

ผลของการเผาไหม้แบบเติมอากาศเป็นขั้นตอนต่อการปล่อยไนโตรเจนออกไซด์จากการเผาไหม้ร่วมของ  
ถ่านหินและชีวมวลในฟลูอิดไธซ์เบดแบบหมุนเวียน



นายชาญวิทย์ กมลรัตน์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)  
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

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 University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2557

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EFFECTS OF AIR STAGED COMBUSTION ON NO<sub>x</sub> EMISSIONS FROM CO-  
COMBUSTION OF COAL AND BIOMASS IN CIRCULATING FLUIDIZED BED

Mr. Chanwit Kamonrat



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 2014

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์ ผลของการเผาไหม้แบบเติมอากาศเป็นขั้นตอนการปล่อย  
ไนโตรเจนออกไซด์จากการเผาไหม้ร่วมของถ่านหินและชีวมวลในฟลูอิดไธซ์เบดแบบหมุนเวียน  
โดย นายชาญวิทย์ กมลรัตน์  
สาขาวิชา เคมีเทคนิค  
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ประพันธ์ คูชลธารา

---

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง  
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร. เกียรติ พลุกษาทร)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ประพันธ์ คูชลธารา)

.....กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร. พรพจน์ เปี่ยมสมบูรณ์)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(ดร. บุญรอด สัจจกุลนุกิจ)

ชาญวิทย์ กมลรัตน์ : ผลของการเผาไหม้แบบเติมอากาศเป็นขั้นต่อการปล่อยไนโตรเจนออกไซด์จากการเผาไหม้ร่วมของถ่านหินและชีวมวลในฟลูอิดไคซ์เบดแบบหมุนเวียน (EFFECTS OF AIR STAGED COMBUSTION ON NO<sub>x</sub> EMISSIONS FROM CO-COMBUSTION OF COAL AND BIOMASS IN CIRCULATING FLUIDIZED BED) อ.ที่  
 ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ. ดร. ประพันธ์ คูชลธารา, 97 หน้า.

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของการเติมอากาศแบบขั้นต่อการปล่อยไนโตรเจนออกไซด์จากการเผาไหม้ร่วมของถ่านหินและชีวมวลในเตาเผาฟลูอิดไคซ์เบดแบบหมุนเวียน โดยมีการเติมอากาศ 2 รูปแบบ คือ การเติมอากาศขั้นเดียว และการเติมอากาศแบบหลายขั้น นอกจากนี้ได้ศึกษาผลของตำแหน่งในการป้อนอากาศทุติยภูมิ สัดส่วนในการป้อนอากาศทุติยภูมิต่ออากาศปฐมภูมิ และชนิดของเชื้อเพลิงที่ส่งผลต่อการเกิดไนโตรเจนออกไซด์ เชื้อเพลิงที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ ถ่านหินและกะลามะพร้าว ในการเผาไหม้ร่วมใช้เชื้อเพลิงผสมถ่านหินและกะลามะพร้าว (ร้อยละ 50 ของถ่านหิน และร้อยละ 50 ของกะลามะพร้าว) โดยการป้อนเชื้อเพลิงที่อัตราคงที่ 7 กิโลกรัมต่อชั่วโมง และใช้อากาศสำหรับเผาไหม้ร้อยละ 100 ของการเผาไหม้เชื้อเพลิงทั้งหมด จากผลการทดลองพบว่า การเผาไหม้ถ่านหินนั้นอุณหภูมิการเผาไหม้จะสูงกว่าการเผาไหม้เชื้อเพลิงผสม เนื่องจากถ่านหินนั้นมีค่าความร้อนที่สูงกว่ากะลามะพร้าว ไนโตรเจนออกไซด์ที่เกิดจากการเผาไหม้ถ่านหินนั้นสูงกว่าการเผาไหม้เชื้อเพลิงผสม เพราะเชื้อเพลิงผสมมีปริมาณไนโตรเจนภายในเชื้อเพลิงน้อยกว่าถ่านหิน ตำแหน่งในการป้อนอากาศทุติยภูมิที่ความสูง 2.4 เมตร และป้อนอากาศทุติยภูมิร้อยละ 40 เกิดไนโตรเจนออกไซด์ต่ำที่สุดทั้งในกรณีที่ใช้เชื้อเพลิงเป็นถ่านหินและเชื้อเพลิงผสม และการเผาไหม้แบบเติมอากาศหลายขั้นนั้นสามารถลดไนโตรเจนออกไซด์ได้อย่างมีประสิทธิภาพสำหรับการเผาไหม้ในเตาเผาฟลูอิดไคซ์เบดแบบหมุนเวียน

ภาควิชา เคมีเทคนิค

สาขาวิชา เคมีเทคนิค

ปีการศึกษา 2557

ลายมือชื่อนิสิต .....

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

# # 5471950623 : MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY

KEYWORDS: MULTI-AIR STAGED / CO-COMBUSTION / CFBC / NITROGEN OXIDE REDUCTION / NITROGEN OXIDE EMISSION

CHANWIT KAMONRAT: EFFECTS OF AIR STAGED COMBUSTION ON NO<sub>x</sub> EMISSIONS FROM CO-COMBUSTION OF COAL AND BIOMASS IN CIRCULATING FLUIDIZED BED. ADVISOR: ASST. PROF. PRAPAN KUCHONTHARA, Ph.D., 97 pp.

This research studied the effects of air staged combustion on NO<sub>x</sub> emissions from co-combustion of coal and biomass in a circulating fluidized bed combustor (CFBC). Air feeding was divided in 2 patterns, consisting of single-air staged combustion and multi-air staged combustion. The effects of position of secondary air injection, primary air and secondary air ratios and type of fuel on NO<sub>x</sub> emissions were also investigated. Coal and coconut shell were used as fuel for this research. Mixed fuel of 50% coal and 50% coconut shell was used in co-combustion experiments. Fuel feed rate and air were kept constant at 7 kg/hr and 100% air for complete combustion. The results showed that coal combustion temperature was higher than co-combustion due to the heating value of coal. NO<sub>x</sub> generated from coal combustion was higher than co-combustion because N-containing in coconut shell is less than in coal. The position of secondary air feeding at 2.4 meter 40% of total air gave the minimum NO<sub>x</sub> emissions in both cases of coal and co-combustion. In addition, multi-staged combustion was found to be an effective way to help reduce NO<sub>x</sub> from fuel combustion in CFBC.

Department: Chemical Technology

Student's Signature .....

Field of Study: Chemical Technology

Advisor's Signature .....

Academic Year: 2014

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เกิดขึ้นได้ด้วยความช่วยเหลือจากหลายๆ ฝ่าย โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประพันธ์ คูชลธารา ผู้เป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่คอยให้คำปรึกษา แนะนำการทำงานวิจัย และคอยให้ความชี้แนะเพื่อแก้ไข ปรับปรุงให้งานวิจัยนี้ให้มีความสมบูรณ์ลุล่วงไปได้ด้วยดี ตลอดจนคณาจารย์ในภาควิชาเคมีเทคนิคทุกท่านที่ให้คำแนะนำที่ดีตลอดมา

งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีโดยได้รับการสนับสนุนจากโครงการพัฒนาบัณฑิตศึกษา และวิจัยด้านเชื้อเพลิง ภายใต้โครงการพัฒนาบัณฑิตศึกษาด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีของ ศูนย์ความเป็นเลิศด้านเทคโนโลยีปิโตรเคมีและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่สนับสนุนทุนวิจัยตลอดการศึกษา

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.เก็จวลี พฤกษาทร ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.พรพจน์ เปี่ยมสมบูรณ์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และอาจารย์ ดร.บุญรอด สัจจกุลนุกิจ กรรมการจากภายนอกมหาวิทยาลัย ที่ให้คำแนะนำ ข้อเสนอแนะ และความคิดเห็นที่เป็นประโยชน์ต่อการทำวิทยานิพนธ์ให้มีความสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ บริษัท บ้านปู จำกัด(มหาชน) ที่เอื้อเฟื้อถ่านหินสำหรับงานวิจัยในครั้งนี้

ขอขอบพระคุณ เจ้าหน้าที่ทุกท่านของภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย พี่ๆ น้องๆ และเพื่อนๆ ที่คอยให้กำลังใจ และความช่วยเหลือในด้านต่างๆ ตลอดจนวิธีการใช้เครื่องมือวิเคราะห์สำหรับงานวิจัย โดยเฉพาะเจ้าหน้าที่ช่างเทคนิคประจำห้องฟลูอิดเซชันที่ให้ความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกในการทำงานวิจัย

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดามารดา พี่น้อง และญาติของข้าพเจ้า ตลอดจนผู้ที่มีพระคุณต่อข้าพเจ้าทั้งหลายที่คอยให้กำลังใจ ให้การสนับสนุนต่างๆ และคำแนะนำดีๆ ที่มอบให้เสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

## สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญรูป.....	ฐ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 พลังงานและเชื้อเพลิง.....	4
2.2 ถ่านหิน.....	4
2.2.1 ลักษณะเฉพาะของถ่านหินแต่ละคักดิ์.....	5
2.2.2 การวิเคราะห์แบบประมาณ (proximate analysis).....	7
2.2.3 การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (ultimate analysis).....	9
2.3 พลังงานจากชีวมวล.....	9
2.3.1 กระบวนการทางเคมีความร้อน (thermochemical conversion).....	9
2.3.1.1 การเผาไหม้โดยตรง.....	9
2.3.1.2 ไพโรไลซิส (Pyrolysis).....	10

2.3.1.3 แก๊สซิฟิเคชัน (Gasification).....	10
2.3.1.4 โพรดิวเซอร์แก๊ส (Producer gas).....	11
2.3.2 การแปรรูปทางชีวเคมี (biochemical conversion).....	11
2.3.2.1 การย่อยสลายในที่ไม่มีอากาศเพื่อให้ได้แก๊สมีเทน (การเกิดแก๊สชีวภาพ).....	11
2.3.2.2 การผลิตเอทานอล.....	11
2.4 ปฏิกริยาการเผาไหม้.....	12
2.4.1 องค์ประกอบที่จำเป็นในการเกิดปฏิกริยาการเผาไหม้.....	12
2.4.2 พลังงานความร้อนของการเผาไหม้.....	14
2.4.2.1 ค่าความร้อนรวม (Total heating value, THV).....	15
2.4.2.2 ค่าความร้อนสุทธิ (Net heating value, NHV).....	16
2.4.3 สมบัติด้านการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงแข็ง.....	16
2.4.3.1 กระแสลมแรง (draught).....	17
2.4.3.2 กฎ 3T's (Time, Turbulence and Temperature).....	17
2.4.3.3 อากาศเกินพอ (excess air).....	18
2.4.4 การเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งในระบบต่างๆ.....	18
2.4.4.1 การเผาไหม้บนตะแกรงเตาหรือการเผาไหม้ของเบดเชื้อเพลิง (combustion of fuel bed).....	18
2.4.4.2 การเผาไหม้ถ่านหินในเตาเผาแบบฟลูอิดไคส์เบด (fluidized bed combustion).....	20
2.5 ฟลูอิดไคส์เบด.....	22
2.5.1 ประเภทของฟลูอิดไคส์เบด.....	22
2.5.2 ลักษณะของฟลูอิดไคส์เบด.....	22
2.6 วัฏจักรไนโตรเจน.....	26
2.7 ไนโตรเจนออกไซด์ (NOx).....	27



2.7.1	กระบวนการเกิดไนโตรเจนออกไซด์ .....	28
2.7.1.1	ไนโตรเจนออกไซด์ที่เกิดจากความร้อน (thermal NOx) .....	28
2.7.1.2	ไนโตรเจนออกไซด์ที่เกิดจากเชื้อเพลิง (fuel NOx) .....	30
2.7.1.3	ไนโตรเจนออกไซด์ที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว (prompt NOx) .....	35
2.7.2	วิธีการลดไนโตรเจนออกไซด์ .....	36
2.8	การเผาไหม้ร่วม .....	37
2.9	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	38
บทที่ 3	เครื่องมือและวิธีการทดลอง .....	43
3.1	เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง .....	43
3.2	วิธีการทดลอง .....	52
3.2.1	การเตรียมเชื้อเพลิงและทราย .....	52
3.2.2	การจุดเตาและดำเนินการทดลอง .....	52
3.2.3	การปิดเตาเผา .....	53
บทที่ 4	ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง .....	54
4.1	สมบัติของเชื้อเพลิง .....	54
4.2	การปรับเทียบสกรูฟีดเดอร์ (screw feeder) และอินเวอร์เตอร์ (inverter) .....	54
4.3	ผลการทดลองการเผาไหม้ถ่านหินในระบบการเผาไหม้แบบขั้นเดียว .....	57
4.3.1	อุณหภูมิเผาไหม้เฉลี่ยตลอดความสูงของโรเตอร์เมื่อศึกษาตำแหน่งการป้อนอากาศ ทุติยภูมิต่อการเผาไหม้ถ่านหิน .....	57
4.3.2	อุณหภูมิเผาไหม้เฉลี่ยตลอดความสูงของโรเตอร์เมื่อศึกษาปริมาณการป้อนอากาศ ทุติยภูมิต่อการเผาไหม้ถ่านหิน .....	58
4.3.3	อุณหภูมิเผาไหม้เฉลี่ยตลอดความสูงของโรเตอร์เมื่อศึกษาตำแหน่งการป้อนอากาศ ทุติยภูมิต่อการเผาไหม้เชื้อเพลิงผสมถ่านหินและชีวมวล .....	60

4.3.4 อุณหภูมิเผาไหม้เฉลี่ยตลอดความสูงของโรเตอร์เมื่อศึกษาปริมาณการป้อนอากาศ ทุกติยภูมิต่อการเผาไหม้เชื้อเพลิงผสมถ่านหินและชีวมวล.....	61
4.4 แนวโน้มการปลดปล่อยแก๊สเผาไหม้ (flue gas) กรณีเปลี่ยนตำแหน่งการป้อนอากาศทุกติย ภูมิที่ใช้ในการเผาไหม้.....	62
4.5 แนวโน้มการปลดปล่อยแก๊สเผาไหม้ (flue gas) กรณีเปลี่ยนอัตราการป้อนอากาศทุกติยภูมิ ที่ใช้ในการเผาไหม้.....	68
4.6 ผลการทดลองการเผาไหม้ถ่านหินในระบบการเผาไหม้แบบเติมอากาศเป็นขั้นศึกษา ภาวะการเผาไหม้แบบเติมอากาศหลายชั้น.....	73
4.6.1 อุณหภูมิเฉลี่ยตลอดความสูงของโรเตอร์ภายใต้การเผาไหม้ในภาวะการเติมอากาศ แบบหลายชั้น.....	75
4.6.2 แนวโน้มการปลดปล่อยแก๊สเผาไหม้ (flue gas) จากการเผาไหม้ในภาวะแบบเติม อากาศหลายชั้น.....	75
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	81
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	81
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	82
รายการอ้างอิง.....	83
ภาคผนวก.....	86
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	97

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 เชื้อเพลิงจำแนกตามกระบวนการผลิตและสถานะทางกายภาพ .....	6
ตารางที่ 2.2 สมบัติของถ่านหินเปรียบเทียบกับสมบัติของไม้และพีต .....	7
ตารางที่ 2.3 อุณหภูมิการจุดไฟของเชื้อเพลิงบางชนิดผสมอากาศ ที่ความดัน 1 บรรยากาศ .....	14
ตารางที่ 2.4 ความเข้มข้นของไนตริกออกไซด์ (NO) และไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO <sub>2</sub> ) ในอากาศ และแก๊สเผาไหม้ (Flue gas) .....	30
ตารางที่ 4.1 ผลวิเคราะห์โดยประมาณ (proximate analysis) และค่าความร้อน (heating value) ของถ่านหินและกะลามะพร้าว .....	55
ตารางที่ 4.2 ผลวิเคราะห์โดยแยกธาตุ (ultimate analysis) ของถ่านหินและกะลามะพร้าว .....	55
ตารางที่ 4.3 ภาวะที่ใช้ในการทดลองสำหรับศึกษาตำแหน่งการป้อนอากาศทุติยภูมิต่อการเผาไหม้ถ่านหิน อากาศรวมที่ใช้ในการเผาไหม้ คือ 860 ลิตรต่อนาที .....	59
ตารางที่ 4.4 ภาวะที่ใช้ในการทดลองสำหรับศึกษาตำแหน่งการป้อนอากาศทุติยภูมิต่อการเผาไหม้เชื้อเพลิงผสมถ่านหินและชีวมวลที่สัดส่วน 50 : 50 อากาศรวมที่ใช้ในการเผาไหม้ คือ 720 ลิตรต่อนาที .....	63
ตารางที่ 4.5 ภาวะที่ใช้ในการทดลองการเผาไหม้แบบขั้นโดยการป้อนอากาศปฐมภูมิร้อยละ 80 และอากาศทุติยภูมิร้อยละ 20 โดยทำการแบ่งป้อนอากาศทุติยภูมิต่างกัน .....	74
ตารางที่ ข.1 ตารางแสดงค่าการวิเคราะห์โดยประมาณ .....	90
ตารางที่ ข.2 ตารางแสดงค่าการวิเคราะห์โดยแยกธาตุ .....	90
ตารางที่ ค.1 อุณหภูมิเฉลี่ยตลอดความสูงโรเตอร์ของการเผาไหม้ถ่านหิน .....	93
ตารางที่ ค.2 องค์ประกอบของแก๊สเผาไหม้ที่วัดได้จากการทดลองเผาไหม้ถ่านหิน .....	93
ตารางที่ ค.3 อุณหภูมิเฉลี่ยตลอดความสูงโรเตอร์ของการเผาไหม้ถ่านหินแบบเติมอากาศหลายชั้น ..	94
ตารางที่ ค.4 องค์ประกอบของแก๊สเผาไหม้ที่วัดได้จากการทดลองเผาไหม้ถ่านหินแบบเติมอากาศหลายชั้น .....	94
ตารางที่ ค.5 อุณหภูมิเฉลี่ยตลอดความสูงโรเตอร์ของการเผาไหม้เชื้อเพลิงผสม .....	95

ตารางที่ ค.6 องค์ประกอบของแก๊สเผาไหม้ที่วัดได้จากการทดลองเผาไหม้เชื้อเพลิงผสม ..... 95

ตารางที่ ค.7 อุณหภูมิเฉลี่ยตลอดความสูงไรเซอร์ของการเผาไหม้เชื้อเพลิงผสมแบบเต็มอากาศ  
หลายชั้น..... 96

ตารางที่ ค.8 องค์ประกอบของแก๊สเผาไหม้ที่วัดได้จากการทดลองเผาไหม้เชื้อเพลิงผสมแบบเต็ม  
อากาศหลายชั้น..... 96



## สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 กระบวนการเกิดถ่านหินและการเพิ่มขึ้นของศักย์ของถ่านหิน.....	8
รูปที่ 2.2 องค์ประกอบที่จำเป็นสำหรับการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้.....	13
รูปที่ 2.3 การเผาไหม้ถ่านหินแบบป้อนถ่านหินใต้ตะแกรง .....	19
รูปที่ 2.4 การเผาไหม้ถ่านหินแบบป้อนถ่านหินเหนือตะแกรง .....	20
รูปที่ 2.5 การเผาไหม้ถ่านหินในฟลูอิดไคซ์เบด.....	21
รูปที่ 2.6 รูปแบบการไหลสำหรับฟลูอิดไคซ์เบดแก๊ส-ของแข็ง.....	23
รูปที่ 2.7 ลักษณะของฟลูอิดไคซ์เบดในระบบฟลูอิดไคซ์สองสถานะ .....	24
รูปที่ 2.8 ลักษณะคล้ายของไหลของฟลูอิดไคซ์เบด.....	24
รูปที่ 2.9 วัฏจักรไนโตรเจน (แต่ละทิศทางการไหลมีหน่วยเป็น 1012 กรัมของไนโตรเจนต่อปี).....	26
รูปที่ 2.10 เส้นทางที่เป็นไปได้ของเชื้อเพลิงไนโตรเจนที่อยู่ในถ่านหินขณะเผาไหม้.....	32
รูปที่ 2.11 ผลของไนโตรเจนที่อยู่ในเชื้อเพลิงต่อการปล่อยไนโตรเจนออกไซด์.....	34
รูปที่ 3.1 โครงร่างเตาเผาฟลูอิดไคซ์เบดแบบหมุนเวียนที่ใช้ในงานวิจัย .....	43
รูปที่ 3.2 เตาเผาฟลูอิดไคซ์เบดแบบหมุนเวียนที่ใช้ในงานวิจัย .....	44
รูปที่ 3.3 เครื่องเป่าอากาศ (air blower).....	44
รูปที่ 3.4 โรตารีเมตรแสดงอัตราการป้อนอากาศ.....	45
รูปที่ 3.5 ท่อโรเตอร์ของเตาเผาฟลูอิดไคซ์เบดแบบหมุนเวียน.....	46
รูปที่ 3.6 หัวเผาและกระจกมองเปลวไฟ.....	47
รูปที่ 3.7 ระบบป้อนเชื้อเพลิง (fuel feeder system).....	48
รูปที่ 3.8 กระจกสำหรับดูภายในห้องเผาไหม้ .....	48
รูปที่ 3.9 เครื่องอัดอากาศ พร้อมอุปกรณ์ทำความสะอาดและระบบกำจัดน้ำในอากาศ .....	49
รูปที่ 3.10 ไซโคลน (cyclone).....	49

รูปที่ 3.11 ท่อป้อนกลับ (ท่อทาง ด้านขวา) และแอลวาล์ว (วาล์วปีกผีเสื้อ).....	50
รูปที่ 3.12 หน้าจอแสดงอุณหภูมิและวาล์วสำหรับดึงแก๊สออกจากระบบ .....	51
รูปที่ 3.13 ปั๊มสุญญากาศ (vacuum pump).....	51
รูปที่ 3.14 เครื่องวิเคราะห์ห้องค์ประกอบของแก๊สเผาไหม้ (flue gas analyzer) .....	52
รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ (Hz) ของอินเวอร์เตอร์ (Inverter) และอัตราการป้อนถ่านหินของสกรูฟีดเดอร์ (Screw feeder) .....	56
รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ (Hz) ของอินเวอร์เตอร์ (Inverter) และอัตราการป้อนกะลามะพร้าวของสกรูฟีดเดอร์ (Screw feeder) .....	56
รูปที่ 4.3 อุณหภูมิตามความสูงของโรเตอร์ของการเผาไหม้ถ่านหินที่มีการปรับตำแหน่งการป้อนอากาศทุติยภูมิ โดยป้อนอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้รวม 860 ลิตรต่อนาที แบ่งเป็นอากาศปฐมภูมิ 600 ลิตรต่อนาที และอากาศทุติยภูมิ 260 ลิตรต่อนาที.....	58
รูปที่ 4.4 อุณหภูมิตามความสูงของโรเตอร์ของการเผาไหม้เชื้อเพลิงผสมถ่านหินและชีวมวลที่มีการปรับสัดส่วนในการป้อนอากาศที่แตกต่างกัน โดยป้อนอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้รวม 860 ลิตรต่อนาที.....	60
รูปที่ 4.5 อุณหภูมิตามความสูงของโรเตอร์ของการเผาไหม้เชื้อเพลิงผสมถ่านหินและชีวมวลที่สัดส่วน 50 : 50 ที่มีการปรับตำแหน่งการป้อนอากาศทุติยภูมิ โดยป้อนอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้รวม 720 ลิตรต่อนาที แบ่งเป็นอากาศปฐมภูมิ 500 ลิตรต่อนาที และอากาศทุติยภูมิ 220 ลิตรต่อนาที.....	61
รูปที่ 4.6 อุณหภูมิตามความสูงของโรเตอร์ของการเผาไหม้เชื้อเพลิงผสมถ่านหินและชีวมวลที่สัดส่วน 50 : 50 ที่มีการปรับสัดส่วนในการป้อนอากาศที่แตกต่างกัน โดยป้อนอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้รวม 720 ลิตรต่อนาที.....	63
รูปที่ 4.7 ปริมาณไนโตรเจนออกไซด์ (NO <sub>x</sub> ) ที่เกิดจากการเผาไหม้ถ่านหิน เปรียบเทียบกับที่ปริมาณออกซิเจนร้อยละ 7 โดยปรับเปลี่ยนตำแหน่งในการป้อนอากาศทุติยภูมิ .....	65
รูปที่ 4.8 ปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ที่เกิดจากการเผาไหม้ถ่านหิน เปรียบเทียบกับที่ปริมาณออกซิเจนร้อยละ 7 โดยปรับเปลี่ยนตำแหน่งในการป้อนอากาศทุติยภูมิ .....	66

รูปที่ 4.9 ปริมาณไนโตรเจนออกไซด์ (NOx) ที่เกิดจากจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงผสมถ่านหินและ  
 กะลามะพร้าว เปรียบเทียบที่ปริมาณออกซิเจนร้อยละ 7 โดยปรับเปลี่ยนตำแหน่งในการป้อน  
 อากาศหตุติภูมิ ..... 67

รูปที่ 4.10 ปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ที่เกิดจากจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงผสมถ่านหิน  
 และกะลามะพร้าว เปรียบเทียบที่ปริมาณออกซิเจนร้อยละ 7 โดยปรับเปลี่ยนตำแหน่งในการ  
 ป้อนอากาศหตุติภูมิ..... 68

รูปที่ 4.11 ปริมาณไนโตรเจนออกไซด์ (NOx) ที่เกิดจากจากการเผาไหม้ถ่านหิน เปรียบเทียบที่  
 ปริมาณออกซิเจนร้อยละ 7 โดยปรับเปลี่ยนสัดส่วนในการป้อนอากาศหตุติภูมิ (ป้อนอากาศหตุติ  
 ภูมิที่ตำแหน่งความสูง 2.4 เมตร)..... 69

รูปที่ 4.12 ปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ที่เกิดจากจากการเผาไหม้ถ่านหิน เปรียบเทียบที่  
 ปริมาณออกซิเจนร้อยละ 7 โดยปรับเปลี่ยนสัดส่วนในการป้อนอากาศหตุติภูมิ (ป้อนอากาศหตุติ  
 ภูมิที่ตำแหน่งความสูง 2.4 เมตร)..... 70

รูปที่ 4.13 ปริมาณไนโตรเจนออกไซด์ (NOx) ที่เกิดจากจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงผสมถ่านหินและ  
 กะลามะพร้าว เปรียบเทียบที่ปริมาณออกซิเจนร้อยละ 7 โดยปรับเปลี่ยนสัดส่วนในการป้อน  
 อากาศหตุติภูมิ (ป้อนอากาศหตุติภูมิที่ตำแหน่งความสูง 2.4 เมตร) ..... 72

รูปที่ 4.14 ปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ที่เกิดจากจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงผสมถ่านหิน  
 และกะลามะพร้าว เปรียบเทียบที่ปริมาณออกซิเจนร้อยละ 7 โดยปรับเปลี่ยนสัดส่วนในการ  
 ป้อนอากาศหตุติภูมิ (ป้อนอากาศหตุติภูมิที่ตำแหน่งความสูง 2.4 เมตร)..... 72

รูปที่ 4.15 ลักษณะการป้อนอากาศสำหรับการเผาไหม้แบบเติมอากาศหลายชั้น (ภาวะ M1)..... 74

รูปที่ 4.16 อุณหภูมิเฉลี่ยตลอดความสูงของโรเตอร์ของการเผาไหม้ถ่านหินที่มีการเติมอากาศหตุติ  
 ภูมิแบบชั้น ..... 77

รูปที่ 4.17 อุณหภูมิเฉลี่ยตลอดความสูงของโรเตอร์ของการเผาไหม้เชื้อเพลิงผสมถ่านหินและ  
 กะลามะพร้าวที่มีการเติมอากาศหตุติภูมิแบบชั้น ..... 77

รูปที่ 4.18 ปริมาณไนโตรเจนออกไซด์ (NOx) ที่เกิดจากจากการเผาไหม้ถ่านหินแบบการเติม  
 อากาศหลายชั้น เปรียบเทียบที่ปริมาณออกซิเจนร้อยละ 7 โดยปรับเปลี่ยนสัดส่วนในการป้อน  
 อากาศหตุติภูมิตามภาวะที่ออกแบบการทดลองไว้..... 78

รูปที่ 4.19 ปริมาณไนโตรเจนออกไซด์ (NO <sub>x</sub> ) ที่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงผสมถ่านหินและ กะลาเมพร้าวแบบการเติมอากาศหลายชั้น เปรียบเทียบที่ปริมาณออกซิเจนร้อยละ 7 โดย ปรับเปลี่ยนสัดส่วนในการป้อนอากาศทุกมิติตามภาวะที่ออกแบบการทดลองไว้ .....	78
รูปที่ 4.20 ปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ที่เกิดจากการเผาไหม้ถ่านหินแบบการเติม อากาศหลายชั้น เปรียบเทียบที่ปริมาณออกซิเจนร้อยละ 7 โดยปรับเปลี่ยนสัดส่วนในการป้อน อากาศทุกมิติตามภาวะที่ออกแบบการทดลองไว้.....	79
รูปที่ 4.21 ปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ที่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงผสมถ่านหิน และกะลาเมพร้าวแบบการเติมอากาศหลายชั้น เปรียบเทียบที่ปริมาณออกซิเจนร้อยละ 7 โดย ปรับเปลี่ยนสัดส่วนในการป้อนอากาศทุกมิติตามภาวะที่ออกแบบการทดลองไว้ .....	80





## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

ปัจจุบันแนวโน้มของจำนวนประชากรของโลกมีปริมาณเพิ่มขึ้นในทุกปี ทำให้ความต้องการของการใช้พลังงานเพิ่มสูงตามจำนวนของประชากร แหล่งวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตพลังงานในปัจจุบันส่วนใหญ่คือ ถ่านหิน แก๊สธรรมชาติ และปิโตรเลียม จากการสำรวจปริมาณสำรองของพลังงานพบว่าปริมาณของวัตถุดิบต่างๆ ที่กล่าวมาข้างต้นมีปริมาณลดลงซึ่งสวนทางกับปริมาณความต้องการของการใช้พลังงาน จึงจำเป็นต้องหาวัตถุดิบชนิดอื่นมาใช้ทดแทน ซึ่งวัตถุดิบที่เลือกมาใช้คือ ชีวมวล เนื่องจากชีวมวลในประเทศไทยมีปริมาณมากและหาได้ง่ายเพราะเป็นวัสดุเหลือใช้จากการเกษตร แต่การนำชีวมวลมาเป็นวัตถุดิบเพียงอย่างเดียวยังมีประสิทธิภาพไม่ดีพอจึงมักจะนำไปใช้ร่วมกับวัตถุดิบชนิดอื่น เช่น ถ่านหิน ในโรงงานอุตสาหกรรมการผลิตไฟฟ้าจากถ่านหินนั้น ในระหว่างกระบวนการผลิตมีการปล่อยแก๊สเรือนกระจกที่เกิดจากการเผาไหม้ของถ่านหินเช่น คาร์บอนไดออกไซด์ คาร์บอนมอนอกไซด์ ไนโตรเจนออกไซด์ และซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ออกสู่ชั้นบรรยากาศซึ่งส่งผลเสียต่อสิ่งแวดล้อม จึงได้มีการพัฒนากระบวนการเพื่อลดปริมาณแก๊สเรือนกระจกที่ถูกปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อม ไนโตรเจนออกไซด์ ( $\text{NO}_x$ ) เป็นแก๊สที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ไนโตรเจนออกไซด์ คือรูปแบบทั่วไปของสารประกอบออกไซด์ของไนโตรเจน ที่ถูกปล่อยออกมาขณะเผาไหม้ ได้แก่ ไนตริกออกไซด์ ( $\text{NO}$ ) ไนโตรเจนไดออกไซด์ ( $\text{NO}_2$ ) และไนตรัสออกไซด์ ( $\text{N}_2\text{O}$ ) ซึ่งร้อยละ 95 ของไนโตรเจนออกไซด์ที่ปล่อยออกมาจะอยู่ในรูปของไนตริกออกไซด์เป็นหลัก ในขณะที่ไนโตรเจนไดออกไซด์เกิดจากการทำปฏิกิริยาออกซิเดชันของไนตริกออกไซด์กับออกซิเจนหรือโอโซนภายในชั้นบรรยากาศ กระบวนการอย่างหลังเกิดขึ้นได้ช้าและมีบทบาทเพียงเล็กน้อย กระบวนการเกิดไนตริกออกไซด์ในเตาเผาที่มีความซับซ้อนและไม่สามารถที่จะเข้าใจได้ทั้งหมด ตามหลักการแล้วในปัจจุบันได้มีแนวคิดของกลไกการเกิดไนตริกออกไซด์ที่แตกต่างกันไว้ 3 แบบตามแหล่งที่มาของไนโตรเจนและปฏิกิริยา ได้แก่ การเกิดไนตริกออกไซด์จากความร้อน (thermal NO formation) การเกิดไนตริกออกไซด์โดยทันที (prompt NO formation) และการเกิดไนตริกออกไซด์จากการเผาไหม้ (NO formation from fuel nitrogen) [1] งานวิจัยก่อนหน้านี้นี้ ได้มีนักวิจัยหลายท่านได้ศึกษาการเผาไหม้ของถ่านหินในเตาเผาแบบฟลูอิดไธซ์เบด ซึ่งเตาเผาแบบนี้

จะป้อนของไหลเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์เพื่อให้เบดหรืออนุภาคของแข็งมีพฤติกรรมเคลื่อนที่คล้ายกับของไหล ถ่านหินจะผสมเข้ากับอากาศในลักษณะคล้ายน้ำเดือดทำให้เกิดการเผาไหม้ได้ดี ผลจากงานวิจัยก่อนหน้านี้พบว่าแก๊สที่ถูกปล่อยจากการเผาไหม้นั้นส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจึงได้ศึกษากระบวนการลดแก๊สเสียดังกล่าวไว้หลายวิธี เช่น การป้อนอากาศแบบชั้น ซึ่งการป้อนอากาศแบบชั้นนั้นสามารถช่วยลดการปลดปล่อยไนโตรเจนออกไซด์ได้ ในขณะที่ถ้าป้อนอากาศในปริมาณที่มากเกินไปส่งผลให้ปริมาณของไนโตรเจนออกไซด์เพิ่มขึ้น งานวิจัยนี้ศึกษาผลของสัดส่วนของอากาศปฐมภูมิและทุติยภูมิ ตำแหน่งของการป้อนอากาศทุติยภูมิ สัดส่วนระหว่างถ่านหินกับชีวมวล และสัดส่วนการป้อนอากาศทุติยภูมิแต่ละตำแหน่งที่ส่งผลต่อการปล่อยไนโตรเจนออกไซด์ภายในเตาเผาฟลูอิดไชน์เบดแบบหมุนเวียน

### 1.2 วัตถุประสงค์

ศึกษาผลของการเผาไหม้แบบชั้นต่อการปลดปล่อยไนโตรเจนออกไซด์จากการเผาไหม้ร่วมของถ่านหินและชีวมวลในเตาเผาฟลูอิดไชน์เบดแบบหมุนเวียน

### 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

ศึกษาการปล่อยแก๊สเรือนกระจกจากกระบวนการเผาไหม้ของถ่านหินและชีวมวลภายในเครื่องฟลูอิดไชน์เบดแบบหมุนเวียน (circulating fluidized-bed) โดยการเผาไหม้แบบชั้น

### 1.4 วิธีการดำเนินงานวิจัย

1. ทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เตรียมอุปกรณ์และสารเคมีต่างๆ ที่จำเป็นในการทดลอง
2. ออกแบบวิธีการทดลอง
3. บดถ่านหินซบิบูมินัส และกะลามะพร้าวให้มีขนาด 1.2 มิลลิเมตร
4. วิเคราะห์องค์ประกอบของถ่านหินแบบประมาณตาม ASTM D3173 เพื่อวิเคราะห์ความชื้น ASTM D3174 เพื่อวิเคราะห์เถ้าและ ASTM D3175 เพื่อวิเคราะห์ปริมาณสารระเหย วิเคราะห์หาปริมาณธาตุด้วยเครื่อง CHN analyzer รุ่น CHN2000 ยี่ห้อ LECO และวิเคราะห์ค่าความร้อนด้วยเครื่อง Bomb calorimeter รุ่น 6200 ยี่ห้อ PARR
5. ศึกษาผลของสัดส่วนของอากาศปฐมภูมิและทุติยภูมิ ตำแหน่งของการป้อนอากาศทุติยภูมิ สัดส่วนระหว่างถ่านหินกับชีวมวล และสัดส่วนการป้อนอากาศทุติยภูมิแต่ละ

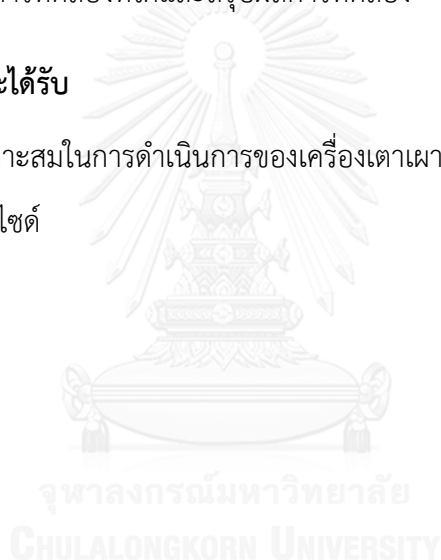
ตำแหน่งที่ส่งผลต่อการปลดปล่อยไนโตรเจนออกไซด์โดยวัดองค์ประกอบของแก๊สเผาไหม้ด้วยเครื่อง Flue gas analyzer โดยตัวแปรที่จะศึกษาคือ

- อัตราส่วนระหว่างอากาศปฐมภูมิและอากาศทุติยภูมิ 100:0, 80:20, 70:30 และ 60:40
- ตำแหน่งการป้อนอากาศทุติยภูมิ 1, 2 และ 2.4 เมตร
- อัตราส่วนระหว่างชีวมวลและถ่านหิน 0:100 และ 50:50
- สัดส่วนของการป้อนอากาศทุติยภูมิหลายตำแหน่งพร้อมกัน โดยใช้อากาศทุติยภูมิ ร้อยละ 20

#### 6. วิเคราะห์ผลการทดลองที่ได้และสรุปผลการทดลอง

##### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ทราบภาวะที่เหมาะสมในการดำเนินการของเครื่องเตาเผาฟลูอิดส์เบดแบบหมุนเวียนต่อการปลดปล่อยไนโตรเจนออกไซด์



## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 พลังงานและเชื้อเพลิง

พลังงานนั้นจัดว่าเป็นหนึ่งในปัจจัยที่สำคัญในการดำเนินชีวิตของสิ่งมีชีวิตในยุคปัจจุบัน ตั้งแต่สมัยโบราณวิวัฒนาการด้านพลังงานได้ถูกคิดค้นอยู่อย่างต่อเนื่อง ผลจากการคิดค้นนี้เองที่ทำให้ในยุคปัจจุบันสามารถผลิตพลังงานจากแหล่งกำเนิดต่างๆ ได้หลายรูปแบบ

รูปแบบที่สำคัญของพลังงานคือ พลังงานความร้อน พลังงานกล พลังงานเคมี และ พลังงานไฟฟ้า โดยพลังงานทั้งสี่รูปแบบนี้ยังสามารถแปรรูปไปมาระหว่างกันได้ แหล่งกำเนิดพลังงานเหล่านี้ คือ เชื้อเพลิง

