

คุณลักษณะของการเผาไหม้เชื้อเพลิงแกลบในเตาเผาออร์เทกคู่

COMBUSTION CHARACTERISTICS
OF A TWO-STAGE VORTEX RICE HUSK COMBUSTOR

ยี่งยง แก้วก่อเกียรติ
YINGYONG KAEWKAOKIET

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาดมหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2549

ISBN 974-15-2533-8

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

คุณลักษณะของการเผาไหม้เชื้อเพลิงแกลบในเตาเผาออร์เทคคู่

COMBUSTION CHARACTERISTICS
OF A TWO-STAGE VORTEX RICE HUSK COMBUSTOR

ยິงยง แก้วก่อเกียรติ

YINGYONG KAEWKAOKIET

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 61608
วัน,เดือน,ปี..... 19 ก.ค. 2549

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2549

ISBN 974-15-2533-8

**COMBUSTION CHARACTERISTICS
OF A TWO-STAGE VORTEX RICE HUSK COMBUSTOR**

YINGYONG KAEWKAOKIET

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN MECHANICAL ENGINEERING
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

2006

ISBN 974-15-2533-8

COPYRIGHT 2006

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

หัวข้อวิทยานิพนธ์	คุณลักษณะของการเผาไหม้เชื้อเพลิงแกลบในเตาเผาออร์เทคคู่
นักศึกษา	นายยิ่งยง แก้วก่อเกียรติ
รหัสประจำตัว	44611503
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
พ.ศ.	2549
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.พงษ์เจต พรหมวงศ์

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้ทำการศึกษาถึงคุณลักษณะของการเผาไหม้เชื้อเพลิงแกลบในเตาเผาออร์เทคคู่ ห้องเผาไหม้ภายในมีความสูง 1.80 เมตร เส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.30 เมตร ห้องเผาไหม้ถูกแบ่งเป็นสองชั้น ห้องเผาไหม้ส่วนที่อยู่ตรงกลางระหว่างห้องเผาไหม้ทั้งสองชั้นนี้ ถูกออกแบบให้มีลักษณะเป็นกรวยและคอคอด การทดลองนี้ใช้แกลบขนาดปกติ (2X8 มิลลิเมตร) ความชื้นปกติ (11%) อัตราการป้อนแกลบ 12-18 กิโลกรัม/ชั่วโมง อากาศส่วนเกิน 14-182 % ความเร็วอากาศ (Superficial air velocity) ตั้งแต่ 0.385-0.538 m/s อากาศที่ใช้ในการเผาไหม้มีสองส่วนคืออากาศปฐมภูมิและอากาศทุติยภูมิ อากาศทุติยภูมิ(λ)ที่ใช้อยู่ระหว่าง 0.00-0.30 ผลที่ได้จากการศึกษาพบว่า อิทธิพลจากอัตราป้อนแกลบส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงระดับของอุณหภูมิในห้องเผาไหม้ การปล่อยมลพิษและประสิทธิภาพการเผาไหม้อย่างเด่นชัดมากกว่าอิทธิพลจากอากาศส่วนเกินหรือความเร็วอากาศ โดยเมื่อปรับอัตราป้อนแกลบจาก 12-18 kg/hr ทำให้อุณหภูมิสูงขึ้นประมาณ 300-400 °C ปริมาณ NO_x เพิ่มขึ้นจาก 215 เป็น 412 ppm ปริมาณ CO ลดลง จาก 447.5 เป็น 87 ppm ประสิทธิภาพการเผาไหม้เพิ่มขึ้นจาก 99.61 เป็น 99.95 % เมื่อปรับการใช้อากาศส่วนเกินหรือความเร็วอากาศ พบว่าปริมาณดังกล่าวเปลี่ยนแปลงไปไม่มากเมื่อเปรียบเทียบกับการปรับอัตราป้อนแกลบ แต่ทั้งนี้อิทธิพลจากอากาศส่วนเกินและความเร็วอากาศมีอิทธิพลอย่างยิ่งต่อความเสถียรและความคงตัวของเปลวไฟภายในห้องเผาไหม้ การใช้อากาศส่วนเกินที่มีความเร็วปานกลางให้ผลที่ดีต่อลักษณะการกระจายอุณหภูมิในห้องเผาไหม้ อุณหภูมิมีความคงตัวกว่าการใช้อากาศอากาศส่วนเกินที่มีความเร็วต่ำและความเร็วสูง ในกรณีของการไม่ใช้อากาศทุติยภูมิ ($\lambda=0$) ให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้ 99.76-99.86 % ปริมาณ CO อยู่ในช่วง 209.5 – 353 ppm การปรับอากาศทุติยภูมิที่ $\lambda = 0.15$ ให้ผลดีที่สุด ต่อทั้งลักษณะการกระจายอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ การปล่อยมลพิษและประสิทธิภาพการเผาไหม้ ปริมาณ CO ลดลง อยู่ในช่วง 110 – 125 ppm ประสิทธิภาพการเผาไหม้เพิ่มขึ้นเป็น 99.91-99.92%

Thesis Title	Combustion Characteristics of a Two-Stage Vortex Rice Husk Combustor
Student	Mr. Yingyong Kaewkaokiet
Student ID.	44611503
Degree	Master of Engineering
Programme	Mechanical Engineering
Year	2006
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Dr. Pongjet Promvonge

ABSTRACT

The thesis is to investigate the combustion characteristics of rice husks in a two-stage vortex combustor. The combustion chamber is 1.8 m high with 0.3 m inner diameter and is divided into two stages of combustion: bottom and top chambers. The middle chamber is designed to be a cone-shape or conical ring like a converging-nozzle mounted between bottom and top chambers. Rice husk is used as a fuel in this study having a 2x8 mm size with moisture content around 11 %. The fuel feeding rates are between 0.20-0.30 kg/min and the excess air is set between 14-182% with superficial air velocity in a range of 0.385 to 0.538 m/s. The combustion airs are divided into two parts: primary and secondary airs. The secondary air is introduced to create stronger swirl inside the flow to help better mixing between combustion air and fuel. The use of secondary air ratio (λ) defined as the secondary air over the total air injection is varied between 0 and 0.30. The experimental results show a significant effect of rice husk feed rate, excess air and secondary air ratio on temperature distributions, exhaust gas emissions and combustion efficiency (η). Adjusting fuel feed rate from 12 to 18 kg/hr leads to the rise of temperature around 300-400°C, NO_x from 215 to 412 ppm, CO from 447.5 to 87 ppm and η from 99.6% to 99.95% (neglecting unburned-carbon). For varying excess air or combustion air velocity, the influences are not much, unlike varying fuel feed rates. However, excess air is found to have a substantial influence on combustion stability and sustainability in the chamber. The use of excess air at a moderate velocity, around 40-80%, provides more stable and sustainable combustion than those at higher or lower air velocities. For the case of no secondary air ($\lambda = 0$), the combustion efficiency is in a range of 99.76-99.86 % and CO = 209.5-353 ppm. The result reveals that the use of $\lambda = 0.15$ yields the best with CO = 110-125 ppm and $\eta = 99.91$ -99.92%.

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยเรื่องคุณลักษณะการเผาไหม้เชื้อเพลิงแกลบภายในเตาเผาออร์แบบสองชั้นสำเร็จ
ถูกลงไปได้โดยความอนุเคราะห์สนับสนุนจากหน่วยงาน และบุคคลต่าง ๆ เป็นอย่างดี

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังได้จัดสรรทุนอุดหนุนในการทำ
วิทยานิพนธ์ครั้งนี้ รองศาสตราจารย์ ดร.พงษ์เจต พรหมวงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษาได้กรุณาให้คำปรึกษา
แนะนำ อันเป็นประโยชน์ในการทำวิทยานิพนธ์ให้สำเร็จถูกลงไปด้วยดี นอกจากนี้งานวิจัยเรื่อง
นี้ยังได้รับคำแนะนำอย่างดียิ่งจากคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ซึ่งเป็นประโยชน์อย่างสูงที่ทำให้
งานวิจัยเรื่องนี้สำเร็จอย่างสมบูรณ์

ผู้ที่ให้กำลังใจและให้การสนับสนุนการศึกษาเล่าเรียนและทำวิจัยของผู้วิจัยมาโดยตลอด
ได้แก่ คุณแม่ พี่สาว ของผู้วิจัย ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในพระคุณเป็นอย่างยิ่ง

ขอขอบคุณ พี่ๆ เพื่อนๆ น้องๆ จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร
ลาดกระบัง และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร โดยเฉพาะอย่างยิ่ง อ. มณฑา เทียมเมือง ที่ให้
ความช่วยเหลือเข้าพเจ้าในทุกๆ ด้านที่ทำให้งานวิจัยสำเร็จไปด้วยดี

ขอขอบคุณ โรงสีไฟศรีกรุง ลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์แกลบเพื่อใช้ในงานวิจัย

ขอขอบพระคุณในทุกประการที่ให้แก่งานวิจัยเรื่องนี้ไว้ ณ โอกาสนี้

ยิ่งยง แก้วก่อเกียรติ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป.....	VII
รายการคำย่อและสัญลักษณ์.....	IX
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	3
1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....	3
1.4 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.5 ขั้นตอนการศึกษา.....	4
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 วรรณกรรมปริทรรศน์.....	5
2.1 หลักการและแนวคิด.....	5
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
บทที่ 3 ทฤษฎี.....	12
3.1 เชื้อเพลิงชีวมวล (Biomass fuel).....	12
3.2 เชื้อเพลิงแกลบ (Rice husk fuel).....	15
3.3 คุณสมบัติบางประการทางเทอร์โมไดนามิกส์.....	16
3.4 ทฤษฎีการเผาไหม้ (Combustion Theory).....	16
3.5 การปล่อยมลพิษ (Emission).....	23
3.6 เตาเผาออร์เทคและหลักการ.....	24
3.7 การปรับปรุงการเผาไหม้.....	25
บทที่ 4 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง.....	31
4.1 ระบบการทดลองและอุปกรณ์.....	31
4.2 พารามิเตอร์ในการทดลอง.....	36

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.3 วิธีการทดลอง.....	36
บทที่ 5 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	40
5.1 การกระจายอุณหภูมิ.....	40
5.2 องค์ประกอบไอเสีย.....	60
5.3 ประสิทธิภาพการเผาไหม้.....	64
บทที่ 6 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	67
6.1 สรุปผลการทดลอง.....	67
6.2 ข้อเสนอแนะ	69
บรรณานุกรม.....	70
ภาคผนวก.....	73
ภาคผนวก ก.....	74
ภาคผนวก ข.....	76
ภาคผนวก ค.....	78
ภาคผนวก ง.....	86
ประวัติผู้เขียน.....	94

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ขนาดของแบบจำลองแบบ Bench-Scale และแบบ Full-scale.....	7
2.2 เงื่อนไขของแบบจำลองแบบ Bench-Scale และแบบ Full scale.....	8
2.3 เงื่อนไขการทดสอบของ S.Nieh, G Yang, A. Q. Zhu และ C. S. Zhao.....	9
3.1 คุณสมบัติของเชื้อเพลิงชีวมวล.....	14
3.2 คุณสมบัติของเชื้อเพลิงแกลบ.....	15
3.3 ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงชีวมวล.....	20
4.1 ขนาดของเตาเผาและพารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบ.....	33
4.2 พารามิเตอร์สำหรับทดลองการเผาไหม้ในเตาเผาแบบวอร์เทคแบบสองชั้น.....	37
5.1 ตารางแสดงปริมาณอากาศส่วนเกินและความเร็วอากาศที่ใช้ในแต่ละอัตราป้อน.....	45
ก.1 ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงชนิดต่างๆ	75
ก.2 คุณสมบัติของเชื้อเพลิงแกลบที่ใช้ทดลอง นิวัติ พิริยะรุ่งโรจน์ (2544).....	75
ข.1 ปริมาณองค์ประกอบไอเสีย.....	77
ค.1 ปริมาณขององค์ประกอบของเชื้อเพลิงแกลบที่ใช้ในการทดลอง.....	79
ค.2 ปริมาณขององค์ประกอบของไอเสียของกรณีตัวอย่าง.....	83

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
3.1 กระบวนการการเผาไหม้อุณหภูมิสูง.....	19
3.2 การถ่ายเทพลังงานของเตาเผา.....	21
3.3 เตาเผาแบบวอร์เทค.....	24
3.4 ขั้นตอนการเผาไหม้และพื้นที่เผาไหม้ในเตาเผา.....	25
3.5 เตาเผาแบบวอร์เทคแบบสองชั้น.....	25
3.6 ปรากฏการณ์ Recirculation.....	28
3.7 การฉีดอากาศทุติยภูมิเข้าสู่ห้องเผาไหม้.....	30
4.1 ชุดอุปกรณ์เตาเผาแบบวอร์เทคแบบสองชั้น.....	31
4.2 ขนาดเตาเผาแบบวอร์เทคสองชั้น.....	32
4.3 ลักษณะของห้องผสมและการฉีดอากาศทุติยภูมิ.....	34
4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณอากาศปฐมภูมิกับระดับความสูงน้ำในมานอมิเตอร์.....	35
4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณอากาศทุติยภูมิกับระดับความสูงน้ำในมานอมิเตอร์.....	35
4.6 แผนผังการทดลองและเก็บค่าอุณหภูมิ.....	38
4.7 แผนผังการทดลองการเก็บค่าไอเสียกรณีใช้อากาศปฐมภูมิอย่างเดียว.....	39
4.8 แผนผังการทดลองการเก็บค่าไอเสียกรณีใช้อากาศทุติยภูมิ.....	39
5.1 การกระจายอุณหภูมิ, Superficial air velocity = 0.385 m/s ไม่ใช้อากาศทุติยภูมิ ($\lambda=0$) อัตราป้อนแกลบ(\dot{m}_h) = 12-18 kg/hr (ก) ตามแนวรัศมี และ (ข) ตามแนวแกน.....	40
5.2 การกระจายอุณหภูมิ, Superficial air velocity = 0.438 m/s ไม่ใช้อากาศทุติยภูมิ ($\lambda=0$) อัตราป้อนแกลบ(\dot{m}_h) = 12-18 kg/hr (ก) ตามแนวรัศมี และ (ข) ตามแนวแกน.....	41
5.3 การกระจายอุณหภูมิ, Superficial air velocity = 0.489 m/s ไม่ใช้อากาศทุติยภูมิ ($\lambda=0$) อัตราป้อนแกลบ(\dot{m}_h) = 12-18 kg/hr (ก) ตามแนวรัศมี และ (ข) ตามแนวแกน.....	42
5.4 การกระจายอุณหภูมิ, Superficial air velocity = 0.538 m/s ไม่ใช้อากาศทุติยภูมิ ($\lambda=0$) อัตราป้อนแกลบ(\dot{m}_h) = 12-18 kg/hr (ก) ตามแนวรัศมี และ (ข) ตามแนวแกน.....	43
5.5 การกระจายอุณหภูมิ อัตราป้อนแกลบ (\dot{m}_h) = 12 kg/hr, ไม่ใช้อากาศทุติยภูมิ ($\lambda=0$) อากาศส่วนเกิน 72-140% (ก) ตามแนวรัศมี และ (ข) ตามแนวแกน.....	44
5.6 การกระจายอุณหภูมิ อัตราป้อนแกลบ (\dot{m}_h) = 15 kg/hr, ไม่ใช้อากาศทุติยภูมิ ($\lambda=0$) อากาศส่วนเกิน 37-92% (ก) ตามแนวรัศมี และ (ข) ตามแนวแกน.....	48
5.7 การกระจายอุณหภูมิ อัตราป้อนแกลบ (\dot{m}_h) = 18 kg/hr, ไม่ใช้อากาศทุติยภูมิ ($\lambda=0$) อากาศส่วนเกิน 14-60% (ก) ตามแนวรัศมี และ (ข) ตามแนวแกน.....	51

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.8 การกระจายอุณหภูมิ อัตราป้อนแกลบ (\dot{m}_h) = 15 kg/hr, อากาศส่วนเกิน 37% อากาศทุติยภูมิ($\lambda=0.00$) (ก) ตามแนวรัศมี และ (ข) ตามแนวแกน.....	53
5.9 การกระจายอุณหภูมิ อัตราป้อนแกลบ (\dot{m}_h) = 15 kg/hr, อากาศส่วนเกิน 56% อากาศทุติยภูมิ($\lambda=0.00-0.15$) (ก) ตามแนวรัศมี และ (ข) ตามแนวแกน.....	54
5.10 การกระจายอุณหภูมิ อัตราป้อนแกลบ (\dot{m}_h) = 15 kg/hr, อากาศส่วนเกิน 74% อากาศทุติยภูมิ($\lambda=0.00-0.20$) (ก) ตามแนวรัศมี และ (ข) ตามแนวแกน.....	56
5.11 การกระจายอุณหภูมิ อัตราป้อนแกลบ (\dot{m}_h) = 15 kg/hr, อากาศส่วนเกิน 92% อากาศทุติยภูมิ($\lambda=0.00-0.25$) (ก) ตามแนวรัศมี และ (ข) ตามแนวแกน.....	57
5.12 การกระจายอุณหภูมิ อัตราป้อนแกลบ (\dot{m}_h) = 15 kg/hr, อากาศส่วนเกิน 109% อากาศทุติยภูมิ($\lambda=0.15-0.30$) (ก) ตามแนวรัศมี และ (ข) ตามแนวแกน.....	58
5.13 การกระจายอุณหภูมิ อัตราป้อนแกลบ (\dot{m}_h) = 15 kg/hr, อากาศส่วนเกิน 125% อากาศทุติยภูมิ($\lambda=0.15-0.30$) (ก) ตามแนวรัศมี และ (ข) ตามแนวแกน.....	59
5.14 องค์ประกอบไอเสีย ความเร็วอากาศ (Superficial air velocity) = 0.385-0.538 m/s, $\lambda=0$...	60
5.15 องค์ประกอบไอเสีย, อัตราป้อนแกลบ (\dot{m}_h) = 12-18 kg/hr, $\lambda=0$	62
5.16 องค์ประกอบไอเสีย, อากาศทุติยภูมิ 0-15% ($\lambda=0.00-0.15$), อากาศส่วนเกิน 37-92%.....	63
5.17 ความเร็วอากาศ (Superficial air velocity) 0.385-0.538 m/s ไม่ใช่อากาศทุติยภูมิ ($\lambda=0$)	64
5.18 อัตราป้อนแกลบ (\dot{m}_h) = 12-18 kg/hr, ไม่ใช่อากาศทุติยภูมิ ($\lambda=0$).....	65
5.19 อากาศทุติยภูมิ 0-15% ($\lambda=0.00-0.15$), อากาศส่วนเกิน 37-92%.....	66

รายการคำย่อและสัญลักษณ์

(A/F)	อัตราส่วนของปริมาณอากาศต่อปริมาณของเชื้อเพลิง, $\text{kg}_{\text{air}}/\text{kg}_{\text{fuel}}$
$(A/F)_{\text{Stoic}}$	อัตราส่วนของปริมาณอากาศต่อปริมาณของเชื้อเพลิงตามทฤษฎี, $\text{kg}_{\text{air}}/\text{kg}_{\text{fuel}}$
A_t	พื้นที่รวมของท่ออากาศทุติยภูมิ, m^2
B	อัตราการเผาไหม้แกลบ, kg/hr
$C_{p_{\text{ambient}}}$	ค่าความจุความร้อนของอากาศ, $\text{kJ}/\text{kg}\cdot\text{K}$
$C_{p_{\text{flue gas}}}$	ค่าความจุความร้อนของก๊าซไอเสีย, $\text{kJ}/\text{kg}\cdot\text{K}$
D	เส้นผ่านศูนย์กลางของเตาเผา, m
D_e	เส้นผ่านศูนย์กลางท่อทิ้งไอเสีย, m
D_i	เส้นผ่านศูนย์กลางจินตนาการของการฉีดอากาศทุติยภูมิ, m
D_o	เส้นผ่านศูนย์กลางของห้องเผาไหม้, m
$(F/A)_{\text{Stoic}}$	อัตราส่วนของปริมาณเชื้อเพลิงต่อปริมาณของอากาศตามทฤษฎี, $\text{kg}_{\text{fuel}}/\text{kg}_{\text{air}}$
(F/A)	อัตราส่วนของปริมาณเชื้อเพลิงต่อปริมาณของอากาศ, $\text{kg}_{\text{fuel}}/\text{kg}_{\text{air}}$
h_{fg}	เอนทาลปีจำเพาะของการกลายเป็นไอหรือความร้อนแฝง, $\text{kJ}/\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}$
HHV	ค่าความร้อนขั้นสูง, kJ/kg
LHV	ค่าความร้อนขั้นต่ำ, kJ/kg
m_{air}	มวลของอากาศที่เข้าทำปฏิกิริยาการเผาไหม้, kg
\dot{m}_{air}	อัตราการไหลของก๊าซไอเสีย kg/s
m_{fuel}	มวลของเชื้อเพลิงที่เข้าทำปฏิกิริยาการเผาไหม้, kg
\dot{m}_{fuel}	อัตราป้อนของเชื้อเพลิงแกลบ, kg/s
m_{H_2}	มวลของไฮโดรเจนต่อหนึ่งหน่วยมวลของเชื้อเพลิง, $\text{kg}/\text{kg}_{\text{fuel}}$
m_w	มวลของไอน้ำที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ต่อหนึ่งหน่วยมวลของเชื้อเพลิง, $\text{kg}/\text{kg}_{\text{fuel}}$
M.W.	มวลโมเลกุล, g/mole
N_i	โมลของก๊าซผสม, mole
P	ความดัน, Pa
P_i	ความดันย่อย, Pa
q	ภาวะความร้อนที่เตาเผาผลิตได้, $\text{kJ}/\text{hr}/\text{m}^3$
Q	ค่าความร้อนของแกลบ, kJ/kg
q_1	ความร้อนที่ถ่ายเทสู่น้ำที่นำไปใช้ประโยชน์, kJ/s
q_2	ความร้อนสุทธิในก๊าซไอเสียที่ออกจากเตาเผา, kJ/s

รายการคำย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

q_3	ความร้อนสูญเสียเนื่องจากคาร์บอนที่เผาไหม้ไม่หมดในซีลล์, kJ/s
q_4	ความร้อนสูญเสียเนื่องจากเผาไหม้ไม่สมบูรณ์, kJ/s
q_5	ความร้อนสูญเสียผ่านผนังเตา, kJ/s
q_{air}	พลังงานจากอากาศ, kJ/s
q_{fuel}	พลังงานที่อยู่ภายในเชื้อเพลิง, kJ/s
Q_S	อัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศทุติยภูมิ, l/min
Q_T	อัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศทั้งหมด, l/min
r	ระยะของตำแหน่งที่ทำการวัดอุณหภูมิตามแนวรัศมี, m
R	รัศมีของเตาเผา, m
r/R	ระยะที่ทำการวัดจากกึ่งกลางเตาต่อรัศมีของเตาเผา
S	Swirl Number
$T_{flue\ gas}$	อุณหภูมิของก๊าซไอเสีย, K
T_{ambien}	อุณหภูมิอากาศภายนอก, K
U	ความเร็วตามแนวรัศมี, m/s
V	ความเร็วตามแนวเชิงมุม, m/s
W	ทิศทางความเร็วตามแนวแกน, m/s
x	ความสูง ณ ตำแหน่งที่ทำการวัดอุณหภูมิตามแนวแกน, m
x/D	ความสูงต่อเส้นผ่าศูนย์กลางเตาเผา
% stoic air	เปอร์เซ็นต์อากาศพอดีทางทฤษฎี
% excess air	เปอร์เซ็นต์ของอากาศส่วนเกิน
β	มุมของท่ออากาศทุติยภูมิที่ฉีดอากาศทุติยภูมิเข้าห้องเผาไหม้
λ	สัดส่วนปริมาณอากาศทุติยภูมิต่ออากาศรวมเชิงปริมาตร
η_{com}	ประสิทธิภาพการเผาไหม้, %
$\eta_{thermal}$	ประสิทธิภาพเชิงความร้อน, %
Φ	อัตราส่วนสมมูล
ρ_a	ความหนาแน่นของอากาศ, kg/m ³
χ_i	สัดส่วนโมลของก๊าซผสม

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

1.1.1 ทำไมต้องมีการพัฒนาการใช้เชื้อเพลิงชีวมวล

พลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิลทั้งในประเทศและทั่วโลก มีอัตราการลดลงอย่างมาก และจะเป็นอุปสรรคอย่างยิ่งต่อการใช้พลังงานในอนาคต นอกจากนี้การปล่อยมลพิษจากกระบวนการเผาไหม้จากเชื้อเพลิงฟอสซิล ส่งผลให้มีการเปลี่ยนแปลงอย่างรุนแรงของชั้นบรรยากาศ ต่างจากพลังงานจากชีวมวลซึ่งเป็นพลังงานทดแทน (Renewable energy) ที่สะอาดกว่ามาก

พลังงานมวลชีวภาพ เป็นพลังงานที่ได้จากสิ่งมีชีวิตหรือองค์ประกอบของสิ่งมีชีวิต หรืออินทรีย์สารต่าง ๆ โดยขบวนการเปลี่ยนแปลงความร้อนทางเคมี หรือทางชีวเคมีโดยอาศัยจุลินทรีย์ เช่น ไม้ชนิดต่าง ๆ วัชพืชบกและน้ำ วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรและมูลสัตว์ต่าง ๆ เป็นต้น ถึงแม้ว่าข้อมูลจากกรมพัฒนาและส่งเสริมพลังงานชี้ว่า ในปี 2537 ประเทศไทยมีการใช้พลังงานรวมทั้งสิ้น 43.8 ล้านตัน น้ำมันดิบเพิ่มขึ้นจากปี 2536 ร้อยละ 11.5 การใช้พลังงานชีวมวลมีสัดส่วนคิดเป็นร้อยละ 26.2 ของการใช้พลังงานทั้งหมด แต่สัดส่วนการใช้พลังงานชีวมวลเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้พลังงานทั้งหมดกลับมีแนวโน้มลดลง โดยในปี 2528 มีการใช้พลังงานชีวมวลร้อยละ 36.4 ในปี 2533 ใช้น้อยลง 29.20 การใช้พลังงานชีวมวลที่สำคัญ ได้แก่ ฟืน ถ่านไม้ กากอ้อย แกลบ และวัสดุทางการเกษตรอื่น ๆ ในปี 2537 ประเทศไทยใช้ไม้ฟืน 10.3 ล้านตัน ถ่านไม้ 6.5 ล้านตัน รวมคิดเป็นไม้ฟืน 71.5 ล้านลบ.ม. ฟืนจะถูกใช้เป็นเชื้อเพลิงในการหุงต้มในครัวเรือนชนบทเป็นส่วนใหญ่ รวมถึงใช้ในอุตสาหกรรมในครัวเรือน ส่วนถ่านไม้จะถูกใช้ในทั้งครัวเรือนชนบทและในเมือง กากอ้อยจะใช้เป็นเชื้อเพลิงในโรงงานน้ำตาลประมาณ 15 ล้านตัน สำหรับแกลบและวัสดุการเกษตรอื่น ๆ นั้นมีปริมาณการใช้ประมาณ 46.6 ล้านตัน ซึ่งจะใช้ในโรงสีข้าวเป็นส่วนใหญ่ นอกจากนี้ก็มีการใช้เพื่อเผาอิฐและอุตสาหกรรมในครัวเรือนอื่น ๆ สำหรับพลังงานชีวมวลอื่น ๆ เช่น ก๊าซชีวภาพก็จะมีใช้บ้างเพียงเล็กน้อยเท่านั้น กรมพัฒนาและส่งเสริมพลังงานรายงานว่าในปัจจุบันพลังงานที่ได้จากชีวมวลทั้งหลาย ปัจจุบันมีการนำไปใช้ผลิตเป็นกระแสไฟฟ้าอยู่บ้าง แต่ยังไม่มากนัก เนื่องจากในต่างประเทศมีการศึกษาปัญหาเหล่านี้อย่างจริงจังและสามารถนำมาใช้ให้เกิดประโยชน์ได้จริงในอุตสาหกรรมและเกษตรกรรม ส่วนในประเทศไทยโดยการไฟฟ้าฝ่ายผลิต (กฟผ.) มีโครงการพลังงานชีวมวลมาผลิตเป็นกระแสไฟฟ้าเป็นพลังงานทดแทนอยู่ถึง 5 โครงการ ได้แก่ โครงการผลิตไฟฟ้าโดยใช้ไม้ไผ่เร็ว โครงการผลิตไฟฟ้าจากแกลบ โครงการผลิตไฟฟ้าจากขยะ โครงการผลิตไฟฟ้าจากมันสำปะหลัง และโครงการผลิตไฟฟ้าจากขานอ้อย ซึ่งเป็นโครงการที่มีศักยภาพที่จะ

สามารถพัฒนาให้เป็นโรงไฟฟ้าขนาดใหญ่ได้ รวมถึงโครงการพลังงานจากชีวมวลต่าง ๆ ของกรมพัฒนาและส่งเสริมพลังงาน เช่น เตาประสิทธิภาพสูง แต่ปัญหาคือโครงการเหล่านี้ไม่สามารถผลักดันให้มีการนำไปปฏิบัติได้โดยง่าย ทั้งนี้ เนื่องจากรัฐบาลยังไม่มียุทธศาสตร์ที่ชัดเจนในการสนับสนุนให้ผลิตพลังงานจากชีวมวลในรูปแบบต่าง ๆ เพราะเห็นว่าโครงการเหล่านี้เป็นเพียงแหล่งพลังงานทดแทนเท่านั้น ไม่ใช่แหล่งพลังงานหลัก (วารสารมูลนิธิสิ่งแวดล้อมเพื่อชีวิต, 2539)

1.1.2 ทำไมจึงเลือกใช้แกลบในการทดลอง

โดยทั่วไปแล้ว เชื้อเพลิงชีวมวลเป็นเชื้อเพลิงที่ค่อนข้างมีความชื้นสูง เช่น กากอ้อย ไม้ยางพารา เส้นใยปาล์ม เป็นต้น ถ้าหากจะนำไปใช้ในการเผาไหม้ควรมีการลดความชื้นเสียก่อน เนื่องจากความชื้นจะส่งผลให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้ต่ำลง และยังคงเสียค่าใช้จ่ายเพิ่มเติมในส่วนนี้ แต่ถ้าหากเป็นเชื้อเพลิงแกลบ แล้วความชื้นโดยเฉลี่ยจะอยู่ที่ประมาณ 10-15 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากในกระบวนการสีข้าวนั้น จำเป็นจะต้องลดความชื้นลงให้ต่ำกว่า 15 เปอร์เซ็นต์ก่อน และถึงแม้ว่าเชื้อเพลิงแกลบ จะมีปริมาณน้ำประมาณ 18-20 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งสูงกว่าเชื้อเพลิงชีวมวลอื่น (โดยทั่วไปแล้วเชื้อเพลิงชีวมวลจะมีปริมาณน้ำต่ำกว่าประมาณ 1-2 เปอร์เซ็นต์) แต่ถ้าหากทำการเผาไหม้ในระบบปิดที่มีการควบคุมและมีการกำจัดอนุภาคที่ติดจากเครื่องแยกอนุภาคจากก๊าซทิ้ง ก็จะสามารถลดกลิ่นและปัญหาจากฝุ่นละอองลงได้มาก นอกจากนี้เชื้อเพลิงที่มีขนาดใหญ่จะมีพื้นที่ผิวต่อปริมาตรจะน้อยจะทำให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้ต่ำถ้าหากจะนำมาเผาไหม้ จะต้องผ่านกระบวนการย่อยเสียก่อน เชื้อเพลิงชีวมวลอื่นๆที่มีขนาดใหญ่ เช่น เศษไม้จากยางพารา และอื่นๆ แต่เชื้อเพลิงแกลบมีขนาดพอเหมาะที่จะมาใช้ในการเผาไหม้ เมื่อพิจารณาในแง่ของพลังงานความร้อนจากตารางที่ ก.1 ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงแกลบกับเชื้อเพลิงเชิงพาณิชย์ต่างๆ ค่าความร้อนของแกลบเป็นตัวเลขที่น่าสนใจเนื่องจากมีค่าความร้อนที่สูงกว่าถ่านหินที่มาจากบางแหล่ง ส่วนในแง่ของมลพิษ จะพบว่าโดยทั่วไปแล้วเชื้อเพลิงแกลบจะมีปริมาณกำมะถันน้อยมาก (แกลบมีกำมะถันประมาณ 0.05 เปอร์เซ็นต์ น้ำมันเตามีประมาณ 2 เปอร์เซ็นต์ ถ่านหินมี 0.3-3.8 เปอร์เซ็นต์) ดังนั้นการเผาไหม้จะทำให้เกิดซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในปริมาณที่ค่อนข้างต่ำ นอกจากนี้ยังสามารถย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติ ในประเทศไทยมีการใช้เชื้อเพลิงชีวมวลต่างๆและแกลบกันมาแต่โบราณแล้ว แต่ว่าประสิทธิภาพการเผาไหม้นั้นค่อนข้างต่ำ เพราะใช้วิธีการเผาไหม้ในเตาเปิด จึงเกิดการสูญเสียความร้อน ทำให้ได้ปริมาณความร้อนน้อยกว่าที่ควรจะได้รับและที่สำคัญทำให้เกิดมลพิษทางอากาศดังนั้นเพื่อให้การเผาไหม้เกิดประสิทธิภาพการเผาไหม้มากที่สุดและสภาพอากาศที่ออกจากปล่องไฟเป็นมลพิษน้อยที่สุด จึงต้องทำการเผาไหม้ในเตาเผาแบบปิด ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาคู่ลักษณะการเผาไหม้เชื้อเพลิงแกลบพร้อมทั้งการพัฒนาเตาเผาให้ส่งผลที่ดีต่อคุณลักษณะดังกล่าว การกระจายอุณหภูมิ การปล่อยมลพิษ ชีวแก๊สและควันจากปล่องทิ้งไอเสีย ล้วนได้ทำการศึกษาและสังเกตเพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบและปรับปรุงเตาเผาออร์เทคต่อไป

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. ออกแบบพัฒนา ปรับปรุงและเก็บข้อมูลเบื้องต้นของเตาเผาแบบวอร์เทคโดยใช้แกลบเป็นเชื้อเพลิงเพื่อการพัฒนาเตาเผาสำหรับการทำงานไปใช้ต่อไป
2. เพื่อหาคุณลักษณะทางด้านเทคนิคในการการทำงานของเตาเผาชนิดนี้
3. สามารถควบคุมระดับอุณหภูมิการเผาไหม้ไม่เกิน 1000 °C
4. ไม่เกิดการจับกันเป็นก้อนของขี้เถ้า (dry fly ash)

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

เมื่อทำการปรับปรุงการเผาไหม้โดยใช้หลักการตามที่ได้กล่าวในข้อ 1.4 คาดว่าสิ่งที่ได้จากการทดลองคือ

1. อุณหภูมิในเตามีความเสถียร การกระจายอุณหภูมิมี่ความสม่ำเสมอทั่วทั้งเตา
2. มลพิษจากการเผาไหม้อยู่ในระดับต่ำ
3. ประสิทธิภาพการเผาไหม้สูงอยู่ในระดับที่ดี

1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

1.4.1 บันทึกลงและวิเคราะห์ผลดังต่อไปนี้

1. การกระจายอุณหภูมิในเตาเผาและการควบคุมอุณหภูมิ
2. การปล่อยมลพิษ
3. ประสิทธิภาพการเผาไหม้

1.4.2 ศึกษาผลกระทบในข้อที่ 1.4.1 เมื่อเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ดังต่อไปนี้

1. อัตราการป้อนของเชื้อเพลิงแกลบ (Feed rate, \dot{m}_h)
2. อากาศส่วนเกิน (%Excess air), ความเร็วอากาศ (Air inlet velocity)
3. อากาศทุติยภูมิ (λ)

1.4.3 สมมติฐานของการทดลอง

1. เชื้อเพลิงแกลบที่ใช้ในการทดลองเป็นแกลบขนาดปกติ (2 มม. x 8 มม.) (Weizhang, 1987)
2. เชื้อเพลิงแกลบมีความชื้นปกติ (11%) (ศุภชัย เลื่อนลอย, 2545)
3. ระบบที่ทำการทดลองเป็นระบบอะเดียบาติก
4. ข้อมูลถูกเก็บที่เงื่อนไขสภาวะคงตัว
5. สิ่งแวดล้อมมีอุณหภูมิและความดัน 25°C และ 1 atm ตามลำดับ

1.5 ขั้นตอนการศึกษา

1. ทำการศึกษาหาข้อมูลเกี่ยวกับเตาเผาชนิดต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย
2. ศึกษาคุณสมบัติของเชื้อเพลิงแกลบ
3. ทำการศึกษาทฤษฎีการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง
4. ออกแบบสร้างเตาเผาออร์เทคแบบสองชั้น
5. เตรียมเครื่องมืออุปกรณ์ในการทดลอง
6. ทำการทดลองและเก็บบันทึกผลการทดลอง
7. สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะเพื่อการพัฒนา และการปรับปรุง

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. พัฒนาการใช้พลังงานอย่างเหมาะสม
2. ทราบถึงพฤติกรรมของการเผาไหม้โดยใช้แกลบเป็นเชื้อเพลิง
3. เป็นต้นแบบของเตาเผาแกลบเพื่อนำเอาความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ใช้ในการอบ

พืชผลทางการเกษตร

บทที่ 2

วรรณกรรมปริทรรศน์

ในบทนี้จะกล่าวถึงส่วนหลักๆ 2 ส่วน คือ

1. หลักการและแนวคิด
2. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 หลักการและแนวคิด

มีรายงานจำนวนมากของเตาเผาหลายชนิดที่มีการใช้วัสดุชีวมวลหรือถ่านหินเป็นเชื้อเพลิง ในจำนวนเหล่านั้นเทคโนโลยีฟลูอิดไคซ์เบด ดูเหมือนว่าจะเป็นเทคโนโลยีที่เหมาะสมสำหรับการเปลี่ยนเชื้อเพลิงแข็งหรือเศษเหลือจากการเกษตรเป็นพลังงานเนื่องจากว่ามีข้อได้เปรียบตามธรรมชาติคือสามารถเปลี่ยนเชื้อเพลิงได้ตามความเหมาะสม ทำงานที่อุณหภูมิต่ำ เงื่อนไขการทำงานที่อุณหภูมิกว่า 1000°C แต่อย่างไรก็ตาม Wan และ Chyang (1998) รายงานว่าการใช้วิธีการของเทคนิคฟลูอิดไคซ์เบดนั้นต้องการห้องเผาไหม้ (ฟรีบอร์ด) ที่สูงมากเพื่อลดอัตราการหลุดลอยของอนุภาคเชื้อเพลิงและทำให้อนุภาคอยู่ในห้องเผาไหม้นานขึ้น ในเตาเผาฟลูอิดไคซ์เบดนั้นอาจต้องมีความสูงรวมของฟรีบอร์ดมากกว่า 15 เท่าของเส้นผ่าศูนย์กลางของเบด โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับการใช้เชื้อเพลิงแข็งที่เบามาก วิธีการนี้อาจจะไม่เหมาะสำหรับการใช้กลายเป็นเชื้อเพลิงในเตาเผาขนาดเล็กเพื่อจุดประสงค์ในการประยุกต์ใช้ในการอบแห้ง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องแก้ไขปรับปรุงเตาเผาเพื่อให้มีประสิทธิภาพในการใช้กับเชื้อเพลิงแข็งที่มีน้ำหนักเบา

Nieh and Fu (1988, 1990) ได้ทำการทดลองเพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการเผาถ่านหินอย่างสะอาด Promvongse and Silapabanleng (2001) ได้ทำการทดลองกับเตาเผาออร์เทคซึ่งมีลักษณะคล้ายคลึงกับเตาเผาของ Nieh and Fu (1988) แต่ใช้กลายเป็นเชื้อเพลิงแทนการใช้ถ่านหิน ได้ศึกษาและรายงานพฤติกรรมของการเผาไหม้กลายเป็นเตาเผาดังกล่าว ผลจากข้อได้เปรียบในเตาเผาต่อประสิทธิภาพการเผาไหม้รวมถึงอุปสรรคปัญหาในการกำจัด เนื่องจากกลายเป็นปริมาณขี้เถ้าสูงซึ่งไม่เหมือนถ่านหิน

ในการปรับปรุงการเผาไหม้ให้มีประสิทธิภาพสูงและเกิดมลพิษต่ำมีวิธีการอยู่หลายวิธีดังนี้

- 1) การปรับปรุงการออกแบบห้องเผาไหม้
- 2) การเตรียมส่วนผสมของเชื้อเพลิง
- 3) การสร้างเสถียรภาพของเปลวไฟด้วยการหมุนวน
- 4) การนำไอเสียกลับมาเผาไหม้ใหม่
- 5) การเผาไหม้เป็นลำดับขั้นและอื่นๆ (Billoud, Galland, Huynh and Candel. 1992 ; McManus, Poinsoot and Candel. 1993)

ดังนั้นเตาเผาออร์เทคแบบสองชั้นจึงได้พัฒนาขึ้น โดยอาศัยหลักการตามที่กล่าวมาข้างต้น คือ ข้อ 1, 2, 3 และ 5 มีการใช้อากาศสองส่วน คืออากาศปฐมภูมิ และ อากาศทุติยภูมิ มาประยุกต์ใช้ โดยอาศัยหลักการการหมุนวนของอากาศในเตาเผาทำให้การฉีดอากาศมีลักษณะดีขึ้นเพื่อที่จะปรับปรุงประสิทธิภาพการเผาไหม้และลดการปล่อยปริมาณมลพิษ การฉีดอากาศรอบนอกก่อให้เกิดการผสมกันอย่างสูงซึ่งนำไปสู่ประสิทธิภาพการเผาไหม้และการถ่ายเทความร้อนที่ดีกว่า

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

G. Yang, S. Nieh and T.T. Fu (1989) ศึกษาการกระจายอนุภาคในฟริบอร์คที่มีลักษณะเป็นชั้นๆ (Suspensions layer) แบบ Cold flow model ในห้องเผาไหม้จำลองแบบไซ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 10.2, 17.8 และ 25.4 cm โดยศึกษาการกระจายอนุภาคทั้งในแบบ หนาแน่น (Dense Suspensions layer) และแบบเจือจาง (Diluted Suspensions layer) เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงความเร็วของอากาศปฐมภูมิและทุติยภูมิ ระดับความสูงของอากาศทุติยภูมิที่ใช้มี 2 ค่าคือ 4R และ 7R (เมื่อ R คือรัศมีภายในห้องเผาไหม้จำลอง) พบว่าการกระจายอนุภาคจะสูงที่ใกล้ผนังและเบาบางบริเวณใกล้กับใจกลางห้องเผาไหม้จำลอง ความหนาแน่นของอนุภาคในแต่ละ Suspensions layer นี้ จะเพิ่มมากขึ้นเมื่อเพิ่มความเร็วอากาศปฐมภูมิและต่ำลงเมื่อเพิ่มความเร็วอากาศทุติยภูมิ ขนาดของอนุภาคที่อยู่ใน Lower suspensions layer จะมีขนาดใหญ่กว่า Upper suspensions layer

Tim T. Fu and Sen Nieh (1989) ทำการทดสอบเตาเผาแบบออร์เทค ขนาด 0.15 MB/H (0.15×10^6 Btu/hr) โดยใช้เชื้อเพลิง DUC (Dry Ultra fine Coal) และ CWF (Coal Water Fuel) อัตราป้อนที่ใช้ของเชื้อเพลิง DUC คือ 17.6 lb/hr และ 12.7 lb/hr การทดลองพบว่าความแรงของการหมุนวนขึ้นอยู่กับความเร็ว อัตราการไหลและมุมของอากาศปฐมภูมิและทุติยภูมิ อุณหภูมิของห้องเผาไหม้ส่วนล่างอยู่ในช่วง 1700-2200 °F เมื่อใช้ความเร็วอากาศปฐมภูมิสูงหรือต่ำมากเกินไป จะส่งผลให้เปลวไฟไม่เสถียรและเปลวไฟจะมัวและมีอัตราการเผาไหม้หมดของเชื้อเพลิงค่อนข้างต่ำ ลักษณะของเปลวไฟจะเสถียร ความสว่างของเปลวไฟสูง และอัตราการเผาไหม้หมดของเชื้อเพลิงจะดี ก็ต่อเมื่อใช้ความเร็วอากาศปฐมภูมิในระดับปานกลาง เมื่อใช้อัตราป้อนปกติ (Normal load: 100%, 0.15 MB/H) ประสิทธิภาพการเผาไหม้ในกรณีไม่ใช้อากาศ ทุติยภูมิเท่ากับ 98% และเป็น 98.5% เมื่อใช้อากาศทุติยภูมิ และเมื่อลดอัตราป้อนจากอัตราป้อนปกติ ประสิทธิภาพการเผาไหม้จะลดลงตามลำดับ การใช้อากาศทุติยภูมิทำให้อุณหภูมิในห้องเผาไหม้ลดลง 100-300 °F แต่จะทำให้ปริมาณคาร์บอนในเถ้าลดลงจาก 30% เป็น 26% เนื่องจากการฉีดอากาศทุติยภูมิ ส่วนปริมาณ NO_x ที่ทางออกต่ำกว่า 50 ppm แต่ยังไม่สามารถอธิบายได้อย่างชัดเจนว่าการใช้อากาศทุติยภูมิมีส่วนอย่างไรต่อปริมาณของ NO_x ปริมาณของ SO_2 อยู่ในระดับต่ำมาก เนื่องจากมีปริมาณกำมะถันในเชื้อเพลิงต่ำ อุณหภูมิไอเสียอยู่ในช่วง 1500-1700 °F

การทดลองนี้สามารถใช้อัตราป้อนของเชื้อเพลิงต่ำสุดอยู่ที่ 3.9 lb/hr (33%ของภาระปกติ) อัตราป้อนเชื้อเพลิงสูงสุดอยู่ที่ 20.5 lb/hr (170%ของภาระปกติ) คิดเป็นอัตราส่วน Turn down ratio สูงสุดเท่ากับ 5:1 แต่ที่อัตราป้อนเชื้อเพลิงสูงมากส่งผลให้มีปริมาณมลพิษสูง อัตราส่วน Turn down ratio ที่เหมาะสมของการทดลองนี้อยู่ที่ 3:1 นอกจากนี้งานวิจัยนี้ยังได้ทำการศึกษาถึงคุณลักษณะของการปฏิบัติงาน (Operational characteristics) เช่น กระบวนการในการจุดเตา (Start up) และการเริ่มการจุดเตาใหม่ (Restart) ไว้ในงานวิจัยนี้ด้วย พบว่าอากาศปฐมภูมิคือพารามิเตอร์สำคัญที่มีผลอย่างยิ่งต่อการจุดเตาใหม่ ถ้าอัตราป้อนอากาศปฐมภูมิสูงส่งผลให้เกิดการสูญเสียความร้อนทำให้การจุดเตาใหม่เป็นไปได้ยากขึ้น

Sen Nieh and Jian Zhang (1992) ศึกษาการจำลองการไหลของพลศาสตร์อากาศในเตาเผาเวอร์เทค โดยใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิง โดยส่วนที่สำคัญมากส่วนหนึ่งในงานวิจัยนี้เกี่ยวข้องกับ การศึกษาความเร็ว ความดันสถิตยและกระแสการไหล (Streamlines) ภายในเตาเผาดังกล่าว ต่อการย่อหรือขยายขนาดของเตาเผา (Scale up และ Scale down) แบบจำลองกำหนดเตาเผาไว้สองขนาด คือ แบบ Bench-scale และแบบ Full-scale โดยขนาดและเงื่อนไขของแบบจำลองทั้งสองแบบ แสดงในตารางที่ 2.1 และ 2.2

ตารางที่ 2.1 ขนาดของแบบจำลองแบบ Bench-Scale และแบบ Full-scale

Model	H/D	D/d	h_1/H	h_2/H	h_3/H	h_4/H	L/H
Bench-Scale	2.6	2.3	0.08	0.16	0.45	0.73	0.77
Full-scale	2.3	2.1	0.06	0.39	0.55	0.72	0.72

* Diameter ratio = 1:2.44, Volume ratio = 1:12.4

ผลที่ได้พบว่าความเร็วตามแนวสัมผัสและความดันสถิตยมีความคล้ายคลึงกันอย่างมากของแบบจำลองทั้ง 2 แบบ ส่วนความเร็วในแนวแกนและแนวรัศมีของแบบจำลองทั้ง 2 มีความคล้ายคลึงกันเช่นเดียวกัน แต่ไม่ชัดเจนมากเท่ากับความเร็วตามแนวสัมผัส ส่วน flow pattern ของแบบจำลอง ดูได้จากเส้นกระแสก็มีความคล้ายคลึงกันเช่นเดียวกัน

ตารางที่ 2.2 เงื่อนไขของแบบจำลองแบบ Bench-Scale และแบบ Full scale

Parameter	Magnitude
1. Bench-scale	
Air flow rate, m ³ /hr	226/0/226/226
Inlet air tangential velocity, m/s	24.6/0/0/24.6/24.6
Inlet average tangential velocity, m/s	24.6
Air temperature, K	300
2. Full-scale	
Air flow rate, m ³ /hr	678/681/680/0
Inlet air tangential velocity, m/s	25/25.1/25.1/0
Inlet average tangential velocity, m/s	25.1
Air temperature, K	300

S. Nieh, G. Yang, A. Q. Zhu and C. S. Zhao (1992) ได้ทำการสร้างเตาเผาออร์เทก-ฟลูอิด ไคซ์เบดขนาด 18 นิ้ว สูง 80 นิ้ว และทำการทดสอบแบบ cold flow model เพื่อศึกษาการผลจากการเปลี่ยนแปลงค่า swirl number และสัดส่วนของอากาศทุติยภูมิ ผลที่สนใจศึกษาดังกล่าวมีทั้งหมด 3 ประการด้วยกันคือ ทำการวัดสนามการไหลของก๊าซ (Gas flow field) การกระจายอนุภาค (Particle mass flux distribution) และการหลุดลอยของอนุภาค (Particle elutriation) ในฟรีบอร์ด (Freeboard) โดยมีเงื่อนไขการทดสอบดังตารางที่ 2.3 และผลการทดสอบระบุว่า

1. ขนาดของการหมุนวนของก๊าซ (Magnitude of gas recirculation) จะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มค่า swirl number และมุมของการฉีดอากาศทุติยภูมิ (β°) ที่ดีที่สุดต่อประสิทธิภาพของการหมุนวน (Performance of gas recirculation) คือ 45°
2. การกระจายอนุภาคในฟรีบอร์ดมีลักษณะเป็นชั้นๆ (Suspensions layer) และสามารถควบคุมอนุภาคที่มีลักษณะเป็นชั้นนี้ให้เป็นแบบหนาแน่นหรือเป็นแบบเจือจาง ได้โดยการใช้ตำแหน่งของชุดหัวฉีดอากาศชุดบนและชุดล่าง นอกจากนี้ยังพบว่า ณ ตำแหน่งความสูงขึ้นไปในฟรีบอร์ด การกระจายอนุภาคจะลดลง แต่จะเพิ่มมากขึ้นตามแนวรัศมีไปจนถึงผนังเตา
3. การเพิ่ม swirl number และสัดส่วนของอากาศทุติยภูมิ จะสามารถลดอัตราการหลุดลอยของอนุภาคได้ถึง ฟังก์ชันอันดับที่ 5 ของการหลุดลอยของอนุภาค ในกรณีนี้ swirl number และสัดส่วนของอากาศทุติยภูมิเป็นศูนย์

ตารางที่ 2.3 เงื่อนไขการทดสอบของ S.Nieh, G Yang, A. Q. Zhu และ C. S. Zhao

Run No.	อากาศปฐมภูมิ (ft ³ /min)	อากาศทุติยภูมิ				Swirl No, S
		หัวฉีดชุดบน		หัวฉีดชุดล่าง		
		(ft ³ /min)	β (°)	(ft ³ /min)	β (°)	
1	500	100	45	150	45	1.63
2	500	100	30	150	30	1.96
3	500	100	60	150	60	1.15
4	500	100	45	150	45	1.78
5	400	150	45	200	45	3.2
6	400	0	0	350	45	6.4
7	750	0	0	0	0	0
8	600	50	45	100	45	0.59

Jian Zhang และ Sen Nieh (1997) ศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบสองมิติ เพื่ออธิบายการไหลแบบปั่นป่วนของอนุภาคในของไหล (gas-particle) ของการเผาไหม้ถ่านหินในเตาเผาเวอร์เทค พบว่า การจุดติดอยู่ใกล้ผนังซึ่งเป็นบริเวณที่พบว่าการกระจายของอนุภาคและอุณหภูมิการเผาไหม้สูง และมีปริมาณออกซิเจนสูง อุณหภูมิของก๊าซเกือบทุกส่วนในห้องเผาไหม้อยู่ในช่วง 1100-1500 K ประสิทธิภาพการเผาไหม้สูงเนื่องจากมีระยะเวลาที่นานของอนุภาคในห้องเผาไหม้

C. H. LIN, J. T. TENG and C. S. CHYANG (1997) ศึกษาการปล่อยมลพิษและประสิทธิภาพของการเผาไหม้ในเตาเผาเวอร์เทค-ฟลูอิดไคซ์เบด โดยใช้ถ่านหินขนาดต่างกันเป็นเชื้อเพลิง ทำการศึกษาเงื่อนไขการทดลองต่างๆ ที่มีผลต่อการปล่อยมลพิษและประสิทธิภาพการเผาไหม้ดังกล่าว ที่ประสิทธิภาพประมาณ 96% จะง่ายต่อการปฏิบัติงานในเตาเผาที่อุณหภูมิในเบดอยู่ที่ประมาณ 850-880 °C ขนาดของถ่านหินที่สูงขึ้นส่งผลให้ได้ประสิทธิภาพการเผาไหม้ที่สูงเนื่องจากอนุภาคขนาดเล็กนั้นมีอัตราการหลุดลอยที่สูงกว่าอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ นอกจากนี้ การศึกษายังพบอีกว่าการฉีดอากาศทุติยภูมิที่ตำแหน่งความสูงมากเกินส่งผลให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้ต่ำกว่าการฉีดอากาศทุติยภูมิที่ระดับความสูงต่ำๆ และที่ความสูงปานกลางของเตาเผา และการใช้อากาศทุติยภูมิส่งผลให้ได้ประสิทธิภาพการเผาไหม้ที่สูงกว่าการใช้อากาศปฐมภูมิเพียงอย่างเดียว

Chun-Hung LIN, Jyh-Tong TENG, Chien-Song CHYANG and Cheng-Hsing HSU (1998) ทำการศึกษานามการไหลในฟริบอร์คของเตาเผาเวอร์เทค-ฟลูอิดไคซ์เบด (Vortexing Fluidized Bed, VFBC) บนพื้นฐานของการใช้สมการแบบจำลอง $k-\epsilon$ และสร้างสมการ

สหสัมพันธ์ทั่วไป (General correlation) ของ vortex number ที่ประกอบไปด้วยพารามิเตอร์ที่จำเป็นต่อการออกแบบเตาเผาดังกล่าว คือ สัดส่วนของอากาศปฐมภูมิต่ออากาศทุติยภูมิ ความเร็วของอากาศทุติยภูมิ และเส้นผ่าศูนย์กลางของ imaginary circle พบว่า vortex number ที่เป็นตัวบ่งชี้ถึงค่าของการหมุนวนซึ่งคล้ายคลึงกับค่า swirl number อันจะส่งผลต่อการเผาไหม้จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเร็วของอากาศทุติยภูมิกับเพิ่มเส้นผ่าศูนย์กลางของ imaginary circle และลดสัดส่วนของอากาศปฐมภูมิต่ออากาศทุติยภูมิลง โดยงานวิจัยนี้ได้กำหนดให้สัดส่วนของอากาศปฐมภูมิต่ออากาศทุติยภูมิทั้งหมด 2 ค่าคือ 1:1 และ 2:1

L.X. Zhou, Y. Li, T. Chen and Y. Xu (2000) ใช้เทคนิค Phase-Doppler particle anemometer (PDPA) ในห้องเผาไหม้แบบไซโคลนที่มีการเพิ่มพื้นที่หน้าตัดอย่างทันทีทันใด (larger sudden expansion) ศึกษาผลจาก Swirl number ที่มีต่อพฤติกรรมกรรมการหมุนวนแบบปั่นป่วนของอนุภาคในของไหล ทั้งแบบสองสถานะ (2D-Phase) และสามสถานะ (3D-Phase) พฤติกรรมดังกล่าว เช่น โพรไฟล์ความเร็วตามแนวแกน (Axial velocity profile) ความเร็วตามแนวสัมผัส (Tangential velocity profile) ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของของไหลแบบสองสถานะ และระดับของความปั่นป่วน โดยที่ค่า swirl number ที่ใช้ในการทดลองคือ 0.47, 1.0, 1.5 และ 2.1 ผลที่ได้คือสนามความเร็วของอนุภาคกับก๊าซจะมีลักษณะเหมือนกับสนามความเร็วของก๊าซเพียงอย่างเดียวทุกค่า swirl number เมื่อเพิ่มค่า swirl number จะเพิ่มขนาดพื้นที่ของการหมุนวนของอนุภาค ความปั่นป่วนในทิศทางตามแนวแกนและตามแนวรัศมีจะลดลง แต่ความปั่นป่วนในทิศทางตามแนวรัศมีจะเพิ่มขึ้น การกระจายอนุภาคที่บริเวณแกนกลางใกล้ทางเข้าจะหายไปและเลื่อนไปอยู่บริเวณผนัง

W. Permchart, V.I. Kouprianov and L. Tantimuratha (2003) ศึกษาการเผาไหม้แกลบในเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบด โดยใช้ทรายซิลิกาเป็นวัสดุเบด และได้ศึกษาผลกระทบเนื่องจากอัตราป้อนแกลบ อากาศส่วนเกิน รวมไปถึงความสูงเบด อัตราป้อนแกลบที่ใช้คือ 37.3 และ 82.4 kg/hr อากาศส่วนเกินตั้งแต่ 20-120 % วัดทั้งการกระจายอุณหภูมิและปริมาณไอเสียต่างๆภายในห้องเผาไหม้และในท่อไอเสียเช่น CO, CO₂, NO และ O₂ เป็นต้น ผลที่ได้คืออัตราป้อนแกลบส่งผลโดยตรงต่อโพรไฟล์อุณหภูมิตามแนวแกน ในขณะที่ความสูงเบดเป็นเพียงอิทธิพลรองลงไปเท่านั้น อิทธิพลจากอากาศส่วนเกินมีผลน้อยมากต่อการกระจายอุณหภูมิในห้องเผาไหม้ อัตราป้อนและอากาศส่วนเกินเป็นตัวแปรสำคัญมากต่อความเข้มข้นของ CO และ NO ตามแนวแกน ขณะที่ความเข้มข้นของ CO และ NO ดังกล่าวส่วนใหญ่เป็นอิสระต่อความสูงเบด ส่วนประสิทธิภาพการเผาไหม้อยู่ในช่วง 81-86% ประสิทธิภาพทางความร้อนต่ำกว่าประสิทธิภาพการเผาไหม้อยู่ประมาณ 3% ในแต่ละเงื่อนไขการทดลอง

จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าพลศาสตร์ของอากาศภายในห้องเผาไหม้ ลักษณะของเชื้อเพลิง การออกแบบห้องเผาไหม้ภายในและอื่นๆ ล้วนมีอิทธิพลต่อคุณลักษณะการเผาไหม้ทั้งสิ้น จากงานวิจัยที่ผ่านมาของคณะได้ผลดีเป็นที่น่าพอใจแต่ยังคงประสบปัญหาบางประการอยู่มาก อย่างไรก็ตาม ก็คิดการพัฒนาการเผาไหม้โดยใช้เชื้อเพลิงชีวมวลเช่นแกลบยังคงต้องอาศัยการเก็บข้อมูล ทั้งข้อมูลทางตัวเลขและข้อมูลทางเทคนิคอีกมาก ซึ่งเป็นสิ่งจำเป็นต่อการพัฒนาการนำพลังงานไปประยุกต์ใช้กับการอบแห้งพืชผลทางการเกษตร งานวิจัยนี้จึงมีความสำคัญต่อการพัฒนาการใช้พลังงานดังกล่าว

บทที่ 3

ทฤษฎี

การใช้เชื้อเพลิงชีวมวลเพื่อผลิตความร้อน ประสิทธิภาพทางความร้อน (Thermal performance) ของเตาเผาขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพของการเปลี่ยนแปลงความร้อนของระบบ เช่น การเปลี่ยนแปลงพลังงานเคมีของเชื้อเพลิงไปสู่พลังงานความร้อน เนื้อหาที่จะแสดงในบทนี้มี 2 ส่วนหลักๆ คือ ทฤษฎีการเผาไหม้ และเนื้อหาที่มีความสัมพันธ์ต่อการปรับปรุงการเผาไหม้ในเตาเผาออร์เทคแบบ 2 ชั้น

3.1 เชื้อเพลิงชีวมวล (Biomass fuel) Food and Agriculture Organization of the United Nation (1993)

เชื้อเพลิงชีวมวลมีอยู่หลายชนิด แต่ละชนิดมีคุณสมบัติแตกต่างกัน ส่งผลให้คุณลักษณะของการเผาไหม้แตกต่างกันออกไปด้วยเช่นกัน ชนิดของเชื้อเพลิงชีวมวล (Biomass fuel type) ส่วนประกอบ (Constituents) และคุณลักษณะการเผาไหม้ (Combustion characteristics) ล้วนมีความสำคัญและมีผลต่อการเผาไหม้ทั้งสิ้น

3.1.1 ชนิดของเชื้อเพลิงชีวมวล

เชื้อเพลิงชีวมวลคืออีกชนิดของเชื้อเพลิง เช่น ไม้ ถ่านจากไม้ มูลสัตว์ เศษเหลือจากการเกษตรในประเทศที่กำลังพัฒนา

3.1.1.1 เชื้อเพลิงชีวมวลจากไม้ (Wood) แบ่งเป็น 2 ประเภทคือ ไม้เนื้อแข็ง (Hard wood) และ ไม้เนื้ออ่อน (Soft wood) ทั้งไม้เนื้อแข็งและไม้เนื้ออ่อนมีส่วนประกอบเซลลูโลส (Cellulose) ประมาณ 40-45% ในไม้เนื้ออ่อนมีเฮมิเซลลูโลส (Hemi cellulose) 20% ในไม้เนื้อแข็งมี 15-35% ในไม้เนื้ออ่อนมีลิกนิน (Lignin) 17-25% ในไม้เนื้อแข็งมี 15-35%

3.1.1.2 เชื้อเพลิงชีวมวลจากการเกษตร (Agricultural residues) เป็นของเหลือที่ได้จากการเกษตร เช่น แกลบ ฟางข้าว ใบอ้อย เศษ ไม้ยางพารา กากปาล์ม, ชังข้าวโพด, เหง้ามันสำปะหลัง, เปลือกมะพร้าว, ซึ่งสารพวกนี้จะมีปริมาณลิกนินต่ำโดยประมาณ 0 – 20 เปอร์เซ็นต์

3.1.1.3 เชื้อเพลิงชีวมวลจากอุตสาหกรรม (Industrial residues) เช่น เชื้อเพลิงที่ได้จากการผลิตน้ำตาล คือ ชานอ้อย นอกจากนี้ยังมีกากสับปะรดที่ได้จากโรงงานผลิตสับปะรดกระป๋อง เชื้อเพลิงประเภทนี้จะมีปริมาณความชื้นสูงมาก

3.1.1.4 เชื้อเพลิงชีวมวลจากของเหลือใช้จากคนและสัตว์ (Human and animal residues) ได้แก่ เชื้อเพลิงจากขยะเทศบาล เป็นต้น

3.1.2 ส่วนประกอบของเชื้อเพลิงชีวมวล

เชื้อเพลิงชีวมวลมีส่วนประกอบหลัก (Major element) อยู่ 3 ส่วน คือ คาร์บอน ออกซิเจน และไฮโดรเจน รวมกันอยู่ในส่วนประกอบที่เป็นสารอินทรีย์รูปต่างๆ เช่น เซลลูโลส ($C_6H_{10}O_5$)_x ซึ่งในกระบวนการการเผาไหม้จะเปลี่ยนเป็นคาร์บอนมอนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ บางส่วนจะอยู่ในรูปของ ชาร์ (Char) และทาร์ (Tar) นอกจากนี้ยังมี เฮมิเซลลูโลส ($C_5H_8O_4$)_y เฮมิเซลลูโลสนี้ทำให้เกิดมีปริมาณแก๊สมากแต่ให้ทาร์และชาร์น้อย และ ลิกนิน ($C_9H_{10}O_3(CH_3)O_{0.9-1.7}$)_z ถ้าเชื้อเพลิงชีวมวลมีปริมาณของลิกนินมากเท่าใดก็จะให้ค่าความร้อนของการเผาไหม้สูง ส่วนประกอบเหล่านี้ขึ้นอยู่กับชนิดของพืชแต่ละชนิด เช่นเชื้อเพลิงชีวมวลชนิดหนึ่งมีคาร์บอน 50% ออกซิเจน 44% และไฮโดรเจน 6% สามารถเขียนเป็นสูตรอย่างง่าย (empirical formula) คือ $CH_{1.44}O_{0.66}$ เชื้อเพลิงชีวมวลยังประกอบไปด้วยสารประกอบที่เป็นอนินทรีย์ซึ่งไม่สามารถที่จะเผาไหม้ได้ซึ่งจะกลายเป็นเถ้า (Ash) ในเวลาต่อมา แต่ไม่จำเป็นต้องเขียนลงไปในสูตรอย่างง่าย เนื่องจากเป็นส่วนประกอบรอง (Minor element) เถ้าของเชื้อเพลิงชีวมวลแต่ละชนิดมีปริมาณตั้งแต่ 1% เช่นไม้ ไปจนถึง 20-25 % ในแกลบ องค์ประกอบของเถ้าจะประกอบไปด้วย CaO , K_2O , Na_2O , MgO , SiO_2 , Fe_2O_3 , P_2O_5 และ Al_2O_3 ซึ่งส่วนประกอบของเชื้อเพลิงชีวมวลเหล่านี้ล้วนมีความสำคัญซึ่งส่งผลต่อคุณลักษณะของการเผาไหม้ทั้งสิ้น

3.1.3 คุณลักษณะการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงชีวมวล

คุณสมบัติที่สำคัญของเชื้อเพลิงชีวมวลมีความสัมพันธ์บางอย่างต่อคุณลักษณะการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงชีวมวล เช่น ขนาด ความหนาแน่น องค์ประกอบหลักของเชื้อเพลิงชีวมวล ค่าความร้อนล้วนมีอิทธิพลโดยตรงต่อคุณลักษณะการเผาไหม้

เชื้อเพลิงชีวมวล มีค่าความหนาแน่นหรือมีค่า Bulk density ต่ำ ทำให้ต้องใช้เชื้อเพลิงในปริมาณสูงเพื่อให้ได้ความร้อนตามที่ต้องการ ส่งผลให้ยากต่อการลำเลียงเชื้อเพลิงเข้าห้องเผาไหม้ ปริมาณความชื้นและสารระเหยของเชื้อเพลิงชีวมวลค่อนข้างสูงทำให้เป็นข้อดีคือง่ายต่อการจุดติด แต่ความชื้นที่สูงทำให้การเผาไหม้ทำได้ยากขึ้น ซึ่งความชื้นที่สูงนี้มีผลอย่างยิ่งต่อค่าความร้อนของเชื้อเพลิง นำไปสู่การจุดติดที่ยากขึ้น ทำให้อุณหภูมิการเผาไหม้ลดลง ขัดขวางให้การเผาไหม้ไม่มีคุณภาพ การที่เชื้อเพลิงชีวมวลมีองค์ประกอบที่แตกต่างกัน จึงทำให้ค่าความร้อน (Heating Value) ของเชื้อเพลิงชีวมวลมีค่าแตกต่างกันดังตารางที่ 3.1

3.1.3.1 ขนาดและความหนาแน่นของเชื้อเพลิงชีวมวล

ความหนาแน่นจำเพาะ เป็นคุณสมบัติที่จำเป็นอย่างยิ่งสำหรับการเผาไหม้ที่เชื้อเพลิงลอยตัวอยู่ในกระแสอากาศ เนื่องจากการลอยตัวจำเป็นต้องใช้พลังงานจำนวนหนึ่ง ถ้าอนุภาคมีความหนาแน่นที่มากหรือน้อยเกินไปจะทำให้ยากต่อการควบคุมให้เกิดการเผาไหม้ที่ดี ส่วนขนาดของอนุภาคเป็นตัวบ่งบอกพื้นที่ โอกาสที่เชื้อเพลิงจะสัมผัสกับอากาศ และถ้าเชื้อเพลิงมีขนาดสม่ำเสมอจะเป็นสิ่งที่ดีมาก เชื้อเพลิงที่มีขนาดเล็กจะมีพื้นที่ผิว(ต่อปริมาตร) ในการสัมผัสกับอากาศที่ทำมากกว่า ทำให้สามารถทำปฏิกิริยากับอากาศได้มากขึ้น นอกจากนี้อนุภาคที่มีขนาดใหญ่และหนัก (ความเฉื่อย) จะทำให้มีการเปลี่ยนแปลงอย่างช้าๆในของไหล

3.1.3.2 องค์ประกอบหลักของเชื้อเพลิงชีวมวล

การวิเคราะห์แบบประมาณ(Proximate analysis)

การวิเคราะห์แบบประมาณเป็นการวิเคราะห์แบบไม่ซับซ้อน เพื่อประมาณองค์ประกอบหลักของเชื้อเพลิงชีวมวลซึ่งมีอิทธิพลโดยตรงต่อคุณลักษณะการเผาไหม้ เช่น ความชื้น ปริมาณของสาร

การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate analysis)

การวิเคราะห์แบบแยกธาตุเป็นการประมาณธาตุที่สำคัญเช่น C, H, O, N และ S หรือสารไม่บริสุทธิ์อื่น เช่น ฟอสฟอรัสและคลอรีน การวิเคราะห์แบบแยกธาตุและองค์ประกอบของก๊าซมีความสำคัญมากต่อการคำนวณมวลและพลังงานทั้งหมดในกระบวนการการเผาไหม้

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติของเชื้อเพลิงชีวมวล

	Bulk density Kg/m ³	ความชื้น %	ค่าความร้อน Mj/kg	สารระเหย %, a.r.	ขี้เถ้า %, a.r.
ขี้เลื่อย	160	40	18.4	80.3	9.5
เศษไม้	311	33-38	18.9	85-88	1.0
กากอ้อย	80	50	19.0	82.5	0.13
ซังข้าวโพด	190	8.0	18.1	84	0.53

3.2 เชื้อเพลิงแกลบ (Rice husk fuel) Weizhang (1987)

ค่าความร้อนของแกลบขึ้นอยู่กับแหล่งที่มาของแกลบนั้น โดยอยู่ที่ประมาณ 2900-4500 kcal/kg ซึ่งคิดเป็นปริมาณ 40 % ของถ่านหินบิทูมินัส ข้อดีของแกลบคือมีปริมาณสารระเหยสูงทำให้ช่วยในการจุดติดได้เป็นอย่างดี มีความชื้นต่ำเมื่อเทียบกับเชื้อเพลิงชีวมวลอื่นและมีขนาดเล็กเหมาะเป็นเชื้อเพลิง ข้อเสียของแกลบคือ มีปริมาณขี้เถ้าสูง (ประมาณ 13-23 % โดยน้ำหนัก) เมื่อเทียบกับเชื้อเพลิงชีวมวลอื่น นอกจากนี้แกลบมีค่าความหนาแน่นหรือมีค่า Bulk density ต่ำเมื่อเทียบกับถ่านหินหลายชนิดที่อยู่ประมาณ 500–900 kg/m³

ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติของเชื้อเพลิงแกลบ

การวิเคราะห์แบบประมาณ	ความชื้น	1.1 - 9.8	%
	คาร์บอนคงตัว	12.7 - 17.4	%
	สารระเหย	56.4 - 69.3	%
	ขี้เถ้า	15.8 - 24.9	%
การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ	คาร์บอน	38.2 - 45.8	%
	ซิลิกา	14.7	%
	ไฮโดรเจน	0.2 - 5.31	%
	ออกซิเจน	29.9 - 31.7	%
	กำมะถัน	0.07 - 0.12	%
Heating value		2900 - 4560	Kcal/kg
Bulk density		95 - 107	Kg/m ³
ขนาดเฉลี่ย		8X2	mm
Weight of single		2.94 - 3.56	mg
องค์ประกอบของขี้เถ้า	SiO ₂	90 - 97	%
	CaO	0.15 - 0.2	%
	MgO	0.1 - 0.2	%
	K ₂ O	0.6 - 1.6	%
	SO ₃	0.1-1.13	%
	P ₂ O ₅	0.3	%

3.3 คุณสมบัติบางประการทางเทอร์โมไดนามิกส์ Van Wylen (1993)

3.3.1 ความดันย่อยของของก๊าซผสมอุดมคติ (Partial pressure)

ความดันของก๊าซผสมอุดมคติ คือผลรวมของความดันย่อยของก๊าซแต่ละตัวที่อุณหภูมิเดียวกัน สามารถหาได้จาก

$$P = \sum_i P_i \quad (3.1)$$

ความดันย่อยมีความสัมพันธ์กับก๊าซผสมดังต่อไปนี้

$$P_i = \chi_i P \quad (3.2)$$

เมื่อ χ_i คือ สัดส่วน โมลของก๊าซผสม (Mole fraction of species, i) หาได้จากสมการ

$$\chi_i \equiv \frac{N_i}{N_1 + N_2 + \dots + N_i + \dots} = \frac{N_i}{N_T} \quad (3.3)$$

N_i คือ โมลของก๊าซผสม, mole

โดยที่

$$\sum_i \chi_i = 1 \quad (3.4)$$

3.4 ทฤษฎีการเผาไหม้ (Combustion Theory) Stephen R. Turns. (2000)

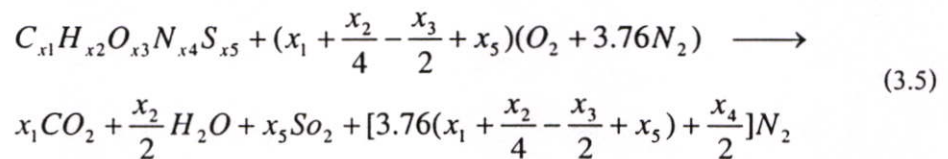
การเผาไหม้เป็นกระบวนการระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศทำปฏิกิริยาต่อกัน ดังนั้นกระบวนการการเผาไหม้จึงขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของเชื้อเพลิง(รูปร่าง ความหนาแน่น ความชื้น ปริมาณคาร์บอนคงตัว สารระเหย ฯลฯตามที่ได้กล่าวมาข้างต้น) ปริมาณของเชื้อเพลิง ปริมาณอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ (อากาศปฐมภูมิและอากาศทุติยภูมิ) และเงื่อนไขภายนอกต่างๆ (อุณหภูมิ ความชื้น ฯลฯ)

การเผาไหม้(Combustion) หมายถึง ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยเปลี่ยนพลังงานในพันธะเคมีเป็นพลังงานความร้อนสูงและมีการแผ่รังสี แต่หากปฏิกิริยาเป็นไปอย่างช้าก็จะมี การให้ความร้อนออกมาเพียงเล็กน้อยและไม่มีแสงสว่าง ปฏิกิริยานี้อาจจะเป็นการออกซิเดชันกับเชื้อเพลิงแข็ง เชื้อเพลิงเหลว หรือเชื้อเพลิงแก๊ส ซึ่งตัวออกซิไดซ์กับเชื้อเพลิงดังกล่าวคือออกซิเจน แต่ในทางปฏิบัติ เราอาจไม่สามารถใช้ออกซิเจนบริสุทธิ์เข้าทำปฏิกิริยากับเชื้อเพลิงได้ เนื่องจากออกซิเจนบริสุทธิ์ส่วนใหญ่ใช้ในห้วงปฏิบัติการเท่านั้น เพราะมีราคาแพง การใช้ออกซิเจนบริสุทธิ์ในการทำปฏิกิริยาจะได้พลังงานที่ค่อนข้างสูง ดังนั้นในทางปฏิบัติเราจึงใช้อากาศที่มีอยู่ทั่วไปเข้าทำปฏิกิริยากับเชื้อเพลิง แต่เนื่องจากในอากาศมีองค์ประกอบหลักคือออกซิเจน 21% ในโดรเจน

79%(โดยปริมาตร) ส่งผลให้อุณหภูมิเปลวไฟของการเผาไหม้ลดลง เนื่องจากต้องใช้ความร้อนส่วนหนึ่งทำให้ไนโตรเจนร้อนขึ้น

3.4.1 ปฏิริยาเคมีของการเผาไหม้

สมการที่ 3.5 เป็นสมการการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลที่สมบูรณ์ ซึ่งเกิดจาก คาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน ไนโตรเจน และกำมะถัน ทำปฏิกิริยากับอากาศในสัดส่วนที่ถูกต้อง ได้เป็น คาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ และซัลเฟอร์ไดออกไซด์ โดยไม่มีอย่างอื่นเหลืออยู่เลย ยกเว้น ไนโตรเจน ซึ่งไม่ได้ทำปฏิกิริยาใดๆกับองค์ประกอบอื่นๆ เรียกว่าเป็นการเผาไหม้ที่สมบูรณ์(Complete combustion) ซึ่งปริมาณอากาศที่ต้องการใช้เป็นตัวออกซิไดซ์นั้นเพียงพอต่อการเผาไหม้เชื้อเพลิง จนหมดพอดีหรือใช้อากาศเกินเป็นศูนย์ (Zero excess air หรือ Stoichiometric combustion) จะทำให้ได้อุณหภูมิของการเผาไหม้และพลังงานความร้อนออกมาสูงที่สุด



ดังนั้นถ้าใช้อัตราส่วนของอากาศต่อเชื้อเพลิงที่น้อยกว่าตามทฤษฎีก็จะทำให้ได้ค่าความร้อนที่ต่ำกว่าที่ควรจะได้ แต่ถ้าหากใช้ปริมาณอากาศต่อปริมาณเชื้อเพลิงที่มากกว่าทางทฤษฎีจะมีผลทำให้เกิดการสูญเสียความร้อนออกไปกับการเผาไหม้ด้วย อัตราส่วนของปริมาณอากาศต่อปริมาณของเชื้อเพลิงตามทฤษฎี (Stoichiometric air fuel ratio) สามารถหาได้จากสมการที่ 3.6

$$(A/F)_{Stoic} = \left(\frac{m_{air}}{m_{fuel}} \right)_{Stoic} \quad (3.6)$$

แต่ $(A/F)_{Stoic}$ ที่แท้จริงนั้นต้องหักปริมาณความชื้นที่มากับเชื้อเพลิงด้วย ซึ่งตัวแปรที่จะเป็นตัวบ่งบอกว่าการผสมกันระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงอยู่ในปริมาณเท่าใด เป็นการผสมกันระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงหนา บาง หรือพอดี ก็คืออัตราส่วนสมมูล(Equivalence ratio) ซึ่งสามารถหาได้จากสมการที่ 3.7

$$\Phi = \frac{(A/F)_{Stoic}}{(A/F)} = \frac{(F/A)}{(F/A)_{Stoic}} \quad (3.7)$$

ถ้า $\Phi > 1$ จะเป็นการเผาไหม้แบบส่วนผสมเชื้อเพลิงหนา (Fuel rich mixture) อาจทำให้ปริมาณออกซิเจนไม่เพียงพอต่อการเผาไหม้ ทำให้เกิดการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ มีปริมาณของคาร์บอนมอนอกไซด์เกิดขึ้น แต่ถ้า $\Phi < 1$ เป็นการเผาไหม้แบบส่วนผสมเชื้อเพลิงบาง (Fuel lean mixture) ส่วนการเผาไหม้แบบส่วนผสมพอดี (Stoichiometry mixture) อัตราส่วนสมมูล $\Phi = 1$ ถ้าการเผาไหม้เป็นแบบส่วนผสมพอดี ปริมาณอากาศที่ใช้ทางทฤษฎีคือเปอร์เซ็นต์อากาศพอดี (Percent stoichiometric air) ซึ่งมีความสัมพันธ์กับอัตราส่วนสมมูลสามารถหาได้ดังนี้

$$\% \text{ stoic air} = \frac{100\%}{\Phi} \quad (3.8)$$

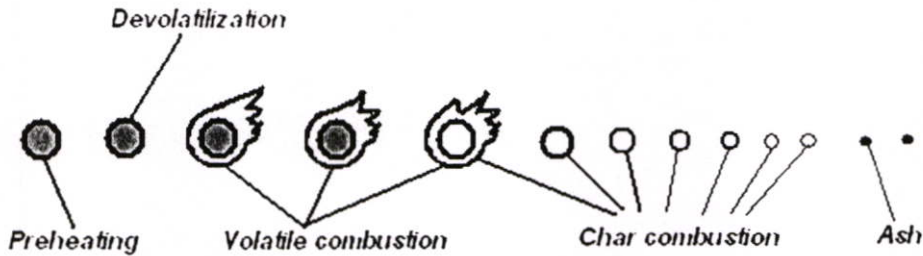
ในทางปฏิบัติแล้วการที่จะทำให้ออกซิเจนในอากาศเข้าไปสัมผัสหรือทำปฏิกิริยากับเชื้อเพลิงได้อย่างพอดีแล้วเป็นสิ่งที่สามารถทำได้ยาก โดยเฉพาะการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง การที่มีออกซิเจนบางส่วนไม่สัมผัสกับเชื้อเพลิงก็จะทำให้เผาไหม้ไม่สมบูรณ์ เกิดแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) เขม่า (Soot) และควัน (Smoke) ทำให้ไม่ได้รับความร้อนอย่างที่ต้องการจะเป็นดังนั้นจึงต้องมีการควบคุมการเผาไหม้ให้ปริมาณอากาศที่ใช้มีมากกว่าปริมาณอากาศทางทฤษฎีคือใช้ปริมาณอากาศส่วนเกินแต่ต้องไม่มากเกินไปจนมีการพาความร้อนออกไปจากระบบเปอร์เซ็นต์ของอากาศส่วนเกินคือ

$$\% \text{ excess air} = \frac{(1 - \Phi)}{\Phi} \cdot 100\% \quad (3.9)$$

ซึ่งกระบวนการเผาไหม้ที่กล่าวมา การใช้ปริมาณอากาศส่วนเกินเป็นเพียงวิธีหนึ่งที่จะทำให้เกิดการเผาไหม้ที่ได้ผลดีวิธีหนึ่งเท่านั้น นอกจากการใช้ปริมาณอากาศส่วนเกินแล้วยังต้องอาศัยปัจจัยอื่นร่วมด้วย ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อถัดๆ ไป

3.4.2 การเผาไหม้อุณหภูมิเชื้อเพลิงแข็ง (Solid-particle combustion) Zhou Lixing (1993)

เชื้อเพลิงแข็งประกอบไปด้วยสารระเหย คาร์บอนคงตัว ความชื้น และเถ้า กระบวนการการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งเขียนเป็นแผนภาพได้ดังรูปที่ 3.1 ซึ่งมีลำดับดังนี้ Preheating, devolatilization, volatile combustion, volatile and char combustion, และ char combustion เชื้อเพลิงแข็งเมื่อได้รับความร้อนจะเกิดการระเหยก่อน ก่อนที่จะมีการเผาไหม้สารระเหยนั่น ความร้อนส่วนหนึ่งที่เกิดจากการเผาไหม้สารระเหยจะถูกถ่ายเทให้แก่ผิวเชื้อเพลิงและมีการถ่ายโอนสารระเหยสู่เปลวไฟอย่างต่อเนื่อง เมื่อสารระเหยที่ติดไฟได้เหล่านั้นถูกปล่อยออกมาจนหมดการเผาไหม้ในขั้นตอนนี้เรียกว่าการเผาไหม้ของสารระเหย (Volatile combustion) จากนั้นจึงตามด้วยการเผาไหม้ของคาร์บอนแข็งที่เหลืออันเนื่องมาจากการแพร่ของออกซิเจนเข้าหาผิวคาร์บอนจนทำให้คาร์บอนเกิดการเผาไหม้ร้อนแดงที่ผิว การเผาไหม้ในขั้นตอนนี้เรียกว่าการเผาไหม้ของคาร์บอน (carbon หรือ char combustion)



รูปที่ 3.1 กระบวนการการเผาไหม้ถ่านหิน

3.4.3 ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง (Heating Value) El-Wakil (1984)

การที่เชื้อเพลิงชีวมวลมีปริมาณความชื้นและองค์ประกอบที่แตกต่างกัน จึงทำให้ค่าความร้อน (Heating Value) ของเชื้อเพลิงชีวมวลมีค่าแตกต่างกันด้วยดังตารางที่ 3.3

ค่าความร้อนเป็นค่าพลังงานความร้อนของเชื้อเพลิงเมื่อเทียบกับ 1 หน่วยน้ำหนักหรือปริมาตรของเชื้อเพลิง โดยมีหน่วยเป็น kJ/kg, kcal/kg, Btu/lb หรือ kcal/litre เป็นต้น และมีคำจำกัดความคือปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทหรือคายออกจากปฏิกิริยาการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงที่เกิดอย่างสมบูรณ์ (Complete combustion) เพื่อให้ผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาการเผาไหม้ (ก๊าซไอเสีย) เย็นตัวลงจนมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิเริ่มต้นที่สภาวะมาตรฐานของเชื้อเพลิงและอากาศที่เผาไหม้ ซึ่งค่ามาตรฐานในที่นี้คือความดันสมบูรณ์ 1 บรรยากาศ (atm) และอุณหภูมิ 25°C โดยปกติค่าความร้อนของเชื้อเพลิงแต่ละชนิดจะถูกกำหนดขึ้นจากการทดลองเผาเชื้อเพลิงในอุปกรณ์ที่เรียกว่า บอมบ์แคลอริมิเตอร์ (Bomb calorimeter) ตามมาตรฐาน ASTM D 2015 ค่าความร้อนของการเผาไหม้ (Heat of combustion) จะกำหนดค่าความร้อนไว้ 2 ค่าคือ

ค่าความร้อนขั้นสูง (High heating value หรือ Gross heating value หรือ HHV)

ค่าความร้อนขั้นสูงคือค่าความร้อนของการเผาไหม้ที่กำหนดให้น้ำในผลิตภัณฑ์อยู่ในรูปของเหลว หรือน้ำเกิดเป็นผลอย่างหนึ่งของผลิตภัณฑ์

ค่าความร้อนขั้นต่ำ (Low heating value หรือ Net heating value หรือ LHV)

ค่าความร้อนขั้นต่ำคือค่าความร้อนของการเผาไหม้ที่กำหนดให้น้ำในผลิตภัณฑ์อยู่ในรูปของไอน้ำ หรือน้ำเกิดเป็นผลอย่างหนึ่งของผลิตภัณฑ์ โดยที่

$$LHV = HHV - m_w h_{fg} \quad (3.10 - 1)$$

$$LHV = HHV - 9m_{H_2} h_{fg} \quad (3.10 - 2)$$

โดยที่

m_w = มวลของไอน้ำที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ต่อหนึ่งหน่วยมวลของเชื้อเพลิง(เนื่องจากการเผาไหม้ H_2 ในเชื้อเพลิง แต่ไม่รวมถึงน้ำที่มาจากความชื้นในเชื้อเพลิง)

m_{H_2} = มวลของไฮโดรเจนต่อหนึ่งหน่วยมวลของเชื้อเพลิง รู้ได้จากการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ

h_{fR} = เอนทาลปีจำเพาะของการกลายเป็นไอหรือความร้อนแฝง ณ ความดันย่อยในผลิตภัณฑ์ มีหน่วยเป็น kJ/kg H_2O

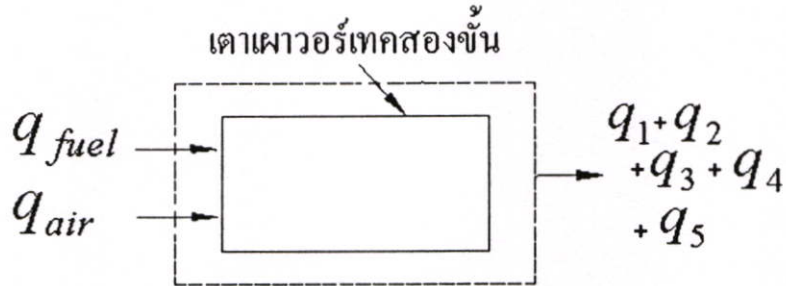
ตารางที่ 3.3 ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงชีวมวล

	ค่าความร้อนขั้นสูง(kJ/kg)	ค่าความร้อนขั้นต่ำ(kJ/kg)
แกลบ	14,921	13,466
ฟางข้าว	14,660	13,527
กากอ้อย	9,243	7,368
ไม้ยางพารา	10,365	8,600
เส้นใยปาล์ม	11,100	9,194
กะลาปาล์ม	18,250	16,900
ทะลายปาล์ม	11,436	9,800
ชังข้าวโพด	17,300	17,126
เหง้ามันสำปะหลัง	13,170	9,034
กากมันสำปะหลัง	12,650	8,080
โยมะพร้าว	8,457	6,272

ทั้งนี้ค่าความร้อนสูง เป็นค่าที่นำเอาค่าความร้อนแฝง (Latent heat) ของไอน้ำที่ปะปนอยู่ในก๊าซไอเสียมารวมด้วยในขณะที่ค่าความร้อนต่ำจะไม่นำค่าดังกล่าวมารวม เพราะสมมติฐานที่ว่าในกระบวนการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นจริงนั้นปริมาณไอน้ำที่เกิดขึ้นในก๊าซไอเสียจะไม่เกิดการควบแน่นและไม่คายพลังงานความร้อนแฝงออกมาให้ระบบ (อุณหภูมิของก๊าซไอเสียจะมีค่าสูงกว่าจุดเดือดของน้ำในก๊าซไอเสียเสมอ) แต่จะถูกทิ้งไปสู่บรรยากาศทางปล่องไอเสียแทน นั่นคือปริมาณความร้อนในส่วนนี้จะเป็ความร้อนที่ไม่ได้ถูกนำมาใช้ประโยชน์เลยในกระบวนการเผาไหม้ ดังนั้นจึงนิยมนำค่าความร้อนต่ำ มาเป็นค่าที่ใช้ในการคำนวณสมดุลความร้อนและประสิทธิภาพของเครื่องจักรอุปกรณ์มากกว่าค่าความร้อนสูง เนื่องจากให้ผลการคำนวณที่ถูกต้องและสะท้อนความเป็นจริงมากกว่าในแง่ของประสิทธิภาพเชิงความร้อน

3.4.4 การคำนวณประสิทธิภาพ (Efficiency calculation) Tim T. Fu and Sen Nieh (1989)

พลังงานที่ใส่เข้าไปในเตาเผา คือพลังงานเคมีที่อยู่ภายในเชื้อเพลิง (Heating value) และพลังงาน (enthalpy) จากอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ แต่พลังงานจากอากาศมีความสำคัญน้อยมากเมื่อเทียบกับพลังงานจากเชื้อเพลิง สามารถตัดทิ้งไปได้จากสมการสมดุลความร้อน รูปที่ 3.2 แสดงการถ่ายเทพลังงานของเตาเผา (เส้นประคือปริมาตรควบคุม)



รูปที่ 3.2 การถ่ายเทพลังงานของเตาเผา

พลังงานที่ใส่เข้าไปในเตาเผาออร์เทค (Energy input) สามารถแบ่งออกได้ดังต่อไปนี้

1. พลังงานที่อยู่ภายในเชื้อเพลิง (q_{fuel} , kJ/s)

$$q_{fuel} = \dot{m}_{fuel} \times LHV \quad (3.11)$$

โดยที่

\dot{m}_{fuel} คือ อัตราป้อนของเชื้อเพลิงแกลบ kg/s

LHV คือ ค่าความร้อนขั้นต่ำของเชื้อเพลิงแกลบ

2. พลังงานจากอากาศ (q_{air} , kJ/s) มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับ q_{fuel}

พลังงานที่ได้รับจากเตาเผาออร์เทค (Energy output) สามารถแบ่งออกได้ดังต่อไปนี้

1. ความร้อนที่ถ่ายเทสู่น้ำที่นำไปใช้ประโยชน์ (q_1) kJ/s
2. ความร้อนสุทธิ (enthalpy) ในก๊าซไอเสียที่ออกจากเตาเผา (q_2) kJ/s
3. ความร้อนสูญเสียเนื่องจากคาร์บอนที่เผาไหม้ไม่หมดในชี้เถ้า (q_3) kJ/s
4. ความร้อนสูญเสียเนื่องจากเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ (q_4) หรือก๊าซที่ไม่สามารถเผาไหม้ได้ เช่น CO ในก๊าซไอเสีย หรือการไม่เผาไหม้ของสารระเหย เป็นต้น ซึ่งโดยทั่วไป น้อยกว่า 1 %
5. ความร้อนสูญเสียผ่านผนังเตา (q_5) kJ/s

สมการสมดุลความร้อนสามารถเขียนได้ดังต่อไปนี้

Energy input = Energy output

$$q_{fuel} + q_{air} \cong q_{fuel} = q_1 + q_2 + q_3 + q_4 + q_5 \quad (3.12)$$

3.4.4.1 ประสิทธิภาพการเผาไหม้ (Combustion efficiency)

การคำนวณประสิทธิภาพการเผาไหม้ในที่นี้เป็นการคำนวณโดยสมมติให้ความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้สมบูรณ์มีประสิทธิภาพ 100% จากนั้นหักลบด้วย ความร้อนสูญเสียเนื่องจากการ์บอนที่เผาไหม้ไม่หมดในซีเต้า (q_3) และความร้อนสูญเสียเนื่องจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ (q_4)

$$\eta_{com} \cong 100 - (\%q_3 + \%q_4) \quad [\%] \quad (3.13)$$

นอกจากประสิทธิภาพที่ทางความร้อนที่สูงแล้ว สิ่งที่ต้องคำนึงถึงคือเรื่องของมลพิษ การปล่อยมลพิษของคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO), unburnt hydrocarbons และ ออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x) ต้องอยู่ในระดับที่ต่ำที่สุดด้วย

3.4.4.2 ประสิทธิภาพเชิงความร้อน (Thermal efficiency)

ประสิทธิภาพเชิงความร้อนคือความร้อนที่นำไปใช้ประโยชน์ของเตาเผาซึ่งมีปริมาณเท่ากับ $q_1 + q_2$ ในที่นี้ไม่มีความร้อนที่ถ่ายเทสู่น้ำที่นำไปใช้ประโยชน์ $q_1 = 0$ ทั้งนี้ต้องไม่ลืมว่ามีความร้อนส่วนหนึ่งที่ถูกถ่ายเทผ่านผนังเตาคือ q_5 ประสิทธิภาพเชิงความร้อนสามารถหาได้จาก

$$\eta_{thermal} \cong \frac{q_2}{q_{fuel}} \quad (3.14)$$

$$\eta_{thermal} \cong \frac{q_2}{\dot{m}_{fuel} \times LHV} \quad (3.15)$$

โดยที่

$$q_2 = \dot{m}_{air} Cp(T_{flue\ gas} - T_{ambient}) \quad (3.16)$$

โดยที่

\dot{m}_{air}	=	อัตราการไหลของก๊าซไอเสีย kg/s
Cp	=	ค่าความจุความร้อนของอากาศ kJ/kg.K
$T_{flue\ gas}$	=	อุณหภูมิของก๊าซไอเสีย K
T_{ambien}	=	อุณหภูมิอากาศภายนอก K

3.5 การปล่อยมลพิษ (Emission) สำเร็จ จักรใจ (2547)

3.5.1 ออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x)

การก่อตัวของ NO_x ในกระบวนการเผาไหม้มีกลไกของการก่อตัวอยู่ดังต่อไปนี้

Thermal NO_x มีอิทธิพลมาจากอุณหภูมิการเผาไหม้ หรืออัตราการเกิดปฏิกิริยาดังนั้นถ้าต้องการลด Thermal NO_x จึงต้องลดอุณหภูมิการเผาไหม้

Prompt NO_x เกิดจากอนุมูลอิสระ พวกไฮโดรคาร์บอนที่เกิดจากการเผาไหม้ในส่วนแรกของการเผาไหม้ (Early stages) ของการเผาไหม้กับโมเลกุลของไนโตรเจน

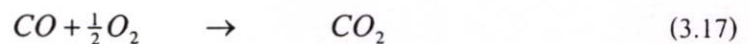
Fuel NO เกิดจากการทำปฏิกิริยากันของอากาศกับไนโตรเจนในเชื้อเพลิงเป็นกลไกของการเกิด NO ซึ่งขึ้นกับสภาวะการทำงานเช่นสภาวะการเผาไหม้แบบส่วนผสมเชื้อเพลิงหนาหรือแบบส่วนผสมเชื้อเพลิงบาง ถ้าเป็นการเผาไหม้แบบส่วนผสมเชื้อเพลิงบาง จะทำให้มีโอกาสเกิด Fuel NO ได้มากยิ่งขึ้น ดังนั้นจึงต้องควบคุมอัตราส่วนผสมระหว่างเชื้อเพลิงต่อออกซิเจนให้ดี

3.5.2 การลดการเกิด NO_x

เทคนิคการเผาไหม้แบบแบ่งเป็นขั้นตอน (Staged combustion) ช่วยทำให้เปลวไฟขยายออกไปและทำให้อุณหภูมิการเผาไหม้ลดลง การใช้อากาศทุติยภูมิในการเผาไหม้ การใช้การหมุนวนของก๊าซไอเสีย (flue gas recirculation) เป็นต้น

3.5.3 มลพิษของคาร์บอนมอนอกไซด์

มลพิษจาก CO จากกระบวนการเผาไหม้เป็นการสูญเสียประสิทธิภาพเชิงความร้อนของระบบ หากการเผาไหม้ก่อนข้างมีอุณหภูมิสูง อาจทำให้ CO₂ เกิดการแยกสลายกลับมาเป็น CO ได้ หรือในขณะเดียวกันถ้าหากเชื้อเพลิงที่กำลังเผาไหม้มีเวลาน้อยเกินไปในห้องเผาไหม้ ไม่มีเวลามากพอที่จะทำให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นอย่างเต็มที่ จะทำให้ไม่สามารถเปลี่ยนแปลงเป็น CO₂ ได้เช่นกัน ดังสมการ

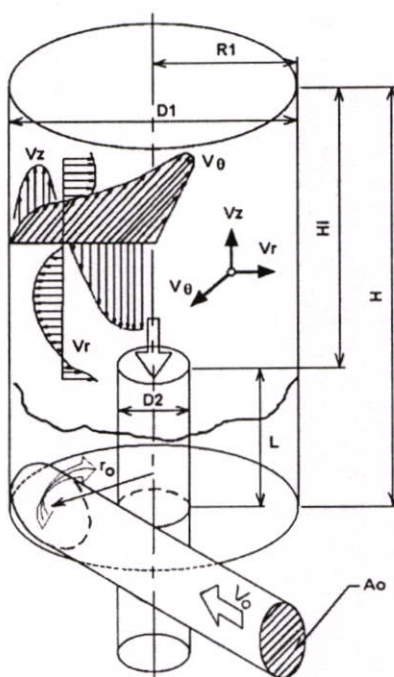


ดังนั้นเพื่อให้การเผาไหม้เป็นไปได้อย่างสมบูรณ์ต้องอาศัยปัจจัยที่สำคัญ 3 ประการ คือ

1. เวลาในการเผาไหม้ต้องนานเพียงพอ เพื่อให้เชื้อเพลิงเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ทั้งหมด
2. อุณหภูมิการเผาไหม้ต้องสูงเพียงพอที่จะทำให้เกิดการเผาไหม้อย่างต่อเนื่อง
3. การผสมผสานระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศจะต้องอยู่ในลักษณะการไหลผสมแบบปั่นป่วน (turbulence)

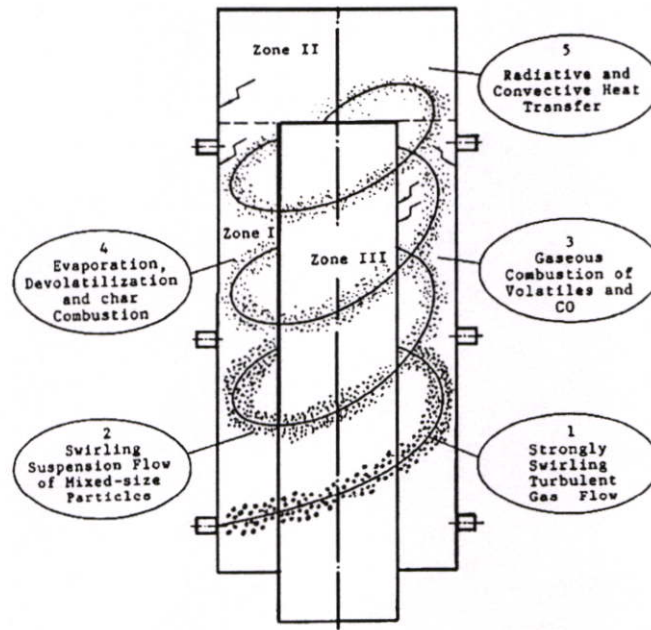
3.6 เตาเผาเวอร์เทคและหลักการ

ก่อนหน้านี้การเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งเช่นถ่านหินนั้นได้ถูกเผาไหม้ในเตาเผาชนิดต่างๆเช่น เตาเผาฟลูอิดไคซ์เบด หรือเตาเผาไซโคลน โดยเมื่อไม่นานนี้เตาเผาเวอร์เทคได้ถูกพัฒนาขึ้นมาเพื่อใช้ในการเผาถ่านหินผง เตาเผาแบบเวอร์เทคนี้เป็นการรวมเอาข้อดีของการเผาไหม้แบบไซโคลน การเผาไหม้แบบหลายชั้นและการเผาไหม้แบบฟลูอิดไคซ์เบด โดยมีการใช้อากาศสองส่วนคือ อากาศปฐมภูมิ และ อากาศทุติยภูมิ มาประยุกต์ใช้โดยอาศัยหลักการการหมุนวนของอากาศ ทำให้การฉีดอากาศมีลักษณะดีขึ้น



รูปที่ 3.3 เตาเผาแบบเวอร์เทค Ogawa akira (1993)

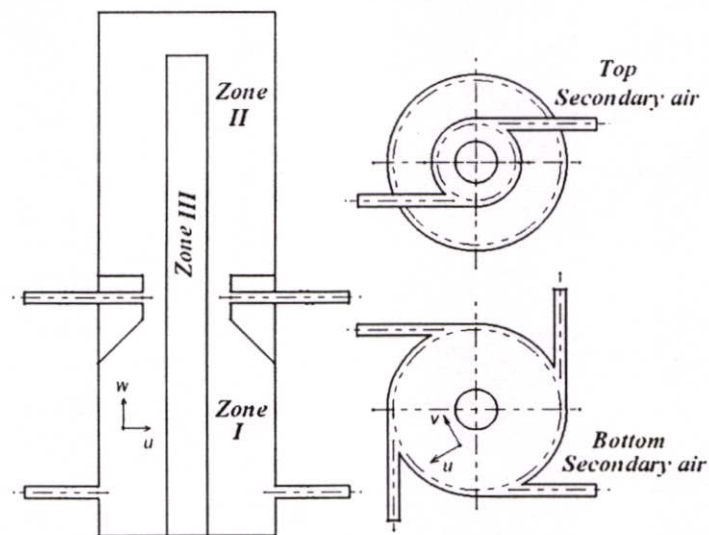
จากข้อเสียของเทคโนโลยีฟลูอิดไคซ์เบด ที่จำเป็นต้องใช้ห้องเผาไหม้ที่มีความสูงมากเพื่อลดอัตราการหลุดลอยของอนุภาค ซึ่งอาจไม่เหมาะกับเชื้อเพลิงแกลบที่มีน้ำหนักเบา การใช้เตาเผาเวอร์เทคในการเผาไหม้เชื้อเพลิงแกลบจึงเป็นสิ่งที่จะช่วยลดอัตราการหลุดลอยของอนุภาคทำให้การเผาไหม้มีความสมบูรณ์ และไม่เปลืองพื้นที่ โดยแนวทางการปรับปรุงการเผาไหม้ได้แสดงในหัวข้อที่ 3.7



รูปที่ 3.4 ขั้นตอนการเผาไหม้และพื้นที่เผาไหม้ในเตาเผาเวอร์เทค

3.7 การปรับปรุงการเผาไหม้

จากเนื้อหาที่ได้กล่าวมาตามข้างต้น ถึงแม้ว่าปริมาณของ CO_2 จะเป็นปริมาณที่บ่งบอกถึง ความสมบูรณ์ของการเผาไหม้ก็ตามที แต่เมื่อพิจารณาให้ดีแล้ว ปริมาณ CO_2 ส่งผลเสียอย่างร้ายแรง ต่อสภาวะอากาศของโลก ดังนั้น การลดปริมาณของ CO_2 จึงเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่ง สามารถทำได้ โดยการลดอัตราการใช้เชื้อเพลิงให้น้อยลง (Fuel consumption) แต่ให้พลังงานหรือประสิทธิภาพที่ดี ดังนั้นการปรับปรุงการเผาไหม้จึงเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่ง ในหัวข้อนี้จะเป็นการกล่าวถึงวิธีการในการปรับปรุงการเผาไหม้ให้ได้ประสิทธิภาพที่ดีดังกล่าว



รูปที่ 3.5 เตาเผาแบบเวอร์เทคแบบสองชั้น

3.7.1 การปรับปรุงการออกแบบห้องเผาไหม้

เตาเผาออร์เทคแบบสองชั้นอาศัยหลักการการหมุนวนของอากาศ มีอากาศทุติยภูมิฉีดเข้ามาตามแนวสัมผัสของแกนเตาเพื่อเพิ่มความปั่นป่วน ท่อทิ้งไอเสียมีขนาดที่ใหญ่พอใช้และการหมุนวนที่เข้มข้น การเผาไหม้ที่ให้อุณหภูมิสิ่งแวดล้อมต่ำ Jian Zhang and Sen Nieh (2000)

การเผาไหม้ในเตาเผาออร์เทคแบบสองชั้น สามารถอธิบายลักษณะห้องเผาไหม้ภายในได้เป็น 3 พื้นที่หลัก (Zone) ดังแสดงในรูปที่ 3.5 พื้นที่ที่ 1 คือพื้นที่วงแหวนระหว่างห้องเผาไหม้จากผนังเตาด้านในจนถึงท่อทิ้งไอเสีย การเผาไหม้เกิดขึ้นก่อนในบริเวณวงแหวนในห้องเผาไหม้ชั้นแรก ในพื้นที่ที่ 1 อากาศปฐมภูมิจะเป็นตัวพาเชื้อเพลิงเข้ายังห้องเผาไหม้ในแนวสัมผัสกับผนังด้านในแล้วจะไหลในลักษณะหมุนวนเป็นเกลียว (Helical motion) ขึ้นสู่ด้านบนห้องเผาไหม้ ภายใต้อิทธิพลของแรงหนีศูนย์กลาง (Centrifugal force) ขณะที่เชื้อเพลิงและอากาศผสมกันแล้วส่งตัวขึ้นสู่ด้านบน จะมีอากาศทุติยภูมิออกจากชุดหัวฉีดที่ฝังไว้ในแนวสัมผัส เพื่อช่วยในการเพิ่มเกลียวให้ถี่ขึ้นและลักษณะของเกลียวจะถี่ขึ้นทำให้เพิ่มเวลาในการเผาไหม้ (Residence time) ซึ่งจะทำให้การเผาไหม้สมบูรณ์มากขึ้น เนื่องจากเกิดการหมุนวน (Swirl flow) และการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulence flow) ซึ่งเอื้ออำนวยในการผสมคลุกเคล้าระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิง ต่อจากนั้นก๊าซร้อนที่ได้จากการเผาไหม้จะหมุนขึ้นไปยังห้องเผาไหม้ชั้นที่สองซึ่งก่อนที่จะเข้าห้องเผาไหม้ชั้นที่สอง ก๊าซที่ได้จากการเผาไหม้จะถูกเร่งและเมื่อผ่านคอคอดจะถูกผสมกับอากาศทุติยภูมิที่เตรียมไว้ การเผาไหม้บริเวณเหนือคอคอดนี้การหมุนวนที่ปั่นป่วนสูงของก๊าซจะเหนี่ยวนำให้เกิด Central toroidal recirculation ในห้องเผาไหม้ทุติยภูมิเพื่อช่วยเพิ่มอัตราการผสมกันระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิง และช่วยเพิ่มเวลาในห้องเผาไหม้ให้มากขึ้น อนุภาคส่วนใหญ่ของขี้เถ้าที่เรียกว่าขี้เถ้าเบา (Fly ash) จะมีน้ำหนักเบาและมีขนาดเล็กถูกส่งให้ลอยขึ้นไปด้วยแก๊สร้อนที่ได้จากการเผาไหม้และเข้าสู่พื้นที่ที่ 2

พื้นที่ที่ 2 คือส่วนด้านบนสุดของห้องเผาไหม้เหนือท่อไอเสีย ระยะระหว่างปากท่อไอเสียด้านบนจนถึงเพดานเตาต้องมีระยะห่างที่ไม่มากจนเกินไปเพราะจะทำให้เชื้อเพลิงหลุดออกไปจากห้องเผาไหม้เสียก่อน และพื้นที่ที่ 3 เป็นพื้นที่ที่อยู่ภายในท่อไอเสีย ของไหลจะไหลวนพาเชื้อเพลิงไปในทิศทางเดียวกัน ตามแนวแกนออกสู่ทางออกทางท่อทิ้งไอเสียซึ่งมีขนาดที่ใหญ่พอใช้มีลักษณะเป็นแกนที่อยู่กลางห้องเผาไหม้ การที่มีท่อไอเสียอยู่ในบริเวณแกนกลางของเตาเผาออร์เทคนั้นมีข้อดีคือจะทำให้การเผาไหม้สมบูรณ์ขึ้นเพราะนอกจากจะเผาไหม้ภายในเตาบริเวณพื้นที่ที่ 1 และ 2 แล้วอาจมีเชื้อเพลิงที่ยังเผาไหม้ไม่หมดออกไปทางท่อทิ้งไอเสียก็จะสามารถเผาไหม้ได้ต่อไปในพื้นที่ที่ 3 นี้ด้วย จึงทำให้การเผาไหม้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น และออกจากด้านล่างของ

เตาตู้เครื่องดักเก็บอนุภาคในที่สุดนอกจากนี้รูปที่ 3.5 ยังแสดงทิศทางความเร็วตามแนวแกน (W) ความเร็วตามแนวรัศมี (V) และความเร็วตามแนวสัมผัส (U)

3.7.2 เทคนิคการเผาไหม้แบบเป็นขั้นตอน (Staged-combustion technique)

เทคนิคการเผาไหม้แบบแบ่งเป็นขั้นตอนเป็นเทคนิคการเผาไหม้ที่ควบคุมการเกิดมลพิษ โดยการควบคุมการผสมกันระหว่างเชื้อเพลิงและออกซิเจนในลักษณะที่ป้องกันไม่ให้เกิดการเผาไหม้ในสภาวะสตอยคิโอเมตรี การผสมอาจเป็นไปในลักษณะที่ทำให้เกิดการเผาไหม้ในห้องเผาไหม้ภายใต้ค่าอัตราส่วนสมมูลที่แตกต่างกันหลายค่าจากไอดิบลงไปหาไอดีหนาหรือกลับกันก็ได้ ต้องไม่ให้เกิดการเผาไหม้สภาวะสตอยคิโอเมตรี อย่างเด็ดขาด เพื่อให้เป็นไปตามวัตถุประสงค์ดังกล่าว จึงต้องแบ่งกาาออกเป็นหลายๆส่วน(หรือต้องการทำให้เชื้อเพลิงขาดอากาศ) แล้วป้อนเข้าสู่เตาเผาไหม้เพื่อเผาไหม้กับเชื้อเพลิงที่ตำแหน่งต่างๆกัน จึงเกิดการเผาไหม้แบบแบ่งเป็นหลายขั้นตอนขึ้นในห้องเผาไหม้และเพื่อควบคุมการเกิด thermal NO_x เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพสูงยิ่งขึ้น อาจมีการดึงความร้อนออกจากแก๊สร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้ในขั้นตอนปฐมภูมิ (Primary combustion) เพื่อลดอุณหภูมิลงก่อนที่จะเผาไหม้ในขั้นตอนทุติยภูมิ (Secondary combustion) การเผาไหม้แบบสองขั้นนี้จะช่วยให้พื้นที่เผาของเปลวไฟ(Flame zone) ถูกขยายออกไปและลดอุณหภูมิสูงสุด (peak temperature) ของการเผาไหม้ ทำให้ลดปริมาณ NO_x ได้ นอกจากนี้การเผาไหม้เป็นขั้นตอนหรือการเผาไหม้ในห้องเผาไหม้ทุติยภูมิยังทำให้การเผาไหม้มีความสมบูรณ์มากขึ้นเนื่องจากในห้องเผาไหม้ทุติยภูมิยังคงเหลือแก๊สหรืออนุภาคที่ยังเผาไหม้ไม่หมดในห้องเผาไหม้ขั้นแรก

3.7.3 การเตรียมส่วนผสมของเชื้อเพลิง

การทำให้เกิดการไหลแบบหมุนวนทำให้เกิดการผสมกันที่ดีของเชื้อเพลิงนำไปสู่การปล่อยมลพิษที่ต่ำและได้ประสิทธิภาพที่มากกว่า และยังทำให้มีการเผาไหม้ที่เสถียรมากกว่า การผสมกันมาก่อนของเชื้อเพลิงทำให้มีอัตราการเผาไหม้ที่สูงกว่า อัตราส่วนผสมของเชื้อเพลิง(A/F) หรือเปอร์เซ็นต์เชื้อเพลิงมีส่วนต่อความเสถียรของเชื้อเพลิง โดยที่ ส่วนผสมเชื้อเพลิงบาง (Fuel lean mixture) มีเปอร์เซ็นต์เชื้อเพลิงต่ำความเร็วในการไหลเปลี่ยนแปลงได้ไม่มาก เมื่อเพิ่มความเร็วเพียงเล็กน้อยอาจทำให้เปลวไฟถูกเป่าดับ (Blow out) ได้ ที่ส่วนผสมเชื้อเพลิงหนา (Fuel rich mixture) มีเปอร์เซ็นต์เชื้อเพลิงสูงขึ้นทำให้มีช่วงของการติดไฟอยู่ได้ค่อนข้างกว้าง

3.7.4 การสร้างเสถียรของเปลวไฟ

ถ้าความเร็วของการไหลของส่วนผสมสูงกว่าความเร็วเป่าดับแล้วจะเกิดการเป่าดับของเปลวไฟเพราะว่าเวลาที่จะทำให้เกิดการติดไฟเพื่อนำไปสู่การเผาไหม้นั้นสั้นเกินไปดังนั้นจึงต้องทำ

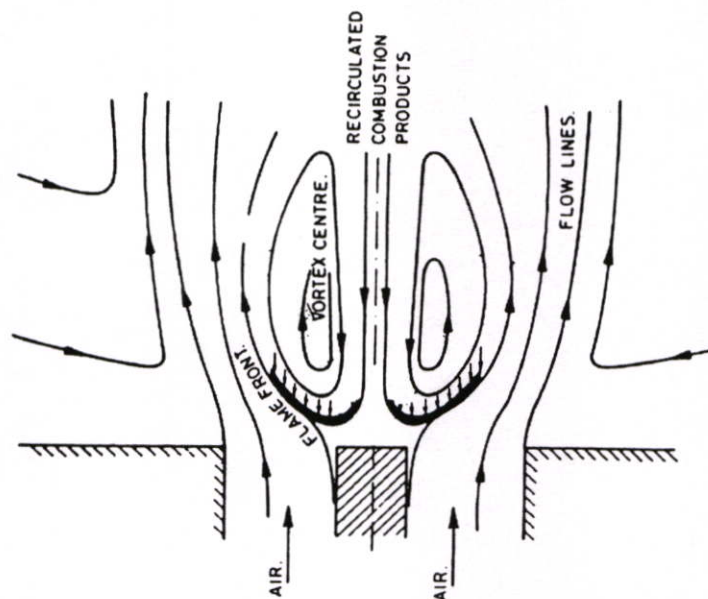
ให้เปลวไฟเกิดความเสถียร ซึ่งมีวิธีคือการใช้เปลวไฟลอย การใช้วัตถุขวางกั้น วิธีการไหลหมุนเวียนย้อนกลับ

3.7.4.1 วิธีการไหลหมุนเวียนย้อนกลับ (Recirculation)

วิธีการไหลหมุนเวียนย้อนกลับนี้ทำได้โดยการกีดขวางอนุภาคหรือการเพิ่มขึ้นอย่างทันทีทันใดของพื้นที่หน้าตัดของการไหล (Rapid increase in flow area) หรือการนำอากาศหมุนวนเข้ามายังห้องเผาไหม้โดยตรงหรือจะเป็นการฉีดอากาศทุติยภูมิเข้ามาเพื่อเป็นการสร้างการหมุนวน

การใช้เทคนิควิธีการไหลหมุนเวียนย้อนกลับหรือการหมุนวนของของไหลนี้เป็นการลดและเปลี่ยนทิศทางความเร็วการไหลของส่วนผสมให้ต่ำลงและไหลหมุนเวียนย้อนกลับจนส่วนผสมมีเวลามากพอที่จะทำให้เกิดการติดไฟด้วยตัวเองและเกิดการเผาไหม้อย่างต่อเนื่อง ทำได้โดยการสร้างวัตถุรูปทรงต่างๆเพื่อวางขวางทิศทางการไหลของส่วนผสม เพื่อให้เกิดบริเวณที่มีความเร็วต่ำและหมุนเวียนย้อนกลับในกระแสหลักของการไหลของส่วนผสมซึ่งจะช่วยให้เกิดการเสถียรของเปลวไฟได้ดีโดยไม่ถูกเป่าให้ดับไปได้

อากาศปฐมภูมิจะทำหน้าที่เป็นตัวพาอนุภาคของเชื้อเพลิงเข้ายังห้องเผาไหม้ในแนวตั้งฉากแล้วจะพองอนุภาคของเชื้อเพลิงขึ้นสู่ด้านบนห้องเผาไหม้ ขณะที่เชื้อเพลิงและอากาศผสมกันและส่งตัวขึ้นสู่ด้านบนนั้นจะมีอากาศทุติยภูมิเข้ามาในแนวสัมผัสกับผนังของเตา ทำให้เกิดการหมุนวนของอากาศและทำให้อนุภาคของเชื้อเพลิงหมุนตามไปด้วย ช่วยเพิ่มเวลาในการเผาไหม้ให้นานขึ้นทำให้การเผาไหม้สมบูรณ์ เนื่องจากการไหลวนของอากาศและการไหลแบบปั่นป่วนของอากาศซึ่งเอื้ออำนวยต่อการคลุกเคล้าของอากาศกับเชื้อเพลิง



รูปที่ 3.6 ปรากฏการณ์ Recirculation

การเคลื่อนที่ของอากาศในลักษณะวอร์เทคเป็นไปตามกฎอนุรักษ์โมเมนตัมเชิงมุม (conservation of angular momentum) ทำให้เกิดความเร็วและการหมุนในแนวรัศมีของอนุภาคต่าง ๆ (สามารถพิจารณาโมเลกุลของอากาศ และปริมาตรของอากาศ) จะมีค่าคงที่เป็นที่น่าสังเกตว่า gradient ความเร็วยังคงอยู่ในของไหลกับความเร็วในแนวเส้นสัมผัสต่ำที่ชั้นนอก (ใกล้บริเวณผนังท่อ) ซึ่งเรียกว่าระบบการไหลแบบ irrotational เมื่อมีผลการไหลที่มีความหนืดเข้ามาเกี่ยวข้องจะเทียบเท่ากับการกระจายความเร็วของอนุภาคผ่านเข้าไปในแนวรัศมีของท่อ ตามการขยายของท่อดาวอร์เทคในท่อ ทำให้ชั้นความเร็วสูงไปเร่งชั้นความเร็วต่ำที่ทำให้ความเร็วเพิ่มขึ้น เรียกการไหลแบบ rotation และจะเกิดการถ่ายเทพลังงานจลน์ออกจากแนวแกนของท่อ สาเหตุที่มีการถ่ายเทพลังงาน (energy transfer) เพราะมีการทำความร้อนของเลเซอร์ชั้นนอก และการทำความเย็นของเลเซอร์ชั้นใน เมื่ออากาศไหลวนภายในท่อ อากาศที่ค้างอยู่จะไหลย้อนกลับไปยังศูนย์กลางของท่อตามแนวแกนแบบสวนทางกัน (counter flow) ที่เป็นเช่นนี้เพราะบังคับให้มีการหมุนวนในตอนแรกไปยังเส้นรอบวงของท่อ โดยแรงหนีศูนย์กลางที่มาจากการหมุนวนครั้งที่สอง มีการหมุนในทิศทางเชิงมุม (angular direction) อย่างเดียวกับตอนแรกโดยที่ viscous drag และความหนาแน่นแบบปั่นป่วนที่ชั้นขอบเขตระหว่างการหมุนทั้งสองจะอยู่ระหว่างช่วงการหมุนชั้นนอก และการหมุนชั้นใน ในการเคลื่อนที่แบบ synchronous และมีผลต่างทางกายภาพอย่างเดียวกัน คือ กระแสทั้งสองเคลื่อนที่ในทิศทางเชิงเส้นตรงข้ามกัน และการหมุนชั้นในจะมีรัศมีน้อยกว่ารัศมีชั้นนอก (แตกต่างกับ ห้องเผาไหม้แบบไซโคลนคือ เป็นอุปกรณ์การเผาไหม้ที่ประยุกต์มาจากไซโคลนดักฝุ่น กล่าวคือ ของไหลซึ่งอาจปนกับอนุภาคของแข็งจะไหลแบบบังคับเข้าสู่ไซโคลนในแนวสัมผัสกับผิวด้านในแล้วจะไหลลักษณะวนเป็นเกลียวหรือขดสปริง (Helix Motion) 2 วง คือ วงแรกเรียกว่า การไหลวนรอบนอก (Outer Vortex) มีทิศทางไหลลงสู่ก้นไซโคลน วงที่สอง เรียกว่า การไหลวนภายใน (Inner Vortex) ภายใต้อิทธิพลของแรงหนีศูนย์กลาง (Centrifugal Force) มีทิศทางไหลวนกลับมาในแนวแกนออกสู่ปากไซโคลน ซึ่งการไหลวนของอากาศภายในเตาเผาไซโคลนนั่นจะใช้ปริมาณและความเร็วของอากาศมากกว่าการเกิดการหมุนวนในเตาออร์เทค)

3.7.5 การหมุนวนของอากาศทุติยภูมิ

เทคนิคในการสร้างการหมุนวนของของไหลอีกเทคนิคหนึ่งคือการใช้อากาศไหลเข้ามาตามท่อที่วางตัวในแนวสัมผัสกับห้องเผาไหม้ การใช้อากาศทุติยภูมิในการเผาไหม้เป็นการสร้างให้เกิด Suspension layer ซึ่ง suspension layer คือชั้นของอนุภาคที่กำลังถูกเผาไหม้ ซึ่ง suspension layer จะถูกสร้างขึ้นทันทีเหนือระนาบของตำแหน่งที่ฉีดอากาศทุติยภูมิ เพื่อให้อนุภาคมีการผสมกันที่ดีและเพื่อลดการหลุดลอยของอนุภาค ทำให้การเผาไหม้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

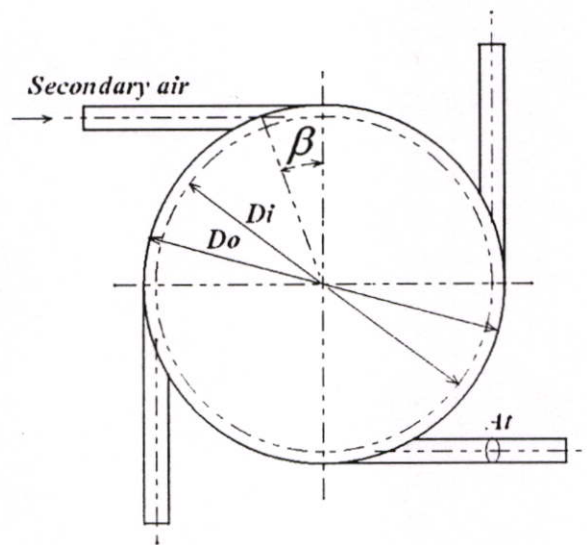
อากาศที่ใช้ในการเผาไหม้แบ่งเป็นสองส่วนคืออากาศปฐมภูมิและอากาศทุติยภูมิ อากาศทุติยภูมิที่ฉีดเข้ามาตามแนวสัมผัสของเตาจะเพิ่มความปั่นป่วนและการหมุนวน สัดส่วนอากาศเชิงปริมาตรของอากาศทุติยภูมิต่ออากาศทั้งหมด (λ) สามารถหาได้ดังต่อไปนี้

$$\lambda = \frac{Q_s}{Q_T} \quad (3.18)$$

เมื่อ

Q_s คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศทุติยภูมิ (l/min)

Q_T คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศทั้งหมด (l/min)



รูปที่ 3.7 การฉีดอากาศทุติยภูมิเข้าสู่ห้องเผาไหม้

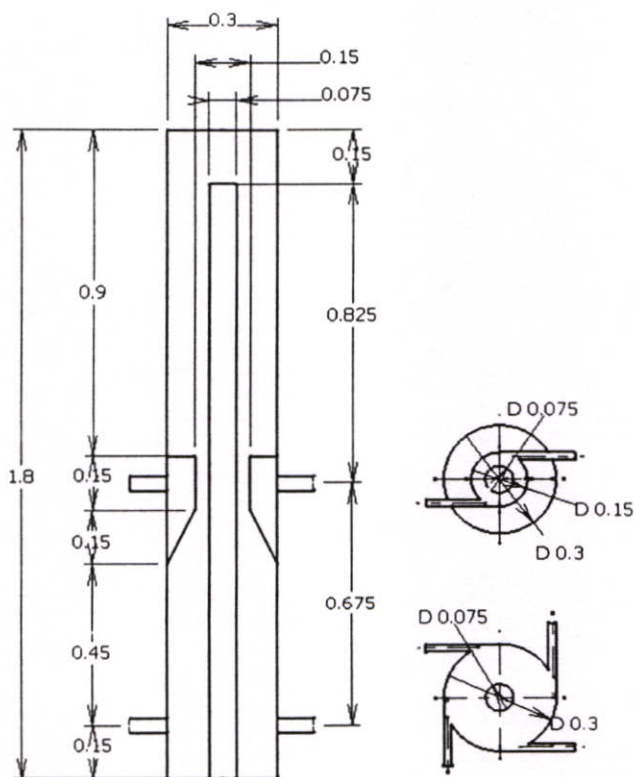
เมื่อ

- β° = มุมของการฉีดอากาศทุติยภูมิ
- D_i = เส้นผ่าศูนย์กลางจินตภาพ (Imaginary circle)
- D_o = เส้นผ่าศูนย์กลางห้องเผาไหม้

อากาศถูกแบ่งเป็นสองส่วนคืออากาศปฐมภูมิและอากาศทุติยภูมิ จากเครื่องเป่าลม(Blower) ขนาด 7 แรงม้า เชื้อเพลิงแกลบถูกผสมกับอากาศปฐมภูมิฉีดไปในแนวสัมผัสเข้าสู่ห้องผสม ก่อนเข้าสู่ห้องเผาไหม้ขั้นแรก ชุดท่อหัวฉีดอากาศทุติยภูมิ เส้นผ่าศูนย์กลาง 0.025 เมตรฉีดอากาศทุติยภูมิสองส่วนเข้าไปบริเวณวงแหวนภายในเตาตามแนวสัมผัสที่ตำแหน่งความสูงต่างกัน วัดอัตราการไหลของอากาศด้วยชุดออร์ฟิสและมานอมิเตอร์ เทอร์โมคัปเปิลชนิด K ทั้งหมดที่ใช้มีจำนวน 14 ตัว มีไว้เพื่อวัดอุณหภูมิตามแนวรัศมีที่แต่ละความสูงในห้องเผาไหม้จำนวน 12 ตัว อีก 2 ตัววัดอุณหภูมิห้องผสมและอุณหภูมิของไอเสียที่ทางออกของเตา อ่านค่าโดย ดิจิตอลเทอร์โมคัปเปิล เชื้อเพลิงแกลบซึ่งถูกจ่ายด้วยชุดป้อนแกลบแบบเกลียวลำเลียงและควบคุมปริมาณเชื้อเพลิงโดยมอเตอร์กับอินเวอร์เตอร์ นอกจากนี้ยังลดการสูญเสียความร้อนของเตาสู่สิ่งแวดล้อมด้วยซีเมนต์ทนไฟหล่อซีเมนต์ทนไฟและหุ้มฉนวน ตัวอย่างถ้ำลอยและปริมาณก๊าซไอเสียถูกวัดที่ทางออกของไซโคลน

4.1.1 เตาเผาออร์เทคแบบสองชั้น

ตัวเตาเผาทำจากเหล็กท่อทรงกระบอก มีส่วนหลักๆอยู่ 3 ส่วนคือห้องผสม (Mixed Chamber) ที่อยู่ล่างสุดของเตาทำหน้าที่ผสมกันระหว่างเชื้อเพลิงแกลบและอากาศปฐมภูมิ ถัดขึ้นไปเป็นส่วนห้องเผาไหม้ขั้นแรก (First stage chamber) และห้องเผาไหม้ขั้นที่สอง(Second chamber) รวมเตามีความสูงภายในทั้งหมด 1.8 เมตร



รูปที่ 4.2 ขนาดเตาเผาออร์เทคสองชั้น (หน่วย:เมตร)

ตารางที่ 4.1 ขนาดของเตาเผาและพารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบ

พารามิเตอร์	ปริมาณ/ชนิด	หน่วย
ห้องผสม		
เส้นผ่าศูนย์กลางภายใน	0.12	เมตร
ความสูง	0.15	เมตร
ห้องเผาไหม้ชั้นแรก		
เส้นผ่าศูนย์กลางภายใน	0.30	เมตร
ความสูง	0.75	เมตร
วัสดุ	เหล็ก	--
ห้องเผาไหม้ชั้นที่สอง		
เส้นผ่าศูนย์กลางภายใน	0.3	เมตร
ความสูง	0.90	เมตร
วัสดุ	เหล็ก	--
เส้นผ่าศูนย์กลางบริเวณคอคอด	0.15	เมตร
ความสูงรวมภายในห้องเผาไหม้ทั้งหมด	1.80	เมตร
อุณหภูมิปฏิบัติงาน	500-1000	°C
ท่อทิ้งไอเสีย(Center tube)		
เส้นผ่าศูนย์กลาง	0.075	เมตร
ความหนา	5	มิลลิเมตร
ช่องว่างระหว่างเพดานเตาด้านบน	0.15	เมตร
วัสดุ	สแตนเลส	
ท่ออากาศทุติยภูมิ		
ระดับความสูง	0.15, 0.825	เมตร
เส้นผ่าศูนย์กลาง	0.025	เมตร

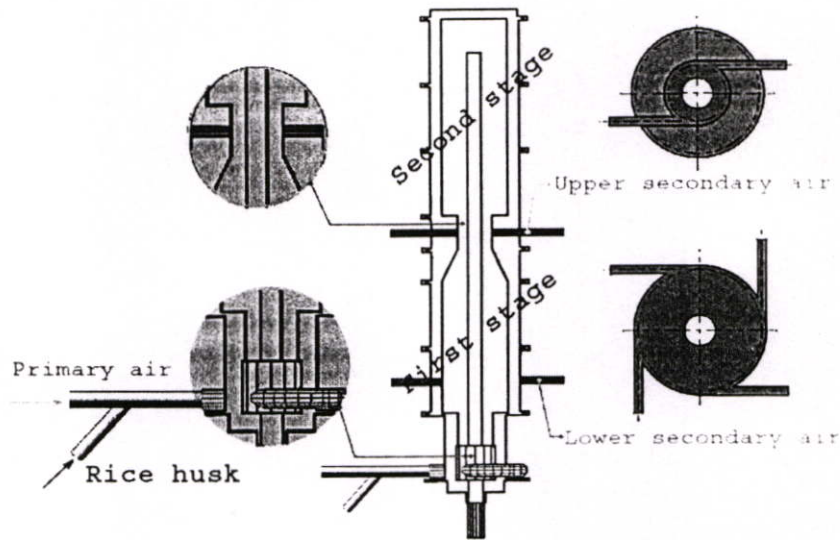
ผนังเตามี 2 ชั้นคือชั้นนอกและชั้นใน กึ่งกลางระหว่างผนังเตาทั้งสองลดการลดการสูญเสียความร้อนด้วยการหล่อซีเมนต์ทนไฟ และหุ้มฉนวนที่ผนังเตาด้านนอก (ระบบอะเดียบาติก) ตรงกึ่งกลางห้องเผาไหม้ระหว่างห้องเผาไหม้หลักทั้ง 2 มีลักษณะเป็นกรวยและคอคอด ลักษณะภายในทั้งสองนี้ส่งเสริมให้มีการไหลหมุนเวียนย้อนกลับตามที่ได้กล่าวในบทที่ผ่านมา ส่วนแกนกลางเตาเป็นท่อทิ้งไอเสียต่อออกไปยังไซโคลนสำหรับดักอนุภาค

4.1.3 ระบบสำหรับการอุ่นเตา

ในการจุดเตาจำเป็นต้องเริ่มต้นอุ่นเตาให้มีอุณหภูมิสูงพอเพื่อช่วยในการจุดติด การอุ่นเตาทำได้โดยใช้หัวเผาและมี LPG เป็นเชื้อเพลิง

4.1.2 ระบบป้อนเชื้อเพลิงและอากาศ

การเตรียมอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้เกิดขึ้นจากพัดลมเป่าขนาด 7 แรงม้าผ่านระบบท่อ ซึ่งภายหลังจากจะถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคืออากาศปฐมภูมิและอากาศทุติยภูมิ เมื่ออากาศถูกแบ่งเป็น 2 ส่วนแล้ว อากาศปฐมภูมิจะถูกผสมรวมกับเชื้อเพลิงแกลบที่จ่ายมาจาก Hopper ผ่านเกลียวลำเลียง (Screw feeder) เข้าสู่ท่ออากาศปฐมภูมิในลักษณะที่รูปตัววาย(Y) ก่อนเข้าสู่ห้องผสม ส่วนอากาศทุติยภูมิจำนวน 4 หัวจ่ายจะถูกนำเข้าสู่เตาเผาที่ความสูง 0.15 เมตร และตรงตำแหน่งคอคอดที่มีความสูง 0.825 เมตร จำนวน 2 หัวจ่าย



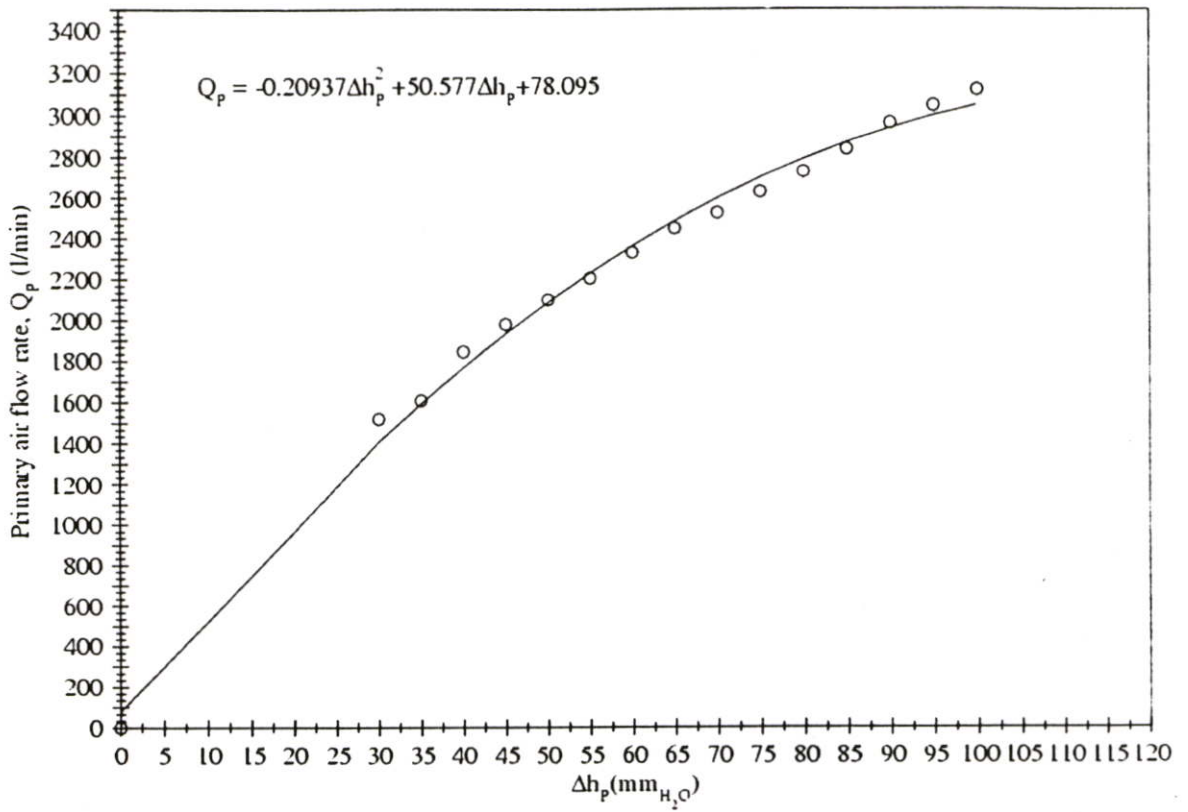
รูปที่ 4.3 ลักษณะของห้องผสมและการฉีดอากาศทุติยภูมิ

4.1.4 ระบบการวัดอัตราการไหลของอากาศ

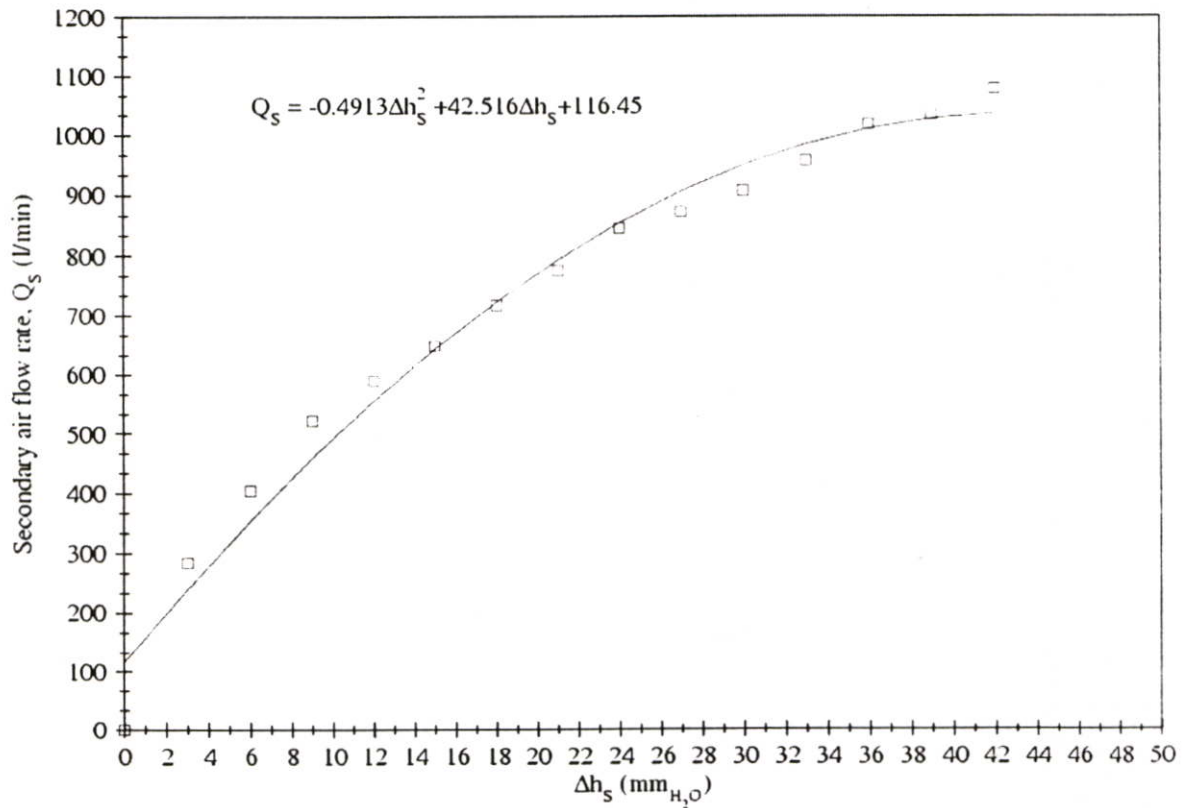
อัตราการไหลของอากาศปฐมภูมิและอากาศทุติยภูมิถูกวัดโดยออร์ฟิสมิเตอร์และอ่านค่าด้วยมานอมิเตอร์แบบท่อตัววัดซึ่งมีความสัมพันธ์กับระดับความสูงของน้ำ ตามรูปที่ 4.4 และ 4.5 ตามลำดับ

4.1.5 ระบบการวัดอุณหภูมิ

การทดลองทำการวัดอุณหภูมิภายในเตาเผาที่ความสูงต่อเส้นผ่าศูนย์กลางเตา(x/D) ทั้งหมด 12 จุด คือ 0.25, 0.75, 1.25, 1.75, 2.25, 2.75, 3.25, 3.75, 4.25, 4.75, 5.25 และ 5.75 ในแต่ละระดับความสูงต่อเส้นผ่าศูนย์กลางดังกล่าวจะเปลี่ยนตำแหน่งของการวัด(r/R) คือ 0, 0.25, 0.4, 0.55, 0.7, 0.85 และ 1 เมื่อ r/R คือระยะที่ทำการวัดจากกึ่งกลางเตาต่อรัศมีของเตาเผา นอกจากนี้ทำการวัดอุณหภูมิในท่อไอเสียที่ทางออกของเตาและอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมอย่างละ 1 จุด



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณอากาศปฐมภูมิกับระดับความสูงน้ำในมานอมิเตอร์



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณอากาศทุติยภูมิกับระดับความสูงน้ำในมานอมิเตอร์

4.1.6 ระบบทิ้งไอเสียและเก็บเถ้าลอย

ท่อทิ้งเถ้าลอยด้านในทำจากสแตนเลสมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกเท่ากับ 0.075 เมตร มีความหนาเท่ากับ 5 มิลลิเมตร มีช่องว่างระหว่างทางเข้าทิ้งเถ้าลอยกับเพดานเตาคือ 0.15 เมตร ชุดไซโคลนถูกต้องเข้ากับท่อทิ้งเถ้าลอยที่ทางออกของเตาเผาเพื่อเก็บอนุภาคและวัดมลพิษ

4.1.7 การวัดมลพิษ

การวัดมลพิษใช้เครื่องมือวัดไอเสียของ Testo รุ่น 350M ณ ทางออกของไซโคลน ซึ่งสามารถวัดก๊าซไอเสียที่จำเป็นเช่น O_2 , CO_2 , CO , NO_x , SO_2 และก๊าซอื่น ๆ ที่ต้องการ นอกจากนี้ อุณหภูมิของก๊าซไอเสียยังถูกบันทึกไปพร้อมกับปริมาณก๊าซไอเสียที่เกิดขึ้นด้วย โดยทุกค่าของข้อมูลถูกเก็บที่เงื่อนไขสถานะคงตัว

4.2 พารามิเตอร์ในการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ทำการศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงอัตราการป้อนของเชื้อเพลิงแกลบอากาศส่วนเกิน สัดส่วนอากาศเชิงปริมาตรของอากาศทุกชนิดต่ออากาศทั้งหมด โดยพารามิเตอร์ต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 4.2

4.3 วิธีการทดลอง

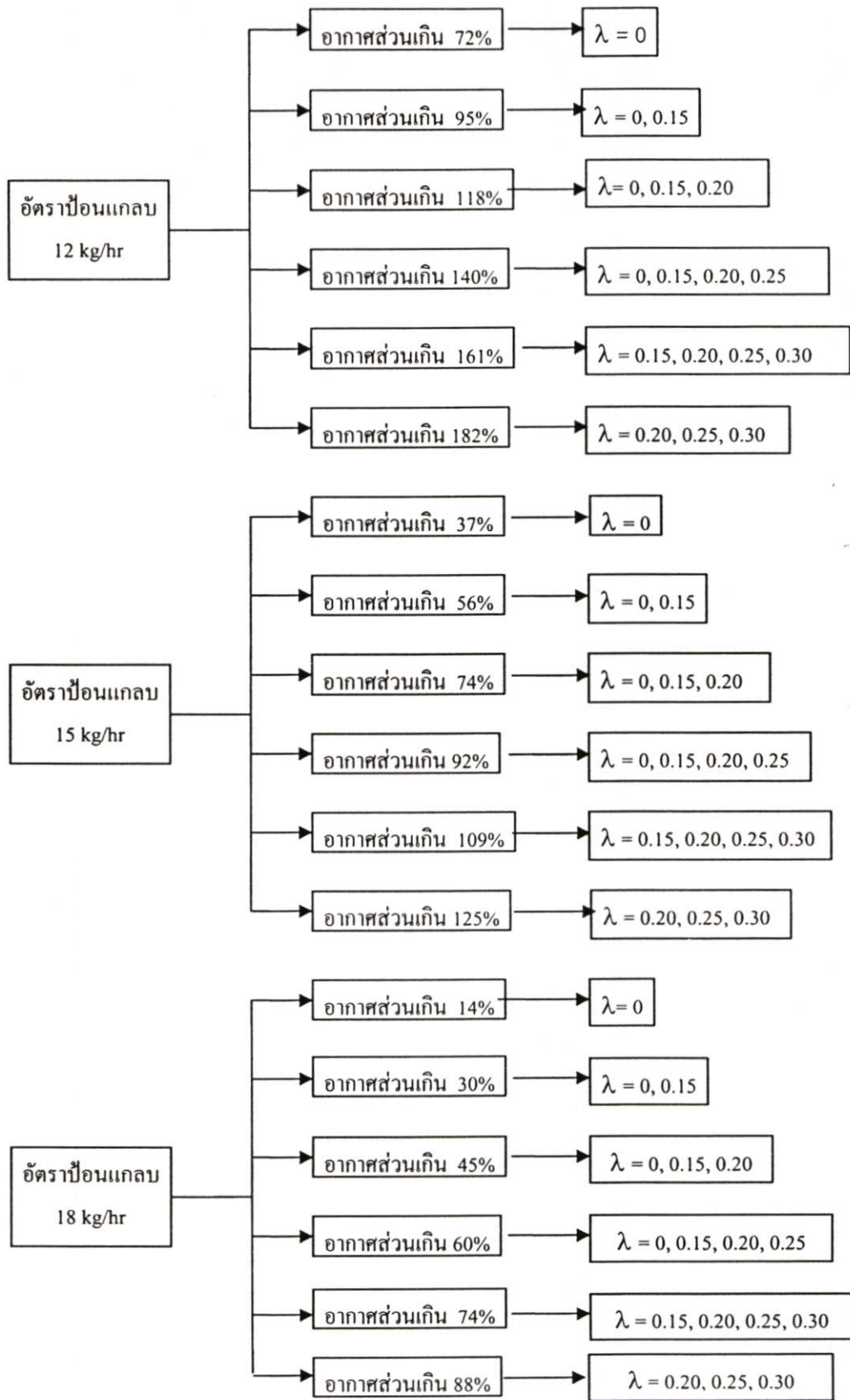
1. เปิดพัดลมเป่าให้อากาศปฐมนุมเข้าสู่เตาที่อัตราการไหลต่ำๆ และใช้หัวเผาอุ่นเตาให้ร้อนด้วยก๊าซ LPG โดยใช้เวลาประมาณ 10 นาที จนห้องเผาไหม้มีอุณหภูมิประมาณ $400^{\circ}C$ เริ่มป้อนแกลบจากฮอปเปอร์อย่างช้าๆ จนอุณหภูมิห้องเผาไหม้ขึ้นแรกสูงขึ้นประมาณ $500-600^{\circ}C$
2. เพิ่มปริมาณอากาศและอัตราการป้อนแกลบขึ้นอย่างช้าๆ และค่อยๆ ลดปริมาณก๊าซ LPG ลง จนห้องเผาไหม้ขึ้นแรกมีอุณหภูมิประมาณ $700^{\circ}C$ รักษาระดับของอัตราการไหลของอากาศและแกลบไว้ ประมาณ 2-3 นาที จึงหยุดการอุ่นเตาโดยการนำหัวเผาออก
3. ปรับพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง เช่น อัตราส่วนการไหลเชิงปริมาตรของอากาศทุกชนิดต่ออากาศทั้งหมด และอัตราการป้อนแกลบ
4. ปลดปล่อยให้เตาเผาทำงานต่อไปจนกระทั่งอุณหภูมิภายในเตาคงที่ ทำการตรวจสอบพารามิเตอร์ดังกล่าวอีกครั้ง จึงเริ่มเก็บข้อมูล

4.3.1 การเก็บข้อมูล

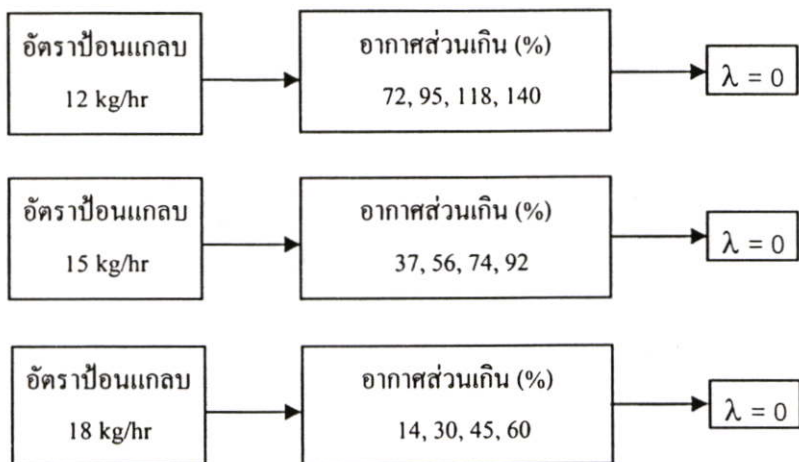
ในการทดสอบแต่ละครั้งใช้เวลาประมาณ 2-3 ชั่วโมง เมื่อเตาเผาอยู่ในสถานะสมดุลแล้ว จะทำการเก็บข้อมูลของอุณหภูมิทุกๆ 10 นาที ตามตำแหน่งของการวัดอุณหภูมิตามหัวข้อที่ 4.1.5 การวัดก๊าซไอเสีย ทำพร้อมกับการเก็บเถ้าลอยที่ถูกเก็บจากทางออกด้านล่างของชุดไซโคลน

ตารางที่ 4.2 พารามิเตอร์สำหรับทดลองการเผาไหม้ในเตาเผาแบบวอร์เทคแบบสองชั้น

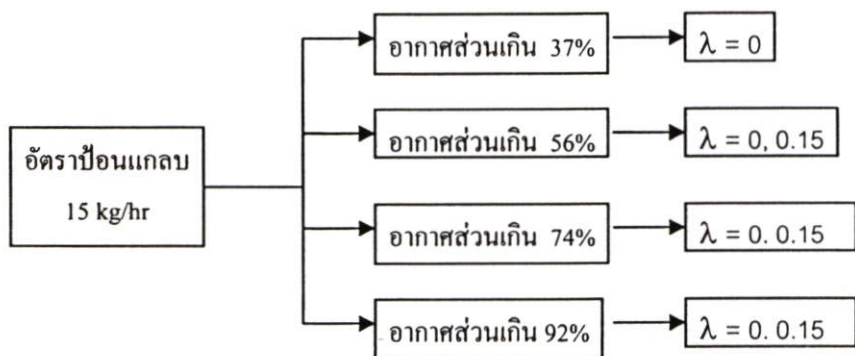
พารามิเตอร์	ปริมาณ/ชนิด	หน่วย
<i>คุณสมบัติของแกลบ</i>		
ขนาด (เฉลี่ย)	(2 mm x 8 mm.)	mm ²
ปริมาณความชื้นเริ่มต้น	10	%
ความหนาแน่น	123	kg/ m ³
<i>เงื่อนไขที่ทางเข้าห้องเผาไหม้</i>		
อัตราการป้อนเชื้อเพลิงแกลบ	12 - 18	kg/hr
อากาศส่วนเกิน	14 - 182	%
ความเร็วอากาศ (Superficial air velocity)	0.385-0.538	m/s
อากาศหุติยภูมิ	0.0 – 0.3	
อุณหภูมิอากาศเข้าห้องเผาไหม้	25	°C
อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม	25	°C
ความดัน	1	atm



รูปที่ 4.6 แผนผังการทดลองและเก็บค่าอุณหภูมิ



รูปที่ 4.7 แผนผังการทดลองการเก็บค่าไอเสียกรณีใช้อากาศปฐมภูมิอย่างเดียว



รูปที่ 4.8 แผนผังการทดลองการเก็บค่าไอเสียกรณีใช้อากาศทุติยภูมิ

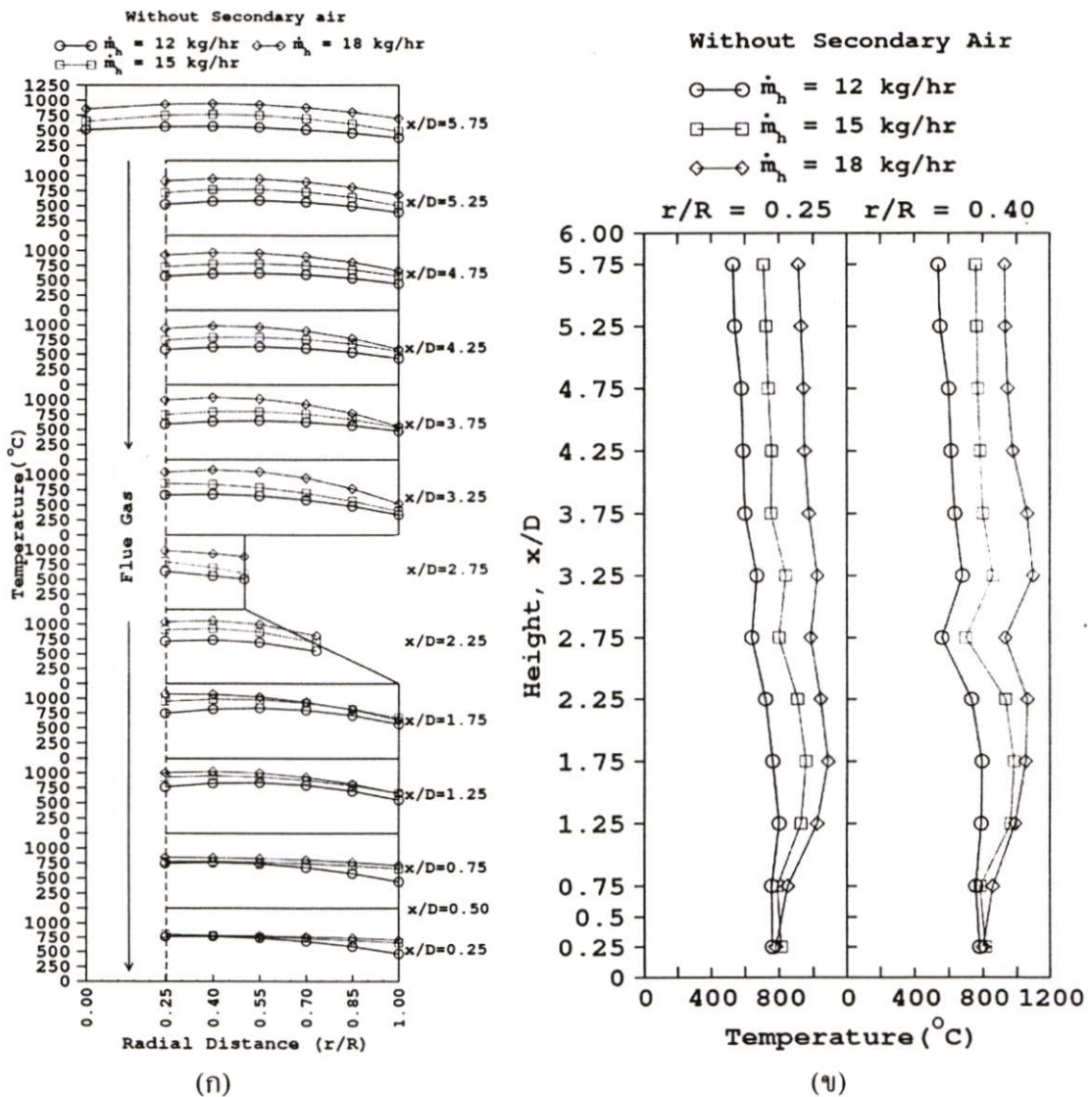
บทที่ 5

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

ในบทนี้ทำการรายงานผลถึงพฤติกรรมการเผาไหม้แก๊สภายในเตาเผาออร์เทคแบบสองชั้น ผลการทดลองแบ่งการรายงานตามลำดับดังต่อไปนี้คือ การกระจายอุณหภูมิภายในเตาเผาองค์ประกอบไอเสียที่สำคัญที่เกิดขึ้นและประสิทธิภาพการเผาไหม้ โดยจะรายงานผลกระทบและพฤติกรรมดังกล่าวเมื่อเปลี่ยนแปลง อัตราป้อนแก๊ส อากาศส่วนเกิน และ อากาศทุติยภูมิ

5.1 การกระจายอุณหภูมิ

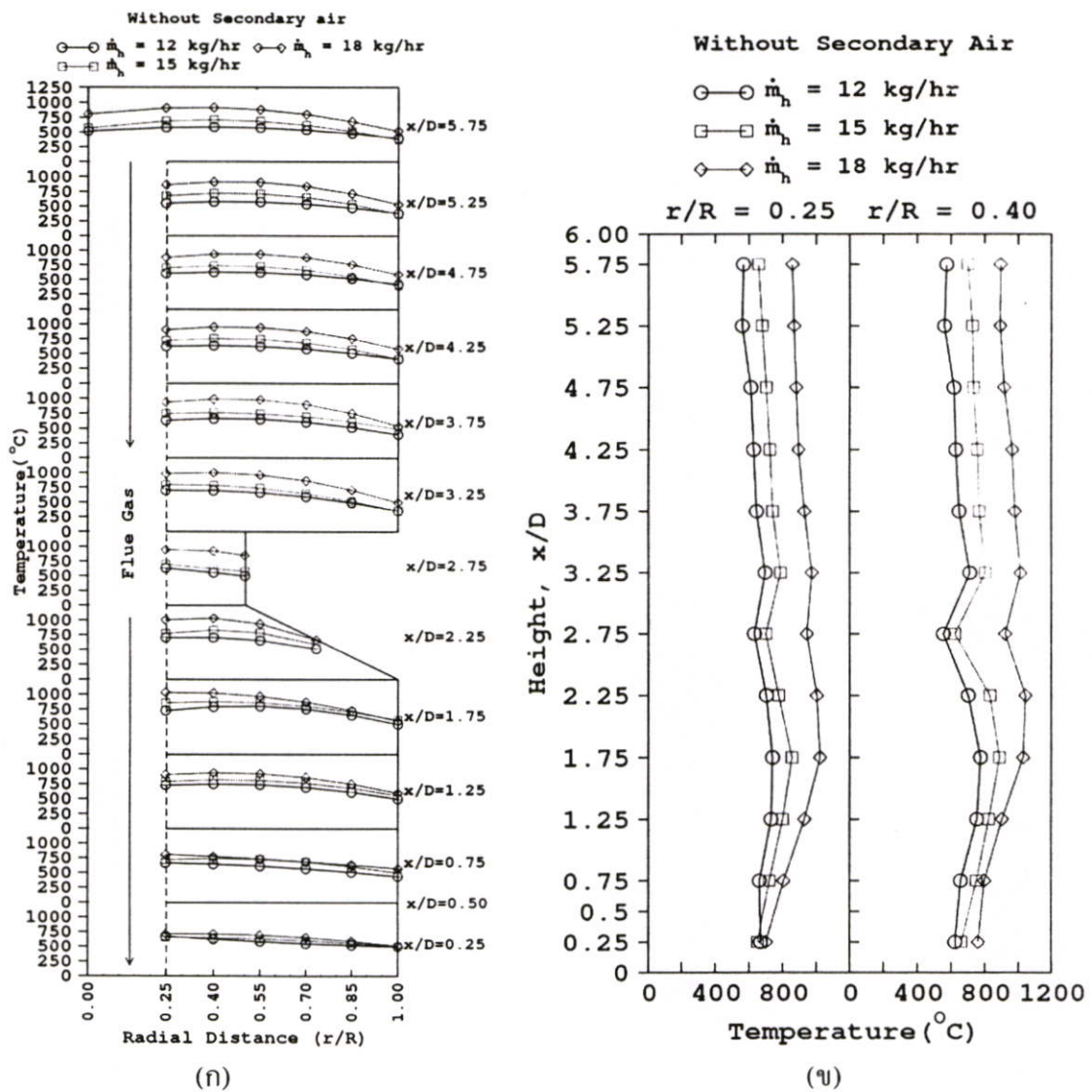
5.1.1 อิทธิพลจากอัตราป้อนแก๊ส



รูปที่ 5.1 การกระจายอุณหภูมิ, Superficial air velocity = 0.385 m/s ไม่ใช้อากาศทุติยภูมิ ($\lambda=0$) อัตราป้อนแก๊ส (\dot{m}_h) = 12-18 kg/hr (ก) ตามแนวรัศมี และ (ข) ตามแนวแกน

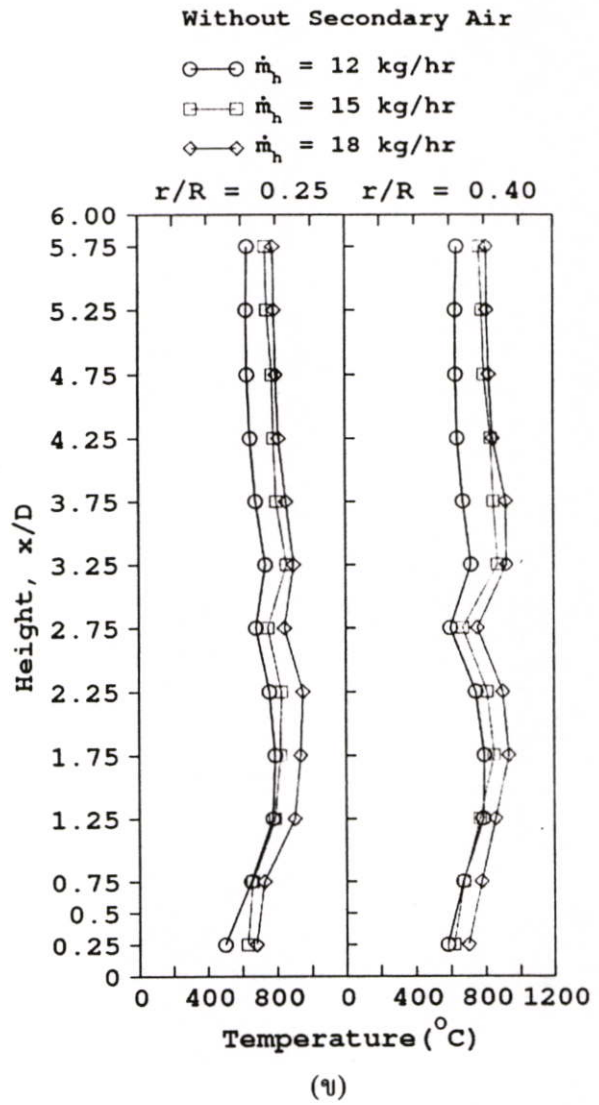
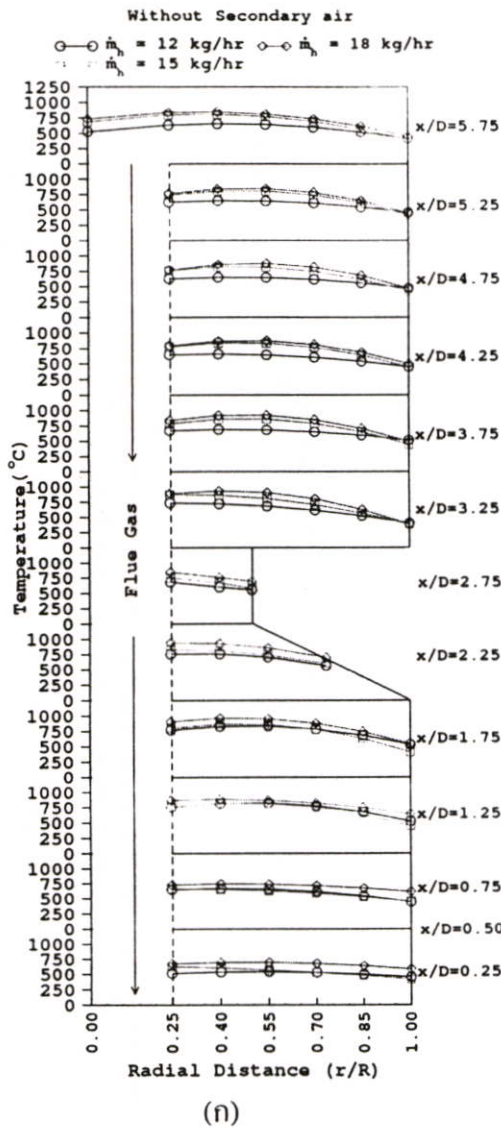
รูปที่ 5.1ก-5.13ก เป็นการแสดงคุณลักษณะของการกระจายอุณหภูมิตามแนวรัศมี r/R (Radial distance, r/R คือตัวแปรไร้หน่วยเพื่อบอกตำแหน่งตามแนวรัศมีของเตาเผา) ตั้งแต่ 0.00-1.00 ส่วนรูปที่ 5.13ข-5.13ค แสดงคุณลักษณะของการกระจายอุณหภูมิตามแนวแกน x/D (Axial distance, x/D คือ ตัวแปรไร้หน่วยเช่นเดียวกับ r/R แต่เป็นความสูงต่อเส้นผ่าศูนย์กลางเตาเผา) ตั้งแต่ 0.25-5.75

รูปที่ 5.1-5.4 แสดงอิทธิพลของอัตราป้อนแกลบต่อคุณลักษณะของการกระจายอุณหภูมิ โดยเปรียบเทียบการใช้อัตราป้อนแกลบ (\dot{m}_h) ตั้งแต่ 12-18 kg/hr ที่ความเร็วอากาศ (Superficial air velocity) ตั้งแต่ 0.385-0.538 m/s และไม่ใช่อากาศทุติยภูมิ ($\lambda = 0$)



รูปที่ 5.2 การกระจายอุณหภูมิ, Superficial air velocity = 0.438 m/s ไม่ใช่อากาศทุติยภูมิ ($\lambda=0$)

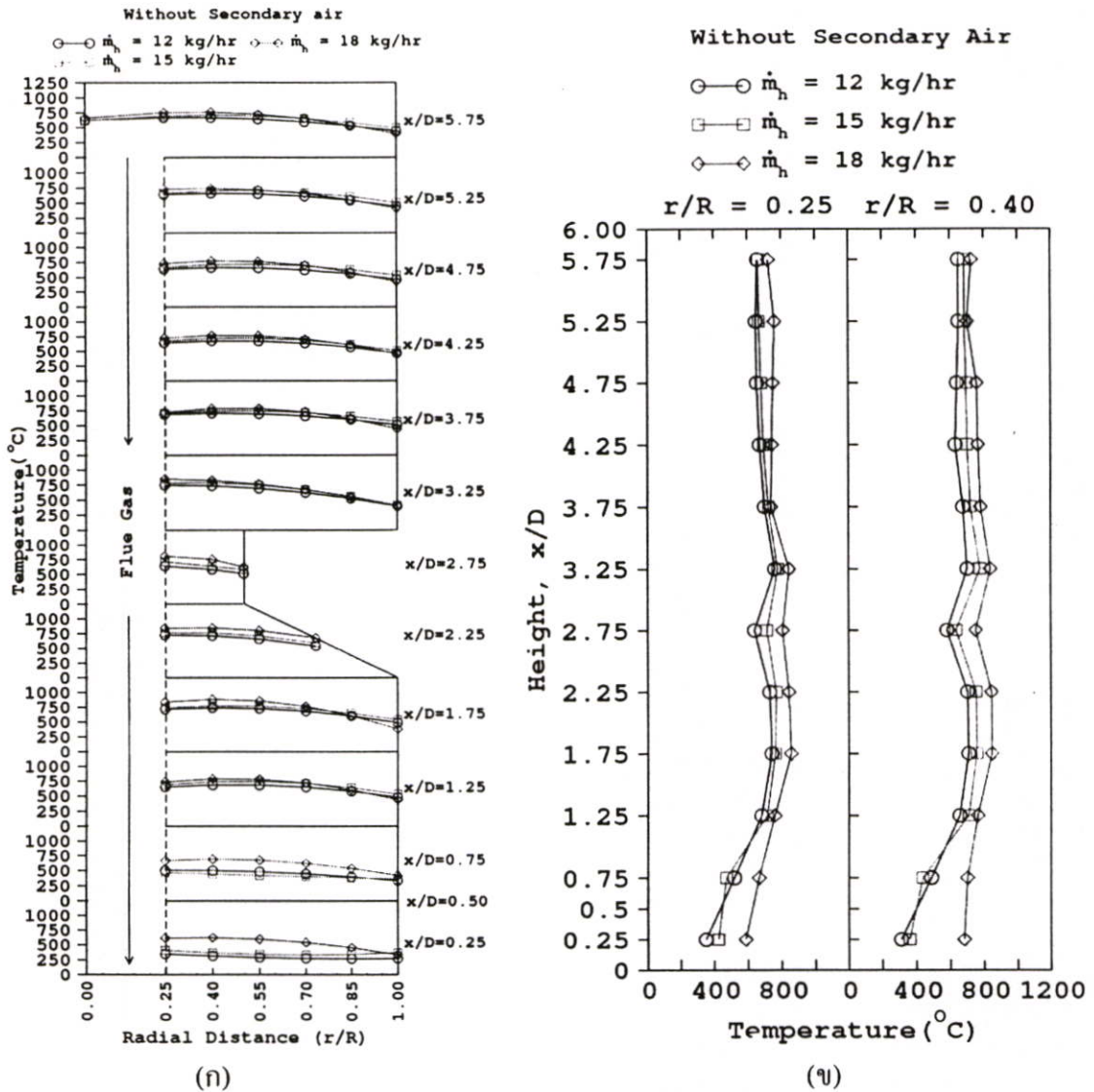
อัตราป้อนแกลบ (\dot{m}_h) = 12-18 kg/hr (ก) ตามแนวรัศมี และ (ข) ตามแนวแกน



รูปที่ 5.3 การกระจายอุณหภูมิ, Superficial air velocity = 0.489 m/s ไม่ใช้อากาศทุติยภูมิ($\lambda=0$) อัตราป้อนแกลบ(\dot{m}_h) = 12-18 kg/hr (ก) ตามแนวรัศมี และ (ข) ตามแนวแกน

พิจารณาการกระจายอุณหภูมิในรูปที่ 5.1ก และ 5.1ข ก่อน จะพบว่าระดับอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราป้อนแกลบจาก 12 kg/hr ไปถึง 18 kg/hr ตำแหน่งที่ให้อุณหภูมิสูงสุดในห้องเผาไหม้ชั้นแรกคือที่ตำแหน่ง $x/D= 1.75$ โดยที่อัตราป้อน 12 kg/hr ให้ อุณหภูมิสูงสุดที่ตำแหน่ง $x/D= 1.75$ นี้เท่ากับ $823\text{ }^{\circ}\text{C}$ ที่อัตราป้อนแกลบ 15 kg/hr ให้อุณหภูมิ สูงสุด $960\text{ }^{\circ}\text{C}$ และที่ อัตราป้อนแกลบ 18 kg/hr ให้อุณหภูมิสูงสุด $1024\text{ }^{\circ}\text{C}$ ทั้งนี้ความเร็วของการ เกิดปฏิกิริยายังขึ้นอยู่กับความเร็วอากาศที่ใช้ในการทดลอง สำหรับกรณีนี้เป็นกรณีความเร็วอากาศ เท่ากับ 0.385 m/s ซึ่งเป็นกรณีที่ความเร็วอากาศต่ำสุด ปฏิกิริยาสามารถเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว

ไหม้ และระดับอุณหภูมิอาจสูงขึ้นได้เล็กน้อยในห้องเผาไหม้ชั้นที่สองเนื่องจากมีการกระจายอุณหภูมิสูงกว่า



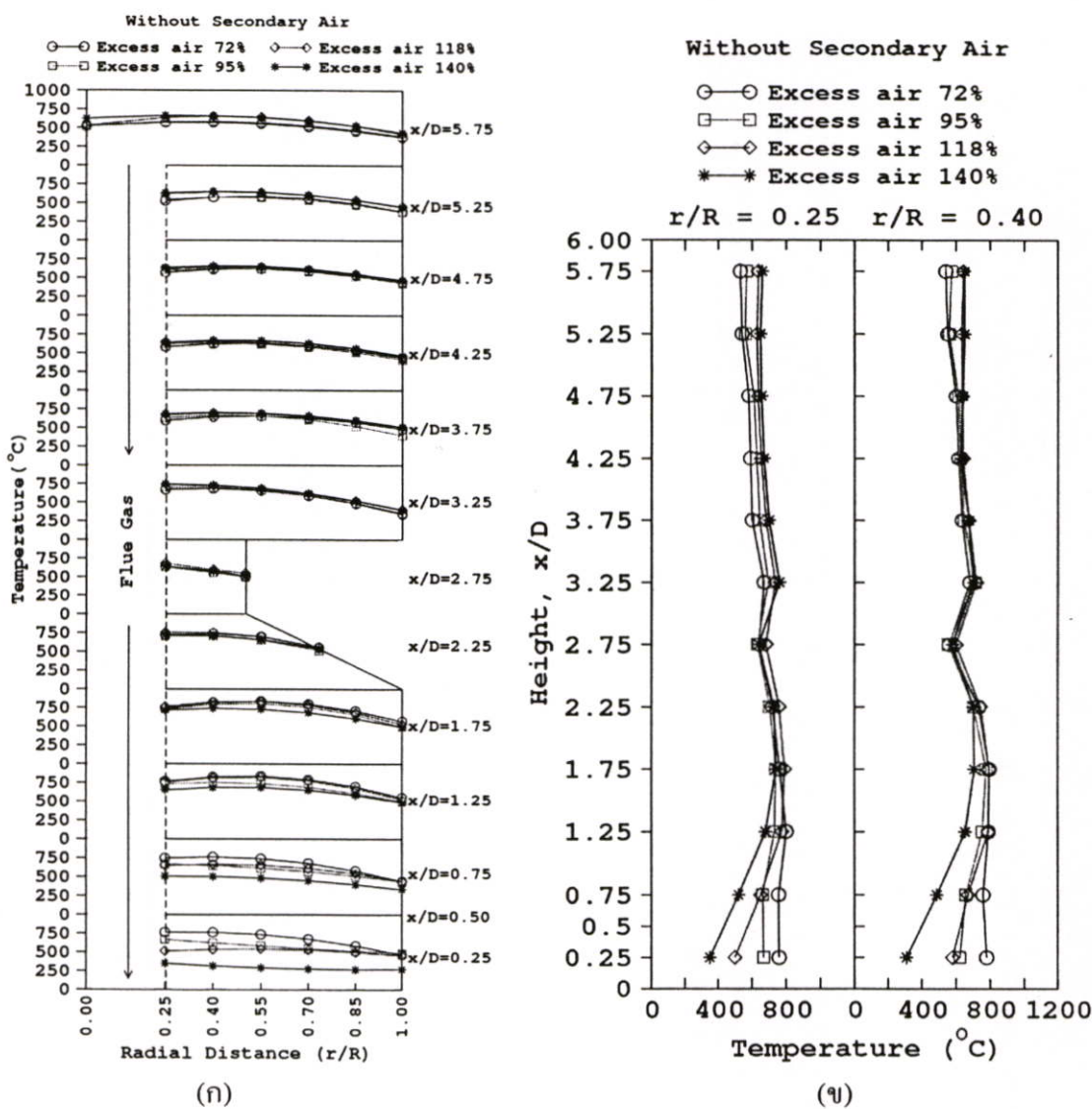
รูปที่ 5.4 การกระจายอุณหภูมิ, Superficial air velocity = 0.538 m/s ไม่ใช้อากาศทุติยภูมิ ($\lambda=0$)

อัตราป้อนแกลบ (\dot{m}_h) = 12-18 kg/hr (ก) ตามแนวรัศมี และ (ข) ตามแนวแกน

สำหรับรูปที่ 5.2-5.4 เป็นการใช้อากาศที่มีความเร็วสูงขึ้น การกระจายอุณหภูมิทั้งตามแนวแกนและตามแนวรัศมีจะเพิ่มขึ้น สามารถเห็นการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจน เมื่อเปลี่ยนอัตราป้อนแกลบจาก 12 kg/hr ไปจนถึง 18 kg/hr เมื่อเปลี่ยนแปลงความเร็วอากาศ จะมีผลในแง่ของมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่แตกต่างกัน อากาศมีความเร็วต่ำ เชื้อเพลิงสามารถเกิดปฏิกิริยาได้อย่างรวดเร็ว แต่หากใช้อากาศที่มีความเร็วสูง พบว่า ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นอย่างช้าๆ เนื่องจากความเร็วอากาศเป็นตัวที่ทำให้มีการกระจายอุณหภูมิที่แตกต่างกันในแต่ละระดับความสูงนั่นเอง ทั้งนี้การทดลองสามารถควบคุมอุณหภูมิในห้องเผาไหม้ได้เป็นอย่างดี ด้วยอิทธิพลจากอัตราป้อนแกลบอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้วอร์เทคสองชั้นที่ใช้แกลบเป็นเชื้อเพลิงนี้พบว่า มีระดับอุณหภูมิในห้อง

เผาไหม้ในช่วง 300-1100 °C ขึ้นอยู่กับอัตราป้อนแกลบ ซึ่งจะมีผลต่อการเกิด NO_x ซึ่งจะอธิบายในหัวข้อที่ 5.2

5.1.2 อิทธิพลจากอากาศส่วนเกิน (ความเร็วอากาศ, Superficial air velocity)



รูปที่ 5.5 การกระจายอุณหภูมิ อัตราป้อนแกลบ(\dot{m}_h)=12 kg/hr, ไม่ใช้อากาศทุติยภูมิ($\lambda=0$)
 อากาศส่วนเกิน 72-140% (ก) ตามแนวรัศมี และ (ข) ตามแนวแกน

สำหรับรูปที่ 5.5, 5.6 และ 5.7 แสดงกระจายอุณหภูมิที่มีอิทธิพลจากอากาศส่วนเกิน กรณีอัตราป้อนแกลบ (\dot{m}_h) = 12-18 kg/hr และไม่ใช้อากาศทุติยภูมิ ($\lambda = 0$) โดย ปริมาณอากาศส่วนเกินและความเร็วอากาศที่ใช้แสดงในตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 ตารางแสดงปริมาณอากาศส่วนเกินและความเร็วอากาศที่ใช้ในแต่ละอัตราป้อน

ความเร็วอากาศ Superficial air velocity (m/s)	อากาศส่วนเกิน, Excess air (%)		
	$\dot{m}_h = 12$ kg/hr	$\dot{m}_h = 15$ kg/hr	$\dot{m}_h = 18$ kg/hr
0.385(ความเร็วต่ำสุด)	72	37	14
0.438(ความเร็วปานกลาง)	95	56	30
0.489(ความเร็วปานกลาง)	118	74	45
0.538(ความเร็วสูงสุด)	140	92	60

ลักษณะของการกระจายอุณหภูมิตามแนวรัศมีในรูป 5.5ก มีลักษณะเป็นเส้นโค้งตั้งแต่ r/R เท่ากับ 0.25 ถึง 1.00 ในทุกๆ ระดับความสูง x/D ของเตาเผา เริ่มต้นพิจารณาอุณหภูมิการเผาไหม้ในห้องเผาไหม้ชั้นแรกก่อน พบว่า ในตอนเริ่มต้นของการเผาไหม้ที่ความสูง $x/D = 0.25-1.75$ แกลบและอากาศถูกผสมกันอย่างดีในห้องผสมสู่ห้องเผาไหม้ชั้นแรกที่ $x/D = 0.25$ เป็นต้นไป อุณหภูมิสูงสุดของการเผาไหม้ที่ความสูง $x/D = 0.25-1.75$ นี้ อยู่ที่บริเวณ $r/R = 0.25-0.55$ หลังจากนั้น อุณหภูมิจะลดลงและต่ำสุดที่ผนังเตาที่ความสูง x/D ระดับเดียวกัน ในทุกๆ การใช้อากาศส่วนเกิน สาเหตุที่เป็นเช่นนี้เนื่องมาจาก ในตอนเริ่มต้นของการเผาไหม้ แกลบและอากาศได้ถูกผสมกันอย่างดีจากห้องผสมเริ่มเข้าสู่ห้องเผาไหม้ชั้นแรกที่ $x/D = 0.25-1.75$ ดังกล่าว บริเวณ $r/R=0.25-0.55$ จึงมีความหนาแน่นของอนุภาคแกลบสูง มีการผสมกันระหว่างแกลบและอากาศอย่างเข้มข้นดีกว่า ด้านข้างของห้องเผาไหม้ เมื่อทำการเปรียบเทียบลักษณะอุณหภูมิในห้องเผาไหม้ชั้นแรกนี้ของแต่ละการใช้อากาศส่วนเกินแล้ว พบว่า การใช้อากาศส่วนเกิน 72%(อากาศความเร็วต่ำสุด) ให้อุณหภูมิของการเผาไหม้สูงที่สุดตลอดทุกความสูง x/D ในห้องเผาไหม้ชั้นแรก เมื่อเพิ่มอากาศส่วนเกินที่ใช้ในการทดลองจาก 72% เป็น 95, 118 และ 140% ตามลำดับ พบว่าระดับอุณหภูมิตามแนวรัศมีของแต่ละ x/D ลดลงตามการเพิ่มขึ้นของอากาศส่วนเกินดังกล่าว ซึ่งเห็นได้ชัดเจนที่สุดเมื่อเปรียบเทียบอุณหภูมิตามแนวรัศมีที่ $x/D = 0.25$ และ 0.75 ระหว่างการใช้อากาศส่วนเกิน 140%(อากาศความเร็วสูงสุด) กับ อากาศส่วนเกิน 72%(อากาศความเร็วต่ำสุด) ผลกระทบจากการใช้อากาศส่วนเกินที่ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของระดับอุณหภูมิในห้องเผาไหม้ชั้นแรกนี้ มีสาเหตุอยู่ 2-3 ประการ สาเหตุประการแรกที่เป็นเช่นนี้คือ การใช้อากาศส่วนเกินสูงๆ ส่งผลให้มีปริมาณอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้มากเกินไป เกินความจำเป็นสำหรับการเผาไหม้ในตอนเริ่มต้น ทำให้อุณหภูมิจากการเผาไหม้ต่ำ เนื่องจากมีอัตราการเผาไหม้น้อยกว่าการใช้อากาศส่วนเกินต่ำๆ ประการที่สองคือ เมื่อใช้อากาศส่วนเกินต่ำๆ(อากาศความเร็วต่ำและความเร็วปานกลาง) ทำให้เชื้อเพลิงอยู่ในห้องเผาไหม้ชั้นแรกได้นาน มีการผสมที่ดีกว่า อัตราการหลุดลอยน้อยกว่า เมื่อเพิ่มอากาศส่วนเกินขึ้น ทำให้อากาศมีความเร็วสูง อัตราการหลุดลอยสูงขึ้น อนุภาคหรือสารระเหยมีเวลาน้อยที่จะถูกเผาไหม้ได้ที่ความสูง x/D ต่ำๆ อนุภาคดังกล่าวจึงลอยไปเผาไหม้ในความสูงถัดไป สังเกตได้จากที่อากาศส่วนเกิน 95, 118 และ 140% มีอุณหภูมิจากการเผาไหม้สูงขึ้น ที่ความสูง x/D ตั้งแต่ 0.75 -2.25 เมื่อเชื้อเพลิงและ

อากาศผ่านความสูง $x/D = 1.75$ เชื้อเพลิงจะผ่านห้องเผาไหม้ที่มีลักษณะกรวย ที่ $x/D = 2.25$ และคอคอด ที่ $x/D = 2.75$ ก่อนจะเข้าสู่ห้องเผาไหม้ชั้นที่สองที่ความสูง $x/D = 3.25-5.75$ เป็นลำดับต่อไป สำหรับอนุภาคนิวเคลียสในห้องเผาไหม้ชั้นที่สองที่ความสูงดังกล่าวนั้นจะพบว่ามีกระจายของอนุภาคออกไปตามแนวรัศมีมากขึ้น สังเกตได้จากลักษณะการกระจายอนุภาคที่ $r/R = 0.25-1.00$ มีความสม่ำเสมอตามแนวรัศมีมากกว่าการกระจายอนุภาคในห้องเผาไหม้ชั้นแรกที่ r/R ดังกล่าวอย่างชัดเจนว่าระดับของอนุภาคในห้องเผาไหม้ชั้นแรกนั้นสูงที่บริเวณ $r/R = 0.25-0.55$ เท่านั้นและลดลงอย่างเห็นได้ชัดที่ $r/R = 0.55-1.00$

ลักษณะของอนุภาคตามแนวแกนในรูปที่ 5.5 ข เป็นสิ่งที่อธิบายเพิ่มเติมของการเผาไหม้ที่อัตราป้อนแกลบ 12 kg/hr และไม่ใช่อากาศทุติยภูมิ ($\lambda = 0$) นี้ ซึ่งพบว่า อนุภาคสูงสุดของการเผาไหม้อยู่ในห้องเผาไหม้ชั้นแรก ที่ความสูง $x/D = 1.75$, $r/R = 0.55$ มีค่าประมาณ 820°C ที่การใช้อากาศส่วนเกิน 72% มีข้อสังเกตบางประการในห้องเผาไหม้ชั้นแรกนี้คือ ที่ความสูง x/D ตั้งแต่ 0.25-1.25 ที่มีความสูงเริ่มต้นของการเผาไหม้นั้น การใช้อากาศความเร็วต่ำหรืออากาศส่วนเกิน 72% เริ่มให้อนุภาคสูงมาตั้งแต่การเริ่มต้นของการเผาไหม้ ส่วนที่อากาศส่วนเกินความเร็วสูง หรืออากาศส่วนเกิน 140% ที่ความสูงดังกล่าวอนุภาคจากการเผาไหม้ค่อนข้างต่ำ ปฏิกริยาเกิดขึ้นอย่างช้าๆ และมีอัตราใกล้เคียงกันที่อากาศส่วนเกินอื่นในห้องเผาไหม้ชั้นที่สอง อันเนื่องจากการใช้ปริมาณและความเร็วที่แตกต่างกันของอากาศส่วนเกินทำให้มีอัตราการเผาไหม้ที่แตกต่างกัน นอกจากนี้ที่ความสูง x/D ตั้งแต่ 1.25-1.75 ของทุกการใช้อากาศส่วนเกิน เป็นช่วงที่มีอัตราการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงและอากาศสูง เนื่องจากบริเวณนี้มีปริมาณของเชื้อเพลิงแกลบและอากาศอยู่มาก รวมไปถึงเป็นการเผาไหม้สารระเหยที่มีอยู่ในเชื้อเพลิง หลังจากความสูง $x/D = 1.75$ อนุภาคลดลงหรือเพิ่มขึ้นตามความสูงของเตาเผาสู่ห้องเผาไหม้ชั้นที่สอง ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณอากาศส่วนเกินที่ใช้เป็นหลัก สำหรับการลดลงของอนุภาคตามแนวแกนหรือตามความสูงนั้นเกิดขึ้นกับการใช้อากาศส่วนเกินความเร็วต่ำสุด 72% และอากาศส่วนเกินความเร็วปานกลางบางค่าคือ 95% เหตุผลส่วนหนึ่งของการลดลงของอนุภาคตามแนวแกนคือมาจากลดลงของการกระจายอนุภาคตามแนวแกน อีกส่วนหนึ่งมาจากการลดลงของเชื้อเพลิงแกลบ เนื่องจากถูกเผาไหม้ได้สูงในห้องเผาไหม้ชั้นแรกโดยอากาศส่วนเกินความเร็วต่ำ เหตุผลส่วนหนึ่งของการเพิ่มขึ้นของอนุภาคตามแนวแกนคือ การที่ไม่สามารถถูกเผาไหม้ได้ของอนุภาคด้วยอากาศส่วนเกินความเร็วสูงที่ความสูง x/D ต่ำๆ ในห้องเผาไหม้ชั้นแรก เมื่อพิจารณาที่ความสูง $x/D = 1.75-2.25$ ห้องเผาไหม้มีลักษณะเป็นกรวย ช่วยส่งเสริมให้มีการหมุนวนมากยิ่งขึ้น ทำให้เชื้อเพลิงอยู่ในห้องเผาไหม้นานขึ้นทำให้มีการเผาไหม้นานกว่าห้องเผาไหม้ที่มีลักษณะตรงขึ้นไป ลักษณะภายในห้องเผาไหม้ที่ความสูง $x/D=2.75$ มีลักษณะเป็นคอคอดทำให้ระดับอนุภาคลดต่ำกว่าที่ $x/D=2.25$ ซึ่งมีสาเหตุมาจากในบริเวณนี้อนุภาคและแก๊สถูกเร่ง ทำให้บริเวณดังกล่าวอนุภาคมีเวลาน้อยในการหมุนวนอยู่ในบริเวณนี้ ถัดขึ้นไปที่ความสูง x/D ตั้งแต่ 3.25-5.75 เป็นระดับความสูงในห้องเผาไหม้ชั้นที่สอง สังเกตได้ว่า

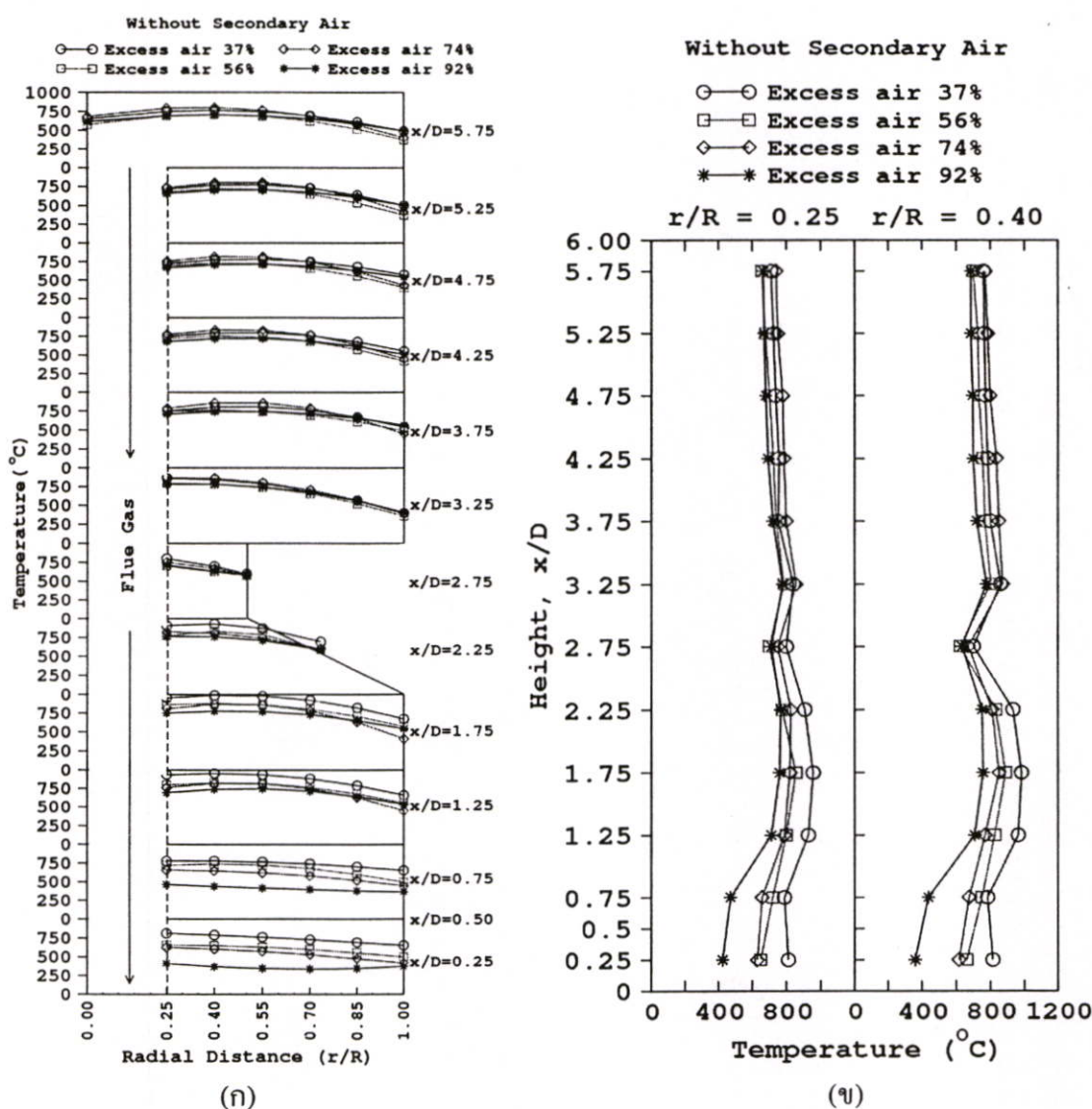
อุณหภูมิของการเผาไหม้ที่ $x/D = 3.25-3.75$, $r/R = 0.70-1.00$ ระดับอุณหภูมิเพิ่มขึ้นอีกครั้งหลังจากที่อนุภาคแกลบและแก๊สได้ผ่านบริเวณคอคอดมาเนื่องจากลักษณะภายในของห้องเผาไหม้ส่วนนี้ออกแบบให้มีการเพิ่มขึ้นอย่างทันทีทันใดของพื้นที่หน้าตัดของการไหล ทำให้ลดและเปลี่ยนทิศทางความเร็วการไหลของส่วนผสมให้ต่ำลงและเกิดการไหลหมุนเวียนย้อนกลับจนส่วนผสมมีเวลามากพอในการเผาไหม้อนุภาคส่วนที่เหลือ เมื่อพิจารณาภาพรวมของการใช้อากาศส่วนเกินทั้ง 4 ค่าต่อการกระจายอุณหภูมิตามแนวแกนในห้องเผาไหม้ชั้นที่สอง พบว่าอุณหภูมิมีความปั่นป่วนน้อยมากและมีความคงตัว(Uniform)สูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับลักษณะอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ชั้นแรกที่มีความคงตัวน้อยกว่ามาก สาเหตุที่เป็นเช่นนี้เพราะเป็นผลสืบเนื่องโดยตรงจากการเผาไหม้ภายในห้องเผาไหม้ชั้นแรก

เมื่อมองภาพรวมถึงลักษณะการกระจายตามอุณหภูมิตามแนวแกนตลอดความสูงของเตาตั้งแต่ห้องเผาไหม้ชั้นแรกที่มีความสูง $x/D = 0.25$ ถึงห้องเผาไหม้ชั้นที่สองที่มีความสูง $x/D = 5.75$ มีข้อสังเกตซึ่งเป็นผลสืบเนื่องโดยตรงเกี่ยวกับลักษณะการกระจายอุณหภูมิตามแนวแกนอันเนื่องจากการใช้อากาศส่วนเกินคือ การกระจายอุณหภูมิของการใช้อากาศส่วนเกิน 72 และ 95% นั้นลดต่ำลงตามความสูง x/D ของเตาในทุกๆ r/R เนื่องจากมีอัตราการเผาไหม้ที่ดีกว่าในห้องเผาไหม้ชั้นแรกแสดงให้เห็นว่าเชื้อเพลิงถูกเผาไหม้หมดมากกว่าการเผาไหม้โดยใช้อากาศส่วนเกิน 118 และ 140% สำหรับการเผาไหม้โดยใช้อากาศส่วนเกิน 118 และ 140% นั้นพบว่ายังคงมีการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิต่อเนื่อง เนื่องจากยังมีเชื้อเพลิงบางส่วนที่ยังไม่ถูกเผาไหม้เนื่องจากการใช้ความเร็วของอากาศป้อนสูงเกินไป นอกจากนี้ การใช้อากาศส่วนเกิน 72%(อากาศความเร็วต่ำสุด) ซึ่งเป็นกรณีที่อากาศส่วนเกินต่ำที่สุดที่สามารถทดลองได้อย่างต่อเนื่อง และไม่สามารถปรับอากาศส่วนเกินให้ต่ำกว่า 72% ได้เนื่องจากทำให้ความเร็วของอากาศไม่เพียงพอในการพาให้อนุภาคออกไปจากห้องเผาไหม้ได้ดีพอ และมีปริมาณอากาศส่วนเกินที่น้อยเกินไปจึงมีอัตราการเผาไหม้ต่ำ ทำให้ได้มีการจับตัวกันเป็นก้อนที่มีลักษณะเหมือนก้อนเค้กอยู่ภายในห้องเผาไหม้ชั้นแรก ส่วนการเผาไหม้โดยใช้อากาศส่วนเกินที่ 140% นั้นพบว่าเป็นการใช้อากาศส่วนเกินที่สูงที่สุดที่สามารถทำการทดสอบได้เช่นกัน เนื่องจากหากทำการเพิ่มอากาศส่วนเกินมากกว่า 140% ส่งผลให้อากาศมีความเร็วสูงเกินไปส่งผลให้ขาดความเสถียรของเปลวไฟ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเชื้อเพลิงแกลบที่มีน้ำหนักเบาจึงง่ายต่อการหลุดลอย

ดังนั้นเมื่อสรุปโดยรวมถึงความเหมาะสมของการกระจายอุณหภูมิของอัตราป้อนแกลบ 12 kg/hr ไม่ใช้อากาศทุติยภูมิ ($\lambda=0$) และใช้อากาศส่วนเกิน 72-140% นี้แล้ว พบว่า การใช้อากาศส่วนเกิน 95% และ 118% มีความเหมาะสมต่อการทดลองมากที่สุด เนื่องจากอากาศส่วนเกินทั้ง 2 ค่านี้ เป็นการใช้อากาศส่วนเกินที่มีความเร็วปานกลาง อันส่งผลต่อลักษณะของการกระจายอุณหภูมิที่ดี ไม่กระจุกตัวสูงอยู่บริเวณใดบริเวณหนึ่ง มีความสม่ำเสมอและคงตัวตลอดทั่วทั้งเตาเผามากกว่า

การใช้อากาศส่วนเกิน 72 และ 140% ที่มีความเร็วอากาศต่ำและสูง ที่ขาดความคงตัวของอุณหภูมิภายในเตาเผา

สำหรับรูปที่ 5.6ก และ 5.6ข มีลักษณะเช่นเดียวกับรูปที่ 5.5ก และ 5.5ข คือแสดงคุณลักษณะของการกระจายอุณหภูมิตามแนวรัศมี r/R ตั้งแต่ 0.00-1.00 และตามแนวแกน x/D ตั้งแต่ 0.25-5.75 ตามลำดับ แต่เป็นกรณีของการเผาไหม้แก๊สที่อัตราป้อนแก๊ส 15 kg/hr (อัตราป้อนปานกลางของการทดลอง) และไม่ใช่อากาศทุติยภูมิ ($\lambda = 0$) เช่นเดียวกัน อากาศส่วนเกินที่ใช้คือ 37% (ความเร็วอากาศ 0.385 m/s, ความเร็วต่ำสุด), 56% (ความเร็วอากาศ 0.438 m/s, ความเร็วปานกลาง), 74% (ความเร็วอากาศ 0.489 m/s, ความเร็วปานกลาง) และ 92% (ความเร็วอากาศ 0.538 m/s, ความเร็วสูงสุด)



รูปที่ 5.6 การกระจายอุณหภูมิ อัตราป้อนแก๊ส (\dot{m}_h) = 15 kg/hr, ไม่ใช่อากาศทุติยภูมิ ($\lambda=0$) อากาศส่วนเกิน 37-92% (ก) ตามแนวรัศมี และ (ข) ตามแนวแกน

สิ่งที่เกิดขึ้นต่อลักษณะและพฤติกรรมของการกระจายอุณหภูมิทั้งตามแนวรัศมีและตามแนวแกนของอัตราป้อนแกลบ 15 kg/hr ในรูป 5.6ก และ 5.6ข ยังคงมีลักษณะคล้ายคลึงกับการกระจายอุณหภูมิของอัตราป้อนแกลบ 12 kg/hr ในรูป 5.5ก และ 5.5ข การกระจายอุณหภูมิตามแนวรัศมีเป็นเส้นโค้งตั้งแต่ r/R เท่ากับ 0.25-1.00 ในทุกๆ ระดับความสูง x/D ของเตาเผา อุณหภูมิสูงสุดอยู่ที่บริเวณ $r/R = 0.25-0.55$ หลังจากนั้นอุณหภูมิลดลงและต่ำสุดที่ผนังเตาที่ความสูง x/D ระดับเดียวกัน และ การกระจายอุณหภูมิตามแนวแกนให้อุณหภูมิสูงสุดของการเผาไหม้อยู่ในห้องเผาไหม้ชั้นแรก อุณหภูมิอาจเพิ่มขึ้นหรือลดลงตามความสูงของเตาเผาขึ้นอยู่กับอากาศส่วนเกินที่ถูกใช้ไปกับการเผาไหม้

ผลกระทบจากการใช้อากาศส่วนเกินยังคงส่งผลต่อลักษณะและพฤติกรรมต่างๆ ของการกระจายอุณหภูมิที่อัตราป้อนแกลบ 15 kg/hr เหมือนกันอย่างใกล้ชิดกับลักษณะและพฤติกรรมต่างๆ ของการกระจายอุณหภูมิที่อัตราป้อนแกลบ 12 kg/hr เช่นการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของระดับอุณหภูมิ อัตราการหลุดลอย เวลาที่จำเป็นสำหรับการเผาไหม้อุณหภูมิหรือสารระเหย อันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงอากาศส่วนเกิน ทั้งการกระจายอุณหภูมิตามแนวแกนและตามแนวรัศมี จากการวิเคราะห์ถึงผลของอัตราป้อน 12 kg/hr ได้กล่าวถึงสาเหตุ 2-3 ประการจากการเปลี่ยนแปลงอากาศส่วนเกิน คือ ความต้องการปริมาณอากาศส่วนเกินที่มากเกินไปในตอนเริ่มต้นของการเผาไหม้ และความเร็วของอากาศส่วนเกิน ต่อการกระจายอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ชั้นแรก และจากที่กล่าวมาข้างต้นว่ามีความเหมือนกันอย่างใกล้ชิดถึงลักษณะของการกระจายอุณหภูมิต่อการเปลี่ยนแปลงอากาศส่วนเกินภายในห้องเผาไหม้ชั้นแรกดังกล่าวคือ ในการใช้อากาศส่วนเกินความเร็วต่ำ ทำให้ได้อุณหภูมิการเผาไหม้ในห้องเผาไหม้ชั้นแรกสูง มีอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิสูงและรวดเร็ว แต่อุณหภูมิการเผาไหม้ยังคงกระจุกตัวสูงอยู่ในห้องเผาไหม้ชั้นแรกนี้ และยังคงมีความไม่คงตัวของอุณหภูมิอยู่เมื่อเปรียบเทียบการกระจายอุณหภูมิตลอดความสูงของเตา นอกจากนั้นระดับอุณหภูมียังคงลดลงตามการเพิ่มขึ้นของอากาศส่วนเกิน หากแต่ภายในความเหมือนนี้ ยังคงมีความแตกต่างในบางประการคือ การกระจายอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ชั้นแรกมีความคงตัวมากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับอัตราป้อน 12 kg/hr เชื้อเพลิงถูกเพิ่มขึ้นอีก 0.5 kg/hr มีปริมาณของเชื้อเพลิงมากขึ้น จึงมีความหนาแน่นของอนุภาคแกลบสูง มีการผสมกันอย่างเข้มข้นมากยิ่งขึ้นระหว่างเชื้อเพลิงแกลบและอากาศ อัตราการเผาไหม้อุณหภูมิและสารระเหยในปริมาณสูงกว่า ระดับอุณหภูมิจึงสูงขึ้นกว่ามาก สำหรับลักษณะการกระจายตัวภายในห้องเผาไหม้ชั้นที่สองมีความปั่นป่วนน้อยมากและมีความคงตัวสูงมากกว่าการกระจายอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ชั้นแรก พิจารณาการทดลองของการใช้อากาศส่วนเกินตั้งแต่ 37-92% พบว่า การทดลองที่อากาศส่วนเกินความเร็วต่ำ 37% ให้อุณหภูมิสูงที่สุดอยู่ในห้องเผาไหม้ชั้นแรก ประมาณ 1000°C ที่ความสูง $x/D = 1.75$, $r/R = 0.40$ เมื่อเปรียบเทียบกรณีของอากาศส่วนเกินความเร็วต่ำ 37% และอากาศส่วนเกินความเร็วสูงที่ 92% พบว่ามีความแตกต่างกันอย่างมากของระดับอุณหภูมิในห้องเผาไหม้ชั้นแรก

เมื่อมองภาพรวมถึงลักษณะการกระจายตามอุณหภูมิตามแนวแกนตลอดความสูงของเตา ตั้งแต่ห้องเผาไหม้ชั้นแรกที่ความสูง $x/D = 0.25$ ถึงห้องเผาไหม้ชั้นที่สองที่ความสูง $x/D = 5.75$ การกระจายอุณหภูมิของการใช้อากาศส่วนเกิน 37 และ 56% นั้นลดต่ำลงตามความสูง x/D ของเตาในทุกๆ r/R เนื่องจากมีอัตราการเผาไหม้ที่ดีกว่าการใช้อากาศส่วนเกิน 74 และ 92% ในห้องเผาไหม้ชั้นแรก สำหรับการเผาไหม้โดยใช้อากาศส่วนเกิน 74 และ 92% ยังคงมีการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากยังมีเชื้อเพลิงบางส่วนที่ยังไม่ถูกเผาไหม้เนื่องจากการใช้ความเร็วของอากาศที่สูงเกินไป

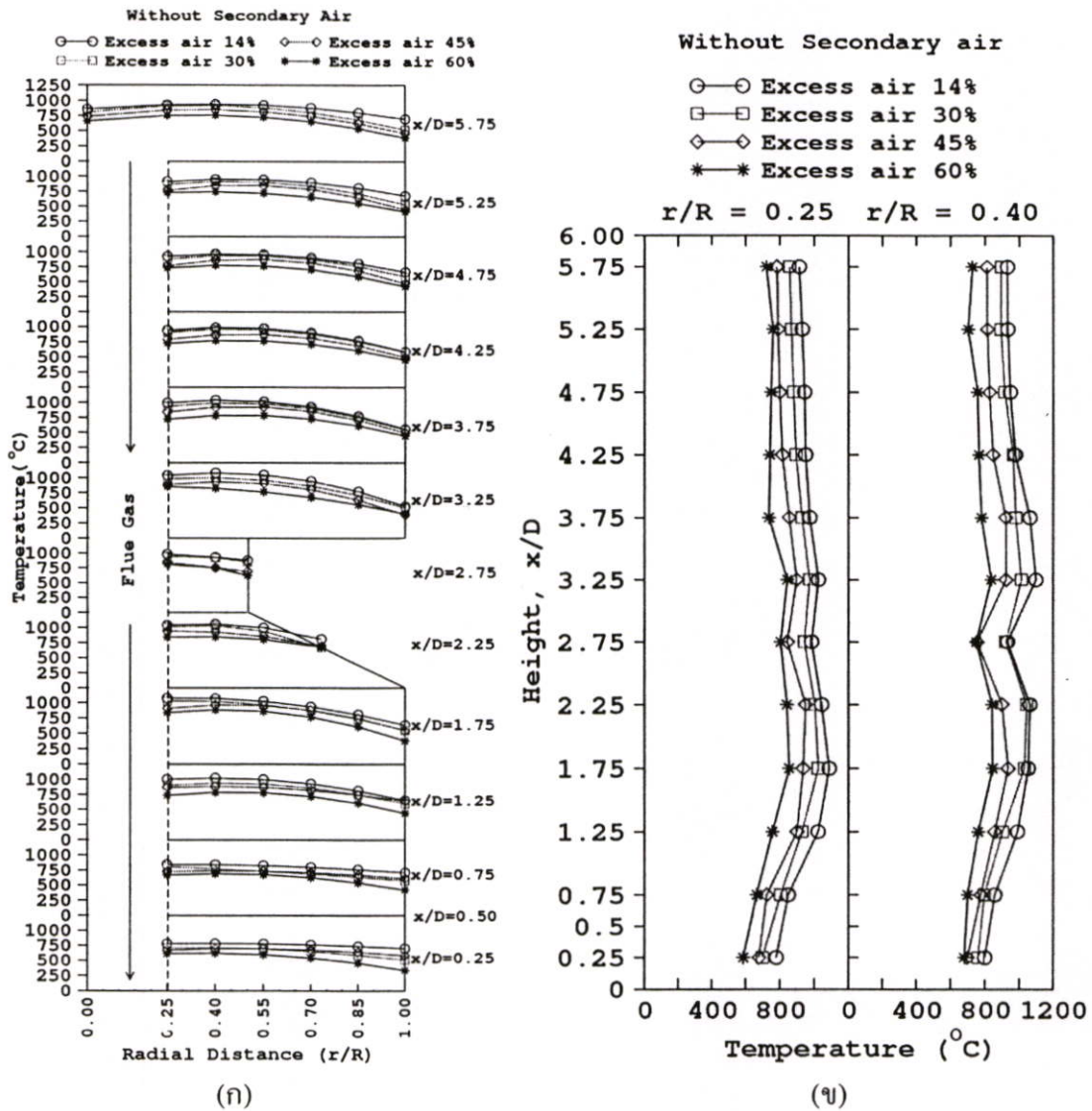
เมื่อสรุปโดยรวมถึงความเหมาะสมของการกระจายอุณหภูมิของอัตราป้อนแกลบ 15 kg/hr ไม่ใช้อากาศทุติยภูมิ ($\lambda=0$) และใช้อากาศส่วนเกิน 37-92% นี้แล้ว พบว่า การใช้อากาศส่วนเกินที่มีความเร็วปานกลาง ยังคงให้ผลที่ดีในแง่ของความคงตัวของการกระจายอุณหภูมิตลอดความสูงเตาเผามากกว่าการใช้อากาศส่วนเกิน 37 และ 92% ที่มีความเร็วอากาศต่ำและสูง ที่ขาดความคงตัวของอุณหภูมิภายในเตาเผาเช่นเดียวกับอัตราป้อนแกลบ 12 kg/hr ไม่ใช้อากาศทุติยภูมิ ($\lambda=0$)

สำหรับรูปที่ 5.7ก และ 5.7ข แสดงการกระจายอุณหภูมิตามแนวรัศมีและตามแนวแกนตามลำดับ กรณีของการเผาไหม้แกลบที่อัตราป้อนแกลบ 18 kg/hr (อัตราป้อนสูงสุดของการทดลอง) และไม่ใช้อากาศทุติยภูมิ ($\lambda = 0$) อากาศส่วนเกินที่ใช้คือ 14% (ความเร็วอากาศ 0.385 m/s, ความเร็วต่ำสุด), 30 % (ความเร็วอากาศ 0.438 m/s, ความเร็วปานกลาง), 45% (ความเร็วอากาศ 0.489 m/s, ความเร็วปานกลาง) และ 60% (ความเร็วอากาศ 0.538 m/s, ความเร็วสูงสุด)

เมื่อเปรียบเทียบการทดลองนี้กับการทดลองโดยใช้อัตราป้อนแกลบ 12, 15 kg/hr และไม่ใช้อากาศทุติยภูมิ ($\lambda = 0$) พบว่าหากใช้อากาศส่วนเกินที่ต่ำกว่าอากาศส่วนเกินความเร็วต่ำ 14% แล้ว เกิดการจับตัวกันเป็นก้อนอยู่ภายในห้องเผาไหม้ชั้นแรกได้ง่ายและรวดเร็วที่สุด แต่สามารถเพิ่มปริมาณและความเร็วอากาศได้มากขึ้น เปลวไฟจึงเริ่มขาดความเสถียร

สำหรับการทดลองในเงื่อนไขนี้ อัตราป้อนแกลบถูกเพิ่มขึ้นเป็น 18 kg/hr มีเปอร์เซ็นต์เชื้อเพลิงสูงขึ้น มีความหนาแน่นของเชื้อเพลิงสูง ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างช้าๆ ในของไหลปฏิกิริยาการเผาไหม้เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วจากห้องเผาไหม้ชั้นแรก ในทุกๆการใช้อากาศส่วนเกินระดับอุณหภูมิสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับ 2 กรณีที่ผ่านมาก่อนหน้านี้ ที่ความเร็วอากาศเดียวกัน แต่ถ้ามีความหนาแน่นของอนุภาคที่มากเกินไป อาจทำให้ยากต่อการควบคุมให้เกิดการเผาไหม้ที่ดี ซึ่งเห็นได้จาก อุณหภูมิสูงสุดของการเผาไหม้เกินกว่า 1000°C ที่การใช้อากาศส่วนเกิน 14% นอกจากนี้ที่การใช้อากาศส่วนเกิน 30% ยังให้อุณหภูมิสูงเกินกว่า 1000°C เนื่องจากที่อากาศส่วนเกินทั้ง 2 ค่านี้มีความหนาแน่นของอนุภาคที่มากเกินไป ถึงแม้ว่าสามารถให้อุณหภูมิที่สูงก็ตาม แต่ทำให้ยากต่อการควบคุมอุณหภูมิการเผาไหม้ เกิดความเสียหายเป็นอย่างมาก เนื่องจากว่า

งานวิจัยนี้พยายามควบคุมการเผาไหม้ไม่ให้มีอุณหภูมิสูงเกินกว่า 1000°C เพราะไม่ต้องการให้เกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์ และอายุการใช้งานของเตาเผา อีกทั้งปริมาณ NO_x ที่จะเกิดขึ้นสูงตามมา



รูปที่ 5.7 การกระจายอุณหภูมิ อัตราป้อนแกลบ (\dot{m}_h) = 18 kg/hr, ไม่ใช้อากาศทุติยภูมิ ($\lambda = 0$)

อากาศส่วนเกิน 14-60% (ก) ตามแนวรัศมี และ (ข) ตามแนวแกน

เมื่อมองภาพรวมถึงลักษณะการกระจายตามอุณหภูมิตามแนวแกนตลอดความสูงของเตา ตั้งแต่ห้องเผาไหม้ชั้นแรกที่ความสูง $x/D = 0.25$ ถึงห้องเผาไหม้ชั้นที่สองที่ความสูง $x/D = 5.75$ ในทุกๆการใช้อากาศส่วนเกินปฏิกิริยาการเผาไหม้เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วจากห้องเผาไหม้ชั้นแรก ทำให้การกระจายอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ชั้นแรกมีความคงตัวสูงและสูงมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับ การทดลองโดยใช้อัตราป้อนแกลบ 12, 15 kg/hr และไม่ใช้อากาศทุติยภูมิ ($\lambda = 0$) ส่วนอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ชั้นที่สองยังคงให้ความเสถียรอยู่เช่นเดียวกัน

เมื่อสรุปโดยรวมถึงความเหมาะสมของการกระจายอุณหภูมิของอัตราป้อนแกลบ 18 kg/hr ไม่ใช้อากาศหุติยภูมิ ($\lambda=0$) และใช้อากาศส่วนเกิน 14-60% นี้แล้ว พบว่า การใช้อากาศส่วนเกิน 60% (ความเร็วอากาศสูง) และอากาศส่วนเกิน 45%(ความเร็วอากาศปานกลาง) มีความคงตัวของ การกระจายอุณหภูมิตลอดความสูงของเตาเผาสูง และถึงแม้ว่าที่การใช้อากาศส่วนเกิน 14% (ความเร็วอากาศต่ำ) และ 30% (ความเร็วอากาศปานกลาง) ที่ค่อนข้างให้ความคงตัวหรือความ สม่ำเสมอเช่นเดียวกับการใช้อากาศส่วนเกิน 45 และ 60% ก็ตามที แต่การใช้อากาศส่วนเกินที่ 46 และ 60% ให้อุณหภูมิที่สูงเกินไปและยากต่อการควบคุมตามที่ได้กล่าวมาแล้วจากข้างต้น

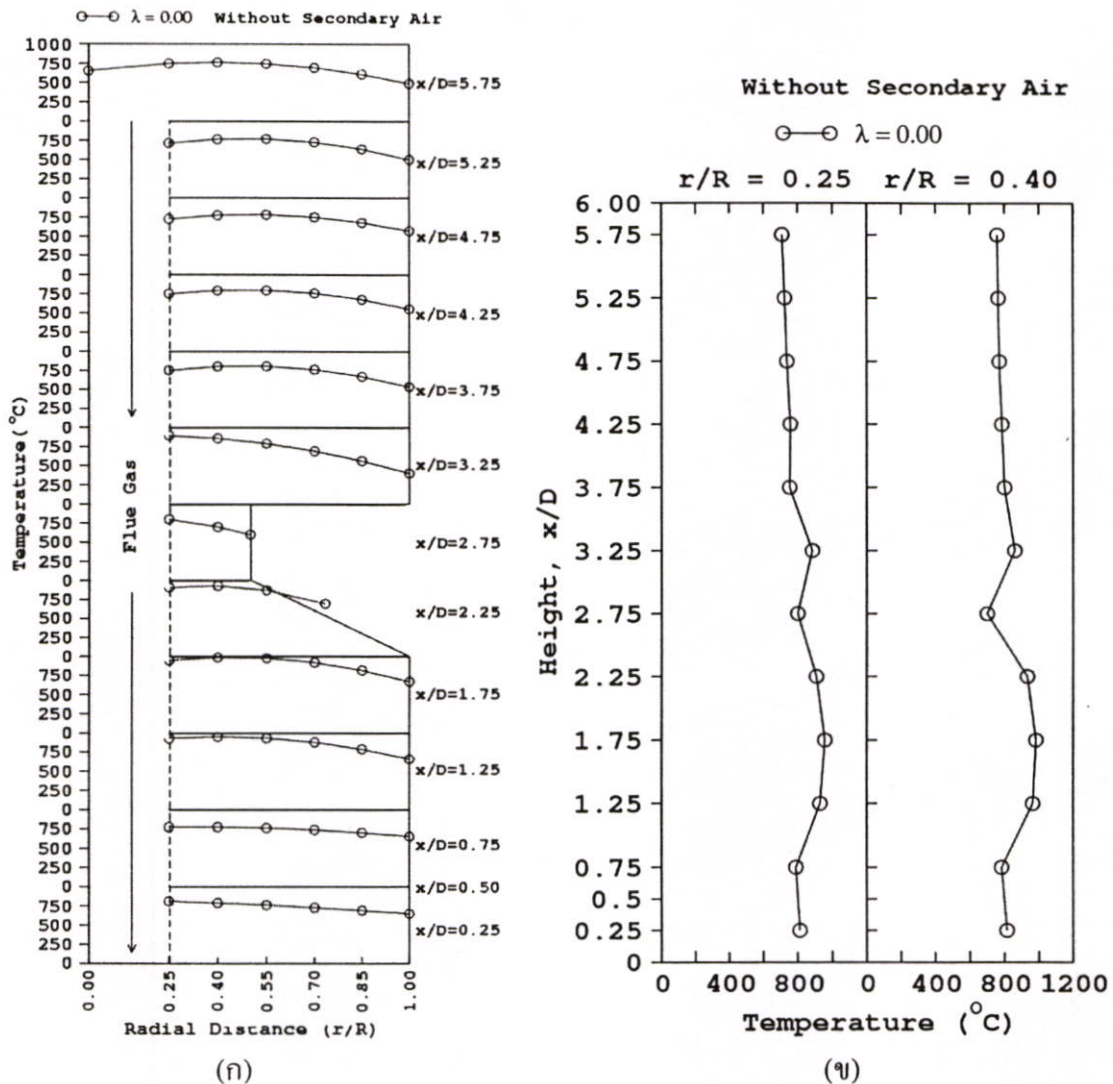
เมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองทั้ง 3 กรณีที่ผ่านมา คือ การใช้อัตราป้อนแกลบ 12, 15 และ 18 kg/hr ทั้ง 3 อัตราป้อนแกลบนี้ ไม่ใช้อากาศหุติยภูมิ ($\lambda=0$) และเปลี่ยนแปลงอากาศส่วนเกิน ต่างๆกัน อิทธิพลจากอากาศส่วนเกิน นอกจากจะมีผลในแง่ของการเปลี่ยนแปลงระดับอุณหภูมิใน ห้องเผาไหม้ ยังมีผลที่เด่นชัดต่อความเสถียรและความสม่ำเสมอของเปลวไฟภายในห้องเผาไหม้

5.1.3 อิทธิพลจากอากาศหุติยภูมิ (λ)

จากหัวข้อ 5.1.2 เป็นการรายงานผลกระทบและพฤติกรรมดังกล่าวต่อ การกระจายอุณหภูมิ อันเนื่องมาจากอิทธิพลจากอากาศส่วนเกิน ที่อัตราป้อนต่างกัน และไม่ใช้อากาศหุติยภูมิ เช่น การ กระจายอนุภาคตามแนวรัศมีและตามแนวแกนที่ให้ลักษณะของการกระจายอุณหภูมิที่ดี นอกจากนี้ ยังมี ข้อจำกัดหรือขีดจำกัดของการใช้อากาศส่วนเกิน ที่ก่อให้เกิดความไม่เสถียรของเปลวไฟ การ เพิ่มอากาศส่วนเกินเพียงเล็กน้อยจากช่วงดังกล่าวทำให้เปลวไฟถูกเป่าดับ ดังนั้นในหัวข้อ 5.1.3 นี้ จึงเป็นการรายงานให้เห็นชัดแจ้งว่า ผลกระทบและการปรับปรุงการเผาไหม้จากอิทธิพลของอากาศ หุติยภูมิมีผลต่อการกระจายอุณหภูมิที่ดีขึ้นอย่างไร

เริ่มต้นพิจารณารูปที่ 5.8ก และ 5.8ข เป็นการแสดงกระจายอุณหภูมิ อัตราป้อนแกลบ (m_h)=15 kg/hr, อากาศส่วนเกิน 37% ไม่ใช้อากาศหุติยภูมิ($\lambda=0.00$) ทั้งตามแนวรัศมีและตาม แนวแกน เป็นรูปแรก พบว่า ผลการทดลองในรูปที่ 5.8 นี้ เป็นกรณีเดียวกับการไม่ใช้อากาศหุติยภูมิ ที่อัตราป้อนแกลบและอากาศส่วนเกินเดียวกัน ที่ถูกอธิบายไว้ในหัวข้อ 5.1.2 รูปที่ 5.6ก และ 5.6ข ว่าการใช้อากาศส่วนเกิน 37%(อากาศความเร็วต่ำ) เป็นกรณีการใช้อากาศส่วนเกินต่ำที่สุดที่สามารถ ทดลองได้อย่างต่อเนื่อง ไม่สามารถปรับอากาศส่วนเกินต่ำกว่า 37% เนื่องจากทำให้ความเร็วของ อากาศไม่เพียงพอในการพาให้อนุภาคออกไปจากห้องเผาไหม้ได้ดีพอ และมีปริมาณอากาศ ส่วนเกินที่น้อยเกินไปจึงมีอัตราการเผาไหม้ต่ำ ถ้าจับตัวกันเป็นก้อนที่มีลักษณะเหมือนก้อนเค้กอยู่ ภายในห้องเผาไหม้ชั้นแรก การเผาไหม้โดยใช้อากาศหุติยภูมิ การเผาไหม้ที่การทดลองตามเงื่อนไข นี้ไม่สามารถประยุกต์การใช้อากาศหุติยภูมิในการเผาไหม้ได้ เพราะการใช้อากาศหุติยภูมิตาม สมการที่ 3.18 จำเป็นต้องแบ่งอากาศปฐมภูมิส่วนหนึ่งเป็นอากาศหุติยภูมิ ที่การใช้อากาศส่วนเกิน 37%นี้ไม่สามารถแบ่งอากาศปฐมภูมิให้เป็นอากาศหุติยภูมิได้ เพราะจะทำให้อากาศปฐมภูมิมี

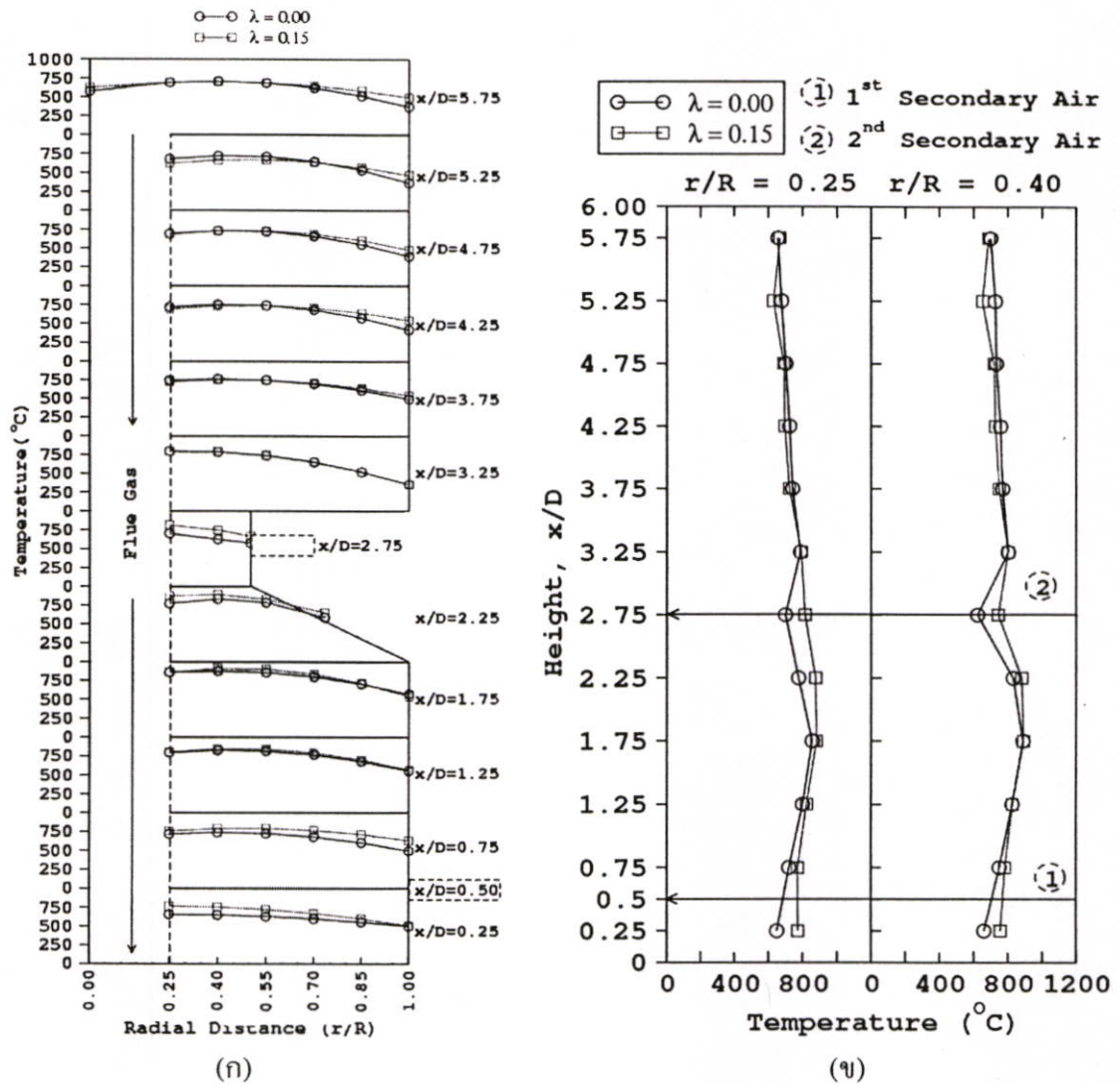
ความเร็วต่ำกว่าความเร็วต่ำสุดที่จะทำการทดลองได้ แล้วจะส่งผลต่อความไม่เสถียรของเปลวไฟ และเกิดพฤติกรรมต่างๆตามที่ได้กล่าวมา



รูปที่ 5.8 การกระจายอุณหภูมิ อัตราป้อนแก๊ส(\dot{m}_g)=15 kg/hr, อากาศส่วนเกิน 37% อากาศทุติยภูมิ($\lambda=0.00$) (ก) ตามแนวรัศมี และ (ข) ตามแนวแกน

พิจารณารูปที่ 5.9ก และ 5.9ข เป็นการแสดงกระจายอุณหภูมิเพื่อศึกษาถึงอิทธิพลจากอากาศทุติยภูมิ ใช้อัตราป้อนแก๊ส (\dot{m}_g)=15 kg/hr, อากาศส่วนเกิน 56% ทั้งตามแนวรัศมีและตามแนวแกน อากาศปฐมภูมิทำหน้าที่เป็นตัวพาอนุภาคของเชื้อเพลิงเข้ายังห้องเผาไหม้ แล้วพองอนุภาคของเชื้อเพลิงขึ้นสู่ด้านบนห้องเผาไหม้ ขณะที่เชื้อเพลิงและอากาศผสมกันและส่งตัวขึ้นสู่ด้านบน อากาศทุติยภูมิถูกนำเข้ามาในแนวสัมผัสกับผนังของเตาที่ความสูง $x/D = 0.5$ และ 2.75 ตามลำดับ พบว่า ลักษณะของการกระจายอุณหภูมิตามแนวรัศมีในรูป 5.9ก การกระจายอุณหภูมิในห้องเผาไหม้ชั้นแรกเริ่มต้นจากการเผาไหม้แก๊สที่ความสูง $x/D = 0.25-1.75$ อุณหภูมิสูงสุดของการเผาไหม้ที่ความสูง $x/D = 0.25-1.75$ นี้ อยู่ที่บริเวณ $r/R = 0.25-0.55$ หลังจากนั้นอุณหภูมิจะลดลงตามแนวรัศมีและต่ำสุดตรงผนังเตาที่ความสูง x/D ระดับเดียวกัน การใช้อากาศทุติยภูมิ 15% ($\lambda=0.15$)

ให้อุณหภูมิสูงกว่า การไม่ใช้อากาศทุติยภูมิ ($\lambda=0.00$) เล็กน้อย ทั้งในห้องเผาไหม้ชั้นแรกนี้และห้องเผาไหม้ชั้นที่สอง



รูปที่ 5.9 การกระจายอุณหภูมิ อัตราป้อนแก๊ส(\dot{m}_h)=15 kg/hr, อากาศส่วนเกิน 56% อากาศทุติยภูมิ($\lambda=0.00-0.15$) (ก) ตามแนวรัศมี และ (ข) ตามแนวแกน

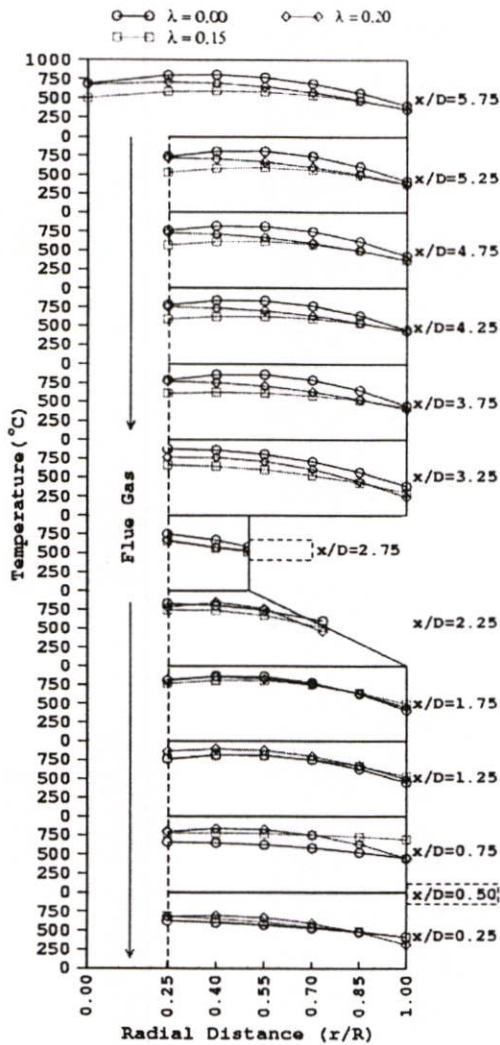
ลักษณะของการกระจายอุณหภูมิตามแนวแกนในรูป 5.9ข เป็นสิ่งที่อธิบายถึงลักษณะของการกระจายอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ทั้งสองส่วนได้เป็นอย่างดี ความสูง x/D ตั้งแต่ 0.00 - 1.75 พบว่าทั้งกรณีของ $\lambda=0.00$ และ $\lambda=0.15$ มีการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิอย่างรวดเร็ว เนื่องจากการผสมกันอย่างเข้มข้นระหว่างเชื้อเพลิงและอากาศ ให้อัตราการเผาไหม้ที่สูงตั้งแต่เริ่มต้นของการเผาไหม้ และสังเกตว่าที่ความสูงเดียวกันนี้ การใช้ $\lambda=0.15$ ให้อุณหภูมิสูงกว่า $\lambda=0.00$ ซึ่งอาจมีสาเหตุอยู่ 2-3 ประการคือ การฉีดอากาศทุติยภูมิที่ตำแหน่ง $x/D = 0.5$ และ 2.75 ส่งผลให้ ประการแรก มีการสร้างการหมุนวนของอากาศมากขึ้น ประการที่สอง เป็นการสร้างชั้นของอนุภาคที่กำลังถูกเผาไหม้หรือ Suspension layer ประการที่สาม การใช้ $\lambda=0.15$ เป็นการลดความเร็วและปริมาณของอากาศปฐมภูมิให้ต่ำลง ซึ่งทั้ง 3 ประการนี้ ทำให้ อนุภาคหรือสารระเหยมีเวลามากในการหมุนวนและถูกเผาไหม้ มี

- การผสมกันระหว่างเกลบและอากาศอย่างเข้มข้น ลดการหลุดลอยของอนุภาค ความหนาแน่นของอนุภาคเกลบสูง เชื้อเพลิงอยู่ในห้องเผาไหม้ชั้นแรกได้นาน การเผาไหม้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น กรณี $\lambda=0.15$ ให้อุณหภูมิสูงสุดของการเผาไหม้ อยู่ที่ความสูง $x/D = 1.75$ ที่ $r/R = 0.55$ มีค่าประมาณ 900°C และกรณีของ $\lambda=0.15$ นี้ยังให้อุณหภูมิที่มีความคงตัวและความเสถียรสูงในห้องเผาไหม้ชั้นแรกมากกว่ากรณี $\lambda=0.00$ หลังจากความสูง $x/D = 2.25$ คือความสูง $x/D = 2.75$ เป็นคอคอดที่มีการฉีดอากาศทุติยภูมิ อุณหภูมิการเผาไหม้ลดลงเนื่องจากอนุภาควิเวณนี้ถูกเร่งจึงมีเวลาน้อยในการหมุนวนในบริเวณนี้ และนอกจากอนุภาคถูกเร่งแล้ว อุณหภูมิที่ลดลงมียังมีสาเหตุมาจากความเย็นของอากาศทุติยภูมิเองทำให้อุณหภูมิการเผาไหม้ลดลง หลังจากนั้นที่ความสูง x/D เท่ากับ 3.25 อุณหภูมิการเผาไหม้ก็กลับมาสูงขึ้นอีกครั้ง ซึ่งมีสาเหตุจาก การหมุนวนของเชื้อเพลิงเกลบในกระแสอากาศเหนือห้องเผาไหม้ที่ขยายพื้นที่หน้าตัดออกอย่างทันทีทันใด หลังจากนั้นจะมีการลดลงของการกระจายอนุภาคตามแนวแกนอุณหภูมิการเผาไหม้ลดลงตามแนวแกนอย่างช้าๆ ส่งผลให้อุณหภูมิการเผาไหม้ภายในห้องเผาไหม้ชั้นที่สองมีความคงตัวสูงมาก

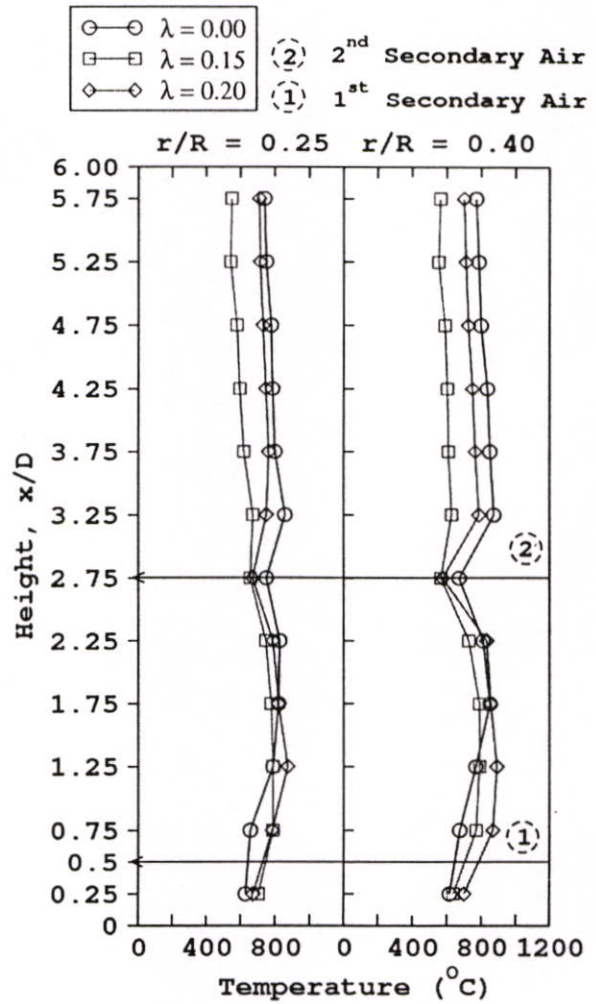
การใช้อากาศทุติยภูมิ $\lambda=0.15$ นี้ ได้ปรับปรุงการเผาไหม้ ให้ลักษณะการเผาไหม้ที่ดี ระดับอุณหภูมิสูงตั้งแต่ตอนเริ่มต้นของการเผาไหม้ นอกจากไม่เกิดการกระจุกตัวสูงของอุณหภูมิแล้ว ยังมีการกระจายตัวของอุณหภูมิที่สม่ำเสมอ ทั้งในห้องเผาไหม้ชั้นแรกและห้องเผาไหม้ชั้นที่สองหรือตลอดความสูงของเตาเผา อุณหภูมิการเผาไหม้ตามแนวแกนมีความคงตัวและความเสถียรมากกว่ากรณีของ $\lambda=0.00$

พิจารณารูปที่ 5.10ก และ 5.10ข เป็นการแสดงกระจายอุณหภูมิตามแนวรัศมีและตามแนวแกนตามลำดับ อัตราป้อนเกลบ ($m_{g,0}$) = 15 kg/hr, อากาศส่วนเกิน 74% เปรียบเทียบเมื่อไม่ใช้อากาศทุติยภูมิ ($\lambda=0.00$) และใช้อากาศทุติยภูมิ 15-20% ($\lambda=0.15-20$)

ผลจากการใช้อากาศทุติยภูมิทั้ง $\lambda=0.15$ และ $\lambda=0.20$ ต่อการกระจายอุณหภูมิที่อากาศส่วนเกิน 74% พบว่าให้อัตราการเผาไหม้ที่สูงตั้งแต่เริ่มต้นของการเผาไหม้ เช่นเดียวกับรูปที่ 5.9ก และ 5.9ข กรณีของ $\lambda=0.15$ และ $\lambda=0.20$ ที่ให้อุณหภูมิสูงตั้งแต่ความสูง x/D ดังกล่าว แสดงถึงอัตราการเผาไหม้เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว อันเนื่องจากการใช้อากาศทุติยภูมิ ที่ทำให้ความเร็วและปริมาณของอากาศปฐมภูมิลดต่ำลงอยู่ในระดับที่เหมาะสมต่อการเผาไหม้ เชื้อเพลิงอยู่ในห้องเผาไหม้ชั้นแรกได้นาน มีการสร้างการหมุนวนของอากาศอนุภาคหรือสารระเหยมีเวลามากในการหมุนวนและถูกเผาไหม้มากขึ้น เกิดชั้นของอนุภาค (Suspension layer) ทำให้ ความหนาแน่นของอนุภาคเกลบสูง ลดการหลุดลอยของอนุภาค มีการผสมกันระหว่างเกลบและอากาศอย่างเข้มข้น การเผาไหม้มีความสมบูรณ์กว่า ซึ่งแตกต่างกับการไม่ใช้อากาศทุติยภูมิ($\lambda=0.00$) พบว่า อัตราการเผาไหม้เริ่มต้นอย่างช้าๆที่ความสูง x/D เท่ากับ 0.25 ในห้องเผาไหม้ชั้นแรก การเผาไหม้โดยใช้ $\lambda=0.15$ และ $\lambda=0.20$ นี้ให้ความคงตัวและมีความเสถียรตลอดความสูงของเตาเผามากกว่ากรณี $\lambda=0.0$



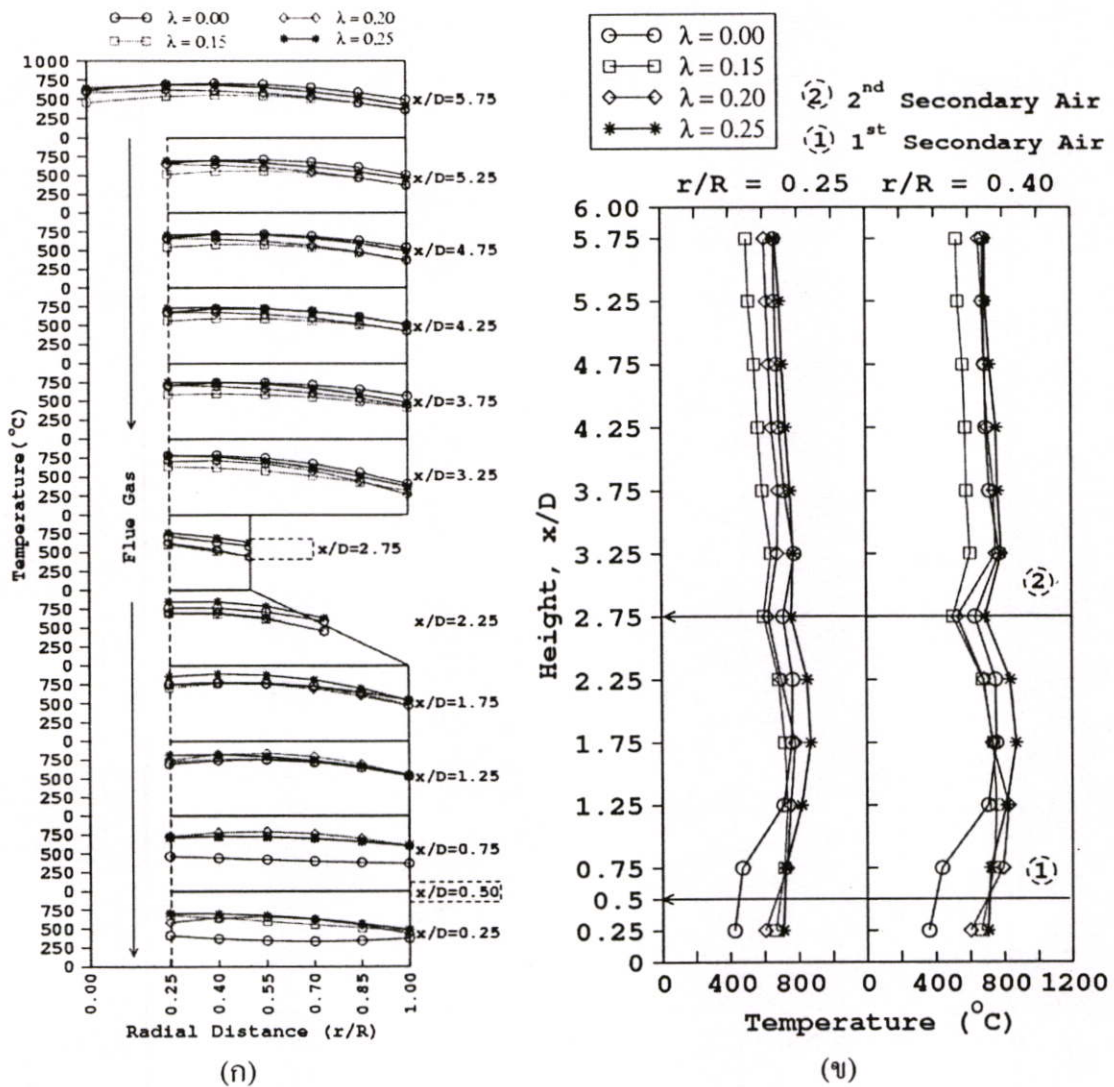
(ก)



(ข)

รูปที่ 5.10 การกระจายอุณหภูมิ อัตราป้อนแกลบ(\dot{m}_h)=15 kg/hr, อากาศส่วนเกิน 74% อากาศทุติยภูมิ($\lambda=0.00-0.20$) (ก) ตามแนวรัศมี และ (ข) ตามแนวแกน

สำหรับหัวข้อ 5.1.3 ที่กำลังรายงานผลการทดลองนี้ พบว่า การใช้อากาศทุติยภูมิเพื่อปรับปรุงการเผาไหม้อยู่ในปริมาณที่จำกัดในแต่ละอากาศส่วนเกิน เริ่มต้นจากรูปที่ 5.8 เป็นการใช้อากาศส่วนเกิน 37% และไม่สามารถใช้อากาศทุติยภูมิได้ รูปที่ 5.9 อากาศส่วนเกินที่ใช้คือ 56% อากาศทุติยภูมิตั้งแต่ 0-15% รูปที่ 5.10 อากาศส่วนเกินที่ใช้คือ 74% อากาศทุติยภูมิตั้งแต่ 0-20% และที่รูปที่ 5.11 นี้ อากาศส่วนเกินที่ใช้คือ 92% สามารถใช้อากาศทุติยภูมิตั้งแต่ 0-25% ทำให้มีข้อสังเกตถึงการใช้อากาศทุติยภูมิกับการใช้อากาศส่วนเกินคือ สามารถเพิ่มสัดส่วนของอากาศทุติยภูมิได้มากขึ้นเมื่อใช้อากาศส่วนเกินที่สูงขึ้น แต่ทั้งนี้ในแต่ละการใช้อากาศส่วนเกินก็สามารถใช้อากาศส่วนเกินอยู่ในช่วงจำกัดเช่นเดียวกัน

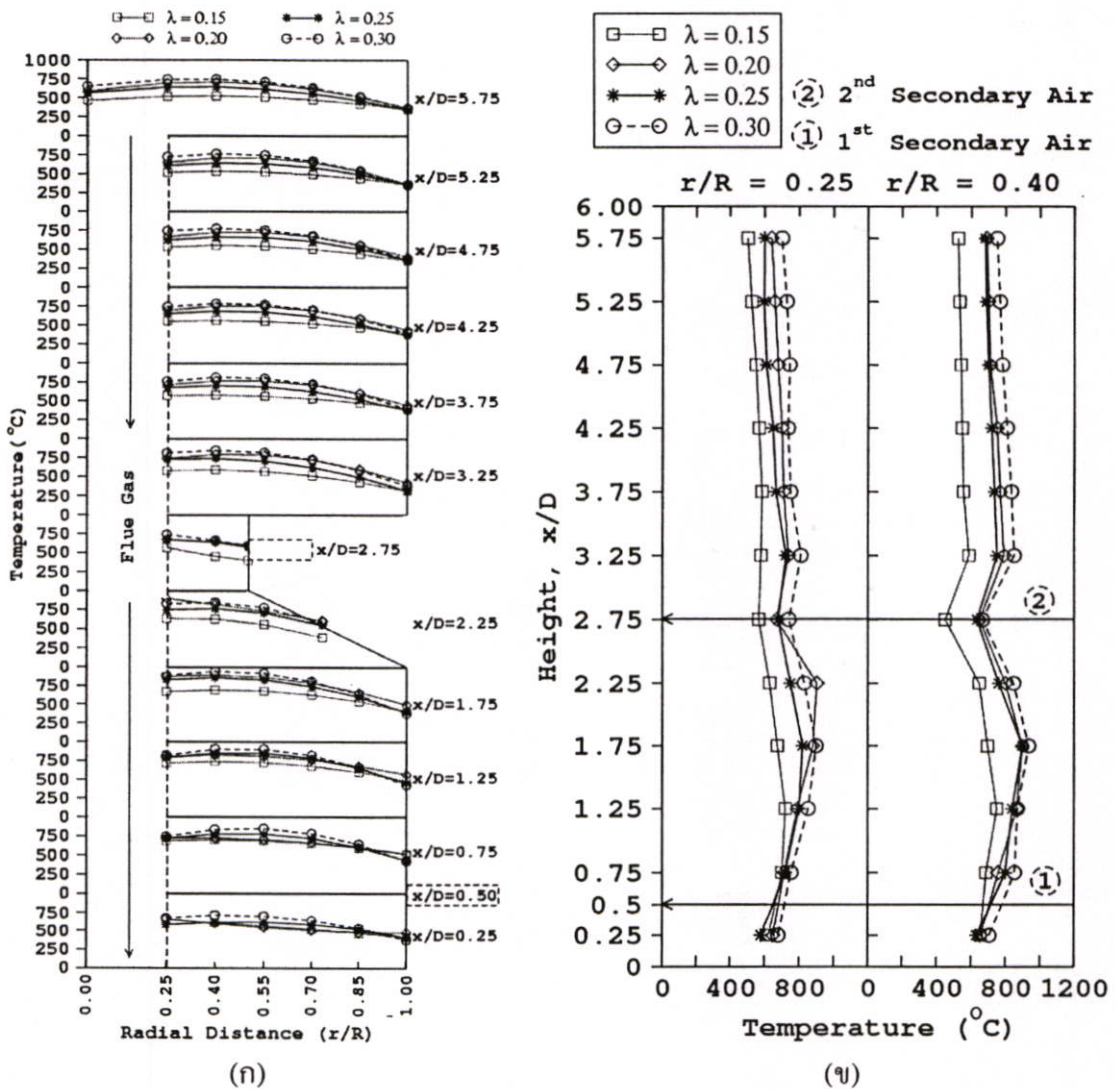


รูปที่ 5.11 การกระจายอุณหภูมิ อัตราป้อนแกลบ (\dot{m}_h)=15 kg/hr, อากาศส่วนเกิน 92%
อากาศทุติยภูมิ ($\lambda=0.00-0.25$) (ก) ตามแนวรัศมี และ (ข) ตามแนวแกน

ยกตัวอย่างเช่น รูปที่ 5.11 อากาศส่วนเกินที่ใช้คือ 92% สามารถใช้อากาศทุติยภูมิได้ถึง 25% ($\lambda=0.25$) และไม่สามารถเพิ่มอากาศทุติยภูมิให้สูงกว่า 25% ได้ เนื่องจาก นิยามของอากาศทุติยภูมิ คือการแบ่งปริมาณอากาศปฐมภูมิออกไปเป็นอากาศทุติยภูมิ และการแบ่งอากาศทุติยภูมินี้ต้องไม่ลดปริมาณอากาศปฐมภูมิให้ต่ำกว่าปริมาณอากาศปฐมภูมิที่ต่ำที่สุดที่สามารถทำการทดลองได้ เนื่องจากทำให้ปริมาณและความเร็วอากาศซึ่งยังคงเป็นสิ่งจำเป็นหลักต่อการเผาไหม้ไม่เพียงพอต่อการเผาไหม้ ซึ่งต้องไม่ลืมว่าการนำอากาศทุติยภูมิเข้าไปสู่ระบบนั้นกระทำเพียงเพื่อเป็นการเสริมหรือปรับปรุงการเผาไหม้ให้ดีขึ้นเท่านั้น ทั้งนี้การเพิ่มอากาศทุติยภูมิให้สูงขึ้นไม่เป็นผลดีเสมอไป การใช้อากาศทุติยภูมิในปริมาณสูงๆอาจทำให้เชื้อเพลิงมีอัตราการหลุดลอยที่ง่ายขึ้น ไม่ส่งผลดีต่อประสิทธิภาพแต่ประการใด

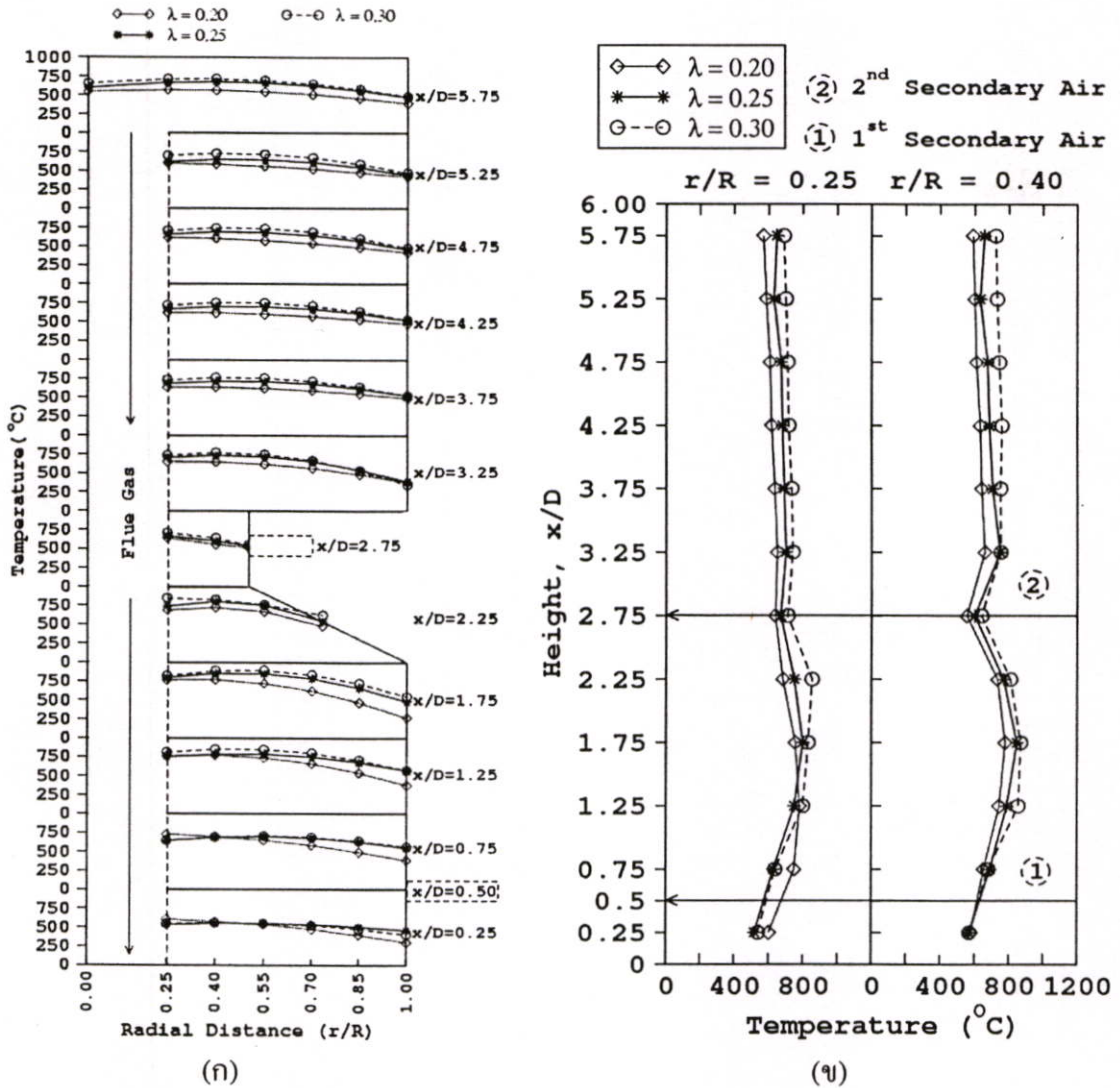
พิจารณารูปที่ 5.11ก และ 5.11ข เป็นการแสดงกระจายอุณหภูมิตามแนวรัศมีและตามแนวแกนตามลำดับ อัตราป้อนแกลบ (\dot{m}_h)=15 kg/hr, อากาศส่วนเกิน 92% เปรียบเทียบเมื่อไม่ใช้

อากาศทุติยภูมิ($\lambda=0.00$) และใช้อากาศทุติยภูมิ 15-25%($\lambda=0.15 -0.25$) พบว่า การใช้อากาศทุติยภูมิ ยังคงให้ความสม่ำเสมอภายในห้องเผาไหม้ชั้นแรกมากกว่าการไม่ใช้อากาศทุติยภูมิมาก สำหรับ อุณหภูมิการเผาไหม้ในห้องเผาไหม้ชั้นที่สองให้ความสม่ำเสมอในทุกกรณีทั้งการใช้และไม่ใช้อากาศทุติยภูมิ แต่มีข้อสังเกตบางประการเกี่ยวกับการใช้อากาศทุติยภูมิในห้องเผาไหม้ชั้นที่สองนี้ สังเกตว่าการใช้ $\lambda=0.15$ ให้อุณหภูมิการเผาไหม้ต่ำที่สุด และมีแนวโน้มลดลงตามความแนวแกน ตั้งแต่ห้องเผาไหม้เผาไหม้ปฐมภูมิจนถึงห้องเผาไหม้ชั้นที่สองนี้ อาจเป็นเพราะการเผาไหม้โดยใช้ $\lambda=0.15$ นี้มีความเร็วสำหรับการเผาไหม้ที่ไม่สูงเกินไปเชื้อเพลิงมีอัตราการหลุดลอยต่ำ เมื่อใช้อากาศทุติยภูมิเกินกว่า15% อาจทำให้เชื้อเพลิงหลุดลอยในห้องเผาไหม้ชั้นแรกค่อนข้างสูงและถูกเผาไหม้ได้ดีกว่าในห้องเผาไหม้ทุติยภูมิ การกระจายอุณหภูมิรูปที่ 5.11ก และ 5.11ข คล้ายคลึงกับรูปที่ 5.10ก และ 5.10ข ที่ผ่านมา คือเมื่อใช้อากาศทุติยภูมิมากกว่า 15% ได้อุณหภูมิในห้องเผาไหม้ชั้นที่สองต่ำที่สุดและสาเหตุอาจเกิดจากพฤติกรรมการใช้อากาศทุติยภูมิที่สูงเกินไป



รูปที่ 5.12 การกระจายอุณหภูมิ อัตราป้อนแกลบ(\dot{m}_h)=15 kg/hr, อากาศส่วนเกิน 109% อากาศทุติยภูมิ($\lambda=0.15 -0.30$) (ก) ตามแนวรัศมี และ (ข) ตามแนวแกน

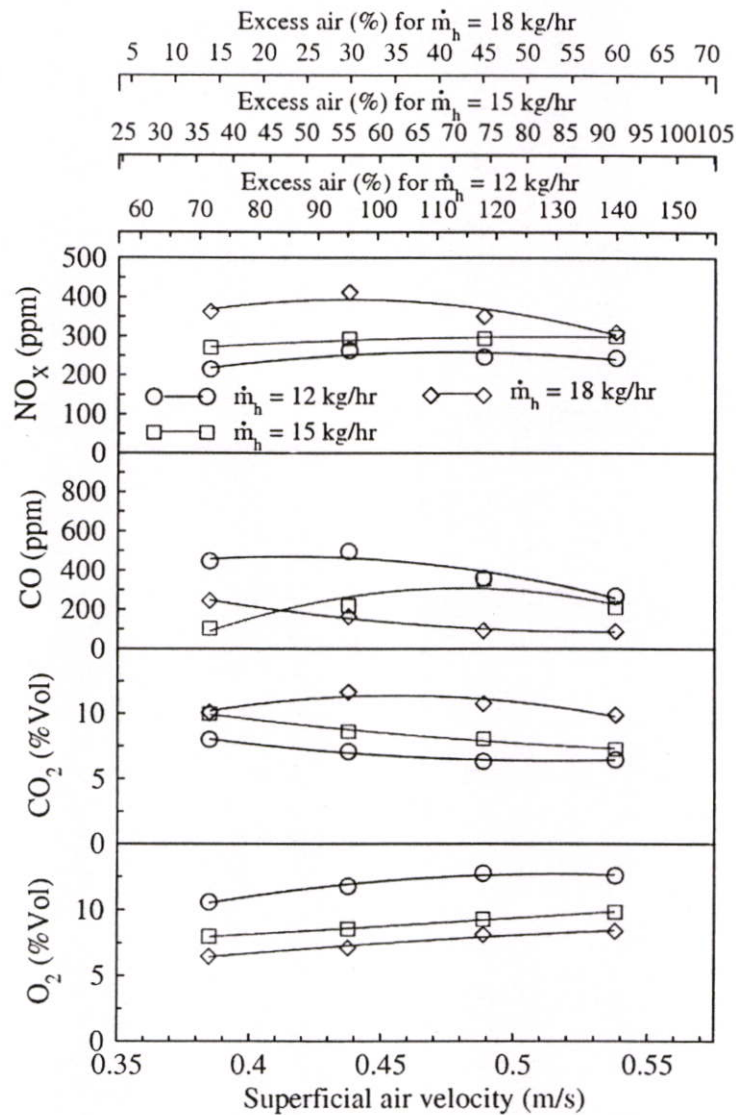
พิจารณารูปที่ 5.12ก-5.12ก และ 5.13ข-5.13ข เป็นการแสดงกระจายอุณหภูมิตามแนวรัศมี และตามแนวแกนตามลำดับ อัตราป้อนแกลบ (\dot{m}_h) = 15 kg/hr, อากาศส่วนเกิน 109 และ 125% ตามลำดับ สามารถประยุกต์การใช้อากาศทุติยภูมิได้ถึง 30% จากรูปดังกล่าวนี้เองทำให้เหตุผลประการอย่างหนึ่งของการใช้อากาศทุติยภูมิในการเผาไหม้ คือ ขอบเขตของการติดไฟของการผสมบางสามารถขยายหรือเพิ่มขึ้นได้โดยการใช้ค่า λ ทำให้มีช่วงของการติดไฟกว้างขึ้น



รูปที่ 5.13 การกระจายอุณหภูมิ อัตราป้อนแกลบ(\dot{m}_h)=15 kg/hr, อากาศส่วนเกิน 125% อากาศทุติยภูมิ($\lambda=0.20-0.30$) (ก) ตามแนวรัศมี และ (ข) ตามแนวแกน

5.2 องค์ประกอบไอเสีย

5.2.1 อิทธิพลจากอัตราป้อนแกลบ



รูปที่ 5.14 องค์ประกอบไอเสีย ความเร็วอากาศ (Superficial air velocity) = 0.385-0.538 m/s, $\lambda=0$

รูปที่ 5.14 นี้ เป็นการศึกษาอิทธิพลจากอัตราป้อนแกลบที่มีผลต่อองค์ประกอบไอเสีย โดยแสดงความสัมพันธ์ระหว่างองค์ประกอบไอเสียตามความเร็วอากาศหรืออากาศส่วนเกิน เป็นที่ทราบกันดีว่าการเผาไหม้ที่เชื้อเพลิงหนาหรือมีปริมาณออกซิเจนที่ไม่เพียงพอต่อการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์หรือมีการผสมกันได้ไม่ดีระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศล้วนส่งผลต่อระดับ CO ที่สูงโดยปริมาณ CO หรือ การสูญเสียความร้อนในการเผาไหม้มีแนวโน้มลดลง เมื่อเพิ่มความเร็วอากาศหรือเพิ่มอากาศส่วนเกิน อันจะทำให้มีการหมุนวนที่ปั่นป่วนมากขึ้นทำให้มีการผสมกันที่ดีและมีปริมาณออกซิเจนในการทำปฏิกิริยามากขึ้นอัตราการเผาไหม้สูงขึ้น และเมื่อทำการเพิ่มอัตราป้อนแกลบจาก 12- 18 kg/hr ก็เป็นสาเหตุทำให้ระดับการปล่อย CO ลดลงการเผาไหม้มีความสมบูรณ์มากขึ้นเช่นเดียวกัน โดยที่อัตราป้อน 18 kg/hr มีระดับของการปล่อย CO น้อยที่สุด ทั้งนี้อิทธิพล

จากอัตราป้อนแกลบและจากอากาศส่วนเกินมีผลต่อการลดลงของปริมาณ CO ทั้งสิ้น แต่อิทธิพลจากอัตราป้อนแกลบส่งผลต่อการลดลงของ CO อย่างเด่นชัดกว่า อิทธิพลจากอากาศส่วนเกิน

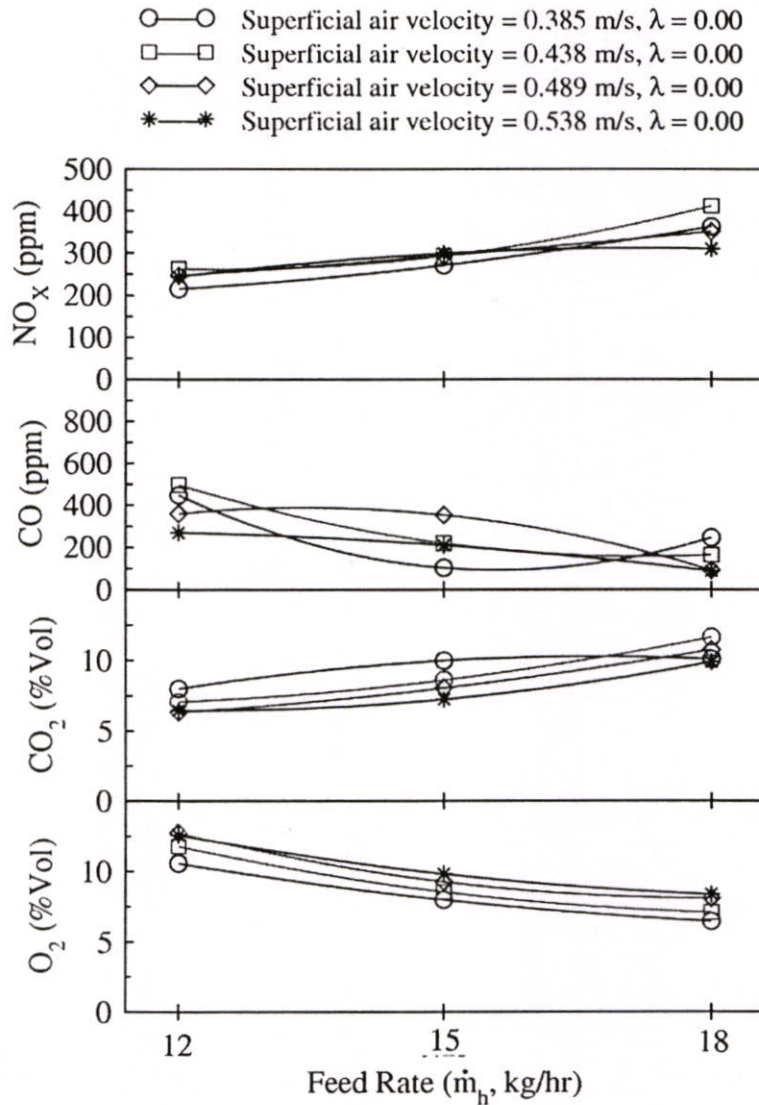
รายงานการวิจัยของ Hsisheng Teng, Chien-Song Chyang, Sheng-Hui Shang, and Jui-An Ho (1997) และ Chien-Song Chyang, Che-Yu Liu and Yi-Di Chang (2001) ได้รายงานถึงระดับอุณหภูมิของการเผาไหม้ต่อการเกิด NO_x จากกลไก Thermal NO_x ว่าจะมีอัตราการเกิด NO_x จากกลไกดังกล่าวที่น้อยมากถ้าอุณหภูมิการเผาไหม้ไม่เกิน 900°C ถ้าหากอุณหภูมิสูงกว่า 900°C จะเริ่มเป็นการเผาไหม้ที่ให้อุณหภูมิสูง และจะมีผลอย่างยิ่งต่อการเกิด NO_x ทำให้มีปริมาณการปล่อย NO_x ในปริมาณที่สูงขึ้น นอกจากนี้ สำเรจ จักรใจ (2547) กล่าวว่า ถ้าเป็นการเผาไหม้แบบส่วนผสมเชื้อเพลิงบางจะทำให้มีปริมาณ NO_x ที่เกิดขึ้นจึงมาจากกลไก Fuel NO_x ที่สูงขึ้น

จากการรายงานผลในหัวข้อที่ 5.1 และ 5.2 ได้แสดงว่าสามารถควบคุมการกระจายอุณหภูมิได้เป็นอย่างดีด้วยอิทธิพลจากอัตราป้อนแกลบและอากาศส่วนเกิน เมื่อเพิ่มอัตราป้อนแกลบจะทำให้อุณหภูมิการเผาไหม้สูงขึ้น ที่อัตราป้อนแกลบ 12 และ 15 kg/hr โดยส่วนใหญ่ให้อุณหภูมิการเผาไหม้ไม่เกิน 950°C แต่เมื่อเพิ่มอัตราป้อนแกลบ เป็น 18 kg/hr อุณหภูมิจะสูงเกินกว่า 900°C จากการบันทึกผลการทดลอง ปริมาณ NO_x ที่วัดได้โดยส่วนใหญ่เป็นปริมาณ NO_x จาก NO ส่วนปริมาณ NO_2 มีปริมาณที่น้อยมาก ดังนั้นในงานวิจัยนี้ปริมาณ NO_x ที่เกิดขึ้นเกิดจากกลไก Fuel NO_x เป็นส่วนใหญ่และอาจมีสาเหตุจากกลไก Thermal NO_x ได้ในกรณีที่การเผาไหม้ให้อุณหภูมิสูงกว่า 900°C

ปริมาณ NO_x ที่เกิดขึ้นสำหรับอัตราป้อนแกลบ 12 kg/hr อยู่ในระดับต่ำมีค่าประมาณ 215-262.5 ppm ที่อัตราป้อนแกลบ 15 kg/hr อยู่ในช่วง 277-299 ppm และที่อัตราป้อนแกลบ 18 kg/hr ปริมาณ NO_x อยู่ในช่วง 310-412 ppm แสดงให้เห็นถึงแนวโน้มของ NO_x เพิ่มขึ้นตามการเพิ่มของอากาศส่วนเกินเนื่องจากมีปริมาณของออกซิเจนมากขึ้น นอกจากนี้รูปที่ 5.14 ยังแสดงให้เห็นถึงการเพิ่มขึ้นของ NO_x อย่างมากเมื่อเพิ่มอัตราป้อน เนื่องจากอุณหภูมิการเผาไหม้เพิ่มสูงขึ้น และเห็นได้ชัดเจนมากยิ่งขึ้นจากรูปที่ 5.15 การเพิ่มอัตราป้อนแกลบจาก 12-18 kg/hr ทำให้อุณหภูมิสูงขึ้นประมาณ $300-400^\circ\text{C}$ ปริมาณ NO_x เพิ่มขึ้นจาก 215 เป็น 412 ppm ปริมาณ CO ลดลง จาก 269 เป็น 81 ppm

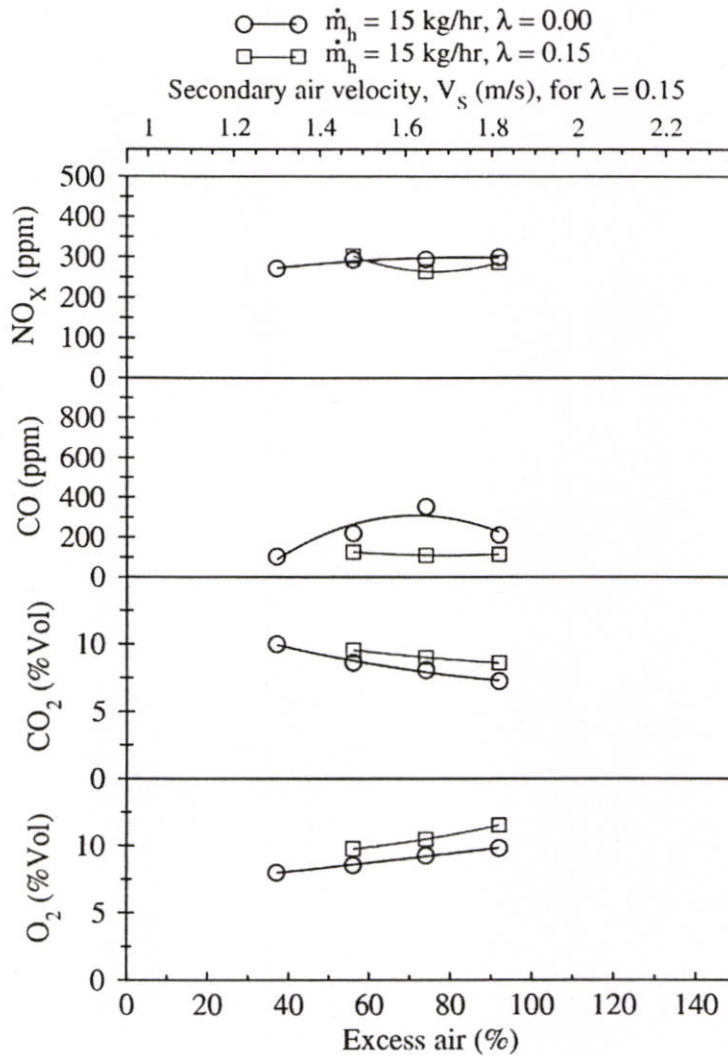
5.2.2 อิทธิพลจากความเร็วอากาศ (อากาศส่วนเกิน)

รูปที่ 5.15 แสดงองค์ประกอบไอเสียเพื่อศึกษาถึงอิทธิพลจากความเร็วอากาศที่อัตราป้อนตั้งแต่ 12 – 18 kg/hr ความเร็วอากาศที่ใช้ตั้งแต่ 0.385-0.538 m/s ปริมาณ CO มีแนวโน้มลดลงตามอัตราป้อนแถบ เนื่องจากการเผาไหม้ที่สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น แต่ทั้งนี้การเผาไหม้ได้ให้อุณหภูมิสูงขึ้นด้วยเช่นกัน จึงสามารถเห็นแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของ NO_x เมื่อเพิ่มอัตราป้อนแถบได้อย่างชัดเจน



รูปที่ 5.15 องค์ประกอบไอเสีย, อัตราป้อนแถบ (\dot{m}_h) = 12-18 kg/hr, $\lambda = 0$

5.2.3 อิทธิพลจากอากาศทุติยภูมิ (λ)



รูปที่ 5.16 องค์ประกอบไอเสีย, อากาศทุติยภูมิ 0-15% ($\lambda=0.00-0.15$), อากาศส่วนเกิน 37-92%

การใช้อากาศทุติยภูมิในการเผาไหม้เป็นการทำให้อุณหภูมิการผสมกันที่ดีและลดการหลุดลอยของอนุภาค ทำให้การเผาไหม้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น นอกจากนี้ในการเผาไหม้จำเป็นต้องอาศัยปริมาณออกซิเจนและเวลาในการเผาไหม้และการผสมกันที่ดีเพื่อการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ การใช้อากาศทุติยภูมินอกจากจะทำให้มีการหมุนวนมากขึ้นแล้วยังเป็นการเติมออกซิเจนในการเผาไหม้อีกประการหนึ่ง

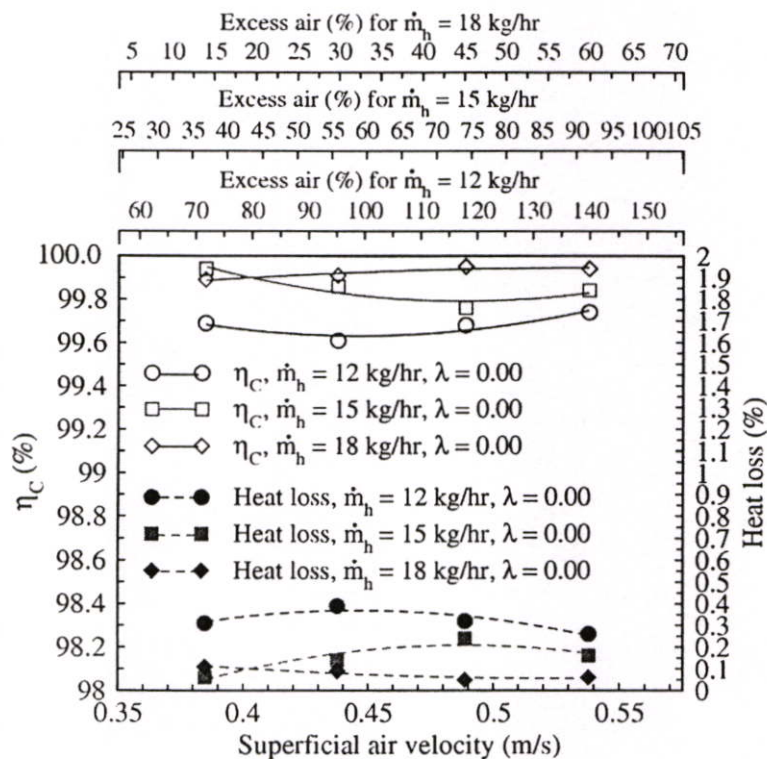
รูปที่ 5.16 นี้ เพื่อศึกษาอิทธิพลจากอากาศทุติยภูมิต่อการปล่อยมลพิษ โดยแสดงตามการเปลี่ยนแปลงของอากาศส่วนเกิน ที่อัตราป้อนแกลบ 15 kg/hr ผลการทดลองแสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของอากาศทุติยภูมิต่อการปล่อย CO ที่มีแนวโน้มลดลงเมื่อใช้อากาศทุติยภูมิช่วยในการเผาไหม้ การใช้ $\lambda=0.15$ การก่อตัวของ CO ลดต่ำลง เนื่องจากการเผาไหม้เกิดการหมุนวน และปั่นป่วน มีการ

ผสมกันระหว่างแกลบและอากาศอย่างเข้มข้น ทำให้อัตราการเผาไหม้สูงขึ้น ปริมาณของ CO อยู่ในช่วง 110-125 ppm ซึ่งลดลงกว่าการไม่ใช้อากาศทุติยภูมิในการเผาไหม้มาก

เป็นที่ทราบกันดีถึงการก่อตัวของ NO_x อันเนื่องมาจากการเผาไหม้ที่มีอุณหภูมิสูง ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าอุณหภูมิของไอเสียลดต่ำลงเมื่อใช้ $\lambda=0.15$ ส่งผลให้ระดับของ NO_x อยู่ในระดับที่ต่ำกว่าการไม่ใช้อากาศทุติยภูมิในการเผาไหม้ ปริมาณของ NO_x เมื่อใช้อากาศทุติยภูมิ 15% นี้ อยู่ในช่วง 264-302 ppm

5.3 ประสิทธิภาพการเผาไหม้

5.3.1 อิทธิพลจากอัตราป้อนแกลบ



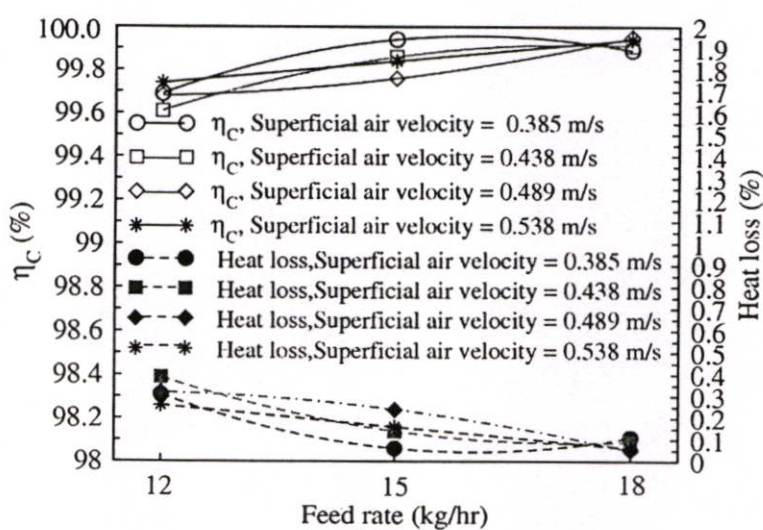
รูปที่ 5.17 ความเร็วอากาศ (Superficial air velocity) 0.385-0.538 m/s ไม่ใช้อากาศทุติยภูมิ ($\lambda=0$)

การคิดประสิทธิภาพการเผาไหม้ในที่นี้เป็นการคำนวณ โดยสมมติให้ความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้สมบูรณ์มีประสิทธิภาพ 100% จากนั้นหักลบด้วย ความร้อนสูญเสียเนื่องจากคาร์บอนที่เผาไหม้ไม่หมดในเต้า (q_3) และความร้อนสูญเสียเนื่องจากเผาไหม้ไม่สมบูรณ์หรือ CO (q_4) แต่จากงานวิจัยของ Weizhang (1987) รายงานว่าความร้อนสูญเสียอันเนื่องจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์หรือ CO นั้น มีอิทธิพลสูงกว่าความร้อนสูญเสียเนื่องจากคาร์บอนที่เผาไหม้ไม่หมดในเต้า ดังนั้นในงานวิจัยนี้ จึงวิเคราะห์ประสิทธิภาพการเผาไหม้โดยคิดความร้อนจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์เป็นหลักและไม่คิดความร้อนสูญเสียเนื่องจากคาร์บอนที่เผาไหม้ไม่หมดในเต้า โดยปริมาณขององค์ประกอบไอเสียและประสิทธิภาพการเผาไหม้ดูได้จากตารางที่ ข.1 ในภาคผนวก ข.

รูปที่ 5.17 แสดงอิทธิพลจากอัตราป้อนแกลบต่อประสิทธิภาพการเผาไหม้ตามการเปลี่ยนแปลงของอากาศส่วนเกิน โดยไม่ใช้อากาศหุติขุม ($\lambda=0$)

ที่อัตราป้อนแกลบ 12 kg/hr ความร้อนสูญเสียจาก CO อยู่ในช่วง 0.26-0.39% การเพิ่มอากาศส่วนเกินทำให้การสูญเสียความร้อนจาก CO ในไอเสียมีแนวโน้มลดลง ดังนั้นประสิทธิภาพการเผาไหม้จึงเพิ่มขึ้นตามปริมาณอากาศส่วนเกิน ประสิทธิภาพการเผาไหม้สูงสุดมีค่าเท่ากับ 99.74% ที่อากาศส่วนเกิน 140% แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มปริมาณอากาศส่วนเกินทำให้มีปริมาณอากาศที่มากพอที่ทำให้มีการเผาไหม้ที่สมบูรณ์มากกว่า สำหรับที่อัตราป้อนแกลบ 15 และ 18 kg/hr ได้แสดงไว้ในรูปที่ 5.17 นี้ให้ผลเช่นเดียวกัน แต่มีข้อสังเกตว่า อิทธิพลจากการเพิ่มอากาศส่วนเกินทำให้มีการเพิ่มขึ้นของประสิทธิภาพการเผาไหม้เพียงเล็กน้อยเท่านั้น แต่อิทธิพลจากอัตราป้อนแกลบจะแสดงให้เห็นถึงการเพิ่มขึ้นของประสิทธิภาพการเผาไหม้อย่างเด่นชัดกว่าอิทธิพลจากอากาศส่วนเกิน โดยการเพิ่มอัตราป้อนแกลบจาก 12-18 kg/hr ประสิทธิภาพการเผาไหม้เพิ่มขึ้นจาก 99.61 เป็น 99.94 %

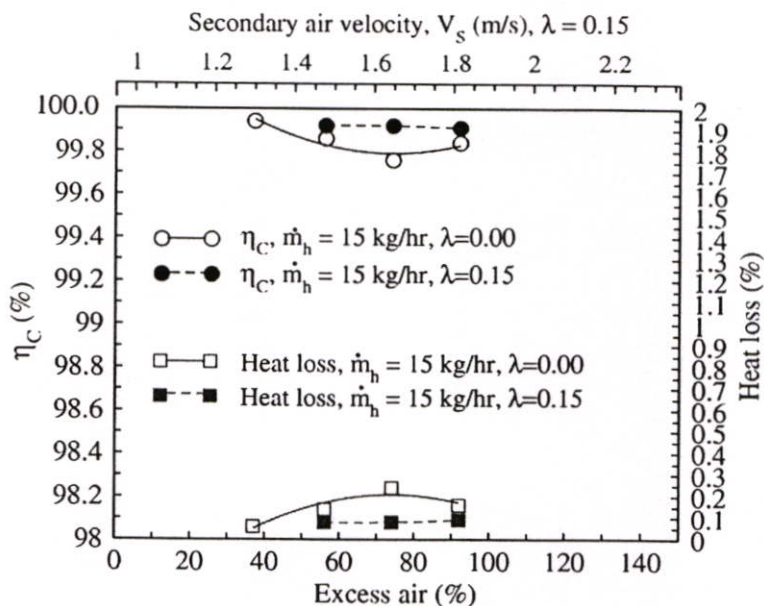
5.3.2 อิทธิพลจากความเร็วอากาศ



รูปที่ 5.18 อัตราป้อนแกลบ (\dot{m}_h)=12-18 kg/hr, ไม่ใช้อากาศหุติขุม ($\lambda=0$)

รูปที่ 5.18 แสดงองค์ประกอบไอเสียเพื่อศึกษาถึงอิทธิพลจากความเร็วอากาศที่มีผลต่อประสิทธิภาพการเผาไหม้ ที่อัตราป้อนตั้งแต่ 12 – 18 kg/hr การสูญเสียความร้อนเนื่องจาก CO มีแนวโน้มลดลงตามอัตราป้อนแกลบ เนื่องจากมีการเผาไหม้ที่สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น แต่เมื่อเพิ่มอัตราป้อนแกลบพบว่าทำให้ได้ประสิทธิภาพการเผาไหม้สูงขึ้น

5.3.3 อิทธิพลจากอากาศทุติยภูมิ (λ)



รูปที่ 5.19 อากาศทุติยภูมิ 0-15% ($\lambda=0.00-0.15$), อากาศส่วนเกิน 37-92%

รูปที่ 5.19 นี้ เพื่อศึกษาอิทธิพลจากอากาศทุติยภูมิต่อประสิทธิภาพการเผาไหม้ โดยแสดงตามการเปลี่ยนแปลงของอากาศส่วนเกิน ที่อัตราป้อนแกลบ 15 kg/hr การใช้ $\lambda=0.15$ แสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของอากาศทุติยภูมิทำให้การสูญเสียความร้อนลดลงและประสิทธิภาพการเผาไหม้เพิ่มขึ้น เนื่องจากการเผาไหม้เกิดการหมุนวน อนุภาคมีการผสมกันที่ดีและลดการหลุดลอยของอนุภาค และปั่นป่วน มีการผสมกันระหว่างแกลบและอากาศอย่างเข้มข้น การไม่ใช้อากาศทุติยภูมิให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้ 99.76 -99.86 % การใช้อากาศทุติยภูมิให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้ 9.91-99.92%

บทที่ 6

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการทดลอง

6.1.1 งานวิจัยในอดีตที่ผ่านมาทำการป้อนเชื้อเพลิงแกลบเข้าสู่ห้องเผาไหม้โดยตรง ทำให้เกิดปัญหาระหว่างการเผาไหม้ในบางประการ คือ มีการลุกลามของเปลวไฟเข้าสู่ชุดป้อนเชื้อเพลิงแกลบ และถึงแม้ว่า งานวิจัยนี้ไม่ได้ศึกษาถึงการเตรียมส่วนผสมระหว่างเชื้อเพลิงแกลบและอากาศ ที่มีผลต่อการเผาไหม้โดยตรง หากแต่ทำการปรับปรุงการเตรียมการเผาไหม้เพื่อการเผาไหม้ที่ดี โดยการผสมเชื้อเพลิงแกลบเข้าสู่ท่ออากาศปฐมภูมิและมีห้องผสมที่ทำการผสมเชื้อเพลิงแกลบและอากาศก่อนเข้าสู่ห้องเผาไหม้ โดยที่ห้องผสมนี้ไม่มีการเผาไหม้เกิดขึ้นแต่อย่างใด พบว่าเชื้อเพลิงเข้าสู่ห้องเผาไหม้ได้อย่างสม่ำเสมอ มีการกระจายอนุภาคเข้าสู่ห้องเผาไหม้ที่ดี ไม่เกิดปัญหาการลุกลามของเปลวไฟเข้าสู่ชุดป้อนเชื้อเพลิงแกลบ ทำให้การทดลองเป็นไปอย่างต่อเนื่อง

6.1.2 การออกแบบปรับปรุงห้องเผาไหม้ให้มีลักษณะของห้องเผาไหม้ภายในเป็นกรวยและคอคอด และมีการเพิ่มขึ้นอย่างทันทีทันใดของพื้นที่หน้าตัดของการไหลแทนที่ห้องเผาไหม้ที่มีลักษณะตรงขึ้นไป ได้แสดงถึงคุณลักษณะที่ดีของการกระจายอุณหภูมิในห้องเผาไหม้

6.1.3 ได้เทคนิคการจุดเตาเผาในตอนเริ่มต้น สามารถจุดเตาเผาได้อย่างรวดเร็ว โดยใช้เวลาในการจุดเตาเผาเพียง 15 นาที

6.1.4 อุณหภูมิในห้องเผาไหม้ สามารถควบคุมได้ด้วยอิทธิพล2อย่างคือ อิทธิพลจากอัตราป้อนแกลบและอากาศส่วนเกิน แต่อิทธิพลจากอัตราป้อนแกลบให้ผลเด่นชัดกว่าอิทธิพลจากอากาศส่วนเกิน สำหรับอิทธิพลจากอากาศส่วนเกินนอกจากจะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงระดับอุณหภูมิแล้วยังมีผลที่เด่นชัดต่อความเสถียรและความคงตัวของเปลวไฟภายในห้องเผาไหม้ นอกจากนี้ อิทธิพลจากอัตราป้อนแกลบและจากอากาศส่วนเกินมีผลต่อการลดลงของปริมาณ CO ทั้งสิ้น แต่อิทธิพลจากอัตราป้อนแกลบส่งผลต่อการลดลงของ CO อย่างเด่นชัดกว่า อิทธิพลจากอากาศส่วนเกิน

6.1.5 ถึงแม้ว่าการใช้อากาศส่วนเกินยังคงเป็นสิ่งจำเป็นต่อการเผาไหม้เชื้อเพลิง โดยเฉพาะอย่างยิ่งเชื้อเพลิงแข็ง เช่น เชื้อเพลิงแกลบที่มีน้ำหนักเบา แต่ยังมีผลสืบเนื่องบางประการอันเกิดจากการใช้อากาศส่วนเกินที่ส่งผลต่อคุณลักษณะการเผาไหม้ภายในเตาเผาออร์เทคสองชั้นนี้ คือ การเปลี่ยนแปลงอากาศส่วนเกินเป็นการเปลี่ยนแปลงทั้งความเร็วและอัตราการไหลของอากาศ เมื่อใช้

ความเร็วอากาศปฐมภูมิสูงหรือต่ำเกินไปส่งผลให้เปลวไฟไม่เสถียรหรือเกิดการจับกันเป็นก้อนของเถ้า อากาศส่วนเกินในการเผาไหม้จึงถูกจำกัดอยู่ในช่วงหนึ่งเท่านั้น นอกจากนี้ ความเร็วอากาศมีผลต่อการขยายพื้นที่ของเปลวไฟในการเผาไหม้ เมื่อใช้ความเร็วอากาศสูงขึ้น ทำให้เปลวไฟถูกขยายออกไป ทำให้ลดอุณหภูมิสูงสุดของการเผาไหม้ งานวิจัยนี้สรุปว่าการใช้ความเร็วอากาศปฐมภูมิปานกลางให้ผลที่ดีต่อลักษณะการกระจายอุณหภูมิในห้องเผาไหม้

6.1.6 การใช้อากาศทุติยภูมิช่วยในการเผาไหม้ในแต่ละอากาศส่วนเกินเป็นการลดความเร็วและปริมาณของอากาศปฐมภูมิให้ต่ำลง มีผลให้ลักษณะการกระจายอุณหภูมิมีความเสถียรมากยิ่งขึ้น การกระจายอุณหภูมิที่ค่อนข้างสม่ำเสมอภายในห้องเผาไหม้ รวมไปถึงช่วยขยายขอบเขตของการติดไฟ สามารถเพิ่มสัดส่วนของอากาศทุติยภูมิได้มากขึ้นเมื่อใช้อากาศส่วนเกินที่สูงขึ้น มีการหมุนวนมากขึ้นและทำให้เกิด Recirculation zone อนุภาคหรือสารระเหยมีเวลามากในการหมุนวนและถูกเผาไหม้ มีการผสมกันระหว่างแกลบและอากาศอย่างเข้มข้น ลดการหลุดลอยของอนุภาคปล่อยมลพิษต่ำกว่า การเผาไหม้มีความสมบูรณ์ ประสิทธิภาพการเผาไหม้สูงขึ้น

6.1.7 ถึงแม้ว่าการใช้อากาศทุติยภูมินั้นช่วยส่งผลที่ดีต่อการเผาไหม้ก็ตาม แต่การนำอากาศทุติยภูมิเข้าไปสู่ระบบนั้นกระทำเพียงเพื่อเป็นการเสริมหรือปรับปรุงการเผาไหม้ให้ดีขึ้นเท่านั้น การเพิ่มอากาศทุติยภูมิให้สูงขึ้นกว่าที่ควรจะเป็นดูเหมือนจะทำให้ได้การกระจายอุณหภูมิในห้องเผาไหม้ที่ดี แต่ไม่เป็นผลดีเสมอไปในแง่ของการปล่อยมลพิษ ทั้งนี้เพราะปริมาณและความเร็วอากาศปฐมภูมียังคงเป็นสิ่งจำเป็นหลักต่อการเผาไหม้ การใช้อากาศทุติยภูมิสูงๆนั้น ทำให้อากาศปฐมภูมิไม่เพียงพอต่อการเผาไหม้ และการใช้อากาศทุติยภูมิในปริมาณสูงๆอาจทำให้เชื้อเพลิงมีอัตราการหลุดลอยสูงขึ้น มีการปล่อยมลพิษสูง โดยงานวิจัยนี้สรุปว่า การใช้อากาศทุติยภูมิ 15% ให้ผลดีที่สุดเนื่องจากได้ผลดีต่อทั้งการกระจายอุณหภูมิ การปล่อยมลพิษที่ลดลงและประสิทธิภาพการเผาไหม้สูงขึ้น

6.1.8 ผลจากการควบคุมการกระจายอุณหภูมิด้วยอิทธิพลจากอัตราป้อนแกลบและอากาศส่วนเกิน ปริมาณ NO_x ที่เกิดขึ้นอยู่ในระดับที่ต่ำ และปริมาณ NO_x ที่เกิดขึ้น เกิดจากกลไก Fuel NO_x เป็นส่วนใหญ่และอาจมีสาเหตุจากกลไก Thermal NO_x ได้ในกรณีที่การเผาไหม้ที่ให้อุณหภูมิสูงกว่า $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ แนวโน้มของการเกิด NO_x เพิ่มขึ้นตามอากาศส่วนเกิน และ เพิ่มขึ้นตามอัตราป้อนแกลบนอกจากนี้ยังทำให้ประสิทธิภาพยังเพิ่มขึ้นอันเนื่องจากการเพิ่มอากาศส่วนเกิน และอัตราป้อน

6.1.9 อุณหภูมิในห้องเผาไหม้อยู่ในช่วง 300-1100 °C การเพิ่มอัตราป้อนแกลบจาก 12-18 kg/hr ทำให้อุณหภูมิสูงขึ้น ประมาณ 300-400 °C ปริมาณ NO_x เพิ่มขึ้นจาก 215 เป็น 412 ppm ปริมาณ CO ลดลง จาก 269 เป็น 81 ppm ประสิทธิภาพการเผาไหม้เพิ่มขึ้นจาก 99.61 เป็น 99.94 % การใช้อากาศปฐมภูมิความเร็วปานกลาง(0.438-0.489 m/s)ให้การกระจายอุณหภูมิที่สุด ส่วนการใช้ อากาศความเร็วต่ำ (0.385 m/s) หรือสูง(0.538 m/s) ทำให้การกระจายอุณหภูมิ ในห้องเผาไหม้ไม่ สม่าเสมอ การใช้อากาศทุติยภูมิให้ลักษณะการกระจายอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ มีความเสถียร และคงตัวมากยิ่งขึ้นกว่าการไม่ใช้อากาศทุติยภูมิ การใช้อากาศทุติยภูมิ(λ) = 0.15 ให้ผลดีที่สุด ต่อ ทั้งการกระจายอุณหภูมิ การปล่อยมลพิษ และประสิทธิภาพการเผาไหม้ การไม่ใช้อากาศทุติยภูมิให้ ประสิทธิภาพการเผาไหม้อยู่ระหว่าง 99.76 -99.86 % การใช้อากาศทุติยภูมิให้ประสิทธิภาพการเผา ไหม้เพิ่มขึ้นเป็น 99.91-99.92%

6.1.10 อิทธิพลทั้งจากอัตราป้อนแกลบ อากาศส่วนเกินและการใช้อากาศทุติยภูมิต่อ คุณลักษณะการเผาไหม้เชื้อเพลิงแกลบในเตาเผาออร์เทคสองชั้นนี้ทั้ง การกระจายอุณหภูมิ การ ปล่อยมลพิษ ประสิทธิภาพการเผาไหม้ ได้ผลที่ดีอยู่ในระดับที่น่าพอใจ ถ้าควบคุมปริมาณเชื้อเพลิง อากาศส่วนเกิน ความเร็วอากาศ และอากาศทุติยภูมิที่ จะสามารถควบคุมการกระจายอุณหภูมิ ความ เสถียรของเปลวไฟ การปล่อยมลพิษ ประสิทธิภาพการเผาไหม้ได้

6.2 ข้อเสนอแนะ

เพื่อการพัฒนางานวิจัยต่อไปในอนาคตสำหรับประยุกต์เพื่อนำไปใช้งานจริงควรศึกษาถึง

6.2.1 อัตราส่วน Turn down ratio ซึ่งเป็นตัวบอกระดับความสามารถในการทำงานของเตาเผา

6.2.2 ควรศึกษาถึงความเสถียรของเปลวไฟอันเนื่องจากความเร็วอากาศที่ใช้ในการเผา ไหม้

บรรณานุกรม

วารสารมูลนิธิสิ่งแวดล้อมเพื่อชีวิต. 2539. 1(2)

นิวัติ พิริยะรุ่งโรจน์. 2544. “การศึกษาเชิงทดลองของเตาเผาแกลบวอร์เทค.”

วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

ศุภชัย เลื่อนลอย. 2545. “อิทธิพลของความชื้นของแกลบต่อคุณลักษณะการเผาไหม้.”

วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

สำเร็จ จักรใจ. 2547. การเผาไหม้. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

สมชาติ โสภณธรรมฤทธิ์ และคณะ. 2544. “เตาเผาแกลบแบบไซโคลนสำหรับการอบแห้ง
ข้าวเปลือก.” วารสารราชบัณฑิตยสถาน. 26(2) : 68-80.

Billoud, G. Galland, M. Huynh, C. and Candel, S.M. 1992. “Adaptive Active Control of
Combustion Instabilities.” **Combustion Science and Technology**. 81 : 257-283.

Chien-Song Chyang, Che-Yu Liu and Yi-Di Chang. 2001. “ Incineration of Paper Sludge in a
Prototype Vortexing Fluidized Bed Combustor.” Journal of the Air & Waste Management
Association. 51 : 542-551.

El-Wakil, M.M. 1984. Powerplant Technology. Singapore : McGraw-Hill.

Food and Agriculture Organization of the United Nation 1993. “Improved Solid
Biomass Burning Cookstoves a Development manual” Regional Wood Energy
Development Programme in Asia. Bangkok

Fu, T.T. and Nieh, S. 1989. “Design and Test of a 0.15 MB/H Vortex Combustor Firing
DUC and CWF.” **Topical Report**. Washington : Department of Mechanical
Engineering The Catholic University of America.

Hsisheng Teng, Chien-Song Chyang, Sheng-Hui Shang, and Jui-An Ho. 1997. “ Characterization
of Waste Tire Incineration in a Prototype Vortexing Fluidized Bed Combustor.” Journal
of the Air & Waste Management Association. 47 : 49-57.

LIN, C. H. TENG, J. T. and CHYANG, C. S. 1997. “Evaluation of Combustion Efficiency
and Emission of Pollutants by Coal Particles in a Vortexing Fluidized Bed.”
Combustion and Flame. 110 : 163-172.

- LIN, C. H. TENG, J. T. and CHYANG, C. S. and HSU, C.H. 1998. "A Study on the Swirling Flow Field in the Freeboard of a Vortexing Fluidized Bed Combustor." **JSME Internal journal**. 41(3) : 538-545.
- Lixing, Z. 1993. "Theory and Numerical Modeling of Turbulent Gas-Particle Flow and Combustion." USA : CRC Press, Inc.
- McManus, K.R. Poinso, T. and Candel, S.M. 1993. "A Review of Active Control of Combustion Instabilities." **Progress in Energy and Combustion Science**. 19 : 1-29.
- Nieh, S. and Fu, T.T. 1988. "Development of a Non-slagging Vortex Combustor (VC) for Space/Water Heating Application." **Proceeding of The 5th International Coal Conference**. Pittsburgh : 761-768.
- Nieh, S. and Fu, T.T. 1990. "A Non-slagging Vortex Combustor Firing Coal-Water Fuel for Commercial Heating Application." **Proceeding of The 7th International Coal Conference**. Pittsburgh. 223.
- Nieh, S. and Zhang, J. 1992. "Simulation of the Strongly Swirling Aerodynamic Field in a Vortex Combustor." **Journal of Fluids Engineering**. 114 : 367-375.
- Nieh, S. Yang, G. Zhu, A.Q. and Zhao, C. S. 1992. "Measurements of Gas-Particle Flows and Elutriation of an 18 inch i.d. Cold Vortex Fluidized-Bed Combustion Model." **Power Technology**. 69 : 139 -146.
- Nieh, S. and Zhang, J. 1997. "Comprehensive Modeling of Pulverized Coal Combustion in a Vortex Combustor." **Fuel**. 76(2) : 123 -131.
- Nieh, S. and Zhang, J. 2000. "Swirling, Reacting, Turbulent Gas-Particle Flow in a Vortex Combustor." **Powder Technology**. 112 : 70 -78.
- Ogawa akira. 1993." Vortex flow." USA : CRC Press, Inc.
- Permchart, W. Kouprianov, V.I. and Tantimuratha, L. 2003. "Experimental Study on a conical Fluidized Bed Combustor Firing Rice Husk." **2nd. Regional Conference on Energy Technology Toward a Clean Environment**.
- Promvongse, P. and Silapabanleng, K. 2001. "Experimental Study of Combustion Characteristics in a Rice Husk Fired Vortex Combustor." **Proceedings of the 36th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference**, Georgia. 2001-RE-17.
- Turn, S.R. 2000. An Introduction to Combustion. 2nd ed. Singapore : McGraw-Hill.

- Wan, H.P. and Chyang, C.S. 1998. "Transport Disengaging Height and Elutriation Rate of a Vortexing Fluidized Bed." **J.of Chemical Engineering of Japan**. 13(6) : 977-986.
- Weizhang, W. 1987. "Fluidized Bed Combustion of Rice Husk for Energy and Pozzolana." A thesis submitted in partial fulfillment of the requirements of the degree of master of Engineering. Asian Institute of technology.
- Wylen, V. Sonntag, E. and Borgnakke, C 1993. **Fundamentals of Classical Thermodynamics**. Fourth edition. USA : John Wiley & Sons, Inc
- Yang, G. and Nieh, S. 1989. "On the Suspension Layers in the Freeboard of Vortex Fluidized Beds." **Power Technology**. 57 : 171-179.
- Yang, G. Zhu, A.Q. Zhao, C.S. and Nieh, S. 1991. "Experimental Study on a Full-Scale Cold Model of Vortexing Fluidized-Bed Combustor." **ASME/JSME Thermal Engineering Proceedings**. 4 : 521-527.
- Zhou, L.X. Li, Y., Chen, T. Xu, Y. 2000. "Studies on the effect of Swirl Numbers on Strongly Swirling Turbulent Gas-Particle Flows Using a Phase-Doppler Particle Anemometer." **Powder Technology**. 112 : 79-86.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก.
คุณสมบัติของเชื้อเพลิงแกลบ

ตารางที่ ก.1 ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงชนิดต่างๆ

ประเภทของ พลังงาน	ชนิดของพลังงาน	ค่าความร้อน: หน่วย/ ก.ก.	
		กิโลแคลอรี	เมกะจูล
พลังงานเชิงพาณิชย์	แอนทราไซต์	7500	31.40
	ถ่านโค้ก	6600	27.63
	ถ่านหินนำเข้า	6300	26.37
	ลิกไนต์(เล็)	4400	18.42
	ลิกไนต์(แจ็คอน)	3610	15.11
	ลิกไนต์(กระบี่)	2600	10.88
	ลิกไนต์(แม่เมาะ)	2500	10.47
พลังงานหมุนเวียน	ถ่าน	6900	28.88
	ฟืน	3820	15.99
	<u>แกลบ</u>	<u>3440</u>	<u>14.40</u>
	ขี้เลื่อย	2600	10.88
	อ้อย	1800	7.53
	ขยะ	1160	4.86

ตารางที่ ก.2 คุณสมบัติของเชื้อเพลิงแกลบที่ใช้ทดลอง นิวัตติ พิริยะรุ่งโรจน์ (2544)

การวิเคราะห์แบบประมาณ (%)		การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (%)	
สารระเหย	55.6	คาร์บอน	38.0
คาร์บอนคงตัว	20.1	ไฮโดรเจน	5.7
ความชื้น	10.3	ไนโตรเจน	0.69
ขี้เถ้า	14.0	ออกซิเจน	41.6
		กำมะถัน	0.06
		ขี้เถ้า	14.0
		Calorific value, cal/g	3580

ภาคผนวก ข.
ตารางบันทึกผลการทดลอง

ตารางที่ ข.1 ปริมาณองค์ประกอบไอเสีย

\dot{m}_{husk}	% excess air	V_p (m/s)	V_s (m/s)	(λ)	O_2 (%)	CO_2 (%)	CO(ppm)	NO_x (ppm)	Flue temp($^{\circ}C$)	CO Loss(%)	η_{com} (%)
12kg/hr	72	0.385	-	0	10.57	8.00	447.5	215	492	0.31	99.69
	95	0.438	-	0	11.77	7.08	497	262.5	530	0.39	99.61
	118	0.489	-	0	12.75	6.33	359.5	246.5	536	0.32	99.68
	140	0.538	-	0	12.57	6.46	269	244	546	0.26	99.74
15kg/hr	37	0.385	-	0	7.99	9.98	103	271	572	0.06	99.94
	56	0.438	-	0	8.55	8.61	219	293	603	0.14	99.86
		-	1.477	0.15	9.77	9.55	125	302	619	0.08	99.92
	74	0.489	-	0	9.27	8.05	353	293.5	618	0.24	99.76
18kg/hr	92	0.538	-	0	10.49	9.00	110	264	571	0.08	99.92
		-	1.815	0.15	9.82	7.25	209.5	299	632	0.16	99.84
	14	0.385	-	0	11.54	8.58	114	286	613	0.09	99.91
	30	0.438	-	0	6.46	10.07	245	363	624	0.11	99.89
18kg/hr	45	0.489	-	0	7.1	11.64	164	412	667	0.09	99.91
	60	0.538	-	0	8.11	10.74	91	351	676	0.05	99.95
					8.38	9.88	87	310	688	0.06	99.94

ภาคผนวก ค.
ตัวอย่างการคำนวณ

1. การคำนวณการเผาไหม้

จากตารางที่ ก.2 องค์ประกอบของเชื้อเพลิงแกลบ (โดยมวล) มีดังนี้ คาร์บอน 38.0% ไฮโดรเจน 5.7% ไนโตรเจน 0.69% ออกซิเจน 41.6% กำมะถัน 0.06% ชี้อาหาร 14.0% และความชื้นในเชื้อเพลิงแกลบ 10.3%

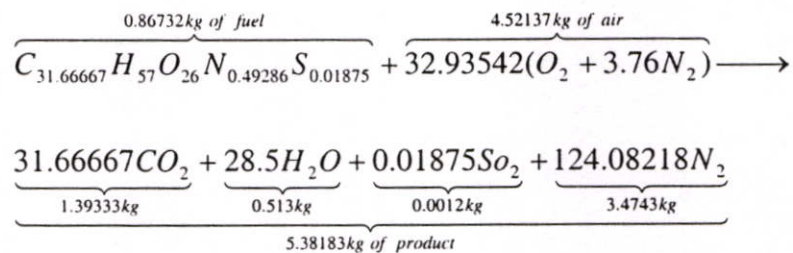
เมื่อคิดที่ปริมาณแกลบ 1kg หรือ 1000 g จะมีปริมาณขององค์ประกอบดังกล่าวดังตารางที่

ก.1

ตารางที่ ก.1 ปริมาณขององค์ประกอบของเชื้อเพลิงแกลบที่ใช้ในการทดลอง

องค์ประกอบ	มวล (m,g)	มวล โมเลกุล (M.W.,g/mole)	จำนวน โมล (N,mole)
คาร์บอน C	380	12	380 /12=31.66667
ไฮโดรเจน H	57	1	57/1=57
ไนโตรเจน N	6.9	14	6.9 /14=0.49286
ออกซิเจน O	416	16	416 /16=26
กำมะถัน S	0.6	32	0.6 /32=0.01875
H ₂ O	103	18	103 /18=5.72222

จากสมการที่ 3.5 จะได้สมการการเผาไหม้ดังต่อไปนี้



อัตราส่วนของปริมาณอากาศต่อปริมาณของเชื้อเพลิงตามทฤษฎี สามารถหาได้จากสมการที่ 3.6

$$(A/F)_{Stoic} = \left(\frac{m_{air}}{m_{fuel}} \right)_{Stoic} = \left(\frac{4.52137}{0.86732} \right) = 5.21304 \frac{\text{kg.dry air}}{\text{kg.husk}}$$

2. การหาค่าความร้อนของเชื้อเพลิง (Heating Value)

จากตารางที่ ก.2 ค่าความร้อนขั้นสูงของเชื้อเพลิงแกลบเท่ากับ 3,580 kcal/kg หรือมีค่าเท่ากับ 14,988.74 kJ/kg ค่าความร้อนขั้นต่ำ สามารถหาได้จากสมการที่ 3.10 -1

$$LHV = HHV - m_w h_{fg}$$

จากสมการที่ 3.1-3.4 จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างความดันย่อยและจำนวน โมลของสารเพื่อใช้ในการหาค่าความร้อนขั้นต่ำดังต่อไปนี้

$$P_i = \frac{N_i}{N_T} \times P$$

เมื่อ

N_i คือ จำนวนโมลของไฮโดรเจนในเชื้อเพลิงมีค่าเท่ากับ 57 mole

N_T คือ จำนวนโมลของผลิตภัณฑ์เท่ากับ 31.66667+28.5+0.01875+124.08218=184.2676 mole

P คือ ความดันบรรยากาศ มีค่าเท่ากับ 1.01325 bar

ดังนั้น

$$P_i = \frac{57 \text{ mole } H_2}{184.2676 \text{ mole. product}} \times 1.01325 \text{ bar} = 0.31343 \text{ bar}$$

จากตารางไอน้ำ Van Wylen (1993) จะได้ค่า h_{fg} เท่ากับ 2,332.63 kJ/kg ดังนั้นค่าความร้อนขั้นต่ำเท่ากับ

$$LHV = 14,988.74 \text{ kJ / kg} - \frac{0.513 \text{ kg. } H_2O}{0.86732 \text{ kg. husk}} \times 2332.63 \text{ kJ / kg} = 13,609 \text{ kJ / kg} = 3,250.46 \text{ kcal / kg}$$

อุณหภูมิน้ำค้างของผลิตภัณฑ์หาได้จาก

$$P_i = \frac{28.5 \text{ mole } H_2O}{184.2676 \text{ mole. product}} \times 1.01325 \text{ bar} = 0.15672 \text{ bar}$$

จากตารางไอน้ำอุณหภูมิน้ำค้างเท่ากับ 54.8 °C

3. การหาปริมาณอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้

เงื่อนไขการทดลอง

อัตราป้อนแกลบ (\dot{m}_{husk}) = 15 kg/hr (= 0.25 kg/min)

% excess air = 56 %

ปริมาณอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้สามารถหาได้ดังนี้

จากสมการที่ 3.6-3.9 อัตราส่วนสมมูลมีค่าเท่ากับ

$$56\% = \frac{(1 - \Phi)}{\Phi} \cdot 100\%$$

$$\Phi = 0.640229$$

$$(A/F) = \frac{(A/F)_{Stoic}}{\Phi} = \frac{5.21304 \frac{kg.dry\ air}{kg.husk}}{0.640229} = 8.1425 \frac{kg.dry\ air}{kg.husk}$$

$$(A/F) = \left(\frac{\dot{m}_{air}}{\dot{m}_{husk}} \right) = \left(\frac{\dot{m}_{air}}{0.25 \frac{kg}{min}} \right) = 8.1425 \frac{kg.dry\ air}{kg.husk}$$

$$\dot{m}_{air} = 2.0356165 \frac{kg}{min}$$

$$Q_T = \frac{2.0356165 kg / min}{1.17 kg / m^3}$$

เมื่อ ความหนาแน่นอากาศเท่ากับ 1.17 kg/m^3

$$\dot{Q}_{air} = \dot{Q}_T = 1739.84 \frac{l}{min}$$

4. การหาปริมาณอากาศทุติยภูมิ

สัดส่วนอากาศเชิงปริมาตรของอากาศทุติยภูมิต่ออากาศทั้งหมด (λ) สามารถหาได้จากสมการที่ 3.18

$$\lambda = \frac{Q_s}{Q_T}$$

ถ้าต้องการให้สัดส่วนปริมาณอากาศทุติยภูมิต่ออากาศรวมเชิงปริมาตร (λ) = 0.15

อัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศทั้งหมด (Q_T) = 1739.84 l/min

$$Q_s = \lambda \cdot Q_T$$

ดังนั้นสัดส่วนอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศทุติยภูมิ (Q_s) = 260.976 l/min

อัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศทุติยภูมิ (Q_p) = 1478.864 l/min

5. การคำนวณประสิทธิภาพ (Efficiency calculation)

เงื่อนไขการทดลอง

อัตราป้อนแกลบ (\dot{m}_{husk}) = 15 kg/hr (= 0.25 kg/min)

อัตราป้อนอากาศรวม (\dot{m}_{air}) = 2.0356165 kg/min

% excess air = 56 %

สัดส่วนปริมาณอากาศทุติยภูมิต่ออากาศรวมเชิงปริมาตร (λ) 0.15

อัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศทั้งหมด (Q_T) = 1739.84 l/min

อัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศปฐมภูมิ (Q_p) = 1478.864 l/min

อัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศทุติยภูมิ (Q_s) = 260.976 l/min

ปริมาณที่วัดได้

ปริมาณขององค์ประกอบไอเสีย

$O_2 = 9.77\%$, $CO_2 = 9.55\%$, $CO = 125$ ppm, $NO_x = 302$ ppm, $SO_2 = 10$ ppm $H_2 = 31$ ppm

$T_{flue\ gas} = 619$ °C หรือ 892.75 K, $T_{ambient} = 25$ °C หรือ 298.75

ดังนั้น $T_{average} = \frac{T_{flue\ gas} + T_{ambient}}{2} = 595.75$ K

ค่าคงที่ต่างๆ

$Cp_{ambient @ 1atm} = 1.00698$ kJ/kg.K, $Cp_{@ Taverage} = 1.05007$ kJ/kg.K

p = ความดันที่สภาวะมาตรฐาน 1 atm หรือ 101,325 pa

$R_u = 8,315$ J/kmol.K และ $\rho_{air @ 1atm, 25^\circ C} = 1.17$ kg/m³

5.1 ประสิทธิภาพการเผาไหม้ (Combustion efficiency)

ประการแรกจำเป็นต้องหาความร้อนสูญเสียเนื่องจากเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ของ CO หรือ $\%q_4$ เมื่อเทียบกับพลังงานที่ได้จากเชื้อเพลิงหรือ q_{fuel} แล้วประสิทธิภาพการเผาไหม้หาได้จากสมการที่ 3.13

$$\eta_{com} \equiv 100 - (\%q_3 + \%q_4) \quad [\%]$$

เนื่องจากในการวัดปริมาณของไอเสีย ปริมาณของ CO นั้นบอกอยู่ในรูปของ ppm จึงต้องทำการหาปริมาณความร้อนเนื่องจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ของ CO ดังกล่าวก่อน ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

ตารางที่ ค.2 ปริมาณขององค์ประกอบของไอเสียของกรณีตัวอย่าง

องค์ประกอบ	%	ppm	χ_i	$M.W._i$	$\chi_i M.W._i$
O ₂	9.77	-	9.77/100=0.0977	32	3.1264
CO ₂	9.55	-	9.55/100=0.0955	48	4.584
CO	125/10000=0.0125	125	125x10 ⁻⁶	28	0.0035
SO ₂	10/10000=0.0010	10	10 x10 ⁻⁶	64	0.00064
H ₂	31/10000=0.0031	31	31 x10 ⁻⁶	2	0.000062

เนื่องจากยังไม่รู้ปริมาณของ N₂ ในไอเสีย จึงจำเป็นต้องหาปริมาณของ N₂ ได้จากสมการที่ 3.4

$$\sum_i \chi_i = 1$$

$$\sum_i \chi_i = \chi_{O_2} + \chi_{CO_2} + \chi_{CO} + \chi_{SO_2} + \chi_{H_2} + \chi_{N_2} = 1$$

$$\chi_{N_2} = 1 - \sum_i \chi_i$$

$$\chi_{N_2} = 1 - (0.0977 + 0.0955 + (125 + 10 + 31) \times 10^{-6})$$

$$\chi_{N_2} = 0.806634 = 80.6634 \% \text{ by volume}$$

จำเป็นต้องหาปริมาณของอากาศที่ทางออกเพื่อต้องการทราบปริมาณของ N_2 ที่มากับอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ดังกล่าว ซึ่งสามารถหาได้ดังนี้

จากปริมาณอากาศรวมที่เข้าเตาเผาคือ \dot{Q}_T ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1735.7 l/min ตามที่ได้หาไว้ในตอนเริ่มต้น และปริมาณอากาศที่สภาวะอากาศมาตรฐาน (STP, 1atm, 25 °C) จำนวน 1gmole มีปริมาตร 22.4 ลิตร ดังนั้นอัตราการไหลของอากาศที่เข้าเตาเผา 1739.84l/min จะหาจำนวนโมลได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{จำนวน โมลของอากาศเข้าเตาเผา} &= \frac{1739.84 \text{ l / min}}{22.4 \text{ l}} = 77.4866 \text{ gmol / min} \\ &= 1.2945238 \text{ gmol / s} \end{aligned}$$

ในอากาศจะมีจำนวน N_2 เท่ากับ 79% by volume ดังนั้นในอากาศที่เข้าเตาเผา 1.29144 gmol/s จะมีจำนวน $N_2 = 0.79 \times 1.2945238 \text{ gmol/s} = 1.0226738095 \text{ gmol/s}$

จากองค์ประกอบไอเสียมีปริมาณ $CO = 0.0125\%$ by volume และ $N_2 = 80.6634\%$ by volume

$$\text{ปริมาณต่อเวลาของ CO ในไอเสีย} = \frac{0.0125 \times 1.0226738095}{80.6634} = 0.0001585 \text{ gmol / s}$$

ค่าความร้อนของ CO เท่ากับ 67,636 cal/gmol

ดังนั้นความร้อนสูญเสียเนื่องจากเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ของ CO หรือ q_4 หาได้จาก

$$\begin{aligned} q_4 &= 67,636 \text{ cal / gmol} \times 0.0001585 \text{ gmol / s} = 10.719 \text{ cal / s} \\ &= 44.87771 \text{ J / s} \\ &= 0.04487771 \text{ kJ / s} \end{aligned}$$

จากพลังงานที่อยู่ภายในเชื้อเพลิงหาได้จากสมการที่ 3.11

$$q_{\text{husk}} = \dot{m}_{\text{fuel}} \times LHV$$

$$q_{\text{husk}} = \frac{0.25 \text{ kg}}{\text{min}} \times \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} \times 13,609 \text{ kJ / kg} = 56.71667 \text{ kJ / s}$$

$$\text{ความร้อนสูญเสียเนื่องจากเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ของCO} = \frac{0.04487771 \text{ kJ / s} \times 100}{56.72 \text{ kJ / s}} = 0.0791215\%$$

ความร้อนสูญเสียเนื่องจากเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ของCO เท่ากับ 0.0791215% ของพลังงานที่อยู่ในเชื้อเพลิง ดังนั้นประสิทธิภาพการเผาไหม้หาได้จากสมการที่ 3.13

$$\eta_{com} = 100 - (0.0791215) = 99.92 \%$$

ภาคผนวก ง.
บทความที่ได้รับการตีพิมพ์



ISSN 0125-1724

วิศวกรรม

ลาดกระบัง

ศูนย์วิจัยการสมรรถนะ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

LADKRABANG ENGINEERING JOURNAL

ปีที่ 20 ฉบับที่ 3

กันยายน 2546

1.	วจนการกำเนิดความถี่แบบเลื่อนเฟสโดยใช้เทคโนโลยีซีมอส มนตรี คำเงิน กอบชัย เดชหาญ สมพงษ์ อารีย์ สุรพล บุญจันทร์	1
2.	วจนการความต้านทานแบบบวกที่ควบคุมด้วยแรงดันโดยใช้มอสทรานซิสเตอร์ สมนึก หัวหาญ กอบชัย เดชหาญ อิทธิพงษ์ ชัยสายัณห์	6
3.	แอลพีเคเคชั่นโปรแกรมโทรศัพท์และอินเตอร์เน็ตแบบโครงสร้างช่องสัญญาณ BAI บนโครงข่าย ISDN ทวีพร เล็กชะอุม กอบชัย เดชหาญ	12
4.	การวิเคราะห์ระบบเครือข่ายท้องถิ่นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ สุพัตรา ทองเกษม กฤษณะพงศ์ พันธุ์ศรี กอบชัย เดชหาญ นภัทร สระเยี่ยม	18
5.	การศึกษาค่าลดทอนสัญญาณจากมุมอาคารในเส้นทางนอกระดับแนวสายตาของระบบโทรศัพท์พื้นฐานพหุภาคส่วนบุคคล (PCT) อำนาจ ยิ้มสวัสดิ์ ไกรสิน สงวนวัฒนา พิเชฐ ม่วงนวล	24
6.	การจัดกลุ่มเอกสารโดยใช้ Self-Organizing Map แบบความเร็วสูง พรเทพ ไรจนวสุ เอื้อน ปิ่นเงิน	30
7.	การศึกษาเชิงทดลองเครื่องผลิตไฟฟ้าจากตะกั่วเทอร์โมอิเล็กทริก เจริญพร เลิศสถิตอนกร ณัฐวุฒิ สุวรรณทา	35
8.	การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าโดยใช้โปรแกรม PSS/E เพื่อใช้งานแผนระยะสั้นในเขตนครหลวง เชาวฤทธิ์ ธรรมเพียร มณฑล สีลาจินดาไกรฤกษ์	42
9.	การตรวจจับและระบุตำแหน่งพอลดโดยใช้การแปลงเวฟเล็ดและโครงข่ายประสาทเทียมชนิดจัดกลุ่มด้วยตนเอง อรรรพพล เก่าพิทักษ์กุล ศุภี บรรจงจิตร ฐิติพงษ์ นิยมสมัย	48
10.	การวิเคราะห์โหลดเกินในระบบไฟฟ้ากำลังโดยวิธีไลเนียร์เซนต์วิตตี้แฟกเตอร์แบบปรับปรุง สิทธิเดช วิชาศรีศิริกุล ศิลปชัย พงษ์ประเสริฐ มณฑล สีลาจินดาไกรฤกษ์	54
11.	การวิเคราะห์คุณสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์ให้ความร้อน 1-เฟส ด้วยวิธีการปรับจำนวนไซเคิลเต็มแบบดิจิทัล รักศักดิ์ ยี่ร้อยสา วิริยะ พิเชฐจำเริญ	60
12.	การวิเคราะห์การใช้พลังงานของรถไฟฟ้า สิปปภาส จารวรรณชัย ศิริวัฒน์ โพธิ์เวชกุล	66
13.	การประเมินความสามารถของผู้รับเหมา : มุมมองจากอุตสาหกรรมก่อสร้างในรัฐควีนแลนด์ จักรพงษ์ พงษ์เพ็ง	72
14.	การศึกษาพฤติกรรมทางกลของเทปรัดกลองสินค้าซึ่งทำจากเศษโพลีโพรพิลีน วีรศักดิ์ หมู่เจริญ มิ่ง โลกิจแสงทอง ชาลิต แสงสวัสดิ์	78
15.	ผลกระทบของ residence time ของอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตต่อกระบวนการดูดซึมก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ นิตินัย ปัญญาบุศยกุล จารุวัตร เจริญสุข	84
16.	อิทธิพลของเงื่อนไขการทำงานต่อการเกิดรอยประสานและรอยยุบในการขึ้นรูปพลาสติกแบบฉีด วิษณุวรรค์ โชคชัยวิวัฒน์ จารุวัตร เจริญสุข	90
17.	คุณลักษณะของการเผาไหม้เชื้อเพลิงแกลบในเตาเผาออร์เทคแบบสองชั้น ยี่ยัง แก้วก่อเกียรติ นิยม ศรีศิริสิทธิกุล พงษ์เจต พรหมวงษ์	96
18.	สหสัมพันธ์ของหอเขย่า เทอดไทย วัฒนธรรม ชื่นกมล ช้องเกี่ยวพันธ์	102
19.	การศึกษาการไหลผ่านลิ้นหัวใจเทียมโดยเทคนิคการสังเกตการไหลจากเส้นควัน สมิทธิ์ เอี่ยมสอาด วิชาญ คงเกียรติไพบูลย์ นิยม ศรีศิริสิทธิกุล พงษ์เจต พรหมวงษ์	108
20.	Periodic Performance of a Membrane Reactor for Methane Steam Reforming Duangkamol Na-Ranong Takao Ohmori Takuji Yamamoto Akira Endo Takaji Akiya and Masaru Nakaiwa	114

คุณลักษณะของการเผาไหม้เชื้อเพลิงแกลบในเตาเผาออร์เทค แบบสองชั้น

Combustion Characteristic of Rice Husk in a Two-Stage Vortex Combustor

ขิงขง แก้วก่อเกียรติ นิยม ศรีศิริทิทธิกุล พงษ์เจต พรหมวงศ์
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการศึกษาคุณลักษณะของการเผาไหม้เชื้อเพลิงแกลบในเตาเผาออร์เทคแบบสองชั้น การกระจายอุณหภูมิตามตำแหน่งต่างๆภายในเตาเผา ซึ่งได้เบาและควันจากก๊าซไอเสียได้ถูกวัดและสังเกตตามลำดับ อัตราการไหลเชิงมวลของแกลบคงที่คือ 0.3 กิโลกรัมต่อนาที และปรับค่าอัตราส่วนสมมูล (Φ) คือ 0.2, 0.25, 0.3 และ 0.35 และในการศึกษาผลจากการป้อนอากาศทุติยภูมิต่อความเสถียรของเปลวไฟ ได้ใช้อัตราส่วนของอัตราการไหลของอากาศทุติยภูมิเชิงปริมาตรต่ออากาศทั้งหมด (λ) จำนวน 3 ค่า คือ 0.0, 0.15 และ 0.25 การทดลองได้แสดงถึงอุณหภูมิสูงสุดของการเผาไหม้ภายในห้องเผาไหม้มีค่าประมาณ 1000°C และควันที่เกิดจากการเผาไหม้มีปริมาณเพียงเล็กน้อย นอกจากนี้สามารถควบคุมการปล่อยมลพิษและขนาดอนุภาคของขี้เถ้าจากปล่องทิ้งไอเสียได้ด้วยอัตราส่วนการไหลของอากาศทุติยภูมิต่ออากาศทั้งหมด (λ) เตาเผาออร์เทคแบบสองชั้นนี้ได้แสดงประสิทธิภาพที่ดี การปล่อยมลพิษต่ำ มีความเสถียรสูงและง่ายต่อการทำงานในการเผาไหม้เชื้อเพลิงแกลบ

Abstract

This paper presents the study of combustion characteristics of rice husk fuel in a two-stage vortex combustor (TVC). The temperature distributions for selected locations inside the combustor and the fly ash and smoke from its flue gas were measured and observed respectively. Measurements were made by setting a constant mass flow rate of rice husk to be 0.3 kg/min and by varying the equivalence ratio, Φ , to be 0.2, 0.25, 0.3 and 0.35. To study the effect of feeding secondary air on flame stability, three values of the ratio of volumetric flow rates of the secondary air to the total air, (λ), were used and set to be 0.0, 0.15 and 0.25. The experiment shows the maximum temperature of about 1000°C in the chamber with less smoke of flue gas. Besides, emissions and the sizes of fly ash particles from the exhaust stack can be controlled by the flow rate ratios of the secondary air to the total air, λ . The TVC shows an excellent performance, low emissions, high stabilization and ease of operation in firing the rice husk fuel.

1. บทนำ

พลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิลที่มีอยู่ตามแหล่งต่างๆ มี
อัตราการลดลงอย่างมาก และจะเป็นอุปสรรคต่อการพัฒนาการ

ใช้พลังงานในอนาคต ดังนั้นความน่าสนใจต่อแหล่งพลังงาน
หมุนเวียนซึ่งเป็นพลังงานทดแทนที่สะอาดจึงเพิ่มขึ้น
ในจำพวกแหล่งพลังงานที่สามารถทดแทนเชื้อเพลิงฟอสซิล

นั้น เชื้อเพลิงชีวมวลคือหนึ่งในจำพวกแหล่งพลังงานเหล่านั้นเนื่องจากมีอยู่ทั่วไปในโลก และมีรายงานจำนวนมากของเตาเผาหลายชนิดที่มีการใช้วัสดุชีวมวลหรือถ่านหินเป็นเชื้อเพลิง แต่อย่างไรก็ตาม Wan และ Chyang 1998 [1] รายงานว่าการใช้วิธีการของฟลูอิดไคซ์เบดนั้นต้องการห้องเผาไหม้ (เฟิร์บอร์ค) ที่สูงมากเพื่อลดอัตราการหลุดลอย

เตาเผาออร์เทคได้ถูกพัฒนาขึ้นเมื่อไม่นานมานี้ ซึ่งเตาเผาชนิดนี้เป็นการรวมข้อได้เปรียบและกำจัดข้อด้อยของเตาเผาไซโคลน เตาเผาฟลูอิดไคซ์เบดและเตาเผาถ่านหินผง Nieh และ Fu (1988,1990)[2,3] ได้ทำการทดลองเพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการเผาถ่านหินอย่างสะอาด Promvong และ Silapabanleng (2001)[4] ได้ทำการทดลองกับเตาเผาออร์เทคซึ่งมีลักษณะคล้ายคลึงกับเตาเผาของ Nieh และ Fu แต่ใช้แกลบเป็นเชื้อเพลิงแทนการใช้ถ่านหิน ได้ศึกษาและรายงานพฤติกรรมของการเผาไหม้แกลบในเตาเผาคังกล่าว ผลจากข้อได้มาในเตาเผาต่อประสิทธิภาพการเผาไหม้รวมถึงอุปสรรคปัญหาในการกำจัด เนื่องจากแกลบมีปริมาณขี้เถ้าสูงซึ่งไม่เหมือนถ่านหิน

ในการปรับปรุงการเผาไหม้ให้มีประสิทธิภาพสูงและเกิดมลพิษต่ำมีวิธีการอยู่หลายวิธีดังนี้ 1) การปรับปรุงการออกแบบห้องเผาไหม้ 2) การเตรียมส่วนผสมของเชื้อเพลิง 3) การสร้างเสถียรภาพของเปลวไฟด้วยการหมุนวน 4) การนำไอเสียกลับมาเผาไหม้ใหม่ 5) การเผาไหม้เป็นลำดับขั้นและอื่นๆ

บทความนี้ได้ทำการศึกษาเบื้องต้นของคุณลักษณะของการเผาไหม้และการกระจายอุณหภูมิในการเผาไหม้แกลบในเตาเผาออร์เทคแบบสองชั้น ผลจากการป้อนอากาศทฤษฎีต่อความเสถียรของเปลวไฟ การควบคุมอุณหภูมิในเตาเผา การปล่อยมลพิษ ขี้เถ้าและควันจากปล่องทิ้งไอเสียส่วนได้ทำการศึกษาและสังเกตเพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบและปรับปรุงประสิทธิภาพของเตาเผา

2.การติดตั้งการทดลองและวิธีการ

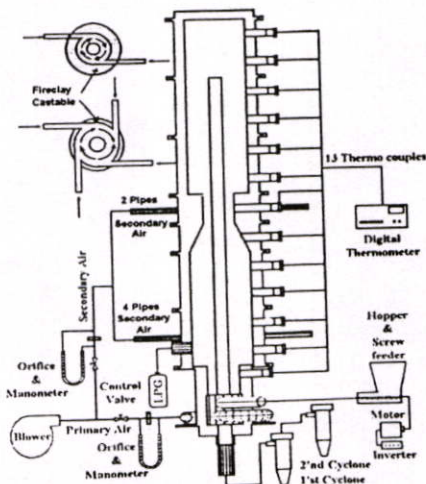
แกลบที่นำมาทดลองมีขนาด 2.0x8.0 mm. (ค่าการวิเคราะห์เชื้อเพลิงแสดงในตารางที่1) การจัดระบบการทดลองของเตาเผาแสดงในรูปที่1 เตาเผาทำจากเหล็กท่อ

ทรงกระบอก หล่อซีเมนต์ทนไฟแทนการหุ้มฉนวน เตาเผามีความสูง1.8 m. เส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.30 m. และมีชุดท่อหัวฉีดอากาศทฤษฎี (Q_s) เส้นผ่าศูนย์กลาง 0.025 m. ท่อทิ้งไอเสียซึ่งอยู่กลางห้องเผาไหม้ทำจากแตนเลสขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.075 m. รายละเอียดเตาเผาออร์เทคแบบสองชั้นแสดงในรูปที่2

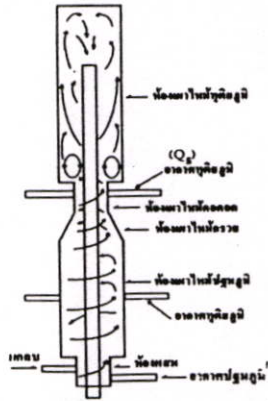
จากแผนผังที่แสดงในภาพที่1 อากาศปฐมภูมิได้ถูกเตรียมเข้าห้องผสมที่ส่วนล่างของเตาพร้อมเชื้อเพลิงแกลบ อากาศทฤษฎีสองส่วนได้ถูกฉีดเข้าไปในเตาตามแนวสัมผัส ส่วนแรกถูกฉีดเข้าไปในห้องเผาไหม้ปฐมภูมิ ส่วนที่สองฉีดไปยังคอกคอดซึ่งอยู่ใต้ห้องเผาไหม้ทฤษฎี เพื่อเพิ่มความเข้มข้นของการหมุนวนและเสถียรภาพของเปลวไฟ

ตารางที่1 องค์ประกอบของแกลบ

คาร์บอน	36.8%
ไฮโดรเจน	5.8%
ออกซิเจน	37.4%
ไนโตรเจน	0.14%
กำมะถัน	0.1%
ความชื้น	7.8%
ขี้เถ้า	18.9%
ความหนาแน่น , kg/m ³	100.
ค่าความร้อน(Gross heat of combustion, kcal/kg)	3,308.
Air fuel ratio	5.0 kg air/kg fuel



รูปที่1 แผนภาพของการติดตั้งระบบชุดทดลอง



รูปที่ 2. รูปร่างของเตาเผาออร์เทคแบบสองชั้น

การเผาไหม้เกิดขึ้นก่อนในบริเวณวงแหวนในห้องเผาไหม้ปฐมภูมิ ต่อจากนั้นก๊าซร้อนที่ได้จากการเผาไหม้จะหมุนขึ้นไปยังห้องเผาไหม้ทุติยภูมิ ซึ่งก่อนที่จะเข้าห้องเผาไหม้ทุติยภูมิก๊าซที่ได้จากการเผาไหม้จะถูกเร่งและเมื่อผ่านคอคอดจะถูกผสมกับอากาศทุติยภูมิที่เตรียมไว้ การเผาไหม้บริเวณเหนือคอคอดนี้การหมุนวนที่ปั่นป่วนสูงของก๊าซจะเหนี่ยวนำให้เกิด Central toroidal recirculation ในห้องเผาไหม้ทุติยภูมิเพื่อช่วยเพิ่มอัตราการผสมกันระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิง และช่วยเพิ่มเวลาในห้องเผาไหม้ให้มากขึ้น นอกจากนี้ผลจากทั้งแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางและแรงกดของไหลจะทำให้เชื้อเพลิงลอยขึ้นสู่ด้านบนของเตาเผา ขณะที่อนุภาคแกลบถูกเผาไหม้ก็จะมีน้ำหนักและขนาดลดลงอย่างค่อนเนื่องจนในที่สุดก็จะถูกเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ อนุภาคส่วนใหญ่ของซีเมนต์จะมีน้ำหนักเบาและมีขนาดเล็กพอจะออกผ่านไปยังท่อทิ้งไอเสียกับก๊าซที่ได้จากการเผาไหม้และออกจากเตาเผาเรียกว่าซีเมนต์เบา

เตาเผาทำงานอยู่ในช่วงอุณหภูมิ 500-1000°C เครื่องเป่าลม (Blower) ขนาด 10 แรงม้าใช้ในการเตรียมอากาศปฐมภูมิและอากาศทุติยภูมิ แกลบถูกลำเลียงผ่านเกลียวลำเลียงเข้าไปยังห้องผสมที่อยู่ด้านล่างของเตา ตอนเริ่มต้นของการทำงานใช้หัวเผาอุ่นเตาให้ร้อนด้วยก๊าซ LPG ใช้เวลาประมาณ 15 นาทีจนอุณหภูมิในห้องเผาไหม้สูงประมาณ 400°C ต่อจากนั้นป้อนแกลบจากฮอปเปอร์ (Hopper) อย่างช้าๆจนกระทั่งอัตราป้อนแกลบอยู่ที่ 0.3 กิโลกรัมต่อนาที จนอุณหภูมิสูงถึง 700°C จึงหยุดการอุ่น

เตาโดยการนำหัวเผาออก ในตอนเริ่มต้นของการจุดเตาจะพบควันสีดำหนาแล้วหลังจากนั้นควันจะจางและน้อยลงจากการปรับ อัตราส่วนผสมซึ่งถูกกำหนดโดย

$$\Phi = \frac{(m_a / m_f)_{stoic}}{(m_a / m_f)_{actual}} \tag{1}$$

เมื่อ m_a คือ อัตราการไหลของอากาศ (kg/min)
 m_f คือ อัตราการไหลของเชื้อเพลิง (kg/min)
 โดยที่ $\Phi > 1$ คืออัตราส่วนผสมหนา (Rich)
 $\Phi = 1$ คืออัตราส่วนผสมพอดี (Stoichiometric)
 $\Phi < 1$ คืออัตราส่วนผสมบาง (Lean)

สัดส่วนของอากาศทุติยภูมิต่ออากาศทั้งหมด (λ) สามารถหาได้ดังต่อไปนี้

$$\lambda = \frac{Q_s}{Q_T} \tag{2}$$

เมื่อ Q_s คืออัตราการไหลของอากาศทุติยภูมิ (kg/min)
 Q_T คืออัตราการไหลของอากาศทั้งหมด (kg/min)
 โดยอัตราส่วนผสมที่ใช้คือ 0.2, 0.25, 0.3 และ 0.35 โดยในแต่ละอัตราส่วนผสมจะมีการใช้อัตราส่วนอากาศเชิงปริมาตรของอากาศทุติยภูมิต่ออากาศทั้งหมด λ มีค่าเท่ากับ 0.0, 0.15 และ 0.25 ใช้เทอร์โมคัปเปิลชนิด K วัดอุณหภูมิให้ห้องเผาไหม้ตามตำแหน่งต่างๆที่เลือกแสดงผลจากอนิเมเตอร์ วัดอัตราการไหลเชิงปริมาตรด้วยออริฟิส วัดปริมาณก๊าซไอเสียที่ทางออกด้วยเครื่องวัดไอเสียของ Testo รุ่น 300 MI โดยทุกค่าของข้อมูลถูกเก็บที่เงื่อนไขสภาวะคงตัว

3. ผลการทดลองและการวิเคราะห์

การวัดระดับอุณหภูมิภายในเตา วัดที่ความสูงต่อเส้นผ่าศูนย์กลางเตา(x/D) 12 ระดับ คือ 0.25 0.75 1.25 1.75 2.25 2.75 3.25 3.75 4.25 4.75 5.25 และ 5.75

3.1 อิทธิพลของอัตราส่วนผสม (Φ)

การกระจายอุณหภูมิตามแนวรัศมีและตามแนวแกนภายในเตาเผาสำหรับในแต่ละอัตราส่วนผสมได้แสดงในภาพที่ 3ก. และ 3ข. ตามลำดับ

ที่ $\lambda = 0.0$ (ไม่มีการฉีดอากาศทุติยภูมิ) อุณหภูมิสูงสุดประมาณ 950°C พบว่ากระกระจายอุณหภูมิในแต่ละตำแหน่งนั้นคงตัวยกเว้นที่ใกล้บริเวณผนังและที่ส่วนล่าง

ของเตา ที่ $\Phi = 0.3$ มีการกระจายอุณหภูมิที่สม่ำเสมอทั้งห้องเผาไหม้ปฐมภูมิและห้องเผาไหม้ทุติยภูมิซึ่งสามารถเห็นได้ชัดเจนในรูปที่ 3 ข. ปฏิบัติการเผาไหม้ที่ $\Phi=0.35$ 0.25 และ 0.2 นั้นสังเกตได้ว่าการเผาไหม้ที่ห้องเผาไหม้ปฐมภูมินั้นไม่เสถียร ส่วนที่ $\Phi < 0.3$ ปฏิบัติการเผาไหม้จะเกิดขึ้นอย่างช้าๆ ในห้องเผาไหม้ปฐมภูมิและจะมีอัตราใกล้เคียงกันกับที่ Φ อื่นๆ ในห้องเผาไหม้ทุติยภูมิ ซึ่งสามารถให้เหตุผลว่าอนุภาคมีเวลาในห้องเผาไหม้น้อยเมื่อใช้อากาศส่วนเกินมาก ดังนั้นความแตกต่างของการใช้อัตราส่วนสมมูลจะสามารถสังเกตเห็นได้ชัดเจนจากระดับอุณหภูมิในห้องเผาไหม้ปฐมภูมิ

3.2 อิทธิพลของอากาศทุติยภูมิ (λ)

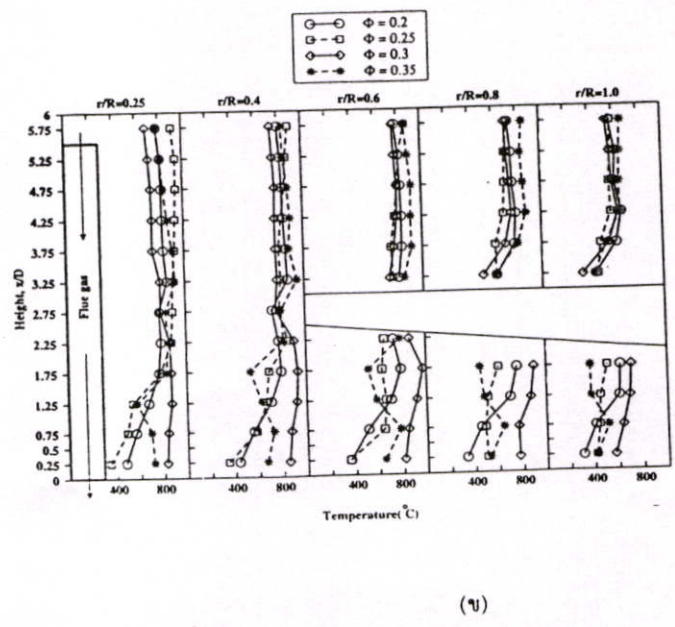
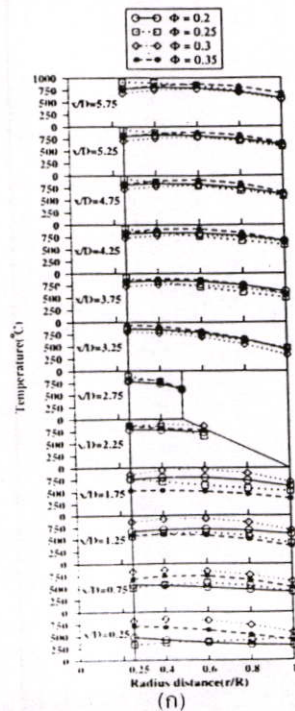
3.2.1 กรณี $\lambda=0.15$

กรณีของ $\lambda = 0.15$ นั้นมีการกระจายอุณหภูมิที่สม่ำเสมอกว่า $\lambda=0.0$ ในทุกอัตราส่วนสมมูล โดยเฉพาะในห้องเผาไหม้ปฐมภูมิ จากกรณีของ $\lambda=0.0$ นั้นที่ $\Phi=0.3$ ให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้ดีที่สุด ส่วนที่ $\Phi=0.35$ ปฏิบัติการเผาไหม้ไม่เสถียร แต่ในกรณี $\lambda=0.15$ ที่

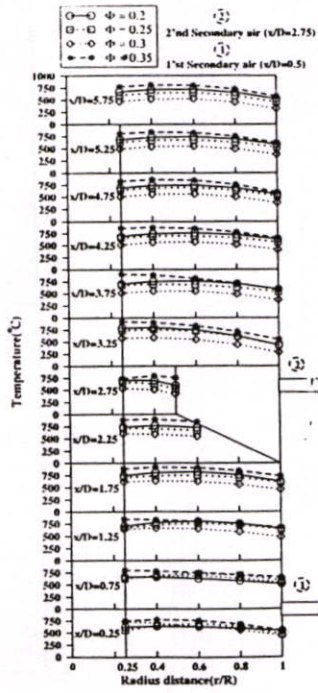
$\Phi=0.35$ แสดงผลได้ดีและให้อุณหภูมิสูงกว่าตามแนวความสูงและการเผาไหม้มีความเสถียรมากกว่ากรณีของ $\lambda=0.0$ ซึ่งสามารถเห็นได้จากภาพที่ 4 ก. และ 4 ข. การใช้ $\lambda=0.15$ ได้ปรับปรุงการกระจายอุณหภูมิและความเสถียรของการเผาไหม้และสามารถที่จะเผาไหม้ได้

3.2.2 กรณี $\lambda=0.25$

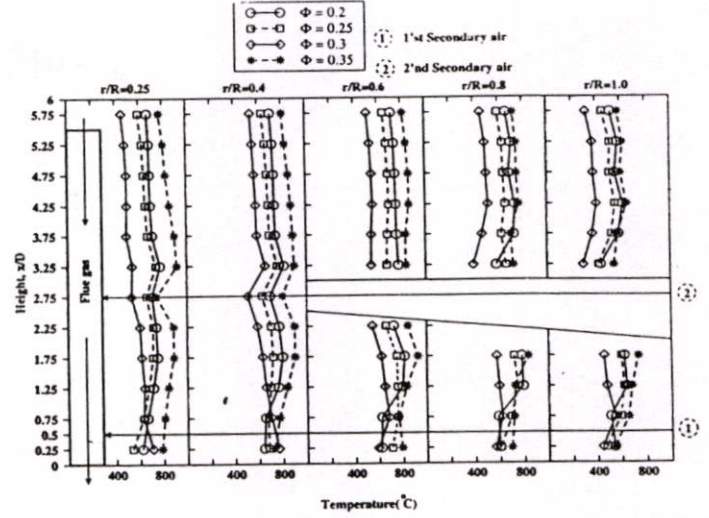
กรณีของการใช้อากาศส่วนเกินน้อย ซึ่งเป็นการบอกว่าการเผาไหม้แบบที่มีอัตราการป้อนเชื้อเพลิงน้อยและมีอากาศส่วนเกินน้อยนั้น λ สามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการเผาไหม้ได้ สำหรับ $\Phi=0.2$ หรือ 0.25 สังเกตว่าอิทธิพลของ $\lambda=0.15$ ทำให้กระจายอุณหภูมิมีความสม่ำเสมอทั้งสองห้องเผาไหม้ผลจากการใช้ $\lambda=0.25$ ต่อการกระจายอุณหภูมิในทุกค่าของ Φ ค่าทั้งหมดมีแนวโน้มเดียวกันทั้งสองห้องเผาไหม้ ซึ่งสามารถมองเห็นได้ชัดที่รูปที่ 5 ก. และ 5 ข. ตามลำดับแต่การกระจายอุณหภูมิมิมีความราบเรียบกว่ากรณี $\lambda=0.0$ และ 0.15 ซึ่งหมายความว่ามีการผสมและเกิดปฏิบัติการเผาไหม้ดีกว่า สามารถสังเกตได้ว่าขอบเขต



รูปที่ 3 การกระจายอุณหภูมิภายในเตาเผา กรณีไม่ใช้อากาศทุติยภูมิ $\lambda=0.0$. (ก) ตามแนวรัศมี และ (ข) ตามแนวแกน



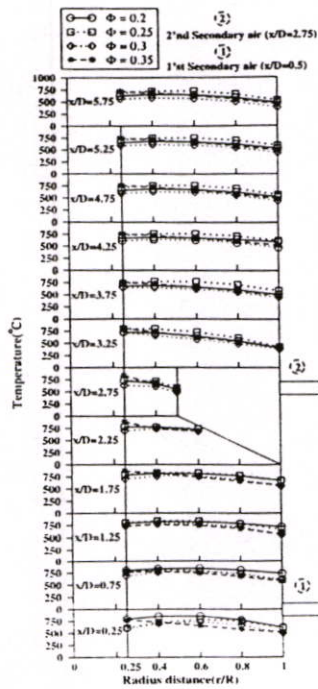
(ก)



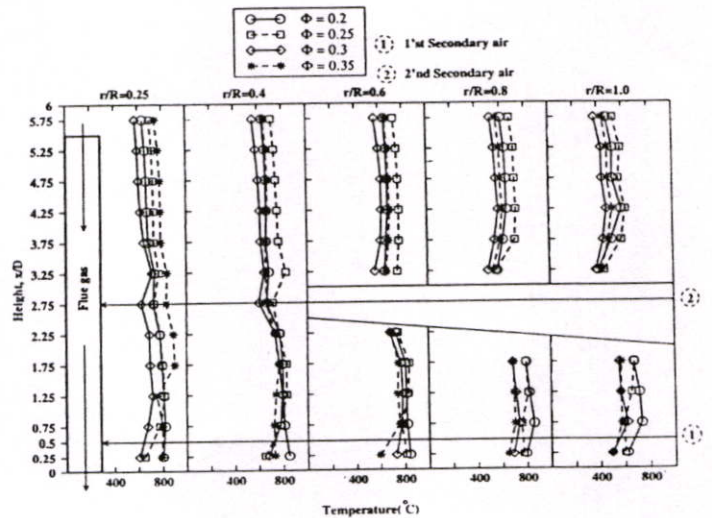
(ข)

รูปที่ 4. การกระจายอุณหภูมิภายในเตาเผา กรณีใช้อากาศชุดปฐมภูมิ 15%, $\lambda=0.15$, (ก) ตามแนวรัศมี และ (ข) ตามแนว

แกน



(ก)



(ข)

รูปที่ 5. การกระจายอุณหภูมิภายในเตาเผา กรณีใช้อากาศชุดปฐมภูมิ 25%, $\lambda=0.25$, (ก) ตามแนวรัศมี และ (ข) ตามแนวแกน

ของการติดไฟของการผสมบางสามารถที่จะเพิ่มขึ้นได้ โดยการใช้ค่า λ นอกจากนี้กรณี $\lambda=0.0$ ปฏิบัติการเผาไหม้จะไม่เสถียรที่ $0.2 < \Phi < 0.3$ แต่การเผาไหม้จะมีความเสถียรมากขึ้นเมื่อมีการใช้ λ ในการเผาไหม้

3.3 การปล่อยมลพิษของก๊าซไอเสีย

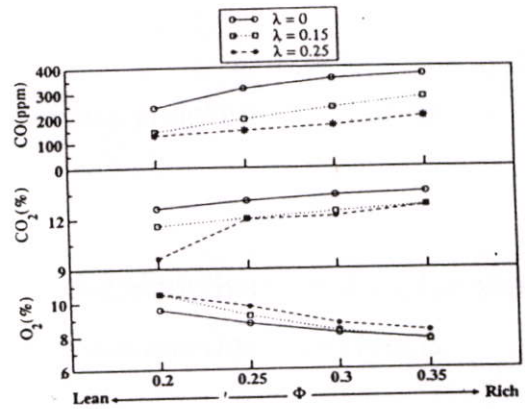
การปล่อยก๊าซ CO, CO₂ และ O₂ ในแต่ละค่าของอัตราส่วนสมมูลและ λ นั้นได้แสดงในภาพที่ 6 สำหรับค่าของ CO นั้นจะลดลงเมื่อปริมาณของ Φ ลดลง (ผสมบาง) การก่อตัวของ CO จะลดลงอีกครั้งเมื่อมี λ ตั้งแต่ได้ จากด้านบนของภาพที่ 6 ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่ามีการเผาไหม้สูงที่ห้องเผาไหม้ทั้งสองเนื่องจากการผสมกันดีระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงในเตาเผา การปล่อย CO₂ นั้นจะค่อยๆลดลงเมื่อมีการเพิ่มอากาศส่วนเกิน นอกจากนี้การใช้ λ จะทำให้ปริมาณ CO₂ ลดลงด้วย ระดับของ O₂ จะพบว่าค่อยๆเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเพิ่มอากาศส่วนเกินและ λ

4.สรุป

การทดลองศึกษาการเผาไหม้เชื้อเพลิงแกลบในเตาเผาออร์ตแบบสองชั้นซึ่งมีอัตราส่วน 0.3 กิโลกรัมต่อนาที โดยได้ทำการวัดการกระจายอุณหภูมิและการปล่อยก๊าซไอเสียรวมถึงเสถียรภาพของการเผาไหม้ ผลการทดลองพบว่าการใช้อัตราส่วนสมมูลระหว่าง 0.2 ถึง 0.3 ให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้และ ความเสถียรของเปลวไฟที่ดี มีค่าการปล่อยของมลพิษน้อย การใช้อากาศชุดภูมิช่วยในการเผาไหม้ในแต่ละค่าอัตราส่วนสมมูลมีผลให้ลักษณะการกระจายอุณหภูมิมีความเสถียรมากยิ่งขึ้น รวมไปถึงช่วยขยายขอบเขตของการติดไฟ มีการหมุนมากขึ้นและทำให้เกิด recirculation zone ส่งผลให้การหลุดลอยของอนุภาคลดลงและปล่อยมลพิษต่ำกว่า ทำให้สามารถเผาไหม้ได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น

5.กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีจากการได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากกองทุนเพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงานและขอขอบคุณห้างหุ้นส่วนจำกัด โรงสีไฟศรีกรุงลาดกระบังที่ได้อนุเคราะห์เชื้อเพลิงแกลบในการทดลอง



รูปที่ 6 การปล่อยมลพิษของก๊าซไอเสียที่ทางออก

6.เอกสารอ้างอิง

- [1] H.P. Wan and C.S. Chyang, "Transport Disengaging Height and Elutriation Rate of a Vortexing Fluidized Bed," J. of Chemical Engineering of Japan, Vol.13, No.6, pp.977-986, 1998.
- [2] S. Nieh and T.T. Fu, "Development of a Non-slugging Vortex Combustor (VC) for Space/Water Heating Application," Proceeding of The 5th International Coal Conference, Pittsburgh, pp.761-768, 1988.
- [3] S. Nieh and T.T. Fu, "A Non-slugging Vortex Combustor Firing Coal-Water Fuel for Commercial Heating Application," Proceeding of The 7th International Coal Conference, Pittsburgh, pp.223, 1990.
- [4] P. Promvong and K. Silapabanleng, "Experimental Study of Combustion Characteristics in a Rice Husk Fired Vortex Combustor," Proceedings of the 36th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference, Savannah, Georgia, paper no. 2001-RE-17, 2001.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายยิ่งยง แก้วก่อเกียรติ
ประวัติการศึกษา	
2543	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
ประสบการณ์ทำงาน	
พ.ศ.2543	ตำแหน่งผู้ช่วยอาจารย์ ภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
	ตำแหน่งผู้ช่วยอาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
พ.ศ.2544-2545	บริษัท Siamese Tire ตำแหน่ง ออกแบบและพัฒนา
พ.ศ. 2546-2547	รับราชการทหาร
พ.ศ.2547-ปัจจุบัน	ตำแหน่งอาจารย์ประจำ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร