



รายงานการวิจัย

การเตรียมและการดูดซับของถ่านกัมมันต์จากไม้

Preparation and Adsorption of Wood-Based Activated Carbon

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ปีงบประมาณ พ.ศ. 2550

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ

1. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้การสนับสนุนทุนอุดหนุนการวิจัยประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2550 สำหรับโครงการวิจัยนี้
2. ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
3. ผู้ช่วยวิจัย ได้แก่ น.ศ. ชูวิรัตน์ เงินเย็น และ น.ศ. สุพรรณิ จันทร์ภิรมณ์

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัสโดยใช้วิธีกระตุ้นทางเคมีด้วยกรดฟอสฟอริก โดยได้ศึกษาผลของสภาวะการเตรียมในช่วงของอุณหภูมิคาร์บอน 300-600°C อัตราส่วนสารเคมีต่อวัตถุดิบ 0.5:1-2:1 โดยน้ำหนัก และเวลาการแช่สารเคมี 0.5-2 ชั่วโมง จากผลการศึกษา พบว่าการเพิ่มขึ้นของระดับตัวแปรของสภาวะการเตรียมทำให้ได้ร้อยละผลผลิตของถ่านกัมมันต์ลดลง แต่พื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนมีค่าเพิ่มขึ้น และมีค่าสูงสุดที่อุณหภูมิคาร์บอนเท่ากับ 400°C อัตราส่วนสารเคมีต่อวัตถุดิบเท่ากับ 1.5:1 และเวลาการแช่สารเคมีเท่ากับ 1.5 ชั่วโมง ซึ่งจากการเตรียมที่สภาวะนี้ ได้ผลผลิตถ่านกัมมันต์ร้อยละ 41.8 พื้นที่ผิวจำเพาะเท่ากับ 1,857 m²/g และปริมาตรรูพรุนรวมเท่ากับ 1.22 cm³/g เมื่อนำถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จำนวน 2 ตัวอย่างที่มีความแตกต่างกันของพื้นที่ผิวและปริมาณหมู่ฟังก์ชันกรครวมไปทดสอบการดูดซับไอน้ำ พบว่าปริมาณการดูดซับไอน้ำขึ้นกับปริมาณหมู่ฟังก์ชันกรครวมและลักษณะความพรุนของถ่านกัมมันต์ ตลอดจนความดันย่อยไอน้ำ นั่นคือที่ความดันไอน้ำต่ำ ความหนาแน่นของหมู่ฟังก์ชันกรครบพื้นที่ผิวถ่านกัมมันต์เป็นตัวแปรสำคัญต่อการดูดซับไอน้ำ โดยถ้ามีความหนาแน่นอยู่มากจะทำให้ดูดซับไอน้ำได้มากและในอัตราที่เร็วกว่า แต่ที่ความดันไอน้ำสูง ค่าพื้นที่ผิวและลักษณะความพรุนของถ่านกัมมันต์เป็นตัวแปรที่สำคัญต่อการดูดซับ โดยถ้ามีพื้นที่ผิวมากกว่าและรูพรุนขนาดใหญ่กว่าจะสามารถดูดซับไอน้ำได้มากกว่า

คำสำคัญ: ไม้ยูคาลิปตัส, ถ่านกัมมันต์, การกระตุ้นทางเคมี, การดูดซับ

Abstract

This research project aims to prepare activated carbon from eucalyptus wood by chemical activation using phosphoric acid. The preparation conditions studied are in the range of carbonization temperature 300-600°C, chemical ratio 0.5:1-2:1 and chemical impregnation time 0.5-2 h. The results indicated that the increasing level of preparation parameters decreased the yield of activated carbon but increased its porous properties, namely surface area and pore volume. These porous properties reached the maximum at the carbonization temperature 400°C, chemical ratio 1.5:1 and chemical impregnation time of 1.5 h, giving the BET surface area and total pore volume of 1,857 m²/g and 1.22 cm³/g, respectively. Water adsorption tests were performed with two samples of prepared activated carbons having different porous properties and total acidic functional group. It was found that the amount of water adsorbed at low partial pressure increased with increasing content of acidic group. However, at higher pressures, water adsorption was controlled by carbon porous structure, that is, carbon with higher surface area and larger pore size could adsorb higher amount of water.

Keywords: Eucalyptus wood, Activated carbon, Chemical activation, Adsorption

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ.....	ก
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ค
สารบัญ.....	ง 1
สารบัญตาราง.....	จ
สารบัญรูป.....	ฉ 1
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาการวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.4 ระเบียบวิธีวิจัย.....	4
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับถ่านกัมมันต์.....	6
2.1.1 วัตถุดิบที่ใช้ผลิตถ่านกัมมันต์.....	6
2.1.2 โครงสร้างถ่านกัมมันต์.....	9
2.1.3 วิธีการผลิตถ่านกัมมันต์.....	13
2.2 การดูดซับ.....	17
2.2.1 ไอโซเทิร์มของการดูดซับ.....	17
2.2.2 การดูดซับไอน้ำ.....	21
2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	21
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย	
3.1 อุปกรณ์และเครื่องมือ.....	24
3.2 วัสดุและสารเคมี.....	24
3.3 วิธีทดลอง.....	34
3.3.1 การวิเคราะห์สมบัติของไม้ยูคาลิปตัส.....	34
3.3.2 การเตรียมถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัส โดยวิธีกระตุ้นทางเคมี.....	34

3.3.3 การวิเคราะห์สมบัติของถ่านกัมมันต์.....	34
3.3.4 การดูดซับไอน้ำด้วยถ่านกัมมันต์.....	36
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผล	
4.1 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบแบบประมาณ องค์ประกอบเซลล์ โลส และการสลายตัวทางความร้อนของไม้ยูคาลิปตัส.....	38
4.2 การเตรียมถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัสโดยการกระตุ้นทางเคมี ด้วยกรดฟอสฟอริก.....	41
4.2.1 ผลของอุณหภูมิคาร์บอนไนเซชัน.....	41
4.2.2 ผลของอัตราส่วนสารเคมีต่อวัตถุดิบ.....	50
4.2.3 ผลของเวลาการแช่สารเคมี.....	56
4.3 การดูดซับไอน้ำด้วยถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้.....	61
บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ.....	65
บรรณานุกรม.....	67
ภาคผนวก ก. ประวัติผู้วิจัย.....	ก1

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 ลำดับชั้นแสดงโครงสร้างถ่านกัมมันต์.....	10
2.2 โครงสร้างของผลึกแกรไฟต์.....	11
2.3 หมู่ฟังก์ชันต่าง ๆ บนผิวของถ่านกัมมันต์.....	12
2.4 แผนผังสำหรับการผลิตถ่านกัมมันต์โดยทั่วไป.....	15
2.5 แผนผังแสดงการผลิตถ่านกัมมันต์ทั้งแบบกระตุ้นทางกายภาพ และกระตุ้นทางเคมี....	16
2.6 ชนิดของ ไอโซเทิร์มการดูดซับ.....	20
3.1 เตาเผาแบบท่อที่ใช้เตรียมถ่านกัมมันต์.....	25
3.2 ตู้อบสาร.....	26
3.3 ชุดตะแกรงร่อน และเครื่องเขย่าตะแกรง.....	27
3.4 เครื่องวัดค่าความเป็นกรดต่าง.....	28
3.5 เครื่องวิเคราะห์ทางความร้อน (TGA).....	29
3.6 กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM).....	30
3.7 เครื่องวัดพื้นที่ผิวและช่วงขนาดรูพรุน (ASAP2010).....	31
3.8 เครื่องวิเคราะห์ไอโซเทิร์มการดูดซับสถานะแก๊สหรือไอ (IGA).....	32
3.9 ไม้ยูคาลิปตัส(ก)ในสภาพเป็นชิ้นใหญ่(ข)ในสภาพลดขนาด.....	33
3.10 แผนผังเครื่อง Intelligent Gravimetric Analyzer (IGA).....	37
4.1 ร้อยละน้ำหนักที่เหลืออยู่และอัตราการหายไปของน้ำหนัก ในระหว่าง การไพโรไลซิสไม้ยูคาลิปตัส.....	40
4.2 ภาพถ่าย SEM ที่กำลังขยาย 800 เท่า แสดงลักษณะพื้นผิวถ่านกัมมันต์จาก ไม้ยูคาลิปตัสกระตุ้นด้วยครคฟอสฟอริก เตรียมที่สภาวะอุณหภูมิคาร์บอนในเซชัน 400°C อัตราส่วนสารเคมีต่อวัตถุดิบ 0.5:1 เวลาการแช่สารเคมี 1 ชั่วโมง.....	43
4.3 ผลของอุณหภูมิการคาร์บอนไนซ์ต่อร้อยละผลผลิตรวมของถ่านกัมมันต์.....	45
4.4 ไอโซเทิร์มการดูดซับแก๊สไนโตรเจนที่อุณหภูมิ -196°C ของถ่านกัมมันต์ที่เตรียม จากสภาวะต่างๆ เพื่อศึกษาผลของ อุณหภูมิการคาร์บอนไนซ์.....	46
4.5 สมบัติความพรุน (ก) พื้นที่ผิว และ (ข) ปริมาตรรูพรุนแบ่งตามขนาดต่างๆของ ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากสภาวะอุณหภูมิการคาร์บอนไนซ์แตกต่างกัน.....	47

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
4.6 กลไกการเกิด โครงข่ายฟอสเฟต (ก) เกิดฟอสเฟตเอสเทอร์ (ข) เกิดโพลีฟอสเฟตจาก ปฏิกิริยาระหว่างเซลลูโลสและกรดฟอสฟอริก ที่อุณหภูมิสูง	48
4.7 กลไกการแตกหักของ โครงข่ายฟอสเฟต ที่อุณหภูมิสูงกว่า 450°C	49
4.8 ผลของอัตราส่วนสารเคมีต่อวัตถุดิบต่อร้อยละผลผลิตรวมของถ่านกัมมันต์.....	53
4.9 ไอโซเทิร์มการดูดซับแก๊สในโตรเจนที่อุณหภูมิ -196°C ของถ่านกัมมันต์ที่เตรียม จากสภาวะต่างๆ เพื่อศึกษาผลของ อัตราส่วนสารเคมีต่อวัตถุดิบ.....	54
4.10 สมบัติความพรุน (ก) พื้นที่ ผิว และ (ข) ปริมาตรรูพรุนแบ่งตามขนาดต่างๆของ ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากสภาวะอัตราส่วนสารเคมีต่อวัตถุดิบแตกต่างกัน.....	55
4.11 ผลของเวลาการแช่สารเคมีต่อร้อยละผลผลิตรวมของถ่านกัมมันต์.....	58
4.12 ไอโซเทิร์มการดูดซับแก๊สในโตรเจนที่อุณหภูมิ -196°C ของถ่านกัมมันต์ที่เตรียม จากสภาวะต่างๆ เพื่อศึกษาผลของเวลาการแช่สารเคมี.....	59
4.13 สมบัติความพรุน (ก) พื้นที่ ผิว และ (ข) ปริมาตรรูพรุนแบ่งตามขนาดต่างๆของถ่าน กัมมันต์ที่เตรียมจากสภาวะเวลาการแช่สารเคมีแตกต่างกัน.....	60
4.14 ไอโซเทิร์มการดูดซับไอน้ำที่ 30°C ของถ่านกัมมันต์จาก ไม้ยูคาลิปตัสที่มี สมบัติรูพรุนต่างกัน และถ่านกัมมันต์ทางการค้า.....	64

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาการวิจัย

ถ่านกัมมันต์จัดเป็นสารดูดซับที่มีพื้นที่ผิวและรูพรุนสูง ซึ่งผลิตได้จากการนำวัตถุดิบที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก เช่น ถ่านหิน กะลามะพร้าว ชานอ้อย และไม้ เป็นต้น มาผ่านกระบวนการก่อกัมมันต์ (Activation) ทำให้เกิดโครงสร้างที่มีรูพรุนจำนวนมาก ส่งผลให้มีพื้นที่ผิวภายในเพิ่มมากขึ้น จึงเป็นวัสดุพิเศษที่มีความสามารถในการดูดซับสูงและถูกนำไปประยุกต์ใช้เป็นสารดูดซับในอุตสาหกรรมประเภทต่างๆ อย่างหลากหลาย เช่น อุตสาหกรรมน้ำตาล อาหารและเครื่องดื่ม ตลอดจนอุตสาหกรรมชุบเคลือบโลหะ สิ่งทอ การกำจัดสารพิษต่างๆ และอื่นๆอีกมาก

กระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์โดยทั่วไปมี 2 วิธี ได้แก่ วิธีใช้อุณหภูมิสูง (800-1000°C) ด้วยกระบวนการออกซิเดชัน เรียกว่า วิธีการกระตุ้นทางกายภาพ (Physical Activation) โดยสารออกซิไดซ์ที่ใช้มาก ได้แก่ ไอ้ไอน้ำและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ส่วนอีกวิธีหนึ่งเป็นวิธีที่ใช้อุณหภูมิต่ำกว่า (300-600°C) ด้วยกระบวนการดีไฮเดรชัน (Dehydration) เรียกว่า วิธีการกระตุ้นทางเคมี (Chemical Activation) สารเคมีที่ใช้มากได้แก่ ซิงค์คลอไรด์ (ZnCl₂) โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) และกรดฟอสฟอริก (H₃PO₄) ตัวอย่างวัตถุดิบที่นำมาใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์ ได้แก่ ถ่านหิน ไม้ ชานอ้อย และกะลามะพร้าว เป็นต้น ในประเทศไทยมีการใช้ถ่านกัมมันต์ในปริมาณมาก แม้จะมีการผลิตถ่านกัมมันต์ในระดับอุตสาหกรรมอยู่บ้างแต่ไม่พอเพียง จึงมีแนวโน้มในการนำเข้าเพิ่มขึ้นทุกปี ตัวอย่างเช่น ในปีพ.ศ. 2547 มีการนำเข้าถ่านกัมมันต์คิดเป็นมูลค่ารวม 540 ล้านบาท โดยนำเข้าจากประเทศสหรัฐอเมริกามากที่สุดคิดเป็นสัดส่วน 32% ⁽¹⁾

จากรายงานการใช้ถ่านกัมมันต์ที่เพิ่มขึ้น พบว่าการใช้ประโยชน์ถ่านกัมมันต์ในกลุ่มประเทศพัฒนาแล้ว มีการเติบโตในตลาดที่เกี่ยวข้องกับยาและวัสดุทางการแพทย์เป็นส่วนใหญ่ ส่วนในกลุ่มประเทศที่กำลังพัฒนาจะเกี่ยวข้องกับการใช้งานในประเด็นสิ่งแวดล้อมโดยส่วนใหญ่ เช่น กระบวนการบำบัดน้ำ กระบวนการบำบัดแก๊สที่ปล่อยออก และกระบวนการบำบัดของเสีย นอกจากนี้ การใช้งานที่เป็นที่นิยมมากขึ้นคือนำมาเป็นวัสดุการกรองในยานพาหนะต่างๆ โดยเฉพาะเพื่อการกรองอากาศในห้องโดยสารรถยนต์ ⁽²⁾ นอกจากนี้ประโยชน์ของถ่านกัมมันต์อีกอย่างหนึ่งที่น่าสนใจในอนาคตคือ การเป็นวัสดุกักเก็บแก๊สมีเทนเพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงให้กับยานยนต์ ⁽³⁾

ในปี ค.ศ. 2005 มีการรายงานว่าปริมาณถ่านกัมมันต์ที่ใช้ทั่วโลกมีประมาณ 970,000 ตัน ⁽²⁾ ตามรายงานดังกล่าวมีสัดส่วนการใช้ถ่านกัมมันต์แบ่งตามเขตพื้นที่ทั่วโลก แสดงดังตารางที่ 1.1 นอกจากนี้มีการประเมินว่า จะมีการใช้ถ่านกัมมันต์เพิ่มขึ้นปีละ 5% และในปี ค.ศ. 2010 ปริมาณถ่านกัมมันต์ที่ใช้ทั่วโลกจะมากกว่า 1.2 ล้านตัน ในส่วนของผู้ผลิตถ่านกัมมันต์ในระดับอุตสาหกรรม

มีมากกว่า 150 บริษัททั่วโลก ซึ่งในกลุ่มนี้บริษัทที่เป็นที่รู้จัก ได้แก่ Calgon, Norit, MeadWestvaco, PICA, CECA, Kurary และ Takeda เป็นต้น

ถ่านกัมมันต์มีสมบัติในการดูดซับสารต่างๆ ได้ดี ทั้งสารที่อยู่ในสารละลายของเหลว และ แก๊ส เนื่องจากสมบัติโครงสร้างรูพรุนที่มีการกระจายรูพรุนขนาดต่างๆ ทำให้มีพื้นที่ผิวสัมผัสสูง จากการศึกษาพบว่า ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตมาจากวัตถุดิบที่ต่างกัน และมีกระบวนการผลิตและกระบวนการกระตุ้นที่ต่างกัน ส่งผลให้สมบัติของถ่านกัมมันต์มีความแตกต่างกัน⁽⁴⁾ จึงทำให้ถ่านกัมมันต์แต่ละชนิดมีข้อจำกัดในการใช้งาน โดยจากข้อจำกัดของการใช้งานที่เกิดขึ้น และจากการที่ถ่านกัมมันต์ผลิตได้จากวัตถุดิบหลากหลายชนิด จึงทำให้มีการศึกษาค้นคว้า เพื่อผลิตถ่านกัมมันต์พร้อมกับพัฒนาสมบัติพื้นผิว ให้เหมาะสมกับการใช้งานอย่างต่อเนื่อง⁽⁵⁻¹²⁾

เนื่องจากพื้นผิวของถ่านกัมมันต์มีอะตอมของคาร์บอนที่อิเล็กทรอนิกส์ไม่ครบแปด เป็นเหตุให้อะตอมของคาร์บอนบนพื้นผิวเป็นอะตอมที่ว่องไว จึงสามารถดูดซับทางเคมี กับธาตุอื่นๆ เช่น ออกซิเจน ไนโตรเจน ไฮโดรเจน คลอรีน และซัลเฟอร์ เป็นต้น เพื่อให้เสถียรขึ้น ดังนั้นพื้นผิวถ่านกัมมันต์จึงมีสมบัติเฉพาะตัวเช่น เป็นกลาง หรือ กรด หรือเบส ขึ้นกับการมีธาตุอื่นๆหรือหมู่ฟังก์ชันชนิดใดบนพื้นผิว ดังนั้นการปรับปรุงสมบัติพื้นผิวของถ่านกัมมันต์เป็นสิ่งจำเป็น หากต้องการใช้งานเฉพาะเจาะจงแต่ละประเภทต่างกัน หรือต้องการให้มีความสามารถในการดูดซับได้ดียิ่งขึ้น ซึ่งทำได้โดยการลดหรือเพิ่มอะตอมของธาตุบางชนิดที่สร้างพันธะเคมีบนผิวถ่านกัมมันต์ ซึ่งจะส่งผลให้สมบัติพื้นผิวต่างกันออกไป โดยทำให้ความสามารถในการดูดซับแตกต่างกันออกไปด้วย ซึ่งหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบมีหลายชนิด เช่น Carboxylic, Phenolic, Lactone, Anhydride ทำให้สมบัติพื้นผิวของถ่านกัมมันต์แสดงสมบัติกรด ส่วน Chromene และ กลุ่ม Pyrone ทำให้สมบัติพื้นผิวของถ่านกัมมันต์แสดงสมบัติเบส เป็นต้น การเพิ่มหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบเพื่อทำให้สมบัติพื้นผิวเป็นกรดนั้น จะช่วยเพิ่มความเป็นขั้วลบได้มากขึ้น ทำให้ถ่านกัมมันต์มีสมบัติการแลกเปลี่ยนไอออนประจุบวก (cation exchange) ได้ดี ส่วนการลดหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบ หรือทำให้สมบัติพื้นผิวของถ่านกัมมันต์มีสมบัติเป็นเบส จะมีสมบัติการแลกเปลี่ยนไอออนประจุลบ (anion exchange) ได้ดี เป็นต้น

เนื่องจาก โครงสร้างทางรูพรุนตลอดจนสมบัติพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ ขึ้นกับชนิดของวัตถุดิบ วิธีการผลิต และกระบวนการกระตุ้น ตลอดจนวิธีการปรับปรุงสมบัติพื้นผิวดังกล่าวข้างต้น งานวิจัยนี้จึงเริ่มต้นด้วยการเตรียมถ่านกัมมันต์ โดยใช้วัสดุเศษไม้ไผ่เร็ว ที่มีราคาถูก ปลูกได้แพร่หลายในภาคอีสาน เช่น ไม้ ยูคาลิปตัส ซึ่งมีรายงานวิจัยพบว่า ไม้ สามารถใช้เตรียมถ่านกัมมันต์ได้ดี⁽⁵⁻⁷⁾ โดยสามารถเตรียมได้โดยการกระตุ้นทางกายภาพ และวิธีทางเคมี จากนั้นจะทำการศึกษา การปรับปรุงสมบัติพื้นผิว เพื่อให้มีหมู่ฟังก์ชัน ที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบมากขึ้น เนื่องจากพบในรายงานวิจัยต่างๆ⁽⁸⁻¹²⁾ ถึงกระบวนการปรับปรุงสมบัติพื้นผิว โดยทำให้ถ่านกัมมันต์มีความสามารถในการดูดซับ

ที่เฉพาะเจาะจงและดูดซับได้ดียิ่งขึ้น เช่น มีความสามารถในการดูดซับไอออนของโลหะหนัก สีเข้ม และสารอินทรีย์ที่มีขั้วต่างๆ ได้ดียิ่งขึ้น

ตารางที่ 1.1 สัดส่วนปริมาณการใช้ถ่านกัมมันต์ทั่วโลก⁽³⁾

Region	Percent of activated carbon used
Asia/Pacific	52
North America	26
Western Europe	13
Others	9

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัสด้วยวิธีการ กระตุ้นทางเคมี โดยใช้สารละลายกรดฟอสฟอริกที่อัตราส่วนต่อวัตถุดิบต่างๆ และอุณหภูมิที่ต่างกัน เพื่อให้ได้ถ่านกัมมันต์ที่มีปริมาตรรูพรุนและพื้นที่ผิวสูง
2. เพื่อวิเคราะห์สมบัติพื้นที่ผิวและลักษณะรูพรุนของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้
3. ศึกษาสมบัติความสามารถในการดูดซับของถ่านกัมมันต์ โดยใช้ไอโอดีนเป็นสารถูกดูดซับ

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. วัสดุชีวมวลที่ใช้คือ ไม้ยูคาลิปตัส ซึ่งนำมาสับและบดให้มีขนาดเล็ก จากนั้นทำการคัดขนาดด้วยชุดตะแกรงร่อน
2. วิธีการกระตุ้นทางเคมีใช้สารละลายกรดฟอสฟอริก และทำการคาร์บอนไนซ์ในเตาเผาแบบท่อในแนวนอน ในบรรยากาศของแก๊สไนโตรเจน
3. ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ จะนำมาทำการวิเคราะห์สมบัติพื้นที่ผิวและลักษณะรูพรุน โดยใช้เครื่อง Surface Area Analyzer (ASAP 2010, Micromeritics)
4. ศึกษาสมบัติการดูดซับของถ่านกัมมันต์ด้วยไอโอดีน โดยใช้เครื่อง Intelligent Gravimetric Analyzer (IGA)

1.4 ระเบียบวิธีวิจัย

1. นำเศษไม้ยูคาลิปตัสมาล้างและบดเป็นชิ้นเล็ก และนำมาถักขนาดต่างๆแล้วนำไปอบให้แห้งที่ 100°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
2. นำไม้ยูคาลิปตัสที่ได้จากข้อ 1 แช่ในสารละลายกรดฟอสฟอริกที่มีความเข้มข้นตามกำหนด โดยแช่ตามเวลาที่กำหนด แล้วนำไปอบให้แห้ง
3. ทำการคาร์บอนไนซ์ไม้ยูคาลิปตัสที่ได้จากข้อ 2 ภายใต้อุณหภูมิของบรรยากาศไนโตรเจน ที่อุณหภูมิต่าง ๆ ตามกำหนดและเวลา 1 ชั่วโมง
4. ล้างสารเคมีที่ยังติดอยู่ในถ่านกัมมันต์ด้วยน้ำกลั่นจนกว่า pH จะคงที่
5. อบถ่านกัมมันต์ให้แห้ง แล้วเก็บไว้ในโถสุญญากาศ
6. วิเคราะห์พื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนถ่านกัมมันต์ โดยเครื่อง Surface Area Analyzer (ASAP 2010)
7. วิเคราะห์สมบัติการดูดซับไอน้ำด้วยเครื่อง Intelligent Gravimetric Analyzer (IGA)
8. สรุปผลการทดลองงานวิจัย
9. เขียนรายงานการวิจัย

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

งานวิจัยนี้สามารถ เตรียมถ่านกัมมันต์จากวัสดุเศษไม้ยูคาลิปตัสซึ่งเป็นวัสดุที่หาได้ง่ายและมีราคาถูก และมีสมบัติพื้นที่ผิวและรูพรุนสูง และมีความสามารถในการดูดซับได้ดี ซึ่งจะเป็นแนวทางให้มี การนำผลวิจัยไปใช้ประโยชน์ได้ดังนี้

1. ได้ทราบสถานะเงื่อนไขที่เหมาะสมในการเตรียมถ่านกัมมันต์ ที่มีพื้นที่ผิวและรูพรุนสูง ซึ่งมีความจุในการดูดซับสารสูง
2. ได้ถ่านกัมมันต์ที่สามารถนำไปใช้งานดูดซับได้ดี ซึ่งผลของงานวิจัยนี้จะเป็นการเพิ่มคุณค่าให้กับวัสดุชีวมวลและกำจัดวัสดุเหลือใช้ และเพิ่มพูนค่าให้กับถ่านกัมมันต์ที่มีคุณภาพสูงและราคาดี หากมีการนำผลวิจัยไปขยายการผลิตถ่านกัมมันต์ไปถึงระดับอุตสาหกรรม ก็สามารถลดการขาดดุลทางเศรษฐกิจอันเนื่องมาจากการนำเข้าถ่านกัมมันต์ในปริมาณสูงได้
3. ได้ช่วยพัฒนาให้มีนักวิจัยรุ่นใหม่ที่มีประสบการณ์การวิจัยและมีศักยภาพการทำวิจัยสูงขึ้นจากโครงการนี้ โดยเป็นองค์ความรู้ในการวิจัยต่อไปให้กับ กลุ่มวิจัยถ่านกัมมันต์ สาขาวิชาเคมี สำนักวิชาวิทยาศาสตร์ และ สาขาวิศวกรรมเคมี สำนักวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และมหาวิทยาลัยอื่นๆ ที่มีกลุ่มวิจัยเรื่องเกี่ยวกับถ่านกัมมันต์และสารดูดซับชนิดอื่นๆ
4. นอกจากนี้ยังสามารถให้บริการความรู้แก่ประชาชนและภาคธุรกิจได้โดย ให้คำปรึกษาได้ในด้านการผลิตถ่านกัมมันต์จากไม้และวัสดุชีวมวลต่างๆ และการปรับปรุงสมบัติถ่านกัมมันต์

ให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น ซึ่งจะนำไปสู่การผลิตเชิงพาณิชย์ โดยข้อมูลที่ได้จากงานวิจัยนี้สามารถนำไปทำการทดลองต่อไปอีกเพื่อขยายระดับการผลิตที่ใหญ่ขึ้นในระดับอุตสาหกรรมต่อไปได้ หรือเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตได้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon หรือ Active carbon) เป็นวัสดุที่มีความพรุนและพื้นที่ผิวสูงมาก จึงเป็นตัวดูดซับที่ดีทั้งในกระบวนการดูดซับแก๊สและของเหลว ส่วนประกอบหลักคือคาร์บอนซึ่งจัดเป็นประเภทหนึ่งของคาร์บอนอสัณฐาน (Amorphous carbon) ผลิตได้จากการนำวัตถุดิบที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลักมาถ่านกัมมันต์หรือกระตุ้น (Activation) เพื่อให้เกิดโครงสร้างรูพรุน โดยทั่วไปถ่านกัมมันต์มีสมบัติดังแสดงในตารางที่ 2.1

2.1.1 วัตถุดิบที่ใช้ผลิตถ่านกัมมันต์

วัตถุดิบที่ใช้ผลิตถ่านกัมมันต์โดยทั่วไปเป็นสารอินทรีย์ที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก เช่น กะลามะพร้าว กะลาปาล์ม ถ่านหิน ไม้ ชังข้าวโพด ชานอ้อย เป็นต้น วัตถุดิบที่ใช้ผลิตถ่านกัมมันต์ ที่มีคุณภาพดีขึ้นกับปัจจัยหลายอย่าง เช่น มีปริมาณคาร์บอนสูง มีปริมาณเถ้าต่ำ มีความหนาแน่นสูง และราคาถูก เป็นต้น นอกจากนี้ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากวัตถุดิบต่างชนิดกัน หรือเตรียมที่สภาวะหรือวิธีการต่างกัน จะได้ถ่านกัมมันต์ที่มีสมบัติทางกายภาพและเคมีที่แตกต่างกัน เช่น มีสมบัติการกระจายขนาดรูพรุนที่แตกต่างกัน หรือมีสมบัติเคมีพื้นผิวที่เป็นกรดหรือเบสที่แตกต่างกัน (ดังตารางที่ 2.2 แสดงสมบัติของวัตถุดิบและสมบัติของถ่านกัมมันต์) ซึ่งส่งผลต่อการนำถ่านกัมมันต์ไปใช้ในงานดูดซับด้านต่างๆ โดยทั่วไปหากการดูดซับเป็นแบบการดูดซับทางกายภาพ แล้วสมบัติที่สำคัญที่สุดของสารดูดซับ ได้แก่ สมบัติโครงสร้างรูพรุน เนื่องจากส่งผลให้เกิดพื้นที่ผิวได้มากจะเกิดการดูดซับได้มาก แต่ถ้าการดูดซับเป็นแบบการดูดซับทางเคมีแล้ว นอกเหนือจากการที่ต้องพิจารณาสมบัติโครงสร้างรูพรุนแล้ว สมบัติเคมีพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ นับเป็นปัจจัยที่สำคัญต่อการดูดซับซึ่งต้องนำมาพิจารณาร่วมด้วย

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon หรือ Active carbon) เป็นวัสดุที่มีความพรุนและพื้นที่ผิวสูงมาก จึงเป็นตัวดูดซับที่ดีทั้งในกระบวนการดูดซับแก๊สและของเหลว ส่วนประกอบหลักคือคาร์บอนซึ่งจัดเป็นประเภทหนึ่งของคาร์บอนอสัณฐาน (Amorphous carbon) ผลิตได้จากการนำวัตถุดิบที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลักมาก่อถ่านกัมมันต์หรือกระตุ้น (Activation) เพื่อให้เกิดโครงสร้างรูพรุน โดยทั่วไปถ่านกัมมันต์มีสมบัติดังแสดงในตารางที่ 2.1

2.1.1 วัตถุดิบที่ใช้ผลิตถ่านกัมมันต์

วัตถุดิบที่ใช้ผลิตถ่านกัมมันต์โดยทั่วไปเป็นสารอินทรีย์ที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก เช่น กะลามะพร้าว กะลาปาล์ม ถ่านหิน ไม้ ชังข้าวโพด ชานอ้อย เป็นต้น วัตถุดิบที่ใช้ผลิตถ่านกัมมันต์ ที่มีคุณภาพดีขึ้นกับปัจจัยหลายอย่าง เช่น มีปริมาณคาร์บอนสูง มีปริมาณเถ้าต่ำ มีความหนาแน่นสูง และราคาถูก เป็นต้น นอกจากนี้ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากวัตถุดิบต่างชนิดกัน หรือเตรียมที่สภาวะหรือวิธีการต่างกัน จะได้ถ่านกัมมันต์ที่มีสมบัติทางกายภาพและเคมีที่แตกต่างกัน เช่น มีสมบัติการกระจายขนาดรูพรุนที่แตกต่างกัน หรือมีสมบัติเคมีพื้นผิวที่เป็นกรดหรือเบสที่แตกต่างกัน (ดังตารางที่ 2.2 แสดงสมบัติของวัตถุดิบและสมบัติของถ่านกัมมันต์) ซึ่งส่งผลต่อการนำถ่านกัมมันต์ไปใช้ในงานดูดซับด้านต่างๆ โดยทั่วไปหากการดูดซับเป็นแบบการดูดซับทางกายภาพ แล้วสมบัติที่สำคัญที่สุดของสารดูดซับ ได้แก่ สมบัติโครงสร้างรูพรุน เนื่องจากส่งผลให้เกิดพื้นที่ผิวได้มากจะเกิดการดูดซับได้มาก แต่ถ้าการดูดซับเป็นแบบการดูดซับทางเคมีแล้ว นอกเหนือจากการที่ต้องพิจารณาสมบัติโครงสร้างรูพรุนแล้ว สมบัติเคมีพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ นับเป็นปัจจัยที่สำคัญต่อการดูดซับซึ่งต้องนำมาพิจารณาด้วย

ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างสมบัติทั่วไปของถ่านกัมมันต์⁽¹³⁾

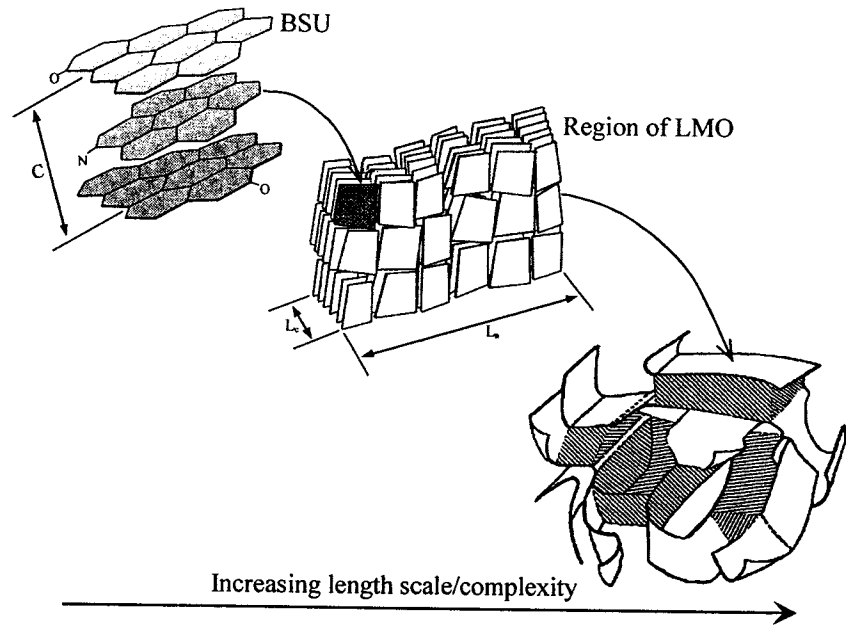
พื้นที่ผิวจำเพาะ (Specific surface area)	500–2500 m ² /g
ปริมาตรรูพรุนรวม (Total pore volume)	0.5–2.5 cm ³ /g
ความแข็งของอนุภาค (Hardness number)	50-100
ปริมาณเถ้า (Ash content)	1–20 wt%
ค่าการดูดซับไอโอดีน (Iodine number)	500–1,200
ค่าการดูดซับคาร์บอนเตตระคลอไรด์ (CCl ₄ activity)	35-125
ค่าการดูดซับบิวเทน(Butane working capacity)	4-14
ค่าการเก็บความร้อนที่ 100°C (Heat capacity at 100°C)	0.84-1.3 J/g-K
ค่าการนำความร้อน(Thermal conductivity)	0.05-0.10 W/m-K

ตารางที่ 2.2 สมบัติทั่วไปของวัตถุดิบชนิดต่างๆที่ใช้เตรียมถ่านกัมมันต์⁽⁴⁾

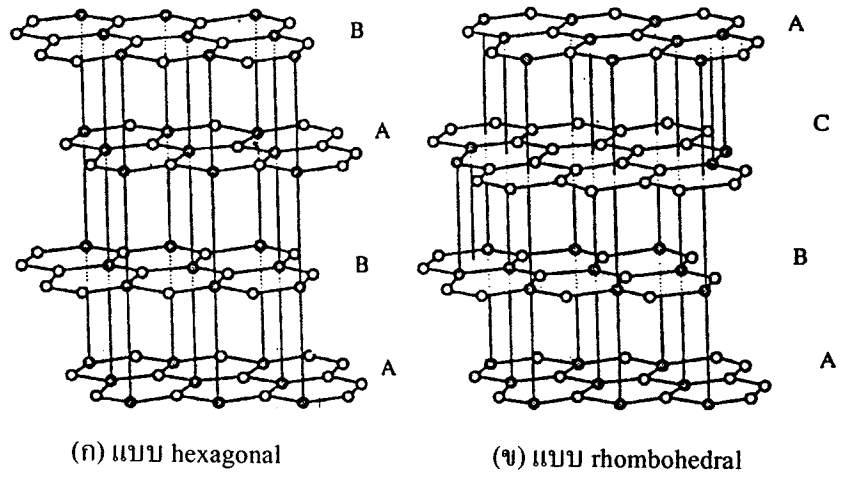
Raw material	Carbon (wt%)	Volatiles (wt%)	Ash (wt%)	Density (g/cm ³)	Texture of activated carbon
Soft wood	40-45	55-60	0.3-1.1	0.4-0.5	Soft, large pore volume
Hard wood	40-42	55-60	0.3-1.2	0.55-0.80	Soft, large pore volume
Lignin	35-40	58-60	-	0.3-0.4	Soft, large pore volume
Nutshells	40-45	55-60	-	1.4	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	1.25-1.5	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

2.1.2 โครงสร้างถ่านกัมมันต์

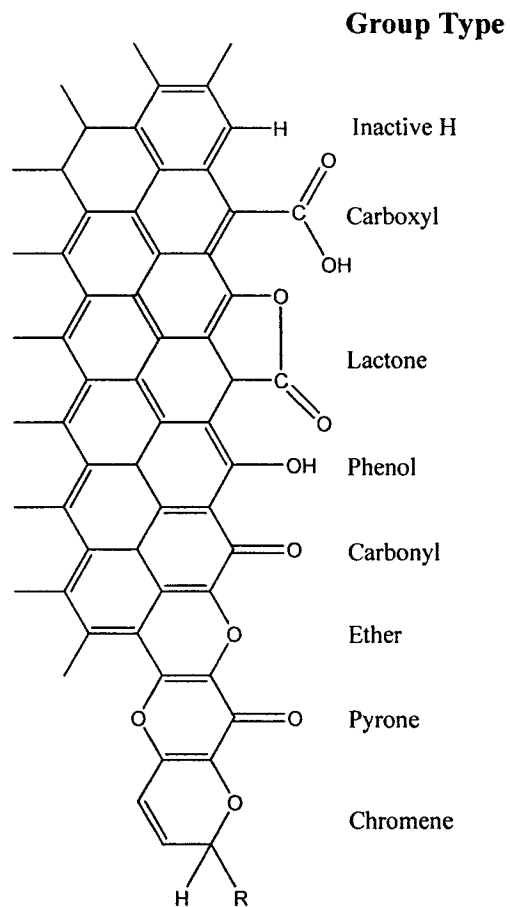
ถ่านกัมมันต์เป็นวัสดุที่มีโครงสร้างซับซ้อนมาก ซึ่งโดยพื้นฐานแล้วประกอบไปด้วยส่วนสำคัญสองส่วนคือ ส่วนที่เป็นคาร์บอนอสถฐาน และส่วนที่เป็นกลุ่มผลึกคล้ายแกรไฟต์ ซึ่งส่วนประกอบที่สองนี้คือส่วนที่แสดงโครงสร้างรูพรุน จึงมีบทบาทสำคัญต่อความสามารถในการดูดซับได้ของถ่านกัมมันต์ รูปแบบที่แท้จริงของโครงสร้างถ่านกัมมันต์ยังเป็นที่ไม่ทราบแน่ชัด แต่รูปแบบที่มีการยอมรับและนิยมใช้ในการอธิบายมากที่สุด เป็นขั้นตอนการรวมตัวของโครงสร้างพื้นฐานดังแสดงในรูปที่ 2.1 ลำดับขั้นตอนของโครงสร้างถ่านกัมมันต์เริ่มจาก หน่วยโครงสร้างพื้นฐาน (Basic structure unit, BSU) ซึ่งเป็นกลุ่มของแผ่นแกรไฟต์ที่มีรูปแบบคล้ายโพลีอะโรมาติก และอาจมีหมู่ฟังก์ชันต่าง ๆ เกาะอยู่ที่ขอบของแผ่น จัดเรียงตัวกันอยู่คล้ายกับโครงสร้างของแกรไฟต์ (ดูรูปแบบของการจัดเรียงโครงสร้างแกรไฟต์ในรูปที่ 2.2) แต่จะไม่เป็นระเบียบเหมือนของแกรไฟต์คือ โดยทั่วไปจะมีช่องว่างที่วัดระยะจากกึ่งกลางของแต่ละแผ่นมากกว่า (ของแกรไฟต์มีค่าเท่ากับ 3.354 Å) และมีการเรียงซ้อนเหลื่อมของแต่ละแผ่นในแนวระนาบ (ในทิศทางตาม C ดังรูป 2.1) ไม่เป็นลำดับที่ตายตัวเหมือนของแกรไฟต์ที่มีการเรียงอยู่สองแบบ (ดูรูปที่ 2.2) คือ แบบ ABAB (hexagonal) และแบบ ABCA (rhombohedral) การเรียงซ้อนเหลื่อมที่ไม่เป็นระเบียบในถ่านกัมมันต์นี้เรียกว่า Turbostratic ลำดับขั้นตอนมาหน่วยโครงสร้างพื้นฐานจะรวมตัวกันอย่างไม่เป็นระเบียบเป็นหน่วยโมเลกุลย่อย (Local molecular orientation, LMO) และขั้นสุดท้ายหน่วยโมเลกุลย่อยจะรวมตัวกันอย่างไม่เป็นระเบียบอีกครั้งกลายเป็นอนุภาค ที่มีช่องว่างเกิดขึ้นมากมายจากการเรียงตัวอย่างไม่เป็นระเบียบนั้น ซึ่งช่องว่างเหล่านี้ก็คือรูพรุนที่ใช้ในการดูดซับของถ่านกัมมันต์นั่นเองโดยทั่วไปแล้วรูปร่างของรูพรุนในถ่านกัมมันต์จะสมมุติให้เป็นรูพรุนแบบแผ่นขนาน (Slit pore) การรายงานขนาดของรูพรุนจึงนิยมใช้ค่าความกว้างกึ่งกลางรูพรุน (Half pore width) การที่แผ่นแกรไฟต์แต่ละแผ่นมีหมู่ฟังก์ชันเกาะอยู่บนนั้น เกิดจากการมีอิเล็กตรอนอิสระ ซึ่งอยู่ในสภาพที่ไม่เสถียรและมีเวเลนซ์ไม่เต็มตัว จึงพยายามที่จะเกาะกับอะตอมหรือโมเลกุลอื่น เช่น ออกซิเจนในอากาศ หรือ อะตอม อื่น ๆ ที่มีอยู่ในสารตั้งต้น การเกาะกับอะตอมหรือโมเลกุลอื่นเป็นพันธะทางเคมีที่แข็งแรง ทำให้เกิดเป็นหมู่ฟังก์ชันต่าง ๆ บนผิวของถ่านกัมมันต์ เช่น หมู่คาร์บอกซิล (Carboxyl) แลคโตน (Lactones) ฟีนอล (Phenol) คาร์บอนิล (Carbonyl) อีเทอร์ (Ether) ไพโรน (Pyrone) และโครมิน (Chromene) เป็นต้น ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.1 ลำดับชั้นแสดงโครงสร้างถ่านกัมมันต์⁽¹⁴⁾



รูปที่ 2.2 โครงสร้างของผลึกแกรไฟต์



รูปที่ 2.3 หมู่ฟังก์ชันต่างๆ บนผิวของถ่านกัมมันต์

2.1.3 วิธีการผลิตถ่านกัมมันต์

โดยทั่วไปกรรมวิธีการผลิตถ่านกัมมันต์ประกอบด้วยขั้นตอนหลัก 3 ขั้นตอน ได้แก่ การเตรียมวัตถุดิบ คาร์บอนในเซชัน (Carbonization) และการกระตุ้น (Activation) รายละเอียดแสดงในรูปแบบที่ 2.4 การเลือกวัตถุดิบต้องพิจารณาจากสมบัติถ่านกัมมันต์ที่ต้องการ สมบัติของวัตถุดิบ (ตารางที่ 2.2) ตลอดจนวิธีการที่จะทำการผลิตด้วย ส่วนในขั้นตอนการเตรียมวัตถุดิบนั้น จะนำวัตถุดิบมาบดและคัดขนาดก่อนที่จะนำไปทำคาร์บอนในเซชัน แต่สำหรับวัตถุดิบที่มีความแข็งและเหนียวมาก การบดวัตถุดิบก่อนอาจจะทำได้ยาก จึงอาจนำวัตถุดิบนั้นไปคาร์บอนในเซชันก่อน แล้วจึงนำมาบดและคัดขนาด ถ้าวัดุดิบมีลักษณะเป็นผงอาจนำมาทำเป็นเม็ดก่อน โดยใช้ตัวประสาน (Binder) ซึ่งเป็นสารที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ เช่น แป้ง น้ำมันเตา หรือ ทาร์ (Tar) ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากกระบวนการคาร์บอนในเซชัน เมื่อทำเป็นเม็ดแล้วจึงนำไปผ่านขั้นตอนคาร์บอนในเซชันและทำการกระตุ้นต่อไป ดังขั้นตอนการผลิตแสดงในรูปแบบที่ 2.4

คาร์บอนในเซชันเป็นกระบวนการแบบไพโรไลซิส ทำโดยการเผาวัตถุดิบในที่อับอากาศที่อุณหภูมิต่ำกว่า 800°C ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์สามประเภทได้แก่ ถ่านที่มีลักษณะสีดำ เรียกว่า ถ่านชาร์ (Char) ส่วนที่เป็นของเหลว เรียกว่า ทาร์ (Tar) และแก๊ส คาร์บอนในเซชันเป็นขั้นตอนการพัฒนาโครงสร้างรูพรุนในวัตถุดิบโดยกระบวนการทางความร้อน ทำให้เกิดการสลายตัวของสารที่ไม่ใช่คาร์บอน (เช่น ไฮโดรเจน ออกซิเจน และ ไนโตรเจน) ออกมาในรูปของเหลวและแก๊ส มีผลให้ถ่านชาร์มีปริมาณคาร์บอนสูงขึ้นกว่าวัตถุดิบ แต่ยังสามารถในการดูดซับค่าเพราะยังมีทาร์ตกค้างอยู่ในรูพรุนหรือเกาะอยู่ตามผิว จึงจำเป็นต้องนำถ่านชาร์ไปผ่านกระบวนการกระตุ้นต่อไป ตัวแปรในขั้นตอนคาร์บอนในเซชันได้แก่ ชนิดของวัตถุดิบ อุณหภูมิ เวลาและอัตราการให้ความร้อน อุณหภูมิเป็นตัวแปรที่สำคัญ เนื่องจากเป็นพลังงานที่ใช้ทำให้เกิดการแตกหักของพันธะที่มีพันธะที่อ่อนหรือหมู่ที่หลุดออกได้ง่าย ทำให้ได้สารระเหยเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ ที่มีโครงสร้างโมเลกุลหรือหมู่ที่มีขนาดเล็ก เช่น น้ำ แอมโมเนีย ทาร์ และแก๊สต่างๆ ส่วนที่เหลืออยู่เป็นถ่านชาร์ ซึ่งมีโครงสร้างโมเลกุลแบบวงแหวนและอะโรมาติกเป็นหลัก ซึ่งคาร์บอนจะมีการจัดระเบียบของโครงสร้างมากขึ้นไปตามอุณหภูมิ ส่วนอัตราการให้ความร้อนนั้น มีความสำคัญต่อปริมาณและองค์ประกอบของสารระเหยที่ได้จากคาร์บอนในเซชัน ถ้าให้อัตราการให้ความร้อนสูง ปริมาณสารระเหยจะถูกปลดปล่อยอย่างรวดเร็ว คาร์บอนจะเรียงตัวเป็นระเบียบน้อย ทำให้เกิดช่องว่างมากเกิดเป็นรูพรุนขนาดใหญ่กว่าเมื่อเทียบกับวัตถุดิบที่ผ่านการให้อัตราการให้ความร้อนต่ำ

ขั้นตอนการกระตุ้นเป็นการทำให้คาร์บอนหรือถ่านชาร์มีความพรุนมากขึ้น ส่งผลให้มีความสามารถในการดูดซับได้มากขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากการเพิ่มพื้นที่ผิวและการทำให้พื้นผิวมีความว่างไวมากขึ้น ขั้นตอนการกระตุ้นนอกจากเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิว โดยการใช้พลังงานความร้อนทำให้เกิดการแตกหักของพันธะหรือหมู่ที่หลุดออกได้ง่ายแล้ว ในปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้น ยังกำจัดสารต่างๆ ที่

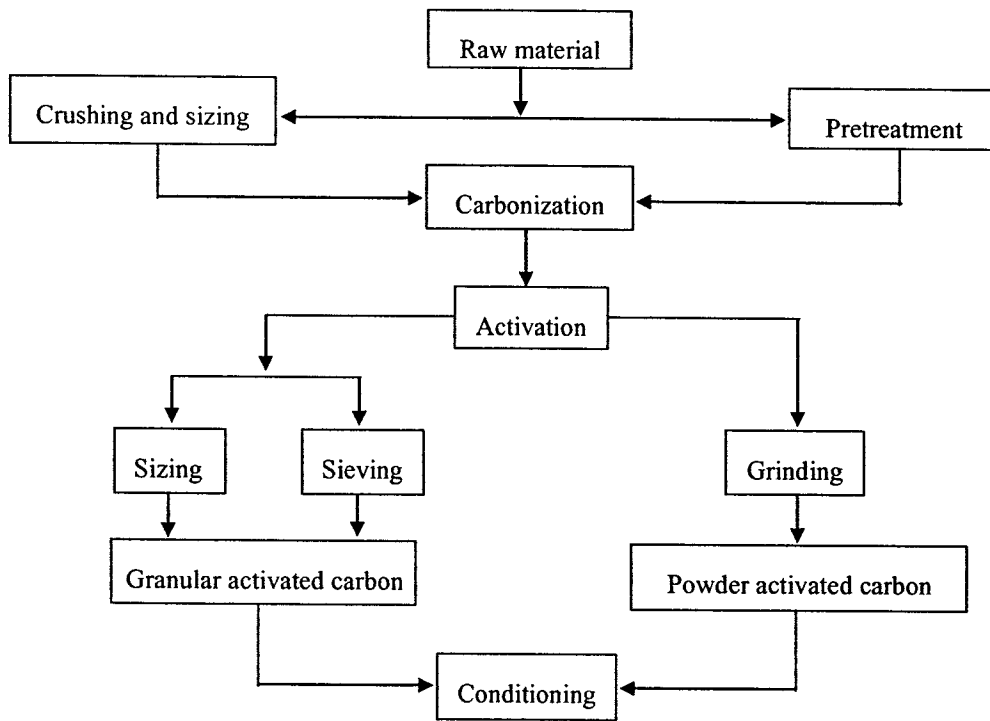
ตั้งค้างอยู่ในช่องว่าง ให้ออกไปจากรูพรุนที่ใช้ดูดซับอีกด้วย ส่วนการทำให้พื้นผิวมีความว่องไวมากขึ้น เกิดจากปฏิกิริยาเคมีทำให้โมเลกุลบางกลุ่มหลุดออกไปและเกิดส่วนที่มีอำนาจดูดซับขึ้นมาแทน นอกจากนี้ยังพบว่าปฏิกิริยาเคมีในขั้นตอนการกระตุ้น ช่วยให้คาร์บอนจัดเปลี่ยน โครงสร้างใหม่ให้มีประสิทธิภาพในการดูดซับสูงขึ้นได้

วิธีการกระตุ้นแบ่งออกเป็น 2 แบบ ได้แก่ วิธีกระตุ้นทางกายภาพ (Physical activation) และวิธีกระตุ้นทางเคมี (Chemical activation) รูปที่ 2.5 แสดงแผนผังของวิธีการผลิตทั้ง 2 แบบ สำหรับวิธีกระตุ้นทางกายภาพ ซึ่งเป็นการผลิตถ่านกัมมันต์ โดยที่ผิวคาร์บอนเกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ เช่น เกิดรูพรุนขนาดต่าง ๆ ทำให้มีพื้นที่ผิวมากขึ้น และคาร์บอนมีการจัดเรียงโครงสร้างใหม่ ซึ่งจะเพิ่มความสามารถในการดูดซับให้สูงขึ้น โดยทั่วไปสารที่ใช้ในการกระตุ้นทางกายภาพได้แก่ ไอ้ น้ำ คาร์บอนไดออกไซด์ อากาศ และออกซิเจน โดยใช้ร่วมกับการให้ความร้อน

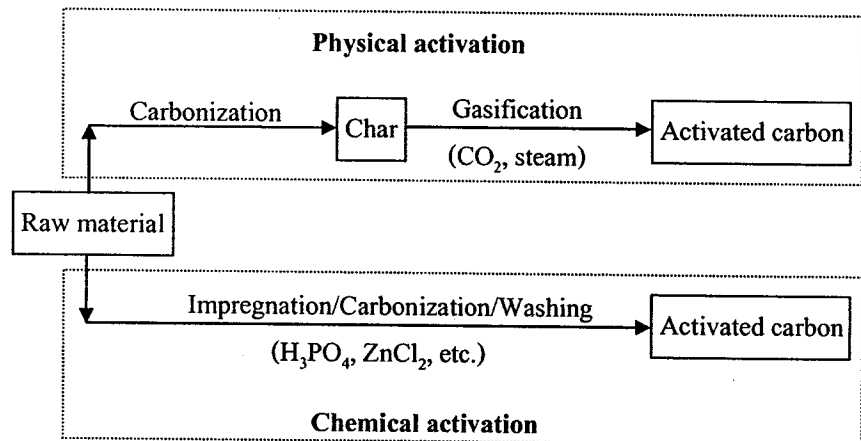
การกระตุ้นทางเคมีมักนิยมใช้กับการผลิตถ่านกัมมันต์ ที่มีวัตถุดิบเป็นสารประกอบคาร์บอนที่มาจากพืชและชีวมวล โดยใช้การแช่วัตถุดิบกับสารเคมีก่อนแล้วนำสารมาทำคาร์บอนในสภาวะที่อุณหภูมิในช่วง 400–800°C ซึ่งขึ้นกับประเภทของวัตถุดิบ และต้องทำการล้างสารเคมีออกก่อนนำไปใช้ สารเคมีส่วนใหญ่จะนำกลับมาใช้ใหม่ได้ สารเคมีที่ใช้กันมากได้แก่ กรดฟอสฟอริก (Phosphoric acid, H_3PO_4) ซิงค์คลอไรด์ (Zinc chloride, $ZnCl_2$) โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (Potassium hydroxide, KOH) และ โพแทสเซียมคาร์บอเนต (Potassium carbonate, K_2CO_3) เป็นต้น

กลไกการเกิดรูพรุนในถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นทางเคมี ยังไม่ทราบชัดเจนและจะแตกต่างกันไปขึ้นสารเคมีแต่ละชนิดที่ใช้ เป็นไปได้ว่าสารเคมีที่เติมลงไปอาจไปทำลายโครงสร้างเดิมของวัตถุดิบ และในขั้นตอนคาร์บอนไนซ์จะทำให้เกิดการสลายตัวของสารอินทรีย์ในวัตถุดิบ และการเชื่อมไขว้กันของโครงสร้างทำให้ถ่านเกิดรูพรุนขึ้นได้ สารระเหยบางประเภทไม่สามารถหลุดออกจากโครงสร้างนี้ได้ ทำให้ได้เนื้อถ่านเพิ่มขึ้นและเกิดทาร์น้อยลง ประกอบกับสารเคมีที่ใช้สามารถแทรกตัวอยู่ใน ทำให้เกิดการหดตัวน้อยลง เมื่อนำถ่านมาล้างสารเคมีออกด้วยน้ำหรือกรดเจือจาง จะเกิดช่องว่างหรือรูพรุนเพิ่มเติมขึ้นอีก

ข้อดีของวิธีกระตุ้นทางเคมีคือ ใช้อุณหภูมิต่ำกว่าวิธีกระตุ้นทางกายภาพ แต่ข้อเสียคืออาจมีสารเคมีตกค้างในถ่านกัมมันต์ ทำให้ต้องใช้เวลาและมีค่าใช้จ่ายในการล้างสารเคมี



รูปที่ 2.4 แผนผังสำหรับการผลิตถ่านกัมมันต์โดยทั่วไป



รูปที่ 2.5 แผนผังแสดงการผลิตถ่านกัมมันต์ทั้งแบบกระตุ้นทางกายภาพ (แผนผังส่วนบน) และกระตุ้นทางเคมี (แผนผังส่วนล่าง)

2.2 การดูดซับ

2.2.1 ไอโซเทิร์มของการดูดซับ

ข้อมูลสมมูลการดูดซับของสารเดี่ยวเป็นข้อมูลพื้นฐานที่มีความสำคัญในการทำความเข้าใจเกี่ยวกับกระบวนการดูดซับ ตลอดจนใช้ประโยชน์ในการวิเคราะห์ระบบดูดซับของสารผสม การศึกษาจลนศาสตร์การดูดซับและการคำนวณออกแบบระบบดูดซับ เป็นต้น ในระบบการดูดซับสารเดี่ยว ปริมาณของการดูดซับจะขึ้นกับชนิดของตัวดูดซับ (Adsorbent) และตัวถูกดูดซับ (Adsorbate) และยังขึ้นกับอุณหภูมิและความดันสำหรับระบบดูดซับแก๊ส หรืออุณหภูมิและความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับสำหรับระบบดูดซับของเหลว ในรูปของสมการเขียนได้เป็น

สำหรับระบบดูดซับแก๊ส

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

สำหรับระบบดูดซับของเหลว

$$q = f(C, T, \text{adsorbent}, \text{adsorbate}) \quad (2.2)$$

เมื่อ q = ปริมาณการดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับ ซึ่งอาจอยู่ในหน่วยของ mol/g, g/g หรือ cm^3 STP/g สำหรับการดูดซับแก๊ส

T = อุณหภูมิ, °C

P = ความดันย่อยของตัวถูกดูดซับในวัฏภาคแก๊ส

C = ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับในสารละลาย, g/cm^3 หรือ mol/L

ถ้าการดูดซับของตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับคู่หนึ่ง ๆ เกิดขึ้นที่อุณหภูมิคงที่ สมการ 2.1 และ 2.2 เขียนได้เป็น

$$q = f(P)_T \quad (2.3)$$

และ

$$q = f(C)_T \quad (2.4)$$

สำหรับระบบดูดซับแก๊ส ถ้าอุณหภูมิการดูดซับมีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤตของสารถูกดูดซับ สมการ 2.3 เขียนได้ในอีกรูปแบบหนึ่ง ดังนี้

$$q = f(P/P^0)_T \quad (2.5)$$

เมื่อ P^0 คือความดันไออิ่มตัวของสารถูกดูดซับที่อุณหภูมิการดูดซับ

ความสัมพันธ์ตามสมการ 2.5 เรียกไอโซเทิร์มของการดูดซับ (Adsorption isotherm) ซึ่งเป็นข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นหรือความหนาแน่นของตัวถูกดูดซับในวัฏภาคแก๊สหรือวัฏภาคของเหลวกับปริมาณของตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับ โดยตัวดูดซับของแข็งที่สภาวะสมดุลเมื่ออุณหภูมิของการดูดซับคงที่ ได้มีการจำแนกลักษณะของไอโซเทิร์มการดูดซับของระบบดูดซับแก๊สเป็น 6 แบบโดย Brunauer และคณะ⁽¹⁵⁾ รายละเอียดดังปรากฏในรูปที่ 2.6 โดยแบ่งได้ดังนี้

แบบที่ 1 (Type I)

เป็นการดูดซับของโมเลกุลของตัวดูดซับที่เกิดขึ้นเพียงหนึ่งชั้น (Monolayer adsorption) เป็นลักษณะการดูดซับของวัสดุที่ไม่มีรูพรุนหรือมีความพรุนต่ำหรือพบในตัวดูดซับที่มีพื้นผิวภายนอกต่ำ แต่มีรูพรุนขนาดเล็กเป็นจำนวนมาก เช่น ถ่านกัมมันต์หรือซีโอไลต์ โดยตัวถูกดูดซับแก๊สจะถูกลดซับจนเต็มรูพรุนและเข้าสู่สมดุลที่ช่วงความดันต่ำ ๆ อย่างรวดเร็ว

แบบที่ 2 (Type II)

เป็นการดูดซับของโมเลกุลมากกว่าหนึ่งชั้น (Multilayer adsorption) เกิดกับการดูดซับของวัสดุไม่มีความพรุน (non-porous) หรือมีการกระจายขนาดของรูพรุนขนาดกลางและขนาดใหญ่ ลักษณะของไอโซเทิร์มมีจุดเปลี่ยนกราฟ (จุด B) ซึ่งเป็นสภาวะที่ผิวหน้าของตัวดูดซับถูกปกคลุมด้วยโมเลกุลของตัวถูกดูดซับแบบชั้นเดียวจนสมบูรณ์แล้ว ที่ช่วงความดันสูงกว่านี้จะเกิดการดูดซับเพิ่มขึ้นเป็นชั้น ๆ จนถึงสภาวะที่ตัวถูกดูดซับแก๊สเกิดการควบแน่นเป็นของเหลวที่ความดันสัมพัทธ์เข้าใกล้หนึ่ง ($P/P^\circ \approx 1$)

แบบที่ 3 (Type III)

เป็นไอโซเทิร์มที่ไม่มีจุดเปลี่ยนกราฟ มีลักษณะคล้ายกระจกว่าเป็นลักษณะการดูดซับที่แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของตัวถูกดูดซับมีค่ามากกว่าแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของตัวถูกดูดซับและผิวหน้าของตัวดูดซับ ทำให้เกิดการดูดซับได้น้อยที่ความดันสัมพัทธ์ต่ำ แต่การดูดซับจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อความดันสัมพัทธ์สูงขึ้น เนื่องจากเกิดการดูดซับแบบหลายชั้น ซึ่งเป็นผลมาจากแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของตัวถูกดูดซับด้วยกันเอง

แบบที่ 4 (Type IV)

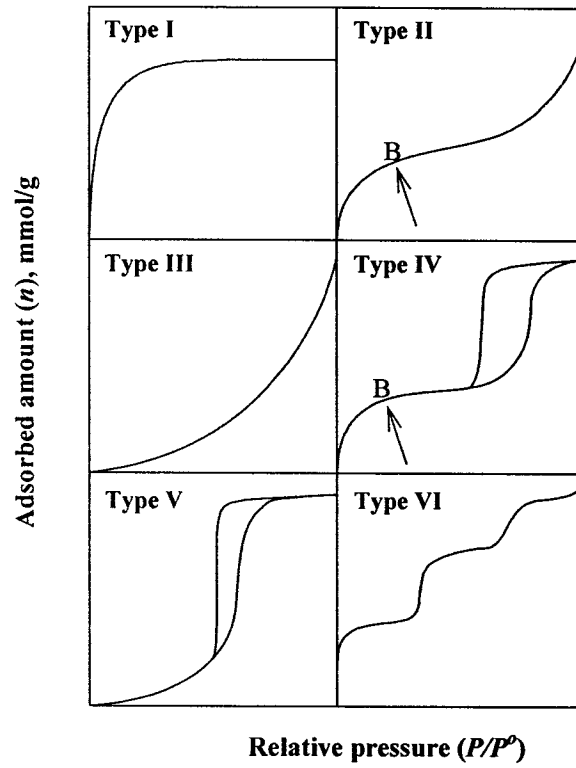
เป็นลักษณะไอโซเทิร์มที่พบในวัสดุที่มีช่วงรูพรุนขนาดกลาง (2 – 50 nm) เป็นส่วนใหญ่ เส้นไอโซเทิร์มในช่วงเพิ่มความดัน (Adsorption branch) จะคล้ายกับแบบที่ 2 แต่ไอโซเทิร์มในช่วงลดความดัน (Desorption branch) จากค่าความดันสัมพัทธ์ใกล้หนึ่งลงมา จะไม่ซ้อนทับกับเส้นไอโซเทิร์มในช่วงขาขึ้น ทำให้เกิดบริเวณหรือพื้นที่ที่เรียก hysteresis loop ซึ่งเกิดจากปรากฏการณ์ capillary condensation โดยที่ค่าความดันสัมพัทธ์ใกล้หนึ่ง (ความดันย่อยของตัวดูดซับในวัฏภาคแก๊สมีค่าใกล้กับค่าความดันไออิ่มตัว) ตัวถูกดูดซับจะอยู่ในสภาวะคล้ายของเหลวที่บรรจุอยู่ในหลอดหรือช่องของรูพรุน ซึ่งจะมีแรงดึงผิวตรงบริเวณที่สัมผัสกับผนังของรูพรุนเข้ามาเกี่ยวข้อง การจะไล่ตัวถูกดูดซับออกจากรูพรุนจึงต้องลดความดันให้น้อยกว่าค่าความดันในช่วงขาขึ้น เพื่อเอาชนะแรงดึงผิวดังกล่าว เป็นสาเหตุให้เส้นไอโซเทิร์มของขาขึ้นและขาลงไม่ซ้อนทับกันเกิดเป็น loop ขึ้น พื้นที่ของ hysteresis loop จะแปรตามสัดส่วนของปริมาตรรูพรุนขนาดกลางเมื่อเทียบกับปริมาตรรูพรุนทั้งหมดของตัวดูดซับ

แบบที่ 5 (Type V)

ลักษณะของไอโซเทิร์มจะคล้ายกับแบบที่ 3 แต่จะมีจุดเปลี่ยนกราฟที่ค่าความดันสัมพัทธ์มากกว่า 0.5 หรืออาจมากกว่านั้นและยังแสดงลักษณะของ hysteresis loop เหมือนไอโซเทิร์มแบบที่ 4 ดังที่กล่าวมาแล้ว เช่นเดียวกับแบบที่ 3 ไอโซเทิร์มแบบที่ 5 นี้ เกิดกับระบบดูดซับที่แรงดึงดูดระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับมีค่าอ่อน ตัวอย่างได้แก่ การดูดซับไอน้ำ ซึ่งจัดเป็นสารมีขั้ว (polar) โดยถ่านกัมมันต์ซึ่งเป็นสารไม่มีขั้ว (nonpolar) เป็นต้น

แบบที่ 6 (Type VI)

เป็นเส้นไอโซเทิร์มแบบขั้นบันได (Stepped isotherm) เกิดกับตัวดูดซับที่ไม่มีความพรุน (Non-porous) และมีลักษณะพื้นผิวที่สม่ำเสมอ ทำให้เกิดการดูดซับเป็นช่วง ๆ ตามความดันที่เพิ่มขึ้น ซึ่งจะแตกต่างจากไอโซเทิร์มแบบที่ 2 ที่มีการดูดซับเป็นขั้น ๆ อย่างต่อเนื่อง ตัวอย่างได้แก่ การดูดซับของแก๊สคริปตอนบน carbon black หรือผลึก cadmium bromide เป็นต้น



รูปที่ 2.6 ชนิดของไอโซเทิร์มการดูดซับ

2.2.2 การดูดซับไอน้ำ

การศึกษากระบวนการดูดซับไอน้ำเป็นหัวข้อที่น่าสนใจเนื่องจาก โดยทั่วไปแล้วถ่านกัมมันต์จะมีสมบัติไม่มีประจุ แต่เนื่องจากการมีหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวอยู่ปริมาณหนึ่ง ซึ่งมากหรือน้อย ขึ้นกับปัจจัยการเตรียมถ่านกัมมันต์ ทำให้ถ่านกัมมันต์ดูดซับสารที่มีขั้วได้เช่น ไอน้ำ ส่งผลให้เมื่อนำถ่านกัมมันต์ไปใช้งานจะมีประสิทธิภาพการดูดซับสารลดลง เพราะไอน้ำเข้ามาแย่งพื้นที่ในการดูดซับไปด้วย ซึ่งเหตุการณ์นี้เป็นปัญหาที่พบได้ในการใช้งานระดับอุตสาหกรรม เนื่องจากส่วนประกอบของสารที่ต้องการดูดซับแยกออกมาจะมีไอน้ำปะปนอยู่เสมอซึ่งอาจจะอยู่ในรูปของความชื้น⁽¹⁶⁻¹⁸⁾ จากปัญหานี้การศึกษากลไกการดูดซับของไอน้ำจึงมีความสำคัญ

Puri⁽¹⁹⁾ เสนอว่าการดูดซับไอน้ำบนพื้นผิวที่มีหมู่ฟังก์ชัน เกิดจากการสร้างพันธะไฮโดรเจนระหว่างน้ำและหมู่ฟังก์ชันออกไซด์บนพื้นผิว และพบว่าปริมาณการดูดซับไอน้ำเพิ่มขึ้นตามจำนวนหมู่ฟังก์ชันที่เพิ่มขึ้น ต่อมาการศึกษาโดยใช้แบบจำลองโมเลกุล⁽²⁰⁻²²⁾ พบว่ากลไกการดูดซับไอน้ำในถ่านกัมมันต์ที่มีหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิว เป็นไปตามกลไกที่ Puri ได้เสนอไว้ จากกลไกนี้ได้มีการเสนอแบบจำลอง โดย Dubinin and Serpinsky (DS equation)⁽²³⁾

เนื่องจากลักษณะพื้นผิวถ่านกัมมันต์มีหมู่ฟังก์ชันในสัดส่วนไม่มากเมื่อเทียบกับพื้นที่ผิวหรือปริมาตรรูพรุน ดังนั้นการดูดซับไอน้ำบางส่วนต้องเกิดในรูพรุนหรือช่องว่างที่มีในโครงสร้างถ่านกัมมันต์ Kaneko⁽²⁴⁾ ได้เสนอว่า การดูดซับไอน้ำในรูพรุนขนาดเล็ก ลักษณะของโมเลกุลของไอน้ำจะรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อน (Cluster) จากการศึกษาการดูดซับไอน้ำในถ่านกัมมันต์แบบเส้นใย 2 ชนิด ที่มีขนาดรูพรุนเท่ากับ 0.8 nm และ 1.1 nm พบว่าปริมาณการดูดซับไอน้ำในถ่านกัมมันต์ชนิดที่หนึ่ง มีค่า 0.2 g/g และในชนิดที่สองมีค่า 0.8 g/g จากผลนี้จึงได้มีการเสนอว่าขนาดของกลุ่มก้อนโมเลกุลจะมีไอน้ำอยู่ 5 โมเลกุล (Pentamer cluster, $(\text{H}_2\text{O})_5$)⁽²⁵⁾ ซึ่งการศึกษาที่สนับสนุนแนวคิดการก่อกลุ่มก้อนโมเลกุลของไอน้ำได้มาจากผลการวิเคราะห์ Small angle X-ray scattering, X-ray diffraction และ Differential scanning calorimeter จากผลการเสนอกฎนี้ ได้มีการเสนอแบบจำลองโดย Do and Do⁽¹⁷⁾ เพื่ออธิบายการดูดซับไอน้ำที่เกิดขึ้นทั้งกับหมู่ฟังก์ชันและภายในรูพรุน

2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การเตรียมถ่านกัมมันต์จากวัสดุชีวมวลโดยวิธีกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก ได้มีการศึกษากันมาบ้างแล้ว ซึ่งส่วนใหญ่ก็พบว่า เป็นวิธีการที่สามารถผลิตถ่านกัมมันต์คุณภาพดีได้ นอกจากนี้การเตรียมถ่านกัมมันต์โดยวิธีการนี้ ยังพบว่าถ่านกัมมันต์ที่ได้ อาจมีหมู่ฟังก์ชันต่าง ๆ เกิดขึ้น โดยมีปริมาณมากหรือน้อยขึ้นกับสภาวะการเตรียมและปริมาณสารกระตุ้นที่ใช้ เช่น Jagtoyen และ Derbyshire⁽⁵⁾ ได้ทดลองเตรียมถ่านกัมมันต์จากต้นโอ๊คขาว โดยใช้ H_3PO_4 พบว่าได้ถ่านกัมมันต์ ที่มีพื้นที่ผิวสูงมากถึง 1800 m^2/g โดยใช้อุณหภูมิในการกระตุ้นประมาณ 350°C Benaddi et al.⁽⁶⁾ นอกจากจะเตรียม

ถ่านกัมมันต์ด้วย H_3PO_4 แล้วยังทดลองใช้ สาร diammonium phosphate $[(NH_4)_2HPO_4]$ เป็นสารกระตุ้นด้วย และทำการกระตุ้นโดยเปรียบเทียบบรรยากาศของแก๊สเฉื่อย กับในบรรยากาศของไอน้ำ พบว่า ถ่านกัมมันต์มีสมบัติของพื้นผิวต่างกัน โดยในบรรยากาศของไอน้ำ ให้สมบัติพื้นผิวที่เป็นกลาง ส่วนในบรรยากาศของแก๊สเฉื่อยให้สมบัติพื้นผิวที่เป็นกรด Lee และ Reucroft ⁽⁷⁾ ศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์โดยใช้ H_3PO_4 เป็นสารกระตุ้น โดยเตรียมที่อุณหภูมิต่างๆกัน ($300^\circ C$, $350^\circ C$ และ $450^\circ C$) นั้น พบว่าอุณหภูมิของการเตรียมที่ต่ำ ถ่านกัมมันต์ที่ได้จะมีหมู่ฟังก์ชันที่มีองค์ประกอบของออกซิเจนมากกว่า และดูดซับไอน้ำ ได้มากกว่าถ่านกัมมันต์ที่เตรียมที่อุณหภูมิสูงขึ้นและมีหมู่ฟังก์ชันน้อยกว่า Considine et al. ⁽⁹⁾ ได้วิจัยในทำนองเดียวกันพบว่า ถ่านกัมมันต์ที่ปรับปรุงพื้นผิวให้ มีออกซิเจนบนพื้นผิวมากสามารถดูดซับสาร 2-methylisoborneol (MID) ออกจากสารละลายได้ดีกว่า ถ่านกัมมันต์ที่ไม่ได้ปรับปรุงสมบัติพื้นผิว

Vernersson และคณะ ⁽²⁶⁾ ศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์จากไม้ไผ่ (*Arundo donax cane*) โดยการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก โดยศึกษาผลของอุณหภูมิในการกระตุ้นระหว่าง $400-550^\circ C$ พบว่า ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้มีพื้นที่ผิวอยู่ระหว่าง $690-1,330 m^2/g$ โดยเมื่อเพิ่มอัตราส่วนของกรดฟอสฟอริกต่อวัตถุดิบจาก 1.5:1 เป็น 2:1 โดยน้ำหนัก จะทำให้ถ่านกัมมันต์มีปริมาตรรูพรุนเพิ่มขึ้น และมีโครงสร้างรูพรุนเป็นแบบรูพรุนขนาดกลาง แต่เมื่ออัตราส่วนของกรดต่อวัตถุดิบเพิ่มขึ้นเป็น 2.5:1 ทำให้ปริมาตรรูพรุนลดลงเนื่องจากปริมาณกรดที่มากเกินไปได้เข้าไปทำลายโครงสร้างรูพรุนของถ่านกัมมันต์

Gomez - Serrano และคณะ ⁽²⁷⁾ ศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์จากต้นเกาลัด (Chestnut wood) โดยการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก โดยศึกษาผลของอุณหภูมิและความเข้มข้นของกรด พบว่า ถ่านกัมมันต์ที่ได้เป็นถ่านกัมมันต์แบบรูพรุนขนาดเล็กโดยพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนขนาดเล็กเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิและความเข้มข้นของกรดเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามที่อุณหภูมิ $600^\circ C$ พื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนขนาดเล็กลดลงเมื่อเทียบกับที่อุณหภูมิ $500^\circ C$

Guo และ Rockstraw ⁽²⁸⁾ ศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์จาก Pecan shell โดยการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก พบว่า ถ่านกัมมันต์จะเริ่มมีการพัฒนารูพรุนที่อุณหภูมิมากกว่า $250^\circ C$ และที่ $500^\circ C$ ได้สมบัติรูพรุนสูงสุดคือ พื้นที่ผิวเท่ากับ $1130 m^2/g$ และปริมาตรรูพรุนเท่ากับ $0.34 cm^3/g$ จากการศึกษา นี้พบว่าตัวแปรจากสถานะการเตรียมที่มีผลต่อการพัฒนารูพรุนคือ ปริมาณสารเคมีหรืออัตราส่วนสารเคมีต่อวัตถุดิบ และเวลาในการคาร์บอนซ์ การเกิดหมู่ฟังก์ชันกรดมีสองส่วนคือหมู่ที่ไม่ทนต่ออุณหภูมิและทนต่ออุณหภูมิ โดยกลุ่มแรกจะเป็นหมู่ฟังก์ชันที่มีฟอสฟอรัสและหมู่คาร์บอนิล และทนต่อความร้อนที่อุณหภูมิไม่เกิน $300^\circ C$ แต่กลุ่มหลังจะมีหมู่คาร์บอนิลเป็นองค์ประกอบหลัก และทนได้แม้อุณหภูมิมากกว่า $500^\circ C$

Budinova และคณะ⁽²⁹⁾ ศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์จาก woody biomass birch โดยวิธีการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกแบบทั่วไปคือการแช่วัตถุดิบในสารเคมีแล้วต่อด้วยการคาร์บอนไนซ์ภายใต้บรรยากาศแก๊สไนโตรเจน และการเตรียมด้วยวิธีการผสมโดยเพิ่มขึ้นขั้นตอนการกระตุ้นทางกายภาพอีกสองวิธีดังนี้ วิธีที่หนึ่ง กระบวนการต่อเนื่องจากการเตรียมแบบทั่วไป จะมีการกระตุ้นต่อด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิเดิม วิธีที่สอง หลังจากแช่วัตถุดิบในสารเคมีแล้ว นำวัตถุดิบที่ได้ไปผ่านขั้นตอนการกระตุ้นด้วยไอน้ำต่อเนื่องโดยไม่มีขั้นตอนการคาร์บอนไนซ์ พบว่าการเตรียมโดยวิธีการผสมโดยการเพิ่มขึ้นขั้นตอนการกระตุ้นทางกายภาพทำให้มีการพัฒนารูพรุนเพิ่มขึ้น โดยถ่านกัมมันต์ที่เตรียมแบบทั่วไปมีค่าพื้นที่ผิวเท่ากับ $761 \text{ m}^2/\text{g}$ ส่วนถ่านกัมมันต์ที่เตรียมโดยวิธีที่หนึ่งมีค่าพื้นที่ผิวเท่ากับ $1290 \text{ m}^2/\text{g}$ และถ่านกัมมันต์ที่เตรียมโดยวิธีที่สองมีค่าพื้นที่ผิวเท่ากับ $1360 \text{ m}^2/\text{g}$ นอกจากนี้ยังพบว่า การเตรียมถ่านกัมมันต์ด้วยกรดฟอสฟอริก ซึ่งทำให้เกิดหมู่ฟังก์ชันที่มีฟอสฟอรัสเป็นองค์ประกอบนั้น หมู่ฟังก์ชันกลุ่มนี้จะลดลงอย่างมากเมื่อมีการผสมขั้นตอนการกระตุ้นด้วยไอน้ำเข้าไปด้วย

บทที่ 3

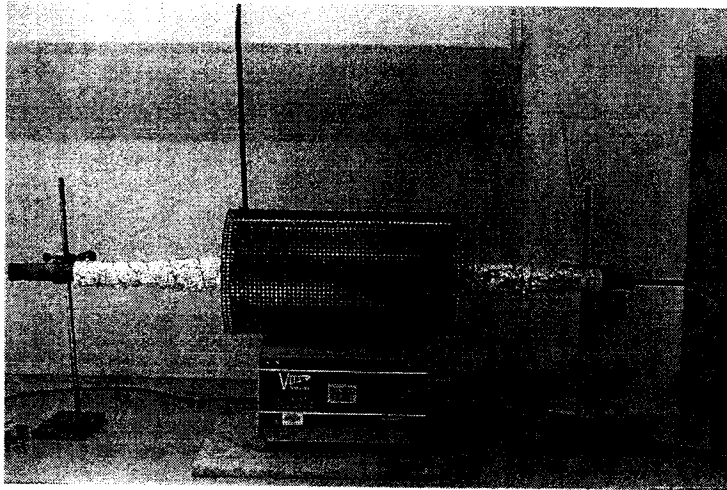
วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 อุปกรณ์และเครื่องมือ

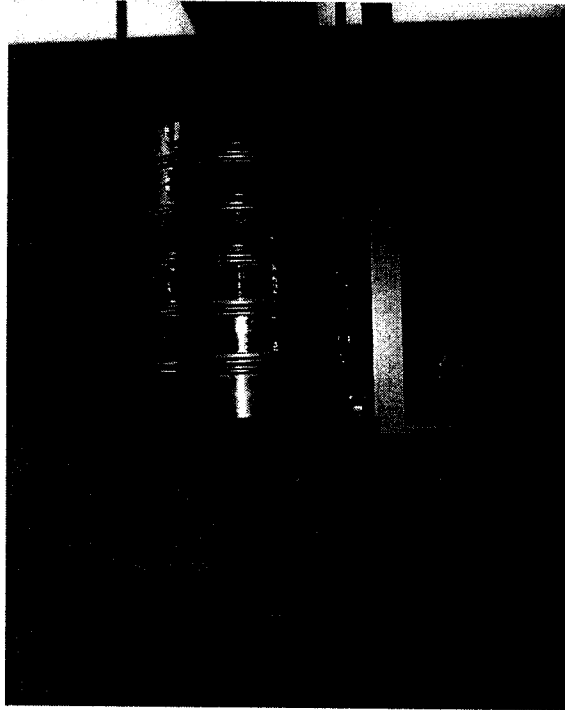
1. เตาเผาแบบท่อยี่ห้อ Vectar รุ่น VCTF4 พร้อมชุดควบคุมอุณหภูมิสำหรับการเตรียมถ่านกัมมันต์ โดยวิธีกระตุ้นทางเคมี (รูปที่ 3.1)
2. ตู้อบ ยี่ห้อ Memmert รุ่น 600 (รูปที่ 3.2)
3. ชุดตะแกรงร่อนและเครื่องเขย่าตะแกรงยี่ห้อ Retsch รุ่น AS200 digit (รูปที่ 3.3)
4. เครื่องวัดค่าความเป็นกรดด่าง (pH meter) ยี่ห้อ Schott รุ่น CG840 (รูปที่ 3.4)
5. เครื่องวิเคราะห์ทางความร้อน (Thermogravimetric analyzer) ยี่ห้อ Perkin Elmer รุ่น TGA7 Series (รูปที่ 3.5)
6. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM 6400 (รูปที่ 3.6)
7. เครื่องวัดพื้นที่ผิวและช่วงขนาดรูพรุน (Surface area analyzer) ยี่ห้อ Micromeritics รุ่น ASAP2010 (รูปที่ 3.7)
8. เครื่องวิเคราะห์ไอโซเทอรั่มการดูดซับสถานะแก๊สหรือไอ (Intelligent Gravimetric Analyzer, IGA) ยี่ห้อ Hiden Analytical รุ่น IGA-002 (รูปที่ 3.8)

3.2 วัสดุและสารเคมี

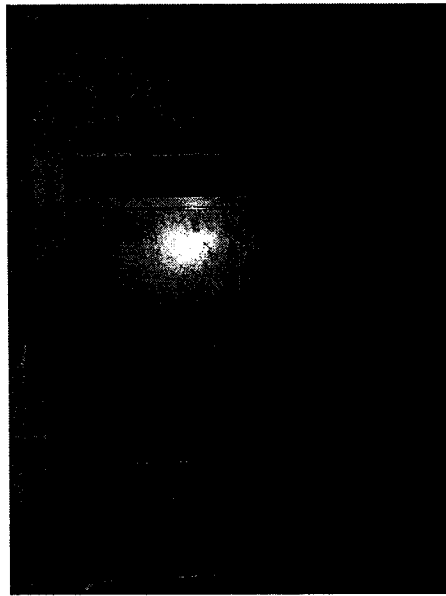
1. ไม้ยูคาลิปตัส ดังรูปที่ 3.9
2. แก๊สไนโตรเจน (N_2) บริสุทธิ์มีความบริสุทธิ์ 99.95% ของบริษัท TIG
3. กรดฟอสฟอริก (H_3PO_4)



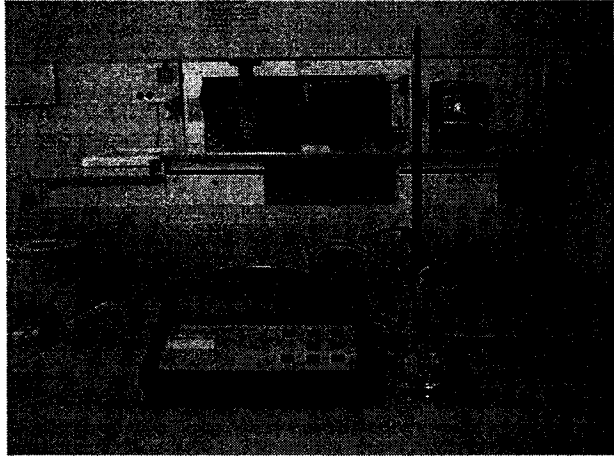
รูปที่ 3.1 เตาเผาแบบท่อที่ใช้เตรียมถ่านกัมมันต์



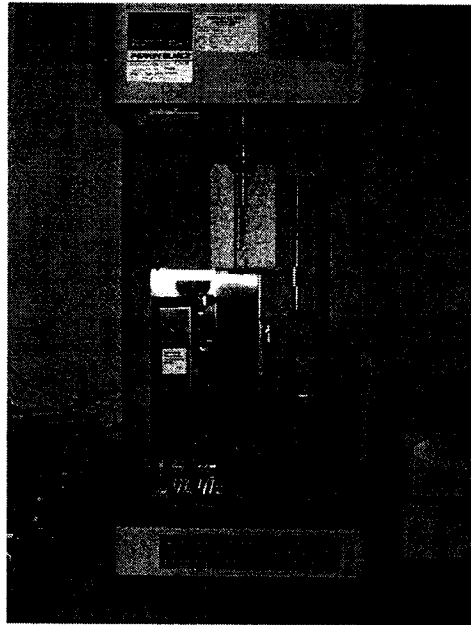
รูปที่ 3.3 ชุดตะแกรงร้อน และเครื่องเขย่าตะแกรง



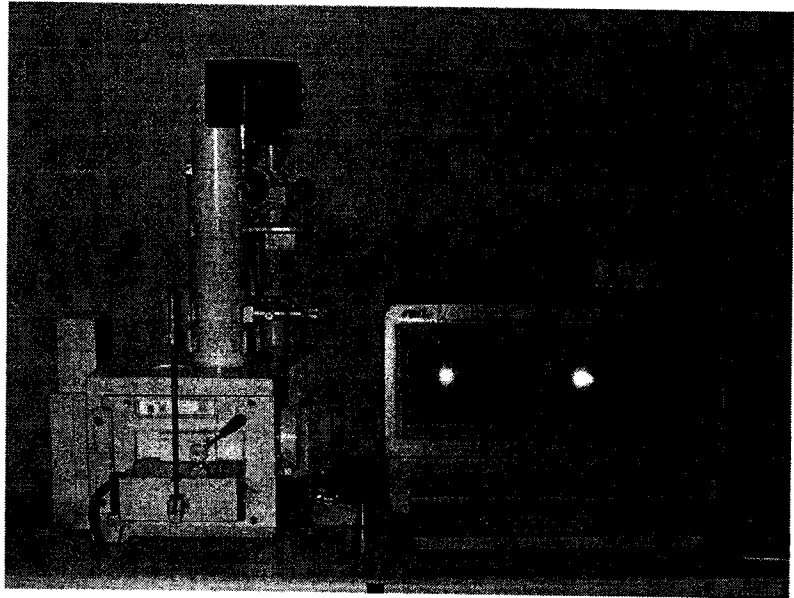
รูปที่ 3.2 คู่อบสาร



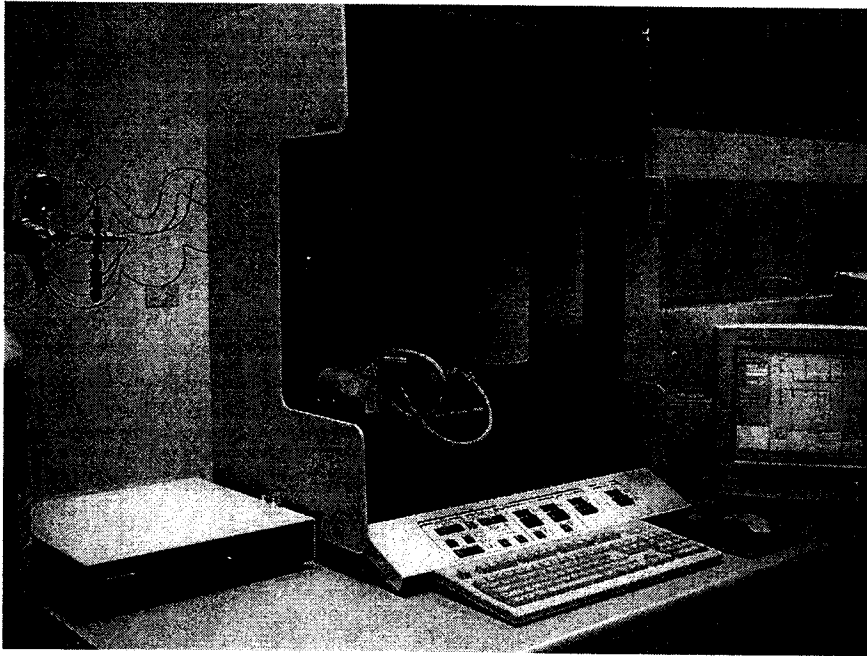
รูปที่ 3.4 เครื่องวัดค่าความเป็นกรดต่าง



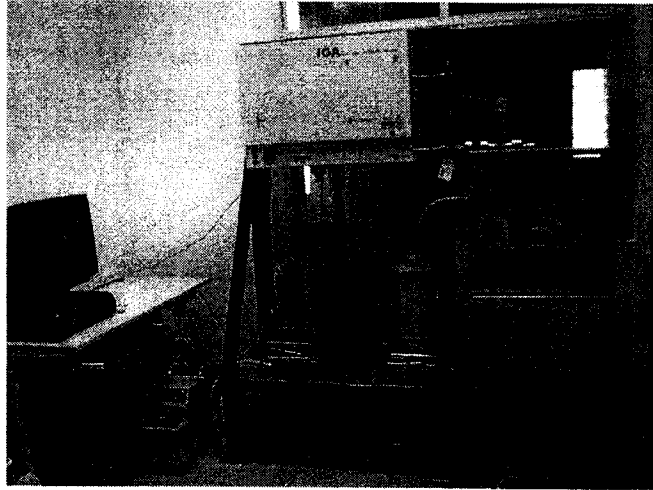
รูปที่ 3.5 เครื่องวิเคราะห์ทางความร้อน (TGA)



รูปที่ 3.6 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)



รูปที่ 3.7 เครื่องวัดพื้นที่ผิวและช่วงขนาดรูพรุน (ASAP2010)



รูปที่ 3.8 เครื่องวิเคราะห์ไอโซโทรมการดูดซับสถานะแก๊สหรือไอ (IGA)



รูปที่ 3.9 ไม้ยูคาลิปตัส (ก) ในสภาพเป็นชิ้นใหญ่ (ข) ในสภาพลดขนาด

3.3 วิธีทดลอง

3.3.1 การวิเคราะห์สมบัติของไม้ยูคาลิปตัส

1. นำเศษไม้ยูคาลิปตัสมาสับและบดเป็นชิ้นเล็ก และนำมาคัดขนาดโดยเลือกศึกษาที่ขนาดเฉลี่ยเท่ากับ 0.714 มิลลิเมตร (20×30 mesh) ซึ่งเป็นขนาดที่มีการผลิตในระดับอุตสาหกรรม
2. วิเคราะห์องค์ประกอบแบบประมาณของไม้ยูคาลิปตัสที่คัดขนาดแล้ว โดยเครื่อง Thermogravimetric analyzer (TGA) โดยวิเคราะห์เป็นปริมาณร้อยละโดยน้ำหนัก ได้แก่ ความชื้น สารระเหย เถ้า และ คาร์บอนคงตัว (โดยผลต่าง)
3. วิเคราะห์องค์ประกอบเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสของ ไม้ยูคาลิปตัสที่คัดขนาดแล้ว โดยใช้วิธีการของ Browning⁽³⁰⁾ และวิเคราะห์องค์ประกอบลิกนินโดยใช้วิธี TAPPI (T222-om-98)⁽³¹⁾
4. วิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนของไม้ยูคาลิปตัสที่คัดขนาดแล้ว โดยเครื่อง Thermogravimetric analyzer (TGA) ภายใต้สภาวะบรรยากาศไนโตรเจน อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเท่ากับ 25°C ต่อนาที และอุณหภูมิสูงสุดเท่ากับ 600°C

3.3.2 การเตรียมถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัสโดยวิธีกระตุ้นทางเคมี

1. นำเศษไม้ยูคาลิปตัสมาสับและบดเป็นชิ้นเล็ก และนำมาคัดขนาดโดยเลือกศึกษาที่ขนาดเฉลี่ยเท่ากับ 0.714 มิลลิเมตร แล้วนำไปอบแห้งที่ 100°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
2. นำไม้ยูคาลิปตัสที่ได้จากข้อ 1 แช่ในสารละลายกรดฟอสฟอริกตามอัตราส่วนสารเคมีต่อวัตถุดิบ ดังนี้ 0.5:1, 1:1, 1.5:1, และ 2:1 และศึกษาเวลาการแช่สารเคมี ดังนี้ 0.5, 1, 1.5 และ 2 ชั่วโมง
3. ทำการคาร์บอนไนซ์ไม้ยูคาลิปตัสที่ได้จากข้อ 2 ภายใต้บรรยากาศแก๊สไนโตรเจน ที่อุณหภูมิ 300, 400, 500, และ 600°C และเลือกเวลาคาร์บอนไนซ์ 1 ชั่วโมง
4. ล้างสารเคมีที่ยังติดอยู่ในถ่านกัมมันต์ ด้วยน้ำกลั่นจนกว่า pH จะคงที่
5. อบถ่านกัมมันต์ให้แห้ง แล้วเก็บไว้ในโถสุญญากาศ

3.3.3 การวิเคราะห์สมบัติของถ่านกัมมันต์

1. การคำนวณหาร้อยละผลผลิตรวมของถ่านกัมมันต์จากสมการ

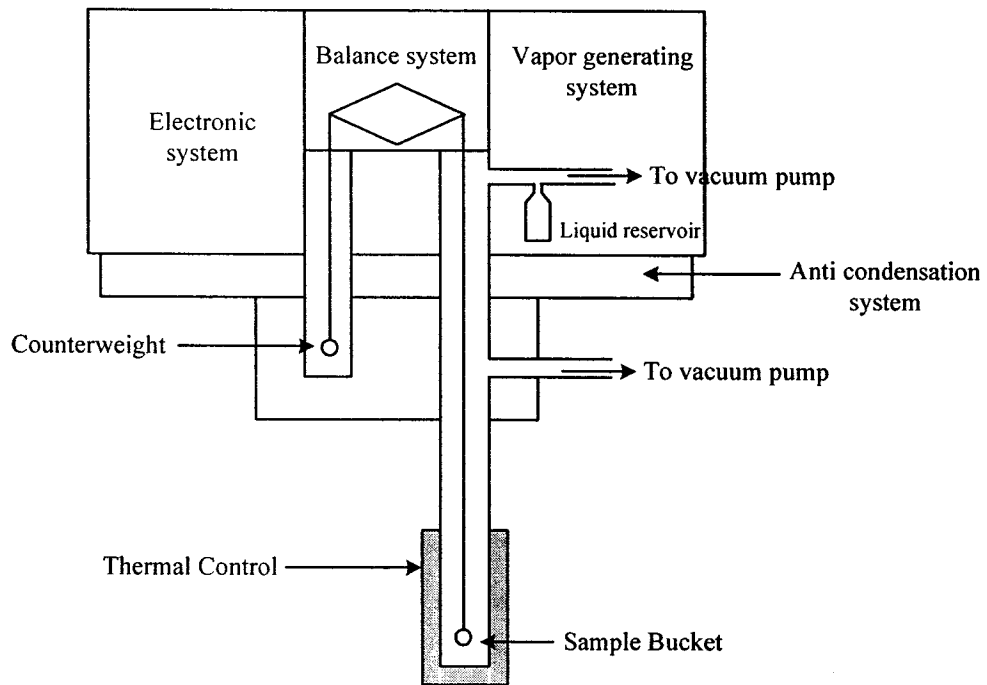
$$\text{ร้อยละผลผลิตรวม} = \frac{\text{น้ำหนักของถ่านกัมมันต์}}{\text{น้ำหนักของวัตถุดิบ}} \times 100$$

2. วิเคราะห์องค์ประกอบแบบประมาณของถ่านกัมมันต์ โดยเครื่อง Thermogravimetric analyzer (TGA) โดยวิเคราะห์เป็นปริมาณร้อยละโดยน้ำหนัก ได้แก่ ความชื้น สารระเหย เถ้า และ คาร์บอนคงตัว (โดยผลต่าง)
3. วิเคราะห์พื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนถ่านกัมมันต์ โดยเครื่อง Surface area analyzer (ASAP 2010) โดยใช้ข้อมูลไอโซเทิร์มการดูดซับแก๊สไนโตรเจน ที่อุณหภูมิ -196°C (77 K) สมบัติรูพรุนที่วิเคราะห์มีดังนี้
 - 3.1 พื้นที่ผิวจำเพาะ คำนวณจากสมการของ Brunauer-Emmett-Teller (BET)
 - 3.2 ปริมาตรรูพรุนรวม คำนวณจากปริมาตรของ N_2 ที่ถูกดูดซับที่ค่าความดันสัมพัทธ์ (P/P°) 0.98 แล้วแปลงเป็นปริมาตรของ N_2 ในสถานะของเหลว
 - 3.3 ปริมาตรรูพรุนขนาดเล็ก คำนวณจากสมการของ Dubinin-Radushkevich (DR)
 - 3.4 ปริมาตรรูพรุนขนาดกลางและใหญ่ คำนวณจากผลต่างของปริมาตรรูพรุนรวมและปริมาตรรูพรุนขนาดเล็ก
4. วิเคราะห์ปริมาณหมู่ฟังก์ชันกรดรวม พร้อมทั้งวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันกรดแยกเป็นชนิดต่างๆ ดังนี้ หมู่ฟังก์ชัน carboxylic acid หมู่ฟังก์ชัน lactonic และหมู่ฟังก์ชัน phenolic และหมู่ฟังก์ชันเบสรวม โดยวิธี Boehm Titration ⁽³²⁾ ซึ่งวิธีนี้มีสมมุติฐานในการวิเคราะห์ปริมาณหมู่ฟังก์ชันดังนี้ สารละลายเบส NaOH ใช้วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันกรดรวม สารละลายเบส NaHCO_3 ใช้วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน carboxylic acid สารละลายเบส Na_2CO_3 ใช้วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน carboxylic acid และ lactonic และสารละลายกรด HCl ใช้วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันเบสรวม โดยมีขั้นตอนการวิเคราะห์ดังนี้
 - 4.1 ชั่งน้ำหนักถ่านกัมมันต์ปริมาณ 1 กรัม จำนวน 4 ชุด โดย
 - ชุดที่หนึ่งแช่ในสารละลายเบส NaOH ความเข้มข้น 0.1 M ปริมาตร 100 cc
 - ชุดที่สองแช่ในสารละลายเบส NaHCO_3 ความเข้มข้น 0.1 M ปริมาตร 100 cc
 - ชุดที่สามแช่ในสารละลายเบส Na_2CO_3 ความเข้มข้น 0.05 M ปริมาตร 100 cc
 - ชุดที่สี่แช่ในสารละลายกรด HCl ความเข้มข้น 0.1 M ปริมาตร 100 cc
 จากนั้นเขย่าของผสมทั้งสองชุดเป็นเวลา 24 ชั่วโมง
 - 4.2 กรองถ่านกัมมันต์ออกจากสารละลายทั้งสองชุด
 - 4.3 ทำการไทเทรตสารละลายที่ได้หลังจากกรองถ่านกัมมันต์ของแต่ละชุดดังนี้
 - ชุดที่หนึ่ง สอง และสาม ไทเทรตด้วยสารละลายกรด HCl ความเข้มข้น 0.1 M
 - ชุดที่สี่ ไทเทรตด้วยสารละลายเบส NaOH ความเข้มข้น 0.1 M

- 4.4 ปริมาณหมู่ฟังก์ชันกรดรวม คำนวณจากปริมาณ สารละลาย HCl ที่ใช้ในการไทเทรตสารละลายชุดที่หนึ่ง
- 4.5 ปริมาณหมู่ฟังก์ชัน carboxylic acid คำนวณจากปริมาณ สารละลาย HCl ที่ใช้ในการไทเทรตสารละลายชุดที่สอง
- 4.6 ปริมาณหมู่ฟังก์ชัน lactic คำนวณจากปริมาณผลต่างของ ปริมาณหมู่ฟังก์ชัน carboxylic acid และ lactic ที่คำนวณจากสารละลาย HCl ที่ใช้ในการไทเทรตสารละลายชุดที่สาม กับปริมาณหมู่ฟังก์ชัน carboxylic acid จากข้อ 4.5
- 4.7 ปริมาณหมู่ฟังก์ชัน phenolic คำนวณจากผลต่างของปริมาณหมู่ฟังก์ชันกรดรวม จากข้อ 4.4 กับปริมาณหมู่ฟังก์ชัน carboxylic acid และ lactic
- 4.8 ปริมาณหมู่ฟังก์ชันเบสรวม คำนวณจากปริมาณสารละลาย NaOH ที่ใช้ในการไทเทรตสารละลายชุดที่สี่

3.3.4 การดูดซับไอน้ำด้วยถ่านกัมมันต์

1. การดูดซับไอน้ำ ได้ทำการวิเคราะห์โดยใช้เครื่อง Intelligent Gravimetric Analyzer (IGA) ซึ่งเป็นเครื่องมือที่ใช้วัดไอโซเทอรั่มการดูดซับแก๊สหรือไอด้วยหลักการการชั่งน้ำหนัก และทำงานแบบอัตโนมัติโดยผ่านการควบคุมจากคอมพิวเตอร์ ซึ่งมีแผนผังดังรูปที่ 3.10
2. ถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ จะมีปริมาณเท่ากับ 0.1 กรัม โดยใส่ในที่ใส่สารตัวอย่างของเครื่อง IGA
3. ขั้นตอนแรกของการวิเคราะห์ คือการไล่สิ่งเจือปนที่มีอยู่ในถ่านกัมมันต์ ด้วยกระบวนการ Degas ที่อุณหภูมิ 250°C ภายใต้สภาวะสุญญากาศ เป็นเวลาอย่างน้อย 5 ชั่วโมง
4. ช่วงความดันสัมพัทธ์ที่ศึกษาไอโซเทอรั่มมีค่าเท่ากับ 0.0-0.94 และอุณหภูมิการดูดซับที่ศึกษาในงานวิจัยนี้คือ 30°C



รูปที่ 3.10 แผนผังเครื่อง Intelligent Gravimetric Analyzer (IGA)

บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ในเบื้องต้นมุ่งศึกษาการปรับปรุงสมบัติเคมีพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากไม้ยูคาลิปตัสโดยวิธีกระตุ้นทางเคมีด้วยกรดฟอสฟอริก แต่เนื่องจากโครงการได้รับอนุมัติในช่วงปีแรกเท่านั้น ในรายงานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาเฉพาะในส่วนของเตรียมถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัสโดยวิธีกระตุ้นทางเคมีด้วยกรดฟอสฟอริก โดยศึกษาสภาวะการเตรียมได้แก่ อุณหภูมิคาร์บอนไนซ์ อัตราส่วนสารเคมีต่อวัตถุดิบ และ เวลาการแช่สารเคมี ต่อสมบัติถ่านกัมมันต์ และการดูดซับไอน้ำด้วยถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ โดยเปรียบเทียบลักษณะไอโซเทิร์มของการดูดซับไอน้ำบนถ่านกัมมันต์ที่มีค่าปริมาณหมู่ฟังก์ชันและค่าพื้นที่ผิวและลักษณะความพรุนที่แตกต่างกัน ผลการวิจัยสรุปได้ดังนี้

1. ไม้ยูคาลิปตัสมีสมบัติพื้นฐานที่ดีสำหรับใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตถ่านกัมมันต์คือมีปริมาณคาร์บอนคงตัวสูง และปริมาณเถ้าต่ำ จัดอยู่ในประเภทไม้เนื้อแข็ง และมีช่วงการสลายตัวเชิงความร้อนหลัก อยู่ในช่วงอุณหภูมิ 280-380°C ซึ่งในช่วงอุณหภูมินี้ น้ำหนักหายไปประมาณร้อยละ 55 สอดคล้องกับร้อยละผลผลิตที่ได้ซึ่งอยู่ในช่วง 41-49

2. การเตรียมถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัสโดยวิธีกระตุ้นทางเคมีด้วยกรดฟอสฟอริก โดยใช้สภาวะอุณหภูมิคาร์บอนไนซ์ 300-600°C อัตราส่วนสารเคมีต่อวัตถุดิบ 0.5-2 และเวลาการแช่สารเคมี 0.5-2 ชั่วโมง พบว่าสภาวะการเตรียมที่ได้พื้นที่ผิวสูงสุดและปริมาณหมู่ฟังก์ชันมากที่สุด ได้แก่ อุณหภูมิคาร์บอนไนซ์ 400°C อัตราส่วนสารเคมีต่อวัตถุดิบ 1.5:1 และเวลาในการแช่สารเคมี 1.5 ชั่วโมง

3. การเพิ่มขึ้นของค่าสภาวะที่ใช้ในการเตรียมถ่านกัมมันต์ทั้งสามตัวแปร ได้แก่ อุณหภูมิคาร์บอนไนซ์ อัตราส่วนสารเคมีต่อวัตถุดิบ และเวลาการแช่สารเคมี ส่งผลต่อสมบัติถ่านกัมมันต์ที่ได้เป็นไปในลักษณะแนวโน้มเดียวกันคือ สมบัติความพรุนเช่นพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนมีค่าเพิ่มขึ้น

4. การนำถ่านกัมมันต์ที่มีปริมาณหมู่ฟังก์ชันและพื้นที่ผิวและลักษณะความพรุนแตกต่างกันไป ทดสอบการดูดซับไอน้ำ พบว่าการดูดซับไอน้ำของถ่านกัมมันต์ทั้งสองชนิดแสดงลักษณะไอโซเทิร์มแบบ Type III ถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวและปริมาณหมู่ฟังก์ชันกรดมากกว่าดูดซับไอน้ำได้น้อยกว่าในช่วงความดันสัมพัทธ์ไอน้ำน้อยกว่า 0.5 แต่เมื่อความดันไอน้ำเพิ่มขึ้นกว่านี้ ถ่านกัมมันต์ชนิดนี้สามารถดูดซับไอน้ำได้เพิ่มมากขึ้นตามค่าความดันที่สูงขึ้น ซึ่งต่างกับถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวและปริมาณหมู่ฟังก์ชันกรดน้อยกว่า พบว่าการดูดซับไอน้ำมีแนวโน้มคงที่

5. จากกลไกการดูดซับไอน้ำทำให้พบว่าที่ความดันไอน้ำต่ำความหนาแน่นของการกระจายหมู่ฟังก์ชันกรดบนพื้นผิวถ่านกัมมันต์เป็นตัวแปรสำคัญต่อการดูดซับไอน้ำ โดยถ้ามีความหนาแน่นอยู่มากจะทำให้ดูดซับไอน้ำได้มากและเร็วกว่า แต่ที่ความดันไอน้ำสูง ค่าพื้นที่ผิวและลักษณะความพรุน

ของถ่านกัมมันต์เป็นตัวแปรที่สำคัญ โดยถ่านที่มีพื้นที่ผิวมากกว่าและรูพรุนขนาดใหญ่กว่าจะมีปริมาณการดูดซับไอน้ำได้มากกว่า

ข้อเสนอแนะ

1. ควรนำถ่านกัมมันต์ที่เตรียมโดยวิธีกระตุ้นทางเคมีที่ได้จากงานวิจัยนี้ไปศึกษาการปรับสภาพเคมีพื้นผิวของถ่านกัมมันต์เพื่อเพิ่มชนิดและปริมาณของหมู่ฟังก์ชันซึ่งจะทำให้พื้นผิวถ่านกัมมันต์มีความเป็นขั้วมากขึ้น เพื่อให้สามารถนำถ่านกัมมันต์ไปใช้ในการดูดซับสารต่าง ๆ ที่มีความเป็นขั้วได้อย่างหลากหลายยิ่งขึ้น

2. ควรศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์โดยวิธีกระตุ้นทางกายภาพ โดยใช้ ไออน้ำ หรือ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ เพื่อศึกษาถึงกลไกการพัฒนาารูพรุนของถ่านกัมมันต์จากวิธีการกระตุ้นทางกายภาพ เนื่องจากมีสมบัติรูพรุนและเคมีพื้นผิวที่แตกต่างจากถ่านกัมมันต์ที่เตรียมโดยวิธีกระตุ้นทางเคมีของงานวิจัยนี้ และปรับสภาพสภาพเคมีพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ เพื่อผลิตถ่านกัมมันต์มีสมบัติต่าง ๆ ได้ตามที่ต้องการ ทั้งนี้เพื่อเปรียบเทียบกับผลวิจัยที่ได้ในข้อเสนอแนะที่ 1 ซึ่งจะนำไปสู่การผลิตถ่านกัมมันต์ที่มีคุณภาพดีและตรงกับการใช้งานมากที่สุด

3. จากงานวิจัยนี้ทำให้ทราบว่า ไม้ยูคาลิปตัสมีศักยภาพสูงในการนำมาผลิตถ่านกัมมันต์ที่มีคุณภาพดี จึงควรมีการศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์และปรับสภาพเคมีพื้นผิวในระบบต่อเนื่อง เช่น ระบบเบดเคลื่อนที่หรือระบบฟลูอิดไคซ์เบด เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการศึกษาการผลิตถ่านกัมมันต์ในระดับอุตสาหกรรมต่อไป

บรรณานุกรม

1. The Customs Department, Ministry of Finance. 2005. Import/Export Statistics (Online). Available from: www.customs.go.th/Statistic/Statistic_Index.jsp
2. Freedonia Group. 2006. New global industry forecast to 2010 & 2015: World activated carbon (Online). Available from: http://freedonia.ecnext.com/coms2/summary_0285-335109_ITM
3. Yang R. T. (2003). Adsorbents Fundamentals and Applications. John Wiley & Sons: USA.
4. Bansal R. C., Donnet J. B. and Stoeckli F. (1998). Active Carbon. Marcel Dekker Inc: New York.
5. Jagtoyen M., Derbyshire F. (1988). Activated carbons from yellow poplar and white oak by H_3PO_4 activation. Carbon. 36. 1085-1097.
6. Benaddi H., et al. (2000). Surface functionality and porosity of activated carbons obtained from chemical activation of wood. Carbon. 38. 669-674.
7. Lee W. H. and Reucroft P. J. (1999). Vapor adsorption on coal- and wood-based chemically activated carbons (I) Surface oxidation states and adsorption of H_2O . Carbon. 37. 7-14.
8. Salame I. I. and Bandosz T. J. (2001). Surface chemistry of activated carbons: Combining the results of Temperature programmed desorption, Boehm, and Potentiometric titrations. Journal of Colloid and Interface Science. 240. 252-258.
9. Considine R., Denoyel R., Pendleton P., Schumann R. and Wong S. H. (2001). The influence of surface chemistry on activated carbon adsorption of 2-methylisoborneol from aqueous solution. Colloids and Surfaces A. 179. 271-280.
10. Wu S. H. and Pendleton P. (2001). Adsorption of anionic surfactant by activated carbon: Effect of surface chemistry, ionic strength, and hydrophobicity. Journal of Colloid and Interface Science. 243. 306-315.
11. Cordero T., et al. (2002). Influence of surface composition and pore structure on Cr(III) adsorption onto activated carbons. Industrial & Engineering Chemistry Research. 41. 6042-6048.
12. El-Sayed Y. and Bandosz T. J. (2004). Adsorption of valeric acid from aqueous solution onto activated carbons: Role of surface basic sites. Journal of Colloid and Interface science. 273. 64-72.

13. Marsh H. (2001). Activated carbon compendium. Elsevier Science: Amsterdam.
14. Bandosz T. J., et al. (2003). Molecular models of porous carbons. In Radovic L.R. (ed.). Chemistry and Physics of Carbon. 28. 41-228.
15. Brunauer S., Deming L. S., Deming W. E. and Teller E. (1940). On a theory of the van der Waals adsorption of gases. J. Amer. Chem. Soc. 62. 1723-1732.
16. Foley N. J., Thomas K. M., Forshaw P. L., Stanton D. and Norman P. R. (1997). Kinetics of water vapor adsorption on activated carbon. Langmuir 13. 2083-2089.
17. Do D. D. and Do H. D. (2000). A model for water adsorption in activated carbon. Carbon. 38. 767-773.
18. Brennan J. K., Bandosz T. J., Thomson K. T., Gubbins K. E. (2001). Review: water in porous carbons. Colloids Surf. A. 187-188. 539-568.
19. Puri B. R. (1966). Chemisorbed oxygen evolved as carbon dioxide and its influence on surface reactivity of carbons. Carbon. 4. 391-400.
20. McCallum C. L., Bandosz T. J., McGrother S. C., Muller E. A. and Gubbins K. E. (1999). A molecular model for adsorption of water on activated carbon: comparison of simulation and experiment. Langmuir. 15. 533-544.
21. Muller E. A. and Gubbins K. E. (1998). Molecular simulation study of hydrophilic and hydrophobic behavior of activated carbon surfaces. Carbon. 36. 1433-1438.
22. Muller E. A., Rull L. F., Vega L. F. and Gubbins K. E. (1996). Adsorption of water on activated carbons: a molecular simulation study. J. Phys. Chem. 100. 1189-1196.
23. Dubinin M. M. and Serpinsky V. V. (1981). Isotherm equation for water vapor adsorption by microporous carbonaceous adsorbents. Carbon. 19. 402-403.
24. Kaneko K. (2000). Specific intermolecular structure of gases confined in carbon nanospace. Carbon. 38. 287-303.
25. Iiyama T., Ruike M. and Kaneko K. (2000). Structural mechanism of water adsorption in hydrophobic micropores from situ small angle X-ray scattering. Chemical Physics letters. 331. 359-364.
26. Vernersson T., Bonelli P. R., Cerrella E. G. and Cukierman A. L. (2002). Arundo donax cane as a Precursor for Activated Carbons Preparation by Phosphoric Acid Activation. Bioresource Technology. 83. 95-104.

27. Gomez-Serrano V., Cuerda-Correa E. M., Fernandez-Gonzalez M. C., Alexandre-Franco M. F. and Macias-Garcia A. (2005). Preparation of Activated Carbon from Chesnut Wood by Phosphoric Acid-Chemical Activation. Materials Letters. 59. 846-853.
28. Guo Y. and Rockstraw D. A. (2007). Physicochemical properties of carbons prepared from pecan shell by phosphoric acid activation. Bioresource Technology. 98. 1513-1521.
29. Budinova T., et al. (2006). Characterization and application of activated carbon produced by H₃PO₄ and water vapor activation. Fuel Processing Technology. 87. 899-905.
30. Lee B. G. and Rowell R. M. (2004). Removal of heavy metal ions from aqueous solutions using lignocellulosic fibers. Journal of Natural Fibers. 1. 97-108.
31. Jimenez L, Garcia J. C., Perez I., Ariza J. and Lopez F. (2001). Acetone pulping of wheat straw: Influence of the cooking and beating conditions on the resulting paper sheets. Industrial and Engineering Chemistry Research. 40. 6201-6206.
32. Boehm H. P. (2002). Surface oxides on carbon and their analysis: a critical assessment. Carbon. 40. 145-149.
33. Daud W. M. A. W. and Ali W. S. W. (2004). Comparison on pore development of activated carbon produced from palm shell and coconut shell. Bioresource Technology. 93. 63-69.
34. Chang C. F., Chang C. Y., and Tsai W. T. (2000). Effects of burn-off and activation temperature on preparation of activated carbon from corn cob agrowaste by CO₂ and steam. J. Colloid Interface Sci. 232. 45-49.
35. Lua A. C. and Guo J. (2000). Activated carbon prepared from oil palm stone by one-step CO₂ activation for gaseous pollutant removal. Carbon. 38. 1089-1097.
36. Siamtree. 2003. Known (Online). Available from: <http://www.siamtree.com/known.htm>
37. Colman J. 2001. Acacia-Wattle (Online). Available from: <http://www.janinesgarden.com/plants/A/acacia.html>
38. Toles C. A., Marshall W. E. and Johns M. M. (1999). Surface functional groups on acid-activated nutshell carbons. Carbon. 37. 1207-1214.
39. Mowla D., Do D. D. and Kaneko K. (2003). Adsorption of water vapor on activated carbon: A brief overview. In Radovic L.R. (ed.). Chemistry and Physics of Carbon. 28. 229-262.
40. Salame I. I. and Bandosz T. J. (1999). Experimental study of water adsorption on activated carbons. Langmuir. 15. 587-593.

41. Rouquerol F., Rouquerol J. and Sing K. (1999). Adsorption by powder and porous solids: Principles, methodology and applications. Academic Press: London.
42. Miyawaki J., Kanda T. and Kaneko K. (2001). Hysteresis-associated pressure-shift-induced water adsorption in carbon micropores. Langmuir. 17. 664-669.

ภาคผนวก ก
ประวัตินักวิจัย

ประวัติหัวหน้าโครงการวิจัยและผู้ร่วมวิจัย

1. ประวัติหัวหน้าโครงการวิจัย

นางมาลี ตั้งสถิตย์กุลชัย (Malee Tangsathitkulchai)

ตำแหน่งปัจจุบัน

รองศาสตราจารย์ ประจำสาขาวิชาเคมี

สำนักวิชาวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ประวัติการศึกษา

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

สาขาวิชาที่มีความชำนาญพิเศษ

- เทคโนโลยีถ่านหิน
- ถ่านกัมมันต์และการดูดซับ

ประสบการณ์งานวิจัย

งานวิจัยที่ทำเสร็จแล้ว

- (1) Reactions at Noble Metal/Ceramic Interfaces
(ผู้ร่วมวิจัย, พ.ศ. 2520-2523)
- (2) Fundamental Studies of the Mechanisms of Slag Deposit Formation
(ผู้ร่วมวิจัย, พ.ศ. 2525-2529)

- (3) Sintering and Slag Deposit Formation of Thai Lignite Ashes
(ผู้ร่วมวิจัย, พ.ศ. 2534-2537)
- (4) กระบวนการซินเทอริงของถ่านหินภายใต้สภาวะการเผาไหม้แบบฟลูอิด ไคซ์เบด
(ผู้ร่วมวิจัย, ทุนอุดหนุนการวิจัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปี 2540-2542)
- (5) การผลิตถ่านกัมมันต์จากถ่านหินลิกไนท์
(ผู้ร่วมวิจัย, ทุนอุดหนุนการวิจัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 2541-2542)
- (6) การผลิตถ่านกัมมันต์จากถ่านหินลิกไนท์โดยวิธีกระตุ้นทางเคมี
(ผู้ร่วมวิจัย, ทุนอุดหนุนการวิจัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 2543-2544)
- (7) การเตรียมถ่านกัมมันต์จากวัสดุชีวมวลและการวัดสมบัติโครงสร้างรูพรุน
(ผู้ร่วมวิจัย, ทุนอุดหนุนการวิจัยปี 2545-2546 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี)

งานวิจัยที่กำลังดำเนินการ

- (1) การปรับปรุงสภาพเคมีพื้นผิวของถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัสเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับ
(หัวหน้าโครงการวิจัย, ทุนอุดหนุนการวิจัยจากกองทุนสนับสนุนการวิจัย

และ

- พัฒนา ปี 2551 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี)
- (2) การพัฒนาการย่อยสลายไหมด้วยสารสกัดจากแก่นฝาง
(หัวหน้าโครงการวิจัย, ทุนอุดหนุนการวิจัยปี 2550 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี)

ผลงานวิจัยที่ตีพิมพ์

มีผลงานวิจัยเกี่ยวกับการใช้ประโยชน์ถ่านหิน กระบวนการซินเทอริงและพลังงานรวม
40 เรื่อง (ดังเอกสารแนบ)

บทความวิจัย (รศ.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, 20-24 Oct, 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, 7-8 Jun, 1994.
10. Tangsathitkulchai, M. and Tangsathitkulchai, C., "Sintering of Coal Ashes: Effects of Temperature and Atmosphere", 4th National Chemical Engineering Conference, Khon Kaen University, 20-21 Oct, 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, 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, 16-21 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, 17-18 Dec, 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, 22-24 Nov, 1999.
16. Tangsathitkulchai, C. and Tangsathitkulchai, M., "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.
17. Tangsathitkulchai, C., Sittichaitaweekul, Y., and Tangsathitkulchai, M., "Temperature Effect on the Viscosities of Palm Oil and Coconut Oil Blended with Diesel Oil", J. Am. Oil Chemists' Soc., 81, 401-405, 2004.
18. Junpirom, S., Tangsathitkulchai, C., and Tangsathitkulchai, M., "Activated Carbon from Longan Seed by Carbon Dioxide Activation", Proceedings of the Regional Symposium on Chemical Engineering (RSCE2004), Bangkok, Thailand, 1-3 Dec, 2004.
19. Junpirom, S., Do, D.D., Tangsathitkulchai, C., and Tangsathitkulchai, M., "A Carbon Activation Model with Application to Longan seed Char Gasification", Carbon, 43, 1936-1943, 2005.
20. Ngernyen, Y., Tangsathitkulchai, C., and Tangsathitkulchai, M., "The Modification of Acidic Surface Functionality of Wood-Based Activated Carbon", International Carbon Conference (Carbon 2005), Hilton Hotel, Gyeongju, Korea, 3-7 Jul, 2005.
21. Luangkiattikhum, P., Tangsathitkulchai, C., and Tangsathitkulchai, M., "Porous Characteristics of Activated Carbon Produced from Oil-Palm Solid Wastes by Carbon Dioxide Activation", International Carbon Conference (Carbon 2005), Hilton Hotel, Gyeongju, Korea, 3-7 Jul, 2005.
22. Junpirom, S., Tangsathitkulchai, C., and Tangsathitkulchai, M., "Water Adsorption Equilibrium of Longan Seed Activated Carbons", International Congress of Chemistry and Environment, Indore, India, 24-26 Dec, 2005.

23. Ngernyen, Y., Tangsathitkulchai, C., and Tangsathitkulchai, M., "Porous properties of Activated Carbon Produced from Eucalyptus and Wattle wood by Carbon dioxide Activation", *The Korean Journal of Chemical Engineering*, 23, 1046-1054, 2006.
24. Punsuwan, N., Tangsathitkulchai, C., and Tangsathitkulchai, M., "Chemically Activated Carbon from Bagasse and the Removal of Chromium from Aqueous Solution with Activated Carbon" (in Thai), *Suranaree Journal of Science and Technology*, 13, 143-158, 2006.
25. Jiwalak, N., Tangsathitkulchai, C., and Tangsathitkulchai, M., "Activated Carbon from Lignite Coal by Chemical Activation with Potassium Hydroxide" (in Thai), *Suranaree Journal of Science and Technology*, 13, 207-218, 2006.
26. Junpirom, S., Tangsathitkulchai, C., and Tangsathitkulchai, M., "Carbonization Temperature Effect on the Porous properties of Physically Activated Carbon from Longan Seed", *International Carbon Conference (CARBON2006)*, Aberdeen, Scotland, 16-21 July, 2006.
27. Luangkiattikhun, P., Ngernyen, Y., Junpirom, S., Tangsathitkulchai, C., and Tangsathitkulchai, M., "A Char Gasification Model for Predicting the Porous properties of Activated Carbons", *Proceedings of the Regional Symposium on Chemical Engineering (RSCE2006)*, Singapore, 3-5 Dec, 2006.
28. Ngernyen, Y., Tangsathitkulchai, C., and Tangsathitkulchai, M., "Water Vapor Adsorption on Wood-based Activated Carbon", *Proceedings of the Regional Symposium on Chemical Engineering (RSCE2006)*, Singapore, 3-5 Dec, 2006.
29. Weerachanchai, P., Tangsathitkulchai, C., and Tangsathitkulchai, M., "Characteristics of bio-oil from biomass pyrolysis", *The Conference on Energy Technology Network of Thailand (E-NETT)*, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, 27 July, 2006.
30. Wongsooksin, K., Rattanaphani, S., Tangsathitkulchai, M., Rattanaphani, V., Tangsathitkulchai, C., and Bremner, J.B., "Spectroscopic investigation of complexes of sappanwood dyes with alum", 4th PSU Symposium on graduate research, Prince of Songkla University, Songkla, 31 March, 2006.
31. Junpirom, S., Tangsathitkulchai, C., and Tangsathitkulchai, M., "Preparation of Activated Carbons from Longan Seed by Physical and Chemical Methods" (in Thai), *Suranaree Journal of Science and Technology*, 14, 63-76, 2007.
32. Ngernyen, Y., Tangsathitkulchai, C., Khaoya, S., Intasa-ard, W., and Tangsathitkulchai, M., "Effect of Surface Functional Groups on Water Vapor Adsorption of Eucalyptus Wood-based Activated Carbon", *Suranaree Journal of Science and Technology*, 14, 9-23, 2007.

33. Weerachanchai, P., Tangsathitkulchai, C., and Tangsathitkulchai, M., "Fuel Properties and Chemical Compositions of Bio-oils from Biomass Pyrolysis", JSAE/SAE International Fuels and Lubricants Meeting, Japan, 23-27 July, 2007.
34. Wongsooksin, K., Rattanaphani, S., Tangsathitkulchai, M., Rattanaphani, V., and Bremner, J.B., "Aluminium ion complexing with the plant dye brazilin: A UV-VIS spectroscopy study", 33rd Congress on Science and Technology of Thailand (STT33), Walailuk University, Nakhon Sri Thammarat, 18-20 Oct, 2007.
35. Luangkiattikhun, P., Tangsathitkulchai, C., and Tangsathitkulchai, M., "Non-isothermal Thermogravimetric Analysis of Oil-palm Solid Wastes", Bioresource Technology, 99, 986-997, 2008.
36. Junpirom, S., Tangsathitkulchai, C., Tangsathitkulchai, M., and Ngernyen, Y., "Water Adsorption in Activated Carbons with Different Burn-off and Its Analysis using a Cluster Model", The Korean Journal of Chemical Engineering, 25, 2008.
37. Wongsooksin, K., Rattanaphani, S., Tangsathitkulchai, M., Rattanaphani, V., and Bremner, J.B., "Study of an AL(III) complex with the plant dye Brazilein from *Ceasalpinia sappan* Linn", Suranaree Journal of Science and Technology, in press, 2008.
38. Tangsathitkulchai, M., Ngernyen, Y., and Tangsathitkulchai, C., "Incorporation of oxygen functional groups on activated carbon surfaces by air and nitric oxidation", 2nd EuChems Chemistry Congress, Torino, Italy, 16-20 Sep, 2008.
39. Tangsathitkulchai, C., Ngernyen, Y., and Tangsathitkulchai, M., "Adsorption of heavy metal ions on surface-modified activated carbon", 2nd EuChems Chemistry Congress, Torino, Italy, 16-20 Sep, 2008.
40. Wongsooksin, K., Tangsathitkulchai, M., Rattanaphani, S., Rattanaphani, V., and Tangsathitkulchai, C., "Treatment of dye effluent using activated carbons with different surface chemistries", 2nd EuChems Chemistry Congress, Torino, Italy, 16-20 Sep, 2008.

2. ประวัติผู้ร่วมงานวิจัย

นายชัยยศ ตั้งสถิตย์กุลชัย (Chaiyot Tangsathitkulchai)

ตำแหน่งปัจจุบัน รองศาสตราจารย์สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี
 สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์
 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ประวัติการศึกษา

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

สาขาวิชาที่มีความชำนาญพิเศษ

- เทคโนโลยีถ่านหิน
- การบดย่อยวัสดุ
- ถ่านกัมมันต์และการดูดซับ

ผลงานวิจัยที่ตีพิมพ์

มีผลงานวิจัยด้านถ่านหินและเทคโนโลยีอนุภาค รวม 66 เรื่อง (ดังเอกสารแนบ)

ประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

งานวิจัยที่ทำเสร็จแล้ว

ชื่อเรื่อง	แหล่งทุน	ปีที่ทำเสร็จ	สถานภาพ
1. Improved Producer Gas Cleaning System	USAID	2533	ผู้ร่วมวิจัย
2. การพัฒนาระบบฟลูอิดไดซ์เบดหมุนเวียน	สภาวิจัยแห่งชาติ	2535	หัวหน้าโครงการ
3. ระบบผลิตพลังงานความร้อนจากแกลบข้าว	สภาวิจัยแห่งชาติ	2537	ผู้ร่วมวิจัย
4. การพัฒนาหม้อกำเนิดไอน้ำฟลูอิดไดซ์เบดสำหรับอุตสาหกรรมขนาดเล็ก	ASEAN-Australian Energy Program	2537	ผู้ร่วมวิจัย
5. การจำแนกเถ้าลอยลิกไนต์ที่เหมาะสมจากแม่เมาะเพื่อใช้ในงานคอนกรีต	การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย	2541	ผู้ร่วมวิจัย
6. กระบวนการซินเทอริงของเถ้าถ่านหินภายใต้สภาวะการเผาไหม้แบบฟลูอิดไดซ์เบด	ทุนอุดหนุนการวิจัยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี	2542	หัวหน้าโครงการ
7. การผลิตถ่านกัมมันต์จากถ่านหินลิกไนท์	ทุนอุดหนุนการวิจัยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี	2542	หัวหน้าโครงการ
8. การผลิตถ่านกัมมันต์จากถ่านหินลิกไนท์โดยวิธีกระตุ้นทางเคมี	ทุนอุดหนุนการวิจัยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี	2544	หัวหน้าโครงการ
9. คุณสมบัติทางเชื้อเพลิงและทางเคมีของน้ำมันปาล์ม	สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)	2546	หัวหน้าโครงการ

ชื่อเรื่อง	แหล่งทุน	ปีที่ทำเสร็จ	สถานภาพ
10. การผลิตถ่านกัมมันต์จากถ่านหิน ลิกไนต์ด้วยวิธีกระตุ้นทางเคมี	ทุนอุดหนุนการวิจัย มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีสุรนารี	2543-2544	หัวหน้าโครงการ
11. การเตรียมถ่านกัมมันต์จากวัสดุ ชีวมวลและการวัดสมบัติโครงสร้าง รูพรุน	ทุนอุดหนุนการวิจัย มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีสุรนารี	2545-2546	หัวหน้าโครงการ
12. สมดุลย์และจลนพลศาสตร์การ ดูดซับของถ่านกัมมันต์ที่เตรียม จากเมล็ดลำไย	ทุนโครงการปริญญา เอกกาญจนาภิเษก รุ่นที่ 3	2543-2547	หัวหน้าโครงการ
13. การเตรียมและวัดสมบัติของ ถ่านกัมมันต์จากกะลาและเส้น ใยปาล์มน้ำมัน	ทุนโครงการปริญญา เอกกาญจนาภิเษก รุ่นที่ 4	2544-2548	หัวหน้าโครงการ
14. การปรับสภาพพื้นผิวของถ่าน กัมมันต์จากไม้ไผ่โตเร็ว	ทุนโครงการปริญญา เอกกาญจนาภิเษก รุ่นที่ 5	2545-2549	หัวหน้าโครงการ

งานวิจัยที่กำลังดำเนินการ

เรื่อง	แหล่งทุน	ระยะเวลา	สถานภาพ
1. กระบวนการไพโรไลซิสของ วัสดุชีวมวล	ทุนโครงการปริญญาเอก กาญจนาภิเษก รุ่นที่ 6	2546-2550	หัวหน้าโครงการ
2. วัสดุแก้วพรุนจากเถ้าลอยลิกไนต์	ทุนโครงการปริญญาเอก กาญจนาภิเษก รุ่นที่ 7	2547-2551	หัวหน้าโครงการ

บทความวิจัย (รศ.ดร.ชัยยศ ตั้งสธิตย์กุลชัย)

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, vol.10, No.1, 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 Dec, 1987.
5. C. Tangsathitkulchai, "Fluidized - Bed Cooling Tower", Proceedings of the Regional Symposium on Petrochemical Technology' 87, Chulalongkorn University Bangkok, Thailand, 14-17 Dec, 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 ตั้งสถิตย์กุลชัย, บทความวิชาการ เรื่อง "ปัญหาหมอกควันจากการใช้ถ่านหินและการป้องกัน", วารสารเทคโนโลยี สจร., 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, 25 -26 Jun, 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 9, 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 9, 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.
- n12
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., 20-21 Oct, 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, USA, 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, พุธร เกตุกราย, สมิตร ส่งพิริยะกิจ, พิชัย นิमितยงสกุล, ปริญา จินดาประเสริฐ, ชัยยศ ตั้งสถิตย์กุลชัย, 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. Tangsatitkulchai and M. Tangsatitkulchai, "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. Tangsatitkulchai and M. Tangsatitkulchai, "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. Tangsatitkulchai, "Acceleration of Particle Breakage Rates in Wet Batch Ball Milling", *Powder Technology*, 124, 67-75, 2002.
40. C. Tangsatitkulchai, "The Effect of Slurry Rheology on Fine Grinding in a Laboratory Ball Mill", *International Journal of Mineral Processing*, 69, 29-47, 2003.
41. C. Tangsatitkulchai, "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. Tangsatitkulchai, Y. Sittichaitaweekul and M. Tangsatitkulchai, "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. Tangsatitkulchai, "The Effect of Medium Viscosity on Breakage Parameters of Quartz in a Laboratory Ball Mill", *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 43, 2104-2112, 2004.
44. S. Junpirom, C. Tangsatitkulchai, and M. Tangsatitkulchai, "Activated Carbon from Longan Seed by Carbon Dioxide Activation", paper presented at the *Regional Symposium on Chemical Engineering (RSCE2004)*, Grand Hotel, Bangkok, 1-3 Dec, 2004.
45. S. Junpirom, D. D. Do, C. Tangsatitkulchai, and M. Tangsatitkulchai, "A Carbon Activation Model with Application to Longan Seed Char Gasification", *Carbon*, 43, 1936-1943, 2005.
46. Y. Ngernyen, C. Tangsatitkulchai, and M. Tangsatitkulchai, "The Modification of Acidic Surface Functionality of Wood-Based Activated Carbon", *International Carbon Conference (CARBON2005)*, Hilton Hotel, Gyeongju, Korea, 3-7 Jul, 2005.

47. P. Luangkiattikhum, C. Tangsathitkulchai, and M. Tangsathitkulchai, "Porous Characteristics of Activated Carbon Produced from Oil-Palm Solid Wastes by Carbon Dioxide Activation", International Carbon Conference (CARBON2005), Hilton Hotel, Gyeongju, Korea, 3-7 Jul, 2005.
48. S. Junpirom, C. Tangsathitkulchai, and M. Tangsathitkulchai, "Water Adsorption Equilibrium of Longan Seed Activated Carbons", International Congress of Chemistry and Environment, Indore, India, 24-26 Dec, 2005.
49. S. Kruaysawat and C. Tangsathitkulchai, "Increasing Adsorption Efficiency of Activated Carbon for H₂S Removal by Surface Oxidation and Metal Addition", The 16th International Conference on Quantitative Methods for the Environmental Sciences, Friendship Hotel, Beijing, China, 21-26 Aug, 2005.
50. Y. Ngernyen, C. Tangsathitkulchai, and M. Tangsathitkulchai, "Porous properties of Activated Carbon Produced from Eucalyptus and Wattle wood by Carbon dioxide Activation", The Korean Journal of Chemical Engineering, 23, 1046-1054, 2006.
51. N. Punsuwan, C. Tangsathitkulchai, and M. Tangsathitkulchai, "Chemically Activated Carbon from Bagasse and the Removal of Chromium from Aqueous Solution with Activated Carbon" (in Thai), Suranaree Journal of Science and Technology, 13, 143-158, 2006.
52. N. Jiwalak, C. Tangsathitkulchai, and M. Tangsathitkulchai, "Activated Carbon from Lignite Coal by Chemical Activation with Potassium Hydroxide" (in Thai), Suranaree Journal of Science and Technology, 13, 207-218, 2006.
53. S. Junpirom, C. Tangsathitkulchai, and M. Tangsathitkulchai, "Carbonization Temperature Effect on the Porous properties of Physically Activated Carbon from Longan Seed", International Carbon Conference (CARBON2006), Aberdeen, Scotland, 16-21 July, 2006.
54. P. Luangkiattikhun, Y. Ngernyen, S. Junpirom, C. Tangsathitkulchai, and M. Tangsathitkulchai, "A Char Gasification Model for Predicting the Porous properties of Activated Carbons", Proceedings of the Regional Symposium on Chemical Engineering (RSCE2006), Singapore, 3-5 Dec, 2006.
55. Y. Ngernyen, C. Tangsathitkulchai, and M. Tangsathitkulchai, "Water Vapor Adsorption on Wood-based Activated Carbon", Proceedings of the Regional Symposium on Chemical Engineering (RSCE2006), Singapore, 3-5 Dec, 2006.

56. P. Weerachanchai, C. Tangsathitkulchai, and M. Tangsathitkulchai, "Characteristics of bio-oil from biomass pyrolysis", The Conference on Energy Technology Network of Thailand (E-NETT), Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, 27 July, 2006.
57. K. Wongsooksin, S. Rattanaphani, M. Tangsathitkulchai, V. Rattanaphani, C. Tangsathitkulchai, and J.B. Bremner, "Spectroscopic investigation of complexes of sappanwood dyes with alum", 4th PSU Symposium on graduate research, Prince of Songkla University, Songkla, 31 March, 2006.
58. Y. Ngernyen, C. Tangsathitkulchai, S. Khaoya, W. Intasa-ard, and M. Tangsathitkulchai, "Effect of Surface Functional Groups on Water Vapor Adsorption of Eucalyptus Wood-based Activated Carbon", Suranaree Journal of Science and Technology, 14, 9-23, 2007.
59. S. Junpirom, C. Tangsathitkulchai, and M. Tangsathitkulchai, "Preparation of Activated Carbons from Longan Seed by Physical and Chemical Methods" (in Thai), Suranaree Journal of Science and Technology, 14, 63-76, 2007.
60. P. Weerachanchai, C. Tangsathitkulchai, and M. Tangsathitkulchai, "Fuel Properties and Chemical Compositions of Bio-oils from Biomass Pyrolysis", JSAE/SAE International Fuels and Lubricants Meeting, Japan, 23-27 July, 2007.
61. P. Luangkiattikhun, C. Tangsathitkulchai, and M. Tangsathitkulchai, "Non-isothermal Thermogravimetric Analysis of Oil-palm Solid Wastes", Bioresource Technology, 99, 986-997, 2008.
62. S. Junpirom, C. Tangsathitkulchai, M. Tangsathitkulchai, and Y. Ngernyen, "Water Adsorption in Activated Carbons with Different Burn-off and Its Analysis using a Cluster Model", The Korean Journal of Chemical Engineering, 25, 2008.
63. P. Weerachanchai, M. Horio, and C. Tangsathitkulchai, "Effects of gasifying conditions and bed materials on fluidized bed steam gasification of wood biomass", Bioresource Technology, in press, 2008.
64. C. Tangsathitkulchai, Y. Ngernyen, and M. Tangsathitkulchai, "Adsorption of heavy metal ions on surface-modified activated carbon", 2nd EuChems Chemistry Congress, Torino, Italy, 16-20 Sep, 2008.
65. M. Tangsathitkulchai, Y. Ngernyen, and C. Tangsathitkulchai, "Incorporation of oxygen functional groups on activated carbon surfaces by air and nitric oxidation", 2nd EuChems Chemistry Congress, Torino, Italy, 16-20 Sep, 2008.

66. K. Wongsooksin, M. Tangsathitkulchai, S. Rattanaphani, V. Rattanaphani, and C. Tangsathitkulchai, "Treatment of dye effluent using activated carbons with different surface chemistries", 2nd EuChemS Chemistry Congress, Torino, Italy, 16-20 Sep, 2008.

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

ผลการทดลองในงานวิจัยการเตรียมถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัส โดยการกระตุ้นทางเคมีด้วยกรดฟอสฟอริกได้นำมาเรียบเรียงตามลำดับดังนี้ ในส่วนแรกจะแสดงผลวิเคราะห์องค์ประกอบแบบประมาณ องค์ประกอบเซลลูโลส การสลายตัวทางความร้อนและความชื้นของไม้ยูคาลิปตัส ส่วนหัวข้อต่อมา แสดงผลของตัวแปรในการเตรียม ได้แก่ อุณหภูมิคาร์บอนไนซ์ อัตราส่วนสารเคมีต่อวัตถุดิบ และ เวลาการแช่สารเคมี ต่อสมบัติถ่านกัมมันต์ และในส่วนสุดท้ายแสดงผลการดูดซับไอน้ำด้วยถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ โดยเปรียบเทียบลักษณะไอโซเทิร์มของการดูดซับไอน้ำบนถ่านกัมมันต์ที่มีค่าพื้นที่ผิวน้อยที่สุดและมากที่สุด

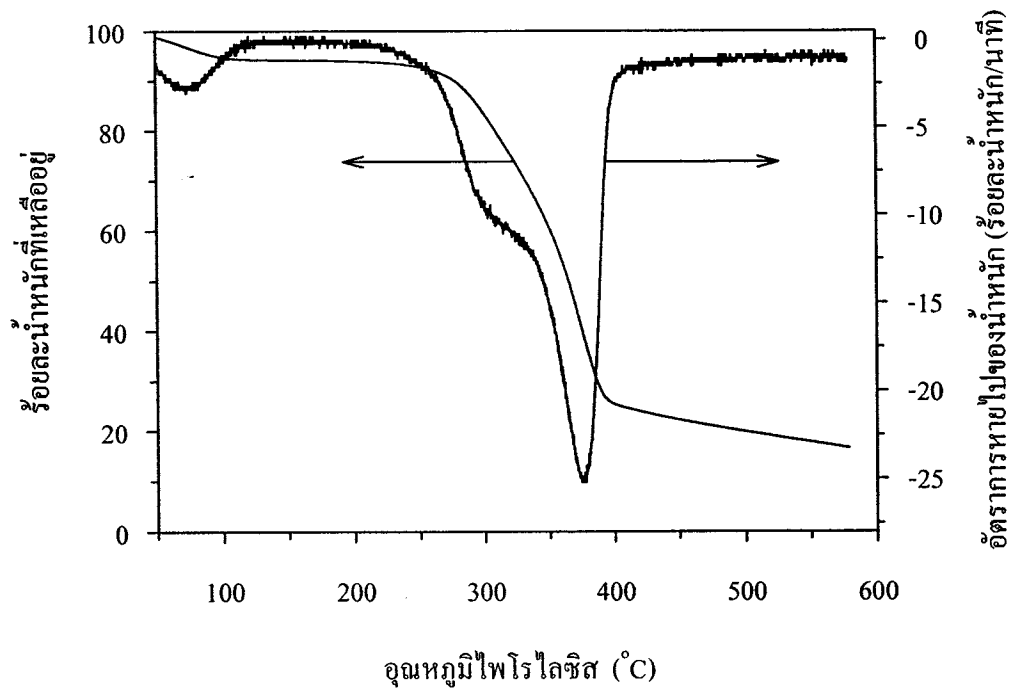
4.1 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบแบบประมาณ องค์ประกอบเซลลูโลส และการสลายตัวทางความร้อนของไม้ยูคาลิปตัส

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบแบบประมาณ และ องค์ประกอบเซลลูโลส ของ ไม้ยูคาลิปตัส แสดงในตาราง ที่ 4.1 พบว่า มีปริมาณคาร์บอนคงตัว เท่ากับร้อยละ 18.3 พบว่าเป็นตัวเลขที่ใกล้เคียงกับวัสดุชีวมวลชนิดอื่นๆ ที่ได้มีการศึกษามาแล้วว่า สามารถนำมาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์คุณภาพดี เช่น กะลามะพร้าว (มีปริมาณคาร์บอนคงตัว 18.6%)⁽³³⁾ ช้างข้าวโพด (มีปริมาณคาร์บอนคงตัว 16.1%)⁽³⁴⁾ และ เปลือกผลปาล์มน้ำมัน (มีปริมาณคาร์บอนคงตัว 16.4%)⁽³⁵⁾ เป็นต้น นอกจากนี้ ไม้ยูคาลิปตัสยังมีองค์ประกอบเถ้าในปริมาณน้อย ประมาณ 1.2% ซึ่งถือได้ว่าไม้ยูคาลิปตัสมีสมบัติที่เหมาะสมในการนำมาเป็นวัตถุดิบสำหรับผลิตถ่านกัมมันต์ กล่าวคือ มีปริมาณคาร์บอนคงตัวสูง และปริมาณเถ้าต่ำ จากผลวิเคราะห์องค์ประกอบเซลลูโลสของไม้ยูคาลิปตัส พบว่า มีปริมาณเซลลูโลสอยู่ 57.3% เฮมิเซลลูโลส 16.8% และ ลิกนิน 25.9% ซึ่งไม้ชนิดนี้จัดเป็นประเภทไม้เนื้อแข็ง⁽³⁶⁻³⁷⁾

ผลการวิเคราะห์การสลายตัวเชิงความร้อนหรือการไพโรไลซิสของไม้ยูคาลิปตัสโดยใช้เครื่อง Thermogravimetric Analyzer (TGA) แสดงในรูปที่ 4.1 ซึ่งแสดงค่าในรูปของร้อยละน้ำหนักที่เหลืออยู่ (TGA) และอัตราการหายไปของน้ำหนัก (DTG) พบว่ามีช่วงการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักที่เห็นได้ชัดอยู่ สองช่วงคือ ในช่วงแรก 60-110°C น้ำหนักหายไปประมาณร้อยละ 5 ซึ่งเป็นการระเหยของน้ำที่ถูกดูดซับเป็นความชื้นอยู่ในวัสดุ ในช่วงที่สอง เกิดการเปลี่ยนแปลงสองขั้นต่อเนื่องกัน ในขั้นตอนแรกคือช่วงอุณหภูมิ 280-320°C น้ำหนักหายไปประมาณร้อยละ 25 ซึ่งคาดว่าเป็นผลมาจากการสลายตัวของเฮมิเซลลูโลส ส่วนขั้นตอนที่ 2 อยู่ในช่วงอุณหภูมิ 370-380°C น้ำหนักหายไปประมาณร้อยละ 30 ซึ่งคาดว่าเป็นผลมาจากการสลายตัวของเซลลูโลสในไม้ยูคาลิปตัส

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบแบบประมาณ และองค์ประกอบเซลล์โลส ของไม้ยูคาลิปตัส

	ปริมาณร้อยละโดยน้ำหนัก
องค์ประกอบแบบประมาณ	
- คาร์บอนคงตัว	18.3
- สารระเหย	76.4
- เถ้า	1.2
- ความชื้น	4.1
องค์ประกอบเซลล์โลส	
- เซลล์โลส	57.3
- เฮมิเซลล์โลส	16.8
- ลิกนิน	25.9



รูปที่ 4.1 ร้อยละน้ำหนักที่เหลืออยู่และอัตราการหายไปของน้ำหนัก ในระหว่างการไพโรไลซิส
ไม้ยูคาลิปตัส

4.2 การเตรียมถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัสโดยการกระตุ้นทางเคมีด้วยกรดฟอสฟอริก

4.2.1 ผลของอุณหภูมิการบอในเซชัน

ลักษณะพื้นผิวจากภาพถ่าย SEM ของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากไม้ยูคาลิปตัสโดยการกระตุ้นทางเคมีด้วยกรดฟอสฟอริก แสดงในรูปที่ 4.2 ซึ่งตัวอย่างถ่านกัมมันต์นี้เตรียมที่สภาวะอุณหภูมิการบอในเซชัน 400°C อัตราส่วนสารเคมีต่อวัตถุดิบ 0.5:1 และเวลาการแช่สารเคมี 1 ชั่วโมง สังเกตได้ว่าพื้นผิวมีรูพรุนกระจายอยู่เป็นจำนวนมาก

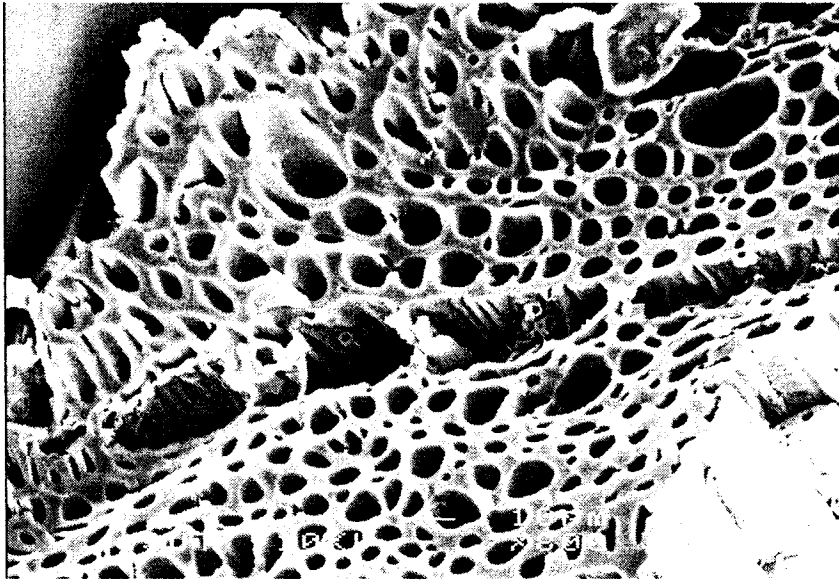
ผลของอุณหภูมิการบอในเซชัน ได้ทำการศึกษาที่ 300, 400, 500, และ 600°C โดยควบคุมสภาวะอื่นๆ ให้คงที่ดังนี้ อัตราส่วนสารเคมีต่อวัตถุดิบ 1:1 เวลาการแช่สารเคมี 1 ชั่วโมง และเวลาการบอในเซชัน 1 ชั่วโมง ผลของตัวแปรนี้ต่อสมบัติต่างๆของถ่านกัมมันต์ แสดงดังตารางที่ 4.2 คำร้อยละผลผลิตของถ่านกัมมันต์ ซึ่งเป็นผลมาจากสภาวะอุณหภูมิการบอในเซชันต่างกันแสดงในรูปที่ 4.3 สรุปโดยภาพรวมคือ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นทำให้คำร้อยละผลผลิตลดลง แต่จะสังเกตได้ว่าการลดลงในแต่ละช่วงอุณหภูมินั้นแตกต่างกัน คือในช่วง 300-400°C (ผลต่างช่วงอุณหภูมิ 100°C) ผลผลิตลดลง 3.8% แต่ในช่วง 400-600°C (ผลต่างช่วงอุณหภูมิ 200°C) ผลผลิตลดลง 3.9% ซึ่งลักษณะการลดลงของร้อยละผลผลิตตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นนี้ มีลักษณะเดียวกันกับผลของการศึกษาการสลายตัวเชิงความร้อนในหัวข้อที่ 4.1 คือในช่วง 300-400°C จะมีการลดลงของน้ำหนักมากที่สุด แต่เมื่อเปรียบเทียบคำร้อยละผลผลิตถ่านกัมมันต์ในตารางที่ 4.2 กับคำร้อยละผลผลิตของกระบวนการไพโรไลซิส (ในรูปที่ 4.1) พบว่าร้อยละผลผลิตถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ (300-600°C) มีค่าเฉลี่ยประมาณ 45% ซึ่งมีค่ามากกว่าคำร้อยละผลผลิตของกระบวนการในไพโรไลซิสซึ่งมีค่าประมาณ 20% แสดงว่ากรดฟอสฟอริกที่ผสมกับวัตถุดิบ จะต้องมีการเกิดปฏิกิริยากับวัตถุดิบและเปลี่ยนแปลงโครงสร้างวัตถุดิบให้มีความคงทนต่ออุณหภูมิมากขึ้น การสลายตัวจึงเกิดได้น้อยลง (ร้อยละผลผลิตมากขึ้น)

ไอโซเทิร์มการดูดซับไนโตรเจนของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากการศึกษาผลของตัวแปรอุณหภูมิการบอในเซชัน แสดงในรูปที่ 4.4 พบว่าเมื่อ อุณหภูมิเพิ่มจาก 300 เป็น 400°C ปริมาณการดูดซับเพิ่มมากขึ้น แต่เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นกว่านี้ ปริมาณการดูดซับมีแนวโน้มลดลง รูปร่างของไอโซเทิร์มทั้งหมดเป็นแบบที่ 1 (Type I) ซึ่งชี้ให้เห็นว่า ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้จากสภาวะเหล่านี้ มีโครงสร้างส่วนใหญ่เป็นรูพรุนขนาดเล็ก

จากผลการศึกษาซึ่งแสดงในรูปที่ 4.5 พบว่าเมื่ออุณหภูมิการบอในเซชันเพิ่มขึ้นจาก 300°C เป็น 400°C ถ่านกัมมันต์มีสมบัติพื้นผิว ทั้งพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนทุกขนาดมีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ และมีค่าสูงสุดที่ 400°C แต่เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นเป็น 500°C สมบัติพื้นผิวมีแนวโน้มลดลงอย่างชัดเจน จากนั้นในช่วงอุณหภูมิ 500°C-600°C สมบัติพื้นผิวยังมีแนวโน้มลดลง ยกเว้นปริมาตรรูพรุนขนาดเล็กมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย จากการทดลองนี้ชี้ให้เห็นว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการกระตุ้น

ทางเคมีโดยใช้กรดฟอสฟอริก จะไม่สูงมากนัก อยู่ที่อุณหภูมิ 400°C ซึ่งจะให้อ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนมากที่สุด

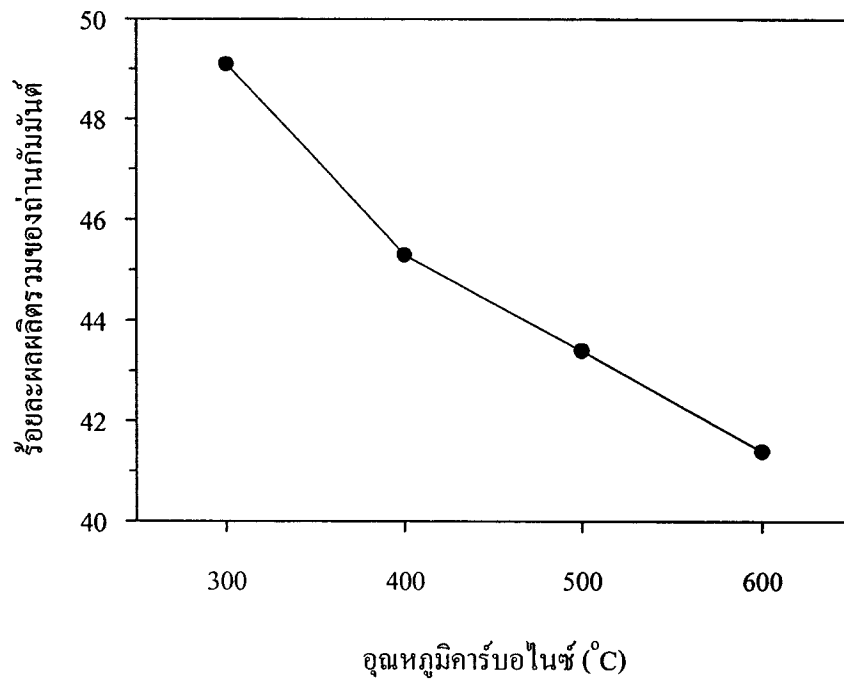
การอธิบายการพัฒนาารูพรุนในอานกัมมันต์ ที่เตรียมจากการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก นั้น ได้มีการอธิบายกลไกโดย Jagtoyen และ Derbyshire⁽⁵⁾ ซึ่งได้มีการเสนอว่า ปฏิกิริยาระหว่างไม้และกรดฟอสฟอริกนั้น เกิดขึ้นตั้งแต่สารตั้งต้นทั้งสองชนิดได้ผสมกัน โดยในช่วงอุณหภูมิ 50-200°C กรดฟอสฟอริกจะทำหน้าที่เหมือนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ทำให้พันธะที่เชื่อมโยงโครงสร้างในไม้ แยกออกจากกัน โดยกรดจะเข้าไปทำปฏิกิริยากับโครงสร้างที่ไม่แข็งแรงและไม่เป็นระเบียบก่อน เช่นเฮมิเซลลูโลสและลิกนิน ต่อจากนั้นจึงเข้าไปสลายพันธะของโครงสร้างที่เป็นผลึกแข็งแรง เช่นเซลลูโลส ในช่วงอุณหภูมิ 200-450°C โดยกรดฟอสฟอริกจะเข้าไปรวมกับส่วนย่อยของโครงสร้างพอลิเมอร์ (biopolymer fragment) ได้เป็นโครงสร้างใหม่ที่เชื่อมต่อกันเช่น ฟอสเฟต และโพลีฟอสเฟตเอสเทอร์ เป็นต้น การเกิดขึ้นของโครงสร้างฟอสเฟตเหล่านี้จากปฏิกิริยาระหว่างเซลลูโลสและกรดฟอสฟอริกมีกลไกดังแสดงในรูปที่ 4.6 จะเห็นว่ากรดฟอสฟอริกจะแทรกเข้าไปในสายโซ่ของโครงสร้างเซลลูโลส โดยการแยกที่ตำแหน่งของพันธะไฮโดรเจน ทำให้โครงสร้างมีการขยายออก เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นกรดฟอสฟอริกเกิดกระบวนการโพลีเมอไรเซชันได้เป็นโพลีฟอสเฟต จากนั้น โพลีฟอสเฟตนี้ก็เข้าไปแทรกในโครงสร้างเซลลูโลส ทำให้โครงสร้างเกิดการขยายตัวมากขึ้น ซึ่งการที่โครงสร้างมีการขยายมากขึ้นนี้ หลังจากที่ล้างกรดออกในขั้นตอนสุดท้ายของการเตรียมอานกัมมันต์ โครงสร้างที่ถูกขยายออกจะกลายเป็นโครงสร้างรูพรุนในอานกัมมันต์ นอกจากนี้กระบวนการที่คาร์บอนเกิดการสลายตัวเชิงความร้อน ออกมาเป็น แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ และพวกแก๊สไฮโดรคาร์บอนที่น้ำหนักโมเลกุลน้อย เช่น มีเทน ซึ่งกระบวนการนี้ก็เป็นส่วนหนึ่งที่ทำให้เกิดโครงสร้างรูพรุนได้ ดังนั้นจากผลการทดลองซึ่งพบว่าที่อุณหภูมิ 300°C ได้ให้อานกัมมันต์ที่มีสมบัติพื้นที่ผิวน้อยกว่าที่ อุณหภูมิ 400°C อธิบายได้ว่าที่อุณหภูมิ 300°C กลุ่มสารระเหยบางส่วนยังสลายตัวได้ไม่สมบูรณ์หรือบางส่วนที่สลายออกมาแต่ยังไม่หลุดออกไปอาจไปปิดหรือกั้นขวางรูพรุนไว้ นอกจากนี้การเกิดโครงข่ายของโครงสร้างโพลีฟอสเฟต ซึ่งเป็นกระบวนการสำคัญในการเกิดรูพรุนเป็นปฏิกิริยาเคมีซึ่ง จะเกิดได้มากที่อุณหภูมิสูงขึ้น แต่เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นมากกว่า 450°C โครงข่ายของฟอสเฟตไม่สามารถทนความร้อนได้ ทำให้เกิดการแตกหักหรือพังทลายของพันธะ โครงสร้างเหล่านี้ ดังกลไกที่แสดงในรูปที่ 4.7 จึงส่งผลให้โครงสร้างรูพรุนในอานกัมมันต์ลดลงเมื่ออุณหภูมิการเตรียมสูงขึ้น



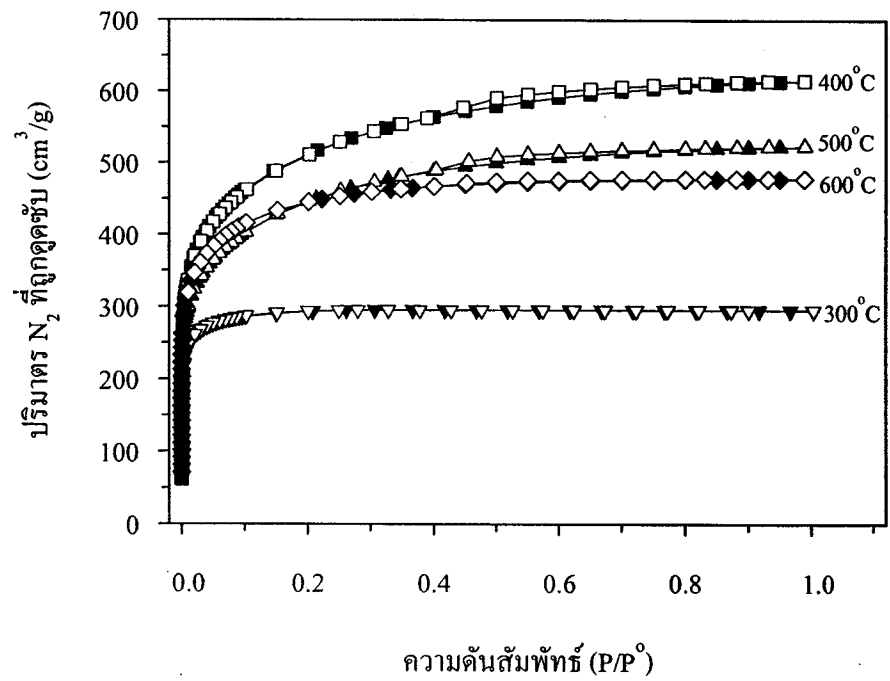
1.2 ภาพถ่าย SEM ที่กำลังขยาย 800 เท่า แสดงลักษณะพื้นผิวถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัส กระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก เตรียมที่สภาวะอุณหภูมิคาร์บอนในเซชัน 400°C อัตราส่วน สารเคมีต่อวัตถุดิบ 0.5:1 เวลาการแช่สารเคมี 1 ชั่วโมง

ตารางที่ 4.2 ผลของอุณหภูมิคาร์บอนไนเซชันต่อสมบัติของถ่านกัมมันต์

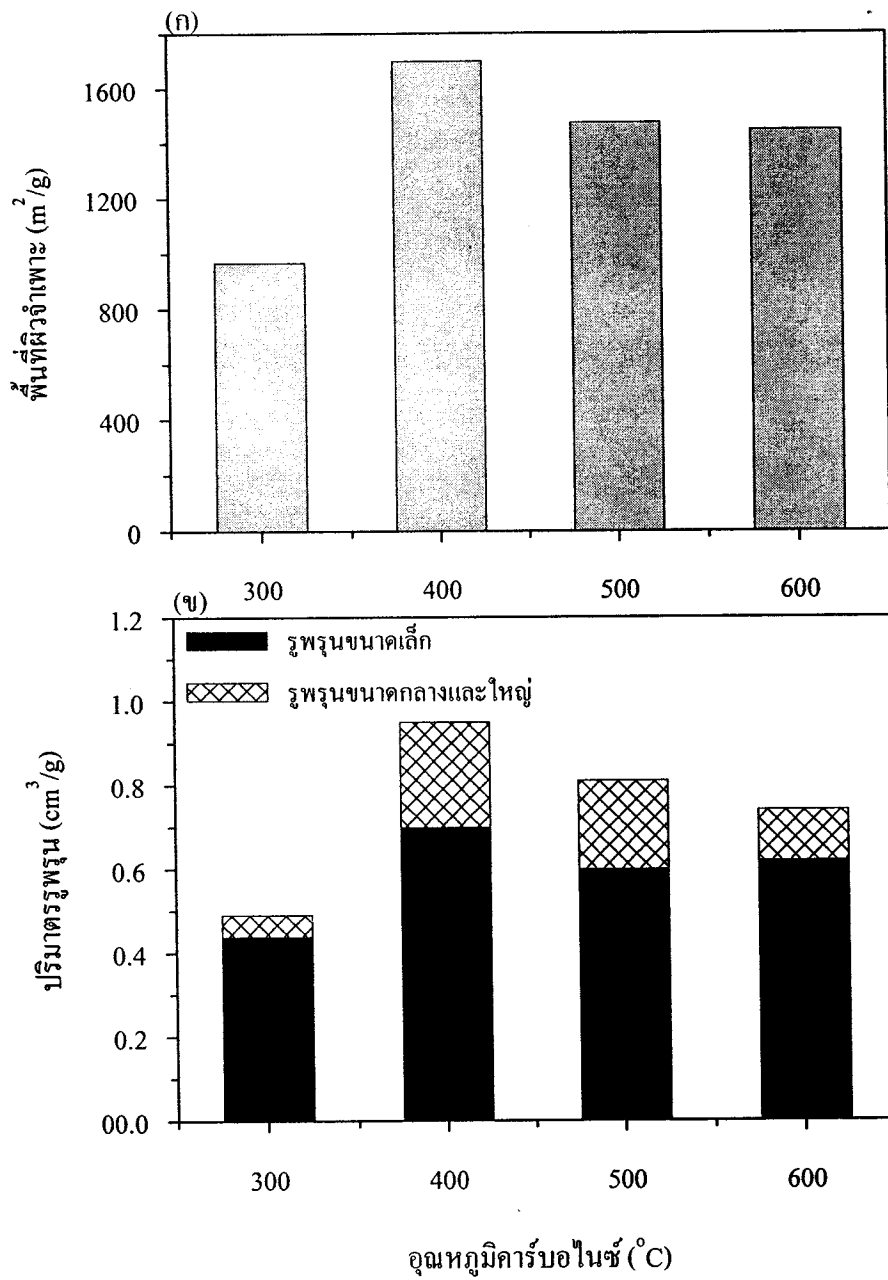
อุณหภูมิคาร์บอนไนซ์ (°C)	ร้อยละผลผลิต รวมถ่านกัมมันต์	พื้นที่ผิว (m ² /g)	ปริมาตรรูพรุน (cm ³ /g)		
			ขนาดเล็ก (< 2 nm)	ขนาดกลางและ ใหญ่ (> 2 nm)	รวม
300	49.1	967	0.44 (89.8%)	0.05	0.49
400	45.3	1699	0.70 (73.3%)	0.25	0.95
500	43.4	1474	0.60 (74.1%)	0.21	0.81
600	41.4	1447	0.62 (83.8%)	0.12	0.74



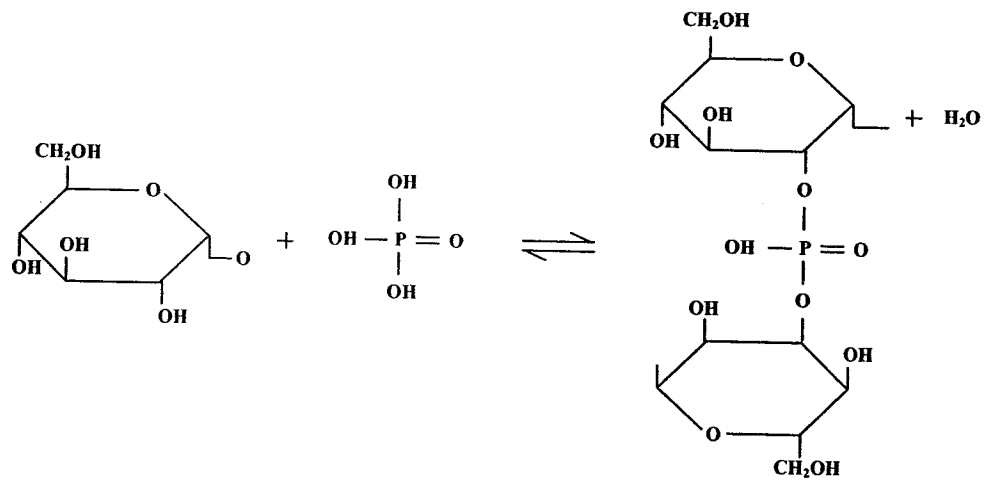
รูปที่ 4.3 ผลของอุณหภูมิการคาร์บอนไนซ์ต่อร้อยละผลผลิตรวมของน้ำมันปาล์ม



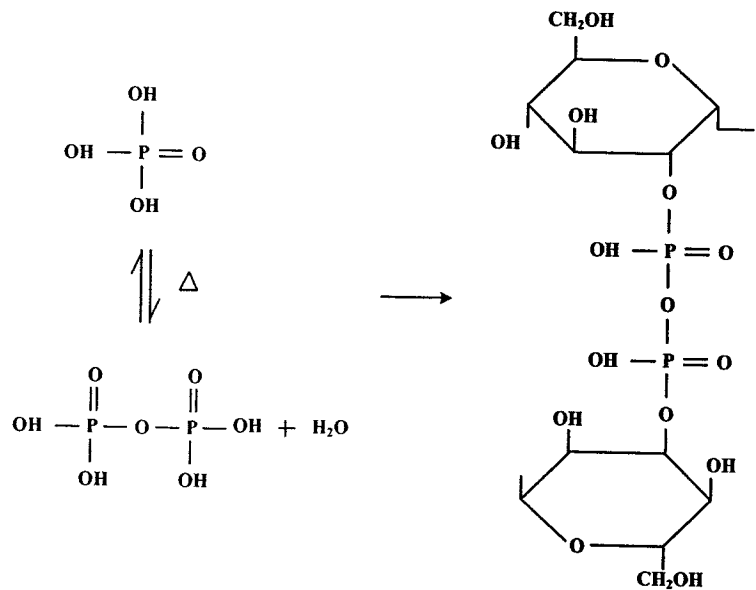
รูปที่ 4.4 ไอโซเทอรั่มการดูดซับแก๊สไนโตรเจนที่อุณหภูมิ $-196^{\circ}C$ ของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากสถานะต่างๆ เพื่อศึกษาผลของ อุณหภูมิการคาร์บอนไนซ์



รูปที่ 4.5 สมบัติความพรุน (ก) พื้นที่ผิว และ (ข) ปริมาตรรูพรุนแบ่งตามขนาดต่างๆของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากสถานะอุณหภูมิคาร์บอนไนซ์แตกต่างกัน

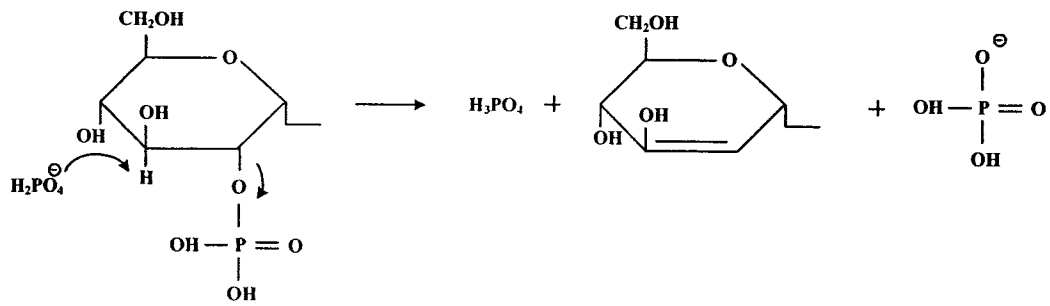


(ก) การเกิดฟอสเฟตเอสเทอร์



(ข) การเกิดโพลีฟอสเฟตเอสเทอร์ ที่อุณหภูมิสูง

รูปที่ 4.6 กลไกการเกิดโครงข่ายฟอสเฟต (ก) เกิดฟอสเฟตเอสเทอร์ (ข) เกิดโพลีฟอสเฟตจากปฏิกิริยาระหว่างเซลล์ูโลสและกรดฟอสฟอริก ที่อุณหภูมิสูง



รูปที่ 4.7 กลไกการแตกหักของโครงข่ายฟอสเฟต ที่อุณหภูมิสูงกว่า 450°C

4.2.2 ผลของอัตราส่วนสารเคมีต่อวัฏดุคิ

จากผลการทดลองในหัวข้อที่ 4.2.1 พบว่าที่อุณหภูมิ 400°C มีการพัฒนาโครงสร้างรูพรุนที่ดีที่สุด จึงได้เลือกสภาวะการเตรียมที่อุณหภูมินี้เพื่อการศึกษาตัวแปรอื่น ๆ ต่อไป ในหัวข้อนี้เป็นการรายงานผลของอัตราส่วนน้ำหนักสารเคมีต่อวัฏดุคิ โดยได้ทำการทดลองในช่วงของอัตราส่วน 0.5:1, 1:1, 1.5:1, และ 2:1 โดยกำหนดสภาวะอื่นๆคงที่ไว้ดังนี้ เวลาการแช่สารเคมีเท่ากับ 1 ชั่วโมง อุณหภูมิคาร์บอนไนซ์ 400°C และเวลาคาร์บอนไนซ์ 1 ชั่วโมง ผลของตัวแปรนี้ต่อสมบัติถ่านกัมมันต์สรุปรวมในตารางที่ 4.3

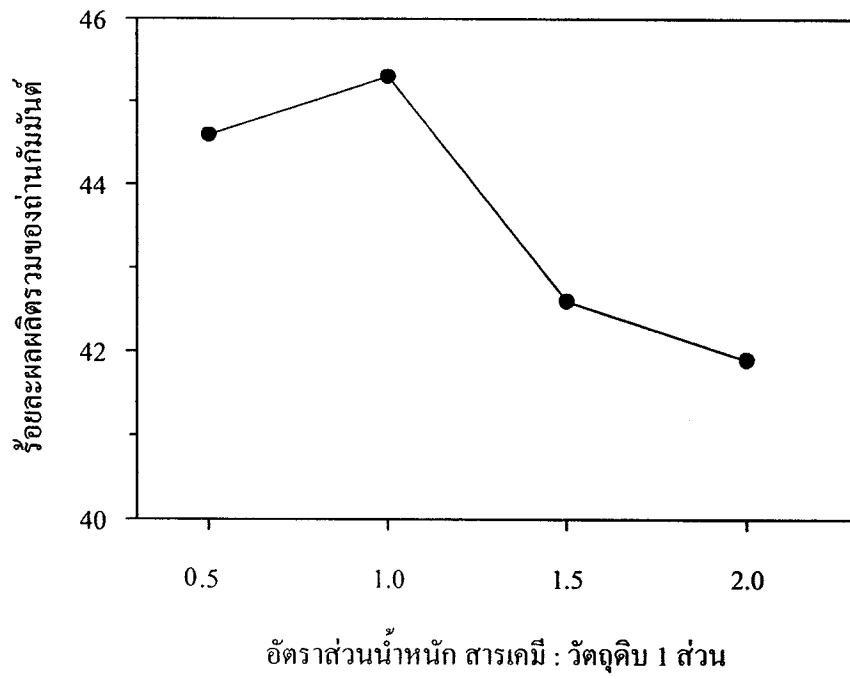
เมื่อแสดงผลของอัตราส่วนน้ำหนักสารเคมีต่อวัฏดุคิ ต่อค่าร้อยละผลผลิตรวมของถ่านกัมมันต์ดังในรูปที่ 4.8 พบว่าการเพิ่มอัตราส่วนสารเคมีต่อวัฏดุคิจาก 0.5:1 เป็น 1:1 มีผลทำให้ร้อยละผลผลิตรวมถ่านกัมมันต์เพิ่มขึ้นเล็กน้อย จากนั้นในช่วงสภาวะอัตราส่วนเพิ่มขึ้นจาก 1:1 ถึง 2:1 ร้อยละผลผลิตรวมมีการลดลงอย่างรวดเร็ว ผลการทดลองนี้แสดงว่า ปริมาณสารเคมีที่เพิ่มขึ้นมีส่วนช่วยให้วัฏดุคิเกิดปฏิกิริยาการพัฒนารูพรุนได้เพิ่มขึ้น ทำให้ร้อยละผลผลิตรวมมีแนวโน้มลดลง ไอโซเทิร์มการดูดซับไนโตรเจนของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จากการศึกษาผลของอัตราส่วนสารเคมีต่อวัฏดุคิแสดงในรูปที่ 4.9 พบว่าปริมาณการดูดซับไนโตรเจนสูงสุดมีค่าเพิ่มมากขึ้นตามอัตราส่วนสารเคมีที่เพิ่มขึ้น โดยที่อัตราส่วน 0.5:1 ให้รูปร่างไอโซเทิร์มการดูดซับ เป็นแบบที่ 1 (Type I) อย่างชัดเจน แต่เมื่ออัตราส่วนสารเคมีเพิ่มขึ้น รูปร่างไอโซเทิร์มเปลี่ยนแปลงไปใกล้เคียงกับแบบที่ 4 (Type IV) คือมีวงฮิสเทอรีซิส (Hysteresis loop) ที่กว้างขึ้น การมีขนาดของวงฮิสเทอรีซิสที่กว้างขึ้น จะสัมพันธ์โดยตรงกับการเพิ่มขึ้นของปริมาณรูพรุนขนาดกลางและใหญ่ในถ่านกัมมันต์ แสดงว่าการใช้อัตราส่วนสารเคมีเท่ากับ 2:1 จะให้รูพรุนขนาดกลางและขนาดใหญ่มากกว่าที่สภาวะอื่นๆ

ผลการทดลอง ในรูปที่ 4.10 (ก) แสดงว่าเมื่อ อัตราส่วนสารเคมีเพิ่มขึ้นในช่วง 0.5:1-1.5:1 พื้นที่ผิวมีค่าเพิ่มมากขึ้น และมีแนวโน้มลดลงเมื่ออัตราส่วนสารเคมีเพิ่มขึ้นเป็น 2:1 ส่วนในรูปที่ 4.10 (ข) ผลรวมของแผนภูมิแท่งหมายถึงปริมาตรรูพรุนรวม ซึ่งพบว่ามีค่าเพิ่มมากขึ้นตามอัตราส่วนสารเคมีตลอดช่วงสภาวะการทดลอง จะสังเกตได้ว่า การที่อัตราส่วน 2:1 มีพื้นที่ผิวจำพวบน้อยกว่าอัตราส่วน 1.5:1 แต่มีปริมาตรรูพรุนรวมมากกว่านั้น เป็นผลมาจากที่อัตราส่วน 2:1 ให้รูพรุนส่วนใหญ่เป็นขนาดกลางและขนาดใหญ่ของมันเอง จากการพิจารณารูปที่ 4.10 (ข) พบว่า ปริมาตรรูพรุนขนาดเล็ก มีแนวโน้มคงที่ในช่วงอัตราส่วน 1:1-1.5:1 จากนั้นลดลง ส่วนปริมาตรรูพรุนขนาดกลางและขนาดใหญ่ มีแนวโน้มคล้ายกับของปริมาตรรูพรุนรวม คือมากที่สุดที่อัตราส่วน 2:1 ลักษณะการพัฒนารูพรุนเมื่ออัตราส่วนสารเคมีเปลี่ยนแปลงไปสามารถอธิบายได้ว่า เมื่อใช้อัตราส่วนสารเคมี 0.5:1 รูพรุนที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่ที่พัฒนาขึ้นเป็นรูพรุนขนาดเล็กเกือบทั้งหมด เมื่อเพิ่มสารเคมีมากขึ้นในช่วงอัตราส่วน 1:1 ถึง 1.5:1 ในช่วงอัตราส่วนนี้มีกลไกการพัฒนารูพรุนอยู่สองกลไก คือการเกิดรู

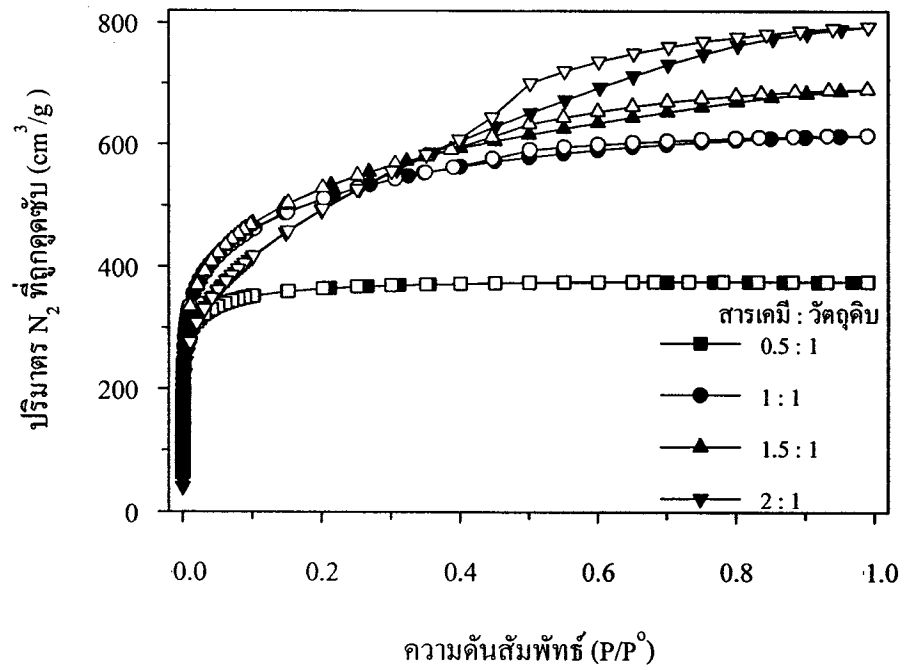
พรุนใหม่ที่เป็นรูพรุนขนาดเล็ก และการพัฒนาของรูพรุนขนาดกลางและใหญ่จากรูพรุนขนาดเล็ก ซึ่งเกิดจากการที่กรดฟอสฟอริกเข้าทำปฏิกิริยาได้มากขึ้นกับเนื้อคาร์บอนที่ผนังของรูพรุนขนาดเล็ก ทำให้รูพรุนขนาดเล็กขยายขนาดเป็นรูพรุนขนาดกลางและใหญ่ตามลำดับ เมื่อใช้สารเคมีที่อัตราส่วน 2:1 กลไกหลักที่สภาวะนี้คือการพัฒนารูพรุนขนาดกลางและขนาดใหญ่ และจากการที่พบได้ในผลการทดลองว่า เมื่อเทียบกับที่สภาวะอัตราส่วน 1.5:1 จะมีค่าพื้นที่ผิวลดลง แต่ปริมาตรรูพรุนรวมยังมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น จึงชี้ให้เห็นว่าการพัฒนารูพรุนขนาดกลางและใหญ่นอกจากจะเกิดจากการขยายของรูพรุนขนาดเล็กดังที่ได้อธิบายไปแล้ว ยังอาจเกิดจากการเชื่อมต่อของรูพรุนขนาดเล็กที่อยู่ชิดกันจากการพังลงของผนังรูพรุนทำให้เกิดรูพรุนขนาดใหญ่เป็นรูพรุนเดี่ยว ซึ่งกลไกนี้จะส่งผลให้ค่าพื้นที่ผิวของรูพรุนไม่เพิ่มขึ้นแต่ปริมาตรรูพรุนรวมยังคงเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4.3 ผลของอัตราส่วนน้ำหนักสารเคมีต่อวัตถุดิบต่อสมบัติของถ่านกัมมันต์

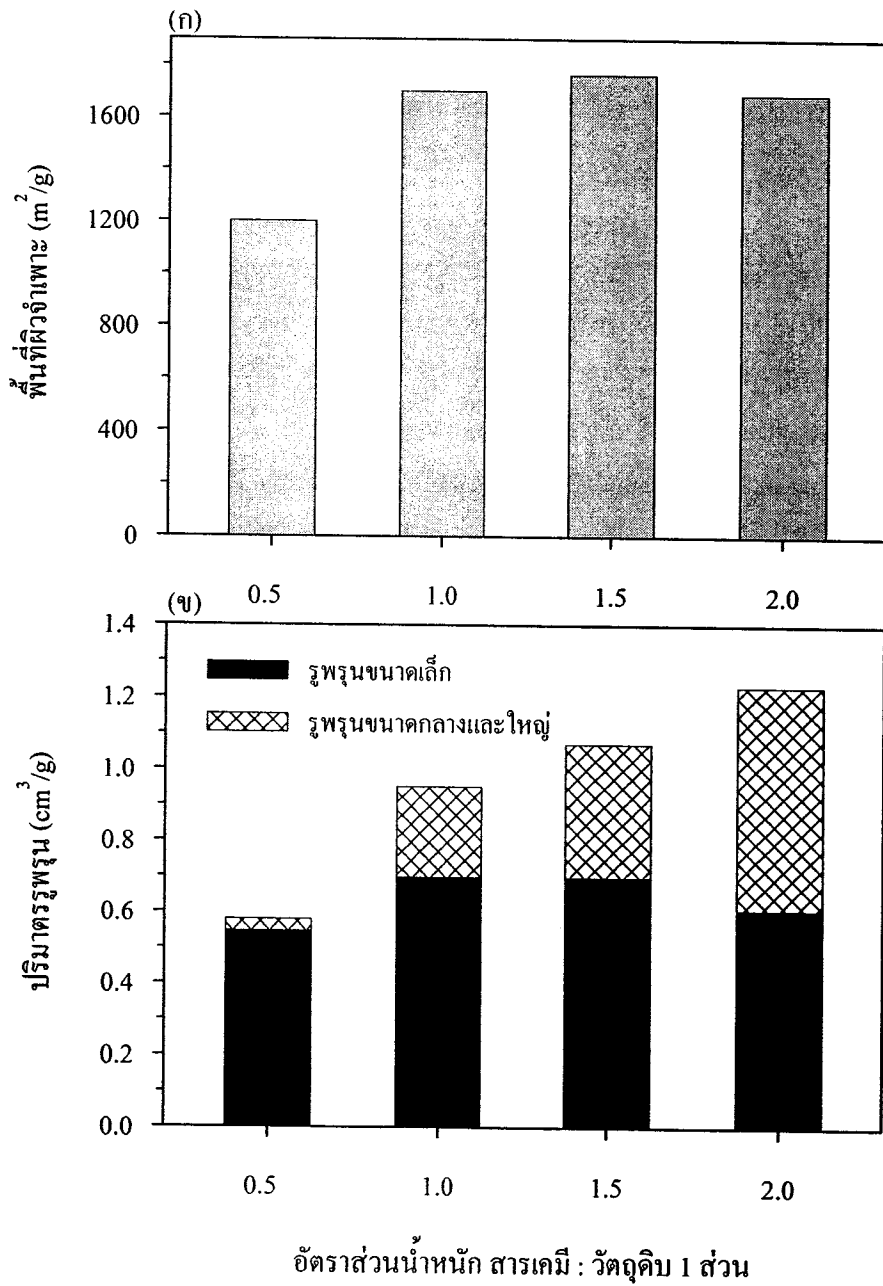
H ₃ PO ₄ : วัตถุดิบ (อัตราส่วนน้ำหนัก)	ร้อยละผลผลิต รวมถ่านกัมมันต์	พื้นที่ผิว (m ² /g)	ปริมาตรรูพรุน (cm ³ /g)		
			ขนาดเล็ก (< 2 nm)	ขนาดกลางและ ใหญ่ (> 2 nm)	รวม
0.5:1	44.6	1200	0.55 (94.8%)	0.03	0.58
1:1	45.3	1699	0.70 (73.7%)	0.25	0.95
1.5:1	42.6	1764	0.70 (65.4%)	0.37	1.07
2:1	41.9	1688	0.61 (49.6%)	0.62	1.23



รูปที่ 4.8 ผลของอัตราส่วนสารเคมีต่อวัสดุคิบต่อร้อยละผลผลิตรวมของถ่านกัมมันต์



รูปที่ 4.9 ไอโซเทอรัมการดูดซับแก๊สไนโตรเจนที่อุณหภูมิ $-196^{\circ}C$ ของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากสภาวะต่างๆ เพื่อศึกษาผลของ อัตราส่วนสารเคมีต่อวัสดุคูป



รูปที่ 4.10 สมบัติความพรุน (ก) พื้นที่ผิว และ (ข) ปริมาตรรูพรุนแบ่งตามขนาดต่างๆของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากสภาวะอัตราส่วนสารเคมีต่อวัสดุคิบแตกต่างกัน

4.2.3 ผลของเวลาการแช่สารเคมี

จากผลการทดลองในหัวข้อที่ผ่านมา พบว่าที่อุณหภูมิ 400°C และอัตราส่วนสารเคมีต่อวัตถุดิบเท่ากับ 1.5:1 ส่งผลให้มีการพัฒนาโครงสร้างรูพรุนที่ดีที่สุด จึงได้เลือกสภาวะที่อุณหภูมินี้เพื่อศึกษาตัวแปรผลของเวลาการแช่สารเคมีในหัวข้อนี้ โดยได้ทดลองที่สภาวะอัตราส่วนสารเคมีต่อวัตถุดิบ 1.5:1 อุณหภูมิคาร์บอนไนซ์ที่ 400°C และเวลาคาร์บอนไนซ์ 1 ชั่วโมง และเวลาการแช่สารเคมีได้ศึกษาในช่วง 0.5, 1, 1.5 และ 2 ชั่วโมง ผลกระทบจากตัวแปรนี้ต่อสมบัติถ่านกัมมันต์ สรุปรวมในตารางที่ 4.4

ผลของเวลาการแช่สารเคมีต่อร้อยละผลผลิตรวมของถ่านกัมมันต์ สามารถพิจารณาได้ชัดเจนยิ่งขึ้น ดังในรูปที่ 4.11 พบว่าเมื่อเวลาการแช่สารมากขึ้น ทำให้เนื้อคาร์บอนเกิดปฏิกิริยาได้มากขึ้นทำให้ค่าร้อยละผลผลิตลดลง ทั้งนี้เหตุผลเนื่องมาจากว่าเมื่อเวลาการแช่วัตถุดิบในสารเคมีนานขึ้น สารเคมีจะสามารถแทรกซึมเข้าไปในโครงสร้างของวัตถุดิบได้มากยิ่งขึ้น ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาได้มากยิ่งขึ้น

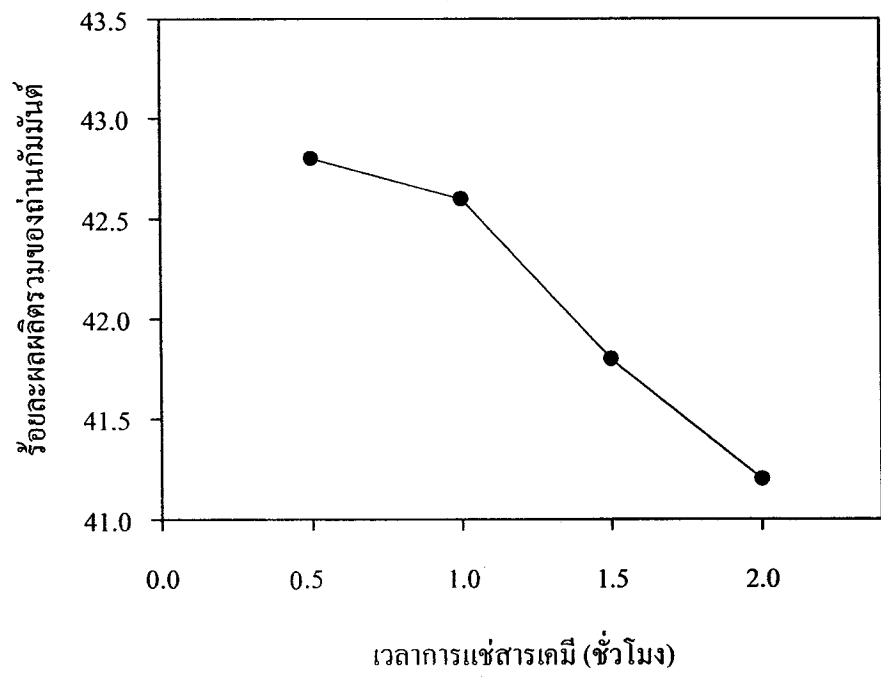
ลักษณะไอโซเทิร์มการดูดซับแก๊สไนโตรเจน ของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากเวลาการแช่สารเคมีต่างกัน เป็นดังรูป 4.12 พบว่า เมื่อแช่สารเคมีนานขึ้นจาก ครึ่งชั่วโมง ไปถึง 1.5 ชั่วโมง ปริมาณการดูดซับไนโตรเจนเพิ่มมากขึ้น และลักษณะเส้นไอโซเทิร์มมีแนวโน้มเปลี่ยนจากแบบ Type I เป็นแบบ Type IV แสดงว่าในช่วงนี้มีการพัฒนาการเกิดขึ้นของรูพรุนขนาดกลางและใหญ่เพิ่มมากขึ้น แต่เมื่อเวลานานขึ้นถึง 2 ชั่วโมง ปริมาณการดูดซับมีแนวโน้มลดลง ซึ่งอาจเกิดจากการยุบตัวของรูพรุนเมื่อใช้เวลาในการแช่สารเคมีนานขึ้น

การพัฒนาโครงสร้างรูพรุนของถ่านกัมมันต์ ซึ่งเป็นผลจากเวลาของการแช่สารเคมี แสดงดังรูปที่ 4.13 พบว่าเมื่อเพิ่มเวลาในการแช่สารเคมีจาก ครึ่งชั่วโมง ถึง 1.5 ชั่วโมง ค่าพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนรวมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามเวลาการแช่ แต่เมื่อแช่นานกว่านี้เป็น 2 ชั่วโมง ค่าพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนรวมลดลง จากผลที่ได้นี้ จะเห็นว่าการพัฒนารูพรุนในเบื้องต้นหรือที่ใช้เวลาการแช่ไม่นานนั้น เป็นการเกิดขึ้นของรูพรุนขนาดเล็กโดยส่วนใหญ่ เมื่อเวลาการแช่นานขึ้น จะช่วยให้มีการพัฒนารูพรุนขนาดกลางและขนาดใหญ่เพิ่มมากขึ้น แต่ถ้าใช้เวลาในการแช่นานเกินไป เช่นที่ 2 ชั่วโมง จะทำให้รูพรุนเกิดการพังทลายหรือยุบลงกลายเป็นรูพรุนขนาดเล็ก

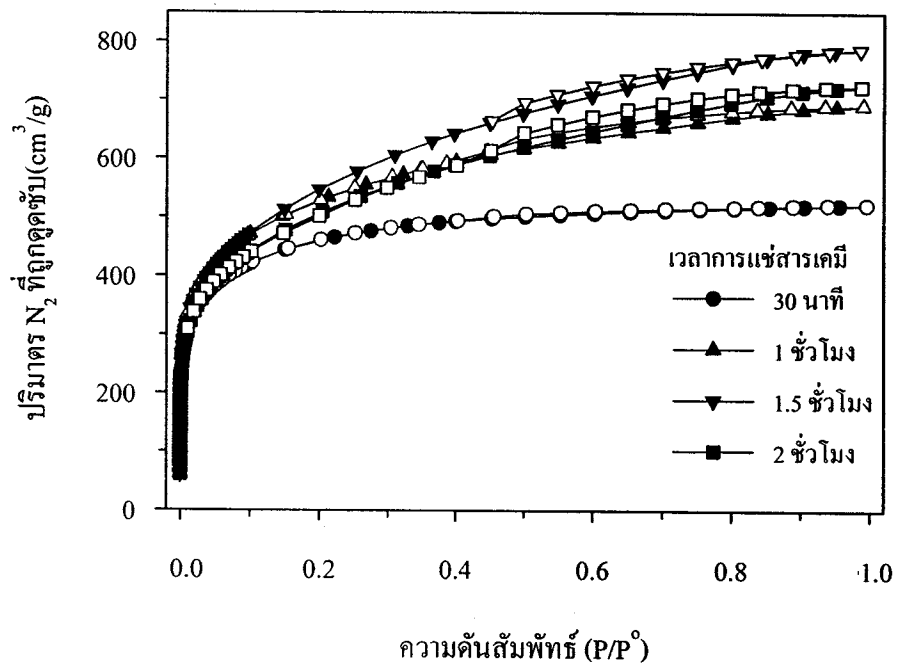
จากผลของอัตราส่วนสารเคมีต่อวัตถุดิบ และเวลาในการแช่สารเคมี จะเห็นว่าทั้งสองตัวแปรส่งผลถึงปริมาณการเข้าทำปฏิกิริยาของสารเคมีในวัตถุดิบ ดังนั้นการที่จะให้กรดฟอสฟอริกเข้าทำปฏิกิริยาได้มากนั้นทำได้จากทั้ง การใส่สารเคมีในปริมาณมาก โดยใช้เวลาการแช่ไม่นาน และอีกทางหนึ่งคือการใช้สารเคมีในปริมาณไม่มากแต่ใช้เวลาในการแช่ที่นานขึ้น

ตารางที่ 4.4 ผลของเวลาการแช่สารเคมีต่อสมบัติของถ่านกัมมันต์

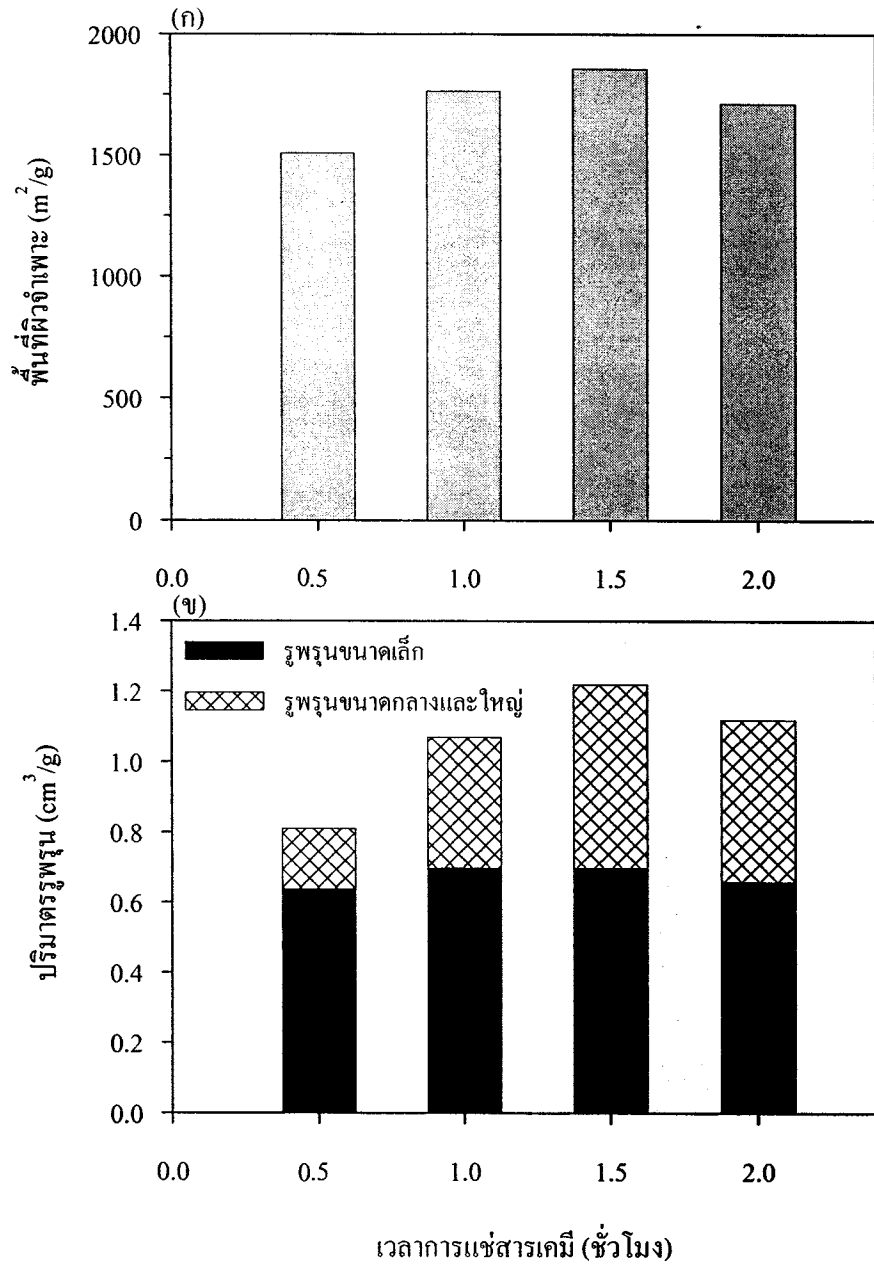
เวลาการแช่ สารเคมี (ชั่วโมง)	ร้อยละผลผลิตรวม ถ่านกัมมันต์	พื้นที่ผิว (m ² /g)	ปริมาตรรูพรุน (cm ³ /g)		
			ขนาดเล็ก (< 2 nm)	ขนาดกลางและ ใหญ่ (> 2 nm)	รวม
0.5	42.8	1508	0.64 (79.0%)	0.17	0.81
1	42.6	1764	0.70 (65.4%)	0.37	1.07
1.5	41.8	1857	0.70 (57.4%)	0.52	1.22
2	41.2	1714	0.66 (58.9%)	0.46	1.12



รูปที่ 4.11 ผลของเวลาการแช่สารเคมีต่อร้อยละผลผลิตรวมของถ่านกัมมันต์



รูปที่ 4.12 ไอโซเทอรั่มการดูดซับแก๊สไนโตรเจนที่อุณหภูมิ $-196^{\circ}C$ ของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากสถานะต่างๆ เพื่อศึกษาผลของเวลาการแช่สารเคมี



รูปที่ 4.13 สมบัติความพรุน (ก) พื้นที่ผิว และ (ข) ปริมาตรรูพรุนแบ่งตามขนาดต่างๆของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากสภาวะเวลาการแช่สารเคมีแตกต่างกัน

4.3 การดูดซับไอน้ำด้วยถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้

เนื่องจากถ่านกัมมันต์ที่เตรียม โดยวิธีกระตุ้นทางเคมี หรือวิธีกระตุ้นทางกายภาพ โดยทั่วไป จะพบว่า มีหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวถ่านกัมมันต์อยู่ในปริมาณหนึ่งเสมอ โดยปริมาณหมู่ฟังก์ชันจะมากหรือน้อยขึ้นสภาวะที่ใช้เตรียมถ่านกัมมันต์⁽³⁸⁻³⁹⁾ การมีหมู่ฟังก์ชันบนผิวถ่านกัมมันต์ส่งผลให้ถ่านกัมมันต์ซึ่งเดิมมีพื้นผิวค่อนข้างเป็นกลางสามารถแสดงสมบัติความมีขั้วและสามารถดูดซับสารมีขั้วต่างๆ ได้ดีขึ้น ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงนำถ่านกัมมันต์ ที่เตรียมได้มาทดสอบการดูดซับไอน้ำซึ่งเป็นสารมีขั้ว โดยใช้เครื่องมือ Intelligent Gravimetric Analyzer (IGA) โดยทดลองดูดซับไอน้ำบนถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้สองชนิด โดยถ่านกัมมันต์ชนิดที่หนึ่ง มีพื้นที่ผิวมากกว่า มีลักษณะความพรุนเป็นรูพรุนขนาดเล็ก ขนาดกลาง และขนาดใหญ่ในสัดส่วนใกล้เคียงกัน และมีปริมาณหมู่ฟังก์ชันกรดรวมมากกว่า ส่วนถ่านกัมมันต์ชนิดที่สอง มีพื้นที่ผิวน้อยกว่า มีลักษณะความพรุนเป็นรูพรุนขนาดเล็ก และมีปริมาณหมู่ฟังก์ชันกรดรวมน้อยกว่า รายละเอียดสภาวะการเตรียม สมบัติพื้นผิวและรูพรุน และปริมาณหมู่ฟังก์ชันกรดรวมของถ่านกัมมันต์ทั้งสองชนิดได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.5 นอกจากนี้ยังได้แสดงสมบัติของถ่านกัมมันต์ทางการค้า เพื่อเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ทั้งสองชนิด ซึ่งถ่านกัมมันต์ทางการค้าชนิดนี้เตรียมจากกะลามะพร้าวโดยวิธีการกระตุ้นทางกายภาพ

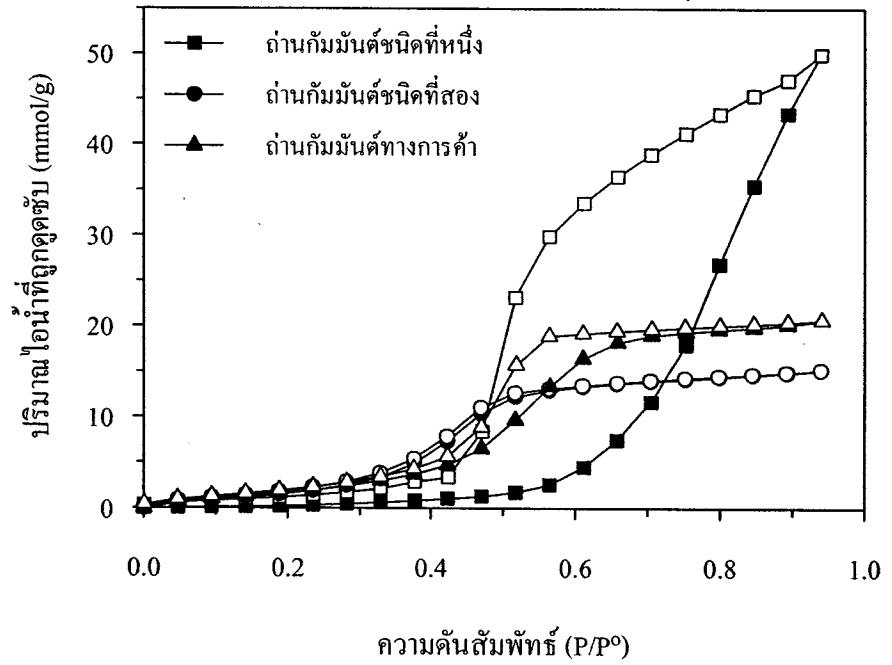
เนื่องจากถ่านกัมมันต์ชนิดที่หนึ่ง ใช้อัตราส่วนสารเคมีต่อวัตถุดิบมากกว่าและเวลาในการแช่สารเคมีนานกว่า จึงเป็นผลทำให้ถ่านกัมมันต์ชนิดที่หนึ่งมีปริมาตรรูพรุนรวมเกิดขึ้นได้มากและมีปริมาณหมู่ฟังก์ชันกรดรวมมากกว่าถ่านกัมมันต์ชนิดที่สอง สำหรับสมบัติรูพรุนพบว่า ถ่านกัมมันต์ชนิดที่หนึ่ง ซึ่งมีพื้นที่ผิวมากกว่านั้น ประกอบด้วยรูพรุนขนาดเล็ก และรูพรุนขนาดกลางและขนาดใหญ่ ในสัดส่วนที่ใกล้เคียงกัน และมีปริมาตรรูพรุนรวมมากกว่าถ่านกัมมันต์ชนิดที่สองเกือบเท่าตัว (ชนิดที่หนึ่งเท่ากับ $1.22 \text{ cm}^3/\text{g}$) ส่วนถ่านกัมมันต์ชนิดที่สอง ซึ่งมีพื้นที่ผิวน้อยกว่านั้น มีรูพรุนส่วนใหญ่เป็นรูพรุนขนาดเล็ก (94.8%) และมีปริมาตรรูพรุนรวมน้อยกว่า ($0.58 \text{ cm}^3/\text{g}$) เมื่อเปรียบเทียบถ่านกัมมันต์ทั้งสองกับถ่านกัมมันต์ทางการค้า พบว่า ถ่านกัมมันต์ทางการค้ามีพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนน้อยที่สุด ซึ่งสมบัติความพรุนที่แตกต่างกันนี้ อาจเนื่องมาจาก ชนิดของวัตถุดิบและวิธีการเตรียมที่แตกต่างกัน และจากการเปรียบเทียบชี้ให้เห็นว่า ไม้ยูคาลิปตัสเป็นวัตถุดิบที่ดีในการผลิตถ่านกัมมันต์

เส้นไอโซเทิร์มการดูดซับไอน้ำที่อุณหภูมิ 30°C ของถ่านกัมมันต์ชนิดที่หนึ่ง ชนิดที่สอง และทางการค้า แสดงเปรียบเทียบกันในรูปแบบที่ 4.14 พบว่าถ่านกัมมันต์ชนิดที่หนึ่ง แสดงลักษณะไอโซเทิร์มใกล้เคียงกับแบบที่ 5 (Type V) ส่วนถ่านกัมมันต์ชนิดที่สองและทางการค้ามีลักษณะใกล้เคียงกับแบบที่ 4 (Type IV) เมื่อพิจารณาเฉพาะเส้นดูดซับขาขึ้น (Adsorption branch) แสดงลักษณะการดูดซับได้น้อยในช่วงที่มีความดันไอน้ำต่ำ โดยเมื่อเปรียบเทียบกันระหว่างถ่านกัมมันต์ทั้งสามชนิด ในช่วงความดันไอน้ำต่ำ พบว่าถ่านกัมมันต์ชนิดที่สองและทางการค้ามีการดูดซับไอน้ำได้

มากกว่า อาจเนื่องมาจากถ่านกัมมันต์ทั้งสองชนิดนี้มีการกระจายหมู่ฟังก์ชันกรด ในรูพรุนขนาดเล็ก อย่างหนาแน่นมากกว่าในถ่านกัมมันต์ชนิดที่หนึ่ง ทำให้เกิดการดูดซับได้เร็วกว่า และสามารถดูดซับ ไอออนเงินเต็มรูพรุนได้อย่างรวดเร็ว เห็นได้จากถ่านกัมมันต์ชนิดที่สอง มีการดูดซับที่ค่อนข้างคงที่เมื่อ ความดันสัมพัทธ์มีค่ามากกว่า 0.5 และของถ่านทางการค้าเมื่อความดันสัมพัทธ์มีค่ามากกว่า 0.7 ดังนั้นกลไกหลักสำหรับการดูดซับไอออนเงินของถ่านกัมมันต์ทั้งสองชนิดนี้ซึ่งประกอบด้วยรูพรุนขนาดเล็กเป็นส่วนใหญ่มักจะขึ้นกับบทบาทของหมู่ฟังก์ชันกรด โดยหมู่ฟังก์ชันเหล่านี้จะอยู่ตรงบริเวณปาก ทางเข้าของรูพรุนขนาดเล็ก ส่วนถ่านกัมมันต์ชนิดที่หนึ่ง ซึ่งมีหมู่ฟังก์ชันกรดในปริมาณที่มากกว่า และพื้นที่ผิวมากกว่า พบว่าในช่วงความดันไออนน้ำต่ำมีการดูดซับไอออนเงินได้น้อยกว่า อาจเป็นไปได้ว่า ถ่านกัมมันต์ชนิดนี้มีการกระจายหมู่ฟังก์ชันกรดในรูพรุนขนาดเล็กน้อยกว่าถ่านกัมมันต์ชนิดที่สอง และถ่านกัมมันต์ทางการค้า ทำให้ไม่สามารถใช้ประโยชน์จากหมู่ฟังก์ชันกรดได้เต็มที่ แต่เมื่อความดันไออนน้ำสูงขึ้น พบว่าถ่านกัมมันต์ชนิดที่หนึ่งสามารถดูดซับไอออนเงินได้มากตามความดันที่เพิ่มขึ้นและ มากกว่าถ่านกัมมันต์ชนิดที่สองและถ่านกัมมันต์ทางการค้า เป็นอย่างมาก ซึ่งอธิบายได้ด้วย สมมุติฐานว่าการดูดซับของถ่านกัมมันต์ชนิดที่หนึ่ง เกี่ยวข้องกับการดูดซับภายในรูพรุนขนาดกลาง ซึ่งมีขนาดใหญ่กว่าและปริมาตรมากกว่า โดยที่การดูดซับที่เกิดขึ้นไม่ต้องอาศัยหมู่ฟังก์ชันพื้นผิว เหมือนที่เกิดในรูพรุนขนาดเล็กของถ่านกัมมันต์ชนิดที่สอง แต่อาศัยกลไกการบรรจุโมเลกุลไอออนเงิน ในรูพรุนขนาดกลางโดยตรงที่สภาวะความหนาแน่นหรือความดันสูงๆ โดยเริ่มแรกโมเลกุลไอออนเงิน ในรูพรุนจะดึงดูดกันเองด้วยพันธะไฮโดรเจนจนแบบหนึ่งต่อหนึ่ง⁽⁴⁰⁾ จากนั้นโมเลกุลไอออนเงินที่ถูก ดูดซับอยู่ก่อนแล้ว จะดูดซับโมเลกุลไอออนเงินอื่น ๆ ด้วยการสร้างพันธะไฮโดรเจนได้อีกหลายพันธะ จึง เกิดการดูดซับแบบหลายชั้นจนเกิดเป็นกลุ่มก้อน (Cluster)⁽²⁴⁾ จากนั้นเมื่อการดูดซับเกิดมากขึ้นจนเต็ม รูพรุนขนาดกลางในช่วงต่างๆ จะเกิดปรากฏการณ์การดูดซับแบบควบแน่น (Capillary condensation) ซึ่งเป็นกลไกที่สถานะของไอออนเงินที่ถูกดูดซับไว้มีลักษณะใกล้เคียงกับของเหลว และมีการยึดเกาะของ โมเลกุลไอออนเงินอย่างแข็งแรง ทำให้การคายโมเลกุลออกมาในช่วงการลดความดันทำได้ยากขึ้น ส่งผล ให้เกิดวงฮิสเทอรีซิส (Hysteresis loop) ที่มีความกว้างกว่าที่พบในถ่านกัมมันต์ชนิดที่สองและถ่านกัมมันต์ทางการค้า เป็นอย่างมาก (ดูรูป 4.14) ซึ่งพบว่าขนาดความกว้างของวงฮิสเทอรีซิสนี้มี ความสัมพันธ์กับขนาดรูพรุนคือถ้ารูพรุนมีขนาดใหญ่กว่าวงฮิสเทอรีซิสจะกว้างกว่าในรูพรุนที่มี ขนาดเล็ก^(41,42)

ตารางที่ 4.5 สภาวะการเตรียม สมบัติรูพรุนและเคมีพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ที่ศึกษาการดูดซับไอน้ำ

	ถ่านกัมมันต์ ชนิดที่หนึ่ง	ถ่านกัมมันต์ ชนิดที่สอง	ถ่านกัมมันต์ ทางการค้า
สภาวะการเตรียม			
อัตราส่วนสารเคมีต่อวัตถุดิบ	1.5:1	0.5:1	เตรียมจาก วิธีการกระตุ้น ทางกายภาพ
เวลาการแช่สารเคมี (ชั่วโมง)	1.5	1	
อุณหภูมิการคาร์บอนไนซ์ (°C)	400	400	
เวลาการคาร์บอนไนซ์ (ชั่วโมง)	1	1	
สมบัติรูพรุน			
พื้นที่ผิว (m ² /g)	1857	1200	923
ปริมาตรรูพรุนขนาดเล็ก (cm ³ /g)	0.70 (57.4%)	0.55 (94.8%)	0.37 (82.2%)
ปริมาตรรูพรุนขนาด กลางและใหญ่ (cm ³ /g)	0.52	0.03	0.08
ปริมาตรรูพรุนรวม (cm ³ /g)	1.22	0.58	0.45
สมบัติเคมีพื้นผิว			
หมู่ฟังก์ชันกรดรวม (mmol/g)	2.30	0.66	1.51
หมู่ฟังก์ชันเบสรวม (mmol/g)	0.30	0.63	1.30
หมู่ฟังก์ชัน carboxylic acid (mmol/g)	0.28	0.06	NA
หมู่ฟังก์ชัน lactonic (mmol/g)	1.25	0.43	NA
หมู่ฟังก์ชัน phenolic (mmol/g)	0.77	0.17	NA



รูปที่ 4.14 ไอโซเทอรัมการดูดซับไอน้ำที่ 30°C ของถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัสที่มีสมบัติรูพรุนต่างกัน และถ่านกัมมันต์ทางการค้า (สัญลักษณ์ทึบ = Adsorption, สัญลักษณ์โปร่ง = Desorption)