5286

แกสิฟิเคชันของถ่านชาร์ที่ล้างสารอนินทรีย์โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแอลคาไลคาร์บอเนต

นางสาว สมพร บรรลือศรีเรือง

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
ภาควิชาเคมีเทคนิค
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
พ.ศ. 2537

ISBN 974-584-801-8

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

I16906676

ALKALI CARBONATE CATALYSED GASIFICATION OF DEMINERALIZED COAL CHARS

Miss Somporn Buniuesriruang

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Science

Department of Chemical Technology

Graduate School

Chulalongkorn University

1994

ISBN 974-584-801-8

หัวข้อวิทยานิพนธ์	แกสิฟิเคชันของถ่านชาร์ที่ล้างสารอนินทรีย์โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแอลคาไลคาร์บอเนต
โดย	นางสาว สมพร บรรลือศรีเรือง
ภาควิชา	เคมีเทคนิค
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ กัญจนา บุณยเกียรติ

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

.....คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร. สันติ ถุงสุวรรณ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. พล สาเกทอง)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ กัญจนา บุณยเกียรติ)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. ภัทรพรรณ ประศาสน์สารกิจ)

..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร. พรพจน์ เปี่ยมสมบูรณ์)

พิมพ์ต้นฉบับบทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสีเขียวนี้เพียงแผ่นเดียว

สมพร บรรลือศรีเรือง : แกสิฟิเคชันของถ่านชาร์ที่ล้างสารอนินทรีย์โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแอลคาไลคาร์บอเนต (ALKALI CARBONATE CATALYSED GASIFICATION OF DEMINERALIZED COAL CHARS) อ.ที่ปรึกษา: รศ. กัญจนา บุณยเกียรติ, 149 หน้า. ISBN 974-584-801-8

งานวิจัยนี้ศึกษาอิทธิพลของตัวเร่งปฏิกิริยาแอลคาไลคาร์บอเนตในการแกสิฟายถ่านชาร์ในเครื่องวิเคราะห์ทางอุณหภูมิและความร้อน(Thermogravimetric analyser ,TGA) ในบรรยากาศของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ วิเคราะห์ในเทอมของค่าพลังงานกระตุ้นและอัตราการเกิดปฏิกิริยา เพื่อหาปัจจัยและภาวะที่มีผลต่ออัตราเร็วของปฏิกิริยาและผลผลิตก๊าซ

ตัวอย่างถ่านชาร์จากถ่านหินที่มีเถ้าแตกต่างกัน 3 ชนิด คือ บางปูดำ110, แม่เมาะและบางปูดำ163 ซึ่งมีปริมาณเถ้า 8.02, 18.57 และ 41.89 เปอร์เซนต์ตามลำดับ ล้างสารอนินทรีย์ออกด้วยกรดไฮโดรคลอริกและไฟโรไลซ์ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียสเพื่อลดปริมาณสารระเหย เติมตัวเร่งปฏิกิริยาโปตัสเซียมคาร์บอเนตและโซเดียมคาร์บอเนตในถ่านชาร์ด้วยวิธี vacuum impregnation ในปริมาณ 0, 5, 10 และ 20 เปอร์เซนต์ของถ่านชาร์ ถ่านชาร์ที่ใช้มีขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร ปริมาณ 40 $\pm$ 0.5 มิลลิกรัม อุณหภูมิที่แกสิฟายคือ 600, 700, 800 และ 850 องศาเซลเซียส ติดตามอัตราการเกิดปฏิกิริยาด้วยเทอร์โมแกรมของน้ำหนักถ่านชาร์ที่ลดลงและการวิเคราะห์ปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่เกิดขึ้นด้วยเครื่องก๊าซโครมาโตกราฟ เปรียบเทียบระหว่างถ่านชาร์ที่ล้างและไม่ล้างสารอนินทรีย์ เติมและไม่เติมตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในระหว่างการแกสิฟายมีเพียงปฏิกิริยาเดียวคือ

$$C + CO_2 \rightleftharpoons 2CO$$

ถ่านชาร์ที่ไม่เติมตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถแกสิฟายได้ตั้งแต่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียสปฏิกิริยาเกิดได้ดีเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น โดยมีอัตราเร็ว 0.24×10^{-3}-11.79×10^{-2} มิลลิกรัมต่อมิลลิกรัมคาร์บอนเริ่มต้นต่อนาที และพลังงานกระตุ้น 98.84-110.78 กิโลจูลต่อโมล เมื่อเติมตัวเร่งปฏิกิริยาการแกสิฟายเกิดที่อุณหภูมิต่ำลงและอัตราเร็วของปฏิกิริยาเพิ่มเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณที่เติมคิดเป็น 9-50 เท่าของปฏิกิริยาที่ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา K_2CO_3 มีความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาได้ดีกว่า Na_2CO_3 ส่วนซิลิกาที่เป็นสารอนินทรีย์ในถ่านชาร์เป็นตัวหน่วงปฏิกิริยา การล้างสารอนินทรีย์ถ่านชาร์บางปูดำ163 ซึ่งมีเถ้ามากช่วยให้การแกสิฟายดีขึ้น แต่สำหรับถ่านชาร์ แม่เมาะและบางปูดำ110 ที่มีเถ้าเพียงเล็กน้อยสารอนินทรีย์ที่มีอยู่ช่วยเร่งปฏิกิริยา อย่างไรก็ดีตัวเร่งปฏิกิริยาไม่มีส่วนลดพลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยา และยังพบว่ามีการระเหยของตัวเร่งปฏิกิริยาในระหว่างการแกสิฟายด้วย

ภาควิชา เคมีเทคนิค ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา เคมีเทคนิค ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....

ปีการศึกษา 2537 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....

C525618 : MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY

KEYWORD : CATALYSED GASIFICATION / ALKALI CARBONATE /COAL CHAR /DEMINERALIZED COAL CHAR SOMPORN BUNLUESRIRUANG : ALKALI CARBONATE CATALYSED GASIFICATION OF DEMINERALIZED COAL CHARS. THESIS ADVISOR : ASSO. PROF. KUNCHANA BUNYAKAIT, 149 pp. ISBN 974-584-801-8

In this study, two alkali carbonates were used as catalysts for CO_2 gasification of coal chars in a thermogravimetric analyser. Catalytic activities were studied in terms of rate and activation energy, to determine significant variables that influence rates of gasification and gas production. Three samples of coals with different ash contents of 8.02, 18.57 and 41.89 % by weight respectively were used namely, Bang-poo-dum110, Mae-moh and Bang-poo-dum163. Coal samples were demineralized by hydrochloric acid and pyrolysed at 900 degree celcius to minimize effects from mineral and volatile matters. Potassium carbonate and sodium carbonate were added to coal chars by vacuum impregnation from 5, 10 to 20% by weight of char. Samples (40 ± 0.5 mg) were gasified at 600, 700, 800 and 850 degree celcius, employing coal sizes smaller than 75 micron. Gasification rates were followed by thermograms obtained from TGA and from GC analysis of gas samples collected for 1 minute at 5 mitute intervals for 30 minutes. The only reaction during gasification was

$$C + CO_2 \rightleftharpoons 2CO$$

The result is as follows: chars without catalysts gasified at low rate at temperature greater than 700 degree celcius; their rates increased with temperature, in the range of 0.24×10^{-3}-11.79×10^{-3} mg.mg $Ci^{-1}.min^{-1}$. Their activated energies were in the range of 98.84-110.78 kJ/mol. Chars with catalysts gasified at a much higher rate , 9-50 times more than that of uncatalysed sample; their rates increased linearly with amount of catalysts and temperature. K_2CO_3 was more effective than Na_2CO_3. The presence of silica in coal samples asserted a negative influence on gasification. Demineralization had a positive effect on high ash char (BP163), but showed negative effect on low ash chars (MM and BP110). Addition of catalysts did not lower the activation energies, and it was found that there were catalyst lost due to its volatility during gasification.

ภาควิชา เคมีเทคนิค ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา เคมีเทคนิค ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....

ปีการศึกษา 2537 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....

กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์กัญจนา บุณยเกียรติ ที่กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ และช่วยเหลือให้งานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี รวมทั้งคณาจารย์ทุกท่านในภาควิชาเคมีเทคนิค ที่ได้ให้คำแนะนำ

ขอขอบพระคุณการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ที่กรุณาอนุเคราะห์ให้ตัวอย่างถ่านหินเพื่อใช้ในการทำวิทยานิพนธ์นี้ ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัยที่ให้ทุนอุดหนุนงานวิจัยนี้ ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย รวมทั้งเจ้าหน้าที่กองวิเคราะห์ กรมทรัพยากรธรณี กระทรวงอุตสาหกรรม ที่กรุณาช่วยเหลือพร้อมทั้งอำนวยความสะดวกในการวิเคราะห์

ขอขอบคุณบุคลากรในภาควิชาเคมีเทคนิคทุกท่าน ที่ได้อำนวยความสะดวกในการใช้ห้องปฏิบัติการจนงานวิจัยสำเร็จลงด้วยดี ขอขอบคุณ คุณสังข์ ชมชื่น ที่ช่วยเหลือซ่อมสร้างเครื่องมือบางส่วนที่ใช้ในงานวิจัย ขอขอบคุณพี่ ๆ เพื่อน ๆ ในภาควิชาเคมีเทคนิคและผู้อยู่เบื้องหลังทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือและเป็นกำลังในให้การทำวิทยานิพนธ์สำเร็จลุล่วง

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่ได้ให้กำลังใจ ให้คำแนะนำ ความช่วยเหลือ และให้การสนับสนุนเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... จ

กิตติกรรมประกาศ..... ฉ

สารบัญตาราง..... ณ

สารบัญภาพ..... ฎ

สารบัญรูป..... ฎ

บทที่

1. บทนำ..... 1

1.1 วัตถุประสงค์และขอบเขตงานวิจัย..... 2

1.2 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ..... 2

2. วารสารปริทัศน์..... 3

2.1 ถ่านหิน..... 3

2.2 ความหมายของการแกสิฟาย..... 4

2.3 การไพโรไลซ์..... 6

2.4 การแกสิฟายถ่านชาร์..... 7

2.5 การนำตัวเร่งปฏิกิริยามาใช้ในการแกสิฟาย..... 9

2.6 กลไกการเกิดปฏิกิริยาเคมี..... 11

2.7 เทอร์โมไดนามิกส์ของการแกสิฟาย..... 14

2.8 จลนพลศาสตร์ของการแกสิฟายถ่านหิน..... 17

2.9 ตัวแปรที่มีผลต่อการแกสิฟาย..... 19

2.9.1 ชนิดของคาร์บอน..... 19

2.9.2 สารอนินทรีย์ในถ่านหิน..... 20

2.9.3 ชนิดตัวเร่งปฏิกิริยา..... 21

2.9.4 ความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยา..... 23

2.9.5 วิธีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยา..... 26

2.9.6 การสูญเสียตัวเร่งปฏิกิริยา..... 26

2.9.7 การระเหยของตัวเร่งปฏิกิริยา..... 27

2.9.8 การหน่วงปฏิกิริยาโดยผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการแกสิฟาย..... 28

สารบัญ(ต่อ)

บทที่		หน้า
	2.10 การวิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์ทางความร้อน	28
	2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	31
3.	การดำเนินงานทดลอง	32
	3.1 ตัวอย่างที่ใช้ในงานวิจัย	32
	3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	32
	3.3 ขั้นตอนการทดลอง	34
	3.4 วิธีการทดลอง	42
	3.4.1 การเตรียมตัวอย่างถ่านหิน	42
	3.4.2 การเตรียมตัวอย่างสำหรับการแกสิฟาย	42
	3.4.3 การล้างสารอนินทรีย์ออกจากถ่านหิน (Demineralization)	42
	3.4.4 การไพโรไลซ์	43
	3.4.5 การเติมตัวเร่งปฏิกิริยา	43
	3.4.6 การแกสิฟายถ่านชาร์	44
	3.4.7 การเก็บก๊าซ	45
	3.4.8 การตรวจสอบก๊าซด้วยเครื่องก๊าซโครมาโตกราฟ	45
	3.4.9 การวิเคราะห์เทอร์โมแกรม	46
	3.4.10 ปัจจัยที่ควบคุม	46
4.	ผลการทดลอง	47
	4.1 สัญลักษณ์ที่ใช้	47
	4.2 ผลการทดลองวิเคราะห์คุณสมบัติของถ่านหิน	48
	4.3 ผลการวิเคราะห์ถ่านหินที่ถูกล้างสารอนินทรีย์และไพโรไลซ์	50
	4.4 แผนภูมิแกสิฟาย	54
	4.5 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วกับปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา	79
	4.6 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของปริมาณก๊าซกับอัตราเร็ว	86
	4.7 ค่าพลังงานกระตุ้น	94
5.	วิจารณ์ สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ	105
	5.1 สมบัติเบื้องต้นของถ่านหิน	105
	5.2 สมบัติของถ่านที่ผ่านการล้างสารอนินทรีย์และไพโรไลซ์	106
	5.3 การแกสิฟายถ่านชาร์	108

สารบัญ(ต่อ)

บทที่		หน้า
	5.3.1 อิทธิพลของธาตุในสารอนินทรีย์	109
	5.3.2 อิทธิพลของตัวเร่งปฏิกิริยา	110
	5.3.3 การวิเคราะห์ก๊าซ	112
	5.3.4 ค่าพลังงานกระตุ้น	113
	5.3.5 การเปรียบเทียบการเร่งปฏิกิริยา	114
	5.3.6 ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างการแกสิฟาย	114
	5.3.7 การทำงานของตัวเร่งปฏิกิริยา	115
	5.4 ข้อเสนอแนะ	115
รายการอ้างอิง		116
ภาคผนวก		119
	ภาคผนวก ก	120
	ภาคผนวก ข	128
	ภาคผนวก ค	129
	ภาคผนวก ง	146
ประวัติผู้เขียน		149

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

2.1 ปฏิกิริยาที่เกิดในการแกสิฟายถ่านหิน 5

2.2 ปฏิกิริยาที่เกิดในระหว่างไพโรไลซ์ถ่านหิน 8

2.3 วัสดุ ภาวะ และวิธีทดลองในงานวิจัยเกี่ยวกับการแกสิฟายที่มีตัวเร่งปฏิกิริยา 10

2.4 กลไกการแกสิฟาย 11

2.5 สมการอัตราเร็วของการแกสิฟายแบบมีตัวเร่งปฏิกิริยา 17

2.6 อัตราการเพิ่มขึ้นของปฏิกิริยา เมื่อศักดิ์ของถ่านหินแตกต่างกัน 19

2.7 เปรียบเทียบการทำงานของตัวเร่งปฏิกิริยา 21

2.8 ความว่องไวของโลหะแอลคาไลในการแกสิฟายถ่านชาร์ 22

2.9 แสดงความว่องไวของโลหะอัลคาไลในการแกสิฟายถ่านหิน 23

2.10 พลังงานกระตุ้นของการแกสิฟายถ่านชาร์ 25

2.11 พลังงานกระตุ้นของการแกสิฟายถ่านชาร์ในคาร์บอนไดออกไซด์ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแตกต่างกัน 25

2.12 แสดงองค์ประกอบที่เกิดขึ้นจากการทำปฏิกิริยาระหว่างตัวเร่งกับสารอนินทรีย์ 27

2.13 การวิเคราะห์ทางความร้อน 30

3.1 การเตรียมตัวอย่างถ่านหินที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์ 42

4.1 อักษรย่อของตัวอย่างชนิดต่าง ๆ 47

4.2 การวิเคราะห์ถ่านหินแบบประมาณ(air dried basis) 49

4.3 การวิเคราะห์ถ่านหินแบบแยกธาตุ (air dried basis) 49

4.4 องค์ประกอบสารอนินทรีย์ในถ่านหินตัวอย่างจากการวิเคราะห์แบบ X-ray fluorescence 49

4.5 การวิเคราะห์แบบประมาณ(dry basis) ของถ่านหินบางปูดำ110 ที่ผ่านการล้างสารอนินทรีย์และไพโรไลซ์ 51

4.6 องค์ประกอบแบบแยกธาตุ(dry basis)ของถ่านหินบางปูดำ110 ที่ผ่านการล้างสารอนินทรีย์และไพโรไลซ์ 51

4.7 องค์ประกอบสารอนินทรีย์ในถ่านหินบางปูดำ110 จากการวิเคราะห์แบบ X-ray fluorescence 51

4.8 การวิเคราะห์แบบประมาณ(dry basis) ของถ่านหินแม่เมาะที่ผ่านการล้างสารอนินทรีย์และไพโรไลซ์ 52

สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่ หน้า

4.9 องค์ประกอบแบบแยกธาตุ (dry basis) ของถ่านหินแม่เมาะที่ผ่านการล้างสารอนินทรีย์และไพโรไลซ์ 52

4.10 องค์ประกอบสารอนินทรีย์ในถ่านหินแม่เมาะจากการวิเคราะห์แบบ X-ray fluorescence 52

4.11 การวิเคราะห์แบบประมาณ(dry basis) ของถ่านหินบางปูดำ163 ที่ผ่านการล้างสารอนินทรีย์และไพโรไลซ์ 53

4.12 องค์ประกอบแบบแยกธาตุ (dry basis) ของถ่านหินบางปูดำ163 ที่ผ่านการล้างสารอนินทรีย์และไพโรไลซ์ 53

4.13 องค์ประกอบสารอนินทรีย์ในถ่านหินบางปูดำ163 จากการวิเคราะห์แบบ X-ray fluorescence 53

4.14 พื้นที่ใต้กราฟและของค์ประกอบของก๊าซจากการวิเคราะห์ด้วยก๊าซโครมาโตรกราฟจากการแกสิฟาย CBP110+Na_2CO_3 10% ที่ 800 องศาเซลเซียส 86

4.15 ค่าพลังงานกระตุ้นของถ่านชาร์บางปูดำ110 ที่ล้างสารอนินทรีย์แล้ว 102

4.16 คาพลังงานกระตุ้นของถ่านชาร์บางปูดำ110 ที่ไม่ล้างสารอนินทรีย์ 102

4.17 ค่าพลังงานกระตุ้นของถ่านชาร์แม่เมาะที่ล้างสารอนินทรีย์แล้ว 103

4.18 ค่าพลังงานกระตุ้นของถ่านชาร์แม่เมาะที่ไม่ล้างสารอนินทรีย์ 103

4.19 ค่าพลังงานกระตุ้นของถ่านชาร์บางปูดำ163 ที่ล้างสารอนินทรีย์แล้ว 104

4.20 ค่าพลังงานกระตุ้นของถ่านชาร์บางปูดำ163 ที่ไม่ล้างสารอนินทรีย์ 104

5.1 ร้อยละของธาตุในสารอนินทรีย์ที่ถูกล้างออกด้วยกรดไฮโดรคลอริกเทียบกับธาตุที่มีอยู่เดิม 107

5.2 เปรียบเทียบอิทธิพลของสารอนินทรีย์ที่มีต่อการแกสิฟาย 109

5.3 อัตราการระเหยของตัวเร่งปฏิกิริยาในเวลาแกสิฟาย 30 นาที 113

สารบัญภาพ

ภาพที่ หน้า

3.1 ชุดรีฟลักซ์ 35

3.2 เตาสำหรับไพโรไลซ์ (tubular furnace) 35

3.3 เครื่องปฏิกรณ์สำหรับไพโรไลซ์ (pyrolyzed reactor) 36

3.4 อุปกรณ์ควบคุมการไหลเข้าของก๊าซ 36

3.5 ชุดเครื่องมือวิเคราะห์ทางอุณหภูมิและความร้อน 37

3.6 รูปแสดงการวางครูซิเบิ้ลบนแกนชั่งน้ำหนัก 37

3.7 อุปกรณ์ดักเก็บก๊าซ 38

3.8 เทอร์มอสอลูมิเนียมหุ้มฉนวนสำหรับใส่ไนโตรเจนเหลว 38

3.9 ถังเก็บไนโตรเจนเหลว ขนาด 25 ลิตร 39

3.10 ก๊าซผสมมาตรฐานจาก Scott Specialty Gases 39

3.11 เครื่อง gas chromatography ของ Hewlett packard 40

สารบัญรูป

รูปที่ หน้า

2.1 กลไกทั้งหมดของการไพโรไลซ์ถ่านหิน..... 7

2.2 ปฏิกิริยาย่อย ๆ ของปฏิกิริยาแกสิฟาย การเผาไหม้ และปฏิกิริยาไฮโดรแครกกิ้ง 8

2.3 อิทธิพลของอุณหภูมิต่อองค์ประกอบก๊าซที่ภาวะสมดุล..... 15

2.4 อิทธิพลของความดันต่อองค์ประกอบก๊าซที่ภาวะสมดุล..... 16

2.5 อิทธิพลของอัตราส่วนระหว่างออกซิเจนกับไอน้ำที่มีต่อองค์ประกอบก๊าซที่ภาวะสมดุล 16

2.6 ความสัมพันธ์ของอัตราการแกสิฟายถ่านชาร์ด้วยคาร์บอนไดออกไซด์กับอัตราส่วน K/C 24

2.7 ความสัมพันธ์ของอัตราการแกสิฟายกราไฟต์และถ่านชาร์ด้วยไอน้ำกับอัตราส่วน K/C 24

2.8 แผนภูมิของระบบ TGA..... 29

2.9 กราฟเปรียบเทียบระหว่าง (a) - TG (b) - DTG..... 29

3.1 ขั้นตอนการทดลอง..... 40

3.2 แผนผังชุดการทดลอง..... 41

4.1 ความสัมพันธ์ของอัตราการแกสิฟายกับเปอร์เซนต์การเปลี่ยนของถ่านชาร์บางปูดำ110 ที่ล้างสารอนินทรีย์แล้ว ที่อุณหภูมิแกสิฟาย 600 องศาเซลเซียส..... 55

4.2 ความสัมพันธ์ของอัตราการแกสิฟายกับเปอร์เซนต์การเปลี่ยนของถ่านชาร์บางปูดำ110 ที่ล้างสารอนินทรีย์แล้ว ที่อุณหภูมิแกสิฟาย 700 องศาเซลเซียส..... 56

4.3 ความสัมพันธ์ของอัตราการแกสิฟายกับเปอร์เซนต์การเปลี่ยนของถ่านชาร์บางปูดำ110 ที่ล้างสารอนินทรีย์แล้ว ที่อุณหภูมิแกสิฟาย 800 องศาเซลเซียส..... 57

4.4 ความสัมพันธ์ของอัตราการแกสิฟายกับเปอร์เซนต์การเปลี่ยนของถ่านชาร์บางปูดำ110 ที่ล้างสารอนินทรีย์แล้ว ที่อุณหภูมิแกสิฟาย 850 องศาเซลเซียส..... 58

4.5 ความสัมพันธ์ของอัตราการแกสิฟายกับเปอร์เซนต์การเปลี่ยนของถ่านชาร์บางปูดำ110 ที่ไม่ล้างสารอนินทรีย์ ที่อุณหภูมิแกสิฟาย 600 องศาเซลเซียส..... 59

4.6 ความสัมพันธ์ของอัตราการแกสิฟายกับเปอร์เซนต์การเปลี่ยนของถ่านชาร์บางปูดำ110 ที่ไม่ล้างสารอนินทรีย์ ที่อุณหภูมิแกสิฟาย 700 องศาเซลเซียส..... 60

4.7 ความสัมพันธ์ของอัตราการแกสิฟายกับเปอร์เซนต์การเปลี่ยนของถ่านชาร์บางปูดำ110 ที่ไม่ล้างสารอนินทรีย์ ที่อุณหภูมิแกสิฟาย 800 องศาเซลเซียส..... 61

4.8 ความสัมพันธ์ของอัตราการแกสิฟายกับ เปอร์เซนต์การเปลี่ยน ของถ่านชาร์บางปูดำ110 ที่ไม่ล้างสารอนินทรีย์ ที่อุณหภูมิแกสิฟาย 850 องศาเซลเซียส..... 62

4.9 ความสัมพันธ์ของอัตราการแกสิฟายกับ เปอร์เซนต์การเปลี่ยน ของถ่านชาร์แม่เมาะที่ล้างสารอนินทรีย์แล้ว ที่อุณหภูมิแกสิฟาย 600 องศาเซลเซียส..... 63

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.10 ความสัมพันธ์ของอัตราการแกสิฟายกับเปอร์เซนต์การเปลี่ยนของถ่านชาร์แม่เมาะที่ล้างสารอนินทรีย์แล้ว ที่อุณหภูมิแกสิฟาย 700 องศาเซลเซียส..... 64
4.11 ความสัมพันธ์ของอัตราการแกสิฟายกับเปอร์เซนต์การเปลี่ยนของถ่านชาร์แม่เมาะที่ล้างสารอนินทรีย์แล้ว ที่อุณหภูมิแกสิฟาย 800 องศาเซลเซียส..... 65
4.12 ความสัมพันธ์ของอัตราการแกสิฟายกับเปอร์เซนต์การเปลี่ยนของถ่านชาร์แม่เมาะที่ล้างสารอนินทรีย์แล้ว ที่อุณหภูมิแกสิฟาย 850 องศาเซลเซียส..... 66
4.13 ความสัมพันธ์ของอัตราการแกสิฟายกับเปอร์เซนต์การเปลี่ยนของถ่านชาร์แม่เมาะที่ไม่ล้างสารอนินทรีย์ ที่อุณหภูมิแกสิฟาย 600 องศาเซลเซียส..... 67
4.14 ความสัมพันธ์ของอัตราการแกสิฟายกับเปอร์เซนต์การเปลี่ยนของถ่านชาร์แม่เมาะที่ไม่ล้างสารอนินทรีย์ ที่อุณหภูมิแกสิฟาย 700 องศาเซลเซียส..... 68
4.15 ความสัมพันธ์ของอัตราการแกสิฟายกับเปอร์เซนต์การเปลี่ยนของถ่านชาร์แม่เมาะที่ไม่ล้างสารอนินทรีย์ ที่อุณหภูมิแกสิฟาย 800 องศาเซลเซียส..... 69
4.16 ความสัมพันธ์ของอัตราการแกสิฟายกับเปอร์เซนต์การเปลี่ยนของถ่านชาร์แม่เมาะที่ไม่ล้างสารอนินทรีย์ ที่อุณหภูมิแกสิฟาย 850 องศาเซลเซียส..... 70
4.17 ความสัมพันธ์ของอัตราการแกสิฟายกับเปอร์เซนต์การเปลี่ยนของถ่านชาร์บางปูดำ163 ที่ล้างสารอนินทรีย์แล้ว ที่อุณหภูมิแกสิฟาย 600 องศาเซลเซียส..... 71
4.18 ความสัมพันธ์ของอัตราการแกสิฟายกับเปอร์เซนต์การเปลี่ยนของถ่านชาร์บางปูดำ163 ที่ล้างสารอนินทรีย์แล้ว ที่อุณหภูมิแกสิฟาย 700 องศาเซลเซียส..... 72
4.19 ความสัมพันธ์ของอัตราการแกสิฟายกับเปอร์เซนต์การเปลี่ยนของถ่านชาร์บางปูดำ163 ที่ล้างสารอนินทรีย์แล้ว ที่อุณหภูมิแกสิฟาย 800 องศาเซลเซียส..... 73
4.20 ความสัมพันธ์ของอัตราการแกสิฟายกับเปอร์เซนต์การเปลี่ยนของถ่านชาร์บางปูดำ163 ที่ล้างสารอนินทรีย์แล้ว ที่อุณหภูมิแกสิฟาย 850 องศาเซลเซียส..... 74
4.21 ความสัมพันธ์ของอัตราการแกสิฟายกับเปอร์เซนต์การเปลี่ยนของถ่านชาร์บางปูดำ163 ที่ไม่ล้างสารอนินทรีย์ ที่อุณหภูมิแกสิฟาย 600 องศาเซลเซียส..... 75
4.22 ความสัมพันธ์ของอัตราการแกสิฟายกับเปอร์เซนต์การเปลี่ยนของถ่านชาร์บางปูดำ163 ที่ไม่ล้างสารอนินทรีย์ ที่อุณหภูมิแกสิฟาย 700 องศาเซลเซียส..... 76
4.23 ความสัมพันธ์ของอัตราการแกสิฟายกับเปอร์เซนต์การเปลี่ยนของถ่านชาร์บางปูดำ163 ที่ไม่ล้างสารอนินทรีย์ ที่อุณหภูมิแกสิฟาย 800 องศาเซลเซียส..... 77

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.24 ความสัมพันธ์ของอัตราการแกสิฟายกับร้อยละการเปลี่ยนของถ่านชาร์บางปูดำ163 ที่ไม่ล้างสารอนินทรีย์ ที่อุณหภูมิแกสิฟาย 850 องศาเซลเซียส 78

4.25 อิทธิพลของตัวเร่งปฏิกิริยาโปตัสเซียมคาร์บอเนตต่อการแกสิฟายถ่านชาร์บางปูดำ110 ที่ล้างสารอนินทรีย์แล้ว 80

4.26 อิทธิพลของตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมคาร์บอเนตต่อการแกสิฟายถ่านชาร์บางปูดำ110 ที่ยังล้างสารอนินทรีย์แล้ว 80

4.27 อิทธิพลของตัวเร่งปฏิกิริยาโปตัสเซียมคาร์บอเนตต่อการแกสิฟายถ่านชาร์บางปูดำ110 ที่ไม่ล้างสารอนินทรีย์ 81

4.28 อิทธิพลของตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมคาร์บอเนตต่อการแกสิฟายถ่านชาร์บางปูดำ110 ที่ไม่ล้างสารอนินทรีย์ 81

4.29 อิทธิพลของตัวเร่งปฏิกิริยาโปตัสเซียมคาร์บอเนตต่อการแกสิฟายถ่านชาร์แม่เมาะที่ล้างสารอนินทรีย์แล้ว 82

4.30 อิทธิพลของตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมคาร์บอเนตต่อการแกสิฟายถ่านชาร์แม่เมาะที่ล้างสารอนินทรีย์แล้ว 82

4.31 อิทธิพลของตัวเร่งปฏิกิริยาโปตัสเซียมคาร์บอเนตต่อการแกสิฟายถ่านชาร์แม่เมาะที่ไม่ล้างสารอนินทรีย์ 83

4.32 อิทธิพลของตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมคาร์บอเนตต่อการแกสิฟายถ่านชาร์แม่เมาะที่ไม่ล้างสารอนินทรีย์ 83

4.33 อิทธิพลของตัวเร่งปฏิกิริยาโปตัสเซียมคาร์บอเนตต่อการแกสิฟายถ่านชาร์บางปูดำ163 ที่ล้างสารอนินทรีย์แล้ว 84

4.34 อิทธิพลของตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมคาร์บอเนตต่อการแกสิฟายถ่านชาร์บางปูดำ163 ที่ล้างสารอนินทรีย์แล้ว 84

4.35 อิทธิพลของตัวเร่งปฏิกิริยาโปตัสเซียมคาร์บอเนตต่อการแกสิฟายถ่านชาร์บางปูดำ163 ที่ไม่ล้างสารอนินทรีย์ 85

4.36 อิทธิพลของตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมคาร์บอเนตต่อการแกสิฟายถ่านชาร์บางปูดำ163 ที่ไม่ล้างสารอนินทรีย์ 85

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.37 เปรียบเทียบปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่วัดได้จากการวิเคราะห์ด้วย
เครื่องก๊าซโครมาโตกราฟ กับจากการคำนวณ จากการแกสิฟายถ่านชาร์บางปูดำ110
ที่ล้างสารอนินทรีย์แล้ว ที่อุณหภูมิแกสิฟาย850องศาเซลเซียส..... 88
4.38 เปรียบเทียบปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่วัดได้จาก การวิเคราะห์ด้วย
เครื่องก๊าซโครมาโตกราฟ กับจากการคำนวณ จากการแกสิฟายถ่านชาร์บางปูดำ110
ที่ไม่ล้างสารอนินทรีย์ ที่อุณหภูมิแกสิฟาย 850 องศาเซลเซียส..... 89
4.39 เปรียบเทียบปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่วัดได้จากการวิเคราะห์ด้วย
เครื่องก๊าซโครมาโตกราฟ กับจากการคำนวณ จากการแกสิฟายถ่านชาร์แม่เมาะ
ที่ล้างสารอนินทรีย์แล้ว ที่อุณหภูมิแกสิฟาย 850 องศาเซลเซียส..... 90
4.40 เปรียบเทียบปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่วัดได้จาก การวิเคราะห์ด้วย
เครื่องก๊าซโครมาโตกราฟ กับจากการคำนวณ จากการแกสิฟายถ่านชาร์แม่เมาะ
ที่ไม่ล้างสารอนินทรีย์ ที่อุณหภูมิแกสิฟาย 850 องศาเซลเซียส..... 91
4.41 เปรียบเทียบปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่วัดได้จาก การวิเคราะห์ด้วย
เครื่องก๊าซโครมาโตกราฟ กับจากการคำนวณ จากการแกสิฟายถ่านชาร์บางปูดำ163
ที่ล้างสารอนินทรีย์แล้ว ที่อุณหภูมิแกสิฟาย 850 องศาเซลเซียส..... 92
4.42 เปรียบเทียบปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่วัดได้จาก การวิเคราะห์ด้วย
เครื่องก๊าซโครมาโตกราฟ กับจากการคำนวณ จากการแกสิฟายถ่านชาร์บางปูดำ163
ที่ไม่ล้างสารอนินทรีย์ที่อุณหภูมิแกสิฟาย 850 องศาเซลเซียส..... 93
4.43 กราฟของอาร์เรเนียสของถ่านชาร์บางปูดำ110 ที่ล้างสารอนินทรีย์แล้ว โดยมี
โปตัสเซียมคาร์บอเนตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา..... 96
4.44 กราฟของอาร์เรเนียสของถ่านชาร์บางปูดำ110 ที่ล้างสารอนินทรีย์แล้ว โดยมี
โซเดียมคาร์บอเนตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา..... 96
4.45 กราฟของอาร์เรเนียสของถ่านชาร์บางปูดำ110 ที่ไม่ล้างสารอนินทรีย์ โดยมี
โปตัสเซียมคาร์บอเนตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา..... 97
4.46 กราฟของอาร์เรเนียสของถ่านชาร์บางปูดำ110 ที่ไม่ล้างสารอนินทรีย์ โดยมี
โซเดียมคาร์บอเนตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา..... 97
4.47 กราฟของอาร์เรเนียสของถ่านชาร์แม่เมาะที่ล้างสารอนินทรีย์แล้ว โดยมี
โปตัสเซียมคาร์บอเนตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา..... 98

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.48 กราฟของอาร์เรเนียสของถ่านชาร์แม่เมาะที่ล้างสารอนินทรีย์แล้ว โดยมี โซเดียมคาร์บอเนตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา..... 98

4.49 กราฟของอาร์เรเนียสของถ่านชาร์แม่เมาะที่ไม่ล้างสารอนินทรีย์ โดยมี โปตัสเซียมคาร์บอเนตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา..... 99

4.50 กราฟของอาร์เรเนียสของถ่านชาร์แม่เมาะที่ไม่ล้างสารอนินทรีย์ โดยมี โซเดียมคาร์บอเนตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา..... 99

4.51 กราฟของอาร์เรเนียสของถ่านชาร์บางปูดำ163 ที่ล้างสารอนินทรีย์แล้ว โดยมี โปตัสเซียมคาร์บอเนตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา..... 100

4.52 กราฟของอาร์เรเนียสของถ่านชาร์บางปูดำ163 ที่ล้างสารอนินทรีย์แล้ว โดยมี โซเดียมคาร์บอเนตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา..... 100

4.53 กราฟของอาร์เรเนียสของถ่านชาร์บางปูดำ163 ที่ไม่ล้างสารอนินทรีย์ โดยมี โปตัสเซียมคาร์บอเนตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา..... 101

4.44 กราฟของอาร์เรเนียสของถ่านชาร์บางปูดำ163 ที่ไม่ล้างสารอนินทรีย์ โดยมี โซเดียมคาร์บอเนตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา..... 102

5.1 อิทธิพลของซิลิกาที่มีต่อการแกสิฟาย..... 111