

ผลงานศาสตร์การขจัดกำมะถันในถ่านหินด้วยกระบวนการเมเยอร์ส

นางสาว มณีไล แห่งทรันย์เจริญ



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
ภาควิชาเคมีเทคนิค

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พ.ศ. 2535


ISBN 974-581-311-7

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

018238

I15192106

KINETICS OF COAL DESULFURIZATION BY MEYERS' PROCESS



MISS MONPILAI HANGSUBCHAROEN

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfilment of the Requirements
for the Degree of Master of Science

Department of Chemical Technology

Graduate School

Chulalongkorn University

1992

ISBN 974-581-311-7



หัวข้อวิทยานิพนธ์ จลนพลศาสตร์การขจัดกำมะถันในถ่านหินด้วยกระบวนการเมเยอร์ส
โดย นางสาวมณิไพไล แห่งทรัพย์เจริญ
ภาควิชา เคมีเทคนิค
อาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ ดร.ภัทรพรรณ ประศาสน์สารกิจ

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

มว รัตน

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(ศาสตราจารย์ ดร.ถาวร วัชรากัย)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ดร. ส

..... ประธานกรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ดำรงค์เลิศ)

ดร. ภัทรพรรณ

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

ดร. สมชาย

..... กรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร.สมชาย ไอสวรรณ)

ดร. ธราพงษ์

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธราพงษ์ วิจิตตานต์)

หนังสือพิมพ์ เจริญ : จลนพลศาสตร์การขจัดกำมะถันในถ่านหินด้วยกระบวนการ
เมเยอร์ส (KINETICS OF COAL DESULFURIZATION BY MEYERS' PROCESS)
อ.ที่ปรึกษา : รศ.ดร.ภัทรพรหม ประศาสน์สารกิจ, 151 หน้า. ISBN 974-581-311-7

การศึกษาจลนพลศาสตร์การขจัดกำมะถันในถ่านหินแม่เมาะด้วยกระบวนการเมเยอร์ส โดยใช้
สารละลายเพอริกคลอไรด์และสารละลายเพอริกซัลเฟตเป็นตัวออกซิไดซ์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบไม่ต่อเนื่อง
จากผลการทดลอง พบว่าปริมาณการขจัดกำมะถันและเถ้าเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของเพอริก(III)อ็อกไซด์
อุณหภูมิและเวลาเพิ่มขึ้น แต่ปริมาณการขจัดจะลดลงเมื่อขนาดถ่านหินเพิ่มขึ้น อัตราเร็วปฏิกิริยาของ
การขจัดกำมะถันไพไรต์แสดงได้ด้วยโมเดลปฏิกิริยาต่อเนื่องและเป็นปฏิกิริยาอันดับสอง มีค่าคงที่อัตรา
เร็วปฏิกิริยา(k_2) สำหรับปฏิกิริยากำมะถันไพไรต์ของถ่านหินแม่เมาะในสารละลายเพอริกคลอไรด์คือ

$$k_2 = 5.1 \times 10^{-2} \exp(-14.30 \times 10^3/RT)$$

และในสารละลายเพอริกซัลเฟต คือ

$$k_2 = 6.3 \times 10^{-2} \exp(-14.50 \times 10^3/RT)$$

ปฏิกิริยาการขจัดกำมะถันไพไรต์สามารถอธิบายโดยโมเดลแกนกลางที่ไม่เกิดปฏิกิริยาหัตถ์จาก
ข้อมูลการทดลอง พบว่าขั้นตอนที่ควบคุมอัตราเร็วปฏิกิริยาการขจัดกำมะถันไพไรต์ คือ ขั้นตอนการแพร่
ของเพอริก(III)อ็อกไซด์ผ่านชั้นผลิตภัณฑ์เข้าสู่แกนกลางที่ยังไม่ได้ทำปฏิกิริยา ค่าการแพร่ประสิทธิผล(De)
สำหรับปฏิกิริยากำมะถันไพไรต์ของถ่านหินแม่เมาะในสารละลายเพอริกคลอไรด์คือ

$$De = 5.1 \times 10^{-8} \exp(-15.40 \times 10^3/RT)$$

และในสารละลายเพอริกซัลเฟต คือ

$$De = 2.4 \times 10^{-8} \exp(-12.45 \times 10^3/RT)$$

ศูนย์วิทยุทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาควิชา เคมี เทคนิค
สาขาวิชา เคมี เทคนิค
ปีการศึกษา 2534

ลายมือชื่อนิสิต
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

C225546 : MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY

KEY WORD : KINETICS/DESULFURIZATION/MEYERS PROCESS

MONPILAI HANGSUBCHAROEN : KINETICS OF COAL DESULFURIZATION BY MEYERS' PROCESS. THESIS ADVISOR : ASSO.PROF.PATTARAPAN PRASSASSARAKICH, Ph.D.
151 pp. ISBN 974-581-311-7

The kinetics of the Meyers process desulfurization of Mae Moh coal, by the oxidation of the pyritic sulphur with aqueous ferric chloride and aqueous ferric sulphate in a stirred batch reactor has been investigated. The sulfur and ash removal rate was found to increase significantly with increasing ferric ion concentration, temperature and time but decrease with increasing coal particle size. The rate of pyritic sulphur removal 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 Moh coal in aqueous ferric chloride was :

$$k_2 = 5.1 \times 10^{-2} \exp(-14.30 \times 10^3 / RT)$$

and in aqueous ferric sulphate was :

$$k_2 = 6.3 \times 10^{-2} \exp(-14.50 \times 10^3 / RT)$$

The pyritic sulphur removal reaction was also well described by the unreacted shrinking core model with the indication that the desulfurization was predominantly diffusion of ferric ion through product layer controlled. The effective diffusivity (De) for pyrite reaction of Mae Moh coal in aqueous ferric chloride was :

$$De = 5.1 \times 10^{-8} \exp(-15.40 \times 10^3 / RT)$$

and in aqueous ferric sulphate was :

$$De = 2.4 \times 10^{-8} \exp(-12.45 \times 10^3 / RT)$$

ภาควิชา เคมีเทคนิค
สาขาวิชา เคมีเทคนิค
ปีการศึกษา 2534

ลายมือชื่อนิสิต
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม



กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. ภัทรพรรณ ประศาสน์สารกิจ ที่กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ และช่วยเหลือให้งานวิจัยลุล่วงไปได้ด้วยดี รวมทั้งคณาจารย์ทุกท่านในภาควิชาเคมีเทคนิคทุกท่านที่ได้ให้คำแนะนำ ขอขอบพระคุณ อ.ดร.ชิตพงศ์ ประดิษฐ์สุวรรณที่ได้ให้คำแนะนำและความช่วยเหลือ

ขอขอบพระคุณการไฟฟ้าผลิตแห่งประเทศไทยที่กรุณาให้ตัวอย่างถ่านหินเพื่อใช้ในการทำวิทยานิพนธ์นี้ ขอขอบพระคุณบัณฑิตวิทยาลัยที่ให้ทุนอุดหนุนงานวิจัยนี้ ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่กรุณาช่วยเหลือพร้อมทั้งอำนวยความสะดวกในการวิเคราะห์

ขอขอบคุณบุคลากรในภาควิชาเคมีเทคนิคทุกท่าน ที่ได้อำนวยความสะดวกในการใช้ห้องปฏิบัติการงานวิจัยสำเร็จลงด้วยดี ขอขอบคุณ คุณสังข์ ชมชื่น ที่ช่วยเหลือซ่อมเครื่องมือบางส่วนที่ใช้ในงานวิจัย ขอขอบคุณพี่ๆ เพื่อนๆ น้องๆ ในภาควิชาเคมีเทคนิคและผู้อยู่เบื้องหลังทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือและเป็นกำลังใจให้การทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วง

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่ได้ให้กำลังใจ ให้คำแนะนำ ความช่วยเหลือ และให้การสนับสนุนเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ



	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป.....	ฉ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ต
บทที่	
1. บทนำ.....	1
2. วารสารปริทัศน์.....	3
2.1 องค์ประกอบและโครงสร้างของถ่านหิน.....	4
2.2 การจำแนกชนิดและลักษณะของกัมมะถันในถ่านหิน.....	12
2.3 กระบวนการขจัดกัมมะถันในถ่านหิน.....	15
2.4 กระบวนการขจัดกัมมะถันโดยวิธีออกซิเดชัน.....	23
2.5 ทฤษฎีกลไกการเกิดปฏิกิริยาการขจัดกัมมะถัน.....	24
2.5.1 โมเดลแกนกลางไม่เกิดปฏิกิริยาหดตัว (Unreacted shrinking core model).....	24
2.5.2 โมเดลปฏิกิริยาต่อเนื่อง (Continuous reaction model).....	36

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.6 ผลงานวิจัยในต่างประเทศ.....	38
2.7 ผลงานวิจัยในประเทศ.....	46
3. เครื่องมือและวิธีการทดลอง.....	61
3.1 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง..	61
3.2 ตัวอย่างถ่านหินและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	62
3.3 การดำเนินการวิจัย.....	62
3.4 ขั้นตอนการทดลอง.....	63
4. ผลการทดลอง การวิเคราะห์ และวิจารณ์.....	69
4.1 การศึกษาตัวแปรที่สำคัญที่มีผลต่อปฏิกิริยาการจัดกำมะถันในถ่านหินโดยใช้ สารละลายเฟอริกคลอไรด์ และสารละลายเฟอริกซัลเฟต.....	69
4.1.1 ผลของความเข้มข้นของสารละลายเฟอริกคลอไรด์ และสารละลายเฟอริกซัลเฟต.....	69
4.1.2 ผลของอุณหภูมิ.....	79
4.1.3 ผลของขนาดถ่านหิน.....	83
4.1.4 ผลของระยะเวลา.....	87
4.1.5 ผลของชนิดสารละลาย.....	89
4.2 จลนพลศาสตร์ของกำมะถันไพไรต์: โมเดลปฏิกิริยาต่อเนื่อง.....	91
4.2.1 การศึกษาอัตราเร็วของปฏิกิริยาเคมีของไพไรต์.....	91
4.3 จลนพลศาสตร์ของกำมะถันไพไรต์: โมเดลแกนกลางไม่เกิด ปฏิกิริยาหดตัว.....	103

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
5. สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ.....	117
รายการอ้างอิง.....	123
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก.	127
ภาคผนวก ข.	145
ประวัติผู้เขียน.....	151

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง




ตารางที่	หน้า
2.1 การแบ่งถ่านหินตามคักดีโดยวิธี ASTM D 388	5
2.2 ผลการวิเคราะห์สมบัติถ่านหินแหล่งต่างๆในประเทศ.....	6
2.3 ชั้นคุณภาพถ่านหินในแหล่งต่างๆจากผลการวิเคราะห์.....	7
2.4 แร่ธาตุส่วนใหญ่ที่พบในถ่านหิน.....	11
2.5 ผลงานวิจัยในอดีต.....	50
4.1 สมบัติของถ่านหินแม่เมาะ (แบบไม่รวมความชื้น).....	70
4.2 สมบัติของถ่านหินแม่เมาะ (แบบไม่รวมความชื้น) ก่อนและหลัง ผ่านกระบวนการขจัดกำมะถันที่มีความเข้มข้นของสารละลาย เฟอริกคลอไรด์ 0.5, 0.8, และ 1.0 โมลต่อลิตร.....	73
4.3 สมบัติของถ่านหินแม่เมาะ (แบบไม่รวมความชื้น) ก่อนและหลัง ผ่านกระบวนการขจัดกำมะถันที่มีอุณหภูมิ 50, 70, 90 และ 120 °ซ และใช้สารละลายเฟอริกคลอไรด์.....	73
4.4 สมบัติของถ่านหินแม่เมาะ (แบบไม่รวมความชื้น) ก่อนและหลัง ผ่านกระบวนการขจัดกำมะถันที่มีขนาดถ่านหิน 150, 250 และ 500-750 ไมโครเมตร โดยใช้สารละลายเฟอริกคลอไรด์.....	74
4.5 สมบัติของถ่านหินแม่เมาะ (แบบไม่รวมความชื้น) ก่อนและหลัง ผ่านกระบวนการขจัดกำมะถันที่มีความเข้มข้นของสารละลาย เฟอริกซัลเฟต 0.5, 0.8, และ 1.0 โมลต่อลิตร.....	74
4.6 สมบัติของถ่านหินแม่เมาะ (แบบไม่รวมความชื้น) ก่อนและหลัง ผ่านกระบวนการขจัดกำมะถันที่มีอุณหภูมิ 50, 70, 90 และ 120 °ซ และใช้สารละลายเฟอริกซัลเฟต.....	75

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.7 สมบัติของถ่านหินแม่เมาะ (แบบไม่รวมความชื้น) ก่อนและหลัง ผ่านกระบวนการขจัดกำมะถันที่มีขนาดถ่านหิน 150, 250 และ 500-750 ไมโครเมตร โดยใช้สารละลายเฟอริกซัลเฟต.....	75
4.8 สมบัติของถ่านหินแม่เมาะ (แบบไม่รวมความชื้น) ก่อนและหลัง ผ่านกระบวนการขจัดกำมะถันที่เวลาต่างๆ.....	88
4.9 สมบัติของถ่านหินแม่เมาะ (แบบไม่รวมความชื้น) ก่อนและหลัง ผ่านกระบวนการขจัดกำมะถันที่มีความเข้มข้นของสารละลาย เฟอริกคลอไรด์ และสารละลายเฟอริกซัลเฟต 1.0 โมลต่อลิตร.....	90
4.10 ค่าร้อยละกำมะถันไฟไรต์ (แบบไม่รวมเถ้าและความชื้น) ความเข้มข้นไฟไรต์ของถ่านหินแม่เมาะตามระยะเวลาและที่ อุณหภูมิต่างๆ โดยใช้สารละลายเฟอริกคลอไรด์.....	93
4.11 ค่าร้อยละกำมะถันไฟไรต์ (แบบไม่รวมเถ้าและความชื้น) ความเข้มข้นไฟไรต์ของถ่านหินแม่เมาะตามระยะเวลาและที่ อุณหภูมิต่างๆ โดยใช้สารละลายเฟอริกซัลเฟต.....	94
4.12 ค่าคงที่อัตราเร็วปฏิกิริยา (k_2) ของถ่านหินแม่เมาะ.....	103
4.13 ความสัมพันธ์ของค่าคงที่อัตราเร็วปฏิกิริยากับอุณหภูมิของ ถ่านหินแม่เมาะตาม Arrhenius law	104
4.14 ค่าการแพร่ประสิทธิผล (De) ของถ่านหิน.....	115
4.15 ความสัมพันธ์ของค่าการแพร่ประสิทธิผลกับอุณหภูมิของ ถ่านหินแม่เมาะตาม Arrhenius law	116

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
5.1 การเปรียบเทียบผลการจัดกำมะถัน และกำในถ่านหิน และจลน์ศาสตร์การจัดไฟไรต์ด้วยสารละลายเฟอริกคลอไรต์.....	121
5.2 การเปรียบเทียบผลการจัดกำมะถัน และกำในถ่านหิน และจลน์ศาสตร์การจัดไฟไรต์ด้วยสารละลายเฟอริกซัลเฟต.....	122



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญรูป



รูปที่	หน้า
2.1 โมเลกุลสมมติของถ่านหิน.....	9
2.2 ตัวอย่างสารประกอบอินทรีย์ในถ่านหิน.....	9
2.3 โครงสร้างทางอินทรีย์ของถ่านหิน.....	10
2.4 Coal Organic Crystalline Structure.....	10
2.5 ลักษณะ โครงสร้างของกำมะถันอินทรีย์ที่มีสารประกอบพวก mercaptan, sulfide และ heterocyclic ring ในโครงสร้างของถ่านหิน.....	14
2.6 ลักษณะ โครงสร้างของกำมะถันอินทรีย์ที่มีสารประกอบพวก ไดซัลไฟด์ในโครงสร้างของถ่านหิน.....	14
2.7 Meyer Process.....	25
2.8 Ledgemont Process.....	25
2.9 ขนาดอนุภาคของถ่านหินเมื่อเวลาผ่านไปในปฏิกิริยา.....	26
2.10 โพรไฟล์ความเข้มข้น A เมื่อการแพร่ผ่านชั้นฟิล์มควบคุม อัตราเร็วปฏิกิริยา.....	28
2.11 โพรไฟล์ความเข้มข้น A เมื่อการแพร่ผ่านชั้นผลิตภัณฑ์ควบคุม อัตราเร็วปฏิกิริยา.....	31
2.12 โพรไฟล์ความเข้มข้น A เมื่อการเกิดปฏิกิริยาเคมีควบคุม อัตราเร็วปฏิกิริยา.....	34
3.1 เครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวน และ เครื่องมือควบคุมต่างๆ.....	65
3.2 อ่างน้ำมัน.....	66
3.3 ถังปฏิกรณ์ และฝาปิด.....	66

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.4	ถึงปฏิกรณ์ และฝาปิดเมื่อประกอบเข้าด้วยกัน..... 67
3.5	การจัดอุปกรณ์ และเครื่องมือต่างๆในการทดลอง..... 67
3.6	แผนผังขั้นตอนการทดลอง..... 68
4.1	ผลของความเข้มข้นของสารละลายเฟอริกคลอไรด์ที่มีต่อ การลดกำมะถันไฟไรต์ในถ่านหินแม่เมาะ..... 76
4.2	ผลของความเข้มข้นของสารละลายเฟอริกคลอไรด์ที่มีต่อ การลดกำมะถันรวมในถ่านหินแม่เมาะ..... 76
4.3	ผลของความเข้มข้นของสารละลายเฟอริกซัลเฟตที่มีต่อ การลดกำมะถันไฟไรต์ในถ่านหินแม่เมาะ..... 77
4.4	ผลของความเข้มข้นของสารละลายเฟอริกซัลเฟตที่มีต่อ การลดกำมะถันรวมในถ่านหินแม่เมาะ..... 77
4.5	แสดงการเปรียบเทียบผลของความเข้มข้นของสารละลาย เฟอริกคลอไรด์และสารละลายเฟอริกซัลเฟตที่มีต่อการลด กำมะถันไฟไรต์ในถ่านหินแม่เมาะ..... 78
4.6	ผลของอุณหภูมิที่มีต่อการลดกำมะถันไฟไรต์ในถ่านหินแม่เมาะ (ความเข้มข้นสารละลายเฟอริกคลอไรด์ 1.0 โมลต่อลิตร)..... 80
4.7	ผลของอุณหภูมิที่มีต่อการลดกำมะถันรวมในถ่านหินแม่เมาะ (ความเข้มข้นสารละลายเฟอริกคลอไรด์ 1.0 โมลต่อลิตร)..... 80
4.8	ผลของอุณหภูมิที่มีต่อการลดกำมะถันไฟไรต์ในถ่านหินแม่เมาะ (ความเข้มข้นสารละลายเฟอริกซัลเฟต 1.0 โมลต่อลิตร)..... 81

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.9 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อการลดกำมะถันรวมในถ่านหินแม่เมาะ (ความเข้มข้นสารละลายเฟอริกซัลเฟต 1.0 โมลต่อลิตร).....	81
4.10 แสดงการเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิที่มีต่อการลดกำมะถัน ไฟไรต์.....	82
4.11 ผลของขนาดถ่านหินที่มีต่อการลดกำมะถันไฟไรต์ในถ่านหินแม่เมาะ (ความเข้มข้นสารละลายเฟอริกคลอไรด์ 1.0 โมลต่อลิตร).....	84
4.12 ผลของขนาดถ่านหินที่มีต่อการลดกำมะถันรวมในถ่านหินแม่เมาะ (ความเข้มข้นสารละลายเฟอริกคลอไรด์ 1.0 โมลต่อลิตร).....	84
4.13 ผลของขนาดถ่านหินที่มีต่อการลดกำมะถันไฟไรต์ในถ่านหินแม่เมาะ (ความเข้มข้นสารละลายเฟอริกซัลเฟต 1.0 โมลต่อลิตร).....	85
4.14 ผลของขนาดถ่านหินที่มีต่อการลดกำมะถันรวมในถ่านหินแม่เมาะ (ความเข้มข้นสารละลายเฟอริกซัลเฟต 1.0 โมลต่อลิตร).....	85
4.15 แสดงการเปรียบเทียบผลของขนาดถ่านหินที่มีต่อการลดกำมะถัน ไฟไรต์ในถ่านหินแม่เมาะ.....	86
4.16 กราฟระหว่าง $1/C_p$ กับเวลาของถ่านหินแม่เมาะ (ความเข้มข้น สารละลายเฟอริกคลอไรด์ 1.0 โมลต่อลิตร).....	95
4.17 กราฟระหว่าง $\ln C_p$ กับเวลาของถ่านหินแม่เมาะ (ความเข้มข้น สารละลายเฟอริกคลอไรด์ 1.0 โมลต่อลิตร).....	95
4.18 กราฟระหว่าง $1/C_p$ กับเวลาของถ่านหินแม่เมาะ (ความเข้มข้น สารละลายเฟอริกซัลเฟต 1.0 โมลต่อลิตร).....	96

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.19 กราฟระหว่าง $\ln C_p$ กับเวลาของถ่านหินแม่เมาะ (ความเข้มข้นสารละลายเฟอริกซัลเฟต 1.0 โมลต่อลิตร).....	96
4.20 กราฟแบบอัตราเร็วปฏิกิริยาระดับสองระหว่าง $[1/(1-X)]-1$ กับเวลาของปฏิกิริยาการขจัดไฟไรต์ในถ่านหินแม่เมาะด้วยสารละลายเฟอริกคลอไรด์เข้มข้น 1.0 โมลต่อลิตร.....	99
4.21 กราฟแบบ Arrhenius Plot ระหว่าง $\ln k_2$ กับ $1/T$ ของปฏิกิริยาการขจัดไฟไรต์ในถ่านหินแม่เมาะด้วยสารละลายเฟอริกคลอไรด์เข้มข้น 1.0 โมลต่อลิตร.....	100
4.22 กราฟแบบอัตราเร็วปฏิกิริยาระดับสองระหว่าง $[1/(1-X)]-1$ กับเวลาของปฏิกิริยาการขจัดไฟไรต์ในถ่านหินแม่เมาะด้วยสารละลายเฟอริกซัลเฟตเข้มข้น 1.0 โมลต่อลิตร.....	101
4.23 กราฟแบบ Arrhenius Plot ระหว่าง $\ln k_2$ กับ $1/T$ ของปฏิกิริยาการขจัดไฟไรต์ในถ่านหินแม่เมาะด้วยสารละลายเฟอริกซัลเฟตเข้มข้น 1.0 โมลต่อลิตร.....	102
4.24 กราฟแสดงการทดสอบสมการรูปแบบการควบคุมอัตราเร็วปฏิกิริยาไฟไรต์ของถ่านหินแม่เมาะ ความเข้มข้นสารละลายเฟอริกคลอไรด์ 0.5, 0.8 และ 1.0 โมลต่อลิตร.....	107
4.25 กราฟแสดงการทดสอบสมการรูปแบบการควบคุมอัตราเร็วปฏิกิริยาไฟไรต์ของถ่านหินแม่เมาะ ความเข้มข้นสารละลายเฟอริกคลอไรด์ 1.0 โมลต่อลิตร อุณหภูมิ 50, 70, 90 และ 120 °C.....	108

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.26 กราฟแสดงการทดสอบสมการรูปแบบการควบคุมอัตราเร็วปฏิกิริยา ไฟไรต์ของถ่านหินแม่เมาะ ความเข้มข้นสารละลายเฟอริกคลอไรด์ 1.0 โมลต่อลิตร ขนาดถ่านหิน 150,250 และ 500-750 ไมโครเมตร.....	109
4.27 กราฟแสดงการทดสอบสมการรูปแบบการควบคุมอัตราเร็วปฏิกิริยา ไฟไรต์ของถ่านหินแม่เมาะ ความเข้มข้นสารละลายเฟอริกซัลเฟต 0.5,0.8 และ 1.0 โมลต่อลิตร.....	110
4.28 กราฟแสดงการทดสอบสมการรูปแบบการควบคุมอัตราเร็วปฏิกิริยา ไฟไรต์ของถ่านหินแม่เมาะ ความเข้มข้นสารละลายเฟอริกซัลเฟต 1.0 โมลต่อลิตร อุณหภูมิ 50,70,90 และ 120 °ซ.....	111
4.29 กราฟแสดงการทดสอบสมการรูปแบบการควบคุมอัตราเร็วปฏิกิริยา ไฟไรต์ของถ่านหินแม่เมาะ ความเข้มข้นสารละลายเฟอริกซัลเฟต 1.0 โมลต่อลิตร ขนาดถ่านหิน 150, 250 และ 500-750 ไมโครเมตร.....	112
4.30 กราฟระหว่าง $\ln (De)$ กับ $1/T$ ตามแบบ Arrhenius Plot ของปฏิกิริยาการขจัดไฟไรต์ในถ่านหินแม่เมาะ ด้วยสารละลาย เฟอริกคลอไรด์ ที่อุณหภูมิ 50,70,90 และ 120 °ซ โดยอาศัย unreacted shrinking core model.....	113
4.31 กราฟระหว่าง $\ln (De)$ กับ $1/T$ ตามแบบ Arrhenius Plot ของปฏิกิริยาการขจัดไฟไรต์ในถ่านหินแม่เมาะ ด้วยสารละลาย เฟอริกซัลเฟต ที่อุณหภูมิ 50,70,90 และ 120 °ซ โดยอาศัย unreacted shrinking core model.....	114



คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

- b = ค่าสัมประสิทธิ์ stoichiometric, เทอมไร้หน่วย
- C_A = ความเข้มข้นก๊าซ A, โมล/ปริมาตร
- C_{AC} = ความเข้มข้นก๊าซ A, ที่แกนใน, โมล/ปริมาตร
- C_{AS} = ความเข้มข้นก๊าซ A, ในวัฏภาคก๊าซ, โมล/ปริมาตร
- C_{AL} = ความเข้มข้นก๊าซ A, ในวัฏภาคของเหลว, โมล/ปริมาตร
- C_{As} = ความเข้มข้นก๊าซ A, ที่ผิวอนุภาค, โมล/ปริมาตร
- C_p = ความเข้มข้นไฟไรต์ในถ่านหิน, กิโลโมล/ m^3
- C_{p_0} = ความเข้มข้นไฟไรต์ในถ่านหินเริ่มต้น, กิโลโมล/ m^3
- De = ค่าการแพร่ประสิทธิผล, m^2 /วินาที
- De_0 = จุดตัดค่าการแพร่ประสิทธิผล, m^2 /วินาที
- E = ค่าพลังงานกระตุ้น, กิโลจูล/กิโลโมล
- k = ค่าคงที่อัตราเร็วปฏิกิริยา
- k_g = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลระหว่างก๊าซกับอนุภาค, พื้นที่/เวลา
- k_1 = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลระหว่างของเหลวกับอนุภาค, พื้นที่/เวลา
- k_u = ค่าคงที่อัตราเร็วปฏิกิริยา, ต่อหน่วยเวลา
- k_0 = จุดตัดค่าคงที่อัตราเร็วปฏิกิริยา
- k_2 = ค่าคงที่อัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับสองของไฟไรต์, m^3 /กิโลโมล วินาที
- $k_2(0)$ = จุดตัดค่าคงที่อัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับสองของไฟไรต์, m^3 /กิโลโมล 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

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

R	=	รัศมีของอนุภาค, เมตร
R_1	=	รัศมีเฉลี่ยของอนุภาคถ่านหิน, เมตร
r_A	=	อัตราเร็วปฏิกิริยาของสาร A, โมล/ปริมาตร เวลา
r_c	=	รัศมีของแกนในอนุภาค, เมตร
r_p	=	อัตราเร็วปฏิกิริยาของไฟไรต์, กิโลโมล/ม ³ วินาที
S_{∞}	=	พื้นที่ผิวส่วนที่ยังไม่ได้เกิดปฏิกิริยาของอนุภาค, ม ²
T	=	อุณหภูมิ, องศาเซลเซียส
t	=	เวลาของการเกิดปฏิกิริยา, วินาที
V	=	ปริมาตรสารในเครื่องปฏิกรณ์, ม ³
X	=	ค่าสัดส่วนการเปลี่ยน, เทอมไร้หน่วย
X_A	=	ค่าสัดส่วนการเปลี่ยน A ทั้งหมด, เทอมไร้หน่วย
X_B	=	ค่าสัดส่วนการเปลี่ยน B ทั้งหมด, เทอมไร้หน่วย
τ	=	เวลาของการเกิดปฏิกิริยาสมบูรณ์, วินาที
ρ	=	ความหนาแน่นเชิงโมลาร์ของไฟไรต์ในถ่านหิน, กิโลโมล/ม ³

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย