การเผาไหม้ถ่านหินและการควบคุมมลพิษในฟลูอิไดซ์เบด

นายสมบัติ นิธิฐิมณีรัตน์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
ภาควิชาเคมีเทคนิค
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
พ.ศ 2531

ISBN 974-568-589-5

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

013866

I 10300193

COAL COMBUSTION AND POLLUTION CONTROL IN FLUIDIZED BED

Mr. SOMBAT NITITHIMANEERAT

A Thesis Submitted in Partial Fulfilment of the Requirements

for the Degree of Master of Science

Department of Chemical Technology

Graduate School

Chulalongkorn University

1988

ISBN 974-568-589-5

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การเผาไหม้ถ่านหินและการควบคุมมลพิษในฟลูอิไดซ์เบด
โดย นายสมบัติ นิธิฐิมณีรัตน์
ภาควิชา เคมีเทคนิค
อาจารย์ที่ปรึกษา ศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ดำรงค์เลิศ

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

_____ คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(ศาสตราจารย์ ดร.ถาวร วัชราภัย)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

_____ ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.พล สาเกทอง)

_____ กรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ดำรงค์เลิศ)

_____ กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ชูชาติ บารมี)

_____ กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เลอสรวง เมฆสุต)

สมบัติ นิธิฐิมณีรัตน์ : การเผาไหม้ถ่านหินและการควบคุมมลพิษในฟลูอิไดซ์เบด (COAL COMBUSTION AND POLLUTION CONTROL IN FLUIDIZED BED) อ.ที่ปรึกษา : ศ.ดร.สมศักดิ์ ดำรงค์เลิศ , 139 หน้า

การเผาไหม้ถ่านหินในระบบฟลูอิไดเซชัน สามารถควบคุมมลพิษ (SO_2 และ NO_x) ที่เกิดจากการเผาไหม้ โดยไม่จำเป็นต้องเพิ่มระบบกำจัดขึ้นอีกหน่วยหนึ่ง ประกอบทั้งสามารถควบคุมอุณหภูมิภายในเตาให้ทำงานในช่วงอุณหภูมิไม่สูงจนเกินต้องการ (750-900 °ซ)

งานวิจัยนี้ได้ใช้โดโลไมท์ ($CaCO_3.MgCO_3$) เป็นสารดูดซับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่เกิดจากการเผาไหม้ โดยผสมกับถ่านหินแล้วป้อนเข้าสู่เตาเผาพร้อม ๆ กันอย่างต่อเนื่อง เตาฟลูอิไดเซชันทำด้วยเหล็กรูปทรงกระบอก ภายในบุด้วยซิเมนต์ทนไฟหนา 7 ซม. มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเตา 15 ซม. ใช้ระบบควบคุมอุณหภูมิภายในเตาแบบเปิดปิด (on - off controller) ควบคุมปริมาณการป้อนของเชื้อเพลิง ช่วงของตัวแปรที่ทดลองมี อุณหภูมิเบด 750 - 900 °ซ อัตราส่วนผสมแคลเซียมต่อกำมะถัน 2.25 - 8.49 (โดยโมล) ความเร็วอากาศ 45.72 - 60.40 เมตรต่อนาที ภาวะความสูงเบด 25 - 60 ซม.

ถ่านหินที่ใช้มีขนาด 1 มม. ถึง 3 มม. (เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 1.11 มม.) เมื่อผสมกับโดโลไมท์แล้วทำการเผาไหม้ได้อย่างต่อเนื่องโดยไม่เกิดตะกรัน มีประสิทธิภาพการเผาไหม้สูงถึง 95-97 % ที่อุณหภูมิเบด 800-850 °ซ อัตราส่วนผสมแคลเซียมต่อกำมะถัน 2.5 - 3.5 (โดยโมล) ความเร็วอากาศ 48.88 - 56.93 เมตรต่อนาที และความสูงเบด 45 ซม. ก๊าซที่เกิดจากการเผาไหม้มีส่วนผสมของซัลเฟอร์ไดออกไซด์ 20 - 80 ส่วนในล้านส่วน และก๊าซไนตริกออกไซด์ไม่เกิน 100 ส่วนในล้านส่วน

ปฏิกิริยาการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นในฟลูอิไดซ์เบดนี้เป็นปฏิกิริยาที่ควบคุมจากการแพร่ของก๊าซผ่านชั้นเถ้า ซึ่งผลการทดลองมีความสอดคล้องกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบ P-P model ได้อย่างเหมาะสม

ภาควิชา เคมีเทคนิค ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา เคมีเทคนิค

ปีการศึกษา 2530 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....

SOMBAT NITITHIMANEERAT : COAL COMBUSTION AND POLLUTION CONTROL IN FLUIDIZED BED. THESIS ADVISOR : PROF.SOMSAK DAMRONGLERT,Ph.D.139 pp.

Polluted gases (SO_2 and NO_x) from coal combustion could be controlled in fluidized bed combustor. It is not necessary to treat these gases in another unit. Temperature in the combustor will be operated in the range 750-900 °C that the slag is not formed.

Dolomite ($CaCO_3.MgCO_3$) was used as sulfur dioxide adsorbent. It mixing with coal and fed continuously into the combustor. The combustor was made of mild steel lining with refractory cement 7 cm. in thickness, the inside diameter was 15 cm. Temperature of the bed was controlled by a ON-OFF controller which connected directly with motor of screw feeder. The parameters were : bed temperature 750 - 900 °C ; calcium to sulfur ratio 2.25 - 8.49 (by mole); air velocity 45.72 - 60.40 m/min and bed height 25-60 cm. The coal particle diameter 1 - 3 mm (average diameter 1.11 mm) was mixed with dolomite. It combusted continuously with air, and had no slag formed. The combustion efficiency could be reacted to 95 - 97 % at the condition as following

temperature of bed 800 - 850 °C

calcium to sulfur ratio 2.5 - 3.5 (by mole)

air velocity 45.88 - 56.93 m/min

bed height 45 cm

The flue gas composed of SO_2 20 - 80 ppm and NO_x less than 100 ppm

The combustion reaction of coal in fluidized bed is the diffusion controlled by the gas passing through ash layer. The experimental results agreed very well with P-P model.

ภาควิชา เคมีเทคนิค ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา เคมีเทคนิค

ปีการศึกษา 2530 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....

กิตติกรรมประกาศ

ในการศึกษาครั้งนี้ข้าพเจ้าได้รับความร่วมมือและช่วยเหลืออย่างดียิ่งจากบุคคลหลายท่าน จึงถือโอกาสนี้แสดงความขอบคุณต่อบุคคลดังที่จะกล่าวต่อไป

ขอขอบพระคุณท่านศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ดำรงค์เลิศ ที่ให้คำปรึกษาแนะนำตักเตือนและช่วยเหลือทำให้การวิจัยครั้งนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบคุณอาจารย์ธราพงษ์ วิทิตศานต์ ที่ให้คำปรึกษาและแนะแนวเป็นอย่างดี

ขอขอบคุณ คุณสังข์ ชมชื่นที่ช่วยซ่อมและสร้างเครื่องมือในการวิจัยนี้จนสามารถดำเนินการทดลองได้ดีตลอดมา ตลอดจนเจ้าหน้าที่ภาควิชาเคมีเทคนิคทุกท่านที่กรุณาให้ความสะดวกในการใช้ห้องปฏิบัติการ

ขอขอบคุณบริษัท แพร่ลิกไนท์ จำกัด บริษัท เทพประทานการแร่ จำกัด และ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ที่เอื้อเฟื้อวัตถุดิบตลอดการทดลอง

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่กรุณาให้ใช้เครื่องมือวิเคราะห์ก๊าซ

และท้ายที่สุดขอกราบขอบพระคุณมารดา พี่ๆ และน้อง ตลอดจนเพื่อนและน้องๆ ที่ให้กำลังใจ และการวิจัยนี้สำเร็จได้เพราะพระคุณของบิดาผู้ล่วงลับ ความดีทุกสิ่งจึงขอมอบให้แก่บิดา ข้อผิดพลาดทุกประการขอน้อมรับแต่เพียงผู้เดียว

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ

กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ

รายการตารางประกอบ ..... ญ

รายการรูปประกอบ ..... ฏ

สัญญลักษณ์ ..... ณ

บทที่

1 บทนำ 1

2 การเผาไหม้และประสิทธิภาพการเผาไหม้ในฟลูอิไดซ์เบด 5

2.1 หลักการและระบบทั่วไปของการเผาไหม้ถ่านหินในฟลูอิไดซ์เบด 5

2.1.1 ห้องเผาไหม้ 6

2.1.2 ระบบการป้อนเชื้อเพลิง 7

2.1.3 ระบบควบคุม 7

2.1.4 ระบบถ่ายเทความร้อน 7

2.1.5 ระบบกำจัดฝุ่นและระบายเถ้า 7

2.2 ไฮโดรไดนามิกในเตาเผาแบบฟลูอิไดเซชัน 8

2.3 กลไกการเผาไหม้ถ่านหินในฟลูอิไดซ์เบด 10

2.3.1 กลไกการเผาไหม้ของสารระเหย 11

2.3.2 กลไกการเผาไหม้ของอนุภาคคาร์บอน 11

2.4 โมเดลของการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้กับเม็ดถ่านหิน 13

2.5 การถ่ายเทมวลสารในฟลูอิไดซ์เบด 15

2.6 การถ่ายเทความร้อนในฟลูอิไดซ์เบด 18

2.7 ประสิทธิภาพการเผาไหม้ของอนุภาคคาร์บอน 18

2.7.1 ตัวแปรที่สภาวะการเผาไหม้ 18

2.7.2 ตังแปรที่เกิดจากการออกแบบ 18

2.8 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการเผาไหม้ 22

3 การควบคุมมลพิษ 28

3.1 ก๊าซซัลเฟอร์ออกไซด์ 28

สารบัญ (ต่อ)

บทที่		หน้า
3	3.1.1 แคลซิเนชัน	28
	3.1.2 ซัลเฟชัน	29
	3.1.1.1 ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นกับเม็ดตัวดูดซับ	31
	3.1.1.2 ปรากฏการณ์ของเม็ดของแข็งในเบด	32
	3.2 ไนโตรเจนออกไซด์	33
	3.2.1 Thermal NO_x	34
	3.2.2 Fuel NO_x	34
	3.3 อนุภาคมลสารและส่วนที่เหลือจากการเผาไหม้	36
4	อุปกรณ์และวิธีการทดลอง	39
	4.1 อุปกรณ์การทดลอง	39
	4.1.1 ระบบการเตรียมวัตถุดิบ	39
	4.1.1.1 เครื่องบดแบบฝ้อนเหวี่ยง	39
	4.1.1.2 เครื่องร่อนแยกขนาด	39
	4.1.2 ระบบการเผาไหม้	39
	4.1.2.1 เตาเผาแบบฟลูอิไดเซชัน	39
	4.1.2.2 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนหรือหม้อน้ำ	40
	4.1.2.3 เครื่องดักฝุ่นแบบไซโคลน	40
	4.1.2.4 เครื่องป้อนเชื้อเพลิงและอากาศ	40
	4.1.2.5 ระบบการควบคุมและการวัดอุณหภูมิ	41
	4.1.2.6 ระบบกำจัดฝุ่นและก๊าซแบบการดูดซึม	41
	4.1.3 ระบบการชักและวิเคราะห์ตัวอย่าง	41
	4.2 วิธีดำเนินการทดลอง	48
5	ผลการทดลอง	50
	5.1 ผลการหาคุณสมบัติทางกายภาพของถ่านหินและโดโลไมท์	50
	5.1.1 คุณสมบัติของถ่านหิน	50
	5.1.2 คุณสมบัติของโดโลไมท์	51
	5.2 ขนาดของถ่านหินและโดโลไมท์	52

สารบัญ (ต่อ)

บทที่			หน้า
5	5.2.1	การกระจายขนาดของถ่านหิน	52
	5.2.2	การกระจายขนาดของโดโลไมท์	54
	5.3	การเผาไหม้	55
	5.3.1	การเผาไหม้ถ่านหินอย่างเดียว	55
	5.3.2	การเผาไหม้ถ่านหินผสมโดโลไมท์ในเตาเผาที่มีระยะฟรีบอร์ดน้อยๆ	56
		5.3.2.1 อุณหภูมิเบด	60
		5.3.2.2 อัตราส่วนผสมของถ่านหินและโดโลไมท์	62
		5.3.2.3 ความเร็วอากาศ	64
	5.3.3	การเผาไหม้ถ่านหินผสมโดโลไมท์ในเตาเผาที่มีระยะฟรีบอร์ดสูง ..	66
		5.3.3.1 อุณหภูมิเบด	71
		5.3.3.2 อัตราส่วนผสมของถ่านหินและโดโลไมท์	75
		5.3.3.3 ความเร็วอากาศ และความสูงของเบด	78
	5.3	คุณสมบัติของฝุ่นที่ดักได้จากไซโคลนและ residue จากท่อล้น	86
6		วิจารณ์ผลการทดลอง	89
	6.1	การเผาไหม้ถ่านหินผสมโดโลไมท์	89
	6.1.1	อุณหภูมิเบด	89
	6.1.2	อัตราส่วนผสมของถ่านหินและโดโลไมท์	92
	6.1.3	ความเร็วอากาศ	93
	6.1.4	ความสูงของเบด	97
	6.2	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์	98
7		บทสรุปและข้อเสนอแนะ	106
ภาคผนวก			115
ประวัติผู้เขียน			139

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

1.1 แสดงศักยภาพความต้องการใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงทดแทนในอุตสาหกรรมต่างๆ .. 3

2.1 แสดงความสัมพันธ์ของค่าของเซอร์วูดเพื่อใช้กับการเผาไหม้ในฟลูอิไดซ์เบด 16

2.2 แสดงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ซึ่งมีข้อสมมติต่างๆ กัน 23

5.1 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของถ่านหินจากเหมืองบ้านปู 51

5.2 ผลการวิเคราะห์โดโลไมท์ 52

5.3 แสดงการกระจายขนาดของถ่านหิน 53

5.4 แสดงการกระจายขนาดของโดโลไมท์ 54

5.5 แสดงผลการทดลองการเผาไหม้ถ่านหินและการควบคุมมลพิษในฟลูอิไดซ์เบด เมื่อยังไม่ได้ติดตั้งหม้อน้ำและขยายความสูงของเครื่องปฏิกรณ์ 59

5.6 แสดงผลการทดลองการเผาไหม้ถ่านหินและการควบคุมมลพิษในฟลูอิไดซ์เบด เมื่อติดตั้งหม้อน้ำและขยายความสูงของเครื่องปฏิกรณ์ 69

5.7 แสดงคุณสมบัติของเถ้าและ residue จากท่อล้น 87

ก.1 แสดงข้อมูลการทดลองหาค่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิไดซ์ของถ่านหินและโดโลไมท์ 117

ค.1 แสดงข้อมูลการเผาไหม้ถ่านหินและการควบคุมมลพิษในฟลูอิไดซ์เบดเมื่อยังไม่ได้ทำการขยายความสูงและติดตั้งหม้อน้ำ 123

ค.2 แสดงข้อมูลการเผาไหม้ถ่านหินและการควบคุมมลพิษในฟลูอิไดซ์เบดเมื่อทำการขยายความสูงและติดตั้งหม้อน้ำ 124

จ.1 แสดงผลการคำนวณหาประสิทธิภาพการเผาไหม้ถ่านหินจากการทดลองเปรียบเทียบกับแบบจำลอง P-P (P-P_1 เป็น fluid film control และ P-P2 เป็น ash diffusion control) 138

สารบัญรูปประกอบ

รูปที่		หน้า
2.1	ลักษณะสำคัญของเตาเผาแบบฟลูอิไดเซชัน	6
2.2	แสดงการเปลี่ยนแปลงของฟองก๊าซเคลื่อนที่ช้าเป็นฟองก๊าซเคลื่อนที่เร็ว	9
2.3	แสดงการเกิดปฏิกิริยาในส่วนต่างๆ ของฟลูอิไดซ์เบดในอุดมคติ	10
2.4	กระบวนการเผาไหม้ของอนุภาคคาร์บอนในฟลูอิไดซ์เบด	11
2.5	แสดงการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของก๊าซต่างๆ ตามแนวรัศมีของอนุภาคถ่านหินที่กำลังเผาไหม้ภายในขอบเขตการแพร่ (diffusion controlled region) ก. แผ่นฟิล์มเชิงเดี่ยว ข. แผ่นฟิล์มเชิงคู่	14
2.6	แสดงลักษณะของการส่งผ่านมวลสารของก๊าซ O_2 ไปยังพื้นผิวของถ่านโค้ก	17
2.7	กระบวนการที่ทำให้อนุภาคคาร์บอนมีขนาดเล็กลงภายในฟลูอิไดซ์เบด	22
2.8	แสดงแบบจำลองพื้นฐานและปฏิกิริยาในวัฏภาคก๊าซ	24
3.1	พื้นฐานทางเคมีของการเกิดแคลซิเนชันและซัลเฟชัน	30
3.2	ปรากฏการณ์ของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นกับตัวดูดซับ	31
3.3	การเปลี่ยนแปลงภายในเบดของตัวดูดซับ	32
3.4	การเปลี่ยนแปลงของไนโตรเจนในถ่านหินในการเผาไหม้แบบฟลูอิไดเซชัน	34
4.1	แสดงระบบการเผาไหม้แบบฟลูอิไดเซชัน	42
4.2	แสดงระบบการวิเคราะห์และชักตัวอย่างก๊าซ	42
4.3	แสดงสัดส่วนของเตาเผาทดลองแบบฟลูอิไดเซชัน	43
4.4	แสดงเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนหรือหม้อไอน้ำชนิดท่อไฟ	44
4.5	แสดงเครื่องดักฝุ่นเชิงกลแบบไซโคลน	44
4.6	แสดงขนาดของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนหรือหม้อไอน้ำชนิดท่อไฟ	45
4.7	แสดงระบบการเผาไหม้แบบฟลูอิไดเซชัน	46
4.8	แสดงภาพสามมิติของระบบการเผาไหม้แบบฟลูอิไดเซชัน	47
4.9	แสดงผังการดำเนินการทดลอง	49
5.1	แสดงเถ้าที่เกิดการหลอมตัว (slag) ในเบด	55
5.2	เปรียบเทียบ ก.เถ้าที่เกิดการหลอมเหลว และ ข.เถ้าที่เหลือจากการเผาไหม้เมื่อผสมโดโลไมท์	56

สารบัญรูปประกอบ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
5.3	แสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเบดที่ควบคุมด้วยเครื่องควบคุมอุณหภูมิอัตโนมัติ แบบเปิด-ปิด	57
5.4	แสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเบดที่ควบคุมด้วยเครื่องควบคุมอุณหภูมิอัตโนมัติ แบบเปิด-ปิด	57
5.5	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเบดกับปริมาณก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ปลดปล่อย เมื่อใช้อัตราส่วนถ่านหินต่อโดโลไมท์ 60:40 ความเร็วอากาศ 40.73 ม/นาที	60
5.6	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเบดและปริมาณก๊าซไนตริกออกไซด์ที่ปลดปล่อย เมื่อใช้อัตราส่วนถ่านหินต่อโดโลไมท์ 60:40 ความเร็วอากาศ 40.73 ม/นาที	61
5.7	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเบดและประสิทธิภาพการเผาไหม้ของถ่านหินผสม โดโลไมท์ 60:40 ที่ความเร็วอากาศ 40.73 ม./นาที	61
5.8	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนถ่านหินและโดโลไมท์ และปริมาณก๊าซซัลเฟอร์ ไดออกไซด์ที่ปลดปล่อยที่อุณหภูมิเบด 850 °ซ ความเร็วอากาศ 44.13 ม/นาที	62
5.9	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนถ่านหินและโดโลไมท์ และประสิทธิภาพการเผาไหม้ ที่อุณหภูมิเบด 850 °ซ ความเร็วอากาศ 44.13 ม/นาที	63
5.10	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วอากาศ และปริมาณก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ที่ปลดปล่อย ของถ่านหินผสมโดโลไมท์ 60:40 (โดยน้ำหนัก) อุณหภูมิเบด 800 °ซ	64
5.11	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วอากาศ และปริมาณก๊าซไนตริกออกไซด์ ที่ปลดปล่อย ของถ่านหินผสมโดโลไมท์ 60:40 (โดยน้ำหนัก) อุณหภูมิเบด 800 °ซ	64
5.12	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วอากาศและประสิทธิภาพการเผาไหม้ของถ่านหินและ โดโลไมท์ 60:40 (โดยน้ำหนัก) ที่อุณหภูมิเบด 800 °ซ	65
5.13	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วอากาศและประสิทธิภาพการเผาไหม้ของถ่านหินและ โดโลไมท์ 55:45 (โดยน้ำหนัก) ที่อุณหภูมิเบด 850 °ซ	65
5.14	แสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเบดที่ควบคุมด้วยเครื่องควบคุมอุณหภูมิอัตโนมัติแบบเปิด-ปิด เมื่อขยายความสูงของฟรีบอร์ด	67
5.15	แสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเบดที่ควบคุมด้วยเครื่องควบคุมอุณหภูมิอัตโนมัติแบบเปิด-ปิด เมื่อขยายความสูงของฟรีบอร์ด	68

สารบัญรูปประกอบ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
5.16	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเบดกับปริมาณก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ปลดปล่อย ที่ความเร็วอากาศ 45.72 ม/นาที ความสูงเบด 45 ซม.	71
5.17	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเบดกับปริมาณก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ปลดปล่อย ที่ความเร็วอากาศ 48.88 ม/นาที ความสูงเบด 45 ซม.	72
5.18	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเบดกับปริมาณก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ปลดปล่อย ที่ความเร็วอากาศ 56.93 ม/นาที ความสูงเบด 45 ซม.	72
5.19	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเบดกับปริมาณก๊าซไนตริกออกไซด์ที่ปลดปล่อย ที่ความเร็วอากาศ 45.72 ม/นาที ความสูงเบด 45 ซม.	73
5.20	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเบดกับปริมาณก๊าซไนตริกออกไซด์ที่ปลดปล่อย ที่ความเร็วอากาศ 48.88 ม/นาที ความสูงเบด 45 ซม.	73
5.21	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเบดกับประสิทธิภาพการเผาไหม้ ของถ่านหินผสม โดโลไมท์ 70:30 (โดยน้ำหนัก)	74
5.22	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเบดกับประสิทธิภาพการเผาไหม้ ของถ่านหินผสม โดโลไมท์ 80:20 (โดยน้ำหนัก)	74
5.23	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเบดกับประสิทธิภาพการเผาไหม้ ของถ่านหินผสม โดโลไมท์ 85:15 (โดยน้ำหนัก)	75
5.24	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนแคลเซียมและกำมะถันกับปริมาณก๊าซซัลเฟอร์ ไดออกไซด์ที่ปลดปล่อย เมื่อความเร็วอากาศ 45.72 ม/นาที	76
5.25	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนแคลเซียมและกำมะถันกับปริมาณก๊าซซัลเฟอร์ ไดออกไซด์ที่ปลดปล่อย เมื่อความเร็วอากาศ 48.88 ม/นาที	76
5.26	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนแคลเซียมและกำมะถันกับปริมาณก๊าซซัลเฟอร์ ไดออกไซด์ที่ปลดปล่อย เมื่อความเร็วอากาศ 56.93 ม/นาที	77
5.27	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนแคลเซียมและกำมะถันกับประสิทธิภาพการเผาไหม้ เมื่อความเร็วอากาศ 45.72 ม/นาที	77
5.28	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนแคลเซียมและกำมะถันกับประสิทธิภาพการเผาไหม้ เมื่อความเร็วอากาศ 48.88 ม/นาที	78
5.29	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วอากาศกับปริมาณก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ที่ปลดปล่อย ที่อุณหภูมิเบด 750 °ซ	79

สารบัญรูปประกอบ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
5.30	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วอากาศกับปริมาณก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ปลดปล่อย ที่อุณหภูมิเบด 800 °ซ	79
5.31	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วอากาศกับปริมาณก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ปลดปล่อย ที่อุณหภูมิเบด 850 °ซ	80
5.32	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วอากาศกับปริมาณก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ปลดปล่อย ที่อุณหภูมิเบด 900 °ซ	80
5.33	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วอากาศกับปริมาณก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ปลดปล่อย เมื่อใช้ถ่านหินผสมโดโลไมท์ 70:30 (โดยน้ำหนัก)	81
5.34	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วอากาศกับปริมาณก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ปลดปล่อย เมื่อใช้ถ่านหินผสมโดโลไมท์ 80:20 (โดยน้ำหนัก)	81
5.35	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วอากาศกับปริมาณก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ปลดปล่อย เมื่อใช้ถ่านหินผสมโดโลไมท์ 85:15 (โดยน้ำหนัก)	82
5.36	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วอากาศกับปริมาณก๊าซไนตริกออกไซด์ที่ปลดปล่อย ที่อุณหภูมิเบด 750 °ซ	82
5.37	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วอากาศกับปริมาณก๊าซไนตริกออกไซด์ที่ปลดปล่อย ที่อุณหภูมิเบด 800 °ซ	83
5.38	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วอากาศกับประสิทธิภาพการเผาไหม้ของถ่านหินผสมโดโลไมท์ 70:30 (โดยน้ำหนัก)	83
5.39	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วอากาศกับประสิทธิภาพการเผาไหม้ของถ่านหินผสมโดโลไมท์ 80:20 (โดยน้ำหนัก)	84
5.40	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วอากาศกับประสิทธิภาพการเผาไหม้ของถ่านหินผสมโดโลไมท์ 85:15 (โดยน้ำหนัก)	84
5.41	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของเบดกับปริมาณก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ปลดปล่อย ของถ่านหินผสมโดโลไมท์ 80:20 (โดยน้ำหนัก) ความเร็วอากาศ 48.88 ม/นาที อุณหภูมิเบด 850 °ซ	85
5.42	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของเบดกับปริมาณก๊าซไนตริกออกไซด์ที่ปลดปล่อย ของถ่านหินผสมโดโลไมท์ 80:20 (โดยน้ำหนัก) ความเร็วอากาศ48.88 ม/นาที อุณหภูมิเบด 850 °ซ	85

สารบัญรูปประกอบ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
5.43	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของเบดกับประสิทธิภาพการเผาไหม้ของถ่านหินผสมโดโลไมท์ 80:20 (โดยน้ำหนัก) ความเร็วอากาศ48.88 ม/นาที อุณหภูมิเบด 850 °ซ	86
5.44	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเบดและอุณหภูมิฟลูก๊าซที่ความเร็วอากาศ 48.88 ม/นาที	88
5.45	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วอากาศและอุณหภูมิฟลูก๊าซ เมื่ออุณหภูมิเบด 850 °ซ	88
6.1	แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการเผาไหม้ซึ่งได้จาก P-P model (fluid film)	103
6.2	แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการเผาไหม้ซึ่งได้จาก P-P model (ash diffusion control)	104
ก 1	แสดงความเร็วอากาศต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิไดซ์ของถ่านหินและโดโลไมท์	116
จ 1	ผังแสดงขั้นตอนการคำนวณประสิทธิภาพการเผาไหม้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบ P-P model โดยใช้เครื่องคอมพิวเตอร์ (IBM PC)	134

สัญญลักษณ์

A = พื้นที่หน้าตัดของเบด (ซม.^{2})

A_o = พื้นที่หน้าตัดของเบด (ม.^{2})

b = สัมประสิทธิมวลสารสัมพันธ์ (ค่าคงที่)

C_A = ความเข้มข้นของก๊าซ, A (กรัม-โมล/ลบ.ซม.)

C_{Ain} = ความเข้มข้นของก๊าซ, A ที่ป้อนเข้า (กรัม-โมล/ลบ.ซม.)

C_{Af} = ความเข้มข้นเฉลี่ยของก๊าซ A ในก๊าซที่ออก (โมล/ลบ.ซม.)

$C_{A,o}$ = ความเข้มข้นของก๊าซ A ในก๊าซที่ออก (โมล/ลบ.ซม.)

C_b = ความเข้มข้นของก๊าซ, A ในวัฏภาคฟอง (กรัม-โมล/ลบ.ซม.)

C_e = ความเข้มข้นของก๊าซ, A ในวัฏภาคหนาแน่น (กรัม-โมล/ลบ.ซม.)

C_p = ความเข้มข้นของออกซิเจนในวัฏภาคหนาแน่น (กรัม-โมล/ลบ.ซม.)

C_s = ความเข้มข้นของ SO_2 ที่ออกมาที่สภาวะคงที่ (Steady state) (กิโลกรัม-โมล/ลบ.ม.)

C_{sb1n} = ความเข้มข้นของของแข็ง, B ที่ป้อนเข้า (กรัม-โมล/ลบ.ซม.)

C_{uc} = ความเข้มข้นของออกซิเจนที่ผิวของคาร์บอน (กรัม-โมล/ลบ.ซม.)

$C_{s,o}$ = ความเข้มข้นของ SO_2 ในก๊าซที่ออกมา (กิโลกรัม-โมล/ลบ.ม.)

C_t = ความเข้มข้นทั้งหมดของก๊าซ (โมล/ลบ.ม.)

d = ขนาดของถ่านหิน (ซม.)

d_o = ขนาดของถ่านหินเริ่มต้น (ซม.)

d_p = ขนาดของอนุภาคที่อยู่ภายในเบด (ซม.)

d'_p = เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของหินปูน (มม.)

d_s = ขนาดของถ่านหิน (ซม.)

D = สัมประสิทธิการแพร่ในวัฏภาคก๊าซ (ม.^{2}/วินาที)

D_e = สัมประสิทธิการแพร่ในก๊าซไนโตรเจน (ม.^{2}/วินาที)

F_o = อัตราการป้อนถ่านหิน (กรัม/นาที)

F_o = อัตราการป้อนถ่านหิน (กิโลกรัม/วินาที)

F_t = อัตราการสูญเสียอนุภาค (กิโลกรัม/วินาที)

F_{be} = สัมประสิทธิการแลกเปลี่ยนก๊าซในวัฏภาคฟอง-วัฏภาคหนาแน่น (วินาที$^{-1}$)

h_t = สัมประสิทธิการถ่ายเทความร้อนรวม (แคลอรี่/วินาที ซม.^{2} °ซ)

I = ตัวแปรไร้หน่วยของความเร็วอากาศเฉลี่ยที่ผิวของอนุภาค

k = ค่าคงที่ของปฏิกิริยาอันดับหนึ่งต่อหน่วยปริมาตรของเบดนิ่ง (วินาที$^{-1}$)

k_c = ค่าคงที่ของปฏิกิริยา base on พื้นผิวของอนุภาค (ซม./วินาที)

k_d = อัตราการลดลงของปฏิกิริยา (วินาที$^{-1}$)

k_m = ค่าคงที่ของปฏิกิริยาที่เกิดที่ผิวของอนุภาค (มม./วินาที)

K_f = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารในเบดของของไหล (กรัม/วินาที)

K_g = ค่าการนำความร้อนของก๊าซ (แคลอรี่/กรัม.วินาที. °ซ)

$K(R)$ = ค่าคงที่ของการปลิวหลุดของอนุภาคถ่านหินที่มีขนาดเท่ากับ R (วินาที$^{-1}$)

L = ความสูงของเบด (ซม.)

L_{mf} = ความสูงของเบดที่จุดเริ่มเกิดฟลูอิไดซ์ (ซม.)

m = จำนวนอนุภาคคาร์บอน (กรัม)

m_o = จำนวนอนุภาคคาร์บอนเริ่มต้น (กรัม)

M_b = น้ำหนักของหินปูนที่เติมเข้าไปในการทดลองแบบครั้งคราว (กิโลกรัม)

n = อันดับของปฏิกิริยา

N_{Ar} = ค่าอาคิมิดิส

N_M = number of transfer unit

$N_{Nu(t)}$ = ค่าของนุสเซล

N_R = number of reaction unit

N_{Re} = ค่าของเรโนล

N_{Sc} = ค่าของชมิดท์

N_{Sh} = ค่าของเชอร์วูด

$P(R)$ = สัดส่วนของถ่านหินที่มีขนาดอยู่ในช่วง R ถึง R+dR (ม.$^{-1}$)

$P_o(R)$ = P(R) ของถ่านหินที่ป้อนเข้า (ม.$^{-1}$)

q = ความร้อนของปฏิกิริยา (แคลอรี่/กรัม)

Q = อัตราการป้อนอากาศ (ลบ.ม/วินาที)

R = รัศมีของอนุภาค (ม.)

R_i = รัศมีของอนุภาคที่ป้อนเข้า (ม.)

$\mathcal{R}$ = อัตราการเปลี่ยนแปลงขนาดของอนุภาค (ม./วินาที)

S = พื้นที่ผิวของหินปูนทั้งหมด (ม.^{2})

S_o = พื้นที่ผิวของหินปูนในตอนเริ่มต้นทั้งหมด (ม.^{2})

t' = ระยะเวลาของการทำปฏิกิริยา (วินาที)

U_b = ความเร็วของฟองก๊าซ (ซม/วินาที)

U_{br} = ความเร็วสัมพัทธ์ของฟองก๊าซ (ความเร็วเมื่อเทียบกับวัฏภาคหนาแน่น) (ซม/วินาที)

U_f = ความเร็วของก๊าซในเบดหนาแน่นที่สภาวะเริ่มต้นของการเกิดฟลูอิไดซ์ (ซม/วินาที)

U_{mf} = ความเร็วอากาศต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิไดซ์ (ซม/วินาที)

X_A = การเปลี่ยนแปลงของก๊าซ A

X_{Af} = การเปลี่ยนแปลง (conversion) ทั้งหมดของก๊าซ A ในก๊าซที่ออกมา

X_B = การเปลี่ยนแปลงของของแข็ง (solid conversion)

W_c = ปริมาณคาร์บอนในเบด (กิโลกรัม)

W_s = อัตราการป้อนถ่านหินโดยปริมาตร (ลบ.ซม./วินาที)

W_t = น้ำหนักของของแข็งทั้งหมดในเบด (กิโลกรัม)

Y_{O_2} = สัดส่วนจำนวนโมลของออกซิเจน

γ_s = สัดส่วนของอนุภาคในวัฏภาคฟองต่อปริมาตรทั้งหมดของอนุภาคที่อยู่ในเบด

β = อัตราส่วนของเวลาเฉลี่ยกับเวลาที่ใช้เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาการเปลี่ยนแปลงของของแข็งจนสมบูรณ์

ρ_{SM} = ความหนาแน่นของของแข็งที่เข้าทำปฏิกิริยา (กรัม-โมล/ลบ.ซม.)

ϵ = สัดส่วนช่องว่างของอนุภาคคาร์บอน

ϵ_b = อัตราส่วนปริมาตรของฟองต่อปริมาตรทั้งหมดของเบดนิ่ง

η_c = ประสิทธิภาพการเผาไหม้ (%)

η_s = ประสิทธิภาพการกำจัด SO_2 (%)

θ = ค่าแก้สำหรับความเร็วอากาศ

μ = ความหนืดของก๊าซ (กรัม/ซม.วินาที)

ρ = ความหนาแน่น (กรัม/ลบ.ซม.)

ρ'_s = ความหนาแน่นของหินปูน (กิโลกรัม/ลบ.ม.)

ρ_A = ความหนาแน่นของคาร์บอนที่ปรากฏ (กรัม/ลบ.ซม.)

ρ_{Ao} = ความหนาแน่นของคาร์บอนที่ปรากฏเมื่อเริ่มต้น (กรัม/ลบ.ซม.)