

อธิปัทนการ



รายงานการวิจัย

การผลิตถ่านกัมมันต์จากถ่านหินลิกไนต์โดยวิธีกระตุ้นทางเคมี

Production of Activated Carbon from Lignite Coals

by Chemical Activation Method

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ปีงบประมาณ พ.ศ. 2543 - 2544

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

รายงานการวิจัย

การผลิตถ่านกัมมันต์จากถ่านหินลิกไนต์โดยวิธีกระตุ้นทางเคมี

(Production of Activated Carbon from Lignite Coals by Chemical Activation Method)

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

รองศาสตราจารย์ ดร.ชัยยศ ตั้งสฤติย์กุลชัย

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผู้ร่วมวิจัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มาลี ตั้งสฤติย์กุลชัย

สาขาวิชาเคมี สำนักวิชาวิทยาศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ปีงบประมาณ พ.ศ. 2543-2544

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ

1. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้การสนับสนุนทุนอุดหนุนการวิจัยประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2543-2544 สำหรับโครงการวิจัยนี้
2. การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยที่ให้ความอนุเคราะห์ตัวอย่างถ่านหินเพื่อใช้ในการวิจัย
3. ผู้ช่วยวิจัย ได้แก่ น.ส.นภารัตน์ จิวาลักษณ์ และน.ส.ณัฐยา พูนสุวรรณ

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาถึงการเตรียมถ่านกัมมันต์จากถ่านหินลิกไนท์ ซึ่งเป็นวัตถุดิบที่มีอยู่มากในประเทศไทย โดยใช้วิธีกระตุ้นทางเคมีด้วยสารละลายโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) และซิงค์คลอไรด์ ($ZnCl_2$) โดยศึกษาถึงผลของสภาวะการเตรียม ได้แก่ อุณหภูมิ เวลา และความเข้มข้นของสารเคมีที่มีต่อองค์ประกอบและลักษณะโครงสร้างรูพรุนของถ่านกัมมันต์ที่ได้ ผลการศึกษาพบว่าตัวแปรทั้งสามมีผลโดยตรงต่ออุณหภูมิและอัตราส่วนของสารกระตุ้นจะมีอิทธิพลมากที่สุด ในช่วงสภาวะการทดลองที่ศึกษา พบว่าถ่านกัมมันต์ที่เตรียมโดยใช้ KOH จะให้พื้นที่ผิวสูงสุด ($1,856 \text{ m}^2/\text{g}$) ที่สภาวะการเตรียม 800°C เวลากระตุ้น 120 นาทีและอัตราส่วนสารเคมีต่อวัตถุดิบเท่ากับ 1:1 โดยน้ำหนัก ในขณะที่ถ่านกัมมันต์จากการใช้ $ZnCl_2$ ให้พื้นที่ผิวมากที่สุด ($1,427 \text{ m}^2/\text{g}$) ที่อุณหภูมิ 500°C เวลากระตุ้น 120 นาทีและอัตราส่วนสารเคมี 1:1 โดยน้ำหนัก ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากถ่านหินลิกไนท์โดยวิธีกระตุ้นทางเคมีจะมีสมบัติการดูดซับที่ดีกว่าถ่านกัมมันต์จากการกระตุ้นทางกายภาพ เนื่องจากมีพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนที่สูงกว่ามาก

Abstract

This research work is focussed on the preparation and characterization of activated carbon from indigenous lignite using the chemical activation technique by impregnation with potassium hydroxide and zinc chloride solution. The variables studied included temperature, time and chemical - precursor ratio. The prepared activated carbon products were analyzed for their composition (proximate analysis) and the porous structure such as surface area and pore size distribution. Those variables studied all influenced the properties of the activated carbon but temperature and chemical ratio appeared to have the largest effect. The maximum BET surface area of $1,856 \text{ m}^2/\text{g}$ was obtained for KOH activation at the activation temperature of 800°C , activation time of 120 min., and chemical ratio of 1:1. For ZnCl_2 activation, maximum BET surface area of $1,427 \text{ m}^2/\text{g}$ was achieved at the temperature 500°C , for 120 min., and 1:1 chemical ratio. Activated carbon from chemical activation showed better adsorption property as compared to that prepared by physical activation, due to much higher specific surface area and larger pore volume.

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ.....	ก
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	จ
สารบัญรูป.....	ฉ1
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาการวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.4 ระเบียบวิธีวิจัย.....	4
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย.....	5
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 วัตถุดิบที่ใช้ผลิตถ่านกัมมันต์.....	6
2.2 โครงสร้างของถ่านกัมมันต์.....	6
2.3 วิธีการผลิตถ่านกัมมันต์.....	10
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	16
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย	
3.1 การเตรียมถ่านกัมมันต์โดยวิธีกระตุ้นทางเคมี.....	18
3.2 การวัดสมบัติของถ่านหิน และถ่านกัมมันต์.....	21
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผล	
4.1 ผลการเตรียมถ่านกัมมันต์โดยใช้ KOH.....	25
4.1.1 ผลการวิเคราะห์แบบประมาณ.....	25
4.1.2 ผลของสถานะกระตุ้นต่อร้อยละผลผลิต.....	27
4.1.3 ผลของสถานะกระตุ้นต่อสมบัติของถ่านกัมมันต์.....	27
4.1.4 กลไกของการกระตุ้นด้วย KOH.....	36

4.2 ผลการเตรียมถ่านกัมมันต์โดยใช้ $ZnCl_2$	42
4.2.1 ผลการวิเคราะห์แบบประมาณ.....	42
4.2.2 ผลของสภาวะกระตุ้นต่อร้อยละผลผลิต.....	44
4.2.3 ผลของสภาวะกระตุ้นต่อสมบัติของถ่านกัมมันต์.....	44
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ	
5.1 การเตรียมถ่านกัมมันต์จากลิกไนท์ โดยการกระตุ้นด้วย KOH.....	60
5.2 การเตรียมถ่านกัมมันต์จากลิกไนท์ โดยการกระตุ้นด้วย $ZnCl_2$	60
5.3 ข้อเสนอแนะ.....	61
บรรณานุกรม.....	62
ภาคผนวก ก. ประวัติผู้วิจัย.....	ก1

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1.1 การนำถ่านกัมมันต์ไปใช้ประโยชน์ในงานด้านต่าง ๆ.....	2
2.1 วัตถุประสงค์สำหรับผลิตถ่านกัมมันต์ ⁽⁵⁾	6
2.2 สมบัติของวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์ ⁽⁵⁾	13
4.1 ผลการวิเคราะห์แบบประมาณของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมโดยใช้ KOH เป็นสารกระตุ้นเปรียบเทียบกับถ่านหินแม่เมาะและถ่านกัมมันต์ ทางการค้า.....	26
4.2 ผลของเวลาและอุณหภูมิที่มีต่อร้อยละผลผลิตและสมบัติของถ่านกัมมันต์ ที่เตรียมได้โดยใช้ KOH.....	29
4.3 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบแบบประมาณของวัตถุดิบและถ่านกัมมันต์ ที่เตรียมโดยใช้ ZnCl ₂	43
4.4 แสดงผลของอุณหภูมิที่มีต่อร้อยละผลผลิตและสมบัติของถ่านกัมมันต์ ที่เตรียมได้ โดยใช้ ZnCl ₂	48
4.5 สมบัติของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากลิกไนท์ โดยวิธีกระตุ้นทางกายภาพ เปรียบเทียบกับวิธีกระตุ้นทางเคมี (ขนาดอนุภาคถ่านหิน 20x30 mesh).....	59

สารบัญรูป

		หน้า
รูปที่ 2.1	โครงสร้างของผลึกแกรไฟต์.....	7
2.2	โครงสร้างของถ่านกัมมันต์.....	8
2.3	รูพรุนแบบต่าง ๆ ในถ่านกัมมันต์.....	9
2.4	หมู่ฟังก์ชันต่าง ๆ บนผิวของถ่านกัมมันต์.....	11
2.5	แผนผังสำหรับการผลิตถ่านกัมมันต์โดยทั่วไป.....	12
2.6	แผนผังสำหรับการผลิตถ่านกัมมันต์แบบเป็นเม็ด.....	15
2.7	แผนผังสำหรับการผลิตถ่านกัมมันต์ทั้งแบบกระตุ้นทางกายภาพ (แผนผังส่วนบน) และกระตุ้นทางเคมี (แผนผังส่วนล่าง).....	16
3.1	เตาเผาแบบท่อ (Tube furnace) ที่ใช้ในการเตรียมถ่านกัมมันต์.....	19
3.2	เครื่อง Thermogravimetric analyzer.....	23
3.3	เครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิวแบบอัตโนมัติ ASAP2010.....	24
4.1	ผลของอุณหภูมิที่มีต่อร้อยละผลผลิตของถ่านกัมมันต์จากถ่านหินแม่เมาะขนาดอนุภาค 20×30 mesh โดยวิธีการกระตุ้นทางเคมี (KOH) ที่สภาวะ : 60 นาที และ KOH:ถ่านหินเท่ากับ 1.0:1.0.....	28
4.2	ผลของอัตราส่วนสารกระตุ้นต่อวัตถุดิบที่มีต่อร้อยละผลผลิตของถ่านกัมมันต์จากถ่านหินแม่เมาะขนาดอนุภาค 20x30 mesh โดยวิธีการกระตุ้นทางเคมี ที่สภาวะเวลาการกระตุ้น 60 นาที.....	30
4.3	เส้นไอโซเทอมการดูดซับของถ่านกัมมันต์จากถ่านหินแม่เมาะขนาดอนุภาค 20x30 mesh โดยวิธีการกระตุ้นทางเคมี (KOH) ที่สภาวะ: (1) 600°C/60นาที / 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.....	31
4.4	ผลของอุณหภูมิที่มีต่อปริมาตรรูพรุนของถ่านกัมมันต์จากถ่านหินแม่เมาะขนาดอนุภาค 20x30 mesh โดยวิธีการกระตุ้นทางเคมี (KOH) ที่สภาวะ : 60 นาที และ KOH : ถ่านหินเท่ากับ 1.0 : 1.0.....	32
4.5	ผลของอัตราส่วนสารกระตุ้นต่อวัตถุดิบที่มีต่อปริมาตรรูพรุนของถ่านกัมมันต์จากถ่านหินแม่เมาะขนาดอนุภาค 20x30 mesh โดยวิธีการกระตุ้นทางเคมี (KOH) ที่สภาวะ : 600°C และเวลา 60 นาที.....	33
4.6	ผลของอัตราส่วนสารกระตุ้นต่อวัตถุดิบที่มีต่อปริมาตรรูพรุนของถ่านกัมมันต์จากถ่านหินแม่เมาะขนาดอนุภาค 20x30 mesh โดยวิธีการกระตุ้นทางเคมี (KOH) ที่สภาวะ : 800°C และเวลา 60 นาที.....	34

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
4.7 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อค่าการดูดซับ ไอโอดีนและพื้นที่ผิวจำเพาะของถ่านกัมมันต์จากถ่านหินแม่เมาะขนาดอนุภาค 20x30 mesh โดยวิธีการกระตุ้นทางเคมี (KOH) ที่สภาวะ : 60 นาที และ KOH : ถ่านหินเท่ากับ 1.0 : 1.0.....	35
4.8 ผลของอัตราส่วนสารกระตุ้นต่อวัตถุดิบที่มีต่อค่าการดูดซับ ไอโอดีนและพื้นที่ผิวจำเพาะ ของถ่านกัมมันต์จากถ่านหินแม่เมาะขนาดอนุภาค 20x30 mesh โดยวิธีการกระตุ้นทางเคมี (KOH) ที่สภาวะ : 600°C/60 นาที.....	37
4.9 ผลของอัตราส่วนสารกระตุ้นต่อวัตถุดิบที่มีต่อค่าการดูดซับ ไอโอดีนและพื้นที่ผิวจำเพาะของถ่านกัมมันต์จากถ่านหินแม่เมาะขนาดอนุภาค 20x30 mesh โดยวิธีการกระตุ้นทางเคมี (KOH) ที่สภาวะ : 800°C/60 นาที.....	38
4.10 ผลของอัตราส่วนสารกระตุ้นต่อวัตถุดิบที่มีต่อขนาดรูพรุนเฉลี่ยของถ่านกัมมันต์จากถ่านหินแม่เมาะขนาดอนุภาค 20x30 mesh โดยวิธีการกระตุ้นทางเคมี (KOH) ที่สภาวะ : 60 นาที.....	39
4.11 ภาพถ่าย SEM ที่กำลังขยาย 1000 เท่า แสดงลักษณะพื้นผิวของถ่านกัมมันต์แม่เมาะขนาด 20x30 mesh (ผลของอุณหภูมิและเวลา).....	40
4.12 ภาพถ่าย SEM ที่กำลังขยาย 1000 เท่า แสดงลักษณะพื้นผิวของถ่านกัมมันต์แม่เมาะขนาด 20x30 mesh (ผลของอุณหภูมิและอัตราส่วนระหว่าง KOH ต่อถ่านหิน).....	41
4.13 ร้อยละผลผลิตของถ่านกัมมันต์จากถ่านหินแม่เมาะขนาด 20x30 mesh โดยวิธีการกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ที่อัตราส่วนสารกระตุ้นต่อวัตถุดิบ และอุณหภูมิในการคาร์บอนไนซ์ต่างกัน (ที่สภาวะเวลาการกระตุ้น 60 นาที).....	45
4.14 ร้อยละผลผลิตของถ่านกัมมันต์จากถ่านหินแม่เมาะขนาด 20x30 mesh โดยวิธีการกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ที่เวลา และอุณหภูมิในการคาร์บอนไนซ์ต่างกัน (ที่อัตราส่วนสารกระตุ้นต่อวัตถุดิบ 1.0 : 1.0).....	46
4.15 เส้นไอโซเทอมการดูดซับแก๊สไนโตรเจนของถ่านกัมมันต์จากถ่านหินแม่เมาะขนาดอนุภาค 20x30 mesh โดยวิธีการกระตุ้นทางเคมี : (1) 500°C / 120 นาที / 1.0:1.0 (2) 500°C / 60 นาที / 1.0:1.0 (3) 500°C / 60 นาที / 0.5:1.0 (4) 400°C / 60 นาที / 0.5:1.0.....	47
4.16 ปริมาตรรูพรุนของถ่านกัมมันต์จากถ่านหินแม่เมาะขนาดอนุภาค 20x30 mesh โดยวิธีการกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ที่อัตราส่วน 0.5:1.0 เวลา 60 นาที.....	50
4.17 ปริมาตรรูพรุนของถ่านกัมมันต์จากถ่านหินแม่เมาะขนาดอนุภาค 20x30 mesh โดยวิธีการกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ที่อัตราส่วน 1.0:1.0 เวลา 60 นาที.....	51

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
4.18 ปริมาตรรูพรุนของถ่านกัมมันต์จากถ่านหินแม่เมาะขนาดอนุภาค 20×30 mesh โดยวิธีการกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ที่อัตราส่วน 1.0:1.0 เวลา 120 นาที.....	52
4.19 พื้นที่ผิวจำเพาะของถ่านกัมมันต์จากถ่านหินแม่เมาะขนาดอนุภาค 20×30 mesh โดยวิธีการกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ที่สภาวะเวลาเดียวกัน (60 นาที) แต่มีอัตราส่วน สารกระตุ้นต่อวัตถุดิบ และอุณหภูมิในการคาร์บอนไนซ์ต่างกัน.....	54
4.20 พื้นที่ผิวจำเพาะของถ่านกัมมันต์จากถ่านหินแม่เมาะขนาดอนุภาค 20×30 mesh โดยวิธีการกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ที่เวลาและอุณหภูมิในการคาร์บอนไนซ์ต่างกัน (อัตราส่วนสารกระตุ้นต่อวัตถุดิบ 1.0 : 1.0).....	55
4.21 ปริมาณการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์จากถ่านหินแม่เมาะขนาด 20×30 mesh โดยวิธีการกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ที่อัตราส่วนสารกระตุ้นต่อวัตถุดิบ และอุณหภูมิ ในการคาร์บอนไนซ์ต่างกัน (เวลาในการกระตุ้น 60 นาที)	56
4.22 ปริมาณการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์จากถ่านหินแม่เมาะขนาด 20×30 mesh โดยวิธีการกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ที่เวลา และอุณหภูมิในการคาร์บอนไนซ์ต่างกัน (อัตราส่วนสารกระตุ้นต่อวัตถุดิบ 1.0 : 1.0).....	57
4.23 พื้นที่ผิวจำเพาะของถ่านกัมมันต์จากถ่านหินลิกไนต์ขนาดอนุภาค 20×30 mesh โดย วิธีการกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ที่ชนิดของถ่านหิน และอุณหภูมิในการคาร์บอนไนซ์ต่างกัน (อัตราส่วนสารกระตุ้นต่อวัตถุดิบ 1.0 : 1.0 และเวลาในการกระตุ้น 60 นาที).....	58

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาการวิจัย

ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) เป็นสารดูดซับความพรุนสูง ซึ่งเตรียมได้จากวัตถุดิบที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ (Carbonaceous material) เช่น ถ่านหิน กะลามะพร้าว ไม้ เปลือกถั่ว โดยการให้ความร้อนแก่วัตถุดิบในบรรยากาศของแก๊สเฉื่อยที่อุณหภูมิระหว่าง 600-900°C เรียกกระบวนการนี้ว่า คาร์บอนไนเซชัน (Carbonization) ซึ่งจะทำให้สารระเหยหลุดออกไปจากวัตถุดิบได้ผลิตภัณฑ์เป็นถ่านชาร์ (Char) ทำให้เกิดโครงสร้างรูพรุนในระดับหนึ่ง และเมื่อนำถ่านชาร์มากระตุ้นต่อด้วยวิธีการที่เหมาะสมจะสามารถเพิ่มรูพรุนและพื้นที่ผิวจำเพาะให้มากขึ้นอีก ผลิตภัณฑ์ที่ได้เรียกว่า ถ่านกัมมันต์ ซึ่งมีสมบัติในการดูดซับสูง

ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากวัตถุดิบต่างชนิดกัน, หรือเตรียมที่สภาวะ หรือวิธีการต่างกันจะได้รับการกระจายของขนาดรูพรุนที่แตกต่างกันด้วย ซึ่งส่งผลกระทบต่อการใช้งานในด้านต่าง ๆ โครงสร้างรูพรุนของถ่านกัมมันต์เป็นสมบัติที่สำคัญที่สุดของถ่านกัมมันต์เนื่องจากความสามารถในการดูดซับถูกกำหนดโดยโครงสร้างรูพรุนขนาดเล็กของถ่านกัมมันต์ โครงสร้างรูพรุนของถ่านกัมมันต์ซึ่งเกิดขึ้นในช่วงการกระตุ้นขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุดิบ อย่างไรก็ตามการปรับสภาพของวัตถุดิบก่อนที่จะทำคาร์บอนไนเซชันและการกระตุ้นหรือการเปลี่ยนแปลงสภาวะของคาร์บอนไนเซชันสามารถเปลี่ยนแปลงโครงสร้างรูพรุนและความสามารถในการดูดซับได้ ความสามารถในการควบคุมการเกิดขึ้นของขนาดและลักษณะของรูพรุนของถ่านกัมมันต์ทำให้สามารถนำถ่านกัมมันต์ไปใช้งานได้มากและมีความหลากหลาย ดังแสดงไว้ในตารางที่ 1.1

จากประโยชน์ของถ่านกัมมันต์ที่มีการนำไปใช้งานได้หลายๆประเภททำให้มีความต้องการถ่านกัมมันต์ในปริมาณมากซึ่งการผลิตในประเทศยังมีไม่เพียงพอ จึงมีการนำเข้าถ่านกัมมันต์จากต่างประเทศมาโดยตลอดตัวอย่างเช่น ในปี พ.ศ. 2543: และ 2544 มีปริมาณการนำเข้าถ่านกัมมันต์คิดเป็นมูลค่า 350 และ 500 ล้านบาทตามลำดับ ⁽¹⁾ ทั้งนี้เนื่องจากโรงงานที่ผลิตถ่านกัมมันต์ในประเทศยังมีไม่มากนักและถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้ยังมีคุณภาพปานกลาง ดังนั้นจึงมีความจำเป็นในการพัฒนางานวิจัยเพื่อผลิตถ่านกัมมันต์ที่มีคุณภาพ เพื่อสามารถพัฒนาองค์ความรู้ขึ้นใช้เองในประเทศและยังเป็นการใช้วัสดุภายในประเทศให้เกิดประโยชน์คุ้มค่าอีกทางหนึ่งด้วย งานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาถึงการผลิตถ่านกัมมันต์จากถ่านหินลิกไนท์ ซึ่งเป็นวัตถุดิบที่ยังมีอยู่มากภายในประเทศ จากการสำรวจข้อมูลถ่านหิน ^(2,3) พบว่าประเทศไทยมีปริมาณถ่านหินสำรองรวมทั้งสิ้น 1,400 ล้านตัน ในปี พ.ศ. 2543 มีปริมาณการใช้ทั้งสิ้นประมาณ 20 ล้านตัน ในจำนวนนี้ 80% ใช้ผลิตกระแสไฟฟ้า 15% ใช้ในอุตสาหกรรมซีเมนต์ และอีก 5% ที่เหลือใช้ในอุตสาหกรรมอื่นๆ เช่น กระบวนการผลิตเส้นใย การบ่มใบยาสูบ เป็นต้น

ตารางที่ 1.1 การนำถ่านกัมมันต์ไปใช้ประโยชน์ในงานด้านต่าง ๆ

ความสามารถของถ่านกัมมันต์	การนำไปใช้ประโยชน์
การกำจัดกลิ่นในที่จำกัดเช่น โรงพยาบาล สถานที่ทำงานและโรงงาน	การทำอากาศให้บริสุทธิ์
การกำจัดไอพิษ เช่น สาร chloropierin และ cyanogen chloride ที่เกิดขึ้นโดยการดูดซับทาง กายภาพและทางเคมี (สำหรับถ่านกัมมันต์แบบ impregnation)	การใช้เป็นหน้ากากกันไอพิษ
การกำจัดหรือขจัดเก็บ xenon, krypton และแก๊ส อื่น ๆ ใน nuclear reactors	การใช้ขจัดเก็บแก๊สใน โรงไฟฟ้านิวเคลียร์
การกำจัดกลิ่นต่าง ๆ เช่น aldehyde, phenol และสารมีสีในโรงงานทำไวน์, เหล้า, เบียร์ และ น้ำอัดลม	การคงไว้หรือเพิ่มรสชาติใน โรงงานผลิตเครื่องดื่ม ต่าง ๆ
การผสมลงในอาหารหรือยาเพื่อลดความเป็นพิษ และดูดซับแก๊สในกระเพาะอาหาร	การใช้เป็นยาหรือส่วนประกอบของยา
การดูดซับทองคำจากสารละลายไซยาไนด์ที่ใช้ แยกทองคำจากแร่	การใช้ทองคำเพิ่มขึ้นของ โรงงานถลุงแร่
การกำจัดโลหะหนัก เช่น cadmium, ตะกั่ว สาร halomethanes เช่น chloroform และยาฆ่าแมลง เช่น DDT, dieldrin, adrin เป็นต้น	การกำจัดน้ำเสีย

ดังนั้นหากสามารถศึกษาวิจัยเพื่อผลิตถ่านกัมมันต์ที่มีคุณภาพจากถ่านหินลิกไนท์จะทำให้มีข้อมูลพื้นฐานที่จำเป็นต่อการพัฒนาเทคโนโลยีของการผลิตในระดับอุตสาหกรรมขึ้นใช้เองในประเทศได้เกิดการประหยัดเงินตราจากการนำเข้า ในระยะยาวจะช่วยให้สามารถสร้างขีดความสามารถในการพึ่งตนเองทางเทคโนโลยีได้อีกทางหนึ่ง

วิธีการผลิตถ่านกัมมันต์โดยทั่วไปมี 2 วิธี วิธีแรกเป็นวิธีทางกายภาพ (Physical activation) ซึ่งต้องทำให้เป็นถ่านคาร์บอนก่อน เรียกว่าขั้นตอนการทำคาร์บอนไนเซชัน (Carbonization) จากนั้นต้องนำไปทำการกระตุ้นที่อุณหภูมิสูงด้วยไอน้ำหรือแก๊ส CO_2 เรียกว่าขั้นตอนการกระตุ้น (Activation) ส่วนอีกวิธีหนึ่งเป็นวิธีกระตุ้นทางเคมี (Chemical activation) ซึ่งใช้สารเคมี เช่น ZnCl_2 , KOH หรือ H_3PO_4 เป็นสารกระตุ้นซึ่งจะทำได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่า สำหรับวิธีทางกายภาพนั้นคณะวิจัยชุดนี้ได้รับทุนอุดหนุนวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2542⁽⁴⁾ เพื่อทำการศึกษานี้ในเบื้องต้นอยู่แล้ว ดังนั้นเพื่อประโยชน์ในการศึกษาเปรียบเทียบทั้ง 2 วิธี คณะวิจัยชุดนี้จึงเลือกเน้นการผลิตโดยวิธีกระตุ้นทางเคมีเนื่องจากเป็นวิธีที่พบว่าสามารถเพิ่มรูพรุนได้มากและให้พื้นที่ผิวที่ว่างไว้ได้มากกว่า อีกทั้งงานวิจัยทางด้านนี้ยังมีไม่มากนัก

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. ศึกษาการผลิตถ่านกัมมันต์จากถ่านหินลิกไนท์ โดยกระบวนการกระตุ้นทางเคมีในอุปกรณ์เตาเผาแบบท่อ (Tube furnace)
2. ศึกษาผลของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีอิทธิพลต่อการผลิตถ่านกัมมันต์ ได้แก่ ถ่านหินจากแหล่งต่างกัน ชนิดของสารเคมีที่ใช้ในการกระตุ้น อุณหภูมิ เวลา และความเข้มข้นของสารเคมีที่ใช้กระตุ้น
3. วิเคราะห์ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ แบ่งเป็นการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและทางเคมี และเปรียบเทียบถ่านกัมมันต์ที่ผลิตโดยวิธีกระตุ้นทางเคมีกับถ่านกัมมันต์ที่ผลิตโดยวิธีกระตุ้นทางกายภาพของถ่านหินจากแหล่งเดียวกัน

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. ติดตั้งเตาเผาแบบท่อพร้อมระบบป้อนแก๊สไนโตรเจนและชุดวัดอุณหภูมิ
2. บดย่อยถ่านหินตัวอย่างและคัดขนาดโดยใช้เครื่องบดย่อยวัสดุและชุดตะแกรงร่อน
3. วิเคราะห์สมบัติของถ่านหิน โดยใช้วิธีวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate analysis)
4. นำถ่านที่คัดขนาดแล้วมาแช่ในสารละลายของสารเคมีที่ใช้กระตุ้น (ZnCl_2 หรือ KOH) ตามความเข้มข้นที่กำหนดพร้อมแช่
5. นำถ่านหินที่แช่สารเคมีแล้วมาอบแห้งที่ 120°C
6. นำถ่านหินจากข้อ 5 มากระตุ้นโดยให้ความร้อนในเตาเผาแบบท่อที่อุณหภูมิสูงโดยผ่านแก๊สไนโตรเจนอย่างต่อเนื่องเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ถ่านกัมมันต์

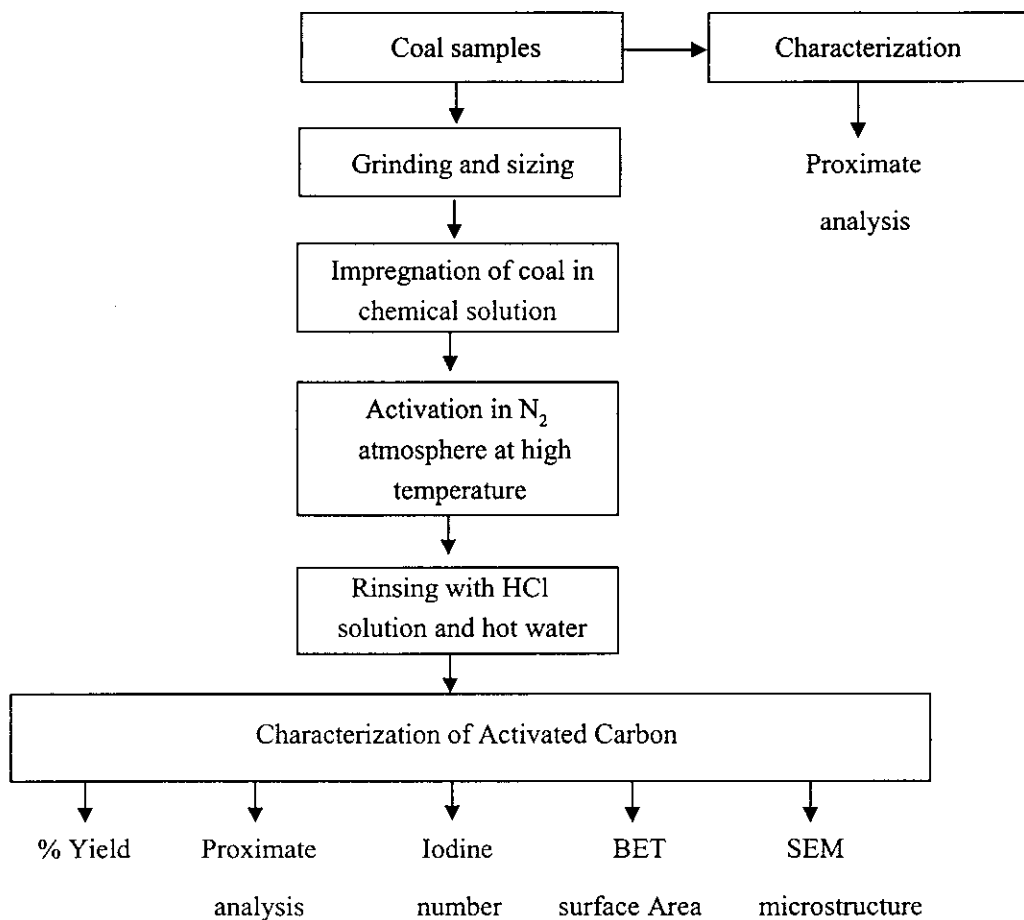
7. ล้างถ่านกัมมันต์ที่ได้ด้วยสารละลาย HCl และน้ำร้อน และอบให้แห้ง
8. เปลี่ยนตัวแปรที่ศึกษา ได้แก่ ถ่านหินจาก 2 แหล่ง สารเคมีที่ใช้กระตุ้น 2 ชนิด, ความเข้มข้นของสารเคมี, อุณหภูมิและเวลาที่ใช้กระตุ้น
9. นำถ่านกัมมันต์ที่ได้จากข้อ 7 มาวิเคราะห์สมบัติต่าง ๆ ได้แก่ ร้อยละของผลผลิต, Proximate analysis, ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ(BET surface area) และปริมาตรรูพรุนขนาดต่างๆ
10. ถ่ายภาพ Microstructure ของถ่านกัมมันต์ที่ได้โดยใช้ SEM เพื่อตรวจสอบเปรียบเทียบลักษณะรูพรุนของพื้นผิว
11. เปรียบเทียบผลการทดลองที่ได้กับถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จากถ่านหินเดียวกันโดยวิธีกระตุ้นทางกายภาพและถ่านกัมมันต์ทางการค้า

1.4 ระเบียบวิธีวิจัย

วิธีการศึกษาประกอบด้วยขั้นตอนหลัก 5 ขั้นตอนดังนี้

1. ขั้นตอนการวิเคราะห์สมบัติของถ่านหิน ใช้วิธีวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate analysis) เพื่อหา % ความชื้น, % สารระเหย, % เถ้า และ % คาร์บอนคงตัว
2. ขั้นตอนการเตรียมวัตถุดิบ ทำโดยการเตรียมถ่านหินด้วยการบดย่อยและคัดขนาดแล้วแช่ในสารละลายของ Zinc chloride หรือ Potassium hydroxide พร้อมเขย่าตามเวลาที่กำหนด จากนั้นนำมาอบให้แห้ง
3. ขั้นตอนการกระตุ้น ทำโดยการให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงในเตาเผาแบบท่อในบรรยากาศการไหลของของแก๊ส N_2
4. ขั้นตอนการล้างสารเคมี ทำโดยการล้างด้วยสารละลาย Hydrochloric acid และน้ำร้อน และทำให้แห้งโดยการอบ
5. ขั้นตอนการวิเคราะห์สมบัติถ่านกัมมันต์
 - หาค่าร้อยละผลผลิต (% yield)
 - ค่าไอโอดีน (Iodine number)
 - ค่าวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate analysis) เพื่อหา % ความชื้น, % สารระเหย, % เถ้า และ % คาร์บอนคงตัว
 - ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะด้วยเทคนิค BET เพื่อหาพื้นที่ผิวทั้งหมดต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักและปริมาตรรูพรุนแบบต่างๆ
 - ศึกษา microstructure ของถ่านกัมมันต์ที่ได้ด้วยเครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

ตัวแปรที่จะศึกษาสำหรับขั้นตอนที่ 1, 2 และ 3 ได้แก่ ถ่านหินจาก 2 แหล่ง ชนิดของสารเคมี 2 ชนิด, ความเข้มข้น, อุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการกระตุ้น แผนภูมิข้างล่างสรุปขั้นตอนการทดลอง



1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย

1. สามารถผลิตถ่านกัมมันต์จากถ่านหินลิกไนท์ซึ่งจะช่วยให้มีการใช้ประโยชน์จากถ่านหินที่มีอยู่ในประเทศได้อย่างคุ้มค่า และลดการนำเข้าถ่านกัมมันต์จากต่างประเทศ
2. ข้อมูลที่ได้สามารถใช้เปรียบเทียบกับการผลิตถ่านกัมมันต์จากวิธีการกระตุ้นทางกายภาพหรือจากวัสดุอื่น ๆ ในแง่ของสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตทั้งเชิงปริมาณและคุณภาพ
3. สร้างฐานข้อมูลที่จำเป็นเพื่อใช้ในการศึกษาแนวโน้มของการผลิตถ่านกัมมันต์ในระดับอุตสาหกรรมต่อไป

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 วัสดุคิบที่ใช้ผลิตถ่านกัมมันต์

วัสดุคิบที่ใช้ผลิตถ่านกัมมันต์โดยทั่วไปเป็นสารอินทรีย์ที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก ได้แก่ กะลามะพร้าว กะลาปาล์ม ไม้ เปลือกถั่ว เมล็ดในผลไม้ ชานอ้อย ถ่านหิน เป็นต้น ตารางที่ 2.1 แสดงตัวอย่างวัสดุคิบที่นิยมใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์ในระดับอุตสาหกรรม โดยจัดลำดับความสำคัญตามกำลังการผลิตของถ่านกัมมันต์ที่ได้

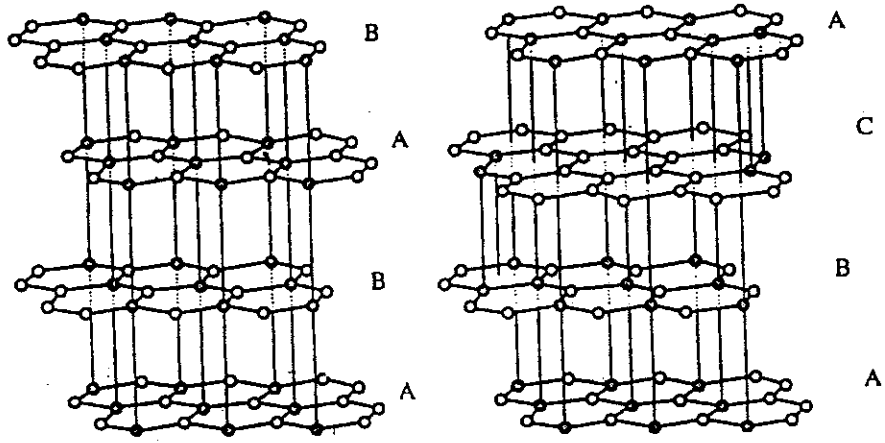
ตารางที่ 2.1 วัสดุคิบสำหรับผลิตถ่านกัมมันต์⁽⁵⁾

วัสดุคิบ	ปริมาณถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้ (ตันต่อปี)
ไม้	130,000
ถ่านหินสัคย์สูง	100,000
ถ่านหินลิกไนต์	50,000
ถ่านพีท	35,000
กะลามะพร้าว	10,000
อื่น ๆ	10,000

วัสดุคิบที่ใช้ผลิตถ่านกัมมันต์ที่มีคุณภาพดีขึ้นกับปัจจัยหลายอย่าง เช่น มีปริมาณคาร์บอนสูง มีปริมาณเถ้าต่ำ มีความหนาแน่นสูงและ ราคาถูก เป็นต้น นอกจากนี้สมบัติของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ยังขึ้นกับอีกหลายปัจจัย เช่น วิธีการเตรียม สารที่ใช้กระตุ้น และสภาวะของการเตรียม เป็นต้น

2.2 โครงสร้างของถ่านกัมมันต์

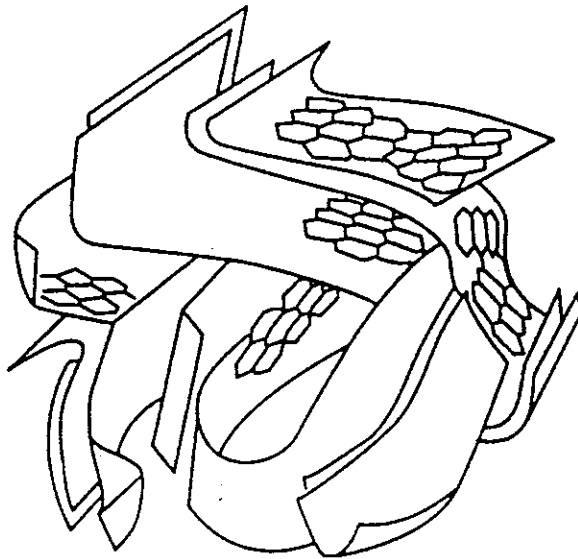
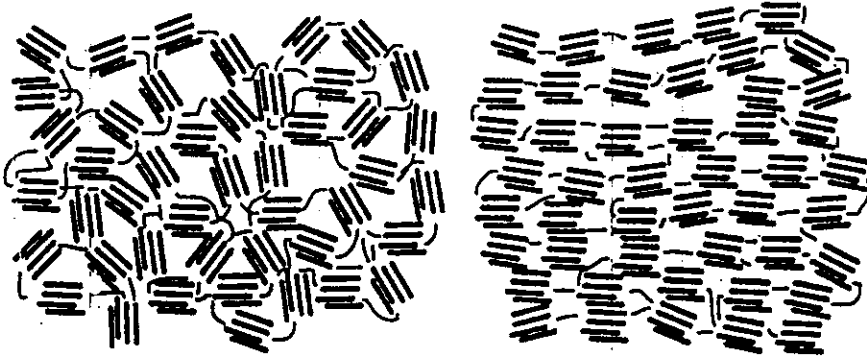
ถ่านกัมมันต์มีโครงสร้างคล้ายแกรไฟต์แต่มีชั้นแกรฟีน (Graphene layer) ที่ไม่เป็นระเบียบ รูปที่ 2.1 แสดงภาพโครงสร้างของแกรไฟต์และรูปที่ 2.2 แสดงภาพโครงสร้างของถ่านกัมมันต์ซึ่งคล้ายกับการนำชั้นของแผ่นกระดาษจำนวนหนึ่งมาขยำรวมกันเป็นก้อน ซึ่งชั้นกระดาษ คือ ชั้นแกรฟีน การขยำเป็นก้อนทำให้ชั้นแกรฟีนไม่เป็นระเบียบและเกิดมีช่องว่างหรือรูพรุนขนาดเล็กระดับโมเลกุลระหว่างชั้นแกรฟีนเหล่านั้น โดยลักษณะรูพรุนนั้นมีลักษณะไม่แน่นอน เช่น เป็นแบบคล้ายหลอดแคปิลลารี (Capillary pores) หรือแบบแผ่นขนาน (Slit pores) บางรูพรุนมีลักษณะเปิดข้างหนึ่งปิดข้างหนึ่ง อาจมีรูปร่างรูพรุนเป็นรูปตัววี รูปคอกขวด เป็นต้น รูพรุนที่มีอยู่ในถ่านกัมมันต์โดยทั่วไปจะมีขนาดต่าง ๆ กัน (รูปที่ 2.3) รูพรุนที่มีขนาดใหญ่กว่า 50 นาโนเมตร (nm) เรียกว่า แมคโครพอร์ (Macropores) เนื่องจากรูพรุนขนาดใหญ่มีพื้นที่ผิวน้อยกว่ารูพรุนขนาดเล็ก แมคโครพอร์จึงเป็นเพียง



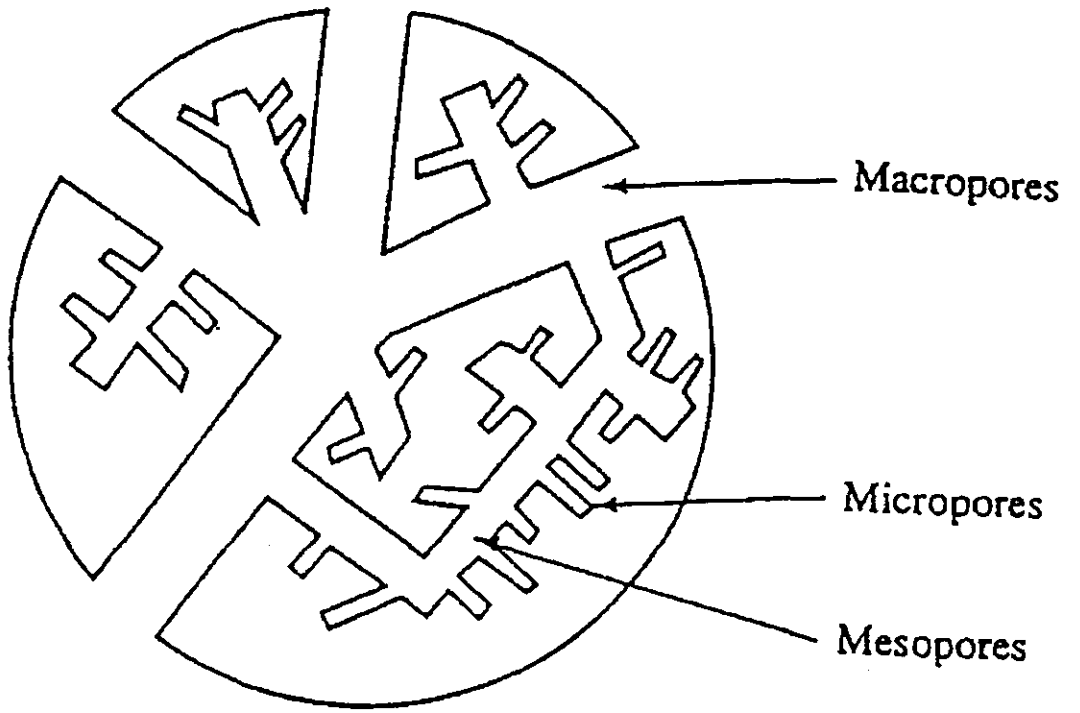
(ก) แบบ hexagonal

(ข) แบบ rhombohedral

รูปที่ 2.1 โครงสร้างของผลึกแกรไฟต์



รูปที่ 2.2 โครงสร้างของถ่านกัมมันต์



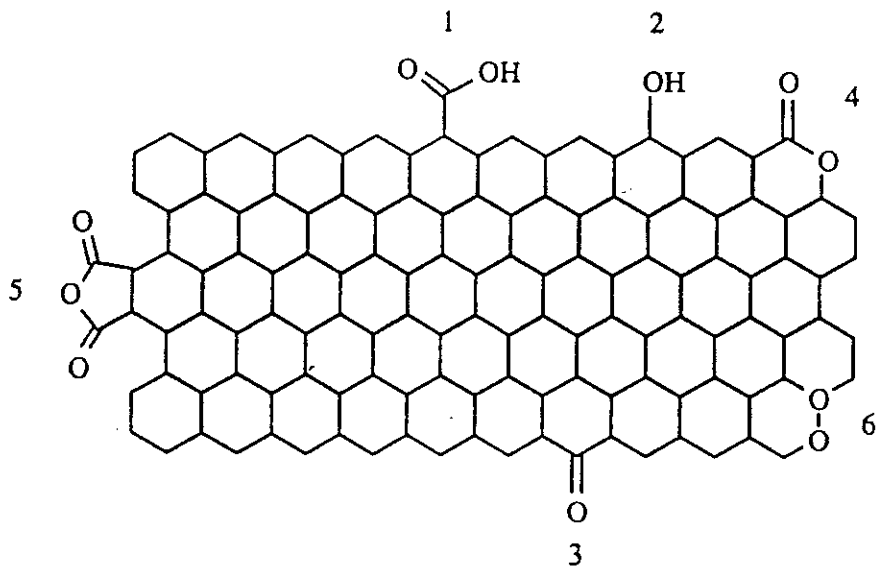
รูปที่ 2.3 รูพรุนแบบต่างๆ ในถ่านกัมมันต์

ทางส่งผ่านอนุภาคที่ถูกดูดซับเข้าไปในรูพรุนขนาดเล็กกว่าและมีผลต่ออัตราเร็วในการดูดซับ ส่วนรูพรุนที่มีขนาดอยู่ระหว่าง 2-50 นาโนเมตร เรียกว่า มีโซพอร์ (Mesopores) หรือรูพรุนขนาดกลางมีพื้นที่ผิวมากกว่าแมโครพอร์ รูพรุนในช่วงขนาดนี้จะช่วยในการดูดซับสารได้บ้าง และไมโครพอร์ (Micropores) หรือรูพรุนขนาดเล็กซึ่งมีขนาดเล็กกว่า 2 นาโนเมตร ซึ่งมีพื้นที่ผิวมากที่สุด จึงมีความสำคัญที่สุดในการดูดซับ วัตถุประสงค์ต่างกันและวิธีการผลิตถ่านกัมมันต์ที่แตกต่างกันจะทำให้เกิดการกระจายขนาดของรูพรุน (Pore size distribution) ที่แตกต่างกันไปด้วย

ความจุของการดูดซับนอกจากจะขึ้นกับพื้นที่ผิวแล้วยังขึ้นกับลักษณะและธรรมชาติของผิวด้วย ถ้าผิวของถ่านกัมมันต์บริเวณดูดซับเป็นระนาบพื้นฐานซึ่งมีแต่คาร์บอนอะตอมไม่มีหมู่ฟังก์ชัน (Functional group) อื่นๆ การดูดซับจะเกิดจากแรงแวนเดอร์วาลส์ หรืออาจเกิดจากไพอิเล็กตรอน (π electron) ซึ่งแรงยึดเหนี่ยวทั้งสองแบบนี้เป็นแรงที่ค่อนข้างอ่อน แม้ว่าจะดูดซับได้แต่โมเลกุลของสารถูกดูดซับจะหลุดออกได้ง่าย แต่ถ้าผิวของถ่านบริเวณดูดซับมีหมู่ฟังก์ชันอยู่ด้วยการดูดซับจะเกิดจากแรงยึดเหนี่ยวที่แข็งแรงกว่า โมเลกุลของสารถูกดูดซับจะหลุดออกยากกว่า รูปที่ 2.4 แสดงหมู่ฟังก์ชันบนผิวของถ่านกัมมันต์ซึ่งมีทั้งพวกออกไซด์ของกรด เช่น หมู่ carbonyls, phenols, lactones, aldehydes, ketones เป็นต้น และพวกออกไซด์ของเบส เช่น หมู่ hydroxide, carbonate เป็นต้น หมู่ฟังก์ชันที่เป็นออกไซด์ของกรด สามารถดูดซับโมเลกุลที่เป็นเบสได้ดี ส่วนหมู่ฟังก์ชันที่เป็นออกไซด์ของเบสสามารถดูดซับโมเลกุลที่เป็นกรดได้ดี การมีหมู่ฟังก์ชันบนผิวของถ่านกัมมันต์เกิดจากอิเล็กตรอนอิสระ ซึ่งอยู่ในสภาพที่ไม่เสถียรและมีเวเลนซ์ไม่อิ่มตัว (Unsaturated valencies) จึงพยายามที่จะเกาะกับอะตอมหรือโมเลกุลอื่น เช่น ออกซิเจนในอากาศ หรือ อะตอมอื่น ๆ ที่มีอยู่ในสารตั้งต้น การเกาะกับอะตอมหรือโมเลกุลอื่นเป็นพันธะทางเคมีที่แข็งแรง และกลายเป็นออกไซด์ เกิดเป็นหมู่ฟังก์ชันต่าง ๆ บนผิวของถ่านกัมมันต์ดังกล่าวข้างต้น

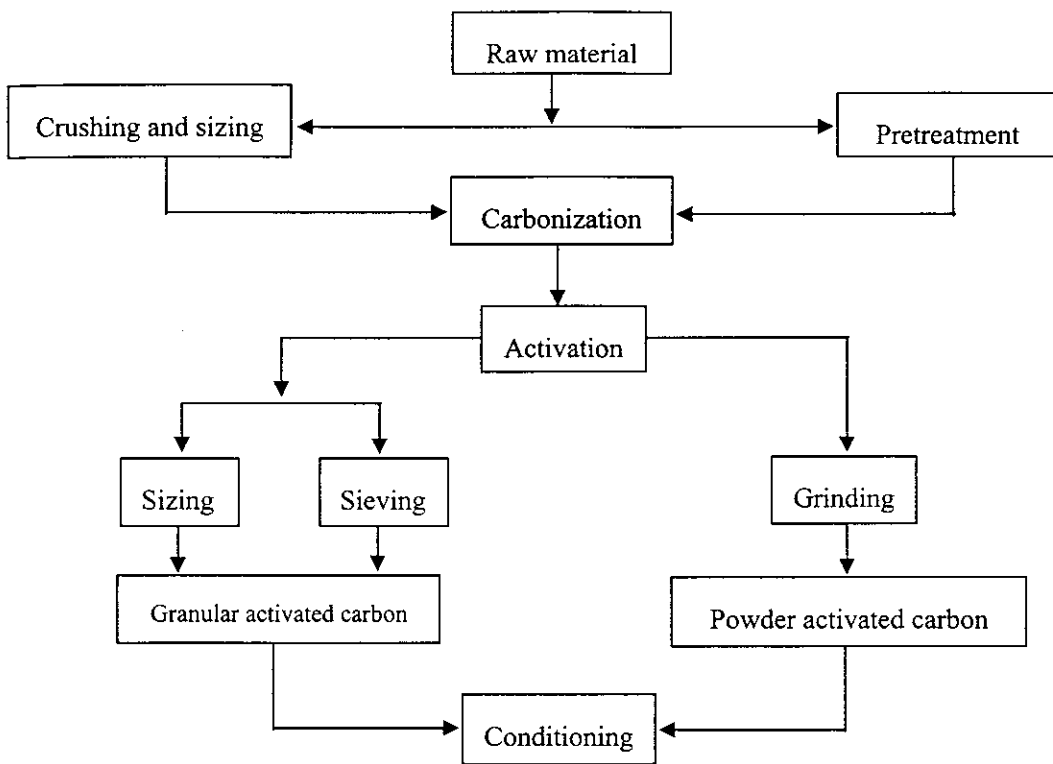
2.3 วิธีการผลิตถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์ผลิตได้จากวัตถุดิบที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก เช่น กะลามะพร้าว เปลือกถั่ว แกลบ เมล็ดผลไม้ ยาง และถ่านหิน เป็นต้น ตารางที่ 2.1 แสดงปริมาณของการใช้วัตถุดิบชนิดต่าง ๆ ในการผลิตถ่านกัมมันต์ โดยทั่วไปกรรมวิธีการผลิตถ่านกัมมันต์ประกอบด้วยขั้นตอนใหญ่ ๆ 3 ขั้นตอน ได้แก่ การเตรียมวัตถุดิบ การคาร์บอนิเซชัน (Carbonization) และการกระตุ้น (Activation) รายละเอียดแสดงในรูปที่ 2.5 การเลือกวัตถุดิบต้องดูจากสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ต้องการ สมบัติของวัตถุดิบ (ดูตารางที่ 2.2) ตลอดจนวิธีที่จะทำการผลิตด้วย ส่วนในขั้นตอนการเตรียมวัตถุดิบนั้น จะนำวัตถุดิบมาบดและคัดขนาดก่อนที่จะนำไปทำการคาร์บอนิเซชัน แต่สำหรับวัตถุที่มีความแข็งและเหนียวมาก ทำให้การบดวัตถุดิบทำได้ยาก อาจนำวัตถุดิบนั้นไปคาร์บอนิเซชันก่อนแล้วจึงนำมาบดและคัดขนาดต่อไป ถ้าวัตถุดิบมีลักษณะเป็นผงอาจนำมาทำเป็นเม็ดก่อน โดยใช้ตัวประสาน (Binder) ซึ่งเป็นสารที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ เช่น แป้ง น้ำมันเตา หรือ ทาร์ (Tar) ซึ่งเป็นผลพลอยได้จาก



รูปที่ 2.4 หมู่ฟังก์ชันต่างๆบนผิวของถ่านกัมมันต์

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



รูปที่ 2.5 แผนผังสำหรับการผลิตถ่านกัมมันต์โดยทั่วไป

ตารางที่ 2.2 สมบัติของวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์⁽⁵⁾

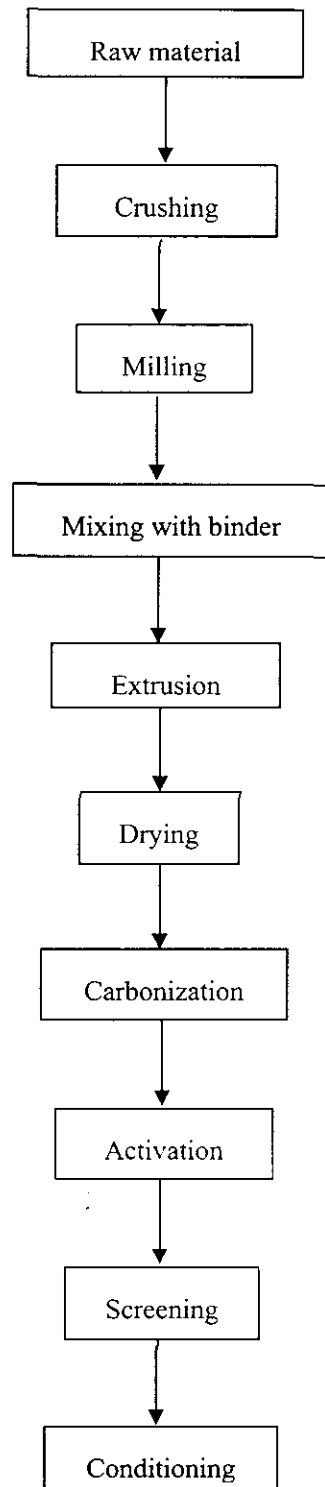
Raw Material	Carbon (wt. %)	Volatiles (wt. %)	Ash (wt. %)	Density (cm ³ g ⁻¹)	Texture of activated carbon
Soft wood	40-45	55-60	0.3-1.1	0.4-0.5	Soft, Large pore volume
Hard wood	40-42	55-60	0.3-1.2	0.55-0.80	Soft, Large pore volume
Lignin	35-40	58-60	-	0.3-0.4	Soft, Large pore volume
Nutshells	40-45	55-60	-	1.4	Hard, Large micropore volume
Lignite	55-70	25-40	5-6	1.0-1.35	Hard, Small pore volume
Soft coal	65-80	20-30	2-12	1.25-1.50	Medium hard, Medium pore volume
Petroleum coke	70-85	15-20	0.5-0.7	1.35	Medium hard, Medium pore volume
Semi-hard coal	70-75	10-15	5-15	1.45	Hard, Large pore volume
Hard coal	85-95	5-10	2-15	1.5-1.8	Hard, Large pore volume

กระบวนการคาร์โบไนเซชัน เมื่อทำเป็นเม็ดแล้วจึงนำไปทำคาร์โบไนเซชันและทำการกระตุ้นต่อไป ขั้นตอนการผลิตแสดงในรูปที่ 2.6

คาร์โบไนเซชันเป็นกระบวนการทางไพโรไลซิสทำโดยการเผาวัตถุดิบในที่อับอากาศที่อุณหภูมิต่ำกว่า 800°C ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์สามประเภทได้แก่ ถ่านที่มีลักษณะสีดำ เรียกว่า ชาร์ (Char) ส่วนที่เป็นของเหลวเรียกว่าทาร์ (Tar) และแก๊ส คาร์โบไนเซชันเป็นขั้นตอนการพัฒนาโครงสร้างรูพรุนในวัตถุดิบโดยกระบวนการทางความร้อนทำให้เกิดการสลายตัวทางเคมีของสารที่ไม่ใช่คาร์บอน (เช่น ไฮโดรเจน, ออกซิเจน และไนโตรเจน) ออกมาในรูปของของเหลวและแก๊ส มีผลให้ชาร์เป็นถ่านที่มีปริมาณคาร์บอนสูงเกินกว่าวัตถุดิบ แต่ยังสามารถในการดูดซับต่ำเพราะยังมีทาร์ตกค้างอยู่ในช่วงรูพรุนหรือเกาะอยู่ตามผิวจึงจำเป็นต้องนำถ่านชาร์ไปผ่านกระบวนการกระตุ้นต่อไป ตัวแปรในการทำคาร์โบไนเซชันได้แก่ ชนิดของวัตถุดิบ อุณหภูมิ เวลาและอัตราการให้ความร้อน อุณหภูมิเป็นตัวแปรที่สำคัญเนื่องจากเป็นพลังงานที่ใช้ทำให้เกิดการแตกหักตรงบริเวณที่มีพันธะที่อ่อนหรือหมู่ที่หลุดออกได้ง่าย ทำให้ได้สารระเหยเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ที่มีโครงสร้างโมเลกุลหรือหมู่ที่มีขนาดเล็ก เช่น น้ำ แอมโมเนีย ทาร์ และแก๊สต่าง ๆ ส่วนที่เหลืออยู่เป็นถ่านชาร์ซึ่งมีโครงสร้างโมเลกุลแบบวงแหวนและอะโรมาติกหลักซึ่งคาร์บอนจะมีการจัดระเบียบของโครงสร้างมากขึ้นไปตามอุณหภูมิ ส่วนอัตราการให้ความร้อนนั้นมีความสำคัญต่อปริมาณและองค์ประกอบของสารระเหยที่ได้จากการทำคาร์โบไนเซชัน ถ้าอัตราการให้ความร้อนสูง ปริมาณสารระเหยจะถูกปลดปล่อยอย่างรวดเร็ว คาร์บอนจะเรียงตัวเป็นระเบียบน้อยทำให้เกิดช่องว่างมากเป็นรูพรุนขนาดใหญ่กว่าเมื่อเทียบกับวัตถุดิบที่มีอัตราการให้ความร้อนต่ำ

โดยทั่วไปการกระตุ้นเป็นการทำให้คาร์บอนหรือถ่านมีความพรุนมากขึ้นและทำให้มีความสามารถในการดูดซับสูงขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากการเพิ่มพื้นที่ผิวและการทำให้ผิวมีความว่องไวมากขึ้น การเพิ่มพื้นที่ผิวนอกเหนือจากการใช้พลังงานความร้อนที่ทำให้เกิดการแตกหักของพันธะหรือหมู่ที่หลุดออกได้ง่ายแล้ว ในปฏิกิริยาเคมีของการกระตุ้นยังกำจัดการต่าง ๆ ที่ค้างค้ำอยู่ในช่องว่างระหว่างผลึกคาร์บอนออกไปจากบริเวณที่ทำหน้าที่ดูดซับอีกด้วย ส่วนการทำให้ผิวมีความว่องไวมากขึ้นเกิดจากปฏิกิริยาเคมีทำให้โมเลกุลบางกลุ่มหลุดออกไปและเกิดส่วนที่มีอำนาจดูดซับขึ้นมาแทน นอกจากนี้ปฏิกิริยาเคมีในการกระตุ้น ยังช่วยให้คาร์บอนจัดเปลี่ยนโครงสร้างใหม่ให้มีความว่องไวในการดูดซับสูงขึ้น

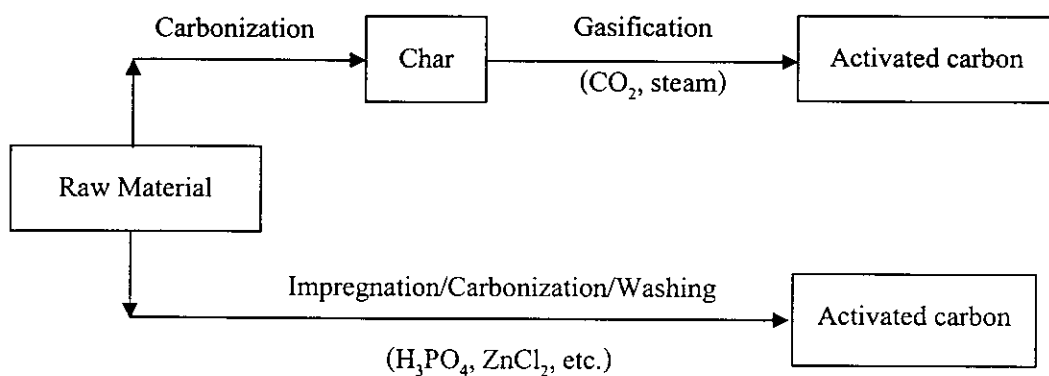
วิธีการกระตุ้นแบ่งออกเป็น 2 แบบ ได้แก่ วิธีการกระตุ้นทางกายภาพ (Physical activation) และวิธีการกระตุ้นทางเคมี (Chemical activation) รูปที่ 2.7 แสดงแผนผังของวิธีการผลิตทั้ง 2 แบบสำหรับวิธีการกระตุ้นทางกายภาพซึ่งเป็นการผลิตถ่านกัมมันต์โดยที่ผิวคาร์บอนเกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ เช่น เกิดมีรูพรุนขนาดต่าง ๆ ทำให้มีพื้นที่ผิวมากขึ้น และคาร์บอนมีการจัดเรียงโครงสร้างใหม่ซึ่งจะเพิ่มความสามารถในการดูดซับให้สูงขึ้น โดยทั่วไปสารที่ใช้ในการกระตุ้นทางกายภาพได้แก่ ไออน้ำ, CO_2 , อากาศ, และ O_2 โดยใช้ร่วมกับการให้ความร้อน



รูปที่ 2.6 แผนผังสำหรับการผลิตถ่านกัมมันต์แบบเป็นเม็ด

การกระตุ้นทางเคมี

โดยทั่วไปการกระตุ้นทางเคมีมักนิยมใช้กับวิธีการผลิตถ่านกัมมันต์ที่มีวัตถุดิบเป็นสารประกอบคาร์บอนที่มาจากพืชและชีวมวล โดยใช้การแช่วัตถุดิบกับสารเคมีก่อนแล้วนำสารมาทำการคาร์บอนไนซ์ที่อุณหภูมิในช่วง 400-800°C ซึ่งขึ้นกับประเภทของวัตถุดิบ และต้องทำการล้างสารเคมีออกก่อนนำไปใช้ สารเคมีส่วนใหญ่จะนำกลับมาใช้ใหม่ได้ หน้าที่ทั่วไปของสารเคมีที่ใช้กระตุ้นนั้นคือ การเข้าไปทำปฏิกิริยากับวัตถุดิบซึ่งสลายตัวจากความร้อนและเพื่อลดการหลุดออกไปของสารระเหย (Devolatilization) มีผลให้ลดการหดตัว (Shrinkage) และเพิ่มผลผลิตของถ่านกัมมันต์ สารเคมีที่ใช้กันมากได้แก่ Phosphoric acid (H_3PO_4), Zinc chloride ($ZnCl_2$), Potassium hydroxide (KOH) และ Potassium carbonate (K_2CO_3) เป็นต้น



รูปที่ 2.7 แผนผังสำหรับการผลิตถ่านกัมมันต์ทั้งแบบกระตุ้นทางกายภาพ (แผนผังส่วนบน) และกระตุ้นทางเคมี (แผนผังส่วนล่าง)

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการผลิตถ่านกัมมันต์มีมานานแล้วอย่างต่อเนื่องจนถึงปัจจุบัน⁽⁵⁻¹³⁾ ส่วนใหญ่เป็นงานวิจัยที่รายงานถึงสถานะที่เหมาะสมที่สุดในการผลิตถ่านกัมมันต์ให้ได้คุณภาพดีจากวัตถุดิบต่าง ๆ กัน เช่น ถ่านหิน, กะลามะพร้าว, ชังข้าวโพด, ชานอ้อย, เปลือกถั่ว, เม็ดในของผลไม้, เปลือกข้าว เป็นต้น โดยทั่วไปสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้ขึ้นกับหลายปัจจัย เช่น วัตถุดิบที่ใช้, วิธีการเตรียม, สารที่ใช้กระตุ้น โครงสร้างรูพรุนและเคมีของพื้นผิว⁽⁵⁾ ซึ่งจะทำให้สามารถเตรียมถ่านกัมมันต์ไปใช้งานได้หลายด้านแตกต่างกันไปด้วย

สำหรับถ่านหินนั้นพบว่าถ่านหินชนิด Bituminous เป็นถ่านหินที่นิยมนำไปใช้ผลิตถ่านกัมมันต์ที่ได้คุณภาพดี เนื่องจากมีโครงสร้างที่มีความหนาแน่นสูง มีความแกร่งและทนทานต่อการใช้งาน⁽¹¹⁾ ส่วนถ่านหินศักย์ต่ำ เช่น Lignite หรือ Subbituminous จะให้คุณภาพต่ำกว่า เนื่องจากในโครงสร้างมีความหนาแน่นและมีสารอะโรมาติกน้อยกว่า ส่งผลให้มีพื้นที่ผิวและรูพรุนต่ำกว่า⁽¹²⁾ อย่างไรก็ตาม การผลิตถ่านกัมมันต์จากถ่านหินดังกล่าวเนื่องมาจากใช้วิธีการผลิตโดยการกระตุ้นทางกายภาพ ซึ่งพบว่าถ้าต้องการได้ถ่านกัมมันต์ที่มีรูพรุนของพื้นที่ผิวสูงมากก็ต้องทำการกระตุ้นที่อุณหภูมิสูงมาก

(>800°C) ซึ่งมีข้อเสียคือทำให้สูญเสียองค์ประกอบคาร์บอนไปมาก ส่งผลให้ร้อยละผลผลิตต่ำ โดยเฉพาะอย่างยิ่งถ่านหินสัคซ์ต่ำ ดังนั้นในปัจจุบันจึงมีแนวโน้มที่นักวิจัยจะให้ความสนใจในการผลิตถ่านกัมมันต์จากถ่านหินโดยวิธีทางเคมี^(9,10,13) ซึ่งสามารถทำการกระตุ้นได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่าและมีการกระจายขนาดของรูพรุนมากกว่าส่งผลให้ได้พื้นที่ผิวสูงกว่าได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งวิธีทางเคมีที่ใช้สารเคมีต่าง ๆ กัน เช่น $ZnCl_2$, H_3PO_4 , KOH , $CaCl_2$ และ Carbohydrates นั้นสามารถเพิ่มผลผลิตปรับปรุงหรือเปลี่ยนแปลงขนาดและปริมาณของรูพรุนทำให้เพิ่มความแกร่งและได้ถ่านกัมมันต์ที่มีคุณภาพดีขึ้น อีกทั้งยังมีสมบัติทางเคมีของพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ที่เหมาะสมกับการใช้งานทั้งด้านการดูดซับในทางอุตสาหกรรมได้หลากหลายมากขึ้น และงานวิจัยทางด้านนี้สามารถนำไปสู่ความเข้าใจถึงกลไกการเกิดรูพรุน เช่น การเพิ่มความว่องไวของพื้นผิวดูดซับ ซึ่งต้องอาศัยข้อมูลจากเครื่องมือวิเคราะห์ทางเคมีขั้นสูงประกอบ เช่น NMR spectrometer และ FTIR spectrometer เป็นต้น (10, 13-16)

Kadlec⁽¹⁷⁾ สังเกตพบว่ารูพรุนของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้โดยวิธีทางเคมีและทางกายภาพมีความแตกต่างกัน ในกรณีของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมโดยวิธีกระตุ้นทางเคมี พบว่ารูพรุนส่วนใหญ่มีรูปร่างแบบขวด ทั้งนี้เนื่องจากปฏิกิริยาการกระตุ้นเกิดขึ้นต่อเมื่ออุณหภูมิขึ้นถึง 300 °C โดยเนื้อคาร์บอนส่วนใหญ่มีการสลายตัวด้วยความร้อนไปแล้ว แก๊สที่เกิดขึ้นในช่วงการสลายตัวด้วยความร้อนดังกล่าวจะทำให้เกิดโพรงขึ้นในเนื้อคาร์บอนและหนีออกไปได้ ส่วนรูพรุนของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมโดยวิธีกระตุ้นทางกายภาพส่วนใหญ่มีลักษณะแบบรูปกรวย (Cone) เนื่องจากมีความเข้มข้นของไอน้ำที่แตกต่างกันภายในอนุภาคเดียวกัน ปฏิกิริยาจึงเกิดขึ้นที่บริเวณปากทางเข้าของรูพรุนมากกว่าเกิดภายในกลางรูพรุน ดังนั้นจึงมีลักษณะแบบรูปกรวยแบบที่ปากรูพรุนมีความกว้างมาก

Wennerberg และ O'Grady⁽¹⁸⁾ เตรียมถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวสูงมาก โดยใช้วัตถุดิบ เช่น ถ่านหิน, ถ่านปิโตรเลียมโค้ก และถ่านหินผสมถ่านปิโตรเลียมโค้ก โดยแช่วัตถุดิบใน Sodium hydroxide และให้ความร้อนในช่วงอุณหภูมิ 300-400 °C ในบรรยากาศของแก๊สเฉื่อย จากนั้นให้ความร้อนต่อไปอีกถึง 800°C ถ่านกัมมันต์ที่ได้เมื่อล้างแล้วพบว่า มีรูพรุนขนาดเล็กเป็นจำนวนมาก โดยเฉพาะถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากถ่านปิโตรเลียมโค้กมีพื้นที่ผิวสูงมากระหว่าง 3,000-4,000 m^2/g ส่วนถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากถ่านหินมีพื้นที่ผิวอยู่ระหว่าง 1,800-3,000 m^2/g

Schafer⁽¹⁹⁾ ได้เตรียมถ่านกัมมันต์จากถ่านหินลิกไนท์ โดยแช่ในกรดไฮโดรคลอริกที่ร้อนเพื่อกำจัดไอออนประจุบวกและเปลี่ยนให้เป็นถ่านหินโปแตสเซียมโดยการเติม Potassium hydroxide จากนั้นได้ทำเป็นเม็ดและคาร์บอนไนซ์ในแก๊สไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 900°C ถ่านกัมมันต์ที่ได้เมื่อล้างสารเคมีออกไปแล้วพบว่า มีพื้นที่ผิวอยู่ระหว่าง 1,100 - 1,500 m^2/g งานวิจัยของ Ehrburger et al.⁽²⁰⁾ ก็พบว่าการคาร์บอนไนซ์ถ่านหินโดยใช้สารอัลคาไล เช่น Sodium hydroxide และ Potassium hydroxide นั้น ทำให้ถ่านกัมมันต์ที่ได้มีสัดส่วนปริมาตรรูพรุนขนาดเล็กเพิ่มขึ้นเมื่อใช้ปริมาณสารเคมีเพิ่มขึ้น โดย Potassium hydroxide ทำให้เกิดสัดส่วนปริมาตรรูพรุนได้มากกว่า Sodium hydroxide

บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาการเตรียมและวัดสมบัติถ่านกัมมันต์จากถ่านหินลิกไนท์โดยวิธีการกระตุ้นทางเคมี โดยใช้ KOH และ $ZnCl_2$ สถานที่ที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัย อยู่ที่อาคารศูนย์เครื่องมือ 1 อาคารศูนย์เครื่องมือ 2 อาคารศูนย์เครื่องมือ 5 อาคารศูนย์เครื่องมือ 6 อาคารศูนย์เครื่องมือ 6/1 ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ซึ่งสามารถแบ่งการดำเนินงานวิจัยเป็นขั้นตอนต่าง ๆ ดังรายละเอียดต่อไปนี้

3.1 การเตรียมถ่านกัมมันต์โดยวิธีการกระตุ้นทางเคมี

3.1.1 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัย

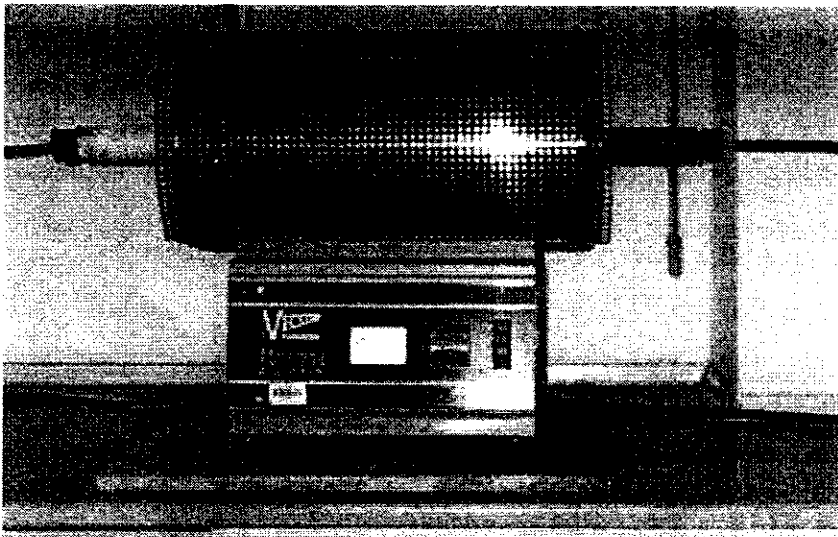
- เตาเผาแบบท่อ (Tube furnace) ยี่ห้อ Vectar รุ่น VC TF4 (รูปที่ 3.1)
- ตู้อบ ยี่ห้อ Memmert รุ่น 600
- เครื่องชั่งน้ำหนักความละเอียดทศนิยม 4 ตำแหน่ง ยี่ห้อ Sartorius รุ่น BP221S
- เครื่องวัดความเป็นกรด - ด่าง (pH meter) ยี่ห้อ SCHOTT รุ่น CG840
- โถดูดความชื้น (Dessicator)
- ชุดกรองสุญญากาศ
- เครื่องเขย่าแนวราบ IKA LABOTECHNIK รุ่น SK501 DIGITAL

3.1.2 สารเคมีที่ใช้ในการวิจัย

- แก๊สไนโตรเจนบรรจุถึงความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.95 ของบริษัท Linde
- โปตัสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) เกรดสำหรับการวิเคราะห์ของบริษัท APS Finechem
- $ZnCl_2$ ของบริษัท APS Finechem
- กรดไฮโดรคลอริก (HCl) เกรดสำหรับการวิเคราะห์ของบริษัท Carlo Erba

3.1.3 การเตรียมถ่านกัมมันต์โดยใช้ KOH

1. นำถ่านหินมาบดและคัดขนาด ให้อยู่ในช่วง 600-850 ไมโครเมตร (20x30 mesh) แล้วอบถ่านหินที่อุณหภูมิ 110-120 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นชั่งถ่านหิน บันทึกน้ำหนักที่แน่นอนแล้วนำมาใส่ในบีกเกอร์ขนาด 50 มิลลิลิตร
2. เติมสารละลายโปตัสเซียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้นร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก แล้วกวนด้วยแท่งแก้วให้เม็ดถ่านจมอยู่ในสารละลายเป็นเวลา 2 นาที ตัวแปรที่ศึกษา คือ อัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างสารละลายโปตัสเซียมไฮดรอกไซด์กับถ่านหิน (0.5 : 1.0 และ 1.0 : 1.0)
3. อบถ่านหินที่ผ่านการแช่ด้วยสารละลายโปตัสเซียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิ 110 °C จนกระทั่งน้ำหนักคงที่ ทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้น



รูปที่ 3.1 เตาเผาแบบท่อ (Tube furnace) ที่ใช้ในการเตรียมถ่านกัมมันต์

4. ชั่งถ่านหินที่ผ่านการแช่ด้วยสารละลายโปดัสเซียมไฮดรอกไซด์ และอบแห้งแล้ว จำนวน 10 กรัม บันทึกน้ำหนักที่แน่นอน ใส่ในภาชนะเซรามิกสำหรับเผาแล้วนำไปวางในเตาเผาแบบท่อ (รูปที่ 3.1) โดยให้ภาชนะเซรามิกที่บรรจุถ่านหินอยู่บริเวณกลางเตาเผา
5. ป้อนก๊าซไนโตรเจนในอัตราการไหล 100 มิลลิลิตรต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที เพื่อไล่อากาศภายในท่อ ทดสอบการรั่วซึมของก๊าซบริเวณฝาปิดท่อทั้ง 2 ด้าน
6. เปิดเตาเผาตั้งอุณหภูมิและเวลาที่ต้องการ โดยใช้อัตราการเพิ่มความร้อน $20^{\circ}\text{C}/\text{นาที}$ เริ่มจับเวลาเมื่อถึงอุณหภูมิที่ตั้งไว้
7. เมื่อครบกำหนดเวลาที่ต้องการ ปิดเตาเผาและยังคงผ่านแก๊สไนโตรเจนตลอดเวลา จนกระทั่งอุณหภูมิกายในเตาเผาตกลงต่ำกว่า 200°C จึงนำภาชนะเซรามิกที่บรรจุถ่านหินออกจากเตาเผา ทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้น
8. ตัวแปรที่ศึกษา ได้แก่ อุณหภูมิการกระตุ้นในช่วง $600\text{-}800^{\circ}\text{C}$ และเวลาการกระตุ้น เท่ากับ 60 และ 120 นาที
9. ชั่งถ่านกัมมันต์ที่ได้ในข้อ 7 บันทึกน้ำหนักที่แน่นอน จากนั้นนำมาใส่ในบีกเกอร์ขนาด 600 มิลลิลิตร เพื่อทำการล้างสารเคมีออก
10. เติมสารละลายกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยปริมาตร ที่ผ่านการต้มให้ร้อน จำนวน 100 มิลลิลิตร กวนด้วยแท่งแก้วให้เม็ดถ่านกัมมันต์จมอยู่ในสารละลายเป็นเวลา 15 นาที
11. แยกถ่านกัมมันต์ออกจากสารละลายกรดไฮโดรคลอริกด้วยชุดกรองสุญญากาศ และทำซ้ำในข้อที่ 10 จนกระทั่งสารละลายกรดไฮโดรคลอริกที่ผ่านการล้างถ่านแล้วไม่มีสี
12. นำถ่านที่ผ่านการล้างด้วยกรดแล้วมาล้างต่อด้วยน้ำกลั่นที่ผ่านการต้มให้ร้อน โดยเติมครั้งละ 200 มิลลิลิตร จำนวน 5 ครั้ง และล้างต่อด้วยน้ำกลั่นธรรมดา โดยเติมครั้งละ 200 มิลลิลิตร จำนวน 5 ครั้ง และล้างต่อด้วยน้ำกลั่นธรรมดา โดยเติมครั้งละ 200 มิลลิลิตร จนกระทั่งน้ำที่ผ่านการล้างถ่านกัมมันต์แล้วมีค่าพีเอชเท่ากับน้ำกลั่น (pH ประมาณ 6-7)
13. อบถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการล้างแล้วที่อุณหภูมิ 110°C จนกระทั่งน้ำหนักคงที่แล้วทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้น แล้วมาชั่งน้ำหนักเพื่อหาร้อยละน้ำหนักที่หายไปหรือร้อยละผลผลิตที่ได้ และทำการวิเคราะห์สมบัติต่าง ๆ ต่อไป

3.1.4 การเตรียมถ่านกัมมันต์โดยใช้ $ZnCl_2$

1. นำถ่านหินมาบดคัดขนาดให้มีช่วงขนาด 600-850 ไมโครเมตร (20x30 mesh) โดยใช้ชุดตะแกรงร่อน อบถ่านหินที่ 110-120 °C เป็นเวลาอย่างน้อย 3 ชั่วโมง ผสมถ่านหินกับสารละลายซิงค์คลอไรด์ความเข้มข้นร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก โดยอัตราส่วนน้ำหนักของวัตถุดิบต่อซิงค์คลอไรด์ต่าง ๆ ตามที่กำหนดไว้ เชยด้วยเครื่องเขย่าแนวราบด้วยความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 3 วัน
2. นำส่วนผสมที่ประกอบด้วยถ่านหินและสารละลายซิงค์คลอไรด์ซึ่งผสมเข้ากันแล้วไปอบจนกระทั่งน้ำหนักคงที่ (ระยะเวลาในการอบขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของซิงค์คลอไรด์ที่ใช้)
3. บรรจุส่วนผสมลงในภาชนะแล้วนำไปเผาในเตาเผาอุณหภูมิสูงแบบท่อในบรรยากาศการไหลของแก๊สไนโตรเจนตามอุณหภูมิและเวลาที่กำหนด จากนั้นปิดเตาเผาและปล่อยให้เตาเผาเย็นตัวโดยยังผ่านแก๊สไนโตรเจนตลอดเวลา
4. นำถ่านกัมมันต์ที่ได้ไปล้างด้วยกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นร้อยละ 10 โดยปริมาตร 2 ครั้ง ตามด้วยน้ำร้อนหลาย ๆ ครั้ง (ใช้กระดาษกรองวัดแมนด์เบอร์ 1 กับอุปกรณ์การกรองแบบสุญญากาศ)
5. ชั่งน้ำหนักถ่านกัมมันต์และคำนวณหาร้อยละผลผลิตของถ่านกัมมันต์ที่ได้แล้วนำไปวิเคราะห์สมบัติต่าง ๆ

ตัวแปรที่กำหนดในการทดลอง

- อัตราส่วนของน้ำหนักวัตถุดิบต่อน้ำหนักของซิงค์คลอไรด์เท่ากับ 1 : 0.5 และ 1 : 1
- อุณหภูมิในการเผาที่ 400, 500, และ 600 °C
- ระยะเวลาในการเผากระตุ้น 1 และ 2 ชั่วโมง
- อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 99.95% เท่ากับ 100 มิลลิลิตรต่อนาที
- อัตราการให้ความร้อน (Heating rate) 20 °C/นาที

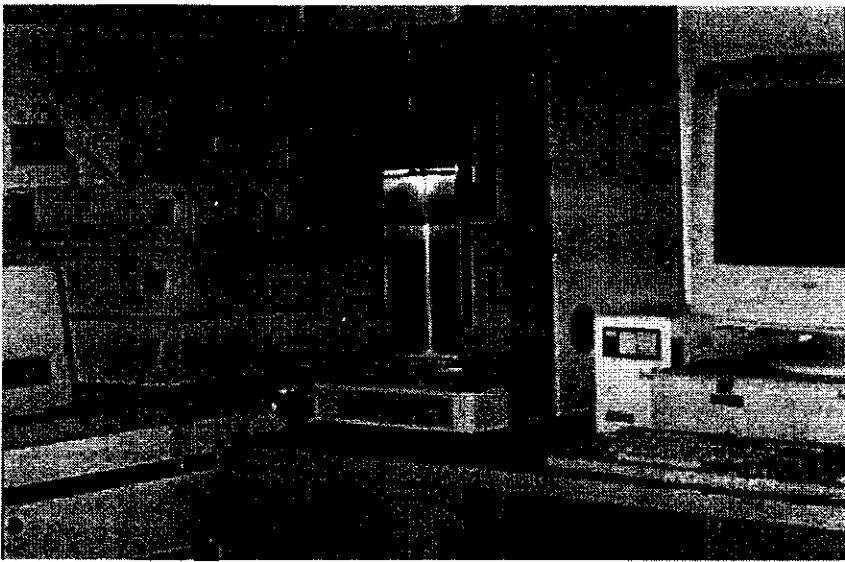
3.2 การวัดสมบัติของถ่านหิน และถ่านกัมมันต์

การคำนวณและวัดสมบัติต่าง ๆ ของวัตถุดิบซึ่งได้แก่ ถ่านหินและของถ่านกัมมันต์ มีดังนี้

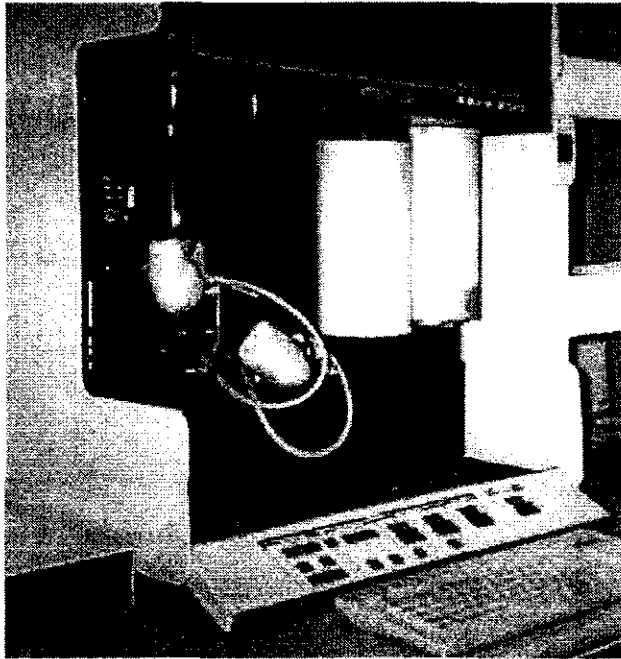
1. การคำนวณหาร้อยละผลผลิตรวมของถ่านกัมมันต์ที่ได้ซึ่งมีค่าเท่ากับ $\frac{\text{น้ำหนักถ่านกัมมันต์}}{\text{น้ำหนักถ่านหินดิบ}} \times 100$ ส่วนร้อยละน้ำหนักรวมที่หายไปมีค่าเท่ากับ (100-ร้อยละผลผลิตรวม)
2. การวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate analysis) เพื่อหาร้อยละปริมาณความชื้น ร้อยละปริมาณสารระเหย ร้อยละปริมาณเถ้า และร้อยละปริมาณคาร์บอนคงตัว ใช้วิธีการวิเคราะห์ตามมาตรฐาน ASTM D3173⁽²⁰⁾ D3174⁽²¹⁾ และ D3175⁽²²⁾ สำหรับถ่านหิน และ ASTM D2866⁽²³⁾ D2867⁽²⁴⁾ และ D5832⁽²⁵⁾ สำหรับถ่านกัมมันต์ นอกจากนี้ยังตรวจสอบผลของการ

วิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate analysis) โดยใช้เครื่อง Thermogravimetric analyzer (TGA) ยี่ห้อ Perkin Elmer รุ่น TGA7 (รูปที่ 3.2)

3. การหาค่าการดูดซับไอโอดีน ใช้วิธีการวิเคราะห์ตามมาตรฐาน ASTM D4607⁽²⁶⁾
4. การหาพื้นที่ผิวจำเพาะและลักษณะรูพรุน วิเคราะห์โดยใช้เครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิวแบบอัตโนมัติ ยี่ห้อ Micromeritics รุ่น ASAP2010 (รูปที่ 3.3) โดยใช้แก๊สไนโตรเจนเป็นตัวดูดซับที่อุณหภูมิ -196°C ซึ่งค่าพื้นที่ผิวจำเพาะสามารถคำนวณได้จากสมการการดูดซับแบบ BET, ค่าปริมาตรรูพรุนขนาดเล็ก (Micropore) คำนวณจากสมการการดูดซับแบบ t-plot, ค่าปริมาตรรูพรุนขนาดกลาง (Mesopore) คำนวณจากสมการการดูดซับแบบ BJH⁽²⁷⁻²⁸⁾, ค่าปริมาตรรูพรุนขนาดใหญ่ (Macropore) คำนวณจากการหักผลรวมของปริมาตรรูพรุนขนาดเล็กกับปริมาตรรูพรุนขนาดกลางออกจากปริมาตรรูพรุนทั้งหมด, ค่าปริมาตรรูพรุนทั้งหมดหาได้จากปริมาตรที่ถูกดูดซับเมื่อแก๊สไนโตรเจนอยู่ในสถานะของเหลวที่ความดันสัมพัทธ์ (P/P°) เท่ากับ 0.98 เมื่อ P คือค่าความดันและ P° คือ ความดันไออิ่มตัวที่อุณหภูมิของการดูดซับ ซึ่งมีค่าเท่ากับความดันหนึ่งบรรยากาศ และขนาดรูพรุนเฉลี่ยคำนวณจากสมการ $4V/A$ โดยที่ V คือ ปริมาตรรูพรุนทั้งหมดและ A คือ พื้นที่ผิวจำเพาะจากสมการการดูดซับแบบ BET
5. การวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของถ่านหิน และถ่านกัมมันต์ ใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope : SEM) ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM6400



รูปที่ 3.2 เครื่อง Thermogravimetric analyzer



รูปที่ 3.3 เครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิวแบบอัตโนมัติ ASAP2010

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

4.1 ผลการเตรียมถ่านกัมมันต์โดยใช้ KOH

งานวิจัยส่วนนี้ได้ศึกษาสภาวะต่าง ๆ ในการเตรียมถ่านกัมมันต์จากถ่านหินลิกไนท์ (แหล่งแม่) โดยวิธีกระตุ้นทางเคมี (KOH) ตัวแปรต่าง ๆ ที่ได้ศึกษา ได้แก่ อุณหภูมิ 600-800°C เวลา 60 และ 120 นาที อัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างสารกระตุ้นต่อวัตถุดิบ (KOH : ถ่านหิน) 0.5 : 1.0 และ 1.0 : 1.0 ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้นำไปวิเคราะห์หาสมบัติต่าง ๆ ได้แก่ การวิเคราะห์แบบประมาณ (% ความชื้น, % สารระเหย, % เถ้า, % คาร์บอนคงตัว), ร้อยละผลผลิต, ค่าดูดซับไอโอดีน, ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ, ปริมาตรรูพรุนขนาดต่าง ๆ ปริมาตรรูพรุนทั้งหมดและขนาดรูพรุนเฉลี่ย ผลการวิเคราะห์สมบัติต่าง ๆ ของถ่านกัมมันต์นำไปเปรียบเทียบกับสมบัติต่าง ๆ ของวัตถุดิบ (ถ่านหิน) ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมโดยวิธีทางกายภาพ⁽⁴⁾ และถ่านกัมมันต์การค้าซึ่งเตรียมจากกะลามะพร้าวโดยวิธีกระตุ้นทางกายภาพด้วยไอน้ำ (ผลิตภัณฑ์ของบริษัทซีใจแกนติก จำกัด อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา)

4.1.1 ผลการวิเคราะห์แบบประมาณ

ผลการวิเคราะห์แบบประมาณของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมโดยใช้ KOH เป็นสารกระตุ้นภายใต้สภาวะต่าง ๆ เปรียบเทียบกับถ่านหินและถ่านกัมมันต์ทางการค้าได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์พบว่าปริมาณคาร์บอนคงตัวของถ่านกัมมันต์มีค่าเพิ่มขึ้นมากกว่าปริมาณคาร์บอนคงตัวของวัตถุดิบ (ถ่านหิน) เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ปริมาณคาร์บอนคงตัวในถ่านกัมมันต์มีค่ามากขึ้นตามอุณหภูมิ โดยถ่านกัมมันต์ที่เตรียมโดยใช้อุณหภูมิสูง 800°C ทุกสภาวะจะมีค่าปริมาณคาร์บอนคงตัวอยู่ระหว่าง 70-80% ซึ่งสอดคล้องกับค่าปริมาณสารระเหยที่ลดลงมากที่สภาวะดังกล่าว อย่างไรก็ตาม ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ในงานวิจัยนี้ยังมีปริมาณคาร์บอนคงตัวน้อยกว่าถ่านกัมมันต์ทางการค้าซึ่งเตรียมจากกะลามะพร้าวโดยวิธีทางกายภาพที่ใช้ไอน้ำเป็นสารกระตุ้น ปริมาณคาร์บอนคงตัวที่แตกต่างกันนี้อาจเนื่องมาจากความแตกต่างในธรรมชาติของโครงสร้างทางกายภาพและทางเคมีของถ่านหินและกะลามะพร้าวและวิธีการกระตุ้นตลอดจนสภาวะและสารกระตุ้นที่มีความแตกต่างกันเป็นที่สังเกตว่าปริมาณเถ้าของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ลดลงมากเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณเถ้าที่มีอยู่ในถ่านหินดิบ(อยู่ระหว่าง 2-5%) ทั้งนี้ เนื่องจาก KOH มีสมบัติเป็นเบส เมื่อแทรกซึมในถ่านหินและเผาที่อุณหภูมิสูง KOH สามารถทำปฏิกิริยากับคาร์บอนในเนื้อถ่านหินและยังปลดปล่อยหรือสลายสารแร่ (Mineral matter) ในถ่านหิน ทำให้ปริมาณสารแร่ที่กลายเป็นเถ้าจากการวิเคราะห์ลดน้อยลงไปได้ ผลจากงานวิจัยนี้จึงชี้ให้เห็นถึงบทบาทของสารกระตุ้น KOH ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ที่สามารถทำหน้าที่ลดปริมาณเถ้าในถ่านหินได้อีกทางหนึ่งด้วย การมีปริมาณเถ้าที่ลดลงมากมีผลให้คุณภาพของถ่านกัมมันต์ดีขึ้นเนื่องจากมีเนื้อถ่านที่จะทำหน้าที่ดูดซับต่อหน้าหนักถ่านกัมมันต์ที่เพิ่มมากขึ้น

ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์แบบประมาณของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมโดยใช้ KOH เป็นสารกระตุ้น
เปรียบเทียบกับถ่านหินแม่เมาะและถ่านกัมมันต์ทางการค้า

ถ่านกัมมันต์เตรียมที่ สภาวะการกระตุ้นต่าง ๆ			รายการวิเคราะห์แบบประมาณ,%โดยน้ำหนัก			
อุณหภูมิ (°C)	เวลา (นาที)	KOH : ถ่านหิน	ความชื้น	สารระเหย	เถ้า	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
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 (วัตถุดิบ)			5	37	23	35
ถ่านกัมมันต์ทางการค้า			4	6	2	88

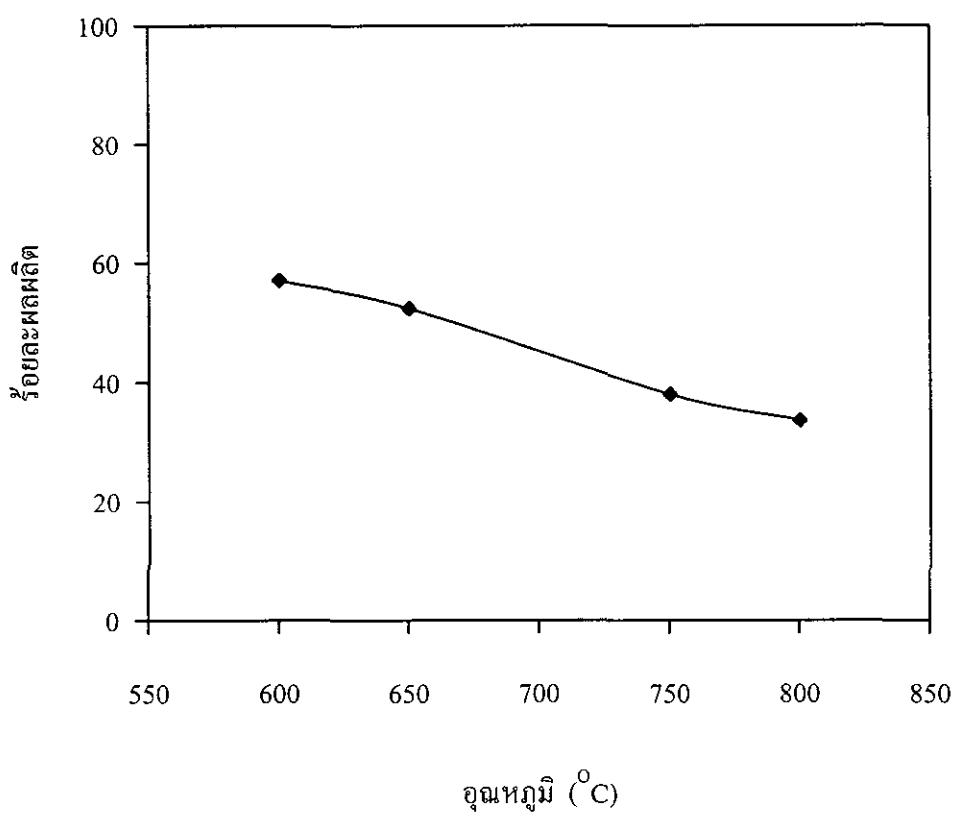
4.1.2 ผลของสภาวะกระตุ้นต่อร้อยละผลผลิต

ผลของสภาวะอุณหภูมิที่มีต่อร้อยละผลผลิตได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.1 พบว่าที่สภาวะเวลาของการกระตุ้นคงที่ การกระตุ้นที่อุณหภูมิต่ำกว่าทำให้ได้ร้อยละผลผลิตมากกว่าการกระตุ้นที่อุณหภูมิสูง ส่วนที่สภาวะอุณหภูมิคงที่ การใช้เวลกระตุ้นนานขึ้นพบว่าร้อยละผลผลิตจะมีค่าลดลง (ดูตารางที่ 4.2) สำหรับผลของสภาวะอัตราส่วน KOH : ถ่านหินที่แสดงไว้ในรูปที่ 4.2 นั้นพบว่าผลของอัตราส่วนสารกระตุ้นต่อวัตถุดิบมีความแตกต่างกันเมื่ออุณหภูมิการกระตุ้นต่างกัน กล่าวคือ ที่อุณหภูมิต่ำ (600°C) การใช้ KOH ปริมาณมากขึ้นมีผลน้อยมากต่อร้อยละผลผลิต แต่ที่อุณหภูมิสูง (800°C) การใช้ KOH ปริมาณมากขึ้นมีผลทำให้ร้อยละผลผลิตลดลงอย่างชัดเจน ผลการทดลองชี้ให้เห็นว่า KOH ทำปฏิกิริยาเคมีกับคาร์บอนในถ่านหินได้มากขึ้นตามปริมาณสารเคมีที่อุณหภูมิสูง และจากผลของสภาวะการทดลองทุกสภาวะนั้นสรุปได้ว่า การใช้อุณหภูมิสูง เวลานาน และใช้ KOH ในปริมาณมากนั้นมีผลทำให้ร้อยละผลผลิตลดลง เนื่องจากที่สภาวะดังกล่าว KOH สามารถเกิดปฏิกิริยากับเนื้อถ่านหินได้มาก ร้อยละน้ำหนักที่หายไปจึงมีมากเป็นผลให้ร้อยละผลผลิตมีค่าลดลงดังกล่าว

4.1.3 ผลของสภาวะกระตุ้นต่อสมบัติของถ่านกัมมันต์

รูปที่ 4.3 แสดงตัวอย่างของลักษณะไอโซเทอมการดูดซับแก๊ส N_2 (ที่ $-196^\circ C$) ของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้โดยใช้ KOH พบว่าถ่านกัมมันต์ทุกสภาวะมีลักษณะไอโซเทอมการดูดซับเป็นแบบ Type I ตามการจำแนกของ IUPAC⁽²⁷⁾ ซึ่งแสดงว่าถ่านกัมมันต์มีรูพรุนส่วนใหญ่เป็นแบบรูพรุนขนาดเล็ก (Micropores, < 2 นาโนเมตร) โดยปริมาตรของรูพรุนขนาดต่าง ๆ ได้แสดงเปรียบเทียบไว้ด้วยกันในตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.4 - 4.6 ปริมาตร N_2 ที่ถูกดูดซับพบว่ามีมากขึ้นในถ่านกัมมันต์ที่เตรียมที่อุณหภูมิสูงขึ้น (กราฟ 1 และกราฟ 3 ในรูปที่ 4.3) ผลการทดลองดังกล่าวนี้สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์สมบัติต่าง ๆ ของถ่านกัมมันต์ นั่นคือพื้นที่ผิวจำเพาะและค่าดูดซับไอโอดีน (รูปที่ 4.7) ที่มีค่ามากขึ้นไปตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น และผลจากการวิเคราะห์ปริมาตรรูพรุน (ในรูป 4.4) พบว่าปริมาตรรูพรุนทั้งหมด ปริมาตรรูพรุนขนาดกลางและขนาดใหญ่มีค่ามากขึ้น โดยเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ ไปตามอุณหภูมิที่สูงขึ้น ส่วนปริมาตรรูพรุนขนาดเล็กมีค่ามากขึ้นในอุณหภูมิช่วงต้น แต่มีค่าเกือบคงที่ในช่วงอุณหภูมิสูงขึ้น ชี้ให้เห็นว่าที่อุณหภูมิสูงอาจเกิดรูพรุนขนาดเล็กมากขึ้น แต่ในขณะเดียวกันส่วนหนึ่งของรูพรุนเหล่านี้ อาจเกิดการรวมตัวกลายเป็นรูพรุนที่มีขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งอาจเป็นผลจากการยุบรวมของผนังรูพรุนขนาดเล็กส่วนหนึ่งที่อุณหภูมิสูงทำให้ปริมาตรรูพรุนขนาดเล็กเพิ่มขึ้น ไม่มากตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิการกระตุ้น

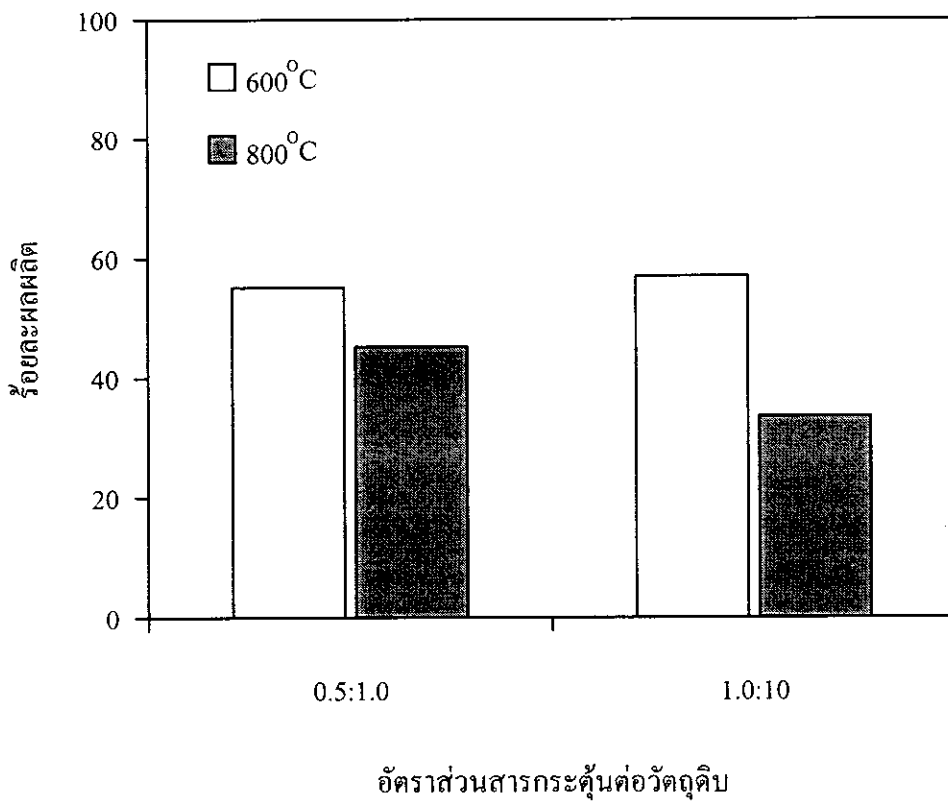
สำหรับผลของเวลาในการกระตุ้นที่มีต่อสมบัติต่าง ๆ ของถ่านกัมมันต์ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.2 นั้น เห็นได้ว่าที่อุณหภูมิต่ำ (600°C) เวลาที่นานขึ้นไม่มีผลต่อพื้นที่ผิวจำเพาะ ค่าการดูดซับไอโอดีน ปริมาตรรูพรุนทุกขนาด ปริมาตรรูพรุนทั้งหมด และขนาดรูพรุนเฉลี่ย แต่ที่อุณหภูมิสูง (800°C) เวลาที่นานขึ้นมีผลทำให้ค่าดูดซับไอโอดีน ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุนขนาดกลาง



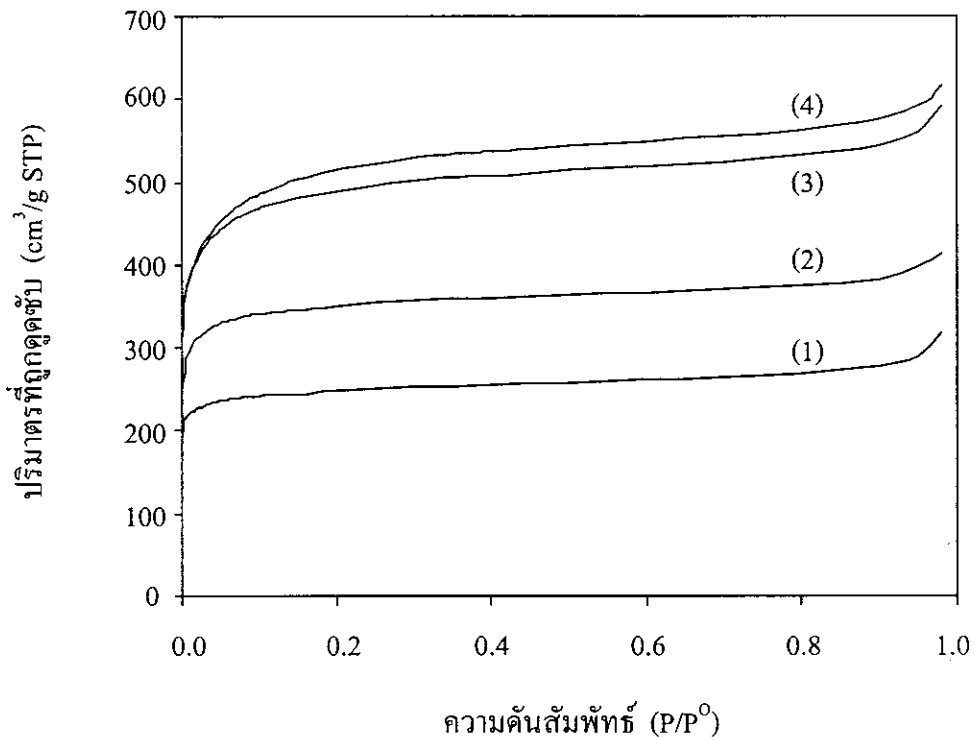
รูปที่ 4.1 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อร้อยละผลผลิตของถ่านกัมมันต์จากถ่านหินแม่เมาะขนาดอนุภาค 20×30 mesh โดยวิธีการกระตุ้นทางเคมี (KOH) ที่สภาวะ : 60 นาที และ KOH:ถ่านหิน เท่ากับ 1.0:1.0

ตารางที่ 4.2 ผลของเวลาและอุณหภูมิที่มีต่อร้อยละผลผลิตและสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้โดยใช้ KOH

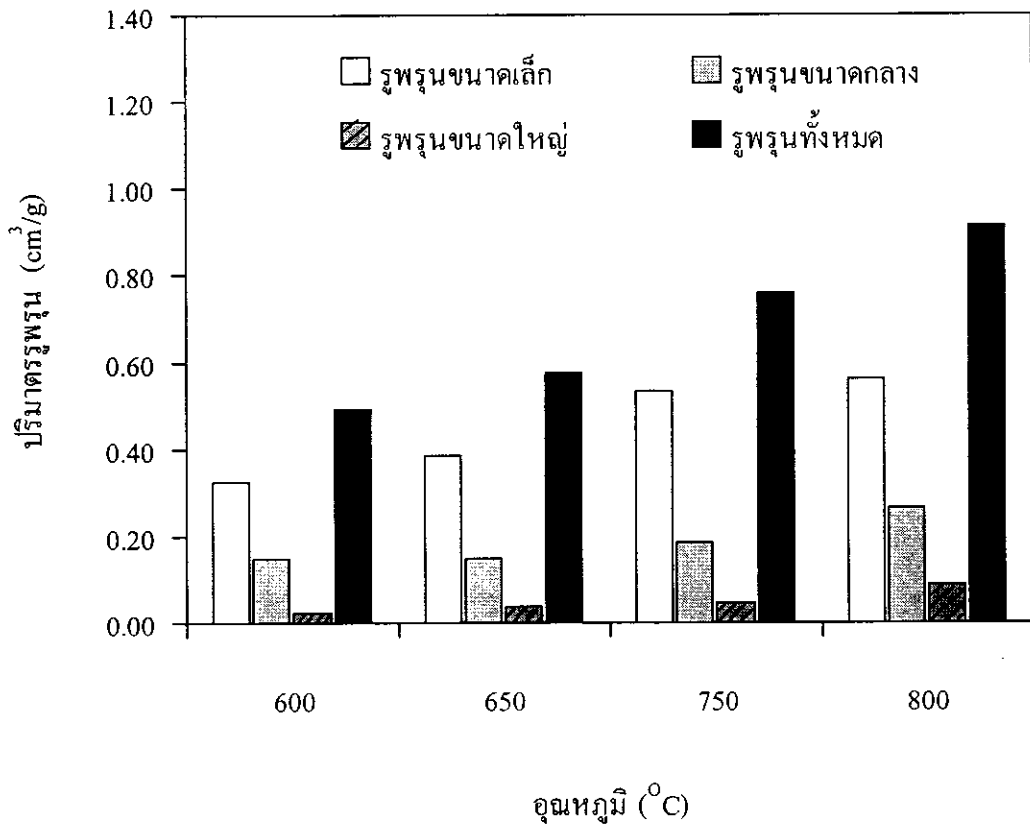
อุณหภูมิ (°C)	สภาวะการกระตุ้น		ร้อยละ ผลผลิต	ร้อยละ น้ำหนัก ที่หายไป	ค่าการดูดซับ ไอโอดีน (mg/g)	พื้นที่ผิว จำเพาะ (m ² /g)	ปริมาณ รูพรุน ขนาดเล็ก (cm ³ /g)	ปริมาณ รูพรุน ขนาดกลาง (cm ³ /g)	ปริมาณ รูพรุน ขนาดใหญ่ (cm ³ /g)	ปริมาณ รูพรุน ทั้งหมด (cm ³ /g)	ขนาด รูพรุน เฉลี่ย (nm)
	เวลา (นาที)	KOH : ถ่านหิน									
600	60	1.0 : 1.0	57	43	754	910	0.32 (65%)	0.15 (31%)	0.02 (4%)	0.49	2.17
600	120	1.0 : 1.0	46	54	799	917	0.33 (66%)	0.15 (30%)	0.02 (4%)	0.50	2.18
800	60	1.0 : 1.0	34	66	1616	1781	0.56 (62%)	0.26 (28%)	0.09 (10%)	0.91	2.05
800	120	1.0 : 1.0	27	73	1699	1856	0.53 (56%)	0.30 (31%)	0.12 (13%)	0.95	2.05
ถ่านกัมมันต์ทางการค้า			-	-	1090	1197	0.39 (71%)	0.10 (18%)	0.06 (11%)	0.55	1.83



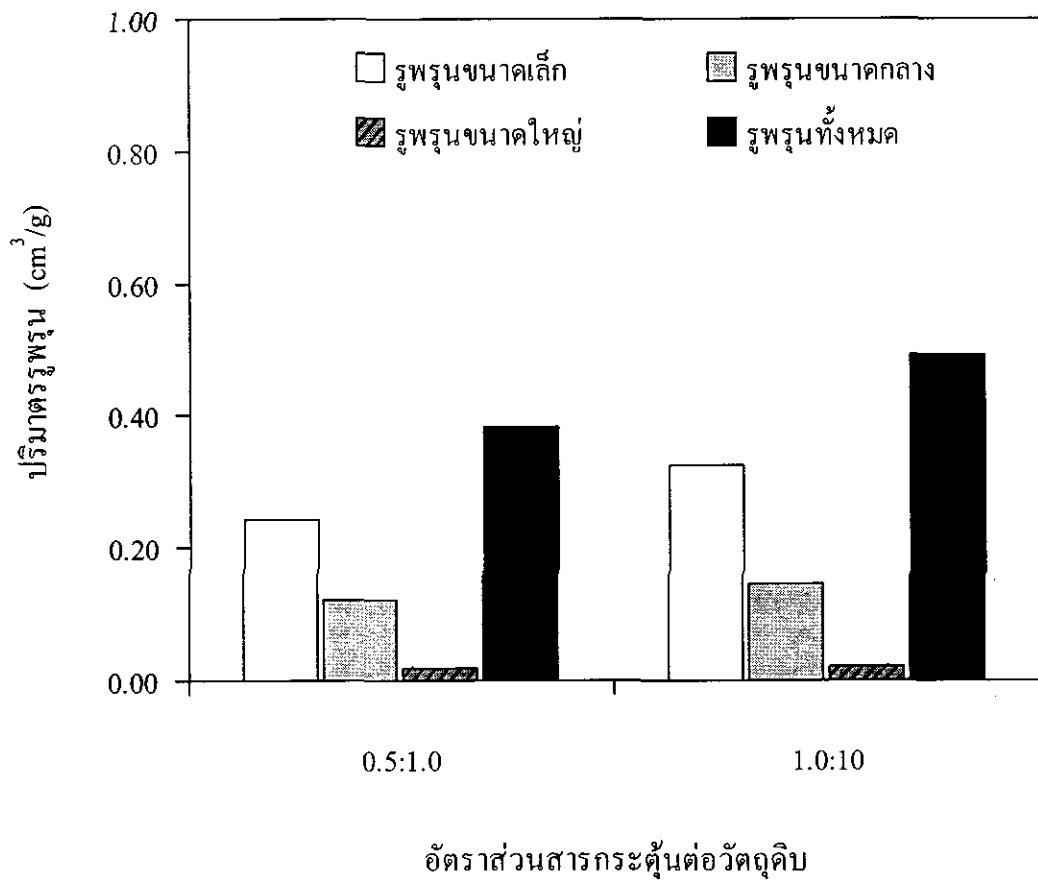
รูปที่ 4.2 ผลของอัตราส่วนสารกระตุ้นต่อวัตถุดิบที่มีต่อร้อยละผลผลิตของถ่านกัมมันต์จากถ่านหินแม่เมาะขนาดอนุภาค 20×30 mesh โดยวิธีการกระตุ้นทางเคมี (KOH) ที่สภาวะเวลาการกระตุ้น 60 นาที



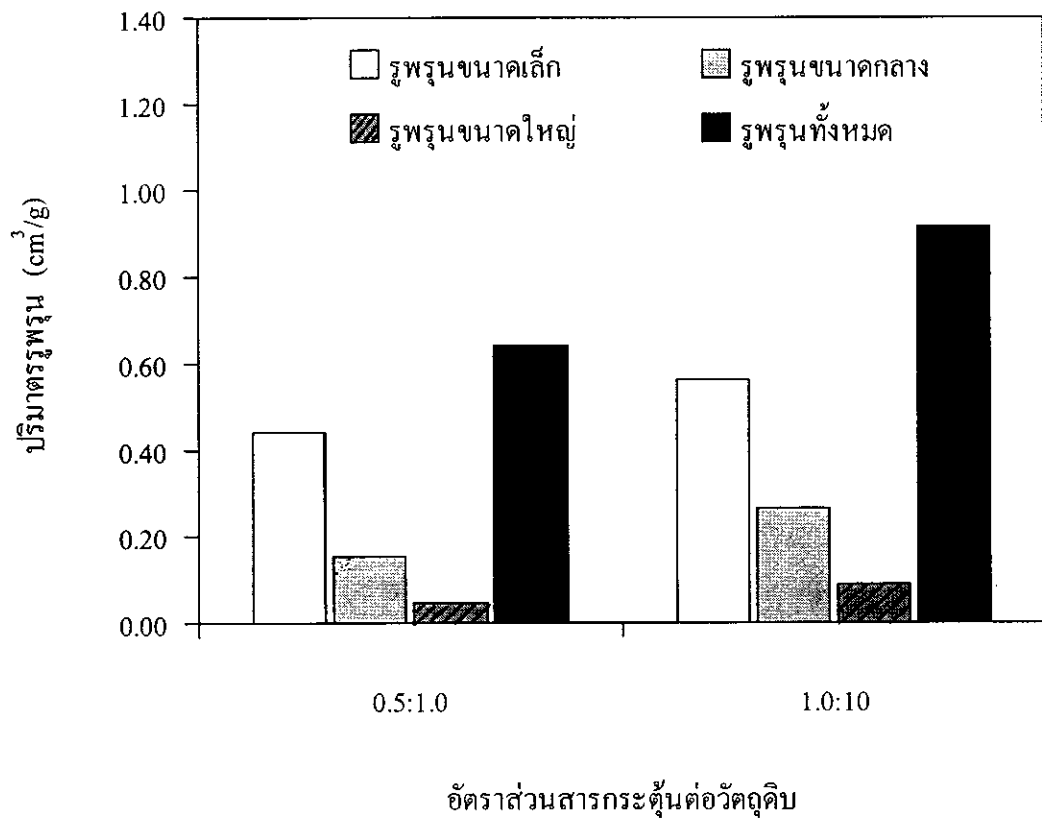
รูปที่ 4.3 เส้นไอโซเทอมการดูดซับของถ่านกัมมันต์จากถ่านหินแม่เมาะขนาดอนุภาค 20×30 mesh โดยวิธีการกระตุ้นทางเคมี (KOH) ที่สภาวะ : (1) 600°C / 60 นาที / 1.0:1.0 (2) 800°C / 60 นาที / 0.5:1.0 (3) 800°C / 60 นาที / 1.0:1.0 (4) 800°C / 120 นาที / 1.0:1.0



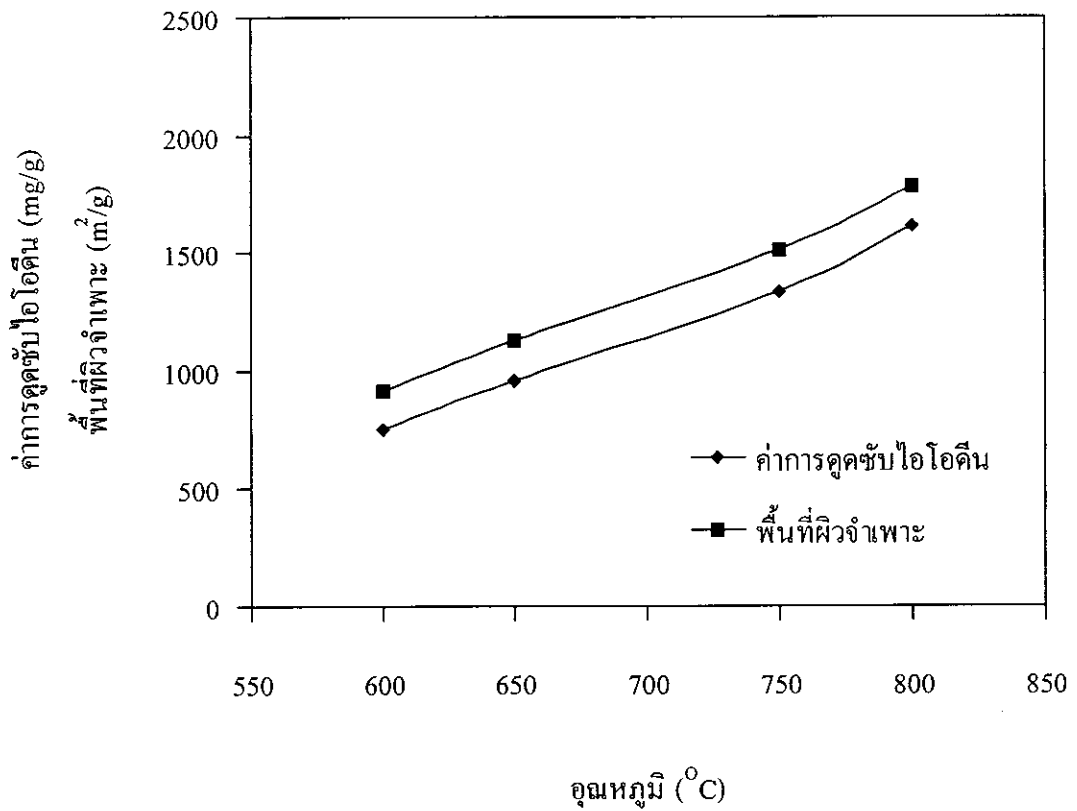
รูปที่ 4.4 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อปริมาณรูพรุนของถ่านกัมมันต์จากถ่านหินแม่เมาะขนาดอนุภาค 20×30 mesh โดยวิธีการกระตุ้นทางเคมี (KOH) ที่สภาวะ : 60 นาที และ KOH:ถ่านหิน เท่ากับ 1.0:1.0



รูปที่ 4.5 ผลของอัตราส่วนสารกระตุ้นต่อวัสดุคิบที่มีต่อปริมาตรรูปพรุนของถ่านกัมมันต์จากถ่านหินแม่เมาะขนาดอนุภาค 20×30 mesh โดยวิธีการกระตุ้นทางเคมี (KOH) ที่สภาวะ : 600°C และเวลา 60 นาที



รูปที่ 4.6 ผลของอัตราส่วนสารกระตุ้นต่อวัสดุคิบที่มีต่อปริมาตรรุกรุ่นของถ่านกัมมันต์จากถ่านหิน
แม่เมาะขนาดอนุภาค 20×30 mesh โดยวิธีการกระตุ้นทางเคมี (KOH) ที่สภาวะ : 800°C
และเวลา 60 นาที



รูปที่ 4.7 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อค่าการดูดซับไอโอดีนและพื้นที่ผิวจำเพาะของถ่านกัมมันต์จากถ่านหิน
 แม่เมาะขนาดอนุภาค 20×30 mesh โดยวิธีการกระตุ้นทางเคมี (KOH) ที่สภาวะ : 60 นาที
 และ KOH:ถ่านหินเท่ากับ 1.0:1.0

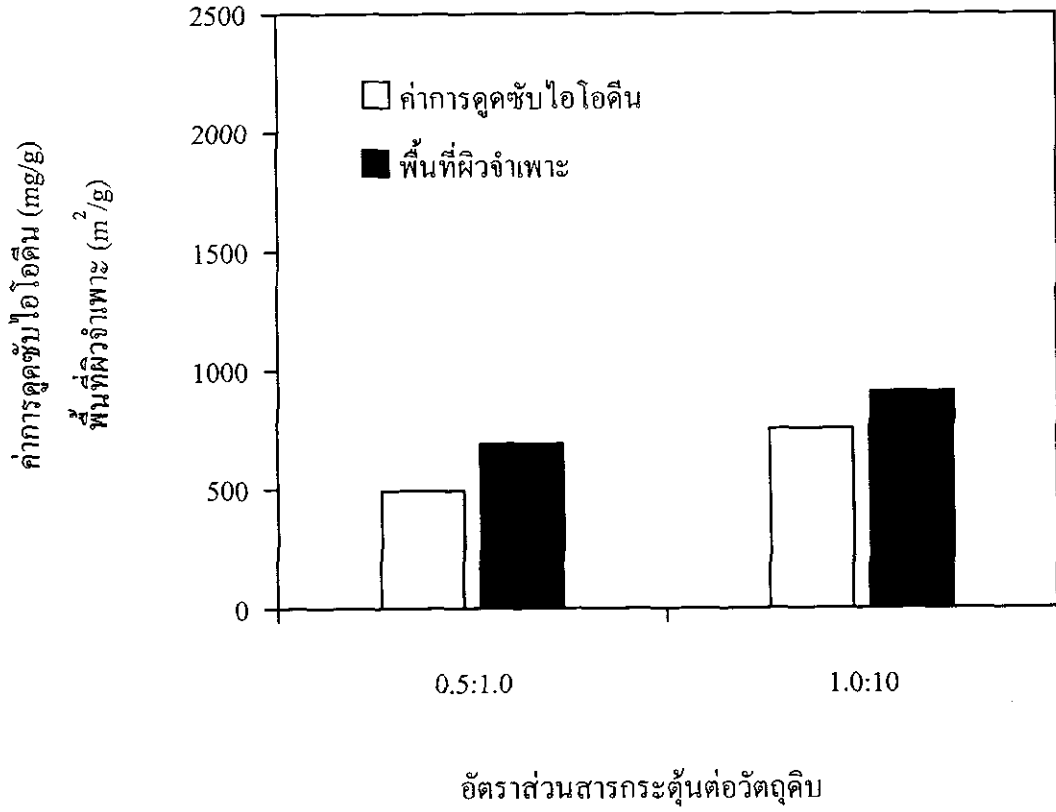
ปริมาณรุกรานขนาดใหญ่ ปริมาณรุกรานทั้งหมดมีค่ามากขึ้นไปตามเวลาที่นานขึ้นแต่ปริมาณรุกรานขนาดเล็กกลับมีค่าลดลงเล็กน้อย ส่วนขนาดรุกรานเฉลี่ยมีค่าคงที่ ผลของการทดลองดังกล่าวชี้ให้เห็นว่าที่อุณหภูมิสูงและเวลานานมีผลต่อสมบัติถ่านกัมมันต์ได้มาก ในส่วนผลของอัตราส่วนระหว่างสารกระตุ้นต่อวัตถุคิบ (KOH : ถ่านหิน) พบว่ามีผลมากต่อสมบัติต่าง ๆ ของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ โดยพบว่าการใช้อัตราส่วน KOH : ถ่านหินมากขึ้นส่งผลให้สมบัติต่าง ๆ มีค่ามากขึ้น สมบัติเหล่านั้น ได้แก่ พื้นที่ผิวจำเพาะและค่าดูดซับไอโอดีน (รูปที่ 4.8 และ 4.9) ปริมาณรุกรานขนาดเล็กและขนาดกลางและปริมาณรุกรานทั้งหมด (รูปที่ 4.5 และ 4.6) อย่างไรก็ตามเมื่อวิเคราะห์ขนาดรุกรานเฉลี่ยพบว่าการใช้อัตราส่วน KOH : ถ่านหินมากขึ้นไม่ได้ทำให้ขนาดรุกรานเฉลี่ยต่างกันมากนัก (ดูรูปที่ 4.10)

ผลของการทดลองนี้แสดงให้เห็นถึงบทบาทของสารเคมี KOH ที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยา อิทธิพลของความเข้มข้นของสารเคมีที่มากจะส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาการกระตุ้นได้มาก จากผลของพื้นที่ผิวจำเพาะของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ในงานวิจัยนี้ พบว่าสถานะที่เตรียมถ่านกัมมันต์แล้วได้พื้นที่ผิวจำเพาะสูงสุดเท่ากับ $1,856 \text{ m}^2/\text{g}$ คือสถานะที่อุณหภูมิกระตุ้น 800°C เวลา 120 นาทีและ อัตราส่วน KOH : ถ่านหินเท่ากับ 1.0 : 1.0 เมื่อเปรียบเทียบกับสถานะที่เตรียมถ่านกัมมันต์จากถ่านหินชนิดเดียวกัน โดยวิธีการกระตุ้นทางกายภาพ⁽⁴⁾ พบว่าถ่านกัมมันต์มีพื้นที่ผิวน้อยกว่ามาก คือ ประมาณ $400 \text{ m}^2/\text{g}$ และเมื่อเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ทางการค้า พบว่าถ่านกัมมันต์ทางการค้ามีพื้นที่ผิวจำเพาะน้อยกว่าเช่นกัน คือ $1,197 \text{ m}^2/\text{g}$ โดยมีขนาดรุกรานเฉลี่ย ปริมาณรุกรานขนาดกลาง และปริมาณรุกรานขนาดใหญ่มีค่าน้อยกว่าด้วย แต่ถ่านกัมมันต์ทางการค้ามีปริมาณรุกรานขนาดเล็กมากกว่า ผลการทดลองเหล่านี้ชี้ให้เห็นถึงความแตกต่างของธรรมชาติของวัตถุคิบและวิธีการกระตุ้นที่มีผลต่อสมบัติถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้

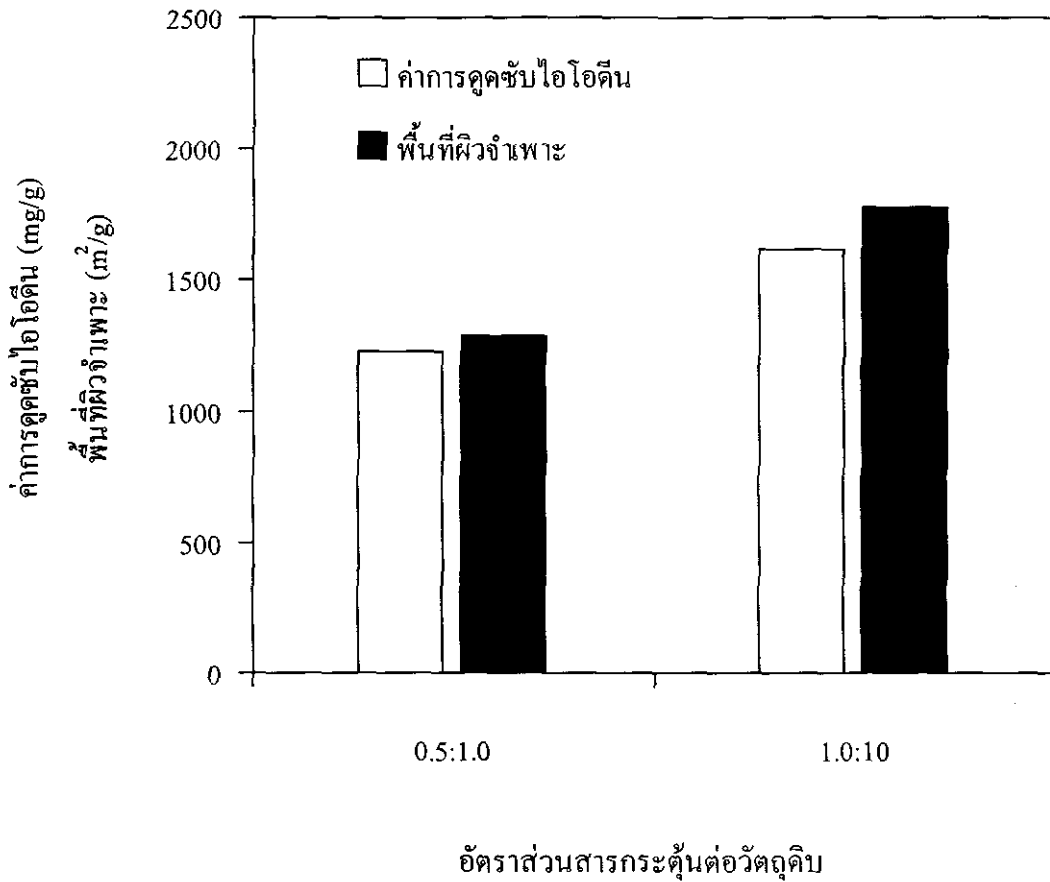
ลักษณะพื้นผิวจากภาพถ่าย SEM แสดงไว้ในรูปที่ 4.11 และ 4.12 เป็นการแสดงตัวอย่างของลักษณะพื้นผิวของถ่านหินและถ่านกัมมันต์ภายใต้สถานะต่าง ๆ เห็นได้ว่าเมื่อผ่านการกระตุ้นทางเคมีแล้ว ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จะเกิดรุกรานขึ้นมาก โดยเห็นได้ชัดเจนทั้งปริมาณรุกรานและขนาดรุกรานที่เพิ่มขึ้นมากเมื่อสถานะของอุณหภูมิ เวลา และอัตราส่วน KOH : ถ่านหินเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับสมบัติต่าง ๆ ของถ่านกัมมันต์ที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อก่อน

4.1.4 กลไกของการกระตุ้นด้วย KOH

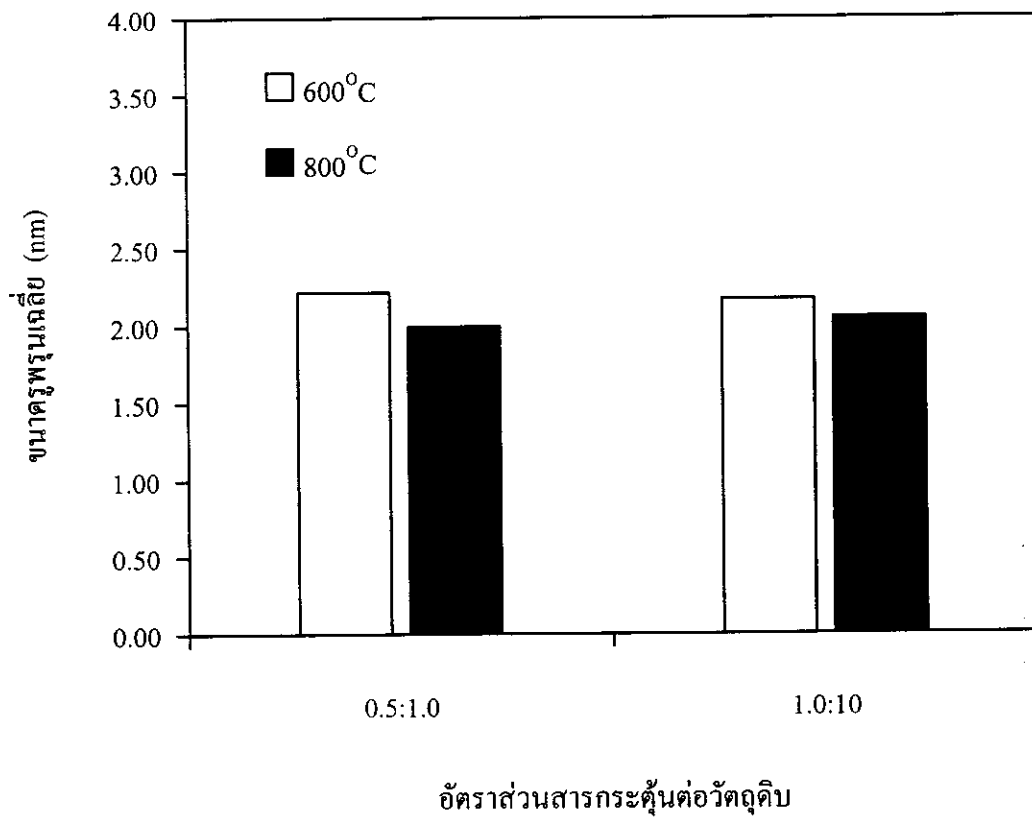
ผลของการกระตุ้นวัตถุคิบด้วย KOH เพื่อให้ได้ถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวสูงที่ผ่านมามีรายงานไว้โดย Marsh et al.⁽³⁰⁾ Wennerberg และ O'Grady⁽¹⁸⁾ ต่อมาได้มีผู้วิจัยได้รายงานว่าสามารถเตรียมถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวสูงมาก โดยใช้ KOH ซึ่งดีกว่าการกระตุ้นด้วยสารเคมีชนิดอื่น ๆ โดย Otawa et al.⁽³¹⁾ และ Hsu et al.⁽³²⁾ ได้เสนอกลไกการกระตุ้นด้วย KOH ไว้ว่าเนื่องจาก KOH เป็นเบสแก่ซึ่งมีความสามารถที่จะทำปฏิกิริยากับอะตอมของคาร์บอนได้มากและอย่างรวดเร็ว ทำให้เกิดรุกรานขึ้นส่งผลให้เกิดทาร์ (Tar) จากการสลายตัวของโครงสร้างด้วยความร้อนมีน้อยลง ปฏิกิริยาทั้งหมดเป็นขั้นตอนดังต่อไปนี้



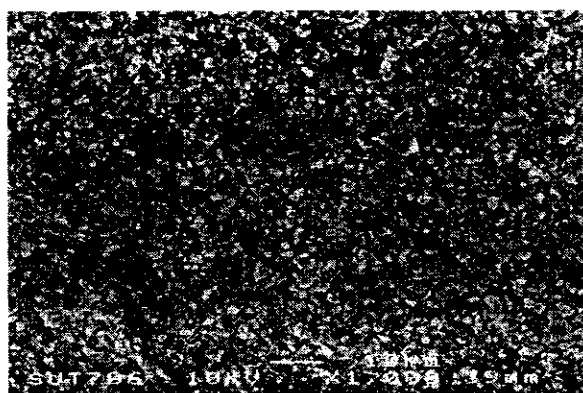
รูปที่ 4.8 ผลของอัตราส่วนสารกระตุ้นต่อวัตถุคิบที่มีต่อค่าการดูดซับไอโอดีนและพื้นที่ผิวจำเพาะของถ่านกัมมันต์จากถ่านหินแม่เมาะขนาดอนุภาค 20×30 mesh โดยวิธีการกระตุ้นทางเคมี (KOH) ที่สภาวะ : 600°C / 60 นาที



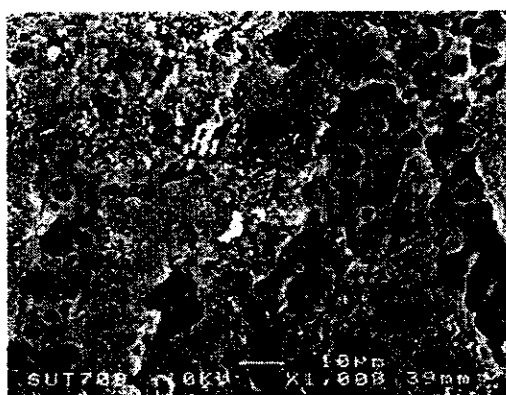
รูปที่ 4.9 ผลของอัตราส่วนสารกระตุ้นต่อวัสดุคิบที่มีต่อค่าการดูดซับไอโอดีนและพื้นที่ผิวจำเพาะของถ่านกัมมันต์จากถ่านหินแม่เมาะขนาดอนุภาค 20×30 mesh โดยวิธีการกระตุ้นทางเคมี (KOH) ที่สภาวะ : 800°C / 60 นาที



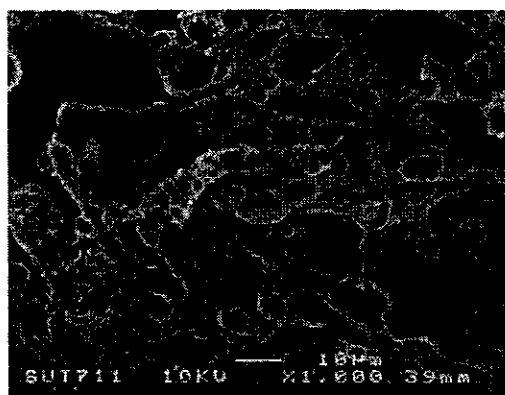
รูปที่ 4.10 ผลของอัตราส่วนสารกระตุ้นต่อวัตถุดิบที่มีต่อขนาดรูพรุนเฉลี่ยของถ่านกัมมันต์จาก ถ่านหินแม่เมาะขนาดอนุภาค 20×30 mesh โดยวิธีการกระตุ้นทางเคมี (KOH) ที่สภาวะ : 60 นาที



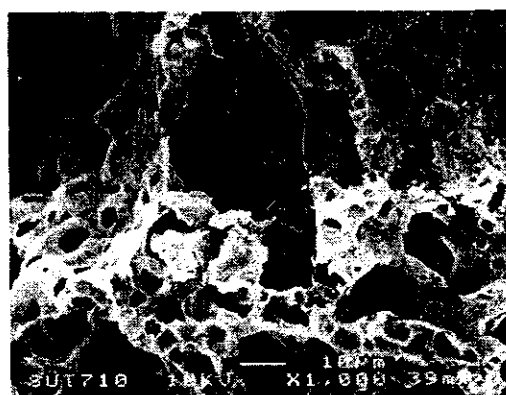
(ก) ถ่านหินดิบแม่เมาะ



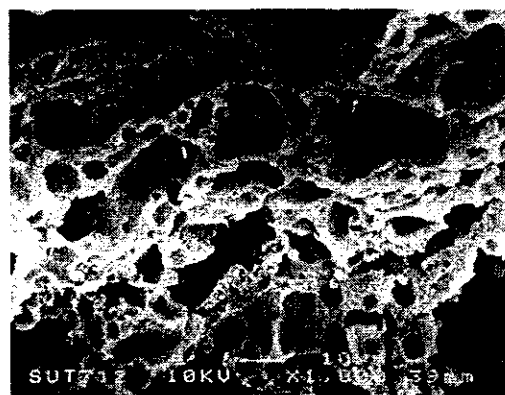
(ข) 600°C / 60 นาที / 1.0:1.0



(ค) 600°C / 120 นาที / 1.0:1.0

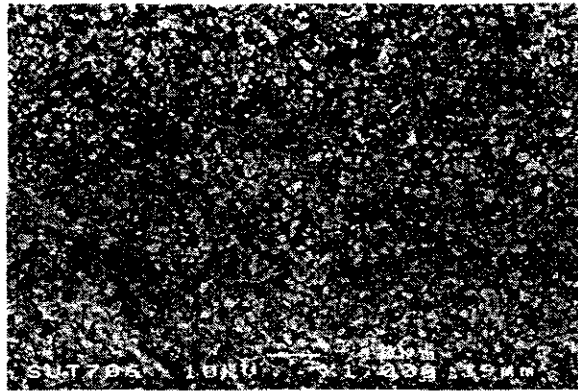


(ง) 800°C / 60 นาที / 1.0:1.0

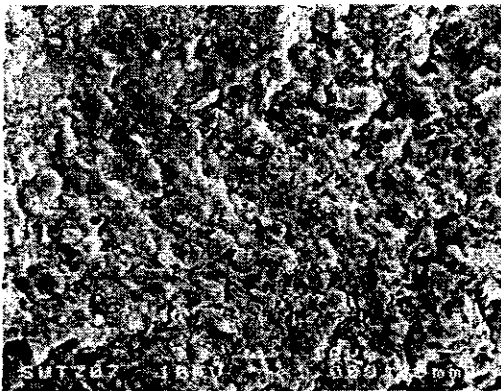


(จ) 800°C / 120 นาที / 1.0:1.0

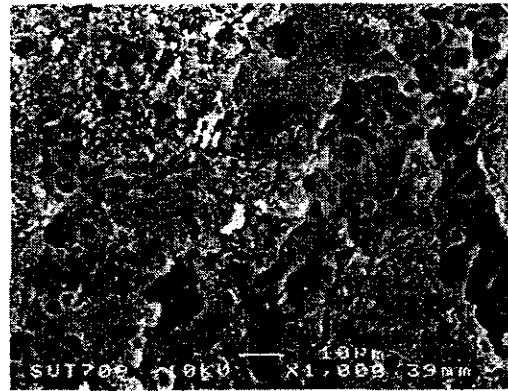
รูปที่ 4.11 ภาพถ่าย SEM ที่กำลังขยาย 1000 เท่า แสดงลักษณะพื้นผิวของถ่านกัมมันต์แม่เมาะขนาด 20×30 mesh (ผลของอุณหภูมิและเวลา)



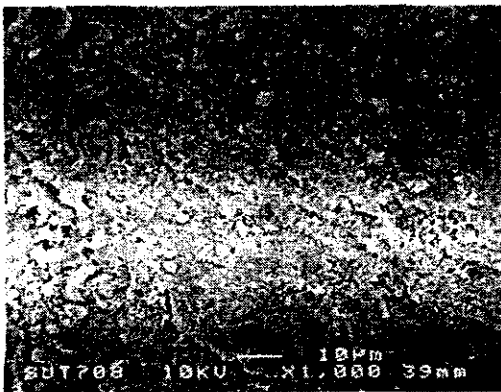
(ก) ถ่านหินดิบแม่เมาะ



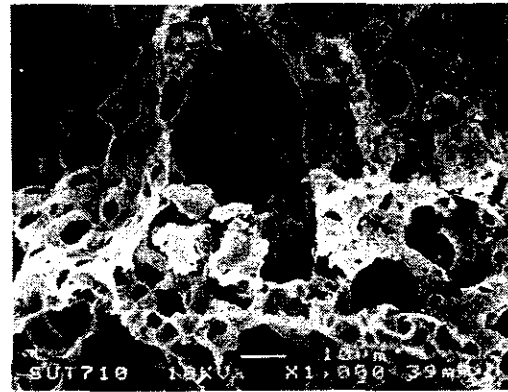
(ข) 600°C / 60 นาที / 0.5:1.0



(ค) 600°C / 60 นาที / 1.0:1.0



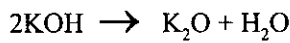
(ง) 800°C / 60 นาที / 0.5:1.0



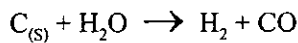
(จ) 800°C / 60 นาที / 1.0:1.0

รูปที่ 4.12 ภาพถ่าย SEM ที่กำลังขยาย 1000 เท่า แสดงลักษณะพื้นผิวของถ่านกัมมันต์แม่เมาะขนาด 20×30 mesh (ผลของอุณหภูมิและอัตราส่วนระหว่างKOHต่อถ่านหิน)

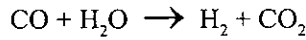
1. เกิด K_2O ขึ้นโดยปฏิกิริยา dehydration ของ KOH ดังนี้



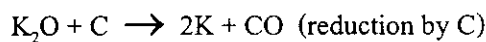
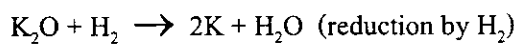
2. ไออน้ำที่เกิดขึ้นสามารถทำปฏิกิริยา water-gas ได้ดังนี้



CO ที่เกิดขึ้นสามารถทำปฏิกิริยา water-gas shift reaction ต่อไปดังนี้



จากปฏิกิริยาที่ 1 และ 2 ดังกล่าวทำให้เกิดรูพรุนขึ้นอย่างรวดเร็วและได้มากเนื่องจากอะตอมของคาร์บอนถูกทำปฏิกิริยาได้โดยตรงกับสารเคมีที่มีอยู่ นอกจากนี้ที่อุณหภูมิสูงประมาณ $700^\circ C$ จะเกิดโลหะ K ขึ้นได้จากการปฏิกิริยารีดักชัน K_2O ด้วย H_2 หรือคาร์บอน (C) ดังนี้



โลหะ K ที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูงสามารถเคลื่อนที่เข้าไปในระหว่างชั้นของโครงสร้างคาร์บอนทำให้มีความกว้างขึ้นและสร้างเป็นรูพรุนขึ้นได้อีกทางหนึ่ง

4.2 ผลการเตรียมถ่านกัมมันต์โดยใช้ $ZnCl_2$

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาสภาวะต่าง ๆ ในการเตรียมถ่านกัมมันต์จากถ่านหินลิกไนต์ (แม่เมาะและบ้านปู้) โดยวิธีกระตุ้นทางเคมีด้วย $ZnCl_2$ ตัวแปรต่าง ๆ ที่ได้ศึกษา ได้แก่ อุณหภูมิ $400-600^\circ C$, เวลา 60 และ 120 นาที, อัตราส่วนระหว่างสารกระตุ้นต่อวัตถุดิบโดยน้ำหนัก ($ZnCl_2$: ถ่านหิน) 0.5 : 1.0 และ 1.0 : 1.0 ถ่านหินที่เตรียมได้นำไปวิเคราะห์หาสมบัติต่าง ๆ ได้แก่ การวิเคราะห์แบบประมาณ (%ความชื้น, %สารระเหย, %เถ้า, %ปริมาณคาร์บอนคงตัว) ร้อยละผลผลิต ค่าดูดซับไอโอดีน ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุนขนาดต่าง ๆ ปริมาตรรูพรุนทั้งหมด และขนาดรูพรุนเฉลี่ย ผลการวิเคราะห์สมบัติต่าง ๆ ของถ่านกัมมันต์นำไปเปรียบเทียบกับสมบัติต่าง ๆ ของวัตถุดิบ (ถ่านหิน) ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากถ่านหินชนิดเดียวกันโดยวิธีกระตุ้นทางกายภาพ และถ่านกัมมันต์ทางการค้าซึ่งเตรียมจากกะลามะพร้าวโดยวิธีกระตุ้นทางกายภาพด้วยไอน้ำ

4.2.1 ผลการวิเคราะห์แบบประมาณ

ผลการวิเคราะห์แบบประมาณของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ภายใต้สภาวะต่าง ๆ เปรียบเทียบกับถ่านหินทั้งสองชนิดและถ่านกัมมันต์ทางการค้าได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์พบว่าสำหรับถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากถ่านหินแม่เมาะมีปริมาณคาร์บอนคงตัวของถ่านกัมมันต์ที่เพิ่มขึ้นมากกว่าปริมาณคาร์บอนคงตัวของวัตถุดิบ (ถ่านหิน) โดยถ่านกัมมันต์มีปริมาณคาร์บอนคงตัวมากขึ้นไปตามอุณหภูมิ โดยมีค่าสูงประมาณ 60-75 % ในช่วงอุณหภูมิ $400-600^\circ C$ (สภาวะที่ 2, 4 และ 6) ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณสารระเหยที่ลดลงมากที่สุดสภาวะดังกล่าว พบว่าที่อุณหภูมิสูง $600^\circ C$ ระยะเวลาที่นาน (120 นาที) (สภาวะที่ 9) มีผลทำให้ถ่านกัมมันต์มีปริมาณคาร์บอนคงตัวน้อยกว่าถ่านกัมมันต์ที่

ตารางที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบแบบประมาณของวัตถุคิบและถ่านกัมมันต์ที่เตรียมโดยใช้ $ZnCl_2$

ชนิดของถ่านหิน	สถานะที่	สภาวะการกระตุ้น			การวิเคราะห์แบบประมาณ,%โดยน้ำหนัก			
		อุณหภูมิ (°C)	เวลา (นาที)	$ZnCl_2$: ถ่านหิน	ความชื้น	สารระเหย	เถ้า	คาร์บอนคงตัว
แม่เมาะ	1	400	60	0.5 : 1.0	7	32	5	56
	2	400	60	1.0 : 1.0	6	30	5	59
	3	500	60	0.5 : 1.0	7	22	7	64
	4	500	60	1.0 : 1.0	9	24	4	63
	5	600	60	0.5 : 1.0	6	18	5	71
	6	600	60	1.0 : 1.0	5	14	5	76
	7	400	120	1.0 : 1.0	10	31	4	55
	8	500	120	1.0 : 1.0	7	37	3	53
	9	600	120	1.0 : 1.0	8	35	4	53
บ้านปู	10	400	60	1.0 : 1.0	9	39	12	40
	11	500	60	1.0 : 1.0	6	14	9	71
	12	600	60	1.0 : 1.0	8	19	11	62
ถ่านกัมมันต์ทางการค้า					4	6	2	88
ถ่านหินแม่เมาะ					20	44	12	24
ถ่านหินบ้านปู					8	50	14	28

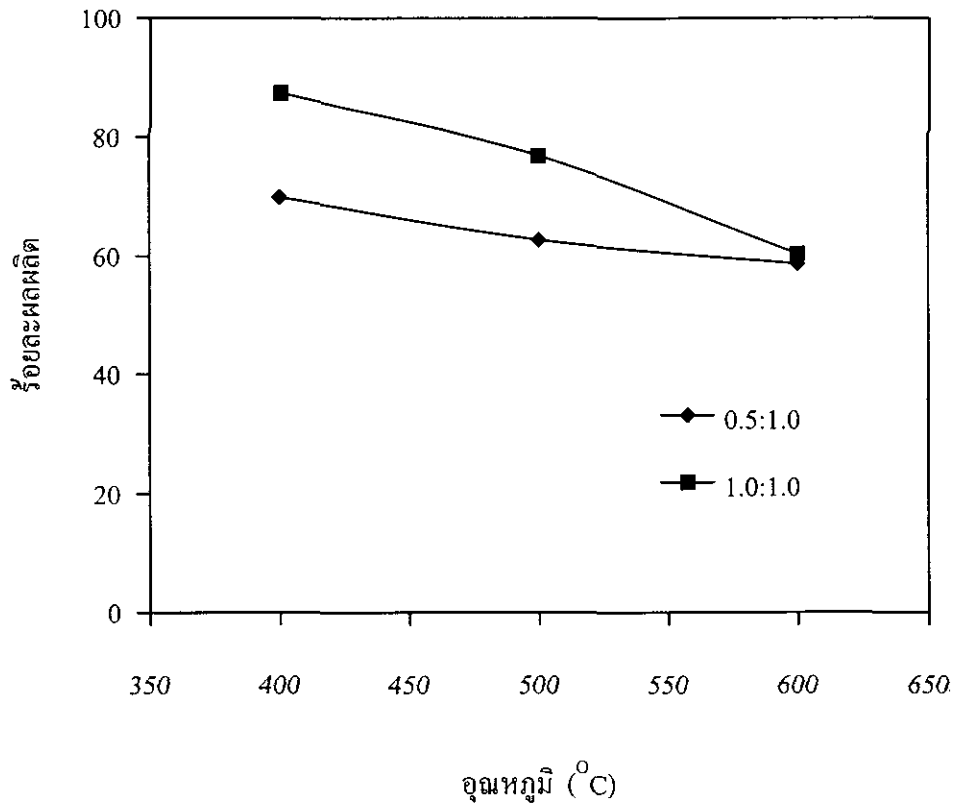
กระตุ้นโดยใช้เวลาน้อยกว่า (60 นาที) (สภาวะที่ 6) แต่ระยะเวลาของการกระตุ้นที่ต่างกันไม่มีผลมากนักที่อุณหภูมิต่ำ (400 °C) (สภาวะที่ 2 และ 7) สำหรับผลของอัตราส่วนระหว่างสารเคมีกับถ่านหินที่ต่างกันพบว่าไม่ได้ทำให้ปริมาณคาร์บอนคงตัวหรือปริมาณสารระเหยของถ่านกัมมันต์ที่ได้แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (สภาวะที่ 1 และ 2, 3 และ 4, 5 และ 6) ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมในงานวิจัยนี้ทุกสภาวะมีปริมาณคาร์บอนคงตัวน้อยกว่าถ่านกัมมันต์ทางการค้า ปริมาณคาร์บอนคงตัวที่แตกต่างกันนี้อาจเนื่องมาจากความแตกต่างในธรรมชาติของโครงสร้างทางกายภาพและทางเคมีของถ่านหินและกะลาอะพริ้วและวิธีการกระตุ้นตลอดจนสภาวะและสารกระตุ้นที่มีความแตกต่างกัน สำหรับถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากถ่านหินบ้านปูพบว่ามีความไวต่อไอน้ำคล้ายกับถ่านหินจากแหล่งแม่เมาะ โดยมีปริมาณคาร์บอนคงตัวสูงขึ้นไปตามอุณหภูมิ แต่มีค่าสูงสุดประมาณ 70% ที่อุณหภูมิกระตุ้น 500 °C

4.2.2 ผลของสภาวะกระตุ้นต่อร้อยละผลผลิต

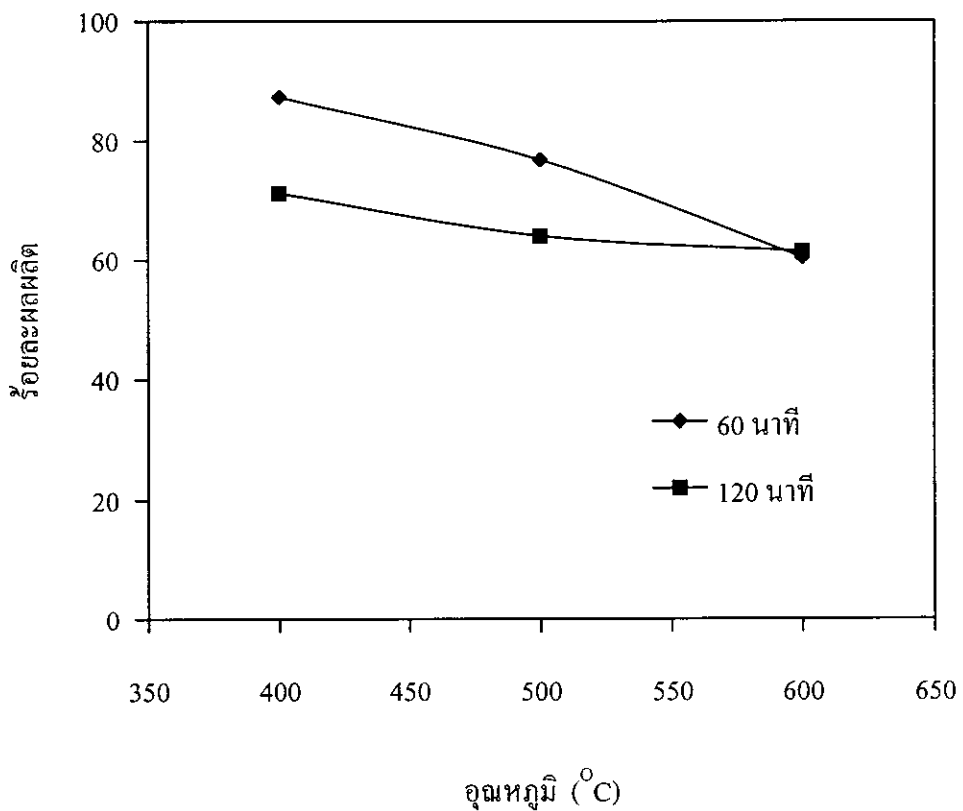
ผลของสภาวะอุณหภูมิที่มีต่อร้อยละผลผลิตได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.13 พบว่าที่สภาวะเวลาคงที่ การกระตุ้นที่อุณหภูมิต่ำกว่าได้ร้อยละผลผลิตมากกว่าการกระตุ้นที่อุณหภูมิสูง และจากผลของสภาวะเวลาที่มีต่อร้อยละผลผลิตที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.14 พบว่าถ้าอุณหภูมิการกระตุ้นคงที่ที่ 400 °C การกระตุ้นที่เวลาสั้นกว่ามีผลทำให้ได้ร้อยละผลผลิตมากกว่าการกระตุ้นที่เวลานานกว่า แต่ถ้าอุณหภูมิการกระตุ้นคงที่ 600 °C พบว่าเวลาไม่มีผลต่อร้อยละผลผลิต สำหรับผลของสภาวะอัตราส่วน $ZnCl_2$ ถ่านหินที่แสดงไว้ในรูปที่ 4.13 นั้น พบว่าที่อุณหภูมิต่ำการมี $ZnCl_2$ มากขึ้นมีผลทำให้ร้อยละผลผลิตมากขึ้น แต่ที่อุณหภูมิสูงการมีปริมาณ $ZnCl_2$ ที่ต่างกันไม่มีผลต่อร้อยละผลผลิตมากนัก สรุปได้ว่าเมื่อสภาวะอุณหภูมิต่างกันนั้นที่อุณหภูมิสูงมีผลทำให้ร้อยละผลผลิตลดลง แต่เมื่อเวลาและปริมาณ $ZnCl_2$ ต่างกันที่สภาวะอุณหภูมิสูงดังกล่าว พบว่าไม่มีอิทธิพลต่อร้อยละผลผลิตแต่อย่างใด

4.2.3 ผลของสภาวะกระตุ้นต่อสมบัติของถ่านกัมมันต์

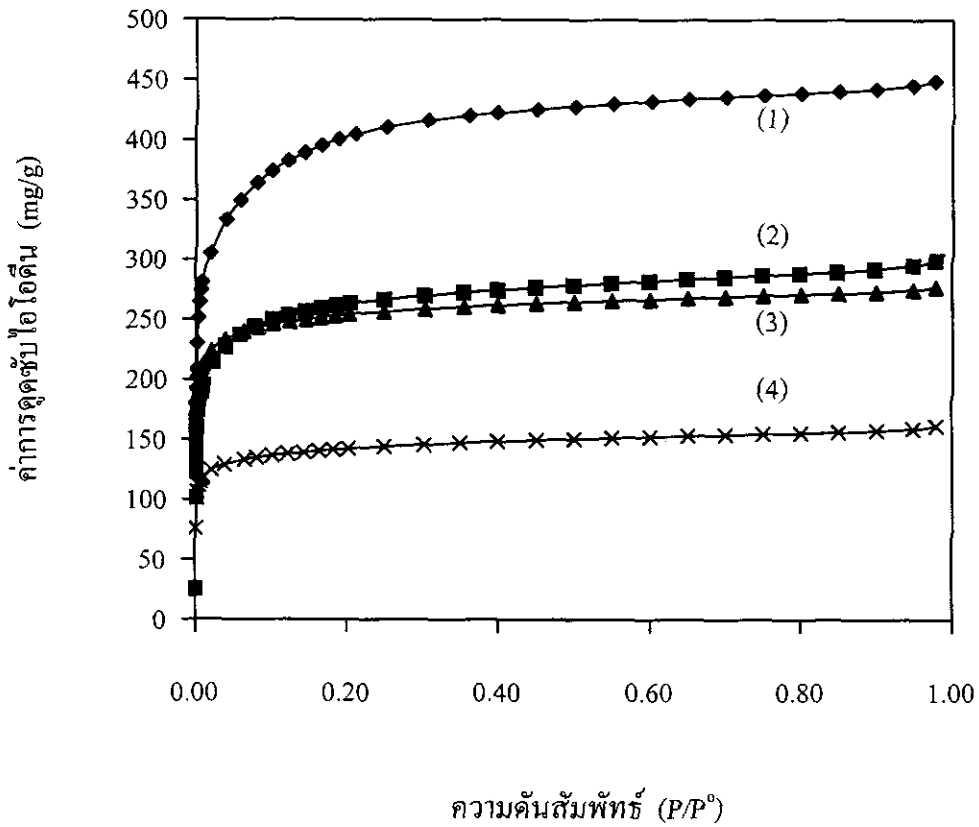
รูปที่ 4.15 แสดงลักษณะไอโซเทอมของการดูดซับแก๊ส N_2 (ที่ -196 °C) ของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้โดยใช้ $ZnCl_2$ จากงานวิจัยนี้พบว่าที่ความดันสัมพัทธ์ต่ำ กราฟไอโซเทอมมีความชันสูงมาก แสดงว่าถ่านกัมมันต์ทุกสภาวะมีลักษณะไอโซเทอมของการดูดซับเป็นแบบ Type I นั่นคือถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ดังกล่าวมีปริมาตรรูพรุนส่วนใหญ่เป็นรูพรุนขนาดเล็ก โดยมีข้อมูลปริมาตรของช่วงขนาดรูพรุนต่าง ๆ เปรียบเทียบกันไว้ในตารางที่ 4.4 และในรูปที่ 4.16 ถึง 4.18



รูปที่ 4.13 ร้อยละผลผลิตของถ่านกัมมันต์จากถ่านหินแม่เมาะขนาด 20×30 mesh โดยวิธีการกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ที่อัตราส่วนสารกระตุ้นต่อวัตถุดิบ และอุณหภูมิในการคาร์บอนไนซ์ต่างกัน (ที่สภาวะเวลาการกระตุ้น 60 นาที)



รูปที่ 4.14 ร้อยละผลผลิตของถ่านกัมมันต์จากถ่านหินแม่เมาะขนาด 20×30 mesh โดยวิธีการกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ที่เวลา และอุณหภูมิในการคาร์บอนไนซ์ต่างกัน (ที่อัตราส่วนสารกระตุ้นต่อวัตถุดิบ 1.0:1.0)



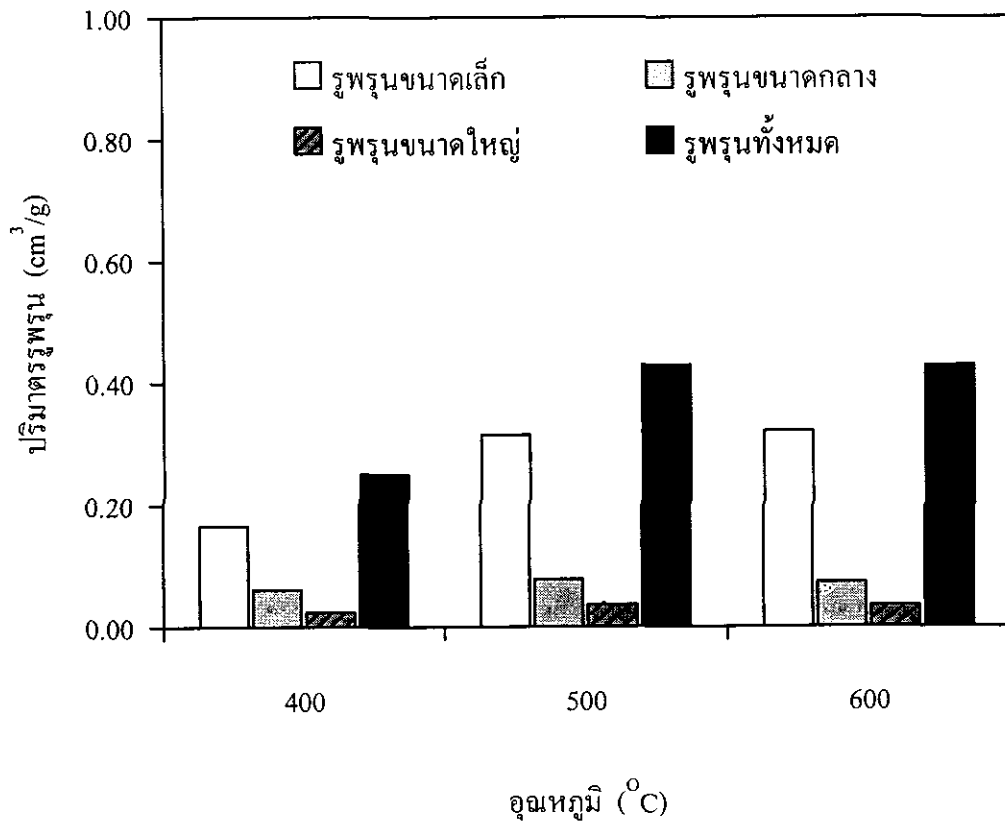
รูปที่ 4.15 เส้นไอโซเทอมการดูดซับแก๊สไนโตรเจนของถ่านกัมมันต์จากถ่านหินแม่เมาะขนาดอนุภาค 20×30 mesh โดยวิธีการกระตุ้นทางเคมี : (1) 500°C / 120 นาที / 1.0:1.0 (2) 500°C / 60 นาที / 1.0:1.0 (3) 500°C / 60 นาที / 0.5:1.0 (4) 400°C / 60 นาที / 0.5:1.0

ตารางที่ 4.4 แสดงผลของอุณหภูมิที่มีต่อร้อยละของผลิตภัณฑ์เตรียมได้ โดยใช้ $ZnCl_2$

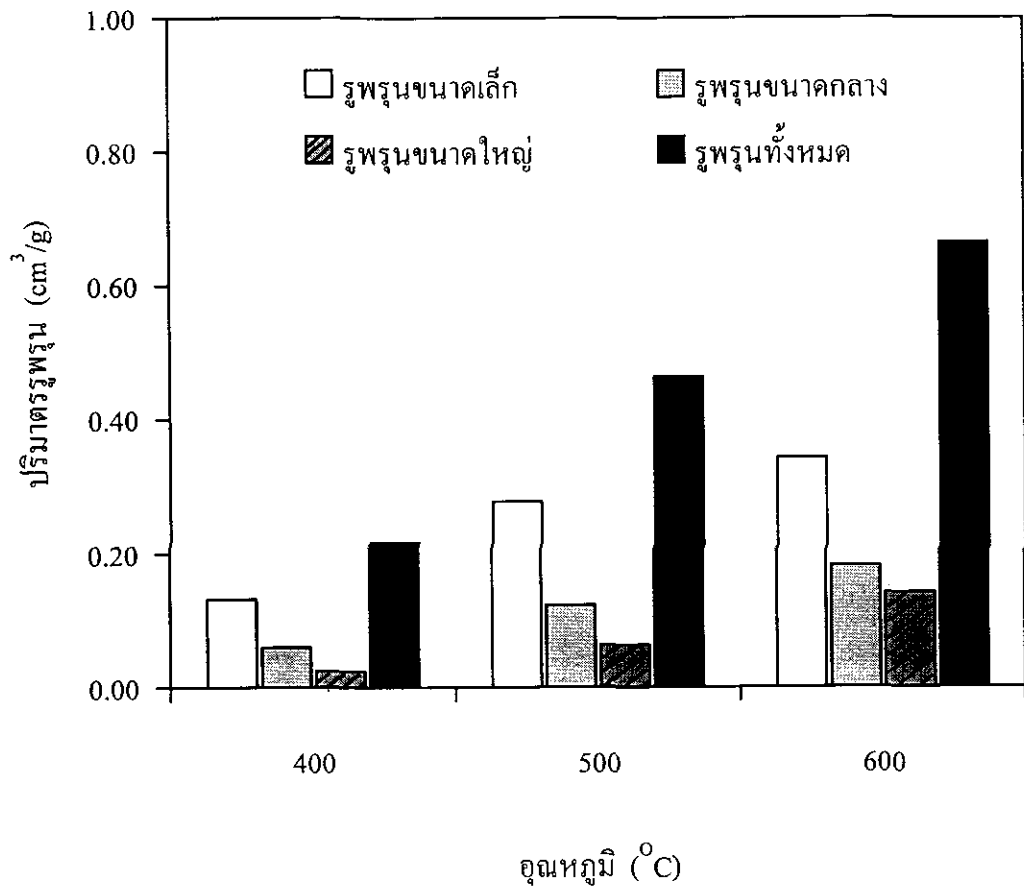
ชนิดถ่านหิน	สภาวะการกระตุ้น		ร้อยละ ผลผลิต	ร้อยละ น้ำหนัก ที่หายไป	ค่าการดูดซับ ไอโอดีน (mg/g)	พื้นที่ผิว จำเพาะ (m^2/g)	ปริมาณ รูพรุน ขนาดเล็ก (cm^3/g)	ปริมาณ รูพรุน ขนาดกลาง (cm^3/g)	ปริมาณ รูพรุน ขนาดใหญ่ (cm^3/g)	ปริมาณ รูพรุน ทั้งหมด (cm^3/g)	ขนาดรูพรุน เฉลี่ย (nm)
	เวลา (นาที)	$ZnCl_2$: ถ่านหิน									
แม่เมาะ	400	0.5 : 1.0	70	30	547	507	0.17 (68%)	0.06 (24%)	0.02 (8%)	0.25	1.97
	400	1.0 : 1.0	87	13	578	432	0.13 (59%)	0.06 (27%)	0.03 (14%)	0.22	2.00
	500	0.5 : 1.0	63	37	787	905	0.32 (74%)	0.08 (19%)	0.04 (7%)	0.43	1.90
	500	1.0 : 1.0	77	23	896	936	0.28 (61%)	0.12 (26%)	0.06 (13%)	0.46	1.98
	600	0.5 : 1.0	59	41	801	905	0.32 (74%)	0.07 (16%)	0.03 (10%)	0.43	1.89
	600	1.0 : 1.0	60	40	1069	1332	0.34 (52%)	0.18 (27%)	0.14 (21%)	0.66	1.92

ตารางที่ 4.4 แสดงผลของอุณหภูมิที่มีต่อร้อยละผลผลิตและสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ โดยใช้ $ZnCl_2$ (ต่อ)

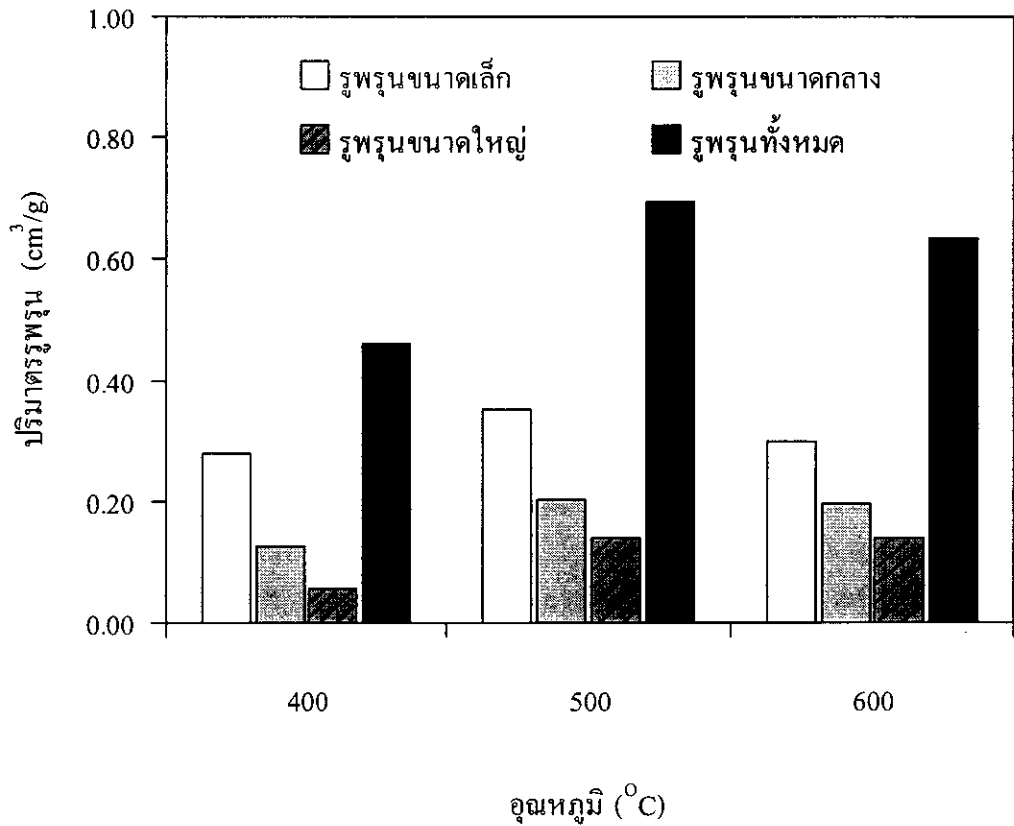
ชนิดถ่านหิน	สภาวะการกระตุ้น		ร้อยละ ผลผลิต	ร้อยละ น้ำหนัก ที่หายไป	ค่าการดูดซับ ไอโอดีน (mg/g)	พื้นที่ผิว จำเพาะ (m^2/g)	ปริมาตร รูพรุน ขนาดเล็ก (cm^3/g)	ปริมาตร รูพรุน ขนาดกลาง (cm^3/g)	ปริมาตร รูพรุน ขนาดใหญ่ (cm^3/g)	ปริมาตร รูพรุน ทั้งหมด (cm^3/g)	ขนาดรูพรุน เฉลี่ย (nm)
	อุณหภูมิ ($^{\circ}C$)	เวลา (นาที)									
แม่เมาะ	400	120	71	29	736	938	0.28 (61%)	0.13 (28%)	0.06 (11%)	0.46	1.97
	500	120	64	36	1002	1427	0.35 (51%)	0.20 (29%)	0.14 (20%)	0.69	1.95
	600	120	61	39	959	1301	0.30 (48%)	0.20 (32%)	0.13 (20%)	0.63	1.95
บ้านปู	400	60	72	28	496	678	0.20 (61%)	0.08 (24%)	0.05 (15%)	0.33	1.93
	500	60	63	37	921	1277	0.27 (42%)	0.22 (34%)	0.14 (24%)	0.64	1.99
	600	60	60	40	854	1124	0.24 (42%)	0.21 (37%)	0.12 (21%)	0.57	2.03
ถ่านกัมมันต์ทางการค้า			-	-	970	1180	0.40 (73%)	0.09 (16%)	0.06 (11%)	0.55	1.85



รูปที่ 4.16 ปริมาตรรุกรุนของถ่านกัมมันต์จากถ่านหินแม่เมาะขนาดอนุภาค 20×30 mesh โดยวิธีการ กระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ที่อัตราส่วน 0.5:1.0 เวลา 60 นาที



รูปที่ 4.17 ปริมาตรรุกรุนของถ่านกัมมันต์จากถ่านหินแม่เมาะขนาดอนุภาค 20×30 mesh โดยวิธีการ กระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ที่อัตราส่วน 1.0:1.0 เวลา 60 นาที

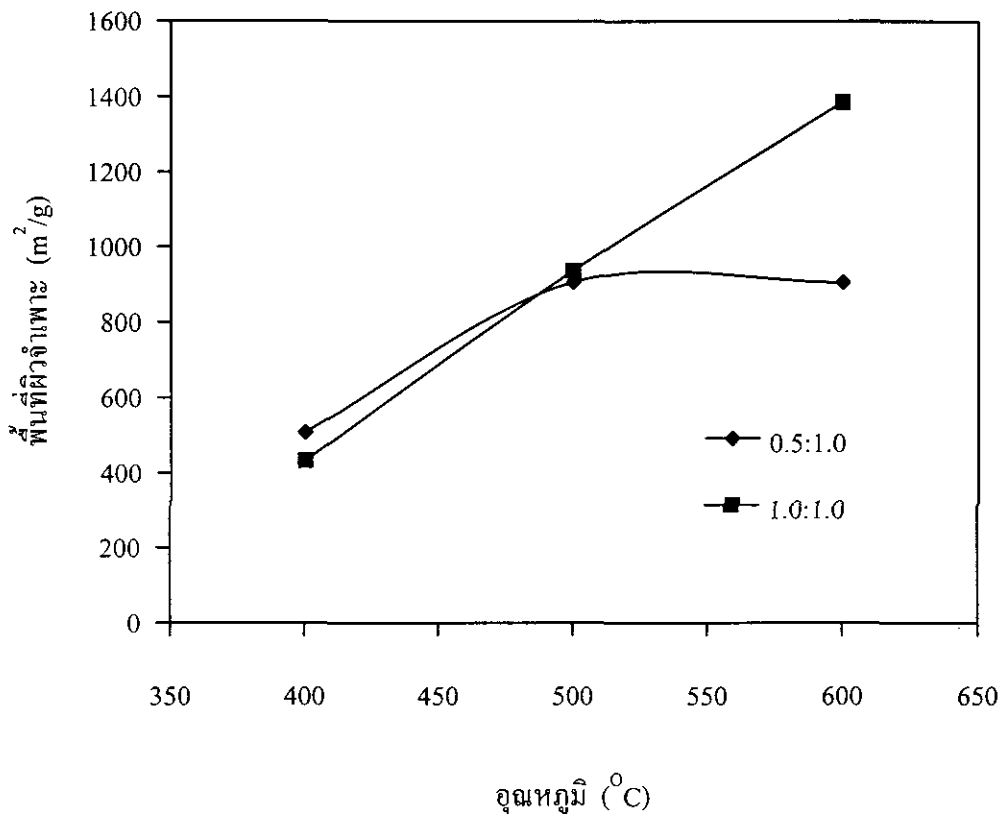


รูปที่ 4.18 ปริมาตรรุกรุ่นของถ่านกัมมันต์จากถ่านหินแม่เมาะขนาดอนุภาค 20×30 mesh โดยวิธีการ กระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ที่อัตราส่วน 1.0:1.0 เวลา 120 นาที

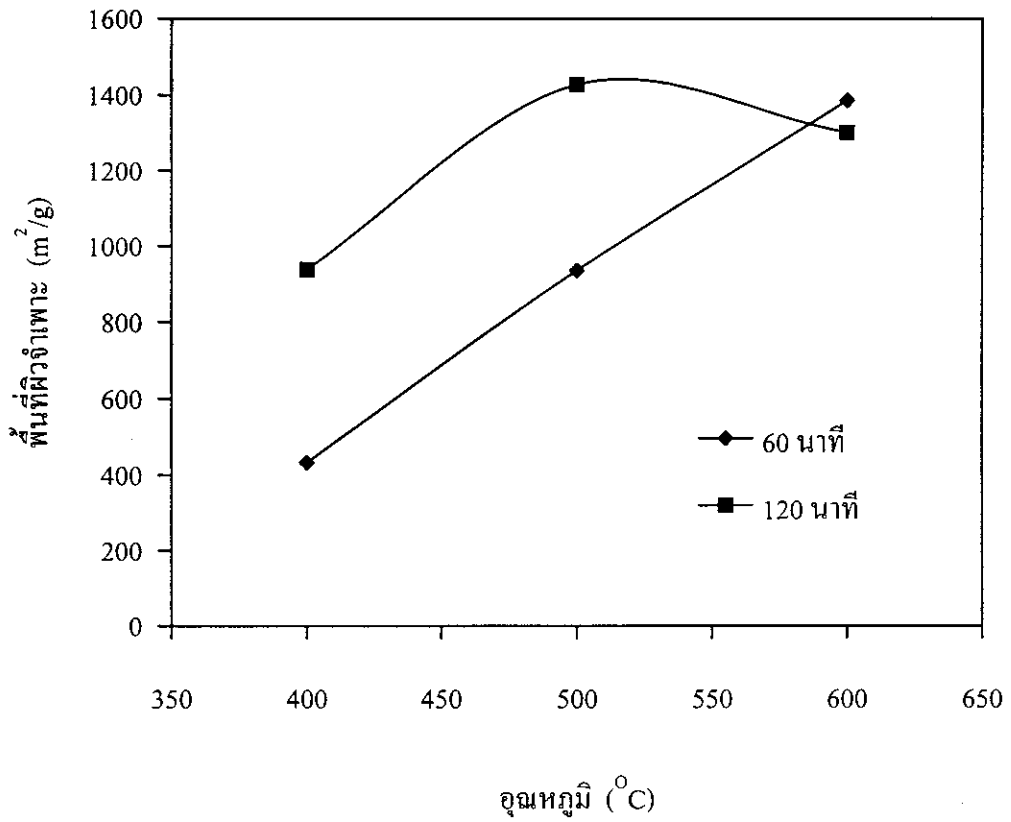
สำหรับผลของสมบัติพื้นที่ผิวจำเพาะ และค่าดูดซับไอโอดีนของสภาวะที่ใช้อัตราส่วนสารกระตุ้นต่อวัสดุคิบเป็น 1.0 : 1.0 นั้น ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.19 ถึง 4.22 ตามลำดับ พบว่าที่สภาวะเวลาเดียวกัน พื้นที่ผิวจำเพาะ และค่าดูดซับไอโอดีนสูงขึ้นไปตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น (ดูรูปที่ 4.19, 4.21) โดยมีปริมาตรรูพรุนทุกช่วงขนาดเพิ่มขึ้นไปตามอุณหภูมิเช่นกัน (ดูรูปที่ 4.17) แต่สำหรับผลของสภาวะที่ใช้อัตราส่วนสารกระตุ้นต่อวัสดุคิบเป็น 0.5 : 1.0 นั้น ที่อุณหภูมิช่วงต้น (400-500°C) พบว่า สมบัติพื้นที่ผิวจำเพาะ และค่าดูดซับไอโอดีน มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นไปตามอุณหภูมิ แต่สมบัติดังกล่าวนี้กลับมีค่าคงที่ในช่วงอุณหภูมิที่สูงขึ้น (500-600°C) (รูปที่ 4.19 และ 4.21) ซึ่งปริมาตรรูพรุนทุกช่วงขนาดก็มีค่าคงที่เช่นกันด้วย (รูปที่ 4.16) แนวโน้มทั้งหมดนี้สามารถอธิบายได้ว่า $ZnCl_2$ มีจุดหลอมเหลว และจุดเดือดเท่ากับ 283 °C และ 732 °C ตามลำดับ ทำให้ที่อุณหภูมิสูง ปริมาณ $ZnCl_2$ เกิดการสูญเสียไปบางส่วนจากการระเหย ส่งผลให้กรณีของสภาวะที่มีปริมาตร $ZnCl_2$ (อัตราส่วนสารเคมีต่อวัสดุคิบ 0.5 : 1.0) นั้น เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นสมบัติพื้นที่ผิวจำเพาะและค่าดูดซับไอโอดีนมีค่าคงที่ เนื่องจากมี $ZnCl_2$ เหลืออยู่ในปริมาณน้อย จึงลบลบบาทลงไป แต่สภาวะที่มีปริมาณ $ZnCl_2$ อยู่มาก (ความเข้มข้นมาก) แม้ว่าจะสูญเสียจากการระเหยไปบ้างแต่ยังคงมี $ZnCl_2$ อยู่เพียงพอ ทำให้ที่อุณหภูมิสูงและสภาวะอัตราส่วนสารเคมีต่อวัสดุคิบเท่ากับ 1.0:1.0 นั้น ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ และค่าดูดซับไอโอดีนยังคงเพิ่มขึ้นไปตามอุณหภูมิ สำหรับความแตกต่างของชนิดของถ่านหินได้แก่ ถ่านหินแม่เมาะและถ่านหินบ้านปู นั้น พบว่าที่อุณหภูมิต่ำกว่า 550°C ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากบ้านปูมีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะสูงกว่าถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากแม่เมาะ แต่มีผลตรงกันข้ามที่อุณหภูมิมากกว่า 550°C (ดูรูปที่ 4.23)

จากผลการทดลองที่ใช้ $ZnCl_2$ เป็นสารกระตุ้นในการเตรียมถ่านกัมมันต์จากถ่านหิน พบว่าสภาวะที่ให้พื้นที่ผิวจำเพาะมากที่สุด (1,427 m²/g) คือ ที่อุณหภูมิ 500°C เวลา 120 นาที และ $ZnCl_2$: ถ่านหิน 1:1 เนื่องจาก $ZnCl_2$ เป็นสารเคมีที่จัดว่าเป็นกรดจึงสามารถทำปฏิกิริยากับกลุ่มฟังก์ชันที่เป็นออกซิเจนที่มีอยู่ในถ่านหินได้ ดังนั้น จึงสามารถเร่งปฏิกิริยา dehydration และ dehydrogenation ทำให้สารระเหยในรูปของ H และ O หลุดออกไปได้มาก จึงเกิดรูพรุนได้มาก และมีการจัดเรียงตัวของโครงร่างคาร์บอนให้เป็นแบบอะโรมาติกที่แข็งแรง ทำให้มีทาร์เกิดขึ้นน้อย และเม็ดถ่านไม่หดตัวมาก ส่งผลให้มีปริมาตรรูพรุนเกิดขึ้นมาก และมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูง

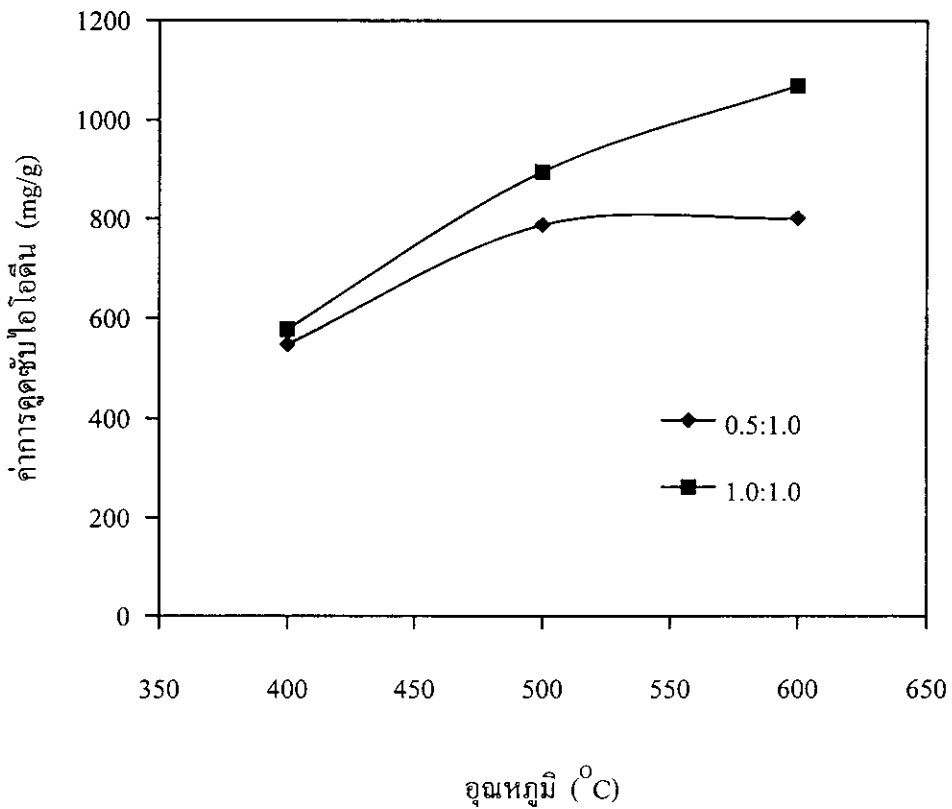
ผลการเปรียบเทียบสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากถ่านหินลิกไนท์โดยการกระตุ้นทางกายภาพด้วย CO₂ และที่เตรียมโดยวิธีกระตุ้นทางเคมีแสดงไว้ในตารางที่ 4.5 โดยเปรียบเทียบถ่านกัมมันต์ที่ให้ค่าพื้นที่ผิว (BET surface area) มากที่สุดของการเตรียมในแต่ละวิธี จะเห็นว่าถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากอนุภาคถ่านหินลิกไนท์โดยวิธีทางเคมีให้พื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนสูงกว่าวิธีเตรียมทางกายภาพประมาณเกือบ 5 เท่า โดยถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากสารละลาย KOH ให้ค่าพื้นที่ผิวสูงสุด ขนาดรูพรุนเฉลี่ยของถ่านกัมมันต์เตรียมทางเคมีมีขนาดเล็กกว่าถ่านกัมมันต์ที่เตรียมโดยวิธีทางกายภาพประมาณ 15% ดังนั้นการเตรียมถ่านกัมมันต์โดยวิธีทางเคมีจึงมีประสิทธิภาพสูงกว่าแต่มีข้อจำกัดที่ต้องสิ้นเปลืองสารเคมีที่ต้องใช้และอาจมีปัญหาคั่งค้างของสารเคมีในถ่านกัมมันต์ถ้าไม่สามารถล้างสารเคมีออกได้หมด



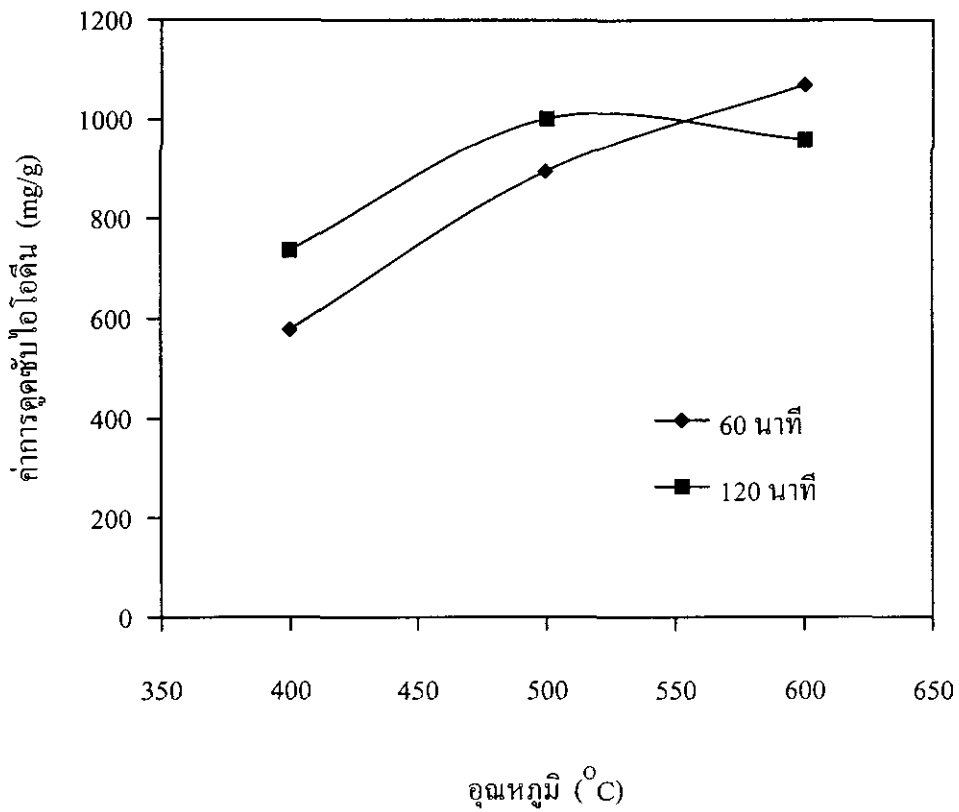
รูปที่ 4.19 พื้นที่ผิวจำเพาะของถ่านกัมมันต์จากถ่านหินแม่เมาะขนาดอนุภาค 20×30 mesh โดยวิธีการกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ที่สภาวะเวลาเดียวกัน (60 นาที) แต่มีอัตราส่วนสารกระตุ้นต่อวัตถุดิบ และอุณหภูมิในการคาร์บอนไนซ์ต่างกัน



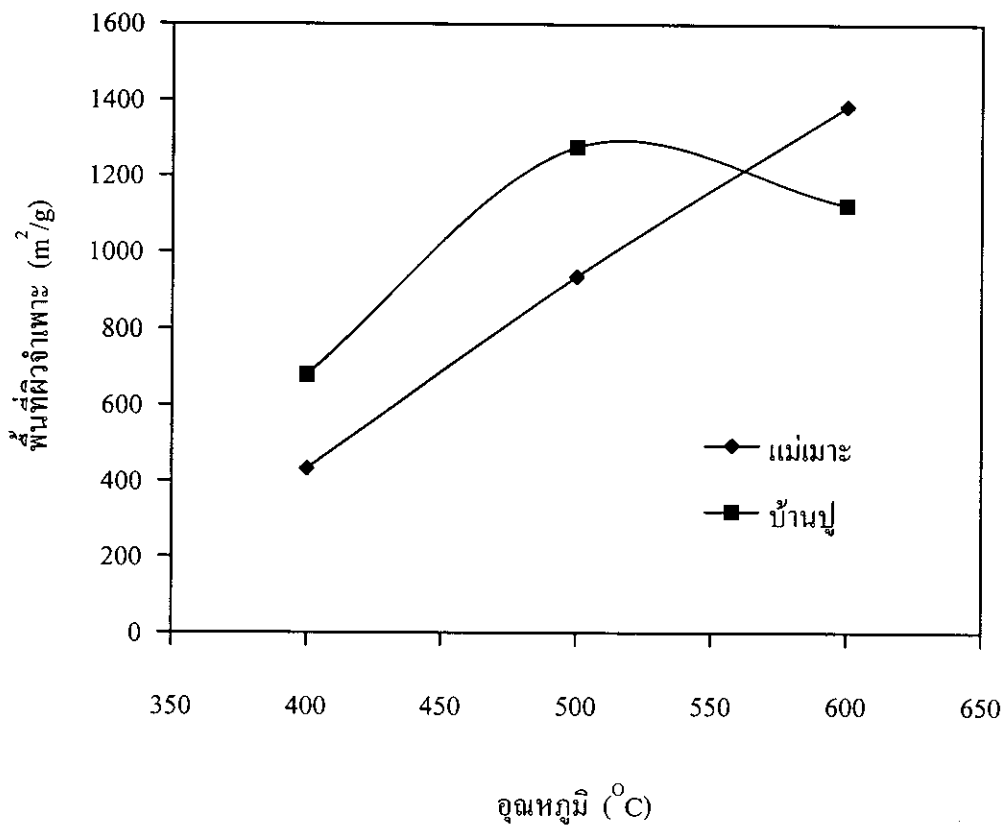
รูปที่ 4.20 พื้นที่ผิวจำเพาะของถ่านกัมมันต์จากถ่านหินแม่เมาะขนาดอนุภาค 20×30 mesh โดยวิธีการ กระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ที่เวลาและอุณหภูมิในการคาร์บอนไนซ์ต่างกัน (อัตราส่วน สารกระตุ้นต่อวัตถุดิบ 1.0:1.0)



รูปที่ 4.21 ปริมาณการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์จากถ่านหินแม่เมาะขนาด 20×30 mesh โดยวิธีการกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ที่อัตราส่วนสารกระตุ้นต่อวัตถุดิบ และอุณหภูมิ ในการคาร์บอนไนซ์ต่างกัน (เวลาในการกระตุ้น 60 นาที)



รูปที่ 4.22 ปริมาณการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์จากถ่านหินแม่เมาะขนาด 20×30 mesh โดยวิธีการกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ที่เวลา และอุณหภูมิในการคาร์บอนไนซ์ต่างกัน (อัตราส่วนสารกระตุ้นต่อวัตถุดิบ 1.0:1.0)



รูปที่ 4.23 พื้นที่ผิวจำเพาะของถ่านกัมมันต์จากถ่านหินลิกไนต์ขนาดอนุภาค 20×30 mesh โดยวิธีการ กระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ที่ชนิดของถ่านหิน และอุณหภูมิในการคาร์บอนไนซ์ต่างกัน (อัตราส่วนสารกระตุ้นต่อวัตถุดิบ 1.0:1.0 และเวลาในการกระตุ้น 60 นาที)

ตารางที่ 4.5 สมบัติของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากลิกไนท์ โดยวิธีกระตุ้นทางกายภาพ เปรียบเทียบกับวิธีกระตุ้นทางเคมี (ขนาดอนุภาคถ่านหิน 20x30 mesh)

สภาวะการเตรียมและสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ได้	วิธีการเตรียมถ่านกัมมันต์		
	ทางกายภาพ (CO ₂)	ทางเคมี (ZnCl ₂)	ทางเคมี (KOH)
สภาวะคาร์บอนไนเซชัน			
▪ บรรยากาศ	100%N ₂	-	-
▪ อุณหภูมิ, °C	700	-	-
▪ เวลา, min.	40	-	-
สภาวะกระตุ้น			
▪ บรรยากาศ	25% CO ₂ +75%N ₂	100%N ₂	100%N ₂
▪ อุณหภูมิ, °C	900°C	500	800
▪ เวลา, min.	30	120	120
▪ น้ำหนักสารเคมีต่อถ่านหิน	-	1 : 1	1 : 1
การวิเคราะห์แบบประมาณ, %โดยน้ำหนัก			
▪ ความชื้น	2	7	12
▪ สารระเหย	7	37	16
▪ เถ้า	32	3	2
▪ คาร์บอนคงตัว	59	53	70
พื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุน			
▪ พื้นที่ผิว, m ² /g	400	1,427	1,856
▪ ปริมาตรรูพรุนรวม, cm ³ /g	0.22 (100%)	0.69(100%)	0.95(100%)
▪ ปริมาตรรูพรุนขนาดเล็ก, cm ³ /g	0.12(55%)	0.35(51%)	0.53(56%)
▪ ปริมาตรรูพรุนขนาดกลาง, cm ³ /g	0.08(36%)	0.20(29%)	0.30(31%)
▪ ปริมาตรรูพรุนขนาดใหญ่, cm ³ /g	0.02(9%)	0.14(20%)	0.12(13%)
▪ ขนาดรูพรุนเฉลี่ย, nm.	2.27	1.95	2.05

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 การเตรียมถ่านกัมมันต์จากลิกไนท์ โดยการกระตุ้นด้วย KOH

1. ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมโดยการกระตุ้นด้วยสารละลาย KOH พบว่ามีปริมาณเถ้าลดลงมากอยู่ในช่วง 2-5% โดยน้ำหนักเทียบกับถ่านหินดิบซึ่งมีเถ้าสูงถึง 23% ส่วนปริมาณคาร์บอนคงตัวในถ่านกัมมันต์มีค่าตั้งแต่ 50-70% ขึ้นกับสภาวะการเตรียม
2. อุณหภูมิการกระตุ้นที่สูงขึ้น (600-800°C) ทำให้ร้อยละของน้ำหนักรที่หายไป ตลอดจนค่าการดูดซับไอโอดีน พื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรของรูพรุนทุกช่วงขนาดมีค่ามากขึ้น ในขณะที่ผลของเวลาการกระตุ้นที่นานขึ้นทำให้ร้อยละน้ำหนักรที่หายไปเพิ่มขึ้น (ร้อยละผลผลิตลดลง) แต่สมบัติอื่น ๆ มีค่าเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก
3. การใช้อัตราส่วนระหว่างสารเคมีต่อวัตถุดิบที่เพิ่มขึ้นทำให้ได้ถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนเพิ่มมากขึ้น
4. ลักษณะไอโซเทอมการดูดซับของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้พบว่าเป็นชนิด Type I แสดงว่าลักษณะของรูพรุนส่วนใหญ่เป็นแบบรูพรุนขนาดเล็ก (น้อยกว่า 2 นาโนเมตร)
5. สภาวะการเตรียมที่ให้พื้นที่ผิวจำเพาะสูงสุด 1,856 m²/g ได้แก่ที่อุณหภูมิ 800°C เวลา 120 นาที และอัตราส่วน KOH ต่อถ่านหินเท่ากับ 1 : 1 โดยน้ำหนัก โดยมีปริมาตรรูพรุนทั้งหมด 0.95 cm³/g และขนาดรูพรุนเฉลี่ยเท่ากับ 2.05 นาโนเมตร

5.2 การเตรียมถ่านกัมมันต์จากลิกไนท์ โดยการกระตุ้นด้วย ZnCl₂

1. การเตรียมถ่านกัมมันต์จากลิกไนท์ โดยการกระตุ้นด้วยสารละลาย ZnCl₂ ในช่วงอุณหภูมิ 400-600°C พบว่าสภาวะที่ทำให้พื้นที่ผิวจำเพาะมีค่าสูงสุด 1,427 m²/g ได้แก่ที่สภาวะอุณหภูมิ 500°C เวลาการกระตุ้น 120 นาที และอัตราส่วนสารเคมีต่อวัตถุดิบเท่ากับ 1 : 1
2. การเพิ่มอุณหภูมิและเวลาการกระตุ้นทำให้ร้อยละผลผลิตของถ่านกัมมันต์มีค่าลดลง แต่เมื่ออุณหภูมิการกระตุ้นสูงถึง 600°C การเพิ่มของเวลาจะไม่มีผลต่อร้อยละผลผลิต
3. การเพิ่มอุณหภูมิและเวลาการกระตุ้นทำให้ร้อยละของสารระเหยของถ่านกัมมันต์มีค่าลดลง ส่งผลให้ปริมาณคาร์บอนคงตัวเพิ่มขึ้น ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 60-75% สำหรับการเพิ่มปริมาณสารเคมีที่ใช้กระตุ้นพบว่าไม่มีผลต่อองค์ประกอบแบบประมาณของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้
4. การเพิ่มอุณหภูมิของการกระตุ้นในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่า 500°C ทำให้พื้นที่ผิวจำเพาะ ค่าการดูดซับไอโอดีนและปริมาตรรูพรุนของถ่านกัมมันต์มีค่าเพิ่มขึ้น แต่เมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 500°C การเพิ่มอุณหภูมิทำให้พื้นที่ผิวจำเพาะค่าการดูดซับไอโอดีนและปริมาตรรูพรุนมีแนวโน้มค่อนข้างคงที่ที่อัตราส่วนสารเคมีต่อวัตถุดิบน้อยกว่า 1:1 แต่ที่อัตราส่วนสารเคมีเท่ากับ 1:1 สมบัติทั้งสามดังกล่าวกลับมีค่าเพิ่มสูงขึ้น

5. การเพิ่มเวลาการกระตุ้นทำให้พื้นที่ผิวจำเพาะค่าการดูดซับไอโอดีนและปริมาตรรูพรุนของถ่านกัมมันต์เพิ่มขึ้น เมื่อใช้อุณหภูมิการกระตุ้นต่ำกว่า 500°C แต่เมื่ออุณหภูมิเพิ่มมากขึ้นมีแนวโน้มว่าสมบัติดังกล่าวมีค่าลดลงเล็กน้อย
6. ลักษณะรูพรุนของถ่านกัมมันต์จากการกระตุ้นด้วย ZnCl_2 ยังเป็นรูพรุนขนาดเล็กแต่การเพิ่มปริมาณสารเคมี อุณหภูมิและเวลาจะทำให้ได้สัดส่วนปริมาตรของรูพรุนขนาดกลางเพิ่มมากขึ้น
7. ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากถ่านหินลิกไนท์สัคค์ (Rank) เดียวกันแต่ต่างแหล่งกันจะมีสมบัติที่แตกต่างกันไปด้วย โดยมีแนวโน้มว่าถ่านหินบ้านปูจะให้พื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนที่มากกว่าถ่านหินจากแหล่งแม่เมาะ

5.3 ข้อเสนอแนะ

จากผลการศึกษาจะเห็นว่าเราสามารถเตรียมถ่านกัมมันต์ที่มีคุณภาพสูงจากถ่านหินลิกไนท์ โดยวิธีกระตุ้นด้วยสารเคมี โดยพบว่าทั้ง KOH และ ZnCl_2 เป็นสารกระตุ้นที่มีประสิทธิภาพ สามารถให้ถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวภายในและปริมาตรรูพรุนค่อนข้างสูง เมื่อเทียบกับถ่านกัมมันต์ทางการค้าที่เตรียมจากกะลามะพร้าวซึ่งกระตุ้นด้วยไอน้ำ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อเทียบกับถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากลิกไนท์ โดยการกระตุ้นทางกายภาพด้วยแก๊ส CO_2 เพื่อให้การศึกษาสมบูรณ์ยิ่งขึ้นจึงควรทำวิจัยเพิ่มเติม โดยมีข้อเสนอแนะดังนี้

1. เนื่องจากรูพรุนที่เกิดจากการกระตุ้นทางเคมียังคงเป็นรูพรุนขนาดเล็ก จึงควรหาวิธีเพิ่มปริมาตรรูพรุนขนาดกลางด้วยวิธีการอื่น ๆ เช่น การใช้สารกระตุ้นเคมีชนิดอื่น หรือใช้ทั้งกระบวนการกระตุ้นทางกายภาพและทางเคมีควบคู่กันไป หรือใช้อุณหภูมิการกระตุ้นที่สูงขึ้นเป็นต้น จุดประสงค์เพื่อให้สามารถนำถ่านกัมมันต์ไปใช้ในการดูดซับสารที่มีโมเลกุลใหญ่ได้ดียิ่งขึ้น
2. เนื่องจากการตกค้างของสารเคมีในผลิตภัณฑ์ถ่านกัมมันต์เป็นข้อจำกัดของการเตรียมถ่านกัมมันต์โดยวิธีทางเคมี จึงน่าจะศึกษาถึงการล้างสารเคมีที่มีประสิทธิภาพและสิ้นเปลืองเวลานให้น้อยลงหรือศึกษาความเข้มข้นต่ำสุดที่ควรใช้ในกระบวนการเตรียมเพื่อประหยัดสารเคมีที่ต้องใช้ ตลอดจนศึกษาการชะล้างของสารเคมีออกจากถ่านกัมมันต์ขณะนำไปใช้งานดูดซับเพื่อลดผลกระทบที่อาจเกิดขึ้น
3. ควรศึกษาในเชิงลึกถึงกลไกการเพิ่มพื้นที่ผิวและรูพรุนของถ่านกัมมันต์ เมื่อใช้สารกระตุ้นประเภทต่าง ๆ เช่น จำพวกกรด ด่าง และเกลือ เป็นต้น เพื่อสามารถเพิ่มสมบัติการดูดซับของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้

บรรณานุกรม

1. กรมศุลกากร. (2545) สถิติการนำเข้า-ส่งออก [ออนไลน์]. ได้จาก :
<http://www.customs.go.th/statistic-search.html>
2. กรมเชื้อเพลิงธรรมชาติ. (2545) ถ่านหิน [ออนไลน์]. ได้จาก <http://www.dmf.go.th/>
3. สำนักงานคณะกรรมการนโยบายพลังงานแห่งชาติ (2545). ข้อมูลพลังงาน [ออนไลน์]. ได้จาก
:<http://www.nepo.go.th/info/index.html>
4. ชัยยศ ตั้งสติกุลชัย และมาลี ตั้งสติกุลชัย, รายงานการวิจัยเรื่อง การผลิตถ่านกัมมันต์จากถ่านหินลิกไนท์, ทูลอดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2542
5. R.C. Bansal, J.Donnet and F.Stoeckli, Active Carbon, Marcel Dekker, New York, 1988.
6. บุญชัย ตระกูลมหชัย, “การผลิตถ่านกัมมันต์จากกะลาตาลโดนคในฟลูอิโดซ์เบด”, วิทยานิพนธ์ระดับวิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย พ.ศ.2537.
7. พงศธร ไคว์ชกรณณ์, “ถ่านกัมมันต์จากขังข้าวโพด”, วิทยานิพนธ์ระดับวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย พ.ศ. 2538.
8. กัทธา ปัญญวัฒน์กิจ และธราพงษ์ วิทิตสานต์, “การผลิตถ่านกัมมันต์จากกะลาปาล์มน้ำมันกระดุนด้วยไอน้ำอิ่มตัวยิ่งยวด”, การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมเคมี และเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 7, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 23-25 ตุลาคม พ.ศ. 2540.
9. H.Teng and T.S.Yeh, “Preparation of Activated Carbons from Bituminous Coals with Zinc Chloride Activation”, Ind. Eng. Chem. Res. Vol.37, pp.58-65, 1998.
10. C.Toles, S.Rimmer.and J.C.Hower, “Production of Activated Carbons from a Washington Lignite using Phosphoric Acid Activation”, Carbon, Vol.34, No.11, pp.1419-1426, 1996.
11. M.Greenbank and S.Spotts, “Six Criteria for Coal-Based Carbons”, Water Technology, Vol.16, pp.56. 1993.
12. J.Sun, E.J.Hippo, H.Marsh, W.S. O'Brien and J.C. Crelling, “Activated Carbon Produced from Illinois Basin Coal”, Carbon, Vol.35, No.3, pp.341-352, 1997.
13. M.Jagtoyen, M.Thwaites, J.Stencel, B.McEnaney and F.Derbyshire, “Adsorbent Carbon Synthesis from Coals by Phosphoric Acid Activation”, Carbon, Vol.30, No.7, pp.1089-1096, 1992.
14. K.Miura and J.Hayashi, “Production of Molecular Sieve Carbon through Carbonization of Coal Modified by Organic Additives”, Carbon, Vol.29, No.4/5, pp.653-660, 1991.

15. T. Otawa, Y.Nojima and T.Miyazaki, "Development of KOH Activated High Surface Area Carbon and Its Application to Drinking Water Purification", Vol.35, No.9, pp.1315-1319, 1997.
16. R.Torregrosa-Macia, J.M.Martin-Martinez and M.C.Mittelmeijer-Hazeleger, "Porous Texture of Activated Carbons Modified with Carbohydrates", Carbon, Vol.35, No.4, pp.447-453, 1997.
17. O.Kadlec, A.Varthanikova and A.Zuhail, Carbon, Vol.8, pp.321,1970.
18. A.N. Wennerberg and T.M. O'Grady, U.S.Patent 4,082,694 (1973).
19. H.N.S. Schafer, U.S.Patent 4,039,473 (1977).
20. Annual Book of ASTM Standards, Standard Test Method for Moisture in the Analysis Sample of Coal and Coke (D3173), 1979.
21. Annual Book of ASTM Standards, Standard Test Method for Ash in the Analysis Sample of Coal and Coke (D3174), 1979.
22. Annual Book of ASTM Standards, Standard Test Method for Volatile Matter in the Analysis Sample of Coal and Coke (D3175), 1979.
23. Annual Book of ASTM Standards, Standard Test Method for Total Ash Content of Activated Carbon (D2866), 1998.
24. Annual Book of ASTM Standards, Standard Test Method for Moisture in Activated Carbon (D2867), 1998.
25. Annual Book of ASTM Standards, Standard Test Method for Volatile Matter Content of Activated Carbon Samples (D5832), 1998.
26. Annual Book of ASTM Standards, Standard Test Method for Determination of Iodine Number of Activated Carbon (D4607), 1998.
27. S.J.Gregg and K.S.W. Sing, "Adsorption, Surface Area and Porosity", Academic Press, 1982.
28. F.Rouquerol, J.Rouquerol and K.S.W.Sing, "Adsorption by Powders and Porous Solids: Principles, Methodology and Applications", Academic Press, 1999.
29. P.Ehrburger, A.Addoun, F.Addoun and J.B. Donnet, Fuel, 65(10), pp.1447-9, 1986.
30. H.Marsh and D.S.Yan, "Formation of Active Carbons from Cokes using Potassium Hydroxide", Carbon, 22, 603-611, 1984.
31. T.Otawa, R.Tanihata and M.Itoh, "Production and Adsorption Characteristics of MAXSORB : High-Surface Area Active Carbon", Gas Separation and Purification, Vol.7, pp.241-245, 1993.

32. C.Y. Hsu and H.Teng, "Influence of Different Chemical Reagents on the Preparation of Activated Carbons from Bituminous Coal", *Fuel Processing Technology*, 64, 155-166, 2000.

ภาคผนวก ก
ประวัตินักวิจัย

ประวัติหัวหน้าโครงการวิจัยและผู้ร่วมวิจัย

ประวัติหัวหน้าโครงการวิจัย

นายชัยยศ ตั้งสถิตย์กุลชัย (Chaiyot Tangsathitkulchai)

ตำแหน่งปัจจุบัน รองศาสตราจารย์และหัวหน้าสาขาวิชาวิศวกรรมเคมี
 สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์
 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ประวัติการศึกษา

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

สาขาวิชาที่มีความชำนาญพิเศษ

- เทคโนโลยีถ่านหิน
- การบดย่อยวัสดุ
- ถ่านกัมมันต์และการดูดซับ

ผลงานวิจัยที่ตีพิมพ์

มีผลงานวิจัยด้านถ่านหินและเทคโนโลยีอนุภาค ประมาณ 40 เรื่อง (ดังแนบ)

ประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

งานวิจัยที่ทำเสร็จแล้ว

ชื่อเรื่อง	แหล่งทุน	ปีที่ทำเสร็จ	สถานภาพ
1. Improved Producer Gas Cleaning System	USAID	2533	ผู้ร่วมวิจัย
2. การพัฒนาระบบฟลูอิดไดซ์เบดหมุนเวียน	สภาวิจัยแห่งชาติ	2535	หัวหน้าโครงการ
3. ระบบผลิตพลังงานความร้อนจากแก๊สชีวภาพ	สภาวิจัยแห่งชาติ	2537	ผู้ร่วมวิจัย
4. การพัฒนาหม้อกำเนิดไอน้ำฟลูอิดไดซ์เบดสำหรับอุตสาหกรรมขนาดเล็ก	ASEAN-Australian Energy Program	2537	ผู้ร่วมวิจัย
5. การจำแนกเถ้าลอยลิกไนต์ที่เหมาะสมจากแม่เฒ่าเพื่อใช้ในงานคอนกรีต	การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย	2538-2541	ผู้ร่วมวิจัย
6. กระบวนการซินเทอริงของเถ้าถ่านหินภายใต้สภาวะการเผาไหม้แบบฟลูอิดไดซ์เบด	เงินอุดหนุนการวิจัยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี	2540-2542	หัวหน้าโครงการ
7. การผลิตถ่านกัมมันต์จากถ่านหินลิกไนต์	เงินอุดหนุนการวิจัยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี	2541-2542	หัวหน้าโครงการ

งานวิจัยที่กำลังดำเนินการ

เรื่อง	แหล่งทุน	ระยะเวลา	สถานภาพ
1. การผลิตถ่านกัมมันต์จากถ่านหินลิกไนต์ด้วยวิธี กระตุ้นทางเคมี	เงินอุดหนุนการวิจัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี	2543-2544	หัวหน้าโครงการ
2. การเตรียมถ่านกัมมันต์จากวัสดุชีวมวลและการวัดสมบัติโครงสร้างรูพรุน	เงินอุดหนุนการวิจัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี	2545-2546	หัวหน้าโครงการ
3. สมดุลย์และจลนพลศาสตร์การดูดซับของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากเมล็ดลำไย	ทุนโครงการปริญญาเอกกาญจนาภิเษก รุ่นที่ 3	2543-2547	หัวหน้าโครงการ
4. การเตรียมและวัดสมบัติของถ่านกัมมันต์จากกะลาและเส้นใยปาล์มน้ำมัน	ทุนโครงการปริญญาเอกกาญจนาภิเษก รุ่นที่ 4	2544-2548	หัวหน้าโครงการ
5. การปรับสภาพพื้นผิวของถ่านกัมมันต์จากไม้โตเร็ว	ทุนโครงการปริญญาเอกกาญจนาภิเษก รุ่นที่ 5	2545-2549	หัวหน้าโครงการ
6. กระบวนการไพโรไลซิสของวัสดุชีวมวล	ทุนโครงการปริญญาเอกกาญจนาภิเษก รุ่นที่ 6	2546-2550	หัวหน้าโครงการ
7. วัสดุแก้วพรุนจากถ่านลิกไนต์	ทุนโครงการปริญญาเอกกาญจนาภิเษก รุ่นที่ 7	2547-2551	หัวหน้าโครงการ

บทความวิจัย (รศ.ดร.ชัยยศ ตั้งสถิตย์กุลชัย)

1. C. Tangsathitkulchai, and L.G. Austin, "The Effect of Slurry Density on Breakage Parameters of Quartz, Coal and Copper Ore in a Laboratory Ball Mill", Powder Technology, Vol. 42, 287-296 (1985).
2. C. Tangsathitkulchai, "The Rheological Behavior of Homogeneous Suspensions of Coal and Quartz Slurries", KMITT Research and Development Bulletin, No.1 vol.10, June 34-59 (1987).
3. L.G. Austin, and C. Tangsathitkulchai, "Comparison of Methods for Sizing Ball Mills Using Open-Circuit Wet Grinding of Phosphate ore as a Test Example", Ind. Eng. Chem. Res., vol.26, 997-1003 (1987).
4. T. Sakulpanich, P. Thitthiwong, D. Khummongkol, and C. Tangsathitkulchai, "Gasification of Coconut Shell with a Purpose of Charcoal Production", Proceedings of the Regional Symposium on Petrochemical Technology' 87, Chulalongkorn University Bangkok, Thailand, 14-17 December 1987.
5. C. Tangsathitkulchai, "Fluidized - Bed Cooling Tower", Proceedings of the Regional Symposium on Petrochemical Technology' 87, Chulalongkorn University Bangkok, Thailand, 14-17 December 1987.
6. C. Tangsathitkulchai, and L.G. Austin, "Rheology of Concentrated Slurries of Particles of Natural Size Distribution Produced by Grinding", Powder Technology, vol. 56, 293 - 299, 1988.
7. C. Tangsathitkulchai, "Slowing - Down Effect in Fine Wet Grinding". paper presented at Joint Technical Seminar on Powder Technology (Thai - Japan), Technological Promotion Association (Thai - Japan), Bangkok, 21 Nov., 1988.
8. C. Tangsathitkulchai, and L.G. Austin, "Slurry Density Effects on Ball Milling in a Laboratory Ball Mill, Powder Tech. Vol. 59, No. 4, 285 -289, 1989.
9. D. Khummongkol, and C. Tangsathitkulchai, " A Model for Tar - Removal Efficiency from Biomass - Produced Gas Impinging on a Water Surface", Energy, Vol. 14, No. 3, 113 -121, 1989.
10. C. Tangsathitkulchai, "Evaporative Cooling of Water in a Spouted Bed Contactor", Technical Meeting on Heat, Mass and Momentum Transfer, The Engineering Institute of Thailand, 12 - 13 Dec. 1989.
11. C. Tangsathitkulchai, " Slowing - Down Effect in Fine Wet Grinding, TIZ International Powder Magazine, vol.113, No.10, 802 -804, 1989.

12. C. Tangsathitkulchai, and D. Khummongkol, "Cleaning of Producer Gas from a Rice Husk Gasifier by Impingement on a Water Surface", International Conference on Energy & Environment, Tara Hotel, Bangkok, 27 - 30 Nov., 1990.
13. M. Tangsathitkulchai and C. Tangsathitkulchai "Study of Boiler Slag Deposit Formation Using a Vertical Externally - Heated Tube Furnace", International Conference on Energy & Environment, Tara Hotel, Bangkok, 27 - 30 Nov., 1990.
14. C. Tangsathitkulchai, "Water Cooling in a Three - Phase Spouted Bed", the First National Chemical Engineering Conference, Siam Intercontinental Hotel, Bangkok, 17-19 Dec, 1990.
15. S. Suwanayuen, C. Tangsathitkulchai, S. Tia, and V. Kritpiphat, "A Multifuel Fluidized Bed Boiler for Small Scale Industrial Use: System Design", the First National Chemical Engineering Conference, Siam Intercontinental Hotel, Bangkok, 17 -19 Dec., 1990.
16. C. Tangsathitkulchai, "Sizing of Ball Mills Using a Size - Mass Balance Approach", 2nd Japan - Thailand Symposium on Powder Technology - Applications to Environmental Protection, New Material and Industrial Pharmacy, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, 22 - 23 Aug., 1991.
17. ชัยยศ ตั้งสติกุลชัย, บทความวิชาการ เรื่อง "ปัญหาหมอกควันจากการใช้ถ่านหินและการป้องกัน", วารสารเทคโนโลยี สงข., ฉบับที่ 1 ปีที่ 4 เดือนตุลาคม 2534.
18. C. Tangsathitkulchai, S. Tia, S. Suwanayuen, A. Dararuja and P. Reungsin, "Mixing of Rice Husk in a Fluidized Bed of Sand", Conference on Advance in Chemical Engineering, B.P. Grand Tower Hotel, Songkla, Jun 25 -26, 1991.
19. S. Suwanayuen, T. Chayawattana, Y. Surachpakorn, S. Tia, and C. Tangsathitkulchai, "Combustion of Rice Hull in a Fluidized Bed Furnace", ASEAN J. Sci & Tech., vol, no. 2, 107 - 115, 1992.
20. S. Suwanayuen, S. Tia, C. Tangsathitkulchai, P. Raungsin, and A. Dararuja, "Mixing of Fuel Particles in a Fluidized Bed of Sand, ASEAN J. Sci & Tech., Vol, no.2 143 -150, 1992.
21. S. Suwanayuen, S. Tia, C. Tangsathitkulchai, T. Pursakasemsug, and W. Promboon, "A Cold Model Study of Erosion in a Gas Fluidized Bed of Sand", Res. Dev. J. of Eng. Inst. Thailand, vol.3, No. 2, 1992.
22. S. Suwanayuen, C. Tangsathitkulchai, and S. Tia, "Lignite Fluidized Bed Combustor for Small - Scale Industrial Use", ASEAN FBC workshop, Bundung, Indonesia, 12-14 Apr, 1993.
23. C. Tangsathitkulchai et.al., "Fluidized Bed Combustion of Rice Hull", proceeding of 1st Technical Meeting of Engineering Faculty, KMITT, 8 - 9 Jun 1993.

24. S. Suwanayeeun, C. Tangsathitkulchai, and S. Tia. "Performance of KMITT - Prototype Fluidized Bed Boiler : Effects of Fuel Type & Size", the 5th ASEAN Conf. on. Energy Tech., Tara Hotel, Bangkok, 25 -27 Apr, 1994.
25. S. Suwanayeeun, C. Tangsathitkulchai, and S. Tia, "Emission Characteristics of KMITT Prototype Fluidized Bed Boiler", the 5th ASEAN Conf. on Energy Tech, Tara Hotel, Bangkok, 25 -27 Apr, 1994.
26. C. Tangsathitkulchai, C. Kuvarananchareon, and M. Tangsathitkulchai, " Sintering Study of Thai Lignite Ashes", 2nd Technical Meeting of Engineering Faculty, KMITT, 7 - 8 Jun, 1994.
27. C. Tangsathitkulchai, S. Suwanayeeun, and S. Tia "Evaluation of a 2MW Fluidized Bed Boiler Burning Thai Lignite", 4th ASIAN Conf. on Fluidized Bed and Three - Phase Reactors, Fukuoka, Japan, 28-30 Nov, 1994.
28. C. Tangsathitkulchai, "Acceleration of Particle Breakage Rate in a Laboratory Wet Ball Mill", Mining Engineering Conf., B.P. Grand Tower, Songkla, 24 - 25 Nov, 1994.
29. M. Tangsathitkulchai, and C. Tangsathitkulchai, "Sintering of Coal Ashes : Effects of Temperature and Atmosphere", 4th Chem. Eng. Conf., Khonkaen Univ., 20-21Oct,1994.
30. M. Tangsathitkulchai, and C. Tangsathitkulchai"Sintering of Coal Ashes : Effects of Extraction and Addition of Alkali Glass Materials, Suranaree J. Sci. Technol.,1, No.2,123 - 132, 1994.
31. C. Tangsathitkulchai, and M. Tangsathitkulchai, "Effect of Environment Atmosphere on the Sintering of Thai Lignite Fly Ashes", Eng. Found. Conf. on Application of Advanced Technologies to Ash - Related Problem in Boilers, New Hampshire, 16-21 July,1995.
32. S. Tia, C. Tangsathitkulchai, and P. Dumronglaohapun, "Continuous Drying of Slurry in a Jet Spouted Bed", Drying Technology, 13 (8&9), 1825 - 1840 (1995).
33. C. Tangsathitkulchai and M. Tangsathitkulchai, "Study of Slag Deposit Formation using Synthetic Coals", 7th APCCHE Congress, Taipei, Mar 4 - 6, 1996.
34. ไกรวุฒิ เกียรติโกมล, ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, เอนก ศิริพานิชกร, จารุรัตน์ วรรณิสรากุล , พยุร เกตุกราย , สมิตร ส่งพิริยะกิจ , พิชัย นิมิตยงสกุล , ปริญญา จินคาประเสริฐ , ชัยยศ ตั้ง สติชัยกุลชัย , ทิน เกตุรัตน์บวร "การคัดเลือกถ่านหินที่เหมาะสมสำหรับงานคอนกรีต (Classified Fly Ash for Concrete Utilization)", บทความเสนอในการประชุมใหญ่ทางวิชาการ ประจำปี 2539 สมาคมวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย , 15-18 สิงหาคม 2539, ศูนย์การประชุมแห่งชาติสิริกิติ์

35. S.Tia, S. Suwanayuen, C. Tangsatitkulchai, C. Phromvichit and W. Nimipal, "Heat Transfer Characteristics in a Small - Scale Fluidized Bed Boiler", *Int. J. Energy Research*, Vol.20, 521- 530, 1996.
36. C. Tangsatitkulchai, and M. Tangsatitkulchai, "Sintering Behavior of Coal Ashes under Fluidized Bed Combustion Conditions", *Proceedings of 8th Chemical Engineering Conference, Mahidol University, 17-18 Dec, 1998.*
37. C. Tangsathitkulchai, and M. Tangsathitkulchai, "Effect of Fluidized Bed Materials on Sintering Behavior of Coal Ashes", *Regional Symposium on Chemical Engineering, Prince of Songkla University, 22 - 24 Nov, 1999.*
38. C. Tangsathitkulchai, and M. Tangsathitkulchai, "Effect of Bed Materials and Additives on the Sintering of Coal Ashes Relevant to Agglomeration in Fluidized Bed Combustion", *Fuel Processing Technology*, 72, 163-183, 2001.
39. C. Tangsathitkulchai, "Acceleration of Particle Breakage Rates in Wet Batch Ball Milling", *Powder Technology*, 124, 67-75, 2002.
40. C.Tangsathitkulchai, "The Effect of Slurry Rheology on Fine Grinding in a Laboratory Ball Mill", *International Journal of Mineral Processing, Int. J. Miner. Proc.*, 69, 29-47, 2003.
41. C.Tangsathitkulchai, "Effects of Slurry Concentration and Powder Filling on the Net Mill Power of a Laboratory Ball Mill", *Powder Technology*, 137, 131-138, 2003.
42. C.Tangsathitkulchai, Y.Sittichaitaweekul and M.Tangsathitkulchai, "Temperature Effect on The Viscosities of Palm Oil and Coconut Oil Blended with Diesel Oil", *Journal of American Oil Chemists' Society*, 81, 401-405, 2004.
43. C.Tangsathitkulchai, "The Effect of Medium Viscosity on Breakage Parameters of Quartz in a Laboratory Ball Mill, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 43, 2104-2112, 2004.

ประวัติผู้ร่วมงานวิจัย

นางมาลี ตังสถิตย์กุลชัย (Malee Tangsathitkulchai)

ตำแหน่งปัจจุบัน

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ประจำสาขาวิชาเคมี

สำนักวิชาวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ประวัติการศึกษา

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

สาขาวิชาที่มีความชำนาญพิเศษ

- เทคโนโลยีถ่านหิน
- ถ่านกัมมันต์และการดูดซับ

ประสบการณ์งานวิจัย

งานวิจัยที่ทำเสร็จแล้ว

- (1) Reactions at Noble Metal/Ceramic Interfaces
(ผู้ร่วมวิจัย, พ.ศ. 2520-2523)
- (2) Fundamental Studies of the Mechanisms of Slag Deposit Formation
(ผู้ร่วมวิจัย, พ.ศ. 2525-2529)
- (3) Sintering and Slag Deposit Formation of Thai Lignite Ashes
(ผู้ร่วมวิจัย, พ.ศ. 2534-2537)
- (4) กระบวนการซินเทอริงของถ่านหินภายใต้สภาวะการเผาไหม้แบบฟลูอิดไดซ์เบด
(ผู้ร่วมวิจัย, ทุนอุดหนุนการวิจัยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปี 2540-2542)

งานวิจัยที่กำลังดำเนินการ

- (1) การนำเถ้าลอยถ่านหินมาใช้ผลิตสาร Zeolite
- (2) การศึกษาซินเทอร์ริงของเถ้าชีวมวลภายใต้สภาวะการเผาไหม้แบบฟลูอิดไดซ์เบด
- (3) การผลิตถ่านกัมมันต์จากถ่านหินลิกไนท์
(ผู้ร่วมวิจัย, ทุนอุดหนุนวิจัยปี 2542 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี)
- (4) การผลิตถ่านกัมมันต์จากถ่านหินลิกไนท์โดยวิธีกระตุ้นทางเคมี
(ผู้ร่วมวิจัย, ทุนอุดหนุนวิจัยปี 2543-4 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี)
- (5) การเตรียมถ่านกัมมันต์จากวัสดุชีวมวลและการวัดสมบัติโครงสร้างรูพรุน
(ผู้ร่วมวิจัย, ทุนอุดหนุนการวิจัยปี 2545-2546 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี)

ผลงานวิจัยที่ตีพิมพ์

มีผลงานวิจัยเกี่ยวกับการใช้ประโยชน์ถ่านหิน และซินเทอร์ริง จำนวน 17 เรื่อง (ดังแนบ)

บทความวิจัย (ผศ.ดร.มาลี ตั้งสถิตย์กุลชัย)

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

11. Tangsathitkulchai, M., and Tangsathitkulchai, C., "Sintering of Coal Ashes: Effects of Extraction and Addition of Alkali - Glass Materials," *Suranaree Journal of Science and Technology*, Vol. 1, No.2, July - December, 123-132, 1994.
12. Tangsathitkulchai, C., and Tangsathitkulchai, M., " Effect of Environment Atmosphere on The Sintering of Thai Lignite Fly Ashes," Presented at the Engineering Foundation Conference:Application of Advanced Technology to Ash - Related Problems in Boilers,16-22 July,New Hampshire, USA, 1995.
13. Tangsathitkulchai, C., and Tangsathitkulchai, M., "Study of Slag Deposit Formation Using Synthetic Coals," Presented at the 7th Asian Pacific Confederation of Chemical Engineers Congress of Taipei Chem Exhibition. Taipei, Taiwan, March 4-6, 1996.
14. Tangsathitkulchai, C., and Tangsathitkulchai, M., "Sintering Behavior of Coal Ashes under Fluidized Bed Combustion Conditions", 8th National Chemical Engineering Conference, Mahidol University, December 17-18, 1998.
15. Tangsathitkulchai, C., and Tangsathitkulchai, M., "Effect of Fluidized Bed Materials on the Sintering Behavior of Coal Ashes", Regional Symposium on Chemical Engineering, Prince of Songkla University, Songkla, November 22-24, 1999.
16. C. Tangsathitkulchai, and M. Tangsathitkulchai, "Effect of bed Materials and Additives on the Sintering of Coal Ashes Relevant to agglomeration in Fluidized Bed Combustion", *Fuel Processing Technology*, 72, 163-183, 2001, 2000.
17. C.Tangsathitkulchai, Y.Sittichaitaweekul and M.Tangsathitkulchai, "Temperature Effect on the Viscosities of Palm Oil and Coconut Oil Blended with Diesel Oil, *J.Am. Oil Chemists' Soc.*, 81, 401-405, 2004.