เชื้อเพลิง คือ วัสดุหรือสารซึ่งเมื่อเกิดการเผาไหม้กับอากาศหรือออกซิเจนแล้วให้พลังงานความร้อนออกมาในปริมาณที่สูงมากพอที่จะนำไปใช้ประโยชน์ได้ ในความหมายกว้างๆ เชื้อเพลิงคือ สารประกอบจำพวกไฮโดรคาร์บอน หรือสารประกอบที่มีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นคาร์บอน และไฮโดรเจน ซึ่งเมื่อเกิดการเผาไหม้แล้วให้ผลผลิตหลักเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ และไอน้ำ เชื้อเพลิงที่ใช้ในการผลิตพลังงานสามารถหาได้จากแหล่งต่างๆ ได้แก่ เชื้อเพลิงจากซากดึกดำบรรพ์ (fossil fuels) เชื้อเพลิงนิวเคลียร์ และเชื้อเพลิงชีวมวล (biomass fuels) โดยเชื้อเพลิงเหล่านี้สามารถจำแนกตามกระบวนการที่ผลิตขึ้น [2] ดังแสดงในตารางที่ 2.1

#### 2.2 ถ่านหิน

ถ่านหินเป็นหินตะกอน (sedimentary rock) ชนิดหนึ่งซึ่งมีองค์ประกอบเป็นสารอินทรีย์คือ คาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจนเป็นส่วนใหญ่ และมีไนโตรเจนและกำมะถันเจือปนอยู่เล็กน้อย ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงแข็งที่ใช้กันมากที่สุดในโลก เพราะนอกจากถ่านหินจะมีปริมาณสำรองที่เหลือมากที่สุดแล้ว ถ่านหินยังมีราคาถูก ขนส่งสะดวก และสามารถเปลี่ยนเป็นพลังงานได้ง่าย

ถ่านหินสามารถจำแนกได้เป็น 2 ประเภทคือ การจำแนกตามชนิด (type) และการจำแนกตามศักดิ์ (rank) ในการศึกษาถ่านหินทางด้านธรณีวิทยาจะจำแนกถ่านหินตามชนิด มีการแบ่งกลุ่ม

ถ่านหินไปตามองค์ประกอบทางด้านศิลาพรรณวิทยา (petrography) เรียกว่า กลุ่มมาเซรัล (maceral groups) 3 กลุ่ม คือ วิทริไนต์ (Vitrinite) เอกซิไนต์ (Exinite) และอินเนอร์ติไนต์ (Inertinite) สองกลุ่มแรกเป็นเนื้อถ่านหินที่มีความว่องไว กลุ่มหลังถือว่าเป็นส่วนที่ไม่ว่องไว โดยแต่ละกลุ่มมีต้นกำเนิดมาจากพืชและสิ่งมีชีวิตขนาดเล็กร่างต่างกัน ส่วนการศึกษาถ่านหินในด้านอื่นและการนำไปใช้งานมักจะนิยมใช้การจำแนกตามศักดิ์ซึ่งบ่งบอกถึงความเป็นถ่านหินหรือลำดับการเปลี่ยนเป็นถ่านหิน (coalification) ขึ้นอยู่กับทั้งอายุและอัตราการเปลี่ยนแปลง

การจำแนกศักดิ์ของถ่านหินและการระบุคุณภาพของถ่านหินที่เกี่ยวกับการเผาไหม้และการให้ความร้อน สามารถทำได้โดยการอาศัยผลจากการวิเคราะห์สมบัติพื้นฐานต่างๆ ของถ่านหิน ได้แก่ การวิเคราะห์แบบประมาณ (proximate analysis) การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (ultimate analysis) และค่าความร้อน

### 2.2.1 ลักษณะเฉพาะของถ่านหินแต่ละศักดิ์

การเกิดถ่านหินแต่ละชนิดนั้นใช้ระยะเวลาในการเกิดที่แตกต่างกันดังรูปที่ 2.1 ซึ่งส่งผลให้ลักษณะเฉพาะและองค์ประกอบของถ่านหินแต่ละชนิดนั้นมีคุณสมบัติที่แตกต่างกันดังแสดงไว้ดังตารางที่ 2.2

ถ่านหินลิกไนต์ บางครั้งเรียกถ่านหินน้ำตาล (brown coal) เป็นถ่านหินที่มีศักดิ์ต่ำสุด lignite มีรากศัพท์มาจากภาษาลาติน lignum หมายถึงไม้ มีความเป็นถ่านหินน้อยที่สุด ลิกไนต์มีลักษณะเหมือนดินมากกว่าหิน ถูกจัดเป็นถ่านหินอ่อน (soft coal) เพราะมีร่องรอยของเนื้อไม้ มีสีทึบดำ มีความชื้นและปริมาณสารระเหยสูงจึงสามารถเปลี่ยนเป็นแก๊สและปิโตรเลียมเหลวได้ง่ายกว่าถ่านหินศักดิ์สูง

ถ่านหินซับบิทูมินัส เป็นถ่านหินที่มีศักดิ์สูงถัดจากลิกไนต์ หรือบางครั้งเรียกว่าลิกไนต์ดำ (black lignite) มีสีเข้มและแข็งกว่าลิกไนต์ ร้อยละของคาร์บอนสูงกว่าลิกไนต์ แต่มักจะมีความชื้นและปริมาณเถ้าสูง แต่เนื่องจากสามารถจุดไฟติดง่าย ไม่เอี่ยมเกาะเป็นก้อน และมีปริมาณกำมะถันน้อยกว่าถ่านหินศักดิ์อื่น จึงนิยมใช้เป็นเชื้อเพลิงในระบบการเผาไหม้

ตารางที่ 2.1 เชื้อเพลิงจำแนกตามกระบวนการผลิตและสถานะทางกายภาพ [2]

เชื้อเพลิงธรรมชาติ (natural fuels)	เชื้อเพลิงสังเคราะห์ (synthetic fuels)
1.ของแข็ง	1.ของแข็ง
ไม้ฟืน (fuel wood)	ถ่านไม้ (wood charcoal)
ถ่านพีต (peat)	ถ่านจากพีต (peat charcoal)
ถ่านหิน (coals) ลิกไนต์ (lignite) ซับบิทูมินัส (subbituminous) บิทูมินัส (bituminous) เซมิแอนทราไซต์ (semianthracite) แอนทราไซต์ (anthracite)	ถ่านหินลิกไนต์อัดก้อน (lignite briquettes) ถ่านหินอัดก้อน (coal briquettes) ถ่านโค้กอ่อน (soft coke) ถ่านหินอัดก้อนไร้ควัน (smokeless briquettes) ถ่านโค้กแข็ง (hard or metallurgical coke)
หินน้ำมัน (oil shale)	
ทรายน้ำมัน (tar sands)	
2.ของเหลว	2.ของเหลว
น้ำมันปิโตรเลียม (crude petroleum or crude oil)	น้ำมันเบนซิน (petrol or gasoline or benzene) น้ำมันก๊าด (kerosene) น้ำมันเครื่องบินเจ็ต (jet fuels) น้ำมันดีเซล (diesel) น้ำมันเตา (fuel oil) น้ำมันทาร์จากถ่านหิน (coal tar liquids) น้ำมันหิน (shale oil) แอลกอฮอล์ และแกโซฮอล (alcohol and gasohol)
3.แก๊ส	3.แก๊ส
แก๊สธรรมชาติ (natural gas)	แก๊สธรรมชาติทางการค้า (commercial nature gas)
แก๊สจากบึง (marsh gas)	แก๊สหุงต้ม หรือแก๊สปิโตรเลียมเหลว (liquefied petroleum gases) แก๊สจากโรงกลั่น (refinery gas) แก๊สจากเตาถ่านโค้ก (coke oven gas) แก๊สจากถ่านหินหลายชนิด รวมทั้ง แก๊สถ่านหิน (coal gas) โปรติวเซอร์แก๊ส (producer gas) แก๊สคาร์บูเรต (carburetted gas) แก๊สในเมือง (town gas) แก๊สไฮโดรเจน (hydrogen) แก๊สจากขยะ (sewage gas) แก๊สชีวภาพ (biogas)

ตารางที่ 2.2 สมบัติของถ่านหินเปรียบเทียบกับสมบัติของไม้และพีต [2]

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

ถ่านหินบิทูมินัส จัดเป็นถ่านหินแข็งชนิดหนึ่ง มีปริมาณของสารระเหยสูงทำให้เผาไหม้ได้ดี เมื่อเผาไหม้แล้วจะเกิดควันและเถ้า ถ่านหินบิทูมินัสมักถูกใช้เป็นเชื้อเพลิงหลักในการผลิตไฟฟ้าจากไอน้ำ ถ่านหินชนิดนี้บางกลุ่มมีการเอี่ยมเกาะเป็นก้อนเมื่อให้ความร้อนที่เหมาะสมที่จะนำไปใช้ในการผลิตถ่านโค้ก

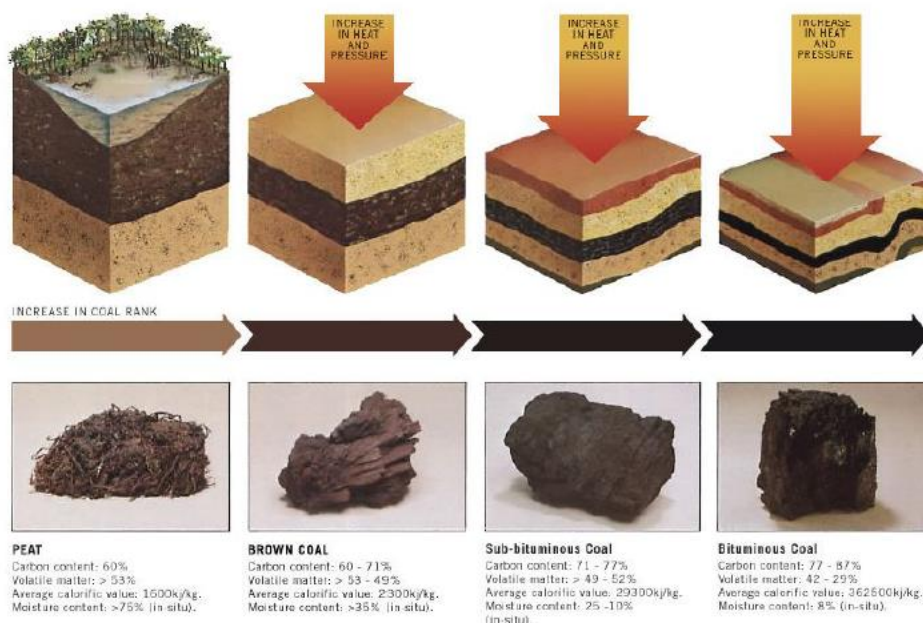
ถ่านหินแอนทราไซต์ เป็นถ่านหินที่ศักดิ์สูงที่สุด เป็นถ่านหินแข็งสีดำเงา มีปริมาณคาร์บอนสูงใกล้เคียงกับกราไฟต์ และมีปริมาณของกำมะถันต่ำ แต่ถ่านหินแอนทราไซต์ติดไฟยากและมีอัตราการเผาไหม้ช้าจึงไม่เป็นที่นิยมในการนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงโดยตรง

### 2.2.2 การวิเคราะห์แบบประมาณ (proximate analysis)

การวิเคราะห์แบบประมาณ เป็นการวิเคราะห์โดยแบ่งกลุ่มองค์ประกอบในถ่านหินออกเป็น ความชื้น เถ้า สารระเหย และคาร์บอนคงตัว

ความชื้นและเถ้า เป็นส่วนสารประกอบอนินทรีย์ที่เฉื่อย เรียกว่าส่วนเฉื่อย (inert) รวมกับเนื้อถ่านหินซึ่งเป็นสารประกอบอินทรีย์ซึ่งประกอบไปด้วย สารระเหยและคาร์บอนคงตัว

PEAT → LIGNITE → SUBBITUMINOUS COAL → BITUMINOUS COAL → ANTHRACITE



รูปที่ 2.1 กระบวนการเกิดถ่านหินและการเพิ่มขึ้นของศักดิ์ของถ่านหิน [3]

ความชื้น (moisture,  $M$ ) เป็นน้ำหนักที่หายไปหลังจากการอบถ่านหินบดละเอียดผ่านตะแกรง ขนาด 250 ไมโครเมตร ภายใต้สภาวะที่กำหนดที่อุณหภูมิ 104-110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง น้ำส่วนที่เป็นความชื้นจะระเหยออกมา

เถ้า (ash,  $A$ ) เป็นน้ำหนักที่เหลืออยู่หลังจากการเผาถ่านหินบดละเอียดภายใต้สภาวะออกซิไดส์ที่กำหนดที่อุณหภูมิ 700-750 องศาเซลเซียส เถ้า คือส่วนประกอบของสารอนินทรีย์ที่มีอยู่เดิมในถ่านหินที่ถูกออกซิไดส์จนสมบูรณ์ ดังนั้น เถ้าจึงมีน้ำหนักน้อยกว่าน้ำหนักของส่วนประกอบอนินทรีย์ที่มีอยู่ในถ่านหินเดิม ความสัมพันธ์ของร้อยละของแร่ธาตุกับร้อยละของเถ้าโดยประมาณ คือ

$$\% \text{mineral matter} = 1.08(\% \text{ash}) + 0.55(\% S) \quad (2.1)$$

สารระเหย (volatile matter,  $VM$ ) เป็นน้ำหนักที่สูญหายไป (หลังหักความชื้นออกแล้ว) หลังจากการอบที่อุณหภูมิ  $950 \pm 20$  องศาเซลเซียส โดยไม่ให้สัมผัสกับอากาศเพื่อกลั่นสลายถ่านหินให้ส่วนที่ระเหยได้ออกมา



คาร์บอนคงตัว (fixed carbon, FC) คือ ส่วนที่เสถียรของโครงสร้างโมเลกุลของถ่านหิน ซึ่งประกอบไปด้วยคาร์บอนเป็นส่วนใหญ่แต่ไม่ใช่ทั้งหมด สามารถหาได้จากการคำนวณดังสมการ

$$\%FC = 100 - (\%M + \%A + \%VM) \quad (2.2)$$

### 2.2.3 การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (ultimate analysis)

การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ เป็นการวิเคราะห์หาปริมาณธาตุต่างๆ ที่สำคัญที่มีอยู่ในถ่านหิน ได้แก่ คาร์บอน ไฮโดรเจน กำมะถัน และไนโตรเจน บางครั้งอาจมีการวิเคราะห์ฟอสฟอรัสและคลอรีนด้วย ปริมาณออกซิเจนสามารถหาได้จากผลต่างระหว่าง 100 กับผลรวมของร้อยละธาตุองค์ประกอบทั้งหมดกับร้อยละความชื้นและเถ้า การวิเคราะห์ธาตุทำได้โดยการกลั่นสลายถ่านหินในสภาวะออกซิไดส์อย่างรุนแรงจนกระทั่งกลายเป็นสารประกอบออกไซด์ แล้วจึงหาปริมาณของออกไซด์ที่เกิดขึ้นด้วยวิธีทางเคมี หรือทางกายภาพ ในปัจจุบันสามารถใช้เครื่อง CHNS elemental analysis ในการวิเคราะห์ธาตุ คาร์บอน ไฮโดรเจน กำมะถัน และไนโตรเจน

## 2.3 พลังงานจากชีวมวล

พืชใช้คาร์บอนไดออกไซด์และน้ำในกระบวนการสังเคราะห์แสงเพื่อช่วยในการเจริญเติบโต ผลผลิตที่ได้จากกระบวนการสังเคราะห์แสงของพืชคือ แป้ง และน้ำตาล ซึ่งผลผลิตเหล่านี้จะถูกสะสมไว้ตามส่วนต่างๆ ของพืช ดังนั้น ในการผลิตพลังงานจากชีวมวลซึ่งเป็นของเหลือใช้ทางการเกษตรจึงเปรียบเสมือนการใช้พลังงานจากแสงอาทิตย์โดยทางอ้อม คิดเป็น 1 ใน 7 ของพลังงานทั้งหมดที่ใช้ในปัจจุบัน [4] พลังงานจากชีวมวลนั้นได้มาจากทั้งพืชและสัตว์ โดยใช้วิธีการต่างๆ ดังต่อไปนี้

### 2.3.1 กระบวนการทางเคมีความร้อน (thermochemical conversion)

#### 2.3.1.1 การเผาไหม้โดยตรง

การเผาไหม้ชีวมวลเป็นกระบวนการที่ใช้อากาศในการเข้าทำปฏิกิริยาเพื่อให้เกิดการสันดาปอย่างสมบูรณ์ สารอินทรีย์ของชีวมวลจะถูกเปลี่ยนไปกลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ ในการ

ผลิตพลังงานจากไม้พืชนั้นเป็นวิธีที่ทำกันมาช้านานแล้ว แม้กระทั่งในปัจจุบันก็ยังคงมีการใช้วิธีแบบนี้ อยู่ แต่เนื่องจากประสิทธิภาพในการเผาไหม้ที่ต่ำจึงเกิดการสูญเสียความร้อนขึ้น การใช้เตาเผาแบบ ฟลูอิดไชต์เบดจะช่วยในการเพิ่มประสิทธิภาพการเผาไหม้ให้สูงขึ้น

### 2.3.1.2 ไพโรไลซิส (Pyrolysis)

ไพโรไลซิสเป็นกระบวนการย่อยสลายชีวมวลโดยใช้ความร้อนในที่ที่ไม่มีอากาศ ใน กระบวนการไพโรไลซิสจะใช้อุณหภูมิและความดันที่ต่ำกว่าแกซิฟิเคชัน ซึ่งผลผลิตที่ได้จะขึ้นอยู่กับ อุณหภูมิ ความดัน ปริมาณความชื้น และส่วนประกอบของชีวมวล โดยทั่วไปผลิตภัณฑ์หลักที่ได้คือ ถ่าน (Charcoal) ส่วนผลิตภัณฑ์รองที่ได้ คือ น้ำมัน เมทธานอล กรดน้ำส้ม และผลิตภัณฑ์ที่เป็น แก๊ส ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สนี้สามารถที่จะนำไปใช้ในการอบชีวมวลก่อนที่จะนำไปใช้ในกระบวนการ หรือสามารถนำไปเผาไหม้เพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงได้

ในประเทศไทยจะใช้กระบวนการไพโรไลซิสในการเผาถ่าน แต่สามารถผลิตพลังงานจากถ่าน ได้เพียงร้อยละ 20 ของพลังงานทั้งหมดที่มีอยู่ในชีวมวล ซึ่งเป็นผลมาจากลักษณะของเตาเผา และ การเก็บผลิตภัณฑ์ที่เป็นถ่านเท่านั้น

### 2.3.1.3 แกซิฟิเคชัน (Gasification)

แกซิฟิเคชันเป็นกระบวนการที่ใช้ออกซิเจนบางส่วน (Partial oxidation) เพื่อทำปฏิกิริยากับ ชีวมวลที่อุณหภูมิสูง ดังนั้นผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่ที่ได้จึงอยู่ในสภาพของแก๊สซึ่งประกอบไปด้วย ไฮโดรเจน และคาร์บอนมอนอกไซด์ นอกจากนี้ยังมี มีเทน คาร์บอนไดออกไซด์ และไอน้ำเกิดขึ้น ด้วย

แกซิฟิเคชันสามารถใช้ออกซิเจนบริสุทธิ์หรืออากาศในการทำปฏิกิริยา ถ้าต้องการ ประสิทธิภาพของแกซิฟิเคชันที่สูงควรใช้ออกซิเจนบริสุทธิ์เพราะถ้าใช้อากาศ ผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้จะมี ไนโตรเจนสูงถึงร้อยละ 42 ทำให้ได้ค่าความร้อนที่ต่ำ แต่ถ้าใช้ออกซิเจนจะไปทำให้ปริมาณของ ไนโตรเจนจะลดลง จึงส่งผลให้ค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์จะเพิ่มสูงขึ้น

แกซิฟิเคชันเป็นกระบวนการที่ใช้กันมานานแล้ว สามารถใช้กับเชื้อเพลิงแข็งที่หลากหลาย เช่น ถ่านหิน เศษไม้ หรือขยะ โดยได้มีการพัฒนาเครื่องแกซิฟายเออร์ (Gasifier) เพื่อให้สามารถ

ใช้ได้กับวัสดุดังกล่าว เครื่องแกซิฟายเออร์ที่ใช้กับไม้ได้ถูกออกแบบให้สามารถใช้ได้ที่ความดันบรรยากาศ ส่วนเครื่องแกซิฟายเออร์ที่ใช้กับถ่านหินนั้นจะใช้ความดันที่ 400 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว (psig) หรือสูงกว่านี้ ซึ่งแกซิฟิเคชันของไม้และถ่านหินนั้นมีความแตกต่างกันคือ แก๊สที่ได้จากแกซิฟิเคชันของไม้นั้นมีความชื้นสูง ซึ่งความชื้นที่เกิดขึ้นนี้มาจากแกซิฟิเคชันและความชื้นที่มาจากไม้ที่ใช้อีกด้วย แต่ก็สามารถกำจัดออกจากแก๊สที่เกิดขึ้นได้ ผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้จากแกซิฟิเคชัน หรือไพโรไลซิส คือ ไฮโดรเจน และคาร์บอนมอนอกไซด์

#### 2.3.1.4 โพรดิวเซอร์แก๊ส (Producer gas)

โพรดิวเซอร์แก๊สเป็นแก๊สที่ประกอบไปด้วยคาร์บอนมอนอกไซด์ และไนโตรเจน ที่เกิดจากการเผาไหม้ของคาร์บอนในที่จำกัดอากาศ ดังแสดงในสมการที่ 2.3 โพรดิวเซอร์แก๊สถูกใช้กันมาตั้งแต่สมัยสงครามโลกครั้งที่ 2 โดยสามารถใช้ได้กับรถบรรทุก รถไฟ รถแทรกเตอร์ หรือแม้แต่รถยนต์ และยังสามารถดัดแปลงให้มีความเหมาะสมเพื่อให้สามารถใช้ได้กับเครื่องยนต์ดีเซล



### 2.3.2 การแปรรูปทางชีวเคมี (biochemical conversion)

#### 2.3.2.1 การย่อยสลายในที่ไม่มีอากาศเพื่อให้ได้แก๊สมีเทน (การเกิดแก๊สชีวภาพ)

มูลสัตว์หรือวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร สามารถนำมาผลิตเป็นแก๊สเพื่อใช้ในการหุงต้ม หรือใช้กับเครื่องยนต์เพื่อการผลิตกระแสไฟฟ้า โดยแก๊สนี้สามารถผลิตได้โดยใช้จุลินทรีย์ย่อยสลายในที่อับอากาศ ผลิตภัณฑ์แก๊สชีวภาพที่ได้มีมีเทนเป็นส่วนประกอบหลัก

ลักษณะของบ่อหมักแก๊สในประเทศแถบเอเชีย มี 2 แบบใหญ่ๆ คือ ลักษณะที่เป็นรูปสี่เหลี่ยมกับลักษณะทรงกลม โดยจะใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุที่ใช้ในการก่อสร้าง แก๊สที่ผลิตได้จะถูกเก็บโดยถังเก็บแก๊สที่ครอบอยู่บนถังหมัก

#### 2.3.2.2 การผลิตเอทานอล

การผลิตเอทานอลจากคาร์โบไฮเดรตหรือน้ำตาล เป็นกระบวนการที่ใช้มานานแล้ว โดยเฉพาะการผลิตเอทานอลเพื่อนำมาผลิตเป็นเครื่องดื่ม นอกจากนี้เอทานอลยังสามารถนำมาใช้

เป็นพลังงานทดแทนได้ แต่ยังมีปัญหาอยู่ที่วัตถุดิบที่ใช้เนื่องจากเป็นวัตถุดิบชนิดเดียวกับที่มนุษย์ใช้เป็นอาหาร ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องคำนึงถึงการเพิ่มปริมาณของวัตถุดิบเพื่อให้เพียงพอต่อการบริโภคและป้อนโรงงาน

## 2.4 ปฏิกิริยาการเผาไหม้

ปฏิกิริยาการเผาไหม้ [2] คือ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูงเป็นปฏิกิริยาคายความร้อนเกิดขึ้นรวดเร็วมาก เป็นปฏิกิริยาเอกพันธ์หรือเป็นเนื้อเดียวกัน (homogeneous) ในวัฏภาคแก๊สระหว่างโมเลกุลของเชื้อเพลิงหรือโมเลกุลของเชื้อเพลิงที่เกิดการแตกตัวและออกซิเจน โดยทั่วไปจะไม่ใช้ออกซิเจนบริสุทธิ์ในการเผาไหม้ร่วมกับเชื้อเพลิง แต่จะใช้อากาศแทนเพราะมีค่าใช้จ่ายที่น้อยกว่า

ปฏิกิริยาการเผาไหม้เป็นปฏิกิริยาลูกโซ่ (chain reaction) ไม่ใช่การทำปฏิกิริยาระหว่างโมเลกุลของเชื้อเพลิงโดยตรง แต่เริ่มจากการแตกตัวของโมเลกุลเชื้อเพลิงเป็นอนุมูลอิสระที่ว่องไว (active free radicals) จำนวนมาก ซึ่งอนุมูลอิสระที่ว่องไวจะทำปฏิกิริยากับโมเลกุลอื่นกลายเป็นอนุมูลอิสระใหม่และอนุมูลขั้นกลาง (intermediate radicals) ตัวอื่นๆ ซึ่งจะทำปฏิกิริยาต่อไปทำให้เกิดเป็นผลผลิตสุดท้าย ปฏิกิริยาการเผาไหม้ทั่วไปที่เป็นเชื้อเพลิงไฮโดรคาร์บอนสามารถเขียนได้ดังนี้ [5]



อนุพันธ์ชนิดอื่น (other species) ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาการเผาไหม้จะขึ้นอยู่กับชนิดของตัวออกซิไดส์และสัดส่วนของเชื้อเพลิงต่อตัวออกซิไดส์

### 2.4.1 องค์ประกอบที่จำเป็นในการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้

ปฏิกิริยาการเผาไหม้จะเกิดขึ้นได้เมื่อมีสารตัวทำปฏิกิริยาและสภาวะที่เหมาะสม องค์ประกอบที่จำเป็นในการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้แสดงดังรูปที่ 2.2 การเผาไหม้คือการที่เชื้อเพลิงเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกลายเป็นออกไซด์ เป็นปฏิกิริยาที่เกิดต่อเนื่องจนสมบูรณ์ การเผาไหม้

โดยทั่วไป ตัวทำปฏิกิริยาที่ใช้คือเชื้อเพลิงและอากาศ ซึ่งปฏิกิริยาจะเริ่มเกิดได้เมื่อมีสภาวะที่เหมาะสมนั่นก็คือ แหล่งให้ความร้อนเพื่อจุดไฟ (ignition source)



รูปที่ 2.2 องค์ประกอบที่จำเป็นสำหรับการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้

ปฏิกิริยาการเผาไหม้เริ่มด้วยการแตกตัวของโมเลกุลของเชื้อเพลิงเป็นอนุมูลอิสระ โดยแหล่งจุดไฟจะให้พลังงานส่วนแรกแก่ส่วนผสมระหว่างเชื้อเพลิงและออกซิเจนทำให้เชื้อเพลิงแตกตัวเป็นอนุมูลอิสระจำนวนมากพอที่จะเริ่มเกิดปฏิกิริยาลูกโซ่ของการเผาไหม้ เมื่อการเผาไหม้เกิดขึ้นแล้ว แหล่งจุดไฟก็ไม่จำเป็นอีกต่อไป เพราะพลังงานความร้อนจากการเผาไหม้ส่วนต้นมากเกินพอที่จะทำให้เชื้อเพลิงที่เหลืออยู่เกิดการแตกตัวและเผาไหม้อย่างต่อเนื่องกันไปจนสมบูรณ์

พลังงานที่ต้องใช้เพื่อเริ่มต้นปฏิกิริยาการเผาไหม้นี้ เรียกว่า พลังงานการจุดไฟ (ignition energy) โดยจะวัดจากอุณหภูมิการจุดไฟ (ignition temperature) ซึ่งเป็นอุณหภูมิของส่วนผสมเชื้อเพลิงและอากาศที่ต่ำที่สุดที่จะจุดติดไฟได้เอง อุณหภูมิการจุดไฟจึงถูกใช้เป็นเครื่องมือในการบ่งชี้ระดับพลังงานที่ต้องให้แก่ส่วนผสมของเชื้อเพลิงแต่ละชนิดซึ่งมีค่าแตกต่างกันไปตามชนิดของเชื้อเพลิงดังแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 อุณหภูมิการจุดไฟของเชื้อเพลิงบางชนิดผสมอากาศ ที่ความดัน 1 บรรยากาศ [2]

เชื้อเพลิง	สูตรโครงสร้าง	อุณหภูมิ	
		°F	°C
กำมะถัน	S	470	245
ถ่าน	C	650	345
คาร์บอนคงตัว (บิทูมินัส)	C	765	405
คาร์บอนคงตัว (ซับบิทูมินัส)	C	870	465
คาร์บอนคงตัว (แอนทราไซต์)	C	840-1115	450-600
อะเซทิลีน	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	580-825	305-440
อีเทน	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	880-1165	470-630
เอทิลีน	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	900-1020	480-550
ไฮโดรเจน	H <sub>2</sub>	1065-1095	575-590
มีเทน	CH <sub>4</sub>	1170-1380	630-765
คาร์บอนมอนอกไซด์	CO	1130-1215	610-665
น้ำมันก๊าด	-	490-560	255-295
แก๊สโซลีน	-	500-800	260-425

อุณหภูมิการจุดไฟบ่งบอกถึงความยากง่ายในการเกิดการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง ในทางด้านอุตสาหกรรมจะใช้อุณหภูมิการจุดไฟเป็นอุณหภูมิอ้างอิงในการอุ่นเตาก่อนจุดหัวเผา

#### 2.4.2 พลังงานความร้อนของการเผาไหม้

การเผาไหม้เป็นปฏิกิริยาออกซิเดชัน ซึ่งเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน (exothermic reaction) ในการคำนวณพลังงานความร้อนจากปฏิกิริยาการเผาไหม้จะให้ค่าเป็นลบเสมอ เนื่องจากเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน ซึ่งไม่สะดวกต่อการใช้งานจึงนิยมใช้ค่าความร้อน (heating value หรือ calorific value) ซึ่งมีค่าเท่ากับความร้อนของการเผาไหม้ที่สภาวะมาตรฐาน แต่มีค่าเป็นบวก การ

ระบุค่าความร้อนของเชื้อเพลิงแข็งจะต้องระบุหลักอ้างอิงสถานะของเชื้อเพลิงด้วยว่าเป็นเชื้อเพลิงตามสภาพที่เป็นจริง หรืออื่นๆ เพราะมีผลต่อค่าความร้อนและการนำค่าไปใช้เป็นอย่างมาก

ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงธรรมชาติ เช่น ถ่านหิน น้ำมันและปิโตรเลียม หรือชีวมวล ไม่สามารถคำนวณจากความร้อนของปฏิกิริยาได้ เนื่องจากเชื้อเพลิงเหล่านี้ไม่ใช่สารประกอบบริสุทธิ์ ต้องทำการทดลองในเครื่องมือเฉพาะที่เรียกว่า บอมบ์แคลอริมิเตอร์ (bomb calorimeter) การบอกค่าความร้อนสามารถบอกได้ 2 วิธี

#### 2.4.2.1 ค่าความร้อนรวม (Total heating value, THV)

ค่าความร้อนรวมของเชื้อเพลิงชนิดหนึ่ง หมายถึงปริมาณความร้อนที่ปลดปล่อยออกมาหลังการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ โดยการดำเนินปฏิกิริยาการเผาไหม้เกิดขึ้นภายใต้สภาวะความดัน 1 บรรยากาศ และที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เมื่อมีน้ำอยู่ในเชื้อเพลิงและน้ำที่เกิดจากการเผาไหม้ อยู่ในรูปของของเหลว บางครั้งอาจเรียกว่า ค่าความร้อนขั้นสูง (High heating value) หรือค่าความร้อนทั้งหมด (Gross heating value, GHV) นอกจากนี้ยังสามารถคำนวณค่าความร้อนรวมจากสมการดุลอง ดังนี้

$$HHV = 0.339(\%C) + 1.256 \left( \%H - \frac{\%O}{8} \right) + 0.105(\%S), MJ/kg \quad (2.5)$$

เมื่อ HHV คือ ค่าความร้อนขั้นสูง [เมกะจูลต่อกิโลกรัม]

%C %H %O และ %S เป็นร้อยละโดยมวลของธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน และกำมะถันตามลำดับ

$$HHV = 8,050(C) + 33,900(H_a) + 3,080(S) \quad (2.6)$$

เมื่อ HHV คือ ค่าความร้อนขั้นสูง [เมกะจูลต่อกิโลกรัม]

C คือ เศษส่วนโดยมวลของคาร์บอน

H<sub>a</sub> คือ เศษส่วนโดยมวลของไฮโดรเจนที่มีอยู่

S คือ เศษส่วนโดยมวลของกำมะถัน

สำหรับแหล่งถ่านหินในประเทศ ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนรวมกับผลการวิเคราะห์แบบประมาณสามารถคำนวณได้ตามสมการไว้ดังนี้ [6]

$$HHV = 71.38(FC_{db}) + 58.40(VM_{db}) \quad (2.7)$$

เมื่อ HHV คือ ค่าความร้อนขั้นสูง [กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม, ถ่านหินแห้ง]

$FC_{db}$  คือ ร้อยละคาร์บอนคงตัว, ถ่านหินแห้ง

$VM_{db}$  คือ ร้อยละสารระเหย, ถ่านหินแห้ง

#### 2.4.2.2 ค่าความร้อนสุทธิ (Net heating value, NHV)

ค่าความร้อนสุทธิของเชื้อเพลิงชนิดหนึ่ง มีความหมายคล้ายกับค่าความร้อนรวม แต่หลังการเผาไหม้สมบูรณ์ น้ำที่มีอยู่ในเชื้อเพลิงและที่เกิดเป็นผลผลิตจากการเผาไหม้อยู่ในรูปของไอน้ำ อาจเรียกว่า ค่าความร้อนขั้นต่ำ (Lower heating value, LHV) ดังนั้น ค่าความร้อนรวมและค่าความร้อนสุทธิจึงมีความแตกต่างเท่ากับความร้อนของการระเหยของน้ำทั้งหมดที่อยู่ในผลผลิตของการเผาไหม้ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส สามารถแสดงความสัมพันธ์ได้ดังสมการ

$$HHV = LHV + n_{H_2O} \Delta H^\circ_{vap, 25^\circ C} \quad (2.8)$$

#### 2.4.3 สมบัติด้านการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงแข็ง

การเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง เนื่องจากเชื้อเพลิงแข็งมีส่วนประกอบที่เป็นสารระเหยและคาร์บอนคงตัว การเผาไหม้ช่วงแรกเป็นการเผาไหม้ของสารระเหยซึ่งเกิดในวัฏภาคแก๊ส ในช่วงหลังเป็นการเผาไหม้ของกากของแข็งที่เหลืออยู่ ด้วยเหตุนี้จึงทำให้สมบัติด้านการเผาไหม้และการควบคุมปฏิกิริยาในแต่ละช่วงจึงแตกต่างกัน เพื่อเพิ่มการสัมผัสกันระหว่างเชื้อเพลิงและออกซิเจนให้ได้ทั่วถึงภายใต้สภาวะที่เหมาะสมสามารถทำได้โดย

1. จัดให้มีปริมาณอากาศที่เพียงพอสำหรับการเผาไหม้ที่ตำแหน่งที่ถูกต้องตลอดบริเวณที่มีเชื้อเพลิง



2. ให้เวลาและจัดให้มีการปั่นป่วนที่เพียงพอ และจัดให้มีอุณหภูมิที่สูงพอสำหรับให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ภายในปริมาตรห้องเผาไหม้ที่มีอยู่ นิยมเรียกว่ากฎ 3T's (Time, Turbulence and Temperature)

#### 2.4.3.1 กระแสลมแรง (draught)

กระแสลมแรง หมายถึงความแตกต่างของความดันระหว่างจุดที่ป้อนอากาศเข้าและจุดที่แก๊สเผาไหม้ไหลออกจากระบบเพื่อปล่อยสู่บรรยากาศ โดยกระแสลมแรงจะช่วยทำให้มีอากาศไหลผ่านบริเวณที่ต้องการในปริมาณที่เพียงพอ ทำให้อากาศไหลผ่านเข้าสู่ระบบการเผาไหม้ และแก๊สเผาไหม้ไหลออกไปจากระบบได้อย่างต่อเนื่อง กระแสลมแรงสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่

##### 2.4.3.1.1 กระแสลมแรงธรรมชาติ (natural draught)

กระแสลมแรงธรรมชาตินี้สามารถเกิดขึ้นเองได้โดยธรรมชาติ เนื่องจากอากาศที่เย็นกว่าจะไหลเข้าไปแทนที่แก๊สเผาไหม้ที่ร้อนกว่าที่ไหลออกจากระบบการเผาไหม้ตลอดเวลา

##### 2.4.3.1.2 กระแสลมแรงทางกล (mechanical draught)

ในระบบการเผาไหม้ขนาดใหญ่ ความต้องการอากาศในห้องเผาไหม้แต่ละบริเวณมีความแตกต่างกัน และแก๊สเผาไหม้ที่ไหลผ่านบริเวณแลกเปลี่ยนความร้อนจึงมีแรงเสียดทานมาก จึงจำเป็นต้องเพิ่มกระแสลมแรงโดยใช้อุปกรณ์ทางกลเพื่อเพิ่มโมเมนตัมในการจัดอากาศป้อนที่เหมาะสมสำหรับกระแสอากาศและแก๊สเผาไหม้ และเพิ่มการถ่ายเทความร้อนระหว่างแก๊สเผาไหม้กับผิวท่อ ซึ่งสามารถทำได้ 3 วิธี คือ

1. ใช้พัดลมเป่าอากาศเข้าด้านหน้า เรียกว่า กระแสลมแรงบังคับ (forced draught)
2. ใช้พัดลมดูดแก๊สเผาไหม้ออกจากเตา เรียกว่า กระแสลมแรงเหนี่ยวนำ (induced draught)
3. ใช้ทั้งพัดลมเป่าอากาศด้านหน้า และใช้พัดลมดูดแก๊สเผาไหม้ออกจากเตา เรียกว่า กระแสลมแรงสมดุล (balanced draught)

#### 2.4.3.2 กฎ 3T's (Time, Turbulence and Temperature)

ถ้ามีอากาศไหลผ่าน แต่ไม่มีเวลาเพียงพอที่อากาศจะผสมกับเชื้อเพลิง ไม่มีการปั่นป่วนที่ทำให้มวลของแก๊สเชื้อเพลิงสัมผัสกับอากาศ และบางบริเวณมีอุณหภูมิที่ไม่สูงพอ จึงทำให้การเผาไหม้ที่

สมบูรณ์เกิดขึ้นไม่ได้ ซึ่งองค์ประกอบทั้งสามอย่างข้างต้นจะขึ้นอยู่กับการป้อนอากาศและปริมาณของอากาศ

การป้อนอากาศจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ อากาศส่วนแรก (primary air) คือ อากาศส่วนที่ป้อนเข้ามาพร้อมกับเชื้อเพลิงหรือส่วนที่สัมผัสกับเชื้อเพลิงก่อน และอากาศส่วนที่สอง (secondary air) คือ อากาศส่วนที่ถูกป้อนเข้ามาเพื่อให้สัมผัสกับเชื้อเพลิงหรือผลผลิตจากการเผาไหม้ โดยสัดส่วนและปริมาณในการป้อนอากาศส่วนแรกและอากาศส่วนที่สองมีผลต่อการเกิดควันและความสมบูรณ์ของปฏิกิริยาด้วย

#### 2.4.3.3 อากาศเกินพอ (excess air)

โดยทั่วไปในระบบการเผาไหม้มักจะนิยมใช้อากาศเกินพอเพื่อให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ซึ่งเชื้อเพลิงแต่ละชนิดก็มีความต้องการอากาศที่เกินพอแตกต่างกัน สำหรับเชื้อเพลิงแข็งนั้นนอกจากต้องป้อนอากาศเป็นสองส่วนแล้ว ยังต้องการอากาศเกินพอที่สูงมาก (ระหว่าง 15-60%) ทั้งอากาศส่วนแรกที่ต้องทำปฏิกิริยากับคาร์บอน และอากาศส่วนที่สองที่ทำปฏิกิริยากับสารระเหยที่ระเหยออกมาจากถ่านหิน ทั้งนี้ยังต้องขึ้นอยู่กับระบบการเผาไหม้และอุปกรณ์ที่ใช้ในการเผาไหม้ด้วย

#### 2.4.4 การเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งในระบบต่างๆ

การศึกษาการเผาไหม้ถ่านหินนั้นมีความยุ่งยาก เนื่องจากถ่านหินนั้นมีองค์ประกอบที่ซับซ้อน มีสิ่งเจือปนที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน และมีการเผาไหม้หลายขั้นตอนนับตั้งแต่การไพโรไลส์ (pyrolyse) คือโครงสร้างของถ่านหินเกิดการสลายตัวให้สารระเหยออกมา การเผาไหม้สารระเหยและการเผาไหม้ถ่านชาร์ ปรากฏการณ์การเผาไหม้ยังแตกต่างออกไปตามลักษณะของเชื้อเพลิงและอุปกรณ์ที่นำมาใช้

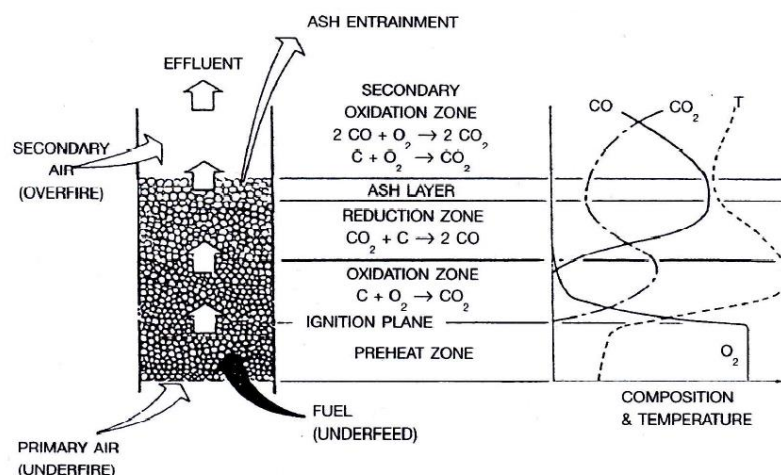
##### 2.4.4.1 การเผาไหม้บนตะแกรงเตาหรือการเผาไหม้ของเบดเชื้อเพลิง (combustion of fuel bed)

การเผาไหม้บนตะแกรงเตา เป็นการเผาไหม้ก่อนถ่านหินในขณะที่ถูกวางไว้อยู่บนตะแกรงเตา โดยป้อนอากาศส่วนแรกเข้ามาจากด้านล่าง และป้อนอากาศส่วนที่สองเหนือชั้นถ่านหิน

การเผาไหม้บนตะแกรงเตา สามารถแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ แบบป้อนถ่านหินใต้ตะแกรง (underfeed) และแบบป้อนถ่านหินเหนือตะแกรง (overfeed)

### แบบป้อนถ่านหินใต้ตะแกรง

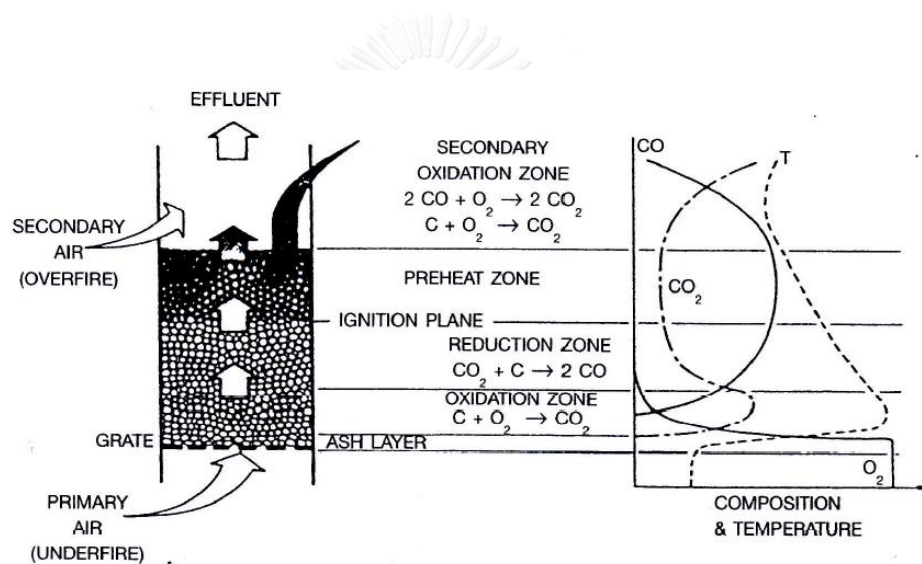
วิธีนี้จะทำให้ถ่านหินเกิดการเปลี่ยนแปลงในแต่ละช่วงความสูงของเบดเรียกว่า โซน (zone) ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ซึ่งแสดงการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของแก๊สและอุณหภูมิภายใต้เครื่องปฏิกรณ์ เริ่มต้นที่ถ่านหินด้านล่างถูกทำให้ร้อนขึ้นพร้อมๆ กับอากาศส่วนแรกที่ป้อนเข้ามาจากด้านล่างของตะแกรง ในโซนอุ่นร้อน (preheat zone) เกิดปฏิกิริยาไพโรไลซิสไล่สารระเหยที่อยู่ในถ่านหินออกมา และสะสมจนกระทั่งถึงจุดติดไฟในบริเวณถัดขึ้นไป (ignition plane) แก๊สร้อนที่เกิดขึ้นไหลขึ้นสู่ด้านบนทำให้ถ่านหินที่อยู่ชั้นล่างได้รับความร้อนจากการแผ่รังสีเพียงอย่างเดียวจึงสลายตัวได้ช้า เหนือบริเวณจุดติดไฟออกซิเจนจะเข้าทำปฏิกิริยากับถ่านหินได้คาร์บอนไดออกไซด์ ออกซิเจนในบริเวณนี้จะถูกใช้หมดในโซนออกซิไดส์ (oxidation zone) และคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นจะถูกรีดิวซ์ในโซนที่เหนือขึ้นไป คือ โซนรีดิวซ์ (reduction zone) เกิดคาร์บอนมอนอกไซด์สูงที่สุด และถ่านหินก็ถูกเผาไหม้จนหมดในโซนถัดไปกลายเป็นเถ้าในโซนเถ้า (ash zone) แต่คาร์บอนมอนอกไซด์และสารระเหยยังทำปฏิกิริยาต่อไปในวัฏภาคแก๊สเหนือเบดเกิดเป็นโซนออกซิไดส์ชั้นที่สอง (secondary oxidation zone) ดังนั้นจึงต้องเติมอากาศส่วนที่สองเข้าไปที่บริเวณเหนือเบด



รูปที่ 2.3 การเผาไหม้ถ่านหินแบบป้อนถ่านหินใต้ตะแกรง [2]

### แบบป้อนถ่านหินเหนือตะแกรง

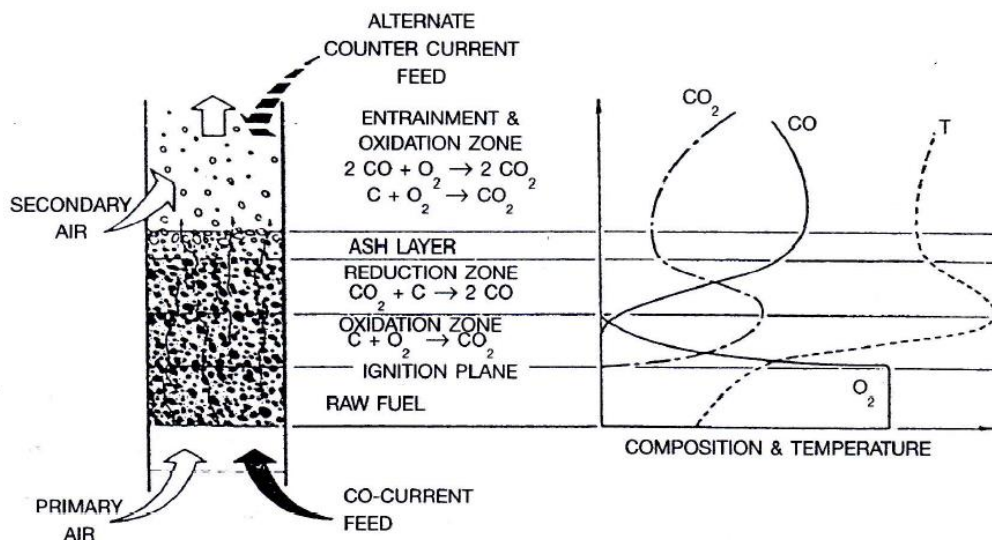
การป้อนถ่านหินเหนือตะแกรง (รูปที่ 2.4) ถ่านหินที่ถูกป้อนเข้ามาอยู่บนชั้นบนสุด ถูกทำให้ร้อนขึ้นโดยการแผ่รังสีความร้อนและการพาของแก๊สร้อนไหลขึ้นสู่ด้านบน ในโซนอุ่นร้อน สารระเหยออกมาเร็วมากต้องป้อนอากาศส่วนที่สองเข้าไปเหนือเบดเพื่อให้เกิดการเผาไหม้ได้ทันในวัฏภาคแก๊สเบดซึ่งทำได้ยาก จึงมีแนวโน้มเกิดควันได้ง่ายมาก ถ่านหินเคลื่อนที่ลงไปพร้อมกับมีความร้อนเพิ่มขึ้นจนถึงโซนรีดิวซ์ แล้วถูกรีดิวซ์กลายเป็นคาร์บอนมอนอกไซด์ และถ่านหินที่เหลืออยู่ก็ทำปฏิกิริยาออกซิเดชันกับอากาศส่วนแรกที่ป้อนเข้าจากด้านล่างของตะแกรงเกิดคาร์บอนไดออกไซด์ออกซิเจนถูกใช้ไปหมดในโซนนี้ ดังนั้นในโซนนี้จึงเกิดคาร์บอนไดออกไซด์มากและมีอุณหภูมิสูงที่สุด



รูปที่ 2.4 การเผาไหม้ถ่านหินแบบป้อนถ่านหินเหนือตะแกรง [2]

#### 2.4.4.2 การเผาไหม้ถ่านหินในเตาเผาแบบฟลูอิดไคซ์เบด (fluidized bed combustion)

ข้อเด่นของวิธีการนี้คือ สามารถผลิตความร้อนปริมาณมากได้โดยใช้ปริมาตรห้องเผาไหม้ขนาดเล็ก อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาไหม้ไม่สูงและสามารถเติมสารดูดซับซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในเบดได้ จึงมีอัตราการปลดปล่อยแก๊สมลพิษต่ำ สามารถใช้เชื้อเพลิงได้หลายชนิดหรือเชื้อเพลิงที่มีความแตกต่างกันมากได้ การเผาไหม้ในฟลูอิดไคซ์เบดได้แสดงดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 การเผาไหม้ถ่านหินในฟลูอิดไคซ์เบด [2]

ระดับอุณหภูมิในเบดอยู่ระหว่าง 750-1,000 องศาเซลเซียส ทำให้เกิดแก๊สกลุ่มไนโตรเจน-ออกไซด์ต่ำ แต่การเผาไหม้สมบูรณ์ถึง 97-99% ทำให้สามารถใช้เชื้อเพลิงที่มีคุณภาพต่ำได้  
ข้อดี

1. สามารถใช้เชื้อเพลิงได้หลากหลายชนิด โดยใช้เชื้อเพลิงเพียงชนิดเดียวหรือเชื้อเพลิงผสมได้ เพราะมีเวลาอยู่ในเบดนานจึงเผาไหม้ได้สมบูรณ์ และยังมีแบบเตาเผาไหม้แบบหมุนเวียนที่นำถ่านที่มีเชื้อเพลิงเหลืออยู่กลับเข้ามาเผาไหม้ได้อีกด้วย
2. อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาไหม้ต่ำ (ไม่เกิน 1,000 องศาเซลเซียส) จึงช่วยลดการกัดกร่อนและการเกาะของถ่านลอมเหลวบนพื้นผิวถ่ายโอนความร้อน (fouling)
3. ควบคุมอัตราการปลดปล่อยแก๊สมลพิษให้อยู่ในค่ามาตรฐาน โดยไม่ต้องติดตั้งอุปกรณ์กำจัดแก๊สมลพิษเพิ่มเติม
4. มีอัตราการถ่ายเทความร้อนสูง

ข้อเสีย

1. ใช้เวลาในการจุดเตาและปิดเตานาน
2. การทำงานของระบบป้อนแปรผันกับสมบัติของเชื้อเพลิงมาก
3. ท่อน้ำที่ฝังอยู่ในเบดเกิดการสึกกร่อน เนื่องจากการปะทะของอนุภาคและกระแสแก๊ส

ระบบจัดการกับถ่านใหญ่และขี้เถ้า

## 2.5 ฟลูอิดเซชัน

ฟลูอิดเซชัน [7] คือ กระบวนการหรือวิธีการที่ทำให้ของแข็งที่มีรูปร่างเป็นเม็ดหรือชิ้นมีคุณสมบัติคล้ายของไหล โดยการทำให้ของแข็งไปสัมผัสกับของไหล ซึ่งของไหลที่ใช้คือแก๊สหรือของเหลว วิธีการทำฟลูอิดเซชัน คือ การปล่อยให้ของไหลไหลผ่านของแข็งซึ่งถูกวางไว้บนตะแกรงในคอลัมน์แล้วไหลออกไปทางด้านบนของหอทดลอง แล้วเพิ่มความเร็วของของไหลมากขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งเม็ดของแข็งขยับตัว และลอยตัวขึ้นเป็นอิสระไม่เกาะติดกัน ของแข็งที่อยู่ในลักษณะแบบนี้จะมีคุณสมบัติคล้ายของไหล นั่นคือ มีการหมุนเวียนของเม็ดของแข็งภายในเบด หรือภายในคอลัมน์ หรือระหว่างเบดต่อเบด

### 2.5.1 ประเภทของฟลูอิดเซชัน

ฟลูอิดเซชันสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ

ฟลูอิดเซชันสองสถานะ (Two-phase Fluidization) ภายในคอลัมน์ที่ใช้งานจะประกอบไปด้วยของสองสถานะ นั่นคือของแข็งและของไหล ซึ่งของไหลนี้อาจจะเป็นแก๊สหรือของเหลว ดังนั้นจึงสามารถแบ่งฟลูอิดเซชันสองสถานะนี้ออกได้อีก 2 ประเภทคือ

ฟลูอิดเซชันแก๊ส (Gas Fluidization)

ฟลูอิดเซชันของเหลว (Liquid Fluidization)

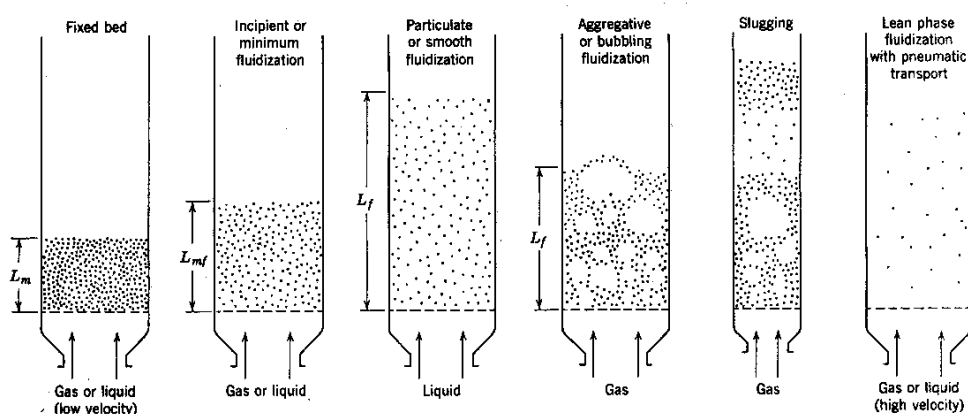
ฟลูอิดเซชันสามสถานะ (Three-phase Fluidization) ภายในคอลัมน์ที่ใช้งานจะประกอบไปด้วยของสามสถานะอยู่พร้อมกัน คือ ของแข็ง ของเหลว และแก๊ส สำหรับกระบวนการฟลูอิดเซชันสามสถานะนั้นเป็นกระบวนการที่พัฒนามาจากฟลูอิดเซชันสองสถานะ

### 2.5.2 ลักษณะของฟลูอิดเซชันเบด

เบด (Bed) หมายถึง บริเวณภายในคอลัมน์ที่มีปริมาณของแข็งบรรจุอยู่ ไม่ว่าของแข็งนั้นจะอยู่นิ่งหรือเคลื่อนไหวด้วยของไหลในคอลัมน์ โดยเริ่มวัดระดับตั้งแต่แผ่นโลหะที่ทำเป็นตะแกรงรองรับหรือเป็นตัวกระจายของไหล (distributor) จนถึงด้านบนสุด คือผิวหน้าของแข็งที่อยู่ในคอลัมน์

พฤติกรรมการเคลื่อนที่ของอนุภาคของแข็งที่อยู่ภายในเครื่องฟลูอิดเซชันจะเปลี่ยนไปตามความเร็วของของไหลที่ป้อนเข้าไป ในเริ่มแรกที่ป้อนของไหลที่ความเร็วต่ำ อนุภาคของแข็งจะยังคง

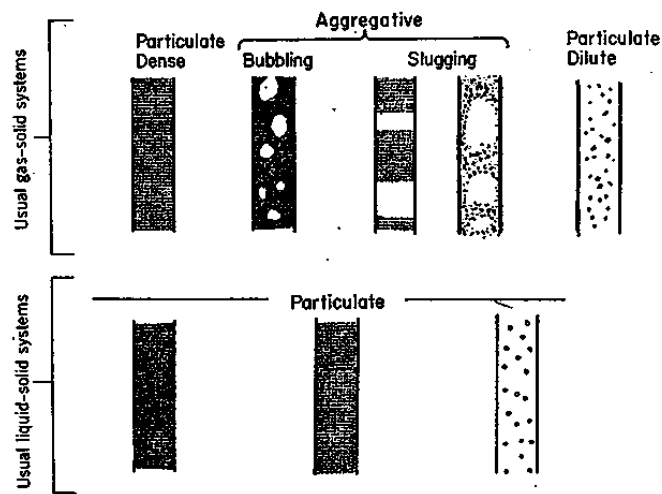
อยู่หนึ่งไม่ขยับจะเรียกลักษณะแบบนี้ว่า เบดนิ่ง (Fixed bed) และเมื่อเพิ่มความเร็วของของไหลขึ้นไปจนถึงความเร็วระดับหนึ่งที่ทำให้อนุภาคของแข็งเริ่มขยับตัวและจัดตัวอย่างเป็นระเบียบ เมื่อเพิ่มความเร็วของของไหลอีกเล็กน้อยจะทำให้อนุภาคของแข็งหลุดออกจากกันลอยตัวเป็นอิสระจะเรียกลักษณะที่เกิดขึ้นแบบนี้ว่า จุดเริ่มฟลูอิดิเซชัน ซึ่งหลังจากจุดนี้ไปแล้ว การเพิ่มความเร็วของของไหลจะทำให้เบดเกิดการขยายตัวเพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 รูปแบบการไหลสำหรับฟลูอิดิเซชันเบดแก๊ส-ของแข็ง [8]

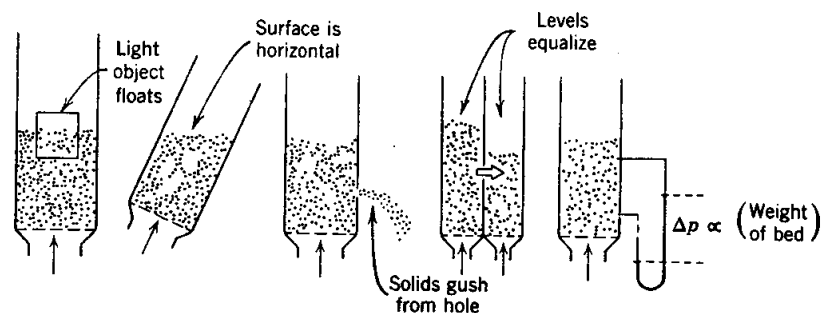
นอกจากนี้เมื่อเพิ่มความเร็วของแข็งที่ทำหน้าที่เป็นเบดหลุดออกจากเตาเผาฟลูอิดิเซชันเบดของแข็งที่หลุดออกไปเหล่านี้สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้โดยการดักจับด้วยไซโคลนแล้วนำเอาของแข็งเหล่านั้นป้อนกลับไปยังส่วนล่างของเตาเผาเพื่อทำปฏิกิริยาใหม่อีกครั้ง ซึ่งเครื่องปฏิกรณ์แบบนี้ถูกเรียกว่าเตาเผาฟลูอิดิเซชันแบบหมุนเวียน (circulating fluidized bed combustor) [9]

ฟลูอิดิเซชันเบดของเหลวที่เบดมีการขยายตัวอย่างสม่ำเสมอ อนุภาคของแข็งมีการลอยตัวและหมุนรอบของอนุภาคเป็นไปอย่างช้าๆ เรียกว่า เบดสม่ำเสมอหรือเบดที่เป็นเนื้อเดียวกัน ซึ่งลักษณะของเบด ของแก๊สฟลูอิดิเซชันนั้นจะแตกต่างจากของเหลวมาก เพราะเมื่อความเร็วแก๊สสูงกว่าความเร็วที่ทำให้เกิดฟลูอิดิเซชันแล้ว จะมีแก๊สบางส่วนรวมตัวกันกลายเป็นฟองแก๊สแล้วแทรกขึ้นมาแตกตัวที่บริเวณด้านบนของผิวหน้าเบด ในขณะที่ฟองแก๊สเคลื่อนที่ขึ้นไปด้านบนอนุภาคของแข็งที่อยู่ด้านบนของฟองแก๊สจะไหลลงมาสู่ด้านล่าง และมีอนุภาคของแข็งบางส่วนลอยติดตามฟองแก๊สขึ้นไปด้วย ลักษณะของฟลูอิดิเซชันเบดของระบบฟลูอิดิเซชันสองสถานะแสดงไว้ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 ลักษณะของฟลูอิด์เบดในระบบฟลูอิด์เซชันสองสถานะ [10]

ฟลูอิด์เบดมีลักษณะคล้ายของไหล (รูปที่ 2.8) คือ เมื่อของแข็งลอยตัวในลักษณะฟลูอิด์เซชันแบบหนาแน่น เบดจะมีผิวหน้าที่เรียบสม่ำเสมอเหมือนกับผิวหน้าของของไหลที่อยู่ในภาชนะ แม้ว่าจะเอียงคอลัมน์เบดยังคงมีผิวหน้าที่เรียบเช่นเดิม เมื่อนำวัตถุแข็งที่มีความจำเพาะน้อยกว่าอนุภาคของแข็งที่ทำหน้าที่เป็นเบดที่บรรจุอยู่ภายในคอลัมน์ วัตถุแข็งนั้นก็เลยลอยอยู่บนผิวหน้าของเบด และถ้าด้านข้างของเบดถูกเจาะเป็นรู อนุภาคของแข็งที่อยู่ในเบดก็จะไหลออกมาทางรูนั้น นอกจากนี้ถ้านำเอาเบด 2 เบดมาต่อกัน อนุภาคของแข็งจากเบดที่สูงกว่าจะไหลไปทางด้านที่เบดต่ำกว่า



รูปที่ 2.8 ลักษณะคล้ายของไหลของฟลูอิด์เบด [8]



### ข้อได้เปรียบ

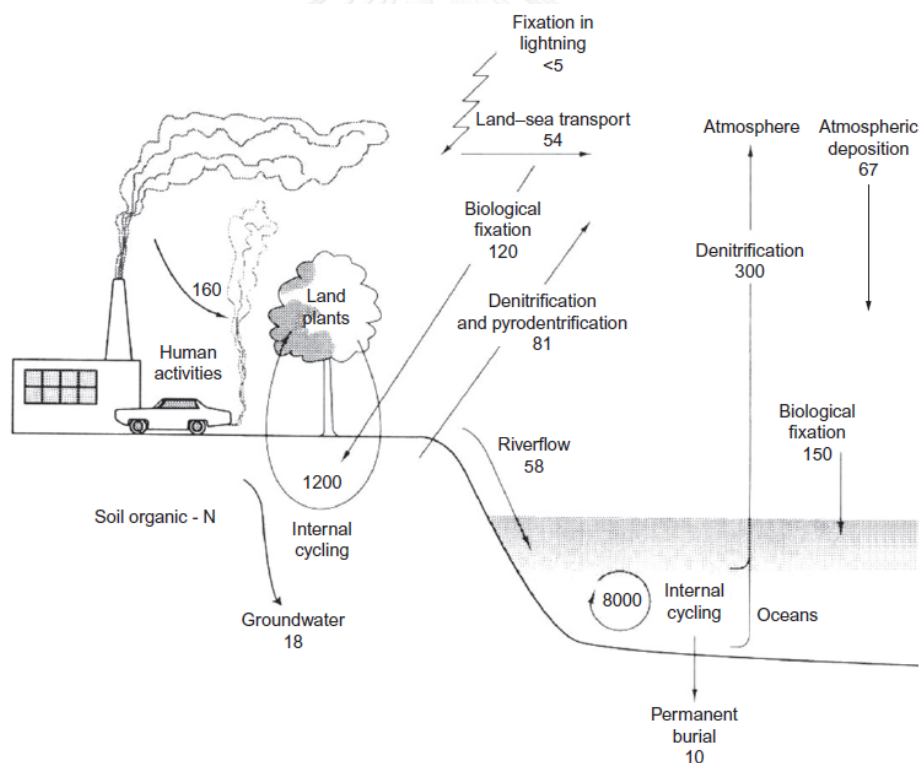
1. มีการผสมกันอย่างรวดเร็วและสม่ำเสมอ เนื่องจากอนุภาคของแข็งเคลื่อนที่อยู่ตลอดเวลา ทำให้อุณหภูมิภายในเบตคงที่ตลอด
2. สามารถใช้แยกขนาดของอนุภาคของแข็งได้ เพราะอนุภาคของแข็งที่อยู่ภายในคอลัมน์มีการจัดเรียงตัวของอนุภาคของแข็ง อนุภาคที่มีน้ำหนักน้อยจะอยู่ส่วนบน ส่วนอนุภาคที่มีน้ำหนักมากจะอยู่ส่วนล่าง
3. สามารถทำงานแบบต่อเนื่องได้ เนื่องจากมีสมบัติคล้ายของไหล คือปล่อยให้ของแข็งไหลออกจากเบตและไหลเติมเข้าไปในเบตได้ การควบคุมก็จะทำได้ง่าย
4. ฟลูอิด์เบตเหมาะสมกับกระบวนการที่มีปฏิกิริยาที่ให้ความร้อนหรือดูดความร้อนจำนวนมากๆ เนื่องจากอนุภาคของแข็งนี้สามารถทำหน้าที่เป็นตัวนำความร้อนจากผนังของแหล่งความร้อนให้กับของไหลได้มากกว่า เพราะมีสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่สูงกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับความเร็วของไหลอันเดียวกัน
5. พื้นที่สัมผัสระหว่างอนุภาคของแข็งกับของไหลในระบบฟลูอิด์เบตมีมากกว่าระบบเบตนิ่ง สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการขยายงานที่มีทั้งการถ่ายเทความร้อนและมวลสาร
6. การทำงานด้วยฟลูอิด์เบตจะเสียพลังงานน้อยกว่าเพราะแรงเสียดทานและความดันตกของเบตน้อย
7. สามารถกำจัดตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีขนาดเล็กมากๆ ได้โดยไม่ต้องหยุดเครื่องทำงาน
8. สามารถใช้ในการขนส่งอนุภาคของแข็งจากที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่งได้

### ข้อเสียเปรียบ

1. เวลาในการสัมผัสกันระหว่างของไหลกับอนุภาคของแข็งนั้นสั้นมาก จึงต้องใช้เบตสูงๆ หรือเบตหลายชั้น ซึ่งต้องใช้เงินลงทุนมาก
2. เมื่อทำงานกับแก๊ส ฟองแก๊สที่เกิดขึ้นในเบตจะทำให้การสัมผัสระหว่างแก๊สกับของแข็งไม่ดีเป็นการสูญเสียเปลือง ทำให้โอกาสในการทำปฏิกิริยาลดลง
3. อนุภาคของแข็งมีเวลาอยู่ในเบตสั้นเกินไป เมื่อทำงานแบบต่อเนื่องจึงให้ผลลัพธ์ที่แย่ง

4. ถ้าความเร็วของของไหลที่ป้อนเข้าสู่ระบบฟลูอิดส์เบดสูงเกินไปจะทำให้อนุภาคของแข็งหลุดออกไปจากเบดพร้อมกับของไหล
5. เมื่อมีการใช้งานตัวเร่งปฏิกิริยาแล้วตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีขนาดเล็ก จะต้องคอยควบคุมความเร็วของแก๊สเพื่อไม่ให้ตัวเร่งปลิวไป
6. อนุภาคของแข็งเมื่อกระทบกับผนังของคอลัมน์ทำให้คอลัมน์เกิดการสั่นสะเทือน หรือเกิดการกัดกร่อน
7. ไม่สามารถใช้กับอนุภาคของแข็งที่เปื่อยกหรือเป็นยางได้ เพราะจะเป็นก้อนใหญ่ ตกตะกอนมายังส่วนล่างของเบด

## 2.6 วัฏจักรไนโตรเจน



รูปที่ 2.9 วัฏจักรไนโตรเจน (แต่ละทิศทางการไหลมีหน่วยเป็น 1012 กรัมของไนโตรเจนต่อปี) [11]

รูปที่ 2.9 แสดงความสัมพันธ์ของวัฏจักรไนโตรเจนระหว่างชั้นบรรยากาศ แผ่นดิน และ มหาสมุทร สิ่งมีชีวิตส่วนใหญ่ไม่สามารถใช้ไนโตรเจนในชั้นบรรยากาศได้ เพราะไนโตรเจน ( $N_2$ ) มี

ความแข็งแรงมากเนื่องจากเป็นพันธะสามจึงทำให้โมเลกุลของไนโตรเจนมีความเฉื่อย วัฏจักรไนโตรเจนเป็นส่วนจำเป็นสำหรับการแปลงสภาพไนโตรเจนในรูปของแก๊สไปสู่รูปแบบสารที่สิ่งมีชีวิตสามารถนำไปใช้ได้ ไนโตรเจนทั้งหมดที่สิ่งมีชีวิตสามารถนำมาใช้ได้จะได้อาจมาจากการตรึงไนโตรเจนจากวิธีการใดวิธีการหนึ่ง เช่น พืชหรือจุลินทรีย์บางชนิดที่สามารถเปลี่ยนไนโตรเจนให้กลายเป็นไนโตรเจนที่พร้อมทำปฏิกิริยา (reactive nitrogen) อัตราการตรึงไนโตรเจนโดยพืชเกิดขึ้นช่วงหนึ่งในสภาวะความดันและอุณหภูมิสูงส่งผลให้ออกซิเจนทำปฏิกิริยากับไนโตรเจนกลายเป็นไนโตรเจนออกไซด์ แต่เกิดขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น การตรึงไนโตรเจนทางชีวภาพจะดำเนินการโดยจุลินทรีย์หลากหลายชนิดทั้งที่อาศัยอยู่ในทะเลสาบ ดิน และตะกอน หรือที่พบในรากของพืช [11]

## 2.7 ไนโตรเจนออกไซด์ (NO<sub>x</sub>)

ไนโตรเจนออกไซด์ [12] เป็นแก๊สที่ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น สามารถละลายในน้ำได้เล็กน้อย เป็นที่สามารถเกิดขึ้นได้เองตามธรรมชาติ เช่น เกิดจากฟ้าผ่า ฟ้าแลบ ภูเขาไฟระเบิด หรือเกิดจากการกระทำของมนุษย์ เช่น การเผาไหม้เชื้อเพลิง อุตสาหกรรมการผลิตกรดไนตริก กรดกำมะถัน อุตสาหกรรมการชุบโลหะ และวัตถุระเบิด เป็นต้น ไนโตรเจนออกไซด์เป็นชื่อเรียกรวมของไนตริกออกไซด์ (NO) และไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO<sub>2</sub>) ซึ่งไนโตรเจนไดออกไซด์พบน้อยมากในแก๊สเผาไหม้ (Flue gas) และไอเสียจากรถยนต์ โดยไนโตรเจนไดออกไซด์จะเกิดขึ้นในบริเวณเปลวไฟ แต่จะถูกรีดิวซ์กลับไปเป็นไนตริกออกไซด์ในบริเวณหลังเปลวไฟ แก๊สไนโตรเจนออกไซด์ที่เกิดขึ้นเหล่านี้สามารถทำจะไปทำปฏิกิริยาเคมีกับแสง (photochemical reaction) ก่อให้เกิดหมอกในชั้นบรรยากาศขึ้น เป็นสารประกอบที่เป็นพิษ (noxious compound) ซึ่งเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต นอกจากนี้ไนตริกออกไซด์ยังสามารถถูกออกซิไดซ์ด้วยออกซิเจนหรือโอโซนในชั้นบรรยากาศกลายเป็นไนโตรเจนไดออกไซด์ เมื่อไนโตรเจนไดออกไซด์ละลายน้ำแล้วจะกลายเป็นกรดไนตริกอันเป็นสาเหตุของการเกิดฝนกรด และไนตริกออกไซด์ยังสามารถไปรวมกับฮีโมโกลบินในเม็ดเลือดแดงได้เหมือนกับคาร์บอนมอนอกไซด์อีกด้วย แก๊สเหล่านี้จึงถูกจัดให้เป็นสารที่ก่อให้เกิดมลพิษทางอากาศ จึงต้องมีมาตรการในการควบคุมปริมาณไม่ให้เกินพิกัดที่เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต

### 2.7.1 กระบวนการเกิดไนโตรเจนออกไซด์

ในกระบวนการเผาไหม้มี 3 ปฏิกิริยาเคมีเชิงซ้อนในการเกิดไนโตรเจนออกไซด์ (NOx) [13] ซึ่งปฏิกิริยาการเกิดไนโตรเจนออกไซด์ที่สำคัญคือ การเกิดไนโตรเจนออกไซด์จากความร้อนที่อุณหภูมิสูง เรียกว่า เทอร์มอลนออกซ์ (thermal NOx) ในการเกิดเทอร์มอลนออกซ์ ไนโตรเจนออกไซด์ที่เกิดขึ้นมาจากการทำปฏิกิริยาระหว่างไนโตรเจนที่มาจากอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ (combustion air) กับสารตั้งต้น เช่น อนุมูลของออกซิเจนและอนุมูลของไฮโดรเจนออกไซด์ (O and OH radicals) และโมเลกุลของไนโตรเจนไดออกไซด์ ในกระบวนการเผาไหม้ ไนตริกออกไซด์ได้มาจากกระบวนการเทอร์มอลนออกซ์เป็นหลัก

ไนโตรเจนออกไซด์จากเชื้อเพลิง (fuel NOx) เกิดขึ้นเมื่อไนโตรเจนที่มีอยู่ในเชื้อเพลิงเกิดการเผาไหม้ ไนโตรเจนออกไซด์ที่เกิดขึ้นจากกลไกนี้ เป็นฟังก์ชันของเชื้อเพลิงที่ถูกเผาไหม้ แก๊สธรรมชาติไม่มีไนโตรเจนอยู่ในเชื้อเพลิง ดังนั้นการเผาไหม้แก๊สธรรมชาติจึงไม่มีไนโตรเจนออกไซด์เกิดขึ้นตามกลไกการเกิดนี้ การเผาไหม้น้ำมันเชื้อเพลิง ปริมาณของไนโตรเจนออกไซด์ที่เกิดขึ้นจากกลไกการเผาไหม้ไนโตรเจนจากเชื้อเพลิงนั้นจะขึ้นอยู่กับชนิดของน้ำมันเชื้อเพลิงที่ใช้ น้ำมันดิบที่มีความหนาแน่นสูง (heavy oil) มีแนวโน้มที่มีปริมาณของไนโตรเจนอยู่สูงกว่าน้ำมันดิบที่มีความหนาแน่นต่ำ (light oil) กลไกการเกิดปฏิกิริยาของไนโตรเจนออกไซด์จากเชื้อเพลิงจะถูกคำนึงถึงอย่างมากเมื่อใช้ถ่านหินในการเผาไหม้

ไนโตรเจนออกไซด์ที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว (prompt NOx) เป็นกลไกที่ 3 ในการเกิดไนโตรเจนออกไซด์ โดยการเปลี่ยนรูปของโมเลกุลของไนโตรเจนให้กลายเป็นไนตริกออกไซด์ (NO) ผ่านผลิตภัณฑ์ขั้นกลาง (intermediate products) ปฏิกิริยานี้จะเกิดในช่วงต้นหน้าเปลวไฟกับไฮโดรคาร์บอน

#### 2.7.1.1 ไนโตรเจนออกไซด์ที่เกิดจากความร้อน (thermal NOx)

ไนโตรเจนออกไซด์ที่เกิดจากความร้อน เกิดขึ้นมาจากการทำปฏิกิริยาระหว่างไนโตรเจนและออกซิเจนที่ถูกสับสนุนโดยกระแสอากาศที่ป้อนเข้าสู่ระบบการเผาไหม้ และส่วนใหญ่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ

แม้ว่าความเข้มข้นของออกซิเจนและระยะเวลาจะมีอิทธิพลต่อการเกิดไนโตรเจนออกไซด์จากความร้อน แต่อุณหภูมิถือว่าเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญยิ่งต่อการเกิดไนโตรเจนออกไซด์จากความร้อน การเกิดไนโตรเจนออกไซด์ผ่านกลไกการเกิดไนโตรเจนออกไซด์จากความร้อนมีเวลาในการทำปฏิกิริยาที่ช้า ดังนั้น จึงต้องการเวลาที่พอจะทำให้ไปถึงสมดุล

ไนตริกออกไซด์ (NO) และไนโตรเจนออกไซด์ที่เกิดจากไนโตรเจนในบรรยากาศมักจะเกิดผ่านกลไกของความร้อน เพราะกลไกนี้จะเกิดที่บริเวณอุณหภูมิสูงของระบบการเผาไหม้ ไนโตรเจนในบรรยากาศ ( $N_2$ ) และออกซิเจน ( $O_2$ ) ที่ป้อนเข้าสู่บริเวณการเผาไหม้เพื่อใช้เป็นอากาศในการเผาไหม้จะถูกเปลี่ยนไปเป็นไนโตรเจนออกไซด์ด้วยความร้อน ความสัมพันธ์โดยรวมแสดงดังสมการที่ 2.9



แม้ว่าปฏิกิริยาที่ (2.9) เป็นรวมการเกิดไนโตรเจนออกไซด์จากความร้อนอย่างง่าย แต่ว่าการเกิดปฏิกิริยาโดยตรงของโมเลกุลของไนโตรเจนและโมเลกุลของออกซิเจนนั้นเป็นไปได้ช้ามาก ในปี 1946 Zeldovich ได้นำเสนอกลไกการเกิดปฏิกิริยาในการเกิดไนโตรเจนออกไซด์จากความร้อน แม้ว่าจะมีปฏิกิริยามากมายเกิดขึ้นร่วมด้วย แต่กลไกการเกิดปฏิกิริยาแบบพื้นฐาน Zeldovich ได้สรุปไว้ดังนี้



ปฏิกิริยาที่ (2.10), (2.11), และ (2.12) จะขึ้นอยู่กับสภาวะที่มี C, H, O และ OH เข้าถึงสมดุลของการเผาไหม้ ปฏิกิริยาที่ (2.10) เป็นขั้นกำหนดอัตราการเกิดปฏิกิริยา เนื่องจากเป็นปฏิกิริยาที่เกิดได้ช้าเพราะมีพลังงานก่อกัมมันต์ที่มาก (317 กิโลจูลต่อโมล) ในบริเวณที่ใกล้กับสัดส่วนการทำปฏิกิริยาที่เหมาะสมและบริเวณที่มีการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงที่สูง ปฏิกิริยาที่ (2.12) จะเป็นปฏิกิริยาการเกิดไนโตรเจนออกไซด์แหล่งแรก

ตารางที่ 2.4 ความเข้มข้นของไนตริกออกไซด์ (NO) และไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO<sub>2</sub>) ในอากาศและแก๊สเผาไหม้ (Flue gas) [13]

อุณหภูมิ (องศาฟาเรนไฮต์)	อากาศ (ppm)		แก๊สเผาไหม้ (ppm)	
	NO	NO <sub>2</sub>	NO	NO <sub>2</sub>
80	$3.4 \times 10^{-10}$	$2.1 \times 10^{-4}$	$1.1 \times 10^{-10}$	$3.3 \times 10^{-5}$
980	2.3	0.7	0.8	0.1
2060	800	5.6	250	0.9
2916	6100	12	2000	1.8

ในการเกิดไนโตรเจนออกไซด์จากความร้อนต้องการพลังงานปริมาณมาก (941 กิโลจูลต่อโมล) เพื่อทำลายพันธะของไนโตรเจน (N<sub>2</sub>) อัตราในการเกิดปฏิกิริยาที่ (2.10) จะมีความสำคัญอย่างมีนัยสำคัญที่อุณหภูมิประมาณ 2700 องศาฟาเรนไฮต์ (1500 องศาเซลเซียส) ปริมาณไนโตรเจนออกไซด์ที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่างๆ สามารถดูได้จากตารางที่ 2.4

ปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อการเกิดไนโตรเจนออกไซด์จากความร้อน คือ (1) อุณหภูมิของเปลวไฟ (2) ระยะเวลาของแก๊สเผาไหม้ที่อยู่ในบริเวณเปลวไฟที่มีอุณหภูมิสูง (3) ปริมาณของออกซิเจนที่ปรากฏอยู่ในช่วงอุณหภูมิสูงของเปลวไฟ

เทคนิคสำหรับการควบคุมหรือลดปริมาณการเกิดไนโตรเจนออกไซด์ที่เกิดจากกลไกทางความร้อน คือ (1) ลดปริมาณของออกซิเจนที่บริเวณเปลวไฟที่มีอุณหภูมิสูงลง (2) ลดระยะเวลาให้อยู่ในช่วงที่มีอุณหภูมิสูงลง (3) รักษาระดับของอุณหภูมิเปลวไฟไม่ให้เกิน 1300 องศาเซลเซียส และ (4) ลดอัตราการปลดปล่อยของเตาเผา ทฤษฎีของการควบคุมด้วยวิธีสุดท้ายนี้จะไปกำจัดสารตั้งต้นจากบริเวณในการทำปฏิกิริยาให้เข้าไปอยู่ในช่วงที่มีอุณหภูมิต่ำก่อนที่สมดุลจะสูง ทำให้ไนตริกออกไซด์เกิดได้น้อย

#### 2.7.1.2 ไนโตรเจนออกไซด์ที่เกิดจากเชื้อเพลิง (fuel NO<sub>x</sub>)

ไนโตรเจนออกไซด์ที่เกิดมาจากสารอินทรีย์ที่มีไนโตรเจนที่อยู่ในเชื้อเพลิง จะเรียกว่า ไนโตรเจนออกไซด์ที่เกิดจากเชื้อเพลิง การเกิดออกซิเดชันของสารประกอบที่มีไนโตรเจนในเชื้อเพลิง

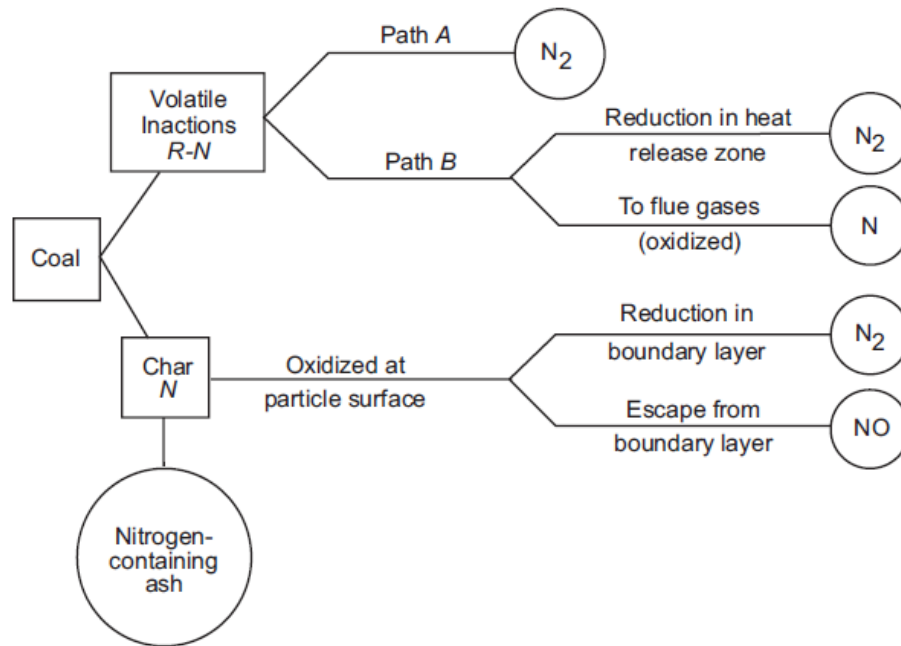
ฟอสซิลทำให้เกิดไนโตรเจนออกไซด์และไนโตรเจนไดออกไซด์ เส้นทางการเกิดไนโตรเจนออกไซด์จากเชื้อเพลิงสามารถดูได้จากรูปที่ 2.10

แม้ว่าจะคิดว่าไนโตรเจนออกไซด์ที่เกิดจากความร้อนเป็นกระบวนการที่ทำให้เกิดไนโตรเจนออกไซด์เป็นหลัก แต่ไนโตรเจนออกไซด์ที่เกิดจากเชื้อเพลิงที่พบก็มีปริมาณที่มากกว่าร้อยละ 40 ถึงร้อยละ 50 ของแก๊สที่ปล่อยออกมา นอกจากนี้

ความแปรปรวนของปริมาณของไนโตรเจนออกไซด์ที่เกิดขึ้นมากจากกระบวนการนี้คือปริมาณของไนโตรเจนที่อยู่ภายในเชื้อเพลิง นั่นคือถ้ามีปริมาณของไนโตรเจนอยู่ในเชื้อเพลิงมากก็จะทำให้เกิดไนโตรเจนออกไซด์มาก ถ่านหินและน้ำมันเป็นแหล่งของการเกิดไนโตรเจนออกไซด์จากเชื้อเพลิง ในประเทศสหรัฐอเมริกา ถ่านหินแข็งมีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบคิดเป็นร้อยละ 0.2 ถึง 3.5 โดยมวล

กระบวนการเกิดไนโตรเจนออกไซด์จากเชื้อเพลิงจะขึ้นอยู่กับปริมาณของออกซิเจนในบริเวณใกล้เคียงกับเปลวไฟ ดังนั้นการลดระดับของออกซิเจนจึงเป็นปัจจัยสำคัญต่อการลดปริมาณของไนโตรเจนออกไซด์ที่เกิดจากกระบวนการนี้ ที่เป็นแบบนี้เพราะว่าระดับของออกซิเจนบริเวณเปลวไฟมีความสำคัญเท่ากับความสัมพันธ์ของออกซิเจนในเตาเผาไหม้

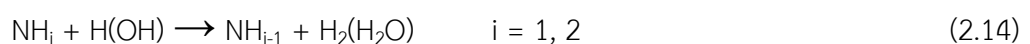
กลไกในการเกิดไนโตรเจนออกไซด์จากเชื้อเพลิงนั้นยังไม่มีกลไกที่อธิบายได้แม่นยำ อย่างไรก็ตามการเปลี่ยนแปลงของไนโตรเจนที่อยู่ในถ่านหินนั้นเป็นที่เข้าใจโดยทั่วไป สัดส่วนของสารระเหยและกลไกการเผาไหม้ของซาร์มีความสำคัญต่อการเปลี่ยนแปลงไนโตรเจนภายในถ่านหินให้กลายเป็นไนโตรเจนออกไซด์ทั้งคู่



รูปที่ 2.10 เส้นทางที่เป็นไปได้ของเชื้อเพลิงไนโตรเจนที่อยู่ในถ่านหินขณะเผาไหม้ [13]

อัตราการเปลี่ยนแปลงของสารระเหยไนโตรเจนไปเป็นไนโตรเจนออกไซด์จะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิในการเผาไหม้ หรือพูดอีกทางหนึ่งคือ อุณหภูมิที่ต่ำส่งผลให้เชื้อเพลิงไนโตรเจนเกิดการระเหยได้น้อย นี่จึงเป็นเหตุผลหนึ่งที่เตาเผาแบบพลูอิโดซ์เบดจึงเกิดไนโตรเจนออกไซด์ต่ำกว่าเตาเผาไหม้แบบทั่วไป

การระเหยของไนโตรเจนที่อยู่ในถ่านหินจะเกิดขึ้นก่อนการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในบริเวณที่มีเชื้อเพลิงสูง โดยเริ่มเกิดการระเหยตั้งแต่เชื้อเพลิงได้รับความร้อน สารระเหยไนโตรเจนที่เกิดขึ้นคือ HCN, N, CN, NO<sub>x</sub> และ NH โดยอนุมูลขั้นกลาง (intermediate radicals) เหล่านี้จะทำปฏิกิริยาออกซิเดชันกับออกซิเจนเกิดเป็นทั้งไนตริกออกไซด์ หรือไนโตรเจน ปฏิกิริยาการเกิดไนโตรเจนออกไซด์จากไนโตรเจนที่อยู่ในเชื้อเพลิงกรณีของแอมโมเนียเป็นดังนี้ [14]



เมื่อ  $\text{NH}_{i-1}$  คือ amine radical อาจเป็น  $\text{NH}_2$  หรือ  $\text{NH}$  หรือ  $\text{N}$  ก็ได้ ซึ่งจะถูกออกซิไดซ์ต่อไปจนเกิดเป็น  $\text{NO}$  หรือ  $\text{N}_2$



กรณีที่เป็น  $\text{NH}_2$  จะได้ปฏิกิริยาต่อไปนี้



กรณีที่เป็น  $\text{NH}$  (คล้ายกับปฏิกิริยาการเกิด prompt  $\text{NO}_x$ ) จะได้ปฏิกิริยาต่อไปนี้



กรณีที่เป็น  $\text{N}$  (คล้ายกับปฏิกิริยาการเกิด thermal  $\text{NO}_x$ ) จะได้ปฏิกิริยาต่อไปนี้



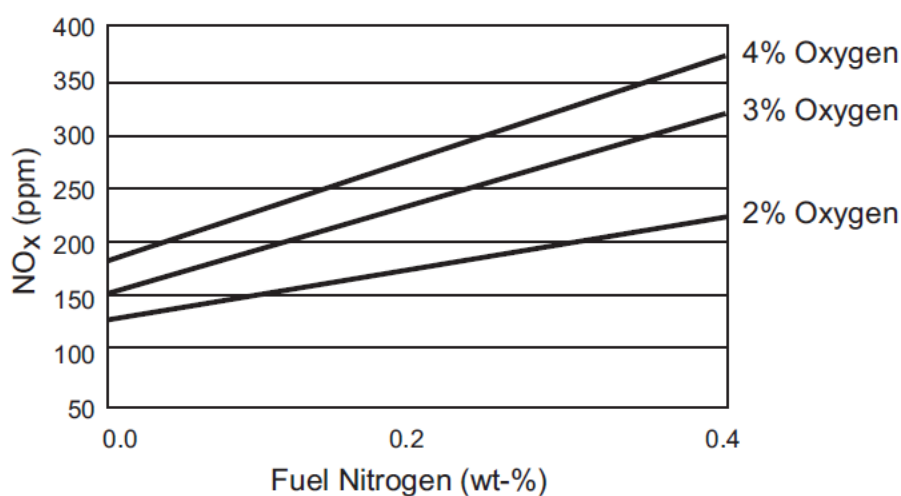
กรณีของกรดไฮโดรไซยานิก ( $\text{HCN}$ ) (คล้ายกับปฏิกิริยาการเกิด prompt  $\text{NO}_x$ ) จะได้ปฏิกิริยาต่อไปนี้



จากสมการปฏิกิริยาเคมีด้านบนจะเห็นได้ว่าการเกิด fuel NO นั้นมีกลไกการเกิดที่ผสมผสานระหว่าง thermal NO และ prompt NO ดังนั้นการเกิดไนโตรเจนออกไซด์จากไนโตรเจนในเชื้อเพลิงจึงขึ้นอยู่กับการออกแบบหัวเผา และขึ้นอยู่กับสภาวะการทำงาน

### การเผาไหม้ของชาร์ (char combustion)

การเผาไหม้ของชาร์คือ การเปลี่ยนแปลงของไนโตรเจนที่เป็นองค์ประกอบอยู่ภายในชาร์ให้กลายเป็นไนโตริกออกไซด์หรือไนโตรเจนด้วยปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์หลังการเผาไหม้ กระบวนการเผาไหม้ของชาร์จะช้ากว่าการระเหยของไนโตรเจนภายในถ่านหิน ดังนั้น การเกิดไนโตริกออกไซด์จากสารระเหยไนโตรเจนคิดเป็น 2.5 เท่าของการเกิดไนโตริกออกไซด์จากการเผาไหม้ของชาร์ ไนโตรเจนภายในเชื้อเพลิงไม่ได้ถูกเปลี่ยนเป็นไนโตรเจนออกไซด์ทั้งหมด ไนโตรเจนภายในเชื้อเพลิงที่เหลือจะอยู่ในเถ้าจมหรือเถ้าลอย (bottom ash or fly ash)



รูปที่ 2.11 ผลของไนโตรเจนที่อยู่ในเชื้อเพลิงต่อการปล่อยไนโตรเจนออกไซด์ [13]

อัตราในการเกิดไนโตรเจนออกไซด์เนื่องจากไนโตรเจนภายในเชื้อเพลิงจะเกิดได้ดีเมื่อความเข้มข้นของออกซิเจนที่ปรากฏอยู่ในเปลวไฟและอัตราการผสมของเชื้อเพลิงกับอากาศที่มากดังแสดงในรูปที่ 2.11 ดังนั้น ไนโตรเจนออกไซด์ที่เกิดจากความร้อนและไนโตรเจนออกไซด์ที่เกิดจากเชื้อเพลิงจึงเป็นกระบวนการหลักในการเกิดไนโตรเจนออกไซด์ภายใต้สภาวะการเผาไหม้ทั่วไป อย่างไรก็ตามไนโตรเจนออกไซด์ที่เกิดจากเชื้อเพลิงจะเกิดที่อุณหภูมิต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับที่เกิด

ไนโตรเจนออกไซด์จากความร้อน หนึ่งในวิธีการควบคุมการเผาไหม้เพื่อลดการเกิดไนโตรเจนออกไซด์จากเชื้อเพลิงคือ การลดปริมาณของไนโตรเจนที่อยู่ในเชื้อเพลิงลง

### 2.7.1.3 ไนโตรเจนออกไซด์ที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว (prompt NOx)

ในกลไกการเกิดไนโตรเจนออกไซด์ทั้ง 3 แบบนั้น ไนโตรเจนออกไซด์ที่เกิดจาก prompt NOx นั้นมีปริมาณเพียงเล็กน้อยเท่านั้น กลไกนี้เกิดได้ดีในบริเวณที่มีการเชื้อเพลิงในการเผาไหม้สูง (fuel-rich combustion zone) และอุณหภูมิการเผาไหม้ของกระบวนการต่ำ ระดับของการเปลี่ยนแปลงจะขึ้นอยู่กับสถานะในการเข้าทำปฏิกิริยาและอุณหภูมิ

prompt NOx เกิดขึ้นใน 5 มิลลิวินาทีแรกของการเผาไหม้ มีกลไกการเกิดที่ซับซ้อนกว่า thermal NOx เพราะบริเวณเปลวไฟเผาไหม้มีสารอินทรีย์บางส่วนที่ถูกออกซิไดซ์ปรากฏอยู่ สารอินทรีย์ที่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบในเชื้อเพลิงจะทำปฏิกิริยาอย่างรวดเร็วกับอนุมูลของ HCN, NH และ N ซึ่งอนุมูลเหล่านี้จะทำปฏิกิริยาต่อไปจนเกิดไนโตริกออกไซด์

เนื่องจากระยะเวลาที่อยู่ในเตาเผาที่สั้นมากยังไม่เข้าสู่สมดุล ดังนั้นจึงเกิดไนโตรเจนออกไซด์สูง ไนโตรเจนออกไซด์ที่เกิดจากกลไกนี้มีความสำคัญรองลงมาจากไนโตรเจนออกไซด์ที่เกิดจาก thermal NOx และ fuel NOx ในระบบการเผาไหม้ที่มีขนาดใหญ่ สมการการเกิด prompt NOx แสดงได้ดังสมการที่ (2.30)-(2.34) [14]



## 2.7.2 วิธีการลดไนโตรเจนออกไซด์

ไนโตรเจนออกไซด์ที่ปล่อยออกสู่บรรยากาศจะต้องถูกควบคุมปริมาณเพื่อไม่ให้ส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตทั้งพืชและสัตว์ [15] โดยสามารถทำได้หลายวิธีดังแสดงต่อไปนี้

### การลดอุณหภูมิ (Reducing temperature)

การลดอุณหภูมิการเผาไหม้ เป็นการหลีกเลี่ยงสัดส่วนที่แน่นอนของสารเคมีที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา เพราะที่สัดส่วนนี้จะทำให้มีอุณหภูมิสูงซึ่งส่งผลให้เกิดไนโตรเจนออกไซด์เนื่องจากความร้อนที่สูงเกิดขึ้นได้มาก อุณหภูมิการเผาไหม้สามารถลดได้โดย : (1) ผสมเชื้อเพลิงในปริมาณมาก (fuel rich mixtures) เพื่อจำกัดปริมาณของออกซิเจนที่สามารถใช้งานได้ (2) ผสมเชื้อเพลิงในปริมาณเล็กน้อย (fuel lean mixtures) เพื่อจำกัดอุณหภูมิโดยการทำให้พลังงานที่ป้อนเข้ามาเจือจางลง (3) ฉีดอากาศเผาไหม้ที่ถูกทำให้เย็นแล้วเข้าไปผสมกับอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ (4) พ่นน้ำหรือไอน้ำ

### การลดเวลาที่ใช้ในเครื่องปฏิกรณ์ (Reducing residence time)

ลดเวลาที่อยู่ในช่วงที่มีอุณหภูมิสูงลง โดยการจำกัดเปลวไฟช่วงการเปลี่ยนอากาศเผาไหม้ให้กลายเป็นแก๊สเผาไหม้ให้อยู่ในช่วงสั้นๆ ซึ่งการลดเวลาในช่วงที่มีอุณหภูมิสูงลงจะทำให้ไนโตรเจนส่วนใหญ่ไม่ถูกเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของไอออน สามารถทำได้โดยการฉีดพ่นเชื้อเพลิง ไอน้ำ อากาศเผาไหม้ที่มาก หรือการใช้แก๊สเผาไหม้มาหมุนเวียนในระบบการเผาไหม้

### การใช้สารเคมีในการลดไนโตรเจนออกไซด์ (chemical reduction of NOx)

วิธีนี้จะใช้สารเคมีช่วยในการดึงออกซิเจนออกมาจากไนโตรเจนออกไซด์ ยกตัวอย่างเช่น Selective Catalytic Reduction (SCR) ใช้แอมโมเนีย Selective Non-Catalytic Reduction (SNCR) ใช้แอมโมเนียหรือยูเรีย และ Fuel Reburning (FR)

### การออกซิเดชันของไนโตรเจนออกไซด์ (oxidation of NOx)

วิธีนี้จะเพิ่มประจุของไอออนไนโตรเจนให้มากขึ้นเพื่อให้สามารถดูดซับได้ สามารถทำได้โดยการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา การพ่นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ สร้างโอโซนในอากาศไหล หรือการพ่น

ไอโซนเข้าไปในอากาศไหล หอดูดซับ (Scrubber) จะต้องถูกติดตั้งเข้าไปในกระบวนการเพื่อดักจับไดไนโตรเจนเพนตะออกไซด์ ( $N_2O_5$ ) และกรดไนตริกถูกทำให้เป็นกลางโดยใช้หอดูดซับแบบเปียก

### การกำจัดไนโตรเจนจากการเผาไหม้ (removal of nitrogen from combustion)

วิธีนี้สามารถทำได้โดย (1) ใช้ออกซิเจนแทนอากาศสำหรับกระบวนการเผาไหม้ (2) ใช้เชื้อเพลิงที่มีไนโตรเจนในปริมาณที่ต่ำ แต่การกำจัดไนโตรเจนโดยการใช้ออกซิเจนแทนอากาศเผาไหม้มีแนวโน้มทำให้เกิดเปลวไฟที่รุนแรงซึ่งต่อมาจำเป็นต้องทำให้เปลวไฟเจือจางลง แม้ว่าวิธีที่ 2 จะสามารถลดอุณหภูมิได้อย่างรวดเร็วเพื่อหลีกเลี่ยงการสร้างไนโตรเจนออกไซด์ที่มากเกินไปก็ไม่สามารถกำจัดไนโตรเจนออกไซด์ได้โดยสิ้นเชิงถ้ายังใช้อากาศเพื่อทำให้แก๊สเผาไหม้มีอุณหภูมิลดลง เพราะความร้อนที่อากาศได้รับอาจไปสร้างไนโตรเจนออกไซด์ที่เกิดจากความร้อนได้

### การดูดซับ (sorption, both adsorption and absorption)

การบำบัดแก๊สเผาไหม้โดยการพ่นตัวดูดซับ (เช่น แอมโมเนีย ผงหินปูน แอมโมเนีย ออกไซด์ หรือคาร์บอน) สามารถกำจัดไนโตรเจนออกไซด์และแก๊สมลพิษอื่นๆ ได้ การใช้คาร์บอนเป็นตัวดูดซับยังไม่ได้นำไปสู่การผลิตเพื่อการตลาด แต่ในบางครั้งใช้เพื่อกำจัดไนโตรเจนออกไซด์ วิธีนี้สามารถที่จะแยกตัวดูดซับออกมาได้โดยการกรอง และหรือการใช้ไฟฟ้าสถิตเพื่อให้ตกตะกอน

### การใช้วิธีการลดไนโตรเจนออกไซด์หลายวิธีร่วมกัน (combinations of these methods)

การใช้วิธีการที่หลากหลายเหล่านี้ร่วมกันเพื่อให้เกิดไนโตรเจนออกไซด์ต่ำได้ดีกว่าการใช้วิธีการใดวิธีการหนึ่งเพียงอย่างเดียว

## 2.8 การเผาไหม้ร่วม

การเผาไหม้ร่วมน่าจะเป็นวิธีที่มีความซับซ้อนน้อยและเป็นวิธีที่มีประโยชน์มากที่สุดในการนำชีวมวลและของเสียมาใช้แทนเชื้อเพลิงซากดึกดำบรรพ์ในการผลิตพลังงาน

การเผาไหม้ร่วม [16] หมายถึง การเผาไหม้เชื้อเพลิงตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไปในระบบเดียวกันที่เวลาเดียวกันเพื่อผลิตพลังงาน แม้ว่าวิธีนี้จะถูกนำมาใช้เมื่อหลายปีมาแล้ว แต่เพิ่งจะได้รับความนิยม

เพิ่มขึ้นเมื่อเร็วๆ นี้ การเผาไหม้ร่วมสามารถนำไปใช้งานได้หลากหลายตามวัตถุประสงค์ต่างๆ โดยแบ่งเป็น 3 ประเภทใหญ่ๆ ได้ดังนี้

1. การใช้เชื้อเพลิงชีวมวลหรือของเสียในปริมาณเล็กน้อยเผาไหม้ร่วมกับถ่านหิน เพื่อเป็นการกำจัดของเสีย หรือเป็นการลดการใช้ถ่านหินโดยใช้ชีวมวลแทน
2. การใช้เชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนสูงปริมาณเล็กน้อยเผาไหม้ร่วมกับเชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนต่ำ เพื่อให้ได้คุณสมบัติการเผาไหม้ที่ต้องการ
3. การเผาไหม้ร่วมของเชื้อเพลิงผสมในสัดส่วนต่างๆ โดยพิจารณาจากราคา ความเหมาะสม และการสนับสนุนจากท้องถิ่น

ข้อดีของการเผาไหม้ร่วม

- ลดการเกิดคาร์บอนไดออกไซด์จากเชื้อเพลิงซากดึกดำบรรพ์
- เป็นการเปลี่ยนรูปของเชื้อเพลิงชีวมวลและของเสียที่มีประสิทธิภาพสูง
- เพิ่มปริมาณการใช้เชื้อเพลิงที่มีอยู่ในท้องถิ่น
- ปริมาณของเชื้อเพลิงที่เดิมสามารถรับได้ตามความเหมาะสมของเชื้อเพลิงชีวมวลและของเสียเพื่อให้เหมาะสมต่อระยะทางในการขนส่งจากโรงงานแปรรูป
- การทำงานร่วมกันระหว่างเชื้อเพลิงที่แตกต่างกันสามารถที่จะนำไปใช้ได้

ข้อเสียของการเผาไหม้ร่วม

- มีค่าใช้จ่ายในการติดตั้งเครื่องมือหรือกระบวนการบำบัด (treatment process)
- อาจมีผลกระทบต่อโรงงานเนื่องจากเชื้อเพลิงที่เดิมเข้าไป

## 2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Cliffe และ Patumsawad [17] ได้ศึกษาการเผาไหม้ร่วมระหว่างของเสียจากกระบวนการผลิตน้ำมันมะกอกและถ่านหินในเครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไคซ์เบด พบว่าเชื้อเพลิงที่เป็นถ่านหินทั้งหมด มีประสิทธิภาพในการเผาไหม้มากกว่าเชื้อเพลิงผสมระหว่างถ่านหินและของเสียจากการผลิตน้ำมันมะกอก โดยมีประสิทธิภาพอยู่ที่ร้อยละ 91-95 ขณะที่ประสิทธิภาพการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงผสมของของเสียจากน้ำมันมะกอกที่ร้อยละ 10 และร้อยละ 20 มีประสิทธิภาพร้อยละ 85-

91 และร้อยละ 88-93 ตามลำดับ สาเหตุที่เชื้อเพลิงผสมที่มีของเสียจากน้ำมันมะกอกร้อยละ 10 มีประสิทธิภาพการเผาไหม้น้อยกว่าเชื้อเพลิงผสมที่มีของเสียจากน้ำมันมะกอกร้อยละ 20 อธิบายได้ว่าเมื่อปริมาณของชีวมวลเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ปริมาณความชื้นมีมากขึ้น ซึ่งปริมาณความชื้นที่มากขึ้นจะทำให้เกิดสารระเหยได้ช้า ดังนั้นเชื้อเพลิงผสมจึงมีเวลาอยู่ในเบดมากพอที่จะเกิดการเผาไหม้ และเมื่อพิจารณาการปล่อยคาร์บอนมอนอกไซด์พบว่าทุกการทดลองค่าการปล่อยคาร์บอนมอนอกไซด์อยู่ระหว่าง 100 และ 350 ส่วนในล้านส่วนที่ออกซิเจนร้อยละ 6 โดยเชื้อเพลิงผสมร้อยละ 20 ของของเสียจากน้ำมันมะกอกมีการปล่อยคาร์บอนมอนอกไซด์มากที่สุด

Splithoff และคณะ [18] ได้ศึกษาผลของการปล่อยไนโตรเจนออกไซด์ในระบบที่มีการป้อนอากาศและเชื้อเพลิงแบบขั้น โดยการป้อนอากาศแบบขั้นนั้นที่โซนแรกจะป้อนอากาศในปริมาณที่น้อย และโซนที่สองจะป้อนอากาศที่มากเกินไป ส่วนการป้อนเชื้อเพลิงแบบขั้นในโซนแรกจะป้อนแก๊สเชื้อเพลิงขนาดเล็กที่ได้จากการเผาไหม้ จากการทดลองพบว่า ในการป้อนอากาศแบบขั้น การเพิ่มระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาจะทำให้การปลดปล่อยไนโตรเจนออกไซด์ลดลง และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้นในสภาวะที่มีอากาศมากจะทำให้สัดส่วนของไนโตรเจนออกไซด์เพิ่มขึ้น ในการป้อนเชื้อเพลิงแบบขั้นนั้น การปล่อยไนโตรเจนออกไซด์จะต่ำที่สุดเมื่อใช้แก๊สไพโรไลซิส และการเพิ่มระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาจะทำให้การปลดปล่อยไนโตรเจนออกไซด์ลดลง เช่นเดียวกับการเพิ่มอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา โดยจะมีไนโตรเจนออกไซด์เกิดขึ้นน้อยกว่า 200 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

Daood และคณะ [19] ได้ศึกษาการควบคุมไนโตรเจนออกไซด์ในระบบการเผาไหม้ถ่านหินด้วยวิธีการเผาไหม้ร่วมกับชีวมวล การเพิ่มปริมาณออกซิเจน และกระบวนการลดไนโตรเจนออกไซด์โดยไม่ใช้ตัวเร่ง (selective non-catalytic reduction (SNCR)) จากผลการทดลองพบว่าชีวมวลที่ใส่เข้าไปเพื่อเผาไหม้ร่วมกับถ่านหินมีแนวโน้มทำให้เกิดคาร์บอนมอนอกไซด์ในปริมาณที่มาก ขณะเดียวกันการเผาชีวมวลร่วมกับถ่านหินยังช่วยลดการปลดปล่อยไนโตรเจนออกไซด์ได้ดีขึ้น ซึ่งอาจจะมีการใช้หรือไม่ใช้กระบวนการลดไนโตรเจนออกไซด์โดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาปริมาณการปล่อยไนโตรเจนออกไซด์ลดลงประมาณร้อยละ 80 เมื่อใช้ SNCR ร้อยละ 15 ผสมกับชีวมวลร้อยละ 50 ที่ความเข้มข้นของออกซิเจนร้อยละ 21

Atimtay และ Varol [20] ได้ศึกษาผลของอัตราการป้อนอากาศทุติยภูมิต่อการปล่อยแก๊สเรือนกระจกของกระบวนการเผาไหม้ของถ่านหินและโอลีฟเค้ก (olive cake) พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราการป้อนอากาศทุติยภูมิส่งผลให้การปล่อยคาร์บอนมอนอกไซด์และไฮโดรคาร์บอนในแก๊สจากการเผาไหม้ (flue gas) ลดลง เนื่องจากมีปริมาณของออกซิเจนเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มอัตราการป้อนอากาศทุติยภูมิ ทำให้เพิ่มการเผาไหม้ของคาร์บอนมอนอกไซด์และไฮโดรคาร์บอนกับออกซิเจนที่มากเกินไปในส่วนที่เหนือจากการเผาไหม้หลักหรือฟรีบอร์ด (freeboard) และเมื่อปริมาณของโอลีฟเค้ก (olive cake) ในเชื้อเพลิงผสมเพิ่มขึ้นก็ทำให้มีปริมาณของสารระเหยของเชื้อเพลิงผสมเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ถ้าสารระเหยที่เกิดขึ้นไม่สามารถหาออกซิเจนมาเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ได้อย่างเพียงพอ สารระเหยเหล่านั้นก็จะหลุดออกไปจากเตาเผาในรูปของสารที่ถูกออกซิไดซ์บางส่วน (partially oxidized species) นั่นจึงเป็นสาเหตุที่ทำให้มีการปล่อยคาร์บอนมอนอกไซด์และไฮโดรคาร์บอนในแก๊สจากการเผาไหม้สูงผลการทดลองพบว่าสภาวะที่ปล่อยไนโตรเจนออกไซด์และคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำสุดคือ ป้อนอากาศเกินพอที่สัดส่วน 1.35 อัตราการไหลของอากาศทุติยภูมิ 30 ลิตรต่อนาที และชีวมวลร้อยละ 75

Wang และคณะ [21] ได้ศึกษาผลของตำแหน่งในการป้อนอากาศทุติยภูมิและการเผาไหม้แบบขั้นต่อการปล่อยไนโตรเจนออกไซด์ของกระบวนการเผาไหม้ถ่านหินภายในเตาเผาพบว่า เมื่ออัตราการป้อนอากาศปฐมภูมิเพิ่มขึ้นจะทำให้ปริมาณการปล่อยไนโตรเจนออกไซด์เพิ่มขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากการเพิ่มอัตราการป้อนอากาศปฐมภูมิจะไปลดการเกิดตัวรีดิวซ์ (reducing species) ที่อยู่ในโซนการเผาไหม้ปฐมภูมิ ซึ่งเป็นผลเสียต่อการลดไนโตรเจนออกไซด์ ในขณะที่เดียวกันการลดอัตราการป้อนอากาศปฐมภูมิจะช่วยทำให้เวลาที่อยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ (residence time) ของถ่านหินในโซนปฐมภูมิและโซนรีดักชัน (reduction zone) นานมากขึ้นซึ่งทำให้ไนโตรเจนออกไซด์ลดลง และนอกจากนี้ไนโตรเจนออกไซด์ลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อเพิ่มระยะของตำแหน่งการป้อนอากาศทุติยภูมิให้ห่างจากบริเวณการเผาไหม้ปฐมภูมิเพราะเมื่อระยะห่างของตำแหน่งการป้อนอากาศทุติยภูมิและบริเวณการเผาไหม้ปฐมภูมิเพิ่มขึ้นทำให้โซนของการเผาไหม้ปฐมภูมิขยายเพิ่มขึ้น และทำให้เวลาของแก๊สจากการเผาไหม้ (flue gas) อยู่ในโซนการเผาไหม้ปฐมภูมิเพิ่มขึ้น การเพิ่มขึ้นของเวลาที่อยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ของแก๊สจากการเผาไหม้ทำให้แก๊สที่มีองค์ประกอบของไนโตรเจน เช่น ไนโตรเจน-



ออกไซด์ (NO) แอมโมเนีย (NH<sub>3</sub>) และไฮโดรเจนไซยาไนด์ (HCN) สลายไปส่งผลให้การปลดปล่อยไนโตรเจนออกไซด์ลดลงได้มาก

Qian และคณะ [22] ได้ศึกษาผลของการนำแก๊สจากการเผาไหม้มาใช้ในการเผาไหม้ร่วมกับอากาศปฐมภูมิต่อการปลดปล่อยไนโตรเจนออกไซด์จากปฏิกิริยาการเผาไหม้ของถ่านหินภายในเตาเผาแบบเวอร์เทกซ์ฟลูอิดิซด์เบด (vortexing fluidized-bed) ถ่านหินที่ใช้มีขนาด 1.4 ถึง 8 มิลลิเมตร ในการทดลองได้ดูผลของสภาวะการดำเนินการ เช่น อุณหภูมิของเบด สัดส่วนของออกซิเจนที่มากเกินไป และอากาศหตุยภูมิร้อน โดยได้เปรียบเทียบผลระหว่างการใช้แก๊สจากการเผาไหม้ร่วมกับอากาศปฐมภูมิและไนโตรเจนร่วมกับอากาศปฐมภูมิที่ใช้สำหรับการเผาไหม้ พบว่าสภาวะที่มีการปล่อยไนโตรเจนออกไซด์ประมาณ 80 ส่วนต่อล้านส่วนที่ออกซิเจนร้อยละ 11 ซึ่งเป็นปริมาณที่น้อยที่สุด เมื่อออกซิเจนที่มากเกินไปป้อนเข้าไปมีปริมาณน้อย อุณหภูมิของเบดที่ 800 องศาเซลเซียส และอากาศปฐมภูมิที่ใช้คืออากาศผสมกับแก๊สจากการเผาไหม้ แต่ขณะเดียวกันปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ที่เกิดขึ้นจะมีค่ามาก

Prompubess และคณะ [23] ได้ทำการทดลองการเผาไหม้ร่วมของถ่านหินและชีวมวลในเตาเผาฟลูอิดิซด์เบดแบบหมุนเวียนเพื่อศึกษาผลของสัดส่วนการผสม อากาศปฐมภูมิและอากาศหตุยภูมิต่ออุณหภูมิการเผาไหม้ และความเข้มข้นของแก๊สเผาไหม้ตลอดความสูงของไรเซอร์ ถ่านหินที่ใช้มีขนาดเฉลี่ย 1,128 มิลลิเมตรและใช้ทรายเป็นเบด อากาศปฐมภูมิที่ป้อนมีอัตรา 480-920 ลิตรต่อนาที ซึ่งคิดเป็นอัตราเร็ว 1.0-2.0 เมตรต่อวินาทีสำหรับการป้อนถ่านหินที่อัตรา 5.8 กิโลกรัมต่อชั่วโมง อัตราการป้อนกลับผ่านแอลวาล์วคือ 100 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ผลการทดลองพบว่า อุณหภูมิเฉลี่ยตลอดความสูงไรเซอร์อยู่ที่ 800-1,000 องศาเซลเซียส การป้อนอากาศหตุยภูมิช่วยปรับปรุงการเผาไหม้และทำให้อุณหภูมิบริเวณด้านล่างของไรเซอร์เกิดการเปลี่ยนแปลงโดยเฉพาะภาวะที่ป้อนอากาศปฐมภูมิที่อัตรา 1.5 เมตรต่อวินาที การเผาไหม้เชื้อเพลิงผสมถ่านหินและแกลบสามารถปรับปรุงประสิทธิภาพการเผาไหม้ของถ่านหินเมื่อผสมแกลบในปริมาณต่ำที่ 3.5 ร้อยละโดยน้ำหนัก นอกจากนี้การเผาไหม้เชื้อเพลิงผสมยังช่วยลดไนโตรเจนออกไซด์และซัลเฟอร์ไดออกไซด์

Saikaew และคณะ [24] ได้ทำการเผาไหม้ร่วมของถ่านหินและชีวมวลในเตาเผาฟลูอิดิซด์เบดแบบหมุนเวียน เพื่อศึกษาอิทธิพลของชนิดของชีวมวลต่อการเกิดมลพิษจากเตาเผาฟลูอิดิซด์เบดแบบหมุนเวียน ชีวมวลที่ใช้ได้แก่ กะลาปาล์ม กะลามะพร้าว ชี้อ้อย และแกลบ จากผลการทดลอง

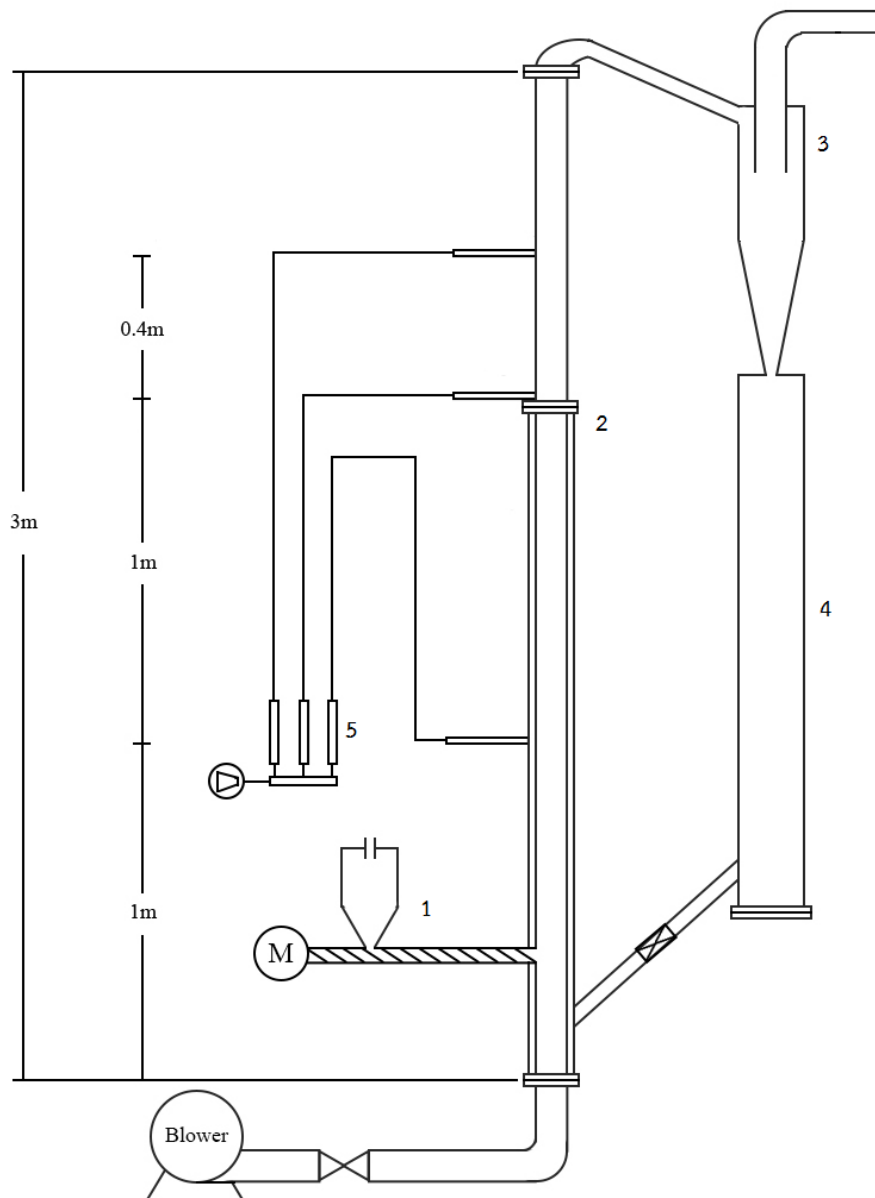
พบว่าอุณหภูมิเฉลี่ยตลอดความสูงไรเซอร์ของการเผาไหม้ร่วมมีความสัมพันธ์กับค่าความร้อนของเชื้อเพลิงผสม การเผาไหม้เชื้อเพลิงผสมถ่านหินและกะลาปาล์มมีอุณหภูมิการเผาไหม้สูงสุดเนื่องจากมีค่าความร้อนของเชื้อเพลิงที่สูง ในอีกทางหนึ่งการเผาไหม้เชื้อเพลิงผสมถ่านหินและแกลบซึ่งมีค่าความร้อนที่ต่ำจึงมีอุณหภูมิการเผาไหม้ที่ต่ำที่สุด และการมีชีวมวลผสมอยู่ในเชื้อเพลิงช่วยลดไนโตรเจนออกไซด์และไนตรัสออกไซด์ในแก๊สเผาไหม้ ปริมาณไนโตรเจนที่อยู่ในเชื้อเพลิงเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อการเกิดไนโตรเจนออกไซด์และไนตรัสออกไซด์ นอกจากนี้ยังพบว่าตำแหน่งในการป้อนอากาศทุติยภูมิที่ต่างกันนั้นมีอิทธิพลต่อการเกิดไนโตรเจนออกไซด์และไนตรัสออกไซด์ในแก๊สเผาไหม้



### บทที่ 3 เครื่องมือและวิธีการทดลอง

#### 3.1 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

เตาเผาฟลูอิด์เบดแบบหมุนเวียน



รูปที่ 3.1 โครงร่างเตาเผาฟลูอิด์เบดแบบหมุนเวียนที่ใช้ในงานวิจัย 1) ระบบการป้อนเชื้อเพลิง 2) โรเตอร์ 3) ไซโคลน 4) ท่อป้อนกลับ 5) โรตاميเตอร์



รูปที่ 3.2 เตาเผาฟลูอิดไธซ์เบดแบบหมุนเวียนที่ใช้ในงานวิจัย

เตาเผาฟลูอิดไธซ์เบดแบบหมุนเวียนที่ใช้ในงานวิจัยนี้ถูกแสดงไว้ดังรูปที่ 3.1 และรูปที่ 3.2 มีประกอบต่างๆ ดังนี้

1. เครื่องเป่าอากาศ (air blower) (รูปที่ 3.3) กำลังขนาด 5 แรงม้า ขนาดกำลังเป่าสูงสุด 20 ลูกบาศก์เมตรต่อนาที มีความดันสูงสุด 150 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว มอเตอร์ 3 เฟส ใช้สำหรับสร้างอากาศปฐมภูมิ (primary air) เพื่อป้อนเป็นอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้เชื้อเพลิง โดยป้อนเข้าสู่ด้านล่างของเตาเผา



รูปที่ 3.3 เครื่องเป่าอากาศ (air blower)

2. โรตاميเตอร์ (rotameter) แสดงอัตราการป้อนอากาศปฐมภูมิ ใช้โรตاميเตอร์ยี่ห้อ Dwyer ในการควบคุมปริมาณการป้อนอากาศปฐมภูมิที่ใช้สำหรับการเผาไหม้เชื้อเพลิง และใช้โรตاميเตอร์ยี่ห้อ TOMATO ในการควบคุมปริมาณการป้อนอากาศทุติยภูมิดังแสดงไว้ในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 โรตاميเตอร์แสดงอัตราการป้อนอากาศ

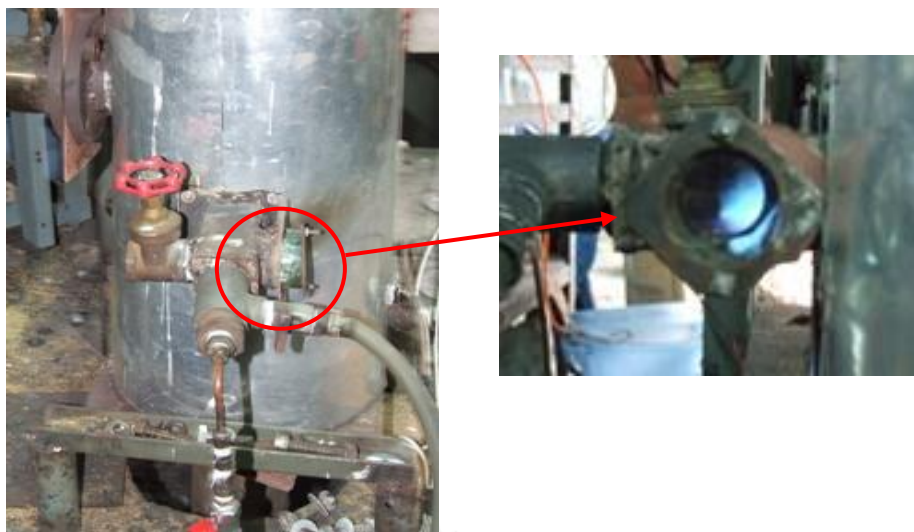
3. ท่อโรเซอร์ (riser) ท่อโรเซอร์ที่ใช้ประกอบด้วยท่อ 2 ส่วน คือ ส่วนบนและส่วนล่าง โดยส่วนล่างของเตาเผา นั้นสร้างโดยการหล่อด้วยซีเมนต์ทนไฟ ผนังท่อมีความหนา 5 เซนติเมตร และมีความสูง 2 เมตร ส่วนด้านบนของโรเซอร์สร้างด้วยเหล็กกล้าไร้สนิม ผนังท่อ มีความหนา 3 มิลลิเมตร และมีความสูง 1 เมตร โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของเตาเผาทั้งส่วนบนและส่วนล่าง คือ 10 เซนติเมตร โดยตลอดช่วงของความสูงของโรเซอร์จะมีช่องสำหรับใส่เทอร์โมคัปเปิลเพื่อวัดอุณหภูมิ และต่อท่อสำหรับดึงแก๊สเพื่อเก็บตัวอย่างของแก๊สที่เกิดจากการเผาไหม้มาวิเคราะห์ ท่อโรเซอร์ที่ใช้ในการทดลองแสดงไว้ในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 ท่อโรเซอร์ของเตาเผาฟลูอิดไชน์เบดแบบหมุนเวียน

4. แผ่นกระจายอากาศ (distributor) เป็นแผ่นตะแกรง มีความละเอียดขนาด 250 ไมโครเมตรซ้อนอยู่กับแผ่นตะแกรงชนิดหยาบ เพื่อให้อากาศเกิดการกระจายตัวที่สม่ำเสมอตลอดพื้นที่หน้าตัดและเพื่อป้องกันทรายรวมทั้งเชื้อเพลิงและเถ้าหล่นลงสู่ด้านล่างของท่อโรเซอร์

5. หัวเผา (burner) ติดตั้งอยู่ที่ตำแหน่งความสูง 0.25 เมตรเหนือแผ่นกระจายอากาศ ใช้สำหรับอุ่นเตาเผาในช่วงเริ่มต้นของการจุดเตาเผา โดยใช้แก๊สหุงต้ม (LPG) เป็นเชื้อเพลิง และใช้อากาศจากเครื่องอัดอากาศ (air compressor) ในการเผาไหม้แก๊สหุงต้ม โดยด้านข้างของหัวเผ่าจะติดตั้งกระจกสำหรับดูเปลวไฟจากหัวเผ่าดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 หัวเผาและกระจกมองเปลวไฟ

6. อุปกรณ์สำหรับป้อนเชื้อเพลิง (รูปที่ 3.7) เป็นเครื่องป้อนเชื้อเพลิงแบบสกรูพีด-เตอร์ มีทั้งหมด 2 ตัวแต่ละตัวประกอบด้วยถังบรรจุเชื้อเพลิง (hopper) และเกลียวขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเกลียวป้อน 4.8 เซนติเมตรสำหรับลำเลียงเชื้อเพลิงเข้าสู่เตาเผา ระบบการป้อนเชื้อเพลิงถูกขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์กำลังขนาด 2 แรงม้า ไฟฟ้า 3 เฟส อัตราการหมุนสูงสุด 1400 รอบต่อนาที ความเร็วของมอเตอร์ถูกควบคุมด้วยอินเวอร์เตอร์ (inverter) โดยตำแหน่งป้อนเชื้อเพลิงอยู่สูงจากแผ่นกระจายอากาศ 0.35 เมตร



รูปที่ 3.7 ระบบป้อนเชื้อเพลิง (fuel feeder system)

7. กระจกด้านข้างสำหรับดูภายในเตาเผาขณะเผาไหม้แสดงไว้ดังรูปที่ 3.8 อยู่ที่ตำแหน่ง 0.60 เมตร เหนือจากแผ่นกระจายอากาศ



รูปที่ 3.8 กระจกสำหรับดูภายในห้องเผาไหม้

8. เครื่องอัดอากาศ (air compressor) สำหรับป้อนอากาศให้หัวเผาและป้อนเป็นอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ที่ตำแหน่งการป้อนอากาศทุติยภูมิแสดงไว้ดังรูปที่ 3.9 โดยใช้มอเตอร์ 3 เฟส กำลังขนาด 15 แรงม้าหรือ 11.2 กิโลวัตต์ ลูกสูบมี bore 120 มิลลิเมตร และ stroke

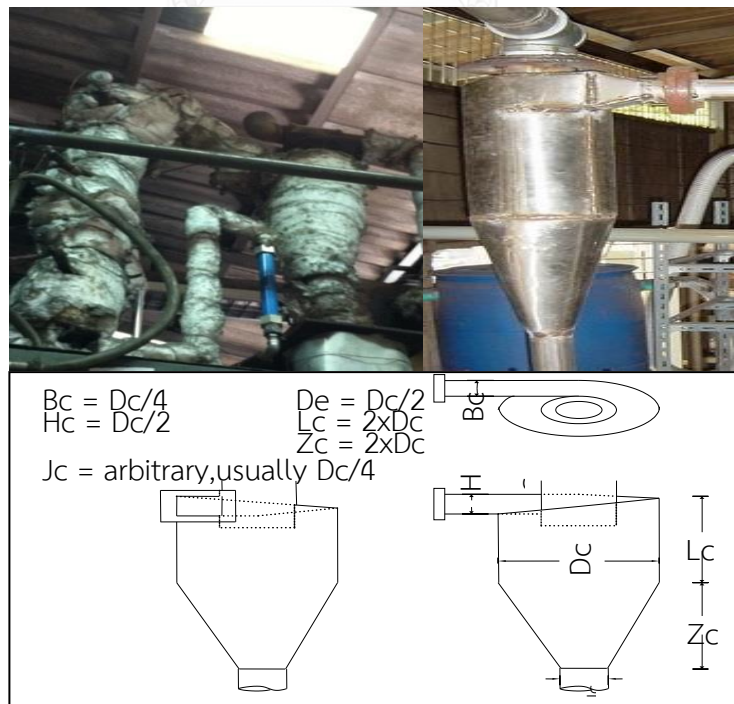


80 มิลลิเมตร ความเร็วรอบ 860 รอบต่อนาทีที่ความถี่ 50 Hz ขนาดถังเส้นผ่านศูนย์กลางคูณความยาวเป็น 0.485x1.770 เมตร ความจุถัง 304 ลิตร ความดันที่ใช้งาน 12 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และความดันสูงสุด 15 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร พร้อมอุปกรณ์ทำความเย็นอากาศและระบบกำจัดน้ำในอากาศ



รูปที่ 3.9 เครื่องอัดอากาศ พร้อมอุปกรณ์ทำความเย็นอากาศและระบบกำจัดน้ำในอากาศ

9.ไซโคลน (cyclone) (รูปที่ 3.10) ทำหน้าที่แยกอนุภาคของแข็ง เช่น ทราย เชื้อเพลิงที่เผาไหม้ไม่หมด และเถ้าบางส่วนออกจากแก๊ส



รูปที่ 3.10 ไซโคลน (cyclone) [25]

- ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม
- เส้นผ่านศูนย์กลางของกระบอกไซโคลน ( $D_c$ ) = 20 เซนติเมตร
- ทางเข้าของแก๊สและอนุภาค ( $B_c \times H_c$ ) =  $5 \times 10$  เซนติเมตร
- เส้นผ่านศูนย์กลางทางออกของแก๊ส ( $D_e$ ) = 10 เซนติเมตร
- ความสูงของกระบอกไซโคลน ( $L_c$ ) = 40 เซนติเมตร
- ความสูงของกรวยไซโคลน ( $Z_c$ ) = 40 เซนติเมตร
- เส้นผ่านศูนย์กลางทางออกของอนุภาค ( $J_c$ ) = 5 เซนติเมตร

10. ระบบป้อนกลับของแข็ง ประกอบไปด้วย 2 ส่วน คือ ท่อป้อนกลับและแอลวาล์ว ดังแสดงไว้ในรูปที่ 3.11

- ท่อป้อนกลับ (downcomer) ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมหนา 2 มิลลิเมตร สูง 1.6 เมตร มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 20 เซนติเมตร เป็นส่วนเชื่อมต่อระหว่างไซโคลนกับแอลวาล์ว ด้านล่างของท่อป้อนกลับมีวาล์วสำหรับปล่อยแก๊สออกจากระบบ

- แอลวาล์ว (L-valve) ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม โดยใช้ท่อที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 นิ้ว โดยทำมุม 45 องศา กับแนวระดับ และใช้วาล์วปีกผีเสื้อ (butterfly valve) ในการควบคุมการป้อนกลับของของแข็ง



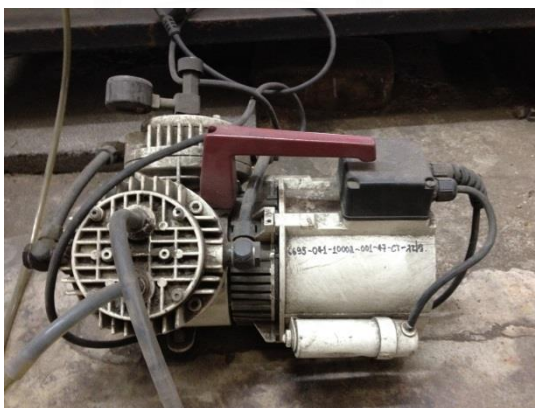
รูปที่ 3.11 ท่อป้อนกลับ (ท่อทาง ด้านขวา) และแอลวาล์ว (วาล์วปีกผีเสื้อ)

11. แผงหน้าจอบอกแสดงอุณหภูมิภายในเตาเผาและวาล์วสำหรับดึงแก๊สออกจากระบบเพื่อนำไปวัดองค์ประกอบของแก๊ส แสดงไว้ดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 หน้าจอบอกแสดงอุณหภูมิและวาล์วสำหรับดึงแก๊สออกจากระบบ

12. ปั๊มสุญญากาศ (vacuum pump) ใช้สำหรับดึงแก๊สออกจากระบบการเผาไหม้เพื่อทำการวัดองค์ประกอบของแก๊ส ปั๊มสุญญากาศที่ใช้ในการทดลองแสดงไว้ดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 ปั๊มสุญญากาศ (vacuum pump)

13. เครื่องวิเคราะห์ห้องค์ประกอบของแก๊สเผาไหม้ (flue gas analyzer) (รูปที่ 3.14) ยี่ห้อ Madur รุ่น GA-40T plus สามารถวัดแก๊สเผาไหม้ได้ 5 ชนิดคือ คาร์บอนมอนอกไซด์

(CO), ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ( $\text{SO}_2$ ), คาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ), ไนตริกออกไซด์ (NO) และ ออกไซด์ของไนโตรเจน ( $\text{NO}_x$ )



รูปที่ 3.14 เครื่องวิเคราะห์ห้องค์ประกอบของแก๊สเผาไหม้ (flue gas analyzer)

### 3.2 วิธีการทดลอง

#### 3.2.1 การเตรียมเชื้อเพลิงและทราย

- 3.2.1.1 ทรายขนาดอนุภาค 350-450 ไมโครเมตร จากห้างหุ้นส่วนจำกัด ตั้งชะฮวด จังหวัดระยอง
- 3.2.1.2 บดถ่านหินและคัดขนาดให้ต่ำกว่า 1.2 มิลลิเมตร ถ่านหินได้รับการสนับสนุนจากบริษัท บ้านปู จำกัด(มหาชน)
- 3.2.1.3 บดกะลามะพร้าวและคัดขนาดให้ต่ำกว่า 1.2 มิลลิเมตร
- 3.2.1.4 นำถ่านหินและกะลามะพร้าวที่บดเตรียมไว้แล้วไปวิเคราะห์ห้องค์ประกอบโดยประมาณ (proximate) และองค์ประกอบแบบแยกธาตุ (ultimate) พร้อมทั้งหาค่าปริมาณความร้อน
- 3.2.1.5 ปรับเทียบสกรูพีดีเตอร์ที่ใช้สำหรับการป้อนเชื้อเพลิง

#### 3.2.2 การจุดเตาและดำเนินการทดลอง

- 3.2.2.1 ปิดแอลวาล์ว และปิดวาล์วด้านล่างของท่อป้อนกลับ แล้วป้อนทรายเข้าไปทางด้านของท่อป้อนกลับปริมาณ 25 กิโลกรัม
- 3.2.2.2 อุ่นเตาเผา (ไรเซอร์) ด้วยแก๊สหุงต้ม โดยป้อนอากาศที่หัวจุดเตาจากเครื่องอัดอากาศด้วยอัตราการไหล 200 ลิตรต่อนาที คอยสังเกตเปลวไฟที่หัวจุดเตาว่ายังคงมีเปลวไฟสีฟ้าติดอยู่ผ่านการมองจากกระจกด้านข้าง หากไฟดับให้หยุดป้อนแก๊สหุงต้ม ทันทีแล้วเริ่มจุดเตาใหม่ รอจนกระทั่งอุณหภูมิที่ตำแหน่งเบอร์ 2 (0.9 เมตร) สูงถึง 600 องศาเซลเซียส

3.2.2.3 ป้อนอากาศปฐมภูมิจากเครื่องเป่าอากาศ (blower) 680 ลิตรต่อนาที เข้าทางด้านล่างของโรเตอร์ผ่านแผ่นกระจายอากาศ พร้อมทั้งเปิดแอลวาล์วเพื่อให้ทรายใน ท่อป้อนกลับไหลเข้าสู่ส่วนล่างโรเตอร์ จนกระทั่งอุณหภูมิตลอดโรเตอร์อยู่ที่ประมาณ 600 องศาเซลเซียส

3.2.2.4 ป้อนถ่านหินที่อัตรา 7 กิโลกรัมต่อชั่วโมง รอกจนกระทั่งอุณหภูมิที่ตำแหน่งเบอร์ 2 (0.9 เมตร) ได้ 900 องศาเซลเซียส

3.2.2.5 หยุดป้อนแก๊สหุงต้ม และอากาศที่หัวจุดเตา

3.2.2.6 ป้อนอากาศทุติยภูมิและเชื้อเพลิงตามสภาวะที่ออกแบบไว้ใช้ในการทดลอง เดิมเชื้อเพลิงเข้าถึงป้อนอยู่เสมอ รอกจนกระทั่งอุณหภูมิในโรเตอร์คงที่ แล้วบันทึกผลการทดลอง (อัตราการป้อนเชื้อเพลิง อัตราการป้อนอากาศ อุณหภูมิ และองค์ประกอบของแก๊สเผาไหม้)

- อัตราการป้อนเชื้อเพลิง อ่านค่าด้วย อินเวอร์เตอร์ (ตัวปรับความเร็วของสกรูพิดเดอร์) หน้าจอแสดงผลแบบดิจิทัล
- อัตราการป้อนอากาศปฐมภูมิ อ่านค่าด้วย โรตารีมิเตอร์
- อัตราการป้อนอากาศทุติยภูมิ อ่านค่าด้วย โรตารีมิเตอร์
- อุณหภูมิวัดด้วยเทอร์โมคัปเปิล หน้าจอแสดงผลแบบดิจิทัล
- องค์ประกอบของแก๊สเผาไหม้

■ CO, NO<sub>x</sub> อ่านค่าด้วยเครื่อง Flue gas Analyzer

3.2.2.7 เปลี่ยนภาวะการทดลองใหม่ตามที่ออกแบบไว้ จนกระทั่งอุณหภูมิในโรเตอร์คงที่อีกครั้ง บันทึกผลการทดลอง

3.2.2.8 ทำซ้ำข้อที่ 3.2.2.7 จนกระทั่งเสร็จสิ้นการทดลอง

### 3.2.3 การปิดเตาเผา

3.2.3.1 ปิดแอลวาล์ว หยุดการป้อนเชื้อเพลิง

3.2.3.2 เมื่ออุณหภูมิในโรเตอร์เหลือประมาณ 400 องศาเซลเซียส ปิดอากาศปฐมภูมิ

3.2.3.3 เมื่ออุณหภูมิในโรเตอร์เหลือประมาณ 200 องศาเซลเซียส หยุดการป้อนอากาศทั้งหมด

3.2.3.4 ถ่ายทรายในท่อป้อนกลับออกมาทางวาล์วด้านล่างของท่อป้อนกลับ

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับตัวแปรต่างๆ ในการดำเนินการเผาไหม้ของถ่านหิน และถ่านหินผสมชีวมวลที่ส่งผลต่อการเกิดไนโตรเจนออกไซด์จากการเผาไหม้ โดยมีตัวแปรที่ศึกษา คือ สัดส่วนของเชื้อเพลิงผสมระหว่างถ่านหินและชีวมวล อัตราส่วนของอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ ระหว่างอากาศปฐมภูมิ (primary air) และอากาศทุติยภูมิ (secondary air) ตำแหน่งในการป้อนอากาศทุติยภูมิ และการปรับอัตราส่วนของอากาศทุติยภูมิในการป้อนอากาศทุติยภูมิแบบหลายชั้น โดยดำเนินการทดลองในเตาเผาไหม้ฟลูอิดเบดแบบหมุนเวียน เชื้อเพลิงที่ถูกใช้ในงานวิจัยนี้คือ ถ่านหินซับบิทูมินัสที่ได้รับการสนับสนุนจากบริษัท บ้านปู จำกัด(มหาชน) และกะลามะพร้าว

#### 4.1 สมบัติของเชื้อเพลิง

ก่อนการทดลอง เชื้อเพลิงที่จะใช้ในการทดลองจะถูกนำไปวิเคราะห์หาองค์ประกอบ โดยประมาณเพื่อหาปริมาณของคาร์บอนคงตัว สารระเหย ความชื้น และเถ้าที่มีอยู่ของเชื้อเพลิง และวิเคราะห์หาองค์ประกอบโดยแยกธาตุเพื่อหาปริมาณของธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน ซัลเฟอร์ และไนโตรเจนที่เป็นองค์ประกอบที่อยู่ในเชื้อเพลิง ผลการวิเคราะห์ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.1 และตารางที่ 4.2 ตามลำดับ ข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์องค์ประกอบของเชื้อเพลิงจะถูกนำไปคำนวณหาปริมาณอากาศที่ต้องใช้สำหรับการเผาไหม้

#### 4.2 การปรับเทียบสกรูฟีดเดอร์ (screw feeder) และอินเวอร์เตอร์ (inverter)

ในงานวิจัยนี้เชื้อเพลิงที่จะถูกป้อนโดยใช้สกรูฟีดเดอร์ในการลำเลียงเข้าสู่เตาเผา ซึ่งถูกควบคุมด้วยอินเวอร์เตอร์ (inverter) ทำหน้าที่ควบคุมความเร็วในการป้อนเชื้อเพลิงของสกรูฟีดเดอร์ มีหน่วยเป็นเฮิร์ต (Hz) แต่ในการทดลองความเร็วที่ใช้สำหรับป้อนเชื้อเพลิงมีหน่วยเป็นกิโลกรัมต่อชั่วโมง จึงต้องทำการปรับเทียบสกรูฟีดเดอร์และอินเวอร์เตอร์เพื่อเปรียบเทียบความเร็วที่ป้อนในหน่วยเฮิร์ตและกิโลกรัมต่อชั่วโมง ซึ่งได้ทำการปรับเทียบทั้งสกรูฟีดเดอร์ที่ป้อนถ่านหินและกะลามะพร้าว ผลการปรับเทียบสกรูฟีดเดอร์และอินเวอร์เตอร์แสดงไว้ในรูปที่ 4.1 และ 4.2

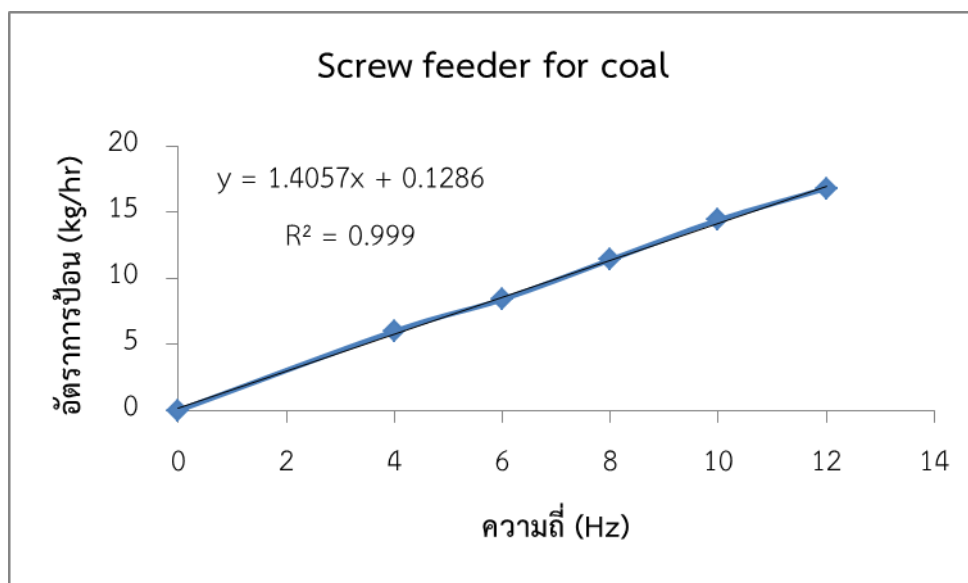
ตามลำดับ สาเหตุที่ต้องทำการแยกสกรูฟิตเตอร์ออกเป็น 2 ชุด เนื่องจากในการป้อนเชื้อเพลิงผสมนั้นถ้าผสมเชื้อเพลิงเข้าด้วยกันก่อนแล้วป้อนด้วยสกรูฟิตเตอร์ตัวเดียวกัน เชื้อเพลิงที่มีความหนาแน่นมากกว่าจะออกมาจากสกรูฟิตเตอร์ก่อนเชื้อเพลิงที่มีความหนาแน่นน้อยกว่า ทำให้เกิดการแยกกันของเชื้อเพลิงผสมจึงต้องแยกสกรูฟิตเตอร์ออกเป็น 2 ชุด เพื่อให้สามารถควบคุมอัตราการป้อนเชื้อเพลิงผสมเข้าไปในเตาเผาได้แม่นยำขึ้น

ตารางที่ 4.1 ผลวิเคราะห์โดยประมาณ (proximate analysis) และค่าความร้อน (heating value) ของถ่านหินและกะลามะพร้าว

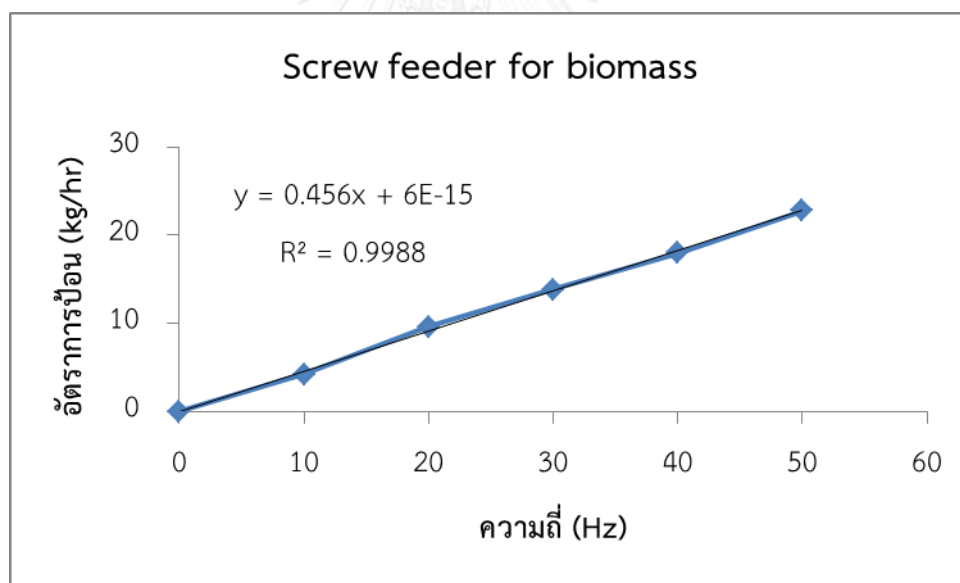
Proximate analysis		
(as received)	Coal	Coconut shell
Fixed carbon [wt%]	43.93	23.96
Volatile matter [wt%]	41.16	62.29
Moisture [wt%]	12.08	11.84
Ash [wt%]	2.83	1.91
Heating value [MJ/kg]	19.3	17.8

ตารางที่ 4.2 ผลวิเคราะห์โดยแยกธาตุ (ultimate analysis) ของถ่านหินและกะลามะพร้าว

Ultimate analysis		
(dry ash free)	Coal	Coconut shell
C [wt%]	71.75	49.69
H [wt%]	7.08	7.44
N [wt%]	1.27	0.22
O [wt%]	19.67	42.65
S [wt%]	0.24	0.00



รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ (Hz) ของอินเวอร์เตอร์ (Inverter) และอัตราการป้อนถ่านหินของสกรูฟีดเดอร์ (Screw feeder)



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ (Hz) ของอินเวอร์เตอร์ (Inverter) และอัตราการป้อนกะลามะพร้าวของสกรูฟีดเดอร์ (Screw feeder)

ในการทดลอง อัตราเร็วของการป้อนเชื้อเพลิงที่ใช้คือ 7 กิโลกรัมต่อชั่วโมง จากผลการเปรียบเทียบสกรูฟีดเดอร์กับอินเวอร์เตอร์ ทำให้ทราบค่าในการปรับอินเวอร์เตอร์เพื่อให้ได้อัตราเร็วของการป้อนเชื้อเพลิงตามที่ต้องการได้ ดังนั้น ในการป้อนถ่านหินที่อัตราเร็ว 7 กิโลกรัมต่อชั่วโมง



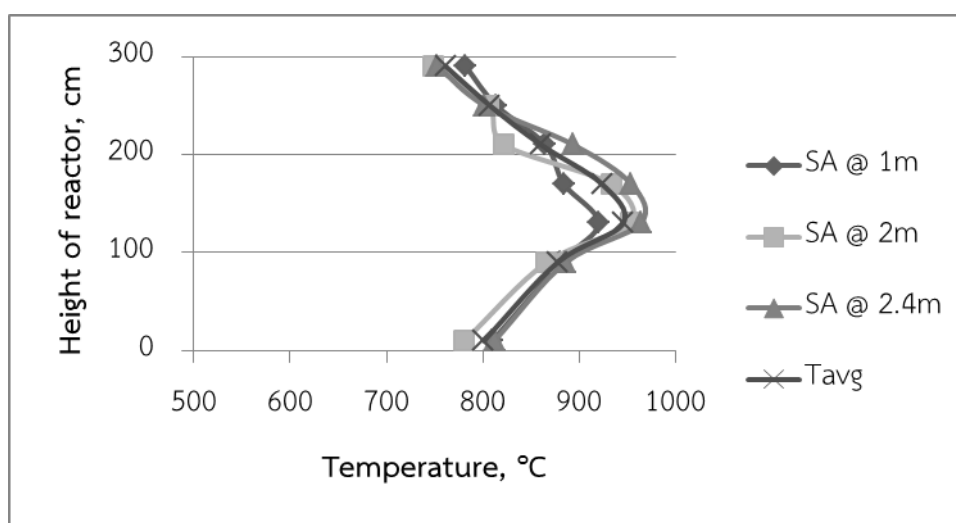
จะต้องทำการปรับค่าของอินเวอร์เตอร์ไว้ที่ 4.89 เฮิร์ต และในส่วนของกาเหาใหม่เชื้อเพลิงผสมถ่านหินและชีวมวลนั้น อัตราส่วนผสมที่ใช้คือ ถ่านหินร้อยละ 50 และชีวมวลร้อยละ 50 ดังนั้นจะต้องป้อนถ่านหินและชีวมวลที่อัตราเร็ว 3.5 กิโลกรัมต่อชั่วโมง จึงต้องปรับค่าของอินเวอร์เตอร์สำหรับการป้อนถ่านหินและชีวมวลไว้ที่ 2.39 เฮิร์ต และ 7.68 เฮิร์ต ตามลำดับ

#### 4.3 ผลการทดลองการเผาไหม้ถ่านหินในระบบการเผาไหม้แบบชั้นเดียว

##### 4.3.1 อุณหภูมิเผาไหม้เฉลี่ยตลอดความสูงของโรเซออร์เมื่อศึกษาตำแหน่งการป้อนอากาศทุติยภูมิต่อการเผาไหม้ถ่านหิน

จากข้อมูลการวัดอุณหภูมิการเผาไหม้ถ่านหินตามความสูงของโรเซออร์ที่ตำแหน่งต่างๆ เมื่อทำการป้อนถ่านหินที่อัตรา 7 กิโลกรัมต่อชั่วโมง โดยป้อนอากาศรวมในการเผาไหม้ที่อัตราการไหล 860 ลิตรต่อนาที แบ่งออกเป็นการป้อนอากาศปฐมภูมิที่อัตราการไหล 600 ลิตรต่อนาที และอัตราการป้อนอากาศทุติยภูมิ 260 ลิตรต่อนาที ซึ่งได้แบ่งตำแหน่งในการป้อนอากาศทุติยภูมิออกเป็น 3 ตำแหน่ง คือ ที่ระยะความสูง 1 เมตร 2 เมตร และ 2.4 เมตร สูงจากแผ่นกระจายอากาศตามลำดับ สามารถสร้างเป็นกราฟได้ดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 4.3 เมื่อพิจารณากราฟจะพบว่าในช่วงแรกของการเผาไหม้ถ่านหินนั้น (บริเวณด้านล่างของโรเซออร์) การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิมีแนวโน้มการเพิ่มขึ้นที่เหมือนกัน และมีอุณหภูมิอยู่ในช่วงประมาณ 780-900 องศาเซลเซียส เหนือตำแหน่งความสูง 1 เมตรขึ้นไปจะสังเกตเห็นความแตกต่างของอุณหภูมิเกิดขึ้น นั่นคือ การป้อนอากาศทุติยภูมิที่ตำแหน่งที่ต่างกัน ส่งผลทำให้แนวโน้มของอุณหภูมิส่วนบนของโรเซออร์มีความแตกต่างกัน สำหรับการป้อนอากาศทุติยภูมิที่ตำแหน่งความสูง 1 เมตร ในภาวะการทดลองนี้อุณหภูมิการเผาไหม้จะต่ำที่สุด โดยเมื่อทำการป้อนอากาศทุติยภูมิเข้าไปจะทำให้อุณหภูมิเหนือตำแหน่งความสูง 1 เมตรขึ้นไปลดลงต่ำกว่าภาวะการทดลองอื่น เนื่องจากอากาศที่ป้อนเข้าไปนั้นเป็นอากาศเย็น และที่ตำแหน่งที่สูงขึ้นไปอุณหภูมิก็ค่อยๆ ลดลงตามความสูงของโรเซออร์ เช่นเดียวกับการป้อนอากาศทุติยภูมิที่ตำแหน่งความสูง 2 เมตร อุณหภูมิของภาวะการทดลองนี้จะลดลงอย่างชัดเจนที่ตำแหน่งความสูงนี้ และค่อยๆ ลดลงตามความสูงของโรเซออร์ที่เพิ่มขึ้น ส่วนในภาวะการทดลองที่ป้อนอากาศทุติยภูมิที่ตำแหน่ง 2.4 เมตรนั้น อากาศทุติยภูมิที่ป้อนเข้าไปนั้นไม่ส่งผลต่ออุณหภูมิเท่าไรนัก ในการป้อนอากาศทุติยภูมิที่ตำแหน่งความสูง 1 เมตร 2 เมตร และ 2.4 เมตรนั้น ที่ความสูง 1.3 เมตรมีอุณหภูมิ

การเผาไหม้สูงที่สุด คือประมาณ 920 องศาเซลเซียส 950 องศาเซลเซียส และ 960 องศาเซลเซียส ตามลำดับ นั้นแสดงให้เห็นว่าที่ตำแหน่งนี้เกิดการเผาไหม้ได้ดีที่สุด และที่ความสูงเหนือจากตำแหน่งนี้ อุณหภูมิการเผาไหม้ที่ลดลงน่าจะเป็นผลจากการถ่ายเทความร้อนไปสู่ผนังของเครื่องปฏิกรณ์ออกไปสู่สิ่งแวดล้อม เพราะเครื่องปฏิกรณ์ไม่มีฉนวนที่สมบูรณ์ โดยเฉพาะที่ตำแหน่งความสูง 2 เมตรขึ้นไป อุณหภูมิจะลดลงอย่างรวดเร็ว



รูปที่ 4.3 อุณหภูมิตามความสูงของโรเซอร์ของการเผาไหม้ถ่านหินที่มีการปรับตำแหน่งการป้อนอากาศทุติยภูมิ โดยป้อนอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้รวม 860 ลิตรต่อนาที แบ่งเป็นอากาศปฐมภูมิ 600 ลิตรต่อนาที และอากาศทุติยภูมิ 260 ลิตรต่อนาที (หมายเหตุ SA คือ secondary air)

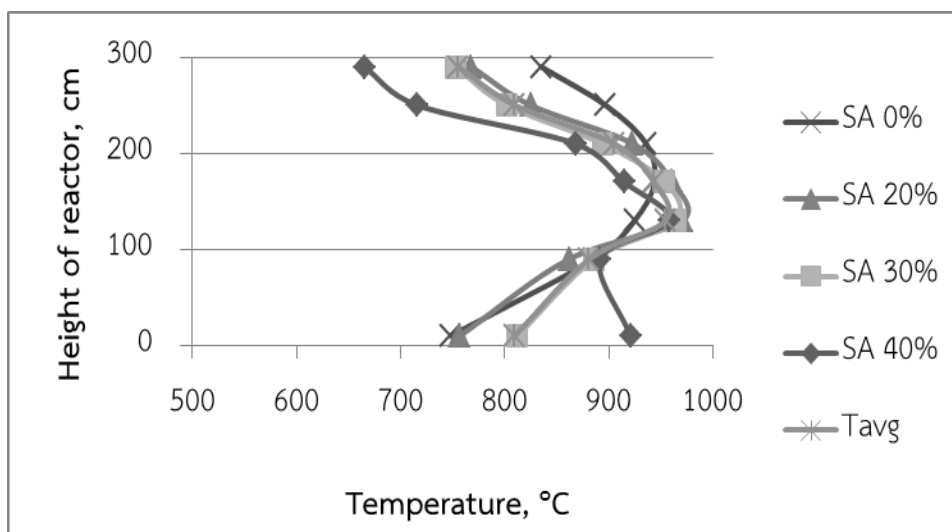
#### 4.3.2 อุณหภูมิเผาไหม้เฉลี่ยตลอดความสูงของโรเซอร์เมื่อศึกษาปริมาณการป้อนอากาศทุติยภูมิต่อการเผาไหม้ถ่านหิน

ในการทดลองนี้จะกำหนดตำแหน่งในการป้อนอากาศทุติยภูมิไว้ที่ค่าความสูงหนึ่ง นั่นคือที่ตำแหน่งความสูง 2.4 เมตร แล้วจะป้อนอากาศทุติยภูมิที่ปริมาณแตกต่างกัน 3 ค่า โดยที่ยังคงใช้อากาศรวมในการเผาไหม้ในปริมาณที่เท่าเดิมไว้ทุกภาวะการทดลอง คือ 860 ลิตรต่อนาที และเปรียบเทียบกับ การเผาไหม้โดยไม่มีการป้อนอากาศทุติยภูมิ ภาวะการทดลองได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ภาวะที่ใช้ในการทดลองสำหรับศึกษาตำแหน่งการป้อนอากาศทุติยภูมิต่อการเผาไหม้ ถ่านหิน อากาศรวมที่ใช้ในการเผาไหม้ คือ 860 ลิตรต่อนาที

ภาวะการทดลองที่	อากาศปฐมภูมิ (ลิตรต่อนาที)	อากาศทุติยภูมิ (ลิตรต่อนาที)
1	860	0
2	680	180
3	600	260
4	510	350

จากผลการวัดอุณหภูมิสำหรับศึกษาปริมาณในการป้อนอากาศทุติยภูมิต่อการเผาไหม้ถ่านหิน ข้อมูลที่ได้จากการทดลองสามารถนำมาสร้างเป็นกราฟดังรูปที่ 4.4 จะสังเกตได้ว่าอุณหภูมิที่จุดเริ่มต้นของการเผาไหม้ในแต่ละภาวะนั้นมีความแตกต่างกัน ทั้งนี้จะเป็นผลเนื่องมาจากความเร็วในการป้อนอากาศปฐมภูมิ ที่อัตราในการป้อนอากาศปฐมภูมิต่ำส่งผลทำให้อุณหภูมิของถ่านหินเคลื่อนที่ขึ้นไปได้ช้า จึงเกิดการเผาไหม้ได้มากที่บริเวณด้านล่างของโรเตอร์ส่งผลให้อัตราการป้อนอากาศปฐมภูมิ 510 ลิตรต่อนาทีมีอุณหภูมิของการเผาไหม้ที่บริเวณเริ่มการเผาไหม้สูง คือ ประมาณ 950 องศาเซลเซียส ส่วนที่อัตราการป้อนอากาศปฐมภูมิ 680 ลิตรต่อนาที และ 600 ลิตรต่อนาที มีอุณหภูมิประมาณ 960 องศาเซลเซียส และ 955 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ทั้ง 3 ภาวะการทดลองมีอุณหภูมิสูงสุดที่ตำแหน่ง 1.3 เมตร แสดงให้เห็นว่าที่ตำแหน่งนี้เกิดการเผาไหม้ได้ดีที่สุด และหลังจากตำแหน่งนี้ขึ้นไปอุณหภูมิของทั้ง 3 ภาวะการทดลองก็ลดลงไปตามความสูงของโรเตอร์ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากเกิดการถ่ายเทความร้อนออกไปสู่สิ่งแวดล้อม แต่ในภาวะที่ป้อนอากาศทุติยภูมิ 350 ลิตรต่อนาทีนั้น อุณหภูมิจะลดลงเร็วกว่าที่ภาวะอื่น เนื่องจากอากาศเย็นที่ป้อนนั้นมีปริมาณมาก ซึ่งไปทำให้ความร้อนถ่ายเทออกนอกเตาได้เร็วยิ่งขึ้น อุณหภูมิที่ส่วนปลายจึงต่ำกว่าที่ภาวะอื่น และเมื่อเปรียบเทียบกับ การเผาไหม้ถ่านหินโดยไม่มีการป้อนอากาศทุติยภูมิจะพบว่าถ่านหินจะเกิดการเผาไหม้ได้ดีที่บริเวณความสูง 1.7 เมตรเหนือจากแผ่นกระจายอากาศ โดยมีอุณหภูมิอยู่ที่ประมาณ 940 องศาเซลเซียส แล้วหลังจากตำแหน่งความสูงนี้ อุณหภูมิก็จะลดลงไปตามความสูงที่เพิ่มขึ้นแต่ยังคงมีอุณหภูมิก่อนออกจากโรเตอร์ที่สูงกว่าในภาวะการเผาไหม้ที่มีการป้อนอากาศทุติยภูมิ



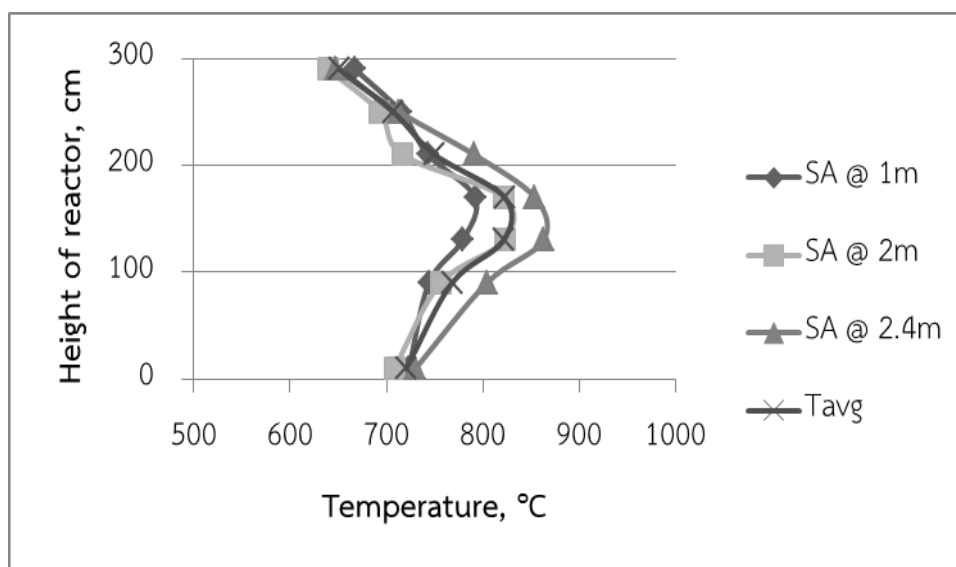
รูปที่ 4.4 อุณหภูมิตามความสูงของโรเซอร์ของการเผาไหม้เชื้อเพลิงผสมถ่านหินและชีวมวลที่มีการปรับสัดส่วนในการป้อนอากาศที่แตกต่างกัน โดยป้อนอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้รวม 860 ลิตรต่อนาที

(หมายเหตุ SA คือ secondary air)

#### 4.3.3 อุณหภูมิเผาไหม้เฉลี่ยตลอดความสูงของโรเซอร์เมื่อศึกษาตำแหน่งการป้อนอากาศ ทุติยภูมิต่อการเผาไหม้เชื้อเพลิงผสมถ่านหินและชีวมวล

การเผาไหม้เชื้อเพลิงผสมถ่านหินและชีวมวล จะผสมถ่านหินร้อยละ 50 และกะลามะพร้าว ร้อยละ 50 ใช้อากาศในการเผาไหม้รวม 720 ลิตรต่อนาที โดยแบ่งเป็นอากาศปฐมภูมิ 500 ลิตรต่อนาที และอากาศทุติยภูมิ 220 ลิตรต่อนาที ผลการทดลองของอุณหภูมิการเผาไหม้เชื้อเพลิงผสมถ่านหินและกะลามะพร้าวที่ได้จากการทดลองในภาชนะนี้สามารถนำข้อมูลสร้างเป็นกราฟแสดงไว้ในรูปที่ 4.5 จากกราฟจะเห็นได้ว่าอุณหภูมิการเผาไหม้จะค่อยๆ เพิ่มขึ้น และมีอุณหภูมิสูงสุดที่ตำแหน่งความสูงประมาณ 1.5 เมตร เป็นตำแหน่งที่เกิดการเผาไหม้ได้ดีที่สุด ซึ่งอยู่สูงจากตำแหน่งการเผาไหม้ที่ดีที่สุดของการเผาไหม้ถ่านหิน (1.3 เมตร) อาจจะเป็นเพราะว่าชีวมวลมีการปลดปล่อยสารระเหยได้มากกว่าถ่านหิน และสารระเหยเหล่านั้นสามารถเคลื่อนที่ไปสู่ด้านบนได้เร็วจึงทำให้ตำแหน่งที่อุณหภูมิการเผาไหม้สูงสุดอยู่สูงกว่าตำแหน่งของอุณหภูมิการเผาไหม้สูงสุดของถ่านหิน โดยภาวะที่ป้อนอากาศทุติยภูมิที่ตำแหน่งความสูง 1 เมตร มีอุณหภูมิประมาณ 790 องศาเซลเซียส ภาวะที่ป้อนอากาศทุติยภูมิที่ตำแหน่งความสูง 2 เมตร มีอุณหภูมิประมาณ 820 องศาเซลเซียส และที่

ภาวะการป้อนอากาศทุติยภูมิที่ตำแหน่งความสูง 2.4 เมตร มีอุณหภูมิประมาณ 850 องศาเซลเซียส สาเหตุที่เมื่อเพิ่มความสูงของตำแหน่งในการป้อนอากาศทุติยภูมิแล้วส่งผลให้อุณหภูมิการเผาไหม้ที่ตำแหน่งความสูง 1.5 เมตรเพิ่มขึ้น เนื่องจากการป้อนอากาศทุติยภูมิที่เป็นอากาศเย็นจะไปทำให้อุณหภูมิในการเผาไหม้ในบริเวณที่ป้อนอากาศเข้าไป และบริเวณใกล้เคียงมีอุณหภูมิที่ต่ำลง ซึ่งการป้อนอากาศทุติยภูมิที่ตำแหน่ง 2.4 เมตรนั้น อยู่ห่างจากบริเวณที่มีการเผาไหม้สูงสุดจึงไม่ส่งผลต่ออุณหภูมิในตำแหน่งนั้น หรืออาจจะส่งผลเพียงเล็กน้อยเท่านั้น



รูปที่ 4.5 อุณหภูมิตามความสูงของโรเซอร์ของการเผาไหม้เชื้อเพลิงผสมถ่านหินและชีวมวลที่สัดส่วน 50 : 50 ที่มีการปรับตำแหน่งการป้อนอากาศทุติยภูมิ โดยป้อนอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้รวม 720 ลิตรต่อนาที แบ่งเป็นอากาศปฐมภูมิ 500 ลิตรต่อนาที และอากาศทุติยภูมิ 220 ลิตรต่อนาที

(หมายเหตุ SA คือ secondary air)

#### 4.3.4 อุณหภูมิเผาไหม้เฉลี่ยตลอดความสูงของโรเซอร์เมื่อศึกษาปริมาณการป้อนอากาศทุติยภูมิต่อการเผาไหม้เชื้อเพลิงผสมถ่านหินและชีวมวล

การศึกษาปริมาณการป้อนอากาศทุติยภูมิต่อการเผาไหม้เชื้อเพลิงผสมนั้น ใช้อากาศรวมในการป้อนที่อัตราการไหล 720 ลิตรต่อนาที และทำการป้อนที่ตำแหน่งความสูง 2.4 เมตร เหนือแผ่นกระจายอากาศ โดยภาวะที่ใช้ในการทดลองแสดงไว้ในตารางที่ 4.4

ผลของอุณหภูมิที่บันทึกไว้จากการทดลองสามารถนำมาสร้างเป็นกราฟที่แสดงไว้ดังรูปที่ 4.6 จากกราฟแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิในการเผาไหม้เชื้อเพลิงผสมโดยการปรับเปลี่ยนอัตราการป้อนอากาศหตุยภูมิต่างกันนั้นมีแนวโน้มที่เหมือนกัน นั่นคือ อุณหภูมิจะค่อยๆ สูงขึ้นจนถึงค่าสูงสุด (1.5 เมตร) แล้วหลังจากนั้นอุณหภูมิจะลดลง โดยทั้ง 4 ภาวะที่ใช้ในการทดลองนั้นมีจุดที่อุณหภูมิสูงสุดที่ตำแหน่งเดียวกัน คือ ที่ตำแหน่งความสูง 1.5 เมตร เหนือแผ่นกระจายอากาศ มีอุณหภูมิประมาณ 830 องศาเซลเซียส 870 องศาเซลเซียส 860 องศาเซลเซียส และ 880 องศาเซลเซียส เมื่อใช้อัตราการป้อนอากาศปฐมภูมิ 720 ลิตรต่อนาที 570 ลิตรต่อนาที 500 ลิตรต่อนาที และ 430 ลิตรต่อนาที ตามลำดับ จากผลการทดลองจะพบว่า การเผาไหม้เชื้อเพลิงผสมโดยไม่มีการป้อนอากาศหตุยภูมิจะมีอุณหภูมิสูงสุดต่ำกว่าภาวะการเผาไหม้ที่มีการป้อนอากาศหตุยภูมิ การป้อนอากาศปฐมภูมิที่เร็วเกินไปจะทำให้อุณหภูมิเคลื่อนที่ขึ้นไปด้านบนของโรเตอร์ได้ดียิ่งขึ้น สารระเหยที่เกิดขึ้นเคลื่อนที่ไปเกิดการเผาไหม้ที่ด้านบนส่งผลให้บริเวณด้านล่างของโรเตอร์มีปริมาณเชื้อเพลิงน้อย อุณหภูมิการเผาไหม้จึงต่ำ แต่เนื่องจากเชื้อเพลิงมีความเร็วในการเคลื่อนที่ขึ้นสู่ด้านบนของเตาเผาที่มากตามความเร็วในการป้อนอากาศปฐมภูมิจึงทำให้เชื้อเพลิงเหล่านั้นหลุดออกจากเตาเผาได้เร็ว จึงเผาไหม้ได้ไม่สมบูรณ์ อุณหภูมิการเผาไหม้ด้านบนเตาเผาจึงไม่สูงมากนัก

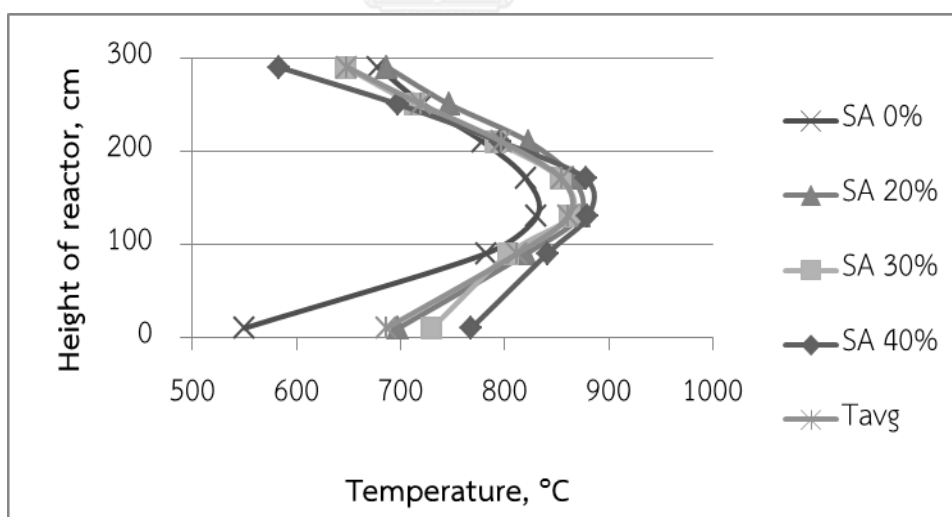
#### 4.4 แนวโน้มการปลดปล่อยแก๊สเผาไหม้ (flue gas) กรณีเปลี่ยนตำแหน่งการป้อนอากาศหตุยภูมิที่ใช้ในการเผาไหม้

ในการทดลองนี้ได้แบ่งการป้อนอากาศที่ใช้สำหรับการเผาไหม้ออกเป็น 2 ส่วน คือ อากาศปฐมภูมิ (primary air) และอากาศหตุยภูมิ (secondary air) เพราะการป้อนอากาศปฐมภูมิเพียงตำแหน่งเดียวจะทำให้เกิดการเผาไหม้ที่สูง เนื่องจากมีปริมาณของอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้เชื้อเพลิงมีปริมาณที่มาก ส่งผลให้อุณหภูมิภายในเตาเผาสูงอย่างรวดเร็วและยังทำให้เกิดแก๊สเผาไหม้ (flue gas) ได้มาก ซึ่งอุณหภูมิที่สูงมากนั้นอาจทำให้เครื่องปฏิกรณ์เกิดการสึกกร่อนเนื่องจากความร้อนที่สูงเกินไป หรืออาจทำให้เถ้าหลอมในเครื่องปฏิกรณ์เกิดปัญหาการอุดตันตามมา และอุณหภูมิที่สูงนั้นยังทำให้แก๊สมลพิษที่เกิดจากการเผาไหม้นั้นเกิดขึ้นได้ดี ดังนั้นจึงได้แบ่งการป้อนอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ เพราะเมื่อแบ่งการป้อนออกเป็น 2 ส่วน อากาศปฐมภูมิที่ป้อนให้กับระบบก็จะมีปริมาณลดลง ทำให้เกิดการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ อุณหภูมิการเผาไหม้จึงไม่สูงมากนัก และหลังจากนั้นการเผาไหม้

เกิดอีกครั้งเมื่อป้อนอากาศทุติยภูมิเข้าไปเพื่อช่วยทำให้การเผาไหม้เกิดได้สมบูรณ์ยิ่งขึ้นดังแสดงไว้ในสมการที่ (4.1) และสมการที่ (4.2)

ตารางที่ 4.4 ภาวะที่ใช้ในการทดลองสำหรับศึกษาตำแหน่งการป้อนอากาศทุติยภูมิต่อการเผาไหม้เชื้อเพลิงผสมถ่านหินและชีวมวลที่สัดส่วน 50 : 50 อากาศรวมที่ใช้ในการเผาไหม้ คือ 720 ลิตรต่อนาที

ภาวะการทดลองที่	อากาศปฐมภูมิ (ลิตรต่อนาที)	อากาศทุติยภูมิ (ลิตรต่อนาที)
1	720	0
2	570	150
3	500	220
4	430	290



รูปที่ 4.6 อุณหภูมิตามความสูงของโรเซอร์ของการเผาไหม้เชื้อเพลิงผสมถ่านหินและชีวมวลที่สัดส่วน 50 : 50 ที่มีการปรับสัดส่วนในการป้อนอากาศที่แตกต่างกัน โดยป้อนอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้รวม 720 ลิตรต่อนาที

(หมายเหตุ SA คือ secondary air)



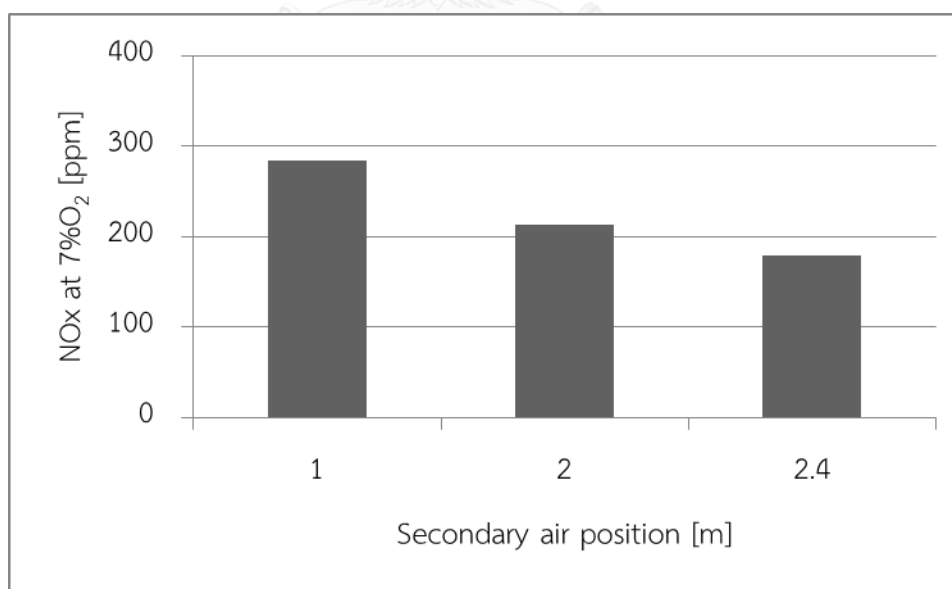
จากผลการทดลองโดยการเปลี่ยนตำแหน่งในการป้อนอากาศทุติยภูมิได้แสดงไว้ดังรูปที่ 4.7 ซึ่งแก๊สเผาไหม้ (flue gas) ที่เกิดขึ้นและออกจากเตาเผาจะถูกดึงด้วยปั๊มสุญญากาศ (vacuum pump) และถูกวิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์แก๊สเผาไหม้ (flue gas analyzer) จากผลการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มความสูงของตำแหน่งในการป้อนอากาศทุติยภูมิปริมาณของไนโตรเจนออกไซด์ (NO<sub>x</sub>) ที่ปล่อยออกมาจากการเผาไหม้นั้นจะมีปริมาณที่ลดลงตามความสูงของตำแหน่งการป้อนอากาศทุติยภูมิที่เพิ่มขึ้น และจากผลของอุณหภูมิจากต้นทำให้ทราบว่าไนโตรเจนออกไซด์ที่เกิดขึ้นนั้นเกิดจากการทำปฏิกิริยาของไนโตรเจนที่อยู่ในเชื้อเพลิงมากกว่าการเกิดไนโตรเจนออกไซด์จากการทำปฏิกิริยาออกซิเดชันของไนโตรเจน (N<sub>2</sub>) ในอากาศที่อุณหภูมิสูง เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไนโตรเจนในอากาศจะเกิดได้ที่อุณหภูมิ 1500 องศาเซลเซียส [13] โดยปริมาณของไนโตรเจนออกไซด์ที่วัดได้คือประมาณ 280 ส่วนในล้านส่วน (ppm) 210 ส่วนในล้านส่วน (ppm) และ 180 ส่วนในล้านส่วน (ppm) ที่ตำแหน่งในการป้อนอากาศทุติยภูมิที่ความสูง 1 เมตร 2 เมตร และ 2.4 เมตร ตามลำดับ โดยเปรียบเทียบที่ปริมาณออกซิเจนร้อยละ 7 แนวโน้มที่เกิดขึ้นแบบนี้เป็นเพราะว่าเมื่อระยะห่างระหว่างตำแหน่งการเผาไหม้หลัก (primary combustion zone) และความสูงของตำแหน่งในการป้อนอากาศทุติยภูมิที่เพิ่มขึ้น จะทำให้เวลาที่อยู่ในเตาเผา (residence time) ของแก๊สเผาไหม้อยู่ในช่วงรีดักชัน (reduction zone) เพิ่มขึ้น ซึ่งในกระบวนการเผาไหม้ ไนตริกออกไซด์ (NO) ที่เกิดขึ้นระหว่างการเผาไหม้จะทำปฏิกิริยากับชาร์ (char) ดังสมการที่ (4.3) ส่งผลให้ไนตริกออกไซด์นั้นมีปริมาณลดลง นอกจากปฏิกิริยาที่ (4.3) แล้ว ไนตริกออกไซด์ยังสามารถทำปฏิกิริยากับคาร์บอนมอนอกไซด์ดังสมการที่ (4.4) ได้ โดยใช้ชาร์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา



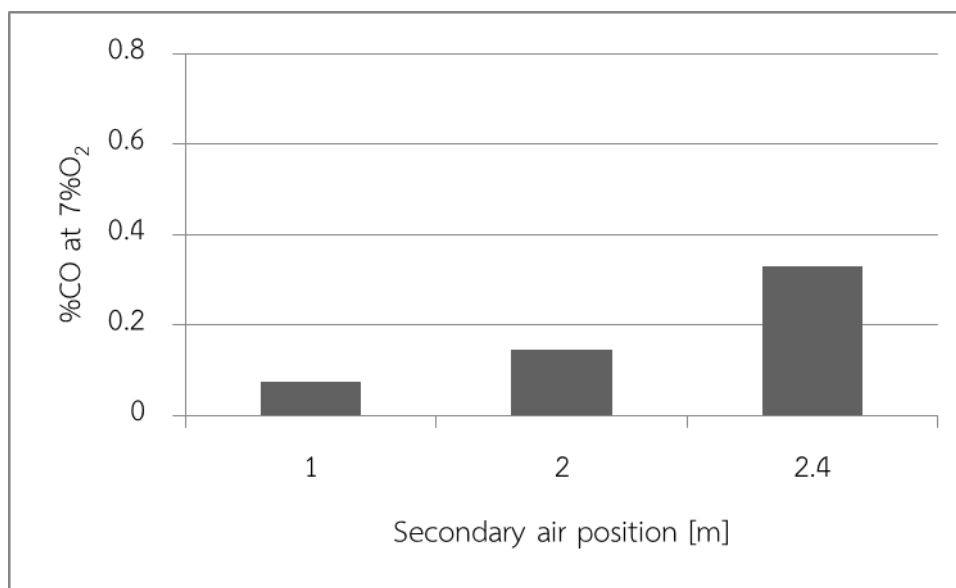
ดังนั้นการป้อนอากาศทุติยภูมิที่ตำแหน่งความสูง 1 เมตรนั้นจึงเกิดไนโตรเจนออกไซด์มากกว่าที่ภาวะการทดลองอื่น



เมื่อพิจารณาผลของคาร์บอนมอนอกไซด์ที่เกิดขึ้น จะพบว่าเมื่อเพิ่มระยะห่างระหว่างตำแหน่งในการเผาไหม้หลักกับตำแหน่งในการป้อนอากาศทุติยภูมิ คาร์บอนมอนอกไซด์ที่เกิดขึ้นจะมีค่าเพิ่มขึ้นดังรูปที่ 4.8 โดยคาร์บอนมอนอกไซด์ที่วัดได้มีค่าเท่ากับร้อยละ 0.07 ร้อยละ 0.15 และร้อยละ 0.32 เมื่อตำแหน่งความสูงในการป้อนคือ 1 เมตร 2 เมตร และ 2.4 เมตร ตามลำดับ โดยเปรียบเทียบที่ปริมาณออกซิเจนร้อยละ 7 สาเหตุที่เป็นเช่นนี้เพราะว่าเมื่อป้อนอากาศทุติยภูมิที่ตำแหน่งความสูงต่างๆ ก็จะไปทำให้มีปริมาณของออกซิเจนในระบบเพิ่มขึ้น การเผาไหม้เกิดขึ้นได้ดี คาร์บอนมอนอกไซด์ที่เกิดขึ้นจึงมีปริมาณที่ค่อนข้างน้อย ปริมาณของคาร์บอนมอนอกไซด์ที่เพิ่มขึ้น น่าจะเป็นผลเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาบาวดาร์ด (Boudouard reaction) (สมการที่ 4.5) ซึ่งเป็นปฏิกิริยาคูดความร้อน ซึ่งสอดคล้องกับผลของอุณหภูมิการเผาไหม้ สังเกตได้จากรูปที่ 4.3 จะพบว่าอุณหภูมิที่ส่วนบนของโรเซอรันั้นลดลง นอกจากนี้เมื่อเพิ่มความสูงของตำแหน่งในการป้อนอากาศทุติยภูมิ โซนรีดักชัน (reduction zone) ที่เพิ่มขึ้นก็จะไปส่งเสริมให้สามารถเกิดปฏิกิริยาที่ (4.3) ได้มากขึ้นทำให้มีปริมาณของคาร์บอนมอนอกไซด์ที่เกิดขึ้นมีค่าสูงขึ้น



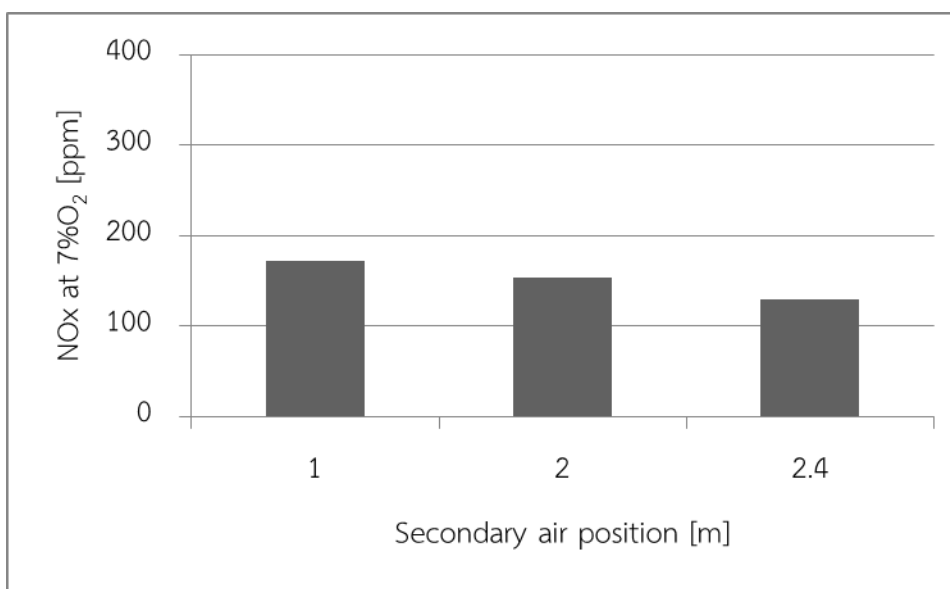
รูปที่ 4.7 ปริมาณไนโตรเจนออกไซด์ (NOx) ที่เกิดจากการเผาไหม้ถ่านหิน เปรียบเทียบที่ปริมาณออกซิเจนร้อยละ 7 โดยปรับเปลี่ยนตำแหน่งในการป้อนอากาศทุติยภูมิ



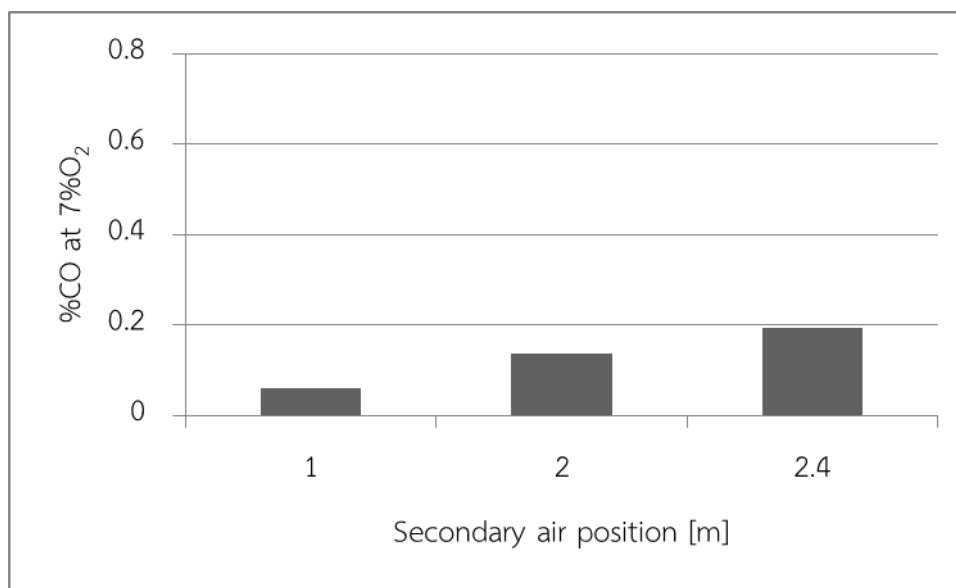
รูปที่ 4.8 ปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ที่เกิดจากการเผาไหม้ถ่านหิน เปรียบเทียบที่ ปริมาณออกซิเจนร้อยละ 7 โดยปรับเปลี่ยนตำแหน่งในการป้อนอากาศทุติยภูมิ

เมื่อเปลี่ยนชนิดของเชื้อเพลิงจากถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงผสมถ่านหินและกะลามะพร้าว พบว่า แนวโน้มในการเกิดไนโตรเจนออกไซด์นั้นมีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับกรณีการเผาไหม้ที่ใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงสังเกตได้จากกราฟรูปที่ 4.9 แต่การใช้เชื้อเพลิงผสมนั้นจะก่อให้เกิดไนโตรเจนออกไซด์ที่น้อยกว่า เพราะว่าปริมาณของไนโตรเจนที่อยู่ในกะลามะพร้าวนั้นมีน้อยกว่าปริมาณของไนโตรเจนที่อยู่ในถ่านหิน เมื่อนำมาผสมกันระหว่างถ่านหินและกะลามะพร้าวจึงทำให้ปริมาณของไนโตรเจนในเชื้อเพลิงผสมนั้นลดต่ำลง โดยไนโตรเจนที่อยู่ในถ่านหินนั้นมีปริมาณร้อยละ 1.27 โดยน้ำหนัก และกะลามะพร้าวมีไนโตรเจนปริมาณร้อยละ 0.22 โดยน้ำหนัก โดยปริมาณของไนโตรเจนออกไซด์ที่วัดได้คือประมาณ 170 ส่วนในล้านส่วน (ppm) 150 ส่วนในล้านส่วน (ppm) และ 130 ส่วนในล้านส่วน (ppm) ที่ตำแหน่งในการป้อนอากาศทุติยภูมิที่ความสูง 1 เมตร 2 เมตร และ 2.4 เมตร ตามลำดับ โดยเปรียบเทียบที่ปริมาณออกซิเจนร้อยละ 7 นอกจากปริมาณของไนโตรเจนที่มีอยู่ในเชื้อเพลิงจะมีส่วนเกี่ยวข้องกับการลดลงของสารประกอบออกไซด์ของไนโตรเจนแล้ว ปริมาณของสารระเหยของเชื้อเพลิงก็มีส่วนเช่นกัน กล่าวคือ เมื่อเชื้อเพลิงมีปริมาณของสารระเหยที่มาก เมื่อเกิดการเผาไหม้ สารระเหยเหล่านั้นก็จะถูกปลดปล่อยออกมา เกิดเป็นบรรยากาศรีดิวซ์ (reducing atmosphere) [26] ซึ่งช่วยในการลดไนโตรเจนออกไซด์

คาร์บอนมอนอกไซด์ที่เกิดขึ้นเมื่อเพิ่มความสูงของตำแหน่งการป้อนอากาศทุติยภูมิ มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับกรณีการเผาไหม้เชื้อเพลิงถ่านหิน (รูปที่ 4.10) แต่ปริมาณของคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ปลดปล่อยออกมานั้นมีน้อยกว่ากรณีการเผาไหม้เชื้อเพลิงถ่านหิน เพราะเชื้อเพลิงผสมนั้นเกิดการเผาไหม้ได้ดีกว่าถ่านหิน ซึ่งปริมาณของคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ปลดปล่อยออกมาคือ ร้อยละ 0.06 ร้อยละ 0.14 และร้อยละ 0.19 เมื่อตำแหน่งของการป้อนอากาศทุติยภูมิอยู่ที่ความสูง 1 เมตร 2 เมตร และ 2.4 เมตร ตามลำดับ โดยเปรียบเทียบที่ปริมาณออกซิเจนร้อยละ 7



รูปที่ 4.9 ปริมาณไนโตรเจนออกไซด์ (NOx) ที่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงผสมถ่านหินและกะลามะพร้าว เปรียบเทียบที่ปริมาณออกซิเจนร้อยละ 7 โดยปรับเปลี่ยนตำแหน่งในการป้อนอากาศทุติยภูมิ

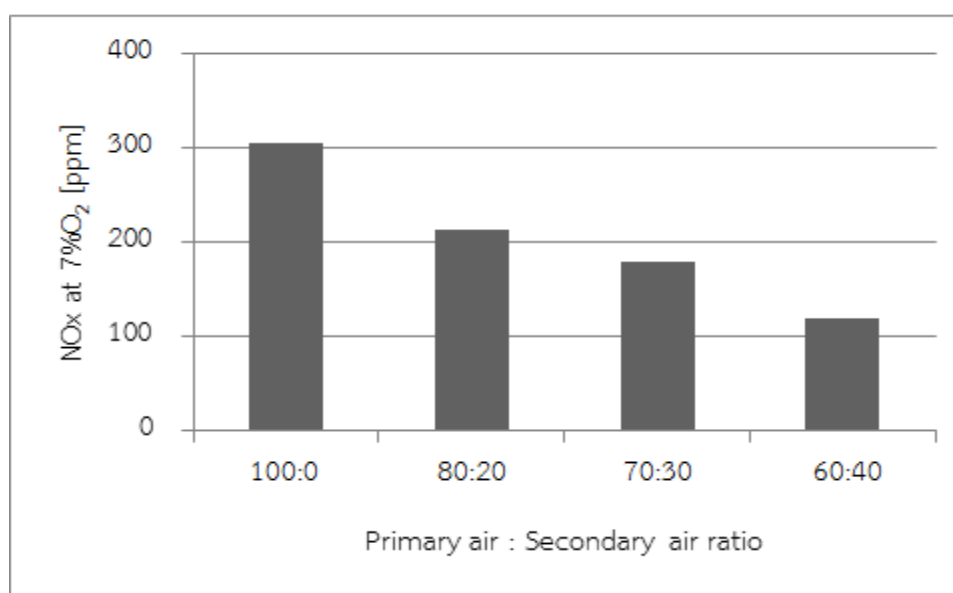


รูปที่ 4.10 ปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ที่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงผสมถ่านหินและกะลามะพร้าว เปรียบเทียบที่ปริมาณออกซิเจนร้อยละ 7 โดยปรับเปลี่ยนตำแหน่งในการป้อนอากาศทุติยภูมิ

#### 4.5 แนวโน้มการปลดปล่อยแก๊สเผาไหม้ (flue gas) กรณีเปลี่ยนอัตราการป้อนอากาศทุติยภูมิที่ใช้ในการเผาไหม้

การทดลองศึกษาการปรับเปลี่ยนอัตราการป้อนอากาศทุติยภูมิได้ทำการป้อนอากาศทุติยภูมิเข้าที่ตำแหน่งความสูง 2.4 เมตร เนื่องจากที่ตำแหน่งความสูงนี้ไนโตรเจนออกไซด์เกิดขึ้นน้อยที่สุดซึ่งดูได้จากผลการทดลองก่อนหน้านี้ โดยการทดลองในส่วนนี้จะใช้ปริมาณอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้รวมเท่ากันทุกภาวะการทดลอง แต่จะปรับเปลี่ยนสัดส่วนของอากาศทุติยภูมิต่ออากาศปฐมภูมิ จากผลการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มสัดส่วนของอากาศทุติยภูมิต่ออากาศปฐมภูมิ ผลการทดลองที่ได้สามารถนำมาสร้างเป็นกราฟได้ดังรูปที่ 4.11 ไนโตรเจนออกไซด์ที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้จะมีค่าลดลง ซึ่งการเผาไหม้โดยไม่มีการป้อนอากาศทุติยภูมินั้นมีการปลดปล่อยสารประกอบออกไซด์ของไนโตรเจนออกมามากที่สุด เนื่องจากในจุดเริ่มต้นของการเผาไหม้ได้มีการป้อนอากาศเข้าไปในปริมาณที่มาก จึงมีปริมาณของออกซิเจนที่เข้าไปเกิดการเผาไหม้กับเชื้อเพลิงได้มาก ไนโตรเจนออกไซด์จึงเกิดขึ้นได้มาก [27] และการป้อนอากาศเข้าไปทีละน้อยในปริมาณที่มากขึ้นก็จะไปทำให้เวลาของแก๊สเผาไหม้ที่เกิดขึ้นอยู่ในโซนรีดักชันที่สั้น เนื่องจากความเร็วของอากาศที่ป้อนนั้นสูง ดังนั้นการเพิ่มสัดส่วนของอากาศทุติยภูมิต่ออากาศปฐมภูมิสำหรับการเผาไหม้นั้นจะช่วยทำให้แก๊สเผาไหม้อยู่ในโซนรีดักชันได้

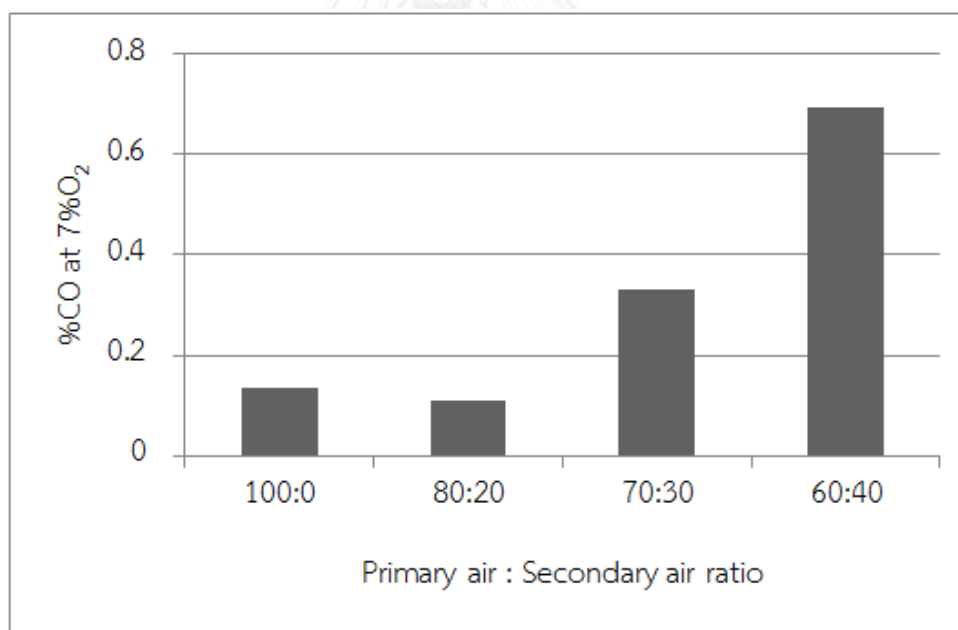
นานขึ้น ไนตริกออกไซด์ที่เกิดขึ้นจึงมีเวลาในการทำปฏิกิริยากับซาร์เพิ่มมากขึ้น และการป้อนอากาศปฐมภูมิในปริมาณที่น้อยๆ ก็จะไปช่วยเพิ่มการเกิดตัวรีดิวซ์ (reducing species) เกิดเป็นบรรยากาศรีดิวซ์ (reducing atmosphere) จึงมีส่วนช่วยในการลดลงของสารประกอบออกไซด์ของไนโตรเจน [18, 21] โดยปริมาณของไนโตรเจนออกไซด์ที่วัดได้คือประมาณ 300 ส่วนในล้านส่วน (ppm) 210 ส่วนในล้านส่วน (ppm) 180 ส่วนในล้านส่วน (ppm) และ 120 ส่วนในล้านส่วน (ppm) ที่สัดส่วนในการป้อนอากาศทุติยภูมิร้อยละ 0 ร้อยละ 20 ร้อยละ 30 และร้อยละ 40 ตามลำดับ โดยเปรียบเทียบที่ปริมาณออกซิเจนร้อยละ 7



รูปที่ 4.11 ปริมาณไนโตรเจนออกไซด์ (NOx) ที่เกิดจากการเผาไหม้ถ่านหิน เปรียบเทียบที่ปริมาณออกซิเจนร้อยละ 7 โดยปรับเปลี่ยนสัดส่วนในการป้อนอากาศทุติยภูมิ (ป้อนอากาศทุติยภูมิที่ตำแหน่งความสูง 2.4 เมตร)

คาร์บอนมอนอกไซด์ที่เกิดขึ้นจากภาวะการเผาไหม้นี้มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มสัดส่วนของอากาศทุติยภูมิต่ออากาศปฐมภูมิดังแสดงไว้ในรูปที่ 4.12 การเพิ่มขึ้นของคาร์บอนมอนอกไซด์เนื่องจาก เมื่อสัดส่วนของอากาศทุติยภูมิต่ออากาศปฐมภูมิเพิ่มขึ้น ทำให้มีปริมาณของอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ช่วงแรกไม่เพียงพอ คาร์บอนมอนอกไซด์จึงเกิดขึ้นมาก [28] และนอกจากนี้อากาศปฐมภูมิที่ต่ำจะทำให้แก๊สเผาไหม้ที่เกิดขึ้นมีเวลาอยู่ในเรซิเดนซ์ (resident time) เพิ่มมากขึ้นเพราะมีความเร็วของฟลูอิดิซ (fluidizing velocity) ต่ำ ไนตริกออกไซด์จึงสามารถทำปฏิกิริยากับซาร์ได้

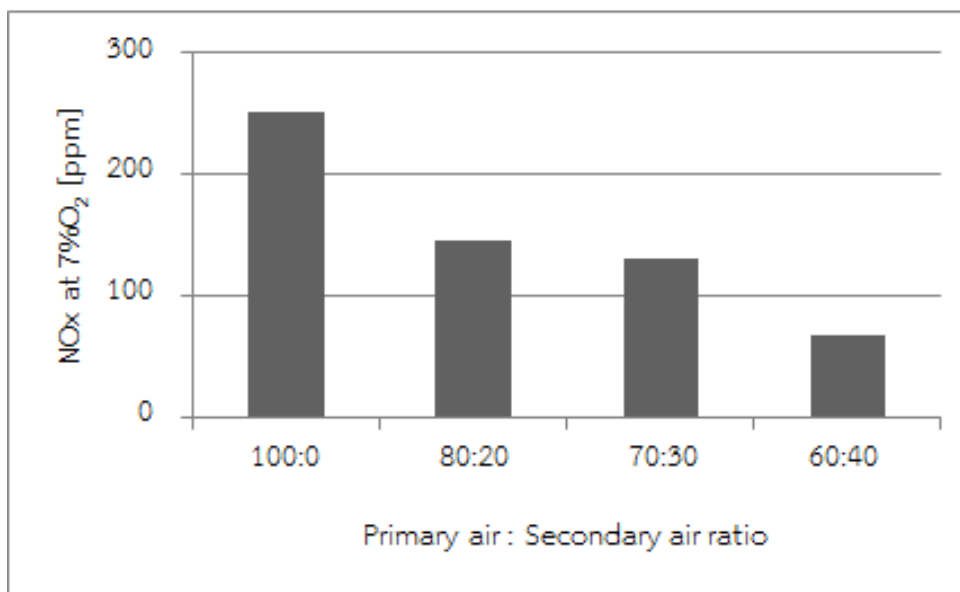
มากขึ้นตามสมการที่ 4.3 คาร์บอนมอนอกไซด์จึงเกิดได้มากตามไปด้วย ถึงแม้ว่าการเติมอากาศหุดิ-  
 ภูมิเข้าไปในภายหลังเพื่อเพิ่มการเผาไหม้ให้สมบูรณ์อาจจะช่วยลดปริมาณของคาร์บอนมอนอกไซด์  
 แต่การป้อนอากาศหุดิภูมิในปริมาณที่มากเกินไปก็จะทำให้อุณหภูมิหลุดออกไปจากโรเซอร์ได้เร็วมาก  
 ขึ้นเกิดการเผาไหม้ไม่ทัน ปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์จึงยังคงสูงอยู่ และในภาวะการทดลองที่ไม่มี  
 การป้อนอากาศหุดิภูมิ คาร์บอนมอนอกไซด์ที่เกิดขึ้นจะมีปริมาณที่มากกว่าในภาวะที่มีการป้อน  
 อากาศหุดิภูมิร้อยละ 20 สาเหตุเนื่องจาก ที่ภาวะที่ไม่มีมีการป้อนอากาศหุดิภูมิ อากาศที่ใช้ในการ  
 เผาไหม้ทั้งหมดจะถูกป้อนเป็นอากาศปฐมภูมิ ดังนั้นในระบบฟลูอิดซ์เบดนี้จึงมีความเร็วที่สูง  
 อุณหภูมิเวลาอยู่ในโรเซอร์ (resident time) น้อย คาร์บอนมอนอกไซด์จึงเกิดขึ้นได้มาก [29]  
 ปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ที่วัดได้คือ ร้อยละ 0.14 ร้อยละ 0.11 ร้อยละ 0.33 และร้อยละ 0.70  
 เมื่อสัดส่วนของการป้อนอากาศหุดิภูมิร้อยละ 0 ร้อยละ 20 ร้อยละ 30 และร้อยละ 40 ตามลำดับ  
 โดยเปรียบเทียบที่ปริมาณออกซิเจนร้อยละ 7



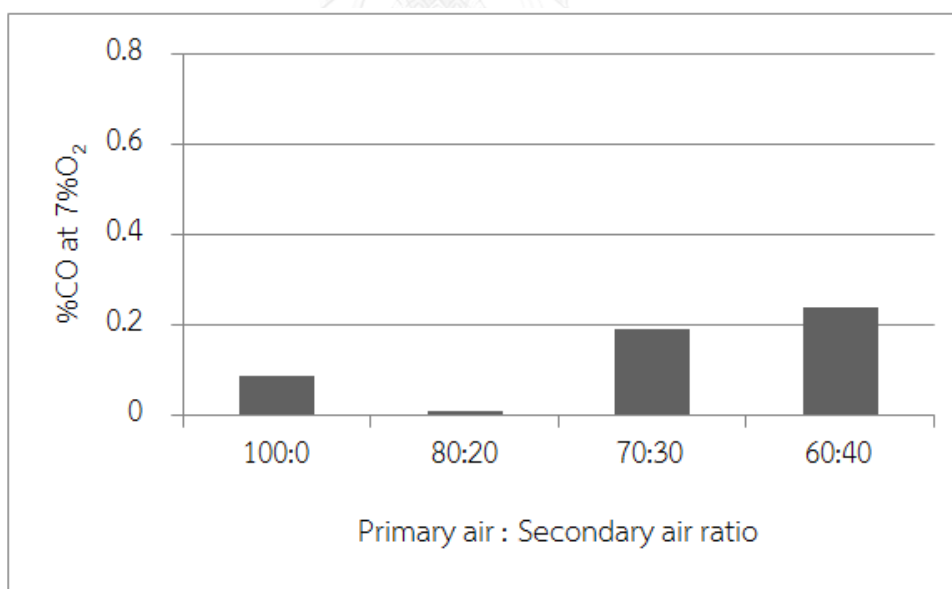
รูปที่ 4.12 ปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ที่เกิดจากการเผาไหม้ถ่านหิน เปรียบเทียบที่  
 ปริมาณออกซิเจนร้อยละ 7 โดยปรับเปลี่ยนสัดส่วนในการป้อนอากาศหุดิภูมิ (ป้อนอากาศหุดิภูมิที่  
 ตำแหน่งความสูง 2.4 เมตร)

การเปลี่ยนชนิดของเชื้อเพลิงจากถ่านหินมาเป็นเชื้อเพลิงผสมถ่านหินและกะลามะพร้าว นั้น ผลการทดลองพบว่าไนโตรเจนออกไซด์ที่เกิดขึ้นมีแนวโน้มที่ลดลงเมื่อเพิ่มสัดส่วนของอากาศหุติยภูมิ ต่ออากาศปฐมภูมิสังเกตได้จากรูปที่ 4.13 ปริมาณไนโตรเจนออกไซด์ที่วัดได้คือ ประมาณ 250 ส่วนในล้านส่วน (ppm) 140 ส่วนในล้านส่วน (ppm) 130 ส่วนในล้านส่วน (ppm) และ 70 ส่วนในล้านส่วนเมื่อสัดส่วนของอากาศหุติยภูมิที่ใช้คือ ร้อยละ 0 ร้อยละ 20 ร้อยละ 30 และร้อยละ 40 ตามลำดับ โดยเปรียบเทียบที่ปริมาณออกซิเจนร้อยละ 7 ซึ่งพบว่าไนโตรเจนออกไซด์ที่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงผสมนั้นมีปริมาณต่ำกว่าไนโตรเจนออกไซด์ที่เกิดจากการเผาไหม้ถ่านหิน เนื่องจากเชื้อเพลิงผสมมีปริมาณไนโตรเจนที่อยู่ในเชื้อเพลิงที่ต่ำกว่าถ่านหิน นอกจากนี้ชีวมวลที่ใช้ในการเผาไหม้เกิดการปลดปล่อยสารระเหยอย่างรวดเร็วในส่วนล่างของโรเซอร์ [30] เป็นภาวะที่มีเชื้อเพลิงมากซึ่งสนับสนุนให้ไนโตรเจนออกไซด์ลดลง [31] เพราะการเพิ่มสัดส่วนของอากาศหุติยภูมิต่ออากาศปฐมภูมิเป็นการลดปริมาณออกซิเจนในบริเวณการเผาไหม้เริ่มต้น ทำให้เกิดภาวะรีดิวซ์ (reducing atmosphere) จึงช่วยลดการเกิดไนโตรเจนออกไซด์

คาร์บอนมอนอกไซด์ที่เกิดขึ้นนั้นมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มสัดส่วนของอากาศหุติยภูมิต่ออากาศปฐมภูมิ (รูปที่ 4.14) ปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ที่วัดได้มีค่าร้อยละ 0.01 ร้อยละ 0.19 และร้อยละ 0.24 เมื่อสัดส่วนในการป้อนอากาศหุติยภูมิคือ ร้อยละ 20 ร้อยละ 30 และร้อยละ 40 ตามลำดับ เนื่องจากปริมาณอากาศปฐมภูมิที่ลดลงทำให้มีปริมาณของออกซิเจนไม่เพียงพอต่อการเผาไหม้ คาร์บอนมอนอกไซด์จึงเกิดขึ้นได้มาก แต่ในกรณีการเผาไหม้ที่ไม่มีการป้อนอากาศหุติยภูมิ อากาศเผาไหม้ทั้งหมดที่ป้อนเข้าสู่ด้านล่างของโรเซอร์ (อากาศปฐมภูมิ) จะทำให้สารระเหยที่ถูกปล่อยออกมาจากเชื้อเพลิงเกิดการเผาไหม้อย่างรวดเร็ว แต่มีเวลาในการเผาไหม้ที่ไม่เพียงพอ จึงทำให้คาร์บอนมอนอกไซด์ที่วัดได้มีปริมาณที่มากกว่าการเผาไหม้ที่มีการป้อนอากาศหุติยภูมิในสัดส่วนร้อยละ 20 โดยปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ที่วัดได้มีปริมาณร้อยละ 0.09 ปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ที่วัดถูกเปรียบเทียบที่ปริมาณออกซิเจนที่ร้อยละ 7 เท่ากัน



รูปที่ 4.13 ปริมาณไนโตรเจนออกไซด์ (NOx) ที่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงผสมถ่านหินและกะลามะพร้าว เปรียบเทียบที่ปริมาณออกซิเจนร้อยละ 7 โดยปรับเปลี่ยนสัดส่วนในการป้อนอากาศทุกติงูมิ (ป้อนอากาศทุกติงูมิที่ตำแหน่งความสูง 2.4 เมตร)



รูปที่ 4.14 ปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ที่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงผสมถ่านหินและกะลามะพร้าว เปรียบเทียบที่ปริมาณออกซิเจนร้อยละ 7 โดยปรับเปลี่ยนสัดส่วนในการป้อนอากาศทุกติงูมิ (ป้อนอากาศทุกติงูมิที่ตำแหน่งความสูง 2.4 เมตร)



#### 4.6 ผลการทดลองการเผาไหม้ถ่านหินในระบบการเผาไหม้แบบเติมอากาศเป็นขั้นศึกษาภาวะการเผาไหม้แบบเติมอากาศหลายชั้น

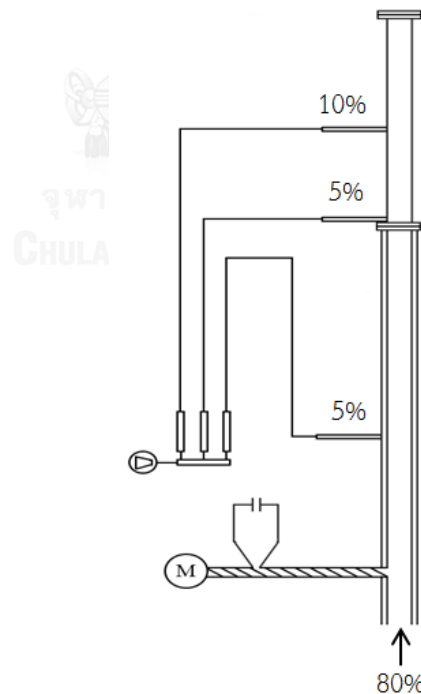
ในงานวิจัยก่อนหน้านี้ได้ศึกษาการเผาไหม้เชื้อเพลิงในเตาเผาแบบต่างๆ ด้วยการป้อนอากาศทุติยภูมิช่วยในการเผาไหม้ (air staged combustion) ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมใช้เพื่อลดไนโตรเจนออกไซด์ที่เกิดจากการเผาไหม้ พบว่านอกจากสัดส่วนของอากาศทุติยภูมิจะส่งผลต่อการเกิดไนโตรเจนออกไซด์แล้ว ตำแหน่งในการป้อนอากาศทุติยภูมิก็ยังมีส่งผลต่อการเกิดไนโตรเจนออกไซด์เช่นกัน การทดลองนี้จึงได้ศึกษาการเผาไหม้แบบเติมอากาศหลายชั้น (multi-air staged combustion) เพื่อเปรียบเทียบกับผลของการเผาไหม้แบบทั่วไป และเพื่อหาภาวะที่ดีที่สุดสำหรับการลดไนโตรเจนออกไซด์

การทดลองในส่วนนี้จะทำการป้อนอากาศเผาไหม้รวมร้อยละ 100 ของการเผาไหม้เชื้อเพลิงทั้งหมด โดยแบ่งอากาศที่ป้อนออกเป็น 2 ส่วน คือ อากาศปฐมภูมิร้อยละ 80 และอากาศทุติยภูมิร้อยละ 20 อากาศทุติยภูมิร้อยละ 20 นี้จะถูกแบ่งป้อนไปตามตำแหน่ง 1 เมตร 2 เมตร และ 2.4 เมตร ตามภาวะที่ใช้ในการทดลองนี้ได้แสดงไว้ดังตารางที่ 4.5 โดยภาวะ M0 คือ การป้อนอากาศทุติยภูมิเพียงตำแหน่งเดียว (single-air staged combustion) จะถูกนำมาเปรียบเทียบกับการเผาไหม้ในภาวะการเติมอากาศแบบหลายชั้นของอากาศทุติยภูมิ (multi-air staged combustion) ทั้งกรณีของการเผาไหม้ถ่านหิน และการเผาไหม้เชื้อเพลิงผสมถ่านหินและชีวมวล

จากตารางที่ 4.5 จะเห็นว่าสัดส่วนของอากาศทุติยภูมิที่ใช้ (ร้อยละ 20 ของอากาศเผาไหม้รวมทั้งหมด) ถูกแบ่งป้อนเข้าสู่เตาเผาใน 3 ตำแหน่ง คือ ที่ความสูง 1 เมตร 2 เมตร และ 2.4 เมตร ตามลำดับ ยกตัวอย่างที่ภาวะ M1 (0.25 : 0.25 : 0.5) จะป้อนอากาศทุติยภูมิที่ตำแหน่ง 1 เมตร และ 2 เมตร ร้อยละ 5 ทั้ง 2 ตำแหน่ง และที่ตำแหน่ง 2.4 เมตร ร้อยละ 10 เป็นต้น (ลักษณะการป้อนอากาศของภาวะการทดลอง M1 แสดงไว้ดังรูปที่ (4.15) เพื่อศึกษาผลของการป้อนอากาศทุติยภูมิแบบขั้นที่ส่งผลต่อการเกิดไนโตรเจนออกไซด์ของการเผาไหม้ถ่านหินและเชื้อเพลิงผสม

ตารางที่ 4.5 ภาวะที่ใช้ในการทดลองการเผาไหม้แบบขั้นโดยการป้อนอากาศปฐมภูมิร้อยละ 80 และอากาศทุติยภูมิร้อยละ 20 โดยทำการแบ่งป้อนอากาศทุติยภูมิต่างกัน

Condition symbols	1m : 2m : 2.4m
M0	0 : 0 : 1
M1	0.25 : 0.25 : 0.5
M2	0.25 : 0.5 : 0.25
M3	0.5 : 0.25 : 0.25
M4	0.33 : 0.33 : 0.33
M5	0 : 0.5 : 0.5
M6	0.5 : 0 : 0.5
M7	0.5 : 0.5 : 0



รูปที่ 4.15 ลักษณะการป้อนอากาศสำหรับการเผาไหม้แบบเติมอากาศหลายชั้น (ภาวะ M1)

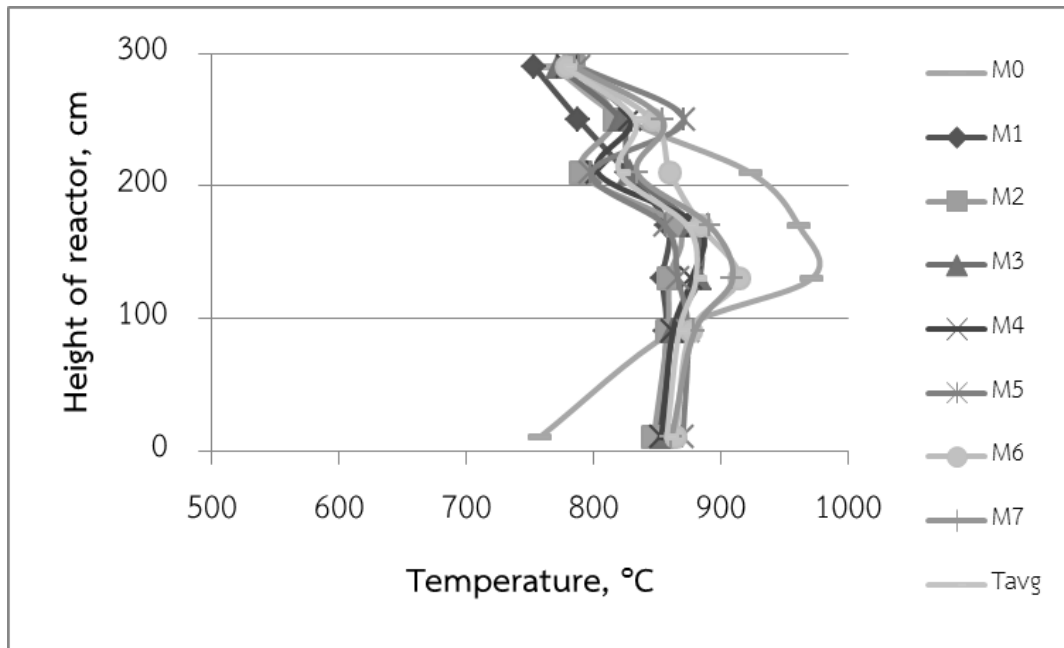
#### 4.6.1 อุณหภูมิเฉลี่ยตลอดความสูงของโรเซอร์ภายใต้การเผาไหม้ในภาวะการเติมอากาศแบบหลายชั้น

อุณหภูมิในการเผาไหม้ภายใต้ภาวะการเติมอากาศแบบหลายชั้นนั้น สามารถนำข้อมูลมาสร้างเป็นกราฟได้ดังรูปที่ 4.16 และรูปที่ 4.17 จากกราฟจะสังเกตเห็นได้ว่าอุณหภูมิของการเผาไหม้แบบเติมอากาศหลายชั้นจะมีการกระจายของอุณหภูมิที่ดีกว่าการเผาไหม้แบบเติมอากาศทุติยภูมิชั้นเดียว และมีอุณหภูมิการเผาไหม้ที่ต่ำกว่า ทั้งนี้ก็เป็นผลเนื่องมาจากอากาศที่เติมเข้าไปนั้นมีอุณหภูมิที่เย็นกว่าอุณหภูมิการเผาไหม้ จึงส่งผลทำให้อุณหภูมิของบริเวณที่มีการเติมอากาศทุติยภูมิเข้าไปนั้นลดต่ำลง และอากาศที่เติมเข้าไปนั้นก็ยิ่งไปเพิ่มปริมาณของออกซิเจนในระบบทำให้การเผาไหม้เกิดขึ้นได้อีกครั้ง ซึ่งต่างจากการเผาไหม้แบบเติมอากาศทุติยภูมิเพียงชั้นเดียว อาจจะเป็นผลเนื่องมาจากความแตกต่างของลักษณะของการป้อนอากาศทุติยภูมิที่เข้าสู่ระบบ เพราะการเผาไหม้แบบเติมอากาศหลายชั้นนั้นจะทำการเติมอากาศที่ละเล็กลงๆ เข้าไปในระบบหลายๆ ตำแหน่งพร้อมกัน ส่วนการเผาไหม้แบบชั้นเดียวนั้นจะป้อนอากาศทุติยภูมิเข้าไปเพียงตำแหน่งเดียวแต่มีปริมาณของอากาศทุติยภูมิรวมที่เท่ากัน ลักษณะของอุณหภูมิแบบนี้เกิดขึ้นในระบบที่เป็นการเผาไหม้ถ่านหิน ส่วนระบบการเผาไหม้เชื้อเพลิงผสมถ่านหินและกะลามะพร้าว นั้น อุณหภูมิเผาไหม้มีการกระจายตัวคล้ายกับการเผาไหม้แบบเติมอากาศชั้นเดียว อาจจะเป็นผลเนื่องมาจากกะลามะพร้าว นั้นมีปริมาณของสารระเหยที่มาก เมื่อป้อนอากาศทุติยภูมิเข้าไป จะทำให้ความเร็วของอนุภาคภายในโรเซอร์เพิ่มขึ้น ซึ่งส่งผลให้สารระเหยหลุดออกไปจากเตาเผาได้เร็วขึ้น เกิดการเผาไหม้ไม่ทัน การเติมอากาศทุติยภูมิเข้าไปจึงส่งผลทำให้อุณหภูมิการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงผสมนั้นเกิดการกระจายของอุณหภูมิต่ำกว่าการเผาไหม้ถ่านหินสำหรับระบบการเผาไหม้แบบเติมอากาศหลายชั้น

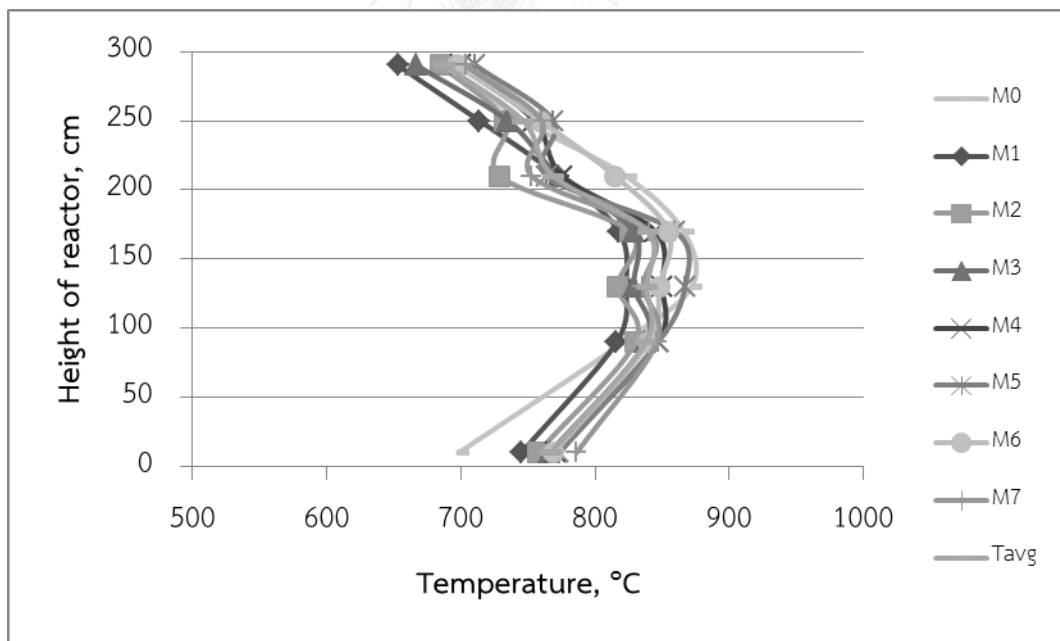
#### 4.6.2 แนวโน้มการปลดปล่อยแก๊สเผาไหม้ (flue gas) จากการเผาไหม้ในภาวะแบบเติมอากาศหลายชั้น

ในการศึกษาผลของการเผาไหม้ถ่านหินแบบเติมอากาศหลายชั้น โดยภาวะการทดลองได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.7 ผลการทดลองที่ได้สามารถสร้างเป็นกราฟได้ดังรูปที่ 4.18 พบว่าการเผาไหม้ที่มีการเติมอากาศทุติยภูมิเพียงตำแหน่งเดียว (ภาวะ M0) นั้นมีปริมาณการปลดปล่อยไนโตรเจนออกไซด์ที่สูงกว่าการเผาไหม้ถ่านหินที่มีการเติมอากาศทุติยภูมิหลายชั้น นั้นแสดงให้เห็นว่าการเผาไหม้แบบเติมอากาศทุติยภูมิหลายชั้นนั้นมีประสิทธิภาพในการลดไนโตรเจนออกไซด์ที่ดีกว่าการเผา-

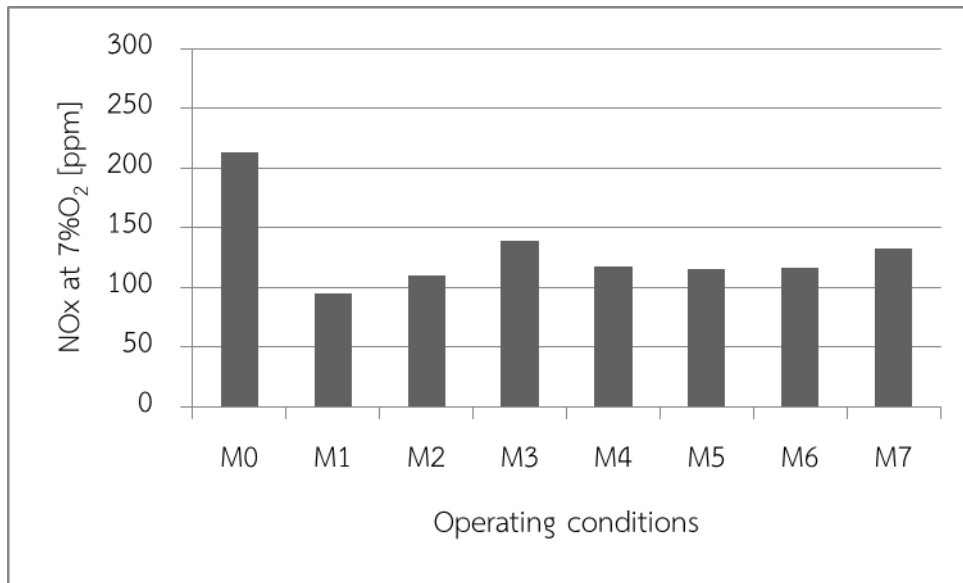
ใหม่แบบปกติที่มีการเติมอากาศทุติยภูมิตำแหน่งเดียว การเผาไหม้ถ่านหินในงานวิจัยที่ผ่านมา [21, 32] พบว่าออกซิเจนนั้นมีอิทธิพลต่อการเกิดปฏิกิริยาระหว่างซาร์และไนตริกออกไซด์ โดยไนโตรเจน ( $N_2$ ) จะเกิดได้มากขึ้นเมื่อมีออกซิเจนปรากฏอยู่ในระบบด้วย ซึ่งการมีอยู่ของปริมาณออกซิเจนที่เหมาะสมจะช่วยให้ไนโตรเจนออกไซด์ที่อยู่ในโซนรีดักชัน (reduction zone) ลดลง ดังนั้นการแบ่งป้อนอากาศทุติยภูมิที่ละนิดเข้าไปในแต่ละตำแหน่งของความสูงในการป้อนอากาศทุติยภูมิจึงช่วยให้ไนโตรเจนออกไซด์ลดลงได้ดีกว่าการป้อนอากาศทุติยภูมิเข้าไปในปริมาณมากๆ ในตำแหน่งเดียว และลักษณะของการป้อนอากาศทุติยภูมิก็ยังคงต้องป้อนคล้ายกับการเผาไหม้แบบชั้นเดียว นั่นคือ ที่ตำแหน่งต่ำๆ ให้ป้อนอากาศเข้าไปในสัดส่วนที่น้อยๆ จึงจะได้ค่าไนโตรเจนออกไซด์ที่ต่ำ ซึ่งการเผาไหม้ถ่านหินแบบเติมอากาศหลายชั้นนั้นที่ภาวะการเผาไหม้ M1 (0.25:0.25:0.50) ให้ค่าไนโตรเจนออกไซด์ที่ต่ำที่สุด เช่นเดียวกับการเผาไหม้เชื้อเพลิงผสมถ่านหินและกะลามะพร้าวในภาวะการเผาไหม้แบบเติมอากาศหลายชั้นดังรูปที่ 4.19 ก็ให้ผลการทดลองที่คล้ายกับการเผาไหม้ที่ใช้เชื้อเพลิงเป็นถ่านหิน กล่าวคือในการเผาไหม้แบบทั่วไป (การเผาไหม้ที่มีการป้อนอากาศทุติยภูมิเพียงชั้นเดียว) มีการปลดปล่อยไนโตรเจนออกไซด์จากเผาไหม้มากกว่าการเผาไหม้แบบเติมอากาศหลายชั้น แต่การเผาไหม้เชื้อเพลิงผสมนั้นมีการปลดปล่อยปริมาณไนโตรเจนออกไซด์ที่ต่ำกว่าการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่เป็นถ่านหิน เนื่องจากปริมาณของไนโตรเจนที่อยู่ในเชื้อเพลิงที่ต่ำกว่า ในการเผาไหม้เชื้อเพลิงผสมถ่านหินและกะลามะพร้าวที่ภาวะการเผาไหม้ M5 (0.00:0.50:0.50) นั้นเกิดการปลดปล่อยไนโตรเจนออกไซด์ที่ต่ำที่สุดซึ่งแตกต่างจากการเผาไหม้ถ่านหิน (ภาวะการเผาไหม้ M1 ปลดปล่อยไนโตรเจนออกไซด์ต่ำที่สุด) สาเหตุอาจจะเป็นเพราะว่ากะลามะพร้าวนั้นมีปริมาณของสารระเหยที่มากกว่าถ่านหิน ซึ่งการป้อนอากาศทุติยภูมิที่ตำแหน่งต่ำๆ นั้นเป็นการเพิ่มปริมาณของออกซิเจน ทำให้สารระเหยที่ปลดปล่อยออกมาจากกะลามะพร้าวนั้นเกิดการเผาไหม้เพิ่มขึ้น ปริมาณไนโตรเจนออกไซด์จึงเพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้จะเห็นได้ว่าที่ภาวะการเผาไหม้ M5 และ M6 ของทั้งการเผาไหม้ถ่านหินและเชื้อเพลิงผสมนั้น ไนโตรเจนออกไซด์ที่เกิดขึ้นนั้นมีปริมาณที่ใกล้เคียงกัน อาจจะเป็นเพราะอากาศทุติยภูมิที่ป้อนเข้าไปที่ตำแหน่ง 2 เมตรนั้นเป็นบริเวณเกิดปฏิกิริยาพอดี จึงทำให้ไนโตรเจนออกไซด์เกิดขึ้นได้มาก ในขณะที่ภาวะ M6 มีปริมาณอากาศในการเผาไหม้ที่ด้านล่างมากจึงเกิดไนโตรเจนออกไซด์มาก แต่ในบริเวณการเกิดปฏิกิริยานั้นไม่มีการเติมอากาศทุติยภูมิเข้าไปจึงน่าจะช่วยลดไนโตรเจนออกไซด์ลง ทำให้ภาวะการเผาไหม้ M5 และ M6 มีปริมาณไนโตรเจนออกไซด์ที่ใกล้เคียงกัน



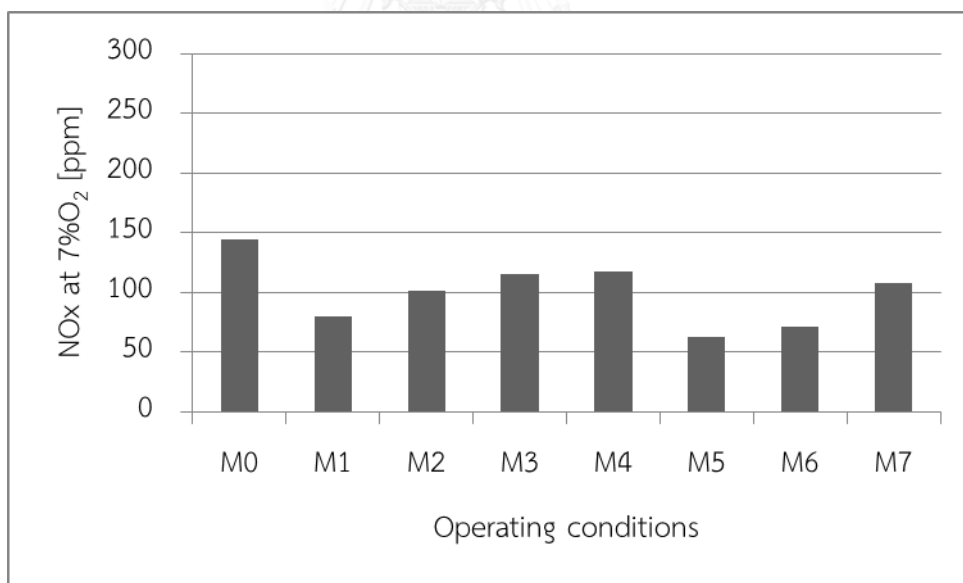
รูปที่ 4.16 อุณหภูมิเฉลี่ยตลอดความสูงของไรเซอร์ของการเผาไหม้ถ่านหินที่มีการเติมอากาศทุติยภูมิแบบขั้น



รูปที่ 4.17 อุณหภูมิเฉลี่ยตลอดความสูงของไรเซอร์ของการเผาไหม้เชื้อเพลิงผสมถ่านหินและกะลามะพร้าวที่มีการเติมอากาศทุติยภูมิแบบขั้น

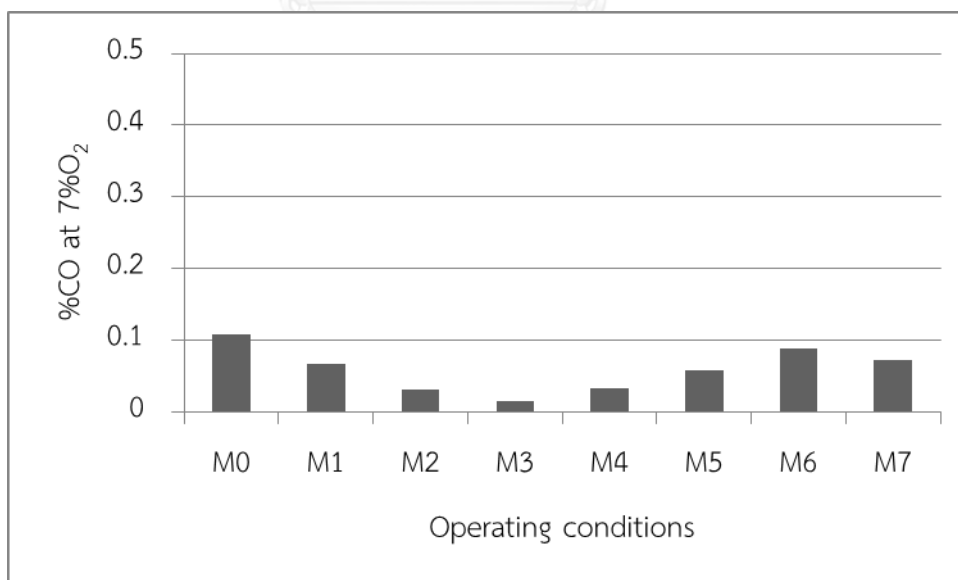


รูปที่ 4.18 ปริมาณไนโตรเจนออกไซด์ (NOx) ที่เกิดจากการเผาไหม้ถ่านหินแบบการเติมอากาศหลายชั้น เปรียบเทียบที่ปริมาณออกซิเจนร้อยละ 7 โดยปรับเปลี่ยนสัดส่วนในการป้อนอากาศทุติยภูมิตามภาวะที่ออกแบบการทดลองไว้

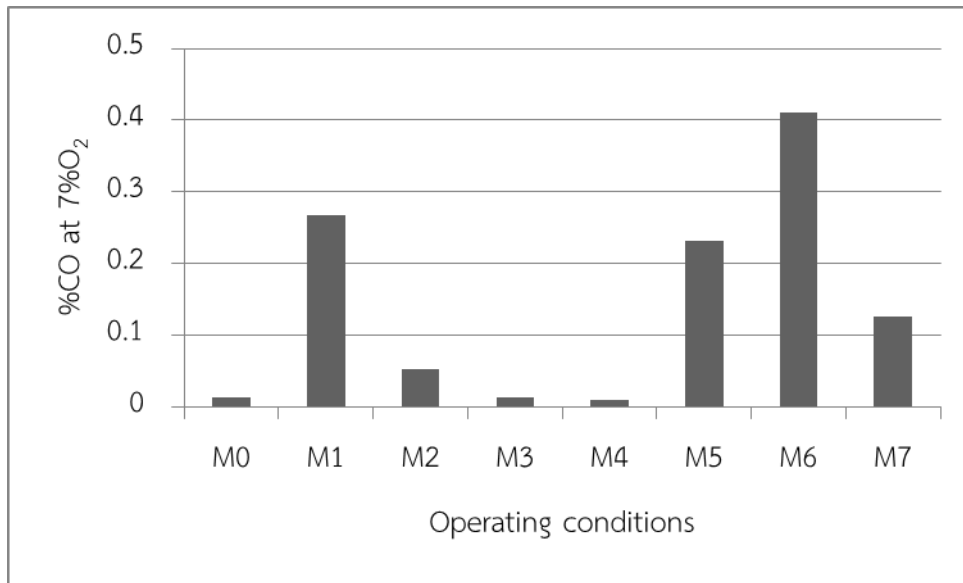


รูปที่ 4.19 ปริมาณไนโตรเจนออกไซด์ (NOx) ที่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงผสมถ่านหินและกะลาหะพร้าวแบบการเติมอากาศหลายชั้น เปรียบเทียบที่ปริมาณออกซิเจนร้อยละ 7 โดยปรับเปลี่ยนสัดส่วนในการป้อนอากาศทุติยภูมิตามภาวะที่ออกแบบการทดลองไว้

คาร์บอนมอนอกไซด์ที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ถ่านหินนั้นจากรูปที่ 4.20 จะพบว่าปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้แบบเต็มอากาศหลายชั้นนั้นมีปริมาณที่ต่ำกว่าการเผาไหม้ที่มีการป้อนอากาศทุติยภูมิเพียงตำแหน่งเดียว นั้นแสดงให้เห็นว่าการเผาไหม้แบบเต็มอากาศหลายชั้นนั้นน่าจะเกิดการสัมผัสของเชื้อเพลิงกับอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ที่ดีกว่าเผาไหม้แบบเต็มอากาศตำแหน่งเดียว ปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ที่เกิดขึ้นจึงมีปริมาณที่ต่ำ เนื่องจากเกิดการเผาไหม้ได้ดีขึ้น แต่ในทางกลับกันการเผาไหม้เชื้อเพลิงผสมถ่านหินและกะลาอะพรว้านั้น ปริมาณของคาร์บอนมอนอกไซด์ที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้แบบเต็มอากาศหลายชั้นนั้นมีปริมาณที่มากกว่าการเผาไหม้ที่ป้อนอากาศทุติยภูมิเพียงตำแหน่งเดียวแสดงไว้ในรูปที่ 4.21 เนื่องจากกะลาอะพรว้านั้นมีปริมาณของสารระเหยที่มากกว่าถ่านหิน สารระเหยที่ปล่อยออกมาเกิดการเผาไหม้ ส่งผลให้เกิดคาร์บอนมอนอกไซด์เพิ่มขึ้นจากการเผาไหม้ คาร์บอนมอนอกไซด์ที่เกิดขึ้นนั้นมีแนวโน้มที่แปรผกผันกับไนโตรเจนออกไซด์ แต่ภาวะการเผาไหม้ M6 นั้น ที่บริเวณความสูง 2 เมตรของโรเซอร์มีอุณหภูมิการเผาไหม้ที่สูงกว่าภาวะการเผาไหม้อื่น และที่ตำแหน่งนี้ไม่มีการป้อนอากาศทุติยภูมิ จึงทำให้มีปริมาณออกซิเจนไม่เพียงพอต่อการเผาไหม้ คาร์บอนมอนอกไซด์จึงเกิดขึ้นสูงกว่าภาวะ M5 และ M7 ที่มีการป้อนอากาศทุติยภูมิ 2 ตำแหน่งเช่นเดียวกับภาวะ M6



รูปที่ 4.20 ปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ที่เกิดจากการเผาไหม้ถ่านหินแบบการเติมอากาศหลายชั้น เปรียบเทียบที่ปริมาณออกซิเจนร้อยละ 7 โดยปรับเปลี่ยนสัดส่วนในการป้อนอากาศทุติยภูมิตามภาวะที่ออกแบบการทดลองไว้



รูปที่ 4.21 ปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ที่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงผสมถ่านหินและ  
กะลาเม็ดป่นแบบการเติมอากาศหลายชั้น เปรียบเทียบที่ปริมาณออกซิเจนร้อยละ 7 โดย  
ปรับเปลี่ยนสัดส่วนในการป้อนอากาศทุติยภูมิตามภาวะที่ออกแบบการทดลองไว้



## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของตำแหน่งในการป้อนอากาศทุติยภูมิ และสัดส่วนของอากาศทุติยภูมิสำหรับการเผาไหม้ที่มีการป้อนอากาศทุติยภูมิตำแหน่งเดียว (air staged combustion) ของเชื้อเพลิงถ่านหิน และเชื้อเพลิงผสมถ่านหินและกะลามะพร้าวในเตาเผาฟลูอิดไชด์แบบหมุนเวียน และศึกษาการเผาไหม้แบบเติมอากาศเป็นขั้น (multi-air staged combustion) ของเชื้อเพลิงทั้ง 2 ชนิด ที่ส่งผลต่อการเกิดไนโตรเจนออกไซด์จากการเผาไหม้ โดยสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

##### 5.1.1 อุณหภูมิการเผาไหม้

อุณหภูมิการเผาไหม้เฉลี่ยตลอดความสูงของโรเตอร์จะขึ้นอยู่กับชนิดของเชื้อเพลิงที่ใช้ และการป้อนอากาศทุติยภูมิ โดยการเผาไหม้ถ่านหินนั้นอุณหภูมิการเผาไหม้จะสูงกว่าการเผาไหม้เชื้อเพลิงผสมถ่านหินและกะลามะพร้าว เนื่องจากค่าความร้อนของเชื้อเพลิงที่ต่างกัน และการป้อนอากาศทุติยภูมิเข้าไปนั้นจะส่งผลให้อุณหภูมิบริเวณที่ป้อนอากาศเข้าไปมีอุณหภูมิต่ำลง โดยผลของอุณหภูมิการเผาไหม้นั้นอาจส่งผลเล็กน้อยต่อการเกิดไนโตรเจนออกไซด์ เนื่องจากมีอุณหภูมิการเผาไหม้ที่ต่ำ

##### 5.1.2 ตำแหน่งในการป้อนอากาศทุติยภูมิ

เมื่อเพิ่มระยะห่างระหว่างบริเวณเผาไหม้หลักและตำแหน่งในการป้อนอากาศทุติยภูมิโดยตำแหน่งที่ป้อนอากาศทุติยภูมิคือที่ความสูง 1 เมตร 2 เมตร และ 2.4 เมตร ตามลำดับ จะพบว่าไนโตรเจนออกไซด์เกิดขึ้นได้น้อยลง เพราะวาระยะห่างระหว่างบริเวณเผาไหม้หลักและตำแหน่งในการป้อนอากาศทุติยภูมิที่เพิ่มขึ้นจะไปทำให้เชื้อเพลิงมีเวลาเกิดปฏิกิริยาในช่วงรีดักชัน (reduction zone) เพิ่มขึ้นจึงช่วยลดการเกิดไนโตรเจนออกไซด์

### 5.1.3 สัดส่วนของอากาศหุติยภูมิ

สัดส่วนของอากาศหุติยภูมิต่ออากาศปฐมภูมิที่เพิ่มมากขึ้น ช่วยลดปริมาณออกซิเจนในการเผาไหม้ช่วงแรก ทำให้เกิดเป็นบรรยากาศรีดิวซ์ (reducing atmosphere) ซึ่งช่วยในการลดไนโตรเจนออกไซด์จากการเผาไหม้ได้

### 5.1.4 ชนิดของเชื้อเพลิง

เชื้อเพลิงที่ใช้สำหรับการเผาไหม้นั้นส่งผลต่อปริมาณในการเกิดไนโตรเจนออกไซด์ กล่าวคือ ถ้าเชื้อเพลิงที่ใช้มีปริมาณของไนโตรเจนในเชื้อเพลิงมาก จะทำให้เชื้อเพลิงเกิดไนโตรเจนออกไซด์ได้มาก

### 5.1.5 ภาวะที่ใช้สำหรับการทดลอง

การเผาไหม้แบบเติมอากาศเป็นชั้น (multi-air staging combustion) นั้นสามารถลดไนโตรเจนออกไซด์และคาร์บอนมอนอกไซด์ได้ดีกว่าการเผาไหม้แบบเติมอากาศทั่วไป (air staging combustion) สำหรับเตาเผาฟลูอิดเบดแบบหมุนเวียน

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

การเผาไหม้ที่เกิดขึ้นในงานวิจัยนี้เกิดการเผาไหม้ได้ไม่สมบูรณ์ เนื่องจากเชื้อเพลิงมีเวลาในการเผาไหม้ไม่เพียงพอ ถึงแม้ว่าไนโตรเจนออกไซด์ที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้จะมีค่าที่ต่ำ แต่ประสิทธิภาพการเผาไหม้ที่ต่ำจึงไม่เหมาะต่อการนำไปใช้งาน ดังนั้นควรเพิ่มความสูงของโรเตอร์เพื่อให้เชื้อเพลิงมีเวลาเผาไหม้ในเตาเผาสูงขึ้น เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการเผาไหม้ เนื่องจากความเร็วในการป้อนอากาศที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีความเร็วที่ค่อนข้างมากจึงทำให้เชื้อเพลิงที่มีน้ำหนักเบาหรือมีความหนาแน่นน้อยหลุดออกไปจากเตาเผาอย่างรวดเร็ว

## รายการอ้างอิง

1. Gohlke, O., et al. A new process for NO<sub>x</sub> reduction in combustion systems for the generation of energy from waste. Waste Management 30 (2010): 1348-1354.
2. กัญจน บุนยเกียรติ. เชื้อเพลิงและการเผาไหม้. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2544.
3. Stammers, J. Coal Seam Gas: Issues for Consideration in the Illawarra Region, NSW, Australia. BEnvSc Hons, School of Earth & Environmental Science, University of Wollongong, 2012.
4. อนุตร จำลองกุล. พลังงานทดแทน. กรุงเทพมหานคร: ทริปเพิ้ล เอ็ดดูเคชั่น, 2555.
5. Charles, E. , and Baukal, J. Industrial combustion pollution and control. United States of America: Marcel Dekker, Inc., 2004.
6. ชีรศักดิ์ ฤกษ์สมบูรณ์. สหสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนกับผลการวิเคราะห์แบบประมาณของถ่านหินแหล่งต่างๆ ในประเทศไทย. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, เคมีเทคนิค จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2533.
7. สมศักดิ์ ดำรงค์เลิศ. ฟลูอิดไดเซชัน. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2528.
8. Kunii, D. , and Levenspiel, O. Fluidization engineering. United States of America: Robert E. Krieger publishing Co., Inc., 1977.
9. Oka, S. N. Fluidized bed combustion. United States of America: Marcel Dekker, Inc., 2004.
10. Davidson, J. F. , and Harrison, D. Fluidization. United States of America: Academic press Inc. (London) ltd., 1971.
11. Schlesinger, W. H. , and Bernhardt, E. S. The Global Cycles of Nitrogen and Phosphorus. United State of America: Elsevier Inc., 2013.
12. ประจักษ์ ทรัพย์อุดมมาก. การปล่อยไนโตรเจนออกไซด์และไนตรัสออกไซด์จากการเผาไหม้ร่วมของถ่านหินและชีวมวลในฟลูอิดได์ซ์เบดแบบหมุนเวียน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, เคมีเทคนิค จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2550.
13. Richards, J. R. Control of nitrogen oxides emissions. United States: EPA, 2000.
14. สำเริง จักรใจ. การเผาไหม้. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2547.

15. Clean Air Technology Center. Nitrogen Oxides (NOx), Why and How They Are Controlled. North Carolina: EPA, 1999.
16. Leckner, B. (2007). Co-combustion a summary of technology. AGS Pathways report 2007:E3, Sweden: Chalmers University of Technology.
17. Cliffe, K. R. , and Patumsawad, S. Co-combustion of waste from olive oil production with coal in a fluidised bed. Waste Management 21 (2001): 49-53.
18. Spliethoff, H., et al. Basic effects on NOx emissions in air staging and reburning at a bench-scale test facility. Fuel 75 (1996): 560-564.
19. Daood, S. S., et al. NOx control in coal combustion by combining biomass co-firing, oxygen enrichment and SNCR. Fuel 105 (2013): 283-292.
20. Atimtay, A. T. , and Varol, M. Investigation of co-combustion of coal and olive cake in a bubbling fluidized bed with secondary air injection. Fuel 88 (2009): 1000-1008.
21. Wang, J., et al. The effect of air staged combustion on NOx emissions in dried lignite combustion. Energy 37 (2012): 725-736.
22. Qian, F., et al. Effect of Flue Gas Recirculation (FGR) on NOx Emission in a Pilot-Scale Vortexing Fluidized-Bed Combustor. Energy&Fuels 25 (2011): 5639–5646.
23. Prompubess, C., et al. Co-combustion of coal and biomass in a circulating fluidized bed combustor. Korean Journal of Chemical Engineering 24 (2007): 989-995.
24. Saikaew, T., et al. Emission of NOx and N2O from co-combustion of coal and biomasses in CFB combustor. International Journal of Greenhouse Gas Control 10 (2012): 26-32.
25. ชัยวัฒน์ พรหมภูเบศร์. การเผาไหม้เชื้อเพลิงผสมถ่านหินและชีวมวลในฟลูอิดไคซ์เบดแบบหมุนเวียน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, เคมีเทคนิค จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2547.
26. Akpulat, O., Varol, M., and Atimtay, A. T. Effect of freeboard extension on co-combustion of coal and olive cake in a fluidized bed combustor. Bioresource Technology 101 (2010): 6177-6184.

27. Fan, W., et al. Impact of air staging along furnace height on NO<sub>x</sub> emissions from pulverized coal combustion. Fuel Processing Technology 91 (2010): 625-634.
28. Suksankraisorn, K., et al. Co-combustion of municipal solid waste and Thai lignite in a fluidized bed. Energy Conversion and Management 45 (2004): 947-962.
29. Sathitruangsak, P., Madhiyanon, T., and Soponronnarit, S. Rice husk co-firing with coal in a short-combustion-chamber fluidized-bed combustor (SFBC). Fuel 88 (2009): 1394-1402.
30. Liu, D. C., et al. Reducing N<sub>2</sub>O Emission by Co-Combustion of Coal and Biomass. Energy & Fuels 16 (2002): 525-526.
31. Sahu, S. G., Chakraborty, N., and Sarkar, P. Coal-biomass co-combustion: An overview. Renewable and Sustainable Energy Reviews 39 (2014): 575-586.
32. Tomita, A. Suppression of nitrogen oxides emission by carbonaceous reductants. Fuel Processing Technology 71 (2001): 53-70.



ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

## ภาคผนวก ก

## วิธีวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของเชื้อเพลิง

## 1. การวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate Analysis): ASTM D3172

## 1.1 ความชื้น (Moisture): ASTM D3173

วิธีการทดลอง

1) อบครุชชีเบลในเตาอบ (Furnace) ที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง นำออกมาทำให้เย็นในเดสิเคเตอร์ ชั่งน้ำหนักครุชชีเบล

2) ชั่งน้ำหนักตัวอย่างใส่ครุชชีเบล ประมาณ 1 กรัม

3) อบครุชชีเบลพร้อมตัวอย่างในเตาอบโดยไม่ต้องปิดฝา 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) เผาครุชชีเบลพร้อมฝาในเตาเผาอุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส ประมาณ 30 นาที นำออกจากเตาเผา ทำให้เย็นในเดสิเคเตอร์ แล้วชั่งน้ำหนักครุชชีเบลพร้อมฝา 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) หย่อนครุชีเบิลให้อยู่กึ่งกลางเตา อุณหภูมิประมาณ 950 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 นาที

6) นำครุชีเบิลออกมาทิ้งไว้ให้เย็น แล้วนำไปใส่ในเดสิเคเตอร์ประมาณ 15 นาที นำไปชั่งและบันทึกผล

สูตรที่ใช้ในการคำนวณ

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

เมื่อ  $V$  = ร้อยละของสารระเหย

$W_5$  = น้ำหนักของครุชีเบิลพร้อมฝารวมกับน้ำหนักตัวอย่างก่อนเผา (กรัม)

$W_6$  = น้ำหนักของครุชีเบิลพร้อมฝารวมกับน้ำหนักตัวอย่างหลังเผา (กรัม)

$W$  = น้ำหนักของตัวอย่างแห้ง (กรัม)

$M$  = ร้อยละของความชื้น

### 1.3 เถ้า (Ash): ASTM D3174

#### วิธีการทดลอง

1) เผาครุชีเบิล (Muffle Furnace) ที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง นำออกมาทำให้เย็นในเดสิเคเตอร์ ชั่งน้ำหนักครุชีเบิล

2) ชั่งน้ำหนักตัวอย่างแห้งใส่ครุชีเบิล ประมาณ 1 กรัม

3) นำไปเผาบนตะเกียงเบนเซนจนควันระเหยหมด

4) ใส่ครุชีเบิลในเตาเผาที่อุณหภูมิประมาณ 750 องศาเซลเซียส เป็นเวลาประมาณ 2 ชั่วโมงหรือจนน้ำหนักคงที่

5) นำครุชีเบิลออกจากเตาเผาวางทิ้งไว้ให้เย็น แล้วนำไปใส่ในเดสิเคเตอร์ ชั่งน้ำหนักพร้อมบันทึกผล

สูตรที่ใช้ในการคำนวณ

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

เมื่อ  $A$  = ร้อยละของเถ้า

$W_3$  = น้ำหนักของครุชีเบิลที่มีเถ้า (กรัม)



$W_4 =$  น้ำหนักของครุฑีเบล (กรัม)

$W =$  น้ำหนักของตัวอย่างแห้ง (กรัม)

#### 1.4 ปริมาณคาร์บอนคงตัว (Fixed Carbon)

สูตรที่ใช้ในการคำนวณ

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

เมื่อ  $A =$  ร้อยละของเถ้า

$V =$  ร้อยละของสารระเหย

$M =$  ร้อยละของความชื้น



**ภาคผนวก ข**  
**วิธีการคำนวณ**

1. ตัวอย่างการคำนวณหาปริมาณอากาศที่จำเป็นในการเผาไหม้สมบูรณ์ 100 เปอร์เซ็นต์  
อัตราการป้อนเชื้อเพลิงถ่านหิน 7 กิโลกรัมต่อชั่วโมง

ตารางที่ ข.1 ตารางแสดงค่าการวิเคราะห์โดยประมาณ

Proximate analysis		
(as received)	Coal	Coconut shell
Fixed carbon [wt%]	43.93	23.96
Volatile matter [wt%]	41.16	62.29
Moisture [wt%]	12.08	11.84
Ash [wt%]	2.83	1.91
Heating value [MJ/kg]	19.3	17.8

ตารางที่ ข.2 ตารางแสดงค่าการวิเคราะห์โดยแยกธาตุ

Ultimate analysis		
(dry ash free)	Coal	Coconut shell
C [wt%]	71.75	49.69
H [wt%]	7.08	7.44
N [wt%]	1.27	0.22
O [wt%]	19.67	42.65
S [wt%]	0.24	0.00

คุณสมบัติของอากาศที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ความดัน 1 บรรยากาศ

ความหนาแน่น	1.165438	กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร
มวลโมเลกุล	28.97	
สัดส่วนของออกซิเจน	21	ร้อยละโดยโมล
สัดส่วนของไนโตรเจน	79	ร้อยละโดยโมล

มวลโมเลกุลของคาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน และซัลเฟอร์ เนื่องจากไนโตรเจนนั้นเฉื่อย ไม่ค่อยเกิดปฏิกิริยาจึงไม่นำมาคิด

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

ถ่านหิน 100 เปอร์เซ็นต์ 7 กิโลกรัมต่อชั่วโมง คิดเป็นน้ำหนักแห้งและปราศจากเถ้าได้เป็น

$$7(100 - 12.08 - 2.83)/100 = 5.9563 \text{ กิโลกรัมต่อชั่วโมง}$$

มีปริมาณคาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน และซัลเฟอร์ คิดเป็นน้ำหนักแห้งและปราศจากเถ้าได้เป็น

ปริมาณ C ;  $5.9563(71.75)/100 = 4.274$  กิโลกรัมต่อชั่วโมง

$$4.274/12 = 0.356 \text{ กิโลโมลต่อชั่วโมง}$$

ปริมาณ H ;  $5.9563(7.08)/100 = 0.421$  กิโลกรัมต่อชั่วโมง

$$0.421/1 = 0.421 \text{ กิโลโมลต่อชั่วโมง}$$

ปริมาณ O ;  $5.9563(19.67)/100 = 1.172$  กิโลกรัมต่อชั่วโมง

$$1.172/16 = 0.073 \text{ กิโลโมลต่อชั่วโมง}$$

ปริมาณ S ;  $5.9563(0.24)/100 = 0.0014$  กิโลกรัมต่อชั่วโมง

$$0.0014/32 = 0.00044 \text{ กิโลโมลต่อชั่วโมง}$$

ต้องใช้ O<sub>2</sub> ในการเผาไหม้สมบูรณ์

ปริมาณ C ;  $0.356*1 = 0.356$  กิโลโมล O<sub>2</sub> ต่อชั่วโมง

ปริมาณ H ;  $0.421/4 = 0.105$  กิโลโมล O<sub>2</sub> ต่อชั่วโมง

ปริมาณ O ;  $-0.073/2 = -0.036$  กิโลโมล O<sub>2</sub> ต่อชั่วโมง

ปริมาณ S ;  $0.00044*1 = 0.00044$  กิโลโมล O<sub>2</sub> ต่อชั่วโมง

$$\begin{aligned}
 \text{รวมต้องใช้แก๊สออกซิเจน} &= 0.425 \text{ กิโลโมล } O_2 \text{ ต่อชั่วโมง} \\
 \text{ต้องใช้อากาศในการเผาไหม้สมบูรณ์} & \\
 0.425 \times (100/21) &= 2.0238 \text{ กิโลโมลอากาศต่อชั่วโมง} \\
 2.0238 \times 28.97 &= 58.630 \text{ กิโลกรัมอากาศต่อชั่วโมง} \\
 58.630/1.165438 &= 50.307 \text{ ลูกบาศก์เมตรอากาศต่อ} \\
 &\text{ชั่วโมง} \\
 50.307 \times 1000 &= 50307 \text{ ลิตรต่อชั่วโมง} \\
 50307/60 &= 838.45 \text{ ลิตรต่อนาที}
 \end{aligned}$$

## 2. การหาออกซิเจนอ้างอิง ( $O_2$ reference)

การทดลองโดยทั่วไปมักจะป้อนอากาศเกินพอ (excess air) ใช้ในการเผาไหม้ เพื่อให้เชื้อเพลิงเกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ อากาศเกินพอที่วัดในแก๊สเผาไหม้เป็นร้อยละออกซิเจน ซึ่งอากาศที่เกินพอจะไปทำให้ความเข้มข้นของแก๊สที่วัดได้เจือจางลง

ความเข้มข้นของแก๊สที่เก็บได้จะมีผลของอากาศเกินพออยู่ด้วย (diluting effects of excess air) ปริมาณของอากาศเกินพอหาได้จากปริมาณของออกซิเจนที่อยู่ในแก๊สเผาไหม้ ความเข้มข้นของออกซิเจนที่วัดได้ และความเข้มข้นของออกซิเจนอ้างอิงจะใช้ในสมการด้านล่างเพื่อหาความเข้มข้นของแก๊ส

$$\text{Corrected PPM} = \text{measured PPM} \times \frac{20.95 - O_2 \text{ reference}}{20.95 - O_2 \text{ measured}}$$

เมื่อ	corrected PPM	คือ	ความเข้มข้นของแก๊สที่ปรับแก้
	measured PPM	คือ	ความเข้มข้นของแก๊สที่วัดได้
	$O_2$ reference	คือ	ร้อยละออกซิเจนที่ต้องการอ้างอิง
	$O_2$ measured	คือ	ร้อยละออกซิเจนที่วัดได้

**ภาคผนวก ค**  
**ข้อมูลการทดลอง**

1. ผลการศึกษาการเผาไหม้ถ่านหินในเตาเผาฟลูอิดซ์เบดแบบหมุนเวียน

ตารางที่ ค.1 อุณหภูมิเฉลี่ยตลอดความสูงไรเซอร์ของการเผาไหม้ถ่านหิน

ตำแหน่ง	ความสูง (ซม.)	ภาวะการทดลอง					
		1	2	3	4	5	6
1	10	748	810	781	812	757	921
2	90	886	881	866	886	862	892
3	130	925	920	953	964	971	958
4	170	944	884	933	954	961	915
5	210	936	865	822	894	923	868
6	250	897	814	806	802	825	716
7	290	835	782	749	753	768	665
8		613	633	654	627	627	605

ตารางที่ ค.2 องค์ประกอบของแก๊สเผาไหม้ที่วัดได้จากการทดลองเผาไหม้ถ่านหิน

ชนิดของแก๊ส	ภาวะการทดลอง					
	1	2	3	4	5	6
%O <sub>2</sub>	10.23	8.83	8.9	7.89	7.99	7.79
NO <sub>x</sub> (ppm)	234	247	184	167	198	112
CO (ppm)	1046	631	1257	3088	1002	6554
%CO <sub>2</sub>	9.21	10.41	10.35	11.22	11.14	11.31
ปรับเทียบแก๊สที่ 7%O <sub>2</sub>						
NO <sub>x</sub> (ppm)	305	284	213	178	213	119
CO (ppm)	1361	726	1455	3299	1078	6948

- หมายเหตุ
- 1 คือ การเผาไหม้ที่ไม่มีการป้อนอากาศหตุยภูมิ
  - 2 คือ การเผาไหม้โดยป้อนอากาศหตุยภูมิร้อยละ 30 ที่ความสูง 1 เมตร
  - 3 คือ การเผาไหม้โดยป้อนอากาศหตุยภูมิร้อยละ 30 ที่ความสูง 2 เมตร
  - 4 คือ การเผาไหม้โดยป้อนอากาศหตุยภูมิร้อยละ 30 ที่ความสูง 2.4 เมตร
  - 5 คือ การเผาไหม้โดยป้อนอากาศหตุยภูมิร้อยละ 20 ที่ความสูง 2.4 เมตร
  - 6 คือ การเผาไหม้โดยป้อนอากาศหตุยภูมิร้อยละ 40 ที่ความสูง 2.4 เมตร

ตารางที่ ค.3 อุณหภูมิเฉลี่ยตลอดความสูงโรเซอร์ของการเผาไหม้ถ่านหินแบบเต็มอากาศหลายชั้น

ตำแหน่ง	ความสูง (ชม.)	ภาวะการทดลอง						
		M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7
1	10	851	847	855	853	870	864	861
2	90	857	858	862	862	874	876	879
3	130	854	859	883	877	866	914	909
4	170	858	865	878	882	856	884	891
5	210	826	790	829	803	798	860	834
6	250	788	816	821	829	871	846	854
7	290	753	784	772	780	789	779	785
8		586	594	612	596	591	584	584

ตารางที่ ค.4 องค์ประกอบของแก๊สเผาไหม้ที่วัดได้จากการทดลองเผาไหม้ถ่านหินแบบเต็มอากาศหลายชั้น

ชนิดของแก๊ส	ภาวะการทดลอง						
	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7
%O <sub>2</sub>	4.17	4.1	5.38	5.08	7.06	7.56	7.22
NO <sub>x</sub> (ppm)	114	133	155	133	115	112	130
CO (ppm)	812	382	155	377	579	850	704
%CO <sub>2</sub>	14.42	14.48	13.38	13.64	11.93	11.50	11.80
เปรียบเทียบแก๊สที่ 7%O <sub>2</sub>							
NO <sub>x</sub> (ppm)	95	110	139	117	115	117	132
CO (ppm)	675	316	139	331	582	885	715

หมายเหตุ M1 คือ ป้อนอากาศทุติยภูมิร้อยละ 5, 5 และ 10 ที่ความสูง 1, 2 และ 2.4 เมตร ตามลำดับ  
M2 คือ ป้อนอากาศทุติยภูมิร้อยละ 5, 10 และ 5 ที่ความสูง 1, 2 และ 2.4 เมตร ตามลำดับ  
M3 คือ ป้อนอากาศทุติยภูมิร้อยละ 10, 5 และ 5 ที่ความสูง 1, 2 และ 2.4 เมตร ตามลำดับ  
M4 คือ ป้อนอากาศทุติยภูมิร้อยละ 7, 7 และ 7 ที่ความสูง 1, 2 และ 2.4 เมตร ตามลำดับ  
M5 คือ ป้อนอากาศทุติยภูมิร้อยละ 0, 10 และ 10 ที่ความสูง 1, 2 และ 2.4 เมตร ตามลำดับ  
M6 คือ ป้อนอากาศทุติยภูมิร้อยละ 10, 0 และ 10 ที่ความสูง 1, 2 และ 2.4 เมตร ตามลำดับ  
M7 คือ ป้อนอากาศทุติยภูมิร้อยละ 10, 10 และ 0 ที่ความสูง 1, 2 และ 2.4 เมตร ตามลำดับ

2. ผลการศึกษาการเผาไหม้เชื้อเพลิงผสมถ่านหินและกะลาหะพร้าวในเตาเผาฟลูอิดไธซ์เบดแบบ  
หมุนเวียน

ตารางที่ ค.5 อุณหภูมิเฉลี่ยตลอดความสูงไรเซอร์ของการเผาไหม้เชื้อเพลิงผสม

ตำแหน่ง	ความสูง (ซม.)	ภาวะการทดลอง					
		1	2	3	4	5	6
1	10	550	723	708	730	698	768
2	90	782	744	756	804	821	841
3	130	831	779	823	863	872	880
4	170	821	792	822	854	866	878
5	210	779	743	716	791	823	796
6	250	722	715	693	713	747	698
7	290	678	667	639	647	687	583
8		467	526	501	625	662	533

ตารางที่ ค.6 องค์ประกอบของแก๊สเผาไหม้ที่วัดได้จากการทดลองเผาไหม้เชื้อเพลิงผสม

ชนิดของแก๊ส	ภาวะการทดลอง					
	1	2	3	4	5	6
%O <sub>2</sub>	11.9	8.93	8.63	8.77	8.56	8.23
NO <sub>x</sub> (ppm)	162	148	135	113	128	63
CO (ppm)	583	514	1209	1675	108	2191
%CO <sub>2</sub>	7.78	10.33	10.59	10.46	10.65	10.93
ปรับเทียบแก๊สที่ 7%O <sub>2</sub>						
NO <sub>x</sub> (ppm)	250	172	153	129	144	69
CO (ppm)	899	597	1369	1918	122	2403

- หมายเหตุ
- 1 คือ การเผาไหม้ที่ไม่มีการป้อนอากาศทุติยภูมิ
  - 2 คือ การเผาไหม้โดยป้อนอากาศทุติยภูมิร้อยละ 30 ที่ความสูง 1 เมตร
  - 3 คือ การเผาไหม้โดยป้อนอากาศทุติยภูมิร้อยละ 30 ที่ความสูง 2 เมตร
  - 4 คือ การเผาไหม้โดยป้อนอากาศทุติยภูมิร้อยละ 30 ที่ความสูง 2.4 เมตร
  - 5 คือ การเผาไหม้โดยป้อนอากาศทุติยภูมิร้อยละ 20 ที่ความสูง 2.4 เมตร
  - 6 คือ การเผาไหม้โดยป้อนอากาศทุติยภูมิร้อยละ 40 ที่ความสูง 2.4 เมตร

ตารางที่ ค.7 อุณหภูมิเฉลี่ยตลอดความสูงโรเซอร์ของการเผาไหม้เชื้อเพลิงผสมแบบเติมอากาศหลายชั้น

ตำแหน่ง	ความสูง (ซม.)	ภาวะการทดลอง						
		M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7
1	10	745	757	766	771	773	769	786
2	90	816	830	838	847	847	840	846
3	130	823	817	829	850	867	848	836
4	170	818	826	829	845	860	855	841
5	210	773	729	773	776	764	815	753
6	250	714	733	735	755	769	759	760
7	290	653	685	667	700	711	697	704
8		424	426	427	437	444	437	442

ตารางที่ ค.8 องค์ประกอบของแก๊สเผาไหม้ที่วัดได้จากการทดลองเผาไหม้เชื้อเพลิงผสมแบบเติมอากาศหลายชั้น

ชนิดของแก๊ส	ภาวะการทดลอง						
	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7
%O <sub>2</sub>	3.22	3.56	4.32	3.98	7.62	7.35	6.98
NO <sub>x</sub> (ppm)	102	126	138	143	60	69	108
CO (ppm)	3388	660	162	123	2212	4006	1263
%CO <sub>2</sub>	15.23	14.94	14.29	14.58	11.45	11.68	12.00
ปรับเทียบแก๊สที่ 7%O <sub>2</sub>							
NO <sub>x</sub> (ppm)	80	101	116	118	63	71	108
CO (ppm)	2665	530	136	101	2315	4109	1262

หมายเหตุ M1 คือ ป้อนอากาศทุติยภูมิร้อยละ 5, 5 และ 10 ที่ความสูง 1, 2 และ 2.4 เมตร ตามลำดับ  
M2 คือ ป้อนอากาศทุติยภูมิร้อยละ 5, 10 และ 5 ที่ความสูง 1, 2 และ 2.4 เมตร ตามลำดับ  
M3 คือ ป้อนอากาศทุติยภูมิร้อยละ 10, 5 และ 5 ที่ความสูง 1, 2 และ 2.4 เมตร ตามลำดับ  
M4 คือ ป้อนอากาศทุติยภูมิร้อยละ 7, 7 และ 7 ที่ความสูง 1, 2 และ 2.4 เมตร ตามลำดับ  
M5 คือ ป้อนอากาศทุติยภูมิร้อยละ 0, 10 และ 10 ที่ความสูง 1, 2 และ 2.4 เมตร ตามลำดับ  
M6 คือ ป้อนอากาศทุติยภูมิร้อยละ 10, 0 และ 10 ที่ความสูง 1, 2 และ 2.4 เมตร ตามลำดับ  
M7 คือ ป้อนอากาศทุติยภูมิร้อยละ 10, 10 และ 0 ที่ความสูง 1, 2 และ 2.4 เมตร ตามลำดับ



## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายชาญวิทย์ กมลรัตน์ เกิดวันที่ 4 สิงหาคม 2531 สำเร็จการศึกษาปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาปิโตรเคมีและวัสดุพอลิเมอร์ ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรม วัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร ปีการศึกษา 2553 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตร วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2554 สำเร็จการศึกษาปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ปีการศึกษา 2557 และได้เข้าร่วมการประชุมวิชาการแห่งชาติ The 2nd ASEAN Plus Three Graduate Research Congress (2nd AGRC) ในวันที่ 5-7 กุมภาพันธ์ 2557 ณ โรงแรมเอส 31 สุขุมวิท กรุงเทพมหานคร

