

การดูดซึมซัลเฟอร์ไดออกไซด์ด้วยเถ้าลอยอัดเม็ดในฟลูอิดไบบด



นางสาวพรรณทิพย์ ธรรมธราธาร

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

ภาควิชาเคมีเทคนิค


บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พ.ศ. 2539

ISBN 974-635-133-8

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ABSORPTION OF SULPHUR DIOXIDE WITH PELLETIZED FLY ASH IN FLUIDIZED BED



Miss Pantavee Thamtharathan

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Science

Department of Chemical Technology

Graduate School

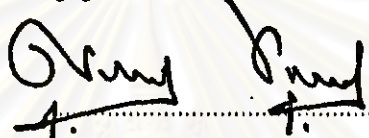
Chulalongkorn University

1996

ISBN 974-635-133-8

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การดูดซึ่มซัลเฟอร์ไดออกไซด์ด้วยเถ้าลอยอัดเม็ดในฟลูอิดไรส์เบด
โดย นางสาวพรรณทวิ ธรรมธราธาร
ภาควิชา เคมีเทคนิค
อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธราพงษ์ วิทิตศานต์
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม อาจารย์ ดร.สมเกียรติ งามประเสริฐสิทธิ์

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

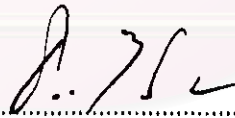


..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(ศาสตราจารย์ นายแพทย์ศุภวัฒน์ ชุตินวงศ์)

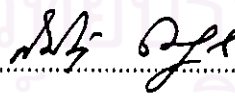
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



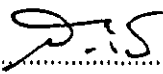
..... ประธานกรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร.ภัทรพรรณ ประศาสน์สารกิจ)



..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธราพงษ์ วิทิตศานต์)



..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(อาจารย์ ดร.สมเกียรติ งามประเสริฐสิทธิ์)



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



..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เลอสรวง เมฆสุด)



พรรณทวี ธรรมธรราร : การดูดซึมซัลเฟอร์ไดออกไซด์ด้วยเถ้าลอยอัดเม็ดในฟลูอิดิซ์เบด
(ABSORPTION OF SULPHUR DIOXIDE WITH PELLETIZED FLY ASH IN FLUIDIZED BED)

อ.ที่ปรึกษา : ผศ.ดร.ธราพงษ์ วิจิตรคานต์, อ.ที่ปรึกษาร่วม : อ.ดร.สมเกียรติ งามประเสริฐสิทธิ์,

138 หน้า. ISBN 974-635-133-8

เถ้าลอยลิกไนต์จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จ.ลำปาง นำมาผสมปูนขาว และยิปซัมในอัตราส่วนต่าง ๆ นำมาผลิตเถ้าลอยอัดเม็ดเพื่อใช้เป็นสารดูดซึมแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ มีตัวแปรที่ศึกษาคือ อัตราส่วนโดยน้ำหนักของเถ้าลอย ปูนขาว และยิปซัม 6:0:2, 6:0:4, 6:2:4 และ 6:3:4 อุณหภูมิการดูดซึม 180-240 องศาเซลเซียส ค่า U/U_{mf} 1.2-1.75 ขนาดอนุภาคเถ้าลอยอัดเม็ด Mesh no. -4+8, -8+16 และ -16+30 และปริมาณเถ้าลอยอัดเม็ดที่ใช้ในการดูดซึม 400-700 กรัม โดยใช้แก๊สป้อนที่มีปริมาณแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ 2000-2500 พีพีเอ็ม พบว่าภาวะที่เหมาะสมในการดูดซึมคือ อุณหภูมิการดูดซึม 200-240 องศาเซลเซียส ค่า U/U_{mf} เท่ากับ 1.25 ขนาดอนุภาคเถ้าลอยอัดเม็ด Mesh no. -16+30 และปริมาณเถ้าลอยอัดเม็ดที่ใช้ในการดูดซึม 700 กรัม

เถ้าลอยอัดเม็ดที่มีอัตราส่วนของเถ้าลอย ปูนขาว และยิปซัมคือ 6:0:2 และ 6:3:4 พบว่ามีการแตกของอนุภาคเถ้าลอยอัดเม็ดในขณะที่ดูดซึมแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ค่าการดูดซึมแบ่งเป็น 3 ช่วงคือ ช่วงที่ 1 ค่าการดูดซึมมีค่าต่ำลงเมื่อเวลาการดูดซึมเพิ่มขึ้น ช่วงที่ 2 ค่าการดูดซึมมีค่าคงที่ และช่วงที่ 3 ค่าการดูดซึมลดลงอย่างรวดเร็ว

เถ้าลอยอัดเม็ดที่มีอัตราส่วนของเถ้าลอย ปูนขาว และยิปซัมคือ 6:0:4 และ 6:2:4 พบว่าอนุภาคเถ้าลอยอัดเม็ดมีการยึดเกาะกันอย่างแข็งแรง ค่าการดูดซึมมีค่าต่ำลงตามเวลาการดูดซึม

อัตราส่วนที่เหมาะสมของเถ้าลอย ปูนขาว และยิปซัมในการผลิตเถ้าลอยอัดเม็ดเพื่อใช้เป็นสารดูดซึมแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์คือ 6:2:4 ส่วนโดยน้ำหนัก

ภาควิชาเคมีเทคนิค.....
สาขาวิชาเคมีเทคนิค.....
ปีการศึกษา ๒๕๓๙

ลายมือชื่อนิสิต พ. ๕๑ ๕๕
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
.....

