

การศึกษาสัดส่วนการปนื้ออากาศที่มีผลต่อการเกิดอนุภาคขนาดเล็กและออกไซด์ของไนโตรเจน
จากการเผาไหม้ชีวมวลร่วมกับถ่านหิน



นายตุลาธร โอภากุลวงษ์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
ปีการศึกษา 2556
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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.

INFLUENCES OF AIR TO FUEL RATIO ON THE FORMATION OF FINE PARTICLES AND
NITROGEN OXIDES GENERATED DURING CO-COMBUSTION OF BIOMASS AND COAL

Mr. Tulathron Ophakulwong

The logo of Chulalongkorn University, featuring a central emblem with a sunburst and a tiered structure, set against a light background.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Environmental Engineering

Department of Environmental Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2013

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การศึกษาสัดส่วนการปนเปื้อนอากาศที่มีผลต่อการเกิดอนุภาค
ขนาดเล็กและออกไซด์ของไนโตรเจนจากการเผาไหม้ชีว
มวลร่วมกับถ่านหิน

โดย

นายตุลาธร โอภากุลวงษ์

สาขาวิชา

วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

อาจารย์ ดร. อัจฉริยา สุริยะวงษ์

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

ดร. สุภวัฒน์ วิวรรณภัทรกิจ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร. บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. ศิริมา ปัญญาเมธีกุล)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(อาจารย์ ดร. อัจฉริยา สุริยะวงษ์)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(ดร. สุภวัฒน์ วิวรรณภัทรกิจ)

.....กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. พิสุทธิ เพ็ชรมนกุล)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(รองศาสตราจารย์ ดร. สุวรรณิ จรรยาพูน)

ตุลาธร โอภากุลวงษ์ : การศึกษาสัดส่วนการป้อนอากาศที่มีผลต่อการเกิดอนุภาคขนาดเล็กและออกไซด์ของไนโตรเจนจากการเผาไหม้ชีวมวลร่วมกับถ่านหิน. (INFLUENCES OF AIR TO FUEL RATIO ON THE FORMATION OF FINE PARTICLES AND NITROGEN OXIDES GENERATED DURING CO-COMBUSTION OF BIOMASS AND COAL) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: อ. ดร. อัจฉรียา สุริยะวงค์, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: ดร. สุภวัฒน์ วิวรรณภัทรกิจ, 247 หน้า.

ลักษณะของการเผาไหม้และการเกิดออกไซด์ของไนโตรเจนและคาร์บอนมอนอกไซด์ในขณะที่เกิดการเผาไหม้ของชีวมวลกับถ่านหิน และกระบวนการเผาไหม้ร่วมกันของชีวมวลและถ่านหิน โดยมีการเลือกใช้ชีวมวล 4 ชนิด ได้แก่ แกลบ กากอ้อย เหง้ามันสำปะหลัง และ กะลามะพร้าว ถ่านหินทั้งสองชนิดที่เลือกใช้ได้แก่ ลิกไนต์ และ บิทูมินัส การศึกษาวิจัยของงานวิจัยในครั้งนี้จะทำการศึกษาการเผาไหม้ชีวมวลต่อถ่านหินในสัดส่วนที่แตกต่างกันดังนี้ 80:20 50:50 และ 20:80 โดยชีวมวลที่เลือกใช้นั้นเป็นชีวมวลที่มีอยู่ในประเทศไทยซึ่งเป็นชีวมวลที่เหลือทิ้งจากการเกษตรหรือเป็นกากชีวมวลที่เหลือจากกระบวนการอุตสาหกรรมบางประเภทและถ่านหินที่เลือกใช้จะเป็นถ่านหินที่มีการใช้มากในภาคอุตสาหกรรมในประเทศ ออกไซด์ของไนโตรเจน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ และอนุภาคฝุ่น ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการเผาไหม้เชื้อเพลิง โดยจะทำการศึกษาที่สัดส่วนอากาศมากเกินไปคิดเป็นร้อยละ 100 150 และ 200 ของปริมาณออกซิเจน และจะทำการตรวจวัดความเข้มข้นของมลสารที่เกิดขึ้นจากกระบวนการเผาไหม้เชื้อเพลิงชนิดต่างๆ แต่ละชนิด ซึ่งจากการเผาไหม้ชีวมวลและถ่านหินเพียงอย่างเดียวพบว่า (1) การเผาไหม้ถ่านหินเพียงอย่างเดียวเกิดออกไซด์ของไนโตรเจนมากกว่าการเผาไหม้ชีวมวล (2) ในสัดส่วนอากาศที่มากขึ้นมีผลทำให้การเกิดก๊าซไนโตรเจนออกไซด์และก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ลดลง (3) การเผาไหม้ชีวมวลเพียงอย่างเดียวทำให้เกิดอนุภาคฝุ่นมากกว่าการเผาไหม้ถ่านหินเพียงอย่างเดียว และการเผาไหม้ชีวมวลร่วมกับถ่านหินพบว่า (1) กระบวนการเผาไหม้ร่วมกันของชีวมวลและถ่านหินสามารถลดการเกิดอนุภาคได้ (2) ออกไซด์ของไนโตรเจน และก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ในกระบวนการเผาไหม้ร่วมกันมีค่าลดลง (3) สัดส่วนอากาศที่มากเกินไปมีผลต่อการเกิดออกไซด์ของไนโตรเจนและก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์

ภาควิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ปีการศึกษา 2556

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

5370542021 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEYWORDS: COAL / BIOMASS / COMBUSTION / CO-COMBUSTION

TULATHRON OPHAKULWONG: INFLUENCES OF AIR TO FUEL RATIO ON THE FORMATION OF FINE PARTICLES AND NITROGEN OXIDES GENERATED DURING CO-COMBUSTION OF BIOMASS AND COAL. ADVISOR: LECTURER ACHARIYA SURIYAWONG, Ph.D., CO-ADVISOR: SUPAWAT VIWATPATARAKID, Ph.D., 247 pp.

Combustion characteristics of nitrogen oxide and carbon monoxide generation during combustion process. In this study were used four different type of biomass included rice husk, bagasse, topical rhizome and coconut shell were selected as biomass fuel. Two different type of coal include lignite and bituminous were selected as coal fuel. Ratio of fuel used 80:20, 50:50 and 20:80 in experiment. Biomass were selected by amount of biomass from agriculture in Thailand and characteristic of biomass. Coal used in this study was widely used in industrial in Thailand. Nitrogen oxide (NO_x), carbon dioxide (CO_2), carbon monoxide (CO) and particles were generated from combustion and co-combustion in excess air. Air percentage used 100, 150 and 200 percentage of O_2 requirement. Pollutant concentration emission from combustion and co-combustion biomass and coal in excess air were compared in different air and fuel ratio. For combustion only biomass or coal were founded (1) Coal combustion has nitrogen oxide higher than biomass combustion. (2) Higher air ratio nitrogen oxide were decrease more than lower air ratio. (3) Particles were generated from biomass combustion more than coal combustion. For co-combustion biomass and coal were founded (1) Co-combustion of biomass and coal can be decrease particles from combustion of biomass and coal. (2) Nitrogen oxide and carbon monoxide were decreased in co-combustion process. (3) Air ratio have effect on combustion process can be decreased nitrogen oxide and carbon monoxide.

Department: Environmental
Engineering

Field of Study: Environmental
Engineering

Academic Year: 2013

Student's Signature

Advisor's Signature

Co-Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยความกรุณาและความช่วยเหลือจากหลายฝ่าย ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์ ดร. อัจฉริยา สุริยะวงค์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ ดร. สุภวัฒน์ วิวรรณภัทรกิจอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ได้ให้คำปรึกษา ข้อคิดเห็น และตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์นี้จนเสร็จสมบูรณ์

กราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ศิริมา ปัญญาเมธิกุล ที่กรุณาเป็นประธานในการสอบวิทยานิพนธ์ และกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. พิสุทธิ เพ็ชรมนกุล ที่กรุณาเป็นกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์

กราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์.ดร.สุวรรณี จรรยาพูน ที่กรุณาเป็นกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์และให้คำปรึกษาในการทำวิทยานิพนธ์

กราบขอบพระคุณ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่ให้เงินทุนสนับสนุนทุนในการวิจัยใน ครั้งนี้

กราบขอบพระคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่ให้เงินทุนสนับสนุนทุนส่งเสริมการวิจัยคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กราบขอบพระคุณ ดร.นพดล สิ้นไพศาลสมบูรณ์ และ คุณดุสิต บัวเกตุ ที่คอยให้คำแนะนำและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัยในครั้งนี้

ขอขอบคุณ เพื่อน รุ่นพี่ รุ่นน้องนิสิตปริญญาโททั้งภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมและภาควิชาวิศวกรรมเคมี นายภาณุพงศ์ ทองประสิทธิ์ ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำแนะนำ และให้กำลังใจเสมอมา

ท้ายที่สุดขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัว ที่ให้ความรัก กำลังใจ และให้การสนับสนุนตลอดมาโดยเฉพาะ นางสาวอัจฉรา โอภากุลวงษ์ ที่ให้ความช่วยเหลือในการทำงานวิจัยครั้งนี้จนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

สารบัญ

หน้า



สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1. 1 ปริมาณการใช้วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรและชีวมวลเพื่อผลิตเป็นพลังงานทดแทน.....	2
ตารางที่ 1. 2 ปริมาณถ่านหินชนิดต่างๆที่ใช้เพื่อผลิตพลังงาน	2
ตารางที่ 1. 3 ศักยภาพการใช้ชีวมวลของประเทศไทย.....	3
ตารางที่ 1. 4 กำลังการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานทดแทน	5
ตารางที่ 1. 5 ความร้อนที่ผลิตได้จากพลังงานทดแทน	5
ตารางที่ 2. 1 องค์ประกอบหลักของชีวมวล.....	12
ตารางที่ 2. 2 กลุ่มโมเลกุลขนาดใหญ่ที่สร้างเป็นชีวมวล	12
ตารางที่ 2. 3 ส่วนประกอบลิกโนเซลลูโลสของพืชพลังงาน	13
ตารางที่ 2. 4 องค์ประกอบทางเคมีของชีวมวลที่ได้จากการเกษตร.....	13
ตารางที่ 2. 5 การใช้และนำเข้าถ่านหิน	19
ตารางที่ 2. 6 มาตรฐานควบคุมการปล่อยทิ้งอากาศเสียจากโรงไฟฟ้าใหม่	34
ตารางที่ 3. 1 จำนวนตัวอย่างที่ทำการทดลองที่เกิดจากการเผาไหม้.....	49
ตารางที่ 3.2. 1 ชุดควบคุมการป้อนเชื้อเพลิง.....	54
ตารางที่ 3.2. 2 ชุดห้องเผา.....	55

ตารางที่ 3.2. 3 ชุดแยกก๊าซ	55
ตารางที่ 3.2. 4 ชุดหัวจ่ายแก๊ส	56
ตารางที่ 3.2. 5 ชุดหล่อเย็น	56
ตารางที่ 3.2. 6 แผงควบคุม	57
ตารางที่ 4. 1 ลักษณะองค์ประกอบทางเคมีของเชื้อเพลิงที่ใช้ทดสอบ	59
ตารางที่ 4. 2 ลักษณะองค์ประกอบทางกายภาพของเชื้อเพลิงที่ใช้ทดสอบ	60
ตารางที่ 4. 3 อุณหภูมิสูงสุดของเชื้อเพลิงแต่ละชนิด	79

สารบัญภาพ

	หน้า
รูปที่ 2. 1 กระบวนการเผาไหม้ทั่วไป	29
รูปที่ 2. 2 แสดงระบบทางเดินหายใจ	32
รูปที่ 2. 3 แสดงการเกิดสารมลพิษการเผาไหม้ชีวมวล	35
รูปที่ 3. 1 ถ่านหินที่ใช้ในการวิจัย	44
รูปที่ 3. 2 ชีวมวลที่ใช้ในการวิจัย	45
รูปที่ 3. 3 ขั้นตอนดำเนินงานวิจัย	48
รูปที่ 3. 4 ระบบเตา	53
รูปที่ 3. 5 แผงวงจรควบคุม	54
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ	ช
บทที่ 1	1

1.1	ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2	วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	6
1.3	ขอบเขตของงานวิจัย	6
1.4	ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	7
บทที่ 2		8
2.1	แนวคิดและทฤษฎี	8
2.1.1	พลังงาน.....	8
2.1.2	พลังงานหมุนเวียน	9
2.1.3	ชีวมวล.....	10
2.1.4	ถ่านหิน.....	17
2.1.5	กระบวนการเปลี่ยนชีวมวลและถ่านหินเป็นพลังงาน.....	19
2.1.6	กระบวนการเผาไหม้.....	25
2.1.7	สัดส่วนเชื้อเพลิงต่ออากาศ (A/F Ratio)	30
2.1.8	ฝุ่นละออง (Particulate Matter).....	31
2.1.9	องค์ประกอบของชีวมวลที่มีผลต่อการเกิดมลพิษ	35
2.1.10	การเกิดไนโตรเจนออกไซด์	36
2.1.10	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	38
บทที่ 3		44
3.1	อุปกรณ์และสารเคมี	44
3.1.1	เชื้อเพลิงที่ใช้ในงานวิจัย	44
3.2	วิธีดำเนินงานวิจัย	46
3.3.1	การป้อนอากาศและการทำงานของเตาเผา	57
บทที่ 4		59
4.1	ลักษณะของเชื้อเพลิงที่ใช้ในการเผาไหม้.....	59
4.2	จำนวนอนุภาคที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ชีวมวลและถ่านหิน	60
4.2.1	จำนวนอนุภาคที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ชีวมวลและถ่านหินเพียงอย่างเดียว.....	60
4.2.2	การกระจายขนาดของอนุภาคที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ของชีวมวลและถ่านหิน	61

4.2.3 การกระจายขนาดของอนุภาคที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ของร่วมกันชีวมวลและถ่านหิน	63
4.3 ไนโตรเจนออกไซด์ที่เกิดจากการเผาไหม้	79
4.3.1 ไนโตรเจนออกไซด์ที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ชีวมวลและถ่านหินที่อากาศมากเกินพอร้อยละ 100, 150 และ 200 ของออกซิเจน	80
4.3.2 ไนโตรเจนออกไซด์ที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ร่วมกันของชีวมวลและถ่านหินที่อากาศมากเกินพอ 100, 150 และ 200 เปอร์เซ็นต์ของออกซิเจน	86
4.3.2.1 ที่สัดส่วนชีวมวลต่อถ่านหิน (80:20)	86
4.3.2.2 ที่สัดส่วนชีวมวลต่อถ่านหิน (50:50)	94
4.3.2.3 ที่สัดส่วนชีวมวลต่อถ่านหิน (20:80)	101
4.4 ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่เกิดจากการเผาไหม้	109
4.4.1 ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ชีวมวลและถ่านหินที่อากาศมากเกินพอ 100, 150 และ 200 เปอร์เซ็นต์ของออกซิเจน	109
4.4.2 ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ชีวมวลร่วมกับถ่านหินที่อากาศมากเกินพอ 100, 150 และ 200 เปอร์เซ็นต์ของออกซิเจน	114
บทที่ 5	137
5.1 สรุปผลการวิจัย	137
5.1.1 อนุภาคที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้	137
5.1.2 ออกไซด์ของไนโตรเจนที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ชีวมวลและถ่านหิน	138
5.1.3 คาร์บอนมอนอกไซด์ที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ชีวมวลและถ่านหิน	139
5.1.4 บทสรุปเชิงประยุกต์	139
5.2 ข้อเสนอแนะ	140
รายการอ้างอิง	141
ภาคผนวก ก	146
ภาคผนวก ข	238
ภาคผนวก ค	240
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	247



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันโลกมีประชากรเพิ่มมากขึ้นกว่าในอดีตและประชากรเหล่านั้นต้องการพลังงานเพื่อมาใช้อำนวยความสะดวกในชีวิตประจำวัน ซึ่งทำให้ความต้องการพลังงานสูงมากขึ้นตามไปด้วย ดังนั้นพลังงานนั้นจะถูกนำไปใช้ในส่วนของการผลิตสิ่งของต่างๆ ทั้งเครื่องอุปโภคและบริโภคแล้วแต่ใช้พลังงานทั้งสิ้น พลังงานยังต้องใช้ในกระบวนการขนส่ง และใช้ในกิจกรรมประจำวันของมนุษย์อีกด้วย พลังงานที่เราใช้ในแต่ละวันนั้นต้องผ่านกระบวนการต่างๆ เช่น การเผาไหม้ (Combustion) กระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน (Gasification) หรือไพโรไลซิส (Pyrolysis) เป็นต้น ซึ่งกระบวนการเหล่านี้ล้วนแล้วแต่ก่อให้เกิดปัญหามลพิษตามมา โดยเชื้อเพลิงที่ใช้ในการผลิตพลังงานนั้นล้วนแล้วแต่เป็นพลังงานที่ใช้แล้วหมดไป เช่น น้ำมัน ก๊าซธรรมชาติ ถ่านหิน เป็นต้น ดังนั้น เพื่อลดปัญหามลพิษและการใช้เชื้อเพลิงที่มีอยู่อย่างจำกัด เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด จึงควรมีการส่งเสริมในการใช้พลังงานทดแทนเพื่อความยั่งยืนทางด้านพลังงาน

การใช้พลังงานทดแทนนั้นเพิ่มสูงขึ้นจากในอดีต ในปี 2554 ประเทศไทยได้มีการใช้พลังงานทดแทน 6,456 พันตัน เทียบเท่าน้ำมันดิบ และปี 2555 ได้มีการใช้พลังงานทดแทน 7,294 พันตัน เทียบเท่าน้ำมันดิบ ซึ่งเพิ่มขึ้นจากปีก่อนคิดเป็น 13.0 เปอร์เซ็นต์ ทำให้สามารถลดการนำเข้าพลังงานได้คิดเป็น 178,849 ล้านบาท และได้มีการลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 22.37 ล้านตัน (กรัมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน 2555) จากข้อมูลที่ใช้วัสดุเหลือใช้จากเกษตรกรรมและชีวมวลเพื่อผลิตเป็นพลังงานทดแทน (ตารางที่ 1.1) และปริมาณถ่านหินที่ใช้เพื่อผลิตเป็นพลังงาน (ตารางที่ 1.2) ซึ่งข้อมูลจากตารางที่ 1.1 แสดงให้เห็นว่ามีการนำเอาชีวมวลมาใช้เป็นพลังงานทดแทนมากขึ้น และตารางที่ 1.2 แสดงให้เห็นว่าการใช้ถ่านหินค่อยๆมีปริมาณลดลงเรื่อยๆ โดยเฉพาะปี พ.ศ.2555 ได้มีการลดปริมาณถ่านหินลง และการใช้พลังงานทดแทนก็เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดแนวโน้มการใช้ชีวมวล และผลผลิตทางการเกษตรนั้นเพิ่มขึ้นอาจจะมีแนวโน้มที่สามารถลดการใช้งานของถ่านหินลงได้ในทุกๆปี และจากตารางที่ 1.3 จะแสดงถึงศักยภาพในการใช้ชีวมวลโดยรวมของประเทศ ซึ่งพืชที่ให้ค่าความร้อนสูง ได้แก่ ปาล์มน้ำมัน และมันสำปะหลัง โดยเฉพาะมันสำปะหลังที่มีการปลูกมากในประเทศ

ตารางที่ 1. 1 ปริมาณการใช้วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรและชีวมวลเพื่อผลิตเป็นพลังงานทดแทน

ปี พ.ศ.	ปริมาณการใช้ชีวมวล* (พินตันเทียบเท่าน้ำมันดิบ)	ปริมาณการใช้วัสดุเหลือใช้จาก เกษตรกรรม (พินตันเทียบเท่าน้ำมันดิบ)	รวม (พินตันเทียบเท่าน้ำมันดิบ)
2551	2,843	965	3,808
2552	2,856	1,067	3,923
2553	2,768	1,331	4,099
2554	3,129	801	3,930
2555	3,990	1,015	5,005

*ชีวมวล ได้แก่ แกลบ และกากอ้อย

ที่มา : กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (2555)

ตารางที่ 1. 2 ปริมาณถ่านหินชนิดต่างๆที่ใช้เพื่อผลิตพลังงาน

ชนิดของถ่านหิน	ปริมาณการใช้ในแต่ละปี (พินตันเทียบน้ำมันดิบ)				
	2551	2552	2553	2554	2555
แอนทราไซต์	173	138	182	165	205
บิทูมินัส	1,437	1,974	586	257	295
ถ่านโค้ก	34	7	177	109	132
ลิกไนต์	904	870	888	1,350	829
ถ่านอัดและอื่นๆ	5,194	4,504	6,407	5,320	4,333
รวม	7,744	7,493	8,204	7,201	5,794

ที่มา : กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (2555)

ตารางที่ 1. 3 ศักยภาพการใช้ชีวมวลของประเทศไทย

ชนิด	ผลผลิต (ตัน/ปี)	ชีวมวล (ส่วนที่ใช้)	ปริมาณชีวมวล เหลือใช้ (ตัน/ปี)	ค่าความ ร้อน (MJ/Kg)	ศักยภาพพลังงาน	
					(TJ)	(Ktoe)
อ้อย	66,816,446	ชานอ้อย	4,190,794.31	14.40	60,347.44	1,428.54
		ยอดและใบ	13,439,727.21	17.39	233,716.86	5,532.52
ข้าว	31,508,364	แกลบ	3,510,598.90	14.27	50,096.25	1,185.87
		ฟางข้าว	25,646,547.96	10.24	262,620.65	6,216.73
ถั่วเหลือง	190,480	ต้น/เปลือก/ ใบ	170,383.17	19.44	3,312.35	78.41
ข้าวโพด	4,616,119	ซัง	584,539.15	18.04	10,545.09	249.62
ปาล์มน้ำมัน	8,162,379	ลำต้น	2,758,777.36	18.04	49,768.34	1,178.11
		ทะลายเปล่า				
		ใย	1,024,868.34	17.86	18,304.15	433.29
		กะลา	162,970.06	17.62	2,871.53	67.97
		ก้าน	38,959.04	18.46	719.18	17.02
		ลำต้น	2,203,740	9.83	21,824.24	516.62
มัน	30,088,025	เหง้า	2,439,236.19	18.42	44,930.73	1,063.60
			1,834,466.88	18.42	33,790.88	799.89
สับปะหลัง		ก้าน				
มะพร้าว	1,380,980	กาบ	628,990.82	15.40	9,686.46	229.30
		กิ่ง/ก้าน	464,250.95	16.23	7,534.79	178.36
ไม้ยางพารา	3,090,280		312,118.28	14.98	4,675.53	110.68
รวม	145,853,073		59,539,905.20	???	504,339.40	11,938.67

ที่มา : กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (2555)

การนำชีวมวลและสิ่งที่เหลือใช้จากการเกษตรมาเพื่อใช้เป็นพลังงานทดแทนนั้นมีมากขึ้นในปัจจุบัน โดยเฉพาะในภาคของอุตสาหกรรมที่สามารถนำกากของสารตั้งต้นที่ใช้แล้วมาผ่านกระบวนการเพื่อให้ได้ออกมาเป็นพลังงาน ซึ่งกระบวนการที่นิยมนำมาใช้ คือ กระบวนการทางชีวภาพ จะทำให้สามารถได้พลังงานออกมา และกระบวนการเผาไหม้ เพื่อเปลี่ยนกากของสารตั้งต้นให้เป็นพลังงาน กระบวนการทางความร้อน (Thermochemical Conversion) ซึ่งวิธีที่ง่ายที่สุดคือ การนำไปเผาให้ได้อาซึ่งความร้อน (Combustion) และมีอีกสองกระบวนการที่กล่าวไปแล้วในข้างต้น ซึ่งกระบวนการเหล่านี้จะก่อให้เกิดสารมลพิษชนิดต่างๆ เช่น ก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ (CO) ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ (NO_x) ก๊าซซัลเฟอร์ออกไซด์ (SO_x) ไออน้ำ (H₂O) และอนุภาคขนาดเล็ก (Fine Particles)

ในปัจจุบันการนำพลังงานทดแทนมาใช้กันอย่างแพร่หลายทั่วโลกและในประเทศไทยได้นำมาใช้เช่นกัน การใช้พลังงานทดแทนนั้นเพิ่มสูงขึ้นมากจากปีก่อนหน้านี้ ดังที่แสดงในตารางที่ 1.4 และตารางที่ 1.5 จะเห็นได้ว่ามีการใช้พลังงานทดแทนเพิ่มมากขึ้นเพื่อใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้าและพลังงานความร้อนมากขึ้น ซึ่งจะเห็นได้ว่าการนำชีวมวลมาเป็นพลังงานทดแทนมากที่สุดเนื่องจากประเทศไทยนั้นเป็นประเทศที่มีการทำเกษตรกรรมเป็นหลักเมื่อทำการเก็บเกี่ยวผลผลิตแล้วจึงมีวัสดุที่เหลือทิ้งเป็นจำนวนมาก และเป็นสิ่งที่มีมูลค่าน้อยหรือไม่มีเลย การนำมาใช้เป็นพลังงานทดแทนจากวัสดุที่เหลือทิ้งเหล่านี้เพิ่มมูลค่าได้ ทั้งนี้ในภาคอุตสาหกรรมนั้นก็ยังสามารถเอากากของเสียมาใช้เป็นพลังงานทดแทนเพื่อที่จะลดการใช้ถ่านหินภายในระบบ เพื่อลดต้นทุนในการผลิต และทำให้ประเทศลดการนำเข้าถ่านหินได้จากต่างประเทศมากขึ้นด้วย

การใช้พลังงานทดแทนในประเทศไทยนั้นมีความแพร่หลายมากขึ้นจากในอดีตจนถึงปัจจุบัน การนำเอาชีวมวลที่มีมากในประเทศ ได้แก่ แกลบ กากอ้อย ชี้นส่วนต่างๆของปาล์ม ชี้นส่วนต่างๆของมะพร้าว เหง้ามันสำปะหลัง เป็นต้น ซึ่งการนำเอาชีวมวลเหล่านี้มาเผาไหม้เพื่อให้ได้พลังงาน สิ่งที่จะตามมา คือปัญหาทางด้านมลพิษที่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงเหล่านี้ นอกจากนี้ยังมีการนำเอาชีวมวลมาเผาไหม้ร่วมกันกับถ่านหิน เพื่อลดการใช้ถ่านหินเพียงอย่างเดียวด้วย ดังนั้นจึงควรมีการศึกษาผลกระทบที่เกิดจากจากนำเอาชีวมวลมาเป็นพลังงานทางเลือก และหามาตรการในการจัดการและควบคุมเพื่อลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

ตารางที่ 1. 4 กำลังการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานทดแทน

ไฟฟ้าจากพลังงานทดแทน	กำลังการผลิตไฟฟ้า (MW)			อัตราการเปลี่ยนแปลง (Percentage)
	2553	2554	2555	
แสงอาทิตย์	48.6	78.7	376.7	378.7
ลม	5.6	7.3	111.7	1,430.1
พลังน้ำขนาดเล็ก	58.9	95.7	101.8	6.4
ชีวมวล	1,650.2	1,790.2	1,959.9	9.5
แก๊สชีวภาพ	103.4	159.2	193.4	21.5
ขยะ	13.1	25.5	42.7	67.5
รวม	1,879.8	2,156.6	2,786.2	29.2

ที่มา : กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (2555)

ตารางที่ 1. 5 ความร้อนที่ผลิตได้จากพลังงานทดแทน

ความร้อนจากพลังงาน ทดแทน	ปริมาณ (พันตันเทียบเท่าน้ำมันดิบ)			อัตราการเปลี่ยนแปลง (Percentage)
	2553	2554	2555	
แสงอาทิตย์	1.8	2.0	4.0	100
ชีวมวล	3,449	4,123	4,346	7.5
แก๊สชีวภาพ	311	402	485	13.9
ขยะ	1.1	1.7	78	4,480
รวม	3,763	4,529	4,886	7.9

ที่มา : กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (2555)

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. ศึกษาสัดส่วนของการปนื้ออากาศเพื่อใช้ในการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงแต่ละชนิด
2. ศึกษาการเกิดไนโตรเจนออกไซด์ ที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ชีวมวลแต่ละชนิด และการเผาไหม้ถ่านหินร่วมกับชีวมวล
3. ศึกษาการกระจายตัวของอนุภาคฝุ่นที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ชีวมวล และการเผาไหม้ถ่านหินร่วมกับชีวมวล

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

เป็นการวิจัยเชิงทดลองกึ่งอุตสาหกรรม เพื่อหาปริมาณอากาศที่เหมาะสมในการเผาไหม้ชีวมวลในแต่ละชนิด และการเผาไหม้ชีวมวลร่วมกับถ่านหินในแต่ละสัดส่วนดังนี้ 100:0, 20:80, 50:50, 80:20 และ 0:100 ศึกษาสารมลพิษ ซึ่งได้แก่ NO, CO และ CO₂ ที่เกิดจากการเผาไหม้ชีวมวล และการเผาไหม้ถ่านหินร่วมกับชีวมวล เพื่อใช้เป็นแนวทางในการเลือกใช้ชีวมวลเพื่อที่จะเป็นพลังงานทดแทน และการเผาไหม้ถ่านหินร่วมกับชีวมวลเพื่อลดมลพิษที่เกิดจากการเผาไหม้ชีวมวล และการเผาไหม้ถ่านหินร่วมกับชีวมวลใช้เป็นแนวทางในการเลือกสัดส่วนอากาศที่เหมาะสมสำหรับชีวมวลแต่ละชนิด และการเผาไหม้ถ่านหินร่วมกับชีวมวล โดยงานวิจัยนี้มีขอบเขตการศึกษาดังนี้

1.3.1 ชีวมวลที่เลือกใช้ ได้แก่ แกลบ กากอ้อย เหม้ามันสำปะหลัง และ กะลามะพร้าว

1.3.2 ถ่านหินที่เลือกใช้ ได้แก่ ลิกไนต์ และบิทูมินัส

1.3.3 ศึกษาที่สภาวะต่างๆ ดังนี้

- ศึกษาการเผาไหม้ของถ่านหินกับชีวมวลและถ่านหินร่วมกับชีวมวล
- ศึกษาสัดส่วนการปนื้อของอากาศ และศึกษาอุณหภูมิในขณะที่เผาไหม้ถ่านหินและชีวมวลแต่ละชนิด และการเผาไหม้ชีวมวลร่วมกับถ่านหิน

1.3.4 ตัวแปรที่ต้องการวิเคราะห์ซึ่งได้แก่ ขนาดอนุภาคที่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง สารมลพิษที่ทำการศึกษาได้แก่ CO, CO₂ และ NO_x ที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 เพื่อใช้เป็นข้อมูลเบื้องต้นในการเลือกใช้ชีวมวลในการเผาไหม้ และการเผาไหม้ถ่านหินร่วมกับชีวมวล

1.4.2 เพื่อใช้เป็นแนวทางในการป้องกันอากาศเพื่อลดการเกิดมลสารที่จะเกิดจากการเผาไหม้ชีวมวล และการเผาไหม้ถ่านหินร่วมกับชีวมวล

1.4.3 เพื่อใช้เป็นข้อมูลเบื้องต้นในการออกแบบอุปกรณ์เพื่อลดการปล่อยมลพิษจากการเผาไหม้ชีวมวล และการเผาไหม้ถ่านหินร่วมกับชีวมวล



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 แนวคิดและทฤษฎี

2.1.1 พลังงาน

ในปัจจุบันนี้พลังงานเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญในการดำรงชีวิต เพราะในการดำเนินชีวิตในแต่ละวันล้วนต้องใช้พลังงานทั้งสิ้นไม่ว่าจะเป็นทางด้านอุตสาหกรรม การขนส่ง การผลิตกระแสไฟฟ้า และทางด้านการบริการต่างๆ ซึ่งในยุคก่อนแหล่งพลังงานนั้นจะมาจากพลังงานที่ใช้แล้วหมดไป โดยส่วนใหญ่แล้วจะมาจากพลังงานที่ได้จากฟอสซิล แต่ในยุคปัจจุบันได้มีการคิดค้นเทคโนโลยีต่างๆที่สามารถทำให้นำพลังงานจากแหล่งธรรมชาติมาใช้ให้เกิดประโยชน์ได้ พลังงานนั้นมีหลายรูปแบบ ซึ่งรูปแบบพลังงานที่มีความสำคัญที่นำไปใช้เป็นพลังงานได้โดยง่าย คือ พลังงานความร้อน พลังงานเคมี พลังงานไฟฟ้า พลังงานกล และพลังงานที่อยู่ในรูปแบบที่ต่างกันั้นสามารถเปลี่ยนรูปแบบไปอยู่ในรูปแบบอื่นได้โดยต้นกำเนิดของพลังงานเหล่านี้ส่วนใหญ่จะมาจากเชื้อเพลิงฟอสซิลร้อยละ 80 และเป็นพลังงานจากชีวมวลร้อยละ 14

เชื้อเพลิงโดยส่วนใหญ่แล้วจะอยู่ในรูปของพลังงานเคมีซึ่งเมื่อถูกพลังงานเผาไหม้แล้วจะมีการเปลี่ยนรูปจากพลังงานเคมีไปเป็นพลังงานความร้อน และพลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นนั้นสามารถนำไปใช้ได้ เช่นนำความร้อนที่ได้ไปต้มน้ำเพื่อใช้ไอน้ำไปปั่นให้เกิดเป็นพลังงานไฟฟ้าได้ หรือจะใช้พลังงานความร้อนที่ได้เพื่อหุงต้มอาหาร เป็นต้น เชื้อเพลิง คือ สารที่มีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นไฮโดรเจนและคาร์บอน ซึ่งเมื่อเกิดการเผาไหม้แล้วจะได้คาร์บอนไดออกไซด์และน้ำเป็นหลัก ซึ่งเชื้อเพลิงแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มคือกลุ่มที่ใช้แล้วหมดไป ได้แก่ น้ำมันปิโตรเลียม ถ่านหิน ก๊าซธรรมชาติ อีกกลุ่มหนึ่งเป็นพลังงานที่ใช้แล้วไม่หมดไป ได้แก่ พลังงานหมุนเวียนอันได้แก่ พลังงานลม พลังงานน้ำ พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานความร้อนใต้พิภพ และพลังงานจากชีวมวล ซึ่งพลังงานจากชีวมวลนั้นในปัจจุบันได้รับความสนใจเป็นอย่างมากเพื่อนำมาใช้เป็นแหล่งพลังงานทดแทน เนื่องจากเป็นของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมบางประเภท เช่น โรงงานน้ำตาล โรงงานผลิตแป้ง เป็นต้น ซึ่งโรงงานเหล่านี้สามารถนำกากอ้อยที่ใช้ในการผลิตน้ำตาลแล้วมาเผาไหม้ร่วมกันกับถ่านหินเพื่อลดปริมาณถ่านหินที่ใช้ หรือ เหมืองมันที่ตัดออกก่อนนำมันสำปะหลังไปผลิตแป้งไปเผาเพื่อลดปริมาณหินที่ใช้อย่างได้

นอกจากนี้การเผาไหม้ร่วมกันของถ่านหินและชีวมวลยังช่วยลดการเกิดมลพิษและลดกากของเสียที่เกิดขึ้นได้เป็นอย่างดีอีกด้วย

การใช้พลังงานทดแทนจากชีวมวลในโลกปัจจุบัน คิดเป็น 14% ของพลังงานทั้งหมด ซึ่งเป็นแหล่งพลังงานหมุนเวียนที่มีความสำคัญมากในปัจจุบัน และปัจจุบันได้มีการนำชีวมวลมาใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้า ดังนั้นการศึกษาเกี่ยวกับมลพิษที่เกิดจากการเผาไหม้ชีวมวลจึงมีความสำคัญ เนื่องจากการเผาไหม้ของชีวมวลนั้นก่อให้เกิดมลพิษที่มีผลกระทบต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อม

2.1.2 พลังงานหมุนเวียน

ในปัจจุบันนี้ความต้องการพลังงานนั้นสูงขึ้นมากจากในอดีต เนื่องจากการขยายตัวของประชากรมากขึ้นทำให้ต้องมีการนำเข้าพลังงานพวกที่ใช้แล้วหมดไปเช่น น้ำมัน ก๊าซธรรมชาติ ถ่านหิน เป็นต้น เพื่อให้เพียงพอต่อความต้องการในประเทศ ดังนั้นเพื่อเป็นการลดการนำเข้าพลังงานที่ใช้แล้วหมดไปเหล่านั้นจึงได้มีการพัฒนาพลังงานทดแทนเพื่อลดการนำเข้าพลังงานที่ใช้แล้วหมดไป นอกจากนี้ พลังงานทดแทนนั้นยังก่อให้เกิดมลพิษที่น้อยกว่าถ่านหินเพราะองค์ประกอบของชีวมวลส่วนใหญ่เป็นสารอินทรีย์ระเหยได้และเกิดเป็นเถ้าน้อยกว่าอีกด้วย

พลังงานหมุนเวียน (Renewable Energy) คือ พลังงานที่มีอยู่ทั่วไปตามธรรมชาติ และสามารถนำมาใช้ทดแทนได้อย่างไม่จำกัดซึ่งในปัจจุบันนี้แบ่งออกได้เป็น 3 ประเภทหลัก ๆ ดังนี้

- พลังงานที่มาจากแสงอาทิตย์โดยตรง ได้แก่ พลังงานแสงอาทิตย์
- พลังงานที่มาจากแสงอาทิตย์โดยอ้อม ได้แก่ พลังงานลม พลังงานคลื่น พลังงานชีวมวล
- พลังงานที่ไม่ได้มาจากแสงอาทิตย์ ได้แก่ พลังงานใต้พิภพ น้ำขึ้นน้ำลง

การนำพลังงานหมุนเวียนเหล่านี้มาใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพนั้นขึ้นอยู่กับสภาพภูมิประเทศและสภาพภูมิอากาศ ในประเทศไทยนั้นพลังงานส่วนใหญ่ได้มาจากพลังงานที่ใช้แล้วหมดไป เช่น ถ่านหิน ก๊าซธรรมชาติ เป็นต้น ส่วนในด้านของพลังงานหมุนเวียนนั้นถูกนำมาใช้น้อยมากเช่น แกลบ กากอ้อย ชิ้นส่วนของมะพร้าว ชิ้นส่วนของปาล์มนั้นยังอยู่ในช่วงที่กำลังพัฒนาให้สามารถนำมาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุดได้ เนื่องจากประเทศไทยนั้นเป็นประเทศเกษตรกรรมทำให้มีผลผลิตที่เหลือจากการเกษตรเป็นจำนวนมากจึงสามารถนำผลผลิตเหล่านี้มาใช้เป็นแหล่งเป็นพลังงานที่มีศักยภาพได้ และประเทศไทยยังมีการเลี้ยงสัตว์ จึงสามารถนำมูลสัตว์ที่เกิดจากการเลี้ยงสัตว์มาผลิตเป็นก๊าซชีวภาพได้ นอกจากนี้ประเทศไทยตั้งอยู่ในแถบเส้นศูนย์สูตรจึงมีศักยภาพในการใช้พลังงานจากแสงอาทิตย์ได้โดยตรงทั้งการใช้โซลาร์เซลล์และการใช้วิธีรวมแสงเพื่อให้พลังงานความร้อนได้ ซึ่งใน

ปัจจุบันได้รับการสนับสนุนจากภาครัฐและเอกชนได้ให้ทุนช่วยเหลือทางด้านการวิจัยและพัฒนาพลังงานหมุนเวียนเพื่อที่จะสามารถนำมาใช้ให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด

2.1.3 ชีวมวล

การใช้ชีวมวลเป็นแหล่งความร้อนและการให้แสงสว่างนั้นมีมาตั้งแต่ยุคเริ่มแรกจนต่อเนื่องมาจนถึงยุคปัจจุบันชีวมวลนั้นก็แหล่งพลังงานที่สำคัญสำหรับประเทศที่มีการเกษตรกรรมเป็นหลัก และประเทศไทยก็เป็นประเทศที่มีการทำเกษตรกรรมเป็นหลัก จึงมีวัสดุเหลือใช้ที่เกิดจากการเกษตรเป็นจำนวนมากซึ่งสิ่งต่างๆเหล่านั้นสามารถนำมาเป็นเชื้อเพลิงชีวมวลได้ทั้งสิ้น ดังนั้นการนำชีวมวลมาประยุกต์ใช้จึงสามารถลดรายจ่ายในการนำเข้าเชื้อเพลิงและถ่านหิน นอกจากนี้แหล่งพลังงานจากชีวมวลนั้นยังก่อให้เกิดมลพิษน้อยลงอีกด้วย

ชีวมวล (Biomass) คือ วัสดุหรือสารอินทรีย์ซึ่งสามารถเปลี่ยนแปลงเป็นพลังงานได้ โดยนับถึงวัสดุเหลือทิ้งจากการเกษตรกรรมสามารถนำมาผลิตเป็นพลังงานหมุนเวียน ได้แก่ แกลบ กากอ้อยเห้ง้ามัน ชี้อ้อย และซังข้าวโพด เป็นต้นพลังงานจากชีวมวลนั้นเป็นพลังงานที่เกิดจากการกักเก็บพลังงานจากแสงอาทิตย์ซึ่งมาจากระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงซึ่งเกิดหมุนเวียนซ้ำแล้วซ้ำอีกในธรรมชาติ ดังนั้นชีวมวลจึงเป็นแหล่งพลังงานที่มาจากแหล่งซึ่งไม่มีวันหมดไปเพราะชีวมวลส่วนใหญ่มาจากวงจรของพืชที่มีระยะสั้นซึ่งต่างจากถ่านหินที่มีวงจรการเกิดเป็นเวลาหลายล้านปี การใช้ชีวมวลเป็นพลังงานหมุนเวียนในการผลิตความร้อนหรือกระแสไฟฟ้านั้นจะไม่เป็นการเพิ่มปริมาณของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เนื่องจากในขณะชีวมวลเจริญเติบโตนั้นได้มีการดึงเอาก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศมาใช้ในการเจริญเติบโต นอกจากนี้ชีวมวลยังมีปริมาณของกำมะถันต่ำกว่าเชื้อเพลิงฟอสซิลมาก ดังนั้นการใช้ชีวมวลแทนเชื้อเพลิงฟอสซิลจึงสามารถลดปริมาณก๊าซเรือนกระจกได้

แหล่งพลังงานที่เป็นแหล่งพลังงานชีวมวลปฐมภูมิที่ชัดเจนได้แก่ ไม้ฟืน ซึ่งมีมากใช้กันมาตั้งแต่ยุคแรกๆ เนื่องจากมีความสะดวกในการใช้ และมีการใช้กันอย่างแพร่หลายในชนบท แหล่งที่มาของไม้ฟืนส่วนใหญ่จะมาจากป่ากร้าง ป่าปลูกซึ่งแหล่งไม้ฟืนจะหาได้จากการเก็บไม้แห้งๆ ที่ตายแล้วแหล่งพลังงานชีวมวลทุติยภูมิเป็นแหล่งพลังงานที่มาจากวัสดุเหลือใช้จากการเกษตร เศษกากจากกระบวนการในโรงงาน ชีวมวลจากการเลี้ยงสัตว์ หรือชีวมวลที่ผ่านการแปลงสภาพมาแล้ว ซึ่งเศษซากวัสดุเหล่านี้จะแปรผันตามผลผลิตทางการเกษตรของประเทศ ซึ่งชีวมวลแต่ละประเภทนั้นก็จะมีข้อดีและข้อเสียต่างกันไป บางชนิดสามารถนำมาเผาให้พลังงานได้โดยตรงแต่บางชนิดก็ไม่สามารถนำมาเผาได้โดยตรงเนื่องจากมีความชื้นอยู่สูงแต่สามารถนำไปผลิตเป็นก๊าซชีวภาพได้

องค์ประกอบของชีวมวล

ชีวมวลส่วนใหญ่นั้นประกอบด้วยธาตุหลักๆ คือ คาร์บอน ออกซิเจน ไฮโดรเจน และธาตุอื่นๆที่มีปริมาณไม่สูงมาก ชีวมวลนั้นมีอยู่มากมายทั้งจากสิ่งที่มีชีวิตและสิ่งที่มีมีองค์ประกอบเป็น คาร์บอน ออกซิเจน ไฮโดรเจน โดยทั่วไปแล้วชีวมวลจะแบ่งออกเป็น 3 ประเภทหลักๆ ได้แก่ ชีวมวลแบบไม้ (Woody) แบบไม่ใช่ไม้ (Non-Woody) และของเสียจากสัตว์

ชีวมวลส่วนใหญ่นั้นประกอบไปด้วยเซลลูโลส (Cellulose) เฮมิเซลลูโลส (Hemicelluloses) ลิกนิน (Lignin) และสารสกัดบางจำพวก ดังที่แสดงในตารางที่ 2.1 ซึ่งถูกสร้างขึ้นจากโมเลกุลขนาดใหญ่ซึ่งแสดงในตารางที่ 2.2 เซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสที่มีการรวมตัวกันเรียกว่า โฮโลเซลลูโลส (Holocellulose) ซึ่งเป็นส่วนประกอบหลักของผนังเซลล์ของเส้นใยไม้ ซึ่งโดยปกติแล้วในไม้เนื้อแข็งประกอบไปด้วยเซลลูโลสประมาณ 40 – 55 % เฮมิเซลลูโลส 24 – 40 % และลิกนิน 18 – 25 % ขณะที่ไม้เนื้ออ่อนจะประกอบด้วยเซลลูโลสประมาณ 45 – 50 % เฮมิเซลลูโลส 25 – 35 % และลิกนิน 25 – 35 % โดยอาจมีสารอื่นปนอยู่ในปริมาณที่น้อยมากซึ่งจะเป็นสารธรรมชาติที่พบในไม้ เศษวัสดุจากการเกษตรส่วนใหญ่นั้นจะมีองค์ประกอบต่างจากไม้ ซึ่งโดยส่วนใหญ่จะประกอบด้วยโฮโลเซลลูโลสเป็นส่วนใหญ่ และพบลิกนินน้อยหรือแทบจะไม่พบเลยส่วนใหญ่เป็นโปรตีนสูง โดยทั่วไปแล้วพืชในตระกูลหญ้า เช่น ข้าว อ้อย จะมีเซลลูโลส 25 – 40 % เฮมิเซลลูโลส 25 – 50 % และลิกนิน 10 – 30 % พืชชนิดอื่นๆ เช่น ใยฝ้าย นั้นมีเซลลูโลสสูงถึง 80 – 95 % เฮมิเซลลูโลส 5 – 20 % และไม่มีลิกนินเลย ซึ่งองค์ประกอบต่างๆของ ชีวมวลจะแสดงในตารางที่ 2.3 โดยส่วนประกอบอื่น ๆ นั้นจะหมายถึง โปรตีน น้ำมัน และแร่ธาตุต่างๆ ส่วนองค์ประกอบทางด้านเคมีนั้นจะแสดงในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2. 1 องค์ประกอบหลักของชีวมวล

เซลลูโลส	
เฮมิเซลลูโลส	กาแลคโทกลูโคแมนแนน (Galactoglucomannans) อาราบิโนกลูคูโรนออกไซแลน (Arabinoglucuronoxylan) อาราบิโนกาแลคแทน (Arabinogalactan) กลูคูโรนออกไซแลน (Glucuronoxylan) กลูโคแมนแนน (Glucomannan)
ลิกนิน	
สารสกัด	สารประกอบอะลิฟาติก พวงไซและแว็กซ์ (Aliphatic Compounds) เทอร์ปีนส์และเทอร์ปีนอยด์ (Terpenes , Terpenoids) สารประกอบฟีนอลิก (Phenolic Compounds)

ที่มา : นคร. เทคโนโลยีการแปลงสภาพชีวมวล , 2552 (ทิพยาวงศ์ 2552)

ตารางที่ 2. 2 กลุ่มโมเลกุลขนาดใหญ่ที่สร้างเป็นชีวมวล

ส่วนประกอบ	กลุ่มโมเลกุลขนาดใหญ่	สูตรเคมีอย่างง่าย
เซลลูโลส	เซลโลบิโอส (Cellobiose)	$C_{12}H_{20}O_{10}$
เฮมิเซลลูโลส	กลูโคส (Glucose) แมนโนส (Mannose) ไซโลส (Xylose) กาแลคโทส (Galactose) อาราบิโนส (Arabinose) รามโนส (Rhamnose) กรดกลูคูโรนิก (Glucuronic acid)	$C_6H_{10}O_6$ $C_6H_{10}O_6$ $C_6H_{10}O_5$ $C_6H_{10}O_6$ $C_5H_{10}O_5$ $C_6H_{12}O_5$ $C_6H_{10}O_7$
ลิกนิน	โคนิเฟอรอลแอลกอฮอล์ (Coniferyl Alcohol) ซินาพิลแอลกอฮอล์ (Sinapyl Alcohol) พิกูมาริลแอลกอฮอล์ (P-Coumaryl Alcohol)	$C_{10}H_{12}O_3$ $C_{11}H_{14}O_4$ $C_9H_{10}O_2$

ที่มา : นคร. เทคโนโลยีการแปลงสภาพชีวมวล , 2552 (ทิพยาวงศ์ 2552)

ตารางที่ 2. 3 ส่วนประกอบลิกโนเซลลูโลสของพืชพลังงาน (Dry Basis)

ชนิดชีวมวล	เซลลูโลส (%)	เฮมิเซลลูโลส (%)	ลิกนิน (%)	อื่นๆ (%)
ฟางข้าว	38	36	16	10
ต้นข้าวโพด	53	15	16	16
ซังข้าวโพด	32	44	13	11
ชานอ้อย	35	25	20	20
ไม้โตเร็ว	50	23	22	5
กระดาษ	76	13	11	0
ไม้ไผ่	41	26	27	7

ที่มา : นคร. เทคโนโลยีการแปลงสภาพชีวมวล , 2552 (ทิพยาวงศ์ 2552)

ตารางที่ 2. 4 องค์ประกอบทางเคมีของชีวมวลที่ได้จากการเกษตร

ชนิด	C (%)	H (%)	O (%)	N (%)	S (%)
แกลบ	38.0	4.7	50.2	0.4	0.1
ฟางข้าว	38.5	6.1	39.3	0.7	0.2
ต้นข้าวโพด	44.2	5.8	43.5	1.3	< 0.01
ซังข้าวโพด	46.2	4.9	43.2	1.2	0.3
ชานอ้อย	44.9	5.9	40.7	0.8	< 0.01
ต้นปาล์ม	43.0	5.6	51.0	0.4	< 0.01
เส้นใยปาล์ม	47.2	6.0	36.7	1.4	0.3
ไม้พิน	51.8	5.7	40.9	0.1	< 0.01
ขี้เลื่อย	50.3	5.7	41.0	0.2	2.7

ที่มา : Tillman , 1991 (Tillman 1999)

คุณสมบัติทั่วไปของชีวมวล

คุณสมบัติโดยทั่วไปของชีวมวลที่ได้รับความนิยมในประเทศไทยมีดังนี้ (สำนักนโยบายและแผนพลังงาน, 2546) (สำนักงานนโยบายและแผนงาน 2546)

(1) แกลบ

ลักษณะทั่วไป - มีขนาดยาวประมาณ 5 มิลลิเมตร และหนาไม่เกิน 2 มิลลิเมตร แกลบได้มาจากข้าวเปลือกซึ่งต้องมีความชื้นไม่เกิน 15 %

แหล่งที่มา - ส่วนใหญ่มาจากโรงสีข้าว

การนำไปใช้งาน - โดยทั่วไปแกลบสามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงและนำมาใช้ปรับสภาพดินก่อนเพาะปลูกพืช

จุดเด่นจุดด้อย - มีปริมาณความชื้นต่ำเหมาะสำหรับนำไปทำเป็นเชื้อเพลิง นอกจากนี้แกลบยังมีมูลค่าที่สูง เมื่อเผาเกิดเป็นถ่าน 16 - 18 % โดยน้ำหนัก (แกลบมีน้ำหนักเบา 1 ลูกบาศก์เมตรหนัก 123 กิโลกรัม) และเสียค่าขนส่งสูงเพราะมีความหนาแน่นต่ำจึงทำให้ขนได้น้อยกว่าชีวมวลชนิดอื่นๆ

(2) ฟางข้าว

ลักษณะทั่วไป - มีขนาดเล็ก ยาวและกลวงได้มาหลังการเกี่ยวข้าว

แหล่งที่มา - จากนาข้าวหลังจากการเก็บเกี่ยวโดยถ้าใช้แรงงานคนฟางข้าวจะถูกกองไว้ด้านข้างของแปลงนา และถ้าใช้เครื่องเกี่ยวฟางข้าวจะอยู่ในแปลงนาที่ทำการเก็บเกี่ยวแล้ว

การนำไปใช้งาน - โดยส่วนใหญ่แล้วจะใช้เป็นอาหารสัตว์และนำไปใช้คลุมดินเพื่อเพาะเห็ดฟาง นอกจากนี้ยังใช้ในอุตสาหกรรมผลิตกระดาษอีกด้วย

จุดเด่นจุดด้อย - มีปริมาณที่มาก เนื่องจากประเทศไทยปลูกข้าวมากถึง 50 % ของอุตสาหกรรมเกษตรทั้งหมด แต่หากใช้รถเกี่ยวข้าวจะทำให้กระจายตัวอยู่ทั่วบริเวณแปลงนา ทำให้รวบรวมได้ยาก

(3) ใบอ้อยและยอดอ้อย

ลักษณะทั่วไป - มีลักษณะเรียวยาวจะทำการตัดออกก่อนที่จะส่งเข้าโรงงาน (ในกรณีที่ไม่ได้เอาใบออกจะทำให้ย่อยเสียราคา) ดังนั้นใบอ้อยและยอดอ้อยจึงกระจายตัวอยู่ทั่วพื้นที่ไร่

แหล่งที่มา - ตามไร่อ้อยทั่วไป แต่ในกรณีที่มีการเผาใบทิ้งจะไม่มีส่วนที่เป็นใบเหลืออยู่ (การเผานิยมทำก่อนการตัดอ้อย)

การนำไปใช้งาน - สวนที่เป็นยอดสามารถนำไปเป็นอาหารสัตว์และนำไปเพาะเป็นต้นใหม่ได้ (ในกรณีที่มีตา)

จุดเด่นจุดด้อย - ใบอ้อยสามารถนำไปเป็นเชื้อเพลิงได้ แต่อ้อยจะมีในแค่บางช่วงและในการรวบรวมต้องใช้เครื่องทุ่นแรงมาช่วยและมีแค่เฉพาะเดือนธันวาคมถึงมีนาคม

(4) กากอ้อย

ลักษณะทั่วไป - มีลักษณะเป็นเส้นใยได้จากกระบวนการผลิตน้ำตาลดิบ โดยการนำอ้อยมาคั้นน้ำออกซึ่งน้ำอ้อยใช้ผลิตเป็นน้ำตาลดิบส่วนที่เหลือคือกากอ้อย

แหล่งที่มา - โรงงานน้ำตาล

การนำไปใช้งาน - ใช้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตน้ำตาลดิบ และใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตกระดาษนอกจากนี้ยังมีงานวิจัยบางงานที่นำไปผลิตเป็นเอทานอลได้อีกด้วย

จุดเด่นจุดด้อย - ยังมีกากอ้อยอีกบางส่วนที่ยังไม่ได้ถูกใช้งาน แต่กากอ้อยนั้นน้ำหนักเบาและมีความชื้นสูง

(5) ชังข้าวโพดและลำต้น

ลักษณะทั่วไป - มีลักษณะเป็นชังสีขาวขุ่นที่ได้มาจากการสีข้าวโพดเพื่อนำเมล็ดมาเป็นอาหารเลี้ยงสัตว์ และส่วนที่เป็นลำต้นจะมีการตัดทิ้งหลังจากเก็บเกี่ยวแล้ว

แหล่งที่มา - ตามไร่ข้าวโพดต่างๆเนื่องจากในปัจจุบันได้มีการใช้เครื่องสีที่เคลื่อนที่เข้าไปได้ในไร่โดยตรงจึงสามารถหาซื้อได้ตามไร่ข้าวโพดทั่วไป

การนำไปใช้ - ชังข้าวโพดนั้นสามารถนำมาผลิตเป็นแอลกอฮอล์ได้ และสามารถนำมาผสมกับโมลาสเพื่อใช้เลี้ยงสัตว์ ส่วนของลำต้นก็นิยมนำมาใช้เลี้ยงสัตว์

จุดเด่นจุดด้อย - ข้าวโพดมีค่าความร้อนที่สูง เมื่อเปรียบเทียบกับชีวมวลอื่นๆ แต่เนื่องจากข้าวโพดมีประโยชน์ในหลายๆด้าน ดังนั้นจึงควรมีการพิจารณาเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ และในส่วนของลำต้นในการนำมาใช้ต้องใช้แรงคนจำนวนมากในการเก็บรวบรวม

(6) เหม้ามันสำปะหลัง

ลักษณะทั่วไป - เป็นส่วนที่ถูกตัดออกจากหัวมัน ด้านบนมีลักษณะของลำต้นอาจมีใบติดมาบ้างมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 15 เซนติเมตร ยาวประมาณ 30 เซนติเมตร มีรูปร่างไม่ค่อยแน่นอน

แหล่งที่มา - ไร่มันสำปะหลัง

การนำไปใช้ - ยังไม่ค่อยมีการนำไปใช้งานจึงถูกเผาทิ้งตามไร่

ข้อดีข้อเสีย - ยังไม่มีการนำไปใช้ประโยชน์จึงมีปริมาณมาก แต่เหม้ามันสำหรับหลังจากนั้นมีความชื้นสูง มีรูปร่างที่ไม่แน่นอน ดังนั้นก่อนใช้จึงควรมีการทำให้แห้งและย่อยให้มีขนาดไม่ต่างกันมาก ขึ้นอยู่กับการนำไปใช้ และส่วนมากจะมีดินติดปนมาด้วยซึ่งจะก่อให้เกิดเป็นมลพิษในกลุ่มของสาร

(7) กากปาล์ม

ลักษณะทั่วไป - เป็นเศษปาล์มที่เหลือจากการสกัดน้ำมันดิบจากทลายปาล์มสดมี 3 แบบ คือ ไฟเบอร์คือ มีลักษณะเป็นขุย กะลาปาล์มมีลักษณะคล้ายกะลามะพร้าวแต่มีขนาดเล็กกว่ามากซึ่งกะลาปาล์มมีขนาด 1-2 เซนติเมตร และทลายปาล์มเปล่า

แหล่งที่มา - ส่วนใหญ่จะได้มาจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบมาตรฐาน อย่างไรก็ตามโรงงานอีกประเภทหนึ่งคือนำเฉพาะปาล์มสดไม่รวมทลายมาสกัด เศษที่ได้สามารถนำมาทำเป็นอาหารสัตว์

การนำไปใช้ - เส้นใยส่วนใหญ่จะถูกใช้เพื่อเป็นเชื้อเพลิงในกระบวนการผลิตน้ำมันปาล์มดิบ ส่วนทลายปาล์มเปล่าได้มีการนำไปเพาะเห็ด

ข้อดีข้อด้อย - พืชตระกูลปาล์มนั้นมีความร้อนสูงสุดเหมาะสำหรับนำมาเป็นเชื้อเพลิง ส่วนทลายปาล์มนั้นยังมีอีกจำนวนมากที่ยังไม่ได้นำมาใช้ประโยชน์ แต่เนื่องจากมีข้อจำกัดทางด้านองค์ประกอบทางเคมี(มีคลอไรด์สูง) อาจทำให้เกิดปัญหาการกัดกร่อนได้และก่อนนำมาใช้ยังต้องมีการย่อยให้มีขนาดที่เหมาะสมก่อนการนำไปใช้งาน

ข้อดีข้อด้อยของชีวมวล

ข้อดี ชีวมวลเป็นพลังงานที่เกิดจากเศษเหลือใช้ทางเกษตรกรรม และประเทศไทยนั้นเป็นประเทศที่มีการทำเกษตรกรรมเป็นหลักจึงมีปริมาณชีวมวลมาก นอกจากนี้ชีวมวลยังเป็นแหล่งพลังงานที่มีระยะเวลาในการเกิดสั้นกว่าพลังงานที่เป็นถ่านหินและน้ำมันซึ่งมีเวลาการเกิดที่นานกว่ามาก ดังนั้นการใช้ชีวมวลเป็นแหล่งพลังงานจะทำให้เกษตรกรรมมีรายได้เพิ่มมากขึ้นและยังช่วยลดการนำเข้าพลังงานจากต่างประเทศอีกด้วย

ข้อด้อย โดยปกติแล้วชีวมวลนั้นจะมีปริมาณความชื้นที่มากกว่าถ่านหินดังนั้นเมื่อนำมาใช้เป็นพลังงานโดยการนำมาเผาจึงทำให้สูญเสียพลังงานในการระเหยน้ำออกจากตัวชีวมวล พลังงานความร้อนที่ได้จึงมีค่าไม่สูงมากนักและความชื้นของชีวมวลนั้นทำให้การเก็บรักษาทำได้ยากลำบาก และชีวมวลนั้นมีความหนาแน่นที่ต่ำจึงจำเป็นต้องใช้ในปริมาณที่มากกว่าและเมื่อต้องมีการขนส่งจึงทำให้เกิดความสิ้นเปลืองในการขนส่ง นอกจากนี้ชีวมวลยังมีขนาดที่ไม่แน่นอนก่อนนำไปใช้จึงต้องมีการย่อยให้มีขนาดตามที่ต้องการก่อนที่จะป้อนเข้าเตาเผา

ถึงแม้ว่าพลังงานชีวมวลนั้นจะมีอยู่ในปริมาณที่มากแต่ก็กระจุกกระจายและในกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้าจำเป็นต้องใช้ชีวมวลในปริมาณที่มากอย่างสม่ำเสมอ นอกจากนี้ชีวมวลบางชนิดยังมีในบางเดือนเท่านั้นเช่น กากอ้อยจะมีในช่วงเดือนธันวาคมไปจนถึงเดือนมีนาคม ดังนั้นการใช้ชีวมวลในการผลิตกระแสไฟฟ้าจึงต้องมีการพัฒนาวิธีการจัดเก็บรักษาและมีระบบการขนส่งที่ดี

เทคโนโลยีการแปลงสภาพชีวมวล

มีเพียงชีวมวลไม่กี่ชนิดเท่านั้นที่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้โดยตรงโดยกระบวนการเผาไหม้เพื่อให้ได้พลังงานมาใช้ประโยชน์ โดยชีวมวลส่วนใหญ่จะต้องมีการแปลงสภาพของชีวมวลก่อนที่จะนำไปใช้งานจริงโดยการแปลงสภาพชีวมวลนั้นมีหลักสำคัญอยู่คือการลดขนาดและเพิ่มความหนาแน่น เพื่อความสะดวกในการนำไปใช้และการเก็บรักษา โดยเทคโนโลยีที่นิยมใช้ในปัจจุบันมีทั้งหมดจำแนกเป็น 3 ประเภท คือ

1. กระบวนการแปลงสภาพเชิงกายภาพ (Physical Conversion) ได้แก่ การอัดแท่ง (Densification) การหีบคั้นน้ำมัน (Oil Extraction)

2. กระบวนการแปลงสภาพเชิงชีวเคมี (Biochemical Conversion) เป็นวิธีการใช้เชื้อจุลินทรีย์ในการย่อยสลายเพื่อให้เกิดก๊าซชีวภาพ เช่น กระบวนการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน และกระบวนการไฮโดรไลซิสเพื่อผลิตเอทานอล

3. กระบวนการแปลงสภาพเชิงเคมีความร้อน (Thermo Chemical Conversion) สามารถแบ่งออกได้ดังนี้คือ การเผาไหม้ (Combustion) ไพโรไลซิส (Pyrolysis) แก๊สซิฟิเคชัน (Gasification) ซึ่งความแตกต่างของแต่ละกระบวนการจะขึ้นอยู่กับสภาวะที่ต่างกันผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น

2.1.4 ถ่านหิน

ถ่านหินเป็นแหล่งพลังงานที่สำคัญในอดีตจนถึงปัจจุบัน อุตสาหกรรมถ่านหินซึ่งรวมทั้งการสำรวจ การผลิตและการใช้นั้นได้มีการพัฒนากันมาอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะในประเทศที่เป็นผู้นำทางด้านเศรษฐกิจอุตสาหกรรม เช่น สหรัฐอเมริกา ญี่ปุ่นและกลุ่มประเทศในยุโรป สำหรับภายในประเทศไทยนั้นถึงแม้จะมีปริมาณสำรองถ่านหินอยู่มากกว่า 2,000 ล้านตัน แต่ส่วนใหญ่เป็นถ่านหินที่มีชั้นคุณภาพต่ำตั้งแต่ลิกไนต์ (Lignite) จนถึง ซับบิทูมินัส (Sub-bituminous) อีกทั้งสภาพลักษณะที่ไม่ดีด้านผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในอดีตทำให้การใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงมีปริมาณไม่มากหากเปรียบเทียบกับประเทศอื่นๆ

อย่างไรก็ตามในอนาคตคาดว่าจะมีการใช้ถ่านหินเพิ่มขึ้น เนื่องจากเป็นเชื้อเพลิงที่มีราคาถูกและมีปริมาณสำรองมากเมื่อเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงชนิดอื่น แต่ทั้งนี้การนำถ่านหินมาใช้

ผลิตพลังงานจะต้องใช้ควบคู่กับเทคโนโลยีถ่านหินสะอาดเพื่อกำจัดสารพิษที่ปลดปล่อยออกมาในกระบวนการผลิตและการใช้ถ่านหิน

ประเภทของถ่านหิน (การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย 2547)

ถ่านหินแบ่งแยกประเภทตามลำดับชั้น 5 ประเภทได้แก่

1. พีต (Peat) เป็นขั้นตอนแรกในกระบวนการการเกิดถ่านหิน ส่วนใหญ่ พีตจะเกิดอยู่บริเวณที่เป็นพื้นที่ชุ่มน้ำ ให้ความร้อนต่ำ เนื่องจากมีปริมาณคาร์บอนคงตัวน้อย
2. ลิกไนต์ (Lignite) เป็นถ่านหินที่มีสีน้ำตาลฉูดด้าน มีซากพืชหลงเหลืออยู่เล็กน้อย มีคาร์บอนร้อยละ 60-75 มีออกซิเจนค่อนข้างสูง มีความชื้นสูงถึงร้อยละ 30-70 เมื่อติดไฟมีควันและเถ้าถ่านมาก มีความชื้นมาก เป็นถ่านหินที่ใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับผลิตกระแสไฟฟ้า
3. ซับบิทูมินัส (Subbituminous) เป็นถ่านหินที่ใช้เวลาในการเกิดนานกว่าลิกไนต์ มีสีน้ำตาลถึงสีดำ ผิวมีทั้งด้านและเป็นมัน มีทั้งเนื้ออ่อนและเนื้อแข็ง มีความชื้นประมาณร้อยละ 25-30 มีคาร์บอนสูงกว่าลิกไนต์ เป็นเชื้อเพลิงที่มีคุณภาพเหมาะสมในการผลิตกระแสไฟฟ้า และงานอุตสาหกรรม
4. บิทูมินัส (Bituminous) เป็นถ่านหินที่ใช้เวลาในการเกิดนานกว่าซับบิทูมินัส เนื้อแน่น แข็ง มีสีน้ำตาลถึงสีดำสนิท ประกอบด้วยชั้นถ่านหินสีดำมันวาว ใช้เป็นเชื้อเพลิงเพื่อการถลุงโลหะ และเป็นวัตถุดิบเพื่อเปลี่ยนเป็นเชื้อเพลิงอื่นๆ
5. แอนทราไซต์ (Anthracite) เป็นถ่านหินที่ใช้เวลาในการเกิดนานกว่าบิทูมินัส มีลักษณะดำเป็นเงา มันวาวมาก มีรอยแตกแว้แบบก้นหอย มีปริมาณคาร์บอนประมาณร้อยละ 90-98 ความชื้นต่ำประมาณร้อยละ 2-5 มีค่าความร้อนสูงแต่ติดไฟยาก เมื่อติดไฟให้เปลวไฟสีน้ำเงิน ไม่มีควัน ใช้เป็นเชื้อเพลิงในอุตสาหกรรมต่างๆ

ทรัพยากรถ่านหินในประเทศไทย

ปริมาณการใช้ถ่านหินที่ผลิตได้ภายในประเทศและจำนวนถ่านหินที่นำเข้าจากต่างประเทศจะเห็นได้ว่าการใช้ถ่านหินนั้นมีปริมาณลดลงเนื่องจากการนำเอาพลังงานทดแทนมาช่วยเสริม โดยที่การใช้และนำเข้าถ่านหินจะแสดงในตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2. 5 การใช้และนำเข้าถ่านหิน

ชนิดของถ่านหิน	ถ่านหินที่ใช้ในประเทศ					ถ่านหินที่นำเข้ามาใช้				
	2551	2552	2553	2554	2555	2551	2552	2553	2554	2555
ลิกไนต์	4,743	4,775	4,996	5,992	4,801	-	-	-	-	-
บิทูมินัส	-	-	-	-	-	4,557	4,411	4,157	2,845	4,768
แอนทราไซต์	-	-	-	-	-	180	504	278	162	97
ถ่านโค้ก	-	-	-	-	-	34	77	137	71	24
ถ่านอัดและอื่นๆ	-	-	-	-	-	5,255	5,278	6,097	7,324	6,751

หน่วย : พันตันเทียบเท่าน้ำมันดิบ

ที่มา : (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน 2555)

2.1.5 กระบวนการเปลี่ยนชีวมวลและถ่านหินเป็นพลังงาน

เมื่อพิจารณาองค์ประกอบหลักของชีวมวลและถ่านหิน จะเห็นได้ว่าชีวมวลและ ถ่านหินจะประกอบไปด้วยคาร์บอนและไฮโดรเจนที่ประกอบรวมกันเป็นโมเลกุลของสารอินทรีย์ที่สามารถถูกออกซิไดซ์ได้ ซึ่งสามารถนำไปเป็นเชื้อเพลิงได้โดยการนำไปผ่านกระบวนการทางความร้อน ได้แก่ การเผาไหม้ (Combustion) กระบวนการแยกสลายด้วยความร้อน (Pyrolysis) แก๊สซิฟิเคชัน (Gasification)

กระบวนการเผาไหม้ (Combustion)

กระบวนการเผาไหม้นั้นเป็นปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วระหว่างเชื้อเพลิงและออกซิเจน ที่เปลี่ยนจากพลังงานเคมีเป็นความร้อนและแสงออกมา ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ เผาไหม้สมบูรณ์ จะเกิดขึ้นเมื่อมีปริมาณออกซิเจนที่เพียงพอจะมีก๊าซที่เกิดขึ้น คือคาร์บอนไดออกไซด์ และการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์จะเกิดเป็นคาร์บอนมอนอกไซด์ดังที่แสดงในสมการที่ 2.1 และ 2.2 ตามลำดับ

การเผาไหม้ด้วยออกซิเจน (Combustion with Oxygen)



ซึ่งจากงานวิจัยนี้จะศึกษาปริมาณออกซิเจนที่เพียงพอในการทำปฏิกิริยาที่จะทำให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ซึ่งโดยทั่วไปแล้วการเผาไหม้ชีวมวลนั้นจะเกิดขึ้นแบ่งออกเป็นสามช่วง ได้แก่ ช่วงแรกคือ การทำแห้งอนุภาคจะได้รับความร้อนไปจนถึงช่วงอุณหภูมิไพโรไลซิส ช่วงกลางคือ การปล่อยสารระเหย จะเกิดการไพโรไลซิสของอนุภาคเชื้อเพลิงแข็งได้ผลิตภัณฑ์เป็นสารอินทรีย์ทั้งที่ระเหยได้และที่ระเหยไม่ได้ และถ่านชาร์ ช่วงสุดท้ายเป็นการเผาไหม้ถ่านชาร์จะเกิดขึ้นเมื่อกระบวนการไพโรไลซิสสิ้นสุดลง โดยสารอินทรีย์ที่เกิดขึ้นจะถูกเผาไหม้ไปในขั้นตอนนี้ร่วมกับถ่านชาร์ กระบวนการการเผาไหม้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ต่างๆได้ดังนี้

การเผาไหม้เพื่อให้ได้ความร้อนในครัวเรือน

มนุษย์ในยุคสมัยก่อนจะใช้ไม้ฟืนนำไปเผาไหม้ในเตาเผาเพื่อที่จะดึงเอาพลังงานความร้อนมาใช้ซึ่งการเผาไหม้ในลักษณะนี้มีประสิทธิภาพต่ำและทำให้เกิดมลพิษขึ้นมากเนื่องจากการเผาไหม้แบบไม่สมบูรณ์ ในปัจจุบันได้นำเอาเทคโนโลยีการอัดแท่งชีวมวลมาใช้ทำให้สามารถเพื่อประสิทธิภาพการเผาไหม้ได้

กระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน (Gasification)

กระบวนการแก๊สซิฟิเคชันนั้นเป็นกระบวนการที่เปลี่ยนเชื้อเพลิงที่อยู่ในรูปของแข็ง เช่น ชีวมวล ถ่านหิน เป็นต้น โดยการออกซิเดชันบางส่วนที่อุณหภูมิสูงด้วยอากาศ ออกซิเจน หรือน้ำในช่วงอุณหภูมิ 800 -1,800 องศาเซลเซียส ให้ไปแตกตัวไปอยู่ในสถานะที่เป็นแก๊สที่มีค่าความร้อนต่ำถึงปานกลาง ซึ่งกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันจะอยู่ในสถานะที่มีออกซิเจนที่ไม่เพียงพอทำให้เกิดเป็น ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ซึ่งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน ดังที่แสดงในตารางที่ 2.3-2.6

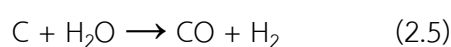
แก๊สซิฟิเคชันร่วมกับออกซิเจน (Gasification with Oxygen)



แก๊สซิฟิเคชันร่วมกับคาร์บอนไดออกไซด์ (Gasification with Carbon Dioxide)



แก๊สซิฟิเคชันร่วมกับไอน้ำ (Gasification with Steam)



แก๊สซิฟิเคชันร่วมกับไฮโดรเจน (Gasification with Hydrogen)



จากสมการที่แสดงให้เห็นว่ากระบวนการเผาไหม้แบบสมบูรณ์ (Complete Combustion) ต่างจากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน (Gasification)

ปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตก๊าซเชื้อเพลิง

ในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน อุณหภูมิและความดันจะเป็นสภาวะที่กำหนดให้เกิดปฏิกิริยาและเกิดก๊าซหรือสารประกอบเป็นไปตามสมดุลเคมี โดยทั่วไปแล้วที่อุณหภูมิต่ำกว่า 500 องศาเซลเซียสปฏิกิริยามักไม่สามารถดำเนินต่อไปได้ โดยทั่วไปที่อุณหภูมิมากกว่า 700 องศาเซลเซียสกระบวนการแพร่ที่จะเข้าทำปฏิกิริยากับคาร์บอนจะตอบสนองไม่ทันเมื่อเทียบกับกระบวนการทางเคมีที่รวดเร็ว ทำให้ปฏิกิริยาเคมีเป็นตัวกำหนดสมดุลปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น ที่สภาวะอุณหภูมิและความดันต่าง ๆ พื้นที่ที่ถูกจำกัดภายในเตาที่จะทำให้เกิดกระบวนการทางกายภาพทำหน้าที่คลุกเคล้าส่งถ่ายมวลสารได้ดีเพียงใด ล้วนเป็นปัจจัยที่ส่งผลให้ปฏิกิริยาเคมีบางส่วนนั้นเกิดขึ้นได้ ปัจจัยอื่นๆ ที่มีผลต่อก๊าซเชื้อเพลิงมีดังนี้

- ความชื้นของเชื้อเพลิง (Moisture Content)

ความชื้นในชีวมวลแบ่งได้ออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่

- (1) ความชื้นที่อยู่ในเนื้อชีวมวล เป็นส่วนที่สามารถอยู่ในรูเปิดของเซลล์ในชีวมวลได้โดยสมดุลกับบรรยากาศที่มีความชื้นสัมพัทธ์ 96 – 97 %
- (2) ความชื้นที่พื้นผิว เป็นส่วนที่ล้นเกินมาจากความชื้นในรูเปิดของเซลล์ชีวมวล
- (3) ความชื้นจากการสลายตัวของสารอินทรีย์ ด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 200 -250 องศาเซลเซียส ซึ่งสูงกว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการระเหยความชื้นที่ผิว และความชื้นที่อยู่ภายในเนื้อชีวมวล ถ้าต้องการนำชีวมวลมาเป็นแหล่งพลังงานความชื้นควรมีค่าไม่เกิน 50 %

- ขนาดของเชื้อเพลิง (Fuel Size) มีผลต่อขนาดเตาของแก๊สซิฟิเคอร์ดังนี้

- (1) เตามีขนาดเล็ก จะเกิดความดันตกคร่อม (Pressure Drop) ภายในเตาแก๊สซิฟิเคอร์ทำให้ต้องใช้พลังงานในการนำเอาแก๊สที่ได้ออกจากภายในเตามากขึ้น
- (2) เตามีขนาดใหญ่ จะเกิดการเผาไหม้ข้ามโซนเป็นเหตุให้เกิดเถ้าหลอมเยิ้มติดผนัง (Slag) โดยสาเหตุนี้เกิดจากการไหลลงของชีวมวลในเตาเผาเกิดการไหลเข้าสู่เตาติดขัด ดังนั้นจึงควรมีการย่อยชีวมวลให้มีขนาดเล็กกว่า 1 เซนติเมตร จะทำให้ช่วยลดปัญหาที่เกิดขึ้นได้

- การกระจายขนาด (Size Distribution)

ขนาดของเชื้อเพลิงควรมีขนาดที่เท่ากันอย่างสม่ำเสมอ เพราะขนาดต่างกันมาก อากาศจะไหลผ่านได้ไม่ดีเกิดจากชีวมวลขนาดใหญ่ และเล็กอาจเกิดการเกยกันทำให้เกิดการเผาไหม้ บางส่วน และอีกบางส่วนไม่เกิดการเผาไหม้ซึ่งอาจทำให้เกิดการหลอมเป็นก้อน (Clinker)

- ความหนาแน่นของชีวมวล (Bulk Density)

