

จลนพลศาสตร์ของออกซิเดชันของกำมะถันไพไรต์ของถ่านหินแม่เมาะ
ในสารละลายทองแดง



นางสาวพัทธราภรณ์ เพชรานนท์

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
ภาควิชาเคมีเทคนิค
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
พ.ศ. 2532

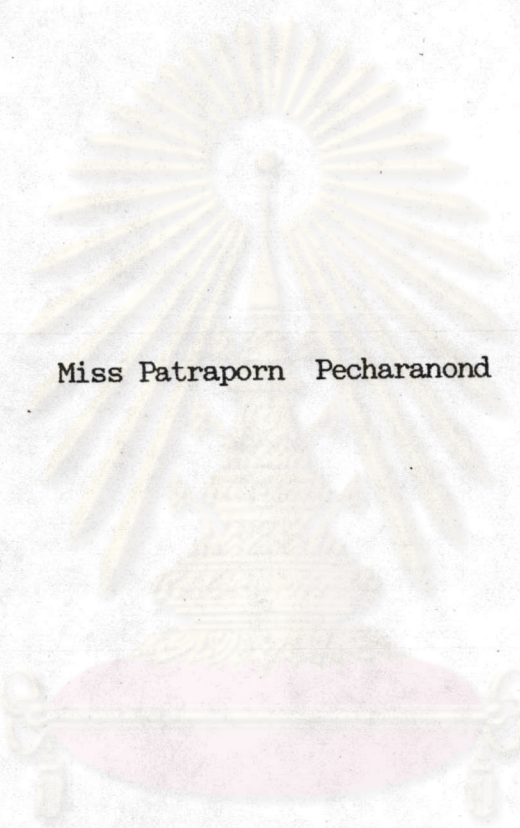
ISBN 974-576-089-7

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

015873

I10304319

Kinetics of Oxidation of Pyritic Sulfur of Mae Mo Coal
in Copper Solution



Miss Patraporn Pecharanond

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 974-576-089-7

หัวข้อวิทยานิพนธ์

จลนพลศาสตร์ของออกซิเดชันของกำมะถันไพไรต์ของถ่านหินแม่เมาะใน
สารละลายทองแดง

โดย

นางสาวพัทธาภรณ์ เพชรานนท์

ภาควิชา

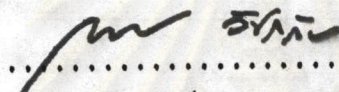
เคมีเทคนิค

อาจารย์ที่ปรึกษา

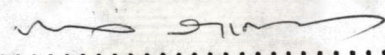
รองศาสตราจารย์ ดร.ภัทรพรหม ประศาสน์สารกิจ

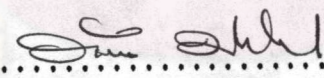



บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติหัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของ
การศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทมหาบัณฑิต

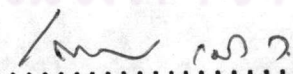
 คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(ศาสตราจารย์ ดร.ถาวร วัชรากัญ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

 ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.พล สาเกตอง)

 อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ ดร.ภัทรพรหม ประศาสน์สารกิจ)

 กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.สมชาย ใญ่สุวรรณ)

 กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เลอสรอง เมฆสุต)



พัฒนารักษ์ เพชรานนท์ : จลนพลศาสตร์ของออกซิเดชันของกำมะถันไพไรต์ของ
กำนหินแม่เมาะในสารละลายทองแดง (KINETICS OF OXIDATION OF PYRITIC
SULFUR OF MAE MO COAL IN COPPER SOLUTION) อ.ที่ปรึกษา:
รศ.ดร. กัทรพรรณ ประศาสน์สารกิจ, 113 หน้า.

การศึกษาจลนพลศาสตร์ของการขจัดกำมะถันจากกำนหินด้วยสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต
ในเครื่องปฏิกรณ์ถังกวนแบบไม่ต่อเนื่อง. จากผลการทดลองพบว่าอัตราเร็วปฏิกิริยาของการขจัด
กำมะถันไพไรต์ แสดงได้ด้วยวิโมเดลปฏิกิริยาต่อเนื่องและเป็นปฏิกิริยาอันดับสอง มีค่าคงที่อัตรา
เร็วปฏิกิริยา (k_2) สำหรับปฏิกิริยากำมะถันไพไรต์ของกำนหินแม่เมาะในสารละลายคอปเปอร์
ซัลเฟต 20% คือ

$$k_2 = 18.71 \times 10^6 \exp(-96.48 \times 10^6 / RT)$$

ปฏิกิริยาการขจัดกำมะถันไพไรต์สามารถอธิบายโดยวิโมเดลแกนกลางที่ไม่เกิดปฏิกิริยา
หดตัว จากข้อมูลการทดลองพบว่าขั้นตอนการแพร่ของคอปเปอร์ (II) อีออนผ่านชั้นผลิตภัณฑ์เข้า
สู่แกนกลางที่ยังไม่ได้ทำปฏิกิริยาเป็นขั้นตอนการควบคุมอัตราเร็วปฏิกิริยาของการขจัดกำมะถัน
ไพไรต์ ค่าการแพร่ประสิทธิผล (De) สำหรับปฏิกิริยากำมะถันไพไรต์ของกำนหินแม่เมาะในสาร
ละลายคอปเปอร์ซัลเฟต 20 % คือ

$$De = 7.49 \times 10^{-2} \exp(-75.62 \times 10^6 / RT)$$

ภาควิชา เคมีเทคนิค

สาขาวิชา เคมีเทคนิค

..... 2531

ลายมือชื่อนิสิต พลธรรพ์ เพชรานนท์

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา พลธรรพ์ เพชรานนท์



PATRAPORN PECHARANOND : KINETICS OF OXIDATION OF PYRITIC
SULFUR OF MAE MO COAL IN COPPER SOLUTION. THESIS ADVISOR :
ASSO.PROF.DR. PATTARAPAN PRASSASSARAKICH, Ph.D 113 pp.

The kinetics of coal desulfurization in copper sulfate solution was studied in a stirred batch reactor. The rate of pyritic removal reaction was found to be well represented by a continuous reaction model that was second order with respect to pyritic sulfur. The rate constant for pyritic reaction (k_2) of Mae Mo coal in 20% CuSO_4 was :

$$k_2 = 18.71 \times 10^8 \exp(-96.48 \times 10^6 / RT)$$

The pyritic removal reaction was also described well by the unreacted shrinking core model. From kinetic data, the diffusion of copper (II) ion through product layer was found to be the controlling step for pyritic sulfur reaction. The effective diffusivity (D_e) for pyritic reaction of Mae Mo coal in 20% CuSO_4 was :

$$D_e = 7.49 \times 10^{-2} \exp(-75.62 \times 10^6 / RT)$$

ภาควิชา เคมีเทคนิค

สาขาวิชา เคมีเทคนิค

ปีการศึกษา 2531

ลายมือชื่อนิสิต พชรพงศ์ เพชรานนท์

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา *[Signature]*



กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ภัทรพรหม ประศาสน์สารกิจ ที่กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำช่วยเหลือการวิจัยและอบรมสั่งสอนมาโดยตลอด รวมทั้งคณาจารย์และบุคคลากรในภาควิชาเคมีเทคนิคทุกท่านที่ได้ให้คำแนะนำ ตลอดจนอำนวยความสะดวกในการเข้าห้องปฏิบัติการจนวิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลงได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณสารพินัยฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ที่กรุณาให้ตัวอย่างถ่านหินเพื่อทำวิทยานิพนธ์นี้ ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัยที่ให้ทุนอุดหนุนงานวิจัยนี้ และขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่กรุณาช่วยเหลือพร้อมทั้งอำนวยความสะดวกในการวิเคราะห์

ขอขอบคุณ คุณสังข์ ชมชื่น คุณสนธิ ปรีนคร คุณประเสริฐ สายวัฒนาสุข ที่ช่วยเหลือซ่อมเครื่องมือบางส่วนจนการทดลองวิจัยนี้สำเร็จลงด้วยดี ขอขอบคุณภักดา พลาฤทธิ์ ช่วยเหลือด้านคอมพิวเตอร์มาโดยตลอดจนวิทยานิพนธ์นี้เสร็จสมบูรณ์ และขอขอบคุณพี่ ๆ เพื่อน ๆ น้อง ๆ ภาควิชาเคมีเทคนิค และผู้อยู่เบื้องหลังทุกท่านที่เป็นกำลังใจสนับสนุน ช่วยเหลือในการทำวิทยานิพนธ์มาโดยตลอด

ท้ายที่สุดนี้ ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ ที่ให้คำแนะนำ ช่วยเหลือและสนับสนุน เป็นกำลังใจเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ญ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	ด
บทที่	
1. บทนำ	1
2. วารสารปริทัศน์	2
2.1 องค์ประกอบและโครงสร้างของถ่านหิน	2
2.2 การจำแนกชนิดและลักษณะของกัมมะถ่านในถ่านหิน	6
2.3 การขจัดกัมมะถ่านในถ่านหิน	9
2.3.1 กระบวนการขจัดกัมมะถ่านโดยวิธีทางกายภาพ	10
2.3.2 กระบวนการขจัดกัมมะถ่านโดยวิธีทางเคมี	11
2.4 ทฤษฎีกลไกการเกิดปฏิกิริยาการขจัดกัมมะถ่าน	13
2.4.1 กระบวนการเกิดของปฏิกิริยาตามแบบจำลอง unreacted core model	14
2.4.2 การศึกษาปฏิกิริยาแบบจำลองจลนศาสตร์ continuous reaction model	20
2.5 ผลงานวิจัย	22
3. เครื่องมือและวิธีการทดลอง	
3.1 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง	29
3.2 ตัวอย่างถ่านหินและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	29
3.3 การดำเนินงานวิจัย	33
3.4 ขั้นตอนการทดลอง	33
3.4.1 การเตรียมตัวอย่างถ่านหิน	33
3.4.2 การทำปฏิกิริยาถ่านหินกับสารละลายทองแดง	33
3.4.3 การวิเคราะห์ถ่านหิน	34

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
4. ผลการทดลอง การวิเคราะห์และวิจารณ์	36
4.1 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของปฏิกิริยาการจัดกำมะถันจากถ่านหิน โดยยว สารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต	36
4.1.1 ผลของความเข้มข้นของสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต	36
4.1.2 ผลของอุณหภูมิ	47
4.1.3 ผลของขนาดถ่านหิน	52
4.1.4 การเปรียบเทียบผลของสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟตต่อการจัด กำมะถันจากถ่านหินเหมืองแม่เมาะที่ชนิดและองค์ประกอบต่างกัน .	57
4.2 การศึกษาอัตราเร็วปฏิกิริยาเคมีของไพไรต์และขั้นตอนควบคุมอัตราเร็วการทำ ปฏิกิริยากับไพไรต์ในถ่านหิน	
4.2.1 การหาอันดับปฏิกิริยาเคมีของไพไรต์ในถ่านหินเหมืองแม่เมาะ....	61
4.2.2 การหาค่าคงที่อัตราเร็วปฏิกิริยา (rate constant) และค่า พลังงานกระตุ้น (activation energy) ของถ่านหินเหมือง แม่เมาะ	70
4.2.3 การศึกษาขั้นตอนควบคุมอัตราเร็วการทำปฏิกิริยากับไพไรต์ของ ถ่านหินเหมืองแม่เมาะ	76
5. สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ	87
เอกสารอ้างอิง	90
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก.	94
ภาคผนวก ข.	108
ประวัติผู้เขียน	113

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 การแบ่งกำหนดตามศักดิ์โดยวิธี ASTM D 388	3
2.2 แร่ธาตุส่วนใหญที่พบในกำหนด	6
4.1 แสดงสมบัติของกำหนดแม่เมาะตัวอย่างต่าง ๆ (แบบไม่รวมความชื้น)	38
4.2 สมบัติของกำหนดเหมืองแม่เมาะ ตัวอย่างที่ 1 (แบบไม่รวมความชื้น) ก่อนและ หลังผ่านกระบวนการขจัดกำมะถันที่มีความเข้มข้นของสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต 10 และ 20%	39
4.3 สมบัติของกำหนดเหมืองแม่เมาะ ตัวอย่างที่ 3 (แบบไม่รวมความชื้น) ก่อนและ หลังผ่านกระบวนการขจัดกำมะถันที่มีอุณหภูมิต่าง ๆ ด้วยสารละลายคอปเปอร์ ซัลเฟต 20%	48
4.4 สมบัติของกำหนดเหมืองแม่เมาะ (แบบไม่รวมความชื้น) ก่อนและหลังผ่าน กระบวนการขจัดกำมะถันด้วยสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต 20% ขนาดกำหนด ต่าง ๆ กัน	53
4.5 สมบัติของกำหนดเหมืองแม่เมาะ ตัวอย่างที่ 2 (แบบไม่รวมความชื้น) ก่อน และหลังผ่านกระบวนการขจัดกำมะถัน ด้วยสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต 20% กำหนดที่มีองค์ประกอบต่าง ๆ กัน	58
4.6 แสดงค่าร้อยละกำมะถันไพไรต์ ความเข้มข้นของไพไรต์ ตามระยะเวลาและที่ อุณหภูมิต่าง ๆ ของกำหนดแม่เมาะ 1	63
4.7 แสดงค่าร้อยละกำมะถันไพไรต์ ความเข้มข้นของไพไรต์ ที่อุณหภูมิ 150°ซ ของ กำหนดแม่เมาะ 2 ขนาดต่าง ๆ กัน	64
4.8 แสดงค่าร้อยละกำมะถันไพไรต์ ความเข้มข้นของไพไรต์ ตามระยะเวลาและที่ อุณหภูมิต่าง ๆ ของกำหนดแม่เมาะ 3	65
4.9 แสดงค่าคงที่อัตราเร็วปฏิกิริยาของกำหนดเหมืองแม่เมาะ	71
4.10 แสดงความสัมพันธ์ของค่าคงที่อัตราเร็วปฏิกิริยากับอุณหภูมิของกำหนดเหมืองแม่ เมาะ ตามสมการของ Arrhenius	72
4.11 แสดงค่าการแพร่ประสิทธิผล (De) ของกำหนดเหมืองแม่เมาะ	78
4.12 แสดงความสัมพันธ์ของค่าการแพร่ประสิทธิผลและอุณหภูมิของกำหนด เหมืองแม่เมาะ	79
5.1 การเปรียบเทียบผลการขจัดกำมะถันและ แก๊สจากกำหนดโดยอาศัยปฏิกิริยา ออกซิเดชันด้วยสารละลายที่เป็นตัวออกซิไดซ์ต่าง ๆ	88

สารบัญรูป

รูปที่

หน้า

2.1	โมเลกุลสมมุติของกำนหิน	5
2.2	ตัวอย่างสารประกอบอินทรีย์ในกำนหิน	5
2.3	ลักษณะโครงสร้างของกำมะถันอินทรีย์ที่มีสารประกอบพวก mercaptan, sulfide และ heterocyclic ring ในโครงสร้างของกำนหิน	8
2.4	ลักษณะโครงสร้างของกำมะถันอินทรีย์ซึ่งมีสารประกอบพวกไดซัลไฟด์ในโครงสร้างของกำนหิน	8
2.5	แสดงขนาดอนุภาคของกำนหินเมื่อเวลาผ่านไปเป็นปฏิกิริยา	14
2.6	แสดงกราฟความเข้มข้นก๊าซ A เมื่อการแพร่ผ่านชั้นฟิล์มเป็นขั้นตอนควบคุมอัตราเร็วปฏิกิริยา	15
2.7	แสดงกราฟความเข้มข้นก๊าซ A เมื่อการแพร่ผ่านชั้นแก้วเป็นขั้นตอนควบคุมอัตราเร็วปฏิกิริยา	17
2.8	แสดงกราฟความเข้มข้นก๊าซ A เมื่อปฏิกิริยาเคมีเป็นขั้นตอนควบคุมอัตราเร็วปฏิกิริยา	19
3.1	เครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวนอ่างน้ำมันและเครื่องมือควบคุมต่าง ๆ	30
3.2	ถังปฏิกรณ์และฝาปิด	31
3.3	ถังปฏิกรณ์และฝาปิดเมื่อประกอบเข้าด้วยกัน	31
3.4	อ่างน้ำมัน	32
3.5	การจัดเครื่องปฏิกรณ์และอ่างน้ำมันในการทดลอง	32
3.6	แสดงแผนผังขั้นตอนการทดลอง	35
4.1	ผลของความเข้มข้นของสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟตที่มีต่อกำมะถันรวมในกำนหินเหมืองแม่เมาะ (ขนาดกำนหิน 150-250 ไมครอน ปริมาณกำนหิน 100 กรัมต่อสารละลาย 500 มล. ความเข้มข้นของสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต 10% เวลา 1 ชม. อัตราการกวน 1400 รอบต่อนาที)	40
4.2	ผลของความเข้มข้นของสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟตที่มีต่อกำมะถันไพไรต์รวมในกำนหินเหมืองแม่เมาะ (ขนาดกำนหิน 150-250 ไมครอน ปริมาณกำนหิน 100 กรัมต่อสารละลาย 500 มล. ความเข้มข้นของสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต 10% เวลา 1 ชม. อัตราการกวน 1400 รอบต่อนาที) .	40

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่

หน้า

- 4.3 ผลของความเข้มข้นของสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟตที่มีต่อการลดก้ำมะกักรวม
ในถ่านหินเหมืองแม่เมาะ (ขนาดถ่านหิน 150-250 ไมครอน ปริมาณถ่านหิน
100 กรัมต่อสารละลาย 500 มล. ความเข้มข้นของสารละลายคอปเปอร์
ซัลเฟต 10% เวลา 1 ชม. อัตราการกวน 1400 รอบต่อนาที) 41
- 4.4 ผลของความเข้มข้นของสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟตที่มีต่อการลดก้ำมะกักรวม
ไพไรต์รวมในถ่านหินเหมืองแม่เมาะ (ขนาดถ่านหิน 150-250 ไมครอน
ปริมาณถ่านหิน 100 กรัมต่อสารละลาย 500 มล. ความเข้มข้นของสาร
ละลายคอปเปอร์ซัลเฟต 10% เวลา 1 ชม. อัตราการกวน 1400
รอบต่อนาที)..... 41
- 4.5 ผลของความเข้มข้นของสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟตที่มีต่อก้ำมะกักรวมใน
ถ่านหินเหมืองแม่เมาะ (ขนาดถ่านหิน 150-250 ไมครอน ปริมาณถ่านหิน
100 กรัมต่อสารละลาย 500 มล. ความเข้มข้นของสารละลายคอปเปอร์
ซัลเฟต 20% เวลา 1 ชม. อัตราการกวน 1400 รอบต่อนาที) 42
- 4.6 ผลของความเข้มข้นของสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟตที่มีต่อก้ำมะกักรวมไพไรต์ใน
ถ่านหินเหมืองแม่เมาะ (ขนาดถ่านหิน 150-250 ไมครอน ปริมาณถ่านหิน
100 กรัมต่อสารละลาย 500 มล. ความเข้มข้นของสารละลายคอปเปอร์
ซัลเฟต 20% เวลา 1 ชม. อัตราการกวน 1400 รอบต่อนาที) 42
- 4.7 ผลของความเข้มข้นของสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟตที่มีต่อการลดก้ำมะกักรวม
ในถ่านหินเหมืองแม่เมาะ (ขนาดถ่านหิน 150-250 ไมครอน ปริมาณถ่านหิน
100 กรัมต่อสารละลาย 500 มล. ความเข้มข้นของสารละลายคอปเปอร์
ซัลเฟต 20% เวลา 1 ชม. อัตราการกวน 1400 รอบต่อนาที) 43
- 4.8 ผลของความเข้มข้นของสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟตที่มีต่อการลดก้ำมะกักรวม
ไพไรต์ในถ่านหินเหมืองแม่เมาะ (ขนาดถ่านหิน 150-250 ไมครอน ปริมาณ
ถ่านหิน 100 กรัมต่อสารละลาย 500 มล. ความเข้มข้นของสารละลาย
คอปเปอร์ซัลเฟต 20% เวลา 1 ชม. อัตราการกวน 1400 รอบต่อนาที). 43
- 4.9 แสดงการเปรียบเทียบผลของความเข้มข้นของสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต
10 และ 20% ที่มีต่อก้ำมะกักรวมในถ่านหินเหมืองแม่เมาะ (ขนาดถ่านหิน
150-250 ไมครอน ปริมาณถ่านหิน 100 กรัมต่อสารละลาย 500 มล.
ที่อุณหภูมิ 120 140 และ 150°ซ อัตราการกวน 1400 รอบต่อนาที)... 44

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่

หน้า

- 4.10 แสดงการเปรียบเทียบผลของความเข้มข้นของสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต 10 และ 20% ที่มีต่อกำมะกัณฑ์ไฟรด์ในถ่านหินเหมืองแม่เมาะ (ขนาดถ่านหิน 150-250 ไมครอน ปริมาณถ่านหิน 100 กรัมต่อสารละลาย 500 มล. ที่อุณหภูมิ 120 140 และ 150 °ซ อัตราการกวน 1400 รอบต่อนาที) ... 44
- 4.11 ก,ข แสดงการเปรียบเทียบผลของความเข้มข้นของสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต 10 และ 20% ที่มีต่อการลดกำมะกัณฑ์รวมในถ่านหินเหมืองแม่เมาะ (ขนาดถ่านหิน 150-250 ไมครอน ปริมาณถ่านหิน 100 กรัมต่อสารละลาย 500 มล. ที่อุณหภูมิ 120 140 และ 150 °ซ อัตราการกวน 1400 รอบต่อนาที) ... 45
- 4.12 ก,ข แสดงการเปรียบเทียบผลของความเข้มข้นของสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต 10 และ 20% ที่มีต่อการลดกำมะกัณฑ์ไฟรด์ในถ่านหินเหมืองแม่เมาะ (ขนาดถ่านหิน 150-250 ไมครอน ปริมาณถ่านหิน 100 กรัมต่อสารละลาย 500 มล. ที่อุณหภูมิ 120 140 และ 150 °ซ อัตราการกวน 1400 รอบต่อนาที) ... 46
- 4.13 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อกำมะกัณฑ์รวมในถ่านหินเหมืองแม่เมาะ (ขนาดถ่านหิน 150-250 ไมครอน ปริมาณถ่านหิน 100 กรัมต่อสารละลาย 500 มล. ความเข้มข้นของสารละลาย 20% เวลา 1 ชม. อัตราการกวน 1400 รอบต่อนาที) 49
- 4.14 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อกำมะกัณฑ์ไฟรด์ในถ่านหินเหมืองแม่เมาะ (ขนาดถ่านหิน 150-250 ไมครอน ปริมาณถ่านหิน 100 กรัมต่อสารละลาย 500 มล. ความเข้มข้นของสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต 20% เวลา 1 ชม. อัตราการกวน 1400 รอบต่อนาที) 49
- 4.15 ก,ข ผลของอุณหภูมิที่มีต่อการลดกำมะกัณฑ์รวมในถ่านหินเหมืองแม่เมาะ (ขนาดถ่านหิน 150-250 ไมครอน ปริมาณถ่านหิน 100 กรัมต่อสารละลาย 500 มล. ความเข้มข้นของสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต 20% เวลา 1 ชม. อัตราการกวน 1400 รอบต่อนาที) 50
- 4.16 ก,ข ผลของอุณหภูมิที่มีต่อการลดกำมะกัณฑ์ไฟรด์ในถ่านหินเหมืองแม่เมาะ (ขนาดถ่านหิน 150-250 ไมครอน ปริมาณถ่านหิน 100 กรัมต่อสารละลาย 500 มล. ความเข้มข้นของสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต 20% เวลา 1 ชม. อัตราการกวน 1400 รอบต่อนาที) 51

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.17 ผลของขนาดถ่านหินที่มีต่อกำมะถันรวมในถ่านหินเหมืองแม่เมาะ (ปริมาณถ่านหิน 100 กรัมต่อสารละลาย 500 มล. ความเข้มข้นของสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต 20% เวลา 1 ชม. อัตราการกวน 1400 รอบต่อนาที).	54
4.18 ผลของขนาดถ่านหินที่มีต่อกำมะถันไพไรต์ในถ่านหินเหมืองแม่เมาะ (ปริมาณถ่านหิน 100 กรัมต่อสารละลาย 500 มล. ความเข้มข้นของสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต 20% เวลา 1 ชม. อัตราการกวน 1400 รอบต่อนาที)	54
4.19 ก,ข ผลของขนาดถ่านหินที่มีต่อการลดกำมะถันรวมในถ่านหินเหมืองแม่เมาะ ปริมาณถ่านหิน 100 กรัมต่อสารละลาย 500 มล. ความเข้มข้นของสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต 20% ที่อุณหภูมิ 150 °ซ เวลา 1 ชม. อัตราการกวน 1400 รอบต่อนาที)	55
4.20 ก,ข ผลของขนาดถ่านหินที่มีต่อการลดกำมะถันไพไรต์ในถ่านหินเหมืองแม่เมาะ (ปริมาณถ่านหิน 100 กรัมต่อสารละลาย 500 มล. ความเข้มข้นของสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต 20% ที่อุณหภูมิ 150 °ซ เวลา 1 ชม. อัตราการกวน 1400 รอบต่อนาที)	56
4.21 ผลของสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟตที่มีต่อกำมะถันรวมในถ่านหินเหมืองแม่เมาะ ตัวอย่างต่าง ๆ ที่มีองค์ประกอบต่างกัน (ขนาดถ่านหิน 150-250 ไมครอน ปริมาณถ่านหิน 100 กรัมต่อสารละลาย 500 มล. ความเข้มข้นของสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต 20% ที่อุณหภูมิ 150 °ซ เวลา 1 ชม. อัตราการกวน 1400 รอบต่อนาที)	59
4.22 ผลของสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟตที่มีต่อกำมะถันไพไรต์ในถ่านหินเหมืองแม่เมาะ ตัวอย่างต่าง ๆ ที่มีองค์ประกอบต่างกัน (ขนาดถ่านหิน 150-250 ไมครอน ปริมาณถ่านหิน 100 กรัมต่อสารละลาย 500 มล. ความเข้มข้นของสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต 20% ที่อุณหภูมิ 120 140 และ 150 °ซ เวลา 1 ชม. อัตราการกวน 1400 รอบต่อนาที)	59

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.23 ผลของสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟตที่มีต่อการลดกำมะถันรวมในถ่านหิน เหมืองแม่เมาะตัวอย่างต่าง ๆ ที่มีองค์ประกอบต่างกัน (ขนาดถ่านหิน 150-250 ไมครอน ปริมาณถ่านหิน 100 กรัมต่อสารละลาย 500 มล. ความเข้มข้นของสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต 20% ที่อุณหภูมิ 150°ซ เวลา 1 ชม. อัตราการกวน 1400 รอบต่อนาที)	60
4.24 ผลของสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟตที่มีต่อการลดกำมะถันไพไรต์ในถ่านหิน เหมืองแม่เมาะตัวอย่างต่าง ๆ ที่มีองค์ประกอบต่างกัน (ขนาดถ่านหิน 150- 250 ไมครอน ปริมาณถ่านหิน 100 กรัมต่อสารละลาย 500 มล. ความ เข้มข้นของสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต 20% ที่อุณหภูมิ และ 150°ซ เวลา 1 ชม. อัตราการกวน 1400 รอบต่อนาที)	60
4.25 กราฟระหว่าง $1/C_p$ กับเวลา ของถ่านหินเหมืองแม่เมาะ 1 ความเข้มข้น ของสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต 10% ที่อุณหภูมิ 120 140 และ 150°ซ..	66
4.26 กราฟระหว่าง $\ln C_p$ กับเวลา ของถ่านหินเหมืองแม่เมาะ 1 ความเข้มข้น ของสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต 10% ที่อุณหภูมิ 120 140 และ 150°ซ..	66
4.27 กราฟระหว่าง $1/C_p$ กับเวลา ของถ่านหินเหมืองแม่เมาะ 1 ความเข้มข้น ของสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต 20% ที่อุณหภูมิ 120 140 และ 150°ซ..	67
4.28 กราฟระหว่าง $\ln C_p$ กับเวลา ของถ่านหินเหมืองแม่เมาะ 1 ความเข้มข้น ของสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต 20% ที่อุณหภูมิ 120 140 และ 150°ซ..	67
4.29 กราฟระหว่าง $1/C_p$ กับเวลา ของถ่านหินเหมืองแม่เมาะ 2 ความเข้มข้น ของสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต 20% ที่อุณหภูมิ 120 140 และ 150°ซ..	68
4.30 กราฟระหว่าง $\ln C_p$ กับเวลา ของถ่านหินเหมืองแม่เมาะ 2 ความเข้มข้น ของสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต 20% ที่อุณหภูมิ 120 140 และ 150°ซ..	68
4.31 กราฟระหว่าง $1/C_p$ กับเวลา ของถ่านหินเหมืองแม่เมาะ 3 ความเข้มข้น ของสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต 20% ที่อุณหภูมิ 120 140 และ 150°ซ..	69
4.32 กราฟระหว่าง $\ln C_p$ กับเวลา ของถ่านหินเหมืองแม่เมาะ 3 ความเข้มข้น ของสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต 20% ที่อุณหภูมิ 120 140 และ 150°ซ..	69
4.33 แสดงกราฟแบบอัตราเร็วปฏิกิริยอันดับสองระหว่าง $(1/1-x)-1$ กับเวลา ของปฏิกิริยาการขจัดไพไรต์ในถ่านหินแม่เมาะ 1 ด้วยสารละลายคอปเปอร์ ซัลเฟต 10 % ที่อุณหภูมิ 120 140 และ 150°ซ.....	73

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่

หน้า

- 4.34 แสดงกราฟตามแบบ Arrhenius plot ระหว่าง $\ln k_2$ กับ $1/T$ ของ
ปฏิกิริยาการขจัดไพไรดีนกำนหินแม่เมาะ 1 ด้วยสารละลายคอปเปอร์ซัล
เฟต 10% 73
- 4.35 แสดงกราฟแบบอัตราเร็วปฏิกิริยอันดับสองระหว่าง $\{1/(1-x)\}-1$ กับเวลา
ของปฏิกิริยาการขจัดไพไรดีนกำนหินแม่เมาะ 1 ด้วยสารละลายคอปเปอร์
ซัลเฟต 20 % ที่อุณหภูมิ 120 140 และ 150°ซ..... 74
- 4.36 แสดงกราฟตามแบบ Arrhenius plot ระหว่าง $\ln k_2$ กับ $1/T$ ของ
ปฏิกิริยาการขจัดไพไรดีนกำนหินแม่เมาะ 1 ด้วยสารละลายคอปเปอร์
ซัลเฟต 20% 74
- 4.37 แสดงกราฟแบบอัตราเร็วปฏิกิริยอันดับสองระหว่าง $\{1/(1-x)\}-1$ กับเวลา
ของปฏิกิริยาการขจัดไพไรดีนกำนหินแม่เมาะ 3 ด้วยสารละลายคอปเปอร์
ซัลเฟต 20 % ที่อุณหภูมิ 120 140 และ 150°ซ..... 75
- 4.38 แสดงกราฟตามแบบ Arrhenius plot ระหว่าง $\ln k_2$ กับ $1/T$ ของ
ปฏิกิริยาการขจัดไพไรดีนกำนหินแม่เมาะ 3 ด้วยสารละลายคอปเปอร์
ซัลเฟต 20 % 75
- 4.39 กราฟแสดงการทดสอบสมการรูปแบบการควบคุมอัตราเร็วปฏิกิริยาไพไรต์
ของกำนหินแม่เมาะ 1 ความเข้มข้นของสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต 10 %
ที่อุณหภูมิ 120 140 และ 150°ซ..... 80
- 4.40 กราฟแสดงการทดสอบสมการรูปแบบการควบคุมอัตราเร็วปฏิกิริยาไพไรต์
ของกำนหินแม่เมาะ 1 ความเข้มข้นของสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต 20 %
ที่อุณหภูมิ 120 140 และ 150°ซ..... 81
- 4.41 กราฟแสดงการทดสอบสมการรูปแบบการควบคุมอัตราเร็วปฏิกิริยาไพไรต์
ของกำนหินแม่เมาะ 2 ความเข้มข้นของสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต 20 %
ที่อุณหภูมิ 120 140 และ 150°ซ..... 82
- 4.42 กราฟแสดงการทดสอบสมการรูปแบบการควบคุมอัตราเร็วปฏิกิริยาไพไรต์
ของกำนหินแม่เมาะ 3 ความเข้มข้นของสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต 20 %
ที่อุณหภูมิ 120 140 และ 150°ซ 83

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่

หน้า

- 4.43 แสดงกราฟตามแบบ Arrhenius plot ระหว่าง De กับ $1/T$ ของ
ไฟไรต์อินก่านหินแม่เมาะ 1 ด้วยสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต 10% ที่อุณหภูมิ
120 140 และ 150 °ซ โดยอาศัย Shrinking core model 84
- 4.44 แสดงกราฟตามแบบ Arrhenius plot ระหว่าง De กับ $1/T$ ของ
ไฟไรต์อินก่านหินแม่เมาะ 1 ด้วยสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต 20% ที่อุณหภูมิ
120 140 และ 150 °ซ โดยอาศัย Shrinking core model 85
- 4.45 แสดงกราฟตามแบบ Arrhenius plot ระหว่าง De กับ $1/T$ ของ
ไฟไรต์อินก่านหินแม่เมาะ 3 ด้วยสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต 20% ที่อุณหภูมิ
120 140 และ 150 °ซ โดยอาศัย Shrinking core model 86

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

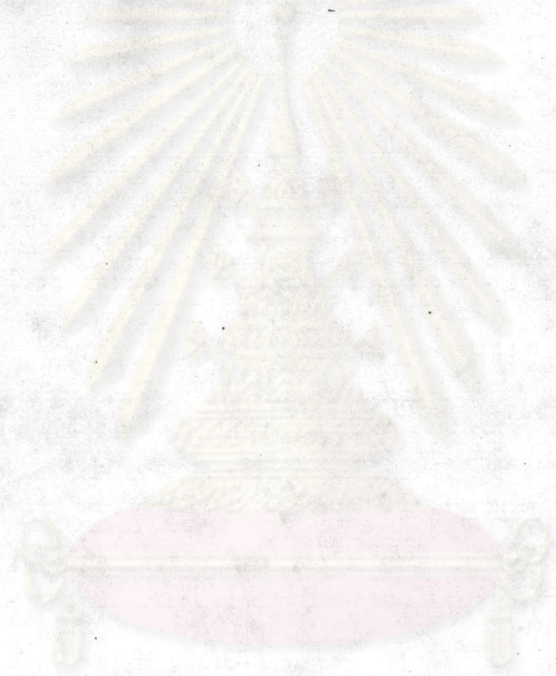


คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

- b = ค่าสัมประสิทธิ์ stoichiometric, เทอมไร้นหน่วย
- C_A = ความเข้มข้นก๊าซ A, โมล/ปริมาตร
- C_{AC} = ความเข้มข้นก๊าซ A, ที่แกนใน, โมล/ปริมาตร
- C_{AG} = ความเข้มข้นก๊าซ A, ในวัฏภาคก๊าซ, โมล/ปริมาตร
- C_{AL} = ความเข้มข้นก๊าซ A, ในวัฏภาคของเหลว, โมล/ปริมาตร
- C_{AS} = ความเข้มข้นก๊าซ A, ที่ผิวอนุภาค, โมล/ปริมาตร
- C_P = ความเข้มข้นไพไรต์ในถ่านหิน, กิโลกรัม/ม³.
- C_{P_0} = ความเข้มข้นไพไรต์ในถ่านหินเริ่มต้น, กิโลกรัม/ม³.
- De = ค่าการแพร่ประสิทธิผล, ม²/วินาที
- De_0 = จุดตัดค่าการแพร่ประสิทธิผล, ม²/วินาที
- E = ค่าพลังงานกระตุ้น, กิโลจูล/กิโลกรัม
- k = ค่าคงที่อัตราเร็วปฏิกิริยา
- kg = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลระหว่างก๊าซกับอนุภาค, พื้นที่/เวลา
- k_L = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลระหว่างของเหลวกับอนุภาค, พื้นที่/เวลา
- k_s = ค่าคงที่อัตราเร็วปฏิกิริยา, ต่อหน่วยเวลา
- k_0 = จุดตัดค่าคงที่อัตราเร็วปฏิกิริยา
- k_2 = ค่าคงที่อัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับสองของไพไรต์, ม³/กิโลกรัม.วินาที
- $k_2(0)$ = จุดตัดค่าคงที่อัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับสองของไพไรต์, ม³/กิโลกรัม.วินาที
- N_A = โมลของ A, โมล
- N_B = โมลของ B, โมล
- Q_A = การถ่ายเทมวล A ต่อหน่วยพื้นที่, โมล/พื้นที่.เวลา
- Q_{AC} = การถ่ายเทมวล A ต่อหน่วยพื้นที่ที่แกนใน, โมล/พื้นที่.เวลา
- Q_{AS} = การถ่ายเทมวล A ต่อหน่วยพื้นที่ที่ผิวของอนุภาค, โมล/พื้นที่.เวลา
- R = รัศมีของอนุภาค, เมตร
- R_1 = รัศมีเฉลี่ยของอนุภาคถ่านหิน, เมตร
- r_A = อัตราเร็วปฏิกิริยาของสาร A, โมล/ปริมาตร.เวลา
- r_C = รัศมีของแกนในอนุภาค, เมตร
- r_P = อัตราเร็วปฏิกิริยาของไพไรต์, กิโลกรัม/ม³.วินาที
- S_{ex} = พื้นที่ผิวส่วนที่ยังไม่ได้เกิดปฏิกิริยาของอนุภาค, ม².
- T = อุณหภูมิ, องศาเซลเซียส
- t = เวลาของการเกิดปฏิกิริยา, วินาที

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

- V = ปริมาตรสารในเครื่องปฏิกรณ์, m^3 .
X = ค่าสัดส่วนการเปลี่ยน, เทอมไร้หน่วย
 X_A = ค่าสัดส่วนการเปลี่ยน A ทั้งหมด, เทอมไร้หน่วย
 X_B = ค่าสัดส่วนการเปลี่ยน B ทั้งหมด, เทอมไร้หน่วย
 τ = เวลาของการเกิดปฏิกิริยาสมบูรณ์, วินาที
 ρ_B = ความหนาแน่นเชิงมวลของไพโรต์อินถ่านหิน, g/m^3 .



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย