

การจัดกำมะถันในถ่านหินแม่เมาะ โดยใช้สารประกอบโลหะอินทรีย์



นางสาว จุติมา ทวีศรี

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

ภาควิชาเคมีเทคนิค


บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พ.ศ. 2537

ISBN 974-584-003-3

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

DESULPHURIZATION OF MAE-MOH COAL BY ORGANOMETALLIC COMPOUNDS



Miss Thitima Thaveesri

**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

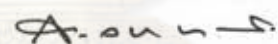
ISBN 974-584-003-3

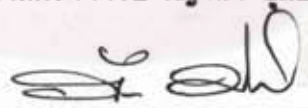
หัวข้อวิทยานิพนธ์ การขจัดกำมะถันในถ่านหินแม่เมาะโดยใช้สารประกอบโลหะอินทรีย์
โดย นางสาว รัฐิมา ทวีศรี
ภาควิชา เคมีเทคนิค
อาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ ดร. ภักทพวรรณ ประศาสน์สารกิจ

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับนี้เป็นส่วนหนึ่งของ
การศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

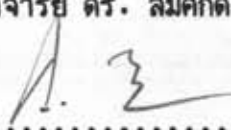

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(ศาสตราจารย์ ดร. ถาวร วัชรภักย์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ กัญญา บุญเกียรติ)


..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ ดร. ภักทพวรรณ ประศาสน์สารกิจ)


..... กรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร. สมศักดิ์ ดำรงค์เลิศ)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ธารพงษ์ วิจิตรคันต์)

จิตติมา ทวีศรี : การขจัดกำมะถันในถ่านหินแม่เมาะ โดยใช้สารประกอบโลหะอินทรีย์
(DESULPHURIZATION OF MAE-MOH COAL BY ORGANOMETALLIC COMPOUNDS)

อ.ที่ปรึกษา : รศ.ดร.ภัทรพรหม ประศาสน์สารกิจ, 139 หน้า.

ISBN 974-584-003-3

การขจัดกำมะถันในถ่านหินแม่เมาะ โดยใช้สารประกอบโลหะอินทรีย์ คือ สารละลาย
โซเดียมเบนซอกไซด์และ โซเดียมบิวทอกไซด์ เป็นการศึกษาผลของเวลาในการขจัดกำมะถัน อุณหภูมิ
และขนาดอนุภาคถ่านหินที่มีต่อการขจัดกำมะถัน สภาวะที่เหมาะสมในการขจัดกำมะถันในถ่านหิน
แม่เมาะ (ขนาดถ่านหิน 75-250 ไมครอน) ด้วยสารละลายโซเดียมเบนซอกไซด์ คือ อุณหภูมิ 205 °C
เวลา 10 นาที กำมะถันในถ่านหินลดลงจาก 3.15 % เป็น 1.65 % หรือ ลดลงร้อยละ 47.6
ร้อยละการลดกำมะถันไพไรต์เป็น 63.2 % หรือลดลงจาก 0.57 % เป็น 0.21 % และร้อยละ
การลดกำมะถันอินทรีย์เป็น 35.3 % หรือลดลงจาก 2.18 % เป็น 1.41 %

การศึกษากลศาสตร์การขจัดกำมะถันไพไรต์พบว่า ปฏิริยาการขจัดกำมะถันไพไรต์
สามารถอธิบายโดยโมเดลปฏิริยาแบบต่อเนื่อง ได้เป็นปฏิริยาอันดับสอง สัดส่วนการเปลี่ยนแปลงของ
กำมะถันไพไรต์ในเทอมของเวลา, อุณหภูมิ และ ขนาดอนุภาคถ่านหิน สามารถเขียนได้เป็น

$$(1/(1-X))^{-1} = 2.08r^{-0.41} \exp(-3783/T)t \quad \text{สำหรับโซเดียมเบนซอกไซด์}$$

$$(1/(1-X))^{-1} = 702r^{-0.34} \exp(-5279/T)t \quad \text{สำหรับโซเดียมบิวทอกไซด์}$$

ข้อมูลทางจลนศาสตร์สามารถอธิบายโดยโมเดลแกนกลางที่ไม่เกิดปฏิริยาหอคั่ว ซึ่ง
พบว่า ปฏิริยาการขจัดกำมะถันควบคุมด้วยขั้นตอนการแพร่ ค่าการแพร่ประสิทธิผล (De) สำหรับ
ปฏิริยากำมะถันไพไรต์ คือ

$$De = 3.67 \times 10^{-8} \exp(-34.9 \times 10^6 / RT) \quad \text{สำหรับโซเดียมเบนซอกไซด์}$$

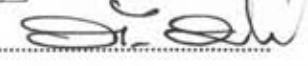
$$De = 0.03 \exp(-58.5 \times 10^6 / RT) \quad \text{สำหรับโซเดียมบิวทอกไซด์}$$

ภาควิชา เคมีเทคนิค

สาขาวิชา เคมีเทคนิค

ปีการศึกษา 2536

ลายมือชื่อนิสิต 

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา 

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม -

C525658 : MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY

KEY WORD: COAL DESULPHURIZATION/ORGANOMETALLIC COMPOUND

THITIMA THAVEESRI : DESULPHURIZATION OF MAE MOH COAL BY
ORGANOMETALLIC COMPOUNDS. THESIS ADVISOR : ASSO. PROF.

PATTARAPAN PRASSASSARAKICH, Ph.D. 139 pp. ISBN 974-584-003-3

The removal of sulphur from Mae Moh coal by organometallic compounds was investigated. Sodium benzoxide and sodium butoxide were used. The effects of desulphurization i.e. time, temperature and coal particle size on the sulphur removal were studied. The optimum conditions for desulphurization of Mae Moh coal (75-250 micron) with sodium benzoxide were at 205 C for 10 minutes. The sulphur content of coal was decreased from 3.15 % to 1.65 % , a reduction of 47.6 % . The pyritic sulphur content was decreased by 63.2 % from 0.57 % to 0.21 % and the organic sulphur content was also decreased by 35.3 % from 2.18 % to 1.41 %.

The kinetics of desulphurization by pyritic sulphur reaction was investigated. The rate of pyritic sulphur reaction was found to be well represented by a continuous reaction model that was second order with respect to pyritic sulphur. The pyritic conversions as a function of time , temperature and coal particle size are expressed as follows:

$$\begin{aligned} (1/(1-X))^{-1} &= 2.08r^{-0.41}\exp(-3783/T)t && \text{for sodium benzoxide} \\ (1/(1-X))^{-1} &= 702r^{-0.34}\exp(-5279/T)t && \text{for sodium butoxide} \end{aligned}$$

The kinetic data were also well described by the unreacted shrinking core model, indicating that the desulphurization was predominantly diffusion controlled. The effective diffusivities (D_e) for pyrite reaction are

$$\begin{aligned} D_e &= 3.67 \times 10^{-6} \exp(-34.9 \times 10^6 / RT) && \text{for sodium benzoxide} \\ D_e &= 0.03 \exp(-58.5 \times 10^6 / RT) && \text{for sodium butoxide} \end{aligned}$$

ภาควิชา.....เคมีเทคนิค
สาขาวิชา.....เคมีเทคนิค
ปีการศึกษา.....2536

ลายมือชื่อนิสิต.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. ภักทพวรรณ ประศาสน์สารกิจ ที่กรุณาให้คำปรึกษาแนะนำ และช่วยเหลือให้งานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี รวมทั้งคณาจารย์ทุกท่านในภาควิชาเคมีเทคนิค ที่ได้ให้คำแนะนำ

ขอขอบพระคุณการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ที่กรุณาอนุเคราะห์ให้ตัวอย่างถ่านหินเพื่อใช้ในการทำวิทยานิพนธ์นี้ ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัยที่ให้ทุนอุดหนุนงานวิจัยนี้ ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่กรุณาช่วยเหลือพร้อมทั้งอำนวยความสะดวกในการวิเคราะห์

ขอขอบคุณบุคลากรในภาควิชาเคมีเทคนิคทุกท่าน ที่ได้อำนวยความสะดวกในการใช้ห้องปฏิบัติการงานวิจัยสำเร็จลงด้วยดี ขอขอบคุณ คุณสังข์ ชมชื่น ที่ช่วยเหลือซ่อมสร้างเครื่องมือบางส่วนที่ใช้ในงานวิจัย ขอขอบคุณพี่ ๆ เพื่อน ๆ ในภาควิชาเคมีเทคนิคและผู้อยู่เบื้องหลังทุกท่าน ที่ได้ให้ความช่วยเหลือและเป็นกำลังใจให้การทำวิทยานิพนธ์สำเร็จลุล่วง

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่ได้ให้กำลังใจ ให้คำแนะนำ ความช่วยเหลือ และให้การสนับสนุนเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูป.....	ฉ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ค
บทที่	
1. บทนำ.....	1
2. วารสารปริทัศน์.....	3
2.1 โครงสร้างและสารประกอบแร่ธาตุของถ่านหิน.....	3
2.2 การจำแนกชนิดและลักษณะของถ่านหิน.....	8
2.3 กระบวนการขจัดกำมะถันในถ่านหิน.....	12
2.4 กระบวนการขจัดกำมะถันโดยใช้สารประกอบโลหะอินทรีย์.....	20
2.5 ทฤษฎีกลไกการเกิดปฏิกิริยาการขจัดกำมะถัน.....	21
2.5.1 โมเดลปฏิกิริยาแบบต่อเนื่อง (Continuous reaction model).....	21
2.5.2 Shrinking Core Model (Constant particle size).....	24
2.6 ผลงานวิจัยในอดีต.....	31
3. เครื่องมือและวิธีการทดลอง.....	41
3.1 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง.....	41
3.2 ตัวอย่างถ่านหินและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	43
3.3 การดำเนินงานวิจัย.....	43
3.4 ขั้นตอนการทดลอง.....	47

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
4. ผลการทดลอง การวิเคราะห์ และวิจารณ์.....	50
4.1 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสม และตัวแปรที่เกี่ยวข้องต่อปฏิกิริยาการ ขจัดกำมะถันในถ่านหิน.....	50
4.1.1 ผลของอัตราส่วน โดยน้ำหนักของ โลหะ โซเดียม ต่อปริมาณ ถ่านหิน.....	52
4.1.2 ผลของอุณหภูมิและชนิดของสารละลาย.....	55
4.1.3 ผลของชนิดของถ่านหิน.....	59
4.1.4 ผลของขนาดอนุภาคถ่านหินและเวลา.....	62
4.1.5 ผลของตัวทำละลายที่ผ่านการ Recovery.....	67
4.2 การศึกษาจลนพลศาสตร์การขจัดกำมะถัน ไนไตรต์ในถ่านหินแม่เมาะ	70
4.2.1 โมเดลปฏิกิริยาแบบต่อเนื่อง.....	75
4.2.2 Shrinking Core Model แบบขนาดอนุภาคไม่เปลี่ยนแปลง.....	94
4.3 การศึกษาจลนพลศาสตร์การขจัดกำมะถันอินทรีย์ในถ่านหินแม่เมาะ	103
4.3.1 การหาอันดับปฏิกิริยาเคมี.....	103
4.3.2 การหาค่าคงที่อัตราเร็วปฏิกิริยาเคมี และค่าพลังงาน กระตุ้น.....	104
5. สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ.....	110
รายการอ้างอิง.....	116
ภาคผนวก.....	120
ภาคผนวก ก.....	121
ภาคผนวก ข.....	137
ประวัติผู้เขียน.....	139

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 การแบ่งลำดับของถ่านหินตามสมบัติของถ่านหิน.....	6
2.2 อัตราส่วนโดยน้ำหนักของอะตอมของธาตุในถ่านหินลำดับต่าง ๆ	6
2.3ก ผลงานวิจัยต่างประเทศ.....	37
2.3ข ผลงานวิจัยในประเทศ.....	39
4.1 สมบัติของถ่านหินแหล่งต่าง ๆ.....	51
4.2 สมบัติของถ่านหินแม่เมาะ 1 ก่อนและหลังผ่านกระบวนการขจัดกำมะถันที่แปรค่า อัตราส่วนโดยน้ำหนักของโลหะโซเดียมต่อถ่านหิน เป็น 1:30 , 2:30 และ 3:30 ของสารละลายโซเดียมเบนซอกไซด์.....	53
4.3 สมบัติของถ่านหินแม่เมาะ 1 ก่อนและหลังผ่านกระบวนการขจัดกำมะถันที่แปรค่า อัตราส่วนโดยน้ำหนักของโลหะโซเดียมต่อถ่านหิน เป็น 1:30 , 2:30 และ 3:30 ของสารละลายโซเดียมบิวทอกไซด์.....	53
4.4 สมบัติของถ่านหินแม่เมาะ 1 ก่อนและหลังผ่านกระบวนการขจัดกำมะถันที่แปรค่า อัตราส่วนโดยน้ำหนักของโลหะโซเดียมต่อถ่านหิน เป็น 1:30 , 2:30 และ 3:30 ของสารละลายโซเดียมเมทอกไซด์.....	53
4.5 สมบัติของถ่านหินแม่เมาะ 1 ก่อนและหลังผ่านกระบวนการขจัดกำมะถัน เมื่อ สารละลายเป็น โซเดียมเบนซอกไซด์ โซเดียมบิวทอกไซด์ และ โซเดียม- เมทอกไซด์ ที่อุณหภูมิแปรค่าตามจุดเดือดของสารละลาย.....	56
4.6 สมบัติของถ่านหินจากแหล่งต่าง ๆ ก่อนและหลังผ่านกระบวนการขจัดกำมะถัน ของสารละลายโซเดียมเบนซอกไซด์และโซเดียมบิวทอกไซด์.....	60
4.7 สมบัติของถ่านหินแม่เมาะ 1 ก่อนและหลังผ่านกระบวนการขจัดกำมะถันที่มีขนาด ถ่านหิน 75-250 , 250-850 , 850-1000 ไมครอน และ 1-2 มิลลิเมตร ของสารละลายโซเดียมเบนซอกไซด์.....	63
4.8 สมบัติของถ่านหินแม่เมาะ 1 ก่อนและหลังผ่านกระบวนการขจัดกำมะถัน ที่มี ขนาดถ่านหิน 75-250 , 250-850 , 850-1000 ไมครอน และ 1-2 มม. ของสารละลายโซเดียมบิวทอกไซด์.....	64

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.18 ค่าพลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยา และความสัมพันธ์ของค่าคงที่อัตราเร็วปฏิกิริยา ตามสมการ Arrhenius ของกัมมันต์ไฟไรต์.....	84
4.19 การหาค่า a และ k เมื่อให้อุณหภูมิคงที่ ของสารละลายโซเดียมเบนซอไซด์ และสารละลายโซเดียมบิวทอไซด์.....	90
4.20 การหาค่า $-E/R$ และ k เมื่อให้รัศมีคงที่ ของสารละลายโซเดียมเบนซอไซด์ และสารละลายโซเดียมบิวทอไซด์.....	90
4.21 การเปรียบเทียบระหว่างข้อมูลจากการคำนวณ โดยใช้สมการอัตราเร็วกับข้อมูลที่ ได้จากการทดลอง เมื่อสารละลายเป็นโซเดียมเบนซอไซด์.....	91
4.22 การเปรียบเทียบระหว่างข้อมูลจากการคำนวณ โดยใช้สมการอัตราเร็วกับข้อมูลที่ ได้จากการทดลอง เมื่อสารละลายเป็นโซเดียมบิวทอไซด์.....	92
4.23 เทอมของสัดส่วนการเปลี่ยนของกัมมันต์ไฟไรต์ของแต่ละขั้นตอนเมื่อสารละลาย เป็นโซเดียมเบนซอไซด์.....	96
4.24 เทอมของสัดส่วนการเปลี่ยนของกัมมันต์ไฟไรต์ของแต่ละขั้นตอนเมื่อสารละลาย เป็นโซเดียมบิวทอไซด์.....	97
4.25 ค่าการแพร่ประสิทธิผล (De) และ $\ln De$ ที่อุณหภูมิต่าง ๆ เมื่อสารละลายเป็น โซเดียมเบนซอไซด์.....	100
4.26 ค่าการแพร่ประสิทธิผล (De) และ $\ln De$ ที่อุณหภูมิต่าง ๆ เมื่อสารละลายเป็น โซเดียมบิวทอไซด์.....	100
4.27 ค่าพลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยา และความสัมพันธ์ของค่าการแพร่ประสิทธิผล (De) ตามสมการ Arrhenius.....	102
4.28 ค่าร้อยละกัมมันต์อินทรีย์ และสัดส่วนการเปลี่ยน (X) เมื่อสารละลายเป็น โซเดียมเบนซอไซด์.....	105
4.29 ค่าร้อยละกัมมันต์อินทรีย์ และสัดส่วนการเปลี่ยน (X) เมื่อสารละลายเป็น โซเดียมบิวทอไซด์.....	105

สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.30 ค่าคงที่อัตราเร็วปฏิกิริยา k_0 และ $\ln k_0$ ที่อุณหภูมิต่าง ๆ เมื่อสารละลายเป็นโซเดียมเบนซอไซด์.....	107
4.31 ค่าคงที่อัตราเร็วปฏิกิริยา k_0 และ $\ln k_0$ ที่อุณหภูมิต่าง ๆ เมื่อสารละลายเป็นโซเดียมบิวทอไซด์.....	107
4.32 ค่าพลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยา และความสัมพันธ์ของค่าคงที่อัตราเร็วปฏิกิริยาตามสมการ Arrhenius ของกำมะถันอินทรีย์.....	109
5.1 การเปรียบเทียบผลการขจัดกำมะถันและกำในถ่านหินแม่เมาะและจลนพลศาสตร์การขจัดกำมะถันไพไรต์และกำมะถันอินทรีย์ ของสารละลายโซเดียมเบนซอไซด์และสารละลายโซเดียมบิวทอไซด์.....	115
ข1 การหาค่ารัศมีอนุภาคถ่านหินเฉลี่ย.....	138

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 สารประกอบอินทรีย์ที่มีในถ่านหิน.....	7
2.2 โครงสร้างทางอินทรีย์ของถ่านหิน.....	7
2.3 ลักษณะต่าง ๆ ของไฟไรต์ที่พบในถ่านหินภาคเหนือของประเทศไทย.....	8
2.4 ลักษณะ โครงสร้างของกำมะถันอินทรีย์พวก heterocyclic ring.....	10
2.5 ลักษณะ โครงสร้างของกำมะถันอินทรีย์ของสารประกอบพวกไดซัลไฟด์ ในโครงสร้างของถ่านหิน.....	11
2.6 ความเข้มข้นของสาร A ที่จุดต่าง ๆ ของอนุภาคของแข็ง.....	26
2.7 แสดงอนุภาคที่เกิดปฏิกิริยาเมื่อการแพร่ผ่านชั้นฟิล์มเป็นชั้นควบคุมอัตราเร็ว....	26
2.8 อนุภาคที่เกิดปฏิกิริยาเมื่อการแพร่ผ่านชั้นเถ้าเป็นชั้นควบคุมอัตราเร็ว และเมื่อ การเกิดปฏิกิริยาเป็นชั้นควบคุมอัตราเร็ว.....	30
3.1 เครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการขจัดกำมะถัน.....	42
3.2 ชุดความแน่น เพื่อใช้หาปริมาณ Recovery ของตัวทำละลาย.....	44
3.3 แผนผังขั้นตอนการทดลอง.....	49
4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน โดยน้ำหนักของ โลหะโซเดียมต่อถ่านหิน กับ ร้อยละการลดกำมะถันรวม กำมะถันซัลเฟต กำมะถันไฟไรต์ กำมะถันอินทรีย์ และร้อยละการลดเถ้า.....	54
4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับร้อยละการลดปริมาณกำมะถันรวม กำมะถันซัลเฟต กำมะถันไฟไรต์ กำมะถันอินทรีย์ และเถ้า.....	57
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ กับ ร้อยละการลดกำมะถัน เมื่อใช้สารละลายเป็น โซเดียมเบนซอกไซด์ โซเดียมบิวทอกไซด์ และโซเดียมเมทอกไซด์.....	58
4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างชนิดของถ่านหิน กับ ร้อยละการลดปริมาณกำมะถันรวม กำมะถันซัลเฟต กำมะถันไฟไรต์ กำมะถันอินทรีย์ และเถ้า.....	61
4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลา กับร้อยละการลดกำมะถัน ที่ขนาดถ่านหินต่าง ๆ กัน เมื่อสารละลายเป็นโซเดียมเบนซอกไซด์.....	65

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับร้อยละการลดกำมะถัน ที่ขนาดถ่านหินต่าง ๆ กัน เมื่อสารละลายเป็นโซเดียมบิวทอกไซด์.....	66
4.7 ความสัมพันธ์ระหว่าง ร้อยละการลดกำมะถันรวม กำมะถันซัลเฟต กำมะถันไพไรต์ กำมะถันอินทรีย์ และถ่าน กับ ตัวทำลายละลายเริ่มต้น และตัวทำลายละลายที่ได้จากการ recovery.....	69
4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับร้อยละการลดกำมะถัน ที่อุณหภูมิต่าง ๆ กัน เมื่อสารละลายเป็นโซเดียมเบนซอกไซด์.....	73
4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับร้อยละการลดกำมะถัน ที่อุณหภูมิต่าง ๆ กัน เมื่อสารละลายเป็นโซเดียมโซเดียมบิวทอกไซด์.....	74
4.10 ความสัมพันธ์ระหว่าง $1/C_0$ กับ เวลา t ที่อุณหภูมิต่าง ๆ กัน.....	79
4.11 ความสัมพันธ์ระหว่าง $(1/(1-X)-1)$ กับเวลา t ที่อุณหภูมิต่าง ๆ กัน.....	81
4.12 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(k_2)$ กับ $1/T$ ของกำมะถันไพไรต์.....	83
4.13 ความสัมพันธ์ระหว่าง $(1/(1-X)-1)$ กับ r ในรูปต่าง ๆ เมื่อสารละลายเป็นโซเดียมเบนซอกไซด์.....	88
4.14 ความสัมพันธ์ระหว่าง $(1/(1-X)-1)$ กับ r ในรูปต่าง ๆ เมื่อสารละลายเป็นโซเดียมบิวทอกไซด์.....	89
4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลที่ได้จากการคำนวณโดยใช้สมการอัตราเร็ว กับข้อมูลที่ได้จากการทดลอง.....	93
4.16 ความสัมพันธ์ระหว่าง สัดส่วนการเปลี่ยนของไพไรต์ (X) กับ เวลา ที่อุณหภูมิต่าง ๆ กัน เมื่อสารละลายเป็นโซเดียมเบนซอกไซด์.....	98
4.17 ความสัมพันธ์ระหว่าง สัดส่วนการเปลี่ยนของไพไรต์ (X) กับ เวลา ที่อุณหภูมิต่าง ๆ กัน เมื่อสารละลายเป็นโซเดียมบิวทอกไซด์.....	99
4.18 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(De)$ กับ $1/T$ ของกำมะถันไพไรต์.....	101
4.19 ความสัมพันธ์ระหว่าง ร้อยละกำมะถันอินทรีย์ กับเวลา ที่อุณหภูมิต่าง ๆ.....	106
4.20 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(k_0)$ กับ $1/T$ ของกำมะถันอินทรีย์.....	108

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

- b = ค่าสัมประสิทธิ์ stoichiometric, เทอมไร้หน่วย
 C_A = ความเข้มข้นของก๊าซ A, โมล/ปริมาตร
 C_{Ac} = ความเข้มข้นของก๊าซ A ที่ผิวแกนใน, โมล/ปริมาตร
 C_{As} = ความเข้มข้นของก๊าซ A ในกระแสก๊าซ, โมล/ปริมาตร
 C_{AL} = ความเข้มข้นของก๊าซ A ในวัฏภาคของเหลว, โมล/ปริมาตร
 C_{As} = ความเข้มข้นของก๊าซ A ที่ผิวอนุภาค, โมล/ปริมาตร
 C_B = ความเข้มข้นกัมมะถันในถ่านหิน, กิโลโมล/ม³
 C_{Bo} = ความเข้มข้นกัมมะถันในถ่านหินเริ่มต้น, กิโลโมล/ม³
 C_O = ความเข้มข้นกัมมะถันอินทรีย์ในถ่านหิน, กิโลโมล/ม³
 C_D = ความเข้มข้นกัมมะถันไพไรต์ในถ่านหิน, กิโลโมล/ม³
 C_{Do} = ความเข้มข้นกัมมะถันไพไรต์ในถ่านหินเริ่มต้น, กิโลโมล/ม³
 D_u = ค่าการแพร่ประสิทธิ์ผล, ม²/วินาที
 D_{uo} = จุดตัดค่าการแพร่ประสิทธิ์ผล, ม²/วินาที
 E = ค่าพลังงานกระตุ้น, จูล/กิโลโมล
 k_u = สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลระหว่างก๊าซกับอนุภาค, พื้นที่/เวลา
 k_L = ค่าคงที่อัตราเร็วปฏิกิริยาชั้นกับตัวแปรต่าง ๆ
 k_n = ค่าคงที่อัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับที่ n
 k_{no} = จุดตัดค่าคงที่อัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับที่ n
 N_A = จำนวนโมลของสาร A, โมล
 N_B = จำนวนโมลของสาร B, โมล
 n = อันดับปฏิกิริยา
 r = รัศมีอนุภาค, เมตร
 r_c = รัศมีของแกนใน, เมตร
 r_B = อัตราเร็วปฏิกิริยาของสาร B, โมล/ปริมาตร เวลา
 r_O = อัตราเร็วปฏิกิริยาของกัมมะถันอินทรีย์, กิโลโมล/ม³.วินาที

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ(ต่อ)

- r_p = อัตราเร็วปฏิกิริยาของกำมะถันไฟไรต์, กิโลโมล/ม³.วินาที
 S = พื้นผิวส่วนนอกของอนุภาค
 T = อุณหภูมิ, องศาเซลวิน
 t = เวลาของการเกิดปฏิกิริยา, นาที
 V = ปริมาตรของอนุภาค
 X = สัดส่วนการเปลี่ยน, เทอมไร้หน่วย
 X_B = สัดส่วนการเปลี่ยนของสาร B, เทอมไร้หน่วย
 τ = เวลาในการเกิดปฏิกิริยาสมบูรณ์
 ρ_p = ความหนาแน่นโดยโมลของสาร B ในของแข็ง, กิโลโมล/ม³

ศูนย์วิทยทรัพยากร
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย