การผลิตถ่านกัมมันต์จากไม้โกงกางด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและคาร์บอนไดออกไซด์

นางสาว นิชชรี นิลนนท์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2540

ISBN 974-637-993-3

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

I18076490

PRODUCTION OF ACTIVATED CARBON FROM MANGROVE WOOD USING SUPERHEATED STEAM AND CARBON DIOXIDE

Miss. Nitcharee Ninlanon

A Thesis Submitted in Partial Fultilment of the Requirments

for the Degree of Master of science in Chemical Technology

Department of Chemical Technology

Graduate School

Chulalongkorn University

Academic Year 1997

ISBN 974-637-993-3

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การผลิตถ่านกัมมันต์จากไม้โกงกางด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและคาร์บอนไดออกไซด์
โดย	นางสาว นิชชรี นิลนนท์
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ธราพงษ์ วิทิตศานต์

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(ศาสตราจารย์ นพ. ศุภวัฒน์ ชุติวงศ์)

กรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(ศาสตราจารย์ ดร. ภัทรพรรณ ประศาสน์สารกิจ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ธราพงษ์ วิทิตศานต์)

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เลอสรวง เมฆสุต)

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พรพจน์ เปี่ยมสมบูรณ์)

พิมพ์ต้นฉบับบทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสีเขียวนี้เพียงแผ่นเดียว

นิชชรี นิลนนท์ : การผลิตถ่านกัมมันต์จากไม้โกงกางด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและคาร์บอนไดออกไซด์ (PRODUCTION OF ACTIVATED CARBON FROM MANGROVE WOOD USING SUPERHEATED STEAM AND CARBON DIOXIDE) อ. ที่ปรึกษา : ผศ. ดร. ธราพงษ์ วิทิตศานต์ ; 132 หน้า. ISBN 974-637-993- 3.

การทดลองผลิตถ่านกัมมันต์จากไม้โกงกางได้ดำเนินงาน 2 ขั้นตอนคือ คาร์บอไนเซชั่นและการกระตุ้นด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ขั้นตอนแรกทำการคาร์บอไนซ์ในเครื่องคาร์บอไนเซอร์ ตัวแปรที่ศึกษาคือ อุณหภูมิ 250-400 องศาเซลเซียส เวลาที่ใช้ในการคาร์บอไนซ์ 20-60 นาที พบว่าภาวะที่เหมาะสมในการคาร์บอไนซ์ คือ อุณหภูมิเบด 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที ได้ผลิตภัณฑ์เป็นถ่านไม้ร้อยละ 38.07 มีปริมาณคาร์บอนคงตัวร้อยละ 71.44 สารระเหยร้อยละ 23.02 และเถ้าร้อยละ 5.54

ขั้นที่ 2 การกระตุ้นด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ มีตัวแปรที่ศึกษาคือ อุณหภูมิ 700-850 องศาเซลเซียส เวลาที่ใช้ในการกระตุ้น 30, 60, 90 และ 120 นาที ขนาดอนุภาคถ่าน < 0.355, 0.355-0.6, 0.6-1.18, 1.18-2.36, 2.36-4.75 มิลลิเมตร พบว่า ภาวะที่เหมาะสมในการกระตุ้น คือ อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ที่เวลา 60 นาที ขนาดอนุภาค 0.6-1.18 มิลิเมตร ปริมาณการป้อนอากาศและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 5 ลิตรต่อนาที ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ความดัน 1 บรรยากาศ ด้วยปริมาณไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่มากเกินพอ ได้ผลิตภัณฑ์เป็นถ่านกัมมันต์ร้อยละ 27.47 มีพื้นที่ผิวจำเพาะทั้งหมด 639.74 ตารางเมตรต่อกรัม โดยแบ่งเป็นพื้นที่ผิวรูพรุนชนิดแมคโครพอร์ 156.50 ตารางเมตรต่อกรัม พื้นที่ผิวรูพรุนชนิดไมโครพอร์ 483.24 ตารางเมตรต่อกรัม ค่าการดูดซับไอโอดีน 675.14 มิลลิกรัมต่อกรัม ค่าการดูดซับเมทธิลีนบลู 254.73 มิลลิกรัมต่อกรัม และเมื่อนำถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้จากภาวะที่เหมาะสมนี้ไปทำการดูดซับไดโครเมตไอออน พบว่ามีค่าความจุในการดูดซับ 66.23 และ 59.52 มิลลิกรัมต่อกรัม ที่ pH 1 และ pH 2 ตามลำดับ

ภาควิชา เคมีเทคนิค ลายมือชื่อนิสิต นส. นิชชรี นิลนนท์

สาขาวิชา เคมีเทคนิค ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2540 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

พิมพ์ต้นฉบับบทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสีเขียวนี้เพียงแผ่นเดียว

3970819923 : MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY
KEY WORD: MANGROVE WOOD / ACTIVATED CARBON / SUPERHEATED STEAM / CARBON DIOXIDE

NITCHAREE NINLANON : PRODUCTION OF ACTIVATED CARBON FROM MANGROVE WOOD USING SUPERHEATED STEAM AND CARBON DIOXIDE. THESIS ADVISOR : ASSIST. PROF. THARAPONG VITIDSANT, Ph.D. 134 pp.
ISBN 974-637-993-3.

The activated carbon production from Mangrove wood has 2 steps : carbonization and activation using superheated steam and carbon dioxide.The first step is carbonization; variables to be studied were temperature 250-400 ^{o}C and time 20-60 min. The optimum condition for carbonization was at 300 ^{o}C for 60 min. The characteristics of char were found to be : % yield 38.07, % FC 71.44 , % VCM 23.02 and % ash 5.54.

The second step is to activate the char by using superheated steam and carbon dioxide . The variables were temperature 700-850 ^{o}C , time 30 , 60 , 90 , 120 min., and sizes of particle < 0.355 , 0.355-0.60 , 0.60-1.18 , 1.18-2.36 , 2.36-4.75 mm. .It was found that the optimum condition for activation was at 850 ^{o}C for 60 min. and 0.6-1.18 mm. size of particles . The quantity of air and carbon dioxide were 5 l/min. at 30 ^{o}C , 1 atm with excess superheated steam .The resulting characteristics were 27.47% yield , BET surface area 639.74 m^2/g , macropores surface area 156.50 m^2/g , micropores surface area 483.24 m^2/g , Iodine adsorption number 675.14 mg/g , and methylene blue adsorption number 254.73 mg/g. It was also found that the capability of the activated carbon on colour adsorption of dichromate ion were 66.23 and 59.52 mg/g at pH 1 and pH 2 respectively.

ภาควิชา เคมีเทคนิค	**ลายมือชื่อนิสิต** นส. นิชชรี นิลานนท์
สาขาวิชา เคมีเทคนิค	**ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา**
ปีการศึกษา 2540	**ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม** -

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของ ผศ.ดร.ธราพงษ์ วิทิตศานต์อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งท่านให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่าง ๆ ตลอดจนแก้ไขข้อผิดพลาด ในการวิจัยมาด้วยดีตลอดตั้งแต่แรกเริ่มจนกระทั่งวิทยานิพนธ์เสร็จสิ้นอย่างสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ คุณภัทรา ปัญญวัฒนกิจ นักวิทยาศาสตร์ 6 ว กลุ่มงานสิ่งแวดล้อม กองฟิสิกส์และวิศวกรรม กรมวิทยาศาสตร์บริการ ที่แนะนำและให้คำปรึกษาในขณะทำวิทยานิพนธ์ เจ้าหน้าที่ภาควิชาเคมีเทคนิค จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยทุกท่านที่ให้คำแนะนำและความช่วยเหลือในการซ่อมและสร้างเครื่องมือ ตลอดจนเพื่อนๆเคมีเทคนิคทุกคนที่ให้กำลังใจและคำปรึกษาในบางเรื่องและเนื่องจากทุนการวิจัยครั้งนี้บางส่วนได้รับมาจากกองทุน ศ.ดร.ประสม สถาปิตานนท์และจากทุนอุดหนุนการวิจัยของบัณฑิตวิทยาลัย จึงขอขอบพระคุณมา ณ ที่นี้ด้วย

ท้ายนี้ผู้วิจัยใคร่ขอขอบพระคุณ พล.ต.ต สนาม - นางมณี นิลนนท์ (บิดา - มารดา) ซึ่งสนับสนุนในด้านการเงินและให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

หากงานวิจัยนี้เป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมของประเทศชาติขอให้ท่านที่กล่าวนามข้างต้นจงได้รับเกียรติคุณความดีและการสรรเสริญโดยทั่วหน้ากัน

นิชชรี นิลนนท์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญตาราง	ญ
สารบัญรูป	ฏ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	ถ
บทที่ 1. บทนำ	1
บทที่ 2. วารสารปริทรรศน์	4
2.1 ความหมายของถ่านกัมมันต์	4
2.2 วัตถุดิบที่ใช้ผลิตถ่านกัมมันต์	4
2.3 ชนิดของถ่านกัมมันต์	5
2.3.1 แบ่งตามชนิดของตัวกระตุ้น	5
2.3.2 แบ่งตามขนาดรูพรุนของถ่านกัมมันต์	5
2.3.3 แบ่งตามลักษณะของรูปร่าง	6
2.3.4 แบ่งตามความหนาแน่น	6
2.3.5 แบ่งตามชนิดของสารที่ถูกดูดซับ	6
2.4 กระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์	7
2.4.1 การเตรียมวัตถุดิบ	7
2.4.2 การคาร์บอไนซ์	7
2.4.3 การกระตุ้น	10
2.5 วิธีการกระตุ้นเพื่อผลิตถ่านกัมมันต์	14
2.5.1 วิธีการกระตุ้นทางเคมี	14
2.5.2 วิธีการกระตุ้นทางฟิสิกส์	14

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.6 เครื่องมือที่ใช้ในการผลิตถ่านหรือถ่านกัมมันต์ 20
2.6.1 เครื่องคาร์บอไนเซอร์ 20
2.6.2 เครื่องแอคติเวเตอร์ 20
2.7 โครงสร้างรูพรุนของถ่านกัมมันต์ 22
2.8 โครงสร้างทางเคมีของถ่านกัมมันต์ 24
2.9 ทฤษฎีการดูดซับ 27
2.10 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับสีของถ่านกัมมันต์ 29
2.10.1 พื้นที่ผิวจำเพาะของถ่านกัมมันต์ 30
2.10.2 pH ของสารละลาย 32
2.10.3 อุณหภูมิและเวลาในการสัมผัส 33
2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 34
บทที่ 3. วิธีการทดลอง 46
3.1 รูปแบบการศึกษา 46
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย 46
3.3 สารเคมี 50
3.4 ขั้นตอนการทดลอง 50
3.4.1 วิเคราะห์คุณสมบัติเบื้องต้นของไม้โกงกาง 50
3.4.2 การคาร์บอไนซ์ตัวอย่าง 50
3.4.3 การกระตุ้น 50
3.4.4 ศึกษาความจุในการดูดซับไดโครเมตอิออน 51
บทที่ 4. ผลการศึกษาและวิจารณ์ผลการศึกษา 63
4.1 คุณสมบัติของวัตถุดิบ 63
4.2 ภาวะที่เหมาะสมในการผลิตถ่านกัมมันต์ 64
4.3 ศึกษาความจุในการดูดซับไดโครเมตอิออน 79
4.3.1 ศึกษาการเปลี่ยนแปลง adsorption spectrum ของสารละลาย $K_2Cr_2O_7$ 79

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.3.2 การทำ Kinetic studies..... 82

4.3.3 การศึกษา adsorption isotherm..... 86

บทที่ 5. อภิปรายและวิจารณ์ผลการทดลอง..... 90

5.1 การแปรภาวะเพื่อเตรียมถ่านไม้โกงกาง..... 90

5.2 การผลิตถ่านกัมมันต์โดยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและคาร์บอนไดออกไซด์..... 92

5.3 ความสามารถในการดูดซับไดโครเมตอิออน..... 95

บทที่ 6. สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ..... 98

รายการอ้างอิง..... 100

ภาคผนวก..... 105

ก. วิธีวิเคราะห์คุณสมบัติโดยประมาณของไม้โกงกางและถ่านไม้โกงกาง..... 105

ข. วิธีวิเคราะห์ค่าเถ้าของถ่านกัมมันต์..... 108

ค. วิธีวิเคราะห์ความหนาแน่นเชิงปริมาตรของถ่านกัมมันต์..... 109

ง. วิธีวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะของรูพรุนทั้งหมด,รูพรุนขนาดเล็ก,รูพรุนขนาดกลาง และเส้นไอโซเทอมการดูดซับก๊าซไนโตรเจนขอองถ่านกัมมันต์..... 110

จ. วิธีวิเคราะห์ค่าเมทธิลีนบูล..... 113

ฉ. วิธีวิเคราะห์ค่าไอโอดีน..... 116

ช. คุณสมบัติถ่านกัมมันต์เกรดการค้า..... 118

ซ. แสดงการเปลี่ยนแปลงระหว่างอุณหภูมิและเวลาในเตาคาร์บอไนเซอร์และเครื่องกระตุ้น..... 123

ฌ. การสร้างกราฟมาตราฐานของ $K_2Cr_2O_7$..... 127

ฌ.1 ค่า absorbance ที่ความเข้มข้นต่างๆ..... 127

ฌ.2 การทำ Kinetic studies ของถ่านกัมมันต์..... 129

ฌ.3 การศึกษา adsorption isotherm..... 131

ประวัติผู้วิจัย..... 132

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่

2.1 คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้เป็นวัตภุดิบในการผลิตถ่านกัมมันต์และการใช้ประโยชน์ 5
2.2 ผลของอัตราการให้ความร้อนที่มีต่อคุณสมบัติของเม็ดถ่าน..... 10
2.3 การดูดซับของถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้น ณ ภาวะต่างๆกัน..... 20
2.4 การเปรียบเทียบเทคนิคต่างๆที่ใช้ในปฏิกิริยาระหว่างก๊าซกับของแข็ง..... 21
2.5 ส่วนประกอบฟังชันนัลกรุปของออกซิเจนบนผิวถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากวัตถุดิบที่ที่เหลือจากการเกษตรต่างชนิดกัน..... 27
2.6 ความสัมพันธ์ของเวลาการกระตุ้นที่มีต่อค่าพื้นที่ผิวจำเพาะของถ่านกัมมันต์กับค่าการดูดซับ..... 31
2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ผิวจำเพาะของถ่านกัมมันต์กับความสามารถในการดูดซับไอโอดีนและโมลาส..... 31
2.8 ความสามารถในการดูดซับ copper ions บนผิวถ่านกัมมันต์จากวัตถุดิบต่างๆ 32
2.9 ความสามารถในการดูดซับ Cu และ Ni บนถ่านกัมมันต์..... 32
2.10 ตัวแปรที่ใช้ในการทดลองของ Kirubakaran,C.J..... 34
2.11 คุณสมบัติการดูดซับของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากวัสดุเหลือทิ้งจากการเกษตร 42
2.12 องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบชนิดต่างๆที่ใช้ผลิตถ่านกัมมันต์..... 43
2.13 คุณลักษณะของรูพรุนและความสามารถในการดูดซับของถ่านกัมมันต์กับถ่านเซลลูโลส..... 43
2.14 การดูดซับเมทธิลีนบูลด้วยถ่านกัมมันต์ที่ 25 องศาเซลเซียส..... 43
2.15 การกำจัดสีด้วย Powder activated carbon (PAC) ขนาดต่างๆ ในสารละลายสีที่มีความเข้มข้น 150 ppm 45
4.1 แสดงค่าประมาณของไม้โกงกางและถ่านไม้โกงกางที่ได้จากการคาร์บอไนว์ ณ ภาวะต่างๆ..... 65
4.2 คุณสมบัติของถ่านกัมมันต์เมื่อกระตุ้นถ่านที่อุณหภูมิถ่านที่อุณหภูมิและเวลา

สารบัญตาราง (ต่อ)

หน้า

ต่างๆกันโดยใช้ถ่านไม้โกงกาง 150 กรัม ปริมาณการป้อนอากาศ 5 l/minอัตราป้อน CO_2 5 l/min. (ณ อุณหภูมิ 30 ^{o} C ที่ความดัน 1 อากาศ) และไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่มากเกินพอ..... 70

4.3 คุณสมบัติของถ่านกัมมันต์เมื่อกระตุ้นถ่านขนาดต่างๆ ที่อุณหภูมิ 850^{o}C เป็นเวลา 1 hr. โดยใช้ถ่านไม้โกงกาง 150 กรัม ปริมาณการป้อนอากาศ 5 l/min อัตราป้อน CO_2 5 l/min. (ณ อุณหภูมิ 30 ^{o} C ที่ความดัน 1 อากาศ)และไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่มากเกินพอ..... 75

4.4 การเปลี่ยนแปลง pH ของสารละลายกรดไนตริกที่ความเข้มข้นต่างๆ เมื่อ equilibrate กับถ่านกัมมันต์จากไม้โกงกาง 80

4.5 แสดงค่าการดูดซับ $Cr_2O_7^{=}$ บนผิวถ่านกัมมันต์จากไม้โกงกาง 0.6-1.18 มม.ในสารละลาย $K_2Cr_2O_7$ เข้มข้น 2 x 10^{-3} M (588.4 ppm) pH= 2 โดยการวัดค่า absordance ณ ความยาวคลื่น 350 นาโนเมตร..... 83

4.6 แสดงค่าการดูดซับ $Cr_2O_7^{=}$ บนผิวถ่านกัมมันต์จากไม้โกงกาง 0.6-1.18 มม.ในสารละลาย $K_2Cr_2O_7$ เข้มข้น 2 x 10^{-3} M (588.4 ppm) pH= 1โดยการวัดค่า absordance ณ ความยาวคลื่น 350 นาโนเมตร..... 84

4.7 แสดงค่าการดูดซับ $Cr_2O_7^{=}$ บนผิวถ่านกัมมันต์จากไม้โกงกาง 0.6-1.18 มม.ในสารละลาย $K_2Cr_2O_7$ เข้มข้น 2 x 10^{-3} M (588.4 ppm) pH= 2 เป็นเวลา 7 ชม. โดยการวัดค่า absorbance ณ ความยาวคลื่น 350 นาโนเมตร..... 86

4.8 แสดงค่าการดูดซับ $Cr_2O_7^{=}$ บนผิวถ่านกัมมันต์จากไม้โกงกาง 0.6-1.18 มม.ในสารละลาย $K_2Cr_2O_7$ เข้มข้น 2 x 10^{-3} M (588.4 ppm) pH= 1เป็นเวลา 7 ชม. โดยการวัดค่า absorbance ณ ความยาวคลื่น 350 นาโนเมตร..... 87

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่

2.1 การเปลี่ยนแปลงการจัดเรียงของคาร์บอนอะตอมตามอุณหภูมิที่เผา..... 9

2.2 แสดงตำแหน่งของอิเล็กตรอนของคาร์บอนที่เกิดจาก sp^2 Hybridization..... 11

2.3 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมี โดยการเตรียมถ่านจากวัสดุทางการเกษตร 12

2.4 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีของปฏิกิริยาการกระตุ้นด้วยก๊าซออกซิไดซ์ 13

2.5 ขั้นตอนการผลิตถ่านกัมมันต์ด้วยก๊าซออกซิไดซ์..... 15

2.6 ผลของปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีต่อปฏิกิริยาการกระตุ้นด้วยไอน้ำ... 17

2.7 การจัดเรียงตัวของคาร์บอนอะตอมในผลึกของแกรไฟต์..... 22

2.8 การเปรียบเทียบการกระจายขนาดของรูพรุนของถ่านกัมมันต์จากวัตถุดิบต่างชนิดกันด้วยกรรมวิธีการผลิตต่างกัน..... 24

2.9 ตัวอย่างหมู่ฟังก์ชั่นนัลที่เป็นกรดบนผิวถ่านกัมมันต์..... 25

2.10 ตัวอย่างปฏิกิริยาของถ่านกัมมันต์ที่มีผิวเป็นกรด..... 26

2.11 ตัวอย่างปฏิกิริยาการดูดซับโมเลกุลกรดด้วยถ่านกัมมันต์ที่มีผิวเป็นด่าง..... 26

2.12 เส้นไอโซเทอมของถ่านกัมมันต์ชนิดต่างๆ..... 28

2.13 ความสามารถในการดูดซับสีของถ่านกัมมันต์ 5 ชนิด..... 30

2.14 การกำจัดด้วยสารดูดซับชนิดต่างๆ..... 44

2.15 การกำจัดสีด้วย power activated carbom (PAC) ขนาดต่างๆในสารละลายสีที่มีความเข้มข้น 150 ppm..... 45

2.16 Langmuir plot ของการดูดซับ Cr (VI) บน fly ash กับ wollastonite(1:1) อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส pH=2..... 46

3.1 แสดงขนาดของส่วนปฏิกิริยาของเครื่องคาร์บอไนซ์เซอร์แบบเบดนิ่ง..... 48

3.2 แสดงขนาดและส่วนประกอบของเครื่องแอคติเวเตอร์โดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่ง 49

3.3 ขั้นตอนการดำเนินการศึกษา..... 53

3.4 เครื่องคาร์บอไนเซอร์แบบเบดนิ่ง..... 54

สารบัญรูป (ต่อ)

		หน้า
3.5	เครื่องแอคติเวเตอร์กระตุ้นด้วยไอน้ำอิ่มตัวยวดยิ่งและคาร์บอนไดออกไซด์.....	54
3.6	เครื่องผลิตไอน้ำ (Boiler).....	55
3.7	เครื่องจ่ายกระแสไฟฟ้า A.C.....	55
3.8	เครื่องบดหยาบ (Hammer mill).....	56
3.9	เครื่องบดละเอียด.....	56
3.10	CO_2 regulator พร้อมโรตามิเตอร์.....	57
3.11	โรตามิเตอร์อากาศอัด.....	57
3.12	ตู้อบ WT binder.....	58
3.13	เตาเผาไฟฟ้า (Muffle furnance) ยี่ห้อ Cabolite.....	58
3.14	เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง SPECTRONIC – 21.....	59
3.15	UV Spectrometer.....	59
3.16	pH meter.....	60
3.17	เครื่องชั่งละเอียด.....	60
3.18	Tube Furnance Type 21100.....	61
3.19	ตะแกรงขนาดต่างๆ (Seives).....	61
3.20	แสดงขั้นตอนการหากราฟมาตราฐานของสารละลาย $K_2Cr_2O_7$.....	62
3.21	แสดงวิธีทดลองหา pH ที่เปลี่ยนแปลงไปของ HNO_3 เมื่อ equilibrate กับถ่านกัมมันต์.....	62
4.1	ไม้โกงกางก่อนการคาร์บอไนซ์.....	63
4.2	ไม้โกงกางหลังการคาร์บอไนซ์.....	64
4.3	ผลของเวลาการคาร์บอไนซ์ที่มีต่อค่าร้อยละของปริมาณผลิตภัณฑ์ ณ อุณหภูมิต่างๆโดยใช้ไม้โกงกาง 400 กรัม.....	66
4.4	ผลของเวลาการคาร์บอไนซ์ที่มีต่อค่าร้อยละของปริมาณเถ้า ณ อุณหภูมิต่าง ๆ โดยใช้ไม้โกงกาง 400 กรัม.....	66

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

4.5 ผลของเวลาการคาร์บอไนซ์ที่มีต่อค่าร้อยละของปริมาณสารระเหย ณ อุณหภูมิต่างๆโดยใช้ไม้โกงกาง 400 กรัม..... 67
4.6 ผลของเวลาการคาร์บอไนซ์ที่มีต่อค่าร้อยละของปริมาณคาร์บอนคงตัว ณ อุณหภูมิต่างๆโดยใช้ไม้โกงกาง 400 กรัม..... 67
4.7 ผลของอุณหภูมิการคาร์บอไนซ์ที่มีต่อค่าร้อยละของปริมาณผลิตภัณฑ์ ณ เวลาต่างๆโดยใช้ไม้โกงกาง 400 กรัม..... 68
4.8 ผลของอุณหภูมิการคาร์บอไนซ์ที่มีต่อค่าร้อยละของปริมาณเถ้า ณ เวลาต่างๆ โดยใช้ไม้โกงกาง 400 กรัม..... 68
4.9 ผลของอุณหภูมิการคาร์บอไนซ์ที่มีต่อค่าร้อยละของปริมาณสารระเหย ณ เวลาต่างๆโดยใช้ไม้โกงกาง 400 กรัม..... 69
4.10 ผลของอุณหภูมิการคาร์บอไนซ์ที่มีต่อค่าร้อยละของปริมาณคาร์บอนคงตัว ณ เวลาต่างๆโดยใช้ไม้โกงกาง 400 กรัม..... 69
4.11 ผลของเวลาการกระตุ้นที่มีค่าร้อยละของปริมาณผลิตภัณฑ์ ณ อุณหภูมิต่าง ๆ โดยใช้ถ่านไม้โกงกาง 150 กรัม ปริมาณการป้อนอากาศ 5l/min. อัตราการป้อนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 5 l/min.(ณ อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ที่ความดัน 1 บรรยากาศ) ปริมาณไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่มากเกินพอ..... 71
4.12 ผลของเวลาการกระตุ้นที่มีค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตร ณ อุณหภูมิต่าง ๆ โดยใช้ถ่านไม้โกงกาง 150 กรัม ปริมาณการป้อนอากาศ 5l/min. อัตราการป้อนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 5 l/min.(ณ อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ที่ความดัน 1 บรรยากาศ) ปริมาณไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่มากเกินพอ..... 71
4.13 ผลของเวลาการกระตุ้นที่มีค่าการดูดซับไอโอดีน ณ อุณหภูมิต่างๆโดยใช้ถ่านไม้โกงกาง 150 กรัม ปริมาณการป้อนอากาศ 5l/min. อัตราการป้อนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 5 l/min.(ณ อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียสที่ความดัน 1 บรรยากาศ) ปริมาณไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่มากเกินพอ..... 72

สารบัญรูป(ต่อ)

หน้า

4.14 ผลของเวลาการกระตุ้นที่มีค่าการดูดซับเมทธิลีนบูล ณ อุณหภูมิต่างๆโดยใช้ถ่านไม้โกงกาง 150 กรัม ปริมาณการป้อนอากาศ 5l/min. อัตราการป้อนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 5 l/min. (ณ อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ที่ความดัน 1 บรรยากาศ) ปริมาณไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่มากเกินพอ..... 72

4.15 ผลของอุณหภูมิการกระตุ้นที่มีค่าร้อยละของปริมาณผลิตภัณฑ์ ณ เวลาต่าง ๆ โดยใช้ถ่านไม้โกงกาง 150 กรัม ปริมาณการป้อนอากาศ 5 l/min. อัตราการป้อนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 5 l/min.(ณ อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ที่ความดัน 1 บรรยากาศ) ปริมาณไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่มากเกินพอ..... 73

4.16 ผลของอุณหภูมิการกระตุ้นที่มีค่าความหนา.แน่นเชิงปริมาตร ณ เวลาต่าง ๆ โดยใช้ถ่านไม้โกงกาง 150 กรัม ปริมาณการป้อนอากาศ 5l/min. อัตราการป้อนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 5 l/min.(ณ อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ที่ความดัน 1 บรรยากาศ) ปริมาณไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่มากเกินพอ..... 73

4.17 ผลของอุณหภูมิการกระตุ้นที่มีค่าการดูดซับไอโอดีน ณ เวลาต่างๆโดยใช้ถ่านไม้โกงกาง 150 กรัม ปริมาณการป้อนอากาศ 5l/min. อัตราการป้อนก๊าซคาร์-บอนไดออกไซด์ 5 l/min.(ณ อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียสที่ความดัน 1 บรรยา-กาศ) ปริมาณไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่มากเกินพอ..... 74

4.18 ผลของอุณหภูมิการกระตุ้นที่มีค่าการดูดซับเมทธิลีนบูล ณ เวลาต่างๆโดยใช้ถ่านไม้โกงกาง 150 กรัม ปริมาณการป้อนอากาศ 5l/min. อัตราการป้อนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 5 l/min. (ณ อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ที่ความดัน 1 บรรยากาศ) ปริมาณไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่มากเกินพอ..... 74

4.19 ผลของขนาดอนุภาคที่มีต่อค่าร้อยละของปริมาณผลิตภัณฑ์ เมื่อกระตุ้นที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชม.โดยใช้ถ่านไม้โกงกาง 150 กรัม ปริมาณการป้อนอากาศ 5 l/min. อัตราการป้อนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 5 l/min.(ณ อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ที่ความดัน 1 บรรยากาศ) ปริมาณ

สารบัญรูป(ต่อ)

หน้า

ไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่มากเกินพอ..... 75

4.20 ผลของขนาดอนุภาคที่มีต่อค่าร้อยละของปริมาณความชื้น เมื่อกระตุ้นที่อุณ-หภูมิ 850 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชม.โดยใช้ถ่านไม้โกงกาง 150 กรัมปริมาณการป้อนอากาศ 5 l/min. อัตราการป้อนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 5 l/min.(ณ อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียสที่ความดัน 1 บรรยากาศ) ปริมาณไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่มากเกินพอ..... 76

4.21 ผลของขนาดอนุภาคที่มีต่อค่าร้อยละของปริมาณเถ้า เมื่อกระตุ้นที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชม.โดยใช้ถ่านไม้โกงกาง 150 กรัมปริมาณการป้อนอากาศ 5 l/min. อัตราการป้อนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 5 l/min.(ณ อุณ-หภูมิ 30 องศาเซลเซียสที่ความดัน 1 บรรยากาศ)ปริมาณไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่มากเกินพอ..... 76

4.22 ผลของขนาดอนุภาคที่มีต่อค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตร เมื่อกระตุ้นที่อุณ - หภูมิ 850 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชม.โดยใช้ถ่านไม้โกงกาง 150 กรัมปริมาณการป้อนอากาศ 5 l/min. อัตราการป้อนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 5 l/min.(ณ อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียสที่ความดัน 1 บรรยากาศ) ปริมาณไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่มากเกินพอ..... 77

4.23 ผลของขนาดอนุภาคที่มีต่อค่าการดูดซับไอโอดีนเมื่อกระตุ้นที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชม.โดยใช้ถ่านไม้โกงกาง 150 กรัมปริมาณการป้อนอากาศ 5 l/min.อัตราการป้อนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 5 l/min.(ณอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียสที่ความดัน 1 บรรยากาศ) ปริมาณไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่มากเกินพอ..... 77

สารบัญรูป(ต่อ)

หน้า

4.24 ผลของขนาดอนุภาคที่มีต่อค่าการดูดซับเมทธิลีนบูล เมื่อกระตุ้นที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชม.โดยใช้ถ่านไม้โกงกาง 150 กรัมปริมาณการป้อนอากาศ 5 l/min.อัตราการป้อนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 5 l/min.(ณ อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียสที่ความดัน 1 บรรยากาศ)ปริมาณไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่มากเกินพอ..... 78

4.25 ผลของขนาดอนุภาคที่มีต่อพื้นที่ผิวรูพรุนทั้งหมดเมื่อกระตุ้นที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชม.โดยใช้ถ่านไม้โกงกาง 150 กรัมปริมาณการป้อนอากาศ 5 l/min. อัตราการป้อนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 5 l/min.(ณ อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ที่ความดัน 1 บรรยากาศ) ปริมาณไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่มากเกินพอ..... 78

4.26 adsorption spectrum ของสารละลาย $K_2Cr_2O_7$ เข้มข้น $1.7X\ 10^{-4}$ M เตรียมณ pH 1,2,3,4,5 และ 7..... 79

4.27 การเปลี่ยนแปลง pH ของสารละลาย HNO_3 เมื่อผ่านการ equilibrate กับถ่านกัมมันต์จากไม้โกงกาง ขนาด 0.6-1.18 มม. pH 1,2,3..... 81

4.28 การศึกษาจลนพลศาสตร์ของการดูดซับ $Cr_2O_7^{2-}$ บนถ่านกัมมันต์จากไม้โกงกางขนาด 0.6-1.18 มม. ที่pH =2..... 85

4.29 การศึกษาจลนพลศาสตร์ของการดูดซับ $Cr_2O_7^{2-}$ บนถ่านกัมมันต์จากไม้โกงกางขนาด 0.6-1.18 มม. ที่pH =1..... 85

4.30 Adsorption isotherm ของการดูดซับ dichromate ion บนถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากไม้โกงกางขนาด 0.6-1.18 มม. ที่pH =2..... 87

4.31 Adsorption isotherm ของการดูดซับ dichromate ion บนถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากไม้โกงกางขนาด 0.6-1.18 มม. ที่pH =1..... 88

4.32 Langmuir plot ในการศึกษา Adsorption isotherm ในการดูดซับ dichromate ion บนถ่านกัมมันต์จากไม้โกงกางขนาด 0.6-1.18 มม. ที่pH =2 เป็นเลา 7 ชม. 89

สารบัญรูป(ต่อ)

หน้า

4.33 Langmuir plot ในการศึกษา Adsorption isotherm ในการดูดซับ dichromate ion บนถ่านกัมมันต์จากไม้โกงกางขนาด 0.6-1.18 มม. ที่pH =1 เป็นเลา 7 ซม. 89

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

^{o} A = อังสตรอม (Angstrom) เป็นหน่วยวัดความยาวมีค่าเท่ากับ 10^{-10} เมตร

ASH = ค่าเถ้า มีหน่วยเป็นร้อยละโดยน้ำหนัก

BD = ค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตร (Bulk density) มีหน่วยเป็นกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

$CaCl_2$ = แคลเซียมคลอไรด์

$Cr_2O_7^{2-}$ = ไดโครเมตไอออน

FC = ค่าถ่านคงตัว (Fixed carbon) มีหน่วยเป็นร้อยละโดยน้ำหนัก

HCl = กรดไฮโดรคลอริค

IA = ค่าไอโอดีน (Iodine adsorption number) มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อกรัมของถ่านกัมมันต์

$K_2Cr_2O_7$ = โปแตสเซียมไดโครเมต

KI = โปแตสเซียมไอโอไดด์

KIO_3 = โปแตสเซียมไอโอเดต

M = ค่าความชื้น (Moisure) มีหน่วยเป็นร้อยละโดยน้ำหนัก

MB = ค่าการดูดซับเมทธิลีนบูล (Methylene blue adsorption) มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อกรัมของถ่านกัมมันต์

N_A = เลขอโวกาโด (Avogado number) เป็นค่าคงที่ มีค่าเท่ากับ $6.023X10^{23}$ โมเลกุลต่อโมล

NaOH = โซเดียมไฮดรอกไซด์

Na_2CO_3 = โซเดียมคาร์โบเนต

$Na_2S_2O_3$ = โซเดียมไทโอซัลเฟต

NH_4OH = แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์

P/P_o = ความดันสัมพัทธ์ (Relative pressure) เป็นความดันของสารถูกดูดซับ ณ จุดสมดุลของการดูดซับเทียบกับความดันมาตราฐาน ในงานวิจัยนี้ใช้ความดันของไนโตรเจนเหลวเป็นความดันมาตรฐาน

S_{BET} = พื้นที่ผิวจำเพาะของรูพรุนทั้งหมด (Total specific surface area) มีหน่วยเป็นตารางเมตรต่อกรัมของถ่านกัมมันต์

VCM = ค่าสารระเหยที่เผาไหม้ได้ (Volatile combustible matter) มีหน่วยเป็นร้อยละต่อน้ำหนัก

Y = ร้อยละของผลิตภัณฑ์ที่ได้ (Yield) มีหน่วยเป็นร้อยละโดยน้ำหนัก

$ZnCl_2$ = ซิงค์คลอไรด์ (Zinc chloride)