การใช้เชื้อเพลิงที่เป็นเม็ดนั้น ถ้ารูปร่างของเม็ดเชื้อเพลิงแนบกันไม่ได้ทำให้เปลี่ยน ปริมาตรภายในเตาเผาทำให้ค่าความหนาแน่นโดยรวมต่ำลง โดยทั่วไปเชื้อเพลิงที่ใช้ในการผลิตก๊าซจะ เปลี่ยนเนื้อที่ประมาณ 20 – 75 % ของปริมาตรบรรจุ

- สารระเหยในเชื้อเพลิง

สารระเหย (Volatile Matter) ถ้ามีปริมาณสารระเหยในชีวมวลมากจะทำให้เกิด เป็นน้ำมันดิน และไอน้ำมันที่มีอุณหภูมิควบแน่น 120 – 150 องศาเซลเซียส จะเกาะฝังตัวบนผนังจึง ควรมีการกำจัดออกก่อนนำไปใช้กับเครื่องยนต์

- ขี้เถ้า (Ash)

ถ้าเชื้อเพลิงที่เรานำมาใช้มันเกิดเถ้ามากจะก่อให้เกิดปัญหาเถ้าหลอมตัว (จะ เกิดขึ้นเมื่อในช่องเก็บเถ้าเต็มแล้วเถ้าล้นออกมาบริเวณช่วงเผาไหม้) ก่อให้เกิดปัญหากับตัวแก๊สซิไฟเออร์ ดังนั้นควรมีการแผนการกำจัดเถ้าที่ดี

กระบวนการแยกสลายด้วยความร้อน (Pyrolysis)

กระบวนการการแยกสลายด้วยความร้อน เป็นกระบวนการเปลี่ยนแปลงทางเคมีที่ ไม่สามารถย้อนกลับได้ ทำให้ชีวมวลเกิดการย่อยสลายตัวภายใต้ความร้อนแบบไร้ออกซิเจน ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจะอยู่ในสถานะ ก๊าซ ของเหลว ของแข็ง ดังนี้

การสลายตัวขั้นแรก

ชีวมวล → ก๊าซ ของเหลว ของแข็ง

การสลายตัวขั้นสอง

ก๊าซ → ก๊าซขั้นต้น ก๊าซขั้นที่สอง

ของเหลว → ก๊าซขั้นที่สอง ของเหลวขั้นต้น ของเหลวขั้นที่สอง ของแข็ง

ของแข็ง → ของแข็ง

กระบวนการแยกสลายด้วยความร้อนสามารถควบคุมให้เกิดผลิตภัณฑ์อยู่ในสถานะใดสถานะหนึ่งมากที่สุดได้โดยควบคุมจากปัจจัยที่สำคัญต่างๆที่เกิดขึ้นภายในกระบวนการ เช่น การควบคุมการให้ความร้อน อุณหภูมิ ซึ่งกระบวนการแยกสลายด้วยความร้อน เป็นดังนี้

- การถ่ายเทความร้อนจากแหล่งความร้อนไปสู่ชีวมวล เพื่อเพิ่มอุณหภูมิข้างในชีวมวลให้สูงขึ้น
- เริ่มเกิดการสลายตัวขั้นแรก มีการปล่อยสารระเหย และเกิดเป็นถ่านหิน
- ไอของสารระเหยร้อนผ่านเนื้อชีวมวลที่ยังเย็นอยู่ ทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนระหว่างกันและกัน
- การควบแน่นของไอสารระเหยโมเลกุลใหญ่บางส่วนในเนื้อชีวมวลที่ยังเย็นอยู่ และตามด้วยการเกิดปฏิกิริยาของการสลายตัวขั้นสองที่สามารถเปลี่ยนสารระเหยขั้นต้นเป็นน้ำมันดิน
- การเกิดปฏิกิริยาของการย่อยสลายขั้นที่สองแบบเร่งปฏิกิริยาด้วยตนเองไปพร้อมกับการเกิดปฏิกิริยาการสลายตัวขั้นต้น มีการแข่งขันแย่งสารตั้งต้นในการเกิดปฏิกิริยา
- การแตกตัวทางความร้อนเพิ่มขึ้น มีปฏิกิริยาร่วมเกิดขึ้น เช่น ปฏิกิริยาของการเปลี่ยนโมเลกุลจากของแข็งเป็นก๊าซด้วยน้ำ ปฏิกิริยาการไอน้ำ ซึ่งขึ้นอยู่กับเวลา อุณหภูมิ และความดัน

ประเภทของกระบวนการแยกสลายด้วยความร้อน

แบ่งออกเป็น 2 ประเภท

(1) การแยกสลายตัวด้วยความร้อนแบบช้า หรือแบบทั่วไป รู้จักโดยทั่วไปคือ การทำถ่าน ซึ่งกระบวนการนี้ชีวมวลจะถูกให้ความร้อนที่ 500 องศาเซลเซียส ไอสารระเหยอยู่ในปฏิกิริยาประมาณ 5 – 30 นาทีโดยไม่หลุดออกไปเร็วจึงทำให้องค์ประกอบของไอสารระเหยยังคงเข้าทำปฏิกิริยากันอย่างต่อเนื่อง ผลิตภัณฑ์ที่ได้เป็นถ่าน ของเหลว และก๊าซ ถ้าสามารถควบคุมให้คงที่อุณหภูมิต่างๆ จะทำให้เกิดเป็นถ่านชาร์มากขึ้น

(2) การแยกสลายตัวด้วยความร้อนแบบเร็ว จำเป็นต้องให้ความร้อนในอัตราที่สูงมากเมื่อเทียบกับแบบช้าและถ้ามีความร้อนที่สูงมากจะทำให้ปริมาณสารระเหยและของเหลวเกิดมากขึ้นด้วยโดยปกติแล้วกระบวนการแยกสลายตัวด้วยความร้อนจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นน้ำมันดิบชีวภาพประมาณ 60 – 70 % โดยน้ำหนักถ่านชาร์ 15 – 25 % และก๊าซเบาที่ไม่ควบแน่น 10 – 20 % ขึ้นอยู่กับชนิดของชีวมวล อัตราการให้ความร้อนของกระบวนการแยกสลายตัวด้วยความร้อนแบบเร็วอาจสูงถึง 1,000 องศาเซลเซียสต่อวินาที ทำให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วอัตราการเกิดถ่านชาร์น้อย

กลไกกระบวนการแยกสลายตัวด้วยความร้อนของซีวมวล (Dangzhen Lv 2010)

องค์ประกอบของทางเคมีของซีวมวลนั้นมีความแตกต่างจากถ่านหิน และน้ำมันดิบ ทำให้เมื่อ มาใช้เป็นเชื้อเพลิงในกระบวนการแยกสลายตัวด้วยความร้อนทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่แตกต่างจากกลุ่มเชื้อเพลิงฟอสซิล โดยองค์ประกอบหลักของซีวมวล คือ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน เมื่อได้รับความร้อนแล้วองค์ประกอบเหล่านั้นจะย่อยสลายทางความร้อนในวิถีที่ต่างกันไป ดังนี้

- (1) การแยกสลายตัวด้วยความร้อนของเซลลูโลส การแยกสลายตัวด้วยความร้อนของเซลลูโลสเป็นปฏิกิริยาแบบดูดความร้อน (Endothermic Reaction) พบว่าเมื่อเซลลูโลสได้รับความร้อนถึงที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส กระบวนการแยกสลายตัวด้วยความร้อนจะเกิดขึ้นแบบช้า ๆ และได้ผลิตภัณฑ์เป็นน้ำ คาร์บอนไดออกไซด์ คาร์บอนมอนอกไซด์ และเศษถ่าน และช่วงอุณหภูมิที่มากกว่า 250 องศาเซลเซียส เซลลูโลสจะย่อยสลายได้เร็วขึ้น ได้ผลิตภัณฑ์เป็นน้ำมันดิน และก๊าซต่างๆ และช่วงอุณหภูมิ 240 -350 องศาเซลเซียส ได้ผลิตภัณฑ์เป็นแอนไฮโดรเซลลูโลส (Anhydrocellulose) และเลโวกลูโคแซน (Levoglucosan)
- (2) การแยกสลายตัวด้วยความร้อนของเฮมิเซลลูโลส ปฏิกิริยาของเฮมิเซลลูโลสเป็นแบบคายความร้อน (Exothermic Reaction) การแยกสลายตัวด้วยความร้อนเฮมิเซลลูโลสเริ่มเกิดในช่วงอุณหภูมิ 200 – 260 องศาเซลเซียส ผลิตภัณฑ์ที่ได้เป็นถ่านชาร์ และน้ำมันดิน แต่น้อยกว่าเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลสนั้นจะเกิดการแตกตัวเกิดขึ้นก่อนที่อุณหภูมิ 130 -194 องศาเซลเซียส โดยส่วนใหญ่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส
- (3) การไพโรไลซิสลิกนิน ลิกนินนั้นเป็นองค์ประกอบที่เสถียรที่สุดของซีวมวลจึงแตกตัวได้ยากกว่าเซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลส ซึ่งลิกนินมีช่วงการแตกตัวกว้างคืออยู่ในช่วง 160 – 900 องศาเซลเซียส ปฏิกิริยาแยกสลายตัวด้วยความร้อนของลิกนินเป็นแบบคายความร้อน ซึ่งการแตกตัวของลิกนินนั้นจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นกลุ่มของฟีนอล และจะเกิดปริมาณถ่านชาร์มากกว่าเซลลูโลส โดยที่อัตราการให้ความร้อนต่ำถ่านชาร์จากลิกนินที่เกิดขึ้นร้อยละ 50 โดยมวล

2.1.6 กระบวนการเผาไหม้

ปฏิกิริยาเคมีของการเผาไหม้

หมายถึง ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูงขึ้น (ตั้งแต่ 1,000 องศาเซลเซียสขึ้นไป) เกิดขึ้นเร็วมาก (ในช่วงเวลา 1 ไมโครวินาที – 10 มิลลิวินาที) เป็นปฏิกิริยาที่เป็นเอกพันธ์หรือเป็นเนื้อเดียวกัน ในวัฏภาคแก๊สระหว่างโมเลกุลของเชื้อเพลิง หรือ โมเลกุลที่เกิดจากการแตกตัวของเชื้อเพลิง และออกซิเจนซึ่งโดยทั่วไปใช้อากาศ ปฏิกิริยาในวัฏภาคแก๊สนั้นมีความซับซ้อนมากทั้งในส่วนของจำนวนปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น และอุปกรณ์ที่บรรจุอยู่

กลไกและจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาเผาไหม้ แม้แต่ของโมเลกุลเล็ก ๆ มีความซับซ้อนมากกว่านั้น ที่อุณหภูมิสูงต้องคำนึงถึงผนังของอุปกรณ์ ซึ่งมีผลอย่างมากต่อจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาเผาไหม้ด้วย และเนื่องจากกระบวนการเผาไหม้มีเทอร์โมไดนามิกส์กลศาสตร์ของไหล และการถ่ายโอนความร้อนเข้ามามีส่วนร่วมสำคัญด้วยการทำความเข้าใจเกี่ยวกับปรากฏการณ์การเผาไหม้ จึงจำเป็นต้องมีการวิเคราะห์เชิงตัวเลข เพื่อทำนายความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นและเวลา [กัญญา,2544]

สภาวะที่จำเป็นในการเริ่มเกิดปฏิกิริยา

ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อมีตัวทำปฏิกิริยาและสภาวะที่เหมาะสม ปฏิกิริยาการเผาไหม้คือปฏิกิริยาการออกซิไดซ์เชื้อเพลิงให้กลายเป็นออกไซด์ ซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นต่อเนื่องจนสมบูรณ์ การเผาไหม้ทั่วไปตัวทำปฏิกิริยา คือ เชื้อเพลิง และอากาศ ซึ่งจะเริ่มเกิดปฏิกิริยาได้ก็ต่อเมื่อมีสภาวะที่เหมาะสม ซึ่งก็คือ แหล่งให้ความร้อนที่จุดไฟ

1. พลังงานการจุดไฟ เป็นพลังงานส่วนแรกที่ต้องให้เข้าไปเพื่อเริ่มต้นการเกิดปฏิกิริยาลุกไหม้เรียกว่า พลังงานการจุดไฟ (ignition temperature) ซึ่งเป็นอุณหภูมิของส่วนผสมระหว่างอากาศที่น้อยที่สุดที่จะทำให้ไฟติดและเชื้อเพลิง

2. ขีดจำกัดของการเกิดเปลวไฟ ปฏิกิริยาเผาไหม้ที่เกิดเป็นเนื้อเดียวกัน สามารถเกิดได้ในช่วงความดันและอุณหภูมิกว้าง ถ้าส่วนผสมระหว่างแก๊สเชื้อเพลิงและอากาศเกิดภายใต้ความดันสูง จะเป็นปฏิกิริยาที่มีความเร็วเหนือเสียง เรียกว่า การระเบิด (Detonations) และถ้าส่วนผสมระหว่างแก๊สเชื้อเพลิงและอากาศที่เกิดที่ความดันบรรยากาศ เรียกว่าการเผาด้วยความร้อน (Deflagration)

3. เปลวไฟ เป็นบริเวณการเผาไหม้ ที่เคลื่อนที่เข้าหาส่วนผสมระหว่างแก๊สเชื้อเพลิงและอากาศ โดยที่เชื้อเพลิงแต่ละชนิดมีขีดจำกัดการเกิดเปลวไฟต่างกัน (กัญญา,2544) (บุญเกียรติ 2554)

พลังงานความร้อนของการเผาไหม้

ปฏิกิริยาเผาไหม้เป็นปฏิกิริยาออกซิเดชัน ซึ่งเป็นการคายความร้อนที่สามารถคำนวณได้จากความร้อนของปฏิกิริยาที่สภาวะมาตรฐาน คือ ความดัน 1 บรรยากาศและอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และเทอร์โมไดนามิกส์ทั่วไปสำหรับการเผาไหม้แสดงออกมาเป็นความร้อนของการเผาไหม้ที่สภาวะมาตรฐาน เนื่องจากเป็นปฏิกิริยาการคายความร้อนจึงมีค่าเป็นลบเสมอ

ค่าความร้อน

ในการคำนวณการเผาไหม้ให้ค่าที่เป็นลบซึ่งไม่สะดวกแก่การใช้งานจึงนิยมใช้ในเทอม ค่าความร้อน ซึ่งมีค่าเท่ากับความร้อนของการเผาไหม้ที่สภาวะมาตรฐานแต่มีค่าเป็นบวก ค่าความร้อนนี้ไม่สามารถคำนวณได้จากชีวมวลไม้ใช้สารบริสุทธิ์จึงต้องทำการทดลองในเครื่องมือเฉพาะที่เรียกว่า Bomb Calorimeter และสำหรับเชื้อเพลิงที่เป็นแก๊ส การแสดงค่าความร้อนมี 2 วิธี

(1) ค่าความร้อนรวม หมายถึง ค่าความร้อนที่ให้มาหลังจากการเผาไหม้สมบูรณ์แล้ว โดยตั้งแต่เริ่มทำปฏิกิริยาจนถึงผลผลิตสุดท้ายทั้งหมดอยู่ภายใต้ความดัน 1 บรรยากาศ และที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เมื่อน้ำที่มีอยู่ในเชื้อเพลิงเกิดเป็นผลผลิตที่อยู่ในรูปแบบของเหลว อาจเรียกว่า ค่าความร้อนขั้นสูง (Higher Heating Value, HHV)

(2) ค่าความร้อนสุทธิ หมายถึง ค่าความร้อนสุทธิของเชื้อเพลิงชนิดหนึ่งให้ค่าจำกัดความเช่นเดียวกัน แต่หลังการเผาไหม้สมบูรณ์เกิดเป็นน้ำที่อยู่ในรูปของไอน้ำ อาจเรียกได้ว่าค่าความร้อนขั้นต่ำ (Lower Heating Value, LHV) ดังนั้นความแตกต่างระหว่างความร้อนรวมและค่าความร้อนสุทธิ จึงมีค่าเท่ากับความร้อนของการระเหยที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสของน้ำทั้งหมดที่อยู่ในผลผลิตของการเผาไหม้ ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ดังสมการที่ 2.7

$$HHV = NHV + n_{\text{น้ำ}} \Delta H^0_{\text{ที่ 25 องศาเซลเซียส}} \quad (2.7)$$

อุณหภูมิเปลวไฟอะเดียเบติก

ในปฏิบัติการเตาเผาและหม้อไอน้ำ จำเป็นต้องทราบถึงอุณหภูมิในเตาเผาและอุณหภูมิแก๊สผลผลิต ที่ได้จากการเผาไหม้ เพื่อใช้ในการออกแบบเกี่ยวกับอุปกรณ์ การถ่ายเทความร้อน หรือการคำนวณเกี่ยวกับปริมาณความร้อน ในระบบดังกล่าวผลผลิตทั้งหมดที่เป็นแก๊ส จะออกจากระบบเป็นกระแสเดียว อุณหภูมิของพลูแก๊สทั้งหมดที่สูงขึ้นเรียกว่า อุณหภูมิของเปลวไฟ ถ้า

ปฏิกิริยาการเผาไหม้กับออกซิเจน อากาศในปริมาณที่ต้องการตามทฤษฎีเกิดอย่างสมบูรณ์ และไม่สูญเสียความร้อนออกจากระบบ อุณหภูมิของเปลวไฟจะเป็นอุณหภูมิสูงสุดเรียกว่าเปลวไฟสูงสุดอะเดียเบติก เป็นอุณหภูมิสูงสุดของเปลวไฟที่เชื้อเพลิงชนิดหนึ่งจะสามารถให้ได้ การแตกตัวที่อุณหภูมิสูงของอะตอมที่ว่องไว ดังที่แสดงในสมการที่ 2.8 -2.10



หลักการคำนวณการเผาไหม้

การวิเคราะห์แบบประมาณ (แช่เตี่ยว 2554)

- (1) ความชื้น (Moisture) เป็นน้ำหนักที่สูญเสียไปหลังจากการอบภายใต้สภาวะที่กำหนดอุณหภูมิ 104 – 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
- (2) เถ้า (Ash) เป็นน้ำหนักที่คงอยู่หลังจากการเผาแล้วภายใต้สภาวะออกซิไดซ์ที่กำหนดอุณหภูมิ 700 -750 องศาเซลเซียส เถ้า คือ ส่วนประกอบของสารอนินทรีย์ที่ถูกออกซิไดซ์จนสมบูรณ์แล้วดังนั้นน้ำหนักของเถ้าจึงน้อยกว่าสารอนินทรีย์ที่อยู่ในสารเดิม เพราะ คาร์บอนเนตซัลเฟต และสารอื่นๆถูกออกซิไดซ์ไปจนหมด โดย % แร่ธาตุคำนวณได้จาก สมการที่ 2.11

$$\% \text{ Mineral Matter} = 1.08 (\% \text{ Ash}) + 0.55 (\% \text{ S}) \quad (2.11)$$

- (3) สารระเหย (Volatile Matter, VM) เป็นน้ำหนักที่สูญเสียไป (หักความชื้นออกแล้ว) หลังจากการอบภายใต้สภาวะที่กำหนดที่อุณหภูมิ 950 ± 20 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 นาทีโดยไม่ให้สัมผัสกับอากาศเพื่อกลั่นสลายให้ได้ส่วนที่ระเหยออกมา
- (4) คาร์บอนคงตัว (Fixed Carbon , FC) เป็นส่วนที่เสถียรของโครงสร้างโมเลกุลประกอบด้วยคาร์บอนเป็นส่วนใหญ่แต่ไม่ทั้งหมด คำนวณได้จากสมการที่ 2.12

$$\% \text{ FC} = 100 - (\% \text{ Moisture} + \% \text{ Ash} + \% \text{ VM}) \quad (2.12)$$

กระบวนการเผาไหม้

จากปฏิกิริยาการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ เราสามารถคำนวณ มวล หรือ ปริมาณ ของตัวทำปฏิกิริยาของผลผลิตที่ได้โดยใช้มวลสารสัมพันธ์ (Stoichiometry) ของปฏิกิริยาดังนี้



ในปฏิบัติการเผาไหม้ในอุตสาหกรรมหรืองานทั่วไป ต้องการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ด้วยเหตุผลหลายประการ คือ ต้องการประหยัดเชื้อเพลิง ต้องการความร้อนสูงสุดจากการเผาไหม้ และไม่ต้องการมลพิษที่เกิดจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ เช่น คาร์บอนมอนอกไซด์ เป็นต้น จึงต้องใช้สภาวะที่เอื้ออำนวยการทำปฏิกิริยาให้สมบูรณ์ที่สุด สภาวะหนึ่งคือ การใช้ปริมาณอากาศที่มากเกินไป (Excess Air) เพื่อให้โมเลกุลของเชื้อเพลิงหรือโมเลกุลที่ได้มาจากการแตกตัวของเชื้อเพลิงมีโอกาสพบกับออกซิเจนมากที่สุด จากมวลสารสัมพันธ์ทำให้เราสามารถคำนวณสัดส่วนอากาศที่มากเกินไปได้

สมดุลมวล

จากกฎการอนุรักษ์มวลสาร (Law of Conservation of Mass) สามารถคำนวณดุลมวลสารระหว่างกระแสเข้าและกระแสออกจากระบบหรือกระบวนการใดๆ ได้ดังสมการที่ 2.16

$$\text{มวลที่เข้า} = \text{มวลที่ออก} + \text{มวลที่สะสมภายใน (หรือสูญหายออกจาก) ระบบ} \quad (2.16)$$

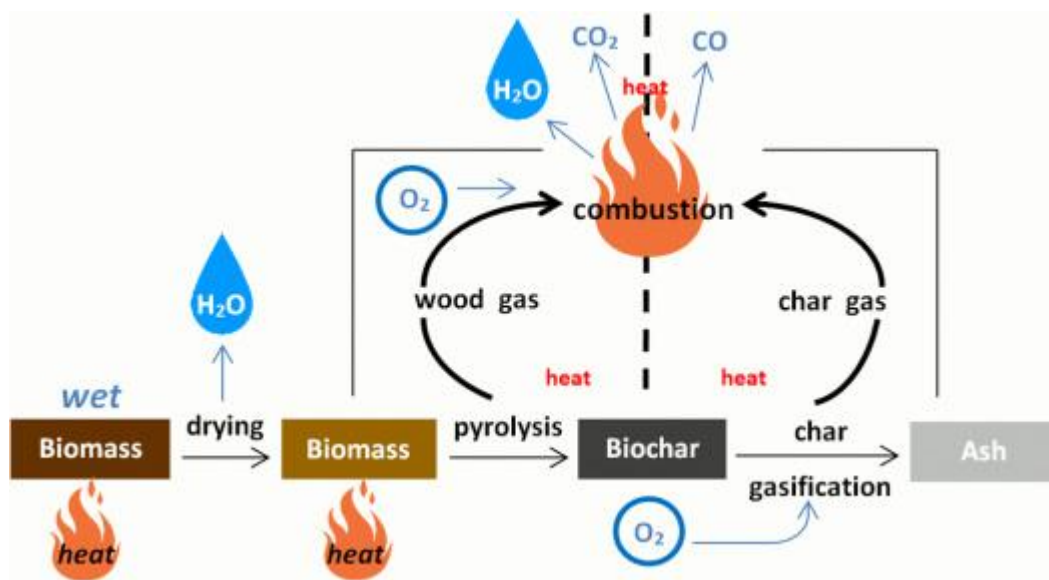
ความสัมพันธ์ดังกล่าวเป็นจริงทั้งสำหรับระบบที่มีการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและทางเคมีหลักการพื้นฐานของการคำนวณในวิศวกรรมเคมี คำนวณดุลมวลของกระบวนการใดๆ โดยใช้เทคนิคของปฏิบัติการกล่องดำ (Black Box Operations) ซึ่งสมมุติให้กล่องดำแทนระบบหรือกระบวนการและสำหรับปฏิบัติการที่สภาวะคงที่ (Steady Stage Operations) จึงไม่มีการสะสมหรือสูญเสียมวลสารเขียนเป็นสมการได้ดังสมการที่ 2.17

$$\text{มวลที่เข้า} = \text{มวลที่ออก} \quad (2.17)$$

ความสัมพันธ์นี้เป็นจริงสำหรับองค์ประกอบหรือธาตุใด ๆ ภายในระบบหรือกระบวนการด้วย ดังนั้น สามารถทำดุลมวลของธาตุแต่ละธาตุได้ดังสมการที่ 2.18

$$\text{มวลของธาตุใด ๆ ที่เข้า} = \text{มวลของธาตุนั้น ที่ออก} \quad (2.18)$$

สำหรับระบบหรือกระบวนการเผาไหม้ ตัวทำปฏิกิริยาทั้งหมดเป็นกระแสเข้าผลผลิตทั้งหมดเป็นกระแสออก และถ้าพิจารณากระบวนการเผาไหม้ที่อยู่ในสภาวะคงที่ คือไม่มีการเปลี่ยนแปลงต่อเวลาขณะเผาไหม้ กระบวนการเผาไหม้ แสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 กระบวนการเผาไหม้ทั่วไป

กระบวนการเผาไหม้มีกระแสก๊าซเข้าสองกระแส คือ เชื้อเพลิง และอากาศ และมีกระแสออกสองกระแส คือ แก๊สที่ผลิตจากการเผาไหม้ และ เถ้า (กากของแข็ง)

ดุลพลังงาน

จากกฎการอนุรักษ์พลังงาน สามารถคำนวณดุลพลังงานระหว่างกระแสเข้าและกระแสออกจากระบบหรือกระบวนการใดๆ ได้เช่นเดียวกับสมดุลมวล ดังสมการที่ 2.19

$$\text{พลังงานที่เพิ่มเข้าสู่ระบบ/ดึงออกจากระบบ} = \text{พลังงานกระแสเข้า} - \text{พลังงานกระแสออก} \quad (2.19)$$

สำหรับระบบการเผาไหม้ รูปแบบพลังงาน คือ ความร้อน หรือ เอนทัลปี (Enthalpy) พลังงานที่เพิ่มเข้าไปในระบบมักจะเป็นการให้ หรือ สูญเสียความร้อน (Q) และพลังงานที่ออกจากระบบมักจะเป็นงาน (W) ที่ระบบทำได้ ในระบบการเผาไหม้ในหน่วยปฏิบัติการเกี่ยวกับการถ่ายโอนความร้อนไม่มีงานเกิดขึ้น และในกรณีที่ไม่มีการสูญเสียพลังงานออกจากระบบหรือรับพลังงานจากภายนอกเข้าสู่ภายในระบบ คือ ระบบอะเดียเบติก เขียนเป็นสมการใหม่ได้ดังสมการที่ 2.20

$$0 = \text{เอนทัลปีของกระแสเข้า} - \text{เอนทัลปีของกระแสออก} \quad (2.20)$$

สมการนี้ เรียกว่าสมการเอนทัลปี (The Enthalpy Equation)

จากปฏิกิริยาการเผาไหม้ได้ความร้อนออกมา ความร้อนของการเผาไหม้เป็นความร้อนที่เกิดขึ้นภายในระบบ แต่เพื่อความสะดวกในการคำนวณ จะถือว่าเป็นความร้อนที่กระแสเข้าไปในระบบ เขียนเป็นสมการใหม่ได้ ดังนี้

$$0 = (\text{เอนทัลปีของกระแสเข้า} + \text{ความร้อนของปฏิกิริยาเผาไหม้}) - \text{เอนทัลปีของกระแสออก} \quad (2.21)$$

$$\text{เอนทัลปีของกระแสเข้า} + \text{ความร้อนของปฏิกิริยาเผาไหม้} = \text{เอนทัลปีของกระแสออก} \quad (2.22)$$

เนื่องจากปริมาณพลังงานในรูปแบบของความร้อน หรือ เอนทัลปี เป็นปริมาณที่เปรียบเทียบกับพลังงานที่สภาวะอ้างอิงหนึ่งๆ จึงต้องระบุสภาวะนั้นก่อนเสมอว่าอยู่ที่อุณหภูมิอันใด ความดันใด และสถานะของสารอ้างอิงเป็นอย่างไร ในกรณีทั่วไปนิยมใช้ความดัน 1 บรรยากาศ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นสภาวะอ้างอิงโดยใช้น้ำ (ของเหลว) เป็นสถานะอ้างอิง โดยจะกำหนดระบบที่อยู่ในสถานะนี้มีค่าเอนทัลปี มีค่าเป็น 0

ประสิทธิภาพทางความร้อน

ความร้อนที่ถูกผลิตขึ้นจากการเผาไหม้จะถูกนำไปใช้ อัตราส่วนระหว่างปริมาณความร้อนที่นำไปใช้กับปริมาณความร้อนที่ได้จากเชื้อเพลิง (ค่าความร้อน) ดังสมการที่ 2.23

$$\eta = \frac{\text{ค่าความร้อนที่นำไปใช้}}{\text{ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง}} \times 100 \quad (2.23)$$

การใช้ประโยชน์อย่างหนึ่งของเชื้อเพลิงอุตสาหกรรม คือ ใช้ผลิตไอน้ำ ซึ่งหม้อไอน้ำส่วนมากจะอยู่ในอุตสาหกรรมผลิตกระแสไฟฟ้า จึงกำหนดการทดสอบประสิทธิภาพหม้อไอน้ำเป็นมาตรฐาน (กฎจนา, 2544) (บุญเกียรติ 2554)

2.1.7 สัดส่วนเชื้อเพลิงต่ออากาศ (A/F Ratio)

องค์ประกอบของเชื้อเพลิงแต่ละชนิดนั้นแตกต่างกันทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างสัดส่วนอากาศที่ทำให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ ซึ่งสามารถคำนวณหาได้จากสมการการเผาไหม้ทั่วไปตามหลักสมดุลมวลสาร ตามที่กล่าวไปแล้วในข้างต้น เมื่อนำค่าที่ได้จากสมการเผาไหม้โดยทั่วไปมาแทนค่าเพื่อหาค่า A/F Ratio ได้จากสมการ

$$A/F \text{ Ratio} = \frac{m_{\text{air}}}{m_{\text{fuel}}} = \frac{(NM)_{\text{air}}}{(NM)_{\text{fuel}}} \quad (2.24)$$

จากนั้นจากการศึกษาค่าสัดส่วนอากาศที่มากเกินไปร้อยละ 100, 150 และ 200 ของออกซิเจนเมื่อนำมาคิดเป็น 1, 1.5 และ 2 เท่า ของอากาศมากเกินไป (ตั้งตระกูล 2554/2)

2.1.8 ฝุ่นละออง (Particulate Matter)

หมายถึง อนุภาคของแข็ง และหยดละอองของเหลวที่แขวนลอยกระจายอยู่ภายในอากาศ อนุภาคที่กระจายในอากาศนี้บางชนิดมีขนาดใหญ่ และมีสีดำจางมองเห็นเป็นเขม่าและควัน แต่บางชนิดมีขนาดเล็กมากจนมองด้วยตาเปล่าไม่เห็น ฝุ่นละอองที่แขวนลอยในบรรยากาศ โดยทั่วไปมีขนาดตั้งแต่ 100 ไมครอนลงมา ฝุ่นละอองสามารถก่อให้เกิดผลกระทบต่อสุขภาพอนามัยของคน สัตว์ พืช เกิดความเสียหายต่ออาคารบ้านเรือน ทำให้เกิดความเดือดร้อนรำคาญต่อประชาชน บดบังทัศนวิสัย ทำให้เกิดอุปสรรคในการคมนาคม ขนส่ง นานาประเทศจึงได้มีการกำหนดมาตรฐานฝุ่นละอองในบรรยากาศขึ้น สำหรับในประเทศสหรัฐอเมริกา US. EPA (United State Environmental Protection Agency) ได้มีการกำหนดค่ามาตรฐานของฝุ่นรวม (Total Suspended Particulates) และฝุ่น PM 10 แต่เนื่องจากมีการศึกษาวิจัย ฝุ่นขนาดเล็กนั้นจะเป็นอันตรายต่อสุขภาพมากกว่าฝุ่นรวม เนื่องจากสามารถผ่านเข้าไประบบทางเดินหายใจส่วนในและมีผลต่อสุขภาพมากกว่า ฝุ่นรวม ดังนั้น US. EPA จึงได้มีการยกเลิกค่ามาตรฐานฝุ่นรวม และกำหนดค่ามาตรฐานฝุ่นขนาดเล็กเป็น 2 ชนิด คือ PM 10 และ PM 2.5 (กรมควบคุมมลพิษ 2552)

แหล่งกำเนิดฝุ่นละออง

แหล่งที่มาของฝุ่นละอองในบรรยากาศ โดยทั่วไปจะแบ่งเป็น 2 ประเภท ใหญ่ ๆ ได้แก่

(1) ฝุ่นละอองที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ (Natural Particles)

เกิดจากกระแสลมที่พัดผ่านตามธรรมชาติ ทำให้เกิดฝุ่น เช่น ดิน ททราย ละอองน้ำ เขม่าควันจากไฟฟ้า หรืออาจเกิดจากปรากฏการณ์ทางธรรมชาติ เช่น ภูเขาไฟระเบิด ฟ้าผ่า เป็นต้น

(2) ฝุ่นละอองที่เกิดจากกิจกรรมของมนุษย์ (Man - made Particles)

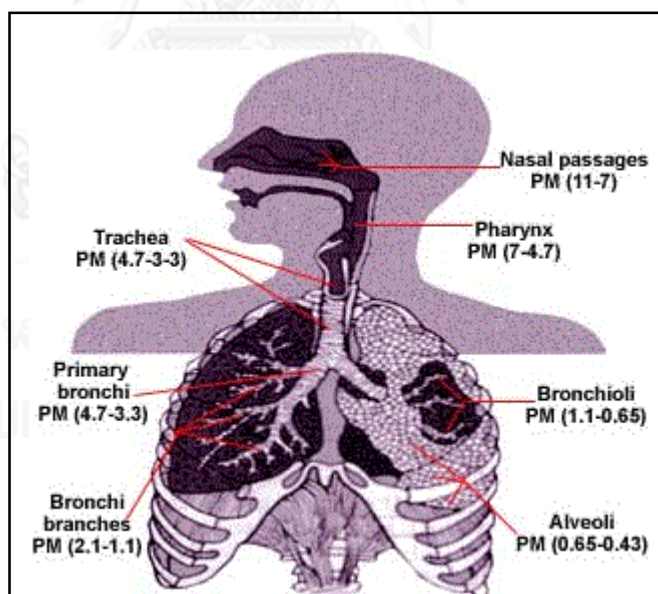
- โรงงานอุตสาหกรรม ส่วนใหญ่เกิดจากกระบวนการที่มีการเผาไหม้เชื้อเพลิง ภายในโรงงาน เช่น ถ่านหิน น้ำมัน ซิวมวล เป็นต้น หรืออาจเกิดจากบางกระบวนการที่ทำให้เกิดเป็นฝุ่นออกมา เช่น การเคลื่อนย้ายวัตถุดิบ เป็นต้น

- การขนส่ง ในปัจจุบันการขนส่งถือเป็นกระบวนการสำคัญทางระบบเศรษฐกิจที่ใช้ส่งสินค้าไปยังเป้าหมายซึ่งกระบวนการนี้เป็นกระบวนการหนึ่งที่ทำให้เกิดฝุ่นละอองจากเครื่องยนต์ที่ออกมาทางท่อไอเสีย นอกจากนี้ยังมีรถบรรทุกขนาดใหญ่ที่ขนย้ายวัตถุดิบประเภท กรวด หิน ดิน ททราย เป็นต้น ซึ่งจากการที่รถวิ่งอาจทำให้วัตถุดิบเหล่านั้นตกลงบนพื้นถนนหรือกระจายตัวอยู่ในอากาศ

- การก่อสร้าง สิ่งก่อสร้างบางประเภทต้องทำการเปิดหน้าดินออกมาก่อนซึ่งจะก่อให้เกิดฝุ่นได้ง่าย และการสร้างอาคารสูงทำให้ปูนซีเมนต์อาจถูกลมพัดออกมาได้ นอกจากนี้ยังรวมไปถึงการรื้อถอนอาคาร และการทุบทำลายอาคารอีกด้วย

ผลกระทบที่เกิดจากฝุ่นละออง

โดยทั่วไปแล้วฝุ่นละอองลอยอยู่ในอากาศ เป็นผลให้ระยการมองเห็นสั้นลง เนื่องจากอนุภาคของฝุ่นนั้นสามารถดูดซับและหักเหแสงได้ โดยจะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบและขนาดอนุภาคของฝุ่นอีกด้วย นอกจากนี้ฝุ่นยังมีผลกระทบต่อชีวิตมนุษย์ทั้งทางตรง และทางอ้อมโดยทางอ้อม คือ ฝุ่นทำให้เกิดความสกปรกต่อบ้านเรือน หรือวัตถุสิ่งของที่อยู่ในบ้าน และทางตรง คือ ผลกระทบต่อสุขภาพชีวิตมนุษย์ เนื่องจากฝุ่นที่มีขนาดเล็กกว่า 10 ไมครอนนั้นสามารถเข้าสู่ระบบทางเดินหายใจเป็นผลให้เกิดการระคายเคือง และเกิดอาการไอหรือจามโดยยิ่งฝุ่นมีอนุภาคเล็กเท่าไร จะยิ่งทำให้เข้าสู่ระบบหายใจได้ลึกขึ้น เมื่อมีการสะสมฝุ่นละอองขนาดเล็กภายในปอดสามารถก่อให้เกิดโรคหืดหอบ หรืออาจทำให้เกิดโรคปอดได้ โดยที่กลุ่มของเด็กจะมีอัตราเสี่ยงสูงมากกว่าผู้ใหญ่



รูปที่ 2. 2 แสดงระบบทางเดินหายใจ

ระบบทางเดินหายใจเริ่มจากจมูก (Nasal) ไปยังคอหอย (Pharynx) หลอดลม (Trachea) จากนั้นจะแบ่งเป็น 2 แขนง คือ ซ้ายและขวา เรียกหลอดลมแขนง (Bronchi) จาก

หลอดลมแขนงก็จะแบ่งย่อยออกไปเป็น Bronchioli และส่วนสุดท้ายของหลอดลม คือ ถุงลม (Alveoli) ส่วนนี้ คือ ส่วนที่เป็นปอด

ฝุ่นละอองขนาดปานกลาง และขนาดใหญ่ประมาณ 99% จะถูกกรองไว้ที่บริเวณจมูกทำให้ไม่สามารถที่จะเข้าไปในทางเดินหายใจในส่วนที่ลึกได้ รูปที่ 2.2 นอกจากจะแสดงกายวิภาคของระบบทางเดินหายใจแล้ว ยังแสดงขนาดของ ฝุ่นละอองขนาดเล็กที่สามารถเข้าสู่ทางเดินหายใจ โดยฝุ่นขนาดเล็กมากๆเท่า นั้นที่จะสามารถเข้าไปได้ถึงระดับถุงลม ถ้าเข้าไปในถุงลม จะทำให้การแลกเปลี่ยนของอากาศน้อยลง ทำให้หายใจสั้น และหัวใจทำงานหนักมาก นอกจากนั้นฝุ่นละอองขนาดเล็กเหล่านี้ก็เป็นพิษต่ออวัยวะต่างๆ โดยตรงไม่ว่าจะเป็นปอด ตับ หรือไต และฝุ่นละอองขนาดเล็กเหล่านี้ ถ้าเป็นฝุ่นละอองที่เป็นอนุภาคที่มีมลสารปนเปื้อนอยู่ด้วยจะทำให้เกิดโรคทางระบบทางเดินหายใจเนื่องจากความเป็นพิษของมลสารเหล่านั้นเข้าไปทำปฏิกิริยากับเซลล์เนื้อเยื่อในร่างกาย (C. Arden Pope III 2002)

มาตรฐานฝุ่นละออง

ฝุ่นละอองเป็นมลพิษทางอากาศที่เป็นปัญหาหลักในกรุงเทพมหานคร และชุมชนขนาดใหญ่ฝุ่นละอองที่มีอยู่ในบรรยากาศรอบ ๆ ตัวเรา มีขนาดตั้งแต่ 0.002 ไมครอน ซึ่งเป็นกลุ่มของโมเลกุล (มองด้วยตาเปล่าไม่เห็น ต้องใช้จุลทรรศน์แบบอิเล็กทรอนิกส์ไปจนถึงขนาดใหญ่กว่า 500 ไมครอน ซึ่งเป็นฝุ่นทรายขนาดใหญ่มองเห็นได้ด้วยตาเปล่า (ฝุ่นที่มองเห็นด้วยตาเปล่ามีขนาดตั้งแต่ 50 ไมครอนขึ้นไป) ฝุ่นละอองเป็นสารที่มีความหลากหลายทางด้านกายภาพ และองค์ประกอบอาจมีสภาพเป็นของแข็งหรือของเหลวฝุ่นละอองที่แขวนลอยอยู่ในอากาศได้นาน มักจะเป็นฝุ่นละอองขนาดเล็ก (ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า 10 ไมครอน) เนื่องจากมีความเร็วในการตกตัวต่ำ หากมีแรงกระทำจากภายนอกเข้ามีส่วนเกี่ยวข้อง เช่น การไหลเวียนของอากาศ กระแสลม เป็นต้น จะทำให้แขวนลอยอยู่ในอากาศได้นานมากขึ้น ฝุ่นละอองที่มีขนาดใหญ่ (ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่กว่า 100 ไมครอน) อาจแขวนลอยอยู่ในบรรยากาศได้เพียง 2-3 นาที แต่ฝุ่นละอองที่มีขนาดเล็กกว่า 0.5 ไมครอน อาจแขวนอยู่ในอากาศ ได้นานเป็นปี โดยฝุ่นขนาดเล็กแบ่งออกเป็น 2 ชนิด ได้แก่ PM 10 และ PM 2.5

- PM 10 ตามคำจำกัดความของ US. EPA หมายถึง ฝุ่นหยาบ (Course Particle) เป็นอนุภาคที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 - 10 ไมครอน มีแหล่งกำเนิดจากการจราจรบนถนนที่ไม่ได้ลาดยางตามการขนส่งวัสดุฝุ่นจาก กิจกรรมบด ย่อย หิน

- PM 2.5 ตามคำจำกัดความของ US. EPA หมายถึง ฝุ่นละเอียด (Final Particles) เป็นอนุภาคที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่า 2.5 ไมครอน ฝุ่นละเอียดที่มีแหล่งกำเนิดจากควันเสียของรถยนต์ โรงไฟฟ้า โรงงานอุตสาหกรรม ควันที่เกิดจากการหุงต้มอาหารโดยใช้ฟืน นอกจากนี้ก๊าซ SO₂ NO_x และสาร VOC_s จะทำปฏิกิริยากับสารอื่นในอากาศทำให้เกิดฝุ่นละเอียดได้
- ตารางที่ 2. 6 มาตรฐานควบคุมการปล่อยทิ้งอากาศเสียจากโรงไฟฟ้าใหม่ (กรมควบคุมมลพิษ 2554)

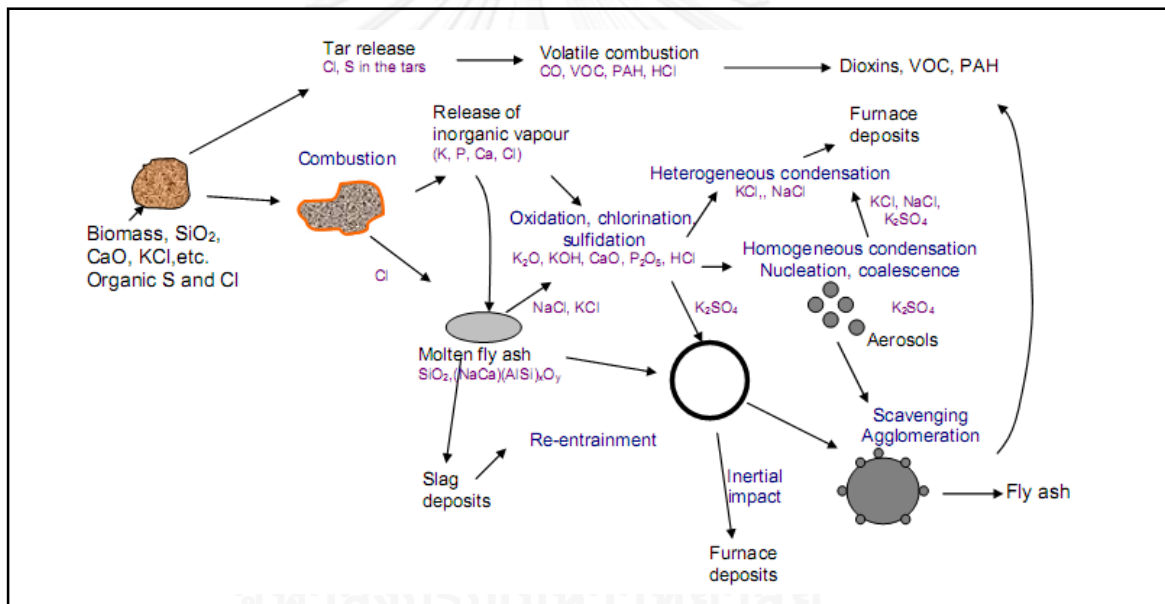
ชนิดของเชื้อเพลิง	ฝุ่นละออง (มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)	ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (ส่วนในล้านส่วน)	ก๊าซออกไซด์ของไนโตรเจนซึ่งคำนวณผลในรูปก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์(ส่วนในล้านส่วน)
1. โรงไฟฟ้าที่ใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิง			
(1) ที่มีกำลังการผลิตไฟฟ้าไม่เกิน 50 เมกะวัตต์	ไม่เกิน 80	ไม่เกิน 360	ไม่เกิน 200
(2) ที่มีกำลังการผลิตไฟฟ้าเกิน 50 เมกะวัตต์	ไม่เกิน 80	ไม่เกิน 180	ไม่เกิน 200
2. โรงไฟฟ้าที่ใช้น้ำมันเป็นเชื้อเพลิง	ไม่เกิน 120	ไม่เกิน 260	ไม่เกิน 180
3. โรงไฟฟ้าที่ใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิง	ไม่เกิน 60	ไม่เกิน 20	ไม่เกิน 120
4. โรงไฟฟ้าที่ใช้ชีวมวลเป็นเชื้อเพลิง	ไม่เกิน 120	ไม่เกิน 60	ไม่เกิน 200

หมายเหตุ

1. มาตรฐานนี้มีผลบังคับใช้กับโรงไฟฟ้าที่ได้รับอนุญาตประกอบกิจการโรงงาน หรือใบอนุญาตขยายโรงงานตั้งแต่วันที่ 15 มกราคม 2553
2. การคำนวณค่าอากาศเสียแต่ละชนิดที่ปล่อยทิ้งจากปล่องโรงไฟฟ้า ให้คำนวณผลที่ความดัน 1 บรรยากาศ หรือที่ 760 มิลลิเมตรปรอท อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ที่สภาวะแห้ง(Dry Basis) โดยมีปริมาตรอากาศส่วนเกินในการเผาไหม้ (Excess Air) ร้อยละ 50 หรือที่ปริมาตรออกซิเจนส่วนเกิน (Excess Oxygen) ในการเผาไหม้ ร้อยละ 7 **ที่มา** : กรมควบคุมมลพิษ

2.1.9 องค์ประกอบของชีวมวลที่มีผลต่อการเกิดมลพิษ

องค์ประกอบของชีวมวลส่วนใหญ่จะเป็นสารอินทรีย์ระเหยได้และธาตุต่างๆ ประกอบด้วย ไฮโดรเจน ออกซิเจน คาร์บอน ไนโตรเจน ซัลเฟอร์ รวมไปถึงโลหะหนักชนิดต่างๆที่มีปริมาณน้อย (trace element) เช่น อาร์เซนิก พรอท เหล็ก ตะกั่ว ลิเทียม ทองแดง โคบอลต์ แมงกานีส นิกเกิล วานาเดียม สังกะสี โครเมียม ซิลิกอน เป็นต้น ถึงโลหะหนักที่มีปริมาณน้อยเหล่านี้มีปริมาณไม่มากแต่สารเหล่านี้สามารถค่อยๆสะสมในร่างกายพอถึงปริมาณหนึ่ง จะก่อให้เกิดโรคต่างๆได้ เช่น โรคมะเร็ง เกิดจากได้รับแคดเมียมมากเกินไป โรคมินามาตะ เกิดจากได้รับสารปรอทมากเกินไป เป็นต้น (Williams, Jones et al. 2012)



รูปที่ 2. 3 แสดงการเกิดสารมลพิษการเผาไหม้ชีวมวล

2.1.10 การเกิดไนโตรเจนออกไซด์ (James A. Miller 1989)

ออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x) ประกอบด้วยไนตรัสออกไซด์ (N_2O) ไนตริกออกไซด์ (NO) ไดไนโตรเจนไดออกไซด์ (N_2O_3) ไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO_2) ไดไนโตรเจนเตตราออกไซด์ (N_2O_4) และไดไนโตรเจนเพนทอกไซด์ (N_2O_5) ออกไซด์ของไนโตรเจนจะประกอบไปด้วย NO และ NO_2 เป็นหลัก เนื่องจากเป็นก๊าซที่มีอยู่ทั่วไปในธรรมชาติ และมีความสำคัญต่อสิ่งมีชีวิตมากกว่า ออกไซด์ของไนโตรเจนตัวอื่น ๆ ไนตริกออกไซด์ (NO) เป็นก๊าซไม่มีสีและกลิ่น ละลายน้ำได้บ้างเล็กน้อย ส่วนไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO_2) มีสภาพเป็นก๊าซที่อุณหภูมิปกติก๊าซทั้งสองเกิดขึ้นตามธรรมชาติ ได้แก่ ไฟผ่า ไฟแลบ ภูเขาไฟระเบิดปฏิกิริยาเชิงจูลินทรีย์ในดินหรืออาจเกิดจากการกระทำของมนุษย์ เช่น การเผาไหม้เชื้อเพลิง การอุตสาหกรรม การทำกรดไนตริก การกัดกำมะถันการชุบโลหะ และการทำวัตถุระเบิด เป็นต้น

กลไกการเกิดออกไซด์ของไนโตรเจนโดยพื้นฐานแล้วแบ่งออกเป็น 2 แบบ ได้แก่ การเกิดออกไซด์ของไนโตรเจนด้วยกลไกจากความร้อน และการเกิดออกไซด์ของไนโตรเจนโดยสารไฮโดรคาร์บอนที่อยู่ในเชื้อเพลิง ซึ่งการเกิดออกไซด์ของไนโตรเจนด้วยกลไกจากความร้อนจะเกิดขึ้นได้เองที่อุณหภูมิสูงมากๆ ตั้งแต่ 400 องศาขึ้นไปโดยยิ่งอุณหภูมิสูงขึ้นมากการเกิดออกไซด์ของไนโตรเจนเกิดได้มากขึ้น โดยที่อุณหภูมิสูงมาก ออกซิเจนจะแตกตัวออกเป็นออกไซด์ ดังที่แสดงในสมการที่ 2.24 และออกไซด์เหล่านั้นจะเข้าทำปฏิกิริยากับก๊าซไนโตรเจนในอากาศ จากปฏิกิริยาไฟโกลไลซิสแบบช้า ดังที่แสดงในสมการที่ 2.25 เกิดเป็นไนโตรเจนมอนอกไซด์ ไนโตรเจนที่เกิดจากการไฟโกลไลซิสแบบช้าสามารถเกิดปฏิกิริยากับก๊าซออกซิเจนเป็นการไฟโกลไลซิสแบบเร็วและเกิดเป็น ไนโตรเจนมอนอกไซด์กับออกไซด์

ปฏิกิริยาการเกิดไนโตรเจนมอนอกไซด์จากความร้อน



ออกไซด์ของไนโตรเจนโดยสารไฮโดรคาร์บอนที่อยู่ภายในของเชื้อเพลิงนั้นเกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงจะเกิดเป็นไฮโดรคาร์บอนเรดิคอลเช่น CH , CH_2 , CH_3 , C_2H_5 และอื่นๆ ซึ่งไฮโดรคาร์บอนเรดิคอลเหล่านี้จะทำปฏิกิริยากับก๊าซไนโตรเจนเกิดเป็น HCN , NH และ CN ดังที่แสดงในสมการที่ 2.27-2.29 ซึ่งโมเลกุลเหล่านี้สามารถเปลี่ยนเป็น ไนโตรเจนออกไซด์ได้โดยง่ายจากการเผาไหม้

ปฏิกิริยาการเกิดไนโตรเจนมอนอกไซด์จากไฮโดรคาร์บอนเรดิคอล



นอกจากนี้การเกิดออกไซด์ของไนโตรเจนยังขึ้นอยู่กับองค์ประกอบต่างๆที่อยู่ในเชื้อเพลิงที่นำมาเผาไหม้และนอกจากไนโตรเจนมอนอกไซด์แล้วออกไซด์ของไนโตรเจนยังประกอบด้วยไนโตรเจนไดออกไซด์และกลไกการเกิดออกไซด์ของไนโตรเจนโดยไนโตรเจนมอนอกไซด์จะทำปฏิกิริยากับออกไซด์และพลังงานจากความร้อนเกิดเป็นไนโตรเจนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 800 องศาเซลเซียส

ปฏิกิริยาการเกิดไนโตรเจนไดออกไซด์



อันตรายจากออกไซด์ของไนโตรเจน

- ทำให้เกิดก๊าซโอโซนในระดับพื้นดิน (Smog) ซึ่งเกิดขึ้นจากการทำปฏิกิริยาระหว่างไนโตรเจนออกไซด์ กับสารระเหยอินทรีย์ (Volatile Organic Compounds หรือ VOCs) โดยมีแสงแดดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ประชากรกลุ่มเสี่ยงต่อการรับผลกระทบ ได้แก่ เด็ก คนชรา ผู้ที่เป็นโรคปอดหรือหลอดลม เช่น โรคหอบหืด และผู้ที่ทำงานหรือออกกำลังกายนอกบ้าน ซึ่งเมื่อสัมผัสเป็นเวลานานๆอยู่เป็นประจำ ก็จะทำให้มีการทำลายของเนื้อปอด ทำให้การทำงานของปอดลดลง นอกจากนี้โอโซน สามารถจะถูกพัดพาไปได้ไกลจากแหล่งกำเนิดมลพิษ ทำให้เกิดผลกระทบกับประชาชนหรือสิ่งแวดล้อมที่อยู่ห่างไกลออกไปได้ รวมถึงมีผลกระทบต่อการลดผลผลิตทางการเกษตรด้วย

- ฝนกรด ไนโตรเจนออกไซด์ และซัลเฟอร์ออกไซด์ สามารถที่จะทำปฏิกิริยากับสารอื่นในอากาศทำให้เกิดกรด และเมื่อตกลงมายังพื้นผิวโลกไม่ว่าจะเป็นฝน หมอก หิมะ หรืออนุภาคแห้ง และสามารถถูกพาไปได้ไกลหลายร้อยไมล์ ฝนกรดจะทำให้เกิดการกัดกร่อน อาคารบ้านเรือน รถยนต์ อนุสาวรีย์หรือโบราณสถานต่างๆ และทำให้แหล่งน้ำต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นแม่น้ำ ทะเลสาบ มีความเป็นกรดและไม่เหมาะต่อการดำรงชีวิตตามปกติของพืชหรือสัตว์ที่อาศัยในแหล่งน้ำนั้น

- ฝุ่นละอองขนาดเล็กไนโตรเจนออกไซด์ ทำปฏิกิริยากับแอมโมเนีย หรือความชื้น หรือสารประกอบอื่นในอากาศ ทำให้เกิดกรดไนตริก หรือฝุ่นละอองขนาดเล็กอื่นๆ และฝุ่นละอองขนาด

เล็กดังกล่าวทำให้มีผลต่อระบบหายใจ และทำลายเนื้อปอด และเป็นสาเหตุของการตายก่อนเวลาอันสมควร อนุภาคที่มีขนาดเล็กจะเข้าไปยังระบบทางเดินหายใจได้ลึก ทำให้ผู้ที่มีโรคของระบบทางเดินหายใจอยู่แล้ว มีอาการแย่ลงจากเดิม เช่น ผู้ที่มีถุงลมโป่งพอง หลอดลมอักเสบ และทำให้ผู้ที่เป็โรคหัวใจมีอาการแย่ลงจากเดิม

- คุณภาพของแหล่งน้ำแย่ง การที่มีปริมาณไนโตรเจนในน้ำสูงขึ้น โดยเฉพาะบริเวณชายฝั่ง จะทำให้רבกวนสมดุลของสารอาหารต่างๆในแหล่งน้ำ ทำให้พืชน้ำบางชนิดเจริญเติบโตมากเกินไปจนเป็นเหตุให้เกิดการลดของปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำ ทำให้ลดจำนวนประชากรของปลา และหอย

- การเปลี่ยนแปลงของดินฟ้าอากาศ ไนตรัสออกไซด์ (N_2O) ซึ่งอยู่ในลุ่มของไนโตรเจนออกไซด์เป็นสารที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาเรือนกระจก (Greenhouse effect) ถ้ามีการสะสมในบรรยากาศในปริมาณที่มาก จะทำให้อุณหภูมิของโลกค่อยๆสูงขึ้น ซึ่งจะเป็นปัจจัยเสี่ยงต่อมนุษยชาติ ทำให้ระดับน้ำทะเลสูงขึ้น และทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างมากต่อพืชและสัตว์

- สารเคมีที่เป็นพิษ ไนโตรเจนออกไซด์ทำปฏิกิริยากับสารต่างๆ โดยเฉพาะสารอินทรีย์หรืออาจจะเป็นไอโซน จะได้สารประกอบตัวใหม่ที่เป็นพิษ ซึ่งบางชนิดเป็นสารเหตุของการผ่าเหล่า (Biological Mutation)

- การลดทัศนวิสัยของการมองเห็น อนุภาคของไนเตรท และไนโตรเจนไดออกไซด์ จะขัดขวางการผ่านของแสงอาทิตย์ ทำให้ทัศนวิสัยในการมองเห็นลดลง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในเขตเมืองหรือสวนสาธารณะต่างๆ

2.1.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

James A. Miller และคณะ (1989) (James A. Miller 1989) ศึกษากลไกการเกิดออกไซด์ของไนโตรเจน พบว่า กลไกการเกิดออกไซด์ของไนโตรเจนแบ่งออกเป็นสองกลไกใหญ่ๆ ได้แก่ อุณหภูมิและไฮโดรคาร์บอนเรดิคอล ซึ่งออกไซด์ของไนโตรเจนที่เกิดขึ้นจากอุณหภูมินั้น จะเกิดได้เองที่อุณหภูมิสูงกว่า 400 องศาเซลเซียส และสามารถเกิดได้มากขึ้นที่อุณหภูมิสูงขึ้น และส่วนของไนโตรเจนออกไซด์ที่เกิดจากไฮโดรคาร์บอนเรดิคอล เกิดได้จากผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยา (HCN, NH, CN) ทำปฏิกิริยากับออกไซด์เกิดเป็น ไนโตรเจนมอนอกไซด์

Chaos และคณะ (2008) (Gaurav Mittala 2008) ได้ศึกษาปริมาณอากาศที่มากเกินไปของการเผาไหม้ชีวมวลและถ่านหิน โดยนำถ่านหินไปย่อยให้มีขนาด 75 ไมโครเมตร และย่อยชีวมวลให้มีขนาด 300 ไมโครเมตร และใช้ประมาณอากาศที่มากเกินไปที่ร้อยละ 10 และร้อยละ 30

จากผลการวิจัยพบว่าที่ปริมาณอากาศมากเกินพอร้อยละ 30 ทำให้อุณหภูมิสูงกว่าเป็นผลให้เกิดการเผาไหม้สมบูรณ์มากกว่าที่ปริมาณอากาศมากเกินพอร้อยละ 10

Suriyawong และ คณะ (2009) (Suriyawong A. 2009) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับจุลธาตุ (Trace Element) จากการเผาไหม้กากสีที่เกิดจากการทำสีของรถยนต์ มีการศึกษาเกี่ยวกับจุลธาตุทั้งหมด 13 ตัว ได้แก่ As Ba Cd Cr Cu Co Mn Mo Ni Pb Hg V และ Zn ขนาดของเชื้อเพลิงทั้งสองชนิดประมาณ 50 – 80 ไมโครเมตร เผาไหม้แบบใช้อากาศมากเกินพอ อัตราเร็วของอากาศที่เข้าสู่เตาเผาคือ 6 ลิตรต่อนาที อัตราการป้อนเชื้อเพลิงคือ 1.2 และ 0.4 กรัมต่อชั่วโมง หลังจากการเผาแล้วจึงเปรียบเทียบระหว่างเผากากสีเพียงอย่างเดียวและเผาถ่านหินร่วมกับกากสีพบว่าจากกระบวนการเผาไหม้ร่วมกันของกากสี และถ่านหินทำให้เถ้าที่เกิดมีขนาดใหญ่ขึ้น แสดงให้เห็นว่าองค์ประกอบของถ่านหินมีการเปลี่ยนแปลงไปส่งผลกระทบต่อขนาดของเถ้า นอกจากนี้ยังพบว่าโลหะหนักจะอยู่ในเถ้าเบามากกว่าเถ้าหนัก

Nimmo และคณะ (2010) (Nimmo, Daood *et al.* 2010) ได้ศึกษาการป้อนออกซิเจนในการเผาไหม้ถ่านหินบดละเอียดในกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้า ซึ่งมีความเป็นไปได้ว่าการเพิ่มก๊าซออกซิเจนจะทำให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในปริมาณที่น้อยลงกว่าการเผาไหม้ที่ใช้อากาศธรรมดาเพียงอย่างเดียวซึ่งการศึกษานี้เป็นการศึกษาเพื่อใช้เป็นแนวทางในการปรับปรุงก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ที่ปล่อยออกมาซึ่งมีความสัมพันธ์กับปริมาณคาร์บอนที่เปลี่ยนแปลงและการทดลองในครั้งนี้ใช้ถ่านหินจากรัสเซีย ซึ่งใช้สถานีการผลิตกระแสไฟฟ้าในประเทศสหรัฐอเมริกาและใช้ชีวมวลลำต้นของฝ้ายจากประเทศปากีสถานในกระบวนการเผาไหม้ร่วมกันโดยจะทำการผสมเข้าไปคิดเป็นอัตราส่วน 15% ของถ่านหินทั้งหมดซึ่งเตาที่ใช้เผาเป็นแบบไหลลงแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ซึ่งในส่วนแรกจะเป็นส่วนที่ทำการควบคุมการเกิดก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ และอีกส่วนหนึ่งเป็นส่วนที่ให้อากาศเข้าไปซึ่งมีความเข้มข้นของออกซิเจนสูงประมาณร้อยละ 79 จากออกซิเจนร้อยละ 100 ซึ่งจากการสังเกตชีวมวลและถ่านหินจะมีลักษณะการเผาเฉพาะตัวที่ต่างกันซึ่งจะทำให้เกิดเป็นไนโตรเจนออกไซด์ในอัตราส่วนที่ต่างกันด้วยซึ่งผลที่ปรากฏออกมาเป็นไปตามหลักการปริมาณสารสัมพันธ์ และการที่จะเกิดไนโตรเจนออกไซด์มากหรือน้อยจะขึ้นอยู่กับข้อกำหนดในส่วนต่างๆของระบบให้มีความเหมาะสม

Voral และคณะ (2010) (Varol, Atimtay *et al.* 2010) ได้ศึกษาการเผาไหม้และการเผาไหม้ร่วมกันของชีวมวลทั้งสามชนิด และลิกไนต์ของตุรกีทั้งสามชนิดและนำไปวิเคราะห์โดยวิธี TGA ซึ่งจากการศึกษานี้เป็นเพียงส่วนหนึ่งของการเผาไหม้ร่วมกันระหว่างชีวมวล และถ่านหิน และ

การเผาไหม้ร่วมกันระหว่างชีวมวล และถ่านหินจะแสดงออกมาที่อุณหภูมิสูงสุด และเวลาที่เผาไหม้ และจากผลในการศึกษานี้พบว่าถ่านหินที่มีคุณภาพต่ำเมื่อนำมาเผาไหม้ร่วมกับชีวมวลจะทำให้เกิดเพิ่มประสิทธิภาพการเผาไหม้ และสามารถเกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ได้ในช่วงอุณหภูมิที่ต่ำๆ และพบว่าองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นสารอินทรีย์ระเหยได้ร้อยละ 80-90 นอกจากนี้พบว่าถ้าเชื้อเพลิงมีองค์ประกอบเป็นชีวมวลมากขึ้นจะทำให้อุณหภูมิการเผาไหม้ใกล้เคียงกับชีวมวลมากขึ้นดังนั้นอาจสรุปได้ว่าการเผาไหม้ชีวมวลเกิดก่อนถ่านหิน

Dangzhen และคณะ (2010) (Dangzhen Lv 2010) ลักษณะเฉพาะของกระบวนการ Pyrolysis และ Gasification ของชีวมวลธรรมชาติ กับ ชีวมวลที่ล้างด้วยกรดที่ปราศจากความแตกต่าง(Alkali and Alkaline Earth Metals,AAEM) โดยใช้วิธีการวิเคราะห์ TGA และใช้เตาเผาแบบ Fix-Bed Reactor ในการทดสอบนี้ใช้ชีวมวลทั้งหมด 6 ชนิด และทำการวัดเกี่ยวกับ Cellulose, Lignin และ AAEM Speciesในชีวมวลจะทำการสังเกตลักษณะเฉพาะของชีวมวลจากกระบวนการ Pyrolysis and Gasification นั้นขึ้นอยู่กับองค์ประกอบและ AAEM Species พื้นฐานของการทดลองด้วยวิธี TGA ในระหว่างชีวมวลเกิดการ Pyrolysis ผลผลิตที่เป็น Tar (น้ำมันดิน) and Gas จะเพิ่มขึ้นตามองค์ประกอบที่เป็น Cellulose แต่ Char จะลดลง จากกระบวนการทั้งสองกระบวนการจะมีกลไกการย่อยสลายหลักสองกลไก กลไกการสลายตัวครั้งแรกจะแสดงให้เห็นว่ามวลลดลงอย่างรวดเร็วเนื่องมาจากการระเหยเป็นไอของ Cellulose ในขณะที่กลไกขั้นที่สองเกิดขึ้นอย่างช้าๆในการย่อยสลาย Lignin การที่มี Cellulose มากๆ จะเกิด Pyrolysis ได้เร็วในทางตรงกันข้ามถ้ามี Lignin มากจะเกิด Pyrolysis ได้ช้ากว่า นอกจากนั้น การที่มี Cellulose มากขึ้นจะทำให้เพิ่มอุณหภูมิสูงสุดและเวลาที่ใช้ในกระบวนการ Gasification เพิ่มมากขึ้น ในขณะที่ผลของ AAEM Species ต่อกระบวนการ Gasification ถูกศึกษาโดยการเปรียบเทียบโดยการล้างกรดและไม่ล้างกรดของชีวมวลโดยที่ AAEM Species จะไปเพิ่ม Peak Gasification Value ในทางตรงกันข้ามจะเป็นการลดลงของอุณหภูมิตั้งต้นของกระบวนการ Gasification ซึ่งสิ่งเหล่านี้แสดงให้เห็นถึงความสามารถที่จะเกิดปฏิกิริยา Gasification ของชีวมวลที่แสดงให้เห็นถึงปฏิกิริยาระหว่าง AAEM กับ Cellulose/Lignin

Nasrin และคณะ (2011) (Nasrin Aghamohammadi 2011) การเกิดสารมลพิษระหว่างการเผาไหม้ของไม้เขตร้อนผสม ไม้ไผ่ต้นปาล์ม น้ำมัน Acacia และไม้ยางพารา ที่ได้รับทำการตรวจสอบโดยใช้ TG-MS ในการทดสอบ ชีวมวลพบว่าน้ำเป็นผลิตภัณฑ์หลักที่เกิดขึ้นสำหรับตัวอย่างทั้งหมด จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีอินฟราเรดของพารามิเตอร์ดังนี้ CO, H₂O, CO₂, CH₄ และ COOH

พบว่าพืชแต่ละพืชเกิดการซ้อนทับกันแสดงว่าองค์ประกอบของชีวมวลส่วนใหญ่ที่นำมาใช้คล้ายคลึงกัน

J. Riaza และคณะ (2012) (L. Álvarez 2012) ทำการศึกษาการเผาไหม้ร่วมกันของชีวมวลและถ่านหิน ซึ่งถ่านหินที่ใช้ได้แก่ แอนทราไซต์และบิทูมินัส ชีวมวลที่เลือกใช้ได้แก่ มะกอกและความเข้มข้นของออกซิเจนที่เลือกใช้ได้แก่ ร้อยละ 21 ของอากาศ ร้อยละ 30 ของอากาศ และร้อยละ 35 ของอากาศผลการทดลองพบว่า เมื่อมีการเพิ่มออกซิเจนทำให้อุณหภูมิในช่วงการจุดเตาลดลงและทำให้ก๊าซออกมียกไฮโดรคาร์บอนเพิ่มขึ้น และการเพิ่มขึ้นของสัดส่วนชีวมวลในเชื้อเพลิงมากขึ้นจะทำให้เกิดออกไซด์ของไนโตรเจนลดลงด้วย เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของชีวมวลนั้นทำให้สารตั้งต้น(ถ่านหิน)ลดลงทำให้เกิดเป็นออกไซด์ของไนโตรเจนลดลงอีกด้วย

Williams และคณะ (2012) (Williams, Jones et al. 2012) ศึกษาสารมลพิษที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง ชีวมวลที่เป็นของแข็ง และศักยภาพของเชื้อเพลิงชีวมวลที่เป็นของแข็งด้วยวิธีการที่ใช้สำหรับการศึกษาคูสมบัติของสารชีวมวล และการจำแนกชั้นตอนต่างๆในการเผาไหม้โดยดูจากกลไก ทางกายภาพ และกลไกทางเคมีสำหรับการก่อตัวของสารมลพิษไนโตรเจนออกไซด์ คาร์บอนและสารไฮโดรคาร์บอนเผาไหม้ ซัลเฟอร์ออกไซด์ สารประกอบคลอรีน และอนุภาคขนาดเล็กที่มีโลหะหนักเกาะอยู่ด้วยโดยจะทำการทดลองทั้งเผาแบบชีวมวลชนิดเดียว และชีวมวลหลายชนิด

Junchao Wang และคณะ (2012) (Junchao Wang 2012) ศึกษาการเผาไหม้ถ่านหินและสารมลพิษที่เกิดขึ้น โดยถ่านหินที่ใช้ทำการศึกษาคือลิกไนต์ จากการทดลองนำลิกไนต์ไปอบเพื่อไล่ความชื้น ลิกไนต์ที่นำไปบดจนเป็นผงโดยตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบได้แก่ลิกไนต์ที่บดเป็นผงและลิกไนต์ผสมกับบิทูมินัสที่บดเป็นผง นำมาเผาไหม้ในเตา 2 แบบได้แก่ เตาเผาไหม้แบบหลายชั้นซึ่งจะมีการเติมอากาศแยกเป็นส่วนๆ และเตาเผาไหม้แบบชั้นเดียว พบว่าการเกิดออกไซด์ของไนโตรเจนของการเผาไหม้ของเตาเผาไหม้แบบหลายชั้น เกิดออกไซด์ของไนโตรเจนมากกว่าแบบเผาไหม้ชั้นเดียวเนื่องจากความเข้มข้นของออกซิเจนที่สูงกว่าทำให้เกิดออกไซด์ของไนโตรเจนได้มากกว่า และผลจากชนิดของเชื้อเพลิงที่ใช้พบว่า ลิกไนต์ผสมกับบิทูมินัสที่บดเป็นผง เกิดออกไซด์ของไนโตรเจนมากที่สุดและเมื่อทำการลดลิกไนต์ที่อบแห้งแล้วกับบิทูมินัสทำให้การเกิดออกไซด์ของไนโตรเจนลดลง

Cuong Van Huynh และคณะ (2013) (Huynh and Kong 2013) ได้ศึกษาการเผาไหม้ชีวมวลในระบบแก๊สซิฟิเคชันสัดส่วนอากาศมากเกินไป จากการศึกษาในครั้งนี้ได้ทำการเติม

อากาศแบบมากเกินพอเพื่อศึกษาการเกิดออกไซด์ของไนโตรเจน ลักษณะเตาเผาที่ใช้เป็นแบบ pressurized bubbling fluidized bed ปริมาณเชื้อเพลิงที่ทำการเผาเท่ากับ 5 ตันต่อวัน สัดส่วนอากาศมากเกินพอที่ใช้ได้แก่ 100, 145 และ 180 ของออกซิเจน อุณหภูมิที่ทำการศึกษาเท่ากับ 800 องศาเซลเซียส พบว่า เมื่อทำการเพิ่มสัดส่วนอากาศมากเกินพอมีผลทำให้ออกไซด์ของไนโตรเจนลดลง และได้ปริมาณแก๊สสังเคราะห์มากขึ้นด้วย

Li-Ming Shao และคณะ (2013) (Shao, Fan et al. 2013) ได้ศึกษาการเกิด SO_2 และ NO จากการเผาไหม้ของขยะแบบ batch ซึ่งการทดลองมีการเปลี่ยน อุณหภูมิ และปริมาณออกซิเจนที่เติมเข้าไปในเตาเผา พบว่า เมื่ออุณหภูมิสูงมากขึ้น NO และ SO_2 จะสามารถเกิดได้มากขึ้นจาก ไนโตรเจนที่อยู่ในอากาศ และ NO จะเกิดได้ดีในช่วงอุณหภูมิ 550 - 650 องศาเซลเซียส และเกิดได้น้อยลงในช่วงอุณหภูมิ 650 - 950 องศาเซลเซียส และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของออกซิเจนพบว่า SO_2 และ NO มีความเข้มข้นเพิ่มขึ้นด้วย

Stanislav V. Vassilev และคณะ (2013) (Vassilev, Baxter et al. 2013) ได้ศึกษาการเผาไหม้ของชีวมวลต่อการเกิดมลพิษจากการกลไกการเผาไหม้และเกิดสารมลพิษต่างๆ จากการอ้างอิงมาจางานวิจัยอื่นๆ ซึ่งพบว่า องค์ประกอบของชีวมวลต่างกันมีผลทำให้เกิดเป็นออกไซด์ของไนโตรเจนได้ไม่เท่ากัน และการเผาไหม้ของชีวมวลแบ่งออกเป็นช่วงดังนี้ ที่ช่วงอุณหภูมิ 200 -850 องศาเซลเซียส สารอินทรีย์ที่อยู่ในชีวมวลจะถูกเผาไหม้ ที่อุณหภูมิมากกว่า 500 องศาเซลเซียสจะเริ่มเกิดอนุภาคจากการเผาไหม้ ที่อุณหภูมิ 700 - 1,300 องศาเซลเซียส จะเกิดเป็นอนุภาคขนาดเล็ก และที่อุณหภูมิ 1,000 - 1,500 องศาเซลเซียส สารอินทรีย์จะหลอมละลายปนออกมากับอนุภาคขนาดเล็ก

María Abián และคณะ (2014) (Abián, Peribáñez et al. 2014) ศึกษาผลกระทบของออกไซด์ของไนโตรเจนต่อการเกิดฝ้าลอย โดยใช้ก๊าซ NO, NO_2 และ N_2O ในการทดสอบ พบว่า NO_2 มีผลกระทบต่อการเกิดฝ้าลอยมากที่สุด รองลงมาได้แก่ NO และ N_2O ตามลำดับ ซึ่งจากการทดสอบ NO_2 ทำให้เกิดฝ้าลอยน้อยที่สุดที่ความเข้มข้นของ NO_2 มากกว่า 5,000 ppm ที่ความเข้มข้นต่ำกว่า 5,000 ppm แนวโน้มการเกิดไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ การเกิดฝ้าลอยจาก N_2O มากที่สุดเนื่องมาจากความเข้มข้นของ N_2O เพิ่มมากขึ้นจะทำให้ เรดิคอลของ O และ OH มีปริมาณเพิ่มมากขึ้น ทำให้สามารถเกิดการแตกตัวของสารไฮโดรคาร์บอนได้มากขึ้น ทำให้เกิดฝ้าลอยมากขึ้นด้วย

Min Kuang และคณะ (2014) (Kuang and Li 2014) ได้ศึกษาเผาไหม้แบบหลายชั้น ในเตาเผาแบบไหลลง เพื่อลดการเกิดออกไซด์ของไนโตรเจนในเตาเผาแบบอุตสาหกรรมที่ใช้ในปัจจุบัน จากการทดลองจะเติมอากาศอยู่ในช่วงร้อยละ 50 - 70 ของออกซิเจน และทำการวัดอุณหภูมิในแต่ละจุดภายในเตาเผา พบว่าการเติมอากาศในชั้นที่สองมีผลทำให้การเกิดไนโตรเจนออกไซด์เพิ่มมากขึ้นเนื่องจากปริมาณออกซิเจนทำให้อุณหภูมิสูงขึ้น และแก๊สลอยที่เกิดขึ้นในช่วงแรกเกิดลดลงแต่เมื่ออากาศมากขึ้นทำให้เกิดการเผาไหม้มากขึ้นในส่วนของห้องเผาไหม้ทำให้เกิดอุณหภูมิสูงขึ้น

Murat Varol และคณะ (2014) (Varol, Atimtay et al. 2014) ได้ทำการศึกษการเผาไหม้ร่วมกันของถ่านหินและชีวมวล โดยถ่านหินที่ใช้คือลิกไนต์ และชีวมวลที่ใช้คือ ชี้เลื่อย ได้ใช้เตาแบบ circulating fluidized bed โดยอุณหภูมิที่เลือกใช้ได้คือ 850 องศาเซลเซียส และแก๊สขาออกที่ทำการตรวจวัดได้แก่ CO NO SO₂ และ O₂ จากการศึกษาพบว่า การเพิ่มสัดส่วนของอากาศมากเกินไปมีผลต่ออุณหภูมิของเตาเผาไหม้แต่อุณหภูมิยังคงที่สม่ำเสมอตลอดการทดลอง จากการศึกษาทดลองพบว่าจากการเพิ่มสัดส่วนของชี้เลื่อยมากขึ้น ทำให้เกิดเป็น CO สูงขึ้น แต่ไม่มีผลต่อการเกิดออกไซด์ของไนโตรเจน

บทที่ 3

วิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 อุปกรณ์และสารเคมี

3.1.1. เชื้อเพลิงที่ใช้ในงานวิจัย

ถ่านหิน (รูปที่ 3.1):

