การเตรียมถ่านกัมมันต์จากยางเหลือทิ้งโดยการกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์

นางสาว ปิยะพร บารมี

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2542

ISBN 974-332-779-7

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

I18619548

PREPARATION OF ACTIVATED CARBON FROM WASTE RUBBER BY ZINC CHLORIDE ACTIVATION

Miss Piyapom Barame

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science in Chemical Technology
Department of Chemical Technology
Chulalongkorn University Graduated School
Academic Year 1999

ISBN 974-332-779-7

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การเตรียมถ่านกัมมันต์จากยางเหลือทิ้งโดยการกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์
โดย	นางสาว ปิยะพร บารมี
ภาควิชา	เคมีเทคนิค
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ธราพงษ์ วิทิตศานต์

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุชาดา กีระนันทน์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เลอสรวง เมฆสุต)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ธราพงษ์ วิทิตศานต์)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สมเกียรติ งามประเสริฐสิทธิ์)

..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร. สุชญา พัดเย็น)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พิมพ์ต้นฉบับบทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสีเขียวนี้เพียงแผ่นเดียว

ปิยะพร บารมี : การเตรียมถ่านกัมมันต์จากยางเหลือทิ้งโดยการกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ (PREPARATION OF ACTIVATED CARBON FROM WASTE RUBBER BY ZINC CHLORIDE ACTIVATION) อ. ที่ปรึกษา : ผศ. ดร. ธราพงษ์ วิทิตศานต์ ; 146 หน้า. ISBN 974-332-779-7.

การเตรียมถ่านกัมมันต์จากยางเหลือทิ้งโดยการกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ มีกระบวนการดำเนินการเป็น 2 ขั้นตอน คือ การคาร์บอไนซ์และการกระตุ้น ในขั้นตอนคาร์บอไนซ์ใช้ตัวอย่างยางที่มีขนาด 5 X 5 X 5 ลูกบาศก์มิลลิเมตร นำมาให้ความร้อนในช่วงอุณหภูมิ 200 ถึง 550 องศาเซลเซียส และใช้เวลาตั้งแต่ 30 ถึง 90 นาที จากผลการทดลองได้ภาวะที่เหมาะสมคือ ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ใช้เวลา 30 นาที ได้ผลิตภัณฑ์ถ่านชาร์ร้อยละ 85.13 มีส่วนประกอบในการวิเคราะห์แบบแห้งคือ เถ้าร้อยละ 6.51 สารระเหยได้ร้อยละ 22.08 และปริมาณคาร์บอนคงตัวร้อยละ 71.41

การกระตุ้นทำในเครื่องปฏิกรณ์ที่ทำจากเหล็กปลอดสนิม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มิลลิเมตร มีความยาว 350 มิลลิเมตร ใส่สารที่ผสมกับสารละลายซิงค์คลอไรด์ที่ผ่านการเซย่าเป็นเวลา 3 วัน นำไปอบแห้งแล้วนำไปเผาในเตาเผาแบบทรงกระบอก มีแก๊สไนโตรเจนไหลผ่านสารในอุปกรณ์ด้วยอัตรา 100 ลูกบาศก์มิลลิลิตรต่อนาที ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาคือ ความเข้มข้นของสารละลายซิงค์คลอไรด์ อยู่ในช่วงร้อยละ 30 ถึง 70 โดยน้ำหนัก อุณหภูมิอยู่ในช่วง 200 ถึง 750 องศาเซลเซียส เวลาในการกระตุ้นอยู่ในช่วง 1 ถึง 5 ชั่วโมง และขนาดอนุภาคแยกเป็น 3 ขนาดอยู่ในช่วง 1.00 ถึง 4.70 มิลลิเมตร ภาวะที่เหมาะสมในการกระตุ้นคือ ใช้สารละลายซิงค์คลอไรด์เข้มข้นร้อยละ 70 โดยน้ำหนัก อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เวลาในการกระตุ้น 2 ชั่วโมง ถ่านขนาด 2.00-2.38 มิลลิเมตร ได้ผลิตภัณฑ์ร้อยละ 54.96 และถ่านกัมมันต์ที่ได้มีสมบัติดังนี้ ค่าความหนาแน่นปรากฏ 0.407 กรัมต่อลูกบาศก์เซ็นติเมตร ร้อยละของเถ้า 6.95 ค่าการดูดซับเมทิลีนบลู 54.9 มิลลิกรัมต่อกรัม ค่าการดูดซับไอโอดีน 351.52 มิลลิกรัมต่อกรัม และค่าพื้นที่ผิวบรูพรุน 237.17 ตารางเมตรต่อกรัม

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา วิศวกรรมเคมี ลายมือชื่อนิสิต ปิยะพร บารมี

สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2548 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

4072315723 : MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY
KEY WORD: ACTIVATED CARBON / WASTE RUBBER / ZINC CHLORIDE ACTIVATION

PIYAPORN BARAME : PREPARATION OF ACTIVATED CARBON FROM WASTE RUBBER BY ZINC CHLORIDE ACTIVATION. THESIS ADVISOR : ASSIST. PROF. TARAPONG VITIDSANT, Ph.D. 146 pp. ISBN 974-332-779-7.

Experimental preparation of activated carbon from waste rubber with zinc chloride was carried out in two steps, carbonization and activation. The sample rubber of dimension 5x5x5 cubic millimeter was carbonized at 200 to 250°C from 30 to 90 minutes. From the experimental results, the optimum conditions are heated the sample at 400°C for 30 minutes. The characteristics of char in the research yielded 85.13 % with composition of dry basis of 6.51 % ash, volatile matter of 22.08 % and 71.14 % fixed carbon.

The activated step was conducted in a stainless steel reactor of diameter 20 mm and length 350 mm. The dry mixture of char and zinc chloride were pack and heated in tubular furnace, nitrogen gas flowed pass the bed with the rate of 100 ml/s. The variables studied were zinc chloride concentration 30-70% by weight, temperature 200-700°C, activated time 1-5 hours and three sizes of particles, 1.00-4.75 mm. The optimum conditions for activation obtained were : zinc chloride solution concentration 70 % by weight, temperature 500°C, activated time 2 hours, char size particle 2.00-2.38 mm. The properties of activated carbon were : bulb density 0.407 gm/cm^3, %ash 8.95, methylene blue absorption number 54.9 mg/g, iodine absorption number 351.52 mg/g, and pore surface area 237.17 m^2/g.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา เคมีเทคนิค ลายมือชื่อนิสิต ปิยะพร บารมี

สาขาวิชา เคมีเทคนิค ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2542 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ธราพงษ์ วิทิตศานต์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งท่านได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ ของการวิจัยตลอดมาอย่างดียิ่ง ขอขอบคุณผู้อำนวยการสถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ ที่ให้ใช้เครื่องมือปีอีทีในการวิเคราะห์ข้อมูล

ขอขอบคุณ คุณ สังข์ ชมชื่น ที่ให้ความช่วยเหลือในการซ่อมและสร้างเครื่องมือ คุณ ณรงค์ ชัยพันธ์ และ คุณ สันติ เมฆอาย ที่ให้คำแนะนำ และความช่วยเหลือต่างๆในการวิจัยตลอดจนเจ้าหน้าที่ทุกท่านของภาควิชาเคมีเทคนิค และสถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ช่วยอำนวยความสะดวกในการวิจัย และเนื่องจากทุนวิจัยครั้งนี้ได้รับมาจากทุนอุดหนุนการวิจัยของบัณฑิตวิทยาลัย และทุนอุดหนุนงานวิจัยของภาควิชาเคมีเทคนิค จึงขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้

ท้ายนี้ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณบิดาและมารดา รวมทั้งขอขอบคุณพี่ ที่ให้กำลังใจด้วยดีเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

ปิยะพร บารมี

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

บทคัดย่อภาษาไทย.....ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....จ
กิตติกรรมประกาศ.....ฉ
สารบัญ.....ช
สารบัญตาราง.....ฎ
สารบัญรูป.....ฐ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....ด

บทที่

1 บทนำ.....1
1.1 ความสำคัญและที่มาของโครงการ.....2
1.2 วัตถุประสงค์.....4
2 ทฤษฎีและสมมติฐานที่สำคัญ.....6
2.1 ถ่านกัมมันต์.....6
2.1.1 วัตถุดิบที่จะนำมาเตรียมถ่านกัมมันต์.....6
2.1.2 วิธีผลิตถ่านกัมมันต์.....7
2.1.3 การกระตุ้นด้วย $ZnCl_2$.....11
2.1.4 ลักษณะและชนิดของถ่านกัมมันต์.....15
2.1.5 โครงสร้างรูพรุนของถ่านกัมมันต์.....16
2.1.6 โครงสร้างทางเคมีของผิวถ่าน.....18
2.2 การดูดซับ.....24
2.2.1 หลักการดูดซับ.....25
2.2.2 จลนพลศาสตร์ของการดูดซับ.....30
2.2.3 การดูดซับและไอโซเทอมของถ่านกัมมันต์.....32

สารบัญ (ต่อ)

บทที่ หน้า

2.3 หลักการวิเคราะห์คุณสมบัติของถ่านกัมมันต์.....35
2.3.1 การหาพื้นที่ผิวจำเพาะ.....35
2.3.2 การหาปริมาณเถ้าของถ่านกัมมันต์.....38
2.3.3 การหาความหนาแน่นเชิงปริมาตร.....39
2.3.4 การหาความสามารถในการดูดซับเมทิลีนบลู.....39
2.3.5 การหาความสามารถในการดูดซับไอโอดีน.....40
2.4 ยางและผลิตภัณฑ์จากยาง.....41
2.4.1 ยาง.....41
2.4.2 โครงสร้างของยาง.....43
2.4.3 กระบวนการวัลคาไนเซชั่นของยาง.....44
2.4.4 ถุงมือยาง.....45
2.4.5 ยางรถยนต์.....46
3 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....48
3.1 ผลงานของนักวิจัยชาวต่างประเทศ.....48
3.2 ผลงานของนักวิจัยชาวไทย.....61
4 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง.....66
4.1 สารที่ใช้ในการทดลอง.....66
4.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง และเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์.....67
4.3 การเตรียมตัวอย่าง และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....72
4.4 การคาร์โบไนซ์.....72
4.5 การกระตุ้นถ่านที่ผ่านกระบวนการคาร์บอไนซ์.....73
4.6 ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาในการกระตุ้น.....74
4.7 การวิเคราะห์สมบัติต่าง ๆ ของผลิตภัณฑ์ที่ได้.....74
5 ผลการวิจัย.....76
5.1 สมบัติของวัตถุดิบ.....76
5.2 กระบวนการคาร์บอไนซ์.....77

สารบัญ (ต่อ)

บทที่ หน้า

5.3 ภาวะที่เหมาะสมในการคาร์บอไนซ์ยางเพื่อนำไปผลิตเป็นถ่านกัมมันต์.....86
5.4 สมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์.....86
5.4.1 การแปรความเข้มข้นของ $ZnCl_2$.....87
5.4.2 ผลของอุณหภูมิที่ใช้กระตุ้นต่อสมบัติของถ่านกัมมันต์.....95
5.4.3 ผลของเวลาที่ใช้กระตุ้นต่อสมบัติของถ่านกัมมันต์.....102
5.4.4 ผลของขนาดของถ่านชาร์ที่นำไปกระตุ้น.....109
5.4.5 ปริมาณZn ที่เหลืออยู่ในถ่านกัมมันต์.....110
5.4.6 ลักษณะพื้นผิวของถ่านของถ่านกัมมันต์.....112
6 อภิปรายและวิจารณ์ผลการทดลอง.....113
6.1 การศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการคาร์บอไนซ์.....113
6.2 การวิเคราะห์สมบัติของถ่านกัมมันต์จากกระบวนการกระตุ้นด้วย $ZnCl_2$.....114
6.2.1 ผลของการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของ $ZnCl_2$.....115
6.2.2 ผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในกระตุ้น.....118
6.2.3 ผลของเวลาที่ใช้กระตุ้น 120
6.2.4 ผลของขนาดของถ่านชาร์ 120
6.2.5 ปริมาณ $ZnCl_2$ที่ตกค้างอยู่ในถ่านกัมมันต์.....121
6.3 คุณภาพของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากผลการทดลองเทียบกับถ่านกัมมันต์เกรดการค้า.....121

7 สรุปผลงานวิจัย ข้อเสนอแนะและอุปสรรคในงานวิจัย.....123
7.1 สรุปผลงานวิจัย.....123
7.2 ข้อเสนอแนะ.....124
7.3 อุปสรรคในงานวิจัย.....124
รายการอ้างอิง.....126

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

ภาคผนวก.....130
ก. การวิเคราะคุณสมบัติโดยประมาณของถ่านจากการคาร์บอไนซ์.....131
ข. การวิเคราะห์ค่าเถ้าของถ่านกัมมันต์.....133
ค. การวิเคราะห์ค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตรของถ่านกัมมันต์.....134
ง. การวิเคราะห์ค่าเมทิลีนบลู.....135
จ. การวิเคราะห์ค่าไอโอดีน.....138
ฉ. การวิเคราะห์ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะของรูพรุนทั้งหมด.....142
ช. สมบัติของถ่านกัมมันต์ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม
(มอก.900-2532).....144
ซ . ตารางแสดงผลการวิเคราะห์โดยประมาณของถ่านชาร์ที่ได้จากการ
คาร์บอไนซ์ยาง.....145
ประวัติผู้เขียน.....146

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

1.1 สถิติการนำเข้าถ่านกัมมันต์ในประเทศไทย.....2

1.2 สถิติการส่งออกถ่านกัมมันต์ของประเทศไทย 3

2.1 สมบัติของวัสดุที่ใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตถ่านกัมมันต์และการใช้ประโยชน์.....8

2.2 สมบัติของ $ZnCl_2$.....12

3.1 ผลการทดลองของ Johnson et al. (1977).....50

3.2 ตัวแปรที่ใช้ในการทดลองของ Kirubakaran,C.J. et al (1974) 51

3.3 ผลการวิเคราะห์ถ่านกัมมันต์ของ Mohd Zobir Hussein et al.....53

3.4 ผลของอุณหภูมิต่อสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่มีความดันสูง 54

3.5 ผลของตัวทำละลายต่อสมบัติของถ่านกัมมันต์ 55

3.6 สมบัติของถ่านกัมมันต์จากการทดลองของ Teng et al. 57

3.7 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อสมบัติของถ่านกัมมันต์จากการทดลองของ Teng et al.....58

3.8 ผลของขนาดอนุภาคของถ่านขนาด 400-1,000 ไมโครเมตร.....59

3.9 สมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ได้ในการทดลองของ บุญชัย ตระกูลมหชัย และคณะ (2534) 62

5.1 สมบัติโดยประมาณของถ่านจากยางที่คาร์บอไนซ์ ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที เพื่อนำไปกระตุ้นด้วย$ZnCl_2$.....86

5.2 สมบัติของสารละลาย $ZnCl_2$ ที่ใช้ในการทดลอง.....87

5.3 สมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นที่ความเข้มข้นของ $ZnCl_2$ ที่ความเข้มข้นต่างๆอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมง 30 นาที.....88

5.4 สมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นที่ความเข้มข้นของ $ZnCl_2$ ที่ความเข้มข้นต่างๆ อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส เวลา 2 ชั่วโมง.....88

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ หน้า

5.5 สมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นที่อุณหภูมิต่างๆ เวลา 1 ชั่วโมง 30 นาที และ 2 ชั่วโมง.....95

5.6 สมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นที่เวลาต่างๆ อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส และ 750 องศาเซลเซียส.....102

5.7 สมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นที่ขนาดของวัตถุดิบต่างๆ อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมง 30 นาที และอุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส เวลา 2 ชั่วโมง.....109

5.8 ปริมาณของ Zn ที่เหลืออยู่หลังการกระตุ้นที่อุณหภูมิต่างๆ ระยะเวลาการกระตุ้น 1 ชั่วโมง 30 นาที.....111

6.1 แสดงภาวะที่ใช้ในการคาร์บอไนซ์ยางรถยนต์ที่ใช้แล้วของผู้วิจัยในอดีต.....114

6.2 สมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการทดลอง.....122

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญรูป

รูปที่ หน้า

2.1 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างในการคาร์บอไนซ์..... 9
2.2 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีเมื่อใช้ $ZnCl_2$.....10
2.3 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีจากการกระตุ้นทางฟิสิกส์.....10
2.4 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีของปฏิกิริยาการกระตุ้นด้วยก๊าซออกซิไดซ์ โดยการทำจัดโมเลกุลแปลกปลอม.....11
2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลาย $ZnCl_2$กับค่าความเป็นกรดด่าง(pH).....13
2.6 ขั้นตอนการผลิตถ่านกัมมันต์ด้วย $ZnCl_2$.....14
2.7 เปรียบเทียบขนาดและการวางตัวของรูพรุนขนาดต่างๆ.....17
2.8 เปรียบเทียบการกระจายขนาดรูพรุนของถ่านกัมมันต์จากวัตถุดิบและวิธีผลิตต่างๆ.....17
2.9 โครงสร้างของถ่านกัมมันต์.....19
2.10 การเคลื่อนที่ของไพอิเล็คตรอนในโครงสร้างของถ่านและถ่านกัมมันต์.....20
2.11 การเคลื่อนที่ของไพอิเล็คตรอนในโครงสร้างของถ่านและถ่านกัมมันต์ที่มีอะตอมออกซิเจน.....20
2.12 ตัวอย่างหมู่ฟังก์ชันนัลที่เป็นกรดบนผิวถ่านกัมมันต์.....22
2.13 ตัวอย่างปฏิกิริยาของถ่านกัมมันต์ที่ผิวเป็นกรด.....22
2.14 ตัวอย่างปฏิกิริยาการดูดซับโมเลกุลกรดด้วยถ่านกัมมันต์ที่มีผิวเป็นด่าง.....23
2.14 (ต่อ) ตัวอย่างปฏิกิริยาการดูดซับโมเลกุลกรดด้วยถ่านกัมมันต์ที่มีผิวเป็นด่าง.....24
2.15 แสดงชนิดของIsotherms.....25
2.16 เส้นไอโซเทอมของถ่านกัมมันต์แบบต่าง ๆ.....32
2.17 กราฟการดูดซับของไอเบนซีนที่อุณหภูมิต่าง ๆ.....33
2.18 กราฟดีอาร์.....34
2.19 หลักการหาพื้นที่ผิว.....36

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

2.20 ลักษณะกราฟตามสมการบีอีที....37
2.21 กราฟที่....38
2.22 โครงสร้างของเมทิลีนบลู....40
2.23 จลนพลศาสตร์ของการดูดซับเมทิลีนบลู....40
2.24 สูตรโครงสร้างของโพลีไอโซพรีน....43
2.25 สูตรโครงสร้างของสะไตรีนบิวตะไดอีน....44
3.1 ผลของเวลาในการคาร์บอไนซ์ที่มีต่อพื้นที่ผิว....60
3.2 ผลของเวลาในการคาร์บอไนซ์ที่มีต่อปริมาตรรูพรุน....60
4.1 แผนภาพแสดงชุดเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ผลิตถ่านกัมมันต์จากถ่านขาร์....68
4.2 เตาเผาอุณหภูมิสูง (muffle furnace) สำหรับคาร์บอไนซ์ยาง....69
4.3 เตาเผาแบบท่อ (tubular furnace) สำหรับกระตุ้นถ่านขาร์....70
4.4 ชุดเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ผลิตถ่านกัมมันต์จากถ่านขาร์....71
4.5 stainless tube สำหรับบรรจุถ่านขาร์เพื่อนำไปกระตุ้น....71
5.1 ก) แผ่นยางที่ใช้ในการทดลอง....76
ข) ยางที่ตัดเป็นก้อน เพื่อนำไปคาร์บอไนซ์....77
5.2 ถ่านจากยางที่คาร์บอไนซ์ที่ 400 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที....78
5.3 ผลของอุณหภูมิ และเวลาที่ใช้ในการคาร์บอไนซ์ ต่อค่าปริมาณร้อยละของ ผลิตภัณฑ์ที่ได้โดยใช้ตัวอย่างยาง 100 กรัม....79
5.4 ผลของอุณหภูมิ และเวลาที่ใช้ในการคาร์บอไนซ์ ต่อค่าปริมาณร้อยละของ สารระเหยโดยใช้ตัวอย่างยาง 100 กรัม....81
5.5 ผลของอุณหภูมิ และเวลาที่ใช้ในการคาร์บอไนซ์ ต่อค่าปริมาณร้อยละของ คาร์บอนคงตัวโดยใช้ตัวอย่างยาง 100 กรัม....83
5.6 ผลของอุณหภูมิ และเวลาที่ใช้ในการคาร์บอไนซ์ ต่อค่าปริมาณร้อยละของ เถ้าโดยใช้ตัวอย่างยาง 100 กรัม....85

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

5.7 ผลของความเข้มข้นของ $ZnCl_2$ ใช้ในการเตรียมถ่านฮาร์สำหรับการกระตุ้น ต่อค่าปริมาณร้อยละของผลิตภัณฑ์.....89
5.8 ผลของความเข้มข้นของ $ZnCl_2$ ที่ใช้ในการเตรียมถ่านฮาร์สำหรับการกระตุ้น ต่อปริมาณเถ้า.....90
5.9 ผลของความเข้มข้นของ $ZnCl_2$ ที่ใช้ในการเตรียมถ่านฮาร์สำหรับการกระตุ้น ต่อค่าความหนาแน่นปรากฏ.....91
5.10 ผลของความเข้มข้นของ $ZnCl_2$ ที่ใช้ในการเตรียมถ่านฮาร์สำหรับการกระตุ้น ต่อค่าการดูดซับเมทธิลีนบลู.....92
5.11 ผลของความเข้มข้นของ $ZnCl_2$ ที่ใช้ในการเตรียมถ่านฮาร์สำหรับการกระตุ้น ต่อค่าการดูดซับไอโอดีน.....93
5.12 ผลของความเข้มข้นของ $ZnCl_2$ ที่ใช้ในการเตรียมถ่านฮาร์สำหรับการกระตุ้น ต่อค่าพื้นที่ผิวทั้งหมด.....94
5.13 ผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการกระตุ้น ต่อค่าปริมาณร้อยละของผลิตภัณฑ์.....96
5.14 ผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการกระตุ้น ต่อปริมาณเถ้า.....97
5.15 ผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการกระตุ้น ต่อค่าของความหนาแน่นปรากฏ.....98
5.16 ผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการกระตุ้น ต่อค่าการดูดซับเมทิลีนบลู.....99
5.17 ผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการกระตุ้น ต่อค่าการดูดซับไอโอดีน.....100
5.18 ผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการกระตุ้น ต่อค่าพื้นที่ผิวทั้งหมด.....101
5.19 ผลของเวลาที่ใช้ในการกระตุ้น ต่อค่าปริมาณร้อยละของผลิตภัณฑ์.....103
5.20 ผลของเวลาที่ใช้ในการกระตุ้น ต่อค่าปริมาณเถ้า.....104
5.21 ผลของเวลาที่ใช้ในการกระตุ้น ต่อค่าความหนาแน่นปรากฏ.....105
5.22 ผลของเวลาที่ใช้ในการกระตุ้น ต่อค่าการดูดซับเมทิลีนบลู.....106
5.23 ผลของเวลาที่ใช้ในการกระตุ้น ต่อค่าการดูดซับไอโอดีน.....107
5.24 ผลของเวลาที่ใช้ในการกระตุ้น ต่อค่าพื้นที่ผิวทั้งหมด.....108

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

5.25 ก) ผิวของถ่านของถ่านทัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นที่อุณหภูมิ 700 องศา เซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง.....112
ข) ผิวของถ่านของถ่านทัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นที่อุณหภูมิ 750 องศา เซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง.....112
ค) ผิวของถ่านของถ่านทัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นที่อุณหภูมิ 750 องศา เซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง.....112

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

ASH	= ค่าเถ้า (Ash) มีหน่วยเป็นร้อยละโดยน้ำหนัก
BD	= ค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตร(Bulk density) มีหน่วยเป็นกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
FC	= ค่าถ่านคงตัว (Fixed carbon) มีหน่วยเป็นร้อยละโดยน้ำหนัก
HCl	= กรดไฮโดรคลอริก
H_3PO_4	= กรดฟอสฟอริก (Phosphoric acid)
IA	= ค่าไอโอดีน (Iodine adsorption numeber) มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อกรัมของถ่านกัมมันต์
M	= ค่าความชื้น (Moisture) มีหน่วยเป็นร้อยละโดยน้ำหนัก
N	= นอร์มัล (Normal) เป็นหน่วยความเข้มข้นของสารละลาย มีหน่วยเป็นน้ำหนักกรัมสมมูลย์ต่อสารละลาย 1 ลิตร
N_A	= เลขอาโวกาโด (Avogado number) เป็นค่าคงที่ มีค่าเท่ากับ $6.023X10^{23}$ โมเลกุลต่อโมล
NaOH	= โซเดียมไฮดรอกไซด์
Na_2CO_3	= โซเดียมคาร์โบเนต
P/P_o	= ความดันสัมพัทธ์ (Relative pressure) เป็นความดันของสารถูกดูดซับ ณ จุดสมดุลของการดูดซับเทียบกับความดันมาตรฐาน ในงานวิจัยนี้ใช้ความดันของไอไนโตรเจนเหลวเป็นความดันมาตรฐาน
S_{BET}	= พื้นที่ผิวจำเพาะของรูพรุนทั้งหมด (Total specific surface area) มีหน่วยเป็นตารางเมตรต่อกรัมของถ่านกัมมันต์
VCM	= ค่าสารระเหยที่เผาไหม้ได้ (Volatile combustible matter) มีหน่วยเป็นร้อยละโดยน้ำหนัก
Y	= ร้อยละของภัณฑ์ที่ได้ (Yield) มีหน่วยเป็นร้อยละโดยน้ำหนักของยาง
$ZnCl_2$	= ซิงค์คลอไรด์ (Zinc chloride)