

เตาเผาแก๊สวอร์เทกซ์หลายขั้น

A MULTISTAGING VORTEX COMBUSTOR FOR BURNING RICE HUSK

วิศิษฐ์ ลีลาภาติกุล

WISIT LELAPHATIKUL

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2545

ISBN 974-648-854-6

เตาเผาแกสบวอร์เทคหลายชั้น

A MULTISTAGING VORTEX COMBUSTOR FOR BURNING RICE HUSK

วิศิษฐ์ ลีลาพาติกุล

WISIT LELAPHATIKUL

เลขที่.....
เลขทะเบียน 43299
วัน, เดือน, ปี 26 ส.ค. 2545

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2545

ISBN 974-648-854-6

A MULTISTAGING VORTEX COMBUSTOR FOR BURNING RICE HUSK

WISIT LELAPHATIKUL

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

2002

ISBN 974-648-854-6

COPYRIGHT 2002

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

หัวข้อวิทยานิพนธ์	เตาเผาแกสบวอร์เทคหลายชั้น
นักศึกษา	นาย วิศิษฐ์ สีลาผาดิกุล
รหัสประจำตัว	42062022
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
พ.ศ.	2545
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ.ดร. พงษ์เจต พรหมวงศ์

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ ได้ทำการศึกษารุ่นบวอร์เทคของเตาเผาแกส ที่มีอิทธิพลต่อการเผาไหม้ภายในเตา ซึ่งเตาเผาไหม้มีลักษณะเป็นท่อทรงกระบอก มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 300 มิลลิเมตร (D) โดยมีแกนกลางภายในเป็นท่อทึงไอเสีย และมีการติดตั้งตำแหน่งท่อฉีดอากาศไว้ในแนวสัมผัสรอบ ๆ ผนังเตาเผาไหม้ เพื่อทำให้เกิดการไหลหมุนวนของอากาศภายใน ขนาดของเตาเผาไหม้ส่วนบนและส่วนล่าง ถูกออกแบบให้สามารถปรับเปลี่ยนขนาดจาก 1.0D เป็น 0.75D และ 0.5D ตามที่ได้ออกแบบไว้ การเปลี่ยนขนาดเตาเผาส่วนบนและส่วนล่างนี้ ก่อให้เกิดการหมุนวนหลายชั้นภายในเตาเผาไหม้ โดยพิจารณาความสัมพันธ์ของการกระจายอุณหภูมิสูงสุดภายในเตา เมื่อทำการปรับค่า อัตราส่วนสมมูล (Φ) เท่ากับ 0.8, 1.0 และ 1.2 โดยแต่ละการทดลอง จะกำหนดอัตราส่วนของอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศทุกชนิดต่ออัตราการไหลของอากาศทั้งหมด (λ) เท่ากับ 0.0, 0.15, และ 0.25 ที่อัตราการไหลของเชื้อเพลิงแกสคงที่เท่ากับ 0.3 kg/min. จากการทดลอง เตาเผาส่วนบนและส่วนล่างที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 0.5D และ 1.0D ตามลำดับ ที่ค่า Φ เท่ากับ 0.8 และที่ค่า λ เท่ากับ 0.0 พบว่าอุณหภูมิสูงสุดในเตาเผาเท่ากับ 1,192.9 องศาเซลเซียส ที่บริเวณวงแหวนของห้องเผาไหม้ โดยควันที่เกิดจากการเผาไหม้มีปริมาณน้อย และ จากการวิเคราะห์ก๊าซไอเสียของเตาเผาบวอร์เทค พบว่าประกอบด้วย ก๊าซออกซิเจน เท่ากับ 1.5%, ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เท่ากับ 18.3% และ ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ เท่ากับ 205 ppm.

Thesis Title	A Multistaging Vortex Combustor for Burning Rice Husk
Student	Mr. Wisit Lelaphatikul
Student ID.	42062022
Degree	Master Degree
Programme	Mechanical Engineering
Year	2002
Thesis Advisor	Asso.Prof.Dr. Pongjet Promvonge

ABSTRACT

This research deals with an experimental study of the vortex stage of a rice husk fired combustor effecting on combustion characteristics. The combustor has a cylindrical shape of 300 mm. diameter (D) with a centered exhaust pipe and has a set of air nozzles placing circumferentially on the combustor to produce air-vortex flow inside. The top and bottom size of the combustor is designed to be adjustable from 1.0D to 0.75D or 0.5D as desired. The change of the top and bottom size leads to multistaging vortex inside the combustor. The maximum temperature distribution inside the combustor is measured for each equivalence ratio, Φ , of 0.8, 1.0, and 1.2. The ratio of volumetric flow rates of the secondary air to the total air, λ , was set to be 0.0, 0.15 and 0.25 for each case. The constant mass flow rate of rice husk to be 0.3 kg/min. The experiment shows the maximum temperature of about 1,192.9°C in the annular chamber with less smoke of flue gas for the top and bottom size is 0.5D and 1.0D respectively, $\Phi = 0.8$ and $\lambda = 0.0$. The emissions of exhaust gas from the stack are composed of $O_2 = 1.5\%$, $CO_2 = 18.3\%$ and $CO = 205$ ppm.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้อย่างดี ด้วยคำสั่งสอน, คำแนะนำ, การให้คำปรึกษาและความกรุณาของ รศ.ดร.พงษ์เจต พรหมวงศ์ ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่านและขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้แก่ผู้วิจัย กราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณบิดามารดาและพี่ ๆ ของผู้วิจัย ที่ให้กำลังใจและคำแนะนำต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์มาโดยตลอด จนสำเร็จในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ โดยเฉพาะมารดาของผู้วิจัย ที่อบรมสั่งสอนและเป็นสิ่งที่ยึดเหนี่ยวจิตใจ ทำให้ผู้วิจัยมีทุกวันนี้ได้

ขอขอบคุณ นายสมศักดิ์ โพธิ์ถวิลเกียรติ, นายยุทธนา พลอยฉาย, นายสมชาย ศรีพัฒนะพิพัฒน์, นายศุภชัย เลื่อนลอย และ นายสมิทธิ เอี่ยมสอาด ที่ให้คำแนะนำด้านข้อมูล และรุ่นน้องนักศึกษาชั้นปีที่ 4 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่ช่วยเหลือในการเก็บข้อมูล

ขอแสดงความขอบคุณ บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังเป็นอย่างสูง ที่ได้ให้ทุนสนับสนุนสำหรับวิทยานิพนธ์นี้

ขอขอบคุณบุคคลที่ไม่ได้กล่าวถึงในที่นี้ ซึ่งผู้วิจัยรู้สึกขอบคุณในกำลังใจนั้น

สุดท้ายนี้ถ้าปราศจากบุคคลเหล่านี้แล้ว วิทยานิพนธ์ฉบับนี้คงไม่สามารถสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีเช่นนี้ ซึ่งคุณค่าและประโยชน์อันพึงมีที่ได้จากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอบแต่ผู้มีพระคุณทุกท่าน ขออำนาจคุณพระศรีรัตนตรัยอวยพรความสุขสวัสดิ์แด่ทุกท่าน

วิศิษฐ์ ลีลาผาดิกุล

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VII
สารบัญรูป	VIII
รายการคำย่อและสัญลักษณ์	X
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา	2
1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....	2
1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	2
1.5 ขอบเขตการวิจัย.....	2
1.6 ขั้นตอนของการศึกษา.....	3
1.7 ประโยชน์ที่ได้รับ	3
บทที่ 2 วรรณกรรมปริทรรศน์.....	4
2.1 บทนำ.....	4
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.2.1 งานวิจัยภายในประเทศ.....	4
2.2.2 งานวิจัยในต่างประเทศ.....	9
บทที่ 3 ทฤษฎี.....	12
3.1 บทนำ.....	12
3.2 เชื้อเพลิง	12
3.3 การเผาไหม้.....	13
3.3.1 ปฏิกริยาเคมีของการเผาไหม้.....	14
3.3.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการเผาไหม้.....	14
3.4 องค์ประกอบของอากาศ.....	16

สารบัญ(ต่อ)

3.5 การเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง	17
3.6 หลักการหมุนวนอากาศ	19
3.7 อัตราส่วนสมมูล	23
3.8 อุณหภูมิอะเดียแบติก	23
บทที่ 4 การออกแบบและการคำนวณ	25
4.1 บทนำ.....	25
4.2 การออกแบบเตาเผา	25
4.3 การคำนวณปริมาณอากาศที่ต้องการใช้ในการเผาไหม้ทางทฤษฎี	28
บทที่ 5 อุปกรณ์และขั้นตอนการทดลอง	31
5.1 บทนำ.....	31
5.2 การจัดเตรียมอุปกรณ์ในการทดลองและการเก็บข้อมูล	31
5.3 ขั้นตอนในการติดตั้งชุดทดลองเตาเผาออร์เทค	41
5.4 ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง	42
5.4.1 ขั้นตอนการอุ่นเตา	42
5.4.2 ขั้นตอนการทดลอง	42
บทที่ 6 ผลการทดลองและวิจารณ์	44
6.1 บทนำ.....	44
6.2 เตาเผาออร์เทค 1 ชั้น.....	44
6.2.1 อิทธิพลของ λ ที่มีผลต่อการเผาไหม้ เมื่อ $\Phi = 0.8$	44
6.2.2 อิทธิพลของ λ ที่มีผลต่อการเผาไหม้ เมื่อ $\Phi = 1.0$	45
6.2.3 อิทธิพลของ λ ที่มีผลต่อการเผาไหม้ เมื่อ $\Phi = 1.2$	46
6.2.4 การศึกษาผลของก๊าซไอเสียที่เกิดจากการเผาไหม้	46
6.3 เตาเผาออร์เทค 2 ชั้น.....	47
6.3.1 อิทธิพลของ λ ที่มีผลต่อการเผาไหม้ เมื่อ $\Phi = 0.8$	47
6.3.2 อิทธิพลของ λ ที่มีผลต่อการเผาไหม้ เมื่อ $\Phi = 1.0$	50
6.3.3 อิทธิพลของ λ ที่มีผลต่อการเผาไหม้ เมื่อ $\Phi = 1.2$	51

สารบัญ(ต่อ)

6.3.4 การศึกษาผลของก๊าซไอเสียที่เกิดจากการเผาไหม้	53
6.4 เตาเผาออร์เทค 3 ชั้น.....	54
6.4.1 อิทธิพลของ λ ที่มีผลต่อการเผาไหม้ เมื่อ $\Phi = 0.8$	55
6.4.2 อิทธิพลของ λ ที่มีผลต่อการเผาไหม้ เมื่อ $\Phi = 1.0$	56
6.4.3 อิทธิพลของ λ ที่มีผลต่อการเผาไหม้ เมื่อ $\Phi = 1.2$	57
6.4.4 การศึกษาผลของก๊าซไอเสียที่เกิดจากการเผาไหม้	59
6.5 เปรียบเทียบเตาเผาออร์เทค 1 ชั้น, 2 ชั้น และ 3 ชั้น	61
บทที่ 7 สรุปและข้อเสนอแนะ	63
7.1 สรุป	63
7.2 ข้อเสนอแนะ.....	64
เอกสารอ้างอิง.....	66
ภาคผนวก ก.....	68
ภาคผนวก ข.....	71
ภาคผนวก ค.....	74
บทความที่ได้รับการตีพิมพ์	77
ประวัติผู้เขียน	84

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 องค์ประกอบของเชื้อเพลิงแกลบ.....	28
4.2 แสดงปริมาณอากาศที่ใช้ในการทดลอง.....	30
5.1 แสดงช่วงความสามารถของเครื่องที่จะวัดก๊าซไอเสียได้.....	37
ก-1 คุณสมบัติของแกลบ.....	68
ก-2 การเปรียบเทียบเชื้อเพลิง.....	69
ก-3 ปริมาณชีวมวลในปี 2540 และ 2544 (หน่วย:ตัน).....	70
ค-1 แสดงอัตราการไหลของอากาศปฐมภูมิและอากาศทุติยภูมิ.....	76
ค-2 แสดงความสูงของระดับน้ำในมานอร์มิเตอร์ของอากาศปฐมภูมิและอากาศทุติยภูมิ.....	76

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ระบบอุปกรณ์การทดลอง	5
2.2 ลักษณะและขนาดเตาเผาแบบวอร์เทค(มม.)	6
2.3 ระบบทดสอบชุดทดลองเตาเผาแบบวอร์เทค	9
2.4 แสดงการกระจายอุณหภูมิ($^{\circ}$ F).....	10
2.5 แสดงสมมูลพลังงาน.....	10
3.1 ปฏิบัติการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง	18
3.2 แสดงระดับการกระจายอากาศของ Stream Function จากการเหนี่ยวนำการไหลหมุนวน	20
3.3 แสดงผลของความสูงท่อทิ้งไอเสียต่อ Gas Streamline	21
3.4 ลักษณะการไหลของอากาศแบบหมุนวนภายในเตาเผาแบบวอร์เทค	22
4.1 แสดงขนาดความสูงของเตาเผาแบบวอร์เทคและท่อทิ้งไอเสีย	25
4.2 แสดงตำแหน่ง Primary air, Secondary air และ Exhaust gas	26
5.1 เตาเผาแบบวอร์เทค.....	32
5.2 ท่อทิ้งไอลอย.....	32
5.3 Blower	33
5.4 Secondary air	33
5.5 ชุดป้อนกลับ	34
5.6 Screw Feeder	34
5.7 Hopper.....	35
5.8 Motor.....	35
5.9 Cyclone.....	36
5.10 โครงสร้างมาตรฐานของไซโคลน	36
5.11 Gas Analyzer.....	36
5.12 Burner	37
5.13 LPG Supply.....	37
5.14 Manometer	38
5.15 Orifice Plate	38
5.16 Digital Thermometer And Multichannel Switch	39
5.17 Thermocouple Type K	39

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.18 Inverter.....	40
5.19 DC. Power Supply	40
5.20 ผังแสดงชุดอุปกรณ์การทดลองเตาเผาออร์เทคหลายชั้น	41
6.1 แสดงการกระจายอุณหภูมิภายในเตาเผาออร์เทค 1 ชั้น เมื่อ $\lambda = 0.0, 0.15, 0.25$	45
6.2 แสดงความสัมพันธ์ของก๊าซที่เกิดจากการเผาไหม้ระหว่าง CO, CO ₂ , และ O ₂ กับค่า $\Phi = 0.8, 1.0, \text{ และ } 1.2$ เมื่อ $\lambda = 0.0, 0.15, 0.25$	47
6.3 เปรียบเทียบการกระจายอุณหภูมิภายในเตาเผาออร์เทค 2 ชั้นและเตาเผาออร์เทค 1 ชั้น ที่ $\Phi = 0.8$, เมื่อ $\lambda = 0.0, 0.15, 0.25$	49
6.4 เปรียบเทียบการกระจายอุณหภูมิภายในเตาเผาออร์เทค 2 ชั้นและเตาเผาออร์เทค 1 ชั้น ที่ $\Phi = 1.0$, เมื่อ $\lambda = 0.0, 0.15, 0.25$	50
6.5 เปรียบเทียบการกระจายอุณหภูมิภายในเตาเผาออร์เทค 2 ชั้นและเตาเผาออร์เทค 1 ชั้น ที่ $\Phi = 1.2$, เมื่อ $\lambda = 0.0, 0.15, 0.25$	52
6.6 แสดงความสัมพันธ์ของก๊าซที่เกิดจากการเผาไหม้ระหว่าง CO, CO ₂ , และ O ₂ กับค่า $\Phi = 0.8, 1.0, \text{ และ } 1.2$ เมื่อ $\lambda = 0.0, 0.15, 0.25$	54
6.7 เปรียบเทียบการกระจายอุณหภูมิภายในเตาเผาออร์เทค 3 ชั้นและเตาเผาออร์เทค 1 ชั้น ที่ $\Phi = 0.8$, เมื่อ $\lambda = 0.0, 0.15, 0.25$	55
6.8 เปรียบเทียบการกระจายอุณหภูมิภายในเตาเผาออร์เทค 3 ชั้นและเตาเผาออร์เทค 1 ชั้น ที่ $\Phi = 1.0$, เมื่อ $\lambda = 0.0, 0.15, 0.25$	57
6.9 เปรียบเทียบการกระจายอุณหภูมิภายในเตาเผาออร์เทค 3 ชั้นและเตาเผาออร์เทค 1 ชั้น ที่ $\Phi = 1.2$, เมื่อ $\lambda = 0.0, 0.15, 0.25$	58
6.10 แสดงความสัมพันธ์ของก๊าซที่เกิดจากการเผาไหม้ระหว่าง CO, CO ₂ , และ O ₂ กับค่า $\Phi = 0.8, 1.0, \text{ และ } 1.2$ เมื่อ $\lambda = 0.0, 0.15, 0.25$	59
6.11 เปรียบเทียบการกระจายอุณหภูมิภายในเตาเผาออร์เทค 1 ชั้น, 2 ชั้น, และ 3 ชั้น ที่ $\Phi = 0.8$, เมื่อ $\lambda = 0.0, 0.15, 0.25$	61
ข-1 standard orifice plate	71
ข-2 ภาพตัดแสดงการติดตั้งออร์ฟิสแบบ Flange Plate	71
ข-3 แสดงตำแหน่งการวัดความดัน และระยะต่าง ๆ ของชุดออร์ฟิส (Orifice).....	72
ข-4 ออร์ฟิสแบบต่างๆ	72
ค-1 จุดวัดความดันของชุดออร์ฟิส.....	74

รายการคำย่อและสัญลักษณ์

RH	ความชื้นสัมพัทธ์, (%)
η	ประสิทธิภาพทางความร้อน, (%)
T_{∞}	อุณหภูมิบรรยากาศอากาศ, ($^{\circ}C$)
\bar{T}_{∞}	อุณหภูมิบรรยากาศอากาศเฉลี่ย, ($^{\circ}C$)
T	อุณหภูมิภายในเตาเผาออร์เทค, ($^{\circ}C$)
\bar{T}	อุณหภูมิภายในเตาเผาออร์เทคเฉลี่ย, ($^{\circ}C$)
x	ความสูงของเตาเผาออร์เทคในแนวตั้ง, (cm.)
D_0	เส้นผ่าศูนย์กลางภายในเตาเผาออร์เทค, (cm.)
r	พิกัดในแนวรัศมีภายในเตาเผาออร์เทค, (cm.)
R	รัศมีภายในของเตาเผาออร์เทค, (cm.)
Φ	อัตราส่วนสมมูลของอากาศกับเชื้อเพลิง
λ	อัตราส่วนการไหลเชิงปริมาตรของอากาศต่อน้ำมันต่ออากาศทั้งหมด
HHV	ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง, (kJ/Kg)
ρ_w	ความถ่วงจำเพาะของน้ำ, (kg/m^3)
ρ_a	ความถ่วงจำเพาะของอากาศ, (kg/m^3)
Δh	ความสูงของระดับน้ำในมานอมิเตอร์, (cm)
M_w	มวลโมเลกุล
N	จำนวนโมล

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ประเทศไทยเป็นประเทศหนึ่ง ที่มีการใช้พลังงานจากทรัพยากรธรรมชาติในปริมาณมากในแต่ละปี โดยเฉพาะน้ำมันปิโตรเลียมและถ่านหินลิกไนต์ แต่แหล่งทรัพยากรดังกล่าวภายในประเทศมีไม่เพียงพอต่อความต้องการใช้งาน ประกอบกับมีคุณภาพต่ำเช่น พวกถ่านหิน ฉะนั้นการนำเข้าแหล่งพลังงานเชื้อเพลิงข้างต้นจึงจำเป็นในภาคงานอุตสาหกรรมในบ้านเรา ซึ่งทำให้ต้องสูญเสียเงินตราออกสู่ต่างประเทศในแต่ละปีเป็นจำนวนเงินมหาศาล ส่งผลกระทบให้เกิดการขาดดุลการค้ากับต่างชาติมากขึ้นด้วย

ปัจจุบันทั้งองค์กรรัฐและเอกชนต่างให้ความสนใจ ในการพัฒนาแหล่งทรัพยากรต่างๆมาใช้ให้เป็นประโยชน์ ดังจะเห็นได้จากการสำรวจเจาะหาน้ำมันและก๊าซธรรมชาติกันอย่างกว้างขวาง รวมถึงการสำรวจถ่านหินภายในประเทศ ซึ่งการสำรวจต่างๆ นั้นต้องใช้เงินลงทุนมูลค่าสูง แต่นอกจากทรัพยากรดังกล่าวแล้วนั้น เชื้อเพลิงอีกประเภทหนึ่งคือ เชื้อเพลิงชีวมวล เป็นเชื้อเพลิงที่เกิดจากผลพลอยได้ทางการเกษตรกรรมหรือวัสดุเหลือใช้จากโรงงานอุตสาหกรรม เช่น แกลบ ชี้อ้อย ชานอ้อย เป็นต้น ซึ่งถือเป็นเชื้อเพลิงคุณภาพต่ำ แต่สามารถนำมาเป็นเชื้อเพลิงได้เป็นอย่างดี ดังจะเห็นได้จาก การนำแกลบใช้เป็นเชื้อเพลิงเพื่อผลิตไอน้ำใช้ในโรงสีข้าวหรือนำความร้อนที่ได้จากการเผาแกลบไปอบเมล็ดพืช

โดยข้าวเปลือก 1 ตันที่ผ่านการสีแล้วจะได้แกลบประมาณ 220 กิโลกรัมคิดเป็น 22 %โดยน้ำหนัก ซึ่งประมาณการณได้ว่าทั่วโลกใน 1 ปี มีแกลบที่ได้จากการสีข้าวเปลือกมากกว่า 60 ล้านตัน ส่วนประเทศไทยพื้นที่ส่วนใหญ่เป็นพื้นที่เพาะปลูกโดยเฉพาะข้าว โดยทุกๆปีทุกปีจะได้แกลบที่ผ่านการสีข้าวเปลือกประมาณ 4.4-4.6 ล้านตัน ซึ่งมีค่าความร้อนเทียบเท่ากับ 1.46-1.53 ล้านตันของน้ำมันดิบตามธรรมชาติ ซึ่งค่าความร้อนของแกลบ (Overall gross calorific Value of rice husk) ประมาณ 3580 kcal/kg จึงถือได้ว่าแกลบเป็นวัสดุชีวมวลที่หาได้ง่าย ราคาถูกและมีจำนวนมาก ดังนั้น การนำแกลบมาใช้ประโยชน์จึงน่าสนใจเป็นอย่างยิ่ง

เนื่องจากแกลบเป็นวัสดุชีวมวลคุณภาพต่ำ ถ้าใช้วิธีการเผาไหม้แกลบให้ลุกไหม้ในเตาเปิดปกติ ทำให้ได้ปริมาณความร้อนน้อยกว่าที่ควรจะได้และทำให้เกิดมลพิษทางอากาศเนื่องจากเถ้าที่เกิดจากการเผาไหม้ ฉะนั้นวิธีการเผาไหม้เพื่อให้มีประสิทธิภาพของการเผาไหม้ดีที่สุดและสภาพอากาศที่ออกจากปล่องไฟเป็นมลพิษน้อยที่สุด จึงทำการเผาไหม้ในเตาเผาไหม้แบบวอร์เทค โดยใช้เทคนิคการหมุนวนของอากาศความเร็วสูงแบบปั่นป่วน ที่มีผู้ได้ศึกษาและนำไปใช้เผาไหม้พวกเชื้อเพลิงถ่านหินและวัสดุชีวมวลให้ผลดีมาแล้ว

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. ศึกษาการออกแบบสร้างและทดสอบเตาเผาออร์เทค
2. ทำการศึกษาถึงอิทธิพลของชั้นของเตาเผาออร์เทค ต่อพฤติกรรมการเผาไหม้ของแกลบภายในเตาเผา โดยพิจารณาถึงการกระจายอุณหภูมิภายในเตาเผาออร์เทค ขี้เถ้า และ องค์ประกอบของก๊าซไอเสียที่เกิดจากการเผาไหม้
3. โดยใช้เป็นต้นแบบในการศึกษาเตาเผาต่อไปในอนาคต

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

1. ขนาดแกลบที่ใช้โดยเฉลี่ยมีขนาดประมาณ 2.0 x 8.0 mm. และความชื้นของแกลบที่ใช้เฉลี่ยประมาณ 11% โดยน้ำหนัก ซึ่งเป็นขนาดและความชื้นของแกลบปกติ

1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย

1. เตาเผาออร์เทคใช้เทคนิคการไหลหมุนวนความเร็วสูงของอากาศถูกนำมาใช้เพื่อเพิ่มความเสถียรให้กับเปลวไฟและช่วยลดเขม่าที่เกิดจากการเผาไหม้ระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงได้ดี การไหลวนไปมาช่วยให้เกิดการถ่ายเทความร้อนอย่างเหมาะสม การกระจายอุณหภูมิภายในจึงสม่ำเสมอ
2. เตาออร์เทคนั้นจะรวมข้อดีของเตาไซโคลอน, เตาถ่านหินผง, ห้องสันดาปของเครื่องยนต์กังหันก๊าซ และ เตาฟลูอิดไดซ์เบด เข้าด้วยกันเพื่อแก้ปัญหาในเรื่องของ Slag, เขม่า, ขี้เถ้า

1.5 ขอบเขตการวิจัย

1. ทำการทดสอบการเผาไหม้เตาเผาออร์เทค 1 ชั้น, 2 ชั้น, และ 3 ชั้น
2. ขนาดของเตาเผาไหม้ที่ใช้ในการทดลองมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 ขนาด คือ 0.5D, 0.75D, 1.0D. ตามลำดับ (โดยค่า D มีค่าเท่ากับ 300 mm.)
3. อัตราการไหลของเชื้อเพลิงแกลบเท่ากับ 0.3 kg/min
4. อัตราส่วนของปริมาณการไหลของอากาศหตุยภูมิต่อปริมาณอากาศทั้งหมด (λ) เท่ากับ 0.0, 0.15, และ 0.25 ตามลำดับ
5. ทำการเปลี่ยนแปลงค่า Equivalent ratio (Φ) ทั้งสิ้น 3 ค่า คือ 0.8, 1.0, และ 1.2 ตามลำดับ
6. ทำการวัดการกระจายอุณหภูมิภายใน ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ในแนวแกนที่กำหนดไว้ของเตาเผา 8 ตำแหน่ง (T1 – T8) และ ในแนวรัศมีของห้องเผาไหม้ ทั้งสิ้น 5 - 6 ตำแหน่ง
7. วิเคราะห์ก๊าซไอเสียที่เกิดขึ้น เนื่องจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงของเตาเผา

1.6 ขั้นตอนของการศึกษา

1. ศึกษางานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้องกับเตาเผาแกลบแบบวอร์เทค รวมถึงปัญหา, ข้อจำกัด, และอุปสรรคที่เกิดขึ้นจากการทดลอง

2. ศึกษาถึงทฤษฎีการเผาไหม้ และหลักการคำนวณ

3. ออกแบบสร้างและทดสอบเตาเผาแกลบแบบวอร์เทค ในการเก็บข้อมูลจะศึกษาถึงผลกระทบต่อการเผาไหม้ภายในเตาเผาวอร์เทค ซึ่งจะแบ่งส่วนประกอบของการทดลองออกเป็น 5 กรณีหลักๆ คือ

3.1 ทำการทดลองการเผาไหม้เตาเผาวอร์เทค 1 ชั้น

3.2 เปลี่ยนขนาดห้องเผาไหม้ วอร์เทคชั้นที่ 1 (เตาเผาวอร์เทค 2 ชั้น) ทั้งสิ้น 2 ขนาด คือ 0.5D, 0.75D ตามลำดับ

3.3 เปลี่ยนขนาดห้องเผาไหม้ วอร์เทคชั้นที่ 2 (เตาเผาวอร์เทค 3 ชั้น) ทั้งสิ้น 2 ขนาด คือ 0.5D, 0.75D ตามลำดับ

3.4 เปลี่ยนอัตราส่วนของปริมาณการไหลของอากาศทุกชนิดต่อปริมาณอากาศทั้งหมด (λ) เท่ากับ 0.0, 0.15, และ 0.25 ตามลำดับ

3.5 เปลี่ยนค่า Equivalent Ratio เป็น 0.8, 1.0, และ 1.2 ตามลำดับ

4. บันทึกผลการทดลอง

5. สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะเพื่อการพัฒนา และ การปรับปรุง

1.7 ประโยชน์ที่ได้รับ

1. เป็นต้นแบบในการสร้างและพัฒนาเตาเผาแกลบให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

2. ลดต้นทุนในการผลิตเนื่องจากแกลบมีราคาถูกและหาได้ง่าย

3. เพื่อช่วยลดการใช้ทรัพยากรธรรมชาติที่เป็นแหล่งพลังงานเดิมที่มีปริมาณอยู่อย่างจำกัดในปัจจุบัน

4. ความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้สามารถนำไปใช้ในงานอุตสาหกรรมต่าง ๆ ได้ เช่น นำไปอบแห้งเมล็ดพืช หรือ ผลิตไอน้ำ เป็นต้น

บทที่ 2

วรรณกรรมปริทรรศน์

2.1 บทนำ

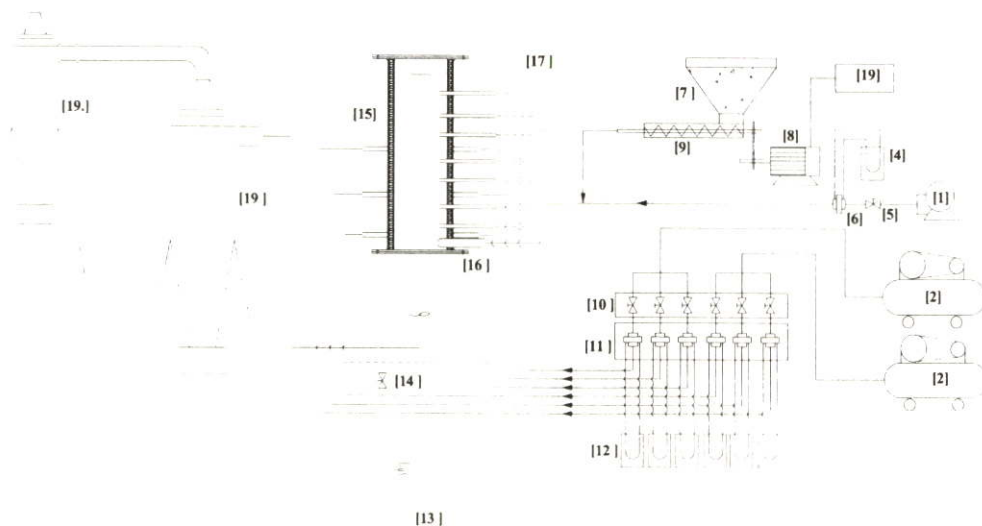
การศึกษาและพัฒนาพลังงานทดแทนเป็นการศึกษา ค้นคว้า ทดสอบ พัฒนา และสาธิต ตลอดจนส่งเสริมและเผยแพร่พลังงานทดแทน ซึ่งเป็นพลังงานที่สะอาด ไม่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และเป็นแหล่งพลังงานที่มีอยู่ในท้องถิ่น พลังงานชีวมวล พลังงานลม พลังงานแสงอาทิตย์ และอื่นๆ เพื่อให้มีการผลิตและการใช้ประโยชน์อย่างแพร่หลาย มีประสิทธิภาพ และมีความเหมาะสมทางด้านเทคนิค เศรษฐกิจ และสังคม สำหรับผู้ใช้ในเมืองและชนบท ซึ่งในการศึกษาค้นคว้า และพัฒนาพลังงานทดแทนดังกล่าว ยังรวมถึงการพัฒนาเครื่องมือ เครื่องใช้และอุปกรณ์เพื่อการใช้งานมีประสิทธิภาพสูงสุดด้วย

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การค้นคว้าวิจัยเกี่ยวกับคุณลักษณะของเตาเผาเพื่อให้เหมาะสมต่อการใช้งาน สำหรับประเทศไทยมีการค้นคว้าวิจัยเตาเผาหลายประเภทด้วยกันเช่น เตาเผาออร์เทค, เตาเผาฟลูอิดไดซ์เบด หรือเตาเผาไซโคลน เป็นต้น แต่ในที่นี่จะกล่าวถึงเตาเผาแบบวอร์เทคเท่านั้น ซึ่งจากอดีตจนถึงปัจจุบันได้มีนักวิจัยทำการวิจัยทั้งในและต่างประเทศมากมาย

2.2.1 งานวิจัยภายในประเทศ

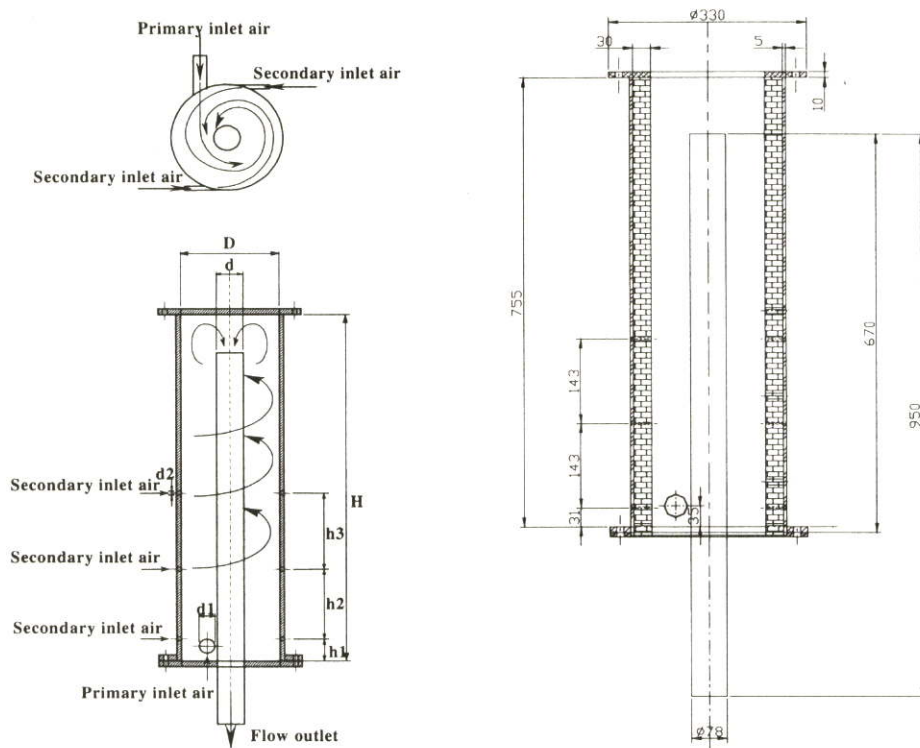
งานวิจัยของ พงษ์เจต พรหมวงศ์ [1] ทำการศึกษาการไหลและการเผาไหม้เกี่ยวกับคุณลักษณะของแกลบในช่องว่างภายในห้องเผาไหม้แบบวอร์เทค (vortex combustor: VC) การกระจายอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆที่เลือกไว้ภายในภายในห้องเผาไหม้ ซีเถ้า และควัน จากท่อทิ้งไอเสียจะถูกวัดและนำไปวิเคราะห์ต่อไป การวัดจะตั้งให้อัตราการไหลของเชื้อเพลิงแกลบคงที่เท่ากับ 0.2 kg/min และมีการเปลี่ยนค่า Equivalence ratio เป็น 0.8, 1.0, และ 1.2 โดยสัดส่วนของอัตราการไหลของอากาศส่วนที่ 1 ต่อ อากาศส่วนที่ 2 ให้เป็นค่า (λ) ซึ่งทำการศึกษาที่ $\lambda=0.0, 0.2$ และ 0.4 เชื้อเพลิงแกลบที่ได้จากการสีข้าวและการบด ทำการร่อนผ่านตะแกรงที่มีขนาดประมาณ 1.3 mm. (ขนาด 1.19-1.41 mm.) และเก็บควบคุมในห้องที่มีความชื้น 10.3 % ความชื้นสัมพัทธ์ ซึ่งติดตั้งระบบการทดลองตามรูปที่ 2.1 โดยห้องเผาไหม้มีลักษณะเป็นทรงกระบอกมีเส้นผ่าศูนย์กลางภายในประมาณ 0.195 m และมีท่อทิ้งไอเสียภายในเตาเป็นท่อทรงกระบอกมีเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 0.078 m. มีความสูงของเตาประมาณ 0.755 m. ตามรูปที่ 2.2 การวัดอุณหภูมิดังกล่าวจะวัดในแนวแกนทั้งสิ้น 7 ตำแหน่ง คือ $X/D = 0.5, 1.0, 1.5, \dots, 3.5$ m.



1. Blower	2. Air compressor1	3. Air compressor2	4. Manometer	5. Needle valve	6. Orifice plate
7. Hopper	8. Motor	9. Screw feeder	10. Needle valve	11. Orifice plate	12. Manometer
13. L.P.G. supply	14. Burner	15. Vortex combustor	16. Primary air nozzle	17. Indicator	18. Inverter
19. Cyclone					

รูปที่ 2.1 ระบบอุปกรณ์การทดลอง

จากผลการทดลองพบว่าบริเวณภายในเตาเผา(annular vortex combustor) มีอุณหภูมิสูงสุดประมาณ $1,000^{\circ}\text{C}$ และมีควันออกจากท่อไอเสียน้อย นอกจากนั้นขนาดชี้เต้าจากปล่องไอเสียสามารถควบคุม โดยปรับอัตราส่วน (λ) ซึ่ง VC แสดงถึงผลผลิตที่เกิดขึ้นคือ ภายในห้องเผาไหม้มีความเสถียรของเปลวไฟสูง, ยังสามารถเผาไหม้ได้ดีกับเชื้อเพลิงแกลบและลักษณะที่สำคัญอีกอย่างคือ ชี้เต้าที่เกิดขึ้นมีขนาดเล็กและอยู่ภายในห้องเผาไหม้ส่วนล่าง การเผาไหม้ที่ค่า Equivalence ratio ระหว่าง 0.8 และ 1.0 จะให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้ดี, เปลวไฟมีความเสถียร, เกิดมลภาวะต่ำ และการใช้อากาศส่วนที่ 2 มีผลต่อการกระจายของอุณหภูมิภายในเตาเผาและสามารถลดขนาดของชี้เต้าให้เล็กลงได้ โดยเมื่อมีการเพิ่มค่า (λ) สูงขึ้นส่งผลให้อุณหภูมิของการเผาไหม้สูงขึ้น เนื่องมาจากมีการขยายบริเวณส่วนของการเกิด Recirculating zone ภายในเตาเผา



รูปที่ 2.2 ลักษณะและขนาดเตาเผาเกลือบแบบวอร์เทค(มม.)

งานวิจัยของ พงษ์เจต พรหมวงศ์ [2] ทำการศึกษาการไหลและการเผาไหม้เกี่ยวกับคุณลักษณะของเกลือบในช่องว่างภายในห้องเผาไหม้แบบวอร์เทค (vortex combustor: VC) การกระจายอุณหภูมิ. ตำแหน่งต่างๆที่เลือกไว้ภายในภายในห้องเผาไหม้ ขึ้นอยู่กับเชื้อเพลิงและควันทันทีจากท่อทิ้งไอเสียจะถูกวัดและนำไปวิเคราะห์ต่อไป การวัดจะตั้งให้อัตราการไหลของเชื้อเพลิงเกลือบคงที่เท่ากับ 0.3 kg/min และมีการเปลี่ยนค่า Equivalence ratio เป็น 0.8, 1.0, และ 1.2 โดยสัดส่วนของอัตราการไหลของอากาศส่วนที่ 1 ต่อ อากาศส่วนที่ 2 ให้เป็นค่า (λ) ซึ่งทำการศึกษาที่ $\lambda=4$ และ 1.5 เชื้อเพลิงเกลือบที่ได้จากการสับและบด ทำการร่อนผ่านตะแกรงที่มีขนาดประมาณ 1 mm. (ขนาด 1.19-1.41 mm.) และเก็บควบคุมในห้องที่มีความชื้น 9.2 % ความชื้นสัมพัทธ์ ซึ่งติดตั้งระบบการทดลองตามรูปที่ 2.1 โดยห้องเผาไหม้มีลักษณะเป็นทรงกระบอกมีเส้นผ่าศูนย์กลางภายในเท่ากับ 0.195 m และมีท่อทิ้งไอเสียภายในเตาเป็นท่อทรงกระบอกมีเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 0.078 m. มีความสูงของเตาประมาณ 0.755 m. ตามรูปที่ 2.2 การวัดอุณหภูมิดังกล่าวจะวัดในแนวแกนทั้งสิ้น 7 ตำแหน่ง คือ $X=0.1, 0.2, 0.3, \dots, 0.7 \text{ m}$.

จากผลการทดลองพบว่าบริเวณภายในเตาเผา(annular vortex combustor) มีอุณหภูมิสูงสุดประมาณ 1,300 K และมีควันออกจากท่อไอเสียน้อย นอกจากนั้นขนาดเชื้อเพลิงจากปล่องไอเสียสามารถควบคุม โดยปรับอัตราส่วน (λ) ซึ่ง VC แสดงถึงผลผลิตที่เกิดขึ้นคือ ภายในห้องเผาไหม้มีความเสถียรของเปลวไฟสูง, ยังสามารถเผาไหม้ได้ดีกับเชื้อเพลิงเกลือบและลักษณะที่

สำคัญอีกอย่างคือ ชี้อัดที่เกิดขึ้นมีขนาดเล็กและอยู่ภายในห้องเผาไหม้ส่วนล่าง การเผาไหม้ที่ค่า Equivalence ratio ระหว่าง 1.0 และ 1.2 จะให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้ดี สำหรับค่า Equivalence ratio ที่มากกว่าหรือเท่ากับ 1.0 การเพิ่มอากาศส่วนที่ 2 ไม่มีผลต่อการกระจายอุณหภูมิภายในเตาเผาแต่สามารถช่วยลดขนาดของชี้อัดกลับได้

งานวิจัยของ พงษ์เจต พรหมวงศ์และคณะ [3] ทำการศึกษาเบื้องต้นถึงพฤติกรรมการเผาไหม้ของแกลบในเตาแบบบอร์เทค โดยพิจารณาถึงการกระจายอุณหภูมิในเตาเผา ชี้อัดและควัน ที่เกิดจากการเผาไหม้ การทดลองจะใช้แกลบละเอียดเป็นเชื้อเพลิงและป้อนแกลบละเอียดสู่เตาเผา โดยปรับอัตราการไหลเชิงมวลอยู่ในช่วง 0.3 ถึง 0.5 kg/min ปรับค่า Φ เท่ากับ 0.8, 0.85, 0.9, 0.95, 1.0, และ 1.05 สำหรับแต่ละค่าของอัตราการไหลของแกลบ แต่ก่อนเริ่มทำการทดลองมีความจำเป็นที่จะต้องใช้ก๊าซเชื้อเพลิงเหลว LPG เพื่อช่วยในการอุ่นเตาทำให้อุณหภูมิภายในเตาเผาสูงขึ้นจนสามารถทำให้เชื้อเพลิงแกลบเกิดการเผาไหม้ด้วยตัวเอง จนกระทั่งภายในเตาเผามีอุณหภูมิประมาณ 700°C แล้วจึงหยุดการอุ่นเตาด้วยก๊าซ LPG

ซึ่งจากการทดลองพบว่า เมื่อป้อนแกลบด้วยอัตราการไหลของแกลบเท่ากับ 0.3 kg/min และปรับค่า Φ เท่ากับ 0.95 พบว่าอุณหภูมิในเตาเผาแกลบแบบบอร์เทคที่ตำแหน่งที่เลือกไว้สูงเท่ากับ $1,030^{\circ}\text{C}$ ควันที่ได้ออกมาน้อย เถ้าลอยที่ได้มีขนาดใหญ่กว่าเถ้าลอยที่ได้จากการป้อนแกลบที่ค่าอัตราการไหลของแกลบเท่ากับ 0.4 และ 0.5 kg/min ที่ Equivalence ratio เดียวกัน นอกจากนี้ยังพบว่า การเผาไหม้ในเตาเผานี้มีความเสถียรสูงและง่ายต่อการควบคุม

งานวิจัยของ สมศักดิ์ โพธิ์ถวิลเกียรติ์ [7] นำเสนอการศึกษาทดลองถึงพฤติกรรมการเผาไหม้ของขนาดเชื้อเพลิงแกลบในเตาเผาแบบบอร์เทคและการกระจายอุณหภูมิภายในของห้องเผาไหม้ ซึ่งขนาดของเชื้อเพลิงแกลบที่ใช้ในการทดลองมีสองขนาดอยู่ในช่วง 0.84-1.00 และ 1.19-1.41 มม. การทดลองปรับค่าอัตราการไหลของเชื้อเพลิงเท่ากับ 0.3 kg/min สำหรับแต่ละขนาดของเชื้อเพลิงแกลบ ส่วนค่า Equivalence ratio, Φ , เท่ากับ 0.8, 0.9, 1.0, 1.1 และ 1.2 อัตราส่วนของอัตราการไหลอากาศหตุยภูมิต่ออากาศทั้งหมด (λ) เท่ากับ 0.2, 0.3 และ 0.4 ซึ่งลักษณะของเตาเผาบอร์เทคเป็นทอรูปทรงกระบอก 2 ชั้น ฉนวนห้องเผาไหม้ชั้นนอกประกอบด้วยเหล็ก และฉนวนของห้องเผาไหม้ด้านในทำจากอิฐทนไฟ ดังแสดงในรูปที่ 2 โดยทำการวัดการกระจายอุณหภูมิภายในเตาทั้งสิ้น 7 ตำแหน่งตามแนวแกน ที่ตำแหน่ง $x = 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6$, และ 0.7 เมตร และ 5 ตำแหน่งตามแนวรัศมีที่ $r = 0.055, 0.065, 0.075, 0.085$, และ 0.095 เมตร

จากการทดลองพบว่าอิทธิพลของค่า Equivalence ratio ในช่วง 0.9 - 1.0 ให้ลักษณะการกระจายอุณหภูมิที่สม่ำเสมอทั่วทั้งเตาเผาในแนวรัศมี อุณหภูมิภายในเตาเผามีค่าสูงสุดประมาณ 1000°C สำหรับอิทธิพลของปริมาตรอัตราการไหลของอากาศหตุยภูมิต่อปริมาตรอัตราการไหลของอากาศทั้งหมดที่ค่า $\lambda = 0.3$ จะให้อุณหภูมิภายในเตาเผาสูงสุด แต่ในช่วง $\Phi \leq 1$ จะไม่ส่งผลมากนักต่อ

ลักษณะการกระจายอุณหภูมิภายในเตาเผา ในส่วนอิทธิพลของขนาดเชื้อเพลิงแกลบ เมื่อนำลักษณะการกระจายอุณหภูมิภายในเตาเผามาเปรียบเทียบกันพบว่าช่วง Φ เท่ากับ 0.9-1.0 ขนาดเชื้อเพลิงแกลบ 0.84-1.00 และ 1.19-1.41 มม. จะมีลักษณะการกระจายอุณหภูมิที่สม่ำเสมอ อุณหภูมิภายในเตาที่ขนาดเชื้อเพลิงแกลบ 0.84-1.00 มม. มีอุณหภูมิสูงกว่าที่ขนาดเชื้อเพลิงแกลบ 1.19-1.41 มม. เพียงเล็กน้อยเท่านั้น แต่เชื้อเพลิงแกลบขนาด 0.84-1.00 มม. จะสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายในการเตรียมเชื้อเพลิงสูง ดังนั้นจึงต้องคำนึงถึงความสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายในการลดขนาดของเชื้อเพลิงให้มีขนาดเล็กลง

งานวิจัยของ ศุภชัย เลื่อนลอย [8] ได้ทำการศึกษาของคุณลักษณะการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงแกลบที่มีความชื้นภายในเตาเผาแบบวอร์เทค ระดับความชื้นของแกลบจำนวนสามค่าที่ใช้กับการทดลองนี้คือ 9.2%, 12% และ 15% โดยน้ำหนัก การทดลองทำการกำหนดอัตราการป้อนของเชื้อเพลิงเท่ากับ 0.3 kg/min โดยตลอด อัตราการไหลโดยมวลของอากาศจะปรับให้มีค่าอัตราส่วนสมมูล, Φ , เท่ากับ 0.8, 0.9, 1.0, 1.1 และ 1.2 สำหรับแต่ละอัตราการไหล ที่แต่ละอัตราส่วนสมมูลจะกำหนดสัดส่วนอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศทุกชนิดต่ออากาศทั้งหมด (อากาศปฐมภูมิ+อากาศทุติยภูมิ), λ , เท่ากับ 0.2, 0.3 และ 0.4 เพื่อตรวจสอบอิทธิพลของ λ ในการทดลองนี้เราจะทำการทดลองกับเชื้อเพลิงแกลบละเอียดซึ่งมีขนาดเท่ากับ 0.84 – 1.00 มม.

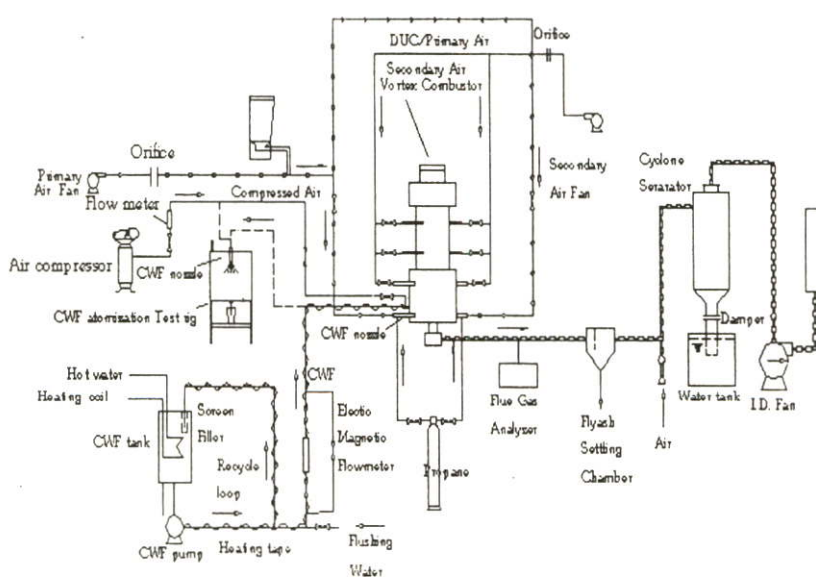
ซึ่งจากการทดลองสามารถสรุปผลได้ว่าการกระจายอุณหภูมิภายในเตาเผาแบบวอร์เทคที่ค่าอัตราส่วนสมมูลเท่ากับ 0.9 – 1.0 ให้การกระจายอุณหภูมิที่สม่ำเสมอและมีค่าสูง สำหรับค่าปริมาณความชื้นในเชื้อเพลิงแกลบที่ 9.2% จะให้อุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้มีค่าสูงสุดประมาณ 1,000°C และหากความชื้นในเชื้อเพลิงแกลบสูงเกินกว่า 15% จะทำให้เกิดการเผาไหม้ที่ไม่ต่อเนื่องเพราะจะเกิดการดับซึ่งเป็นผลจากอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ต่ำกว่าจุดติดไฟได้เองของเชื้อเพลิงแกลบ ส่วนผลของอากาศทุติยภูมิที่เข้าสู่ห้องเผาไหม้ที่ λ เท่ากับ 0.3 จะให้ผลการกระจายอุณหภูมิสม่ำเสมอและสูงที่สุด แต่ผลของอากาศทุติยภูมินี้จะไม่มีผลที่สำคัญต่อการกระจายอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้เมื่ออัตราส่วนสมมูล < 1.0 แต่จะมีผลต่อการช่วยในการลดขนาดของจี๊ด้าลอยที่ออกจากห้องเผาไหม้ ดังนั้นในการนำเชื้อเพลิงแกลบที่มีความชื้นมาใช้เป็นเชื้อเพลิงเราจะต้องทำการลดปริมาณความชื้นที่มีอยู่ในแกลบให้มีค่าต่ำเพื่อลดปริมาณความร้อนที่สูญเสียไปในการไล่ความชื้นและจะทำให้อุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้สูงขึ้นอีกด้วยซึ่งส่งผลให้ประสิทธิภาพทางความร้อนของเตาเผาเพิ่มขึ้น

งานวิจัยของ นิวัตติ พิริยะรุ่งโรจน์ [6] ได้ทำการศึกษาเบื้องต้นของการออกแบบสร้างและทดสอบหาพฤติกรรมการเผาไหม้เชื้อเพลิงแกลบในเตาเผาแบบวอร์เทค โดยทำการวัดและสังเกตการกระจายอุณหภูมิในตำแหน่งต่าง ๆ ภายในเตา, จี๊ด้า และควันที่ออกมากับไอเสีย ในการวัดจะกำหนดอัตราการไหล 0.2 kg/min โดยตลอดและทำการปรับค่า Equivalence ratio, Φ , เท่ากับ 0.7,

0.8, 1.0 และ 1.2 ในการเผาแต่ละครั้งจะกำหนดส่วนของอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศทุกชนิดต่ออัตราการไหลของอากาศทั้งหมด, λ , เท่ากับ 0, 0.2, และ 0.4

จากการทดลองพบว่าเมื่อปริมาณอากาศที่ใช้ในการทดลองเท่ากับปริมาณอากาศทางทฤษฎี ($\Phi=1.0$)สามารถทำให้การกระจายอุณหภูมิภายในเตาเวิร์เทคสูงกว่ากรณี $\Phi = 0.7, 0.8$ และ 1.2 และในการศึกษาถึงอัตราส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศทุกชนิดต่ออัตราการไหลของอากาศทั้งหมด(λ)ที่เหมาะสมต่อการเผาไหม้ โดยทำการทดลองที่ $\lambda = 0, 0.2$ และ 0.4 โดยการเพิ่มปริมาณอากาศส่วนที่ 2 จะมีปริมาณมากขึ้นตามอัตราส่วนที่ระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงที่ใช้ในการเผาไหม้ การจ่ายอากาศส่วนที่ 2 จะถูกจ่ายอากาศในแนวสัมผัสกับผนังด้านในของเตาเผาเวิร์เทคซึ่งจะช่วยทำให้เกิดการเผาไหม้แบบหมุนวนภายในเตาเผาเวิร์เทค ดังนั้นเมื่อ λ มากขึ้นจะเป็นการเพิ่มการเผาไหม้แบบหมุนวนมากขึ้น ซึ่งจะส่งผลดีต่อการเผาไหม้ 2 ประการหลักๆ คือ ประการแรกจะช่วยทำให้เกิดการผสมหรือการสัมผัสกันอย่างทั่วถึงระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศมากขึ้น ประการที่ 2 เป็นการเพิ่มระยะเวลาในการเผาไหม้ภายในเตาเผาเวิร์เทคให้นานมากขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพในการเผาไหม้มากขึ้น ซึ่งจากการทดลองพบว่า $\Phi = 1.0$ และ $\lambda = 0.4$ ทำให้ได้อุณหภูมิสูงสุดจากการเผาไหม้เท่ากับ $1,135^{\circ}\text{C}$ ซึ่งเป็นอุณหภูมิสูงสุดของการทดลอง ควันทที่เกิดขึ้นมีปริมาณน้อย มีการเผาไหม้อย่างต่อเนื่อง ชี้ออกมาที่มีสีดำปนเทา และจากการวิเคราะห์แก๊สไอเสียพบว่า O_2 เหลือเท่ากับ 4.41% , CO_2 เหลือเท่ากับ 15.34 % , มีปริมาณ CO เหลือต่ำซึ่งมีปริมาณเท่ากับ 130.25 ppm., มีปริมาณ NO_x เหลือเท่ากับ 764.00 ppm.

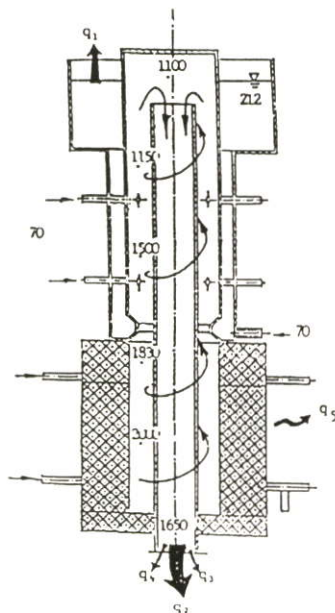
2.2.2 งานวิจัยในต่างประเทศ



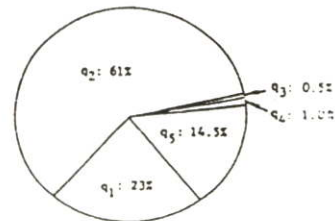
รูปที่ 2.3 ระบบทดสอบชุดทดลองเตาเผาแบบเวิร์เทค

งานวิจัยของ Sen Nieh และ Tim T. Fu [4] ได้ทำการทดลอง โดยทดสอบแบบจำลองที่ใช้หลักการของการเผาไหม้ใน Vortex combustor (VC) ที่ใช้เชื้อเพลิง Dry Ultrafine Coal (DUC) และ Coal Water Fuel (CWF) ที่อัตราการเผาไหม้ 0.15 MB/H เพื่อศึกษาพฤติกรรมของอุณหภูมิที่เกิดจากการเผาไหม้ , ประสิทธิภาพทางการเผาไหม้, ประสิทธิภาพทางความร้อน, ความเสถียรของเปลวไฟภายในเตาเผา, ระดับของมลภาวะและการควบคุม โดยรูปที่ 2.3 แสดงถึงระบบทดสอบการทดลองของ VC

จากรูปที่ 2.4 แสดงถึงการกระจายอุณหภูมิการเผาไหม้ สำหรับการทดสอบของ DUC ด้วยอัตราการไหล 11.9 lb/hr ที่อากาศส่วนเกิน 40 % อุณหภูมิบรรยากาศและอุณหภูมิการป้อนของน้ำเป็น 70 °F อุณหภูมิควบคุมในห้องเผาไหม้ส่วนล่างอยู่ในช่วง 1800-2000 °F เชื้อเพลิงที่ไม่เผาไหม้จะออกจากห้องเผาไหม้โดยผ่านแกนกลางภายใน ส่วนอุณหภูมิในห้องเผาไหม้ใหม่ส่วนบนลดลงจาก 1800 °F อยู่ที่ 1500 °F ณ ตำแหน่งที่วัดอากาศส่วนที่สองมีอุณหภูมิถึง 1100 °F ก๊าซไอเสียจะไหลผ่านแกนกลางและเกิดการถ่ายเทความร้อนระหว่างภายในห้องเผาไหม้ โดยการเผาไหม้ที่ต่อเนื่องจะเพิ่มอุณหภูมิการเผาไหม้ทำให้ที่ทางออกมีอุณหภูมิเท่ากับ 1650 °F และมีประสิทธิภาพการเผาไหม้ 98.5 % ส่วนรูปที่ 2.5 แสดงแผนภูมิของสมดุลพลังงานที่ใช้ของห้องเผาไหม้มีค่า 84 % (q_1+q_2) และอีก 16 % เป็นพลังงานสูญเสียกับสิ่งแวดล้อมโดยถ่ายเทผ่านออกสู่ผนังและท่อทิ้งไอเสีย



รูปที่ 2.4 แสดงการกระจายอุณหภูมิ(°F)



- q_1 --Useful heat absorbed by steam
- q_2 --Useful heat in hot flue gas
- q_3 --Heat loss from unburned carbon in flyash
- q_4 --Heat loss from incomplete combustion
- q_5 --Heat transfer losses

รูปที่ 2.5 แสดงสมดุลพลังงาน

จากการทดลองพบว่าประสิทธิภาพการเผาไหม้เท่ากับ 99 % และประสิทธิภาพทางความร้อนเป็น 84 % ซึ่ง VC model พบว่าสามารถช่วยควบคุมลักษณะอากาศภายใน จากการสันตะเทียนที่เกิด

จากแรงหมุนวนแบบปั่นป่วนของอากาศภายใน อุณหภูมิภายในสูงประมาณ 1500-2200 °F ไม่มี slag (dry fly ash) ส่งผลให้ก๊าซไอเสียและซีเฝ้าที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้สะอาดขึ้น โดยมีค่าน้อยกว่า 2 % และมีซัลเฟอร์น้อยกว่า 0.7 %

- ผลของอากาศส่วนที่ 2 ต่อการเผาไหม้ ซึ่งความหนาแน่นของการหมุนวนอากาศภายในห้องเผาไหม้ขึ้นอยู่กับความเร็วของการฉีดอากาศส่วนที่ 1, อัตราการไหลของอากาศรวมถึงมุมของการฉีดอากาศส่วนที่ 1 และ 2 การหมุนวนที่เกิดขึ้นมีผลต่อการผสมของอากาศและเชื้อเพลิง โดยอากาศส่วนที่ 2 มีผลต่อห้องเผาไหม้ส่วนบน ซึ่งการให้ออกซิเจนอย่างต่อเนื่องในการเผาไหม้ส่งผลถึงการถ่ายเทความร้อนระหว่างอากาศและเชื้อเพลิงขณะเกิดการผสมกัน แต่อากาศส่วนที่ 2 ไม่ใช่กระบวนการ Preheat จึงมีอุณหภูมิต่ำกว่าห้องเผาไหม้ส่วนล่าง ประสิทธิภาพการเผาไหม้เพิ่มขึ้นประมาณ 0.5 % และ Carbon ในซีเฝ้าลดลงจาก 30 % เหลือ 26 % ไอเสียที่สามารถวัดได้มีความเข้มข้นของ NO_x ไม่เกิน 50 ppm

- ผลของการสันดาปต่อเนื่องต่อการเผาไหม้ โดยผลของแรงสันดาปต่อเนื่องต่ออุณหภูมิการเผาไหม้ ใน DUC ประสิทธิภาพการเผาไหม้เท่ากับ 98 % (ไม่มีอากาศส่วนที่ 2) และมีค่า 98.5 % (มีอากาศส่วนที่ 2) สำหรับแรงกระทำอื่นมีผลต่อประสิทธิภาพการเผาไหม้เพียงเล็กน้อย

- มลภาวะค่าต่าง ๆ ที่วัดได้ จากการวัดระดับ NO_x ของอากาศที่ทางออก มีระดับ NO_x ต่ำ ซึ่งอ้างมาจากเชื้อเพลิงที่มีส่วนประกอบของ Sulfur ต่ำ (0.6-0.7 %) มีระดับการกระจายในสัดส่วนต่ำ (0.25 lb/hr) เพราะว่าเชื้อเพลิงที่ใช้ในการทดสอบเป็นเชื้อเพลิงสะอาด โดย NO_x ในห้องเผาไหม้เกิดการเปลี่ยนแปลง(ที่ 3% ออกซิเจน) ลดลงจาก 1500 ppm ณ. จุดกึ่งกลางของห้องเผาไหม้ส่วนล่างเหลือ 1050 ppm ณ. ตำแหน่งทางออกของก๊าซไอเสีย ซึ่ง NO_x เป็นที่รู้โดยทั่วกันคือจะเกิดเมื่ออุณหภูมิสูงหรือไม่ก็มีปริมาณออกซิเจนมากในการเผาไหม้ ในการทดลองนี้ให้อากาศส่วนเกิน 60 % โดยมีอากาศส่วนที่ 2 ฉีดเข้าไป ทำให้ค่า NO_x เป็นอิสระต่ออุณหภูมิการเผาไหม้ ซึ่งให้ช่วงอุณหภูมิที่ต่ำกว่าอากาศส่วนเกินที่มีค่าต่ำที่ฉีดเข้าไปและการขยายค่า NO_x สามารถควบคุมให้อยู่ในระดับต่ำได้

บทที่ 3

ทฤษฎี

3.1 บทนำ

พลังงานทดแทน หมายถึง พลังงานที่นำมาใช้แทนน้ำมันเชื้อเพลิง สามารถแบ่งได้ตามแหล่งที่ได้มาเป็น 2 ประเภท คือ พลังงานทดแทนจากแหล่งที่ใช้แล้วหมดไป อาจเรียกว่า พลังงานประเภทสิ้นเปลือง ได้แก่ ถ่านหิน ก๊าซธรรมชาติ นิวเคลียร์ หินน้ำมัน และ ทราชน้ำมัน เป็นต้น และพลังงานทดแทนอีกประเภทหนึ่งเป็นพลังงานที่ใช้แล้วสามารถนำมาใช้หมุนเวียนได้อีก เรียกว่า พลังงานหมุนเวียน ได้แก่ ชีวมวล แสงอาทิตย์ ลม และน้ำ เป็นต้น ซึ่งในที่นี้จะขอลำถึงเฉพาะศักยภาพและรายละเอียดข้อมูลของพลังงานทดแทนประเภทหมุนเวียนเท่านั้น

3.2 เชื้อเพลิง (Fuels)

เชื้อเพลิงเมื่อแบ่งออกตามสภาพขณะอุณหภูมิปกติแล้ว สามารถแบ่งออกได้ 3 ชนิด ได้แก่

1. เชื้อเพลิงก๊าซ (Gaseous Fuels) คือ เชื้อเพลิงที่มีสถานะเป็นก๊าซที่อุณหภูมิปกติ ได้แก่ ก๊าซธรรมชาติ(Natural Gas) และก๊าซอื่น ๆ ที่ได้มาจากกรรมวิธีการผลิต (Producer Gas) ฯลฯ
2. เชื้อเพลิงเหลว (Liquid Fuels) คือ เชื้อเพลิงที่มีสถานะเป็นของเหลวที่อุณหภูมิปกติ ได้แก่
 - 2.1 น้ำมันพืช (Vegetable Fuels) เป็นเชื้อเพลิงที่ได้มาจากพืช เช่น เมล็ดพืช รำข้าว เปลือกเมล็ดพืช เป็นต้น
 - 2.2 น้ำมันสัตว์ (Animal Fuels) เป็นเชื้อเพลิงที่ได้มาจากสัตว์ เช่น ไขปลาวาฬ เป็นต้น
 - 2.3 น้ำมันแร่ (Mineral Fuels) เป็นเชื้อเพลิงที่ได้มาจากน้ำมันปิโตรเลียม(Crude oil) ซึ่งใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมมากที่สุด

3. เชื้อเพลิงแข็ง (Solid Fuels) เป็นเชื้อเพลิงที่มีสถานะเป็นของแข็งที่อุณหภูมิปกติ ซึ่งจะกล่าวถึงแต่เชื้อเพลิงชีวมวลเท่านั้น เชื้อเพลิงชีวมวล สามารถแบ่งออกได้ 4 ชนิด [10] คือ

3.1 เชื้อเพลิงชีวมวลที่ได้จากไม้ (Forest Biomass) สามารถแบ่งได้เป็นไม้เนื้ออ่อน (Soft Wood) กับ ไม้เนื้อแข็ง (Hard Wood) ในเชื้อเพลิงประเภทนี้จะมีปริมาณของลิกนิน (Lignin) สูงถึงประมาณ 40 % ในไม้เนื้อแข็ง ตัวอย่างเชื้อเพลิงประเภทนี้ ได้แก่ เศษไม้ เปลือกไม้ กิ่งไม้ และพวกขี้เลื่อย

3.2 เชื้อเพลิงชีวมวลที่ได้จากการเกษตร (Agriculture Biomass) ส่วนใหญ่จะเป็นของเหลือใช้ทางการเกษตร เช่น แกลบข้าว ซึ่งในสารพวกนี้จะมีลิกนินต่ำประมาณ 0-20 %

3.3 เชื้อเพลิงชีวมวลที่ได้จากโรงงานอุตสาหกรรม (Industrial Wastes) เช่น เชื้อเพลิงที่ได้จากขบวนการผลิตน้ำตาล คือ ชานอ้อย นอกจากนี้ยังมีกากสับปะรดที่ได้จากโรงงานทำสับปะรดกระป๋อง เชื้อเพลิงเหล่านี้จะมีปริมาณความชื้นสูงมาก

3.4 เชื้อเพลิงที่ได้จากของเหลือใช้จากคน (Domestic Wastes) ได้แก่เชื้อเพลิงที่ได้จากขยะเทศบาล เป็นต้น

เชื้อเพลิงชีวมวลโดยทั่ว ๆ ไป จะเป็นเชื้อเพลิงที่เป็นของแข็ง มีปริมาณความชื้นสูงและ ความหนาแน่นน้อย องค์ประกอบของเชื้อเพลิงจะแตกต่างกันตามประเภทของเชื้อเพลิงชีวมวล และการที่เชื้อเพลิงชีวมวลมีปริมาณความชื้นและองค์ประกอบที่แตกต่างกัน จึงทำให้ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงชีวมวลมีค่าแตกต่างกันด้วย ดังนี้

แกลบ	มีคุณค่าทางความร้อนเท่ากับ	3,300	kcal/kg
จี้เลื่อย	มีคุณค่าทางความร้อนเท่ากับ	4,000	kcal/kg
ชานอ้อย	มีคุณค่าทางความร้อนเท่ากับ	1,900	kcal/kg
ขยะ	มีคุณค่าทางความร้อนเท่ากับ	2,000	kcal/kg

ดังนั้นเชื้อเพลิงชีวมวลที่นิยมนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงให้ความร้อน ส่วนมากจะเป็น จี้เลื่อยและแกลบข้าว เพราะให้ค่าความร้อนสูงและความชื้นต่ำ

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเชื้อเพลิงชีวมวล โดยวิธี Ultimate Analysis ทำให้ทราบองค์ประกอบของแกลบ คือ มีคาร์บอนประมาณ 40-42 % ออกซิเจนประมาณ 36-37 % ไฮโดรเจน 5 % ไนโตรเจนน้อยกว่า 1 % มีปริมาณจี้เลื่อย ประมาณ 10-12 % และมีความชื้นสูงประมาณ 2.4-11 %

3.3 การเผาไหม้

การเผาไหม้เป็นปฏิกิริยาการรวมตัวกันของเชื้อเพลิงกับออกซิเจนอย่างรวดเร็วพร้อมกับเกิดการลุกไหม้และคายความร้อน

ในการเผาไหม้ส่วนใหญ่ไม่ใช้ออกซิเจนบริสุทธิ์ เพราะสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายสูงจะใช้ออกซิเจนในอากาศ จะมีก๊าซออกซิเจนและไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบหลัก ก๊าซอื่นมีน้อยมากจนไม่มีความสำคัญ ออกซิเจนจะมีอยู่ในอากาศร้อยละ 21 และไนโตรเจนร้อยละ 79 โดยปริมาตร หรือมีออกซิเจนประมาณร้อยละ 23 และไนโตรเจนประมาณร้อยละ 77 โดยน้ำหนัก [10]

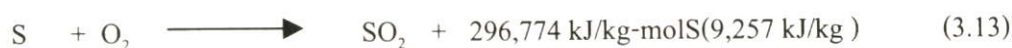
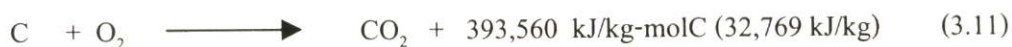
หรือจะกล่าวสรุปได้ว่า การเผาไหม้เป็นปฏิกิริยาชนิดหนึ่ง ซึ่งปลดปล่อยพลังงานความร้อนออกมาพร้อมกันกับการเปลี่ยนแปลงทางเคมี ซึ่งเป็นการรวมตัวของออกซิเจนเข้ากับคาร์บอน ไฮโดรเจน และซัลเฟอร์ เกิดเป็นสารประกอบใหม่ คือ คาร์บอนไดออกไซด์ ไอน้ำ และซัลเฟอร์ไดออกไซด์

3.3.1 ปฏิกิริยาเคมีของการเผาไหม้ มีดังนี้ คือ

เนื่องจากเชื้อเพลิงส่วนใหญ่ประกอบด้วย คาร์บอน , ไฮโดรเจน และปริมาณธาตุอื่นปนอยู่บ้าง เช่น กำมะถันเมื่อเผาไหม้จะเกิดปฏิกิริยาเคมีดังสมการต่อไปนี้ [16]



ซึ่งอาจเขียนรวมกันได้เป็น



นอกจากนี้ยังมีปฏิกิริยาปฏิกิริยาปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในการเผาไหม้อีกมาก เช่น



การเผาไหม้จะเกิดได้ดีต้องมีสภาวะที่เหมาะสม นั่นก็คือ ต้องมีอากาศที่เพียงพอ มีอุณหภูมิสูงพอ มีเวลามากพอสำหรับทำปฏิกิริยา และมีการผสมผสานของเชื้อเพลิงที่ดี ในการเผาไหม้เพื่อที่จะให้เกิดปฏิกิริยาสมบูรณ์จึงต้องเพิ่มปริมาณอากาศขึ้นจนเพียงพอ ซึ่งจะได้อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงจริงสูงกว่าอัตราส่วนตามทฤษฎี อากาศที่เกินจากที่ต้องการนั้น เรียกว่า อากาศมากเกินพอ คำนวณได้จาก

$$\% \text{ Excess air} = \left(\frac{\text{อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงจริง}-\text{อัตราส่วนต่อเชื้อเพลิงตามทฤษฎี}}{\text{อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงตามทฤษฎี}} \right) \times 100 \quad (3.18)$$

3.3.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการเผาไหม้

ปัจจัยที่มีผลต่อการเผาไหม้ที่สำคัญมี 4 ประการ คือ Turbulent (การปั่นป่วนหรือการผสมคลุกเคล้า) , Temperature (อุณหภูมิ) , Theoretical Air (ปริมาณอากาศที่ต้องการ) และ Time (เวลาที่เพียงพอในการเผาไหม้)

3.3.2.1 การปั่นป่วนหรือการผสมคลุกเคล้าระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศ

การผสมหรือการสัมผัสกันอย่างทั่วถึงระหว่างเชื้อเพลิงกับออกซิเจน คือ การที่อนุภาคของเชื้อเพลิงสัมผัสกับโมเลกุลของออกซิเจนได้อย่างทั่วถึง ในกรณีที่เชื้อเพลิงเป็นก๊าซใน

การผสมจะเป็นไปได้ง่าย แต่ถ้าเป็นเชื้อเพลิงแข็งหรือของเหลวการผสมจะยุ่งยากขึ้น ในกรณีที่เชื้อเพลิงส่วนใหญ่เป็นของเหลวจะมีการทำให้เป็นอนุภาคเล็ก โดยใช้หัวพ่นแล้วจึงทำการเผาไหม้ซึ่งจะทำให้รวมตัวกับอากาศได้ง่ายขึ้น

ส่วนเชื้อเพลิงที่เป็นของแข็งนั้น แต่ละโมเลกุลของออกซิเจนจะสัมผัสกับผิวของเชื้อเพลิงเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ให้ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ จากนั้นออกซิเจนจะเข้าผสมกับก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ทำให้เกิดปฏิกิริยาสมบูรณ์ คือ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในที่สุด

ดังนั้นจะกล่าวได้ว่า จุดประสงค์ของการทำให้เกิดการปั่นป่วนขึ้นก็เพื่อที่จะทำให้เกิดการสัมผัสกันระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิง ทำให้เกิดปฏิกิริยาอย่างรวดเร็วและทำให้เกิดบริเวณของพื้นผิวที่จะเกิดปฏิกิริยาขึ้นมาใหม่

3.3.2.2 อุณหภูมิ[11]

การลุกไหม้ของเชื้อเพลิงหรืออัตรารวมตัวกันทางเคมีของเชื้อเพลิงกับอากาศนั้นขึ้นโดยตรงกับอุณหภูมิ การเผาไหม้จะเกิดขึ้นในตอนแรก ๆ และเกิดต่อไปเรื่อย ๆ ความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ก็จะเพิ่มอุณหภูมิของเชื้อเพลิงและอากาศให้มากขึ้น ทำให้อัตราการเผาไหม้มากขึ้นด้วย ฉะนั้นสิ่งที่ต้องการสำหรับการเผาไหม้แบบเกิดขึ้นเอง (Spontaneous Combustion) จะประกอบด้วย

1. บริเวณที่จำกัดสำหรับสะสมความร้อน
2. ชนิดของเชื้อเพลิง
3. อากาศ

การลุกไหม้นั้นไม่ได้เป็นขบวนการที่เกิดขึ้นได้เอง โดยส่วนใหญ่จะใช้ปริมาณความร้อนจากภายนอกช่วยเร่งปฏิกิริยาการเผาไหม้ และให้ปริมาณความร้อนออกมามากขึ้น นอกจากนั้นสิ่งที่สำคัญสำหรับการเผาไหม้แบบต่อเนื่องก็คือ อุณหภูมิ ซึ่งถ้าอุณหภูมิต่ำเกินไปก็ทำให้เชื้อเพลิงไม่สามารถลุกไหม้แบบต่อเนื่องได้ แต่ถ้าอุณหภูมิการเผาไหม้สูงพอเพียง การลุกไหม้ก็จะเกิดต่อไปได้เรื่อย ๆ โดยปกติแล้วการเผาไหม้นั้นต้องการให้มีอุณหภูมิสูงเท่าที่จะเป็นไปได้ เพื่อให้เกิดการถ่ายเทความร้อนได้เร็ว แต่การที่จะให้อุณหภูมิจะสูงได้มากน้อยขึ้นอยู่กับชนิดของเชื้อเพลิงที่ใช้ ซึ่งจะสามารถให้อุณหภูมิที่แตกต่างกัน ในกรณีอุณหภูมิต่ำเกินไปอาจทำให้เกิดการรวมตัวกันเป็นสารที่ไม่ต้องการได้ เช่น สารประกอบออกไซด์ของไนโตรเจน หรือ เกิดเถ้าหลอมรวมตัวเป็นซิลิคา (slag) ก็จะเกาะติดอยู่บนผนังเหล็ก ที่ใช้ในการถ่ายเทความร้อนทำให้เกิดการกัดกร่อนได้

3.3.2.3 อัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างเชื้อเพลิงกับปริมาณอากาศ

อัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างเชื้อเพลิงกับปริมาณอากาศที่ใช้ในกระบวนการเผาไหม้ เพื่อให้ได้ผลอย่างสมบูรณ์นั้น จะต้องมีสัดส่วนที่พอดีกันระหว่างปริมาณเชื้อเพลิงกับปริมาณออกซิเจน ตามสมการเผาไหม้ ปริมาณของอากาศตามทฤษฎี (Theoretical air) คือปริมาณน้อยที่สุดของอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้เชื้อเพลิงอย่างสมบูรณ์ จนคาร์บอน, ไฮโดรเจน และกำมะถัน

เปลี่ยนเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์, น้ำ และ ก๊าซซัลเฟอร์ไดร็อกไซด์ ตามลำดับ[10] ในทางปฏิบัติจริงของอากาศที่ต้องการตามทฤษฎีไม่พอที่จะทำให้เกิดการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ การสันดาปที่ไม่สมบูรณ์ คือ การเกิดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ และ คาร์บอนในก๊าซไอเสีย

3.3.2.4 เวลาที่เพียงพอในการเผาไหม้ให้สมบูรณ์ของเชื้อเพลิง

เวลาที่เพียงพอในการเผาไหม้ให้สมบูรณ์ของเชื้อเพลิง คือเวลาที่เชื้อเพลิงอยู่ในเตาเผาควรรานพอที่จะทำให้เกิดการเผาไหม้มากที่สุด แต่การเผาไหม้เชื้อเพลิงอย่างสมบูรณ์เป็นไปได้ยากเพราะต้องใช้เวลาาน ดังนั้นจึงนำเทคนิคการหมุนวนความเร็วสูงของเตาเผาออร์ทอกมาเพื่อช่วยให้เกิดการไหลหมุนวน (Recirculating Flow) ของเชื้อเพลิงกับอากาศ ขณะเกิดการเผาไหม้ภายใน ทำให้เวลาในการเผาไหม้นานขึ้น

3.4 องค์ประกอบของอากาศ[9]

ปฏิกิริยาเคมีซึ่งเชื้อเพลิงทำปฏิกิริยากับออกซิเจน (เรียกว่าถูก Oxidized) และให้พลังงานออกมาเป็นจำนวนมากเรียกว่า การสันดาป หรือ การเผาไหม้ (combustion) อากาศเป็นตัว Oxidizer ที่ใช้บ่อยที่สุดในกระบวนการเผาไหม้ ทั้งนี้เพราะมันสามารถหาได้ง่ายและไม่เสียค่าใช้จ่าย ส่วนออกซิเจนบริสุทธิ์ (pure oxygen : O_2) นั้นถูกใช้เป็นตัว Oxidizer เฉพาะในกรณีพิเศษซึ่งไม่สามารถใช้อากาศได้ ดังนั้นเราจึงจะพิจารณาองค์ประกอบของอากาศก่อนที่จะไปพิจารณาด้านอื่น ๆ เช่น พลังงานจากการเผาไหม้

ตามจำนวนโมล (หรือปริมาตร) นั้นพบว่าอากาศแห้งประกอบด้วยออกซิเจน 20.9 % ในโตรเจน 78.1 % อาร์กอน 0.9 % และสารอื่น ๆ จำนวนเล็กน้อย ในการวิเคราะห์กระบวนการเผาไหม้อาร์กอนในอากาศจะพิจารณาว่าเป็นไนโตรเจน และสารอื่น ๆ ที่มีจำนวนเล็กน้อยจะไม่นำมาพิจารณา ดังนั้นจึงจะพิจารณาว่าอากาศแห้งประกอบไปด้วยออกซิเจน 21 % ในโตรเจน 79 % (ตามจำนวน โมล) ดังนั้นแต่ละโมลของออกซิเจนจะมีไนโตรเจนจำนวน 3.76 โมลผสมอยู่ด้วยในอากาศ นั่นคือ



ที่อุณหภูมิการเผาไหม้ปกติ ไนโตรเจนมีพฤติกรรมเป็นก๊าซเฉื่อย ซึ่งไม่ทำปฏิกิริยากับสารอื่นถึงอย่างไรก็ตาม แม้นไนโตรเจนไม่ทำปฏิกิริยาแต่ก็มีผลต่อกระบวนการเผาไหม้อย่างมากทั้งนี้เพราะไนโตรเจนจะเข้าสู่ห้องเผาไหม้ในปริมาณมากที่อุณหภูมิต่ำ และออกจากห้องเผาไหม้ที่อุณหภูมิสูงซึ่งเป็นการดูดซับพลังงานเคมีส่วนหนึ่งที่ถูกล่อลอยออกมาระหว่างกระบวนการเผาไหม้ ซึ่งจะสมมุติว่าไนโตรเจนเป็นก๊าซเฉื่อยโดยสมบูรณ์ ที่อุณหภูมิสูงไนโตรเจนจำนวนหนึ่ง(ซึ่งอาจไม่มากนัก) จะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนให้สารพิษ เช่น Nitric Oxide

อากาศที่เข้าสู่ห้องเผาไหม้มักจะมีละอองน้ำปนอยู่ ละอองน้ำนี้จะต้องนำมาพิจารณาเพราะแม้ว่าในกระบวนการเผาไหม้ส่วนใหญ่ซึ่งจะคิดให้เป็นก๊าซเฉื่อยเช่นเดียวกับไนโตรเจน อย่างไรก็ตามที่อุณหภูมิสูงละอองน้ำอาจแยกตัว(dissociate) เป็น H₂ และ O₂ รวมทั้งอาจแยกเป็น H, O, OH และเมื่อก๊าซจากการเผาไหม้ทำให้เย็นลงต่ำกว่าอุณหภูมิจุดน้ำค้าง (dew point temperature) ของละอองน้ำ จะทำให้ละอองน้ำส่วนหนึ่งกลั่นตัวออกมาเป็นหยดน้ำ และจำเป็นที่จะต้องรู้อุณหภูมิจุดน้ำค้างนี้เพราะหยดน้ำมักจะรวมตัวกับ Sulfur dioxide ซึ่งอาจมากับก๊าซที่ได้จากการเผาไหม้ กลายเป็นกรดกำมะถัน(Sulfuric acid) ซึ่งทำให้เกิดการผุกร่อนอย่างมาก

ปริมาณที่ใช้ในการวิเคราะห์การเผาไหม้ ได้แก่ สัดส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง (air-fuel ratio : AF) ปกติแล้วมันจะเขียนอยู่ในรูปสัดส่วนเชิงมวลและมีค่าจำกัดความเป็น มวลของอากาศต่อมวลเชื้อเพลิง ในระหว่างกระบวนการเผาไหม้ นั่นคือ

$$AF = \frac{m_{air}}{m_{fuel}} \quad (3.20)$$

มวลสาร (m) ของสารนั้นสัมพันธ์กับจำนวนโมล (N) โดยสมการเขียนเป็นสมการได้ว่า $m = NM_w$ โดยที่ M_w คือ มวลโมเลกุล (molar mass) ของสาร

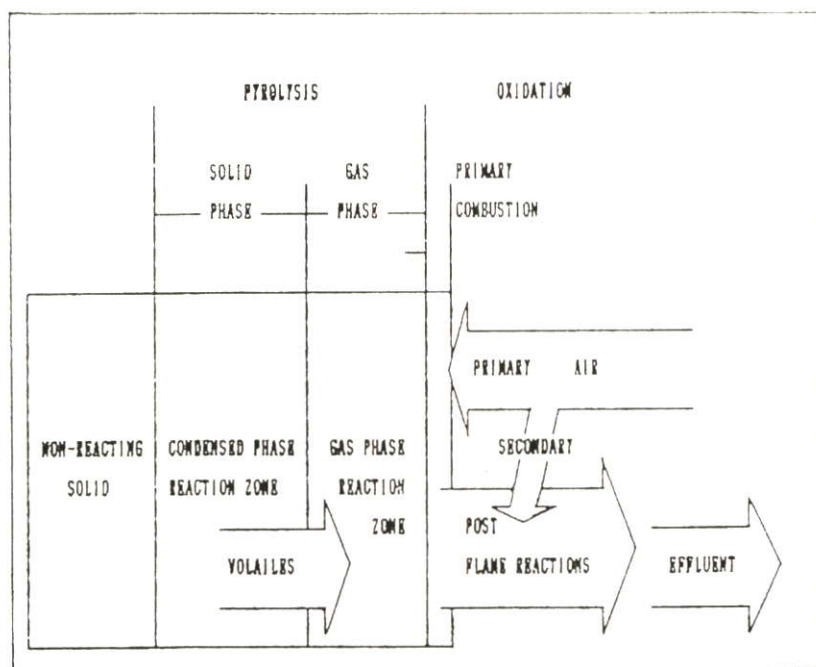
สัดส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงนี้สามารถเขียนอยู่ในรูปของจำนวนโมลได้เป็น จำนวนโมลของอากาศต่อจำนวนโมลของเชื้อเพลิง ดังนั้นจะได้ว่า ส่วนกลับของ AF จึงเรียกว่า สัดส่วนเชื้อเพลิงต่ออากาศ (fuel-air ratio)

3.5 การเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง

เชื้อเพลิงแข็งที่ใช้อยู่ทั่ว ๆ ไปมีหลายชนิด เช่น ไม้ วัสดุชีวมวล เป็นต้น ขบวนการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งจะมีความแตกต่างไปจากเชื้อเพลิงเหลว หรือ ก๊าซเนื่องจาก คุณสมบัติของเชื้อเพลิงแข็งมักเป็นสารประกอบที่มีส่วนผสมของสารต่าง ๆ มากมายและผสมกันอยู่อย่างไม่เป็นเนื้อเดียวกันนัก อีกทั้งอัตราส่วนของสารต่าง ๆ ภายในเชื้อเพลิงแข็งยังไม่แน่นอน นอกจากนี้การเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งยังขึ้นอยู่กับขนาดของเชื้อเพลิงแข็งด้วย เชื้อเพลิงแข็งประกอบด้วยสารต่าง ๆ ซึ่งทั้งสามารถเผาไหม้ได้และ ไม่สามารถเผาไหม้ได้ ส่วนที่ไม่สามารถเผาไหม้ได้เรียกว่า สารเฉื่อย (Inert) สารเฉื่อยนี้สามารถเปรียบเทียบได้กับ ก๊าซไนโตรเจนในอากาศ ซึ่งไม่ช่วยให้เกิดการเผาไหม้ แต่ในบางครั้ง สารเฉื่อยเหล่านี้ ก็อาจเกิดปฏิกิริยาได้ในบางขบวนการของการเผาไหม้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในขบวนการที่มีอุณหภูมิสูง ๆ สารเฉื่อยที่ประกอบอยู่ในเชื้อเพลิงแข็งสามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ ความชื้น และสารอนินทรีย์ที่ประกอบเป็นขี้เถ้า ซึ่งสารเหล่านี้ส่วนมากเป็นสารจำพวก ซิลิเกต (Silicates) ซัลไฟด์ (Sulfides) เป็นต้น เมื่อเผาไหม้สารเหล่านี้จะกลายเป็นขี้เถ้า บางส่วนจะตกอยู่ภายในห้องเผาไหม้ บางส่วนที่มีน้ำหนักเบาจะปลิวออกไปกับก๊าซไอเสีย เรียกว่า เถ้าปลิว (Fly Ash) [12]

เชื้อเพลิงแข็ง เป็นวัสดุที่มีส่วนผสมเป็นสารประกอบที่รวมตัวกับออกซิเจน อาจเกิดปฏิกิริยา และไม่เกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ร่วมกัน สารประกอบที่เกิดการเผาไหม้แบ่งออกได้ 2 ชนิด ชนิดที่เป็นสารระเหย (Volatile matter) . ในที่นี้จะหมายถึง สารประกอบที่ระเหยในช่วงอุณหภูมิการเผาไหม้ เช่น ไฮโดรเจน ไฮโดรคาร์บอน ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ ๆ และชนิดที่ไม่เป็นสารระเหย (Nonvolatile) หรือ เป็นสารที่น้ำหนักโมเลกุลสูงนั่นเอง เช่น คาร์บอน โพลีเมอร์ลิก (Polymeric)

ในขบวนการไพโรไลซิส สารที่ระเหยได้ในเชื้อเพลิงจะระเหยออกจากผิวอนุภาคของเชื้อเพลิง และผสมกับอากาศรอบ ๆ เกิดการเผาไหม้ขึ้น ซึ่งเรียกช่วงนี้ว่า การเผาไหม้ช่วงแรก (Primary Combustion) หลังจากเผาไหม้แล้วยังมีบางส่วนที่ยังเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ เมื่อมาพบกับอากาศส่วนที่สอง (Secondary Air) จะเกิดปฏิกิริยาเผาไหม้ต่อไปและออกมาเป็นก๊าซไอเสียในที่สุด ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ปฏิกิริยาการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง

ในส่วนของสารที่ไม่ระเหยที่อยู่ในเชื้อเพลิงแข็ง เช่น คาร์บอนเมื่อเกิดขบวนการเผาไหม้ ออกซิเจนจะเข้าไปสัมผัสกับผิวคาร์บอนตามขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาของคาร์บอนดังนี้



หลังจากที่เกิดปฏิกิริยาทั้ง 3 สมการ จะให้ผลิตภัณฑ์ไพโรซีส ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่ต้องทำปฏิกิริยาต่อไปอีก มีสองสถานะ คือ ก๊าซ และของแข็ง สำหรับก๊าซประกอบด้วย CO , CO_2 , H_2 , O_2 , H_2O และสารประกอบไฮโดรคาร์บอนอีกเล็กน้อยที่ปล่อยออกมารอบ ๆ อนุภาคเชื้อเพลิง เมื่อปฏิกิริยาสารระเหยต่อพื้นที่ผิว (Surface Flux of Volatile) ของอนุภาคน้อย ออกซิเจนจะเข้าทำปฏิกิริยากับก๊าซดังกล่าว เกิดการเผาไหม้แบบผสมไม่เป็นเนื้อเดียวกันของก๊าซแต่ละชนิด ในทางตรงกันข้าม ถ้าปริมาณของสารระเหยต่อพื้นที่ผิวมาก จะทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้ออกซิเจนเข้าทำปฏิกิริยากับก๊าซ เป็นผลให้เกิดปฏิกิริยาหรือเกิดน้อย ฉะนั้นจึงต้องใช้เวลาเพื่อให้ปริมาณของสารระเหยเจือจางลงจึงจะเกิดปฏิกิริยา ในส่วนที่เป็นของแข็งจำพวกถ่าน จะไม่เกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ในเวลานั้น เนื่องจากก๊าซที่เกิดในกระบวนการไพโรซีสจะป้องกันไม่ให้ออกซิเจนเข้าทำปฏิกิริยาและอุณหภูมิยังไม่สูงพอที่จะเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ได้ แต่หลังจากก๊าซต่าง ๆ เกิดปฏิกิริยาจะถ่ายเทความร้อนให้กับคาร์บอนทำให้มีอุณหภูมิสูงขึ้นจนถึงจุดที่เกิดปฏิกิริยา และมีขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาดังนี้



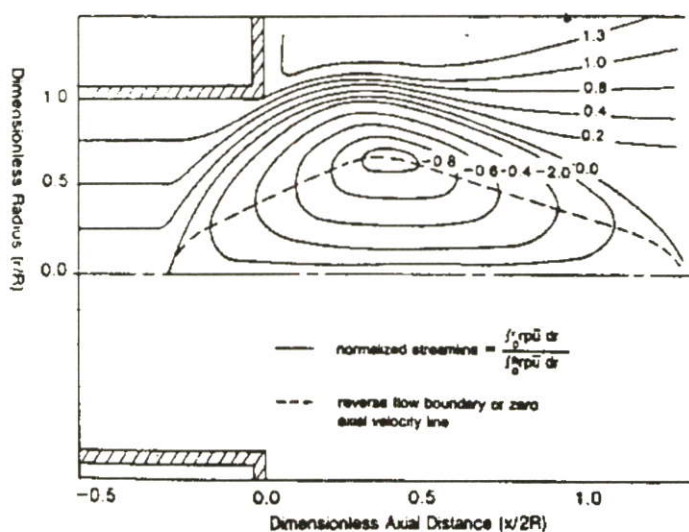
อัตราการเกิดปฏิกิริยาของการเผาไหม้ขึ้นอยู่กับของเชื้อเพลิงแข็ง และเชื้อเพลิงแข็งนี้จะได้รับการถ่ายเทความร้อน โดยการแผ่รังสีมากที่สุด

ในส่วนของสารที่ไม่สามารถเผาไหม้ได้ เช่น ความชื้น ซึ่งจะระเหยออกไปในขณะที่เกิดการเผาไหม้ และออกไปกับก๊าซไอเสีย ความชื้นเหล่านี้จะทำให้อุณหภูมิจากการเผาไหม้ลดลงเพราะจะต้องสูญเสียความร้อน เพื่อทำให้ความชื้นระเหยตัว และมีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิจากการเผาไหม้ และสารที่ไม่สามารถเผาไหม้ได้จำพวก สารอนินทรีย์ต่าง ๆ จะเกิดเป็นขี้เถ้า ถ้าอุณหภูมิต่ำกว่า สารเหล่านี้จะละลายกลายเป็นสแลก (Slag)

3.6 หลักการหมุนวนอากาศ

การเคลื่อนที่ของอากาศในลักษณะวอร์เทคเป็นไปตามกฎอนุรักษ์โมเมนตัมเชิงมุม (conservation of angular momentum) ทำให้เกิดความเร็วและการหมุนในแนวรัศมีของอนุภาคต่าง ๆ (สามารถพิจารณาโมเลกุลของอากาศ และปริมาตรของอากาศ) จะมีค่าคงที่ เป็นที่น่าสังเกตว่า gradient ความเร็วยังคงอยู่ในของไหลกับความเร็วในแนวสัมผัสมีค่าสูงที่ชั้นใน (มีการหมุนวนในแนวรัศมีเล็กน้อย) และความเร็วในแนวเส้นสัมผัสต่ำที่ชั้นนอก (ใกล้บริเวณผนังท่อ) ซึ่งเรียกว่าระบบการไหลแบบ irrotational เมื่อมีผลการไหลที่มีความหนืดเข้ามาเกี่ยวข้องจะเทียบเท่ากับการกระจายความเร็วของอนุภาคผ่านเข้าไปในแนวรัศมีของท่อ ตามการขยายของทอวอร์เทคในท่อ ทำให้ชั้นความเร็วสูงไปเร่งชั้นความเร็วต่ำทำให้มีความเร็วเพิ่มขึ้น เรียกการไหลแบบ rotation และจะ

เกิดการถ่ายเทพลังงานจลน์ออกจากแนวแกนของท่อ สาเหตุที่มีการถ่ายเทพลังงาน(energy transfer) เพราะมีการทำความร้อนของเลเยอร์ชั้นนอก และการทำความเย็นของเลเยอร์ชั้นใน เมื่ออากาศไหลวนภายในท่อ อากาศที่ค้างอยู่จะไหลย้อนกลับไปยังศูนย์กลางของท่อตามแนวแกนแบบสวนทางกัน (counter flow) ที่เป็นเช่นนี้เพราะบังคับให้มีการหมุนวนในตอนแรกไปยังเส้นรอบวงของท่อ โดยแรงหนีศูนย์กลาง ที่มาจากการหมุนวนครั้งที่สอง มีการหมุนในทิศทางเชิงมุม(angular direction) อย่างเดียวกับตอนแรก โดยที่ viscous drag และความหนาแน่นแบบปั่นป่วนที่ชั้นขอบเขตระหว่าง การหมุนทั้งสองจะอยู่ระหว่างช่วงการหมุนชั้นนอก และการหมุนชั้นใน ในการเคลื่อนที่แบบ synchronous และมีผลต่างทางกายภาพอย่างเดียวกัน คือ กระแสทั้งสองเคลื่อนที่ในทิศทางเชิงเส้นตรงข้ามกัน และการหมุนชั้นในจะมีรัศมีน้อยกว่ารัศมีชั้นนอก (แตกต่างกับ ห้องเผาไหม้แบบไซโคลน คือ เป็นอุปกรณ์การเผาไหม้ที่ประยุกต์มาจากไซโคลนดักฝุ่น กล่าวคือ ของไหลซึ่งอาจปนกับอนุภาคของแข็งจะไหลแบบบังคับเข้าสู่ไซโคลนในแนวสัมผัสกับผิวด้านในแล้วจะไหลลักษณะวนเป็นเกลียวหรือคดสปริง(Helix Motion) 2 วง คือ วงแรกเรียกว่า การไหลวนรอบนอก (Outer Vortex) มีทิศทางไหลลงสู่ก้นไซโคลน วงที่สอง เรียกว่า การไหลวนภายใน (Inner Vortex) ภายใต้อิทธิพลของแรงหนีศูนย์กลาง(Centrifugal Force) มีทิศทางไหลสวนกลับมาในแนวแกนออกสู่ปากไซโคลน ซึ่งการไหลวนของอากาศภายในเตาเผาไซโคลนนั่นจะใช้ ปริมาณและความเร็วของอากาศมากกว่าการเกิดการหมุนวนในเตาเผาออร์ทเทค)

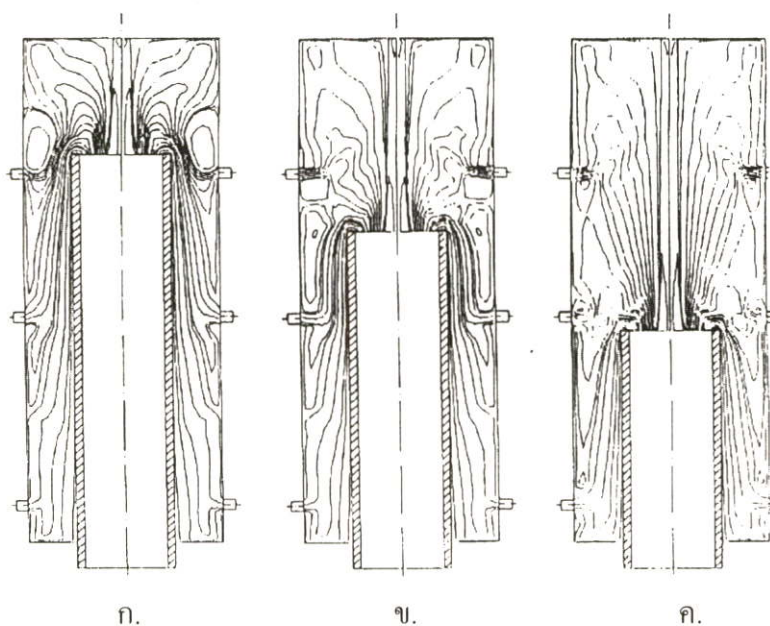


รูปที่ 3.2 แสดงระดับการกระจายอากาศของ stream function จากการเหนี่ยวนำของการไหลหมุนวน(swirl)

การไหลหมุนวนเกิดจากความเร็วในแนวสัมผัส ซึ่งประกอบจากเทอมของ Force Vortex Flow และ Free Vortex Flow ความเร็วในแนวสัมผัสจะเกิดจากจุดกำเนิดของ swirl โดยความเร็วสัมผัส

เฉลี่ยในบริเวณการไหลจะเป็นศูนย์ที่ตำแหน่งแนวแกนสามเมตร จากรูปที่ 3.2 เมื่อบริเวณพื้นที่การไหลเกิดการเปลี่ยนแปลง stream line จะเกิดการไหลวนในทิศทางไปข้างหน้าและสวนทางกัน ซึ่งเรียกบริเวณนี้ว่า recirculation zone ประกอบด้วย swirling forward flows และ reverse flows ส่งผลให้เกิดความปั่นป่วนและระดับการเปลี่ยนแปลงของการไหลสูง [13]

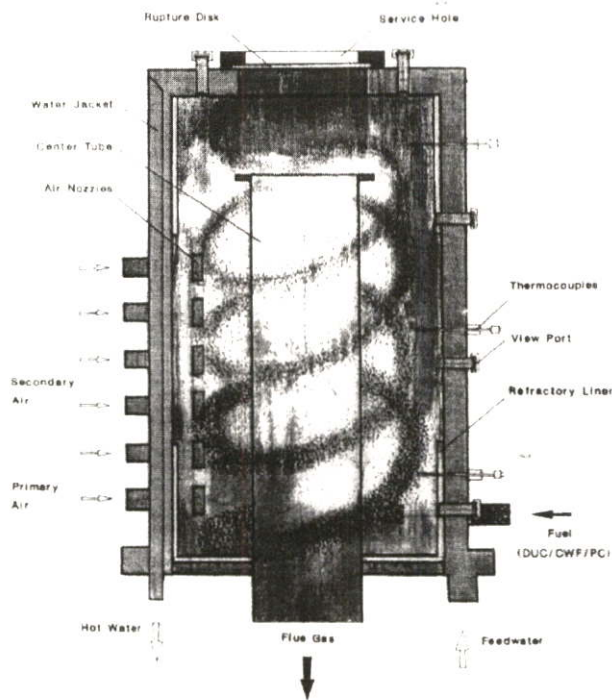
จากรูปที่ 3.3 แสดงอิทธิพลของความสูงของท่อทิ้งไอเสียต่อ Gas streamline [14] โดยผลรวมของอัตราการไหลของอากาศที่ผ่านไปยังหัวฉีดแต่ละตำแหน่งมีค่าเท่ากัน ซึ่งถูกติดตั้งไว้ 3 ตำแหน่งที่ผนังเตา คือ ตำแหน่งส่วนล่าง, ส่วนกลาง และส่วนบนของเตาเผา การคำนวณความเร็วในแนวแกน และ ความเร็วแนวสัมผัสที่ได้ผลมาจากการทดลอง โดยแกนกลางภายในจะแบ่งการไหลของก๊าซภายในเตาเผาออร์เทค 2 ช่วง โดยให้อากาศที่อยู่ระหว่างแกนกลางกับผนังห้องเผาไหม้ด้านในเป็นช่วงที่ 1 และบริเวณอากาศที่อยู่เหนือแกนกลางภายในให้เป็นช่วงที่ 2 ซึ่งความเร็วในแนวสัมผัสของก๊าซแสดงถึงความสัมพันธ์ของรูปแบบ Profile ในช่วงที่ 1 และ Profile แบบหมุนวนในช่วงที่ 2 ความสัมพันธ์อย่างหนึ่งของความเร็วสัมผัส (หมุนวน) ที่เริ่มต้นในช่วงที่ 1 ซึ่งการไหลของก๊าซในห้องเผาไหม้ออร์เทค ส่งผลให้เกิดความแตกต่างจากลมวนในห้องเผาไหม้



รูปที่ 3.3 แสดงผลของความสูงท่อทิ้งไอเสียต่อ gas streamline

Recirculating flow จะเกิดที่บริเวณส่วนที่เป็นแกนกลาง ณ ตำแหน่งมุมบนของแกน(บริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงพื้นที่ว่างภายใน, Annular) และ ที่หัวฉีดบริเวณช่วงที่ 1 และ 2 โดยรูป ข. และ ค. แสดงถึงการแปลงเปลี่ยนความสูงของแกนกลางที่ส่งผลกระทบต่อพื้นที่ Annular ภายในช่วงที่ 1 และ ช่วงที่ 2 ดังรูป ซึ่งรูปแบบการไหลในช่วงที่ 1 แสดงถึงความเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย เมื่อมี

การเปลี่ยนแปลงความสูงของแกนกลาง ส่วนรูปแบบการไหลในช่วงที่ 2 จะแสดงถึงผลกระทบโดยตรงจากหัวฉีดทางเข้าของอากาศ ทำให้เกิดความปั่นป่วนหมุนวนของอากาศ ซึ่งจะเรียกว่า Short-circulating ซึ่งมีก็จะเกิดขึ้นเมื่อลดความสูงของแกนกลาง ดังรูป ก. ซึ่งหมายถึงว่า ก๊าซช่วงที่ 1 ไหลตรงไปยังแกนกลางเกิดขึ้นในเวลาสั้น ๆ ทำให้เชื้อเพลิงเผาไหม้ไม่หมด เพราะ เชื้อเพลิงมีเวลาไม่เพียงพอต่อการเผาไหม้ภายในห้องเผาไหม้ ก่อนที่จะผ่านไปยังท่อทิ้งไอเสีย การเกิด Short-circulating มีผลเพียงเล็กน้อยสำหรับก๊าซและเชื้อเพลิงที่ไม่เกิดปฏิกิริยาเผาไหม้ ซึ่งในการติดตั้งแกนกลางควรให้แกนกลางอยู่ในตำแหน่งเหนือหัวฉีดอากาศ ดังรูป ก. ส่วนรูป ข. และ ค. แสดงกรณีที่หัวฉีดติดตั้งเหนือแกนกลาง โดยบางส่วนของก๊าซจากช่วงที่ 1 อาจจะไปทางท่อทิ้งไอเสียโดยตรง ดังนั้นการผสมของก๊าซในช่วงที่ 1 กับอากาศใหม่ที่ฉีดเข้ามาจากหัวฉีด จะมีผลเสียต่อกระบวนการเผาไหม้ระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิง



รูปที่ 3.4 ลักษณะการไหลของอากาศแบบหมุนวนภายในเตาเผาออร์เทค

เตาออร์เทคเป็นเตาที่ใช้เทคนิคของไหลแบบหมุนวนความเร็วสูงช่วยในการเผาไหม้ การไหลแบบหมุนวนความเร็วสูงได้ถูกนำมาใช้ในงานทางด้านอุตสาหกรรมเป็นจำนวนมาก เช่น เตาเผาเครื่องยนต์สันดาปภายใน เครื่องยนต์กังหันก๊าซ และ อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนต่างๆ ในระบบการเผาไหม้นั้น การหมุนวนได้ถูกนำมาใช้เพื่อเพิ่มความเสถียรของเปลวไฟ เพิ่มการผสมคลุกเคล้าของเชื้อเพลิงและอากาศ และช่วยเพิ่มการถ่ายเทความร้อน นอกเหนือจากช่วยเพิ่มเวลาอยู่ในเตาของเชื้อเพลิง และช่วยลดมลพิษที่เกิดจากการเผาไหม้นี้ เพราะว่าการหมุนวนช่วยเหนี่ยวนำให้เกิดการ

ไหลวนไปมาในบริเวณกึ่งกลางของเตาเป็นผลให้เกิดความปั่นป่วนอย่างรุนแรงขึ้นในแต่ละชั้น ระหว่างการไหลวนไปมาและการไหลของชั้นภายนอกซึ่งช่วยทำให้เปลวไฟในเตาเสถียรยิ่งขึ้น โครงสร้างของความปั่นป่วนในการไหลแบบหมุนวนความเร็วสูงนี้โดยทั่วไปมีความสัมพันธ์ที่ซับซ้อนมาก การไหลวนไปมาอันเป็นผลจากการหมุนวนสามารถนำไปสู่การเพิ่มประสิทธิภาพการสันดาป ลดมลภาวะที่ปล่อยออก ลดความยาวของเปลวเพลิงและเป็นผลให้เตาเผามีขนาดเล็กลง เพิ่มความเสถียรของการสันดาป รวมถึงการเพิ่มเวลาในการเผาไหม้เพื่อการเผาไหม้ที่ดีขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 3.4

3.7 อัตราส่วนสมมูล

ในการเผาไหม้จริงปริมาณอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้อาจจะมากกว่าหรือน้อยกว่าทางทฤษฎี ถ้าปริมาณอากาศที่ใช้มากกว่าปริมาณอากาศทางทฤษฎีจะเรียกว่า อัตราส่วนผสมบาง (Lean Mixture) ตรงกันข้ามหากปริมาณอากาศที่ใช้น้อยกว่าจะเรียกว่า อัตราส่วนผสมหนา (Rich Mixture) เพื่อความสะดวกในการแสดงปริมาณของอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้จริง จึงกำหนดให้อยู่ในรูปของอัตราส่วนของเชื้อเพลิงต่ออากาศ $(F/A)_{\text{stoic}} = (m_{\text{fuel}} / m_{\text{air}})_{\text{stoic}}$ และอัตราส่วนสมมูล (equivalence ratio, Φ)[4] จะหมายถึง

$$\Phi = \frac{(F/A)_{\text{Actual}}}{(F/A)_{\text{Stoic}}} \quad (3.26)$$

หรือถ้าอยู่ในรูปของอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง

$$\Phi = \frac{(A/F)_{\text{Stoic}}}{(A/F)_{\text{Actual}}} \quad (3.27)$$

Fuel rich mixture	$\Phi > 1$	ปริมาณอากาศที่ใช้น้อยกว่าปริมาณที่ต้องใช้ทางทฤษฎี
Stoichiometric	$\Phi = 1$	ปริมาณอากาศที่ใช้เท่ากับปริมาณที่ต้องใช้ทางทฤษฎี
Fuel lean mixture	$\Phi < 1$	ปริมาณอากาศที่ใช้มากกว่าปริมาณที่ต้องใช้ทางทฤษฎี

3.8 อุณหภูมิอะเดียแบติก (Adiabatic Flame Temperature)[9]

ในกรณีไม่มีงานเกี่ยวข้องและไม่มีการเปลี่ยนแปลงพลังงานจลน์หรือพลังงานศักย์ พลังงานเคมีที่ปล่อยออกมาในระหว่างการเผาไหม้นั้นอาจสูญเสียไปสู่สิ่งแวดล้อม ในรูปของพลังงานความร้อนหรืออาจถูกใช้ไปในการเพิ่มอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ ถ้าการสูญเสียความร้อนมีค่าน้อยอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ก็จะสูง ค่าจำกัดของมันคือเมื่อไม่มีการสูญเสียความร้อนสู่สิ่งแวดล้อม ($Q=0$) และอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ก็จะมีค่าสูงที่สุด ซึ่งเราเรียกอุณหภูมินี้ว่าอุณหภูมิเปลวอะเดียแบติก (adiabatic flame Temperature)

อุณหภูมิดังกล่าวนี้หาได้จากการให้ Q และ W มีค่าเท่ากับศูนย์ในกฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์ ซึ่งจะได้ว่า

$$H_P = H_R \quad (3.29)$$

หรือ

$$\sum N_P (\bar{h}_f^0 + \bar{h} - \bar{h}^0)_P = \sum N_R (\bar{h}_f^0 + \bar{h} - \bar{h}^0)_R \quad (3.30)$$

เมื่อรู้สถานะของสารตั้งต้นเราก็สามารถหา H_R ได้โดยง่าย แต่การหา H_P นั้นไม่เป็นเรื่องที่ย่านักเพราะเรายังไม่รู้อุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ ดังนั้นการคำนวณเปลวอะเดียแบติก (adiabatic flame temperature) จะต้องใช้วิธีสมมติค่าจนกว่าจะได้ $H_P = H_R$ (เรียกว่า “iterative procedure”) ถ้าเป็นการเผาไหม้ด้วยอากาศซึ่งประกอบด้วย N_2 ส่วนใหญ่ ค่าอุณหภูมิแรกที่เราควรจะได้ คือการสมมติว่าผลิตภัณฑ์ทั้งหมดเป็น N_2

อุณหภูมิสูงสุดในห้องเผาไหม้นั้นถูกจำกัดโดยความทนทานของวัตถุ ดังนั้นอุณหภูมิเปลวอะเดียแบติกจึงมีความสำคัญมากในการออกแบบห้องเผาไหม้ เครื่องยนต์กังหันก๊าซ และหัวฉีด อุณหภูมิสูงสุดที่เกิดขึ้นในอุปกรณ์เหล่านี้ที่จริงแล้วจะน้อยกว่าอุณหภูมิเปลวอะเดียแบติกมาก ทั้งนี้เนื่องจากการเผาไหม้อาจไม่สมบูรณ์ มีการสูญเสียความร้อนสู่สิ่งแวดล้อม รวมทั้งก๊าซบางชนิดอาจแยกตัวออก (dissociate) อุณหภูมิสูงสุดในห้องเผาไหม้อาจควบคุมได้โดยการปรับแต่งปริมาณของอากาศส่วนที่เกิน (excess air) ซึ่งเปรียบเสมือนการระบายความร้อน

บทที่ 4

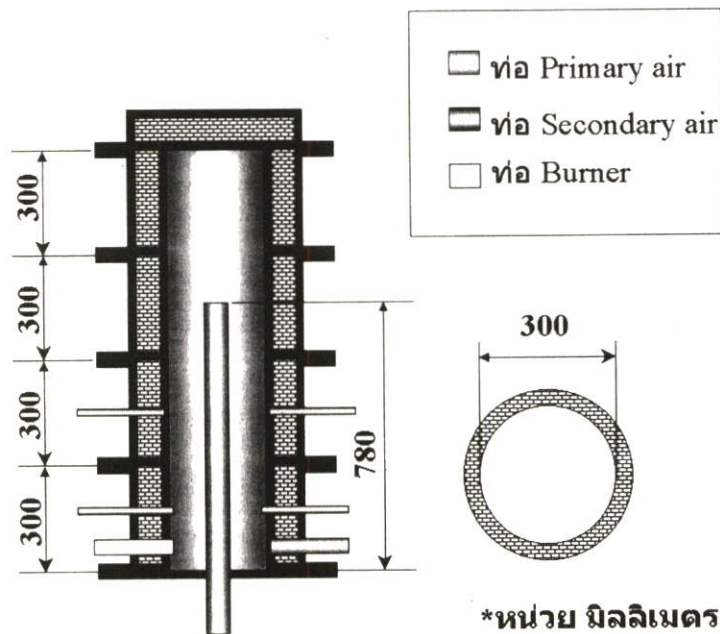
การออกแบบและการคำนวณ

4.1 บทนำ

หัวข้อสำคัญในบทนี้จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนใหญ่ๆ ได้แก่ การออกแบบและการคำนวณ ซึ่งการออกแบบเตาเผาเวอร์เทคที่ยึดหลักการเหนี่ยวนำให้เกิดการผสมระหว่างอากาศและเชื้อเพลิงขณะเกิดการเผาไหม้ ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของเตาเผา โดยการศึกษาชั้นของเตาเผาที่มีอิทธิพลต่อการกระจายอุณหภูมิภายในที่เกิดขึ้น ส่วนในหัวข้อการคำนวณยึดหลักทฤษฎีการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ของสสาร โดยคำนึงถึงองค์ประกอบของสารตั้งต้น(เชื้อเพลิง) เมื่อเกิดปฏิกิริยาทางเคมีจนได้ผลิตภัณฑ์ออกมา เพื่อคำนวณหาค่าต่าง ๆ ที่ต้องการใช้ในการคำนวณ

4.2 การออกแบบเตาเผา

จากการศึกษาเตาเผาเวอร์เทคในอดีต ทำให้ทราบปัญหาในการคำนวณของเตาเผา เพื่อนำมาปรับปรุงออกแบบสร้างและทดสอบ ดังนี้



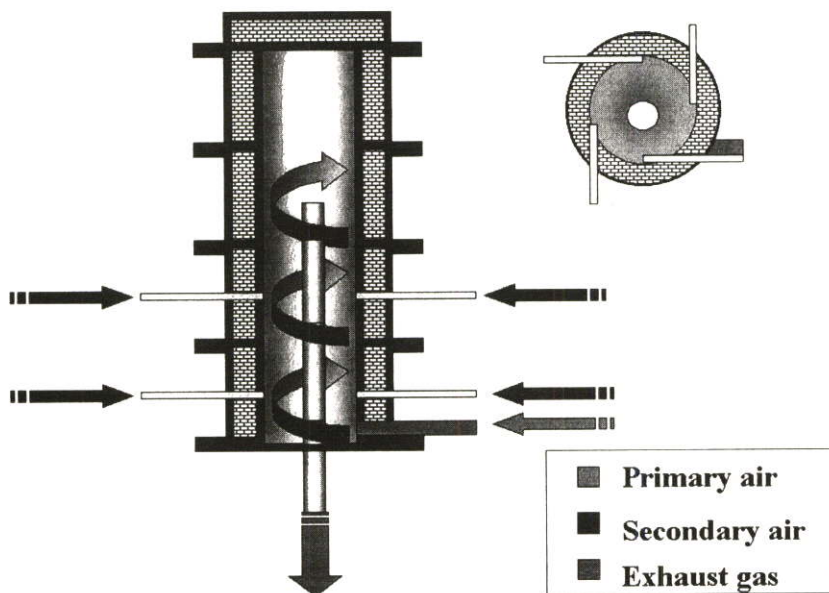
รูปที่ 4.1 แสดงขนาดความสูงของเตาเผาเวอร์เทค และท่อทิ้งไอเสีย

4.2.1 ขนาดของเตาเผาที่เหมาะสม (Multistage)

ทำการขยายพื้นที่ภายในของเตาเผาที่มีทั้งสิ้น 3 ขนาด คือ 0.5D, 0.75D, และ 1.0D ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการเกิดการเผาไหม้ เนื่องจากการขยายพื้นที่ภายในห้องเผาไหม้จะเป็นการเพิ่มชั้นการเผาไหม้มากขึ้น (Multistage) ซึ่งขนาดของเตาเผาที่เหมาะสมจะช่วยให้อากาศกับเชื้อเพลิงมีการคลุกเคล้าในขณะที่เกิดการเผาไหม้ได้เป็นอย่างดี และยังเป็นการเพิ่มเวลาในการเผาไหม้ให้นานขึ้นจนสามารถเกิดการเผาไหม้สมบูรณ์ได้

4.2.2 ระบบป้อนอากาศส่วนที่ 2 (Secondary Air)

โดยอากาศส่วนที่ 2 ได้จากท่อลมหลักที่ By Pass จาก Blower และทำการแยกอากาศในท่อของอากาศส่วนที่ 2 เป็นท่อเล็กๆ (nozzle) เพื่อฉีดเข้าไปในเตาเผาที่บริเวณผนังเตา โดยอากาศส่วนที่ 2 ที่ฉีดเข้าไปนั้นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการหมุนวนของอากาศ ซึ่งทำการออกแบบท่อที่ฉีดอากาศพิเศษ โดยอากาศที่ฉีดเข้าไปจะเข้าไปในแนวสัมผัสเส้นรอบวง (tangent) ของผนังเตาด้านในมากที่สุด เพื่อให้การหมุนวนของอากาศเป็นไปอย่างสมมาตร ไม่กีดขวางทิศทางของแนวอากาศภายในและยังเป็นการเพิ่มการคลุกเคล้าของอากาศกับเชื้อเพลิงมากยิ่งขึ้นด้วย ดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 แสดงตำแหน่ง Primary air, Secondary air และ Exhaust gas

4.2.3 ระบบป้อนเชื้อเพลิง

การใช้ระบบป้อนเชื้อเพลิงแบบเกลียว (Screw Feeder) โดยป้อนตรงเข้าสู่เตาเผาไหม้ส่วนล่าง ซึ่งมีลมจากท่ออากาศส่วนที่ 1 เข้ามาผสมในจุดที่มีการเชื่อมต่อระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิง เพื่อทำ

ให้เกิดการคลุกเคล้าระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงและยังช่วยลดการติดขัดของเชื้อเพลิงแกลบในท่อนก่อนเข้าเตาเผา

ในการออกแบบเตาเผาออร์เทค ซึ่งเตาเผามีลักษณะเป็นท่อลดขนาดทรงกระบอก ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้ (ดังรูปที่ 4.1 และ 4.2)

เตาเผาออร์เทค มีความสูงโดยรวม 4 ส่วน เท่ากับ 1200 mm. ในแต่ละส่วนมีขนาดเท่ากัน ผนังของเตาเผาใหม่แต่ละส่วนประกอบด้วยเหล็กทรงกระบอก 2 ชั้น มีความสูงเท่ากับ 300 mm. ท่อชั้นนอกมีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 400 mm. ส่วนท่อเหล็กชั้นในมีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 300 mm. ความหนาของเหล็กในแต่ละท่อนมีความหนา 5 mm. และช่องว่างภายในระหว่างท่อเหล็กทั้งสองทำการหล่อฉนวนด้วยซีเมนต์ทนไฟหนา 40 mm. เพื่อกักเก็บความร้อนภายในเตาเผาในขณะเกิดการเผาไหม้

ในการทดลองนี้ขนาดเตาที่ใช้ทำการศึกษามีทั้งสิ้น 3 ขนาด คือ เตาเผาใหม่ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 150 mm. , 225 mm. และ 300 mm. และมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกเท่ากับ 250 mm. , 325 mm. , และ 400 mm. ตามลำดับ

แกนภายในเตาเผา ทำหน้าที่เป็นท่อทิ้งเถ้าลอยทำจากสแตนเลสมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกเท่ากับ 75 mm. และมีความหนา 3 mm. มีความสูงเท่ากับ 1,100 mm.

ฝาบนเป็นเหล็กแผ่นที่หล่อด้วยฉนวนหนา 40 mm. และหน้าแปลนของเตาเผาทั้งส่วนบนและส่วนล่างมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกเท่ากับ 480 mm. มีความหนา 5 mm.

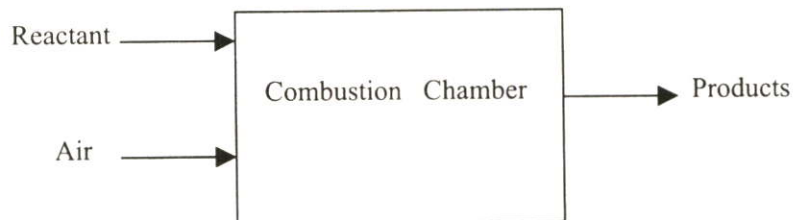
อากาศที่ใช้ในการทดลองจะใช้อากาศด้วยกัน 2 ส่วน คือ อากาศส่วนที่ 1 (Primary Air) และอากาศส่วนที่ 2 (Secondary Air) โดยอากาศส่วนที่ 1 เป็นอากาศที่ใช้ในการลำเลียงแกลบเข้าสู่เตาเผาได้จาก Blower ที่มีขนาด 7.5 kW เป็นแหล่งจ่ายอากาศเข้าสู่ท่อจ่ายอากาศมีขนาด 75 mm. ในการทดลองกำหนดให้ใช้อากาศส่วนที่ 1 มีอัตราการไหลอยู่ในช่วง 0.0168-0.0336 kg/s และอากาศส่วนที่ 2 เป็นอากาศที่จ่ายเข้าสู่เตาเผาไหลเข้าบริเวณผนังเตาเพื่อช่วยให้เกิดการหมุนวนและคลุกเคล้าระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงมากขึ้น ซึ่งจะใช้แหล่งจ่ายลมคือ Blower เช่นเดียวกัน โดยจากท่อลมหลักจะต่อท่อลม Secondary Air ขนาด 50 mm. ซึ่งอากาศส่วนที่ 2 มีอัตราการไหลของอากาศอยู่ในช่วง 0.0034-0.0084 kg/s โดยอากาศส่วนที่ 2 จะถูกแยกออกเป็น 8 ส่วนเท่า ๆ กันเข้าสู่ท่อนฉีด (nozzle) ที่มีขนาด เส้นผ่านศูนย์กลาง 10 mm. ที่ยึดติดอยู่กับผนังเตา การฉีดอากาศส่วนที่ 2 จะฉีดอากาศเข้าเตาเผา 2 ตำแหน่ง คือ ตำแหน่งแรกฉีดเข้าที่วอร์เทคชั้นที่ 1 และตำแหน่งที่ 2 จะฉีดเข้าสู่วอร์เทคชั้นที่ 2 ซึ่งตำแหน่งที่ฉีดอากาศทั้ง 2 จะอยู่ตรงตำแหน่งกึ่งกลางตัวเตา อากาศแต่ละตำแหน่งจะมีจุดฉีดอากาศ 4 จุด แต่ละจุดตั้งฉากกับรัศมีของเตาเผา(Tangent) และทุกจุดทำมุมระหว่างกันทุก ๆ 90 องศาและยังตั้งฉากกับแนวแกนของตัวเตาเผา ทั้งอากาศส่วนที่ 1 และส่วนที่ 2 ควบคุมด้วยวาล์วควบคุม (Gate Valve) และวัดอัตราการไหลผ่านชุด Orifice plate และ Manometer

4.3 การคำนวณปริมาณอากาศที่ต้องการใช้ในการเผาไหม้ทางทฤษฎี

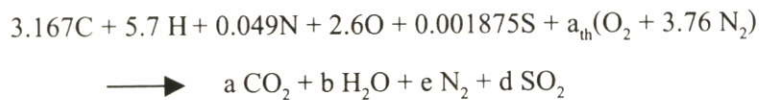
ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบของเชื้อเพลิงแกลบ[6]

สาร		%	MW	จำนวน โมล
คาร์บอนมอนไดออกไซด์	C	38	12	3.167
ไฮโดรเจน	H	5.7	1	5.7
ออกซิเจน	O	41.6	16	2.6
ไนโตรเจน	N	0.69	14	0.049
ซัลเฟอร์	S	0.06	32	0.001875
ขี้เถ้า	Ash	19.8	-	-

สมดุลสมการทางเคมี



จะได้ดังนี้



หาค่าที่ได้จากการสมดุลสมการ

$$\begin{aligned} C &: 3.167 &= & a \\ H &: 5.7 &= & 2b \\ \therefore & b &= & 2.8 \\ S &: 0.001875 &= & d \\ O &: 2.6 + (a_{th} \times 2) &= & 2a + b + 2d \\ a_{th} & &= & \frac{(2 \times 3.167) + 2.85 + (2 \times 0.001875) - 2.6}{2} \\ & &= & 3.293 \\ N &: 0.049 + (a_{th} \times 3.76 \times 2) &= & 2e \\ e & &= & 12.409 \end{aligned}$$

การหาปริมาณความชื้นในอากาศอากาศแห้งเท่ากับ

$$4.76a_{th} = 4.76 \times 3.293 = 15.788 \text{ kmol}$$

ความดันย่อยของละอองน้ำในอากาศเท่ากับ

$$T_{db} = \text{Dry - bulb temperature} = 33^{\circ}\text{C}$$

$$RH = \text{Relative humidity} = 53\%$$

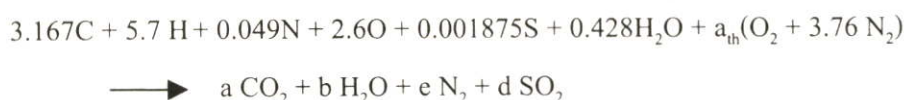
$$P_{v,air} = \phi_{air} P_{sat} @ 33^{\circ}\text{C} = 0.53 \times 5.0752 \text{ kPa} = 2.690 \text{ kPa}$$

จำนวนโมลของละอองน้ำในอากาศเท่ากับ

$$\begin{aligned} \text{จากสูตร} \quad N_{v,air} &= \left(\frac{P_{v,air}}{P_{total}} \right) N_{total} \\ &= \left(\frac{2.690 \text{ kPa}}{101.325 \text{ kPa}} \right) (15.678845 + N_{v,air}) \end{aligned}$$

$$N_{v,air} = 0.428 \text{ kmol}$$

ทำการสมดุลสมการทางเคมี โดยเอาจำนวนโมลของละอองน้ำมาแทนลงในสมการ



ทำการสมดุลสมการ

$$C : 3.167 = a$$

$$H : 5.7 + (0.428 \times 2) = 2b$$

$$\therefore b = 3.278$$

$$S : 0.001875 = d$$

$$O : 2.6 + 0.428 + (a_{th} \times 2) = 2a + b + 2d$$

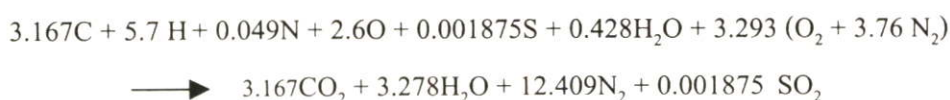
$$a_{th} = \frac{(2 \times 3.167) + 3.278 + (2 \times 0.001875) - 2.6 - 0.428}{2}$$

$$= 3.293$$

$$N : 0.049 + (a_{th} \times 3.76 \times 2) = 2e$$

$$e = 12.409$$

\therefore นำค่าที่ได้จากการสมดุลสมการสมการมาแทนค่า จะได้สมการเผาไหม้พอดีดังต่อไปนี้



จากสูตร

$$\left(\frac{A}{F} \right)_{ratio} = \frac{m_{air}}{m_{fuel}}$$

$$m_{\text{air}} = 3.293(4.76 \times 29) \text{ kmol} \times \frac{\text{kg}}{\text{kmol}} + (0.428 \times 18) \text{ kmol} \times \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}$$

$$= 462.269 \text{ kg}$$

$$m_{\text{fuel}} = (3.167 \times 12) + (5.7 \times 1) + (0.049 \times 14) + (2.6 \times 16)$$

$$+ (0.001875 \times 32) \text{ kmol} \times \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}$$

$$= 86.05 \text{ kg}$$

ดังนั้น

$$\left(\frac{A}{F}\right)_{\text{ratio}} = \frac{462.269}{86.05} = 5.372$$

จากสมการ (3.26) และ (3.27)

$$\Phi = \frac{(A/F)_{\text{Stoic}}}{(A/F)_{\text{Actual}}} = \frac{(F/A)_{\text{Actual}}}{(F/A)_{\text{Stoic}}}$$

Fuel rich mixtures,	$\Phi > 1$	ปริมาณอากาศที่ใช้น้อยกว่าปริมาณที่ต้องใช้ทางทฤษฎี
Stoichiometric mixtures,	$\Phi = 1$	ปริมาณอากาศที่ใช้เท่ากับปริมาณที่ต้องใช้ทางทฤษฎี
Fuel lean mixtures,	$\Phi < 1$	ปริมาณอากาศที่ใช้มากกว่าปริมาณที่ต้องใช้ทางทฤษฎี

เมื่อ $A/F \text{ ratio} = 5.372$

ในการทดลองใช้แก๊สที่มีอัตราการไหล	= 0.3	kg/min
ฉะนั้นจะใช้อากาศเท่ากับ	= 0.3 x 5.372	kg/min
	= 1.6116	kg/min
	= 0.0269	kg/s

ตารางที่ 4.2 แสดงปริมาณอากาศที่ใช้ในการทดลอง

Φ	Primary Air (kg/sec)			Secondary Air (kg/sec)	
	100%	85%	75%	15%(8 ท่อ)	25%(8 ท่อ)
0.8	0.0336	0.0286	0.0252	0.0050	0.0084
1	0.0269	0.0229	0.0202	0.0040	0.0067
1.2	0.0224	0.0190	0.0168	0.0034	0.0056

บทที่ 5

อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

5.1 บทนำ

ขั้นตอนในการทดลองสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ขั้นตอน ได้แก่ ขั้นตอนแรก คือ ขั้นตอนการจัดเตรียมอุปกรณ์ในการทดลองและการเก็บข้อมูล , ขั้นตอนที่สอง คือ ขั้นตอนในการติดตั้งชุดทดลองเตาเผาออร์เทก และขั้นตอนที่สาม คือ ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง

5.2 การจัดเตรียมอุปกรณ์ในการทดลองและการเก็บข้อมูล

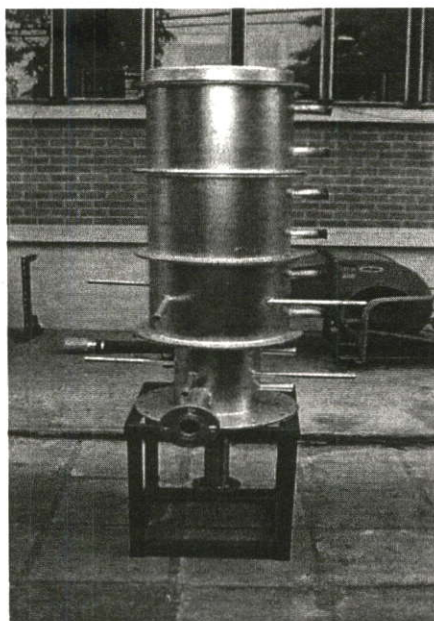
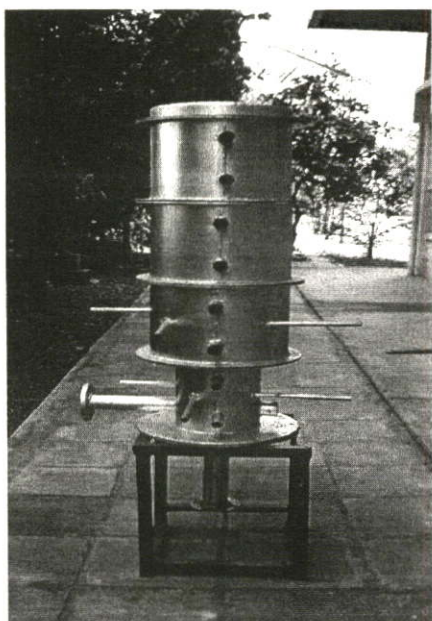
ในการทดลองการเผาไหม้ของเตาเผาออร์เทก เกี่ยวกับการกระจายอุณหภูมิภายในเตาเผา ประกอบด้วยชิ้นส่วนตัวเตาเผาและอุปกรณ์ต่าง ๆ มากมายที่ใช้ในการทดลอง ซึ่งจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนแรก คือ อุปกรณ์ในการทดลองและส่วนที่สอง คือ อุปกรณ์ในการเก็บข้อมูล ฉะนั้นในบทนี้จะกล่าวถึงรายละเอียดของอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดลอง ดังนี้

5.2.1 อุปกรณ์ในการทดลอง

แบ่งอุปกรณ์ในการทดลองได้เป็น 4 ประเภทคือ

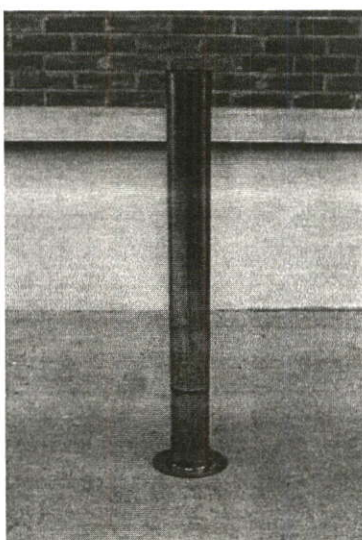
5.2.1.1 ชุดประกอบเตาเผา

Vortex Combustor (เตาเผาออร์เทก) ประกอบเตาเผาที่มีลักษณะเป็นท่อลดขนาดทรงกระบอก ซึ่งเตาเผาไหม้มีความสูงโดยรวมทั้งสิ้น 4 ชั้นส่วน แต่ละชั้นส่วนมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 300 mm.(D) , มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกเท่ากับ 400 mm. และมีความสูงเท่ากับ 300 mm. ความหนาของเหล็กในแต่ละท่อนมีความหนา 5 mm. และช่องว่างภายในระหว่างท่อเหล็กทั้งสองทำการหล่อฉนวนด้วยซีเมนต์ทนไฟหนา 40 mm. เพื่อกักเก็บความร้อนภายในเตาเผาในขณะที่เกิดการเผาไหม้ ในการทดลองนี้เตาเผาที่ใช้ในการศึกษาอิทธิพลของขนาดมีทั้งสิ้น 3 ขนาด คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 0.5D ,0.75D ,และ 1.0D. หรือ มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 150 mm. , 225 mm. และ 300 mm. และมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกเท่ากับ 250 mm. , 325 mm. , และ 400 mm. ตามลำดับ ฝาบนเป็นเหล็กแผ่นที่หล่อด้วยฉนวนหนา 40 mm. และหน้าแปลนของเตาเผาทั้งส่วนบน และส่วนล่างมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกเท่ากับ 480 mm. มีความหนา 5 mm. ดังรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 เตาเผาแลกเปลี่ยนแบบวอร์เทคหลายชั้น

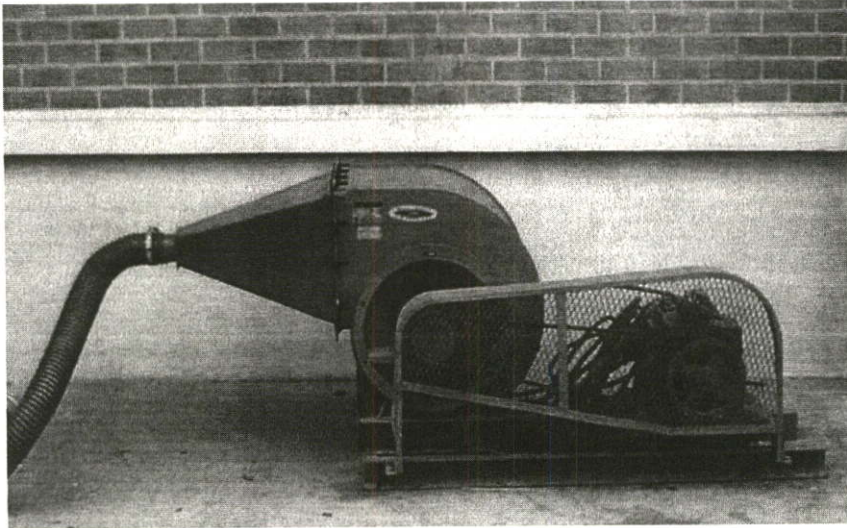
แกนภายในเตาเผาใหม่ (ท่อทิ้งเด้าลอย) แกนภายในเตาเผาทำหน้าที่เป็นท่อทิ้งเด้าลอยทำจากสแตนเลสมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกเท่ากับ 75 mm. และมีความหนา 3 mm. มีความสูงเท่ากับ 1,100 mm. ดังรูปที่ 5.2



รูปที่ 5.2 ท่อทิ้งเด้าลอย

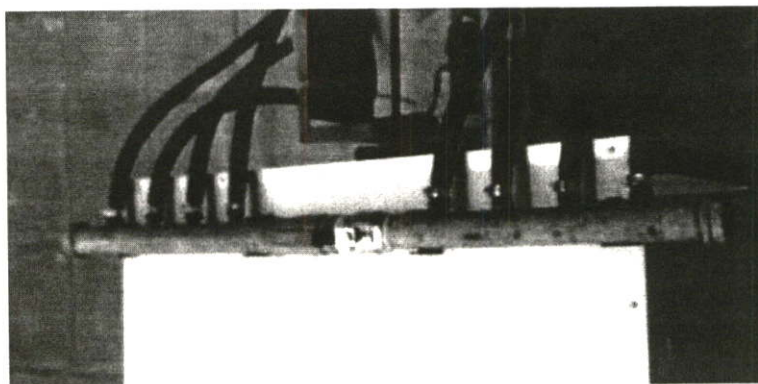
5.2.1.2 ชุดป้อนอากาศ

Blower เป็นแหล่งจ่ายลมให้กับอากาศส่วนที่ 1 และอากาศส่วนที่ 2 ซึ่งเป็น Blower แบบใบพัดคู่ กำลังขับ 7.5KW (10 HP) กระแสไฟฟ้า 15 Amp., 380 V มีอัตราการไหลอากาศสูงสุด $100 \text{ m}^3/\text{min}$ มีความเร็วรอบเท่ากับ 1,140 RPM rpm ดังรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.3 Blower

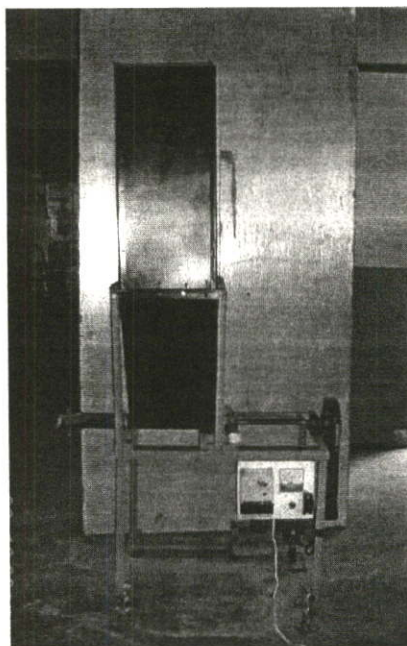
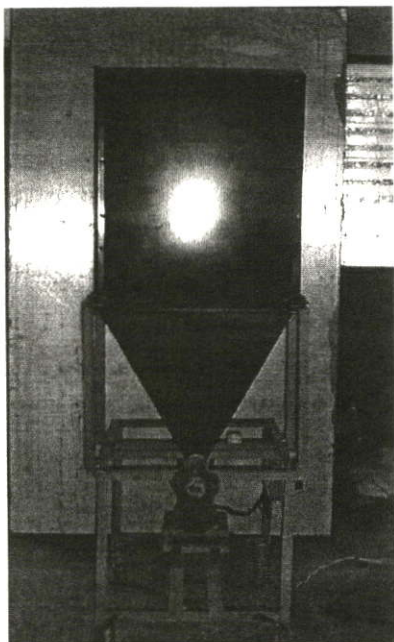
ชุดท่อ Secondary Air เป็นชุดท่อลมที่ต่อมาจากท่อลมหลักของ Blower ซึ่งแยกเป็น 8 ส่วนเท่า ๆ กัน โดยจะกระจายลมเข้าสู่เตาเผาไหม้ส่วนบนจำนวน 4 ชุดและ ส่วนล่างจำนวน 4 ชุด เพื่อเพิ่มอากาศช่วยให้เกิดการหมุนวนและการคลุกเคล้าภายในเตาเผา ระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงมากขึ้น ดังรูปที่ 5.4



รูปที่ 5.4 Secondary air

5.2.1.3 ชุดป้อนแกลบ

เป็นชุดอุปกรณ์รวมในการส่งถ่ายเชื้อเพลิงแกลบเข้าสู่เตาเผาไหม้และมีอุปกรณ์ต่าง ๆ และรายละเอียด ดังต่อไปนี้



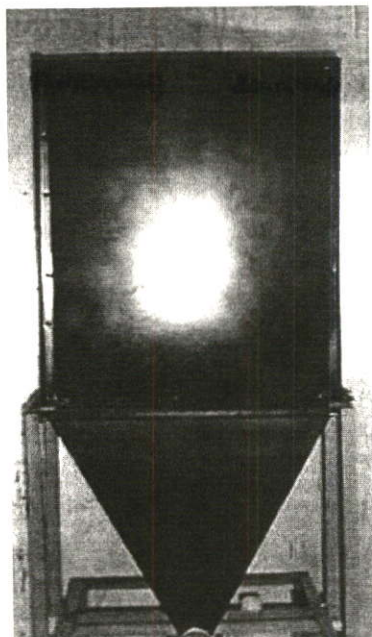
รูปที่ 5.5 ชุดป้อนแกลบ

Screw Feeder เป็นตัวขับเคลื่อนในการนำแกลบเคลื่อนที่เข้าสู่ท่อลำเลียง โดยจะใช้อากาศส่วนที่ 1 ในการคลุกเคล้าระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงก่อนเข้าเตาเผาแสดง ดังรูปที่ 5.6



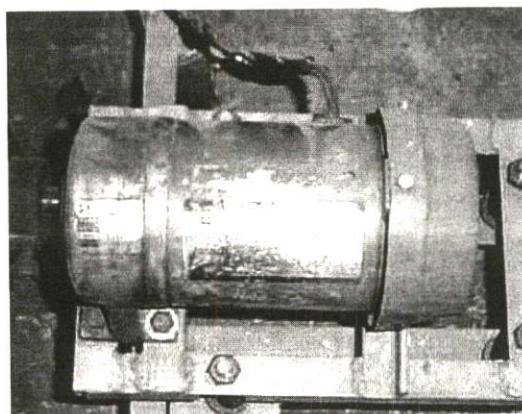
รูปที่ 5.6 Screw Feeder

Hopper เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการบรรจุเชื้อเพลิงแกลบ มีลักษณะเป็นท่อนี่เหลี่ยมลดขนาด สามารถบรรจุแกลบได้ 0.05 m^3 ดังรูปที่ 5.7



รูปที่ 5.7 Hopper

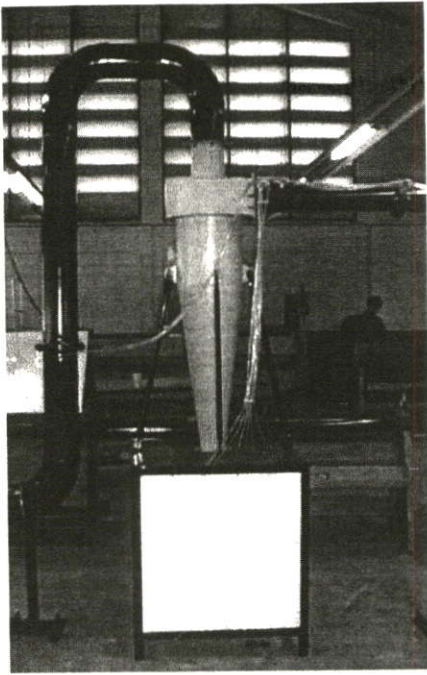
มอเตอร์ เป็นอุปกรณ์ที่เป็นต้นกำลังในการขับ Screw Feeder ด้วยสายพาน มีกำลังขับ 0.2 HP แสดงดังรูปที่ 5.8



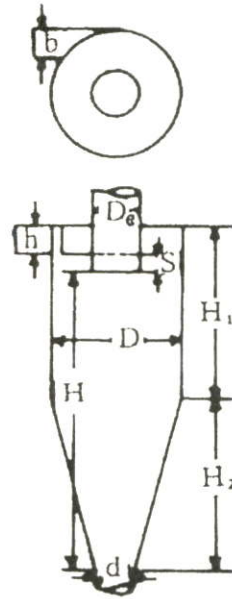
รูปที่ 5.8 Motor

5.2.1.4 อุปกรณ์ประกอบอื่นๆ

Cyclone เป็นอุปกรณ์ที่ทำด้วยแผ่นเหล็กที่นำมาหมุนเป็นท่อลดขนาดทรงกรวย ซึ่งมีไว้สำหรับแยกขี้เถ้าและก๊าซที่เกิดจากการเผาไหม้ออกด้วยกัน เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดมลพิษทางอากาศ แสดงดังรูปที่ 5.9

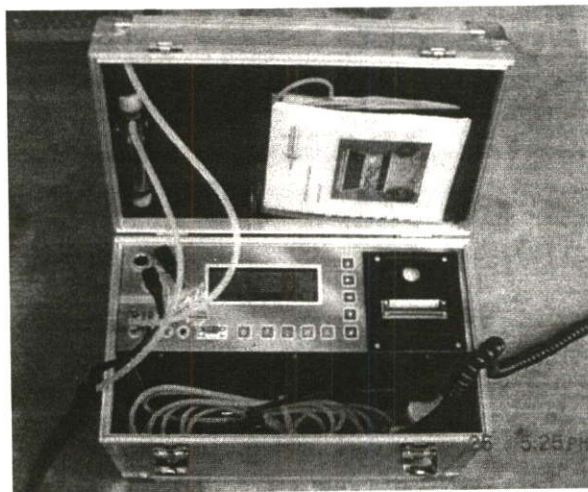


รูปที่ 5.9 Cyclone



รูปที่ 5.10 โครงสร้างมาตรฐานของไซโคลน

อุปกรณ์วิเคราะห์ก๊าซไอเสีย (Gas Analyzer) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้วิเคราะห์ก๊าซไอเสียที่ออกจากเตาเผาออร์เทค เครื่องวิเคราะห์ก๊าซไอเสีย Visit 01-L/LR ดังแสดงในรูปที่ 5.11 เป็นอุปกรณ์ที่ใช้วิเคราะห์แก๊สไอเสียที่ออกจากเตาเผาออร์เทคโดยช่วงการตรวจวัดปริมาณของแก๊สต่างๆ จะแสดงในตารางที่ 5.2 หัววัดอุณหภูมิของเครื่องวิเคราะห์แก๊สไอเสียทำจาก NiCr-Ni ซึ่งมีช่วงวัดอุณหภูมิอยู่ในช่วง -30 ถึง $+800$ °C

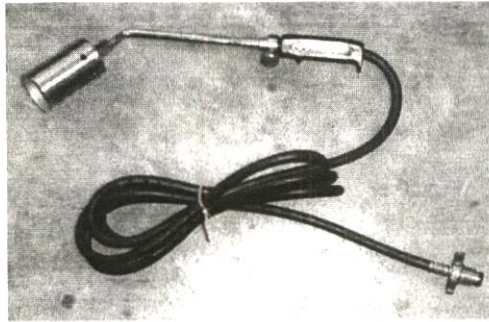


รูปที่ 5.11 Gas Analyzer

ตารางที่ 5.1 แสดงช่วงความสามารถของเครื่องที่จะวัดแก๊สไอเสียได้

Gas	Range[ppm]
O ₂	0 – 21 %
CO ₂	0 – 25 %
CO	0 – 4,000
NO (option)	0 – 4,000
SO ₂ (option)	0 – 4,000

หัวเผาแก๊ส (Burner) เป็นอุปกรณ์ในการให้ความร้อนแก่เตาเผา โดยให้ปรับเปลวไฟจนเป็นสีน้ำเงินก่อนใส่เข้าภายในเตาเผา ดังรูปที่ 5.12



รูปที่ 5.12 Burner

แก๊สหุงต้ม (LPG Supply) เป็นแหล่งให้ความร้อนแก่เตาเผา ในขณะที่เริ่มทำการอุ่นเตา ซึ่งจำเป็นที่จะต้องให้แหล่งความร้อนดังกล่าวจนถึงค่าหนึ่ง เพื่อให้เตาเผาสามารถเผาไหม้ได้ด้วยตัวเอง แล้วจึงหยุดให้ LPG Supply แสดงดังรูปที่ 5.13



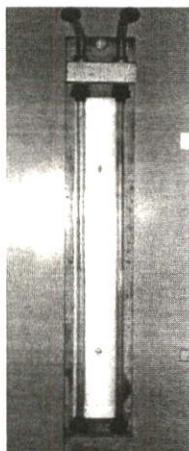
รูปที่ 5.13 LPG Supply

5.2.2 อุปกรณ์ในการเก็บข้อมูล

อุปกรณ์ที่ใช้ในการเก็บข้อมูลแบ่งได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่ ประเภทแรก คือ อุปกรณ์ชุดวัดอัตราการไหลของอากาศและอุณหภูมิ และ ประเภทที่สอง คือ อุปกรณ์ชุดควบคุม

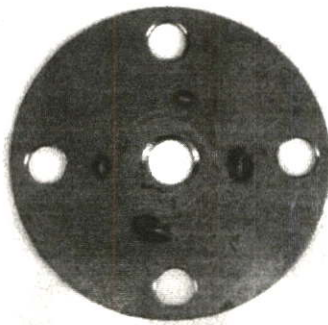
5.2.2.1 อุปกรณ์ชุดวัดอัตราการไหลของอากาศและอุณหภูมิ

Manometer ใช้วัดความแตกต่างของความดัน เพื่อใช้อัตราการไหลของอากาศ ส่วนที่ 1 และ อากาศส่วนที่ 2 โดยมีลักษณะเป็นหลอดแก้ว (U-tube) ซึ่งมีของเหลวที่บรรจุภายใน คือ น้ำ (Water) ดังรูปที่ 5.14



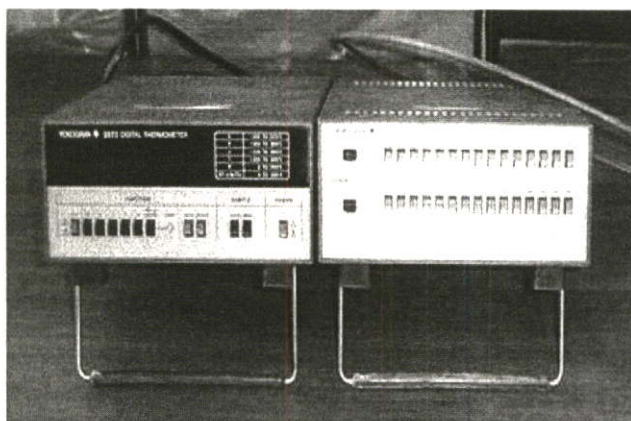
รูปที่ 5.14 Manometer

Orifice Plate ใช้ในกรณีวัดอัตราการไหล ซึ่งที่พบใช้งานอยู่โดยทั่วไปจะมีช่อง Orifice ทางด้าน fluid ไหลเข้าจะเป็นมุมฉากและทางด้านออกจะผายออกประมาณ 45 องศา เพื่อเป็นการลดความเสียดทานลงให้เหลือเท่าที่จำเป็นสำหรับการวัด โดย Orifice Plate ที่ใช้ในการทดลองมี 2 ขนาด คือ Orifice Plate ที่ใช้กับท่อลม 3 นิ้ว ซึ่งเป็นของอากาศส่วนที่ 1 และ Orifice Plate ที่ใช้กับท่อลม 2 นิ้ว ซึ่งเป็นของอากาศส่วนที่ 2 ในการสร้าง Orifice Plate ทั้ง สองใช้สร้างตาม มาตรฐาน ANSI/API 2530 [15] ดังรูปที่ 5.15



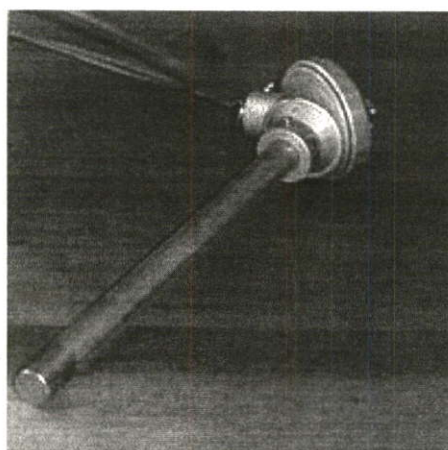
รูปที่ 5.15 Orifice Plate

Digital Thermometer And Multichannel Switch เป็นอุปกรณ์ที่ใช้แสดงผลในการวัดอุณหภูมิ การกระจายอุณหภูมิภายในเตาเผาใหม่แสดงเป็นจำนวนตัวเลขมี 4 หลักและมีหลักทศนิยม 1 ตำแหน่ง สามารถวัดอุณหภูมิของ Thermocouple Type K ได้ถึง $1,370^{\circ}\text{C}$ และสามารถวัดอุณหภูมิได้ 30 Channel ดังแสดงในรูปที่ 5.16



รูปที่ 5.16 Digital Thermometer And Multichannel Switch

Thermocouple Type K เป็นอุปกรณ์ประเภทเครื่องมือวัด ซึ่งใช้ในการวัดอุณหภูมิทำจากโลหะผสม ที่สายบวกทำจากโลหะผสมระหว่าง นิกเกิล 10% + โครเมียม 90% และ สายลบทำจากโลหะผสมระหว่าง นิกเกิล 95%+ 5% ของส่วนผสมระหว่าง อลูมิเนียม, แมงกานีส และซิลิกอน สามารถอุณหภูมิได้สูงสุด $1,260^{\circ}\text{C}$ และที่อุณหภูมิต่ำสุดถึง -250°C โดยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความยาวของแกนวัดอุณหภูมิจะแปรผันตามอุณหภูมิที่สามารถวัดได้ ขนาดของ Thermocouple Type K ที่ใช้ในการทดลองมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 22 mm. มีความยาว 300 mm. ดังแสดงรูปที่ 5.17

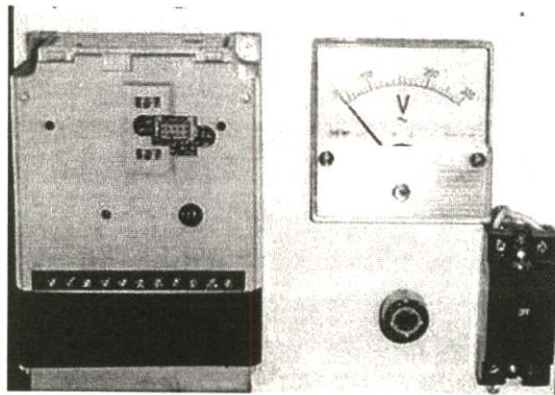


รูปที่ 5.17 Thermocouple Type K

5.2.2.2 อุปกรณ์ชุดควบคุม

อุปกรณ์ชุดควบคุมในการทดลอง ใช้ในการควบคุมเครื่องมือทางไฟฟ้าและทางเครื่องกล เพื่อแปรผันค่าต่าง ๆ ผ่านชุดควบคุม(การปรับค่าต่าง ๆ จะเป็นแบบ Analog) ซึ่งมีอุปกรณ์ต่าง ๆ ดังนี้

Inverter ทำหน้าที่ในการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ที่ใช้ขับ Screw Feeder ในการควบคุมอัตราการไหลของแก๊สให้ได้ตามที่กำหนดดังแสดงในรูปที่ 5.18 มีกำลังขับ 0.2 kW, 1.5A (Model FR-A024-0.2KP) โดย Inverter สามารถปรับความเร็วรอบได้สูงสุดเท่ากับ 1,650 RPM



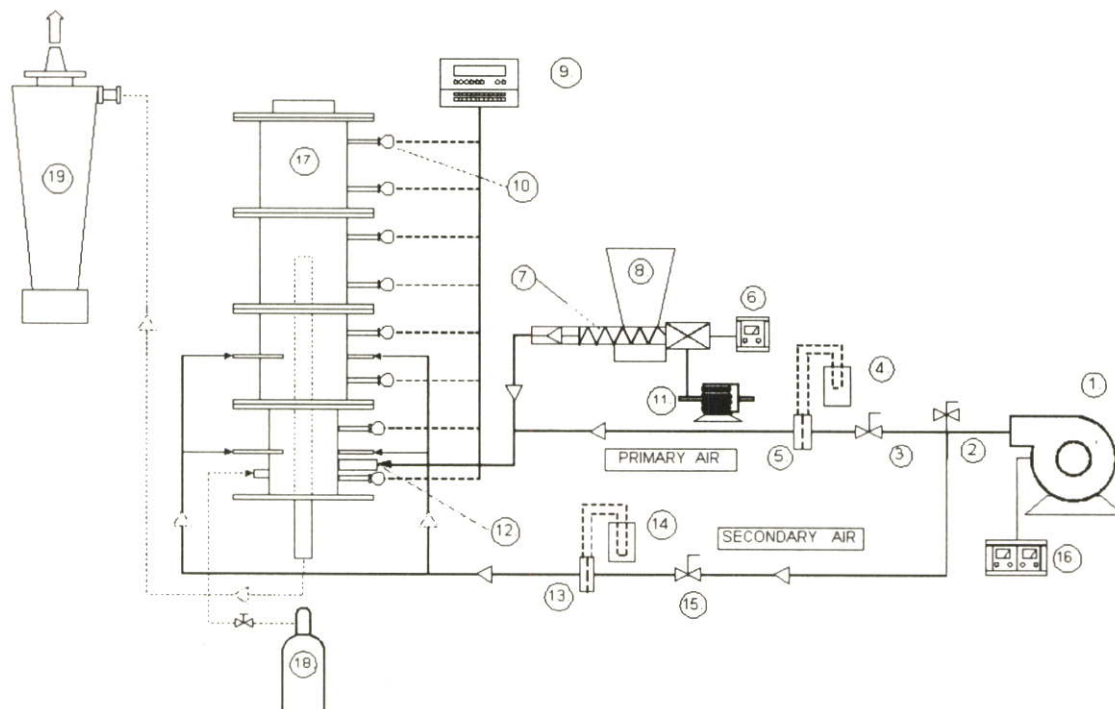
รูปที่ 5.18 Inverter

DC. Power Supply เป็นชุดเครื่องมือที่ใช้ในการควบคุมมอเตอร์ขับของ Blower สามารถปรับแรงดันสูงสุดเท่ากับ 70 Volt, 6 Amp ซึ่งให้ความเร็วรอบสูงสุดเท่ากับ 1,650 RPM (มอเตอร์ขับที่ความเร็วรอบ 1,650 RPM จะให้แรงบิดเท่ากับ 4.0 N.m) ดังรูปที่ 5.19



รูปที่ 5.19 DC. Power Supply

5.3 ขั้นตอนในการติดตั้งชุดทดลองเตาเผาเวอร์เทค



- | | | | |
|------------------|-------------------------------|------------------------|----------------------|
| 1. Blower | 6. Inverter | 11. Motor | 16. Power Supply |
| 2. Bypass Valve | 7. Screw Feeder | 12. Primary Air Nozzle | 17. Vortex Combustor |
| 3. Needle Valve | 8. Hopper | 13. Orifice Plate | 18. LPG Supply |
| 4. Manometer | 9. Digital Thermometer Switch | 14. Manometer | 19. Cyclone |
| 5. Orifice Plate | 10. Thermocouple Type K | 15. Needle Valve | |

รูปที่ 5.20 ผังแสดงชุดอุปกรณ์การทดลองเตาเผาเวอร์เทคหลายชั้น

ในการติดตั้งชุดอุปกรณ์การทดลอง เริ่มต้นจากการประกอบตัวเตาเผาใหม่แต่ละส่วนเข้าด้วยกัน เมื่อติดตั้งเรียบร้อยแล้ว ให้ทำการติดตั้ง Thermocouple Type K จำนวน 8 ตัว (ติดตั้งตามกรณีที่ทำการศึกษา ดูหัวข้อ 5.4.2) เข้ากับชุด Digital Thermometer And Multichannel Switch (9) โดยอากาศที่ใช้ในการเผาใหม่ประกอบด้วยอากาศ 2 ส่วนด้วยกัน คือ อากาศส่วนที่ 1 (Primary Air) และ อากาศส่วนที่ 2 (Secondary Air) ซึ่งได้จากแหล่งต้นกำเนิดเดียวกัน คือ Blower (1) มีชุด Power Supply (16) ใช้ทำหน้าที่ปรับความเร็วรอบของชุดมอเตอร์ขับเคลื่อนของ Blower (1) ในส่วนของอากาศในท่อ Primary Air จะผ่านชุด Needle Valve (3) ซึ่งมีหน้าที่ควบคุมอัตราการไหล และวัดอัตราการไหลผ่านชุด Orifice Plate (5) และ Manometer (4) ซึ่งอากาศส่วนที่ 1 จะเข้าไปผสมกับแก๊สที่ชุดท่อลมของเครื่องป้อนแก๊ส โดยแก๊สจะถูกบรรจุภายใน Hopper (8) จะลำเลียงเข้าสู่ชุดท่อลมโดยใช้ Screw Feeder (7) ซึ่งมีต้นกำเนิดจาก Motor (11) เป็นชุดขับเคลื่อน และมี Inverter (6) เป็นชุดปรับรอบ

ความเร็วของมอเตอร์ เพื่อให้เกิดการผสมและคลุกเคล้าอากาศกับเชื้อเพลิงก่อนเข้าสู่เตาเผาไหม้ ส่วน Secondary Air จะผ่านเข้าสู่ท่อลมโดยมีชุด Needle Valve(15) ซึ่งมีหน้าที่ควบคุมอัตราการไหลและวัดอัตราการไหลผ่านชุด Orifice Plate(13) และ Manometer(14) และจะแบ่งอากาศส่วนนี้ออกเป็น 8 ส่วนเท่า ๆ กัน เพื่อจ่ายลมให้กับเตาเผาส่วนบน (4 ส่วน) และเตาเผาส่วนล่าง (4 ส่วน) โดยจะจ่ายลมเข้าทางผนังบริเวณกึ่งกลางเตาเผา ซึ่งท่อลมจะติดตั้งสัณฐานผนังด้านในของห้องเผาไหม้และตั้งฉากกับรัศมีเตาทุก ๆ 90 องศา ทั้งเตาเผาส่วนบนและส่วนล่าง เมื่อติดตั้งชุดอุปกรณ์เรียบร้อยแล้วจึงเริ่มทำการอุ่นเตาเผาไหม้ แสดงดังรูปที่ 5.20

5.4 ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง

ในขั้นตอนสุดท้ายนี้แบ่งขั้นการทดลองออกเป็น 2 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนการอุ่นเตาเผา และขั้นตอนการทดลอง โดยมีรายละเอียดต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

5.4.1 ขั้นตอนการอุ่นเตา

หลังที่ติดตั้งอุปกรณ์การทดลอง เรียบร้อยแล้ว ในการเผาไหม้นั้นจำเป็นต้องมีการอุ่นเตาก่อนเสมอ โดยจะอุ่นเตาด้วย LPG Supply (18) โดยใช้หัว Burner เป็นตัวปรับเปลวไฟให้เป็นสีน้ำเงิน จากนั้นนำเข้าไปที่ท่ออุ่นเตาของเตาเผา(12) ให้มีอุณหภูมิสูงที่เหมาะสมต่อการเผาไหม้เสียก่อน ซึ่งในขั้นต้นเริ่มอุ่นเตาให้มีอุณหภูมิประมาณ 450°C จนอุณหภูมิภายในเริ่มคงที่ จึงทำการ Feed เชื้อเพลิงกลบเข้าไปในปริมาณน้อย เพื่อให้เกิดการเผาไหม้ ซึ่งหลังจากกลบถูกเผาไหม้แล้วจะคายค่าความร้อนของกลบออกมามีผลทำให้อุณหภูมิสูงขึ้น จนอุณหภูมิภายในสูงถึงประมาณ $600-700^{\circ}\text{C}$ ซึ่งขณะนี้กลบสามารถติดไฟได้ด้วยตัวเองแล้ว จึงหยุดให้ LPG Supply แล้วเริ่มทำการทดลองต่อไป

5.4.2 ขั้นตอนการทดลอง

เมื่อทำการอุ่นเตาเผาเรียบร้อยแล้ว สามารถเริ่มทำการทดลองได้ ซึ่งในการทดลองการเผาไหม้ของเตาเผาเวอร์เทค จะปรับอัตราการไหลของเชื้อเพลิงกลบเท่ากับ 0.3 kg/min ขั้นตอนการทดลองมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. ติดตั้งเตาเผาไหม้เวอร์เทค 1 ชั้นที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเวอร์เทคชั้นที่ 1 เท่ากับ 1.0D และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเวอร์เทคชั้นที่ 2 เท่ากับ 1.0D (ความสูงของเตาเผาเวอร์เทคชั้นที่ 2 เท่ากับ 3.0D และเตาเผาเวอร์เทคชั้นที่ 1 เท่ากับ 1.0D)
2. เมื่อ $\lambda = 0.0$
3. ปรับอัตราการไหลของอากาศให้ค่า equivalence ratio เท่ากับ 0.8
4. เริ่มบันทึกอุณหภูมิที่ตำแหน่ง $x = 0.075 \text{ m}, 0.225 \text{ m}, 0.375 \text{ m}, 0.525 \text{ m}, 0.675 \text{ m}$ ที่ $r/R = 0.25$ และ ที่ตำแหน่ง $x = 0.825 \text{ m}, 0.975 \text{ m}$ และ 1.125 m ที่ $r/R = 0.0$

5. บันทึกอุณหภูมิที่เวลา นาทีที่ 10 และ นาทีที่ 15, บันทึกผลการทดลอง สังเกตควัน และเก็บซีเมนต์ที่ได้จากการเผาไหม้, วิเคราะห์องค์ประกอบของแก๊สที่เกิดจากการเผาไหม้

6. ทำการทดลองซ้ำข้อ 4 ที่ตำแหน่ง $x = 0.075 \text{ m}, 0.225 \text{ m}, 0.375 \text{ m}, 0.525 \text{ m}$ และ 0.675 m วัดอุณหภูมิที่ตำแหน่ง $r/R = 0.44, 0.63, 0.82,$ และ 1.0 ตามลำดับ และที่ $x = 0.825 \text{ m}, 0.975 \text{ m},$ และ 1.125 m ทำการวัดอุณหภูมิที่ตำแหน่ง $r/R = 0.25, 0.44, 0.63, 0.82,$ และ 1.0 ตามลำดับ

7. ทำการทดลองตามข้อที่ 3 - 6 ปรับอัตราการไหลของอากาศให้ค่า equivalence ratio เท่ากับ 1.0, 1.2 ตามลำดับ

8. ทำการทดลองตามข้อที่ 2 - 7 เมื่อ $\lambda = 0.15$ และเมื่อ $\lambda = 0.25$ ตามลำดับ

9. ทำการทดลองตามข้อที่ 1 เปลี่ยนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของห้องเผาไหม้ ส่วนที่ 2 จาก 1.0D เป็น 0.5D (เตาเผาออร์เทค 3 ชั้น) ทำการทดลองซ้ำข้อที่ 4 - 8 โดยเปลี่ยนการวัดอุณหภูมิที่ตำแหน่ง $x = 0.375 \text{ m}, 0.525 \text{ m}$ โดยเริ่มวัดอุณหภูมิที่ตำแหน่ง $r/R = 0.25, 0.31, 0.38, 0.44,$ และ 0.50 ตามลำดับ บันทึกผลการทดลอง

10. ทำการทดลองตามข้อที่ 9 เปลี่ยนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของห้องเผาไหม้ ส่วนที่ 2 จาก 0.5D เป็น 0.75D (เตาเผาออร์เทค 3 ชั้น) ทำการทดลองซ้ำข้อที่ 4 - 8 โดยเปลี่ยนการวัดอุณหภูมิที่ตำแหน่ง $x = 0.375 \text{ m}, 0.525 \text{ m}$ โดยเริ่มวัดอุณหภูมิที่ตำแหน่ง $r/R = 0.25, 0.37, 0.50, 0.62,$ และ 0.75 ตามลำดับ บันทึกผลการทดลอง

11. ทำการทดลองตามข้อที่ 1 เปลี่ยนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางห้องเผาไหม้ ส่วนที่ 1 จาก 1.0D เป็น 0.5D (เตาเผาออร์เทค 2 ชั้น) ทำการทดลองซ้ำข้อที่ 4 - 8 โดยเปลี่ยนการวัดอุณหภูมิที่ตำแหน่ง $x = 0.075 \text{ m}, 0.225 \text{ m}$ โดยเริ่มวัดอุณหภูมิที่ตำแหน่ง $r/R = 0.25, 0.31, 0.38, 0.44,$ และ 0.50 ตามลำดับ บันทึกผลการทดลอง

12. ทำการทดลองตามข้อที่ 11 เปลี่ยนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางห้องเผาไหม้ ส่วนที่ 1 จาก 0.5D เป็น 0.75D (เตาเผาออร์เทค 2 ชั้น) ทำการทดลองซ้ำข้อที่ 4 - 8 โดยเปลี่ยนการวัดอุณหภูมิที่ตำแหน่ง $x = 0.075 \text{ m}, 0.225 \text{ m}$ โดยเริ่มวัดอุณหภูมิที่ตำแหน่ง $r/R = 0.25, 0.37, 0.50, 0.62,$ และ 0.75 ตามลำดับ บันทึกผลการทดลอง

เมื่อ x คือ ความสูงของเตาเผาออร์เทค

r/R คือ อัตราส่วนระหว่างตำแหน่งที่วัดอุณหภูมิในแนวรัศมีต่อรัศมีภายในเตาเผาออร์เทค

บทที่ 6

ผลการทดลองและวิจารณ์

6.1 บทนำ

จากการทำการทดลองในบทที่ 5 โดยผลการทดลองมุ่งเน้นที่จะทำการศึกษาถึงอิทธิพลของชั้นวอร์เทคของเตาเผา, อัตราส่วนของปริมาณการไหลของอากาศทุติยภูมิต่อปริมาณอากาศทั้งหมด(λ) และ อัตราส่วนสมมูล(Φ) ที่มีความเหมาะสมต่อกระบวนการเผาไหม้ โดยพิจารณาความเหมาะสมต่อกระบวนการเผาไหม้จาก การกระจายอุณหภูมิภายในเตาเผา วอร์เทค, ถ้ำลอยที่ได้ที่ได้จากการเผาไหม้ เมื่อกำหนดให้อัตราการไหลของเชื้อเพลิงแกลบเท่ากับ 0.3 kg/min ตลอดการทดลอง

ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการเผาไหม้อย่างหนึ่ง คือ การหมุนวนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิง (การคลุกเคล้าระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิง) ซึ่งถ้าเกิดการหมุนวนที่มีความรุนแรงมากในขณะที่เกิดการเผาไหม้ ย่อมทำให้การถ่ายเทความร้อนระหว่างอนุภาคภายในเป็นไปอย่างดี ก็ยิ่งส่งผลให้อุณหภูมิที่ได้มีค่าสูง เตาเผา วอร์เทคที่ใช้มีความสูงโดยรวม 1,200 mm. เส้นผ่านศูนย์กลางภายในเตาเผาเท่ากับ 300 mm, แกนท่อทึงไอเสียภายในมีขนาด d ($d = 75$ mm.) สูง เท่ากับ 1,100 mm. ซึ่งในการทดลองจะศึกษาถึงชั้นวอร์เทคของเตาเผา วอร์เทค 1 ชั้น, 2 ชั้น, และ 3 ชั้น โดยมีขนาดของเตาเผาไหม้ที่ทำการศึกษา คือ 0.5D, 0.75D, และ 1.0D(D เท่ากับ 300 mm.) เมื่อ $\Phi = 0.8, 1.0, 1.2$ และ ปรับค่า $\lambda = 0.0, 0.15$ และ 0.25 ตามลำดับ

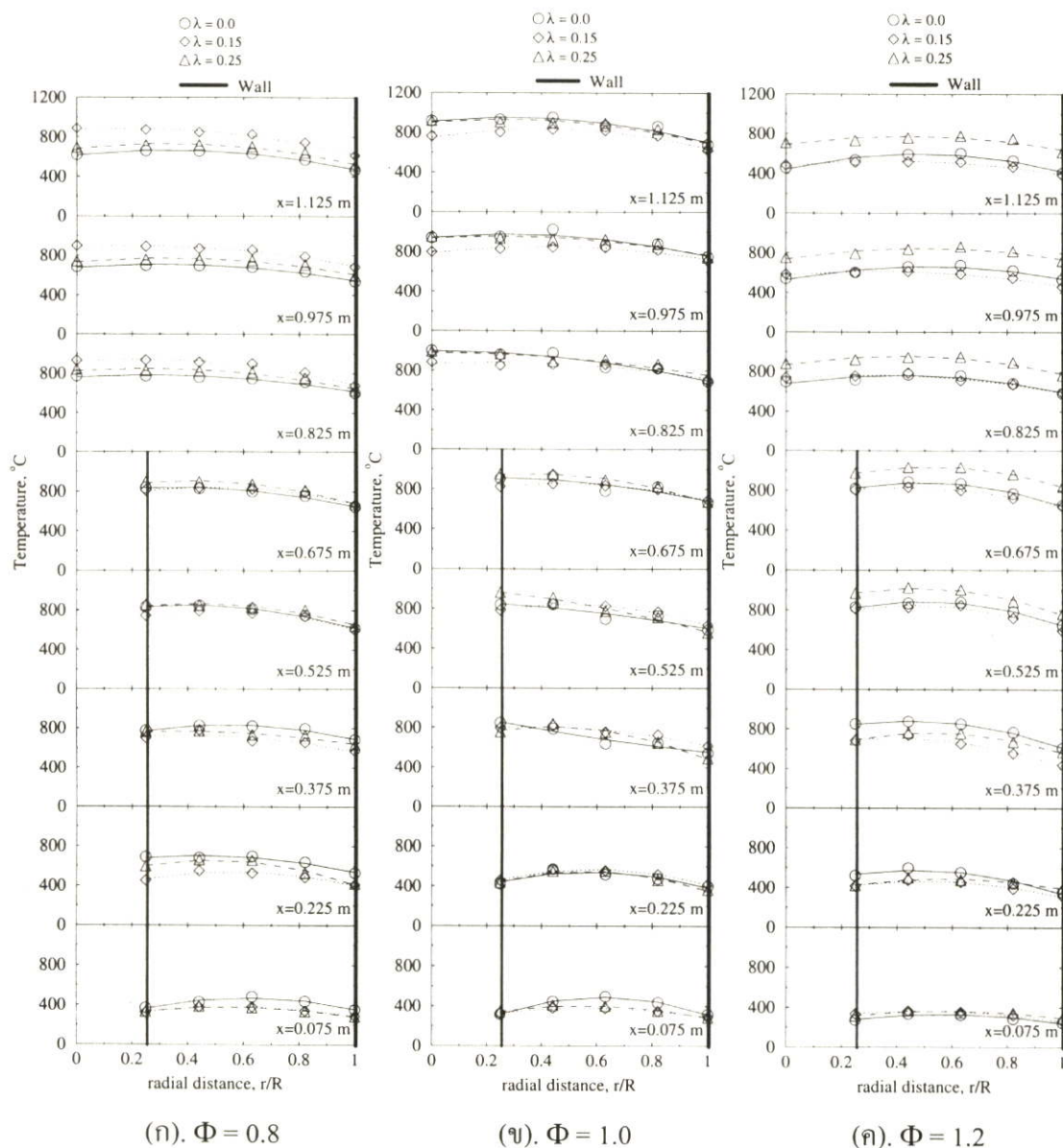
6.2 เตาเผา วอร์เทค 1 ชั้น (1.0D)

เตาเผา วอร์เทค 1 ชั้น มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในห้องเผาไหม้ ตั้งแต่ส่วนล่างจนถึงส่วนบนของห้องเผาไหม้เท่ากับ 1.0D (วอร์เทคเดี่ยว) ดังรูปที่ 6.1

6.2.1 อิทธิพลของ λ ที่มีผลต่อการเผาไหม้เมื่อ $\Phi = 0.8$

จากรูปที่ 6.1(ก) ที่ $\Phi = 0.8$ พบว่า การกระจายอุณหภูมิภายในส่วนล่างของ วอร์เทค 1 ชั้น ได้รับอิทธิพลของ $\lambda = 0.0$ เนื่องจากลมหมุนวนที่เกิดจาก อากาศส่วนที่ 1 ซึ่งมีสัดส่วนของอากาศ 100 % จะช่วยเร่งให้เกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ในเตาเผาส่วนล่างได้ดีกว่า เมื่อการเผาไหม้ดำเนินจนถึงกลางวอร์เทค อากาศส่วนที่ 2 จะเข้ามาช่วยเสริมให้เกิดความปั่นป่วนในการเผาไหม้มากยิ่งขึ้น ที่ค่า $\lambda = 0.25$ เนื่องจากมีเปอร์เซ็นต์ของอากาศส่วนที่ 2 มากที่สุด คือ 25% ของอากาศทั้งหมด การคลุกเคล้าระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิง เป็นไปอย่างสม่ำเสมอ ปฏิกิริยาการเผาไหม้ส่วนใหญ่จึงเกิดขึ้นที่กึ่งกลางเตาเผา และในส่วนของบนของ วอร์เทคเดี่ยว ได้รับอิทธิพลที่ $\lambda = 0.15$ เนื่องจากในส่วนล่างและส่วนกลางของ วอร์เทคเดี่ยว ปฏิกิริยาการเผาไหม้ยังอยู่ในช่วงเริ่มต้น แต่หลังจากผ่านขึ้นไป

ยังส่วนบนของห้องเผาไหม้ จะเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น อุณหภูมิจึงสูงขึ้นกว่า $\lambda = 0.0, 0.25$ โดยอุณหภูมิสูงสุดเกิดขึ้นบริเวณกึ่งกลางด้านบนเตาเผาอยู่ระหว่าง $700-900^{\circ}\text{C}$



รูปที่ 6.1 แสดงการกระจายอุณหภูมิภายในเตาเผาออร์เทค 1 ชั้น เมื่อ $\lambda = 0.0, 0.15, 0.25$

6.2.2 อิทธิพลของ λ ที่มีผลต่อการเผาไหม้เมื่อ $\Phi = 1.0$

รูปที่ 6.1(ข) ที่ $\Phi = 1.0$ มีการกระจายอุณหภูมิที่เกิดขึ้นตลอดทั้ง วอร์เทคเดี่ยว พบว่าที่ $\lambda = 0.0, 0.15, 0.25$ มีการกระจายอุณหภูมิที่สม่ำเสมอมาก โดยอากาศส่วนที่ 2 มีผลเพียงเล็กน้อยต่อการกระจายอุณหภูมิภายในเตาเผา ซึ่งอุณหภูมิสูงสุด เกิดเช่นเดียวกับรูปที่ 6.1(ก) อยู่ในช่วง $800-900^{\circ}\text{C}$

6.2.3 อิทธิพลของ λ ที่มีผลต่อการเผาไหม้เมื่อ $\Phi = 1.2$

รูปที่ 6.1(ค) ที่ $\Phi = 1.2$ การกระจายอุณหภูมิภายในเตาเผาเป็นในลักษณะเดียวกับที่ $\Phi = 0.8$ โดยอากาศส่วนที่ 2 ($\lambda = 0.25$) มีอิทธิพลต่อการกระจายอุณหภูมิมากที่สุดที่ตำแหน่งส่วนบนและส่วนกลางของ วอร์เทคเดี่ยว เนื่องจาก $\Phi = 1.2$ อากาศที่ใช้จริงน้อยกว่าอากาศทางทฤษฎี การเผาอยู่ในช่วงที่ไม่เหมาะสม อากาศส่วนที่ 2 จึงมีผลอย่างมาก ที่ช่วยให้เกิดการคลุกเคล้าระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงได้มากขึ้น รวมถึงการถ่ายเทความร้อนระหว่างอนุภาคเป็นไปอย่างทั่วถึงอุณหภูมิจึงสูงกว่าที่ $\lambda = 0.0, 0.15$ แต่การกระจายอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้จะต่ำกว่าที่ $\Phi = 0.8$ และ $\Phi = 1.0$ ซึ่งมีอุณหภูมิสูงสุดอยู่ในช่วง $700-800^{\circ}\text{C}$

6.2.4 การศึกษาผลของก๊าซไอเสียที่เกิดจากการเผาไหม้

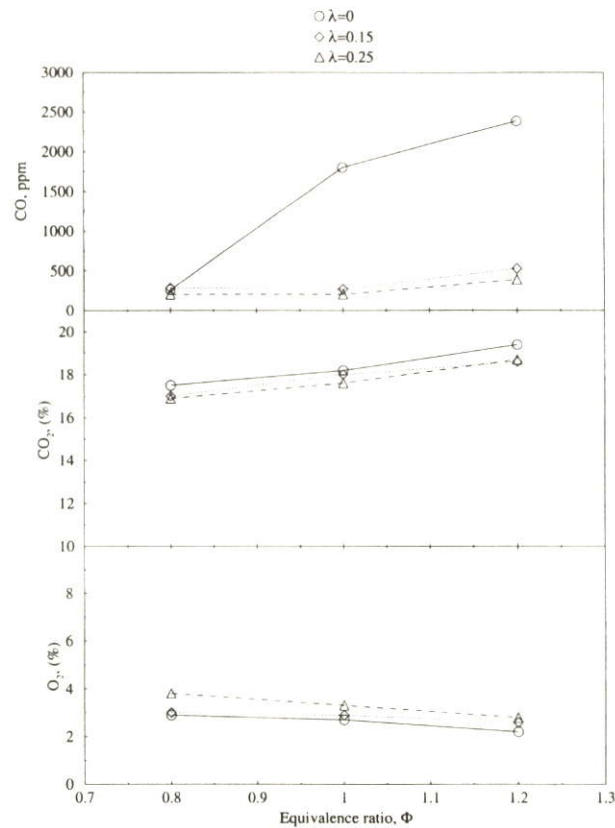
จากผลการทดลองก๊าซไอเสียที่ได้จากการเผาไหม้ เมื่อปรับอัตราการไหลของอากาศให้ $\lambda = 0.0, 0.15,$ และ 0.25 ตามลำดับ พบว่าการเปลี่ยนแปลง λ มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณ ก๊าซออกซิเจน, ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์, และก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ดังนี้

เมื่อ $\Phi = 0.8$ มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงไอเสียน้อยมาก โดยปริมาณก๊าซออกซิเจน, ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์, และก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ที่ได้จากการเผาไหม้มีการเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก เนื่องจากปริมาณอากาศที่ใช้ในการทดลองมากกว่าปริมาณอากาศทางทฤษฎี จึงทำให้มีปริมาณของก๊าซออกซิเจนมีมากเกินไปสำหรับการเผาไหม้ คว้นที่เกิดจากกระบวนการเผาไหม้มีสีขาวบาง ๆ ขึ้นเล็กน้อยสีเทาปนขาว และพบแกลบบางส่วนที่ยังไม่เกิดเผาไหม้ออกจากเตาเผา วอร์เทคทำให้แกลบลอยออกมามีสีดำแดง ซึ่งจากการทดลองที่ $\lambda = 0.25$ สามารถวัดค่าคาร์บอนมอนอกไซด์ต่ำสุดที่เกิดจากการเผาไหม้ได้เท่ากับ 205 ppm , ออกซิเจนเท่ากับ 3.8% และคาร์บอนไดออกไซด์เท่ากับ 16.9% ดังรูปที่ 6.2

เมื่อ $\Phi = 1.0$ ปริมาณอากาศที่ใช้จริงเท่ากับปริมาณอากาศทางทฤษฎี มีผลทำให้การเผาไหม้สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น และอุณหภูมิในการเผาไหม้จึงสูงขึ้นด้วย คว้นที่ออกจากเตาเผา วอร์เทคมีสีขาวปริมาณมาก ขึ้นที่ให้มีสีดำปนเทา ซึ่งจากการทดลองที่ $\lambda = 0.25$ สามารถวัดค่าคาร์บอนมอนอกไซด์ต่ำสุดที่เกิดจากการเผาไหม้ได้เท่ากับ 204 ppm , ออกซิเจนเท่ากับ 3.3% และคาร์บอนไดออกไซด์เท่ากับ 17.6% ดังรูปที่ 6.2

เมื่อ $\Phi = 1.2$ ปริมาณอากาศที่ใช้จริงน้อยกว่าปริมาณอากาศทางทฤษฎี คว้นที่ออกจากเตาเผา วอร์เทคมีสีเทาปนขาวปริมาณพอประมาณ ขึ้นที่ให้มีขนาดใหญ่สีดำปนเทา ซึ่งอุณหภูมิที่เกิดจากการทดลองจะมีอุณหภูมิสูงเป็นบางช่วงไม่ใช่ตรงกลางเตาเผา เนื่องจากมีปริมาณสัดส่วนของเชื้อเพลิงในปริมาณมากกว่าอากาศ ซึ่งสังเกตได้จากรูปที่ 6.2 พบว่า ที่ค่า $\Phi = 1.2$ เพราะมีอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้น้อย การคลุกเคล้าระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงเป็นไปอย่างไม่เหมาะสม ค่า λ จึงมีผลเป็นอย่างมาก เพราะอากาศส่วนที่ 2 ที่ใช้ในการเผาไหม้จะช่วยทำให้เกิดการคลุกเคล้าระหว่าง

อากาศกับเชื้อเพลิงในขณะที่เกิดการเผาไหม้ได้ดี ซึ่งจากการทดลองที่ $\lambda = 0.25$ สามารถวัดค่าคาร์บอนมอนนอกไซด์ต่ำสุดที่เกิดจากการเผาไหม้ได้เท่ากับ 387 ppm, ออกซิเจนเท่ากับ 2.8% และคาร์บอนไดออกไซด์เท่ากับ 18.7% ดังรูปที่ 6.2



รูปที่ 6.2 แสดงความสัมพันธ์ของก๊าซที่เกิดจากการเผาไหม้ระหว่าง CO, CO₂, และ O₂ กับค่า $\Phi=0.8, 1.0$, และ 1.2 เมื่อ $\lambda = 0.0, 0.15, 0.25$

6.3 เตาเผาเวอร์เทค 2 ชั้น

เตาเผาเวอร์เทค 2 ชั้น ประกอบด้วย เวอร์เทคชั้นที่ 1 หรือเวอร์เทคด้านล่าง และ เวอร์เทคชั้นที่ 2 หรือ เวอร์เทคด้านบน ซึ่งเวอร์เทคชั้นที่ 1 ซึ่งอยู่ด้านล่างของเตาเผามีขนาดห้องเผาไหม้ที่ใช้ในการทดลอง 2 ขนาด คือ 0.5D และ 0.75D ส่วนเวอร์เทคชั้นที่ 2 ซึ่งอยู่ด้านบนของเตาเผามีขนาดห้องเผาไหม้คงที่เท่ากับ 1.0D โดยทำการศึกษาอิทธิพลของ λ ที่มีผลต่อการเผาไหม้ที่ $\Phi = 0.8, 1.0$, และ 1.2 ดังรูปที่ 6.3

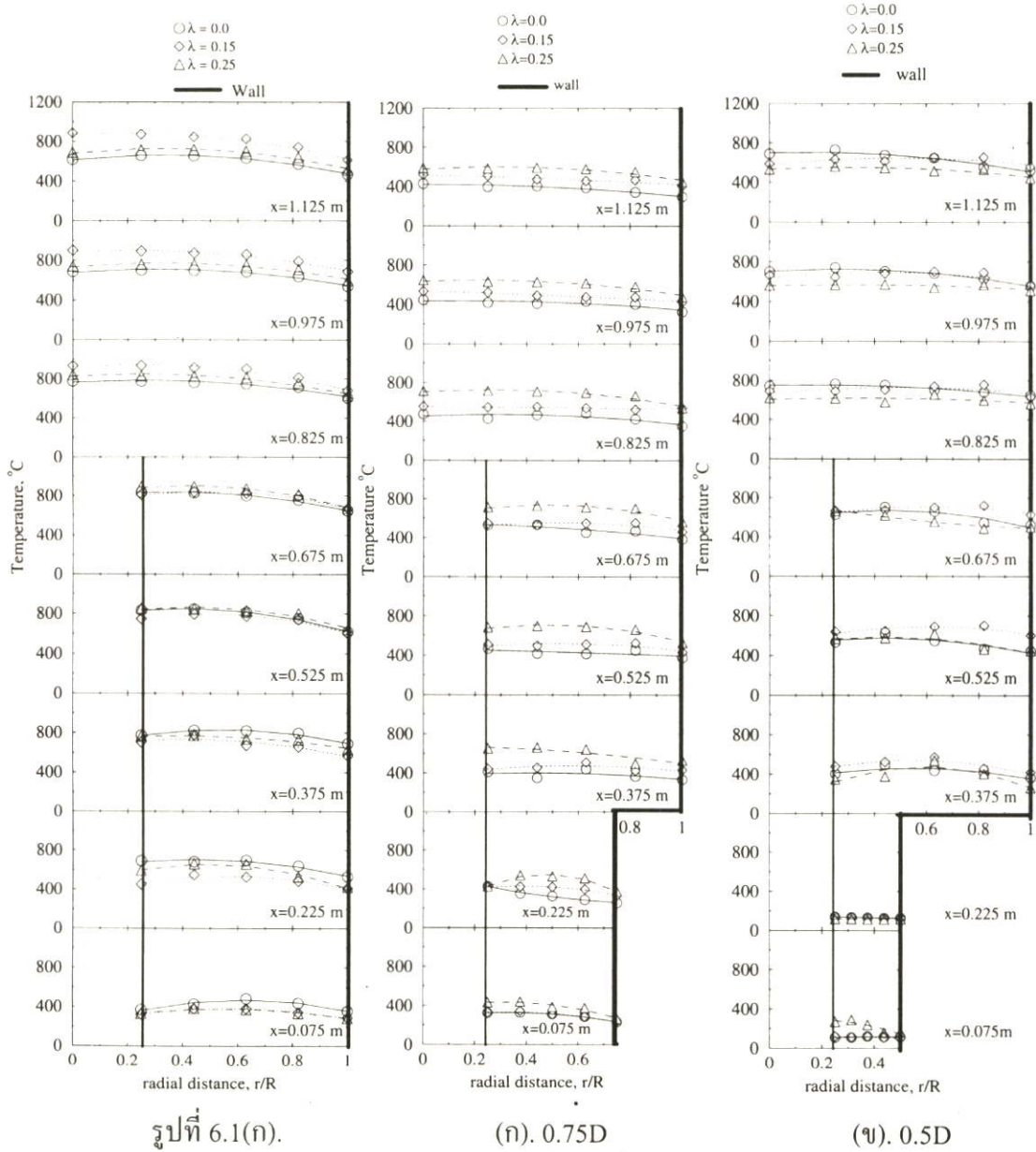
6.3.1 อิทธิพลของ λ ที่มีผลต่อการเผาไหม้เมื่อ $\Phi = 0.8$

ในรูปที่ 6.3 (ก) แสดงถึงการกระจายอุณหภูมิภายในเตาเผา ซึ่งเริ่มการเผาไหม้ที่ เวอร์เทคชั้นที่ 1 โดยมีขนาดเท่ากับ 0.75D การกระจายอุณหภูมิภายในชั้นนี้ได้รับอิทธิพลโดยตรงจากอากาศส่วนที่ 2 ($\lambda = 0.25$) มากที่สุด เนื่องจากที่ $\Phi = 0.8$ อากาศที่ใช้จริงมากกว่าอากาศทางทฤษฎี อากาศ

ส่วนที่ 1 ซึ่งเป็นอากาศหลักที่ทำให้เกิดการหมุนวนมีความแรงสูงแต่อุณหภูมิกายในไม่สูงมากนัก เพราะภายใน วอร์เทคชั้นที่ 1 จะมีพื้นที่เกิดปฏิกิริยาลดลง(เทียบกับห้องเผาไหม้ส่วนล่างของเตาเผา วอร์เทค 1 ชั้น) เวลาที่เกิดการเผาไหม้จึงย่อมลดลงด้วย การเผาไหม้ที่เกิดจึงยังไม่สมบูรณ์มากนัก หรือไม่เกิดเลย เชื้อเพลิงก็หลุดเข้าไปยัง วอร์เทคชั้นที่ 2 แล้ว แต่เมื่อให้อากาศส่วนที่ 2 แก่เตาเผา พบว่า อุณหภูมิที่เกิดสูงขึ้น เนื่องมาจากการให้อากาศส่วนที่ 2 แก่เตาเผาเป็นการเพิ่มการคลุกเคล้าระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงในขณะที่เกิดการเผาไหม้มากขึ้น ด้วยรอบการหมุนวนที่เพิ่มขึ้นจากอากาศส่วนที่ 2 ที่ให้กับเตาเผา ส่งผลให้เวลาในการเผาไหม้นานขึ้น เชื้อเพลิงกับอากาศจึงเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ที่สมบูรณ์มากขึ้น อุณหภูมิที่เกิดอยู่ในช่วง $400-500^{\circ}\text{C}$ หลังจากการเผาไหม้เข้ามาสู่ วอร์เทคชั้นที่ 2 จนถึง ส่วนบนของห้องเผาไหม้ พบว่าอากาศส่วนที่ 2 ยังคงมีผลอย่างต่อเนื่องกับการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ ซึ่งใน วอร์เทคชั้นที่ 2 นี้ อากาศส่วนที่ 2 ($\lambda = 0.25$) มีผลต่อการกระจายอุณหภูมิมากที่สุด เนื่องมาจากช่วยหน่วงเวลาในการเผาไหม้ระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงนานขึ้น การหมุนวนที่เพิ่มขึ้นยังผลให้เกิดแรงเหวี่ยงภายในอนุภาคของเชื้อเพลิง ทำให้ขี้เถ้าที่ติดบริเวณพื้นผิวของเชื้อเพลิงหลุดออกไปด้วย ออกซิเจนในอากาศจึงสามารถเข้าทำปฏิกิริยากับเชื้อเพลิงได้ทันที โดยเป็นกระบวนการที่เพิ่มพื้นผิวในการทำปฏิกิริยาระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงได้มากยิ่งขึ้น และในขณะที่เกิดการเผาไหม้ การหมุนวนของอากาศยังเป็นการช่วยเพิ่มการถ่ายเทความร้อนภายใน ทำให้การเผาไหม้สมบูรณ์มากขึ้น โดยอุณหภูมิมิมีการกระจายที่สม่ำเสมอในช่วง $600-700^{\circ}\text{C}$

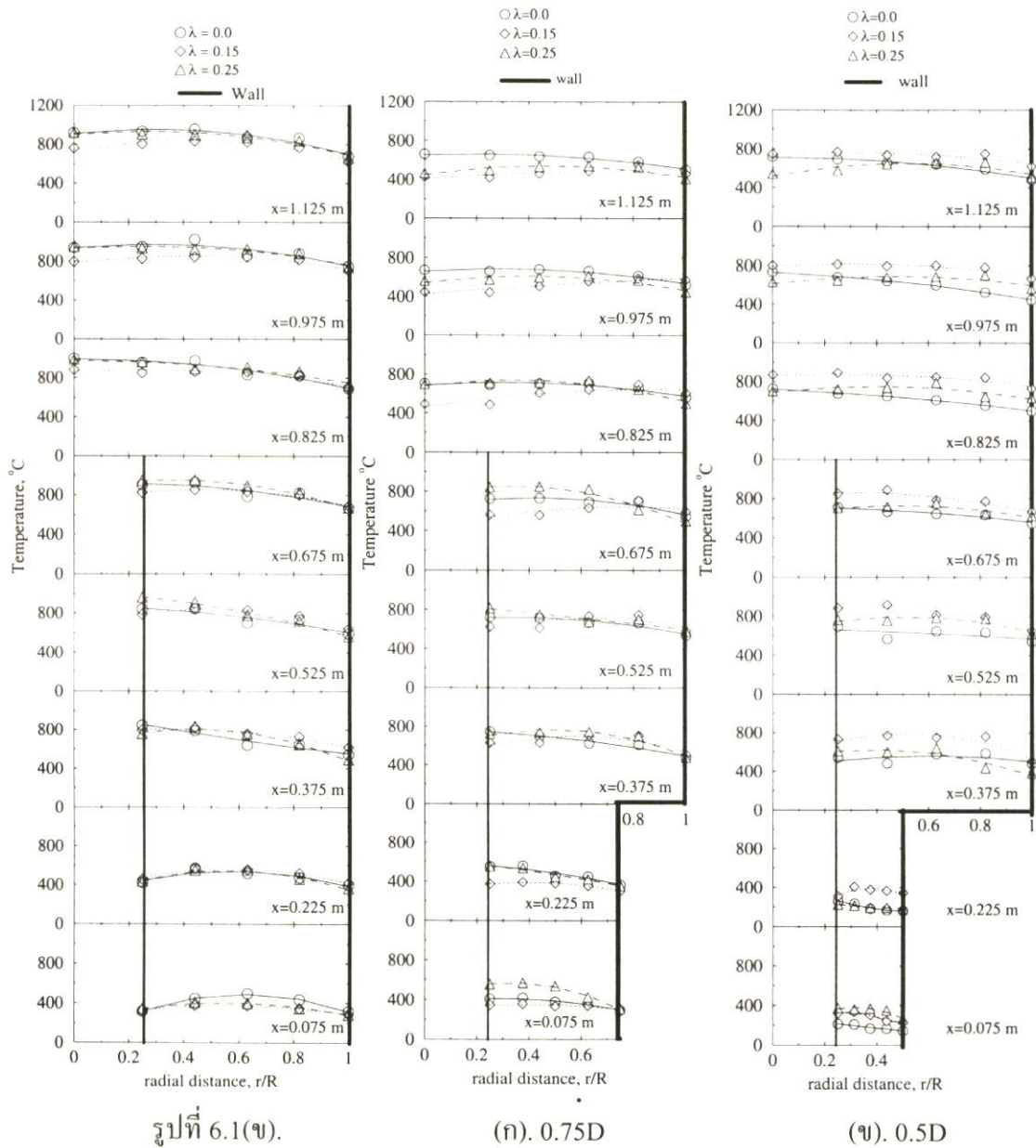
รูปที่ 6.3 (ข) เป็นรูปที่แสดงถึงการกระจายอุณหภูมิกายในเตาเผา วอร์เทค 2 ชั้น ที่มีขนาดของ วอร์เทคชั้นที่ 1 เท่ากับ $0.5D$ ในขณะที่เริ่มการเผาไหม้ ในวอร์เทคชั้นที่ 1 พบว่าการกระจายอุณหภูมิที่เกิดขึ้นสม่ำเสมอมากแต่อยู่ในเกณฑ์ต่ำ ซึ่งมีช่วงอุณหภูมิเพียง $100-250^{\circ}\text{C}$ เท่านั้น สาเหตุเนื่องจากพื้นที่ภายในวอร์เทคชั้นที่ 1 มีพื้นที่น้อยลงเป็นผลให้เวลาที่ใช้ในการเผาไหม้มีน้อย ซึ่งมีเชื้อเพลิงเพียงเล็กน้อยที่เกิดการเผาไหม้ จากนั้นก็หลุดออกสู่ วอร์เทคชั้นที่ 2 ซึ่งอิทธิพลของ λ มีผลต่อการกระจายอุณหภูมิในวอร์เทคชั้นที่ 1 น้อยมาก หลังจากที่เชื้อเพลิงกับอากาศเผาไหม้เข้ามาสู่ วอร์เทคชั้นที่ 2 พบว่าอุณหภูมิสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว เนื่องมาจากการไหลวนของอากาศภายใน วอร์เทคชั้นที่ 1 มายัง วอร์เทคชั้นที่ 2 ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงพื้นที่ในการไหลวนของอากาศภายใน จะเกิดปรากฏการณ์ที่เรียกว่า Recirculation (บทที่ 3) ซึ่งจะทำให้เกิดความปั่นป่วนรุนแรงมากขึ้น(มากกว่ารูปที่ 6.3 ก) จากอากาศไหลวนย้อนกลับในแนวแกน โดยส่งผลให้อุณหภูมิการเผาไหม้สูงขึ้นอย่างรวดเร็ว ประกอบกับได้อากาศส่วนที่ 2 ที่ช่วยเสริมการหมุนวนของอากาศ ทำให้การคลุกเคล้าของอากาศกับเชื้อเพลิงมีความรุนแรงมากยิ่งขึ้น ซึ่งเหตุผลเช่นเดียวกับ รูปที่ 6.3(ก) อุณหภูมิที่เกิดขึ้นอยู่ในช่วง $600-700^{\circ}\text{C}$ แต่ในบริเวณส่วนบนของ วอร์เทคชั้นที่ 2 พบว่าที่ $\lambda = 0.0$ มีผลต่อการกระจายอุณหภูมิสูงสุดอยู่ในช่วง $700-800^{\circ}\text{C}$ เนื่องมาจาก การเผาไหม้ที่ $\lambda = 0.0$ จะเริ่มมีการเผาไหม้เพิ่มขึ้นในช่วง วอร์เทคชั้นที่ 2 (บริเวณปลายท่อทิ้งไอเสีย) และเกิดการเผาไหม้ต่อเนื่องมายังส่วนบนของ วอร์เทคชั้นที่ 2 การเผาไหม้จึงมีความสมบูรณ์ที่สุด และอีกสาเหตุหนึ่งก็คือ $\lambda = 0.15$ และ 0.25

บริเวณส่วนบนของวอร์เทคชั้นที่ 2 มีอุณหภูมิต่ำกว่าที่ $\lambda = 0.0$ เพราะ ที่ $\lambda = 0.15$ และ 0.25 จะมีอากาศส่วนที่ 1 เพียง 85% และ 75% ของอากาศทั้งหมด ตามลำดับ ซึ่งอากาศส่วนที่ 1 ถือได้ว่าเป็นอากาศหลักที่สำคัญที่ทำให้เกิดการหมุนวนของอากาศภายในขณะเริ่มต้นการเผาไหม้ จึงทำให้ที่ $\lambda = 0.15$ และ 0.25 อากาศที่ช่วยให้เกิดการหมุนวนภายในมีค่า ทำให้การพาเชื้อเพลิงจากวอร์เทคชั้นที่ 2 มายังห้องเผาไหม้ส่วนบนเป็นไปได้ช้ากว่า จึงเกิดการเผาไหม้ส่วนใหญ่ ณ วอร์เทคชั้นที่ 2 ทำให้บริเวณส่วนบนของวอร์เทคชั้นที่ 2 มีอุณหภูมิการเผาไหม้ต่ำกว่าที่ $\lambda = 0.0$ ดังรูปที่ 6.3(ข)



รูปที่ 6.3 เปรียบเทียบการกระจายอุณหภูมิภายในเตาเผา วอร์เทค 2 ชั้น และ เตาเผา วอร์เทค 1 ชั้น ที่ค่า $\Phi = 0.8$, เมื่อ $\lambda = 0.0, 0.15, 0.25$

6.3.2 อิทธิพลของ λ ที่มีผลต่อการเผาไหม้เมื่อ $\Phi = 1.0$



รูปที่ 6.4 เปรียบเทียบการกระจายอุณหภูมิภายในเตาเผาออร์เทค 2 ชั้น และ เตาเผาออร์เทค 1 ชั้น
ที่ค่า $\Phi = 1.0$, เมื่อ $\lambda = 0.0, 0.15, 0.25$

รูปที่ 6.4 (ก) ลักษณะการกระจายอุณหภูมิภายในทั่วทั้งห้องเผาไหม้คล้ายกับรูปที่ 6.1(ข) ซึ่งมีความสม่ำเสมอในแนวรัศมี แต่ที่ระยะใกล้ผนังท่อห้องไอเสีย จะเกิดการถ่ายเทความร้อนจากท่อห้องไอเสีย ทำให้บริเวณนี้มีความแตกต่างของอุณหภูมิจากค่า λ มากกว่า อุณหภูมิภายในวอร์เทคชั้นที่ 1 อยู่ในช่วง $400-600^{\circ}\text{C}$ ส่วนอุณหภูมิการเผาไหม้ วอร์เทคชั้นที่ 2 อยู่ในช่วง $600-800^{\circ}\text{C}$ ซึ่ง $\lambda = 0.25$ มีผลต่อการกระจายอุณหภูมิสูงสุด และที่บริเวณส่วนบนของวอร์เทคชั้นที่ 2 ที่ $\lambda = 0.0$ (ไม่มี

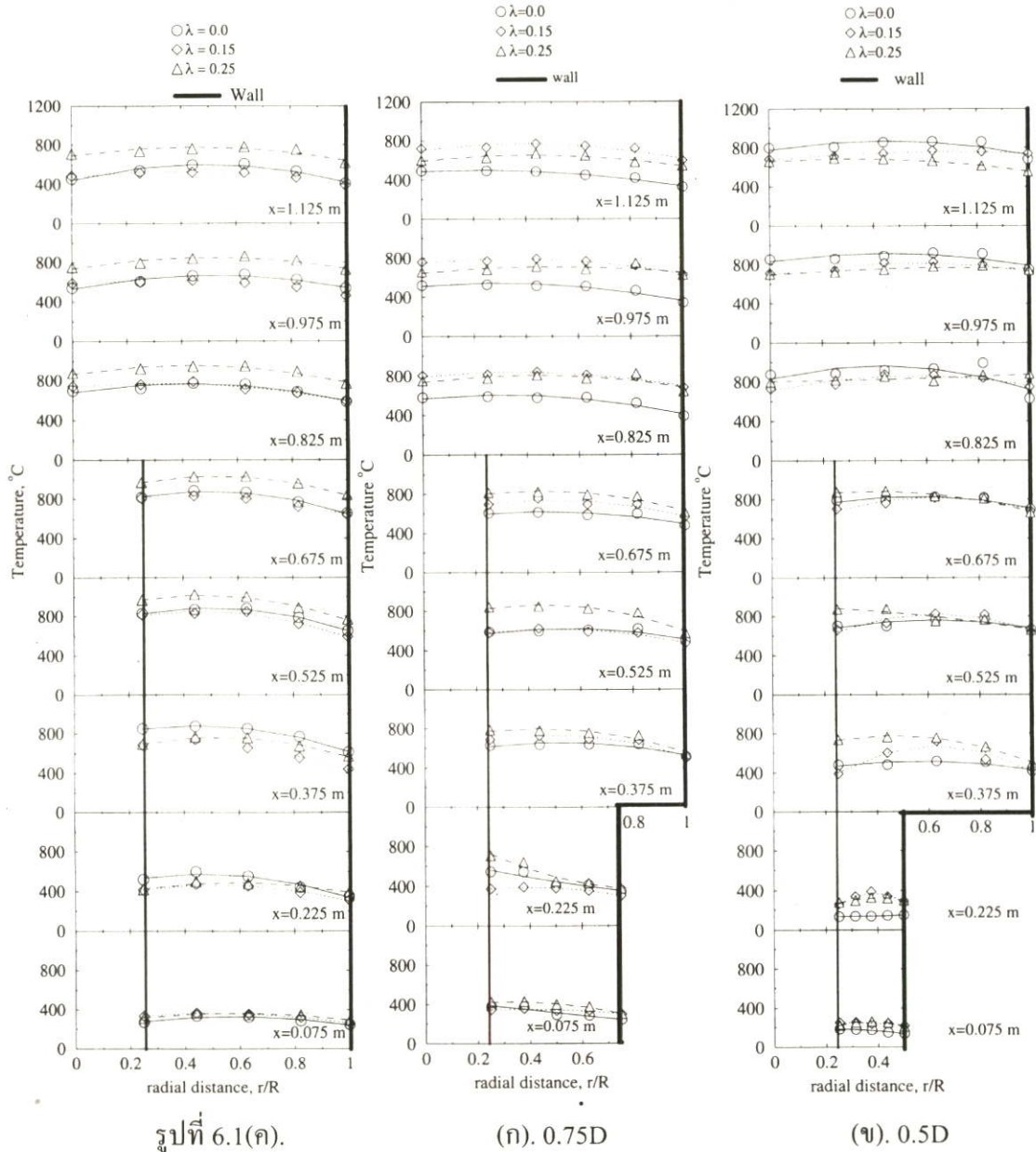
การป้อนอากาศส่วนที่ 2) มีผลต่อการกระจายอุณหภูมิสูงสุดประมาณ 700°C เนื่องจากได้รับอิทธิพลของ recirculation อากาศหมุนวนจึงมีความปั่นป่วนรุนแรงมากขึ้น ซึ่งส่งผลให้การเผาไหม้ระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงมีความสมบูรณ์มากขึ้น แต่การกระจายของอุณหภูมิต่ำกว่า รูปที่ 6.1(ข) เนื่องจากปริมาตรของห้องเผาไหม้โดยรวมลดลง ส่งผลให้เวลาที่ใช้ในการเผาไหม้ลดลงด้วย การเผาไหม้จึงสมบูรณ์น้อยกว่า รูปที่ 6.1(ข)

รูปที่ 6.4 (ข) เนื่องจากขณะนี้ อากาศที่ใช้จริงเท่ากับทางทฤษฎี อากาศส่วนที่ 2 เริ่มมีอิทธิพลต่อการกระจายอุณหภูมิ เพราะอากาศส่วนที่ 2 ช่วยให้เกิดการหมุนวนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงมากยิ่งขึ้น เวลาในการเผาไหม้จึงนานขึ้น แต่บริเวณ วอร์เทคชั้นที่ 1 การกระจายอุณหภูมิต่ำอยู่ในช่วงระหว่าง $300-400^{\circ}\text{C}$ เพราะมีพื้นที่การเผาไหม้ลดลงกว่ารูปที่ 6.4(ก) เวลาในการเผาไหม้จึงลดลง อุณหภูมิที่เกิดจากการเผาไหม้จึงต่ำกว่า ในส่วนของการเผาไหม้ วอร์เทคชั้นที่ 2 ที่ $\lambda = 0.15$ มีผลต่อการกระจายอุณหภูมิสูงสุดและยังได้ลมหมุนวนจากการเกิด recirculation จนเข้าสู่บริเวณ ส่วนบนของวอร์เทคชั้นที่ 2 ซึ่งทำให้มีอุณหภูมิสูงสุดอยู่ในช่วง $700-800^{\circ}\text{C}$

6.3.3 อิทธิพลของ λ ที่มีผลต่อการเผาไหม้เมื่อ $\Phi = 1.2$

ในรูปที่ 6.5 (ก) พฤติกรรมการกระจายตัวของอุณหภูมิกลายคลึงกับ รูปที่ 6.1 (ค) แต่ที่ $\Phi = 1.2$ โดยมีอากาศส่วนที่ 2 มีผลต่อการกระจายอุณหภูมิภายในเตาเผาตั้งแต่ วอร์เทคชั้นที่ 1 จนถึงส่วนบนของวอร์เทคชั้นที่ 2 ซึ่งมีอุณหภูมิอยู่ในช่วง $700-800^{\circ}\text{C}$ เนื่องจากอากาศในขณะนี้น้อยกว่าทางทฤษฎี ฉะนั้นการได้รับอากาศส่วนที่ 2 ($\lambda = 0.15$) จึงมีผลช่วยให้การคลุกเคล้าระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงได้มากขึ้น ประกอบกับการเกิด recirculation จึงช่วยให้ทำให้เกิดความปั่นป่วนภายในมากขึ้น การเผาไหม้ระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงจึงสมบูรณ์มากขึ้น

รูปที่ 6.5 (ข) พฤติกรรมการกระจายอุณหภูมิภายในเกิดในลักษณะเดียวกับรูปที่ 6.3(ข) และ 6.4 (ข) ซึ่ง วอร์เทคชั้นที่ 1 มีการกระจายอุณหภูมิภายในต่ำอยู่ในช่วง $300-400^{\circ}\text{C}$ การเผาไหม้จึงไม่สมบูรณ์มากนัก(เพราะมีพื้นที่ในการเผาไหม้ลดลง เวลาในการเผาไหม้ลดลง) ส่วนวอร์เทคชั้นที่ 2 มีการกระจายอุณหภูมิอยู่ระหว่าง $700-800^{\circ}\text{C}$ จนถึง ส่วนบนของวอร์เทคชั้นที่ 2 ซึ่งมีอุณหภูมิอยู่ในช่วง $800-900^{\circ}\text{C}$ ที่ ($\lambda = 0.0$) เนื่องจากพื้นที่ห้องเผาไหม้ของ วอร์เทคชั้นที่ 1 ที่ลดลงนี้ทำให้อากาศที่หมุนวนผ่าน ถูกเร่งให้มีความเร็วเพิ่มขึ้น ส่งผลให้อากาศเกิดความปั่นป่วนมากขึ้นในวอร์เทคชั้นที่ 2 นี้ และยังได้รับอิทธิพลของ recirculation ทำให้อุณหภูมิการเผาไหม้สูงขึ้นอย่างรวดเร็ว ดังรูป 6.5 (ข)



รูปที่ 6.1(ค). (ก). 0.75D (ข). 0.5D
 รูปที่ 6.5 เปรียบเทียบการกระจายอุณหภูมิภายในเตาเผาออร์เทค 2 ชั้น และ เตาเผาออร์เทค 1 ชั้น
 ที่ค่า $\Phi = 1.2$, เมื่อ $\lambda = 0.0, 0.15, 0.25$

จากการทดลองสามารถสรุปได้ คือ เตาเผาออร์เทค 2 ชั้น และ เตาเผาออร์เทค 1 ชั้น จะมีลักษณะการกระจายอุณหภูมิที่ส่วนบนของเตาเผาสม่ำเสมอใกล้เคียงกัน โดยอุณหภูมิภายในเตาเผาออร์เทค 2 ชั้น (ออร์เทคชั้นที่ 1 = 0.75D และ 0.5D) จะมีอุณหภูมิต่ำกว่าเตาเผาออร์เทค 1 ชั้น ซึ่งในกรณีนี้เหมาะสำหรับการเผาไหม้ที่มีการป้อนเชื้อเพลิงโดยตรงเข้าสู่ห้องเผาไหม้ เพราะอุณหภูมิไม่สูงมากนัก จึงสามารถใช้ Screw feed ป้อนเชื้อเพลิงแทนการใช้ Blower ที่เป่าอากาศเพื่อผสมกับเชื้อเพลิงเข้าสู่ห้องเผาไหม้ ซึ่งเป็นการประหยัดกำลังป้อนลมที่ใช้ในการทดลอง

6.3.4 การศึกษาผลของก๊าซไอเสียที่เกิดจากการเผาไหม้

จากการทดลองผลต่อก๊าซไอเสียที่เกิดจากการเผาไหม้ เมื่อปรับค่า $\Phi = 0.8, 1.0$ และ 1.2 ตามลำดับ พบว่าการเปลี่ยนแปลงของค่า Φ มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณ ก๊าซออกซิเจน, ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์, และก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ดังนี้

เมื่อ $\Phi = 0.8$ มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงไอเสียน้อยมาก โดยปริมาณก๊าซออกซิเจน, ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์, และก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ที่ได้จากการเผาไหม้มีการเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก เนื่องจากปริมาณอากาศที่ใช้ในการทดลองมากกว่าปริมาณอากาศทางทฤษฎี จึงทำให้มีปริมาณของก๊าซออกซิเจนมีมากเกินไปสำหรับการเผาไหม้ คว้นที่เกิดจากกระบวนการเผาไหม้มีสีขาวบาง ๆ ซึ่งถ้ามีขนาดเล็กสีเทาปนขาว และพบแถบบางส่วนที่ยังไม่เกิดเผาไหม้ออกจากเตาเผา วอร์เทคทำให้ได้ลอยออกมาสีดำแดง ซึ่งจากการทดลองที่ $\lambda = 0.25$ สามารถวัดค่าคาร์บอนมอนอกไซด์ต่ำสุดที่เกิดจากการเผาไหม้ได้เท่ากับ 205 ppm , ออกซิเจนเท่ากับ 1.5% และคาร์บอนไดออกไซด์เท่ากับ 18.3% ดังรูปที่ 6.6

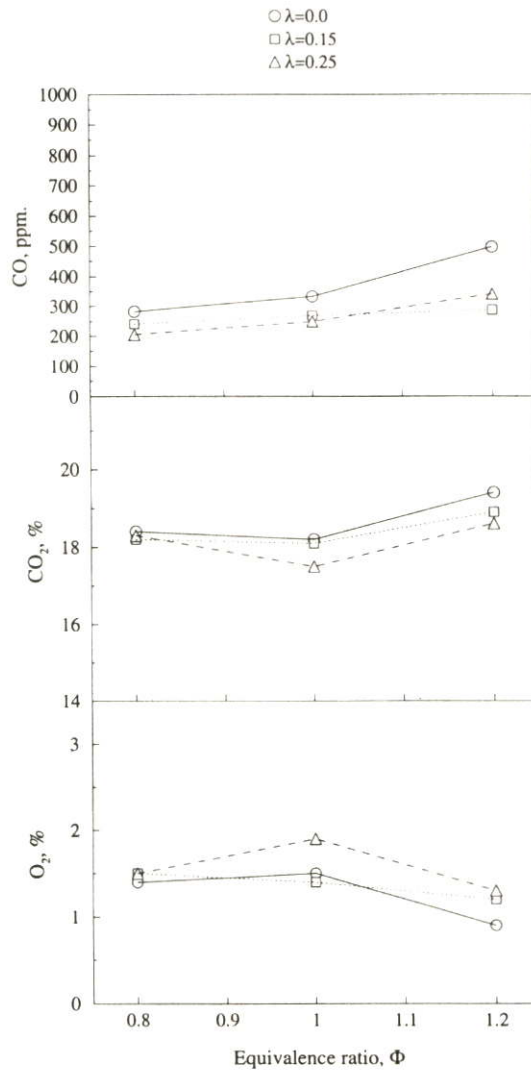
เมื่อ $\Phi = 1.0$ ปริมาณอากาศที่ใช้จริงเท่ากับปริมาณอากาศทางทฤษฎี มีผลทำให้การเผาไหม้สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น และอุณหภูมิในการเผาไหม้จึงสูงขึ้นด้วย คว้นที่ออกจากเตาเผา วอร์เทคมีสีขาวปริมาณมาก ซึ่งถ้าที่ได้มีสีดำปนเทา ซึ่งจากการทดลองที่ $\lambda = 0.25$ สามารถวัดค่าคาร์บอนมอนอกไซด์ต่ำสุดที่เกิดจากการเผาไหม้ได้เท่ากับ 250 ppm , ออกซิเจนเท่ากับ 1.9% และคาร์บอนไดออกไซด์เท่ากับ 17.5% ดังรูปที่ 6.6

เมื่อ $\Phi = 1.2$ ปริมาณอากาศที่ใช้จริงน้อยกว่าปริมาณอากาศทางทฤษฎี คว้นที่ออกจากเตาเผา วอร์เทคมีสีเทาปนขาว ซึ่งถ้าที่ได้มีขนาดใหญ่สีดำปนเทา ซึ่งอุณหภูมิที่เกิดจากการทดลองจะมีอุณหภูมิสูง เนื่องจากมีปริมาณสัดส่วนของเชื้อเพลิงในปริมาณมากกว่าอากาศ ซึ่งสังเกตได้จากรูปที่ 6.6 พบว่า ที่ค่า $\Phi = 1.2$ เพราะมีอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้น้อย การคลุกเคล้าระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงเป็นไปอย่างไม่เหมาะสม ค่า λ จึงมีผลเป็นอย่างมาก เพราะอากาศส่วนที่ 2 ที่ใช้ในการเผาไหม้ จะช่วยทำให้เกิดการคลุกเคล้าระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงในขณะที่เกิดการเผาไหม้ได้ดียิ่งขึ้น ซึ่งจากการทดลองที่ $\lambda = 0.25$ สามารถวัดค่าคาร์บอนมอนอกไซด์ต่ำสุดที่เกิดจากการเผาไหม้ได้เท่ากับ 288 ppm , ออกซิเจนเท่ากับ 1.2% และ คาร์บอนไดออกไซด์เท่ากับ 18.9% ดังรูปที่ 6.6

จากผลการทดลองพบอัตราส่วนสมมูลที่มีความเหมาะสมต่อการเผาไหม้ของเตาเผาแบบวอร์เทคเมื่อ $\lambda = 0.0, 0.15, 0.25$ คือ การปรับอัตราการไหลให้มีปริมาณอากาศที่ใช้ในการทดลองมากกว่าปริมาณอากาศทางทฤษฎี ($\Phi = 0.8$) ซึ่งจะทำให้เกิดการกระจายอุณหภูมิสม่ำเสมอ และปริมาณก๊าซไอเสียที่เกิดขึ้นอยู่ในเกณฑ์ต่ำ ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในข้างต้น

ส่วนหลังจากการเผาไหม้ พบปริมาณ ออกซิเจนที่ $\Phi = 1.0$ และ 1.2 ซึ่งปกติแล้วจะต้องไม่พบ สาเหตุเนื่องมาจาก ในการเผาไหม้ภายในเตาเผา วอร์เทค 2 ชั้น ปริมาตรภายในห้องเผาไหม้ลดลง ส่งผลให้เวลาที่ใช้ในการเผาไหม้ลดลง การหมุนวนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงภายในขณะเกิด

การเผาไหม้ จึงไม่เกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ 100% ฉะนั้นหลังจากการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นจึงมีปริมาณ ออกซิเจนเหลืออยู่ ซึ่งจากค่าที่วัดได้พบว่า ออกซิเจนที่เหลือจากการเผาไหม้มีเพียง 1-2% เท่านั้น ดังสาเหตุที่ได้กล่าวมาข้างต้น(อิทธิพลของพื้นที่ห้องเผาไหม้ที่ลดลง และ อีกสาเหตุหนึ่งอาจเกิดจากความผิดพลาดในขณะที่ทำการทดลองการเผาไหม้)



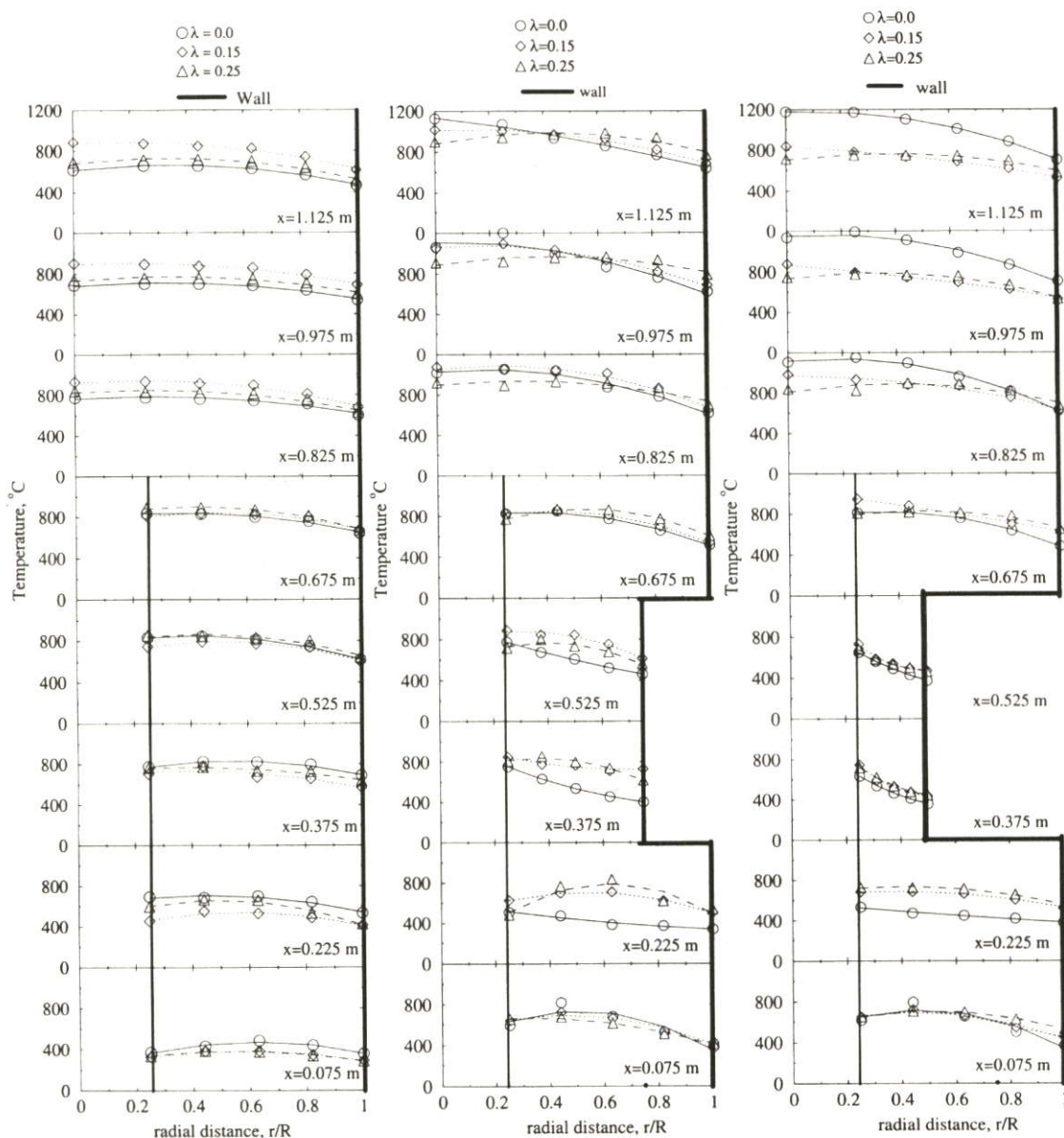
รูปที่ 6.6 แสดงความสัมพันธ์ของก๊าซที่เกิดจากการเผาไหม้ระหว่าง CO, CO₂, และ O₂ กับค่า $\Phi = 0.8, 1.0,$ และ 1.2 เมื่อ $\lambda = 0.0, 0.15, 0.25$

6.4 เตาเผาเวอร์เทค 3 ชั้น

เตาเผาเวอร์เทค 3 ชั้น ประกอบด้วย เวอร์เทคชั้นที่ 1, 2 และ 3 ซึ่งก็คือ เวอร์เทคส่วนล่าง, เวอร์เทคส่วนกลาง และเวอร์เทคส่วนบน ตามลำดับ โดยขนาดห้องเผาไหม้เวอร์เทคชั้นที่ 1 และ 3 มีขนาดเท่ากันคือ (1.0D) ส่วนเวอร์เทคชั้นที่ 2 ห้องเผาไหม้ที่ใช้จะปรับเปลี่ยนให้มีขนาดเท่ากับ 0.5D หรือ

0.75D แล้วแต่ต้องการ ดังรูปที่ 6.7 โดยทำการศึกษาอิทธิพลของ λ ที่มีผลต่อการเผาไหม้ที่ $\Phi = 0.8$, 1.0, และ 1.2

6.4.1 อิทธิพลของ λ ที่มีผลต่อการเผาไหม้เมื่อ $\Phi = 0.8$



รูปที่ 6.1(ก).

(ก). 0.75D

(ข). 0.5D

รูปที่ 6.7 เปรียบเทียบการกระจายอุณหภูมิภายในเตาเผาออร์เทค 3 ชั้น และ เตาเผาออร์เทค 1 ชั้น ที่ค่า $\Phi = 0.8$, เมื่อ $\lambda = 0.0, 0.15, 0.25$

รูปที่ 6.7(ก) การเผาไหม้ที่เกิดขึ้นในส่วนแรก ออร์เทคชั้นที่ 1 โดยเริ่มมีการเผาไหม้ ซึ่งได้รับอิทธิพลของอากาศส่วนที่ 2 ทำให้อุณหภูมิที่เกิดขึ้นสูงขึ้น แต่ไม่สม่ำเสมอ โดยใช้ค่า $\lambda = 0.25$ พบว่าอุณหภูมิกระจายอยู่ในช่วง $500-800^{\circ}\text{C}$ หลังจากเริ่มเผาไหม้ในออร์เทคชั้นที่ 2 (ห้องเผาไหม้มี

ขนาดเล็กลง) การกระจายอุณหภูมิภายในยังคงได้รับอิทธิพลของอากาศส่วนที่ 2 โดยมีอุณหภูมิสูงสุดอยู่ในช่วง $700-800^{\circ}\text{C}$ เนื่องจากพื้นที่ภายในห้องเผาไหม้ที่แคบลงนี้ และการได้รับอากาศส่วนที่ 2 ทำให้อากาศในห้องเผาไหม้มีความเร็วหมุนวนมาก เปรียบเหมือนกับอากาศภายในตุ๊กเร่งด้วยแรงเหวี่ยงจากลมหมุนวน ทำให้ความเร็วในแนวสัมผัสเพิ่มขึ้นเกิดความปั่นป่วนอย่างรุนแรง ซึ่งพบว่าอากาศในวอร์เทคชั้นที่ 3 มีอุณหภูมิสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งเป็นพฤติกรรมของอากาศในลักษณะเดียวกับรูปที่ 6.3-6.5 ในหัวข้อที่ 6.3 แต่มีความปั่นป่วนรุนแรงมากยิ่งขึ้น ซึ่งเกิดจากการที่ได้รับอิทธิพลของอากาศร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้ที่สมบูรณ์กว่าในวอร์เทคชั้นที่ 1 และ 2 โดย Recirculation ที่เกิดใน วอร์เทคชั้นที่ 3 มีส่วนช่วยให้อากาศดังกล่าวมีความรุนแรงของการหมุนวนไปมายิ่งขึ้น จึงเป็นสาเหตุให้การกระจายอุณหภูมิภายในสูงขึ้นรวดเร็ว บริเวณส่วนบนของวอร์เทคชั้นที่ 3 ที่ $\lambda = 0.0$ (ไม่มีการให้อากาศส่วนที่ 2) เนื่องจากในขณะนั้น อากาศส่วนที่ 1 มีค่า 100% ทำให้อากาศที่ทำให้เกิดการหมุนวนจึงมีความเร็วสูง เมื่ออากาศไหลผ่านพื้นที่แคบ อากาศจึงถูกเร่งให้มีความรุนแรงในการหมุนวนมากขึ้น การคลุกเคล้าระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงภายในเป็นไปอย่างทั่วถึง การเผาไหม้จึงมีความสมบูรณ์มากขึ้น ซึ่งมีอุณหภูมิสูงสุดที่กึ่งกลางเตาเผาอยู่ในช่วง $900-1000^{\circ}\text{C}$

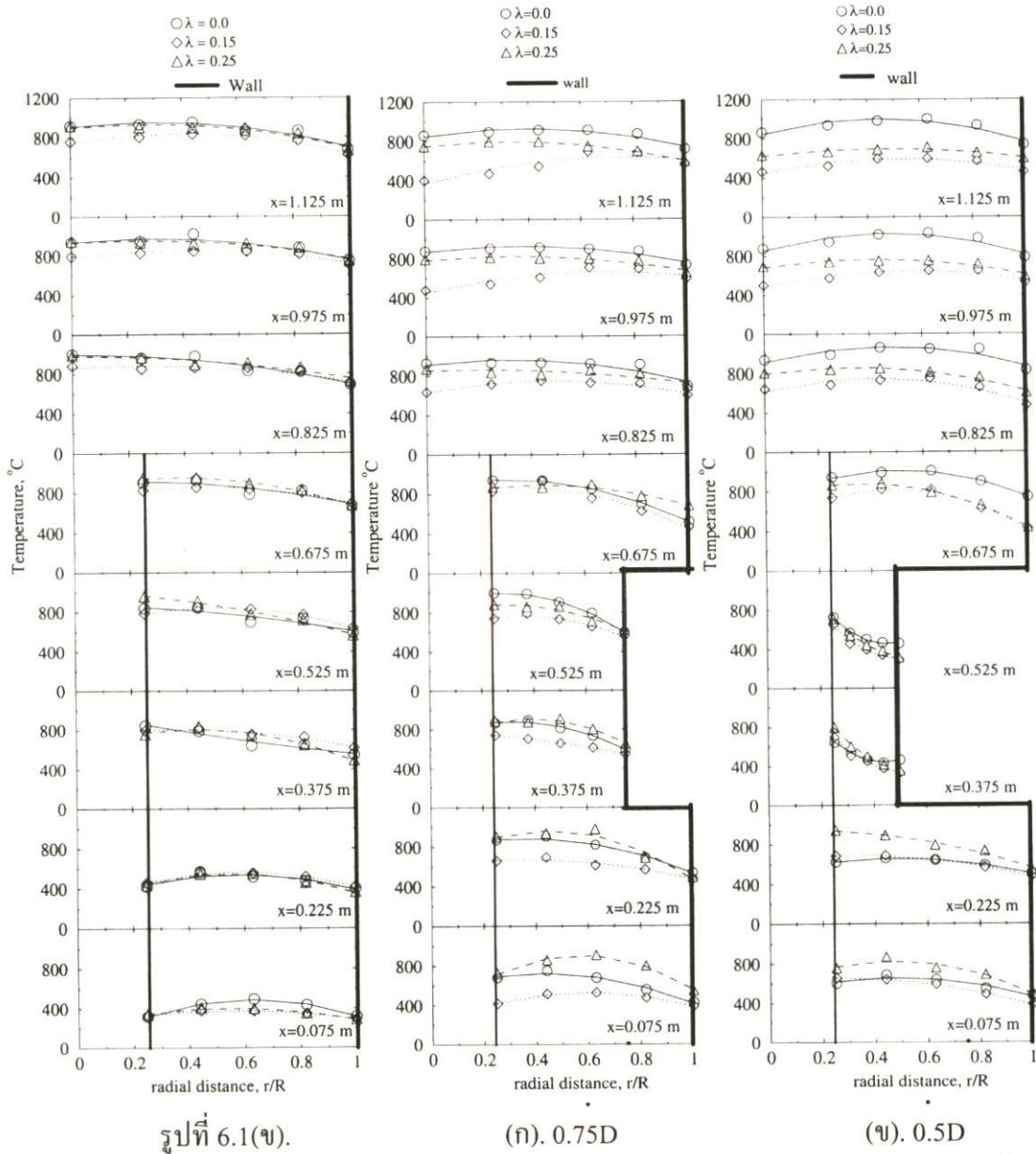
รูปที่ 6.7(ข) ซึ่งเป็นกรณีที่วอร์เทคส่วนที่ 2 มีขนาดเท่ากับ 0.5D โดยมีลักษณะการกระจายในลักษณะเดียวกับ รูปที่ 6.7(ก) แต่อุณหภูมิที่เกิดขึ้นสูงกว่าทุกชั้นของวอร์เทค โดยวอร์เทคชั้นที่ 1 มีอุณหภูมิต่ำกว่าอยู่ในช่วง $700-800^{\circ}\text{C}$ แต่ในส่วนบนของวอร์เทคชั้นที่ 2 อุณหภูมิลดลงเนื่องจากมีการเผาไหม้ในชั้นนี้น้อย อุณหภูมิภายในลดต่ำลงอยู่ในช่วง $400-600^{\circ}\text{C}$ โดยอากาศส่วนที่ 2 มีผลต่อการกระจายอุณหภูมิภายในน้อยมาก ซึ่งอุณหภูมิภายในต้องสูญเสียความร้อนในการอุ่นอากาศส่วนที่ 2 ที่เข้ามาใหม่อุณหภูมิจึงลดลง โดยห้องเผาไหม้ใน วอร์เทคชั้นที่ 2 ที่มีพื้นที่แคบลงนี้ทำให้อากาศถูกเร่ง ซึ่งจะช่วยเพิ่มความเร็วในการหมุนวนไปมามากยิ่งขึ้น ส่งผลให้การหมุนวนของอากาศรุนแรงและปั่นป่วนยิ่งกว่าที่เกิดใน รูปที่ 6.7(ก) การกระจายอุณหภูมิในวอร์เทคชั้นที่ 3 พบว่าสูงกว่า รูปที่ 6.7(ก) ซึ่งที่ $\lambda = 0.0$ มีอุณหภูมิสูงสุดอยู่ในช่วง $900-1,150^{\circ}\text{C}$ ที่บริเวณส่วนบนของวอร์เทคชั้นที่ 3

6.4.2 อิทธิพลของ λ ที่มีผลต่อการเผาไหม้เมื่อ $\Phi = 1.0$

รูปที่ 6.8 (ก) พฤติกรรมของการกระจายอุณหภูมิภายในเตาเผาเป็นตามเหตุผลลักษณะเดียวกับรูปที่ 6.7(ก) ซึ่งมีการกระจายอุณหภูมิที่สม่ำเสมอในแนวรัศมี แต่มีอุณหภูมิต่ำกว่ารูปที่ 6.7(ก) โดยการกระจายอุณหภูมิใน วอร์เทคชั้นที่ 1 อยู่ระหว่าง $700-850^{\circ}\text{C}$ และ วอร์เทคชั้นที่ 2 จนถึง วอร์เทคชั้นที่ 3 อุณหภูมิอยู่ระหว่าง $800-900^{\circ}\text{C}$ ตามลำดับ

รูปที่ 6.8 (ข) พฤติกรรมของการกระจายอุณหภูมิภายในเป็นไปตามเหตุผลเดียวกับ รูปที่ 6.7 (ข) โดยใน วอร์เทคชั้นที่ 1 อุณหภูมิจะอยู่ระหว่าง $700-800^{\circ}\text{C}$ และ วอร์เทคชั้นที่ 2 มีอุณหภูมิลดลงเช่น

เดียวกับ 6.7 (ข) และที่วอร์เทคชั้นที่ 3 จนถึงบริเวณส่วนบนของวอร์เทคชั้นที่ 3 มีอุณหภูมิอยู่ระหว่าง $800-1000^{\circ}\text{C}$



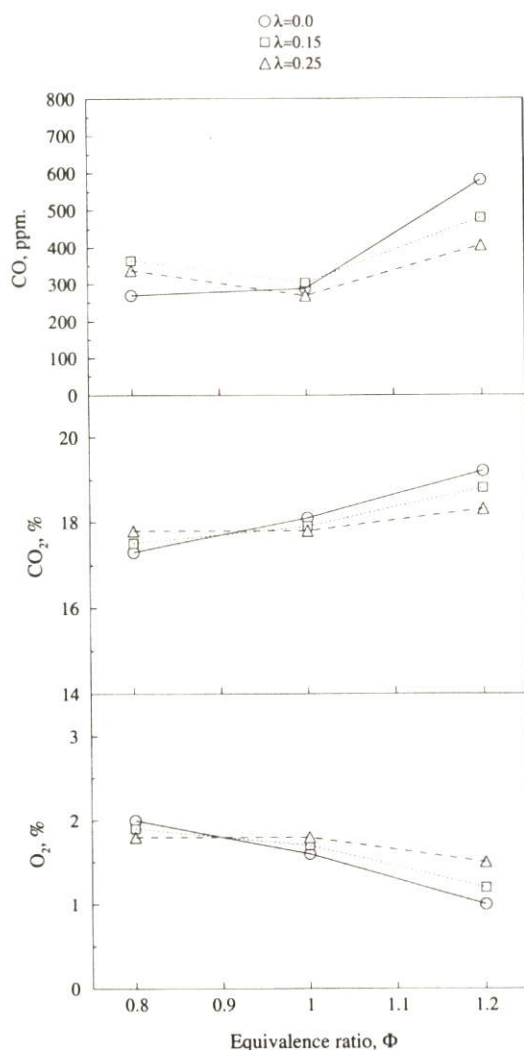
รูปที่ 6.8 เปรียบเทียบการกระจายอุณหภูมิภายในเตาเผาออร์เทค 3 ชั้น และ เตาเผาออร์เทค 1 ชั้น
ที่ค่า $\Phi = 1.0$, เมื่อ $\lambda = 0.0, 0.15, 0.25$

6.4.3 อิทธิพลของ λ ที่มีผลต่อการเผาไหม้เมื่อ $\Phi = 1.2$

รูปที่ 6.9 (ก) การกระจายอุณหภูมิภายในคล้ายรูปที่ 6.8(ก) ซึ่งได้รับอิทธิพลของอากาศส่วนที่ 2 ซึ่งจะช่วยในการหมุนวนของอากาศกับเชื้อเพลิงได้มากขึ้น ซึ่งอุณหภูมิตั้งแต่ วอร์เทคชั้นที่ 1 จนถึง ส่วนบนของวอร์เทคชั้นที่ 3 อยู่ระหว่าง $700-1,000^{\circ}\text{C}$

6.4.4 การศึกษาผลของก๊าซไอเสียที่เกิดจากการเผาไหม้

จากการทดลองผลต่อก๊าซไอเสียที่ได้จากการเผาไหม้ เมื่อปรับอัตราการไหลของอากาศให้ $\lambda = 0.0, 0.15,$ และ 0.25 ตามลำดับ พบว่าการเปลี่ยนแปลง λ มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณ ก๊าซออกซิเจน, ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์, และก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ ดังนี้



รูปที่ 6.10 แสดงความสัมพันธ์ของก๊าซที่เกิดจากการเผาไหม้ระหว่าง CO, CO₂, และ O₂ กับค่า $\Phi = 0.8, 1.0,$ และ 1.2 เมื่อ $\lambda = 0.0, 0.15, 0.25$

เมื่อ $\Phi = 0.8$ มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงไอเสียเล็กน้อยมาก โดยปริมาณก๊าซออกซิเจน, ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์, และก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ ที่ได้จากการเผาไหม้มีการเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก เนื่องจากปริมาณอากาศที่ใช้ในการทดลองมากกว่าปริมาณอากาศทางทฤษฎี จึงทำให้มีปริมาณของก๊าซออกซิเจนมีมากเกินไปสำหรับการเผาไหม้ คว้นที่เกิดจากกระบวนการเผาไหม้มีสีขาบบาง ๆ ขี้เถ้ามีขนาดเล็กสีเทาปนขาว (อนุภาคเล็กกว่าขี้เถ้าที่ได้จากเตาเผาออร์เทค 1 ชั้น) และพบ

แถบบางส่วนที่ยังไม่เกิดเผาไหม้ออกจากเตาเผาออร์เทคทำให้เถ้าลอยออกมามีสีดําแดง ซึ่งจากการทดลองที่ $\lambda = 0.0$ สามารถวัดค่าคาร์บอนมอนนอกไซด์ต่ำสุดที่เกิดจากการเผาไหม้ได้เท่ากับ 270 ppm, ออกซิเจนเท่ากับ 2.0% และ คาร์บอนไดออกไซด์เท่ากับ 17.3 % ดังรูปที่ 6.10

เมื่อ $\Phi = 1.0$ ปริมาณอากาศที่ใช้จริงเท่ากับปริมาณอากาศทางทฤษฎี มีผลทำให้การเผาไหม้สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น และอุณหภูมิในการเผาไหม้จึงสูงขึ้นด้วย คว้นที่ออกจากเตาเผาออร์เทคมีสีขาวปริมาณน้อยมาก ขี้เถ้าที่ได้มีขนาดเล็กสีเทาปนดํา(คล้ายกับขี้เถ้าที่ได้จากเตาเผาออร์เทค 1 ชั้น) ซึ่งจากการทดลองที่ $\lambda = 0.25$ สามารถวัดค่าคาร์บอนมอนนอกไซด์ต่ำสุดที่เกิดจากการเผาไหม้ได้เท่ากับ 288 ppm, ออกซิเจนเท่ากับ 1.6% และ คาร์บอนไดออกไซด์เท่ากับ 18.1% ดังรูปที่ 6.10

เมื่อ $\Phi = 1.2$ ปริมาณอากาศที่ใช้จริงน้อยกว่าปริมาณอากาศทางทฤษฎี คว้นที่ออกจากเตาเผาออร์เทคมีสีเทาปนขาวปริมาณพอประมาณ ขี้เถ้าที่ได้มีขนาดใหญ่สีดําปนเทา(คล้ายกับขี้เถ้าที่ได้จากเตาเผาออร์เทค 1 ชั้น) ซึ่งอุณหภูมิที่เกิดจากการทดลองจะมีอุณหภูมิสูง เนื่องจากมีปริมาณสัดส่วนของเชื้อเพลิงในปริมาณมากกว่าอากาศ ซึ่งสังเกตได้จากรูปที่ 6.10 พบว่า ค่า λ มีผลเพียงเล็กน้อยต่อค่า $\Phi = 0.8$ และ 1.0 เพราะที่สภาวะนี้ อากาศที่ใช้ในการทดลองมีปริมาณมากเพียงพอต่อการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ จึงไม่ส่งผลกระทบต่อมากนัก แต่ต่างกับที่ค่า $\Phi = 1.2$ เพราะมีอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้น้อย การคลุกเคล้าระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงเป็นไปอย่างไม่เหมาะสม ค่า λ จึงมีผลเป็นอย่างมาก เพราะอากาศส่วนที่ 2 ที่ใช้ในการเผาไหม้จะช่วยทำให้เกิดการคลุกเคล้าระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงในขณะที่เกิดการเผาไหม้ได้ดียิ่งขึ้น ซึ่งจากการทดลองที่ $\lambda = 0.25$ สามารถวัดค่าคาร์บอนมอนนอกไซด์ต่ำสุดที่เกิดจากการเผาไหม้ได้เท่ากับ 405 ppm, ออกซิเจนเท่ากับ 1.5 % และ คาร์บอนไดออกไซด์เท่ากับ 18.3 % ดังรูปที่ 6.10

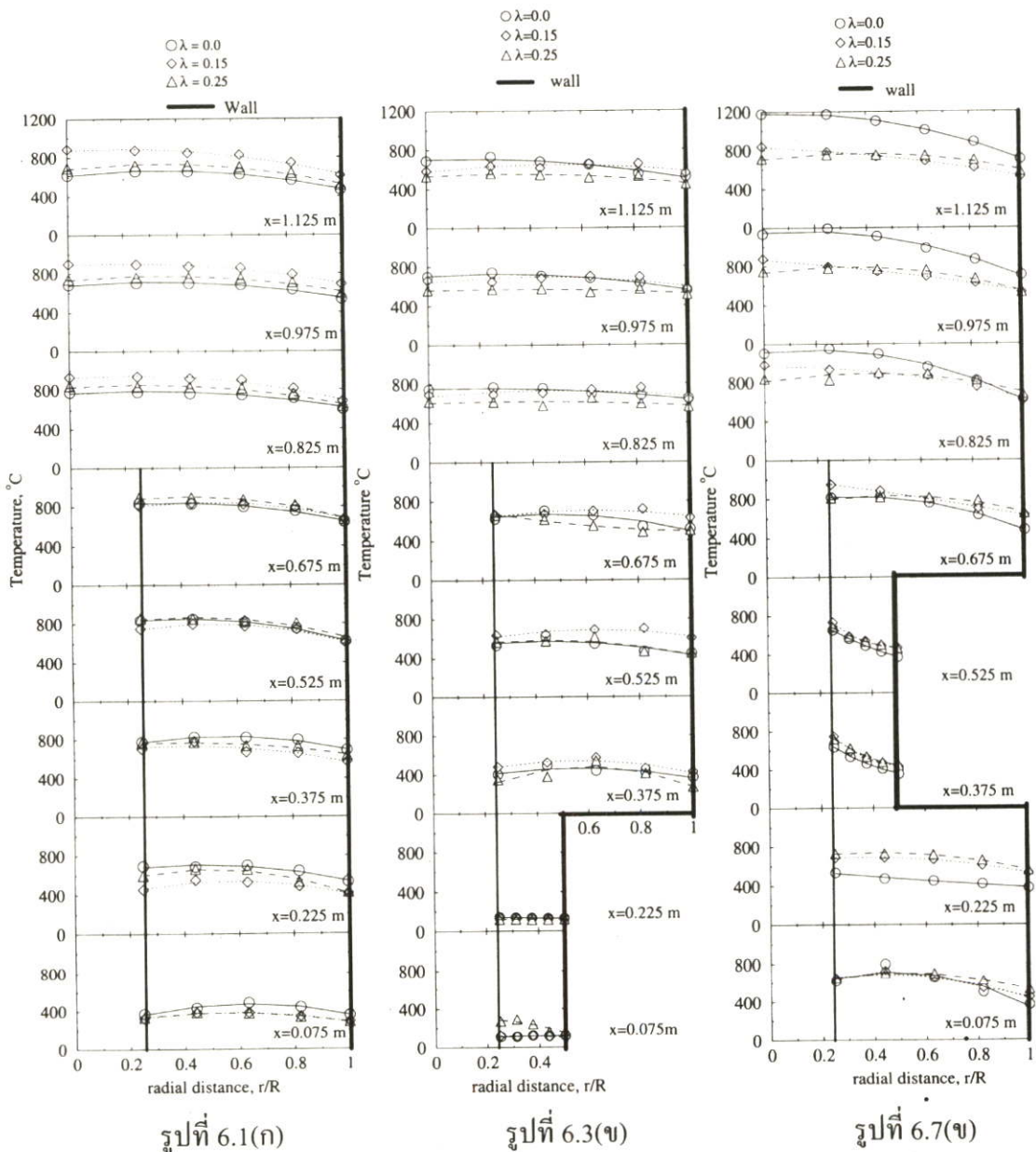
จากผลการทดลองพบว่าอัตราส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศทฤษฎีต่ออัตราการไหลของอากาศทั้งหมดที่มีความเหมาะสมต่อการเผาไหม้ของเตาเผาแถบแบบออร์เทค เมื่อ $\Phi = 0.8, 1.0, 1.2$ คือ การปรับอัตราการไหลของอากาศ ให้อัตราส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศทฤษฎีต่ออัตราการไหลของอากาศทั้งหมดเท่ากับ 0.25 (ใช้ปริมาณอากาศส่วนที่ 2 เป็น 25 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณอากาศทั้งหมด)จะช่วยทำให้เกิดการกระจายตัวของแถบภายในเตาเผาออร์เทคมากขึ้น แถบจึงไม่สามารถจับตัวเป็นก้อนได้ทำให้เกิดการผสมหรือการสัมผัสกันอย่างทั่วถึงระหว่างเชื้อเพลิงแถบกับอากาศ และ การเคลื่อนที่แบบหมุนวนภายในเตาเผาออร์เทค จะช่วยทำให้แถบมีเพิ่มระยะเวลาของแถบที่อยู่ภายในเตาเผาออร์เทค ซึ่งจะทำให้เกิดการกระจายอุณหภูมิที่สูง

ส่วนหลังจากการเผาไหม้ พบปริมาณ ออกซิเจนที่ $\Phi = 1.0$ และ 1.2 ซึ่งปกติแล้วจะต้องไม่พบ สาเหตุเนื่องมาจาก ในการเผาไหม้ภายในเตาเผาออร์เทค 3 ชั้น ปริมาตรภายในห้องเผาไหม้ลดลง ส่งผลให้เวลาที่ใช้ในการเผาไหม้ลดลง การหมุนวนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงภายในขณะเกิดการเผาไหม้ จึงไม่เกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ 100% ฉะนั้นหลังจากการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นจึงมี

ปริมาณออกซิเจนเหลืออยู่(น้อยกว่าออกซิเจนที่เกิดจากการเผาไหม้เตาเผาออร์เทค 2 ชั้น) ซึ่งจากค่าที่วัดได้พบว่า ออกซิเจนที่เหลือจากการเผาไหม้มีเพียง 1-1.5% เท่านั้น ดังสาเหตุที่ได้กล่าวมาแล้ว (อิทธิพลของพื้นที่ห้องเผาไหม้ที่ลดลงของออร์เทคชั้นที่ 2 และ อีกสาเหตุหนึ่งอาจจะเกิดจากความผิดพลาดในขณะที่ทำการทดลองการเผาไหม้)

6.5 เปรียบเทียบเตาเผาออร์เทค 1 ชั้น, 2 ชั้น และ 3 ชั้น

จากการทดลองการเผาไหม้เตาเผาออร์เทค 1 ชั้น, 2 ชั้น และ 3 ชั้น พบว่าที่อากาศส่วนเกิน($\Phi = 0.8$) จะเกิดอุณหภูมิการเผาไหม้สูงสุด ในการทดลอง



รูปที่ 6.11 เปรียบเทียบการกระจายอุณหภูมิภายในเตาเผาออร์เทค 1 ชั้น, 2 ชั้น และ 3 ชั้น

ที่ค่า $\Phi = 0.8$, เมื่อ $\lambda = 0.0, 0.15, 0.25$

จากรูปที่ 6.11 ที่ $\Phi = 0.8$ สามารถสรุปได้ดังนี้คือ

เตาเผาออร์เทค 1 ชั้น ที่ $\lambda = 0.15$ อุณหภูมิการเผาไหม้สูงสุดเท่ากับ 925.6°C ดังรูปที่ 6.1(ก)

เตาเผาออร์เทค 2 ชั้น(ออร์เทคชั้นที่ 1 เท่ากับ 0.5D) ที่ $\lambda = 0.0$ อุณหภูมิการเผาไหม้สูงสุดเท่ากับ 752.8°C ดังรูปที่ 6.3(ข)

เตาเผาออร์เทค 3 ชั้น(ออร์เทคชั้นที่ 2 เท่ากับ 0.5D) ที่ $\lambda = 0.0$ อุณหภูมิการเผาไหม้สูงสุดเท่ากับ $1,192.9^{\circ}\text{C}$ ซึ่งมีอุณหภูมิสูงขึ้นประมาณ 50% ดังรูปที่ 6.7(ข)

ซึ่งจากผลการทดลองเตาเผาที่ให้อุณหภูมิการเผาไหม้สูงสุด คือ เตาเผาออร์เทค 3 ชั้น, เตาเผาออร์เทค 1 ชั้น และเตาเผาออร์เทค 2 ชั้น ตามลำดับ ดังสาเหตุที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 6

บทที่ 7

สรุปและข้อเสนอแนะ

7.1 สรุป

วิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการออกแบบและสร้างและทดสอบเตาเผาออร์เทคเพื่อใช้ในการเผาไหม้ชีวมวลที่มาจากพืช โดยเฉพาะเชื้อเพลิงชีวมวลที่ใช้ในการทดลอง คือ แกลบที่มีปริมาณอยู่มากภายในประเทศไทยและราคาถูก เพื่อนำมาเป็นพลังงานทดแทนแหล่งพลังงานเดิมที่ได้จากน้ำมัน และฟอสซิลจำพวกถ่านหินที่ต้องนำเข้าจากต่างประเทศ ซึ่งมีมูลค่าสูงและมีปริมาณลดน้อยลงเรื่อย ๆ ในปัจจุบัน จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

1. การศึกษาเกี่ยวกับขั้นของเตาเผา (Multistaging Combustor) ที่มีผลต่อการกระจายอุณหภูมิการเผาไหม้ จากการทดลอง พบว่าการเพิ่มขั้นเตาเผาออร์เทคในการเผาไหม้โดยการเปลี่ยนขนาดของออร์เทคขั้นที่ 1 และ 2 ให้มีขนาดเล็กกว่าห้องเผาไหม้ของเตาเผาออร์เทค 1 ขั้น นั้นมีผลต่อการกระจายอุณหภูมิภายในเตาเผาและอุณหภูมิสูงสุดที่เกิดจากการเผาไหม้ ซึ่งจากผลการทดลองสามารถสรุปพฤติกรรมของอุณหภูมิที่เปลี่ยนไปได้คือ การเผาไหม้ของเตาเผาออร์เทค 2 ขั้น ซึ่งมีขนาดของออร์เทคขั้นที่ 1 เท่ากับ $0.75D$ และ $0.5D$ ส่งผลให้การกระจายตัวของอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ในขั้นนี้ต่ำ และมีการกระจายในช่วงแคบ ๆ เชื้อเพลิงส่วนใหญ่ไม่เกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้เนื่องจากพื้นที่ห้องเผาไหม้น้อยลง เป็นผลทำให้การคลุกเคล้าระหว่างเชื้อเพลิงเป็นไปอย่างไม่ทั่วถึง ประกอบกับเวลาที่เกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้สั้นเกินไป จึงทำให้อุณหภูมิที่ได้ต่ำ(เหมาะสำหรับการป้อนเชื้อเพลิงโดยตรงเข้าสู่ห้องเผาไหม้) แต่หลังจากเกิดการเผาไหม้ไปสู่ย้งออร์เทคขั้นที่ 2 ของเตาเผา ทำให้อุณหภูมิสูงขึ้นเรื่อย ๆ โดยการกระจายตัวของอุณหภูมิก่อนข้างสม่ำเสมออยู่ระหว่าง $600-800^{\circ}\text{C}$ ที่กึ่งกลางเตาเผา(ซึ่งมีอุณหภูมิต่ำกว่าเตาเผาออร์เทค 1 ขั้นที่มีอุณหภูมิอยู่ในช่วง $700-900^{\circ}\text{C}$) ในกรณีการเผาไหม้เตาเผาออร์เทค 3 ขั้น พบว่า อุณหภูมิในขณะที่เริ่มการเผาไหม้ ออร์เทคขั้นที่ 1 จะมีอุณหภูมิสูงกว่าการเผาไหม้ในเตาเผาออร์เทค 2 ขั้น แต่หลังจากที่เชื้อเพลิงเริ่มการเผาไหม้ผ่านออร์เทคขั้นที่ 2 (ของเตาเผาออร์เทค 3 ขั้น) ซึ่งเป็นส่วนที่มีห้องเผาไหม้ที่แคบไปยังบริเวณส่วนบนของออร์เทคขั้นที่ 3 พบว่าอุณหภูมิสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยการกระจายตัวของอุณหภูมิต่ำสม่ำเสมออยู่ระหว่าง $900-1,100^{\circ}\text{C}$ ที่กึ่งกลางเตาเผา สาเหตุที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากในขณะที่เริ่มการเผาไหม้ใน ออร์เทคขั้นที่ 1 เตาเผาที่มีอุณหภูมิก่อนข้างสูงเพียงพอสำหรับการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง ประกอบกับเชื้อเพลิงบางส่วนเริ่มมีการเผาไหม้ไปแล้วอุณหภูมิในขณะนั้นจึงค่อนข้างสูง และ ยังได้รับผลจากการเร่งอากาศของ ออร์เทคขั้นที่ 2(ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว) ซึ่งทำให้การไหลของอากาศเกิดปรากฏการณ์ Recirculation ส่งผลให้อากาศเกิดการไหลหมุนวนอย่างปั่นป่วนรุนแรงมากยิ่งขึ้น ซึ่งเป็นผลให้อุณหภูมิของเชื้อเพลิงที่ติดบริเวณผิวของเชื้อเพลิงจึงหลุดออก ทำให้ออกซิเจนในอากาศเข้า

ทำปฏิกิริยากับพื้นผิวของเชื้อเพลิงได้อย่างทั่วถึง อุณหภูมิที่เกิดขึ้นจึงสูงมาก โดยมีอุณหภูมิสูงกว่า 2 กรณีแรก คือ เตาเผาออร์เทค 1 ชั้นและ 2 ชั้น ดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น

2. ศึกษาถึงอัตราส่วนสมมูล (Equivalence Ratio, Φ)ที่เหมาะสมต่อการเผาไหม้ จากการคำนวณพบว่าอัตราส่วนระหว่างอากาศต่อเชื้อเพลิงแกลบทางทฤษฎีเท่ากับ 5.372:1 โดยน้ำหนัก(ซึ่งงานวิจัยนี้กำหนดให้อัตราการไหลเชื้อเพลิงแกลบให้คงที่เท่ากับ 0.3 kg/min) โดยจะทำการทดลองที่ $\Phi = 0.8, 1.0$ และ 1.2 จากการทดลองพบว่าเมื่อปริมาณอากาศที่ใช้ในการทดลองมากกว่าปริมาณอากาศทางทฤษฎี($\Phi = 0.8$)สามารถทำให้การกระจายอุณหภูมิภายในเตาเผาสูงกว่ากรณี $\Phi = 1.0$ และ 1.2 และในการศึกษาถึงอัตราส่วนของปริมาณการไหลของอากาศต่อปริมาณอากาศทั้งหมด(λ)ที่เหมาะสมต่อการเผาไหม้ โดยทำการทดลองที่ $\lambda = 0.0, 0.15$ และ 0.25 โดยการเพิ่มปริมาณอากาศส่วนที่ 2 ที่มีปริมาณมากขึ้นตามอัตราส่วนที่ระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงที่ใช้ในการเผาไหม้ การจ่ายอากาศส่วนที่ 2 จะถูกจ่ายอากาศในแนวสัมผัส (tangent) กับผนังด้านในของเตาเผาออร์เทคซึ่งจะช่วยทำให้เกิดการเผาไหม้แบบหมุนวนภายในเตาเผาออร์เทค ดังนั้นเมื่อ λ มากขึ้นจะเป็นการเพิ่มการเผาไหม้แบบหมุนวนมากขึ้นตาม ซึ่งจะส่งผลดีต่อการเผาไหม้ 2 ประการหลักๆ คือ ประการแรกจะช่วยทำให้เกิดการผสมหรือการสัมผัสกันอย่างทั่วถึงระหว่างเชื้อเพลิงแกลบกับอากาศมากขึ้น ประการที่ 2 เป็นการเพิ่มระยะเวลาในการเผาไหม้ภายในเตาเผาออร์เทคให้นานมากขึ้น ทำให้เกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้สมบูรณ์มากขึ้น

3. ขบวนการเผาไหม้ในทางปฏิบัติจริง ๆ จะไม่สามารถทำให้เกิดการผสมกันอย่างสมบูรณ์ ดังนั้น การเผาไหม้จะเกิดขึ้นได้ดีก็โดย การใช้อัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงที่มีค่ามากกว่าทางทฤษฎี และค่าอัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงนี้ยังขึ้นอยู่กับผสมกันได้ดีมากน้อยระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิง

7.2 ข้อเสนอแนะ

เนื่องจากเตาเผาออร์เทคหลายชั้นนี้ เป็นงานวิจัยที่พัฒนาจากเตาเผาออร์เทคแบบเดิมในอดีต ซึ่งการทดลองได้มุ่งเน้นในการศึกษาการกระจายอุณหภูมิสูงสุดภายในเตาเผาออร์เทคหลายชั้น สังเกตได้ว่ารอยที่ออกจากเตา ควัน ที่เกิดจากการเผาไหม้ซึ่งเป็นการควบคุมในระดับหนึ่งฉะนั้นแล้วควรมีการศึกษาถึงตัวแปรอื่นๆ เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการออกแบบให้ได้เตาเผาออร์เทคที่มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น เช่น

1. ศึกษาถึงขนาดของเตาเผาไหม้โดยการเพิ่มขั้น(Multistage)ในการเผาไหม้เพิ่มขึ้นอีก
2. ศึกษาถึงตำแหน่งการฉีดอากาศส่วนที่ 2 ให้แก่เตาเผาที่มีผลต่อการกระจายอุณหภูมิภายในเตา และอุณหภูมิสูงสุดที่เกิดจากการเผาไหม้
3. ศึกษาถึงมุมในการฉีดอากาศส่วนที่ 2 ควรทำมุม 30-45 องศา กับผนังเตาเผา

4. ศึกษาถึงการออกแบบระบบการป้อนเชื้อเพลิงโดยตรงแก่เตาเผา เพื่อลดการใช้ลมในการพาเชื้อเพลิงเข้าสู่ห้องเผาไหม้ และลดการติดขัดของเชื้อเพลิงกลับที่ท่อผสมระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิง ในกรณีอากาศส่วนที่ 1 มีอากาศน้อย
5. ศึกษาถึงความร้อนสูญเสียในขณะเกิดการเผาไหม้ เช่น การหุ้มฉนวน, การติดตั้งอุปกรณ์การทดลองเครื่องมือวัด
6. ต่อระบบแลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อนำไปใช้งาน
7. ศึกษาถึงการใช้เชื้อเพลิงชีวมวลชนิดอื่นๆ เช่น ชี้อัลกอฮอล์ ฟางข้าว ชานอ้อยกับเตาเผาออร์เทค

เอกสารอ้างอิง

- [1] Promvonge, P., Silapabanleng K., Experimental Study of Combustion Characteristics in a Rice Husk Fired Vortex Combustor, Proceedings of IECEC'01 36th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference, July 29-August 2, Sarannah, Georgia, 2001.
- [2] Pongjet promvonge, "A Low Emission Annular vortex Combustor Firing Rice Husk Fuel: Part II – Experiment Investigation" The First Regional Conference on Energy Technology Towards a Clean Environment, 1st-2nd December 2000 The Empress Hotel, Chang Mai, Thailand.
- [3] พงษ์เจต พรหมวงศ์ และ คณะ (2543) “ การศึกษาเชิงทดลองของการกระจายอุณหภูมิในเตาเผาแบบบอร์เทค ”วารสารพระจอมเกล้าลาดกระบัง ปีที่ 8 ฉบับที่ 3 (ธันวาคม), หน้า 19-24.
- [4] Sen Nieh and Tim T. Fu, “Development of a Non-Slagging Vortex Combustor (VC) for Space/Water Heating Applications” Proc. 5th International Coal Conf., 1988, pp. 761-768.
- [5] Stephen R. Turns , “An Introduction to Combustion (Concepts and Applications), International Editions, 1996 , pp. 19.
- [6] นิวัติ พิริยะรุ่งโรจน์ “การศึกษาเชิงทดลองของเตาเผาแบบบอร์เทค” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2544.
- [7] สมศักดิ์ โพธิ์ถวิลเกียรติ “อิทธิพลของขนาดของเกลบต่อคุณลักษณะการเผาไหม้ในเตาเผาแบบบอร์เทค” การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 15, 28-30 พฤศจิกายน 2544, หน้า CE 50-54.
- [8] สุภชัย เลื่อนลอย “การตรวจสอบเชิงทดลองของคุณลักษณะการเผาไหม้เกลบที่มีความชื้น” การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 15, 28-30 พฤศจิกายน 2544, หน้า CE 60-65.
- [9] มนต์ชัย กาทอง “ อุณหภูมิพลศาสตร์ 2 ” กองวิชาวิศวกรรมเครื่องกลเรือ โรงเรียนนายเรือ, กันยายน 2537, หน้า 353-354 .
- [10] อภิชัย เทอดเทียนวงษ์ “เตาเผาไหม้ชีวมวลแบบฟลูอิดไดซ์เบด” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชา วิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2528.
- [11] ศศิวิมล สูงสว่าง “การเผาไหม้เกลบในเตาฟลูอิดไดซ์เบด” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2520.

- [12] สุพจน์ นำนานาโชค “การเผาไหม้จี้เปลี่ยในห้องเผาไหม้แบบไซโคลนชนิดอากาศเข้าหลายช่องทาง” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2536
- [13] David G. Sloan, Philip J. Smith and L. Douglas Smooth “ Modeling of Swirl in Turbulent Flow Systems” *Energy Combustion Sci*, 1986, Vol. 12, pp. 163-250.
- [14] Jian Zhang and Sen nieh “ Numerical Simulation of the Effects of Center Tube and Multiple Air Injection on the Gas Flow Field in a Vortex Combustor” *Combust. Sci. and Tech*, 1992, Vol. 88, pp. 43-57.
- [15] สมศักดิ์ กิรติวุฒิสเรษฐ “หลักการและการใช้งานเครื่องมือวัดอุตสาหกรรม” พิมพ์ครั้งที่ 3, สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี(ไทย-ญี่ปุ่น), 2539
- [16] สุวิทย์ เตีย และ คณะ(2542) “การเผาไหม้ชีวมวลในเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบด” วารสารวิจัยและพัฒนา มจร. ปีที่ 22 ฉบับที่ 2 พฤษภาคม-สิงหาคม, หน้า 47-63

ภาคผนวก ก

คุณสมบัติของเชื้อเพลิงแกลบ (Rice Husk)

แกลบเป็นผลพลอยได้จากการสีข้าว ในการสีข้าวเปลือก 1 ตัน จะได้แกลบออกมาทั้งหมดประมาณ 220 กิโลกรัม หรือคิดเป็นร้อยละ 22 สำหรับประเทศไทยประเมินได้ว่าในแต่ละปีจะมีแกลบประมาณ 4.4-4.6 ล้านตัน มีศักยภาพเชิงความร้อนเทียบเท่ากับการใช้น้ำมันดิบ 1.46-1.53 ล้านตัน แต่ตามความเป็นจริงถูกนำมาใช้ในครัวเรือนและอุตสาหกรรมทั่วไปเพียงร้อยละ 12 เท่านั้น ทั้งนี้เพราะวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรเหล่านี้อยู่กระจัดกระจาย มีความหนาแน่นไม่มากเป็นผลให้การขนส่งมีราคาแพง ปัจจุบันการใช้แกลบเป็นพลังงานอยู่ในวงจำกัดปริมาณการใช้แกลบน้อย โดยที่แกลบอาจนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงได้หลายวิธี เช่น ใช้เป็นเชื้อเพลิงโดยตรงในเตาเผา เพื่อผลิตความร้อนให้หม้อน้ำเพื่อผลิตไฟฟ้า ใช้ผลิตแก๊สเพื่อใช้กับเครื่องยนต์ ทำเป็นเชื้อเพลิงอัดแท่งใช้แทนฟืน และใช้อบโดยวิธีไพโรไลซิส(Pyrolysis) เพื่อใช้แทนถ่าน เป็นต้น

คุณสมบัติทางกายภาพ

แกลบมีคุณสมบัติทางด้านการเป็นเชื้อเพลิงได้เป็นอย่างดีพอสมควร แต่จะมีข้อเสียคือเมื่อทำการเผาไหม้แกลบจะมีปริมาณสูงถึงประมาณร้อยละ 15.8-24.9 ค่าความร้อนของแกลบจะอยู่ระหว่าง 2,900-4,580 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม ค่าความชื้นโดยประมาณ 1.1-9.8% กิโลกรัม

ตารางที่ ก-1 คุณสมบัติของแกลบ

Proximate	Moisture	(%)	1.1-9.8
Analysis	Fixed	(%)	12.7-17.4
	Volatile matter	(%)	56.4-69.3
	Ash	(%)	15.8-24.9
Ultimate	Carbon	(%)	38.2-55.8
	Silica	(%)	14.7
	Hydrogen	(%)	0.2-5.31
	Oxygen	(%)	29.9-31.7
	Sulphur	(%)	0.07-0.12

ตารางที่ ก-2 การเปรียบเทียบเชื้อเพลิง

	เชื้อเพลิงแข็ง	เชื้อเพลิงเหลว	แก๊สเชื้อเพลิง
การขนส่ง	- ขนส่งง่ายแต่ลำบากในการขนย้าย	- ขนส่งง่ายและขนย้ายง่าย	- แก๊สธรรมชาติขนส่งและขนย้ายง่าย
การเก็บ	- ต้องใช้พื้นที่กว้าง	- ต้องใช้ถัง	- ต้องบรรจุในภาชนะพิเศษ
คุณสมบัติ	- คุณภาพเปลี่ยนแปลงไม่แน่นอน - ค่าความร้อนต่อหน่วยต่ำ - ชื้นเกินไป - ประสิทธิภาพในการสันดาปต่ำ - ต้องการอากาศส่วนเกินในการสันดาปเป็นจำนวนมาก - มีความยุ่งยากในการใช้ระบบควบคุมอัตโนมัติ	- คุณภาพค่อนข้างคงที่ - ค่าความร้อนต่อหน่วยน้ำหนักรวมสูง - ประสิทธิภาพในการสันดาปสูง - ต้องการอากาศในการสันดาปน้อย - ใช้ระบบควบคุมอัตโนมัติได้ง่าย	- คุณภาพคงที่ - ค่าความร้อนต่อหน่วยน้ำหนักรวมมีค่าสูง - ไม่มีชื้น - ประสิทธิภาพในการสันดาปสูงสุด - ต้องการอากาศส่วนเกินจำนวนน้อยมาก - ใช้ระบบควบคุมอัตโนมัติได้ง่าย
อุปกรณ์สันดาป	- ขนาดเล็กไม่ซับซ้อน	- ขนาดเล็ก	- ขนาดค่อนข้างใหญ่
มลภาวะ	- จำเป็นต้องมีการป้องกันการเกิดมลภาวะต่อบรรยากาศ	- จำเป็นต้องมีการป้องกันการเกิดมลภาวะต่อบรรยากาศ	- มีผลกระทบต่ออากาศเกิดมลภาวะของบรรยากาศน้อย
ราคา	- ถูก	- ค่อนข้างแพง	- แพงที่สุดต่อความร้อน 1 หน่วย

ตารางที่ ก-3 ปริมาณชีวมวลในปี 2540 และ 2544 (หน่วย :ตัน)

ชีวมวล	ปี พ.ศ.	
	2540 [*]	2544 ^{**}
กากอ้อย	15,410,636	19,357,826.64
แกลบ	5,962,548	5,582,426.4
ลำต้นมันสำปะหลัง	1,591,353	1,656,557.81
ซังข้าวโพด	9,066,220	6,905,058.88
กากถั่วเหลือง	141,483	259,574.21
เส้นใย/เปลือกผลปาล์ม	680,029	1,449,985.40

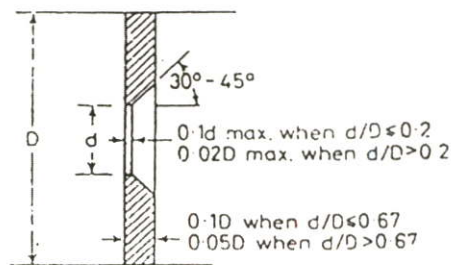
หมายเหตุ * ข้อมูลจากสำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร ปีเพาะปลูก 2540/44

** ประมาณการ

ภาคผนวก ข

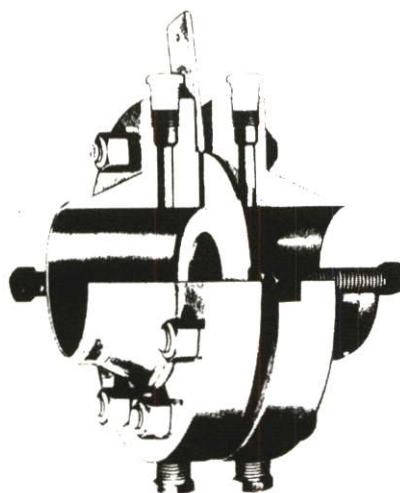
ออริฟิส(Orifice)

ออริฟิส ชนิดต่างๆ คล้ายคลึงกันสามารถอธิบายด้วยกันได้แต่ละชนิดแตกต่างกันที่ pressure tapping ซึ่งออริฟิส มาตรฐานกำหนดดังนี้รูปร่างลักษณะ (description) ออริฟิสได้แสดงหน้าตัดต่างๆดังรูปที่ ข-1



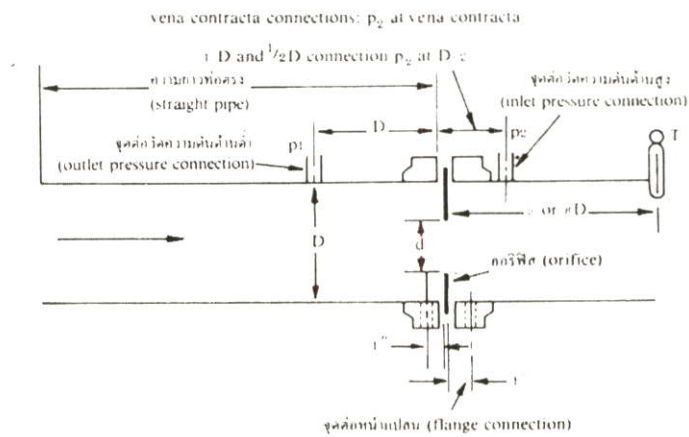
รูปที่ ข-1 standard orifice plate

แผ่นออริฟิสเป็นแผ่นบางๆ ที่ถูกจับยึดระหว่างขอบของท่อเนื่องจากมีรูปทรงเรขาคณิตอย่างง่ายๆ ดังนั้นจึงมีราคาถูก และง่ายในการติดตั้ง หรือการย้ายตำแหน่งแต่อย่างไรก็ตามขอบของแผ่นอาจจะมีการสึกกร่อนได้อันเนื่องจากการชนของอนุภาคเล็กๆ ที่กระจายอยู่ในของไหล ข้อเสียอีกประการก็คือ เนื่องจากไม่สามารถควบคุมการขยายของด้านล่างของกระแสทำให้มี head loss ถาวรที่สูงมาก จุดวัดความดันสำหรับออริฟิสนั้นสามารถกำหนดตำแหน่งได้หลายตำแหน่งดังรูปที่ ข-2 เนื่องจากตำแหน่งของจุดวัดความดันมีอิทธิพลต่อการหาสัมประสิทธิ์การไหล



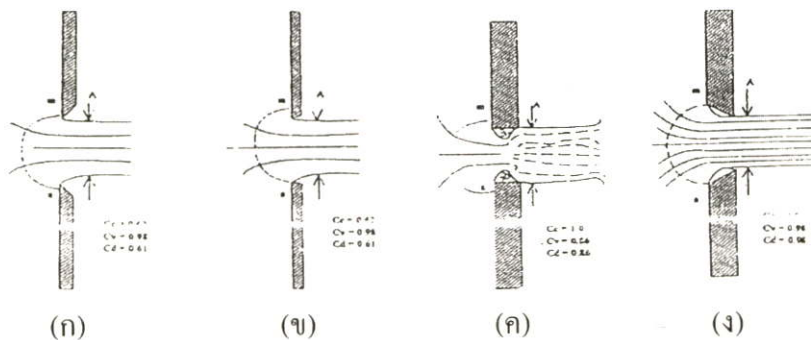
รูปที่ ข-2 ภาพตัดแสดงการติดตั้งออริฟิสแบบ Flange taps.

สำหรับการวัด อัตราการไหลของของไหลภายในท่อและจัดได้ว่า ออร์ฟิสเป็นเครื่องมือวัดที่ วัดอัตราการไหลของพื้นที่หน้าตัดให้ของไหล ไหลผ่านออร์ฟิสมีขนาดน้อยกว่าพื้นที่หน้าตัดของท่อ ดังรูปที่ ข-3 ดังนั้นเมื่อนำออร์ฟิสไปติดตั้งกับท่อซึ่งมีของไหลไหลผ่านจะทำให้เกิดความดันตกคร่อมออร์ฟิสซึ่งความดันตกคร่อมนี้จะแปรเปลี่ยนไปตามอัตราการไหล กล่าวคือถ้าอัตราการไหลมีค่าสูง ความดันตกคร่อมออร์ฟิสก็จะมีค่าสูง และอัตราการไหลมีค่าต่ำความดันตกคร่อมออร์ฟิสก็จะมีค่าต่ำ โดยทั่วไปออร์ฟิสจะนำไปหาอัตราการไหลที่สภาวะ steady state เท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้วัดอัตราการไหลที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา (Dynamic Response)



รูปที่ ข-3 แสดงตำแหน่งการวัดความดัน และระยะต่าง ๆ ของชุดออร์ฟิส (Orifice)

ในบรรดาเครื่องมือวัดอัตราการไหลทั้งหลาย ออร์ฟิสถือว่าเป็นเครื่องมือที่มีผู้นำไปใช้อย่างกว้างขวางมากที่สุดดังนั้นการทดลองชุดนี้จึงได้มีการนำเอาการวัดอัตราการไหลแบบออร์ฟิสมาใช้ ออร์ฟิสมาตรฐานที่มีขอบคม ดังรูปที่ ข-4(ก) หรือขอบเป็นรูปสี่เหลี่ยม ดังรูปที่ ข-4(ข) นั้นจะสัมพันธ์ลำนํ้าที่ไหลผ่านในลักษณะที่เป็นการสัมพันธ์แบบเส้นส่วนออร์ฟิส ดังรูปที่ ข-4(ค) และ รูปที่ ข-4(ง) นั้นไม่ใช่เป็นออร์ฟิสมาตรฐาน ทั้งนี้เพราะลำนํ้าที่ผ่านรู ออร์ฟิสนั้นถูกระทบจากความหนาแน่นของแผ่นวัดถูกกับความหยาบของผิวและรัศมีมีความโค้ง ดังนั้นจึงต้องมีการสอบเทียบเพื่อความถูกต้อง



รูปที่ ข-4 ออริฟิสแบบต่างๆ

ข้อดีของออริฟิส คือมีราคาต่ำกว่าเครื่องมือวัดชนิดอื่นๆ ที่อาศัยหลักการเดียวกัน และสะดวกในการสร้าง เพราะมีรูปร่างที่ไม่ซับซ้อน รวมทั้งมีข้อมูลของการทำวิจัยที่เกี่ยวกับพฤติกรรมการวัดของไหล ที่มีเงื่อนไขต่างๆ ไว้อย่างมากมาย ของไหลเมื่อไหลผ่าน square-edged orifice ซึ่งเป็นออริฟิสที่นำมาใช้ในการศึกษาครั้งนี้ จะมีทิศทางการไหลเป็นไปดังรูป สมมติว่าของไหลก่อนเข้าปะทะกับออริฟิสมีความเร็วคงที่ตลอดหน้าตัดของท่อ (หน้าตัดวงกลม) เท่ากับ V_1 เมตรต่อวินาที ของไหลที่บริเวณด้านหลังของออริฟิส จะมีลักษณะเป็นลำของไหล ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางของลำของไหลลดลงเรื่อยๆ จนกระทั่งมีค่าเท่ากับ $D/2$ เมตร ณ บริเวณจุดวัดความดันที่ 2 ซึ่งถือได้ว่าเป็นจุดที่มีพื้นที่หน้าตัดของการไหลน้อยที่สุด (Vena Contracta) ของ Jet ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ Jet จะมีขนาดเพิ่มขึ้นเมื่อของไหลเคลื่อนที่ผ่านจุดที่ 2 หรือมีความดันสถิตย์ต่ำสุด (จากสมการของ Bernoulli)

สมมติฐานเบื้องต้นสำหรับการวัดอัตราการไหลด้วยออริฟิสในการทดลองนี้คือของไหลที่อยู่ภายในท่อไม่สามารถอัดตัวได้ ความเร็วของของไหลมีค่าคงที่ตลอดหน้าตัด (โดยไม่คิดบริเวณที่เรียกว่า บริเวณกระแสไหลวน) ของไหลไม่มีความหนืดและการไหลเกิดขึ้นแบบ Steady flow (อัตราการไหลมีค่าคงที่เมื่อเทียบกับเวลา)

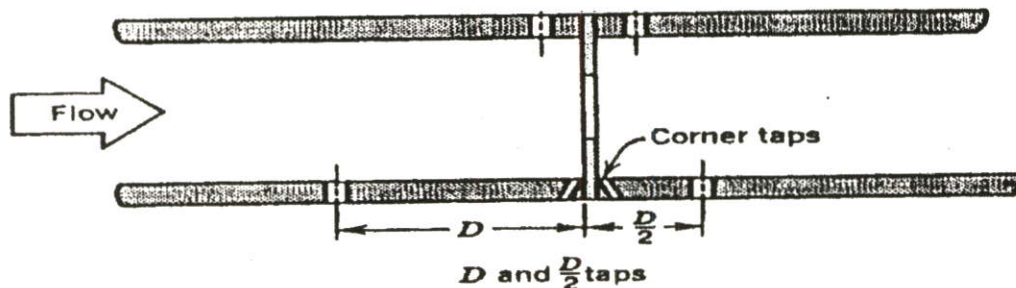
จากสมการของ Bernoulli สามารถนำมาใช้อธิบายคุณสมบัติการไหลที่จุดต่างๆ ภายในท่อได้ ดังนั้น สมการของ Bernoulli สำหรับจุดที่ 1 และจุดที่ 2 ของการไหลดังแสดงในรูปที่ 3.5

$$\dot{m} = \frac{C_d A \sqrt{2\rho (\Delta P)}}{\sqrt{1 - \left[\frac{d}{D}\right]^4}}$$

เมื่อ	P = ความดันสถิตย์ของของไหล (N/m^2)
	ρ = น้ำหนักจำเพาะ (specific weight, N/m^3)
	d = เส้นผ่านศูนย์กลางรูออริฟิส (m)
	D = เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ (m)
	A = พื้นที่หน้าตัดรูออริฟิส (m^2)
	C_d = discharge coefficient

ภาคผนวก ค

ตัวอย่างการวัดอัตราการไหลของอากาศโดยใช้ ชุดออร์ฟิส



รูปที่ ค-1 จุดวัดความดันของชุดออร์ฟิส

ตัวอย่างการคำนวณ ความสูงของระดับน้ำในमानometer
กำหนดให้

- | | | | |
|--|------------------------|------------------------|--|
| 1. Equivalent ratio เท่ากับ 1.0 | | | |
| 2. อัตราส่วนของอากาศต่อเชื้อเพลิงเชิงทฤษฎี | $A/F_{\text{ratio}} =$ | 5.372 | $\text{kg}_{\text{air}}/\text{kg}_{\text{fuel}}$ |
| 3. อัตราการไหลของอากาศทั้งหมด | $=$ | 0.3 | kg/min |
| 4. ใช้อากาศอากาศปฐมภูมิเท่ากับ 75 % | $=$ | 0.020175 | kg/s |
| 5. ใช้อากาศทุติยภูมิเท่ากับ 25% | $=$ | 6.725×10^{-3} | kg/s |
| 6. ความหนาแน่นของอากาศ | $\rho_a =$ | 1.2 | kg/m^3 |
| 7. ความหนาแน่นของแก๊ส | $\rho_f =$ | 100 | kg/m^3 |
| 8. ความหนาแน่นของน้ำ | $\rho_w =$ | 1000 | kg/m^3 |
| 9. พื้นที่หน้าตัดอากาศท่อปฐมภูมิ | $A_p =$ | 1.64×10^{-3} | m^2 |
| 10. อัตราส่วน เบต้า ของท่อปฐมภูมิ | $\beta_p =$ | 0.6 | |
| 11. พื้นที่หน้าตัดอากาศท่ออากาศทุติยภูมิ | $A_s =$ | 8.04×10^{-4} | m^2 |
| 12. อัตราส่วน เบต้า ของอากาศทุติยภูมิ | $\beta_s =$ | 0.62 | |
| 13.สัมประสิทธิ์การไหลผ่าน | $C =$ | 0.62 | |

จากสมการ

ความสูงของระดับน้ำในमानอมิเตอร์ของอากาศปรภูมิ

$$\begin{aligned}\dot{m}_p &= \frac{CA_p \sqrt{(2\rho_a \Delta P)}}{\sqrt{1-\beta_p^4}} \\ 0.0202 &= \frac{0.62 \times (1.64 \times 10^{-3}) \sqrt{(2 \times 1.2) \Delta P}}{\sqrt{(1-(0.6)^4)}} \\ \Delta P &= 142.77 \text{ N/m}^2 \\ \Delta P &= \rho_w g h \\ 142.77 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} &= 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \times \Delta h \\ \Delta h &= 1.45 \text{ cm.}\end{aligned}$$

จากสมการ

ความสูงของระดับน้ำในमानอมิเตอร์ของอากาศหตุยภูมิ

$$\begin{aligned}\dot{m}_s &= \frac{CA_s \sqrt{(2\rho_a \Delta P)}}{\sqrt{1-\beta_s^4}} \\ 6.725 \times 10^3 &= \frac{0.62 \times 8.04 \times 10^{-4} \sqrt{(2 \times 1.2) \Delta P}}{\sqrt{1-(0.62)^4}} \\ \Delta P &= 64.63 \text{ N/m}^2 \\ \Delta P &= \rho_w g h \\ 64.63 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} &= 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \times \Delta h \\ \Delta h &= 0.66 \text{ cm.}\end{aligned}$$

ตารางที่ ค-1 แสดงอัตราการไหลของอากาศปฐมภูมิและอากาศทุติยภูมิ

Φ	Primary Air (kg/sec)			Secondary Air (kg/sec)	
	100%	85%	75%	15%(8 ท่อ)	25%(8 ท่อ)
0.8	0.0336	0.0285	0.0252	0.00504	0.00840
1	0.0269	0.0228	0.0202	0.00403	0.00673
1.2	0.0224	0.0190	0.0168	0.00336	0.00560

ตารางที่ ค-2 แสดงความสูงของระดับน้ำในมานอร์มิเตอร์ของอากาศปฐมภูมิและอากาศทุติยภูมิ

Φ	Primary Air (Δh) cm.			Secondary Air (Δh) cm.	
	100%	85%	75%	15%	25%
0.8	4.03	2.91	2.27	0.37	1.03
1	2.58	1.87	1.45	0.24	0.66
1.2	1.79	1.29	1.00	0.16	0.46



**บทความวิชาการ : การประชุมวิชาการ
เครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย
ครั้งที่ 15**

**เล่มที่ 1 (เพิ่มเติม)
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ**

สารบัญ

บทความสาขา Combustion and Emission Controls

หน้า

- | | |
|--|----------|
| 1. การส่งเสริมการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ก๊าซธรรมชาติโดยใช้ก๊าซไฮโดรเจน
พิพัฒน์ ดันสกุล, สมชาย จันทร์ชานนา | CE 1-7 |
| 2. Enhancement of Heat Transfer by the combustor – Heat Exchanger
Sumrerng Jugjai, Phatthi Jaturanon, Pichai Sripipattanukul, rawin Sarajit | CE 8-13 |
| 3. Liquid Fuels Porous Medium Burner
Sumrerng Jugjai, Narongsak Wongpanit, Thawatchai Laoketkan, Sorawut Nokkaew | CE 14-20 |
| 4. การทดลองการเผาไหม้เชื้อเพลิงเหลวโดยวัสดุพอร์ซันชนิดสลับทิศทางการไหลของแก๊สอย่างเป็นจังหวะ
กัมปนาท เทียนน้อย, สำเรง จักรใจ | CE 21-26 |
| 5. การทดลอง Thermo-electric Conversion โดยการเผาไหม้เชื้อเพลิงแก๊สในวัสดุพอร์ซันชนิดสลับทิศทางการไหลอย่างเป็นจังหวะ
อภิวัฒน์ หงษ์คำเนิน, สำเรง จักรใจ | CE 27-31 |
| 6. Experimental Investigation in to the incineration of sewage sludge in a fluidized bed
Suthum Patumsawad | CE 32-36 |
| 7. การศึกษากระบวนการเผาผลิภัณฑ์เครื่องปั้นดินเผาในเตามังกร
ณัฐวุฒิ หนูเกื้อ, ปุณยศ วลิลกุล, บัณฑิต พึ่งธรรมสาร | CE 37-41 |
| 8. Combustion Characteristics of Thai Lignite in a Fluidized Bed
K. Suksankraisorn, S. Patumsawad, P. Vallikul, B. Fungtammasan | CE 42-49 |
| 9. อิทธิพลของขนาดของแกลบต่อคุณลักษณะการเผาไหม้ในเตาเผาแบบวอร์เทค
พงษ์เจต พรหมวงษ์, สมศักดิ์ โพธิ์วิลเกียรติ, ชินรัชย์ เขียรพงษ์ | CE 50-54 |
| 10. เตาเผาวอร์เทคหลายชั้นสำหรับเผาแกลบ
พงษ์เจต พรหมวงษ์, วิศิษฐ์ ลีลาญาติกุล, ชินรัชย์ เขียรพงษ์ | CE 55-59 |
| 11. การตรวจสอบเชิงทดลองของคุณลักษณะการเผาไหม้แกลบที่มีความชื้น
พงษ์เจต พรหมวงษ์, ศุภชัย เลื่อนลอย, ชินรัชย์ เขียรพงษ์ | CE 60-65 |
| 12. การลดการสิ้นเปลืองในห้องเผาไหม้ด้วยการนำไอเสียกลับมาเผาไหม้ใหม่
รุ่งเรือง พิทยศิริ | CE 66-78 |

บทความสาขา Computational Methods

หน้า

- | | |
|--|--------|
| 1. Structure Identification and Detection for the Unsteady Separated Flow
Anotia Suksangpanomrung | CM 1-5 |
|--|--------|

เตาเผาออร์เทคหลายชั้นสำหรับเผาแกลบ

A Multistage Vortex Combustor for Burning Rice Husk

พงษ์เจต พรหมวงศ์ วิศิษฐ์ ลีลาผาดิกุล ชินวัจน์ เขียวพงษ์
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ถ. ฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520
โทร (662)326-9987, Fax (662)326-9053, E-mail: kppongje@kmitl.ac.th

นิวัติ พิริยะรุ่งโรจน์

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
ถนน เข้มสัมพันธน์ แขวงกระทุ่มราย เขตหนองจอก กรุงเทพฯ ๙ 10530

บทคัดย่อ

บทความฉบับนี้ ได้ทำการศึกษาขนาดและรูปร่างของเตาเผาแกลบแบบวอร์เทคที่มีอิทธิพลต่อการเผาไหม้ภายในเตา โดยทำการออกแบบสร้างและทดสอบขนาดและรูปร่างของเตาเผา ที่มีลักษณะเป็นท่อลดขนาดทรงกระบอก 2 ส่วน คือ ส่วนบนและส่วนล่าง ซึ่งขนาดของเตาเผาส่วนบนที่ใช้ในการทดลองมีทั้งสิ้น 3 ขนาด คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 260 , 305 และ 360 mm. ส่วนขนาดของเตาเผาไหม้ส่วนล่างมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 180 mm. และมีแกนภายในเตาเผาเพื่อให้เกิดการหมุนวนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 101 mm. โดยพิจารณาความสัมพันธ์ของการกระจายอุณหภูมิภายในเตา เมื่อทำการปรับค่า Equivalence ratio (Φ) เท่ากับ 0.8 , 1.0 และ 1.2 จากการทดลอง เมื่ออัตราการไหลของเชื้อเพลิงแกลบเท่ากับ 0.3 kg/min และปรับค่า Equivalence ratio (Φ) เท่ากับ 1.0 พบว่าอุณหภูมิสูงสุดภายในเตาเผาเท่ากับ 932.4°C และการเผาไหม้ในเตาเผามีความเสถียรสูง

Abstract

The paper deals with experimental study of the size and shape of rice husk vortex combustor effecting on combustion characteristics. The combustor is a cylindrical shape with different diameters. The top part of combustor is varied to be 3 different diameters : 260 , 305 and 360 mm., while the bottom part of combustor is fixed and 180 mm. diameter with centred exhaust pipe of 101 mm. in diameter. The temperature distribution inside the combustor is measured for each equivalence ratio, Φ of 0.8 , 1.0 , and 1.2. For the rice husk flow rate of 0.3 kg/min and equivalence ratio, Φ of 1.0 , the experiment shows the maximum temperature of 932.4°C in the combustor. The combustor has a high combustion stability.

1. บทนำ

การค้นคว้าและการวิจัยเกี่ยวกับด้านการใช้พลังงานจากชีวมวลเป็นที่สนใจมากในปัจจุบัน เนื่องจากเป็นพลังงานที่สามารถใช้ทดแทนพลังงานเดิม ได้แก่ น้ำมันปิโตรเลียม , ถ่านหิน , ลิกไนต์ , ก๊าซธรรมชาติ เป็นต้น ซึ่งนับวันจะเหลือในปริมาณน้อยลงเรื่อยๆ วัสดุจากชีวมวลที่จะนำมาใช้เป็นพลังงานคือ ชี้อ้อย แกลบ ฟางข้าว ป่าส้ม หรือ แอลกอฮอล์ที่ได้จากการหมัก เป็นต้น

การเกษตรกรรมของประเทศส่วนใหญ่คือ การเพาะปลูก โดยเฉพาะข้าว ดังนั้นแกลบจึงเป็นวัสดุชีวมวลที่ได้จากการสีข้าว และมีจำนวนมาก ราคาถูก จึงเป็นเชื้อเพลิงที่น่าสนใจที่จะนำมาใช้มากที่สุด ตัวอย่างเช่นถ้าทำการสีข้าวที่มีน้ำหนัก 100 กิโลกรัม จะได้แกลบออกมา 20.12 กิโลกรัม ค่าความร้อนของแกลบมีค่าประมาณ 2,900–4,560 kcal/kg เมื่อเทียบกับค่าความร้อนของชี้อ้อยประมาณ 4,000–4,300 kcal/kg [4] แต่ชี้อ้อยมีข้อเสียคือ มีความชื้นและซี้ต่ำกว่าแกลบ และเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันเตา ซึ่งมีค่าความร้อนประมาณ 9,900 kcal/kg [4] โดยทั้งแกลบและชี้อ้อยมีค่าความร้อนใกล้เคียงกันและมีค่าเป็นครึ่งหนึ่งของน้ำมันเตาแต่ราคาถูกกว่า

ปัจจุบันได้มีการวิจัยทั้งในและต่างประเทศ ซึ่งทำการวิจัยเกี่ยวกับเตาเผาประเภทต่าง ๆ มากมาย ในที่นี้จะกล่าวถึง เตาเผาแบบวอร์เทคซึ่งผลงานวิจัยในประเทศ อาทิเช่น งานวิจัยของ พงษ์เจต พรหมวงศ์ และ คณะ [1] ทำการศึกษาเชิงทดลองของการกระจายอุณหภูมิในเตาเผาแกลบแบบวอร์เทค พิจารณาถึงการกระจายอุณหภูมิภายในเตาเผา โดยปรับอัตราการไหลเชิงมวลอยู่ในช่วง 0.3 ถึง 0.5 kg/min ปรับค่า Φ เท่ากับ 0.8 , 0.85 , 0.9 , 0.95 , 1.0 , และ 1.05 สำหรับแต่ละค่าของอัตราการไหลของแกลบ จากการทดลองพบว่า เมื่อป้อนแกลบด้วยอัตราการไหลของแกลบเท่ากับ 0.3 kg/min และปรับค่า Φ เท่ากับ 0.95 พบว่าอุณหภูมิในเตาเผาแกลบมีการกระจายอุณหภูมิเสถียรสูงและควันทันได้มีปริมาณน้อย ส่วนผลงานวิจัยในต่างประเทศ อาทิเช่น งานวิจัยของ Sen Nieh และ Tim T. Fu [2] ได้ทำการทดลองโดยการทดสอบการไหลในเตาแบบจำลอง Cold models และ Hot models ของเตาเผาแบบวอร์เทคโดยใช้ถ่านหินผงและงานวิจัยต่อเนื่องถึงการทดสอบ

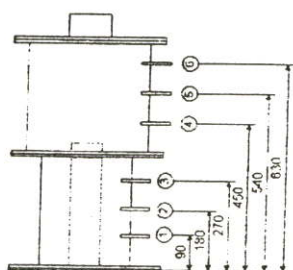
ภาแบบบอร์เทคโดยใช้เชื้อเพลิง Dry Ultra Find Coal และ Coal Vater Fuel

เตาเผาแบบบอร์เทคเป็นเตาที่ถูกพัฒนามาจากเตาเผาแบบไซโคลน(Cyclone Furnace)โดยเทคนิคของไหลแบบหมุนวนความเร็วช่วยในการเผาไหม้ ซึ่งรายละเอียดสามารถดูได้จาก [1]

ในบทความนี้ ได้ทำการศึกษาอิทธิพลขนาดและรูปร่างของเตาเผาแบบบอร์เทคและแกนที่ช่วยให้เกิดการหมุนวนของอากาศและเชื้อเพลิง อากาศเผาไหม้ ซึ่งการหมุนวนระหว่างอากาศและเชื้อเพลิงที่เกิดขึ้นเป็นการผสมผสานระหว่างเตาเผาแบบบอร์เทคและเตาเผาแบบไซโคลน โดยพิจารณาความสัมพันธ์จากการกระจายอุณหภูมิภายในเตาเผา เมื่อการปรับค่า Equivalence ratio ค่าต่าง ๆ เพื่อให้ได้ความร้อนสูงสุดที่เกิดจากการเผาไหม้ที่เหมาะสม โดยใช้เป็นต้นแบบในการศึกษาและพัฒนาต่อไปในอนาคต

เครื่องมือและอุปกรณ์การทดลอง

การออกแบบเตาเผาที่ใช้ในการทดลองนั้น เตาเผาจะประกอบด้วย 4 ส่วน คือ เตาเผาส่วนล่างและเตาเผาส่วนบน โดยเตาเผาส่วนล่างขนาดให้มีขนาดเท่ากับ 180 mm. และมีแกนกลางภายในมีขนาดเส้นศูนย์กลางเท่ากับ 101 mm. ส่วนเตาเผาส่วนบนได้ทำการออกแบบให้มีขนาดที่ใช้ในการทดลอง 3 ขนาด คือ มีขนาดโดยประมาณ 5, 1.75, และ 2.0 เท่าของขนาดเตาเผาส่วนล่าง คือ มีขนาดเส้นศูนย์กลางเท่ากับ 260 mm., 305 mm., 360 mm. ตามลำดับ ซึ่งขนาดของเตาเผาแบบบอร์เทคมีลักษณะดังรูปที่(1)



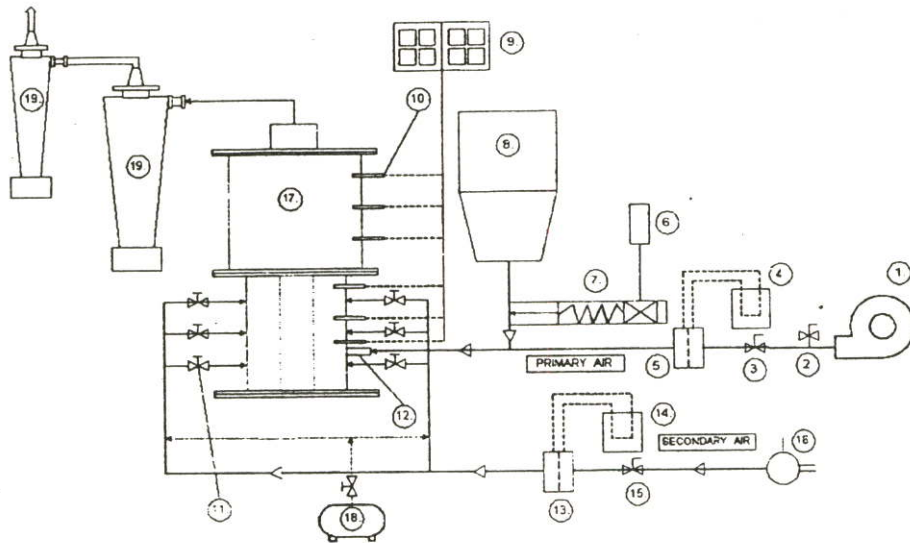
ที่ 1. ตำแหน่ง ที่ใช้วัดอุณหภูมิภายในเตาเผา (หน่วยเป็น มม.)

จากการทดลองเตาเผาแบบบอร์เทค สามารถเผาไหม้เชื้อเพลิงกลบละเอียดได้อย่างต่อเนื่อง โดยที่ไม่ต้องใช้เชื้อเพลิงชนิดอื่น ๆ ในการเผาไหม้ แต่ก่อนเริ่มทำการทดลองจำเป็นต้องใช้แก๊สเชื้อเพลิงเหลว LPG เพื่อช่วยในการอุ่นเตาทำให้อุณหภูมิภายในเตาสูงจนสามารถทำให้เชื้อเพลิงกลบเกิดการเผาไหม้ด้วยตัวเองได้ ในการติดตั้งใช้เฉพาะอากาศส่วนที่ 1 ที่ได้จาก Blower เพื่อช่วยลำเลียงกลบละเอียดเพื่อเป็นเชื้อเพลิงในการติดเตา ไฟที่ได้จากแก๊สเชื้อเพลิงเหลว LPG ถูกจ่ายเข้าไปยังส่วนล่างของเตา ซึ่งเป็นตำแหน่งที่จ่ายอากาศส่วนที่ 2 เมื่ออุณหภูมิภายในเตาเผามีค่าประมาณ 600 °C แล้วหยุดการอุ่นเตาด้วยแก๊ส LPG

เตาเผาแบบบอร์เทค จะใช้อากาศ 2 ส่วน ซึ่งอากาศส่วนที่ 1 ได้จาก Blower(1) ขนาด 3 Hp อากาศถูกควบคุมอัตราการไหล โดย Needle valve(3) และสามารถวัดอัตราการไหลโดยใช้ชุด Orifice meter (4,5) แกลบละเอียดที่ใช้ในการทดลองจะถูกบรรจุใช้ภายใน Hopper(8) ซึ่งมีความจุเท่ากับ 0.055 m³ ซึ่งลำเลียงจาก Hopper เข้าสู่ท่อ อากาศส่วนที่ 1 โดยใช้ Screw feeder(7) ซึ่งมีต้นกำลังมาจาก Inverter(6) ฉะนั้นการปรับอัตราการไหล ซึ่งมีต้นกำลังมาจาก Inverter(6) ฉะนั้นการปรับอัตราการไหล ของแกลบละเอียด โดยใช้ Inverter ควบคุมความเร็วรอบของ Motor เพื่อให้ได้อัตราการไหลของแกลบละเอียดได้ตามต้องการ ในการป้อนอากาศส่วนที่ 2(Secondary Air) ซึ่งอากาศจะได้จาก Air compressor(16)อากาศส่วนที่ 2 จะถูกส่งผ่านชุด Orifice Meter(13,14) ทั้งหมด 12 ชุดสามารถปรับอัตราการไหลทั้ง 12 ชุด โดยใช้ Needle valve(11) ทั้งหมด 12 ตัว ซึ่งจะให้อากาศส่วนที่ 2 ที่เข้าไปยังเตาเผาแบบบอร์เทคมีอัตราการไหลของอากาศเท่ากันทุกจุด โดยเตาเผาส่วนล่างมีความสูงทั้งหมด 360 mm. ตำแหน่งในการป้อนอากาศส่วนที่ 2 จำนวน 12 รู ทำการเจาะส่วนที่เป็นผนังเตาด้านละ 3 รู ทุกๆ 90 องศา ในแนวแกน y เจาะทุก ๆ ความสูง 90 mm. ของความสูงของเตาเผา ส่วนการวัดอุณหภูมิ ซึ่งจะเจาะรูเพื่อใส่ Thermocouple type K ในการวัดอุณหภูมิภายในเตาเผาขณะทำการทดลอง โดยจะเจาะรูจำนวน 3 รู ในแนวแกน y อย่างสมมาตร ทั้งเตาเผาส่วนล่างและส่วนบน รวมทั้งสิ้น 6 ตำแหน่ง ดังรูปที่ (1) ส่วนการเจาะรูของ Primary air ที่ความสูง 135 mm. จากส่วนฐานล่างของเตา ส่วนเตาเผาส่วนบน จะขยายเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวเตาเพิ่มขึ้น เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการเผาไหม้มีทั้งสิ้น 3 ขนาดได้แก่ เส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 260 , 305 , 360 mm. ความสูงของเตาเผาตัวบนมีขนาด 360 mm.และมีการใช้แกนกลางภายในที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 101 mm เพื่อช่วยในการหมุนวน โดยจะยึดติดกับฐานของเตาเผาส่วนล่างและมีความสูงของแกนทั้งสิ้นเท่ากับ 370 mm.

3. การทดลอง

1. การทดลองนี้เป็นการศึกษาการเผาไหม้ ในเตาเผาไหม้ขนาดต่าง ๆ เปรียบเทียบอุณหภูมิกับเวลาโดยอากาศเป็นตัวแปรหลักในการเผาไหม้ เริ่มจากการประกอบเตาตัวล่างและเตาตัวบนขนาดห้องเผาไหม้ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 260 mm. ติดตั้งเทอร์โมคัปเปิล 6 ตำแหน่งและติดตั้งท่อลมทาง Secondary air ทั้ง 12 ตำแหน่ง แล้วอุ่นเตาจนอุณหภูมิเท่ากับ 600 °C แล้วจึงทำการทดลองดังต่อไปนี้ปรับอัตราการไหลของแกลบให้มีค่าเท่ากับ 0.3 kg/min โดยการปรับรอบที่ Inverter ให้มอเตอร์มีความเร็วรอบที่ 350 รอบ/นาที
2. ปรับอัตราการไหลของอากาศที่ทางเข้าของ Primary air และ Secondary air ให้เท่ากับที่ $\Phi = 1.2$ โดยปรับ Primary air ที่ชุดमानอมิเตอร์ที่ค่า $\Delta h = 49.3$ mm. และทาง Secondary air ปรับที่ชุดออริฟิตที่ค่า $\Delta h = 4.157$ mm.(จากการคำนวณ)
3. ทำการบันทึกอุณหภูมิ โดยอ่านค่าแสดงจากตัวแสดงอุณหภูมิแบบดิจิตอลโดยใช้ Thermocouple type K เป็นตัววัดอุณหภูมิทั้ง 6 ตำแหน่ง บนเตาเผาในทุก ๆ 2 นาที จนครบ 30 นาที



- | | | | |
|------------------|-------------------------|------------------------|----------------------|
| 1. Blower | 6. Inverter | 11. Needle valve | 16. Air compressor |
| 2. Bypass valve | 7. Screw feeder | 12. Primary air nozzle | 17. Vortex combustor |
| 3. Needle valve | 8. Hopper | 13. Orifice plate | 18. LPG Supply |
| 4. Manometer | 9. Digital thermocouple | 14. Manometer | 19. Cyclone |
| 5. Orifice plate | 10. Thermocouple type K | 15. Needle feed | |

รูปที่ 2. ระบบอุปกรณ์การทดลองของเตาเผาแบบ (Vortex Combustor)

- ปรับเปลี่ยนอัตราการไหลของอากาศทั้งของ Primary air และ Secondary air จาก $\Phi = 1.2$ เป็น 1.0 และ 0.8 ตามลำดับ
- เมื่อปรับอัตราการไหลครบหมดแล้วทำการเปลี่ยนขนาดเตาเผาใหม่ส่วนบนและทำการทดลองซ้ำข้อ 3-4 ซึ่งเดิมขนาดห้องเผาใหม่ส่วนบนเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 260 mm. เปลี่ยนเป็น 305 mm. และ 360 mm. ตามลำดับ

ตารางที่ 1. ข้อมูลองค์ประกอบของเชื้อเพลิงถ่าน [4]

องค์ประกอบเชื้อเพลิงถ่าน	เปอร์เซ็นต์โดยมวล
Carbon	38.0
Hydrogen	5.70
Oxygen	41.6
Nitrogen	0.69
Sulfur	0.06
Volatile matter	55.6
Fixed carbon	20.1
Moisture	10.3
Ash	14.0

ตารางที่ 2. เงื่อนไขของการทดลอง

เงื่อนไข	ค่าที่ใช้
อัตราการไหลของเชื้อเพลิงถ่าน	0.3 kg/min
อัตราการไหลของอากาศ	1.46 kg/min
Calorific value	3,308 kcal/kg

การเผาไหม้เชื้อเพลิงโดยปกติแล้ว ต้องใช้ออกซิเจนเข้าทำปฏิกิริยาจึงเป็นการยากที่จะใช้ออกซิเจนบริสุทธิ์เพียงอย่างเดียว การเผาไหม้จึงใช้อากาศเข้าทำปฏิกิริยา โดยแสดงปริมาณของอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ ฉะนั้นจึงกำหนดให้อยู่ในรูปของ อัตราส่วนสมมูล (Equivalence ratio, Φ) [3] จะได้ว่า

$$\Phi = \frac{(m_f / m_a)_{act}}{(m_f / m_a)_{sto}} \quad (1)$$

เมื่อ m_a คือ อัตราการไหลของอากาศ (kg/min)

m_f คือ อัตราการไหลของเชื้อเพลิง (kg/min)

โดยสัดส่วนผสมจะเรียกว่า

ส่วนผสมหนา Fuel-rich mixture เมื่อ $\Phi > 1$

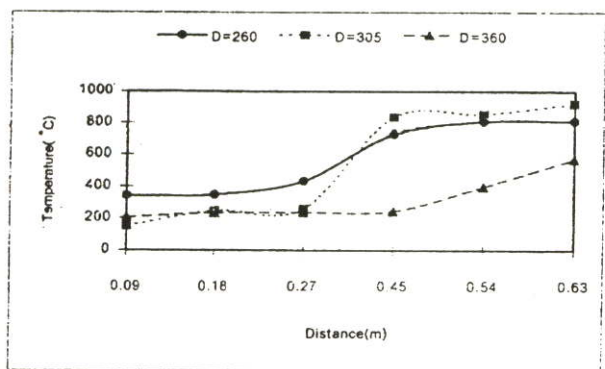
ส่วนผสมพอดีทางเคมี Stoichiometric เมื่อ $\Phi = 1$

ส่วนผสมบาง Fuel-lean mixture เมื่อ $\Phi < 1$

4. ผลการทดลอง

จากผลการทดลองการเผาไหม้เตาเผาแบบวอร์เทค โดยจะใช้เตาเผาที่มีการปรับเปลี่ยนขนาดของเตาเผาส่วนบนทั้งสิ้น 3 ขนาด คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 260 , 305 และ 360 mm.ตามลำดับ และมีแกนกลางภายในเตาเผาส่วนล่างมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 101 mm. โดยมีขนาดของเตาเผาส่วนล่างเท่ากับ 180 mm. การปรับเปลี่ยนกรณีต่าง ๆ ดังกล่าวข้างต้น เพื่อศึกษาการกระจายอุณหภูมิที่สม่ำเสมอภายในเตาเผาที่เหมาะสมที่สุด

จากกราฟการทดลองรูปที่ (3) ลักษณะการกระจายของอุณหภูมิภายในเตาเผาแต่ละจุด ณ.อุณหภูมิที่ระยะ(0.09-0.27 m.)มีการกระจายของอุณหภูมิก่อนข้างคงที่ของแกนหมุนวนภายในเตาเผาส่วนล่างที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 101 mm. เมื่อขนาดของเตาเผาส่วนบนใหญ่ขึ้น ณ.ตำแหน่งของเทอร์โมคัปเปิลที่ระยะ(0.27-0.45 m.) เป็นช่วงที่มีความแตกต่างของอุณหภูมิมาก เนื่องจากเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงการเผาไหม้จากเตาเผาส่วนล่างไปยังเตาเผาส่วนบนจากอิทธิพลของการหมุนวนระหว่างอากาศและเชื้อเพลิง จากการทดลองพบว่า ขนาดของเตาเผาส่วนบนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 305 mm.จะมีการกระจายของอุณหภูมิภายในคงที่สูงสุด เนื่องจากขนาดของเตาเผาส่วนบนใหญ่ขึ้นพื้นที่และเวลาในการเผาไหม้มากขึ้น การเผาไหม้ระหว่างอากาศและเชื้อเพลิงจึงเกิดการคลุกเคล้าอย่างทั่วถึงและเหมาะสม อุณหภูมิที่ได้จึงสูงกว่าเตาเผาส่วนบนที่มีขนาด 260 mm. แต่ที่เตาเผาส่วนบนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 360 mm. อุณหภูมิ ณ.เตาเผาส่วนบนจะสูงขึ้นอย่างช้า เนื่องจากขนาดของเตาเผาที่มีขนาดใหญ่เวลาในการหมุนวนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงมากแต่ต้องสูญเสียความร้อนบางส่วนในการอุ่นอากาศภายในเตาเผาให้เพียงพอต่อการลุกไหม้ของเชื้อเพลิง การกระจายอุณหภูมิที่ได้จึงมีอุณหภูมิโดยเฉลี่ยสูงขึ้นแต่ไม่สูงมากนักซึ่งที่ระยะ 0.63 m. จะเป็นตำแหน่งที่มีอุณหภูมิสูงสุดของเตาเผาคือ 922.3 °C

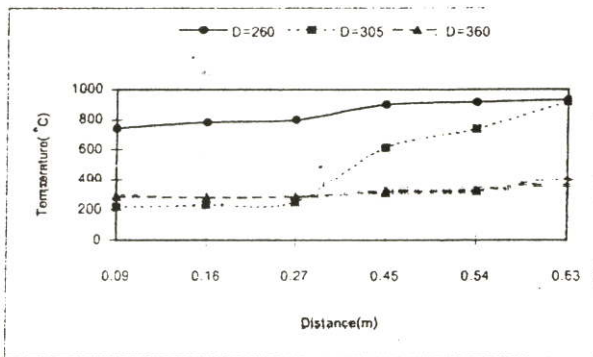


รูปที่ 3. กราฟแสดงการกระจายอุณหภูมิ ที่ระยะต่าง ๆ ตามแนวแกน เมื่อ $\Phi = 0.8$

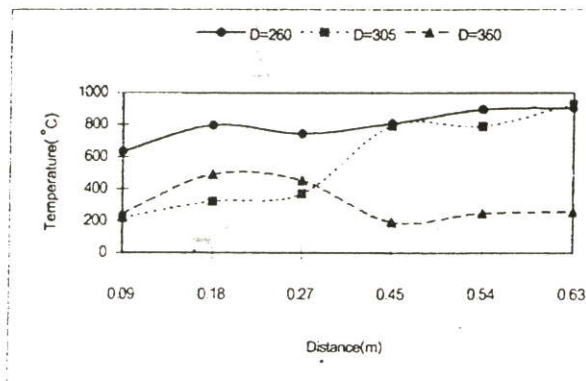
จากกราฟการทดลองรูปที่ (4) ลักษณะการกระจายอุณหภูมิภายในแต่ละตำแหน่งคล้ายกับที่ $\Phi = 0.8$ แต่อุณหภูมิเฉลี่ยภายในเตาเผาจะสูงกว่าที่ $\Phi = 0.8$ เนื่องจาก ณ. $\Phi = 1.0$ นั้น อากาศที่ใช้กับอากาศทางทฤษฎีเท่ากัน เกิดความสมดุลกันระหว่างการผสมระหว่างอากาศและเชื้อเพลิง การเผาไหม้ที่เกิดขึ้นสมบูรณ์อุณหภูมิภายในแต่ละตำแหน่งจึงมีอุณหภูมิสูงกว่า ซึ่งสังเกตได้จากกราฟที่ $\Phi = 1.0$ ที่ขนาดเตาเผาส่วนบนมีขนาดเท่ากับ 260 mm. มีการกระจายอุณหภูมิภายในคงที่สูงสุด ที่ระยะ 0.63 m. มีอุณหภูมิสูงสุด = 932.4 °C

จากกราฟการทดลองรูปที่ (5) ที่ระยะ(0.09-0.27 m.) ยังมีการกระจายของอุณหภูมิกิ่งที่ ส่วนที่ระยะ(0.27-0.45 m.) มีความแตกต่างของอุณหภูมิมาก ซึ่ง ณ.ตำแหน่งที่ 0.63 m. เป็นตำแหน่งที่มีอุณหภูมิสูงสุดเท่ากับ 925.5°C โดยขนาดเตาเผาที่มีการกระจายอุณหภูมิกิ่งที่สูงสุด คือ ขนาดเตาเผาส่วนบนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 305 mm.

ซึ่งถ้าเราสังเกตจากกราฟ การทดลองที่ขนาดเตาเผาส่วนบนเท่ากับ 360 mm. อุณหภูมิจะตกลงที่ระยะ(0.27-0.45 m.) คือ เมื่อเริ่มต้นการเผาไหม้ภายในเตาเผาส่วนล่างไปยังส่วนบน เนื่องจากอากาศ(ทฤษฎี)ที่ให้กับเตาน้อย การหมุนวนของอากาศและเชื้อเพลิงไม่สม่ำเสมอ จึงมีเชื้อเพลิงบางส่วน ตกค้างอยู่ในเตาเผาส่วนล่างเป็นจำนวนมาก เมื่อเกิดการเผาไหม้ที่เตาเผาส่วนบนจึงทำให้เกิดการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์อยู่ในเกณฑ์ต่ำและเกิดควันดำ



รูปที่ 4. กราฟแสดงการกระจายอุณหภูมิ ที่ระยะต่าง ๆ ตามแนวแกน เมื่อ $\Phi = 1.0$



รูปที่ 5. กราฟแสดงการกระจายอุณหภูมิ ที่ระยะต่าง ๆ ตามแนวแกน เมื่อ $\Phi = 1.2$

5. สรุปผลการทดลอง

- จากการทดลองพบว่าเมื่อให้ปริมาณอากาศที่ใช้มีปริมาณอากาศทางทฤษฎี(rich) $\Phi = 1.2$ อุณหภูมิในเตาเผาต่ำ ควันที่ออกมา มีสีดำปริมาณมาก เมื่อเพิ่มปริมาณอากาศที่ใช้มากขึ้นพบว่า อุณหภูมิในเตาเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ปริมาณควันที่เกิดขึ้นน้อยลง จนกระทั่ง $\Phi = 1.0$ ซึ่งเป็นอัตราส่วนที่ทำให้ปริมาณอากาศที่ใช้เท่ากับปริมาณอากาศทางทฤษฎี และถ้าเมื่อให้ปริมาณอากาศที่ใช้มากกว่าปริมาณอากาศทางทฤษฎี(lean) $\Phi = 0.8$ พบว่า อุณหภูมิในเตาเผาอวอร์ทเคมีค่าลดลงและควันที่เกิดขึ้นมีปริมาณน้อย ถ้าที่ได้จากการทดลองมีลักษณะสีเทาปนดำ
- ที่ขนาดของเตาเผาส่วนบนเท่ากับ 260 mm. ตำแหน่งระยะวัดอุณหภูมิภายในที่(0.09-0.27 m.)จากฐานล่างของเตาเผา อุณหภูมิ

ภายในค่อนข้างคงที่ เนื่องจากในช่วงนี้เริ่มมีการเผาไหม้ระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิง อุณหภูมิจึงไม่สูงมากนัก ส่วนอุณหภูมิที่ระยะตำแหน่ง(0.27-0.45 m.)จากฐานล่างของเตา มีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิอยู่ในเกณฑ์สูง เนื่องจากพื้นที่ภายในเตาเผาส่วนล่างที่เกิดการหมุนวนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงและเวลาในการเผาไหม้น้อยจึงทำให้เชื้อเพลิงเผาไหม้ไม่สมบูรณ์อุณหภูมิจึงต่ำ แต่หลังจากเริ่มเผาไหม้ในส่วนบนของเตาเผา ซึ่งมีพื้นที่มากขึ้นรวมถึงเวลาในการเผาไหม้ก็มากขึ้นด้วย จึงทำให้มีการเผาไหม้ที่สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น อุณหภูมิที่วัดได้จึงสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งโดยเฉลี่ยช่วงระยะตำแหน่งที่ 0.63 m.จากฐานล่างของเตา จะมีอุณหภูมิสูงสุดภายในเตาเผา

3. เราสามารถสรุป การกระจายอุณหภูมิภายในเตาเผาที่มีอุณหภูมิคงที่สูงสุด ตามลำดับ คือ

- 2.1 ที่ $\Phi = 1.0$, ขนาดของเตาเผาส่วนบน = 260 mm.
- 2.2 ที่ $\Phi = 1.2$, ขนาดของเตาเผาส่วนบน = 260 mm.
- 2.3 ที่ $\Phi = 0.8$, ขนาดของเตาเผาส่วนบน = 305 mm.

6. กิตติกรรมประกาศ

บทความวิจัยนี้สำเร็จไปได้ด้วยดีต้องขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร ที่สนับสนุนการทดลองนี้

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] พงษ์เจต พรหมวงศ์ และ คณะ (2543) " การศึกษาเชิงทดลองของการกระจายอุณหภูมิในเตาเผาแบบบอร์เทค "วารสารพระจอมเกล้าลาดกระบัง ปีที่ 8 ฉบับที่ 3 (ธันวาคม),หน้า 19-24
- [2] Sen Nieh and Tim T. Fu, "Development of a Non-Slagging Vortex Combustor (VC) for Space/Water Heating Applications" Proc. 5th International Coal Conf., 1988, pp. 761-768.
- [3] Stephen R. Turns , "An Introduction to Combustion (Concepts and Applications), International Editions, 1996 , pp. 19
- [4] นิวัติ พิริยะรุ่งโรจน์ "การศึกษาเชิงทดลองของเตาเผาแบบบอร์เทค" วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2544

ประวัติผู้เขียน

นาย วิศิษฐ์ สีลาผาดิกุล เกิดเมื่อวันที่ 17 พฤษภาคม 2518 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร ปีการศึกษา 2540 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมเครื่องกล จากมหาวิทยาลัยสยาม และในปีการศึกษา 2542 ได้เข้ารับการศึกษาดำเนินระดับปริญญาโท คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ประวัติการทำงาน พ.ศ. 2542 - 2544 ทำงานที่ SIAM CAST IRON WORKS CO., LTD.

- ตำแหน่งวิศวกรประจำฝ่าย
- ตำแหน่งวิศวกรประจำหน่วยงานผลิต(งานหล่อโลหะ)