- ลิกไนต์ จาก อำเภอ แม่เมาะ จังหวัด ลำปาง
- บิทูมินัส จาก อำเภอ ท่ามะกะ จังหวัด กาญจนบุรี



ลิกไนต์ (Lignite)

บิทูมินัส (Bituminus)

รูปที่ 3. 1 ถ่านหินที่ใช้ในการวิจัย

ชีวมวล (รูปที่ 3.2) :

- กากอ้อย จากจังหวัด กาญจนบุรี
- แกลบ จากจังหวัด กาญจนบุรี
- กะลามะพร้าว จากจังหวัด กาญจนบุรี
- เหง้ามันสำปะหลัง จากจังหวัด สระบุรี



กากอ้อย (Bagasse)



เหง้ามันสำปะหลัง (Tapioca Rhizome)



แกลบ (Rice Husk)



กะลามะพร้าว (Coconut Shell)

รูปที่ 3. 2 ชีวมวลที่ใช้ในการวิจัย

3.1.2. เครื่องมือและวัสดุในการเตรียมตัวอย่าง การทดลองและการเก็บตัวอย่าง ได้แก่

1. เตาเผาแบบไหลลง (Downdraft Gasifier) ขนาด 10MW ห้องเผาไหม้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 34 เซนติเมตร สูง 65 เซนติเมตร ผลิตในประเทศไทยตัวต้นแบบใช้ในพระราชวังจិតลดา
2. เครื่องวัดอัตราการไหล (Rotameter Air Type) ยี่ห้อ nitto ประเทศไทย
3. เครื่องย่อยขนาดชีวมวลให้มีขนาดเล็กกว่า 1 นิ้ว
4. เครื่องชั่งทศนิยม 5 ตำแหน่ง บริษัท Mettler Toledo ประเทศไทย
5. ตะแกรงร่อนขนาด 1 นิ้ว
6. เครื่องวัดก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ รุ่น Testo 300 M-1 ประเทศเยอรมัน
7. เทอร์โมคัปเปิ้ล รุ่น JB-35C ชนิด K
8. นาฬิกาจับเวลา ยี่ห้อ Junso ประเทศ จีน
9. ถูมือไวนิลชนิดไม่มีแป้ง ยี่ห้อ ศรีตรังโกลฟ์ ประเทศไทย
10. เครื่องวัดขนาดของอนุภาคฝุ่นที่เกิดจากการเผาไหม้ รุ่น RION Model KR-12 ชนิด Laser Class ประเทศ ญี่ปุ่น

3.2 วิธีดำเนินงานวิจัย

1. ศึกษาองค์ประกอบทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีของเชื้อเพลิงที่ใช้ทำการทดลอง เพื่อวิเคราะห์องค์ประกอบต่างๆ ที่มีผลต่อการเกิดก๊าซไนโตรเจนออกไซด์และลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้

1.1 การศึกษาองค์ประกอบทางกายภาพของเชื้อเพลิง ได้แก่ ปริมาณความชื้น และค่าความร้อน ตามวิธีมาตรฐาน (material 2006, material 2006, material 2006, material 2006)

1.2 การศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของเชื้อเพลิง ได้แก่ ปริมาณ CHN โดยใช้เครื่องวิเคราะห์ธาตุ (CHON/S Analyzer)

2. การเตรียมตัวอย่าง

2.1 นำเชื้อเพลิงทุกชนิดไปเข้าเครื่องตัดให้มีขนาดเล็กกว่า 1 นิ้ว นำไปร่อนผ่านตะแกรงที่มีขนาด 1 นิ้ว จึงนำไปผึ่งให้แห้ง

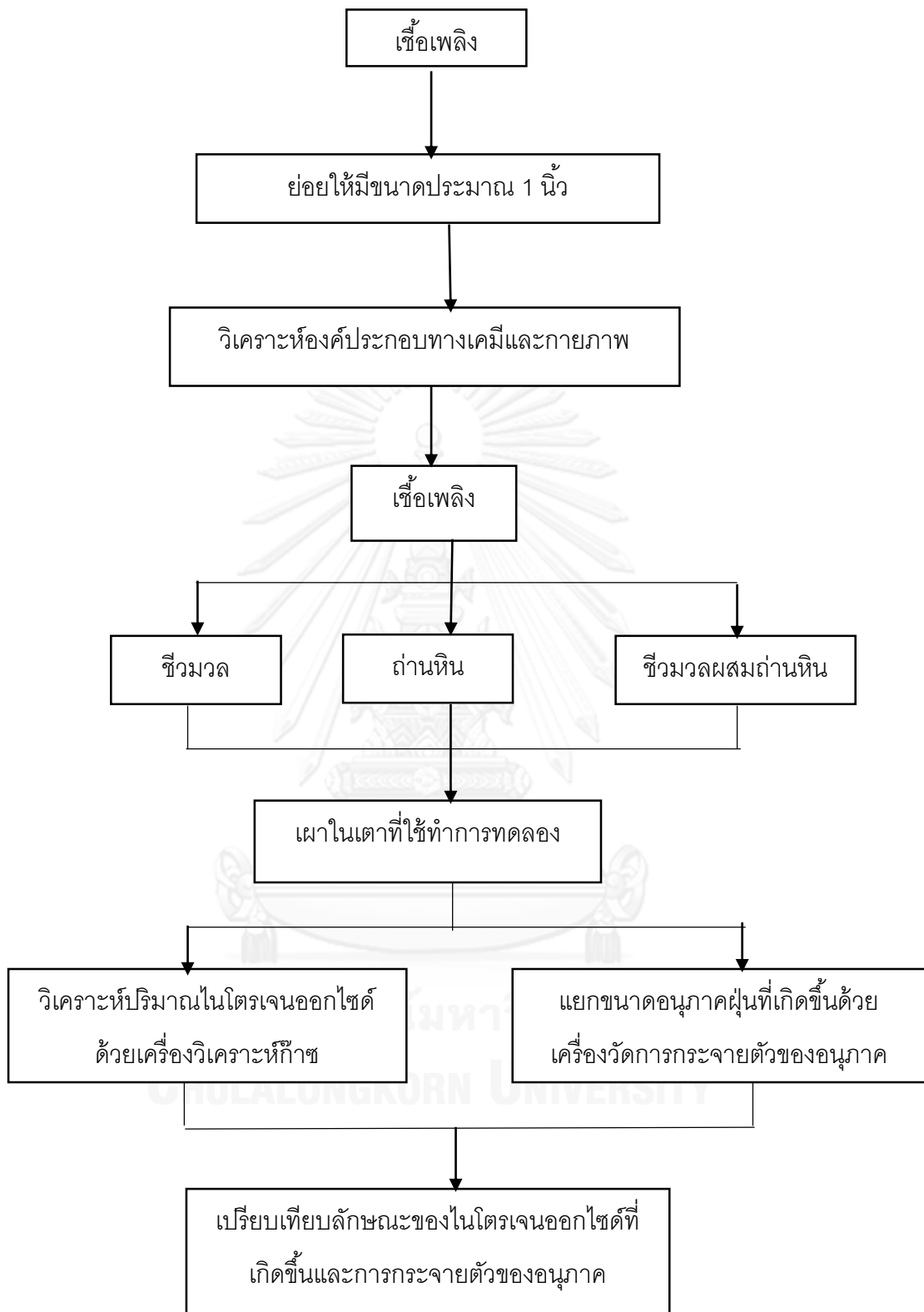
2.2 สำหรับตัวอย่างเชื้อเพลิงที่ใช้ในการทดลองที่ใช้จะทำการผสมในอัตราส่วนของชีวมวลและถ่านหินเท่ากับ 100:0, 80:20, 50:50, 80:20 และ 0:100

3. เตาเผาเชื้อเพลิงที่ใช้เป็นเตาผลิตก๊าซเพื่อใช้ผลิตกระแสไฟฟ้าขนาด 10 MW ซึ่งวิธีการเผาไหม้จะอธิบายเป็นขั้นตอนต่อไปนี้

3.1 นำเชื้อเพลิงที่ใช้ในการทดลองใส่ลงในที่บรรจุเชื้อเพลิง โดยใช้เชื้อเพลิง 2 กิโลกรัม ต่อการเผา 1 ชั่วโมง ต่อการทดลอง 1 รอบ

3.2 เผาด้วยสัดส่วนอากาศมากเกินพอที่ 100 150 และ 200 ของปริมาณออกซิเจนที่ต้องการในการเผาไหม้ (ดังที่แสดงในตารางที่ 3.1)

3.3 ทำการเก็บตัวอย่างโดยจะทำการเก็บตัวอย่างทุก 5 นาทีตลอด 1 ชั่วโมง ด้วยเครื่องมือวิเคราะห์ก๊าซ และเครื่องคัดแยกจำนวนอนุภาค



รูปที่ 3. 3 ขั้นตอนดำเนินงานวิจัย

ตารางที่ 3. 1 จำนวนตัวอย่างที่ทำการทดลองที่เกิดจากการเผาไหม้

เชื้อเพลิง	อัตราส่วนเชื้อเพลิง	สัดส่วนอากาศ
ถ่านหินลิกไนต์	100	100
		150
		200
ถ่านหินบิทูมินัส	100	100
		150
		200
แกลบ	100	100
		150
		200
กากอ้อย	100	100
		150
		200
กะลามะพร้าว	100	100
		150
		200
เหง้ามันสำปะหลัง	100	100
		150
		200
แกลบ:ลิกไนต์	80:20	100
		150
		200
	50:50	100
		150
		200
	20:80	100
		150
		200
แกลบ:บิทูมินัส	80:20	100

ตารางที่ 3.1 จำนวนตัวอย่างที่ทำการทดลองที่เกิดจากการเผาไหม้(ต่อ)

เชื้อเพลิง	อัตราส่วนเชื้อเพลิง	สัดส่วนอากาศ
แกลบ:บิทูมินัส(ต่อ)	50:50	150
		200
		100
		150
		200
		100
กากอ้อย:ลิกไนต์	20:80	150
		200
		100
		150
		200
		100
กากอ้อย:บิทูมินัส	80:20	100
		150
		200
		100
		150
		200
เห้งจ้ำมัน:ลิกไนต์	50:50	100
		150
		200
		100
		150
		200
เห้งจ้ำมัน:ลิกไนต์	20:80	100
		150
		200
		100
		150
		200
เห้งจ้ำมัน:ลิกไนต์	80:20	100
		150
		200
		100
		150
		200

ตารางที่ 3.1 จำนวนตัวอย่างที่ทำการทดลองที่เกิดจากการเผาไหม้(ต่อ)

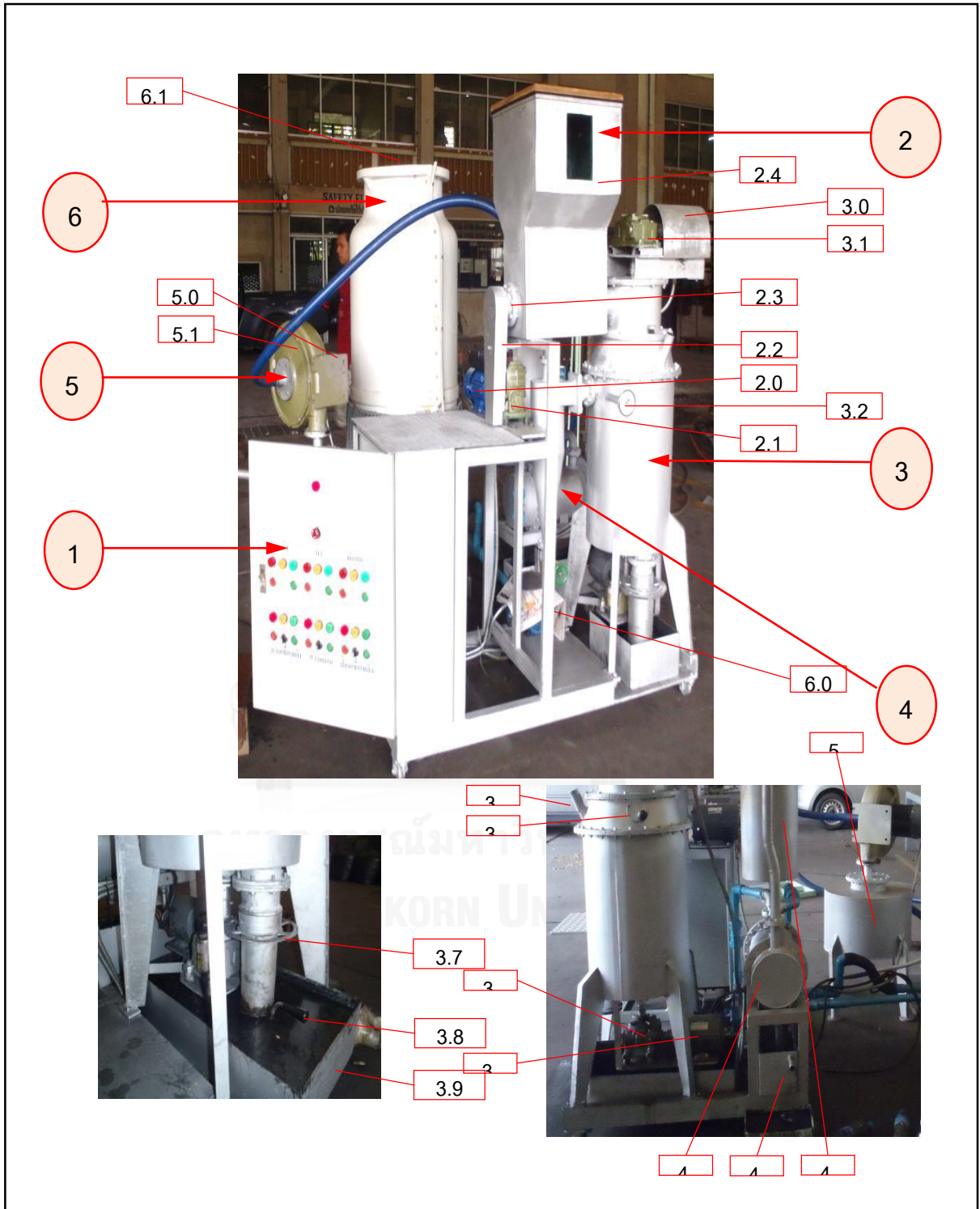
เชื้อเพลิง	อัตราส่วนเชื้อเพลิง	สัดส่วนอากาศ
แก๊ง้ำมัน:ลิกไนต์(ต่อ)	20:80	200
	50:50	100
		150
	80:20	200
		100
แก๊ง้ำมัน:บิทูมินัส		150
	50:50	200
		100
	20:80	150
		200
กาลามะพร้าว:ลิกไนต์		100
		150
	50:50	200
		100
		150
กาลามะพร้าว:บิทูมินัส	20:80	200
		100
		150
	80:20	200
		100
	150	
	50:50	200
		100
		150
		200

เชื้อเพลิง	อัตราส่วนเชื้อเพลิง	สัดส่วนอากาศ
กะลามะพร้าว:ปิโตรมินัส	20:80	100
		150
		200
รวม		90

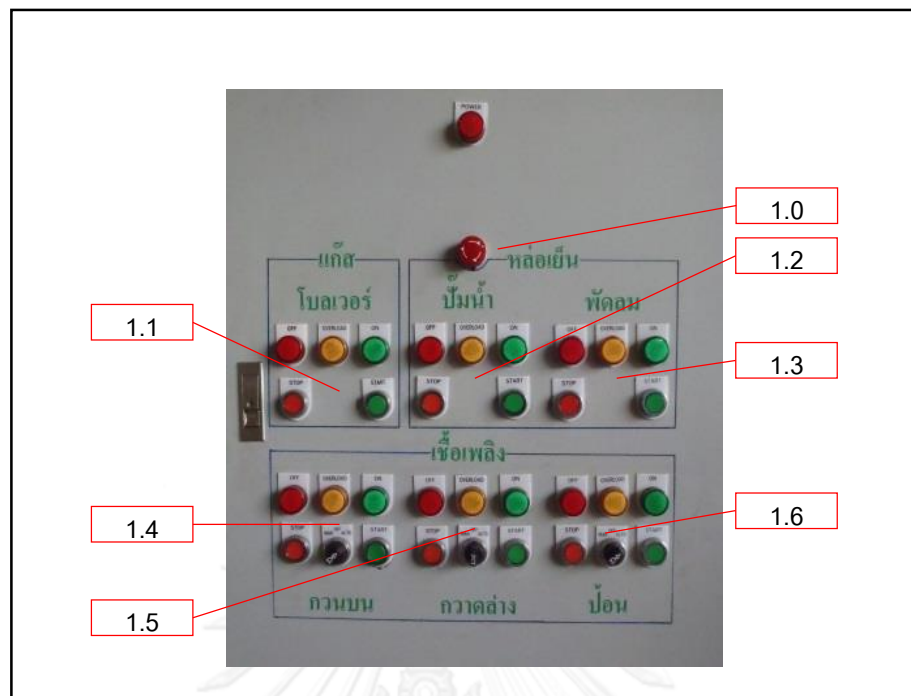
จากการทดลองมีการทำซ้ำ ของตัวอย่าง 3 ครั้ง จำนวนการทดลองทั้งหมดเท่ากับ 180 ตัวอย่าง



3.3 ระบบเตาเผาไหม้



รูปที่ 3. 4 ระบบเตา



รูปที่ 3. 5 แผงวงจรควบคุม

ตารางที่ 3.2. 1 ชุดควบคุมการป้อนเชื้อเพลิง

หมายเลข	ชื่อชิ้นส่วน	ขนาด	หน้าที่
2.0	มอเตอร์ขับ	1 แรงม้า	ต้นกำลังป้อนเชื้อเพลิง
2.1	เกียร์ทด	1 ต่อ 60 , ¼ แรงม้า	ลดความเร็วรอบ
2.2	โซ่	เบอร์ 4	ส่งกำลังจากเกียร์ทดไปยังเกสียัด
2.3	เกลียวป้อนอัด	เส้นผ่า ศ.ก. 6 เซนติเมตร	กวดและป้อนเชื้อเพลิงเข้าถังเผา
2.4	ถังเติมเชื้อเพลิง	ปริมาตรบรรจุเชื้อเพลิง 10 กิโลกรัม	บรรจุเชื้อเพลิง

ตารางที่ 3.2. 2 ชุดห้องเผา

หมายเลข	ชื่อชิ้นส่วน	ขนาด	หน้าที่
3.0	มอเตอร์ขับ	¼ แรงม้า	ต้นกำลังใบกววนเชื้อเพลิง
3.1	เกียร์ทด	1 ต่อ 60 , ¼ แรงม้า	ลดความเร็วรอบ
3.2	เกจอุณหภูมิ	0-500 องศาเซลเซียส	วัดอุณหภูมิแก๊ส
3.3	ท่อติดเตา	¾ นิ้ว	ป้อนไฟ เริ่มติดเตา
3.4	ท่ออากาศ	¾ นิ้ว	ปรับปริมาณอากาศเข้าเตา
3.5	เกียร์ทด	1 ต่อ 60 , ¼ แรงม้า	ลดความเร็วรอบ
3.6	มอเตอร์	¼ แรงม้า	ต้นกำลังใบกวาดซีเถ้า
3.7	มือหมุน	-	หมุนเกลียว ถอด-ประกอบท่อทิ้งซีเถ้า
3.8	ด้ามโยก	-	โยก กวาดซีเถ้า
3.9	กระบะรอง	28 X 83 X 15 เซนติเมตร	วาล์วตักแก๊ส รองรับซีเถ้า

ตารางที่ 3.2. 3 ชุดแยกก๊าซ

หมายเลข	ชื่อชิ้นส่วน	ขนาด	หน้าที่
4.0	ถังแยก	2 ห้องแก๊ส	กลั่นแยกน้ำส้มควันไม้ ลดอุณหภูมิแก๊ส
4.1	กระบะรอง	14 X 55 X 15 เซนติเมตร	วาล์วตักแก๊ส รองรับน้ำส้มควันไม้
4.2	ถังกรอง	¼ แรงม้า	กรองฝุ่น, แยกแก๊ส

ตารางที่ 3.2. 4 ชุดหัวจ่ายแก๊ส

หมายเลข	ชื่อชิ้นส่วน	ขนาด	หน้าที่
5.0	มอเตอร์	1 แรงม้า	ต้นกำลังขับเคลื่อนปั๊ม
5.1	พัดลม	-	ดูด-อัด แก๊ส ส่งไปยังหาเตา
5.2	ถังกรอง	-	กรองน้ำ และ แยกแก๊ส

ตารางที่ 3.2. 5 ชุดหล่อเย็น

หมายเลข	ชื่อชิ้นส่วน	ขนาด	หน้าที่
6.0	ปั๊มน้ำ	1 นิ้ว มอเตอร์ ¼ แรงม้า	เคลื่อนที่น้ำไปยังชุดแยกแก๊สและวนกลับ
6.1	พัดลมระบายอากาศ	มอเตอร์ ¼ แรงม้า	ระบายความร้อนน้ำ
6.2	อ่างน้ำ	-	ใช้แลกเปลี่ยนความร้อน

ตารางที่ 3.2. 6 แผงควบคุม

หมายเลข	ชื่อชิ้นส่วน	หน้าที่	สถานะ
1.0	สวิทช์หัวเห็ด	ปิดฉุกเฉินควบคุมวงจรทั้งหมด	กด-ปิดหมุนตามเข็ม-เปิด
1.1	- สวิทช์กดเปิด-ปิด - ไฟแสดงสถานะ	ควบคุมโบลเวอร์ดูด-จ่ายแก๊ส	กดปุ่มเขียว-ไฟเขียว..ทำงาน กดปุ่มแดง-ไฟแดง...หยุด
1.2	- สวิทช์กดเปิด-ปิด - ไฟแสดงสถานะ	ควบคุมปั้มน้ำ	กด ปุ่ม เขียว -ไฟ เขียว.. ทำงาน กดปุ่มแดง-ไฟแดง...หยุด
1.3	- สวิทช์กดเปิด-ปิด - ไฟแสดงสถานะ	ควบคุมพัดลมระบายความร้อน	กด ปุ่ม เขียว -ไฟ เขียว.. ทำงาน กดปุ่มแดง-ไฟแดง...หยุด
1.4	- สวิทช์ลูกศร - สวิทช์กดเปิด-ปิด - ไฟแสดงสถานะ	ควบคุมชุดกวนเชื้อเพลิง	- สวิทช์ลูกศรบิดซ้าย, กดปุ่มเขียว-ไฟเขียว..ทำงาน, กดปุ่มแดง-ไฟแดง...หยุด - สวิทช์ ลูกศร บิด ขวา อัต โนมัติ ไฟเขียว..ทำงาน,ไฟแดง...หยุด
1.5	- สวิทช์ลูกศร - สวิทช์กดเปิด-ปิด - ไฟแสดงสถานะ	ควบคุมชุดกวาดซีเถ้า	- สวิทช์ลูกศรบิดซ้าย, กดปุ่มเขียว-ไฟเขียว..ทำงาน, กดปุ่มแดง-ไฟแดง...หยุด - สวิทช์ ลูกศร บิด ขวา อัต โนมัติ ไฟเขียว..ทำงาน,ไฟแดง...หยุด
1.6	- สวิทช์ ลูก ศร - สวิทช์กดเปิด-ปิด - ไฟแสดงสถานะ	ควบคุมชุดป้อนอัดเชื้อเพลิง	- สวิทช์ลูกศรบิดซ้าย, กดปุ่มเขียว-ไฟเขียว..ทำงาน, กดปุ่มแดง-ไฟแดง...หยุด - สวิทช์ลูกศรบิดขวา อัตโนมติ ไฟเขียว..ทำงาน,ไฟแดง...หยุด

3.3.1 การป้อนอากาศและการทำงานของเตาเผา

จากการทดลองการเผาไหม้ที่สภาวะอากาศมากเกินพอที่ ร้อยละ 100, 150 และ 200 ของออกซิเจนคิด เป็น 120 180 และ 240 ลิตรต่อนาที (ตัวอย่างการคำนวณในภาคผนวก ข.)

เชื้อเพลิงถูกบรรจุอยู่ด้านในของฮอปเปอร์และเข้าสู่ห้องเผาไหม้โดยเครื่องป้อนอัตโนมัติที่อัตราการป้อน 2,000 กรัม ต่อ 1 ชั่วโมง อากาศจะเข้าสู่ห้องเผาไหม้ดังที่แสดงในภาพที่ 3.2 ในหมายเลข 3 และสารมลพิษที่เกิดขึ้น จะออกมาทางช่องก๊าซออก ผ่านจุดตรวจวัด ออกไซด์ของไนโตรเจน และอนุภาคที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ โดยบริเวณปลายสุดของท่อจะมีปั๊มดูดก๊าซที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ เพื่อให้อากาศมีอัตราการไหลคงที่



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทที่ 4

ผลและการวิเคราะห์ข้อมูล

จากการศึกษาการเผาไหม้เชื้อเพลิงต่อแนวโน้มการเกิดมลพิษ ได้ทำการศึกษาเชื้อเพลิงที่เป็นชีวมวล อันได้แก่ แกลบ กากอ้อย เหม้ามันสำปะหลัง และกะลามะพร้าว ร่วมกับถ่านหินได้แก่ ลิกไนต์ และบิทูมินัส โดยการศึกษาครั้งนี้ใช้อากาศมากเกินพอที่ร้อยละ 100, 150 และ 200 ของออกซิเจน เพื่อศึกษาลักษณะการเกิดออกไซด์ของไนโตรเจนและการกระจายตัวของอนุภาคฝุ่นที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงแต่ละชนิดและการเผาไหม้ร่วมกันระหว่างเชื้อเพลิงที่เป็นชีวมวลและถ่านหินที่สัดส่วนชีวมวลต่อถ่านหิน ดังนี้ 100:0, 80:20, 50:50, 20:80 และ 0:100 ซึ่งได้มีการอภิปรายผลในหัวข้อต่อไปนี้

4.1 ลักษณะของเชื้อเพลิงที่ใช้ในการเผาไหม้

จากการทดลองผลการวิเคราะห์ข้อมูลได้แสดงในบทนี้ โดยจะแบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลัก ได้แก่ คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของเชื้อเพลิง การเกิดอนุภาค และการเกิดออกไซด์ของไนโตรเจน ซึ่งพารามิเตอร์ที่เป็นตัวชี้วัดที่ได้ทำการตรวจวัดมีดังนี้ อุณหภูมิ ขนาดอนุภาคที่เกิดขึ้น ความเข้มข้นมลพิษที่เกิดขึ้น (ออกไซด์ของไนโตรเจน คาร์บอนมอนอกไซด์) ในหน่วยของ ppm

ลักษณะสมบัติของเชื้อเพลิงที่ใช้ในการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.1 - 4.2 ซึ่งแสดงถึงลักษณะทางกายภาพและลักษณะทางเคมีของเชื้อเพลิงแต่ละชนิด

ตารางที่ 4. 1 ลักษณะองค์ประกอบทางเคมีของเชื้อเพลิงที่ใช้ทดสอบ

การวิเคราะห์ปริมาณธาตุ	แกลบ	กากอ้อย	เหม้ามัน	กะลามะพร้าว	ลิกไนต์	บิทูมินัส
คาร์บอน*	38.56	44.81	42.14	41.18	51.18	77.2
ไฮโดรเจน*	5.24	5.87	7.10	4.73	4.59	5.98
ไนโตรเจน*	0.40	0.24	0.62	1.22	1.16	1.49

* ร้อยละโดยน้ำหนักแห้ง

ตารางที่ 4. 2 ลักษณะองค์ประกอบทางกายภาพของเชื้อเพลิงที่ใช้ทดสอบ

ลักษณะทางกายภาพ	แกลบ	กากอ้อย	เหง้ามัน	กะลามะพร้าว	ลิกไนต์	บิทูมินัส
สารอินทรีย์ระเหย*	48.54	56.8	24.28	68.23	30.18	27.34
ความชื้น*	7.97	4.23	31.7	12.04	31.28	8.26
คาร์บอนคงตัว*	30.37	19.22	6.38	14.27	37.63	72.11
เถ้า*	15.18	20.1	6.23	3.49	18.2	7.62
LHV*	6.22	8.37	6.08	8.72	8.67	25.28

* ร้อยละโดยน้ำหนักแห้ง

จากตารางที่ 4.1 แสดงคุณสมบัติทางเคมีของเชื้อเพลิง และเห็นได้ว่า องค์ประกอบของถ่านหิน มีองค์ประกอบเป็นไนโตรเจนสูงกว่าในชีวมวลมากซึ่งองค์ประกอบที่เป็นไนโตรเจนนั้นเป็นองค์ประกอบสำคัญที่จะก่อให้เกิดเป็น ออกไซด์ของไนโตรเจนโดยทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศที่ความร้อนเพียงพอ ดังที่กล่าวมาแล้วในบทที่ 3 และจากตารางที่ 4.2 แสดงคุณสมบัติทางกายภาพของเชื้อเพลิง และเห็นได้ว่าถ่านหินมีองค์ประกอบที่เป็นคาร์บอนคงตัวสูงกว่าชีวมวล ซึ่งคาร์บอนคงตัวนั้นจะส่งผลต่อการเกิดอนุภาค นอกจากนี้ค่าความร้อนของถ่านหินที่สูงกว่าชีวมวลนั้นส่งผลต่อการเกิดออกไซด์ของไนโตรเจน ในส่วนของปริมาณของเถ้าที่เกิดขึ้นจะพบว่าการเผาไหม้ชีวมวลเกิดเถ้ามากกว่าถ่านหิน ซึ่งทำให้เกิดปัญหาเมื่อทำการทดลองต่อเนื่อง ค่าความชื้นของชีวมวลมีแนวโน้มสูงกว่าในถ่านหินซึ่งค่าความชื้นเหล่านี้ส่งผลกระทบโดยตรงจากการเผาไหม้เนื่องจากกระบวนการ dehydration ซึ่งเป็นกระบวนการกำจัดน้ำออกจากเชื้อเพลิงที่เผาไหม้โดยไนโตรเจนใช้ความร้อนทำให้เมื่อเผาไหม้ชีวมวลในช่วงเริ่มแรกค่าความร้อนจะสูงขึ้นซ้ำกว่าการเผาไหม้ถ่านหิน

4.2 จำนวนอนุภาคที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ชีวมวลและถ่านหิน

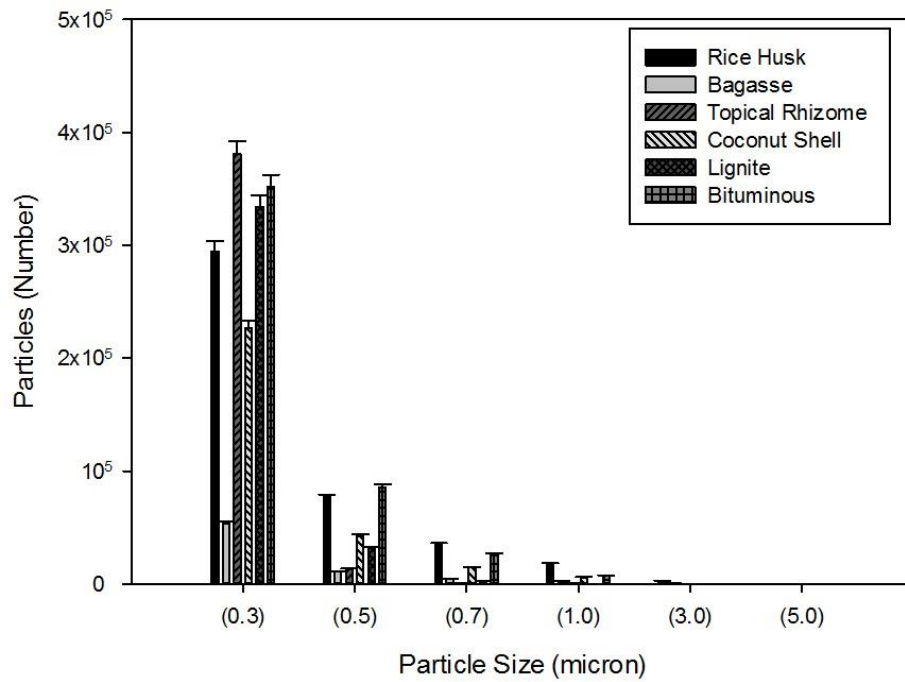
4.2.1 จำนวนอนุภาคที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ชีวมวลและถ่านหินเพียงอย่างเดียว

จำนวนอนุภาคที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ชีวมวลและถ่านหินเพียงอย่างเดียวอันได้แก่ แกลบ กากอ้อย เหง้ามันสำหรับหลัง กะลามะพร้าว ลิกไนต์ และบิทูมินัส ที่สัดส่วนอากาศมากเกินพอ 100 150 และ 200 เปอร์เซ็นต์ ดังที่แสดงในรูปที่ 4.1 - 4.3 จะเห็นได้ว่าอนุภาคที่อากาศมากเกินพอ

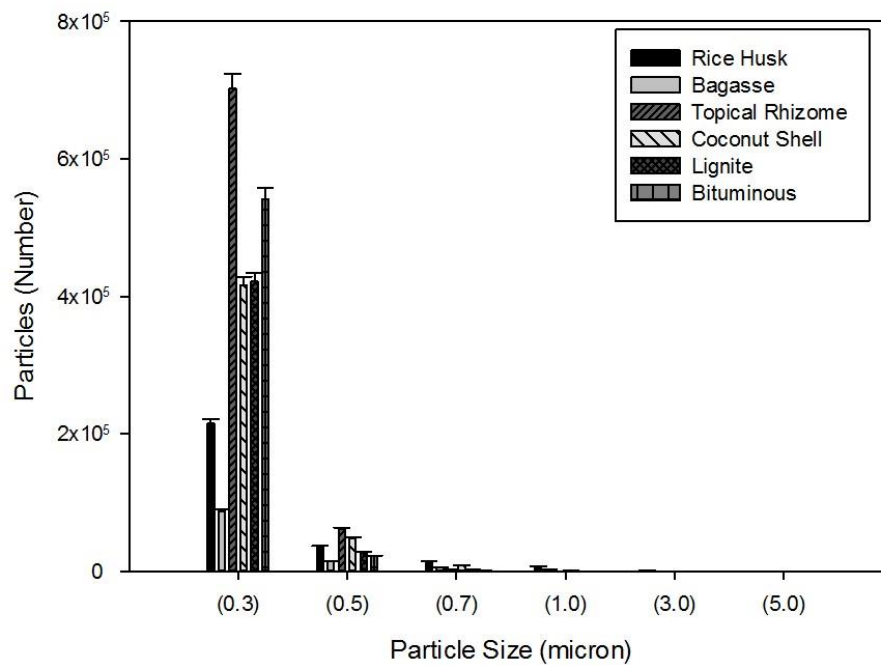
ร้อยละ 200 จำนวนอนุภาคที่เกิดขึ้นจะมากกว่าที่อากาศมากเกินพอร้อยละ 100 และร้อยละ 150 และการเผาไหม้ชีวมวลเพียงอย่างเดียวจะมีจำนวนอนุภาคน้อยกว่าการเผาไหม้ถ่านหินเพียงอย่างเดียวเนื่องจากในถ่านหินมีคาร์บอนคงตัวในปริมาณที่มากกว่าชีวมวลดังที่แสดงในตารางที่ 4.2 และเมื่อมีการเพิ่มอากาศเพิ่มมากขึ้นจะทำให้อนุภาคขนาดเล็กเกิดได้มากขึ้นและการเกิดอนุภาคขนาดใหญ่ลดลงเนื่องจากปริมาณของออกซิเจนที่มากขึ้นสามารถเกิดปฏิกิริยาทำให้สารไฮโดรคาร์บอนแตกตัวเป็นอนุภาคได้มากขึ้น (L. Álvarez 2012) ยกเว้นการเกิดอนุภาคของเขม่ามันสำปะหลังในทุกสภาวะอากาศมากเกินพอเกิดอนุภาคสูงที่สุดเนื่องจากมีเถ้าในปริมาณที่น้อยอนุภาคที่เกิดขึ้นจึงมีปริมาณที่สูง

4.2.2 การกระจายขนาดของอนุภาคที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ของชีวมวลและถ่านหิน

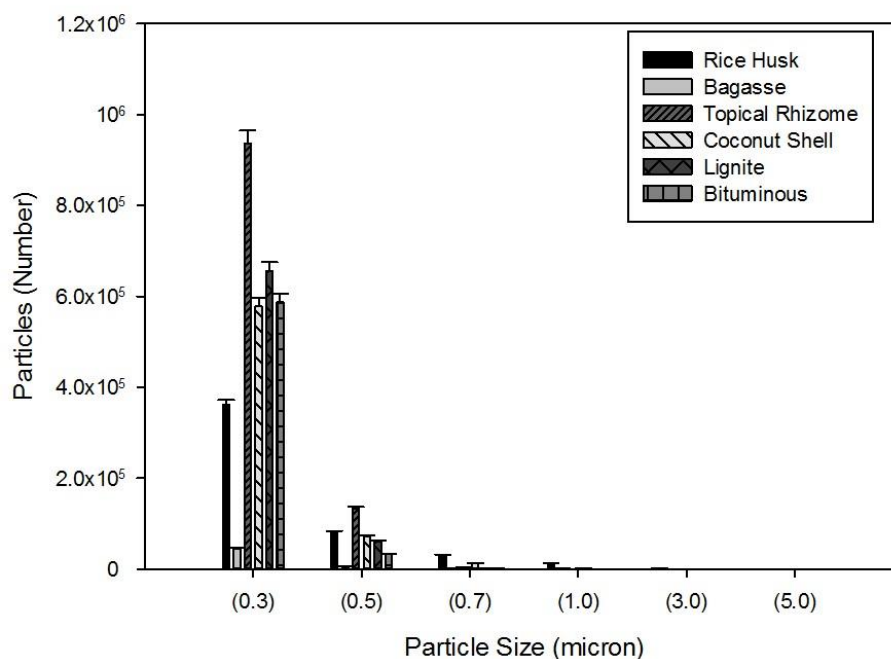
จำนวนอนุภาคที่เกิดขึ้นมากที่สุดคือ อนุภาคขนาดเล็ก (ขนาด 0.3, 0.5 และ 0.7 ไมโครเมตร) มากกว่าอนุภาคขนาดใหญ่ (ขนาด 1.0, 3.0 และ 5.0 ไมโครเมตร) ในทุกการทดลอง และการเผาไหม้ถ่านหินเพียงอย่างเดียวมีแนวโน้มก่อให้เกิดอนุภาคที่มีขนาดเล็กมากกว่าการเผาไหม้ชีวมวลเพียงอย่างเดียว ดังที่แสดงในรูปที่ 4.1 - 4.3 เนื่องจากถ่านหินมีค่าความร้อนสูงปริมาณคาร์บอนคงตัวสูงความชื้นต่ำ ดังที่แสดงในตารางที่ 4.2 การเผาไหม้ชีวมวลเพียงอย่างเดียวนั้นเกิดเป็นอนุภาคขนาดใหญ่มากกว่าเนื่องจากกระบวนการการเผาไหม้ที่ไม่ต่อเนื่องซึ่งแตกต่างจากถ่านหินที่เกิดการเผาไหม้อย่างต่อเนื่องซึ่งกระบวนการการเผาไหม้ของชีวมวลจะแบ่งออกเป็นสองช่วงอุณหภูมิในช่วงอุณหภูมิต่ำ 200 - 400 เป็นช่วงที่กำจัดน้ำและสารระเหยอินทรีย์ออก และช่วงที่อุณหภูมิสูงกว่า 600 เป็นช่วงเผาไหม้ ซึ่งระหว่างสองช่วงอุณหภูมิจะเกิดจะเกิดการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ ทำให้เกิดเป็นอนุภาคขนาดใหญ่ได้มากกว่าถ่านหิน (Varol, Atimtay et al. 2010) ในส่วนของสัดส่วนของอากาศมากเกินพอที่สัดส่วนอากาศมากเกินพอของออกซิเจนร้อยละ 200 มีอนุภาคขนาดเล็กเกิดมากที่สุดเนื่องจากปริมาณของออกซิเจนที่มากขึ้นทำให้เกิดการแตกของไฮโดรคาร์บอนได้มากขึ้นนอกจากนี้ อุณหภูมิที่สูงขึ้นยังส่งผลทำให้พลังงานโมเลกุลเพิ่มมากขึ้นทำให้เกิดเป็นอนุภาคขนาดเล็กได้ดีขึ้น



รูปที่ 4. 1 การกระจายตัวของอนุภาคของชีวมวลและถ่านหินที่สัดส่วนอากาศมากเกินพอร้อยละ100



รูปที่ 4. 2 การกระจายตัวของอนุภาคของชีวมวลและถ่านหินที่สัดส่วนอากาศมากเกินพอร้อยละ150



รูปที่ 4. 3 การกระจายตัวของอนุภาคของชีวมวลและถ่านหินที่สัดส่วนอากาศมากเกินพอร้อยละ 200

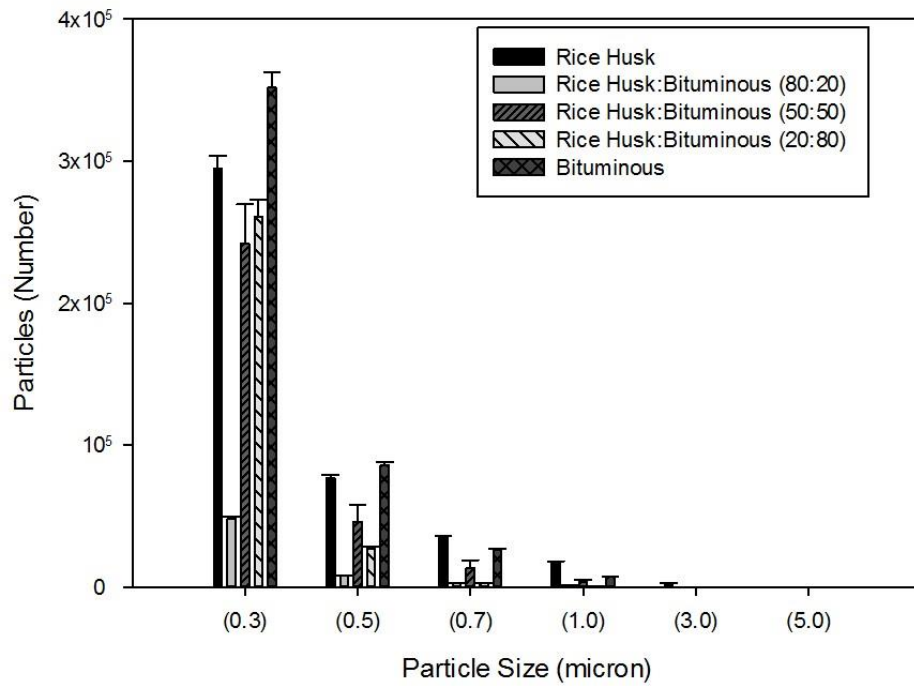
4.2.3 การกระจายขนาดของอนุภาคที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ของร่วมกันชีวมวลและถ่านหิน

1) การเผาไหม้ร่วมกันของชีวมวลร่วมกับถ่านหินที่สภาวะอากาศมากเกินพอ 100 เปอร์เซ็นต์

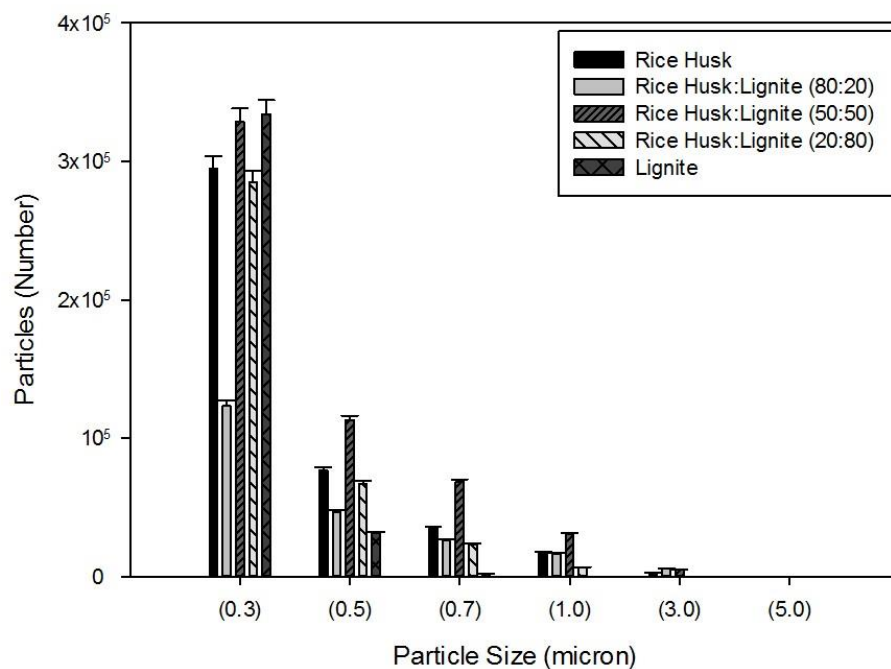
จำนวนอนุภาคขนาดต่างๆที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ชีวมวลร่วมกับถ่านหินเล็กน้อย พบว่าอนุภาคที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ร่วมกันของเชื้อเพลิงทุกชนิดมีจำนวนอนุภาคละเอียดมากกว่าอนุภาคหยาบ ดังที่แสดงในรูปที่ 4.4 - 4.11 จะพบว่าที่เชื้อเพลิงที่มีสัดส่วนชีวมวลมากกว่าถ่านหิน (80:20) มีแนวโน้มเกิดเป็นอนุภาคขนาดใหญ่มากกว่าเนื่องมาจากการเผาไหม้ชีวมวลเพียงอย่างเดียวจะก่อให้เกิดอนุภาคขนาดใหญ่กว่าดังที่แสดงในภาพที่ 4.1 เมื่อนำมาเผาไหม้ร่วมกันสามารถลดการอนุภาคขนาดใหญ่ได้เนื่องมาจากการเผาไหม้เกิดได้อย่างสมบูรณ์มากขึ้นเมื่อนำมาเผาไหม้ร่วมกับถ่านหิน โดยที่สัดส่วนของชีวมวลมากกว่าถ่านหิน จะเกิดเป็นอนุภาคขนาดเล็กได้น้อยกว่า เนื่องจากการองค์ประกอบของชีวมวลมีมากกว่าถ่านหินทำให้อุณหภูมิในการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงใกล้เคียงกับชีวมวลซึ่งมีอุณหภูมิลดลง ทำให้การแตกตัวเป็นอนุภาคขนาดเล็กลดลง (Varol, Atimtay et al. 2010) เชื้อเพลิงที่มีสัดส่วนเป็นชีวมวลน้อยกว่า (50:50) และ (20:80) และอนุภาคที่มีขนาด 0.3 ไมโครเมตร มีจำนวนมากขึ้นจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงทุกชนิดเนื่องมาจากสัดส่วนของถ่านหินมีปริมาณมากขึ้นทำให้เกิดการเผาไหม้ได้ที่อุณหภูมิสูงขึ้นนอกจากนี้ องค์ประกอบของถ่านหินจากตารางที่ 4.2 มี

องค์ประกอบเป็นคาร์บอนคงตัวสูงกว่าในชีวมวลทำให้สามารถเกิดเป็นอนุภาคได้มากขึ้น เมื่อนำข้อมูลมาเปรียบเทียบกับ การเผาไหม้ชีวมวลหรือถ่านหินเพียงอย่างเดียวจะพบว่า การเผาไหม้แกลบนั้นมีฝุ่นที่มีขนาดใหญ่ เนื่องจากกลไกการเผาไหม้ของชีวมวล (Dangzhen Lv 2010) เมื่อนำมาเผาไหม้ร่วมกับถ่านหินแล้วอนุภาคฝุ่นขนาดใหญ่ นั้นลดลง ยกเว้นการเผาไหม้ร่วมกันของกะลามะพร้าว และลิกไนต์ที่มีสัดส่วนของเชื้อเพลิง (20:80) มีอนุภาคขนาดใหญ่มากกว่าที่สัดส่วนเชื้อเพลิง (80:20) และแนวโน้มการเกิดอนุภาคใกล้เคียงกันที่ในสัดส่วนของชีวมวลกับถ่านหิน (50:50) กับ (20:80) จากลักษณะองค์ประกอบทางเคมีของเชื้อเพลิงที่ใช้ทำการทดลองนั้นแตกต่างกันจะทำให้การก่อให้เกิดอนุภาคบางขนาดมากขึ้นหรือน้อยลง เมื่อเปรียบเทียบกับ การเผาไหม้ชีวมวลหรือถ่านหินเพียงอย่างเดียว ซึ่งการเผาไหม้ร่วมกันทำให้อนุภาคขนาดใหญ่และขนาดเล็กลดลง ซึ่งอนุภาคขนาดใหญ่จะส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพชีวิตมนุษย์น้อยกว่าอนุภาคที่มีขนาดเล็ก เนื่องจากอนุภาคขนาดเล็กสามารถเข้าไปยังส่วนลึกของปอดได้มากกว่าขนาดใหญ่

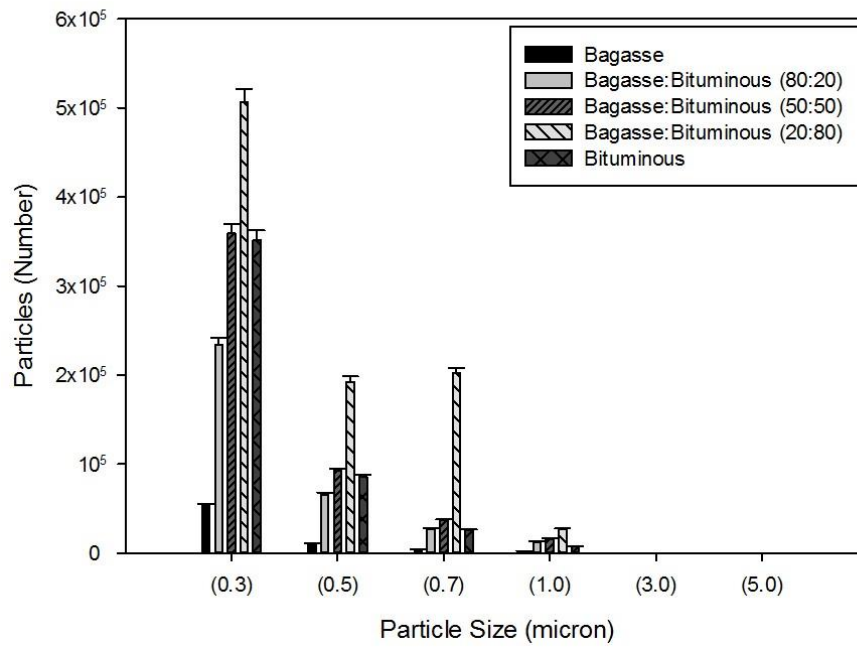
ในส่วนของปริมาณพบว่าจำนวนอนุภาคขนาดต่างๆ ที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ชีวมวลร่วมกับถ่านหินปริมาณ พบว่าอนุภาคที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ร่วมกันของเชื้อเพลิงทุกชนิดมีจำนวนอนุภาคขนาดเล็กมากกว่าอนุภาคขนาดใหญ่ จะพบว่าที่เชื้อเพลิงที่มีสัดส่วนชีวมวลมากกว่าถ่านหิน (80:20) มีแนวโน้มเกิดเป็นอนุภาคขนาดใหญ่มากกว่าเนื่องจากองค์ประกอบของเชื้อเพลิงเป็นชีวมวลมากกว่าถ่านหิน เชื้อเพลิงที่มีสัดส่วนเป็นชีวมวลน้อยกว่า (50:50) และ (20:80) และอนุภาคที่มีขนาด 0.3 ไมโครเมตรมีจำนวนมากที่สุดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงทุกชนิดและเมื่อนำข้อมูลมาเปรียบเทียบกับ การเผาไหม้ชีวมวลหรือถ่านหินเพียงอย่างเดียวจะพบว่า การเผาไหม้แกลบนั้นมีฝุ่นที่มีขนาดใหญ่ มากกว่าชีวมวลชนิดอื่นแล้วเมื่อนำมาเผาไหม้ร่วมกับลิกไนต์แล้วอนุภาคฝุ่นขนาดใหญ่ นั้นลดลง



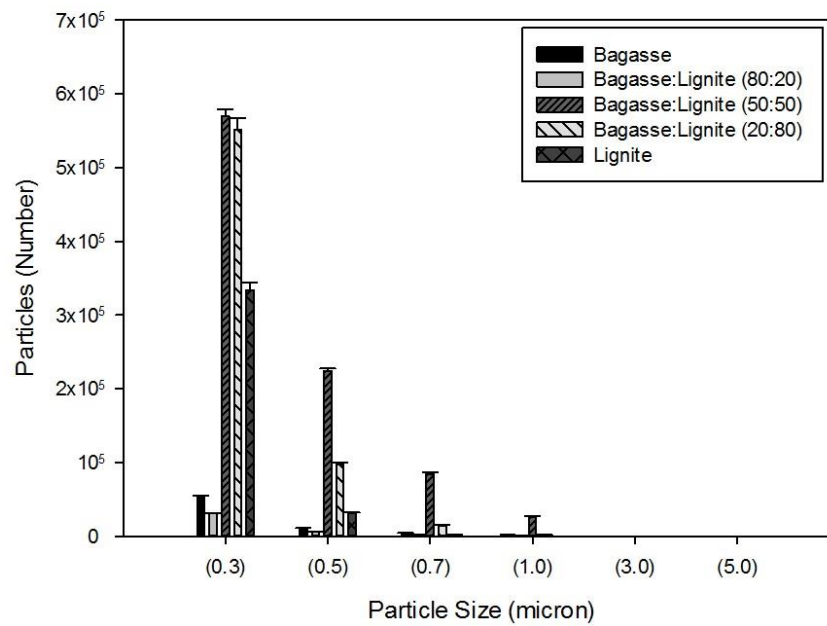
รูปที่ 4. 4 การกระจายตัวของอนุภาคของแกลบและบิทูมินัสที่สัดส่วนอากาศมากเกินพอร้อยละ100



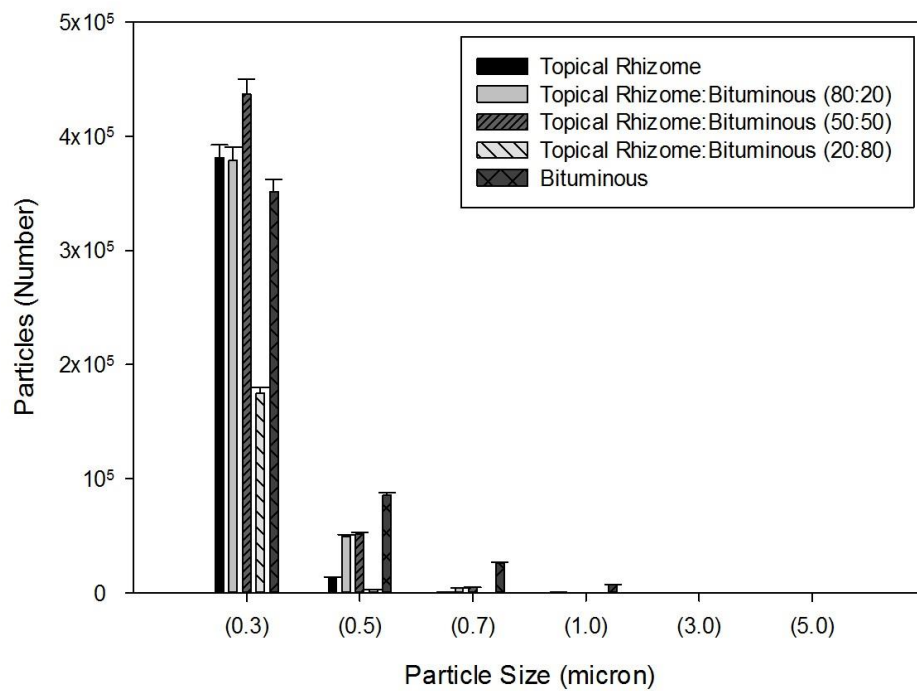
รูปที่ 4. 5 การกระจายตัวของอนุภาคของแกลบและลิกไนต์ที่สัดส่วนอากาศมากเกินพอร้อยละ100



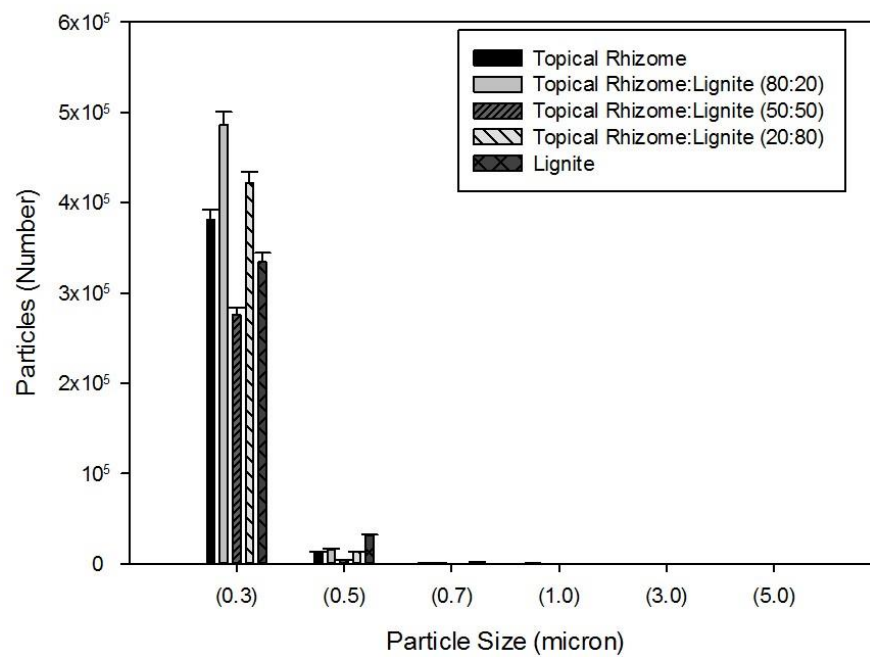
รูปที่ 4. 6 การกระจายตัวของอนุภาคของกากอ้อยและบิทูมินัสที่สัดส่วนอากาศมากเกินพอร้อยละ 100



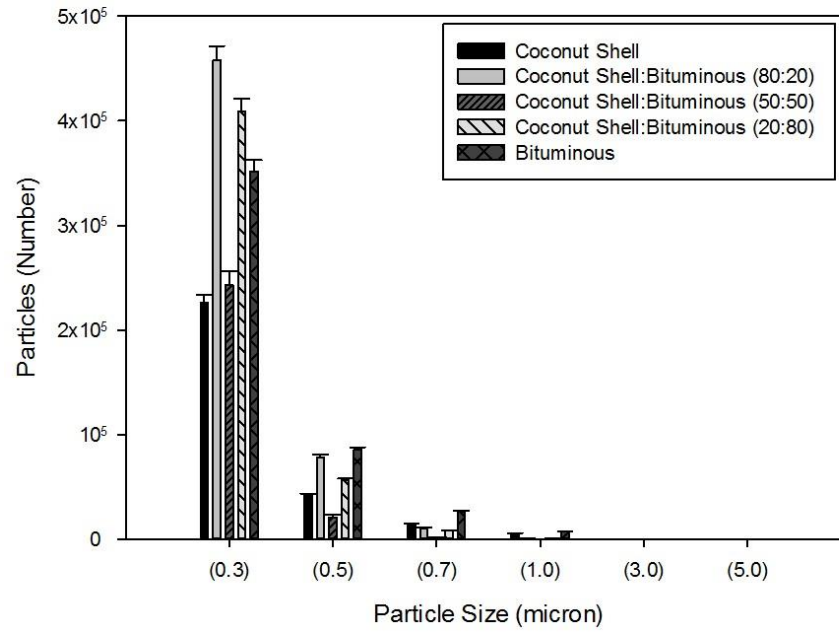
รูปที่ 4. 7 การกระจายตัวของอนุภาคของกากอ้อยและลิกไนต์ที่สัดส่วนอากาศมากเกินพอร้อยละ 100



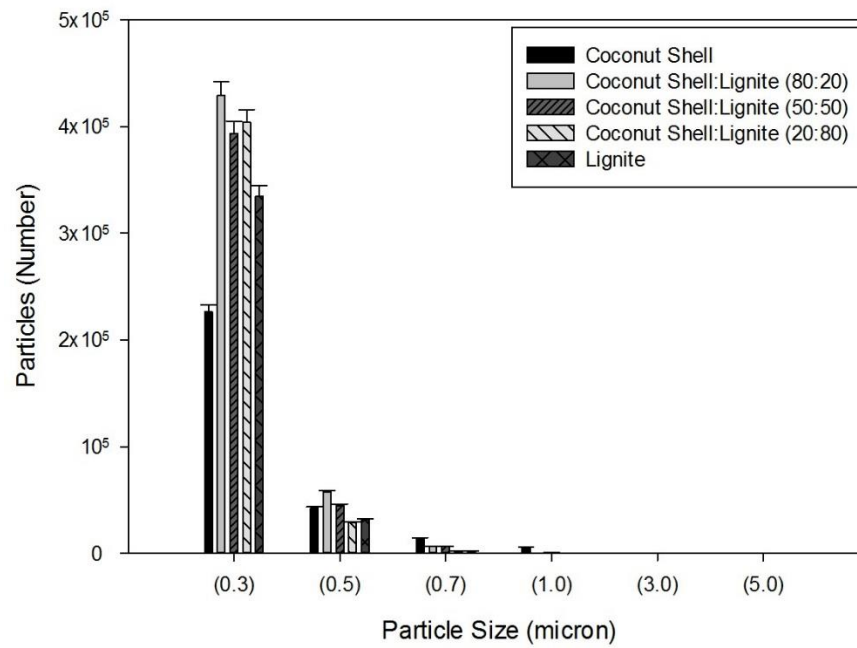
รูปที่ 4. 8 การกระจายตัวของอนุภาคของเหง้ามันสำปะหลังและบิทูมินัสที่สัดส่วนอากาศมากเกินพอร้อยละ100



รูปที่ 4. 9 การกระจายตัวของอนุภาคของเหง้ามันสำปะหลังและลิกไนต์ที่สัดส่วนอากาศมากเกินพอร้อยละ100



รูปที่ 4. 10 การกระจายตัวของอนุภาคของกะลามะพร้าวและบิทูมินัสที่สัดส่วนอากาศมากเกินพอร้อยละ100

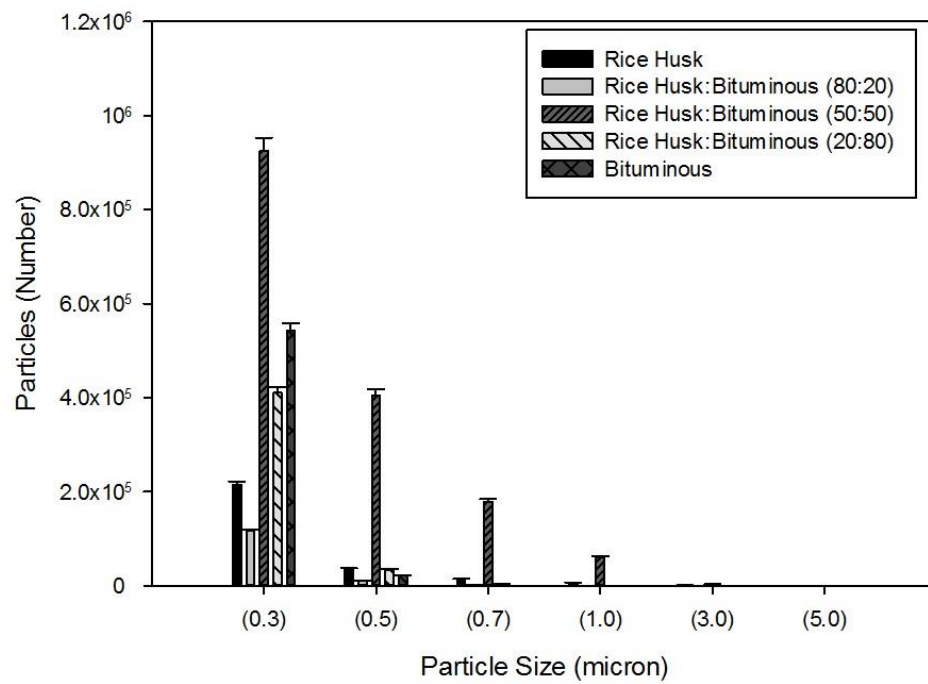


รูปที่ 4. 11 การกระจายตัวของอนุภาคของกะลามะพร้าวและลิกไนต์ที่สัดส่วนอากาศมากเกินพอร้อยละ100

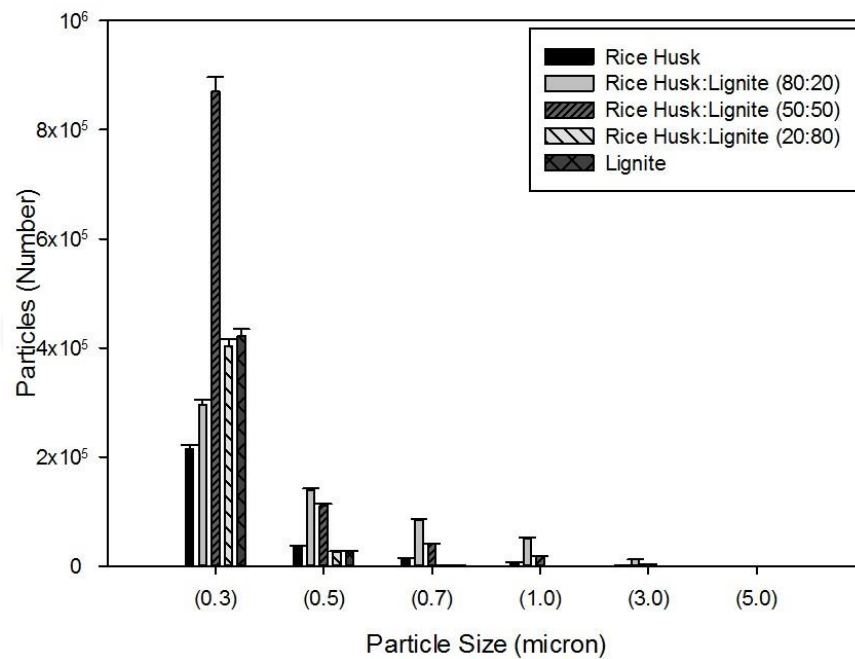
2) การเผาไหม้ร่วมกันของชีวมวลร่วมกับถ่านหินที่สภาวะอากาศมากเกินพอ 150 เปอร์เซ็นต์

จำนวนอนุภาคขนาดต่างๆที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ชีวมวลร่วมกับถ่านหินลิกไนต์ พบว่าอนุภาคที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ร่วมกันของเชื้อเพลิงทุกชนิดมีจำนวนอนุภาคละเอียดมากกว่าอนุภาคหยาบ ดังที่แสดงในรูปที่ 4.12 - 4.19 พบว่าที่เชื้อเพลิงที่มีสัดส่วนชีวมวลมากกว่าถ่านหิน (80:20) มีแนวโน้มเกิดเป็นอนุภาคขนาดใหญ่มากกว่าเนื่องจากสัดส่วนของเชื้อเพลิงมีองค์ประกอบเป็นชีวมวลมากกว่าเพราะการเผาไหม้ชีวมวลเพียงอย่างเดียวเกิดอนุภาคขนาดใหญ่มากกว่าถ่านหิน เชื้อเพลิงที่มีสัดส่วนเป็นชีวมวลน้อยกว่า (50:50 และ 20:80) และอนุภาคที่มีขนาด 0.3 ไมโครเมตรมีจำนวนมากที่สุดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงทุกชนิดและเมื่อนำข้อมูลมาเปรียบเทียบกับการเผาไหม้ชีวมวลหรือถ่านหินเพียงอย่างเดียวจะพบว่าการเผาไหม้กลบนั้นมีฝุ่นที่มีขนาดใหญ่กว่าเนื่องจากกลบมีองค์ประกอบเป็นคาร์บอนคงตัวสูงกว่าชีวมวลชนิดอื่นดังที่แสดงในตารางที่ 4.2 แล้วเมื่อนำมาเผาไหม้ร่วมกันกับลิกไนต์แล้วอนุภาคฝุ่นขนาดใหญ่ที่ลดลงเพราะการเผาไหม้สมบูรณ์ขึ้น

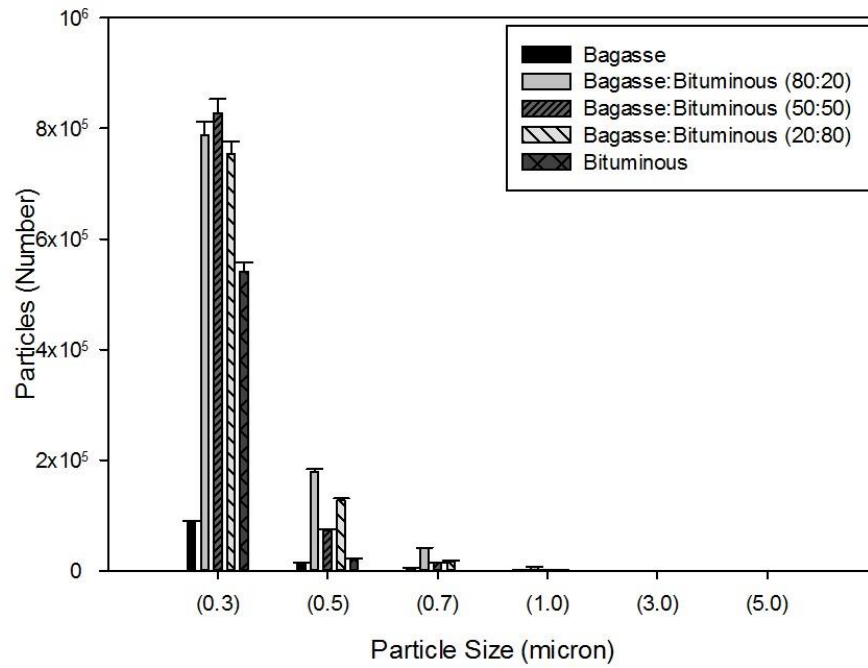
ในส่วนของปิทมินัสพบว่าจำนวนอนุภาคขนาดต่างๆที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ชีวมวลร่วมกับถ่านหินปิทมินัส พบว่าอนุภาคที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ร่วมกันของเชื้อเพลิงทุกชนิดมีจำนวนอนุภาคละเอียดมากกว่าอนุภาคหยาบ จะพบว่าที่เชื้อเพลิงที่มีสัดส่วนชีวมวลต่อถ่านหิน (50:50) มีแนวโน้มเกิดเป็นอนุภาคขนาดใหญ่กว่า เชื้อเพลิงที่มีสัดส่วนเป็นชีวมวลน้อยกว่า (80:20 และ 20:80) และอนุภาคที่มีขนาด 0.3 ไมโครเมตรมีจำนวนมากที่สุดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงทุกชนิดและเมื่อนำข้อมูลมาเปรียบเทียบกับการเผาไหม้ชีวมวลหรือถ่านหินเพียงอย่างเดียวจะพบว่าการเผาไหม้กลบนั้นมีฝุ่นที่มีขนาดใหญ่กว่าชีวมวลชนิดอื่นเนื่องจากองค์ประกอบทางกายภาพที่แสดงในตารางที่ 4.2 มีองค์ประกอบเป็นคาร์บอนคงตัวสูงที่สุดในชีวมวลทั้งสี่ชนิด แล้วเมื่อนำมาเผาไหม้ร่วมกันกับปิทมินัสแล้วอนุภาคฝุ่นขนาดใหญ่ที่ลดลง ยกเว้นเหง้ามันสำปะหลังที่สัดส่วนชีวมวลและถ่านหินที่ (80:20) มากกว่า (50:50) และ (20:80) จะเกิดอนุภาคขนาดเล็กลดลงเนื่องจากเผาไหม้ร่วมกันของชีวมวลร่วมกับถ่านหินทำให้เกิดการเผาไหม้ได้สมบูรณ์ขึ้น (Dangzhen Lv 2010, Varol, Atimtay et al. 2010)



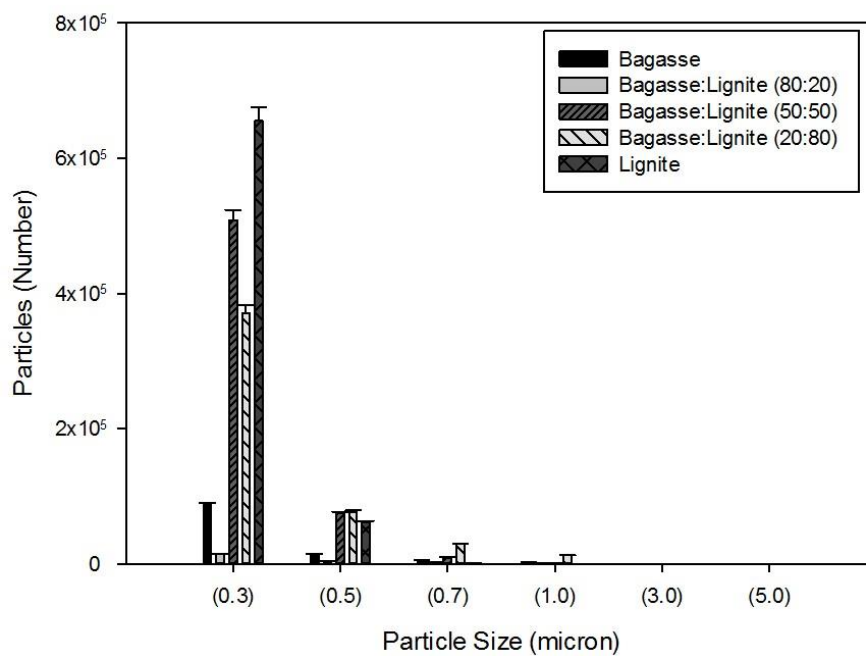
รูปที่ 4. 12 การกระจายตัวของอนุภาคของแกลบและบิทูมินัสที่สัดส่วนอากาศมากเกินพอ ร้อยละ150



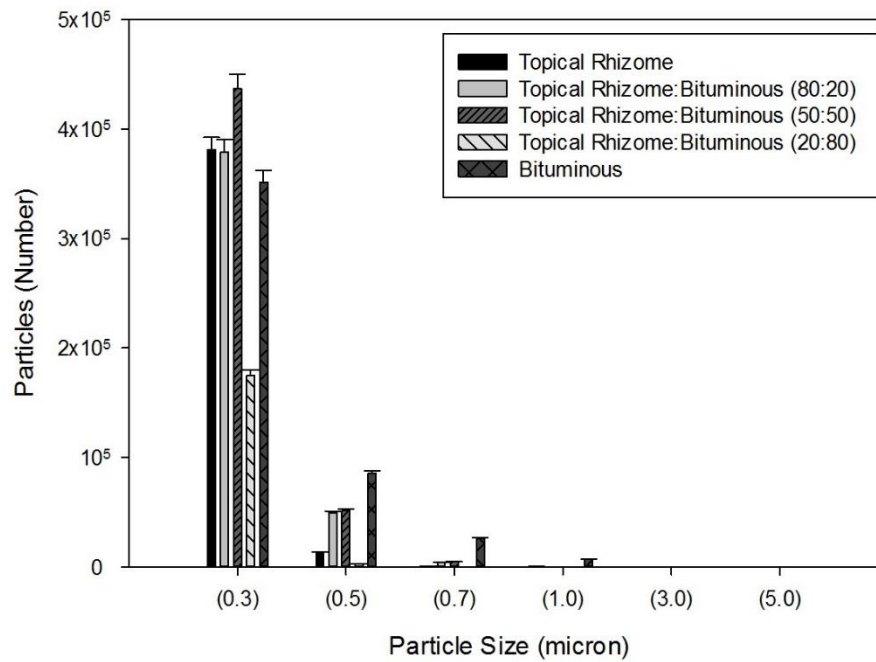
รูปที่ 4. 13 การกระจายตัวของอนุภาคของแกลบและลิกไนต์ที่สัดส่วนอากาศมากเกินพอ ร้อยละ150



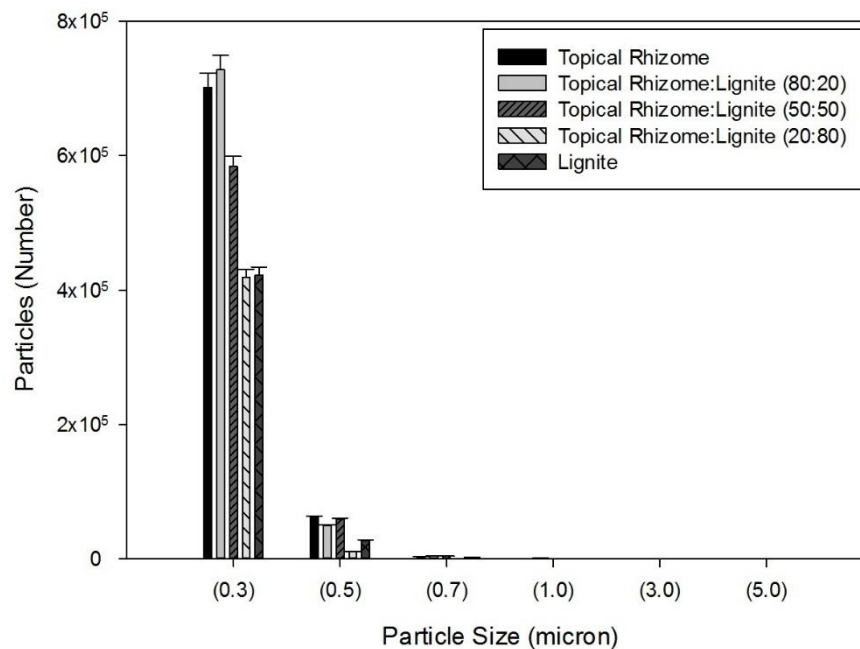
รูปที่ 4. 14 การกระจายตัวของอนุภาคของกากอ้อยและบิทูมินัสที่สัดส่วนอากาศมากเกินพอร้อยละ150



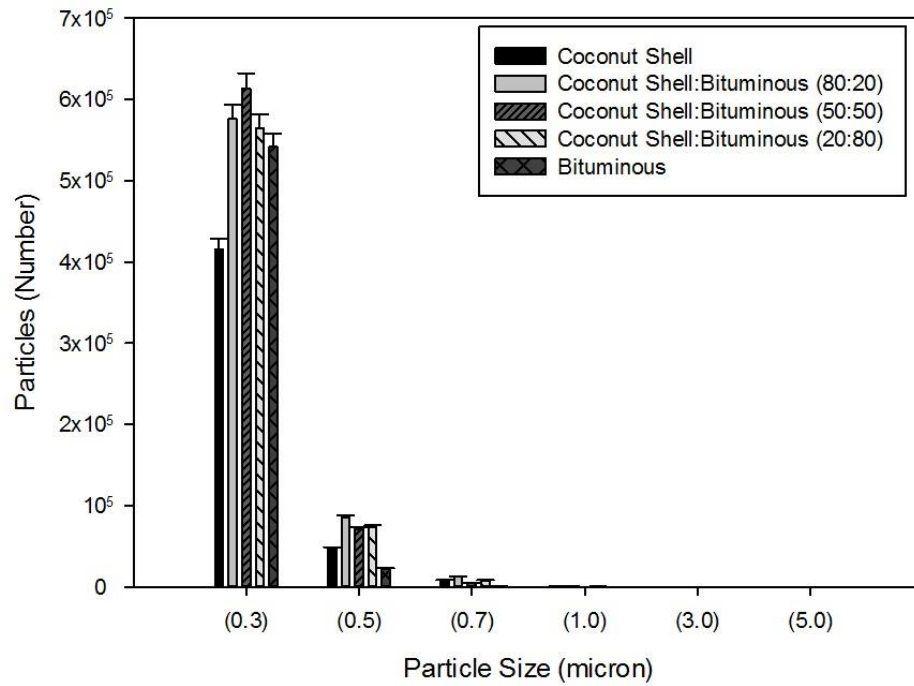
รูปที่ 4. 15 การกระจายตัวของอนุภาคของกากอ้อยและลิกไนต์ที่สัดส่วนอากาศมากเกินพอร้อยละ150



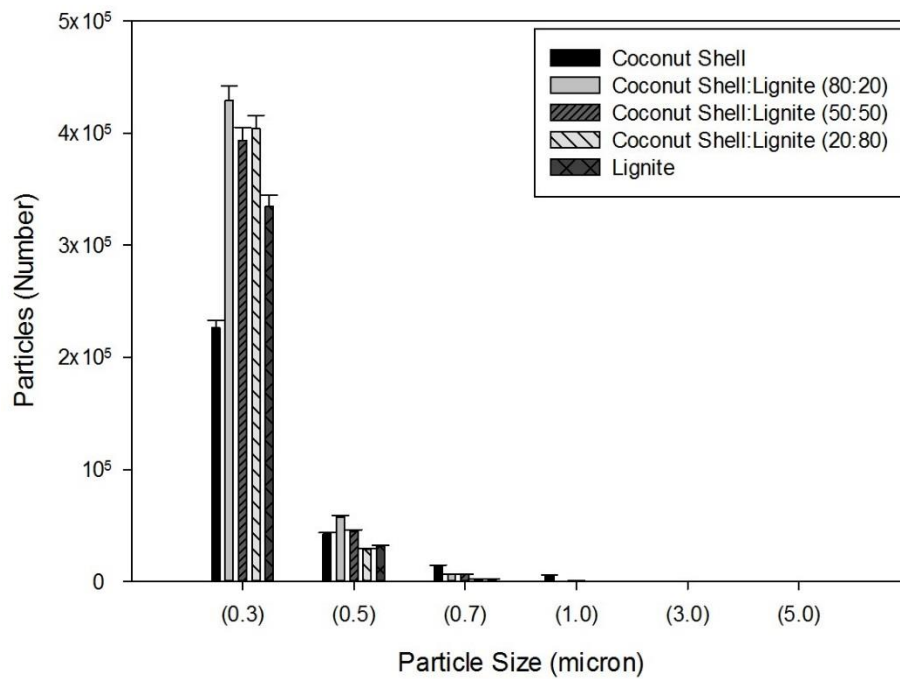
รูปที่ 4. 16 การกระจายตัวของอนุภาคของเหง้ามันและบิทูมินัสที่สัดส่วนอากาศมากเกินพอร้อยละ150



รูปที่ 4. 17 การกระจายตัวของอนุภาคของเหง้ามันและลิกไนต์ที่สัดส่วนอากาศมากเกินพอร้อยละ150



รูปที่ 4. 18 การกระจายตัวของอนุภาคของกะลามะพร้าวและบิทูมินัสที่สัดส่วนอากาศมากเกินพอร้อยละ150

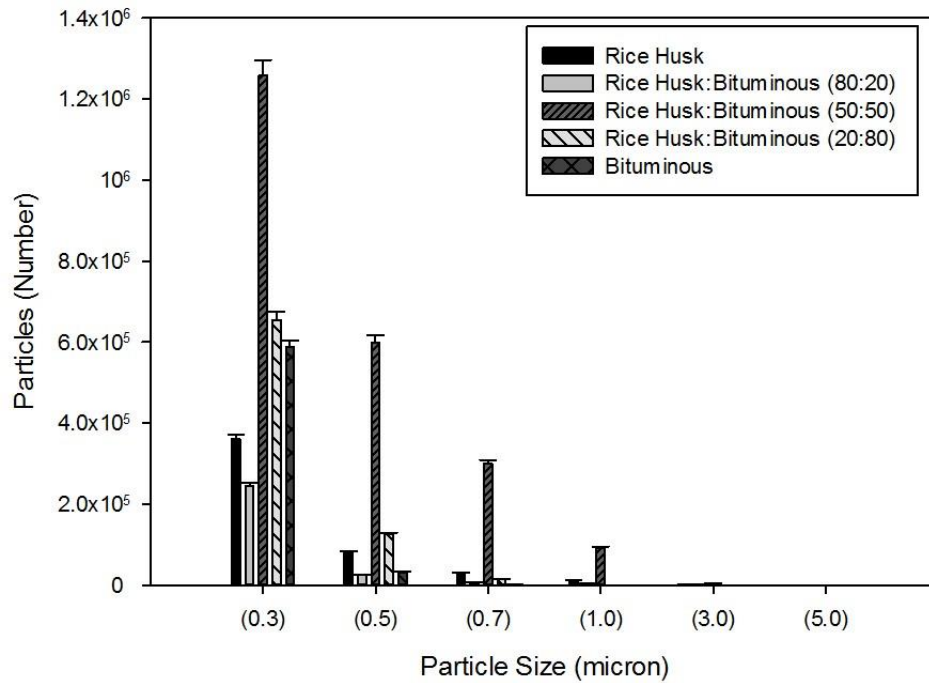


รูปที่ 4. 19 การกระจายตัวของอนุภาคของกะลามะพร้าวและลิกไนต์ที่สัดส่วนอากาศมากเกินพอร้อยละ150

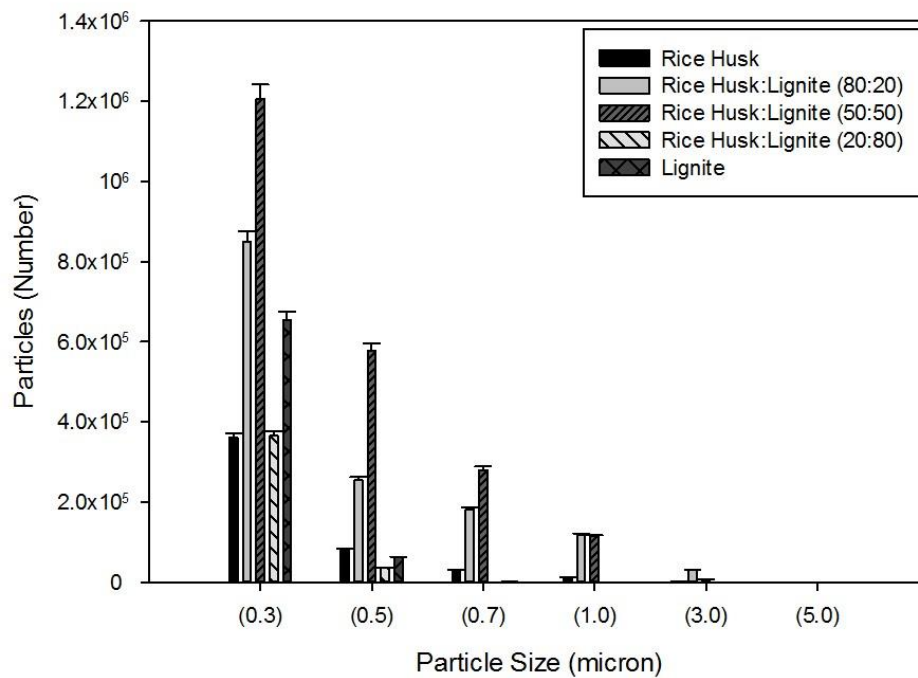
3) การเผาไหม้ร่วมกันของชีวมวลร่วมกับถ่านหินที่สภาวะอากาศมากเกินพอ 200 เปอร์เซ็นต์

จำนวนอนุภาคขนาดต่างๆที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ชีวมวลร่วมกับถ่านหินลิกไนต์ พบว่าอนุภาคที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ร่วมกันของเชื้อเพลิงทุกชนิดมีจำนวนอนุภาคละเอียดมากกว่าอนุภาคหยาบ ดังที่แสดงในรูปที่ 4.20 - 4.27 จะพบว่าที่เชื้อเพลิงที่มีสัดส่วนชีวมวลมากกว่าถ่านหิน (80:20) มีแนวโน้มเกิดเป็นอนุภาคขนาดใหญ่มากกว่าเนื่องจากสัดส่วนของชีวมวลในเชื้อเพลิงมีมากกว่าถ่านหิน และที่สัดส่วนอื่น (50:50 และ 20:80) และอนุภาคที่มีขนาด 0.3 ไมโครเมตรมีจำนวนมากที่สุดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงทุกชนิดและเนื่องจากมีสัดส่วนเป็นถ่านหินมากขึ้นการเผาไหม้สมบูรณ์มากขึ้น และเมื่อนำข้อมูลมาเปรียบเทียบกับ การเผาไหม้ชีวมวลหรือถ่านหินเพียงอย่างเดียวจะพบว่าการเผาไหม้แกลบนั้นมีฝุ่นที่มีขนาดใหญ่กว่าชีวมวลชนิดอื่นแล้วเมื่อนำมาเผาไหม้ร่วมกันกับลิกไนต์แล้วอนุภาคฝุ่นขนาดใหญ่ที่ลดลงเนื่องจากการเผาไหม้ร่วมกับถ่านหินทำให้การเผาไหม้ที่อุณหภูมิต่ำสมบูรณ์ยิ่งขึ้น ยกเว้นการเผาไหม้ร่วมกันของกะลามะพร้าวและลิกไนต์ที่มีสัดส่วนของเชื้อเพลิง (20:80) มีอนุภาคขนาดใหญ่มากกว่าที่สัดส่วนเชื้อเพลิง (80:20) เกิดขึ้นได้เนื่องจากสัดส่วนของอากาศที่มีปริมาณมากทำให้ต้องใส่อากาศเข้าในห้องเผาไหม้ปริมาณมากจึงทำให้เถ้าบางส่วนฟุ้งกระจาย และ แนวโน้มการเกิดอนุภาคใกล้เคียงกันที่ในสัดส่วนของชีวมวลกับถ่านหิน (50:50 และ 20:80) เนื่องจากสัดส่วนของถ่านหินมีปริมาณมากขึ้น ทำให้การเผาไหม้เกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์มากขึ้น

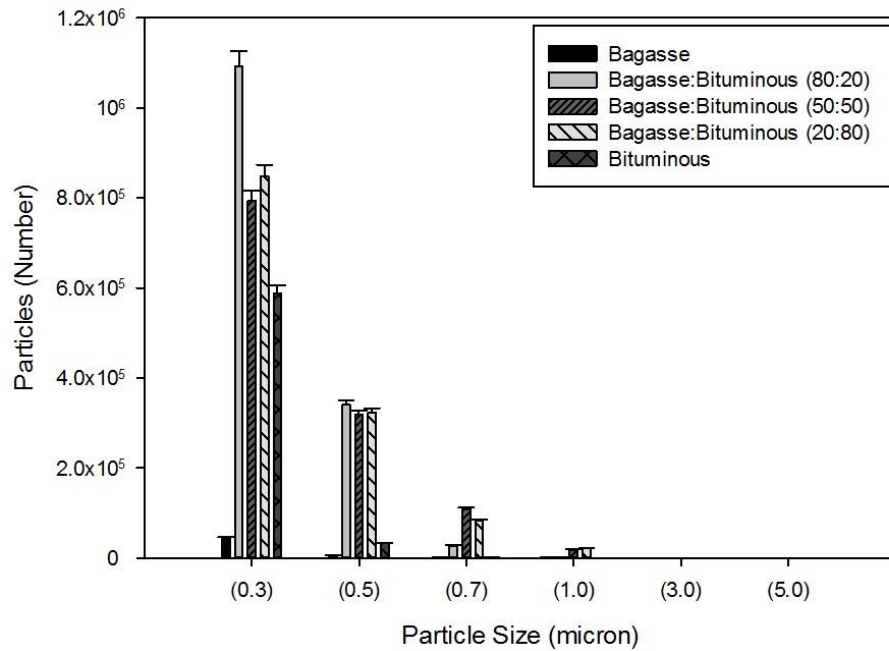
ในส่วนของบิโทมินัสพบว่าจำนวนอนุภาคขนาดต่างๆที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ชีวมวลร่วมกับถ่านหินบิโทมินัส พบว่าอนุภาคที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ร่วมกันของเชื้อเพลิงทุกชนิดมีจำนวนอนุภาคละเอียดมากกว่าอนุภาคหยาบเนื่องจากค่าความร้อนของบิโทมินัสสูงกว่าลิกไนต์ จะพบว่าที่เชื้อเพลิงที่มีสัดส่วนชีวมวลมากกว่าถ่านหิน (80:20) มีแนวโน้มเกิดเป็นอนุภาคขนาดใหญ่กว่าเนื่องมาจากการสัดส่วนของเชื้อเพลิงเป็นชีวมวลมากกว่าถ่านหิน เชื้อเพลิงที่มีสัดส่วนเป็นชีวมวลน้อยกว่า (50:50 และ 20:80) และอนุภาคที่มีขนาด 0.3 ไมโครเมตรมีจำนวนมากที่สุดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงทุกชนิดและเมื่อนำข้อมูลมาเปรียบเทียบกับ การเผาไหม้ชีวมวลหรือถ่านหินเพียงอย่างเดียวจะพบว่าการเผาไหม้แกลบนั้นมีฝุ่นที่มีขนาดใหญ่กว่าชีวมวลชนิดอื่นแล้วเมื่อนำมาเผาไหม้ร่วมกันกับบิโทมินัสแล้วอนุภาคฝุ่นขนาดใหญ่ที่ลดลง ยกเว้นเหง้ามันสำปะหลังที่มีแนวโน้มในการเกิดอนุภาคขนาดเล็กมากที่สุดที่สัดส่วนชีวมวลและถ่านหินที่ (80:20) มากกว่า (50:50) และ (20:80)



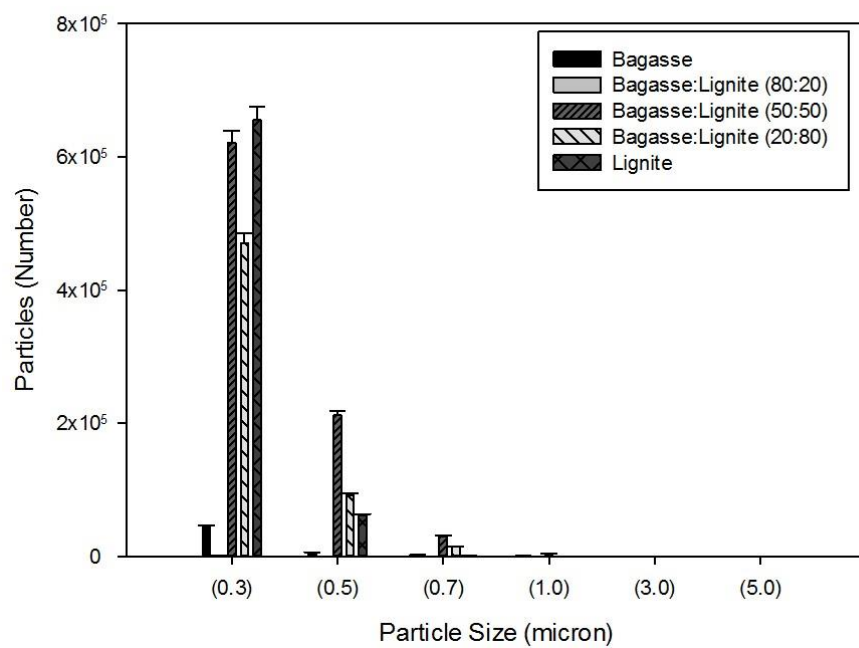
รูปที่ 4. 20 การกระจายตัวของอนุภาคของแกลบและบิทูมินัสที่สัดส่วนอากาศมากเกินพอ ร้อยละ 200



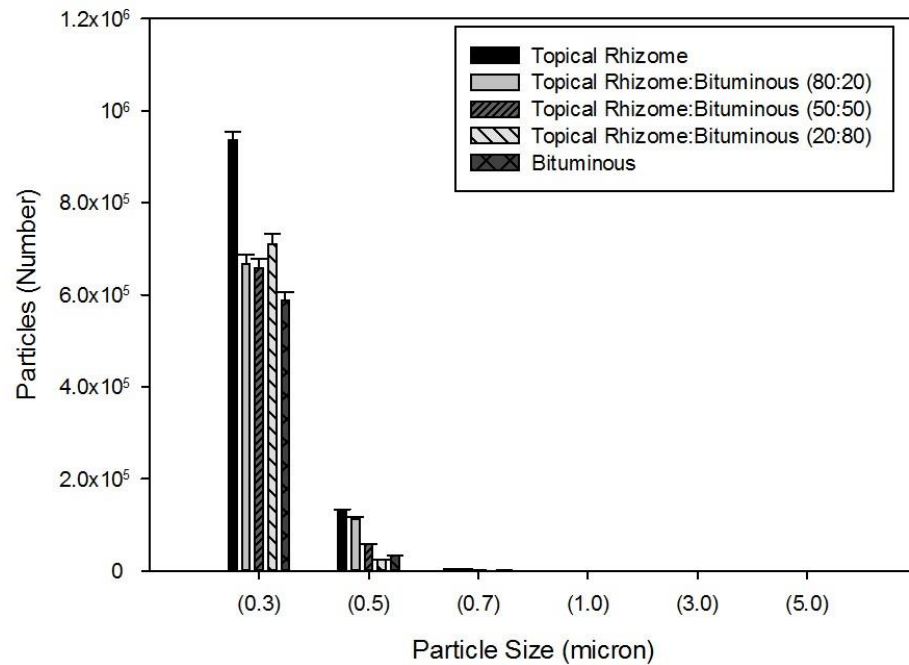
รูปที่ 4. 21 การกระจายตัวของอนุภาคของแกลบและลิกไนต์ที่สัดส่วนอากาศมากเกินพอ ร้อยละ 200



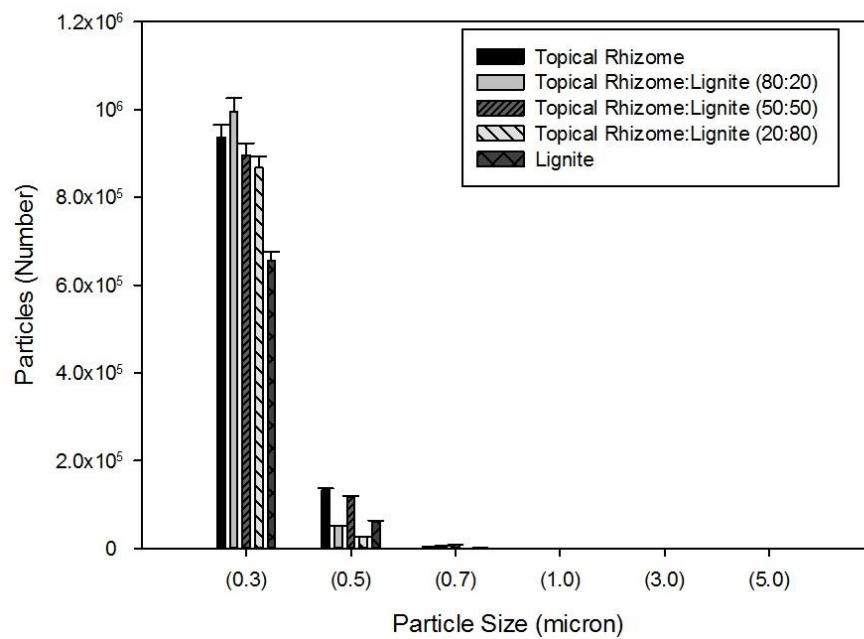
รูปที่ 4. 22 การกระจายตัวของอนุภาคของกากอ้อยและบิทูมินัสที่สัดส่วนอากาศมากเกินพอร้อยละ 200



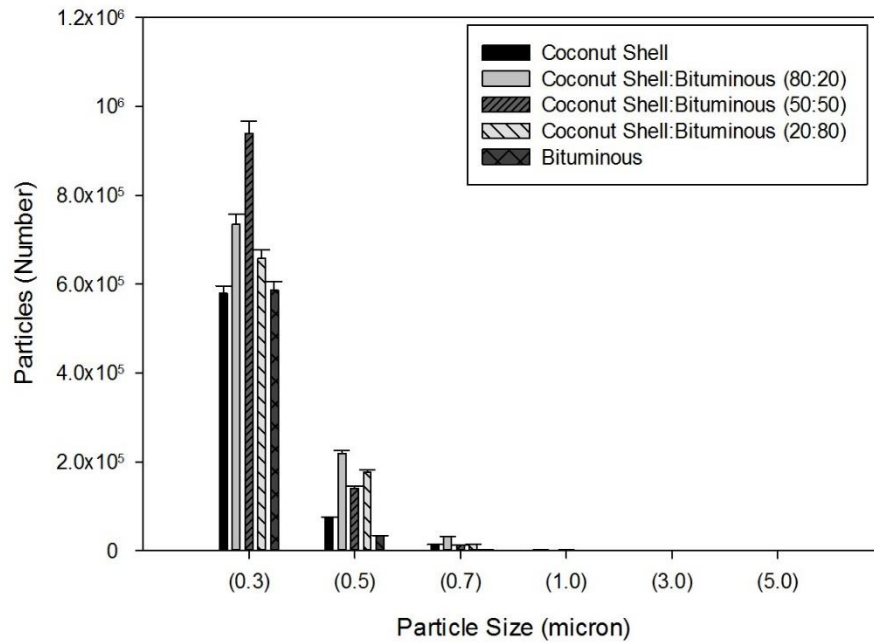
รูปที่ 4. 23 การกระจายตัวของอนุภาคของกากอ้อยและลิกไนต์ที่สัดส่วนอากาศมากเกินพอร้อยละ 200



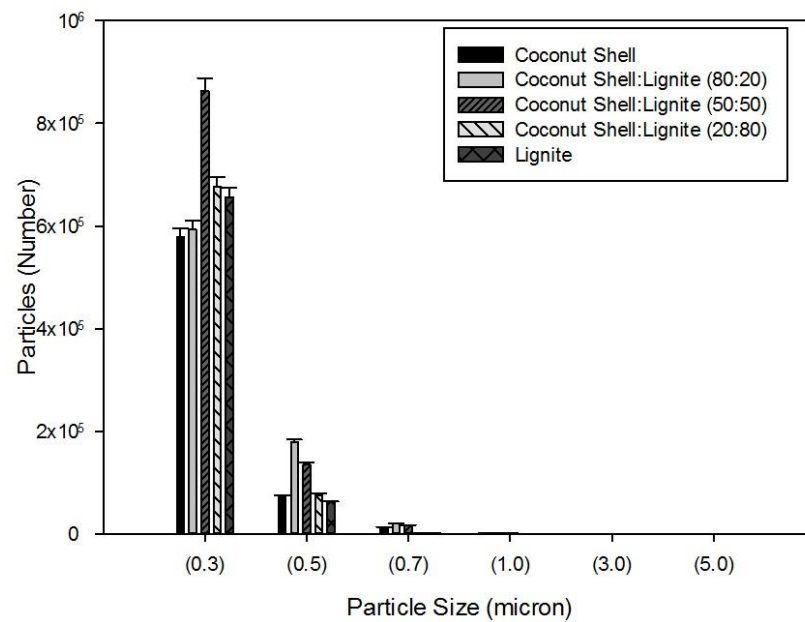
รูปที่ 4. 24 การกระจายตัวของอนุภาคของเหง้ามันสำปะหลังและบิทูมินัสที่สัดส่วนอากาศมากเกินพอร์ร้อยละ 200



รูปที่ 4. 25 การกระจายตัวของอนุภาคของเหง้ามันสำปะหลังและลิกไนต์ที่สัดส่วนมากเกินพอร์ร้อยละ 200



รูปที่ 4. 26 การกระจายตัวของอนุภาคของกะลามะพร้าวและบิทูมินัสที่สัดส่วนอากาศมากเกินพอร้อยละ200



รูปที่ 4. 27 การกระจายตัวของอนุภาคของกะลามะพร้าวและลิกไนต์ที่สัดส่วนอากาศมากเกินพอร้อยละ200

จากการเผาไหม้ร่วมกันของชีวมวลและถ่านหินที่สัดส่วนอากาศมากเกินพอที่ร้อยละ 100, 150 และ 200 พบว่า ที่สภาวะอากาศมากเกินพอร้อยละ 200 นั้นมีแนวโน้มที่อนุภาคฝุ่นที่เกิดขึ้นนั้นมีจำนวนมากว่า เนื่องจากที่สภาวะอากาศมากเกินพอร้อยละ 200 มีปริมาณออกซิเจนมากเกินพอมากขึ้น ทำให้อุณหภูมิสูงขึ้นเกิดเป็นอนุภาคได้มากขึ้นมากกว่าที่ร้อยละ 100 และ 150 โดยเฉพาะอนุภาคที่มีขนาดเล็กนั้นมีจำนวนที่สูงมาก โดยเฉพาะที่ขนาด 0.3 ไมโครเมตรจะมีจำนวนมากที่สุด และฝุ่นที่มีขนาดใหญ่กว่า 3.0 ก็มีขนาดเพิ่มมากขึ้นด้วยตามสัดส่วนของเชื้อเพลิงโดนที่สัดส่วนของชีวมวลมากขึ้นจะทำให้เกิดอนุภาคขนาดใหญ่มากขึ้นด้วย ดังนั้นจะเห็นได้ว่าการเผาไหม้ร่วมกันของถ่านหินและชีวมวลที่ทำการทดสอบมีแนวโน้มไปในทางเดียวกันคือ อนุภาคที่มีขนาดเล็กนั้นจะเกิดมากกว่าอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ ซึ่งเมื่อเมื่อทำการเผาไหม้ร่วมกันแล้วจะทำให้อนุภาคขนาดใหญ่ลดน้อยลงด้วย เนื่องจากความแตกต่างของลักษณะทางเคมีของเชื้อเพลิงนั่นเองซึ่งโดยปกติแล้วในชีวมวลจะประกอบไปด้วยสารอินทรีย์ระเหย เมื่อนำไปเผาจึงทำให้เกิดการระเหยและเกิดปฏิกิริยาในเฟสก๊าซก่อให้เกิดเป็นอนุภาคฝุ่น

4.3 ไนโตรเจนออกไซด์ที่เกิดจากการเผาไหม้

จากการเผาไหม้ชีวมวลทั้ง 4 ชนิดอันได้แก่ แกลบ กากอ้อย เหม้ามันสำปะหลัง และ กะลามะพร้าวและถ่านหิน 2 ชนิดได้แก่ ลิกไนต์ และ บิทูมินัส จากการส่งวิเคราะห์ตัวอย่างด้วยวิธี TG-DTA (Thermogravimetric Differential Analysis) ได้ผลอุณหภูมิสูงสุดของเชื้อเพลิงแต่ละชนิดดังที่แสดงในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4. 3 อุณหภูมิสูงสุดของเชื้อเพลิงแต่ละชนิด

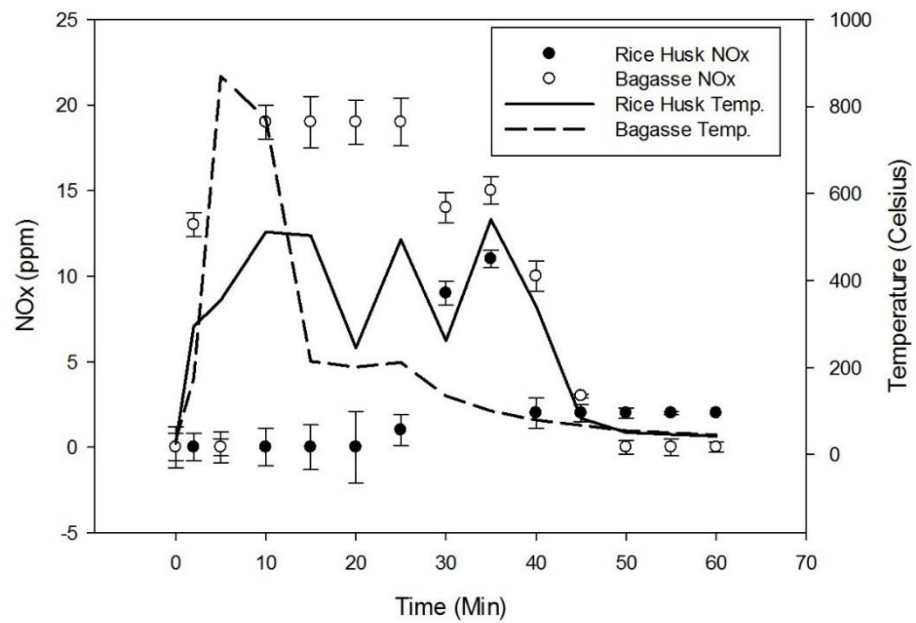
ชนิดของเชื้อเพลิง	อุณหภูมิสูงสุด (องศาเซลเซียส)
แกลบ	630
กากอ้อย	560
เหม้ามันสำปะหลัง	620
กะลามะพร้าว	590
ลิกไนต์	970
บิทูมินัส	980

จากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงแต่ละชนิดซึ่งองค์ประกอบทางเคมีที่เป็นไนโตรเจนเมื่อเผาไหม้จึงสามารถทำให้เกิดเป็นก๊าซออกไซด์ของไนโตรเจนซึ่งเป็นก๊าซที่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและมนุษย์ ซึ่งในปัจจุบันนั้นพลังงานทางเลือกอย่างชีวมวลนั้นถูกนำมาใช้กันมากขึ้นทำให้ต้องมีการควบคุมมลพิษที่เกิดจากการเผาไหม้ชีวมวลเหล่านั้น

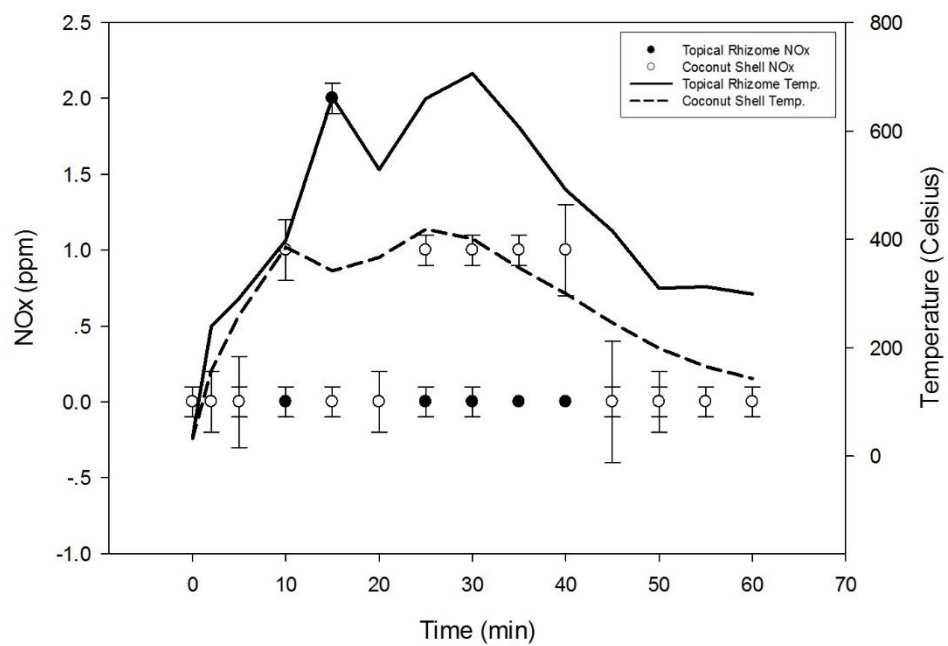
ในงานวิจัยนี้ได้รายงานผลของไนโตรเจนออกไซด์เป็นส่วนในล้านส่วน (ppm) ที่เกิดจากการเผาไหม้ชีวมวลและถ่านหิน

4.3.1 ไนโตรเจนออกไซด์ที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ชีวมวลและถ่านหินที่อากาศมากเกินพอ ร้อยละ 100, 150 และ 200 ของออกซิเจน

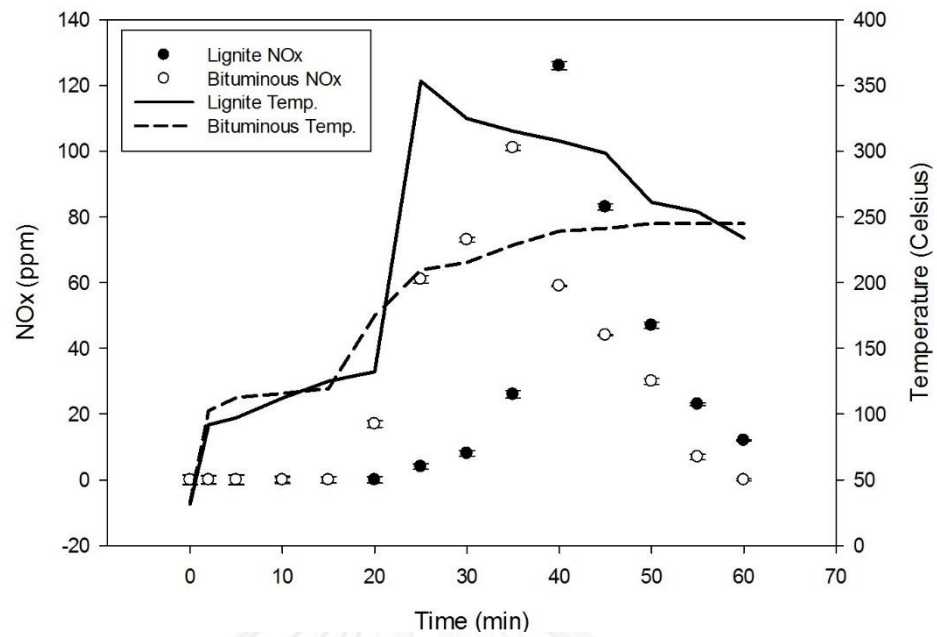
จากการทดลองพบว่าลิคไนต์นั้นมีการเกิดออกไซด์ของไนโตรเจนมากที่สุดในทุกๆ สภาวะของอากาศที่มากเกินพอ โดยที่ 150 เปอร์เซ็นต์จะเกิดออกไซด์ของไนโตรเจนมากที่สุดคือ 178 ppm รองลงมาที่อากาศมากเกินพอ 200 และ 100 เปอร์เซ็นต์ ที่ค่าเท่ากับ 156 ppm และ 126 ppm ตามลำดับ ซึ่งจากสภาวะอากาศที่มากเกินพอที่ 100, 150 และ 200 เปอร์เซ็นต์นั้น เมื่อมีปริมาณอากาศมากขึ้นแนวโน้มการเกิดออกไซด์ของไนโตรเจนจะลดลงเนื่องจากปริมาณของออกซิเจนมากขึ้นทำให้การเผาไหม้ที่สมบูรณ์มากขึ้น (Nimmo, Daood et al. 2010) ยกเว้นลิคไนต์ที่สภาวะอากาศมากเกินพอ 150 เปอร์เซ็นต์นั้นจะมีค่าออกไซด์ของไนโตรเจนสูงสุด ดังที่แสดงในรูปที่ 4.28 - 4.36 ซึ่งการเกิดออกไซด์ของไนโตรเจนนั้นเกิดได้จากไนโตรเจนที่อยู่ในอากาศหรือที่มีอยู่ในเชื้อเพลิงชนิดนั้น และผลการวิเคราะห์ทางเคมีของเชื้อเพลิงนั้น ลิคไนต์มีองค์ประกอบที่เป็นไนโตรเจน 1.16 เปอร์เซ็นต์



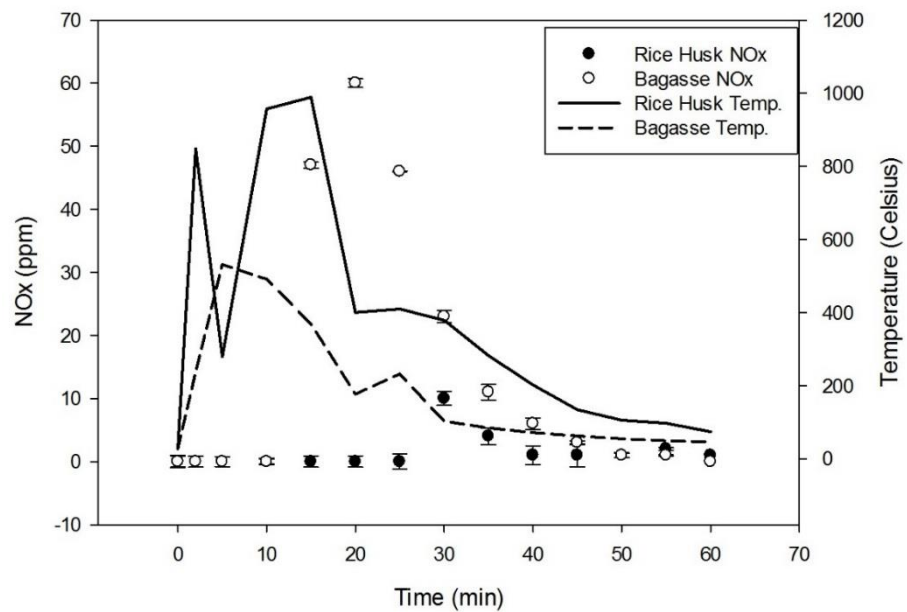
รูปที่ 4. 28 การเกิดออกไซด์ของไนโตรเจนของแกลบและกากอ้อยที่อากาศมากเกินพอร้อยละ 100 ของออกซิเจน



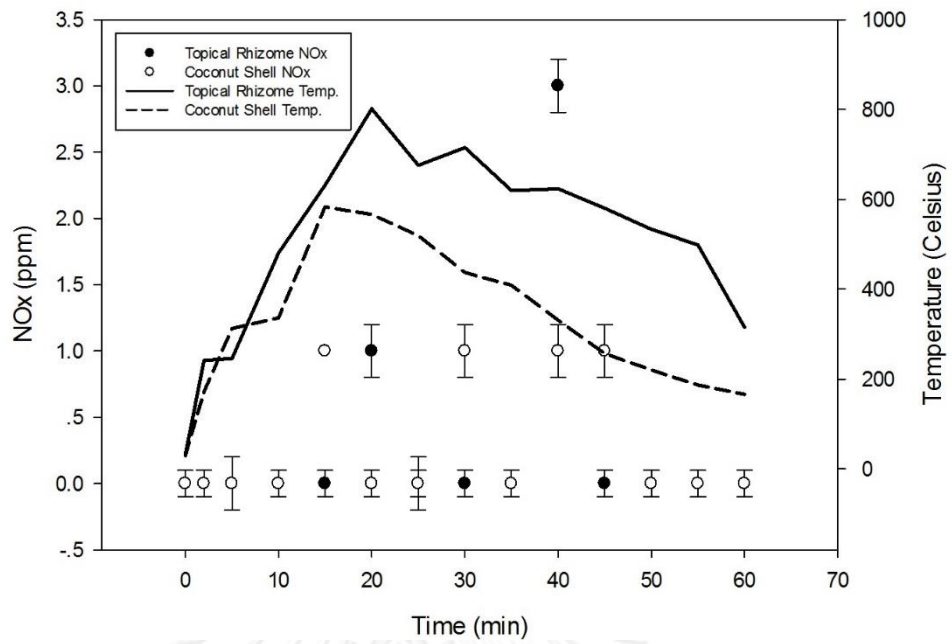
รูปที่ 4. 29 การเกิดออกไซด์ของไนโตรเจนของเหง้ามันสำปะหลังและกะลามะพร้าวที่อากาศมากเกินพอร้อยละ 100 ของออกซิเจน



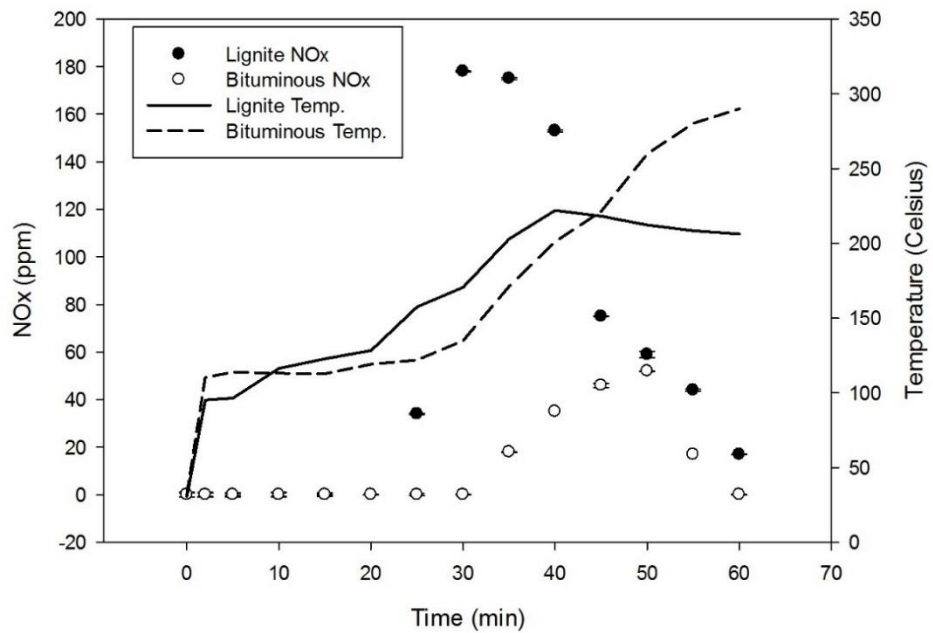
รูปที่ 4. 30 การเกิดออกไซด์ของไนโตรเจนของลิกไนต์และบิทูมินัสที่อากาศมากเกินพอร้อยละ 100 ของออกซิเจน



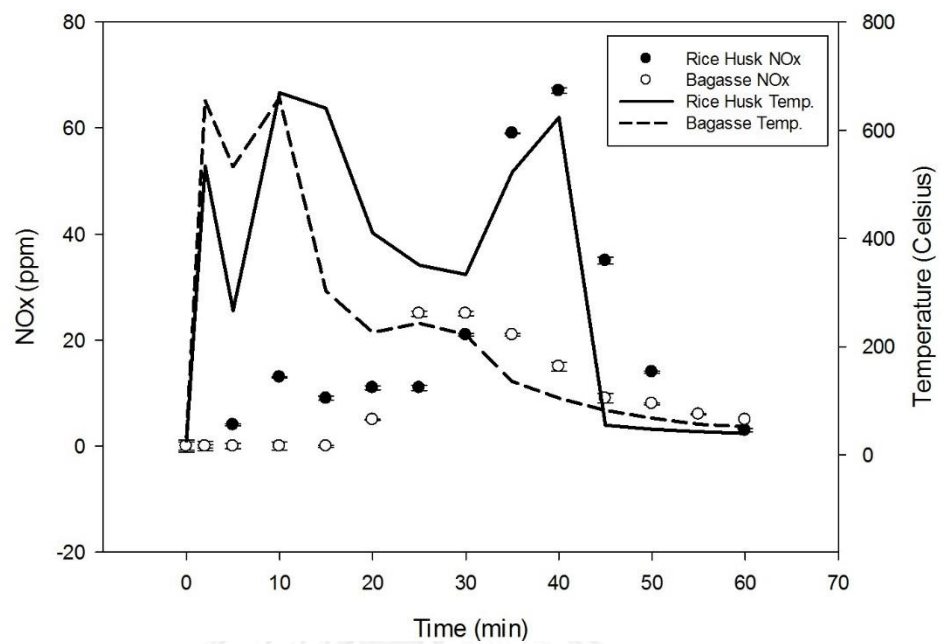
รูปที่ 4. 31 การเกิดออกไซด์ของไนโตรเจนของแกลบและกากอ้อย ที่อากาศมากเกินพอร้อยละ 150 ของออกซิเจน



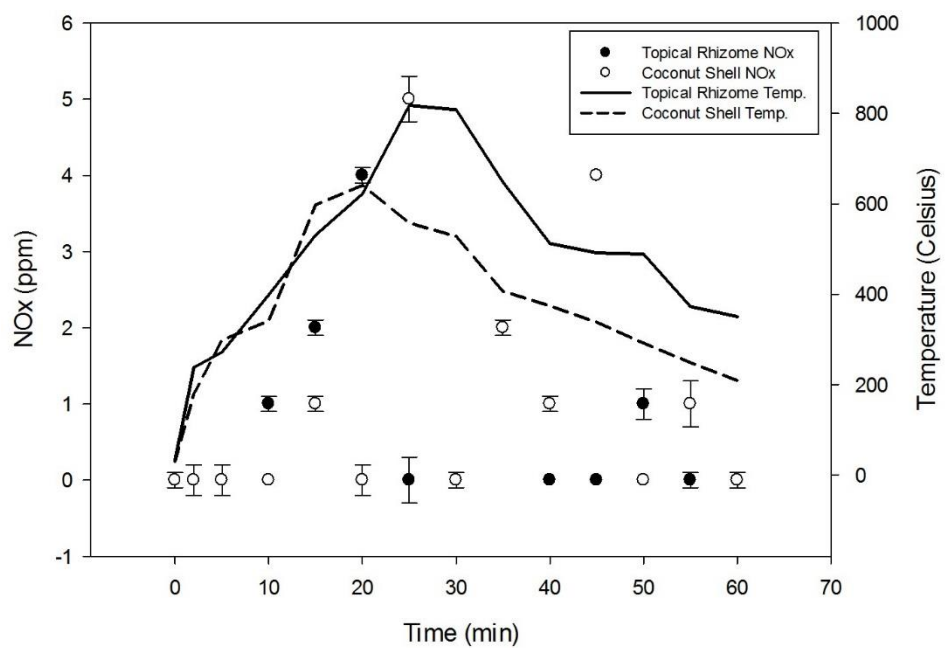
รูปที่ 4. 32 การเกิดออกไซด์ของไนโตรเจนของเหง้ามันสำปะหลังและกะลามะพร้าวที่อากาศมากเกินพอร้อยละ 150 ของออกซิเจน



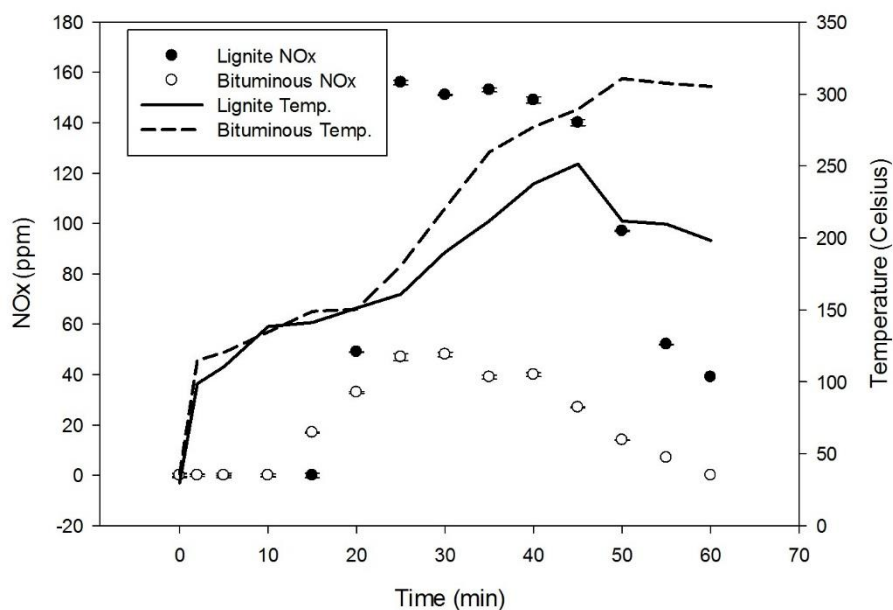
รูปที่ 4. 33 การเกิดออกไซด์ของไนโตรเจนของลิกไนต์และบิทูมินัสที่อากาศมากเกินพอร้อยละ 150 ของออกซิเจน



รูปที่ 4. 34 การเกิดออกไซด์ของไนโตรเจนของแกลบและกากอ้อยที่อากาศมากเกินไปร้อยละ 200 ของออกซิเจน



รูปที่ 4. 35 การเกิดออกไซด์ของไนโตรเจนของเหง้ามันสำปะหลังและกะลามะพร้าวที่อากาศมากเกินไปร้อยละ 200 ของออกซิเจน



รูปที่ 4. 36 การเกิดออกไซด์ของไนโตรเจนของลิกไนต์และบิทูมินัสที่อากาศมากเกินพอร้อยละ 200 ของออกซิเจน

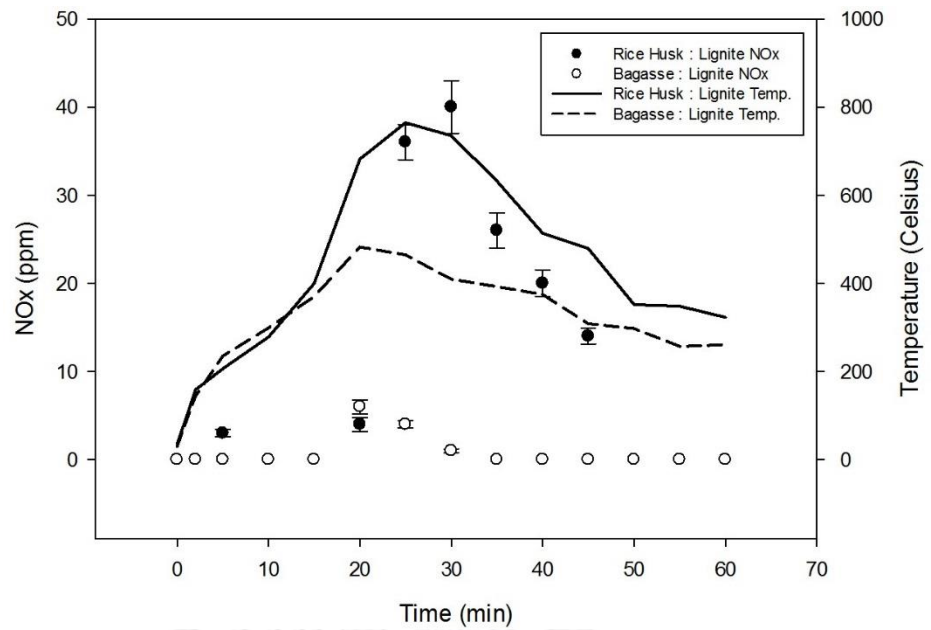
ที่สัดส่วนอากาศมากเกินพอร้อยละ 100 150 และ 200 ของออกซิเจน พบว่าการเผาไหม้ถ่านหินเพียงอย่างเดียวมีปริมาณออกไซด์ของไนโตรเจนสูงที่สุด รองลงมา ได้แก่ แกลบและกากอ้อย การเผาไหม้กะลามะพร้าวและเห้งน้ำมันสำปะหลังเกิดไนโตรเจนออกไซด์น้อยที่สุด เนื่องจากถ่านหินมีองค์ประกอบที่เป็นไนโตรเจนมากที่สุด และอุณหภูมิการเผาไหม้สูงที่สุด และจากการเผาไหม้ชีวมวลทั้ง 4 ชนิดพบว่า การเผาไหม้แกลบและกากอ้อยมีการเกิดออกไซด์ของไนโตรเจนสูงกว่าการเผาไหม้เห้งน้ำมันสำปะหลังและกะลามะพร้าว เนื่องจากความชื้นของแกลบและกากอ้อยนั้นน้อยกว่าเห้งน้ำมันสำปะหลังและกะลามะพร้าวทำให้แกลบและกากอ้อยเกิดการเผาไหม้ได้เร็วกว่าได้รับความร้อนสูงขึ้นเร็วกว่าทำให้มีปริมาณออกไซด์ของไนโตรเจนมากกว่า นอกจากนี้ยังพบว่าการเพิ่มสัดส่วนของอากาศทำให้การเกิดออกไซด์ของไนโตรเจนนั้นลดลง เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของอากาศมีผลต่อสัดส่วนของออกซิเจนสูงขึ้น ทำให้การเผาไหม้มีความสมบูรณ์มากขึ้น ออกไซด์ของไนโตรเจนจึงมีค่าลดลง (Shao, Fan et al. 2013)

4.3.2 ไนโตรเจนออกไซด์ที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ร่วมกันของชีวมวลและถ่านหินที่ อากาศมากเกินพอ 100, 150 และ 200 เปอร์เซ็นต์ของออกซิเจน

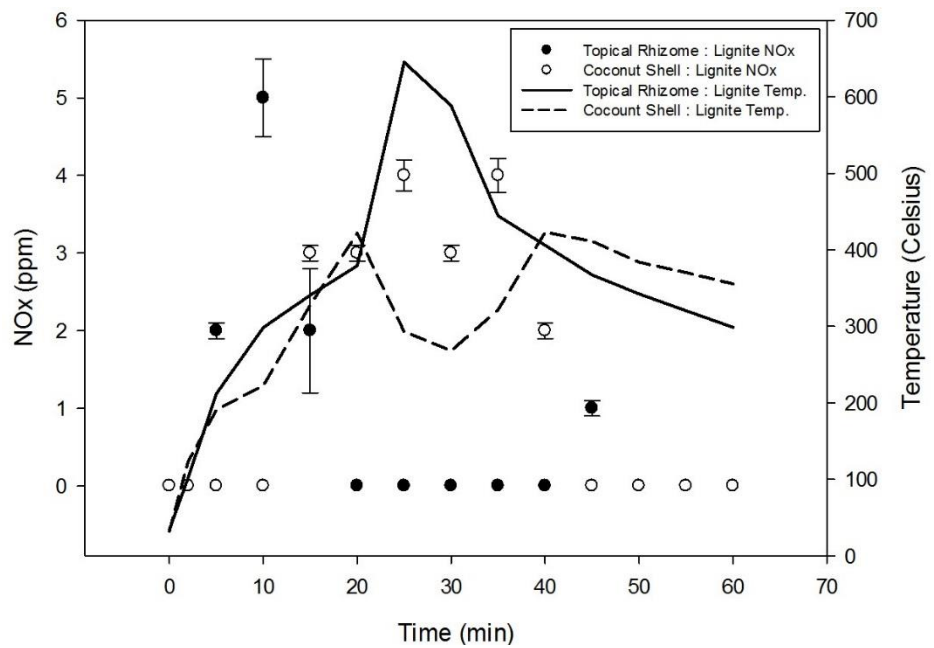
4.3.2.1 ที่สัดส่วนชีวมวลต่อถ่านหิน (80:20)

1) ชีวมวลต่อลิกไนต์

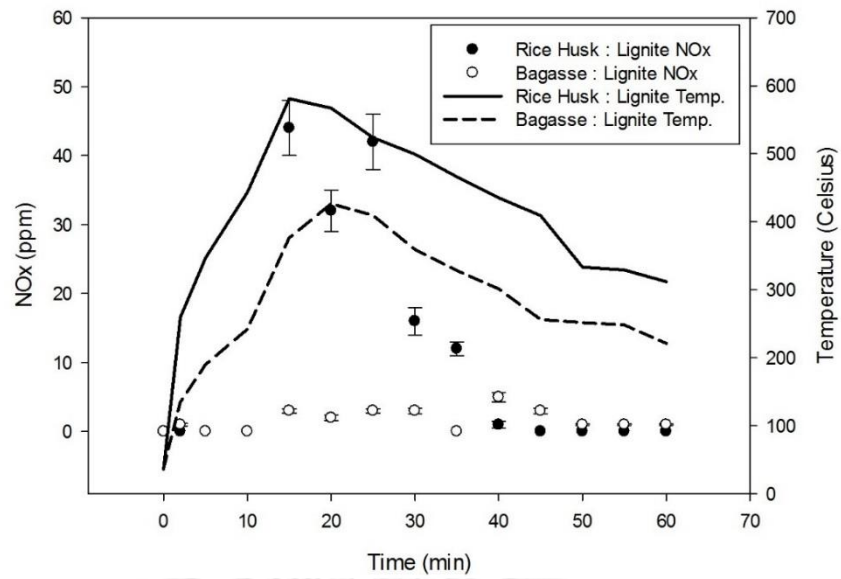
จากการทดลองพบว่า แกลบต่อลิกไนต์นั้นเกิดออกไซด์ของไนโตรเจนสูงที่สุดที่ สัดส่วนอากาศร้อยละ 200 โดยเกิดออกไซด์ของไนโตรเจน 48 ppm รองลงมาที่ร้อยละ 150 และร้อยละ 100 โดยเกิดออกไซด์ของไนโตรเจนเท่ากับ 44 ppm และ 40 ppm ตามลำดับ ส่วนที่เชื้อเพลิงชนิดอื่นนั้นมีแนวโน้มการเกิดออกไซด์ของไนโตรเจนลดลงเมื่อสัดส่วนอากาศมากขึ้นออกไซด์ไนโตรเจนของอากาศจะลดลง เนื่องจากปริมาณออกซิเจนที่มากขึ้นทำให้การเผาไหม้มีความสมบูรณ์มากขึ้น (Shao, Fan et al. 2013) ยกเว้นแกลบต่อลิกไนต์ที่สภาวะอากาศมากเกินพอที่ร้อยละ 200 จะเกิดออกไซด์ของไนโตรเจนมากที่สุดซึ่งเป็นผลของอุณหภูมิที่สูงทำให้ส่งผลต่อปริมาณอากาศที่เข้าซึ่งในอากาศมีไนโตรเจนในปริมาณมากทำให้เกิดเป็นออกไซด์ของไนโตรเจนมากขึ้น (James A. Miller 1989) รองลงมาคือที่ร้อยละ 150 และร้อยละ 100 ในส่วนของออกไซด์ของไนโตรเจนสูงสุดในแต่ละการทดลองพบว่า ที่สภาวะอากาศมากเกินพอร้อยละ 200 จะเกิดค่าสูงสุดของออกไซด์ของไนโตรเจนได้เร็วกว่าที่อากาศมากเกินพอร้อยละ 150 และ 100 เนื่องจาก เมื่อปริมาณออกซิเจนมากขึ้นทำให้เผาไหม้ได้ดีขึ้นอุณหภูมิสูงขึ้นเร็วกว่าในสัดส่วนที่มีออกซิเจนน้อยกว่า ดังที่แสดงในรูปที่ 4.37 - 4.42



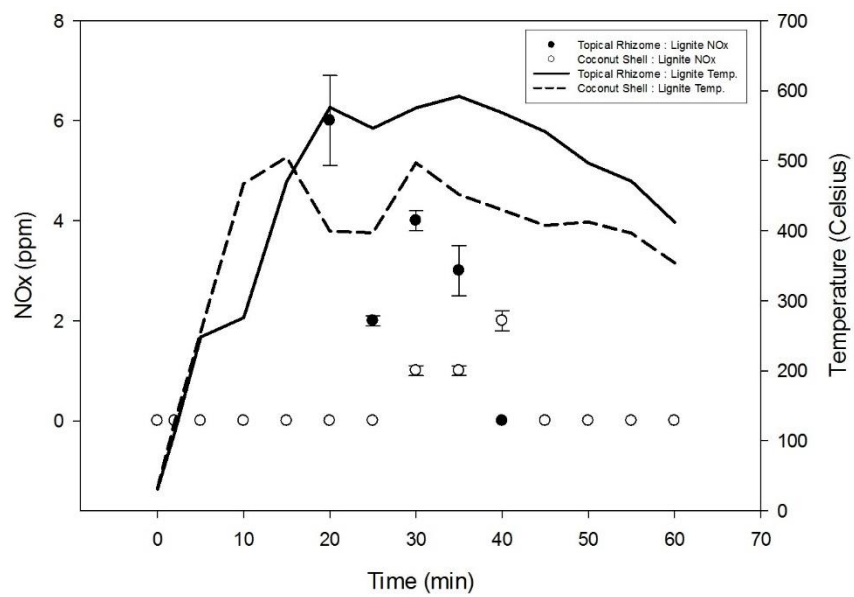
รูปที่ 4. 37 การเกิดออกไซด์ของไนโตรเจนของแกลบและกากอ้อยที่อากาศมากเกินพอร้อยละ 100 ของออกซิเจน



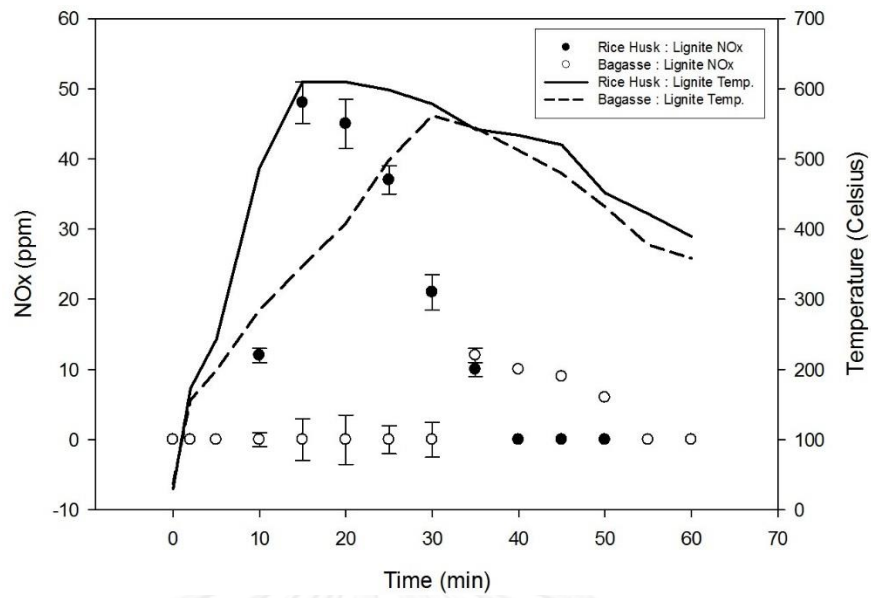
รูปที่ 4. 38 การเกิดออกไซด์ของไนโตรเจนของเหง้ามันสำปะหลังและกะลามะพร้าวที่อากาศมากเกินพอร้อยละ 100 ของออกซิเจน



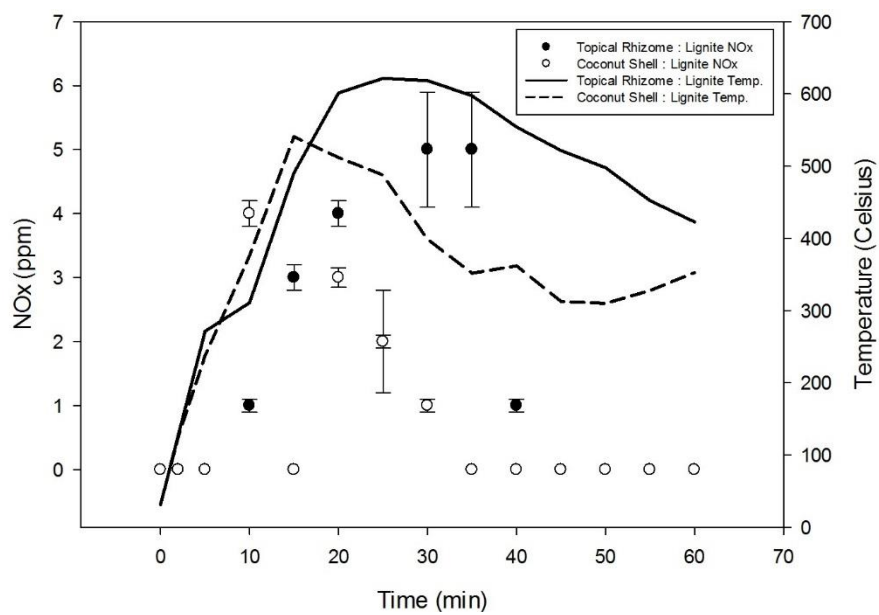
รูปที่ 4. 39 การเกิดออกไซด์ของไนโตรเจนของแกลบและกากอ้อย ที่อากาศมากเกินพอร้อยละ 150 ของออกซิเจน



รูปที่ 4. 40 การเกิดออกไซด์ของไนโตรเจนของเหง้ามันสำปะหลังและกะลามะพร้าว ที่อากาศมากเกินพอร้อยละ 150 ของออกซิเจน



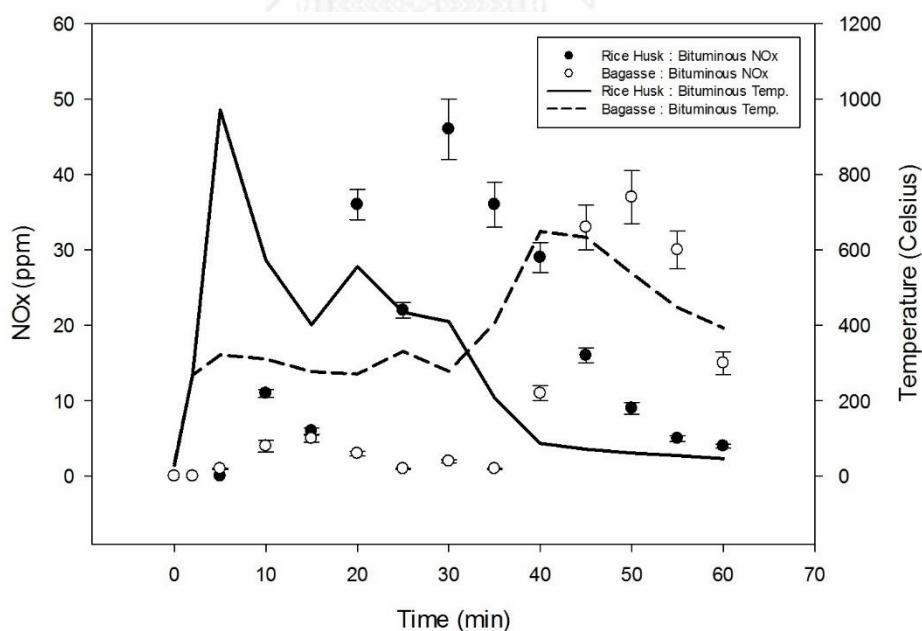
รูปที่ 4. 41 การเกิดออกไซด์ของไนโตรเจนของแกลบและกากอ้อย ที่อากาศ
มากเกินไปร้อยละ 200 ของออกซิเจน



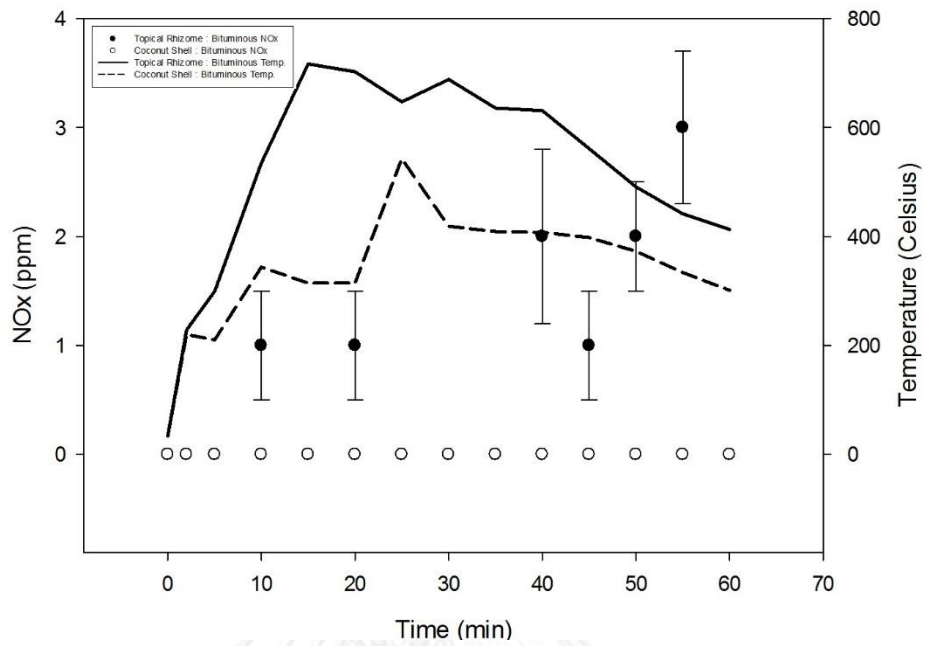
รูปที่ 4. 42 การเกิดออกไซด์ของไนโตรเจนของเหง้ามันสำปะหลังและ
กะลามะพร้าว ที่อากาศมากเกินไปร้อยละ 200 ของออกซิเจน

2) ชีวมวลต่อบิหมินัส

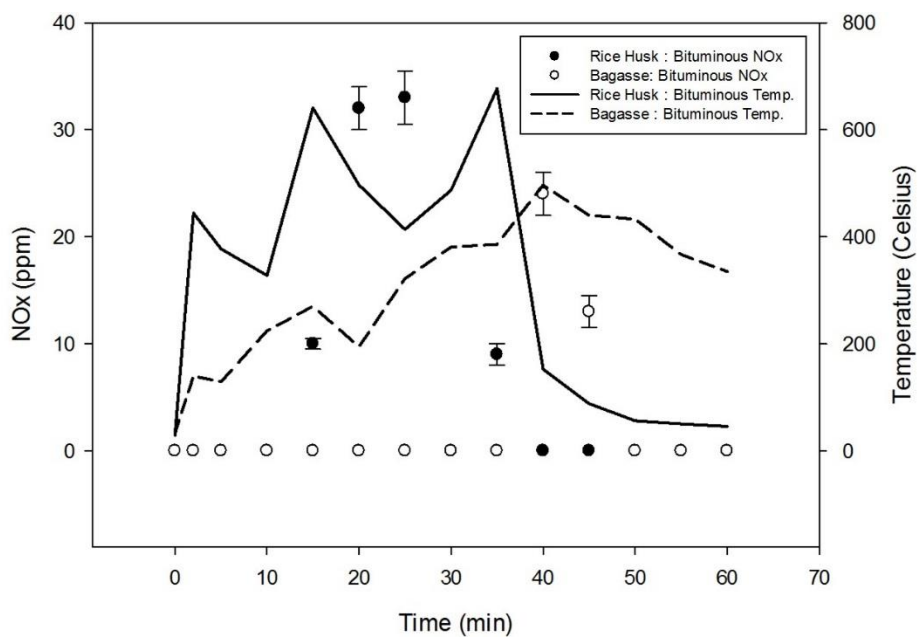
จากการทดลอง พบว่า แกลบต่อบิหมินัสนั้นเกิดออกไซด์ของไนโตรเจนสูงที่สุดที่ สัดส่วนอากาศ อากาศมากเกินพอร้อยละ 200 โดยเกิดออกไซด์ของไนโตรเจน 61 ppm รองลงมาสัดส่วนอากาศมากเกินพอที่ร้อยละ 150 และ 100 โดยเกิดออกไซด์ของไนโตรเจนเท่ากับ 53 ppm และ 27 ppm ตามลำดับ โดยที่เชื้อเพลิงชนิดอื่นนั้นมีแนวโน้มการเกิดออกไซด์ของไนโตรเจนลดลงเมื่อสัดส่วนอากาศมากขึ้นออกไซด์ไนโตรเจนของอากาศจะลดลงเนื่องจากปริมาณของออกซิเจนมากขึ้นการเผาไหม้จึงสมบูรณ์มากขึ้น (Shao, Fan et al. 2013) ยกเว้นแกลบต่อบิหมินัสที่สัดส่วนอากาศมากเกินพอที่ร้อยละ 200 จะเกิดออกไซด์ของไนโตรเจนมากที่สุดเนื่องจากค่าความร้อนของบิหมินัสที่สูงที่สุดในเชื้อเพลิงทุกชนิดที่ใช้ในการทดลองและองค์ประกอบทางเคมีของบิหมินัสยังมีค่าสูงที่สุด ดังนั้นจึงเกิดเป็นออกไซด์ของไนโตรเจนได้มากที่สุด (James A. Miller 1989) รองลงมาคือที่สัดส่วนอากาศมากเกินพอร้อยละ 150 และ 100 ส่วนของเวลาในการเกิดออกไซด์ของไนโตรเจนสูงที่สุดพบว่า ที่สภาวะอากาศมากเกินพอร้อยละ 200 เกิดออกไซด์ของไนโตรเจนโดยสูงสุดใช้เวลาสั้นเนื่องจากอุณหภูมิที่สูงขึ้นเร็วกว่าที่สัดส่วนอากาศมากเกินพอร้อยละ 150 และ 100 ที่สุดดังที่แสดงในรูปที่ 4.43 - 4.48



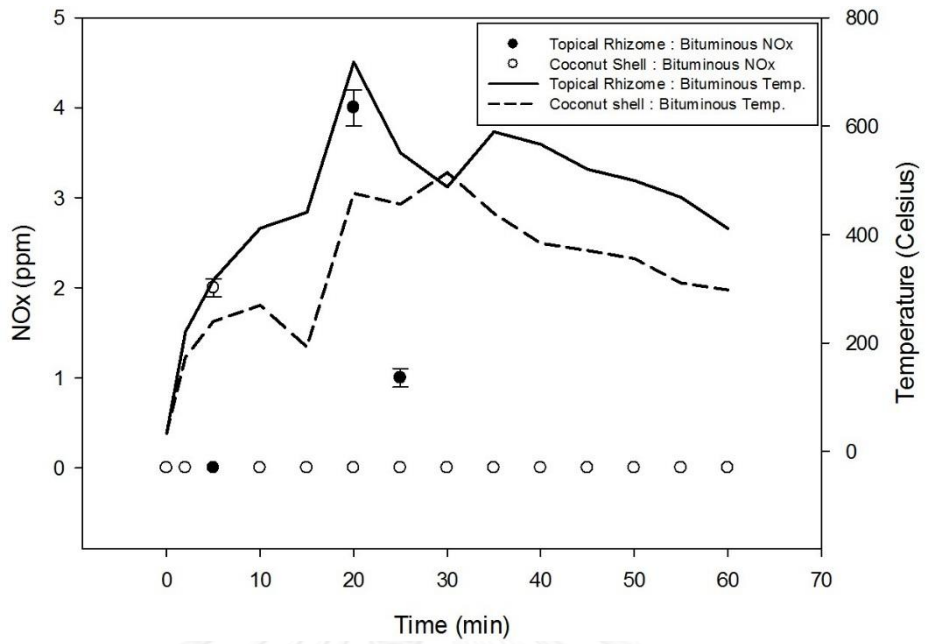
รูปที่ 4. 43 การเกิดออกไซด์ของไนโตรเจนของแกลบและกากอ้อย ที่อากาศมากเกินพอร้อยละ 100 ของออกซิเจน



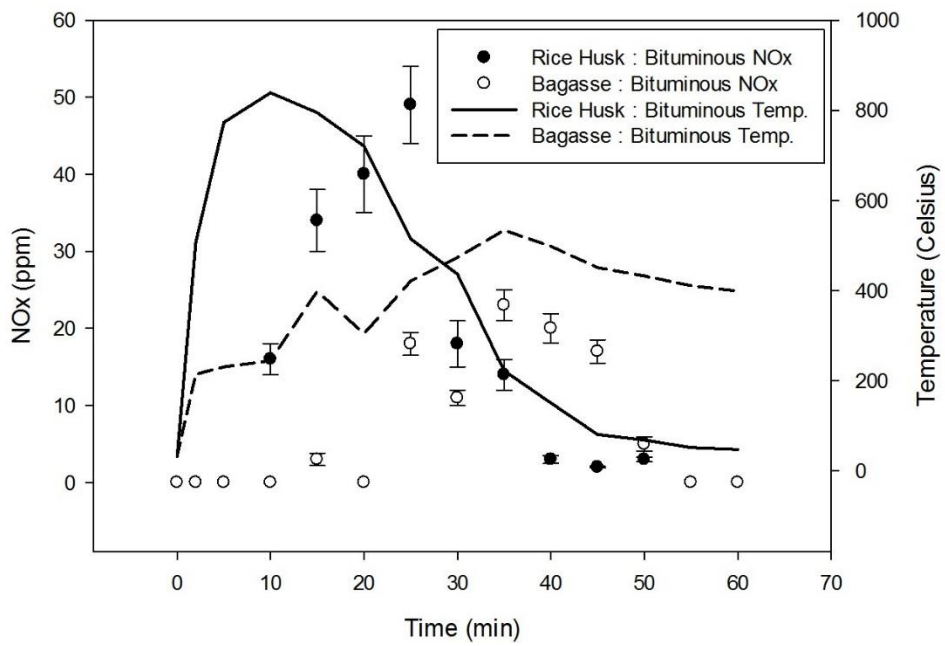
รูปที่ 4. 44 การเกิดออกไซด์ของไนโตรเจนของเหง้ามันสำปะหลังและ
กะลามะพร้าว ที่อากาศมากเกินพอร้อยละ 100 ของออกซิเจน



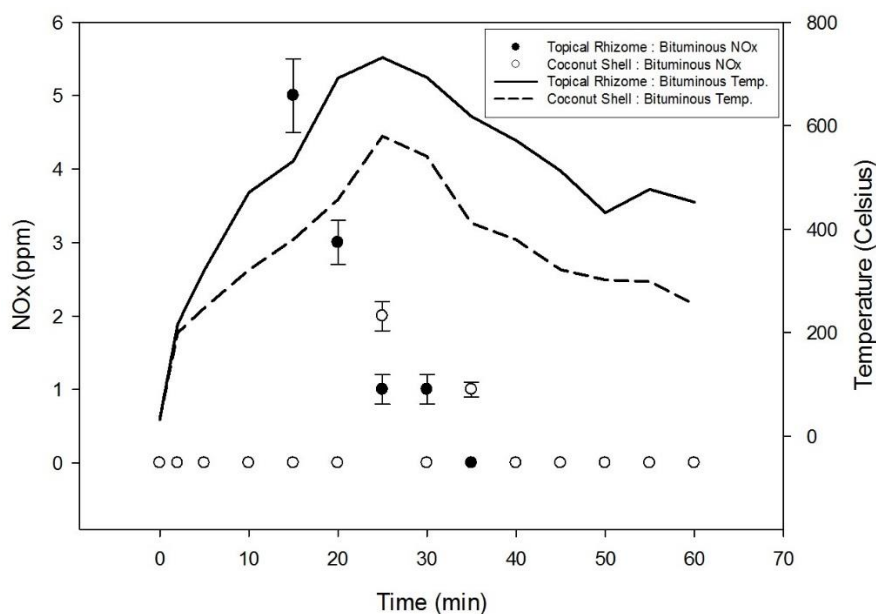
รูปที่ 4. 45 การเกิดออกไซด์ของไนโตรเจนของแกลบและกากอ้อย ที่อากาศ
มากเกินพอร้อยละ 150 ของออกซิเจน



รูปที่ 4. 46 การเกิดออกไซด์ของไนโตรเจนของเหง้ามันสำปะหลังและ
กะลามะพร้าว ที่อากาศมากเกินพอร้อยละ 150 ของออกซิเจน



รูปที่ 4. 47 การเกิดออกไซด์ของไนโตรเจนของแกลบและกากอ้อย ที่อากาศมาก
เกินพอร้อยละ 200 ของออกซิเจน



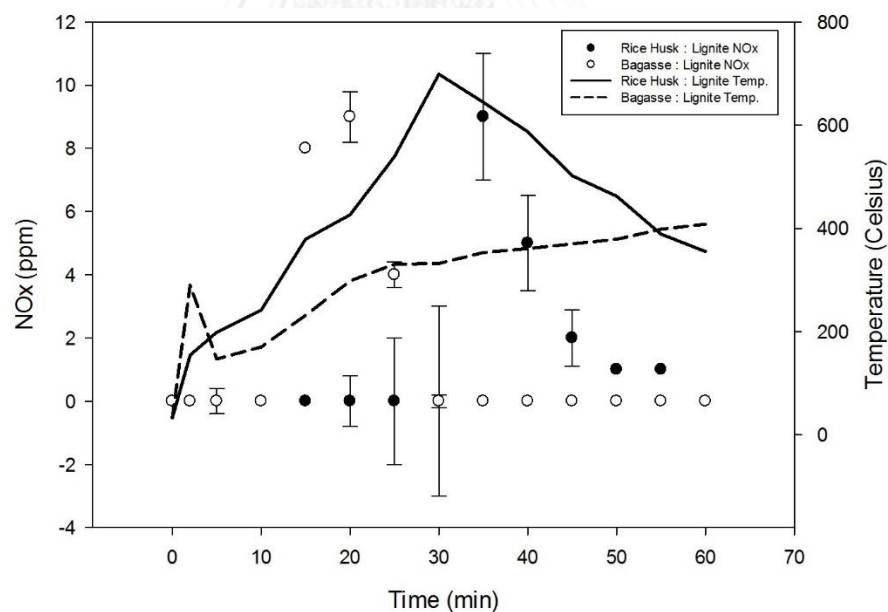
รูปที่ 4. 48 การเกิดออกไซด์ของไนโตรเจนของเหง้ามันสำปะหลังและ
กะลามะพร้าว ที่อากาศมากเกินพอร้อยละ 200 ของออกซิเจน

จากการเผาไหม้ชีวมวลร่วมกับถ่านหินที่สัดส่วนชีวมวลต่อถ่านหินเท่ากับ 80:20 พบว่า การเผาไหม้ชีวมวลร่วมกับปิโตรลีนและการเผาไหม้ถ่านหินและชีวมวลร่วมกับลิกไนต์เกิดออกไซด์ของไนโตรเจนมีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากค่าอุณหภูมิขณะเผาไหม้แตกต่างกันน้อย (James A. Miller 1989) นอกจากนี้พบว่า การเผาไหม้แกลบและกากอ้อยร่วมกับถ่านหินทั้งสองชนิดทำให้เกิดออกไซด์ของไนโตรเจนมากกว่าเหง้ามันสำปะหลังและกะลามะพร้าวร่วมกับถ่านหินทั้งสองชนิด เนื่องจากปริมาณของแกลบและกากอ้อยมีความชื้นน้อยกว่าเหง้ามันสำปะหลังและกะลามะพร้าว จึงสูญเสียความร้อนในการระเหยน้ำออกจากเชื้อน้อยกว่าเกิดเป็นออกไซด์ของไนโตรเจนได้เร็วกว่า (Wang, Michael Daukoru et al. 2013) และการเพิ่มสัดส่วนอากาศมีผลทำให้การเกิดออกไซด์ของไนโตรเจนมีค่าลดลง เนื่องจากปริมาณออกซิเจนที่มากขึ้นทำให้การเผาไหม้สมบูรณ์มากขึ้น (Shao, Fan et al. 2013)

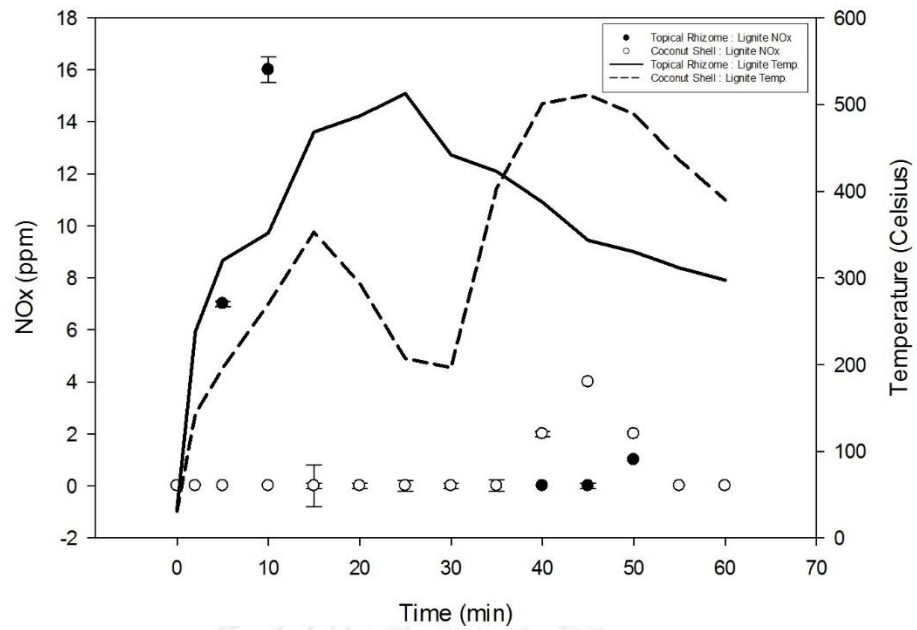
4.3.2.2 ที่สัดส่วนชีวมวลต่อถ่านหิน (50:50)

1) ชีวมวลต่อถ่านหิน

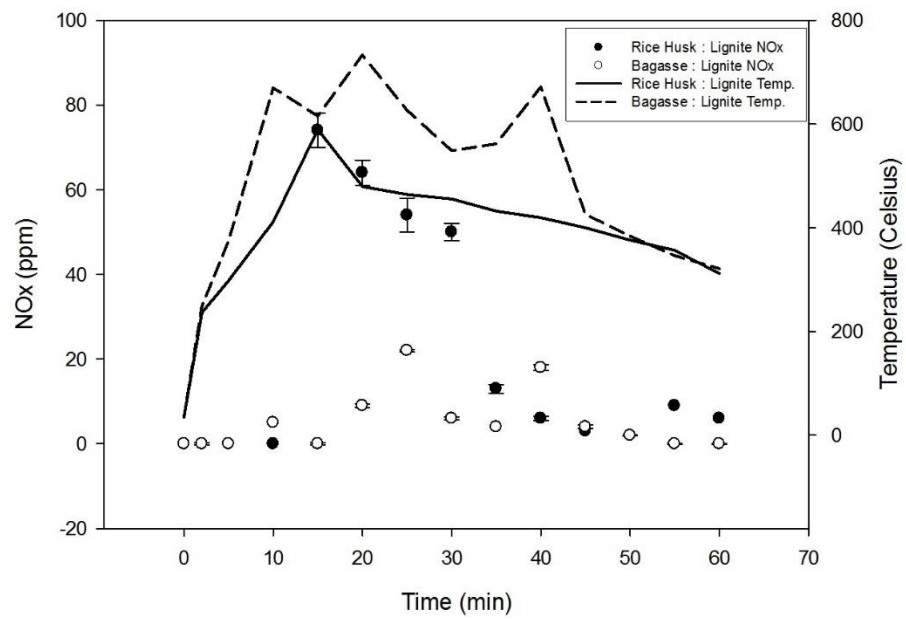
จากการทดลอง พบว่า แกลบต่อถ่านหินนั้นเกิดออกไซด์ของไนโตรเจนมากที่สุดที่สัดส่วนอากาศมากเกินพอร้อยละ 200 โดยมีค่าออกไซด์ของไนโตรเจนเท่ากับ 82 ppm รองลงมาคือที่สัดส่วนอากาศมากเกินพอร้อยละ 150 และ 100 โดยมีค่าออกไซด์ของไนโตรเจนเท่ากับ 74 ppm และ 9 ppm ตามลำดับ แนวโน้มการเกิดออกไซด์ของไนโตรเจนของเชื้อเพลิงชนิดอื่นนั้นลดลงเมื่อมีปริมาณอากาศมากเกินพอเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากออกซิเจนมีปริมาณเพิ่มมากขึ้นจากสัดส่วนอากาศมากเกินพอที่มากขึ้น ทำให้การเผาไหม้มีความสมบูรณ์มากขึ้น (Wang, Michael Daukoru et al. 2013) ยกเว้นแกลบต่อถ่านหิน ที่มีค่าออกไซด์ของไนโตรเจนเพิ่มขึ้นที่สัดส่วนอากาศมากเกินพอที่ร้อยละ 200 รองลงมาที่ร้อยละ 150 และ 100 ตามลำดับ ซึ่งเกิดจากอุณหภูมิที่สูงขึ้นจากสัดส่วนอากาศที่มากเกินพอที่ให้เกิดเป็นออกไซด์ของไนโตรเจนได้มากขึ้นด้วยกลไกทางความร้อน (James A. Miller 1989) ดังที่แสดงในรูปที่ 4.49 - 4.54



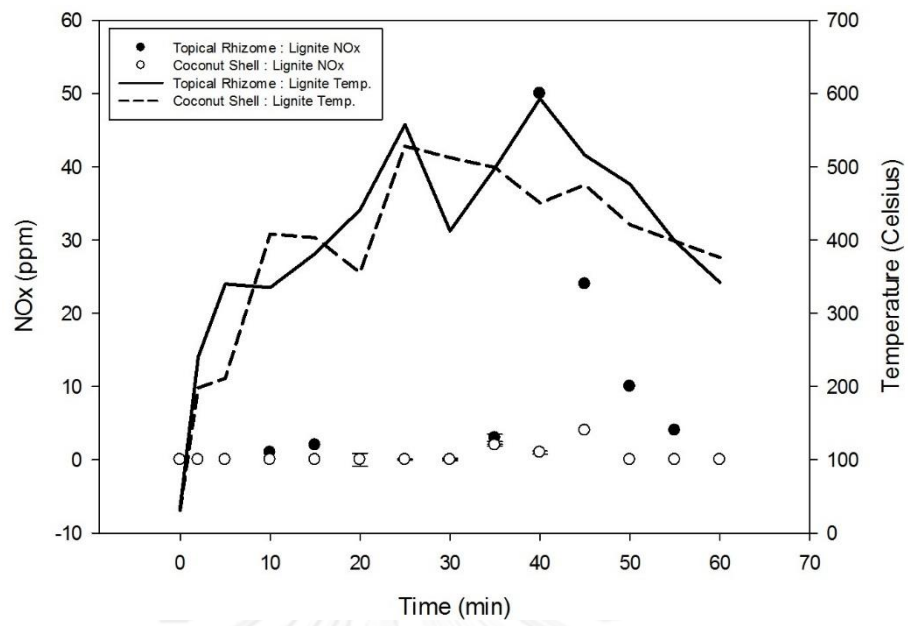
รูปที่ 4. 49 การเกิดออกไซด์ของไนโตรเจนของแกลบและกากอ้อย ที่อากาศมากเกินพอร้อยละ 100 ของออกซิเจน



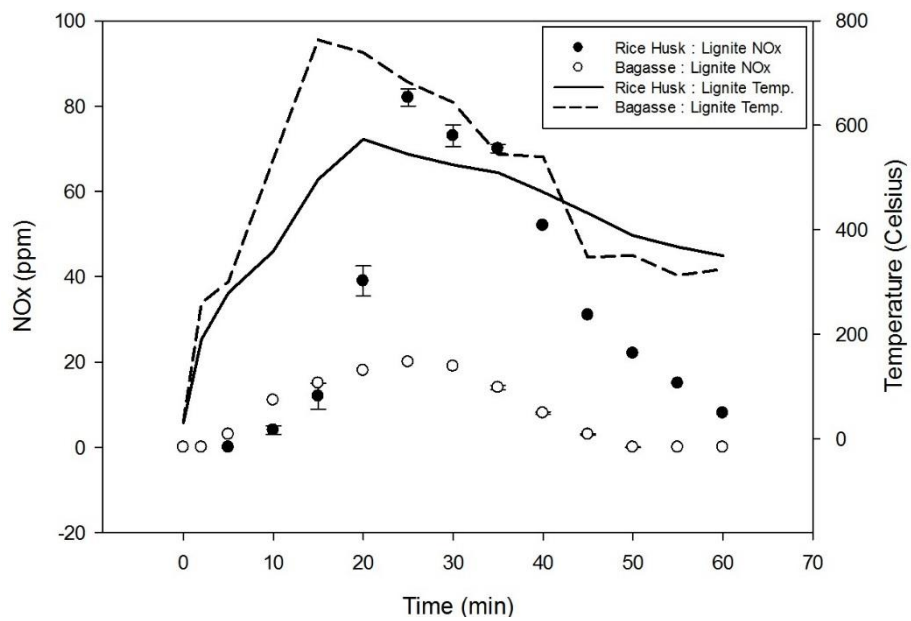
รูปที่ 4. 50 การเกิดออกไซด์ของไนโตรเจนของเหง้ามันสำปะหลังและกะลามะพร้าว ที่อากาศมากเกินพอร้อยละ 100 ของออกซิเจน



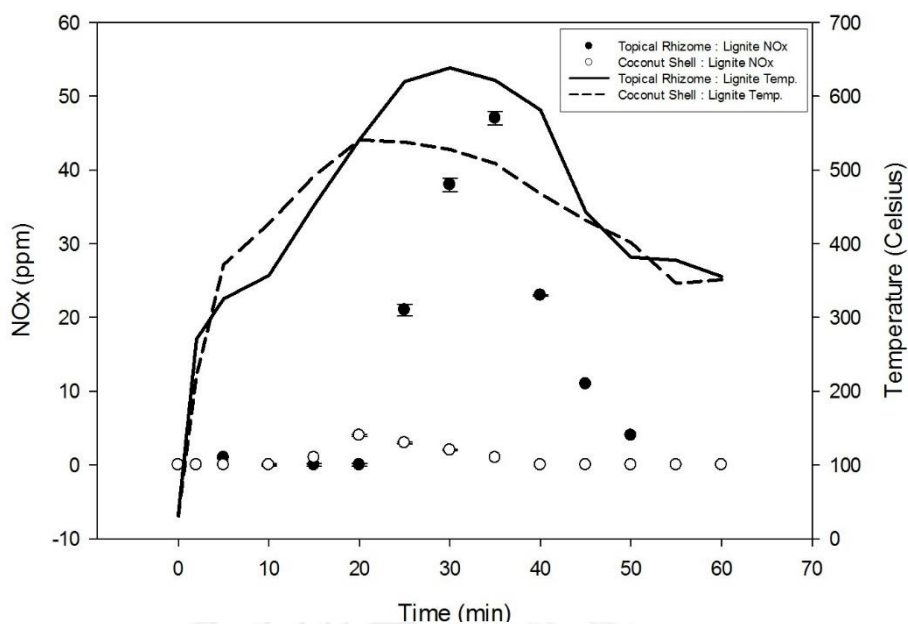
รูปที่ 4. 51 การเกิดออกไซด์ของไนโตรเจนของแกลบและกากอ้อย ที่อากาศมากเกินพอร้อยละ 150 ของออกซิเจน



รูปที่ 4. 52 การเกิดออกไซด์ของไนโตรเจนของเหง้ามันสำปะหลังและ
กะลามะพร้าว ที่อากาศมากเกินพอร้อยละ 150 ของออกซิเจน



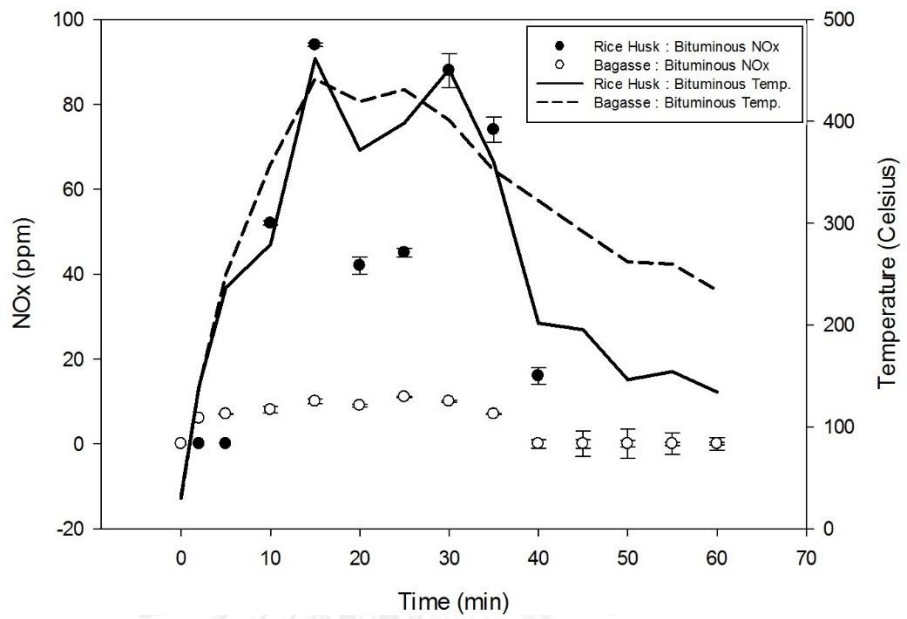
รูปที่ 4. 53 การเกิดออกไซด์ของไนโตรเจนของแกลบและกากอ้อย ที่อากาศ
มากเกินพอร้อยละ 200 ของออกซิเจน



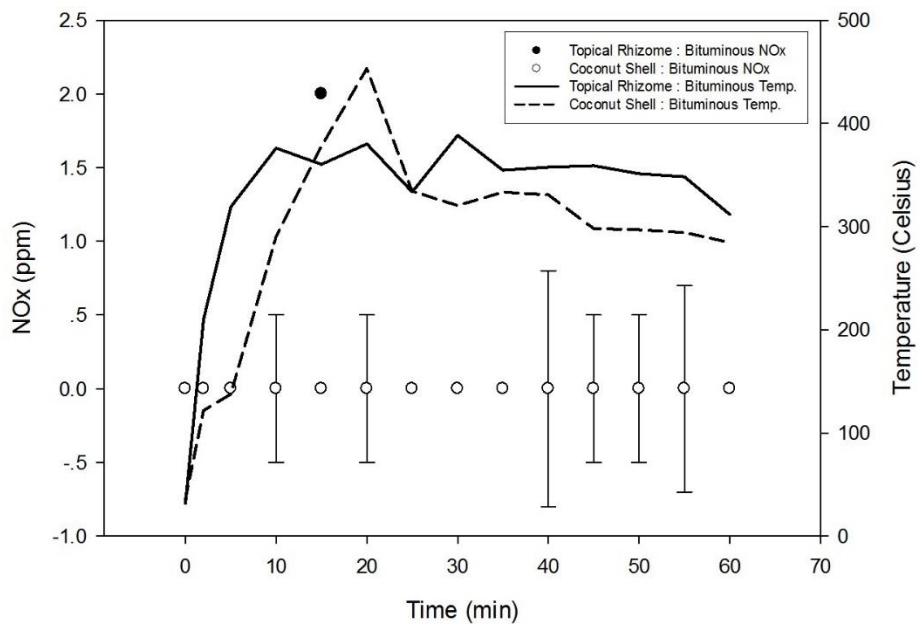
รูปที่ 4. 54 การเกิดออกไซด์ของไนโตรเจนของเหง้ามันสำปะหลังและ
กะลามะพร้าว ที่อากาศมากเกินพอร้อยละ 200 ของออกซิเจน

2) ชีวมวลกับปิโตรมิเนส

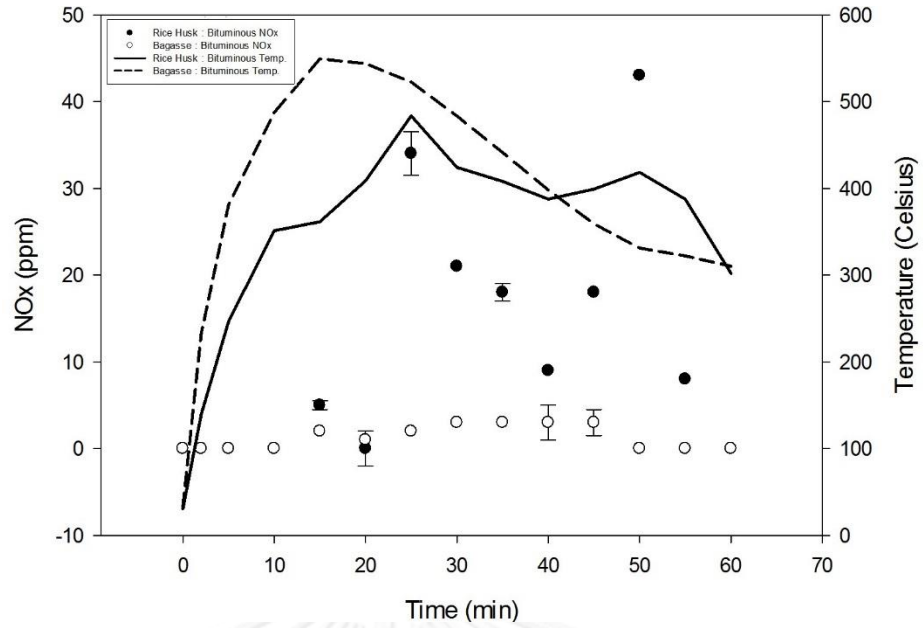
จากการทดลอง พบว่า แกลบต่อปิโตรมิเนสที่ สัดส่วนอากาศมากเกินพอร้อยละ 100 นั้นมีค่าออกไซด์ของไนโตรเจนสูงสุดโดยมีค่าเท่ากับ 94 ppm เนื่องจากสัดส่วนอากาศมากเกินพอที่เข้าสู่ห้องเผาไหม้น้อยกว่าสัดส่วนที่เหลือ ปริมาณออกซิเจนจึงมีปริมาณน้อยลงตามไปด้วย ดังนั้นในบางช่วงเริ่มต้นของการเผาไหม้เกิดเป็นออกไซด์ของไนโตรเจนในปริมาณที่สูงจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ (Wang, Michael Daukoru et al. 2013) รองลงมาที่สัดส่วนอากาศมากเกินพอร้อยละ 200 และร้อยละ 150 โดยมีค่าออกไซด์ของไนโตรเจนเท่ากับ 54 ppm และ 34 ppm ตามลำดับ และแนวโน้มการเกิดออกไซด์ของไนโตรเจน ของชีวมวลชนิดอื่นกับปิโตรมิเนสนั้นจะลดลงเมื่อมีสัดส่วนอากาศมากเกินพอมากขึ้นส่งผลให้ปริมาณออกซิเจนเพิ่มมากขึ้นการเผาไหม้สมบูรณ์มากขึ้น ในส่วนของการเผาไหม้เหง้ามันสำปะหลังที่สัดส่วนอากาศมากเกินพอร้อยละ 150 เกิดออกไซด์น้อยที่สุดเนื่องจากลักษณะทางกายภาพของเหง้ามันสำปะหลังมีความชื้นสูงที่สุดในชีวมวลที่ใช้ในการทดลองและค่าความร้อนยังมีค่าต่ำสุดอีกด้วย ส่งผลให้ต้องใช้ความร้อนในปริมาณที่มากในกระบวนการกำจัดน้ำออกจากรวมเชื้อเพลิง ออกไซด์ของไนโตรเจนจึงเกิดได้น้อยลง (Dangzhen Lv 2010, Wang, Michael Daukoru et al. 2013) ดังที่แสดงในรูปที่ 4.55 - 4.60



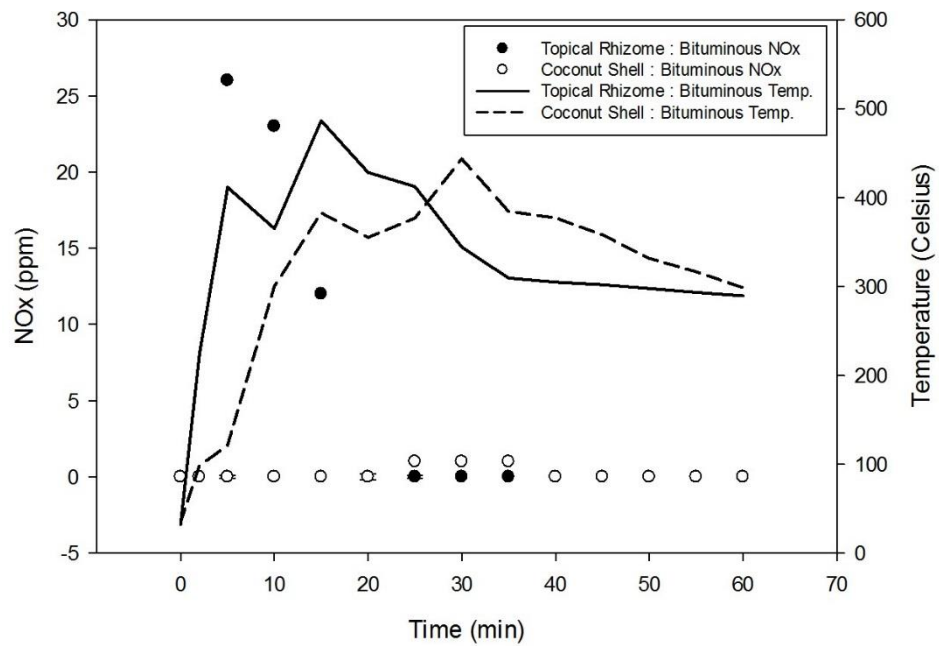
รูปที่ 4. 55 การเกิดออกไซด์ของไนโตรเจนของแกลบและกากอ้อย ที่อากาศมากเกินพอร้อยละ 100 ของออกซิเจน



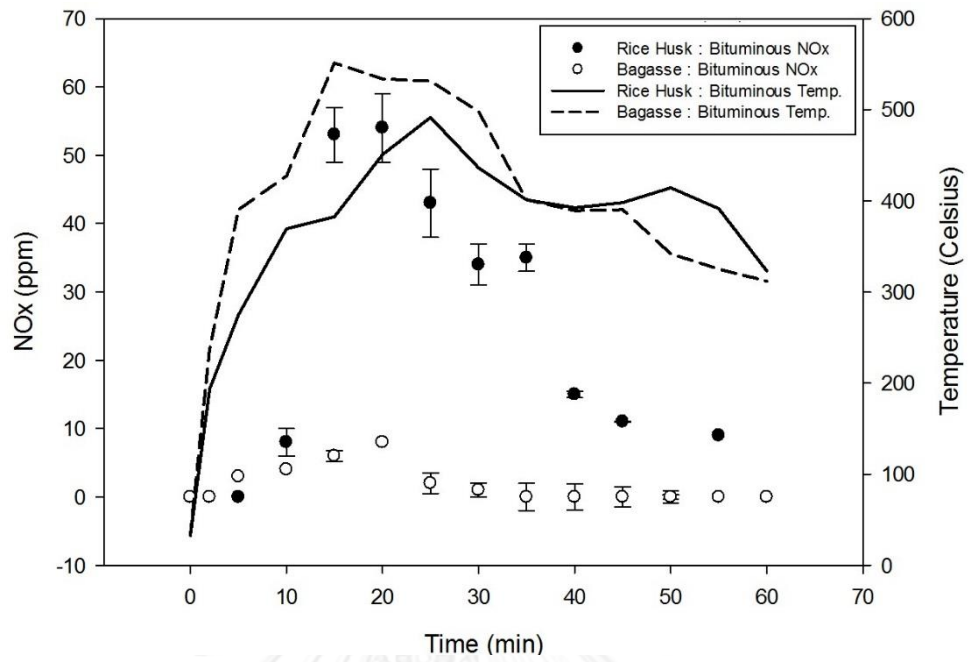
รูปที่ 4. 56 การเกิดออกไซด์ของไนโตรเจนของเหง้ามันสำปะหลังและกะลามะพร้าว ที่อากาศมากเกินพอร้อยละ 100 ของออกซิเจน



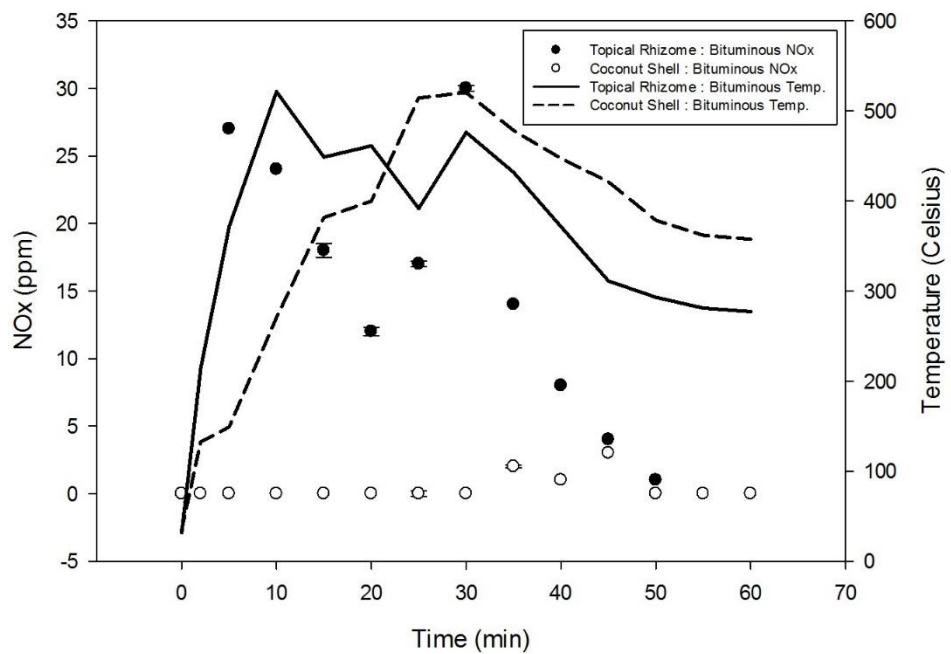
รูปที่ 4. 57 การเกิดออกไซด์ของไนโตรเจนของแกลบและกากอ้อย ที่อากาศมากเกินพอร้อยละ 150 ของออกซิเจน



รูปที่ 4. 58 การเกิดออกไซด์ของไนโตรเจนของเหง้ามันสำปะหลังและกะลามะพร้าว ที่อากาศมากเกินพอ 150 ของออกซิเจน



รูปที่ 4. 59 การเกิดออกไซด์ของไนโตรเจนของแกลบและกากอ้อย ที่อากาศมากเกินพอ 200 ของออกซิเจน



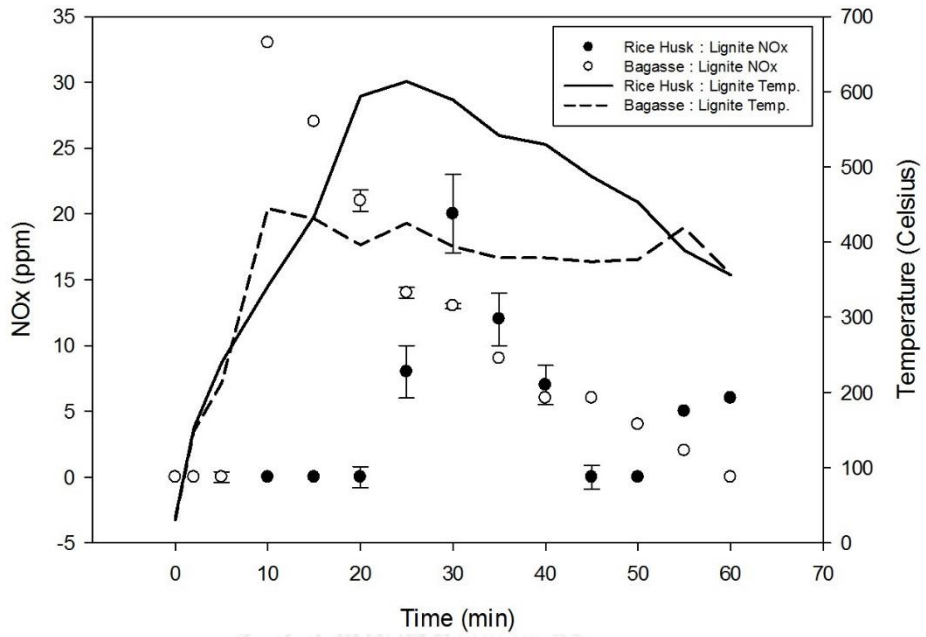
รูปที่ 4. 60 การเกิดออกไซด์ของไนโตรเจนของเหง้ามันสำปะหลังและกะลามะพร้าว ที่อากาศมากเกินพอ 200 ของออกซิเจน

จากการเผาไหม้ชีวมวลร่วมกับถ่านหินที่สัดส่วนชีวมวลต่อถ่านหินเท่ากับ 50:50 พบว่า การเผาไหม้ชีวมวลร่วมกับปิโตรลีนัสและการเผาไหม้ถ่านหินและชีวมวลร่วมกับลิกไนต์เกิดออกไซด์ของไนโตรเจนมีค่าใกล้เคียงกัน นอกจากนี้พบว่าการเผาไหม้แกลบและกากอ้อยร่วมกับถ่านหินทั้งสองชนิดทำให้เกิดออกไซด์ของไนโตรเจนมากกว่าเหง้ามันสำปะหลังและกะลามะพร้าวร่วมกับถ่านหินทั้งสองชนิด เนื่องจากความชื้นของแกลบและกากอ้อยมีค่าต่ำกว่าเหง้ามันสำปะหลังจึงไม่ต้องสูญเสียความร้อนในการกำจัดความชื้นออกจากเชื้อเพลิงเกิดการเผาไหม้ได้เร็วกว่าเมื่อสังเกตช่วงเวลาในการเกิดออกไซด์ของไนโตรเจน (Wang, Michael Daukoru et al. 2013) และการเพิ่มสัดส่วนอากาศมีผลทำให้การเกิดออกไซด์ของไนโตรเจนมีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องมาจากสัดส่วนที่เป็นถ่านหินเพิ่มมากขึ้นทำให้อุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้คงที่มากกว่า ทำให้เกิดเป็นออกไซด์ของไนโตรเจนได้มากกว่า เนื่องจากอุณหภูมิยิ่งสูงมากขึ้นออกไซด์ของไนโตรเจนจะเกิดได้มากขึ้น (Warnatz 1996)

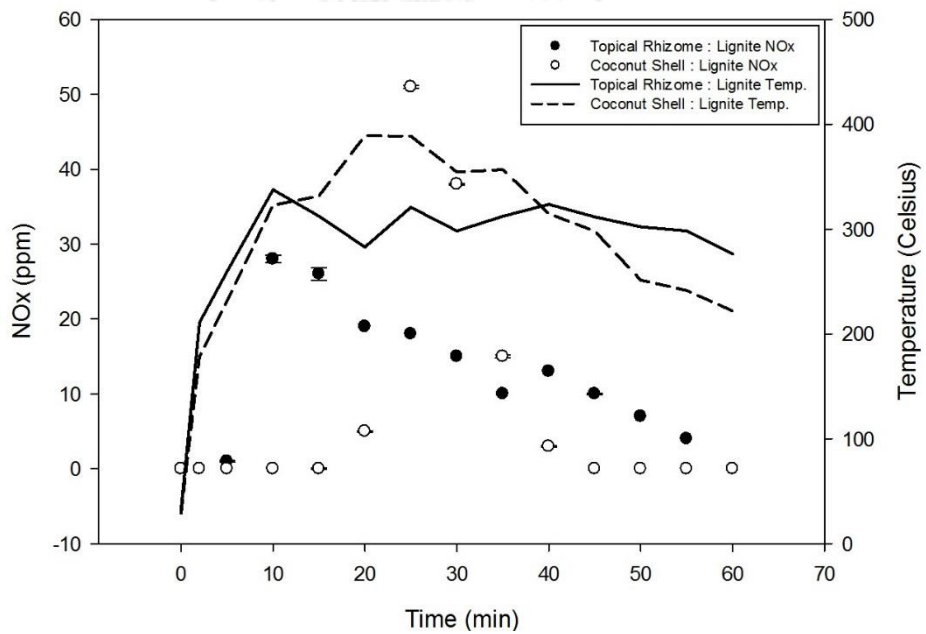
4.3.2.3 ที่สัดส่วนชีวมวลต่อถ่านหิน (20:80)

1) ชีวมวลกับลิกไนต์

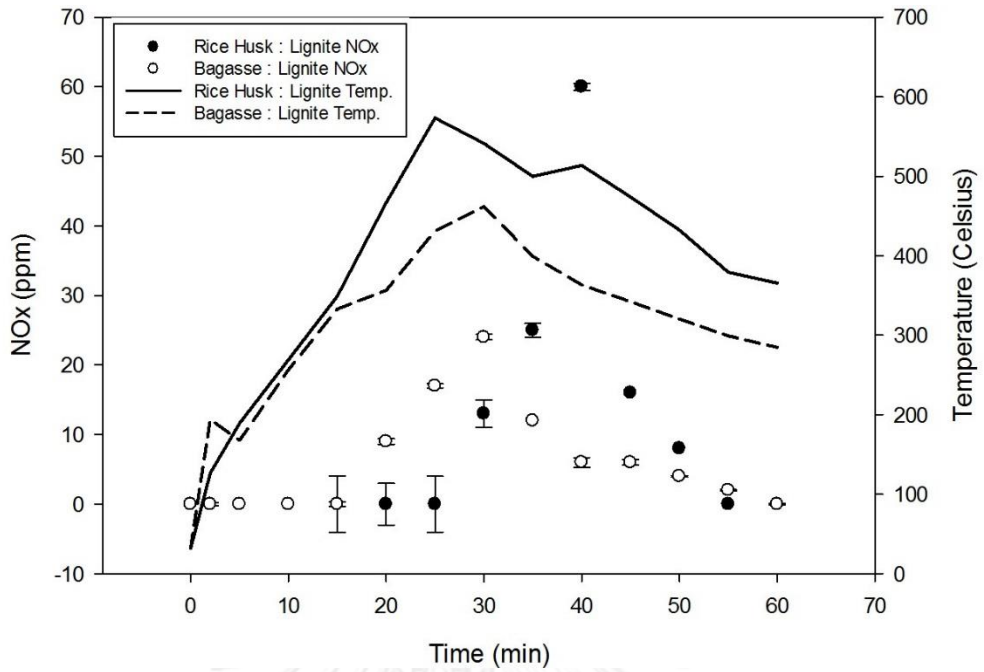
จากการทดลอง พบว่า แกลบต่อลิกไนต์ที่สัดส่วนอากาศมากเกินพอร้อยละ 150 นั้นเกิดออกไซด์ของไนโตรเจนมากที่สุดมีค่าเท่ากับ 60 ppm เนื่องจากที่สัดส่วนอากาศมากเกินพอร้อยละ 150 มีปริมาณออกซิเจนน้อยกว่าที่สัดส่วนอากาศมากเกินพอร้อยละ 200 ดังนั้นการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นในบางช่วงของการทดลองไม่สมบูรณ์เนื่องจากอุณหภูมิเพิ่มขึ้นได้ช้ากว่าที่สัดส่วนอากาศมากเกินพอร้อยละ 200 รองลงมาที่สัดส่วนอากาศมากเกินพอ 200 เปอร์เซ็นต์และ 100 เปอร์เซ็นต์ นั้นมีค่าเท่ากับ 58 ppm และ 20 ppm ตามลำดับ ชีวมวลชนิดอื่นที่เผาไหม้ร่วมกับลิกไนต์พบว่ามีแนวโน้มการเกิดออกไซด์ของไนโตรเจนนั้นลดลงเมื่อปริมาณอากาศมากเกินพอเพิ่มมากขึ้น (James A. Miller 1989) ดังที่แสดงในรูปที่ 4.61 - 4.66



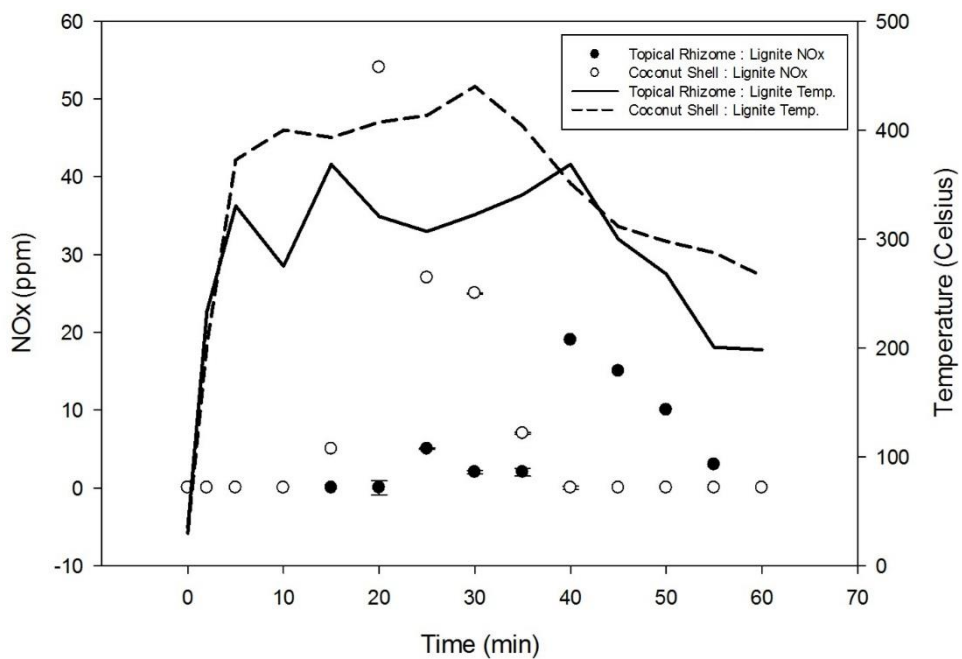
รูปที่ 4. 61 การเกิดออกไซด์ของไนโตรเจนของแกลบและกากอ้อย ที่อากาศมากเกินพอร้อยละ 100 ของออกซิเจน



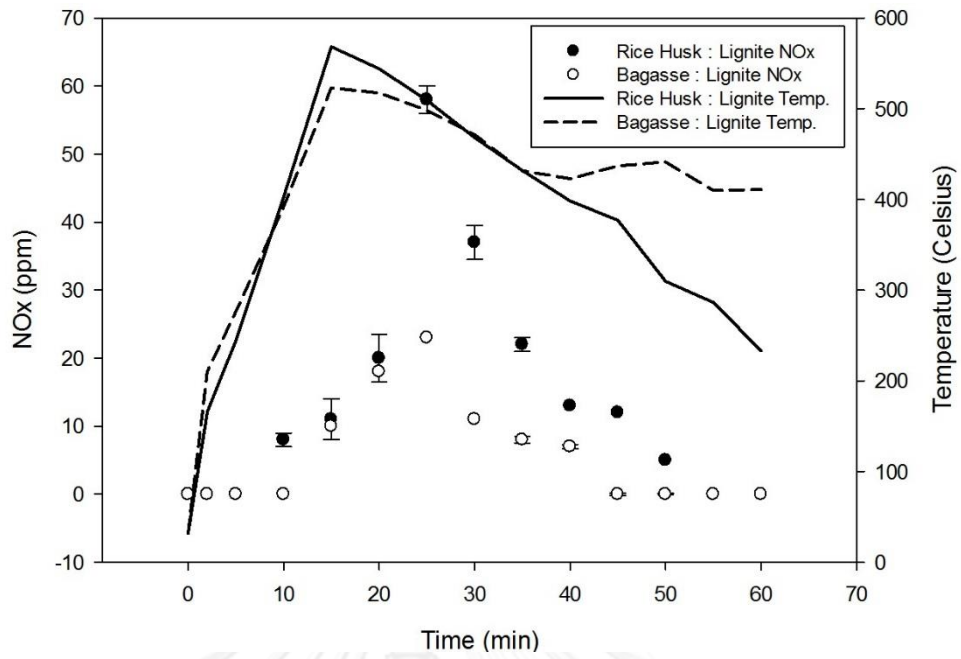
รูปที่ 4. 62 การเกิดออกไซด์ของไนโตรเจนของเหง้ามันสำปะหลังและกะลามะพร้าว ที่อากาศมากเกินพอร้อยละ 100 ของออกซิเจน



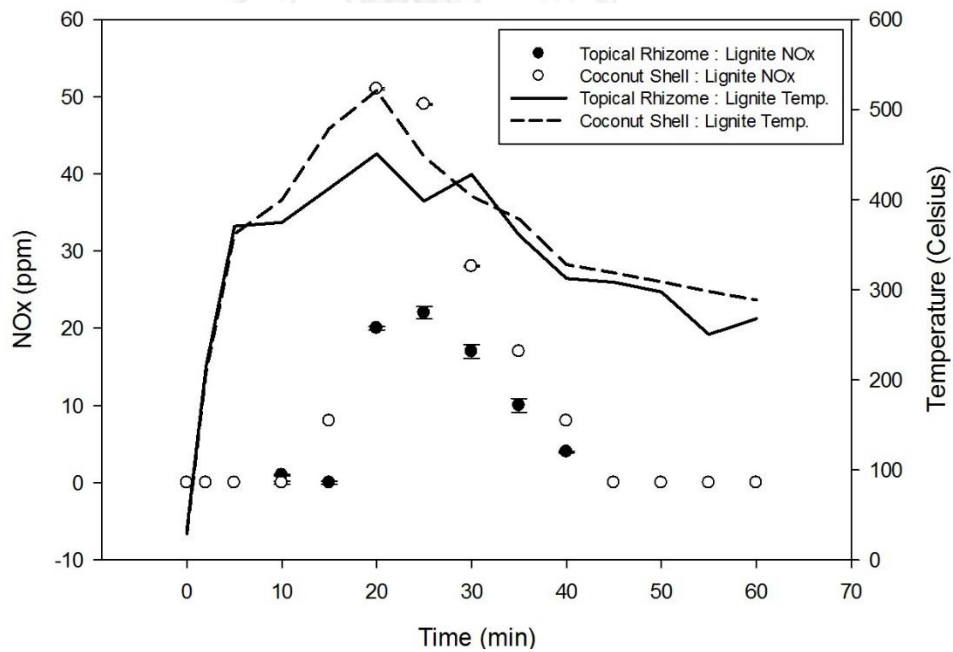
รูปที่ 4. 63 การเกิดออกไซด์ของไนโตรเจนของแกลบและกากอ้อย ที่อากาศมากเกินพอร้อยละ 150 ของออกซิเจน



รูปที่ 4. 64 การเกิดออกไซด์ของไนโตรเจนของเหง้ามันสำปะหลังและกะลามะพร้าว ที่อากาศมากเกินพอร้อยละ 150 ของออกซิเจน



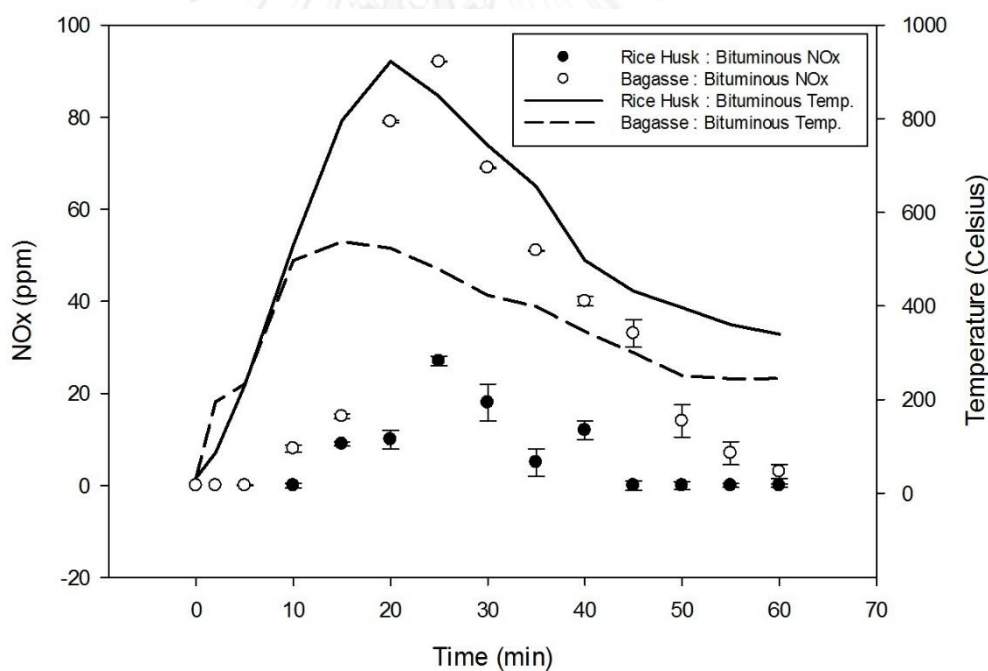
รูปที่ 4. 65 การเกิดออกไซด์ของไนโตรเจนของแกลบและกากอ้อย ที่อากาศมากเกินพอร้อยละ 200 ของออกซิเจน



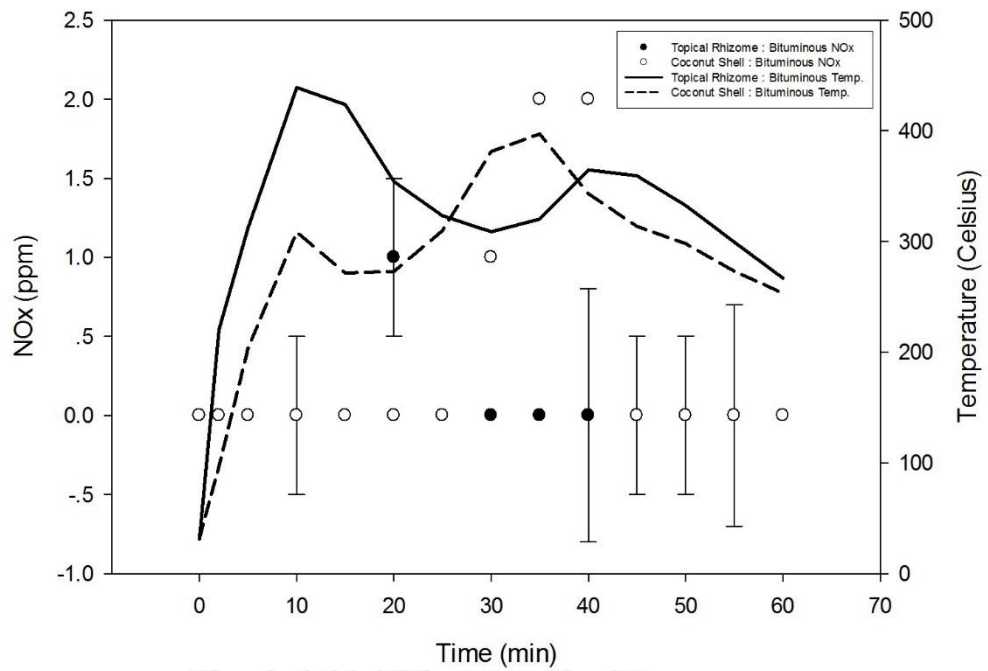
รูปที่ 4. 66 การเกิดออกไซด์ของไนโตรเจนของเหง้ามันสำปะหลังและกะลามะพร้าว ที่อากาศมากเกินพอร้อยละ 200 ของออกซิเจน

2) ชีวมวลกับปิโตรเคมี

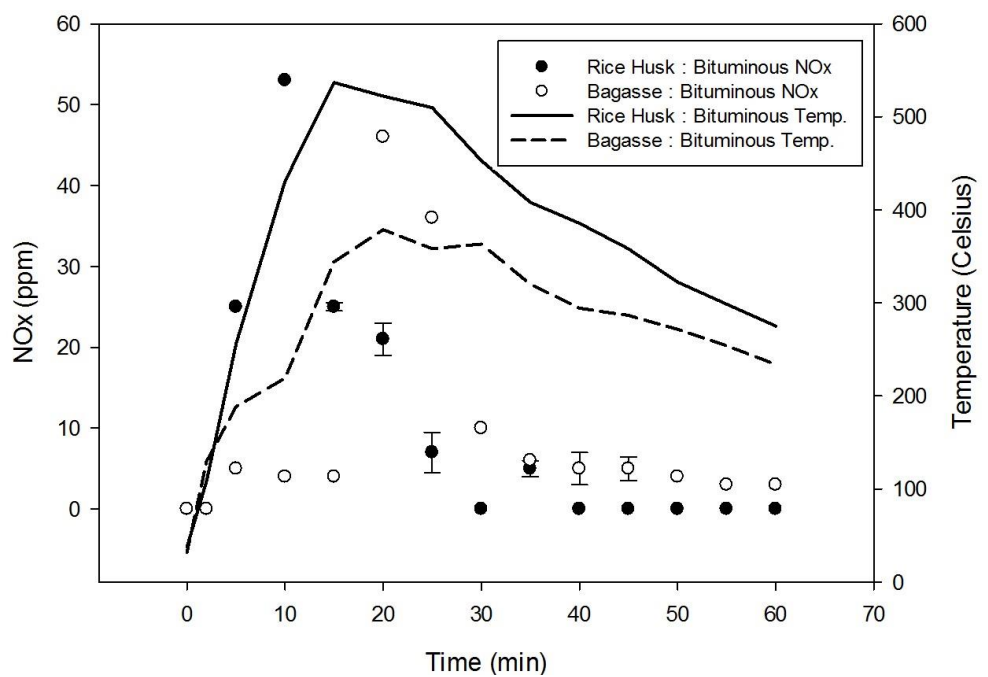
จากการทดลอง พบว่า กากอ้อยที่สภาวะอากาศมากเกินพอที่ 100 เปอร์เซ็นต์เกิดออกไซด์ของไนโตรเจนมากที่สุดมีค่าเท่ากับ 92ppm เนื่องจากปริมาณของออกซิเจนน้อยกว่าในสัดส่วนอากาศอื่นทำให้เกิดการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ (Wang, Michael Daukoru et al. 2013) รองลงมาที่สภาวะอากาศมากเกินพอ 200 เปอร์เซ็นต์ และ 100 เปอร์เซ็นต์ โดยมีค่าเท่ากับ 86 ppm และ 46 ppm ตามลำดับ นอกจากนี้ชีวมวลชนิดอื่นเมื่อเผาไหม้ร่วมกับถ่านหินปิโตรเคมีนั้นมีค่าออกไซด์ของไนโตรเจนมากขึ้นเนื่องจากสัดส่วนของเชื้อเพลิงเป็นถ่านหินมากกว่าชีวมวลที่สัดส่วนชีวมวลต่อถ่านหิน (20:80) (Varol, Atimtay et al. 2010) ซึ่งถ่านหินปิโตรเคมีมีปริมาณไนโตรเจนสูงที่สุดในเชื้อเพลิงที่ใช้ทำการทดลอง ในส่วนของกะลามะพร้าวที่สัดส่วนอากาศมากเกินพอร้อยละ 150 พบว่ากะลามะพร้าวไม่เกิดเป็นออกไซด์ของไนโตรเจน เนื่องจากอุณหภูมิในการเผาไหม้ต่ำ ซึ่งโดยปกติแล้วออกไซด์ของไนโตรเจนจะเกิดที่อุณหภูมิสูง (James A. Miller 1989) ดังที่แสดงในรูปที่ 6.67 - 6.72



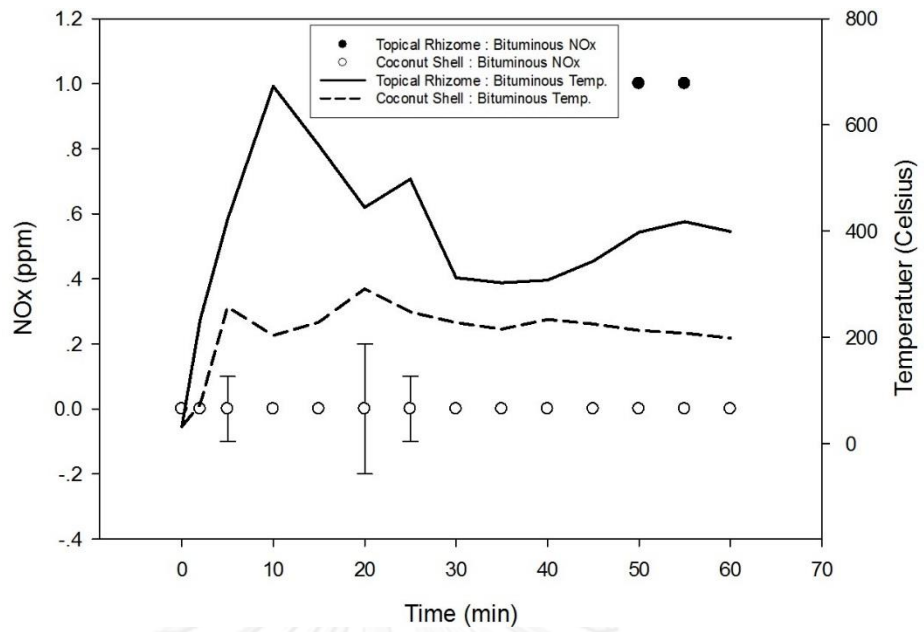
รูปที่ 4. 67 การเกิดออกไซด์ของไนโตรเจนของแกลบและกากอ้อย ที่อากาศมากเกินพอร้อยละ 100 ของออกซิเจน



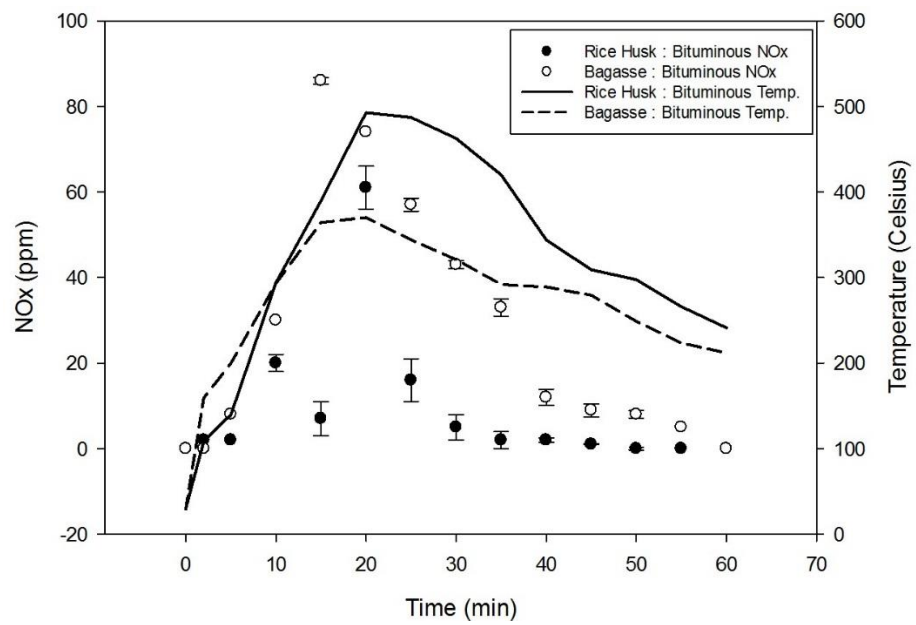
รูปที่ 4. 68 การเกิดออกไซด์ของไนโตรเจนของเหง้ามันสำปะหลังและ
กะลามะพร้าว ที่อากาศมากเกินพอร้อยละ 100 ของออกซิเจน



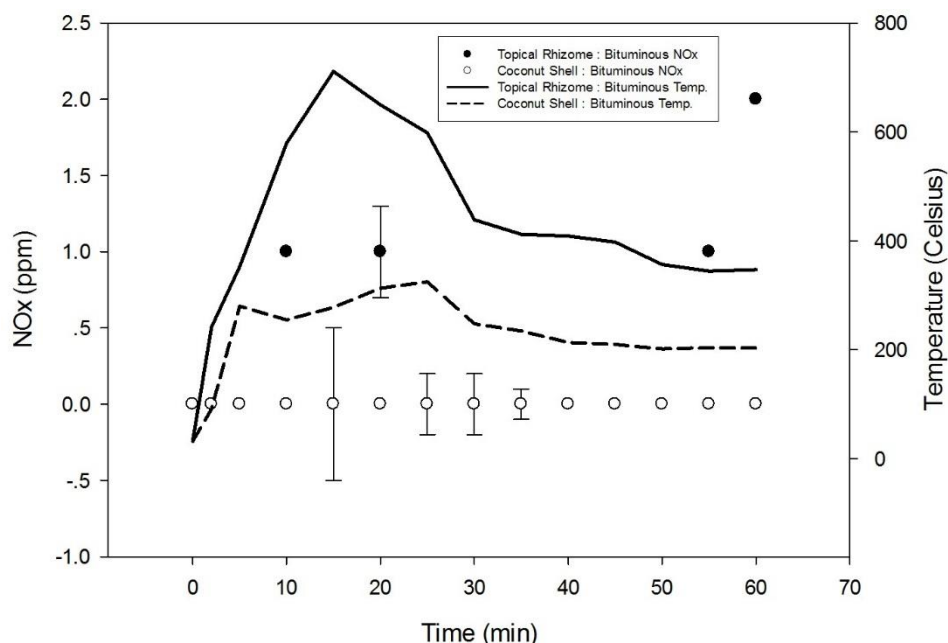
รูปที่ 4. 69 การเกิดออกไซด์ของไนโตรเจนของแกลบและกากอ้อย ที่อากาศ
มากเกินพอร้อยละ 150 ของออกซิเจน



รูปที่ 4. 70 การเกิดออกไซด์ของไนโตรเจนของเหง้ามันสำปะหลังและ
กะลามะพร้าว ที่อากาศมากเกินพอร้อยละ 150 ของออกซิเจน



รูปที่ 4. 71 การเกิดออกไซด์ของไนโตรเจนของแกลบและกากอ้อย ที่
อากาศมากเกินพอร้อยละ 200 ของออกซิเจน



รูปที่ 4. 72 การเกิดออกไซด์ของไนโตรเจนของเหง้ามันสำปะหลังและ
กะลามะพร้าว ที่อากาศมากเกินพอร้อยละ 200 ของออกซิเจน

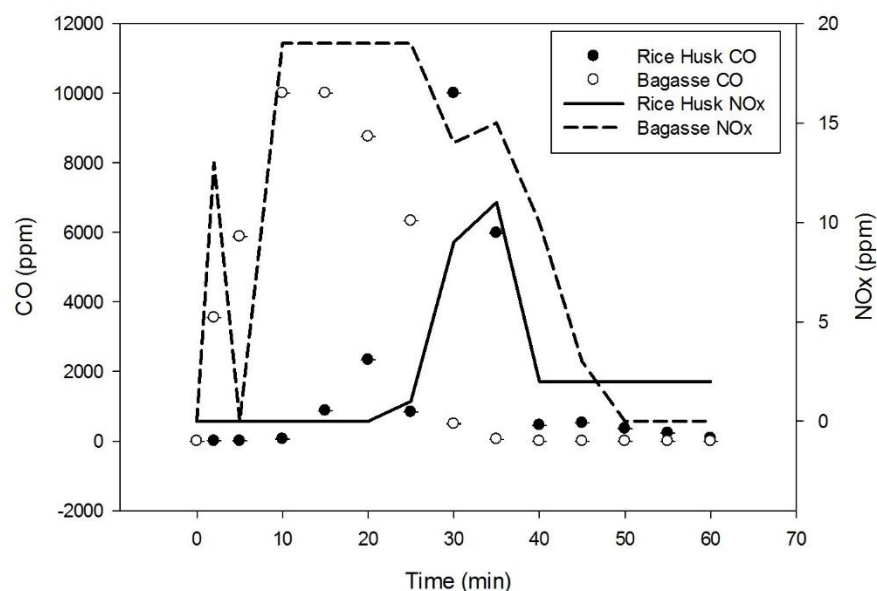
จากการเผาไหม้ชีวมวลกับถ่านหินและการเผาไหม้ชีวมวลร่วมกับถ่านหินในสัดส่วนที่กล่าวมาทั้งหมด (100:0, 80:20, 50:50, 20:80, 0:100) สามารถก่อให้เกิดออกไซด์ไนโตรเจนได้ โดยเฉพาะถ่านหินมีองค์ประกอบทางเคมีเป็นไนโตรเจนมากกว่าชีวมวลจากการวิเคราะห์ทางกายภาพของถ่านหินมีค่าความร้อนสูงกว่าและค่าความชื้นต่ำกว่าชีวมวลจึงทำให้เกิดเป็นออกไซด์ของไนโตรเจนได้มากกว่า การเผาไหม้ชีวมวลเพียงอย่างเดียว เมื่อนำเอาถ่านหินทั้งสองชนิดมาเผาไหม้ร่วมกันกับชีวมวลทั้ง 4 ชนิด นิตพบว่าสามารถลดการเกิดออกไซด์ของไนโตรเจนลงได้ เนื่องจากชีวมวลนั้นมีองค์ประกอบเป็นไนโตรเจนน้อยกว่าถ่านหินดังที่แสดงในตาราง 4.1 ซึ่งในสัดส่วนของชีวมวลกับถ่านหินที่มีองค์ประกอบเป็นชีวมวลมากกว่าจะทำให้เกิดเป็นออกไซด์ของไนโตรเจนน้อยกว่า (L. Álvarez 2012) นอกจากนี้ปริมาณอากาศที่เติมเข้าไปยังมีผลทำให้แนวโน้มการเกิดออกไซด์ของไนโตรเจนลดลง เนื่องจากการเติมอากาศเข้าสู่ห้องเผาไหม้ทำให้มีปริมาณออกซิเจนเพิ่มมากขึ้นเกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์มากขึ้น (Wang, Michael Daukoru et al. 2013)

4.4 ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่เกิดจากการเผาไหม้

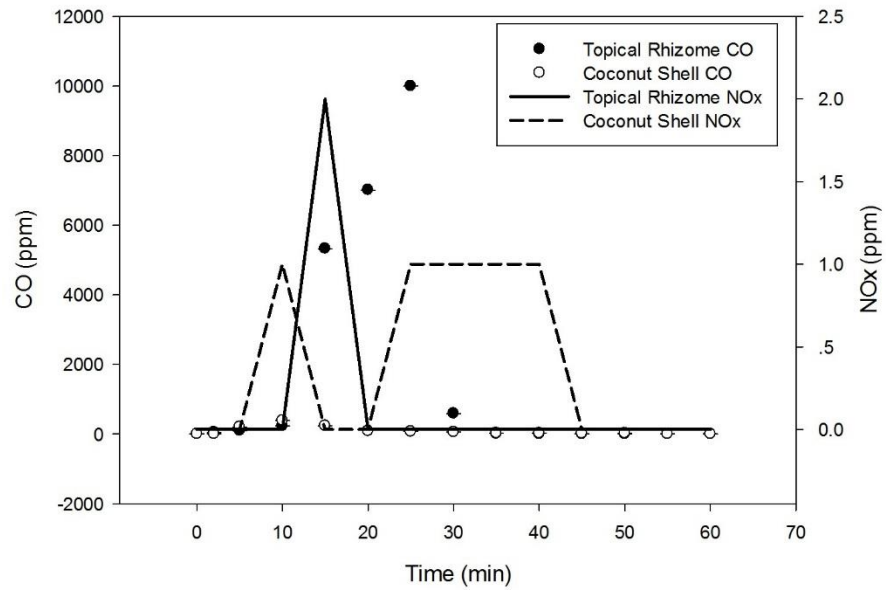
จากการทดลองพบว่า เมื่อการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่ใช้ในการทดสอบนั้น จะเกิดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ก่อนที่จะเกิดออกไซด์ของไนโตรเจน ซึ่งรายละเอียดจะแสดงในหัวข้อต่อไป ดังนี้

4.4.1 ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ชีวมวลและถ่านหินที่อากาศมากเกินพอ 100, 150 และ 200 เปอร์เซ็นต์ของออกซิเจน

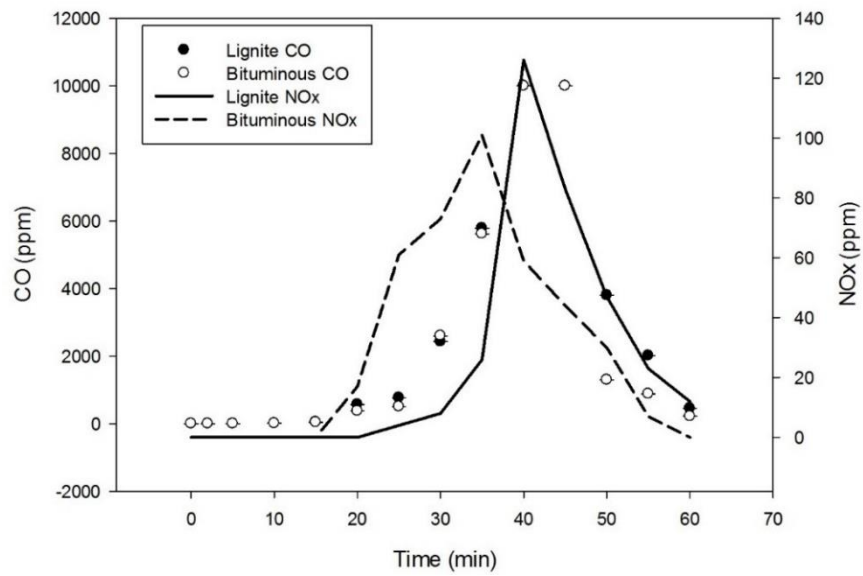
จากการทดลองพบว่าเมื่อทำการเผาไหม้แกลบและกากอ้อยก่อให้เกิดก๊าซคาร์บอนในปริมาณที่สูงเมื่อเทียบกับกะลามะพร้าวและเห้ง้ามันสำปะหลัง เนื่องมาจากกากอ้อยและแกลบมีปริมาณที่มากกว่าเห้ง้ามันสำปะหลังและกะลามะพร้าวที่น้ำหนักเท่ากัน และการเผาไหม้ถ่านหินเพียงอย่างเดียว นั้นทำให้เกิดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ในปริมาณที่สูงอยู่แล้วเนื่องจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ของถ่านหิน จึงทำให้เกิดคาร์บอนมอนอกไซด์ จากการเผาไหม้เห้ง้ามันสำปะหลังและกะลามะพร้าวที่สัดส่วนอากาศมากเกินพอร้อยละ 100 เนื่องจากค่าความร้อนที่สูงและองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นสารอินทรีย์ระเหยได้ดังที่แสดงในตารางที่ 4.2 การเผาไหม้จึงเกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์ และเกิดคาร์บอนมอนอกไซด์น้อย ดังที่แสดงในรูปที่ 4.73 - 4.81



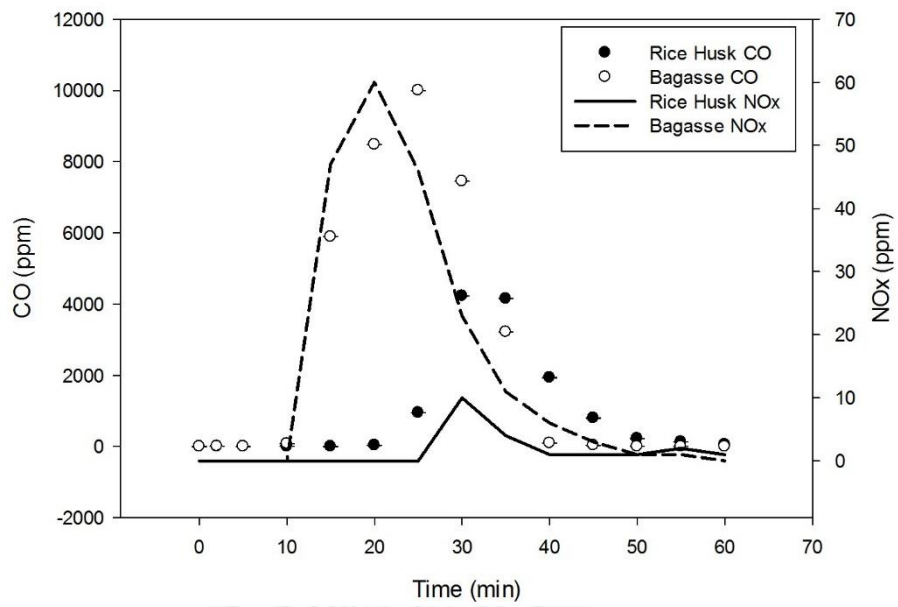
รูปที่ 4. 73 การเกิดคาร์บอนมอนอกไซด์ของแกลบและกากอ้อย ที่อากาศมากเกินพอร้อยละ 100 ของออกซิเจน



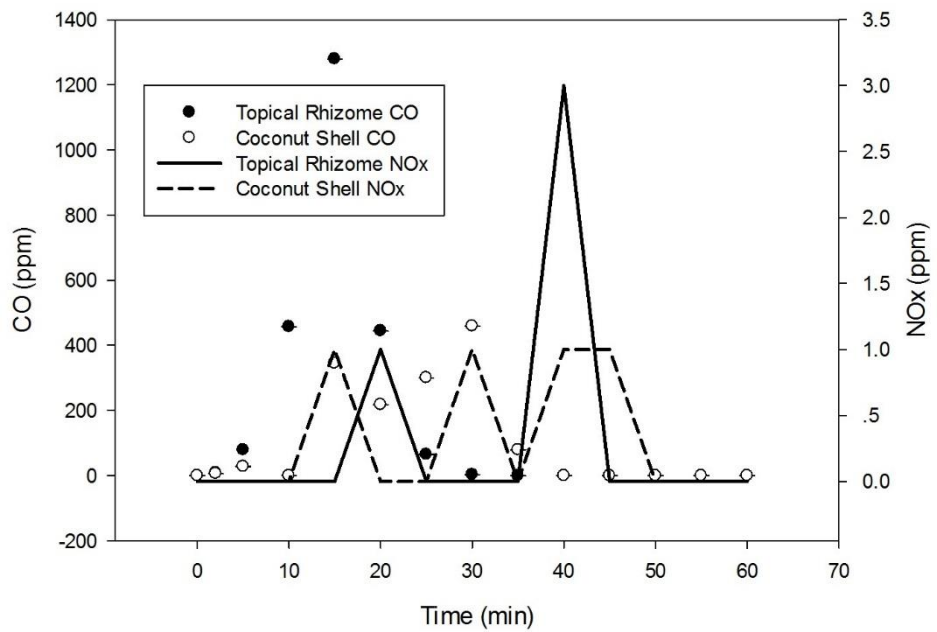
รูปที่ 4. 74 การเกิดคาร์บอนมอนอกไซด์ของเหง้ามันสำปะหลังและ
กะลามะพร้าว ที่อากาศมากเกินพอร้อยละ 100 ของออกซิเจน



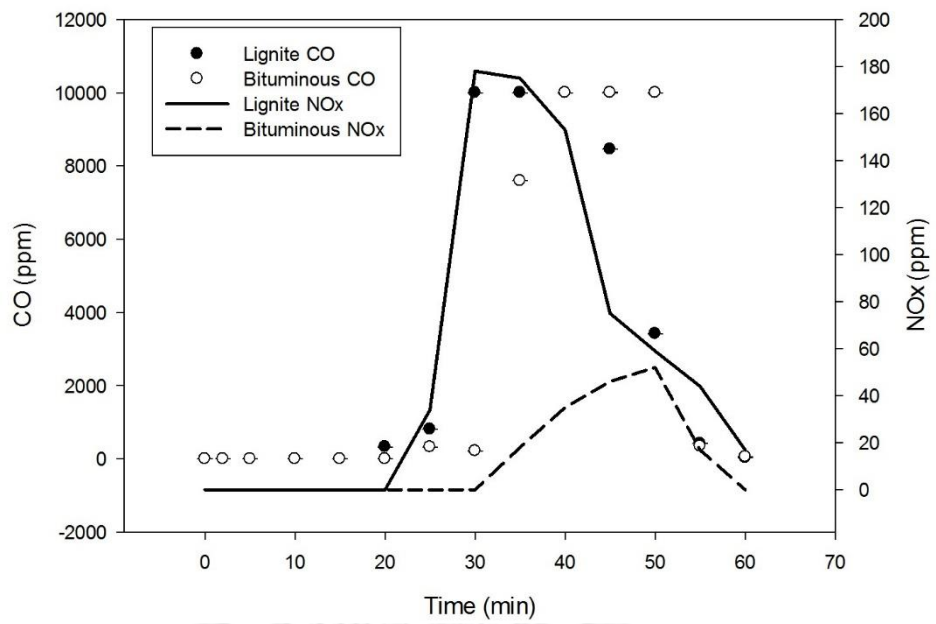
รูปที่ 4. 75 การเกิดคาร์บอนมอนอกไซด์ของลิกไนต์และบิทูมินัส ที่
อากาศมากเกินพอร้อยละ 100 ของออกซิเจน



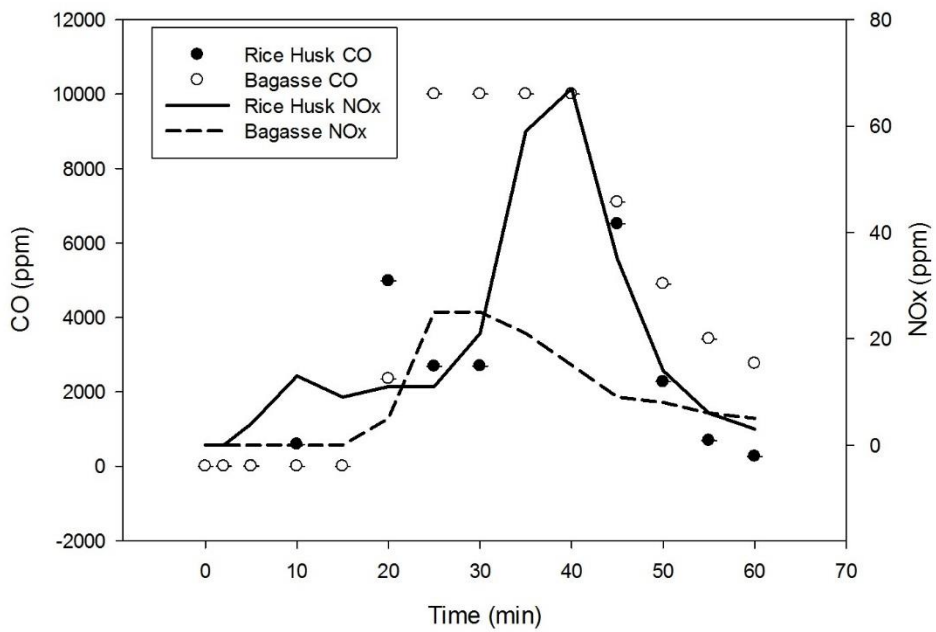
รูปที่ 4. 76 การเกิดคาร์บอนมอนอกไซด์ของแกลบและกากอ้อย ที่อากาศมากเกินพอร้อยละ 150 ของออกซิเจน



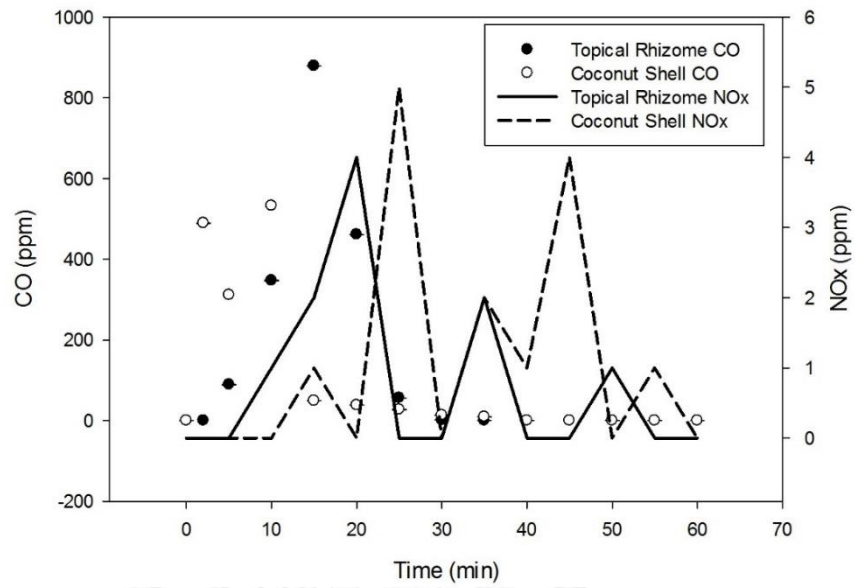
รูปที่ 4. 77 การเกิดคาร์บอนมอนอกไซด์ของเหง้ามันสำปะหลังและกะลามะพร้าว ที่อากาศมากเกินพอร้อยละ 150 ของออกซิเจน



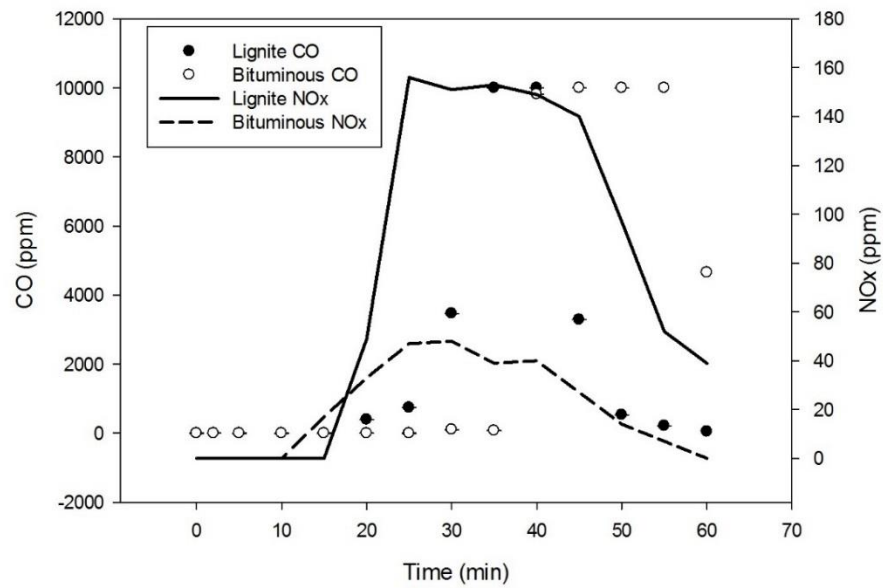
รูปที่ 4. 78 การเกิดคาร์บอนมอนอกไซด์ของลิกไนต์และบิทูมินัส ที่อากาศมากเกินพอร้อยละ 150 ของออกซิเจน



รูปที่ 4. 79 การเกิดคาร์บอนมอนอกไซด์ของแกลบและกากอ้อย ที่อากาศมากเกินพอร้อยละ 200 ของออกซิเจน



รูปที่ 4. 80 การเกิดคาร์บอนมอนอกไซด์ของเหง้ามันสำปะหลังและ
กะลามะพร้าว ที่อากาศมากเกินพอร้อยละ 200 ของออกซิเจน



รูปที่ 4. 81 การเกิดคาร์บอนมอนอกไซด์ของลิกไนต์และบิทูมินัส ที่
อากาศมากเกินพอร้อยละ 200 ของออกซิเจน

จากการทดลองพบว่าที่สภาวะอากาศมากเกินพอ 100 เปอร์เซ็นต์ของออกซิเจนมีปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์สูงในเชื้อเพลิงทุกชนิด แต่เมื่อมีการเพิ่มปริมาณอากาศเพิ่มมากขึ้นที่ 150 และ 200 เปอร์เซ็นต์ของออกซิเจนพบว่า การเกิดคาร์บอนมอนอกไซด์มีแนวโน้มลดลงยกเว้นที่ถ่านหิน ยังคงมีคาร์บอนมอนอกไซด์สูงและเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับที่เกิดออกไซด์ของไนโตรเจนพบว่า คาร์บอนมอนอกไซด์ที่เกิดขึ้นไม่มีผลกระทบต่อที่เกิดออกไซด์ของไนโตรเจน ((Varol, Atimtay et al. 2014)

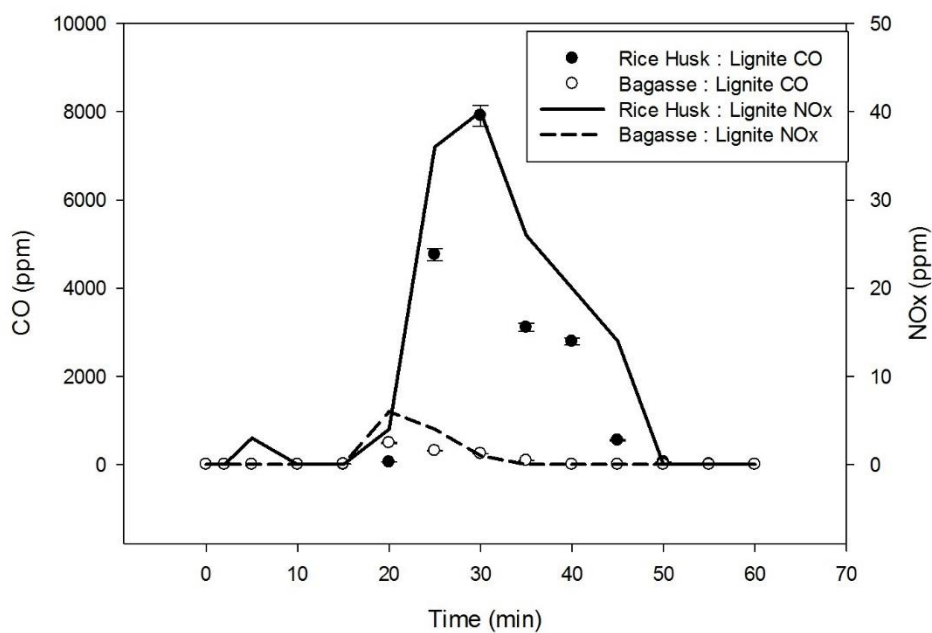
4.4.2 ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ชีวมวลร่วมกับถ่านหินที่อากาศมากเกินพอ 100, 150 และ 200 เปอร์เซ็นต์ของออกซิเจน

1) ที่สัดส่วนชีวมวลต่อถ่านหิน 80:20

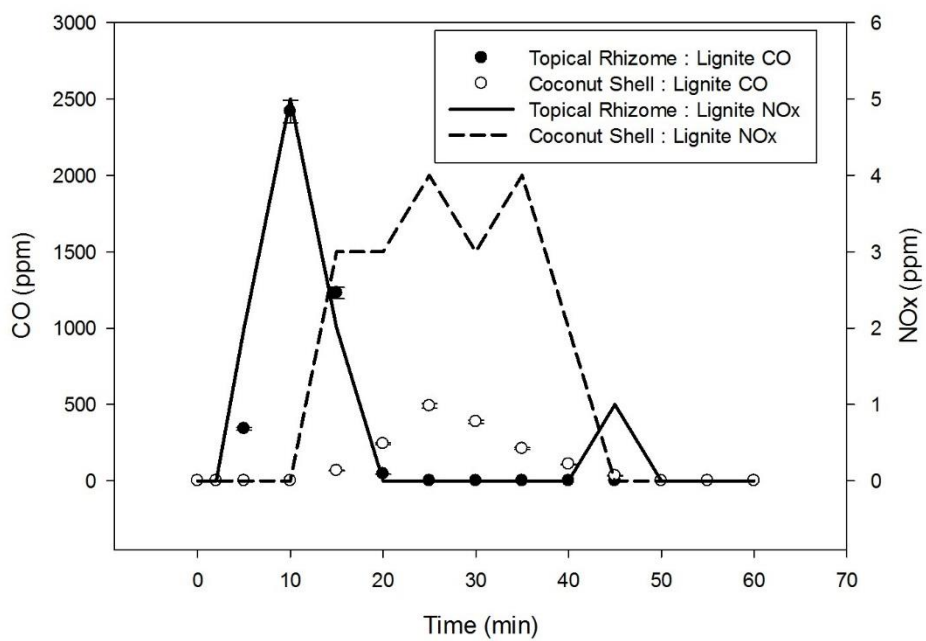
จากการเผาไหม้ถ่านหินร่วมกับชีวมวลพบว่าปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์มีปริมาณลดลงในถ่านหินทั้งสองชนิด แต่พบว่าบิโทมินัสเมื่อเผาไหม้ร่วมกับแกลบนั้นมีปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ สูงขึ้นเนื่องจากแกลบมีปริมาณที่มากเมื่อเทียบกับชีวมวลชนิดอื่นๆที่ใช้ในการทดสอบในน้ำหนักที่เท่ากัน และองค์ประกอบทางเคมีของบิโทมินัสที่มีองค์ประกอบที่เป็นคาร์บอนสูงที่สุด แต่เมื่อมีการเพิ่มปริมาณอากาศเข้าไปแล้วพบว่าเกิดการเกิดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ลดลง และการเผาไหม้กากอ้อยร่วมกับถ่านหินบิโทมินัสพบว่า เมื่อปริมาณอากาศเพิ่มมากขึ้นพบว่าก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์นั้นมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งอาจเกิดลักษณะของชีวมวลชนิดนี้ที่มีลักษณะเป็นเส้นใย เมื่อทำการป้อนเข้าไปสู่ห้องเผาไหม้อาจทำให้การกระจายตัวอากาศไม่ทั่วถึงจึงทำให้เกิดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์เพิ่มมากขึ้น จากการเผาถ่านหินทั้งสองชนิดนั้นร่วมกับแห้งมันและกะลามะพร้าว นั้นช่วยทำให้การเกิดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์มีแนวโน้มลดลงได้ ดังที่แสดงในรูปที่ 4.73 - 4.81 นอกจากนี้เมื่อนำผลการเกิดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ได้ไปเทียบกับการเกิดออกไซด์ของไนโตรเจน เห็นได้วก่อนที่จะเกิดออกไซด์ของไนโตรเจนนั้นจะเกิดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ขึ้นก่อนเสมอ แต่การเกิดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์นั้นไม่มีผลกระทบต่อที่เกิดออกไซด์ของไนโตรเจนไม่ว่าปริมาณของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์จะมากหรือน้อยจะไม่มีผลกระทบต่อปริมาณการเกิดออกไซด์ของไนโตรเจน (Varol, Atimtay et al. 2014)

1.1) การเผาไหม้ชีวมวลร่วมกับลิกไนต์

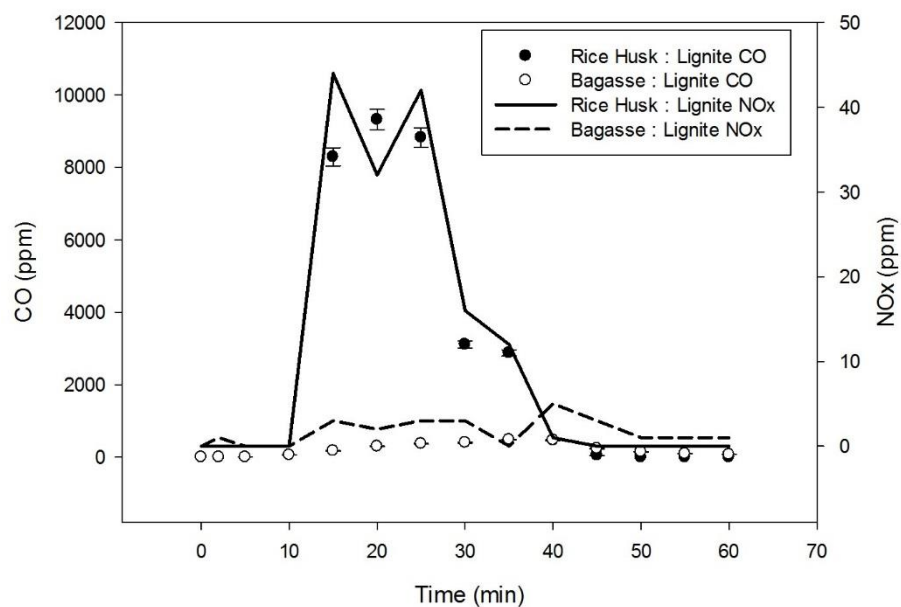
จากการทดลองพบว่า การเผาไหม้แกลบและกากอ้อยเกิดคาร์บอนมอนอกไซด์มากกว่าการเผาไหม้เหง้ามันสำปะหลังและกะลามะพร้าวเนื่องจากองค์ประกอบที่เป็นคาร์บอนคงตัวของแกลบและกากอ้อยมากกว่าเหง้ามันสำปะหลังและกะลามะพร้าวทำให้ต้องการปริมาณอากาศมากกว่าในการเผาไหม้ให้สมบูรณ์ได้ยากกว่าจึงทำให้เกิดคาร์บอนมอนอกไซด์ได้มากกว่า แต่เมื่อทำการเพิ่มสัดส่วนของอากาศพบว่า การเกิดคาร์บอนมอนอกไซด์มีแนวโน้มลดลง ดังที่แสดงในรูปที่ 4.82 - 4.87



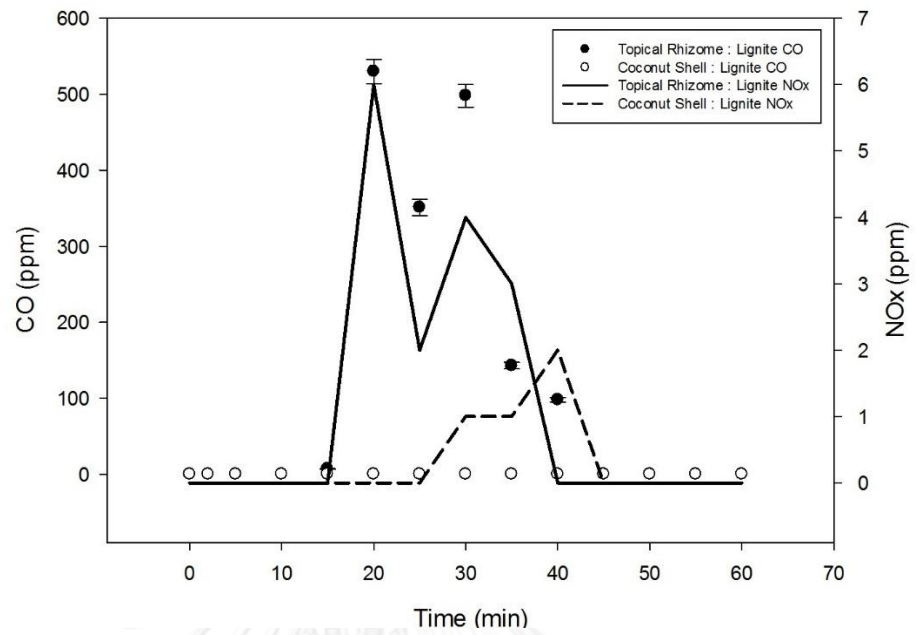
รูปที่ 4. 82 การเกิดคาร์บอนมอนอกไซด์ของแกลบและกากอ้อย ที่อากาศมากเกินพอร้อยละ 100 ของออกซิเจน



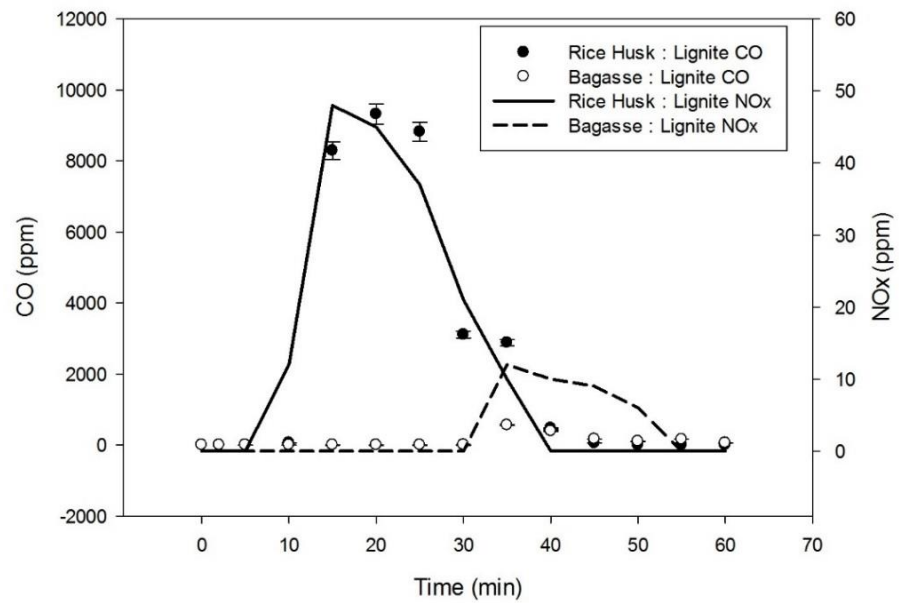
รูปที่ 4. 83 การเกิดคาร์บอนมอนอกไซด์ของเหง้ามันสำปะหลังและ
กะลามะพร้าว ที่อากาศมากเกินพอร้อยละ 100 ของออกซิเจน



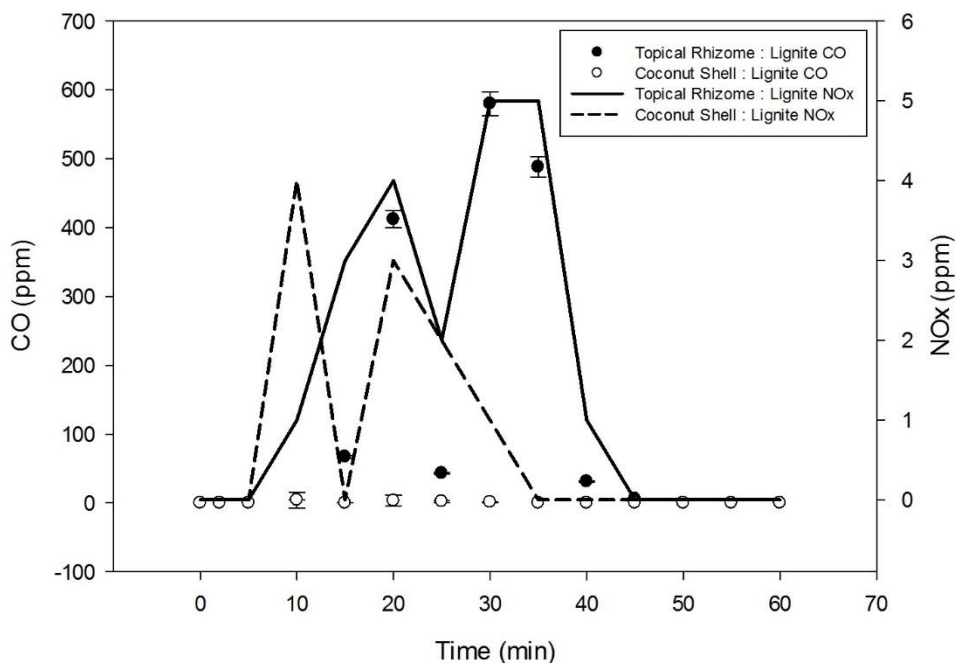
รูปที่ 4. 84 การเกิดคาร์บอนมอนอกไซด์ของแกลบและกากอ้อย ที่
อากาศมากเกินพอร้อยละ 150 ของออกซิเจน



รูปที่ 4. 85 การเกิดคาร์บอนมอนอกไซด์ของเหง้ามันสำปะหลังและ
กะลามะพร้าว ที่อากาศมากเกินพอร้อยละ 150 ของออกซิเจน



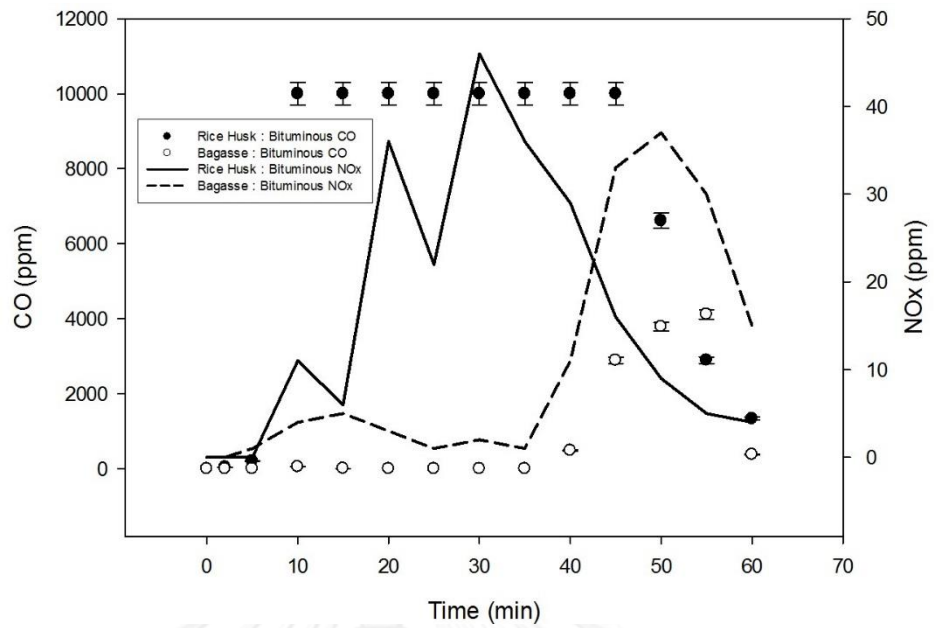
รูปที่ 4. 86 การเกิดคาร์บอนมอนอกไซด์ของแกลบและกากอ้อย ที่
อากาศมากเกินพอร้อยละ 200 ของออกซิเจน



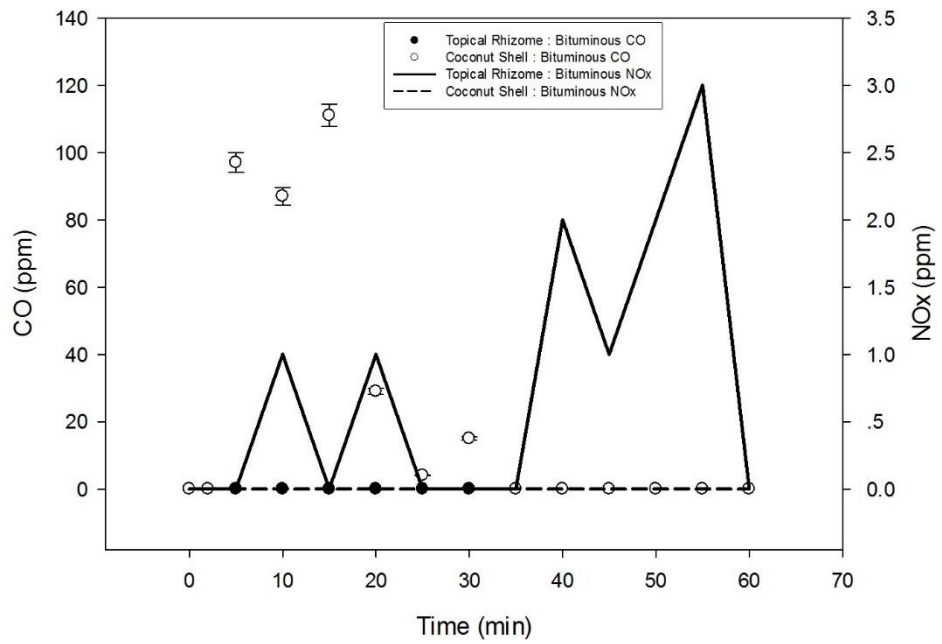
รูปที่ 4. 87 การเกิดคาร์บอนมอนอกไซด์ของเหง้ามันสำปะหลังและ
กะลามะพร้าว ที่อากาศมากเกินพอร้อยละ 20 ของออกซิเจน

1.2) การเผาไหม้ชีวมวลร่วมกับปิโตรมินัส

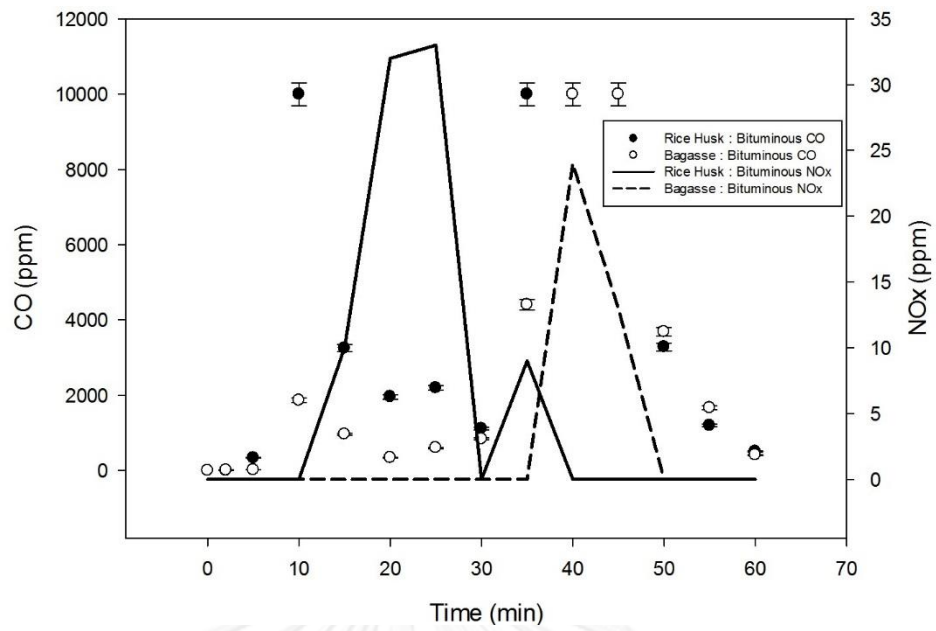
จากการทดลองพบว่า การเผาไหม้เหง้ามันสำปะหลังเกิดคาร์บอนมอนอกไซด์น้อย เนื่องจากในสัดส่วนของเชื้อเพลิงมีองค์ประกอบเป็นชีวมวลมากกว่าถ่านหินจึงทำให้คุณสมบัติของเชื้อเพลิงใกล้เคียงกับชีวมวล (Varol, Atimtay et al. 2010) ซึ่งในเหง้ามันสำปะหลังและกะลามะพร้าวมีองค์ประกอบเป็นคาร์บอนคงตัวน้อยเมื่อเทียบกับแกลบและกากอ้อย ดังนั้นเหง้ามันสำปะหลังและกะลามะพร้าวจึงสามารถเผาไหม้สมบูรณ์ได้ง่ายกว่าแกลบและกากอ้อย คาร์บอนมอนอกไซด์จึงเกิดน้อยกว่า ในส่วนของการเผาไหม้แกลบและกากอ้อยเกิดเป็นคาร์บอนมอนอกไซด์ได้มากกว่าเหง้ามันสำปะหลังและกะลามะพร้าวเผาไหม้สมบูรณ์ได้ยากกว่าเนื่องจากองค์ประกอบที่เป็นคาร์บอนคงตัวมากกว่า จึงทำให้เกิดคาร์บอนมอนอกไซด์ได้มากกว่า แต่เมื่อทำการเพิ่มสัดส่วนของอากาศพบว่า การเกิดคาร์บอนมอนอกไซด์มีแนวโน้มลดลง ดังที่แสดงในรูปที่ 4.88 - 4.93



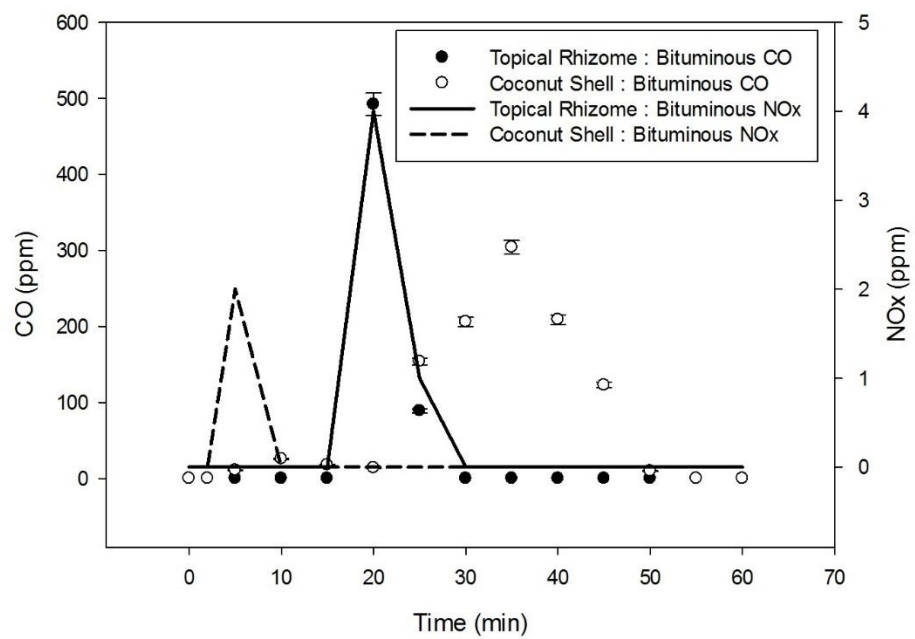
รูปที่ 4. 88 การเกิดคาร์บอนมอนอกไซด์ของแกลบและกากอ้อย ที่อากาศมากเกินพอร์ร้อยละ 100 ของออกซิเจน



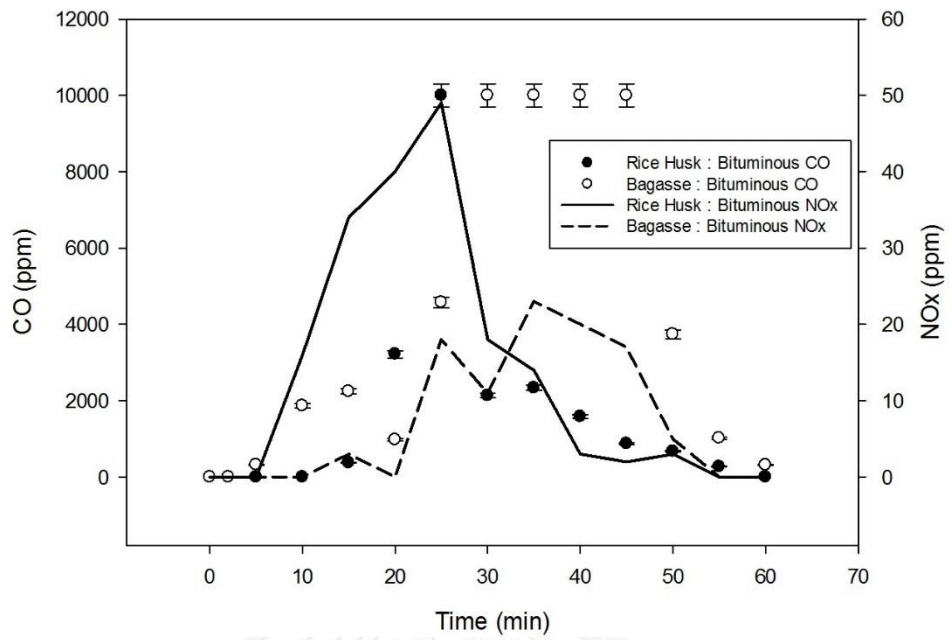
รูปที่ 4. 89 การเกิดคาร์บอนมอนอกไซด์ของเหง้ามันสำปะหลังและกะลามะพร้าว ที่อากาศมากเกินพอร์ร้อยละ 100 ของออกซิเจน



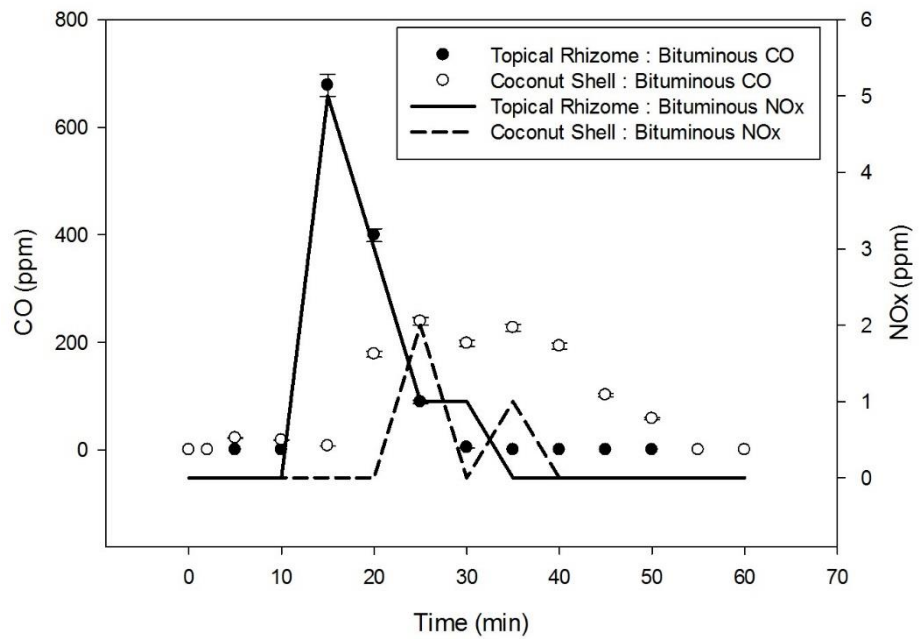
รูปที่ 4. 90 การเกิดคาร์บอนมอนอกไซด์ของแกลบและกากอ้อย ที่อากาศมากเกินพอร้อยละ 150 ของออกซิเจน



รูปที่ 4. 91 การเกิดคาร์บอนมอนอกไซด์ของเหง้ามันสำปะหลังและกะลามะพร้าว ที่อากาศมากเกินพอร้อยละ 150 ของออกซิเจน



รูปที่ 4. 92 การเกิดคาร์บอนมอนอกไซด์ของแกลบและกากอ้อย ที่อากาศมากเกินพอร้อยละ 200 ของออกซิเจน



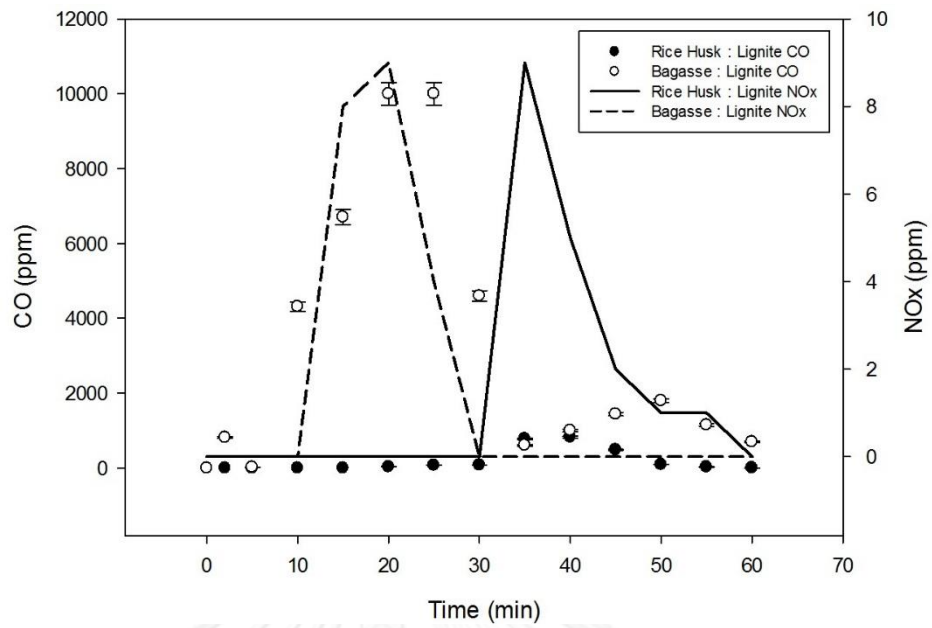
รูปที่ 4. 93 การเกิดคาร์บอนมอนอกไซด์ของเหง้ามันสำปะหลังและกะลามะพร้าว ที่อากาศมากเกินพอร้อยละ 200 ของออกซิเจน

2) ที่สัดส่วนชีวมวลต่อถ่านหิน 50:50

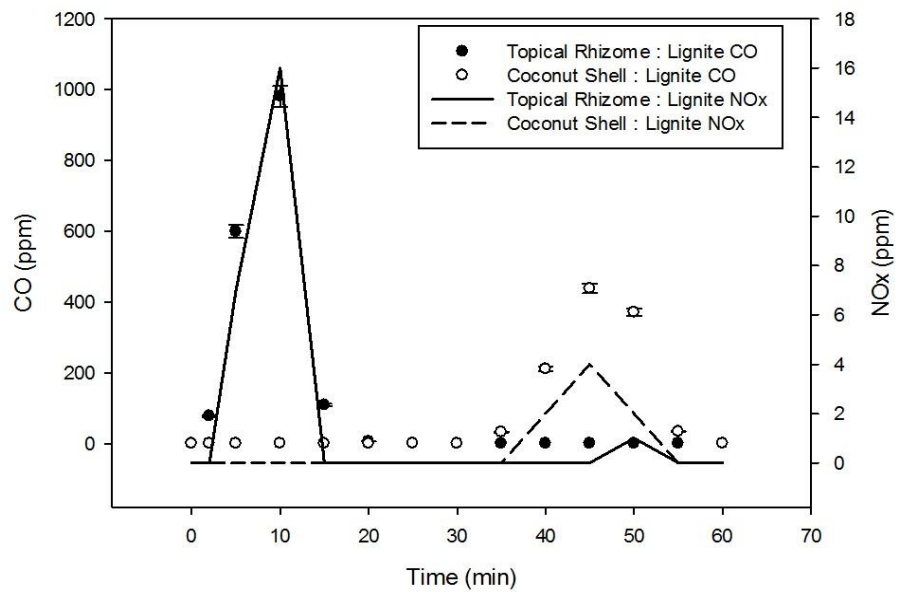
จากการทดลองพบว่าการเผาไหม้ถ่านหินร่วมกับชีวมวลในสัดส่วนอากาศที่มากขึ้นมีแนวโน้มการเกิดการเกิดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์น้อยลง เนื่องจากปริมาณออกซิเจนเพิ่มขึ้นจึงทำให้เกิดการเผาไหม้สมบูรณ์มากขึ้น ยกเว้นการเผาไหม้ร่วมกับของแกลบและลิกไนต์นั้นเกิดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์เพิ่มมากขึ้นที่สัดส่วนอากาศมากเกินไปร้อยละ 150 เนื่องจากองค์ประกอบทางเคมีของแกลบมีองค์ประกอบเป็นคาร์บอนคงตัวสูงและลิกไนต์ที่มีองค์ประกอบทางเคมีเป็นคาร์บอนคงตัวสูง ดังนั้นจึงเกิดการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์และการเกิดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ลดลงที่สัดส่วนอากาศมากเกินไปร้อยละ 200 เนื่องจากปริมาณออกซิเจนเพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าการเกิดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์มากขึ้นจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงชนิดอื่นๆ เนื่องจากปริมาณของถ่านหินที่ใช้มีจำนวนมากขึ้นและในถ่านหินนั้นยังมีองค์ประกอบหลักเป็นคาร์บอนคงตัวจึงทำให้ปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์เพิ่มสูงขึ้นได้เนื่องจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์

2.1) การเผาไหม้ชีวมวลร่วมกับลิกไนต์

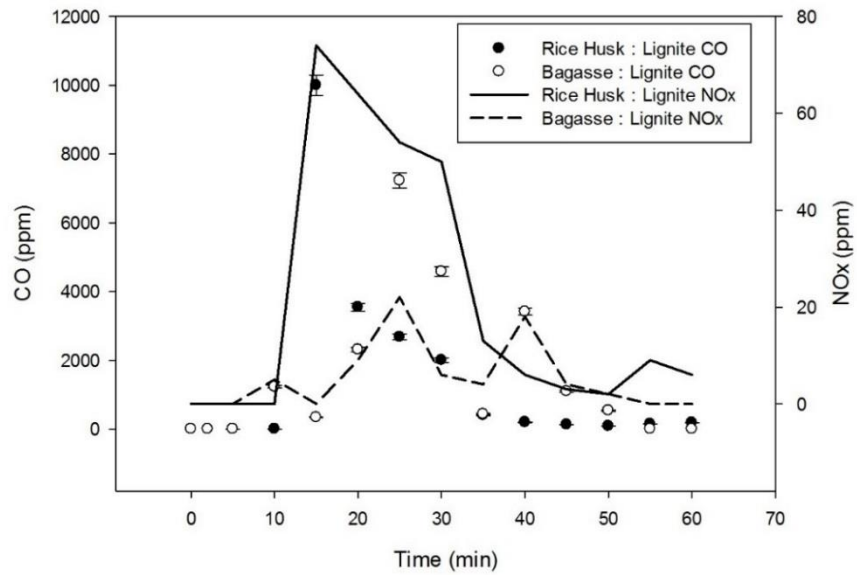
จากการทดลองพบว่า ที่สัดส่วนอากาศมากเกินไปร้อยละ 100 ของออกซิเจนกากอ้อยมีปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์สูงที่สุด ที่สัดส่วนอากาศมากเกินไปร้อยละ 150 ของออกซิเจนแกลบมีปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์สูงที่สุด และที่สัดส่วนอากาศมากเกินไปร้อยละ 200 ของอากาศมากเกินไปพบว่า กากอ้อยมีปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์สูงที่สุด เนื่องมาจากแกลบและกากอ้อยมีองค์ประกอบเป็นคาร์บอนคงตัวมากกว่าเหงำมันสำปะหลังและกะลามะพร้าว ดังนั้นเมื่อนำมาเผาไหม้ร่วมกับลิกไนต์แล้วแกลบและกากอ้อยจึงมีปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์สูงกว่าการเผาไหม้เหงำมันสำปะหลังและกะลามะพร้าวร่วมกันกับลิกไนต์ เพราะต้องใช้ปริมาณออกซิเจนมากกว่า ดังที่แสดงในรูปที่ 4.94 - 4.99



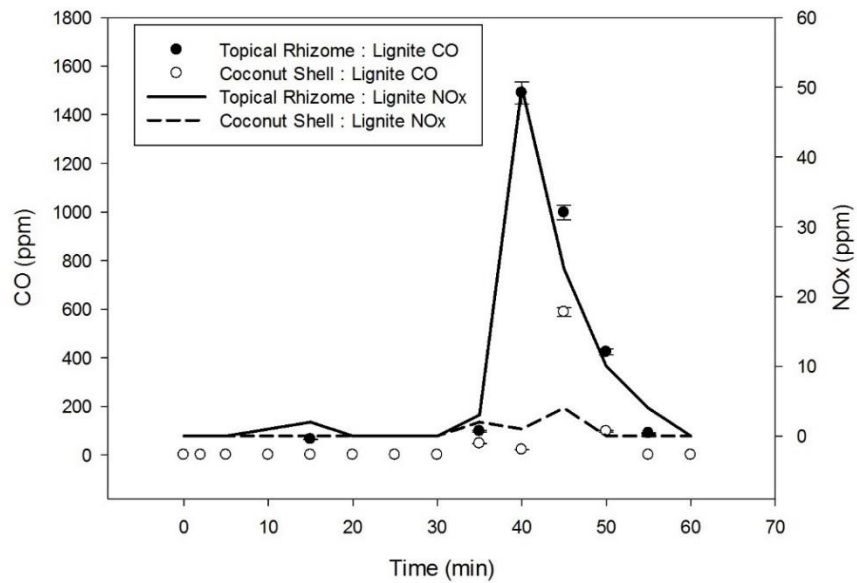
รูปที่ 4. 94 การเกิดคาร์บอนมอนอกไซด์ของแกลบและกากอ้อย ที่อากาศมากเกินพอร้อยละ 100 ของออกซิเจน



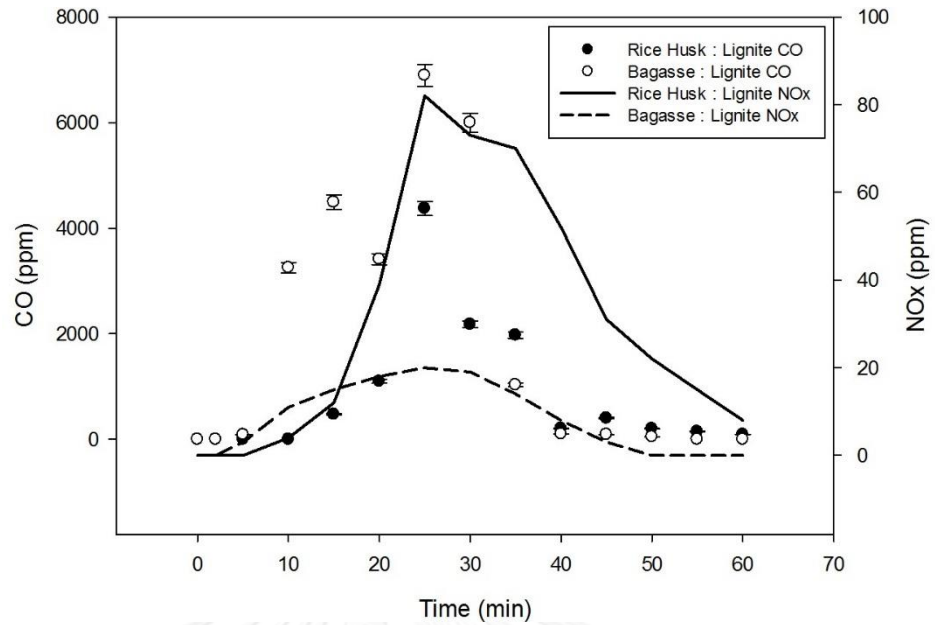
รูปที่ 4. 95 การเกิดคาร์บอนมอนอกไซด์ของเหง้ามันสำปะหลังและกะลามะพร้าว ที่อากาศมากเกินพอร้อยละ 100 ของออกซิเจน



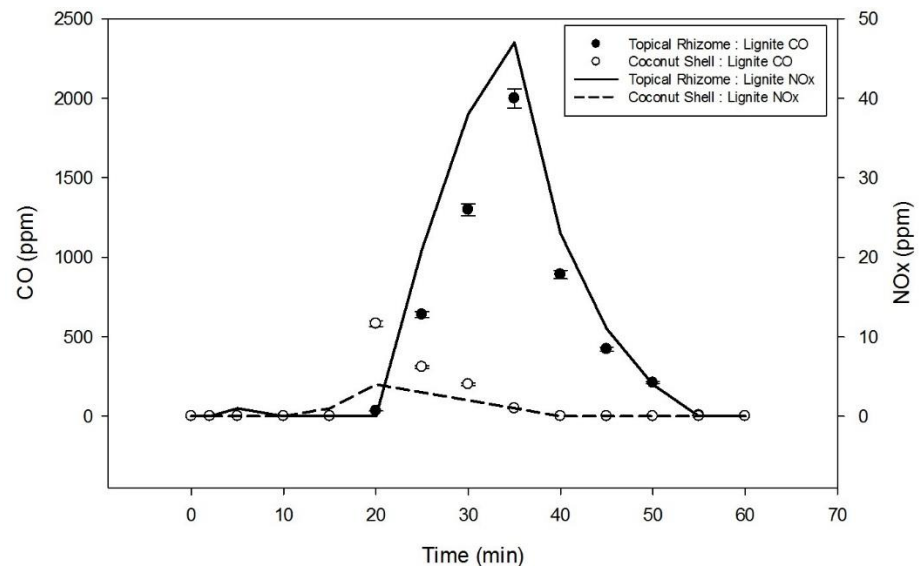
รูปที่ 4. 96 การเกิดคาร์บอนมอนอกไซด์ของแกลบและกากอ้อย ที่
อากาศมากเกินพอร้อยละ 150 ของออกซิเจน



รูปที่ 4. 97 การเกิดคาร์บอนมอนอกไซด์ของเหง้ามันสำปะหลังและ
กะลามะพร้าว ที่อากาศมากเกินพอร้อยละ 150 ของออกซิเจน



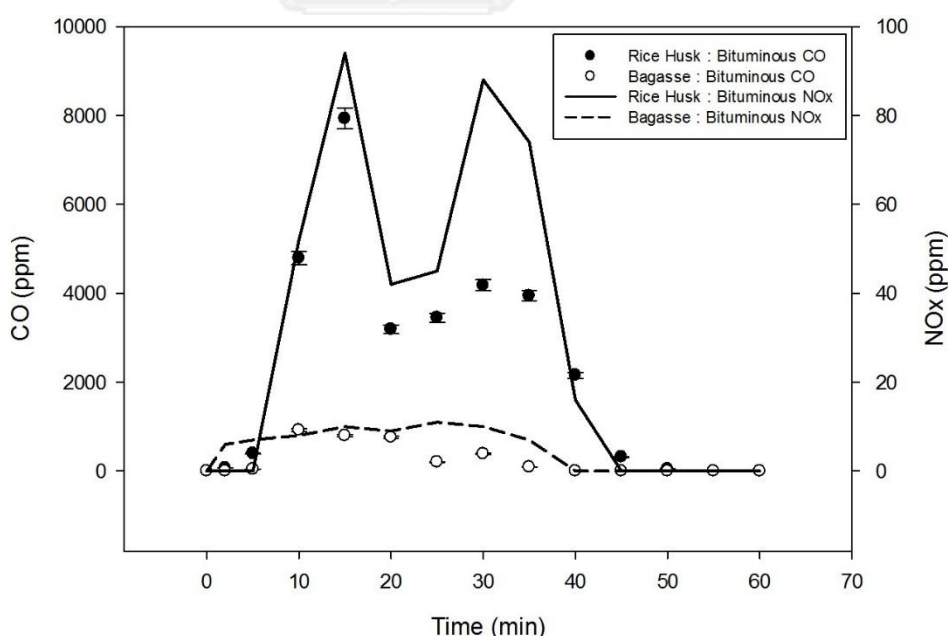
รูปที่ 4. 98 การเกิดคาร์บอนมอนอกไซด์ของแกลบและกากอ้อย ที่อากาศมากเกินพอร้อยละ 200 ของออกซิเจน



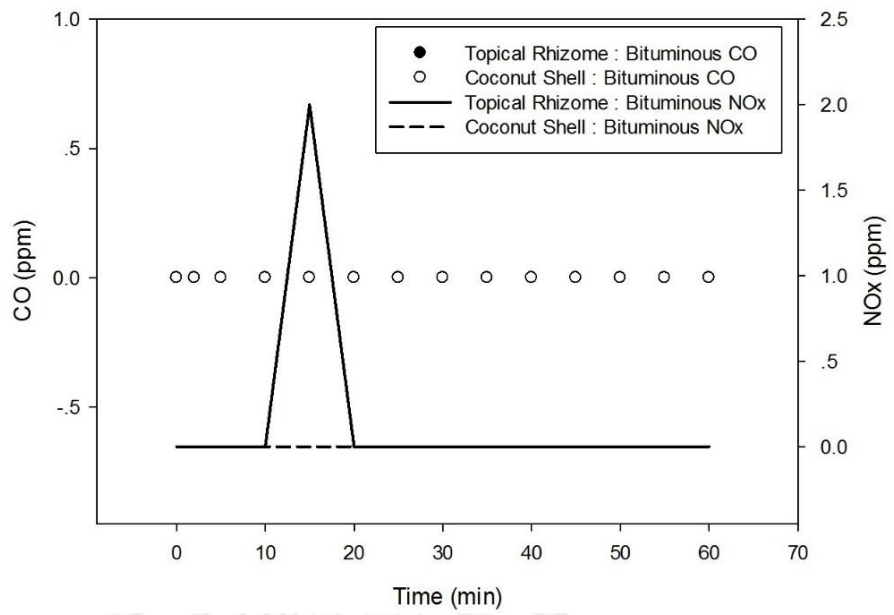
รูปที่ 4. 99 การเกิดคาร์บอนมอนอกไซด์ของเหง้ามันสำปะหลังและกะลามะพร้าว ที่อากาศมากเกินพอร้อยละ 200 ของออกซิเจน

2.2) การเผาไหม้ชีวมวลร่วมกับปิโตรมินัส

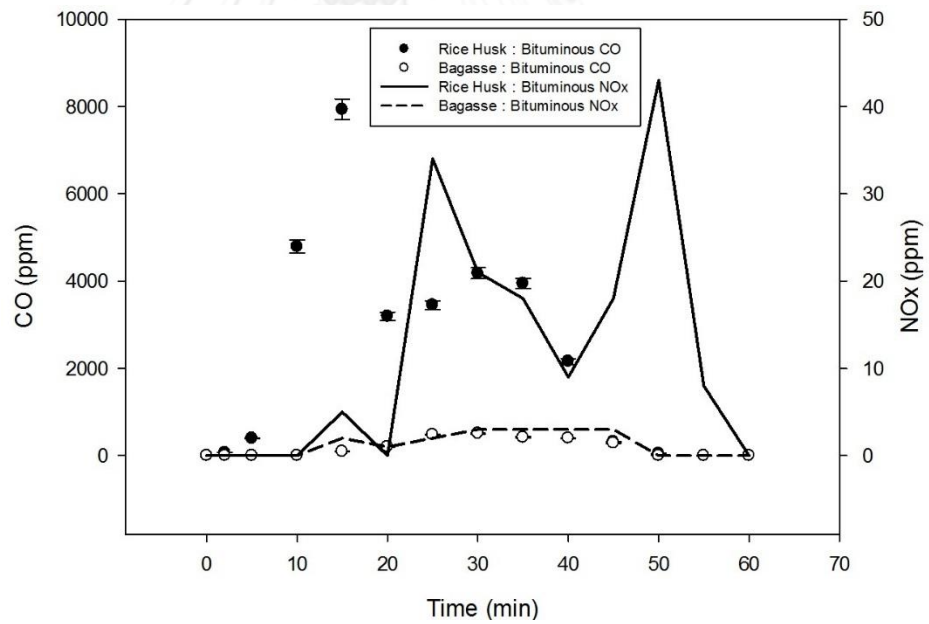
จากการทดลองพบว่า ที่สัดส่วนอากาศมากเกินพอร้อยละ 100 ของออกซิเจนแกลบมีปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์สูงสุด ที่สัดส่วนอากาศมากเกินพอร้อยละ 150 ของออกซิเจนแกลบมีปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์สูงสุด และที่สัดส่วนอากาศมากเกินพอร้อยละ 200 ของอากาศมากเกินพอพบว่าแกลบมีปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์สูงสุดในตัวอย่างชีวมวลที่ใช้เป็นเชื้อเพลิง และที่สัดส่วนเชื้อเพลิงชีวมวลต่อถ่านหินเป็นถ่านหินมากขึ้นจึงต้องการอากาศปริมาณที่มากขึ้น ดังนั้นการเผาไหม้ในช่วงแรกเริ่มแรกของการเผาไหม้เกิดเป็นคาร์บอนมอนอกไซด์มากขึ้น ในส่วนการเผาไหม้ร่วมกันของเห้งมันสำปะหลังกับลิกไนต์ และ การเผาไหม้ร่วมกันของกะลามะพร้าวกับลิกไนต์ ที่สัดส่วนอากาศมากเกินพอร้อยละ 100 ไม่เกิดเป็นคาร์บอนมอนอกไซด์เนื่องจาก ลักษณะองค์ประกอบของชีวมวลมีคาร์บอนคงตัวน้อยกว่า แกลบและกากอ้อย จึงใช้ออกซิเจนในการเผาไหม้สมบูรณ์น้อยกว่าแกลบและกากอ้อย จึงเกิดเป็นคาร์บอนมอนอกไซด์น้อยกว่า การเผาไหม้กะลามะพร้าวร่วมกับปิโตรมินัสที่สัดส่วนอากาศมากเกินพอร้อยละ 150 มีความชื้นน้อยกว่าเห้งมันสำปะหลังจึงเกิดเป็นคาร์บอนมอนอกไซด์ น้อยกว่า เนื่องจากกระบวนการเผาไหม้ไม่ต้องสูญเสียพลังงานในการกำจัดความชื้นออกจากเชื้อเพลิง ดังที่แสดงในรูปที่ 4.100 - 4.105



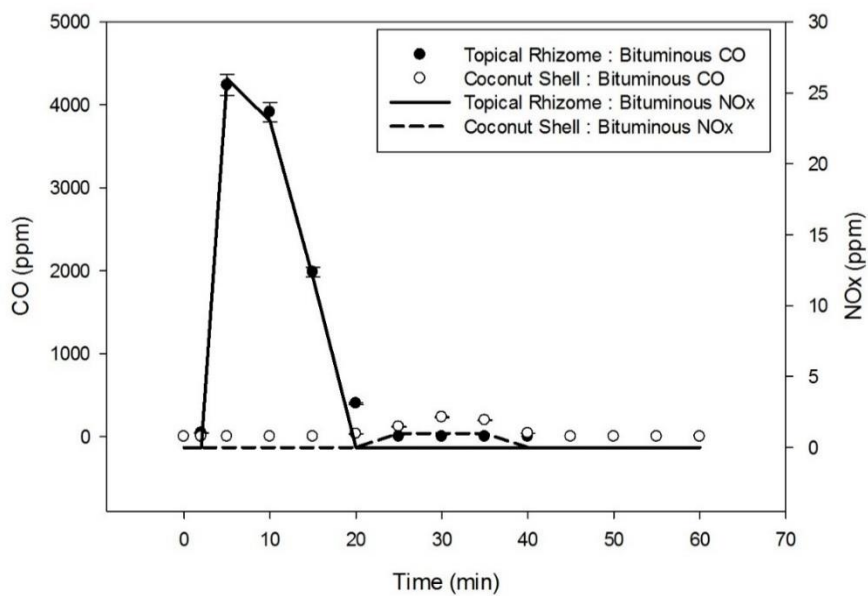
รูปที่ 4. 100 การเกิดคาร์บอนมอนอกไซด์ของแกลบและกากอ้อย ที่อากาศมากเกินพอร้อยละ 100 ของออกซิเจน



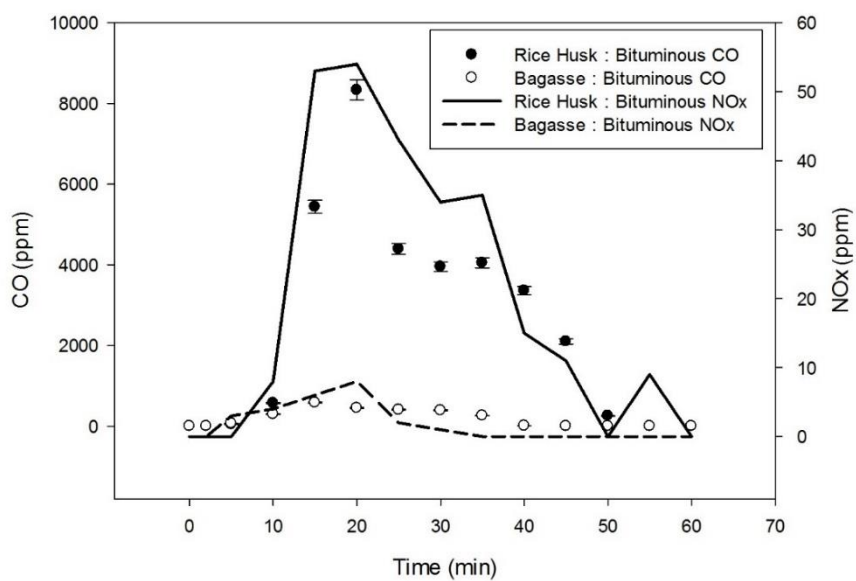
รูปที่ 4. 101 การเกิดคาร์บอนมอนอกไซด์ของเหง้ามันสำปะหลังและ
กะลามะพร้าว ที่อากาศมากเกินพอร้อยละ 100 ของออกซิเจน



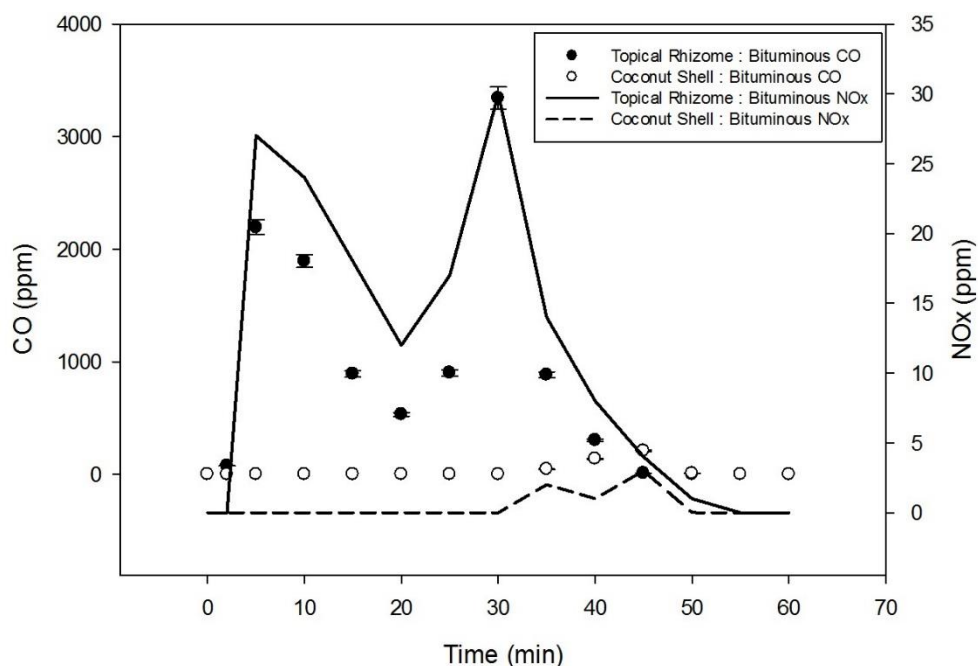
รูปที่ 4. 102 การเกิดคาร์บอนมอนอกไซด์ของแกลบและกากอ้อย ที่อากาศ
มากเกินพอร้อยละ 150 ของออกซิเจน



รูปที่ 4. 103 การเกิดคาร์บอนมอนอกไซด์ของเหง้ามันสำปะหลังและ
กะลามะพร้าว ที่อากาศมากเกินพอร้อยละ 15 ของออกซิเจน



รูปที่ 4. 104 การเกิดคาร์บอนมอนอกไซด์ของแกลบและกากอ้อย
ที่อากาศมากเกินพอร้อยละ 20 ของออกซิเจน



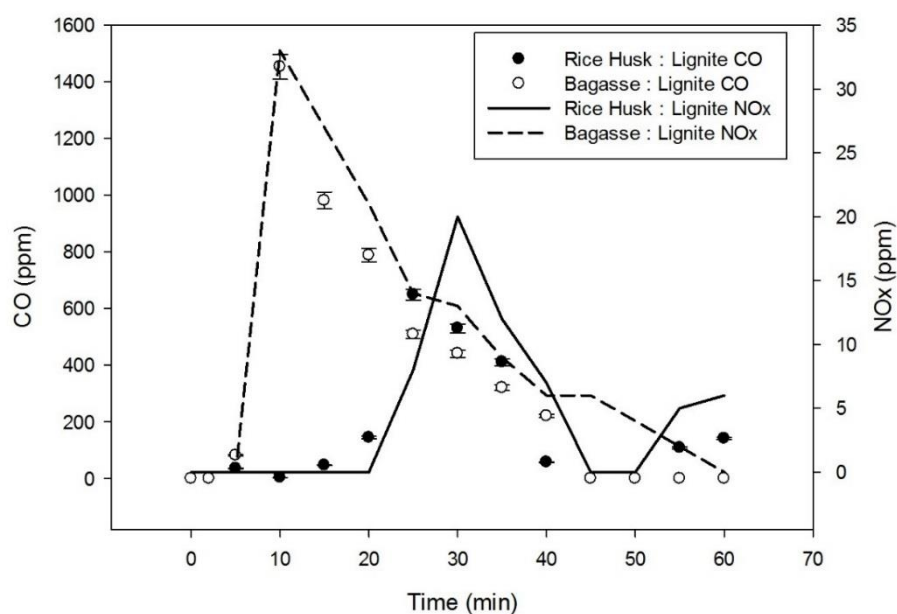
รูปที่ 4. 105 การเกิดคาร์บอนมอนอกไซด์ของเหง้ามันสำปะหลังและ
กะลามะพร้าว ที่อากาศมากเกินพอร้อยละ 200 ของออกซิเจน

3) ที่สัดส่วนชีวมวลต่อถ่านหิน 20:80

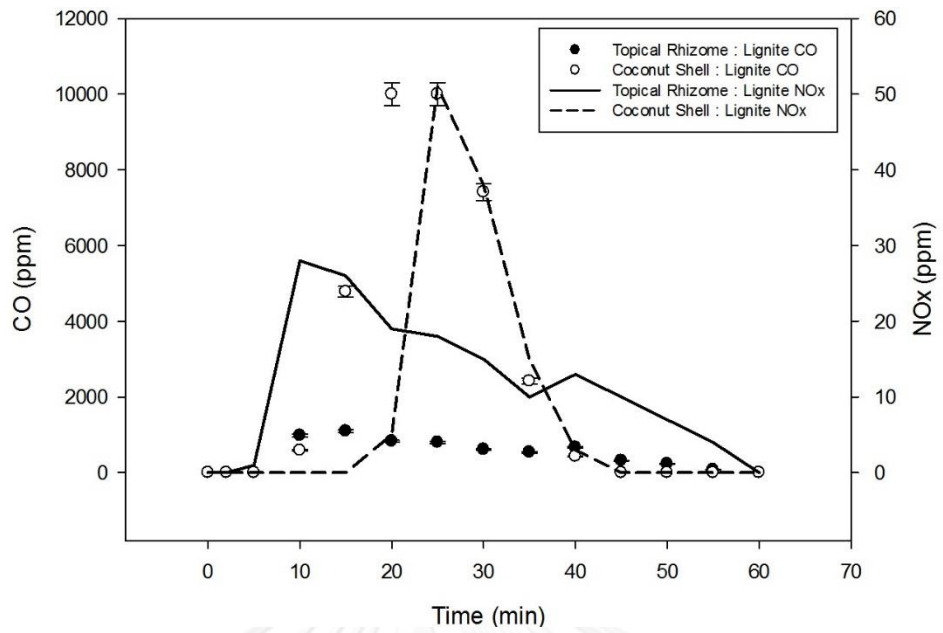
จากการทดลองพบว่าการเผาไหม้ถ่านหินร่วมกับชีวมวลในสัดส่วนอากาศที่มากขึ้นมีแนวโน้มการเกิดการเกิดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์น้อยลง ยกเว้นการเผาไหม้ร่วมกันของแกลบและลิกไนต์ที่สัดส่วนอากาศมากเกินพอที่ร้อยละ 100 จะเกิดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์น้อยกว่าที่มีสัดส่วนอากาศมากเกินพอที่ร้อยละ 150 และร้อยละ 200 และการเผาไหม้ร่วมกันระหว่างกะลามะพร้าวและลิกไนต์ ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่เกิดขึ้นนั้นมีค่า สูงสุดเท่ากันทั้งสามสัดส่วนอากาศมากเกินพอแต่ค่าสูงสุดนั้นต่างกันที่ช่วงเวลาในการเกิด ในส่วนของการเผาไหม้ร่วมกันของกากอ้อยและบิทูมินัสที่สัดส่วนอากาศมากเกินพอที่ร้อยละ 100 เกิดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์สูงแต่เมื่อเพิ่มสัดส่วนอากาศมากเกินพอที่ร้อยละ 150 นั้นพบว่าก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์มีค่าลดลงแต่เมื่อเพิ่มสัดส่วนอากาศมากเกินพอที่ร้อยละ 200 แล้วก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์กลับมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากในขณะที่ทำการทดลองแรงดันอากาศจากปั๊มมีค่าลดลงจึงทำให้อากาศเข้าสู่ห้องเผาไหม้น้อยลงทำให้เกิดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์มากขึ้น

3.1) การเผาไหม้ชีวมวลร่วมกับลิกไนต์

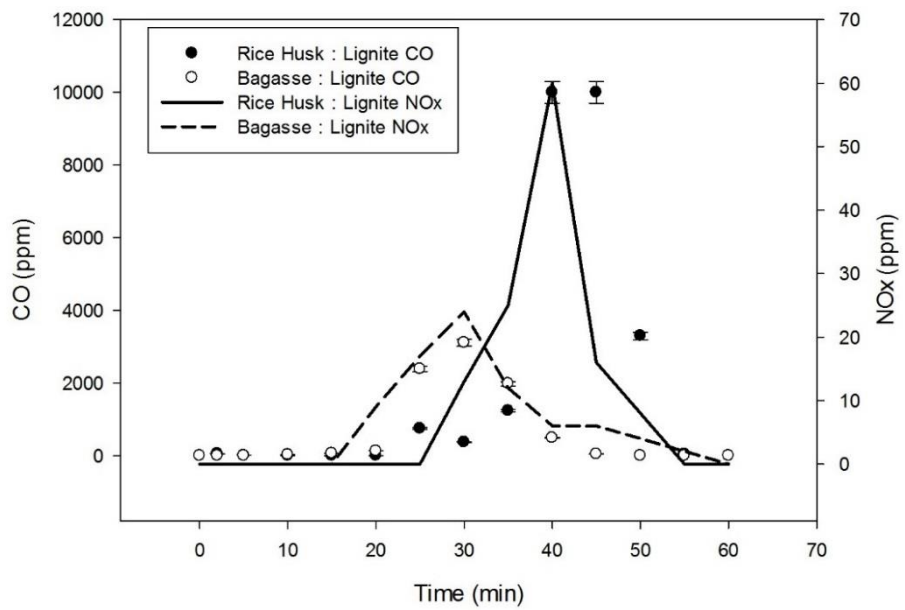
จากการทดลองพบว่า ที่สัดส่วนอากาศมากเกินพอร้อยละ 100 ของออกซิเจนกากอ้อยมีปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์สูงสุดที่สุด ที่สัดส่วนอากาศมากเกินพอร้อยละ 150 ของออกซิเจนแกลบ และกะลามะพร้าวมีปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์สูงสุดเท่ากัน และที่สัดส่วนอากาศมากเกินพอร้อยละ 200 ของออกซิเจนพบว่าแกลบและกะลามะพร้าวมีปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์สูงสุดเท่ากัน (Detection Limit ของอุปกรณ์มีค่าสูงสุดที่ 10,000 ppm) ดังที่แสดงในรูปที่ 4.106 - 4.111



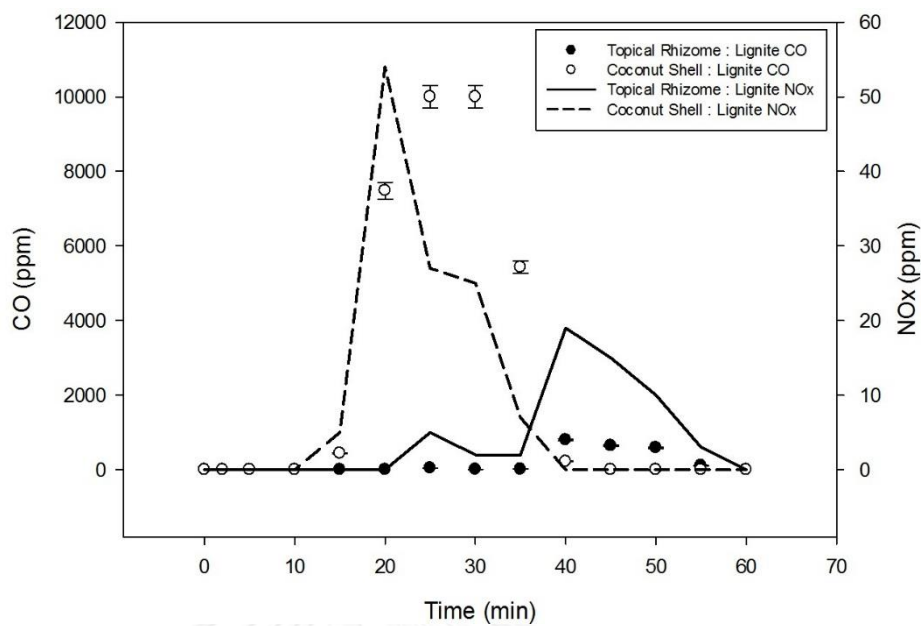
รูปที่ 4. 106 การเกิดคาร์บอนมอนอกไซด์ของแกลบและกากอ้อย ที่อากาศมากเกินพอร้อยละ 100 ของออกซิเจน



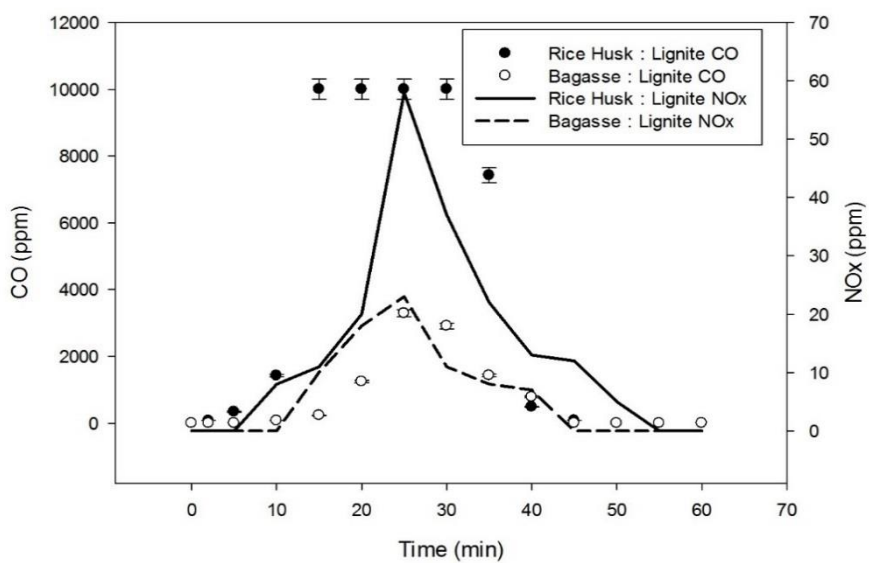
รูปที่ 4. 107 การเกิดคาร์บอนมอนอกไซด์ของเหง้ามันสำปะหลังและ
กะลามะพร้าว ที่อากาศมากเกินพอร้อยละ 100 ของออกซิเจน



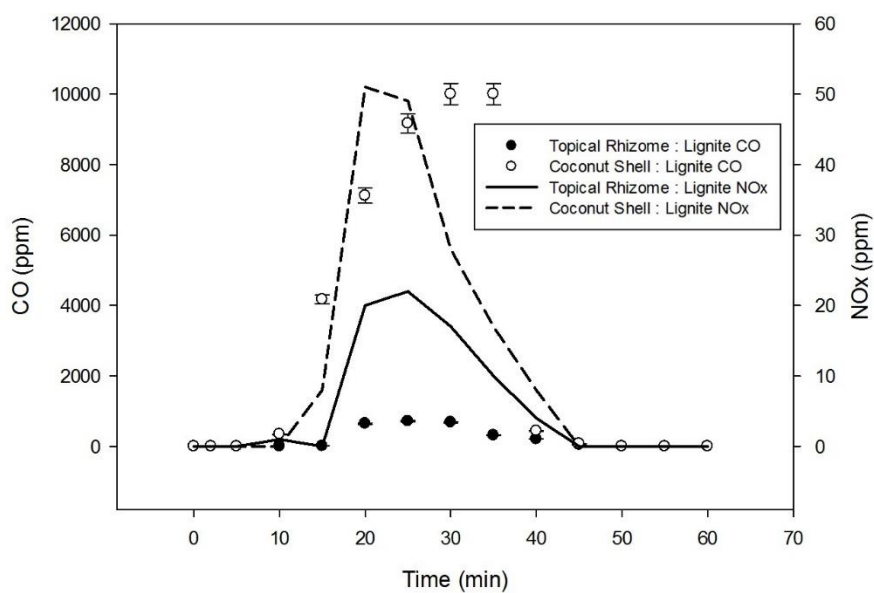
รูปที่ 4. 108 การเกิดคาร์บอนมอนอกไซด์ของแกลบและกากอ้อย ที่
อากาศมากเกินพอร้อยละ 150 ของออกซิเจน



รูปที่ 4. 109 การเกิดคาร์บอนมอนอกไซด์ของเหง้ามันสำปะหลังและ
กะลามะพร้าว ที่อากาศมากเกินพอร้อยละ 150 ของออกซิเจน



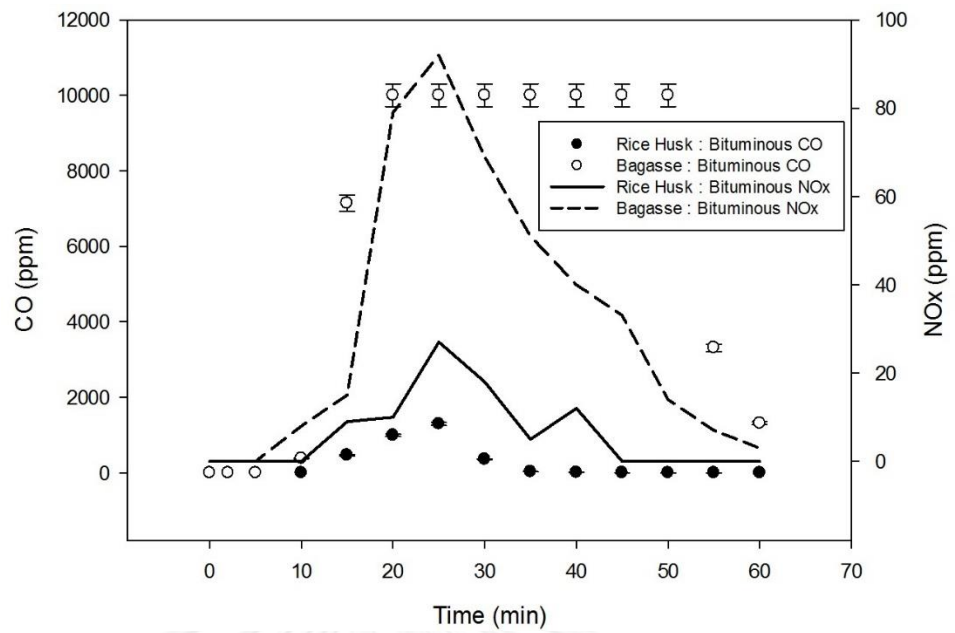
รูปที่ 4. 110 การเกิดคาร์บอนมอนอกไซด์ของแกลบและกากอ้อย ที่
อากาศมากเกินพอร้อยละ 200 ของออกซิเจน



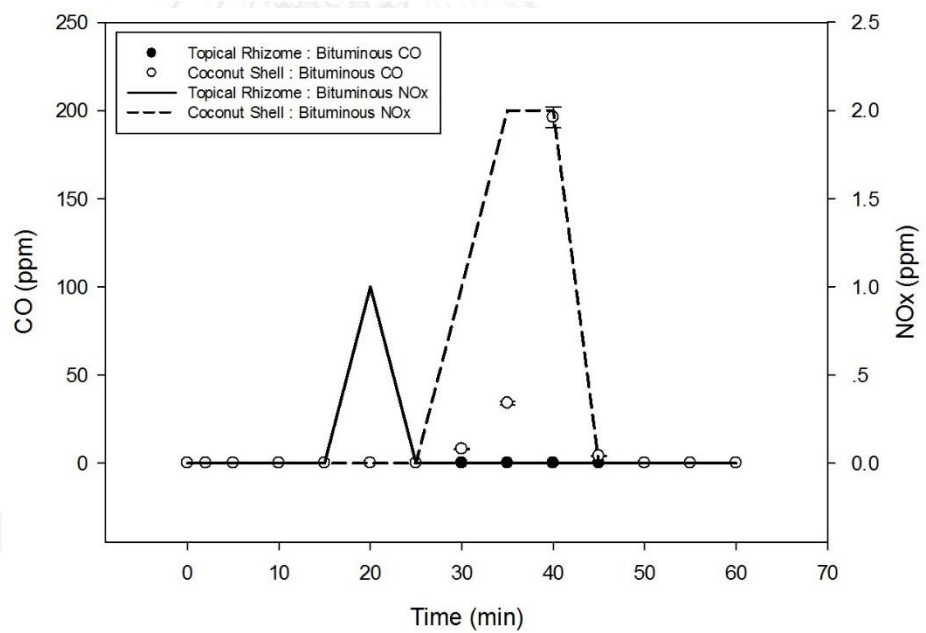
รูปที่ 4. 111 การเกิดคาร์บอนมอนอกไซด์ของเหง้ามันสำปะหลังและ
กะลามะพร้าว ที่อากาศมากเกินพอร้อยละ 200 ของออกซิเจน

3.2) การเผาไหม้ชีวมวลร่วมกับบิทูมินัส

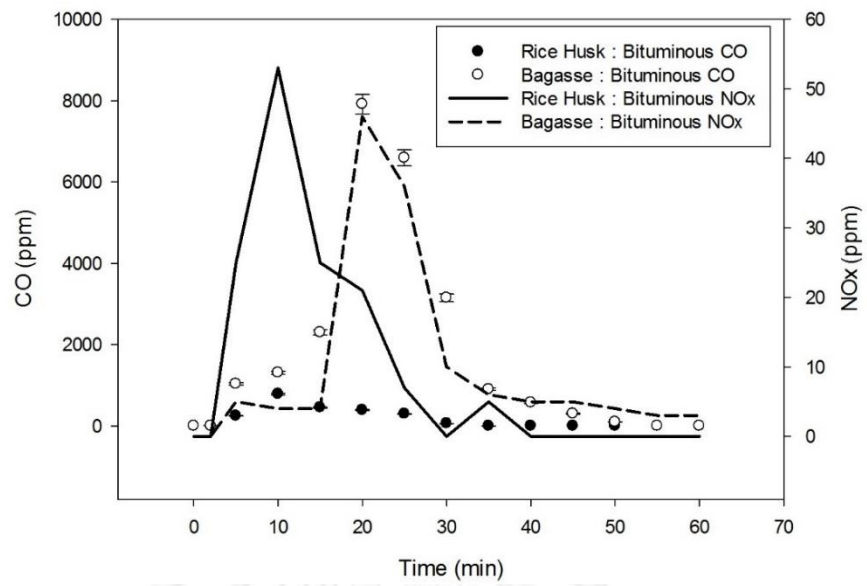
จากการทดลองพบว่า ที่สัดส่วนอากาศมากเกินพอ 100 เปอร์เซ็นต์ของออกซิเจนจาก
อ้อยมีปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์สูงที่สุด ที่สัดส่วนอากาศมากเกินพอ 150 เปอร์เซ็นต์ของออกซิเจน
แกลบและกะลามะพร้าวมีปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์สูงที่สุดเท่ากัน และที่ 200 เปอร์เซ็นต์ของ
อากาศมากเกินพอพบว่าแกลบและกะลามะพร้าวมีปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์สูงที่สุดเท่ากัน ดังที่
แสดงในรูปที่ 4.112 - 4.117



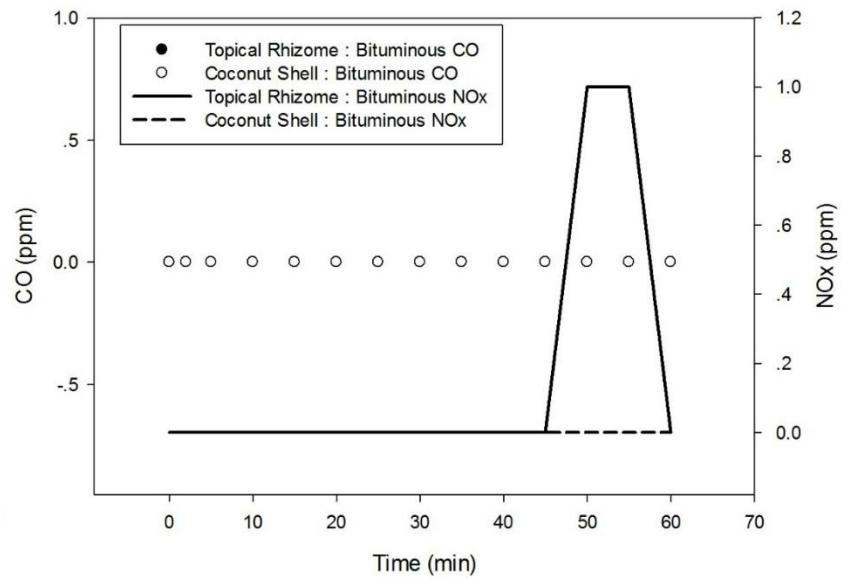
รูปที่ 4. 112 การเกิดคาร์บอนมอนอกไซด์ของแกลบและกากอ้อย ที่อากาศมากเกินพอร์ร้อยละ 100 ของออกซิเจน



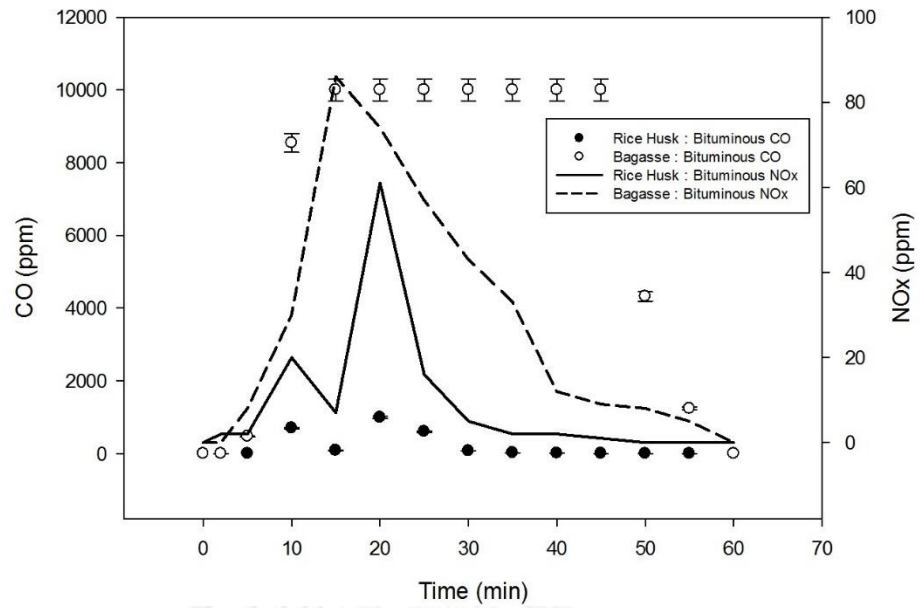
รูปที่ 4. 113 การเกิดคาร์บอนมอนอกไซด์ของเหง้ามันสำปะหลังและกะลามะพร้าว ที่อากาศมากเกินพอร์ร้อยละ 100 ของออกซิเจน



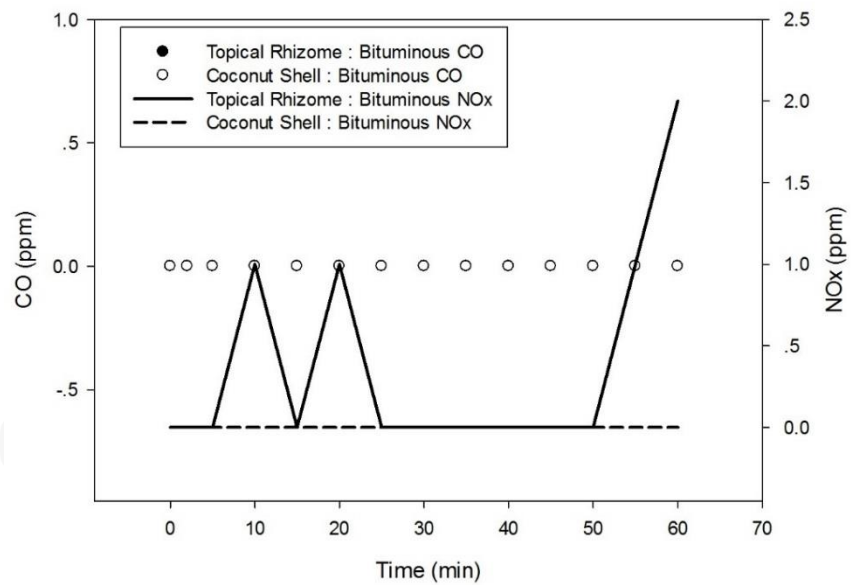
รูปที่ 4. 114 การเกิดคาร์บอนมอนอกไซด์ของแกลบและกากอ้อย ที่อากาศมากเกินพอร้อยละ 150 ของออกซิเจน



รูปที่ 4. 115 การเกิดคาร์บอนมอนอกไซด์ของเหง้ามันสำปะหลัง และกะลามะพร้าว ที่อากาศมากเกินพอร้อยละ 150 ของออกซิเจน



รูปที่ 4. 116 การเกิดคาร์บอนมอนอกไซด์ของแกลบและกากอ้อย ที่อากาศมากเกินพอร้อยละ 200 ของออกซิเจน



รูปที่ 4. 117 การเกิดคาร์บอนมอนอกไซด์ของเหง้ามันสำปะหลัง และกะลามะพร้าว ที่อากาศมากเกินพอร้อยละ 200 ของออกซิเจน

บทที่ 5

สรุปผลและการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

5.1.1 อนุภาคที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้

จำนวนอนุภาคที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ชีวมวลหรือถ่านหินเพียงอย่างเดียวนั้นพบว่าการเผาไหม้ที่เกิดจำนวนอนุภาคมากที่สุดที่สัดส่วนอากาศมากเกินพอร้อยละ 200 ของออกซิเจน รองลงมาคือที่สัดส่วนอากาศมากเกินพอร้อยละ 150 และร้อยละ 100 ของออกซิเจน ยกเว้นกากอ้อย ที่มีจำนวนอนุภาคสูงสุดที่สัดส่วนอากาศมากเกินพอร้อยละ 150 ของออกซิเจน รองลงมาที่ร้อยละ 100 และร้อยละ 150 ของออกซิเจน และเชื้อเพลิงที่ก่อให้เกิดจำนวนอนุภาคมากที่สุด ได้แก่ เหมง้ำมัน สำปะหลัง รองลงมาคือ กากอ้อย บิทูมินัส กะลามะพร้าว ลิกไนต์ และ แกลบตามลำดับ

1. การเผาไหม้ชีวมวลร่วมกับถ่านหินที่สัดส่วน 80:20

จำนวนอนุภาคที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ชีวมวลร่วมกับถ่านหินที่สัดส่วนชีวมวลต่อถ่านหินเท่ากับ 80:20 พบว่า ที่สัดส่วนอากาศมากเกินพอร้อยละ 200 ของออกซิเจนมีจำนวนอนุภาคมากที่สุดรองลงมาคือที่ร้อยละ 150 และร้อยละ 100 ของออกซิเจน ยกเว้นการเผาไหม้ร่วมกันของกากอ้อยร่วมกับลิกไนต์จะมีจำนวนอนุภาคสูงสุดที่สัดส่วนอากาศมากเกินพอร้อยละ 100 ของออกซิเจน และรองลงมาที่สัดส่วนอากาศมากเกินพอร้อยละ 150 และ 200 ของออกซิเจน และเชื้อเพลิงที่เผาไหม้ร่วมกันแล้วเกิดจำนวนอนุภาคมากที่สุดคือ กากอ้อยและบิทูมินัส รองลงมาได้แก่ เหมง้ำมัน สำปะหลังและลิกไนต์ แกลบและลิกไนต์ กะลามะพร้าวและบิทูมินัส เหมง้ำมันและบิทูมินัส กะลามะพร้าวและลิกไนต์ แกลบและบิทูมินัส และ กากอ้อยและลิกไนต์ ตามลำดับ

2. การเผาไหม้ชีวมวลร่วมกับถ่านหินที่สัดส่วน 50:50

จำนวนอนุภาคที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ชีวมวลร่วมกับถ่านหินที่สัดส่วนชีวมวลต่อถ่านหินเท่ากับ 50:50 พบว่า ที่สัดส่วนอากาศมากเกินพอร้อยละ 200 ของออกซิเจนมีจำนวนอนุภาคมากที่สุดรองลงมาคือที่ร้อยละ 150 และร้อยละ 100 ของออกซิเจน ตามลำดับ ยกเว้นการเผาไหม้ร่วมกันของกากอ้อยกับบิทูมินัส และแกลบกับลิกไนต์ นั้นที่สัดส่วนอากาศมากเกินพอร้อยละ 150 ของออกซิเจนนั้นมีจำนวนอนุภาคฝุ่นมากกว่าที่สัดส่วนอากาศมากเกินพอร้อยละ 200 และร้อยละ 100

ของออกซิเจนตามลำดับ โดยเชื้อเพลิงที่ก่อให้เกิดอนุภาคมากที่สุดคือ แกลบและบิทูมินัส รองลงมา ได้แก่ แกลบและลิกไนต์ กะลามะพร้าวและบิทูมินัส เหง้ามันและลิกไนต์ กะลาและลิกไนต์ กากอ้อย และบิทูมินัส เหง้ามันและบิทูมินัส กากอ้อยและลิกไนต์ ตามลำดับ

3. การเผาไหม้ชีวมวลร่วมกับถ่านหินที่สัดส่วน 20:80

จำนวนอนุภาคที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ชีวมวลร่วมกับถ่านหินที่สัดส่วนชีวมวลต่อถ่านหิน เท่ากับ 20:80 พบว่า ที่สัดส่วนอากาศมากเกินพอร้อยละ 200 ของออกซิเจน มีจำนวนอนุภาคมากที่สุดรองลงมาคือที่ร้อยละ 150 และร้อยละ 100 ของออกซิเจน ตามลำดับ ยกเว้น แกลบกับลิกไนต์ จะมีจำนวนอนุภาคมากที่สุดที่สัดส่วนอากาศมากเกินพอร้อยละ 150 และรองลงมาที่ร้อยละ 200 และร้อยละ 100 ของออกซิเจน กากอ้อยกับลิกไนต์จะมีจำนวนอนุภาคมากที่สุดที่สัดส่วนอากาศมากเกินพอร้อยละ 100 รองลงมาที่ร้อยละ 200 และร้อยละ 150 ของออกซิเจน เหง้ามันสำปะหลังกับลิกไนต์ จะมีจำนวนอนุภาคมากที่สุดที่สัดส่วนอากาศมากเกินพอร้อยละ 200 และรองลงมาที่ร้อยละ 100 และร้อยละ 150 ของออกซิเจน เชื้อเพลิงที่จำนวนอนุภาคมากที่สุดคือ เหง้ามันสำปะหลังกับลิกไนต์ รองลงมาได้แก่ กากอ้อยกับบิทูมินัส เหง้ามันสำปะหลังกับบิทูมินัส กะลามะพร้าวกับลิกไนต์ กะลามะพร้าวกับบิทูมินัส แกลบกับบิทูมินัส กากอ้อยกับลิกไนต์ และ แกลบกับลิกไนต์ ตามลำดับ

การเผาไหม้ชีวมวลและถ่านหินนั้นโดยส่วนมากพบว่า การเผาไหม้ชีวมวลเพียงอย่างเดียวจะทำให้เกิดอนุภาคขนาดใหญ่จำนวนมากว่าจำนวนอนุภาคขนาดใหญ่ที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ถ่านหินเพียงอย่างเดียว และเมื่อนำชีวมวลมาเผาไหม้ร่วมกับถ่านหินจะพบว่าอนุภาคขนาดใหญ่และขนาดเล็กลดลงและที่ปริมาณอากาศมากจะทำให้เกิดอนุภาคขนาดเล็กมากขึ้นด้วยเนื่องจากความร้อนที่สูงขึ้น

5.1.2 ออกไซด์ของไนโตรเจนที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ชีวมวลและถ่านหิน

การเผาไหม้ชีวมวลและถ่านหินแต่ละชนิดพบว่า การเผาไหม้ถ่านหินเพียงอย่างเดียว นั้น จะก่อให้เกิดออกไซด์ของไนโตรเจนมากกว่าการเผาไหม้ชีวมวลเพียงอย่างเดียวเมื่อทำการเพิ่มสัดส่วนอากาศมากเกินพอมากขึ้นจะทำให้เกิดออกไซด์ของไนโตรเจนน้อยลง (Huynh and Kong 2013) แต่ความเข้มข้นของออกไซด์ของไนโตรเจนลดลงเพียงเล็กน้อย (L. Álvarez 2012) ซึ่งในบางตัวอย่างเชื้อเพลิงที่ทำการทดลองมีออกไซด์ของไนโตรเจนเพิ่มขึ้นเนื่องมาจากปริมาณของเชื้อเพลิงแต่ละชนิดมีขนาดไม่เท่ากันโดยเฉพาะแกลบและกากอ้อย ที่น้ำหนักเท่าๆกันแกลบและกากอ้อยจะมีปริมาณมากกว่ากะลามะพร้าวและเหง้ามันสำปะหลังเนื่องมาแกลบและกากอ้อยมีความหนาแน่นน้อยกว่าทำ

ให้มีปริมาณที่มากกว่าจึงทำให้เกิดเป็นออกไซด์ของไนโตรเจนได้มากกว่า และชนิดของเชื้อเพลิงแต่ละชนิดนั้นมีคุณสมบัติทางเคมีที่แตกต่างกันโดยเฉพาะองค์ประกอบที่เป็นไนโตรเจนที่จะทำให้เกิดเป็นออกไซด์ของไนโตรเจนได้มากขึ้น (Vassilev, Baxter et al. 2013) นอกจากนี้ถ่านหินทั้งสองชนิดมีอุณหภูมิสูงสุดไม่เท่ากันทำให้เมื่อนำไปเผาไหม้ร่วมกันแล้วเกิดเป็นออกไซด์ของไนโตรเจนได้มากกว่า เนื่องจากอุณหภูมิที่สูงกว่า

5.1.3 คาร์บอนมอนอกไซด์ที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ชีวมวลและถ่านหิน

การเผาไหม้ชีวมวลและถ่านหินแต่ละชนิดพบว่าการเผาไหม้ถ่านหินเพียงอย่างเดียวก่อให้เกิดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่มากกว่าเนื่องจากองค์ประกอบทางเคมีของถ่านหินทั้งสองชนิดมีธาตุคาร์บอน สูงกว่าในชีวมวลมากโดยเฉพาะบิทูมินัส และเมื่อนำถ่านหินมาเผาไหม้ร่วมกับชีวมวล จะทำให้ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์มีค่าลดลง และเมื่อทำการเพิ่มปริมาณอากาศเพิ่มมากขึ้นจะทำให้ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่เกิดขึ้นน้อยลง (Shao, Fan et al. 2013) แต่จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงบางชนิดที่สัดส่วนอากาศมากขึ้นแต่ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์มีค่าไม่ลดลงเนื่องจากลักษณะของชีวมวลที่มีความหนาแน่นน้อยและมีปริมาณที่มากเมื่อทำการป้อนเข้าสู่ห้องเผาไหม้จะมีปริมาณที่มากทำให้การกระจายตัวของอากาศไม่ทั่วถึงจึงเกิดเป็นก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ได้มากนอกจากนี้เครื่องมือที่ใช้วัดสามารถตรวจวัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์สูงสุดได้ 10,000 ppm ถ้ามีค่ามากกว่า 10,000 ppm จะทำให้เครื่องไม่สามารถประเมินค่าได้ และเนื่องด้วยค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่สูงอาจตกค้างอยู่ในเครื่องในขณะที่ทำการทดลองอยู่ทำให้ได้ค่าที่คลาดเคลื่อนจากความเป็นจริง

5.1.4 บทสรุปเชิงประยุกต์

มลพิษที่เกิดขึ้นที่เกิดจากการเผาไหม้ชีวมวลและถ่านหิน เช่น อนุภาคขนาดเล็ก ออกไซด์ของไนโตรเจน และก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ เป็นต้น นั้นสามารถควบคุม และลดปริมาณได้หลายวิธี ซึ่งเทคโนโลยีในปัจจุบันนั้นก็พัฒนาให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น สามารถลดปริมาณมลพิษที่เกิดขึ้นได้ ซึ่งการกำจัดอนุภาคที่มีขนาดเล็กมีหลายวิธีที่นิยมในปัจจุบัน เช่น ไซโคลน เครื่องตกตะกอนไฟฟ้าสถิตย์ (ESP) ถุงกรอง และการลดออกไซด์ของไนโตรเจนที่เกิดขึ้นด้วยการใช้ สกรับเบอร์ในการดักจับอนุภาคก๊าซที่เกิดขึ้น ซึ่งในปัจจุบันการลดการเกิดมลพิษยังทำได้ที่กระบวนการอื่นๆของการผลิต เช่น การเปลี่ยนกระบวนการผลิต การเปลี่ยนวัตถุดิบที่ใช้ เป็นต้น แต่ในบางกรณีการเปลี่ยนกระบวนการผลิต หรือ การเปลี่ยนวัตถุดิบมีค่าใช้จ่ายที่สูง จึงทำให้วิธีการควบคุมที่ตอนปลายของ

กระบวนการผลิตมีความสำคัญ ซึ่งจากงานวิจัยนี้ชี้ให้เห็นถึงความสำคัญของมลพิษที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้เป็นสิ่งที่สำคัญ เนื่องจากเป็นข้อมูลในการเลือกชนิดของเชื้อเพลิงเป็นข้อมูลเชื้อเพลิงชีวมวลที่มีปริมาณที่มากในประเทศไทยและถ่านหินที่ประเทศไทยใช้มากในอุตสาหกรรมต่างๆ ซึ่งการเผาไหม้ถ่านหินอย่างเดียวนั้นจะมีปริมาณมลพิษที่มากกว่าการเผาไหม้ชีวมวลเพียงอย่างเดียว แต่เมื่อเราเผาไหม้ชีวมวลเพียงอย่างเดียวนั้นก็ทำให้เกิดอนุภาคทั้งขนาดเล็กและขนาดใหญ่มากกว่าการเผาไหม้ถ่านหินเพียงอย่างเดียว นอกจากชีวมวลนั้นจะจำนวนอนุภาคเมื่อนำมาเผาไหม้มากกว่าถ่านหินแล้วยังมีข้อจำกัดในด้านอื่นๆ เช่น ชีวมวลบางชนิดมีแค่ในช่วงของปี (ภาคอ้อย) (สำนักงานนโยบายและแผนงาน 2546) ความหนาแน่นของชีวมวลที่มากกว่าถ่านหินทำให้เวลาขนส่งได้ที่ละไม่มากเป็นต้น แต่เมื่อนำถ่านหินและชีวมวลมาเผาไหม้ร่วมกันแล้ว จะทำให้การเกิดมลพิษน้อยลงทั้งอนุภาคขนาดเล็กและขนาดใหญ่ และยังสามารถลดการเกิดออกไซด์ของไนโตรเจนและก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ได้อีกด้วยและจากการเผาไหม้ชีวมวลร่วมกับถ่านหินนั้นยังเป็นการลดค่าใช้จ่ายทางด้านเชื้อเพลิงได้อีกด้วยทำให้ต้นทุนในการผลิตลดลงได้ทำให้มีกำไรมากขึ้นด้วย นอกจากนี้การเติมอากาศเพื่อทำให้การเกิดมลพิษลดลงนั้นจะเห็นได้ว่า ที่สัดส่วนของอากาศมากเกินร้อยละ 150 ของอากาศมากเกินพอนั้น มีสารมลพิษต่างจากที่ 200 เปอร์เซ็นต์ไม่มาก ดังนั้นจึงควรใช้สัดส่วนอากาศที่มากเกินพอยู่ในช่วงร้อยละ 120 -150 เพื่อเป็นการประหยัดค่าใช้จ่ายได้มากขึ้น

5.2 ข้อเสนอแนะ

เนื่องจากประเทศไทยนั้นเป็นประเทศที่มีการทำเกษตรกรรมกระจายอยู่ทั่วทุกภูมิภาค ดังนั้นจึงควรมีการศึกษาชีวมวลชนิดอื่นๆ ที่มีมากในแต่ละภูมิภาคเพื่อสามารถนำของเหลือทิ้งทางการเกษตรมาใช้เป็นพลังงานทางเลือกทั้งนี้ยังสามารถลดค่าขนส่งมาจากที่อื่นและยังสามารถเพิ่มรายได้ให้กับเกษตรกรอีกด้วย นอกจากนี้ยังมีมลพิษชนิดอื่น ๆ ที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ชีวมวลและถ่านหินที่ยังไม่ได้ทำการศึกษา เช่น พอลิไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (PAHs) ซึ่งเป็นสารที่ก่อให้เกิดโรคมะเร็งมีผลต่อสิ่งมีชีวิตของมนุษย์และสัตว์ ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) ซึ่งเป็นสารมลพิษที่ก่อให้เกิดภาวะเรือนกระจก หรือเลือกศึกษาข้อมูลที่ได้จากการศึกษาชีวมวลชนิดต่างๆที่ใช้เผาไหม้ร่วมกับถ่านหินยังสามารถนำมาออกแบบเตาหรือห้องเผาไหม้ให้มีความเหมาะสมกับเชื้อเพลิงที่ใช้ได้อีกด้วย และยังสามารถลดมลพิษที่จะเกิดขึ้นจากการเผาไหม้หรือสามารถหาวิธีวางแผนเพื่อกำจัดมลพิษที่จะเกิดขึ้นได้

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

(2014). "เชื้อเพลิงและการเผาไหม้." 24 กรกฎาคม 2557, from [http://www.energyefficiencyasia.org/docs/ee_modules/thai/Chapter%20-%20Fuels%20and%20combustion%20\(Thai\).pdf](http://www.energyefficiencyasia.org/docs/ee_modules/thai/Chapter%20-%20Fuels%20and%20combustion%20(Thai).pdf).

กรมควบคุมมลพิษ (2552). "ฝุ่นละออง ". Retrieved 8, 2552, from http://aqnis.pcd.go.th/basic/pollution_pm.htm.

กรมควบคุมมลพิษ (2554). "มาตรฐานควบคุมการปล่อยทิ้งอากาศเสียจากโรงไฟฟ้าใหม่."

กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (2555). ปริมาณการใช้วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรและชีวมวลเพื่อผลิตเป็นพลังงานทดแทน.

การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (2547). "ถ่านหิน." from <http://www.egat.co.th/fuel/lignite/coal.html>.

แซ่เตี้ยว, ภ. (2554). การศึกษามลพิษในรูปแบบอนุภาคที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ชีวมวลและถ่านหิน. วิศวกรรมศาสตร์. ไทย, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. ปริญญาโท.

ตั้งตระกูล, ค. ม. น. (2554/2). "การวิเคราะห์ การใช้พลังงานในเตาเผาเหล็กที่ใช้หัวเผาไร้เงินเนอเรทที่ร่วมกับบรีคเพอเรเตอร์." วารสารวิจัยพลังงาน: 7.

ทิพยาวงศ์, ร. ด. น. (2552). เทคโนโลยีการแปลงสภาพชีวมวล. กรุงเทพฯ, สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี(ไทย-ญี่ปุ่น).

บุญเกียรติ, ก. (2554). เชื้อเพลิงและการเผาไหม้. กรุงเทพฯ, สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

สำนักงานนโยบายและแผนงาน (2546). วสารนโยบายพลังงาน ฉบับที่59.

ภาษาอังกฤษ

Abián, M., et al. (2014). "Impact of nitrogen oxides (NO, NO₂, N₂O) on the formation of soot." Combustion and Flame **161**(1): 280-287.

C. Arden Pope III, P. R. T. B., PhD; Michael J. Thun, MD; Eugenia E. Calle, PhD; Daniel Krewski, PhD; Kazuhiko Ito, PhD; George D. Thurston, ScD (2002). "Lung Cancer, Cardiopulmonary Mortality, and Long-term Exposure to Fine Particulate Air Pollution." **287**(9): 9.

Dangzhen Lv, M. X., Xiaowei Liu, Zhonghua Zhan, Zhiyuan Li, Hong Yao (2010). "Effect of cellulose, lignin, alkali and alkaline earth metallic species on biomass pyrolysis and gasification." Fuel Processing Technology **91**(8): 7.

Gaurav Mittala, M. C., Chih-Jen Sunga, Frederick L. Dryerb (2008). "Dimethyl ether autoignition in a rapid compression machine: Experiments and chemical kinetic modeling." Fuel Processing Technology **89**(12): 11.

Huynh, C. V. and S.-C. Kong (2013). "Performance characteristics of a pilot-scale biomass gasifier using oxygen-enriched air and steam." Fuel **103**: 987-996.

James A. Miller, C. T. B. (1989). "Modeling of nitrogen oxides formation and destruction in combustion systems." Progress in Energy and Combustion Science **15**(4): 52.

Junchao Wang, W. F., , Yu Li, Meng Xiao, Kang Wang, Peng Ren (2012). "The effect of air staged combustion on NO_x emissions in dried lignite combustion." Energy **37**(1): 13.

Kuang, M. and Z. Li (2014). "Review of gas/particle flow, coal combustion, and NO_x emission characteristics within down-fired boilers." Energy.

L. Álvarez, M. G., J.M. Jonesc, M. Pourkashanianb, A. Williamsb, , , J. Riazaa, C. Pevidaa, J.J. Pisa, F. Rubieraa (2012). "Numerical investigation of NO emissions from an

entrained flow reactor under oxy-coal conditions." Fuel Processing Technology **93**(1): 12.

material, A. s. f. t. a. (2006). Standard test method for ash in the analysis sample of coal and coke

material, A. s. f. t. a. (2006). Standard test method for moisture in the analysis sample of coal and coke

material, A. s. f. t. a. (2006). Standard test method for Proximate Analysis of coal and coke.

material, A. s. f. t. a. (2006). Standard test method for volatile matter in the analysis sample of coal and coke

Nasrin Aghamohammadi, N. M. N. S., Mohamed Kheireddine Aroua (2011). "Combustion characteristics of biomass in SouthEast Asia." Biomass and Bioenergy **35**(9): 6.

Nimmo, W., et al. (2010). "The effect of O₂ enrichment on NO_x formation in biomass co-fired pulverised coal combustion." Fuel **89**(10): 2945-2952.

Shao, L.-M., et al. (2013). "SO₂ and NO_x emissions from sludge combustion in a CO₂/O₂ atmosphere." Fuel **109**: 178-183.

Suriyawong A., M. R., Peeble K., Biwas P. (2009). "Energy recycling by co-combustion of coal and recovered paint solids from automobile paint operation " Air and Waste Management Association **59**: 8.

Tillman, D. A. (1999). The combustion of solid fuels and waste. USA, Academic press, Inc.

Varol, M., et al. (2010). "Investigation of co-combustion characteristics of low quality lignite coals and biomass with thermogravimetric analysis." Thermochemica Acta **510**(1-2): 195-201.

Varol, M., et al. (2014). "Emission characteristics of co-combustion of a low calorie and high sulfur–lignite coal and woodchips in a circulating fluidized bed combustor: Part 1. Effect of excess air ratio." Fuel **117**: 792-800.

Vassilev, S. V., et al. (2013). "An overview of the behaviour of biomass during combustion: Part I. Phase-mineral transformations of organic and inorganic matter." Fuel **112**: 391-449.

Wang, X., et al. (2013). "Role of exhaust gas recycle on submicrometer particle formation during oxy-coal combustion." Proceedings of the Combustion Institute **34**(2): 3479-3487.

Warnatz, J. (1996). "Experimental and computational study of ignition and flame propagation in internal combustion engines." Endeavour **20**(1): 6.

Williams, A., et al. (2012). "Pollutants from the combustion of solid biomass fuels." Progress in Energy and Combustion Science **38**(2): 113-137.



ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



ภาคผนวก ก

ข้อมูลปริมาณมลสารที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ข้อมูลของปริมาณมลสารที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ชีวมวลและถ่านหิน

ข้อมูลของปริมาณมลสารที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ชีวมวลและถ่านหินประกอบไปด้วย

1. ปริมาณมลสารที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ชีวมวลเพียงอย่างเดียว
2. ปริมาณมลสารที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ถ่านหินเพียงอย่างเดียว
3. ปริมาณมลสารที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ร่วมกันของชีวมวลและถ่านหินในสัดส่วนที่ต่างกัันดังนี้ 80:20, 50:50 และ 20:80
4. ปริมาณมลสารที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ร่วมกันของชีวมวลและถ่านหินในที่สัดส่วนสัดส่วนอากาศแตกต่างกันดังนี้ ที่อากาศมากเกินพอร้อยละ 100 150 และ 200 ของออกซิเจน

ตารางที่ ก.1 แกลบ ที่ 100 เปอร์เซ็นต์ของอากาศมากเกินพอ

Time(Min.)	O ₂ (Percentage)	CO (PPM)	CO ₂ (Percentage)	NO (PPM)	NO _x (PPM)	FT (Celsius)	
						Effuence	combustion
0	21.0	0	0	0	0	38.2	25.6
2	20.8	6	0.2	0	0	160.4	294.9
5	20.8	5	0.2	0	0	108.2	354.7
10	20.2	59	0.8	0	0	172.3	511.5
15	19.2	874	1.8	0	0	314.6	503.2
20	19.2	2334	1.8	0	0	118.7	245.0
25	19.3	840	1.7	1	1	209.3	493.8
30	17.1	>10000	3.9	8	9	173.5	261.4
35	18.2	5978	2.8	11	11	272.8	540.3
40	20.4	459	0.6	2	2	49.3	341.0
45	20.5	520	0.5	2	2	58.7	83.4
50	20.6	359	0.4	2	2	43.2	50.5
55	20.7	236	0.3	2	2	40.5	46.4
60	20.7	83	0.3	2	2	36.4	42.2

ตารางที่ ก.2 แกลบ ที่ 150 เปอร์เซ็นต์ของอากาศมากเกินไป

Time(Min.)	O ₂ (Percentage)	CO (PPM)	CO ₂ (Percentage)	NO (PPM)	NO _x (PPM)	FT (Celsius)	
						Effuence	combustion
0	21.0	0	0	0	0	40.3	32.5
2	20.8	1	0.2	0	0	343.7	848.3
5	20.8	0	0.2	0	0	100.9	279.6
10	21.0	3	0	0	0	267.7	957.2
15	20.9	0	0.1	0	0	265.3	989.2
20	21.0	32	0	0	0	233.4	400.5
25	16.5	950	4.5	0	0	257.6	410.0
30	15.9	4229	5.1	10	10	269	379.0
35	17.8	4152	3.2	4	4	188.9	282.7
40	19.4	1932	1.6	2	1	132.7	202.1
45	20.3	799	0.7	1	1	94.9	134.4
50	20.9	228	0.1	1	1	75.5	105.8
55	21.2	132	0	2	2	68.5	97.4
60	21.3	55	0	1	1	55.5	74.0

ตารางที่ ก.3 แกลบ ที่ 200 เปอร์เซ็นต์ของอากาศมากเกินพอ

Time(Min.)	O ₂ (Percentage)	CO (PPM)	CO ₂ (Percentage)	NO (PPM)	NO _x (PPM)	FT (Celsius)	
						Effuence	combustion
0	21.0	0	0	0	0	39.6	25.1
2	20.8	3	0.2	0	0	155.4	533.9
5	18.2	9	2.8	4	4	178.5	266.5
10	17.6	589	3.4	13	13	196.0	669.3
15	19.4	0	1.6	8	9	169.8	640.3
20	19.8	4979	1.2	10	11	163.2	410.0
25	19.6	2684	1.4	11	11	152.3	350.6
30	17.8	2694	3.2	20	21	242.3	333.3
35	15.7	>10000	5.3	56	59	198.5	522.5
40	15.5	>10000	5.5	64	67	196.1	623.4
45	18.5	6515	2.5	33	35	47.4	54.7
50	20.1	2267	0.9	13	14	46.2	47.3
55	20.6	690	0.4	6	6	43.4	42.7
60	20.8	267	0.2	3	3	38.1	39.5

ตารางที่ ก.4 กากอ้อย ที่ 100 เปอร์เซ็นต์ของอากาศมากเกินไป

Time(Min.)	O ₂ (Percentage)	CO (PPM)	CO ₂ (Percentage)	NO (PPM)	NO _x (PPM)	FT (Celsius)	
						Effuence	combustion
0	21.0	0	0	0	0	37.4	32.3
2	16.3	3551	4.7	12	13	89.3	174.6
5	15.7	5879	5.3	0	0	257.0	869.3
10	15.7	>10000	5.3	10	19	280.3	772.1
15	18.0	>10000	2.0	10	19	135.7	214.3
20	20.2	8750	0.8	13	19	123.9	200.7
25	20.5	6329	0.5	18	19	120.3	211.4
30	20.0	497	1.0	10	14	86.0	134.3
35	20.7	57	0.3	9	15	69.4	99.8
40	20.9	0	0.1	7	10	62.7	78.9
45	21.0	0	0	3	3	54.2	67.1
50	21.0	0	0	0	0	49.0	54.4
55	21.1	0	0	0	0	42.8	50.0
60	21.2	0	0	0	0	41.4	45.1

ตารางที่ ก.5 กากอ้อย ที่ 150 เปอร์เซนต์ของอากาศมากเกินพอ

Time(Min.)	O ₂ (Percentage)	CO (PPM)	CO ₂ (Percentage)	NO (PPM)	NO _x (PPM)	FT (Celsius)	
						Effuence	combustion
0	21.0	0	0	0	0	34.5	27.3
2	20.8	8	0.2	0	0	98.6	237.4
5	21.0	3	0	0	0	117	531.3
10	20.5	79	0.5	0	0	160.3	491.3
15	17.6	5890	3.4	45	47	162.1	369.5
20	15.8	8477	5.2	59	60	195.9	176.9
25	14.2	>10000	6.8	44	46	118.6	232.3
30	17.4	7450	3.6	22	23	69.7	102.9
35	19.5	3218	1.5	11	11	55.0	84.2
40	20.4	97	0.6	6	6	54.4	71.3
45	20.7	34	0.3	3	3	46.6	62.3
50	20.7	0	0.3	1	1	43.2	54.7
55	20.8	0	0.2	1	1	44.8	49.2
60	20.8	0	0.2	0	0	40.1	45.6

ตารางที่ ก.6 กากอ้อย ที่ 200 เปอร์เซนต์ของอากาศมากเกินพอ

Time(Min.)	O ₂ (Percentage)	CO (PPM)	CO ₂ (Percentage)	NO (PPM)	NO _x (PPM)	FT (Celsius)	
						Effuence	combustion
0	21.0	0	0	0	0	35.4	31.7
2	21.2	0	0	0	0	189.9	654.8
5	21.2	0	0	0	0	261.4	532.5
10	21.2	0	0	0	0	309.5	659.6
15	21.0	0	0	0	0	147.0	302.5
20	19.9	2353	1.1	5	5	105.0	226.3
25	16.9	>10000	4.1	24	25	140.1	243.1
30	15.3	>10000	5.7	24	25	112.7	221.7
35	14.0	>10000	6.0	20	21	81.5	135.4
40	15.8	>10000	5.2	14	15	72.0	104.6
45	16.9	7097	4.1	8	9	61.2	82.2
50	18.0	4902	3.0	7	8	51.5	67.6
55	18.8	3422	2.2	6	6	28.3	56.3
60	19.2	2759	1.8	5	5	44.6	51.6

ตารางที่ ก.7 เหน้้ำมัน ที่ 100 เปอร์เซนต์ของอากาศมากเกินพอ

Time(Min.)	O ₂ (Percentage)	CO (PPM)	CO ₂ (Percentage)	NO (PPM)	NO _x (PPM)	FT (Celsius)	
						Effuence	combustion
0	21.0	0	0	0	0	36.2	34.5
2	20.8	54	0.2	0	0	54.6	238.9
5	20.8	98	0.2	0	0	81.6	291.4
10	20.7	230	0.3	0	0	100.1	398.4
15	20.7	5328	0.3	2	2	276.2	661.8
20	20.8	7013	0.2	0	0	288.7	528.6
25	20.8	>10000	0.2	0	0	226.5	659.4
30	20.9	589	0.1	0	0	207.4	705.6
35	20.9	9	0.1	0	0	190.1	606.9
40	21.0	0	0	0	0	174.4	491.1
45	20.9	0	0.1	0	0	166.3	415.4
50	20.8	0	0.2	0	0	140.3	309.5
55	20.9	0	0.1	0	0	122.2	312.6
60	20.9	0	0.1	0	0	120.4	298.8

ตารางที่ ก.8 เหน้้ำมัน ที่ 150 เปอร์เซนต์ของอากาศมากเกินพอ

Time(Min.)	O ₂ (Percentage)	CO (PPM)	CO ₂ (Percentage)	NO (PPM)	NO _x (PPM)	FT (Celsius)	
						Effuence	combustion
0	21.0	0	0	0	0	38.6	31.4
2	20.8	8	0.2	0	0	58.6	241.6
5	20.8	79	0.2	0	0	79.4	245.7
10	20.7	457	0.3	0	0	102.2	480.5
15	20.7	1279	0.3	0	0	141.3	631.6
20	20.6	444	0.4	0	0	155.6	801.3
25	20.5	65	0.5	0	0	157.4	675.9
30	20.5	3	0.5	0	0	153.4	715.1
35	20.5	0	0.5	0	0	152.0	619.4
40	20.4	0	0.6	0	0	151.8	623.4
45	20.3	0	0.7	0	0	139.7	580.3
50	20.5	0	0.5	0	0	121.1	533.2
55	20.8	0	0.2	0	0	110.0	498.5
60	20.9	0	0.1	0	0	102.2	315.2

ตารางที่ ก.9 เหน้้ำมัน ที่ 200 เปอร์เซนต์ของอากาศมากเกินพอ

Time(Min.)	O ₂ (Percentage)	CO (PPM)	CO ₂ (Percentage)	NO (PPM)	NO _x (PPM)	FT (Celsius)	
						Effuence	combustion
0	21.0	0	0	0	0	39.1	33.2
2	20.8	0	0.2	0	0	61.7	237.8
5	20.9	89	0.1	0	0	80.6	271.8
10	20.7	347	0.3	0	0	170.5	398.6
15	20.7	879	0.3	0	0	211.6	530.6
20	20.4	461	0.6	0	0	222.4	621.8
25	20.3	56	0.7	0	0	247.9	817.6
30	20.3	1	0.7	0	0	231.6	808.1
35	20.2	0	0.8	0	0	222.3	647.8
40	20.5	0	0.5	0	0	198.7	512.4
45	20.7	0	0.3	0	0	195.6	491.6
50	20.8	0	0.2	0	0	160.8	488.6
55	20.9	0	0.1	0	0	161.3	372.6
60	20.9	0	0.1	0	0	150.1	350.4

ตารางที่ ก.10 กะลามาพร้าว ที่ 100 เปอร์เซ็นต์ของอากาศมากเกินพอ

Time(Min.)	O ₂ (Percentage)	CO (PPM)	CO ₂ (Percentage)	NO (PPM)	NO _x (PPM)	FT (Celsius)	
						Effuence	combustion
0	21.0	0	0	0	0	35.4	32.6
2	20.9	0	0.1	0	0	143.4	157.2
5	20.9	208	0.1	0	0	224.4	260.5
10	21.0	389	0	1	1	236.5	385.4
15	20.9	240	0.1	0	0	216.5	341.4
20	21.0	85	0	0	0	227.6	366.7
25	21.0	74	0	1	1	241.1	418.4
30	21.0	55	0	1	1	221.3	400.6
35	21.0	28	0	1	1	191.6	347.0
40	21.0	30	0	1	1	168.9	299.5
45	21.1	17	0	0	0	133.4	245.7
50	21.0	24	0	0	0	128.0	198.8
55	21.0	0	0	0	0	114.3	165.1
60	21.1	0	0	0	0	96.5	143.0

ตารางที่ ก.11 กะลามาพร้าว ที่ 150 เปอร์เซ็นต์ของอากาศมากเกินพอ

Time(Min.)	O ₂ (Percentage)	CO (PPM)	CO ₂ (Percentage)	NO (PPM)	NO _x (PPM)	FT (Celsius)	
						Effuence	combustion
0	21.0	0	0	0	0	34.6	29.7
2	20.7	6	0.3	0	0	155.7	171.1
5	20.8	28	0.2	0	0	225.0	312.3
10	20.8	0	0.2	0	0	232.9	336.0
15	20.8	345	0.2	0	0	300.4	583.0
20	18.0	218	3.0	0	0	324.5	566.3
25	17.3	300	3.7	0	0	300.5	519.4
30	20.0	459	1.0	0	0	244.7	437.0
35	19.2	79	1.8	0	0	236.3	408.2
40	20.6	0	0.4	0	0	192.9	330.6
45	20.8	0	0.2	0	0	187.0	256.6
50	20.0	0	1.0	0	0	170.3	220.0
55	20.1	0	0.9	0	0	169.6	186.4
60	21.0	0	0	0	0	141.2	165.8

ตารางที่ ก.12 กะลามาพร้าว ที่ 200 เปอร์เซนต์ของอากาศมากเกินพอ

Time(Min.)	O ₂ (Percentage)	CO (PPM)	CO ₂ (Percentage)	NO (PPM)	NO _x (PPM)	FT (Celsius)	
						Effuence	combustion
0	21.0	0	0	0	0	35.2	30.4
2	20.8	489	0.2	0	0	120.8	178.4
5	20.7	311	0.3	0	0	248.8	298.5
10	20.6	532	0.4	0	0	241.6	340.7
15	18.1	49	2.9	0	0	320.7	597.6
20	17.2	38	3.8	0	0	381.7	640.8
25	17.0	27	4.0	0	0	299.8	557.2
30	19.3	13	1.7	0	0	297.6	527.8
35	20.4	9	0.6	0	0	251.2	406.5
40	20.5	0	0.5	0	0	199.8	374.1
45	20.4	0	0.6	0	0	201.6	337.6
50	20.6	0	0.4	0	0	203.4	291.4
55	20.7	0	0.3	0	0	187.6	248.5
60	20.9	0	0.1	0	0	167.4	208.8

ตารางที่ ก.13 ลิกไนต์ ที่ 100 เปอร์เซ็นต์ของอากาศมากเกินพอ

Time(Min.)	O ₂ (Percentage)	CO (PPM)	CO ₂ (Percentage)	NO (PPM)	NO _x (PPM)	FT (Celsius)	
						Effuence	combustion
0	21.0	0	0	0	0	34.8	31.7
2	21.1	0	0	0	0	47.7	91.9
5	21.0	0	0	0	0	51.1	97.3
10	21.1	13	0	0	0	63.2	112.2
15	21.0	48	0	0	0	112.7	125.0
20	21.1	569	0	0	0	120.4	132.3
25	19.3	769	1.7	3	4	163.7	353.2
30	18.8	2431	2.2	8	8	158.0	324.7
35	17.0	5786	4.0	25	26	156.0	315.2
40	14.6	>10000	6.4	124	126	152.8	307.7
45	15.3	>10000	5.7	78	83	142.2	298.4
50	16.4	3798	4.6	42	47	133.1	261.1
55	20.2	2016	0.8	22	23	128.4	254.0
60	20.8	456	0.2	11	12	119.5	233.9

ตารางที่ ก.14 ลิกไนต์ ที่ 150 เปอร์เซ็นต์ของอากาศมากเกินพอ

Time(Min.)	O ₂ (Percentage)	CO (PPM)	CO ₂ (Percentage)	NO (PPM)	NO _x (PPM)	FT (Celsius)	
						Effuence	combustion
0	21.0	0	0	0	0	35.2	30.6
2	21.0	0	0	0	0	49.5	95.2
5	20.9	0	0.1	0	0	50.0	96.5
10	20.9	0	0.1	0	0	73.3	116.3
15	20.7	0	0.3	0	0	75.2	122.7
20	20.6	328	0.4	0	0	84.4	128.3
25	17.2	809	3.8	32	34	81.9	157.4
30	5.8	>10000	15.2	175	178	87.9	170.6
35	6.7	>10000	14.3	167	175	95.0	202.9
40	7.8	>10000	13.2	146	153	99.5	222.0
45	14.9	8453	6.1	74	75	94.0	218.2
50	18.2	3419	2.8	56	59	90.2	212.2
55	20.1	420	0.9	42	44	89.0	208.4
60	20.9	38	0.1	15	17	87.7	206.2

ตารางที่ ก.15 ลิกไนต์ ที่ 200 เปอร์เซ็นต์ของอากาศมากเกินพอ

Time(Min.)	O ₂ (Percentage)	CO (PPM)	CO ₂ (Percentage)	NO (PPM)	NO _x (PPM)	FT (Celsius)	
						Effuence	combustion
0	21.0	0	0	0	0	36.1	29.8
2	21.0	0	0	0	0	52.7	98.7
5	21.0	0	0	0	0	59.7	110.5
10	20.9	0	0.1	0	0	60.3	138.4
15	20.1	0	0.9	0	0	63.4	141.2
20	18.2	398	2.8	47	49	67.9	151.3
25	6.1	743	14.9	154	156	91.6	160.9
30	6.0	3471	15.0	150	151	101.4	190.1
35	5.8	>10000	15.2	151	153	110.3	211.8
40	10.5	>10000	10.5	147	149	109.7	237.6
45	14.3	3290	6.7	138	140	112.4	251.4
50	19.2	530	1.8	96	97	101.2	211.7
55	20.6	214	0.4	51	52	97.5	209.6
60	21.0	49	0	39	39	95.4	198.2

ตารางที่ ก.16 บิพูมินัส ที่ 100 เปอร์เซนต์ของอากาศมากเกินพอ

Time(Min.)	O ₂ (Percentage)	CO (PPM)	CO ₂ (Percentage)	NO (PPM)	NO _x (PPM)	FT (Celsius)	
						Effuence	combustion
0	21.0	0	0	0	0	37.8	33.1
2	20.8	0	0	0	0	58.5	102.4
5	21.1	0	0	0	0	61.5	112.5
10	21.2	9	0	0	0	62.7	115.7
15	21.1	39	0	0	0	60.4	119.4
20	12.6	378	8.4	16	17	80.7	174.7
25	6.1	509	14.9	58	61	97.3	209.5
30	3.2	2602	17.8	69	73	103.3	215.3
35	3.0	5621	18.0	97	101	109.0	228.6
40	5.5	>10000	15.5	57	59	114.4	239.1
45	9.2	>10000	11.8	42	44	116.3	241.1
50	13.0	1298	8.0	29	30	119.7	244.9
55	16.9	884	4.1	6	7	121.9	244.8
60	21.0	219	0	0	0	122.9	244.9

ตารางที่ ก.17 บิพูมินัส ที่ 150 เปอร์เซนต์ของอากาศมากเกินพอ

Time(Min.)	O ₂ (Percentage)	CO (PPM)	CO ₂ (Percentage)	NO (PPM)	NO _x (PPM)	FT (Celsius)	
						Effuence	combustion
0	21.0	0	0	0	0	48.1	32.2
2	21.0	0	0	0	0	65.2	110.2
5	21.1	0	0	0	0	67.4	113.9
10	21.0	0	0	0	0	58.4	113.0
15	21.0	0	0	0	0	58.9	112.7
20	21.1	0	0	0	0	63.1	119.1
25	21.1	325	0	0	0	74.9	121.9
30	21.1	218	0	0	0	74.8	134.8
35	14.1	7592	6.9	17	18	81.8	171.0
40	11.1	>10000	9.9	33	35	87.0	201.1
45	10.1	>10000	10.9	44	46	88.9	221.2
50	10.8	>10000	10.2	50	52	89.7	259.8
55	16.6	349	4.4	16	17	89.3	280.1
60	20.5	59	0.5	0	0	89.3	290.0

ตารางที่ ก.18 บิพูมินัส ที่ 200 เปอร์เซนต์ของอากาศมากเกินพอ

Time(Min.)	O ₂ (Percentage)	CO (PPM)	CO ₂ (Percentage)	NO (PPM)	NO _x (PPM)	FT (Celsius)	
						Effuence	combustion
0	21.0	0	0	0	0	47.1	35.9
2	21.2	0	0	0	0	87.6	114.8
5	21.3	0	0	0	0	88.7	120.4
10	21.0	0	0	0	0	93.2	134.6
15	16.7	0	4.3	16	17	98.5	148.9
20	15.4	0	5.6	31	33	101.8	150.4
25	12.1	0	8.9	45	47	108.9	180.6
30	10.9	109	10.1	48	48	112.3	220.7
35	9.8	78	11.2	38	39	120.7	259.6
40	15.6	9821	5.4	40	40	119.8	277.1
45	18.9	>10000	2.1	26	27	108.4	289.4
50	20.2	>10000	0.8	13	14	110.3	310.6
55	20.8	>10000	0.2	6	7	103.4	307.4
60	21.0	4657	0	0	0	101.3	305.2

ตารางที่ ก.19 แกลบ : บิทูมินัส (80 : 20) ที่ 100 เปอร์เซ็นต์ของอากาศมากเกินไป

Time(Min.)	O ₂ (Percentage)	CO (PPM)	CO ₂ (Percentage)	NO (PPM)	NO _x (PPM)	FT (Celsius)	
						Effuence	combustion
0	21.0	0	0	0	0	34.5	28.6
2	20.6	44	0.4	0	0	148.7	271.7
5	20.1	207	0.9	0	0	300.6	971.2
10	14.1	>10000	6.9	11	11	242.2	573.0
15	16.9	>10000	4.1	6	6	182.9	401.8
20	14.0	>10000	7.0	34	36	152.5	555.7
25	15.6	>10000	5.4	21	22	327.4	434.9
30	14.9	>10000	6.1	44	46	161.1	410.2
35	13.2	>10000	7.8	34	36	100.5	208.2
40	14.4	>10000	6.6	27	29	61.7	87.2
45	17.1	>10000	3.9	15	16	51.9	72.0
50	19.3	6616	1.7	8	9	58.5	61.6
55	20.1	2896	0.9	5	5	48.6	55.0
60	20.5	1333	0.5	4	4	41.4	46.9

ตารางที่ ก.20 แกลบ : บิทูมินัส (80 : 20) ที่ 150 เฟอร์เซ็นต์ของอากาศมากเกินไป

Time(Min.)	O ₂ (Percentage)	CO (PPM)	CO ₂ (Percentage)	NO (PPM)	NO _x (PPM)	FT (Celsius)	
						Effuence	combustion
0	21.0	0	0	0	0	35.4	29.3
2	20.8	0	0	0	0	133.3	444.2
5	20.3	337	0	0	0	100.2	377.1
10	17.3	>10000	3.7	0	0	115.0	327.6
15	16.9	3251	4.1	9	10	269.0	640.9
20	16.0	1963	5.0	30	32	284.1	496.8
25	15.9	2196	5.1	31	33	269.3	413.8
30	19.2	1115	1.8	0	0	209.5	487.0
35	19.2	>10000	1.8	8	9	286.4	676.7
40	17.8	>10000	3.2	0	0	62.8	152.6
45	19.7	>10000	1.3	0	0	50.8	88.3
50	20.3	3283	0.7	0	0	47.2	56.0
55	20.4	1197	0.6	0	0	45.0	50.4
60	20.4	509	0.6	0	0	41.4	45.7

ตารางที่ ก.21 แกลบ : บิทูมินัส (80 : 20) ที่ 200 เปอร์เซนต์ของอากาศมากเกินไป

Time(Min.)	O ₂ (Percentage)	CO (PPM)	CO ₂ (Percentage)	NO (PPM)	NO _x (PPM)	FT (Celsius)	
						Effuence	combustion
0	21.0	0	0	0	0	36.9	31.2
2	20.8	0	0.2	0	0	176.0	507.8
5	19.1	0	1.9	0	0	248.1	773.0
10	17.1	0	3.9	15	16	392.4	838.7
15	15.3	374	5.7	27	34	312.8	794.6
20	15.3	3217	5.7	39	40	291.6	720.4
25	15.1	>10000	5.9	47	49	198.1	514.6
30	17.3	2136	3.7	17	18	162.7	436.4
35	18.0	2339	3.0	2	14	109.2	222.3
40	18.3	1587	2.7	4	3	92.4	150.7
45	19.7	872	1.3	1	2	56.3	80.6
50	20.9	674	0.1	1	3	45.2	68.4
55	20.3	276	0.7	0	0	40.1	51.7
60	20.7	0	0.1	0	0	41.5	47.2

ตารางที่ ก.22 แกลบ : บิพูมินัส (50 : 50) ที่ 100 เปอร์เซนต์ของอากาศมากเกินพอ

Time(Min.)	O ₂ (Percentage)	CO (PPM)	CO ₂ (Percentage)	NO (PPM)	NO _x (PPM)	FT (Celsius)	
						Effuence	combustion
0	21.0	0	0	0	0	36.8	32.6
2	20.7	68	0.3	0	0	133.4	140.3
5	20.7	395	0.3	0	0	143.5	236.8
10	17.5	4791	3.5	51	52	152.9	279.1
15	17.8	7931	3.2	91	94	280.7	461.4
20	18.3	3190	2.7	40	42	288.6	371.6
25	18.0	3451	3.0	42	45	256.6	398.3
30	13.7	4178	7.3	84	88	239.1	451.0
35	17.3	3945	3.7	72	74	242.1	360.1
40	18.2	2157	2.8	14	16	140.2	201.8
45	18.9	321	2.1	0	0	136.2	195.4
50	19.1	48	1.9	0	0	130.6	146.3
55	19.5	0	1.5	0	0	129.3	154.2
60	19.8	0	1.2	0	0	120.5	134.2

ตารางที่ ก.23 แกลบ : บิทูมินัส (50 : 50) ที่ 150 เปอร์เซ็นต์ของอากาศมากเกินไป

Time(Min.)	O ₂ (Percentage)	CO (PPM)	CO ₂ (Percentage)	NO (PPM)	NO _x (PPM)	FT (Celsius)	
						Effuence	combustion
0	21.0	0	0	0	0	36.4	30.8
2	20.9	68	0.1	0	0	110.3	139.4
5	21.1	395	0	0	0	143.5	246.9
10	21.0	4791	0	0	0	159.3	351.2
15	20.0	7931	1.0	5	5	160.5	361.5
20	20.1	3190	0.9	0	0	154.3	408.8
25	19.3	3451	1.7	33	34	209.1	483.5
30	19.4	4178	1.6	19	21	211.5	424.1
35	19.7	3945	1.3	17	18	205.4	408.1
40	19.8	2157	1.2	8	9	201.3	387.5
45	19.7	321	1.3	17	18	209.4	399.1
50	18.6	48	2.4	42	43	231.5	418.3
55	19.2	0	1.8	6	8	201.4	387.5
60	21.0	0	0	0	0	189.3	302.1

ตารางที่ ก.24 แกลบ : บิทูมินัส (50 : 50) ที่ 200 เปอร์เซนต์ของอากาศมากเกินพอ

Time(Min.)	O ₂ (Percentage)	CO (PPM)	CO ₂ (Percentage)	NO (PPM)	NO _x (PPM)	FT (Celsius)	
						Effuence	combustion
0	21.0	0	0	0	0	36.5	32.8
2	20.8	0	0.2	0	0	110.3	193.4
5	20.5	45	0.5	0	0	153.5	274.9
10	20.0	568	1.0	7	8	198.2	369.2
15	16.3	5437	4.7	52	53	199.4	382.5
20	16.2	8331	4.8	50	54	201.3	450.8
25	17.0	4390	4.0	42	43	223.1	491.5
30	18.3	3951	2.7	33	34	232.5	436.1
35	18.6	4048	2.4	34	35	209.4	401.1
40	19.0	3355	2.0	13	15	204.3	392.5
45	19.3	2097	1.7	10	11	203.4	398.1
50	20.8	255	0.2	0	0	202.5	414.3
55	19.8	0	1.2	8	9	207.4	391.5
60	20.9	0	0.1	0	0	194.3	323.1

ตารางที่ ก.25 แกลบ : บิทูมินัส (20 : 80) ที่ 100 เปอร์เซ็นต์ของอากาศมากเกินไป

Time(Min.)	O ₂ (Percentage)	CO (PPM)	CO ₂ (Percentage)	NO (PPM)	NO _x (PPM)	FT (Celsius)	
						Effuence	combustion
0	21.0	0	0	0	0	36.7	33.3
2	21.0	0	0	0	0	62.3	87.0
5	21.1	0	0	0	0	134.5	231.4
10	21.0	0	0	0	0	209.7	530.3
15	21.1	468	0	8	9	241.5	795.6
20	21.3	995	0	9	10	260.5	922.3
25	20.5	1295	0.5	26	27	252.1	847.6
30	20.4	361	0.6	17	18	231.4	743.1
35	21.3	34	0	4	5	210.3	655.2
40	19.8	8	1.2	11	12	199.3	497.1
45	21.2	4	0	0	0	187.3	431.6
50	21.2	2	0	0	0	156.2	396.5
55	20.7	1	0.3	0	0	154.2	360.1
60	21.7	0	0	0	0	149.1	339.6

ตารางที่ ก.26 แกลบ : บิทูมินัส (20 : 80) ที่ 150 เปอร์เซ็นต์ของอากาศมากเกินไป

Time(Min.)	O ₂ (Percentage)	CO (PPM)	CO ₂ (Percentage)	NO (PPM)	NO _x (PPM)	FT (Celsius)	
						Effuence	combustion
0	21.0	0	0	0	0	33.5	37.5
2	20.9	5	0.1	0	0	88.8	108.9
5	18.2	245	2.8	24	25	154.0	256.1
10	15.1	783	5.9	52	53	199.9	431.0
15	19.5	452	1.5	23	25	230.4	536.8
20	18.5	391	2.5	20	21	213.5	522.1
25	19.3	297	1.7	7	7	222.1	509.8
30	21.0	59	0	0	0	210.0	452.9
35	20.0	1	1.0	4	5	198.4	408.1
40	20.6	0	0.4	0	0	185.3	385.6
45	20.7	0	0.3	0	0	145.6	358.1
50	20.5	0	0.5	0	0	155.3	322.3
55	20.6	0	0.4	0	0	109.4	298.7
60	20.7	0	0.3	0	0	123.4	275.1

ตารางที่ ก.27 แกลบ : บิทูมินัส (20 : 80) ที่ 200 เปอร์เซนต์ของอากาศมากเกินไป

Time(Min.)	O ₂ (Percentage)	CO (PPM)	CO ₂ (Percentage)	NO (PPM)	NO _x (PPM)	FT (Celsius)	
						Effuence	combustion
0	21.0	0	0	0	0	37.2	30.2
2	21.1	2	0	2	2	99.3	109.2
5	21.1	0	0	2	2	109.8	139.8
10	20.1	701	0.9	19	20	149.1	294.1
15	20.2	86	0.8	6	7	177.7	389.6
20	19.4	995	1.6	58	61	207.0	492.8
25	19.4	604	1.6	15	16	210.5	487.2
30	19.7	77	1.3	5	5	198.6	462.5
35	19.8	24	1.2	2	2	176.4	420.1
40	20.0	10	1.0	1	2	165.3	344.1
45	20.3	5	0.7	1	1	159.7	309.1
50	20.4	2	0.6	0	0	144.2	297.4
55	20.6	1	0.4	0	0	134.2	265.9
60	20.9	0	0.1	0	0	132.5	241.2

ตารางที่ ก.28 แกลบ : ลิกไนต์ (80 : 20) ที่ 100 เปอร์เซ็นต์ของอากาศมากเกินไป

Time(Min.)	O ₂ (Percentage)	CO (PPM)	CO ₂ (Percentage)	NO (PPM)	NO _x (PPM)	FT (Celsius)	
						Effuence	combustion
0	21.0	0	0	0	0	36.8	34.5
2	21.0	0	0	0	0	87.5	158.4
5	20.4	0	0.6	3	3	130.5	206.5
10	20.5	0	0.5	0	0	148.6	278.1
15	20.6	0	0.4	0	0	207.1	399.6
20	20.2	54	0.8	3	4	211.7	681.9
25	18.1	4758	2.9	34	36	226.4	764.2
30	17.0	7914	4.0	40	40	231.4	734.6
35	18.6	3109	2.4	25	26	209.8	631.9
40	18.9	2791	2.1	18	20	199.9	513.5
45	19.1	549	1.9	12	14	185.2	479.1
50	20.9	59	0.1	0	0	147.5	351.7
55	20.9	8	0.1	0	0	129.1	348.2
60	21.0	0	0	0	0	109.3	322.8

ตารางที่ ก.29 แกลบ : ลิกไนต์ (80 : 20) ที่ 150 เปอร์เซนต์ของอากาศมากเกินพอ

Time(Min.)	O ₂ (Percentage)	CO (PPM)	CO ₂ (Percentage)	NO (PPM)	NO _x (PPM)	FT (Celsius)	
						Effuence	combustion
0	21.0	0	0	0	0	37.2	36.1
2	20.7	0	0.3	0	0	149.3	259.8
5	20.9	0	0.1	0	0	248.9	347.1
10	20.8	59	0.2	0	0	309.1	443.2
15	18.1	8291	2.9	42	44	350.2	580.9
20	18.8	9318	2.2	31	32	329.1	567.1
25	17.1	8822	3.9	40	42	347.6	523.6
30	19.5	3109	1.5	16	16	311.7	499.3
35	20.1	2881	0.9	12	12	295.3	466.1
40	19.9	467	1.1	1	1	291.6	435.1
45	20.0	51	1.0	0	0	254.6	409.1
50	20.1	0	0.9	0	0	233.1	333.3
55	20.1	0	0.9	0	0	229.0	329.1
60	20.2	0	0.8	0	0	220.8	311.9

ตารางที่ ก.30 แกลบ : ลิกไนต์ (80 : 20) ที่ 200 เปอร์เซ็นต์ของอากาศมากเกินพอ

Time(Min.)	O ₂ (Percentage)	CO (PPM)	CO ₂ (Percentage)	NO (PPM)	NO _x (PPM)	FT (Celsius)	
						Effuence	combustion
0	21.0	0	0	0	0	38.1	30.3
2	20.8	0	0.2	0	0	98.4	172.8
5	20.8	0	0.2	0	0	183.2	243.1
10	19.2	59	1.8	10	12	298.6	487.4
15	17.1	8291	3.9	47	48	330.2	610.0
20	17.2	9318	3.8	43	45	332.1	609.4
25	18.4	8822	2.6	36	37	297.7	598.2
30	19.4	3109	1.6	20	21	275.3	578.1
35	20.0	2881	1.0	8	10	261.9	542.1
40	21.0	467	0	0	0	231.5	533.6
45	21.0	51	0	0	0	222.6	519.9
50	21.0	0	0	0	0	219.4	451.4
55	21.0	0	00	0	0	211.8	421.8
60	20.9	0	0.1	0	0	209.5	3896

ตารางที่ ก.31 แกลบ : ลิกไนต์ (50 : 50) ที่ 100 เปอร์เซ็นต์ของอากาศมากเกินพอ

Time(Min.)	O ₂ (Percentage)	CO (PPM)	CO ₂ (Percentage)	NO (PPM)	NO _x (PPM)	FT (Celsius)	
						Effuence	combustion
0	21.0	0	0	0	0	37.4	32.7
2	20.7	0	0.3	0	0	86.3	154.2
5	20.7	0	0.3	0	0	109.9	198.7
10	20.8	0	0.2	0	0	142.6	241.5
15	20.8	0	0.2	0	0	189.5	379.0
20	20.8	35	0.2	0	0	204.1	426.1
25	20.8	74	0.2	0	0	239.6	538.7
30	21.0	82	0	0	0	268.5	698.8
35	20.9	783	0.1	9	9	241.8	644.4
40	20.8	831	0.2	5	5	211.1	587.1
45	20.8	491	0.2	2	2	196.0	501.9
50	20.8	93	0.2	1	1	183.1	462.3
55	20.9	31	0.1	1	1	175.2	388.9
60	21.0	9	0	0	0	173.9	355.2

ตารางที่ ก.32 แกลบ : ลิกไนต์ (50 : 50) ที่ 150 เปอร์เซ็นต์ของอากาศมากเกินไป

Time(Min.)	O ₂ (Percentage)	CO (PPM)	CO ₂ (Percentage)	NO (PPM)	NO _x (PPM)	FT (Celsius)	
						Effuence	combustion
0	21.0	0	0	0	0	37.6	35.9
2	20.8	0	0.2	0	0	121.4	236.4
5	20.9	4	0.1	0	0	169.2	298.5
10	20.8	6	0.2	0	0	198.1	411.5
15	16.0	>10000	5.0	70	74	205.1	589.4
20	18.2	3545	2.8	61	64	201.3	479.2
25	18.4	2678	2.6	51	54	211.6	464.1
30	18.5	2006	2.5	47	50	213.5	455.6
35	18.5	401	2.5	13	13	198.4	431.9
40	18.7	200	2.3	6	6	176.3	419.2
45	18.9	129	2.1	3	3	168.2	399.9
50	19.1	90	1.9	2	2	159.1	376.1
55	18.7	148	2.3	9	9	154.4	356.6
60	18.9	186	2.1	6	6	139.9	311.6

ตารางที่ ก.33 แกลบ : ลิกไนต์ (50 : 50) ที่ 200 เปอร์เซนต์ของอากาศมากเกินไป

Time(Min.)	O ₂ (Percentage)	CO (PPM)	CO ₂ (Percentage)	NO (PPM)	NO _x (PPM)	FT (Celsius)	
						Effuence	combustion
0	21.0	0	0	0	0	38.1	30.3
2	20.7	0	0.3	0	0	98.4	189.9
5	20.8	0	0.2	0	0	129.5	279.3
10	19.1	0	1.9	3	4	174.3	358.6
15	18.4	472	2.6	10	12	201.3	496.2
20	17.2	1098	3.8	38	39	214.9	573.1
25	15.1	4372	5.9	80	82	220.3	544.5
30	16.4	2177	4.6	72	73	201.4	524.2
35	16.9	1972	4.1	69	70	177.9	509.1
40	19.1	205	1.9	50	52	159.2	472.1
45	18.2	400	2.8	30	31	143.1	431.5
50	19.3	200	1.7	20	22	133.2	388.9
55	18.9	146	2.1	14	15	134.9	367.1
60	18.3	90	2.7	7	8	126.0	350.2

ตารางที่ ก.34 แกลบ : ลิกไนต์ (20 : 80) ที่ 100 เปอร์เซ็นต์ของอากาศมากเกินพอ

Time(Min.)	O ₂ (Percentage)	CO (PPM)	CO ₂ (Percentage)	NO (PPM)	NO _x (PPM)	FT (Celsius)	
						Effuence	combustion
0	21.0	0	0	0	0	39.2	33.4
2	20.8	0	0.2	0	0	114.1	153.2
5	19.5	36	1.5	0	0	145.9	239.7
10	20.3	4	0.7	0	0	198.5	341.3
15	20.4	47	0.6	0	0	215.6	433.9
20	20.5	145	0.5	0	0	229.8	594.0
25	20.7	649	0.3	7	8	233.1	613.5
30	20.9	530	0.1	18	20	241.5	589.1
35	21.0	411	0	11	12	219.4	541.6
40	21.0	58	0	6	7	200.1	529.8
45	21.0	0	0	0	0	185.3	487.1
50	21.0	0	0	0	0	169.9	452.9
55	21.1	109	0	4	5	154.1	389.2
60	21.2	142	0	5	6	149.2	356.4

ตารางที่ ก.35 แกลบ : ลิกไนต์ (20 : 80) ที่ 150 เปอร์เซนต์ของอากาศมากเกินไป

Time(Min.)	O ₂ (Percentage)	CO (PPM)	CO ₂ (Percentage)	NO (PPM)	NO _x (PPM)	FT (Celsius)	
						Effuence	combustion
0	21.0	0	0	0	0	37.1	31.9
2	21.0	60	0	0	0	79.4	126.7
5	21.2	8	0	0	0	109.2	189.3
10	21.1	7	0	0	0	136.2	269.2
15	21.0	6	0	0	0	163.3	349.0
20	20.9	5	0.1	0	0	198.9	466.7
25	18.8	750	2.2	0	0	217.9	573.2
30	17.2	374	3.8	11	13	219.5	541.3
35	16.1	1237	4.9	24	25	188.5	499.8
40	16.0	>10000	5.0	58	60	177.8	513.5
45	18.3	>10000	2.7	15	16	169.3	473.9
50	20.8	3299	0.2	7	8	159.2	432.1
55	20.9	45	0.1	0	0	144.7	379.2
60	20.9	0	0.1	0	0	145.2	365.7

ตารางที่ ก.36 แกลบ : ลิกไนต์ (20 : 80) ที่ 200 เปอร์เซนต์ของอากาศมากเกินไป

Time(Min.)	O ₂ (Percentage)	CO (PPM)	CO ₂ (Percentage)	NO (PPM)	NO _x (PPM)	FT (Celsius)	
						Effuence	combustion
0	21.0	0	0	0	0	36.2	32.4
2	20.6	76	0.4	0	0	108.3	165.9
5	18.7	346	2.3	0	0	165.6	244.8
10	17.2	1426	3.8	7	8	198.2	402.9
15	16.8	>10000	4.2	10	11	209.7	568.2
20	16.2	>10000	4.8	21	20	191.3	544.1
25	16.1	>10000	4.9	54	58	181.6	509.3
30	17.3	>10000	3.7	35	37	177.3	468.1
35	18.7	7423	2.3	20	22	172.4	432.0
40	19.2	491	1.8	13	13	165.3	398.2
45	20.0	89	1.0	10	12	154.4	377.1
50	21.0	0	0	3	5	149.9	309.6
55	21.2	0	0	0	0	143.1	286.4
60	21.3	0	0	0	0	139.2	233.1

ตารางที่ ก.37 กากอ้อย : บิโทมินัส (80 : 20) ที่ 100 เปอร์เซ็นต์ของอากาศมากเกินพอ

Time(Min.)	O ₂ (Percentage)	CO (PPM)	CO ₂ (Percentage)	NO (PPM)	NO _x (PPM)	FT (Celsius)	
						Effuence	combustion
0	21.0	0	0	0	0	38.1	33.9
2	21.0	0	0	0	0	124.1	268.0
5	21.1	0	0	1	1	122.1	321.7
10	20.7	54	0.3	3	4	121.2	310.8
15	20.9	8	0.1	4	5	109.0	277.2
20	21.0	0	0	3	3	101.1	271.0
25	21.3	0	0	1	1	98.7	331.3
30	21.3	0	0	2	2	109.0	278.3
35	21.3	0	0	1	1	94.5	406.1
40	19.2	489	1.8	11	11	90.9	649.1
45	15.4	2891	5.6	31	33	104.8	633.5
50	14.4	3788	6.6	36	37	100.9	537.7
55	14.0	4119	7.0	28	30	72.0	447.3
60	14.7	380	6.3	14	15	83.8	393.0

ตารางที่ ก.38 กากอ้อย : บิทูมินัส (80 : 20) ที่ 150 เปอร์เซ็นต์ของอากาศมากเกินพอ

Time(Min.)	O ₂ (Percentage)	CO (PPM)	CO ₂ (Percentage)	NO (PPM)	NO _x (PPM)	FT (Celsius)	
						Effuence	combustion
0	21.0	0	0	0	0	36.2	32.4
2	20.9	15	0.1	0	0	136.9	139.2
5	20.9	21	0.1	0	0	119.3	128.7
10	20.3	1869	0.7	0	0	97.7	224.0
15	20.6	966	0.4	0	0	90.9	270.0
20	20.6	344	0.4	0	0	81.8	194.0
25	20.5	604	0.5	0	0	86.5	321.7
30	20.3	841	0.7	0	0	128.4	380.5
35	19.6	4407	1.4	0	0	125.5	385.7
40	13.5	>10000	7.5	23	24	136.4	496.5
45	19.0	>10000	2.0	12	13	126.5	440.0
50	20.1	3687	0.9	0	0	151.2	432.9
55	20.3	1669	0.7	0	0	136.3	366.7
60	20.4	417	0.6	0	0	128.3	334.8

ตารางที่ ก.39 กากอ้อย : บิทูมินัส (80 : 20) ที่ 200 เปอร์เซ็นต์ของอากาศมากเกินพอ

Time(Min.)	O ₂ (Percentage)	CO (PPM)	CO ₂ (Percentage)	NO (PPM)	NO _x (PPM)	FT (Celsius)	
						Effuence	combustion
0	21.0	0	0	0	0	36.2	32.4
2	21.0	0	0	0	0	129.8	214.2
5	20.8	320	0.2	0	0	140.5	230.4
10	20.7	1871	0.3	0	0	134.8	244.2
15	20.6	2246	0.4	2	3	170.2	398.2
20	20.3	980	0.7	0	0	161.4	304.2
25	19.4	4577	1.6	16	18	211.7	420.7
30	17.2	>10000	3.8	11	11	207.3	473.4
35	14.6	>10000	6.4	21	23	235.8	533.5
40	15.9	>10000	5.1	19	20	211.4	497.8
45	18.6	>10000	2.4	17	17	131.2	450.7
50	19.7	3741	1.3	2	5	190.4	432.4
55	20.8	1020	0.2	0	0	187.2	410.3
60	20.3	318	0.7	0	0	140.7	398.7

ตารางที่ ก.40 กากอ้อย : บิทูมินัส (50 : 50) ที่ 100 เปอร์เซ็นต์ของอากาศมากเกินพอ

Time(Min.)	O ₂ (Percentage)	CO (PPM)	CO ₂ (Percentage)	NO (PPM)	NO _x (PPM)	FT (Celsius)	
						Effuence	combustion
0	21.0	0	0	0	0	36.1	29.9
2	21.2	0	0	6	6	93.4	139.2
5	21.2	45	0	7	7	146.2	249.5
10	21.4	922	0	8	8	178.5	357.7
15	21.5	800	0	9	10	198.1	441.5
20	21.6	759	0	9	9	201.8	419.3
25	21.7	203	0	10	11	188.2	431.1
30	21.9	390	0	10	10	174.4	401.2
35	21.8	90	0	6	7	176.3	351.9
40	21.7	0	0	0	0	142.9	322.0
45	21.7	0	0	0	0	138.7	291.5
50	21.2	0	0	0	0	133.2	261.9
55	21.2	0	0	0	0	129.4	259.8
60	21.1	0	0	0	0	132.1	233.8

ตารางที่ ก.41 กากอ้อย : บิทูมินัส (50 : 50) ที่ 150 เปอร์เซ็นต์ของอากาศมากเกินพอ

Time(Min.)	O ₂ (Percentage)	CO (PPM)	CO ₂ (Percentage)	NO (PPM)	NO _x (PPM)	FT (Celsius)	
						Effuence	combustion
0	21.0	0	0	0	0	37.4	33.5
2	21.1	0	0	0	0	100.3	231.8
5	21.1	0	0	0	0	145.2	380.9
10	20.9	0	0.1	0	0	174.9	487.3
15	20.9	98	0.1	1	2	199.3	549.1
20	20.8	203	0.2	1	1	184.1	543.7
25	20.8	481	0.2	2	2	180.2	522.4
30	20.7	509	0.3	2	3	203.1	483.2
35	20.7	421	0.3	2	3	196.4	441.2
40	20.7	399	0.3	3	3	133.0	398.1
45	20.7	289	0.3	3	3	127.8	359.1
50	20.9	2	0.1	0	0	125.1	331.0
55	21.0	0	0	0	0	111.0	322.0
60	21.1	0	0	0	0	121.4	310.2

ตารางที่ ก.42 กากอ้อย : บิทูมินัส (50 : 50) ที่ 200 เปอร์เซ็นต์ของอากาศมากเกินพอ

Time(Min.)	O ₂ (Percentage)	CO (PPM)	CO ₂ (Percentage)	NO (PPM)	NO _x (PPM)	FT (Celsius)	
						Effuence	combustion
0	21.0	0	0	0	0	37.4	33.5
2	21.1	0	0	0	0	110.3	237.1
5	21.3	68	0	2	3	155.2	390.2
10	21.2	293	0	2	4	176.9	427.1
15	21.4	583	0	5	6	181.3	551.1
20	21.6	449	0	7	8	186.1	533.7
25	21.7	406	0	1	2	190.2	531.4
30	21.8	391	0	1	1	210.1	498.0
35	21.8	260	0	0	0	189.4	401.2
40	21.7	8	0	0	0	143.0	389.1
45	21.7	0	0	0	0	129.8	390.2
50	21.9	0	0	0	0	101.1	341.8
55	21.2	0	0	0	0	120.0	325.1
60	21.1	0	0	0	0	121.4	311.9

ตารางที่ ก.43 กากอ้อย : บิทูมินัส (20 : 80) ที่ 100 เปอร์เซ็นต์ของอากาศมากเกินพอ

Time(Min.)	O ₂ (Percentage)	CO (PPM)	CO ₂ (Percentage)	NO (PPM)	NO _x (PPM)	FT (Celsius)	
						Effuence	combustion
0	21.0	0	0	0	0	37.4	33.5
2	21.0	0	0	0	0	102.5	195.2
5	20.4	0	0.6	0	0	169.2	233.6
10	19.0	385	2.0	7	8	200.1	497.0
15	18.6	7140	2.4	15	15	210.4	537.1
20	14.2	>10000	6.8	75	79	221.4	522.9
25	12.1	>10000	8.9	87	92	193.6	478.1
30	12.4	>10000	8.6	66	69	184.2	422.3
35	13.2	>10000	7.8	49	51	179.3	398.7
40	12.4	>10000	8.6	39	40	166.7	344.9
45	14.4	>10000	6.6	31	33	152.3	299.9
50	18.9	>10000	2.1	13	14	130.2	251.3
55	20.0	3315	1.0	7	7	122.9	244.1
60	20.3	1315	0.7	3	3	110.7	245.0

ตารางที่ ก.44 กากอ้อย : บิทูมินัส (20 : 80) ที่ 150 เปอร์เซ็นต์ของอากาศมากเกินพอ

Time(Min.)	O ₂ (Percentage)	CO (PPM)	CO ₂ (Percentage)	NO (PPM)	NO _x (PPM)	FT (Celsius)	
						Effuence	combustion
0	21.0	0	0	0	0	36.9	31.6
2	21.1	0	0	0	0	87.4	129.4
5	20.0	1034	1.0	4	5	134.5	188.4
10	20.8	1309	0.2	4	4	169.7	219.0
15	20.3	2299	0.7	4	4	183.5	344.1
20	17.8	7914	3.2	44	46	192.2	378.6
25	19.4	6590	1.6	35	36	190.3	358.1
30	20.7	3148	0.3	10	10	187.1	363.2
35	20.5	899	0.5	6	6	179.0	320.0
40	20.9	574	0.1	4	5	169.2	294.1
45	21.0	301	0	4	5	144.8	286.5
50	21.0	93	0	4	4	132.6	271.3
55	21.0	0	0	3	3	130.2	254.0
60	21.0	0	0	3	3	128.9	233.8

ตารางที่ ก.45 กากอ้อย : บิทูมินัส (20 : 80) ที่ 200 เปอร์เซนต์ของอากาศมากเกินพอ

Time(Min.)	O ₂ (Percentage)	CO (PPM)	CO ₂ (Percentage)	NO (PPM)	NO _x (PPM)	FT (Celsius)	
						Effuence	combustion
0	21.0	0	0	0	0	36.9	29.4
2	20.0	0	1.0	0	0	103.4	159.2
5	18.2	472	2.8	6	8	145.1	199.8
10	14.3	8540	6.7	28	30	176.9	293.1
15	12.1	>10000	8.9	81	86	194.5	364.2
20	12.3	>10000	8.7	72	74	197.1	370.1
25	13.4	>10000	7.6	54	57	189.4	344.1
30	13.6	>10000	7.4	42	43	193.1	320.9
35	14.7	>10000	6.3	31	33	183.2	291.8
40	14.9	>10000	6.1	10	12	185.5	288.8
45	18.6	>10000	2.4	8	9	169.4	279.1
50	20.0	4320	1.0	7	8	159.8	248.7
55	20.3	1240	0.7	4	5	152.1	223.5
60	20.5	0	0.5	0	0	148.2	211.7

ตารางที่ ก.46 กากอ้อย : ลิกไนต์ (80 : 20) ที่ 100 เปอร์เซ็นต์ของอากาศมากเกินพอ

Time(Min.)	O ₂ (Percentage)	CO (PPM)	CO ₂ (Percentage)	NO (PPM)	NO _x (PPM)	FT (Celsius)	
						Effuence	combustion
0	21.0	0	0	0	0	36.4	30.7
2	20.8	0	0.2	0	0	87.1	143.7
5	20.8	0	0.2	0	0	134.5	235.1
10	21.0	0	0	0	0	146.8	298.9
15	21.4	9	0	0	0	289.9	369.7
20	18.1	491	2.9	5	6	348.2	482.3
25	19.6	310	1.4	3	4	314.5	464.2
30	19.8	244	1.2	1	1	310.2	409.1
35	21.2	89	0	0	0	271.2	392.4
40	21.3	1	0	0	0	209.8	374.3
45	21.1	0	0	0	0	194.5	308.0
50	21.1	0	0	0	0	172.5	297.2
55	21.3	0	0	0	0	143.0	256.9
60	21.3	0	0	0	0	133.5	260.1

ตารางที่ ก.47 กากอ้อย : ลิกไนต์ (80 : 20) ที่ 150 เปอร์เซ็นต์ของอากาศมากเกินพอ

Time(Min.)	O ₂ (Percentage)	CO (PPM)	CO ₂ (Percentage)	NO (PPM)	NO _x (PPM)	FT (Celsius)	
						Effuence	combustion
0	21.0	0	0	0	0	40.6	38.1
2	20.9	0	0.1	1	1	84.7	134.9
5	21.1	2	0	0	0	127.5	189.9
10	20.5	60	0.5	0	0	149.0	241.9
15	20.0	177	1.0	2	3	208.9	376.2
20	19.4	301	1.6	2	2	261.1	426.4
25	19.1	371	1.9	3	3	233.4	409.2
30	19.0	403	2.0	3	3	222.9	359.1
35	18.7	486	2.3	0	0	198.4	328.0
40	18.6	476	2.4	5	5	211.9	301.2
45	18.9	238	2.1	3	3	238.0	256.1
50	19.0	148	2.0	1	1	198.9	251.6
55	19.2	99	1.8	1	1	183.2	248.1
60	19.4	77	1.6	1	1	172.9	221.0

ตารางที่ ก.48 กากอ้อย : ลิกไนต์ (80 : 20) ที่ 200 เปอร์เซ็นต์ของอากาศมากเกินพอ

Time(Min.)	O ₂ (Percentage)	CO (PPM)	CO ₂ (Percentage)	NO (PPM)	NO _x (PPM)	FT (Celsius)	
						Effuence	combustion
0	21.0	0	0	0	0	40.5	37.6
2	20.9	0	0.1	0	0	85.9	156.3
5	20.9	1	0.1	0	0	108.4	198.9
10	20.9	0	0.1	0	0	190.3	285.0
15	21.2	0	0	0	0	213.4	347.1
20	21.2	1	0	0	0	289.3	408.3
25	21.0	0	0	0	0	311.5	498.1
30	21.1	7	0	0	0	328.6	561.5
35	18.0	560	3.0	11	12	301.5	544.0
40	18.9	394	2.1	9	10	319.6	511.8
45	19.2	166	1.8	7	9	279.1	479.1
50	20.1	103	0.9	5	6	251.8	431.8
55	21.0	161	0	0	0	244.5	377.6
60	21.1	56	0	0	0	239.1	358.1

ตารางที่ ก.49 กากอ้อย : ลิกไนต์ (50 : 50) ที่ 100 เปอร์เซ็นต์ของอากาศมากเกินพอ

Time(Min.)	O ₂ (Percentage)	CO (PPM)	CO ₂ (Percentage)	NO (PPM)	NO _x (PPM)	FT (Celsius)	
						Effuence	combustion
0	21.0	0	0	0	0	39.2	33.4
2	20.7	821	0.3	0	0	129.7	289.7
5	20.9	23	0.1	0	0	145.7	146.8
10	19.0	4313	2.0	0	0	198.1	169.8
15	17.1	6703	3.9	8	8	148.1	231.3
20	17.8	>10000	3.2	9	9	136.0	297.8
25	18.7	>10000	2.3	4	4	126.1	330.1
30	20.2	4600	0.8	0	0	135.9	331.8
35	20.3	612	0.7	0	0	119.4	353.0
40	20.5	1007	0.5	0	0	123.8	360.6
45	20.5	1443	0.5	0	0	113.1	369.8
50	20.7	1799	0.3	0	0	104.4	378.5
55	20.8	1153	0.2	0	0	91.6	398.3
60	21.1	702	0	0	0	86.5	408.0

ตารางที่ ก.50 กากอ้อย : ลิกไนต์ (50 : 50) ที่ 150 เปอร์เซ็นต์ของอากาศมากเกินพอ

Time(Min.)	O ₂ (Percentage)	CO (PPM)	CO ₂ (Percentage)	NO (PPM)	NO _x (PPM)	FT (Celsius)	
						Effuence	combustion
0	21.0	0	0	0	0	38.2	34.4
2	21.6	0	0	0	0	110.8	248.2
5	21.7	0	0	0	0	217.9	375.2
10	20.4	1233	0.6	4	5	250.5	669.7
15	21.6	342	0	0	0	219.8	615.0
20	20.0	2310	1.0	8	9	221.1	732.9
25	18.2	7230	2.8	20	22	201.8	626.7
30	20.1	4581	0.9	6	6	181.0	548.1
35	19.1	439	1.9	3	4	166.5	561.6
40	17.6	3419	3.4	17	18	174.2	671.5
45	19.7	1098	1.3	3	4	170.2	426.0
50	20.8	541	0.2	1	2	152.2	383.5
55	21.1	0	0	0	0	135.3	345.9
60	21.0	0	0	0	0	121.9	320.7

ตารางที่ ก.51 กากอ้อย : ลิกไนต์ (50 : 50) ที่ 200 เปอร์เซ็นต์ของอากาศมากเกินพอ

Time(Min.)	O ₂ (Percentage)	CO (PPM)	CO ₂ (Percentage)	NO (PPM)	NO _x (PPM)	FT (Celsius)	
						Effuence	combustion
0	21.0	0	0	0	0	38.1	32.9
2	21.6	0	0	0	0	120.7	259.6
5	20.0	89	1.0	2	3	214.4	300.4
10	19.8	3251	1.2	9	11	278.2	534.6
15	18.2	4491	2.8	14	15	314.3	763.3
20	17.6	3410	3.4	17	18	299.4	738.8
25	14.5	6892	6.5	19	20	271.2	682.1
30	15.2	5998	5.8	19	19	250.4	643.7
35	17.1	1032	3.9	12	14	217.2	544.6
40	19.2	100	1.8	8	8	223.4	539.3
45	20.3	91	0.7	2	3	153.3	347.1
50	20.1	48	0.9	0	0	155.2	350.4
55	21.0	0	0	0	0	120.8	312.1
60	21.2	0	0	0	0	134.2	324.4

ตารางที่ ก.52 กากอ้อย : ลิกไนต์ (20 : 80) ที่ 100 เปอร์เซ็นต์ของอากาศมากเกินพอ

Time(Min.)	O ₂ (Percentage)	CO (PPM)	CO ₂ (Percentage)	NO (PPM)	NO _x (PPM)	FT (Celsius)	
						Effuence	combustion
0	21.0	0	0	0	0	35.1	30.9
2	20.8	0	0.2	0	0	96.5	148.4
5	21.0	82	0	0	0	119.8	212.4
10	16.6	1453	4.4	32	33	143.2	444.4
15	17.9	981	3.1	25	27	120.3	431.0
20	18.4	788	2.6	20	21	122.1	396.0
25	19.2	509	1.8	13	14	119.6	425.0
30	19.5	441	1.5	12	13	109.5	394.2
35	19.9	320	1.1	9	9	132.5	378.8
40	20.3	221	0.7	5	6	146.8	379.0
45	20.5	0	0.5	5	6	146.7	373.7
50	20.6	0	0.4	4	4	131.5	376.7
55	20.6	0	0.4	2	2	119.2	419.3
60	21.0	0	0	0	0	102.9	357.1

ตารางที่ ก.53 กากอ้อย : ลิกไนต์ (20 : 80) ที่ 150 เปอร์เซ็นต์ของอากาศมากเกินพอ

Time(Min.)	O ₂ (Percentage)	CO (PPM)	CO ₂ (Percentage)	NO (PPM)	NO _x (PPM)	FT (Celsius)	
						Effuence	combustion
0	21.0	0	0	0	0	39.6	32.8
2	21.0	0	0	0	0	147.6	194.0
5	21.0	0	0	0	0	211.3	167.6
10	20.7	34	0.3	0	0	250.2	256.3
15	20.5	68	0.5	0	0	205.6	332.8
20	18.2	133	2.8	8	9	251.0	356.6
25	19.1	2390	1.9	16	17	174.9	431.0
30	19.0	3110	2.0	23	24	162.7	462.0
35	20.3	1983	0.7	11	12	149.7	399.2
40	20.6	491	0.4	6	6	138.1	363.2
45	20.7	44	0.3	5	6	133.3	342.0
50	20.8	0	0.2	3	4	116.7	320.1
55	21.0	0	0	2	2	110.4	299.0
60	21.1	0	0	0	0	103.6	284.6

ตารางที่ ก.54 กากอ้อย : ลิกไนต์ (20 : 80) ที่ 200 เปอร์เซ็นต์ของอากาศมากเกินพอ

Time(Min.)	O ₂ (Percentage)	CO (PPM)	CO ₂ (Percentage)	NO (PPM)	NO _x (PPM)	FT (Celsius)	
						Effuence	combustion
0	21.0	0	0	0	0	38.4	32.1
2	21.0	0	0	0	0	98.2	210.3
5	20.8	0	0.2	0	0	127.8	276.4
10	20.2	78	0.8	0	0	219.4	391.7
15	19.7	238	0.3	9	10	239.7	522.8
20	18.1	1248	2.9	17	18	227.4	517.2
25	17.8	3291	3.2	21	23	233.4	498.1
30	17.9	2914	3.1	10	11	219.8	471.2
35	19.8	1432	1.2	7	8	239.2	431.4
40	20.2	784	0.8	6	7	217.4	422.8
45	20.8	0	0.2	0	0	203.4	436.9
50	20.7	0	0.3	0	0	198.7	441.3
55	21.0	0	0	0	0	187.6	409.8
60	21.0	0	0	0	0	198.4	411.0

ตารางที่ ก.55 เหน้้ำมันสำปะหลัง : บิทูมินัส (80 : 20) ที่ 100 เปอร์เซ็นต์ของอากาศมากเกินพอ

Time(Min.)	O ₂ (Percentage)	CO (PPM)	CO ₂ (Percentage)	NO (PPM)	NO _x (PPM)	FT (Celsius)	
						Effuence	combustion
0	21.0	0	0	0	0	39.2	33.9
2	20.9	0	0.1	0	0	110.3	228.6
5	21.0	0	0	0	0	123.3	299.6
10	21.1	0	0	1	1	146.6	535.3
15	20.8	0	0.2	0	0	225.5	716.8
20	20.9	0	0.1	1	1	208.8	702.5
25	20.9	0	0.1	0	0	207.8	647.3
30	20.8	0	0.2	0	0	227.3	688.3
35	20.9	0	0.1	0	0	221.4	635.7
40	20.9	0	0.1	2	2	202.4	631.0
45	20.9	0	0.1	1	1	193.9	561.4
50	20.9	0	0.1	2	2	181.3	491.2
55	20.8	0	0.2	3	3	171.0	441.6
60	21.1	0	0	0	0	165.0	412.9

ตารางที่ ก.56 เหน้้ำมันสำปะหลัง : บิทูมินัส (80 : 20) ที่ 150 เปอร์เซนต์ของอากาศมากเกินพอ

Time(Min.)	O ₂ (Percentage)	CO (PPM)	CO ₂ (Percentage)	NO (PPM)	NO _x (PPM)	FT (Celsius)	
						Effuence	combustion
0	21.0	0	0	0	0	39.0	33.8
2	21.1	0	0	0	0	112.0	220.5
5	21.1	0	0	0	0	126.0	316.5
10	21.1	0	0	0	0	126.1	411.6
15	21.1	0	0	0	0	121.7	440.7
20	21.3	492	0	4	4	145.1	717.8
25	21.2	89	0	1	1	136.3	550.7
30	21.3	0	0	0	0	133.4	487.5
35	21.2	0	0	0	0	131.0	589.4
40	21.0	0	0	0	0	127.7	566.0
45	21.0	0	0	0	0	121.4	520.3
50	20.9	0	0.1	0	0	115.3	499.6
55	20.8	0	0.2	0	0	110.2	468.4
60	21.1	0	0	0	0	98.8	411.0

ตารางที่ ก.57 เหน้้ำมันสำปะหลัง : บิทูมินัส (80 : 20) ที่ 200 เปอร์เซนต์ของอากาศมากเกินพอ

Time(Min.)	O ₂ (Percentage)	CO (PPM)	CO ₂ (Percentage)	NO (PPM)	NO _x (PPM)	FT (Celsius)	
						Effuence	combustion
0	21.0	0	0	0	0	39.4	32.9
2	21.0	0	0	0	0	97.6	216.4
5	20.8	0	0.2	0	0	137.6	320.8
10	20.9	0	0.1	0	0	140.7	470.6
15	20.8	678	0.2	5	5	201.4	531.6
20	20.8	399	0.2	2	3	212.3	691.7
25	20.7	89	0.3	1	1	221.7	731.5
30	20.6	4	0.4	1	1	209.6	692.8
35	20.9	0	0.1	0	0	198.7	617.6
40	20.9	0	0.1	0	0	196.2	571.1
45	21.0	0	0	0	0	180.4	512.4
50	21.0	0	0	0	0	172.7	431.6
55	21.1	0	0	0	0	159.4	476.8
60	21.1	0	0	0	0	152.3	452.3

ตารางที่ ก.58 เหน้้ำมันสำปะหลัง : บิทูมินัส (50 : 50) ที่ 100 เปอร์เซ็นต์ของอากาศมากเกินพอ

Time(Min.)	O ₂ (Percentage)	CO (PPM)	CO ₂ (Percentage)	NO (PPM)	NO _x (PPM)	FT (Celsius)	
						Effuence	combustion
0	21.0	0	0	0	0	37.2	31.8
2	21.0	0	0	0	0	65.7	210.3
5	20.9	0	0	0	0	72.2	319.2
10	21.0	0	0	0	0	66.3	376.0
15	21.0	0	0	2	2	64.1	360.2
20	21.0	0	0	0	0	67.1	380.1
25	21.0	0	0	0	0	108.1	333.5
30	21.1	0	0	0	0	134.4	388.5
35	21.0	0	0	0	0	103.9	354.6
40	21.1	0	0	0	0	93.6	357.6
45	21.0	0	0	0	0	94.9	359.0
50	21.1	0	0	0	0	92.7	351.2
55	21.1	0	0	0	0	91.1	348.2
60	21.0	0	0	0	0	89.2	311.7

ตารางที่ ก.59 เหน้้ำมันสำปะหลัง : บิทูมินัส (50 : 50) ที่ 150 เปอร์เซนต์ของอากาศมากเกินพอ

Time(Min.)	O ₂ (Percentage)	CO (PPM)	CO ₂ (Percentage)	NO (PPM)	NO _x (PPM)	FT (Celsius)	
						Effuence	combustion
0	21.0	0	0	0	0	38.4	32.6
2	21.0	45	0	0	0	62.3	223.7
5	17.7	4235	3.3	24	26	64.1	411.4
10	18.7	3910	2.3	22	23	63.5	365.0
15	18.8	1984	2.2	11	12	61.0	486.3
20	19.0	399	2.0	0	0	60.8	428.0
25	19.1	0	1.9	0	0	65.5	412.2
30	19.1	0	1.9	0	0	70.6	344.0
35	19.3	0	1.7	0	0	74.1	309.3
40	19.2	0	1.8	0	0	75.5	304.7
45	19.2	0	1.8	0	0	78.3	301.9
50	19.3	0	1.7	0	0	79.4	297.6
55	19.4	0	1.6	0	0	80.1	293.3
60	20.0	0	1.0	0	0	82.0	289.4

ตารางที่ ก.60 เหน้้ำมันสำปะหลัง : บิทูมินัส (50 : 50) ที่ 200 เปอร์เซนต์ของอากาศมากเกินพอ

Time(Min.)	O ₂ (Percentage)	CO (PPM)	CO ₂ (Percentage)	NO (PPM)	NO _x (PPM)	FT (Celsius)	
						Effuence	combustion
0	21.0	0	0	0	0	38.9	31.5
2	20.5	76	0.5	0	0	74.6	214.1
5	20.0	2194	1.0	25	27	89.1	371.6
10	16.3	1893	4.7	24	24	120.8	521.3
15	15.7	891	5.3	17	18	138.1	448.7
20	16.3	532	4.7	11	12	144.1	461.3
25	16.8	901	4.2	16	17	140.5	391.6
30	17.6	3341	3.4	30	30	138.7	476.1
35	18.5	883	2.5	12	14	120.6	431.7
40	19.3	302	1.7	8	8	110.5	371.5
45	19.4	9	1.6	4	4	98.7	311.2
50	20.1	0	0.9	1	1	91.7	293.1
55	20.3	0	0.7	0	0	93.2	281.1
60	20.7	0	0.3	0	0	81.6	277.1

ตารางที่ ก.61 เหน้้ำมันสำปะหลัง : บิทูมินัส (20 : 80) ที่ 100 เปอร์เซนต์ของอากาศมากเกินพอ

Time(Min.)	O ₂ (Percentage)	CO (PPM)	CO ₂ (Percentage)	NO (PPM)	NO _x (PPM)	FT (Celsius)	
						Effuence	combustion
0	21.0	0	0	0	0	36.1	31.1
2	21.1	0	0	0	0	64.2	220.7
5	21.1	0	0	0	0	75.5	312.7
10	21.2	0	0	0	0	117.8	439.1
15	21.1	0	0	0	0	198.8	423.7
20	21.0	0	0	1	1	210.7	354.2
25	21.1	0	0	0	0	204.5	323.3
30	21.1	0	0	0	0	209.2	308.9
35	21.1	0	0	0	0	197.9	320.3
40	21.2	0	0	0	0	215.4	364.8
45	21.1	0	0	0	0	212.2	359.4
50	21.1	0	0	0	0	196.7	332.5
55	21.0	0	0	0	0	178.0	299.6
60	21.1	0	0	0	0	170.0	267.0

ตารางที่ ก.62 เหน้้ำมันสำปะหลัง : บิทูมินัส (20 : 80) ที่ 150 เปอร์เซนต์ของอากาศมากเกินไป

Time(Min.)	O ₂ (Percentage)	CO (PPM)	CO ₂ (Percentage)	NO (PPM)	NO _x (PPM)	FT (Celsius)	
						Effuence	combustion
0	21.0	0	0	0	0	37.2	31.5
2	21.1	0	0	0	0	86.4	232.9
5	21.4	0	0	0	0	102.1	422.1
10	21.8	0	0	0	0	99.0	672.6
15	21.7	0	0	0	0	102.8	561.2
20	21.9	0	0	0	0	99.0	444.4
25	21.8	0	0	0	0	91.0	497.8
30	21.9	0	0	0	0	98.3	312.0
35	21.0	0	0	0	0	89.0	302.5
40	21.0	0	0	0	0	95.5	307.5
45	21.1	0	0	0	0	105.9	343.3
50	20.9	0	0.1	1	1	116.3	397.6
55	20.8	0	0.2	1	1	118.8	417.5
60	20.8	0	0.2	0	0	145.2	399.2

ตารางที่ ก.63 เหน้้ำมันสำปะหลัง : บิทูมินัส (20 : 80) ที่ 200 เปอร์เซนต์ของอากาศมากเกินพอ

Time(Min.)	O ₂ (Percentage)	CO (PPM)	CO ₂ (Percentage)	NO (PPM)	NO _x (PPM)	FT (Celsius)	
						Effuence	combustion
0	21.0	0	0	0	0	38.3	32.0
2	20.8	0	0.2	0	0	91.6	241.7
5	21.1	0	0	0	0	107.6	352.6
10	21.2	0	0	1	1	127.6	579.1
15	21.3	0	0	0	0	151.3	711.1
20	21.5	0	0	1	1	120.1	649.8
25	21.6	0	0	0	0	108.4	598.4
30	21.0	0	0	0	0	101.3	438.6
35	21.1	0	0	0	0	98.7	412.1
40	21.5	0	0	0	0	91.6	408.7
45	21.6	0	0	0	0	90.3	397.6
50	21.0	0	0	0	0	89.7	356.4
55	20.5	0	0.5	1	1	93.4	344.3
60	20.4	0	0.6	2	2	96.5	347.1

ตารางที่ ก.64 เหน้้ำมันสำปะหลัง : ลิกไนต์ (80 : 20) ที่ 100 เปอร์เซ็นต์ของอากาศมากเกินพอ

Time(Min.)	O ₂ (Percentage)	CO (PPM)	CO ₂ (Percentage)	NO (PPM)	NO _x (PPM)	FT (Celsius)	
						Effuence	combustion
0	21.0	0	0	0	0	39.2	34.5
2	20.9	0	0.1	0	0	59.8	102.5
5	20.6	341	0.4	2	2	87.4	212.0
10	20.5	2418	0.5	5	5	119.3	298.4
15	20.6	1230	0.4	2	2	118.3	340.7
20	20.7	45	0.3	0	0	111.0	379.3
25	20.8	0	0.2	0	0	198.3	645.2
30	20.8	0	0.2	0	0	167.9	588.3
35	20.8	0	0.2	0	0	108.4	444.5
40	20.9	0	0.1	0	0	104.8	406.0
45	21.0	0	0	1	1	111.8	367.2
50	21.0	0	0	0	0	106.9	342.3
55	20.9	0	0.1	0	0	101.0	320.4
60	20.8	0	0.2	0	0	97.5	298.6

ตารางที่ ก.65 เหน้ามันสำปะหลัง : ลิกไนต์ (80 : 20) ที่ 150 เปอร์เซ็นต์ของอากาศมากเกินพอ

Time(Min.)	O ₂ (Percentage)	CO (PPM)	CO ₂ (Percentage)	NO (PPM)	NO _x (PPM)	FT (Celsius)	
						Effuence	combustion
0	21.0	0	0	0	0	38.2	31.0
2	20.9	0	0.1	0	0	65.7	112.5
5	20.9	0	0.1	0	0	139.4	248.1
10	20.8	0	0.2	0	0	125.6	275.8
15	20.7	7	0.3	0	0	153.9	470.4
20	14.2	530	6.8	6	6	144.5	576.0
25	15.3	351	5.7	2	2	128.9	546.1
30	14.5	498	6.5	4	4	127.3	575.3
35	14.8	143	6.2	3	3	120.8	591.8
40	15.0	98	6.0	0	0	133.8	568.4
45	15.3	0	5.7	0	0	120.0	541.2
50	17.8	0	3.2	0	0	118.8	496.5
55	19.0	0	2.0	0	0	112.5	470.6
60	20.9	0	0.1	0	0	102.7	412.2

ตารางที่ ก.66 เหน้้ำมันสำปะหลัง : ลิกไนต์ (80 : 20) ที่ 200 เปอร์เซ็นต์ของอากาศมากเกินพอ

Time(Min.)	O ₂ (Percentage)	CO (PPM)	CO ₂ (Percentage)	NO (PPM)	NO _x (PPM)	FT (Celsius)	
						Effuence	combustion
0	21.0	0	0	0	0	38.1	31.2
2	20.9	0	0.1	0	0	72.8	128.4
5	20.8	0	0.2	0	0	121.7	271.3
10	20.6	4	0.4	1	1	152.4	310.8
15	16.2	67	4.8	2	3	168.5	490.6
20	16.1	412	4.9	4	4	224.7	601.3
25	14.1	43	6.9	2	2	210.5	621.4
30	13.4	580	7.6	5	5	191.2	618.4
35	13.9	488	7.1	4	5	189.4	597.3
40	17.2	31	3.8	1	1	161.7	554.1
45	18.9	6	2.1	0	0	159.2	521.4
50	19.6	0	1.4	0	0	153.7	497.8
55	20.5	0	0.5	0	0	149.4	452.2
60	20.4	0	0.6	0	0	140.9	422.8

ตารางที่ ก.67 เหม้ามันสำปะหลัง : ลิกไนต์ (50 : 50) ที่ 100 เปอร์เซ็นต์ของอากาศมากเกินพอ

Time(Min.)	O ₂ (Percentage)	CO (PPM)	CO ₂ (Percentage)	NO (PPM)	NO _x (PPM)	FT (Celsius)	
						Effuence	combustion
0	21.0	0	0	0	0	36.3	33.2
2	21.0	78	0	0	0	98.5	238.2
5	20.7	599	0.3	6	7	102.9	320.4
10	20.5	981	0.5	15	16	110.4	351.8
15	21.1	109	0	0	0	183.2	468.3
20	21.2	6	0	0	0	181.8	486.8
25	21.2	0	0	0	0	193.1	512.6
30	21.0	0	0	0	0	185.1	441.8
35	21.0	0	0	0	0	175.9	422.8
40	21.0	0	0	0	0	170.4	387.3
45	21.1	0	0	0	0	167.1	343.4
50	20.9	0	0.1	1	1	157.8	330.2
55	21.0	0	0	0	0	148.9	311.6
60	21.0	0	0	0	0	122.3	297.4

ตารางที่ ก.68 เหน้้ำมันสำปะหลัง : ลิกไนต์ (50 : 50) ที่ 150 เปอร์เซ็นต์ของอากาศมากเกินพอ

Time(Min.)	O ₂ (Percentage)	CO (PPM)	CO ₂ (Percentage)	NO (PPM)	NO _x (PPM)	FT (Celsius)	
						Effuence	combustion
0	21.0	0	0	0	0	38.2	34.4
2	21.2	0	0	0	0	108.2	240.6
5	21.2	0	0	0	0	107.6	340.0
10	20.9	0	0.1	1	1	111.2	334.9
15	20.9	65	0.1	2	2	114.8	381.4
20	21.2	0	0	0	0	119.8	441.3
25	21.3	0	0	0	0	168.5	557.7
30	21.2	0	0	0	0	152.3	412.4
35	20.2	98	0.8	3	3	155.9	498.2
40	15.4	1490	5.6	48	50	164.7	593.1
45	18.0	998	3.0	23	24	158.3	515.7
50	19.2	424	1.8	9	10	140.0	476.3
55	20.8	90	0.2	4	4	144.4	398.6
60	21.0	0	0	0	0	137.4	342.1

ตารางที่ ก.69 เหน้้ำมันสำปะหลัง : ลิกไนต์ (50 : 50) ที่ 200 เปอร์เซ็นต์ของอากาศมากเกินพอ

Time(Min.)	O ₂ (Percentage)	CO (PPM)	CO ₂ (Percentage)	NO (PPM)	NO _x (PPM)	FT (Celsius)	
						Effuence	combustion
0	21.0	0	0	0	0	40.1	33.3
2	21.0	0	0	0	0	119.2	270.5
5	21.1	0	0	1	1	131.3	325.3
10	20.8	0	0.2	0	0	144.7	357.0
15	20.7	0	0.3	0	0	167.4	451.9
20	20.7	34	0.3	0	0	149.9	541.0
25	18.2	639	2.8	20	21	209.8	619.8
30	17.3	1298	3.7	35	38	217.4	638.4
35	17.1	1998	3.9	46	47	200.3	621.4
40	18.2	891	2.8	21	23	198.3	581.3
45	18.4	421	2.6	9	11	187.4	443.2
50	19.8	210	1.2	3	4	174.3	381.9
55	20.6	6	0.4	0	0	177.2	377.4
60	21.0	0	0	0	0	151.4	355.6

ตารางที่ ก.70 เหน้้ำมันสำปะหลัง : ลิกไนต์ (20 : 80) ที่ 100 เปอร์เซ็นต์ของอากาศมากเกินพอ

Time(Min.)	O ₂ (Percentage)	CO (PPM)	CO ₂ (Percentage)	NO (PPM)	NO _x (PPM)	FT (Celsius)	
						Effuence	combustion
0	21.0	0	0	0	0	37.8	33.5
2	21.1	0	0	0	0	67.5	211.0
5	20.7	0	0.3	1	1	79.4	259.7
10	19.8	983	1.2	26	28	86.8	337.6
15	19.9	1098	1.1	24	26	130.7	312.4
20	19.9	834	1.1	18	19	154.0	282.9
25	20.0	799	1.0	17	18	148.6	320.8
30	20.0	613	1.0	14	15	133.5	298.3
35	20.4	541	0.6	9	10	129.4	312.2
40	20.1	671	0.9	12	13	133.3	323.6
45	20.2	319	0.8	9	10	124.9	311.7
50	20.3	233	0.7	6	7	120.4	302.2
55	20.5	78	0.5	3	4	116.2	298.3
60	20.8	0	0.2	0	0	109.8	276.4

ตารางที่ ก.71 เหน้้ำมันสำปะหลัง : ลิกไนต์ (20 : 80) ที่ 150 เปอร์เซ็นต์ของอากาศมากเกินพอ

Time(Min.)	O ₂ (Percentage)	CO (PPM)	CO ₂ (Percentage)	NO (PPM)	NO _x (PPM)	FT (Celsius)	
						Effuence	combustion
0	21.0	0	0	0	0	39.8	35.2
2	21.2	0	0	0	0	76.9	233.8
5	21.3	0	0	0	0	83.0	330.2
10	21.2	0	0	0	0	95.4	274.9
15	21.1	0	0	0	0	103.5	368.4
20	21.1	0	0	0	0	108.3	320.6
25	20.8	45	0.2	5	5	139.7	306.8
30	21.0	8	0	2	2	152.2	322.3
35	20.9	12	0.1	2	2	196.5	340.4
40	20.1	798	0.9	18	19	176.9	368.4
45	20.0	643	1.0	14	15	158.7	299.7
50	20.1	590	0.9	10	10	160.2	267.6
55	20.8	109	0.2	3	3	140.8	200.5
60	20.9	0	0.1	0	0	132.3	198.2

ตารางที่ ก.72 เหน้้ำมันสำปะหลัง : ลิกไนต์ (20 : 80) ที่ 200 เปอร์เซ็นต์ของอากาศมากเกินพอ

Time(Min.)	O ₂ (Percentage)	CO (PPM)	CO ₂ (Percentage)	NO (PPM)	NO _x (PPM)	FT (Celsius)	
						Effuence	combustion
0	21.0	0	0	0	0	38.7	34.8
2	21.1	0	0	0	0	85.9	214.7
5	21.0	0	0	0	0	121.9	370.4
10	20.8	0	0.2	1	1	134.2	374.6
15	20.6	10	0.4	0	0	140.4	412.4
20	16.4	649	4.6	19	20	159.0	450.7
25	16.2	713	4.8	21	22	167.4	398.4
30	17.5	682	3.5	17	17	191.7	427.9
35	18.3	314	2.7	9	10	199.6	360.7
40	19.4	209	1.6	4	4	181.7	312.4
45	20.3	44	0.7	0	0	177.9	308.3
50	20.7	0	0.3	0	0	169.4	297.4
55	21.0	0	0	0	0	158.2	250.4
60	21.2	0	0	0	0	140.7	267.8

ตารางที่ ก.73 กะลามาพร้าว : บิทูมินัส (80 : 20) ที่ 100 เปอร์เซ็นต์ของอากาศมากเกินพอ

Time(Min.)	O ₂ (Percentage)	CO (PPM)	CO ₂ (Percentage)	NO (PPM)	NO _x (PPM)	FT (Celsius)	
						Effuence	combustion
0	21.0	0	0	0	0	39.6	34.2
2	20.7	0	0.3	0	0	84.1	220.0
5	21.0	97	0	0	0	84.5	210.2
10	20.9	87	0.1	0	0	87.8	343.8
15	20.9	111	0.1	0	0	94.9	314.5
20	20.9	29	0.1	0	0	89.8	314.5
25	20.8	4	0.2	0	0	193.0	543.0
30	20.8	15	0.2	0	0	197.5	418.7
35	20.8	0	0.2	0	0	197.2	409.1
40	20.7	0	0.3	0	0	167.2	407.6
45	20.6	0	0.4	0	0	158.2	398.0
50	20.8	0	0.2	0	0	133.2	372.7
55	20.8	0	0.2	0	0	111.4	333.8
60	20.9	0	0.1	0	0	102.8	301.1

ตารางที่ ก.74 กะลามาพร้าว : บิทูมินัส (80 : 20) ที่ 150 เปอร์เซนต์ของอากาศมากเกินพอ

Time(Min.)	O ₂ (Percentage)	CO (PPM)	CO ₂ (Percentage)	NO (PPM)	NO _x (PPM)	FT (Celsius)	
						Effuence	combustion
0	21.0	0	0	0	0	38.7	34.1
2	21.0	0	0	0	0	95.5	173.3
5	21.2	11	0	2	2	94.5	239.8
10	21.3	26	0	0	0	89.7	269.3
15	21.1	18	0	0	0	81.5	192.4
20	21.0	14	0	0	0	185.6	475.8
25	20.9	154	0.1	0	0	194.2	455.8
30	20.9	206	0.1	0	0	187.6	514.2
35	20.9	304	0.1	0	0	165.3	438.7
40	20.9	209	0.1	0	0	109.4	383.7
45	20.9	123	0.1	0	0	109.1	370.4
50	20.7	10	0.3	0	0	107.0	355.5
55	20.9	0	0.1	0	0	106.3	310.2
60	21.1	0	0	0	0	104.4	297.5

ตารางที่ ก.75 กะลามาพร้าว : บิทูมินัส (80 : 20) ที่ 200 เปอร์เซนต์ของอากาศมากเกินพอ

Time(Min.)	O ₂ (Percentage)	CO (PPM)	CO ₂ (Percentage)	NO (PPM)	NO _x (PPM)	FT (Celsius)	
						Effuence	combustion
0	21.0	0	0	0	0	36.9	31.9
2	21.0	0	0	0	0	72.9	199.1
5	20.8	22	0.2	0	0	110.6	247.9
10	20.7	18	0.3	0	0	198.4	321.1
15	20.7	7	0.3	0	0	123.7	379.6
20	20.6	178	0.4	0	0	142.6	457.2
25	20.5	239	0.5	1	2	187.4	579.4
30	20.6	198	0.4	0	0	198.6	540.2
35	20.7	227	0.3	1	1	171.4	411.2
40	20.4	193	0.6	0	0	164.8	379.2
45	20.8	102	0.2	0	0	171.2	321.4
50	20.9	58	0.1	0	0	162.8	301.7
55	20.9	0	0.1	0	0	140.5	298.7
60	20.9	0	0.1	0	0	138.7	254.4

ตารางที่ ก.76 กะลามาพร้าว : บิทูมินัส (50 : 50) ที่ 100 เปอร์เซ็นต์ของอากาศมากเกินพอ

Time(Min.)	O ₂ (Percentage)	CO (PPM)	CO ₂ (Percentage)	NO (PPM)	NO _x (PPM)	FT (Celsius)	
						Effuence	combustion
0	21.0	0	0	0	0	41.2	35.7
2	20.9	0	0.1	0	0	89.7	121.7
5	20.9	0	0.1	0	0	90.6	137.7
10	20.9	0	0.1	0	0	90.6	290.2
15	21.0	0	0	0	0	85.2	377.7
20	20.9	0	0.1	0	0	86.4	453.1
25	21.1	0	0	0	0	84.9	334.3
30	21.2	0	0	0	0	82.2	320.3
35	21.2	0	0	0	0	84.2	333.2
40	21.0	0	0	0	0	83.4	330.6
45	21.0	0	0	0	0	84.0	298.0
50	20.9	0	0.1	0	0	83.0	296.7
55	20.9	0	0.1	0	0	78.2	294.2
60	21.0	0	0	0	0	66.7	284.4

ตารางที่ ก.77 กะลามาพร้าว : บิทูมินัส (50 : 50) ที่ 150 เปอร์เซ็นต์ของอากาศมากเกินพอ

Time(Min.)	O ₂ (Percentage)	CO (PPM)	CO ₂ (Percentage)	NO (PPM)	NO _x (PPM)	FT (Celsius)	
						Effuence	combustion
0	21.0	0	0	0	0	38.9	34.7
2	21.0	0	0	0	0	61.5	98.3
5	20.9	0	0.1	0	0	68.0	121.2
10	20.8	0	0.2	0	0	81.5	299.8
15	20.9	0	0.1	0	0	100.5	382.6
20	20.8	34	0.2	0	0	102.0	354.8
25	20.4	120	0.6	1	1	105.2	376.7
30	20.5	233	0.5	1	1	102.0	443.4
35	20.5	198	0.5	1	1	101.4	384.3
40	20.4	40	0.6	0	0	107.7	376.8
45	20.4	0	0.6	0	0	105.3	358.0
50	20.6	0	0.4	0	0	102.4	331.3
55	20.7	0	0.3	0	0	98.1	316.5
60	20.7	0	0.3	0	0	92.5	298.5

ตารางที่ ก.78 กะลามาพร้าว : บิทูมินัส (50 : 50) ที่ 200 เปอร์เซนต์ของอากาศมากเกินพอ

Time(Min.)	O ₂ (Percentage)	CO (PPM)	CO ₂ (Percentage)	NO (PPM)	NO _x (PPM)	FT (Celsius)	
						Effuence	combustion
0	21.0	0	0	0	0	39.8	34.9
2	21.1	0	0	0	0	91.3	132.4
5	20.8	0	0.2	0	0	110.3	149.1
10	20.9	0	0.1	0	0	137.9	270.4
15	20.7	0	0.3	0	0	120.9	381.5
20	20.8	0	0.2	0	0	117.4	399.7
25	20.9	0	0.1	0	0	121.2	514.2
30	20.7	0	0.3	0	0	138.7	520.3
35	20.5	45	0.5	1	2	140.0	478.2
40	20.4	138	0.6	1	1	123.4	447.2
45	20.3	208	0.7	2	3	119.8	421.3
50	20.8	8	0.2	0	0	108.7	378.4
55	20.7	0	0.3	0	0	98.6	361.8
60	20.9	0	0.1	0	0	95.4	357.4

ตารางที่ ก.79 กะลามาพร้าว : บิทูมินัส (20 : 80) ที่ 100 เปอร์เซ็นต์ของอากาศมากเกินพอ

Time(Min.)	O ₂ (Percentage)	CO (PPM)	CO ₂ (Percentage)	NO (PPM)	NO _x (PPM)	FT (Celsius)	
						Effuence	combustion
0	21.0	0	0	0	0	38.6	31.9
2	20.8	0	0.2	0	0	43.1	96.7
5	20.9	0	0.1	0	0	96.5	203.7
10	21.0	0	0	0	0	108.6	308.4
15	21.0	0	0	0	0	102.2	271.4
20	21.0	0	0	0	0	99.5	273.0
25	21.0	0	0	0	0	97.7	309.8
30	20.9	8	0.1	1	1	100.7	381.3
35	20.8	34	0.2	2	2	105.0	397.2
40	20.7	196	0.3	2	2	100.3	343.1
45	20.9	4	0.1	0	0	97.3	313.7
50	20.8	0	0.2	0	0	99.2	298.0
55	20.9	0	0.1	0	0	95.1	273.1
60	21.2	0	0	0	0	94.0	253.3

ตารางที่ ก.80 กะลามาพร้าว : บิทูมินัส (20 : 80) ที่ 150 เปอร์เซ็นต์ของอากาศมากเกินพอ

Time(Min.)	O ₂ (Percentage)	CO (PPM)	CO ₂ (Percentage)	NO (PPM)	NO _x (PPM)	FT (Celsius)	
						Effuence	combustion
0	21.0	0	0	0	0	39.1	32.1
2	20.8	0	0.2	0	0	34.7	73.2
5	20.9	0	0.1	0	0	33.7	256.9
10	20.8	0	0.2	0	0	37.5	203.3
15	20.8	0	0.2	0	0	44.3	228.4
20	20.8	0	0.2	0	0	49.4	290.8
25	20.9	0	0.1	0	0	52.2	247.5
30	20.9	0	0.1	0	0	57.2	227.4
35	20.9	0	0.1	0	0	59.6	215.0
40	20.7	0	0.3	0	0	60.6	233.5
45	20.8	0	0.2	0	0	50.5	224.8
50	20.8	0	0.2	0	0	43.7	212.6
55	20.9	0	0.1	0	0	42.6	207.6
60	21.1	0	0	0	0	40.3	198.3

ตารางที่ ก.81 กะลามาพร้าว : บิทูมินัส (20 : 80) ที่ 200 เปอร์เซ็นต์ของอากาศมากเกินพอ

Time(Min.)	O ₂ (Percentage)	CO (PPM)	CO ₂ (Percentage)	NO (PPM)	NO _x (PPM)	FT (Celsius)	
						Effuence	combustion
0	21.0	0	0	0	0	37.9	31.8
2	21.0	0	0	0	0	39.8	90.7
5	20.8	0	0.2	0	0	97.5	279.8
10	20.8	0	0.2	0	0	101.3	254.8
15	20.8	0	0.2	0	0	130.7	277.5
20	20.7	0	0.3	0	0	127.3	312.7
25	20.8	0	0.2	0	0	147.6	324.6
30	20.9	0	0.1	0	0	133.9	247.6
35	20.9	0	0.1	0	0	130.1	234.1
40	20.9	0	0.1	0	0	120.3	213.3
45	20.8	0	0.2	0	0	121.2	209.6
50	20.9	0	0.1	0	0	109.3	201.4
55	20.9	0	0.1	0	0	97.6	203.4
60	21.0	0	0	0	0	96.5	202.8

ตารางที่ ก.82 กะลามาะพร้าว : ลิกไนต์ (80 : 20) ที่ 100 เปอร์เซ็นต์ของอากาศมากเกินพอ

Time(Min.)	O ₂ (Percentage)	CO (PPM)	CO ₂ (Percentage)	NO (PPM)	NO _x (PPM)	FT (Celsius)	
						Effuence	combustion
0	21.0	0	0	0	0	39.1	32.4
2	20.7	0	0.3	0	0	90.8	123.4
5	20.8	0	0.2	0	0	110.2	190.8
10	20.6	0	0.4	0	0	130.4	222.3
15	20.2	67	0.8	3	3	178.6	327.9
20	20.0	243	1.0	3	3	100.5	421.6
25	19.8	491	1.2	4	4	91.9	293.0
30	19.7	387	1.3	3	3	86.0	268.1
35	19.7	211	1.3	4	4	90.6	321.6
40	20.1	109	0.9	2	2	93.0	423.0
45	20.5	33	0.5	0	0	89.6	411.0
50	20.6	0	0.4	0	0	87.4	383.6
55	20.8	0	0.2	0	0	88.4	370.1
60	20.9	0	0.1	0	0	81.1	355.4

ตารางที่ ก.83 กะลามาพร้าว : ลิกไนต์ (80 : 20) ที่ 150 เปอร์เซนต์ของอากาศมากเกินพอ

Time(Min.)	O ₂ (Percentage)	CO (PPM)	CO ₂ (Percentage)	NO (PPM)	NO _x (PPM)	FT (Celsius)	
						Effuence	combustion
0	21.0	0	0	0	0	36.6	32.5
2	20.9	0	0.1	0	0	75.8	127.2
5	20.7	0	0.3	0	0	95.0	254.9
10	21.0	0	0	0	0	134.4	466.9
15	21.0	0	0	0	0	127.4	504.9
20	20.9	0	0.1	0	0	118.5	399.4
25	20.7	0	0.3	0	0	124.8	396.9
30	20.5	0	0.5	1	1	124.4	496.7
35	20.4	0	0.6	1	1	122.8	451.4
40	20.3	0	0.7	2	2	118.7	429.5
45	20.7	0	0.3	0	0	100.6	407.3
50	20.9	0	0.1	0	0	96.3	412.2
55	20.8	0	0.2	0	0	80.7	396.3
60	21.0	0	0	0	0	80.3	354.0

ตารางที่ ก.84 กะลามาพร้าว : ลิกไนต์ (80 : 20) ที่ 200 เปอร์เซ็นต์ของอากาศมากเกินพอ

Time(Min.)	O ₂ (Percentage)	CO (PPM)	CO ₂ (Percentage)	NO (PPM)	NO _x (PPM)	FT (Celsius)	
						Effuence	combustion
0	21.0	0	0	0	0	36.2	31.8
2	20.8	0	0.2	0	0	77.9	125.3
5	20.9	0	0.1	0	0	124.3	237.4
10	20.7	389	0.3	4	4	139.8	375.6
15	20.5	4	0.5	0	0	160.9	540.6
20	20.3	272	0.7	3	3	157.6	511.7
25	20.0	46	1.0	1	2	139.8	487.6
30	20.2	11	0.8	1	1	147.6	398.7
35	20.3	0	0.7	0	0	132.4	351.6
40	20.7	0	0.3	0	0	172.6	361.8
45	20.8	0	0.2	0	0	108.5	312.4
50	20.9	0	0.1	0	0	93.6	309.8
55	21.0	0	0	0	0	85.7	327.6
60	21.0	0	0	0	0	94.3	352.6

ตารางที่ ก.85 กะลามาพร้าว : ลิกไนต์ (50 : 50) ที่ 100 เปอร์เซ็นต์ของอากาศมากเกินพอ

Time(Min.)	O ₂ (Percentage)	CO (PPM)	CO ₂ (Percentage)	NO (PPM)	NO _x (PPM)	FT (Celsius)	
						Effuence	combustion
0	21.0	0	0	0	0	35.9	30.8
2	20.7	0	0.3	0	0	64.3	143.2
5	20.8	0	0.2	0	0	74.7	196.0
10	20.9	0	0.1	0	0	89.9	269.8
15	21.0	0	0	0	0	160.1	352.8
20	20.9	0	0.1	0	0	136.5	293.7
25	20.7	0	0.3	0	0	142.7	207.0
30	20.8	0	0.2	0	0	171.9	196.3
35	20.0	32	1.0	0	0	224.0	403.2
40	19.0	211	2.0	2	2	220.2	500.8
45	18.2	438	2.8	4	4	236.0	511.2
50	19.2	371	1.8	2	2	189.5	489.0
55	20.3	34	0.7	0	0	178.3	435.8
60	20.3	0	0.7	0	0	155.2	389.9

ตารางที่ ก.86 กะลามาพร้าว : ลิกไนต์ (50 : 50) ที่ 150 เปอร์เซ็นต์ของอากาศมากเกินพอ

Time(Min.)	O ₂ (Percentage)	CO (PPM)	CO ₂ (Percentage)	NO (PPM)	NO _x (PPM)	FT (Celsius)	
						Effuence	combustion
0	21.0	0	0	0	0	35.7	31.1
2	20.9	0	0.1	0	0	74.3	198.0
5	21.0	0	0	0	0	89.5	211.2
10	21.4	0	0	0	0	147.2	407.8
15	21.0	0	0	0	0	134.7	403.1
20	20.9	0	0.1	0	0	114.2	355.3
25	21.0	0	0	0	0	126.1	528.0
30	21.2	0	0	0	0	229.5	512.4
35	20.7	47	0.3	2	2	213.1	499.0
40	20.5	22	0.5	1	1	190.2	450.6
45	20.5	588	0.5	4	4	220.6	475.3
50	20.5	98	0.5	0	0	189.7	420.7
55	20.8	0	0.3	0	0	166.3	398.4
60	20.9	0	0.1	0	0	142.4	376.0

ตารางที่ ก.87 กะลามาพร้าว : ลิกไนต์ (50 : 50) ที่ 200 เปอร์เซนต์ของอากาศมากเกินพอ

Time(Min.)	O ₂ (Percentage)	CO (PPM)	CO ₂ (Percentage)	NO (PPM)	NO _x (PPM)	FT (Celsius)	
						Effuence	combustion
0	21.0	0	0	0	0	35.9	30.8
2	20.6	0	0.4	0	0	98.6	221.0
5	20.8	0	0.2	0	0	138.7	371.6
10	20.9	0	0.1	0	0	191.6	427.3
15	20.5	0	0.5	1	1	199.7	491.6
20	20.0	582	1.0	4	4	213.4	540.7
25	20.0	310	1.0	3	3	231.8	537.6
30	19.7	201	1.3	2	2	220.6	527.7
35	20.3	49	0.7	1	1	201.5	508.7
40	20.5	0	0.5	0	0	200.1	467.8
45	20.6	0	0.4	0	0	198.7	431.7
50	20.8	0	0.2	0	0	161.4	401.4
55	20.9	0	0.1	0	0	155.3	346.1
60	21.0	0	0	0	0	150.7	351.2

ตารางที่ ก.88 กะลามาพร้าว : ลิกไนต์ (20 : 80) ที่ 100 เปอร์เซ็นต์ของอากาศมากเกินพอ

Time(Min.)	O ₂ (Percentage)	CO (PPM)	CO ₂ (Percentage)	NO (PPM)	NO _x (PPM)	FT (Celsius)	
						Effuence	combustion
0	21.0	0	0	0	0	35.4	29.2
2	20.9	0	0.1	0	0	61.2	178.4
5	20.8	0	0.2	0	0	191.4	231.6
10	21.0	591	0	0	0	213.8	322.8
15	20.1	4781	0.9	0	0	208.7	331.6
20	19.2	>10000	1.8	4	5	265.4	389.2
25	18.6	>10000	2.4	50	51	159.5	388.6
30	19.8	7414	1.2	35	38	169.8	354.3
35	20.2	2421	0.8	14	15	171.2	356.7
40	20.5	429	0.5	2	3	159.9	314.6
45	20.6	0	0.4	0	0	140.1	298.1
50	20.8	0	0.2	0	0	129.2	251.4
55	21.1	0	0	0	0	111.3	241.4
60	21.0	0	0	0	0	112.3	221.9

ตารางที่ ก.89 กะลามาพร้าว : ลิกไนต์ (20 : 80) ที่ 150 เปอร์เซ็นต์ของอากาศมากเกินพอ

Time(Min.)	O ₂ (Percentage)	CO (PPM)	CO ₂ (Percentage)	NO (PPM)	NO _x (PPM)	FT (Celsius)	
						Effuence	combustion
0	21.0	0	0	0	0	35.1	29.9
2	20.9	0	0.1	0	0	87.0	202.7
5	20.8	0	0.2	0	0	255.8	372.3
10	21.3	0	0	0	0	260.2	399.7
15	20.9	439	0.1	4	5	265.1	393.0
20	19.1	7483	1.9	53	54	252.2	406.9
25	20.0	>10000	1.0	25	27	268.0	413.3
30	20.1	>10000	0.9	23	25	241.9	439.8
35	20.8	5433	0.2	6	7	227.3	403.4
40	20.9	219	0.1	0	0	209.8	350.9
45	20.8	0	0.2	0	0	178.5	311.2
50	20.9	0	0.9	0	0	150.4	297.5
55	21.0	0	0	0	0	164.3	287.2
60	21.0	0	0	0	0	152.4	265.8

ตารางที่ ก.90 กะลามาพร้าว : ลิกไนต์ (20 : 80) ที่ 200 เปอร์เซนต์ของอากาศมากเกินพอ

Time(Min.)	O ₂ (Percentage)	CO (PPM)	CO ₂ (Percentage)	NO (PPM)	NO _x (PPM)	FT (Celsius)	
						Effuence	combustion
0	21.0	0	0	0	0	34.5	29.3
2	20.8	0	0.2	0	0	118.7	207.6
5	20.5	0	0.5	0	0	217.4	361.7
10	20.1	347	0.9	0	0	239.7	399.6
15	20.0	4169	1.0	7	8	256.8	478.6
20	17.6	7114	3.4	50	51	289.2	520.8
25	18.3	9161	2.7	47	49	247.6	447.6
30	19.1	>10000	1.9	28	28	251.6	403.7
35	20.0	>10000	1.0	17	17	241.7	378.2
40	20.7	437	0.3	8	8	221.6	327.6
45	20.7	81	0.3	0	0	218.7	318.6
50	20.8	0	0.2	0	0	198.7	308.7
55	20.9	0	0.1	0	0	191.6	297.9
60	21.0	0	0	0	0	192.0	288.4

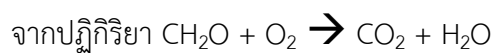


ภาคผนวก ข

การคำนวณปริมาณอากาศที่เข้าสู่เตาเผาไหม้

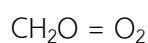
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

จากข้อมูลองค์ประกอบของเชื้อเพลิงพื้นฐานของชีวมวลเขียนเป็นสูตรอย่างง่ายได้ว่า CH_2O



เผาเชื้อเพลิง $2 \text{ kg/hr} \times \text{hr}/60\text{min} \times 10^3\text{g/kg} = 100/3 = 33.33 \text{ g/min}$

ปริมาณ O_2 ที่ต้องการจาก



โมลโมเลกุลของ $\text{CH}_2\text{O} = 30.0261$

$33.33/30 = 1.11 \text{ mol}$

จาก $\text{CH}_2\text{O} = \text{O}_2$ จะได้ $1.11 = \text{g of O}_2/32$

จำนวนกรัมของ $\text{O}_2 = 1.11 \times 32 = 35.55 \text{ g} \times 1\text{mol}/32\text{g} \times 22.4 \text{ L/mol} = 24.89 \text{ L/min}$

ที่ ออกซิเจน 100 %

ใน Air มี O_2 21 % ต้องการ O_2 100 ต้องใช้ Air $= (24.89 \times 100)/21 = 118.52 \text{ L/min}$

เนื่องจากชีวมวลทำปฏิกิริยาเผาไหม้สมบูรณ์กับ O_2 ดังนั้นจะเกิดเป็น

CO_2 และ H_2O อย่างละ 24.89 L/min

เพราะฉะนั้น $Q_{\text{ออก}} = 24.89 + 24.89 + (118.52 - 24.89) = 49.77 + 93.63 = 143.44 \text{ L/min}$

ประมาณ **143.5 L/min**



ภาคผนวก ค.
ประสิทธิภาพของเชื้อเพลิง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

การหาค่าประสิทธิภาพของเชื้อเพลิง (2014)

เชื้อเพลิงที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ประกอบไปด้วยชีวมวล ได้แก่ แกลบ กากอ้อย เหน่ามันสำปะหลัง และกะลามะพร้าว และถ่านหิน ได้แก่ ลิกไนต์ และ บิทูมินัส โดยทำการศึกษาที่สัดส่วนอากาศมากเกินพอร้อยละ 100, 150 และ 200 สัดส่วนชีวมวลต่อถ่านหิน 100:0, 80:20, 50:50, 20:80 และ 0:100 อัตราการป้อนเชื้อเพลิง 2 กิโลกรัมต่อชั่วโมง จุดที่ทำกรวัดอุณหภูมิได้แก่ในห้องเผาไหม้และก๊าซขาออก คุณสมบัติของเชื้อเพลิงได้แสดงในตารางที่ 4.1 และ 4.2 และค่าอุณหภูมิได้แสดงในภาคผนวก ก

ค่าพลังงานของเชื้อเพลิง สามารถหาได้จากสมการ (ก)

$$\text{ค่าพลังงานของเชื้อเพลิง} = \text{อัตราการใช้เชื้อเพลิง} \times \text{LHV} \quad (\text{ก})$$

ตัวอย่างการคำนวณที่สัดส่วนอากาศมากเกินพอร้อยละ 100 และ สัดส่วนชีวมวลต่อถ่านหิน 50:50

แกลบ มีอัตราการใช้เชื้อเพลิง 2 กิโลกรัมต่อชั่วโมง และมีค่า LHV = 6.22 kJ/kg

$$\text{ค่าพลังงานของแกลบ} = 2 \text{ kg/h} \times 6.22 \text{ kJ/kg} = 12.44 \text{ kJ/h}$$

แกลบต่อลิกไนต์ ที่สัดส่วน 50:50 ประกอบไปด้วย แกลบ 1 กิโลกรัม และ ลิกไนต์ 1 กิโลกรัม

$$\text{ค่าพลังงานของแกลบต่อลิกไนต์} = (1 \text{ kg/h} \times 6.22 \text{ kJ/kg}) + (1 \text{ kg/h} \times 8.67 \text{ kJ/kg})$$

$$= 6.22 \text{ kJ/h} + 8.67 \text{ kJ/kg}$$

$$= 14.89 \text{ kJ/h}$$

เมื่อได้ค่าพลังงานเชื้อเพลิงแต่ละชนิดมาแล้ว คำนวณหาค่าพลังงานความร้อนของเตาซึ่งปริมาตรของเตาคำนวณจาก (ข)

$$V = \pi r^2 h \quad (\text{ข})$$

$$\text{แทนค่าลงในสมการ } V = 3.142 \times 17^2 \times 65 = 59,022.47 \text{ cm}^3 = 59.022 \text{ L}$$

$$= 0.07 \text{ kg of air}$$

คำนวณหาค่าความร้อนจากอุณหภูมิที่เปลี่ยนของเตาจากสมการ (ค)

$$q = ms\Delta t = C\Delta t \quad (\text{ค})$$

ที่อุณหภูมิห้อง 25 Celsius $s_{air} = 1.006 \text{ kJ/kg}$ แทนค่าลงในสมการ (ค) ได้ว่า

$$q_{\text{แกลบ}} = 0.07 \times 1.006 \times (540 - 25)$$

$$= 36.26 \text{ ประมาณ } 36 \text{ kJ/h}$$

$$Q_{\text{แกลบลิกไนต์}} = 0.07 \times 1.006 (699 - 25)$$

$$= 47.46 \text{ ประมาณ } 47 \text{ kJ/h}$$

เมื่อทำการหาพลังงานจากการเผาไหม้ได้แล้วนำมาหาประสิทธิภาพจากสมการ (ง)

$$Eff = 100 - \left(\frac{1}{(E_{\text{combustion}} - E_{\text{fuel}})} \times 100 \right) \quad (\text{ง})$$

Eff ของแกลบ จากการเผาไหม้ที่ สัดส่วนออกซิเจนร้อยละ 100 แทนค่าลงใน (ง)

$$Eff = 100 - \left(\frac{1}{(36-12)} \times 100 \right) = 95.80 \%$$

Eff ของแกลบต่อลิกไนต์ (50:50) ที่สัดส่วนอากาศร้อยละ 100 แทนค่าลงในสมการ (ง)

$$Eff = 100 - \left(\frac{1}{(47-15)} \times 100 \right) = 96.87\%$$

ตาราง ค.1 แสดงค่าประสิทธิภาพของเชื้อเพลิงแต่ละชนิดที่สัดส่วนอากาศมากเกินไปร้อยละ 100

ชนิดและสัดส่วนของเชื้อเพลิง		ประสิทธิภาพของเชื้อเพลิง (เปอร์เซ็นต์)	อุณหภูมิสูงสุด (เซลเซียส)
สัดส่วน	ชนิด		
100	แกลบ	95.80	540.3
100	กากอ้อย	97.65	869.3
100	เหง้ามันสำปะหลัง	96.94	661.8
100	กะลามะพร้าว	90.17	418.4
100	ลิกไนต์	82.67	353.2
100	บิทูมินัส	(หาค่าไม่ได้)	244.9
80:20	แกลบ:ลิกไนต์	97.41	764.2
50:50	แกลบ:ลิกไนต์	96.87	698.8

ตารางที่ ค.1 แสดงค่าประสิทธิภาพของเชื้อเพลิงแต่ละชนิดที่สัดส่วนอากาศมากเกินพอร้อยละ 100 (ต่อ)

ชนิดและสัดส่วนของเชื้อเพลิง		ประสิทธิภาพของเชื้อเพลิง (เปอร์เซ็นต์)	อุณหภูมิสูงสุด (เซลเซียส)
สัดส่วน	ชนิด		
20:80	แกลบ:ลิกไนต์	97.19	613.5
80:20	แกลบ:บิทูมินัส	97.85	971.2
50:50	แกลบ:บิทูมินัส	(หาค่าไม่ได้)	461.4
20:80	แกลบ:บิทูมินัส	93.32	847.6
80:20	กากอ้อย:ลิกไนต์	93.48	482.3
50:50	กากอ้อย:ลิกไนต์	89.93	408.0
20:80	กากอ้อย:ลิกไนต์	91.87	444.4
80:20	กากอ้อย:บิทูมินัส	95.10	649.1
50:50	กากอ้อย:บิทูมินัส	(หาค่าไม่ได้)	431.1
20:80	กากอ้อย:บิทูมินัส	(หาค่าไม่ได้)	537.1
80:20	เหง้ามันสำปะหลัง:ลิกไนต์	96.71	645.2
50:50	เหง้ามันสำปะหลัง:ลิกไนต์	94.89	512.6
20:80	เหง้ามันสำปะหลัง:ลิกไนต์	77.90	320.8
80:20	เหง้ามันสำปะหลัง:บิทูมินัส	96.53	716.8
50:50	เหง้ามันสำปะหลัง:บิทูมินัส	(หาค่าไม่ได้)	388.5
20:80	เหง้ามันสำปะหลัง:บิทูมินัส	(หาค่าไม่ได้)	439.1
80:20	กะลามะพร้าว:ลิกไนต์	90.42	421.6
50:50	กะลามะพร้าว:ลิกไนต์	94.05	511.2
20:80	กะลามะพร้าว:ลิกไนต์	87.90	389.2
80:20	กะลามะพร้าว:บิทูมินัส	91.90	543.0
50:50	กะลามะพร้าว:บิทูมินัส	(หาค่าไม่ได้)	453.1
20:80	กะลามะพร้าว:บิทูมินัส	(หาค่าไม่ได้)	397.2

ตารางที่ ค.2 แสดงค่าประสิทธิภาพของเชื้อเพลิงแต่ละชนิดที่สัดส่วนอากาศมากเกินพอร้อยละ 150

ชนิดและสัดส่วนของเชื้อเพลิง		ประสิทธิภาพของเชื้อเพลิง (เปอร์เซ็นต์)	อุณหภูมิสูงสุด (เซลเซียส)
สัดส่วน	ชนิด		
100	แกลบ	98.19	989.2
100	กากอ้อย	94.17	531.3
100	เหง้ามันสำปะหลัง	97.64	801.3
100	กะลามะพร้าว	95.40	583.0
100	ลิกไนต์	(หาค่าไม่ได้)	222.0
100	บิทูมินัส	(หาค่าไม่ได้)	290.0
80:20	แกลบ:ลิกไนต์	96.11	580.9
50:50	แกลบ:ลิกไนต์	95.97	589.4
20:80	แกลบ:ลิกไนต์	95.50	573.2
80:20	แกลบ:บิทูมินัส	96.12	676.7
50:50	แกลบ:บิทูมินัส	(หาค่าไม่ได้)	483.5
20:80	แกลบ:บิทูมินัส	(หาค่าไม่ได้)	536.8
80:20	กากอ้อย:ลิกไนต์	91.23	426.4
50:50	กากอ้อย:ลิกไนต์	96.48	671.5
20:80	กากอ้อย:ลิกไนต์	92.64	462.0
80:20	กากอ้อย:บิทูมินัส	89.68	496.5
50:50	กากอ้อย:บิทูมินัส	69.29	549.1
20:80	กากอ้อย:บิทูมินัส	(หาค่าไม่ได้)	363.2
80:20	เหง้ามันสำปะหลัง:ลิกไนต์	96.25	591.8
50:50	เหง้ามันสำปะหลัง:ลิกไนต์	96.04	593.1
20:80	เหง้ามันสำปะหลัง:ลิกไนต์	87.30	368.4
80:20	เหง้ามันสำปะหลัง:บิทูมินัส	96.54	717.8
50:50	เหง้ามันสำปะหลัง:บิทูมินัส	11.09	486.3
20:80	เหง้ามันสำปะหลัง:บิทูมินัส	63.28	672.6
80:20	กะลามะพร้าว:ลิกไนต์	93.86	504.9
50:50	กะลามะพร้าว:ลิกไนต์	94.44	528.0
20:80	กะลามะพร้าว:ลิกไนต์	91.54	439.8

ตารางที่ ค.2 แสดงค่าประสิทธิภาพของเชื้อเพลิงแต่ละชนิดที่สัดส่วนอากาศมากเกินพอร้อยละ 150 (ต่อ)

ชนิดและสัดส่วนของเชื้อเพลิง		ประสิทธิภาพของเชื้อเพลิง (เปอร์เซ็นต์)	อุณหภูมิสูงสุด (เซลเซียส)
สัดส่วน	ชนิด		
80:20	กะลามะพร้าว:ปิโตรมิเนส	90.27	514.2
50:50	กะลามะพร้าว:ปิโตรมิเนส	(หาค่าไม่ได้)	443.4
20:80	กะลามะพร้าว:ปิโตรมิเนส	(หาค่าไม่ได้)	290.8

ตารางที่ ค.3 แสดงค่าประสิทธิภาพของเชื้อเพลิงแต่ละชนิดที่สัดส่วนอากาศมากเกินพอร้อยละ 200

ชนิดและสัดส่วนของเชื้อเพลิง		ประสิทธิภาพของเชื้อเพลิง (เปอร์เซ็นต์)	อุณหภูมิสูงสุด (เซลเซียส)
สัดส่วน	ชนิด		
100	แกลบ	96.96	669.3
100	กากอ้อย	96.42	659.6
100	เห้งน้ำมันสำปะหลัง	97.70	817.6
100	กะลามะพร้าว	96.13	640.8
100	ลิกไนต์	(หาค่าไม่ได้)	251.4
100	ปิโตรมิเนส	(หาค่าไม่ได้)	310.6
80:20	แกลบ:ลิกไนต์	96.39	610.0
50:50	แกลบ:ลิกไนต์	95.78	573.1
20:80	แกลบ:ลิกไนต์	95.43	568.2
80:20	แกลบ:ปิโตรมิเนส	97.31	838.7
50:50	แกลบ:ปิโตรมิเนส	25.97	491.5
20:80	แกลบ:ปิโตรมิเนส	(หาค่าไม่ได้)	492.8
80:20	กากอ้อย:ลิกไนต์	95.21	561.5
50:50	กากอ้อย:ลิกไนต์	97.13	763.3
20:80	กากอ้อย:ลิกไนต์	94.39	522.8
80:20	กากอ้อย:ปิโตรมิเนส	91.87	533.5
50:50	กากอ้อย:ปิโตรมิเนส	70.57	551.1
20:80	กากอ้อย:ปิโตรมิเนส	(หาค่าไม่ได้)	370.1

ตารางที่ ค.3 แสดงค่าประสิทธิภาพของเชื้อเพลิงแต่ละชนิดที่สัดส่วนอากาศมากเกินพอร้อยละ 200 (ต่อ)

ชนิดและสัดส่วนของเชื้อเพลิง		ประสิทธิภาพของเชื้อเพลิง (เปอร์เซ็นต์)	อุณหภูมิสูงสุด (เซลเซียส)
สัดส่วน	ชนิด		
80:20	เหง้ามันสำปะหลัง:ลิกไนต์	96.52	621.4
50:50	เหง้ามันสำปะหลัง:ลิกไนต์	96.48	638.4
20:80	เหง้ามันสำปะหลัง:ลิกไนต์	92.68	450.7
80:20	เหง้ามันสำปะหลัง:บิทูมินัส	96.61	731.5
50:50	เหง้ามันสำปะหลัง:บิทูมินัส	72.14	521.3
20:80	เหง้ามันสำปะหลัง:บิทูมินัส	89.64	771.1
80:20	กะลามะพร้าว:ลิกไนต์	94.68	540.6
50:50	กะลามะพร้าว:ลิกไนต์	94.70	540.7
20:80	กะลามะพร้าว:ลิกไนต์	94.29	520.8
80:20	กะลามะพร้าว:บิทูมินัส	93.29	579.4
50:50	กะลามะพร้าว:บิทูมินัส	(หาค่าไม่ได้)	520.3
20:80	กะลามะพร้าว:บิทูมินัส	(หาค่าไม่ได้)	324.6

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

ชื่อ นาย ตูลาธร โอภากุลวงษ์

สำเร็จการศึกษาระดับ มัธยมต้นจาก โรงเรียนธีรศาสตร์

สำเร็จการศึกษาระดับ มัธยมปลายจาก โรงเรียนสารสิทธิ์พิทยาลัย

สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีจาก สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร
ลาดกระบัง คณะวิทยาศาสตร์ ภาควิชาเคมี สาขาเคมี-ทรัพยากรสิ่งแวดล้อม

ปัจจุบันกำลังศึกษาระดับปริญญาโทอยู่ที่ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย คณะวิศวกรรมศาสตร์
สาขา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY