การปล่อยไนโตรเจนออกไซด์และไนตรัสออกไซด์จากการเผาไหม้ร่วมของถ่านหินและชีวมวลในฟลูอิไดซ์เบดแบบหมุนเวียน

นายประจักษ์ ทรัพย์อุดมมาก

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2550
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EMISSIONS OF NO_x AND N_2O FROM CO-COMBUSTION OF COAL AND BIOMASS IN A CIRCULATING FLUIDIZED BED

Mr. Prajak Supudommak

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Science Program in Chemical Technology

Department of Chemical Technology

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2007

Copyright of Chulalongkorn University

500494

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การปล่อยไนโตรเจนออกไซด์และไนตรัสออกไซด์จากการเผาไหม้ร่วมของถ่านหินและชีวมวลในฟลูอิไดซ์เบดแบบหมุนเวียน
โดย	นายประจักษ์ ทรัพย์อุดมมาก
สาขาวิชา	เคมีเทคนิค
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร. เลอสรวง เมฆสุต
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ประพันธ์ คูชลธารา

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร. สุพจน์ หารหนองบัว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(ศาสตราจารย์ ดร. ภัทรพรรณ ประศาสน์สารกิจ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รองศาสตราจารย์ ดร. เลอสรวง เมฆสุต)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ประพันธ์ คูชลธารา)

..... กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. พรพจน์ เปี่ยมสมบูรณ์)

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุชญา นิติวัฒนานนท์)

ประจักษ์ ทรัพย์อุดมมาก : การปล่อยไนโตรเจนออกไซด์และไนตรัสออกไซด์จากการเผาไหม้ร่วมของถ่านหินและชีวมวลในฟลูอิไดซ์เบดแบบหมุนเวียน. (EMISSIONS OF NO_x AND N_2O FROM CO-COMBUSTION OF COAL AND BIOMASS IN A CIRCULATING FLUIDIZED BED) อาจารย์ที่ปรึกษา : รศ. ดร.เลอสรวง เมฆสุต, อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม : ผศ. ดร.ประพันธ์ คูชลธารา, จำนวนหน้า 157 หน้า.

งานวิจัยนี้ศึกษาการปล่อยไนโตรเจนออกไซด์และไนตรัสออกไซด์จากการเผาไหม้ร่วมของถ่านหินและชีวมวลในฟลูอิไดซ์เบดแบบหมุนเวียน โดยใช้ถ่านหินศักดิ์ซับบิทูมินัสและชีวมวลคือแกลบ โดยมีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบร้อยละ 0.30 และ 0.18 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ไรเซอร์หรือห้องเผาไหม้มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 3 เมตร ป้อนเชื้อเพลิงที่อัตราคงที่ 7 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ป้อนอากาศปฐมภูมิอัตราคงที่ 200 ลิตรต่อนาที และอัตราการหมุนเวียนของเบดคงที่ 300 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ตัวแปรที่ทำการศึกษาคือ ส่วนผสมของเชื้อเพลิง ปริมาณอากาศรวม ตำแหน่งการป้อนอากาศทุติยภูมิ และผลของหอดูดซับด้วยน้ำ

จากผลการทดลองพบว่า ถ่านหินซึ่งมีค่าความร้อนสูงและมีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบมากกว่าจึงให้อุณหภูมิสูงและปล่อยไนโตรเจนออกไซด์และไนตรัสออกไซด์มาก ปริมาณอากาศรวมที่ป้อนเข้าสู่เตาเผาแปรผันตรงกับอัตราการปล่อยแก๊สไนโตรเจนออกไซด์และไนตรัสออกไซด์ และการป้อนอากาศทุติยภูมิที่ตำแหน่งสูงๆ จะมีอัตราการปล่อยแก๊สไนโตรเจนออกไซด์และไนตรัสออกไซด์น้อยกว่าพร้อมทั้งให้อุณหภูมิสูงกว่า หอดูดซับช่วยลดแก๊สไนโตรเจนออกไซด์ได้เล็กน้อย และมีผลต่อแก๊สไนตรัสออกไซด์น้อยมาก แก๊สไนโตรเจนออกไซด์และไนตรัสออกไซด์มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน การเกิดแก๊สไนโตรเจนออกไซด์จะมากกว่าไนตรัสออกไซด์เสมอโดยมีค่า 40 ถึง 90 และ 20 ถึง 45 ส่วนในล้านส่วน (แก๊สออกซิเจนร้อยละ 7) ตามลำดับ ส่วนแก๊สไนโตรเจนไดออกไซด์เกิดขึ้นน้อยมาก อุณหภูมิเฉลี่ยตลอดไรเซอร์อยู่ที่ 650 ถึง 800 องศาเซลเซียส องค์ประกอบของฟลูแก๊สที่ปล่อยออกมาในทุกการทดลองมีค่าน้อยกว่าระดับมาตรฐานของการปล่อยแก๊สพิษในประเทศไทย

ภาควิชา .....เคมีเทคนิค..... ลายมือชื่อนิสิต.....ประจักษ์ ทรัพย์อุดมมาก.....

สาขาวิชา .....เคมีเทคนิค..... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

ปีการศึกษา .....2550..... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

4772359023 : MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY

KEY WORD : CO-COMBUSTION / COAL / BIOMASS / NO_x / N_2O

PRAJAK SUPUDOMMAK : EMISSIONS OF NO_x AND N_2O FROM CO-COMBUSTION OF COAL AND BIOMASS IN A CIRCULATING FLUIDIZED BED. THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. LURSUANG MEKASUT, Ph.D. THESIS COADVISOR : ASST. PROF. PRAPAN KUCHONTHARA, Ph.D. 157 pp.

This research studied the emissions of NO_x and N_2O from co-combustion of coal and biomass in a circulating fluidized bed (CFB). Sub-bituminous rank coal and rice husk were employed as feedstocks. Nitrogen contents in coal and rice husk are 0.30 and 0.18% by weight, respectively. The combustion zone in this CFB took place in the cylindrical riser with 10 cm I.D. and 3 m in height. Fuel feed rate, primary air feed rate and solid circulation rate (silica sand return rate) were kept constant at 7 kg/hr, 200 l/min and 300 kg/hr, respectively. Here, effects of coal to biomass ratio in the mixed fuel and secondary air position were investigated. In addition, performance of water scrubber on reducing some toxic gases was examined.

From the experimental results, coal and rice husk properties such as density, heating value and nitrogen composition obviously influenced temperature in combustion zone and also emissions of NO_x and N_2O. Average temperature in the riser was approximately 650 – 800 °C. NO_x and N_2O emissions increased with the increasing of total air feed rate. Injecting secondary air at higher position resulted in lower NO_x and N_2O concentrations and higher temperature. Utilization of the water scrubber helped slightly decrease NO_x emission, but had no effect on N_2O emission. The change in NO_x and N_2O was found in the same trend. Moreover, the concentration of NO_x (approximately 40 – 90 ppm) was observed to be higher than that of N_2O (approximately 20 – 45 ppm) (at 7% O_2) . The concentration of NO_2 was relatively low in the flue gas. The flue gas from co-combustion of coal and rice husk in CFB was found to satisfy the Thai emission standards.

Department ...Chemical Technology..... Student's signature..... Prajak Supudommak

Field of study ...Chemical Technology... Advisor's signature.....

Academic year ....2007..... Co-advisor's signature.....

กิตติกรรมประกาศ

ความสำเร็จด้วยดีของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เกิดขึ้นได้ด้วยความร่วมมือจากหลายๆ ฝ่าย โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ความอนุเคราะห์เป็นอย่างสูงจาก รองศาสตราจารย์ ดร. เลอสรวง เมฆสุต อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประพันธ์ คูชลธารา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ซึ่งท่านได้คอยให้ความช่วยเหลือเป็นห่วงเป็นใยในทุกๆ ด้าน รวมทั้งให้คำชี้แนะที่มีประโยชน์เกี่ยวกับงานวิจัย พร้อมกันนี้ ขอขอบพระคุณคณาจารย์กลุ่มฟลูอิไดซ์เบดแบบหมุนเวียนที่ให้คำแนะนำดีๆ เป็นประจำทุกเดือน อีกทั้งคณาจารย์ทุกท่านในภาควิชาเคมีเทคนิคที่ได้ให้ความช่วยเหลือเป็นอย่างดีเสมอมา

งานวิจัยเรื่อง "การปล่อยไนโตรเจนออกไซด์และไนตรัสออกไซด์จากการเผาไหม้ร่วมของถ่านหินและชีวมวลในฟลูอิไดซ์เบดแบบหมุนเวียน" สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีโดยได้รับการสนับสนุนเงินทุนจากโครงการพัฒนาบัณฑิตศึกษาและวิจัยด้านเชื้อเพลิง ภายใต้โครงการพัฒนาบัณฑิตศึกษาด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ศูนย์ปิโตรเลียมและเทคโนโลยีปิโตรเคมี ซึ่งผู้วิจัยต้องขอขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร. ภัทรพรรณ ประศาสน์สารกิจ รองศาสตราจารย์ ดร. พรพจน์ เปี่ยมสมบูรณ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุชญา นิติวัฒนานนท์ ที่กรุณาเป็นกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณ บริษัท บ้านปู จำกัดมหาชน ที่เอื้อเฟื้อถ่านหินสำหรับงานวิจัยในครั้งนี้

ขอขอบพระคุณ เจ้าหน้าที่ทุกท่านของภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย คุณสังข์ ชมชื่น โดยเฉพาะเจ้าหน้าที่ช่างเทคนิคประจำห้องฟลูอิไดเซชัน นายกิติรัช สิทธิเวคิน และ นายสรวิชญ์ ฉิมสกุล ที่ให้ความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกในการวิจัย

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ญาติพี่น้อง ที่ให้ความช่วยเหลือ เป็นกำลังใจและให้การสนับสนุนเป็นอย่างดีจนสำเร็จการศึกษา รวมทั้งขอขอบคุณพี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆ พร้อมทั้งชาวเคมีเทคนิคทุกท่านที่คอยให้กำลังใจ ช่วยเหลือประกอบกับคำแนะนำดีๆ ที่มอบให้เสมอมา

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... จ

กิตติกรรมประกาศ..... ฉ

สารบัญ..... ช

สารบัญตาราง..... ญ

สารบัญรูปภาพ..... ฎ

คำอธิบายสัญลักษณ์..... ถ

บทที่ 1 บทนำ..... 1

1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย..... 1

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย..... 3

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย..... 3

1.4 ขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัย..... 3

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย..... 5

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... 6

2.1 การเผาไหม้..... 6

2.1.1 สภาวะที่จำเป็นในการเริ่มเกิดปฏิกิริยา..... 7

2.1.2 ข้อเด่นของการเผาไหม้..... 12

2.2 อุปสงค์และอุปทานของพลังงาน..... 13

2.3 ถ่านหิน..... 18

2.4 พลังงานหมุนเวียนและพลังงานจากชีวมวล..... 19

2.5 การวิเคราะห์และทดสอบเชื้อเพลิงแข็ง..... 22

2.6 ฟลูอิไดเซชัน..... 23

2.6.1 นิยาม..... 23

2.6.2 ประเภทของฟลูอิไดเซชัน..... 23

2.6.3 ลักษณะของฟลูอิไดซ์เบด..... 24

2.6.4 แก๊สฟลูอิไดเซชัน..... 25

2.7 ระบบการเผาไหม้ฟลูอิไดซ์เบด..... 32

2.8 ระบบการเผาไหม้ฟลูอิไดซ์เบดแบบหมุนเวียน..... 34

2.9 กลไกการเผาไหม้..... 35

หน้า

2.10 การควบคุมมลพิษ..... 37
2.10.1 การกำจัดอนุภาค..... 41
2.10.2 วัฏจักรไนโตรเจน..... 49
2.10.2.1 แก๊สไนโตรเจนออกไซด์ (NO_X)..... 51
2.10.2.2 แก๊สไนตรัสออกไซด์ (N_2O)..... 56
2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... 58
บทที่ 3 เครื่องมือและวิธีการทดลอง..... 65
3.1 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง..... 65
3.2 วิธีการทดลอง..... 80
3.2.1 การเตรียมเชื้อเพลิงและทราย..... 80
3.2.2 การจุดเตาและดำเนินการทดลอง..... 80
3.2.3 การปิดเตาเผา..... 82
บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง..... 83
4.1 สมบัติของเชื้อเพลิง..... 83
4.1.1 การวิเคราะห์โดยวิธีประมาณ (proximate analysis)..... 83
4.1.2 การวิเคราะห์โดยวิธีแยกธาตุ (ultimate analysis)..... 84
4.2 การปรับเทียบสกรูฟีดเดอร์ และ inverter..... 84
4.3 การหาปริมาณอากาศปฐมภูมิต่ำสุดที่ทำให้ทรายในไรเซอร์เกิดการฟลูอิไดซ์และหมุนเวียน..... 86
4.4 การหาขนาดของแกลบและปริมาณอากาศที่เหมาะสมสำหรับป้อนเข้าในสกรูฟีดเดอร์สำหรับป้อนแกลบเพื่อไม่ให้เปลวไฟและความร้อนไหลย้อนกลับไปไหม้แกลบในถังเก็บแกลบ..... 87
4.5 การหาปริมาณเชื้อเพลิงและปริมาณอากาศในการเผาไหม้ในระบบฟลูอิไดซ์เบดแบบหมุนเวียน..... 89
4.6 ศึกษาผลของอุณหภูมิที่การป้อนเชื้อเพลิงอัตราเท่ากัน (7 กิโลกรัมต่อชั่วโมง)..... 90
4.6.1 ศึกษาผลของชนิดเชื้อเพลิงที่ต่างกันที่มีผลต่ออุณหภูมิในไรเซอร์..... 93
4.6.2 ศึกษาผลของตำแหน่งการป้อนอากาศทุติยภูมิที่มีผลต่ออุณหภูมิในไรเซอร์..... 98

หน้า

4.6.3 ศึกษาผลของอุณหภูมิที่ตัวแปรต่างๆ กัน..... 102
4.7 ศึกษาความเข้มข้นแก๊สที่เกิดขึ้น ณ ตำแหน่งต่างๆ ของเครื่องเผาไหม้ฟลูอิไดซ์เบดแบบหมุนเวียน..... 105
4.8 ศึกษาปริมาณฟลูแก๊สที่เกิดขึ้น ณ ตำแหน่งที่ 10 ของเครื่องเผาไหม้ฟลูอิไดซ์เบดแบบหมุนเวียน..... 114
4.8.1 ศึกษาผลของอัตราการปล่อยฟลูแก๊สที่มีการใช้เชื้อเพลิงต่างชนิดกัน แต่ปริมาณอากาศที่ป้อนเท่ากัน..... 117
4.8.2 ศึกษาผลของอัตราการปล่อยฟลูแก๊สที่มีการป้อนอากาศทุติยภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ กัน แต่ปริมาณอากาศที่ป้อนเท่ากัน..... 120
4.9 ศึกษาผลของอัตราการปล่อยไนโตรเจนออกไซด์และไนตรัสออกไซด์ที่ตำแหน่งที่ 10 ที่ภาวะการทดลองต่างๆ กัน..... 125
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ..... 133
5.1 อุณหภูมิของเตาเผา..... 133
5.2 องค์ประกอบของฟลูแก๊ส..... 133
5.3 ข้อเสนอแนะ..... 134
รายการอ้างอิง..... 135
ภาคผนวก..... 139
ภาคผนวก ก วิธีวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของเชื้อเพลิง..... 140
ภาคผนวก ข วิธีการคำนวณ..... 143
ภาคผนวก ค ตารางบันทึกผลการทดลอง..... 146
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์..... 157

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 อุณภูมิการจุดไฟของเชื้อเพลิงบางชนิดผสมอากาศ ที่ความดัน 1 บรรยากาศ... 8
ตารางที่ 2.2 ปริมาณอากาศเกินพอที่มักใช้กับระบบการการเผาไหม้เชื้อเพลิง..... 10
ตารางที่ 2.3 สมบัติของถ่านหิน เปรียบเทียบกับไม้และพีต..... 19
ตารางที่ 2.4 มาตรฐานของการปล่อยแก๊สพิษในประเทศไทย..... 40
ตารางที่ 2.5 ประสิทธิภาพของไซโคลนที่ขนาดของไซโคลนและขนาดของอนุภาคต่างๆ กัน.. 44
ตารางที่ 2.6 ตารางแสดงศักยภาพของแก๊สเรือนกระจก เปรียบเทียบโดย 1 กิโลกรัมของ แก๊สเรือนกระจกต่อ 1 กิโลกรัม ของแก๊สคาร์บอนไดอกไซด์..... 57
ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์โดยวิธีวิเคราะห์แบบประมาณ (proximate analysis) รวมทั้งค่าพลังงานความร้อน ความหนาแน่น และ ขนาดของอนุภาคที่ใช้ ในการทดลอง..... 83
ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์โดยวิธีวิเคราะห์แยกธาตุ (ultimate analysis)..... 84
ตารางที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของ Inverter กับอัตราการป้อนถ่านหิน..... 85
ตารางที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของ Inverter กับอัตราการป้อนถ่านหินผ่าน สกรูฟีดเดอร์..... 85
ตารางที่ 4.5 ขนาดของแกลบปกติก่อนการถูกบดย่อยและคัดแยกขนาด..... 88
ตารางที่ 4.6 ขนาดของแกลบหลังการถูกบดย่อยและคัดแยกขนาดผ่านตระแกรง แยกขนาด 1200 ไมโครเมตร..... 89
ตารางที่ 4.7 ปริมาณอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ถ่านหิน, ถ่านหินผสมแกลบในอัตรา ส่วน 50:50 และแกลบ ที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิง 7 กิโลกรัมต่อชั่วโมง โดยคิดปริมาณอากาศที่การเผาไหม้สมบูรณ์ 100 เปอร์เซ็นต์..... 90
ตารางที่ 4.8 การวิเคราะห์โดยวิธีประมาณของเถ้าลอย..... 91
ตารางที่ 4.9 การวิเคราะห์โดยวิธีแยกธาตุของเถ้าลอย..... 92
ตารางที่ 4.10 การวิเคราะห์หาธาตุองค์ประกอบด้วยเครื่อง X-ray fluorescence ของเถ้าลอย 92
ตารางที่ 4.11 ค่าการละลายน้ำของแก๊สต่างๆ..... 107
ตารางที่ 4.12 ค่าพลังงานเสรีของกิบส์ของออกไซด์ของไนโตรเจน..... 127

สารบัญรูปภาพ

หน้า

รูปที่ 2.1 องค์ประกอบที่จำเป็นในการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้..... 7

รูปที่ 2.2 การป้อนอากาศส่วนแรกและอากาศส่วนที่สองสู่ตะกรับเตาแบบป้อนถ่านหินเหนือตะกรับ..... 9

รูปที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่าง เปอร์เซ็นต์คาร์บอนไดออกไซด์ และเปอร์เซ็นต์อากาศเกินพอ 12

รูปที่ 2.4 ตัวอย่างบันทึกอุปทานพลังงานรายปีในช่วง 120 ปี (ค.ศ. 1850 – 1970) ของประเทศสหรัฐอเมริกา..... 14

รูปที่ 2.5 แนวโน้มอุปทานพลังงานของไทยแบ่งตามแหล่งเชื้อเพลิง หน่วยคิดเทียบเท่าน้ำมันดิบล้านตัน..... 16

รูปที่ 2.6 แนวโน้มอุปสงค์พลังงานของไทยแบ่งตามภาคเศรษฐกิจ หน่วยคิดเทียบเท่าน้ำมันดิบล้านตัน..... 17

รูปที่ 2.7 วัฏจักรคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2 cycle)..... 21

รูปที่ 2.8 ลักษณะการเกิดฟลูอิไดซ์เซชันของเบดที่มีของไหลต่างชนิดกันไหลผ่าน..... 24

รูปที่ 2.9 รูปแบบการไหลสำหรับฟลูอิไดซ์เบดแก๊ส- ของแข็ง..... 25

รูปที่ 2.10 ลักษณะของเบดนิ่งที่ไม่มีและมีการเคลื่อนที่สัมพัทธ์กับผนัง..... 26

รูปที่ 2.11 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันลดกับ ความเร็วของของไหล..... 29

รูปที่ 2.12 การเผาไหม้ของถ่านหินในฟลูอิไดซ์เบด..... 32

รูปที่ 2.13 เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบด..... 34

รูปที่ 2.14 เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบดแบบหมุนเวียน..... 35

รูปที่ 2.15 ปฏิกิริยาการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงแข็งในเตาฟลูอิไดซ์เบด..... 36

รูปที่ 2.16 ปฏิกิริยาการเผาไหม้โดยทั่วไปของเชื้อเพลิงแข็งในเตาชนิดอื่น..... 37

รูปที่ 2.17 กลไกการเกิดอนุภาคเถ้าถ่านหินขณะเผาไหม้..... 41

รูปที่ 2.18 อุปกรณ์แยกฝุ่นด้วยแรงโน้มถ่วงของโลกแบบต่างๆ..... 42

รูปที่ 2.19 หลักการและสัดส่วนของไซโคลน..... 43

รูปที่ 2.20 หลักการแยกฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิต..... 45

รูปที่ 2.21 เครื่องกรองฝุ่นแบบถุงกรอง..... 47

รูปที่ 2.22 เครื่องล้างแก๊สชนิดต่างๆ..... 48

รูปที่ 2.23 ปฏิกิริยาต่างๆ ที่เกิดขึ้นในวัฏจักรไนโตรเจน โดย $R\text{-}NH_2$ คือสารอินทรีย์..... 50

รูปที่ 2.24 การเกิดไนโตรเจนออกไซด์ที่อุณหภูมิต่างๆ..... 52

รูปที่ 2.25 ปริมาณการปล่อยแก๊สไนตริกออกไซด์โดยเปรียบเทียบกับปริมาณอากาศ

หน้า

เกินพอ..... 53
รูป 2.26 ปริมาณไนโตรเจนออกไซด์ที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงโดยมีการเผาไหม้เป็น 2 ขั้น (staged combustion) ที่ปริมาณอากาศรวมเท่ากัน และเปรียบเทียบที่อุณหภูมิในการเผาไหม้ต่างๆ กัน..... 53
รูปที่ 3.1 โครงร่างเตาเผาฟลูอิไดซ์เบดแบบหมุนเวียนที่ใช้ในงานวิจัย..... 65
รูปที่ 3.2 เตาเผาฟลูอิไดซ์เบดแบบหมุนเวียนที่ใช้ในงานวิจัย..... 66
รูปที่ 3.3 เครื่องเป่าอากาศ (air blower)..... 67
รูปที่ 3.4 วาล์วไฟฟ้ารูปผีเสื้อและ orifice..... 67
รูปที่ 3.5 หน้าจอแสดงความเร็วอากาศปฐมภูมิแบบดิจิตอล..... 68
รูปที่ 3.6 ไรเซอร์ (ท่อแนวตั้งด้านซ้าย) และ probe สำหรับวัดอุณหภูมิและวัดองค์ประกอบของแก๊ส..... 69
รูปที่ 3.7 หัวเผาและกระจกมองเปลวไฟ 69
รูปที่ 3.8 ระบบป้อนเชื้อเพลิง (fuel feeder system)..... 71
รูปที่ 3.9 กระจกสำหรับดูภายในห้องเผาไหม้..... 71
รูปที่ 3.10 เครื่องอัดอากาศ พร้อมอุปกรณ์ทำความเย็นอากาศและระบบกำจัดน้ำในอากาศ 72
รูปที่ 3.11 ไซโคลน (cyclone)..... 72
รูปที่ 3.12 downcomer (ท่อทาง ด้านขวา) และ แอลวาล์ว (วาล์วปีกผีเสื้อ)..... 73
รูปที่ 3.13 หอดูดซึมและอุปกรณ์อัดฉีดน้ำ..... 74
รูปที่ 3.14 หน้าจอแสดงอุณหภูมิและวาล์วสำหรับดึงแก๊สออกจากระบบ..... 75
รูปที่ 3.15 อุปกรณ์ (module) สำหรับแปลงสัญญาณอุณหภูมิจากเทอร์โมคับเปิล ความเร็วอากาศปฐมภูมิจากเครื่องเป่าอากาศ อัตราการป้อนเชื้อเพลิงจาก inverter แล้วส่งสัญญาณไปแสดงที่หน้าจอคอมพิวเตอร์..... 75
รูปที่ 3.16 หน้าจอคอมพิวเตอร์แสดงอุณหภูมิ ความเร็วอากาศปฐมภูมิ อัตราการป้อนเชื้อเพลิงของถ่านหินและแกลบ โดยหน้าจอนี้เป็นตัวอย่างของการทดลองเผาไหม้แกลบ 100 เปอร์เซ็นต์ อากาศปฐมภูมิ 200 ลิตรต่อนาที อากาศป้อนสกรูฟีดเดอร์ 200 ลิตรต่อนาที ไม่มีการป้อนอากาศทุติยภูมิ แล้วในช่วงท้ายเป็นการเริ่มทดลองเผาไหม้ถ่านหินผสมแกลบในอัตราส่วน 50:50 อากาศปฐมภูมิ 200 ลิตรต่อนาที อากาศป้อนที่สกรูฟีดเดอร์ 200 ลิตรต่อนาที ไม่มีการป้อนอากาศทุติยภูมิ..... 76
รูปที่ 3.17 อุปกรณ์วัดความดันอากาศแบบดิจิตอล..... 77

หน้า

รูปที่ 3.18 ปั้มดูดจ่ายของไหล (peristaltic pump)..... 77
รูปที่ 3.19 เครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบของฟลูแก๊ส (flue gas analyzer)..... 78
รูปที่ 3.20 gas chromatography..... 79
รูปที่ 3.21 เครื่องบดถ่านหินอย่างหยาบ..... 79
รูปที่ 3.22 เครื่องบดชีวมวลอย่างหยาบ..... 80
รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของ inverter กับอัตราการป้อนถ่านหิน..... 85
รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของ inverter กับอัตราการป้อนแกลบผ่านสกรูฟีดเดอร์ 86
รูปที่ 4.3 ลักษณะของแกลบปกติก่อนการถูกบดย่อยและคัดแยกขนาด..... 87
รูปที่ 4.4 ลักษณะของแกลบหลังการถูกบดย่อยและคัดแยกขนาดผ่านตระแกรง
แยกขนาด 1200 ไมโครเมตร..... 88
รูปที่ 4.5 อุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆ ในไรเซอร์ที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิง 7 กิโลกรัมต่อ
ชั่วโมง อากาศรวม 120 เปอร์เซ็นต์ ในการเผาไหม้สมบูรณ์ อากาศปฐมภูมิ 200
ลิตรต่อนาที ป้อนอากาศที่สกรูฟีดเดอร์ ของแกลบ 200 ลิตรต่อนาที อากาศที่
เหลือเป็นอากาศทุติยภูมิตำแหน่ง 1 เมตร..... 93
รูปที่ 4.6 อุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆ ในไรเซอร์ที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิง 7 กิโลกรัมต่อ
ชั่วโมง อากาศรวม 120 เปอร์เซ็นต์ ในการเผาไหม้สมบูรณ์ อากาศปฐมภูมิ 200
ลิตรต่อนาที ป้อนอากาศที่สกรูฟีดเดอร์ของแกลบ 200 ลิตรต่อนาที อากาศที่
เหลือเป็นอากาศทุติยภูมิตำแหน่ง 2 เมตร..... 94
รูปที่ 4.7 อุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆ ในไรเซอร์ที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิง 7 กิโลกรัมต่อ
ชั่วโมง อากาศรวม 120 เปอร์เซ็นต์ในการเผาไหม้สมบูรณ์ อากาศปฐมภูมิ 200
ลิตรต่อนาที ป้อนอากาศที่สกรูฟีดเดอร์ของแกลบ 200 ลิตรต่อนาที อากาศที่
เหลือเป็นอากาศทุติยภูมิตำแหน่ง 2.4 เมตร..... 94
รูปที่ 4.8 อุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆ ในไรเซอร์ที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิง 7 กิโลกรัมต่อ
ชั่วโมง อากาศรวม 100 เปอร์เซ็นต์ในการเผาไหม้สมบูรณ์ อากาศปฐมภูมิ 200
ลิตรต่อนาที ป้อนอากาศที่สกรูฟีดเดอร์ของแกลบ 200 ลิตรต่อนาที อากาศที่
เหลือเป็นอากาศทุติยภูมิตำแหน่ง 1 เมตร..... 95
รูปที่ 4.9 อุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆ ในไรเซอร์ที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิง 7 กิโลกรัมต่อ
ชั่วโมง อากาศรวม 100 เปอร์เซ็นต์ ในการเผาไหม้สมบูรณ์ อากาศปฐมภูมิ 200 ลิตร
ต่อนาทีป้อนอากาศที่สกรูฟีดเดอร์ของแกลบ 200 ลิตรต่อนาที อากาศที่เหลือ

หน้า

เป็นอากาศทุติยภูมิตำแหน่ง 2 เมตร..... 96
รูปที่ 4.10 อุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆ ในไรเซอร์ที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิง 7 กิโลกรัมต่อชั่วโมง อากาศรวม 100 เปอร์เซ็นต์ ในการเผาไหม้สมบูรณ์ อากาศปฐมภูมิ 200 ลิตรต่อนาที ป้อนอากาศที่สกรูฟีดเดอร์ของแกลบ 200 ลิตรต่อนาที อากาศที่เหลือเป็นอากาศทุติยภูมิตำแหน่ง 2.4 เมตร..... 96
รูปที่ 4.11 อุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆ ในไรเซอร์ที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิง 7 กิโลกรัมต่อชั่วโมง อากาศรวม 400 ลิตรต่อนที อากาศปฐมภูมิ 200 ลิตรต่อนาที ป้อนอากาศที่สกรูฟีดเดอร์ของแกลบ 200 ลิตรต่อนาที ไม่มีการป้อนอากาศทุติยภูมิ 97
รูปที่ 4.12 อุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆ ในไรเซอร์ที่อัตราการป้อนถ่านหิน 7 กิโลกรัมต่อชั่วโมง อากาศรวม (1400 ลิตรต่อนาที) 260.89 เปอร์เซ็นต์ ในการเผาไหม้สมบูรณ์ อากาศปฐมภูมิ 200 ลิตรต่อนาที ป้อนอากาศที่สกรูฟีดเดอร์ของแกลบ 200 ลิตรต่อนาที อากาศทุติยภูมิ 1000 ลิตรต่อนาที ป้อนที่ตำแหน่งต่างๆ.... 99
รูปที่ 4.13 อุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆ ในไรเซอร์ที่อัตราการป้อนถ่านหิน 7 กิโลกรัมต่อชั่วโมง อากาศรวม(643.96 ลิตรต่อนาที) 120 เปอร์เซ็นต์ในการเผาไหม้สมบูรณ์ อากาศปฐมภูมิ 200 ลิตรต่อนาที ป้อนอากาศที่สกรูฟีดเดอร์ของแกลบ 100 ลิตรต่อนาที อากาศทุติยภูมิ 343.96 ลิตรต่อนาที ป้อนที่ตำแหน่งต่างๆ..... 99
รูปที่ 4.14 อุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆ ในไรเซอร์ที่อัตราการป้อนถ่านหิน 7 กิโลกรัมต่อชั่วโมง อากาศรวม (536.63 ลิตรต่อนาที) 100 เปอร์เซ็นต์ในการเผาไหม้สมบูรณ์ อากาศปฐมภูมิ 200 ลิตรต่อนาที ป้อนอากาศที่สกรูฟีดเดอร์ของแกลบ 100 ลิตรต่อนาที อากาศทุติยภูมิ 236.63 ลิตรต่อนาที ป้อนที่ตำแหน่งต่างๆ..... 100
รูปที่ 4.15 อุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆ ในไรเซอร์ที่อัตราการป้อนถ่านหินผสมแกลบในอัตราส่วน 50:50 7 กิโลกรัมต่อชั่วโมง อากาศรวม(1200 ลิตรต่อนาที) 240.06 เปอร์เซ็นต์ในการเผาไหม้สมบูรณ์ อากาศปฐมภูมิ 200 ลิตรต่อนาที ป้อนอากาศที่สกรูฟีดเดอร์ของแกลบ 200 ลิตรต่อนาที อากาศทุติยภูมิ 800 ลิตรต่อนาที ป้อนที่ตำแหน่งต่างๆ..... 100
รูปที่ 4.16 อุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆ ในไรเซอร์ที่อัตราการป้อนถ่านหินผสมแกลบในอัตราส่วน 50:50 7 กิโลกรัมต่อชั่วโมง อากาศรวม(586.68 ลิตรต่อนาที) 120 เปอร์เซ็นต์ ในการเผาไหม้สมบูรณ์ อากาศปฐมภูมิ 200 ลิตรต่อนาที ป้อนอากาศที่สกรูฟีดเดอร์ของแกลบ 100 ลิตรต่อนาที อากาศทุติยภูมิ 286.68

หน้า

ลิตรต่อนาที ป้อนที่ตำแหน่งต่างๆ..... 101
รูปที่ 4.17 อุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆ ในไรเซอร์ที่อัตราการป้อนถ่านหินผสมแกลบ ในอัตราส่วน 50:50 7 กิโลกรัมต่อชั่วโมง อากาศรวม(499.88 ลิตรต่อนาที) 100 เปอร์เซ็นต์ในการเผาไหม้สมบูรณ์ อากาศปฐมภูมิ 200 ลิตรต่อนาที ป้อนอากาศที่สกรูฟีดเดอร์ของแกลบ 100 ลิตรต่อนาที อากาศทุติยภูมิ 199.88 ลิตรต่อนาที ป้อนที่ตำแหน่งต่างๆ..... 101
รูปที่ 4.18 อุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆ ในไรเซอร์ที่ภาวะในการทดลองต่างๆ กัน..... 103
รูปที่ 4.19 การเกิด core annulus ตำแหน่งเทอร์โมคัปเปิล และ probe สำหรับเก็บตัวอย่างแก๊สในไรเซอร์ไปวิเคราะห์..... 107
รูปที่ 4.20 ความเข้มข้นของแก๊ส ณ ตำแหน่งต่างๆ ของเครื่อง CFBC ถ่านหิน 100 เปอร์เซ็นต์ อากาศรวม (1400 ลิตรต่อนาที) 260.89 เปอร์เซ็นต์ในการเผาไหม้สมบูรณ์ อากาศปฐมภูมิ 200 ลิตรต่อนาที ป้อนอากาศที่สกรูฟีดเดอร์ของแกลบ 200 ลิตรต่อนาที อากาศทุติยภูมิป้อนที่ตำแหน่ง 1 เมตร 1000 ลิตรต่อนาที. 108
รูปที่ 4.21 ความเข้มข้นของแก๊ส ณ ตำแหน่งต่างๆ ของเครื่อง CFBC ถ่านหิน 100 เปอร์เซ็นต์ อากาศรวม (1400 ลิตรต่อนาที) 260.89 เปอร์เซ็นต์ในการเผาไหม้สมบูรณ์ อากาศปฐมภูมิ 200 ลิตรต่อนาที ป้อนอากาศที่สกรูฟีดเดอร์ของแกลบ 200 ลิตรต่อนาที อากาศทุติยภูมิป้อนที่ตำแหน่ง 2 เมตร 1000 ลิตรต่อนาที. 109
รูปที่ 4.22 ความเข้มข้นของแก๊ส ณ ตำแหน่งต่างๆ ของเครื่อง CFBC ถ่านหิน 100 เปอร์เซ็นต์ อากาศรวม (1400 ลิตรต่อนาที) 260.89 เปอร์เซ็นต์ในการเผาไหม้สมบูรณ์ อากาศปฐมภูมิ 200 ลิตรต่อนาที ป้อนอากาศที่สกรูฟีดเดอร์ของแกลบ 200 ลิตรต่อนาที อากาศทุติยภูมิป้อนที่ตำแหน่ง 2.4 เมตร 1000 ลิตรต่อนาที 109
รูปที่ 4.23 ความเข้มข้นของแก๊ส ณ ตำแหน่งต่างๆ ของเครื่อง CFBC ถ่านหินผสมแกลบ 50:50 อากาศรวม (1200 ลิตรต่อนาที) 240.06 เปอร์เซ็นต์ ในการเผาไหม้สมบูรณ์ อากาศปฐมภูมิ 200 ลิตรต่อนาที ป้อนอากาศที่สกรูฟีดเดอร์ของแกลบ 200 ลิตรต่อนาที อากาศทุติยภูมิป้อนที่ตำแหน่ง 1 เมตร 800 ลิตรต่อนาที... 110
รูปที่ 4.24 ความเข้มข้นของแก๊ส ณ ตำแหน่งต่างๆ ของเครื่อง CFBC ถ่านหินผสมแกลบ 50:50 อากาศรวม (1200 ลิตรต่อนาที) 240.06 เปอร์เซ็นต์ในการเผาไหม้สมบูรณ์ อากาศปฐมภูมิ 200 ลิตรต่อนาที ป้อนอากาศที่สกรูฟีดเดอร์ของแกลบ 200 ลิตรต่อนาที อากาศทุติยภูมิป้อนที่ตำแหน่ง 2 เมตร 800 ลิตรต่อนาที... 110

หน้า

รูปที่ 4.25 ความเข้มข้นของแก๊ส ณ ตำแหน่งต่างๆ ของเครื่อง CFBC ถ่านหินผสม แกลบ 50:50 อากาศรวม (1200 ลิตรต่อนาที) 240.06 เปอร์เซ็นต์ในการเผาไหม้ สมบูรณ์ อากาศปฐมภูมิ 200 ลิตรต่อนาที ป้อนอากาศที่สกรูฟีดเดอร์ของแกลบ 200 ลิตรต่อนาที อากาศทุติยภูมิป้อนที่ตำแหน่ง 2.4 เมตร 800 ลิตรต่อนาที..... 111

รูปที่ 4.26 ความเข้มข้นของแก๊ส ณ ตำแหน่งต่างๆ ของเครื่อง CFBC ถ่านหิน 100 เปอร์เซ็นต์ อากาศรวม (400 ลิตรต่อนาที) 74.54 เปอร์เซ็นต์ในการเผาไหม้ สมบูรณ์ อากาศปฐมภูมิ 200 ลิตรต่อนาที ป้อนอากาศที่สกรูฟีดเดอร์ของแกลบ 200 ลิตรต่อนาที ไม่มีการป้อนอากาศทุติยภูมิ..... 111

รูปที่ 4.27 ความเข้มข้นของแก๊ส ณ ตำแหน่งต่างๆ ของเครื่อง CFBC ถ่านหินผสม แกลบ 50:50 อากาศรวม (400 ลิตรต่อนาที) 80.02 เปอร์เซ็นต์ในการเผาไหม้ สมบูรณ์ อากาศปฐมภูมิ 200 ลิตรต่อนาที ป้อนอากาศที่สกรูฟีดเดอร์ของแกลบ 200 ลิตรต่อนาที ไม่มีอากาศทุติยภูมิ..... 112

รูปที่ 4.28 ความเข้มข้นของแก๊ส ณ ตำแหน่งต่างๆ ของเครื่อง CFBC แกลบ 100 เปอร์เซ็นต์ อากาศรวม (400 ลิตรต่อนาที) 86.37 เปอร์เซ็นต์ในการเผาไหม้ สมบูรณ์ อากาศปฐมภูมิ 200 ลิตรต่อนาที ป้อนอากาศที่สกรูฟีดเดอร์ของแกลบ 200 ลิตรต่อนาที ไม่มีการป้อนอากาศทุติยภูมิ..... 112

รูปที่ 4.29 ความเข้มข้นของแก๊สไนโตรเจนออกไซด์ที่ตำแหน่ง 10 ก่อนที่จะปล่อยฟลูแก๊สออกสู่บรรยากาศในหลายๆ ภาวะการทดลอง โดยในแต่ละภาวะมีการเปรียบเทียบผลกระทบจากการเปิดหอดูดซับด้วย..... 114

รูปที่ 4.30 ความเข้มข้นของแก๊สไนตรัสออกไซด์ที่ตำแหน่ง 10 ก่อนที่จะปล่อยฟลูแก๊สออกสู่บรรยากาศในหลายๆ ภาวะการทดลอง โดยในแต่ละภาวะมีการเปรียบเทียบผลกระทบจากการเปิดหอดูดซับด้วย..... 115

รูปที่ 4.31 ความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ตำแหน่ง 10 ก่อนที่จะปล่อยฟลูแก๊สออกสู่บรรยากาศในหลายๆสภาวะการทดลอง โดยในแต่ละสภาวะมีการเปรียบเทียบผลกระทบจากการเปิดหอดูดซับด้วย..... 115

รูปที่ 4.32 ความเข้มข้นของแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ตำแหน่ง 10 ก่อนที่จะปล่อยฟลูแก๊สออกสู่บรรยากาศในหลายๆสภาวะการทดลอง โดยในแต่ละสภาวะมีการเปรียบเทียบผลกระทบจากการเปิดหอดูดซับด้วย..... 116

หน้า

รูปที่ 4.33 อัตราการปล่อยฟลูแก๊สชนิดต่างๆ ที่ตำแหน่ง 10 ที่การป้อนเชื้อเพลิงต่างๆ กัน ปริมาณอากาศรวมเท่ากันคือ 400 ลิตรต่อนาที แบ่งเป็นอากาศปฐมภูมิ 200 ลิตรต่อนาที และป้อนที่สกรูฟีดเดอร์ของแกลบ 200 ลิตรต่อนาที ไม่มีการป้อนอากาศทุติยภูมิ..... 117

รูปที่ 4.34 อัตราการปล่อยฟลูแก๊สชนิดต่างๆ ที่ตำแหน่ง 10 ถ่านหิน 100 เปอร์เซ็นต์ อากาศรวม (1400 ลิตรต่อนาที) 260.89 เปอร์เซ็นต์ในการเผาไหม้สมบูรณ์ อากาศปฐมภูมิ 200 ลิตรต่อนาที ป้อนอากาศที่สกรูฟีดเดอร์ของแกลบ 200 ลิตรต่อนาที อากาศทุติยภูมิ 1000 ลิตรต่อนาที..... 120

รูปที่ 4.35 อัตราการปล่อยฟลูแก๊สชนิดต่างๆ ที่ตำแหน่ง 10 ถ่านหินผสมแกลบ 50:50 อากาศรวม(1200 ลิตรต่อนาที) 240.06 เปอร์เซ็นต์ในการเผาไหม้สมบูรณ์ อากาศปฐมภูมิ 200 ลิตรต่อนาที ป้อนอากาศที่สกรูฟีดเดอร์ของแกลบ 200 ลิตรต่อนาที อากาศทุติยภูมิ 800 ลิตรต่อนาที..... 121

รูปที่ 4.36 อัตราการปล่อยฟลูแก๊สชนิดต่างๆ ที่ตำแหน่ง 10 ถ่านหิน 100 เปอร์เซ็นต์ อากาศรวม(643.96 ลิตรต่อนาที) 120 เปอร์เซ็นต์ ในการเผาไหม้สมบูรณ์ อากาศปฐมภูมิ 200 ลิตรต่อนาที ป้อนอากาศที่สกรูฟีดเดอร์ของแกลบ 100 ลิตรต่อนาที อากาศทุติยภูมิ 343.96 ลิตรต่อนาที..... 121

ปที่ 4.37 อัตราการปล่อยฟลูแก๊สชนิดต่างๆ ที่ตำแหน่ง 10 ถ่านหินผสมแกลบ 50:50 อากาศรวม(599.86 ลิตรต่อนาที) 120 เปอร์เซ็นต์ ในการเผาไหม้สมบูรณ์ อากาศปฐมภูมิ 200 ลิตรต่อนาที ป้อนอากาศที่สกรูฟีดเดอร์ของแกลบ 100 ลิตรต่อนาที อากาศทุติยภูมิ 299.86 ลิตรต่อนาที..... 122

รูปที่ 4.38 อัตราการปล่อยฟลูแก๊สชนิดต่างๆ ที่ตำแหน่ง 10 ถ่านหิน100 เปอร์เซ็นต์ อากาศรวม(536.63 ลิตรต่อนาที) 100 เปอร์เซ็นต์ ในการเผาไหม้สมบูรณ์ อากาศปฐมภูมิ 200 ลิตรต่อนาที ป้อนอากาศที่สกรูฟีดเดอร์ของแกลบ 100 ลิตรต่อนาที อากาศทุติยภูมิ 236.63 ลิตรต่อนาที..... 122

รูปที่ 4.39 อัตราการปล่อยฟลูแก๊สชนิดต่างๆ ที่ตำแหน่ง 10 ถ่านหินผสมแกลบ 50:50 อากาศรวม(499.88 ลิตรต่อนาที) 100 เปอร์เซ็นต์ในการเผาไหม้สมบูรณ์ อากาศปฐมภูมิ 200 ลิตรต่อนาที ป้อนอากาศที่สกรูฟีดเดอร์ของแกลบ 100 ลิตรต่อนาที อากาศทุติยภูมิ 199.88 ลิตรต่อนาที..... 123

รูปที่ 4.40 อัตราการปล่อยของแก๊สไนโตรเจนออกไซด์ที่ตำแหน่ง 10 ก่อนที่จะปล่อยฟลู

แก๊สออกสู่บรรยากาศในหลายๆ ภาวะการทดลอง โดยในแต่ละภาวะมีการเปรียบเทียบผลกระทบจากการเปิดหอดูดซับด้วย..... 125
รูปที่ 4.41 อัตราการปล่อยของแก๊สไนตรัสออกไซด์ที่ตำแหน่ง 10 ก่อนที่จะปล่อยฟลูแก๊สออกสู่บรรยากาศในหลายๆ ภาวะการทดลอง โดยในแต่ละภาวะมีการเปรียบเทียบผลกระทบจากการเปิดหอดูดซับด้วย..... 126
รูปที่ 4.42 อัตราการปล่อยออกไซด์ของไนโตรเจนที่ตำแหน่ง 10 ที่การป้อนถ่านหิน 100 เปอร์เซ็นต์ การป้อนปริมาณอากาศรวมต่างๆ กัน และมีการป้อนอากาศทุติยภูมิที่ตำแหน่ง 2.4 เมตร โดยในแต่ละสภาวะมีการเปรียบเทียบผลกระทบจากการเปิดหอดูดซับด้วย..... 129
รูปที่ 4.43 อุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆ ในไรเซอร์ที่การป้อนถ่านหิน 100 เปอร์เซ็นต์ การป้อนปริมาณอากาศรวมต่างๆ กัน และมีการป้อนอากาศทุติยภูมิที่ตำแหน่ง 2.4 เมตร..... 129
รูปที่ 4.44 อัตราการปล่อยออกไซด์ของไนโตรเจนที่ตำแหน่ง 10 ที่การป้อนถ่านหินผสมแกลบในอัตราส่วน 50:50 การป้อนปริมาณอากาศรวมต่างๆกัน และมีการป้อนอากาศทุติยภูมิที่ตำแหน่ง 2.4 เมตร โดยในแต่ละสภาวะมีการเปรียบเทียบผลกระทบจากการเปิดหอดูดซับด้วย..... 130
รูปที่ 4.45 อุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆ ในไรเซอร์ที่การป้อนถ่านหินผสมแกลบในอัตราส่วน 50:50 การป้อนปริมาณอากาศรวมต่างๆ กัน และมีการป้อนอากาศทุติยภูมิที่ตำแหน่ง 2.4 เมตร..... 130
รูปที่ 4.46 อัตราการปล่อยออกไซด์ของไนโตรเจนที่ตำแหน่ง 10 ที่การป้อนเชื้อเพลิงต่างกัน การป้อนปริมาณอากาศรวม 400 ลิตรต่อนาทีเท่ากัน โดยในแต่ละภาวะมีการเปรียบเทียบผลกระทบจากการเปิดหอดูดซับด้วย..... 131
รูปที่ 4.47 อุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆ ในไรเซอร์ ที่การป้อนเชื้อเพลิงต่างกัน การป้อนปริมาณอากาศรวม 400 ลิตรต่อนาทีเท่ากัน..... 132

คำอธิบายสัญลักษณ์

A	=	พื้นที่หน้าตัดของหอทดลอง (m^2)
d_p	=	เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคของแข็ง (μm)
d_p^*	=	ตัวแปรไร้หน่วยของเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคของแข็ง
D	=	เส้นผ่านศูนย์กลางภายในหอทดลอง (m)
F_D	=	แรงลากเนื่องจากการไหล (drag force, kgm/s^2)
g	=	ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก มีค่าเท่ากับ 9.8 m/s^2
$G_{S, Ch}$	=	อัตราการไหลของของแข็งออกจากเบดต่อพื้นที่หน้าตัดของหอทดลอง ณ ที่ความเร็วแก๊สเท่ากับความเร็วโชคกิ้ง (kg/m^2s)
L	=	ความสูงเบด (m)
L_{mf}	=	ความสูงของเบดขณะเกิดเริ่มเกิดฟลูอิไดเซชัน (m)
ΔP	=	ความดันตกคร่อม ($mm.H_2O$)
Re_p	=	ตัวแปรไร้หน่วยของ particle Reynolds number
U	=	ความเร็วอากาศภายในไรเซอร์
U_{ch}	=	ความเร็วโชคกิ้ง (m/s)
U_c	=	ความเร็วแก๊สขณะเกิดสภาวะ turbulent
U_{mb}	=	ความเร็วแก๊สที่ทำให้เริ่มมีฟองแก๊สเกิดขึ้นในเบด (m/s)
U_{mf}	=	ความเร็วแก๊สที่ทำให้เริ่มเกิดฟลูอิไดเซชัน (m/s)
U_{ms}	=	ความเร็วแก๊สที่ทำให้ฟองแก๊สเริ่มมีขนาดใหญ่เท่ากับหอทดลอง (m/s)
U_t	=	ความเร็วตกอิสระของเม็ดของแข็งในของไหลที่อยู่นิ่ง (terminal velocity, m/s)
$U_{t, spherical}$	=	ความเร็วตกอิสระของเม็ดของแข็งที่เป็นทรงกลมในของไหลที่อยู่นิ่ง (m/s)
U_t^*	=	ตัวแปรไร้หน่วยของความเร็วตกอิสระของเม็ดของแข็งในของไหลที่อยู่นิ่ง
ϕ	=	ตัวแปรไร้หน่วยของค่าความเป็นทรงกลม
ρ_g	=	ความหนาแน่นของแก๊ส (kg/m^3)
ρ_s	=	ความหนาแน่นของอนุภาคของแข็ง (kg/m^3)
μ	=	สัมประสิทธิ์ความหนืดของแก๊ส (g/cm.s)
ε	=	ตัวแปรไร้หน่วยของสัดส่วนของช่องว่าง
ε_{ch}	=	ตัวแปรไร้หน่วยของสัดส่วนของช่องว่าง ขณะที่แก๊สมีความเร็วเท่ากับ U_{ch}
ε_{mf}	=	ตัวแปรไร้หน่วยของสัดส่วนของช่องว่าง ขณะที่แก๊สมีความเร็วเท่ากับ U_{mf}
Q_g	=	อัตราเร็วของแก๊ส

d_p = เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค

θ_1 = (12π) = มุมที่อนุภาคอันในที่สุดจะตกกระทบผนัง

R_2 = รัศมีของเส้นโค้งการหมุนวนของแก๊สสกปรก (ทรงกระบอกไซโคลน)

R_1 = รัศมีของเส้นโค้งการหมุนวนของแก๊สสะอาด (ทรงกระบอกท่อทางออก)

N = ค่าคงที่ (0.5-0.7)

W = ความกว้างของช่องทางเข้าของแก๊สสกปรก