C725939 : MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY

KEY WORD: ABSORPTION / SULPHUR DIOXIDE / PELLETIZED FLY ASH

PANTAVEE THAMTHARATHAN : ABSORPTION OF SULPHUR DIOXIDE WITH PELLETIZED FLY ASH IN FLUIDIZED BED. THESIS ADVISOR : ASSIST.PROF. THARAPONG VITIDSANT, Doctorat de l'INT. SOMKIAT NGAMPRASERTSITH, Doctorat de l'INT. 138 pp. ISBN 974-635-133-8

Lignite fly ash from Mac Moh mine at Lumpang Province was mixed with lime and gypsum in varying composition to produce pelletized fly ash. The variable studied were composition by weight of fly ash, lime and gypsum 6:0:2, 6:0:4, 6:2:4 and 6:3:4 respectively, temperature range of 180-240 °C, U/Umf (1.2-1.75), pelletized fly ash diameter equivalent to Mesh no. -4+8, -8+16 and -16+30 and weight of pelletized fly ash (400-700 gm). For feed gas containing SO₂ 2000-2500 ppm, the result showed that the suitable condition for absorption of SO₂ was as follows : temperature of absorption 200-240 °C, U/Umf 1.25, diameter of pelletized fly ash Mesh no. -16+30, weight of pelletized fly ash 700 gm.

Pelletized fly ash with composition by weight of fly ash, lime and gypsum was 6:0:2 and 6:3:4, the result showed that they broke down between absorption SO₂, the absorption had 3 steps. In the first step, the absorption varied with time. The second step, they had constant absorption and they had quickly low absorption in the last step.

Pelletized fly ash with composition by weight of fly ash, lime and gypsum was 6:0:4 and 6:2:4, the result showed that they had strong structure and the absorption varied with time.

The suitable composition by weight of fly ash, lime and gypsum to produce pelletized fly ash for used of SO₂ absorption was 6:2:4



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา.....เคมีเทคนิค.....

สาขาวิชา.....เคมีเทคนิค.....

ปีการศึกษา.....๒๕๓๙.....

ลายมือชื่อนิติกร..... ๙๗๕ ๕๕.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา..... ๗๗.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม..... ๗๗.....

กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธราพงษ์ วิจิตรदानต์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และอาจารย์ ดร.สมเกียรติ งามประเสริฐสิทธิ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่กรุณาให้คำปรึกษาตักเตือน และช่วยเหลือในการทำวิจัยครั้งนี้ให้สำเร็จ ลุล่วงไปด้วยดี รวมทั้งคณาจารย์ทุกท่านในภาควิชาเคมีเทคนิคที่ได้ให้คำแนะนำและช่วยเหลือ

ขอขอบคุณ คุณสังข์ ชมชื่น ที่ช่วยสร้างและซ่อมแซมอุปกรณ์ในการทำวิจัยครั้งนี้จน ดำเนินการวิจัยได้ดี

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ บุคลากรในภาควิชาเคมีเทคนิคทุกท่าน ที่อำนวยความสะดวก ในการใช้ห้องปฏิบัติการ และขอบคุณพี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆ ในภาควิชาเคมีเทคนิคที่ให้การ สนับสนุนช่วยเหลือในการทำวิทยานิพนธ์มาโดยตลอด

ทุนในการวิจัยครั้งนี้บางส่วนได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยของบัณฑิตวิทยาลัย จึงขอ ขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัยมา ณ. ที่นี้ด้วย

ท้ายสุดขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ญาติพี่น้อง ที่ให้ความช่วยเหลือเป็น กำลังใจเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญตารางประกอบ.....	ฅ
สารบัญรูปประกอบ.....	ด
สัญลักษณ์.....	บ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
2 ทฤษฎีและงานวิจัยในอดีต.....	3
ถ่านหิน.....	3
โครงสร้างถ่านหิน.....	3
1. โครงสร้างอินทรีย์.....	5
2. สารประกอบแร่ธาตุ.....	6
กัมมะถันในถ่านหิน.....	8
ถ้ำถ่านหิน.....	8
1. องค์ประกอบถ้ำถ่านหิน.....	11
2. ปัญหาของถ้ำถ่านหินในเตาเผาและหม้อไอน้ำ.....	14
แก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์.....	15
1. คุณสมบัติทางกายภาพของแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์.....	16
2. ผลกระทบของแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ต่อสิ่งแวดล้อมและมนุษย์.....	17
การกำจัดแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่เกิดจากการเผาไหม้.....	17
1. วิธีการกำจัดกัมมะถันก่อนการเผาไหม้.....	18
2. วิธีการกำจัดกัมมะถันขณะเผาไหม้.....	18
3. วิธีการกำจัดกัมมะถันหลังการเผาไหม้.....	19
กระบวนการกำจัดแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ออกจากฟลูแก๊ส.....	19
1. กระบวนการแบบ Wet absorption process.....	20
2. กระบวนการแบบ Catalytic oxidation process.....	20

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
3. กระบวนการแบบ Wet and dry adsorption process.....	20
4. กระบวนการแบบ Dry adsorption process.....	21
การนำเถ้าลอยมาใช้ในการกำจัดแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์.....	25
1. Dry process flue gas desulphurizer utilizing fly ash.....	25
ตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อปฏิกิริยาเคมี.....	26
ฟลูอิดเซชัน.....	28
1. ข้อได้เปรียบ.....	29
2. ข้อเสียเปรียบ.....	29
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	30
3 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง.....	32
อุปกรณ์การทดลอง.....	32
1. เครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิดเบด	32
2. เครื่องวัดและควบคุมอัตราการป้อนแก๊สเข้าเครื่องปฏิกรณ์.....	36
3. มานอมิเตอร์.....	36
4. อุปกรณ์ชั่งตัวอย่างแก๊ส.....	36
วิธีการทดลอง.....	40
1. การเตรียมสารดูดซึม (เถ้าลอยอัดเม็ด).....	40
2. การทดลองหาความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชันของเถ้าลอยอัดเม็ด.....	40
3. ขั้นตอนการทดลอง.....	41
4. ขั้นตอนการทดลองต่อไป.....	42
ตัวแปรที่ทำการศึกษา.....	42
4 ผลการทดลอง.....	43
ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของเถ้าลอยลิกไนต์.....	43
ผลการวิเคราะห์หาปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CaO) และยิปซัม (CaSO ₄).....	45
ผลการวิเคราะห์หาปริมาณความหนาแน่นเชิงปริมาตร (Bulk density, BD).....	46
ผลการวิเคราะห์การดูดซึมแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิดเบด.....	46
1. ความสามารถในการดูดซึมแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ของเถ้าลอยอัดเม็ด	
ที่มีอัตราส่วนเถ้าลอย ปูนขาวและยิปซัม คือ 6:0:2 (โดยน้ำหนัก).....	46

สารบัญ (ต่อ)

บทที่

หน้า

2. ความสามารถในการดูดซึมแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ของถ้ำลอยอัดเม็ด ที่มีอัตราส่วนถ้ำลอย ปูนขาวและยิปซัม คือ 6:0:4 (โดยน้ำหนัก).....	51
3. ความสามารถในการดูดซึมแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ของถ้ำลอยอัดเม็ด ที่มีอัตราส่วนถ้ำลอย ปูนขาวและยิปซัม คือ 6:2:4 (โดยน้ำหนัก).....	53
4. ความสามารถในการดูดซึมแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ของถ้ำลอยอัดเม็ด ที่มีอัตราส่วนถ้ำลอย ปูนขาวและยิปซัม คือ 6:3:4 (โดยน้ำหนัก).....	77
5. ความสามารถในการดูดซึมแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ของถ้ำลอยอัดเม็ด ที่มีอัตราส่วนถ้ำลอย ปูนขาวและยิปซัม (โดยน้ำหนัก) ต่างๆ กัน.....	80
ผลการวิเคราะห์ค่าความต้านทานแรงอัด.....	81
ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของขนาดอนุภาคถ้ำลอยอัดเม็ด.....	82
ผลการวิเคราะห์หาปริมาณยิปซัมของถ้ำลอยอัดเม็ดภายหลังการดูดซึม แก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์.....	83
5. วิจัยรณผลการทดลอง.....	86
ถ้ำลอยอัดเม็ดที่ใช้เป็นสารดูดซึม.....	86
1. อัตราส่วนต่างๆ ของถ้ำลอยอัดเม็ดที่ใช้เป็นสารดูดซึม.....	86
ผลกระทบของตัวแปรที่มีต่อความสามารถในการดูดซึมแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์.....	87
1. อิทธิพลของอุณหภูมิที่ใช้ในการดูดซึม.....	87
2. อิทธิพลของค่า U/U_m ต่อความสามารถในการดูดซึม แก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์.....	88
3. อิทธิพลของขนาดอนุภาคถ้ำลอยอัดเม็ดต่อความสามารถในการดูดซึม แก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์.....	89
4. อิทธิพลของปริมาณถ้ำลอยอัดเม็ดที่ใช้ต่อความสามารถในการดูดซึม แก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์.....	90
5. อิทธิพลขององค์ประกอบของถ้ำลอยอัดเม็ดที่มีอัตราส่วนของถ้ำลอย ปูนขาว และยิปซัมต่างๆ กันต่อความสามารถในการดูดซึม แก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์.....	91

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
6 สรุปผลการทดลอง.....	93
กระบวนการผลิตเก้าอี้ลอยอัดเม็ดเพื่อใช้ไปตารูดซี่ม.....	93
กระบวนการดัดซี่มแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในหอดูดซี่มแบบฟลูอิด์เบด.....	93
รายการอ้างอิง.....	96
ภาคผนวก.....	98
ประวัติผู้เขียน.....	138



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตารางประกอบ

ตารางที่	หน้า
2.1 การจำแนกชนิดถ่านหินตาม ASTM D388.....	4
2.2 สารประกอบแร่ธาตุที่พบในถ่านหิน.....	7
2.3 ลักษณะของ Thermogram ที่ได้จากการวิเคราะห์แร่ด้วย DTA.....	13
2.4 สารประกอบแร่ธาตุที่พบในถ่านหิน.....	14
2.5 ตารางแสดงค่าคงที่ทางกายภาพของแก๊สซิลเฟอร์ไดออกไซด์.....	16
2.6 ระดับแก๊สซิลเฟอร์ไดออกไซด์ที่สิ่งมีชีวิตยอมรับได้.....	17
4.1 ผลการวิเคราะห์ตัวอย่างถ่านหินด้วยวิธี X-ray fluorescence Spectrometry.....	44
4.2 ผลการวิเคราะห์หาปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CaO) และยิปซัม (CaSO ₄).....	45
4.3 ค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตรของถ่านหิน บุนขาว และยิปซัม ที่อัตราส่วนต่างๆ กัน.....	46
4.4 ค่าความต้านทานแรงอัดของสารดูดซึม.....	82
4.5 ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของขนาดอนุภาคถ่านหินอัดเม็ดภายหลังการดูดซึม แก๊สซิลเฟอร์ไดออกไซด์ของถ่านหินอัดเม็ดขนาดอนุภาค Mesh no. -4+8.....	82
4.6 ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของขนาดอนุภาคถ่านหินอัดเม็ดภายหลังการดูดซึม แก๊สซิลเฟอร์ไดออกไซด์ของถ่านหินอัดเม็ดขนาดอนุภาค Mesh no. -8+16.....	83
4.7 ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของขนาดอนุภาคถ่านหินอัดเม็ดภายหลังการดูดซึม แก๊สซิลเฟอร์ไดออกไซด์ของถ่านหินอัดเม็ดขนาดอนุภาค Mesh no.-16+30.....	83
4.8 ผลการวิเคราะห์หาปริมาณยิปซัมของถ่านหินอัดเม็ดที่มีอัตราส่วนถ่านหิน บุนขาว และยิปซัมคือ 6:2:4 ส่วนโดยน้ำหนัก ภายหลังการดูดซึม แก๊สซิลเฟอร์ไดออกไซด์ โดยมีภาวะการดูดซึม ขนาดอนุภาคถ่านหินอัดเม็ด Mesh no. -4+8 ปริมาณ 500 กรัม ค่า U/U _{mf} เท่ากับ 1.23 ที่อุณหภูมิ การดูดซึมต่างๆ.....	84
4.9 ผลการวิเคราะห์หาปริมาณยิปซัมของถ่านหินอัดเม็ดที่มีอัตราส่วนถ่านหิน บุนขาว และยิปซัมคือ 6:2:4 ส่วนโดยน้ำหนัก ภายหลังการดูดซึม แก๊สซิลเฟอร์ไดออกไซด์ โดยมีภาวะการดูดซึม ขนาดอนุภาคถ่านหินอัดเม็ด Mesh no. -4+8 ปริมาณ 500 กรัม อุณหภูมิการดูดซึม 200 องศาเซลเซียส ที่ค่า U/U _{mf} ต่างๆ.....	84

สารบัญตารางประกอบ (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.10 ผลการวิเคราะห์หาปริมาณยิปซัมของแฉ่ำลอยอัดเม็ดที่มีอัตราส่วนแฉ่ำลอย ปูนขาว และยิปซัมคือ 6:2:4 ส่วนโดยน้ำหนัก ภายหลังจากการดูดซึ่ม แก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ โดยมีภาวะการดูดซึ่ม แฉ่ำลอยอัดเม็ดปริมาณ 500 กรัม ค่า U/U_{mf} เท่ากับ 1.23 จุดหนุมิการดูดซึ่ม 200 องศาเซลเซียส ที่ขนาดอนุภาค แฉ่ำลอยอัดเม็ดต่างๆ.....	84
4.11 ผลการวิเคราะห์หาปริมาณยิปซัมของแฉ่ำลอยอัดเม็ดที่มีอัตราส่วนแฉ่ำลอย ปูนขาว และยิปซัมคือ 6:2:4 ส่วนโดยน้ำหนัก ภายหลังจากการดูดซึ่มแก๊สซัลเฟอร์- ไดออกไซด์ โดยมีภาวะการดูดซึ่ม จุดหนุมิการดูดซึ่ม 200 องศาเซลเซียส ที่ค่า U/U_{mf} , ขนาดอนุภาคและปริมาณแฉ่ำลอยอัดเม็ดต่างๆ.....	85

สารบัญรูปประกอบ

รูปที่	หน้า
2.1 โมเลกุลสมมุติของถ่านหิน.....	5
2.2 การรวมตัวของวงแหวนอะโรมาติกเมื่อศักดิ์ของถ่านหินเพิ่มขึ้น.....	6
2.3 การเกิดถ้ำถ่านหินขณะเผาไหม้.....	10
2.4 การกระจายขนาดของอนุภาค fly ash จาก stoker-fired boiler (R) และ pulverized-coal-fired boiler (G).....	11
2.5 แสดงผลของ X-ray diffraction ถ้ำถ่านหินในช่วงอุณหภูมิ 400-1500 องศาเซลเซียส.	12
2.6 แสดงถึงลักษณะการเข้าทำปฏิกิริยาของแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์กับปูนขาว (CaO).....	27
3.1 อุปกรณ์ดูดซึมแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ด้วยถ้ำลอยอัดเม็ดในฟลูอิดไบริเบด.....	33
3.2 สัดส่วนเครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไบริเบดที่ใช้ในงานวิจัย.....	34
3.3 เครื่องดูดซึมแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์.....	35
3.4 ถังเก็บแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์.....	37
3.5 โรตารีเตออร์.....	37
3.6 มานอมีเตออร์.....	38
3.7 อุปกรณ์ชักตัวอย่างแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์.....	38
3.8 เครื่องผลิตอากาศอัด.....	39
3.9 เครื่องควบแน่นไอน้ำจากอากาศอัด.....	39
4.1 ลักษณะของถ้ำลอยลิกไนต์ที่นำมาใช้ในงานวิจัย.....	43
4.2 ลักษณะของถ้ำลอย ปูนขาว และยิปซัมก่อนขึ้นรูป.....	44
4.3 ลักษณะของถ้ำลอยอัดเม็ดก่อนและหลังการดูดซึมแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์.....	45
4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดซึมแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์กับเวลาของถ้ำลอยอัดเม็ดที่มีอัตราส่วนถ้ำลอย ปูนขาว และยิปซัมคือ 6:0:2 (โดยน้ำหนัก) ขนาดอนุภาค Mesh no. -4+8 ปริมาณ 500 กรัม ค่า U/U_m เท่ากับ 1.23 ที่อุณหภูมิการดูดซึมต่างๆ.....	47
4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดซึมแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์กับเวลาของถ้ำลอยอัดเม็ดที่มีอัตราส่วนถ้ำลอย ปูนขาว และยิปซัมคือ 6:0:2 (โดยน้ำหนัก) ขนาดอนุภาค Mesh no. -4+8 ปริมาณ 500 กรัม อุณหภูมิการดูดซึม 200 องศาเซลเซียส ที่ค่า U/U_m ต่างๆ.....	48

สารบัญรูปประกอบ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดซึมแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์กับเวลา ของถ้ำลอยอัดเม็ดที่มีอัตราส่วนถ้ำลอย ปูนขาว และยิปซัมคือ 6:0:2 (โดยน้ำหนัก) ปริมาณ 500 กรัม ค่า U/U_{mf} เท่ากับ 1.23 อุณหภูมิการดูดซึม 200 องศาเซลเซียส ที่ขนาดอนุภาคถ้ำลอยอัดเม็ดต่างๆ.....	49
4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดซึมแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์กับเวลา ของถ้ำลอยอัดเม็ดที่มีอัตราส่วนถ้ำลอย ปูนขาว และยิปซัมคือ 6:0:2 (โดยน้ำหนัก) ขนาดอนุภาค Mesh no. -8+16 ค่า U/U_{mf} เท่ากับ 1.23 อุณหภูมิการดูดซึม 200 องศาเซลเซียส ที่ปริมาณถ้ำลอยอัดเม็ดต่างๆ.....	50
4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดซึมแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์กับเวลา ของถ้ำลอยอัดเม็ดที่มีอัตราส่วนถ้ำลอย ปูนขาว และยิปซัมคือ 6:0:4 (โดยน้ำหนัก) ปริมาณ 500 กรัม ค่า U/U_{mf} เท่ากับ 1.23 อุณหภูมิการดูดซึม 200 องศาเซลเซียส ที่ขนาดอนุภาคถ้ำลอยอัดเม็ดต่างๆ.....	51
4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดซึมแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์กับเวลา ของถ้ำลอยอัดเม็ดที่มีอัตราส่วนถ้ำลอย ปูนขาว และยิปซัมคือ 6:0:4 (โดยน้ำหนัก) ขนาดอนุภาค Mesh no. -8+16 ค่า U/U_{mf} เท่ากับ 1.2 อุณหภูมิการดูดซึม 200 องศาเซลเซียส ที่ปริมาณถ้ำลอยอัดเม็ดต่างๆ.....	52
4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดซึมแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์กับเวลา ของถ้ำลอยอัดเม็ดที่มีอัตราส่วนถ้ำลอย ปูนขาว และยิปซัมคือ 6:0:4 (โดยน้ำหนัก) ขนาดอนุภาค Mesh no. -16+30 ค่า U/U_{mf} เท่ากับ 1.25 อุณหภูมิการดูดซึม 200 องศาเซลเซียส ที่ปริมาณถ้ำลอยอัดเม็ดต่างๆ.....	53
4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดซึมแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์กับเวลา ของถ้ำลอยอัดเม็ดที่มีอัตราส่วนถ้ำลอย ปูนขาว และยิปซัมคือ 6:2:4 (โดยน้ำหนัก) ขนาดอนุภาค Mesh no. -4+8 ปริมาณ 500 กรัม ค่า U/U_{mf} เท่ากับ 1.23 ที่อุณหภูมิการดูดซึมต่างๆ.....	54
4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดซึมแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์กับ อุณหภูมิขณะดูดซึมของถ้ำลอยอัดเม็ดที่มีอัตราส่วนถ้ำลอย ปูนขาว และยิปซัมคือ 6:2:4 (โดยน้ำหนัก) ขนาดอนุภาค Mesh no. -4+8 ปริมาณ 500 กรัม ค่า U/U_{mf} เท่ากับ 1.23 ที่เวลาการดูดซึมต่างๆ.....	55

สารบัญรูปประกอบ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดซึมแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์กับเวลา ของถ้ำลอยอัดเม็ดที่มีอัตราส่วนถ้ำลอย ปูนขาว และยิปซัมคือ 6:2:4 (โดยน้ำหนัก) ขนาดอนุภาค Mesh no. -4+8 ปริมาณ 500 กรัม อุณหภูมิการดูดซึม 200 องศา- เซลเซียส ที่ค่า U/U_{mf} ต่างๆ.....	56
4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดซึมแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์กับเวลา ของถ้ำลอยอัดเม็ดที่มีอัตราส่วนถ้ำลอย ปูนขาว และยิปซัมคือ 6:2:4 (โดยน้ำหนัก) ขนาดอนุภาค Mesh no. -16+30 ปริมาณ 500 กรัม อุณหภูมิการดูดซึม 200 องศา- เซลเซียส ที่ค่า U/U_{mf} ต่างๆ.....	57
4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดซึมแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์กับ ค่า U/U_{mf} ของถ้ำลอยอัดเม็ดที่มีอัตราส่วนถ้ำลอย ปูนขาว และยิปซัมคือ 6:2:4 (โดยน้ำหนัก) ขนาดอนุภาค Mesh no. -8+16 ปริมาณ 500 กรัม ค่า U/U_{mf} เท่ากับ 1.2 อุณหภูมิการดูดซึม 200 องศาเซลเซียส ที่เวลาการดูดซึมต่างๆ.....	58
4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดซึมแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์กับเวลา ของถ้ำลอยอัดเม็ดที่มีอัตราส่วนถ้ำลอย ปูนขาว และยิปซัมคือ 6:2:4 (โดยน้ำหนัก) ขนาดอนุภาค Mesh no. -16+30 ปริมาณ 500 กรัม อุณหภูมิการดูดซึม 200 องศา- เซลเซียส ที่ค่า U/U_{mf} ต่างๆ.....	59
4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดซึมแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์กับ ค่า U/U_{mf} ของถ้ำลอยอัดเม็ดที่มีอัตราส่วนถ้ำลอย ปูนขาว และยิปซัมคือ 6:0:2 (โดยน้ำหนัก) ขนาดอนุภาค Mesh no. -4+8 ปริมาณ 500 กรัม อุณหภูมิการดูดซึม 200 องศาเซลเซียส ที่เวลาการดูดซึมต่างๆ.....	60
4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดซึมแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์กับเวลา ของถ้ำลอยอัดเม็ดที่มีอัตราส่วนถ้ำลอย ปูนขาว และยิปซัมคือ 6:2:4 (โดยน้ำหนัก) ปริมาณ 500 กรัม ค่า U/U_{mf} เท่ากับ 1.23 อุณหภูมิการดูดซึม 200 องศาเซลเซียส ที่ขนาดอนุภาคถ้ำลอยอัดเม็ดต่างๆ.....	61
4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดซึมแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์กับเวลา ของถ้ำลอยอัดเม็ดที่มีอัตราส่วนถ้ำลอย ปูนขาว และยิปซัมคือ 6:2:4 (โดยน้ำหนัก) ปริมาณ 500 กรัม ค่า U/U_{mf} เท่ากับ 1.50 อุณหภูมิการดูดซึม 200 องศาเซลเซียส ที่ขนาดอนุภาคถ้ำลอยอัดเม็ดต่างๆ.....	62

สารบัญรูปประกอบ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดซึมแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์กับเวลา ของถ้ำลอยอัดเม็ดที่มีอัตราส่วนถ้ำลอย ปูนขาว และยิปซัมคือ 6:2:4 (โดยน้ำหนัก) ปริมาณ 500 กรัม ค่า U/U_{mf} เท่ากับ 1.75 อุณหภูมิการดูดซึม 200 องศาเซลเซียส ที่ขนาดอนุภาคถ้ำลอยอัดเม็ดต่างๆ.....	63
4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดซึมแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์กับเวลา ของถ้ำลอยอัดเม็ดที่มีอัตราส่วนถ้ำลอย ปูนขาว และยิปซัมคือ 6:2:4 (โดยน้ำหนัก) ขนาดอนุภาค Mesh no. -8+16 ค่า U/U_{mf} เท่ากับ 1.2 อุณหภูมิการดูดซึม 200 องศาเซลเซียส ที่ปริมาณถ้ำลอยอัดเม็ดต่างๆ.....	64
4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดซึมแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์กับเวลา ของถ้ำลอยอัดเม็ดที่มีอัตราส่วนถ้ำลอย ปูนขาว และยิปซัมคือ 6:2:4 (โดยน้ำหนัก) ขนาดอนุภาค Mesh no. -8+16 ค่า U/U_{mf} เท่ากับ 1.47 อุณหภูมิการดูดซึม 200 องศาเซลเซียส ที่ปริมาณถ้ำลอยอัดเม็ดต่างๆ.....	65
4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดซึมแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์กับ ปริมาณถ้ำลอยอัดเม็ดของถ้ำลอยอัดเม็ดที่มีอัตราส่วนถ้ำลอย ปูนขาว และยิปซัม คือ 6:2:4 (โดยน้ำหนัก) ขนาดอนุภาค Mesh no. -8+16 ค่า U/U_{mf} เท่ากับ 1.47 อุณหภูมิการดูดซึม 200 องศาเซลเซียส ที่เวลาการดูดซึมต่างๆ.....	66
4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดซึมแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์กับ ปริมาณแคลเซียมออกไซด์ที่มีในถ้ำลอยอัดเม็ด ของถ้ำลอยอัดเม็ดที่มีอัตราส่วน ถ้ำลอย ปูนขาว และยิปซัมคือ 6:2:4 (โดยน้ำหนัก) ขนาดอนุภาค Mesh no. -8+16 ค่า U/U_{mf} เท่ากับ 1.47 อุณหภูมิการดูดซึม 200 องศาเซลเซียส ที่เวลาการดูดซึมต่างๆ.	67
4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดซึมแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์กับเวลา ของถ้ำลอยอัดเม็ดที่มีอัตราส่วนถ้ำลอย ปูนขาว และยิปซัมคือ 6:2:4 (โดยน้ำหนัก) ขนาดอนุภาค Mesh no. -8+16 ค่า U/U_{mf} เท่ากับ 1.73 อุณหภูมิการดูดซึม 200 องศาเซลเซียส ที่ปริมาณถ้ำลอยอัดเม็ดต่างๆ.....	68
4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดซึมแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์กับ ปริมาณถ้ำลอยอัดเม็ดของถ้ำลอยอัดเม็ดที่มีอัตราส่วนถ้ำลอย ปูนขาว และยิปซัม คือ 6:2:4 (โดยน้ำหนัก) ขนาดอนุภาค Mesh no. -8+16 ค่า U/U_{mf} เท่ากับ 1.73 อุณหภูมิการดูดซึม 200 องศาเซลเซียส ที่เวลาการดูดซึมต่างๆ.....	69

สารบัญรูปประกอบ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดซึมแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์กับปริมาณแคลเซียมออกไซด์ที่มีในถ้ำลอยอัดเม็ด ของถ้ำลอยอัดเม็ดที่มีอัตราส่วนถ้ำลอย ปูนขาว และยิปซัมคือ 6:2:4 (โดยน้ำหนัก) ขนาดอนุภาค Mesh no. -8+16 ค่า U/U_{mf} เท่ากับ 1.73 อุณหภูมิการดูดซึม 200 องศาเซลเซียส ที่เวลาการดูดซึมต่างๆ...	70
4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดซึมแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์กับเวลาของถ้ำลอยอัดเม็ดที่มีอัตราส่วนถ้ำลอย ปูนขาว และยิปซัมคือ 6:2:4 (โดยน้ำหนัก) ขนาดอนุภาค Mesh no. -16+30 ค่า U/U_{mf} เท่ากับ 1.25 อุณหภูมิการดูดซึม 200 องศาเซลเซียส ที่ปริมาณถ้ำลอยอัดเม็ดต่างๆ.....	71
4.29 ความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดซึมแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์กับเวลาของถ้ำลอยอัดเม็ดที่มีอัตราส่วนถ้ำลอย ปูนขาว และยิปซัมคือ 6:2:4 (โดยน้ำหนัก) ขนาดอนุภาค Mesh no. -16+30 ค่า U/U_{mf} เท่ากับ 1.50 อุณหภูมิการดูดซึม 200 องศาเซลเซียส ที่ปริมาณถ้ำลอยอัดเม็ดต่างๆ.....	72
4.30 ความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดซึมแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์กับปริมาณถ้ำลอยอัดเม็ดของถ้ำลอยอัดเม็ดที่มีอัตราส่วนถ้ำลอย ปูนขาว และยิปซัมคือ 6:2:4 (โดยน้ำหนัก) ขนาดอนุภาค Mesh no. -16+30 ค่า U/U_{mf} เท่ากับ 1.50 อุณหภูมิการดูดซึม 200 องศาเซลเซียส ที่เวลาการดูดซึมต่างๆ.....	73
4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดซึมแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์กับปริมาณแคลเซียมออกไซด์ที่มีในถ้ำลอยอัดเม็ด ของถ้ำลอยอัดเม็ดที่มีอัตราส่วนถ้ำลอย ปูนขาว และยิปซัมคือ 6:2:4 (โดยน้ำหนัก) ขนาดอนุภาค Mesh no. -16+30 ค่า U/U_{mf} เท่ากับ 1.50 อุณหภูมิการดูดซึม 200 องศาเซลเซียส ที่เวลาการดูดซึมต่างๆ...	74
4.32 ความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดซึมแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์กับเวลาของถ้ำลอยอัดเม็ดที่มีอัตราส่วนถ้ำลอย ปูนขาว และยิปซัมคือ 6:2:4 (โดยน้ำหนัก) ขนาดอนุภาค Mesh no. -16+30 ค่า U/U_{mf} เท่ากับ 1.75 อุณหภูมิการดูดซึม 200 องศาเซลเซียส ที่ปริมาณถ้ำลอยอัดเม็ดต่างๆ.....	75
4.33 ความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดซึมแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์กับปริมาณถ้ำลอยอัดเม็ดของถ้ำลอยอัดเม็ดที่มีอัตราส่วนถ้ำลอย ปูนขาว และยิปซัมคือ 6:2:4 (โดยน้ำหนัก) ขนาดอนุภาค Mesh no. -16+30 ค่า U/U_{mf} เท่ากับ 1.75 อุณหภูมิการดูดซึม 200 องศาเซลเซียส ที่เวลาการดูดซึมต่างๆ.....	76

สารบัญรูปประกอบ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.34 ความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดซึมแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์กับปริมาณแคลเซียมออกไซด์ที่มีในถ้ำลอยอัดเม็ด ของถ้ำลอยอัดเม็ดที่มีอัตราส่วนถ้ำลอย ปูนขาว และยิปซัมคือ 6:2:4 (โดยน้ำหนัก) ขนาดอนุภาค Mesh no. -16+30 ค่า U/U_{mf} เท่ากับ 1.75 จุณภูมิการดูดซึม 200 องศาเซลเซียส ที่เวลาการดูดซึมต่างๆ...	77
4.35 ความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดซึมแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์กับเวลาของถ้ำลอยอัดเม็ดที่มีอัตราส่วนถ้ำลอย ปูนขาว และยิปซัมคือ 6:3:4 (โดยน้ำหนัก) ปริมาณ 500 กรัม ค่า U/U_{mf} เท่ากับ 1.2 จุณภูมิการดูดซึม 200 องศาเซลเซียส ที่ขนาดอนุภาคถ้ำลอยอัดเม็ดต่างๆ.....	78
4.36 ความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดซึมแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์กับเวลาของถ้ำลอยอัดเม็ดที่มีอัตราส่วนถ้ำลอย ปูนขาว และยิปซัมคือ 6:3:4 (โดยน้ำหนัก) ขนาดอนุภาค Mesh no. -8+16 ค่า U/U_{mf} เท่ากับ 1.2 จุณภูมิการดูดซึม 200 องศาเซลเซียส ที่ปริมาณถ้ำลอยอัดเม็ดต่างๆ.....	79
4.37 ความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดซึมแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์กับเวลาของถ้ำลอยอัดเม็ดที่มีอัตราส่วนถ้ำลอย ปูนขาว และยิปซัมคือ 6:3:4 (โดยน้ำหนัก) ขนาดอนุภาค Mesh no. -16+30 ค่า U/U_{mf} เท่ากับ 1.25 จุณภูมิการดูดซึม 200 องศาเซลเซียส ที่ปริมาณถ้ำลอยอัดเม็ดต่างๆ.....	80
4.38 ความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดซึมแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์กับเวลาของถ้ำลอยอัดเม็ดที่มีอัตราส่วนโดยน้ำหนักของถ้ำลอย ปูนขาว และยิปซัมต่างๆ กัน คือ 6:0:2, 6:0:4, 6:2:4 และ 6:3:4 ขนาดอนุภาค Mesh no. -8+16 ปริมาณ 500 กรัม ค่า U/U_{mf} เท่ากับ 1.2 และจุณภูมิการดูดซึม 200 องศาเซลเซียส	81

สัญลักษณ์

- T = อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)
 t = เวลา (นาที)
 °C = องศาเซลเซียส
 U = ความเร็ว (เซนติเมตรต่อวินาที)
 U_{mf} = ความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไอเซชัน (เซนติเมตรต่อวินาที)
 SO_2 = แก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์
 CaO = แคลเซียมออกไซด์หรือปูนขาว
 $CaSO_4$ = แคลเซียมซัลเฟตหรือยิปซัม
 kg/cm^2 = กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร
 $กก./ซม.^2$ = กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร
 g. = กรัม
 cm. = เซนติเมตร
 min. = นาที
 ppm. = ความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)

สถาบันวิทยบริการ
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย