

การปรับปรุงคุณภาพด้านหินทางเคมีโดยเทคนิคฟลูอิดิเซชัน

นาย กฤษดา พลาฤทธิ์



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

ภาควิชาเคมีเทคนิค

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พ.ศ. 2532

ISBN 974-576-361-6

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

0 15635

Chemical Beneficiation of Coal by Fluidization Technique

Mr. Krissada Plarid

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science
Department of Chemical Technology**

Graduate School


Chulalongkorn University

1989

ISBN 974-576-361-6

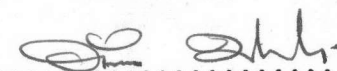
วิทยานิพนธ์ การปรับปรุงคุณภาพถ่านหินทางเคมีโดยเทคนิคฟลูอิดไอเซชัน
โดย นาย กฤษดา พลาฤทธิ์
ภาควิชา เคมีเทคนิค
อาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ ดร. ภัทรพรรณ ประศาสน์สารกิจ
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ศาสตราจารย์ ดร. สมศักดิ์ คำรงค์เลิศ


บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

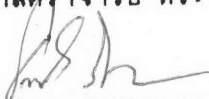
.....  คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(ศาสตราจารย์ ดร. ถาวร วัชรวิทย์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....  ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. พล สาเกตอง)

.....  อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ ดร. ภัทรพรรณ ประศาสน์สารกิจ)

.....  อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(ศาสตราจารย์ ดร. สมศักดิ์ คำรงค์เลิศ)

.....  กรรมการ
(อาจารย์ ดร. ธราพงษ์ วิทิศานต์)



กฤษฎา พลากุทธิ์ : การปรับปรุงคุณภาพถ่านหินทางเคมีโดยเทคนิคฟลูอิดิเซชัน (CHEMICAL BENEFICIATION OF COAL BY FLUIDIZATION TECHNIQUE) อ.ที่ปรึกษา : รศ.ดร. ภัทรพรณ ประศาสนสารกิจ, ศ.ดร.สมศักดิ์ คำรงค์เลิศ, 125 หน้า.

ถ่านหินที่นำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในอุตสาหกรรมก่อให้เกิดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อมเนื่องจากมีเถ้าและกำมะถันเป็นองค์ประกอบ การขจัดเถ้าและกำมะถันจากถ่านหินด้วยสารเคมีก่อนนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงเป็นวิธีหนึ่งในการปรับปรุงคุณภาพถ่านหิน งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการปรับปรุงคุณภาพถ่านหินเหมืองแม่เมาะโดยใช้สารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิดิเซชันของเหลว โดยศึกษาตัวแปรต่าง ๆ ที่มีผลต่อการขจัดเถ้าและกำมะถันในถ่านหินคือ ความเข้มข้นของสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (5-10%) อัตราการไหลของสารละลาย 3.5-5 เท่าของ Umf (1.05, 1.25 และ 1.49 ลิตร/นาที) ขนาดถ่านหิน (0.5-1.0 และ 1.0-2.0 มม.) อุณหภูมิ (10, 20 และ 30 °ซ) จากการทดลองพบว่า สภาวะที่เหมาะสมในการขจัดเถ้าและกำมะถันจากถ่านหินแม่เมาะคือ ความเข้มข้นของสารละลาย 7% โดยน้ำหนักต่อปริมาตรในกรดซัลฟูริก 0.05 โมลาร์ อัตราการไหลของสารละลาย 1.25 ลิตรต่อนาที ขนาดถ่านหิน 0.5-1.0 มม. อุณหภูมิ 20 °ซ ระยะเวลา 60 นาที สามารถลดปริมาณเถ้าได้ร้อยละ 28.๐8 เพิ่มค่าความร้อนได้ร้อยละ 11.26 และสามารถลดปริมาณกำมะถันซัลเฟตได้ร้อยละ 92.41 ลดปริมาณกำมะถันไพไรต์ได้ร้อยละ 68.93 และลดปริมาณกำมะถันรวมได้ร้อยละ 36.12 การศึกษาอัตราเร็วปฏิกิริยาระหว่างไพไรต์กับก๊าซออกซิเจนในสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ พบว่าเป็นปฏิกิริยาอันดับสอง และขั้นตอนการแพร่ของก๊าซออกซิเจนผ่านชั้นผลิตภัณฑ์เข้าสู่แกนกลางที่ยังไม่ได้ทำปฏิกิริยา เป็นขั้นตอนควบคุมอัตราเร็วปฏิกิริยาไพไรต์โดยมีค่าคงที่อัตราเร็วปฏิกิริยาของไพไรต์ (k_2) และค่าการแพร่ประสิทธิผล (De) คือ

$$\text{ถ่านหินแม่เมาะ 1} \quad k_2 = 61.08 \exp(-26.56 \times 10^6 / RT)$$

$$De = 1.55 \times 10^{-7} \exp(-16.40 \times 10^6 / RT)$$

ภาควิชา เคมีเทคนิค
สาขาวิชา เคมีเทคนิค
ปีการศึกษา 2531

ลายมือชื่อนิติ
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา
.....

KRISSADA PLARID : CHEMICAL BENEFICIATION OF COAL BY FLUIDIZATION TECHINQUE. THESIS ADVISOR : ASSO.PROF.PATTARAPAN PRASSASSARAKICH, Ph.D., PORF.SOMSAK DAMRONGLERD, Ph.D., 125 PP.

Burning coal as fuels in industry pollutes the environment due to the quantity of ash and sulfur. Beneficiation of coal prior to combustion can be achieved by chemical method. In this study, Mae-Moh coal was beneficiated by hydrogenperoxide in liquid fluidize-bed reactor. The varied parameters were studied : concentration of hydrogenperoxide (5-10%), flowrate 3.5-5 times of Umf (1.06, 1.25 and 1.49 lit/min), coal particle size (0.5-1.0 and 1.0-2.0 mm), temperature of solution (10, 20 and 30°C). The optimum conditions for removed ash and sulfur in this experiment were as follows : concentration of 7% hydrogenperoxide in 0.05 molar sulfuric acid, flowrate of 1.25 lit/min, coal particle size of 0.5-1.0 mm, temperature 20°C, in a period of 60 min could be removed 28.08 %ash, increased 11.25% heating value, reduced 92.41% sulfate sulfur, 68.93% pyritic sulfur, and 35.12% total sulfur. The kinetic model of pyrite oxidation was second-order and the rate-controlling step of pyrite was determined to be the diffusion of oxygen through product layer. The rate constant for pyrite reaction (k_2) and effective diffusivity (De) were as follows:

$$\begin{aligned} \text{Mae-Moh 1 Coal} \quad k_2 &= 61.08 \exp(-26.55 \times 10^6/RT) \\ De &= 1.55 \times 10^{-7} \exp(-16.40 \times 10^6/RT) \end{aligned}$$

ภาควิชา เคมีเทคนิค
สาขาวิชา เคมีเทคนิค
ปีการศึกษา 2531

ลายมือชื่อนิติต นิติต อรรถสิทธิ์
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา อ. อ. อ.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลงด้วยดี ต้องขอกราบขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร. ภักทรพรรณ ประศาสน์สารกิจ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ ศาสตราจารย์ ดร. สมศักดิ์ คำรงค์เลิศ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม และอาจารย์ทุกท่านที่กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำช่วยเหลือการวิจัยเป็นอย่างดีมาโดยตลอด

ขอขอบพระคุณการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ที่กรุณาให้ตัวอย่างถ่านหินเพื่อทำวิทยานิพนธ์นี้ ขอขอบพระคุณบัณฑิตวิทยาลัยที่กรุณาให้ทุนอุดหนุนงานวิจัยนี้ และขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่กรุณาช่วยเหลือ พร้อมทั้งอำนวยความสะดวกในการวิเคราะห์

ขอขอบคุณ คุณสนิท ปรีนคร ที่ช่วยเหลือในการสร้างเครื่องมือจนการวิจัยนี้สำเร็จลงได้ด้วยดี ขอขอบคุณข้าราชการภาควิชาเคมีเทคนิคทุกท่าน ที่ให้ความสะดวกในการใช้ห้องปฏิบัติการ และขอขอบคุณ พี่ ๆ เพื่อน ๆ และน้อง ๆ ในภาควิชาเคมีเทคนิค และผู้อยู่เบื้องหลังทุกท่านที่เป็นกำลังใจสนับสนุน ช่วยเหลือในการทำวิทยานิพนธ์มาโดยตลอด

ท้ายที่สุดนี้ ขอกราบขอบพระคุณ บิดา-มารดา ที่เป็นกำลังใจและสนับสนุนการทำวิจัยนี้มาโดยตลอด

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญตาราง	ณ
สารบัญรูป	ญ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	ด
บทที่	
1. บทนำ	1
2. ทฤษฎีและผลงานวิจัยในอดีต	3
2.1 องค์ประกอบและโครงสร้างของถ่านหิน	3
2.1.1 การจัดแบ่งลำดับคีย์ของถ่านหิน	3
2.1.2 โครงสร้างสารอินทรีย์	7
2.1.3 สารประกอบแร่ธาตุ	7
2.1.4 ชนิดและลักษณะของกัมมะถันในถ่านหิน	7
2.2 กระบวนการปรับปรุงคุณภาพถ่านหิน	10
2.2.1 กระบวนการปรับปรุงคุณภาพถ่านหินโดยวิธีทางกายภาพ ...	10
2.2.2 กระบวนการปรับปรุงคุณภาพถ่านหินโดยวิธีทางเคมี	10
2.3 เทคนิคฟลูอิดไอเซชันของเหลว	12
2.3.1 ประเภทของฟลูอิดไอเซชัน	12
2.3.2 ลักษณะของฟลูอิดไอซ์เบด	12
2.3.3 ข้อได้เปรียบและข้อเสียเปรียบของฟลูอิดไอเซชันของเหลว .	14
2.3.4 การหาค่าความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไอเซชัน	14
2.4 ทฤษฎีกลไกการเกิดปฏิกิริยา	15
2.4.1 การหาอันดับและค่าคงที่ปฏิกิริยาของปฏิกิริยาออกซิเดชัน กัมมะถันไพไรต์	15
2.4.2 การศึกษาแบบจำลองกลไกควบคุมปฏิกิริยาออกซิเดชัน กัมมะถันไพไรต์	16
2.5 ผลงานวิจัยในต่างประเทศ	23
2.6 ผลงานวิจัยในประเทศ	26

บทที่	หน้า
3. เครื่องมือและวิธีการทดลอง	28
3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	28
3.2 ตัวอย่างถ่านหินที่ใช้ในการทดลอง	28
3.3 การดำเนินการวิจัย	28
3.4 ขั้นตอนการทดลอง	33
4. ผลการทดลอง สรุปและวิจารณ์	35
4.1 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของปฏิกิริยาออกซิเดชันของสารละลาย ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์	39
4.1.1 ผลของความเข้มข้นของสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ในกรดซัลฟูริก	39
4.1.2 ผลของอัตราการใช้สารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ .	47
4.1.3 ผลของขนาดถ่านหิน	51
4.1.4 ผลของอุณหภูมิ	55
4.1.5 ผลของระยะเวลา	59
4.1.6 ผลของการล้างถ่านหินด้วยน้ำก่อนกระบวนการขจัดเถ้าและ กักมันด้วยสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์	63
4.2 การเปรียบเทียบผลของสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อการ ขจัดเถ้าและกักมันในถ่านหินตัวอย่างต่าง ๆ	65
4.3 การศึกษาอัตราเร็วของปฏิกิริยาเคมีของไพไรต์และขั้นตอนควบคุม อัตราเร็วของปฏิกิริยากับไพไรต์ในถ่านหิน	69
4.3.1 การศึกษาอัตราเร็วของปฏิกิริยาเคมีของไพไรต์	69
4.3.2 การศึกษาขั้นตอนควบคุมอัตราเร็วของการทำปฏิกิริยาของ ก๊าซออกซิเจนกับไพไรต์	86
5. สรุปผลและข้อเสนอแนะ	97
เอกสารอ้างอิง	100
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก.	104
ภาคผนวก ข.	114
ภาคผนวก ค.	122
ประวัติผู้เขียน	125

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 การแบ่งถ่านหินตามค้ำยโดยวิธี ASTM D 388	4
2.2 ผลการวิเคราะห์สมบัติถ่านหินแหล่งต่าง ๆ ในประเทศไทย	5
2.3 ชั้นคุณภาพของถ่านหินในแหล่งต่าง ๆ จากผลการวิเคราะห์	6
2.4 แร่ธาตุส่วนใหญ่ที่พบในถ่านหิน	9
2.5 แสดงผลการขจัดกำมะถันด้วยสารละลาย $CuCl_2$	24
2.6 แสดงผลการขจัดกำมะถันด้วยสารละลาย $CuSO_4$	24
4.1 แสดงสมบัติของถ่านหินเหมืองแม่เมาะที่ระดับชั้นและตำแหน่งต่าง ๆ (แบบ ไม่รวมความชื้น)	36
4.2 สมบัติถ่านหินแม่เมาะ 1 (แบบไม่รวมความชื้น) ก่อนและหลังผ่านกระบวนการ การขจัดเถ้าและกำมะถัน ความเข้มข้นสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ต่าง ๆ และขนาดถ่านหิน 1.0-2.0 มม.	41
4.3 สมบัติถ่านหินแม่เมาะ 1 (แบบไม่รวมความชื้น) ก่อนและหลังผ่านกระบวนการ การขจัดเถ้าและกำมะถัน ความเข้มข้นสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ต่าง ๆ และขนาดถ่านหิน 0.5-1.0 มม.	42
4.4 สมบัติถ่านหินแม่เมาะ 1 (แบบไม่รวมความชื้น) ก่อนและหลังผ่านกระบวนการ การขจัดเถ้าและกำมะถัน ที่อัตราการไหลสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออก ไซด์ต่าง ๆ	48
4.5 สมบัติถ่านหินแม่เมาะ 1 (แบบไม่รวมความชื้น) ก่อนและหลังผ่านกระบวนการ การขจัดเถ้าและกำมะถัน ที่ขนาดถ่านหิน 0.5-1.0 มม. และ 1.0-2.0 มม.	52
4.6 สมบัติถ่านหินแม่เมาะ 1 (แบบไม่รวมความชื้น) ก่อนและหลังผ่านกระบวนการ การขจัดเถ้าและกำมะถัน ที่อุณหภูมิต่าง ๆ	56
4.7 สมบัติถ่านหินแม่เมาะ 1 (แบบไม่รวมความชื้น) ก่อนและหลังผ่านกระบวนการ การขจัดเถ้าและกำมะถัน ที่ระยะเวลาต่าง ๆ	60
4.8 แสดงผลการล้างถ่านหินด้วยน้ำ สำหรับการทดลองที่สภาวะต่าง ๆ	64
4.9 สมบัติถ่านหินแม่เมาะระดับชั้นและตำแหน่งต่างๆ (แบบไม่รวมความชื้น) ก่อนและหลังผ่านกระบวนการขจัดเถ้าและกำมะถัน	66

ตารางที่

หน้า

4.10	แสดงค่าร้อยละการก่อกำเนิดไฟโรต์ (แบบไม่รวมความชื้น) ความเข้มข้นไฟโรต์ (Cp) และสัดส่วนการเปลี่ยนแปลง (X) ตามระยะเวลา ที่ความเข้มข้นสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่าง ๆ ขนาดถ่านหิน 1.0-2.0 มม. ...	70
4.11	แสดงค่าร้อยละการก่อกำเนิดไฟโรต์ (แบบไม่รวมความชื้น) ความเข้มข้นไฟโรต์ (Cp) และสัดส่วนการเปลี่ยนแปลง (X) ตามระยะเวลา ที่ความเข้มข้นสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่าง ๆ ขนาดถ่านหิน 0.5-1.0 มม. ...	71
4.12	แสดงค่าร้อยละการก่อกำเนิดไฟโรต์ (แบบไม่รวมความชื้น) ความเข้มข้นไฟโรต์ (Cp) และสัดส่วนการเปลี่ยนแปลง (X) ตามระยะเวลา ที่อัตราการไหลสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่าง ๆ	72
4.13	แสดงค่าร้อยละการก่อกำเนิดไฟโรต์ (แบบไม่รวมความชื้น) ความเข้มข้นไฟโรต์ (Cp) และสัดส่วนการเปลี่ยนแปลง (X) ตามระยะเวลา ที่อุณหภูมิต่าง ๆ	73
4.14	แสดงค่าร้อยละการก่อกำเนิดไฟโรต์ (แบบไม่รวมความชื้น) ความเข้มข้นไฟโรต์ (Cp) และสัดส่วนการเปลี่ยนแปลง (X) ตามระยะเวลา สำหรับถ่านหินแม่เมาะระดับชั้นและตำแหน่งต่าง ๆ	74
4.15	แสดงค่าคงที่อัตราเร็วปฏิกิริยา (k_2) ของการก่อกำเนิดไฟโรต์กับก๊าซออกซิเจนในสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในกรดซัลฟูริก 0.05 โมลาร์ ที่สภาวะต่าง ๆ	81
4.16	แสดงค่าคงที่อัตราเร็วปฏิกิริยา (k_2) ของถ่านหินแม่เมาะ 1 ที่อุณหภูมิต่าง ๆ	82
4.17	แสดงค่าการแพร่ประสิทธิผล (De) ของก๊าซออกซิเจนในสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในกรดซัลฟูริก 0.05 โมลาร์ ที่สภาวะต่าง ๆ	93
4.18	แสดงค่าการแพร่ประสิทธิผล (De) ของถ่านหินแม่เมาะ 1 ที่อุณหภูมิต่าง ๆ	94

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	สารประกอบอินทรีย์ที่มีในถ่านหิน	8
2.2	โครงสร้างทางอินทรีย์ของถ่านหิน	8
2.3	Coal organic crystalline structure	9
2.4	ลักษณะการเกิดฟลูอิดไฮโดรคาร์บอน	13
2.5	การหาค่าความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไฮโดรคาร์บอน	15
2.6	แสดงแบบจำลองการถ่ายเทมวลสารแบบ unreacted shrinking core model	16
2.7	แสดงโปรไฟล์ความเข้มข้นของ A เมื่อการแพร่ผ่านชั้นผลิตภัณฑ์ด้วยอัตราเร็วปฏิกิริยา	17
2.8	แสดงโปรไฟล์ความเข้มข้นของ A เมื่อการแพร่ผ่านชั้นผลิตภัณฑ์ด้วยความเร็วปฏิกิริยา	19
2.9	แสดงโปรไฟล์ความเข้มข้นของ A เมื่อการเกิดปฏิกิริยาเคมีด้วยความเร็วปฏิกิริยา	21
3.1	แสดงระบบเครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไคซ์เบดของเหลว	29
3.2	แสดงระบบเครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไคซ์เบดของเหลว	30
3.3	แสดงถังสารละลาย ถังน้ำ บั๊มพ์ และไซโคลอน	30
3.4	แสดงเครื่องปฏิกรณ์และลักษณะการเกิดฟลูอิดไฮโดรคาร์บอน	31
3.5	แสดงแผนผังขั้นตอนการทดลอง	34
4.1	การหาค่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไคซ์ของถ่านหินขนาด 0.5-1.0 มม. .	37
4.2	การหาค่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไคซ์ของถ่านหินขนาด 0.5-1.0 มม. .	37
4.3	การหาค่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไคซ์ของถ่านหินขนาด 1.0-2.0 มม. .	38
4.4	การหาค่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไคซ์ของถ่านหินขนาด 1.0-2.0 มม. .	38
4.5	ผลของความเข้มข้นของสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในกรดซัลฟูริก 0.05 โมลาร์ ที่มีต่อร้อยละการลดปริมาณเถ้าและการเพิ่มค่าความร้อนของถ่านหินแม่เมฆ 1 หลังผ่านกระบวนการขจัดเถ้าและกำมะถัน (อัตราการไหลสารละลาย 1.49 ลิตรต่อวินาที ปริมาณสารละลาย 10 ลิตร ขนาดถ่านหิน 1.0-2.0 มม. ปริมาณถ่านหิน 150 กรัม อุณหภูมิ 20°ซ ระยะเวลา 60 นาที)	43

4.6	ผลของความเข้มข้นสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ในกรดซัลฟูริก 0.05 โมลาร์ ที่มีต่อร้อยละการลดปริมาณเก่าและการเพิ่มค่าความร้อนของถ่านหินแม่เมาะ 1 หลังผ่านกระบวนการขจัดเถ้าและกำมะถัน (อัตราการไหลสารละลาย 1.25 ลิตร/นาที ปริมาณสารละลาย 10 ลิตร ขนาดถ่านหิน 0.5-1.0 มม. ปริมาณถ่านหิน 150 กรัม อุณหภูมิ 20°ซ ระยะเวลา 60 นาที)	44
4.7	ผลของความเข้มข้นสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ในกรดซัลฟูริก 0.05 โมลาร์ที่มีต่อร้อยละการลดปริมาณกำมะถันชนิดต่าง ๆ ถ่านหินแม่เมาะ 1 หลังผ่านกระบวนการขจัดเถ้าและกำมะถัน (อัตราการไหลสารละลาย 1.49 ลิตรต่อนาที ปริมาณสารละลาย 10 ลิตร ขนาดถ่านหิน 1.0-2.0 มม. ปริมาณถ่านหิน 150 กรัม อุณหภูมิ 20°ซ ระยะเวลา 60 นาที)	45
4.8	ผลของความเข้มข้นของสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในกรดซัลฟูริก 0.05 โมลาร์ที่มีต่อร้อยละการลดปริมาณกำมะถันชนิดต่าง ๆ ถ่านหินแม่เมาะ 1 หลังผ่านกระบวนการขจัดเถ้าและกำมะถัน (อัตราการไหลสารละลาย 1.25 ลิตรต่อ นาที ปริมาณสารละลาย 10 ลิตร ขนาดถ่านหิน 0.5-1.0 มม. ปริมาณถ่านหิน 150 กรัม อุณหภูมิ 20°ซ ระยะเวลา 60 นาที)	46
4.9	ผลของอัตราการไหลของสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ที่มีต่อร้อยละการลดปริมาณเก่าและการเพิ่มค่าความร้อนของถ่านหินแม่เมาะ 1 หลังผ่านกระบวนการขจัดเถ้าและกำมะถัน (ความเข้มข้นของสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 7 % โดยน้ำหนักต่อปริมาตรในกรดซัลฟูริก 0.05 โมลาร์ ปริมาณสารละลาย 10 ลิตร ขนาดถ่านหิน 0.5-1.0 มม. ปริมาณถ่านหิน 150 กรัม อุณหภูมิ 20°ซ ระยะเวลา 60 นาที)	49
4.10	ผลของอัตราการไหลของสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ที่มีต่อร้อยละการลดปริมาณกำมะถันชนิดต่าง ๆ ของถ่านหินแม่เมาะ 1 หลังผ่านกระบวนการขจัดเถ้าและกำมะถัน (ความเข้มข้นของสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 7 % โดยน้ำหนักต่อปริมาตรในกรดซัลฟูริก 0.05 โมลาร์ ปริมาณสารละลาย 10 ลิตร ขนาดถ่านหิน 0.5-1.0 มม. ปริมาณถ่านหิน 150 กรัม อุณหภูมิ 20°ซ ระยะเวลา 60 นาที)	50
4.11	ผลของขนาดถ่านหินที่มีต่อร้อยละการลดปริมาณเก่าของถ่านหินแม่เมาะ 1 หลังผ่านกระบวนการขจัดเถ้าและกำมะถัน (ความเข้มข้นของสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 7 % โดยน้ำหนักต่อปริมาตรในกรดซัลฟูริก 0.05 โมลาร์ อัตราการไหลสารละลาย 1.49 ลิตร/นาที ปริมาณสารละลาย 10 ลิตร ปริมาณถ่านหิน 150 กรัม อุณหภูมิ 20°ซ)	53

- 4.12 ผลของขนาดถ่านหินที่มีต่อร้อยละการลดกำมะถันรวมของถ่านหินแม่เมาะ 1 หลังผ่านกระบวนการขจัดเถ้าและกำมะถัน (ความเข้มข้นของสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 7 % โดยน้ำหนักต่อปริมาตรในกรดซัลฟูริก 0.05 โมลาร์ อัตราการไหลสารละลาย 1.49 ลิตร/นาทึ ปริมาณสารละลาย 10 ลิตร ปริมาณถ่านหิน 150 กรัม อุณหภูมิ 20°ซ) 53
- 4.13 ผลของขนาดถ่านหินที่มีต่อร้อยละการลดกำมะถันซัลเฟตของถ่านหินแม่เมาะ 1 หลังผ่านกระบวนการขจัดเถ้าและกำมะถัน (ความเข้มข้นของสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 7 % โดยน้ำหนักต่อปริมาตรในกรดซัลฟูริก 0.05 โมลาร์ อัตราการไหลสารละลาย 1.49 ลิตร/นาทึ ปริมาณสารละลาย 10 ลิตร ปริมาณถ่านหิน 150 กรัม อุณหภูมิ 20°ซ) 54
- 4.14 ผลของขนาดถ่านหินที่มีต่อร้อยละการลดกำมะถันไนโรต์ของถ่านหินแม่เมาะ 1 หลังผ่านกระบวนการขจัดเถ้าและกำมะถัน (ความเข้มข้นของสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 7 % โดยน้ำหนักต่อปริมาตรในกรดซัลฟูริก 0.05 โมลาร์ อัตราการไหลสารละลาย 1.49 ลิตร/นาทึ ปริมาณสารละลาย 10 ลิตร ปริมาณถ่านหิน 150 กรัม อุณหภูมิ 20°ซ) 54
- 4.15 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อร้อยละการลดปริมาณเถ้าและการเพิ่มค่าความร้อนของถ่านหินแม่เมาะ 1 หลังผ่านกระบวนการขจัดเถ้าและกำมะถัน (ความเข้มข้นของสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 7% โดยน้ำหนักต่อปริมาตรในกรดซัลฟูริก 0.05 โมลาร์ อัตราการไหลสารละลาย 1.25 ลิตร/นาทึ ปริมาณสารละลาย 10 ลิตร ขนาดถ่านหิน 0.5-1.0 มม. ปริมาณถ่านหิน 150 กรัม ระยะเวลา 60 นาที) . 57
- 4.16 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อร้อยละการลดปริมาณกำมะถันชนิดต่างๆ ของถ่านหินแม่เมาะ 1 หลังผ่านกระบวนการขจัดเถ้าและกำมะถัน (ความเข้มข้นของสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 7 % โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ในกรดซัลฟูริก 0.05 โมลาร์ อัตราการไหลสารละลาย 1.25 ลิตร/นาทึ ปริมาณสารละลาย 10 ลิตร ขนาดถ่านหิน 0.5-1.0 มม. ปริมาณถ่านหิน 150 กรัม ระยะเวลา 60 นาที) ... 58
- 4.17 ผลของระยะเวลาที่มีต่อปริมาณเถ้า และร้อยละการลดปริมาณเถ้าของถ่านหินแม่เมาะ 1 หลังผ่านกระบวนการขจัดเถ้าและกำมะถัน (ความเข้มข้นของสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 7% โดยน้ำหนักต่อปริมาตรในกรดซัลฟูริก 0.05 โมลาร์ อัตราการไหลสารละลาย 1.25 ลิตร/นาทึ ปริมาณสารละลาย 10 ลิตร ขนาดถ่านหิน 0.5-1.0 มม. ปริมาณถ่านหิน 150 กรัม อุณหภูมิ 20°ซ) 61

- 4.18 ผลของระยะเวลาที่มีต่อปริมาณกำมะถันชนิดต่าง ๆ ของถ่านหินแม่เมาะ 1 หลังผ่านกระบวนการขจัดเถ้าและกำมะถัน (ความเข้มข้นของสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 7 % โดยน้ำหนักต่อปริมาตรในกรดซัลฟูริก 0.05 โมลาร์ อัตราการไหลสารละลาย 1.25 ลิตร/นาที ปริมาณสารละลาย 10 ลิตร ขนาดถ่านหิน 0.5-1.0 มม. ปริมาณถ่านหิน 150 กรัม อุณหภูมิ 20°ซ) 62
- 4.19 ผลของระยะเวลา ที่มีต่อร้อยละการลดปริมาณกำมะถันชนิดต่าง ๆ ของถ่านหินแม่เมาะ 1 หลังผ่านกระบวนการขจัดเถ้าและกำมะถัน (ความเข้มข้นของสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 7% โดยน้ำหนักต่อปริมาตรในกรดซัลฟูริก 0.05 โมลาร์ อัตราการไหลสารละลาย 1.25 ลิตร/นาที ปริมาณสารละลาย 10 ลิตร ขนาดถ่านหิน 0.5-1.0 มม. ปริมาณถ่านหิน 150 กรัม อุณหภูมิ 20°ซ) 62
- 4.20 เปรียบเทียบผลร้อยละการลดปริมาณเถ้าและการเพิ่มค่าความร้อนของถ่านหินระดับชั้นและตำแหน่งต่างๆ (ความเข้มข้นของสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 7% โดยน้ำหนักต่อปริมาตรในกรดซัลฟูริก 0.05 โมลาร์ อัตราการไหลสารละลาย 1.25 ลิตรต่อนาที ปริมาณสารละลาย 10 ลิตร ขนาดถ่านหิน 0.5-1.0 มม. ปริมาณถ่านหิน 150 กรัม อุณหภูมิ 20°ซ ระยะเวลา 60 นาที) 67
- 4.21 เปรียบเทียบผลร้อยละการลดปริมาณกำมะถันชนิดต่าง ๆ ของถ่านหินระดับชั้นและตำแหน่งต่าง ๆ (ความเข้มข้นของสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 7% โดยน้ำหนักต่อปริมาตรในกรดซัลฟูริก 0.05 โมลาร์ อัตราการไหลสารละลาย 1.25 ลิตรต่อนาที ปริมาณสารละลาย 10 ลิตร ขนาดถ่านหิน 0.5-1.0 มม. ปริมาณถ่านหิน 150 กรัม อุณหภูมิ 20°ซ ระยะเวลา 60 นาที) 68
- 4.22 กราฟระหว่าง $1/C_p$ กับ เวลาของถ่านหินแม่เมาะ 1 (ที่ความเข้มข้นของสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่าง ๆ ในกรดซัลฟูริก 0.05 โมลาร์ อัตราการไหลสารละลาย 1.49 ลิตรต่อนาที ปริมาณสารละลาย 10 ลิตร ขนาดถ่านหิน 1.0-2.0 มม. ปริมาณถ่านหิน 150 กรัม อุณหภูมิ 20°ซ) 76
- 4.23 กราฟระหว่าง $1/C_p$ กับ เวลาของถ่านหินแม่เมาะ 1 (ที่ความเข้มข้นของสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่าง ๆ ในกรดซัลฟูริก 0.05 โมลาร์ อัตราการไหลสารละลาย 1.25 ลิตร/นาที ปริมาณสารละลาย 10 ลิตร ขนาดถ่านหิน 0.5-1.0 มม. ปริมาณถ่านหิน 150 กรัม อุณหภูมิ 20°ซ) 77
- 4.24 กราฟระหว่าง $1/C_p$ กับ เวลาของถ่านหินแม่เมาะ 1 (ที่ความเข้มข้นของสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 7% โดยน้ำหนักต่อปริมาตรในกรดซัลฟูริก 0.05 โมลาร์ อัตราการไหลสารละลายต่าง ๆ ปริมาณสารละลาย 10 ลิตร ขนาดถ่านหิน 0.5-1.0 มม. ปริมาณถ่านหิน 150 กรัม อุณหภูมิ 20°ซ) 78

- 4.25 กราฟระหว่าง $1/C_p$ กับ เวลาของถ่านหินแม่เมาะ 1 (ที่ความเข้มข้นของสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 7% โดยน้ำหนักต่อปริมาตรในกรดซัลฟูริก 0.05 โมลาร์ อัตราการไหลสารละลาย 1.25 ลิตร/นาที ปริมาณสารละลาย 10 ลิตร ขนาดถ่านหิน 0.5-1.0 มม. ปริมาณถ่านหิน 150 กรัม ที่อุณหภูมิต่าง ๆ) 79
- 4.26 กราฟระหว่าง $1/C_p$ กับ เวลา ของถ่านหินแม่เมาะระดับชั้นและตำแหน่งต่าง ๆ (ความเข้มข้นของสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 7% โดยน้ำหนัก/ปริมาตรในกรดซัลฟูริก 0.05 โมลาร์ อัตราการไหลสารละลาย 1.25 ลิตร/นาที ปริมาณสารละลาย 10 ลิตร ขนาดถ่านหิน 0.5-1.0 มม. ปริมาณถ่านหิน 150 กรัม ที่อุณหภูมิ 20°ซ) 80
- 4.27 กราฟระหว่างสัดส่วนการเปลี่ยนแปลง (X) กับเวลา ของถ่านหินแม่เมาะ 1 (ความเข้มข้นของสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 7 % โดยน้ำหนักต่อปริมาตรในกรดซัลฟูริก 0.05 โมลาร์ อัตราการไหลสารละลาย 1.25 ลิตรต่อนาที ปริมาณสารละลาย 10 ลิตร ขนาดถ่านหิน 0.5-1.0 มม. ปริมาณถ่านหิน 150 กรัม ที่อุณหภูมิ 10, 20 และ 30°ซ) 83
- 4.28 กราฟระหว่าง $1/(1-X)-1$ กับเวลาของถ่านหินแม่เมาะ 1 (ความเข้มข้นของสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 7% โดยน้ำหนักต่อปริมาตรในกรดซัลฟูริก 0.05 โมลาร์ อัตราการไหลสารละลาย 1.25 ลิตรต่อนาที ปริมาณสารละลาย 10 ลิตร ขนาดถ่านหิน 0.5-1.0 มม. ปริมาณถ่านหิน 150 กรัม ที่อุณหภูมิ 10, 20 และ 30°ซ) 83
- 4.29 กราฟระหว่าง $\ln(k_p)$ กับ $1/T$ ตามแบบ Arrhenius plot ของปฏิกิริยาระหว่างกัมมะถันไพไรต์ กับก๊าซออกซิเจนในสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 85
- 4.30 กราฟแสดงการทดสอบขั้นตอนควบคุมอัตราเร็วปฏิกิริยาระหว่างก๊าซออกซิเจน กับไพไรต์ของถ่านหินแม่เมาะ 1 ที่ความเข้มข้นของสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่าง ๆ ในกรดซัลฟูริก 0.05 โมลาร์ ขนาดถ่านหิน 1.0-2.0 มม. .. 88
- 4.31 กราฟแสดงการทดสอบขั้นตอนควบคุมอัตราเร็วปฏิกิริยาระหว่างก๊าซออกซิเจน กับไพไรต์ของถ่านหินแม่เมาะ 1 ที่ความเข้มข้นของสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่าง ๆ ในกรดซัลฟูริก 0.05 โมลาร์ ขนาดถ่านหิน 0.5-1.0 มม. .. 89
- 4.32 กราฟแสดงการทดสอบขั้นตอนควบคุมอัตราเร็วปฏิกิริยาระหว่างก๊าซออกซิเจน กับไพไรต์ของถ่านหินแม่เมาะ 1 ที่อัตราการไหลของสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่าง ๆ 90
- 4.33 กราฟแสดงการทดสอบขั้นตอนควบคุมอัตราเร็วปฏิกิริยาระหว่างก๊าซออกซิเจน กับไพไรต์ของถ่านหินแม่เมาะ 1 ที่อุณหภูมิต่าง 91

รูปที่	หน้า
4.34 กราฟแสดงการทดสอบขั้นตอนควบคุมอัตราเร็วปฏิกิริยาระหว่างก๊าซออกซิเจน กับ ไฟไรต์ของถ่านหินแม่เมาะระดับชั้นและตำแหน่งต่าง ๆ	92
4.35 กราฟระหว่าง $1-3(1-X)^{2/3}+2(1-X)$ กับ เวลา โดยอาศัย unreacted shrinking core model ของถ่านหินแม่เมาะ 1 (ความเข้มข้นของสาร ละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 7% โดยน้ำหนักต่อปริมาตรในกรดซัลฟูริก 0.05 โมลาร์ อัตราการไหลสารละลาย 1.25 ลิตร/นาที ปริมาณสารละลาย 10 ลิตร ขนาดถ่านหิน 0.5-1.0 มม. ปริมาณถ่านหิน 150 กรัม ที่อุณหภูมิต่าง ๆ)	95
4.36 กราฟระหว่าง $\ln(D_e)$ กับ $1/T$ ตามแบบ Arrhenius plot ของปฏิกิริยา ระหว่างกัมมะถันไฟไรต์ กับก๊าซออกซิเจนในสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ โดยอาศัย unreacted shrinking core model	96

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

b	=	ค่าสัมประสิทธิ์ stoichiometric, เทอมไร้นหน่วย
C_A	=	ความเข้มข้นของก๊าซ A, โมล/ปริมาตร
C_{Ac}	=	ความเข้มข้นของก๊าซ A ที่แกนใน, โมล/ปริมาตร
C_{A1}	=	ความเข้มข้นของก๊าซ A ในวัฏภาคของเหลว, โมล/ปริมาตร
C_{As}	=	ความเข้มข้นของก๊าซ A ที่ผิวอนุภาค, โมล/ปริมาตร
C_p	=	ความเข้มข้นของไฟรต์ในถ่านหิน, โมล/ปริมาตร
C_{p0}	=	ความเข้มข้นของไฟรต์ในถ่านหินเริ่มต้น, โมล/ปริมาตร
C_B	=	ความเข้มข้นของของแข็ง (สาร B), โมล/ปริมาตร
De	=	ค่าการแพร่ประสิทธิผล, $m^2/วินาที$
$De_{(o)}$	=	จุดตัดค่าการแพร่ประสิทธิผล, $m^2/วินาที$
E	=	ค่าพลังงานกระตุ้น, จูล/กิโลโมล
H	=	ความสูงของเบด
ΔP	=	ความดันต่างของเบด
Δh	=	ความดันลดของเบด, ซม.น้ำ
k	=	ค่าคงที่อัตราเร็วปฏิกิริยา
k_1	=	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลระหว่างของเหลวกับอนุภาค, $พื้นที่/เวลา$
k_n	=	ค่าคงที่อัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับ n
$k_{n(o)}$	=	จุดตัดค่าคงที่อัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับ n
k_{∞}	=	ค่าคงที่อัตราเร็วปฏิกิริยา, ต่อหน่วยเวลา
k_2	=	ค่าคงที่อัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับสองของไฟรต์, $m^3/กิโลโมล.วินาที$
$k_{2(o)}$	=	จุดตัดค่าคงที่อัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับสองของไฟรต์, $m^3/กิโลโมล.วินาที$
N_A	=	จำนวนโมลของสาร A, โมล
N_B	=	จำนวนโมลของสาร B, โมล
Q_A	=	การถ่ายเทมวล A ต่อหน่วยพื้นที่, โมล/พื้นที่.เวลา
Q_{Ac}	=	การถ่ายเทมวล A ต่อหน่วยพื้นที่ที่แกนใน, โมล/พื้นที่.เวลา
Q_{As}	=	การถ่ายเทมวล A ต่อหน่วยพื้นที่ที่ผิวอนุภาค, โมล/พื้นที่.เวลา
R	=	รัศมีของอนุภาค, เมตร
R_1	=	รัศมีเฉลี่ยของอนุภาคถ่านหิน, เมตร
r_B	=	อัตราเร็วปฏิกิริยาของของแข็ง (สาร B), โมล/ปริมาตร.เวลา

- r_c = รัศมีของแกนในอนุภาค, เมตร
 r_p = อัตราเร็วปฏิกิริยาของไฟไรต์, กิโลเมตร/ม.^๓.วินาที
 $S_{u,x}$ = พื้นที่ผิวส่วนที่ยังไม่ได้เกิดปฏิกิริยาของอนุภาค, เมตร^๒
 T = อุณหภูมิ, องศาเซลวิน
 t = ระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยา, วินาที
 V = ปริมาตรสารในเครื่องปฏิกรณ์, ม.^๓
 X = ค่าสัดส่วนการเปลี่ยน, เทอมไร้หน่วย
 X_A = ค่าสัดส่วนการเปลี่ยนของ A ทั้งหมด, เทอมไร้หน่วย
 X_B = ค่าสัดส่วนการเปลี่ยนของของแข็ง A, เทอมไร้หน่วย
 τ = ระยะเวลาที่เกิดปฏิกิริยาสมบูรณ์, วินาที
 ρ_b = ความหนาแน่นเชิงโมลาร์ของไฟไรต์ในถ่านหิน, กิโลเมตร/ม.^๓