

ผลของชนิดขั้วมวลต่อการปล่อยไนโตรเจนออกไซด์และไนตรัสออกไซด์ในเตาเผาฟลูอิโดซ์เบดแบบหมุนเวียน



เรืออากาศเอกธีระชัย สายแก้ว

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2552

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EFFECT OF BIOMASS TYPE ON EMISSION OF NO_x AND N_2O
IN CIRCULATING FLUIDIZED BED COMBUSTOR



FLt.Lt. Theerachai Saykaw

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 2009

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์ ผลของชนิดชีวมวลต่อการปล่อยไนโตรเจนออกไซด์และไนตรัสออกไซด์ในเตาเผาฟลูอิดไบริดแบบหมุนเวียน

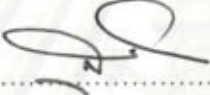
โดย เรืออากาศเอกธีระชัย สายแก้ว

สาขาวิชา เคมีเทคนิค

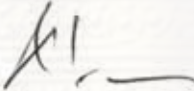
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก รองศาสตราจารย์ ดร. เลอสรวง เมฆสุด


อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ประพันธ์ คูชลธารา

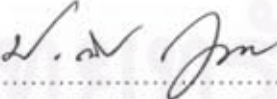
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต



..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. สุพจน์ ทารหนองบัว)


คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. ธราพงษ์ วิทิตสานต์)


..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร. เลอสรวง เมฆสุด)


..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ประพันธ์ คูชลธารา)



..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. พรพจน์ เปี่ยมสมบุญ)



..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร. ไสฝัส สุวรรณยืน)

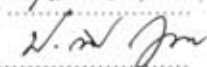
ธีระชัย สายแก้ว : ผลของชนิดชีวมวลต่อการปล่อยไนโตรเจนออกไซด์และไนตรัสออกไซด์ในเตาเผาฟลูอิดไคซ์เบดแบบหมุนเวียน. (EFFECTS OF BIOMASS TYPES ON EMISSION OF NO_x AND N₂O IN A CIRCULATING FLUIDIZED BED COMBUSTOR) อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : รศ. ดร.เลอสรวง เมฆสุด, อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม : ผศ. ดร. ประพันธ์ คูชลธารา, จำนวนหน้า 112 หน้า.

งานวิจัยนี้ศึกษาการปล่อยแก๊สไนโตรเจนออกไซด์และแก๊สไนตรัสออกไซด์จากการเผาไหม้ร่วมของถ่านหินและชีวมวลในเตาเผาฟลูอิดไคซ์เบดแบบหมุนเวียน โดยใช้ถ่านหินซับบิทูมินัสและชีวมวลชนิดต่างๆ ได้แก่ กะลาปาล์ม กะลามะพร้าว แกลบ และซีเลื้อย โรเตอร์หรือห้องเผาไหม้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 3 เมตร ตัวแปรที่ทำการศึกษาคือ ชนิดของชีวมวล อัตราส่วนของชีวมวลกับถ่านหิน จากร้อยละ 0 ถึง 70 โดยน้ำหนัก และตำแหน่งการป้อนอากาศทุติยภูมิ นอกจากนี้ได้ศึกษาผลของแคลเซียมออกไซด์ต่อการปล่อยแก๊สไนโตรเจนออกไซด์และแก๊สไนตรัสออกไซด์ จากผลการทดลองพบว่า การเผาไหม้ของถ่านหินกับกะลาปาล์มจะให้อุณหภูมิโดยเฉลี่ยตลอดความสูงของเตาสูงกว่าการเผาไหม้ของถ่านหินกับกะลามะพร้าว แกลบ และซีเลื้อย ซึ่งสอดคล้องกับค่าพลังงานความร้อนของกะลาปาล์ม การเพิ่มอัตราส่วนของชีวมวลกับถ่านหินจะส่งผลให้ความเข้มข้นของแก๊สไนโตรเจนออกไซด์และแก๊สไนตรัสออกไซด์มีปริมาณลดลง การป้อนอากาศทุติยภูมิที่ตำแหน่ง 1 เมตร จะทำให้การปล่อยแก๊สไนโตรเจนออกไซด์และแก๊สไนตรัสออกไซด์มีปริมาณมากที่สุด นอกจากนี้การเติมแคลเซียมออกไซด์ในขณะที่เผาไหม้จะส่งผลทำให้เกิดการปล่อยแก๊สไนโตรเจนออกไซด์เพิ่มมากขึ้นในขณะที่การปล่อยแก๊สไนตรัสออกไซด์มีปริมาณลดลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ผลจากการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าการเผาไหม้ร่วมของถ่านหินและชีวมวลส่งผลให้เกิดแก๊สไนโตรเจนออกไซด์มากกว่าแก๊สไนตรัสออกไซด์

ศูนย์วิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา เคมีเทคนิค ลายมือชื่อนิสิต 

สาขาวิชา เคมีเทคนิค ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก 

ปีการศึกษา 2552 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม 

497232933 : MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY

KEY WORD : CO-COMBUSTION / COAL / BIOMASS / NO_x / N₂O

THEERACHAI SAYKAW : EFFECTS OF BIOMASS TYPES ON EMISSION OF NO_x AND N₂O IN A CIRCULATING FLUIDIZED BED COMBUSTOR. THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. LURSUANG MEKASUT, Dr.Eng. THESIS CO-ADVISOR : ASST. PROF. PRAPAN KUCHONTHARA, Ph.D. 112 pp.

This research studied the emission of NO_x and N₂O in circulating fluidized bed combustor for co-combustion of coal and biomass. The sub-bituminous coal and various types of biomass; palm shell, coconut shell, rice husk and sawdust, were used in co-combustion. The riser had a diameter of 10 cm. and its height was 3.0 m. The influence of biomass types, various ratios of biomass to coal ranging from 0 to 70 wt % and secondary air position feeding were studied. Effect of CaO addition on the emission of NO_x and N₂O was also investigated. The results showed that the combustion of coal and palm shell gave higher temperature than the combustions of coconut shell, rice husk and sawdust, due to the heating values of this biomass. An increase in mass ratio of biomass and coal was observed to decrease concentration of NO_x and N₂O. Feeding secondary air position at 1 m caused the highest amount of NO_x and N₂O emission. Furthermore, it was found that the addition of CaO resulted in an increase in NO_x emission but a slightly decrease in N₂O emission. The results of this study suggested that co-combustion of coal and biomass could induce more NO_x emission compared to N₂O emission.

Department : Chemical Technology..... Student's Signature.....
Field of Study : Chemical Technology..... Advisor's Signature.....
Academic Year : 2009..... Co-advisor's Signature.....

กิตติกรรมประกาศ

ความสำเร็จด้วยดีของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เกิดขึ้นได้ด้วยความร่วมมือจากหลายๆ ฝ่าย โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ความอนุเคราะห์เป็นอย่างสูงจาก รองศาสตราจารย์ ดร. เลอสรวง เมฆสุด อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประพันธ์ คูชลธารา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ซึ่งท่านได้คอยให้ความช่วยเหลือเป็นห่วงเป็นใยในทุกๆ ด้าน รวมทั้งให้คำชี้แนะที่มีประโยชน์เกี่ยวกับงานวิจัย

งานวิจัยเรื่อง “ผลของชนิดชีวมวลต่อการปล่อยแก๊สไนโตรเจนออกไซด์และแก๊สไนตรัสออกไซด์จากการเผาไหม้ร่วมของถ่านหินและชีวมวล” สำเร็จลุล่วงได้ดีด้วยดีโดยได้รับการสนับสนุนเงินทุนจากโครงการพัฒนาบัณฑิตศึกษาและวิจัยด้านเชื้อเพลิง ภายใต้โครงการพัฒนาบัณฑิตศึกษาด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ศูนย์ปิโตรเลียมและเทคโนโลยีปิโตรเคมี ซึ่งผู้วิจัยต้องขอขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. ธราพงษ์ วิทิตสานต์ รองศาสตราจารย์ ดร. พรพจน์ เปี่ยมสมบุรณ์ และรองศาสตราจารย์ ดร.โสฬส สุวรรณยืน ที่กรุณาเป็นกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณ เจ้าหน้าที่ทุกท่านของภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย คุณสังข์ ชมชื่น และ นายสรวิชัย ฉิมสกุล ที่ให้ความช่วยเหลือในการสร้าง ซ่อมแซมเครื่องมือและอำนวยความสะดวกในการวิจัย

ขอขอบพระคุณผู้บังคับบัญชา จากศูนย์วิจัยวิทยาศาสตร์เทคโนโลยี การบินและอวกาศ กองทัพอากาศ และกองทัพอากาศ ที่ช่วยเหลือทุนการศึกษา และอนุญาตในการลาราชการไปศึกษาในระดับบัณฑิตศึกษา

ขอขอบพระคุณ คุณประจักษ์ ทรัพย์อุดมมาก ที่ให้คำแนะนำในทุกๆด้านเกี่ยวกับเครื่องมือ วิธีการทดลองและช่วยแก้ปัญหาต่างๆที่เกิดขึ้นในการทดลอง

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ญาติพี่น้อง ที่ให้ความช่วยเหลือ เป็นกำลังใจ และให้การสนับสนุนเป็นอย่างดีจนสำเร็จการศึกษา รวมทั้งขอขอบคุณพี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆ พร้อมทั้งชาวเคมีเทคนิคทุกท่านที่คอยให้กำลังใจ ช่วยเหลือประกอบกับคำแนะนำดีๆ ที่มอบให้เสมอมา

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญรูปภาพ.....	ฏ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ฑ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัย.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ทฤษฎีฟลูอิดไดเซชัน.....	4
2.1.1 นิยาม.....	4
2.1.2 ประเภทของฟลูอิดไดเซชัน.....	4
2.1.3 ความเร็วอากาศที่ใช้ฟลูอิดไดเซชันกับการขยายตัวของเบด.....	5
2.1.4 ลักษณะของแก๊สฟลูอิดไดเซชัน.....	6
2.1.5 ลักษณะของฟลูอิดไดซ์เบด.....	11
2.1.6 ฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียน.....	14
2.2 ทฤษฎีการเผาไหม้.....	16
2.2.1 การเผาไหม้ในระบบฟลูอิดไดซ์เบด.....	16
2.2.2 การเผาไหม้ในระบบฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียน.....	19
2.3 อากาศเกินพอ.....	19
2.4 ถ่านหิน.....	21
2.5 เชื้อเพลิงชีวมวล.....	22
2.6 แก๊สไนโตรเจนออกไซด์ (NO _x).....	24

	หน้า
2.7 แก๊สไนโตรัสออกไซด์ (N ₂ O).....	28
2.8 สารประกอบคาร์บอนเนต.....	30
2.9 การควบคุมมลพิษ.....	31
2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	34
บทที่ 3 เครื่องมือและวิธีการทดลอง.....	39
3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์การทดลอง.....	39
3.1.1 ท่อไรเซอร์ (Riser).....	40
3.1.2 ไซโคลน (Cyclone).....	41
3.1.3 ท่อป้อนกลับ (Downcomer).....	42
3.1.4 แอลวาล์ว (L-valve).....	43
3.1.5 อุปกรณ์ป้อนอากาศ.....	43
3.1.6 อุปกรณ์วัดอัตราการไหลของอากาศ.....	45
3.1.7 ระบบป้อนเชื้อเพลิง.....	47
3.1.8 หัวเผาแก๊สหุงต้ม.....	49
3.1.9 กระจกทนความร้อน.....	49
3.1.10 Probe สำหรับอุณหภูมิและวัดองค์ประกอบของแก๊ส.....	50
3.1.11 ระบบดึงแก๊สออกจากไรเซอร์.....	50
3.1.12 เครื่องวัดฟลูแก๊ส (Flu gas analyzer).....	52
3.2 วิธีการทดลอง.....	53
3.2.1 การเตรียมเชื้อเพลิงและทราย.....	53
3.2.2 การจุดเตาและดำเนินการทดลอง.....	53
3.2.3 การปิดเตาเผา.....	55
บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	56
4.1 สมบัติของเชื้อเพลิง.....	56
4.1.1 การวิเคราะห์โดยวิธีประมาณ (proximate analysis).....	56
4.1.2 การวิเคราะห์โดยวิธีแยกธาตุ (ultimate analysis).....	57
4.1.3 การวิเคราะห์หาค่าพลังงานร้อนของถ่านหินและชีวมวล.....	58
4.1.4 การวิเคราะห์หาปริมาณสารประกอบออกไซด์ของถ่าน.....	59
4.2 การเปรียบเทียบสกรูพีดเดอร์ และ inverter.....	60

4.3 การหาปริมาณอากาศปฐมภูมิต่ำสุดที่ทำให้ทรายในไรเซอร์เกิดการ ฟลูอิดซ์และหมุนเวียน.....	66
4.4 การหาขนาดของเกลบและปริมาณอากาศที่เหมาะสมสำหรับป้อน เข้าในสกรูพีดเดอร์สำหรับป้อนเกลบเพื่อไม่ให้เปลวไฟและความร้อน ไหลย้อนกลับไปไหม้เกลบในถังเก็บเกลบ.....	66
4.5 การหาปริมาณเชื้อเพลิงและปริมาณอากาศในการเผาไหม้ในระบบ ฟลูอิดซ์เบดแบบหมุนเวียน.....	67
4.6 ศึกษาผลของชนิดชีวมวลเผาไหม้ร่วมกับถ่านหิน.....	68
4.6.1 ศึกษาผลของชนิดของชีวมวลเผาไหม้ร่วมกับถ่านหิน ที่มีผลต่ออุณหภูมิในไรเซอร์.....	68
4.6.2 ศึกษาผลของชนิดของชีวมวลเผาไหม้ร่วมกับถ่านหิน ที่มีผลต่อการปล่อยแก๊สไนโตรเจนออกไซด์และไนตรัสออกไซด์.....	73
4.7 ศึกษาผลของตำแหน่งการป้อนอากาศทุติยภูมิ.....	77
4.7.1 ศึกษาผลของตำแหน่งการป้อนอากาศทุติยภูมิ ที่มีผลต่ออุณหภูมิในไรเซอร์.....	77
4.7.2 ศึกษาผลของตำแหน่งการป้อนอากาศทุติยภูมิ ที่มีผลต่อการปล่อยแก๊สไนโตรเจนออกไซด์และไนตรัสออกไซด์...	81
4.8 ศึกษาผลของแคลเซียมออกไซด์.....	84
4.8.1 ศึกษาผลของแคลเซียมออกไซด์ที่มีผลต่ออุณหภูมิในไรเซอร์.....	84
4.8.2 ศึกษาผลของแคลเซียมออกไซด์ ที่มีผลต่อการปล่อยแก๊สไนโตรเจนออกไซด์และไนตรัสออกไซด์.....	87
4.9 การเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานของการปล่อยแก๊สไนโตรเจนออกไซด์.....	90
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	91
5.1 อุณหภูมิของเตาเผา.....	91
5.2 องค์ประกอบของฟลูแก๊ส.....	91
5.3 ข้อเสนอแนะ.....	92
รายการอ้างอิง.....	93
ภาคผนวก.....	96
ภาคผนวก ก วิธีวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของเชื้อเพลิง.....	97

ภาคผนวก ข วิธีกรณาคำนวณ.....	99
ภาคผนวก ค ตารางบันทึกผลการทดลอง.....	102
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	112



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ปริมาณอากาศเกินพอที่มักใช้กับระบบการเผาไหม้เชื้อเพลิง.....	20
ตารางที่ 2.2 สมบัติของถ่านหิน เปรียบเทียบกับไม้และพีต.....	22
ตารางที่ 2.3 ตารางแสดงศักยภาพของแก๊สเรือนกระจก เปรียบเทียบโดย 1 กิโลกรัมของ แก๊สเรือนกระจกต่อ 1 กิโลกรัม ของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์.....	30
ตารางที่ 2.4 ตารางแสดงมาตรฐานของการปล่อยแก๊สพิษในประเทศไทย.....	34
ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์โดยวิธีวิเคราะห์แบบประมาณ (proximate analysis).....	56
ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์โดยวิธีวิเคราะห์แยกธาตุ (ultimate analysis).....	57
ตารางที่ 4.3 ค่าพลังความร้อนของถ่านหินและชีวมวล.....	58
ตารางที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์สารประกอบออกไซด์ของถ่าน.....	59
ตารางที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของ inverter กับอัตราการป้อนถ่านหินผ่านสกรูพีดเดอร์.....	60
ตารางที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของ inverter กับอัตราการป้อนกะลาปาล์มผ่านสกรูพีดเดอร์.....	61
ตารางที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของ inverter กับอัตราการป้อนกะลามะพร้าวผ่านสกรูพีดเดอร์.....	62
ตารางที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของ inverter กับอัตราการป้อนแกลบผ่านสกรูพีดเดอร์.....	63
ตารางที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของ inverter กับอัตราการป้อนขี้เลื่อยผ่านสกรูพีดเดอร์.....	64
ตารางที่ 4.10 ปริมาณอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ถ่านหินและชีวมวล โดยคิดอากาศปริมาณอากาศที่เผาไหม้สมบูรณ์ร้อยละ 100.....	68
ตารางที่ 4.11 อุณหภูมิเฉลี่ยในโรเตอร์จากการเผาไหม้ ถ่านหิน:ชีวมวล 100:00และถ่านหิน:ชีวมวล 50:50.....	72

สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วอากาศที่ใช้ฟลูอิโดเซชัน กับการขยายตัวของเบด.....	6
รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันลดกับความเร็ว ในช่วงการเกิดเบดแบบปั่นป่วน.....	9
รูปที่ 2.3 แสดงการเกิดฟลูอิโดเซชันของเบดที่มีของไหลเป็นของเหลวและแก๊ส.....	12
รูปที่ 2.4 เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิโดซ์เบด.....	13
รูปที่ 2.5 ส่วนประกอบของระบบฟลูอิโดซ์เบดแบบหมุนเวียน.....	14
รูปที่ 2.6 เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิโดซ์เบดแบบหมุนเวียน.....	15
รูปที่ 2.7 ความสัมพันธ์ระหว่าง ร้อยละคาร์บอนไดออกไซด์ และร้อยละอากาศเกินพอ.....	21
รูปที่ 2.8 วัฏจักรคาร์บอนไดออกไซด์ (CO ₂ cycle).....	24
รูปที่ 2.9 การเกิดไนโตรเจนออกไซด์ที่อุณหภูมิต่างๆ.....	25
รูปที่ 3.1 โครงร่างเตาเผาฟลูอิโดซ์เบดแบบหมุนเวียนที่ใช้ในงานวิจัย.....	39
รูปที่ 3.2 เตาเผาฟลูอิโดซ์เบดแบบหมุนเวียนที่ใช้ในงานวิจัย.....	40
รูปที่ 3.3 ไซโคลน (cyclone).....	41
รูปที่ 3.4 ท่อป้อนกลับ.....	42
รูปที่ 3.5 แอลวาล์ว (วาล์วปีกผีเสื้อ).....	43
รูปที่ 3.6 เครื่องเป่าอากาศ (air blower).....	44
รูปที่ 3.7 เครื่องอัดอากาศ (air compressor).....	45
รูปที่ 3.8 วาล์วควบคุมแบบผีเสื้อและ orifice.....	45
รูปที่ 3.9 หน้าจอแสดงความเร็วอากาศปฐมภูมิแบบดิจิตอล.....	46
รูปที่ 3.10 Rotameter.....	47
รูปที่ 3.11 ระบบป้อนเชื้อเพลิง (fuel feeder system).....	48
รูปที่ 3.12 หัวเผาและกระจกมองเปลวไฟ.....	49
รูปที่ 3.13 กระจกสำหรับดูภายในห้องเผาไหม้.....	49
รูปที่ 3.14 probe สำหรับวัดอุณหภูมิและองค์ประกอบของแก๊ส.....	50
รูปที่ 3.15 แผงวงจรวาล์ว.....	51
รูปที่ 3.16 บั๊มดูดจ่ายของไหล (peristaltic pump).....	51
รูปที่ 3.17 เครื่องวิเคราะห์ห้องค์ประกอบของฟลูแก๊ส (flue gas analyzer).....	52

รูปที่ 3.18 gas chromatography.....	53
รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของ inverter กับอัตราการป้อนถ่านหินผ่านสกรูพีดเดอร์.....	61
รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของ inverter กับอัตราการกะลาปาล์มผ่านสกรูพีดเดอร์.....	62
รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของ inverter กับอัตราการป้อนกะลามะพร้าวผ่านสกรูพีดเดอร์.....	63
รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของ inverter กับอัตราการป้อนแกลบผ่านสกรูพีดเดอร์.....	64
รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของ inverter กับอัตราการป้อนขี้เลื่อยผ่านสกรูพีดเดอร์.....	65
รูปที่ 4.6 อุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆ ในโรเตอร์จากการเผาไหม้ ถ่านหิน:กะลาปาล์มอัตราส่วน 70:30 , 50:50 และ30:70.....	69
รูปที่ 4.7 อุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆ ในโรเตอร์จากการเผาไหม้ ถ่านหิน:กะลามะพร้าวอัตราส่วน 70:30 , 50:50 และ30:70.....	69
รูปที่ 4.8 อุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆ ในโรเตอร์จากการเผาไหม้ ถ่านหิน:แกลบอัตราส่วน 70:30 , 50:50 และ30:70.....	70
รูปที่ 4.9 อุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆ ในโรเตอร์จากการเผาไหม้ ถ่านหิน:ขี้เลื่อยอัตราส่วน 70:30 , 50:50 และ30:70.....	70
รูปที่ 4.10 อุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆ ในโรเตอร์จากการเผาไหม้ ถ่านหิน:ชีวมวล 100:00และถ่านหิน:ชีวมวล 50:50.....	72
รูปที่ 4.11 ความเข้มข้นของแก๊สไนโตรเจนออกไซด์จากการเผาไหม้ถ่านหินร่วมกับชีวมวล 4 ชนิด ถ่านหิน:ชีวมวล 100:00 ถ่านหิน:ชีวมวล 70:30 ถ่านหิน:ชีวมวล 50:50 ถ่านหิน:ชีวมวล 70:30.....	74
รูปที่ 4.12 ความเข้มข้นของแก๊สไนตรัสออกไซด์จากการเผาไหม้ถ่านหินร่วมกับชีวมวล 4 ชนิด ถ่านหิน:ชีวมวล 100:00 ถ่านหิน:ชีวมวล 70:30 ถ่านหิน:ชีวมวล 50:50 ถ่านหิน:ชีวมวล 70:30.....	76
รูปที่ 4.13 อุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆ ในโรเตอร์จากการเผาไหม้ถ่านหินเพียงอย่างเดียว กับการป้อนอากาศทุติยภูมิที่ตำแหน่ง 1 เมตร , 2 เมตร , 2.4 เมตร.....	78

รูปที่ 4.14 อุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆ ในไรเซอร์จากการเผาไหม้ ถ่านหินร่วมกับกะลาปาล์ม อัตราส่วน 50:50 กับการป้อนอากาศทุติยภูมิ ที่ตำแหน่ง 1 เมตร , 2 เมตรและ2.4 เมตร.....	78
รูปที่ 4.15 อุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆ ในไรเซอร์จากการเผาไหม้ ถ่านหินร่วมกับกะลามะพร้าว อัตราส่วน 50:50 กับการป้อนอากาศทุติยภูมิ ที่ตำแหน่ง 1 เมตร , 2 เมตรและ2.4 เมตร.....	79
รูปที่ 4.16 อุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆ ในไรเซอร์จากการเผาไหม้ ถ่านหินร่วมกับแกลบ อัตราส่วน 50:50 กับการป้อนอากาศทุติยภูมิ ที่ตำแหน่ง 1 เมตร , 2 เมตรและ2.4 เมตร.....	79
รูปที่ 4.17 อุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆ ในไรเซอร์จากการเผาไหม้ ถ่านหินร่วมกับขี้เลื่อย อัตราส่วน 50:50 กับการป้อนอากาศทุติยภูมิ ที่ตำแหน่ง 1 เมตร , 2 เมตรและ2.4 เมตร.....	80
รูปที่ 4.18 ความเข้มข้นของแก๊สไนโตรเจนออกไซด์จากการเผาไหม้ถ่านหินเพียงอย่างเดียว และ ถ่านหินร่วมกับซีเมนต์ อัตราส่วน 50:50 กับการป้อนอากาศทุติยภูมิ ที่ตำแหน่ง 1 เมตร , 2 เมตร , 2.4 เมตร.....	82
รูปที่ 4.19 ความเข้มข้นของแก๊สไนตรัสออกไซด์จากการเผาไหม้ถ่านหินเพียงอย่างเดียว และ ถ่านหินร่วมกับซีเมนต์ อัตราส่วน 50:50 กับการป้อนอากาศทุติยภูมิ ที่ตำแหน่ง 1 เมตร , 2 เมตร , 2.4 เมตร.....	83
รูปที่ 4.20 อุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆ ในไรเซอร์จากการเผาไหม้ ถ่านหินร่วมกับกะลาปาล์ม อัตราส่วน 50:50 กับการป้อนหินปูน ด้วยอัตราส่วน Ca/S=0 , Ca/S=2 และCa/S=3.....	84
รูปที่ 4.21 อุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆ ในไรเซอร์จากการเผาไหม้ ถ่านหินร่วมกับกะลามะพร้าว อัตราส่วน 50:50 กับการป้อนหินปูน ด้วยอัตราส่วน Ca/S=0 , Ca/S=2 และCa/S=3.....	85
รูปที่ 4.22 อุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆ ในไรเซอร์จากการเผาไหม้ ถ่านหินร่วมกับแกลบ อัตราส่วน 50:50 กับการป้อนหินปูน ด้วยอัตราส่วน Ca/S=0 , Ca/S=2 และCa/S=3.....	85

- รูปที่ 4.23 อุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆ ในไรเซอร์จากการเผาไหม้
 ถ่านหินร่วมกับซีลี้อย อัตราส่วน 50:50 กับการบ่อนหินปูน
 ด้วยอัตราส่วน Ca/S=0 , Ca/S=2 และCa/S=3..... 86
- รูปที่ 4.24 ความเข้มข้นของแก๊สไนโตรเจนออกไซด์จากการเผาไหม้ถ่านหินเพียงอย่างเดียว
 และ ถ่านหินร่วมกับซีมวล อัตราส่วน 50:50 กับการบ่อนหินปูน
 ด้วยอัตราส่วน Ca/S=0 , Ca/S=2 และCa/S=3..... 87
- รูปที่ 4.25 ความเข้มข้นของแก๊สไนตรัสออกไซด์จากการเผาไหม้ถ่านหินเพียงอย่างเดียว
 และ ถ่านหินร่วมกับซีมวล อัตราส่วน 50:50 กับการบ่อนหินปูน
 ด้วยอัตราส่วน Ca/S=0 , Ca/S=2 และCa/S=3..... 89



ศูนย์วิทยทรัพยากร
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

คำอธิบายสัญลักษณ์

A	=	พื้นที่หน้าตัดของหลอด (m ²)
d_p	=	เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคของแข็ง (μm)
d_p^*	=	ตัวแปรไร้หน่วยของเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคของแข็ง
D	=	เส้นผ่านศูนย์กลางภายในหลอด (m)
F_D	=	แรงลากเนื่องจากการไหล (drag force, kgm/s ²)
g	=	ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก มีค่าเท่ากับ 9.8 m/s ²
$G_{s, Ch}$	=	อัตราการไหลของของแข็งออกจากเบดต่อพื้นที่หน้าตัดของหลอด ณ ที่ ความเร็วแก๊สเท่ากับความเร็วไซคิ่ง (kg/m ² s)
L	=	ความสูงเบด (m)
L_{mf}	=	ความสูงของเบดขณะเกิดเริ่มเกิดฟลูอิดไอเซชัน (m)
ΔP	=	ความดันตกคร่อม (mm.H ₂ O)
Re_p	=	ตัวแปรไร้หน่วยของ particle Reynolds number
U	=	ความเร็วอากาศภายในไอเซอร์
U_{ch}	=	ความเร็วไซคิ่ง (m/s)
U_c	=	ความเร็วแก๊สขณะเกิดสภาวะ turbulent
U_{mb}	=	ความเร็วแก๊สที่ทำให้เริ่มมีฟองแก๊สเกิดขึ้นในเบด (m/s)
U_{mf}	=	ความเร็วแก๊สที่ทำให้เริ่มเกิดฟลูอิดไอเซชัน (m/s)
U_{ms}	=	ความเร็วแก๊สที่ทำให้ฟองแก๊สเริ่มมีขนาดใหญ่เท่ากับหลอด (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 = รัศมีของเส้นโค้งการหมุนวนของแก๊สสปริง (ทรงกระบอกไซโคลน)
- R_1 = รัศมีของเส้นโค้งการหมุนวนของแก๊สสะอาด (ทรงกระบอกท่อทางออก)
- N = ค่าคงที่ (0.5-0.7)
- W = ความกว้างของช่องทางเข้าของแก๊สสปริง



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

เตาเผาฟลูอิโดซ์เบดแบบหมุนเวียน(CFBC) ถูกนำมาใช้งานอย่างกว้างขวางในกระบวนการอุตสาหกรรมเพื่อใช้ในการผลิตไอน้ำและกระแสไฟฟ้า ซึ่งเป็นเตาเผาที่มีประสิทธิภาพสูง โดยใช้เทคนิคฟลูอิโดซ์เซชัน

ฟลูอิโดซ์เซชัน เป็นเทคนิคที่ทำให้อนุภาคของของแข็งที่บรรจุในคอลัมน์ที่เรียกว่าเบด (bed) เกิดการเคลื่อนที่ลอยตัวอย่างอิสระ โดยอาศัยความเร็วของของไหลที่ผ่านแผ่นกระจายทางด้านล่าง อนุภาคของของแข็งเหล่านี้จะเกิดการผสมผสานอย่างสม่ำเสมอเป็นเนื้อเดียวกันตลอด สามารถแลกเปลี่ยนมวลสารและพลังงานได้เป็นอย่างดี

ระบบฟลูอิโดซ์เบดแบบหมุนเวียน เป็นระบบซึ่งอาศัยเทคนิคทางฟลูอิโดซ์เซชันมาประยุกต์ใช้งาน ระบบจะประกอบไปด้วยส่วนที่สำคัญ 3 ส่วนคือ

- ท่อไรเซอร์ เป็นส่วนที่ทำงานภายใต้ภาวะการเกิดฟลูอิโดซ์เบดที่ความเร็วสูง (fast fluidized bed)
- Gas-solid separator เช่น cyclone ทำหน้าที่ดักจับเม็ดของแข็งที่หลุดออกมาจากท่อไรเซอร์
- ท่อป้อนกลับ (downcomer หรือ return leg) ทำหน้าที่ป้อนเม็ดของของแข็งที่ได้จาก cyclone กลับไปยังด้านล่างของท่อไรเซอร์ เพื่อให้เกิดการหมุนเวียนของเม็ดของแข็ง

การนำฟลูอิโดซ์เบดแบบหมุนเวียนมาใช้ในการเผาไหม้ อุณหภูมิการเผาไหม้อยู่ระหว่าง 700-900 องศาเซลเซียส ทำให้อัตราการปล่อยไนโตรเจนออกไซด์ต่ำ และสามารถเติมสารดูดซับซัลเฟอร์ออกไซด์ในเบด ทำให้อัตราการปล่อยแก๊สมลพิษต่ำ อนุภาคของแข็งจะหมุนเวียนโดยมีกระแสแก๊สหมุนวนพัดผ่านตลอดเวลา ทำให้เกิดการถ่ายโอนมวลและความร้อนที่พื้นผิวอย่างดียิ่ง มีผลทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงมากและสม่ำเสมอตลอดทั้งช่วงความสูงและพื้นที่หน้าตัดของเบด เป็นการเผาไหม้ที่อาจใช้เชื้อเพลิงที่มีคุณภาพแตกต่างกันมากได้ จึงมีการนำไปใช้ในการเผาไหม้เชื้อเพลิงหลายชนิดอย่างเช่น ถ่านหิน ขยะชุมชน และชีวมวล

ชีวมวลเป็นพลังงานที่สำคัญถือว่าเป็นพลังงานหมุนเวียนซึ่งใช้แล้วไม่หมดไปผลิตทดแทนกันได้ ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรมมีกำลังการผลิตชีวมวลได้ในปริมาณมาก แต่ยังมี

ชีวมวลจำนวนมากที่ยังไม่ถูกนำมาใช้ประโยชน์ ถ้าหากสามารถนำมาแปรรูปเป็นพลังงานทดแทน ก็จะช่วยลดการใช้พลังงานฟอสซิลลงได้ การนำชีวมวลมาใช้เป็นพลังงานจะช่วยลดการปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สู่บรรยากาศ แต่ก็ยังพบปัญหาการปล่อยแก๊สไนโตรเจนออกไซด์และแก๊สไนตรัสออกไซด์ ซึ่งแก๊สไนโตรเจนออกไซด์จะเป็นมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม และ แก๊สไนตรัสออกไซด์ จะทำให้เกิดสภาวะโลกร้อน

งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นที่จะศึกษาการปลดปล่อยแก๊สไนโตรเจนออกไซด์และแก๊สไนตรัสออกไซด์ จากการเผาไหม้ร่วมระหว่างถ่านหินและชีวมวลในเตาเผาฟลูอิดไคซ์เบดแบบหมุนเวียน โดยจะศึกษาผลชนิดของชีวมวล และแคลเซียมออกไซด์

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. ศึกษาผลของชนิดชีวมวลต่อการปล่อยแก๊สไนโตรเจนออกไซด์(NO_x) และไนตรัสออกไซด์(N_2O) จากการเผาไหม้ร่วมกับถ่านหิน ในเตาเผาฟลูอิดไคซ์เบดแบบหมุนเวียน
2. ศึกษาผลของแคลเซียมออกไซด์(CaO) ต่อการปล่อยแก๊สไนโตรเจนออกไซด์ และไนตรัสออกไซด์

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2. จัดหาถ่านหิน ชีวมวล ทRAY และหินปูน
3. วิเคราะห์คุณภาพถ่านหินและชีวมวลโดยประมาณ (proximate analysis) และแบบแยกธาตุ (ultimate analysis)
4. บดถ่านหินและชีวมวล คัดขนาดของถ่านหิน ชีวมวลและทRAY
5. ติดตั้งอุปกรณ์วัดค่าต่างๆ และเครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบของฟลูแก๊ส บนเครื่องเผาไหม้ฟลูอิดไคซ์เบดแบบหมุนเวียน
6. เผาถ่านหินและชีวมวลในเครื่องฟลูอิดไคซ์เบดแบบหมุนเวียนและบันทึกผล การทดลอง
7. เผาถ่านหินผสมปูนขาวกับชีวมวลในเครื่องฟลูอิดไคซ์เบดแบบหมุนเวียนและบันทึกผล การทดลอง
8. วิจาร์ณ สรุปผล และเขียนวิทยานิพนธ์

1.4 ขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัย

1. ศึกษาข้อมูลและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2. จัดหาถ่านหิน ชีวมวล ทყาย และหินปูน
3. การวิเคราะห์คุณภาพของถ่านหินและชีวมวล
 - นำถ่านหินและชีวมวลไปวิเคราะห์หาคุณภาพโดยประมาณและโดยแยกธาตุ
4. การเตรียมถ่านหิน ชีวมวล ทყาย และหินปูนขาว
 - บดถ่านหินและชีวมวลให้ได้ขนาดประมาณ 1200 μm
 - คัดขนาดของถ่านหิน ชีวมวลและทყาย ด้วยเครื่องคัดแยกขนาด
 - ผสมหินปูนกับถ่านหินในอัตราส่วนที่คำนวณได้
5. ติดตั้งอุปกรณ์วัดค่าอุณหภูมิ ความดัน และ เครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบของฟลูแก๊สบนเครื่องเผาไหม้ฟลูอิโดซ์แบบหมุนเวียน
6. ทำการเผาไหม้ร่วมระหว่างชีวมวลและถ่านหินในเครื่องฟลูอิโดซ์เบดแบบหมุนเวียน โดยศึกษาตัวแปรต่างๆ ดังนี้
 - อัตราส่วนของถ่านหินต่อชีวมวล
 - ตำแหน่งของการป้อนอากาศทุติยภูมิ
 - ผลของแคลเซียมออกไซด์
7. วัดอุณหภูมิ และ วิเคราะห์ปริมาณแก๊ส NO_x และ N_2O พร้อมทั้งบันทึกผล
8. วิจัยรูปผล และเขียนวิทยานิพนธ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

1. สามารถนำชีวมวลมาเผาไหม้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ
2. ทราบถึงผลชนิดของชีวมวล ในการเผาไหม้ในเตาเผาฟลูอิโดซ์เบดแบบหมุนเวียน ต่อการปล่อยไนโตรเจนออกไซด์ และไนตรัสออกไซด์
3. ทราบถึงผลของแคลเซียมออกไซด์ ต่อการปล่อยไนโตรเจนออกไซด์ และไนตรัสออกไซด์

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีฟลูอิดิเดชัน (Fluidization theory)

2.1.1 นิยาม

ฟลูอิดิเดชัน (Fluidization) เป็นนิยามที่ใช้อธิบายกระบวนการที่ทำให้ของแข็งซึ่งมีรูปร่างลักษณะเป็นเม็ดหรือชิ้นเมื่อสัมผัสกับของไหลแล้วเม็ดของแข็งเหล่านี้จะมีสมบัติคล้ายของไหล เมื่อนำเม็ดของแข็งไปไว้บนตะแกรงหรือตัวกระจายในหอตดลองแล้วให้ของไหลที่เป็นแก๊สหรือของเหลวไหลผ่านขึ้นไปจากด้านล่างของตะแกรงที่รองรับเม็ดของแข็งและไหลผ่านชั้นเม็ดของแข็งออกทางส่วนบนของหอตดลอง เมื่อเพิ่มความเร็วของไหลขึ้นเรื่อยๆ ในที่สุดจะเห็นเม็ดของแข็งขยับตัวและลอยตัวไปพร้อมกับของไหลและแยกตัวเป็นอิสระไม่เกาะติดกัน พฤติกรรมของเม็ดของแข็งในลักษณะนี้จะมีสมบัติคล้ายของไหล จึงเรียกของแข็งในสภาวะนี้ว่า ฟลูอิดิเดชัน (Mooson, 1992; สมศักดิ์ คำรงค์เลิศ, 2528)

2.1.2 ประเภทของฟลูอิดิเดชัน

ฟลูอิดิเดชัน แบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ

1. ฟลูอิดิเดชันสองสถานะ (Two-phase fluidization) หมายความว่าในหอตดลองหรือเบดที่ใช้งานประกอบด้วยสองสถานะ คือ ของแข็งกับของไหล โดยที่ของไหลจะเป็นแก๊สหรือของเหลวอย่างใดก็ได้ ดังนั้นฟลูอิดิเดชันสองสถานะจึงแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ แก๊สฟลูอิดิเดชัน (Gas fluidization) และฟลูอิดิเดชันของเหลว (Liquid fluidization)

ในระบบ 2 เฟส อนุภาคกับแก๊ส สามารถแบ่งได้ 3 แบบ คือ

- Co-current upward flow เป็นการเคลื่อนที่ของอนุภาคและแก๊สจากด้านล่างสู่ด้านบนในทิศทางเดียวกัน

- Co-current downward flow เป็นการเคลื่อนที่ของอนุภาคและแก๊สจากด้านบนสู่ด้านล่างในทิศทางเดียวกัน

- Counter-current flow เป็นการเคลื่อนที่สวนทางกันกันของอนุภาคและแก๊ส

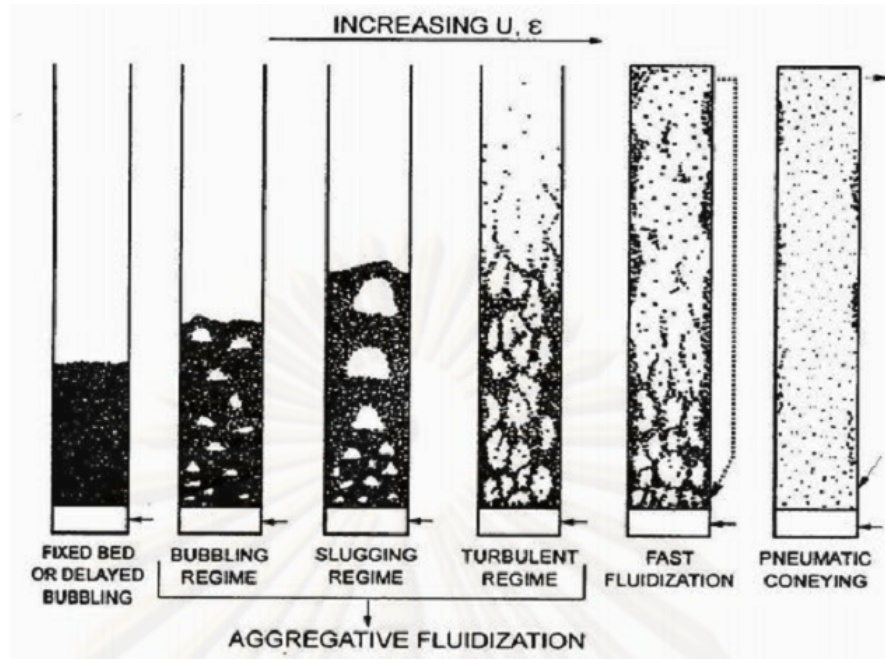
2. ฟลูอิดิเดชันสามสถานะ (Three-phase fluidization) หมายความว่าภายในหอตดลองหรือเบดจะประกอบด้วยของสามสถานะอยู่พร้อม คือ ของแข็ง ของเหลว และแก๊ส สำหรับฟลูอิดิเดชันสามสถานะนี้เป็นกระบวนการที่พัฒนาไปจากฟลูอิดิเดชันสองสถานะ

2.1.3 ความเร็วอากาศที่ใช้ฟลูอิดาเซชันกับการขยายตัวของเบด

เม็ดของแข็งในเบดเป็นการบรรจุแบบไม่เป็นระเบียบ เม็ดของแข็งจะก้ำกัวยกันอยู่ ทำให้เกิดช่องว่างมากกว่าช่องว่างต่ำสุดที่จะเป็น เมื่อเพิ่มความเร็วของไหลที่ละน้อยของไหลจะไหลผ่านช่องว่างของเม็ดของแข็ง ขณะเดียวกันกับความดันลดของเบดก็จะพัฒนาไปพร้อมๆกัน ช่วงนี้เรียกว่า เบดนิ่ง หรือ Packed bed หลังจากนั้นถ้าเพิ่มความเร็วของของไหลในระดับหนึ่ง ความเร็วของของไหลจะใกล้กับความเร็วต่ำสุดที่เกิดฟลูอิดาเซชัน เม็ดของแข็งจะเริ่มขยับตัว จัดตัวเองให้เป็นระเบียบและเกิดการสั่นสะเทือน ช่วงนี้เรียกว่า Expanded bed ภายในเบดความดันลดขณะนั้นจะมากที่สุดหลังจากนั้นเม็ดของแข็งก็จะแตกตัวเป็นอิสระออกจากกันและเรียงตัวเรียบ ต้อยแล้วความดันลดของเบดจะลดลงเล็กน้อยและจะไม่พัฒนาอีกต่อไปแม้ว่าการเพิ่มความเร็วของของไหลขึ้น เบดช่วงนี้เรียกว่า จุดความเร็วต่ำสุดที่เกิดฟลูอิดาเซชันเบด สาเหตุที่ความดันลดของเบดช่วงแรกสูงกว่าความดันลดในขณะเบดเป็นระเบียบเพราะช่องว่างภายในเบดไม่เป็นระเบียบ การไหลเกิดการสูญเสียพลังงานมากกว่าปกติ

เมื่อความเร็วของแก๊สเพิ่มมากขึ้นจะเกิดฟองอากาศขนาดเล็กจำนวนมากทางด้านล่างของเบดต้นอนุภาคภายในเบดให้ลอยตัวสูงขึ้น และเกิดการผสมกันเป็นเนื้อเดียวระหว่างฟองอากาศและทั่วทั้งเบด ฟองอากาศจะรวมตัวกันมีขนาดใหญ่ขึ้นตามความสูงของเบด และแตกตัวออกที่ผิวด้านบนของเบด เรียกความเร็วนี้ว่า ความเร็วเริ่มต้นของการเกิดฟอง และเรียกเบดในขณะนี้ว่า Bubbling bed เมื่อความเร็วของแก๊สเพิ่มมากขึ้นอีก ฟองอากาศจะมีขนาดใหญ่มากขึ้นจนกระทั่งมีขนาดเท่ากับขนาดของคอลัมน์ อนุภาคและฟองอากาศไม่สามารถสัมผัสกันได้อย่างทั่วถึง เรียกว่า Slugging bed

เมื่อความเร็วของแก๊สสูงขึ้นอีก อนุภาคและฟองอากาศจะเกิดการเคลื่อนที่อย่างปั่นป่วนทั่วทั้งเบด จนไม่สามารถสังเกตเห็นผิวด้านบนของเบดได้ เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า Turbulent อนุภาคจะหลุดออกจากเบดเมื่อความเร็วของแก๊สเพิ่มมากขึ้นเกินความเร็วตกอิสระของอนุภาค เรียกเบดในขณะนี้ว่า Fast fluidized bed ความหนาแน่นของอนุภาคจะลดลงเรื่อยๆ เมื่อเพิ่มความเร็วของแก๊สมากขึ้นอีก ภาวะนี้เรียกว่า Pneumatic transport แสดงความสัมพันธ์ดังแสดงในรูปที่ 2.1 (พล สาเกทอง, 2526; สมศักดิ์ ดำรงค์เลิศ, 2528)



รูปที่ 2.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วอากาศที่ใช้ฟลูอิดิไดเซชันกับการขยายตัวของเบด (ที่มา: Grace, et al., 1977)

2.1.4 ลักษณะของแก๊สฟลูอิดิไดเซชัน (Gas fluidization)

แก๊สฟลูอิดิไดเซชันเป็นการเกิดฟลูอิดิไดซ์เบดสองสถานะระหว่างของไหลที่เป็นแก๊สกับของแข็ง เมื่อเบดวางตัวบนตะแกรงหรือตัวกระจายแก๊ส (Gas distributor) และมีแก๊สเคลื่อนที่ผ่านขึ้นมา (Upward flowing) ซึ่งความเร็วที่เพิ่มขึ้น และ Hydrodynamic ที่เกิดขึ้นอธิบายได้ดังนี้

- เบดนิ่ง (Packed bed หรือ Fixed bed)

เมื่อแก๊สไหลผ่านเบดขึ้นมาด้วยความเร็วต่ำ ของแข็งที่วางตัวอยู่บนตัวกระจายแก๊สจะวางตัวนิ่งไม่เคลื่อนไหว แก๊สจะไหลคดเคี้ยวไปตามช่องว่างที่มีอยู่ในเบด เรียกลักษณะเบดแบบนี้ว่าเบดนิ่ง หรือเบดอาจมีการเคลื่อนที่สัมผัสกับผนังแต่อนุภาคของแข็งในเบดไม่มีการเคลื่อนที่สัมผัสต่อกัน กรณีนี้เรียกว่า เบดเคลื่อนที่ (Moving bed)

เมื่อแก๊สเคลื่อนที่ผ่านเบดนิ่งจะมีแรงเนื่องจากการไหลของของไหล กระทำต่ออนุภาคของแข็งในทิศทางกรไหล เรียกแรงนี้ว่าแรงลากเนื่องจากการไหล (Drag force) ซึ่งจะก่อให้เกิดความดันลด (Pressure drop) ตกคร่อมเบด ความดันตกคร่อมเบดตลอดความสูงของเบดนิ่งที่เกิดขึ้น จะเพิ่มตามความเร็วของแก๊สที่เพิ่มขึ้น ซึ่งสามารถคำนวณได้จาก Ergun equation ดังนี้

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{150\mu U (1-\varepsilon)^2}{(\phi d_p)^2 \varepsilon^3} + \frac{1.75\rho_g U^2 (1-\varepsilon)}{(\phi d_p)^2 \varepsilon^3} \quad (2.1)$$

- เบดแบบฟองแก๊ส (Bubbling fluidized bed)

เมื่อความเร็วแก๊สที่เคลื่อนที่ผ่านเบดหนึ่งเพิ่มขึ้นจนถึงความเร็วค่าหนึ่ง อนุภาคของแข็งจะเริ่มเกิดการเคลื่อนที่ขึ้น ความเร็วที่จุดนี้เรียกว่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชัน (Minimum fluidization velocity, U_{mf}) และเรียกเบด ณ จุดนี้ว่า Minimum fluidized bed ซึ่งเป็นจุดแรกที่อนุภาคของแข็งประพฤติตัวคล้ายของไหล สำหรับค่าความดันตกคร่อมเบด ณ จุดนี้มีค่าเท่ากับน้ำหนักของเบด ดังนั้น แรงเสียดทานเนื่องจากการไหล (Drag force; F_D) ที่เกิดขึ้น ณ จุดนี้สามารถแสดงได้ดังนี้

$$F_D = \Delta P \cdot A = AL(1 - \varepsilon)(\rho_s - \rho_g)g \quad (2.2)$$

จตุรสมการใหม่จะได้ภาวะต่ำสุดของฟลูอิดเซชัน (minimum fluidization condition) ดังนี้

$$\frac{\Delta P}{L_{mf}} = (1 - \varepsilon_{mf})(\rho_s - \rho_g)g \quad (2.3)$$

สำหรับความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชัน สามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้

$$\text{- Re}_p < 20 \quad U_{mf} = \frac{(\phi d_p)^2}{150} \cdot \frac{(\rho_s - \rho_g)}{\mu} g \left(\frac{\varepsilon_{mf}^3}{1 - \varepsilon_{mf}} \right) = \frac{d_p^2 (\rho_s - \rho_g) g}{1650 \mu} \quad (2.4)$$

$$\text{- Re}_p > 1,000 \quad U_{mf} = \frac{\phi d_p}{1.75} \cdot \frac{(\rho_s - \rho_g)}{\rho_g} g \varepsilon_{mf}^3 = \frac{d_p (\rho_s - \rho_g) g}{24.5 \rho_g} \quad (2.5)$$

ฟองแก๊สที่เกิดขึ้นจะเคลื่อนที่แทรกขึ้นไป และอาจมีการรวมตัวกันผ่าน Emulsion phase โดยที่อาจจะมีของแข็งบางส่วนติดไปด้านบนของฟองแก๊ส และบางส่วนวิ่งตามฟองแก๊สขึ้นมาด้วย จนกระทั่งถึงผิวบนก็จะเคลื่อนที่หลุดออกไปแล้วแตกกระจายอยู่เหนือผิว อนุภาคของแข็งที่ติดอยู่เกือบทั้งหมดจะตกกลับลงมายังเบดใหม่ โดยเรียกปรากฏการณ์ที่ของแข็งเคลื่อนที่ตามฟองแก๊สนี้ว่าการเกิด Wake การเกิด Wake เกิดจากความดันที่อยู่ใต้ล่างฟองแก๊สน้อยกว่าความดันบริเวณ Emulsion phase ทำให้ของแข็งเคลื่อนที่จากบริเวณที่มีความดันสูงมาอยู่ในบริเวณที่มีความดันต่ำ ส่วนบริเวณที่อยู่เหนือเบดขึ้นไป ซึ่งฟองแก๊สจะเกิดการแตกตัวและของแข็งที่ติดไปกับฟองแก๊สจะตกลงมายังเบดอีกครั้งด้วยผลของแรงโน้มถ่วง เรียกว่าบริเวณอิสระ (Freeboard) อย่างไรก็ตาม อาจจะมีอนุภาคของแข็งบางส่วน (น้อยมาก) ซึ่งมีขนาดเล็กถูกพัดพาเคลื่อนที่ไปกับแก๊สด้วย (ไม่ตกกลับลงมา) ณ ความสูงค่าหนึ่งใน Freeboard ซึ่งอนุภาคของแข็งเกือบทั้งหมดตกกลับลงมายังเบดจะเรียกความสูงนี้ว่า ความสูงหลุดลอยส่งผ่าน หรือ Transport disengaged height

(TDH) เหนือความสูงนี้ไปจะมีของแข็งเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ซึ่งอาจหลุดไปกับแก๊สด้วยอัตราที่สม่ำเสมอ ซึ่งอัตราการเคลื่อนที่ของของแข็งในช่วงนี้จะเรียกว่า Elutriation rate

- เบดแบบสลัก (Slugging bed)

ขนาดของฟองแก๊สจะมีขนาดเพิ่มตามความเร็วของแก๊ส และความสูงของเบด ถ้าเบดบรรจุอยู่ในหอทดลองซึ่งมีขนาดเล็กหรือแคบและยาว ฟองแก๊สที่เกิดขึ้นอาจจะมีขนาดใหญ่เกือบเท่ากับเส้นผ่านศูนย์กลางหรือความกว้างของเบด (หอทดลอง) ในกรณีนี้จะสังเกตเห็นฟองแก๊สเคลื่อนที่ผ่านเบดและแยกอนุภาคของแข็งออกเป็นชั้นๆ เรียกว่าเกิดสลัก และที่ความเร็วของแก๊สที่ทำให้ฟองแก๊สเริ่มมีขนาดใหญ่เท่ากับเส้นผ่านศูนย์กลางของเบดหรือหอทดลองก็คือ Minimum slugging velocity (U_{ms}) มีค่าประมาณไว้คือ

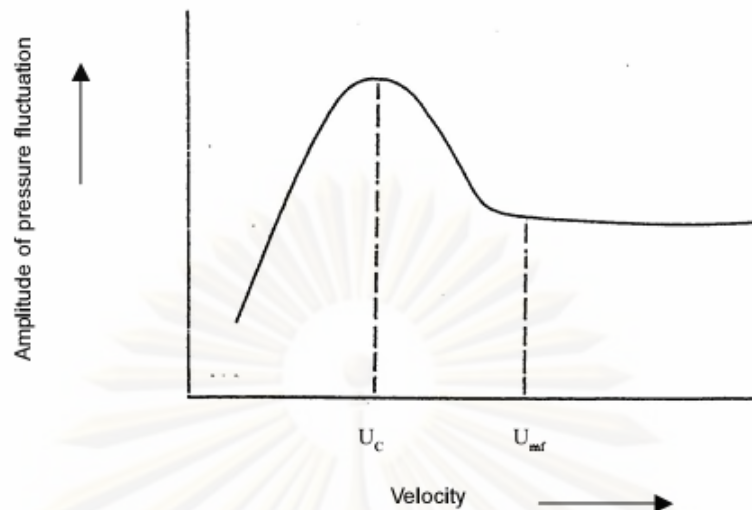
$$U_{ms} = U_{mf} + 0.07\sqrt{gD} \quad (2.6)$$

- เบดแบบปั่นป่วน (Turbulent bed)

เมื่อความเร็วของแก๊สที่เคลื่อนที่ผ่านเบดแบบฟองแก๊สเพิ่มขึ้น จนมากกว่า U_{mf} เบดจะเกิดการขยายตัว และเมื่อเพิ่มความเร็วขึ้นเรื่อยๆ จะเริ่มสังเกตเห็นรูปแบบการสัมผัสของอนุภาคของแข็งกับแก๊ส ซึ่งมีการขยายตัวเปลี่ยนแปลงไป ฟองแก๊สที่เกิดขึ้นมีการรวมตัวและแตกกระจายออกจากกันอย่างรวดเร็ว (จนดูเหมือนไม่มีฟองแก๊ส) การเคลื่อนไหวภายในเบดเป็นแบบปั่นป่วน ลักษณะภายในเบดจะแบ่งได้เป็น 2 ส่วน คือ Dense phase ซึ่งเป็นส่วนที่มีอนุภาคของแข็งอยู่หนาแน่น และ Dilute phase ซึ่งเป็นส่วนที่มีอนุภาคของแข็งอยู่เบาบาง

สำหรับช่วงในการเปลี่ยนแปลงภาวะจากเบดแบบฟองแก๊สไปเป็นเบดแบบปั่นป่วนนั้น ไม่ได้เกิดขึ้นแบบทันทีทันใดที่ความเร็วค่าหนึ่ง แต่จะมีช่วงของความเร็วในการเปลี่ยนภาวะทั้งสองนี้ โดยการเปลี่ยนภาวะจากเบดแบบฟองแก๊สไปเป็นเบดแบบปั่นป่วนนั้นจะมีช่วงของการเปลี่ยนโดยเมื่อค่อยๆ เพิ่มความเร็วขึ้นจนถึงค่าๆ หนึ่ง เบดซึ่งเดิมอยู่ในภาวะเบดแบบฟองแก๊สนั้น ที่บริเวณผิวหน้าของเบดจะเริ่มเปลี่ยนไปเป็นเบดแบบปั่นป่วน ซึ่งเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ สามารถแสดงความสัมพันธ์ของความดันตกคร่อมเบดที่เกิดขึ้นในช่วงการเปลี่ยนภาวะได้ดังนี้ ดังแสดงในรูปที่ 2.2

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันตกกับความเร็วในช่วงการเกิดเบดแบบปั่นป่วน
(ที่มา: ปิยะพันธ์ จะกอบ, 2548)

ความเร็วสุดท้าย (Terminal velocity) คือ ความเร็วตกอิสระของเม็ดของแข็งในของไหล ซึ่งความเร็วนี้จะมีค่าเท่ากับความเร็วของไหลที่ทำให้เม็ดของแข็งเคลื่อนตัวหลุดออกจากหอตกลงไป โดยแบ่งออกเป็น 2 กรณี ตามลักษณะของอนุภาคของแข็ง

- กรณีอนุภาคของแข็งมีรูปร่างเป็นทรงกลม

$$U_t^* = \left[\frac{18}{(d_p^*)^2} + \frac{0.591}{(d_p^*)^{1/2}} \right]^{-1} \quad (2.7)$$

หรือ

$$U_{t,spherical} = \frac{g(\rho_s - \rho_g)d_p^2}{18\mu} \quad \text{เมื่อ } Re_p < 0.4 \quad (2.8)$$

$$U_{t,spherical} = \left[\frac{4}{225} \frac{(\rho_s - \rho_g)^2 g^2}{\rho_g \mu} \right]^{1/3} d_p \quad \text{เมื่อ } 0.4 < Re_p < 500 \quad (2.9)$$

$$U_{t,spherical} = \left[\frac{3.1g(\rho_s - \rho_g)d_p}{\rho_g} \right]^{1/2} \quad \text{เมื่อ } 500 < Re_p < 200,000 \quad (2.10)$$

- กรณีที่อนุภาคของแข็งไม่เป็นทรงกลม

$$U_t^* = \left[\frac{18}{(d_p^*)^2} + \frac{2.335 - 1.744\phi}{(d_p^*)^{1/2}} \right]^{-1} \quad (2.11)$$

จากสมการที่ 2.7 และ 2.11 จะอยู่ในตัวแปร U_t^* และ d_p^* ซึ่งเป็นเทอมของตัวแปรไร้หน่วย โดยที่

$$d_p^* = d_p \left[\frac{\rho_g (\rho_s - \rho_g) g}{\mu^2} \right]^{1/3} \quad (2.12)$$

และ

$$U_t^* = U_t \left[\frac{\rho_g^2}{\mu (\rho_s - \rho_g) g} \right]^{1/3} \quad (2.13)$$

ดังนั้นจาก U_t^* ที่ได้จากสมการที่ 2.7 และ 2.11 นำมาหา U_t โดยอาศัยสมการที่ 2.14 ได้

$$U_t = U_t^* \left[\frac{\mu (\rho_s - \rho_g) g}{\rho_g^2} \right]^{1/3} \quad (2.14)$$

- Fast fluidized bed

เมื่อความเร็วของอากาศมากขึ้นจนไม่สามารถระงับพื้นผิวด้านบนของเบดได้ จนกระทั่งอนุภาคของแข็งเคลื่อนที่ออกทางด้านบนหรือตกลงและต้องเติมอนุภาคของแข็งเข้ามาแทนที่โดยการใส่เข้ามาใกล้ๆ ส่วนล่างของหอคอย อนุภาคของแข็งจะรวมกลุ่มและเคลื่อนที่ลงบริเวณใกล้ๆ ผังของหอคอย ขณะที่เกิดขึ้นและอนุภาคของแข็งที่กระจายตัวอยู่ด้านบนจะเคลื่อนที่ขึ้น ในขณะที่อัตราการป้อนของแข็งคงที่ที่ความเร็วแก๊สเพิ่มขึ้นจะทำให้อนุภาคของแข็งในหอคอยเจือจางมากขึ้น ที่ภาวะนี้อัตราส่วนของปริมาตรของช่องว่างต่อปริมาตรของเบดมีค่าอยู่ระหว่าง 0.8 ถึง 0.98

จากรูปที่ 2.2 ในภาวะที่เป็น Fast fluidization ถ้านำเอาของแข็งที่หลุดออกจากเบดหรือหอคอยตกลงกลับเข้ามาในระบบใหม่ตรงบริเวณส่วนล่างของหอคอย ระบบแบบนี้จะเรียกว่าฟลูอิดไรซ์เบดแบบหมุนเวียน (Circulating fluidized bed, CFB)

- Dilute-phase transport หรือ Pneumatic conveying

เป็นการขนถ่ายอนุภาคของแข็งด้วยแก๊ส ไม่มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของของแข็งในแนวแกนยกเว้นในส่วนล่างที่อนุภาคของแข็งมีความเร่ง และอนุภาคของแข็งบางส่วนอาจหยุดนิ่งอยู่ใกล้ๆ ผนังของหอทดลอง ความเร็วแก๊สที่ทำให้เบตในท่อเปลี่ยนจากเบตเฉื่อยจางเป็นเบตหนาแน่นเรียกว่า ความเร็วในการเกิดโซคกิง (Choking velocity, U_{ch}) ค่าความเร็วนี้สามารถหาได้จากการทำการทดลอง โดยการปรับลดความเร็วแก๊สในระบบที่เป็นเฟสเฉื่อยจางและมีปริมาณอนุภาคของแข็งในระบบคงที่ลงจนกระทั่งเบตเกิดการยุบตัวลงอย่างรวดเร็วเปลี่ยนจากเฟสเฉื่อยจางเป็นเฟสหนาแน่น ซึ่งความเร็วแก๊สที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงดังกล่าว คือความเร็วในการเกิดโซคกิงนั่นเอง ปริมาณของแข็งที่ไหลออกจากเบตภาวะนี้ คือ

$$G_{s,ch} = \rho_s(1 - \epsilon_{ch})(U_{ch} - U_t) \quad (2.15)$$

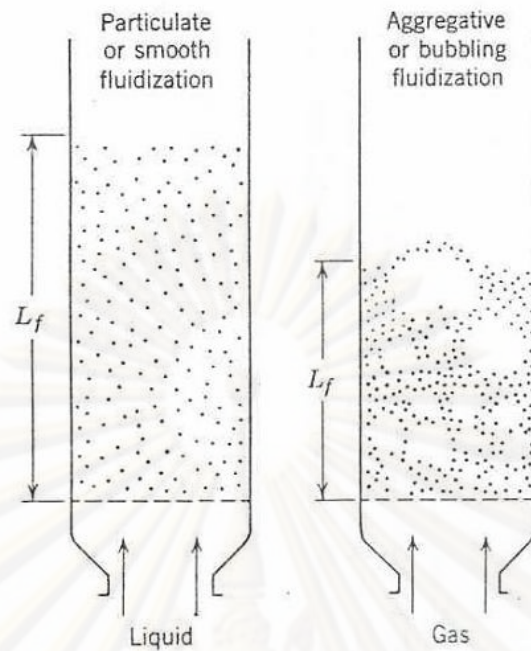
โดยค่า ϵ_{ch} หรืออัตราส่วนของปริมาตรของช่องว่างต่อปริมาตรของเบตในภาวะ Choking พบว่าค่านี้มีค่าอยู่ระหว่าง 0.943 ถึง 0.987 (พล สาเกทอง, 2526; สมศักดิ์ ดำรงค์เลิศ, 2528)

2.1.5 ลักษณะของฟลูอิไดซ์เบด (Fluidized bed)

เบต (Bed) หมายถึง อาณาเขตในหอการทดลองที่มีปริมาณเม็ดของแข็งบรรจุอยู่ไม่ว่าของแข็งนั้นจะอยู่นิ่งหรือเคลื่อนไหวด้วยของไหลในหอทดลอง จะมีระดับตั้งแต่แผ่นโลหะที่ทำเป็นตะแกรงรองรับหรือเป็นตัวกระจายแก๊สจนถึงระดับสูงสุดหรือผิวหน้าของเม็ดเบต

ตัวกระจายแก๊ส (Gas distributor) ทำหน้าที่กระจายให้ของไหลมีความเร็วสม่ำเสมอตลอดพื้นที่หน้าตัดขวางของทรงกระบอก (พล สาเกทอง, 2526; สมศักดิ์ ดำรงค์เลิศ, 2528)

ฟลูอิไดซ์เบดที่เป็นของเหลวจะมีการขยายตัวของเบตอย่างสม่ำเสมอ การลอยตัวและการหมุนรอบตัวเป็นไปอย่างช้าๆ เรียกเบตแบบนี้ว่า เบตสม่ำเสมอหรือเบดที่เป็นเนื้อเดียวกัน สำหรับฟลูอิไดซ์เบดที่ของไหลเป็นแก๊ส ลักษณะเบดที่เกิดขึ้นจะแตกต่างจากที่เป็นของเหลวมาก เพราะว่าเมื่อความเร็วของแก๊สสูงกว่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิไดซ์เบดแล้ว แก๊สส่วนหนึ่งยังทำหน้าที่ให้เกิดการลอยตัวของเม็ดของแข็งเหมือนเดิม แต่มีอีกส่วนหนึ่งรวมตัวกันแล้วก่อตัวกันเป็นฟองแก๊สขึ้น ฟองแก๊สก็จะแทรกตัวขึ้นมาถึงบนผิวหน้าของเบตและแตกตัวในที่สุด แต่ขณะที่ฟองแก๊สลอยขึ้นมาจะทำให้เม็ดของแข็งลอยติดตามฟองแก๊สขึ้นมาด้วย เม็ดของแข็งภายในเบตจึงมีการเคลื่อนที่เป็นไปอย่างซุกซม ดังแสดงในรูปที่ 2.3

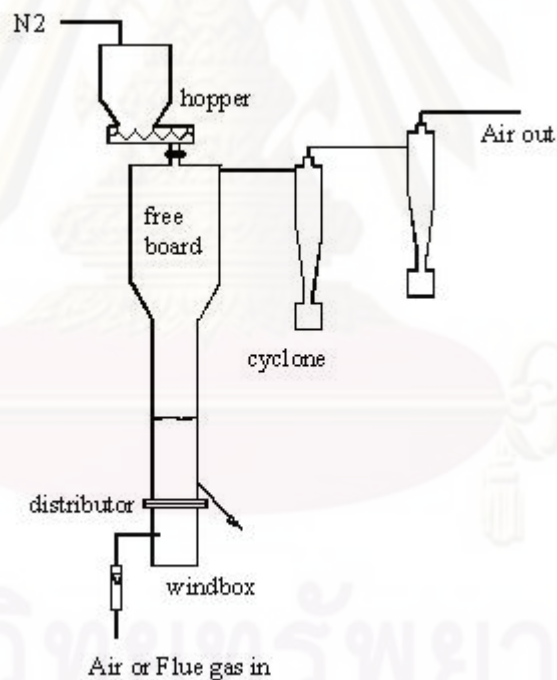


รูปที่ 2.3 แสดงการเกิดฟลูอิดเซชันของเบดที่มีของไหลเป็นของเหลว และแก๊ส
(ที่มา: สมศักดิ์ ดำรงค์เลิศ, 2528)

ระบบการเผาไหม้แบบฟลูอิดเบดมีข้อดีคือ สามารถทำงานแบบต่อเนื่องได้ ใช้เชื้อเพลิงได้หลายชนิด ทั้งแบบเชื้อเพลิงชนิดเดียวหรือแบบผสม อุณหภูมิของเบดและอากาศผสมกันอยู่อย่างปั่นป่วนคลุกเคล้ากันอย่างดี ทำให้เกิดการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ การถ่ายโอนความร้อนจากรอบนอกถ่านหินและการแพร่ของออกซิเจนสู่ผิวถ่านหินดีตลอดจนการถ่ายโอนความร้อนสู่ผิวท่อน้ำมีประสิทธิภาพที่ดีเพราะชั้นขอบเขตโดยรอบของผิวถ่านหินหรือถ่านและผิวท่อถูกทำลายอยู่ตลอดเวลาอันเนื่องจากการเคลื่อนที่ของชั้นฟลูอิดเบด ทำให้ใช้ถ่านหินที่มีเกรดกว้างได้ ที่ความเร็วของอากาศสูงๆ การทำงานของฟลูอิดเบดจะเสียพลังงานน้อยกว่าเบดที่อยู่กับที่มาก เพราะแรงเสียดทานและความดันลมมีค่าน้อยกว่า การควบคุมแก๊สมลพิษ SO_2 ก็ทำได้ง่ายเพราะสามารถใช้หินปูนหรือโดโลไมต์ใส่ลงในชั้นฟลูอิดเบดโดยไม่ต้องติดตั้งระบบกำจัดแก๊สไอเสียและการปลดปล่อย NO_x ก็ต่ำเนื่องจากชั้นฟลูอิดเบดจะมีอุณหภูมิการเผาไหม้ค่อนข้างต่ำ (สำเริง จักรใจ, 2547)

ส่วนข้อเสียคือ ใช้เวลาเริ่มจุดเตาหรือหยุดเดินเตานาน การกักความร้อนของเครื่องปฏิกรณ์และท่อน้ำค่อนข้างสูงเนื่องจากการขัดสีของฟลูอิดเบด เกิดการสูญเสียอนุภาคคาร์บอนขนาดเล็กที่ยังไม่เผาไหม้ไปในรูปของเถ้าลอยซึ่งจะถูกหอบลอยขึ้นไปพร้อมกับไอเสียในปริมาณที่สูง อนุภาคคาร์บอนขนาดเล็กเหล่านี้ เป็นผลมาจากการลดลงของขนาดถ่านคาร์บอนในชั้นฟลูอิดเบดซึ่งมีสาเหตุมาจากหลายประการเช่น จากการแตกตัวปฏิกิริยาของคาร์บอน (เช่น เกิดจากความ

เส้นทางความร้อนในโครงสร้างที่พูนของคาร์บอนและความเค้นจากความดันที่เพิ่มขึ้นของสารระเหยระหว่างเกิดกระบวนการแยกสลายด้วยความร้อนในโครงสร้างที่พูนของคาร์บอน เป็นต้น) จากการเผาไหม้ของคาร์บอนเอง จากการแตกตัวทุติยภูมิของถ่านคาร์บอนอื่นเนื่องมาจากการชนในชั้นฟลูอิดไคต์เบดและการขัดถูของถ่านคาร์บอน เนื่องจากว่าอุณหภูมิการเผาไหม้ของระบบฟลูอิดไคต์เบดค่อนข้างต่ำอยู่แล้ว ทำให้การเผาไหม้โดยรวมของถ่านคาร์บอนถูกควบคุมโดยอัตราการเผาไหม้ที่ผิวและในรูปพูนของถ่านคาร์บอนเป็นหลัก ยิ่งใช้ถ่านหินที่มีความว่องไวต่ำด้วยแล้ว อุณหภูมิของถ่านคาร์บอนขนาดเล็กๆ เหล่านี้จะยิ่งไม่มีเวลาเพียงพอเพื่อเกิดการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ ขณะที่ถูกหอบให้ลอยออกไปจากบริเวณเหนือชั้นฟลูอิดไคต์เบดของเตาแม้ว่าจะมีเวลาอยู่ในเตานานถึง 3 วินาทีที่อุณหภูมิ 830 องศาเซลเซียส ก็ตาม นอกจากนี้ยังมีข้อเสียอีกประการหนึ่งคือ เครื่องปฏิกรณ์ต้องมีความสูงพอสมควร ไม่สามารถขยายขนาดของเครื่องปฏิกรณ์ได้ง่าย ระบบการเผาไหม้ใหญ่ๆ ต้องมีการป้อนถ่านหินหลายจุด เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคต์เบดแสดงดังรูปที่ 2.4



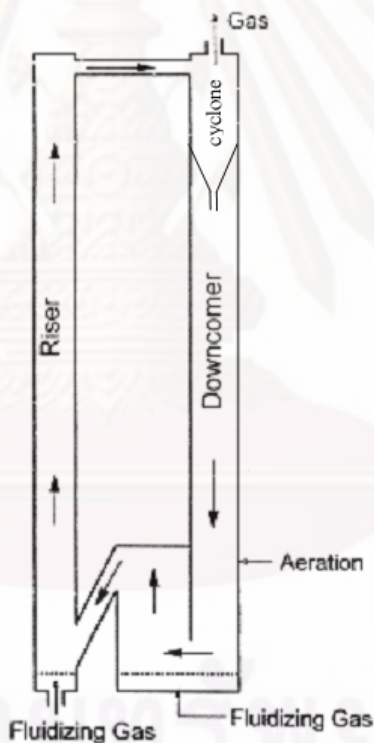
รูปที่ 2.4 เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคต์เบด

(ที่มา: Son Sung Real , 2003: <http://www.fb.kaist.ac.th>)

2.1.6 ฟลูอิดไคซ์เบดแบบหมุนเวียน (Circulating fluidized bed, CFB)

ระบบฟลูอิดไคซ์เบดแบบหมุนเวียนเป็นรูปแบบหนึ่งของกระบวนการสัมผัสระหว่างแก๊สกับเม็ดของแข็ง โดยอาศัยเทคนิคทางฟลูอิดไคซ์ชันมาประยุกต์ใช้งาน ระบบประกอบด้วยส่วนที่สำคัญ 3 ส่วน คือ (ดังรูปที่ 2.5)

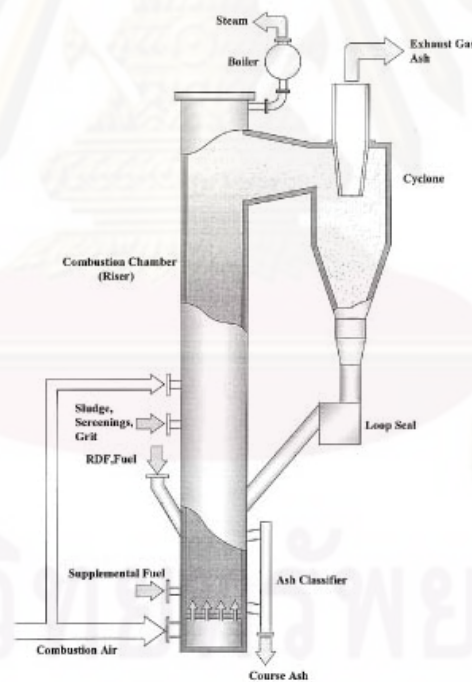
- 1) ท่อไรเซอร์ เป็นส่วนที่ทำงานภายใต้ภาวะการเกิดฟลูอิดไคซ์เบดที่ความเร็วสูง (Fast fluidized bed)
- 2) Gas-solid separator เช่น Cyclone ทำหน้าที่ดักจับของแข็งที่หลุดออกมาจากท่อไรเซอร์
- 3) ท่อป้อนกลับ (Downcomer หรือ Return leg) ทำหน้าที่ป้อนเม็ดของแข็งที่ได้จาก Cyclone กลับไปยังด้านล่างของท่อไรเซอร์ เพื่อให้เกิดการหมุนเวียนของเม็ดของแข็ง



รูปที่ 2.5 ส่วนประกอบของระบบฟลูอิดไคซ์เบดแบบหมุนเวียน

(ที่มา: สมศักดิ์ ดำรงค์เลิศ, 2528)

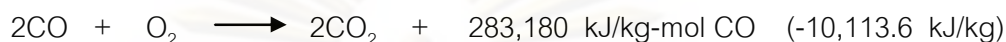
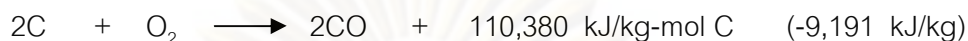
ระบบการเผาไหม้ฟลูอิโดซ์เบดแบบหมุนเวียนจะมีลักษณะคล้ายคลึงกับระบบการเผาไหม้ฟลูอิโดซ์เบด แต่จะมีการปรับปรุงจากระบบการเผาไหม้ฟลูอิโดซ์เบดให้มีการหมุนเวียนของเบด โดยจะมีเตาปฏิกรณ์ 2 ตัวต่อกัน โดยตัวแรก (riser) จะทำหน้าที่เสมือนระบบการเผาไหม้ฟลูอิโดซ์เบด ในขณะที่เตาปฏิกรณ์อีกตัว (downcomer) จะทำหน้าที่กักเก็บและนำเบดพร้อมทั้งเชื้อเพลิงที่ยังเผาไหม้ไม่สมบูรณ์กลับเข้ามาสู่เตาปฏิกรณ์ตัวที่ 1 ใหม่อีกครั้งเพื่อให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ยิ่งขึ้น มีการป้อนอากาศหรือออกซิเจนมากกว่าระบบการเผาไหม้ฟลูอิโดซ์เบดเพื่อให้เกิดฟลูอิโดซ์เบดอย่างรวดเร็วและหลุดออกจากเตาปฏิกรณ์ตัวที่ 1 ไป เกิดเป็นชั้นฟลูอิโดซ์เบดตลอดเตาปฏิกรณ์ตัวที่ 1 อุณหภูมิสูงกระจายตลอดทั้งเตาและไม่สูงมากเกินไป ทั้งนี้อุณหภูมิจะไม่สูงมาก เฉพาะส่วนล่างของเตาเหมือนกับระบบการเผาไหม้ฟลูอิโดซ์เบดอันเป็นสาเหตุของปัญหามลพิษ เนื่องจากการปล่อยแก๊สไนโตรเจนออกไซด์ (NO_x) นอกจากนี้ พื้นที่หน้าตัดของเบดจะเล็กกว่าสามารถขยายขนาดของเครื่องได้ง่ายกว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดกำมะถันยังดีกว่าที่อัตราการใช้หินปูนที่เท่ากันอีกด้วย(สำเริง จักรใจ, 2547) เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิโดซ์เบดแบบหมุนเวียนแสดงดังรูปที่ 2.6



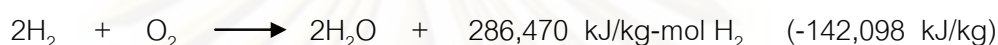
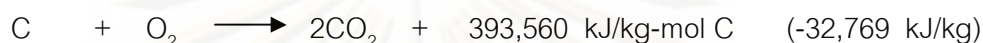
รูปที่ 2.6 เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิโดซ์เบดแบบหมุนเวียน
(ที่มา: Kinrakuji , 2007: <http://www.gec.>)

2.2 ทฤษฎีการเผาไหม้ (Theory of combustion)

การเผาไหม้เป็นปฏิกิริยาเคมีชนิดหนึ่งซึ่งปลดปล่อยพลังงานความร้อนออกมาพร้อมกับการเปลี่ยนแปลงทางเคมี ซึ่งเป็นการรวมตัวของออกซิเจนเข้ากับคาร์บอน ไฮโดรเจน และซัลเฟอร์ เกิดเป็นสารประกอบคือ คาร์บอนไดออกไซด์ ไอน้ำ และซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ปฏิกิริยาการเผาไหม้ของคาร์บอนคือ



ซึ่งอาจเขียนรวมกันได้เป็น



จากการวิเคราะห์โดยแยกธาตุของเชื้อเพลิงแข็งหรือเชื้อเพลิงเหลว หรือข้อมูลการวิเคราะห์องค์ประกอบของแก๊สเชื้อเพลิง สามารถนำมาคำนวณปริมาณออกซิเจนหรือปริมาณอากาศที่ทำการปฏิกิริยาพอดีกับเชื้อเพลิง (อากาศที่ต้องการตามทฤษฎี) ได้ และนำมาคำนวณปริมาณผลผลิตแต่ละชนิดที่ได้จากปฏิกิริยาได้เช่นเดียวกัน มวลสารสัมพันธ์ดังกล่าวเป็นความสัมพันธ์โดยโมล ดังนั้นต้องแปลงหน่วยหรือมวลจากข้อมูลการวิเคราะห์เชื้อเพลิงให้อยู่ในรูปหน่วยของ กิโลกรัมโมลหรือหน่วยของโมลในระบบหน่วยอื่นก่อน จึงจะคำนวณปริมาณอากาศที่ต้องการตามทฤษฎีได้ ซึ่งเป็นจุดเริ่มต้นที่สำคัญที่สุดในการเผาไหม้

ในปฏิบัติการเผาไหม้ในอุตสาหกรรม หรือในการใช้งานทั่วไป ต้องการการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ด้วยเหตุผลหลายประการคือ ต้องการประหยัดเชื้อเพลิง ต้องการความร้อนสูงสุดจากการเผาไหม้ และไม่ต้องการมลพิษที่เกิดจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ เช่น คาร์บอนมอนอกไซด์ และไฮโดรคาร์บอน เป็นต้น จึงต้องใช้ภาวะที่เอื้ออำนวยต่อการทำปฏิกิริยาการเผาไหม้ให้สมบูรณ์มากที่สุด ภาวะอันหนึ่งคือ การใช้ปริมาณอากาศเกินพอ เพื่อให้โมเลกุลของเชื้อเพลิงหรือโมเลกุลที่มาจากการแตกตัวของเชื้อเพลิงมีโอกาสพบกับโมเลกุลของออกซิเจนเพิ่มมากขึ้น จากมวลสารสัมพันธ์ เมื่อทราบปริมาณอากาศที่ต้องการตามทฤษฎี ก็จะสามารถคำนวณปริมาณอากาศเกินพอได้ทันที (สมบัติ นิธิจิมณีรัตน์, 2531)

2.2.1 การเผาไหม้ในระบบฟลูอิดเบด

ฟลูอิดเซชันเป็นเทคนิคที่ทำให้อนุภาคของแข็งที่บรรจุในคอลัมน์ซึ่งเรียกว่า เบด เกิดการเคลื่อนที่ลอยตัวอย่างอิสระ โดยอาศัยความร้อนของของไหลที่ผ่านกระจายทางด้านล่าง อนุภาคของของแข็งเหล่านี้จะเกิดการผสมผสานอย่างสม่ำเสมอเป็นเนื้อเดียวกันตลอด สามารถ

แลกเปลี่ยนมวลสารและพลังงานได้เป็นอย่างดี จึงถูกนำมาใช้ออกแบบเป็นเตาเผาหรือเตาปฏิกรณ์เคมีมากมาย การเผาไหม้ถ่านหินจึงเป็นกระบวนการหนึ่งที่เทคนิคฟลูอิดไอเซชันถูกนำมาใช้

ในระบบฟลูอิดไอเซชันแบบแก๊ส-ของแข็ง แก๊สหรืออากาศที่ป้อนเข้าสู่เบดจะทำหน้าที่เป็นตัวพียงของแข็งภายในเบดให้เคลื่อนที่อย่างอิสระและมีสมบัติเป็นของไหล ช่วยให้การผสมผสานและสัมผัสกันระหว่างของแข็งและแก๊สดีขึ้น เนื่องจากการเผาไหม้ถ่านหินในระบบฟลูอิดไอเซชันเบดเป็นระบบโดยใช้แก๊สทำให้ไฮโดรไดนามิกส์ในเตาเผามีความซับซ้อนขึ้นอยู่กับความเร็วของแก๊สที่ป้อนเข้าสู่เบด และขนาดของเม็ดของแข็งที่ใช้ในเบด ลักษณะการเคลื่อนที่ของฟองแก๊สจะขึ้นอยู่กับความเร็วสัมพัทธ์ของฟองแก๊ส ความเร็วของแก๊สในเบดหนาแน่นที่ภาวะเริ่มต้นของฟลูอิดไอเซชัน และขนาดของอนุภาคในเบด

ระบบการเผาไหม้แบบนี้มีข้อดีคือ สามารถทำงานแบบต่อเนื่องได้ ใช้เชื้อเพลิงได้หลายชนิด ทั้งแบบเชื้อเพลิงชนิดเดียวหรือแบบผสม อนุภาคของเบดและอากาศผสมกันอย่างปั่นป่วนคลุกเคล้ากันอย่างดี ทำให้เกิดการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ การถ่ายโอนความร้อนจากรอบนอกถ่านหินและการแพร่ของออกซิเจนสู่ผิวถ่านหินดีตลอดจนการถ่ายโอนความร้อนสู่ผิวท่อน้ำมีประสิทธิภาพที่ดีเพราะชั้นขอบเขตโดยรอบของผิวถ่านหินหรือถ่านและผิวท่อน้ำถูกทำลายอยู่ตลอดเวลาอันเนื่องจากการเคลื่อนที่ของชั้นฟลูอิดไอเซชันเบด ทำให้ใช้ถ่านหินที่มีเกรดกว้างได้ ที่ความเร็วของอากาศสูงๆ การทำงานของฟลูอิดไอเซชันเบดจะเสียพลังงานน้อยกว่าเบดที่อยู่กับที่มาก เพราะแรงเสียดทานและความดันลมน้อยกว่า การควบคุมแก๊สมลพิษ SO_2 ก็ทำได้ง่ายเพราะสามารถใช้หินปูนหรือโดโลไมต์ใส่ลงในชั้นฟลูอิดไอเซชันเบดโดยไม่ต้องติดตั้งระบบกำจัดแก๊สไอเสียและการปลดปล่อย NO_x ก็ต่ำเนื่องจากชั้นฟลูอิดไอเซชันเบดจะมีอุณหภูมิการเผาไหม้ค่อนข้างต่ำ

ส่วนข้อเสียคือ ใช้เวลาเริ่มจุดเตาหรือหยุดเดินเตานาน การกักความร้อนของเครื่องปฏิกรณ์และท่อน้ำค่อนข้างสูงเนื่องจากการขจัดสีของฟลูอิดไอเซชันเบด เกิดการสูญเสียอนุภาคคาร์บอนขนาดเล็กที่ยังไม่เผาไหม้ไปในรูปของเถ้าลอยซึ่งจะถูกหอบลอยขึ้นไปพร้อมกับไอเสียในปริมาณที่สูง อนุภาคคาร์บอนขนาดเล็กเหล่านี้ เป็นผลมาจากการลดลงของขนาดถ่านคาร์บอนในชั้นฟลูอิดไอเซชันเบดซึ่งมีสาเหตุมาจากหลายประการ เช่น จากการแตกตัวปฏิกิริยาของคาร์บอน (เช่น เกิดจากความเค้นทางความร้อนในโครงสร้างที่พูนของคาร์บอนและความเค้นจากความดันที่เพิ่มขึ้นของสารระเหยระหว่างเกิดกระบวนการแยกสลายด้วยความร้อนในโครงสร้างที่พูนของคาร์บอน เป็นต้น) จากการเผาไหม้ของคาร์บอนเอง จากการแตกตัวทุติยภูมิของถ่านคาร์บอนอันเนื่องมาจากการชนในชั้นฟลูอิดไอเซชันเบดและการขจัดสีของถ่านคาร์บอน เนื่องจากว่าอุณหภูมิการเผาไหม้ของระบบฟลูอิดไอเซชันเบดค่อนข้างต่ำอยู่แล้ว ทำให้การเผาไหม้โดยรวมของถ่านคาร์บอนถูกควบคุมโดยอัตราการเผาไหม้ที่ผิวและในรูปพูนของถ่านคาร์บอนเป็นหลัก ยิ่งใช้ถ่านหินที่มีความว่องไวต่ำด้วยแล้ว

อนุภาคของถ่านคาร์บอนขนาดเล็กๆ เหล่านี้จะยังไม่มีความเพียงพอเพื่อเกิดการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ขณะที่ถูกหอบให้ลอยออกไปจากบริเวณเหนือชั้นฟลูอิดไคด์เบดของเขาแม้ว่าจะมีเวลาอยู่ในเตานานถึง 3 วินาทีที่อุณหภูมิ 830 องศาเซลเซียส ก็ตาม นอกจากนี้ยังมีข้อเสียอีกประการหนึ่งคือ เครื่องปฏิกรณ์ต้องมีความสูงพอสมควร ไม่สามารถขยายขนาดของเครื่องปฏิกรณ์ได้ง่าย ระบบการเผาไหม้ใหญ่ๆ ต้องมีการป้อนถ่านหินหลายจุด (สำเร็จ จักรใจ, 2547)

2.2.2 การเผาไหม้ในระบบฟลูอิดไคด์เบดแบบหมุนเวียน

การเผาไหม้ในระบบฟลูอิดไคด์แบบหมุนเวียน สามารถแบ่งเป็นส่วนต่างๆ ที่สำคัญ ดังนี้

1) ห้องเผาไหม้ เป็นบริเวณที่เกิดการเผาไหม้ที่ส่วนล่างของห้องเผาไหม้ ประกอบด้วยแผ่นกระจายอากาศ ทำหน้าที่สำคัญ 2 ประการ คือ

- รองรับน้ำหนักของเบด ได้แก่

- วัสดุเชื้อเพลิง ซึ่งมีขนาดพอเหมาะที่สามารถถูกทำให้เกิดฟลูอิดไคด์ได้ โดยทั่วไปขนาดของเชื้อเพลิงที่ใช้จะมีขนาดประมาณ 1-5 มิลลิเมตร

- วัสดุเฉื่อย (Inert material) เช่น ททราย และ Reactive material เช่น สารประกอบคาร์บอนเนต ได้แก่ หินปูน (Limestone) โดโลไมท์ (Dolomite) ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalysts) พวกนี้ทำหน้าที่ช่วยให้เบดมีอุณหภูมิสม่ำเสมอ และมีการส่งผ่านความร้อนได้ดีขึ้น นอกจากนี้ Reactive material ยังช่วยกำจัดแก๊สพิษที่เกิดจากการเผาไหม้คือ แก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂)

- การกระจายอากาศช่วยให้เบดเกิดฟลูอิดไคด์อย่างสม่ำเสมอ ทำให้การเผาไหม้เกิดได้สม่ำเสมอตลอดพื้นที่หน้าตัดของเบด

2) ระบบป้อนเชื้อเพลิง มีหลายแบบแต่แต่ละแบบมีจุดประสงค์เพื่อป้อนเชื้อเพลิงให้กระจายตลอดผิวหน้าของเบด ปกติใช้ระบบป้อนแบบสกรู (Screw feeder) มีตำแหน่งในการป้อนมีทั้งที่ป้อนเหนือเบด และภายในเบด ขึ้นกับการออกแบบและวัตถุประสงค์ในการใช้งาน

3) ระบบควบคุม เป็นระบบควบคุมการทำงานของห้องเผาไหม้ ซึ่งสามารถทำได้หลายวิธี แต่ทั้งหมดมีวัตถุประสงค์อันเดียวกันคือ ให้การดำเนินงานของระบบเป็นไปอย่างสม่ำเสมอและต่อเนื่อง

4) ระบบถ่ายเทความร้อน เป็นการดึงเอาพลังงานของเชื้อเพลิงในรูปพลังงานความร้อนเพื่อใช้ผลิตไอน้ำหรือกระแสไฟฟ้า ภายในเตาเผาแบบฟลูอิดไคด์เบดจึงมีท่อถ่ายเทความร้อนขดอยู่ในเบดและฟริบอร์ค

5) ระบบกำจัดฝุ่นและระบายนํ้า การเผาไหม้เชื้อเพลิงจะเหลือของแข็งจากการเผาไหม้ เช่น เถ้า และถ่านซาร์ โดยทั่วไปจะแยกเอาของแข็งเหล่านี้ออกโดยใช้ไซโคลน ซึ่งทำ

หน้าที่แยกเอาของแข็งขนาดเล็กที่ปลิวออกจากเบต ส่วนถ้าหรือของแข็งหนักจะแยกโดยผ่านช่องหรือท่อซึ่งอยู่ด้านล่างของห้องเผาไหม้ (สมบัติ นิธิภูมิวัฒน์, 2531)

การเผาไหม้ในฟลูอิไดซ์เบดแบบหมุนเวียนเกิดขึ้นโดย เชื้อเพลิงจะถูกพยุงให้ลอยตัวด้วยแก๊สหรืออากาศที่เข้าสู่เตาโดยผ่านแผ่นกระจายอากาศ จนเชื้อเพลิงจะมีสภาพคล้ายของไหล โดยภายในเตาเผาจะมีเบตที่ร้อน เช่น ททราย หรือถ่านที่เกิดจากการเผาไหม้ เพื่อช่วยทำให้เกิดการผสมผสานของเชื้อเพลิงกับออกซิเจนได้ดีและช่วยให้ถ่านที่เกาะอยู่กับเชื้อเพลิงนั้นหลุด ผิวของเชื้อเพลิงจึงสามารถสัมผัสกับออกซิเจนได้โดยตรงตลอดเวลาทำให้เกิดการเผาไหม้ที่ดี ซึ่งจะต่างจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งในเตาเผาทั่วไป ซึ่งจะเกิดการเผาไหม้ที่ผิวของเชื้อเพลิงก่อน จากนั้นบริเวณของการเกิดปฏิกิริยาก็จะค่อย ๆ เคลื่อนเข้าไปโดยผ่านส่วนที่เหลือที่เกิดจากการเผาไหม้คือถ่าน ซึ่งจะเป็นสารเฉื่อยทำให้เชื้อเพลิงมีโอกาสสัมผัสกับออกซิเจนลดลง ดังนั้นเมื่อเวลาผ่านไปอัตราการเผาไหม้จะค่อย ๆ ลดลงจนเผาไหม้หมดทั้งก้อน (ปิยะพันธ์ จะกอ, 2548)

2.3 อากาศเกินพอ (กัญญา บุญเกียรติ, 2544)

ระบบการเผาไหม้ทั่วไปจะใช้อากาศเผาไหม้เกินพอเพื่อให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ ในกรณีของแก๊สเชื้อเพลิง มวลของแก๊สและอากาศผสมเป็นเนื้อเดียวกันอยู่แล้ว จึงไม่ต้องใช้อากาศเกินพอ หรือใช้เพียงเล็กน้อย (ระหว่าง 0 – 10 เปอร์เซ็นต์) ในกรณีของเชื้อเพลิงเหลว หดน้ำมันเกิดการระเหยเป็นไอพร้อมๆกับการเผาไหม้ จำเป็นต้องใช้อากาศเกินพอสูงกว่าในกรณีของแก๊สเชื้อเพลิงเพื่อให้ทันกับการระเหย (ระหว่าง 5 – 20 เปอร์เซ็นต์) ในกรณีเชื้อเพลิงแข็ง นอกจากต้องการแบ่งอากาศเป็นสองส่วนแล้ว ยังต้องใช้อากาศเกินพอสูงมาก (ระหว่าง 15 – 60 เปอร์เซ็นต์) ทั้งอากาศส่วนแรกเพื่อทำปฏิกิริยากับสารระเหยที่ถูกไล่ออกจากพื้นผิวเชื้อเพลิงแข็งอย่างรวดเร็ว และอากาศส่วนที่สองเพื่อทำปฏิกิริยากับคาร์บอนในกากของแข็ง ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับระบบและอุปกรณ์ด้วย ปริมาณอากาศเกินพอในระบบการเผาไหม้เชื้อเพลิง ดังแสดงในตารางที่

2.1

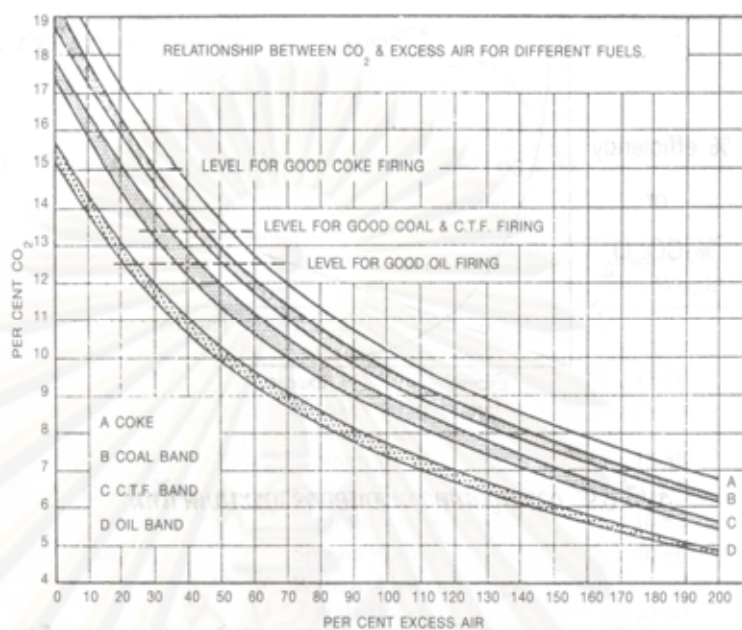
ตารางที่ 2.1 ปริมาณอากาศเกินพอที่มักใช้กับระบบการเผาไหม้เชื้อเพลิง (กัญจนา บุญยเกียรติ, 2544)

Fuel	Type of Furnace or Burners	Excess Air (% by Weight)
Pulverized coal	Completely water-cooled furnace for slag-tap or dry-ash-removal	15 - 20
	Partially water-cooled furnace for dry-ash-removal	15 - 40
Crushed coal	Cyclone Furnace-pressure or suction	10 - 15
Coal	Spreader stoker	30 - 60
	Water-cooled vibrating-grate stoker	30 - 60
	Chain-grate and traveling-grate stokers	15 - 50
	Underfeed stoker	20 - 50
Fuel oil	Oil Burners, register-type	5 - 10
	Multifuel burners and flat-frame	20 - 20
Wood	Dutch oven (10-23% through grates) and Hoff-type	20 - 25
Bagasse	All Furnaces	25 - 35

ปริมาณอากาศเกินพอที่เหมาะสมนั้นนอกจากจะหมายถึงการเผาไหม้ที่สมบูรณ์แล้ว ยังมีผลให้การสูญเสียความร้อนที่ต่ำที่สุดด้วย ทั้งนี้เนื่องจากถ้าใช้อากาศไม่พอ จนเกิดการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์จะทำให้เกิดการสูญเสียความร้อนในรูปขององค์ประกอบแก๊สและของแข็งที่ยังเผาไหม้ได้ออกไปจากระบบ เรียกว่า การสูญเสียศักยภาพทางความร้อน เช่น แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ไฮโดรเจน (H₂) หรือ คาร์บอน (C) เป็นต้น โดยเฉพาะแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ ซึ่งมักจะพบเสมอ แต่ถ้าใช้อากาศมากเกินไป ปริมาตรอากาศส่วนที่เกินพอที่เข้ามาจะออกไปจากระบบโดยที่ไม่ได้ทำปฏิกิริยา ทำให้ปริมาตรรวมของฟลูแก๊สเพิ่มขึ้น ความร้อนสูญเสียสัมผัสที่ออกไปจากระบบนี้ เรียกว่า การสูญเสียความร้อนสัมผัส ดังนั้นต้องมีจุดที่เหมาะสมที่ทำให้การสูญเสียความร้อนต่ำที่สุด

ถ้าคำนวณคุณมวลของระบบเผาไหม้จะพบว่ามีความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์คาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) และ เปอร์เซ็นต์ออกซิเจน (O₂) คือถ้าอากาศเกินพอน้อย ฟลูแก๊สมีความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์สูง และออกซิเจนต่ำ ตรงกันข้าม ถ้ามีอากาศเกินพอมาก ฟลูแก๊สจะถูกเจือจางด้วยไนโตรเจน (N₂) และออกซิเจน (O₂) เกินพอจากอากาศ จึงมีความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำ และออกซิเจนสูง ในการควบคุมอากาศเกินพอจึงอาจใช้เครื่องมือวัดความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ หรือ ออกซิเจน เพียงชนิดเดียวก็ได้ ในหลักการวัดความเข้มข้นของแก๊ส คาร์บอนไดออกไซด์ ในฟลูแก๊สให้ผลถูกต้องมากกว่าเพราะไม่มีผลจากการรั่ว

ของอากาศเข้าสู่อุปกรณ์การวัด จึงเป็นที่นิยมมากกว่า โดยความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์คาร์บอนไดออกไซด์และเปอร์เซ็นต์อากาศเกินพอ ดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 ความสัมพันธ์ระหว่าง เปอร์เซ็นต์คาร์บอนไดออกไซด์ และเปอร์เซ็นต์อากาศเกินพอ
(กัญจนา บุญเกียรติ, 2544)

2.4 ถ่านหิน (สำเริง จักรใจ, 2547)

ถ่านหินเกิดจากไม้และชีวมวลชนิดอื่นๆ ที่ทับถมกันและอัดแน่นเป็นเวลานานหลายแสนปี จนกระทั่งกลายเป็นหิน โดยเริ่มจากพืชในบริเวณที่ชื้นแฉะและอับอากาศแล้วเกิดการสลายตัวทางเคมีซึ่งสภาพพร้อมกับการทับถมกันของพืชชนิดต่างๆ เพิ่มเติมเข้ามาจนมีความลึกมากขึ้นเรื่อยๆ ทำให้พืชมีความชื้น ความพรุน ปริมาณสารระเหย พร้อมกับปริมาณของออกซิเจนและไฮโดรเจนลดลงในขณะที่ปริมาณคาร์บอนเพิ่มมากขึ้น พืชจะเปลี่ยนเป็นถ่านหินที่มีศักดิ์สูงขึ้นตามลำดับ (มีปริมาณคาร์บอนคงตัวมากขึ้น) คือ ลิกไนต์ บิทูมินัส และแอนทราไซต์ในที่สุด เรียกกระบวนการเปลี่ยนแปลงนี้ว่าการเกิดถ่านหิน ถ่านหินมีองค์ประกอบหลักคือ คาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน ไนโตรเจน กำมะถัน และสารอนินทรีย์อื่นๆ (ในปริมาณเล็กน้อย) ที่จะกลายเป็นเถ้าหลังการเผาไหม้ เช่น อลูมิเนียม เหล็ก แคลเซียม แมกนีเซียม โพแทสเซียม แมงกานีส ฟอสฟอรัส และออกไซด์ของซิลิกอน (เช่น แร่ไพไรต์ แร่แคลไซต์ และแร่ควาลิไนต์ เป็นต้น) โดยสมบัติของถ่านหินเปรียบเทียบกับไม้และพืช ดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 สมบัติของถ่านหิน เปรียบเทียบกับไม้และพีต (กัญจนานุญเกียรติ, 2544)

ชนิด	ร้อยละความชื้น (ตามสภาพ)	ร้อยละความชื้น (ผึ่งแห้งในอากาศ)	ร้อยละ, แห้งและปราศจากเถ้า		
			คาร์บอน	ไฮโดรเจน	ออกซิเจน
ไม้	30-60	10-15	50	6.0	43
พีต	+90	20-25	55-65	5.5	32
ลิกไนต์	20-40	15-25	65-73	4.5	21
ซับบิทูมินัส	10-20	10-20	73-78	6.0	16
บิทูมินัส	13-1	13-1	78-92	5.3	8
แอนทราไซต์	2-3.5	2-3.5	92-96	2.5	4

2.5 เชื้อเพลิงชีวมวล (Biomass)

เชื้อเพลิงชีวมวล เป็นเชื้อเพลิงที่ได้จากชีวมวล ซึ่งเป็นสิ่งมีชีวิตหรือผลิตผลจากการสร้างและสลายของสิ่งมีชีวิต (Metabolic byproducts) เช่น มูลวัว เป็นต้น พลังงานทดแทน (Renewable energy) ไม่เหมือนพลังงานจากแหล่งธรรมชาติอื่น เช่น ปิโตรเลียม ถ่านหิน และเชื้อเพลิงนิวเคลียร์

มวลชีวภาพ หรือชีวมวล (Biomass) คือสารอินทรีย์ที่เป็นแหล่งกักเก็บพลังงานจากธรรมชาติและสามารถนำมาใช้ผลิตพลังงานได้ เช่น เศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร หรือกากจากกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมการเกษตร เช่น แกลบ ชานอ้อย เศษไม้ กากปาล์ม กากมันสำปะหลัง ชังข้าวโพด กาบและกะลามะพร้าว ส่าเหล้า เป็นต้น

เชื้อเพลิงชีวมวล สามารถแยกออกได้ 4 ประเภท คือ

1. เชื้อเพลิงชีวมวลที่ได้จากไม้ (Forest biomass) ซึ่งสามารถแยกออกได้เป็นไม้เนื้ออ่อนและแข็ง ได้แก่ เศษไม้ เปลือกไม้ กิ่งไม้ และพวกซี้เสื่อย
2. เชื้อเพลิงชีวมวลที่ได้จากการเกษตร (Agriculture biomass) ส่วนใหญ่จะเป็นของเหลือทิ้งจากการเกษตร เช่น ฟางข้าว ชังข้าวโพด แกลบ เป็นต้น
3. เชื้อเพลิงชีวมวลที่ได้จากอุตสาหกรรมเกษตร (Industrial waste) เช่น เชื้อเพลิงที่ได้จากโรงงานน้ำตาล ได้แก่ ชานอ้อย นอกจากนี้ยังมีกากสับปะรดที่ได้จากโรงงานทำสับปะรดกระป๋อง เชื้อเพลิงประเภทนี้จะมีประมาณความร้อนสูงมาก
4. เชื้อเพลิงที่ได้จากของเหลือใช้จากมนุษย์ (Domestic waste) ได้แก่ เชื้อเพลิงที่ได้จากขยะเทศบาล (พรเทพ จิตวุฒิกโร และคณะ, 2538)

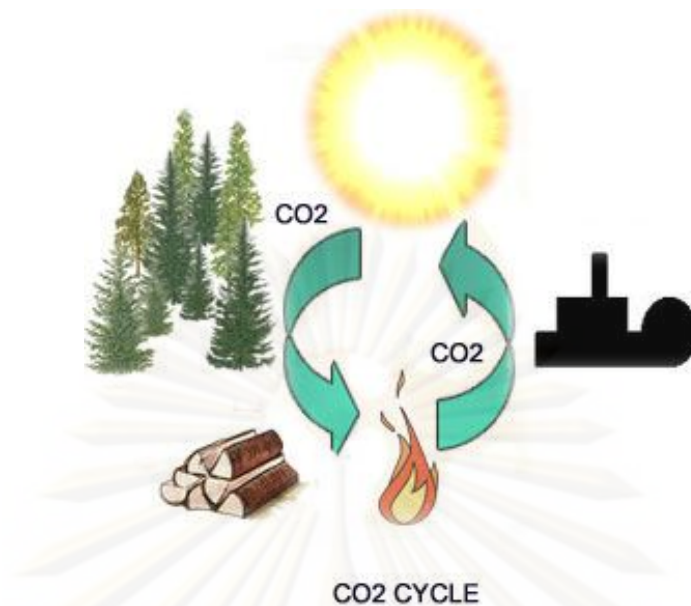
พลังงานชีวมวลมีสัดส่วนการใช้คิดเป็น 14.7% ของพลังงานรวมของโลก โดยที่ประชากรกว่า 40% ของประชากรโลก อาศัยชีวมวลในการหุงต้มและให้ความอบอุ่น และหากพิจารณาเฉพาะปริมาณการใช้ในประเทศกำลังพัฒนาทั่วโลกนั้น การใช้พลังงานชีวมวลจะมีสัดส่วนที่ 38.1% ของการใช้พลังงานทั้งหมด โดยมีจีนและอินเดีย เป็นประเทศผู้ใช้หลัก

ชีวมวลเป็นพลังงานที่มาจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรที่ไม่มีวันหมดไป เพราะวงจรการผลิตชีวมวลคือวงจรของพืชที่มีระยะเวลาสั้น ต่างจากน้ำมันหรือถ่านหินที่ต้องอาศัยการทับถมกันเป็นเวลาหลายล้านปี นอกจากนี้ ชีวมวลสามารถผลิตได้ภายในประเทศ เกษตรกรจะมีรายได้เพิ่มขึ้นจากการจำหน่ายชีวมวลสู่ผู้ใช้ และยังช่วยลดการนำเข้าพลังงานจากต่างประเทศได้อีกด้วย

ข้อดีที่สำคัญทางสิ่งแวดล้อมคือ การใช้ชีวมวลในการผลิตความร้อนหรือไฟฟ้าจะไม่เพิ่มปริมาณสุทธิของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศโลก ในกรณีที่เรามีการผลิตชีวมวลขึ้นมาเพื่อทดแทนชีวมวลที่ได้ใช้ไป เพราะจะทำให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ถูกหมุนเวียนมาใช้ในชีวมวลที่ผลิตใหม่เท่ากับปริมาณก๊าซที่ถูกผลิตจากการเผาไหม้ชีวมวลนั้นๆ เนื่องจากพืชต้องหายใจเพื่อเอาก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เข้าไปใช้ในการเจริญเติบโต อีกทั้งชีวมวลยังมีปริมาณกำมะถันต่ำกว่าเชื้อเพลิงฟอสซิลมาก นั่นหมายถึง การใช้ชีวมวลจะลดโอกาสในการเกิดปรากฏการณ์เรือนกระจก (Greenhouse effect) ซึ่งตรงข้ามกับการใช้น้ำมันในภาคขนส่งหรือถ่านหินในโรงไฟฟ้า แต่ชีวมวลมีข้อเสียคือ ชีวมวลมีการเก็บรักษาและการขนส่งที่ยาก และมีความเสี่ยงสูงในการจัดหาหรือรวบรวมปริมาณชีวมวลที่ต้องการใช้ให้คงที่ตลอดปี เพราะชีวมวลบางประเภทเช่นกากอ้อยมีจำกัดเพียงบางเดือน อีกทั้งชีวมวลทุกประเภทต่างต้องการพื้นที่ในการเก็บรักษาขนาดใหญ่กว่าเชื้อเพลิงฟอสซิล เช่น หากต้องการปริมาณความร้อนที่เท่ากัน จะต้องใช้แกลบในปริมาณที่มากกว่าน้ำมันเตา เป็นต้น (วงกต วงศ์อภัย, 2547)

ศูนย์วิทยุทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.8 วัฏจักรคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂ cycle)

(ที่มา: Jonhanner , 2008: <http://www.climatechangenetwork.org.uk>)

2.6 แก๊สไนโตรเจนออกไซด์ (NO_x)

แก๊สไนโตรเจนออกไซด์เป็นแก๊สไม่มีสี ไม่มีกลิ่น ละลายน้ำได้บ้างเล็กน้อย สามารถเกิดขึ้นได้ตามธรรมชาติได้แก่ ไฟผ่าฟ้าแลบ ภูเขาไฟระเบิด หรือจากการกระทำของมนุษย์เช่น การเผาเชื้อเพลิง อุตสาหกรรมกรดไนตริก ซุปโลหะ กรดกำมะถัน และวัตถุระเบิด เป็นต้น แก๊สไนโตรเจนออกไซด์ที่สำคัญคือ แก๊สไนตริกออกไซด์ (NO) และแก๊สไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO₂) โดยแก๊สไนโตรเจนไดออกไซด์จะพบได้น้อยมากในฟลูแก๊สและไอเสียจากยานพาหนะ โดยจะเกิดขึ้นในบริเวณเปลวไฟแต่จะถูกรีดิวซ์กลับไปเป็นไนตริกออกไซด์ในบริเวณหลังเปลวไฟ แก๊สเหล่านี้สามารถทำปฏิกิริยากับแสง (Photochemical reaction) ในบรรยากาศก่อให้เกิดหมอกที่เรียกว่า Smog เป็นสารมลพิษทางโฟโตเคมี เป็นสารประกอบที่มีพิษ (Noxious compound) เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตทั้งพืชและสัตว์ อีกทั้งแก๊สไนตริกออกไซด์จะถูกออกซิไดซ์เมื่อพบกับออกซิเจนและโอโซนในบรรยากาศกลายเป็นแก๊สไนโตรเจนไดออกไซด์ ซึ่งเป็นสาเหตุของฝนกรดเนื่องจากละลายน้ำแล้วจะได้กรดไนตริก (มีส่วนให้เกิดฝนกรดถึง 30%) นอกจากนี้ แก๊สไนตริก ออกไซด์ยังสามารถรวมกับฮีโมโกลบินในเม็ดเลือดแดงได้เช่นเดียวกับแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ แก๊สเหล่านี้จึงจัดเป็นสารที่ก่อให้เกิดมลพิษในอากาศ ซึ่งจะต้องควบคุมปริมาณไม่ให้เกินพิกัดที่เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต

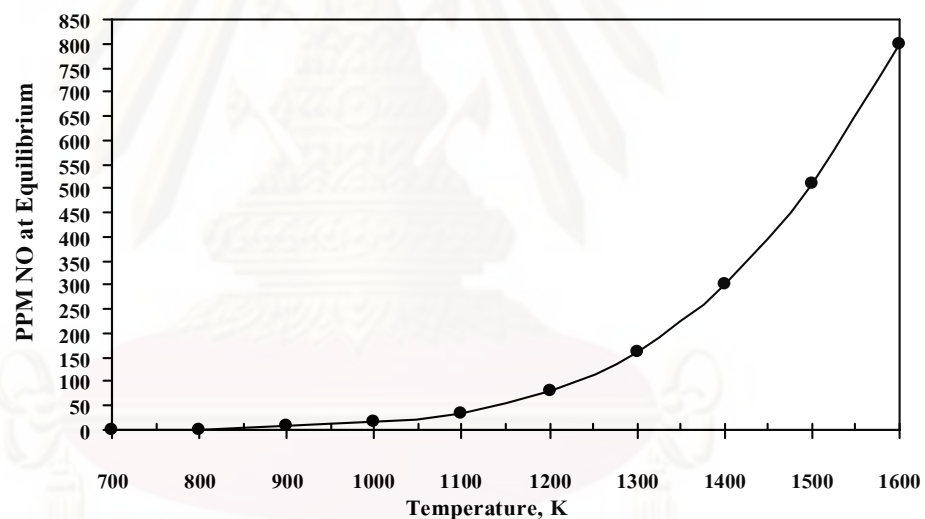
แก๊สไนโตรเจนออกไซด์สามารถเกิดได้จากการเผาไหม้ถ่านหินและน้ำมัน ซึ่งพบว่าจะมีแก๊สไนตริกออกไซด์มากกว่าแก๊สไนโตรเจนไดออกไซด์ โดยปริมาณของแก๊สไนโตรเจนออกไซด์จะขึ้นอยู่กับ

1. ชนิดของเชื้อเพลิงที่ใช้ ขึ้นกับปริมาณของไนโตรเจนที่เป็นองค์ประกอบอยู่ในถ่านหินหรือเชื้อเพลิงที่นำมาใช้ในการเผาไหม้

2. อุณหภูมิของการเผาไหม้ ยิ่งอุณหภูมิในการเผาไหม้สูงจะทำให้เกิดแก๊สไนโตรเจนออกไซด์ได้ดี โดยเฉพาะที่อุณหภูมิของการเผาไหม้สูงกว่า 1,173 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ 2.9

3. ปริมาณอากาศมากเกินไป ส่งผลให้มีปริมาณของไนโตรเจนในอากาศมากขึ้นและก่อให้เกิดแก๊สไนโตรเจนออกไซด์มากตามไปด้วย

4. ปริมาณหินปูนที่ใช้เพื่อการกำจัดแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ซึ่งขึ้นกับปริมาณสารระเหยในเชื้อเพลิง โดยเชื้อเพลิงที่มีสารระเหยสูงจะมีแนวโน้มที่จะเกิดแก๊สไนโตรเจนออกไซด์ได้ดีกว่าเชื้อเพลิงที่มีสารระเหยต่ำ ไนโตรเจนที่อยู่ในสารระเหยของเชื้อเพลิงจะอยู่ในรูปของแอมโมเนีย (NH_3) เมื่อเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ แอมโมเนียจะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนโดยมีปูนขาว (CaO) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาให้เกิดแก๊สไนโตรเจนออกไซด์ (NO)



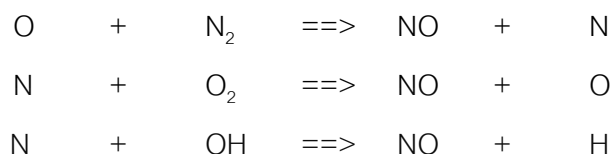
รูปที่ 2.9 การเกิดไนโตรเจนออกไซด์ที่อุณหภูมิต่างๆ

(ที่มา: ปิยะพันธ์ จะกอ, 2548)

โดยทั่วไปสามารถแบ่งการเกิดแก๊สไนโตรเจนออกไซด์ได้ 4 ลักษณะ ดังนี้คือ

1. Thermal NO_x (Zeldovich- NO)

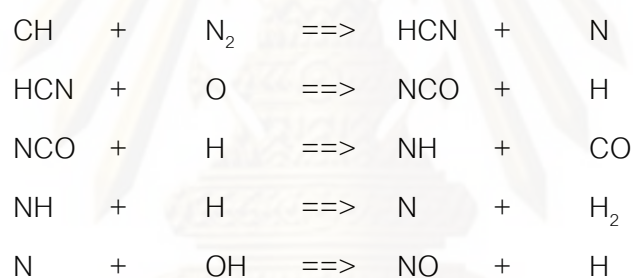
เป็นการเกิดแก๊สไนโตรเจนออกไซด์จากปฏิกิริยาออกซิเดชันของแก๊สไนโตรเจนในบรรยากาศที่อุณหภูมิสูง (ประมาณ 1,700 องศาเซลเซียส)



สาเหตุที่ได้ชื่อว่าเป็น Thermal NO เพราะว่าไนโตรเจนออกไซด์ที่เกิดขึ้นนี้ต้องใช้พลังงานก่อกัมมันต์ที่สูงมาก ทั้งนี้เพราะต้องเอาชนะแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมของ N_2 ในรูปของไตรพันธะเพื่อเกิดปฏิกิริยา และจะเกิดได้อย่างเร็วมากก็ต่อเมื่ออุณหภูมิต้องสูงมากเท่านั้น ดังนั้นการที่จะลดปริมาณ Thermal NO ได้นั้นมีเพียง 2 วิธี คือ ลด $[\text{N}_2]$ และ $[\text{O}]$ หรือ ลดอุณหภูมิการเผาไหม้

2. Prompt NO (Fenimore-NO)

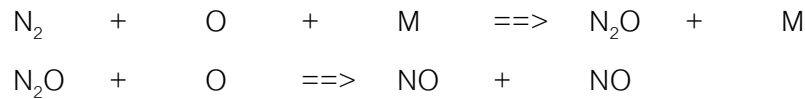
Prompt NO เกิดจากอนุมูลอิสระ CH ซึ่งแต่เดิมพิจารณาว่าไม่มีความสำคัญประการใด แต่กลับพบว่าอนุมูลอิสระ CH นี้ เกิดขึ้นในลักษณะเป็นสารชั้นกลางที่บริเวณแนวเปลวไฟเท่านั้น จากนั้น CH จะทำปฏิกิริยากับไนโตรเจนในอากาศทำให้เกิดกรดไฮโดรไซยานิก (HCN) ซึ่งจะทำปฏิกิริยาต่อไปจนเกิด NO ดังสมการต่อไปนี้



อย่างไรก็ตาม การประเมินเพื่อหาปริมาณ Prompt NO ภายใต้ภาวะความเข้าใจในการเกิดปฏิกิริยาในปัจจุบันยังไม่ดีนักเพราะยังมีข้อมูลเกี่ยวกับอัตราการเกิดปฏิกิริยาของ Prompt NO ค่อนข้างน้อย ทั้งนี้ Prompt NO จะเกิดขึ้นที่ภาวะอากาศน้อยๆ (อัตราส่วนอากาศที่ใช้จริงต่ออากาศทางทฤษฎี < 1) ที่อุณหภูมิต่ำกว่าการเกิด Thermal NO คือประมาณ 1,300 องศาเซลเซียส

3. NO ที่เกิดขึ้นผ่านไนตรัสออกไซด์ (N_2O)

Thermal NO จะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูงๆ ในขณะที่ Prompt NO จะเกิดที่ภาวะอากาศน้อยๆ แต่สำหรับ NO ที่เกิดผ่าน N_2O จะเกิดได้ดีที่ภาวะการเผาไหม้ที่อากาศมากๆ (อัตราส่วนอากาศที่ใช้จริงต่ออากาศทางทฤษฎี > 1) NO ที่เกิดผ่าน N_2O นี้จะมีความคล้ายคลึงกับการเกิด Thermal NO ในแง่ที่ว่าอะตอมของออกซิเจนเข้าทำปฏิกิริยาโดยตรงกับโมเลกุลไนโตรเจน แต่ต้องอาศัยโมเลกุลที่สาม M เป็นตัวช่วยเร่งปฏิกิริยาให้เกิด N_2O จากนั้น N_2O จะทำปฏิกิริยากับอะตอมของออกซิเจนต่อไปจนเกิด NO ตามสมการข้างล่างนี้

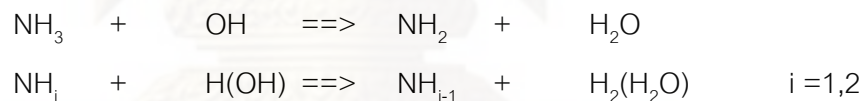


ยิ่งความดันจากการเผาไหม้มีค่าสูงมากเท่าไร NO ที่เกิดขึ้นผ่านไนตรัสออกไซด์ ก็จะมียิ่งเกิดขึ้นเท่านั้น เนื่องจากต้องการพลังงานกระตุ้นที่ต่ำ และอุณหภูมิการเผาไหม้ที่ต่ำก็ไม่ได้มีผลเหมือนกับ Thermal NO ดังนั้น NO ที่เกิดขึ้นผ่านไนตรัสออกไซด์ จึงเกิดได้ดีที่ระบบการเผาไหม้ถูกเจือจางด้วยอากาศมากๆ

4. NO ที่เกิดจากไนโตรเจนในเชื้อเพลิง (Fuel NO)

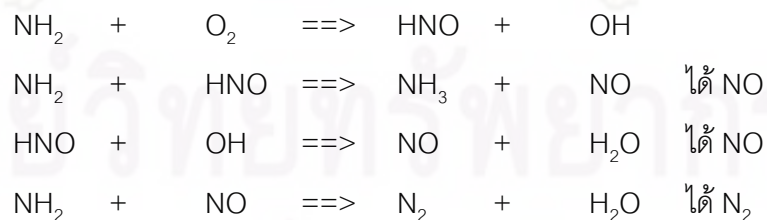
จะเกิดในขณะที่เชื้อเพลิงเกิดการเผาไหม้ มีธาตุไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบอยู่ในเชื้อเพลิง จะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในบรรยากาศ โดยทั่วไประบบการเผาไหม้แบบฟลูอิดเบดจะเกิด NO ที่เกิดจากไนโตรเจนในเชื้อเพลิงมากกว่า (ประมาณ 90%) กลไกการเปลี่ยนแปลงของสารประกอบไนโตรเจนจะเกิดการสลายตัวเป็นสองส่วนดังกล่าวคือสารระเหยและถ่านชาร์ ในแต่ละส่วนจะมีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบ เมื่อเผาไหม้ที่อุณหภูมิสูงไนโตรเจนจะเกิดปฏิกิริยาเปลี่ยนรูปเป็นสารประกอบที่อยู่ในรูป แอมโมเนีย (NH_3) และ กรดไฮโดรไซยานิก (HCN) ก่อนจะทำปฏิกิริยาต่อไปจนเกิด NO ดังสมการข้างล่าง

กรณีแอมโมเนีย

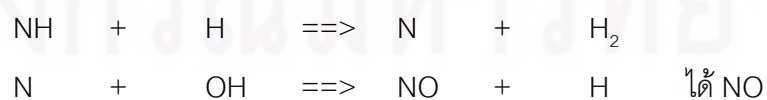


เมื่อ NH_{i-1} คือ Amine radical อาจเป็น NH_2 , NH หรือ N ก็ได้ ซึ่งจะถูกออกซิไดซ์ต่อไปจนเกิด NO หรือ N_2

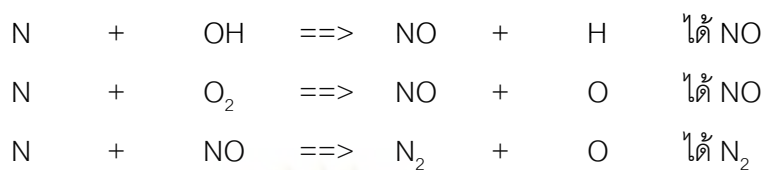
กรณี NH_2



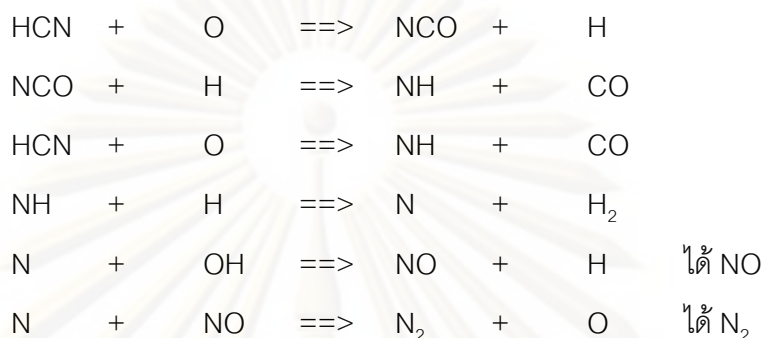
กรณี NH (คล้ายปฏิกิริยาการเกิด Prompt NO)



กรณี N (คล้ายปฏิกิริยาการเกิด Thermal NO)



กรณีของกรดไฮโดรไซยานิก (คล้ายปฏิกิริยาการเกิด Prompt NO)



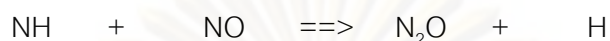
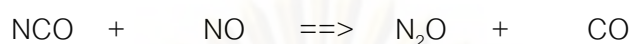
จะพบว่า Fuel NO มีกลไกการเกิด NO ที่ผสมผสานระหว่าง Thermal NO และ Prompt NO โดยจะเกิดขึ้นได้ดีในกรณีการเผาไหม้ที่เจือจางด้วยออกซิเจนในปริมาณที่สูง ดังนั้นจึงต้องควบคุมอัตราส่วนผสมระหว่างเชื้อเพลิงต่อออกซิเจนให้ดี โดยเฉพาะอย่างยิ่งการใช้เชื้อเพลิงที่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบ (สำเร็จ จักรใจ, 2547)

2.7 แก๊สไนตรัสออกไซด์ (N₂O)

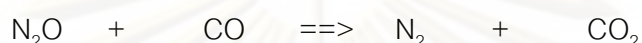
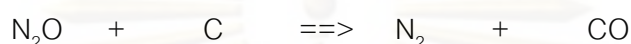
ไนตรัสออกไซด์ (Nitrous oxide) หรือที่รู้จักกันโดยทั่วไปในชื่อแก๊สหัวเราะ (Laughing gas) คือสารประกอบทางเคมีที่มีสูตรทางเคมีว่า N₂O ที่อุณหภูมิห้อง ไนตรัสออกไซด์จะไม่มีสี และเป็นแก๊สไม่ติดไฟ ไนตรัสออกไซด์มีกลิ่นหอมและมีรสหวานเล็กน้อย มีการนำไนตรัสออกไซด์ไปใช้ในการผ่าตัดและทางทันตกรรมเพื่อให้เกิดอาการชาและเพื่อการระงับความปวด โดยทั่วไปรู้จักกันในชื่อ “แก๊สหัวเราะ” เนื่องจากเมื่อสูดดมแล้วจะให้ความรู้สึกเคลิ้มสุขหรือครีมีใจ เป็นคุณสมบัติที่ทำให้มีการใช้ในเชิงนันทนาการโดยการใช้เป็นยาดม และยังมีมีการนำไปใช้ในการแข่งรถยนต์โดยให้เป็นตัวเติมออกซิเจนเพื่อเพิ่มกำลังให้เครื่องยนต์อีกด้วย ในปัจจุบันแก๊สไนตรัสออกไซด์ได้ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในวงการแพทย์ ทำหน้าที่เป็นยาสลบ ยาชา หรือยาระงับปวด เป็นต้น อีกทั้งยังมีการนำไปใช้ในการปรับแต่งเครื่องยนต์ที่มีความเร็วรอบสูงๆ เพื่อเพิ่มกำลังของเครื่องยนต์ในฐานะเป็นตัวออกซิไดเซอร์ หรือเรียกว่า NOS (Nitrous oxide systems)

ไนตรัสออกไซด์ส่วนใหญ่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายดิน สารอินทรีย์ในน้ำ และมหาสมุทรโดยแบคทีเรีย ซึ่งในภาวะธรรมชาตินั้นมีความสมดุลอยู่แล้ว แต่ในปัจจุบันมีการทำเกษตรกรรมกันอย่างแพร่หลาย มีการพรวนดิน ใส่ปุ๋ยไนโตรเจน อีกทั้งยังมีการทำฟาร์มปศุสัตว์ ซึ่งทำให้เกิดการย่อยสลายโดยแบคทีเรียในปริมาณมากขึ้นจึงเกิดการสะสมของแก๊สไนตรัสออกไซด์ในบรรยากาศ

โดยคิดเป็นปริมาณถึง 65% ในขณะที่ในกระบวนการอุตสาหกรรม อาทิเช่น อุตสาหกรรมไนลอน อุตสาหกรรมเคมีและพลาสติกบางชนิด อุตสาหกรรมที่มีกรดไนตริกเกี่ยวข้อง และการเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิลทำให้เกิดแก๊สไนตรัสออกไซด์สู่สิ่งแวดล้อม 20% โดยปฏิกิริยาการเกิดไนตรัสออกไซด์จากกระบวนการเผาไหม้เป็นดังนี้



และปฏิกิริยาเปลี่ยนแก๊สไนตรัสออกไซด์เป็นแก๊สไนโตรเจนมีดังนี้



ออกไซด์ของไนโตรเจนมีอยู่หลายชนิด แต่ไนตรัสออกไซด์จะมีความแตกต่างจากออกไซด์ของไนโตรเจนชนิดอื่นๆเป็นอย่างมากตรงที่ เป็นแก๊สเรือนกระจกชนิดรุนแรง ซึ่งหากกล่าวถึงแก๊สเรือนกระจกคงจะหนีไม่พ้นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ เนื่องจากมีการปล่อยออกสู่บรรยากาศในปริมาณมากมายมหาศาล การกำหนดค่าศักยภาพของแก๊สเรือนกระจก (GWP, global warming potential) จะกำหนดให้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าเป็น 1 GWP แต่แก๊สไนตรัสออกไซด์มีผลกระทบต่อภาวะเรือนกระจกมากกว่าคาร์บอนไดออกไซด์ถึงประมาณ 310 เท่า หรือ 310 GWP เมื่อเทียบที่ปริมาณเท่าๆกัน และมีระยะเวลาในการสลายตัวมากกว่า 100 ปี ดังแสดงในตารางที่ 2.3

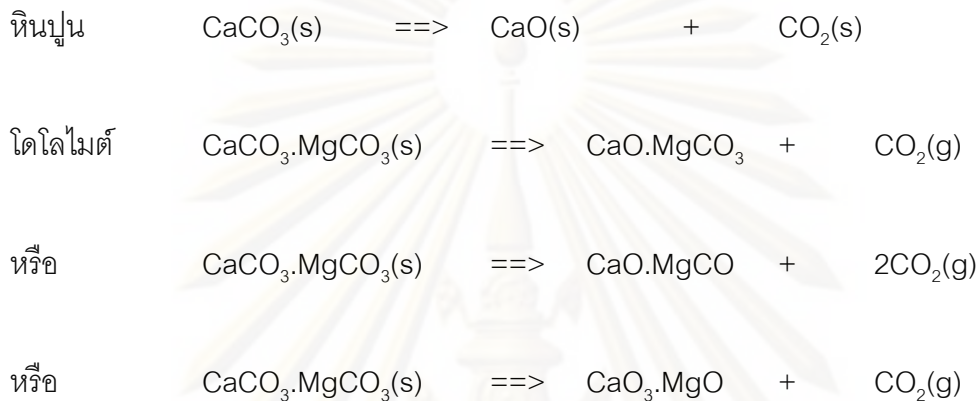
ตารางที่ 2.3 ศักยภาพของแก๊สเรือนกระจก เปรียบเทียบโดย 1 กิโลกรัมของแก๊สเรือนกระจกต่อ 1 กิโลกรัมของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

(ที่มา: <http://www.geocraft.com> วันที่ 15 มีนาคม พ.ศ.2553)

This table adjusts values in Table 1 to compare greenhouse gases equally with respect to CO ₂ . (#'s are unit-less)	Multiplier (GWP)	Pre-industrial baseline(new)	Natural additions (new)	Man-made additions (new)	Tot. Relative Contribution	Percent of Total (new)
Carbon Dioxide (CO ₂)	1	288,000	68,520	11,880	368,400	72.369%
Methane (CH ₄)	21 (2)	17,808	12,117	6,720	36,645	7.199%
Nitrous Oxide (N ₂ O)	310 (2)	88,350	3,599	4,771	96,720	19.000%
CFC's (and other misc. gases)	see data (3)	2,500	0	4,791	7,291	1.432%
Total		396,658	84,236	28,162	509,056	100.000%

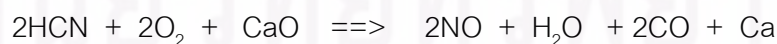
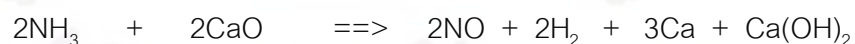
2.8 สารประกอบคาร์บอเนต

สารประกอบคาร์บอเนตเช่นหินปูน (Limestone , CaCO_3) หรือ โดโลไมต์ (dolomite , $\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$) เป็นสารประกอบที่มีสถานะของแข็ง ในกระบวนการเผาไหม้หินปูนหรือโดโลไมต์ จะเกิดปฏิกิริยา แคลซิเนชัน (calcinations) เป็นปฏิกิริยาการสลายตัวของตัวดูดซับ (sorbent) เมื่อได้รับความร้อนเกิดเป็นสารประกอบออกไซด์ที่มีรูพรุนและว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาดังสมการ

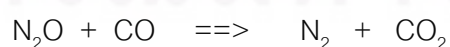


ปฏิกิริยาเริ่มต้นเกิดการจากการที่หินปูนได้รับความร้อนแล้วเกิดปฏิกิริยาแคลซิเนชันได้เป็นแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ทำให้มีความพรุน ขนาดของรูพรุน และพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น บางครั้งเกิดปฏิกิริยาการหลอมตัว (sintering) ของสารเจือปน แต่ปฏิกิริยาแคลซิเนชันเกิดได้ดีกว่า หลังจากนั้นตัวดูดซับ (CaO) จะทำปฏิกิริยากับสารประกอบต่างๆ

แคลเซียมออกไซด์เข้าทำปฏิกิริยากับแอมโมเนีย(NH_3)และไฮโดรเจนไซยาไนด์(HCN) ซึ่งเป็นสารประกอบไฮโดรเจนที่เป็นองค์ประกอบในสารระเหยของเชื้อเพลิงเกิดเป็นแก๊สไนโตรเจนออกไซด์ ดังสมการ (A.N. Hayhurst และ A.D. Lawrence , 1996)



แคลเซียมออกไซด์จะเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้เกิดการสลายตัวของแก๊สไนตรัสออกไซด์ดังสมการ (B.X. Shen และคณะ ,2003)



2.9 การควบคุมมลพิษ (กัญจนา บุญเกียรติ, 2544)

ผลผลิตจากการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ของเชื้อเพลิงที่มี ไฮโดรคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก คือ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำ แต่ในทางปฏิบัติ การเผาไหม้มักเกิดแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ แก๊สกลุ่มไนโตรเจนออกไซด์ แก๊สกลุ่มซัลเฟอร์ออกไซด์ ไฮโดรคาร์บอนที่เผาไหม้ไม่หมด และอนุภาคแขวนลอย ได้แก่ เขม่าและควันในแก๊สด้วย อันตรายของผลผลิตเหล่านี้ไม่น่าจะมีหากกระจายออกไปในบรรยากาศ อย่างไรก็ตาม เราจะมีแหล่งผลิตจำนวนมากอยู่รวมกันในบริเวณหนึ่งๆ จึงทำให้การกระจายออกถูกจำกัดโดยสภาพภูมิประเทศและภูมิอากาศ นอกจากนั้นแก๊สมลพิษและอนุภาคมลพิษหลายชนิดทำปฏิกิริยาเสริมกัน จึงเร่งให้เกิดผลทวีคูณขึ้น แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ แก๊สกลุ่มไนโตรเจนออกไซด์ และไฮโดรคาร์บอนที่เผาไหม้ไม่หมด จะเกิดปฏิกิริยาเมื่อมีแสงอาทิตย์ให้หมอกปนควันทางโฟโตเคมี แก๊สกลุ่มซัลเฟอร์ออกไซด์ที่รวมตัวกันอย่างเข้มข้นเฉพาะบริเวณก็ให้ผลเช่นเดียวกัน ตัวอย่างที่เป็นบทเรียนราคาแพงคือ หมอกปนควันที่เกิดขึ้นอย่างรุนแรงในนครลอสแอนเจลิส สหรัฐอเมริกา และลอนดอน สหราชอาณาจักร ในตัวอย่างแรก การเกิดหมอกปนควันถูกเร่งโดยสภาพภูมิประเทศ ทั้งภูเขาและทะเล ที่ช่วยขังมลพิษและอากาศที่เย็นกว่าไว้ใต้ชั้นอากาศที่อุ่นกว่า ทำให้เกิดผลกระทบจากหมอกปนควันอย่างรุนแรงในช่วงกลางวัน มีผลต่อสุขภาพมนุษย์และพืช ในตัวอย่างหลัง เกิดผลร้ายแรงเมื่ออุณหภูมิลดต่ำลงทำลายสุขภาพมนุษย์และสิ่งก่อสร้าง เนื่องจากหมอกปนควันที่กักตัวของกรดซัลฟูริก

แม้แต่แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งไม่ใช่แก๊สมลพิษ ก็มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมได้เช่นเดียวกัน ทั่วโลกแผ่รังสีอินฟราเรดในช่วง 13 – 18 ไมโครเมตร ซึ่งคาร์บอนไดออกไซด์ดูดซับได้ดีมาก ทำให้รังสีดังกล่าวถูกกักเก็บไว้ในบรรยากาศ และอุณหภูมิของโลกเพิ่มขึ้น เกิดเป็นปรากฏการณ์เรือนกระจก (greenhouse effects) แก๊สเรือนกระจก (greenhouse gases) ส่วนใหญ่มาจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงได้พิภพ โดยเฉพาะคาร์บอนไดออกไซด์ มีผลให้ความเข้มข้นเพิ่มขึ้นจากประมาณ 300 ส่วนในล้านส่วน ประมาณ 1 ส่วนในล้านส่วนทุกปี ถึงแม้ว่าแก๊สชนิดอื่นจะทำให้เกิดผลกระทบนี้ได้สูงกว่าเช่น มีเทน ซึ่งเกิดจากการปลูกข้าว และไนตรัสออกไซด์จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบ ซึ่งไนตรัสออกไซด์จะทำให้เกิดปรากฏการณ์เรือนกระจกได้รุนแรงกว่าคาร์บอนไดออกไซด์เป็นอย่างมาก อีกทั้งยังมีระยะเวลาในการสลายตัวยาวนานถึง 120 ปี แต่ทั้งมีเทนและไนตรัสออกไซด์นั้นเกิดในปริมาณที่น้อยกว่าคาร์บอนไดออกไซด์เป็นอย่างมาก มีการทำนายว่าถ้าความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้นเป็นสองเท่า จะมีผลให้อุณหภูมิผิวโลกเพิ่มขึ้น 2 องศาเซลเซียส ซึ่งมีผลร้ายแรงต่อการละลายของยอดภูเขาน้ำแข็งที่ขั้วโลก และส่งผลให้โลกร้อนขึ้นต่อไปได้อีก

นอกจากภาวะอากาศจะได้รับผลกระทบจากการเผาไหม้เนื่องจากแก๊สพิษแล้ว ยังได้รับผลกระทบจากอนุภาคแขวนลอย ได้แก่ เขม่าและเถ้า จากถ่านหินและน้ำมันเตา ซึ่งมีผลกระทบต่อสุขภาพมนุษย์และการเจริญเติบโตของพืช และยังมีส่วนร่วมในการเร่งการเกิดปฏิกิริยาการเกิดหมอกควันทางโฟโตเคมีให้ทวีคูณด้วย

ในกรณีของแก๊สเชื้อเพลิง การเผาไหม้จะเกิดได้อย่างสมบูรณ์และสะอาด ฟลูแก๊สไม่มีอนุภาคของเถ้า จึงผ่านฟลูแก๊สไปที่ปล่องควันออกสูบรรยากาศได้โดยตรง มลพิษและผลกระทบมีน้อย ในกรณีของเชื้อเพลิงเหลวก็เช่นเดียวกัน ปริมาณเถ้าในน้ำมันเตามีน้อยเมื่อเทียบกับเชื้อเพลิงแข็ง จึงไม่จำเป็นต้องติดตั้งอุปกรณ์ดักฝุ่นเท่าไรนัก สิ่งที่ต้องคำนึงถึงคือการควบคุมการเผาไหม้ให้สมบูรณ์เพื่อไม่ให้แก๊สที่ออกจากปล่องควันมีความเข้มข้นของควันสูงเกินไป ในกรณีของเชื้อเพลิงแข็ง โดยเฉพาะอย่างยิ่งถ่านหิน มลพิษและผลกระทบจะเกิดมากที่สุด ทั้งในรูปของแก๊สกลุ่มซัลเฟอร์ออกไซด์ แก๊สกลุ่มไนโตรเจนออกไซด์ อนุภาคแขวนลอย การกัดกร่อนที่เกิดขึ้นในระบบเผาไหม้ และในระบบกำจัดมลพิษ

ในบรรดาแหล่งเกิดมลพิษต่างๆ แหล่งกำเนิดมลพิษจากการเผาไหม้เป็นแหล่งกำเนิดที่สำคัญที่สุด เพราะมีสารมลพิษหลายชนิดถูกปลดปล่อยออกมาในปริมาณมาก และกระจายอยู่ทุกบริเวณทั่วโลก โดยเฉพาะในประเทศอุตสาหกรรมและในเมืองใหญ่ สารมลพิษส่วนหนึ่งสามารถควบคุมให้ปลดปล่อยออกมาในระดับต่ำได้ด้วยการควบคุมการเผาไหม้ให้สมบูรณ์ และใช้อากาศเกินพอเล็กน้อย แต่มลพิษส่วนหนึ่งมาจากการเผาไหม้ที่อุณหภูมิสูง (สูงกว่า 1,750 องศาเซลเซียส) มีผลให้เกิดอะตอม อนุมูลอิสระ และไอออน ที่ว่องไวต่อการทำปฏิกิริยาแม้เมื่อออกจากห้องเผาไหม้แล้วก็ตาม การปลดปล่อยสารมลพิษจึงเป็นผลสืบเนื่องตามมา โดยค่ามาตรฐานของการปล่อยแก๊สพิษจากแหล่งกำเนิดอยู่ที่ในประเทศไทย แสดงดังตารางที่ 2.4

ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.4 ตารางแสดงมาตรฐานของการปล่อยแก๊สพิษในประเทศไทย
(ประกาศกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม ราชกิจจานุเบกษา 18 พฤษภาคม 2549)

ชนิดของอากาศเสีย	แหล่งที่มาของอากาศเสีย	ค่าปริมาณของอากาศเสียที่ปล่อยทิ้งจาก	
		กระบวนการผลิตที่ไม่มี การเผาไหม้เชื้อเพลิง	กระบวนการผลิตที่มี การเผาไหม้เชื้อเพลิง
1. ฝุ่นละออง (total suspended particulate) (มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)	1.1 หม้อไอน้ำ หรือแหล่งกำเนิด ความร้อนที่ใช้เชื้อเพลิง ดังนี้		
	(1) น้ำมันเตา	-	ไม่เกิน 240
	(2) ถ่านหิน	-	ไม่เกิน 320
	(3) ซีวมวล	-	ไม่เกิน 320
	(4) เชื้อเพลิงอื่นๆ	-	ไม่เกิน 320
	1.2 การถลุง หล่อหลอม รีดตีง และ/หรือผลิต อะลูมิเนียม	ไม่เกิน 300	ไม่เกิน 240
1.3 กระบวนการผลิต	ไม่เกิน 400	ไม่เกิน 320	
2. ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (Sulfur dioxide) (ส่วนในล้านส่วน)	2.1 หม้อไอน้ำ หรือแหล่งกำเนิด ความร้อนที่ใช้เชื้อเพลิง ดังนี้		
	(1) น้ำมันเตา	-	ไม่เกิน 950
	(2) ถ่านหิน	-	ไม่เกิน 700
	(3) ซีวมวล	-	ไม่เกิน 60
	(4) เชื้อเพลิงอื่นๆ	-	ไม่เกิน 60
	2.2 กระบวนการผลิต	ไม่เกิน 500	-
3. ก๊าซออกไซด์ของไนโตรเจน ซึ่งคำนวณในรูปของก๊าซ ไนโตรเจนไดออกไซด์ (oxides of nitrogen as Nitrogen dioxide) (ส่วนในล้านส่วน)	หม้อไอน้ำ หรือแหล่งกำเนิดความร้อน ที่ใช้เชื้อเพลิง ดังนี้		
	(1) น้ำมันเตา	-	ไม่เกิน 200
	(2) ถ่านหิน	-	ไม่เกิน 400
	(3) ซีวมวล	-	ไม่เกิน 200
	(4) เชื้อเพลิงอื่นๆ	-	ไม่เกิน 200
4. ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (Carbon monoxide) (ส่วนในล้านส่วน)	กระบวนการผลิต	ไม่เกิน 870	ไม่เกิน 690

กระบวนการผลิตที่ไม่มี การเผาไหม้เชื้อเพลิง ให้คำนวณผลที่ความดัน 1 บรรยากาศ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ที่ภาวะแห้ง (dry basis) โดยมีปริมาตรอากาศเสียที่ออกซิเจน (ร้อยละ ของ O₂) ณ ภาวะจริงในขณะตรวจวัดกระบวนการผลิตที่มีการเผาไหม้เชื้อเพลิง ให้คำนวณผลที่

ความดัน 1 บรรยากาศ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ที่ภาวะแห้ง (dry basis) โดยมีปริมาตรอากาศเสียที่ออกซิเจน (ร้อยละของ O_2) ร้อยละ 7

2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปิยะพันธ์ จะกอ (2548) ทำการศึกษาการเผาไหม้ถ่านหินผสมแกลบโดยใช้เครื่องเผาไหม้ฟลูอิดไคต์แบบหมุนเวียน พบว่าสามารถผสมแกลบกับถ่านหินได้มากที่สุดที่ร้อยละ 13.11 โดยน้ำหนัก เนื่องจากข้อจำกัดของระบบป้อนเชื้อเพลิงที่ใช้ในการทดลอง จากการทดลองที่อัตราส่วนผสมของแกลบที่ร้อยละ 23.19 โดยน้ำหนัก จะเกิดการไหม้ของเชื้อเพลิงย้อนเข้าไปในถังบรรจุเชื้อเพลิง ปริมาณแกลบที่เพิ่มขึ้นทำให้อุณหภูมิส่วนล่างของท่อไรเซอร์สูงขึ้น และเมื่อเพิ่มปริมาณแกลบมีผลทำให้ปริมาณออกซิเจนและแก๊สไนโตรเจนออกไซด์ (ไนตริกออกไซด์และไนโตรเจนไดออกไซด์) เพิ่มขึ้น ในขณะที่แก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์และแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ลดลง เนื่องจากแกลบมีปริมาณไนโตรเจนมากกว่าถ่านหิน และแกลบมีปริมาณคาร์บอนคงตัวและซัลเฟอร์น้อยกว่าถ่านหิน

ชัยวัฒน์ พรหมภูเบศร์ (2548) ได้ทดลองเผาไหม้ถ่านหินผสมแกลบโดยใช้เครื่องเผาไหม้ฟลูอิดไคต์แบบหมุนเวียนขนาด 3.5 kW เส้นผ่านศูนย์กลางไรเซอร์ 0.1 เมตร สูง 3 เมตร พบว่าอุณหภูมิการเผาไหม้ตลอดไรเซอร์อยู่ในช่วงประมาณ 800-1,000 องศาเซลเซียส ที่ปริมาณการป้อนอากาศรวมทั้งตั้งแต่ 920 ลิตรต่อนาทีขึ้นไป ปริมาณและสัดส่วนของการป้อนอากาศทุกัญมิแทบไม่มีผลต่อแนวโน้มของอุณหภูมิตลอดไรเซอร์ ปริมาณ CO จะสูงมากบริเวณส่วนล่างของไรเซอร์และลดลงอย่างรวดเร็วบริเวณตำแหน่งที่มีการป้อนอากาศทุกัญมิ ปริมาณ O_2 จะลดลงตลอดความสูงไรเซอร์ ปริมาณ CO_2 และ SO_2 จะเพิ่มขึ้นตลอดความสูงไรเซอร์ ปริมาณ NO และ NO_2 ค่อนข้างคงที่ตลอดไรเซอร์ อยู่ในช่วงประมาณ 100 และ 10 ppm ตามลำดับ เมื่อทำการเปลี่ยนเชื้อเพลิงจากถ่านหินเป็นถ่านหินผสมแกลบ พบว่าอุณหภูมิตลอดไรเซอร์มีแนวโน้มสูงขึ้นตามปริมาณแกลบที่เพิ่มขึ้น ปริมาณ CO และ SO_2 ลดลงเมื่ออัตราส่วนของแกลบที่ป้อนมีมากขึ้น

พรวิภา บุญนุช (2547) ได้ศึกษาผลของการป้อนอากาศแบบขั้นต่อการเกิด NO และ N_2O โดยมีวัตถุประสงค์คือหาผลกระทบของอากาศส่วนเกิน สัดส่วนและตำแหน่งในการฉีดอากาศทุกัญมิที่มีต่อประสิทธิภาพการเผาไหม้ พฤติกรรมการเผาไหม้ การเกิดก๊าซต่างๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งก๊าซ NO และ N_2O โดยผลการทดลองได้จากการเผาไหม้ถ่านหินที่มีการเปลี่ยนตำแหน่งการป้อนอากาศทุกัญมิ (H) 3 ตำแหน่ง ได้แก่ 525, 675 และ 825 มิลลิเมตรเหนือแผ่นกระจายลมภายในเตา โดยทุกกรณีทำการเผาไหม้ที่สภาวะอากาศส่วนเกิน 40, 60 และ 80% และสัดส่วนของปริมาณอากาศทุกัญมิต่ออากาศทั้งหมด (SA) 0.1, 0.2 และ 0.3 ผลที่ได้จากการศึกษานี้พบว่ายิ่งความสูงของตำแหน่งในการป้อนอากาศทุกัญมิ (H) และสัดส่วนอากาศ

ทุติยภูมิต่ออากาศทั้งหมด (SA) มีค่าเพิ่มมากขึ้น จะมีผลให้ความเข้มข้นของก๊าซ NO มีค่าลดลง โดยมีค่าลดลงสูงสุดถึง 83% เมื่อเพิ่มความสูงของตำแหน่งการฉีดอากาศทุติยภูมิจาก 525 มิลลิเมตรเป็น 825 มิลลิเมตรเหนือแผ่นกระจายลมที่สัดส่วน SA = 0.3

อันธิการ์ วรณะ (2548) ได้ทดลองเผาไหม้ถ่านหินผสมชีวมวล 3 ชนิด ได้แก่ ช้างข้าวโพด แกลบ และกากกาแฟ โดยใช้เครื่องเผาไหม้ฟลูอิโดซ์เบดแบบหมุนเวียน ในการทดลองจะใช้ชีวมวลที่ละชนิดมาเผาไหม้ร่วมกับถ่านหิน โดยใช้เครื่องควบคุมอุณหภูมิแบบ P และ PI มาบังคับอัตราการป้อนเชื้อเพลิงและอัตราการป้อนอากาศ ซึ่งจะควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ที่ 700, 800 และ 900 องศาเซลเซียส จากการทดลองพบว่าอัตราส่วนของถ่านหินต่อชีวมวลที่สามารถป้อนชีวมวลได้มากที่สุดคือ 2 ต่อ 1 หากอัตราส่วนของชีวมวลมากกว่านี้จะทำให้เกิดการเผาไหม้ย้อนกลับเข้าทางถึงบรรจุเชื้อเพลิง

Amand และ Leckner (2001) ได้ศึกษาการลดปริมาณของ NO_x , N_2O ที่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงผสมระหว่างถ่านหิน ไม้ และกากของเสีย โดยศึกษาถึงความแตกต่างระหว่างถ่านหินหรือไม้ที่ใช้เป็นเชื้อเพลิงหลักโดยมีกากของเสียเป็นเชื้อเพลิงผสม และผลของกากของเสียเข้ากับกากของเสียเปียกต่อการปล่อย NO_x และ N_2O โดยประยุกต์ใช้วิธี Advanced air staging method มาใช้กับเตาเผาฟลูอิโดซ์เบดแบบหมุนเวียน (CFB) พบว่าทั้งถ่านหินและไม้นั้นปล่อย NO_x ออกมาในปริมาณน้อยแต่กากของเสียเข้ากับกากของเสียเปียกยังไม่สามารถที่จะหาข้อสรุปที่ชัดเจนได้ วิธีนี้ใช้ได้ดีในกรณีที่กากของเสียที่นำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงผสมกับเชื้อเพลิงหลักมีสัดส่วนที่ไม่สูงเกินไป (ไม่เกินร้อยละ 25) และวิธีนี้ไม่เหมาะสมที่จะใช้กับเชื้อเพลิงที่มีปริมาณสารระเหย (Volatile) สูง

Fang *et al* (2004) ได้ศึกษาการนำแกลบมาเผาไหม้ในเตาฟลูอิโดซ์เบดแบบหมุนเวียน โดยทำการทดลองในระบบ cold model พบว่าแกลบทำการฟลูอิโดซ์ได้ยากแต่สามารถแก้ไขได้โดยการใส่ทรายและถ่านหินเป็นตัวช่วยให้เกิดการฟลูอิโดซ์ ผลจากการศึกษาขนาดทราย ความเร็วของอากาศ พบว่าขนาดของทรายที่เหมาะสมที่ทำให้การผสมได้ดีอยู่ในช่วง 0.3 – 0.8 มิลลิเมตร (เฉลี่ย 0.55 มม.) ความเร็วของอากาศ 0.8 – 2 เมตรต่อวินาที เเผาไหม้ที่อุณหภูมิ 340 องศาเซลเซียส (Ignition temperature) ซึ่งใช้อุณหภูมิน้อยกว่าการเผาไหม้ถ่านหิน จากการศึกษาพบว่าแกลบมีประสิทธิภาพการเผาไหม้ 97% มีปริมาณคาร์บอนที่พบในเถ้าอยู่ระหว่าง 3-8% โดยที่ปริมาณ CO ที่ปล่อยออกมามีค่า 200-800 ppm ปริมาณ SO_2 มีค่า 50-100 ppm และ N_xO มีค่า 150-220 ppm

Li *et al* (2004) ได้ศึกษาการเผาไหม้ชีวมวลในระบบแก๊สฟลูอิโดซ์เบดแบบหมุนเวียน ในการทดลองระดับใหญ่ (Pilot-scale) ที่ห้องเผาไหม้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.1 เมตร สูง 6.5 เมตร เปรียบเทียบกับสมการทำนายแบบ Non-stoichiometric equilibrium model ตามทฤษฎี

Gibbs free energy ทำการเผาที่อุณหภูมิ 700-850 องศาเซลเซียส อัตราการการป้อนที่เฉลี่ย 16-45 กิโลกรัมต่อชั่วโมง พบว่าอุณหภูมิ ความเร็วการป้อนอากาศ ความหนาแน่น ถ้ำที่ปล่อยออกมา มีผลต่อปริมาณชีวมวลและพลังงานความร้อนที่ใช้ โดยอัตราการลดลงของชีวมวลแปรผันตรงกับการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเตาเผา ซึ่งผลการทดลองสอดคล้องกับสมการทำนาย

X. Jian-jun และ คณะ (2007) ศึกษาการปล่อยซัลเฟอร์ออกไซด์ ไนโตรเจนออกไซด์ และไนตรัสออกไซด์ จากการเผาไหม้ถ่านหินผสมกับชีวมวล ในเตาเผาฟลูอิดเบดแบบหมุนเวียน โดยศึกษาผลของปริมาณอากาศที่ต้องการ อุณหภูมิของอากาศที่เข้า อัตราส่วนของถ่านหินและชีวมวล พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณชีวมวลในเชื้อเพลิงผสม ปริมาณของคาร์บอนมอนอกไซด์จะเพิ่มขึ้น น่าจะเกิดจากชีวมวลมีค่าการระเหยกลายเป็นไอสูง ซัลเฟอร์ออกไซด์เพิ่มขึ้นเล็กน้อย ไนโตรเจนออกไซด์ และไนตรัสออกไซด์ลดลง ปริมาณอากาศที่เหมาะสมมีความสำคัญมากในการช่วยลดการปล่อยไนโตรเจนออกไซด์ และเมื่อทำการป้อนเชื้อเพลิงบริเวณไซโคลน ก็จะทำให้ไนโตรเจนออกไซด์ลดลง แต่ซัลเฟอร์ออกไซด์ไม่เปลี่ยนแปลง

A. Lyngfelt และ B. Leckner (1999) ศึกษาการปล่อยไนโตรเจนออกไซด์ และคาร์บอนมอนอกไซด์ ในหม้อต้มไอน้ำฟลูอิดเบดแบบหมุนเวียน จากการเผาไหม้เศษไม้ โดยศึกษาผลของอัตราส่วนของอากาศ พิจารณาการเพิ่มของอากาศทุติยภูมิบริเวณไซโคลน พบว่าเมื่อเพิ่มอากาศทุติยภูมิที่บริเวณไซโคลน จะช่วยลดการปล่อยไนโตรเจนออกไซด์ แต่คาร์บอนมอนอกไซด์สูงขึ้น การที่คาร์บอนมอนอกไซด์สูงขึ้นเกิดจากการเผาไหม้บริเวณไซโคลนไม่สมบูรณ์ เนื่องจากแก๊สที่เข้ามาบริเวณไซโคลนผสมกันไม่สมบูรณ์ จึงได้ทำการเพิ่มอุณหภูมิบริเวณทางออกของเตาเผาซึ่งเป็นผลทำให้ปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ลดลง

L. F. de Diego และ คณะ (1996) ศึกษาตัวแปรต่างๆ ในการปล่อยไนโตรเจนออกไซด์ และไนตรัสออกไซด์ จากการเผาไหม้ถ่านหิน ในเตาเผาฟลูอิดเบดแบบหมุนเวียน ตัวแปรที่ศึกษาได้แก่ อุณหภูมิ ปริมาณอากาศที่ต้องการ อัตราส่วนอากาศทุติยภูมิต่ออากาศทั้งหมด การใส่หินปูนเพื่อใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และขนาดของอนุภาคถ่านหิน พบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการปล่อย ไนโตรเจนออกไซด์ และไนตรัสออกไซด์ลดลง แก๊สทั้งสองจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณอากาศ และลดลงเมื่อเพิ่มอัตราส่วนของอากาศทุติยภูมิต่ออากาศทั้งหมด เมื่อใส่หินปูนและเพิ่มขนาดของอนุภาคถ่านหินไนโตรเจนออกไซด์เพิ่มขึ้น ส่วนไนตรัสออกไซด์ลดลง

L. E. Amand และ คณะ (1992) ศึกษากระบวนการทางเคมีของซัลเฟอร์ออกไซด์ ไนโตรเจนออกไซด์ และไนตรัสออกไซด์ ในการเผาไหม้ถ่านหินที่มีคุณภาพสูงและคุณภาพต่ำโดยการใช้หินปูนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าเมื่อใส่หินปูนจะเป็นตัวช่วยในการลดซัลเฟอร์ออกไซด์ และหินปูนซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาก็จะมีผลต่อกระบวนการทางเคมีทำให้ไนโตรเจนออกไซด์เพิ่มขึ้น และไนตรัสออกไซด์ลดลง

H. Liu และ B. M. Gibb (2002) ศึกษาแบบจำลองในการปล่อยไนโตรเจนออกไซด์ และไนตรัสออกไซด์ จากการเผาไหม้ชีวมวลในเตาเผาแบบฟลูอิโดเบดแบบหมุนเวียน โดยจะเปรียบเทียบแบบจำลองกับการทดลอง โดยใช้ค่าตัวแปรต่างๆและ ศึกษาปฏิกิริยาและการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าการปล่อยไนตรัสออกไซด์ มีค่าน้อยซึ่งใกล้เคียงกับผลการทดลอง การเพิ่มของไนโตรเจนออกไซด์ เพิ่มขึ้นกับการเพิ่มของปริมาณอากาศ และปริมาณไนโตรเจนในเชื้อเพลิงไนโตรเจนออกไซด์ จะลดลงกับร้อยละการเปลี่ยนแปลงของไนโตรเจนในเชื้อเพลิง ปฏิกิริยาระหว่างไนโตรเจนออกไซด์ และซาร์ เป็นกุญแจหลักในการลดปริมาณของไนโตรเจนออกไซด์

B. X. Shen และ คณะ (2003) ศึกษาเกี่ยวกับการเผาไหม้ร่วมระหว่างถ่านหินและชีวมวล โดยใช้เครื่องเผาไหม้แบบฟลูอิโดเบด โดยมีการศึกษาถึงผลของตัวเร่งปฏิกิริยา 4 ชนิด คือ CaO , CaSO_4 , Fe_2O_3 และ ถ่านซาร์ พบว่า CaO , Fe_2O_3 , หินปูน และ ถ่านซาร์ สามารถช่วยลดปริมาณไนตรัสออกไซด์ได้ อีกทั้งการเผาไหม้ร่วมระหว่างถ่านหินและชีวมวลสามารถช่วยลดปริมาณไนตรัสออกไซด์ได้อีกด้วย

Liu และ Gibbs (1998) ศึกษาผลของการเติมหินปูน ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ในท่อไรเซอร์คือ ส่วนล่างของท่อไรเซอร์ และอีกตำแหน่งคือ ส่วนบนซึ่งอยู่เหนือตำแหน่งของการป้อนอากาศทุติยภูมิ ที่มีผลต่อองค์ประกอบของฟลูแก๊สได้แก่ แก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ไนตรัสออกไซด์ ไนโตรเจนออกไซด์ และ คาร์บอนมอนอกไซด์ ที่เกิดจากการเผาถ่านหินในเตาฟลูอิโดเบดแบบหมุนเวียน พบว่าหินปูนซึ่งเติมลงไปเพื่อกำจัดแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ทำให้แก๊สไนตรัสออกไซด์และคาร์บอนมอนอกไซด์ลดลงแต่ทำให้แก๊สไนโตรเจนออกไซด์เพิ่มขึ้นทั้งตำแหน่งบนและตำแหน่งล่าง โดยตำแหน่งการเติมหินปูนทั้งสองตำแหน่งไม่มีผลต่อการลดลงของแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ แต่ส่งผลต่อแก๊สอื่นๆ คือเมื่อเติมหินปูนที่ตำแหน่งบนพบว่าสามารถลดแก๊สไนตรัสออกไซด์และคาร์บอนมอนอกไซด์ได้มากกว่าการเติมที่ตำแหน่งล่าง และทำให้เกิดแก๊สไนโตรเจนออกไซด์เพิ่มขึ้นกว่าด้านล่างเช่นกัน ทำให้ไม่สามารถสรุปได้ว่าตำแหน่งในการเติมหินปูนในเตาฟลูอิโด

Jensen และ คณะ (1995) ได้ทำการทดลองเผาไหม้ถ่านหินโดยใช้เครื่องเผาไหม้ฟลูอิโดเบดแบบอัดความดันสูง โดยได้ทดลองวิธีลดการปล่อยแก๊สไนโตรเจนออกไซด์ 2 วิธี คือฉีดสารละลายแอมโมเนีย และการควบคุมปริมาณออกซิเจนหรือปริมาณอากาศ พบว่าการฉีดสารละลายแอมโมเนียเป็นละอองฝอยทางด้านบนสุดของห้องเผาไหม้สามารถช่วยลดปริมาณแก๊สไนโตรเจนออกไซด์ลงได้ 50 – 70 เปอร์เซ็นต์ และการลดปริมาณออกซิเจนที่การป้อนอากาศปฐมภูมิ (primary air) สามารถลดการปล่อยแก๊สไนโตรเจนออกไซด์ลงได้ เช่นการทดลองขั้นตอนหนึ่ง ป้อนปริมาณอากาศต่อเชื้อเพลิง ประมาณ 0.82 โดยไม่มีการป้อนอากาศทุติยภูมิ (secondary air) พบว่ามีการปล่อย แก๊สไนโตรเจนออกไซด์ออกมาน้อยมากจนเกือบเป็นศูนย์

Hayhurst และ Lawrence (1996) ได้ทดลองเผาไหม้ถ่านหิน โดยใช้เครื่องเผาไหม้แบบ ฟลูอิดไดซ์เบด พบว่าแก๊สไนโตรเจนออกไซด์ที่เกิดขึ้นมีแหล่งที่มา 2 แหล่งคือ แก๊สไนโตรเจนใน อากาศและปริมาณไนโตรเจนในเชื้อเพลิง และประมาณ 90 เปอร์เซ็นต์ ของแก๊สไนโตรเจนออกไซด์ ที่เกิดขึ้น เกิดมาจากไนโตรเจนในเชื้อเพลิง เนื่องจากต้องใช้อุณหภูมิถึง 1700 องศาเซลเซียส เพื่อให้เกิดปฏิกิริยากับแก๊สไนโตรเจนในอากาศเปลี่ยนไปเป็นแก๊สไนโตรเจนออกไซด์ ในขณะที่การ เผาไหม้ในเครื่องเผาไหม้แบบฟลูอิดไดซ์เบดจะมีอุณหภูมิเพียง 1000 องศาเซลเซียส เท่านั้น และการใช้เชื้อเพลิงที่มีปริมาณไฮโดรคาร์บอนหรือคาร์บอนคงตัวสูงๆ หรือ การเติมสารละลาย แอมโมเนียช่วยลดปริมาณแก๊สไนโตรเจนออกไซด์ได้ และการศึกษาเกี่ยวกับแก๊สไนโตรเจนออกไซด์ พบว่าแก๊สไนโตรเจนออกไซด์เกิดมาจากแก๊สไนโตรเจนออกไซด์ทำปฏิกิริยากับเชื้อเพลิงหรือ แอมโมเนีย แต่แก๊สไนโตรเจนออกไซด์สามารถแปรเปลี่ยนเป็นแก๊สไนโตรเจนหรือไนโตรเจนออกไซด์ ได้ง่ายมาก ด้วยการใช้อุณหภูมิสูงๆและป้อนปริมาณออกซิเจนมากๆ ทำให้มีการปลดปล่อยแก๊ส ไนโตรเจนออกไซด์ออกมาเพียงเล็กน้อยเท่านั้น (น้อยกว่า 5 ส่วนในล้านส่วน)

ศูนย์วิทยทรัพยากร

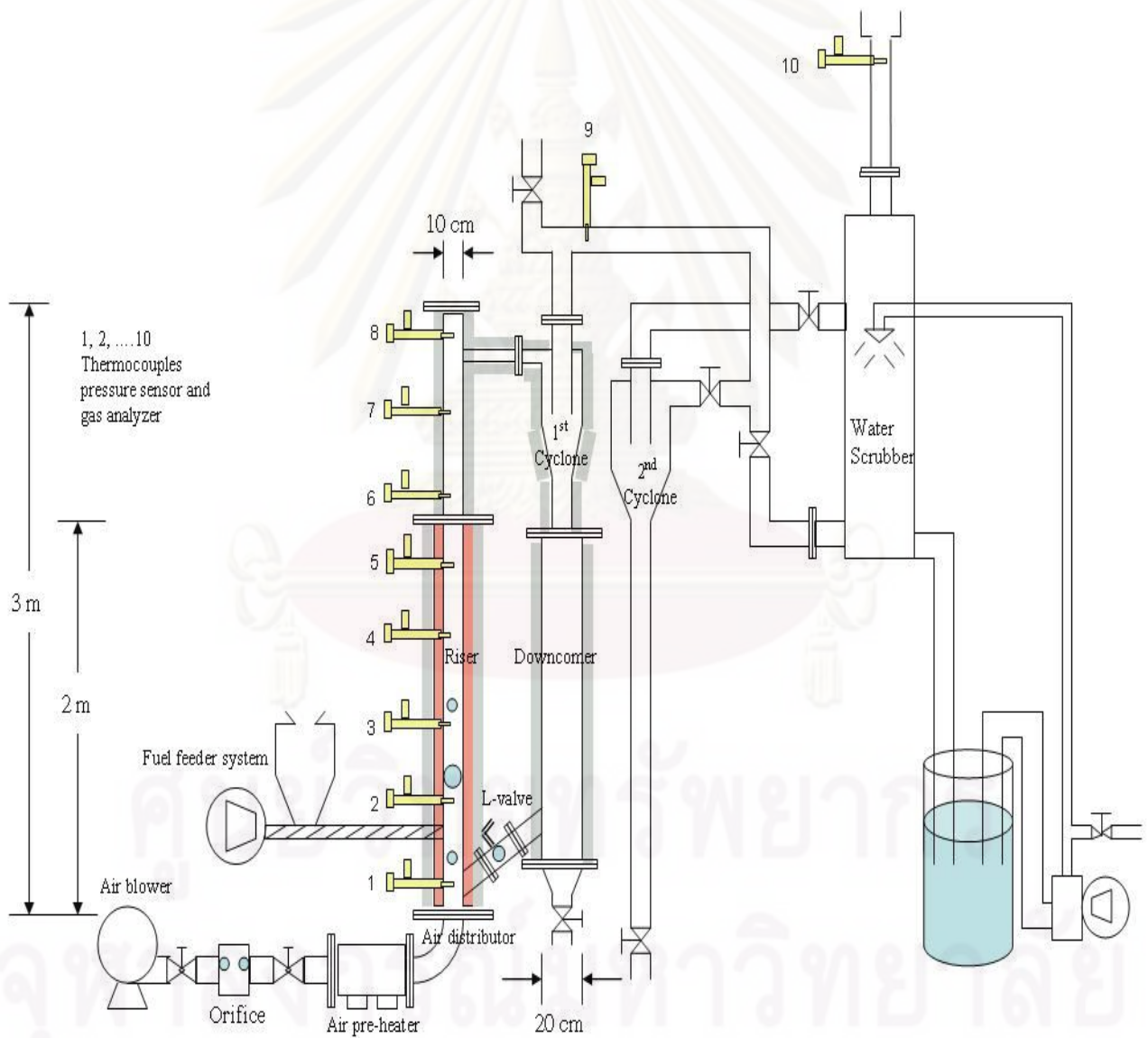
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

เครื่องมือและวิธีการทดลอง

3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์การทดลอง

เตาเผาฟลูอิดไธซ์เบดแบบหมุนเวียน(Circulating Fluidized Bed: CFB) ส่วนประกอบที่สำคัญดังแสดงรูปที่ 3.1 และรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.1 โครงร่างเตาเผาฟลูอิดไธซ์เบดแบบหมุนเวียนที่ใช้ในงานวิจัย



รูปที่ 3.2 เตาเผาฟลูอิไดซ์เบดแบบหมุนเวียนที่ใช้ในงานวิจัย

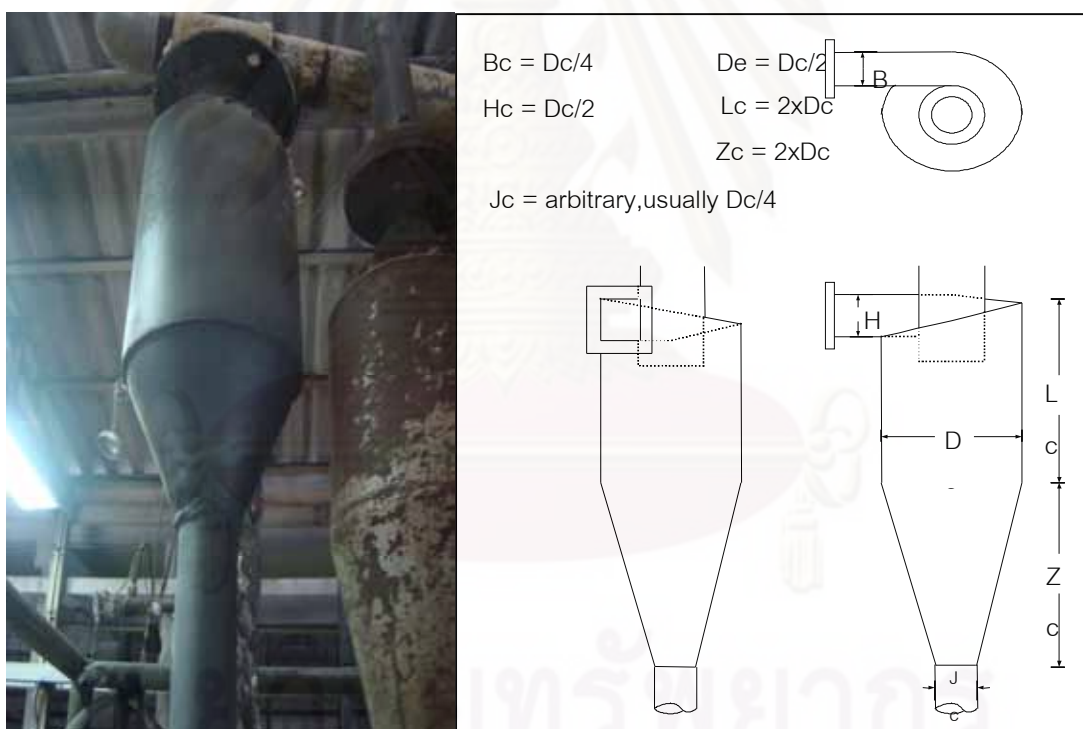
3.1.1 ท่อไรเซอร์ (Riser)

ท่อไรเซอร์หรือห้องเผาไหม้ เป็นบริเวณที่มีการเผาไหม้แบ่งออกเป็นส่วนล่างและส่วนบนโดยส่วนล่างหล่อด้วยซีเมนต์ทนความร้อนหนา 5 เซนติเมตร สูง 2 เมตร ส่วนบนทำด้วยเหล็กกล้าไร้สนิมหนา 3 มิลลิเมตร สูง 1 เมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 10 เซนติเมตร

บริเวณด้านล่างของโรเตอร์มีตัวกระจายอากาศเป็นแผ่นตะแกรงแผ่นเดียวที่มีความละเอียด 80 mesh มีprobe สำหรับใส่เทอร์โมคัปเปิลและสำหรับดึงแก๊ส 8 ตำแหน่ง ที่ตำแหน่ง 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 และ 8 ดังรูปที่ 3.1 โดยแต่ละตำแหน่งสูงจากตัวกระจายอากาศเป็นระยะ 0.1, 0.5, 0.9, 1.3, 1.7, 2.1, 2.5 และ 2.9 เมตร ตามลำดับ มีหัวเผาแก๊สหุงต้มเป็นตัวให้ความร้อนแก่เบด ในขณะที่เริ่มจุดเตาที่ความสูง 0.25 เมตร ที่ตำแหน่ง 0.35 เมตร เป็นตำแหน่งที่มีการป้อนเชื้อเพลิงเข้าสู่เตาเผา โดยผ่านสกรูฟีดเดอร์ ที่ตำแหน่งความสูง 0.65 เมตร มีกระจกสำหรับดูการเผาไหม้ในโรเตอร์ และมีตำแหน่งป้อนอากาศทุติยภูมิที่ความสูง 1 เมตร, 2 เมตร และ 2.4 เมตร

3.1.2 ไซโคลน (Cyclone)

ไซโคลน เป็นอุปกรณ์สำหรับแยกอนุภาคที่มีขนาดเล็กที่หลุดจากโรเตอร์ออกจากแก๊สเพื่อป้องกันการฟุ้งกระจายอากาศ ไซโคลนทำจากแผ่นสแตนเลสหนา 3 มิลลิเมตรดังแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 ไซโคลน (cyclone) (ชัยวัฒน์ พรหมภูเบศร์, 2548)

มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

เส้นผ่านศูนย์กลางของกระบอกไซโคลน (D_c) = 20 เซนติเมตร

ทางเข้าของแก๊สและอนุภาค ($B_c \times H_c$) = 5×10 เซนติเมตร

เส้นผ่านศูนย์กลางทางออกของแก๊ส (D_e) = 10 เซนติเมตร

ความสูงของกระบอกไซโคลน (L_c) = 40 เซนติเมตร

ความสูงของกรวยไซโคลน (Z_c) = 40 เซนติเมตร

เส้นผ่านศูนย์กลางทางออกของอนุภาค (J_c) = 5 เซนติเมตร

3.1.3 ท่อป้อนกลับ (Downcomer)

ท่อป้อนกลับเป็นส่วนที่นำอนุภาคที่ถูกดักจับโดยไซโคลนป้อนกลับสู่เรเซอร์วอร์อีก ครั้งทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมหนา 2 มิลลิเมตร สูง 1.6 เมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 ท่อป้อนกลับ

3.1.4 แอลวาล์ว (L-valve)

แอลวาล์วเป็นส่วนที่ป้องกันกลับอนุภาคจากท่อป้องกันสู่ท่อไรเซอร์ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 นิ้ว โดยทำมุม 45 องศากับแนวระดับและมีวาล์วปีกผีเสื้อเป็นตัวควบคุมอัตราของเบดตัวกลางให้มีค่าคงที่เท่ากับ 100 กิโลกรัมต่อชั่วโมงดังแสดงในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 แอลวาล์ว (วาล์วปีกผีเสื้อ)

3.1.5 อุปกรณ์ป้องกันอากาศ

อุปกรณ์ที่ใช้ในการป้องกันอากาศปฐมภูมิ ในการทดลองนี้คือเครื่องเป่าอากาศ ที่มีขนาด 15 กำลังม้า ขนาดกำลังผลิตสูงสุด 20 ลบ.ม/นาที ความดันสูงสุด 150 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว อากาศจะถูกส่งตามท่อผ่านการควบคุมโดยเกทวาล์ว (gate valve) ขนาด 4 นิ้ว ดังแสดงในรูปที่ 3.6

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.6 เครื่องเป่าอากาศ (air blower)

เครื่องอัดอากาศ (air compressor) สำหรับป้อนอากาศให้หัวเผา ระบบป้อนเชื้อเพลิงชีวมวล และ ตำแหน่งป้อนอากาศทุติยภูมิ โดยใช้มอเตอร์ 3 เฟส ขนาด 15 แรงม้าหรือ 11.2 กิโลวัตต์ ลูกสูบมี bore 120 มิลลิเมตร และ stroke 80 มิลลิเมตร ความเร็วรอบ 860 รอบต่อนาทีที่ความถี่ 50 Hz ขนาดถังเส้นผ่านศูนย์กลางความยาวเป็น 485x1770 มิลลิเมตร ความจุถัง 304 ลิตร ความดันที่ใช้งาน 12 กก.ต่อ ตร.ซม. และความดันสูงสุด 15 กก.ต่อ ตร.ซม. ดังแสดงในรูปที่ 3.7

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



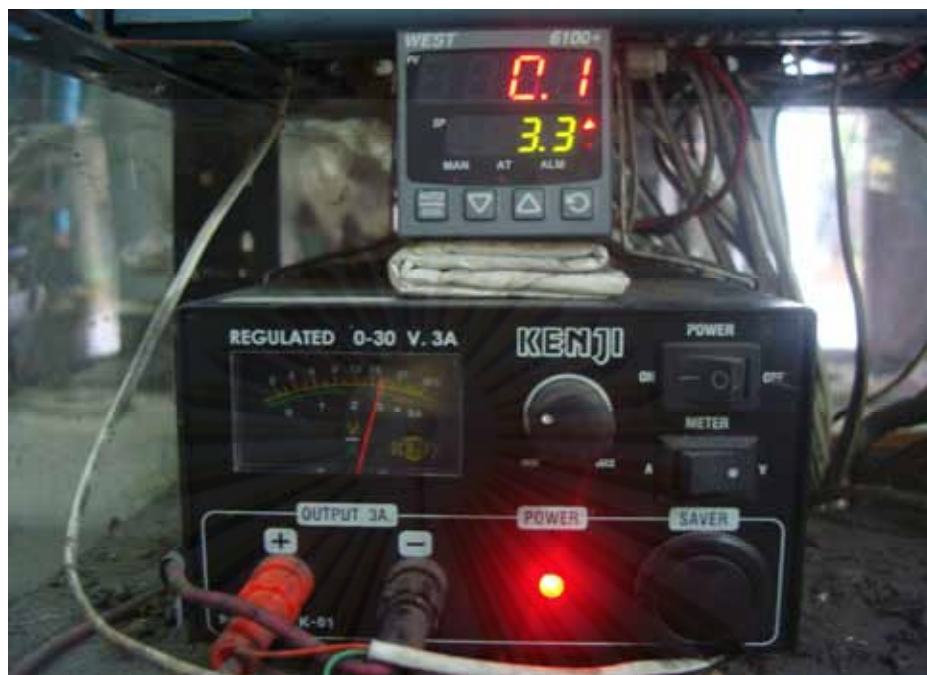
รูปที่ 3.7 เครื่องอัดอากาศ (air compressor)

3.1.6 อุปกรณ์วัดอัตราการไหลของอากาศ

วาล์วควบคุมแบบผีเสื้อเพื่อใช้ปรับปริมาณอากาศจากเครื่องเป่าอากาศ (อากาศปฐมภูมิ) และ orifice สำหรับวัดค่าความแตกต่างของความดันอากาศแล้วนำไปแสดงผลเป็นอัตราการป้อนอากาศปฐมภูมิที่หน้าจอดีจิดอลและบันทึกผลลงคอมพิวเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 3.8 และรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.8 วาล์วควบคุมแบบผีเสื้อและ orifice



รูปที่ 3.9 หน้าจอแสดงความเร็วอากาศปฐมภูมิแบบดิจิทัล

อุปกรณ์วัดอัตราการไหลของอากาศที่ใช้วัดอัตราการป้อนอากาศทุติยภูมิ คือ Rotameter ดังแสดงในรูปที่ 3.10 ทำมาจากอะคริลิกใส ภายในบรรจุลูกกลอยที่ทำมาจาก สแตนเลส

ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.10 Rotameter

3.1.7 ระบบป้อนเชื้อเพลิง (Fuel feeder)

อุปกรณ์ป้อนเชื้อเพลิง เป็นเครื่องป้อนเชื้อเพลิงแบบสกรูพิดเดอร์ทั้งหมด 2 ตัวแต่ละตัวประกอบด้วยถังบรรจุเชื้อเพลิงและระบบลำเลียงเชื้อเพลิงรูปเกลียว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเกลียวป้อน 4.8 เซนติเมตร ระบบขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ขนาด 2 แรงม้า ใช้ไฟฟ้า 3 เฟส อัตราการหมุน 1400 รอบต่อนาที ควบคุมความเร็วของมอเตอร์ด้วยเครื่องควบคุมความเร็วของมอเตอร์ (inverter) ที่ตำแหน่งปลายของระบบลำเลียงเชื้อเพลิงและตำแหน่งบนของถังบรรจุเชื้อเพลิงตัวหนึ่ง สำหรับการป้อนเชื้อเพลิงประเภทชีวมวลจะติดตั้งระบบป้อนอากาศเพื่อป้องกันการไหม้ย้อนกลับเข้าสู่ถังเก็บเชื้อเพลิง โดยตำแหน่งที่ป้อนเชื้อเพลิงอยู่ที่ระดับสูงจากแผ่นกระจายอากาศ 0.35 เมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.11

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.11 ระบบป้อนเชื้อเพลิง (fuel feeder system)

3.1.8 หัวเผาแก๊สหุงต้ม (LPG burner)

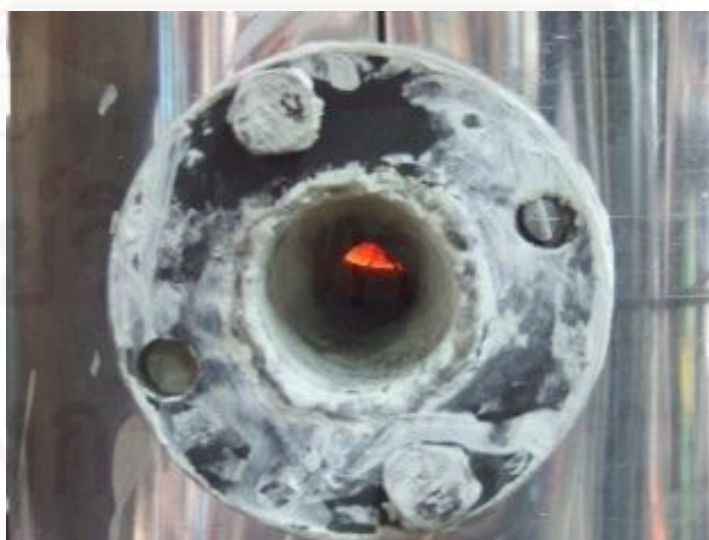
หัวเผา (burner) อยู่ที่ตำแหน่ง 0.25 เมตร จากแผ่นกระจายอากาศ ใช้สำหรับอุ่นเตาเผาในช่วงเริ่มต้น โดยใช้แก๊สหุงต้ม (LPG) เป็นเชื้อเพลิง และใช้อากาศจากเครื่องอัดอากาศ ด้านข้างของหัวเผาติดตั้งกระจกสำหรับดูเปลวไฟจากหัวเผา ดังแสดงในรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 หัวเผาและกระจกมองเปลวไฟ

3.1.9 กระจกทนความร้อน

กระจกสำหรับดูภายในห้องเผาไหม้อยู่ที่ตำแหน่ง 0.60 เมตร จากแผ่นกระจายอากาศ ดังแสดงในรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 กระจกสำหรับดูภายในห้องเผาไหม้

3.1.10 Probe สำหรับวัดอุณหภูมิและวัดองค์ประกอบของแก๊ส

บริเวณผนังท่อด้านไรเซอร์มีการเจาะรู เพื่อสอด probe ท่อสแตนเลส ขนาด 0.5 นิ้ว ไปยังกลางไรเซอร์สำหรับเสียบเทอร์โมคัปเปิลชนิด type K สามารถวัดอุณหภูมิอยู่ในช่วง 0 ถึง 1200 องศาเซลเซียส และเป็นจุดสำหรับดึงแก๊สไปวัดองค์ประกอบ ดังแสดงในรูปที่ 3.14 probe ในไรเซอร์จะอยู่ที่ตำแหน่ง 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 และ 8 ดังแสดงในรูปที่ 3.1 โดยแต่ละตำแหน่งห่างจากตัวกระจายอากาศเป็นระยะ 0.1, 0.5, 0.9, 1.3, 1.7, 2.1, 2.5 และ 2.9 เมตร ตามลำดับ



รูปที่ 3.14 probe สำหรับวัดอุณหภูมิและองค์ประกอบของแก๊ส

3.1.11 ระบบดึงแก๊สออกจากไรเซอร์

ที่ probe แต่ละตำแหน่งจะมีวาล์วซึ่งต่อท่อทองแดงเข้าสู่แผงวงจรวาล์ว ดังแสดงในรูปที่ 3.15 สำหรับวัดองค์ประกอบของแก๊ส แต่ละตำแหน่งโดยใช้ปั๊มดูดจ่ายของไหล (peristaltic pump) ดังแสดงในรูปที่ 3.16 ใช้ดึงแก๊สออกจากระบบ และนอกจากนั้นแผงวงจรวาล์วยังมีการติดตั้งตัวแสดงอุณหภูมิแต่ละตำแหน่ง



รูปที่ 3.15 แผงวงจรวาล์ว



รูปที่ 3.16 ปั๊มดูดจ่ายของไหล (peristaltic pump)

3.1.12 เครื่องวัดฟลูแก๊ส (Flue gas analyzer)

เครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบของฟลูแก๊ส (flue gas analyzer) ดังแสดงในรูปที่ 3.17 สามารถวัดฟลูแก๊สได้ คือ แก๊สออกซิเจน (O_2) , แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) , แก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) , แก๊สไนตริกออกไซด์ (NO) ส่วนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) , ไนโตรเจนออกไซด์ (NO_x) เครื่องจะทำการคำนวณและแสดงผลออกมาด้วย สำหรับวัดแก๊สไนตรัสออกไซด์ (N_2O) จะใช้เครื่อง Gas Chromatography ดังแสดงในรูปที่ 3.18 โดยใช้คอลัมน์ Hayesep Q ดีเทคเตอร์แบบ TCD



รูปที่ 3.17 เครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบของฟลูแก๊ส (flue gas analyzer)



รูปที่ 3.18 gas chromatography

3.2 วิธีการทดลอง

3.2.1 การเตรียมเชื้อเพลิงและทราย

- 3.2.1.1 เตรียมทรายให้ได้ขนาดระหว่าง 275 ไมโครเมตร ถึง 400 ไมโครเมตร
- 3.2.1.2 บดถ่านหินและคัดขนาดให้ต่ำกว่า 1.2 มิลลิเมตร
- 3.2.1.3 บดซีเมนต์และคัดขนาดให้ต่ำกว่า 1.2 มิลลิเมตร
- 3.2.1.4 นำถ่านหินผสมกับหินปูน(อัตราส่วน Ca/S=2 และอัตราส่วน Ca/S=3)

3.2.2 การจุดเตาและดำเนินการทดลอง

- 3.2.2.1 ป้อนทรายเข้าด้านบนของ downcomer ปริมาณ 20 กิโลกรัม
- 3.2.2.2 ชூนเตาเผา (ไรเซอร์) ด้วยแก๊ส LPG โดยป้อนอากาศที่หัวจุดเตาจากเครื่องอัดอากาศ 200 ลิตรต่ออนาที พร้อมทั้งสังเกตประกะจกดูเปลวไฟที่หัวจุดเตาตลอดเวลายังคงมีเปลวไฟติดอยู่ ถ้าไฟดับให้หยุดป้อนแก๊ส LPG ทันทีแล้วเริ่มจุดเตาใหม่ จนกระทั่งอุณหภูมิตำแหน่งที่ 2 (0.5 เมตร) มีอุณหภูมิประมาณ 650 องศาเซลเซียส

3.2.2.3 ป้อนถ่านหินที่อัตรา 3.50 กิโลกรัมต่อชั่วโมง และ ป้อนอากาศ 100 ลิตร ต่อนาทีที่สกรูฟีดเดอร์ของชีวมวล เพื่อเป็นการเพิ่มอากาศช่วยในการเผาไหม้ถ่านหิน จนกระทั่งอุณหภูมิตำแหน่งที่ 2 มีอุณหภูมิประมาณ 900 องศาเซลเซียส

3.2.2.4 ป้อนอากาศปฐมภูมิจากเครื่องเป่าอากาศ (blower) 200 ลิตรต่อนาที เข้าทางด้านล่างของโรเตอร์ผ่านแผ่นกระจายอากาศ พร้อมทั้งเปิดแอสวาล์ว เพื่อให้ทรายใน downcomer ไหลเข้าสู่ส่วนล่างโรเตอร์ด้วยอัตรา 100 กิโลกรัมต่อชั่วโมง จนกระทั่งอุณหภูมิตลอดโรเตอร์คงที่ประมาณ 800 องศาเซลเซียส

3.2.2.5 หยุดป้อนแก๊ส LPG และเปลี่ยนอากาศที่หัวจุดเตาเป็นอากาศทุติยภูมิ

3.2.2.6 ป้อนถ่านหินและชีวมวลตามสภาวะที่ต้องการ เติมเชื้อเพลิงเข้าถังเก็บอยู่เสมอ จนกระทั่งอุณหภูมิในโรเตอร์คงที่ บันทึกผลการทดลอง

- อุณหภูมิ วัดโดย เทอร์โมคัปเบิล หน้าจอแสดงค่าแบบดิจิตอล และบันทึกลงคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม autoview
- องค์ประกอบของแก๊สเผาไหม้
 - NO_x แสดงค่าด้วยเครื่อง Flue gas Analyzer
 - N_2O อ่านค่าด้วย gas chromatography ยี่ห้อ Thermo Finnigan โดยใช้คอลัมน์ Hayesep Q ดีเทคเตอร์แบบ TCD อุณหภูมิคอลัมน์ 35 องศาเซลเซียส อุณหภูมิดีเทคเตอร์ 80 องศาเซลเซียส

3.2.2.7 เปลี่ยนสภาวะการทดลองใหม่ จนกระทั่งอุณหภูมิในโรเตอร์คงที่อีกครั้ง บันทึกผลการทดลอง

3.2.2.8 ทำซ้ำข้อที่ 7 จนกระทั่งเสร็จสิ้นการทดลอง

ศูนย์วิทยุทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

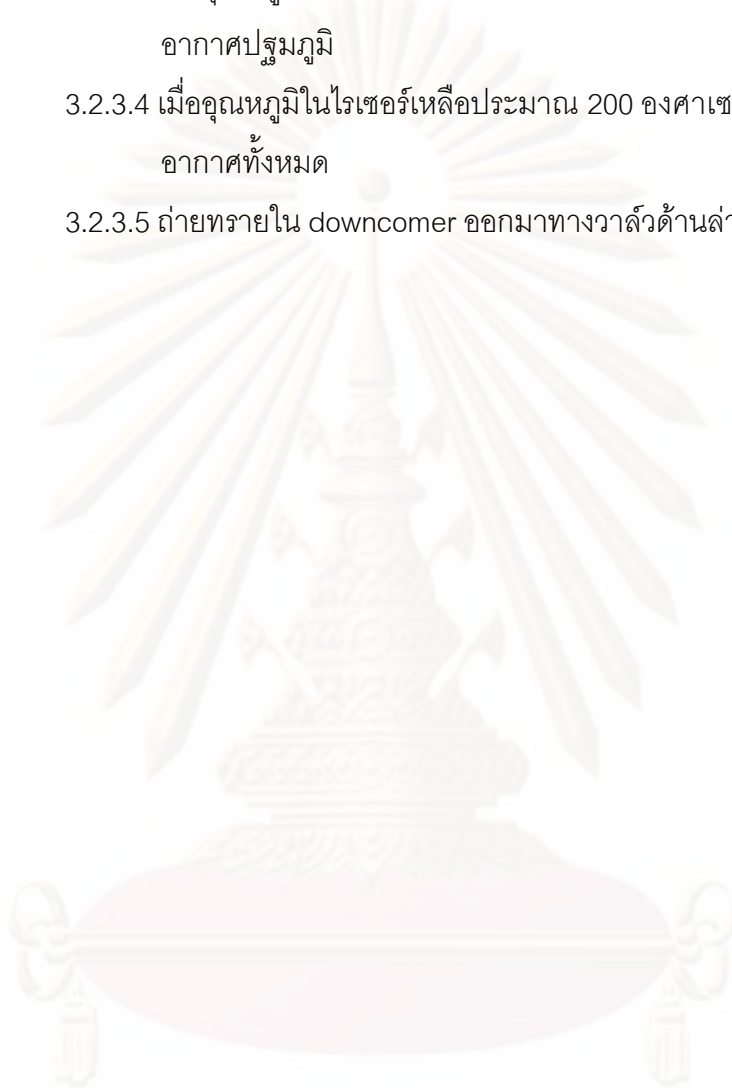
3.2.3 การปิดเตาเผา

3.2.3.1 ปิดแอดวาล์ว หยุดการป้อนถ่านหิน และชีวมวลที่กำลังทำการทดลองใน
ขณะนั้น

3.2.3.2 เมื่ออุณหภูมิในไรเซอร์เหลือประมาณ 400 องศาเซลเซียส หยุดการป้อน
อากาศปฐมภูมิ

3.2.3.4 เมื่ออุณหภูมิในไรเซอร์เหลือประมาณ 200 องศาเซลเซียส หยุดการป้อน
อากาศทั้งหมด

3.2.3.5 ถ่ายทรายใน downcomer ออกมาทางวาล์วด้านล่างของ downcomer



ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับ การปล่อยไนโตรเจนออกไซด์และไนตรัสออกไซด์ จากการเผาไหม้ร่วมของถ่านหินและชีวมวลในเตาเผาฟลูอิดไธด์แบบหมุนเวียน โดยถ่านหินที่นำมาใช้ในการทดลองเป็นถ่านหินจากประเทศอินโดนีเซีย คัดจัดชั้นบิทูมินัส เป็นถ่านหินที่มีคุณภาพสูงและปริมาณไนโตรเจนต่ำ เพราะสนใจปริมาณไนโตรเจนในชีวมวลจึงต้องใช้ถ่านหินที่มีปริมาณไนโตรเจนต่ำ เพื่อให้ส่งผลต่อการทดลองน้อยที่สุด และชีวมวลที่ใช้มี 4 ชนิดคือ กะลาปาล์ม กะลามะพร้าว แกลบ และ ชี้อเลื่อย ในงานวิจัยได้ทำการศึกษาถึงตัวแปรสำคัญต่างๆ ที่ทำการศึกษาได้แก่ ชนิดของชีวมวล อัตราส่วนผสมระหว่างถ่านหินและชีวมวล ตำแหน่งของการป้อนอากาศชุดปฐมภูมิ และผลของแคลเซียมออกไซด์ ที่มีผลต่อการปล่อยแก๊สไนโตรเจนออกไซด์และไนตรัสออกไซด์จากกระบวนการเผาไหม้

4.1 สมบัติของเชื้อเพลิง

4.1.1 การวิเคราะห์โดยประมาณ (proximate analysis)

องค์ประกอบโดยประมาณของถ่านหินและชีวมวลที่ทำการวิเคราะห์ได้แก่ปริมาณ ความชื้น ปริมาณเถ้า ปริมาณสารระเหย ปริมาณคาร์บอนคงตัว ผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์โดยประมาณ (proximate analysis)

Proximate analysis	% By Mass				
	Coal	Palm Shell	Coconut shell	Rice Husk	Saw Dust
Fixed Carbon	38.66	11.96	21.13	18.21	11.14
Volatile Matter	35.84	77.60	67.79	57.48	79.14
Moisture	17.11	5.78	9.76	8.18	5.90
Ash	8.39	4.66	1.32	16.13	3.82
Total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

การวิเคราะห์องค์ประกอบโดยประมาณของถ่านหินและชีวมวลทั้ง 4 ชนิด ได้แก่ กะลาปาล์ม กะลามะพร้าว แกลบ และขี้เลื่อย ด้วยวิธีมาตรฐาน ASTM (D 3173, D 3175, D 3174) จะแสดงผลเป็นร้อยละของ ความชื้น ปริมาณเถ้า ปริมาณสารระเหย ปริมาณคาร์บอนคงตัว ของถ่านหินและชีวมวล โดยน้ำหนัก จากการวิเคราะห์พบว่า ถ่านหินมีปริมาณคาร์บอนคงตัวและความชื้นมากที่สุด คือร้อยละ 38.66 และ 17.11 ชีวมวลทั้ง 4 ชนิดมีปริมาณสารระเหย มากกว่าถ่านหินมาก โดยปริมาณสารระเหยของ กะลาปาล์ม กะลามะพร้าว แกลบ และขี้เลื่อย คือร้อยละ 77.60, 67.79, 57.48 และ 79.14 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ แกลบมีปริมาณของเถ้ามากที่สุดคือร้อยละ 16.13

4.1.2 การวิเคราะห์โดยแยกธาตุ (ultimate analysis)

การวิเคราะห์องค์ประกอบโดยแยกธาตุเป็นการวิเคราะห์หาปริมาณธาตุ ได้แก่ คาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน ออกซิเจนและซัลเฟอร์ ผลการวิเคราะห์เป็นร้อยละองค์ประกอบของธาตุในเชื้อเพลิงแสดงดังในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์โดยวิธีวิเคราะห์แยกธาตุ (ultimate analysis)

Ultimate analysis	% By Mass (daf)				
	Coal	Palm Shell	Coconut shell	Rice Husk	Saw Dust
C	52.22	45.36	45.95	48.05	46.70
H	4.97	5.65	5.76	7.27	5.47
N	1.33	0.65	0.04	0.18	0.19
O	40.80	48.25	48.23	44.48	47.63
S	0.68	0.09	0.02	0.02	0.01
Total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

การวิเคราะห์องค์ประกอบโดยแยกธาตุของถ่านหินและชีวมวลทั้ง 4 ชนิด ได้แก่ กะลาปาล์ม กะลามะพร้าว แกลบ และขี้เลื่อย โดยใช้ เครื่อง CHN analyzer จะ แสดง ผล เป็น ร้อยละ คาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน ออกซิเจน และซัลเฟอร์ ของถ่านหินและชีวมวลโดยน้ำหนัก ปรากฏจากความชื้นและเถ้า จากการวิเคราะห์พบว่าถ่านหินมีปริมาณคาร์บอน ไนโตรเจน และซัลเฟอร์มากที่สุดคือร้อยละ 52.22, 1.33 และ 0.68 ตามลำดับ ส่วนชีวมวลมีปริมาณ

ไนโตรเจนน้อยกว่าถ่านหิน และมีปริมาณไม่เท่ากัน โดยปริมาณไนโตรเจนของ กะลาปาล์ม กะลามะพร้าว แกลบ และขี้เลื่อย คือร้อยละ 0.65, 0.04, 0.18 และ 0.19 ตามลำดับ ชีวมวลมี ปริมาณซัลเฟอร์น้อยมาก โดยปริมาณซัลเฟอร์ของ กะลาปาล์ม กะลามะพร้าว แกลบ และขี้เลื่อย คือร้อยละ 0.09, 0.02, 0.02 และ 0.01 ตามลำดับ

4.1.3 การวิเคราะห์หาค่าพลังงานความร้อนของถ่านหินและชีวมวล

การวิเคราะห์หาค่าพลังงานความร้อนของถ่านหินและชีวมวล ด้วยเครื่อง bomb calories meter ค่าพลังงานความร้อนของถ่านหินและชีวมวลแสดงดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ค่าพลังงานความร้อนของถ่านหินและชีวมวล

Material	Heating values (kJ/kg)
Coal	22,195
Palm shell	22,517
Coconut shell	18,721
Saw dust	16,783
Rice husk	14,960

การวิเคราะห์หาค่าพลังงานความร้อนของถ่านหินและชีวมวล จะแสดงผลเป็นค่า พลังในหน่วยกิโลจูลต่อกิโลกรัม จากการวิเคราะห์พบว่ากะลาปาล์มให้ค่าพลังงานความร้อนมาก สุดคือ 22,517 กิโลจูลต่อกิโลกรัม และใกล้เคียงกับถ่านหินซึ่งให้ค่าพลังงานความร้อน 22,195 กิโลจูลต่อกิโลกรัม ชีวมวลชนิดอื่นๆให้ค่าพลังงานความร้อนน้อยกว่าถ่านหิน โดยกะลามะพร้าว และขี้เลื่อยให้ค่าพลังงานความร้อน 18,721 และ 16,783 กิโลจูลต่อกิโลกรัม ส่วนแกลบให้ค่า พลังงานความร้อนน้อยสุดคือ 14,960 กิโลจูลต่อกิโลกรัม

4.1.4 การวิเคราะห์หาปริมาณสารประกอบออกไซด์ของเถ้า

การวิเคราะห์หาปริมาณของสารประกอบออกไซด์ของเถ้า ด้วยเครื่อง X-ray fluorescence ผลการวิเคราะห์เป็นร้อยละปริมาณสารประกอบออกไซด์ดังในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์สารประกอบออกไซด์ของเถ้า

Metal oxides	% By Mass				
	Coal	Palm shell	Coconut shell	Rice husk	Saw dust
Fe ₂ O ₃	16.59	11.36	21.49	2.02	2.94
SiO ₂	26.04	22.48	10.20	83.40	8.18
Na ₂ O	8.52	1.64	5.87	1.07	2.21
MgO	1.50	7.18	2.17	1.15	9.48
Al ₂ O ₃	12.50	2.64	2.54	0.57	1.84
SO ₃	18.78	1.60	4.23	1.06	4.27
CaO	9.17	34.97	10.16	2.47	46.60
P ₂ O ₅	0.28	6.80	3.71	2.72	4.04
K ₂ O	1.64	7.43	28.75	3.85	15.49
Other	4.98	3.90	10.88	1.69	4.95

การวิเคราะห์หาปริมาณสารประกอบออกไซด์ของเถ้าของถ่านหินและชีวมวล จะแสดงผลเป็นร้อยละโดยน้ำหนักของปริมาณสารประกอบออกไซด์ จากการวิเคราะห์พบว่า กะลามะพร้าวมีปริมาณเหล็กออกไซด์และโพแทสเซียมออกไซด์ เป็นองค์ประกอบในเถ้ามากที่สุดคือ ร้อยละ 21.49 และ 28.75 โดยน้ำหนัก เมื่อเผาไหม้อุณหภูมิสูงกว่า 800 องศาเซลเซียส โพแทสเซียมออกไซด์จะหลอมเหลวและเกิดเป็นแอสลิกติดที่เตาเผา แกลบมีปริมาณของซิลิคอนไดออกไซด์เป็นองค์ประกอบในเถ้ามากที่สุดคือร้อยละ 83.40 โดยน้ำหนัก ส่วนขี้เลื่อยและกะลาปาล์มมีปริมาณแคลเซียมออกไซด์เป็นองค์ประกอบในเถ้ามากที่สุดคือร้อยละ 34.97 และ 46.60 โดยน้ำหนัก

4.2 การเปรียบเทียบสกรูฟีดเดอร์ และ inverter

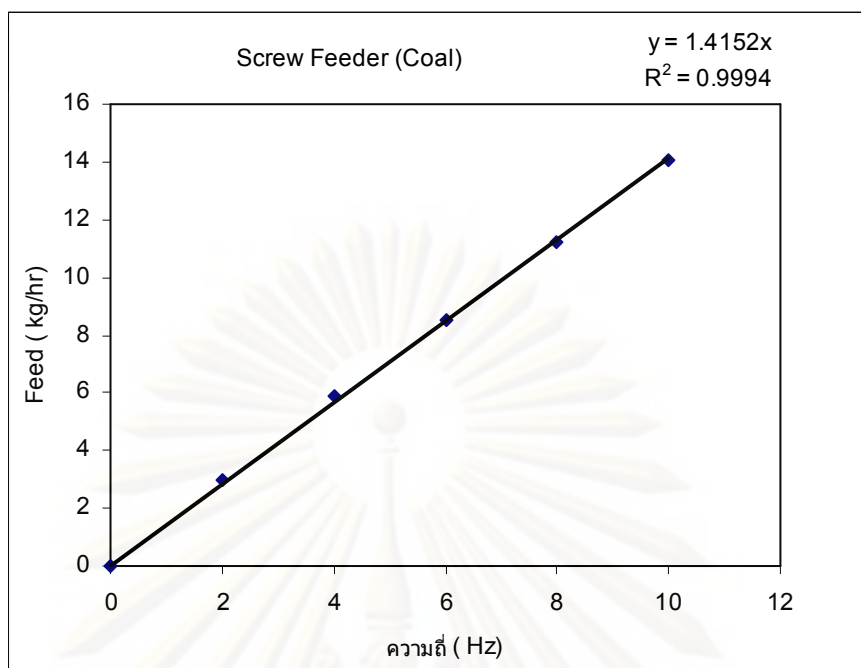
เนื่องจากการป้อนเชื้อเพลิงจะใช้ inverter เป็นตัวควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ที่ใช้ขับเคลื่อนสกรูฟีดเดอร์ ซึ่งหน่วยวัดความเร็วรอบของมอเตอร์คือ Hz แต่หน่วยของการป้อนเชื้อเพลิงที่ต้องการคือ กิโลกรัมของเชื้อเพลิงต่อชั่วโมง ดังนั้นจึงต้องมีการเปรียบเทียบสกรูฟีดเดอร์ และ inverter เพื่อให้ได้ค่าเปรียบเทียบระหว่าง Hz และกิโลกรัมต่อชั่วโมง ของถ่านหินและชีวมวลทั้ง 4 ชนิด คือกะลาปาล์ม กะลามะพร้าว แกลบ และขี้เลื่อย ซึ่งเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัยนี้ประกอบไปด้วยสกรูฟีดเดอร์ 2 ชุด เพื่อแยกป้อนเชื้อเพลิงระหว่างถ่านหินและชีวมวล ดังนั้นจึงต้องมีการเปรียบเทียบสกรูฟีดเดอร์ และ inverter ของทั้ง 2 ชุด ดังแสดงในตารางที่ 4.5 ถึง 4.9 และ รูปที่ 4.1 ถึง 4.5

ตารางที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของ inverter กับอัตราการป้อนถ่านหินผ่านสกรูฟีดเดอร์

Screw feeder (Coal)	
Hz	Kg/hr
0	0
2	2.98
4	5.89
6	8.53
8	11.24
10	14.08

ศูนย์วิทยทรัพยากร

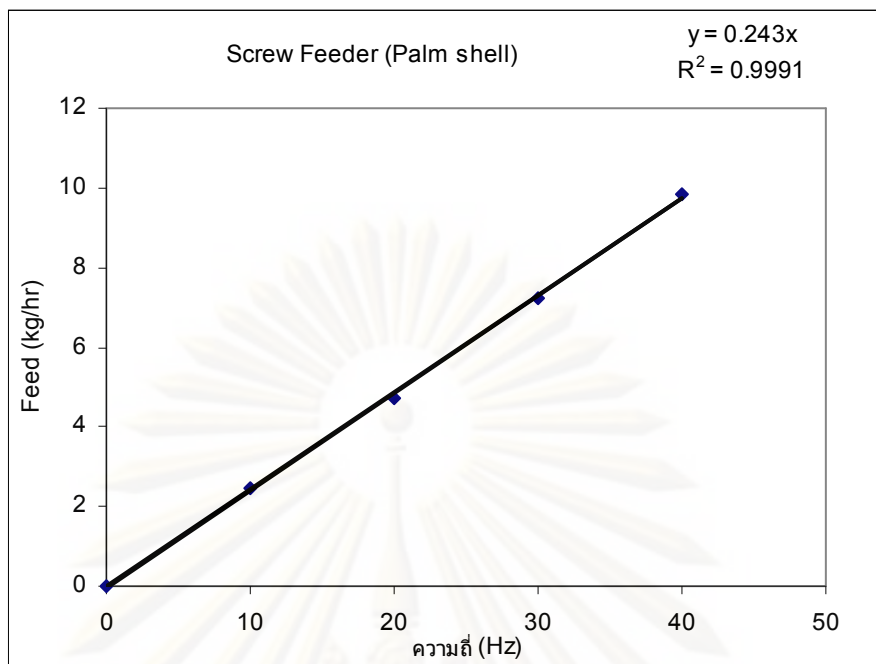
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของ inverter กับอัตราการป้อนถ่านหินผ่านสกรูฟีดเดอร์

ตารางที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของ inverter กับอัตราการป้อนกะลาปาล์มผ่านสกรูฟีดเดอร์

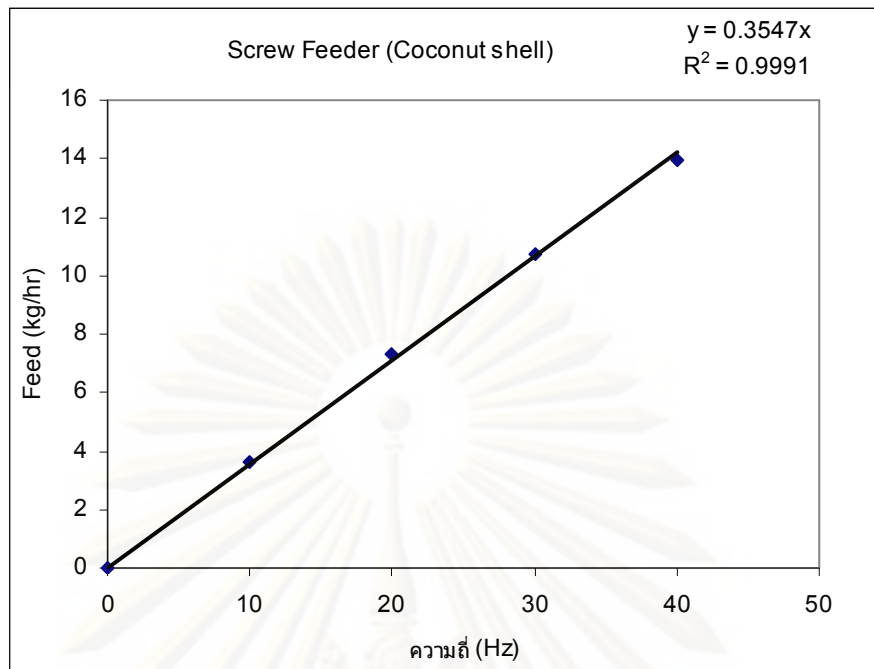
Screw feeder (Palm shell)	
Hz	Kg/hr
0	0
10	2.44
20	4.70
30	7.21
40	9.86



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของ inverter กับอัตราการป้อนกะลาปาล์มผ่านสกรูฟีดเดอร์

ตารางที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของ inverter กับอัตราการป้อนกะลามะพร้าวผ่านสกรูฟีดเดอร์

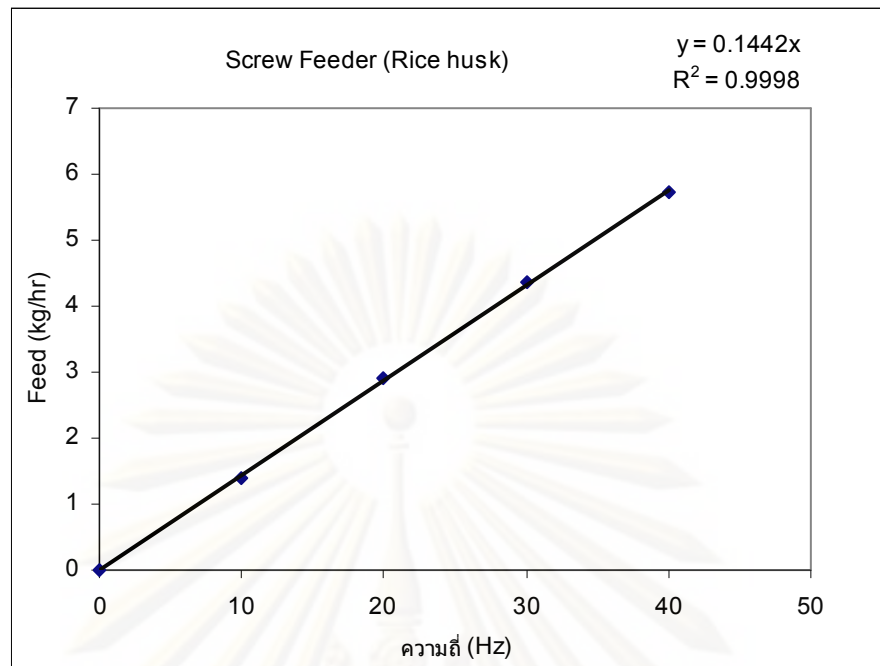
Screw feeder (Coconut shell)	
Hz	Kg/hr
0	0
10	3.62
20	7.32
30	10.75
40	13.97



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของ inverter กับอัตราการป้อนกะลามะพร้าวผ่านสกรูฟีดเดอร์

ตารางที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของ inverter กับอัตราการป้อนแกลบผ่านสกรูฟีดเดอร์

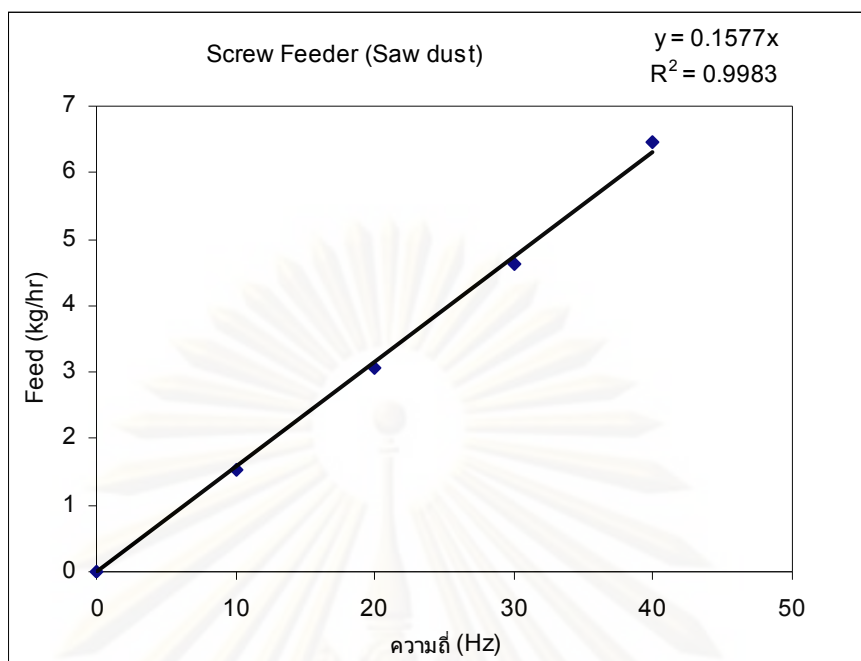
Screw feeder (Rice husk)	
Hz	Kg/hr
0	0
10	1.40
20	2.91
30	4.36
40	5.74



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของ inverter กับอัตราการป้อนแกลบผ่านสกรูพีดเดอร์

ตารางที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของ inverter กับอัตราการป้อนขี้เลื่อยผ่านสกรูพีดเดอร์

Screw feeder (Saw dust)	
Hz	Kg/hr
0	0
10	1.52
20	2.91
30	4.36
40	6.45



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของ inverter กับอัตราการป้อนซีลี้อยผ่านสกรูฟีดเดอร์

จากตารางที่ 4.5 ถึง 4.9 และ รูปที่ 4.1 ถึง 4.5 แสดงการเปรียบเทียบสกรูฟีดเดอร์ และ inverter ของถ่านหินและซีวมวล พบว่าถ่านหินและซีวมวลทั้ง 4 ชนิด มีน้ำหนักไม่เท่ากันถ้าเรียงลำดับของน้ำหนักจากมากไปหาน้อยคือ ถ่านหิน กะลามะพร้าว กะลาปาล์ม ซีลี้อย และ แกลบ ในการป้อนเชื้อเพลิงแต่ละชนิดด้วยอัตราเท่ากัน ความถี่ของ inverter ของถ่านหินจะมีค่าน้อยที่สุด และความถี่ของ inverter ของแกลบมีค่ามากที่สุด ซึ่งเป็นผลจากน้ำหนักของถ่านหินและซีวมวลแต่ละชนิด

4.3 การหาปริมาณอากาศปฐมภูมิต่ำสุดที่ทำให้ทรายในโรเตอร์เกิดการฟลูอิด์และหมุนเวียน

เนื่องจากแก๊สออกซิเจนเป็นตัวแปรที่มีความสำคัญมากตัวแปรหนึ่งที่มีผลต่อการปล่อยไนโตรเจนออกไซด์และไนตรัสออกไซด์จากกระบวนการเผาไหม้ โดยไนโตรเจนออกไซด์และไนตรัสออกไซด์จะเกิดได้มากขึ้นหากมีปริมาณแก๊สออกซิเจนมากขึ้น ซึ่งแก๊สออกซิเจนที่ใช้ในงานวิจัยนี้มาจากอากาศ การป้อนอากาศหลายตำแหน่งในโรเตอร์ เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการสะสมของอากาศมากเกินไปที่จุดใดจุดหนึ่งจึงเป็นอีกวิธีการหนึ่งที่สามารถลดการเกิดไนโตรเจนออกไซด์และไนตรัสออกไซด์ได้ โดยเฉพาะการควบคุมการป้อนปริมาณอากาศที่ตำแหน่งด้านล่างของโรเตอร์ที่มีการป้อนเชื้อเพลิงเข้ามาด้วยให้น้อยที่สุด ซึ่งการที่มีอากาศมาก เชื้อเพลิงมาก (ปริมาณไนโตรเจนในเชื้อเพลิงมาก) อุณหภูมิจะสูงมาก ย่อมก่อให้เกิดไนโตรเจนออกไซด์และไนตรัสออกไซด์ได้มากขึ้น ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงใช้ปริมาณอากาศปฐมภูมิที่น้อยที่สุดที่ทำให้ทรายซึ่งเป็นอนุภาคส่วนใหญ่ในระบบเกิดการฟลูอิด์และหมุนเวียน โดยโรเตอร์หรือห้องเผาไหม้ที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีลักษณะเป็นท่อรูปทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 10 เซนติเมตร สูง 3 เมตร อัตราการไหลของทรายผ่านแอลวาล์ว 100 กิโลกรัมต่อชั่วโมงจาก downcomer มาสู่ด้านล่างของโรเตอร์ ซึ่งจากการสังเกตลักษณะการไหลของอนุภาคในโรเตอร์พบว่าอัตราการป้อนอากาศปฐมภูมิ 200 ลิตรต่อนาทีเป็นปริมาณอากาศต่ำสุดที่ทำให้ทรายเกิดการฟลูอิด์และหมุนเวียน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงป้อนอากาศปฐมภูมิคงที่ทุกการทดลองที่ 200 ลิตรต่อนาที

4.4 การหาขนาดของชีวมวลและปริมาณอากาศที่เหมาะสมสำหรับป้อนเข้าไปในสกรูพีดเดอร์สำหรับป้อนชีวมวลเพื่อไม่ให้เปลวไฟและความร้อนไหลย้อนกลับไปไหม้ชีวมวลในถังเก็บ

เนื่องจากการป้อนชีวมวลเข้าโรเตอร์โดยใช้ สกรูพีดเดอร์ จะเกิดปัญหาไฟไหม้ย้อนกลับเข้าไปในสกรูพีดเดอร์ และเกิดการเผาไหม้ในถังเก็บเชื้อเพลิงได้ เนื่องจากชีวมวลมีลักษณะเบา มีปริมาณสารระเหยค่อนข้างมาก ติดไฟได้ง่ายที่อุณหภูมิต่ำ หากอัตราการป้อนเชื้อเพลิงน้อยกว่าการเผาไหม้ย้อนกลับไปในสกรูพีดเดอร์ ก็จะทำให้เกิดการเผาไหม้ในถังเก็บเชื้อเพลิง หรือความดันในถังเก็บชีวมวลน้อยกว่าความดันใน โรเตอร์ เปลวไฟและความร้อนก็จะไหลย้อนกลับไปในสกรูพีดเดอร์ได้ง่ายทำให้เกิดการเผาไหม้ในถังเก็บเชื้อเพลิงในที่สุด ดังนั้นหากป้อนชีวมวลที่มีความหนาแน่นน้อย มีลักษณะเป็นเส้นใย เกิดการเกาะติดกันเป็นกลุ่มก้อนได้ มีช่องว่างของอากาศแทรกอยู่ระหว่างอนุภาคชีวมวลในปริมาณมาก ก็จะทำให้เกิดปัญหาการเผาไหม้ย้อนกลับเข้าไปในสกรูพีดเดอร์ และเกิดการเผาไหม้ในถังเก็บเชื้อเพลิงง่ายกว่าปกติ ชีวมวลที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ กะลาปาล์ม , กะลามะพร้าว , แกลบ และขี้เลื่อย ซึ่งแกลบและขี้เลื่อยก็ประสบปัญหาจากการเผาไหม้

ย้อนกลับเข้าไปในสกรูพีดเดอร์ และเกิดการเผาไหม้ในถังเก็บเชื้อเพลิง จากการทดลองพบว่าขนาดของชีวมวลทั้ง 4 ชนิดที่ถูกบดย่อยและสามารถผ่านตระแกรงแยกขนาด 1200 ไมโครเมตร และปริมาณอากาศป้อนที่สกรูพีดเดอร์ของถังเก็บชีวมวลเท่ากับ 100 ลิตรต่อนาที ทำให้ไม่เกิดปัญหาไฟไหม้ย้อนกลับเข้าไปในสกรูพีดเดอร์ และการแก้ปัญหาของการเกิดช่องว่างของอากาศแทรกอยู่ระหว่างอนุภาคชีวมวลในปริมาณมากต้องให้เหล็กกระทันชีวมวลในถังเก็บเมื่อมีช่องว่างของอากาศเกิดขึ้น การแก้ปัญหาทั้ง 3 วิธีจะทำให้สามารถป้อนชีวมวลได้อย่างต่อเนื่องและไม่เกิดการเผาไหม้ย้อนกลับเข้าไปในสกรูพีดเดอร์ และเกิดการเผาไหม้ในถังเก็บเชื้อเพลิง

4.5 การหาปริมาณเชื้อเพลิงและปริมาณอากาศในการเผาไหม้ในระบบฟลูอิดไคซ์เบดแบบหมุนเวียน

จากการทดลองพบว่าอัตราการป้อนถ่านหินและกะลาปาล์ม 7 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ที่อัตราการป้อนอากาศร้อยละ 100 ของการเผาไหม้สมบูรณ์ ดังแสดงในตารางที่ 4.9 และอุณหภูมิบริเวณด้านล่างของไรเซอร์ไม่เกิน 1000 องศาเซลเซียส ซึ่งในเตาเผาจะมีปัญหาคือการเกิดเถ้าหลอมและติดในเตาเผาจะทำให้เป็นอุปสรรคในการทดลอง เถ้าหลอมจะเกิดขึ้นได้ง่ายเมื่ออุณหภูมิบริเวณด้านล่างของไรเซอร์มีค่าสูงกว่า 1000 องศาเซลเซียส ถ่านหินและกะลาปาล์มมีค่าพลังงานความร้อนสูง การป้อนถ่านหินและกะลาปาล์มที่อัตรา 7 กิโลกรัมต่อชั่วโมงอุณหภูมิไม่เกิน 1000 องศาเซลเซียส จึงทำให้มีโอกาสที่จะเกิดเถ้าหลอมเกาะติดในเตาได้น้อย และอัตราการป้อนแกลบ 7 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ที่อัตราการป้อนอากาศร้อยละ 100 ของการเผาไหม้สมบูรณ์ ซึ่งแกลบมีค่าพลังงานความร้อนน้อยที่สุด ยังสามารถเผาไหม้ได้โดยที่ไฟในเตาเผาไม่ดับ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงกำหนดอัตราการป้อนของเชื้อเพลิงคงที่ที่ 7 กิโลกรัมต่อชั่วโมง และมีการปรับค่าปริมาณอากาศที่ป้อน ดังแสดงในตารางที่ 4.10

ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

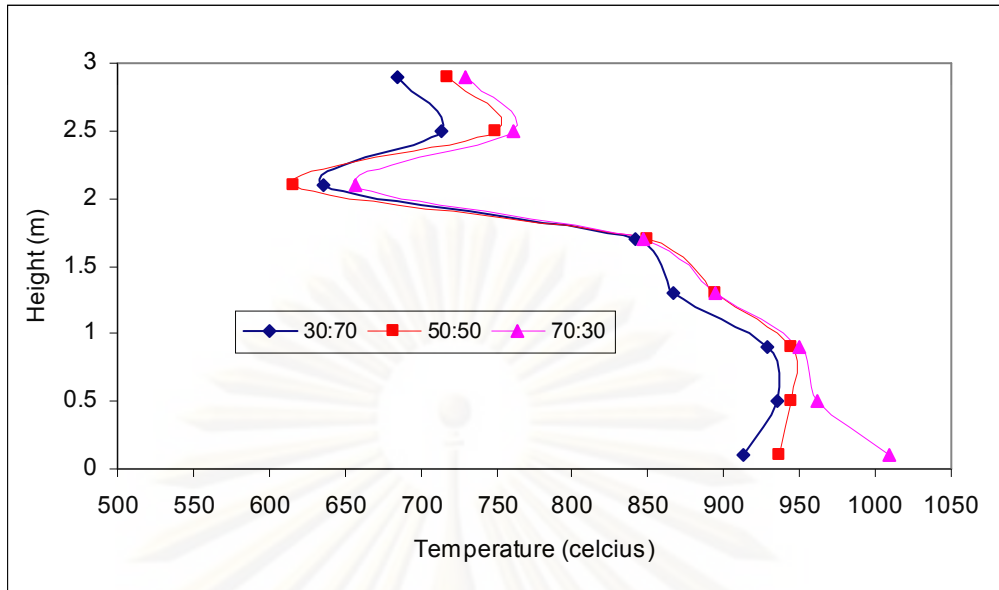
ตารางที่ 4.10 ปริมาณอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ถ่านหินร้อยละ 100 , ถ่านหินผสมชีวมวลในอัตราส่วน 70:30 , 50:50 และ 30:70 ที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิง 7 กิโลกรัมต่อชั่วโมง โดยคิดปริมาณอากาศที่การเผาไหม้สมบูรณ์ ร้อยละ 100

Fuel	Air Required (L/min)
Feed 7.0 kg/hr	100% combustion
Coal 100%	447
Coal:Palm shell 70:30	450
Coal:Palm shell 50:50	452
Coal:Palm shell 30:70	453
Coal:Coconut shell 70:30	452
Coal:Coconut shell 50:50	455
Coal:Coconut shell 30:70	458
Coal:Rice husk 70:30	452
Coal:Rice husk 50:50	455
Coal:Rice husk 30:70	458
Coal:Saw dust 30:70	454
Coal:Saw dust 50:50	459
Coal:Saw dust 70:30	463

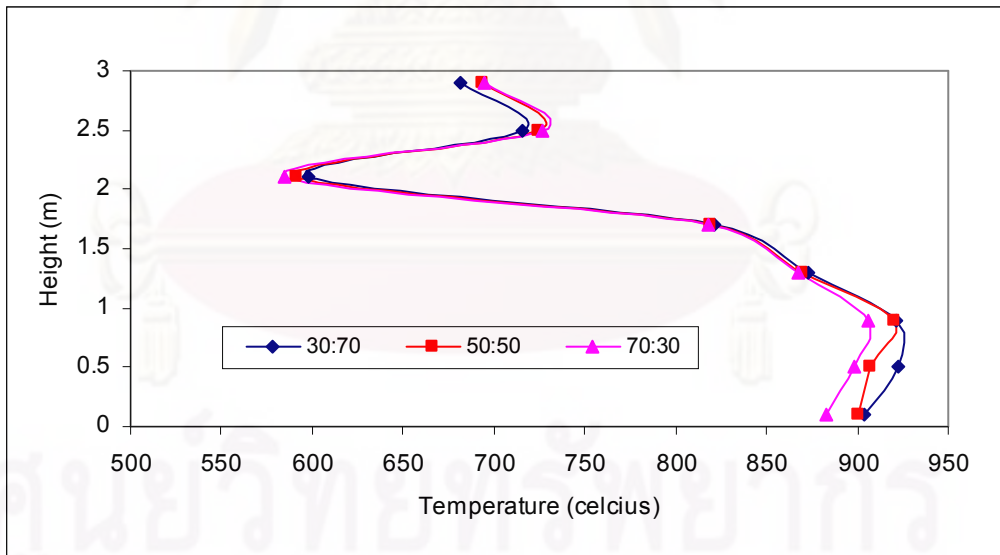
4.6 ศึกษาผลของชนิดชีวมวลเผาไหม้ร่วมกับถ่านหินต่อการปล่อยแก๊สไนโตรเจนออกไซด์และไนตรัสออกไซด์

4.6.1 ศึกษาผลของชนิดของชีวมวลเผาไหม้ร่วมกับถ่านหินที่มีผลต่ออุณหภูมิในไรเซอร์

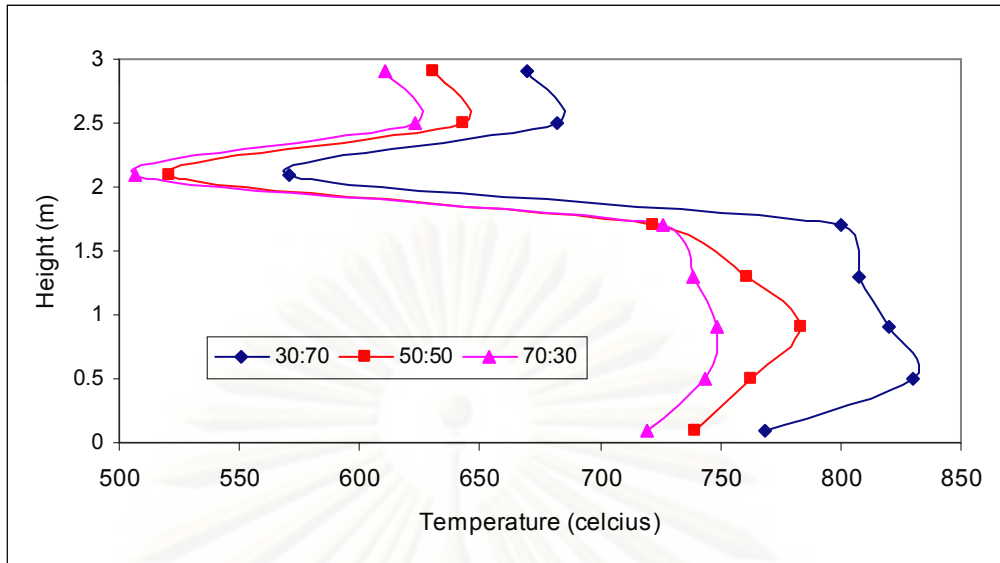
ในการทดลองที่การป้อนเชื้อเพลิงและอากาศในปริมาณที่เท่ากัน อากาศทุกติดยุมีป้อนที่ตำแหน่งเดียวแต่ชีวมวลต่างชนิดกัน การเผาไหม้ชีวมวลร่วมกับถ่านหินจะให้อุณหภูมิไม่เท่ากันเป็นผลเนื่องจากค่าพลังงานความร้อนในตัวของถ่านหินและชีวมวล อุณหภูมิตลอดไรเซอร์ในการทดลองต่างๆแสดงได้ดังรูปที่ 4.6 ถึง 4.9



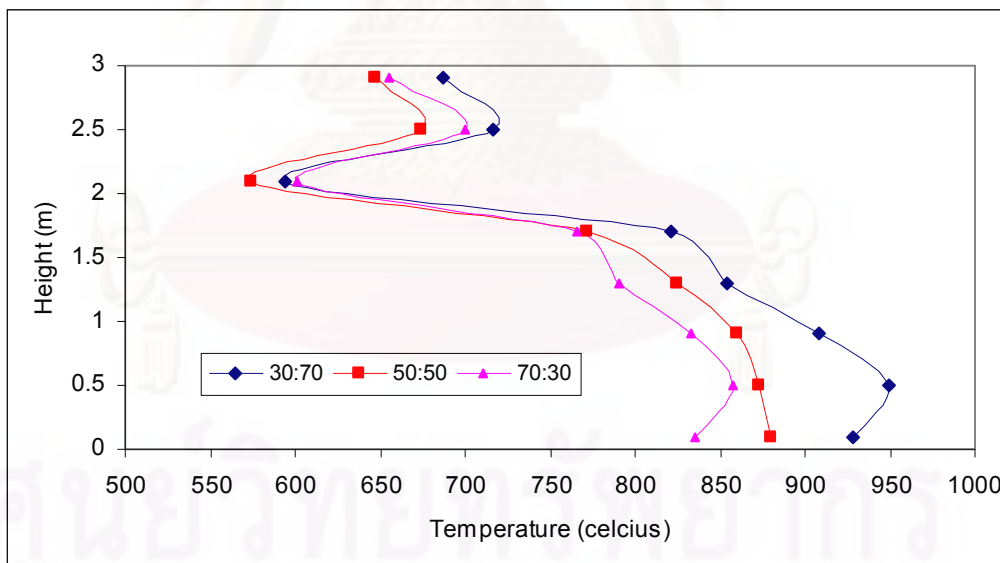
รูปที่ 4.6 อุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆ ในไรเซอร์จากการเผาไหม้ ถ่านหิน:กะลาปาล์ม 70:30, 50:50, 30:70 ที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิง 7 กิโลกรัมต่อชั่วโมง อากาศรวมร้อยละ 100 ในการเผาไหม้สมบูรณ์ อากาศปฐมภูมิ 200 ลิตรต่อนาที ป้อนอากาศที่สกรูพีดเดอร์ของชีวมวล 100 ลิตรต่อนาที ป้อนอากาศทุติยภูมิที่ตำแหน่ง 2 เมตร



รูปที่ 4.7 อุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆ ในไรเซอร์จากการเผาไหม้ ถ่านหิน:กะลามะพร้าว 70:30, 50:50, 30:70 ที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิง 7 กิโลกรัมต่อชั่วโมง อากาศรวมร้อยละ 100 ในการเผาไหม้สมบูรณ์ อากาศปฐมภูมิ 200 ลิตรต่อนาที ป้อนอากาศที่สกรูพีดเดอร์ของชีวมวล 100 ลิตรต่อนาที ป้อนอากาศทุติยภูมิที่ตำแหน่ง 2 เมตร



รูปที่ 4.8 อุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆ ในไรเซอร์จากการเผาไหม้ ถ่านหิน: แกลบ 70:30 , 50:50 , 30:70 ที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิง 7 กิโลกรัมต่อชั่วโมง อากาศรวมร้อยละ 100 ในการเผาไหม้สมบูรณ์ อากาศปฐมภูมิ 200 ลิตรต่ออนาที ป้อนอากาศที่สกรูพีดเดอร์ของชีวมวล 100 ลิตรต่ออนาที ป้อนอากาศทุติยภูมิที่ตำแหน่ง 2 เมตร

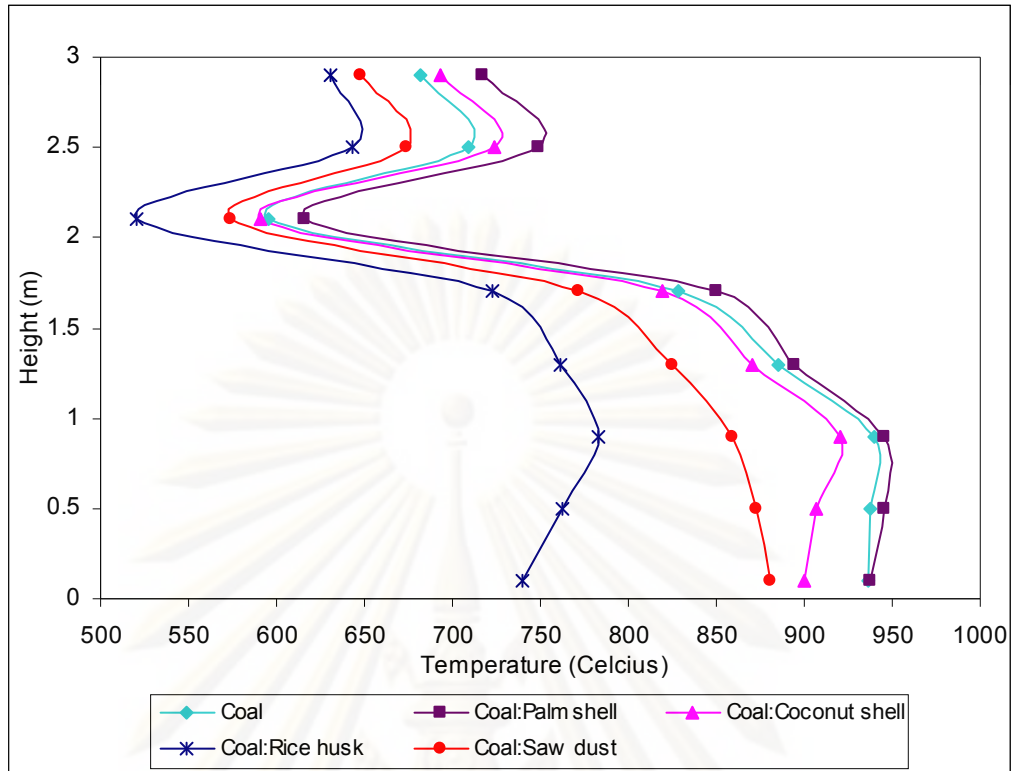


รูปที่ 4.9 อุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆ ในไรเซอร์จากการเผาไหม้ ถ่านหิน: ชี้อ้อย 70:30 , 50:50 , 30:70 ที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิง 7 กิโลกรัมต่อชั่วโมง อากาศรวมร้อยละ 100 ในการเผาไหม้สมบูรณ์ อากาศปฐมภูมิ 200 ลิตรต่ออนาที ป้อนอากาศที่สกรูพีดเดอร์ของชีวมวล 100 ลิตรต่ออนาที ป้อนอากาศทุติยภูมิที่ตำแหน่ง 2 เมตร

รูปที่ 4.6 ถึง 4.9 แสดงการป้อนเชื้อเพลิงต่างชนิดกันที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิง 7 กิโลกรัมต่อชั่วโมง อากาศรวมไม่เท่ากันแต่เมื่อคิดถึงปริมาณอากาศที่จำเป็นสำหรับการเผาไหม้แล้วมีค่าเท่ากันคือร้อยละ 100 ของการเผาไหม้สมบูรณ์ และป้อนอากาศสุทธิที่มีที่ตำแหน่ง 2 เมตร หากสังเกตดูอุณหภูมิตลอดไรเซอร์ในแต่ละการทดลอง จะพบว่าที่ตำแหน่งความสูง 2 เมตร อุณหภูมิในไรเซอร์จะลดลงอย่างกะทันหันแล้วจึงค่อยๆ เพิ่มสูงขึ้น เพราะเป็นตำแหน่งที่มีการป้อนอากาศสุทธิซึ่งเป็นอากาศเย็นเข้ามาและอากาศสุทธิที่เติมเข้ามานี้ก็จะช่วยเผาไหม้เชื้อเพลิงที่ยังเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ทำให้อุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นอีกครั้ง รูปที่ 4.6 แสดงการป้อนถ่านหินและกะลาปาล์ม โดยจะเพิ่มปริมาณของกะลาปาล์มจากร้อยละ 30 , 50 และ 70 โดยน้ำหนัก หากสังเกตดูอุณหภูมิตลอดไรเซอร์ในแต่ละการทดลอง จะพบว่าอุณหภูมิสูงขึ้นเล็กน้อยเป็นผลเนื่องจากค่าพลังงานความร้อนของกะลาปาล์มมากกว่าถ่านหินเล็กน้อย รูปที่ 4.7 แสดงการป้อนถ่านหินและกะลามะพร้าว โดยจะเพิ่มปริมาณของกะลามะพร้าวจากร้อยละ 30 , 50 และ 70 โดยน้ำหนัก หากสังเกตดูอุณหภูมิตลอดไรเซอร์ในแต่ละการทดลอง จะพบว่าอุณหภูมิลดลงเล็กน้อยเป็นผลเนื่องจากค่าพลังงานความร้อนของกะลามะพร้าวน้อยกว่าถ่านหินเพียงเล็กน้อย รูปที่ 4.8 และ 4.9 แสดงการป้อนถ่านหินร่วมกับแกลบ และซีลี้อย โดยจะเพิ่มปริมาณของแกลบ และซีลี้อย จากร้อยละ 30 , 50 และ 70 โดยน้ำหนัก หากสังเกตดูอุณหภูมิตลอดไรเซอร์ในแต่ละการทดลอง จะพบว่าอุณหภูมิลดลงอย่างมากเป็นผลเนื่องจากค่าพลังงานความร้อนของแกลบ และซีลี้อย มีค่าน้อยกว่าถ่านหินมาก

ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.10 อุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆ ในไรเซอร์จากการเผาไหม้ ถ่านหิน:ชีวมวล 100:00 ถ่านหิน:กะลาปาล์ม 50:50 ถ่านหิน:กะลามะพร้าว 50:50 ถ่านหิน:แกลบ 50:50 ถ่าน:ขี้เลื่อย 50:50 ที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิง 7 กิโลกรัมต่อชั่วโมง อากาศรวมร้อยละ 100 ในการเผาไหม้สมบูรณ์ อากาศปฐมภูมิ 200 ลิตรต่อนาที ป้อนอากาศที่สกรูฟีดเดอร์ของชีวมวล 100 ลิตรต่อนาที ป้อนอากาศทุติยภูมิที่ตำแหน่ง 2 เมตร

ตารางที่ 4.11 อุณหภูมิเฉลี่ยในไรเซอร์จากการเผาไหม้ ถ่านหิน:ชีวมวล 100:00 ถ่านหิน:กะลาปาล์ม 50:50 ถ่านหิน:กะลามะพร้าว 50:50 ถ่านหิน:แกลบ 50:50 ถ่าน:ขี้เลื่อย 50:50 ที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิง 7 กิโลกรัมต่อชั่วโมง อากาศรวมร้อยละ 100 ในการเผาไหม้สมบูรณ์ อากาศปฐมภูมิ 200 ลิตรต่อนาที ป้อนอากาศที่สกรูฟีดเดอร์ของชีวมวล 100 ลิตรต่อนาที ป้อนอากาศทุติยภูมิที่ตำแหน่ง 2 เมตร

Coal:Biomass(50:50)	Average temperature (°C)
Coal	814.31
Coal : Palm shell	831.66
Coal : Coconut shell	803.09
Coal : Rice husk	695.36
Coal : Saw dust	763.10

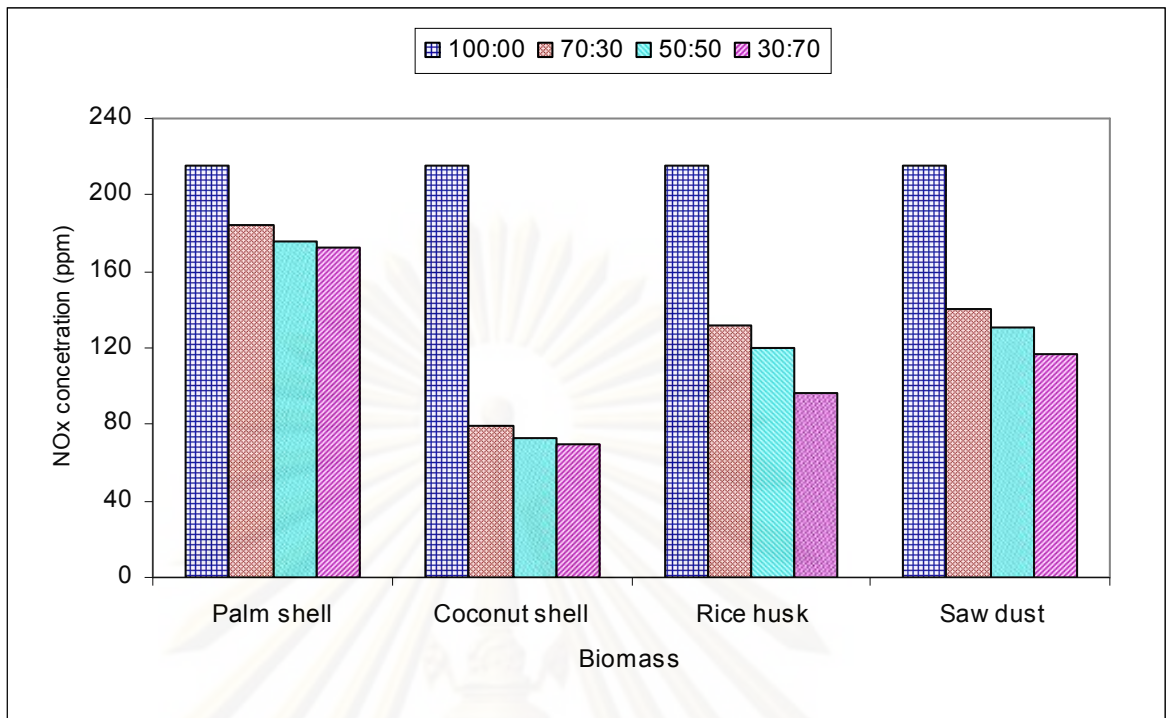
จากรูปที่ 4.10 และตารางที่ 4.11 แสดงคุณสมบัติจากการป้อนเชื้อเพลิงต่างชนิดกันที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิง 7 กิโลกรัมต่อชั่วโมง อากาศรวมไม่เท่ากันแต่เมื่อคิดถึงปริมาณอากาศที่จำเป็นสำหรับการเผาไหม้แล้วมีค่าเท่ากันคือร้อยละ 100 ของการเผาไหม้สมบูรณ์ และป้อนอากาศทุติยภูมิที่ตำแหน่ง 2 เมตร โดยการป้อนเชื้อเพลิงจะป้อนถ่านหินเพียงอย่างเดียว และป้อนถ่านหินร่วมกับชีวมวล 4 ชนิดได้แก่ กะลาปาล์ม กะลามะพร้าว แกลบ และขี้เลื่อย ด้วยอัตราส่วน 50:50 หากสังเกตดูคุณสมบัติตลอดไโรเซอร์ในแต่ละการทดลองจะพบว่า การป้อนถ่านหินและกะลาปาล์ม คุณสมบัติจะสูงกว่าการป้อนถ่านหินเพียงอย่างเดียวและมีค่าสูงที่สุด ส่วนการป้อนถ่านหินร่วมกับ กะลามะพร้าว แกลบ และขี้เลื่อย คุณสมบัติจะต่ำกว่าการเผาไหม้ถ่านหินเพียงอย่างเดียว และการป้อนถ่านหินร่วมกับแกลบคุณสมบัติจะต่ำที่สุด ซึ่งเป็นผลเนื่องจากค่าพลังงานความร้อนของถ่านหิน และชีวมวลทั้ง 4 ชนิด

4.6.2 ศึกษาผลของชนิดชีวมวลเผาไหม้ร่วมกับถ่านหินที่มีผลต่อการปล่อย แก๊สไนโตรเจนออกไซด์ และแก๊สไนตรัสออกไซด์

การศึกษาค่าผลของชีวมวลทั้ง 4 ชนิดได้แก่ กะลาปาล์ม กะลามะพร้าว แกลบ และขี้เลื่อย เผาไหม้ร่วมกับถ่านหิน ที่มีผลต่อการปล่อยแก๊สไนโตรเจนออกไซด์ และแก๊สไนตรัสออกไซด์ จะเพิ่มปริมาณการป้อนชีวมวลขึ้นเรื่อยๆ จากร้อยละ 0 , 30 , 50 และ 70 โดยน้ำหนัก การวัดค่าปริมาณความเข้มข้นของแก๊สไนโตรเจนออกไซด์ และแก๊สไนตรัสออกไซด์ ณ ตำแหน่งที่ 10 ของเครื่องเผาไหม้ฟลูอิดไธซ์เบดแบบหมุนเวียน ซึ่งเป็นตำแหน่งที่ไม่มีปัจจัยรบกวนเหมือนไนโรเซอร์ และเป็นตำแหน่งของฟลูแก๊สที่จะปล่อยสู่บรรยากาศ ความเข้มข้นของแก๊สไนโตรเจนออกไซด์ และแก๊สไนตรัสออกไซด์ จากการเพิ่มปริมาณการป้อนชีวมวลเผาไหม้ร่วมกับถ่านหิน แสดงได้ดังรูปที่ 4.11 และ 4.12

ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



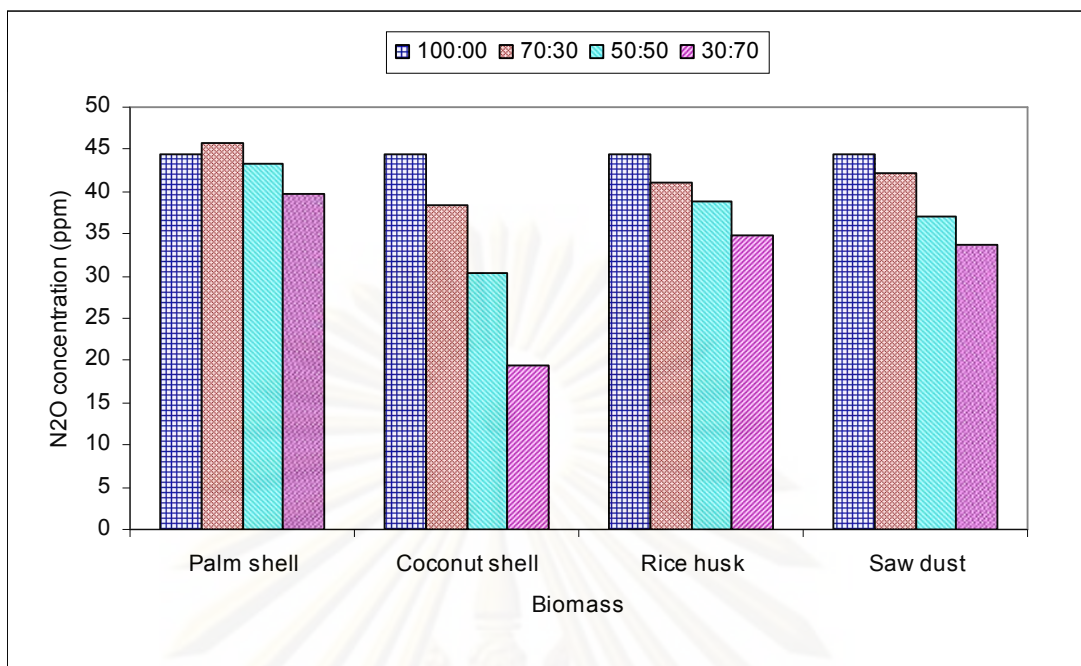
รูปที่ 4.11 ความเข้มข้นของแก๊สไนโตรเจนออกไซด์จากการเผาไหม้ถ่านหินร่วมกับชีวมวล ทั้ง 4 ชนิด ถ่านหิน:ชีวมวล 100:00 ถ่านหิน:ชีวมวล 70:30 ถ่านหิน:ชีวมวล 50:50 ถ่านหิน:ชีวมวล 70:30 ที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิง 7 กิโลกรัมต่อชั่วโมง อากาศรวมร้อยละ 100ในการเผาไหม้สมบูรณ์ อากาศปฐมภูมิ 200 ลิตรต่อนาที ป้อนอากาศที่สกรูพีดเดอร์ของชีวมวล 100 ลิตรต่อนาที ป้อนอากาศทุติยภูมิที่ตำแหน่ง 2 เมตร

จากรูปที่ 4.11 แสดงความเข้มข้นของแก๊สไนโตรเจนออกไซด์จากการเผาไหม้ถ่านหินร่วมกับชีวมวลที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิง 7 กิโลกรัมต่อชั่วโมง อากาศรวมร้อยละ 100 ในการเผาไหม้สมบูรณ์ อากาศปฐมภูมิ 200 ลิตรต่อนาที ป้อนอากาศที่สกรูพีดเดอร์ของชีวมวล 100 ลิตรต่อนาที ที่เหลือเป็นอากาศทุติยภูมิและป้อนที่ตำแหน่ง 2 เมตร จากผลการทดลองพบว่าการป้อนถ่านหินเพียงอย่างเดียวความเข้มข้นของแก๊สไนโตรเจนออกไซด์มีค่ามากที่สุดคือ 215 ส่วนในล้านส่วน เมื่อเพิ่มปริมาณการป้อนชีวมวลทั้ง 4 ชนิด ขึ้นเรื่อยๆ จากร้อยละ 0 , 30 , 50 และ 70 โดยน้ำหนัก ความเข้มข้นของแก๊สไนโตรเจนออกไซด์มีค่าลดลงเรื่อยๆ เป็นผลเนื่องจากชีวมวลมีปริมาณร้อยละไนโตรเจนน้อยกว่าถ่านหิน การป้อนถ่านหินร่วมกับกะลาปาล์มความเข้มข้นของแก๊สไนโตรเจนออกไซด์มีค่าใกล้เคียงกันกับการป้อนถ่านหินเพียงอย่างเดียว เพราะกะลาปาล์มมีปริมาณร้อยละไนโตรเจน ใกล้เคียงกับถ่านหิน การป้อนถ่านหินร่วมกับกะลามะพร้าวความเข้มข้นของแก๊สไนโตรเจนออกไซด์มีค่าน้อยที่สุด โดยการป้อนถ่านหินร่วมกับกะลามะพร้าว อัตราส่วน 30:70 ความเข้มข้นของแก๊สไนโตรเจนออกไซด์มีค่าเพียง 70 ส่วนในล้านส่วน เป็นผลจากกะลามะพร้าวมี

ปริมาณไนโตรเจนน้อยที่สุด คือร้อยละ 0.04 การป้อนถ่านหินร่วมกับแกลบและขี้เลื่อย ความเข้มข้นของแก๊สไนโตรเจนออกไซด์มีค่าใกล้เคียงกัน เพราะปริมาณไนโตรเจนของแกลบและขี้เลื่อยมีค่าใกล้เคียงกันคือร้อยละ 0.18 และ 0.19 โดยน้ำหนัก การป้อนถ่านหินร่วมกับแกลบปริมาณความเข้มข้นของแก๊สไนโตรเจนออกไซด์มีค่าน้อยกว่าขี้เลื่อยเล็กน้อย เป็นผลเนื่องจากอุณหภูมิจากการป้อนถ่านหินกับแกลบ ต่ำกว่าการป้อนถ่านหินกับขี้เลื่อย เพราะแก๊สไนโตรเจนออกไซด์จะลดลงเมื่ออุณหภูมิลดลง ปริมาณร้อยละไนโตรเจนในเชื้อเพลิงมีผลต่อความเข้มข้นของแก๊สไนโตรเจนออกไซด์มากกว่าอุณหภูมิ สังเกตได้จากการป้อนถ่านหินร่วมกับกะลามะพร้าว ความเข้มข้นของแก๊สไนโตรเจนออกไซด์มีน้อยกว่า การป้อนถ่านหินร่วมกับแกลบ และขี้เลื่อย แต่อุณหภูมิจากการป้อนถ่านหินและกะลาปาล์มมีค่าสูงกว่า ดังแสดงใน รูปที่ 4.10



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

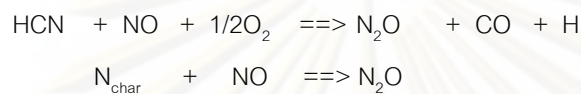


รูปที่ 4.12 ความเข้มข้นของแก๊สไนตรัสออกไซด์จากการเผาไหม้ถ่านหินร่วมกับชีวมวลทั้ง 4 ชนิด ถ่านหินร้อยละ 100 ถ่านหิน:ชีวมวล 70:30 ถ่านหิน:ชีวมวล 50:50 ถ่านหิน:ชีวมวล 70:30 ที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิง 7 กิโลกรัมต่อชั่วโมง อากาศรวมร้อยละ 100 ในการเผาไหม้สมบูรณ์ อากาศปฐมภูมิ 200 ลิตรต่อนาที ป้อนอากาศที่สกรูพีดเดอร์ของชีวมวล 100 ลิตรต่อนาที ป้อนอากาศทุติยภูมิที่ตำแหน่ง 2 เมตร

จากรูปที่ 4.12 แสดงความเข้มข้นของแก๊สไนตรัสออกไซด์จากการเผาไหม้ถ่านหินร่วมกับชีวมวลที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิง 7 กิโลกรัมต่อชั่วโมง อากาศรวมร้อยละ 100 เปอร์เซ็นต์ในการเผาไหม้สมบูรณ์ อากาศปฐมภูมิ 200 ลิตรต่อนาที ป้อนอากาศที่สกรูพีดเดอร์ของชีวมวล 100 ลิตรต่อนาที ที่เหลือเป็นอากาศทุติยภูมิและป้อนที่ตำแหน่ง 2 เมตร จากผลการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณการป้อนชีวมวลทั้ง 4 ชนิด ขึ้นเรื่อยๆ จากร้อยละ 0 , 30 , 50 และ 70 โดยน้ำหนัก ความเข้มข้นของแก๊สไนตรัสออกไซด์มีปริมาณลดลงเรื่อยๆ เป็นผลเนื่องมาจากชีวมวลมีปริมาณร้อยละไนโตรเจนน้อยกว่าถ่านหิน แต่การป้อนถ่านหินร่วมกับกะลาปาล์มที่อัตราส่วน 70:30 เพิ่มขึ้นจากการเผาไหม้ถ่านหินเพียงอย่างเดียวเล็กน้อยจาก 44.4 เป็น 45.79 ส่วนในด้านอื่น เป็นผลเนื่องจากการเพิ่มของอุณหภูมิ แก๊สไนตรัสออกไซด์จะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่มากขึ้นจนถึงอุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ถ้าหากอุณหภูมิสูงกว่า 850 องศาเซลเซียส แก๊สไนตรัสออกไซด์จะค่อยๆ ลดลงตามอุณหภูมิที่มากขึ้น (Miccio และ คณะ, 2001) การป้อนถ่านหินร่วมกับกะลามะพร้าวความเข้มข้นของแก๊สไนโตรเจนออกไซด์มีค่าน้อยที่สุด โดยการป้อนถ่านหินร่วมกับกะลามะพร้าว

อัตราส่วน 30:70 ความเข้มข้นของแก๊สไนตรัสออกไซด์มีค่าเพียง 19.5 ส่วนในล้านส่วน เป็นเพราะ กะลามาะพร้าวมีปริมาณไนโตรเจนน้อยที่สุด คือร้อยละ 0.04 โดยน้ำหนัก

จากรูปที่ 4.11 และ 4.12 แสดงความเข้มข้นของแก๊สไนตรัสออกไซด์และแก๊สไนตรัสออกไซด์จากการเผาไหม้ถ่านหินร่วมกับชีวมวล จากผลการทดลองพบว่าความเข้มข้นของแก๊สไนตรัสออกไซด์มีปริมาณน้อยกว่าแก๊สไนโตรเจนออกไซด์ เป็นเพราะว่าการเกิดแก๊สไนตรัสออกไซด์เกิดปฏิกิริยาขึ้นในลำดับที่ 2 กล่าวคือแก๊สไนตรัสออกไซด์เกิดจากการทำปฏิกิริยาของแก๊สไนโตรเจนออกไซด์ ดังสมการ (Hao Liu และ คณะ , 2544)

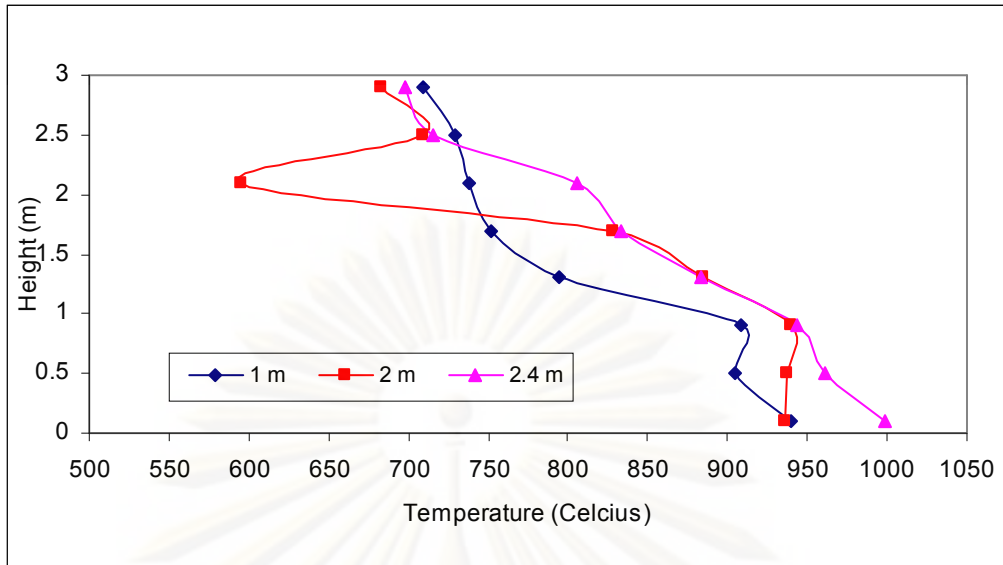


จากผลการทดลองปริมาณการปล่อยแก๊สไนโตรเจนออกไซด์และไนตรัสออกไซด์ของชีวมวลทั้ง 4 ชนิด ไม่เป็นอัตราส่วนโดยตรงกับปริมาณของไนโตรเจนในเชื้อเพลิง กล่าวคือปริมาณการปล่อยแก๊สไนโตรเจนออกไซด์และไนตรัสออกไซด์ จากการป้อนถ่านหินกับกะลาปาล์มที่อัตราส่วน 30:70 มีปริมาณ 172.5 และ 39.77 ส่วนในล้านส่วน และการป้อนถ่านหินกับกะลามาะพร้าวที่อัตราส่วน 30:70 มีปริมาณ 70 และ 19.5 ส่วนในล้านส่วน โดยปริมาณไนโตรเจนในกะลาปาล์มและกะลามาะพร้าว คือร้อยละ 0.65 และ 0.04 ซึ่งมีความแตกต่างกันมากหลายเท่า แต่ปริมาณการปล่อยแก๊สไนโตรเจนออกไซด์และไนตรัสออกไซด์ มีปริมาณที่แตกต่างกันไม่ถึงสามเท่า เป็นเพราะการเกิดแก๊สไนโตรเจนออกไซด์และไนตรัสออกไซด์ มีปัจจัยที่เกี่ยวข้องหลายปัจจัยได้แก่ อุณหภูมิ ปริมาณของอากาศ ปริมาณสารระเหย และน้ำหนักของอนุภาค จึงส่งผลทำให้ปริมาณการปล่อยแก๊สไนโตรเจนออกไซด์และไนตรัสออกไซด์ ไม่เป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณของไนโตรเจนในเชื้อเพลิง ปริมาณการปล่อยแก๊สไนโตรเจนออกไซด์และไนตรัสออกไซด์ของการป้อนถ่านหินกับแกลบ และขี้เลื่อย ผลที่ได้มีลักษณะเช่นเดียวกัน

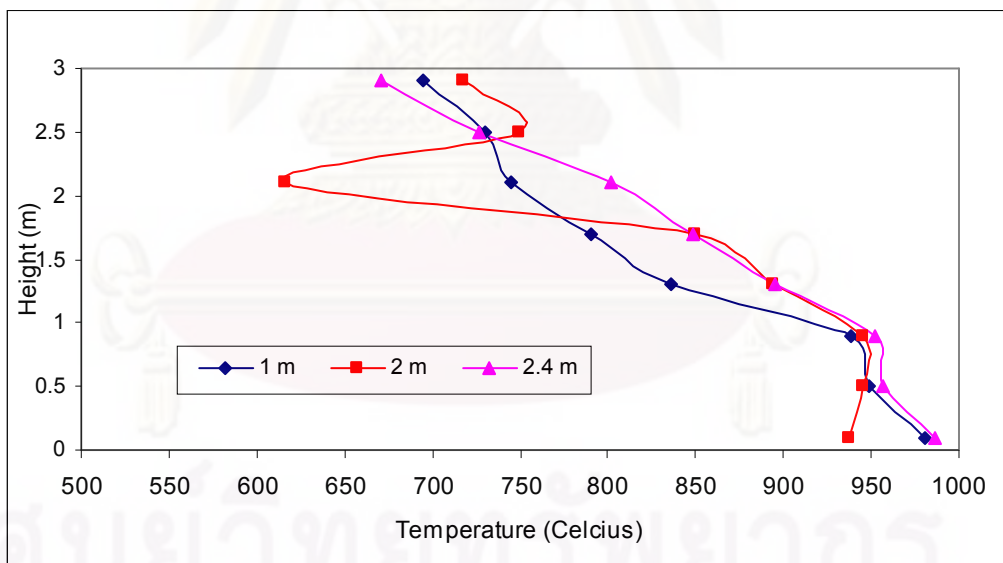
4.7 ศึกษาผลของตำแหน่งการป้อนอากาศหุตุยภูมิที่มีผลต่อการปล่อยแก๊สไนโตรเจนออกไซด์และแก๊สไนตรัสออกไซด์

4.7.1 ศึกษาผลของตำแหน่งการป้อนอากาศหุตุยภูมิที่มีผลต่ออุณหภูมิในโรเซอรั

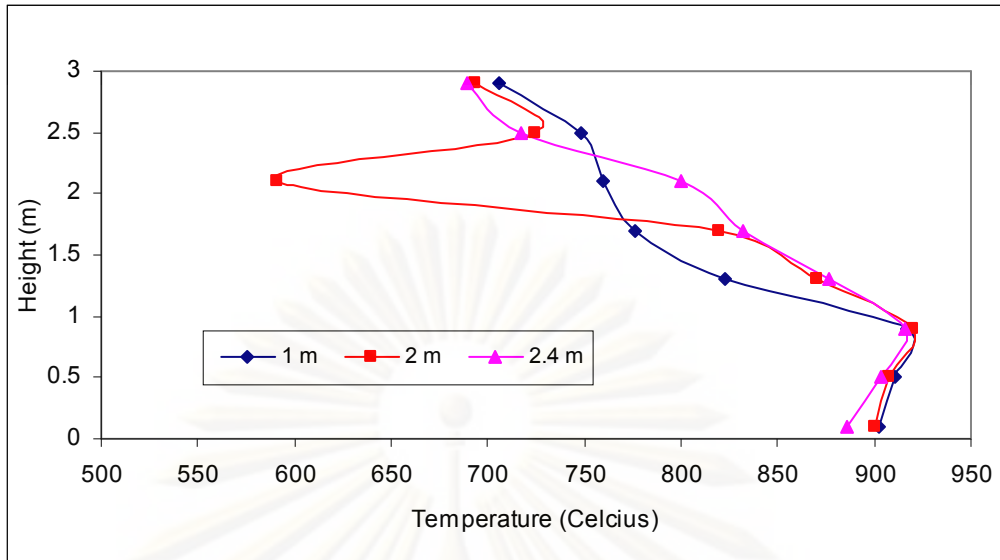
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



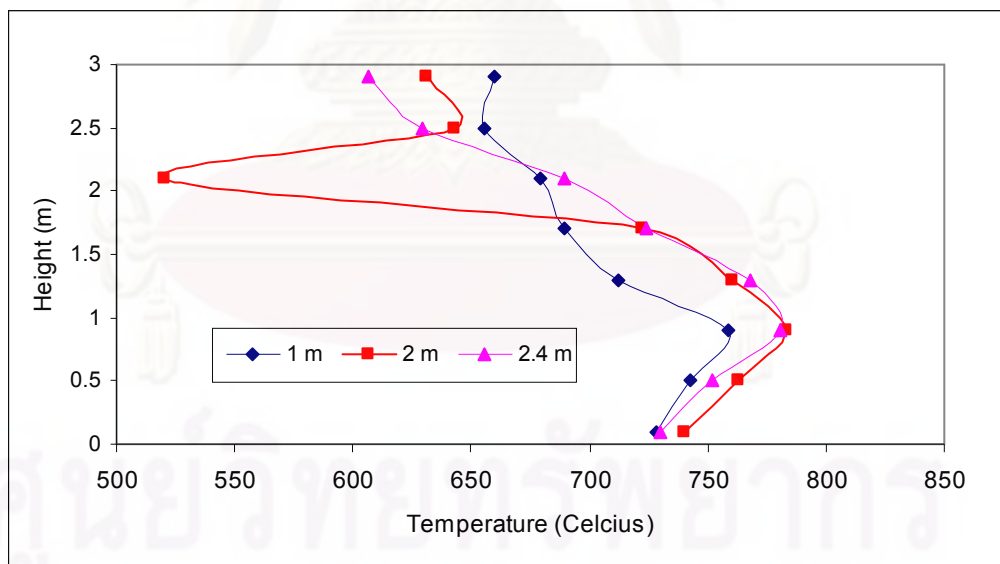
รูปที่ 4.13 อุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆ ในไรเซอร์จากการเผาไหม้ ถ่านหินเพียงอย่างเดียว ที่ อัตราการป้อนเชื้อเพลิง 7 กิโลกรัมต่อชั่วโมง อากาศรวมร้อยละ 100 ในการเผาไหม้ สมบูรณ์ อากาศปฐมภูมิ 200 ลิตรต่ออนาที ป้อนอากาศที่สกรูพีดเดอร์ของชีวมวล 100 ลิตรต่ออนาที ป้อนอากาศทุติยภูมิที่ตำแหน่ง 1 เมตร, 2 เมตร, 2.4 เมตร



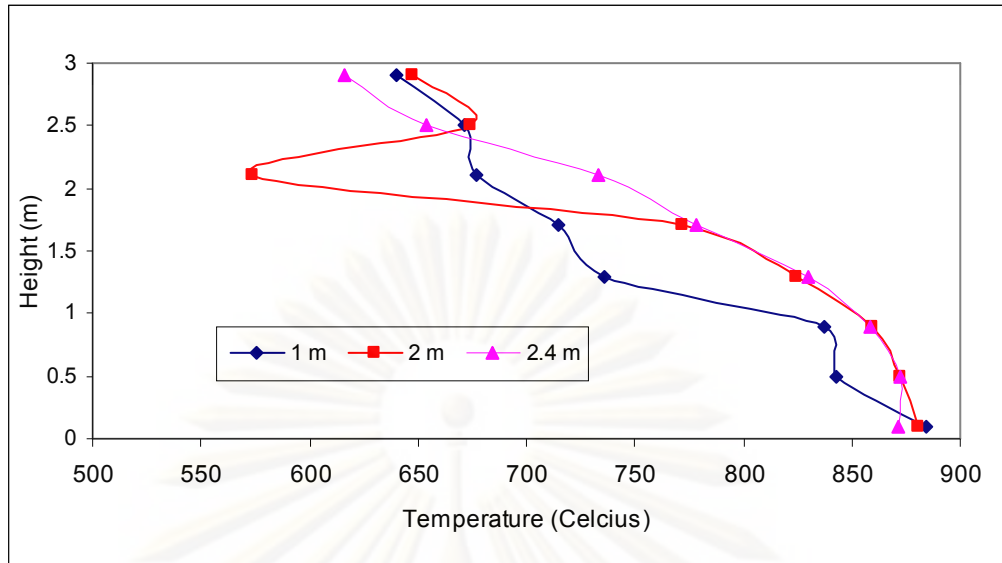
รูปที่ 4.14 อุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆ ในไรเซอร์จากการเผาไหม้ ถ่านหินร่วมกับกะลาปาล์ม อัตราส่วน 50:50 ที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิง 7 กิโลกรัมต่อชั่วโมง อากาศรวมร้อยละ 100 ในการเผาไหม้สมบูรณ์ อากาศปฐมภูมิ 200 ลิตรต่ออนาที ป้อนอากาศที่สกรูพีดเดอร์ของชีวมวล 100 ลิตรต่ออนาที ป้อนอากาศทุติยภูมิที่ตำแหน่ง 1 เมตร, 2 เมตร, 2.4 เมตร



รูปที่ 4.15 อุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆ ในไรเซอร์จากการเผาไหม้ ถ่านหินร่วมกับ
 กะลามะพร้าว อัตราส่วน 50:50 ที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิง 7 กิโลกรัมต่อชั่วโมง
 อากาศรวมร้อยละ 100 ในการเผาไหม้สมบูรณ์ อากาศปฐมภูมิ 200 ลิตรต่อนาที
 ป้อนอากาศที่สกรูพีดเดอร์ของชีวมวล 100 ลิตรต่อนาที ป้อนอากาศทุติยภูมิที่
 ตำแหน่ง 1 เมตร, 2 เมตร, 2.4 เมตร



รูปที่ 4.16 อุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆ ในไรเซอร์จากการเผาไหม้ ถ่านหินร่วมกับแกลบ
 อัตราส่วน 50:50 ที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิง 7 กิโลกรัมต่อชั่วโมง อากาศรวมร้อยละ
 100 ในการเผาไหม้สมบูรณ์ อากาศปฐมภูมิ 200 ลิตรต่อนาที ป้อนอากาศที่สกรูพีด
 เดอร์ของชีวมวล 100 ลิตรต่อนาที ป้อนอากาศทุติยภูมิที่ตำแหน่ง 1 เมตร, 2 เมตร,
 2.4 เมตร



รูปที่ 4.17 อุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆ ในไรเซอร์จากการเผาไหม้ ถ่านหินร่วมกับชีลียอัตราส่วน 50:50 ที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิง 7 กิโลกรัมต่อชั่วโมง อากาศรวมร้อยละ 100 ในการเผาไหม้สมบูรณ์ อากาศปฐมภูมิ 200 ลิตรต่อนาที ป้อนอากาศที่สกรูพิดเตอร์ของชีวมวล 100 ลิตรต่อนาที ป้อนอากาศทุติยภูมิที่ตำแหน่ง 1 เมตร, 2 เมตร, 2.4 เมตร

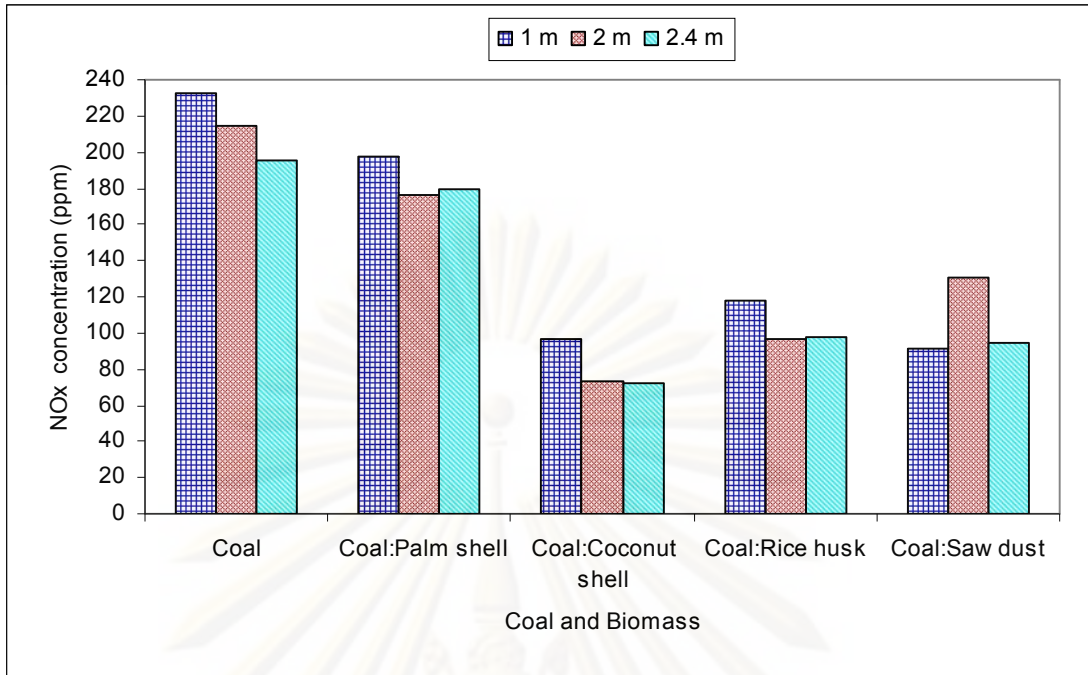
จากรูปที่ 4.13 ถึง 4.17 แสดงอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆ ในไรเซอร์จากการเผาไหม้ถ่านหินเพียงอย่างเดียว และถ่านหินร่วมกับชีวมวลอัตราส่วน 50:50 โดยการเปลี่ยนตำแหน่งการป้อนอากาศทุติยภูมิจากตำแหน่ง 1 เมตร , 2 เมตร และ 2.4 เมตร จากผลการทดลองพบว่าเมื่อป้อนอากาศทุติยภูมิที่ตำแหน่ง 1 เมตร , 2 เมตร และ 2.4 เมตร พบว่าอุณหภูมิในไรเซอร์จะลดลงอย่างกะทันหันแล้วจึงค่อยๆ เพิ่มสูงขึ้นใหม่ โดยอุณหภูมิจะลดลงที่ตำแหน่งความสูงประมาณ 1 เมตร, 2 เมตร และ 2.4 เมตร ตามลำดับ ซึ่งตำแหน่งความสูงเหล่านี้ก็คือตำแหน่งที่มีการป้อนอากาศทุติยภูมิซึ่งเป็นอากาศเย็นเข้ามานั่นเอง จึงทำให้อุณหภูมิลดลง และอากาศทุติยภูมิที่เดิมเข้ามานี้ก็จะช่วยเผาไหม้เชื้อเพลิงที่ยังเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ทำให้อุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นอีกครั้ง การป้อนอากาศเข้าไปจึงเป็นการเพิ่มออกซิเจนเพื่อช่วยในการเผาไหม้ให้ดียิ่งขึ้น แต่บริเวณตำแหน่งที่มีการป้อนอากาศทุติยภูมิจะมีอุณหภูมิลดลงเนื่องจากอากาศทุติยภูมิป้อนมาจากเครื่องอัดอากาศที่มีเครื่องดักน้ำที่มีหลักการทำงานคือ ให้ความเย็นกับอากาศ ความชื้นในอากาศจะควบแน่นเป็นของเหลว แล้วมีการถ่ายของเหลวออกจากเครื่องดักน้ำเป็นช่วงๆ ทำให้อุณหภูมิลดลงของอากาศทุติยภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง เมื่อไหลเข้าสู่ระบบ จึงทำให้อุณหภูมิลดลง

4.7.2 ศึกษาผลของตำแหน่งการป้อนอากาศทุติยภูมิที่มีผลต่อการปล่อยแก๊สไนโตรเจนออกไซด์และไนตรัสออกไซด์

โดยจุดประสงค์หลักของการป้อนอากาศทุติยภูมิก็คือ ลดปริมาณอากาศบริเวณด้านล่างของไรเซอร์ เพราะการที่อากาศและเชื้อเพลิงมีปริมาณมาก ประกอบกับได้รับความร้อนจากทราย จะทำให้เกิดการเผาไหม้อย่างรุนแรงอุณหภูมิเบดสูงอย่างรวดเร็ว แต่จะสูงมากเพียงจุดที่เกิดการเผาไหม้เท่านั้น เมื่อเชื้อเพลิงถูกเผาไหม้หมด อุณหภูมิตำแหน่งด้านบนก็จะลดลง ซึ่งการที่อุณหภูมิสูงมากจะทำให้เกิดปัญหาหลายอย่างตามมาคือ การสึกกร่อนของวัสดุบริเวณที่มีความร้อนสูงเกินไป ปัญหาถ้าหลอมในเครื่อง การอุดตัน และปัญหามลพิษจากฟลูแก๊สที่ปล่อยออกมา เนื่องจากมีแก๊สพิษหลายชนิดเกิดขึ้นได้ดีที่ปริมาณอากาศมาก ๆ อุณหภูมิสูง ๆ ซึ่งตามปกติแล้วแก๊สออกซิเจนจะทำปฏิกิริยากับเชื้อเพลิงที่อยู่ในรูปของคาร์บอนและไฮโดรเจนได้อย่างรวดเร็วมาก แต่หากมีแก๊สออกซิเจนในปริมาณมากเกินพอ ไนโตรเจนก็จะสามารถทำปฏิกิริยากับออกซิเจนได้เช่นกัน อีกทั้งแก๊สไนโตรเจนออกไซด์และไนตรัสออกไซด์ยังสามารถเกิดได้ดีที่อุณหภูมิสูง ๆ การลดปริมาณอากาศด้านล่างไรเซอร์โดยไปป้อนเพิ่มที่อากาศทุติยภูมิ จะทำให้เกิดการเผาไหม้เป็นชั้นๆ คือเผาไหม้ตรงตำแหน่งที่มีการป้อนเชื้อเพลิง แต่เผาไหม้ไม่สมบูรณ์ ทำให้อุณหภูมิไม่สูงมากนัก หลังจากนั้นจึงมีการเผาไหม้เพิ่มขึ้นอีกครั้งที่ตำแหน่งการป้อนอากาศทุติยภูมิ ความเข้มข้นของแก๊สไนโตรเจนออกไซด์ และแก๊สไนตรัสออกไซด์ จากการป้อนอากาศทุติยภูมิที่ตำแหน่ง 1 เมตร , 2 เมตร และ 2.4 เมตร จากการเผาไหม้ซึ่งมวลร่วมกับถ่านหิน แสดงได้ดังรูปที่ 4.18 และ 4.19

ศูนย์วิทยทรัพยากร

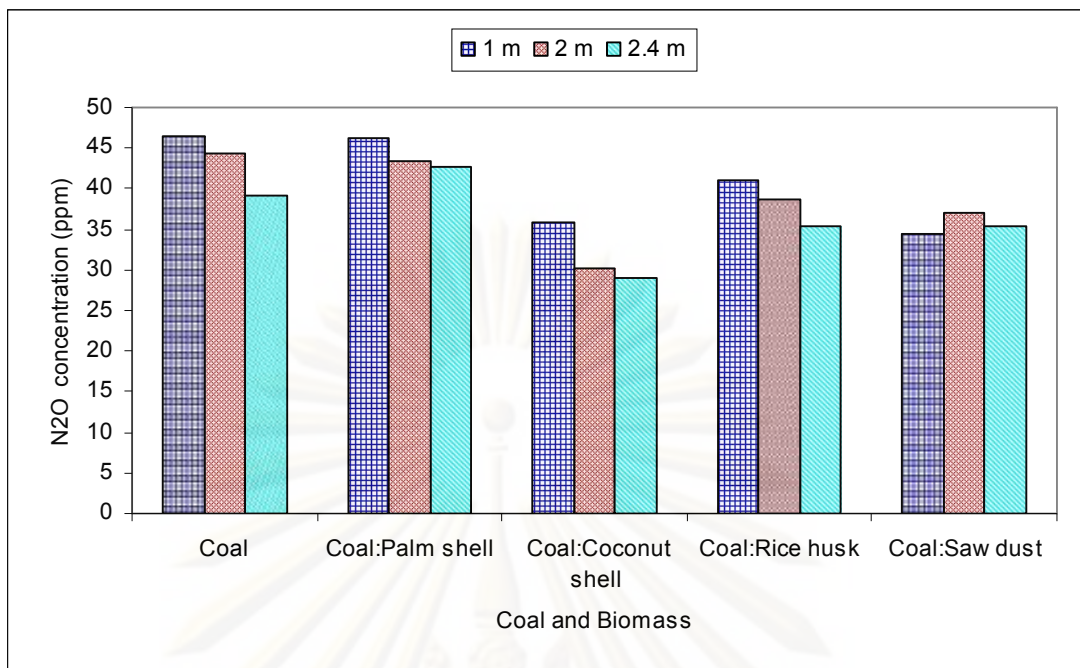
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.18 ความเข้มข้นของแก๊สไนโตรเจนออกไซด์จากการเผาไหม้ถ่านหินเพียงอย่างเดียว และ ถ่านหินร่วมกับชีวมวล อัตราส่วน 50:50 ที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิง 7 กิโลกรัมต่อชั่วโมง อากาศรวมร้อยละ 100 ในการเผาไหม้สมบูรณ์ อากาศปฐมภูมิ 200 ลิตรต่อนาที ป้อนอากาศที่สกรูฟีดเดอร์ของชีวมวล 100 ลิตรต่อนาที ป้อนอากาศทุติยภูมิที่ตำแหน่ง 1 เมตร , 2 เมตร , 2.4 เมตร

ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.19 ความเข้มข้นของแก๊สไนตรัสออกไซด์จากการเผาไหม้ถ่านหินเพียงอย่างเดียว และ ถ่านหินร่วมกับชีวมวล อัตราส่วน 50:50 ที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิง 7 กิโลกรัมต่อ ชั่วโมง อากาศรวม 100 เปอร์เซ็นต์ในการเผาไหม้สมบูรณ์ อากาศปฐมภูมิ 200 ลิตร ต่อนาที ป้อนอากาศที่สกรูพีดเดอร์ของชีวมวล 100 ลิตรต่อนาที ป้อนอากาศทุติยภูมิที่ตำแหน่ง 1 เมตร , 2 เมตร , 2.4 เมตร

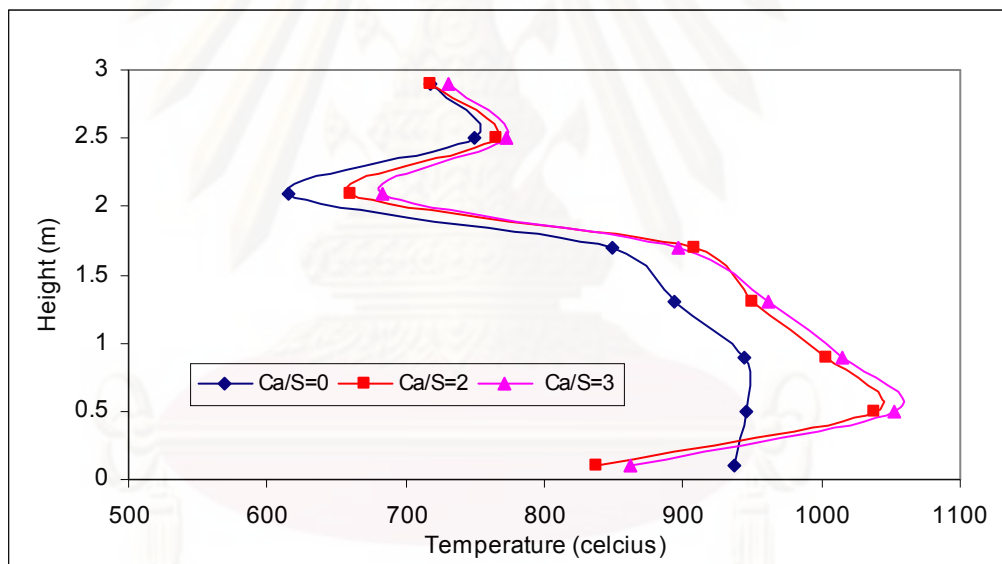
จากรูปที่ 4.18 และ 4.19 แสดงความเข้มข้นของแก๊สไนโตรเจนออกไซด์และไนตรัสออกไซด์ จากการเผาไหม้ถ่านหินเพียงอย่างเดียว และถ่านหินร่วมกับชีวมวลอัตราส่วน 50:50 โดยการเปลี่ยนตำแหน่งการป้อนอากาศทุติยภูมิจากตำแหน่ง 1 เมตร , 2 เมตร และ 2.4 เมตร จากผลการทดลองพบความเข้มข้นของแก๊สไนโตรเจนออกไซด์และไนตรัสออกไซด์ ที่การป้อนอากาศทุติยภูมิตำแหน่ง 1 เมตร จากการป้อนถ่านหินเพียงอย่างเดียว และการเผาไหม้ถ่านหินร่วมกับกะลาปาล์ม , กะลามะพร้าว และแกลบ มีค่ามากที่สุด เป็นผลจากปริมาณออกซิเจนที่เพิ่มเข้าไปสัมผัสกับเชื้อเพลิงเพราะเชื้อเพลิงที่ป้อนเข้าโดยสกรูพีดเดอร์จะอยู่ที่ตำแหน่ง 0.35 เมตร จึงทำให้ออกซิเจนที่เพิ่มเข้าไปทำปฏิกิริยากับเชื้อเพลิงได้ดี ถึงแม้ว่าอุณหภูมิจากการป้อนอากาศทุติยภูมิที่ตำแหน่ง 1 เมตร จะต่ำกว่าอุณหภูมิจากการป้อนอากาศทุติยภูมิที่ตำแหน่ง 2 เมตรและ 2.4 เมตร แต่การป้อนถ่านหินร่วมกับชีเลื่อยความเข้มข้นของแก๊สไนโตรเจนออกไซด์และไนตรัสออกไซด์จากการป้อนอากาศทุติยภูมิที่ตำแหน่ง 2 มีค่ามากที่สุด เพราะชีเลื่อยมีอนุภาคขนาดเล็กและมีน้ำหนักเบา จึงทำให้อนุภาคของชีเลื่อยส่วนมากเกิดการเผาไหม้ได้ที่ตำแหน่ง 2 เมตร ซึ่งเป็นผลจาก

ความเร็วของอากาศ แรงดันของอากาศปฐมภูมิและแรงดันของอากาศที่ป้อนบริเวณสกรูพีดเดอร์ของชีวมวล

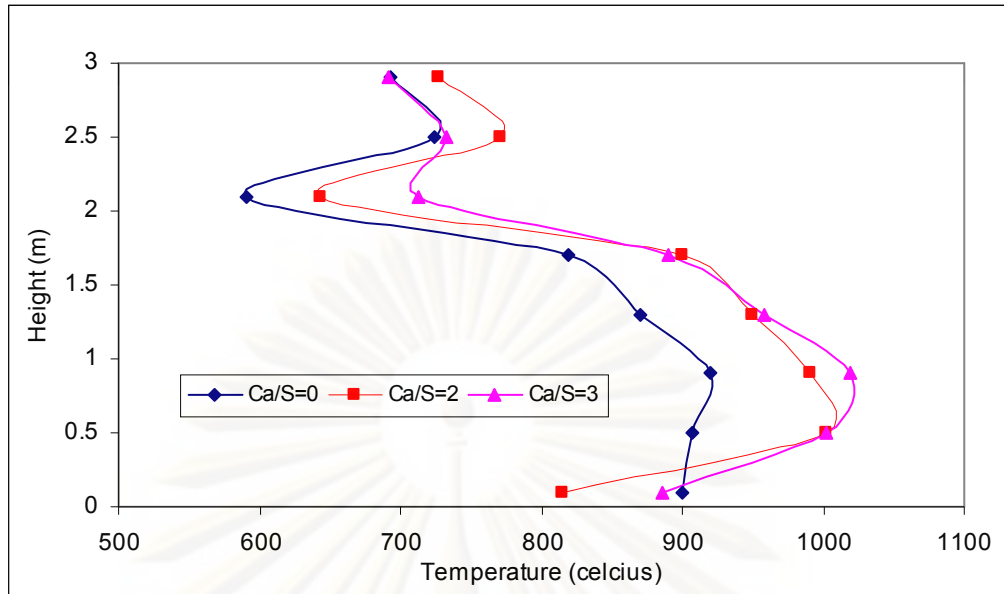
4.8 การศึกษาผลของแคลเซียมออกไซด์ที่มีผลต่อการปล่อยแก๊สไนโตรเจนออกไซด์และแก๊สไนตรัสออกไซด์

4.8.1 การศึกษาผลของแคลเซียมออกไซด์ที่มีผลต่ออุณหภูมิในไรเซอร์

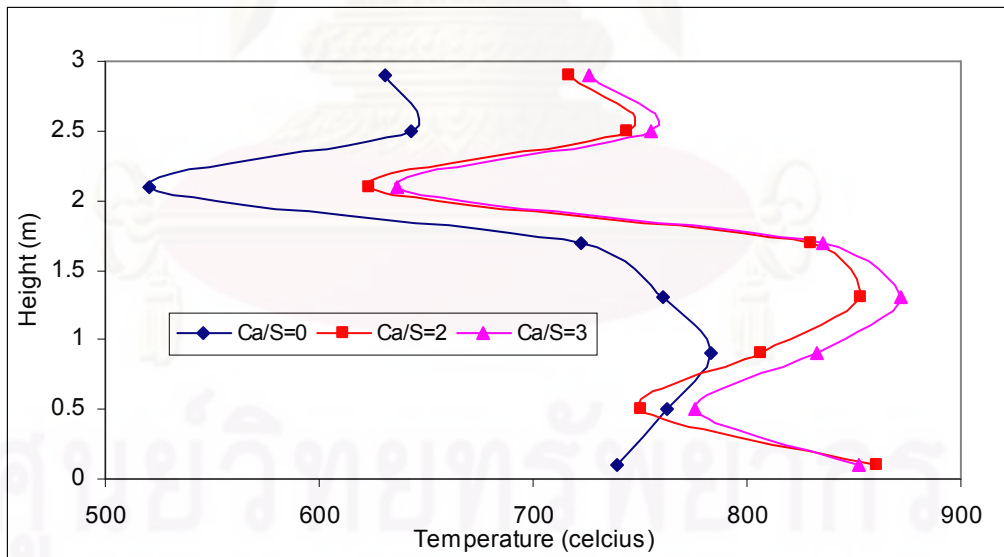
การศึกษาค่าผลของแคลเซียมออกไซด์จะไม่ใส่แคลเซียมออกไซด์โดยตรงแต่ใช้หินปูน(Limestone) แทนการป้อนหินปูนผสมกับถ่านหิน หินปูนจะเกิดปฏิกิริยาแคลซิเนชัน(calcination) เมื่อได้รับความร้อนเกิดเป็นแคลเซียมออกไซด์ที่มีความพรุนและว่างไวต่อปฏิกิริยาอุณหภูมิในไรเซอร์จากการป้อนหินปูนร่วมกับถ่านหินและชีวมวลแสดงได้ดังรูปที่ 4.20 ถึง 4.23



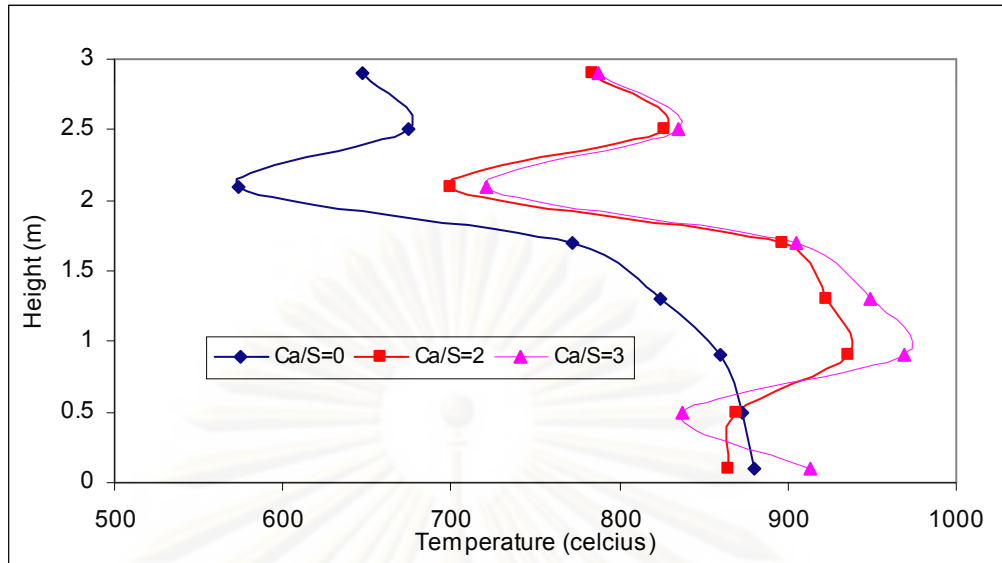
รูปที่ 4.20 อุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆ ในไรเซอร์จากการเผาไหม้ ถ่านหินร่วมกับกะลาปาล์ม อัตราส่วน 50:50 ที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิง 7 กิโลกรัมต่อชั่วโมง อากาศรวมร้อยละ 100 ในการเผาไหม้สมบูรณ์ อากาศปฐมภูมิ 200 ลิตรต่อนาที ป้อนอากาศที่สกรูพีดเดอร์ของชีวมวล 100 ลิตรต่อนาที ป้อนอากาศทุติยภูมิที่ตำแหน่ง 2 เมตร ป้อนหินปูนด้วยอัตราส่วน Ca/S=0 , Ca/S=2 และ Ca/S=3



รูปที่ 4.21 อุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆ ในไรเซอร์จากการเผาไหม้ ถ่านหินร่วมกับ กะลามะพร้าว อัตราส่วน 50:50 ที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิง 7 กิโลกรัมต่อชั่วโมง อากาศรวมร้อยละ 100 ในการเผาไหม้สมบูรณ์ อากาศปฐมภูมิ 200 ลิตรต่อนาที ป้อนอากาศที่สกรูพีดเดอร์ของชีวมวล 100 ลิตรต่อนาที ป้อนอากาศทุติยภูมิที่ ตำแหน่ง 2 เมตร ป้อนหินปูนด้วยอัตราส่วน Ca/S=0 , Ca/S=2 และ Ca/S=3



รูปที่ 4.22 อุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆ ในไรเซอร์จากการเผาไหม้ ถ่านหินร่วมกับ แกลบ อัตราส่วน 50:50 ที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิง 7 กิโลกรัมต่อชั่วโมง อากาศรวมร้อยละ 100 ในการเผาไหม้สมบูรณ์ อากาศปฐมภูมิ 200 ลิตรต่อนาที ป้อนอากาศที่สกรูพีดเดอร์ของชีวมวล 100 ลิตรต่อนาที ป้อนอากาศทุติยภูมิที่ตำแหน่ง 2 เมตร ป้อนหินปูนด้วยอัตราส่วน Ca/S=0 , Ca/S=2 และ Ca/S=3

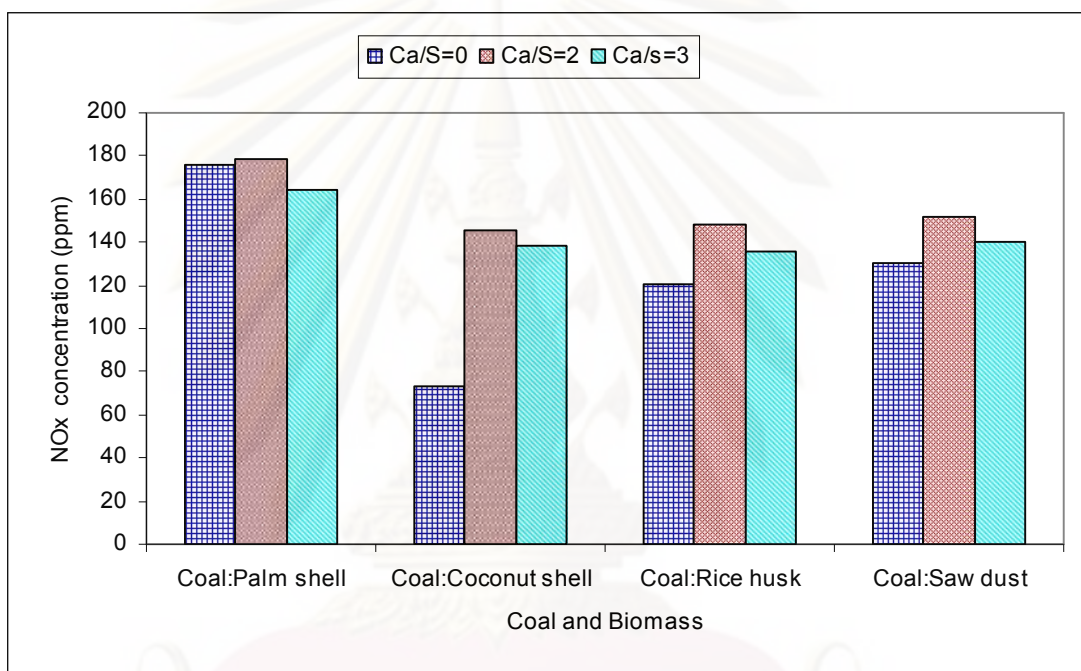


รูปที่ 4.23 อุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆ ในโรเซอร์จากการเผาไหม้ ถ่านหินร่วมกับซีลี้อยู่ อัตราส่วน 50:50 ที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิง 7 กิโลกรัมต่อชั่วโมง อากาศรวมร้อยละ 100 ในการเผาไหม้สมบูรณ์ อากาศปฐมภูมิ 200 ลิตรต่ออนาที ป้อนอากาศที่สกรูพีดเดอร์ของซีวมวล 100 ลิตรต่ออนาที ป้อนอากาศทุติยภูมิที่ตำแหน่ง 2 เมตร ป้อนหินปูนด้วยอัตราส่วน $Ca/S=0$, $Ca/S=2$ และ $Ca/S=3$

จากรูปที่ 4.20 ถึง 4.23 แสดงอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆ ในโรเซอร์จากการเผาไหม้ ถ่านหินร่วมกับซีวมวล อัตราส่วน 50:50 และหินปูน จากผลการทดลองพบว่าเมื่อป้อนหินปูน สัดส่วน Ca/S เท่ากับ 2 และ 3 อุณหภูมิบริเวณด้านล่างของโรเซอร์อุณหภูมิลดต่ำลง เนื่องจากหินปูนหนักจึงหล่นลงบริเวณด้านล่างและเกิดปฏิกิริยาแคลซิเนชันซึ่งเป็นปฏิกิริยาคูดพลังงาน เกิดเป็นแคลเซียมออกไซด์ การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิจะทำให้เกิดการแคลเซียมออกไซด์ ทำปฏิกิริยากับไอน้ำ ที่มากับอากาศที่ป้อนเข้าไปบริเวณสกรูพีดเดอร์ของซีวมวล เกิดเป็นแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน จึงทำให้อุณหภูมิสูงขึ้น และไอน้ำในระบบมีปริมาณลดลงก็มีผลทำให้ อุณหภูมิสูงขึ้นเช่นเดียวกัน

4.8.2 ศึกษาผลของแคลเซียมออกไซด์ที่มีผลต่อการปล่อยแก๊สไนโตรเจนออกไซด์และไนตรัสออกไซด์

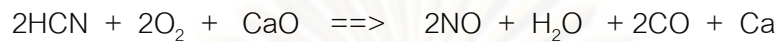
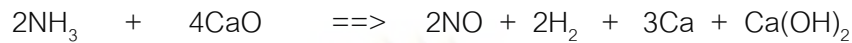
การป้อนหินปูนจะมีปริมาณมากน้อยเพียงใดนั้น ขึ้นอยู่กับปริมาณของแคลเซียมต่อซัลเฟอร์ที่ได้จากการคำนวณ เพื่อต้องการให้แคลเซียมออกไซด์ทำปฏิกิริยากับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ แต่ในการทดลองนี้ไม่เกิดแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์เลย ดังนั้นแคลเซียมออกไซด์ที่เกิดขึ้นจึงมีปริมาณมากที่จะทำปฏิกิริยากับแก๊สชนิดอื่นๆ ความเข้มข้นของแก๊สไนโตรเจนออกไซด์และแก๊สไนตรัสออกไซด์ จากการป้อนหินปูนร่วมกับถ่านหินและชีวมวล แสดงได้ดังรูปที่ 4.24 ถึง 4.25



รูปที่ 4.24 ความเข้มข้นของแก๊สไนโตรเจนออกไซด์จากการเผาไหม้ถ่านหินเพียงอย่างเดียว และ ถ่านหินร่วมกับชีวมวล อัตราส่วน 50:50 ที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิง 7 กิโลกรัมต่อชั่วโมง อากาศรวมร้อยละ 100 ในการเผาไหม้สมบูรณ์ อากาศปฐมภูมิ 200 ลิตรต่อนาที ป้อนอากาศที่สกรูพีดเดอร์ของชีวมวล 100 ลิตรต่อนาที ป้อนอากาศทุติยภูมิที่ตำแหน่ง 2 เมตร ป้อนหินปูนด้วยอัตราส่วน Ca/S=0 , Ca/S=2 และCa/S=3

จากรูปที่ 4.24 แสดงความเข้มข้นของแก๊สไนโตรเจนออกไซด์จากการเผาไหม้ถ่านหินเพียงอย่างเดียว และ ถ่านหินร่วมกับชีวมวล อัตราส่วน 50:50 และป้อนหินปูน จากผลการทดลองพบว่า เมื่อป้อนหินปูนความเข้มข้นของแก๊สไนโตรเจนออกไซด์เพิ่มขึ้น เนื่องจากหินปูนสลายตัวเกิดเป็นแคลเซียมออกไซด์ซึ่งมีความพรุนและว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยา จึงเข้าทำปฏิกิริยากับแอมโมเนีย(NH_3)และไฮโดรเจนไซยาไนด์(HCN) ซึ่งเป็นสารประกอบไฮโดรเจนที่เป็น

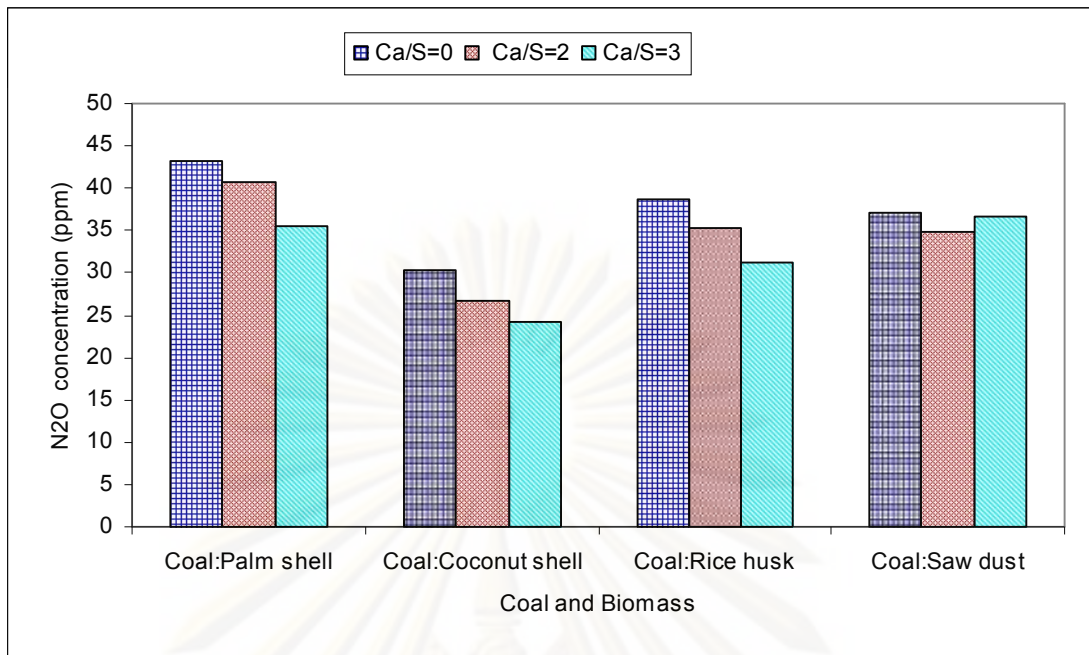
องค์ประกอบในสารระเหยของเชื้อเพลิงเกิดเป็นแก๊สไนโตรเจนออกไซด์ ดังสมการ(A.N. Hayhurst และ A.D. Lanwrence , 2539)



การที่หินปูนสัดส่วน Ca/S เท่ากับ 2 ความเข้มข้นของแก๊สไนโตรเจนออกไซด์มีค่ามากกว่าหินปูนสัดส่วน Ca/S เท่ากับ 3 แทนที่หินปูนสัดส่วน Ca/S เท่ากับ 3 ความเข้มข้นของแก๊สไนโตรเจนออกไซด์จะเพิ่มขึ้นเป็นเพราะ หินปูนสัดส่วน Ca/S เท่ากับ 3 ปริมาณหินปูนมากเกินพอที่จะเกิดเป็นแคลเซียมออกไซด์เพื่อเข้าทำปฏิกิริยากับแอมโมเนีย(NH₃)และไฮโดรเจนไซยาไนด์(HCN) และหินปูนสัดส่วน Ca/S เท่ากับ 3 ปริมาณความเข้มข้นคาร์บอนมอนอกไซด์เพิ่มขึ้นจึงทำให้เกิดการเจือจางแก๊สไนโตรเจนออกไซด์ได้

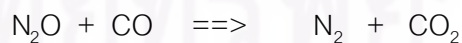
การเพิ่มขึ้นของแก๊สไนโตรเจนออกไซด์จากการป้อนหินปูนสัดส่วน Ca/S เท่ากับ 2 และ Ca/S เท่ากับ 3 กับการป้อนถ่านหินและกะลามะพร้าว มีปริมาณเพิ่มขึ้นจาก 73.2 เป็น 145.3 และ 138 ส่วนในล้านส่วน ตามลำดับ และมีปริมาณใกล้เคียงกันกับการป้อนหินปูน ถ่านหินกับแกลบ และถ่านหินกับขี้เลื่อย ซึ่งการเพิ่มขึ้นของแก๊สไนโตรเจนออกไซด์มีปริมาณมาก แต่ปริมาณไนโตรเจนในกะลามะพร้าวมีปริมาณน้อยมาก คือร้อยละ 0.04 โดยน้ำหนักเป็นเพราะการป้อนหินปูนกับถ่านหินและกะลามะพร้าว อุณหภูมิที่ได้มีค่าสูงขึ้น และมากกว่าการป้อนหินปูน ถ่านหินกับแกลบ และถ่านหินกับขี้เลื่อย จึงทำให้ปริมาณการปล่อยแก๊สไนโตรเจนออกไซด์มีค่าสูงขึ้น และใกล้เคียงกันกับแกลบ และขี้เลื่อย แสดงว่าอุณหภูมิมีผลอย่างมากต่อปริมาณการปล่อยแก๊สไนโตรเจนออกไซด์ และในงานวิจัยนี้จะควบคุมอุณหภูมิในเตาเผาให้เท่ากันทั้งหมดไม่ได้ขึ้นอยู่กับค่าพลังงานความร้อนของชีวมวลแต่ละชนิด

ศูนย์วิทยุทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.25 ความเข้มข้นของแก๊สไนตรัสออกไซด์จากการเผาไหม้ ถ่านหินร่วมกับชีวมวล อัตราส่วน 50:50 ที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิง 7 กิโลกรัมต่อชั่วโมง อากาศรวมร้อยละ 100 ในการเผาไหม้สมบูรณ์ อากาศปฐมภูมิ 200 ลิตรต่อนาที ป้อนอากาศที่สกรูพีดเตอร์ของชีวมวล 100 ลิตรต่อนาที ป้อนอากาศทุติยภูมิที่ตำแหน่ง 2 เมตร ป้อนหินปูนด้วยอัตราส่วน Ca/S=0 , Ca/S=2 และ Ca/S=3

จากรูปที่ 4.25 แสดงความเข้มข้นของแก๊สไนตรัสออกไซด์จากการป้อนถ่านหินร่วมกับชีวมวล อัตราส่วน 50:50 และหินปูน จากผลการทดลองพบว่าเมื่อป้อนหินปูนปริมาณความเข้มข้นของแก๊สไนตรัสออกไซด์ลดลง เนื่องจากหินปูนสลายตัวเกิดเป็นแคลเซียมออกไซด์ซึ่งจะเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้เกิดการสลายตัวของแก๊สไนตรัสออกไซด์ดังสมการ (B.X. Shen และคณะ ,2003)



การที่หินปูนสัดส่วน Ca/S เท่ากับ 3 ความเข้มข้นของแก๊สไนตรัสออกไซด์น้อยกว่าหินปูนสัดส่วน Ca/S เท่ากับ 2 อาจเกิดจากการเกิดแก๊สไนโตรเจนออกไซด์มีปริมาณความเข้มข้นน้อยจึงทำให้เกิดแก๊สไนตรัสออกไซด์มีปริมาณความเข้มข้นน้อยตามไปด้วยก็ได้

จากการศึกษาผลของแคลเซียมออกไซด์ต่อความเข้มข้นของแก๊สไนโตรเจนออกไซด์และไนตรัสออกไซด์ พบว่าเมื่อป้อนหินปูนพร้อมกับถ่านหินและชีวมวลปริมาณความเข้มข้นของแก๊สไนโตรเจนออกไซด์เพิ่มขึ้น แต่ความเข้มข้นของแก๊สไนตรัสออกไซด์ลดลง การเพิ่มขึ้นของแก๊สไนโตรเจนออกไซด์เพิ่มขึ้นแตกต่างจากเดิมมาก เมื่อเปรียบเทียบกับไม่ป้อนหินปูนพร้อมกับถ่านหินและชีวมวล สืบเนื่องจากการป้อนหินปูนพร้อมกับถ่านหินและกะลามะพร้าว ที่หินปูนสัดส่วน Ca/S เท่ากับ 2 ความเข้มข้นของแก๊สไนโตรเจนออกไซด์เพิ่มขึ้นจาก 73.2 เป็น 145.3 ส่วนในล้านส่วน และชีวมวลชนิดอื่นๆการเพิ่มของแก๊สไนโตรเจนออกไซด์ก็เพิ่มขึ้นมากเช่นเดียวกัน แต่การลดลงของแก๊สไนตรัสออกไซด์ลดลงจากเดิมเพียงเล็กน้อยเท่านั้น สืบเนื่องได้จากการป้อนหินปูนพร้อมกับถ่านหินและชีวมวล ทั้ง 4 ชนิด ที่หินปูนสัดส่วน Ca/S เท่ากับ 2 ความเข้มข้นของแก๊สไนตรัสออกไซด์ลดลงเพียง 3 ถึง 5 ส่วนในล้านส่วน เพราะการเกิดแก๊สไนตรัสออกไซด์มีปริมาณน้อยอยู่แล้ว จึงไม่เหมาะสมที่จะป้อนหินปูนไปพร้อมกับถ่านหินและชีวมวล เพราะจะทำให้ปริมาณความเข้มข้นของแก๊สไนโตรเจนออกไซด์มีปริมาณสูงมากเกินไป เนื่องจากถ่านหินที่นำมาใช้ในการทดลองมีคุณภาพสูงและมีปริมาณร้อยละของซัลเฟอร์น้อย ประกอบกับชีวมวลมีปริมาณร้อยละของซัลเฟอร์น้อยมาก ในการทดลองจึงไม่เกิดแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ การป้อนหินปูนจึงไม่มีผลต่อการลดปริมาณความเข้มข้นของแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์

4.9 การเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานของการปล่อยแก๊สไนโตรเจนออกไซด์

จากงานวิจัยซึ่งทำการป้อนถ่านหินเพียงอย่างเดียวและ ถ่านหินร่วมกับกะลาปาล์ม กะลามะพร้าว แกลบ และขี้เลื่อย ที่อัตราการป้อนชีวมวลทั้ง 4 ชนิด ตั้งแต่ร้อยละ 30 , 50 และ 70 โดนน้าหนัก พบว่า การป้อนถ่านหินเพียงอย่างเดียว และอัตราการป้อนถ่านหินกับชีวมวล 4 ชนิด ที่อัตรา 70:30 มีปริมาณการปล่อยแก๊สไนโตรเจนออกไซด์มากที่สุด โดยการป้อนถ่านหินเพียงอย่างเดียว และการป้อนถ่านหินกับกะลาปาล์ม กะลามะพร้าว แกลบ และขี้เลื่อย มีปริมาณการปล่อยแก๊สไนโตรเจนออกไซด์ 215 , 184.4 , 78.8 , 131.5 และ 140 ส่วนในล้านส่วน ตามลำดับ ซึ่งปริมาณการปล่อยแก๊สไนโตรเจนออกไซด์ยังอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน ดังแสดงในตารางที่ 2.4 ปริมาณการปล่อยแก๊สไนโตรเจนออกไซด์ จากการป้อนถ่านหินเพียงอย่างเดียวต้องมีค่าไม่เกิน 400 ส่วนในล้านส่วน และการป้อนชีวมวลต้องไม่เกิน 200 ส่วนในล้านส่วน จากการทดลองค่าการปล่อยแก๊สไนโตรเจนออกไซด์ทั้งหมดไม่เกินค่ามาตรฐานที่กำหนด

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 อุณหภูมิของเตาเผา

- 1) การป้อนถ่านหินร่วมกับกะลาปาล์มอุณหภูมิตลอดไรเซอร์สูงกว่าการป้อนถ่านหินร่วมกับกะลามะพร้าว ชี้เล็กน้อย และแกลบ
- 2) การป้อนอากาศทุติยภูมิอุณหภูมิตลอดไรเซอร์เพิ่มมากขึ้นหากมีป้อนอากาศทุติยภูมิที่ตำแหน่งสูงขึ้น แต่ตำแหน่งที่มีการป้อนอากาศทุติยภูมิ อุณหภูมิจะลดต่ำลง
- 3) เมื่อป้อนหินปูนร่วมกับถ่านหินและชีวมวลอุณหภูมิตลอดไรเซอร์จะเพิ่มสูงขึ้นและการป้อนหินปูนอัตราส่วน Ca/S=3 จะให้อุณหภูมิสูงที่สุด

5.2 ความเข้มข้นของแก๊สไนโตรเจนออกไซด์และแก๊สไนตรัสออกไซด์

- 1) เมื่อเพิ่มปริมาณการป้อนชีวมวลความเข้มข้นของแก๊สไนโตรเจนออกไซด์ และแก๊สไนตรัสออกไซด์มีปริมาณลดลง
- 2) การป้อนถ่านหินร่วมกับกะลามะพร้าวความเข้มข้นของแก๊สไนโตรเจนออกไซด์ และแก๊สไนตรัสออกไซด์มีค่าน้อยที่สุด
- 3) การป้อนอากาศทุติยภูมิที่ตำแหน่งความสูง 1 เมตร จากการป้อนถ่านหินร่วมกับกะลาปาล์ม กะลามะพร้าว และแกลบ ความเข้มข้นของแก๊สไนโตรเจนออกไซด์และแก๊สไนตรัสออกไซด์มีปริมาณมากที่สุด แต่การป้อนถ่านหินร่วมกับชี้เล็กน้อยความเข้มข้นของแก๊สไนโตรเจนออกไซด์และไนตรัสออกไซด์จากการป้อนอากาศทุติยภูมิที่ตำแหน่ง 2 มีปริมาณมากที่สุด
- 4) แคลเซียมออกไซด์มีผลทำให้ความเข้มข้นของแก๊สไนโตรเจนออกไซด์มีปริมาณเพิ่มขึ้น แต่ความเข้มข้นของแก๊สไนตรัสออกไซด์มีปริมาณลดลง
- 5) ปริมาณความเข้มข้นของแก๊สไนโตรเจนออกไซด์และแก๊สไนตรัสออกไซด์มีแนวโน้มไปในทางเดียวกันคือ ไนโตรเจนออกไซด์มากขึ้น ไนตรัสออกไซด์ก็มากขึ้น เนื่องจากแก๊สไนโตรเจนออกไซด์และแก๊สไนตรัสออกไซด์ส่วนมากเกิดจาก ร้อยละของไนโตรเจนในเชื้อเพลิง
- 6) ผลจากการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าการเผาไหม้ร่วมของถ่านหินและชีวมวลส่งผลให้เกิดแก๊สไนโตรเจนออกไซด์มากกว่าแก๊สไนตรัสออกไซด์

- 7) แคลเซียมออกไซด์มีผลทำให้แก๊สไนโตรเจนออกไซด์มีค่าเพิ่มขึ้นมากเกินไป แต่แก๊สไนโตรเจนออกไซด์ลดลงเพียงเล็กน้อย จึงไม่ควรที่จะนำมาใช้เพื่อลดออกไซด์ของไนโตรเจน
- 8) ความเข้มข้นของแก๊สไนโตรเจนออกไซด์จากการป้อนถ่านหินกับชีวมวลทั้ง 4 ชนิดมีปริมาณน้อยกว่าค่ามาตรฐาน

5.3 ข้อเสนอแนะ

- 1) ควรปรับปรุงระบบการป้อนชีวมวล เพราะยังคงเกิดปัญหาการเผาไหม้ย้อนกลับเข้าไปในสกรูพีดเดอร์ ของถังเก็บชีวมวล
- 2) ควรจะศึกษาที่จะนำพลังงานความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ มาใช้ประโยชน์
- 3) ในการวัดองค์ประกอบของแก๊สจากการเผาไหม้อาจเปลี่ยนจากการใช้ Flue Gas Analyzer ใช้เครื่อง Gas Chromatography ซึ่งสามารถวัดได้อย่างต่อเนื่องและบันทึกเข้าคอมพิวเตอร์ได้ด้วย
- 4) ควรปรับโรเตอร์ให้สูงขึ้นเป็น 5-6 เมตร เพื่อให้เชื้อเพลิงได้มีเวลาเผาไหม้ในโรเตอร์ได้นานมากขึ้น ซึ่งจะเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของการเผาไหม้ให้สูงขึ้นได้
- 5) ควบคุมอุณหภูมิในโรเตอร์ไม่ให้สูงกว่า 1000 องศาเซลเซียส เนื่องจากจะทำให้เกิดเถ้าหลอมอุดตันเครื่อง ทำให้เทอร์โมคัปเปิลเสื่อมสภาพเร็ว และทำให้เกิดแก๊สพิษมากขึ้น
- 6) โรเตอร์ที่ใช้ในการทดลองในปัจจุบัน ถูกใช้งานมาหลายปีแล้ว จึงเกิดการชำรุดบ่อยมากทำให้เกิดปัญหาในการทดลอง จึงสมควรที่จะสร้างขึ้นใหม่เพื่อที่จะทำให้การทดลองทำได้อย่างต่อเนื่องและมีประสิทธิภาพ

ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

- กัญญา บุญยเกียรติ. เชื้อเพลิงและถ่านหินใหม่. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2544.
- ชัยวัฒน์ พรหมภูเบศร์. การเผาไหม้เชื้อเพลิงผสมถ่านหินและชีวมวลในฟลูอิโดซ์เบดแบบหมุนเวียน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, สาขาวิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2548.
- ปิยะพันธ์ จะกอ. การควบคุมการปล่อยแก๊สของการเผาไหม้ถ่านหินและชีวมวลในฟลูอิโดซ์เบดแบบหมุนเวียน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, สาขาวิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2548.
- พล สาเททอง. ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับฟลูอิโดซ์เบด. กรุงเทพมหานคร: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2526.
- พล สาเททอง และ คณะ. ระบบการใช้ถ่านหินลิกไนต์โดยการเผาไหม้ในเตาเผาฟลูอิโดซ์เบด. กรุงเทพมหานคร: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2530.
- คันสนีย์ กำธนาทรัพย์. ผลของอัตราการไหลอากาศต่อโปรไฟล์ความเร็วอนุภาคในฟลูอิโดซ์เบดแบบหมุนเวียน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, สาขาวิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2548.
- สมบัติ นิธิภูมิรัตน์. การเผาไหม้ถ่านหินและการควบคุมมลพิษในฟลูอิโดซ์เบด. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, สาขาวิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2531.
- สมศักดิ์ ดำรงค์เลิศ. ฟลูอิโดเซชัน. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2528.
- สำเร็จ จักรใจ. การเผาไหม้. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2547.
- อันทิการ์ วรรณะ. ระบบควบคุมอุณหภูมิของเตาเผาฟลูอิโดซ์เบดแบบหมุนเวียน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, สาขาวิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2548.

ภาษาอังกฤษ

- Akira, N.; Toshihiko, I.; Hisanao, H.; Nobuyuki, S.; and Masahiro H. Application of CFB (Circulating Fluidized Bed) to Sewage Sludge Incinerator. NKK Technical Review 86 (2002): 30-35.
- Amand, L. E.; and Leckner, B. Co-Combustion of Sewage Sludge with Wood/Coal in a Circulating Fluidized Boiler-A study of gaseous Emissions. Goteborg 65 (April 2001):154-162.
- Fang, M.; Yang, L.; Chen, G.; Shi, Z.; Luo, Z.; and Cen, K. Experimental Study on Rice Husk Combustion in a Circulating Fluidized Bed. Fuel Processing Technology 85 (2004): 1273-1282.
- Grace, J. R.; Avedan, A. A.; and Knowlton, T. M. Circulating Fluidized Beds. London: Chapman & Hall, 1977.
- Hayhurst, A. N.; and Lawrence, A. D. The Amounts of NO_x and N₂O Formed in a Fluidized Bed Combustor During The Burning of Coal Volatiles and Also of Char. Combustion and Flame 105 (1996): 341-357.
- Jensen, A., et al. Formation and Reduction of NO_x in Pressurized Fluidized Bed Combustion of Coal. Fuel 74 (1995): 1555-1569.
- Kunii, D.; and Levenspiel, O. Fluidization engineering. New York: John Wiley and Sons , 1969:1120-1129
- Leckner, B.; Amand, L. E.; Lucke, K.; and Werther, J. Gaseous Emissions from Co-Combustion of Sewage Sludge and Coal/Wood in a Fluidized Bed. Fuel 83 (2004): 477-486.
- Liu, H.; and Gibbs, B.M. The Influence of Calcined Limestone on NO_x and N₂O Emissions from Char Combustion in Fluidized Combustor. Fuel 80 (2001): 1211-1215.
- Liu, H.; and Gibbs, B.M. The Influence of Limestone Addition at Different Positions on Gaseous Emissions from a Coal-Fired Circulating Fluidized Bed Combustor. Fuel 77 (1998): 1569-1577.

- Miccio, F.; Löffler, G.; Wargadalam, V.J.; and Winter, F. The Influence of SO₂ Level and Operating Conditions on NO_x and N₂O Emissions during Fluidised Bed Combustions of Coals. Fuel 80 (2001): 1555 – 1566.
- Nimmo, W., et al. Calcium Magnesium Acetate and Urea Advanced Reburning for NO Control with Simultaneous SO₂ Reduction. Fuel 83 (2004): 1143-1150.
- Nimmo, W.; Patsias, A.A.; Hampartsoumian, E.; Gibbs, B.M.; and Williams, P.T. Simultaneous Reduction NO_x and SO₂ Emissions from Coal Combustion by Calcium Magnesium Acetate. Fuel 83 (2004): 149-155.
- Okasha, F. Staged combustion of rice straw in a fluidized bed. Experimental Thermal and Fluid Science 32 (2007): 52–59.
- Rogmuae, T.; Jabouille, F.; and Torero, J.L. Effect of excess air on grate combustion of solid wastes and on gaseous products. International Journal of Thermal Sciences 96 (2008):346-358
- Shen, B.X., et al. N₂O Emission under Fluidized Bed Combustion Condition. Fuel Processing Technology 84 (2003): 13-21.
- Topal, H.; Atimtay, A. T.; and Durmaz, A. Olive Cake Combustion in a Circulating Fluidized Bed. Fuel 82 (2003): 1049-1056.
- Werther, J., and others. New Air-Staging Techniques for Co-Combustion in Fluidized Bed Combustors. VGB Conference Research for Power Plant Technology 75 (October 2000):542-550
- Zhao, J.; Brereton, C.; Grace, J.R.; Lim, C.J.; and Legros, R. Gas Concentration Profiles and NO_x Formation in Circulating Fluidized Combustion. Fuel 76 (1997): 853-860.

ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

วิธีวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของเชื้อเพลิง

1. การวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate Analysis)

1.1 ความชื้น (Moisture)

วิธีการทดลอง

- 1) อบครุชีเบิ้ลในเตาอบ (Furnace) ที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง นำออกมาทำให้เย็นในเดสิเคเตอร์ ชั่งน้ำหนักครุชีเบิ้ล
 - 2) ชั่งน้ำหนักตัวอย่างใส่ครุชีเบิ้ล ประมาณ 1 กรัม
 - 3) อบครุชีเบิ้ลพร้อมตัวอย่างในเตาอบโดยไม่ต้องปิดฝา ที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง นำออกมาทำให้เย็นในเดสิเคเตอร์ ชั่งน้ำหนักครุชีเบิ้ลพร้อมตัวอย่าง
- สูตรที่ใช้ในการคำนวณ

$$\text{ร้อยละของความชื้น} = 100 - 100(\text{น้ำหนักตัวอย่างหลังอบ} / \text{น้ำหนักตัวอย่างก่อน$$

อบ)

1.2 ปริมาณสารระเหย (Volatile Matter)

วิธีการทดลอง

- 1) เผาครุชีเบิ้ลพร้อมฝานในเตาเผาอุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง นำออกจากเตาเผา ทำให้เย็นในเดสิเคเตอร์ แล้วชั่งน้ำหนักครุชีเบิ้ลพร้อมฝาน บันทึกผล
- 2) ชั่งตัวอย่างแห้งใส่ในครุชีเบิ้ลประมาณ 1 กรัม แล้วปิดฝาให้เรียบร้อย
- 3) นำไปให้ความร้อนโดยอยู่เหนือปากเตาเผา (Tubular Furnace) เป็นเวลา 1 นาที
- 4) หย่อนครุชีเบิ้ลให้อยู่บริเวณปากเตา เป็นเวลา 4 นาที
- 5) หย่อนครุชีเบิ้ลให้อยู่กึ่งกลางเตา อุณหภูมิประมาณ 950 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 นาที
- 6) นำครุชีเบิ้ลออกมาทิ้งไว้ให้เย็น แล้วนำไปใส่ในเดสิเคเตอร์ประมาณ 15 นาที นำไปชั่งและบันทึกผล

สูตรที่ใช้ในการคำนวณ

$$\text{ร้อยละของสารระเหย} = [100(\text{น้ำหนักตัวอย่างหลังเผา} / \text{น้ำหนักตัวอย่างก่อนเผา})] - \text{ร้อยละความชื้น}$$

1.3 เถ้า (Ash)

วิธีการทดลอง

- 1) เเผาคูชิเบิล (Muffle Furnace) ที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง นำออกมาทำให้เย็นในเดสิเคเตอร์ ชั่งน้ำหนักคูชิเบิล
- 2) ชั่งน้ำหนักตัวอย่างแห้งใส่คูชิเบิล ประมาณ 1 กรัม
- 3) นำไปเผาบนตะเกียงเบนเซนจนควันระเหยหมด
- 4) ใส่คูชิเบิลในเตาเผาที่อุณหภูมิประมาณ 750 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง หรือจนน้ำหนักคงที่
- 5) ปรับอุณหภูมิประมาณ 950 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
- 6) นำคูชิเบิลออกจากเตาเผาวางทิ้งไว้ให้เย็น แล้วนำไปใส่ในเดสิเคเตอร์ ชั่งน้ำหนักพร้อมบันทึกผล

สูตรที่ใช้ในการคำนวณ

$$\text{ร้อยละของเถ้า} = 100(\text{น้ำหนักตัวอย่างหลังเผา} / \text{น้ำหนักตัวอย่างก่อนเผา})$$

1.4 ปริมาณคาร์บอนคงตัว (Fixed Carbon)

สูตรที่ใช้ในการคำนวณ

$$\text{ร้อยละของคาร์บอนคงตัว} = 100 - \text{ร้อยละของความชื้น} - \text{ร้อยละของสารระเหย} - \text{ร้อยละของเถ้า}$$

ภาคผนวก ข

วิธีการคำนวณ

- การคำนวณหาปริมาณอากาศที่จำเป็นในการเผาไหม้สมบูรณ์ร้อยละ 100 อัตราการป้อนเชื้อเพลิง 7 กิโลกรัมต่อชั่วโมง

ตารางแสดงค่าการวิเคราะห์โดยประมาณ

Proximate analysis	% By Mass				
	Coal	Palm Shell	Coconut shell	Rice Husk	Saw Dust
Fixed Carbon	38.66	11.96	21.13	18.21	11.14
Volatile Matter	35.84	77.60	67.79	57.48	79.14
Moisture	17.11	5.78	9.76	8.18	5.90
Ash	8.39	4.66	1.32	16.13	3.82
Total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

ตารางแสดงค่าการวิเคราะห์โดยแยกธาตุ

Ultimate analysis	% By Mass (daf)				
	Coal	Palm Shell	Coconut shell	Rice Husk	Saw Dust
C	52.22	45.36	45.95	48.05	46.70
H	4.97	5.65	5.76	7.27	5.47
N	1.33	0.65	0.04	0.18	0.19
O	40.80	48.25	48.23	44.48	47.63
S	0.68	0.09	0.02	0.02	0.01
Total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

คุณสมบัติของอากาศที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ความดัน 1 บรรยากาศ

ความหนาแน่น	1.165438	กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร
มวลโมเลกุล	28.97	
สัดส่วนของออกซิเจนร้อยละ	21	
สัดส่วนของไนโตรเจนร้อยละ	79	
มวลอะตอม	คาร์บอน = 12	
	ไฮโดรเจน = 1	
	ออกซิเจน = 16	
	ซัลเฟอร์ = 32	

ป้อนค่าพิน 7 กิโลกรัมต่อชั่วโมง คิดเป็นน้ำหนักแห้งและปราศจากน้ำได้เป็น

$$7(100 - 17.11 - 8.39)/100 = 5.215 \text{ กิโลกรัมต่อชั่วโมง}$$

จากตารางการวิเคราะห์โดยแยกธาตุของถ่านหินมี

คาร์บอนร้อยละ	52.22	โดยน้ำหนัก
ไฮโดรเจนร้อยละ	4.97	โดยน้ำหนัก
ออกซิเจนร้อยละ	40.80	โดยน้ำหนัก
ซัลเฟอร์ร้อยละ	0.68	โดยน้ำหนัก

เนื่องจากไนโตรเจนส่วนใหญ่แล้วจะเฉื่อย ไม่ค่อยเกิดปฏิกิริยา จึงไม่นำไนโตรเจนมาคิด
คิดเป็นน้ำหนักแห้งและปราศจากน้ำได้เป็น

ปริมาณ คาร์บอน	$5.215(52.22)/100$	=	2.723	กิโลกรัมต่อชั่วโมง
	$2.723/12$	=	0.227	กิโลโมลต่อชั่วโมง
ปริมาณ ไฮโดรเจน	$5.215(4.97)/100$	=	0.259	กิโลกรัมต่อชั่วโมง
	$0.259/1$	=	0.257	กิโลโมลต่อชั่วโมง
ปริมาณ ออกซิเจน	$5.215(40.80)/100$	=	2.128	กิโลกรัมต่อชั่วโมง
	$2.128/16$	=	0.133	กิโลโมลต่อชั่วโมง
ปริมาณ ซัลเฟอร์	$5.215(0.68)/100$	=	0.035	กิโลกรัมต่อชั่วโมง
	$0.035/32$	=	0.0011	กิโลโมลต่อชั่วโมง

ต้องใช้ O_2 ในการเผาไหม้สมบูรณ์

ปริมาณ คาร์บอน	$0.227 * 1$	=	0.227	กิโลโมล O_2 ต่อชั่วโมง
ปริมาณ ไฮโดรเจน	$0.259/4$	=	0.065	กิโลโมล O_2 ต่อชั่วโมง
ปริมาณ ออกซิเจน	$0.133/2$	=	0.0665	กิโลโมล O_2 ต่อชั่วโมง
ปริมาณ ซัลเฟอร์	$0.0011 * 1$	=	0.0011	กิโลโมล O_2 ต่อชั่วโมง

ปริมาณออกซิเจนที่ใช้ในการเผาไหม้ต้องหักปริมาณออกซิเจนในเชื้อเพลิงออกด้วย

ต้องใส่แก๊สออกซิเจน $(0.227 + 0.065 + 0.0011 - 0.0665) = 0.2266$ กิโลโมล O_2 ต่อชั่วโมง

ต้องใช้อากาศในการเผาไหม้สมบูรณ์

$$\begin{aligned} 0.2266 * 100/21 &= 1.079 \text{ กิโลโมลอากาศต่อชั่วโมง} \\ 1.079 * 28.97 &= 31.26 \text{ กิโลกรัมอากาศต่อชั่วโมง} \\ 31.26 / 1.165438 &= 26.823 \text{ ลูกบาศก์เมตรอากาศต่อ} \\ &\text{ชั่วโมง} \\ 26.823 * 1000 &= 26823 \text{ ลิตรต่อชั่วโมง} \\ 26823 / 60 &= 447 \text{ ลิตรต่อนาที} \end{aligned}$$

2. การคำนวณหาความเร็วอากาศปฐมภูมิ 200 ลิตรต่อนาที ในโรเตอร์ซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 10 เซนติเมตร

$$\begin{aligned} 200 \text{ ลิตรต่อนาที} &= 200/1000 = 0.2 \text{ ลูกบาศก์เมตรอากาศต่อ} \\ &\text{นาที} \\ 0.2 / 60 &= 3.33 * 10^{-3} \text{ ลูกบาศก์เมตรอากาศต่อ} \\ &\text{วินาที} \\ 3.33 * 10^{-3} * 7/22/(0.05^2) &= 0.4242 \text{ เมตรต่อวินาที} \end{aligned}$$

3. การคำนวณสัดส่วนหินปูน

ถ่านหิน 7 กิโลกรัมต่อชั่วโมง คิดเป็นน้ำหนักแห้งและปราศจากเถ้าได้เป็น

$$7(100 - 17.11 - 8.39)/100 = 5.215 \text{ กิโลกรัมต่อชั่วโมง}$$

ซัลเฟอร์ในถ่านหินร้อยละ 0.68 โดยน้ำหนัก

$$\text{ซัลเฟอร์มีมวลโมเลกุล} = 32$$

$$\text{ซัลเฟอร์ในถ่านหิน} (0.68 * 5.215)/100 = 0.035462 \text{ กิโลกรัม}$$

$$\text{คิดเป็น} 0.035462/32 = 0.0011082 \text{ กิโลโมล}$$

ถ้าต้องการผสมหินปูนสัดส่วน Ca/S=2

$$\text{จะต้องใช้ Ca} 2 * 0.0011082 = 0.0022164 \text{ กิโลโมล}$$

$$\text{หินปูนมีสูตรโมเลกุล} CaCO_3 \text{ มีมวลโมเลกุล} = 100$$

$$Ca \text{ มีมวลอะตอม} = 40$$

$$\text{ดังนั้นต้องใช้หินปูน} 0.0022164 * (100/40) = 0.00541 \text{ กิโลโมล}$$

$$0.00541 * 100 = 0.541 \text{ กิโลกรัม}$$

ภาคผนวก ค

ตารางบันทึกผลการทดลอง

1. ถ่านหินเพียงอย่างเดียว อากาศรวมร้อยละ 100 ในการเผาไหม้สมบูรณ์ อากาศป้อน 200 ลิตรต่อนาที ป้อนอากาศที่ screw feeder ของชีวมวล 100 ลิตรต่อนาที อากาศหุติยภูมิป้อนที่ ตำแหน่ง 2 เมตร

Concentration (ppm)	
NO _x	N ₂ O
215	44.4

Position (m)	Temperature (°C)
0.1	935.8
0.5	937.8
0.9	940.3
1.3	885.1
1.7	828.5
2.1	595.6
2.5	709.1
2.9	682.3

2. ถ่านหิน:กะลาปาล์ม 30:70 , 50:50 และ 70:30 อากาศรวมร้อยละ 100 ในการเผาไหม้สมบูรณ์ อากาศป้อน 200 ลิตรต่อนาที ป้อนอากาศที่ screw feeder ของชีวมวล 100 ลิตรต่อนาที อากาศหุติยภูมิป้อนที่ตำแหน่ง 2 เมตร

Coal:Palm shell	Concentration (ppm)	
	NO _x	N ₂ O
70:30	184.4	45.79
50:50	176	43.28
30:70	172.5	39.77

Position (m)	Temperature (°C)		
	Coal:Palm shell		
	70:30	50:50	30:70
0.1	913.4	937.2	1008.5
0.5	935.5	945.1	961.6
0.9	928.3	944.9	949.6
1.3	866.4	894.2	893.9
1.7	841.2	849.5	846.8
2.1	635.7	615.8	656.4
2.5	714	749.4	761.5
2.9	684.3	717.2	729.1

3. ถ่านหิน:กะลามะพร้าว 30:70 , 50:50 และ 70:30 อากาศรวมร้อยละ 100 ในการเผาไหม้ สมบูรณ์ อากาศป้อน 200 ลิตรต่อหน้าที่ ป้อนอากาศที่ screw feeder ของชีวมวล 100 ลิตร ต่อหน้าที่ อากาศหุติยภูมิป้อนที่ตำแหน่ง 2 เมตร

Coal:Coconut shell	Concentration (ppm)	
	NO _x	N ₂ O
70:30	78.8	38.5
50:50	73.2	30.3
30:70	70	19.5

Position (m)	Temperature (°C)		
	Coal:Coconut shell		
	70:30	50:50	30:70
0.1	904.1	900	882.4
0.5	922.6	907.1	898.1
0.9	921.4	920.2	906.5
1.3	872.9	869.9	867.9
1.7	820.9	819.3	818.3
2.1	597.9	590.8	584.4
2.5	715.9	724.2	726.5
2.9	681.5	693.2	694.5

4. ถ่านหิน:แกลบ 30:70 , 50:50 และ 70:30 อากาศรวมร้อยละ 100 ในการเผาไหม้สมบูรณ์ อากาศปฐมภูมิ 200 ลิตรต่อนาที ป้อนอากาศที่ screw feeder ของชีวมวล 100 ลิตรต่อนาที อากาศทุติยภูมิป้อนที่ตำแหน่ง 2 เมตร

Coal:Rice husk	Concentration (ppm)	
	NO _x	N ₂ O
70:30	131.5	41.02
50:50	120.4	38.76
30:70	96.7	34.83

Position (m)	Temperature (°C)		
	Coal:Rice husk		
	70:30	50:50	30:70
0.1	768.6	739.7	719.2
0.5	830.4	762.5	743.5
0.9	820.3	783.3	748.2
1.3	807.6	760.8	738.7
1.7	800.1	722.3	725.8
2.1	570.5	520.6	506.5
2.5	682.1	642.9	622.9
2.9	669.5	630.8	610.8

5. ถ่านหิน:ขี้เลื่อย 30:70 , 50:50 และ 70:30 อากาศรวมร้อยละ 100 ในการเผาไหม้สมบูรณ์ อากาศปฐมภูมิ 200 ลิตรต่อนาที ป้อนอากาศที่ screw feeder ของชีวมวล 100 ลิตรต่อนาที อากาศทุติยภูมิป้อนที่ตำแหน่ง 2 เมตร

Coal:Saw dust	Concentration (ppm)	
	NO _x	N ₂ O
70:30	140	42.25
50:50	130.4	37.12
30:70	116.5	33.76

Position (m)	Temperature (°C)		
	Coal:Saw dust		
	70:30	50:50	30:70
0.1	928.8	880.2	835.8
0.5	949.9	872.6	857.2
0.9	908.4	859.6	833.2
1.3	854	824.8	790.2
1.7	820.6	771.9	765.9
2.1	594.1	573.9	600.9
2.5	716.9	674.2	699.9
2.9	686.6	647.6	655.4

6. ผ่านหินเพียงอย่างเดียว อากาศรวมร้อยละ100 ในการเผาไหม้สมบูรณ์ อากาศปฐมภูมิ 200 ลิตรต่ออนาที ป้อนอากาศที่ screw feeder ของชีวมวล 100 ลิตรต่ออนาที อากาศทุติยภูมิป้อนที่ ตำแหน่ง 1 เมตร , 2 เมตร และ 2.4 เมตร

Secondary air position (m)	Concentration (ppm)	
	NO _x	N ₂ O
1	232.4	46.45
2	215	44.4
2.4	195.2	39.25

Position (m)	Temperature (°C)		
	Secondary air position (m)		
	1	2	2.4
0.1	939.6	935.8	998.5
0.5	904.7	937.8	960.7
0.9	908.6	940.3	943.6
1.3	794.5	885.1	883
1.7	752	828.5	832.8
2.1	737.8	595.6	806.3
2.5	729.2	709.1	715.8
2.9	709.1	682.3	698

7. ถ่านหิน:กะลาปาล์ม 50:50 อากาศรวมร้อยละ 100 ในการเผาไหม้สมบูรณ์ อากาศปฐมภูมิ 200 ลิตรต่อนาที ป้อนอากาศที่ screw feeder ของชีวมวล 100 ลิตรต่อนาที อากาศทุติยภูมิ ป้อนที่ตำแหน่ง 1 เมตร , 2 เมตร และ 2.4 เมตร

Secondary air position (m)	Concentration (ppm)	
	NO _x	N ₂ O
1	197.2	46.34
2	176	46.34
2.4	179.4	46.34

Position (m)	Temperature (°C)		
	Secondary air position (m)		
	1	2	2.4
0.1	980.5	937.2	985.8
0.5	948.2	945.1	957.1
0.9	938.6	944.9	951.9
1.3	835.8	894.2	895
1.7	791	849.5	848.7
2.1	744.8	615.8	801.5
2.5	730.2	749.4	726.6
2.9	695	717.2	670.6

8. ถ่านหิน:กะลามะพร้าว 50:50 อากาศรวมร้อยละ 100 ในการเผาไหม้สมบูรณ์ อากาศปฐมภูมิ 200 ลิตรต่อนาที ป้อนอากาศที่ screw feeder ของชีวมวล 100 ลิตรต่อนาที อากาศทุติยภูมิ ป้อนที่ตำแหน่ง 1 เมตร , 2 เมตร และ 2.4 เมตร

Secondary air position (m)	Concentration (ppm)	
	NO _x	N ₂ O
1	96.4	35.8
2	73.2	30.3
2.4	72.5	28.95

Position (m)	Temperature (°C)		
	Secondary air position (m)		
	1	2	2.4
0.1	902.9	900	886.2
0.5	910.6	907.1	903.5
0.9	917.1	920.2	916
1.3	823	869.9	877
1.7	776.5	819.3	832
2.1	759.7	590.8	799.8
2.5	748	724.2	717.2
2.9	705.8	693.2	689.8

9. ถ่านหิน: แกลบ 50:50 อากาศรวมร้อยละ 100 ในการเผาไหม้สมบูรณ์ อากาศปฐมภูมิ 200 ลิตรต่ออนาที ป้อนอากาศที่ screw feeder ของชีวมวล 100 ลิตรต่ออนาที อากาศทุติยภูมิป้อนที่ ตำแหน่ง 1 เมตร , 2 เมตร และ 2.4 เมตร

Secondary air position (m)	Concentration (ppm)	
	NO _x	N ₂ O
1	118	41.01
2	96.4	38.76
2.4	98.2	35.45

Position (m)	Temperature (°C)		
	Secondary air position (m)		
	1	2	2.4
0.1	728.5	739.7	729.6
0.5	742.4	762.5	752.3
0.9	758.3	783.3	780.7
1.3	711.9	760.8	767.6
1.7	689	722.3	724.1
2.1	679.2	520.6	689.3
2.5	655.8	642.9	629.7
2.9	659.9	630.8	606.4

10. ถ่านหิน:ซีลื้อย 50:50 อากาศรวมร้อยละ 100 ในการเผาไหม้สมบูรณ์ อากาศปฐมภูมิ 200 ลิตรต่ออนาที ป้อนอากาศที่ screw feeder ของชีวมวล 100 ลิตรต่ออนาที อากาศทุติยภูมิป้อนที่ ตำแหน่ง 1 เมตร , 2 เมตร และ 2.4 เมตร

Secondary air position (m)	Concentration (ppm)	
	NO _x	N ₂ O
1	91	34.5
2	130.4	37.12
2.4	95	35.43

Position (m)	Temperature (°C)		
	Secondary air position (m)		
	1	2	2.4
0.1	884.7	880.2	871
0.5	843.3	872.6	872
0.9	837.1	859.6	858.2
1.3	735.5	824.8	829.5
1.7	714.4	771.9	778.4
2.1	677	573.9	733.6
2.5	671.8	674.2	653.6
2.9	639.7	647.6	616.3

11. ถ่านหิน:กะลาปาล์ม 50:50 อากาศรวมร้อยละ 100 ในการเผาไหม้สมบูรณ์ อากาศปฐมภูมิ 200 ลิตรต่ออนาที ป้อนอากาศที่ screw feeder ของชีวมวล 100 ลิตรต่ออนาที อากาศทุติยภูมิป้อนที่ตำแหน่ง 2 เมตร ป้อนหินปูนอัตราส่วน Ca/S=0 , Ca/S=2 และ Ca/S=3

Limestone	Concentration (ppm)	
	NO _x	N ₂ O
Ca/S=0	176	43.28
Ca/S=2	179	40.64
Ca/S=3	164.4	35.42

Position (m)	Temperature (°C)		
	Limestone		
	Ca/S=0	Ca/S=2	Ca/S=3
0.1	937.2	837.3	861.5
0.5	945.1	1038.5	1052.8
0.9	944.9	1003.8	1015
1.3	894.2	950.7	962.1
1.7	849.5	907.6	896.8
2.1	615.8	660	683.1
2.5	749.4	766.1	771.9
2.9	717.2	717.9	730.7

12. ถ่านหิน:กะลามาะพร้าว 50:50 อากาศรวมร้อยละ 100 ในการเผาไหม้สมบูรณ์ อากาศปฐมภูมิ 200 ลิตรต่อนาที ป้อนอากาศที่ screw feeder ของชีวมวล 100 ลิตรต่อนาที อากาศทุติยภูมิ ป้อนที่ตำแหน่ง 2 เมตร ป้อนหินปูนอัตราส่วน Ca/S=0 , Ca/S=2 และ Ca/S=3

Limestone	Concentration (ppm)	
	NO _x	N ₂ O
Ca/S=0	73.2	30.3
Ca/S=2	145.3	26.73
Ca/S=3	138	24.25

Position (m)	Temperature (°C)		
	Limestone		
	Ca/S=0	Ca/S=2	Ca/S=3
0.1	900	815.4	885.5
0.5	907.1	1001.6	1002.6
0.9	920.2	991.1	1019.5
1.3	869.9	950	957.6
1.7	819.3	900.1	889.9
2.1	590.8	642.8	713.1
2.5	724.2	771.5	733.1
2.9	693.2	726.5	691.4

13. ถ่านหิน:แกลบ 50:50 อากาศรวมร้อยละ 100 ในการเผาไหม้สมบูรณ์ อากาศปฐมภูมิ 200 ลิตรต่ออนาที ป้อนอากาศที่ screw feeder ของชีวมวล 100 ลิตรต่ออนาที อากาศทุติยภูมิป้อนที่ ตำแหน่ง 2 เมตร ป้อนหินปูนอัตราส่วน Ca/S=0 , Ca/S=2 และCa/S=3

Limestone	Concentration (ppm)	
	NO _x	N ₂ O
Ca/S=0	120.4	38.76
Ca/S=2	148.2	35.4
Ca/S=3	135.5	31.21

Position (m)	Temperature (°C)		
	Limestone		
	Ca/S=0	Ca/S=2	Ca/S=3
0.1	739.7	860.5	852.6
0.5	762.5	750.2	775.7
0.9	783.3	806.7	832.7
1.3	760.8	853.7	871.5
1.7	722.3	829.7	835.7
2.1	520.6	623.6	636.1
2.5	642.9	744	755.4
2.9	630.8	717.2	726

14. ถ่านหิน:ซีลี้อย 50:50 อากาศรวมร้อยละ 100 ในการเผาไหม้สมบูรณ์ อากาศปฐมภูมิ 200 ลิตรต่ออนาที ป้อนอากาศที่ screw feeder ของชีวมวล 100 ลิตรต่ออนาที อากาศทุติยภูมิป้อนที่ ตำแหน่ง 2 เมตร ป้อนหินปูนอัตราส่วน Ca/S=0 , Ca/S=2 และCa/S=3

Limestone	Concentration (ppm)	
	NO _x	N ₂ O
Ca/S=0	130.4	37.12
Ca/S=2	152	34.73
Ca/S=3	140.3	36.68

Position (m)	Temperature (°C)		
	Limestone		
	Ca/S=0	Ca/S=2	Ca/S=3
0.1	880.2	864.8	913.3
0.5	872.6	868.9	837.5
0.9	859.6	935.4	969.4
1.3	824.8	923.1	948.5
1.7	771.9	897	904.6
2.1	573.9	699.3	721.1
2.5	674.2	826.1	834.6
2.9	647.6	784.1	787.6

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

เรืออากาศเอกธีระชัย สายแก้ว เกิดวันที่ 24 กรกฎาคม พ.ศ. 2521 สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรม โรงเรียนนายเรืออากาศ ในปีการศึกษา 2545 รับราชการในตำแหน่ง นายทหารวิทยากร แผนกวิทยากร กองวิทยาศาสตร์ ศูนย์วิจัยวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีการบินและอวกาศ กองทัพอากาศ และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรพัฒนามหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อ พ.ศ. 2549



ศูนย์วิทยุทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย