

ผลของตัวแปรดำเนินการต่อการปล่อยแก๊สระหว่างการเผาไหม้ร่วมของถ่านหินและชีวมวล
ในหม้อกำเนิดไอน้ำฟลูอิโดซ์เบดแบบหมุนเวียน

นายชัยณรงค์ หาญชนะ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2554

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.

EFFECTS OF OPERATING PARAMETERS ON GASEOUS EMISSION DURING CO-
COMBUSTION OF COAL AND BIOMASS IN CIRCULATING FLUIDIZED BED BOILER

Mr. Chainarong Hanchana

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 2011

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ผลของตัวแปรดำเนินการต่อการปล่อยแก๊สระหว่าง การเผาไหม้ร่วมของถ่านหินและชีวมวลในหม้อกำเนิดไอน้ำ ฟลูอิโดเบดแบบหมุนเวียน
โดย	นายชัยณรงค์ หาญชนะ
สาขาวิชา	เคมีเทคนิค
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร. เลอสรวง เมฆสุด
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ประพันธ์ คูชลธारा

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัย
ของนักศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. สุพจน์ นารหนองบัว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

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

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

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ประพันธ์ คูชลธारा)

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

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.โสฬส สุวรรณเย็น)

ชัยณรงค์ หาญชนะ : ผลของตัวแปรดำเนินการต่อการปล่อยแก๊สระหว่างการเผาไหม้
ร่วมของถ่านหินและชีวมวลในหม้อกำเนิดไอน้ำฟลูอิโดซ์เบดแบบหมุนเวียน.
(EFFECTS OF OPERATING PARAMETERS ON GASEOUS EMISSION
DURING CO-COMBUSTION OF COAL AND BIOMASS IN CIRCULATING
FLUIDIZED BED BOILER) อ.ที่ปรึกษา: รศ. ดร.เลอสรอง เมฆสุด, อ.ที่ปรึกษา
วิทยานิพนธ์ร่วม: ผศ. ดร.ประพันธ์ คุชลธารา, 142 หน้า.

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของตัวแปรดำเนินการต่อการปล่อยฟลูแก๊ส จากการเผาไหม้ร่วม
ของถ่านหินและชีวมวลในหม้อกำเนิดไอน้ำฟลูอิโดซ์เบดแบบหมุนเวียน โดยใช้ถ่านหินซับบิทู
มินัสและชีวมวลชนิดต่างๆ ได้แก่ กะลาปาล์ม กะลามะพร้าว กระจินยักษ์ และยูคาลิปตัส ป้อน
เชื้อเพลิงที่อัตราการคงที่ 7 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ป้อนอากาศปฐมภูมิอัตราการคงที่ 300 ลิตรต่อนาที
จากนั้นทำการสร้างเครื่องผลิตไอน้ำ ซึ่งมีส่วนประกอบสำคัญ 3 ส่วนคือ ส่วนอุ่นน้ำ ส่วน
แลกเปลี่ยนความร้อน และส่วนเก็บไอน้ำ ตัวแปรที่ทำการศึกษาคือ สัดส่วนของชีวมวลกับถ่าน
หิน ตำแหน่งการป้อนอากาศทุติยภูมิ และประสิทธิภาพของเครื่องผลิตไอน้ำ จากผลการ
ทดลองพบว่า การเผาไหม้ของถ่านหินกับกะลาปาล์มจะให้อุณหภูมิโดยเฉลี่ยตลอดความสูง
ของไรเซอร์สูงกว่าการเผาไหม้ของถ่านหินกับกะลามะพร้าว กระจินยักษ์ และยูคาลิปตัส ซึ่ง
สอดคล้องกับค่าพลังงานความร้อนของกะลาปาล์ม การเพิ่มสัดส่วนส่วนของชีวมวลจะส่งผลให้
ความเข้มข้นของ (NO_x) มีปริมาณลดลง ในส่วนการเผาไหม้เชื้อเพลิงผสมชีวมวล การป้อน
อากาศทุติยภูมิ ที่ตำแหน่ง 1 เมตร จะมีอัตราการปล่อยแก๊สไนโตรเจนออกไซด์มากที่สุด
สำหรับเครื่องผลิตไอน้ำ สามารถผลิตไอน้ำอุณหภูมิได้สูงสุดเท่ากับ 160 องศาเซลเซียส และ
ความดันเท่ากับ 2.6 บาร์ เมื่อใช้เชื้อเพลิงถ่านหินร้อยละ 100 ในการเผาไหม้ และอุณหภูมิไอน้ำ
ผลิตได้สูงสุดเท่ากับ 145 องศาเซลเซียส และความดันเท่ากับ 2.3 บาร์ เมื่อใช้เชื้อเพลิงถ่านหิน
ต่อกะลาปาล์ม ที่สัดส่วน 70:30 ในการเผาไหม้ ประสิทธิภาพเครื่องผลิตไอน้ำที่ได้เท่ากับร้อยละ
22.44

ภาควิชา.....เคมีเทคนิค.....ลายมือชื่อ.....
สาขาวิชา.....เคมีเทคนิค.....ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....
ปีการศึกษา.....2554.....ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม.....

5272275723 : MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY

KEYWORDS : CFB BOILER / CO-COMBUSTION / COAL / BIOMASS / NO_x

CHAINARONG HANCHANA: EFFECTS OF OPERATING PARAMETERS ON GASEOUS EMISSION DURING CO-COMBUSTION OF COAL AND BIOMASS IN CIRCULATING FLUIDIZED BED BOILER. ADVISOR: ASSOC. PROF. LURSUANG MEKASUT, Ph.D. THESIS COADVISOR: ASST. PROF. PRAPAN KUCHONTHARA, Ph.D., 142 pp.

This research studied the Effects of operating parameters on gaseous emission during co-combustion of coal and biomass in circulating fluidized bed boiler (CFBB). The sub-bituminous coal and various types of biomass; palm shell, coconut shell, Giant Leucaena and Eucalyptus, were used in co-combustion. Fuel feed rate, primary air feed rate and solid circulation rate (silica sand return rate) were kept constant at 7 kg/hr., 300 l/min and 300 kg/hr., respectively. The CFB was attached with the steam generator which consists of 3 main parts, the warm space, the exchanger and the steam space. Here, effects of coal to biomass ratio in the mixed fuel, the secondary air feed position and the steam production efficiency were investigated. The results showed that the combustion of coal and palm shell gave higher temperature than the combustions of another biomass, 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. In co-combustion, the secondary air that entered at the position of 1 m. was the cause of maximum rate of nitrogen oxide emission. The CFBB system was then installed with steam production. This system can generate steam with the temperature of 160°C and the pressure of 2.6 bars when using 100% coal and steam with the temperature of 145°C and the pressure of 2.3 bars when using the ratio of coal and palm shell 70:30. Steam production efficiency was 22.44%.

Department : Chemical Technology..... Student's Signature

Field of Study : Chemical Technology..... Advisor's Signature

Academic Year : 2011..... Co-advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

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

งานวิจัยเรื่อง “ผลของตัวแปรดำเนินการต่อการปล่อยแก๊สระหว่างการผลิตโพลีเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงในหม้อกำเนิดไอน้ำฟลูอิดไบทแบบหมุนเวียน” สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีโดยได้รับการสนับสนุนจากศูนย์วิจัยเชื้อเพลิง ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และศูนย์ความเป็นเลิศแห่งชาติด้านปิโตรเลียม ปิโตรเคมีและวัสดุขั้นสูง (Center of Excellence for Petroleum, Petrochemicals and Advance Materials) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่สนับสนุนทุนวิจัยตลอดการศึกษา ซึ่งผู้วิจัยต้องขอขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณ บัณฑิตวิทยาลัย สำหรับทุนอุดหนุนวิทยานิพนธ์สำหรับนิสิต

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. ดร. ธราพงษ์ วิทิตสานต์ รองศาสตราจารย์ ดร. พรพจน์ เปี่ยมสมบุญ และรองช่วยศาสตราจารย์ ดร.โสฬส สุวรรณเย็น ที่กรุณาเป็นกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณ บริษัท บ้านปู จำกัดมหาชน ที่เชื้อเพื่อถ่านหินสำหรับงานวิจัยในครั้งนี้

ขอขอบพระคุณ บริษัท ดับเบิ้ล เอ (1991) จำกัดมหาชน ที่เชื้อเพื่อเปลือกยูคาลิปตัสสำหรับงานวิจัยในครั้งนี้

ขอขอบพระคุณ เจ้าหน้าที่ทุกท่านของภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย คุณสังข์ ชมชื่น โดยเฉพาะเจ้าหน้าที่ช่างเทคนิคประจำห้องฟลูอิดเซชัน ที่ให้ความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกในการวิจัย

ขอขอบพระคุณ คุณประจักษ์ ทรัพย์อุดมมาก และคุณมาวิน ปูนอน ที่ให้คำแนะนำในทุกๆ ด้านเกี่ยวกับเครื่องมือ วิธีการทดลองและช่วยแก้ปัญหาต่างๆที่เกิดขึ้นในการทดลอง

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณนายชินภัทร์ หาญชนะ บิดา นางพรภัส หาญชนะ มารดา ญาติพี่น้อง ที่ให้ความช่วยเหลือ เป็นกำลังใจและให้การสนับสนุนเป็นอย่างดีจนสำเร็จการศึกษา รวมทั้งขอขอบคุณพี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆ พร้อมทั้งชาวเคมีเทคนิคทุกท่านที่คอยให้กำลังใจช่วยเหลือประกอบกับคำแนะนำดีๆ ที่มอบให้เสมอมา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญภาพ.....	ฏ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ต
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.4 ขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัย.....	4
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย.....	5
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1 การเผาไหม้.....	6
2.1.1 ภาวะที่จำเป็นในการเริ่มเกิดปฏิกิริยา.....	7
2.1.2 ข้อเด่นของการเผาไหม้.....	11
2.2 ถ่านหิน.....	13
2.3 พลังงานหมุนเวียนและพลังงานจากชีวมวล.....	13
2.4 การวิเคราะห์และทดสอบเชื้อเพลิงแข็ง.....	16
2.5 ฟลูอิดไดเซชัน.....	17
2.5.1 นิยาม.....	17
2.5.2 ประเภทของฟลูอิดไดเซชัน.....	17
2.5.3 ลักษณะของฟลูอิดไดซ์เบด.....	18
2.5.4 แก๊สฟลูอิดไดเซชัน.....	19
2.6 ระบบการเผาไหม้ฟลูอิดไดซ์เบด.....	25
2.7 ระบบการเผาไหม้ฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียน.....	27

	หน้า
2.8 กลไกการเผาไหม้.....	28
2.9 การควบคุมมลพิษ.....	30
2.9.1 การกำจัดอนุภาค.....	33
2.9.2 วัฏจักรไนโตรเจน.....	34
2.9.2.1 แก๊สไนโตรเจนออกไซด์ (NOx)	35
2.9.2.2 แก๊สไนตรัสออกไซด์ (N ₂ O).....	40
2.10 เครื่องกำเนิดไอน้ำ (Steam Production).....	41
2.5.1 บอยเลอร์.....	41
2.5.2 ระบบไอน้ำ.....	41
2.5.3 ประเภทของบอยเลอร์.....	42
2.5.3.1 หม้อไอน้ำแบบท่อน้ำ.....	43
2.5.3.2 หม้อไอน้ำแบบท่อไฟ.....	44
2.5.3.3 หม้อไอน้ำชนิด Circulating Fluidized Bed (CFB).....	45
2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	48
บทที่ 3 เครื่องมือและวิธีการทดลอง.....	53
3.1 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง.....	53
3.2 การสร้างเครื่องผลิตไอน้ำ.....	66
3.2.1 ส่วนอุ่นน้ำ.....	66
3.2.2 ส่วนแลกเปลี่ยนความร้อน.....	67
3.2.3 ส่วนเก็บไอน้ำ.....	68
3.2.4 แผนผังเครื่องผลิตไอน้ำ.....	69
3.3 วิธีการทดลอง.....	69
3.3.1 การเตรียมเชื้อเพลิงและทราย.....	69
3.3.2 การจุดเตาและดำเนินการทดลอง.....	69
3.3.3 การเดินระบบผลิตไอน้ำ.....	71
3.3.4 การปิดเตาเผา.....	71
บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	72
4.1 สมบัติของเชื้อเพลิง.....	72
4.1.1 การวิเคราะห์โดยวิธีประมาณ (proximate analysis).....	72

4.1.2 การวิเคราะห์โดยวิธีแยกธาตุ (ultimate analysis).....	73
4.1.3 การวิเคราะห์หาค่าพลังงานความร้อนของถ่านหินและชีวมวล...	74
4.2 การหาปริมาณอากาศปฐุมภูมิต่ำสุดที่ทำให้ทรายในโรเตอร์เกิดการ ฟลูอิดซ์และหมุนเวียน.....	76
4.3 การหาขนาดของชีวมวลและปริมาณอากาศที่เหมาะสมสำหรับป้อน เข้าในสกรูพีดเดอร์สำหรับป้อนชีวมวลเพื่อไม่ให้เปลวไฟและความร้อน ไหลย้อนกลับไปที่หม้อแกบลในถังเก็บชีวมวล.....	76
4.4 การหาปริมาณเชื้อเพลิงและปริมาณอากาศในการเผาไหม้ในระบบ ฟลูอิดซ์แบบหมุนเวียน.....	77
4.5 ศึกษาผลของชีวมวลเผาไหม้ร่วมกับถ่านหินต่อการปล่อยแก๊ส คาร์บอนมอนอกไซด์คาร์บอนไดออกไซด์ และสารประกอบไนโตรเจนออกไซด์.....	79
4.5.1 ศึกษาผลของการเผาไหม้ร่วมของถ่านหินกับชีวมวลที่มีต่ออุณหภูมิ ในโรเตอร์.....	79
4.5.1.1 ศึกษาผลของการเผาไหม้ถ่านหินที่มีผลต่ออุณหภูมิในโรเตอร์.	79
4.5.1.2 ศึกษาผลของชนิดของชีวมวลเผาไหม้ร่วมกับถ่านหินที่มีผลต่อ อุณหภูมิในโรเตอร์.....	81
4.5.1.3 ศึกษาผลของตำแหน่งการป้อนอากาศทุติยภูมิที่มีผลต่อ อุณหภูมิในโรเตอร์.....	85
4.5.2 ศึกษาผลของการเผาไหม้ร่วมของถ่านหินกับชีวมวลที่มีต่อ องค์ประกอบฟลูแก๊ส.....	89
4.5.2.1 ศึกษาผลของการเผาไหม้ของถ่านหินที่มีต่อ องค์ประกอบฟลูแก๊ส.....	90
4.5.2.1.1 แนวโน้มของปริมาณแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์.....	90
4.5.2.1.2 แนวโน้มของปริมาณแก๊สสารประกอบออกไซด์ ของไนโตรเจน (NOx)	92
4.5.2.2 ศึกษาผลของชนิดของชีวมวลเผาไหม้ร่วมกับถ่านหินที่มีผล	

ต่อองค์ประกอบฟลูแก๊ส.....	94
4.5.2.2.1 แนวโน้มของปริมาณแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์.....	94
4.5.2.2.2 แนวโน้มของปริมาณแก๊สสารประกอบออกไซด์ ของไนโตรเจน (NOx).....	95
4.5.2.3 ศึกษาผลของตำแหน่งการปล่อยอากาศทุดิยภูมิที่มีต่อ องค์ประกอบฟลูแก๊ส.....	95
4.5.2.3.1 แนวโน้มของปริมาณแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์.....	96
4.5.2.3.2 แนวโน้มของปริมาณแก๊สสารประกอบออกไซด์ ของไนโตรเจน (NOx)	99
4.5.2.4 ศึกษาความสัมพันธ์ร่วมระหว่างคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) กับสารประกอบออกไซด์ของไนโตรเจน (NOx) ที่ตำแหน่งที่ 9 ที่ภาวการณ์ทดลองต่างๆกัน.....	102
4.6 การศึกษาเชื้อเพลิงต่อผลของเครื่องผลิตไอน้ำที่สร้างขึ้น.....	104
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	110
5.1 คุณทงุมิของเตาเผา.....	110
5.2 องค์ประกอบของฟลูแก๊ส.....	110
5.3 เครื่องผลิตไอน้ำ.....	111
5.4 ข้อเสนอแนะ.....	112
รายการอ้างอิง.....	113
ภาคผนวก.....	117
ภาคผนวก ก วิธีวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของเชื้อเพลิง.....	118
ภาคผนวก ข วิธีการคำนวณ.....	121
ภาคผนวก ค ตารางบันทึกผลการทดลอง.....	124
ภาคผนวก ง ตารางไอน้ำ.....	140
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	142

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 คุณภูมิการจุดไฟของเชื้อเพลิงบางชนิดผสมอากาศ ที่ความดัน 1 บรรยากาศ...	8
ตารางที่ 2.2 สมบัติของถ่านหิน เปรียบเทียบกับไม้และพีต.....	13
ตารางที่ 2.3 มาตรฐานของการปล่อยแก๊สพิษในประเทศไทย.....	32
ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์โดยวิธีวิเคราะห์แบบประมาณ (proximate analysis).....	72
ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์โดยวิธีวิเคราะห์แยกธาตุ (ultimate analysis).....	73
ตารางที่ 4.3 ค่าพลังงานความร้อนของถ่านหินและชีวมวล.....	74
ตารางที่ 4.4 สรุปอัตราการป้อนเชื้อเพลิง.....	75
ตารางที่ 4.5 ปริมาณอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ถ่านหินร้อยละ 100, ถ่านหินผสมชีวมวลในอัตราส่วน 70:30, 50:50 และ 30:70 ที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิง 7 กิโลกรัมต่อชั่วโมง โดยคิดปริมาณอากาศที่การเผาไหม้สมบูรณ์ ร้อยละ 100.....	78

สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 2.1 องค์ประกอบที่จำเป็นในการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้.....	7
ภาพที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง เปอร์เซ็นต์คาร์บอนไดออกไซด์ และเปอร์เซ็นต์อากาศเกินพอ	11
ภาพที่ 2.3 วัฏจักรคาร์บอนไดออกไซด์ (CO ₂ cycle).....	16
ภาพที่ 2.4 ลักษณะการเกิดฟลูอิดิซ์เซชันของเบดที่มีของไหลต่างชนิดกันไหลผ่าน.....	18
ภาพที่ 2.5 รูปแบบการไหลสำหรับฟลูอิดิซ์เบดแก๊ส- ของแข็ง.....	19
ภาพที่ 2.6 ลักษณะของเบดนิ่งที่ไม่มีและมีการเคลื่อนที่สัมพัทธ์กับผนัง.....	20
ภาพที่ 2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันลดกับ ความเร็วของของไหล.....	22
ภาพที่ 2.8 การเผาไหม้ของถ่านหินในฟลูอิดิซ์เบด.....	26
ภาพที่ 2.9 เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดิซ์เบด.....	28
ภาพที่ 2.10 ปฏิกิริยาการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงแข็งในเตาฟลูอิดิซ์เบด.....	29
ภาพที่ 2.11 ปฏิกิริยาการเผาไหม้โดยทั่วไปของเชื้อเพลิงแข็งในเตาชนิดอื่น.....	30
ภาพที่ 2.12 กลไกการเกิดอนุภาคเถ้าถ่านหินขณะเผาไหม้.....	33
ภาพที่ 2.13 ปฏิกิริยาต่างๆ ที่เกิดขึ้นในวัฏจักรไนโตรเจน โดย R-NH ₂ คือสารอินทรีย์.....	34
ภาพที่ 2.14 การเกิดไนโตรเจนออกไซด์ที่อุณหภูมิต่างๆ.....	36
ภาพที่ 2.15 ปริมาณการปล่อยแก๊สไนตริกออกไซด์โดยเปรียบเทียบกับปริมาณอากาศ เกินพอ.....	37
ภาพที่ 2.16 ปริมาณไนโตรเจนออกไซด์ที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงโดยมีการ เผาไหม้เป็น 2 ชั้น (staged combustion) ที่ปริมาณอากาศรวมเท่ากัน และ เปรียบเทียบที่อุณหภูมิในการเผาไหม้ต่างๆ กัน.....	37
ภาพที่ 2.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันไอกับจุดเดือดของน้ำ.....	42
ภาพที่ 2.18 ภาพตัวอย่างของหม้อไอน้ำแบบท่อน้ำ.....	43
ภาพที่ 2.19 ภาพตัวอย่างของหม้อไอน้ำแบบถังท่อไฟ.....	45
ภาพที่ 2.20 การเผาไหม้แบบฟลูอิดิซ์เบด (a) Collapsed (b) Fluidized State.....	46
ภาพที่ 2.21 หม้อไอน้ำชนิด Circulating Fluidized Bed (CFB).....	46
ภาพที่ 2.22 หม้อไอน้ำแบบเผาไหม้เชื้อเพลิงชนิดลอยตัวและหมุนเวียน (CFB).....	47
ภาพที่ 3.1 โครงร่างหม้อกำเนิดไอน้ำฟลูอิดิซ์เบดแบบหมุนเวียนที่ใช้ในงานวิจัย.....	53
ภาพที่ 3.2 เตาเผาฟลูอิดิซ์เบดแบบหมุนเวียนที่ใช้ในงานวิจัย.....	54

สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 3.3 เครื่องเป่าอากาศ (air blower).....	55
ภาพที่ 3.4 วาล์วไฟฟ้ารูปผีเสื้อและ orifice.....	56
ภาพที่ 3.5 หน้าจอแสดงความเร็วอากาศปฐมภูมิแบบดิจิทัล.....	56
ภาพที่ 3.6 โรเตอร์ (ท่อแนวตั้งด้านซ้าย) และ probe สำหรับวัดอุณหภูมิและวัดองค์ประกอบ ของแก๊ส.....	57
ภาพที่ 3.7 หัวเผาและกระจกมองเปลวไฟ	57
ภาพที่ 3.8 ระบบป้อนเชื้อเพลิง (fuel feeder system).....	59
ภาพที่ 3.9 กระจกสำหรับดูภายในห้องเผาไหม้.....	59
ภาพที่ 3.10 เครื่องอัดอากาศ พร้อมอุปกรณ์ทำความสะอาดและระบบกำจัดน้ำในอากาศ	60
ภาพที่ 3.11 ไซโคลน (cyclone).....	60
ภาพที่ 3.12 downcomer (ท่อทาง ด้านขวา) และ แอลวาล์ว (วาล์วปีกผีเสื้อ).....	61
ภาพที่ 3.13 หอคอยซึมและอุปกรณ์อัดฉีดน้ำ.....	62
ภาพที่ 3.14 หน้าจอแสดงอุณหภูมิและวาล์วสำหรับดึงแก๊สออกจากระบบ.....	63
ภาพที่ 3.15 บั้มสุญญากาศ.....	63
ภาพที่ 3.16 เครื่องวัดฟลูแก๊ส (Flue gas Analyzer).....	64
ภาพที่ 3.17 เครื่องบดถ่านหินอย่างหยาบ.....	65
ภาพที่ 3.18 เครื่องบดชีวมวลอย่างหยาบ.....	65
ภาพที่ 3.19 ส่วนอุ่นน้ำ (Warm Space).....	66
ภาพที่ 3.20 ส่วนแลกเปลี่ยน (Exchanger).....	67
ภาพที่ 3.21 ส่วนเก็บไอน้ำ (Steam Space).....	68
ภาพที่ 3.22 แผ่นผังเครื่องผลิตไอน้ำ.....	69
ภาพที่ 4.1 อุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆ ในโรเตอร์ที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิงถ่านหิน 7 กิโลกรัม ต่อชั่วโมง อากาศรวมร้อยละ 100 ในการเผาไหม้สมบูรณ์ อากาศปฐมภูมิ 300 ลิตรต่อนาที ป้อนอากาศที่สกรูพีดเดอร์ของชีวมวล 100 ลิตรต่อนาที อากาศที่เหลือเป็นอากาศทุติยภูมิตำแหน่ง 1, 2 และ 2.4 เมตร.....	81
ภาพที่ 4.2 อุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆ ในโรเตอร์ที่อัตราการป้อนถ่านหินต่อกะลาปาล์ม อากาศรวมร้อยละ 100 ในการเผาไหม้สมบูรณ์ อากาศปฐมภูมิ 300 ลิตรต่อนาที	

สารบัญภาพ

	หน้า
ป้อนอากาศที่สกปรกที่ได้ออกของชีวมวล 100 ลิตรต่ออนาที อากาศหุติยภูมิที่ตำแหน่ง 2 เมตร.....	82
ภาพที่ 4.3 อุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆในไรเซอร์ที่อัตราการป้อนถ่านหินต่อกะลามะพร้าว อากาศรวมร้อยละ 100 ในการเผาไหม้สมบูรณ์ อากาศปฐมภูมิ 300 ลิตรต่ออนาที ป้อนอากาศที่สกปรกที่ได้ออกของชีวมวล 100 ลิตรต่ออนาที อากาศหุติยภูมิ ที่ตำแหน่ง 2 เมตร.....	83
ภาพที่ 4.4 อุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆในไรเซอร์ที่อัตราการป้อนถ่านหินต่อกระถินยักษ์ อากาศรวมร้อยละ 100 ในการเผาไหม้สมบูรณ์ อากาศปฐมภูมิ 300 ลิตรต่ออนาที ป้อนอากาศที่สกปรกที่ได้ออกของชีวมวล 100 ลิตรต่ออนาที อากาศหุติยภูมิที่ตำแหน่ง 2 เมตร.....	84
ภาพที่ 4.5 อุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆในไรเซอร์ที่อัตราการป้อนถ่านหินต่อยูคาลิปตัส อากาศรวมร้อยละ 100 ในการเผาไหม้สมบูรณ์ อากาศปฐมภูมิ 300 ลิตรต่ออนาที ป้อนอากาศที่สกปรกที่ได้ออกของชีวมวล 100 ลิตรต่ออนาที อากาศหุติยภูมิที่ตำแหน่ง 2 เมตร.....	84
ภาพที่ 4.6 อุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆในไรเซอร์ที่อัตราการป้อนถ่านหินต่อกะลาปาล์ม 50:50 อากาศรวมร้อยละ100 ในการเผาไหม้สมบูรณ์ อากาศปฐมภูมิ 300 ลิตรต่ออนาที ป้อนอากาศที่สกปรกที่ได้ออกของชีวมวล 100 ลิตรต่ออนาที.....	86
ภาพที่ 4.7 อุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆในไรเซอร์ที่อัตราการป้อนถ่านหินต่อกะลามะพร้าว 50:50 อากาศรวมร้อยละ100 ในการเผาไหม้สมบูรณ์ อากาศปฐมภูมิ 300 ลิตรต่ออนาที ป้อนอากาศที่สกปรกที่ได้ออกของชีวมวล 100 ลิตรต่ออนาที	87
ภาพที่ 4.8 อุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆในไรเซอร์ที่อัตราการป้อนถ่านหินต่อกระถินยักษ์ 50:50 อากาศรวมร้อยละ100 ในการเผาไหม้สมบูรณ์ อากาศปฐมภูมิ 300 ลิตรต่ออนาที ป้อนอากาศที่สกปรกที่ได้ออกของชีวมวล 100 ลิตรต่ออนาที	87
ภาพที่ 4.9 อุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆในไรเซอร์ที่อัตราการป้อนถ่านหินต่อยูคาลิปตัส 50:50 อากาศรวมร้อยละ100 ในการเผาไหม้สมบูรณ์ อากาศปฐมภูมิ 300 ลิตรต่ออนาที ป้อนอากาศที่สกปรกที่ได้ออกของชีวมวล 100 ลิตรต่ออนาที.....	88
ภาพที่ 4.10 ความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ จากเครื่อง CFBB ที่มีการป้อนเชื้อเพลิง	

สารบัญภาพ

หน้า

<p>ถ่านหินร้อยละ100 ถ่านหินต่อกะลาปาล์ม 50:50 และถ่านหินต่อกะลามะพร้าว 50:50 ถ่านหินต่อกระถินยักษ์ 50:50 และถ่านหินต่อยูคาลิปตัส 50:50 ตามลำดับ อากาศรวมร้อยละ 100 ในการเผาไหม้สมบูรณ์ อากาศปฐมภูมิ 300 ลิตรต่อหน้าที่ ป้อนอากาศที่สกรูพีดเดอร์ 100 ลิตรต่อหน้าที่ อากาศทุติยภูมิป้อนที่ตำแหน่ง 2 เมตร....91</p>	91
<p>ภาพที่ 4.11 ร้อยละแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ จากเครื่อง CFBB ที่มีการป้อนเชื้อเพลิงถ่านหิน ร้อยละ100 ถ่านหินต่อกะลาปาล์ม 50:50 และถ่านหินต่อกะลามะพร้าว 50:50 ถ่านหินต่อกระถินยักษ์ 50:50 และถ่านหินต่อยูคาลิปตัส 50:50 ตามลำดับอากาศรวม ร้อยละ 100 ในการเผาไหม้สมบูรณ์ อากาศปฐมภูมิ 300 ลิตรต่อหน้าที่ ป้อนอากาศที่ สกรูพีดเดอร์ 100 ลิตรต่อหน้าที่ อากาศทุติยภูมิป้อนที่ตำแหน่ง 2 เมตร.....</p>	91
<p>ภาพที่ 4.12 ความเข้มข้นของแก๊สไนตริกออกไซด์จากเครื่อง CFBB ที่มีการป้อนเชื้อเพลิง ถ่านหินต่อ กะลาปาล์มกะลามะพร้าว กระถินยักษ์ และยูคาลิปตัส อากาศรวมร้อยละ 100 ในการเผาไหม้สมบูรณ์ อากาศปฐมภูมิ 300 ลิตรต่อหน้าที่ ป้อนอากาศที่สกรู พีดเดอร์ 100 ลิตรต่อหน้าที่ อากาศทุติยภูมิป้อนที่ตำแหน่ง 2 เมตร.....</p>	92
<p>ภาพที่ 4.13 ความเข้มข้นของแก๊สออกไซด์ของไนโตรเจน จากเครื่อง CFBB ที่มีการป้อน เชื้อเพลิงถ่านหินต่อ กะลาปาล์มกะลามะพร้าว กระถินยักษ์ และยูคาลิปตัส อากาศ รวมร้อยละ 100 ในการเผาไหม้สมบูรณ์ อากาศปฐมภูมิ 300 ลิตรต่อหน้าที่ ป้อนอากาศ ที่สกรูพีดเดอร์ 100 ลิตรต่อหน้าที่ อากาศทุติยภูมิป้อนที่ตำแหน่ง 2 เมตร.....</p>	93
<p>ภาพที่ 4.14 ความเข้มข้นของแก๊สไนโตรเจนไดออกไซด์ จากเครื่อง CFBB ที่มีการป้อนเชื้อเพลิง ถ่านหินต่อกะลาปาล์มกะลามะพร้าว กระถินยักษ์ และยูคาลิปตัส อากาศรวมร้อยละ 100 ในการเผาไหม้สมบูรณ์ อากาศปฐมภูมิ 300 ลิตรต่อหน้าที่ ป้อนอากาศที่สกรู พีดเดอร์ 100 ลิตรต่อหน้าที่ อากาศทุติยภูมิป้อนที่ตำแหน่ง 2 เมตร.....</p>	93
<p>ภาพที่ 4.15 ความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์จากเครื่อง CFBB ที่มีการป้อนเชื้อเพลิง ถ่านหินร้อยละ100 ถ่านหินต่อกะลาปาล์ม 50:50 ถ่านหินต่อกะลามะพร้าว 50:50 ถ่านหินต่อกระถินยักษ์ 50:50 และถ่านหินต่อยูคาลิปตัส 50:50 ตามลำดับอากาศ รวมร้อยละ 100 ในการเผาไหม้สมบูรณ์ อากาศปฐมภูมิ 300 ลิตรต่อหน้าที่ ป้อน อากาศที่สกรูพีดเดอร์ 100 ลิตรต่อหน้าที่ (1. 2nd air at 1m, 2. 2nd air at 2m,</p>	

สารบัญภาพ

	หน้า
3. 2 nd air at 2.4m).....	98
ภาพที่ 4.16 ร้อยละแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ จากเครื่อง CFBB ที่มีการป้อนเชื้อเพลิงถ่านหิน ร้อยละ100 ถ่านหินต่อกะลาปาล์ม 50:50 ถ่านหินต่อกะลามะพร้าว 50:50 ถ่านหินต่อกระถินยักษ์ 50:50 และถ่านหินต่อยูคาลิปตัส 50:50 ตามลำดับอากาศรวม ร้อยละ 100 ในการเผาไหม้สมบูรณ์ อากาศปฐมภูมิ 300 ลิตรต่อหน้าที่ ป้อนอากาศที่ สกรูพีดเดอร์ 100 ลิตรต่อหน้าที่ (1. 2 nd air at 1m, 2. 2 nd air at 2m, 3. 2 nd air at 2.4m).....	99
ภาพที่ 4.17 ความเข้มข้นของแก๊สไนตริกออกไซด์ จากเครื่อง CFBB ที่มีการป้อนเชื้อเพลิง ถ่านหินร้อยละ100 ถ่านหินต่อกะลาปาล์ม 50:50 และถ่านหินต่อกะลามะพร้าว 50:50 ถ่านหินต่อกระถินยักษ์ 50:50 และถ่านหินต่อยูคาลิปตัส 50:50 ตามลำดับ อากาศรวมร้อยละ 100 ในการเผาไหม้สมบูรณ์ อากาศปฐมภูมิ 300 ลิตรต่อหน้าที่ ป้อนอากาศที่สกรูพีดเดอร์ 100 ลิตรต่อหน้าที่ (1. 2 nd air at 1m, 2. 2 nd air at 2m, 3. 2 nd air at 2.4m)	100
ภาพที่ 4.18 ความเข้มข้นของแก๊สออกไซด์ของไนโตรเจน จากเครื่อง CFBB ที่มีการป้อน เชื้อเพลิงถ่านหินร้อยละ100 ถ่านหินต่อกะลาปาล์ม 50:50 และถ่านหินต่อ กะลามะพร้าว 50:50 ถ่านหินต่อกระถินยักษ์ 50:50 และถ่านหินต่อยูคาลิปตัส 50:50 ตามลำดับ อากาศรวมร้อยละ 100 ในการเผาไหม้สมบูรณ์ อากาศปฐมภูมิ 300 ลิตรต่อหน้าที่ ป้อนอากาศที่สกรูพีดเดอร์ 100 ลิตรต่อหน้าที่ (1. 2 nd air at 1m, 2. 2 nd air at 2m, 2. 2 nd air at 2.4m).....	101
ภาพที่ 4.19 ความเข้มข้นของแก๊สไนโตรเจนไดออกไซด์ของ จากเครื่อง CFBB ที่มีการป้อน เชื้อเพลิงถ่านหินร้อยละ100 ถ่านหินต่อกะลาปาล์ม 50:50 และถ่านหินต่อ กะลามะพร้าว 50:50 ถ่านหินต่อกระถินยักษ์ 50:50 และถ่านหินต่อยูคาลิปตัส 50:50 ตามลำดับ อากาศรวมร้อยละ 100 ในการเผาไหม้สมบูรณ์ อากาศปฐมภูมิ 300 ลิตรต่อหน้าที่ ป้อนอากาศที่สกรูพีดเดอร์ 100 ลิตรต่อหน้าที่ (1. 2 nd air at 1m, 2. 2 nd air at 2m, 3. 2 nd air at 2.4m).....	101
ภาพที่ 4.20 อุณหภูมิไอน้ำที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิง 7 กิโลกรัมต่อชั่วโมง อากาศรวมร้อยละ 100 ในการเผาไหม้สมบูรณ์ อากาศปฐมภูมิ 300 ลิตรต่อหน้าที่.....	105

สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 4.21 ความดันไอน้ำที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิง 7 กิโลกรัมต่อชั่วโมง อากาศรวมร้อยละ 100 ในการเผาไหม้สมบูรณ์ อากาศปฐมภูมิ 300 ลิตรต่อนาที.....	105
ภาพที่ 4.22 อัตราการไหลของไอน้ำที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิง 7 กิโลกรัมต่อชั่วโมง อากาศรวมร้อยละ 100 ในการเผาไหม้สมบูรณ์ อากาศปฐมภูมิ 300 ลิตรต่อนาที.....	108
ภาพที่ 4.23 ประสิทธิภาพรวมของหม้อกำเนิดไอน้ำที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิง 7 กิโลกรัมต่อชั่วโมง อากาศรวมร้อยละ 100 ในการเผาไหม้สมบูรณ์ อากาศปฐมภูมิ 300 ลิตรต่อนาที.....	109
ภาพที่ 4.24 ประสิทธิภาพของส่วนแลกเปลี่ยนความร้อนที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิง 7 กิโลกรัมต่อชั่วโมง อากาศรวมร้อยละ 100 ในการเผาไหม้สมบูรณ์ อากาศปฐมภูมิ 300 ลิตรต่อนาที.....	109

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

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

Q_g	=	อัตราเร็วของแก๊ส
d_p	=	เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค
θ_1	=	(12π) = มุมที่อนุภาคอันในที่สุดจะตกกระทบผนัง
R_2	=	รัศมีของเส้นโค้งการหมุนวนของแก๊สสกปรก (ทรงกระบอกไซโคลน)
R_1	=	รัศมีของเส้นโค้งการหมุนวนของแก๊สสะอาด (ทรงกระบอกท่อทางออก)
N	=	ค่าคงที่ (0.5-0.7)
W	=	ความกว้างของช่องทางเข้าของแก๊สสกปรก

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

เนื่องจากความก้าวหน้าทางด้านเกษตรกรรม และด้านอุตสาหกรรมต่างก็ขยายวงกว้างไปอย่างรวดเร็ว ซึ่งทำให้หลายองค์กรต่างก็ให้ความสนใจถึงการสร้างพลังงานทางเลือกใหม่ๆกัน อย่างกว้างขวาง โดยในประเทศไทยนั้นก็มีผลิตภัณฑ์ที่ได้จากเกษตรกรรม สามารถนำมาเข้ากระบวนการต่างๆเพื่อให้ได้ซึ่งพลังงาน เช่น เชื้อเพลิงชีวมวลสามารถนำมาผสมกับเชื้อเพลิงถ่าน เพื่อลดต้นทุนของถ่านหินที่ใช้ในกระบวนการเผาไหม้ แต่เชื้อเพลิงชีวมวลแต่ละชนิดนั้นต่างก็มีสมบัติทางกายภาพที่ต่างกันออกไป จึงส่งผลต่อประสิทธิภาพของการเผาไหม้ จึงต้องหาภาวะที่เหมาะสมต่อการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลในแต่ละชนิด ดังนั้นการเผาไหม้ในเตาเผาฟลูอิโดซ์เบด แบบหมุนเวียนจึงเป็นเทคนิคที่น่าสนใจ เนื่องจากสามารถเผาไหม้ได้ประสิทธิภาพสูงกว่าการเผาโดยทั่วไป

ชีวมวล (Biomass) หมายถึง ผลผลิตจากพืชและสัตว์ (โดยที่ไม่นับการเป็นเชื้อเพลิงฟอสซิลไปแล้ว) ที่เป็นแหล่งพลังงานหมุนเวียนที่สำคัญของโลก และถูกจัดเป็นพลังงานทดแทนพลังงานจากฟอสซิลซึ่งมีอยู่อย่างจำกัดและอาจหมดลงได้ แบ่งชีวมวลตามแหล่งที่มาได้ดังนี้

1.พืชผลทางการเกษตร (Agricultural crops) เช่น อ้อย มันสำปะหลัง ข้าวโพด ข้าวฟ่าง ที่เป็นแหล่งของคาร์โบไฮเดรต แป้งและน้ำตาล รวมถึงพืชน้ำมันต่างๆ ที่สามารถนำน้ำมันมาใช้เป็นพลังงานได้

2.เศษวัสดุเหลือทิ้งการเกษตร (Agricultural residues) เช่น ฟางข้าว เศษลำต้นข้าวโพด ชังข้าวโพด เหง้ามันสำปะหลัง

3.ไม้และเศษไม้ (Wood and wood residues) เช่น ไม้โตเร็ว ยูคาลิปตัส กระถินณรงค์ เศษไม้จากโรงงานผลิตเครื่องเรือน และโรงงานผลิตเยื่อกระดาษ เป็นต้น

4.ของเหลือจากจากอุตสาหกรรมและชุมชน (Waste streams) เช่น กากน้ำตาล และขานอ้อยจากโรงงานน้ำตาล แกลบ ชี้เลี้ยง เส้นใยปาล์ม และกะลาปาล์ม

ฟลูอิโดเซชันเป็นเทคนิคที่ทำให้อนุภาคของของแข็งที่บรรจุในคอลัมน์ซึ่งเรียกว่าเบด (Bed) เกิดการเคลื่อนที่ลอยตัวอย่างอิสระ โดยอาศัยความเร็วของของไหลที่ผ่านแผ่นกระจายทางด้านล่าง อนุภาคของของแข็งเหล่านี้จะเกิดการผสมผสานอย่างสม่ำเสมอเป็นเนื้อเดียวกันโดยตลอด สามารถแลกเปลี่ยนมวลสารและพลังงานได้เป็นอย่างดี จึงถูกนำมาใช้ออกแบบเป็นเตาเผา

หรือเตาปฏิกรณ์เคมีมากมาย การเผาไหม้ถ่านหินจึงเป็นกระบวนการหนึ่งที่เทคนิคฟลูอิโดเซชันถูกนำมาใช้ ซึ่งพบว่าสามารถเผาไหม้ถ่านหินและเชื้อเพลิงแข็งที่มีคุณภาพต่ำ และมีปริมาณกำมะถันเป็นองค์ประกอบอยู่เกินกว่าร้อยละ 1 โดยสามารถควบคุมปริมาณแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) ให้อยู่ในเกณฑ์ที่ไม่ก่อให้เกิดอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตและสิ่งแวดล้อม ทั้งนี้โดยการเติมหินปูนหรือโดโลไมท์ลงไปในเตาเผาพร้อมกับถ่านหินเพื่อกำจัดมลพิษจากแก๊สดังกล่าว และด้วยเหตุที่อุณหภูมิที่ใช้เผาไหม้ของเตาเผาลักษณะนี้ต่ำ (ประมาณ 600-1000 องศาเซลเซียส) ซึ่งต่ำกว่าระบบการเผาไหม้แบบอื่นๆ จึงทำให้ปริมาณแก๊สสารประกอบออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x) ที่ปล่อยออกมาขณะเผาไหม้ต่ำด้วย

ระบบการเผาไหม้ฟลูอิโดเบดแบบหมุนเวียนจะมีลักษณะคล้ายคลึงกับระบบการเผาไหม้ฟลูอิโดเบด แต่จะมีการปรับปรุงจากระบบการเผาไหม้ฟลูอิโดเบดให้มีการหมุนเวียนของเบด โดยจะมีเตาปฏิกรณ์ 2 ตัวต่อกัน โดยตัวแรก (Riser) จะทำหน้าที่เสมือนระบบการเผาไหม้ฟลูอิโดเบด ในขณะที่เตาปฏิกรณ์อีกตัว (Downcomer) จะทำหน้าที่กักเก็บและนำเบดพร้อมทั้งเชื้อเพลิงที่ยังเผาไหม้ไม่สมบูรณ์กลับเข้ามาสู่เตาปฏิกรณ์ตัวที่ 1 ใหม่อีกครั้งเพื่อให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ยิ่งขึ้น มีการป้อนอากาศหรือออกซิเจนมากกว่าระบบการเผาไหม้ฟลูอิโดเบดเพื่อให้เกิดฟลูอิโดเบดอย่างรวดเร็วและหลุดออกจากเตาปฏิกรณ์ตัวที่ 1 ไป เกิดเป็นชั้นฟลูอิโดเบดตลอดเตาปฏิกรณ์ตัวที่ 1 อุณหภูมิสูงกระจายตลอดทั้งเตาและไม่สูงมากเกินไป ทั้งนี้อุณหภูมิจะไม่สูงมาก เฉพาะส่วนล่างของเตาเหมือนกับระบบการเผาไหม้ฟลูอิโดเบดอันเป็นสาเหตุของปัญหามลพิษเนื่องจากการปล่อยแก๊สไนโตรเจนออกไซด์ (NO_x)

ซึ่งในปัจจุบันนี้การเกิดปรากฏการณ์เรือนกระจกที่มีสาเหตุร่วมมาจากปริมาณของคาร์บอนไดออกไซด์จากกระบวนการทางอุตสาหกรรม จากการเผาไหม้พลังงานฟอสซิลก่อให้เกิดการปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกสู่บรรยากาศเพียงอย่างเดียว ทำให้เกิดการสะสมในบรรยากาศมากขึ้น แต่การเผาไหม้ชีวมวลอย่างสมบูรณ์จะเกิดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์กลับคืนสู่บรรยากาศ จะช่วยให้เกิดการหมุนเวียนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศ เนื่องจากพืชจะนำแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศมาใช้ในการสังเคราะห์แสง นอกจากนี้ปริมาณไนโตรเจนที่สะสมอยู่ในเชื้อเพลิงก็เป็นสิ่งที่ไม่ควรมองข้าม เพราะการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่มีองค์ประกอบเป็นธาตุไนโตรเจนปริมาณมากๆ อาจก่อให้เกิดแก๊สไนโตรเจนออกไซด์และไนตรัสออกไซด์ในปริมาณมากด้วย ซึ่งแก๊สทั้งสองชนิดนี้เป็นต้นเหตุที่สำคัญในการเกิดมลพิษ ฝนกรดและปรากฏการณ์เรือนกระจกเช่นกัน

งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นที่จะศึกษาตัวแปรต่างๆ ที่มีผลกระทบต่อการเผาไหม้ร่วมระหว่างถ่านหินและชีวมวล ไม่ว่าจะเป็นค่าอุณหภูมิและปริมาณแก๊สที่ปล่อยออกมา ซึ่งเป็นสาเหตุของปัญหาสิ่งแวดล้อม โดยใช้หม้อกำเนิดไอน้ำฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียน เพื่อแปรรูปชีวมวลให้เปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนที่มีประโยชน์เพื่อนำไปใช้ผลิตไอน้ำอย่างมีประสิทธิภาพ

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. ออกแบบและสร้างหม้อกำเนิดไอน้ำฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียน (Circulating Fluidized Bed Boiler)
2. ศึกษาภาวะของปัจจัยต่างๆ โดยศึกษา สัดส่วนการเผาไหม้ร่วมของถ่านหิน และชีวมวล ตำแหน่งการป้อนอากาศทุติยภูมิ ที่มีผลต่ออุณหภูมิ และการปล่อยของแก๊ส คาร์บอนมอนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ และสารประกอบออกไซด์ของไนโตรเจน ที่ความสูงระดับต่างๆตลอดไรเซอร์ ในการเผาไหม้ฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียน

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ศึกษาค้นคว้าเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2. ออกแบบและสร้างหม้อกำเนิดไอน้ำฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียน
3. นำถ่านหินและชีวมวลไปวิเคราะห์คุณภาพแบบประมาณ (Proximate analysis) และแบบแยกธาตุ (Ultimate analysis)
4. ทดลองเผาไหม้ถ่านหินและชีวมวลในหม้อกำเนิดไอน้ำฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียน เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมต่อการปล่อยแก๊ส และบันทึกผลการทดลอง
 - ศึกษาการเผาไหม้ในหม้อกำเนิดไอน้ำฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียน
 - ศึกษาการใช้เชื้อเพลิงผสมเป็นเชื้อเพลิงในการเผาไหม้ในหม้อกำเนิดไอน้ำฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียน
 - ศึกษาตำแหน่งการป้อนอากาศทุติยภูมิในการเผาไหม้ในหม้อกำเนิดไอน้ำฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียน
 - ศึกษาแนวโน้มของอุณหภูมิตลอดไรเซอร์ และองค์ประกอบของฟลูแก๊ส เนื่องจากการเปลี่ยนตัวแปรต่างๆ
5. วิเคราะห์ข้อมูลการทดลอง ผลการทดลอง และสรุปผลการทดลอง
6. เขียนวิทยานิพนธ์

1.4 ขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัย

1. ค้นหาข้อมูลและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องจากตำรา ห้องสมุด อินเทอร์เน็ต ฯลฯ
 - พลังงาน พลังงานฟอสซิล พลังงานหมุนเวียน
 - วิธีการลดแก๊สสารประกอบออกไซด์ของไนโตรเจนที่เกิดจากกระบวนการเผาไหม้
 - หลักการวิเคราะห์โดยประมาณและโดยแยกธาตุ
 - วิธีใช้เครื่องเผาไหม้ และการผลิตไอน้ำจากหม้อกำเนิดไอน้ำฟลูอิดไธด์แบบหมุนเวียน
 - งานวิจัยที่เกี่ยวกับการเผาไหม้เชื้อเพลิงชนิดต่างๆ ในหลายรูปแบบ อาทิเช่น การเผาไหม้โดยตรงธรรมดา การเผาไหม้แบบเบดนิ่ง การเผาไหม้แบบบับเบิลเบด การเผาไหม้แบบฟลูอิดไธด์เบด การเผาไหม้ฟลูอิดไธด์แบบหมุนเวียน การผลิตไอน้ำจากหม้อกำเนิดไอน้ำฟลูอิดไธด์แบบหมุนเวียน
 - ค่ามาตรฐานสากลของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ และสารประกอบออกไซด์ของไนโตรเจน
 - วิธีการใช้เครื่องมือต่างๆ เช่น เครื่องมือวิเคราะห์ฟลูแก๊ส , เครื่อง GC (gas chromatograph) , เครื่อง CHN analyzer เป็นต้น
2. ดำเนินการติดต่อประสานงานเพื่อจัดหาถ่านหิน ชีวมวล และทราย จากแหล่งที่ต้องการ
 - ถ่านหิน จาก บริษัท บ้านปู จำกัด (มหาชน)
 - ชีวมวล จาก โรงงานแปรรูปผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร หรือจากเกษตรกร
 - ทราย จาก โรงผสมปูน หรือ ร้านขายวัสดุและอุปกรณ์ก่อสร้าง
3. การวิเคราะห์คุณภาพของถ่านหินและชีวมวล
 - นำถ่านหินและชีวมวลไปวิเคราะห์หาคุณภาพโดยประมาณ ด้วยวิธีมาตรฐาน ASTM (D 3173, D 3175, D 3174)
 - นำถ่านหินและชีวมวลไปวิเคราะห์ค่าคุณภาพโดยแยกธาตุ โดยจะรายงานเป็นร้อยละของธาตุต่างๆ ที่ประกอบขึ้นเป็นถ่านหิน ดังต่อไปนี้ คาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน ไนโตรเจน และ กำมะถัน โดยใช้ เครื่อง CHN analyzer
4. การเตรียมถ่านหิน ชีวมวล และทราย
 - บดถ่านหินและชีวมวลให้ได้ขนาดประมาณ 1200 μm
 - วัดขนาดของถ่านหิน ชีวมวลและทราย ด้วยเครื่องคัดแยกขนาด

5. ประกอบเครื่องเผาฟลูอิโดซ์เบดแบบหมุนเวียน และส่วนของเครื่องผลิตไอน้ำเข้าด้วยกัน
6. ประกอบอุปกรณ์วัดค่าอุณหภูมิ ความดัน และ ปริมาณแก๊ส ในตำแหน่งต่างๆ ของห้องเผาไหม้ (riser) ส่วนป้อนกลับ (downcomer) และตำแหน่งแก๊สขาออกจากไซโคลน
7. การเผาไหม้ร่วมระหว่างชีวมวลและถ่านหินในเครื่องฟลูอิโดซ์เบดแบบหมุนเวียนโดยมีตัวแปรต่างๆ ดังนี้
 - อัตราการป้อนเชื้อเพลิง
 - อัตราส่วนของถ่านหินต่อชีวมวล
 - ปริมาณอากาศรวม (อากาศปฐมภูมิ + อากาศที่สกรูพีดเดอร์สำหรับป้อนชีวมวล + อากาศทุติยภูมิ) โดยให้อากาศปฐมภูมิคงที่ 300 ลิตรต่อนาที
 - ตำแหน่งการป้อนอากาศทุติยภูมิ
8. บันทึกอุณหภูมิ และปริมาณแก๊ส CO, CO₂, NO_x (NO + NO₂) ในตำแหน่งต่างๆ ของเครื่อง
9. วิเคราะห์ สรุปผล และเขียนวิทยานิพนธ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

1. ได้ภาวะที่ทำให้อุณหภูมิของโรเตอร์สูง โดยที่ความเข้มข้นของแก๊สที่ปล่อยออกจากการเผาไหม้ร่วมของถ่านหินและชีวมวลในหม้อกำเนิดไอน้ำฟลูอิโดซ์เบดแบบหมุนเวียน น้อยกว่ามาตรฐานของการปล่อยแก๊สพิษในประเทศไทย
2. การผลิตไอน้ำเพื่อนำไปใช้ประโยชน์อื่นๆ ได้ เช่น การผลิตไฟฟ้า เป็นต้น

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การเผาไหม้

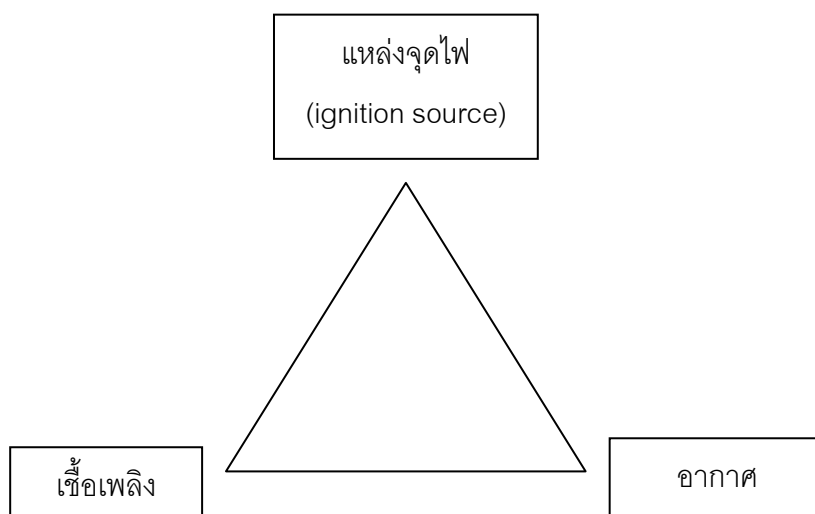
นิยาม (สำเร็จ จักรใจ, 2547)

การเผาไหม้เป็นกระบวนการออกซิเดชันของโมเลกุล โดยปกติทั่วไปหมายถึงโมเลกุลของคาร์บอน ไฮโดรเจน หรือขององค์ประกอบไฮโดรคาร์บอนซึ่งเกิดขึ้นเร็วมากภายใต้อุณหภูมิสูง พร้อมทั้งปลดปล่อยพลังงานออกมาหรือเป็นกระบวนการคายความร้อนนั่นเอง ถ้าพลังงานที่ปลดปล่อยออกมามีค่ามากเพียงพอก็จะทำให้กระบวนการเผาไหม้ดำเนินต่อไปได้ด้วยตัวเองอย่างต่อเนื่องพร้อมทั้งปลดปล่อยพลังงานในรูปของความร้อนและแสงสว่างออกมาเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ได้ การเผาไหม้อาจมองได้ในอีกลักษณะหนึ่งว่าเป็นเรื่องเกี่ยวกับจลน์ทางเคมีซึ่งเกี่ยวข้องกับความเร็วและกลไกของปฏิกิริยาเคมีของสารขณะที่กำลังสลายตัวไปเป็นสารใหม่ พร้อมทั้งมีการเปลี่ยนรูปของพลังงานระหว่างพลังงานทางเคมีและพลังงานความร้อนอย่างรวดเร็ว การเผาไหม้จะเกิดขึ้นได้ต้องมีภาวะที่เหมาะสม เช่น ส่วนประกอบของสารที่ทำปฏิกิริยา (ส่วนผสมระหว่างเชื้อเพลิงกับออกซิไดเซอร์ เช่น ออกซิเจน หรือ อากาศ เป็นต้น) อุณหภูมิ และ ความดัน เป็นต้น การเผาไหม้จะต้องปลดปล่อยความร้อน และ/หรือ แสงสว่าง การเผาไหม้จะต้องมีเปลวไฟหรือ บริเวณบางๆ ที่ซึ่งปฏิกิริยาคายความร้อนเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว เช่น เปลวไฟของตะเกียงเบนเซน และเปลวไฟของเทียนไข เป็นต้น การเผาไหม้เกิดขึ้นในอัตราเร็วหรือช้าขึ้นอยู่กับ หลายปัจจัย เช่น พื้นที่ผิวสัมผัสของเชื้อเพลิง (เช่น ถ่านหินบดละเอียด และสเปรย์ละอองของน้ำมันเชื้อเพลิง เป็นต้น) และ อุณหภูมิ เป็นต้น การเผาไหม้ทำให้เกิดการระเบิดได้ ถ้าอัตราการปลดปล่อยความร้อนสูงกว่าอัตราการถ่ายโอนความร้อนออกไป ระบบจะมีอุณหภูมิสูงขึ้นเรื่อยๆ อัตราการเกิดปฏิกิริยายิ่งสูง ทำให้อัตราการปลดปล่อยความร้อนยิ่งสูงอย่างรวดเร็วจนเกิดการระเบิด การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงแข็ง เชื้อเพลิงเหลว และเชื้อเพลิงแก๊ส มีขั้นตอนต่างกัน การเผาไหม้ก่อให้เกิดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อม ที่สำคัญ คือ คาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ที่ทำให้โลกร้อนขึ้น ซึ่งก่อนปฏิวัติอุตสาหกรรมในอังกฤษตอนปลายศตวรรษที่ 18 จนถึงปลายศตวรรษที่ 20 ปี 1996 คาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มจาก 280 ส่วนในล้านส่วน เป็น 362 ส่วนในล้านส่วน ดังนั้นการเผาไหม้ที่ดีต้องเป็นระบบที่ปลดปล่อยมลพิษต่ำ เข้าได้กับสิ่งแวดล้อม ต้นทุนต่ำแต่มีประสิทธิภาพสูง

2.1.1 ภาวะที่จำเป็นในการเริ่มเกิดปฏิกิริยา (กัญจนา บุญเกียรติ, 2544)

ปฏิกิริยาการเผาไหม้เป็นปฏิกิริยาลูกโซ่ ไม่ใช่ปฏิกิริยาระหว่างโมเลกุลโดยตรง แต่จะเริ่มด้วยการแตกตัวของโมเลกุลของเชื้อเพลิงเป็นอนุมูลอิสระที่ว่องไวจำนวนมาก เป็นขั้นตอนการเริ่มต้นของลูกโซ่ อนุมูลอิสระที่ว่องไวจะทำปฏิกิริยากับโมเลกุลอื่น ได้ทั้งอนุมูลอิสระใหม่และอนุมูลชั้นกลางอื่นๆ ซึ่งก็จะทำปฏิกิริยาต่อลูกโซ่ ทั้งที่เกิดขึ้นพร้อมกันและที่เกิดเป็นลำดับก่อนหลังกันหลายรูปแบบ ทำให้เกิดทั้งผลผลิต และอนุมูลอื่นๆ อีกมาก สุดท้ายคือปฏิกิริยาที่ให้ผลผลิตสุดท้ายและอนุมูลที่ไม่ว่องไว ตามด้วยการสิ้นสุดของปฏิกิริยาลูกโซ่

ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อมีตัวทำปฏิกิริยาและภาวะที่เหมาะสม ปฏิกิริยาการเผาไหม้คือปฏิกิริยาการออกซิไดซ์เชื้อเพลิงให้กลายเป็นออกไซด์ ซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่เกิดต่อเนื่องจนสมบูรณ์ในการเผาไหม้โดยทั่วไป ตัวทำปฏิกิริยา คือ เชื้อเพลิง (ส่วนใหญ่เป็นไฮโดรคาร์บอน) และอากาศ ซึ่งจะเริ่มเกิดปฏิกิริยาได้ต่อเมื่อมีภาวะที่เหมาะสม ซึ่งก็คือ แหล่งให้ความร้อนเพื่อจุดไฟ ดังนั้นอาจแสดงองค์ประกอบทั้ง สามได้ในกราฟสามเหลี่ยมดังภาพที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 องค์ประกอบที่จำเป็นในการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ (กัญจนา บุญเกียรติ, 2544)

การเริ่มต้นปฏิกิริยาการเผาไหม้ซึ่งเป็นปฏิกิริยาลูกโซ่ เริ่มด้วยการแตกตัวของโมเลกุลของเชื้อเพลิงเป็นอนุมูลอิสระก่อน แหล่งจุดไฟจึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง เพราะจะให้พลังงานส่วนแรกแก่ส่วนผสมระหว่างเชื้อเพลิงและออกซิเจนจนทำให้เชื้อเพลิงเกิดการแตกตัวเป็นอนุมูลอิสระจำนวนมากพอที่จะไปทำให้เริ่มเกิดปฏิกิริยาลูกโซ่ของการเผาไหม้ เมื่อเริ่มเกิดการเผาไหม้แล้ว แหล่งจุดไฟจะไม่จำเป็นอีกต่อไป เพราะพลังงานความร้อนจากการเผาไหม้ส่วนต้นมากเกินพอที่จะไปทำให้เชื้อเพลิงส่วนที่เหลืออยู่เกิดการแตกตัวและเผาไหม้ต่อเนื่องกันไปได้อย่างสมบูรณ์

พลังงานส่วนแรกที่ต้องให้เพื่อเริ่มต้นเกิดปฏิกิริยาลุกไหม้ เรียกว่า พลังงานการจุดไฟ ซึ่งอาจไม่ใช่วิธีวัดโดยตรง แต่มักจะวัดอุณหภูมิการจุดไฟ ซึ่งเป็นอุณหภูมิของส่วนผสมระหว่างเชื้อเพลิงและอากาศที่ต่ำที่สุดที่จะจุดติดไฟได้เอง อุณหภูมิการจุดไฟขึ้นเครื่องบ่งชี้ระดับพลังงานที่ต้องให้แก่ส่วนผสมของเชื้อเพลิงแต่ละชนิด ซึ่งมีค่าแตกต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 อุณหภูมิการจุดไฟของเชื้อเพลิงบางชนิดผสมอากาศ ที่ความดัน 1 บรรยากาศ (กัญญา นานุกยเกียรติ, 2544)

Combustible	Formula	Temperature	
		°F	°C
Sulfur	S	470	245
Charcoal	C	650	345
Fixed carbon (bituminous coal)	C	765	405
Fixed carbon (semibituminous coal)	C	870	465
Fixed carbon (anthracite)	C	840 - 1115	450 - 600
Acetylene	C ₂ H ₂	580 - 825	305 - 440
Ethane	C ₂ H ₆	880 - 1165	470 - 630
Ethylene	C ₂ H ₄	900 - 1020	480 - 550
Hydrogen	H ₂	1065 - 1095	575 - 590
Methane	CH ₄	1170 - 1380	630 - 765
Carbon monoxide	CO	1130 - 1215	610 - 665
Kerosene	-	490 - 560	255 - 295
Gasoline	-	500 - 800	260 - 425

แต่ดังที่กล่าวมาแล้ว ปฏิกิริยาการเผาไหม้เป็นปฏิกิริยาลุกไหม้ ดังนั้นเราสามารถทำให้ส่วนผสมติดไฟได้ โดยให้พลังงานการจุดไฟในบริเวณเล็กๆ เพียงบริเวณเดียวก็เพียงพอแล้ว ยกตัวอย่างเช่น การใช้ไม้ขีดไฟจุดหัวเตาแก๊สหุงต้ม หรือการใช้ประกายไฟจากหัวเทียนจุดระเบิดส่วนผสมในกระบอกสูบของเครื่องยนต์ อุณหภูมิการจุดไฟแสดงถึงความยากง่ายที่เชื้อเพลิงจะเกิดการเผาไหม้ ซึ่งหมายถึงความปลอดภัยในการใช้งานด้วย

เชื้อเพลิงแข็งมีส่วนประกอบที่เป็นสารระเหยและคาร์บอนคงตัว ในช่วงแรกจะเป็นการเผาไหม้ของสารระเหยซึ่งจะเกิดขึ้นในวัฏภาคแก๊ส เป็นปฏิกิริยาระหว่างแก๊สกับแก๊ส ในช่วงหลังเป็นการเผาไหม้ของกากของแข็งที่เหลืออยู่คือคาร์บอนทำปฏิกิริยากับแก๊ส การควบคุมปฏิกิริยาในแต่

ละช่วงจึงแตกต่างกันและสมบัติด้านการเผาไหม้ก็แตกต่างกันด้วย ซึ่งการทำให้เชื้อเพลิงและออกซิเจน (อากาศ) สัมผัสกันได้อย่างทั่วถึงภายใต้ภาวะที่เหมาะสมต้อง

1. จัดให้มีปริมาณอากาศที่เพียงพอที่ตำแหน่งที่ถูกต้องโดยตลอดบริเวณที่มีเชื้อเพลิง
2. ให้เวลาและจัดให้มีการปั่นป่วนเพียงพอ และที่อุณหภูมิสูงพอที่จะทำให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ภายในปริมาตรห้องเผาไหม้ที่มีอยู่ ข้อนี้นิยมเรียกว่ากฎ 3T's (time, turbulence and temperature)

กฎ 3T's (time, turbulence and temperature) (กัญจนา บุญเกียรติ, 2544)

ถ้าอากาศไหลผ่านแต่มีเวลาไม่เพียงพอที่จะผสมกับเชื้อเพลิง ไม่มีการปั่นป่วนเพื่อให้มวลของเชื้อเพลิงและอากาศสัมผัสกัน และมีบางบริเวณที่อุณหภูมิไม่สูงพอ การเผาไหม้ที่สมบูรณ์ก็ไม่สามารถเกิดขึ้นได้ การจัดให้มีองค์ประกอบที่เหมาะสมทั้ง 3 ประการขึ้นอยู่กับการป้อนอากาศและปริมาณอากาศ

การป้อนอากาศแบ่งเป็น 2 ส่วนคือ อากาศส่วนแรก (อากาศปฐมภูมิ) และอากาศส่วนที่สอง (อากาศทุติยภูมิ) อากาศส่วนแรกคือส่วนที่ป้อนเข้ามาพร้อมกับเชื้อเพลิงหรือส่วนที่สัมผัสกับเชื้อเพลิงก่อน อากาศส่วนที่สองคือส่วนที่ป้อนเข้ามาสัมผัสกับเชื้อเพลิงหรือผลผลิตจากการไพโรไลต์หรือการเผาไหม้เชื้อเพลิงในระยะถัดไป ตัวอย่างเช่น การเผาไหม้บนตะแกรงเตา อากาศที่ป้อนผ่านตะแกรงเตาขึ้นมาคือ อากาศส่วนแรก อากาศส่วนที่ป้อนเข้ามาเหนือตะแกรงเตาเพื่อทำปฏิกิริยากับสารระเหยที่ได้และควันที่เกิดขึ้นคืออากาศส่วนที่ 2

สัดส่วนและปริมาณการป้อนอากาศส่วนแรกและอากาศส่วนที่สองมีความสำคัญมากและมีผลเป็นอย่างมากต่อการเกิดควันและความสมบูรณ์ของปฏิกิริยา ซึ่งขึ้นอยู่กับศักดิ์และร้อยละของสารระเหย ขนาดและการกระจายขนาดของถ่านหิน อัตราการเผาไหม้ ระบบการเผาไหม้ที่ใช้และรูปแบบการไหลของแก๊สผ่านระบบด้วย

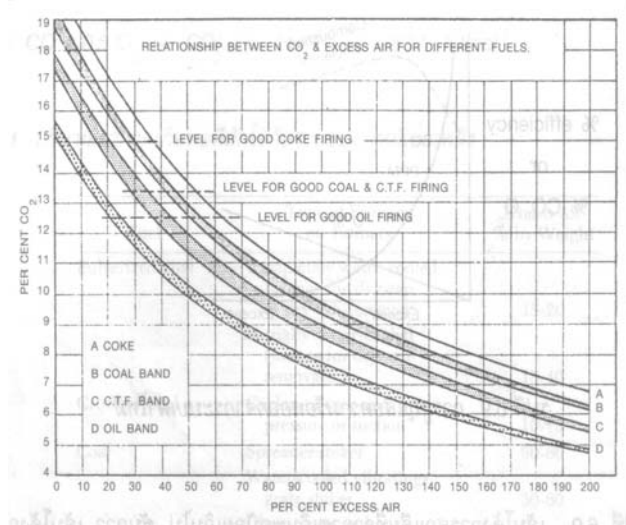
อากาศเกินพอ (กัญจนา บุญเกียรติ, 2544)

ระบบการเผาไหม้ทั่วไปจะใช้อากาศเผาไหม้เกินพอเพื่อให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ ในกรณีของแก๊สเชื้อเพลิง มวลของแก๊สและอากาศผสมเป็นเนื้อเดียวกันอยู่แล้ว จึงไม่ต้องใช้อากาศเกินพอ หรือใช้เพียงเล็กน้อย (ระหว่าง 0 – 10 เปอร์เซ็นต์) ในกรณีของเชื้อเพลิงเหลว หยดน้ำมันเกิดการระเหยเป็นไอพร้อมๆกับการเผาไหม้ จำเป็นต้องใช้อากาศเกินพอสูงกว่าในกรณีของแก๊สเชื้อเพลิงเพื่อให้ทันกับการระเหย (ระหว่าง 5 – 20 เปอร์เซ็นต์) ในกรณีเชื้อเพลิงแข็ง นอกจาก

ต้องการแบ่งอากาศเป็นสองส่วนแล้ว ยังต้องใช้อากาศเกินพอสูงมาก (ระหว่าง 15 – 60 เปอร์เซ็นต์) ทั้งอากาศส่วนแรกเพื่อทำปฏิกิริยากับสารระเหยที่ถูกละอออกจากพื้นผิวเชื้อเพลิงแข็งอย่างรวดเร็ว และอากาศส่วนที่สองเพื่อทำปฏิกิริยากับคาร์บอนในกากของแข็ง ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับระบบและอุปกรณ์ด้วย

ปริมาณอากาศเกินพอที่เหมาะสมนั้นนอกจากจะหมายถึงการเผาไหม้ที่สมบูรณ์แล้ว ยังมีผลให้การสูญเสียความร้อนที่ต่ำที่สุดด้วย ทั้งนี้เนื่องจากถ้าใช้อากาศไม่พอ จนเกิดการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์จะทำให้เกิดการสูญเสียความร้อนในรูปขององค์ประกอบแก๊สและของแข็งที่ยังเผาไหม้ได้ออกไปจากระบบ เรียกว่า การสูญเสียศักยภาพทางความร้อน เช่น แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ไฮโดรเจน (H_2) หรือ คาร์บอน (C) เป็นต้น โดยเฉพาะแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ ซึ่งมักจะพบเสมอ แต่ถ้าใช้อากาศมากเกินไป ปริมาตรอากาศส่วนที่เกินพอที่เข้ามาจะออกไปจากระบบโดยที่ไม่ได้ทำปฏิกิริยา ทำให้ปริมาตรรวมของฟลูแก๊สเพิ่มขึ้น ความร้อนสูญเสียสัมผัสที่ออกไปจากระบบนี้ เรียกว่า การสูญเสียความร้อนสัมผัส ดังนั้นต้องมีจุดที่เหมาะสมที่ทำให้การสูญเสียความร้อนต่ำที่สุด

ถ้าคำนวณดุลมวลของระบบเผาไหม้จะพบว่ามีความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และ เปอร์เซ็นต์ออกซิเจน (O_2) คือถ้าอากาศเกินพอน้อย ฟลูแก๊สมีความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์สูง และออกซิเจนต่ำ ตรงกันข้าม ถ้ามีอากาศเกินพอมาก ฟลูแก๊สจะถูกเจือจางด้วยไนโตรเจน (N_2) และออกซิเจน (O_2) เกินพอจากอากาศ จึงมีความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำ และออกซิเจนสูง ในการควบคุมอากาศเกินพอจึงอาจใช้เครื่องมือวัดความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ หรือ ออกซิเจน เพียงชนิดเดียวก็ได้ ในหลักการวัดความเข้มข้นของแก๊ส คาร์บอนไดออกไซด์ ในฟลูแก๊สให้ผลถูกต้องมากกว่าเพราะไม่มีผลจากการรั่วของอากาศเข้าสู่อุปกรณ์การวัด จึงเป็นที่นิยมมากกว่า โดยความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์คาร์บอนไดออกไซด์และเปอร์เซ็นต์อากาศเกินพอ แสดงได้ดังภาพที่ 2.2



ภาพที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง เปอร์เซนต์คาร์บอนไดออกไซด์ และเปอร์เซนต์อากาศเกินพอ (กัญญา บุญยเกียรติ, 2544)

2.1.2 ข้อเด่นของการเผาไหม้ (สำเริง จักรใจ, 2547)

การเผาไหม้ คือ ปฏิกิริยาเคมีของสารอินทรีย์อย่างแรกสุดที่มนุษย์นำมาใช้ประโยชน์ และอาจกล่าวได้ว่าเป็นสิ่งที่สำคัญที่สุดที่ทำให้อารยธรรมของมนุษย์เจริญสูงขึ้นตามลำดับเหมือนเช่นที่เป็นอยู่ในปัจจุบันนี้และต่อไปในอนาคต ความสำคัญของการเผาไหม้สามารถตระหนักให้เห็นได้อย่างชัดเจนจาก พลังงานมากกว่า 90 เปอร์เซนต์ ที่ใช้อยู่ทั้งหมดในโลกปัจจุบันนี้ (ทั้งที่เป็นเชื้อเพลิงฟอสซิล และไม้ เช่น ชีวมวล) อาศัยกระบวนการเผาไหม้เป็นหลักในการแปรรูปเป็นความร้อนหรืองานเพื่อใช้ประโยชน์ แม้ว่าในอนาคตโลกจะเปลี่ยนมาใช้เชื้อเพลิงหมุนเวียน (เช่น ไบโอดีเซลที่บ่มเพาะขึ้นมาโดยอาศัยแบคทีเรียช่วยเร่งในการหมัก เป็นต้น) เพิ่มมากขึ้นเพื่อทดแทนเชื้อเพลิงฟอสซิลด้วยเหตุผลเกี่ยวกับสิ่งแวดล้อม ก็ยังเชื่อได้ว่าการเผาไหม้ยังคงต้องมีบทบาทสำคัญต่อไปเหมือนเดิมในการเผาไหม้เชื้อเพลิงหมุนเวียนเหล่านั้นเพื่อนำพลังงานมาใช้ประโยชน์

ข้อดีของการเปลี่ยนรูปพลังงานโดยอาศัยกระบวนการเผาไหม้เมื่อเทียบกับวิธีอื่นๆ เช่น ปฏิกิริยานิวเคลียร์ เป็นต้น มีหลายประการ เช่น

1. ง่ายแก่การแปรรูปพลังงานและไม่อันตรายจากการแผ่กัมมันตภาพรังสีเหมือนปฏิกิริยานิวเคลียร์ เราสามารถพบพลังงานมหาศาลหลายล้านจูลในกระเปาะเล็กในรูปของไฟแช็กที่ใช้น้ำมันเป็นเชื้อเพลิงขนาดเล็กกระทัดรัดและพร้อมที่จะนำออกมาเผาไหม้เพื่อนำความร้อนไปใช้ประโยชน์ด้วยวิธีง่ายๆ เพียงแค่ใช้มือข้างเดียวติดไฟแช็กเท่านั้น

2. แหล่งพลังงานเพื่อการเผาไหม้ ได้แก่ น้ำมัน แก๊สธรรมชาติ ถ่านหิน และพลังงานชีวมวล ยังมีอีกมาก
3. มีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนรูปพลังงานสูงมากขึ้นถ้านำไปใช้ในกระบวนการร่วม เช่น วัฏจักรร่วมระหว่างวัฏจักรกังหันไอน้ำและวัฏจักรกังหันแก๊สมีประสิทธิภาพเชิงความร้อนรวมสูงเกือบ 60 เปอร์เซ็นต์
4. มีความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ที่ดีเพราะต้นทุนการก่อสร้างระบบเตาเผาไหม้ต่ำ
5. เข้าได้กับสิ่งแวดล้อมโดยมีเงื่อนไขว่าต้องเป็นเชื้อเพลิงสะอาด ในกรณีที่เชื้อเพลิงสกปรกและสารมลพิษก็สามารถใช้เทคนิคการเผาไหม้ขั้นสูงที่ได้รับการพิสูจน์แล้วเพื่อควบคุมให้การปลดปล่อยมลพิษอยู่ในระดับที่ยอมรับได้
6. ปลอดภัยและมีความเชื่อถือได้สูง ต้นทุนการบำรุงรักษาต่ำ
7. มีความยืดหยุ่นของเชื้อเพลิงสูง โดยเฉพาะในเรื่องเชื้อเพลิงที่จะนำมาเผาไหม้ ระบบการเผาไหม้ที่ดีจะต้องเผาไหม้เชื้อเพลิงได้หลายรูปแบบโดยมีการดัดแปลงระบบน้อยที่สุดหรือไม่มีเลย

การใช้ประโยชน์จากการเผาไหม้สามารถจำแนกตามชนิดของพลังงานที่เปลี่ยนรูปจากการเผาไหม้ได้ดังนี้

1. เพื่อการผลิตกระแสไฟฟ้า โดยการเผาไหม้ถ่านหินบดละเอียดในหม้อไอน้ำขนาดใหญ่ และโดยการเผาไหม้แก๊สธรรมชาติในเครื่องยนต์กังหันแก๊ส เป็นต้น ไฟฟ้าจะถูกแปรรูปต่อไปเป็น แสงสว่าง ความร้อน และ งานทางกล
2. เพื่อผลิตงานทางกลโดยตรงเพื่อกิจการด้านขนส่ง และคมนาคม เช่น การเผาไหม้เชื้อเพลิงเหลวเพื่อขับเคลื่อนรถไฟ รถยนต์ เรือเดินสมุทร และ เครื่องบิน การเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งและเชื้อเพลิงเหลวเพื่อขับเคลื่อนจรวด เพื่อกิจการทางทหารและการสำรวจอวกาศ เป็นต้น
3. เพื่อผลิตความร้อนในกระบวนการทางอุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมผลิตวัสดุต่างๆ (เหล็ก แก้ว เซรามิก ปูนซีเมนต์ ฯลฯ) อุตสาหกรรมเคมี (ผงคาร์บอน เม็ดพลาสติก การกลั่นน้ำมัน ฯลฯ) เป็นต้น
4. เพื่อผลิตความร้อนเพื่อการอยู่อาศัยของมนุษย์ เช่น การหุงต้ม และ การให้ความอบอุ่นในครัวเรือนและอาคาร เป็นต้น

2.2 ถ่านหิน (สำเริง จักรใจ, 2547)

ถ่านหินเกิดจากไม้และชีวมวลชนิดอื่นๆที่ทับถมกันและอัดแน่นเป็นเวลานานหลายแสนปี จนกระทั่งกลายเป็นหิน โดยเริ่มจากพืชในบริเวณที่ชื้นแฉะและอับอากาศแล้วเกิดการสลายตัวทางเคมีชีวภาพพร้อมกับมีการทับถมกันของพืชชนิดต่างๆเพิ่มเติมเข้ามาจนมีความลึกมากขึ้นเรื่อยๆ ทำให้พืชมีความชื้น ความพรุน ปริมาณสารระเหย พร้อมกับปริมาณของออกซิเจนและไฮโดรเจน ลดลงในขณะที่ปริมาณคาร์บอนเพิ่มมากขึ้น 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 และแร่เคาลีไนต์ เป็นต้น) โดยสมบัติของถ่านหินเปรียบเทียบกับไม้และพืช แสดงดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 สมบัติของถ่านหิน เปรียบเทียบกับไม้และพืช (กัญจนา บุญเกียรติ, 2544)

ชนิด	ร้อยละความชื้น (ตามสภาพ)	ร้อยละความชื้น (ผึ่งแห้งในอากาศ)	ร้อยละ แห้งและปราศจากเถ้า		
			คาร์บอน	ไฮโดรเจน	ออกซิเจน
ไม้	30-60	10-15	50	6.0	43
พืช	+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

2.3 พลังงานหมุนเวียนและพลังงานจากชีวมวล

พลังงานหมุนเวียนในโลกนี้ สามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภทหลัก ดังนี้

- (1) พลังงานหมุนเวียนที่มาจากแสงอาทิตย์โดยตรง คือ พลังงานแสงอาทิตย์
- (2) พลังงานหมุนเวียนที่มาจากแสงอาทิตย์โดยอ้อม เช่น พลังงานลม, คลื่น และ ชีวมวล
- (3) พลังงานหมุนเวียนที่ไม่เกี่ยวข้องกับแสงอาทิตย์ เช่น พลังงานใต้พิภพ, น้ำขึ้น-น้ำลง

พลังงานทั้งสามประเภท ต่างมีศักยภาพที่แตกต่างกันออกไปตามลักษณะภูมิประเทศและภูมิอากาศ สำหรับในประเทศไทยนั้น นอกเหนือจากพลังงานจากแสงอาทิตย์แล้ว พลังงานชีวมวลจัดได้ว่าเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจ และที่สำคัญคือ มีศักยภาพสูงมากอีกด้วย

เชื้อเพลิงชีวมวล (biomass)

ชีวมวล (biomass) หมายถึง ผลผลิตจากพืชและสัตว์ (โดยที่ไม่นับการเป็นเชื้อเพลิงฟอสซิลไปแล้ว) ที่เป็นแหล่งพลังงานหมุนเวียนที่สำคัญของโลก และถูกจัดเป็นพลังงานทดแทนพลังงานจากฟอสซิลซึ่งมีอยู่อย่างจำกัดและอาจหมดลงได้ แบ่งชีวมวลตามแหล่งที่มาได้ดังนี้

1. พืชผลทางการเกษตร (agricultural crops) เช่น อ้อย มันสำปะหลัง ข้าวโพด ข้าวฟ่าง ที่เป็นแหล่งของคาร์โบไฮเดรต แป้งและน้ำตาล รวมถึงพืชน้ำมันต่างๆ ที่สามารถนำน้ำมันมาใช้เป็นพลังงานได้
2. เศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร (agricultural residues) เช่น ฟางข้าว เศษลำต้นข้าวโพด ชังข้าวโพด เหง้ามันสำปะหลัง
3. ไม้และเศษไม้ (wood and wood residues) เช่น ไม้โตเร็ว ยูคาลิปตัส กระจิน ผนังเศษไม้จากโรงงานผลิตเครื่องเรือน และโรงงานผลิตเยื่อกระดาษ เป็นต้น
4. ของเหลือจากจากอุตสาหกรรมและชุมชน (waste streams) เช่น กากน้ำตาล และขานอ้อยจากโรงงานน้ำตาล แกลบ ขี้เลื่อย เส้นใยปาล์ม และกะลาปาล์ม

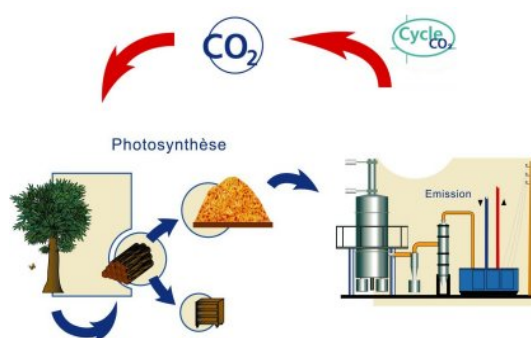
พลังงานชีวมวล (bio-energy) หมายถึง พลังงานที่ได้จากชีวมวลชนิดต่างๆ ดังที่กล่าวแล้วข้างต้น โดยกระบวนการแปรรูปชีวมวลไปเป็นพลังงานรูปแบบต่างๆ มีดังนี้คือ

1. การเผาไหม้โดยตรง (combustion) เมื่อนำชีวมวลมาเผา จะได้รับความร้อนออกมาตามค่าความร้อนของชนิดชีวมวล ความร้อนที่ได้จากการเผาสามารถนำไปใช้ในการผลิตไอน้ำที่มีอุณหภูมิ และความดันสูง ไอน้ำนี้จะถูกนำไปขับเคลื่อนกังหันไอน้ำเพื่อผลิตไฟฟ้าต่อไป ตัวอย่างชีวมวลประเภทนี้คือ เศษวัสดุทางการเกษตร และเศษไม้
2. การผลิตก๊าซ (gasification) เป็นกระบวนการเปลี่ยนเชื้อเพลิงแข็งหรือชีวมวลให้เป็นแก๊สเชื้อเพลิง เรียกว่าแก๊สชีวภาพ (biogas) มีองค์ประกอบของแก๊สมีเทน แก๊สไฮโดรเจน แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ สามารถนำไปใช้สำหรับกังหันแก๊ส (gas turbine)
3. การหมัก (fermentation) เป็นการนำชีวมวลมาหมักด้วยแบคทีเรียในภาวะไร้อากาศ ชีวมวลจะถูกย่อยสลายและแตกตัว เกิดแก๊สชีวภาพ (biogas) ที่มีองค์ประกอบของแก๊สมีเทนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แก๊สมีเทนใช้เป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์สำหรับผลิตไฟฟ้า นอกจากนี้สามารถใช้ขยะอินทรีย์ชุมชน มูลสัตว์ น้ำเสียจากชุมชนหรืออุตสาหกรรมเกษตร เป็นแหล่งวัตถุดิบชีวมวลได้
4. การผลิตเชื้อเพลิงเหลวจากพืช มีกระบวนการที่ใช้ผลิตดังนี้

- กระบวนการทางชีวภาพ ทำการย่อยสลายแป้ง น้ำตาล และเซลลูโลสจากพืชทางการเกษตร เช่น อ้อย มันสำปะหลัง ข้าวโพด ข้าวฟ่างหวาน กากน้ำตาล และเศษลำต้นอ้อย ให้เป็นเอทานอล เพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงเหลวในเครื่องยนต์เบนซิน
- กระบวนการทางฟิสิกส์และเคมี โดยสกัดน้ำมันออกจากพืชน้ำมัน จากนั้นนำน้ำมันที่ได้ไปผ่านกระบวนการทรานส์เอสเตอริฟิเคชัน (trans-esterification) เพื่อผลิตเป็นไบโอดีเซล
- กระบวนการใช้ความร้อนสูง เช่นกระบวนการไพโรไลซิส เมื่อวัสดุทางการเกษตรได้รับความร้อนสูงในสภาพไร้ออกซิเจน จะเกิดการสลายตัวเกิดเป็นเชื้อเพลิงในรูปของเหลวและแก๊สผสมกัน

พลังงานเชื้อเพลิงเหลวจากชีวมวลได้แก่ เอทานอล และไบโอดีเซล ชีวมวลเป็นพลังงานที่มาจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรที่ไม่มีวันหมดไป เพราะวงจรการผลิตชีวมวลคือวงจรของพืชที่มีระยะเวลาสั้น ต่างจากน้ำมันหรือถ่านหินที่ต้องอาศัยการทับถมกันเป็นเวลาหลายล้านปี นอกจากนี้ ชีวมวลสามารถผลิตได้ภายในประเทศ เกษตรกรจะมีรายได้เพิ่มขึ้นจากการจำหน่ายชีวมวลสู่ผู้ใช้ และยังช่วยลดการนำเข้าพลังงานจากต่างประเทศได้อีกด้วย

ข้อดีที่สำคัญทางสิ่งแวดล้อมคือ การใช้ชีวมวลในการผลิตความร้อนหรือไฟฟ้าจะไม่เพิ่มปริมาณสุทธิของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศโลก ในกรณีที่เรามีการผลิตชีวมวลขึ้นมาเพื่อทดแทนชีวมวลที่ได้ใช้ไป เพราะจะทำให้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ถูกหมุนเวียนมาใช้ในชีวมวลที่ผลิตใหม่ เท่ากับปริมาณก๊าซที่ถูกผลิตจากการเผาไหม้ชีวมวลนั้นๆ เนื่องจากพืชต้องหายใจเพื่อเอาแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เข้าไปใช้ในการเจริญเติบโต ในขณะที่การเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิลนั้น จะปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกสู่อากาศอย่างรวดเร็ว อีกทั้งชีวมวลยังมีปริมาณกำมะถันต่ำกว่าเชื้อเพลิงฟอสซิลมากนัก หมายถึง การใช้ชีวมวล จะลดโอกาสในการเกิดปรากฏการณ์เรือนกระจก (greenhouse effect) ซึ่งตรงข้ามกับการใช้น้ำมันในภาคขนส่ง หรือถ่านหินในโรงไฟฟ้า อธิบายดังภาพที่ 2.3



ภาพที่ 2.3 วัฏจักรคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂ cycle)

(ที่มา www.xylowatt.com/resEN.htm วันที่ 16 เมษายน พ.ศ.2551)

แต่เมื่อมีข้อดี ชีวมวลก็ย่อมมีข้อเสีย ดังที่ได้กล่าวมาแล้วว่า ชีวมวลมีการเก็บรักษาและการขนส่งที่ยาก และมีความเสี่ยงสูงในการจัดหาหรือรวบรวมปริมาณชีวมวลที่ต้องการใช้ให้คงที่ตลอดปี เพราะชีวมวลบางประเภทเช่นกากอ้อยมีจำกัดเพียงบางเดือน อีกทั้งชีวมวลทุกประเภท ต่างต้องการพื้นที่ในการเก็บรักษาขนาดใหญ่กว่าเชื้อเพลิงฟอสซิล เช่น หากต้องการปริมาณความร้อนที่เท่ากัน จะต้องใช้แกลบในปริมาณที่มากกว่าน้ำมันเตา เป็นต้น ดังนั้นการพัฒนาระบบวิธีการจัดเก็บและขนส่งจึงสำคัญและจำเป็นอย่างมาก

2.4 การวิเคราะห์และทดสอบเชื้อเพลิงแข็ง (สำเนา จักรใจ, 2547)

การวิเคราะห์และทดสอบเชื้อเพลิงแข็งสามารถทำได้โดยใช้วิธีตามมาตรฐาน ASTM ซึ่งในที่นี้จะขอกล่าวถึงแต่เฉพาะที่เห็นว่าสำคัญๆ เช่น การวิเคราะห์โดยประมาณ (proximate analysis) การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (ultimate analysis) และค่าความร้อน

การวิเคราะห์โดยประมาณ (proximate analysis) ตามมาตรฐาน ASTM D3172 จะระบุปริมาณความชื้น ปริมาณสารระเหยที่เผาไหม้ได้ ปริมาณคาร์บอนคงตัว และ ปริมาณเถ้า ในการทดสอบตามมาตรฐานดังกล่าว ถ่านหินจะถูกบดเป็นผงขนาดเล็กกว่า 250 ไมโครเมตร และนำถ่านหินใส่ภาชนะเปิดประมาณ 1 กรัม ไปอบให้แห้งในเตาอบภายใต้อุณหภูมิประมาณ 104 – 110 องศาเซลเซียส จนได้น้ำหนักคงที่ (1 ชั่วโมง) น้ำหนักส่วนที่หายไปเมื่อเทียบกับน้ำหนักเดิม คือ ปริมาณความชื้น จากนั้นนำถ่านหินที่แห้งแล้วไปถูกทำให้ร้อนในภาชนะปิด (เพื่อป้องกันการเกิดออกซิเดชัน) ภายใต้อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส เพื่อไล่สารระเหยที่เผาไหม้ได้จนกระทั่งน้ำหนักคงที่ (7 นาที) น้ำหนักส่วนที่หายไปคือสารระเหยที่เผาไหม้ได้นั่นเอง จากนั้นนำถ่านหินที่เหลือจากการหาสารระเหยที่เผาไหม้ได้ไปอบในภาชนะเปิดภายใต้อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส เพื่อให้เกิด

การเผาไหม้จนได้น้ำหนักเหลือคงที่ (2 ชั่วโมง) น้ำหนักที่เหลือจะเป็นน้ำหนักของเถ้า ส่วนน้ำหนักที่หายไปคือปริมาณคาร์บอนคงตัวนั่นเอง

การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (ultimate analysis) ตามมาตรฐาน ASTM D3176 เป็นการวิเคราะห์ที่ให้ผลระบุถึงปริมาณธาตุต่างๆ ที่เป็นองค์ประกอบของเชื้อเพลิงนั้นโดยระบุในลักษณะหลักอ้างอิงแห้งและไม่คิดเถ้า ปริมาณคาร์บอนและปริมาณไฮโดรเจนทั้งหมดที่มีอยู่ในเชื้อเพลิงถูกกำหนดโดยการเผาเชื้อเพลิงตัวอย่างในภาชนะปิดที่บรรจุออกซิเจนไว้อย่างเพียงพอแล้ววัดองค์ประกอบของไอเสียเพื่อคำนวณย้อนกลับไปที่หาปริมาณคาร์บอนและปริมาณไฮโดรเจนที่มีอยู่ในเชื้อเพลิงนั้น ไนโตรเจนและกำมะถันจะถูกกำหนดโดยอาศัยวิธีทางเคมี ในขณะที่ออกซิเจนจะถูกระบุโดยค่า 100 ลบด้วยปริมาณของธาตุ C H N และ S การกำหนดค่าความร้อนของเชื้อเพลิง ASTM D2015 ทำได้โดยใช้บอมบ์แคลอริมิเตอร์

2.5 ฟลูอิดไอเซชัน

2.5.1 นิยาม (สมศักดิ์ ดำรงค์เลิศ, 2528)

คำว่า ฟลูอิดไอเซชัน เป็นนิยามที่ใช้อธิบายกระบวนการหรือวิธีการที่ทำให้ของแข็งซึ่งมีรูปร่างลักษณะเป็นเม็ดหรือชิ้น เมื่อสัมผัสกับของไหลแล้วเม็ดของแข็งเหล่านี้จะมีสมบัติคล้ายของไหล ดังนั้น เมื่อนำเม็ดของแข็งกลุ่มหนึ่งมาวางไว้บนตะแกรงในหอตดลองแล้วให้ของไหล(แก๊สของเหลว) ไหลผ่านจากด้านล่างของตะแกรงที่รองรับเม็ดของแข็งเหล่านั้น ของไหลก็จะผ่านชั้นของเม็ดของแข็งและไหลออกทางส่วนบนของหอตดลอง เมื่อเพิ่มความเร็วของไหลขึ้นเรื่อยๆ ในที่สุดจะเห็นเม็ดของแข็งขยับตัวและลอยตัวขึ้นเป็นอิสระไม่เกาะติดกัน ของแข็งที่อยู่ในลักษณะนี้จะมีสมบัติคล้ายของไหล เรียกของแข็งที่ประพฤติตัวในลักษณะนี้ว่า ฟลูอิดไอเซเบด และเรียกปรากฏการณ์ดังกล่าวว่าฟลูอิดไอเซชัน

2.5.2 ประเภทของฟลูอิดไอเซชัน

งานของฟลูอิดไอเซชัน ตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงปัจจุบันพอที่จะสรุปประเภทของงานได้เป็น 2 ประเภทด้วยกัน คือ ฟลูอิดไอเซชันสองสถานะและฟลูอิดไอเซชันสามสถานะ

1. ฟลูอิดไอเซชันสองสถานะ (two-phase fluidization) หมายความว่าในหอตดลองหรือในเบดที่ใช้งานประกอบด้วยสองสถานะ คือ ของแข็งกับของไหล โดยที่ของไหลจะเป็นแก๊สหรือของเหลวอย่างใดอย่างหนึ่ง ดังนั้นฟลูอิดไอเซชัน 2 สถานะจึงแบ่งย่อยได้เป็น แก๊สฟลูอิดไอเซชัน (gas fluidization) และฟลูอิดไอเซชันของเหลว (liquid fluidization)

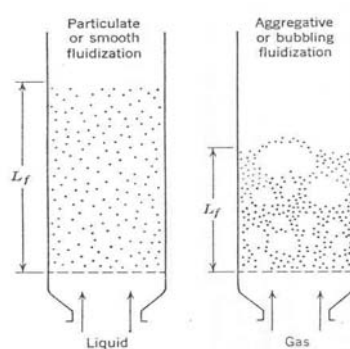
2. ฟลูอิดไดเซชันสามสถานะ (three-phase fluidization) หมายความว่าในหอตดลองหรือในเบดจะประกอบด้วยของสามสถานะอยู่พร้อม คือ ของแข็ง ของเหลว และแก๊ส

สำหรับฟลูอิดไดเซชันสามสถานะนั้นเป็นกระบวนการที่พัฒนาไปจากฟลูอิดไดเซชันสองสถานะ หอตดลองที่เป็นฟอง (bubble column) และหอตดลองที่บรรจุด้วยของแข็ง (packed bed) ดังนั้นจึงมีกลไกที่ซับซ้อนมากกว่า การคำนวณต้องใช้หลักคณิตศาสตร์ขั้นสูง

2.5.3 ลักษณะของฟลูอิดไดซ์เบด

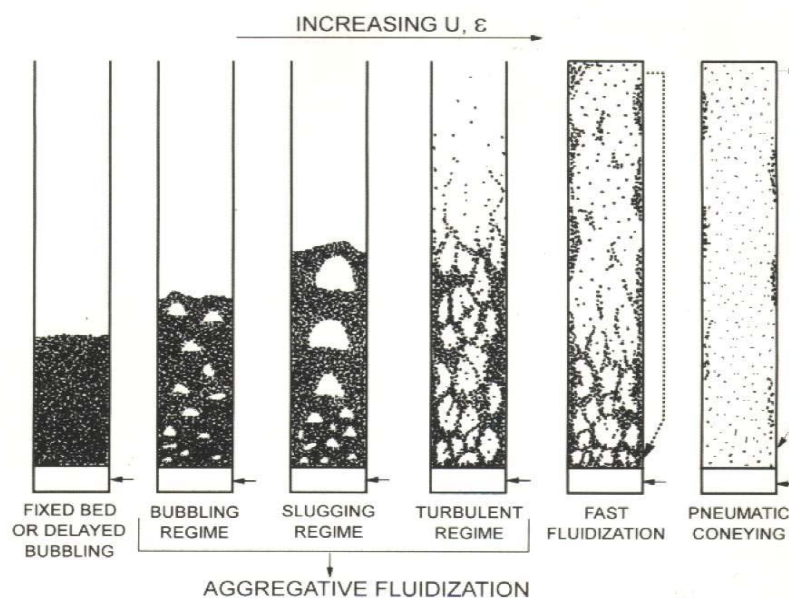
คำว่า เบด (bed) หมายถึง อาณาเขตในหอการทดลองที่มีปริมาณเม็ดของแข็งบรรจุอยู่ไม่ว่าของแข็งนั้นจะอยู่นิ่งหรือเคลื่อนไหวด้วยของไหลในหอตดลอง จะมีระดับตั้งแต่แผ่นโลหะที่ทำเป็นตะแกรงรองรับหรือเป็นตัวกระจายแก๊ส (gas distributor) จนถึงระดับสูงสุดหรือผิวหน้าของเม็ดเบด

ฟลูอิดไดซ์เบดที่เป็นของเหลวจะมีการขยายตัวของเบดอย่างสม่ำเสมอ การลอยตัวและการหมุนรอบตัวเป็นไปอย่างช้าๆ เรียกเบดแบบนี้ว่าเบดสม่ำเสมอหรือเบดที่เป็นเนื้อเดียวกัน สำหรับฟลูอิดไดซ์เบดที่ของไหลเป็นแก๊ส ลักษณะเบดที่เกิดขึ้นจะแตกต่างจากที่เป็นของเหลวมากเพราะว่าเมื่อความเร็วของแก๊สสูงกว่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดซ์เบดแล้ว แก๊สส่วนหนึ่งยังทำหน้าที่ให้เกิดการลอยตัวของเม็ดของแข็งเหมือนเดิม แต่มีอีกส่วนหนึ่งรวมตัวกันแล้วก่อตัวกันเป็นฟองแก๊สขึ้น ฟองแก๊สก็จะแทรกตัวขึ้นมายังบนผิวหน้าของเบดและแตกตัวในที่สุด แต่ขณะที่ฟองแก๊สลอยขึ้นมาจะทำให้เม็ดของแข็งลอยติดตามฟองแก๊สขึ้นมาด้วย เม็ดของแข็งภายในเบดจึงมีการเคลื่อนที่เป็นไปอย่างซุกซม ดังแสดงในภาพที่ 2.4



ภาพที่ 2.4 ลักษณะการเกิดฟลูอิดไดซ์เซชันของเบดที่มีของไหลต่างชนิดกันไหลผ่าน

(สมศักดิ์ ดำรงค์เลิศ, 2528)



ภาพที่ 2.5 รูปแบบการไหลสำหรับฟลูอิดไรซ์เบดแก๊ส - ของแข็ง

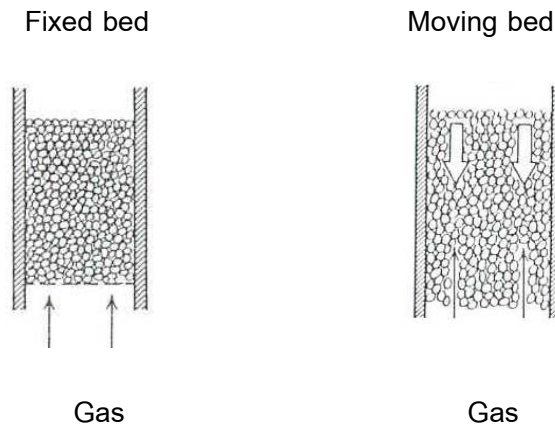
(Grace, et al., 1977)

2.5.4 แก๊สฟลูอิดไรซ์

แก๊สฟลูอิดไรซ์เป็นการเกิดฟลูอิดไรซ์เบดสองสถานะระหว่างของไหลที่เป็นแก๊สกับของแข็งดังที่ได้กล่าวไว้แล้วข้างต้น รูปแบบของฟลูอิดไรซ์เบด (regime of fluidization) สามารถแบ่งได้ดังภาพที่ 2.5 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) ดังแสดงในภาพที่ 2.6



ภาพที่ 2.6 ลักษณะของเบดนิ่งที่ไม่มีและมีการเคลื่อนที่สัมพันธ์กับผนัง

(Kunii, et al., 1969)

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)

เมื่อความเร็วแก๊สที่เคลื่อนที่ผ่านเบดนิ่งเพิ่มขึ้นจนถึงความเร็วค่าหนึ่ง อนุภาคของแข็งจะเริ่มเกิดการเคลื่อนที่ขึ้น ความเร็วที่จุดนี้เรียกว่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดาเซชัน (minimum fluidization velocity, U_{mf}) และเรียกเบด ณ จุดนี้ว่า minimum fluidized bed ซึ่งเป็นจุดแรกที่อนุภาคของแข็งประพฤติตัวคล้ายของไหล สำหรับค่าความดันตกคร่อมเบด ณ จุดนี้มีค่าเท่ากับน้ำหนักของเบด ดังนั้น แรงเสียดทานเนื่องจากการไหล (drag force; F_D) ที่เกิดขึ้น ณ จุดนี้สามารถแสดงได้ดังนี้

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

จัดรูปสมการใหม่จะได้ภาวะต่ำสุดของฟลูอิดาเซชัน (minimum fluidization condition) ดังนี้

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

สำหรับความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไอเซชัน สามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้

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

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

ฟองแก๊สที่เกิดขึ้นจะเคลื่อนที่แทรกขึ้นไป และอาจมีการรวมตัวกันผ่าน emulsion phase โดยที่อาจจะมีของแข็งบางส่วนติดไปด้านบนของฟองแก๊ส และบางส่วนวิ่งตามฟองแก๊สขึ้นมาด้วย จนกระทั่งถึงผิวบนก็จะเคลื่อนที่หลุดออกไปแล้วแตกกระจายอยู่เหนือผิว อนุภาคของแข็งที่ติดอยู่เกือบทั้งหมดจะตกกลับลงมายังเบตใหม่ โดยเรียกปรากฏการณ์ที่ของแข็งเคลื่อนที่ตามฟองแก๊สนี้ว่าการเกิด wake การเกิด wake เกิดจากความดันที่อยู่ใต้ฟองแก๊สน้อยกว่าความดันบริเวณ emulsion phase ทำให้ของแข็งเคลื่อนที่จากบริเวณที่ความดันสูงมาอยู่ในบริเวณที่มีความดันต่ำ

ส่วนบริเวณที่อยู่เหนือเบตขึ้นไป ซึ่งฟองแก๊สจะเกิดการแตกตัวและของแข็งที่ติดไปกับฟองแก๊สจะตกลงมายังเบตอีกครั้งด้วยผลของแรงโน้มถ่วง เรียกว่าบริเวณอิสระ (freeboard) อย่างไรก็ตามอาจจะมีอนุภาคของแข็งบางส่วน (น้อยมาก) ซึ่งมีขนาดเล็กถูกพัดพาเคลื่อนที่ไปกับแก๊สด้วย (ไม่ตกกลับลงมา) ณ ความสูงค่าหนึ่งใน freeboard ซึ่งอนุภาคของแข็งเกือบทั้งหมดตกกลับลงมายังเบตจะเรียกความสูงนี้ว่า ความสูงหลุดลอยส่งผ่าน หรือ transport disengaged height (TDH) เหนือความสูงนี้ไปจะมีของแข็งเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ซึ่งอาจหลุดไปกับแก๊สด้วยอัตราที่สม่ำเสมอ ซึ่งอัตราการเคลื่อนที่ของของแข็งในช่วงนี้จะเรียกว่า elutriation rate

- เบตแบบสลัก (slugging bed)

ดังกล่าวมาแล้วว่าขนาดของฟองแก๊สจะมีขนาดเพิ่มตามความเร็วของแก๊ส และความสูงของเบต ถ้าเบตบรรจุอยู่ในหอทดลองซึ่งมีขนาดเล็กหรือแคบและยาว ฟองแก๊สที่เกิดขึ้นอาจจะมีขนาดใหญ่เกือบเท่ากับเส้นผ่านศูนย์กลางหรือความกว้างของเบต (หอทดลอง) ในกรณีนี้จะสังเกตเห็นฟองแก๊สเคลื่อนที่ผ่านเบตและแยกอนุภาคของแข็งออกเป็นชั้นๆ เรียกว่าเกิดสลัก และที่ความเร็วของแก๊สที่ทำให้ฟองแก๊สเริ่มมีขนาดใหญ่เท่ากับเส้นผ่านศูนย์กลางของเบตหรือหอทดลองก็คือ Minimum slugging velocity (U_{ms}) มีค่าประมาณไว้คือ

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

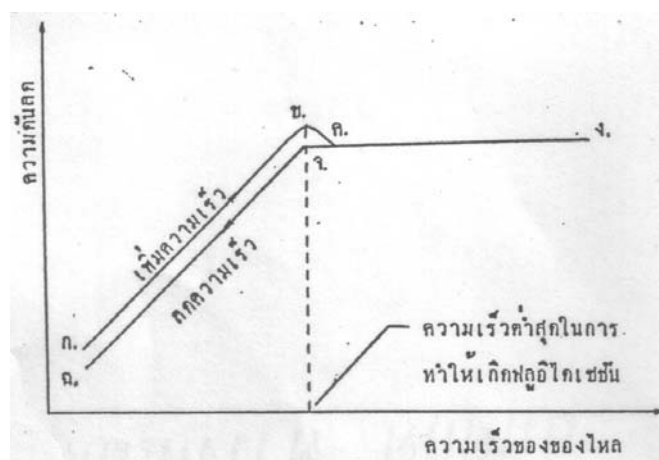
- เบตแบบปั่นป่วน (turbulent bed)

เมื่อความเร็วของแก๊สที่เคลื่อนที่ผ่านเบดแบบฟองแก๊สเพิ่มขึ้น จนมากกว่า U_{mf} เบดจะเกิดการขยายตัว และเมื่อเพิ่มความเร็วขึ้นเรื่อยๆ จะเริ่มสังเกตเห็นรูปแบบการสัมผัสของอนุภาคของแข็งกับแก๊ส ซึ่งมีการขยายตัวเปลี่ยนแปลงไป ฟองแก๊สที่เกิดขึ้นมีการรวมตัวและแตกกระจายออกจากกันอย่างรวดเร็ว (จนดูเหมือนไม่มีฟองแก๊ส) การเคลื่อนไหวภายในเบดเป็นแบบปั่นป่วน ลักษณะภายในเบดจะแบ่งได้เป็น 2 ส่วน คือ

- Dense phase ซึ่งเป็นส่วนที่มีอนุภาคของแข็งอยู่หนาแน่น
- Dilute phase ซึ่งเป็นส่วนที่มีอนุภาคของแข็งอยู่เบาบาง

สำหรับช่วงในการเปลี่ยนแปลงภาวะจากเบดแบบฟองแก๊สไปเป็นเบดแบบปั่นป่วนนั้นไม่ได้เกิดขึ้นแบบทันทีทันใดที่ความเร็วค่าหนึ่ง แต่จะมีช่วงของความเร็วในการเปลี่ยนภาวะทั้งสองนี้ โดยการเปลี่ยนภาวะจากเบดแบบฟองแก๊สไปเป็นเบดแบบปั่นป่วนนั้นจะมีช่วงของการเปลี่ยน โดยเมื่อค่อยๆ เพิ่มความเร็วขึ้นจนถึงค่าๆ หนึ่ง เบดซึ่งเดิมอยู่ในภาวะเบดแบบฟองแก๊สนั้น ที่บริเวณผิวหน้าของเบดจะเริ่มเปลี่ยนไปเป็นเบดแบบปั่นป่วน ซึ่งเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ สามารถแสดงความสัมพันธ์ของความดันตกคร่อมเบดที่เกิดขึ้นในช่วงการเปลี่ยนภาวะได้ดังนี้ ภาพที่ 2.7

จากการทดลองหาค่าความเร็วต่ำสุดในการทำให้เกิดฟลูอิไดเซชันโดยอาศัยหลักการที่ว่า เมื่อเพิ่มความเร็วของของไหลที่ละน้อย ความดันลด (pressure drop) จะค่อยๆ เพิ่มขึ้นพร้อมกับการเพิ่มขึ้นของความเร็วของของไหล จนกระทั่งถึงจุดจุดหนึ่ง ความดันลดจะมีค่าคงที่โดยไม่ขึ้นกับความเร็วของของไหล ดังนั้นในช่วงที่ความดันลดเริ่มคงที่ก็คือช่วงที่เปลี่ยนจากเบดที่อยู่กับที่เป็นฟลูอิไดซ์เบด ถ้าวาดกราฟระหว่างความดันลดและความเร็วของของไหล ก็จะสามารถหาความเร็วต่ำสุดในการทำให้เกิดฟลูอิไดเซชันได้ (พล สาเกตทอง, 2526)



ภาพที่ 2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันลดกับ ความเร็วของของไหล (พล สาเกตทอง, 2526)

ในขณะที่ค่อยๆเพิ่มความเร็วของของไหลนั้นของไหลจะค่อยๆแทรกตัวผ่านไปตามช่องว่างระหว่างอนุภาค ความดันลดที่เกิดขึ้นก็จะค่อยๆเพิ่มขึ้นตามความเร็วของของไหล จากภาพที่ 2.7 จะสังเกตเห็นได้ว่าเส้นกราฟ กขค. ที่แสดงการเพิ่มความเร็วของของไหลจะมีส่วนที่โค้งและลากลงมาตามแนวเส้น ขค. บริเวณดังกล่าวนี้จะต้องใช้แรงดันมากเป็นพิเศษ เพื่อที่จะกระจายหรือแยกอนุภาคให้ออกจากกันและจัดเรียงตัวกันให้เป็นระเบียบ เมื่ออนุภาคจัดเรียงตัวกันเรียบร้อยแล้วความดันลดจึงค่อยๆลดลง และจะคงที่ตลอดไปไม่ขึ้นกับความเร็วของของไหล ความดันลดที่เกิดขึ้นจะเดินตามเส้น คง. หลังจากนั้นถ้าค่อยๆลดความเร็วของของไหล ความดันลดก็จะเดินตามเส้น งคจ. ซึ่งมีค่าคงที่ไม่ขึ้นกับความเร็วของของไหล และถ้ายังคงลดความเร็วของของไหลลงอีกความดันลดที่เกิดขึ้นจะเดินตามเส้น จจ. ซึ่งขนานกับเส้นกราฟขณะเพิ่มความเร็ว กข. แต่ความดันลดมีค่าต่ำกว่า ทั้งนี้เป็นเพราะเบดเปลี่ยนจากฟลูอิดไธซ์เบด (เส้น งคจ.) มาเป็นเบดที่อยู่กับที่นั้น (จจ.) อนุภาคได้จัดเรียงตัวเป็นระเบียบอยู่ก่อนแล้ว จึงไม่ต้องสูญเสียพลังงานในการจัดช่องว่างให้เป็นระเบียบอีก และเมื่อได้มีการทดลองซ้ำในเบดเดิม เส้นกราฟที่แสดงการเพิ่มความเร็วใหม่นี้จะเดินตามเส้นลดความเร็วในการทดลองครั้งแรก จากกราฟจะเห็นได้ว่าที่จุด จ. ความดันลดจะเริ่มคงที่ไม่่ว่าจะเพิ่มความเร็วของของไหลเป็นเท่าไรก็ตาม ซึ่งเป็นข้อแตกต่างจากเบดที่อยู่กับที่ความเร็วของของไหลที่จุด จ. จึงเป็นความเร็วต่ำสุดในการทำให้เกิดฟลูอิดไธซ์ชัน

ความเร็วสุดท้าย (terminal velocity) คือ ความเร็วตกอิสระของเม็ดของแข็งในของไหล ซึ่งความเร็วนี้จะมีค่าเท่ากับความเร็วของไหลที่ทำให้เม็ดของแข็งเคลื่อนตัวหลุดออกจากหอตกลงไปโดยแบ่งออกเป็น 2 กรณี ตามลักษณะของอนุภาคของแข็ง (Kunii, 1969)

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

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

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

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

- fast fluidized bed

เมื่อความเร็วของอากาศมากขึ้นจนไม่สามารถระบุพื้นผิวด้านบนของเบดได้ จนกระทั่งอนุภาคของแข็งเคลื่อนที่ออกจากด้านบนหอตกลงและต้องเติมอนุภาคของแข็งเข้ามาแทนที่โดยการใส่เข้ามาใกล้ๆ ส่วนล่างหอตกลง อนุภาคของแข็งจะรวมกลุ่มและเคลื่อนที่ลงบริเวณใกล้ๆผนังของหอตกลง ขณะที่แก๊สและอนุภาคของแข็งที่กระจายตัวอยู่ด้านบนจะเคลื่อนที่ขึ้น ในขณะที่อัตราการป้อนของแข็งคงที่ที่ความเร็วแก๊สเพิ่มขึ้นจะทำให้อนุภาคของแข็งในหอตกลงเจือจางมากขึ้น ที่ภาวะนี้อัตราส่วนของปริมาตรของช่องว่างต่อปริมาตรของเบดมีค่าอยู่ระหว่าง 0.8 ถึง 0.98

ในภาวะที่เป็น fast fluidization ถ้านำเอาของแข็งที่หลุดออกจากเบดหรือหอตกลงกลับเข้ามาในระบบใหม่ตรงบริเวณส่วนล่างของหอตกลง ระบบแบบนี้จะเรียกว่าฟลูอิไดซ์เบดแบบหมุนเวียน (circulating fluidized bed, CFB)

หมายเหตุ ฟลูอิไดซ์ชันที่ผ่านมามีทั้งหมด ยกเว้น fast fluidized bed อาจจะเรียกรวมกันว่า captive fluidized bed เพราะว่า อนุภาคของแข็งทั้งหมดซึ่งสัมผัสกับแก๊สจะถูกจำกัดบริเวณอยู่

ภายในระยะความสูงหนึ่งจากตัวกระจายแก๊สเท่านั้น หรือในบางกรณีที่มีการพัดพาเกิดขึ้นก็มีอนุภาคของแข็งเพียงเล็กน้อยเท่านั้นที่ถูกพัดพาไป

- dilute-phase transport หรือ pneumatic conveying

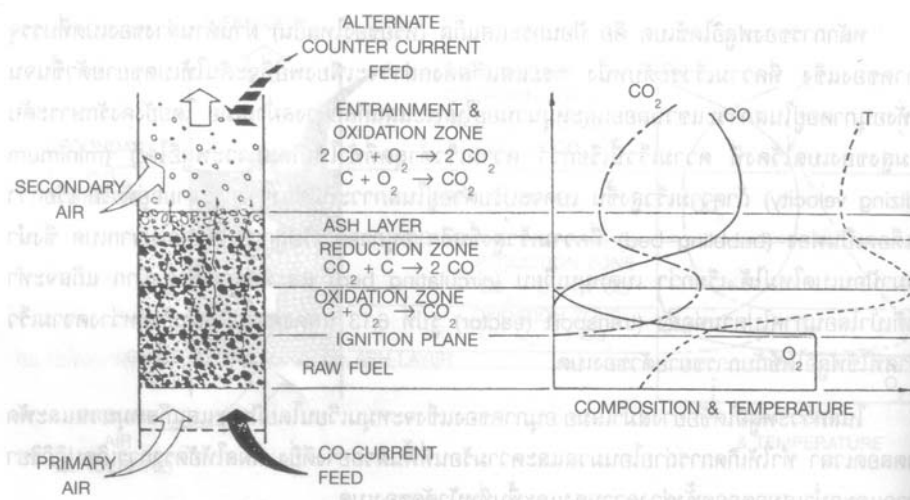
เป็นการขนถ่ายอนุภาคของแข็งด้วยแก๊ส ไม่มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของของแข็งในแนวแกนยกเว้นในส่วนล่างที่อนุภาคของแข็งมีความเร่ง และอนุภาคของแข็งบางส่วนอาจหยุดนิ่งอยู่ใกล้ๆ ผนังของท่อทดลอง ความเร็วแก๊สที่ทำให้เบตในท่อเปลี่ยนจากเบตเฉื่อยจางเป็นเบตหนาแน่นเรียกว่า ความเร็วในการเกิดโซคกิ้ง (choking velocity, U_{ch}) ค่าความเร็วนี้สามารถหาได้จากการทำการทดลอง โดยการปรับลดความเร็วแก๊สในระบบที่เป็นเฟสเฉื่อยจางและมีปริมาณอนุภาคของแข็งในระบบคงที่ลงจนกระทั่งเบตเกิดการยุบตัวลงอย่างรวดเร็วเปลี่ยนจากเฟสเฉื่อยจางเป็นเฟสหนาแน่น ซึ่งความเร็วแก๊สที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงดังกล่าว คือความเร็วในการเกิดโซคกิ้งนั่นเอง 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

2.6 ระบบการเผาไหม้ฟลูอิดไคด์เบด

ระบบการเผาไหม้ฟลูอิดไคด์เบดเป็นเทคโนโลยีที่ได้รับการพัฒนามาค่อนข้างนานมากแล้ว โดยมีวัตถุประสงค์หลักคือใช้เผาไหม้ถ่านหินเกรดต่ำในเตาเผาหรือในหม้อไอน้ำขนาดใหญ่มาก นัก ระบบการเผาไหม้แบบนี้จะใช้ถ่านหินที่บดแล้วมาเผาไหม้ในชั้นฟลูอิดไคด์เบดของวัสดุที่ไม่เกิดปฏิกิริยาหรือวัสดุเฉื่อย เช่น ททราย เป็นต้น ในชั้นฟลูอิดไคด์เบดนี้จะมีถ่านและหินปูนหรือโดโลไมต์ เพื่อใช้ในการกำจัดกำมะถันในถ่านหินขณะเผาไหม้ นอกจากนี้ ในชั้นฟลูอิดไคด์เบดนี้จะมีท่อน้ำฝังอยู่เพื่อผลิตไอน้ำ ขณะเดียวกันก็เป็นการช่วยลดอุณหภูมิของชั้นฟลูอิดไคด์เบดให้ต่ำลงอยู่ในช่วง 770 – 900 องศาเซลเซียส เพื่อป้องกันไม่ให้ถ่านอ่อนตัวจนจับเป็นก้อนและเพื่อป้องกันการแยกสลายด้วยความร้อนของ CaSO_4 ซึ่งก็คือกำมะถันที่ถูกกำจัดออกจากการเผาไหม้ (สำเริง จักรใจ, 2547)



ภาพที่ 2.8 การเผาไหม้ของถ่านหินในฟลูอิไดซ์เบด

(กัญญา บุญยเกียรติ, 2544)

ถ่านหินที่ป้อนเข้ามาใหม่จะหนักกว่าและจมอยู่ด้านล่างของเบด เกิดการไฟโรไลต์และจุดติดไฟในบริเวณถัดขึ้นมา และเกิดการเผาไหม้ในโซนออกซิไดซ์ ถ่านชาร์มีขนาดเล็กลงและมีความพรุนมากขึ้นจึงลอยขึ้นมาในระดับกลาง แล้วถูกรีดิวซ์ในโซนรีดิวซ์กลายเป็นเถ้าซึ่งเบาที่สุด จึงถูกให้หมุนวนอยู่ในระดับบน ขณะที่เถ้าบางส่วนพร้อมถ่านชาร์ขนาดเล็กถูกเป่าออกจากเบดขึ้นมาอยู่ในช่องว่างเหนือเบด (ฟรีบอร์ด) บางส่วนทำปฏิกิริยากับอากาศส่วนที่สอง บางส่วนออกไปกับฟลูแก๊ส (กัญญา บุญยเกียรติ, 2544)

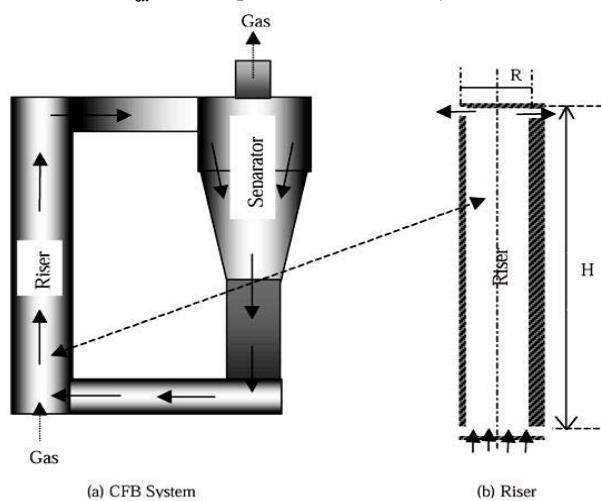
ด้วยเหตุผลดังกล่าวข้างต้น ระบบการเผาไหม้แบบนี้จึงมีข้อดีคือ สามารถทำงานแบบต่อเนื่องได้ ใช้เชื้อเพลิงได้หลายชนิด ทั้งแบบเชื้อเพลิงชนิดเดียวหรือแบบผสม อนุภาคของเบดและอากาศผสมกันอย่างปั่นป่วนคลุกเคล้ากันอย่างดี ทำให้เกิดการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ การถ่ายโอนความร้อนจากรอบนอกถ่านหินและการแพร่ของออกซิเจนสู่ผิวถ่านหินดีตลอดจนการถ่ายโอนความร้อนสู่ผิวท่อน้ำมีประสิทธิภาพที่ดีเพราะชั้นขอบเขตโดยรอบของผิวถ่านหินหรือเถ้าและผิวท่อน้ำถูกทำลายอยู่ตลอดเวลาอันเนื่องจากการเคลื่อนที่ของชั้นฟลูอิไดซ์เบด ทำให้ใช้ถ่านหินที่มีเกรดกว้างได้ ที่ความเร็วของอากาศสูงๆ การทำงานของฟลูอิไดซ์เบดจะเสียพลังงานน้อยกว่าเบดที่อยู่กับที่มากเพราะแรงเสียดทานและความดันลดมีค่าน้อยกว่า การควบคุมแก๊สมลพิษ SO_2 ก็ทำได้ง่ายเพราะสามารถใช้หินปูนหรือโดโลไมต์ใส่ลงในชั้นฟลูอิไดซ์เบดโดยไม่ต้องติดตั้งระบบกำจัดแก๊สไอเสีย และการปลดปล่อย NO_x ก็ต่ำเนื่องจากชั้นฟลูอิไดซ์เบดจะมีอุณหภูมิการเผาไหม้ค่อนข้างต่ำ (สำเริง จักรใจ, 2547)

ส่วนข้อเสียคือ ใช้เวลาเริ่มจุดเตาหรือหยุดเดินเตานาน การกักถ้อนของเครื่องปฏิกรณ์ และท่อน้ำค่อนข้างสูงเนื่องจากการขัดสีของฟลูอิโดซ์เบด เกิดการสูญเสียอนุภาคคาร์บอนขนาดเล็กที่ยังไม่เผาไหม้ไปในรูปของเถ้าลอยซึ่งจะถูกหอบลอยขึ้นไปพร้อมกับไอเสียในปริมาณที่สูง อนุภาคคาร์บอนขนาดเล็กเหล่านี้ เป็นผลมาจากการลดลงของขนาดถ่านคาร์บอนในชั้นฟลูอิโดซ์เบดซึ่งมีสาเหตุมาจากหลายประการเช่น จากการแตกตัวปฏิกิริยาของคาร์บอน (เช่น เกิดจากความเค้นทางความร้อนในโครงสร้างที่พรุนของคาร์บอนและความเค้นจากความดันที่เพิ่มขึ้นของสารระเหยระหว่างเกิดกระบวนการแยกสลายด้วยความร้อนในโครงสร้างที่พรุนของคาร์บอน เป็นต้น) จากการเผาไหม้ของคาร์บอนเอง จากการแตกตัวทุติยภูมิของถ่านคาร์บอนอื่นเนื่องมาจากการชนในชั้นฟลูอิโดซ์เบดและการขัดถูของถ่านคาร์บอน เนื่องจากว่าอุณหภูมิการเผาไหม้ของระบบฟลูอิโดซ์เบดค่อนข้างต่ำอยู่แล้ว ทำให้การเผาไหม้โดยรวมของถ่านคาร์บอนถูกควบคุมโดยอัตราการเผาไหม้ที่ผิวและในรูพรุนของถ่านคาร์บอนเป็นหลัก ยิ่งใช้ถ่านหินที่มีความว่องไวต่ำด้วยแล้ว อนุภาคของถ่านคาร์บอนขนาดเล็กๆ เหล่านี้จะยิ่งไม่มีเวลาเพียงพอเพื่อเกิดการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ ขณะที่ถูกหอบให้ลอยออกไปจากบริเวณเหนือชั้นฟลูอิโดซ์เบดของเตาแม้ว่าจะมีเวลาอยู่ในเตานานถึง 3 วินาทีที่อุณหภูมิ 830 องศาเซลเซียส ก็ตาม นอกจากนี้ยังมีข้อเสียอีกประการหนึ่งคือ เครื่องปฏิกรณ์ต้องมีความสูงพอสมควร ไม่สามารถขยายขนาดของเครื่องปฏิกรณ์ได้ง่าย ระบบการเผาไหม้ใหญ่ๆ ต้องมีการป้อนถ่านหินหลายจุด

2.7 ระบบการเผาไหม้ฟลูอิโดซ์เบดแบบหมุนเวียน (ลำเริง จักรใจ, 2547)

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 พื้นที่หน้าตัดของเบดจะเล็กกว่า

สามารถขยายขนาดของเครื่องได้ง่ายกว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดกำมะถันยังดีกว่าที่อัตราการใช้หินปูนที่เท่ากันอีกด้วย เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิโดซ์เบดแบบหมุนเวียนแสดงดังภาพที่ 2.9

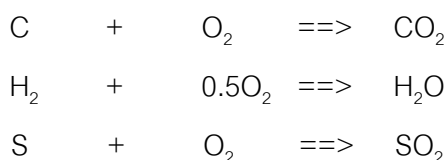


ภาพที่ 2.9 เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิโดซ์เบดแบบหมุนเวียน

(ที่มาจาก <http://www.scielo.br/scielo.php> วันที่ 16 เมษายน พ.ศ.2551)

2.8 กลไกการเผาไหม้ (กัญจนา บุญเกียรติ, 2544)

จากปฏิกิริยาการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ เราสามารถคำนวณมวล หรือปริมาณของตัวทำปฏิกิริยา และของผลผลิตที่ได้ โดยใช้มวลสารสัมพันธ์ของปฏิกิริยา

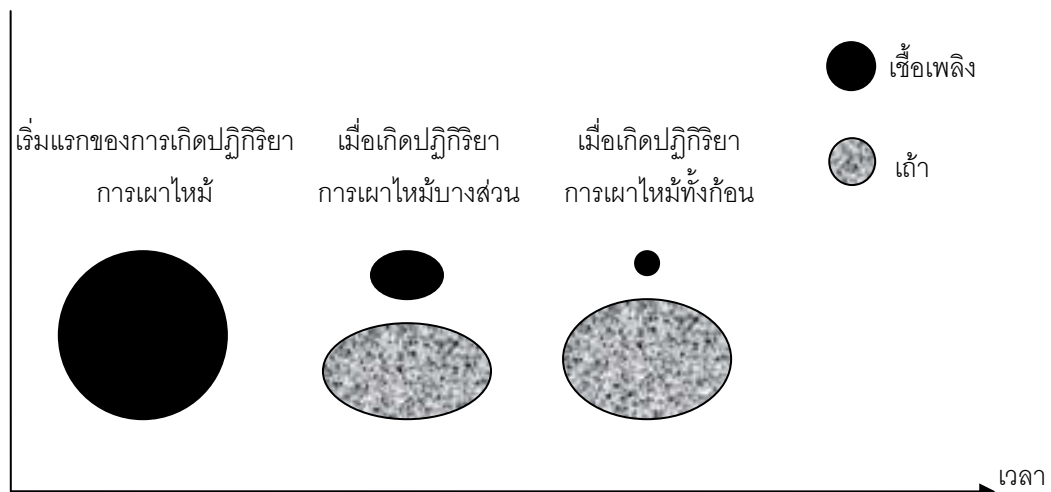


จากการวิเคราะห์โดยแยกธาตุของ เชื้อเพลิงแข็ง หรือ เชื้อเพลิงเหลว หรือข้อมูลการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบของ แก๊สเชื้อเพลิง สามารถนำมาคำนวณปริมาณออกซิเจน หรือปริมาณอากาศที่ทำปฏิกิริยาพอดีกับเชื้อเพลิง (อากาศที่ต้องการตามทฤษฎี) ได้ และนำมาคำนวณปริมาณผลผลิตแต่ละชนิดที่ได้จากปฏิกิริยาได้เช่นเดียวกัน มวลสารสัมพันธ์ดังกล่าวเป็นความสัมพันธ์โดยโมล ดังนั้นต้องแปลงหน่วยหรือมวลจากข้อมูลการวิเคราะห์เชื้อเพลิงให้อยู่ในรูปหน่วยของ กิโลกรัมโมลหรือหน่วยของโมลในระบบหน่วยอื่นก่อน จึงจะคำนวณปริมาณอากาศที่ต้องการตามทฤษฎีได้ ซึ่งเป็นจุดเริ่มต้นที่สำคัญที่สุดในการเผาไหม้

ในปฏิบัติการเผาไหม้ในอุตสาหกรรม หรือในการใช้งานทั่วไป ต้องการการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ด้วยเหตุผลหลายประการคือ ต้องการประหยัดเชื้อเพลิง ต้องการความร้อนสูงสุดจากการ

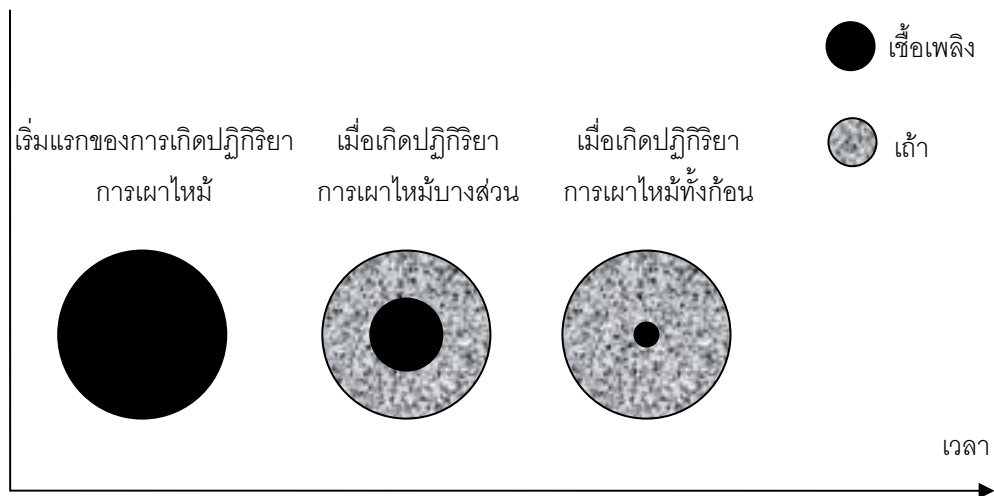
เผาไหม้ และไม่ต้องการมลพิษที่เกิดจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ เช่น คาร์บอนมอนอกไซด์ และไฮโดรคาร์บอน เป็นต้น จึงต้องใช้ภาวะที่เอื้ออำนวยต่อการทำปฏิกิริยาการเผาไหม้ให้สมบูรณ์มากที่สุด ภาวะอันหนึ่งคือ การใช้ปริมาณอากาศเกินพอ เพื่อให้โมเลกุลของเชื้อเพลิงหรือโมเลกุลที่มาจากการแตกตัวของเชื้อเพลิงมีโอกาสพบกับโมเลกุลของออกซิเจนเพิ่มมากขึ้น จากมวลสารสัมพันธ์ เมื่อทราบปริมาณอากาศที่ต้องการตามทฤษฎี ก็จะสามารถคำนวณปริมาณอากาศเกินพอได้ทันที

การเผาไหม้ในฟลูอิดเบดแบบหมุนเวียนเกิดขึ้นโดย เชื้อเพลิงจะถูกพุงให้ลอยตัวด้วยแก๊สหรืออากาศที่เข้าสู่เตาโดยผ่านแผ่นกระจายอากาศ จนเชื้อเพลิงจะมีสภาพคล้ายของไหล โดยภายในเตาเผาจะมีเบดที่ร้อน เช่น ททราย หรือเถ้าที่เกิดจากการเผาไหม้ เพื่อช่วยทำให้เกิดการผสมผสานของเชื้อเพลิงกับออกซิเจนได้ดีและช่วยให้เถ้าที่เกาะอยู่กับเชื้อเพลิงนั้นหลุด ผิวของเชื้อเพลิงจึงสามารถสัมผัสกับออกซิเจนได้โดยตรงตลอดเวลาทำให้เกิดการเผาไหม้ที่ดี ดังภาพที่ 2.10 ซึ่งจะต่างจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งในเตาเผาทั่วไป ซึ่งจะเกิดการเผาไหม้ที่ผิวของเชื้อเพลิงก่อน จากนั้นบริเวณของการเกิดปฏิกิริยาก็จะค่อย ๆ เคลื่อนเข้าไปโดยผ่านส่วนที่เหลือที่เกิดจากการเผาไหม้คือ เถ้า ซึ่งจะเป็นสารเฉื่อยทำให้เชื้อเพลิงมีโอกาสสัมผัสกับออกซิเจนลดลง ดังนั้นเมื่อเวลาผ่านไปอัตราการเผาไหม้จะค่อย ๆ ลดลงจนเผาไหม้หมดทั้งก้อน ดังภาพที่ 2.11 (ปิยะพันธ์ จะกอ, 2548)



ภาพที่ 2.10 ปฏิกิริยาการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงแข็งในเตาฟลูอิดเบด

(ปิยะพันธ์ จะกอ, 2548)



ภาพที่ 2.11 ปฏิกิริยาการเผาไหม้โดยทั่วไปของเชื้อเพลิงแข็งในเตาชนิดอื่น
(ปิยะพันธ์ จะกอ, 2548)

โดยออกซิเจนที่ใช้ในการเผาไหม้สารระเหยและก้อนของเชื้อเพลิงแข็งมาจากแก๊สที่อยู่ในฟองแก๊สถ่ายเทไปยัง particulate phase (ทราย) แล้วแพร่ผ่าน particulate phase ไปที่ผิวหน้าของเชื้อเพลิงแข็ง ส่วนอนุภาคของเชื้อเพลิงแข็งที่ยังเผาไหม้ไม่หมดเมื่อหลุดออกจากเตาเผา จะถูกดักจับโดยไซโคลน ผ่านไปยัง downcomer แล้วกลับเข้าไปเผาไหม้ในเตาเผาอีกครั้งจนเผาไหม้หมด

2.9 การควบคุมมลพิษ (กัญจนา บุญเกียรติ, 2544)

ผลผลิตจากการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ของเชื้อเพลิงที่มี ไฮโดรคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลักคือ 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 ใน

ตัวอย่างแรก การเกิดหมอกปนควันถูกเร่งโดยสภาพภูมิประเทศ ทั้งภูเขาและทะเล ที่ช่วยขังมลพิษ และอากาศที่เย็นกว่าไว้ได้ชั้นอากาศที่อุ่นกว่า ทำให้เกิดผลกระทบจากหมอกปนควันอย่างรุนแรง ในช่วงกลางวัน มีผลต่อสุขภาพมนุษย์และพืช ในตัวอย่างหลัง เกิดผลร้ายแรงเมื่ออุณหภูมิลดต่ำลง ทำลายสุขภาพมนุษย์และสิ่งก่อสร้าง เนื่องจากหมอกปนควันที่กักตัวของกรดซัลฟูริก

แม้แต่แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งไม่ใช่แก๊สมลพิษ ก็มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมได้ เช่นเดียวกัน ผิวโลกแผ่รังสีอินฟราเรดในช่วง 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 ฟลูออแก๊สไม่มีอนุภาคของเถ้า จึงผ่านฟลูออแก๊สไปปล่อยควันออกสู่อากาศได้โดยตรง มลพิษและผลกระทบมีน้อย ในกรณีของเชื้อเพลิงเหลวก็เช่นเดียวกัน ปริมาณเถ้าในน้ำมันเตามีน้อยเมื่อเทียบกับเชื้อเพลิงแข็ง จึงไม่จำเป็นต้องติดตั้งอุปกรณ์ดักฝุ่นเท่าไรนัก สิ่งที่ต้องคำนึงถึงคือการควบคุมการเผาไหม้ให้สมบูรณ์เพื่อไม่ให้แก๊สที่ออกจากปล่องควันมีความเข้มข้นของควันสูงเกินไป ในกรณีของเชื้อเพลิงแข็ง โดยเฉพาะอย่างยิ่งถ่านหิน มลพิษและผลกระทบจะเกิดมากที่สุด ทั้งในรูปของแก๊สกลุ่มซัลเฟอร์ออกไซด์ แก๊สกลุ่มไนโตรเจนออกไซด์ อนุภาคแขวนลอย การกักต้อนที่เกิดขึ้นในระบบเผาไหม้ และในระบบกำจัดมลพิษ

ในบรรดาแหล่งกำเนิดมลพิษต่างๆ แหล่งกำเนิดมลพิษจากการเผาไหม้เป็นแหล่งกำเนิดที่สำคัญที่สุด เพราะมีสารมลพิษหลายชนิดถูกปลดปล่อยออกมาในปริมาณมาก และกระจายอยู่ทุกบริเวณทั่วโลก โดยเฉพาะในประเทศอุตสาหกรรมและในเมืองใหญ่ สารมลพิษส่วนหนึ่งสามารถควบคุมให้ปลดปล่อยออกมาในระดับต่ำได้ด้วยการควบคุมการเผาไหม้ให้สมบูรณ์ และใช้อากาศเกินพอเพียง แต่มลพิษส่วนหนึ่งมาจากการเผาไหม้ที่อุณหภูมิสูง (สูงกว่า 1,750 องศาเซลเซียส) มีผลให้เกิดอะตอม อนุมูลอิสระ และไอออน ที่ว่องไวต่อการทำปฏิกิริยาแม้เมื่อออกจากห้องเผาไหม้แล้วก็ตาม การปลดปล่อยสารมลพิษจึงเป็นผลสืบเนื่องตามมา โดยค่ามาตรฐานของการปล่อยแก๊สพิษจากแหล่งกำเนิดอยู่กับที่ในประเทศไทย แสดงดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 มาตรฐานของการปล่อยแก๊สพิษในประเทศไทย (ประกาศกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม ราชกิจจานุเบกษา 18 พฤษภาคม 2549)

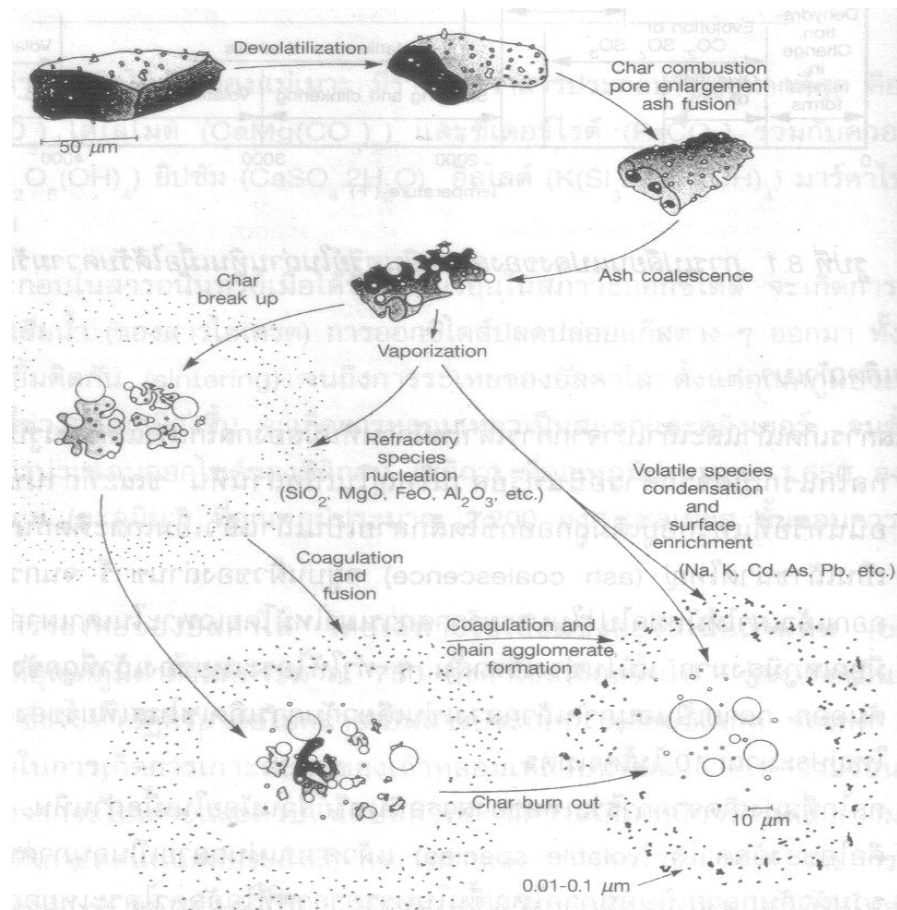
ชนิดของอากาศเสีย	แหล่งที่มาของอากาศเสีย	ค่าปริมาณของอากาศเสียที่ปล่อยทิ้งจาก	
		กระบวนการผลิตที่ไม่มี การเผาไหม้เชื้อเพลิง	กระบวนการผลิตที่มี การเผาไหม้เชื้อเพลิง
1. ฝุ่นละออง (total suspended particulate) (มีดลิกกรัมต่อลูก บาศก์เมตร)	1.1 หม้อไอน้ำ หรือแหล่งกำเนิด ความร้อนที่ใช้เชื้อเพลิง ดังนี้		
	(1) 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

กระบวนการผลิตที่ไม่มีการเผาไหม้เชื้อเพลิง ให้คำนวณผลที่ความดัน 1 บรรยากาศ คุณณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ที่ภาวะแห้ง (dry basis) โดยมีปริมาตรอากาศเสียที่ออกซิเจน (ร้อยละของ O_2) ณ ภาวะจริงในขณะตรวจวัด

กระบวนการผลิตที่มีการเผาไหม้เชื้อเพลิง ให้คำนวณผลที่ความดัน 1 บรรยากาศ คุณณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ที่ภาวะแห้ง (dry basis) โดยมีปริมาตรอากาศเสียที่ออกซิเจน (ร้อยละของ O_2) ร้อยละ 7

2.9.1 การกำจัดอนุภาค (กัญญา บุญเกียรติ, 2544)

กลไกการเกิดอนุภาคเถ้าถ่านหินขณะเผาไหม้ แสดงได้ดังภาพที่ 2.12



ภาพที่ 2.12 กลไกการเกิดอนุภาคเถ้าถ่านหินขณะเผาไหม้
(กัญญา บุญเกียรติ, 2544)

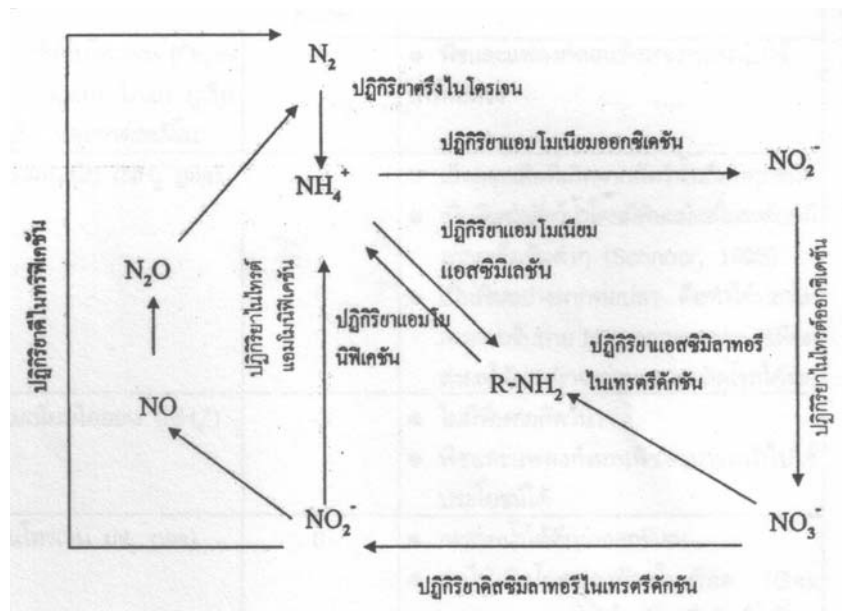
หลักการสำคัญในการกำจัดอนุภาค คือ

1. การแยกด้วยแรงโน้มถ่วงของโลก (gravity)

2. การแยกด้วยแรงเฉื่อย (inertia)
3. การใช้ไฟฟ้าสถิตย์ (electrostatic)
4. การกรอง (filtration)
5. การล้าง (scrubbling)

2.9.2 วัฏจักรไนโตรเจน (สุภัณฑิต นิมรัตน์, 2549)

ในธรรมชาติ มีการหมุนเวียนธาตุไนโตรเจนในรูปแบบต่างๆอย่างสลับซับซ้อน โดยเรียกว่า วัฏจักรของไนโตรเจน ซึ่งเป็นวัฏจักรที่เกิดจากกลไกทางฟิสิกส์ เคมี และชีวภาพ โดยประกอบไปด้วยจุลินทรีย์หลากหลายชนิด โดยเฉพาะอย่างยิ่งคือแบคทีเรีย ดังสรุปในภาพที่ 2.13 คือมีการเอาธาตุไนโตรเจนอิสระจากบรรยากาศด้วยแบคทีเรียกลุ่มที่สามารถตรึงแก๊สไนโตรเจนให้เป็นแอมโมเนียมไอออน จากนั้นแอมโมเนียมไอออนจะถูกเปลี่ยนให้เป็นแอมโมเนียมไนเตรต และถูกเปลี่ยนต่อให้เป็นไนไตรต์ ด้วยจุลินทรีย์กลุ่มไนไตรไฟเออร์ แต่ไนไตรต์บางส่วนจะถูกเปลี่ยนให้เป็นแก๊สไนโตรเจนกลับสู่บรรยากาศโดยแบคทีเรียกลุ่มดีไนไตรไฟเออร์ นอกจากนั้นไนไตรต์บางส่วนจะถูกดูดซึมโดยพืชเพื่อนำไปใช้ในการเจริญเติบโต จากนั้นพืชบางส่วนจะถูกสัตว์และมนุษย์กินเป็นอาหาร เมื่อพืช สัตว์ และมนุษย์ตายลง จะถูกจุลินทรีย์พวกย่อยสลาย ย่อยสลายให้เป็นแอมโมเนียมไอออนต่อไป



ภาพที่ 2.13 ปฏิกิริยาต่างๆ ที่เกิดขึ้นในวัฏจักรไนโตรเจน โดย $R-NH_2$ คือสารอินทรีย์ (สุภัณฑิต นิมรัตน์, 2549)

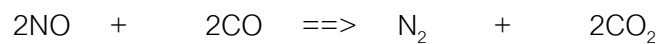
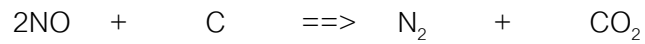
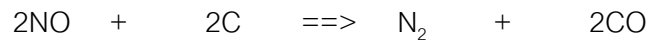
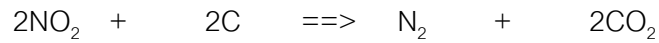
2.9.2.1 แก๊สไนโตรเจนออกไซด์ (NO_x) (ปิยะพันธ์ จะกอ, 2548)

แก๊สไนโตรเจนออกไซด์เป็นแก๊สไม่มีสี ไม่มีกลิ่น ละลายน้ำได้บ้างเล็กน้อย สามารถเกิดขึ้นได้ตามธรรมชาติได้แก่ ฟ้าผ่า ฟ้าแลบ ภูเขาไฟระเบิด หรือจากการกระทำของมนุษย์เช่น การเผาเชื้อเพลิง อุตสาหกรรมกรดไนตริก ชุบโลหะ กรดกำมะถัน และวัตถุระเบิด เป็นต้น แก๊สไนโตรเจนออกไซด์ที่สำคัญคือ แก๊สไนตริกออกไซด์ (NO) และแก๊สไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO₂) โดยแก๊สไนโตรเจนไดออกไซด์จะพบได้น้อยมากในฟลูแก๊สและไอเสียจากยานพาหนะ โดยจะเกิดขึ้นในบริเวณเปลวไฟแต่จะถูกรีดิวซ์กลับไปเป็นไนตริกออกไซด์ในบริเวณหลังเปลวไฟ แก๊สเหล่านี้สามารถทำปฏิกิริยากับแสง (photochemical reaction) ในบรรยากาศก่อให้เกิดหมอกที่เรียกว่า smog เป็นสารมลพิษทางไฟโตเคมี เป็นสารประกอบที่มีพิษ (noxious compound) เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตทั้งพืชและสัตว์ อีกทั้งแก๊สไนตริกออกไซด์จะถูกออกซิไดซ์เมื่อพบกับออกซิเจนและโอโซนในบรรยากาศกลายเป็นแก๊สไนโตรเจนไดออกไซด์ ซึ่งเป็นสาเหตุของฝนกรดเนื่องจากละลายน้ำแล้วจะได้กรดไนตริก (มีส่วนให้เกิดฝนกรดถึง 30 เปอร์เซ็นต์) นอกจากนี้ แก๊สไนตริกออกไซด์ยังสามารถรวมกับฮีโมโกลบินในเม็ดเลือดแดงได้เช่นเดียวกับแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ แก๊สเหล่านี้จึงจัดเป็นสารที่ก่อให้เกิดมลพิษในอากาศ ซึ่งจะต้องควบคุมปริมาณไม่ให้เกินพิกัดที่เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต

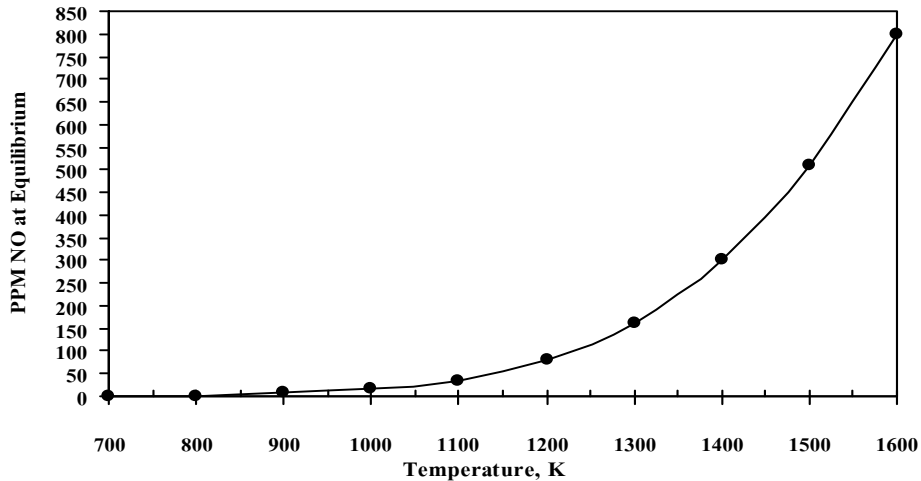
แก๊สไนโตรเจนออกไซด์สามารถเกิดได้จากการเผาไหม้ถ่านหินและน้ำมัน ซึ่งพบว่าจะมีแก๊สไนตริกออกไซด์มากกว่าแก๊สไนโตรเจนไดออกไซด์ โดยปริมาณของแก๊สไนโตรเจนออกไซด์จะขึ้นกับ

1. ชนิดของเชื้อเพลิงที่ใช้ ขึ้นกับปริมาณของไนโตรเจนที่เป็นองค์ประกอบอยู่ในถ่านหินหรือเชื้อเพลิงที่นำมาใช้ในการเผาไหม้
2. อุณหภูมิของการเผาไหม้ ยิ่งอุณหภูมิในการเผาไหม้สูงจะทำให้เกิดแก๊สไนโตรเจนออกไซด์ได้ดี โดยเฉพาะที่อุณหภูมิของการเผาไหม้สูงกว่า 1,173 องศาเซลเซียส
3. ปริมาณอากาศมากเกินไป ส่งผลให้มีปริมาณของไนโตรเจนในอากาศมากขึ้นและก่อให้เกิดแก๊สไนโตรเจนออกไซด์มากตามไปด้วย
4. การเกิดแก๊สไนโตรเจนออกไซด์จะลดลงเมื่อเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาของแก๊สในช่วงอุณหภูมิสูงสุดลดลง
5. ถ้านำฟลูแก๊สมาทำให้เย็นลงช้าๆ แก๊สไนโตรเจนออกไซด์ที่เกิดจะกลายเป็นแก๊สไนโตรเจน และแก๊สออกซิเจน

6. ถ่านชาร์และแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์สามารถลดปริมาณแก๊สไนโตรเจนออกไซด์ลงโดยเปลี่ยนเป็นแก๊สไนโตรเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์หรือแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ได้ โดยมีความร้อนเข้าร่วมด้วย ดังปฏิกิริยา

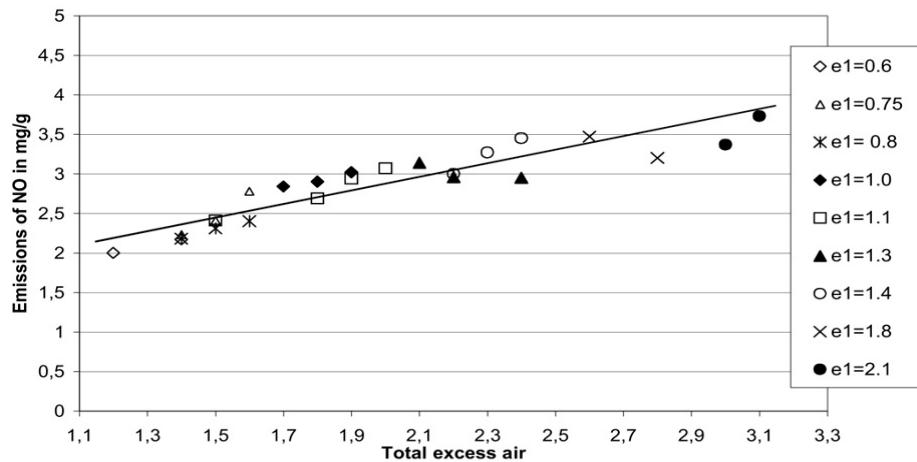


7. การเผาไหม้เป็นขั้นๆ (staged combustion) โดยเผาไหม้ช่วงแรกที่ภาวะอากาศน้อยๆ หรือภาวะเชื้อเพลิงเกินพอไนโตรเจนออกไซด์จะถูกปล่อยออกมาน้อย เนื่องจากอากาศน้อยกว่าเชื้อเพลิง อุณหภูมิต่ำ ออกซิเจนน้อย นอกจากนี้โมเลกุลของไนโตรเจนออกไซด์ที่เกิดขึ้นสามารถทำปฏิกิริยาไปเป็นแก๊สไนโตรเจนซึ่งมีความเสถียรสูง หลังจากนั้นจึงป้อนอากาศเข้าไปเพิ่มในขั้นถัดไป เรียกภาวะเช่นนี้ว่า ภาวะอากาศเกินพอ เพื่อทำให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ต่อไป (ไบรด์ปราน สิริธีรศาสตร์, 2539)

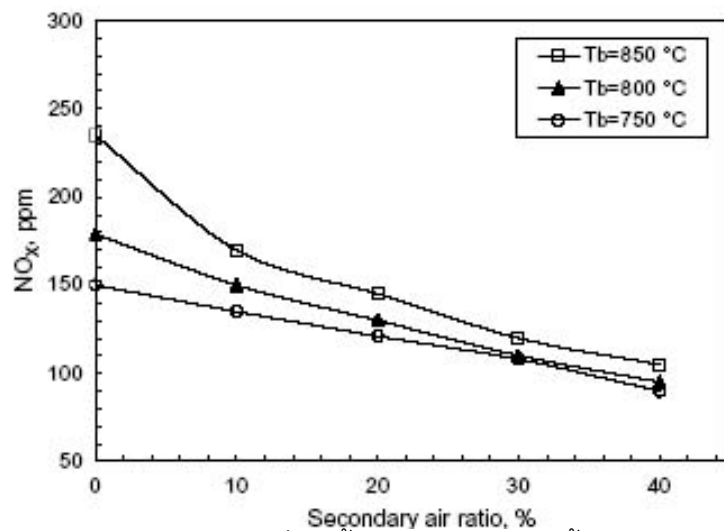


ภาพที่ 2.14 การเกิดไนโตรเจนออกไซด์ที่อุณหภูมิต่างๆ

(ปิยะพันธ์ จะกอ, 2548)



ภาพที่ 2.15 ปริมาณการปล่อยแก๊สไนตริกออกไซด์โดยเปรียบเทียบกับปริมาณอากาศเกินพอ (Rogmuae, et al., 2008)

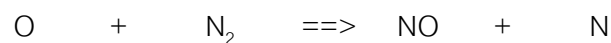


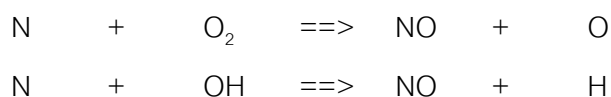
ภาพที่ 2.16 ปริมาณไนโตรเจนออกไซด์ที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงโดยมีการเผาไหม้เป็น 2 ชั้น (Staged combustion) ที่ปริมาณอากาศรวมเท่ากัน และเปรียบเทียบที่อุณหภูมิในการเผาไหม้ต่างๆ กัน (Okasha, 2007)

โดยทั่วไปสามารถแบ่งการเกิดแก๊สไนโตรเจนออกไซด์ได้ 4 เส้นทาง (สำเริง จักรใจ, 2547)

1. Thermal NO_x (Zeldovich-NO)

เป็นการเกิดแก๊สไนโตรเจนออกไซด์จากปฏิกิริยาออกซิเดชันของแก๊สไนโตรเจนในบรรยากาศที่อุณหภูมิสูง (ประมาณ 1,700 องศาเซลเซียส)

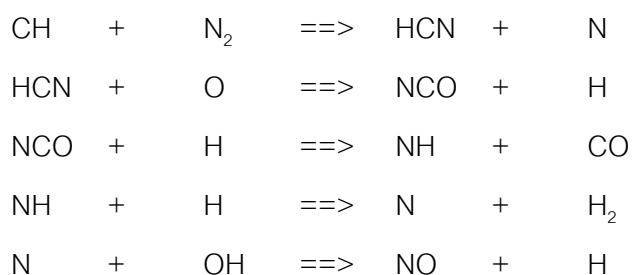




สาเหตุที่ได้ชื่อว่า thermal NO เพราะว่า ไนโตรเจนออกไซด์ที่เกิดขึ้นนี้ต้องใช้พลังงานก่อกัมมันต์ที่สูงมาก ทั้งนี้เพราะต้องเอาชนะแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมของ N_2 ในรูปของไตรพันธะเพื่อเกิดปฏิกิริยา และจะเกิดได้อย่างเร็วมากก็ต่อเมื่ออุณหภูมิต้องสูงมากเท่านั้น ดังนั้นการที่จะลดปริมาณ thermal NO ได้นั้นมีเพียง 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

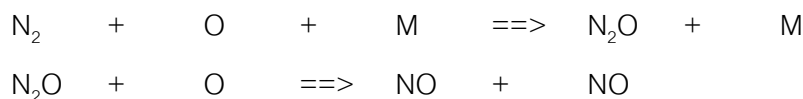


อย่างไรก็ตาม การประเมินเพื่อหาปริมาณ prompt NO ภายใต้ภาวะความเข้าใจในการเกิดปฏิกิริยาในปัจจุบันยังไม่ดีนักเพราะยังมีข้อมูลเกี่ยวกับอัตราการเกิดปฏิกิริยาของ prompt NO ค่อนข้างน้อย ทั้งนี้ prompt NO จะเกิดขึ้นที่ภาวะอากาศน้อยๆ (อัตราส่วนอากาศที่ใช้จริงต่ออากาศทางทฤษฎี < 1) ที่อุณหภูมิต่ำกว่าการเกิด thermal 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 เป็นตัวช่วยเร่งปฏิกิริยาให้

เกิด N_2O จากนั้น N_2O จะทำปฏิกิริยากับอะตอมของออกซิเจนต่อไปจนเกิด NO ตามสมการข้างล่างนี้

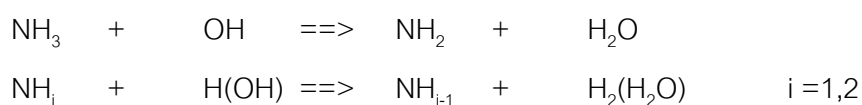


ยิ่งความดันจากการเผาไหม้มีค่าสูงมากเท่าไร NO ที่เกิดขึ้นผ่านไนโตรสออกไซด์ ก็ยิ่งเกิดขึ้นเท่านั้น เนื่องจากต้องการพลังงานกระตุ้นที่ต่ำ และอุณหภูมิการเผาไหม้ที่ต่ำก็ไม่ได้มีผลเหมือนกับ thermal NO ดังนั้น NO ที่เกิดขึ้นผ่านไนโตรสออกไซด์ จึงเกิดได้ดีที่ระบบการเผาไหม้ถูกเจือจางด้วยอากาศมากๆ

4. NO ที่เกิดจากไนโตรเจนในเชื้อเพลิง (Fuel NO)

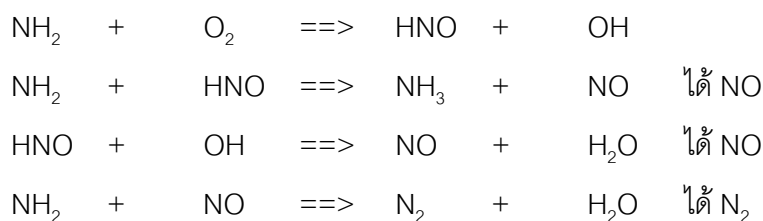
จะเกิดในขณะที่เชื้อเพลิงเกิดการเผาไหม้ มีธาตุไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบอยู่ในเชื้อเพลิงจะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในบรรยากาศ โดยทั่วไประบบการเผาไหม้แบบฟลูอิดไตซ์เบดจะเกิด NO ที่เกิดจากไนโตรเจนในเชื้อเพลิงมากกว่า (ประมาณร้อยละ 90) กลไกการเปลี่ยนแปลงของสารประกอบในถ่านหินจะเกิดการสลายตัวเป็นสองส่วนดังกล่าวคือ สารระเหยและถ่านชาร์ ในแต่ละส่วนจะมีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบ เมื่อเผาไหม้ที่อุณหภูมิสูงไนโตรเจนจะเกิดปฏิกิริยาเปลี่ยนรูปเป็นสารประกอบที่อยู่ในรูป แอมโมเนีย (NH_3) และ กรดไฮโดรไซยานิก (HCN) ก่อนจะทำปฏิกิริยาต่อไปจนเกิด NO ดังสมการข้างล่าง

กรณีแอมโมเนีย

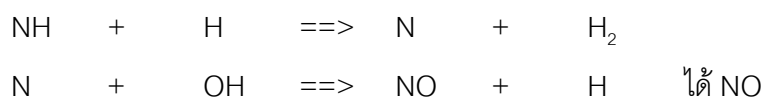


เมื่อ NH_{i-1} คือ amine radical อาจเป็น NH_2 , NH หรือ N ก็ได้ ซึ่งจะถูกออกซิไดซ์ต่อไปจนเกิด NO หรือ N_2

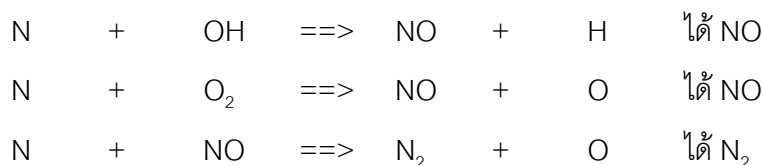
กรณี NH_2



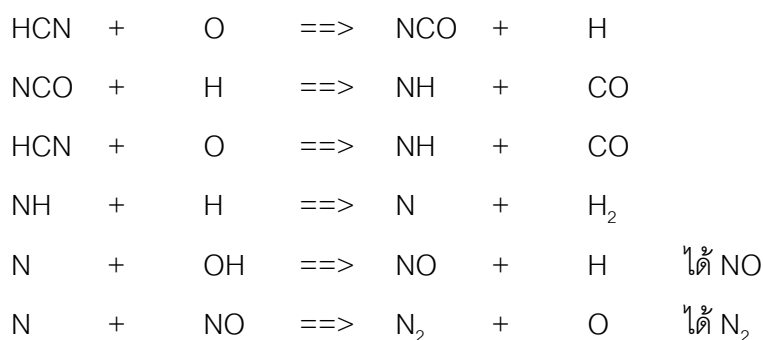
กรณี NH (คล้ายปฏิกิริยาการเกิด prompt NO)



กรณี N (คล้ายปฏิกิริยาการเกิด thermal NO)



กรณีของกรดไฮโดรไซยานิก (คล้ายปฏิกิริยาการเกิด prompt NO)



จะพบว่า fuel NO มีกลไกการเกิด NO ที่ผสมผสานระหว่าง thermal NO และ prompt NO โดยจะเกิดขึ้นได้ดีในกรณีการเผาไหม้ที่เจือจางด้วยออกซิเจนในปริมาณที่สูง ดังนั้นจึงต้องควบคุมอัตราส่วนผสมระหว่างเชื้อเพลิงต่อออกซิเจนให้ดี โดยเฉพาะอย่างยิ่งการใช้เชื้อเพลิงที่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบ

2.9.2.2 แก๊สไนตรัสออกไซด์ (N₂O)

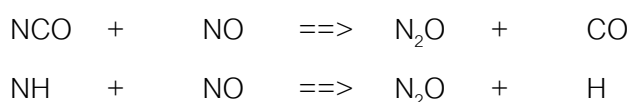
(ที่มา [http://en.wikipedia.org/wiki/N₂O](http://en.wikipedia.org/wiki/N2O) วันที่ 16 เมษายน พ.ศ.2551)

แก๊สไนตรัสออกไซด์ ๓ อะตอมไม่มีสี แต่มีกลิ่นและรสชาติหอมหวานชวนเพลิดเพลิน หากสูดดมในปริมาณมากจะรู้สึกเคลิบเคลิ้ม มีความสุข จึงมีชื่อเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า แก๊สหัวเราะ เป็นแก๊สไม่ติดไฟแต่ช่วยให้ไฟติดเนื่องจากมีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบ ในปัจจุบันแก๊สไนตรัสออกไซด์ได้ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในวงการแพทย์ ทำหน้าที่เป็นยาสลบ ยาชา หรือยาระงับปวด เป็นต้น อีกทั้งยังมีการนำไปใช้ในการปรับแต่งเครื่องยนต์ที่มีความเร็วรอบสูงๆ เพื่อเพิ่มกำลังของเครื่องยนต์ในฐานะเป็นตัวออกซิไดเซอร์ หรือเรียกว่า NOS (nitrous oxide systems)

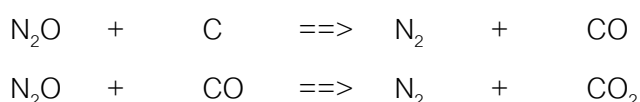
ออกไซด์ของไนโตรเจนมีอยู่หลายชนิด แต่ไนตรัสออกไซด์จะมีความแตกต่างจากออกไซด์ของไนโตรเจนชนิดอื่นๆเป็นอย่างมากตรงที่ เป็นแก๊สเรือนกระจกชนิดรุนแรง ซึ่ง

หากกล่าวถึงแก๊สเรือนกระจกคงจะหนีไม่พ้นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ เนื่องจากมีการปล่อยออกสู่บรรยากาศในปริมาณมากมายมหาศาล

ไนตรัสออกไซด์ส่วนใหญ่เกิดขึ้นจากการย่อยสารดิน สารอินทรีย์ในน้ำ และมหาสมุทรโดยแบคทีเรีย ซึ่งในภาวะธรรมชาตินั้นมีความสมดุลอยู่แล้ว แต่ในปัจจุบันมีการทำเกษตรกรรมกันอย่างแพร่หลาย มีการพรวนดิน ใส่ปุ๋ยไนโตรเจน อีกทั้งยังมีการทำฟาร์มปศุสัตว์ ซึ่งทำให้เกิดการย่อยสลายโดยแบคทีเรียในปริมาณมากขึ้นจึงเกิดการสะสมของแก๊สไนตรัสออกไซด์ในบรรยากาศ โดยคิดเป็นปริมาณถึง 65 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ในกระบวนการอุตสาหกรรม อาทิเช่น อุตสาหกรรมไนลอน อุตสาหกรรมเคมีและพลาสติก บางชนิด อุตสาหกรรมที่มีกรดไนตริกเกี่ยวข้อง และการเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิล ทำให้เกิดแก๊สไนตรัสออกไซด์สู่สิ่งแวดล้อม 20 เปอร์เซ็นต์ โดยปฏิกิริยาการเกิดไนตรัสออกไซด์จากกระบวนการเผาไหม้เป็นดังนี้



และปฏิกิริยาเปลี่ยนแก๊สไนตรัสออกไซด์เป็นแก๊สไนโตรเจนมีดังนี้



2.10 เครื่องกำเนิดไอน้ำ (Steam Production)

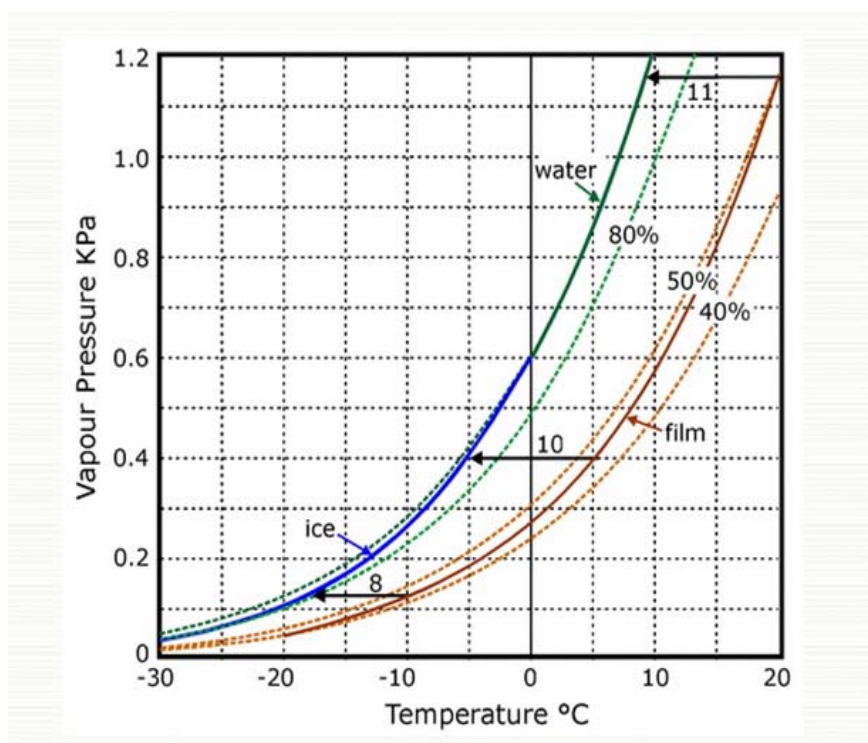
2.10.1 บอยเลอร์ (Boiler) หรือ หม้อไอน้ำ หมายถึง เครื่องกำเนิดไอน้ำชนิดภาชนะปิด ทำด้วยเหล็กกล้าหรือวัสดุอื่นๆ ที่มีคุณสมบัติคล้ายกัน ซึ่งได้รับการออกแบบและสร้างอย่างแข็งแรงถูกต้องตามหลักเกณฑ์ทางวิศวกรรม ภายในภาชนะบรรจุไอน้ำและไอน้ำ

2.10.2 ระบบไอน้ำ (Steam System)

การเกิดขึ้นของไอน้ำ (Raising Steam) การเปลี่ยนสถานะของน้ำให้กลายเป็นไอน้ำ อุณหภูมิของน้ำจะต้องเพิ่มขึ้นจนถึงจุดเดือดของน้ำ (อุณหภูมิไอน้ำอิ่มตัว = Saturation Temperature) โดยใช้ความร้อนสัมผัส (Sensible Heat) เมื่อเพิ่มความร้อนต่อไปอุณหภูมิจะคงที่ ในช่วงนี้คือความร้อนแฝง (Latent Heat) น้ำจะเกิดการเปลี่ยนสถานะกลายเป็นไอน้ำ การ

ต้มน้ำที่ความดันบรรยากาศ ความร้อนสัมผัส 419 กิโลจูล/กิโลกรัม จะใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิของน้ำจากจุดเยือกแข็ง (Freezing Point = 0 องศาเซลเซียส) จนถึงจุดเดือดของน้ำ (100 องศาเซลเซียส) ถ้าต้องการเปลี่ยนน้ำ 1 กิโลกรัม ให้เป็นไอน้ำต้องใช้ความร้อนประมาณ 2,258 กิโลจูล

เมื่อความดันเพิ่มขึ้นน้ำจะไม่เดือดที่ 100 องศาเซลเซียส แต่จะเดือดที่อุณหภูมิที่สูงกว่านี้ ดังภาพที่ 2.14 ปริมาณความร้อนทั้งหมดของไอน้ำเพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนกับความดัน สำหรับคุณสมบัติของจุดเดือดที่อุณหภูมิสูง เมื่อความดันเพิ่มขึ้นก็ต้องสัมพันธ์กับกระบวนการผลิตด้วย ค่าความสัมพันธ์ต่าง ๆ ของไอน้ำแต่ละความดันที่ได้จากการทดลอง คือตารางไอน้ำ (ภาคผนวก จ)



ภาพที่ 2.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันไอกับจุดเดือดของน้ำ

(ที่มา: www.promma.ac.th)

2.10.3 ประเภทของบอยเลอร์ (หม้อไอน้ำ)

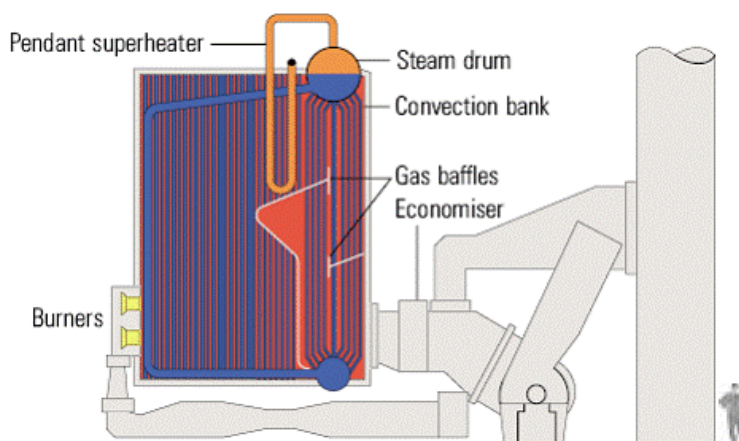
การเลือกชนิดของหม้อไอน้ำ อุปกรณ์ทั่วไปของหม้อไอน้ำทุกประเภทประกอบไปด้วยห้องเผาไหม้ (Furnace Chamber) ซึ่งความร้อนจะถูกถ่ายเทโดยตรงจากเปลวไฟโดยการแผ่รังสีความร้อน (Radiation) ส่วนแก๊สไอเสีย (Flue Gas) จะถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อน (Convection) ไปยังส่วนต่าง ๆ ความร้อน 2 ใน 3 ส่วนจะเกิดการถ่ายเทความร้อนขึ้นในห้องเผาไหม้ และส่วนที่เหลือเกิดขึ้นจากการพาความร้อนของแก๊สไอเสีย

ประเภทของหม้อไอน้ำที่สำคัญมีอยู่ด้วยกัน 2 ประเภท คือ ประเภทท่อน้ำ (Water Tube Type) ซึ่งจะมีน้ำอยู่ในท่อและที่ใช้แก๊สในการเผาไหม้ให้เกิดความร้อนอยู่รอบ ๆ ท่อเหล่านั้น และอีกประเภทก็คือแบบเปลือกหรือท่อไฟ (Shell or Fire Tube) ซึ่งตรงกันข้ามกับประเภทแรก หม้อไอน้ำรุ่นต่อมาทั้งหมดได้มีการพัฒนาสืบเนื่องมาจากหม้อไอน้ำทั้ง 2 ชนิดนี้ แต่ออกแบบให้แตกต่างกันออกไปเพื่อให้มีขนาดที่ต่างกันออกไป หรือข้อจำกัดในการใช้งานที่สำคัญมากขึ้น หรือความต้องการในการปฏิบัติการของหม้อไอน้ำแตกต่างกัน หากจะแบ่งรูปแบบของหม้อไอน้ำจะสามารถแบ่งได้ ดังนี้

2.10.3.1 หม้อไอน้ำแบบท่อน้ำ (Water Tube Boilers)

หม้อไอน้ำแบบท่อน้ำ (Water Tube Boilers) เป็นหม้อไอน้ำที่มีท่อจำนวนมากเชื่อมต่อกันระหว่างหม้อไอน้ำ (Steam Drum) กับ หม้อน้ำล่าง (Mud Drum) โดยใช้หลักการปล่อยน้ำวิ่งอยู่ในท่อ แล้วปล่อยเปลวไฟให้สัมผัสกับท่อ เพื่อถ่ายเทความร้อนไปสู่ น้ำให้กลายเป็นไอ

หม้อไอน้ำแบบท่อน้ำจะผลิตไอน้ำโดยมีค่าพลังงานเริ่มต้นที่ประมาณ 8.5 เมกกะวัตต์ และสามารถเพิ่มกำลังผลิตของหม้อไอน้ำได้ถึงขนาดที่โรงไฟฟ้าใช้ ซึ่งมีอัตราการผลิต 2,000 เมกกะวัตต์หรือมากกว่า ภาพตัวอย่างของหม้อไอน้ำแบบท่อน้ำแสดงได้ดังภาพที่ 2.18



ภาพที่ 2.18 ภาพตัวอย่างของหม้อไอน้ำแบบท่อน้ำ

(ที่มา: www.pttplc.com)

หม้อไอน้ำแบบท่อน้ำในสมัยก่อนจะใช้การหมุนเวียนของน้ำที่เกิดขึ้นจาก เทอร์มอลไซฟอน (Thermal Siphons) คือ น้ำร้อนในหม้อไอน้ำที่มีความหนาแน่นน้อยกว่าลอยตัวสูงขึ้น ทำให้น้ำที่

เย็นที่มีความหนาแน่นมากกว่าที่อยู่ด้านล่างไหลเข้าไปแทนที่ จะปรากฏการณ์ดังกล่าวทำให้การออกแบบหม้อไอน้ำจะใช้ท่อที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางขนาดเล็ก เพื่อให้สามารถสูบน้ำที่ป้อนเข้าไปให้เกิดการหมุนเวียนของน้ำในหม้อไอน้ำ

ข้อดีของหม้อไอน้ำแบบท่อน้ำ คือ กำลังการผลิตอยู่ในช่วง 10-20 เมกกะวัตต์ สามารถที่จะรับการเปลี่ยนแปลงภาระงานอย่างรวดเร็ว ทำให้ได้เปรียบหม้อไอน้ำแบบท่อไฟ หม้อไอน้ำแบบท่อน้ำจะมีน้ำบรรจุภายในเป็นส่วนน้อย ดังนั้นความล่าช้าในการให้ความร้อนที่มีต่อระบบก็จะน้อยกว่าในหม้อไอน้ำแบบท่อไฟ

ข้อเสียของหม้อไอน้ำแบบท่อน้ำ คือ บำรุงรักษายากกว่า เนื่องจากหม้อไอน้ำมีท่อจำนวนมากเรียงซ้อนกันเป็นแถวหลายแถว ถ้าท่อหนึ่งท่อใดท่อหนึ่งของหม้อไอน้ำเกิดชำรุดและเป็นท่อที่อยู่แถวด้านในการจะเข้าไปเปลี่ยนหรือซ่อมจะต้องตัดท่อน้ำแถวนอกๆ ที่บังออกเสียก่อนจึงจะเข้าไปซ่อมท่อที่อยู่แถวในได้ ซึ่งเป็นการซ่อมแซมที่ไม่คุ้มค่า

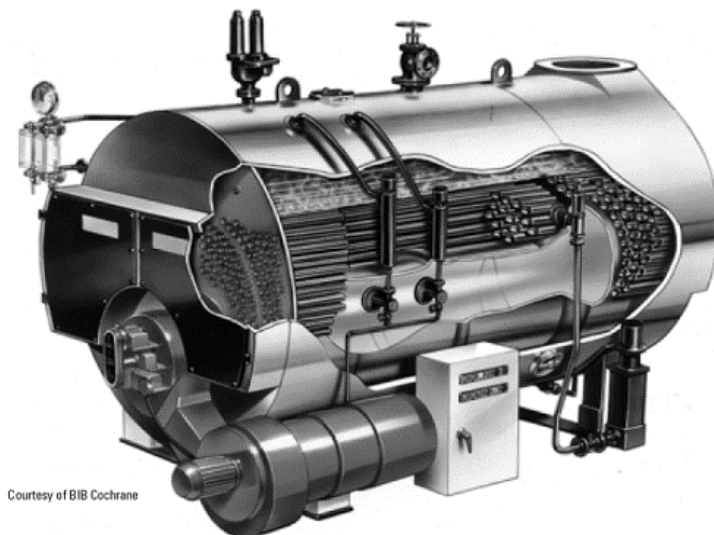
หม้อไอน้ำแบบท่อน้ำสามารถเผาไหม้โดยใช้เชื้อเพลิงเผาไหม้แบบเก่าได้ หรือสามารถทำงานได้เหมือนกับหม้อไอน้ำรุ่นใหม่ที่ใช้เชื้อเพลิงหลาย ๆ ชนิดได้

2.10.3.2 หม้อไอน้ำแบบท่อไฟ (Fire tube Shell Boilers)

หม้อไอน้ำแบบท่อไฟ (Fire tube Shell Boilers) เริ่มต้นการทำงานอย่างง่าย ๆ โดยเพียงแค่ป้อนเชื้อเพลิงใส่ไว้ได้ภาชนะแบบปิด (Closed Vessel) ก่อปิดด้วยอิฐอยู่รอบ ๆ เท่านั้น จะมีการถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้น ชั้นตอนต่อไป ใส่เชื้อเพลิงเข้าไปในห้องเผาไหม้ของหม้อไอน้ำก็จะทำให้เกิดแก๊สไอเสียร้อนบริเวณใต้รอบถังน้ำ ซึ่งเป็นพื้นฐานของหม้อไอน้ำแบบ "คอร์นิช (Cornish)" และแบบ "แลงคาสเซอร์ (Lan-Cashire)" ต่อมามีการพัฒนานำเอาแก๊สไอเสียร้อนผ่านเข้ามาในท่อเพื่อต้มน้ำในหม้อไอน้ำหรือที่เรียกว่า ท่อไฟ (Fire Tubes) หรือท่อควัน (Smoke Tubes)

หม้อไอน้ำแบบท่อไฟเหล่านี้แบ่งประเภทตามจำนวนครั้งของการไหลวกกลับของแก๊สร้อนที่ผ่านท่อ ซึ่งก็คือจำนวนครั้งของแก๊สร้อนที่ผ่านไปยังหม้อไอน้ำ ห้องเผาไหม้จะเป็นตัวส่งผ่านความร้อนเป็นที่แรก หลังจากนั้นก็จะผ่านไปที่ท่อไฟหนึ่งชุด สองชุด หรือสามชุด ส่วนใหญ่หม้อไอน้ำแบบท่อไฟทั่ว ๆ ไปจะมีแก๊สร้อนวิ่งผ่านในตัวเครื่อง 3 ครั้ง ดังภาพที่ 2.19 จะแสดงถึงห้องเผาไหม้หลัก ชุดท่อไฟ 2 ชุด และปล่องทางออกของแก๊สไอเสียที่อยู่ด้านหลังของหม้อไอน้ำ ประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำถึงท่อไฟแบบเก่าที่มีการผ่าน 2 ครั้ง จะมีประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนต่ำ มีท่อไฟเล็กไม่มากนัก และมีพื้นที่การถ่ายเทความร้อนน้อย แต่ในแก๊สไอเสียยังมี

ความร้อนเหลืออยู่อีกจำนวนหนึ่ง และถ้าต้องการนำความร้อนกลับมาใช้ใหม่ก็ต้องติดตั้งอุปกรณ์ชุดอุ่นน้ำป้อนของหม้อไอน้ำ



Courtesy of BIB Cochrane

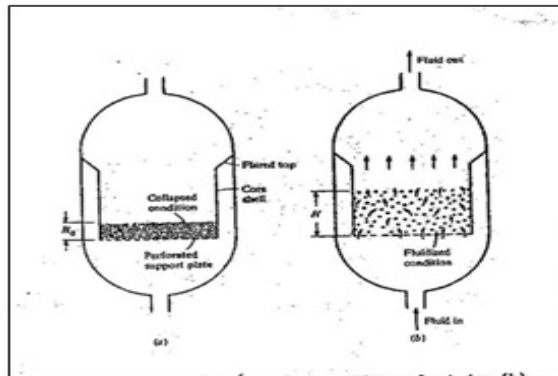
ภาพที่ 2.19 ภาพตัวอย่างของหม้อไอน้ำแบบถังท่อไฟ

(ที่มา: www.ptplc.com)

หม้อไอน้ำที่มีแก๊สร้อนวิ่งผ่านในตัวเครื่อง 4 ครั้ง จะมีประสิทธิภาพของการให้ความร้อนสูงที่สุด แต่อาจมีข้อจำกัดในเรื่องประเภทของเชื้อเพลิงและเงื่อนไขในการปฏิบัติงาน ตัวอย่างเช่น เมื่อไรก็ตามที่หม้อไอน้ำที่ใช้เชื้อเพลิงเป็นน้ำมันเตาหรือถ่านหิน เมื่อเครื่องหรือลิง การถ่ายเทความร้อนก็จะดี แต่อุณหภูมิของแก๊สไอเสียที่ทางออกจะต่ำเกินไป เป็นสาเหตุทำให้เกิดการกัดกร่อนของแก๊สไอเสียที่ปล่องไฟ

2.10.3.3 หม้อไอน้ำชนิด Circulating Fluidized Bed (CFB)

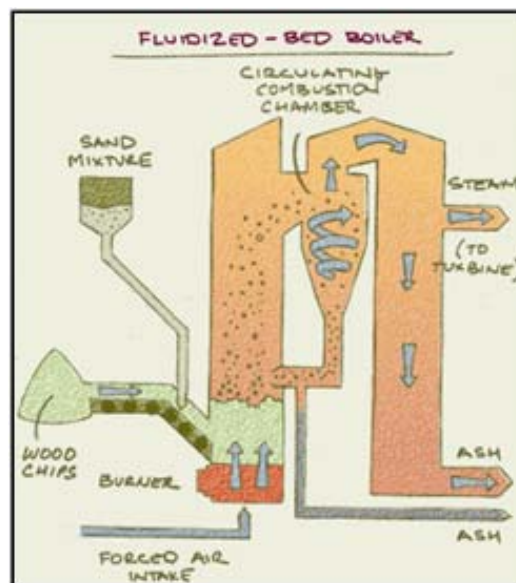
การเผาไหม้แบบฟลูอิดเบด (Fluidized-Bed Combustion) เป็นการเผาไหม้เชื้อเพลิงขณะลอยตัวและหมุนเวียน โดยมีการแยกเอากำมะถันออกระหว่างการเผาไหม้และการเผาไหม้ฟลูอิดเบดจะประกอบไปด้วยอนุภาคของแข็งอยู่ในสภาวะผสมเข้ากับของไหลที่ไหลผ่านตัวมันด้วยความเร็วสูงพอที่จะทำให้อนุภาคแยกออกจากกันและสามารถลอยตัวอยู่ได้ด้วยของไหลนั้นดังภาพที่ 2.20



ภาพที่ 2.20 การเผาไหม้แบบฟลูอิดไคซ์เบด (a) Collapsed (b) Fluidized State

(ที่มา: www.thailandindustry.com)

ในการเผาไหม้แบบฟลูอิดไคซ์เบดเชื้อเพลิงขนาดเล็กจะถูกบ้อนเข้าสู่เบดเหนือตะแกรง (Air Distribution Grid) อากาศจะถูกเป่าเข้าสู่ด้านล่างตะแกรง ทำให้เชื้อเพลิงลอยขึ้นมาและทำการเผาไหม้ในก๊าซที่ได้จากการเผาไหม้จะมีคาร์บอนส่วนที่ยังเผาไหม้ไม่หมดปนออกไปจะถูกแยกโดยเครื่องแยกแบบไซโคลนและส่งกลับมายังเบดเพื่อเผาไหม้ต่อให้สมบูรณ์ดังภาพที่ 2.21



ภาพที่ 2.21 หม้อไอน้ำชนิด Circulating Fluidized Bed (CFB)

(ที่มา: www.thailandindustry.com)

ข้อดีที่สำคัญของการเผาไหม้แบบฟลูอิดไคซ์เบดก็คือ การเผาไหม้จะมีการแยกเอาซัลเฟอร์ไดออกไซด์ซึ่งมักจะเกิดในการเผาไหม้ทั่วไปและเป็นก๊าซพิษออกได้ การลดซัลเฟอร์ไดออกไซด์ทำได้โดยการเติมหินปูนเข้าไปกับเชื้อเพลิงแข็ง เช่น ถ่านหินโดยตรง หินปูนจะประกอบไปด้วย

แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) และในบางครั้งก็มีแมกนีเซียมคาร์บอเนต (MgCO_3) ซึ่งจะทำหน้าที่ร่วมกับอากาศส่วนที่เหลือจากการเผาไหม้ดูดซับซัลเฟอร์ไดออกไซด์

ส่วนหินปูนเมื่อถูกเผาที่อุณหภูมิประมาณ 800 - 850 องศาเซลเซียส จะเป็นแคลเซียมมากนั้นจึงทำปฏิกิริยากับซัลเฟอร์ไดออกไซด์เกิดเป็นยิปซัม (ที่สัดส่วนที่ใช้ระหว่างแคลเซียม/กำมะถันเท่ากับ 2 และอุณหภูมิของการเผาไหม้ที่ 800 องศาเซลเซียส ประสิทธิภาพการกำจัดกำมะถันอยู่ที่ประมาณ 80 เปอร์เซ็นต์)

ข้อดีอีกอย่างของการเผาไหม้แบบนี้ก็คือเผาไหม้ที่อุณหภูมิไม่สูงมาก ทำให้สามารถใช้โลหะที่มีราคาถูกกว่าเป็นอุปกรณ์ได้และมีสารประกอบไนโตรเจนออกไซด์ (NO_x) ที่เกิดจากการเผาไหม้น้อย

ส่วนใหญ่หม้อไอน้ำที่ใช้ในการปฏิบัติการกับการเผาไหม้ประเภทนี้ จะเป็นประเภทที่มีการเผาไหม้แบบฟลูอิดไธด์เบดที่ความดันบรรยากาศ หรือหม้อไอน้ำแบบเผาไหม้เชื้อเพลิงขณะลอยตัวและหมุนเวียน ดังแสดงให้เห็นในภาพที่ 2.22 เหตุผลดังกล่าวนี้ มีความต้องการไม่มากก็น้อยที่จะนำเอาการเผาไหม้แบบฟลูอิดไธด์เบดเข้าไปร่วมกับการใช้หม้อไอน้ำแบบถังท่อไฟ ระบบเช่นนี้ก็จะคล้ายกับระบบที่มีการติดตั้งมากับหม้อไอน้ำแบบท่อน้ำ



ภาพที่ 2.22 หม้อไอน้ำแบบเผาไหม้เชื้อเพลิงขณะลอยตัวและหมุนเวียน (CFB)

(ที่มา: www.thailandindustry.com)

การติดตั้งระบบในปัจจุบันจะเป็นประเภทของการเผาไหม้แบบฟลูอิดไธด์เบดแบบใช้ความดัน ซึ่งจะรวมการใช้แก๊สไอเสียที่ร้อนเพื่อเป็นแรงขับเคลื่อนให้กังหันแก๊สไอน้ำที่ผลิตออกมาจากท่อที่พ่วงกัน 2 ท่อ ท่อหนึ่งอยู่ในเบด อีกท่ออยู่บนเบด การเพิ่มหินปูนแคลเซียมคาร์บอเนตพร้อมกับการ

ป้อนถ่านหินด้วย ก็จะเป็นการช่วยกำจัดกำมะถัน ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้เกิดการกัดกร่อนขึ้นที่กังหัน แก๊สด้วย ทิ้งไปแล้วระบบประเภทนี้ที่เกิดขึ้นใหม่ ๆ สามารถนำไปใช้ได้ในการผลิตที่มีขนาดใหญ่ ใช้ได้ทั้งการผลิตกระแสไฟฟ้าและการผลิตไอน้ำเพื่อที่จะทำให้ระบบมีประสิทธิภาพด้านพลังงานสูงที่สุด

2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ชัยวัฒน์ พรหมภูเบศร์ (2548) ทดลองเผาไหม้ถ่านหินผสมแกลบโดยใช้เครื่องเผาไหม้ฟลูอิโดเบดแบบหมุนเวียน พบว่า อุณหภูมิการเผาไหม้ในโรเซออร์ของฟลูอิโดเบดแบบหมุนเวียนจะค่อนข้างคงที่ตลอดโรเซออร์อยู่ในช่วงประมาณ 800 – 1,000 องศาเซลเซียส ที่ปริมาณการป้อนอากาศรวมเท่ากัน (อากาศปฐมภูมิมรวมกับอากาศทุติยภูมิ) อุณหภูมิในโรเซออร์จะสูงกว่าเมื่อมีการแบ่งอากาศไปป้อนในตำแหน่งอากาศทุติยภูมิมากกว่า ปริมาณแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์จะสูงมากบริเวณส่วนล่างของโรเซออร์ซึ่งมีการปลดปล่อยสารระเหยของเชื้อเพลิงและจะลดลงอย่างรวดเร็วบริเวณตำแหน่งที่มีการป้อนอากาศทุติยภูมิซึ่งจะช่วยให้การเผาไหม้สมบูรณ์ขึ้น ปริมาณแก๊สออกซิเจนจะลดลงตลอดความสูงโรเซออร์ ปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จะเพิ่มขึ้นตลอดความสูงโรเซออร์ ปริมาณแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์จะเพิ่มขึ้นตลอดความสูงโรเซออร์อยู่ในช่วงไม่เกิน 400 – 600 ส่วนในล้านส่วน ปริมาณแก๊สไนโตรเจนออกไซด์ (ไนตริกออกไซด์และไนโตรเจนไดออกไซด์) ค่อนข้างจะคงที่ตลอดโรเซออร์อยู่ในช่วงไม่เกิน 100 และ 10 ส่วนในล้านส่วน ตามลำดับ อุณหภูมิตลอดโรเซออร์มีแนวโน้มสูงขึ้นตามปริมาณแกลบที่เพิ่มขึ้น แก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์และคาร์บอนมอนอกไซด์ลดลงเมื่ออัตราส่วนของแกลบที่ป้อนมีมากขึ้น

งานวิจัยนี้ศึกษาการปล่อยไนโตรเจนออกไซด์และไนตรัสออกไซด์จากการเผาไหม้ร่วมของถ่านหินและชีวมวลในฟลูอิโดเบดแบบหมุนเวียน โดยใช้ถ่านหินศักดิ์ชัยบิพูนินัสและชีวมวลคือแกลบ โดยมีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบร้อยละ 0.30 และ 0.18 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ โรเซออร์หรือห้องเผาไหม้มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 3 เมตร ป้อนเชื้อเพลิงที่อัตราคงที่ 7 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ป้อนอากาศปฐมภูมิอัตราคงที่ 200 ลิตรต่อนาที และอัตราการหมุนเวียนของเบดคงที่ 300 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ตัวแปรที่ทำการศึกษาคือ ส่วนผสมของเชื้อเพลิง ปริมาณอากาศรวม ตำแหน่งการป้อนอากาศทุติยภูมิ และผลของหอคูดซับด้วยน้ำ

ประจักษ์ ทรัพย์อุดมมาก (2550) จากผลการทดลองพบว่า ถ่านหินซึ่งมีค่าความร้อนสูงและมีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบมากกว่าจึงให้อุณหภูมิสูงและปล่อยไนโตรเจนออกไซด์และไนตรัสออกไซด์มาก ปริมาณอากาศรวมที่ป้อนเข้าสู่เตาเผาแปรผันตรงกับอัตราการปล่อยแก๊สไนโตรเจนออกไซด์และไนตรัสออกไซด์ และการป้อนอากาศทุติยภูมิที่ตำแหน่งสูงๆ จะมีอัตราการ

ปล่อยแก๊สไนโตรเจนออกไซด์และไนตรัสออกไซด์น้อยกว่าพร้อมทั้งให้อุณหภูมิสูงกว่า หอดูดซับช่วยลดแก๊สไนโตรเจนออกไซด์ได้เล็กน้อย และมีผลต่อแก๊สไนตรัสออกไซด์น้อยมาก แก๊สไนโตรเจนออกไซด์และไนตรัสออกไซด์มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน การเกิดแก๊สไนโตรเจนออกไซด์จะมากกว่าไนตรัสออกไซด์เสมอโดยมีค่า 40 ถึง 90 และ 20 ถึง 45 ส่วนในล้านส่วน (แก๊สออกซิเจนร้อยละ 7) ตามลำดับ ส่วนแก๊สไนโตรเจนไดออกไซด์เกิดขึ้นน้อยมาก อุณหภูมิเฉลี่ยตลอดโรเซอร์อยู่ที่ 650 ถึง 800 องศาเซลเซียส องค์ประกอบของฟลูแก๊สที่ปล่อยออกมาในทุกการทดลองมีค่าน้อยกว่าระดับมาตรฐานของการปล่อยแก๊สพิษในประเทศไทย

ปิยะพันธ์ จะกอ (2548) ทดลองเผาไหม้ถ่านหินผสมแกลบโดยใช้เครื่องเผาไหม้ฟลูอิโดซ์เบดแบบหมุนเวียน พบว่า สามารถผสมแกลบกับถ่านหินได้มากที่สุดที่ร้อยละ 13.11 โดยน้ำหนัก เนื่องจากข้อจำกัดของระบบป้อนเชื้อเพลิงที่ใช้ในการทดลอง จากการทดลองที่อัตราส่วนผสมของแกลบที่ร้อยละ 23.19 โดยน้ำหนัก จะเกิดการไหม้ของเชื้อเพลิงย้อนเข้าในถังบรรจุเชื้อเพลิงปริมาณแกลบที่เพิ่มขึ้นทำให้อุณหภูมิส่วนล่างของท่อโรเซอร์สูงขึ้น และเมื่อเพิ่มปริมาณแกลบมีผลทำให้ปริมาณออกซิเจนและแก๊สไนโตรเจนออกไซด์ (ไนตริกออกไซด์และไนโตรเจนไดออกไซด์) เพิ่มขึ้น ในขณะที่แก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์และแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ลดลง เนื่องจากแกลบมีปริมาณไนโตรเจนมากกว่าถ่านหิน และแกลบมีปริมาณคาร์บอนคงตัวและซัลเฟอร์น้อยกว่าถ่านหิน

พรวิภา บุญนุช (2547) ได้ศึกษาผลของการป้อนอากาศแบบขั้นต่อการเกิด NO และ N_2O โดยมีวัตถุประสงค์คือหาผลกระทบของอากาศส่วนเกิน สัดส่วนและตำแหน่งในการฉีดอากาศทุติยภูมิที่มีต่อประสิทธิภาพการเผาไหม้ พฤติกรรมการเผาไหม้ การเกิดก๊าซต่างๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งก๊าซ NO และ N_2O โดยผลการทดลองได้จากการเผาไหม้ลิกไนต์ที่มีการเปลี่ยนตำแหน่งการป้อนอากาศทุติยภูมิ (H) 3 ตำแหน่ง ได้แก่ 525, 675 และ 825 มิลลิเมตรเหนือแผ่นกระจายลมภายในเตา โดยทุกกรณีทำการเผาไหม้ที่สภาวะอากาศส่วนเกิน 40, 60 และ 80% และสัดส่วนของปริมาณอากาศทุติยภูมิต่ออากาศทั้งหมด (SA) 0.1, 0.2 และ 0.3 ผลที่ได้จากการศึกษานี้พบว่ายิ่งความสูงของตำแหน่งในการป้อนอากาศทุติยภูมิ (H) และสัดส่วนอากาศ ทุติยภูมิต่ออากาศทั้งหมด (SA) มีค่าเพิ่มมากขึ้น จะมีผลให้ความเข้มข้นของก๊าซ NO มีค่าลดลง โดยมีค่าลดลงสูงสุดถึง 83% เมื่อเพิ่มความสูงของตำแหน่งการฉีดอากาศทุติยภูมิจาก 525 มิลลิเมตรเป็น 825 มิลลิเมตรเหนือแผ่นกระจายลมที่สัดส่วน SA = 0.3

อันธิการ์ วรรณะ (2548) ได้ทดลองเผาไหม้ถ่านหินผสมชีวมวล 3 ชนิด ได้แก่ ช้างข้าวโพด แกลบ และกากกาแฟ โดยใช้เครื่องเผาไหม้ฟลูอิโดซ์เบดแบบหมุนเวียน ในการทดลองจะใช้ชีวมวลทีละชนิดมาเผาไหม้ร่วมกับถ่านหิน โดยใช้เครื่องควบคุมอุณหภูมิแบบ P และ PI มาบังคับ

อัตราการป้อนเชื้อเพลิงและอัตราการป้อนอากาศ ซึ่งจะควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ที่ 700, 800 และ 900 องศาเซลเซียส จากการทดลองพบว่าอัตราส่วนของถ่านหินต่อชีวมวลที่สามารถป้อนชีวมวลได้มากที่สุดคือ 2 ต่อ 1 หากอัตราส่วนของชีวมวลมากกว่านี้จะทำให้เกิดการเผาไหม้ย้อนกลับเข้าทางถึงบรรจุเชื้อเพลิง

คันสนีย์ กำธนาทรัพย์ (2548) ได้ศึกษารูปแบบการเคลื่อนที่ของของแข็งในเครื่องฟลูอิไดซ์เบดแบบหมุนเวียน โดยมีตัวแปรที่ใช้ศึกษา คือ ความเร็วอากาศ ตำแหน่งตามแนวรัศมีและตามความสูงของโรเตอร์และชีวมวลที่นำมาผสม โดยใช้ความเร็วของอากาศ 7, 8 และ 9 เมตรต่อวินาที ใช้เม็ดแก้วเป็นเบดและผสมกลับในสัดส่วนร้อยละ 20 จากการศึกษาเบดที่เป็นเม็ดแก้วอย่างเดียว พบว่าที่ความเร็วอากาศเท่ากับ 7 เมตรต่อวินาที มีปริมาณของแข็งสะสมอยู่ภายในโรเตอร์เป็นจำนวนมากตลอดช่วงความสูงของโรเตอร์ และที่ส่วนบนของโรเตอร์ใกล้กับทางออกของของแข็ง ค่าสัดส่วนช่องว่างมีค่าน้อยลง เป็นผลจากบริเวณทางออกของโรเตอร์ทำมุมกับทางเข้าของไซโคลนแบบ 90 องศา จึงทำให้เม็ดแก้วที่เคลื่อนที่ขึ้นกระทบกับส่วนปลายของโรเตอร์ซึ่งเป็นท่อตันแล้วตกกลับมาที่ส่วนล่างอีกครั้ง ที่ความเร็วอากาศ 8 และ 9 เมตรต่อวินาทีส่วนของเบดหนาแน่นทางด้านล่างของโรเตอร์ลดลง และสัดส่วนช่องว่างมีค่าใกล้เคียงกันตลอดความสูงของโรเตอร์ ประมาณ 0.99 และผลกระทบของทางออกต่อสัดส่วนช่องว่างจะมีน้อยมากเมื่อความเร็วอากาศที่ใช้มากขึ้น เนื่องจากปริมาณของเม็ดแก้วในโรเตอร์มีน้อยลง ที่ความเร็วอากาศต่างๆ พบว่าเมื่อความเร็วอากาศเพิ่มขึ้น ร้อยละของเม็ดแก้วที่เคลื่อนที่ลงมีน้อยลง แต่ร้อยละของเม็ดแก้วที่เคลื่อนที่ขึ้นมีมากขึ้น โดยที่ความเร็วอากาศ 7 และ 8 เมตรต่อวินาที เกิดรูปแบบการเคลื่อนที่ของเม็ดแก้ว เป็นแบบคอร์-แอนนูลัส คือของแข็งส่วนใหญ่ที่บริเวณกึ่งกลางคอลัมน์มีความเร็วสูงและเคลื่อนที่ขึ้น เรียกส่วนนี้ว่า คอร์ ในขณะที่บริเวณผนังของแข็งส่วนใหญ่เคลื่อนที่ลง เรียกส่วนนี้ว่า แอนนูลัส และเมื่อศึกษาเบดผสม พบว่าที่บริเวณด้านบนสัดส่วนช่องว่างมีค่าใกล้เคียงกัน ประมาณ 0.99 ที่ทุกความเร็วอากาศและไม่มีผลกระทบจากลักษณะทางออกของโรเตอร์ อาจเนื่องมาจาก ในระบบที่วัสดุเบดเป็นของผสมระหว่างเม็ดแก้วกับแกลบมีอัตราการไหลป้อนกลับของของแข็งน้อยกว่าเมื่อใช้วัสดุเบดเป็นเม็ดแก้วอย่างเดียว จึงทำให้ภายในโรเตอร์มีปริมาณของของแข็งน้อยลง และมีแกลบที่เบาเคลื่อนที่ได้ง่ายมาช่วยในการพาเม็ดแก้วออกไปจากโรเตอร์ได้ง่ายขึ้น และพบว่าความหนาแน่นของของแข็งมีผลต่อความเร็วของเบดน้อยมากเมื่อเทียบกับผลของขนาดของของแข็ง โดยความเร็วของเม็ดแก้วที่อยู่ในของผสมระหว่างเม็ดแก้วกับแกลบน้อยกว่าความเร็วของระบบที่มีเม็ดแก้วเป็นวัสดุเบดเพียงอย่างเดียว โดยเฉพาะที่บริเวณส่วนล่างของโรเตอร์มีความแตกต่างของความเร็วของเม็ดแก้วค่อนข้างมาก

Fang และ คณะ (2004) ศึกษาการนำแกลบมาเผาไหม้ในเตาฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียน จากการทดลองใช้แกลบในระบบ Cold model ของฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียนพบว่าทำให้แกลบเกิดการฟลูอิดไดซ์ทำได้ยากแต่สามารถแก้ไขได้โดยการใช้ทรายและถ่านหินเป็นตัวช่วยให้เกิดการฟลูอิดไดซ์ ดังนั้นในการเผาไหม้จริงสำหรับการทดลองนี้จึงศึกษาผลของขนาดทราย ความเร็วของอากาศ โดยขนาดของทรายที่เหมาะสมที่ทำให้การผสมได้ดีอยู่ในช่วง 0.3 – 0.8 มิลลิเมตร (เฉลี่ย 0.55 ม.ม.) ความเร็วของอากาศ 0.8 – 2 เมตรต่อวินาที อัตราการป้อนแกลบ 20-40 กก./ชม. พบว่าอุณหภูมิในการเผาไหม้ 750-850 องศาเซลเซียส โดยเริ่มเผาไหม้ที่อุณหภูมิ 340 องศาเซลเซียส (Ignition temperature) เนื่องจากแกลบมีสารระเหยง่ายอยู่มาก ดังนั้นการเผาไหม้ส่วนใหญ่จะเกิดในบริเวณ Freeboard และการแบ่งอากาศเป็นสองส่วนจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการเผาไหม้ โดยความเร็วอากาศที่เหมาะสม 1.2 เมตรต่อวินาทีโดยแบ่งเป็นร้อยละ 70 สำหรับอากาศปฐมภูมิและร้อยละ 30 สำหรับอากาศทุติยภูมิ

Ghani และ คณะ (2009) ศึกษากระบวนการพลังงานจากชีวมวลโดยการนำกากเหลือของของเสียทางการเกษตรมาใช้ เป็นเทคโนโลยีหนึ่งที่น่าสนใจในการเผาไหม้พวกชีวมวล จะใช้ผลิตภัณฑ์ที่เหลือทางการเกษตร เช่น ฟางข้าวและแกลบปาล์ม มาเผาไหม้ร่วมกับถ่านหิน ในเตาเผาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.15 m สูง 2.3 m ประสิทธิภาพในการเผาไหม้และการปล่อยของคาร์บอนมอนอกไซด์จะถูกนำมาศึกษาและเปรียบเทียบกับ การเผาโดยใช้ถ่านหินอย่างเดียว

Jaroslaw และคณะ (2010) ศึกษาผลการคำนวณเชิงตัวเลขสำหรับหม้อกำเนิดไอน้ำฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียน ในงานวิจัยนี้ได้ดำเนินการสองสถานะที่แตกต่างกันคือใช้แก๊สผสม O_2 / N_2 ในการเผาไหม้ และแก๊สผสม O_2 / CO_2 โดยไม่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบ การทดลองทั้งสองสถานะให้ผลของแนวโน้มเดียวกันคือลดปริมาณของการปล่อยแก๊สสู่บรรยากาศ

Jianguo และคณะ (2009) ทดลองใช้อากาศอุณหภูมิสูงในการเผาไหม้ที่มีอัตราส่วนอากาศส่วนเกินในฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียน การทดสอบในกระบวนการเผาไหม้ถ่านหินบดในอากาศอุณหภูมิสูงจากฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียน จะเกิดที่ Down-fired combustor ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 220 มม. และสูง 3000 มม. การปล่อย NO ลดลงด้วยการเพิ่มเวลาในการทำปฏิกิริยาของถ่านหินบดใน Reducing zone และการปล่อย NO จะแปรผันตรงกับอัตราส่วนอากาศส่วนเกิน อุณหภูมิเตา ขนาดถ่านหิน และ ความเข้มข้นของออกซิเจนในอากาศอุณหภูมิสูง ผลที่ได้ออกมาคือ Co-exiting ของ การเผาไหม้ Air-staging ด้วยอากาศอุณหภูมิสูงที่มีประสิทธิภาพมาก เพื่อลดการปลดปล่อยไนโตรเจนออกไซด์สำหรับการเผาไหม้ถ่านหินบด ใน Down-fired combustor

Liu และ Gibbs (2001) ทดลองเผาไหม้ถ่านหินโดยใช้เครื่องเผาไหม้ฟลูอิดไธด์แบบหมุนเวียน ซึ่งในการทดลองมีการเติมปูนขาวด้วย วัตถุประสงค์หลักคือเพื่อลดแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ แต่ผลการทดลองพบว่าเมื่อมีผลกระทบต่อแก๊สไนโตรเจนออกไซด์และไนตรัสออกไซด์ด้วยคือ เมื่อเพิ่มปริมาณปูนขาวจะทำให้แก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์และไนตรัสออกไซด์ลดลง ในขณะที่แก๊สไนโตรเจนออกไซด์จะเพิ่มขึ้น

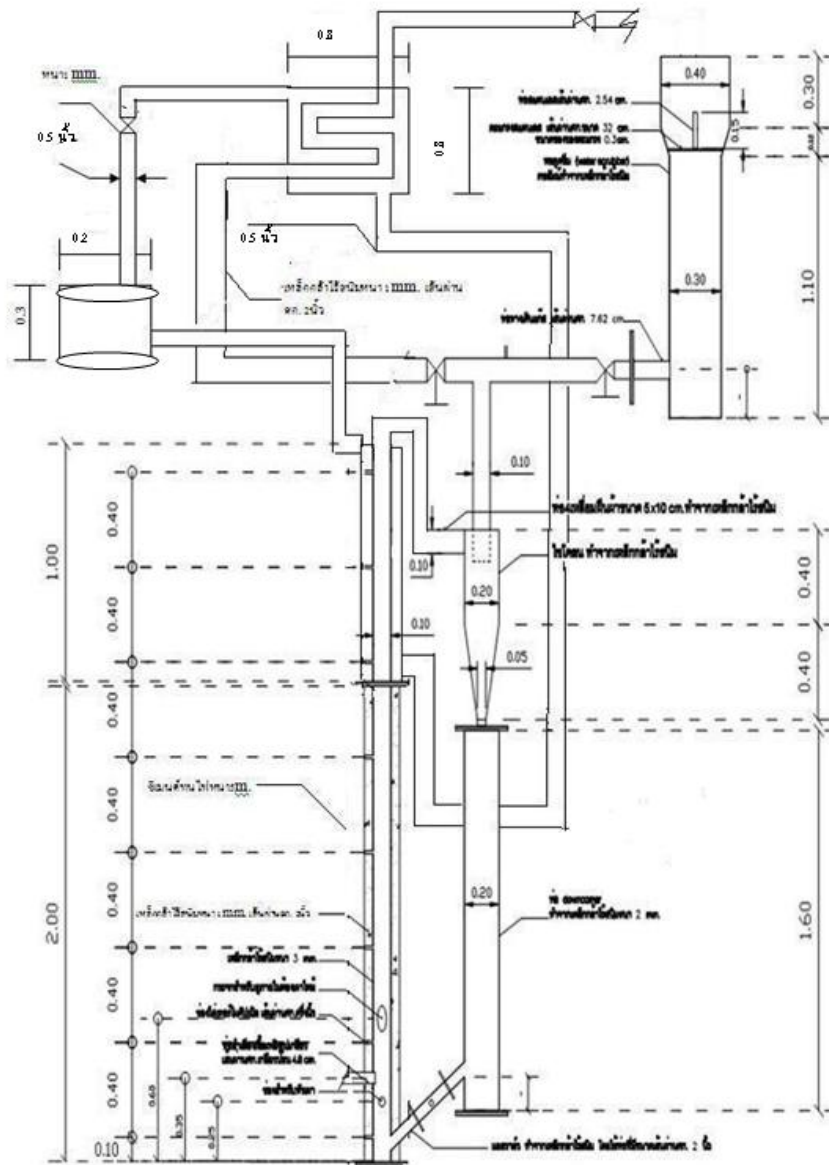
Topal และ คณะ (2003) ศึกษาประสิทธิภาพการเผาไหม้เยื่อมะกอก (Olive cake) เปรียบเทียบกับการเผาไหม้ถ่านหินลิกไนต์ในฟลูอิดไธด์แบบหมุนเวียนโดยมีสัดส่วนอากาศอากาศเกินพอเป็นตัวแปรตั้งแต่ 1.1 – 2.16 ที่มีผลต่ออุณหภูมิและองค์ประกอบของฟลูแก๊ส พบว่าการเผาไหม้เยื่อมะกอกจะเกิดการเผาไหม้บริเวณส่วนบนของท่อไรซ์เซอร์อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส มีประสิทธิภาพการเผาไหม้ถึงร้อยละ 94 – 98.95 และเมื่อมีอากาศเกินพอน้อยๆ พบว่าการเผาไหม้เยื่อมะกอกจะมีประสิทธิภาพการเผาไหม้ลดลงและจะเกิดแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์รวมทั้งส่วนที่เผาไหม้ไม่สมบูรณ์มากกว่าการเผาไหม้ถ่านหิน และเมื่อเพิ่มอากาศเกินพอทำให้แก๊สต่าง ๆ มีปริมาณลดลง โดยอากาศเกินพอที่เหมาะสมที่สุดคือร้อยละ 36

บทที่ 3

เครื่องมือและวิธีการทดลอง

3.1 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

หม้อกำเนิดไอน้ำฟลูอิดเบดแบบหมุนเวียน (Circulating Fluidized Bed Boiler)



ภาพที่ 3.1 โครงร่างหม้อกำเนิดไอน้ำฟลูอิดเบดแบบหมุนเวียนที่ใช้ในงานวิจัย

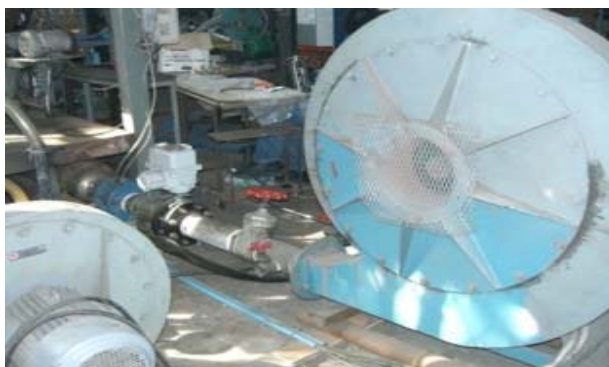


ภาพที่ 3.2 เตาเผาฟลูอิดไชน์เบดแบบหมุนเวียนที่ใช้ในงานวิจัย

หม้อกำเนิดไอน้ำฟลูอิดไชน์เบดแบบหมุนเวียนที่ใช้สำหรับงานวิจัยนี้แสดงส่วนประกอบด้วยส่วนต่างๆ ดังนี้ ท่อไรเซอร์(Riser) เป็นบริเวณที่มีการเผาไหม้ใช้ท่อเหล็กกล้าไร้สนิมมีความหนา 5 มิลลิเมตร สูง 3.0 เมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.1 เมตร บริเวณด้านล่างของไรเซอร์จะมีตัวกระจายอากาศ (air distributor) เป็นแบบแผ่นตระแกรงแผ่นเดียว (single perforated plate) ที่มีความละเอียด 60 mesh (200 micrometers) ดังแสดงในรูปที่ 3.1 และรูปที่ 3.2 บริเวณผนังท่อด้านไรเซอร์มีการเจาะรูขนาด 0.5 นิ้ว เพื่อสอดท่อเหล็กกล้าไร้สนิมขนาด 0.5 นิ้วไปยังกลางไรเซอร์ที่ตำแหน่ง P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7 และ P8 ดังในรูปที่ 2.1 สำหรับเสียบเทอร์โมคัปเปิลเพื่อวัด

อุณหภูมิและเพื่อเป็นจุดสำหรับดึงแก๊สไปวัดองค์ประกอบโดยแต่ละตำแหน่งห่างจากตัวกระจายอากาศเป็นระยะ 0.10, 0.50, 0.90, 1.30, 1.70, 2.10, 2.50, และ 2.90 เมตร ตามลำดับ มีหัวเผาแก๊สหุงต้ม (LPG burner) เป็นตัวให้ความร้อนแก่เบดในขณะเริ่มจุดเตาที่ความสูง 0.25 เมตรจากตัวกระจายอากาศ ที่ตำแหน่ง 0.35 เมตรจากตัวกระจายอากาศจะเป็นตำแหน่งที่มีการเพิ่มเชื้อเพลิงเข้าสู่เตาเผาโดยผ่านสกรูพิดเดอร์ ซึ่งขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ 1 กำลังม้า และสามารถปรับอัตราการป้อนเชื้อเพลิงได้ผ่านทางมอเตอร์อินเวอร์เตอร์ (motor inverter) ที่ความสูง 0.65 เมตรจากตัวกระจายอากาศจะมีช่องกระจกสำหรับดูการเผาไหม้ในไรเซอร์ได้ ที่ความสูง 1 เมตรจากตัวกระจายอากาศจะเป็นตำแหน่งที่มีการป้อนอากาศทุติยภูมิ ที่ความสูง 3.0 เมตร จากตัวกระจายอากาศจะเป็นทางออกของไรเซอร์ซึ่งเป็นท่อขนาด 2 นิ้ว เชื่อมต่อตั้งฉากไปยังปากทางเข้าไซโคลน ซึ่งอุปกรณ์ที่ติดตั้งจะแสดงในภาพต่างๆ ดังต่อไปนี้

1. เครื่องเป่าอากาศ (Air blower) สำหรับให้อากาศปฐมภูมิ (Primary air) ใช้มอเตอร์ 3 เฟส ขนาด 5 แรงม้า ขนาดกำลังผลิตสูงสุด 20 ลบ.ม/นาที ความดันสูงสุด 150 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว แสดงดังภาพที่ 3.3



ภาพที่ 3.3 เครื่องเป่าอากาศ (air blower)

2. วาล์วไฟฟ้ารูปผีเสื้อเพื่อใช้ปรับปริมาณอากาศจากเครื่องเป่าอากาศ (อากาศปฐมภูมิ) และ Orifice สำหรับวัดค่าความแตกต่างของความดันอากาศแล้วนำไปแสดงผลเป็นอัตราการป้อนอากาศปฐมภูมิที่หน้าจอดีจิจิตอลและบันทึกผลลงคอมพิวเตอร์ แสดงดังภาพที่ 3.4



ภาพที่ 3.4 วาล์วไฟฟ้ารูปผีเสื้อและ Orifice

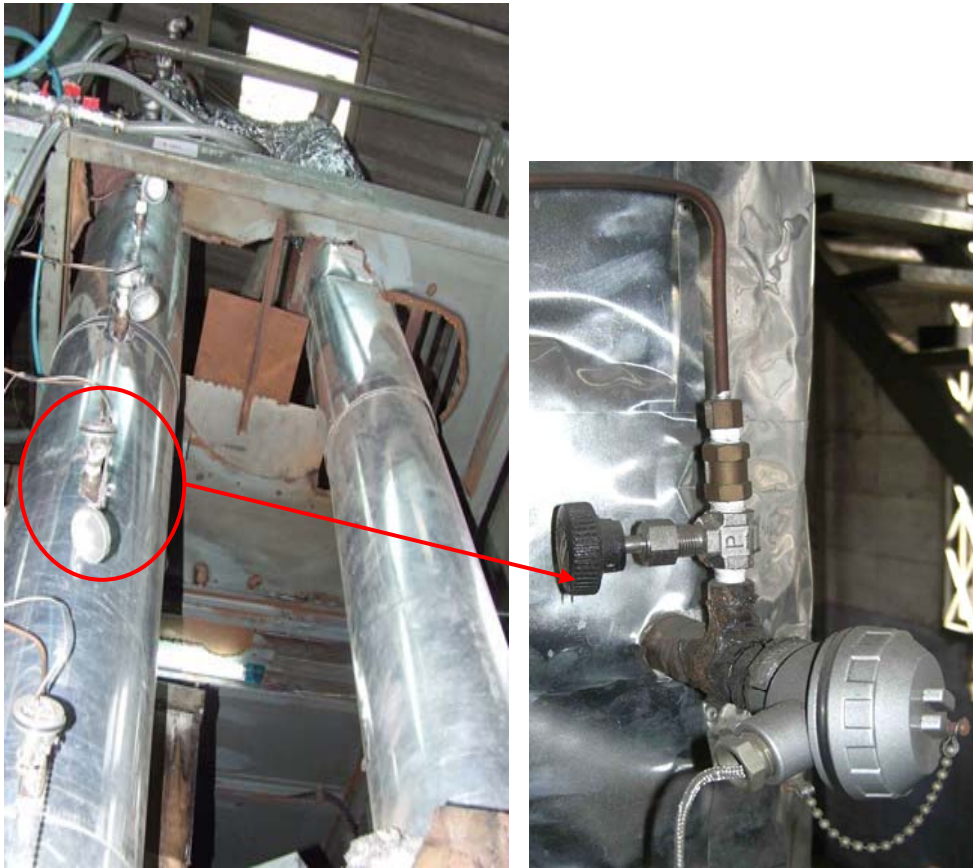
3. หน้าจอแสดงอัตราการป้อนอากาศปฐมภูมิแบบดิจิตอลแสดงดังภาพที่ 3.5



ภาพที่ 3.5 หน้าจอแสดงความเร็วอากาศปฐมภูมิแบบดิจิตอล

4. แผ่นกระจายอากาศ (Distributor) เป็นแบบแผ่นตะแกรง ความละเอียด 60 mesh ซ้อนอยู่กับแผ่นตะแกรงชนิดหยาบ เพื่อให้อากาศกระจายตัวสม่ำเสมอตลอดพื้นที่หน้าตัด และป้องกันไม่ให้ทรายรวมทั้งเชื้อเพลิงและเถ้าหล่นลงสู่ด้านล่างไรเซอร์

5. ท่อไรเซอร์ (Riser) ทำด้วยเหล็กกล้าไร้สนิมหนา 3 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 10 เซนติเมตร มีช่องสำหรับใส่เทอร์โมคัปเปิลและสำหรับตั้งแก๊ส 8 ตำแหน่ง โดยตำแหน่งแรกสูงจากแผ่นกระจายอากาศ 10 เซนติเมตร และตำแหน่งต่อไปห่างกัน 40 เซนติเมตรขึ้นมาจากด้านบนของท่อไรเซอร์ แสดงดังภาพที่ 3.6



ภาพที่ 3.6 ไรเซอร์ (ท่อแนวตั้งด้านซ้าย) และ Probe สำหรับวัดอุณหภูมิและองค์ประกอบของแก๊ส

6. หัวเผา (Burner) อยู่ที่ตำแหน่ง 0.25 เมตร จากแผ่นกระจายอากาศ ใช้สำหรับอุ่นเตาเผาในช่วงเริ่มต้น โดยใช้แก๊สหุงต้ม (LPG) เป็นเชื้อเพลิง และใช้อากาศจากเครื่องอัดอากาศ ด้านข้างของหัวเผาดัดตั้งกระจกสำหรับดูเปลวไฟจากหัวเผาเพื่อความปลอดภัย แสดงดังภาพที่ 3.7



ภาพที่ 3.7 หัวเผาและกระจกมองเปลวไฟ

7. อุปกรณ์ป้อนเชื้อเพลิง เป็นเครื่องป้อนเชื้อเพลิงแบบสกรูพิดเดอร์ทั้งหมด 2 ตัวแต่ละตัวประกอบด้วยถังบรรจุเชื้อเพลิงและระบบลำเลียงเชื้อเพลิงรูปเกลียว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเกลียวป้อน 4.8 เซนติเมตร ระบบขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ขนาด 2 แรงม้า ใช้ไฟฟ้า 3 เฟส อัตราการหมุน 1400 รอบต่อนาที ควบคุมความเร็วของมอเตอร์ด้วยเครื่องควบคุมความเร็วของมอเตอร์ (inverter) ที่ตำแหน่งปลายของระบบลำเลียงเชื้อเพลิงและตำแหน่งบนของถังบรรจุเชื้อเพลิงตัวหนึ่ง (สำหรับป้อนเชื้อเพลิงประเภทชีวมวล) จะติดตั้งระบบป้อนอากาศเพื่อป้องกันการไหม้ย้อนกลับเข้าสู่ถังเก็บเชื้อเพลิง โดยตำแหน่งที่ป้อนเชื้อเพลิงอยู่ที่ระดับสูงจากแผ่นกระจายอากาศ 0.35 เมตร แสดงดังภาพที่ 3.8





ภาพที่ 3.8 ระบบป้อนเชื้อเพลิง (Fuel feeder system)

8. กระจกสำหรับดูภายในห้องเผาไหม้อยู่ที่ตำแหน่ง 0.60 เมตร จากแผ่นกระจายอากาศ แสดงดังภาพที่ 3.9



ภาพที่ 3.9 กระจกสำหรับดูภายในห้องเผาไหม้

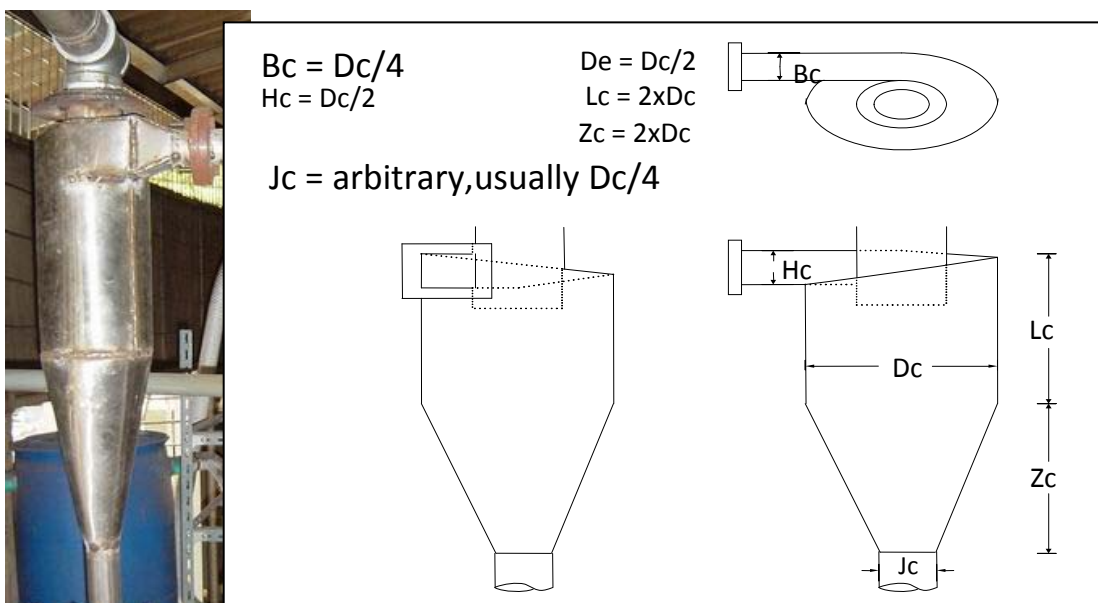
9. เครื่องอัดอากาศ (Air compressor) สำหรับป้อนอากาศให้หัวเผา ระบบป้อนเชื้อเพลิงซีวมวล และ ตำแหน่งป้อนอากาศทุติยภูมิ โดยใช้มอเตอร์ 3 เฟส ขนาด 15 แรงม้า หรือ 11.2 กิโลวัตต์ ลูกสูบมี Bore 120 มิลลิเมตร และ Stroke 80 มิลลิเมตร ความเร็วรอบ 860 รอบต่อนาทีที่ความถี่ 50 Hz ขนาดถังเส้นผ่านศูนย์กลางความยาวเป็น 485x1770

มิลลิเมตร ความจุถัง 304 ลิตร ความดันที่ใช้งาน 12 กก.ต่อ ตร.ซม. และความดันสูงสุด 15 กก.ต่อ ตร.ซม. พร้อมอุปกรณ์ทำความเย็นอากาศและระบบกำจัดน้ำในอากาศ แสดงดังภาพที่ 3.10



ภาพที่ 3.10 เครื่องอัดอากาศ พร้อมอุปกรณ์ทำความเย็นอากาศและระบบกำจัดน้ำในอากาศ

10. ไส้โคลน (Cyclone) เพื่อแยกอนุภาคของแข็ง (ทราย เชื้อเพลิงที่เผาไหม้ไม่หมด และเถ้าบางส่วนออกจากแก๊ส แสดงดังภาพที่ 3.11



ภาพที่ 3.11 ไส้โคลน (Cyclone) (ชัยวัฒน์ พรหมภูเบศร์, 2548)

ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม

เส้นผ่านศูนย์กลางของกระบอกไซโคลน (D_c) = 20 เซนติเมตร

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

เส้นผ่านศูนย์กลางทางออกของแก๊ส (D_e) = 10 เซนติเมตร

ความสูงของกระบอกไซโคลน (L_c) = 40 เซนติเมตร

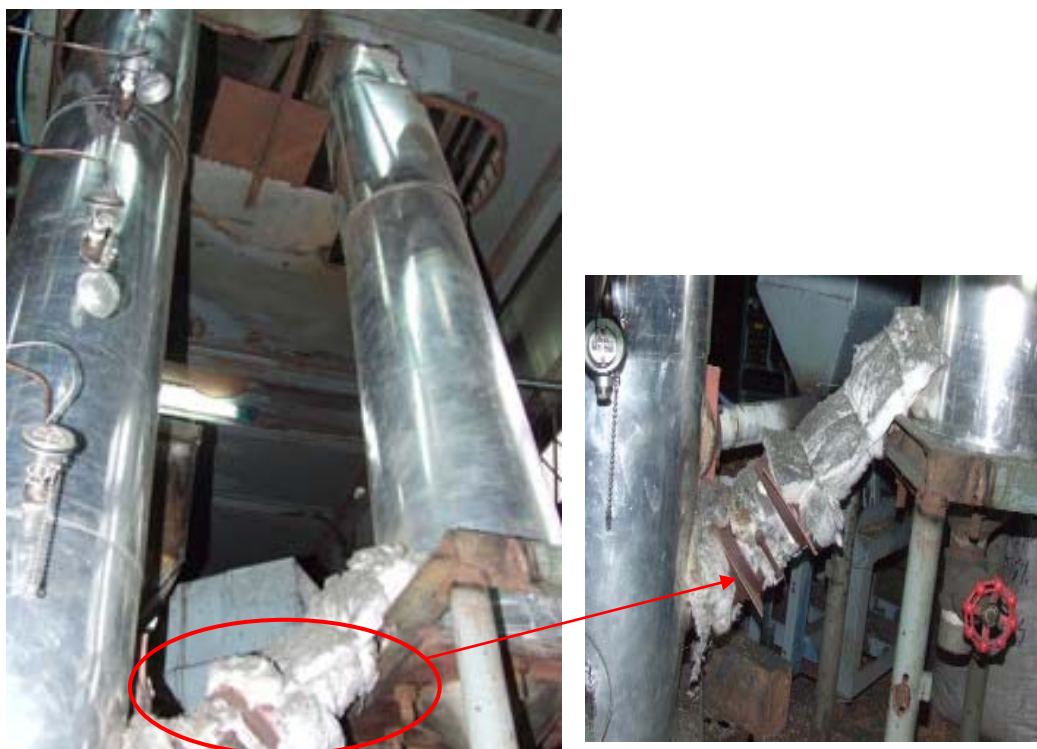
ความสูงของกรวยไซโคลน (Z_c) = 40 เซนติเมตร

เส้นผ่านศูนย์กลางทางออกของอนุภาค (J_c) = 5 เซนติเมตร

11. ระบบป้องกันกลับของแข็ง

- ท่อ Downcomer ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมหนา 2 มิลลิเมตร สูง 1.6 เมตร มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 20 เซนติเมตร เป็นส่วนเชื่อมต่อบetween ไซโคลนกับแอลวาล์ว ด้านล่างของ Downcomer มีวาล์วสำหรับปล่อยแก๊สออกจากระบบ

- แอลวาล์ว ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม โดยใช้ท่อที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 นิ้ว ใช้วาล์วเป็นลักษณะของวาล์วปีกผีเสื้อ (Butterfly valve) แสดงดังภาพที่ 3.12



ภาพที่ 3.12 Downcomer (ท่อทาง ด้านขวา) และ แอลวาล์ว (วาล์วปีกผีเสื้อ)

12. หอดูดซึ่ม (water scrubber) คอลัมน์ทำจากอะลูมิเนียม ตัวคอลัมน์สูง 250 เซนติเมตร ประกอบด้วย 2 ส่วน ส่วนบนมีลักษณะเป็นปล่องสี่เหลี่ยมสูง 150 เซนติเมตร ส่วนล่างมีลักษณะเป็นทรงสี่เหลี่ยมด้านเท่าด้านละ 100 เซนติเมตร สูง 50 เซนติเมตร ส่วนบนของหอดูดซึ่มสำหรับสเปรย์น้ำสวนทางกับทิศทางเดินทางของแก๊สที่ออกจากไซโคลน ด้านล่างมีท่อทางเดินแก๊สจากไซโคลนเข้าสู่คอลัมน์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7.62 เซนติเมตร หอดูดซึ่มทำหน้าที่ลดอุณหภูมิของแก๊สและดูดซับควันและเขม่าที่เกิดจากการเผาไหม้ ถึงเก็บน้ำจะมีตะแกรงกรองอนุภาคของแข็งออกจากรูน้ำก่อนที่จะนำไปฉีดสเปรย์ใน หอดูดซึ่มเพื่อป้องกันอุปกรณ์ฉีดสเปรย์อุดตัน แสดงดังภาพ 3.13



ภาพที่ 3.13 หอดูดซึ่มและอุปกรณ์ฉีดน้ำ

13. หน้าจอแสดงอุณหภูมิและวาล์วสำหรับดึงแก๊สออกจากระบบเพื่อนำไปวัดความดันภายในระบบและนำไปวัดองค์ประกอบของแก๊ส ณ probe แต่ละตำแหน่งจะมีวาล์วซึ่งต่อท่อทองแดงเข้าสู่แผงวงจรวาล์ว (ภาพที่ 3.14) สำหรับวัดองค์ประกอบของแก๊สแต่ละตำแหน่งโดยใช้ปั๊มสุญญากาศ (ภาพที่ 3.15) เป็นตัวดึงแก๊สออกมาจากโรเซอร์และนอกจากนั้นแผงวงจรวาล์วยังมีการติดตั้งตัวแสดงค่าอุณหภูมิแต่ละตำแหน่งด้วย



ภาพที่ 3.14 หน้าจอแสดงอุณหภูมิและวาล์วสำหรับดึงแก๊สออกจากระบบ



ภาพที่ 3.15 ปั๊มสุญญากาศ

14. เครื่องวัดฟลูแก๊ส (Flue gas Analyzer)

-อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับวัดองค์ประกอบของแก๊สแต่ละตำแหน่งคือเครื่องวัดฟลูแก๊ส (Flue gas Analyzer) รุ่น Testo 350 (ภาพที่ 3.16) ซึ่งสามารถวัดองค์ประกอบของแก๊สชนิดต่างๆได้ดังต่อไปนี้ CO, CO₂, O₂, SO₂, NO, NO₂ โดยปริมาณของแก๊ส CO₂ และ O₂ จะวัดอยู่ในหน่วยเปอร์เซ็นต์ ส่วนปริมาณของแก๊ส CO, SO₂, NO, NO₂ จะวัดอยู่ในหน่วย part per million (ppm) แต่มีข้อจำกัดอยู่ที่การวัดปริมาณ CO นั้นสามารถวัดค่าได้ไม่เกิน 10,000 ppm โดยก่อนที่จะทำการทดลองได้มีการปรับเทียบ(calibration) เครื่องวัดฟลูแก๊สนี้กับแก๊สมาตรฐานก่อน และทุกครั้งที่ทำการวัดองค์ประกอบของแก๊สจะต้องทำการปรับเทียบกับอากาศบริสุทธิ์ก่อนทุกครั้ง



ภาพที่ 3.16 เครื่องวัดฟลูแก๊ส (Flue gas Analyzer)

15. เครื่องบดถ่านหินอย่างหยาบ ใช้มอเตอร์ขนาด 3.8 กิโลวัตต์ 3 เฟส บดผ่านช่องตะแกรงแยกขนาด 1.2 มิลลิเมตร แสดงดังภาพที่ 3.17



ภาพที่ 3.17 เครื่องบดถ่านหินอย่างหยาบ

16. เครื่องบดชีวมวลอย่างหยาบ ใช้มอเตอร์ขนาด 3.8 กิโลวัตต์ 3 เฟส บดผ่านช่อง ตะแกรงแยกขนาด 1.2 มิลลิเมตร แสดงดังภาพที่ 3.18



ภาพที่ 3.18 เครื่องบดชีวมวลอย่างหยาบ

3.2 การสร้างเครื่องผลิตไอน้ำ

การสร้างเครื่องผลิตไอน้ำที่ได้รับพลังงานความร้อนจากส่วนผนังเตาฟลูอิโดซ์เบดแบบหมุนเวียนนั้นจำเป็นต้องสร้างส่วนสำคัญ 3 ส่วน ดังนี้

3.2.1 **ส่วนอุ่นน้ำ (Warm Space)** คือ บริเวณเก็บอุปกรณ์ส่วนหลักที่ใช้ในการเดินเครื่องผลิตไอน้ำ น้ำหมุนเวียนในส่วนนี้มีมากกว่า 2 ส่วน คือ จากน้ำภายนอก ระบบและน้ำภายในระบบ น้ำภายนอกระบบเป็นน้ำสะอาดธรรมดาที่ใช้เติมหล่อเลี้ยงให้ระบบ น้ำภายในระบบ คือ น้ำที่เกิดจากการกลั่นตัวจากส่วนเก็บไอน้ำ (Steam Space) ส่วนเก็บน้ำนี้มีขนาดกว้าง 0.30 เมตร ยาว 0.80 เมตร และสูง 0.80 เมตร ขนาดความจุ 0.192 ลูกบาศก์เมตร ส่วนเก็บน้ำนี้สร้างจากเหล็กดำน้ำมันแผ่น ความหนา 0.003 เมตร ภายในมีท่อเหล็กดำซึ่งใช้สำหรับการนำเอาแก๊สร้อนและของแข็งบางส่วนจากเตาไปยังส่วนของหอดูดซึม ขนาด 2 นิ้ว ต่อเข้าไปยังท่อเหล็กกล้าไร้สนิมขนาด 1/2 นิ้ว จำนวน 18 ท่อ เพื่อให้อุ่นน้ำภายในถัง แสดงดังภาพที่

3.19



ภาพที่ 3.19 ส่วนอุ่นน้ำ (Warm Space)

- 3.2.2 **ส่วนแลกเปลี่ยนความร้อน (Exchanger)** คือ อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างน้ำภายในท่อและความร้อนจากผนังเตา ลักษณะเป็นท่อแนวตั้งวิ่งขึ้น ลงตามแนวของส่วนไรเซอร์ อุปกรณ์นี้สร้างจากท่อเหล็กกล้าไร้สนิมขนาด $\frac{1}{2}$ นิ้ว ความจุ 0.006 ลูกบาศก์เมตร แสดงดังภาพที่ 3.20



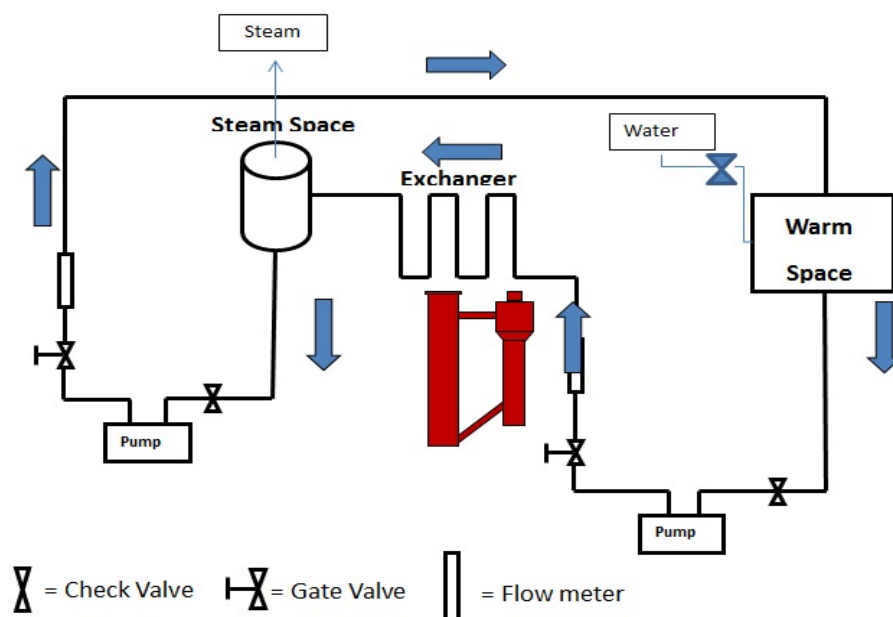
ภาพที่ 3.20 ส่วนแลกเปลี่ยน (Exchanger)

- 3.2.3 **ส่วนเก็บไอน้ำ (Steam Space)** คือ อุปกรณ์ที่ใช้กักไอน้ำร้อน และน้ำร้อนที่เกิดจากการกลั่นตัวของไอน้ำบางส่วน รวมไปถึงน้ำร้อนที่ไม่เกิดเป็นไอ จากส่วนแลกเปลี่ยน สร้างจากเหล็กกล้าไร้สนิมรูปทรงกระบอก เส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 0.20 เมตร สูง 0.30 เมตร ความจุ 0.09 ลูกบาศก์เมตร ส่วนล่างของอุปกรณ์มีช่องระบายน้ำขนาด $\frac{1}{2}$ นิ้ว ส่วนบนติดตั้งอุปกรณ์วัดความดัน อุณหภูมิ และวาล์วระบายไอน้ำ แสดงดังภาพที่ 3.21



ภาพที่ 3.21 ส่วนเก็บไอน้ำ (Steam Space)

3.2.4 **แผนผังเครื่องผลิตไอน้ำ** หลังจากการสร้างอุปกรณ์หลักข้างต้นที่ได้กล่าวมาแล้วทำการประกอบอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ทำการสร้างขึ้นโดยใช้ ปั๊ม (Pump) วาล์ว (Value) และอุปกรณ์วัดอัตราการไหล (Flow meter) ดังแผนผังในภาพที่ 3.22





ภาพที่ 3.22 แผนผังเครื่องผลิตไอน้ำ

3.3 วิธีการทดลอง

3.3.1 การเตรียมเชื้อเพลิงและทราย

- 3.5.1.1 เตรียมทรายให้ได้ขนาดระหว่าง 200 ไมโครเมตร ถึง 300 ไมโครเมตร
- 3.5.1.2 บดถ่านหินและคัดขนาดให้ต่ำกว่า 1.2 มิลลิเมตร
- 3.5.1.3 บดซีเมนต์ (กะลามะพร้าว กะลาปาล์ม กระถินยักษ์ และยูคาลิปตัส) และคัดขนาดให้ต่ำกว่า 1.2 มิลลิเมตร
- 3.5.1.4 นำถ่านหิน กะลามะพร้าว กะลาปาล์ม กระถินยักษ์ และยูคาลิปตัสไปวิเคราะห์โดยประมาณและวิเคราะห์โดยแยกธาตุ พร้อมทั้งหาค่าปริมาณความร้อน

3.3.2 การจุดเตาและดำเนินการทดลอง

- 3.3.2.1 ปิดแอสวาล์ว และปิดวาล์วด้านล่างของ downcomer แล้วป้อนทรายเข้า downcomer ปริมาณ 25 กิโลกรัม
- 3.3.2.2 จุดเตาเผา (ไรเซอร์) ด้วยแก๊ส LPG โดยป้อนอากาศที่หัวจุดเตาจากเครื่องอัดอากาศ 200 ลิตรต่อนาที สังเกตประกายจุดเปลวไฟที่หัวจุดเตาว่า

ยังคงมีเปลวไฟสีฟ้าติดอยู่ หากไฟดับให้หยุดป้อนแก๊ส LPG ทันทีแล้วเริ่มจุดเตาใหม่ จนกระทั่งอุณหภูมิตำแหน่งเบอร์ 2 (0.5 เมตร) ได้ 600 องศาเซลเซียส

3.3.2.3 ป้อนถ่านหินที่อัตรา 3.00 กิโลกรัมต่อชั่วโมง (2.00 Hz) และ ชีวมวลที่อัตรา 3.00 กิโลกรัมต่อชั่วโมง (12.26 Hz) โดยป้อนอากาศ 100 ลิตรต่อนาทีที่สกรูพีดเดอร์ของชีวมวลด้วย เพื่อป้องกันไม่ให้ความร้อนและเปลวไฟในโรเตอร์ย้อนเข้าสู่ถังเก็บชีวมวลซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญของการไหม้ย้อนของไฟเข้าสู่ถังเก็บแก๊สได้ จนกระทั่งอุณหภูมิตำแหน่งเบอร์ 2 (0.5 เมตร) ได้ 900 องศาเซลเซียส

3.3.2.4 ป้อนอากาศปฐมภูมิจากเครื่องเป่าอากาศ (blower) 300 ลิตรต่อนาที เข้าทางด้านล่างของโรเตอร์ผ่านแผ่นกระจายอากาศ พร้อมทั้งเปิดแอสวาล์วเพื่อให้ทรายใน downcomer ไหลเข้าสู่ส่วนล่างโรเตอร์ด้วยอัตรา 300 กิโลกรัมต่อชั่วโมง จนกระทั่งอุณหภูมิตลอดโรเตอร์อยู่ที่ประมาณ 800 องศาเซลเซียส

3.3.2.5 หยุดป้อนแก๊ส LPG และอากาศที่หัวจุดเตา

3.3.2.6 ป้อนอากาศและเชื้อเพลิงตามสภาวะที่ต้องการ เติมเชื้อเพลิงเข้าถังเก็บอยู่เสมอ จนกระทั่งอุณหภูมิในโรเตอร์คงที่ บันทึกผลการทดลอง (อัตราการป้อนเชื้อเพลิง อัตราการป้อนอากาศ อุณหภูมิ)

- อัตราการป้อนเชื้อเพลิง อ่านค่าด้วย อินเวอร์เตอร์ (ตัวปรับความเร็วของสกรูพีดเดอร์) หน้าจอแสดงค่าแบบดิจิตอล และบันทึกผล
- อัตราการป้อนอากาศปฐมภูมิ อ่านค่าด้วย orifice หน้าจอแสดงค่าแบบดิจิตอล และบันทึก
- อัตราการป้อนอากาศทุติยภูมิ อ่านค่าด้วย โรตารีมิเตอร์
- อุณหภูมิ วัดโดย เทอร์โมคัปเปิล หน้าจอแสดงค่าแบบดิจิตอล และบันทึกผล

3.3.2.7 เปลี่ยนสภาวะการทดลองใหม่ จนกระทั่งอุณหภูมิในโรเตอร์คงที่อีกครั้ง บันทึกผลการทดลอง

3.3.2.8 ทำซ้ำข้อที่ 7 จนกระทั่งเสร็จสิ้นการทดลอง

3.3.3 การเดินระบบผลิตไอน้ำ

- 3.3.3.1 วัดอุณหภูมิจากส่วนอุ่นน้ำได้ 90 องศาเซลเซียส
- 3.3.3.2 ทำการเปิดปั้มน้ำที่ปั้มจากส่วนอุ่นน้ำไปยังส่วนแลกเปลี่ยน
- 3.3.3.3 ปรับอัตราการไหลที่อัตรา 60, 80, 100, 120, 140 และ 160 ลิตรต่อชั่วโมง
- 3.3.3.4 เปิดวาล์วปล่อยไอทำการบันทึกผล อุณหภูมิและความดัน
- 3.3.3.5 นำน้ำแข็งมาใส่ยังส่วนควบแน่น ทำการวัดอัตราการควบแน่นและบันทึกผล

3.3.4 การปิดเตาเผา

- 3.3.4.1 ปิดแอสวาล์ว หยุดการป้อนเชื้อเพลิงถ่านหิน และลดการป้อนเชื้อเพลิงชีวมวลลงเหลือ 2.00 กิโลกรัมต่อชั่วโมง (8.17 Hz) เพื่อป้องกันไฟไหม้ย้อนเข้าถังเก็บชีวมวล
- 3.3.4.2 เมื่ออุณหภูมิในไรเซอร์เหลือประมาณ 600 องศาเซลเซียส หยุดการป้อนเชื้อเพลิงชีวมวล
- 3.3.4.3 เมื่ออุณหภูมิในไรเซอร์เหลือประมาณ 400 องศาเซลเซียส ปิดอากาศปฐมภูมิ
- 3.3.4.4 เมื่ออุณหภูมิในไรเซอร์เหลือประมาณ 200 องศาเซลเซียส หยุดการป้อนอากาศทั้งหมด
- 3.3.4.5 ถ่ายทรายใน Downcomer ออกมาทางวาล์วด้านล่างของ Downcomer

บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับ ผลกระทบของตัวแปรต่างๆ คือชนิดเชื้อเพลิง สัดส่วนผสมระหว่างถ่านหินกับชีวมวล และตำแหน่งของอากาศทุติยภูมิ ที่มีต่อการเผาไหม้ร่วมของถ่านหินและชีวมวลในฟลูอิโดซ์เบดแบบหมุนเวียน โดยถ่านหินที่นำมาใช้ในการทดลองเป็นถ่านหินจากประเทศอินโดนีเซีย คัดซ์ับบิทูมินัส และชีวมวลที่ใช้คือ กะลาปาล์ม กะลามะพร้าว กระถินยักษ์ และยูคาลิปตัสที่มีต่ออุณหภูมิ และองค์ประกอบของแก๊ส ณ ตำแหน่งต่างๆ ของไรเซอร์จากกระบวนการเผาไหม้ โดยทำการวัดอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆ โดย เทอร์โมคัปเปิลและวัดองค์ประกอบของแก๊ส โดยเครื่องวัดฟลูแก๊ส (Flue gas analyzer)

4.1 สมบัติของเชื้อเพลิง

4.1.1 การวิเคราะห์โดยประมาณ (proximate analysis)

องค์ประกอบโดยประมาณของถ่านหินและชีวมวลที่ทำกรวิเคราะห์ได้แก่ปริมาณ ความชื้น ปริมาณเถ้า ปริมาณสารระเหย ปริมาณคาร์บอนคงตัว ผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์โดยประมาณ (proximate analysis)

Proximate analysis	% By Mass				
	Coal	Palm Shell	Coconut shell	Giant Leucaena	Eucalyptus
Fixed Carbon	38.66	18.51	23.32	9.98	15.61
Volatile Matter	35.84	72.24	68.83	70.37	66.10
Moisture	17.11	5.43	6.79	9.98	11.38
Ash	8.39	3.82	1.07	9.67	6.91
Total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

การวิเคราะห์องค์ประกอบโดยประมาณของถ่านหินและชีวมวลทั้ง 4 ชนิด ได้แก่ กะลาปาล์ม กะลามะพร้าว กระจินยักษ์ และยูคาลิปตัส ด้วยวิธีมาตรฐาน ASTM (D 3173, D 3175, D 3174) จะแสดงผลเป็นร้อยละของ ความชื้น ปริมาณเถ้า ปริมาณสารระเหย ปริมาณคาร์บอนคงตัวของถ่านหินและชีวมวล โดยน้ำหนัก จากการวิเคราะห์พบว่า ถ่านหินมีปริมาณคาร์บอนคงตัวและความชื้นมากที่สุด คือร้อยละ 38.66 และ 17.11 ชีวมวลทั้ง 4 ชนิดมีปริมาณสารระเหย มากกว่าถ่านหินมาก โดยปริมาณสารระเหยของ กะลาปาล์ม กะลามะพร้าว กระจินยักษ์ และยูคาลิปตัสคือร้อยละ 72.24, 68.83, 70.37 และ 66.10 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ กระจินยักษ์มีปริมาณของเถ้ามากที่สุดคือร้อยละ 9.67

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	Giant Leucaena	Eucalyptus
C	54.19	49.06	45.95	55.13	47.83
H	6.96	7.41	5.76	6.82	5.57
N	1.01	0.65	0.09	0.89	0.37
O	37.54	42.79	48.18	37.12	46.17
S	0.3	0.09	0.02	0.04	0.06
Total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

การวิเคราะห์องค์ประกอบโดยแยกธาตุของถ่านหินและชีวมวลทั้ง 4 ชนิด ได้แก่ กะลาปาล์ม กะลามะพร้าว กระจินยักษ์ และยูคาลิปตัส โดยใช้ เครื่อง CHN analyzer จะแสดงผลเป็น ร้อยละ คาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน ออกซิเจน และซัลเฟอร์ ของถ่านหินและชีวมวลโดยน้ำหนักปราศจากความชื้นและเถ้า จากการวิเคราะห์พบว่าถ่านหินมีปริมาณคาร์บอน ไนโตรเจน และซัลเฟอร์มากที่สุดคือร้อยละ 54.19, 1.01 และ 0.3 ตามลำดับ ส่วนชีวมวลมีปริมาณไนโตรเจน น้อยกว่าถ่านหิน และมีปริมาณไม่เท่ากัน โดยปริมาณไนโตรเจนของ กะลาปาล์ม กะลามะพร้าว กระจินยักษ์ และยูคาลิปตัส คือร้อยละ 0.65, 0.09, 0.89 และ 0.37 ตามลำดับ ชีวมวลมีปริมาณ ซัลเฟอร์น้อยมาก โดยปริมาณซัลเฟอร์ของ กะลาปาล์ม กะลามะพร้าว กระจินยักษ์ และยูคาลิปตัส คือร้อยละ 0.09, 0.02, 0.04 และ 0.06 ตามลำดับ

ซึ่งจากผลของการวิเคราะห์โดยประมาณ และการวิเคราะห์โดยแยกธาตุของชีวมวลทั้ง 4 ชนิด คือ กะลาปาล์ม กะลามะพร้าว (มาริน ปูนอน, 2553) กระจินยักษ์ (Jiachun, 2000) และยูคาลิปตัส (1st Conference of Biomass for Energy and Industry, 2000) มีค่าแนวโน้มใกล้เคียงกับงานวิจัยนี้ดังตารางที่ 4.1-4.2

4.1.3 การวิเคราะห์หาค่าพลังงานความร้อนของถ่านหินและชีวมวล

การวิเคราะห์หาค่าพลังงานความร้อนของถ่านหินและชีวมวล ด้วยเครื่อง bomb calories meter ค่าพลังงานความร้อนของถ่านหินและชีวมวลแสดงดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ค่าพลังงานความร้อนของถ่านหินและชีวมวล

Material	Gross heat (cal/g)
Coal	5221.8
Palm shell	4875.7
Coconut shell	4470.4
Giant Leucaena	3725.9
Eucalyptus	3476.3

การวิเคราะห์หาค่าพลังงานความร้อนของถ่านหินและชีวมวล จะแสดงผลเป็นค่าพลังในหน่วยแคลอรีต่อกรัม จากการวิเคราะห์พบว่าถ่านหินให้ค่าพลังงานความร้อนมากที่สุดคือ 5221.8 แคลอรีต่อกรัม และชีวมวลที่ให้ค่าพลังงานความร้อนมากที่สุดใกล้เคียงกับถ่านหิน คือกะลาปาล์ม ซึ่งให้ค่าพลังงานความร้อน 4875.7 แคลอรีต่อกรัม ชีวมวลชนิดอื่นๆ โดยกะลามะพร้าวและกระถินยักษ์ให้ค่าพลังงานความร้อน 4470.4 และ3725.9 แคลอรีต่อกรัม ตามลำดับ ส่วนยูคาลิปตัสให้ค่าพลังงานความร้อนน้อยสุดคือ 3476.3 แคลอรีต่อกรัม

ตารางที่ 4.4 สรุปอัตราการป้อนเชื้อเพลิง

	kg/hr	Hz
coal	7	5.46
	4.9	4.12
	3.5	3.23
	2.1	2.34
Palm shell	7	13.91
	4.9	9.98
	3.5	7.36
	2.1	4.74
Coconut shell	7	15.49
	4.9	10.70
	3.5	7.50
	2.1	4.30
Giant leucaena	7	49.78
	4.9	35.50
	3.5	25.99
	2.1	16.47
Eucalyptus	7	/
	4.9	32.40
	3.5	22.56
	2.1	12.71

4.2 การหาปริมาณอากาศปฐมภูมิต่ำสุดที่ทำให้ทรายในโรเซอ์เกิดการฟลูอิด์และ หมุนเวียน

เนื่องจากแก๊สออกซิเจนคือปัจจัยที่มีความสำคัญมากปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อการปล่อยสารประกอบออกไซด์ของไนโตรเจน จากกระบวนการเผาไหม้ โดยสารประกอบออกไซด์ของไนโตรเจน จะเกิดได้มากขึ้นหากมีปริมาณแก๊สออกซิเจนมากขึ้น ซึ่งแก๊สออกซิเจนที่ใช้ในงานวิจัยนี้มาจากอากาศ การป้อนอากาศ 3 ตำแหน่งในโรเซอ์ เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการสะสมของอากาศมากเกินไปที่จุดใดจุดหนึ่ง จึงเป็นข้อดีอีกวิธีการหนึ่งที่สามารถลดการเกิดสารประกอบออกไซด์ของไนโตรเจน ได้ โดยเฉพาะการควบคุมการป้อนปริมาณอากาศที่ตำแหน่งด้านล่างของโรเซอ์ที่มีการป้อนเชื้อเพลิงเข้ามาด้วยให้น้อยที่สุด ซึ่งการที่มีอากาศ และเชื้อเพลิงมาก (ปริมาณไนโตรเจนในเชื้อเพลิงมาก) จะทำให้อุณหภูมิสูงมาก ย่อมก่อให้เกิดสารประกอบออกไซด์ของไนโตรเจนได้มากขึ้น ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงต้องใช้ปริมาณอากาศปฐมภูมิที่น้อยที่สุดที่ทำให้ทรายซึ่งเป็นอนุภาคส่วนใหญ่ในระบบเกิดการฟลูอิด์และหมุนเวียน โดยโรเซอ์หรือห้องเผาไหม้ที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีลักษณะเป็นท่อรูปทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 10 เซนติเมตร สูง 3 เมตร อัตราการไหลของทรายผ่านแอดวาล์ว 100 กิโลกรัมต่อชั่วโมงจาก downcomer มาสู่ด้านล่างของโรเซอ์ ซึ่งจากการสังเกตลักษณะการไหลของอนุภาคในโรเซอ์พบว่าอัตราการป้อนอากาศปฐมภูมิ 300 ลิตรต่อนาที เป็นปริมาณอากาศต่ำสุดที่ทำให้ทรายเกิดการฟลูอิด์และหมุนเวียน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงป้อนอากาศปฐมภูมิตั้งที่ทุกการทดลองที่ 300 ลิตรต่อนาที

4.3 การหาขนาดของชีวมวลและปริมาณอากาศที่เหมาะสมสำหรับป้อนเข้าไปในสกรูพีด เตอร์สำหรับป้อนชีวมวลเพื่อไม่ให้เปลวไฟและความร้อนไหลย้อนกลับไปที่ชีวมวล ในถังเก็บ

เนื่องจากการป้อนชีวมวลเข้าโรเซอ์โดยใช้ สกรูพีดเตอร์ จะเกิดปัญหาไฟไหม้ย้อนกลับเข้าไปในสกรูพีดเตอร์ และเกิดการเผาไหม้ในถังเก็บเชื้อเพลิงได้ เนื่องจากชีวมวลมีลักษณะเบา มีปริมาณสารระเหยค่อนข้างมาก ติดไฟได้ง่ายที่อุณหภูมิต่ำ หากอัตราการป้อนเชื้อเพลิงน้อยกว่าการเผาไหม้ย้อนกลับไปในสกรูพีดเตอร์ ก็จะทำให้เกิดการเผาไหม้ในถังเก็บเชื้อเพลิง หรือความดันในถังเก็บชีวมวลน้อยกว่าความดันในโรเซอ์ เปลวไฟและความร้อนก็จะไหลย้อนกลับไปในสกรูพีดเตอร์ได้ง่ายทำให้เกิดการเผาไหม้ในถังเก็บเชื้อเพลิงในที่สุด ดังนั้นหากป้อนชีวมวลที่มีความหนาแน่นน้อย มีลักษณะเป็นเส้นใย เกิดการเกาะติดกันเป็นกลุ่มก้อนได้ มีช่องว่างของอากาศแทรกอยู่ระหว่างอนุภาคชีวมวลในปริมาณมาก ก็จะทำให้เกิดการเผาไหม้ย้อนกลับเข้าไปในสกรูพีดเตอร์

และเกิดการเผาไหม้ในถังเก็บเชื้อเพลิงง่ายกว่าปกติ ชีวมวลที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ กะลาปาล์ม กะลามะพร้าว กระจินยักษ์ และยูคาลิปตัส ซึ่งกระจินยักษ์ และยูคาลิปตัส ก็ประสบปัญหามากจากการเผาไหม้ย้อนกลับเข้าไปในสกรูพีดเดอร์ และเกิดการเผาไหม้ในถังเก็บเชื้อเพลิง จากการทดลองพบว่าขนาดของชีวมวลทั้ง 4 ชนิดที่ถูกบดย่อยและสามารถผ่านตระแกรงแยกขนาด 1200 ไมโครเมตร และปริมาณอากาศป้อนที่สกรูพีดเดอร์ของถังเก็บชีวมวลต้องมากกว่าหรือเท่ากับ 100 ลิตรต่อนาที ทำให้อาจไม่เกิดปัญหาไฟไหม้ย้อนกลับเข้าไปในสกรูพีดเดอร์ และการแก้ปัญหาของการเกิดช่องว่างของอากาศแทรกอยู่ระหว่างอนุภาคชีวมวลในปริมาณมากต้องใช้เหล็กกระทันชีชีวมวลในถังเก็บเมื่อมีช่องว่างของอากาศเกิดขึ้น สุดท้ายในกรณีของยูคาลิปตัสยังอาจต้องเพิ่มความชื้นโดยการผสมน้ำลงไปชีวมวลก่อนใส่ลงไปถังเก็บชีวมวลก่อนการทำการทดลองในช่วงแรก (ช่วงที่เริ่มให้ความร้อนโดยแก๊สหุงต้ม) การแก้ปัญหาทั้ง 4 วิธีจะทำให้สามารถป้อนชีวมวลได้อย่างต่อเนื่องและไม่เกิดการเผาไหม้ย้อนกลับเข้าไปในสกรูพีดเดอร์ และเกิดการเผาไหม้ในถังเก็บเชื้อเพลิง

4.4 การหาปริมาณเชื้อเพลิงและปริมาณอากาศในการเผาไหม้ในระบบฟลูอิดไคซ์เบดแบบหมุนเวียน

จากการทดลองพบว่าอัตราการป้อนถ่านหิน 7 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ที่อัตราการป้อนอากาศร้อยละ 100 ของการเผาไหม้สมบูรณ์ ดังแสดงในตารางที่ 4.10 และอุณหภูมิในไรเซอร์อยู่ในช่วงไม่เกิน 1,000 องศาเซลเซียส ทำให้มีโอกาสที่จะเกิดเถ้าหลอมเกาะติดในเตาได้น้อย โดยเถ้าหลอมจะเกิดขึ้นได้ง่ายหากอุณหภูมิในเตาเผาสูงกว่า 1,200 องศาเซลเซียส และอัตราการป้อนเชื้อเพลิงผสม 7 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ที่อัตราการป้อนอากาศร้อยละ 100 ของการเผาไหม้สมบูรณ์ สามารถเผาไหม้ได้โดยที่ไฟไม่ดับ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงกำหนดอัตราการป้อนของเชื้อเพลิงคงที่ที่ 7 กิโลกรัมต่อชั่วโมง และมีการปรับค่าปริมาณอากาศที่ป้อน

ตารางที่ 4.5 ปริมาณอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ถ่านหินร้อยละ 100 , ถ่านหินผสมชีวมวลในอัตราส่วน 70:30 , 50:50 และ 30:70 ที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิง 7 กิโลกรัมต่อชั่วโมง โดยคิดปริมาณอากาศที่การเผาไหม้สมบูรณ์ ร้อยละ 100 ซึ่งทำการทดลองที่สภาวะอุณหภูมิ 32 องศาเซลเซียส และความดัน 101.3 เมกะปาสคาล (ภาคผนวก ข)

Fuel	Air Required (L/min)
Feed 7.0 kg/hr	100% combustion
Coal 100%	522.9
Coal: Palm shell 70:30	540.6
Coal: Palm shell 50:50	550.4
Coal: Palm shell 30:70	562.3
Coal: Coconut shell 70:30	511.0
Coal: Coconut shell 50:50	501.1
Coal: Coconut shell 30:70	493.2
Coal: Giant Leucaena 70:30	538.6
Coal: Giant Leucaena 50:50	548.4
Coal: Giant Leucaena 30:70	556.3
Coal: Eucalyptus 70:30	501.1
Coal: Eucalyptus 50:50	485.3
Coal: Eucalyptus 30:70	469.5

4.5 ศึกษาผลของชนิดชีวมวลเผาไหม้ร่วมกับถ่านหินต่อการปล่อยแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์คาร์บอนไดออกไซด์ และสารประกอบไนโตรเจนออกไซด์

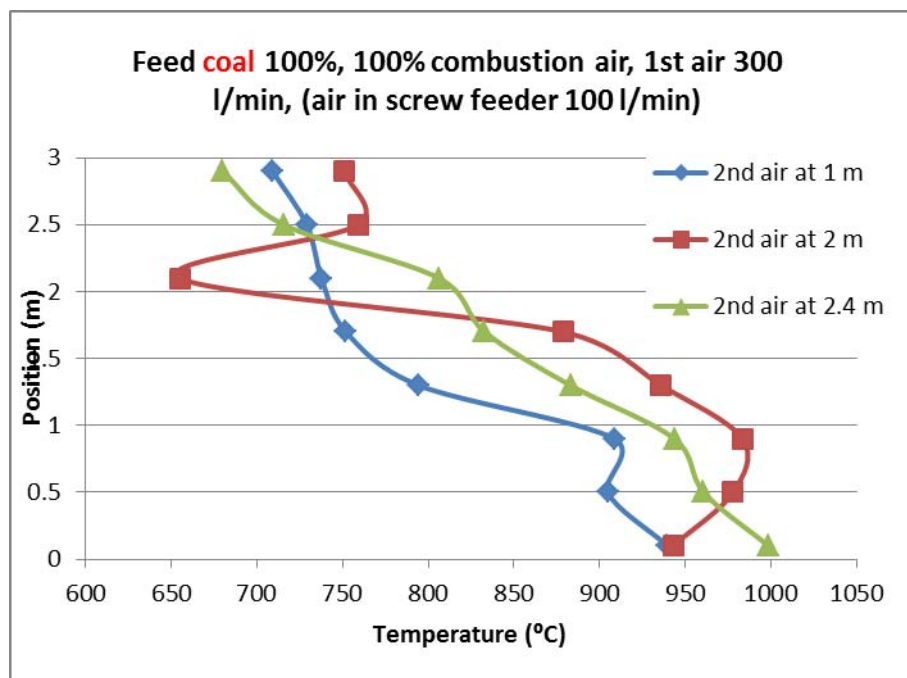
4.5.1 ศึกษาผลของการเผาไหม้ร่วมของถ่านหินกับชีวมวลที่มีต่ออุณหภูมิในไรเซอร์

4.5.1.1 ศึกษาผลของการเผาไหม้ถ่านหินที่มีต่ออุณหภูมิในไรเซอร์

จากคุณสมบัติของเชื้อเพลิงถ่านหินมีค่าความร้อน 5221.8 แคลอรีต่อกรัม โดยค่าความร้อนนี้คิดในกรณีที่เผาไหม้หมดอย่างสมบูรณ์เท่านั้น ซึ่งโดยทั่วไปแล้วไม่มีการเผาไหม้ที่สมบูรณ์เกิดขึ้น โดยเฉพาะการเผาไหม้ในเตาเผาฟลูอิโดซ์เบดแบบหมุนเวียนที่มีการใช้ปริมาณอากาศมาก ๆ ความเร็วของไหลสูง ๆ หากใช้ระบบดักจับและคัดแยกอนุภาคของแข็งและแก๊สที่มีประสิทธิภาพต่ำ ย่อมมีโอกาสที่เชื้อเพลิงที่ยังเผาไหม้ไม่สมบูรณ์หลุดลอดออกไปจากระบบได้มากยิ่งขึ้น จากการทดลอง ได้ป้อนอากาศปฐมภูมิคงที่ 300 ลิตรต่อนาที มีการป้อนอากาศเพิ่มที่สกรูพีดเดอร์ ของถ่านหินซึ่งอยู่ที่ความสูง 0.35 เมตร จากแผ่นกระจายอากาศ เพื่อป้องกันการเผาไหม้ย้อนกลับไปในสกรูพีดเดอร์ อีก 100 หรือ 200 ลิตรต่อนาที แก๊สและอนุภาคของแข็งจะไหลต่อไปยังไซโคลนที่ความสูง 3.0 เมตร ดังนั้นความเร็วของแก๊สในไรเซอร์ตั้งแต่ตำแหน่งของการป้อนเชื้อเพลิงขึ้นไปจึงเท่ากับ 0.849 เมตรต่อวินาทีหากป้อนอากาศเพิ่มที่สกรูพีดเดอร์ 100 ลิตรต่อวินาที และ 1.061 เมตรต่อวินาทีหากป้อนอากาศเพิ่มที่สกรูพีดเดอร์ 200 ลิตรต่อวินาที ถ้ามีการป้อนอากาศทุติยภูมิ ความเร็วของแก๊สเหนือตำแหน่งการป้อนอากาศทุติยภูมิก็จะสูงขึ้นไปอีก ดังนั้นหากอนุภาคของเชื้อเพลิงมีความเร็วเท่าความเร็วของแก๊สที่มีการป้อนอากาศเพิ่มที่สกรูพีดเดอร์ 100 ลิตรต่อวินาทีเท่านั้น โดยที่ไม่คิดความเร็วที่เพิ่มขึ้นจากการเติมอากาศทุติยภูมิ ก็จะใช้เวลาอยู่ในไรเซอร์เพียง 4.16 วินาทีตั้งแต่เริ่มเข้าสู่ไรเซอร์ที่ความสูง 0.35 เมตร จนกระทั่งไหลต่อไปยังไซโคลนที่ความสูง 3.0 เมตร โดยปกติแล้วความเร็วของอนุภาคของแข็งย่อมน้อยกว่าแก๊ส แต่ก็ยังคงไม่นานพอที่จะทำให้เกิดการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ในการไหลผ่านไรเซอร์เพียงครั้งเดียว จึงต้องมีไซโคลนคอยดักจับและคัดแยกอนุภาคของแข็งออกจากแก๊ส แล้วเชื้อเพลิงที่ยังเผาไหม้ไม่หมดก็จะถูกนำเข้าไปไรเซอร์มาเผาไหม้ต่อไป

ในการทดลองวัดอุณหภูมิในการเผาไหม้ของถ่านหิน ณ ตำแหน่งต่างๆ ตามความสูงของไรเซอร์ (ภาคผนวก ค) เมื่ออัตราการป้อน 7 กิโลกรัมต่อชั่วโมง โดยที่มีอัตราการป้อนอากาศเป็นแบบเผาไหม้สมบูรณ์ร้อยละ 100 อัตราการป้อนอากาศปฐมภูมิคงที่เท่ากับ 300 ลิตรต่อวินาที และอากาศที่สกรูพีดเดอร์ของชีวมวล 100 ลิตรต่อวินาที อากาศที่เหลือป้อนเข้าที่อากาศทุติยภูมิทั้งหมดที่สภาวะการป้อนอากาศทุติยภูมิที่ตำแหน่ง 2 เมตร อุณหภูมิตลอดไรเซอร์ในการทดลองต่างๆแสดง

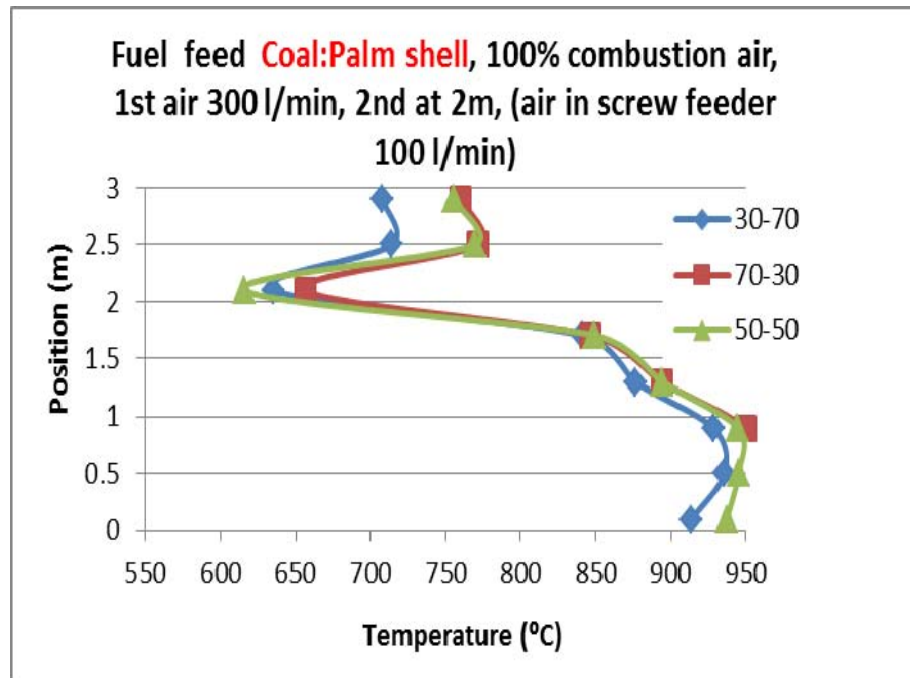
ได้ดังภาพที่ 4.6 พบว่าบริเวณส่วนล่างของโรเซอร์ (T1-T3) อุณหภูมิจะค่อยๆสูงขึ้นอยู่ในช่วง 900 – 1000 องศาเซลเซียส ส่วนในช่วง (T4-T6) อุณหภูมิจะลดต่ำลง และต่ำสุดที่ T6 สำหรับ (T7-T8) อุณหภูมิก็จะค่อยๆสูงขึ้นอยู่ในช่วง 650-750 องศาเซลเซียส อุณหภูมิตลอดโรเซอร์ในการทดลอง แสดงได้ดังภาพที่ 4.6 หากสังเกตอุณหภูมิตลอดโรเซอร์ในการทดลอง จะพบว่ามีอยู่ช่วงหนึ่งที่ อุณหภูมิในโรเซอร์ลดลงอย่างกะทันหันแล้วจึงค่อยๆเพิ่มสูงขึ้นใหม่ โดยอุณหภูมิจะลดลงที่ ตำแหน่งความสูง 2 เมตร ซึ่งตำแหน่งความสูงนี้ก็คือตำแหน่งที่มีการป้อนอากาศทุติยภูมิซึ่งเป็น อากาศเย็นเข้ามานั่นเอง ทำให้อุณหภูมิลดลงและอากาศทุติยภูมิที่เติมเข้ามานี้ก็จะช่วยเผาไหม้ เชื้อเพลิงที่ยังเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ทำให้อุณหภูมิสูงขึ้น และอีกหนึ่งเหตุผลคืออากาศทุติยภูมิที่ ป้อนเข้ามานี้มีลักษณะการเคลื่อนที่ที่ตั้งฉากกับอนุภาคและอากาศปฐมภูมิ จะมีส่วนขัดขวางการ เคลื่อนที่ของอนุภาคด้วย ทำให้เชื้อเพลิงที่ควรจะไปได้อัตราที่มากกว่านี้กลับชะลอการ เคลื่อนที่ขึ้น ทำให้เชื้อเพลิงมีเวลาในการเกิดการเผาไหม้ได้มากขึ้นอีก ซึ่งเป็นเหตุผลที่สอดคล้อง จากผลของอุณหภูมิในช่วง (T7-T8) ที่กลับมาสูงขึ้นอีกครั้ง แต่ในส่วนของการป้อนอากาศทุติยภูมิที่ ตำแหน่ง 1 เมตร นั้นพบว่าเป็นการเพิ่มปริมาณอากาศรวมให้มากขึ้นไป เป็นผลให้มีเวลาในการ เผาไหม้น้อยลง จึงมีอุณหภูมิตลอดโรเซอร์ที่ต่ำสุดในทุกการทดลอง และในส่วนของการป้อนอากาศ ทุติยภูมิที่ตำแหน่ง 2.4 เมตร นั้นก็พบว่าเกิดการเผาไหม้แบบสมบูรณ์อีกครั้ง ณ ตำแหน่งที่ป้อน อากาศทุติยภูมิ แต่ความหนาแน่นของเชื้อเพลิงในส่วนบนของโรเซอร์นั้นเบาบางกว่าในส่วนล่างของ โรเซอร์ อีกทั้งตำแหน่งที่ป้อนอากาศทุติยภูมินั้นสูงเกินไปจึงทำให้มีเวลาในการเผาไหม้ได้น้อยกว่าที่ ตำแหน่งการป้อนอากาศทุติยภูมิ 2 เมตร



ภาพที่ 4.1 อุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆ ในไรเซอร์ที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิงถ่านหิน 7 กิโลกรัมต่อ ชั่วโมง อากาศรวมร้อยละ 100 ในการเผาไหม้สมบูรณ์ อากาศปฐมภูมิ 300 ลิตรต่อนาที ป้อน อากาศที่สกรูพิดเดอร์ของชีวมวล 100 ลิตรต่อนาที อากาศที่เหลือเป็นอากาศทุติยภูมิตำแหน่ง 1, 2 และ 2.4 เมตร

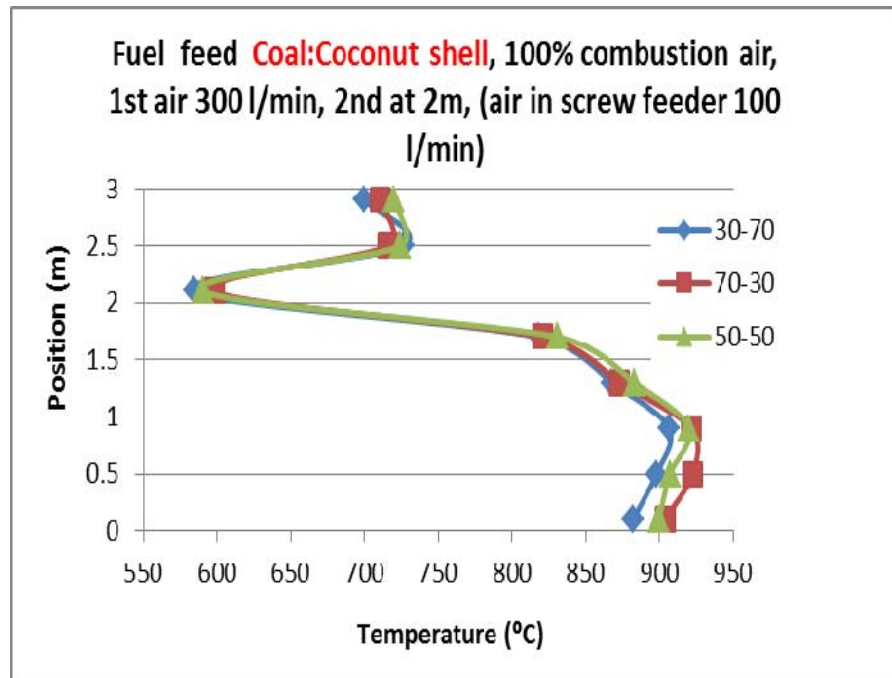
4.5.1.2 ศึกษาผลของชนิดของชีวมวลเผาไหม้ร่วมกับถ่านหินที่มีต่ออุณหภูมิในไรเซอร์

ในการทดลองนี้ได้ทำการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่สัดส่วนถ่านหินต่อชีวมวลต่างๆ โดยที่มีอัตราการป้อนอากาศเป็นแบบเผาไหม้สมบูรณ์ร้อยละ 100 เหมือนกัน แบ่งป้อนอากาศปฐมภูมิ 300 ลิตรต่อนาที และอากาศที่สกรูพิดเดอร์ของชีวมวล 100 ลิตรต่อนาที อากาศที่เหลือป้อนเข้าที่ อากาศทุติยภูมิทั้งหมด และที่สภาวะการป้อนอากาศทุติยภูมิที่ตำแหน่ง 2 เมตร ของการเผาไหม้ ถ่านหินนั้นทำให้อุณหภูมิเฉลี่ยตลอดไรเซอร์สูงสุด ดังนั้นในการเผาไหม้ร่วมของถ่านหินและชีวมวล จึงป้อนอากาศทุติยภูมิที่ตำแหน่ง 2 เมตร การศึกษาถึงผลของสัดส่วนของเชื้อเพลิงผสมถ่านหินและชีวมวลที่มีผลต่อการเผาไหม้ ผลที่ได้จะนำไปเปรียบเทียบกับ การเผาไหม้เชื้อเพลิงถ่านหินแบบไม่ผสมชีวมวล โดยมีสัดส่วนการผสมเท่ากับ ร้อยละ 30, 50, 70 โดยมวล จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าชีวมวลทั้งสี่ชนิดมีแนวโน้มเดียวกันคือ สัดส่วนการผสมชีวมวลที่มากขึ้น จะทำให้แนวโน้มอุณหภูมิตลอดไรเซอร์มีค่าต่ำลง เป็นเพราะว่าชีวมวลทั้งสี่ชนิดมีค่าความร้อนที่ต่ำกว่าถ่านหิน ดังนั้นหากมีถ่านหินผสมในเชื้อเพลิงมากก็จะทำให้การเผาไหม้เชื้อเพลิงให้ค่าความร้อนมาก แนวโน้มอุณหภูมิโดยรวมตลอดไรเซอร์ก็จะสูงตามไปด้วย อุณหภูมิตลอดไรเซอร์ในการทดลองต่างๆแสดงได้ดังภาพที่ 4.7 ถึง 4.10



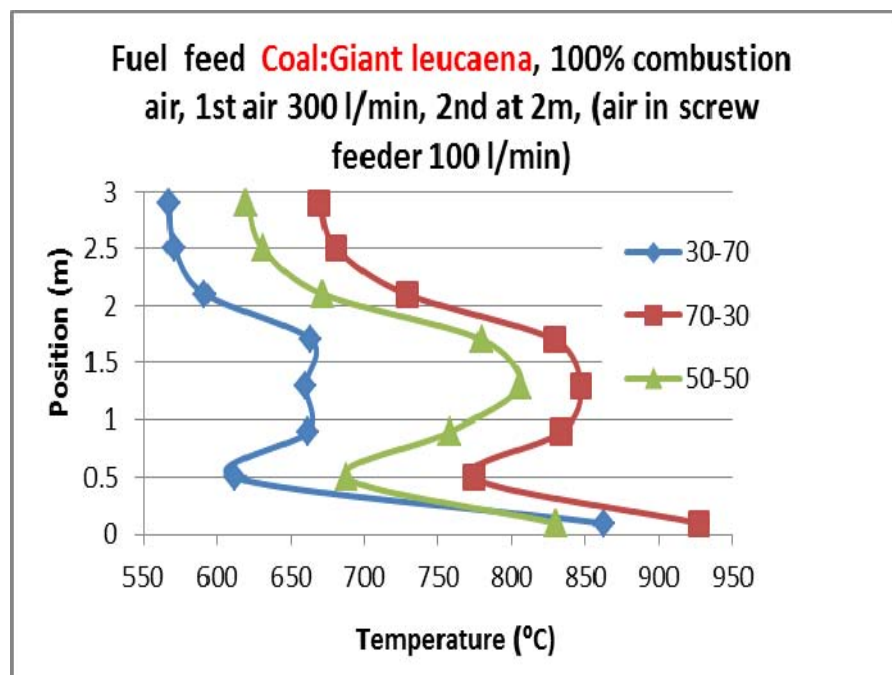
ภาพที่ 4.2 อุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆในโรเตอร์ที่อัตราการป้อนถ่านหินต่อกะลาปาล์ม อากาศรวมร้อยละ 100 ในการเผาไหม้สมบูรณ์ อากาศปฐมภูมิ 300 ลิตรต่ออนาที ป้อนอากาศที่สกรูฟีดเดอร์ของชีวมวล 100 ลิตรต่ออนาที อากาศทุติยภูมิที่ตำแหน่ง 2 เมตร

1. ถ่านหินต่อกะลาปาล์ม 30:70
2. ถ่านหินต่อกะลาปาล์ม 50:50
3. ถ่านหินต่อกะลาปาล์ม 70:30



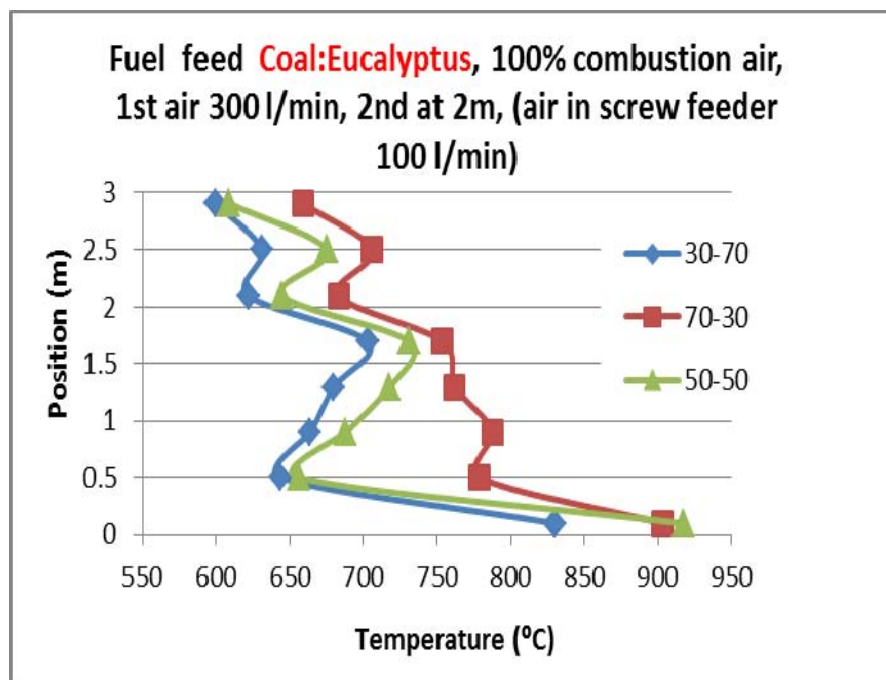
ภาพที่ 4.3 อุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆในโรเตอร์ที่อัตราการป้อนถ่านหินต่อกะลามะพร้าว อากาศรวมร้อยละ 100 ในการเผาไหม้สมบูรณ อากาศปฐมภูมิ 300 ลิตรต่อนาที ป้อนอากาศที่สกรูพีดเดอร์ของชีวมวล 100 ลิตรต่อนาที อากาศทุติยภูมิที่ตำแหน่ง 2 เมตร

1. ถ่านหินต่อกะลามะพร้าว 30:70
2. ถ่านหินต่อกะลามะพร้าว 50:50
3. ถ่านหินต่อกะลามะพร้าว 70:30



ภาพที่ 4.4 อุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆในโรเตอร์ที่อัตราการป้อนถ่านหินต่อกระถินยักษ์ อากาศรวมร้อยละ 100 ในการเผาไหม้สมบูรณ์ อากาศปฐมภูมิ 300 ลิตรต่อนาที ป้อนอากาศที่สกรูฟีดเดอร์ของชีวมวล 100 ลิตรต่อนาที อากาศทุติยภูมิที่ตำแหน่ง 2 เมตร

1. ถ่านหินต่อกระถินยักษ์ 30:70
2. ถ่านหินต่อกระถินยักษ์ 50:50
3. ถ่านหินต่อกระถินยักษ์ 70:30



ภาพที่ 4.5 อุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆในโรเตอร์ที่อัตราการป้อนถ่านหินต่อยูคาลิปตัส อากาศรวมร้อยละ 100 ในการเผาไหม้สมบูรณ์ อากาศปฐมภูมิ 300 ลิตรต่อนาที ป้อนอากาศที่สกรูฟีดเดอร์ของชีวมวล 100 ลิตรต่อนาที อากาศทุติยภูมิที่ตำแหน่ง 2 เมตร

1. ถ่านหินต่อยูคาลิปตัส 30:70
2. ถ่านหินต่อยูคาลิปตัส 50:50
3. ถ่านหินต่อยูคาลิปตัส 70:30

จากภาพที่ 4.7-4.10 หากสังเกตอุณหภูมิตลอดโรเตอร์ในแต่ละการทดลอง จะพบว่าที่ตำแหน่งความสูง 2 เมตร อุณหภูมิในโรเตอร์จะลดลงอย่างกะทันหันแล้วจึงค่อยๆ เพิ่มสูงขึ้น เพราะเป็นตำแหน่งที่มีการป้อนอากาศทุติยภูมิซึ่งเป็นอากาศเย็นเข้ามาและอากาศทุติยภูมิที่เดิมเข้ามานี้ก็จะช่วยเผาไหม้เชื้อเพลิงที่ยังเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ทำให้อุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นอีกครั้ง ซึ่งในภาพที่ 4.7 แสดงการป้อนถ่านหินและกะลาปาล์ม โดยจะเพิ่มปริมาณของกะลาปาล์มจากร้อยละ 30 , 50 และ 70 โดยน้ำหนัก อุณหภูมิตลอดโรเตอร์ในแต่ละการทดลอง จะพบว่าอุณหภูมิลดลง

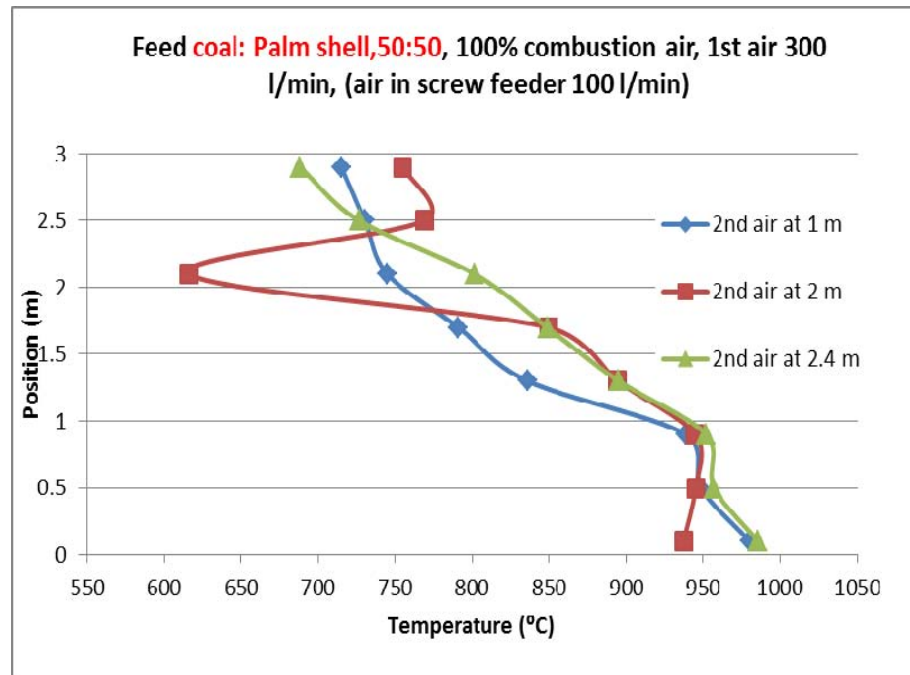
เล็กน้อย (อุณหภูมิอยู่ในช่วง 650-900 องศาเซลเซียส ซึ่งอุณหภูมิการเผาไหม้ถ่านหินอยู่ในช่วง 650-1000 องศาเซลเซียส) เป็นผลเนื่องจากค่าพลังงานความร้อนของถ่านหินมากกว่ากะลาปาล์มเล็กน้อย ภาพที่ 4.8 แสดงการป้อนถ่านหินและกะลามะพร้าว โดยจะเพิ่มปริมาณของกะลามะพร้าวจากร้อยละ 30 , 50 และ 70 โดยน้ำหนัก อุณหภูมิตลอดโรเซอริในแต่ละการทดลอง จะพบว่าอุณหภูมิลดลงเล็กน้อย (อุณหภูมิอยู่ในช่วง 600-850 องศาเซลเซียส) เป็นผลเนื่องจากค่าพลังงานความร้อนของถ่านหินมากกว่ากะลามะพร้าวไม่มากนัก ในส่วนของภาพที่ 4.9 และ 4.10 แสดงการป้อนถ่านหินร่วมกับกระถินยักษ์ และยูคาลิปตัส โดยจะเพิ่มปริมาณของกระถินยักษ์ และยูคาลิปตัส จากร้อยละ 30 , 50 และ 70 โดยน้ำหนัก อุณหภูมิตลอดโรเซอริในแต่ละการทดลอง จะพบว่าอุณหภูมิลดลงอย่างมากเป็นผลเนื่องจากค่าพลังงานความร้อนของกระถินยักษ์ และยูคาลิปตัส มีค่าน้อยกว่าถ่านหินค่อนข้างมากนั่นเอง

4.5.1.3 ศึกษาผลของตำแหน่งการป้อนอากาศทุติยภูมิที่มีต่ออุณหภูมิในโรเซอริ

ในการทดลองนี้ได้ทำการเผาไหม้เชื้อเพลิงถ่านหินอย่างเดียว และเชื้อเพลิงถ่านหินผสมชีวมวลสัดส่วนถ่านหินต่อชีวมวลร้อยละ 50:50 โดยที่มีอัตราการป้อนอากาศเป็นแบบเผาไหม้สมบูรณ์ร้อยละ 100 เหมือนกัน แบ่งป้อนอากาศปฐมภูมิ 300 ลิตรต่อนาที และอากาศที่สกรูพิดเตอร์ของชีวมวล 100 ลิตรต่อนาที อากาศที่เหลือ ป้อนเข้าที่อากาศทุติยภูมิทั้งหมด โดยทำการศึกษาผลเนื่องจากการเปลี่ยนตำแหน่งการป้อนอากาศทุติยภูมิที่ตำแหน่ง 1 เมตร 2 เมตร และ 2.4 เมตร สำหรับเชื้อเพลิงถ่านหินนั้นจากการศึกษาร่วมกับผลของปริมาณองค์ประกอบฟลูแก๊ส พบว่า ณ ตำแหน่ง 2 เมตร เป็นบริเวณที่ถ่านหินเกิดการเผาไหม้มาก หรือที่เรียกว่า บริเวณเกิดปฏิกิริยา (Reaction zone) ทำให้การป้อนอากาศทุติยภูมิไปที่ตำแหน่งบริเวณเกิดปฏิกิริยา (Reaction zone) จะช่วยเติมออกซิเจนให้แก่ปฏิกิริยา เกิดการเผาไหม้ได้ดีทำให้มีอุณหภูมิเฉลี่ยภายในโรเซอริที่สูงกว่าการป้อนอากาศทุติยภูมิที่ตำแหน่ง 1 เมตร และ 2.4 เมตร ดังแสดงในภาพที่ 4.6

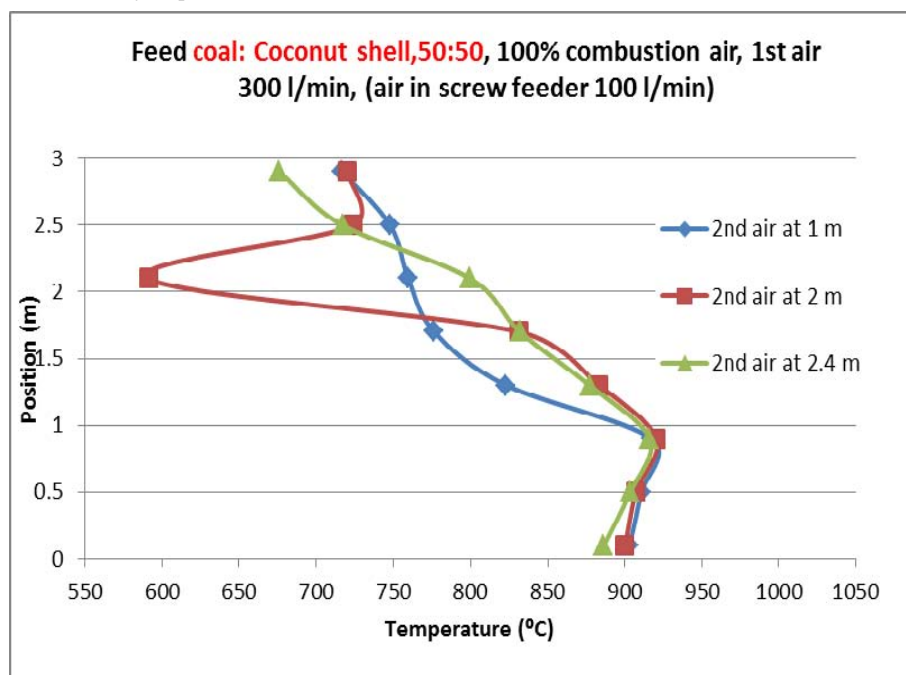
ในส่วนการทดลองการเผาไหม้เชื้อเพลิงถ่านหินผสมชีวมวลมีแนวโน้มเดียวกันคือ เมื่อเปลี่ยนตำแหน่งการป้อนอากาศทุติยภูมิขึ้นไปในตำแหน่งที่สูงขึ้นมีแนวโน้มทำให้อุณหภูมิสูงขึ้นตลอดโรเซอริ เนื่องจากด้านล่างโรเซอริมีอากาศปฐมภูมิที่เพิ่งเข้ามาเมื่อรวมกับอากาศทุติยภูมิที่ป้อนเข้าไป ทำให้อากาศที่มากเกินไป นอกจากจะช่วยในการเพิ่มออกซิเจนในกระบวนการเผาไหม้ และชะลอการเคลื่อนที่ของอนุภาคของเชื้อเพลิงในการทำปฏิกิริยาแล้ว ยังทำหน้าที่ดูดซับความร้อนและพาความร้อนออกไปจากระบบด้วย ซึ่งสอดคล้องกับผลของการทดลองที่ป้อน

อากาศทุติยภูมิที่ตำแหน่ง 2.4 เมตร มีแนวโน้มอุณหภูมิเฉลี่ยตลอดโรเตอร์สูงสุด ดังแสดงในภาพที่ 4.11-4.14



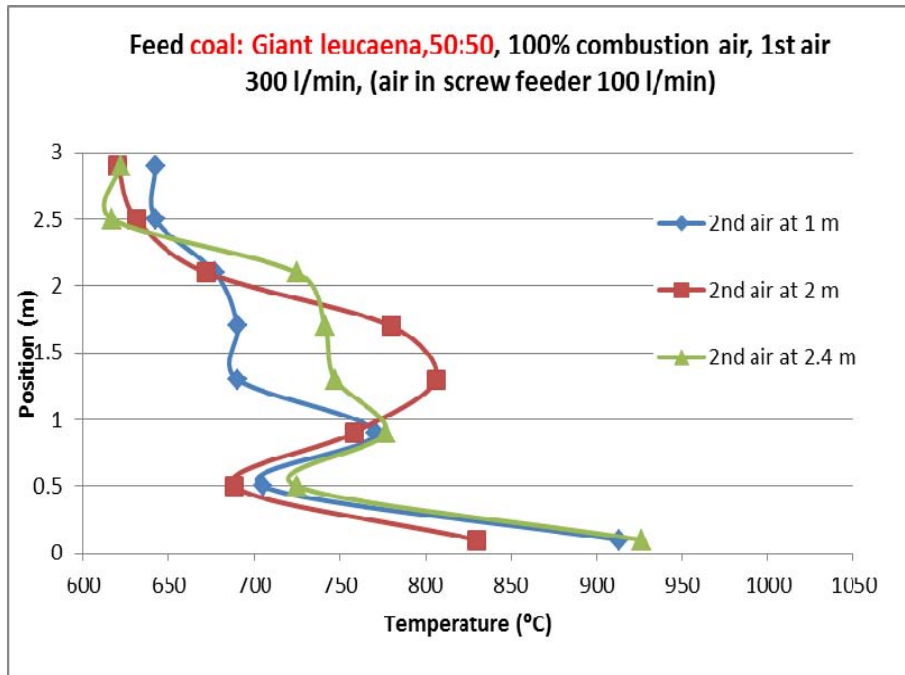
ภาพที่ 4.6 อุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆในโรเตอร์ที่อัตราการป้อนถ่านหินต่อกะลาปาล์ม 50:50 อากาศรวมร้อยละ100 ในการเผาไหม้สมบูรณ์ อากาศปฐมภูมิ 300 ลิตรต่อนาที ป้อนอากาศที่สกรูไฟเดอรัลของชีวมวล 100 ลิตรต่อนาที

1. ป้อนอากาศทุติยภูมิที่ตำแหน่ง 1 เมตร
2. ป้อนอากาศทุติยภูมิที่ตำแหน่ง 2 เมตร
3. ป้อนอากาศทุติยภูมิที่ตำแหน่ง 2.4 เมตร



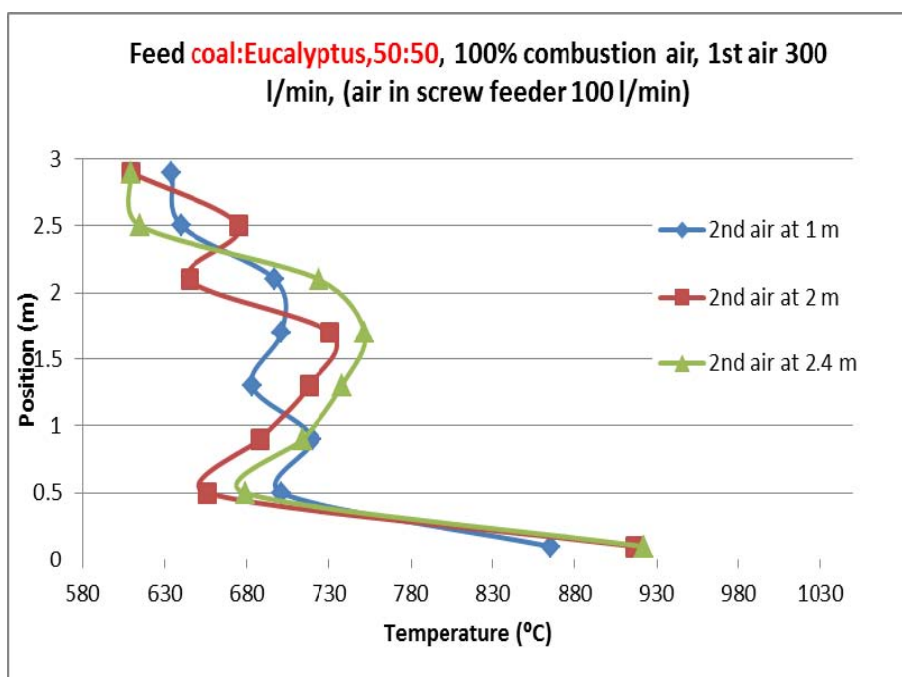
ภาพที่ 4.7 อุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆในโรเตอร์ที่อัตราการป้อนถ่านหินต่อกะลามะพร้าว 50:50 อากาศรวมร้อยละ100 ในการเผาไหม้สมบูรณ์ อากาศปฐมภูมิ 300 ลิตรต่อนาที ป้อนอากาศที่สก รุพีดีเตอร์ของชีวมวล 100 ลิตรต่อนาที

1. ป้อนอากาศทุติยภูมิที่ตำแหน่ง 1 เมตร
2. ป้อนอากาศทุติยภูมิที่ตำแหน่ง 2 เมตร
3. ป้อนอากาศทุติยภูมิที่ตำแหน่ง 2.4 เมตร



ภาพที่ 4.8 อุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆในโรเตอร์ที่อัตราการป้อนถ่านหินต่อกระถินยักษ์ 50:50 อากาศรวมร้อยละ100 ในการเผาไหม้สมบูรณ์ อากาศปฐมภูมิ 300 ลิตรต่อนาที ป้อนอากาศที่สก รุพีดีเตอร์ของชีวมวล 100 ลิตรต่อนาที

1. ป้อนอากาศทุติยภูมิที่ตำแหน่ง 1 เมตร
2. ป้อนอากาศทุติยภูมิที่ตำแหน่ง 2 เมตร
3. ป้อนอากาศทุติยภูมิที่ตำแหน่ง 2.4 เมตร



ภาพที่ 4.9 อุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆในโรเตอร์ที่อัตราการป้อนถ่านหินต่อยุคาลิปต์ส 50:50 อากาศรวมร้อยละ100 ในการเผาไหม้สมบรูณ์ อากาศปฐมภูมิ 300 ลิตรต่อนาที ป้อนอากาศที่สกรูพีดเดอร์ของชีวมวล 100 ลิตรต่อนาที

1. ป้อนอากาศทุติยภูมิที่ตำแหน่ง 1 เมตร
2. ป้อนอากาศทุติยภูมิที่ตำแหน่ง 2 เมตร
3. ป้อนอากาศทุติยภูมิที่ตำแหน่ง 2.4 เมตร

หากสังเกตบริเวณตำแหน่งที่มีการเติมอากาศทุติยภูมิจะมีอุณหภูมิลดลงเนื่องจากอากาศทุติยภูมิป้อนมาจากเครื่องอัดอากาศที่มีเครื่องดักน้ำที่มีหลักการทำงานคือ ให้ความเย็นกับอากาศ ความชื้นในอากาศจะควบแน่นเป็นของเหลวซึ่งก็คือน้ำ แล้วมีการถ่ายของเหลวออกจากเครื่องดักน้ำเป็นช่วงๆ ทำให้อุณหภูมิลดลงของอากาศทุติยภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิจริง เมื่อไหลเข้าสู่ระบบ จึงทำให้อุณหภูมิลดลง เมื่อเกิดการเผาไหม้มากขึ้น อุณหภูมิจะค่อยๆ สูงขึ้นอีกครั้ง นอกจากนี้ยังพบว่าในกรณีของการเผาไหม้เชื้อเพลิงถ่านหินนั้น การป้อนอากาศทุติยภูมิที่ตำแหน่ง 2 เมตร ที่เป็นบริเวณเกิดปฏิกิริยา (Reaction zone) นั้น เนื่องจากเป็นบริเวณเกิดปฏิกิริยา (Reaction zone) อุณหภูมิลดลงไม่มากนักเหมือนในกรณีเชื้อเพลิงถ่านหินผสมชีวมวลซึ่งบริเวณเกิดปฏิกิริยา (Reaction zone) ไม่ได้มีอยู่บริเวณตำแหน่ง 2 เมตร เพราะชีวมวลมีสารระเหยง่ายมากกว่าถ่านหินจึงเกิดการเผาไหม้ได้เร็วกว่าถ่านหิน ฉะนั้นบริเวณเกิดปฏิกิริยา (Reaction zone) ของชีวมวลนั้นจึงอยู่ต่ำกว่าถ่านหิน ซึ่งแสดงว่าจุดที่ป้อนอากาศทุติยภูมิตำแหน่งที่ 1 เมตรของโรเตอร์ จึงเป็นบริเวณที่เกิดปฏิกิริยา (Reaction zone) ของชีวมวล

4.5.2 ศึกษาผลของการเผาไหม้ร่วมของถ่านหินกับชีวมวลที่มีต่อองค์ประกอบฟลูแก๊ส

เนื่องจากองค์ประกอบของแก๊สที่วัดได้ ณ ตำแหน่งต่างๆ ในไรเซอร์มีความแปรปรวนเนื่องจากปัจจัยหลายๆ อย่าง ในงานวิจัยนี้จึงเน้นทำการศึกษาองค์ประกอบของฟลูแก๊สที่เกิดขึ้น ณ ตำแหน่งที่ 9 ของเครื่องเผาไหม้ฟลูอิโดซ์เบดแบบหมุนเวียน ซึ่งเป็นตำแหน่งที่ไม่มีปัจจัยรบกวนเหมือนในไรเซอร์ อีกทั้งยังเป็นการวัดองค์ประกอบของแก๊สก่อนที่จะปล่อยออกสู่บรรยากาศ

ในการทดลองที่ทำการเผาไหม้เชื้อเพลิงต่างชนิดกัน โดยที่มีอัตราการป้อนอากาศเป็นแบบเผาไหม้ สมบูรณ์ร้อยละ 100 เหมือนกัน โดยจะศึกษาเปรียบเทียบที่สภาวะการป้อนอากาศทุติยภูมิที่ตำแหน่ง 2 เมตร โดยแบ่งป้อนอากาศปฐมภูมิ 300 ลิตรต่อนาที และอากาศที่สกรูพีดเดอร์ของชีวมวล 100 ลิตรต่อนาที อากาศที่เหลือป้อนเข้าที่อากาศทุติยภูมิทั้งหมด

ความเข้มข้นของแก๊สชนิดต่างๆ ที่วัดได้ ณ ตำแหน่งต่างๆ ของเครื่องฟลูอิโดซ์เบดแบบหมุนเวียนจะมีค่าน้อยเพียงใด ขึ้นกับ

1. ชนิด สมบัติ และธาตุองค์ประกอบในเชื้อเพลิง

เชื้อเพลิงที่มีความชื้นและเถ้าต่ำ จะสามารถเผาไหม้ให้ความร้อนได้ดี ต้องใช้ปริมาณอากาศเยอะ เกิดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้มาก หากในเชื้อเพลิงมีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบร่วม จะเกิดไนตริกออกไซด์ ไนโตรเจนไดออกไซด์ และไนตรัสออกไซด์ได้ ซึ่งถ่านหินที่ใช้ในการทดลองมีไนโตรเจนมากกว่ากะลาปาล์ม กะลามะพร้าว กระจินยักษ์ และยูคาลิปตัส ดังนั้นการเผาไหม้เชื้อเพลิงถ่านหินย่อมมีโอกาสเกิดไนตริกออกไซด์ ไนโตรเจนไดออกไซด์ และไนตรัสออกไซด์ได้มากกว่าการเผาไหม้กะลาปาล์ม กะลามะพร้าว กระจินยักษ์ และยูคาลิปตัส เชื้อเพลิงที่มีขนาดเล็ก ความหนาแน่นน้อยเช่นกระจินยักษ์ และยูคาลิปตัสที่ใช้ในการทดลอง ซึ่งถูกบดและมีขนาดเล็ก จะลอยหลุดออกจากไรเซอร์ได้ง่ายก่อนที่จะเกิดการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ แล้วไปรวมกับทรายร้อนใน downcomer ที่มีปริมาณอากาศน้อย ทำให้เกิดการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ใน downcomer เกิดเป็นแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ได้

2. ตำแหน่งที่ทำการวัด

ตำแหน่งใดก็ตามที่เกิดการเผาไหม้ได้ดีซึ่งตามปกติแล้วจะเป็นตำแหน่งที่มีการป้อนเชื้อเพลิง และตำแหน่งเหนือจุดที่มีการป้อนอากาศทุติยภูมิ ตำแหน่งนี้จะมีอุณหภูมิสูง มีเชื้อเพลิง และอากาศมากเพียงพอต่อการเผาไหม้ จะมีสัดส่วนของแก๊สเกิดขึ้นจากกระบวนการเผาไหม้มาก เช่น แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ณ ตำแหน่งที่มีการป้อนอากาศทุติยภูมิ อุณหภูมิจะลดลงเมื่อเทียบกับตำแหน่งก่อนหน้า มีอากาศมาก ให้ความเข้มข้นของแก๊สทุกชนิดลดลงเนื่องจากถูก

เจือจางด้วยอากาศ และแก๊สบางชนิดจะลดลงมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิลดลง เช่น ไนโตรเจนออกไซด์ (NOx) เป็นต้น

3. ปริมาณอากาศรวม

ปริมาณอากาศรวมในที่นี้หมายถึงอากาศปฐมภูมิ อากาศที่ป้อนที่สกรูพีดเดอร์ ของชีวมวลและอากาศทุติยภูมิ โดยปริมาณอากาศรวมนี้จะมีผลกับฟลูแก๊ส หรือความเข้มข้นของแก๊สก่อนที่ปล่อยออกสู่บรรยากาศ หรือที่ตำแหน่งที่ 9 (ตำแหน่งแก๊สขาออกจากไซโคลน) หากปริมาณอากาศรวมมีค่าน้อย ทำให้ความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนและไนโตรเจนต่ำ จะทำให้ความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์สูง หากปริมาณอากาศรวมมีค่ามากก็จะเกิดผลในทางตรงกันข้าม

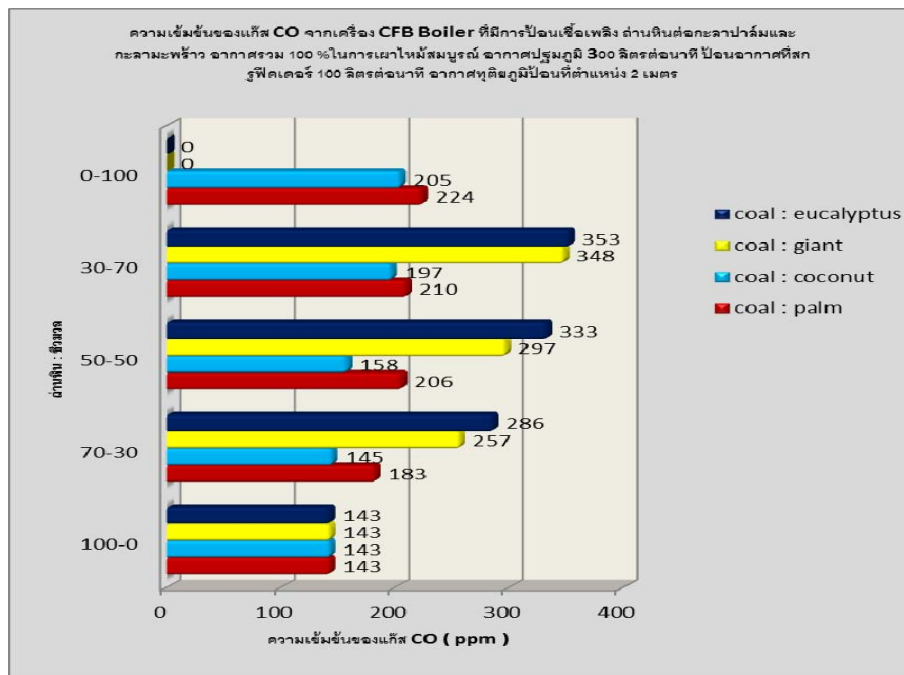
4. ตำแหน่งบนสุดของโรเตอร์

ทางออกของโรเตอร์ปลายเปิดที่ตำแหน่ง 3 เมตร เพื่อไหลต่อไปยังไซโคลนอยู่ที่ความสูง 3 เมตร จากแผ่นกระจายอากาศ ดังนั้นการเคลื่อนที่ของอนุภาคเชื้อเพลิง ทราาย และฟลูแก๊สภายในโรเตอร์นั้นจึงมีความอิสระมากในการเคลื่อนที่ผ่านโรเตอร์ไปยังไซโคลน ทำให้เกิดการถ่ายโอนความร้อน และการพาความร้อนออกจากระบบได้ดี ซึ่งมีผลต่ออุณหภูมิตลอดโรเตอร์ ซึ่งแก๊สบางชนิด เช่น ไนโตรเจนออกไซด์ (NOx) จะเกิดได้ดีที่อุณหภูมิสูงๆ

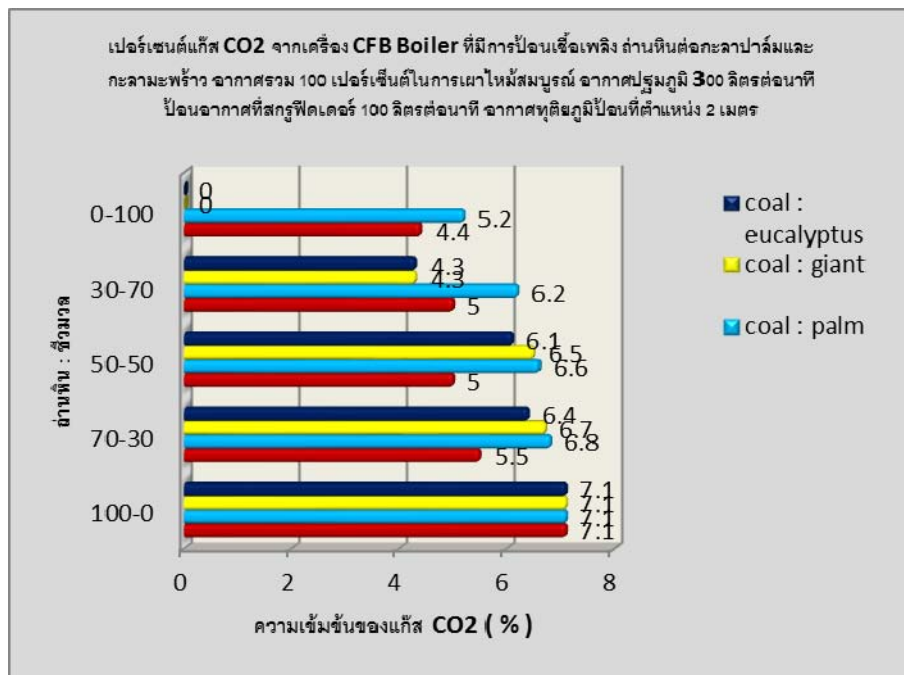
4.5.2.1 ศึกษาผลของการเผาไหม้ของถ่านหินที่มีต่อองค์ประกอบฟลูแก๊ส

4.5.2.1.1 แนวโน้มของปริมาณแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

จากผลการทดลองเผาไหม้เชื้อเพลิงถ่านหิน จึงต้องพิจารณาตามหัวข้อ 4.6.1 ดังที่ได้อธิบายมาข้างต้นซึ่งก็พบว่ากรณีที่ปริมาณสารระเหยของที่เป็นองค์ประกอบของถ่านหินมีค่าต่ำจึงทำให้ยังไม่เกิดการเผาไหม้ในช่วงล่างของโรเตอร์ในทันที เป็นผลให้เกิดการเผาไหม้แบบไม่สมบูรณ์ไม่มากนัก แต่จะไปเกิดการเผาไหม้ตลอดช่วงโรเตอร์ ส่งผลให้ปริมาณแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ต่ำ และการที่ไม่เกิดปัญหาการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์มากนัก จึงเป็นผลให้ปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สูง ซึ่งสอดคล้องกับแนวโน้มของปริมาณการเกิดแก๊สทั้ง 2 สอง ดังกล่าวที่ได้จากการเผาไหม้จะตรงข้ามกัน ดังแสดงในภาพที่ 4.15-4.16



ภาพที่ 4.10 ความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ จากเครื่อง CFBB ที่มีการป้อนเชื้อเพลิง ถ่านหินร้อยละ 100 ถ่านหินต่อกะลาปาล์ม 50:50 และถ่านหินต่อกะลามะพร้าว 50:50 ถ่านหินต่อกระถินยักษ์ 50:50 และถ่านหินต่อยูคาลิปตัส 50:50 ตามลำดับอากาศรวมร้อยละ 100 ในการเผาไหม้สมบูรณ์ อากาศปฐมภูมิ 300 ลิตรต่อนาที ป้อนอากาศที่สกรูฟีดเดอร์ 100 ลิตรต่อนาที อากาศทุติยภูมิป้อนที่ตำแหน่ง 2 เมตร

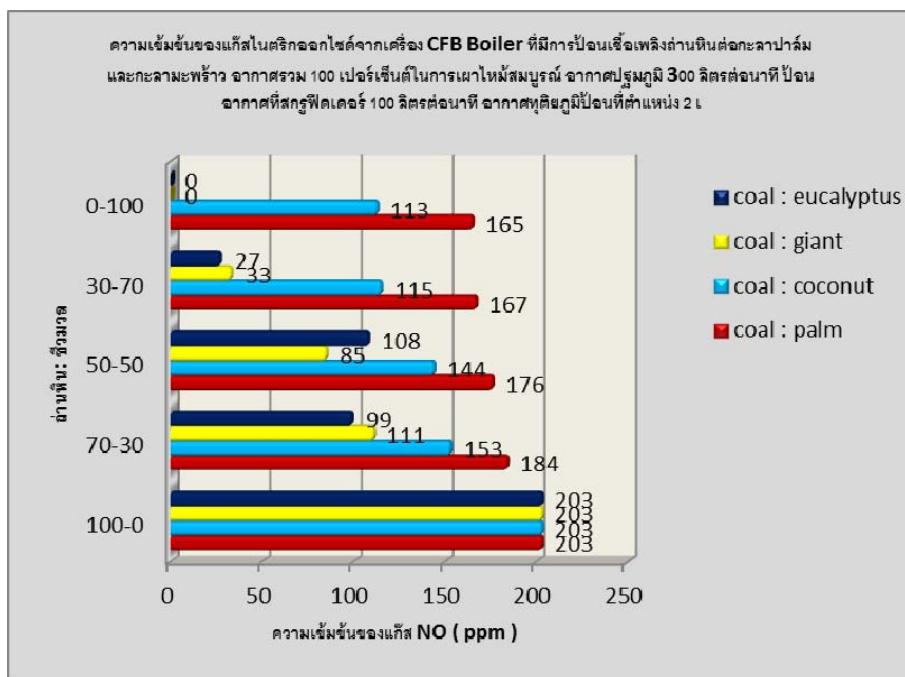


ภาพที่ 4.11 ร้อยละแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ จากเครื่อง CFBB ที่มีการป้อนเชื้อเพลิงถ่านหินร้อยละ 100 ถ่านหินต่อกะลาปาล์ม 50:50 และถ่านหินต่อกะลามะพร้าว 50:50 ถ่านหินต่อกระถิน

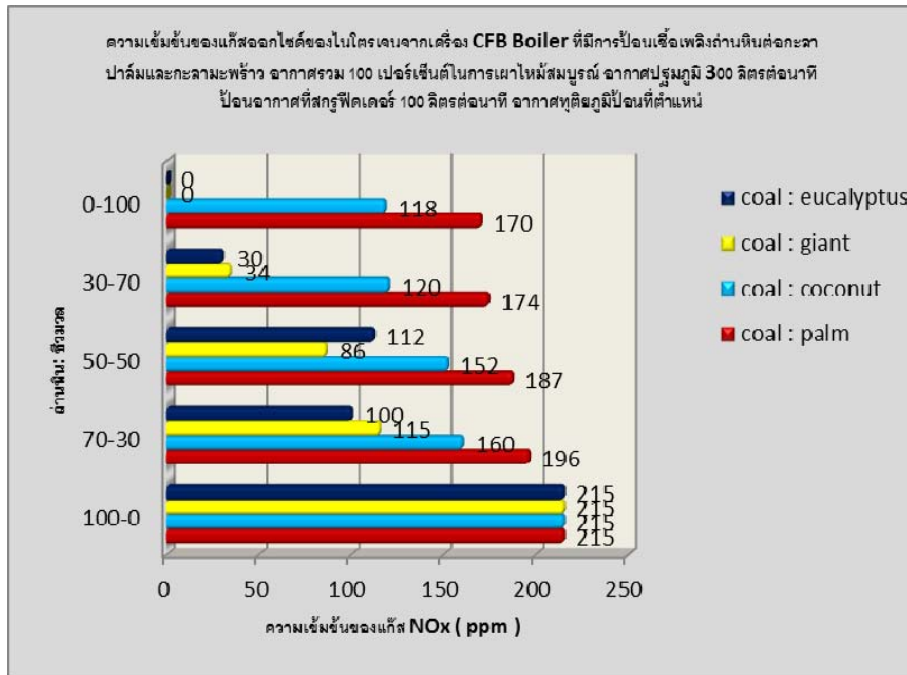
ยักซ์ 50:50 และถ่านหินต่อยูคาลิปตัส 50:50 ตามลำดับอากาศรวมร้อยละ 100 ในการเผาไหม้ สมบูรณ์ อากาศปฐมภูมิ 300 ลิตรต่อนาที ป้อนอากาศที่สกรูฟีดเดอร์ 100 ลิตรต่อนาที อากาศทุติยภูมิป้อนที่ตำแหน่ง 2 เมตร

4.5.2.1.2 แนวโน้มของปริมาณแก๊สสารประกอบออกไซด์ของไนโตรเจน (NOx)

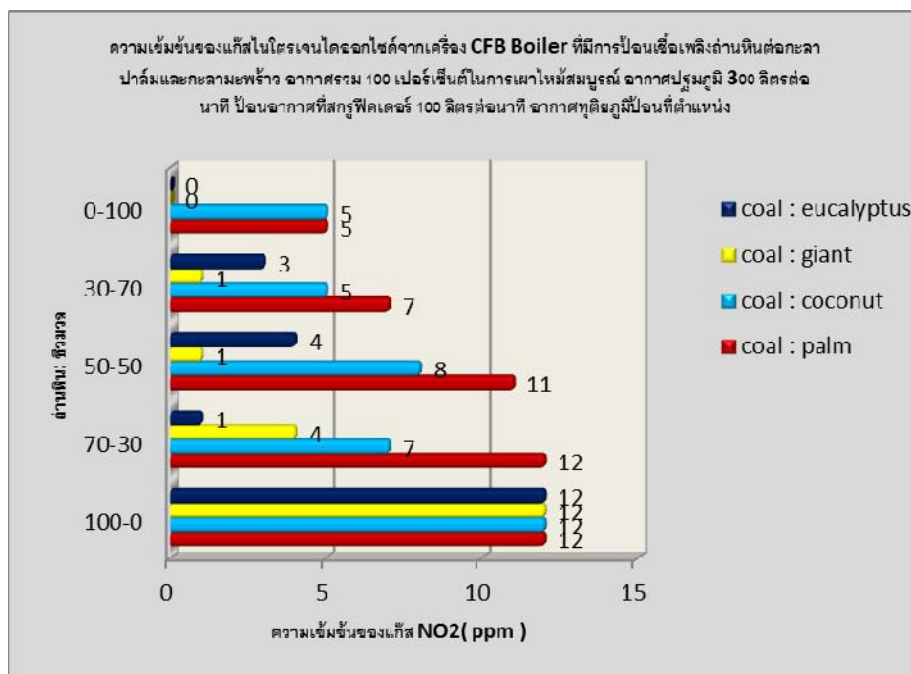
จากผลการทดลองเผาไหม้เชื้อเพลิงถ่านหิน จึงต้องพิจารณาตามหัวข้อ 4.6.1 และทฤษฎี การเกิดสารประกอบออกไซด์ของไนโตรเจน (NOx) ในกระบวนการเผาไหม้จากบทที่ 2 ดังที่ได้ อธิบายมาข้างต้นนั้น ก็พบว่าองค์ประกอบของถ่านหินนั้นมีไนโตรเจนอะตอมมาก เชื้อเพลิงจะทำ ปฏิกิริยากับออกซิเจน ทำให้เกิดแก๊สสารประกอบออกไซด์ของไนโตรเจน (NOx) ได้มาก อีกทั้งการ เผาไหม้ถ่านหินเพียงอย่างเดียวจึงให้อุณหภูมิตลอดโรเซอร์สูงกว่าการเผาไหม้ร่วมกับชีวมวล ดังนั้นจึงอีกเหตุผลที่อาจทำให้แก๊สสารประกอบออกไซด์ของไนโตรเจน (NOx) เกิดได้ดีขึ้นอีกด้วย ดังแสดงในภาพที่ 4.17-4.19



ภาพที่ 4.12 ความเข้มข้นของแก๊สไนตริกออกไซด์จากเครื่อง CFBB ที่มีการป้อนเชื้อเพลิงถ่านหิน ต่อ กะลาปาล์มกะลามะพร้าว กระถินยักซ์ และยูคาลิปตัส อากาศรวมร้อยละ 100 ในการเผาไหม้ สมบูรณ์ อากาศปฐมภูมิ 300 ลิตรต่อนาที ป้อนอากาศที่สกรูฟีดเดอร์ 100 ลิตรต่อนาที อากาศ ทุติยภูมิป้อนที่ตำแหน่ง 2 เมตร



ภาพที่ 4.13 ความเข้มข้นของแก๊สออกไซด์ของไนโตรเจน จากเครื่อง CFBB ที่มีการป้อนเชื้อเพลิงถ่านหินต่อ กะลาปาล์มกะลามะพร้าว กระถินยักษ์ และยูคาลิปตัส อากาศรวมร้อยละ 100 ในการเผาไหม้สมบูรณ์ อากาศปฐมภูมิ 300 ลิตรต่อนาที ป้อนอากาศที่สกรูฟีดเดอร์ 100 ลิตรต่อนาที อากาศทุติยภูมิป้อนที่ตำแหน่ง 2 เมตร



ภาพที่ 4.14 ความเข้มข้นของแก๊สไนโตรเจนไดออกไซด์ จากเครื่อง CFBB ที่มีการป้อนเชื้อเพลิงถ่านหินต่อกะลาปาล์มกะลามะพร้าว กระถินยักษ์ และยูคาลิปตัส อากาศรวมร้อยละ 100 ในการ

เผาไหม้สมบูรณ์ อากาศปฐมภูมิ 300 ลิตรต่อนาที ป้อนอากาศที่สกรูฟีดเดอร์ 100 ลิตรต่อนาที อากาศทุติยภูมิป้อนที่ตำแหน่ง 2 เมตร

4.5.2.2 ศึกษาผลของชนิดของชีวมวลเผาไหม้ร่วมกับถ่านหินที่มีต่อองค์ประกอบ ฟลูแก๊ส

การศึกษาค้นคว้าของชีวมวลทั้ง 4 ชนิดได้แก่ กะลาปาล์ม กะลามะพร้าว กระจินยักษ์ และยูคาลิปตัส เผาไหม้ร่วมกับถ่านหิน ที่มีผลต่อการปล่อยแก๊สคาร์บอนมอนนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ และแก๊สสารประกอบออกไซด์ของไนโตรเจน โดยการทดลองจะเพิ่มปริมาณ การป้อนชีวมวลขึ้นเรื่อยๆ จากร้อยละ 30 , 50 และ 70 โดยน้ำหนัก โดยที่มีอัตราการป้อนอากาศ เป็นแบบเผาไหม้ สมบูรณ์ร้อยละ 100 เหมือนกัน โดยจะศึกษาเปรียบเทียบที่สภาวะการป้อน อากาศทุติยภูมิที่ตำแหน่ง 2 เมตร โดยแบ่งป้อนอากาศปฐมภูมิ 300 ลิตรต่อนาที และอากาศที่สกรู ฟีดเดอร์ของชีวมวล 100 ลิตรต่อนาที อากาศที่เหลือ ป้อนเข้าที่อากาศทุติยภูมิทั้งหมด

4.5.2.2.1 แนวโน้มของปริมาณแก๊สคาร์บอนมอนนอกไซด์ แก๊ส คาร์บอนไดออกไซด์

จากการทดลองพบว่าทั้งเชื้อเพลิงถ่านหินผสมกะลาปาล์ม เชื้อเพลิงถ่านหินผสม กะลามะพร้าว เชื้อเพลิงถ่านหินผสมกระจินยักษ์ และเชื้อเพลิงถ่านหินผสมยูคาลิปตัส มีแนวโน้มที่ เหมือนกัน คือสัดส่วนชีวมวลที่มากขึ้น จะส่งผลให้แนวโน้มปริมาณแก๊สคาร์บอนมอนนอกไซด์ที่ได้ จากการเผาไหม้มากขึ้นไปด้วย ทั้งนี้เนื่องมาจากชีวมวลมีค่าปริมาณสารระเหยที่มากกว่าถ่านหิน ทำให้เมื่อถูกป้อนเข้ามาสู่ห้องเผาไหม้ส่วนที่เป็นชีวมวลจึงเกิดการลุกติดไฟเผาไหม้ได้ง่ายกว่า และรวดเร็วกว่าถ่านหิน จึงเกิดการเผาไหม้ที่ด้านล่างทันที ในขณะที่ด้านล่างนั้นยังมีอากาศไม่ เพียงพอ เนื่องจากมีเพียงอากาศปฐมภูมิเท่านั้น (อากาศทุติยภูมิถูกป้อนเข้ามาที่บริเวณความสูง 2 เมตร) จึงเกิดการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ขึ้นมากและเกิดแก๊สคาร์บอนมอนนอกไซด์ขึ้นมาก ปริมาณ ของแก๊สคาร์บอนมอนนอกไซด์ที่เกิดขึ้นมากนี้ ทำให้ปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำ เพราะเกิด การเผาไหม้แบบไม่สมบูรณ์ ดังนั้นจึงพบว่ายังมีปริมาณสัดส่วนของชีวมวลมาก แนวโน้มปริมาณ แก๊สคาร์บอนมอนนอกไซด์จากการเผาไหม้ก็จะยิ่งมาก ซึ่งตรงข้ามกับปริมาณแก๊ส คาร์บอนไดออกไซด์ ที่ยิ่งปริมาณสัดส่วนของชีวมวลมาก แนวโน้มปริมาณแก๊ส คาร์บอนไดออกไซด์ก็จะยิ่งต่ำ โดยปกติแนวโน้มของปริมาณแก๊สคาร์บอนมอนนอกไซด์และปริมาณ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์นั้นจะตรงกันข้ามกัน องค์ประกอบฟลูแก๊สในการทดลองต่างๆแสดงได้ดัง ภาพที่ 4.15 - 4.16

4.5.2.2 แนวโน้มของปริมาณแก๊สสารประกอบออกไซด์ของไนโตรเจน

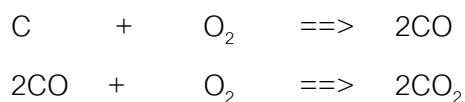
(NO_x)

จากการทดลองพบว่าทั้งเชื้อเพลิงถ่านหินผสมกะลาปาล์ม เชื้อเพลิงถ่านหินผสมกะลามะพร้าว เชื้อเพลิงถ่านหินผสมกระถินยักษ์ และเชื้อเพลิงถ่านหินผสมยูคาลิปตัส มีแนวโน้มที่เหมือนกัน คือสัดส่วนชีวมวลที่มาก ส่งผลให้แนวโน้มปริมาณแก๊สสารประกอบออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x) ซึ่งเกือบทั้งหมดเป็นไนตริกออกไซด์ (NO) และที่เหลือเป็นไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO₂) มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันคือมีปริมาณต่ำลงทั้งนี้เนื่องมาจากชีวมวลทั้งสี่ชนิดมีปริมาณองค์ประกอบไนโตรเจนอะตอมที่ต่ำกว่าถ่านหิน หากสังเกตว่าถ้าสัดส่วนของถ่านหินมาก จะส่งผลให้ค่าความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้มาก อุณหภูมิเฉลี่ยตลอดโรเซอริกจะสูง ทำให้แก๊สสารประกอบออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x) เกิดได้ดีขึ้นอีก แต่เมื่อเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิพบว่า อุณหภูมิเฉลี่ยตลอดโรเซอริกในแต่ละการทดลองไม่ค่าไม่ถึง 1,200 องศาเซลเซียส (ปิยะพันธ์ จะกอบ, 2548) ซึ่งทำให้แก๊สสารประกอบออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x) เกิดได้ไม่ดี ฉะนั้นปัจจัยของปริมาณไนโตรเจนในเชื้อเพลิง ที่มีอัตราการป้อนอากาศเท่ากัน และตำแหน่งป้อนอากาศทุติยภูมิที่ระดับเดียวกัน จึงมีความสำคัญมากกว่าอุณหภูมิ องค์ประกอบพลูแก๊สในการทดลองต่างๆ แสดงได้ดังภาพที่ 4.17 ถึง 4.19

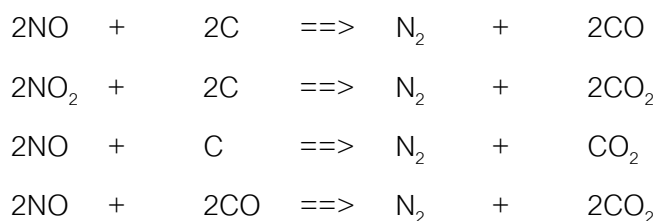
4.5.2.3 ศึกษาผลของตำแหน่งการป้อนอากาศทุติยภูมิที่มีต่อองค์ประกอบพลูแก๊ส

จุดประสงค์หลักของการป้อนอากาศทุติยภูมิก็คือ ลดปริมาณอากาศบริเวณด้านล่างของโรเซอริก เพราะการที่อากาศและเชื้อเพลิงมีปริมาณมาก ประกอบกับได้รับความร้อนจากทราย จะทำให้เกิดการเผาไหม้อย่างรุนแรงอุณหภูมิเบดสูงอย่างรวดเร็ว แต่จะสูงมากเพียงจุดที่เกิดการเผาไหม้เท่านั้น เมื่อเชื้อเพลิงถูกเผาไหม้หมด อุณหภูมิตำแหน่งด้านบนก็จะลดลง ซึ่งการที่อุณหภูมิสูงมากจะทำให้เกิดปัญหาหลายอย่างตามมาคือ การสึกกร่อนของวัสดุบริเวณที่มีความร้อนสูงเกินไป ปัญหาถ้าหลอมในเครื่อง การอุดตัน และปัญหามลพิษจากพลูแก๊สที่ปล่อยออกมา เนื่องจากมีแก๊สพิษหลายชนิดเกิดขึ้นได้ดีที่ปริมาณอากาศมากๆ อุณหภูมิสูงๆ ซึ่งตามปกติแล้วแก๊สออกซิเจนจะทำปฏิกิริยากับเชื้อเพลิงที่อยู่ในรูปของคาร์บอนและไฮโดรเจนได้อย่างรวดเร็วมาก แต่หากมีแก๊สออกซิเจนในปริมาณมากเกินไป ไนโตรเจนและซัลเฟอร์ก็จะสามารถทำปฏิกิริยากับออกซิเจนได้เช่นกัน อีกทั้งแก๊สไนตริกออกไซด์ยังสามารถเกิดได้ดีที่อุณหภูมิสูงๆ โดยแก๊สไนตริกออกไซด์จะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มมากขึ้นตั้งแต่ช่วงอุณหภูมิ 1,200 องศาเซลเซียส ดังนั้นการลดปริมาณอากาศด้านล่างโรเซอริกโดยไปป้อนเพิ่มที่อากาศทุติยภูมิ จะทำให้เกิดการเผาไหม้เป็นขั้นๆ คือ

เผาไหม้ตรงตำแหน่งที่มีการป้อนเชื้อเพลิง แต่เผาไหม้ไม่สมบูรณ์ ทำให้อุณหภูมิไม่สูงมากนัก หลังจากนั้นจึงมีการเผาไหม้เพิ่มขึ้นอีกครั้งที่ตำแหน่งการป้อนอากาศทุติยภูมิ ดังสมการ



และการป้อนอากาศบริเวณด้านล่างโรเตอร์น้อยๆ จะทำให้การเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ เกิดถ่านชาร์ และแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์จำนวนมาก ซึ่งถ่านชาร์ และแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ที่เกิดขึ้นนี้มีส่วนช่วยในการลดแก๊สไนโตรเจนออกไซด์เพิ่มขึ้นด้วย โดยเกิดปฏิกิริยาดังนี้



นอกจากนี้ การที่อากาศด้านล่างโรเตอร์มากเกินไป มีโอกาสทำให้อุณหภูมิของเชื้อเพลิงและทรายไหลออกไปจากโรเตอร์อย่างรวดเร็วตามความเร็วของอากาศที่มากขึ้น

ในการทดลองนี้ได้ทำการเผาไหม้เชื้อเพลิงถ่านหินอย่างเดียว เชื้อเพลิงถ่านหินผสมกะลาปาล์มสัดส่วนถ่านหินต่อกะลาปาล์มร้อยละ 50:50 เชื้อเพลิงถ่านหินผสมกะลามะพร้าว สัดส่วนถ่านหินต่อกะลามะพร้าวร้อยละ 50:50 เชื้อเพลิงถ่านหินผสมกระถินยักษ์สัดส่วนถ่านหินต่อกระถินยักษ์ร้อยละ 50:50 และเชื้อเพลิงถ่านหินผสมยูคาลิปตัสสัดส่วนถ่านหินต่อยูคาลิปตัส ร้อยละ 50:50 โดยที่มีอัตราการป้อนอากาศเป็นแบบเผาไหม้สมบูรณ์ร้อยละ 100 เหมือนกัน แบ่งป้อนอากาศปฐมภูมิ 300 ลิตรต่ออนาที และอากาศที่สกรูพิดเดอร์ของชีวมวล 100 ลิตรต่ออนาที อากาศที่เหลือ ป้อนเข้าที่อากาศทุติยภูมิทั้งหมด โดยทำการศึกษาผลเนื่องจากการเปลี่ยนตำแหน่งการป้อนอากาศทุติยภูมิที่ตำแหน่ง 1 เมตร, 2 เมตร และ 2.4 เมตร

4.5.2.3.1 แนวโน้มของปริมาณแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

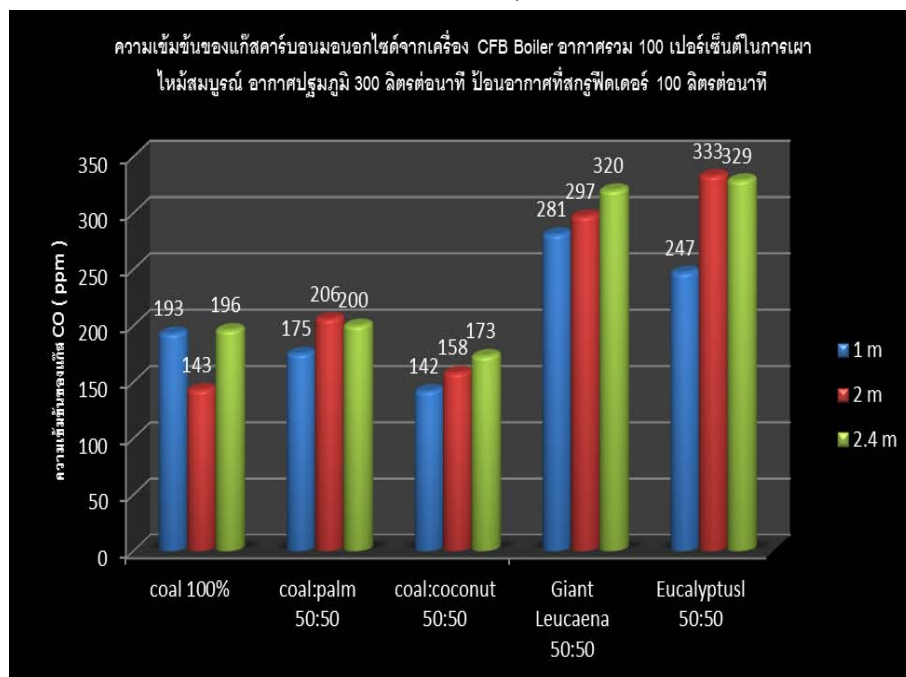
จากผลการทดลองพบว่า การเผาไหม้เชื้อเพลิงถ่านหินที่ตำแหน่งการป้อนอากาศทุติยภูมิ 2 เมตร จะให้ค่าปริมาณแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ต่ำที่สุด และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่มากที่สุด

ทั้งนี้เนื่องมาจากถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงที่มีปริมาณสารระเหยง่ายต่ำ ทำให้เกิดการติดไฟได้ไม่เร็วเท่าเชื้อเพลิงชีวมวล บริเวณเกิดปฏิกิริยา (Reaction zone) จึงไม่อยู่บริเวณด้านล่างโรเซอร์ จากผลของแก๊สทำให้สามารถวิเคราะห์ได้ว่าบริเวณเกิดปฏิกิริยา (Reaction zone) ของเชื้อเพลิงถ่านหินจะอยู่ที่บริเวณความสูง 2 เมตร ทำให้เมื่อป้อนอากาศทุติยภูมิเข้าไปที่ตำแหน่งนี้ ทำให้มีอากาศที่มากพอ เกิดการกระจายตัวของเชื้อเพลิงและทำให้เชื้อเพลิงสัมผัสกับอากาศได้ดี เกิดการเผาไหม้แบบสมบูรณ์มากขึ้น ทำให้เกิดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้นและแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ลดลง

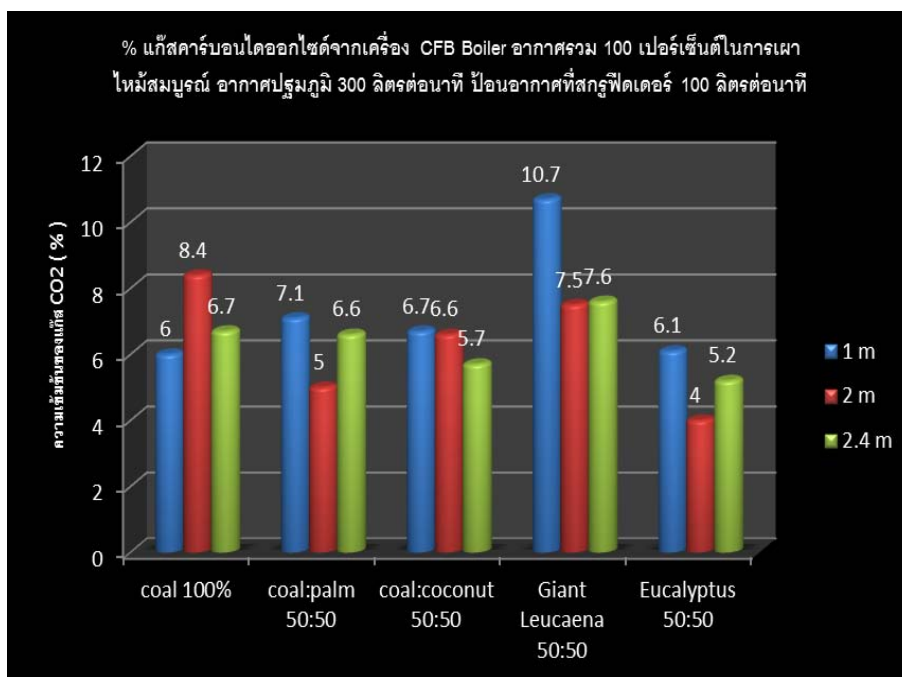
และอธิบายการป้อนอากาศทุติยภูมิตำแหน่งอื่นๆได้ว่า แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ในตำแหน่งที่ 9 จากการป้อนอากาศทุติยภูมิในตำแหน่งที่ 1 เมตรมีปริมาณที่สูง เนื่องจากความเร็วของอากาศเหนือตำแหน่งป้อนอากาศทุติยภูมิจะเร็วขึ้น ในขณะที่อากาศปฐมภูมิเพียงอย่างเดียวก็เพียงพอต่อการเกิดฟลูอิดไรส์และหมุนเวียนของเบดแล้ว ดังนั้นเชื้อเพลิงจะลอยออกจากโรเซอร์อย่างรวดเร็วหากเติมอากาศทุติยภูมิที่ตำแหน่ง 1 เมตร เชื้อเพลิงมีเวลาอยู่ในโรเซอร์เพื่อเผาไหม้น้อยลง ในขณะที่การเติมอากาศทุติยภูมิทางด้านบนจะทำให้เชื้อเพลิงมีเวลาเผาไหม้ (อย่างไม่สมบูรณ์) ในโรเซอร์ได้มากขึ้น แต่ก็มีบางส่วนที่เกิดการเผาไหม้ให้สมบูรณ์อีกครั้งที่ตำแหน่งที่สูงขึ้นไปตลอดความสูงของโรเซอร์ ถึงแม้ว่าการป้อนอากาศทุติยภูมิในตำแหน่งที่ 2.4 เมตร จะให้อุณหภูมิโดยเฉลี่ยตลอดโรเซอร์ใกล้เคียงกับการป้อนอากาศทุติยภูมิที่ 2 เมตร แต่ปริมาณของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์กลับมีค่าสูง ซึ่งอธิบายได้ว่าที่ตำแหน่งการป้อนนี้ได้เกิดการเผาไหม้สมบูรณ์อีกครั้ง แต่ก็ก็เป็นเพียงแค่บางส่วนของเชื้อเพลิงซึ่งมีความหนาแน่นน้อยกว่าในช่วงล่างของโรเซอร์ที่เกิดการเผาไหม้อย่างไม่สมบูรณ์มากกว่า จึงให้ปริมาณแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ที่สูง ฉะนั้นการที่ป้อนอากาศทุติยภูมิที่ตำแหน่ง 2.4 เมตร นี้มีอุณหภูมิเฉลี่ยที่สูง จึงให้เหตุผลได้ด้วยการเกิดการถ่ายโอนความร้อน และการพาความร้อนได้ดี อุณหภูมิจึงสูงทั่วตลอดโรเซอร์

ส่วนการเผาไหม้เชื้อเพลิงถ่านหินผสมกะลาปาล์ม เชื้อเพลิงถ่านหินผสมกะลามะพร้าว เชื้อเพลิงถ่านหินผสมกระถินยักษ์ และเชื้อเพลิงถ่านหินผสมยูคาลิปตัส มีแนวโน้มที่เหมือนกัน คือที่ตำแหน่งการป้อนอากาศทุติยภูมิ 1 เมตร จะให้ค่าปริมาณแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ต่ำที่สุด และปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่สูงที่สุด ทั้งนี้เนื่องมาจาก ชีวมวลทั้งสี่ชนิดมีปริมาณสารระเหยง่ายที่มาก ส่งผลให้บริเวณเกิดปฏิกิริยา (Reaction zone) อยู่ตำแหน่งด้านล่างของโรเซอร์ เพราะสารระเหยง่ายที่มีอยู่มากจะช่วยให้ชีวมวลลุกติดไฟได้เร็วและทันทีที่ด้านล่างโรเซอร์ ส่งผลให้เมื่อป้อนอากาศทุติยภูมิเข้าไปด้านล่าง ทำให้มีอากาศที่มากพอ เกิดการกระจายตัวของเชื้อเพลิงและทำให้เชื้อเพลิงสัมผัสกับอากาศได้ดี เกิดการเผาไหม้แบบสมบูรณ์มากขึ้น ทำให้เกิดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้นและแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ลดลง ซึ่งหากพิจารณาถึงอุณหภูมิตลอด

โรเซอร์สำหรับการเผาไหม้เชื้อเพลิงผสมถ่านหินกับกะลาปาล์ม และกะลามะพร้าว มีอุณหภูมิเฉลี่ยตลอดโรเซอร์ใกล้เคียงกันทุกตำแหน่งการป้อนอากาศทุติยภูมิ ซึ่งสอดคล้องกับผลของแก๊สดังกล่าว ต่างจากการเผาไหม้ถ่านหินกับกระถินยักษ์ และยูคาลิปตัสที่มีอุณหภูมิเฉลี่ยตลอดโรเซอร์ตำแหน่งที่ 1 เมตรน้อยกว่าตำแหน่งที่ 2 และ 2.4 เมตร เนื่องการเผาไหม้แบบไม่สมบูรณ์ที่มากของเชื้อเพลิงถ่านหินเป็นหลัก ซึ่งพิจารณาจากปริมาณแวนไนม์ที่มีค่ามากของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ ที่วัดได้จากการทดลองการเผาไหม้ของถ่านหินกับกระถินยักษ์ และยูคาลิปตัสนั่นเอง องค์ประกอบพลูแก๊สในการทดลองต่างๆแสดงได้ดังภาพที่ 4.20-4.21



ภาพที่ 4.15 ความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์จากเครื่อง CFBB ที่มีการป้อนเชื้อเพลิงถ่านหินร้อยละ 100 ถ่านหินต่อกะลาปาล์ม 50:50 ถ่านหินต่อกะลามะพร้าว 50:50 100 ถ่านหินต่อกระถินยักษ์ 50:50 และถ่านหินต่อยูคาลิปตัส 50:50 ตามลำดับอากาศรวมร้อยละ 100 ในการเผาไหม้สมบูรณ์ อากาศปฐมภูมิ 300 ลิตรต่อนาที ป้อนอากาศที่สกรูฟีดเดอร์ 100 ลิตรต่อนาที (1. 2nd air at 1m, 2. 2nd air at 2m, 3. 2nd air at 2.4m)



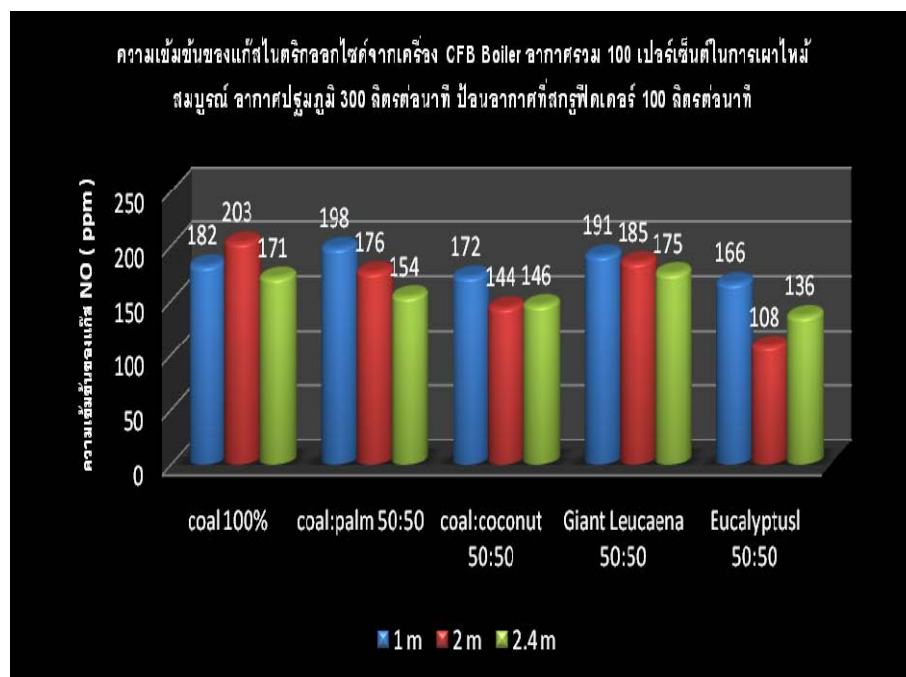
ภาพที่ 4.16 ร้อยละแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ จากเครื่อง CFBB ที่มีการป้อนเชื้อเพลิงถ่านหินร้อยละ 100 ถ่านหินต่อกะลาปาล์ม 50:50 ถ่านหินต่อกะลามะพร้าว 50:50 100 ถ่านหินต่อกระถินยักษ์ 50:50 และถ่านหินต่อยูคาลิปตัส 50:50 ตามลำดับอากาศรวมร้อยละ 100 ในการเผาไหม้สมบูรณ อากาศปฐมภูมิ 300 ลิตรต่อนาที ป้อนอากาศที่สกรูพีดเดอร์ 100 ลิตรต่อนาที (1. 2nd air at 1m, 2. 2nd air at 2m, 3. 2nd air at 2.4m)

4.5.2.3.2 แนวโน้มของปริมาณแก๊สสารประกอบออกไซด์ของไนโตรเจน

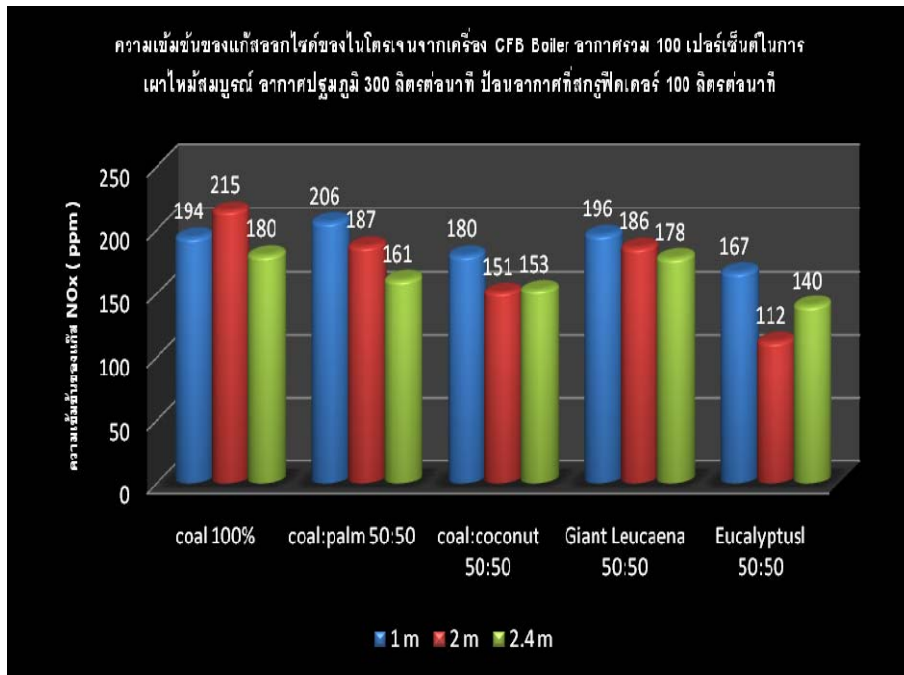
(NO_x)

จากผลการทดลองพบว่าการเผาไหม้เชื้อเพลิงถ่านหินที่ตำแหน่งการป้อนอากาศทุติยภูมิ 2 เมตร จะให้ค่าปริมาณแก๊สสารประกอบออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x) ที่มากที่สุด เนื่องจากที่กล่าวไปแล้วว่า บริเวณเกิดปฏิกิริยา (Reaction zone) ของเชื้อเพลิงถ่านหินจะอยู่บริเวณความสูง 2 เมตร เมื่อป้อนอากาศทุติยภูมิเข้าไปที่ตำแหน่งนี้ ทำให้มีอากาศที่มากพอเกิดการกระจายตัวของเชื้อเพลิงและทำให้เชื้อเพลิงสัมผัสกับอากาศได้ดี จึงเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่างไนโตรเจนอะตอม กับออกซิเจนได้มากทำให้เกิดแก๊สสารประกอบออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x) มากนั่นเอง ส่วนการเผาไหม้เชื้อเพลิงถ่านหินผสมกะลาปาล์ม เชื้อเพลิงถ่านหินผสมกะลามะพร้าว เชื้อเพลิงถ่านหินผสมกระถินยักษ์ เชื้อเพลิงถ่านหินผสมยูคาลิปตัสมีแนวโน้มที่เหมือนกัน คือที่ตำแหน่งการป้อนอากาศทุติยภูมิ 1 เมตร จะให้ค่าปริมาณแก๊สสารประกอบออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x) สูงที่สุด ทั้งนี้เนื่องมาจากการกล่าวมาข้างต้นแล้วว่า บริเวณเกิดปฏิกิริยา (Reaction zone) ของเชื้อเพลิงผสมชีวมวลนี้อยู่ที่บริเวณด้านล่างของโรเตอร์ ส่งผล

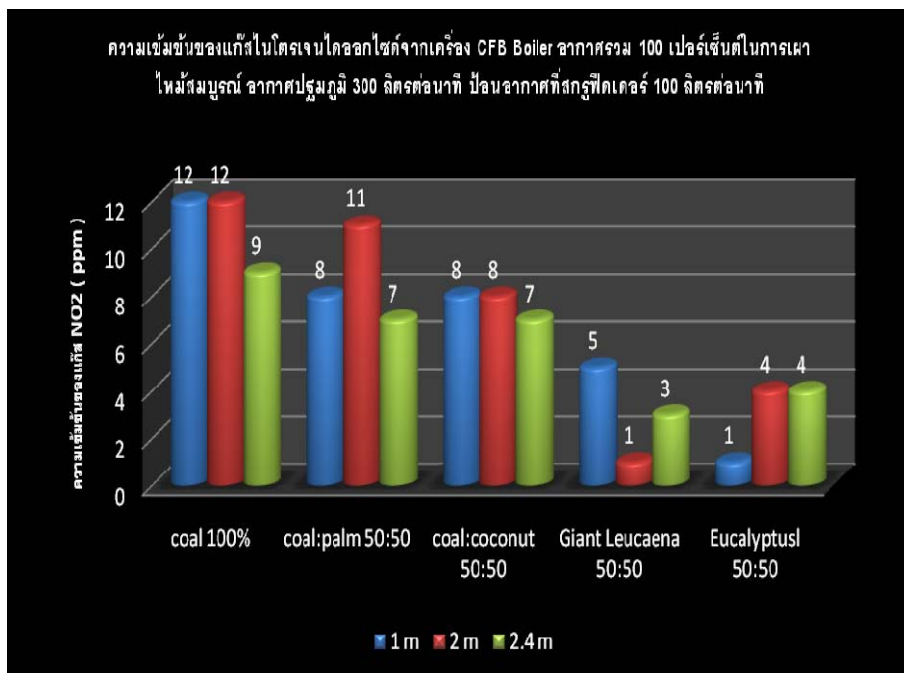
ให้เมื่อป้อนอากาศหุติยภูมิเข้าไปด้านล่าง ทำให้มีอากาศที่มากพอ เกิดการกระจายตัวของเชื้อเพลิงและทำให้เชื้อเพลิงสัมผัสกับอากาศได้ดี จึงเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่างไนโตรเจนอะตอม กับออกซิเจนได้มากทำให้เกิดแก๊สสารประกอบออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x) มากนั่นเอง ซึ่งหากอ้างอิงจากผลของอุณหภูมิในการทดลองเดียวกันนี้ พบว่าไม่สอดคล้องกับแนวโน้มของอุณหภูมิเฉลี่ยตลอดโรเตอร์ที่มีค่าสูงขึ้นตามความสูงของการป้อนอากาศหุติยภูมิ อธิบายได้ว่าการเกิดแก๊สสารประกอบออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x) จะเกิดได้ดีที่อุณหภูมิสูงกว่า 1,200 องศาเซลเซียส (ปิยะพันธ์ จะกอ, 2548) ซึ่งอุณหภูมิเฉลี่ยตลอดโรเตอร์ในแต่ละการทดลองอยู่ในช่วง 650-950 องศาเซลเซียส ดังนั้นสารประกอบออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x) จึงเกิดจากปัจจัยของอากาศที่ป้อน และไนโตรเจนจากในเชื้อเพลิงเป็นสำคัญ องค์ประกอบพลูแก๊สในการทดลองต่างๆ แสดงได้ดังภาพที่ 4.22-4.24



ภาพที่ 4.17 ความเข้มข้นของแก๊สไนตริกออกไซด์ จากเครื่อง CFBB ที่มีการป้อนเชื้อเพลิงถ่านหินร้อยละ 100 ถ่านหินต่อกะลาปาล์ม 50:50 และถ่านหินต่อกะลามะพร้าว 50:50 ถ่านหินต่อกระถินยักษ์ 50:50 และถ่านหินต่อยูคาลิปตัส 50:50 ตามลำดับ อากาศรวมร้อยละ 100 ในการเผาไหม้สมบูรณ์ อากาศปฐมภูมิ 300 ลิตรต่อนาที ป้อนอากาศที่สกรูฟีดเดอร์ 100 ลิตรต่อนาที (1. 2nd air at 1m, 2. 2nd air at 2m, 3. 2nd air at 2.4m)



ภาพที่ 4.18 ความเข้มข้นของแก๊สออกไซด์ของไนโตรเจน จากเครื่อง CFBB ที่มีการป้อนเชื้อเพลิงถ่านหินร้อยละ 100 ถ่านหินต่อกะลาปาล์ม 50:50 และถ่านหินต่อกะลามะพร้าว 50:50 ถ่านหินต่อกระถินยักษ์ 50:50 และถ่านหินต่อยูคาลิปตัส 50:50 ตามลำดับ อากาศรวมร้อยละ 100 ในการเผาไหม้ผสมบุงอร์น อากาศปฐมภูมิ 300 ลิตรต่อนาที ป้อนอากาศที่สกรูฟีดเดอร์ 100 ลิตรต่อนาที (1. 2nd air at 1m, 2. 2nd air at 2m, 2. 2nd air at 2.4m)

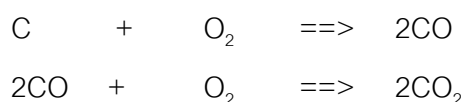


ภาพที่ 4.19 ความเข้มข้นของแก๊สไนโตรเจนไดออกไซด์ของ จากเครื่อง CFBB ที่มีการป้อนเชื้อเพลิงถ่านหินร้อยละ 100 ถ่านหินต่อกะลาปาล์ม 50:50 และถ่านหินต่อกะลามะพร้าว 50:50

ถ่านหินต่อกระถินยักษ์ 50:50 และถ่านหินต่อยูคาลิปตัส 50:50 ตามลำดับ อากาศรวมร้อยละ 100 ในการเผาไหม้สมบูรณ์ อากาศปฐมภูมิ 300 ลิตรต่ออนาที ป้อนอากาศที่สกรูพีดเดอร์ 100 ลิตรต่ออนาที (1. 2nd air at 1m, 2. 2nd air at 2m, 3. 2nd air at 2.4m)

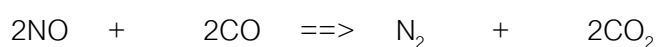
4.5.2.4 ศึกษาความสัมพันธ์ร่วมระหว่างคาร์บอนมอนนอกไซด์ (CO) กับ สารประกอบออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x) ที่ตำแหน่งที่ 9 ที่ภาวการณ์ทดลองต่างๆ กัน

จากภาพที่ 4.15 และภาพที่ 4.18 แสดงปริมาณการปล่อยแก๊สคาร์บอนมอนนอกไซด์ และ แก๊สสารประกอบออกไซด์ของไนโตรเจน ที่สัดส่วนการป้อนเชื้อเพลิงถ่านหินต่อชีวมวลต่างกัน การป้อนปริมาณอากาศรวมร้อยละ 100 ในการเผาไหม้สมบูรณ์ ตำแหน่งการป้อนอากาศทุติยภูมิที่ 2 เมตร ซึ่งจากผลการทดลองพบว่า ความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนมอนนอกไซด์จะเพิ่มขึ้นเมื่อมีสัดส่วนของชีวมวลเพิ่มมากขึ้น ในขณะที่แก๊สสารประกอบออกไซด์ของไนโตรเจน จะมีค่าลดลงตามสัดส่วนของชีวมวลที่มากขึ้น (ไนโตรเจนไดออกไซด์มีค่าน้อยมาก ดังนั้นสารประกอบออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x) ในงานวิจัยนี้จึงเป็นไนตริกออกไซด์เกือบทั้งหมด) หากสังเกตดูที่อัตราการปล่อยฟลูแก๊สชนิดต่างๆ ให้ดี จะอธิบายได้ว่า การที่แก๊สออกซิเจนยิ่งมากเข้าใกล้การเผาไหม้สมบูรณ์ย่อมต้องมีการเผาไหม้ได้ดี มีอุณหภูมิสูง เหลือแก๊สออกซิเจนน้อย ปล่อยแก๊สที่เกิดจากการเผาไหม้สูง เช่น คาร์บอนไดออกไซด์ ไนโตรเจนออกไซด์ และไนตริกออกไซด์ ส่วนคาร์บอนมอนอกไซด์น้อย ซึ่งแสดงได้ดังสมการ

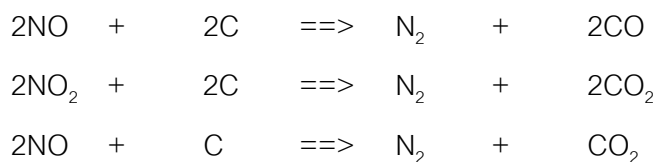


และการป้อนอากาศบริเวณด้านล่างโรเตอร์ก็คืออากาศปฐมภูมิคงที่ที่ 300 ลิตรต่ออนาที ในทุกการทดลองจะทำให้การเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ เกิดถ่านชาร์ และแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์จำนวนมาก ซึ่งถ่านชาร์ และแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ที่เกิดขึ้นนี้มีส่วนช่วยในการลดแก๊สไนโตรเจนออกไซด์เพิ่มขึ้นด้วย โดยเกิดปฏิกิริยาดังนี้ คือ

ปฏิกิริยาหลักแบบโฮโมจีเนียสของปฏิกิริยาไนโตรเจนออกไซด์รีดักชันในรีดิวซิงโซน

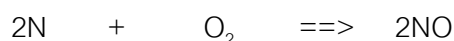


และปฏิกิริยาหลักแบบเฮทเทอโรจีเนียสของปฏิกิริยาไนโตรเจนออกไซด์รีดักชันโดยถ่าน
ชาร์คือ

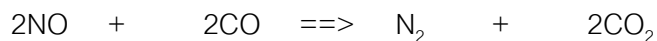


ดังนั้นสารประกอบออกไซด์ของไนโตรเจน ซึ่งนอกจากจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่าง
ไนโตรเจนอะตอมกับออกซิเจนอะตอม แล้วยังเปลี่ยนรูปทางเคมีเกิดปฏิกิริยารีดักชัน ซึ่งจะช่วยลด
ปริมาณการเพิ่มขึ้นของสารประกอบออกไซด์ของไนโตรเจน ก็ขึ้นอยู่กับปัจจัยของแก๊ส
คาร์บอนมอนอกไซด์ และปริมาณของถ่านชาร์เป็นสำคัญ

จากภาพที่ 4.20 และภาพที่ 4.23 แสดงผลของการป้อนอากาศทุติยภูมิที่ตำแหน่งต่างๆกัน
ปริมาณการปล่อยแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ และแก๊สสารประกอบออกไซด์ของไนโตรเจน ที่
สัดส่วนการป้อนเชื้อเพลิงถ่านหินต่อชีวมวลสัดส่วน 50:50 โดยมวล การป้อนปริมาณอากาศรวม
ร้อยละ 100 ในการเผาไหม้สมบูรณ์ และนำมาเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับผลของ
ความเข้มข้นของออกซิเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์ และสารประกอบออกไซด์ของไนโตรเจนของ
(Jaroslaw, 2010) มีแนวโน้มการทดลองไปในทิศทางเดียวกันซึ่งพบว่า ณ ตำแหน่งบริเวณ
เกิดปฏิกิริยา (Reaction zone) ก็คือตำแหน่งที่ป้อนอากาศทุติยภูมิ จะให้ค่าปริมาณแก๊ส
คาร์บอนมอนอกไซด์น้อยที่สุด แต่ปริมาณแก๊สสารประกอบออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x) สูงที่สุด
อธิบายได้ว่าเมื่อป้อนอากาศทุติยภูมิเข้าไปด้านล่าง ทำให้มีอากาศที่มากพอ เกิดการกระจายตัว
ของเชื้อเพลิงและทำให้เชื้อเพลิงสัมผัสกับอากาศได้ดี เกิดการเผาไหม้แบบสมบูรณ์มากขึ้น ดัง
สมการการเผาไหม้ที่ได้กล่าวไปข้างต้น ซึ่งตำแหน่งนี้จะมีปริมาณออกซิเจนเกินพอทำปฏิกิริยา
ออกซิเดชันกับไนโตรเจนในเชื้อเพลิงเกิดเป็นสารประกอบออกไซด์ของไนโตรเจนได้มากที่สุด ดัง
สมการ



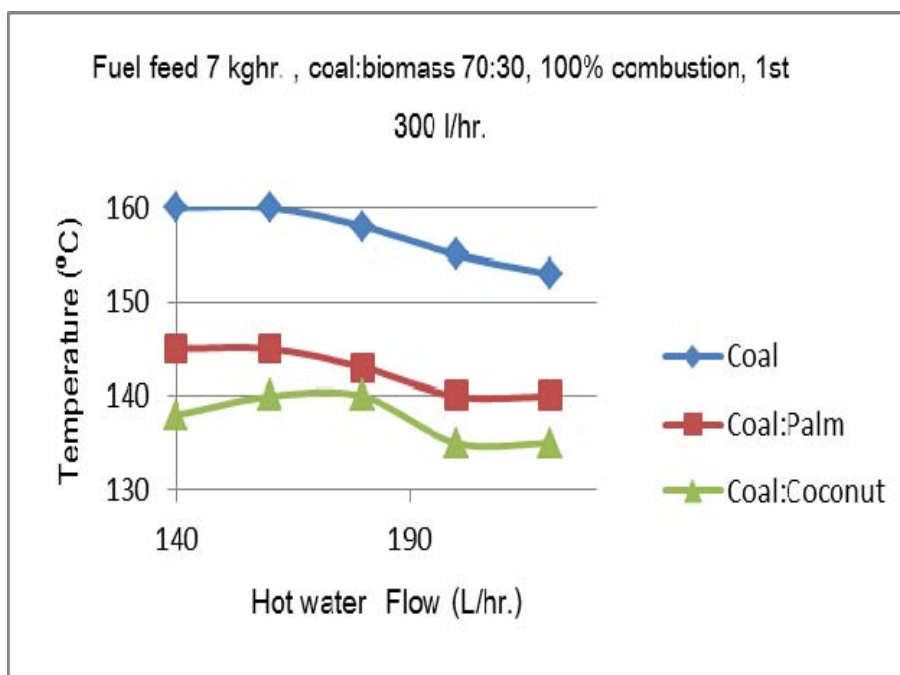
ในส่วนของปฏิกิริยารีดักชันของสารประกอบออกไซด์ของไนโตรเจน เนื่องจากมีปริมาณของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ต่ำที่สุด ซึ่งเกิดการเปลี่ยนกลับไปในรูปแบบของแก๊สไนโตรเจนได้ออย เป็นผลให้ปริมาณที่วัดได้ของสารประกอบออกไซด์ของไนโตรเจนสูงที่สุดนั่นเอง ดังสมการ



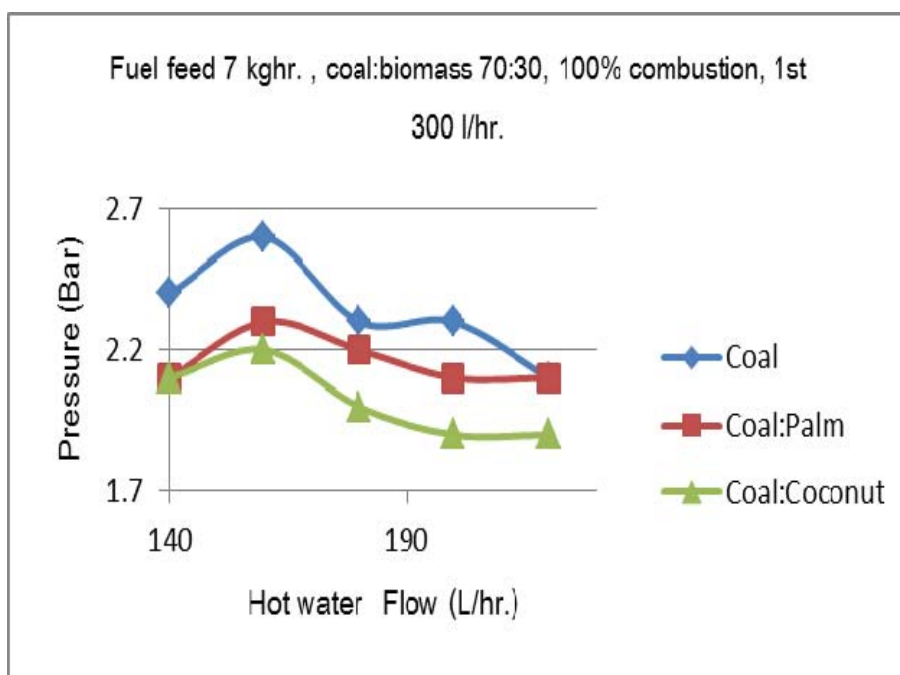
ในงานวิจัยนี้ไม่ได้ทดลองที่ปริมาณการป้อนอากาศรวมที่ต่างๆ กัน ซึ่งทำการทดลองเพียงแต่การใช้อากาศรวมร้อยละ 100 ในการเผาไหม้สมบูรณ์เท่านั้น ฉะนั้นจึงจึงไม่สามารถอธิบายความสัมพันธ์แนวโน้มของปริมาณออกซิเจนที่ความเข้มข้นสูง และความเข้มข้นต่ำต่อปริมาณของคาร์บอนมอนอกไซด์ และสารประกอบออกไซด์ของไนโตรเจนอย่างชัดเจนได้ และไม่ได้ทำการทดลองที่อุณหภูมิเท่าๆ กัน เนื่องจากไม่มีระบบควบคุมอุณหภูมิให้คงที่โดยที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิงและการป้อนปริมาณอากาศรวมคงที่ได้ เพราะการควบคุมอุณหภูมิให้คงที่จะมีอัตราการป้อนเชื้อเพลิงเป็นช่วง คือป้อนไม่สม่ำเสมอ และปริมาณอากาศก็จะแปรผันตามปริมาณเชื้อเพลิง คือ คิดเป็นร้อยละในการเผาไหม้สมบูรณ์ ทำให้ปริมาณอากาศที่ป้อนไม่สม่ำเสมอด้วย

4.6 การศึกษาผลของเชื้อเพลิงต่อประสิทธิภาพของเครื่องผลิตไอน้ำที่สร้างขึ้น

การทดลองที่สภาวะการป้อนอากาศเท่ากัน เชื้อเพลิงต่างชนิดกัน การเผาไหม้เชื้อเพลิงที่มีส่วนผสมของถ่านหินมากกว่าจะให้ความร้อนได้มากกว่า (ถ่านหิน : ซีวมวล, 70: 30) เนื่องจากค่าความร้อนในตัวของถ่านหินเองที่มีค่ามากกว่าซีวมวล ถ่านหินมีเวลาเผาไหม้อยู่ในโรเตอร์นานกว่ามีโอกาสหลุดออกจากไซโคลนไปพร้อมกับฟลูแก๊สได้ออยกว่าเนื่องจากมีขนาดใหญ่ แข็ง และความหนาแน่นสูงกว่า อุณหภูมิ ความดัน จากเครื่องผลิตไอน้ำที่สร้างขึ้นที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิงรวมที่ 7 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ที่อัตราการป้อนน้ำจากส่วนเก็บน้ำ (Warm Space) ต่าง ๆ ขณะที่น้ำจากส่วนเก็บน้ำมีอุณหภูมิ 85 – 95 °C แสดงได้ดังภาพที่ 4.25 และ 4.26



ภาพที่ 4.20 อุณหภูมิไอน้ำที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิง 7 กิโลกรัมต่อชั่วโมง สัดส่วนถ่านหินต่อชีวมวล 70:30 โดยมวล อากาศรวมร้อยละ 100 ในการเผาไหม้สมบูรณ์ อากาศป้อนรวม 300 ลิตรต่อ นาที



ภาพที่ 4.21 ความดันไอน้ำที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิง 7 กิโลกรัมต่อชั่วโมง สัดส่วนถ่านหินต่อชีวมวล 70:30 อากาศรวมร้อยละ 100 ในการเผาไหม้สมบูรณ์ อากาศปฐมภูมิ 300 ลิตรต่ออนาที

จากการพิจารณาอุณหภูมิตั้งแต่ความดันและปริมาณการผลิตไอน้ำที่ได้รับจากเครื่องผลิตไอน้ำที่ได้รับความร้อนจากผนังเตาฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียน สามารถคำนวณประสิทธิภาพเครื่องมือที่สร้างขึ้นได้ โดยสมการใช้ Input-Output Method (Basu, 1999) ในการคำนวณประสิทธิภาพรวมของหม้อกำเนิดไอน้ำ ดังนี้

$$\eta_b = 100 \times \frac{Q_o}{Q_i}$$

เมื่อ

η_b = ประสิทธิภาพรวมของหม้อกำเนิดไอน้ำ, %

Q_o = พลังงานขาออก, kJ/s

Q_i = พลังงานขาเข้า, kJ/s

$$Q_i = \dot{m}_f \times HV$$

\dot{m}_f = อัตราการป้อนเชื้อเพลิง, kg/s

HV = ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง, kJ/kg

$$Q_o = \dot{m}_w \times (H_s - H_w)$$

\dot{m}_w = อัตราการผลิตของไอน้ำ, kg/s

H_s = ค่าเอนทาลปีของไอน้ำขาออก, kJ/kg

H_w = ค่าเอนทาลปีของน้ำร้อนป้อน, kJ/kg

และคำนวณประสิทธิภาพของส่วนแลกเปลี่ยนความร้อนได้ดังสมการ

$$\eta = \left[\frac{(H_{out} - H_{in}) \times M_s}{M_f \times H_{in}} \right] \times 100\%$$

เมื่อ

η = ประสิทธิภาพ (%)

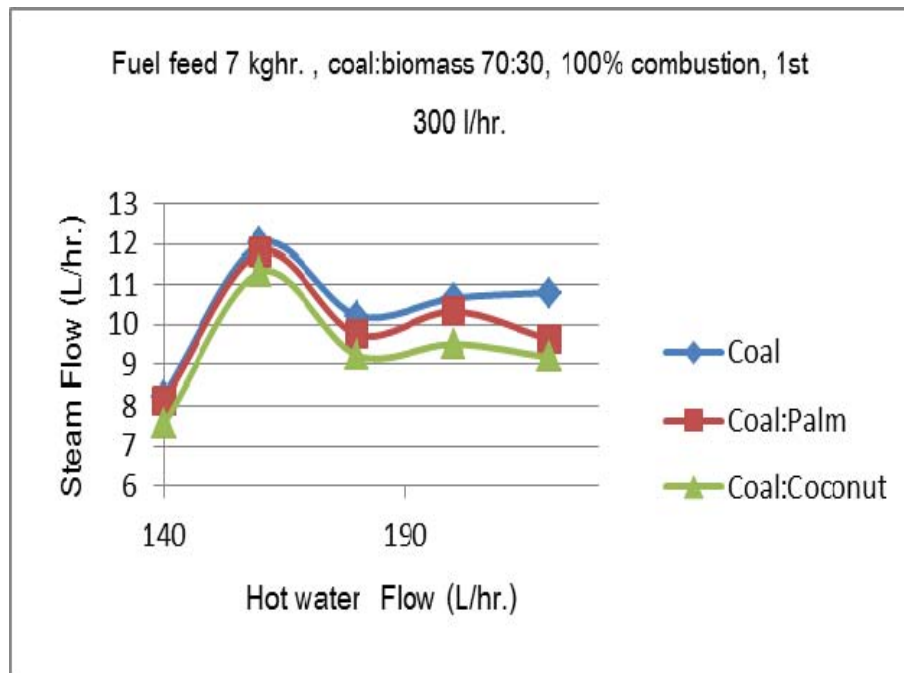
H_{out} = เอนทาลปีไอน้ำที่ผลิตได้ (KJ/kg.)

H_{in} = เอนทาลปีน้ำถ่วงอุ่น (KJ/kg.)

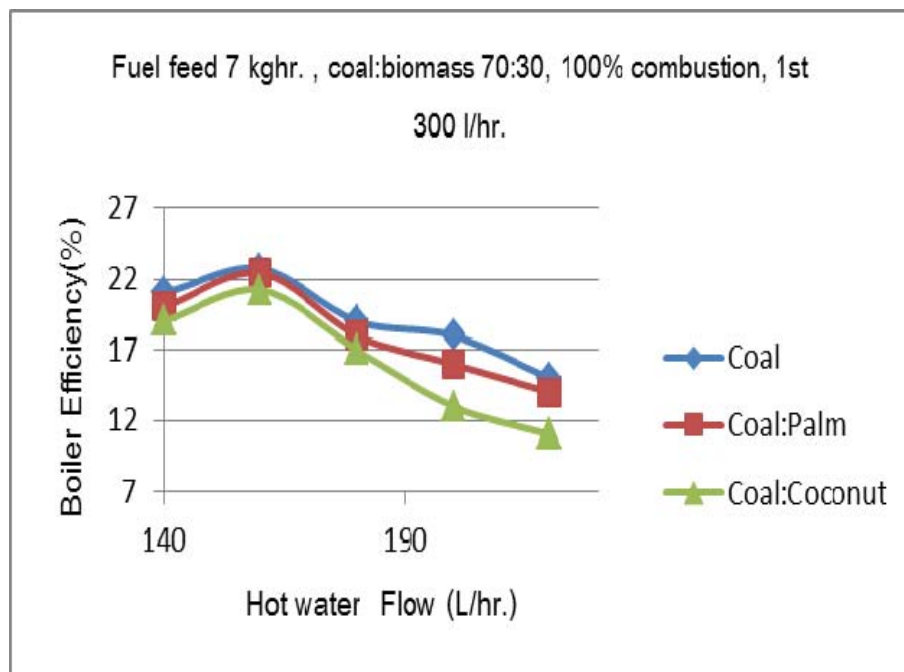
M_s = อัตราการผลิตไอน้ำ (kg/hr.)

M_f = อัตราการป้อนน้ำอุ่น (kg/hr.)

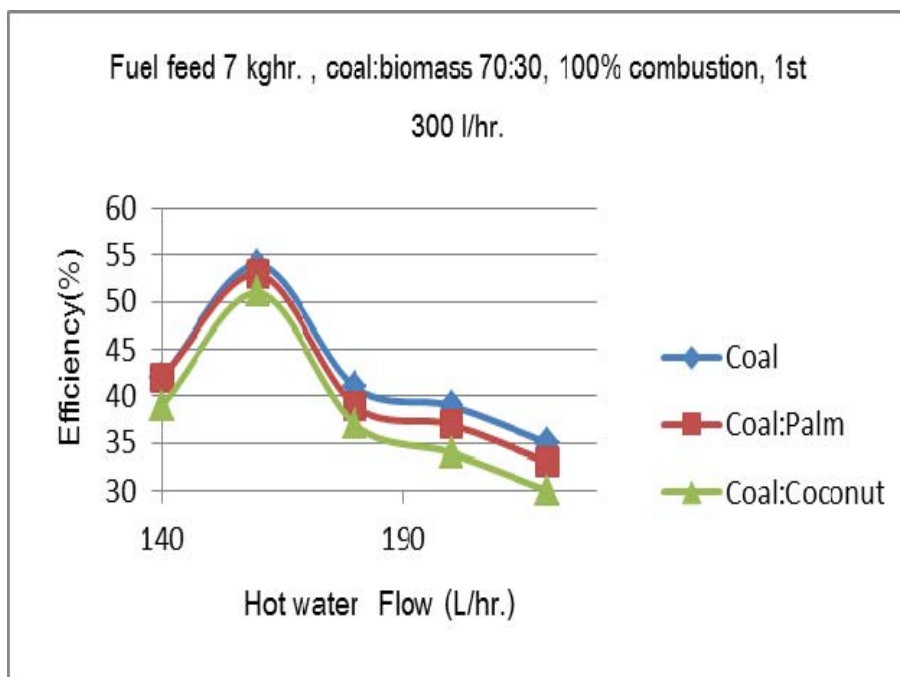
พบว่าประสิทธิภาพรวมของหม้อกำเนิดไอน้ำที่คำนวณได้มากที่สุด เท่ากับ 22.77% จากการเผาไหม้ถ่านหินเพียงอย่างเดียว และในส่วนของเผาไหม้ร่วมของถ่านหินและชีวมวล พบว่าการเผาไหม้ร่วมระหว่างถ่านหินกับกะลาปาล์มให้ประสิทธิภาพสูงที่สุด เท่ากับ 22.44% โดยในส่วนของประสิทธิภาพของส่วนแลกเปลี่ยนความร้อนที่คำนวณได้มากที่สุด เท่ากับ 54.82% จากการเผาไหม้ถ่านหินเพียงอย่างเดียว และในส่วนของเผาไหม้ร่วมของถ่านหินและชีวมวล พบว่าการเผาไหม้ร่วมระหว่างถ่านหินกับกะลาปาล์มให้ประสิทธิภาพสูงที่สุด เท่ากับ 53.91% ซึ่งในทุกการทดลอง อัตราการไหลของน้ำร้อนที่ 160 ลิตรต่อชั่วโมง เป็นอัตราที่ดีที่สุดในการผลิตไอน้ำ คือได้ปริมาณไอน้ำมาก เมื่อเทียบกับอัตราการป้อนของน้ำร้อน รวมทั้งอุณหภูมิ และความดันของไอน้ำ จากเครื่องผลิตที่สร้างสูงสุดด้วย เครื่องมือผลิตไอน้ำที่สร้างขึ้นได้รับความร้อนเพื่อผลิตน้ำให้กลายเป็นไอน้ำ จากส่วนของผนังโรเตอร์ที่บริเวณความสูงทั้ง 3 เมตร ของโรเตอร์ สำหรับการประเมินประสิทธิภาพที่ได้จากการสร้างนั้นถือว่ามีประสิทธิภาพในการผลิตไอน้ำน้อยอยู่ ด้วยเหตุผลจากพื้นที่ผิวของการแลกเปลี่ยนความร้อนที่สร้างจากท่อสแตนเลสขนาด 0.5 นิ้ว ที่ใช้สัมผัสกับส่วนของผนังโรเตอร์มีเพียงประมาณ 3,000 ตารางเซนติเมตร ทำให้เวลาของน้ำที่ใช้ในการป้อนมีระยะเวลาในการแลกเปลี่ยนความร้อนเร็ว และสแตนเลสนั้นมีค่าการนำความร้อนต่ำกว่า ทองแดง ทองเหลือง เหล็ก เป็นต้น จึงทำให้การถ่ายโอนความร้อนนั้นมีประสิทธิภาพต่ำ (ที่เลือกใช้โลหะชนิดนี้ เนื่องจากคำนึงถึงความทนทานต่อสนิม และการกัดกร่อนเป็นหลัก) ส่งผลให้น้ำส่วนหนึ่งกลายเป็นไอได้ไม่ทั้งหมด ซึ่งเป็นเหตุผลหลักในการเกิดการสูญเสียความร้อน เป็นผลให้มีประสิทธิภาพในการผลิตไอน้ำต่ำด้วย ดังแสดงในภาพที่ 4.27 และภาพที่ 4.28



ภาพที่ 4.22 อัตราการไหลของไอน้ำที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิง 7 กิโลกรัมต่อชั่วโมง สัดส่วนถ่านหินต่อชีวมวล 70:30 อากาศรวมร้อยละ 100 ในการเผาไหม้สมบูรณ์ อากาศปฐมภูมิ 300 ลิตรต่อนาที



ภาพที่ 4.23 ประสิทธิภาพรวมของหม้อกำเนิดไอน้ำที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิง 7 กิโลกรัมต่อชั่วโมง สัดส่วนถ่านหินต่อชีวมวล 70:30 อากาศรวมร้อยละ 100 ในการเผาไหม้สมบูรณ์ อากาศปฐมภูมิ 300 ลิตรต่อนาที



ภาพที่ 4.24 ประสิทธิภาพของส่วนแลกเปลี่ยนความร้อนที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิง 7 กิโลกรัมต่อชั่วโมง สัดส่วนถ่านหินต่อชีวมวล 70:30 อากาศรวมร้อยละ 100 ในการเผาไหม้สมบูรณ์ อากาศปฐมภูมิ 300 ลิตรต่อนาที

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 คุณภาพของเตาเผา

- 1) การป้อนถ่านหินร่วมกับกะลาปาล์มอุณหภูมิเฉลี่ยตลอดโรเตอร์สูงกว่าการป้อนถ่านหินร่วมกับ กะลามะพร้าว กระถินยักษ์ และยูคาลิปตัส
- 2) การป้อนอากาศทุติยภูมิอุณหภูมิตลอดโรเตอร์เพิ่มมากขึ้นหากมีป้อนอากาศทุติยภูมิที่ตำแหน่งสูงขึ้น แต่ตำแหน่งที่มีการป้อนอากาศทุติยภูมิ อุณหภูมิจะลดต่ำลง
- 3) อุณหภูมิเฉลี่ยตลอดโรเตอร์มีแนวโน้มที่เพิ่มสูงขึ้นตามอัตราส่วนของถ่านหินที่เพิ่มสูงขึ้นที่อัตราร้อยละการป้อนอากาศเท่ากันที่อัตราการป้อนอากาศรวมร้อยละ 100 ในการเผาไหม้สมบูรณ์
- 4) ในทุกการทดลอง อุณหภูมิเฉลี่ยตลอดโรเตอร์อยู่ที่ช่วง 600 ถึง 950 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ไม่ทำให้เกิดเถ้าหลอม โดยอุณหภูมิเฉลี่ยตลอดโรเตอร์สูงสุดที่สัดส่วนการป้อนถ่านหินร่วมกับกะลาปาล์ม 70:30 โดยมวล และตำแหน่งการป้อนอากาศทุติยภูมิที่ 2.4 เมตร อุณหภูมิตลอดโรเตอร์อยู่ที่ 750 ถึง 950 องศาเซลเซียส

5.2 องค์ประกอบของฟลูแก๊ส

- 1) ปริมาณแก๊สคาร์บอนออกไซด์จากการเผาไหม้ เพิ่มสูงขึ้นตามสัดส่วนของชีวมวลที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากผลของปริมาณสารระเหยง่ายในเชื้อเพลิงที่มากขึ้น
- 2) เมื่อเพิ่มสัดส่วนการป้อนชีวมวล ความเข้มข้นของแก๊สสารประกอบออกไซด์ของไนโตรเจนมีปริมาณลดลง
- 3) การป้อนถ่านหินร่วมกับกะลามะพร้าวความเข้มข้นของแก๊สสารประกอบออกไซด์ของไนโตรเจนมีค่าน้อยที่สุด
- 4) ปริมาณสารประกอบออกไซด์ของไนโตรเจนแปรผันตามปริมาณไนโตรเจนในเชื้อเพลิงและปริมาณอากาศ เป็นสำคัญ
- 5) ปริมาณอากาศรวมที่มากเกินไปผลให้ความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ลดลง แต่ความเข้มข้นของสารประกอบออกไซด์ของไนโตรเจนเพิ่มขึ้น หากการป้อนอากาศมากเกินไปสำหรับการเผาไหม้ จะทำให้การเผาไหม้ลดลง และมีผลต่อฟลูแก๊สที่จะปล่อยออกสู่บรรยากาศ คือทำให้ความเข้มข้นลดลงเนื่องจากถูกเจือจางด้วยอากาศ

- 6) ปริมาณอากาศมีผลต่อการปล่อยออกไซด์ของไนโตรเจนมากกว่าอุณหภูมิเผาไหม้แบบฟลูอิดไคต์เบดแบบหมุนเวียน
- 7) การป้อนอากาศหุติยภูมิที่ตำแหน่งความสูง 1 เมตร จากการป้อนถ่านหินร่วมกับกะลาปาล์ม กะลามะพร้าว กระถินยักษ์ และยูคาลิปตัส ความเข้มข้นของแก๊สสารประกอบออกไซด์ของไนโตรเจนมีปริมาณมากที่สุด แต่การป้อนถ่านหินความเข้มข้นของแก๊สสารประกอบออกไซด์ของไนโตรเจนจากการป้อนอากาศหุติยภูมิที่ตำแหน่ง 2 เมตร มีปริมาณมากที่สุด
- 8) ตำแหน่งการป้อนอากาศหุติยภูมิที่ Reaction zone ทำให้แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ต่ำ แต่ปริมาณแก๊สสารประกอบออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x) สูง
- 9) ความเข้มข้นของสารประกอบออกไซด์ของไนโตรเจนน้อยกว่าค่ามาตรฐาน ส่วนแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ปล่อยออกมา มีค่าค่อนข้างสูงเนื่องจากเกิดการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ แต่ส่วนใหญ่ยังคงอยู่ในระดับมาตรฐาน
- 10) ปริมาณอากาศรวมร้อยละ 100 สำหรับการเผาไหม้สมบูรณ์ และการเติมอากาศหุติยภูมิที่ตำแหน่ง 2.4 เมตร เหมาะสมที่สุดสำหรับการเผาไหม้ร่วมระหว่างถ่านหินและกะลาปาล์ม กะลามะพร้าว กระถินยักษ์ และยูคาลิปตัส เนื่องจากให้อุณหภูมิเฉลี่ยตลอดไรเซอร์สูงที่สุด และปริมาณสารประกอบออกไซด์ของไนโตรเจนยังคงอยู่ในระดับมาตรฐาน

5.3 เครื่องผลิตไอน้ำ

- 1) อุณหภูมิน้ำป้อนเครื่องผลิตไอน้ำ ที่สร้างได้จากส่วนอุ่นน้ำ (Warm Space) เท่ากับ 85 ถึง 95 องศาเซลเซียส
- 2) อุณหภูมิไอน้ำผลิตได้สูงสุดเท่ากับ 160 องศาเซลเซียส และความดันเท่ากับ 2.6 บาร์ เมื่อใช้เชื้อเพลิงถ่านหินร้อยละ 100 ในการเผาไหม้
- 3) อุณหภูมิไอน้ำผลิตได้สูงสุดเท่ากับ 145 องศาเซลเซียสและความดันเท่ากับ 2.3 บาร์ เมื่อใช้เชื้อเพลิงถ่านหินต่อกะลาปาล์ม ที่สัดส่วน 70:30 ในการเผาไหม้
- 4) ประสิทธิภาพรวมของหม้อกำเนิดไอน้ำ และประสิทธิภาพของส่วนแลกเปลี่ยนความร้อนจากการเผาไหม้ถ่านหินเพียงอย่างเดียว สูงสุดที่ร้อยละ 22.77 และร้อยละ 54.82 ตามลำดับ

- 5) ประสิทธิภาพรวมของหม้อกำเนิดไอน้ำ และประสิทธิภาพของส่วนแลกเปลี่ยนความร้อน จากการเผาไหม้ร่วมของถ่านหินกับชีวมวล สูงสุดที่ร้อยละ 22.44 และร้อยละ 53.91 ตามลำดับ
- 6) ทดลองทดลองของการเผาไหม้แบบฟลูอิดไบนด์แบบหมุนเวียน ที่อัตราการไหลของน้ำร้อน 160 ลิตรต่อชั่วโมง ทำให้ผลิตไอน้ำได้มากที่สุด

5.4 ข้อเสนอแนะ

- 1) การศึกษาเชื้อเพลิงที่มีองค์ประกอบของไนโตรเจน จะเห็นผลของการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบในฟลูแก๊สได้ชัดเจน
- 2) ควรปรับโรเตอร์ให้สูงขึ้นเพื่อให้เชื้อเพลิงได้มีเวลาเผาไหม้ในโรเตอร์ได้นานมากขึ้น ซึ่งจะเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของการเผาไหม้ให้สูงขึ้นได้
- 3) ควบคุมอุณหภูมิในโรเตอร์ไม่ให้สูงเกิน 1,200 องศาเซลเซียส เนื่องจากจะทำให้เกิดเถ้าหลอมอุดตันเครื่อง ทำให้เทอร์โมคัปเปิลเสื่อมสภาพเร็ว และทำให้เกิดแก๊สพิษมากขึ้น
- 4) ทำการวัดปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นจริง เพื่อจะได้สามารถคำนวณหาประสิทธิภาพการเผาไหม้ได้
- 5) ในการวัดค่าประสิทธิภาพการเผาไหม้ควรมีวิธีการที่เก็บวัดเถ้าที่ได้หลังการเผาไหม้ ซึ่งจะได้ผลที่แม่นยำกว่า
- 6) ศึกษาเชื้อเพลิงที่มีองค์ประกอบของไนโตรเจนและค่าความร้อนผกผันกัน เพื่อเปรียบเทียบผลกระทบของปริมาณไนโตรเจนในเชื้อเพลิงและอุณหภูมิต่อปริมาณสารประกอบออกไซด์ของไนโตรเจน
- 7) ควรปรับปรุงระบบการป้อนชีวมวล เพราะยังคงเกิดปัญหาการเผาไหม้ย้อนกลับเข้าไปในสกรูฟีดเดอร์ ของถังเก็บชีวมวล
- 8) ควรจะศึกษาที่จะนำไอน้ำที่ได้จากการเผาไหม้มาใช้ประโยชน์
- 9) ในการวัดองค์ประกอบของแก๊สจากการเผาไหม้อาจเปลี่ยนจากการใช้ Flue Gas Analyzer รุ่น testo-350 มาใช้เครื่อง Flue Gas Analyzer รุ่นอื่นที่สามารถวัดค่าได้อย่างต่อเนื่องและบันทึกข้อมูลเข้าคอมพิวเตอร์
- 10) ประสิทธิภาพจากเครื่องผลิตไอน้ำที่สร้างขึ้นยังสามารถพัฒนาให้สูงขึ้นได้ โดยการเพิ่มอัตราการป้อนของเชื้อเพลิงให้สูงขึ้น แต่ต้องระวังในเรื่องของอุณหภูมิเฉลี่ยตลอดโรเตอร์ไม่ให้สูงเกินกว่า 1,200 องศาเซลเซียส

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

กัญญา บุญยเกียรติ. เชื้อเพลิงและการเผาไหม้. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2544.

ชัยวัฒน์ พรหมภูเบศร์. การเผาไหม้เชื้อเพลิงผสมถ่านหินและชีวมวลในฟลูอิโดซ์เบดแบบหมุนเวียน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2548.

ดวงเพ็ญ ศรีบัวงาม และ คณะ. การใช้ถ่านหินในฟลูอิโดซ์เบด. กรุงเทพมหานคร: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2528.

ปิยะพันธ์ จะกอ. การควบคุมการปล่อยแก๊สของการเผาไหม้ถ่านหินและชีวมวลในฟลูอิโดซ์เบดแบบหมุนเวียน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2548.

ประจักษ์ ทรัพย์อุดมมาก. การปล่อยไนโตรเจนออกไซด์และไนตรัสออกไซด์จากการเผาไหม้ร่วมถ่านหินและชีวมวลในฟลูอิโดซ์เบดแบบหมุนเวียน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2551.

ภัทรพรพรณ ประศาสน์สารกิจ. เทอร์โมไดนามิกสวิตเซอร์กรรมเคมี. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545.

มาวิน ปูนอน. การผลิตไอน้ำจากเตาฟลูอิโดซ์เบดแบบหมุนเวียน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2553.

คันสนีย์ กำธนาทรัพย์. ผลของอัตราการไหลอากาศต่อโพรไฟล์ความเร็วอนุภาคในฟลูอิโดซ์เบดแบบหมุนเวียน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2548.

สมบัติ นิธิภูมิรัตน์. การเผาไหม้ถ่านหินและการควบคุมมลพิษในฟลูอิโดซ์เบด. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2531.

สมศักดิ์ ดำรงค์เลิศ. ฟลูอิโดไดเซชัน. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2528.

สำเร็จ จักรใจ. การเผาไหม้. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2547.

อัคริการ์ วรณะ. ระบบควบคุมอุณหภูมิของเตาเผาฟลูอิโดซ์เบดแบบหมุนเวียน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, ภาควิชาเคมีเทคนิค 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. Presented at the First Biennial Meeting of the Scandinavian-Nordic Section of the Combustion Institute at Chalmers University of Technology. Goteborg (April 18-20 2001).

Basu, P. Combustion of coal in circulating Fluidized-bed boilers. Engineering Science 54 (1999): 5547-5557.

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.

Ghani, W.; Alias, A. M.; Savory, R.M.; Cliffe, K.R. Co-combustion of agricultural residues with coal in circulating fluidized bed combustor. Waste Management 29 (2009): 767-773.

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.

- Jaroslaw, K.; Tomasz, C.; Waldemar, M.; Robert, S.; and Wojciech, N. Modeling of solid fuel combustion in oxygen-enriched atmosphere in circulating fluidized bed boiler Part 2. Numerical simulations of heat transfer and gaseous pollutant emissions associated with coal combustion in O₂/CO₂ and O₂/N₂ atmospheres enriched with oxygen under circulating fluidized bed conditions. Fuel Processing Technology 91 (2010): 364-368.
- Jiachun, Z.; Stephen, M.; Darren, I.; Scott, T.; and Charles, K. Release of Fuel-Bound Nitrogen during Biomass Gasification. Ind. Eng. Chem. Res. 39 (2000): 626-634.
- Jianguo, Z.; Qinggang, L.; Tianyu, N.; Guoliang, S.; and Yongjie, N. NO emission on pulverized coal combustion in high temperature air from circulating fluidized bed – An experimental study. Fuel Processing Technology 90 (2009): 664-670.
- Jian-jun, X.; Xue-min, Y.; Lei, Z.; Tong-li, D.; wen-li, S. Emissions of SO₂, NO and N₂O in a circulating fluidized bed combustor during co-firing coal and biomass, J. Env. Sci. 19 (2007):109-117.
- Kunii, D.; and Levenspiel, O. Fluidization engineering. New York: John Wiley and Sons Inc, 1969.
- 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 SO_2 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 48 (2008): 165-173.
- Shen, B.X., et al. N_2O Emission under Fluidized Bed Combustion Condition. Fuel Processing Technology 84 (2003): 13-21.
- Topal, H.; Atımtay, A. T.; and Durmaz, A. Olive Cake Combustion in a Circulating Fluidized Bed. Fuel 82 (2003): 1049-1056.
- Werther, J.; Hartge, E. U.; Lucke, K.; Fehr, M.; Amand, L. E; and Leckner, B. New Air-Staging Techniques for Co-Combustion in Fluidized Bed Combustors. VGB Conference Research for Power Plant Technology (October 10-12 2000).
- 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.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

วิธีวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของเชื้อเพลิง

1. การวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate Analysis): ASTM D3172

1.1 ความชื้น (Moisture): ASTM D3173

วิธีการทดลอง

- 1) ออบครุชชีเบลในเตาอบ (Furnace) ที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง นำออกมาทำให้เย็นในเดสิเคเตอร์ ชั่งน้ำหนักครุชชีเบล
- 2) ชั่งน้ำหนักตัวอย่างใส่ครุชชีเบล ประมาณ 1 กรัม
- 3) ออบครุชชีเบลพร้อมตัวอย่างในเตาอบโดยไม่ต้องปิดฝา ที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง นำออกมาทำให้เย็นในเดสิเคเตอร์ ชั่งน้ำหนักครุชชีเบลพร้อมตัวอย่าง

สูตรที่ใช้ในการคำนวณ

$$M = 100 - 100(W_1 - W_2) / W$$

- เมื่อ
- M = ร้อยละของความชื้น
 - W_2 = น้ำหนักของครุชชีเบล (กรัม)
 - W_1 = น้ำหนักของครุชชีเบลที่มีตัวอย่างผ่านการอบที่ 105 องศาเซลเซียส 2 ชั่วโมง (กรัม)
 - W = น้ำหนักของตัวอย่างแห้ง (กรัม)

1.2 ปริมาณสารระเหย (Volatile Matter): ASTM D3175

วิธีการทดลอง

- 1) เผาครุชชีเบลพร้อมฝานในเตาเผาอุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส ประมาณ 30 นาที นำออกจากเตาเผา ทำให้เย็นในเดสิเคเตอร์ แล้วชั่งน้ำหนักครุชชีเบลพร้อมฝาน บันทึกผล
- 2) ชั่งตัวอย่างแห้งใส่ในครุชชีเบลประมาณ 1 กรัม แล้วปิดฝาให้เรียบร้อย
- 3) นำไปให้ความร้อนโดยอยู่เหนือปากเตาเผา (Tubular Furnace) อุณหภูมิประมาณ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 นาที
- 4) หย่อนครุชชีเบลให้อยู่บริเวณปากเตา ที่อุณหภูมิประมาณ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 นาที

5) หย่อนครุชชีเบิ้ลให้อยู่กึ่งกลางเตา อุณหภูมิประมาณ 950 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 นาที

6) นำครุชชีเบิ้ลออกมาทิ้งไว้ให้เย็น แล้วนำไปใส่ในเดสิเคเตอร์ประมาณ 15 นาที นำไปชั่งและบันทึกผล

สูตรที่ใช้ในการคำนวณ

$$V = [100(W_5 - W_6) / W] - M$$

เมื่อ	V	=	ร้อยละของสารระเหย
	W_5	=	น้ำหนักของครุชชีเบิ้ลพร้อมฝารวมกับน้ำหนักตัวอย่างก่อนเผา (กรัม)
	W_6	=	น้ำหนักของครุชชีเบิ้ลพร้อมฝารวมกับน้ำหนักตัวอย่างหลังเผา (กรัม)
	W	=	น้ำหนักของตัวอย่างแห้ง (กรัม)
	M	=	ร้อยละของความชื้น

1.3 เถ้า (Ash): ASTM D3174

วิธีการทดลอง

1) เเผครุชชีเบิ้ล (Muffle Furnace) ที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง นำออกมาทำให้เย็นในเดสิเคเตอร์ ชั่งน้ำหนักครุชชีเบิ้ล

2) ชั่งน้ำหนักตัวอย่างแห้งใส่ครุชชีเบิ้ล ประมาณ 1 กรัม

3) นำไปเผาบนตะเกียงเบนเซนจนควันระเหยหมด

4) ใส่ครุชชีเบิ้ลในเตาเผาที่อุณหภูมิประมาณ 750 องศาเซลเซียส เป็นเวลาประมาณ 2 ชั่วโมงหรือจนน้ำหนักคงที่

5) นำครุชชีเบิ้ลออกจากเตาเผาวางทิ้งไว้ให้เย็น แล้วนำไปใส่ในเดสิเคเตอร์ ชั่งน้ำหนักพร้อมบันทึกผล

สูตรที่ใช้ในการคำนวณ

$$A = 100(W_3 - W_4) / W$$

เมื่อ	A	=	ร้อยละของเก่า
	W_3	=	น้ำหนักของครุชิลที่มีเก่า (กรัม)
	W_4	=	น้ำหนักของครุชิล (กรัม)
	W	=	น้ำหนักของตัวอย่างแห้ง (กรัม)

1.4 ปริมาณคาร์บอนคงตัว (Fixed Carbon)

สูตรที่ใช้ในการคำนวณ

$$\text{ร้อยละของคาร์บอนคงตัว} = 100 - A - V - M$$

เมื่อ	A	=	ร้อยละของเก่า
	V	=	ร้อยละของสารระเหย
	M	=	ร้อยละของความชื้น

ภาคผนวก ข

วิธีการคำนวณ

- การคำนวณหาปริมาณอากาศที่จำเป็นในการเผาไหม้สมบูรณ์ร้อยละ 100 อัตราการป้อนเชื้อเพลิง 7 กิโลกรัมต่อชั่วโมง

ตารางแสดงค่าการวิเคราะห์โดยประมาณ

Proximate analysis	% By Mass				
	Coal	Palm Shell	Coconut shell	Giant Leucaena	Eucalyptus
Fixed Carbon	38.66	18.51	23.32	9.98	15.61
Volatile Matter	35.84	72.24	68.83	70.37	66.10
Moisture	17.11	5.43	6.79	9.98	11.38
Ash	8.39	3.82	1.07	9.67	6.91
Total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

ตารางแสดงค่าการวิเคราะห์โดยแยกธาตุ

Ultimate analysis	% By Mass (daf)				
	Coal	Palm Shell	Coconut shell	Giant Leucaena	Eucalyptus
C	54.19	49.06	45.95	55.13	47.83
H	6.96	7.41	5.76	6.82	5.57
N	1.01	0.65	0.09	0.89	0.37
O	37.54	42.79	48.18	37.12	46.17
S	0.3	0.09	0.02	0.04	0.06
Total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

คุณสมบัติของอากาศที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ความดัน 1 บรรยากาศ

ความหนาแน่น	1.165438	กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร
มวลโมเลกุล	28.97	
สัดส่วนของออกซิเจน	21	เปอร์เซ็นต์
สัดส่วนของไนโตรเจน	79	เปอร์เซ็นต์

มวลโมเลกุลของ C H O และ S เนื่องจากไนโตรเจนส่วนใหญ่แล้วจะเฉื่อย ไม่ค่อยเกิดปฏิกิริยา จึงไม่นำไนโตรเจนมาคิด

C	=	12
H	=	1
O	=	16
S	=	32

ถ่านหิน 100 เปอร์เซ็นต์ 7 กิโลกรัมต่อชั่วโมง คิดเป็นน้ำหนักแห้งและปราศจากเถ้าได้เป็น

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

มีปริมาณ C H N O และ S คิดเป็นน้ำหนักแห้งและปราศจากเถ้าได้เป็น

ปริมาณ C ;	$5.215(54.19)/100$	=	2.826	กิโลกรัมต่อชั่วโมง
	$2.826/12$	=	0.236	กิโลโมลต่อชั่วโมง
ปริมาณ H ;	$5.215(6.96)/100$	=	0.363	กิโลกรัมต่อชั่วโมง
	$0.363/1$	=	0.363	กิโลโมลต่อชั่วโมง
ปริมาณ O ;	$5.215(37.54)/100$	=	1.958	กิโลกรัมต่อชั่วโมง
	$1.958/16$	=	0.122	กิโลโมลต่อชั่วโมง
ปริมาณ S ;	$5.215(0.30)/100$	=	0.016	กิโลกรัมต่อชั่วโมง
	$0.016/32$	=	0.0005	กิโลโมลต่อชั่วโมง

ต้องใช้ O₂ ในการเผาไหม้สมบูรณ์

ปริมาณ C ;	$0.236 * 1$	=	0.236	กิโลโมล O ₂ ต่อชั่วโมง
ปริมาณ H ;	$0.363/4$	=	0.091	กิโลโมล O ₂ ต่อชั่วโมง
ปริมาณ O ;	$-0.122/2$	=	-0.061	กิโลโมล O ₂ ต่อชั่วโมง
ปริมาณ S ;	$0.0005 * 1$	=	0.0005	กิโลโมล O ₂ ต่อชั่วโมง

$$\begin{aligned}
\text{รวมต้องใช้แก๊สออกซิเจน} &= 0.265 \text{ กิโลโมล } O_2 \text{ ต่อชั่วโมง} \\
\text{ต้องใช้อากาศในการเผาไหม้สมบูรณ์} & \\
0.265 * 100/21 &= 1.262 \text{ กิโลโมลอากาศต่อชั่วโมง} \\
1.262 * 28.97 &= 36.566 \text{ กิโลกรัมอากาศต่อชั่วโมง} \\
36.566 / 1.165438 &= 31.375 \text{ ลูกบาศก์เมตรอากาศต่อ} \\
&\quad \text{ชั่วโมง} \\
31.375 * 1000 &= 313375.4 \text{ ลิตรต่อชั่วโมง} \\
31375.4 / 60 &= 522.92 \text{ ลิตรต่อนาที}
\end{aligned}$$

2. การคำนวณหาความเร็วอากาศปฐมภูมิ 300 ลิตรต่อนาที ในโรเตอร์ซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 10 เซนติเมตร

$$\begin{aligned}
300 \text{ ลิตรต่อนาที} &= 300/1000 = 0.3 \text{ ลูกบาศก์เมตรอากาศต่อ} \\
&\quad \text{นาที} \\
0.3 / 60 &= 5 * 10^{-3} \text{ ลูกบาศก์เมตรอากาศต่อ} \\
&\quad \text{วินาที} \\
5 * 10^{-3} * 7/22/(0.05^2) &= 0.636 \text{ เมตรต่อวินาที}
\end{aligned}$$

3. การคำนวณหาประสิทธิภาพของหม้อกำเนิดไอน้ำ

ตัวอย่างเช่น ในการป้อนเชื้อเพลิง 7 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ถ่านหินร้อยละ 100 ฉะนั้นอัตราการป้อนถ่านหินคือ 7 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ค่าความร้อนของถ่านหิน 21858 กิโลจูลต่อกิโลกรัม อัตราการไหลของไอน้ำ 12.02 ลิตรต่อชั่วโมง ค่าเอนทาลปีของไอน้ำขาออก 2788 กิโลจูลต่อกิโลกรัม อัตราการไหลของน้ำร้อน 160 ลิตรต่อชั่วโมง ค่าเอนทาลปีของน้ำร้อน 90 องศาเซลเซียส ขาเข้า 377 กิโลจูลต่อกิโลกรัม

$$\begin{aligned}
\text{ประสิทธิภาพรวมของหม้อกำเนิดไอน้ำ} &= \frac{(2788-377) \times (0.22) \times 100}{21864 \times 7/60}
\end{aligned}$$

$$= 22.77 \%$$

$$\begin{aligned}
\text{ประสิทธิภาพของส่วนแลกเปลี่ยนความร้อน} &= \frac{(2788-377) \times (0.22) \times 100}{377 \times 2.565}
\end{aligned}$$

$$= 54.82 \%$$

ภาคผนวก ค

ตารางบันทึกผลการทดลอง

1. ส่วนบันทึกผลของอุณหภูมิตำแหน่งต่างๆของไรเซอร์ และองค์ประกอบของฟลูแก๊ส

ข้อมูลเงื่อนไขในการทดลอง

Run	Type of Biomass	Ratio coal:biomass	Position of Secondary air (m)
1	Coconut	"30:70"	2
2	Coconut	"50:50"	2
3	Coconut	"70:30"	2
4	Palm	"30:70"	2
5	Palm	"50:50"	2
6	Palm	"70:30"	2
7	Palm	"50:50"	1
8	Palm	"50:50"	2.4
9	Coconut	"50:50"	1
10	Coconut	"50:50"	2.4
11	Coal	"100:0"	2
12	Coal	"100:0"	1
13	Coal	"100:0"	2.4

Run	Type of Biomass	Ratio coal:biomass	Position of Secondary air (m)
14	Giant Leucaena	"30:70"	2
15	Giant Leucaena	"50:50"	2
16	Giant Leucaena	"70:30"	2
17	Eucalyptus	"30:70"	2
18	Eucalyptus	"50:50"	2
19	Eucalyptus	"70:30"	2
20	Eucalyptus	"50:50"	1
21	Eucalyptus	"50:50"	2.4
22	Giant Leucaena	"50:50"	1
23	Giant Leucaena	"50:50"	2.4

หมายเหตุ : Run 1-23 อธิบายภาวะการทดลองได้ดังต่อไปนี้

1. ถ่านหิน:กะลามะพร้าว 30:70 อากาศรวมร้อยละ 100 ในการเผาไหม้สมบูรณ์ อากาศปฐมภูมิ 300 ลิตรต่อนาที ป้อนอากาศที่ screw feeder ของชีวมวล 100 ลิตรต่อนาที อากาศทุติยภูมิ ป้อนที่ตำแหน่ง 2 เมตร
2. ถ่านหิน:กะลามะพร้าว 50:50 อากาศรวมร้อยละ 100 ในการเผาไหม้สมบูรณ์ อากาศปฐมภูมิ 300 ลิตรต่อนาที ป้อนอากาศที่ screw feeder ของชีวมวล 100 ลิตรต่อนาที อากาศทุติยภูมิ ป้อนที่ตำแหน่ง 2 เมตร
3. ถ่านหิน:กะลามะพร้าว 70:30 อากาศรวมร้อยละ 100 ในการเผาไหม้สมบูรณ์ อากาศปฐมภูมิ 300 ลิตรต่อนาที ป้อนอากาศที่ screw feeder ของชีวมวล 100 ลิตรต่อนาที อากาศทุติยภูมิ ป้อนที่ตำแหน่ง 2 เมตร
4. ถ่านหิน:กะลาปาล์ม 30:70 อากาศรวมร้อยละ 100 ในการเผาไหม้สมบูรณ์ อากาศปฐมภูมิ 300 ลิตรต่อนาที ป้อนอากาศที่ screw feeder ของชีวมวล 100 ลิตรต่อนาที อากาศทุติยภูมิ ป้อนที่ตำแหน่ง 2 เมตร

ข้อมูลผลการทดลองของค่าอุณหภูมิ(องศาเซลเซียส)ที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ถ่านหินและชีวมวลตามเงื่อนไขที่กำหนด
 หมายเหตุ อัตราส่วนที่แสดงคือ coal :biomass และระยะที่แสดงในหน่วยเมตรคือ ตำแหน่งที่ป้อนอากาศทุติยภูมิ

run	Coconut shell at 2 m				Palm shell at 2 m				Palm shell 50:50		Coconut shell 50:50		coal 100:0			ความสูง(m.)
	0-100	30-70	50-50	70-30	0-100	30-70	50-50	70-30	1 m	2.4 m	1 m	2.4 m	2 m	1 m	2.4 m	
	0	1	2	3	0	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	
T1	848	882	900	904	894	913	937	988	981	986	903	886	943	940	999	0.1
T2	883	898	907	923	925	936	945	962	948	957	911	904	978	905	961	0.5
T3	908	907	920	921	926	928	945	950	939	952	917	916	983	909	944	0.9
T4	879	868	883	873	880	876	894	894	836	895	823	877	936	795	883	1.3
T5	829	818	831	821	851	841	850	847	791	849	777	832	879	752	833	1.7
T6	587	584	591	598	640	636	616	656	745	802	760	800	656	738	806	2.1
T7	729	727	724	716	750	714	769	772	730	727	748	717	759	729	716	2.5
T8	699	700	720	711	744	708	755	760	715	688	717	676	751	709	680	2.9
T9	555	599	611	621	609	588	644	652	597	592	604	582	669	650	644	out cyclone

ข้อมูลผลการทดลองของค่าอุณหภูมิ(องศาเซลเซียส)ที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ถ่านหินและชีวมวลตามเงื่อนไขที่กำหนด
 หมายเหตุ อัตราส่วนที่แสดงคือ coal :biomass และระยะที่แสดงในหน่วยเมตรคือ ตำแหน่งที่ป้อนอากาศทุติยภูมิ

	Giant Leucaena at 2 m				Eucalyptus at 2 m				Eucalyptus 50:50		Giant Leucaena50:50		coal 100:0			
	0-100	30-70	50-50	70-30	0-100	30-70	50-50	70-30	1 m	2.4 m	1 m	2.4 m	2 m	1 m	2.4 m	
run	0	14	15	16	0	17	18	19	20	21	22	23	11	12	13	ความสูง(m.)
T1	/	862	830	927	/	816	800	902	812	836	913	926	943	940	999	0.1
T2	/	612	688	774	/	589	665	720	646	682	705	725	978	905	961	0.5
T3	/	662	758	834	/	625	702	744	688	731	771	777	983	909	944	0.9
T4	/	660	806	847	/	636	713	769	699	748	690	776	936	795	883	1.3
T5	/	664	780	829	/	655	765	781	659	732	690	765	879	752	833	1.7
T6	/	592	672	729	/	566	660	780	665	685	677	725	656	738	806	2.1
T7	/	571	631	681	/	540	645	686	642	657	642	617	759	729	716	2.5
T8	/	567	620	669	/	538	625	641	615	643	642	622	751	709	680	2.9
T9	/	482	576	582	/	456	566	572	598	629	588	545	669	650	644	out cyclone

ข้อมูลผลการทดลองของค่าองค์ประกอบฟลูแก๊ส (ppm) และ ประสิทธิภาพการเผาไหม้ (ร้อยละ) ที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ถ่านหินและชีวมวลตามเงื่อนไขที่กำหนด

หมายเหตุ อัตราส่วนที่แสดงคือ coal : biomass และระยะที่แสดงในหน่วยเมตรคือ ตำแหน่งที่ป้อนอากาศทุติยภูมิ

	coconut shell at 2 m				Palm shell at 2 m				Palm shell 50:50		coconut shell 50:50		coal 100:0		
	0-100	30-70	50-50	70-30	0-100	30-70	50-50	70-30	1 m	2.4 m	1 m	2.4 m	2 m	1 m	2.4 m
run	0	1	2	3	0	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
CO	205	197	158	145	224	210	206	183	175	200	142	173	143	193	196
NO	113	115	144	153	165	167	176	184	198	154	172	146	203	182	171
NO ₂	5	5	8	7	5	7	11	12	8	7	8	7	12	12	9
NO _x	118	120	152	160	170	174	187	196	206	161	180	153	215	194	180
%CO ₂	5.2	6.2	6.6	6.8	4.4	5	5	5.5	8.4	7.4	6.7	5.7	7.1	6	6.1

ข้อมูลผลการทดลองของค่าองค์ประกอบฟลูแก๊ส (ppm) และ ประสิทธิภาพการเผาไหม้ (ร้อยละ) ที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ถ่านหินและชีวมวลตามเงื่อนไขที่กำหนด

หมายเหตุ อัตราส่วนที่แสดงคือ coal : biomass และระยะที่แสดงในหน่วยเมตรคือ ตำแหน่งที่ป้อนอากาศทุติยภูมิ

	Giant Leucaena at 2 m				Eucalyptus at 2 m				Eucalyptus 50:50		Giant Leucaena 50:50		coal 100:0		
	0-100	30-70	50-50	70-30	0-100	30-70	50-50	70-30	1 m	2.4 m	1 m	2.4 m	2 m	1 m	2.4 m
run	0	14	15	16	0	17	18	19	20	21	22	23	11	12	13
CO	/	348	297	257	/	353	333	286	247	329	281	320	143	193	196
NO	/	33	85	111	/	27	108	99	66	76	91	75	203	182	171
NO ₂	/	1	1	4	/	3	4	1	1	4	5	3	12	12	9
NO _x	/	34	86	115	/	30	112	100	67	80	96	78	215	194	180
%CO ₂	/	4.3	7.5	6.7	/	4.3	6.1	4.6	4	5.2	10.7	7.6	7.1	6	6.1

2. ส่วนบันทึกผลของอุณหภูมิ และความดันสำหรับประเมินประสิทธิภาพของหม้อกำเนิดไอน้ำฟลูอิดิเบดแบบหมุนเวียน

2.1 อุณหภูมิไอน้ำที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิง 7 กิโลกรัมต่อชั่วโมง อากาศรวมร้อยละ 100 ในการเผาไหม้สมบูรณ์ อากาศปฐมภูมิ 300 ลิตรต่ออนาที (ก) ถ่านหิน (ข) ถ่านหิน: กะลาปาล์ม, 70:30 และ (ค) ถ่านหิน: กะลามะพร้าว, 70:30

Hot water Flow (L/hr.)	Steam	
	Temperature (°C)	Flow (L/hr.)
140	160	8.24
160	160	12.02
180	158	10.23
200	155	10.67
220	153	10.81

(ก)

Hot water Flow (L/hr.)	Steam	
	Temperature (°C)	Flow (L/hr.)
140	145	8.11
160	145	11.82
180	143	9.75
200	140	10.34
220	140	9.63

(ข)

Hot water Flow (L/hr.)	Steam	
	Temperature (°C)	Flow (L/hr.)
140	138	7.55
160	140	11.33
180	140	9.23
200	135	9.51
220	135	9.18

(ค)

2.2 ความดันไอน้ำที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิง 7 กิโลกรัมต่อชั่วโมง อากาศรวมร้อยละ 100 ในการเผาไหม้สมบูรณ์ อากาศปฐมภูมิ 300 ลิตรต่ออนาที (ก) ถ่านหิน (ข) ถ่านหิน: กะลาปาล์ม, 70:30 และ (ค) ถ่านหิน: กะลามะพร้าว, 70:30

Hot water Flow (L/hr.)	Steam	
	Pressure (Bar)	Flow (L/hr.)
140	2.4	8.24
160	2.6	12.02
180	2.3	10.23
200	2.3	10.67
220	2.1	10.81

(f)

Hot water Flow (L/hr.)	Steam	
	Pressure (Bar)	Flow (L/hr.)
140	2.1	8.11
160	2.3	11.82
180	2.2	9.75
200	2.1	10.34
220	2.1	9.63

(g)

Hot water Flow (L/hr.)	Pressure (Bar)	
	Pressure (Bar)	Flow (L/hr.)
140	2.1	7.55
160	2.2	11.33
180	2.0	9.23
200	1.9	9.51
220	1.9	9.18

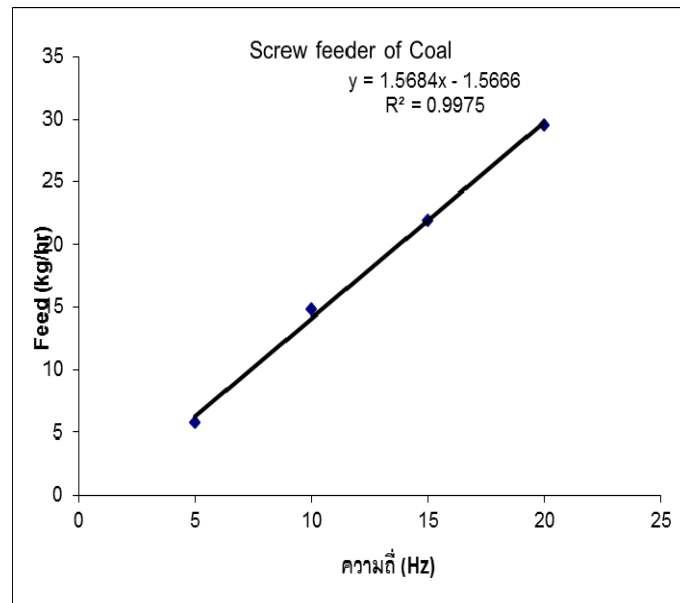
(h)

3.การปรับเทียบสกรูฟีดเดอร์ และ inverter

เนื่องจากการป้อนเชื้อเพลิงจะใช้ inverter เป็นตัวควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ที่ใช้ขับเคลื่อนสกรูฟีดเดอร์ ซึ่งหน่วยวัดความเร็วรอบของมอเตอร์คือ Hz แต่หน่วยของการป้อนเชื้อเพลิงที่ต้องการคือ กิโลกรัมของเชื้อเพลิงต่อชั่วโมง ดังนั้นจึงต้องมีการปรับเทียบสกรูฟีดเดอร์ และ inverter เพื่อให้ได้ค่าเปรียบเทียบระหว่าง Hz และกิโลกรัมต่อชั่วโมง ของเชื้อเพลิงทั้ง 5 ชนิด คือ ถ่านหิน กะลาปาล์ม กะลามะพร้าว กระจินยักษ์ และยูคาลิปตัส ซึ่งเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ประกอบไปด้วยสกรูฟีดเดอร์ 2 ชุด เพื่อแยกป้อนเชื้อเพลิงระหว่างถ่านหินและชีวมวล ดังนั้นจึงต้องมีการปรับเทียบสกรูฟีดเดอร์ และ inverter ของทั้ง 2 ชุด ดังแสดงในตารางที่ 4.4, 4.5, 4.6, 4.7 และ 4.8 ภาพที่ 4.1, 4.2, 4.3, 4.4 และ 4.5

ตารางที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของ inverter กับอัตราการป้อนถ่านหินผ่านสกรูฟีดเดอร์

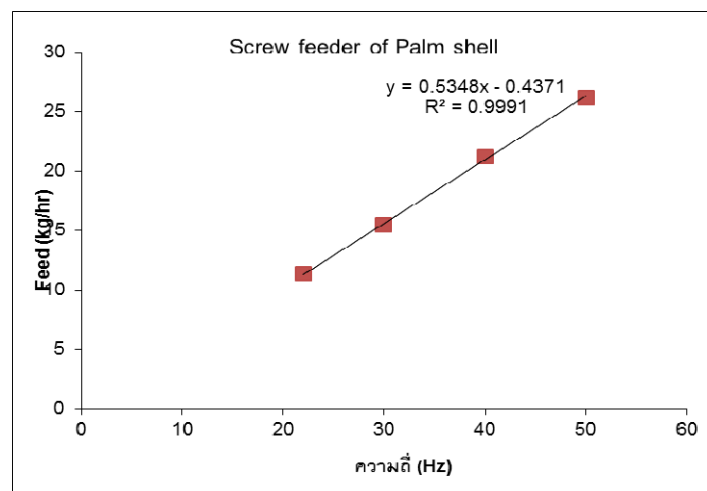
Screw feeder (Coal)	
Hz	Kg/hr
5	5.8008
10	14.8188
15	21.9828
20	29.5536



ภาพที่ ค.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของ inverter กับอัตราการป้อนถ่านหินผ่านสกรูพีดเดอร์

ตาราง ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของ inverter กับอัตราการป้อนกะลาปาล์มผ่านสกรูพีดเดอร์

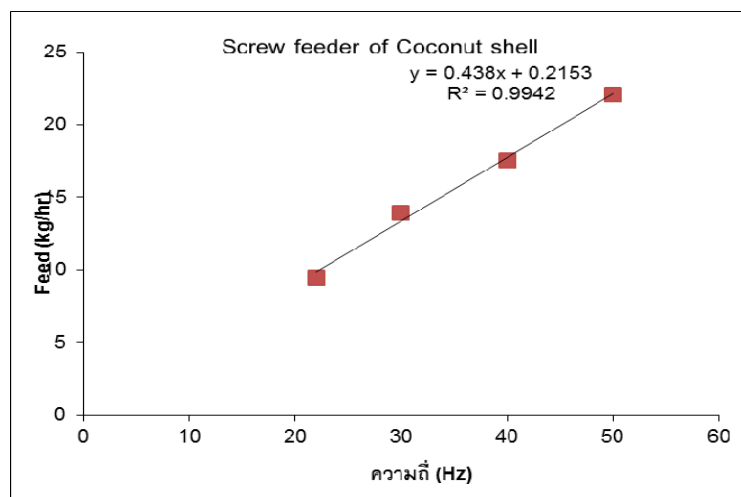
Screw feeder (Palm shell)	
Hz	Kg/hr
22	11.352
30	15.4392
40	21.2208
50	26.178



ภาพที่ ค.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของ inverter กับอัตราการป้อนกะลาปาล์มผ่านสกรูพีดเดอร์

ตารางที่ ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของ inverter กับอัตราการป้อนกะลามะพร้าวผ่านสกรูพีด
เดอริ์

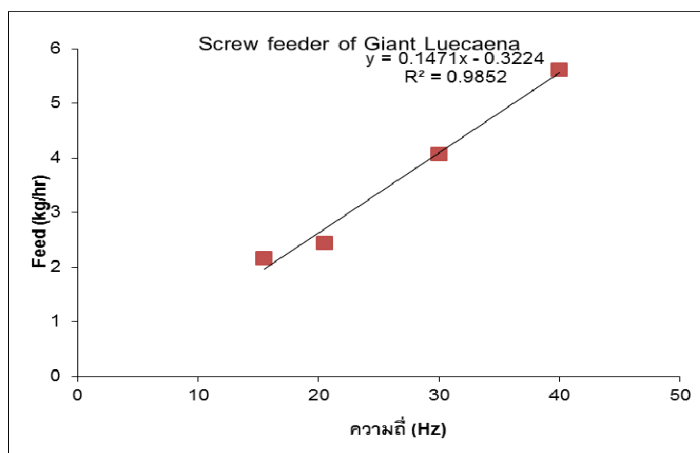
Screw feeder (Coconut shell)	
Hz	Kg/hr
22	9.4944
30	13.938
40	17.5752
50	22.0548



ภาพที่ ค.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของ inverter กับอัตราการป้อนกะลามะพร้าวผ่าน
สกรูพีดเดอริ์

ตารางที่ ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของ inverter กับอัตราการป้อนกระดิ่งยักษ์ผ่านสกรูพีด
เดอริ์

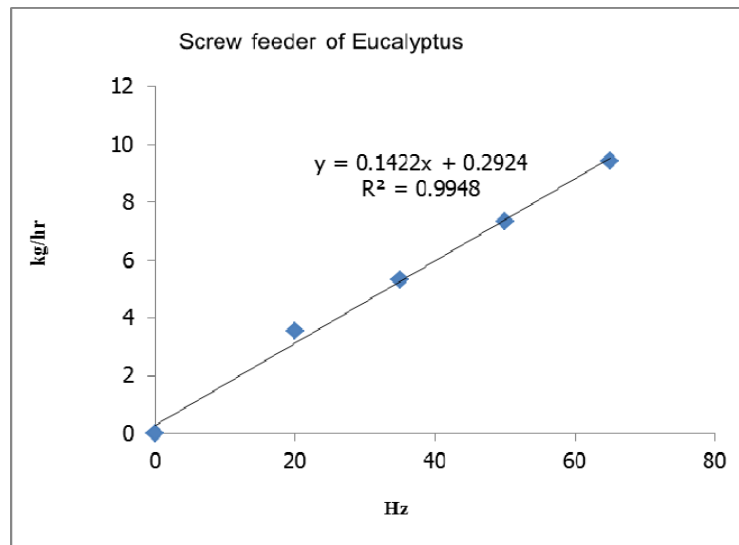
Screw feeder (Giant Leucaena)	
Hz	Kg/hr
15.5	2.1696
20.5	2.4384
30	4.0716
40	5.6268



ภาพที่ ค.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของ inverter กับอัตราการป้อนกระถินยักษ์ผ่านสกรูพีดเดอร์

ตารางที่ ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของ inverter กับอัตราการป้อนยูคาลิปตัสผ่านสกรูพีดเดอร์

Screw feeder (Eucalyptus)	
Hz	Kg/hr
0	0
20	3.543
35	5.324
50	7.332
65	9.429



ภาพที่ ค.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของ inverter กับอัตราการป้อนยูคาลิปตัสผ่านสกรูฟีดเดอร์

ภาคผนวก ง

ตารางไอน้ำ

Relative Pressure p_e bar	Temperature t °C	Energy of water h' kcal/kg	Evaporation energy r kcal/kg	Total steam energy h'' kcal/kg	Steam density n'' m ³ /kg
0.0	99.6	99.6	539	639	1.694
0.5	111.4	111.5	532	643	1.159
1.0	120.2	120.6	526	647	0.885
1.5	127.4	127.8	521	649	0.718
2.0	133.5	134.0	517	651	0.606
2.5	138.9	139.5	513	652	0.524
3.0	143.6	144.5	509	654	0.462
3.5	147.9	148.8	506	655	0.414
4.0	151.8	152.9	503	656	0.375
4.5	155.5	156.7	501	658	0.343
5.0	158.8	160.0	498	658	0.316
6.0	165.0	166	493	659	0.2727
7.0	170.4	172	487	659	0.2403
8.0	175.4	177	485	662	0.2148
9.0	179.9	182	481	663	0.1943
10.0	184.1	186	477	663	0.1774

11.0	188.0	191	474	665	0.1632
12.0	191.6	195	471	666	0.1511
13.0	195.0	198	468	666	0.1407
14.0	198.3	202	465	667	0.1317
15.0	201.4	205	462	667	0.1237
20.0	214.9	220	449	669	0.0968
30.0	235.7	243	426	669	0.0645
40.0	251.8	262	407	669	0.0485
50.0	265.1	277	391	668	0.0387

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายชัยณรงค์ หาญชนะ เกิดวันที่ 15 ตุลาคม พ.ศ. 2529 สำเร็จการศึกษาปริญญาตรี
วิทยาศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปี
การศึกษา 2551 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะ
วิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อ พ.ศ. 2552