของตัวดูดซับ เช่น ผงถ่านกัมมันต์สามารถดูดซับสารละลายที่ไม่มีขี้ได้ดี และสามารถทำให้ตัวดูดซับมีคุณสมบัติพิเศษได้โดยทำให้ผิวสัมผัสของตัวดูดซับมีออกไซด์ ซึ่งสามารถดูดซับองค์ประกอบอื่นได้มากขึ้น ในบางครั้งสารละลายที่ป้อนเข้าระบบดูดซับมีองค์ประกอบอื่นปลอมปนมาด้วยและเกิดการยึดเกาะตัวดูดซับทำให้ความสามารถของตัวดูดซับน้อยลง จำเป็นต้องนำตัวดูดซับนั้นมาบำบัดด้วยสารอินทรีย์หรืออนินทรีย์ที่สามารถทำปฏิกิริยากับองค์ประกอบที่ปลอมปนนั้นเพื่อให้สภาพผิวหน้าของตัวดูดซับกลับสู่สภาพเดิม คุณสมบัติทางกายภาพของตัวดูดซับทั่วไปได้แก่ ความพรุน ความหนาแน่น และพื้นที่ผิวสัมผัส ตัวอย่างปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับมีดังนี้

- อุณหภูมิ อุณหภูมิมีผลต่ออัตราเร็วและขีดความสามารถในการดูดซับ คือ อัตราเร็วจะเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ และลดลงตามการลดลงของอุณหภูมิ แต่ขีดความสามารถในการ

ดูดซับจะมีค่าลดลงที่อุณหภูมิสูงและมีค่าเพิ่มขึ้นที่อุณหภูมิต่ำ

- ขนาดของอนุภาค อัตราการดูดซับจะขึ้นอยู่กับผิวหน้าของตัวดูดซับและความเร็วในการแพร่กระจายของตัวถูกดูดซับเข้าสู่ในอนุภาค อัตราการดูดซับของถ่านกัมมันต์ จะเป็นสัดส่วนผกผันกับขนาดของถ่านกัมมันต์ แต่ก็ไม่มีผลมากเท่ากับพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ โดยพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์นี้ จะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความสามารถในการดูดซับ กล่าวคือ ถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวมากก็จะดูดซับได้มากกว่าถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวน้อย แต่อย่างไรก็ตามเฉพาะพื้นที่ผิวอย่างเดียวไม่สามารถที่จะให้เหตุผลสำหรับอธิบายความสามารถในการดูดซับของการดูดซับสารทุกชนิด เพราะขนาดพื้นที่ผิวจะมาจากทั้งรูพรุนขนาดใหญ่ ขนาดกลาง และขนาดเล็ก กรณีถ้าสารถูกดูดซับมีขนาดใหญ่กว่ารูพรุน จะทำให้พื้นที่ผิวที่มาจากรูพรุนขนาดเล็กไม่มีประโยชน์ต่อการดูดซับเนื่องจากมีรูพรุนขนาดเล็กเกินกว่าที่สารถูกดูดซับจะเข้าไปได้ เพราะฉะนั้นจะต้องพิจารณาทั้งปริมาณพื้นที่ผิวและการกระจายขนาดของรูพรุน ซึ่งเป็นผลจากชนิดของวัสดุที่ใช้ทำถ่านกัมมันต์และกรรมวิธีในการผลิตถ่านกัมมันต์ อีกทั้งชนิดวัสดุและกรรมวิธีในการผลิตยังมีผลต่อลักษณะทางเคมีของพื้นที่ผิวซึ่งมีผลต่อความสามารถในการดูดซับ

- ความปั่นป่วน อัตราเร็วในการดูดซับอาจขึ้นอยู่กับ การแพร่ในฟิล์มหรือการแพร่ในรูพรุน ซึ่งแล้วแต่ความปั่นป่วนของระบบ ถ่านน้ำมีความปั่นป่วนต่ำ ฟิล์มน้ำที่ล้อมรอบถ่านกัมมันต์ จะมีความหนามาก (เพราะไม่ถูกรบกวน) และเป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลเข้าหาถ่านกัมมันต์ ทำให้การแพร่ในฟิล์มเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ ในทางตรงกันข้ามถ่านน้ำมีความปั่นป่วนสูงทำให้น้ำไม่สามารถสะสมตัวเป็นฟิล์มหนาขึ้นเป็นผลให้โมเลกุลสามารถเคลื่อนที่ผ่านฟิล์มน้ำเข้าไปหาถ่านกัมมันต์ได้เร็วกว่าการเคลื่อนที่เข้าไปในรูพรุน กรณีนี้การแพร่ในรูพรุนจะเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ

- ความเป็นกรด - เบสของสารละลาย (pH) มีอิทธิพลต่อการแตกตัวเป็นไอออนและการละลายน้ำของสารต่างๆ จึงมีผลต่อการดูดซับของถ่านกัมมันต์ โดยทั่วไปถ้าสารสามารถละลายน้ำได้ดีจะถูกดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ได้ยาก ถ่านกัมมันต์สามารถดูดซับได้ทั้งสารที่อยู่ในรูปไม่แตกตัวและสารที่อยู่ในรูปไอออน แต่สารที่อยู่ในรูปที่ไม่แตกตัวจะถูกดูดซับได้ดีกว่าสารที่อยู่ในรูปไอออน เนื่องจากผิวของถ่านกัมมันต์มักเป็นกลาง

- ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับ สำหรับการดูดซับที่ตัวถูกดูดซับมีความเข้มข้นมาก จะทำให้อัตราการดูดซับเร็วกว่าการดูดซับที่ตัวถูกดูดซับมีความเข้มข้นน้อย

2.14 การดูดซับฟีนอลในน้ำ

ฟีนอล (phenol) เป็นสารอินทรีย์กลุ่มสารประกอบอะโรมาติก มีสูตรโมเลกุล คือ C_6H_6O (C 76.57%, H 6.43%, O 17.00%) อนุพันธ์ต่างๆ ของฟีนอล ได้แก่ ครีซอล ไซลีนอล และพาราอะมิโนฟีนอล เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีอนุพันธ์ของฟีนอลอีกหลายชนิดโดยมีโครงสร้างที่แตกต่าง กันดังแสดงในรูปที่ 2.6

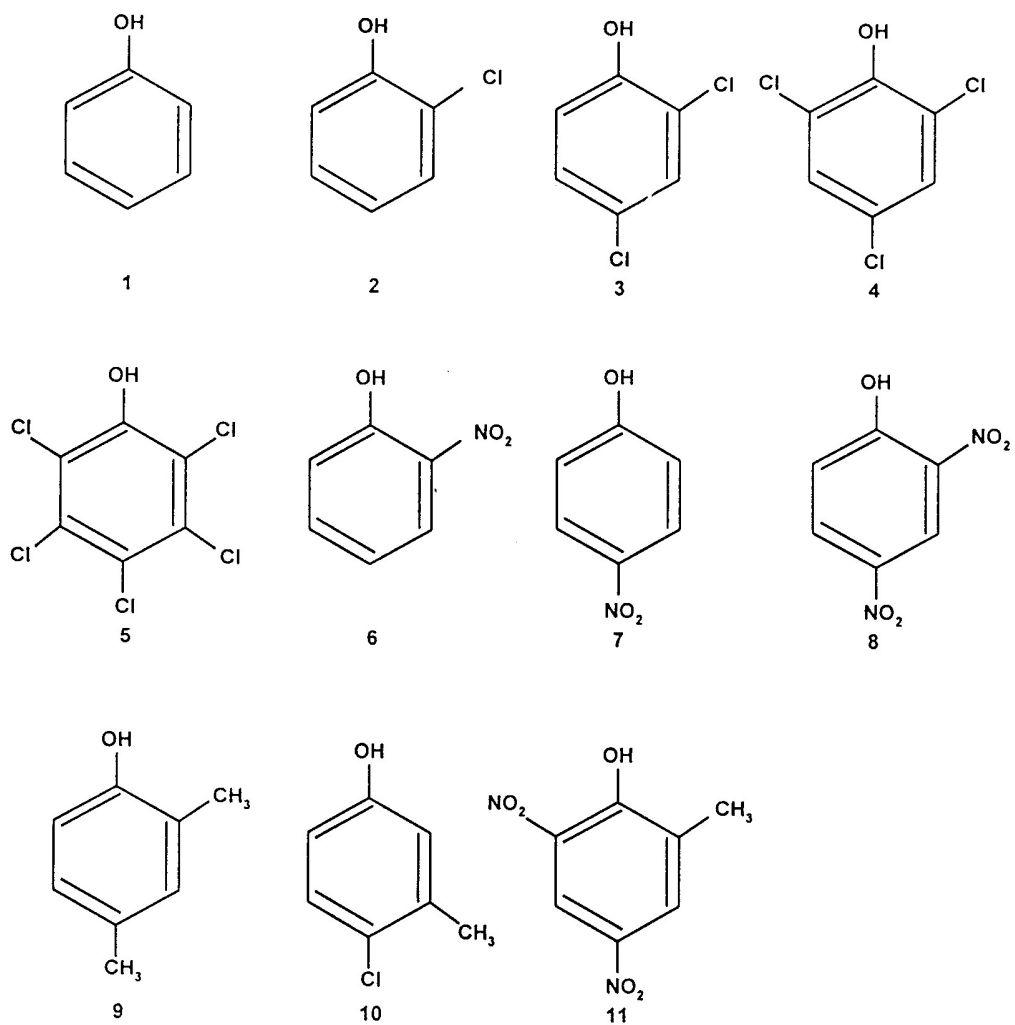
ฟีนอล เป็นผลึกไม่มีสีหรือสีขาว ถ้าไม่บริสุทธิ์จะมีสีชมพูอ่อนๆ มีกลิ่นฉุนเฉพาะตัว ดูดความชื้น ละลายน้ำได้ดี สารละลายที่ได้มีฤทธิ์เป็นกรดอ่อน จึงมีชื่อเรียกที่รู้จักกันทั่วไปว่า กรดคาร์บอริก (carbolic acid) คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของฟีนอลแสดงในตารางที่ 2.4 ฟีนอลเป็นสารที่ย่อยสลายยาก ซึ่งค่าครึ่งชีวิตของฟีนอลในอากาศจะน้อยกว่า 1 วัน สามารถปนเปื้อนในดินได้นาน 2 – 5 วัน สามารถเจือปนอยู่ในน้ำได้นานกว่า 9 วัน อันตรายของฟีนอลจะขึ้นอยู่กับปริมาณและระยะเวลา ในการได้รับ อันตรายที่เกิดกับคนส่วนใหญ่จะเกิดจากการสัมผัสกับฟีนอลโดยตรง โดยจะก่อให้เกิดการ ระคายเคืองต่อผิวหนัง ตาและทางเดินหายใจ หากสัมผัสถูกผิวหนังจะเป็นผื่นแดง อักเสบ สีผิวเปลี่ยน และอาจถึงขั้นเป็นโรคผิวหนัง เกิดเนื้องอกที่ผิวหนังหรือผิวหนังตาย (กรมควบคุมมลพิษ กองจัดการ สารอันตรายและกากของเสีย, 2542) และเมื่อคนหรือสัตว์ดื่มน้ำที่มีฟีนอลปนเปื้อนอยู่ตั้งแต่ 100 – 5000 มิลลิกรัมต่อลิตร ต่อเนื่องกันจะเป็นอันตรายถึงชีวิตได้ภายใน 14 วัน (ATSDR, ออนไลน์, 2000)

สารประกอบฟีนอลที่ใช้กันมีหลายประเภท และปัจจุบันได้มีการนำสารประกอบฟีนอลไป ใช้ในงานอุตสาหกรรมต่างๆ แต่ที่ใช้กันอย่างกว้างขวางมีอยู่ 2 ชนิดได้แก่

- ฟีนอลิกเรซิน (phenolic resins) เรซินชนิดนี้ถูกสังเคราะห์ขึ้นมาจากสารประกอบ ฟีนอลและสารประกอบฟอร์มัลดีไฮด์ โดยนำเรซินนี้ไปใช้ในการติดไม้อัด ผลิตฉนวนกันกระแส ไฟรั่ว ผลิตแบบหล่อแม่พิมพ์ และผลิตแผ่นเรซิน

- สารประกอบบิสฟีนอลเอ (bisphenol a) สารประกอบชนิดนี้ถูกสังเคราะห์ขึ้น มาจากสารประกอบฟีนอลและอะซีโตน สารประกอบบิสฟีนอลเอนี้ใช้ในการผลิตโพลีคาร์บอเนต

นอกจากนี้ มีการนำสารประกอบฟีนอลไปใช้งานอีกหลายประเภท เช่น ใช้ในการผลิตยา แอสไพริน ใช้เป็นยาฆ่าเชื้อโรค ใช้ในโรงงานผลิตยางมะตอย ใช้ในโรงงานผลิตสี ใช้ในโรงงาน ผลิตเม็ดพลาสติก เป็นต้น



- | | |
|--------------------------|---------------------------------|
| 1. phenol | 7. 4-nitrophenol |
| 2. 2-chlorophenol | 8. 2,4-dinitrophenol |
| 3. 2,4-dichlorophenol | 9. 2,4-dimethylphenol |
| 4. 2,4,6-trichlorophenol | 10. 4-chloro-3-methylphenol |
| 5. pentachlorophenol | 11. 2,6-dinitro-2- methylphenol |
| 6. 2-nitrophenol | |

รูปที่ 2.6 สูตรโครงสร้างของฟีนอลและอนุพันธ์ของฟีนอล

หมายเหตุ จากหนังสือ Chemistry of water treatment โดย Faust, S. D. and Aly, O. M.,
1983, Boston : Butterworth.

ตารางที่ 2.4 คุณสมบัติทางกายภาพของฟีนอล

คุณสมบัติทางกายภาพของฟีนอล	
จุดเดือด	181°C
จุดหลอมเหลว	42°C
ความสามารถในการแพร่ในน้ำ ที่ 20°C	8.7×10^4 cm ² /sec
ความสามารถในการละลายน้ำ ที่ 25°C	67,000 mg/L
pK _a ที่ 25°C	9.9
ขนาดโมเลกุล	0.43 nm
น้ำหนักโมเลกุล	94.113

หมายเหตุ จากหนังสือ Chemical properties handbook โดย Yaws, C. L., 1999, New York : McGraw-Hill.

ตารางที่ 2.5 ความเข้มข้นของฟีนอล อุณหภูมิ และความเป็นกรด-เบสในน้ำทิ้งของนิคมอุตสาหกรรมต่างๆ

นิคมอุตสาหกรรม	ความเข้มข้นของฟีนอล (มิลลิกรัมต่อลิตร)	อุณหภูมิ (°C)	ความเป็นกรด - เบส
นวนคร	10	45	6-9
โรจนะ(ระยอง)	1	45	6-9
โรจนะ (อยุธยา)	1	40	5-9
สุรนารี	1	45	6-9
แหลมฉบัง	1	45	5-9
บางปู	1	45	6-9
กบินทร์บุรี	1	45	5-9
ระยอง	1	45	6-9
304	1	45	5-9
อีสเทิร์นซีบอร์ด	1	45	5-9
มาบตาพุด	1	40	6-9

หมายเหตุ จาก Denkothai, ออนไลน์, 2545.

ปริมาณความเข้มข้นของฟีนอล อุณหภูมิ และความเป็นกรด-เบสในน้ำทิ้งของเขตนิคมอุตสาหกรรมต่างๆ มีความแตกต่างกันไปดังมีรายละเอียดในตารางที่ 2.5 จะเห็นได้ว่าน้ำทิ้งของเขตอุตสาหกรรมต่างๆ มีปริมาณความเข้มข้นของฟีนอลอยู่ในช่วงระหว่าง 1 – 10 มิลลิกรัมต่อลิตร อุณหภูมิของน้ำทิ้งอยู่ในช่วงระหว่าง 40 – 45°C และความเป็นกรด – เบสของน้ำทิ้งอยู่ในช่วงระหว่าง 5 – 9 โดยมาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับที่ 2 (พ.ศ. 2539) ได้กำหนดให้มีปริมาณฟีนอลได้ไม่เกิน 1 มิลลิกรัมต่อลิตร นอกจากนี้ยังมีประกาศของคณะกรรมการและกระทรวงต่างๆ เกี่ยวกับมาตรฐานกำหนดปริมาณฟีนอลอีกดังแสดงในตารางที่ 2.6

ปัจจุบันการกำจัดฟีนอลออกจากน้ำเสีย สามารถทำได้หลายวิธีด้วยกัน เช่น กระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพ และการบำบัดทางด้านเคมีกายภาพ เป็นต้น โดยแต่ละวิธีมีประสิทธิภาพในการกำจัดฟีนอลแตกต่างกันไป การบำบัดทางด้านเคมีกายภาพจะมีความยุ่งยากน้อยกว่าและระบบมีความเสี่ยงต่อการล้มเหลวน้อยกว่าแบบชีวภาพ แต่การบำบัดทางด้านเคมีกายภาพมักจะมีค่าใช้จ่ายแพงกว่าแบบชีวภาพมาก ซึ่งการบำบัดแบบเคมีกายภาพที่นิยมใช้ทั่วไป คือ กระบวนการดูดซับ ตัวดูดซับที่นิยมใช้คือ ถ่านกัมมันต์ (เกรียงศักดิ์ อุคมสินโรจน์, 2542 ; Mckey (ed.), 1996)

ตารางที่ 2.6 ประกาศของคณะกรรมการและกระทรวงต่างๆ ที่เกี่ยวกับฟินอล

คณะกรรมการ/ กระทรวง	ประกาศ ฉบับที่/พ.ศ.	ชื่อเรื่อง	รายละเอียด
กระทรวง อุตสาหกรรม	พ.ศ. 2538	บัญชีรายชื่อวัตถุ อันตราย	จัดฟินอลให้เป็นวัตถุอันตรายชนิดที่ 2 ซึ่งหมายความว่า การผลิต การนำเข้า การส่งออก หรือการมีไว้ในครอบครอง ต้องแจ้งให้พนักงานเจ้าหน้าที่ทราบก่อน และต้องปฏิบัติตามหลักเกณฑ์และวิธีการที่กำหนด โดยมีกรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม เป็นหน่วยงานผู้รับผิดชอบ
กระทรวง มหาดไทย	พ.ศ. 2515	ความปลอดภัยในการ ทำงานใน สถานที่ประกอบการ	กำหนดให้มีฟินอลได้ 5 ส่วนในล้านส่วน โดยปริมาตร (ppm.) หรือ 19 มิลลิกรัม ต่ออากาศ 1 ลูกบาศก์เมตร (mg/m^3)
คณะกรรมการสิ่ง แวดล้อมแห่งชาติ	ฉบับที่ 8 พ.ศ. 2537	กำหนดมาตรฐานคุณ ภาพน้ำในแหล่งน้ำ ผิวดิน	กำหนดคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำประเภทที่ 2 ต้องมีฟินอล ไม่เกินกว่า 0.005 มิลลิกรัมต่อลิตร
กระทรวง สาธารณสุข	ฉบับที่ 92 พ.ศ. 2528	ความปลอดภัยในการ ทำงานใน สถานที่ประกอบการ	กำหนดให้ภาชนะบรรจุอาหารที่ทำด้วยพลาสติกชนิดอื่นที่ไม่ใช่ polyvinyl chloride, polyethylene, polypropylene, polystyrene, polyvinylidene chloride หรือ polyethylene terephthalate มีปริมาณฟินอลได้ไม่เกิน 30 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และต้องไม่พบฟินอล ในภาชนะบรรจุอาหารที่ทำด้วยพลาสติกชนิดเมลามีน (melamin)

หมายเหตุ จากเอกสารเผยแพร่ทางวิชาการของสารเคมีเฉพาะเรื่อง ฟินอล โดยกรมควบคุมมลพิษ กองจัดการสารอันตรายและกากของเสีย, 2542.

2.15 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เนื่องจากถ่านกัมมันต์มีโครงสร้างที่มีรูพรุน มีพื้นที่ผิวสูง และมีความสามารถในการดูดซับสารต่างๆ ได้ดีไม่ว่าจะอยู่ในรูปของแก๊สหรือของเหลวจึงถูกนำไปใช้งานในอุตสาหกรรมต่างๆ กันอย่างแพร่หลาย ด้วยเหตุนี้จึงได้มีผู้ศึกษา ค้นคว้า วิจัย และพัฒนาเทคนิคต่างๆ ในการผลิตถ่านกัมมันต์ต่อเนื่องกันมาตั้งแต่ศตวรรษที่ 15 จนถึงปัจจุบัน สำหรับวัตถุดิบที่สามารถนำมาผลิตถ่านกัมมันต์ควรมีปริมาณคาร์บอนสูง และมีปริมาณสารอนินทรีย์ซึ่งวิเคราะห์เป็นปริมาณเถ้าต่ำ (Bansal et al., 1988) การวิเคราะห์ปริมาณคาร์บอน ปริมาณเถ้า รวมถึงปริมาณความชื้นและปริมาณสารระเหย เรียกว่า การวิเคราะห์แบบประมาณ มาตรฐานการวิเคราะห์ที่นิยมใช้กันในปัจจุบันคือ ASTM นอกจากนี้ Warne (1991) Karatepe and Kucukbayrak (1993) Beamish (1994) และ Ceylan, Karaca and Onal (1999) ได้เสนอวิธีการวิเคราะห์แบบประมาณด้วยเครื่อง Thermogravimetric analysis (TGA) พบว่าสามารถใช้วิเคราะห์ได้ค่าใกล้เคียงกับการวิเคราะห์ตามมาตรฐาน ASTM อีกทั้งยังใช้ปริมาณสารในการวิเคราะห์ไม่มากนัก

ถ่านกัมมันต์สามารถผลิตจากวัตถุดิบชนิดต่างๆ มากมาย เช่น ถ่านหิน กะลามะพร้าว กะลาปาล์ม กะลาตาล โตนด ชานอ้อย ไม้ เปลือกถั่ว เมล็ดในผลไม้ และซังข้าวโพด เป็นต้น ซึ่งวัตถุดิบแต่ละชนิดยังแตกต่างกันตามแหล่งที่มาด้วย นอกจากนี้วิธีการผลิตถ่านกัมมันต์ยังมีอีกสองวิธี ได้แก่ วิธีการกระตุ้นทางกายภาพซึ่งสามารถใช้สารกระตุ้นหลายชนิด เช่น ไออน้ำ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ อากาศ แก๊สออกซิเจน และแก๊สไอเสีย โดยอาจใช้สารกระตุ้นเดี่ยวๆ หรือใช้เป็นของผสมระหว่างแก๊สเหล่านี้ได้อีกด้วย วิธีการกระตุ้นอีกวิธีหนึ่งคือการกระตุ้นทางเคมีซึ่งสามารถใช้สารกระตุ้นหลายชนิดเช่นกัน เช่น โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ซิงค์คลอไรด์ และกรดฟอสฟอริก เป็นต้น ถ่านกัมมันต์ที่ได้จึงมีสมบัติแตกต่างกันตามชนิดของวัตถุดิบ วิธีการกระตุ้น ชนิดของสารกระตุ้น และสภาวะที่ใช้ในการผลิต สำหรับงานวิจัยนี้ได้ศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์จากถ่านหินลิกไนต์ โดยวิธีการกระตุ้นทางกายภาพโดยใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และไออน้ำเป็นสารกระตุ้น และวิธีการกระตุ้นทางเคมีโดยใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นสารกระตุ้น

ถ่านหินมีหลายชนิดโดยแบ่งเป็นสัคย์ต่างๆ ได้แก่ แอนทราไซต์ บิทูมินัส ซับบิทูมินัส และลิกไนต์ เนื่องจากโครงสร้างทางเคมีของถ่านหินสัคย์ต่างๆ เหล่านี้มีความแตกต่างกันขึ้นตอนและรายละเอียดของการผลิตถ่านกัมมันต์จึงมีความแตกต่างกัน ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้จากถ่านหินแอนทราไซต์ซึ่งเป็นถ่านหินสัคย์สูงมีสมบัติดีพอใช้โดยมีความแข็งมากมีพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนสูง แต่ต้องใช้อุณหภูมิค่อนข้างสูงในการเตรียม (Sun, Hippo, Marsh, O'Brien and Crilling, 1997) ถ่านหินบิทูมินัสเป็นถ่านหินที่นิยมใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตถ่านกัมมันต์ที่มีคุณภาพดี มีประสิทธิภาพการดูดซับสูง มีความหนาแน่นสูง และมีความแข็งมากกว่า (Teng and Hsieh, 1999) แต่ถ่านหินบิทูมินัสมี

สมบัติที่เรียกว่า caking ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อถ่านหินบิทูมินัสได้รับความร้อนในช่วงการคาร์บอไนซ์ ถ่านหินบิทูมินัสจะเกิดลักษณะไหลมารวมกันและแสดงสถานะพลาสติก (plastic phase) ทำให้ถ่านชาร์ที่ได้มีรูพรุนน้อยกว่าที่ควรและเมื่อนำไปกระตุ้นก็จะได้ถ่านกัมมันต์ที่มีคุณภาพด้อยกว่าที่ควร Munoz-Guillena, Illan-Gomez, Martin-Martinez, Linares-Solano and Salinas-Matinez (1992) Parra, Pis, Sousa, Pajares and Bansal (1996) Sun et al. (1997) และ Teng, Ho and Hsu (1997) ได้สนใจศึกษาการลดปัญหา caking ของถ่านหินบิทูมินัสรวมทั้งถ่านหินที่มีศักย์ใกล้เคียงกัน เช่น เซมิแอนทราไซต์และซับบิทูมินัส โดยการใช้ออกซิเดชันก่อน (preoxidation) ที่จะนำมาผ่านขั้นตอนการคาร์บอไนซ์และการกระตุ้นในกระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์ มีผลทำให้ถ่านกัมมันต์ที่ได้มีพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนสูงกว่าถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากถ่านหินที่ไม่ได้ผ่านการทำออกซิเดชันก่อนการผลิต นอกจากนี้ Teng et al. (1999) ได้ศึกษาการผลิตถ่านกัมมันต์จากถ่านหินบิทูมินัสที่มีปริมาณออกซิเจนแตกต่างกัน พบว่าถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากถ่านหินที่มีปริมาณออกซิเจนมากจะมีพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนมากด้วย สำหรับถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากถ่านหินลิกไนต์ซึ่งเป็นถ่านหินศักย์ต่ำที่มีโครงสร้างเป็นแบบอะโรมาติกที่มีความหนาแน่นน้อย และมีปริมาณออกซิเจนมากทำให้โครงสร้างของถ่านหินศักย์ต่ำไม่แข็งแรงมาก สภาพะที่ใช้ในการเตรียม เช่น อุณหภูมิ จึงไม่สูงมากนัก แต่สมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ได้มักมีความแข็ง พื้นที่ผิว และปริมาตรรูพรุนน้อยกว่าถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากถ่านหินศักย์สูง (Sun et al., 1997)

เนื่องจากการผลิตถ่านกัมมันต์โดยวิธีการกระตุ้นทางกายภาพนั้นประกอบด้วยสองขั้นตอน ได้แก่ ขั้นตอนการคาร์บอไนซ์หรือการไพโรไลซิส และขั้นตอนการกระตุ้น ขั้นตอนการคาร์บอไนซ์เป็นขั้นตอนที่จะทำให้ได้ถ่านชาร์เพื่อนำไปทำการกระตุ้นต่อไป ถ่านชาร์ที่ได้นี้มีผลต่อสมบัติของถ่านกัมมันต์ ดังนั้นการศึกษารายละเอียดของขั้นตอนการคาร์บอไนซ์จึงมีประโยชน์ที่จะทำให้ทราบถึงสถานะที่ต้องใช้เพื่อให้ได้ถ่านชาร์ที่มีสมบัติดีซึ่งจะทำให้ถ่านกัมมันต์ที่ได้มีสมบัติดีด้วย ในปี 1992 Minoz-Guillena et al. ได้ทำการศึกษารายละเอียดในขั้นตอนการไพโรไลซิสของถ่านหินศักย์ต่างๆโดยใช้เครื่องมือ Thermogravimetric analysis (TGA) ซึ่งจากผลการศึกษาพบว่า ถ่านหินที่มีศักย์สูงมีการพัฒนาเกิดรูพรุนน้อย แต่ถ่านหินที่มีศักย์ต่ำจะมีการพัฒนาเกิดรูพรุนมากในขั้นตอนนี้ สำหรับขั้นตอนการกระตุ้น สารกระตุ้นที่นิยมใช้ได้แก่ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และไอน้ำ ซึ่งมีผลทำให้ถ่านกัมมันต์ที่ได้มีลักษณะและสมบัติที่แตกต่างกัน Teng and Hung-Chi (1998) ได้สนใจศึกษาการผลิตถ่านกัมมันต์จากถ่านหินบิทูมินัส โดยใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เป็นสารกระตุ้น พบว่า การกระตุ้นที่อุณหภูมิต่ำ (700 – 750°C) ลักษณะรูพรุนที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่เป็นรูพรุนขนาดเล็ก พื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นแต่จะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 750°C นอกจากนี้ Pis, Mahamud, Pajares, Parra and Bansal (1998) ได้สนใจศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับผลของ

อัตราการไหลของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งพบว่า การใช้อัตราการไหลของแก๊สดำทำให้ถ่านกัมมันต์ที่ได้มีพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนมากกว่าถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการใช้อัตราการไหลของแก๊สสูงในการกระตุ้น เนื่องจากที่อุณหภูมิสูงและอัตราการไหลของแก๊สสูงอัตราการเกิดแก๊สซิฟิเคชันเร็วทำให้แก๊สสามารถแพร่เข้าไปในรูพรุนน้อยการสร้างรูพรุนภายในจึงน้อยและมีการหายไปของเนื้อคาร์บอนภายนอกมาก ถ่านกัมมันต์ที่ได้จึงมีพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนน้อยเมื่อทำการเปรียบเทียบถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์กับไอน้ำเป็นสารกระตุ้นพบว่า ถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เป็นสารกระตุ้นจะมีปริมาตรรูพรุนขนาดเล็กมากกว่า และมีการกระจายขนาดรูพรุนแคบกว่าการใช้ไอน้ำเป็นสารกระตุ้น (Walker, 1996)

ดังที่ได้กล่าวมาข้างต้นเกี่ยวกับวัตถุดิบที่นำมาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ว่าควรมีปริมาณสารอินทรีย์ต่ำ ดังนั้นได้มีผู้สนใจศึกษาวิธีการลดปริมาณสารอินทรีย์หรือสารแระในถ่านหิน รวมถึงผลของชนิดและปริมาณของสารอินทรีย์ที่มีอยู่ในถ่านหินต่อปฏิกิริยาไพโรไลซิสและสมบัติพื้นที่ผิวและรูพรุนของถ่านกัมมันต์ที่ได้ Aktas, Karacan and Olcay (1998) ได้ศึกษาวิธีการลดปริมาณสารอินทรีย์ในถ่านหินบิทูมินัสและถ่านหินลิกไนต์โดยวิธีการแยกอนุภาคในตัวกลางของเหลว ตัวกลางที่ใช้เป็นสารละลายสารอินทรีย์ซึ่งเป็นของผสมระหว่างคาร์บอนเตตระคลอไรด์กับไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ (CCl_4 +isopropyl alcohol) และสารละลายซิงค์คลอไรด์ซึ่งเป็นสารละลายอินทรีย์ พบว่าการเปียก (wetting) และการกระจายอนุภาคถ่านหินในตัวกลางสารละลายสารอินทรีย์ดีกว่าในตัวกลางสารละลายอินทรีย์ เมื่อความหนาแน่นของสารละลายทั้งสองชนิดเพิ่มขึ้นทำให้ปริมาณอนุภาคถ่านหินบิทูมินัสและถ่านหินลิกไนต์ที่แยกได้เพิ่มขึ้น และสามารถลดปริมาณสารอินทรีย์ได้มากขึ้น Bolat et al. (1998) Linares-Solano et al. (2000) Oztas and Yurum (2000) และ Steel, Basida, O'Donnell and Wood (2001) ได้สนใจศึกษาการลดปริมาณสารอินทรีย์ในถ่านหินโดยวิธีการล้างด้วยกรดไฮโดรคลอริกพบว่า การเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรคลอริกมีผลต่อปริมาณสารอินทรีย์ที่ลดลงไม่มากนัก กรดไฮโดรคลอริกสามารถลดปริมาณแคลเซียม แมกนีเซียม เหล็กที่อยู่ในรูปของคาร์บอเนต ซัลเฟต ฟอสเฟต และโซเดียมได้ดี ส่วนอะลูมิเนียม โปแทสเซียม และไททานเนียมถูกลดได้บางส่วนแต่ไม่สามารถลดปริมาณของซิลิกอนได้ นอกจากนี้ Linares-Solano et al. (2000) ได้ศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากถ่านหินที่ผ่านการลดปริมาณสารอินทรีย์พบว่า ปริมาณสารอินทรีย์ไม่มีผลต่อการสร้างรูพรุนของถ่านกัมมันต์ทำให้ถ่านกัมมันต์ที่ได้มีสมบัติพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนต่างไปจากถ่านกัมมันต์ที่ได้จากถ่านหินที่ไม่ผ่านการลดปริมาณสารอินทรีย์ อย่างไรก็ตามการมีสารอินทรีย์ปนอยู่ในถ่านกัมมันต์ที่ได้จะมีผลทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับต่อน้ำหนักลดลงไป ในทางตรงกันข้าม Oztas et al. (2000) ได้สรุปว่า แคลเซียม เหล็ก และ แมกนีเซียม ในรูปของแคทไอออนมีผลดีโดยทำหน้าที่

เป็นตัวเร่ง (catalyst) ในปฏิกิริยาไพโรไลซิส แต่สารอนินทรีย์กลุ่มซัลไฟด์มีผลทำให้ปฏิกิริยาไพโรไลซิส เกิดช้าลง

สำหรับการผลิตถ่านกัมมันต์ด้วยวิธีการกระตุ้นทางเคมีโดยใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ เป็นสารกระตุ้นนั้น Ahmadpour and Do (1996) Li-Yeh and Teng (2000) ได้สนใจศึกษาผลของ ตัวแปรต่างๆที่มีต่อการผลิตถ่านกัมมันต์โดยใช้ถ่านหินบิทูมินัสเป็นวัตถุดิบ พบว่า เมื่ออุณหภูมิ เวลา และอัตราส่วนระหว่างสารกระตุ้นต่อวัตถุดิบเพิ่มขึ้นจะมีผลทำให้พื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุน เพิ่มขึ้นด้วย Otowa, Tanibata and Itoh (1993) และ Hu and Srinivasan (1999) ได้ผลเช่น เดียวกัน แม้ว่าวัตถุดิบที่ใช้ต่างกัน คือ กากปิโตรเลียม และกะลามะพร้าว ตามลำดับ ถ่านกัมมันต์ ที่ได้จากการใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นสารกระตุ้นมีพื้นที่ผิวมากเนื่องจากในขั้นตอนการแช่ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์จะเข้าไปทำลายโครงสร้างและลดปริมาณสารอนินทรีย์ในถ่านหินด้วย (Lolja, 1999) ต่อมาในขั้นตอนการคาร์บอนไนซ์ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์จะเกิดการสลายตัวให้ ไอออนโพแทสเซียมออกไซด์ (K_2O) ออกมาซึ่งไอออนโพแทสเซียมในถ่านหินเกิด ปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันขึ้นทำให้มีการหายไปของเนื้อคาร์บอนเกิดเป็นรูพรุนขึ้น ส่วนโพแทสเซียม ออกไซด์จะถูกรีดิวซ์ด้วยไฮโดรเจน หรือคาร์บอนอะตอมกลายเป็นโลหะโพแทสเซียม (K) ซึ่งที่ อุณหภูมิสูงโพแทสเซียมเป็นโลหะที่อ่อนตัว จึงสามารถแทรกเข้าไปในชั้นอะตอมของคาร์บอน (graphene layer) ได้ทำให้เกิดรูพรุนได้มากขึ้น (Li-Yeh et al., 2000 ; Otowa et al.,1993)

Hu et al. (1999) Teng and Hsieh (1999) และ Qadeer and Rehan (2002) ได้สนใจ ศึกษาการใช้ถ่านกัมมันต์เป็นตัวดูดซับฟีนอลในสารละลาย โดยวิธีการดูดซับแบบกะ (batch adsorption process) ถ่านกัมมันต์ที่ใช้มีค่าพื้นที่ผิวอยู่ระหว่าง 200 – 2400 ตารางเมตรต่อกรัม พบว่าถ่านกัมมันต์ สามารถดูดซับฟีนอลในน้ำได้เร็วในช่วง 4 ชั่วโมงแรก และเข้าสู่สมดุลที่เวลา 24 ชั่วโมง การเพิ่ม ปริมาณถ่านกัมมันต์ทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับเพิ่มขึ้นแต่ลดลงเมื่อความเข้มข้นของสารละลาย ฟีนอลเพิ่มขึ้น อุณหภูมิของสารละลายฟีนอลมีผลทำให้การดูดซับลดลงไม่มากนัก นอกจากนี้ Teng et al. (1999) และ Qadeer et al. (2002) ได้วิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้แบบจำลองการ ดูดซับของ Langmuir และ Freundlich พบว่าสามารถอธิบายการดูดซับได้ดีทั้งสองสมการ

บทที่ 3

วิธีดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาการเตรียมและวัดสมบัติถ่านกัมมันต์จากถ่านหินลิกไนต์โดยวิธีการกระตุ้นทางกายภาพและทางเคมี อีกทั้งทดสอบและเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับฟีนอลในน้ำของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากงานวิจัยและถ่านกัมมันต์ทางการค้า สถานที่ที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัยคือ อาคารศูนย์เครื่องมือ 1 อาคารศูนย์เครื่องมือ 2 อาคารศูนย์เครื่องมือ 5 อาคารศูนย์เครื่องมือ 6 อาคารศูนย์เครื่องมือ 6/1 ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ซึ่งสามารถแบ่งการดำเนินงานวิจัยเป็นขั้นตอนต่างๆ ดังรายละเอียดต่อไปนี้

3.1 การเตรียมถ่านกัมมันต์โดยวิธีการกระตุ้นทางกายภาพ

1. อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัย

- เครื่องบดหยาบ (jaw crusher) ยี่ห้อ Retsch รุ่น BB1
- เครื่องบดละเอียดแบบลูกบอล (ball mill) ยี่ห้อ Pascal engineering รุ่น 23790
- เครื่องเขย่าตะแกรง (sieve shaker) ยี่ห้อ Retsch รุ่น AS200digit
- ตะแกรงขนาด 0.3 มิลลิเมตร (50 mesh) 0.425 มิลลิเมตร (40 mesh) 0.6 มิลลิเมตร (30 mesh) และ 0.85 มิลลิเมตร (20 mesh) ยี่ห้อ Retsch รุ่น ASTM11
- เตาเผาแบบท่อ (tube furnace) ยี่ห้อ Carbolite รุ่น CTF 12/75/700/2416
- เตาเผาแบบท่อ ยี่ห้อ Carbolite รุ่น CTF 12/75/700/201
- เครื่องเขย่าแนวราบแบบควบคุมอุณหภูมิ (shaking water bath) ยี่ห้อ Labnet รุ่น SBD50
- ตู้อบ ยี่ห้อ Memmert รุ่น 600
- เครื่องชั่งน้ำหนักความละเอียดทศนิยม 4 ตำแหน่ง ยี่ห้อ Sartorius รุ่น BP221S
- เครื่องวัดความเป็นกรด-เบส (pH meter) ยี่ห้อ SCHOTT รุ่น CG840
- ชุดกรองสุญญากาศ
- โถดูดความชื้น (dessicator)

2. สารเคมีที่ใช้ในการวิจัย

- แก๊สไนโตรเจนบรรจุถึงความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.999 ของบริษัท Linde
- แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์บรรจุถึงความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.8 ของบริษัท Linde
- กรดไฮโดรคลอริก สำหรับการวิเคราะห์ ของบริษัท Carlo erba
- แคลเซียมคลอไรด์ สำหรับการวิเคราะห์ ของบริษัท APS Finechem

3. วัตถุดิบที่ใช้ในการวิจัย

ถ่านหินลิกไนต์จากเหมืองแม่เมาะและเหมืองลานนา ได้รับการอนุเคราะห์จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง

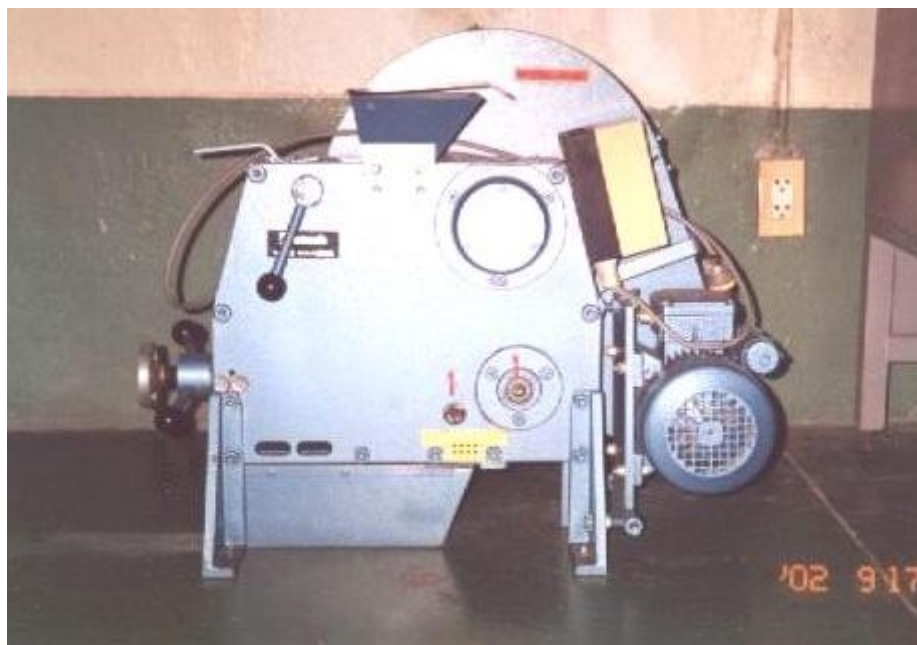
4. การเตรียมถ่านหินลิกไนต์

- 1) นำถ่านหินลิกไนต์จากเหมืองแม่เมาะมาบดหยาบด้วยเครื่องบดหยาบ (รูปที่ 3.1) จากนั้นนำถ่านหินที่บดหยาบแล้วไปบดละเอียดด้วยเครื่องบดละเอียด (รูปที่ 3.2)
- 2) นำถ่านหินที่บดละเอียดแล้วมาคัดขนาดให้ได้ขนาด 0.60 – 0.85 มิลลิเมตร (20×30 mesh) และ 0.30 – 0.425 มิลลิเมตร (40×50 mesh) ด้วยเครื่องเขย่าตะแกรง (รูปที่ 3.3)
- 3) อบถ่านหินที่คัดขนาดแล้วที่อุณหภูมิ 110°C จนกระทั่งน้ำหนักคงที่ แล้วทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้น

สำหรับถ่านหินจากเหมืองลานนาได้เตรียมโดยวิธีเดียวกัน แต่คัดขนาดให้ได้ขนาด 20×30 mesh เท่านั้น

5. การเตรียมถ่านชาร์จากถ่านหิน

- 1) ชั่งถ่านหินแม่เมาะขนาด 0.60 – 0.85 มิลลิเมตร ที่อบแห้งแล้วจำนวน 15 กรัม และบันทึกน้ำหนักที่แน่นอน ใส่ในภาชนะเซรามิกสำหรับเผา แล้วนำไปวางในเตาเผาแบบท่อ (รูปที่ 3.4) โดยให้ภาชนะเซรามิกที่บรรจุถ่านหินอยู่กลางเตาเผา
- 2) ป้อนแก๊สไนโตรเจนในอัตราการไหล 100 มิลลิลิตรต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที เพื่อไล่อากาศภายในท่อ ทดสอบการรั่วซึมของแก๊สบริเวณฝาปิดท่อทั้ง 2 ด้าน
- 3) เปิดเตาเผาตั้งอุณหภูมิ และเวลาที่ต้องการ โดยใช้อัตราการเพิ่มความร้อน 20°C ต่อนาที เริ่มจับเวลาเมื่อถึงอุณหภูมิที่ตั้งไว้
- 4) เมื่อครบกำหนดเวลาที่ต้องการ ปิดเตาเผา และยังคงผ่านแก๊สไนโตรเจนตลอดเวลา จนกระทั่งอุณหภูมิภายในเตาเผาตกลงต่ำกว่า 200°C จึงนำภาชนะเซรามิกที่บรรจุถ่านหินออกจากเตาเผา ทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้น



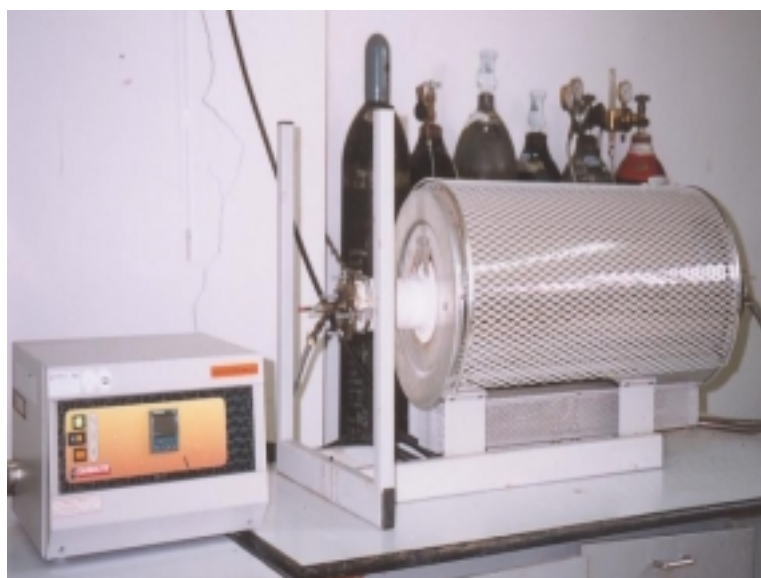
รูปที่ 3.1 เครื่องบดหยาบ (jaw crusher) ยี่ห้อ Retsch รุ่น BB1



รูปที่ 3.2 เครื่องบดละเอียดแบบลูกบอล (ball mill) ยี่ห้อ Pascal engineering รุ่น 23790



รูปที่ 3.3 เครื่องเขย่าตะแกรง (sieve shaker) ยี่ห้อ Retsch รุ่น AS200digit และตะแกรงขนาด 0.3 มิลลิเมตร (50 mesh) 0.425 มิลลิเมตร (40 mesh) 0.60 มิลลิเมตร (30 mesh) และ 0.85 มิลลิเมตร (20 mesh) ยี่ห้อ Retsch รุ่น ASTM11



รูปที่ 3.4 เตาเผาแบบท่อ (tube furnace) ยี่ห้อ Carbolite รุ่น CTF 12/75/700/2416

5) นำถ่านซาร์ที่เตรียมได้มาชั่งน้ำหนักเพื่อนำไปหาร้อยละน้ำหนักที่หายไป และผลวิเคราะห์แบบประมาณ

6) ตัวแปรที่ศึกษา ได้แก่ อุณหภูมิ ($500 - 700^{\circ}\text{C}$) และเวลา (15 – 80 นาที)

6. การกระตุ้นถ่านซาร์ให้เป็นถ่านกัมมันต์

1) นำถ่านซาร์มาชั่งน้ำหนัก จำนวน 6 กรัม และบันทึกน้ำหนักที่แน่นอน วางลงบนตะแกรงสำหรับเผา แล้วเกลี่ยบางๆ ให้กระจายทั่วตะแกรง และนำไปวางในเตาเผาแบบท่อ (รูปที่ 3.5) โดยให้ตะแกรงอยู่บริเวณกลางเตา ปิดฝาเตาทั้ง 2 ด้าน

2) ป้อนแก๊สไนโตรเจนที่อัตราการไหล 100 มิลลิลิตรต่อนาที เป็นเวลาประมาณ 30 นาที เพื่อไล่อากาศในท่อ ทดสอบการรั่วซึมของแก๊สบริเวณฝาปิดเตาทั้ง 2 ด้าน

3) เปิดเตาเผาตั้งอุณหภูมิ เวลา และอัตราการเพิ่มความร้อนที่ต้องการ (ดูตารางที่ 3.1)

4) เมื่อถึงอุณหภูมิที่ต้องการ จากนั้นป้อนสารกระตุ้น (แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ หรือ ไอน้ำ) โดยปรับอัตราการไหลของสารกระตุ้น และแก๊สไนโตรเจนตามที่ต้องการ โดยควบคุมให้อัตราการไหลของแก๊สผสมคงที่ที่ 100 มิลลิลิตรต่อนาที แล้วเริ่มจับเวลา

5) เมื่อครบกำหนดเวลาที่ต้องการ ปิดเตาเผา และหยุดการป้อนสารกระตุ้น แล้วปรับอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนเป็น 100 มิลลิลิตรต่อนาที รอจนกระทั่งอุณหภูมิภายในเตาลดลงต่ำกว่า 200°C จึงนำตะแกรงพร้อมถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการกระตุ้นแล้วออกจากเตา ทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้น

6) นำถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการกระตุ้นแล้วมาชั่งน้ำหนักเพื่อหาร้อยละน้ำหนักที่หายไป และทำการวิเคราะห์สมบัติต่างๆ ต่อไป



รูปที่ 3.5 เตาเผาแบบท่อ (tube furnace) ยี่ห้อ Carbolite รุ่น CTF 12/75/700/201



รูปที่ 3.6 เครื่องเขย่าแนวราบแบบควบคุมอุณหภูมิ (shaking water bath) ยี่ห้อ Labnet รุ่น SBD50

ตารางที่ 3.1 สภาวะที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัยในขั้นตอนการกระตุ้น

ตัวแปรที่ศึกษา	ขอบเขตการศึกษา	ตัวแปรควบคุม
อุณหภูมิ	800 และ 900°C	ถ่านหินแม่เมาะ ขนาด 0.60 – 0.85 มิลลิเมตร เวลา 30 60 และ 90 นาที อัตราการเพิ่มความร้อน 20°C ต่อนาที สารกระตุ้น 25%CO ₂ +75%N ₂
เวลา	30 60 และ 90 นาที	ถ่านหินแม่เมาะ ขนาด 0.60 – 0.85 มิลลิเมตร อุณหภูมิ 800 และ 900°C อัตราการเพิ่มความร้อน 20°C ต่อนาที สารกระตุ้น 25%CO ₂ +75%N ₂
อัตราการเพิ่มความร้อน	5 และ 20°C ต่อนาที	ถ่านหินแม่เมาะ ขนาด 0.60 – 0.85 มิลลิเมตร อุณหภูมิ 900°C เวลา 60 นาที สารกระตุ้น 25%CO ₂ +75%N ₂
ชนิดของสารกระตุ้น	CO ₂ และ ไอน้ำ	ถ่านหินแม่เมาะ ขนาด 0.60 – 0.85 มิลลิเมตร อุณหภูมิ 900°C เวลา 60 นาที อัตราการเพิ่มความร้อน 20°C ต่อนาที 100%สารกระตุ้น
ความเข้มข้นของสารกระตุ้น	25%CO ₂ +75%N ₂ , 100%CO ₂ , 50%ไอน้ำ+50%N ₂ และ 100%ไอน้ำ	ถ่านหินแม่เมาะ ขนาด 0.60 – 0.85 มิลลิเมตร อุณหภูมิ 900°C เวลา 60 นาที อัตราการเพิ่มความร้อน 20°C ต่อนาที
ขนาดอนุภาค	0.60 – 0.85 มิลลิเมตร และ 0.30 – 0.425 มิลลิเมตร	ถ่านหินแม่เมาะ อุณหภูมิ 900°C เวลา 60 นาที อัตราการเพิ่มความร้อน 5°C ต่อนาที สารกระตุ้น 25%CO ₂ +75%N ₂
ชนิดของถ่านหิน	ถ่านหินแม่เมาะ และ ถ่านหินลานนา	ถ่านหินแม่เมาะ ขนาด 0.60 – 0.85 มิลลิเมตร อุณหภูมิ 900°C เวลา 60 นาที อัตราการเพิ่มความร้อน 5°C ต่อนาที สารกระตุ้น 25%CO ₂ +75%N ₂

7. การศึกษาผลของปริมาณเถ้าในถ่านหิน

เนื่องจากถ่านหินลิกไนต์จากเหมืองแม่เมาะส่วนใหญ่มีปริมาณเถ้าสูง ซึ่งอาจมีผลต่อปฏิกิริยาไพโรไลซิสและต่อสมบัติพื้นที่ผิวและรูพรุนของถ่านกัมมันต์ได้ จึงทำการศึกษาผลของปริมาณเถ้าในถ่านหินที่มีต่อการเตรียมถ่านกัมมันต์ โดยศึกษาการลดปริมาณเถ้าในถ่านหินสองวิธีด้วยกัน คือ การล้างด้วยกรดไฮโดรคลอริก และการแยกอนุภาคในตัวกลางของเหลวโดยใช้สารละลายแคลเซียมคลอไรด์เป็นตัวกลาง ดังรายละเอียดต่อไปนี้

- การลดปริมาณเถ้าในถ่านหินโดยการล้างด้วยกรดไฮโดรคลอริก

1) ชั่งน้ำหนักถ่านหินแม่เมาะขนาด 0.60–0.85 มิลลิเมตร จำนวน 5 กรัม บันทึกน้ำหนักที่แน่นอน ใส่ในขวดรูปชมพู่แบบมีฝาปิด

2) เติมสารละลายกรดไฮโดรคลอริกปริมาตร 80 มิลลิลิตร ตัวแปรที่ศึกษา คือ ความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรคลอริก (ร้อยละ 10 20 และ 30 โดยปริมาตร)

3) นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าแนวราบแบบควบคุมอุณหภูมิ (รูปที่ 3.6) ที่ความเร็วรอบ 100 รอบต่อนาที อุณหภูมิ 30°C เป็นเวลา 20 นาที

4) แยกถ่านหินออกด้วยชุดกรองสุญญากาศ พร้อมทั้งล้างด้วยน้ำกลั่นจนกระทั่งน้ำล้างมีค่าความเป็นกรด-เบสเท่ากับน้ำกลั่น (pH ประมาณ 6-7)

5) อบถ่านหินที่ผ่านการลดเถ้าแล้วที่อุณหภูมิ 110°C จนกระทั่งน้ำหนักคงที่แล้วทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้น

6) นำถ่านหินที่ผ่านการลดเถ้าแล้วไปทำการเตรียมเป็นถ่านชาร์ และนำไปกระตุ้นเป็นถ่านกัมมันต์ต่อไป โดยทำเช่นเดียวกันกับข้อ 5) และ 6) โดยใช้สภาวะการคาร์บอน 700°C 40 นาที อัตราการเพิ่มความร้อน 20°C ต่อนาที และสภาวะการกระตุ้น 800°C 60 นาที อัตราการเพิ่มความร้อน 20°C ต่อนาที สารกระตุ้น 25%CO₂+75%N₂

- การลดปริมาณเถ้าในถ่านหินโดยการแยกอนุภาคในตัวกลางของเหลว

1) ชั่งน้ำหนักถ่านหินแม่เมาะขนาด 0.60–0.85 มิลลิเมตร จำนวน 60 กรัม บันทึกน้ำหนักที่แน่นอน ใส่บีกเกอร์ขนาด 600 มิลลิลิตร

2) เติมสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ ปริมาตร 300 มิลลิลิตร แล้วกวนด้วยแท่งแก้วให้เม็ดถ่านจมอยู่ในสารละลาย ทิ้งไว้จนกระทั่งถ่านหินแยกชั้นอย่างชัดเจน และไม่มี การเคลื่อนที่ของเม็ดถ่านหิน ตัวแปรที่ศึกษา คือ ความถ่วงจำเพาะของสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ (ความหนาแน่น 1.2 1.3 และ 1.4 กรัมต่อมิลลิลิตร)

3) แยกถ่านหินส่วนที่ลอยออกด้วยชุดกรองสุญญากาศ พร้อมทั้งล้างด้วยน้ำกลั่น จนกระทั่งน้ำล้างมีค่าความเป็นกรด-เบสเท่ากับน้ำกลั่น (pH ประมาณ 6–7)

4) อบถ่านหินที่ผ่านการลดแล้วที่อุณหภูมิ 110°C จนกระทั่งน้ำหนักคงที่แล้วทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้น

5) นำถ่านหินที่ผ่านการลดแล้วไปทำการเตรียมเป็นถ่านชาร์ และนำไปกระตุ้นเป็นถ่านกัมมันต์ต่อไป โดยทำเช่นเดียวกันกับข้อ 5 และ 6 โดยใช้สภาวะการคาร์บอนไนซ์ 700°C 40 นาที อัตราการเพิ่มความร้อน 20°C ต่อ นาที และสภาวะการกระตุ้น 800°C 60 นาที อัตราการเพิ่มความร้อน 20°C ต่อ นาที สารกระตุ้น $25\%\text{CO}_2+75\%\text{N}_2$

3.2 การเตรียมถ่านกัมมันต์โดยวิธีการกระตุ้นทางเคมี

1. อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัย

- เตาเผาแบบท่อ ยี่ห้อ Vectar รุ่น VC TF4
- ตู้อบ ยี่ห้อ Memmert รุ่น 600
- เครื่องชั่งน้ำหนักความละเอียดตศนิยม 4 ตำแหน่ง ยี่ห้อ Sartorius รุ่น BP221S
- เครื่องวัดความเป็นกรด-เบส ยี่ห้อ SCHOTT รุ่น CG840
- โถดูดความชื้น
- ชุดกรองสุญญากาศ

2. สารเคมีที่ใช้ในการวิจัย

- แก๊สไนโตรเจนบรรจุถึงความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.95 ของบริษัท Linde
- โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ สำหรับการวิเคราะห์ ของบริษัท APS Finechem
- กรดไฮโดรคลอริก สำหรับการวิเคราะห์ ของบริษัท Carlo erba

3. การแช่ถ่านหินด้วยสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์

1) ชั่งถ่านหินแม่เมาะขนาด 0.60 – 0.85 มิลลิเมตร บันทึกน้ำหนักที่แน่นอน ใส่ในบีกเกอร์ขนาด 50 มิลลิลิตร

2) เติมสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้นร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก แล้วกวนด้วยแท่งแก้วให้เม็ดถ่านจมอยู่ในสารละลายเป็นเวลา 2 นาที ตัวแปรที่ศึกษา คือ อัตราส่วนระหว่างสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อถ่านหิน (0.5ต่อ1.0 และ1.0ต่อ1.0)

3) อบถ่านหินที่ผ่านการแช่ด้วยสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิ 110°C จนกระทั่งน้ำหนักคงที่ ทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้น

4. การคาร์บอไนซ์ถ่านหินที่ผ่านการแช่ด้วยสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์

1) ชั่งถ่านหินที่ผ่านการแช่ด้วยสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ และอบแห้งแล้ว จำนวน 10 กรัม บันทึกน้ำหนักที่แน่นอน ใส่ในภาชนะเซรามิกสำหรับเผา แล้วนำไปวางในเตาเผาแบบท่อ (รูปที่ 3.7) โดยให้ภาชนะเซรามิกอยู่กลางเตาเผา

2) ป้อนแก๊สไนโตรเจนในอัตราการไหล 100 มิลลิลิตรต่อนาที เป็นเวลา 30 นาทีเพื่อไล่อากาศภายในท่อ ทดสอบการรั่วซึมของแก๊สบริเวณฝาปิดท่อทั้ง 2 ด้าน

3) เปิดเตาเผาตั้งอุณหภูมิ และเวลาที่ต้องการ โดยใช้อัตราการเพิ่มความร้อน 20°C ต่อนาที เริ่มจับเวลาเมื่อถึงอุณหภูมิที่ตั้งไว้

4) เมื่อครบกำหนดเวลาที่ต้องการ ปิดเตาเผา และยังคงผ่านแก๊สไนโตรเจนตลอดเวลา จนกระทั่งอุณหภูมิภายในเตาเผาตกลงต่ำกว่า 200°C จึงนำภาชนะเซรามิกที่บรรจุถ่านกัมมันต์ออกจากเตาเผา ทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้น

5) ตัวแปรที่ศึกษา ได้แก่ อุณหภูมิ ($600-900^{\circ}\text{C}$) และเวลา (60 และ 120 นาที)

5. การล้างถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการคาร์บอไนซ์

1) ชั่งถ่านกัมมันต์ที่ผ่านขั้นตอนการคาร์บอไนซ์แล้ว บันทึกน้ำหนักที่แน่นอน ใส่ในบีกเกอร์ขนาด 600 มิลลิลิตร

2) เติมสารละลายกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยปริมาตร ที่ผ่านการต้มให้ร้อน จำนวน 100 มิลลิลิตร กวนด้วยแท่งแก้วให้เม็ดถ่านกัมมันต์จมอยู่ในสารละลายเป็นเวลา 15 นาที

3) แยกถ่านกัมมันต์ออกจากสารละลายกรดไฮโดรคลอริกด้วยชุดกรองสุญญากาศ และทำซ้ำในข้อที่ 2) จนกระทั่งสารละลายกรดไฮโดรคลอริกที่ผ่านการล้างถ่านกัมมันต์แล้วไม่มีสี

4) นำถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการล้างด้วยกรดแล้ว มาล้างต่อด้วยน้ำกลั่นที่ผ่านการต้มให้ร้อน โดยเติมครั้งละ 200 มิลลิลิตร จำนวน 5 ครั้ง และล้างต่อด้วยน้ำกลั่นที่ไม่ได้ผ่านการต้ม โดยเติมครั้งละ 200 มิลลิลิตร จนกระทั่งน้ำที่ผ่านการล้างถ่านกัมมันต์แล้วมีค่าความเป็นกรด - เบส เท่ากับน้ำกลั่น (pH ประมาณ 6 - 7)

5) อบถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการล้างแล้วที่อุณหภูมิ 110°C จนกระทั่งน้ำหนักคงที่แล้วทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้น แล้วมาชั่งน้ำหนักเพื่อหาร้อยละน้ำหนักที่หายไป และทำการวิเคราะห์สมบัติต่างๆ ต่อไป



รูปที่ 3.7 เตาเผาแบบท่อ (tube furnace) ยี่ห้อ Vectar รุ่น VC TF4



รูปที่ 3.8 เครื่อง Thermogravimetric analyzer (TGA) ยี่ห้อ Perkin Elmer รุ่น TGA7

3.3 การวัดสมบัติของถ่านหิน ถ่านชาร์ และถ่านกัมมันต์

การคำนวณและวัดสมบัติต่างๆ ของวัตถุดิบซึ่งได้แก่ถ่านหิน และผลิตภัณฑ์ซึ่งได้แก่ถ่านชาร์ และถ่านกัมมันต์ มีดังนี้

1. การคำนวณหาร้อยละน้ำหนักรวมที่หายไปของถ่านกัมมันต์มีค่าเท่ากับ

$$\left(\frac{\text{น้ำหนักถ่านหินดิบ} - \text{น้ำหนักถ่านกัมมันต์}}{\text{น้ำหนักถ่านหินดิบ}} \right) \times 100$$

2. การวิเคราะห์แบบประมาณ เพื่อหาร้อยละปริมาณความชื้น ร้อยละปริมาณสารระเหย ร้อยละปริมาณเถ้า และร้อยละปริมาณคาร์บอนคงตัว สำหรับถ่านหินใช้วิธีการวิเคราะห์ตามมาตรฐาน ASTM D3173 D3174 D3175 และสำหรับถ่านถ่านกัมมันต์ใช้วิธีการวิเคราะห์ตามมาตรฐาน ASTM D2866 D2867 D5832

3. การวิเคราะห์แบบประมาณ เพื่อหาร้อยละปริมาณความชื้น ร้อยละปริมาณสารระเหย ร้อยละปริมาณเถ้า และร้อยละปริมาณคาร์บอนคงตัว วิเคราะห์โดยใช้เครื่อง Thermogravimetric analyzer (TGA) ยี่ห้อ Perkin Elmer รุ่น TGA7 (รูปที่ 3.8)

4. การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ เพื่อหาปริมาณสารอินทรีย์ในถ่านหินซึ่งได้แก่ คาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน ซัลเฟอร์ และออกซิเจน ด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุ ยี่ห้อ LECO รุ่น CHNS-932 (รูปที่ 3.9)

5. การวิเคราะห์หาองค์ประกอบในเถ้าของถ่านหิน ด้วยเครื่องเรืองแสงรังสีเอ็กซ์ (Energy Dispersive X-ray Fluorescence Spectrometer, EDXRF) ยี่ห้อ Oxford รุ่น ED2000 (รูปที่ 3.10)

6. การหาค่าการดูดซับไอโอดีน ใช้วิธีการวิเคราะห์ตามมาตรฐาน ASTM D4607

7. การหาพื้นที่ผิวจำเพาะและลักษณะรูพรุน วิเคราะห์โดยใช้เครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิวแบบอัตโนมัติ ยี่ห้อ Micromeritics รุ่น ASAP2010 (รูปที่ 3.11) โดยใช้แก๊สไนโตรเจนเป็นตัวถูกดูดซับที่อุณหภูมิ -196°C ซึ่งค่าพื้นที่ผิวจำเพาะสามารถคำนวณได้จากสมการการดูดซับแบบ BET ค่าปริมาตรรูพรุนขนาดเล็ก คำนวณจากสมการการดูดซับแบบ Dubinin Radushkevich (DR) ค่าปริมาตรรูพรุนขนาดกลาง และค่าปริมาตรรูพรุนขนาดใหญ่ คำนวณจากการหาค่าของปริมาตรรูพรุนขนาดเล็กออกจากปริมาตรรูพรุนทั้งหมด ค่าปริมาตรรูพรุนทั้งหมดได้จากปริมาตรที่ถูกดูดซับที่ความดันสัมพัทธ์ 0.98 และขนาดรูพรุนเฉลี่ยคำนวณจากสมการ $4V/A$ โดยที่ V คือ ปริมาตรรูพรุนทั้งหมด A คือ พื้นที่ผิวจำเพาะจากสมการการดูดซับแบบ BET

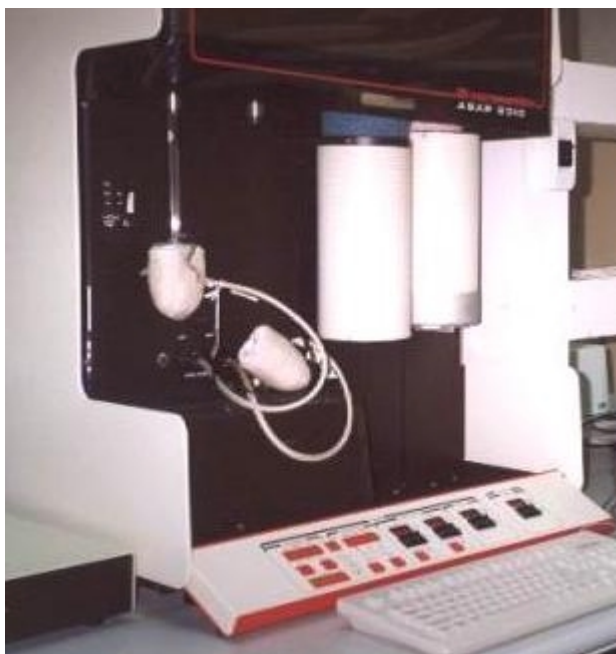
8. การวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของถ่านหิน ถ่านชาร์ และถ่านกัมมันต์ ใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM6400 (รูปที่ 3.12)



รูปที่ 3.9 เครื่องวิเคราะห์ธาตุ ยี่ห้อ LECO รุ่น CHNS-932



รูปที่ 3.10 เครื่องเรืองแสงรังสีเอกซ์ (Energy Dispersive X-ray Fluorescence Spectrometer, EDXRF) ยี่ห้อ Oxford รุ่น ED2000



รูปที่ 3.11 เครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิวแบบอัตโนมัติ ยี่ห้อ Micromeritics รุ่น ASAP2010



รูปที่ 3.12 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM6400

3.4 การทดสอบและเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับฟีนอลในสารละลายของถ่านกัมมันต์ และถ่านกัมมันต์ทางค้ำ

1. อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัย

- เครื่อง UV/visible spectrophotometer ยี่ห้อ Varian รุ่น Cary 1E
- เครื่องเขย่าแนวราบแบบควบคุมอุณหภูมิ ยี่ห้อ Labnet รุ่น SBD50
- ตู้อบ ยี่ห้อ Memmert รุ่น 600
- เครื่องชั่งน้ำหนักความละเอียดทศนิยม 4 ตำแหน่ง ยี่ห้อ Sartorius รุ่น BP221S
- เครื่องวัดความเป็นกรด-เบส ยี่ห้อ SCHOTT รุ่น CG840
- ชุดกรองสุญญากาศ

2. สารเคมีที่ใช้ในการวิจัย

- ฟีนอล สำหรับการวิเคราะห์ ของบริษัท Carlo erba
- โซเดียมไฮดรอกไซด์ สำหรับการวิเคราะห์ ของบริษัท Carlo erba
- กรดไฮโดรคลอริก สำหรับการวิเคราะห์ ของบริษัท Carlo erba
- ถ่านกัมมันต์ทางการค้า ของบริษัท ซี ไจแกนติค คาร์บอน จำกัด สมบัติต่างๆ

แสดงในตารางที่ 3.2

- ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมโดยวิธีการกระตุ้นทางกายภาพ
- ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมโดยวิธีการกระตุ้นทางเคมี

ตารางที่ 3.2 สมบัติต่างๆ ของถ่านกัมมันต์ทางการค้า

เลขที่ชนิด (Type No.)	CGC 140 C
เลขที่การผลิต (Lot No.)	430120 – C
วัตถุดิบ	กะลามะพร้าว
สารกระตุ้น	ไอน้ำ
ความชื้น (moisture : ASTM D2867)	7.4%
ปริมาณเถ้า (ash content : ASTM D2863)	6.2%
ความหนาแน่น (bulk density : ASTM D2854)	0.46 g/cc
ค่าความเป็นกรด-เบส (pH value : ASTM D3838)	10.6
ค่าการดูดซับไอโอดีน (iodine adsorption : ASTM D4607)	1034 mg/g
การกระจายขนาด (particle size distribution : ASTM D2862)	+140 = 0.96% -140 = 99.04%

หมายเหตุ จากเอกสารกำกับสินค้าเลขที่ 0295

3. การหากราฟมาตรฐานของสารละลายฟีนอล

- 1) เตรียมสารละลายฟีนอลความเข้มข้น 1 กรัมต่อลิตรด้วยน้ำกลั่น
- 2) เตรียมสารละลายฟีนอลความเข้มข้น 0–200 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร โดยการเจือจางจากสารละลายฟีนอลความเข้มข้น 1 กรัมต่อลิตร
- 3) นำสารละลายฟีนอลแต่ละความเข้มข้นมาทำการวัดค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) ด้วยเครื่อง UV/visible spectrophotometer (รูปที่ 3.13) ที่ความยาวคลื่น 268.89 นาโนเมตร โดยเทียบกับสารละลายอ้างอิง (ฟีนอล 0 มิลลิกรัมต่อลิตร)
- 4) พล็อตค่าการดูดกลืนแสงกับความเข้มข้นของฟีนอล จะได้กราฟมาตรฐานของสารละลายฟีนอล



รูปที่ 3.13 เครื่อง UV/visible spectrophotometer ยี่ห้อ Varian รุ่น Cary 1E

4. การหาปริมาณถ่านกัมมันต์ที่เหมาะสม

1) เตรียมสารละลายฟีนอลความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร เติมถ่านกัมมันต์ที่เตรียมโดยวิธีการกระตุ้นทางเคมีจำนวน 0.1 - 0.5 กรัม ในแต่ละขวดตามลำดับ

2) นำของผสมระหว่างสารละลายฟีนอลกับถ่านกัมมันต์ไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าแนวราบแบบควบคุมอุณหภูมิ ที่อุณหภูมิ 30°C ด้วยความเร็วรอบ 100 รอบต่อนาที เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

3) แยกถ่านกัมมันต์ออกจากสารละลายฟีนอลด้วยชุดกรองสุญญากาศ แล้วนำสารละลายที่ได้ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงโดยเทียบกับสารละลายอ้างอิง (ฟีนอล 0 มิลลิกรัมต่อลิตร) ที่เติมถ่านกัมมันต์ในปริมาณเท่ากัน

5. การหาเวลาเข้าสู่สมดุลของการดูดซับฟีนอล

1) เตรียมสารละลายฟีนอลที่ความเข้มข้น 100 500 และ 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร แต่ละขวดเติมถ่านกัมมันต์ที่เตรียมโดยวิธีการกระตุ้นทางเคมี จำนวน 0.3 กรัม

2) นำของผสมระหว่างสารละลายฟีนอลกับถ่านกัมมันต์ไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าแนวราบแบบควบคุมอุณหภูมิ ที่อุณหภูมิ 30°C ด้วยความเร็วรอบ 100 รอบต่อนาที เป็นเวลา 0-24 ชั่วโมง

3) แยกถ่านกัมมันต์ออกจากสารละลายฟีนอลด้วยชุดกรองสุญญากาศ แล้วนำสารละลายที่ได้ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงโดยเทียบกับสารละลายอ้างอิง (สารละลายฟีนอล 0 มิลลิกรัมต่อลิตร) ที่ใช้เวลาในการเขย่าเท่ากัน

6. การศึกษาผลของความเป็นกรด – เบสของสารละลายฟีนอล

1) เตรียมสารละลายฟีนอลที่ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยแปรผันความเป็นกรด – เบส (pH) ของสารละลายฟีนอล 3 ค่า ได้แก่ pH 2 pH 7 และ pH 10 ปริมาตร 100 มิลลิตร แต่ละขวดเติมถ่านกัมมันต์ที่เตรียมโดยวิธีการกระตุ้นทางเคมี จำนวน 0.3 กรัม

2) นำของผสมระหว่างสารละลายฟีนอลกับถ่านกัมมันต์ไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าแนวราบแบบควบคุมอุณหภูมิ ที่อุณหภูมิ 30°C ด้วยความเร็วรอบ 100 รอบต่อนาที เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

3) แยกถ่านกัมมันต์ออกจากสารละลายฟีนอลด้วยชุดกรองสุญญากาศ แล้วนำสารละลายที่ได้ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงโดยเทียบกับสารละลายอ้างอิง (ฟีนอล 0 มิลลิกรัมต่อลิตร) ที่มีค่า pH เท่ากัน

7. การศึกษาผลของอุณหภูมิของสารละลายฟีนอล

1) เตรียมสารละลายฟีนอลที่ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิตร แต่ละขวดเติมถ่านกัมมันต์ที่เตรียมโดยวิธีการกระตุ้นทางเคมี จำนวน 0.3 กรัม

2) นำของผสมระหว่างสารละลายฟีนอลกับถ่านกัมมันต์ไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าแนวราบแบบควบคุมอุณหภูมิ ที่อุณหภูมิ 30°C 40°C และ 50°C ตามลำดับ ด้วยความเร็วรอบ 100 รอบต่อนาที เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

3) แยกถ่านกัมมันต์ออกจากสารละลายฟีนอลด้วยชุดกรองสุญญากาศ แล้วนำสารละลายที่ได้ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงโดยเทียบกับสารละลายอ้างอิง (ฟีนอล 0 มิลลิกรัมต่อลิตร) ที่เขย่าที่อุณหภูมิเดียวกัน

สำหรับถ่านกัมมันต์ทางการค้าและถ่านกัมมันต์ที่เตรียมโดยวิธีการกระตุ้นทางกายภาพทำเช่นเดียวกัน แต่เขย่าที่อุณหภูมิ 30°C เท่านั้น

บทที่ 4

ผลและการอภิปรายผล

4.1 ผลการวิเคราะห์วัตถุดิบ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการเตรียมและวิเคราะห์สมบัติของถ่านกัมมันต์จากถ่านหินลิกไนต์ซึ่งได้รับความอนุเคราะห์ตัวอย่างถ่านหินจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย จังหวัดลำปาง ผลการวิเคราะห์แบบประมาณ แสดงในตารางที่ 4.1 พบว่าถ่านหินแม่เมาะมีร้อยละปริมาณคาร์บอนคงตัวสูงกว่าแต่มีร้อยละปริมาณถ่านน้อยกว่าถ่านหินลานนา ส่วนตารางที่ 4.2 แสดงผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ พบว่าถ่านหินแม่เมาะมีร้อยละปริมาณธาตุต่างๆใกล้เคียงกันกับของถ่านหินลานนา

4.2 การเตรียมถ่านกัมมันต์โดยวิธีการกระตุ้นทางกายภาพ

4.2.1 ขั้นตอนการคาร์บอนไนซ์

ขั้นตอนการผลิตถ่านกัมมันต์โดยวิธีการกระตุ้นทางกายภาพ ประกอบด้วย การเตรียมถ่านชาร์จากถ่านหิน หรือที่เรียกว่าการคาร์บอนไนซ์ โดยนำถ่านหินมาให้ความร้อนในบรรยากาศของแก๊สไนโตรเจน จากนั้นจึงนำถ่านชาร์ไปทำการกระตุ้นด้วยไอน้ำหรือแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่อไป ถ่านชาร์ที่ได้นี้มีผลต่อสมบัติของถ่านกัมมันต์ ดังนั้นการศึกษารายละเอียดของขั้นตอนการคาร์บอนไนซ์ จึงมีประโยชน์ที่จะทำให้ทราบถึงสถานะที่ต้องใช้ เพื่อให้ได้ถ่านชาร์ที่มีสมบัติที่ดีซึ่งเมื่อนำไปกระตุ้นจะให้ถ่านกัมมันต์ที่มีคุณภาพ งานวิจัยในส่วนนี้ใช้ถ่านหินแม่เมาะที่มีขนาด 0.60 – 0.85 มิลลิเมตร (20×30 mesh) ทำการคาร์บอนไนซ์โดยผ่านแก๊สไนโตรเจนที่อัตราการไหล 100 มิลลิลิตรต่อนาที อัตราการให้ความร้อน 20°C ต่อ นาที โดยศึกษาผลของตัวแปร อุณหภูมิและเวลาของการคาร์บอนไนซ์

ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์แบบประมาณของถ่านหินที่ศึกษา

ร้อยละโดยน้ำหนัก	ถ่านหินแม่เมาะ	ถ่านหินลานนา
ความชื้น	5	6
สารระเหย	37	34
เถ้า	23	30
คาร์บอนคงตัว (โดยผลต่าง)	35	30

ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุของถ่านหินที่ศึกษา

ร้อยละโดยน้ำหนัก	ถ่านหินแม่เมาะ	ถ่านหินลานนา
คาร์บอน	51	52
ไฮโดรเจน	4	4
ไนโตรเจน	2	2
ซัลเฟอร์	2	2
ออกซิเจน (โดยผลต่าง)	41	40

1. ผลของอุณหภูมิและเวลาต่อร้อยละน้ำหนักที่หายไป

ผลการศึกษาศึกษาการเตรียมถ่านชาร์จากถ่านหินแม่เมาะ ในช่วงอุณหภูมิ 500 – 800°C และเวลา 15 – 80 นาที ดังแสดงในตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.1 พบว่าเมื่ออุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการคาร์บอนไนซ์เพิ่มขึ้นร้อยละน้ำหนักที่หายไปมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยเพิ่มขึ้นมากในช่วง 15 – 20 นาทีแรก สำหรับทุกๆ อุณหภูมิ หลังจากนั้นร้อยละน้ำหนักที่หายไปจะมีค่าค่อนข้างคงที่ โดยร้อยละน้ำหนักที่หายไปมีค่าเฉลี่ยที่เวลาต่างๆ เท่ากับร้อยละ 37 ร้อยละ 41 ร้อยละ 46 และร้อยละ 47 สำหรับการทำการคาร์บอนไนซ์ที่อุณหภูมิ 500°C 600°C 700°C และ 800°C ตามลำดับ

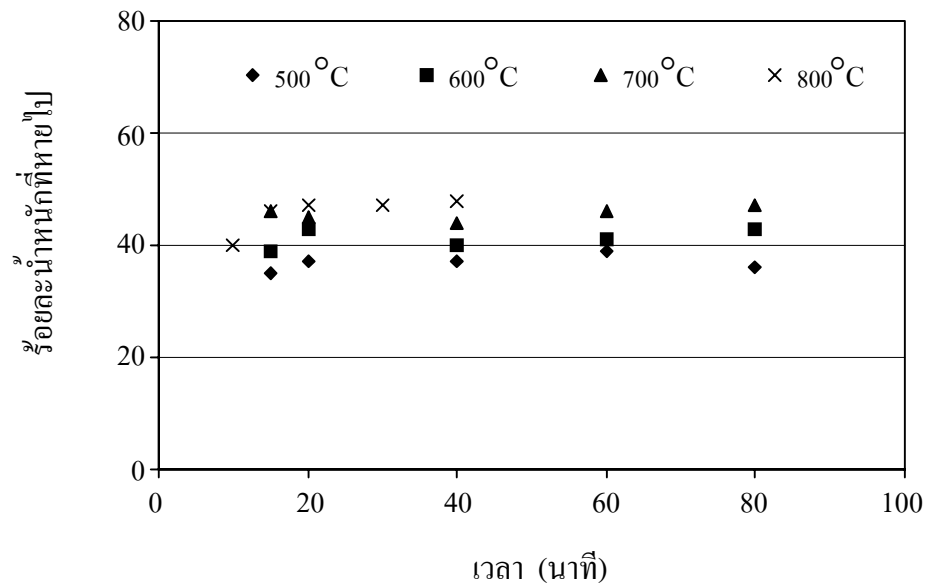
2. ผลของอุณหภูมิและเวลาต่อองค์ประกอบของถ่านชาร์

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบของถ่านชาร์โดยวิธีวิเคราะห์แบบประมาณ ดังแสดงในตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.2 จะเห็นว่าถ่านชาร์ที่เตรียมได้ภายใต้สภาวะต่างๆ เมื่อเปรียบเทียบกับถ่านหินจะมีร้อยละปริมาณคาร์บอนคงตัวเพิ่มขึ้นและมีร้อยละปริมาณสารระเหยลดลง และเมื่อพิจารณาผลของอุณหภูมิการคาร์บอนไนซ์ที่เพิ่มขึ้นจาก 500 – 700°C ที่แต่ละเวลาการคาร์บอนไนซ์พบว่าถ่านชาร์ที่ได้มีร้อยละปริมาณคาร์บอนคงตัวเพิ่มขึ้นและมีร้อยละปริมาณสารระเหยลดลง เนื่องจากถ่านหินเกิดการสลายตัวมากในช่วงอุณหภูมิประมาณ 300 – 500°C (ดูรูปที่ 4.3) ดังนั้นการคาร์บอนไนซ์ที่อุณหภูมิสูงขึ้นกว่า 500°C อัตราการไล่สารระเหยยังเพิ่มขึ้นได้เมื่อเพิ่มอุณหภูมิของการคาร์บอนไนซ์แต่อัตราการเพิ่มจะช้าลง ถ่านชาร์ที่เตรียมที่อุณหภูมิ 700°C มีร้อยละปริมาณคาร์บอนคงตัวสูงสุดโดยเฉลี่ยประมาณร้อยละ 56 โดยน้ำหนัก และมีร้อยละปริมาณสารระเหยโดยเฉลี่ยประมาณร้อยละ 13 โดยน้ำหนัก

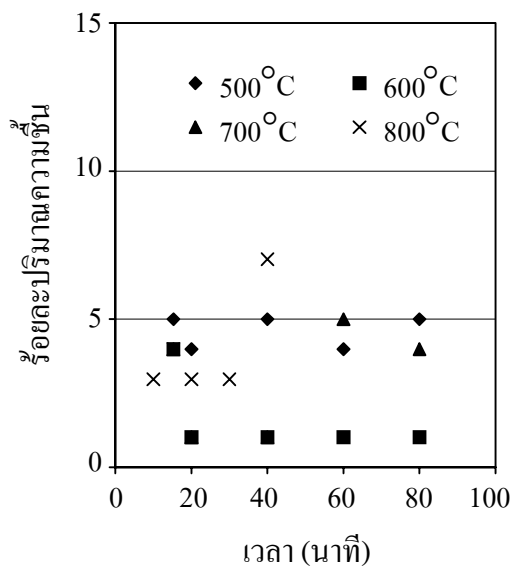
อย่างไรก็ดีเมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการคาร์บอนไนซ์เพิ่มสูงถึง 800°C พบว่าถ่านชาร์ที่ได้กลับมีร้อยละปริมาณสารระเหยเพิ่มขึ้นซึ่งทำให้ร้อยละปริมาณคาร์บอนคงตัวมีค่าลดลง เนื่องจากร้อยละน้ำหนักที่หายไปที่อุณหภูมิ 800°C ไม่แตกต่างจากค่าที่ 700°C จึงเป็นไปได้ว่าการเพิ่มของร้อยละปริมาณสารระเหยในถ่านชาร์อาจเกิดจากการแตกของโครงสร้างถ่านหินที่มีอยู่เดิมทำให้ได้องค์ประกอบที่มีขนาดของโมเลกุลเล็กลงซึ่งกลไกนี้จะแตกต่างจากการไล่สารระเหย (devolatilization) ออกจากถ่านหินโดยตรง เมื่อพิจารณาผลของเวลาที่ใช้ในการคาร์บอนไนซ์ที่มีต่อองค์ประกอบของถ่านชาร์ เมื่อเวลาการคาร์บอนไนซ์เพิ่มขึ้นจาก 15 – 80 นาที ที่แต่ละอุณหภูมิการคาร์บอนไนซ์ พบว่าปริมาณความชื้น ปริมาณเถ้า ปริมาณสารระเหย และปริมาณคาร์บอนคงตัวมีค่าค่อนข้างคงที่ ดังนั้นอุณหภูมิจึงเป็นตัวแปรสำคัญเมื่อเทียบกับเวลาการคาร์บอนไนซ์ เนื่องจากอุณหภูมิมิผลทำให้องค์ประกอบต่างๆ ของถ่านชาร์ที่ได้มีความแตกต่างกันมาก

ตารางที่ 4.3 ผลการคาร์บอนไนซ์และการวิเคราะห์แบบประมาณของถ่านหิน และถ่านชาร์

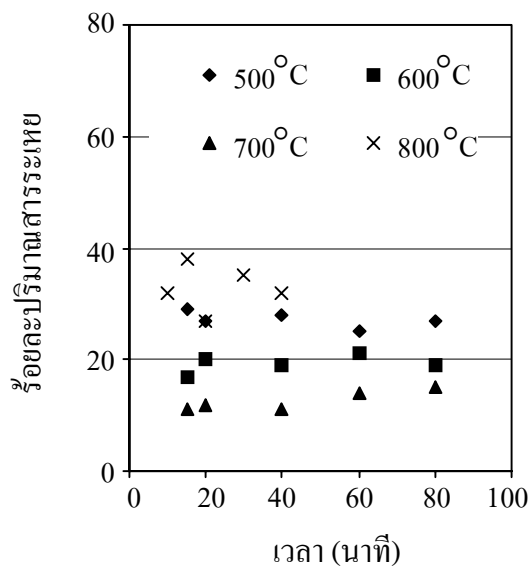
สภาวะที่ใช้ในการคาร์บอนไนซ์		ร้อยละ	ร้อยละ	ร้อยละ	ร้อยละ	ร้อยละ
อุณหภูมิ (°C)	เวลา (นาท)	น้ำหนัก ที่หายไป	ปริมาณ ความชื้น	ปริมาณ สารระเหย	ปริมาณ เถ้า	ปริมาณ คาร์บอนคงตัว
500	15	35	5	29	25	41
500	20	37	4	27	24	45
500	40	37	5	28	24	43
500	60	39	4	25	24	47
500	80	36	5	27	24	44
600	15	39	4	17	26	53
600	20	43	1	20	26	53
600	40	40	1	19	27	53
600	60	41	1	21	27	51
600	80	43	1	19	28	52
700	15	46	4	11	27	58
700	20	45	1	12	29	58
700	40	44	1	11	30	58
700	60	46	5	14	28	53
700	80	47	4	15	28	53
800	10	40	3	32	29	36
800	15	46	4	38	29	29
800	20	47	3	27	29	41
800	30	47	3	35	29	33
800	40	48	7	32	26	35
ถ่านหินแม่เมาะ		-	5	37	23	35



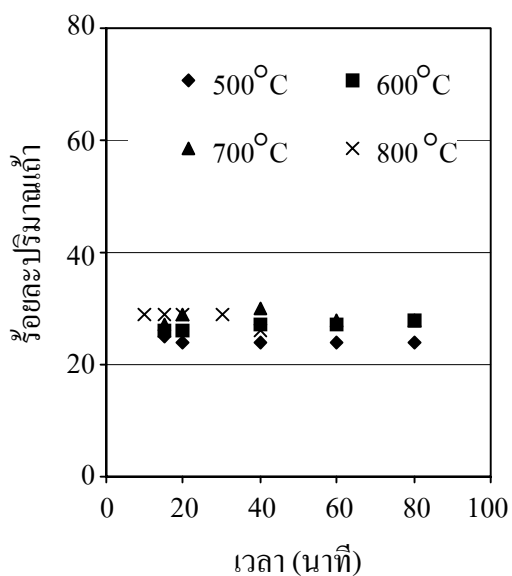
รูปที่ 4.1 ผลของอุณหภูมิและเวลาต่อร้อยละน้ำหนักที่หายไปของถ่านชาร์ (ช่วงอุณหภูมิการคาร์บอไนซ์ 500 – 800°C ช่วงเวลาการคาร์บอไนซ์ 10 – 80 นาที อัตราการเพิ่มความร้อน 20°C ต่อ นาที อัตราการป้อนแก๊สไนโตรเจน 100 มิลลิลิตรต่อ นาที)



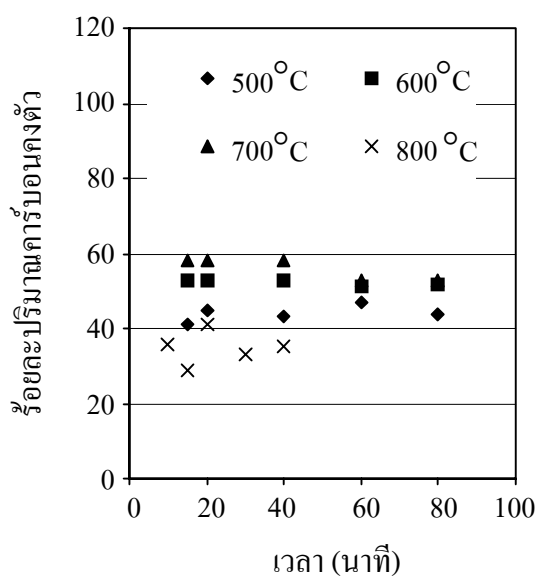
(ก)



(ข)



(ค)



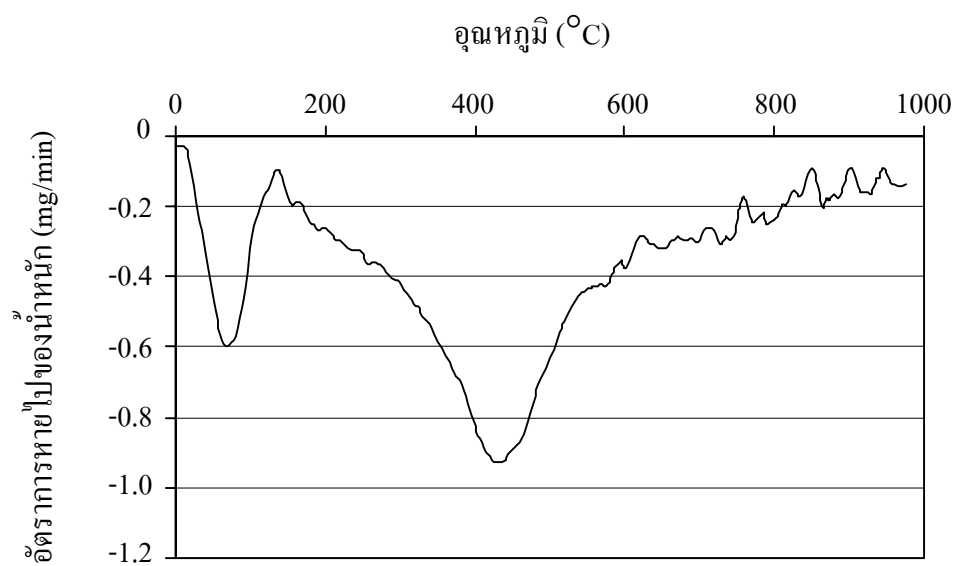
(ง)

รูปที่ 4.2 (ก) ผลของอุณหภูมิและเวลาต่อร้อยละปริมาณความชื้นของถ่านชาร์

(ข) ผลของอุณหภูมิและเวลาต่อร้อยละปริมาณสารระเหยของถ่านชาร์

(ค) ผลของอุณหภูมิและเวลาต่อร้อยละปริมาณเถ้าของถ่านชาร์

(ง) ผลของอุณหภูมิและเวลาต่อร้อยละปริมาณคาร์บอนคงตัวของถ่านชาร์



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการหายไปของน้ำหนักของถ่านหินลิกไนต์กับอุณหภูมิการคาร์บอไนซ์ (ช่วงอุณหภูมิการคาร์บอไนซ์ 25 – 950°C อัตราการเพิ่มความร้อน 20°C ต่อ นาที ภายใต้บรรยากาศแก๊สไนโตรเจน วิเคราะห์ด้วยเครื่อง Thermogravimetric analyzer (TGA))

4.2.2 ขั้นตอนการกระตุ้น

ขั้นตอนการกระตุ้นเป็นการทำให้ถ่านชาร์มีรูพรุนและพื้นที่ผิวเพิ่มมากขึ้น ส่งผลทำให้มีความสามารถในการดูดซับสูงขึ้น โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้เรียกว่าถ่านกัมมันต์ จากข้อมูลในขั้นตอนการคาร์บอนไนซ์สามารถนำมาใช้ประโยชน์ในการพิจารณาเลือกถ่านชาร์ โดยงานวิจัยในส่วนนี้ได้เลือกถ่านชาร์ที่มีปริมาณคาร์บอนคงตัวสูงนั่นคือใช้ถ่านชาร์ที่เตรียมที่อุณหภูมิ 700°C เวลา 40 นาที อัตราการเพิ่มความร้อน 20°C ต่อ นาที เพื่อใช้สำหรับการศึกษาผลของตัวแปรที่สำคัญเช่นอุณหภูมิ เวลา ชนิดของสารกระตุ้น และความเข้มข้นของสารกระตุ้น ส่วนถ่านชาร์ที่ได้เตรียมไว้ในการศึกษาที่อุณหภูมิ 800°C เวลา 60 นาที อัตราการเพิ่มความร้อน 5°C ต่อ นาที นั้นได้ใช้สำหรับการศึกษาผลของอัตราการเพิ่มความร้อน ขนาดอนุภาค และชนิดของถ่านหิน

1. ผลการวิเคราะห์แบบประมาณ

ตารางที่ 4.4 แสดงตัวอย่างผลการวิเคราะห์แบบประมาณของถ่านหิน ถ่านชาร์และถ่านกัมมันต์ภายใต้สภาวะต่างๆ เห็นได้ว่าเมื่อเทียบกับถ่านหินดิบและถ่านชาร์ ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากถ่านหินแม่เมาะและถ่านหินลานนามีร้อยละปริมาณคาร์บอนคงตัวเพิ่มขึ้น โดยมีร้อยละปริมาณสารระเหยลดลงและถ่านกัมมันต์เตรียมจากถ่านหินลานนามีร้อยละปริมาณคาร์บอนคงตัวสูงกว่าถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากถ่านหินแม่เมาะ โดยมีร้อยละปริมาณคาร์บอนคงตัวสูงสุดเท่ากับร้อยละ 68 โดยน้ำหนัก ส่วนร้อยละปริมาณสารระเหยของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ภายใต้สภาวะต่างๆ มีค่าตั้งแต่ร้อยละ 8 ถึงร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก เมื่อเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จากถ่านหินของงานวิจัยนี้กับถ่านกัมมันต์ทางการค้าซึ่งเตรียมจากกะลามะพร้าว พบว่าถ่านกัมมันต์จากงานวิจัยนี้มีร้อยละปริมาณคาร์บอนคงตัวต่ำกว่าและมีร้อยละปริมาณเถ้าสูงกว่ามาก ขณะที่ร้อยละปริมาณสารระเหยและร้อยละปริมาณความชื้นมีค่าใกล้เคียงกัน ปริมาณคาร์บอนคงตัวและปริมาณเถ้าที่ต่างกันเป็นผลมาจากความแตกต่างในธรรมชาติของโครงสร้างทางเคมีและทางกายภาพของถ่านหินและกะลามะพร้าวที่ใช้เตรียมถ่านกัมมันต์

ตารางที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์แบบประมาณของถ่านหิน ถ่านชาร์ และถ่านกัมมันต์

ชนิดของตัวอย่าง	ร้อยละ ปริมาณ ความชื้น	ร้อยละ ปริมาณ สารระเหย	ร้อยละ ปริมาณ เถ้า	ร้อยละ ปริมาณ คาร์บอน คงตัว
ถ่านหินแม่เมาะ	5	37	23	35
ถ่านหินลานนา	6	34	30	30
ถ่านชาร์จากถ่านหินแม่เมาะ ขนาด 20×30 mesh เตรียมที่สภาวะ 700°C 40 นาที 20°C/นาที	1	11	30	58
ถ่านชาร์จากถ่านหินแม่เมาะ ขนาด 20×30 mesh เตรียมที่สภาวะ 800°C 60 นาที 5°C/นาที	2	11	30	57
ถ่านชาร์จากถ่านหินลานนา ขนาด 20×30 mesh เตรียมที่สภาวะ 800°C 60 นาที 5°C/นาที	2	18	16	64
ถ่านกัมมันต์ จากถ่านชาร์แม่เมาะ ขนาด 20×30 mesh กระตุ้นที่สภาวะ 800°C 30 นาที 20°C/นาที 25%CO ₂	3	8	29	60
ถ่านกัมมันต์ จากถ่านชาร์แม่เมาะ ขนาด 20×30 mesh กระตุ้นที่สภาวะ 900°C 30 นาที 20°C/นาที 25%CO ₂	2	7	32	59
ถ่านกัมมันต์ จากถ่านชาร์แม่เมาะ ขนาด 20×30 mesh กระตุ้นที่สภาวะ 800°C 60 นาที 20°C/นาที 25%CO ₂	3	11	23	63
ถ่านกัมมันต์ จากถ่านชาร์แม่เมาะ ขนาด 40×50 mesh กระตุ้นที่สภาวะ 900°C 60 นาที 5°C/นาที 25%CO ₂	2	10	32	56
ถ่านกัมมันต์ จากถ่านชาร์ลานนา ขนาด 20×30 mesh กระตุ้นที่สภาวะ 900°C 60 นาที 5°C/นาที 25%CO ₂	2	9	21	68
ถ่านกัมมันต์ทางการค้า	4	6	2	88

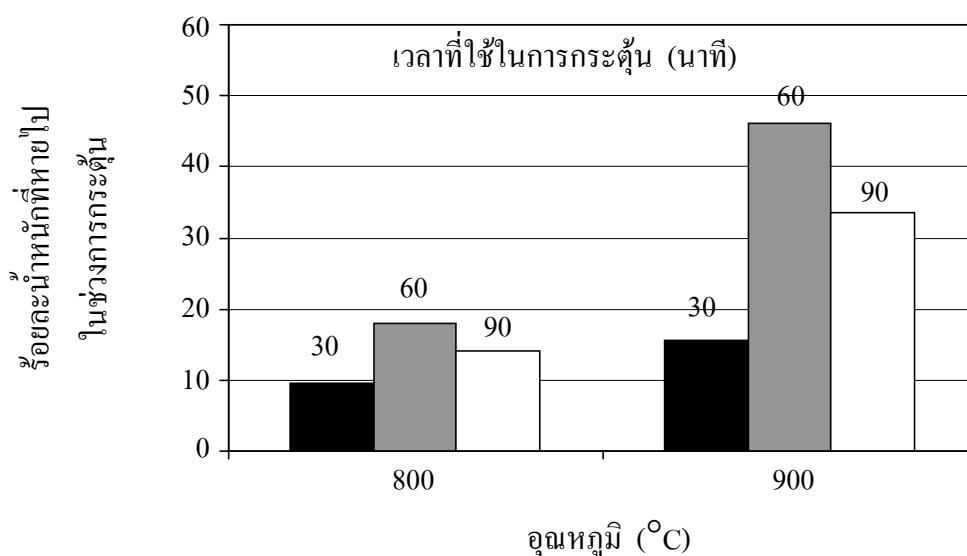
2. ผลของอุณหภูมิและเวลาต่อร้อยละน้ำหนักที่หายไปในช่วงการกระตุ้น

การทดลองเพื่อศึกษาตัวแปรอุณหภูมิและเวลาของการกระตุ้น ได้ใช้ถ่านชาร์ที่เตรียมจากถ่านหินแม่เมาะที่มีขนาดอนุภาค 0.60 – 0.85 มิลลิเมตร (20×30 mesh) ที่อุณหภูมิ 700°C เวลา 40 นาที อัตราการเพิ่มความร้อน 20°C ต่อ นาที และทำการกระตุ้นที่อุณหภูมิ 800°C และ 900°C เวลา 30 60 และ 90 นาที อัตราการเพิ่มความร้อน 20°C ต่อ นาที อัตราการป้อนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 25 มิลลิลิตรต่อ นาที และอัตราการป้อนแก๊สไนโตรเจน 75 มิลลิลิตรต่อ นาที

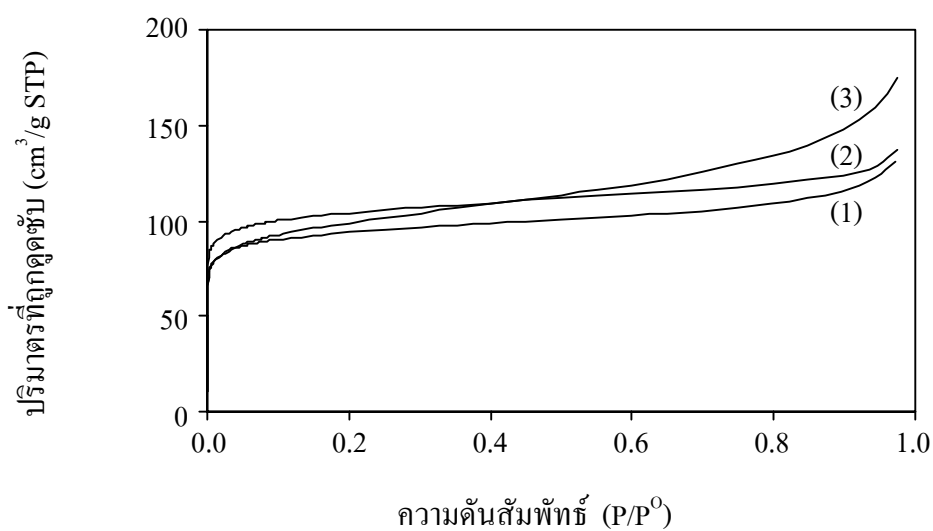
ค่าร้อยละน้ำหนักที่หายไปในช่วงการกระตุ้นซึ่งเป็นร้อยละของอัตราส่วนระหว่างผลต่างของน้ำหนักถ่านชาร์กับถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ต่อน้ำหนักถ่านชาร์แสดงไว้ในรูปที่ 4.4 พบว่าที่สภาวะเวลาของการกระตุ้นคงที่ การกระตุ้นที่อุณหภูมิสูงให้ร้อยละน้ำหนักที่หายไปในช่วงการกระตุ้นมากกว่าการกระตุ้นที่อุณหภูมิต่ำ เมื่อเพิ่มเวลาในการกระตุ้นจาก 30 นาที เป็น 60 นาที ที่อุณหภูมิการกระตุ้นคงที่ ร้อยละน้ำหนักที่หายไปในช่วงการกระตุ้นเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องมาจากที่อุณหภูมิการกระตุ้นสูงและการใช้เวลาการกระตุ้นนาน จะทำให้เกิดปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันได้มาก ร้อยละน้ำหนักที่หายไปในช่วงการกระตุ้นจึงมีมาก แต่เมื่อเวลาของการกระตุ้นเพิ่มขึ้นจาก 30 นาที เป็น 90 นาที ร้อยละน้ำหนักที่หายไปในช่วงการกระตุ้นมีค่าเพิ่มขึ้นไม่มากเท่ากับสภาวะที่ใช้เวลา 60 นาที ซึ่งให้เห็นว่าเวลาที่นานขึ้นอาจทำให้มีปฏิกิริยาอื่นๆ เช่น ปฏิกิริยาการรวมตัวให้หนาแน่น (condensation reaction) เกิดขึ้นร่วมด้วยกับปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันซึ่งส่งผลให้เกิดการเชื่อมโยง (cross-link) ทำให้มีการสูญเสียเนื้อถ่านไปได้น้อยกว่าที่ใช้สภาวะเวลาการกระตุ้นสั้นกว่า

3. เส้นไอโซเทอมการดูดซับของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้

รูปที่ 4.5 แสดงตัวอย่างลักษณะเส้นไอโซเทอมการดูดซับแก๊สไนโตรเจนบนถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ที่อุณหภูมิการดูดซับ -196°C พบว่าเส้นไอโซเทอมการดูดซับของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ภายใต้สภาวะการเตรียมต่างๆ เป็นแบบชนิดที่ 1 (Type I) แสดงว่าถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากถ่านหินโดยวิธีการกระตุ้นทางกายภาพ มีลักษณะรูพรุนขนาดเล็กเป็นส่วนใหญ่ ที่สภาวะการกระตุ้นที่เวลาการกระตุ้นคงที่ การกระตุ้นที่อุณหภูมิสูงขึ้น จะทำให้ถ่านกัมมันต์ที่ได้มีความสามารถในการดูดซับสูงขึ้น (รูปที่ 4.3(1) และรูปที่ 4.3(3)) และที่สภาวะการกระตุ้นที่อุณหภูมิการกระตุ้นคงที่ การกระตุ้นที่เวลานานขึ้น จะทำให้ถ่านกัมมันต์ที่ได้มีความสามารถในการดูดซับลดลง (รูปที่ 4.3(1) และรูปที่ 4.3(2))



รูปที่ 4.4 ผลของอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการกระตุ้นต่อค่าร้อยละน้ำหนักรั่วหายไปในระหว่างการกระตุ้นของถ่านกัมมันต์ (ขนาดอนุภาค 20×30 mesh ที่สภาวะการคาร์บอนไนซ์ : 700°C 40 นาที 20°Cต่อนาที และสภาวะการกระตุ้น : 25%CO₂ + 75%N₂)



รูปที่ 4.5 เส้นไอโซเทอมการดูดซับของถ่านกัมมันต์ขนาด 20×30 mesh ที่สภาวะการคาร์บอนไนซ์ : 700°C 40 นาที 20°Cต่อนาที และสภาวะการกระตุ้น : (1) 800°C 90 นาที (2) 800°C 60 นาที (3) 900°C 90 นาที ทั้งหมดใช้อัตราการป้อน 25%CO₂ + 75%N₂

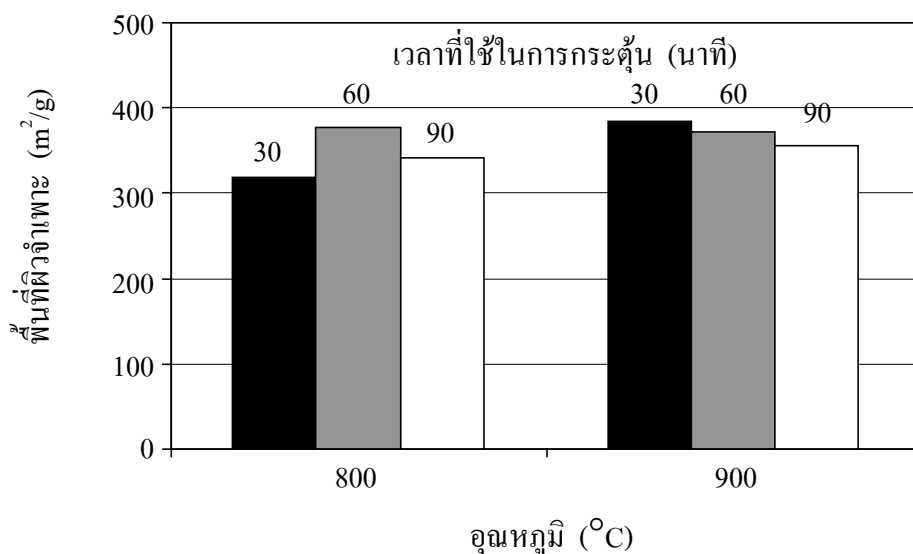
4. ผลของอุณหภูมิและเวลาของการกระตุ้นต่อพื้นที่ผิวและลักษณะรูพรุนของถ่านกัมมันต์

ข้อมูลจากเส้นไอโซเทอมการดูดซับสามารถนำมาคำนวณหาพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุน และการกระจายขนาดรูพรุนของถ่านกัมมันต์ได้ ผลของอุณหภูมิและเวลาของการกระตุ้นต่อพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.5 และรูปที่ 4.6 ถึง รูปที่ 4.7 พบว่าเมื่อเทียบกับถ่านชาร์ ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ภายใต้สภาวะการเตรียมต่างๆ มีพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนขนาดเล็กและปริมาตรรูพรุนทั้งหมดสูงขึ้น โดยมีพื้นที่ผิวจำเพาะอยู่ในช่วง 318 – 384 ตารางเมตรต่อกรัม และมีปริมาตรรูพรุนขนาดเล็กเป็นส่วนใหญ่ (มากกว่าร้อยละ 50 ของปริมาตรรูพรุนทั้งหมด) ที่สภาวะเวลาของการกระตุ้นคงที่ เมื่อการกระตุ้นทำที่อุณหภูมิสูงขึ้นมีแนวโน้มทำให้พื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนทั้งหมดเพิ่มขึ้น (รูปที่ 4.6 และรูปที่ 4.7) เนื่องมาจากการกระตุ้นที่อุณหภูมิสูงจะเกิดปฏิกิริยาการแก๊สซิฟิเคชันได้ดีกว่าการกระตุ้นที่อุณหภูมิต่ำ นอกจากนี้การกระตุ้นที่อุณหภูมิสูงยังทำให้ถ่านกัมมันต์ที่ได้มีปริมาตรรูพรุนขนาดกลางและขนาดใหญ่เพิ่มขึ้น แสดงว่าการกระตุ้นที่เกิดขึ้นเป็นการสร้างรูพรุนใหม่และเป็นการทำให้รูพรุนขนาดเล็กมีขนาดใหญ่ขึ้น เมื่อสภาวะอุณหภูมิการกระตุ้นคงที่ที่ 800°C ใช้เวลานานขึ้นจาก 30 นาที เป็น 60 นาที มีแนวโน้มทำให้ถ่านกัมมันต์มีพื้นที่ผิวจำเพาะมากขึ้นเช่นกัน แต่เมื่อเวลาของการกระตุ้นนานขึ้นเป็น 90 นาที และสภาวะการกระตุ้นที่อุณหภูมิสูงกว่านั้น (900°C) เมื่อใช้เวลานานขึ้นจาก 30 นาที เป็น 60 และ 90 นาที จะมีผลทำให้พื้นที่ผิวจำเพาะมีค่าลดลงเล็กน้อย Teng et al. (1998) ได้อธิบายเหตุผลไว้ว่าที่อุณหภูมิสูงและเวลานานการเกิดรูพรุนมีความสัมพันธ์กับการเชื่อมโยง (cross-link) ของโครงสร้างของวัสดุซับ ซึ่งเกิดมาจากการจัดเรียงตัวใหม่ของโครงสร้างที่ไหลมารวมกัน และการพังลงของรูพรุน อีกทั้งที่อุณหภูมิสูงๆ ปฏิกิริยาระหว่างคาร์บอนอะตอมกับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เกิดขึ้นเร็ว ทำให้ปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันที่ปากทางเข้ารูพรุนเกิดขึ้นก่อนที่โมเลกุลของแก๊สจะแพร่เข้าไปภายในทำให้เกิดรูพรุนที่มีขนาดกว้างแต่ตื้นมากขึ้น

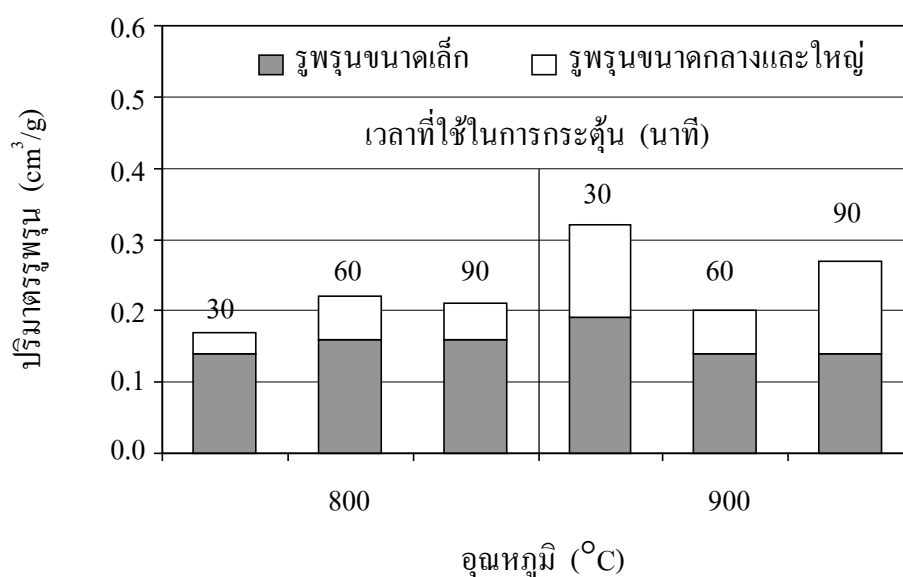
การวัดค่าการดูดซับไอโอดีนจัดเป็นวิธีการหนึ่งในการหาประสิทธิภาพการดูดซับของถ่านกัมมันต์ ซึ่งโดยทั่วไปแล้วค่าการดูดซับไอโอดีนมีแนวโน้มไปในทางเดียวกันกับค่าพื้นที่ผิวจำเพาะแต่สัดส่วนการเปลี่ยนแปลงจะไม่เท่ากัน ผลการวัดค่าดูดซับไอโอดีนเทียบกับค่าพื้นที่ผิวจำเพาะในการทดลองนี้ก็พบอย่างเดียวกันดังแสดงไว้ในรูปที่ 4.8 ซึ่งแสดงสภาวะที่เวลาการกระตุ้นคงที่ (60 นาที) เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ค่าดูดซับไอโอดีนและค่าพื้นที่ผิวจำเพาะมีค่าสูงขึ้นตามอุณหภูมิ และจะเห็นว่าค่าดูดซับไอโอดีนมีค่าน้อยกว่าค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ โดยที่อัตราส่วนค่าการดูดซับไอโอดีนต่อพื้นที่ผิวจำเพาะมีค่าเฉลี่ยประมาณ 0.70 ต่อ 1.0 ซึ่งเป็นลักษณะของสารคาร์บอนที่มีขนาดรูพรุนขนาดเล็กเป็นส่วนใหญ่

ตารางที่ 4.5 ผลการกระตุ้นและสมบัติของถ่านกัมมันต์แปรผันอุณหภูมิและเวลา

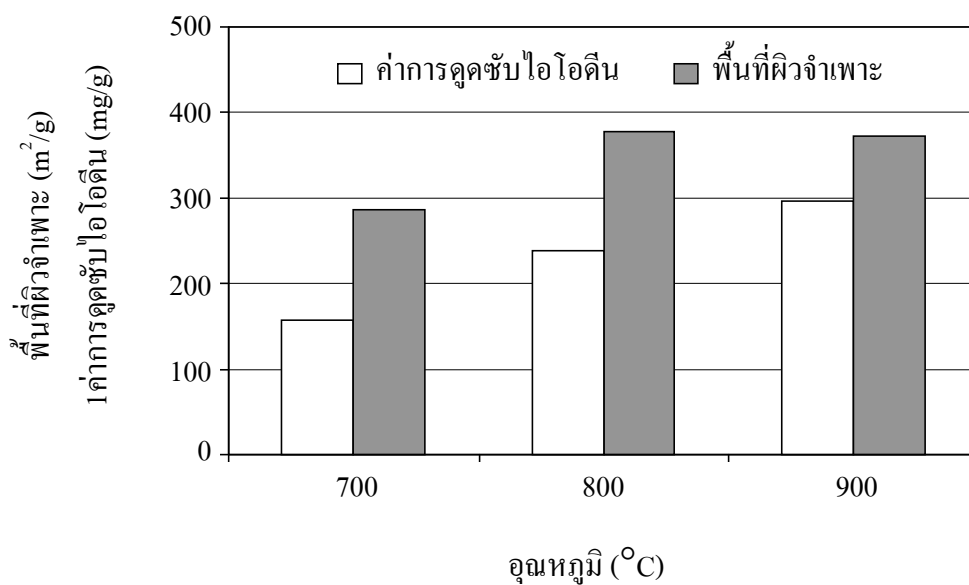
อุณหภูมิ (°C)	เวลา (นาท)	ร้อยละน้ำ หนักที่หาย ไปในช่วง การกระตุ้น	ร้อยละ น้ำหนัก ที่หายไป ทั้งหมด	พื้นที่ผิว จำเพาะ แบบBET (m ² /g)	ปริมาตร รูพรุน ขนาดเล็ก (cm ³ /g)	ปริมาตร รูพรุนขนาด กลางและใหญ่ (cm ³ /g)	ปริมาตร รูพรุน ทั้งหมด (cm ³ /g)	ขนาด รูพรุน เฉลี่ย (nm)
800	30	9	50	318	0.14 (82%)	0.03 (18%)	0.17	2.12
900	30	16	53	384	0.16 (73%)	0.06 (27%)	0.22	2.27
700	60	23	57	286	0.12 (86%)	0.02 (14%)	0.14	2.02
800	60	18	54	378	0.16 (76%)	0.05 (24%)	0.21	2.25
900	60	46	70	372	0.19 (59%)	0.13 (41%)	0.32	3.43
800	90	14	52	341	0.14 (70%)	0.06 (30%)	0.20	2.37
900	90	34	63	355	0.14 (52%)	0.13 (48%)	0.27	3.06
ถ่านชาร์เตรียมที่ 700°C 40นาท				125	0.05 (63%)	0.03 (37%)	0.08	2.52
ถ่านกัมมันต์ทางการค้า				1197	0.48 (87%)	0.07 (13%)	0.55	1.83



รูปที่ 4.6 ผลของอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการกระตุ้นต่อพื้นที่ผิวจำเพาะของถ่านกัมมันต์ (ขนาดอนุภาค 20×30 mesh ที่สภาวะการคาร์บอนไนซ์ : 700°C 40 นาที 20°C ต่อ นาที และสภาวะการกระตุ้น : 25%CO₂ + 75%N₂)



รูปที่ 4.7 ผลของอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการกระตุ้นต่อปริมาณรูพรุนของถ่านกัมมันต์ (ขนาดอนุภาค 20×30 mesh ที่สภาวะการคาร์บอนไนซ์ : 700°C 40 นาที 20°C ต่อ นาที และสภาวะการกระตุ้น : 25%CO₂ + 75%N₂)



รูปที่ 4.8 ผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการกระตุ้นต่อค่าการดูดซับไอโอดีนและพื้นที่ผิวจำเพาะของถ่านกัมมันต์ (ขนาดอนุภาค 20×30 mesh ที่สภาวะการคาร์บอนไนซ์ : 700°C 40 นาที 20°C ต่อ นาที และสภาวะการกระตุ้น : 60 นาที 25%CO₂ + 75%N₂)

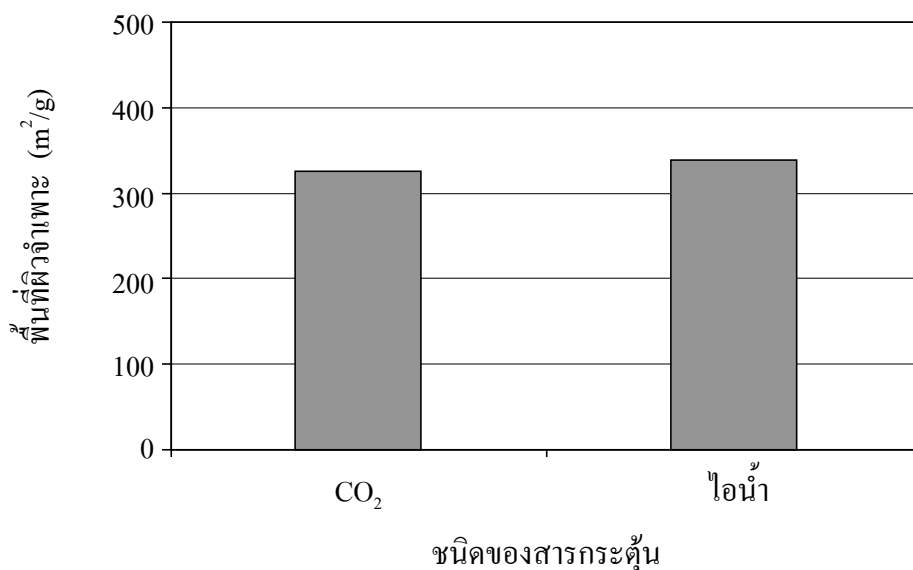
5. ผลของชนิดของสารกระตุ้น

การทดลองเพื่อศึกษาตัวแปรชนิดของสารกระตุ้น ใช้ถ่านชาร์ที่เตรียมจากถ่านหินแม่เมาะที่มีขนาดอนุภาค 0.60 – 0.85 มิลลิเมตร (20×30 mesh) ที่อุณหภูมิ 700°C เวลา 40 นาที อัตราการเพิ่มความร้อน 20°C ต่อ นาที และทำการกระตุ้นที่อุณหภูมิ 900°C เวลา 60 นาที อัตราการเพิ่มความร้อน 20°C ต่อ นาที อัตราการป้อนสารกระตุ้น 100 มิลลิลิตรต่อ นาที โดยใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำเป็นสารกระตุ้น ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.6 และรูปที่ 4.9 ถึง 4.10

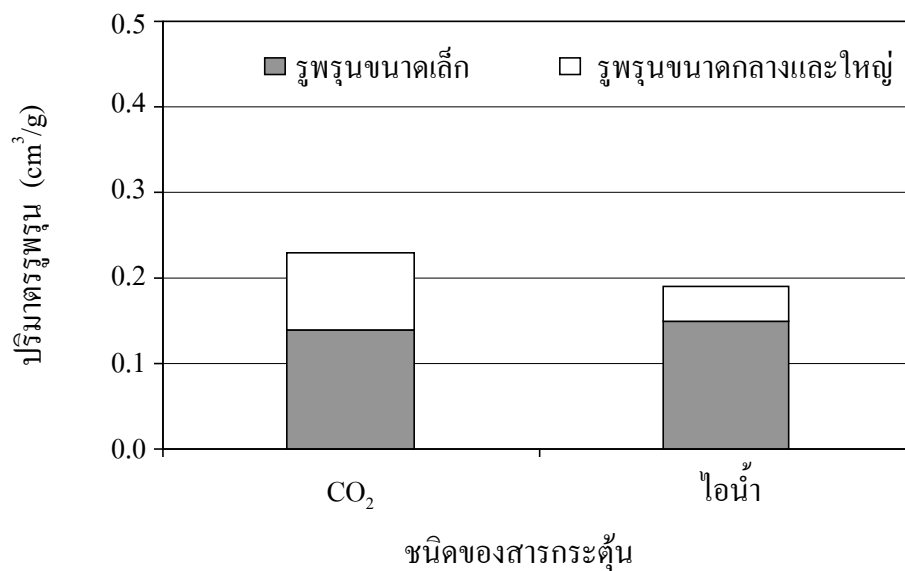
ผลของชนิดของสารกระตุ้นที่มีต่อร้อยละน้ำหนักที่หายไปในช่วงการกระตุ้น ดังแสดงในตารางที่ 4.6 แสดงร้อยละน้ำหนักที่หายไปในช่วงการกระตุ้นของถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มีค่ามากกว่าของถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยไอน้ำ รูปที่ 4.9 และ 4.10 แสดงผลของชนิดของสารกระตุ้นที่มีต่อพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนตามลำดับ พบว่าถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนขนาดเล็กน้อยกว่าของถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยไอน้ำ แต่มีปริมาตรรูพรุนทั้งหมดและขนาดรูพรุนเฉลี่ยมากกว่า ทั้งนี้เนื่องจากแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มีขนาดโมเลกุลใหญ่กว่าน้ำทำให้อัตราการเกิดแก๊สซิฟิเคชันช้ากว่าและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์แพร่เข้าไปเกิดปฏิกิริยาในรูพรุนได้ช้ากว่าจึงเกิดปฏิกิริยาที่บริเวณผิวนอกหรือปากทางเข้ารูพรุนมากกว่า (Walker, 1996)

ตารางที่ 4.6 ผลการกระตุ้นและสมบัติของถ่านกัมมันต์เมื่อแปรผันชนิดของสารกระตุ้น

ชนิดของสารกระตุ้น	ร้อยละน้ำหนักที่หายไปในช่วงการกระตุ้น	ร้อยละน้ำหนักที่หายไปทั้งหมด	พื้นที่ผิวจำเพาะแบบ BET (m ² /g)	ปริมาตรรูพรุนขนาดเล็ก (cm ³ /g)	ปริมาตรรูพรุนขนาดกลางและใหญ่ (cm ³ /g)	ปริมาตรรูพรุนทั้งหมด (cm ³ /g)	ขนาดรูพรุนเฉลี่ย (nm)
CO ₂	34	63	325	0.14 (61%)	0.09 (39%)	0.23	2.87
ไอน้ำ	13	52	338	0.15 (79%)	0.04 (21%)	0.19	2.26



รูปที่ 4.9 ผลของชนิดของสารกระตุ้นต่อพื้นที่ผิวจำเพาะของถ่านกัมมันต์ (ขนาดอนุภาค 20×30 mesh ที่สภาวะการคาร์บอนไนซ์ : 700°C 40 นาที 20°C ต่อ นาที และสภาวะการกระตุ้น : 900°C 60 นาที 20°C ต่อ นาที 100% สารกระตุ้น)



รูปที่ 4.10 ผลของชนิดของสารกระตุ้นต่อปริมาตรรูพรุนของถ่านกัมมันต์ (ขนาดอนุภาค 20×30 mesh ที่สภาวะการคาร์บอนไนซ์ : 700°C 40 นาที 20°C/นาที และสภาวะการกระตุ้น : 900°C 60 นาที 20°C ต่อ นาที 100% สารกระตุ้น)

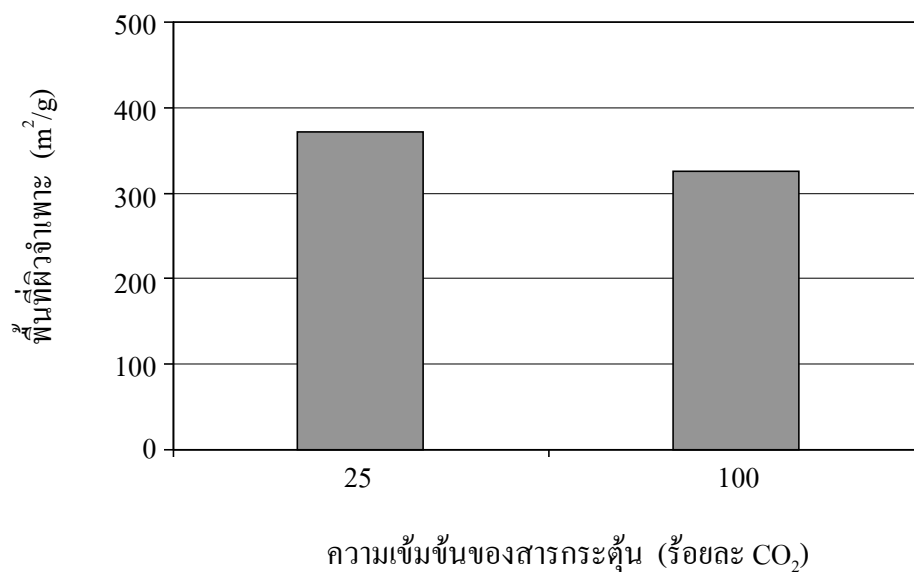
6. ผลของความเข้มข้นของสารกระตุ้น

ผลการทดลองเพื่อศึกษาผลของความเข้มข้นของสารกระตุ้นทั้งแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำใช้ถ่านชาร์ที่เตรียมจากถ่านหินแม่เมาะที่มีขนาดอนุภาค 0.60 – 0.85 มิลลิเมตร (20×30 mesh) ที่อุณหภูมิ 700°C เวลา 40 นาที อัตราการเพิ่มความร้อน 20°C ต่อ นาที และทำการกระตุ้นที่สภาวะอุณหภูมิ 900°C นาน 60 นาที อัตราการเพิ่มความร้อน 20°C ต่อ นาที โดยใช้ความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เป็น 25% และ 100% โดยมีส่วนที่เหลือเป็นแก๊สไนโตรเจนเพื่อให้มีอัตราการป้อนสารกระตุ้น 100 มิลลิตรต่อ นาที เท่ากันทุกการทดลอง ส่วนการกระตุ้นด้วยไอน้ำได้ทำในทำนองเดียวกันแต่ใช้ความเข้มข้นเป็น 50% และ 100% ตามลำดับ ผลการวิเคราะห์สมบัติของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้แสดงในตารางที่ 4.7 และรูปที่ 4.11 ถึง รูปที่ 4.14

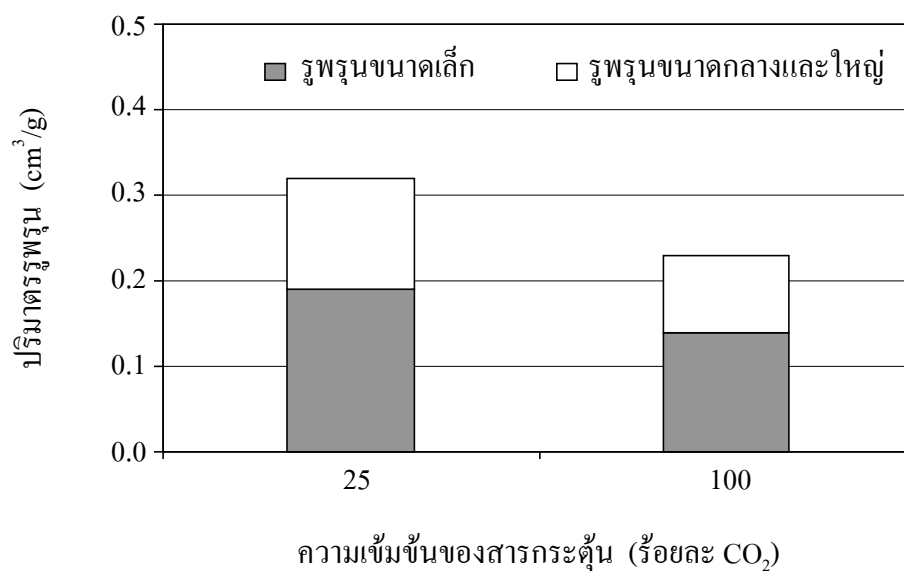
ผลของความเข้มข้นของสารกระตุ้นที่มีต่อร้อยละน้ำหนักที่หายไปในช่วงการกระตุ้น แสดงในตารางที่ 4.7 พบว่าร้อยละน้ำหนักที่หายไปในช่วงการกระตุ้นมีค่าลดลงเมื่อความเข้มข้นของสารกระตุ้นที่มากขึ้น ซึ่งให้ผลเช่นเดียวทั้งการกระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำ ผลของความเข้มข้นของสารกระตุ้นต่อพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.11 ถึง 4.14 พบว่าพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนทั้งหมดของถ่านกัมมันต์เตรียมที่ความเข้มข้นของสารกระตุ้นมากมีค่าน้อยกว่าของถ่านกัมมันต์เตรียมที่ความเข้มข้นของสารกระตุ้นน้อย โดยให้ผลเช่นเดียวทั้งการกระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำ ทั้งนี้เนื่องการกระตุ้นด้วยความเข้มข้นของสารกระตุ้นมากปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วทำให้สารกระตุ้นสามารถแพร่เข้าไปในรูพรุนได้น้อย มีการหายไปของเนื้อคาร์บอนบริเวณภายนอกมาก ส่วนการกระตุ้นความเข้มข้นของสารกระตุ้นน้อย สารกระตุ้นสามารถแพร่เข้าไปในช่องว่างของโครงตาข่ายคาร์บอนได้อย่างสม่ำเสมอจึงสามารถสร้างรูพรุนได้มากขึ้น (Pis et al., 1998)

ตารางที่ 4.7 ผลการกระตุ้นและสมบัติของถ่านกัมมันต์เมื่อแปรผันความเข้มข้นของสารกระตุ้น

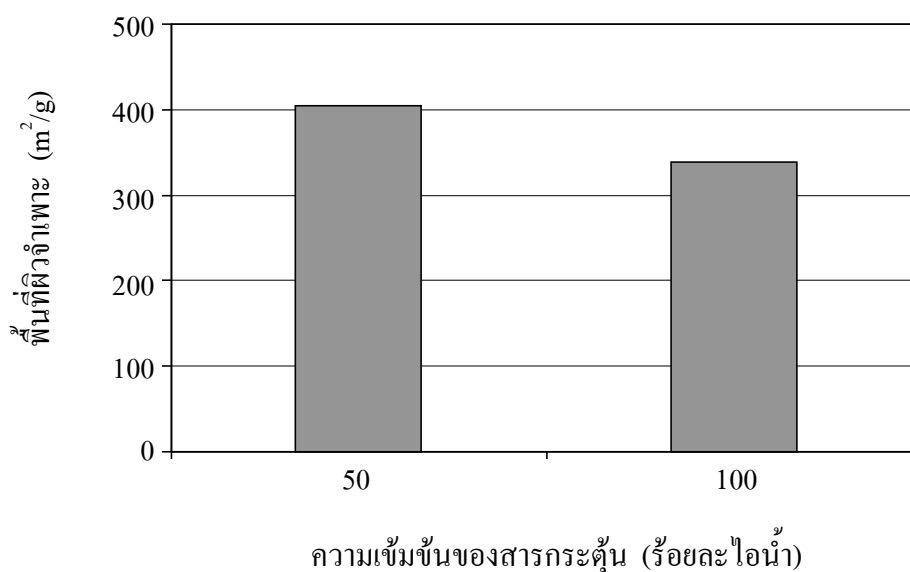
ความเข้มข้น สารกระตุ้น (ร้อยละโดย ปริมาตร)			ร้อยละน้ำ หนักที่หายไป ในช่วง การกระตุ้น	ร้อยละ น้ำหนัก ที่หายไป ทั้งหมด	พื้นที่ผิว จำเพาะ แบบ BET (m^2/g)	ปริมาตร รูพรุน ขนาดเล็ก (cm^3/g)	ปริมาตร รูพรุนขนาด กลางและใหญ่ (cm^3/g)	ปริมาตร รูพรุน ทั้งหมด (cm^3/g)	ขนาด รูพรุน เฉลี่ย (nm)
CO ₂	ไอน้ำ	N ₂							
25	-	75	46	70	372	0.19 (59%)	0.13 (41%)	0.32	3.43
100	-	-	34	63	325	0.14 (61%)	0.09 (39%)	0.23	2.87
-	50	50	55	75	405	0.16 (43%)	0.21 (57%)	0.37	3.68
-	100	-	13	52	338	0.11 (58%)	0.08 (42%)	0.19	2.26



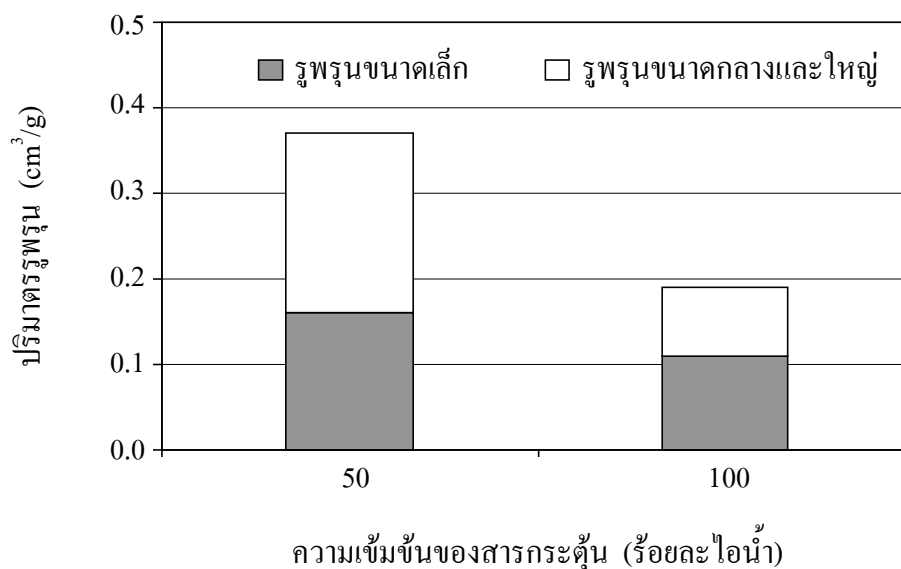
รูปที่ 4.11 ผลของความเข้มข้นของสารกระตุ้น (แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์) ต่อพื้นที่ผิวจำเพาะของ ถ่านกัมมันต์ (ขนาดอนุภาค 20×30 mesh ที่สภาวะการคาร์บอนไนซ์ : 700°C 40 นาที 20°C ต่อ นาที และสภาวะการกระตุ้น : 900°C 60 นาที 20°C ต่อ นาที)



รูปที่ 4.12 ผลของความเข้มข้นของสารกระตุ้น (แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์) ต่อปริมาตรรูพรุนของ ถ่านกัมมันต์ (ขนาดอนุภาค 20×30 mesh ที่สภาวะการคาร์บอนไนซ์ : 700°C 40 นาที 20°C ต่อ นาที และสภาวะการกระตุ้น : 900°C 60 นาที 20°C ต่อ นาที)



รูปที่ 4.13 ผลของความเข้มข้นของสารกระตุ้น (ไอน้ำ) ต่อพื้นที่ผิวจำเพาะของถ่านกัมมันต์ (ขนาดอนุภาค 20×30 mesh ที่สภาวะการคาร์บอนไนซ์ : 700°C 40 นาที 20°Cต่อนาที และสภาวะการกระตุ้น : 900°C 60 นาที 20°Cต่อนาที)



รูปที่ 4.14 ผลของความเข้มข้นของสารกระตุ้น (ไอน้ำ) ต่อปริมาตรรูพรุนของถ่านกัมมันต์ (ขนาดอนุภาค 20×30 mesh ที่สภาวะการคาร์บอนไนซ์ : 700°C 40 นาที 20°Cต่อนาที และสภาวะการกระตุ้น : 900°C 60 นาที 20°Cต่อนาที)

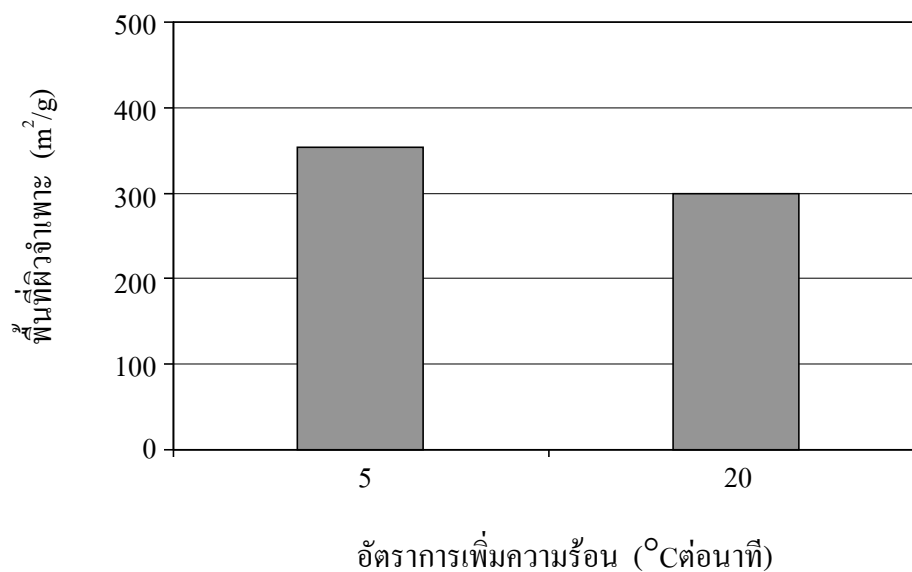
7. ผลของอัตราการเพิ่มความร้อนในช่วงการกระตุ้น

การทดลองเพื่อศึกษาตัวแปรอัตราการเพิ่มความร้อน ใช้ถ่านชาร์ที่เตรียมจากถ่านหินแม่เมาะที่มีขนาดอนุภาค 0.60 – 0.85 มิลลิเมตร (20×30 mesh) ที่อุณหภูมิ 800°C เวลา 60 นาที อัตราการเพิ่มความร้อน 5°C ต่อ นาที และทำการกระตุ้นที่อุณหภูมิ 900°C เวลา 60 นาที อัตราการเพิ่มความร้อน 5°C ต่อ นาที และ 20°C ต่อ นาที อัตราการป้อนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 25 มิลลิลิตร ต่อ นาที และอัตราการป้อนแก๊สไนโตรเจน 75 มิลลิลิตร ต่อ นาที ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.8 และรูปที่ 4.15 ถึง 4.16

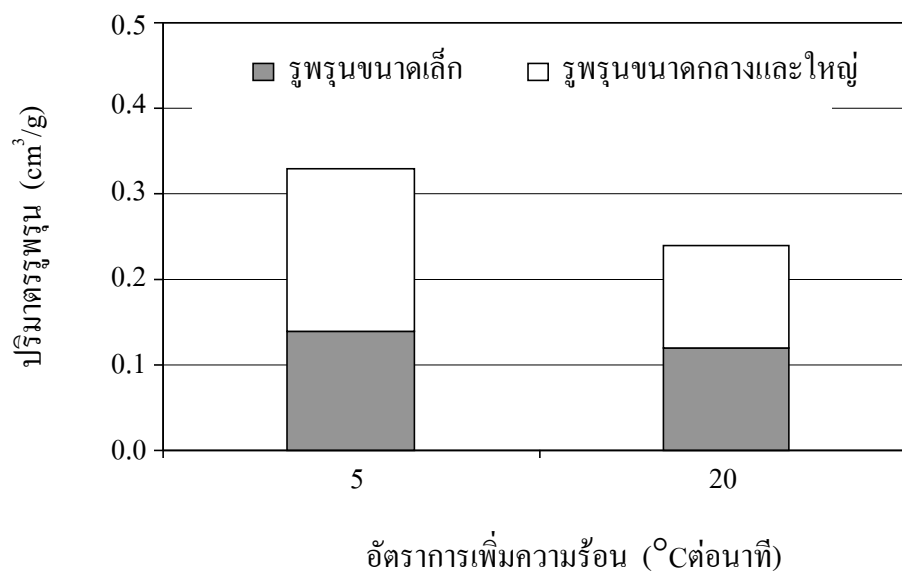
ผลของอัตราการเพิ่มความร้อนที่มีต่อร้อยละน้ำหนักที่หายไปในช่วงการกระตุ้นแสดงในตารางที่ 4.8 พบว่าการเปลี่ยนแปลงอัตราการเพิ่มความร้อนในขั้นตอนการกระตุ้นไม่มีผลต่อร้อยละน้ำหนักที่หายไป แต่มีผลต่อพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนของถ่านกัมมันต์ (รูปที่ 4.15 และรูปที่ 4.16 ตามลำดับ) ซึ่งอาจเป็นไปได้ว่าการใช้อัตราการเพิ่มความร้อนช้ากว่าจะมีช่วงเวลาที่ใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิจากต่ำ (อุณหภูมิห้อง) ไปสูง (อุณหภูมิที่ใช้ในการกระตุ้น) นานกว่าการใช้อัตราการเพิ่มความร้อนเร็ว จึงช่วยให้เกิดรูพรุนได้มากกว่า และการเพิ่มความร้อนอย่างรวดเร็วอาจทำให้เกิดการแตกหักของโครงสร้างเพิ่มมากขึ้น ซึ่งเป็นอุปสรรคต่อการแพร่ของสารกระตุ้นในช่วงการเกิดปฏิกิริยาการแก๊สซิฟิเคชันเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวของรูพรุน

ตารางที่ 4.8 ผลการกระตุ้นและสมบัติของถ่านกัมมันต์เมื่อแปรผันอัตราการเพิ่มความร้อน

อัตราการเพิ่มความร้อน (°C/นาที)	ร้อยละน้ำหนักที่หายไปในช่วงการกระตุ้น	ร้อยละน้ำหนักที่หายไปทั้งหมด	พื้นที่ผิวจำเพาะแบบ BET (m ² /g)	ปริมาตรรูพรุนขนาดเล็ก (cm ³ /g)	ปริมาตรรูพรุนขนาดกลางและใหญ่ (cm ³ /g)	ปริมาตรรูพรุนทั้งหมด (cm ³ /g)	ขนาดรูพรุนเฉลี่ย (nm)
5	33	63	354	0.14 (42%)	0.19 (58%)	0.33	3.78
20	32	64	300	0.12 (50%)	0.12 (50%)	0.24	3.14
ถ่านชาร์เตรียมที่ 800°C 60 นาที			125	0.06 (100%)	0.00 (0%)	0.06	2.05



รูปที่ 4.15 ผลของอัตราการเพิ่มความร้อนต่อค่าพื้นที่ผิวจำเพาะของถ่านกัมมันต์ (ขนาดอนุภาค 20×30 mesh ที่สภาวะการคาร์บอไนซ์ : 800°C 60นาที และสภาวะการกระตุ้น : 900°C 60นาที 25%CO₂ + 75%N₂)



รูปที่ 4.16 ผลของอัตราการเพิ่มความร้อนต่อปริมาณรูพรุนของถ่านกัมมันต์ (ขนาดอนุภาค 20×30 mesh ที่สภาวะการคาร์บอไนซ์ : 800°C 60นาที และสภาวะการกระตุ้น : 900°C 60นาที 25%CO₂ + 75%N₂)

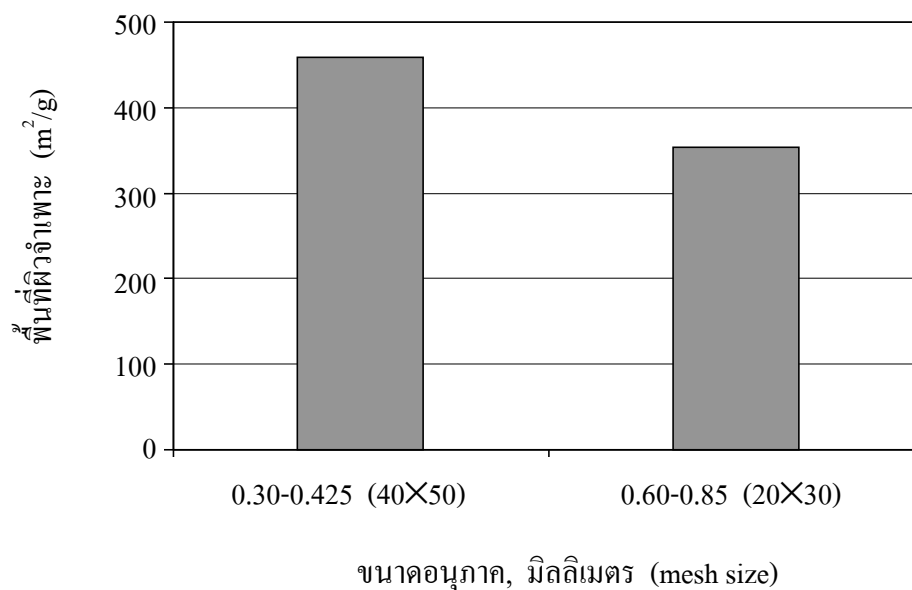
8. ผลของขนาดอนุภาคถ่านหิน

การทดลองเพื่อศึกษาตัวแปรขนาดอนุภาคถ่านหิน ใช้ถ่านชาร์ที่เตรียมจากถ่านหินแม่เมาะที่มีขนาดอนุภาค 0.30 – 0.425 มิลลิเมตร (40×50 mesh) และ 0.60 – 0.85 มิลลิเมตร (20×30 mesh) ที่อุณหภูมิ 800°C เวลา 60 นาที อัตราการเพิ่มความร้อน 5°C ต่อ นาที และทำการกระตุ้นที่อุณหภูมิ 900°C เวลา 60 นาที อัตราการเพิ่มความร้อน 5°C ต่อ นาที อัตราการป้อนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 25 มิลลิลิตรต่อ นาที และอัตราการป้อนแก๊สไนโตรเจน 75 มิลลิลิตรต่อ นาที ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.9 และรูปที่ 4.17 ถึง 4.18

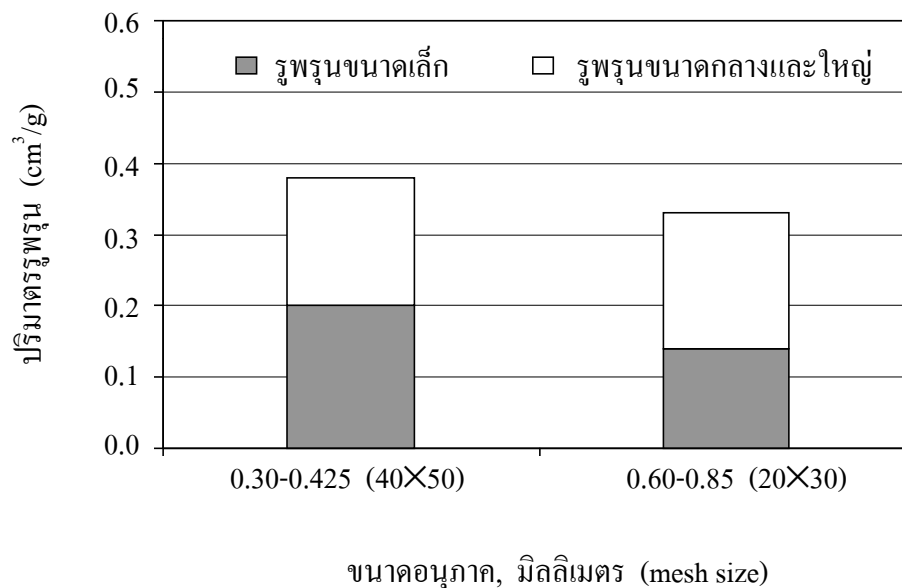
ผลของขนาดอนุภาคถ่านหินที่มีต่อร้อยละน้ำหนักที่หายไปในช่วงการกระตุ้นของถ่านกัมมันต์ที่ได้แสดงในตารางที่ 4.9 ซึ่งให้เห็นว่าอนุภาคขนาดเล็กจะมีร้อยละน้ำหนักที่หายไปในช่วงการกระตุ้นมากเนื่องมาจากอนุภาคขนาดเล็กสามารถเกิดปฏิกิริยาการแก๊สซิฟิเคชันได้ดีกว่าอนุภาคขนาดใหญ่ เนื่องจากมีพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาเคมีได้มากกว่าเมื่อเทียบน้ำหนักเท่ากันจึงมีร้อยละน้ำหนักที่หายไปมาก สำหรับผลของขนาดอนุภาคของถ่านหินที่มีต่อพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนของถ่านกัมมันต์ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.17 และ 4.18 ตามลำดับ พบว่าเมื่อขนาดอนุภาคถ่านหินมีขนาดเล็กจะได้ถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนมากกว่าขนาดอนุภาคใหญ่ เนื่องจากอนุภาคขนาดเล็กสัมผัสกับสารกระตุ้นได้มากกว่าจึงสามารถเกิดปฏิกิริยาการแก๊สซิฟิเคชันได้มากกว่าอนุภาคขนาดใหญ่จึงเกิดรูพรุนได้มากกว่า

ตารางที่ 4.9 ผลการกระตุ้นและสมบัติของถ่านกัมมันต์เมื่อแปรผันขนาดอนุภาค

ขนาดอนุภาค (mm)	ร้อยละน้ำหนักที่หายไปในช่วงการกระตุ้น	ร้อยละน้ำหนักที่หายไปทั้งหมด	พื้นที่ผิวจำเพาะแบบ BET (m ² /g)	ปริมาตรรูพรุนขนาดเล็ก (cm ³ /g)	ปริมาตรรูพรุนขนาดกลางและใหญ่ (cm ³ /g)	ปริมาตรรูพรุนทั้งหมด (cm ³ /g)	ขนาดรูพรุนเฉลี่ย (nm)
0.30 – 0.425 (40×50 mesh)	39	69	459	0.20 (53%)	0.18 (47%)	0.38	3.30
0.60 – 0.85 (20×30 mesh)	33	63	354	0.14 (42%)	0.19 (58%)	0.33	3.78



รูปที่ 4.17 ผลของขนาดอนุภาคต่อพื้นที่ผิวจำเพาะของถ่านกัมมันต์ (สภาวะการคาร์บอนไนซ์ : 800°C 60 นาที 5°Cต่อนาทีและสภาวะการกระตุ้น : 900°C 60 นาที 5°Cต่อนาที 25%CO₂+75%N₂)



รูปที่ 4.18 ผลของขนาดอนุภาคต่อปริมาตรรูพรุนของถ่านกัมมันต์ (สภาวะการคาร์บอนไนซ์ : 800°C 60 นาที 5°Cต่อนาทีและสภาวะการกระตุ้น : 900°C 60 นาที 5°Cต่อนาที 25%CO₂+75%N₂)

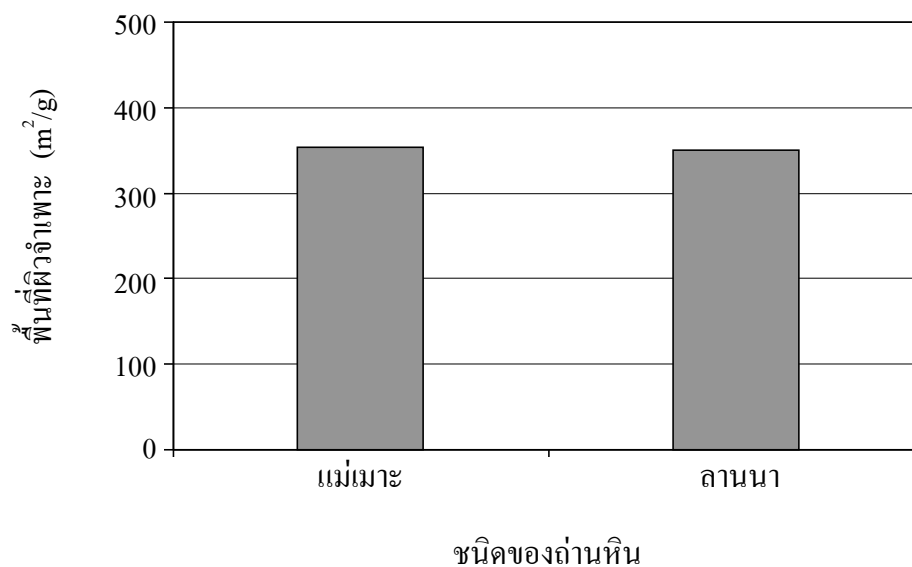
9. ผลของชนิดของถ่านหิน

การทดลองเพื่อศึกษาตัวแปรชนิดของถ่านหิน ใช้ถ่านชาร์ที่เตรียมจากถ่านหินแม่เมาะ และถ่านหินลานนาที่มีขนาดอนุภาค 0.60 – 0.85 มิลลิเมตร (20×30 mesh) ที่อุณหภูมิ 800°C เวลา 60 นาที อัตราการเพิ่มความร้อน 5°C ต่อ นาที และทำการกระตุ้นที่อุณหภูมิ 900°C เวลา 60 นาที อัตราการเพิ่มความร้อน 5°C ต่อ นาที อัตราการป้อนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 25 มิลลิตรต่อ นาที และอัตราการป้อนแก๊สไนโตรเจน 75 มิลลิตรต่อ นาที ผลการทดลองที่แสดงในตารางที่ 4.10 และรูปที่ 4.19 ถึง 4.21

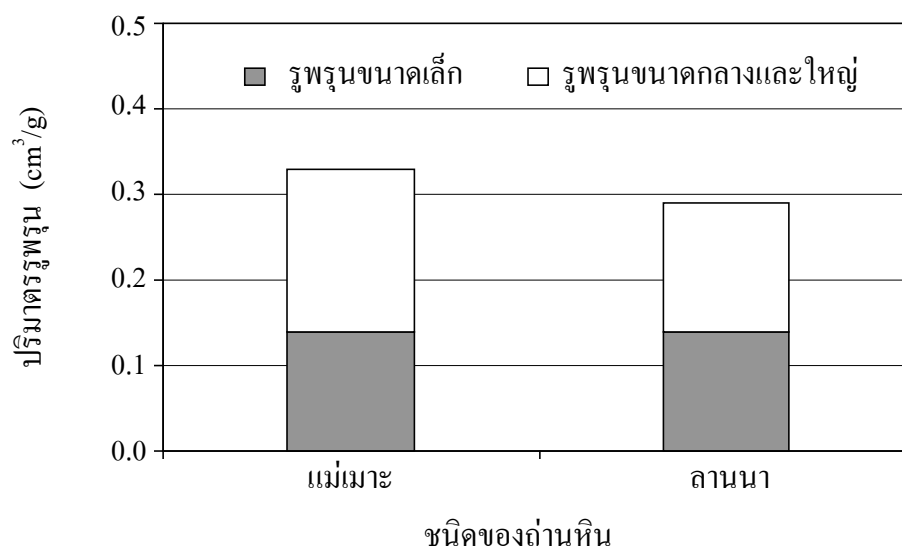
ผลของชนิดถ่านหินที่มีต่อร้อยละน้ำหนักที่หายในช่วงการกระตุ้นแสดงในตารางที่ 4.10 พบว่าร้อยละน้ำหนักที่หายในช่วงการกระตุ้นของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากถ่านหินลานนามีค่ามากกว่าถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากถ่านหินแม่เมาะ แสดงว่าถ่านหินลานนาเกิดปฏิกิริยาการแก๊สซิฟิเคชันได้ดีกว่าจึงมีร้อยละการหายไปของน้ำหนักมากกว่า อย่างไรก็ตาม รูปที่ 4.19 และ 4.20 แสดงค่าพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนของถ่านกัมมันต์จากถ่านหินทั้งสองแหล่งเตรียมภายใต้สภาวะเดียวกัน มีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก แต่เมื่อเปรียบเทียบพื้นที่ผิวจำเพาะของถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่อัตราการป้อน 100 มิลลิตรต่อ นาที (ดูรูปที่ 4.21) พบว่าถ่านกัมมันต์จากถ่านหินลานนาให้ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะมากกว่าที่เตรียมจากถ่านหินแม่เมาะอย่างชัดเจน ซึ่งอาจจะเนื่องมาจากถ่านหินทั้งสองมาจากแหล่งต่างกันจึงมีโครงสร้างทางกายภาพและทางเคมีต่างกันและสรุปได้ว่าความเข้มข้นของสารกระตุ้นมีผลต่อการเกิดรูพรุนสำหรับถ่านหินแต่ละแหล่งได้ไม่เหมือนกัน

ตารางที่ 4.10 ผลการกระตุ้นและสมบัติของถ่านกัมมันต์เมื่อแปรผันชนิดของถ่านหิน

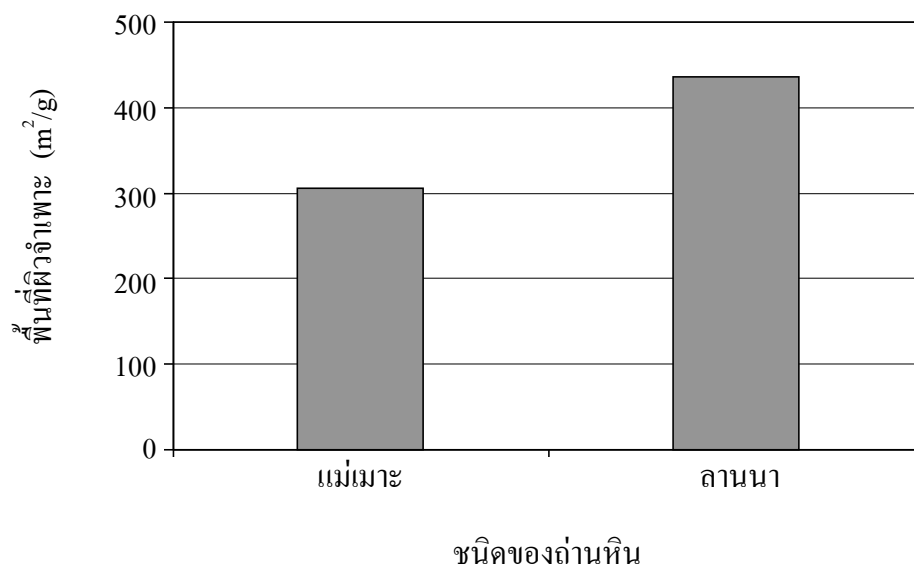
ชนิดของ ถ่านหิน	อัตราการ ป้อนสาร กระตุ้น (ml/นาที่)		ร้อยละ น้ำหนักที่ หายไป ในช่วงการ กระตุ้น	ร้อยละ น้ำหนัก ที่หายไป ทั้งหมด	พื้นที่ผิว จำเพาะ แบบ BET (m ² /g)	ปริมาตร รูพรุน ขนาดเล็ก (cm ³ /g)	ปริมาตร รูพรุน ขนาดกลาง และใหญ่ (cm ³ /g)	ปริมาตร รูพรุน ทั้งหมด (cm ³ /g)	ขนาด รูพรุน เฉลี่ย (nm)
	CO ₂	N ₂							
	แม่เมาะ	25	75	33	63	354	0.14 (42%)	0.19 (58%)	0.33
ลานนา	25	75	38	71	350	0.14 (48%)	0.15 (52%)	0.29	3.36
แม่เมาะ	100	-	43	69	306	0.12 (39%)	0.19 (61%)	0.31	3.99
ลานนา	100	-	54	78	436	0.17 (39%)	0.27 (61%)	0.44	4.05



รูปที่ 4.19 ผลของชนิดของถ่านหินต่อพื้นที่ผิวจำเพาะของถ่านกัมมันต์ (ขนาดอนุภาค 20×30 mesh ที่สภาวะการคาร์บอนไนซ์ : 800°C 60 นาที 5°Cต่อนาที และสภาวะการกระตุ้น : 900°C 60 นาที 5°Cต่อนาที 25%CO₂ + 75%N₂)



รูปที่ 4.20 ผลของชนิดของถ่านหินต่อปริมาตรรูพรุนของถ่านกัมมันต์ (ขนาดอนุภาค 20×30 mesh ที่สภาวะการคาร์บอนไนซ์ : 800°C 60 นาที 5°Cต่อนาที และสภาวะการกระตุ้น : 900°C 60 นาที 5°Cต่อนาที 25%CO₂ + 75%N₂)



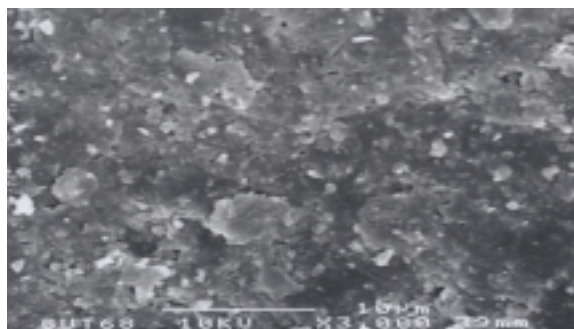
รูปที่ 4.21 ผลของชนิดของถ่านหินต่อพื้นที่ผิวจำเพาะของถ่านกัมมันต์ (ขนาดอนุภาค 20×30 mesh ที่สภาวะการคาร์บอนไนซ์ : 800°C 60 นาที 5°Cต่อนาที และสภาวะการกระตุ้น : 900°C 60 นาที 5°Cต่อนาที 100%CO₂)

10. ลักษณะพื้นผิวจากภาพถ่าย SEM

รูปที่ 4.22 และ 4.23 แสดงตัวอย่างลักษณะพื้นผิวของอนุภาคถ่านหิน ถ่านชาร์ ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ภายใต้สภาวะต่างๆ โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่าเมื่อผ่านการกระตุ้นแล้ว ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากถ่านหินแม่เมาะมีรูพรุนขนาดเล็กกระจายอยู่ทั่วไปบนพื้นผิว และเมื่อเปรียบเทียบกับลักษณะพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ทางการค้า (รูปที่ 4.24) ที่เตรียมจากกะลามะพร้าวโดยใช้ไอน้ำเป็นสารกระตุ้น พบว่ามีจำนวนรูพรุนเกิดขึ้นน้อยกว่า จึงทำให้พื้นที่ผิวจำเพาะของถ่านกัมมันต์ทางการค้ามีค่ามากกว่าของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากถ่านหิน

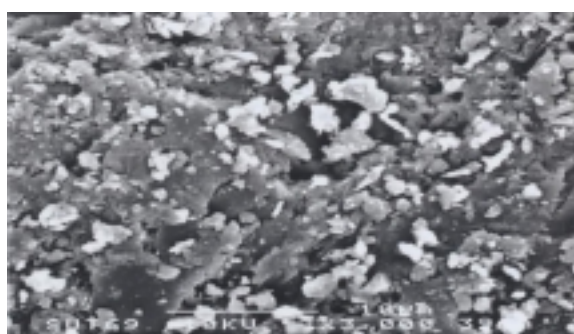
11. การเปรียบเทียบสมบัติถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้กับถ่านกัมมันต์ทางการค้า

จากข้อมูลในตารางที่ 4.5 ถึง 4.10 พบว่าถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จากถ่านหินลิกไนต์ที่สภาวะการกระตุ้นต่างๆ พื้นที่ผิวจำเพาะเพิ่มมากขึ้นจากของถ่านชาร์โดยมีค่าอยู่ในช่วงประมาณ 300 – 460 ตารางเมตรต่อกรัม แต่อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ทางการค้าจะเห็นว่ามีความต่ำกว่ามาก ขนาดรูพรุนเฉลี่ยของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากถ่านหินลิกไนต์มีขนาดใหญ่กว่าของถ่านกัมมันต์ทางการค้าที่ทุกสภาวะ โดยสภาวะการกระตุ้นที่ 900°C เวลา 60 นาที อัตราเพิ่มความร้อน 5°C ต่อ นาที และขนาดอนุภาค 0.60 – 0.85 มิลลิเมตร (20×30 mesh) มีขนาดรูพรุนเฉลี่ยมากที่สุดเท่ากับ 3.78 นาโนเมตร ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากถ่านหินแม่เมาะในช่วงขนาด 0.30 – 0.425 มิลลิเมตร (40×50 mesh) โดยกระตุ้นที่ 900°C เวลา 60 นาที ให้ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนรวมมากที่สุดเท่ากับ 459 ตารางเมตรต่อกรัม และ 0.38 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม ตามลำดับ



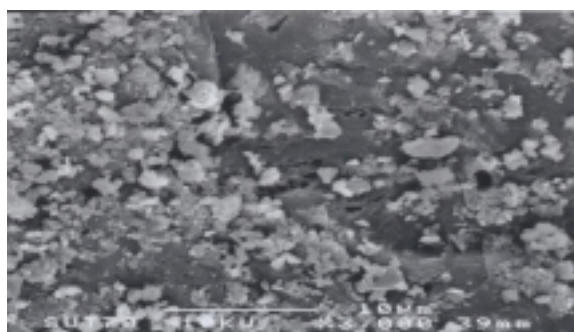
ถ่านหิน

(ก)



ถ่านชาร์

(ข)



ถ่านกัมมันต์

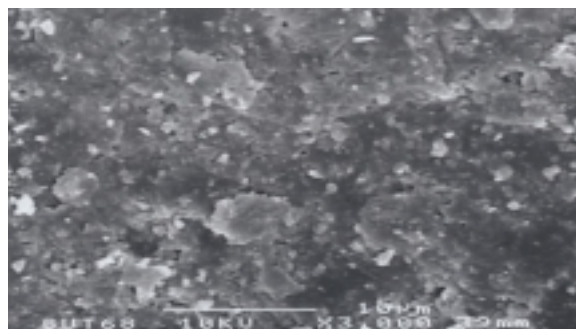
(ค)

รูปที่ 4.22 ภาพถ่าย SEM ที่กำลังขยาย 3000 เท่า แสดงลักษณะพื้นผิวของ

(ก) ถ่านหินดิบแม่เมาะ ขนาดอนุภาค 20×30 mesh

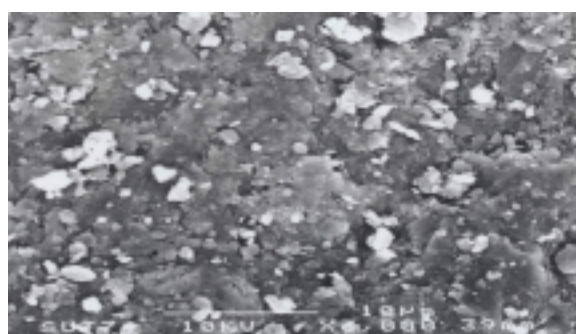
(ข) ถ่านชาร์แม่เมาะ ที่สภาวะการคาร์บอไนซ์ : 700°C 40นาที 20°Cต่อนาที

(ค) ถ่านกัมมันต์แม่เมาะ ที่สภาวะการคาร์บอไนซ์ : 700°C 40นาที 20°Cต่อนาที
และที่สภาวะการกระตุ้น : 800°C 60นาที 20°Cต่อนาที 25%CO₂ + 75%N₂



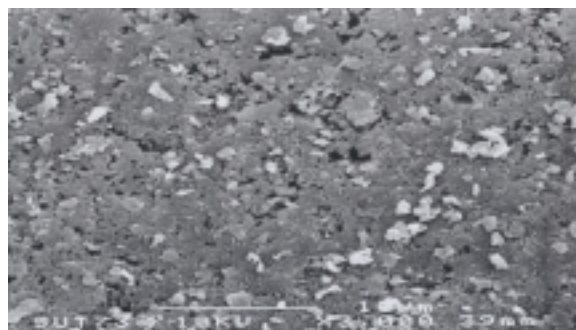
ถ่านหิน

(ก)



ถ่านชาร์

(ข)



ถ่านกัมมันต์

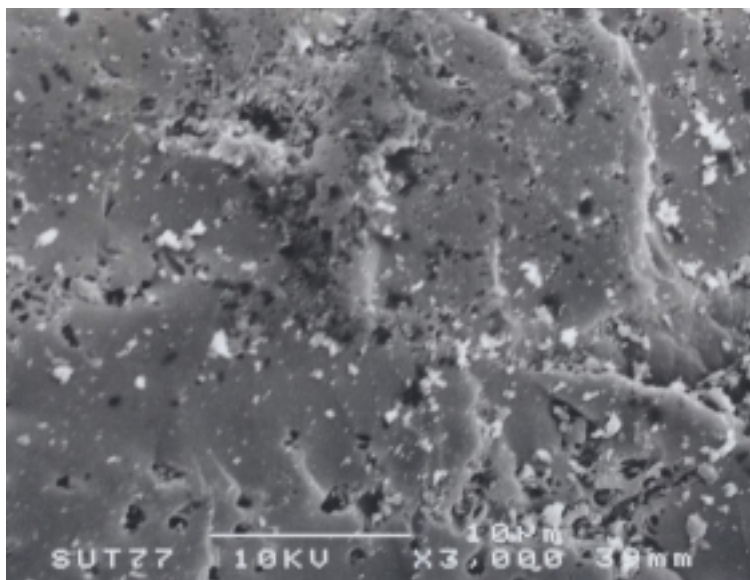
(ค)

รูปที่ 4.23 ภาพถ่าย SEM ที่กำลังขยาย 3000 เท่า แสดงลักษณะพื้นผิวของ

(ก) ถ่านหินดิบแม่เมาะ ขนาดอนุภาค 20×30 mesh

(ข) ถ่านชาร์แม่เมาะ ที่สภาวะการคาร์บอน : 800°C 60 นาที 5°C ต่อ นาที

(ค) ถ่านกัมมันต์แม่เมาะ ที่สภาวะการคาร์บอน : 800°C 60 นาที 5°C ต่อ นาที
และที่สภาวะการกระตุ้น : 900°C 60 นาที 5°C ต่อ นาที 25%CO₂ + 75%N₂



รูปที่ 4.24 ภาพถ่าย SEM ที่กำลังขยาย 3000 เท่า แสดงลักษณะพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ทางการค้า

4.2.3 การลดปริมาณแร่ในถ่านหินลิกไนต์

เนื่องจากถ่านหินลิกไนต์จากเหมืองแม่เมาะส่วนใหญ่มีปริมาณแร่สูง ซึ่งอาจมีผลต่อสมบัติพื้นที่ผิวและลักษณะการเกิดรูพรุนของถ่านกัมมันต์ได้ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาวิธีการลดปริมาณแร่ในถ่านหิน 2 วิธี ได้แก่ 1) การล้างถ่านหินด้วยกรดไฮโดรคลอริก 2) การแยกอนุภาคในตัวกลางของเหลว สำหรับงานวิจัยนี้ใช้สารละลายแคลเซียมคลอไรด์เป็นตัวกลาง ถ่านหินที่นำมาศึกษามีขนาดอนุภาค 0.60 – 0.85 มิลลิเมตร (20×30 mesh) และนำถ่านหินที่ผ่านการลดปริมาณแร่แล้วไปเตรียมเป็นถ่านกัมมันต์ที่สภาวะการคาร์บอนไนซ์ 700°C เวลา 40 นาที อัตราการเพิ่มความร้อน 20°C ต่อ นาที และทำการกระตุ้นต่อที่สภาวะ 800°C เวลา 60 นาที อัตราการเพิ่มความร้อน 20°C ต่อ นาที อัตราการป้อนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 25 มิลลิลิตรต่อ นาที และอัตราการป้อนแก๊สไนโตรเจน 75 มิลลิลิตรต่อ นาที ได้ผลการทดลองดังต่อไปนี้

1. ผลการวิเคราะห์ชนิดและปริมาณสารอนินทรีย์ (แร่) ในถ่านหิน

ตารางที่ 4.11 แสดงชนิดและปริมาณสารอนินทรีย์ (แร่) หลักในถ่านหินที่ไม่ผ่านการลดแร่และถ่านหินที่ผ่านการลดแร่ทั้ง 2 วิธี จะเห็นว่าการลดแร่โดยการแยกอนุภาคในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์นั้นสามารถลดปริมาณของอะลูมิเนียม ซิลิกอน โพแทสเซียม ไททานเนียม และเหล็กได้ ส่วนการลดแร่ด้วยกรดไฮโดรคลอริกสามารถลดปริมาณของแมกนีเซียม ฟอสเฟต ซัลเฟต แคลเซียม และเหล็ก ซึ่งให้ผลสอดคล้องกับผลการวิจัยของ Steel et al. (2001) ที่กล่าวไว้ว่ากรดไฮโดรคลอริกสามารถลดปริมาณแคลเซียม แมกนีเซียม เหล็กที่อยู่ในรูปของคาร์บอเนต ซัลเฟต ฟอสเฟต และโซเดียมได้ดี ส่วนอะลูมิเนียม โพแทสเซียม และไททานเนียมถูกลดได้บ้างเล็กน้อย แต่ไม่สามารถลดปริมาณของซิลิกอนได้

ตารางที่ 4.11 ชนิดและปริมาณสารอนินทรีย์ (เถ้า) หลักในถ่านหิน

ชนิดของสารอนินทรีย์	ปริมาณสารอนินทรีย์ในถ่านหินแม่เมาะ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)		
	ถ่านหินที่ไม่ผ่านการลดเถ้า	ถ่านหินที่ผ่านการลดเถ้าด้วยกรดไฮโดรคลอริก ความเข้มข้นร้อยละ 30 โดยปริมาตร	ถ่านดิบที่ผ่านการลดเถ้าโดยการแยกอนุภาคในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ ความหนาแน่น 1.4 กรัมต่อมิลลิลิตร
MgO	2.294	0.776	8.699
Al ₂ O ₃	17.877	24.514	11.046
SiO ₂	35.292	51.094	13.956
P ₂ O ₅	0.454	-	1.055
SO ₃	13.526	1.312	25.108
K ₂ O	2.315	3.157	0.699
CaO	9.627	1.210	21.289
TiO ₂	0.454	0.557	0.178
Fe ₂ O ₃	17.277	16.565	16.836

2. ผลการวิเคราะห์แบบประมาณของถ่านหินและถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการลดเถ้า

ตารางที่ 4.12 แสดงผลการวิเคราะห์แบบประมาณของถ่านหินและถ่านกัมมันต์ภายใต้สภาวะการเตรียมต่างๆ พบว่าวิธีการลดปริมาณเถ้าของถ่านหินทั้ง 2 วิธี สามารถลดปริมาณเถ้าของถ่านหินได้สูงสุดประมาณร้อยละ 60 ส่งผลให้ปริมาณคาร์บอนคงตัวมีค่าเพิ่มมากขึ้น วิธีการลดปริมาณเถ้าของถ่านหินโดยวิธีการล้างด้วยกรดไฮโดรคลอริกสามารถลดปริมาณเถ้าได้มากขึ้นตามความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก แต่ร้อยละของน้ำหนักถ่านหินหลังการลดปริมาณเถ้ามีค่าค่อนข้างคงที่ ส่วนวิธีการลดปริมาณเถ้าในถ่านหินโดยการแยกอนุภาคในตัวกลางของเหลวโดยใช้สารละลายแคลเซียมคลอไรด์เป็นตัวกลางนั้น เมื่อความหนาแน่นของตัวกลางเพิ่มมากขึ้น ปริมาณเถ้าของถ่านหินที่ผ่านการลดเถ้าแล้วมีค่าค่อนข้างคงที่ แต่ร้อยละของน้ำหนักถ่านหินหลังการลดปริมาณเถ้ามีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วตามความหนาแน่นของตัวกลาง ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าวิธีการลดปริมาณเถ้าในถ่านหินทั้ง 2 วิธีสามารถลดปริมาณเถ้าในถ่านหินได้ ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกมีผลต่อความสามารถในการลดปริมาณเถ้าในถ่านหิน ส่วนความหนาแน่นของสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ไม่มีผลต่อความสามารถในการลดปริมาณเถ้าในถ่านหิน แต่มีผลอย่างมากต่อร้อยละของน้ำหนักถ่านหินหลังการลดปริมาณเถ้า เมื่อเปรียบเทียบถ่านหินที่ผ่านการลดเถ้ากับถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากถ่านหินที่ผ่านการลดเถ้าทั้ง 2 วิธี พบว่าถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากถ่านหินที่ผ่านการลดเถ้าด้วยกรดไฮโดรคลอริกมีปริมาณคาร์บอนคงตัวเพิ่มมากขึ้นแต่มีปริมาณสารระเหยลดลง ส่วนถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากถ่านหินที่ผ่านการลดเถ้าโดยการแยกอนุภาคในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์มีปริมาณคาร์บอนคงตัวค่อนข้างคงที่แต่มีปริมาณสารระเหยลดลงเช่นเดียวกัน

ตารางที่ 4.12 ผลการวิเคราะห์แบบประมาณของถ่านหินและถ่านกัมมันต์ที่ได้จากถ่านหินที่ผ่านและที่ไม่ผ่านการลดปริมาณเถ้าทั้ง 2 วิธี

ชนิดของตัวอย่าง	ร้อยละน้ำหนัก ถ่านหินหลัง การลดเถ้า	ร้อยละ ปริมาณ ความชื้น	ร้อยละ ปริมาณ สารระเหย	ร้อยละ ปริมาณเถ้า	ร้อยละปริมาณ คาร์บอนคงตัว
COAL	-	5	37	23	35
COAL10	83	6	31	13	50
COAL20	82	4	29	12	55
COAL30	82	5	30	9	56
COAL1.2	5	5	31	10	54
COAL1.3	17	8	30	9	52
COAL1.4	45	8	30	9	53
AC	-	3	11	23	63
AC30	-	1	15	19	65
AC1.4	-	5	16	24	54

หมายเหตุ COAL หมายถึง ถ่านหินที่ไม่ผ่านการลดเถ้า

ตัวเลข 10 20 และ 30 หมายถึง การลดเถ้าด้วยกรดไฮโดรคลอริก ความเข้มข้นร้อยละ 10 20 และ 30 โดยปริมาตร

ตัวเลข 1.2 1.3 และ 1.4 หมายถึง การลดเถ้าโดยการแยกอนุภาคในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ที่ความหนาแน่น 1.2 1.3 และ 1.4 กรัมต่อมิลลิลิตร

AC หมายถึง ถ่านกัมมันต์จากถ่านหินที่ไม่ผ่านการลดเถ้า

AC30 หมายถึง ถ่านกัมมันต์จากถ่านหินที่ผ่านการลดเถ้าด้วยกรดไฮโดรคลอริก ความเข้มข้นร้อยละ 30 โดยปริมาตร

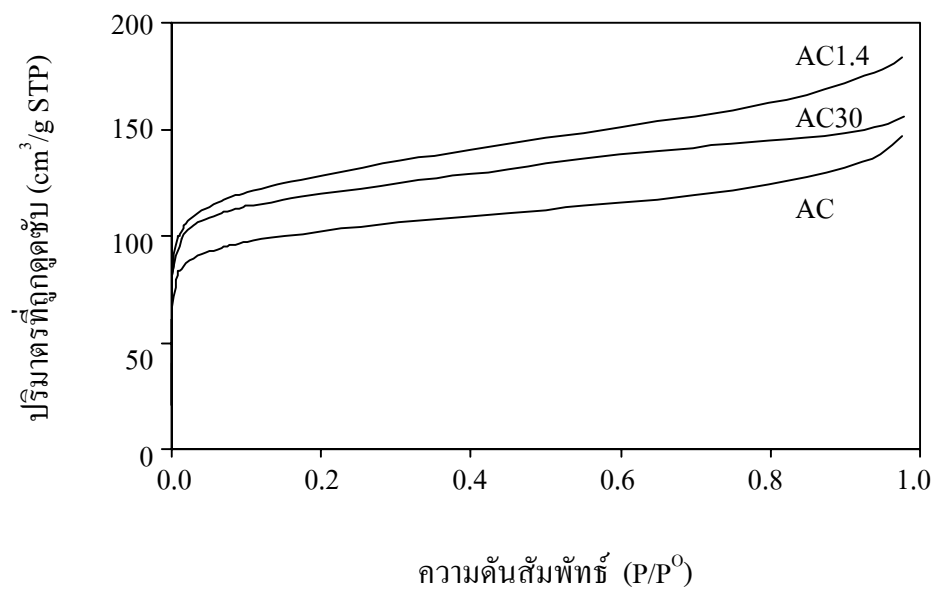
AC1.4 หมายถึง ถ่านกัมมันต์จากถ่านหินที่ผ่านการลดเถ้าโดยการแยกอนุภาคในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ที่ความหนาแน่น 1.4 กรัมต่อมิลลิลิตร

3. เส้นไอโซเทอมการดูดซับของถ่านกัมมันต์จากถ่านหินที่ไม่ผ่านการลดเถ้าและจากถ่านหินที่ผ่านการลดเถ้า

รูปที่ 4.25 แสดงตัวอย่างลักษณะเส้นไอโซเทอมการดูดซับแก๊สในโตรเจนบนถ่านกัมมันต์จากถ่านหินที่ไม่ผ่านการลดเถ้าและจากถ่านหินที่ผ่านการลดเถ้าทั้ง 2 วิธี ที่อุณหภูมิการดูดซับ -196°C พบว่าเส้นไอโซเทอมการดูดซับของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ภายใต้สภาวะการเตรียมต่างๆ เป็นแบบชนิดที่ 1 (Type I) แสดงว่าถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้มีลักษณะรูพรุนขนาดเล็กเป็นส่วนใหญ่ และถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากถ่านหินที่ผ่านการลดเถ้าโดยวิธีการแยกอนุภาคในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์มีความสามารถในการดูดซับมากกว่าถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากถ่านหินที่ผ่านการลดเถ้าโดยวิธีการล้างกรดไฮโดรคลอริก และถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากถ่านหินที่ไม่ผ่านการลดเถ้าตามลำดับ

4. สมบัติของถ่านกัมมันต์จากถ่านหินที่ไม่ผ่านการลดเถ้าและจากถ่านหินที่ผ่านการลดเถ้า

ตารางที่ 4.13 แสดงผลการกระตุ้นและสมบัติของถ่านกัมมันต์ จะเห็นว่าร้อยละน้ำหนักที่หายไปทั้งหมดของถ่านกัมมันต์จากถ่านหินที่ไม่ผ่านการลดเถ้าและของถ่านกัมมันต์จากถ่านหินที่ผ่านการลดเถ้าโดยการแยกอนุภาคในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์มีค่าใกล้เคียงกัน และมีค่ามากกว่าของถ่านกัมมันต์จากถ่านหินที่ผ่านการลดเถ้าด้วยกรดไฮโดรคลอริก รูปที่ 4.26 และ 4.27 แสดงพื้นที่ผิวจำเพาะ และปริมาตรรูพรุนของถ่านกัมมันต์จากถ่านหินที่ไม่ผ่านการลดเถ้าและจากถ่านหินที่ผ่านการลดเถ้าทั้ง 2 วิธี พบว่าถ่านกัมมันต์จากถ่านหินผ่านการลดเถ้าทั้ง 2 วิธีภายใต้สภาวะต่างๆ มีพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนขนาดเล็กมากกว่าถ่านกัมมันต์จากถ่านหินที่ไม่ผ่านการลดเถ้า ถ่านกัมมันต์จากถ่านหินผ่านการลดเถ้าโดยวิธีการล้างด้วยกรดไฮโดรคลอริกมีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะสูงขึ้นตามความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรคลอริก แต่ปริมาตรรูพรุนขนาดเล็กมีค่าไม่เปลี่ยนแปลงตามความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรคลอริก โดยถ่านกัมมันต์จากถ่านหินที่ผ่านการลดเถ้าโดยวิธีการล้างด้วยกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้นร้อยละ 30 โดยปริมาตร มีพื้นที่ผิวจำเพาะมากที่สุดโดยมีค่าประมาณ 429 ตารางเมตรต่อกรัม ถ่านกัมมันต์จากถ่านหินที่ผ่านการลดเถ้าโดยวิธีการแยกอนุภาคในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ มีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนขนาดเล็กสูงขึ้นตามความหนาแน่นของสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ โดยถ่านกัมมันต์จากถ่านหินที่ผ่านการลดเถ้าโดยการแยกอนุภาคในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ความหนาแน่น 1.4 กรัมต่อมิลลิลิตร มีพื้นที่ผิวจำเพาะมากที่สุดโดยมีค่าประมาณ 460 ตารางเมตรต่อกรัม สรุปได้ว่าปริมาณเถ้าในถ่านหินมีผลต่อการเกิดรูพรุนของถ่านกัมมันต์



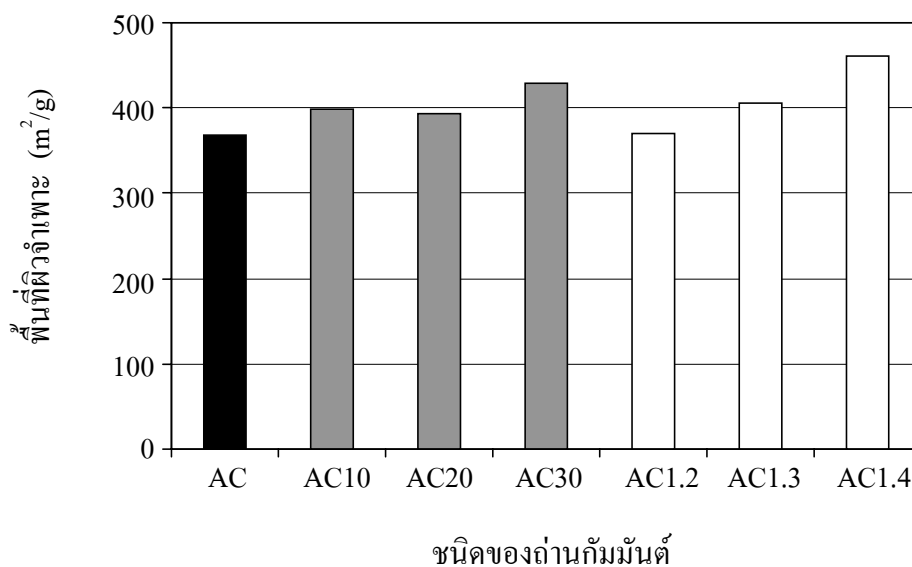
รูปที่ 4.25 เส้นไอโซเทอมการดูดซับของถ่านกัมมันต์ (ขนาด 20×30 mesh ที่สภาวะการคาร์บอนไนซ์ : 700°C 40 นาที 20°Cต่อนาที และสภาวะการกระตุ้น : 800°C 60นาที 20°Cต่อนาที 25%CO₂ + 75%N₂)

ตารางที่ 4.13 ผลการกระตุ้นและสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากถ่านหินที่ผ่านและไม่ผ่านการลดปริมาณ
เถ้าทั้ง 2 วิธี

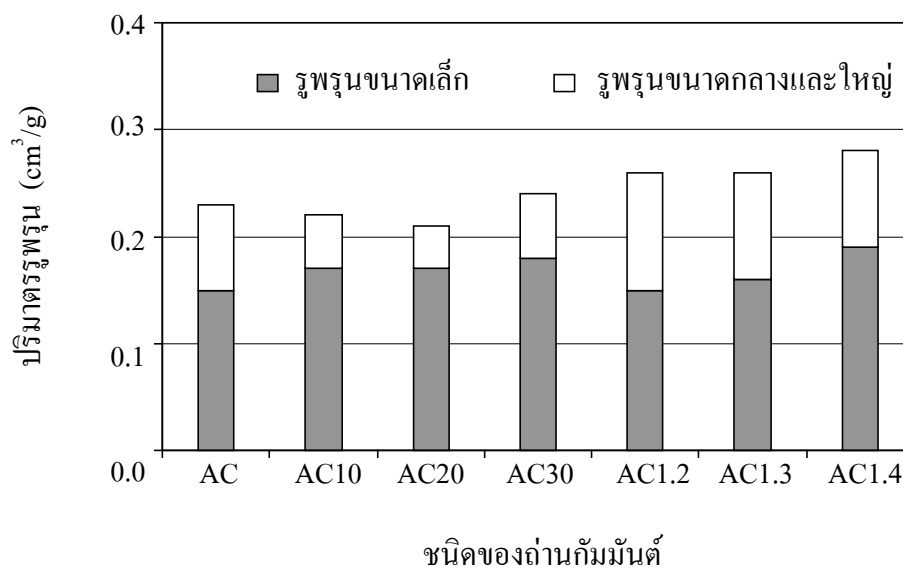
ชนิดของ ถ่านกัมมันต์	ร้อยละ น้ำหนัก ที่หายไป ในช่วงการ กระตุ้น	ร้อยละ น้ำหนัก ที่หายไป ทั้งหมด	พื้นที่ผิว จำเพาะ แบบBET (m ² /g)	ปริมาตร รูพรุน ขนาดเล็ก (cm ³ /g)	ปริมาตร รูพรุนขนาด กลางและใหญ่ (cm ³ /g)	ปริมาตร รูพรุน ทั้งหมด (cm ³ /g)	ขนาด รูพรุน เฉลี่ย (nm)
AC	26	59	368	0.15 (66%)	0.08 (34%)	0.23	2.46
AC10	11	48	398	0.17 (77%)	0.05 (23%)	0.22	2.20
AC20	9	46	393	0.17 (81%)	0.04 (19%)	0.21	2.11
AC30	19	53	429	0.19 (75%)	0.06 (25%)	0.24	2.25
AC1.2	30	60	370	0.17 (58%)	0.11 (42%)	0.26	2.88
AC1.3	29	58	406	0.19 (62%)	0.10 (38%)	0.26	2.59
AC1.4	27	57	460	0.21 (68%)	0.09 (32%)	0.28	2.47

5. ลักษณะพื้นผิวจากภาพถ่าย SEM

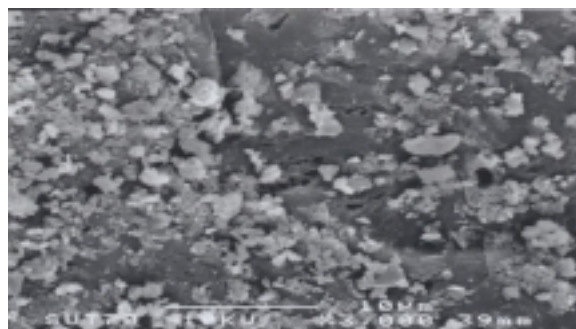
รูปที่ 4.28 แสดงตัวอย่างลักษณะพื้นผิวของอนุภาคถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ภายใต้สภาวะต่างๆ โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่าถ่านกัมมันต์ทั้ง 3 ชนิดซึ่งได้แก่ ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากถ่านหินที่ไม่ผ่านการลดเถ้า ถ่านกัมมันต์จากถ่านหินที่ผ่านการลดเถ้าด้วยกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้นร้อยละ 30 โดยปริมาตร และถ่านกัมมันต์จากถ่านหินที่ผ่านการลดเถ้าโดยการแยกอนุภาคในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ความหนาแน่น 1.4 กรัมต่อมิลลิลิตร มีรูพรุนขนาดเล็กกระจายอยู่ทั่วไปบนพื้นผิว



รูปที่ 4.26 ผลของการลดเถ้าในถ่านหินต่อพื้นที่ผิวจำเพาะของถ่านกัมมันต์ (ขนาดอนุภาค 20×30 mesh ที่สภาวะการคาร์บอนไนซ์ : 700°C 40 นาที 20°C ต่อ นาที และสภาวะการกระตุ้น : 800°C 60 นาที 20°C ต่อ นาที 25%CO₂+75%N₂)

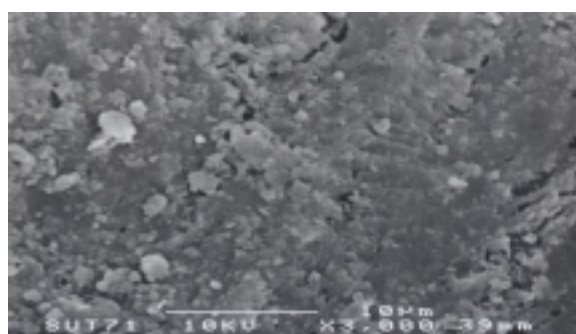


รูปที่ 4.27 ผลของการลดเถ้าในถ่านหินต่อปริมาตรรูพรุนของถ่านกัมมันต์ (ขนาดอนุภาค 20×30 mesh ที่สภาวะการคาร์บอนไนซ์ : 700°C 40 นาที 20°C ต่อ นาที และสภาวะการกระตุ้น : 800°C 60 นาที 20°C ต่อ นาที 25%CO₂+75%N₂)



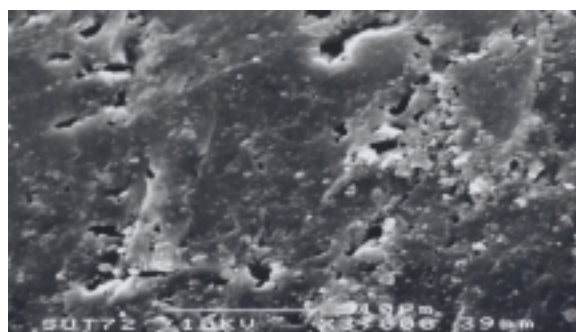
AC

(ก)



AC1.4

(ข)



AC30

(ค)

รูปที่ 4.28 ภาพถ่าย SEM ที่กำลังขยาย 3000 เท่า แสดงลักษณะพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ที่สภาวะการคาร์บอนไนซ์ : 700°C 40 นาที 20°C ต่อ นาที และที่สภาวะการกระตุ้น : 800°C 60 นาที 20°C ต่อ นาที $25\%\text{CO}_2 + 75\%\text{N}_2$ (ก) ถ่านกัมมันต์จากถ่านหินไม่ผ่านการลดเถ้า (ข) ถ่านกัมมันต์จากถ่านหินที่ผ่านการลดเถ้าโดยการแยกอนุภาคในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ความหนาแน่น 1.4 กรัมต่อมิลลิลิตร (ค) ถ่านกัมมันต์จากถ่านหินที่ผ่านการลดเถ้าด้วยกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้นร้อยละ 30 โดยปริมาตร

4.3 การเตรียมถ่านกัมมันต์โดยวิธีการกระตุ้นทางเคมี

การกระตุ้นทางเคมีเป็นการเตรียมถ่านกัมมันต์แบบขั้นตอนเดียว คือ การคาร์บอนในซ้่วัตถุดิบที่ผสมกับสารเคมีที่ใช้เป็นสารกระตุ้น สำหรับงานวิจัยนี้ใช้ถ่านหินแม่เมาะขนาดอนุภาค 0.60 – 0.85 มิลลิเมตร (20×30 mesh) เป็นวัตถุดิบ และใช้สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นสารกระตุ้น โดยศึกษาผลของตัวแปรอุณหภูมิในช่วง 600 – 900 °C ที่เวลาการกระตุ้น 60 และ 120 นาที อัตราส่วนระหว่างสารกระตุ้นต่อวัตถุดิบเท่ากับ 0.5ต่อ1.0 และ 1.0ต่อ1.0 ภายใต้สภาวะการเตรียมที่อัตราการเพิ่มความร้อน 20 °C ต่อ นาที อัตราการป้อนแก๊สไนโตรเจน 100 มิลลิตรต่อ นาที ได้ผลการทดลองดังรายละเอียดต่อไปนี้

1. ผลการวิเคราะห์แบบประมาณ

ตารางที่ 4.14 แสดงตัวอย่างผลการวิเคราะห์แบบประมาณของถ่านหินและถ่านกัมมันต์ภายใต้สภาวะการเตรียมต่างๆ พบว่าเมื่อเทียบกับถ่านหิน ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ทุกสภาวะมีปริมาณคาร์บอนคงตัวเพิ่มขึ้น แต่มีปริมาณสารระเหยและปริมาณเถ้าลดลงอย่างมาก ที่สภาวะเวลาและอัตราส่วนระหว่างสารกระตุ้นต่อวัตถุดิบคงที่ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้มีปริมาณคาร์บอนคงตัวสูงขึ้น โดยถ่านกัมมันต์ที่เตรียมที่สภาวะอุณหภูมิ 800 °C เวลา 60 นาที อัตราส่วนระหว่างสารกระตุ้นต่อวัตถุดิบเท่ากับ 1.0ต่อ1.0 มีปริมาณคาร์บอนคงตัวสูงสุดเท่ากับร้อยละ 81 โดยน้ำหนัก ส่วนปริมาณสารระเหยของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ภายใต้สภาวะต่างๆ มีค่าตั้งแต่ร้อยละ 14 ถึง ร้อยละ 35 โดยน้ำหนัก เมื่อเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จากถ่านหินของงานวิจัยนี้กับถ่านกัมมันต์ทางการค้าซึ่งเตรียมจากกะลามะพร้าว พบว่ามีปริมาณคาร์บอนคงตัวและปริมาณสารระเหยต่างกันมากเนื่องมาจากความแตกต่างในธรรมชาติของโครงสร้างทางเคมีและทางกายภาพของถ่านหินและกะลามะพร้าวที่ใช้เตรียมถ่านกัมมันต์ ส่วนปริมาณเถ้าของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้มีค่าต่ำและมีค่าใกล้เคียงกับถ่านกัมมันต์ทางการค้า ทั้งนี้เนื่องจากโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้เป็นสารกระตุ้นสามารถทำลายโครงสร้างถ่านหินบางส่วนและลดปริมาณสารอนินทรีย์ในถ่านหิน (Lojja, 1999)

ตารางที่ 4.14 ผลการวิเคราะห์แบบประมาณของถ่านหินและถ่านกัมมันต์

สภาวะการกระตุ้น			ร้อยละ	ร้อยละ	ร้อยละ	ร้อยละ
อุณหภูมิ (°C)	เวลา (นาท)	KOH : ถ่านหิน	ปริมาณ ความชื้น	ปริมาณ สารระเหย	ปริมาณ เถ้า	ปริมาณ คาร์บอนคงตัว
600	60	0.5 : 1.0	4	33	5	58
800	60	0.5 : 1.0	8	14	4	74
600	60	1.0 : 1.0	5	31	2	62
700	60	1.0 : 1.0	1	22	1	76
800	60	1.0 : 1.0	1	17	1	81
600	120	1.0 : 1.0	9	35	2	54
800	120	1.0 : 1.0	12	16	2	70
ถ่านหินแม่เมาะ			5	37	23	35
ถ่านกัมมันต์ทางการค้า			4	6	2	88

2. เส้นไอโซเทอมการดูดซับของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้

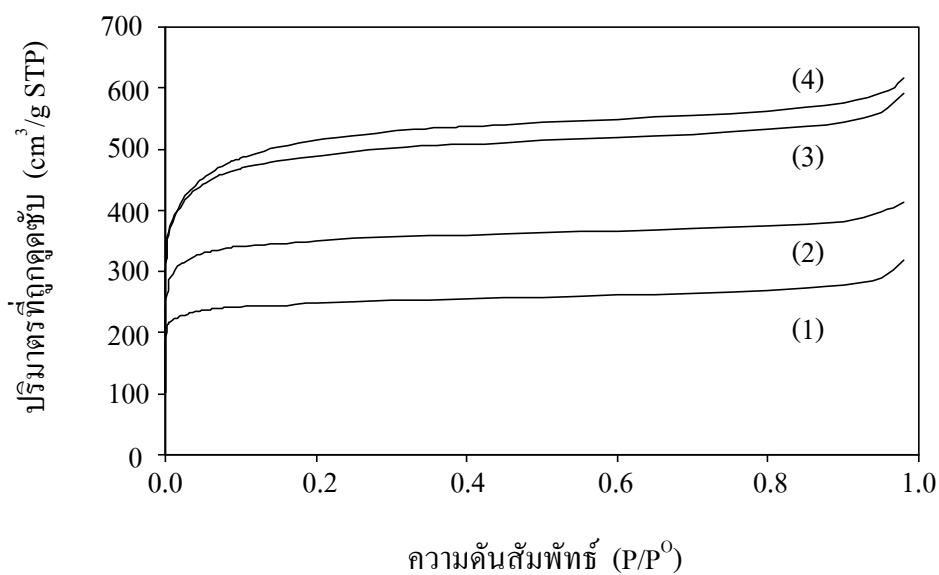
รูปที่ 4.29 แสดงตัวอย่างลักษณะเส้น ไอโซเทอมการดูดซับแก๊สใน โตรเจนบนถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ที่อุณหภูมิการดูดซับ -196°C พบว่าเส้นไอโซเทอมการดูดซับของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ภายใต้สภาวะการเตรียมต่างๆ เป็นแบบชนิดที่ 1 (Type I) แสดงว่าถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากถ่านหินโดยวิธีการกระตุ้นทางเคมี มีลักษณะรูพรุนขนาดเล็กเป็นส่วนใหญ่ ที่สภาวะการเตรียมที่เวลาและอัตราส่วนระหว่างสารกระตุ้นต่อวัตถุดิบคงที่ การกระตุ้นที่อุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้ถ่านกัมมันต์ที่ได้มีความสามารถในการดูดซับสูงขึ้น (รูปที่ 4.29(1) และ 4.29(3)) ที่สภาวะการกระตุ้นที่อุณหภูมิและอัตราส่วนระหว่างสารกระตุ้นต่อวัตถุดิบคงที่ การกระตุ้นที่เวลานานขึ้นจะทำให้ถ่านกัมมันต์ที่ได้มีความสามารถในการดูดซับสูงขึ้น (รูปที่ 4.29(3) และ 4.29(4)) ที่สภาวะการกระตุ้นที่อุณหภูมิและเวลาคงที่ การใช้อัตราส่วนระหว่างสารกระตุ้นต่อวัตถุดิบมากขึ้นจะทำให้ถ่านกัมมันต์ที่ได้มีความสามารถในการดูดซับสูงขึ้น (รูปที่ 4.29(2) และ 4.29(3))

3. ผลของอุณหภูมิที่มีต่อสมบัติของถ่านกัมมันต์

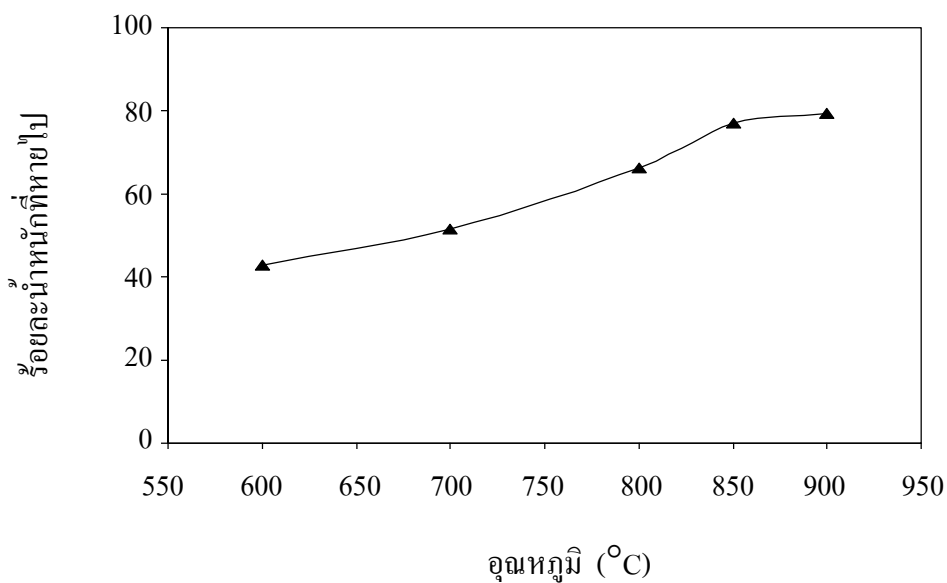
จากตารางที่ 4.15 และรูปที่ 4.30 ถึง 4.32 แสดงผลของอุณหภูมิที่มีต่อสมบัติต่างๆ ของถ่านกัมมันต์ภายใต้สภาวะการเตรียมที่อุณหภูมิและอัตราส่วนระหว่างสารกระตุ้นต่อวัตถุดิบคงที่ พบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น ค่าร้อยละน้ำหนักที่หายไป ค่าการดูดซับไอโอดีน พื้นที่ผิวจำเพาะ และปริมาตรรูพรุนต่างๆ ของถ่านกัมมันต์มีแนวโน้มสูงขึ้น เนื่องจากการคาร์บอนไนซ์ทำให้เกิดการสลายตัวของอินทรีย์วัตถุในถ่านหินในรูปของแก๊สและของเหลว ดังนั้นเมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการคาร์บอนไนซ์เพิ่มขึ้นปริมาณการสลายตัวของอินทรีย์วัตถุและปฏิกิริยาเคมีเกิดมากขึ้น ทำให้ถ่านกัมมันต์มีรูพรุนมากขึ้นด้วย แต่อย่างไรก็ดีขนาดรูพรุนเฉลี่ยของถ่านกัมมันต์มีค่าใกล้เคียงกันอยู่ในช่วงประมาณ 2.0 – 2.3 นาโนเมตร ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าที่อุณหภูมิสูงมีผลทำให้ร้อยละน้ำหนักที่หายไป พื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนของถ่านกัมมันต์มีค่ามากขึ้น

ตารางที่ 4.15 ผลการกระตุ้นและสมบัติของถ่านกัมมันต์

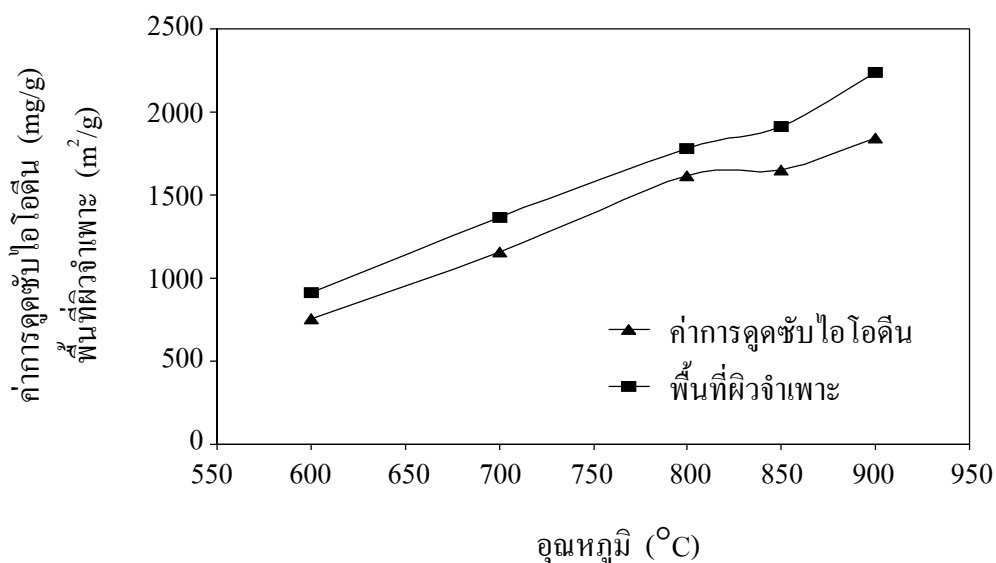
สภาวะการกระตุ้น			ร้อยละ น้ำหนักร ที่หายไป	ค่าการ ดูดซับ ไอโอดีน (mg/g)	พื้นที่ผิว จำเพาะ แบบBET (m ² /g)	ปริมาตร รูพรุน ขนาดเล็ก (cm ³ /g)	ปริมาตร รูพรุนขนาด กลางและใหญ่ (cm ³ /g)	ปริมาตร รูพรุน ทั้งหมด (cm ³ /g)	ขนาด รูพรุน เฉลี่ย (nm)
อุณหภูมิ (°C)	เวลา (นาท)	KOH: ถ่าน หิน							
600	60	0.5:1.0	45	494	691	0.29 (76%)	0.10 (24%)	0.38	2.22
700	60	0.5:1.0	48	906	1041	0.43 (80%)	0.11 (21%)	0.54	2.07
800	60	0.5:1.0	55	1226	1286	0.53 (83%)	0.11 (17%)	0.64	2.00
600	60	1.0:1.0	43	754	910	0.38 (78%)	0.11 (22%)	0.49	2.17
700	60	1.0:1.0	52	1157	1368	0.57 (83%)	0.12 (17%)	0.69	2.02
800	60	1.0:1.0	66	1616	1781	0.72 (79%)	0.19 (21%)	0.91	2.05
850	60	1.0:1.0	77	1654	1912	0.74 (75%)	0.25 (25%)	0.99	2.08
900	60	1.0:1.0	79	1842	2236	0.84 (65%)	0.46 (35%)	1.30	2.33
600	120	1.0:1.0	54	799	917	0.38 (76%)	0.12 (24%)	0.50	2.18
700	120	1.0:1.0	61	1263	1349	0.56 (82%)	0.12 (18%)	0.68	2.01
800	120	1.0:1.0	73	1699	1856	0.73 (77%)	0.22 (23%)	0.95	2.05
ถ่านกัมมันต์ทางการค้า				1090	1197	0.48 (87%)	0.07 (13%)	0.55	1.83



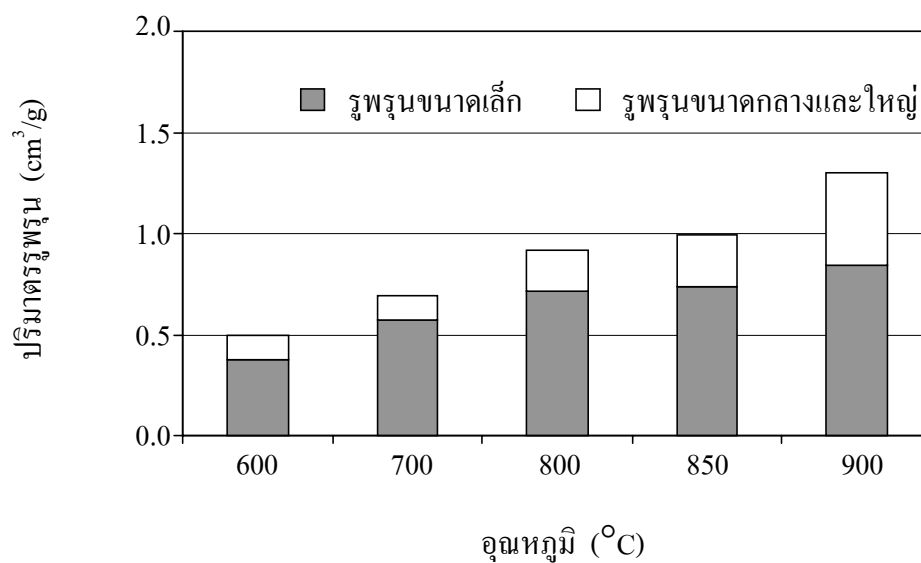
รูปที่ 4.29 เส้นไอโซเทอมการดูดซับของถ่านกัมมันต์จากถ่านหินแม่เมาะขนาดอนุภาค 20×30 mesh โดยวิธีการกระตุ้นทางเคมี : (1) 600°C 60 นาที 1.0:1.0 (2) 800°C 60 นาที 0.5:1.0 (3) 800°C 60 นาที 1.0:1.0 (4) 800°C 120 นาที 1.0:1.0



รูปที่ 4.30 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อร้อยละน้ำหนักที่หายไปของถ่านกัมมันต์จากถ่านหินแม่เมาะขนาดอนุภาค 20×30 mesh โดยวิธีการกระตุ้นทางเคมี ที่สภาวะ : 60 นาที 1.0:1.0 (KOH:ถ่านหิน)



รูปที่ 4.31 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อค่าการดูดซับไอโอดีนและพื้นที่ผิวจำเพาะของถ่านกัมมันต์จากถ่านหินแม่เมาะขนาดอนุภาค 20×30 mesh โดยวิธีการกระตุ้นทางเคมี ที่สภาวะ : 60 นาที 1.0:1.0 (KOH:ถ่านหิน)



รูปที่ 4.32 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อปริมาณรูพรุนต่างๆของถ่านกัมมันต์จากถ่านหินแม่เมาะขนาดอนุภาค 20×30 mesh โดยวิธีการกระตุ้นทางเคมี ที่สภาวะ : 60 นาที 1.0:1.0 (KOH:ถ่านหิน)

4. ผลของเวลาที่มีต่อสมบัติของถ่านกัมมันต์

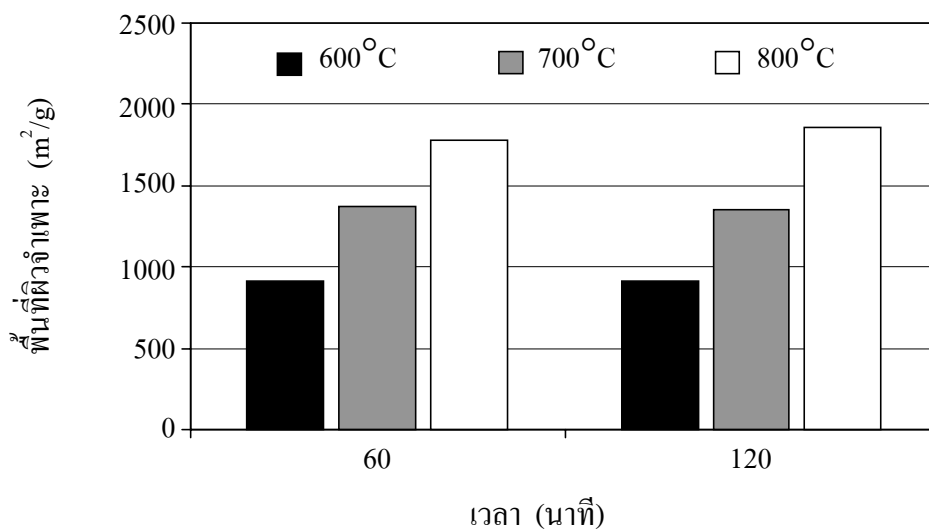
จากตารางที่ 4.15 และรูปที่ 4.33 ถึง 4.34 แสดงผลของเวลาที่มีต่อสมบัติต่างๆของถ่านกัมมันต์ภายใต้สภาวะการเตรียมที่อุณหภูมิและอัตราส่วนระหว่างสารกระตุ้นต่อวัตถุดิบคงที่ พบว่าเมื่อเวลานานขึ้น ค่าร้อยละน้ำหนักที่หายไปของถ่านกัมมันต์มีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนค่าการดูดซับไอโอดีนพื้นที่ผิวจำเพาะ และปริมาตรรูพรุนต่างๆมีค่าไม่เปลี่ยนแปลง ยกเว้นที่อุณหภูมิ 800°C มีแนวโน้มสูงขึ้นเล็กน้อย อธิบายได้ด้วยเหตุผลเช่นเดียวกันกับผลของอุณหภูมิ ส่วนขนาดรูพรุนเฉลี่ยของถ่านกัมมันต์มีค่าใกล้เคียงกันอยู่ในช่วงประมาณ 2.0 – 2.2 นาโนเมตร ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าสภาวะที่อุณหภูมิสูงเวลามีผลต่อพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนของถ่านกัมมันต์

5. ผลของอัตราส่วนระหว่างสารกระตุ้นต่อวัตถุดิบ

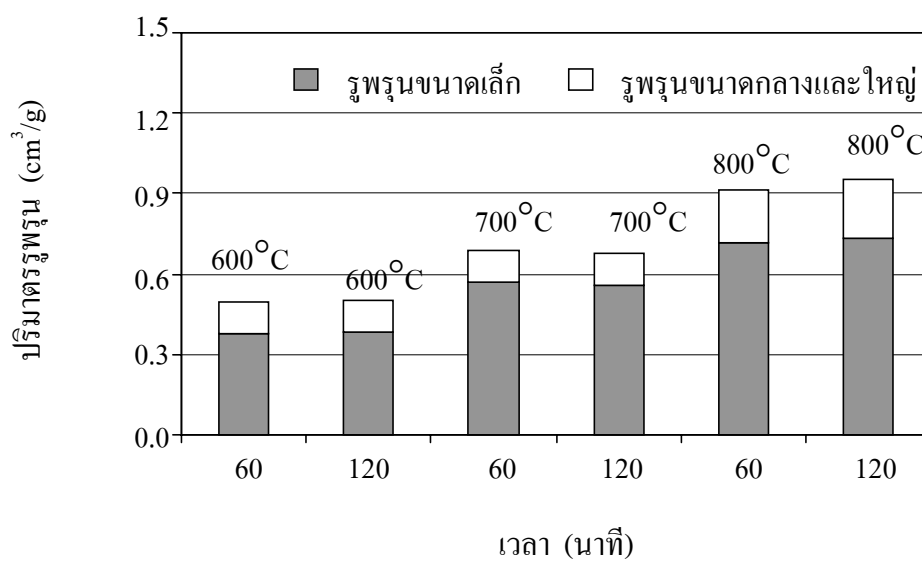
จากตารางที่ 4.15 และรูปที่ 4.35 ถึง 4.36 แสดงผลของอัตราส่วนระหว่างสารกระตุ้นต่อวัตถุดิบที่มีต่อสมบัติต่างๆของถ่านกัมมันต์ภายใต้สภาวะการเตรียมที่อุณหภูมิและเวลาคงที่ พบว่าเมื่ออัตราส่วนระหว่างสารกระตุ้นต่อวัตถุดิบมากขึ้น ค่าร้อยละน้ำหนักที่หายไปของถ่านกัมมันต์มีค่าไม่เปลี่ยนแปลงที่อุณหภูมิ 600°C แต่มีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นจาก $700 - 800^{\circ}\text{C}$ ส่วนค่าการดูดซับไอโอดีน พื้นที่ผิวจำเพาะ และปริมาตรรูพรุนต่างๆของถ่านกัมมันต์มีค่าเพิ่มมากขึ้นสำหรับทุกๆอุณหภูมิ และขนาดรูพรุนเฉลี่ยของถ่านกัมมันต์มีค่าใกล้เคียงกันอยู่ในช่วงประมาณ 2.0 – 2.2 นาโนเมตร ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าอัตราส่วนระหว่างสารกระตุ้นต่อวัตถุดิบมากขึ้น ทำให้พื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนของถ่านกัมมันต์มีค่ามากขึ้นด้วย

6. ลักษณะพื้นผิวจากภาพถ่าย SEM

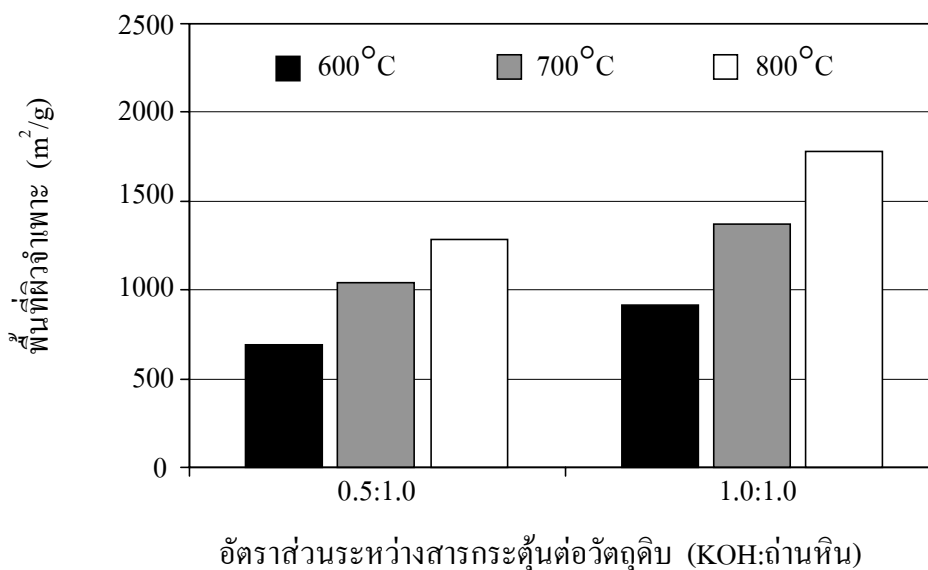
รูปที่ 4.37 และ 4.38 แสดงตัวอย่างลักษณะพื้นผิวของอนุภาคถ่านหิน และถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ภายใต้สภาวะต่างๆ โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่าเมื่อผ่านการกระตุ้นแล้ว ถ่านกัมมันต์มีรูพรุนขนาดเล็กกระจายอยู่ทั่วไปบนพื้นผิว ซึ่งเห็นได้อย่างชัดเจนกับถ่านกัมมันต์เตรียมที่อัตราส่วนระหว่างสารกระตุ้นต่อวัตถุดิบมาก (1.0ต่อ1.0) ภายใต้ทุกสภาวะ นอกจากนี้ยังพบรูพรุนขนาดใหญ่ซึ่งเป็นทางผ่านของสารกระตุ้นเข้าสู่โครงสร้างภายในเพื่อทำปฏิกิริยากับเนื้อถ่านเกิดเป็นรูพรุนขนาดเล็กขึ้นภายในกระจายอยู่ทั่วไปบนพื้นผิวเช่นเดียวกัน



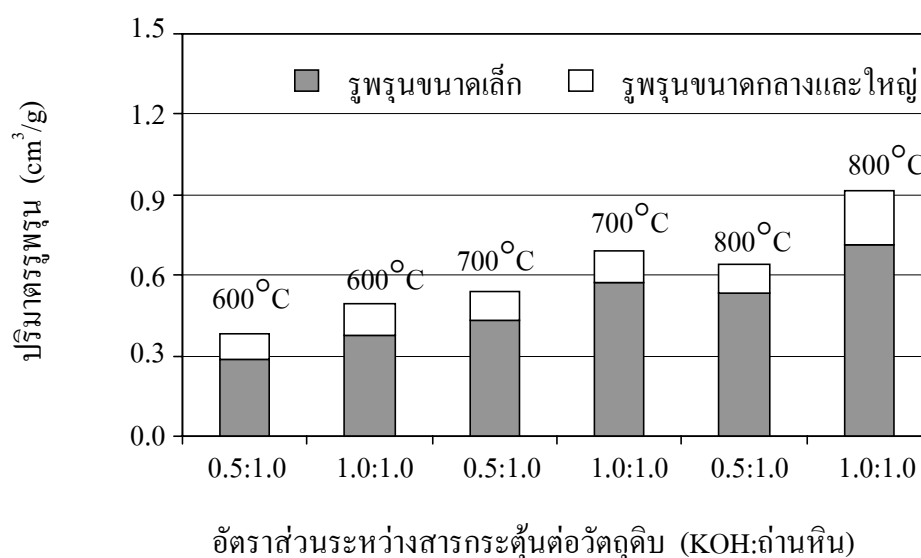
รูปที่ 4.33 ผลของเวลาที่มีต่อพื้นที่ผิวจำเพาะของถ่านกัมมันต์จากถ่านหินแม่เมาะขนาดอนุภาค 20×30 mesh โดยวิธีการกระตุ้นทางเคมี ที่สภาวะ : 600 – 800°C 1.0:1.0 (KOH:ถ่านหิน)



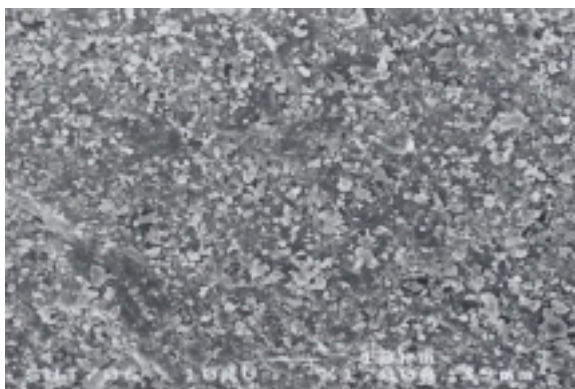
รูปที่ 4.34 ผลของเวลาที่มีต่อปริมาตรรูพรุนต่างๆของถ่านกัมมันต์จากถ่านหินแม่เมาะขนาดอนุภาค 20×30 mesh โดยวิธีการกระตุ้นทางเคมี ที่สภาวะ : 600 – 800°C 1.0:1.0 (KOH:ถ่านหิน)



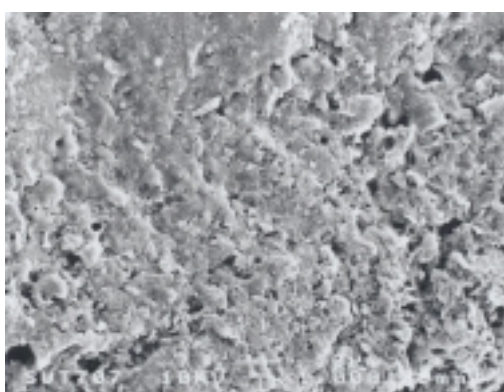
รูปที่ 4.35 ผลของอัตราส่วนระหว่างสารกระตุ้นต่อวัตถุดิบที่มีต่อพื้นที่ผิวจำเพาะของถ่านกัมมันต์ จากถ่านหินแม่เมาะขนาดอนุภาค 20×30 mesh โดยวิธีการกระตุ้นทางเคมี ที่สภาวะ : 600 – 800°C 60 นาที



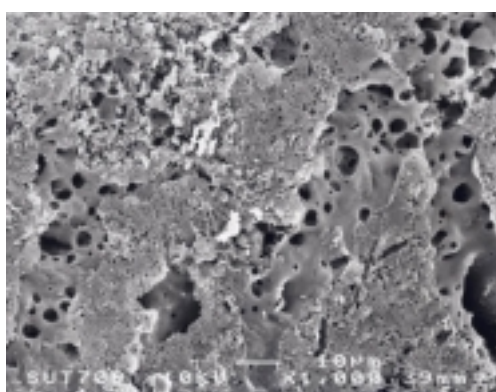
รูปที่ 4.36 ผลของอัตราส่วนระหว่างสารกระตุ้นต่อวัตถุดิบที่มีต่อปริมาตรรูพรุนต่างๆของถ่านกัมมันต์ จากถ่านหินแม่เมาะขนาดอนุภาค 20×30 mesh โดยวิธีการกระตุ้นทางเคมี ที่สภาวะ : 600 – 800°C 60 นาที



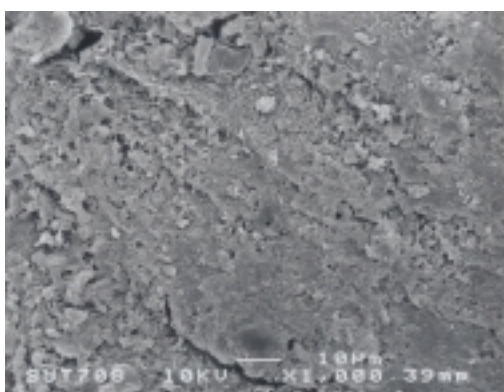
(ก) ถ่านหินดิบแม่เมาะ



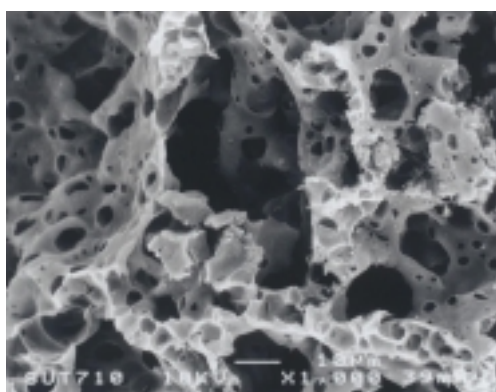
(ข) 600°C / 60 นาที / 0.5:1.0



(ค) 600°C / 60 นาที / 1.0:1.0

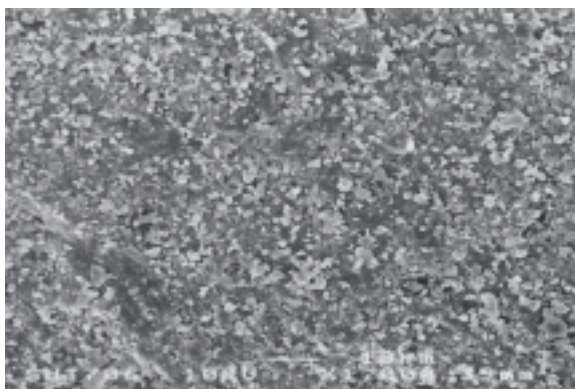


(ง) 800°C / 60 นาที / 0.5:1.0

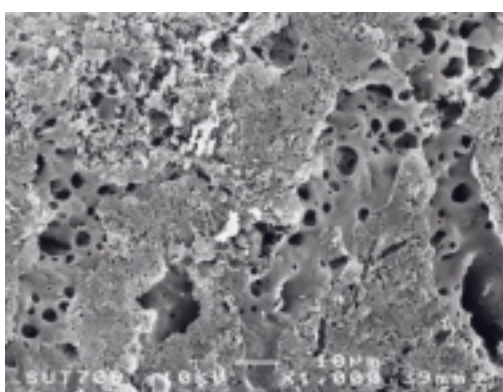


(จ) 800°C / 60 นาที / 1.0:1.0

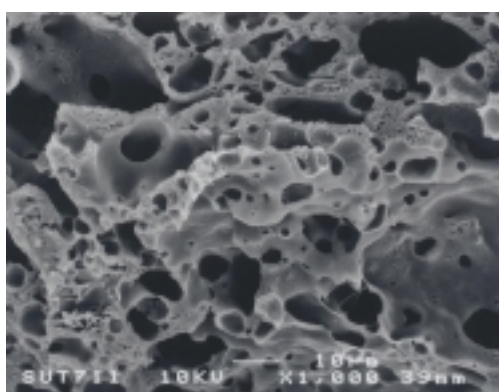
รูปที่ 4.37 ภาพถ่าย SEM ที่กำลังขยาย 1000 เท่า แสดงลักษณะพื้นผิวของถ่านกัมมันต์แม่เมาะขนาด 20×30 mesh (ผลของอุณหภูมิและอัตราส่วนระหว่างKOHต่อถ่านหิน)



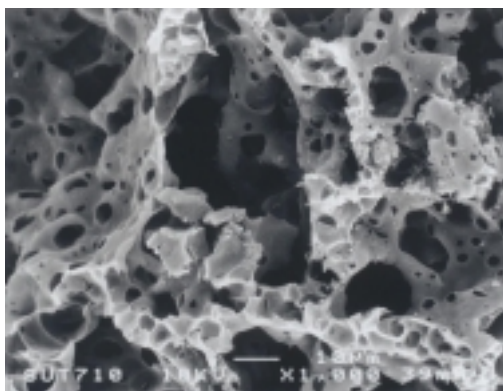
(ก) ถ่านหินดิบแม่เมาะ



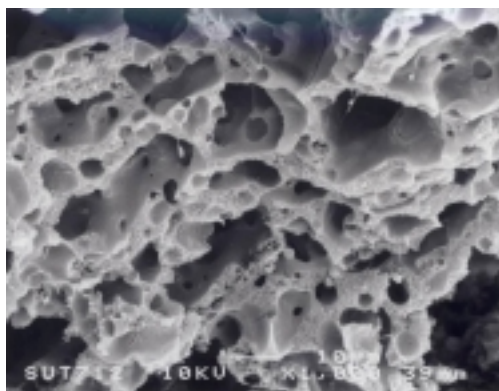
(ข) 600°C / 60 นาที / 1.0:1.0



(ค) 600°C / 120 นาที / 1.0:1.0



(ง) 800°C / 60 นาที / 1.0:1.0



(จ) 800°C / 120 นาที / 1.0:1.0

รูปที่ 4.38 ภาพถ่าย SEM ที่กำลังขยาย 1000 เท่า แสดงลักษณะพื้นผิวของถ่านกัมมันต์แม่เมาะขนาด 20×30 mesh (ผลของอุณหภูมิและเวลา)

7. การเปรียบเทียบสมบัติถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จากถ่านหินลิกไนต์ภายใต้สภาวะการเตรียมเกือบทุกสภาวะ (ยกเว้นที่สภาวะอัตราส่วนระหว่างสารกระตุ้นต่อวัตถุดิบเท่ากับ 0.5ต่อ1.0 อุณหภูมิ 600 – 700°C เวลา 60 นาที และอัตราส่วนระหว่างสารกระตุ้นต่อวัตถุดิบเท่ากับ 1.0ต่อ1.0 อุณหภูมิ 600°C เวลา 60 นาที) มีพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาณรูพรุนต่างๆมากกว่าถ่านกัมมันต์ทางการค้าที่เตรียมจากกะลามะพร้าวด้วยวิธีการกระตุ้นทางกายภาพโดยใช้ไอน้ำเป็นสารกระตุ้น สำหรับงานวิจัยนี้ถ่านกัมมันต์เตรียมที่อุณหภูมิ 900°C เวลา 60 นาที อัตราส่วนระหว่างสารกระตุ้นต่อวัตถุดิบเท่ากับ 1.0ต่อ1.0 มีพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาณรูพรุนรวมมากที่สุดเท่ากับ 2200 ตารางเมตรต่อกรัม และ 1.30 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม ตามลำดับ

จากข้อมูลในตารางที่ 4.15 พบว่าถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จากถ่านหินลิกไนต์ภายใต้สภาวะการเตรียมเกือบทุกสภาวะ (ยกเว้นที่สภาวะอัตราส่วนระหว่างสารกระตุ้นต่อวัตถุดิบเท่ากับ 0.5ต่อ1.0 อุณหภูมิ 600 – 700°C เวลา 60 นาที และอัตราส่วนระหว่างสารกระตุ้นต่อวัตถุดิบเท่ากับ 1.0ต่อ1.0 อุณหภูมิ 600°C เวลา 60 นาที) มีพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาณรูพรุนต่างๆมากกว่าถ่านกัมมันต์ทางการค้าที่เตรียมจากกะลามะพร้าวด้วยวิธีการกระตุ้นทางกายภาพโดยใช้ไอน้ำเป็นสารกระตุ้น สำหรับงานวิจัยนี้ถ่านกัมมันต์เตรียมที่อุณหภูมิ 900°C เวลา 60 นาที อัตราส่วนระหว่างสารกระตุ้นต่อวัตถุดิบเท่ากับ 1.0ต่อ1.0 มีพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาณรูพรุนรวมมากที่สุดเท่ากับ 2200 ตารางเมตรต่อกรัม และ 1.30 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม ตามลำดับ

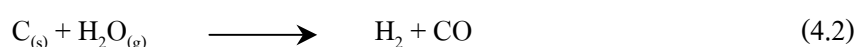
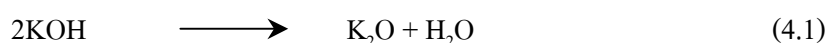
8. กลไกของการใช้ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นสารกระตุ้น

กลไกของการใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นสารกระตุ้น ซึ่งทำให้ได้ถ่านกัมมันต์มีพื้นที่ผิวสูงมาก เนื่องมาจากเกิดปรากฏการณ์หลายอย่างประกอบกัน ดังนี้

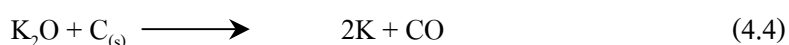
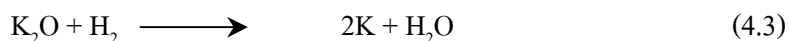
- 1) การคาร์บอนไนซ์ที่อุณหภูมิสูงทำให้โครงสร้างของถ่านหินสลายตัวทำให้เกิดรูพรุน
- 2) การมีโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ทำหน้าที่อีก 3 อย่างร่วมด้วยทำให้ได้รูพรุนและพื้นที่ผิวสูงมากขึ้นดังนี้

- ทำลายโครงสร้างถ่านหินบางส่วนและลดสารอนินทรีย์ในถ่านหินในขั้นตอนการแช่ในสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์และการคาร์บอนไนซ์ (Lojja, 1999)

- ที่อุณหภูมิสูงโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เกิดการสลายตัวให้น้ำซึ่งเป็นสารทำให้คาร์บอนในถ่านหินเกิดปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันขึ้น ดังสมการที่ 4.1 และ 4.2 ตามลำดับ



- ส่วนโพแทสเซียมออกไซด์ (K_2O) ถูกรีดิวซ์ด้วยไฮโดรเจนหรือคาร์บอนกลายเป็นโลหะโพแทสเซียม ดังสมการที่ 4.3 และ 4.4 ตามลำดับ



ที่อุณหภูมิสูงโพแทสเซียมเป็นโลหะที่อ่อนตัวจึงทำให้แทรกเข้าไปในชั้นของอะตอมคาร์บอน (graphene layer) ทำให้เกิดรูพรุนได้มากขึ้น (Li-Yeh et al., 2000 และ Otowa et al., 1993)

4.4 การดูดซับฟีนอลในสารละลายโดยใช้ถ่านกัมมันต์

เพื่อทดสอบความสามารถการดูดซับของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากถ่านหินโดยวิธีการกระตุ้นทางเคมีและทางกายภาพได้ใช้ฟีนอลเป็นตัวถูกดูดซับ งานวิจัยในส่วนนี้ได้แบ่งการศึกษาออกเป็นส่วนๆ ดังนี้

- 1) การสร้างกราฟมาตรฐานของสารละลายฟีนอล
- 2) การหาปริมาณถ่านกัมมันต์ที่เหมาะสม
- 3) การหาเวลาเข้าสู่สมดุลของการดูดซับ
- 4) การศึกษาผลของความเป็นกรด – เบสของสารละลายฟีนอล
- 5) การศึกษาผลของอุณหภูมิการดูดซับ โดยใช้ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมโดยวิธีการกระตุ้นทางเคมี นอกจากนี้ได้ทำการเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับสารละลายฟีนอลโดยใช้ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมโดยวิธีการกระตุ้นทางเคมีและทางกายภาพกับถ่านกัมมันต์ทางการค้า โดยถ่านกัมมันต์ทั้ง 3 ชนิดมีสมบัติต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 4.16

ตารางที่ 4.16 สมบัติของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จากถ่านหินลิกไนต์(แม่เมาะ) ขนาดอนุภาค 20×30 mesh และถ่านกัมมันต์ทางการค้าที่ใช้ในการดูดซับฟีนอลในสารละลาย

ชนิดของ ถ่านกัมมันต์	ค่าการ ดูดซับ ไอโอดีน (mg/g)	พื้นที่ผิว จำเพาะ แบบBET (m ² /g)	ปริมาตร รูพรุน ขนาดเล็ก (cm ³ /g)	ปริมาตร รูพรุนขนาดกลาง และขนาดใหญ่ (cm ³ /g)	ปริมาตร รูพรุน ทั้งหมด (cm ³ /g)	ขนาด รูพรุน เฉลี่ย (nm)
กระตุ้นโดยวิธี ทางเคมี*	1226	1286	0.53 (83%)	0.11 (17%)	0.64	2.00
กระตุ้นโดยวิธี ทางกายภาพ**	238	386	0.15 (65%)	0.08 (35%)	0.23	2.46
ทางการค้า***	1090	1197	0.48 (87%)	0.07 (13%)	0.55	1.83

หมายเหตุ * หมายถึง ถ่านกัมมันต์เตรียมที่สภาวะ 800°C 60นาที 0.5:1.0 (KOH:ถ่านหิน)

** หมายถึง ถ่านกัมมันต์เตรียมที่สภาวะการคาร์บอนซ์ 700°C 40นาที 20°Cต่อนาที และกระตุ้นที่สภาวะ 800°C 60นาที 20°Cต่อนาที 25%CO₂

*** หมายถึง ถ่านกัมมันต์ทางการค้าที่ผลิตจากกะลามะพร้าว โดยการกระตุ้นด้วยไอน้ำ

1. การสร้างกราฟมาตรฐานของสารละลายฟีนอล

การสร้างกราฟมาตรฐานของสารละลายฟีนอลมีวัตถุประสงค์เพื่อใช้เทียบหาความเข้มข้นของสารละลายฟีนอลที่สมดุลจากค่าการดูดกลืนแสงที่วัดได้ ทำโดยการวัดค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายฟีนอลในช่วงความเข้มข้น 0 – 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วยเครื่องUV/visible spectrophotometer ที่ค่าความยาวคลื่น 268.89 นาโนเมตร โดยใช้สารละลายฟีนอลความเข้มข้น 0 มิลลิกรัมต่อลิตร (น้ำกลั่น) เป็นสารละลายอ้างอิง รูปที่ 4.39 แสดงกราฟมาตรฐานของสารละลายฟีนอล เห็นได้ว่าการดูดกลืนแสงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของสารละลายฟีนอล โดยมีความสัมพันธ์เป็นสมการเส้นตรงดังสมการที่ 4.5

$$C = 66.359 \times \text{Abs} \quad (4.5)$$

โดยที่ C คือ ความเข้มข้นของสารละลายฟีนอล

Abs คือ ค่าการดูดกลืนแสง

จากความสัมพันธ์ดังสมการที่ 4.5 สามารถใช้คำนวณหาความเข้มข้นของสารละลายฟีนอลที่สมดุลได้ และสำหรับการคำนวณหาปริมาณฟีนอลที่ถูกดูดซับบนถ่านกัมมันต์ สามารถคำนวณหาได้จากสมการสมดุลมวลสาร ดังแสดงในสมการที่ 4.6

$$X = (C_i - C_e)V/m \quad (4.6)$$

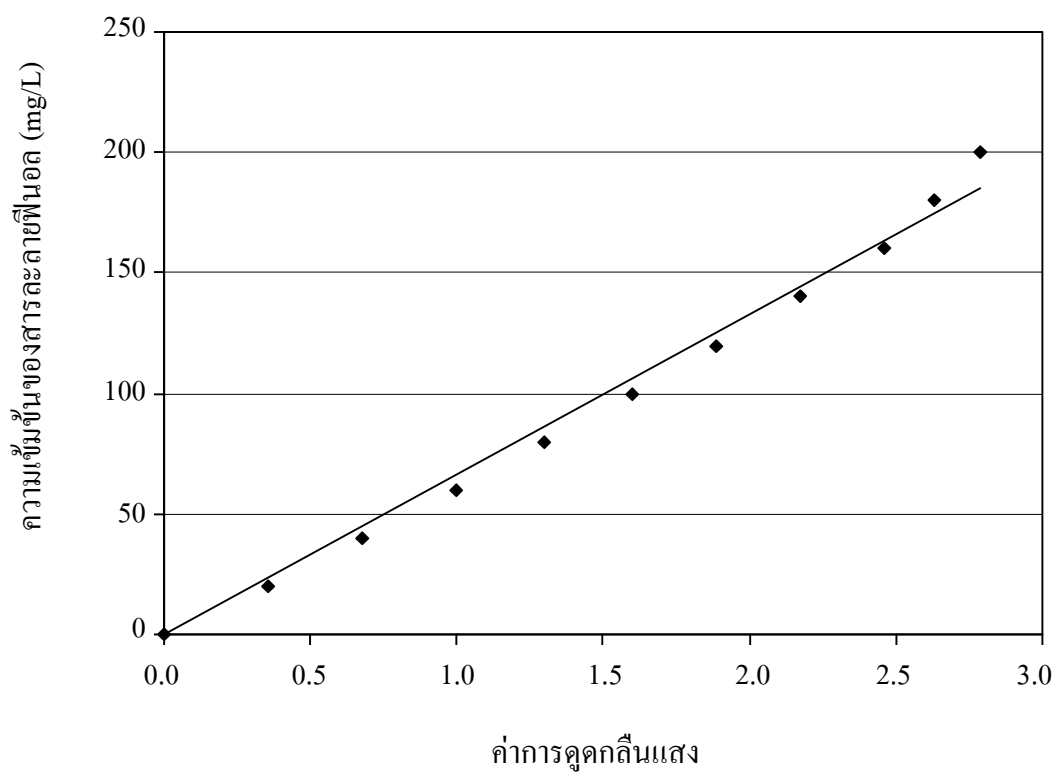
โดยที่ X คือ ปริมาณฟีนอลที่ถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของถ่านกัมมันต์ (มิลลิกรัมต่อกรัม)

C_i คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายฟีนอล (มิลลิกรัมต่อลิตร)

C_e คือ ความเข้มข้นที่สมดุลของสารละลายฟีนอล (มิลลิกรัมต่อลิตร)

V คือ ปริมาตรของสารละลายฟีนอล (มิลลิลิตร)

M คือ น้ำหนักของถ่านกัมมันต์ (กรัม)



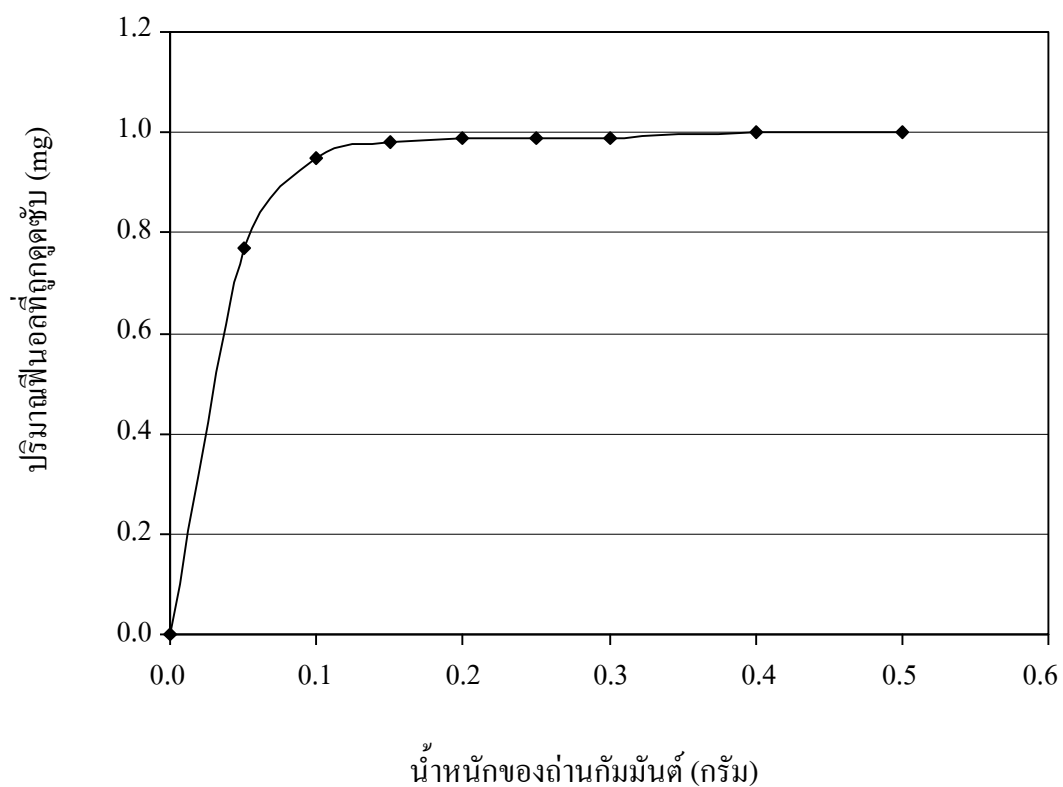
รูปที่ 4.39 กราฟมาตรฐานของสารละลายฟีนอล (วัดค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายฟีนอลด้วยเครื่อง UV/visible spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 268.89 นาโนเมตร)

2. ผลของปริมาณถ่านกัมมันต์ต่อความสามารถการดูดซับสารละลายฟีนอล

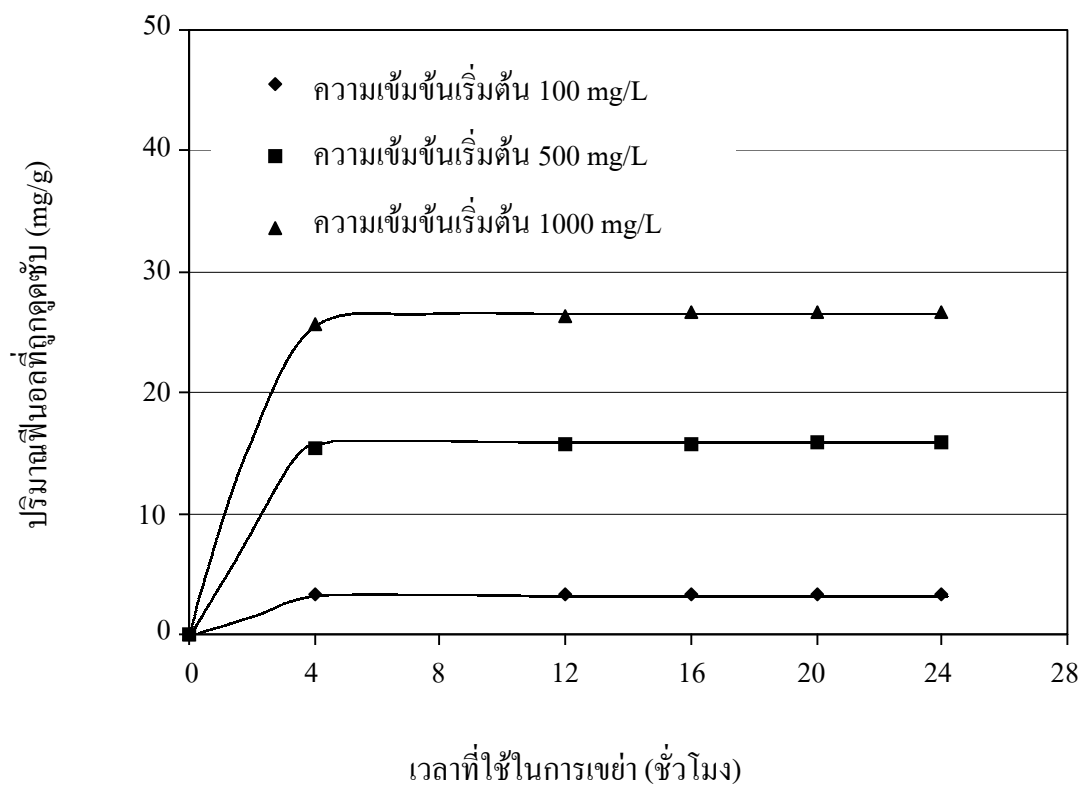
สำหรับการทดลองหาปริมาณถ่านกัมมันต์ที่เหมาะสมในการดูดซับสารละลายฟีนอล ได้ใช้ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมโดยวิธีการกระตุ้นทางเคมีเป็นตัวดูดซับ และศึกษาการดูดซับโดยใช้น้ำหนักของถ่านกัมมันต์ในช่วง 0.05 – 0.50 กรัม ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายฟีนอลมีค่าคงที่เท่ากับ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร การศึกษาที่ความเข้มข้นเริ่มต้นดังกล่าวนี้เนื่องจากเป็นความเข้มข้นน้อยที่สุดที่สามารถวัดค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายฟีนอลที่สมดุลได้ และเป็นความเข้มข้นที่ครอบคลุมค่าความเข้มข้นของฟีนอลในน้ำเสียดอุตสาหกรรมที่มีค่าอยู่ในช่วง 1 – 10 มิลลิกรัมต่อลิตร (Denkothai, ออนไลน์, 2545) ปริมาตรของสารละลายที่ใช้ 100 มิลลิลิตร ความเป็นกรด – เบสของสารละลายฟีนอลประมาณ 7 เวลาที่ใช้ในการเขย่า 24 ชั่วโมง และอุณหภูมิการดูดซับ 30°C ผลการทดลองแสดงในรูปที่ 4.40 พบว่าเมื่อใช้ปริมาณถ่านกัมมันต์ในช่วง 0.05 – 0.20 กรัม ปริมาณฟีนอลที่ถูกดูดซับบนถ่านกัมมันต์เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และเมื่อเพิ่มปริมาณถ่านกัมมันต์ในช่วง 0.30 – 0.50 กรัมจะเห็นว่าปริมาณฟีนอลที่ถูกดูดซับบนถ่านกัมมันต์เพิ่มขึ้นน้อยมาก ดังนั้นสำหรับการทดลองนี้ปริมาณถ่านกัมมันต์ที่เหมาะสมที่สามารถดูดซับฟีนอลได้มากคือ 0.30 กรัม หากใช้ปริมาณถ่านกัมมันต์ต่ำกว่านี้ความสามารถในการดูดซับฟีนอลจะน้อยลง และหากใช้มากกว่านี้ก็ไม่ทำให้ความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้น

3. ผลการหาเวลาเข้าสู่สมดุลของการดูดซับสารละลายฟีนอล

การทดลองหาเวลาเข้าสู่สมดุลของการดูดซับสารละลายฟีนอล ได้ใช้ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมโดยวิธีการกระตุ้นทางเคมี และศึกษาเวลาที่ใช้ในการเขย่าในช่วง 0 – 24 ชั่วโมง ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายฟีนอลต่างๆกัน ได้แก่ 100 500 และ 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเป็นกรด – เบสของสารละลายฟีนอลประมาณ 7 ปริมาตรสารละลายที่ใช้ 100 มิลลิลิตร ปริมาณถ่านกัมมันต์คงที่เท่ากับ 0.3 กรัม และที่อุณหภูมิการดูดซับ 30°C ผลการทดลองแสดงในรูปที่ 4.41 จะเห็นว่า ปริมาณฟีนอลที่ถูกดูดซับบนถ่านกัมมันต์มีค่าเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นเริ่มต้น โดยในช่วงเวลาที่ใช้ในการเขย่า 0 – 4 ชั่วโมง ปริมาณฟีนอลที่ถูกดูดซับบนถ่านกัมมันต์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และเมื่อเพิ่มเวลาที่ใช้ในการเขย่าในช่วง 12 – 24 ชั่วโมง ปริมาณฟีนอลที่ถูกดูดซับบนถ่านกัมมันต์มีค่าค่อนข้างคงที่ ซึ่งเป็นไปในทำนองเดียวทั้งสามความเข้มข้นเริ่มต้น แสดงว่าการดูดซับฟีนอลบนถ่านกัมมันต์จะเข้าสู่สมดุลที่เวลามากกว่า 4 ชั่วโมง ดังนั้นงานวิจัยในส่วนนี้จะพิจารณาปริมาณฟีนอลที่ถูกดูดซับบนถ่านกัมมันต์ที่เวลาในการเขย่า 24 ชั่วโมง



รูปที่ 4.40 ผลของปริมาณถ่านกัมมันต์ต่อปริมาณฟีนอลที่ถูกดูดซับบนถ่านกัมมันต์ที่เตรียมโดยวิธีการกระตุ้นทางเคมี (ความเข้มข้นของสารละลายฟีนอลเริ่มต้นเท่ากับ 100 mg/L ความเป็นกรด-เบสของสารละลายฟีนอลเท่ากับ 7 ปริมาตรสารละลายที่ใช้ 100 mL เวลาที่ใช้ในการเขย่า 24 ชั่วโมง อุณหภูมิการดูดซับ 30°C)



รูปที่ 4.41 ผลของเวลาที่ใช้ในการเข้าสู่สมดุลต่อปริมาณฟินอลที่ถูกดูดซับบนถ่านกัมมันต์ที่เตรียมโดยวิธีการกระตุ้นทางเคมี (ความเข้มข้นของสารละลายฟินอลเริ่มต้นเท่ากับ 100 500 และ 1000 mg/L ความเป็นกรด-เบสของสารละลายฟินอลเท่ากับ 7 ปริมาตรสารละลายที่ใช้ 100 mL อุณหภูมิการดูดซับ 30°C)

4. ผลของความเป็นกรด – เบสของสารละลายฟีนอล

สำหรับการศึกษาผลของความเป็นกรด – เบส (ค่า pH) ของสารละลายฟีนอลต่อความสามารถในการดูดซับฟีนอลบนถ่านกัมมันต์ ได้ใช้ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมโดยวิธีการกระตุ้นทางเคมีเป็นตัวดูดซับ และศึกษาการดูดซับโดยใช้สารละลายฟีนอลที่มีค่า pH แตกต่างกัน 3 ค่า ได้แก่ pH 2 pH 7 และ pH 12 ความเข้มข้นของสารละลายมีค่าคงที่เท่ากับ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตรของสารละลายที่ใช้ 100 มิลลิตร ปริมาณถ่านกัมมันต์คงที่เท่ากับ 0.3 กรัม เวลาที่ใช้ในการเขย่า 24 ชั่วโมง และอุณหภูมิการดูดซับ 30°C ผลการทดลองแสดงในรูปที่ 4.42 เห็นได้ว่าถ่านกัมมันต์สามารถดูดซับฟีนอลในสารละลายที่มีสภาพเป็นกรด (pH2) ได้มากใกล้เคียงกับการดูดซับฟีนอลในสารละลายที่มีสภาพเป็นกลาง (pH7) และสามารถดูดซับได้มากกว่าในกรณีที่สารละลายมีสภาพเป็นเบส (pH12) เนื่องจากถ่านกัมมันต์สามารถดูดซับได้ทั้งสารที่อยู่ในรูปไม่แตกตัว และสารที่อยู่ในรูปของไอออน โดยสามารถดูดซับสารในรูปไม่แตกตัวได้ดีกว่าสารที่อยู่ในรูปของไอออน (Faust et al, 1983) ดังนั้นการดูดซับกรดอินทรีย์อ่อนที่มีค่า pH สูงกว่าค่า pKa ของกรดอินทรีย์อ่อน ความสามารถในการดูดซับจะลดลง เนื่องจากกรดอินทรีย์เกิดการแตกตัวอยู่ในรูปของไอออน (Vansant, 1997 อ้างถึงใน สิทธิชัย พิมลศรี, 2543, หน้า 114) สำหรับฟีนอลเป็นกรดอินทรีย์อ่อนที่มีค่า pKa 9.9 ที่อุณหภูมิ 25°C (Yaws, 1999) ดังนั้นฟีนอลที่อยู่ในสารละลายที่มีค่า pH 12 ซึ่งมากกว่าค่า pKa ฟีนอลจะเกิดการแตกตัวอยู่ในรูปของไอออนฟีนอล (phenolate ions) ทำให้ปริมาณฟีนอลที่ถูกดูดซับบนถ่านกัมมันต์มีค่าลดลง นอกจากนี้ที่เวลาเดียวกันการมีไอออนของไฮดรอกไซด์ (OH⁻ ions) บนถ่านกัมมันต์ จากการเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ เพื่อปรับค่า pH นั้น จะขัดขวางการดูดซับของไอออนฟีนอลอีกด้วย (Rengaraj, Moon, Sivabalan, Arabindoo and Murugesan, 2002)

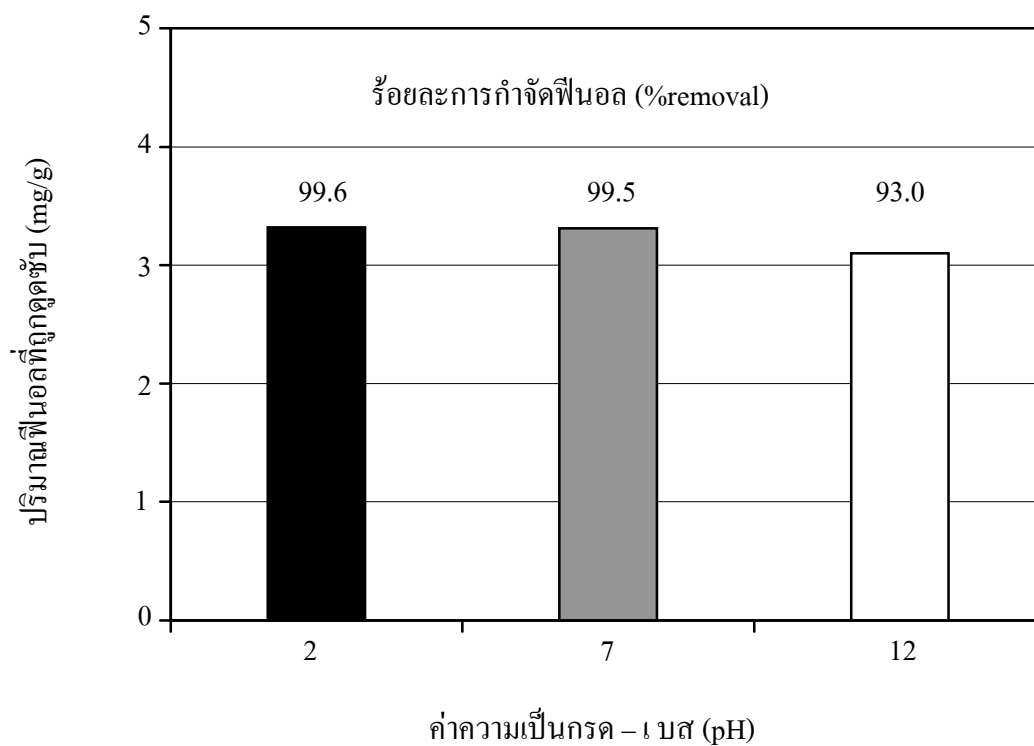
5. ผลของอุณหภูมิการดูดซับฟีนอล

ผลของอุณหภูมิการดูดซับต่อปริมาณฟีนอลที่ถูกดูดซับบนถ่านกัมมันต์ โดยใช้ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมโดยวิธีการกระตุ้นทางเคมีเป็นตัวดูดซับในการดูดซับสารละลายฟีนอลความเข้มข้นเริ่มต้นในช่วง 100 – 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเป็นกรด – เบสของสารละลายฟีนอลประมาณ 7 ปริมาตรสารละลายที่ใช้ 100 มิลลิตร ปริมาณถ่านกัมมันต์คงที่เท่ากับ 0.3 กรัม เวลาที่ใช้ในการเขย่า 24 ชั่วโมง โดยศึกษาอุณหภูมิการดูดซับในช่วง 30 – 50°C ผลการทดลองแสดงในรูปที่ 4.43 จะเห็นได้ว่า ที่แต่ละอุณหภูมิการดูดซับ ปริมาณฟีนอลที่ถูกดูดซับบนถ่านกัมมันต์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นเริ่มต้น และเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงความเข้มข้นเริ่มต้นน้อยกว่า 600 มิลลิกรัมต่อลิตร (ความเข้มข้นที่สมดุลน้อยกว่า 50 มิลลิกรัมต่อลิตร) ลักษณะเส้นไอโซเทอมการดูดซับที่อุณหภูมิการดูดซับทั้งสามอุณหภูมิเป็นแบบชนิดที่ 2 (Type II) ซึ่งเกิดขึ้นในสารที่มีรูพรุนหลายขนาด พบว่าอุณหภูมิมิมีผลต่อการดูดซับโดยที่เมื่อ

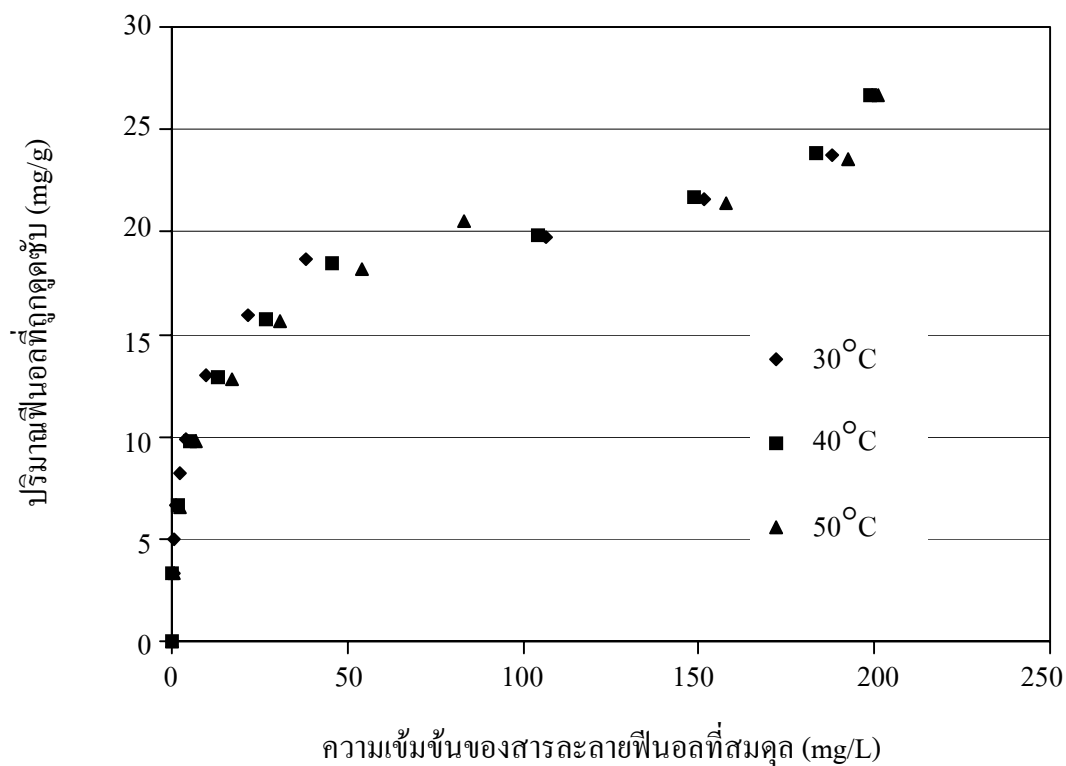
อุณหภูมิเพิ่มขึ้นปริมาณฟินอลที่ถูกดูดซับมีค่าลดลงแสดงว่าเป็นการดูดซับทางกายภาพซึ่งเป็นกระบวนการคายความร้อน

6. ผลการเปรียบเทียบความสามารถการดูดซับฟินอลในสารละลายบนถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้กับถ่านกัมมันต์ทางการค้า

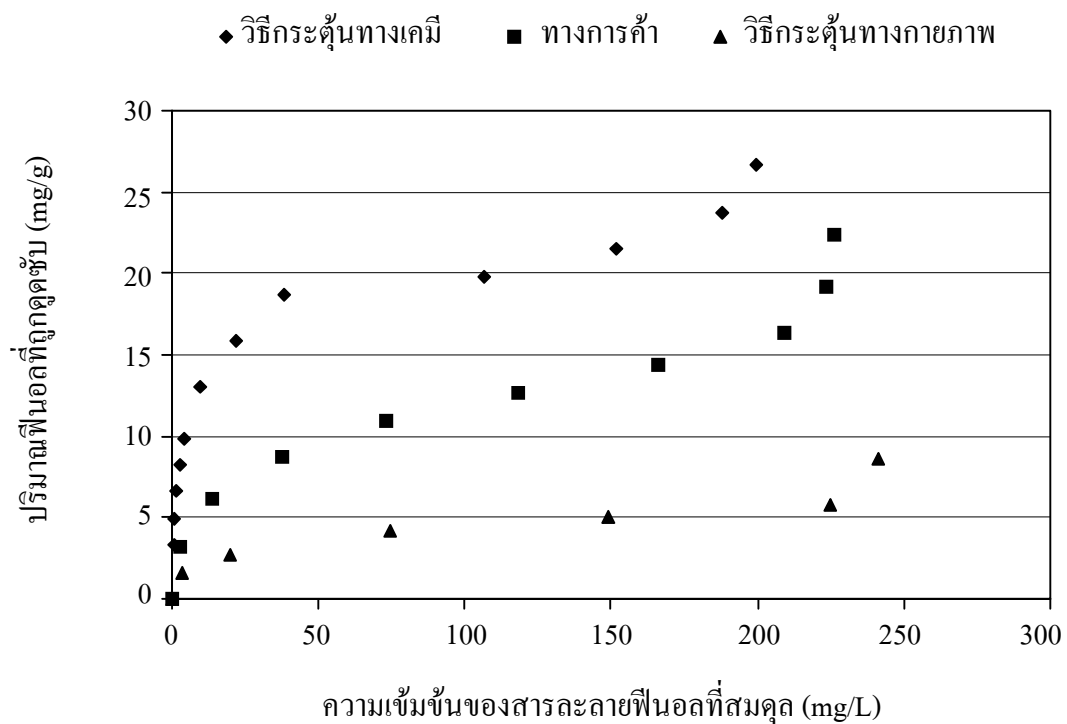
การเปรียบเทียบความสามารถการดูดซับฟินอลในสารละลายบนถ่านกัมมันต์ได้ใช้ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมโดยวิธีการกระตุ้นทางเคมีและทางกายภาพกับถ่านกัมมันต์ทางการค้า โดยศึกษาการดูดซับสารละลายฟินอลความเข้มข้นเริ่มต้นในช่วง 100 – 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเป็นกรด – เบสของสารละลายฟินอลประมาณ 7 ปริมาตรสารละลายที่ใช้ 100 มิลลิตร ปริมาณถ่านกัมมันต์คงที่เท่ากับ 0.3 กรัม เวลาที่ใช้ในการเขย่า 24 ชั่วโมง และที่อุณหภูมิการดูดซับ 30°C ผลการทดลองแสดงในรูปที่ 4.44 พบว่า ปริมาณฟินอลที่ถูกดูดซับบนถ่านกัมมันต์ที่เตรียมโดยวิธีการกระตุ้นทางเคมีได้มากกว่าบนถ่านกัมมันต์ทางการค้าและถ่านกัมมันต์ที่เตรียมโดยวิธีการกระตุ้นทางกายภาพ แสดงว่าปริมาณฟินอลที่ถูกดูดซับบนถ่านกัมมันต์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนของถ่านกัมมันต์ (ดูตารางที่ 4.16 ประกอบ) โดยลักษณะเส้นไอโซเทอมการดูดซับของถ่านกัมมันต์ทั้งสามชนิดมีความคล้ายกัน สำหรับถ่านกัมมันต์ที่เตรียมโดยวิธีการกระตุ้นทางกายภาพ แม้ว่าจะมีความสามารถในการดูดซับน้อยกว่าถ่านกัมมันต์ทางการค้า แต่ถ้าสารละลายมีความเข้มข้นเริ่มต้นน้อยกว่า 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้นี้จะมีความสามารถในการดูดซับฟินอลเกือบเท่าถ่านกัมมันต์ทางการค้า (แสดงในตารางที่ 4.17) เนื่องจากขนาดพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์นี้ที่มีอยู่สามารถดูดซับฟินอลในปริมาณดังกล่าวได้ดี แต่เมื่อความเข้มข้นมากขึ้น ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้นี้จะมีประสิทธิภาพการดูดซับลดลงมากกว่าถ่านกัมมันต์ทางการค้า เนื่องจากถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้นี้มีพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนน้อยกว่า จึงสามารถดูดซับฟินอลได้มากที่สุดเพียงปริมาณหนึ่งเท่านั้น แต่อย่างไรก็ตาม ปริมาณฟินอลในน้ำเสียอุตสาหกรรมโดยทั่วไปมีค่าไม่เกิน 10 มิลลิกรัมต่อลิตร (Denkothai, ออนไลน์, 2545) ดังนั้นถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จากงานวิจัยนี้ทั้งสองวิธีสามารถนำไปกำจัดฟินอลในน้ำเสียได้



รูปที่ 4.42 ผลของค่าความเป็นกรด - เบสของสารละลายฟินอลต่อปริมาณฟินอลที่ถูกดูดซับบนถ่านกัมมันต์ที่เตรียมโดยวิธีการกระตุ้นทางเคมี (ความเข้มข้นของสารละลายฟินอลเริ่มต้นเท่ากับ 100 mg/L ปริมาตรสารละลายที่ใช้ 100 mL เวลาที่ใช้ในการเขย่า 24 ชั่วโมง อุณหภูมิการดูดซับ 30°C)



รูปที่ 4.43 ผลของอุณหภูมิการดูดซับต่อปริมาณฟีนอลที่ถูกดูดซับบนถ่านกัมมันต์ที่เตรียมโดยวิธีการกระตุ้นทางเคมี (ความเข้มข้นของสารละลายฟีนอลเริ่มต้นเท่ากับ 100 mg/L ความเป็นกรด-เบสของสารละลายฟีนอลเท่ากับ 7 ปริมาตรสารละลายที่ใช้ 100 mL เวลาที่ใช้ในการเขย่า 24 ชั่วโมง)



รูปที่ 4.44 ผลของชนิดของถ่านกัมมันต์ต่อปริมาณฟีนอลที่ถูกดูดซับบนถ่านกัมมันต์ (ความเข้มข้นของสารละลายฟีนอลเริ่มต้นในช่วง 0 – 1000 mg/L ความเป็นกรด – เบสของสารละลายฟีนอลเท่ากับ 7 ปริมาตรสารละลายที่ใช้ 100 mL เวลาที่ใช้ในการเขย่า 24 ชั่วโมง อุณหภูมิการดูดซับ 30°C)

ตารางที่ 4.17 ผลการทดสอบและเปรียบเทียบความสามารถการดูดซับฟีนอลในสารละลายของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากถ่านหินลิกไนต์ และถ่านกัมมันต์ทางการค้า

ความเข้มข้นเริ่มต้น (mg/L)	ถ่านกัมมันต์ จากถ่านหินลิกไนต์โดย วิธีการกระตุ้นทางเคมี (พื้นที่ผิวจำเพาะ 1286 m ² /g)		ถ่านกัมมันต์ จากถ่านหินลิกไนต์โดย วิธีการกระตุ้นทางกายภาพ (พื้นที่ผิวจำเพาะ 386 m ² /g)		ถ่านกัมมันต์ทางการค้า (พื้นที่ผิวจำเพาะ 1197 m ² /g)	
	ความเข้มข้น ที่สมดุล (mg/L)	ร้อยละ การกำจัด (%removal)	ความเข้มข้น ที่สมดุล (mg/L)	ร้อยละ การกำจัด (%removal)	ความเข้มข้น ที่สมดุล (mg/L)	ร้อยละ การกำจัด (%removal)
50	-	-	4	93	-	-
100	0.5	99.5	20	80	2	98
200	1	99.3	74	63	14	93
300	4	99	149	52	38	87
400	10	98	225	50	73	82
500	22	96	241	44	118	76
600	38	94	-	-	166	74
700	107	85	-	-	209	72
800	152	81	-	-	224	72
900	188	80	-	-	226	70
1000	199	79	-	-	-	-

7. การวิเคราะห์การดูดซับด้วยสมการทางคณิตศาสตร์

ระบบการดูดซับได้ถูกวิเคราะห์ด้วยทางคณิตศาสตร์ เพื่อให้ได้ในรูปแบบของสมการอย่างง่าย โดยนำสมการมาวาดกราฟหรือใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อวิเคราะห์หาค่าคงที่ต่างๆ ซึ่งเป็นแนวทางในการคำนวณออกแบบระบบดูดซับ โดยมีสมการเพื่อใช้ในการวิเคราะห์และอธิบายลักษณะข้อมูลของการดูดซับ ได้แก่ สมการของLangmuir สมการของBrunauer-Emmett-Teller (BET) และสมการของFreundlich

สมการของLangmuir สมการนี้มีเงื่อนไขว่าการดูดซับจะเกิดขึ้นเต็มที่เพียงชั้นเดียว และโมเลกุลของตัวถูกดูดซับไม่มีการเคลื่อนที่อิสระบนผิว รูปแบบสมการแสดงในสมการที่ 4.7

$$X = \frac{X_m K_L C_e}{1 + K_L C_e} \quad (4.7)$$

โดยที่ X คือ ปริมาณของตัวถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับ

X_m คือ ปริมาณของตัวถูกดูดซับที่เรียงแบบชั้นเดียวในลักษณะปกคลุมผิวของตัวดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับ

C_e คือ ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่สมดุล

K_L คือ ค่าคงที่

สมการของ Brunauer – Emmett – Teller (BET) เป็นสมการที่ใช้อธิบายการดูดซับแบบหลายชั้น รูปแบบสมการแสดงในสมการที่ 4.8

$$X = \frac{X_m K_B C_e}{(C_s - C_e)[1 + (K_B - 1)(C_e / C_s)]} \quad (4.8)$$

โดยที่ X คือ ปริมาณของตัวถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับ

X_m คือ ปริมาณของตัวถูกดูดซับที่เรียงแบบชั้นเดียวในลักษณะปกคลุมผิวของตัวดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับ

C_e คือ ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่สมดุล

C_s คือ ความเข้มข้นอิ่มตัวของตัวถูกดูดซับ

K_B คือ ค่าคงที่

สมการของ Freundlich สมการนี้เป็นที่นิยมใช้กันมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับสารละลายที่ค่อนข้างเจือจางและมีความเข้มข้นค่อนข้างต่ำ รูปแบบสมการแสดงในสมการที่ 4.9

$$X = K_F C_e^{1/n} \quad (4.9)$$

โดยที่ X คือ ปริมาณของตัวถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับ

C_e คือ ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่สมดุล

K_F และ n คือ ค่าคงที่

สำหรับทดลองนี้ได้วิเคราะห์การดูดซับฟีนอลบนถ่านกัมมันต์ด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ทั้งสามสมการ จากข้อมูลการดูดซับโดยใช้ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมโดยวิธีการกระตุ้นทางเคมีเป็นตัวดูดซับ ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายฟีนอลในช่วง 100 – 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเป็นกรด – เบสของสารละลายฟีนอลประมาณ 7 ปริมาตรสารละลายที่ใช้ 100 มิลลิลิตร ปริมาณถ่านกัมมันต์คงที่เท่ากับ 0.3 กรัม เวลาที่ใช้ในการเขย่า 24 ชั่วโมง และที่อุณหภูมิการดูดซับ 30°C โดยงานวิจัยนี้ได้ใช้โปรแกรม Microcal origin 4.1 ในการหาค่าตัวแปรต่างๆของทั้งสามสมการ ซึ่งแสดงในตารางที่ 4.18 และผลการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ทั้งสามสมการ แสดงในรูปที่ 4.45 จะเห็นว่า ที่ความเข้มข้นของสารละลายฟีนอลที่สมดุลต่ำกว่า 50 มิลลิกรัมต่อลิตร (หรือความเข้มข้นเริ่มต้นต่ำกว่า 600 มิลลิกรัมต่อลิตร) สมการทั้งสามสมการสามารถอธิบายข้อมูลการดูดซับจากการทดลองนี้ได้ดี โดยมีสมการของ BET อธิบายได้ดีที่สุด เนื่องจากให้ค่าร้อยละความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์เฉลี่ย (%ARE) ต่ำที่สุด

ตารางที่ 4.18 ค่าตัวแปรต่างๆของสมการ Langmuir BET และ Freundlich

Langmuir			BET				Freundlich		
X_m (mg/g)	K_L	%ARE	X_m (mg/g)	C_s (mg/L)	K_B	%ARE	K_F	n	%ARE
23	5	17	17	574	250	7	7	4	13

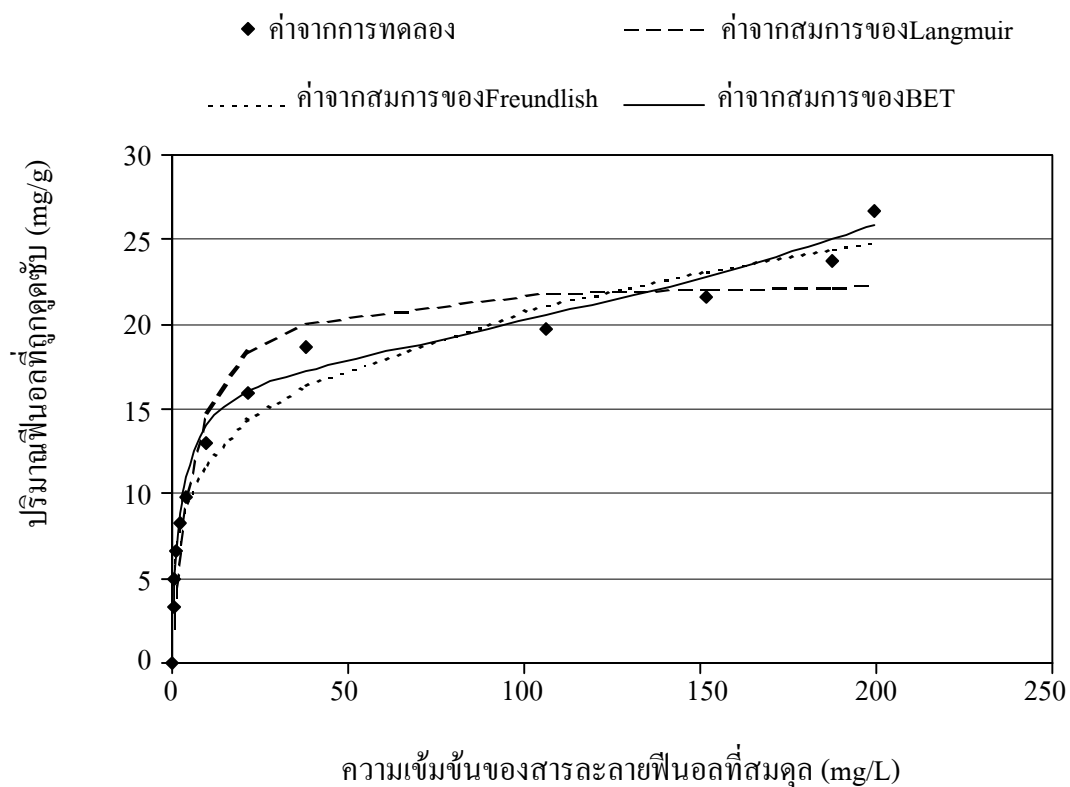
หมายเหตุ %ARE หมายถึง ร้อยละค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์เฉลี่ย (average relative error) ดังแสดงในสมการที่ 4.10

$$\%ARE = \frac{1}{n} \sum \left| \frac{C_{e(obs)} - C_{e(cal)}}{C_{e(obs)}} \right| \quad (4.10)$$

โดยที่ n คือ จำนวนของความเข้มข้นเริ่มต้นที่ใช้ในการทดลอง

$C_{e(obs)}$ คือ ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่สมดุลที่ได้จากการทดลอง (มิลลิกรัมต่อลิตร)

$C_{e(cal)}$ คือ ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่สมดุลที่ได้จากการคำนวณ (มิลลิกรัมต่อลิตร)



รูปที่ 4.45 เส้น ไอโซเทอมการดูดซับฟีนอลบนถ่านกัมมันต์ที่เตรียมโดยวิธีการกระตุ้นทางเคมีจากการทดลองและจากสมการทางคณิตศาสตร์ (ความเข้มข้นของสารละลายฟีนอลเริ่มต้นในช่วง 0 – 1000 mg/L ความเป็นกรด – เบสของสารละลายฟีนอลเท่ากับ 7 ปริมาตรสารละลายที่ใช้ 100 mL เวลาที่ใช้ในการเขย่า 24 ชั่วโมง อุณหภูมิการดูดซับ 30°C)

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลงานวิจัย

5.1.1 การเตรียมถ่านกัมมันต์โดยวิธีการกระตุ้นทางกายภาพ

1. อุณหภูมิของการคาร์บอนไนซ์มีผลต่อองค์ประกอบและร้อยละน้ำหนักที่หายไปของถ่านชาร์มากกว่าเวลา โดยการคาร์บอนไนซ์ที่อุณหภูมิสูงมีผลทำให้ปริมาณคาร์บอนคงตัวและร้อยละน้ำหนักที่หายไปของถ่านชาร์เพิ่มขึ้น
2. อุณหภูมิของการกระตุ้นมีผลต่อร้อยละน้ำหนักที่หายไป โดยถ่านกัมมันต์มีร้อยละน้ำหนักที่หายไปมากขึ้นตามอุณหภูมิ แต่มีปริมาณคาร์บอนคงตัวไม่ต่างกันมากนัก
3. อุณหภูมิและเวลาของการกระตุ้นมีผลต่อสมบัติของถ่านกัมมันต์ โดยที่อุณหภูมิของการกระตุ้นต่ำ ถ่านกัมมันต์ที่ได้มีพื้นที่ผิวจำเพาะเพิ่มขึ้นไปตามเวลาของการกระตุ้น และที่เวลาการกระตุ้นน้อยถ่านกัมมันต์ที่ได้มีพื้นที่ผิวจำเพาะเพิ่มขึ้นไปตามอุณหภูมิของการกระตุ้น แต่การกระตุ้นที่อุณหภูมิสูงขึ้นและเวลานานขึ้น ถ่านกัมมันต์ที่ได้มีปริมาตรรูพรุนขนาดกลางและใหญ่มากขึ้น และมีปริมาตรรูพรุนขนาดเล็กน้อยลง ส่งผลให้ถ่านกัมมันต์ที่ได้มีพื้นที่ผิวจำเพาะลดลง
4. ความเข้มข้นของสารกระตุ้นที่มากขึ้นส่งผลให้ถ่านกัมมันต์ที่ได้มีพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนน้อยลง ซึ่งให้ผลเช่นเดียวกันทั้งการกระตุ้นด้วยไอน้ำและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ส่วนการกระตุ้นด้วยไอน้ำและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีความเข้มข้นเท่ากันให้ถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะใกล้เคียงกัน แต่ถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มีปริมาตรรูพรุนขนาดกลางและใหญ่มากกว่าของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นด้วยไอน้ำ
5. อัตราการเพิ่มความร้อนในช่วงการกระตุ้นไม่มีผลต่อร้อยละน้ำหนักที่หายไปในช่วงการกระตุ้น แต่พื้นที่ผิวจำเพาะของถ่านกัมมันต์มีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มอัตราการให้ความร้อนจาก 5°C ต่อ นาที เป็น 20°C ต่อ นาที
6. อนุภาคถ่านหินที่มีขนาดเล็กทำให้ได้ถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนมากกว่าถ่านกัมมันต์ที่ได้จากอนุภาคถ่านหินที่มีขนาดใหญ่

7. การกระตุ้นโดยใช้ความเข้มข้นของสารกระตุ้นต่ำ ถ่านกัมมันต์จากถ่านหินแม่เมาะ และลานนามีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนใกล้เคียงกัน แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารกระตุ้น ถ่านกัมมันต์จากถ่านหินลานนาให้ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะที่มากกว่า

8. การลดปริมาณเถ้าในถ่านหินทั้งสองวิธีสามารถลดปริมาณเถ้าสูงสุดประมาณร้อยละ 60 ถ่านกัมมันต์จากถ่านหินที่ผ่านการลดเถ้าโดยการแยกอนุภาคในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ ความหนาแน่น 1.4 กรัมต่อมิลลิลิตร มีพื้นที่ผิวจำเพาะมากที่สุดโดยมีค่า 460 ตารางเมตรต่อกรัม

9. เส้นไอโซเทอมของการดูดซับของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จากถ่านหินที่ไม่ผ่านการลดเถ้าและถ่านหินที่ผ่านการลดเถ้าทั้งสองวิธีเป็นแบบชนิดที่ 1 (Type I) เช่นเดียวกัน แสดงว่าถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากถ่านหินโดยวิธีการกระตุ้นทางกายภาพ มีลักษณะรูพรุนขนาดเล็กเป็นส่วนใหญ่

5.1.2 การเตรียมถ่านกัมมันต์โดยวิธีการกระตุ้นทางเคมี

1. ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้โดยวิธีการกระตุ้นทางเคมีโดยใช้สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นสารกระตุ้น พบว่ามีปริมาณเถ้าลดลงมากและมีปริมาณคาร์บอนคงตัวสูงกว่าวิธีการกระตุ้นทางกายภาพ

2. ผลของอุณหภูมิที่สูงขึ้นทำให้ร้อยละน้ำหนักที่หายไป ค่าการดูดซับไอโอดีน พื้นที่ผิวจำเพาะ และปริมาตรรูพรุนทุกๆขนาดมีค่ามากขึ้น ขณะที่ผลของเวลาที่นานขึ้นทำให้ร้อยละน้ำหนักที่หายไปมากขึ้น แต่สมบัติอื่นๆมีค่าไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก

3. การเตรียมถ่านกัมมันต์โดยใช้อัตราส่วนระหว่างสารกระตุ้นต่อวัตถุดิบมากมีผลทำให้ถ่านกัมมันต์ที่ได้มีพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนมากกว่าการใช้อัตราส่วนระหว่างสารกระตุ้นต่อวัตถุดิบน้อย

4. เส้นไอโซเทอมของการดูดซับสำหรับถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้โดยวิธีการกระตุ้นทางเคมี เป็นแบบชนิดที่ 1 (Type I) เช่นเดียวกับของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมโดยวิธีการกระตุ้นทางกายภาพ นั่นคือถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากถ่านหินจะมีลักษณะรูพรุนขนาดเล็กเป็นส่วนใหญ่

5. ลักษณะรูพรุนจากภาพถ่าย SEM พบว่าการเตรียมถ่านกัมมันต์โดยวิธีการกระตุ้นทางเคมีมีการกระจายขนาดรูพรุนเกิดขึ้นมาก ซึ่งทำให้มีพื้นที่ผิวจำเพาะมากกว่าถ่านกัมมันต์ที่เตรียมโดยวิธีการกระตุ้นทางกายภาพซึ่งส่วนใหญ่มีรูพรุนขนาดเล็ก

5.1.3 การดูดซับฟีนอลในสารละลายโดยใช้ถ่านกัมมันต์

1. ปริมาณถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในการดูดซับฟีนอลของงานวิจัยนี้ต้องใช้ในปริมาณ 0.3 กรัม ถ้าปริมาณน้อยกว่านี้จะดูดซับได้น้อย แต่ถ้าปริมาณมากกว่านี้ก็ไม่สามารถทำให้ความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้นได้
2. การดูดซับฟีนอลต้องมีค่า pH อยู่ในช่วง 2 – 7 ถ้าค่า pH มากกว่านี้การดูดซับจะน้อยลง เนื่องจากฟีนอลจะแตกตัวเป็นไอออนในสารละลายเบส
3. การดูดซับฟีนอลบนถ่านกัมมันต์มีค่าเพิ่มขึ้นตามพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนของถ่านกัมมันต์ นั่นคือถ่านกัมมันต์ที่เตรียมโดยวิธีการกระตุ้นทางเคมีสามารถดูดซับฟีนอลได้ดีกว่าถ่านกัมมันต์ทางการค้า ส่วนถ่านกัมมันต์ที่เตรียมโดยวิธีการกระตุ้นทางกายภาพสามารถดูดซับฟีนอลได้น้อยกว่าถ่านกัมมันต์ทางการค้า
4. กระบวนการดูดซับฟีนอลที่ความเข้มข้นต่ำสามารถอธิบายด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ ได้แก่ สมการการดูดซับของ Langmuir สมการการดูดซับของ BET และสมการการดูดซับของ Freundlich และกระบวนการดูดซับฟีนอลบนถ่านกัมมันต์เป็นกระบวนการคายความร้อน

5.2 ข้อเสนอแนะ

เนื่องจากถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากถ่านหินลิกไนต์โดยวิธีการกระตุ้นทางกายภาพในงานวิจัยนี้ยังมีความสามารถในการดูดซับ ไอโอดีนที่ต่ำกว่าถ่านกัมมันต์ทางการค้าซึ่งกำหนดค่าการดูดซับ ไอโอดีนต้องไม่ต่ำกว่า 600 มิลลิกรัมต่อกรัม (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2532) ดังนั้นงานวิจัยในขั้นตอนต่อไปจึงควรมีการศึกษาถึงวิธีการที่จะเพิ่มความสามารถในการดูดซับของถ่านกัมมันต์เพื่อให้ได้ถ่านกัมมันต์ที่มีคุณภาพ ดังตัวอย่างเช่น

1. การเพิ่มความว่องไวในการเกิดรูพรุนจากปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันโดยการทำ preoxidation ก่อนนำไปผ่านการกระตุ้นทางกายภาพ โดยการเผาในอากาศที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดติดไฟ เช่น ต่ำกว่า 300°C
2. การแช่ถ่านหินในสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ก่อนนำไปผ่านการกระตุ้นทางกายภาพ เพื่อเปลี่ยนสภาพโครงสร้างภายในให้สลายตัวได้ง่ายและให้การแพร่ของสารกระตุ้นเพื่อเข้าไปทำปฏิกิริยาได้ง่าย อีกทั้งเป็นการลดปริมาณเถ้าในถ่านหินได้
3. การเตรียมถ่านกัมมันต์โดยวิธีการกระตุ้นทางเคมีโดยใช้สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก เป็นสารกระตุ้นนั้น ให้ค่าการดูดซับ ไอโอดีนและค่าพื้นที่ผิวจำเพาะสูงกว่าค่าต่ำสุดที่มาตรฐานกำหนดประมาณสามเท่า หากต้องการนำถ่านกัมมันต์ไปใช้งานทั่วไป สามารถเตรียมถ่านกัมมันต์โดยใช้สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์

ที่มีความเข้มข้นน้อยกว่านี้ เพื่อเป็นการประหยัดสารเคมีที่ใช้ และสามารถล้างสารเคมีออกจากถ่าน หลังการคาร์บอนไนซ์ได้ง่ายขึ้น ทำให้มีปริมาณสารเคมีตกค้างในถ่านกัมมันต์น้อยลง ได้อีกทางหนึ่งด้วย

4. การนำถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ไปวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันด้วยเครื่องมือวิเคราะห์ เช่น FTIR spectrometer จะทำให้ได้ข้อมูลเพื่อเป็นแนวทางในการอธิบายและเปรียบเทียบกลไกการดูดซับฟีนอลบนถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้โดยวิธีต่างกันหรือสภาวะที่แตกต่างกันได้

เอกสารอ้างอิง

- กรมควบคุมมลพิษ กองจัดการสารอันตรายและกากของเสีย. (2542). **พินอล**. ใน **เอกสารเผยแพร่ทางวิชาการของสารเคมีเฉพาะเรื่อง**. กรุงเทพฯ: ศรีเมืองการพิมพ์.
- กรมเชื้อเพลิงธรรมชาติ. (2545). **ถ่านหิน** [ออนไลน์]. ได้จาก: <http://www.dmf.go.th/>
- กรมพัฒนาและส่งเสริมพลังงาน. (2544). **ปกิณกะพลังงาน. จดหมายข่าวพลังงาน**. 9(1): 8-10.
- กรมศุลกากร. (2545). **สถิติการนำเข้า-ส่งออก** [ออนไลน์]. ได้จาก: <http://www.customs.go.th/statistic-search.html>
- กรมส่งเสริมอุตสาหกรรม. (2545). **ถ่านกัมมันต์** [ออนไลน์]. ได้จาก: <http://www.smethai.net/th/>
- กาญจนา บุญเกียรติ. (2544). **เชื้อเพลิงและการเผาไหม้**. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย. (2538). **เหมืองแม่เมาะ**. กรุงเทพฯ: ฝ่ายประชาสัมพันธ์.
- เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์. (2542). **การบำบัดน้ำเสีย**. กรุงเทพฯ: มิตรนราการพิมพ์.
- บริษัท Denko จำกัด. (2545). **ข้อมูล Thailand wastewater effluent standard of industrial estate** [ออนไลน์]. ได้จาก: http://www.denkothai.com/raw_water_frame_4.htm
- บุญชัย ตระกูลมหชัย. (2536). **การผลิตถ่านกัมมันต์จากกะลาตาลโตนดในฟลูอิดไดซ์เบด**. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ประเสริฐ ชูมรุณ. (2538). **เทคโนโลยีการทำเหมืองถ่านหิน**. กรุงเทพฯ: แคนดิก มีเดีย.
- พงศธร ใศวัดชาภรณ์. (2538). **ถ่านกัมมันต์จากขังข้าวโพด**. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- พิณพิมล สิงชีวงศ์. (2537). **การผลิตถ่านกัมมันต์จากขาน้อย**. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- รติกร อิศระเสนีย์. (2539). **การผลิตถ่านกัมมันต์จากยางรถยนต์ที่ใช้แล้วโดยการกระตุ้นด้วยไอน้ำร้อน**. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สำนักงานคณะกรรมการนโยบายพลังงานแห่งชาติ. (2545). **ข้อมูลพลังงาน**[ออนไลน์]. ได้จาก: <http://www.nepo.go.th/info/index.html>

- สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. (2532). มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมถ่านกัมมันต์. **ราชกิจจานุเบกษาฉบับพิเศษ**. 106(226). 1-10.
- สิทธิชัย พิมลศรี. (2543). ผลของความเข้มข้นฟินอลและฟิเอนต่อการดูดติดฟินอลด้วยถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ดจากกะลามะพร้าวและจากถ่านหิน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- Ahmadpour, A. and Do, D. D. (1996). The preparation of active carbons from coal by chemical and physical activation. **Carbon**. 34(4): 471-479.
- Aktas, Z., Karacan, F. and Olcay, A. (1998). Centrifugal float-sink separation of fine Turkish coals in dense media. **Fuel processing technology**. 55: 235-250.
- American Society for Testing and Materials. (1998). **Annual book of ASTM standards**. United States: Philadelphia.
- ASTDR Public Health Statement. (2000). **Phenols** [On-line]. Available: <http://www.astdr.cdc.gov/ToxProfiles>
- Bansal, R. C., Donnet, J. and Stoeckli, F. (1988). **Active carbon**. New York: Marcel Dekker.
- Beamish, B. B. (1994). Proximate analysis of New Zealand and Australian coals by thermogravimetry. **Journal of Geology and Geophysics**. 37: 387-392.
- Berkowitz, N. (1994). **An introduction to coal technology**. San Diego: Academic Press.
- Bolat, E., Saglam, S. and Piskin, P. (1998). Chemical demineralization of Turkish high ash bituminous coal. **Fuel Processing Technology**. 57: 93-99.
- Caylan, N., Karaca, H. and Onal, Y. (1999). Thermogravimetric analysis of pretreated Turkish lignites. **Fuel**. 78: 1109-1116.
- Do, D. D. (1998). **Adsorption analysis: Equilibria and kinetics**. London: Imperial college Press.
- Faust, S. D. and Aly, O. M. (1987). **Adsorption processes for water treatment**. Boston: Butterworth.
- Gregg, S. J. and Sing, K. S. W. (1982). **Adsorption surface area and porosity**. London: Academic Press.
- Hu, Z. and Srinivasan, M. P. (1999). Preparation of high-surface-area activated carbons from coconut shell. **Microporous and Mesoporous Materials**. 27: 11-18.
- Jai, Y. F. (1998). **Adsorption of gold and silver species on activated carbon**. Ph.D. Thesis, University of Newcastle Upon Tyne, United Kingdom.
- Karatepe, N. and Kucukbayrak, S. (1993). Proximate analysis of some Turkish lignites by Thermogravimetry. **Thermochimica Acta**. 213: 145-147.

- Leonard, J. W. (ed.). (1979). **Coal preparation**. New York: Port city Press.
- Linares-Solano, A., Martin-Gullon, I., Salinas-Martinez de Lecea, C. and Serrano-Talavera, B. (2000). Activated carbons from bituminous coal: Effect of mineral matter content. **Fuel**. 79: 635-643.
- Li-Yeh, H. and Teng, H. (2000). Influence of different chemical reagents on the preparation of activated carbons from bituminous coal. **Fuel processing technology**. 64: 155-166.
- Lolja, S. M. (1999). A model for alkaline removal of sulfur from a low-rank coal. **Fuel processing technology**. 60: 185-194.
- Marsh, H. (1997). **Introduction to carbon technologies**. Spain: Secretariado.
- Masel, R. I. (1996). **Principles of adsorption and reaction on solid surfaces**. New York: Wiley.
- Mckay, G. (ed.) (1996). **Use of adsorbents for the removal of pollutants from wastewaters**. Boca Ratan, MA: CRC Press.
- Monoz-Guillena, M. J., Illan-Gomez, M. J., Martin-Martinez, J. M., Linares-Solano, A. and Salinas-Matinez de Lecea, C. (1992). Activated carbon from Spanish coals: 1. Two-stage CO₂. **Activation Energy and Fuels**. 6: 9-45.
- Otowa, T., Tanibata, R. and Itoh, M. (1993). Production and adsorption characteristics of maxsorb: high-surface-area active carbon. **Gas separation & purification**. 7(4): 241-245.
- Oztas, N. A. and Yurum, Y. (2000). Pyrolysis of Turkish Zongldak bituminous coal: Part 1 Effect of mineral matter. **Fuel**. 79: 1221-1227.
- Parra, J. B., Pis, J. J., Sousa, J. C., Pajares, J. A. and Bansal, R. C. (1997). Effect of coal preoxidation on the development of microporosity in activated carbon. **Carbon**. 34(6): 783-787.
- Patrick, J. W. (ed.). (1995). **Porosity in carbons: Characterization and applications**. London: Edward Arnold.
- Pis, J. J., Marhamud, M., Pajares, J. A., Parra, J. B. and Bansal, R. C. (1998). Preparation of active carbons from coal: Part III Activation of char. **Fuel processing technology**. 57: 149-161.
- Qadeer, R. and Rehan, A. H. (2002). A study of the adsorption of phenol by activated carbon from aqueous solutions. **Turk. J. chem**. 26: 357-361.
- Rengaraj, S., Moon, Seung-Hyeon., Sivabalan, R., Arabindoo, B. and Murugesan, V. (2002). Agricultural solid waste for the removal of organics: Adsorption of phenol from water

- and wastewater by palm seed coat activated carbon. **Waste Management**. 22: 543-548.
- Rivera-Utrilla, J., Lopez-Romon, M. V., Carrasco-Marin, F., Maldonado-Hoder, F. J. and Moreno-Castilla, C. (1996). Demineralization of bituminous coal by froth flotation before obtaining activated carbon. **Carbon**. 34 (7): 917-921.
- Rouquerol, F., Rouquerol, J. and Sing, K. S. W. (1999). **Adsorption by powders and porous solid: Principles methodology and application**. London: Academic Press.
- Seader, J. D. and Henley, E. J. (1998). **Separation process principles**. New York: John Wiley & Sons.
- Smoot, L. D. (1993). **Fundamentals of coal combustion for clean and efficient use**. New York: Elsevier.
- Speight, J. G. (1994). **The chemistry and technology of coal**. New York: Marcel Dekker.
- Steel, K. M., Basida, J., O'Donnell, T. A. and Wood, D. G. (2001). Production of ultra clean coal: Part I Dissolution behavior of mineral matter in black coal toward hydrochloric and hydrofluoric acids. **Fuel processing technology**. 70: 171-192.
- Sun, J., Hippo, E. J., March, H., O'Brien, W. S. and Crelling, J. C. (1997). Activated carbon produced from an Illinois basin coal. **Carbon**. 35(3): 341-352.
- Teng, H. and Chien-To, A. (1999). Liquid-phase adsorption of phenol by activated carbon prepared from bituminous coals with different oxygen content. **Journal of chemical technology and biotechnology**. 74: 123-130.
- Teng, H. and Hsieh, C. T. (1999). Liquid-phase adsorption of phenol by activated carbon prepared from bituminous coals with different oxygen content. **Journal of chemical technology and biotechnology**. 74: 123-130.
- Teng, H. and Hung-Chi, L. (1998). Activated carbon production from low ash sub-bituminous coal with CO₂ activation. **AIChE**. 44(5): 1170-1177.
- Teng, H., Ho, J. A. and Hsu, Y. E. (1997). Preparation of activated carbon from bituminous coals with CO₂ activation: Influence of coal oxidation. **Carbon**. 35(2): 275-283.
- Thrower, P. A. (1994). **Chemistry and physics of carbon**. New York: Marcel Dekker.
- Walker, P. L. (1996). Production of activated carbon: use CO₂ versus H₂O as activating agent. **Carbon**. 34(10): 1297-1299.

Warne, S. St. J. (1991). Proximate analysis of coal, oil shale, low quality fossil fuels and related materials by thermogravimetry. **Trends in analytical chemistry**. 10(6): 195-199.

Yaws, C. L. (1999). **Chemical properties handbook**. New York: McGraw-Hill.

ประวัติผู้เขียน

นางสาวนภารัตน์ จิวลักษณ์ เกิดเมื่อวันที่ 30 ตุลาคม พ.ศ.2517 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมเคมี) จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เมื่อพ.ศ. 2541 ภายหลังจากสำเร็จการศึกษาได้เข้าทำงานในตำแหน่งผู้ช่วยวิจัยของรองศาสตราจารย์ ดร.ชัยยศ ตั้งสฤตย์กุลชัย หัวหน้าสาขาวิชาวิศวกรรมเคมี สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เป็นเวลา 2 ปี จากการทำงานทำให้ผู้วิจัยเกิดแรงจูงใจที่จะศึกษาต่อระดับปริญญาโททางด้านวิศวกรรมเคมี เพื่อเป็นการพัฒนาความรู้ ความสามารถให้กับตนเอง จึงได้เข้าศึกษาต่อระดับปริญญาโท ในสาขาวิชาวิศวกรรมเคมี สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปี พ.ศ.2543 ปัจจุบันทำงานในตำแหน่งผู้ช่วยสอนและวิจัยของสาขาวิชาเคมี สำนักวิชาวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา