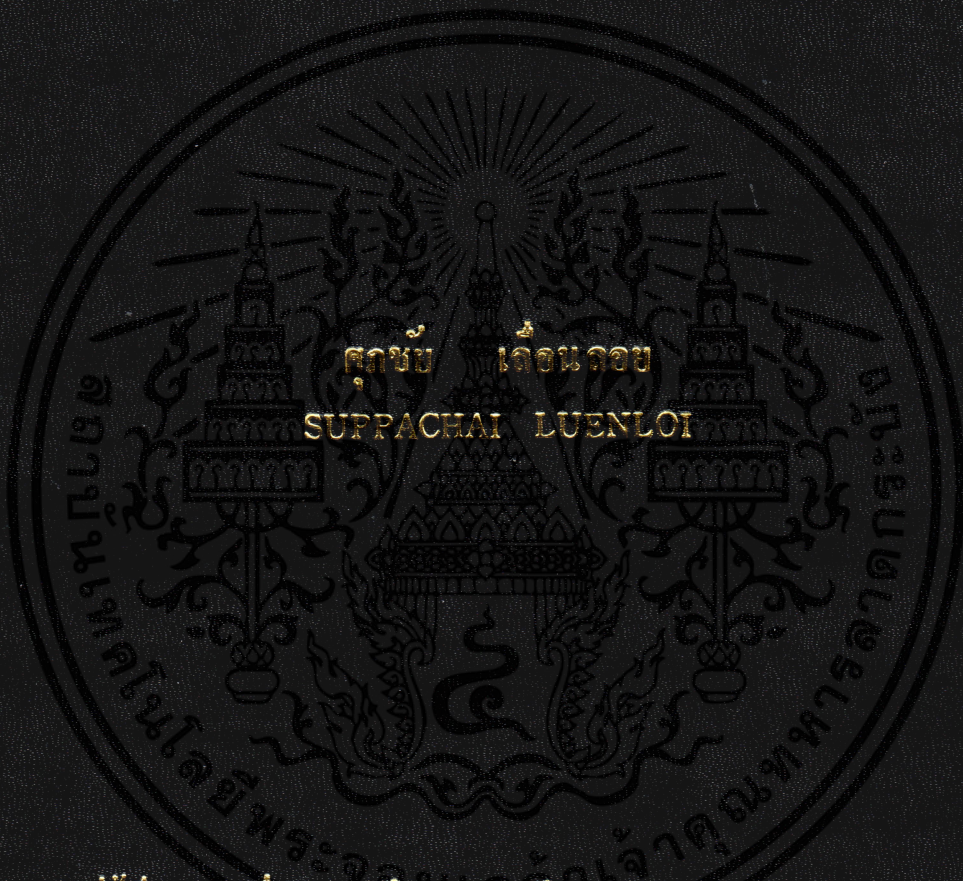


อิทธิพลของความชื้นของแกลบต่อคุณลักษณะการเผาไหม้

EFFECT OF RICE HUSK MOISTURE ON COMBUSTION
CHARACTERISTICS



ศุภชัย เลื่อนลอย
SUPRACHAI LUENLOI

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของงานวิจัยที่ศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิทยาศาตร์เครื่องกล

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2545

ISBN 974-648-853-8

อิทธิพลของความชื้นของแกลบต่อคุณลักษณะการเผาไหม้

EFFECT OF RICE HUSK MOISTURE ON COMBUSTION CHARACTERISTICS



ศุภชัย เลื่อนลอย

SUPPACHAI LUENLOI

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 43302
วัน, เดือน, ปี 26 ส.ค. 2545

b.....
.....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล บัณฑิตวิทยาลัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ใช้ภายในสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และเผยแพร่หรือเข้าถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ พ.ศ.2545

**EFFECT OF RICE HUSK MOISTURE ON COMBUSTION
CHARACTERISTICS**

SUPPACHAI LUENLOI



**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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
2002

ISBN 974-648-853-8



COPYRIGHT 2002

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ อิทธิพลของความชื้นของแกลบต่อคุณลักษณะการเผาไหม้
EFFECT OF RICE HUSK MOISTURE ON COMBUSTION
CHARACTERISTICS

ชื่อนักศึกษา นายศุภชัย เลื่อนลอย

รหัสประจำตัว 42062019

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล

อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.พงษ์เจต พรหมวงศ์

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.จารุวัตร	เจริญสุข	
ดร.จินดา	เจริญพรพาณิชย์	
ผศ.ดร.ชินรัชย์	เชียรพงษ์	
ผศ.จำลอง	ปราบแก้ว	
รศ.ดร.พงษ์เจต	พรหมวงศ์	

วัน/เดือน/ปี ที่สอบ 22 พฤษภาคม 2545 เวลา 14.00-16.00 น.

สถานที่สอบ ณ อาคาร 12 ชั้น ชั้น 4 (ห้อง E12-403)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเมื่อวันที่... 12... มีนาคม... 2545... พ.ศ. 2545... การค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	อิทธิพลของความชื้นของแกลบต่อคุณลักษณะการเผาไหม้
นักศึกษา	นายศุภชัย เลื่อนลอย
รหัสประจำตัว	42062019
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
พ.ศ.	2545

อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ รศ.ดร. พงษ์เจด พรหมวงศ์

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นการศึกษาถึงอิทธิพลของปริมาณความชื้นในเชื้อเพลิงแกลบต่อคุณลักษณะการเผาไหม้ในเตาเผาแบบวอร์เทค ระดับความชื้นของแกลบกำหนดไว้สามค่า คือ 7%, 11% และ 15% โดยน้ำหนัก โดยที่ทำการกำหนดอัตราการป้อนแกลบแตกต่างกันให้มีค่าเท่ากับ 0.2, 0.25 และ 0.3 kg/min ในการศึกษาที่ อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศจะปรับให้มีค่าอัตราส่วนสมมูล (Φ) เท่ากับ 0.8, 1.0 และ 1.2 สำหรับแต่ละอัตราการไหล ที่แต่ละอัตราส่วนสมมูลจะทำการกำหนดสัดส่วนของอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศทุกชนิดต่ออากาศทั้งหมด (อากาศปฐมภูมิ + ทุติภูมิ) (λ) ให้มีค่าเท่ากับ 0, 0.15 และ 0.25 เพื่อตรวจสอบอิทธิพลของ λ จากผลการทดลองพบว่าการกระจายอุณหภูมิสูงสุดจะอยู่ที่อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ 1.0 และความชื้นของเชื้อเพลิงแกลบเท่ากับ 7% โดยน้ำหนัก อยู่บริเวณกึ่งกลางเตา โดยทั่วไปพบว่าผลของ $\lambda = 0.25$ จะให้ผลดีกว่ากรณีอื่น และเมื่อความชื้นของเชื้อเพลิงแกลบมากขึ้นจะทำให้อุณหภูมิภายในเตาเผาลดต่ำลงและการเผาไหม้ไม่เสถียร ที่ $\Phi = 1.0$ และ $\lambda = 0.25$ เมื่อความชื้นของเชื้อเพลิงแกลบเท่ากับ 7% โดยน้ำหนักจะให้ก๊าซไอเสียออกมาน้อยที่สุดประกอบด้วย $O_2 = 2.1\%$, $CO_2 = 16.2\%$ และ $CO = 130$ ppm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	Effect of Rice Husk Moisture on Combustion Characteristics
Student	Mr. Suppachai Luenloi
Student ID.	42062019
Degree	Master of Engineering
Programme	Mechanical Engineering
Year	2002
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Dr. Pongjet Promvonge

ABSTRACT

This thesis concerns the study of effect of moisture content in rice husk fuel on combustion characteristics in a vortex combustor. Three moisture values of rice husk are set to be 7%, 11% and 15% by weight with different feeding rate of rice husk to the combustor given as 0.2, 0.25 and 0.3 kg/min in the present study. The mass flow rate of supply air was adjusted to let the equivalence ratio (Φ) become 0.8, 1.0 and 1.2 for each run. At each equivalence ratio, the ratio of volumetric flow rate of secondary air to total air (primary + secondary) (λ) was set to 0.00, 0.15 and 0.25 for investigating the influence of λ . The experiment shows the distribution of maximum temperature at $\Phi=1.0$ and at 7% moisture of rice husk fuel in the middle of annular region of the combustor. In general, better results are found for the case of $\lambda = 0.25$. The increase in moisture of rice husk fuel leads to the decrease in combustion temperature including unstable combustion. At $\Phi = 1.0$ and $\lambda = 0.25$, rice husk moisture of 7% by weight gives minimum emission of exhaust gas which is composed of $O_2 = 2.1\%$, $CO_2 = 16.2\%$ and $CO = 130$ ppm.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี ด้วยคำสั่งสอน , ให้คำแนะนำ , ให้คำปรึกษาและความกรุณาของ รศ.ดร.พงษ์เจต พรหมวงศ์ ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์และที่ปรึกษา ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่านและขอกราบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณท่านอาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลทุกท่าน ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้แก่ลูกศิษย์คนนี้ ขอขอบพระคุณยิ่ง

ขอขอบคุณบิดา มารดาและญาติ ๆ ของผู้วิจัยที่ให้กำลังใจ เลี้ยงดูและคอยอบรมสั่งสอนให้ผู้วิจัยก้าวมาถึงวันนี้

ขอขอบคุณนายสมชาย ศรีพัฒนะพิพัฒน์, นายชุตานา พลอยฉาย, นายสมิทธิ์ เอี่ยมสอาด, นายสมศักดิ์ โพธิ์ถวิลเกียรติ, นายวิศิษฐ์ ธิลาผาดิกุล, นายเมืองแก้ว ชุตัน, นายนิยม ศรีศิริสิทธิกุล, นายนิวัติ พิริยะรุ่งโรจน์ ที่คอยคำแนะนำและความช่วยเหลือ

ขอขอบคุณอาจารย์ณัฐพล ศิริสว่าง ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ศรีราชา ที่ได้ความอนุเคราะห์ให้แผ่นออริฟิส

ขอขอบคุณรุ่นน้องจากภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร ที่ได้ลงแรงช่วยเหลือในการทดลอง

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ให้ใช้เตาอบ

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมอาหาร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ให้ยืม Invertor เพื่อใช้ในการทดลอง

งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีจากการได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากกองทุนเพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน

ขอแสดงความขอบคุณ บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังเป็นอย่างสูง ที่ได้ให้ทุนสนับสนุนสำหรับวิทยานิพนธ์นี้

ศุภชัย เลื่อนลอย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	IX
สารบัญรูป	X
รายการคำย่อและสัญลักษณ์	XIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	2
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา	2
1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....	2
1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย	2
1.5 ขอบเขตของงานวิจัย	3
1.6 ขั้นตอนการศึกษา.....	3
1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 วรรณกรรมปริทรรศน์	5
2.1 รูปแบบของเตาเผาที่ใช้กับเชื้อเพลิงแข็ง	5
2.1.1 เตาแบบตะกรับ	5
2.1.2 เตาเผาไซโคลน	6
2.1.3 เตาเผาฟลูอิดไคซ์เบด	6
2.1.4 เตาเผาแบบวอร์เทค	7
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	7
2.2.1 งานวิจัยของ ศศิวิมล สูงสว่าง	7
2.2.2 งานวิจัยของ อติศักดิ์ ชูจินดา	8
2.2.3 งานวิจัยของ บุญเรือง ศรีสวัสดิ์.....	9
2.2.4 งานวิจัยของ รัชชัย ท้วถวิล และ สันติ วัชรอากาศไพบูลย์.....	10
2.2.5 งานวิจัยของ สุวิทย์ เตีย และคณะ.....	11
2.2.6 งานวิจัยของ อภิชัย เทอดเทียนวงษ์.....	12

เอกสารนี้เป็น
ไม่ว่ากรณีใดๆ

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.2.7 งานวิจัยของ สุพจน์ นำนำโชค.....	13
2.2.8 งานวิจัยของ นิวัติ พิริยะรุ่งโรจน์.....	15
2.2.9 งานวิจัยของ Tim T. Fu and Sen Nieh.....	18
บทที่ 3 ทฤษฎี.....	23
3.1 เชื้อเพลิงชีวมวล.....	23
3.1.1 ประเภทของเชื้อเพลิงชีวมวล.....	23
3.1.2 คุณสมบัติของเชื้อเพลิงชีวมวล.....	24
3.2 ทฤษฎีการเผาไหม้.....	25
3.2.1 การผสม.....	25
3.2.2 การติดไฟและการลุกไหม้.....	26
3.3 การเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง.....	27
3.3.1 แบบจำลองการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง.....	28
3.3.2 แบบจำลอง Unreacted core.....	28
3.4 อากาศชั้น.....	30
3.4.1 อากาศแห้งและอากาศชื้น.....	30
3.4.2 ความดันย่อยของอากาศและความดันไอ.....	31
3.4.3 อัตราส่วนความชื้น.....	31
3.4.4 ความชื้นสัมพัทธ์.....	32
3.4.5 อุณหภูมิกระเปาะแห้งและอุณหภูมิกระเปาะเปียก.....	32
3.5 การอบแห้ง.....	33
3.5.1 ความชื้นในวัสดุ.....	33
3.5.2 อัตราส่วนความชื้นสมดุล.....	33
3.5.3 อัตราส่วนความชื้นอิสระ.....	34
3.5.4 อัตราส่วนความชื้นวิกฤต.....	34
3.5.5 วิธีการลดความชื้น.....	34
3.5.6 กลไกที่เกิดขึ้นระหว่างการอบแห้ง.....	35
3.5.7 อัตราการอบแห้งหรืออัตราการระเหยของความชื้น.....	38
3.5.8 ตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการอบแห้ง.....	40

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.6 อัตราส่วนสมมูล	40
3.7 ออริฟิส	40
บทที่ 4 การดำเนินการวิจัย.....	44
4.1 การคำนวณปริมาณอากาศที่ต้องการใช้ในการเผาไหม้.....	45
4.2 การคำนวณความสูงของระดับน้ำของมาโนมิเตอร์	49
4.3 การเตรียมความชื้น.....	53
4.4 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	54
4.4.1 ส่วนของเตาเผาแบบวอร์เทค	54
4.4.2 ชุดป้อนอากาศปฐมภูมิและทุติยภูมิ	55
4.4.3 ชุดป้อนเชื้อเพลิงแก๊ส	57
4.4.4 ชุดอุ่นเตา.....	59
4.4.5 ชุดอุปกรณ์วัดและอ่านอุณหภูมิ	59
4.4.6 ชุดวิเคราะห์ก๊าซไอเสีย.....	60
4.4.7 ชุดกำจัดเถ้าลอย	61
4.5 ขั้นตอนการทดลอง	62
บทที่ 5 ผลการทดลองและการวิเคราะห์.....	63
5.1 เชื้อเพลิงแก๊สที่มีความชื้น 7% โดยน้ำหนัก.....	63
5.1.1 อิทธิพลของอัตราส่วนสมมูล.....	63
5.1.1.1 กรณีศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนสมมูลเมื่อ $\lambda = 0.00$	64
5.1.1.2 กรณีศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนสมมูลเมื่อ $\lambda = 0.15$	65
5.1.1.3 กรณีศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนสมมูลเมื่อ $\lambda = 0.25$	67
5.1.2 อิทธิพลของปริมาณอากาศทุติยภูมิต่ออากาศทั้งหมด	67
5.1.2.1 กรณีศึกษาอิทธิพลของ λ เมื่อ $\Phi = 0.8$	67
5.1.2.2 กรณีศึกษาอิทธิพลของ λ เมื่อ $\Phi = 1.0$	69
5.1.2.3 กรณีศึกษาอิทธิพลของ λ เมื่อ $\Phi = 1.2$	69
5.2 เชื้อเพลิงแก๊สที่มีความชื้น 11% โดยน้ำหนัก.....	69
5.2.1 อิทธิพลของอัตราส่วนสมมูล.....	69

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.2.1.1	กรณีศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนสมมูลเมื่อ $\lambda = 0.00$	70
5.2.1.2	กรณีศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนสมมูลเมื่อ $\lambda = 0.15$	71
5.2.1.3	กรณีศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนสมมูลเมื่อ $\lambda = 0.25$	72
5.2.2	อิทธิพลของปริมาณอากาศชุดิยภูมิต่ออากาศทั้งหมด	73
5.2.2.1	กรณีศึกษาอิทธิพลของ λ เมื่อ $\Phi = 0.8$	73
5.2.2.2	กรณีศึกษาอิทธิพลของ λ เมื่อ $\Phi = 1.0$	73
5.2.2.3	กรณีศึกษาอิทธิพลของ λ เมื่อ $\Phi = 1.2$	74
5.3	เชื้อเพลิงแก๊สที่มีความชื้น 15% โดยน้ำหนัก.....	75
5.3.1	อิทธิพลของอัตราส่วนสมมูล.....	75
5.3.1.1	กรณีศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนสมมูลเมื่อ $\lambda = 0.00$	75
5.3.1.2	กรณีศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนสมมูลเมื่อ $\lambda = 0.15$	77
5.3.1.3	กรณีศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนสมมูลเมื่อ $\lambda = 0.25$	77
5.3.2	อิทธิพลของปริมาณอากาศชุดิยภูมิต่ออากาศทั้งหมด	78
5.3.2.1	กรณีศึกษาอิทธิพลของ λ เมื่อ $\Phi = 0.8$	79
5.3.2.2	กรณีศึกษาอิทธิพลของ λ เมื่อ $\Phi = 1.0$	80
5.3.2.3	กรณีศึกษาอิทธิพลของ λ เมื่อ $\Phi = 1.2$	80
5.4	อิทธิพลของอัตราการป้อนแก๊ส.....	80
5.4.1	อิทธิพลของอัตราการป้อนแก๊สต่อการเผาไหม้ กรณีความชื้น 7%.....	80
5.4.2	อิทธิพลของอัตราการป้อนแก๊สต่อการเผาไหม้ กรณีความชื้น 11%.....	82
5.4.3	อิทธิพลของอัตราการป้อนแก๊สต่อการเผาไหม้ กรณีความชื้น 15%.....	82
5.5	อิทธิพลของความชื้นของแก๊ส.....	84
5.5.1	อิทธิพลของความชื้น กรณีของอัตราการป้อนแก๊สเท่ากับ 0.2 kg/min.....	84
5.5.2	อิทธิพลของความชื้น กรณีของอัตราการป้อนแก๊สเท่ากับ 0.25 kg/min.....	88
5.5.3	อิทธิพลของความชื้น กรณีของอัตราการป้อนแก๊สเท่ากับ 0.3 kg/min.....	89

บทที่ 6	สรุปและข้อเสนอแนะ.....	92
---------	------------------------	----

6.1	สรุปผล.....	92
6.2	ข้อเสนอแนะ.....	93

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บรรณานุกรม	94
ภาคผนวก ก	96
ภาคผนวก ข	99
ภาคผนวก บทความที่ได้รับการตีพิมพ์	106
ประวัติผู้เขียน	113



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 มิติของเตาเผาแบบไซโคลน.....	14
2.2 มิติหลักและตัวแปรในการออกแบบ.....	18
4.1 องค์ประกอบของเชื้อเพลิงแกลบ.....	45
4.2 แสดงปริมาณอากาศที่ใช้ในการทดลองกรณีอัตราการป้อนแกลบเท่ากับ 0.2 kg/min.....	48
4.3 แสดงปริมาณอากาศที่ใช้ในการทดลองกรณีอัตราการป้อนแกลบเท่ากับ 0.25 kg/min.....	48
4.4 แสดงปริมาณอากาศที่ใช้ในการทดลองกรณีอัตราการป้อนแกลบเท่ากับ 0.3 kg/min.....	49
4.5 แสดงความสูงของระดับน้ำในमानอมิเตอร์ของอากาศปฐมภูมิและทุติยภูมิที่อัตราการป้อนแกลบเท่ากับ 0.2 kg/min.....	52
4.6 แสดงความสูงของระดับน้ำในमानอมิเตอร์ของอากาศปฐมภูมิและทุติยภูมิที่อัตราการป้อนแกลบเท่ากับ 0.25 kg/min.....	53
4.7 แสดงความสูงของระดับน้ำในमानอมิเตอร์ของอากาศปฐมภูมิและทุติยภูมิที่อัตราการป้อนแกลบเท่ากับ 0.3 kg/min.....	53
4.8 แสดงช่วงของปริมาณก๊าซไอเสียที่สามารถวิเคราะห์ได้.....	60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แผนภาพของเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง	8
2.2 ใคอะแกรมขบวนการของเตาเผาเกลือ	9
2.3 แสดงรูปร่างลักษณะของเตาเผาแบบหมุนวน	11
2.4 เตาเผาไหม้แบบฟลูอิด ไคซ์เบค	12
2.5 แสดงลักษณะเตาเผา และอุปกรณ์ในการทดลอง	13
2.6 เตาเผาแบบไซโคลนของ นายสุพจน์ นำน้าโชค	14
2.7 ใคอะแกรมอุปกรณ์การทดลอง	15
2.8 แสดงอุปกรณ์การทดลอง	16
2.9 ระบบการทดลองแบบเตาเผาแบบวอร์เทค	18
2.10 การแพร่กระจายของอุณหภูมิภายในเตาเผาไหม้	20
3.1 องค์ประกอบของเชื้อเพลิงแข็ง	27
3.2 ปฏิกริยาการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง	28
3.3 แบบจำลองการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง	29
3.4 บริเวณการเกิดการเผาไหม้	29
3.5 ลักษณะชั้นเชื้อเพลิงระหว่างการเผาไหม้	29
3.6 แสดงอัตราส่วนความชื้นสมดุลสำหรับวัสดุประเภทต่าง ๆ ที่อุณหภูมิ 25°C	34
3.7 แสดงน้ำบนผิวหน้าวัสดุที่ระเหยสู่ชั้นบรรยากาศ	35
3.8 การถ่ายเทความร้อนและมวลในการวัด	36
3.9 แสดงน้ำในวัสดุที่เกิดการระเหย	37
3.10 แสดงอัตราการระเหยที่ขนาดความชื้นต่าง ๆ	38
3.11 แสดงอัตราการอบแห้งลดลงที่มีสองระยะ	39
3.12 แผ่นออริฟิสมมาตรฐาน	41
3.13 แสดงโครงสร้างเชิงเรขาคณิตและจุดวัดความดันของออริฟิส	41
3.14 แสดงการไหลผ่านแผ่นออริฟิส	42
3.15 ออริฟิสแบบต่าง ๆ	42
4.1 แสดงลักษณะของเตาเผาแบบวอร์เทค	44
4.2 แสดงภาพของเตาเผาแบบวอร์เทคและท่อทิ้งเถ้าที่ใช้ทดลอง	55
4.3 แสดง Blower และ Motor	55
4.4 แสดง DC Supply	56

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.5 แสดงแผ่นออร์ฟิส	56
4.6 แสดงมานอมิเตอร์	57
4.7 แสดงชุดแยกอากาศทุติยภูมิ	57
4.8 แสดงชุดป้อนเชื้อเพลิงแกลบ	58
4.9 แสดงมอเตอร์และชุดสายพาน	58
4.10 แสดงถังแก๊ส	59
4.11 แสดงหัวเผา	59
4.12 แสดงเทอร์โมคัพเปิ้ล และดิจิตอล อินดิเคเตอร์	60
4.13 แสดงเทอร์โมคัพเปิ้ล	60
4.14 แสดงเครื่องวิเคราะห์ก๊าซไอเสีย	61
4.15 แสดงไซโคลน	61
5.1 แสดงการกระจายอุณหภูมิภายในเตาเผาที่อัตราการป้อนแกลบเท่ากับ 0.3 kg/min ที่ความชื้นของแกลบ 7%	65
5.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างก๊าซไอเสียกับอัตราส่วนผสม เมื่ออัตราการป้อนแกลบเท่ากับ 0.3 kg/min ที่ความชื้น 7%	66
5.3 แสดงการกระจายอุณหภูมิภายในเตาเผาเมื่ออัตราการป้อนเชื้อเพลิงแกลบเท่ากับ 0.3 kg/min และความชื้นของเชื้อเพลิงแกลบ 7%	68
5.4 แสดงการกระจายอุณหภูมิภายในเตาเผาที่อัตราการป้อนแกลบเท่ากับ 0.3 kg/min ที่ความชื้นของแกลบ 11%	70
5.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างก๊าซไอเสียกับอัตราส่วนผสม เมื่ออัตราการป้อนแกลบเท่ากับ 0.3 kg/min ที่ความชื้น 11%	72
5.6 แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเตาเผาเมื่ออัตราการป้อนเชื้อเพลิงแกลบเท่ากับ 0.3 kg/min และความชื้นของแกลบ 11%	74
5.7 แสดงการกระจายอุณหภูมิภายในเตาเผาที่อัตราการป้อนแกลบเท่ากับ 0.3 kg/min และความชื้นของแกลบ 15%	76
5.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างก๊าซไอเสียกับอัตราส่วนผสม เมื่ออัตราการป้อนแกลบเท่ากับ 0.3 kg/min ที่ความชื้น 15%	78
5.9 แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเตาเผาเมื่ออัตราการป้อนเชื้อเพลิงแกลบเท่ากับ 0.3 kg/min และความชื้นของแกลบ 15%	79

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.10 แสดงการกระจายอุณหภูมิภายในเตาเผาที่ $\Phi = 1.0$ และ $\lambda = 0.25$	81
5.11 ความสัมพันธ์ระหว่างก๊าซไอเสียกับปริมาณความชื้นของแกลบ ที่อัตราการป้อนต่าง ๆ เมื่อ $\Phi = 1.0$ และ $\lambda = 0.25$	83
5.12 แสดงการกระจายอุณหภูมิภายในเตาเผาที่อัตราการป้อนแกลบเท่ากับ 0.2 kg/min และ $\lambda = 0.25$	85
5.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างองค์ประกอบของก๊าซไอเสียกับอัตราส่วนสมมูล เมื่อความชื้นในเชื้อเพลิงแกลบมีค่าต่างกัน ที่อัตราการป้อนแกลบเท่ากับ 0.2 kg/min	86
5.14 แสดงการกระจายอุณหภูมิภายในเตาเผา ที่อัตราการป้อนแกลบเท่ากับ 0.25 kg/min และ $\lambda = 0.25$	87
5.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างองค์ประกอบของก๊าซไอเสียกับอัตราส่วนสมมูล เมื่อความชื้นในเชื้อเพลิงแกลบมีค่าต่างกัน ที่อัตราการป้อนแกลบเท่ากับ 0.25 kg/min	88
5.16 แสดงการกระจายอุณหภูมิภายในเตาเผาที่อัตราการป้อนแกลบเท่ากับ 0.3 kg/min และ $\lambda = 0.25$	89
5.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างองค์ประกอบของก๊าซไอเสียกับอัตราส่วนสมมูล เมื่อความชื้นในเชื้อเพลิงแกลบมีค่าต่างกัน ที่อัตราการป้อนแกลบเท่ากับ 0.3 kg/min	90

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายการคำย่อและสัญลักษณ์

A_0	พื้นที่หน้าตัดรูออริฟิส , (m ²)
A_p	พื้นที่หน้าตัดท่ออากาศปฐมภูมิ , (m ²)
A_s	พื้นที่หน้าตัดท่ออากาศทุติยภูมิ , (m ²)
AF	อัตราส่วนของอากาศต่อเชื้อเพลิง
AF_{ac}	อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงทางปฏิบัติ
AF_{th}	อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงทางทฤษฎี
C_d	discharge coefficient
D_p	เส้นผ่านศูนย์กลางของท่ออากาศปฐมภูมิ , (m)
D_s	เส้นผ่านศูนย์กลางของท่ออากาศทุติยภูมิ , (m)
DW	น้ำหนักของแกลบแห้ง , (kg)
d_p	เส้นผ่านศูนย์กลางรูของออริฟิสของท่ออากาศปฐมภูมิ , (m)
d_s	เส้นผ่านศูนย์กลางรูของออริฟิสของท่ออากาศทุติยภูมิ , (m)
g	สัมประสิทธิ์แรงโน้มถ่วงของโลก , (m/s ²)
MC_{wet}	ปริมาณความชื้นตามมาตรฐานเปียก , (%)
MW	มวลโมเลกุล , (kmol)
m_a	มวลของอากาศแห้ง , (kg)
m_g	ปริมาณไอน้ำในอากาศสูงสุดที่อุณหภูมิใด ๆ , (kg)
m_v	มวลของไอน้ำ , (kg)
\dot{m}_{air}	อัตราการไหลของอากาศ (kg/s)
\dot{m}_{fuel}	อัตราการป้อนแกลบ , (kg/min)
n	จำนวนโมล
P	ความดันของอากาศชื้น , (Pa)
P_a	ความดันย่อยของอากาศแห้ง , (Pa)
P_g	ความดันของอากาศอิ่มตัวที่อุณหภูมิใด ๆ , (Pa)
P_v	ความดันไอ , (Pa)
Q_{ac}	อัตราการไหลจริงเชิงปริมาตร , (m ³ /s)
R	รัศมีภายในของเตาเผาออร์ทอก , (m)
R_a	ค่าคงที่ของอากาศ , (kJ/kg·K)
R_v	ค่าคงที่ของไอน้ำ , (kJ/kg·K)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง หากท่านนั้น ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่าการ R_a ใดๆทั้งสิ้น อีกค่าคงที่ของอากาศ , (kJ/kg·K) ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายการคำย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

r	พิกัดในแนวรัศมีภายในเตาเผาออร์ต , (m)
T	อุณหภูมิ , ($^{\circ}C$)
T_{db}	อุณหภูมิกระเปาะแห้ง , ($^{\circ}C$)
T_{wb}	อุณหภูมิกระเปาะเปียก , ($^{\circ}C$)
V	ปริมาตร , (m^3)
WW	น้ำหนักของแกลบเปียก , (kg)
X	ความสูงของเตาเผาออร์ตในแนวตั้ง , (m)
x	ระยะตำแหน่งความสูงของเตาเผาออร์ตในแนวตั้ง , (m)
Φ	อัตราส่วนสมมูล
ϕ	ความชื้นสัมพัทธ์
ω	อัตราส่วนความชื้น , (kg/kg-dry air)
ρ_a	ความหนาแน่นของอากาศ , (kg/m^3)
ρ_g	ความหนาแน่นของอากาศอิมิตัวที่อุณหภูมิใด ๆ , (kg/m^3)
ρ_v	ความหนาแน่นของไอน้ำ , (kg/m^3)
ρ_w	ความหนาแน่นของน้ำ , (kg/m^3)
γ	น้ำหนักจำเพาะ , (N/m^3)
β	อัตราส่วนระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางรูของอริฟิสต่อเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ
Δh	ความสูงของระดับน้ำในมานอมิเตอร์ , (m)
λ	อัตราส่วนการไหลเชิงปริมาตรของอากาศทุกชนิดต่ออากาศทั้งหมด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

เนื่องจากในปัจจุบันนี้ความต้องการทางด้านพลังงานความร้อนที่จะนำมาใช้ในกระบวนการผลิตทางอุตสาหกรรมมีปริมาณเพิ่มมากขึ้นเรื่อย ๆ ทำให้จะต้องหาแหล่งเชื้อเพลิงใหม่ ๆ ที่จะนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับเปลี่ยนรูปพลังงานให้ได้เป็นพลังงานความร้อนเพื่อจะนำไปใช้งานต่อไป ซึ่งในปัจจุบันจะพบว่าเชื้อเพลิงที่มีใช้กันอยู่ในอุตสาหกรรมส่วนใหญ่จะเป็นเชื้อเพลิงที่ได้มาจากพวกฟอสซิล เช่น น้ำมันเชื้อเพลิง, ก๊าซธรรมชาติ, ถ่านหิน เป็นต้น ซึ่งในกระบวนการเผาไหม้จะทำให้เชื้อเพลิงเหล่านี้ทำปฏิกิริยากับออกซิเจนและจะได้พลังงานความร้อนออกมาเพราะฉะนั้นจะเห็นได้ว่าเชื้อเพลิงเหล่านี้จะหมดไปกับการเผาไหม้ จึงมีความจำเป็นจะต้องใช้เชื้อเพลิงจำนวนมากในการจะได้มาซึ่งพลังงานความร้อนที่ใช้ในกระบวนการผลิตที่อยู่ในทางอุตสาหกรรม โดยที่เชื้อเพลิงพวกฟอสซิลเหล่านี้จะต้องใช้เวลานานในการสะสมและทับถมเพื่อเกิดการรวมตัวและเปลี่ยนรูปทางเคมีกลายเป็นน้ำมันหรือก๊าซที่จะนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงได้ ในปัจจุบันจะพบว่าได้มีการนำเอามาใช้เป็นจำนวนมาก ซึ่งจากผลการสำรวจจะพบว่าปริมาณน้ำมันสำรองที่จะนำมาใช้ได้เป็นระยะเวลาอีกไม่กี่สิบปีก็จะหมด ซึ่งจะเห็นได้ว่าในปัจจุบันในรถยนต์ก็ได้มีการออกแบบเครื่องยนต์รุ่นใหม่ที่มีการใช้พลังงาน ไฟฟ้าในการขับเคลื่อนเพิ่มมากขึ้นเพื่อรองรับกับการหมดลงของน้ำมันเชื้อเพลิง และเมื่อเร็ว ๆ นี้จะพบว่าได้มีการคิดค้นน้ำมันแก๊สโซฮอล์และน้ำมันไบโอดีเซลเพื่อลดปริมาณการนำเข้าของน้ำมันจีนและน้ำมันดีเซลเพราะประเทศไทยนั้นไม่สามารถผลิตน้ำมันได้เองจึงต้องอาศัยการนำเข้าจากต่างประเทศทำให้เกิดการเสียดุลการค้ากับประเทศผู้ค้าน้ำมันมาโดยตลอด แต่วิธีการดังกล่าวเป็นเพียงแนวทางในการลดปริมาณการนำเข้าเท่านั้นและในปัจจุบันยังได้มีการคิดค้นเพื่อหาแหล่งพลังงานอื่น ๆ เพื่อนำมาใช้ทดแทน เช่น พลังงานแสงอาทิตย์, พลังงานจากลม เป็นต้น หากทำการพิจารณาจะพบว่าประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรมจะมีเชื้อเพลิงประเภทชีวมวลซึ่งไม่ว่าจะเป็นเศษวัสดุที่เหลือใช้ทางการเกษตรเช่น แกลบ, ฟางข้าว, ชังข้าวโพด, เปลือกถั่วลิสง เป็นต้น หรือทางอุตสาหกรรม เช่น ขี้เถ้า, กากมันสำปะหลัง, ขานอ้อย เป็นต้น ยังไม่ได้มีการนำมาใช้ประโยชน์จากเชื้อเพลิงชีวมวลเหล่านี้อย่างเต็มที่ หากมีการปล่อยทิ้งไว้ยังจะก่อให้เกิดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อมอีกด้วย เพราะฉะนั้นควรจะหาแนวทางในการนำวัสดุเหล่านี้มาใช้เป็นเชื้อเพลิงเพื่อจะได้พลังงานความร้อนออกมาใช้งานต่อไป เมื่อทำการศึกษาพบว่าประเทศไทยมีปริมาณแกลบเป็นจำนวนมากซึ่งสามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงได้เป็นอย่างดีเพราะทุกภาคของประเทศไทยมีการทำนาจึงมีการสีข้าวเปลือกเพื่อนำข้าวสารไปบริโภคและได้แกลบออกมาด้วยจึงไม่น่าจะนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงเพื่อผลิตพลังงานความร้อนต่อไป โดยที่ในปัจจุบันได้มีการนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับเตาเผาแกลบ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

จากการศึกษาที่ผ่านมาได้ทำการศึกษาเบื้องต้นของการเผาไหม้ของแกลบในเตาเผาแบบวอร์เทค โดยทำการศึกษาถึงผลของอัตราส่วนสมมูลที่มีผลต่อการเผาไหม้ แต่จากการทดลองจะพบว่าความชื้นในเชื้อเพลิงแกลบมีผลกระทบต่อการกระจายอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ เพราะฉะนั้นควรจะทำการศึกษาถึงอิทธิพลของความชื้นในเชื้อเพลิงแกลบที่มีผลต่อคุณลักษณะการเผาไหม้ เพื่อที่จะสามารถนำไปปรับปรุงคุณภาพของเชื้อเพลิงแกลบก่อนที่จะป้อนเข้าสู่ห้องเผาไหม้เพื่อจะทำให้อุณหภูมิภายในห้องไหม้สูงและจะได้ไม่ต้องสูญเสียความร้อนเป็นปริมาณมากเกินไปในการไล่ความชื้นที่มีอยู่ในเชื้อเพลิง เพราะฉะนั้นจึงควรที่จะทำการศึกษาถึงผลของความชื้นในแกลบ โดยที่ทำการเปลี่ยนแปลงค่าความชื้นต่าง ๆ เพื่อศึกษาปริมาณความชื้นที่เหมาะสมกับเตาเผาแบบวอร์เทค และยังสามารถเปลี่ยนแปลงอัตราการป้อนแกลบเข้าสู่ห้องเผาไหม้ เพื่อศึกษาอัตราการป้อนแกลบที่เหมาะสมกับเตาเผาที่ได้ทำการออกแบบไว้ ตัวแปรที่สำคัญที่มีการเปลี่ยนแปลงอีกคือ อัตราส่วนสมมูลและอัตราส่วนอากาศหตุติภูมิต่ออากาศทั้งหมดที่มีผลต่อการเผาไหม้ เพื่อที่จะอัตราส่วนที่เหมาะสมโดยที่สังเกตจากค่าอุณหภูมิภายในเตาเผาและปริมาณก๊าซไอเสียที่ออกจากห้องเผาไหม้

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. เพื่อทำการศึกษาถึงอิทธิพลของความชื้นของเชื้อเพลิงแกลบต่อการกระจายอุณหภูมิภายในเตาเผาแบบวอร์เทค
2. เพื่อทำการศึกษาปริมาณความชื้นของเชื้อเพลิงแกลบที่เหมาะสมกับเตาเผาแบบวอร์เทค
3. เพื่อทำการศึกษาปริมาณก๊าซไอเสียที่ออกจากห้องเผาไหม้ที่ค่าความชื้นต่าง ๆ ของแกลบ

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

สมมติให้ระบบที่ทำการศึกษากเป็นระบบแบบอะเดียบาติกและเชื้อเพลิงแกลบที่ใช้ในการทดลองเป็นแกลบขนาดปกติ (2 มม. x 8 มม.)

1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย

เตาเผาที่ใช้ในการทดลองนี้เป็นเตาเผาแบบวอร์เทค ซึ่งเป็นการนำเอาข้อดีของเตาเผาแบบไซโคลน, เตาฟลูอิดไดซ์เบด, ห้องเผาไหม้ถ่านหินแบบหมุนวน, การเผาไหม้หลายขั้นตอน มาใช้เป็นแนวคิดในการออกแบบ ซึ่งอาศัยแนวคิดการหมุนวนของเชื้อเพลิงในห้องเผาไหม้เพื่อให้เกิดความปั่นป่วนซึ่งส่งผลให้เกิดการผสมคลุกเคล้ากันระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงได้ดีขึ้นเพราะว่าเชื้อเพลิงแกลบนั้นเป็นเชื้อเพลิงแข็งมีความยุ่งยากกว่าเชื้อเพลิงก๊าซและของเหลวที่จะให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์โดยที่ความปั่นป่วนภายในห้องเผาไหม้จะทำให้เชื้อเพลิงที่เกิดจากการเผาไหม้หลุดออก

จากผิวเคลือบที่เกิดการเผาไหม้แล้วทำให้ได้พื้นที่ผิวสำหรับออกซิเจนจากอากาศเข้าไปทำปฏิกิริยาทางเคมีกับเชื้อเพลิงเคลือบส่วนที่เหลือและอากาศสุดท้ายยังช่วยเพิ่มระยะเวลาที่เชื้อเพลิงอยู่ในห้องเผาไหม้ได้นานยิ่งขึ้นทำให้เกิดการเผาไหม้สมบูรณ์เพิ่มขึ้น และแนวทางการนำเชื้อเพลิงเคลือบซึ่งมีความชื้นมาใช้เป็นเชื้อเพลิงหากสามารถใช้เชื้อเพลิงเคลือบที่มีความชื้นสูงเป็นเชื้อเพลิงได้เราสามารถลดค่าใช้จ่ายในการลดความชื้นในเคลือบได้ ซึ่งในการทดลองนี้จะทำการศึกษาถึงช่วงของความชื้นของเคลือบที่เหมาะสมกับเตาเผาแบบวอร์เทคนี้

1.5 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ค่าความชื้นของเชื้อเพลิงเคลือบที่ทำการทดลองจำนวน 3 ค่า คือ 7%, 11% และ 15% โดยน้ำหนัก
2. อัตราการป้อนเคลือบเข้าสู่เตาเผาจำนวน 3 ค่า คือ 0.2, 0.25 และ 0.3 kg/min
3. ค่าอัตราส่วนอากาศสุดท้ายต่ออากาศทั้งหมด (λ) จำนวน 3 ค่า คือ 0 : 100 ($\lambda = 0.00$), 15 : 85 ($\lambda = 0.15$), 25 : 75 ($\lambda = 0.25$)
4. ค่าอัตราส่วนสมมูล (Equivalence ratio, Φ) ทำการกำหนดไว้เท่ากับ 0.8, 1.0 และ 1.2
5. ทำการวัดปริมาณก๊าซไอเสียที่ออกจากห้องเผาไหม้

1.6 ขั้นตอนการศึกษา

1. ทำการศึกษาหาข้อมูลเกี่ยวกับเตาเผาชนิดต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย
2. ศึกษาคุณสมบัติของเชื้อเพลิงเคลือบ
3. ทำการศึกษาทฤษฎีการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงเคลือบ
4. เตรียมเครื่องมืออุปกรณ์ในการทดลอง
5. ทำการทดลองและเก็บบันทึกผลการทดลอง
6. นำข้อมูลที่ได้มาทำการวิเคราะห์และสรุปผล

1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทำให้ทราบถึงปริมาณความชื้นที่เหมาะสมของเชื้อเพลิงเคลือบที่ใช้กับเตาเผาแบบวอร์เทค
2. สามารถนำวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรมาใช้เป็นแหล่งพลังงานทดแทนแหล่งพลังงานที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน
3. สามารถนำเคลือบที่เหลือจากกระบวนการสีข้าวมาใช้ให้เป็นประโยชน์มากยิ่งขึ้นกว่าที่เป็นอยู่
4. สามารถนำความร้อนที่ได้จากเตาเผาแบบวอร์เทคไปใช้ในทางอุตสาหกรรมได้

5. สามารถลดปริมาณของแกลบซึ่งเป็นเศษวัสดุเหลือใช้จากกระบวนการสีข้าวให้ลดน้อยลงก่อนที่จะทำให้เกิดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อม
6. เป็นต้นแบบของเตาเผาแกลบเพื่อนำเอาความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ใช้ในการอบพืชผลทางการเกษตรสำหรับชนบท
7. สามารถลดปริมาณก๊าซไอเสียที่ออกจากเตาเผาที่มีใช้อยู่ในปัจจุบันนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

วรรณกรรมปริทรรศน์

ปัจจุบันนี้จะเห็นได้ว่าความต้องการพลังงานมีปริมาณเพิ่มมากขึ้นอย่างต่อเนื่อง ๆ จากมีการพัฒนาทางด้านอุตสาหกรรมอย่างรวดเร็ว ซึ่งในขณะนี้โดยส่วนใหญ่เชื้อเพลิงที่มีใช้กันอยู่ในอุตสาหกรรมเป็นเชื้อเพลิงจำพวกน้ำมันและถ่านหิน เพื่อให้ได้มาซึ่งพลังงานความร้อนมาใช้ในอุตสาหกรรมต่อไป เมื่อทำการพิจารณาก็จะเห็นได้ว่าราคาของเชื้อเพลิงเหล่านี้มีราคาค่อนข้างสูงชันและจะหมดไปในอนาคตอันใกล้นี้ โดยเฉพาะเชื้อเพลิงพวกถ่านหินหากมีการควบคุมการเผาไหม้ไม่ดีแล้วจะก่อให้เกิดมลพิษออกสู่สิ่งแวดล้อม เพราะฉะนั้นควรจะหาแหล่งเชื้อเพลิงใหม่ ๆ มาทดแทนเพื่อให้ได้พลังงานความร้อนมาใช้ในอุตสาหกรรม เมื่อทำการศึกษาก็จะเห็นว่าประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรมซึ่งจะมีเชื้อเพลิงชีวมวลซึ่งถือว่าเป็นเชื้อเพลิงแข็งอยู่อย่างมากมายไม่ว่าจะเป็นแกลบ, ฟางข้าว, ชี้อเลื้อย และกากมันสำปะหลัง เป็นต้น แต่ยังไม่มีการนำมาใช้ให้เป็นประโยชน์มากนักและอุปกรณ์เครื่องมือที่จะทำให้ได้มาซึ่งพลังงานความร้อนจากเชื้อเพลิงเหล่านี้คือเตาเผา ซึ่งจากการศึกษาพบว่าพอจะแยกประเภทของเตาเผาที่มีใช้อยู่ในปัจจุบันนี้

2.1 รูปแบบของเตาเผาที่ใช้กับเชื้อเพลิงแข็ง

2.1.1 เตาแบบตะกรับ

เตาชนิดนี้ในปัจจุบันใช้กันอยู่ในโรงสีข้าว โดยใช้แกลบเป็นเชื้อเพลิง ตะกรับที่มีอยู่ด้วยกัน 2 แบบ คือ

1. แบบเรียบ (Flat grate)
2. แบบชันบันไดเอียงเป็นมุม (Inclined step grate)

เตาแบบนี้เชื้อเพลิงจะไหลลงบนตะกรับเอียงเป็นชันบันไดและเกิดการเผาไหม้โดยการเผาภายในเตา ซึ่งเป็นการก่อโดยใช้อิฐและซีเมนต์จะไหลลงสู่ด้านล่างของตะกรับ

ข้อดี

1. ราคาถูก
2. โครงสร้างไม่ซับซ้อน
3. ค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานถูก

ข้อเสีย

1. ประสิทธิภาพต่ำ
2. เชื้อเพลิงถูกเผาไหม้ไม่หมด
3. ต้องใช้คนเขี่ยซีเมนต์ออกมาจากเตา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆก็ตาม หากมีข้อสงสัยหรือต้องการข้อมูลเพิ่มเติม กรุณาติดต่ออาจารย์ผู้จัดทำเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2 เตาเผาไซโคลน (Cyclone Furnaces)

การเผาไหม้ในเตาไซโคลน นำมาใช้ในราวปลายคริสต์ทศวรรษที่ 1930 นับเป็นระบบเผาไหม้ถ่านหินระบบที่สามที่ได้รับการพัฒนาขึ้นมา เตาเผาไซโคลนได้รับการออกแบบจากแนวคิดที่ต้องการให้ใช้ได้กับถ่านหินทุกชนิด โดยเฉพาะอย่างยิ่งถ่านหินเกรดต่ำ จึงเป็นที่นิยมใช้กันในปัจจุบัน เตาเผาลักษณะนี้เผาถ่านหินที่มีปริมาณขี้เถ้าสูงและอุณหภูมิอ่อนตัวของขี้เถ้าที่ 1425°C หรือต่ำกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับระบบถ่านหินผง

ข้อดี

1. ปริมาณฝุ่นขี้เถ้าจากการเผาไหม้น้อย
2. ขนาดของเตามีขนาดเล็ก
3. ราคาการเตรียมเชื้อเพลิงต่ำ

ข้อเสีย

1. ต้องใช้ความดันของพัดลมเป่าลมแรงสูง
2. เกิดการรวมกันของออกไซด์ของไนโตรเจน NO_x เพิ่มมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูง ซึ่งเป็นมลภาวะทางอากาศในกระบวนการเผาไหม้

ในปัจจุบันเตาเผาชนิดนี้ถูกนำมาพัฒนาตัดแปลงให้สามารถใช้กับเชื้อเพลิงแข็งชนิดอื่น เช่น แกลบและขี้เลื่อย เป็นต้น

2.1.3 เตาเผาฟลูอิดไดซ์เบด (Fluidized — Bed Combustor)

เป็นเตาเผาที่มีการนำมาใช้เมื่อไม่นานมานี้ เชื้อเพลิงจะถูกพ่นเข้าไปให้แก่กระจายตลอดช่วงตะแกรงจ่ายอากาศ อากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ถูกเป่าผ่านตะแกรงออกมา โดยมีความเร็วสูงขึ้นเพียงพอที่จะทำให้อนุภาคเชื้อเพลิงไหลแบบของไหล คือ ทำให้มันลอยขึ้นขณะเผาไหม้ สำหรับคาร์บอนที่ไม่เผาไหม้จะถูกส่งเก็บไว้ในเครื่องแยกไซโคลน (Cyclone Separation) เพื่อส่งกลับให้เกิดการสันดาปอีกครั้งหนึ่ง

ข้อดี

1. สามารถจำกัดกำมะถันจากเชื้อเพลิงระหว่างการสันดาป การจำกัดกำมะถันที่ได้ผลคือ เพิ่มปูนขาวโดยตรงเข้าสู่เตาเผา
2. เกิดการเผาไหม้สมบูรณ์
3. ประหยัด
4. มีการสันดาปที่อุณหภูมิต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. การป้อนถ่านหินปูนขาวเข้าสู่เบดรวมกันยังมีปัญหาอยู่

2.1.4 เตาเผาแบบวอร์เทก (Vortex Combustor)

เตาชนิดนี้ได้ถูกพัฒนามาจากเตาเผาแบบไซโคลน (Cyclone Furnaces) มีลักษณะเป็นทรงกระบอก มีช่องอากาศตามแนวสัมผัสเส้นรอบวงที่ผนังของห้องเผาไหม้ การทำงานจะอาศัยอากาศปฐมภูมิและอากาศทุติยภูมิ อากาศปฐมภูมิและเชื้อเพลิง ซึ่งจะถูกบังคับออกมาจาก Screw Feed เข้ายังห้องเผาไหม้ในแนวสัมผัสกับผิวด้านใน แล้วจะไหลในลักษณะหมุนวนเป็นเกลียว (Helical Motion) ขึ้นสู่ด้านบนของห้องเผาไหม้ ภายใต้อิทธิพลของแรงหนีศูนย์กลาง (Centrifugal Force) ของไหลจะวนพาเชื้อเพลิงไปทิศทางเดียวกัน ตามแนวแกนออกสู่ทางออก ซึ่งมีลักษณะเป็นแกนท่ออยู่กลางห้องเผาไหม้ ขณะที่เชื้อเพลิงและอากาศผสมกันและส่งตัวขึ้นสู่ด้านบนจะมีอากาศทุติยภูมิออกจากหัวฉีดที่ฝังไว้ข้างเตา ในตำแหน่งต่าง ๆ ช่วยในการเพิ่มเกลียวและลักษณะจะถี่ขึ้น ซึ่งจะก่อให้เกิดผลดี คือ จะช่วยเพิ่มเวลาในการเผาไหม้ (Residence Time) ทำให้การเผาไหม้สมบูรณ์ เนื่องจากเกิดการไหลวน (Swirl flow) และการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulence Flow) ซึ่งอำนวยความสะดวกของอากาศกับเชื้อเพลิง เตาเผาแบบนี้เพิ่งได้รับการพัฒนาเมื่อไม่กี่ปีที่ผ่านมา

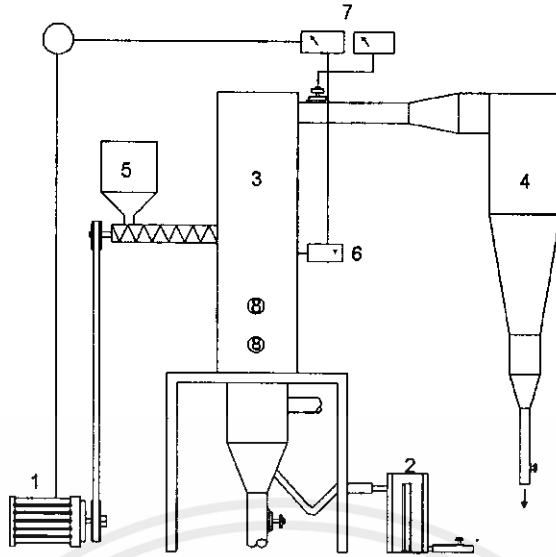
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.2.1 งานวิจัยของ ศศิวิมล สูงสว่าง [1]

ได้ทำการวิจัยการเผาไหม้ของแกลบโดยใช้เตาเผาแบบฟลูอิดไดซ์เบด เพื่อทำการศึกษาลักษณะที่เหมาะสมของการเผาไหม้แกลบที่ทำให้ได้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพและคุ้มทุน ซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อเทคโนโลยีในการเปลี่ยนพลังงานเคมีที่มีอยู่แกลบที่เหลือใช้ให้เป็นพลังงานความร้อนเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป

โดยในการทดลองนี้ได้ทำการออกแบบและสร้างเตาเผาแบบฟลูอิดไดซ์เบด และศึกษาการทำงานรวมถึงกลไกการทำงานของเครื่องมือวิจัยของเตาเผาแบบฟลูอิดไดซ์เบดแบบต่อเนื่อง ดังแสดงในรูปที่ 1 จากการศึกษาทำการเปลี่ยนแปลงตัวแปรดังนี้ คือ อัตราการไหลของอากาศและอุณหภูมิของการเผาไหม้ เพื่อที่จะหาความสัมพันธ์กับประสิทธิภาพของความร้อนที่เกิดขึ้น ซึ่งทำให้ได้สถานะที่เหมาะสมของการเผาไหม้แกลบในฟลูอิดไดซ์เบด ในการทดลองได้ทำการเปลี่ยนแปลงความเร็วของอากาศจาก 20.62 - 45.67 m/s และอุณหภูมิของการเผาไหม้จาก 500 - 800 องศาเซลเซียส

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าสถานะที่เหมาะสมในการเผาไหม้แกลบในเตาเผาแบบฟลูอิดไดซ์เบดคือ ความเร็วของอากาศเท่ากับ 32.77 m/s และอุณหภูมิของการเผาไหม้มีค่าประมาณ 600 องศาเซลเซียส อย่างไรก็ตามยังมีข้อจำกัดในการดำเนินการวิจัยครั้งนี้คือ การดำเนินการคำนวณการเผาไหม้แกลบในฟลูอิดไดซ์เบดเป็นการคำนวณแบบง่าย ๆ ไม่สามารถพิจารณาถึงผลกระทบอื่น ๆ ได้ทั้งหมด และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



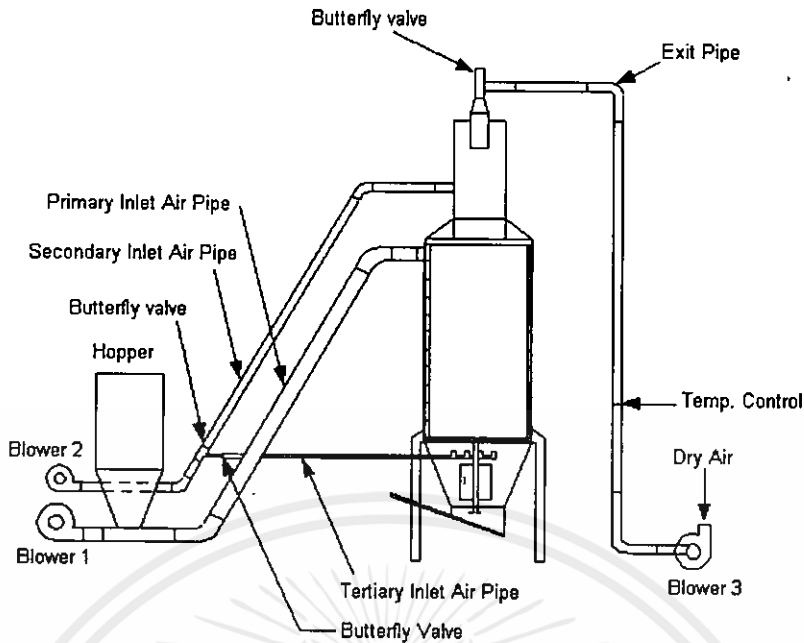
1. มอเตอร์ 2. เครื่องวัดความเร็วของอากาศ 3. ฟลูอิดไดซ์เบดคอลัมน์ 4. ไซโคลน 5. เครื่องป้อนวัตถุดิบ
6. เครื่องวัดอุณหภูมิ 7. เครื่องควบคุมอุณหภูมิ 8. ช่องสำหรับการเผาไหม้ภายในคอลัมน์

รูปที่ 2.1 แผนภาพของเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

700 องศาเซลเซียส ซึ่งประสิทธิภาพของการเผาไหม้ที่คำนวณได้มีค่าเท่ากับ ร้อยละ 96.91 โดยที่ กำหนดอัตราการป้อนแกลบไว้ที่ 3.05 kg/h และชี้แกลบที่ได้จากการเผาไหม้เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับวิธีการที่มีชี้อยู่พบว่าประสิทธิภาพของการเผาไหม้แบบฟลูอิดไดซ์เบดมีค่าสูงกว่า ประมาณร้อยละ 47 – 53

2.2.2 งานวิจัยของ อติศักดิ์ ชูจินดา [2]

ได้ทำการศึกษาออกแบบ สร้างและทดสอบเตาเผาแกลบสำหรับเครื่องอบแห้ง ข้าวเปลือกแบบฟลูอิดไดซ์เบด ขนาด 10 ตันต่อชั่วโมง โดยที่เตาเผาแกลบเป็นแบบไซโคลน เพื่อนำความร้อนที่ได้จากเตาเผาไปอบแห้งข้าวเปลือกในเครื่องอบแห้งที่มีขนาดกว้าง 1 เมตร ยาว 2.4 เมตร ซึ่งต้องการอุณหภูมิก่อนอบแห้งมีค่าประมาณ 150°C และทำการกำหนดให้มีการนำความร้อนที่ผ่านการอบแห้งกลับมาใช้ใหม่ประมาณ 70% ซึ่งอากาศที่นำกลับมาใช้ใหม่มีอุณหภูมิประมาณ 80°C เมื่อทำการสมดุลพลังงานทำให้ทราบว่าอุณหภูมิอากาศที่ต้องการจากเตาเผาแกลบมีค่าประมาณ 319°C จากนั้นนำไปทำการคำนวณหาขนาดของเตาเผาแกลบโดยเตาเผาจะมีลักษณะของห้องเผาไหม้เป็นทรงกระบอกมีขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 1.37 เมตร และมีความสูงเท่ากับ 2.75 เมตร โดยที่ส่วนบนจะมีทางเข้าของแกลบและอากาศปฐมภูมิ (Primary air) พร้อมทั้งมีห้องต่อจากห้องเผาไหม้ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 0.8 เมตร สูงเท่ากับ 1.6 เมตร มีทางเข้าของอากาศทุติยภูมิ (Secondary air) ส่วนด้านล่างของเตาเผาจะเป็นห้องเก็บชี้แกลบ โดยที่อุปกรณ์ชุดทดลองจะสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ไดอะแกรมขบวนการของเตาเผาแกลบ

ในการทดลองทำการกำหนดให้อัตราการป้อนแกลบเท่ากับ 120 – 150 กิโลกรัมต่อชั่วโมงและอัตราการไหลของอากาศที่เข้าท่อดูดของพัดลมเท่ากับ 1.11 กิโลกรัมต่อวินาที ทำการเปลี่ยนแปลงความสูงของถ่านแกลบให้มีค่าเท่ากับ 30, 45, 50 และ 60 เซนติเมตร พบว่าสภาวะการดำเนินการทดสอบเตาที่เหมาะสมของการทดลองอยู่ที่ความสูงเบด 50 เซนติเมตร โดยใช้อัตราการป้อนแกลบเท่ากับ 126 กิโลกรัมต่อชั่วโมง อุณหภูมิเฉลี่ยทางออกก่อนเข้าพัดลมดูดอากาศมีค่าประมาณ 296°C ประสิทธิภาพโดยรวมของระบบประมาณ 61 – 63% และยังพบอีกว่าเมื่อความสูงของเบดต่ำกว่า 30 cm จะมีผลในการเผาไหม้ของแกลบที่เข้ามาจะสว่างมากองบนตะแกรงเป็นผลให้อุณหภูมิแกว่งในช่วงล่าง แต่หากความสูงของเบดเกิน 60 เซนติเมตร จะมีผลต่อการเกิดไซโคลน

ประสิทธิภาพทางความร้อนของระบบพบว่าประสิทธิภาพรวมทั้งระบบจะมีค่าใกล้เคียงกันมาก คืออยู่ในช่วง 60% สำหรับประสิทธิภาพการเผาไหม้ซึ่งคำนวณจากเปอร์เซ็นต์คาร์บอนในชีแฉะมีค่าประมาณ 85 – 92% และเมื่อวิเคราะห์จากองค์ประกอบของก๊าซหลังการเผาไหม้จะได้ประสิทธิภาพการเผาไหม้ประมาณ 94%

2.2.3 งานวิจัยของ บุญเรือง ศรีสวัสดิ์ [3]

เป็นงานวิจัยต่อเนื่องจากงานวิจัยของ อติศักดิ์ ชูจินดา โดยได้ทำการปรับปรุงเตาเผาแกลบแบบไซโคลน, ระบบควบคุม, ระบบลมของเตาเผา และประเมินผลทางเศรษฐศาสตร์ของเตาเผาเมื่อใช้ร่วมกับเครื่องอบแห้งฟลูอิด ไคซ์เบดขนาด 10 ตัน เทียบกับการใช้หั่วเผาในเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิด ไคซ์เบดขนาด 10 ตัน

การพัฒนาสมรรถนะของเตาเผา โดยมีรายละเอียดดังนี้

1. ระบบลมทำให้มีการกระจายลมจากด้านล่างดีขึ้น โดยการเพิ่มขนาดท่อลมและการกระจายของหัวเป่าลมให้มีการกระจายทั่วทั้งตะแกรง
2. มีการเพิ่มความแข็งแรงของแผ่นตะแกรง เพื่อลดการแอ่นตัวของตะแกรงโดยใช้เหล็กเหนียวขนาด $0.08 \text{ m} \times 1.37 \text{ m}$ หนา 0.01 m ฉักเป็นตะแกรงสี่เหลี่ยมรองรับทั่วทั้งตะแกรง
3. ย้ายประตูของเตาเผา เพื่อเพิ่มความสะดวกในการทำงาน
4. ขยายขนาดของใบปาด เพื่อเพิ่มความแข็งแรงสามารถทนต่ออุณหภูมิสูง ๆ ได้
5. ระบบควบคุม ทำการแยกออกเป็นสองระบบ โดยระบบหนึ่งเป็นแบบอัตโนมัติ และระบบที่ควบคุมด้วยคนงาน เพื่อแก้ปัญหาการหยุดเครื่อง ในขณะที่เกิดปัญหาทำให้ไม่สามารถทำงานได้ต่อเนื่อง
6. เพิ่มจุดที่ทำการเก็บข้อมูลเพื่อให้ครอบคลุมมากยิ่งขึ้น

จากการทดสอบพบว่าผลจากการเพิ่มขนาดท่อกระจายลมด้านล่างทำให้การเผาไหม้ดีขึ้นเป็นผลให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้คาร์บอนสูงกว่า 97% , อากาศส่วนเกิน (excess air) ที่ใช้ในการเผาไหม้มีผลต่อประสิทธิภาพของเตาเผาที่มีค่าสูงขึ้น, ความสูงของเบดไม่มีผลต่อประสิทธิภาพของเตาเผา, เมื่ออัตราการไหลของอากาศที่ช่วยในการเผาไหม้จากด้านล่างของตะแกรงสูงขึ้นจะทำให้แก๊สที่กำลังเผาไหม้ตกลงผ่านตะแกรงเร็วขึ้น เป็นผลให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้คาร์บอนต่ำลง, เมื่อทำการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ของเตาเผาแลพบว่าเตาเผาแลลงทุนในการรอบแห้งข้าวเปลือกแบบฟลูอิดไดซ์เบดขนาด 10 ตัน มากกว่าการใช้หัวเผาเป็นแหล่งความร้อน

2.2.4 งานวิจัยของ ธัชชัย ท้วถวิล และ สันติ วัชรอากาศไพบูลย์ [4]

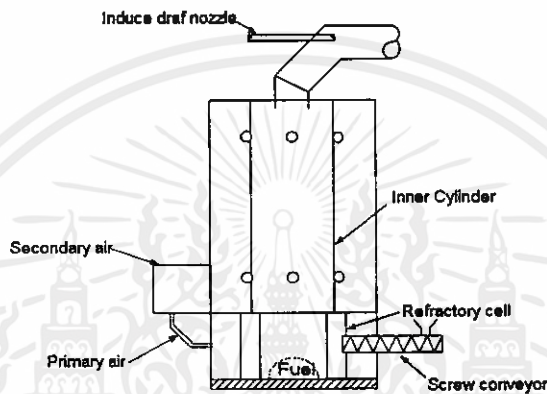
ได้ทำการวิจัยเตาเผาเศษวัสดุทางการเกษตรโดยใช้อากาศหมุนวน โดยใช้แก๊สเป็นเชื้อเพลิง เพื่อทำการหาค่าอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง (A/F ratio) ที่เหมาะสมที่สุด โดยพิจารณาจากปริมาณความร้อนและอุณหภูมิจากการเผาไหม้ และศึกษาอิทธิพลของอัตราการไหลของอากาศที่ผ่านพัดลมดูดต่ออุณหภูมิที่ได้จากการเผาไหม้ โดยที่ลักษณะของเตาเผาแสดงได้ดังรูปที่ 2.3 ซึ่งประกอบด้วย

1. ทรงกระบอกภายนอก เป็นส่วนนอกสุดของเตา ทำการขึ้นรูปจากเหล็กแผ่น มีความสูงเท่ากับ 1250 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 600 มิลลิเมตร
2. ทรงกระบอกภายใน จะอยู่ในทรงกระบอกภายนอกประกอบด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวน 2.1 ส่วนที่เป็นเตา (Refractory cell) ก่อสร้างด้วยอิฐทนไฟ ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้ง 2.2 ส่วนที่เป็นทรงกระบอกส่วนบนจะตั้งอยู่บนส่วนที่เป็นเตา เป็นส่วนที่มีท่ออิงอากาศติดตั้งอยู่ทางส่วนบนและส่วนล่าง เพื่อให้อากาศถูกส่งผ่านเข้าสู่

- เตาในแนวเฉียง ซึ่งจะทำให้เกิดการหมุนวนของอากาศขึ้น ความสูงของ ส่วนนี้เท่ากับ 610 มิลลิเมตรและมีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 457 มิลลิเมตร
3. ตัวป้อนเชื้อเพลิงแบบสกรู (Screw feeder) จะทำหน้าที่ป้อนเชื้อเพลิงเข้าสู่เตา อย่างต่อเนื่อง
 4. พัดลมเป่าและพัดลมดูด เป็นพัดลมแบบแรงเหวี่ยงชนิดใบพัดเอียงหลัง (Backward straight blade)
 5. ปล่องไฟ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 203.2 มิลลิเมตร

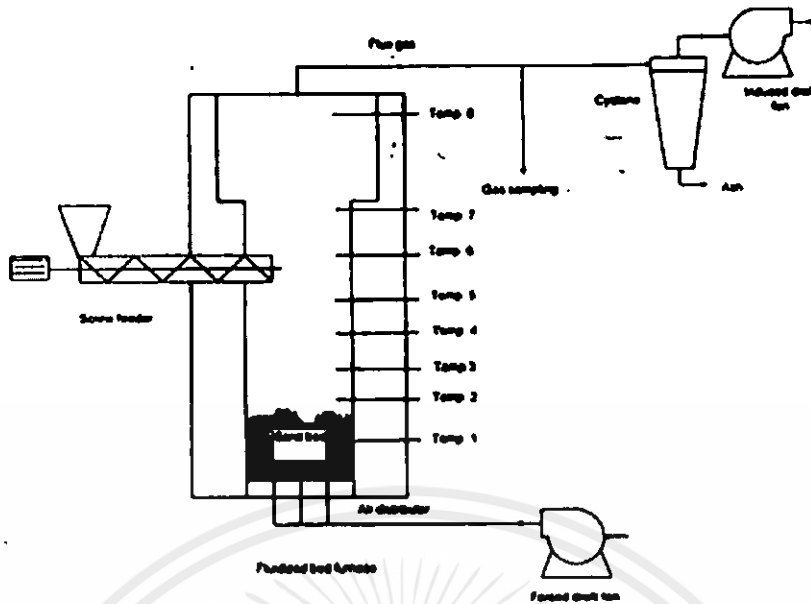


รูปที่ 2.3 แสดงรูปร่างลักษณะของเตาเผาแบบหมุนวน

จากการทดลองพบว่าอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงเท่ากับ 6 : 1 จะให้อุณหภูมิจากการเผาไหม้มีค่าสูงที่สุดเท่ากับ 595°C และปริมาณความร้อนที่ได้รับมีค่าสูงพอสมควร โดยมีค่าเท่ากับ 12.73 kW สำหรับที่อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงเท่ากับ 9 : 1 จะได้รับปริมาณความร้อนจากการเผาไหม้และประสิทธิภาพของเตาสูงที่สุด โดยปริมาณที่ได้รับมีค่าเท่ากับ 14.58% และประสิทธิภาพของเตาเท่ากับ 25.64% ส่วนของการทดสอบผลของพัดลมดูดต่ออุณหภูมิที่ได้จากการเผาไหม้ เมื่อพัดลมดูดเป็น 0%, 20%, 60% และ 100% พบว่าเมื่อปิดแอมเปอร์ของพัดลมดูดในปริมาณมากขึ้นจะทำให้อุณหภูมิของก๊าซร้อนมีค่าสูงขึ้น อุณหภูมิของก๊าซร้อนจากเตาเผามีค่ามากที่สุดเมื่อพัดลมดูดไม่ทำงาน

2.2.5 งานวิจัยของ สุวิทย์ เตีย และคณะ [5]

ได้ทำการศึกษาการเผาไหม้ชีวมวลในเตาเผาฟลูอิด ไคซ์เบด ซึ่งได้ทำการนำเตาฟลูอิด ไคซ์เบดมาใช้เชื้อเพลิงชีวมวล ได้แก่ กากมันสำปะหลัง , เปลือกถั่วลิสง และฟางข้าว เพื่อทำการศึกษาถึงผลของอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงที่มีผลต่อการเผาไหม้ โดยที่ทำการกำหนดอัตราการใช้ป้อนเชื้อเพลิงให้มีค่าคงที่ คือ 15 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ซึ่งอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัยแสดงได้ดังรูปที่ 2.4

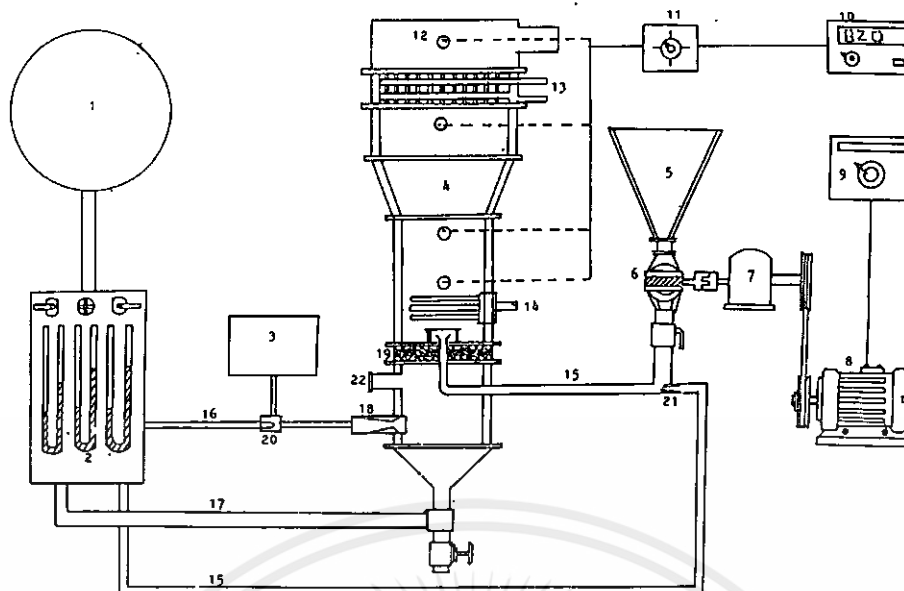


รูปที่ 2.4 เตาเผาไหม้แบบฟลูอิด ไคซ์เบด

จากการทดลองพบว่า ค่าอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงที่ทำให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้สูงสุดของกากมันสำปะหลัง , เปลือกถั่วลิสง และฟางข้าว มีค่าเท่ากับ 7.25 , 6.0 และ 7.15 ตามลำดับจะได้ค่าประสิทธิภาพการเผาไหม้เท่ากับ 99.71% , 99.07% และ 97.92% ตามลำดับ และพบว่าอุณหภูมิเหนือเบดสูงกว่าอุณหภูมิในเบด เป็นเพราะชีวมวลที่ใช้มีปริมาณสารระเหยสูง ส่วนปริมาณก๊าซพิษ ได้แก่ ก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์เฉลี่ยอยู่ในช่วง 290 – 340 ppm ส่วนสารประกอบออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x) จะมีน้อยมากประมาณ 120 – 200 ppm

2.2.6 งานวิจัยของ อภิชัย เทอดเทียนวงษ์ [6]

ทำการศึกษาทดลองและออกแบบเตาเผาไหม้ชีวมวลแบบฟลูอิดไคซ์เบด เพื่อศึกษาผลของอัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิง ความเร็วของอากาศในการฟลูอิดไคซ์เบด ขนาดของทรายที่ใช้ทำเบดที่มีผลต่อการเผาไหม้ และศึกษาถึงการถ่ายเทความร้อนระหว่างเบดกับท่อน้ำรับความร้อน การศึกษาทดลองได้ทำการออกแบบเตาเผาฟลูอิดไคซ์เบดแบบต่อเนื่อง ดังแสดงดังรูปที่ 2.5 และเชื้อเพลิงชีวมวลที่ใช้ในการทดสอบ 2 ชนิดคือ เชื้อเพลิงขี้เลื่อย และเชื้อเพลิงแกลบ จากการทดลองพบว่า อัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงที่เหมาะสมต่อการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ และอุณหภูมิสูงสุดคือ 9:1 ถึง 10:1 อัตราการป้อนเชื้อเพลิงเท่ากับ 3 กิโลกรัม/ชั่วโมง และที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิงเท่ากับ 4 กิโลกรัม/ชั่วโมง อัตราส่วนของอากาศกับเชื้อเพลิงที่เหมาะสมเท่ากับ 8.5:1 เทียบเป็นอากาศมากเกินพอประมาณ 50 ถึง 80 เปอร์เซ็นต์ ความเร็วของอากาศมีค่า 2 ถึง 4 เท่าของความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไคซ์เบด (ประมาณ 85 เซนติเมตร/วินาที) เนื่องจากอัตราการป้อนเชื้อเพลิงที่มากกว่าจะให้อุณหภูมิการเผาไหม้สูงกว่า และใช้อัตราส่วนของอากาศกับเชื้อ



- 1 ระบบอัดอากาศ 2 เครื่องควบคุมความเร็วอากาศและน้ำ 3 ถังก๊าซ 4 ฟลูอิดโคจซ์เบดคอลัมน์ 5 ที่ใส่เชื้อเพลิงชีวมวล
6 ระบบป้อนเชื้อเพลิงแบบหมุนวน 7 เกียร์ทด 8 มอเตอร์ 9 เครื่องปรับความเร็วรอบมอเตอร์ 10 เครื่องอ่านอุณหภูมิ
11 Selector switch 12 Thermocouple 13 ท่อน้ำรับความร้อนเหนือเบด 14 ท่อน้ำรับความร้อนในเบด 15 ท่ออากาศ
16 ท่ออากาศผสมก๊าซเชื้อเพลิง 17 ท่ออากาศสำหรับการฟลูอิดโคจซ์เบด 18 หัวเผา 19 ตัวกระจายลม
20 ระบบผสมก๊าซเชื้อเพลิงกับอากาศ 21 หัวพ่นอากาศ 22 ช่องคูไฟ

รูปที่ 2.5 แสดงลักษณะเตาเผา และอุปกรณ์ในการทดลอง

เพลิงที่ต่ำกว่า นอกจากนี้ขนาดของทรายที่ใช้ทำเบดที่มีขนาดเล็กกว่า (ประมาณ 40 ถึง 50 เมช) เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ อุณหภูมิสูงกว่า และอัตราส่วนของอากาศกับเชื้อเพลิงต่ำกว่า ทรายขนาดใหญ่กว่า (ประมาณ 30-40 เมช) ซึ่งช่วยลดการสูญเสียความร้อนไปกับก๊าซร้อนที่ออกจากเตาเผาได้ กรณีการถ่ายเทความร้อนของเตาฟลูอิดโคจซ์เบดพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนระหว่างเบดกับท่อน้ำรับความร้อน มีค่าเพิ่มขึ้นตามความเร็วของอากาศ และขนาดของทรายที่เล็กกว่าจะให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสูงกว่าทรายขนาดใหญ่ สำหรับท่อน้ำรับความร้อนในเบดจะมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนอยู่ในช่วง 190-260 วัตต์/เมตร² พบว่ามีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนให้ท่อน้ำที่อยู่ในเบดสูงกว่า การถ่ายเทความร้อนระหว่างก๊าซร้อนกับท่อน้ำประมาณ 23 เท่า

2.2.7 งานวิจัยของ สุพจน์ นำน้าโชค [7]

ได้ทำการวิจัยการเผาไหม้ชี้เลื่อยในห้องเผาไหม้แบบไซโคลนชนิดอากาศเข้าหลายช่องทาง ผลจากการวิจัยพบว่า ชี้้เลื่อยมีค่าความร้อนประมาณ 4,000 – 4,300 kcal/kg

ห้องเผาไหม้แบบไซโคลนที่ใช้ในการวิจัยนี้ จะมีช่องสำหรับป้อนอากาศกับเชื้อเพลิงตามแนวเส้นรอบวง ทางด้านบนของห้องเผาไหม้ นอกจากนี้ยังมีการป้อนอากาศทุติยภูมิ (Secondary air) ในแนวสัมผัสเส้นรอบวง ที่บริเวณกึ่งกลางของห้องเผาไหม้ เพื่อช่วยให้เกิดการคลุกเคล้า การกระจายตัวระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศได้ดีขึ้น ส่งผลให้การเผาไหม้มีประสิทธิภาพที่ดีขึ้นด้วย

ห้องเผาไหม้แบบไซโคลนนี้ มีอุณหภูมิที่ได้จากการเผาไหม้ประมาณ 1,200 องศาเซลเซียส

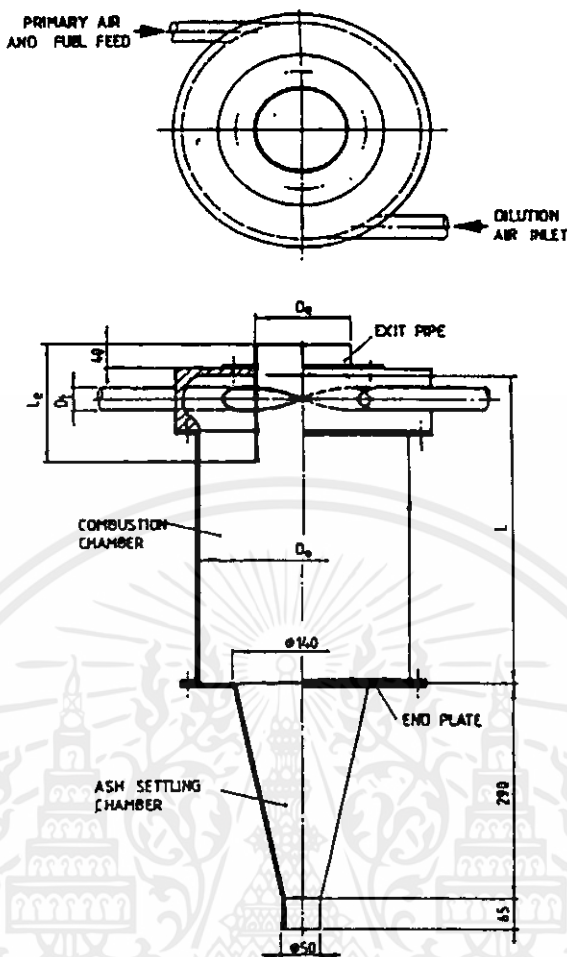
ในการทดลองใช้อัตราการป้อนอนุภาคเชื้อเพลิง ตั้งแต่ 205.4 ถึง 333.3 g/min อัตราการป้อนอากาศ 12,185 g/min และมีการปรับค่าปริมาณอากาศส่วนที่สองเป็น 5%, 10% และ 15% และทำการทดลองโดยกำหนดอากาศส่วนที่สองคงที่เท่ากับ 15% และปรับค่าอัตราส่วนสมมูล (Equivalence ratio, Φ) เป็น 1.0, 1.2 และ 1.5

ตารางที่ 2.1 มิติของเตาเผาแบบไซโคลน (หน่วยเป็นมิลลิเมตร)

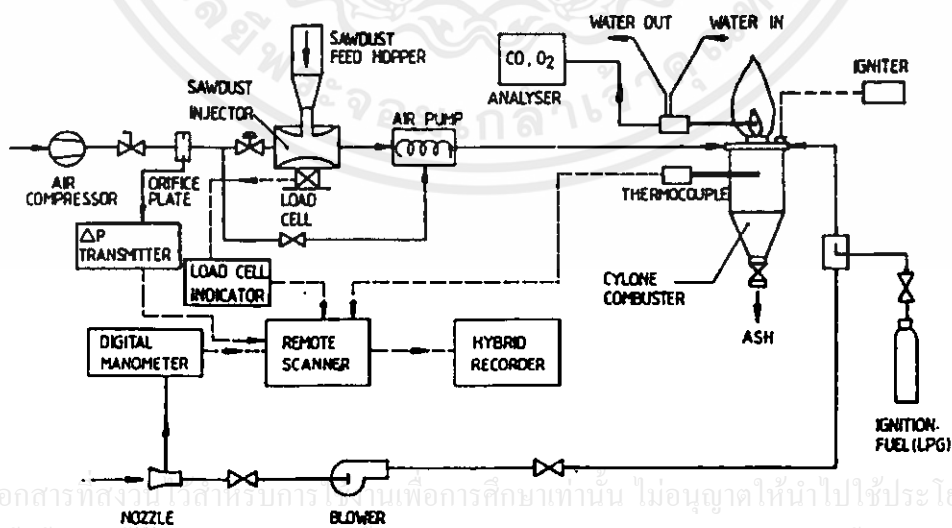
มิติ	ห้องเผาไหม้จริง	ห้องเผาไหม้จำลอง
อัตราส่วนรูปร่าง (L/D_0)	2.00	2.06
D_0	155	164
D_c	68	84
D_T	28	28
L	310	338
L_c	115	115
S	6.8	8.8

ผลจากการทดลองจะพบว่าที่ปริมาณอากาศส่วนที่สอง 15% ของอากาศทั้งหมดจะแปรค่า Φ ที่ 1.5 จะเกิดการเผาไหม้เป็นบริเวณกว้างทั่วห้องเผาไหม้ เนื่องจากอากาศเป็นส่วนที่สองทำให้อุณหภูมิของเชื้อเพลิงไหลวนและอยู่ภายในห้องเผาไหม้นานขึ้น จึงทำให้มีเวลาในการเผาไหม้มากขึ้น มีเปลวไฟออกมาจากช่องทางออกน้อย แสดงว่าเกิดการเผาไหม้ที่ค่อนข้างจะสมบูรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 เตาเผาแบบไซโคลนของ นายสุพจน์ นานาโชค



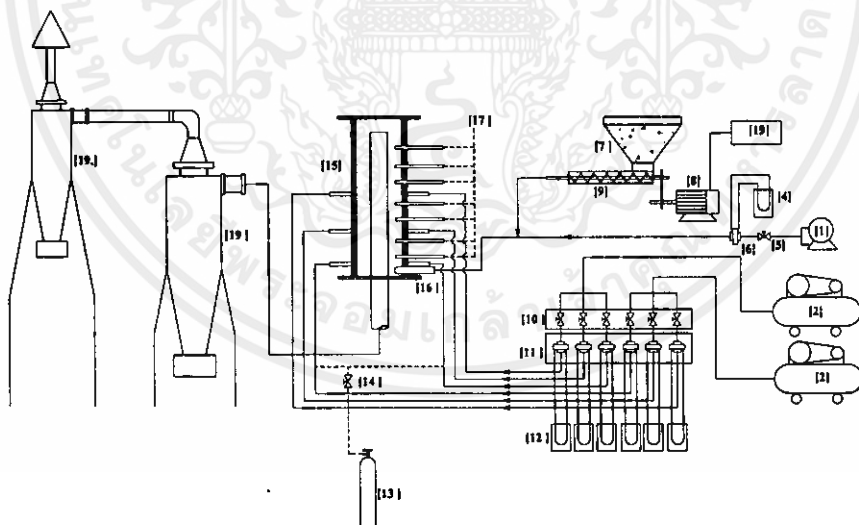
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.7 ไลอะแกรมอุปกรณ์การทดลอง

2.2.8 งานวิจัยของ นิวัติ พิริยะรุ่งโรจน์ [8]

ทำการศึกษาเชิงทดลองของเตาเผาแบบวอร์เทค โดยศึกษาถึงการออกแบบ สร้างและทดสอบ หาพฤติกรรมการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงแกลบภายในเตาเผาแบบวอร์เทค การทดลองทำโดยกำหนดอัตราไหลเชิงมวลของแกลบละเอียด 0.2 kg/min ปรับค่าอัตราส่วนสมมูล(Φ) เท่ากับ 0.7, 0.8, 1.0 และ 1.2 ปรับค่าอัตราส่วนของอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศทุกชนิดต่ออัตราการไหลของอากาศทั้งหมด (λ) เท่ากับ 0, 0.2 และ 0.4 ทำการทดลองกับเตาที่มีความสูงเท่ากับ 950 มิลลิเมตร ลักษณะทรงกระบอกประกอบจากท่อเหล็ก 2 ชั้น โดยท่อเหล็กชั้นแรกมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกเท่ากับ 280 มิลลิเมตร ท่อเหล็กชั้นที่สองมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 200 มิลลิเมตร ระหว่างท่อเหล็ก หล่อปูนทนไฟเพื่อป้องกันการถ่ายเทความร้อนออกสู่ภายนอกเตา ท่อทิ้งทำจากสแตนเลสมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกเท่ากับ 80 เซนติเมตร สูง 755 มิลลิเมตร ผลการทดลองสรุปได้ดังนี้

1. ขั้นตอนการออกแบบ การติดเตาเผา วอร์เทค ได้ง่ายสามารถเผาได้ต่อเนื่องมีอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้สูง โดยไม่ใช้เชื้อเพลิงอื่นในการอุ่นเตา เกิดการเผาไหม้แกลบได้อย่างหมดจด เนื่องจากท่อทิ้งเต้าลอยอยู่ตำแหน่งกึ่งกลางของตัวเตา ซึ่งทำให้เชื้อเพลิงแกลบขนาดใหญ่ไม่สามารถหลุดออกจากท่อทิ้งเต้าลอยได้จนกว่าจะถูกเผาไหม้จนหมด ทำให้เฉพาะเต้าเล็กที่สามารถหลุดออกมาได้



- | | | | | | |
|-------------------|--------------------|----------------------|------------------------|-------------------|------------------|
| 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 | | | | | |

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการใช้งาน เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ กรุณาแจ้งเจ้าของลิขสิทธิ์ก่อนใช้งาน และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.8 แสดงอุปกรณ์การทดลอง

2. ขั้นตอนการทดลอง ผลการทดลองศึกษาถึง ปริมาณแก๊สไอเสีย อัตราส่วนสมมูล และอัตราส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศทุกชนิดต่ออัตราไหลของอากาศทั้งหมด ที่มีความเหมาะสมต่อการบวนการเผาไหม้

การศึกษาถึง Φ ที่มีผลต่อการเผาไหม้ เมื่อ $\lambda = 0$ พบว่า ที่ $\Phi = 1.0$ เกิดการกระจายตัวของอุณหภูมิสูงกว่า $\Phi = 0.7, 0.8$ และ 1.2 เกิดอุณหภูมิสูงสุดเท่ากับ 926 องศาเซลเซียส เมื่อ $\Phi = 0.8$ ปริมาณแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์เฉลี่ยมีค่าต่ำสุด 113.5 ppm

$\lambda = 0.2$ พบว่า ที่ $\Phi = 1.0$ พบว่าเกิดการกระจายตัวสูงกว่า กรณี $\Phi = 0.7, 0.8, 1.2$ เกิดการเผาไหม้มีอุณหภูมิสูงสุดเท่ากับ 1,012 องศาเซลเซียส และทำให้ปริมาณแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์มีค่าต่ำสุดเท่ากับ 134.25 ppm

$\lambda = 0.4$ พบว่า ที่ $\Phi = 1.0$ เกิดการกระจายตัวของอุณหภูมิสูงกว่า กรณี $\Phi = 0.7, 0.8, 1.2$ เกิดการเผาไหม้มีอุณหภูมิสูงสุดเท่ากับ 1,135 องศาเซลเซียส ทำให้เกิดปริมาณแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ต่ำสุดเท่ากับ 130.25 ppm

จากผลการทดลอง พบอัตราส่วนสมมูลที่มีความเหมาะสมต่อการเผาไหม้ของเตาเผาแบบบอร์เทค เมื่อ $\lambda = 0, 0.2, 0.4$ คือ $\Phi = 1.0$ ซึ่งทำให้เกิดการกระจายอุณหภูมิที่สูง และได้ปริมาณแก๊สไอเสียต่ำ

การศึกษาถึง λ ที่มีผลต่อการเผาไหม้ เมื่อ $\Phi = 0.7$ พบว่าที่ $\lambda = 0.4$ ทำให้เกิดการกระจายตัวของอุณหภูมิสูงกว่ากรณี $\lambda = 0, 0.2$ ทำให้เกิดการเผาไหม้ที่มีอุณหภูมิสูงสุด มีค่า 400 ppm

เมื่อ $\Phi = 0.8$ พบว่าที่ $\lambda = 0.4$ เกิดการกระจายตัวของอุณหภูมิสูงกว่า $\lambda = 0, 0.2$ และทำให้เกิดการเผาไหม้มีอุณหภูมิสูงสุดเท่ากับ 1,086 องศาเซลเซียส และ เมื่อ $\lambda = 0$ ทำให้ปริมาณแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ที่เหลือมีค่าต่ำที่สุดเท่ากับ 113.5 ppm

เมื่อ $\Phi = 1.0$ พบว่าที่ $\lambda = 0.4$ เกิดการกระจายตัวของอุณหภูมิสูงกว่า $\lambda = 0, 0.2$ ทำให้เกิดการเผาไหม้ที่มีอุณหภูมิสูงสุดเท่ากับ 1,135 องศาเซลเซียส และทำให้ปริมาณแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ที่เหลือมีค่าต่ำสุดเท่ากับ 130.25 ppm

เมื่อ $\Phi = 1.2$ พบว่าที่ $\lambda = 0.4$ เกิดการกระจายตัวของอุณหภูมิสูงกว่า $\lambda = 0, 0.2$ ทำให้เกิดการเผาไหม้ที่มีอุณหภูมิสูงสุดเท่ากับ 1,064 องศาเซลเซียส และทำให้ปริมาณแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ที่เหลือมีค่าต่ำสุดเท่ากับ 348.75 ppm

จากการทดลองพบว่าอัตราส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศทุกชนิดต่ออัตราการไหลของอากาศทั้งหมด ที่มีความเหมาะสมต่อการเผาไหม้ เมื่อ $\Phi = 0.7, 0.8, 1.0$ และ 1.2 คือ $\lambda = 0.4$ ประการแรก จะช่วยทำให้เกิดการกระจายตัวของแกลบภายในเตาเผามากขึ้น แกลบไม่จับตัวเป็นก้อน เกิดการผสมหรือ สัมผัสกันอย่างทั่วถึง ระหว่างเชื้อเพลิงแกลบกับอากาศ และ ประการสอง การเคลื่อนที่แบบหมุนวนภายในเตาเผาช่วยทำให้แกลบเพิ่มเวลาของการเผาไหม้ภายใน

ในเตาอีกด้วย ซึ่งจากการทดลองทั้งหมดพบว่าที่ $\Phi = 1.0$ และ $\lambda = 0.4$ ทำให้อุณหภูมิสูงสุดจากการเผาไหม้เท่ากับ 1,135 องศาเซลเซียส คิวมีปริมาณน้อย มีการเผาไหม้ที่ต่อเนื่อง ขี้เถ้าที่ออกมามีสีดำปนเทา ส่วนการวิเคราะห์ไอเสียพบว่า O_2 เหลือเท่ากับ 4.41%, $CO_2 = 15.34\%$ มีปริมาณ CO เหลือต่ำ 130.25 ppm มีปริมาณ NO_x เหลือ 764.00 ppm

2.2.9 งานวิจัยของ Tim T. Fu and Sen Nieh [9]

ได้ทำการทดสอบแบบ Vortex โดยใช้เชื้อเพลิง DUC (Dry Ultrafine Coal) และ CWF (Coal Water Fuel) อัตราความร้อน 0.15 MB/H

ประกอบด้วยส่วนที่สำคัญดังนี้

เตาเผาแบบ Vortex คุณสมบัติดังตารางที่ 2.2

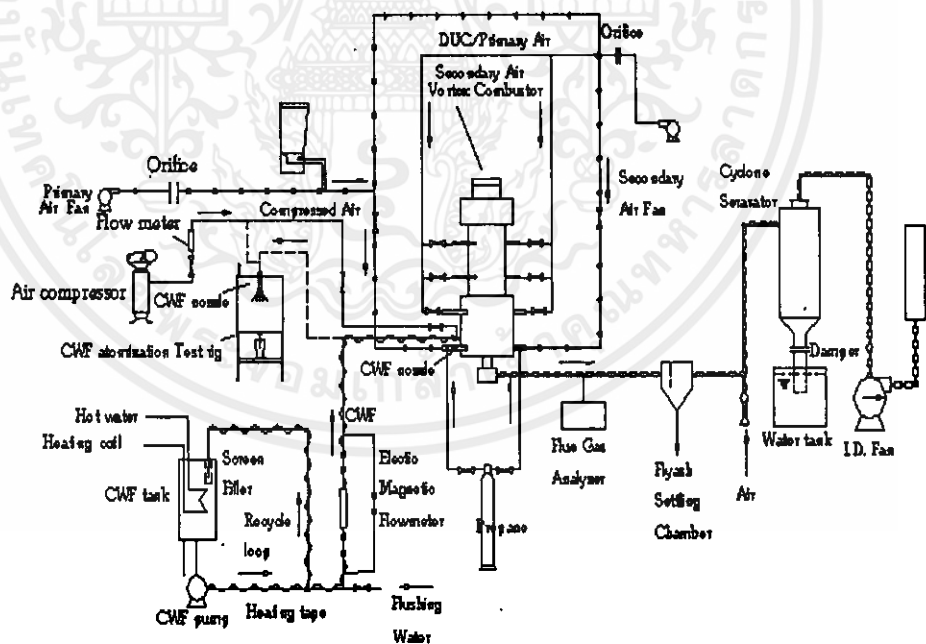
ระบบส่งอากาศปฐมภูมิและ DUC

ระบบส่ง CWF

ระบบทดสอบ CWF Atomization

ระบบช่วงเสริม ได้แก่ ระบบจุดระเบิด ระบบกำจัดฝุ่นละออง

ระบบเครื่องมือวัด ได้แก่ เครื่องมือวัดความดัน และอัตราการไหล เครื่องวัด อุณหภูมิ



เอกสารรูปที่ 2.9 ระบบการทดลองแบบเตาเผาแบบวอร์เทค

ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

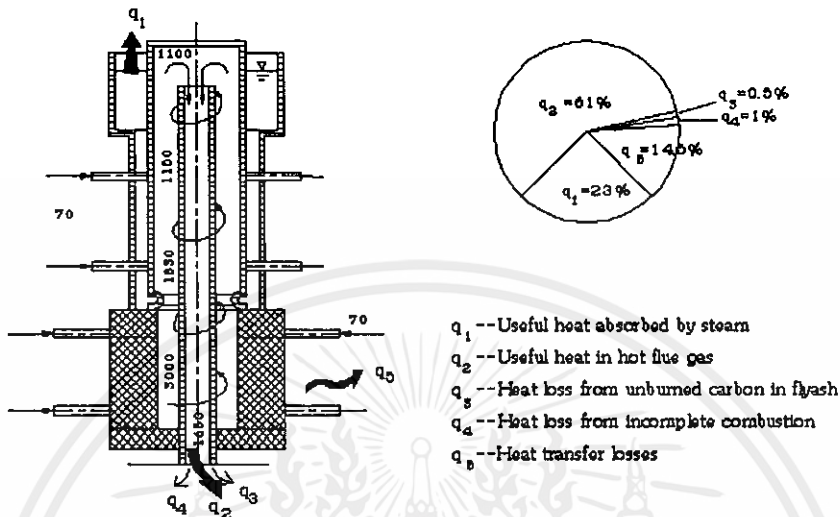
ตารางที่ 2.2 มิติหลักและตัวแปรในการออกแบบ

PARAMETER	MAGNITUDE
Firing Rate, MB/H	0.15
Fuel Consumption Rate, lb/hr	17.6 (CWF) 12.7 (DUC)
Steam Generation, lb/hr	77
Exit Gas Temperature, °F	1,500 – 1,700
Lower Chamber Temperature, °F	1,700 – 2,200
Cooling Surface Area, in	540
Lower Combustion Chamber	
Inner Diameter, in	7.5
Height, in	11.5
Material	Refractory
Upper Combustion Chamber	
Inner Diameter, in	7.5
Height, in	23
Material	Carbon Steel
Center Tube	
Diameter, in	3.5
Thickness, in	0.25
Clearance to Top, in	5 – 10
Material	Stainless Steel

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องวิเคราะห์ก๊าซเผาไหม้ เครื่องวิเคราะห์คุณสมบัติของซีเมนต์
ผลการทดสอบ

- การแพร่กระจายของอุณหภูมิภายในเตาเผาไหม้ ดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 การแพร่กระจายของอุณหภูมิภายในเตาเผาไหม้

อุณหภูมิที่ส่วนล่างของเตาเผา เท่ากับ $2,000^{\circ}\text{F}$ และลดลงเหลือ $1,100^{\circ}\text{F}$ ที่บริเวณส่วนบนของเตาเผา บริเวณทางออก มีอุณหภูมิเท่ากับ $1,650^{\circ}\text{F}$

จากสมดุลพลังงาน พลังงานเคมีจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง (q_f) ได้เปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน

พลังงานที่ให้แก่ระบบ : พลังงานเคมี $q_f = 168,400$ Btu / hr 100.0%

พลังงานที่ออกจากระบบ : ความร้อนที่ให้แก่น้ำ $q_1 = 38,400$ Btu / hr 23.0%

ความร้อนของก๊าซที่ออกจากเตาเผา $q_2 = 102,300$ Btu / hr 61.0%

ความร้อนที่สูญเสียของคาร์บอนที่ไม่เผาไหม้ $q_3 = 2,600$ Btu / hr 1.0%

ความร้อนที่สูญเสียจากการสันดาปไม่สมบูรณ์ $q_4 = 700$ Btu / hr 0.5%

ความร้อนที่สูญเสียผ่านผนังเตาสู่สิ่งแวดล้อม $q_5 = 24,400$ Btu / hr 14.5%

ประสิทธิภาพความร้อนของเตาเผา เท่ากับ 84% ($q_1 + q_2$)

ประสิทธิภาพการเผาไหม้ เท่ากับ 98.5% [$100 - (q_3 + q_4)$]

ประสิทธิภาพการเผาไหม้ ไม่เปลี่ยนแปลงตามปริมาณอากาศ อุณหภูมิของก๊าซที่ห้องเผาไหม้ ส่วนล่างจะเพิ่มขึ้นตาม Firing Rate การเพิ่มอากาศ จะเป็นผลเสียต่อสมรรถนะการสันดาป เพราะมีการสูญเสียความร้อนเพิ่มขึ้น และผลของการ Oxidizing ในห้องเผาไหม้ซึ่งเพิ่ม

ปริมาณ NO_x ห้องเผาไหม้ส่วนล่างจะมีการเผาไหม้ คาร์บอน 85% และ 100% ที่ห้องเผาไหม้ ส่วนบน

- ก๊าซที่ได้รับการสันดาป ประกอบด้วย O_2 , CO_2 , CO สารไฮโดรคาร์บอนที่ไหม้เผาไหม้ NO_x และ SO_x
- ปริมาณ O_2 จะลดลงตามความสูงของเตาเผา ที่ส่วนล่างของห้องเผาไหม้มี ปริมาณ CO เท่ากับ 550 ppm และ 250 ppm ที่ทางออก ปริมาณสารไฮโดรคาร์บอนที่ทางออกเท่ากับ 1% ซึ่งมีค่าสูง
- เปลวไฟของการสันดาป มีลักษณะการไหลหมุนวนเป็นเกลียววงแหวน แบบปั่นป่วนรอบท่อศูนย์กลางภายในเตาเผา ความเร็วของอากาศปฐมภูมิ เป็นปัจจัยสำคัญต่อความเสถียรและคุณลักษณะของเปลวไฟ
- ผลกระทบของการเปลี่ยนอัตราความร้อน สำหรับการเผาไหม้ DUC ที่ภาระปกติ (100% load, 0.15 MB/H) มีประสิทธิภาพการสันดาปเท่ากับ 98% (ไม่มีอากาศทุดิถภูมิ) และ 98.5% (มีอากาศทุดิถภูมิ) สำหรับการดำเนินงานที่ภาระต่างๆ ประสิทธิภาพการเผาไหม้จะเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย
- ความแรงของการหมุนวนในเตาเผาแบบวอร์เทคขึ้นอยู่กับความเร็ว, อัตราการไหลและมุมของอากาศปฐมภูมิและทุดิถภูมิ อากาศทุดิถภูมิให้ออกซิเจนสำหรับการเผาไหม้เป็นไปอย่างต่อเนื่อง เพิ่มส่วนผสมของเชื้อเพลิงกับอากาศ และการถ่ายเทความร้อน/มวล ในห้องเผาไหม้ส่วนบน อากาศทุดิถภูมิจะช่วยลดอุณหภูมิเตาเผา $100^\circ F$ ถึง $300^\circ F$ และช่วยขยับปฏิบัติการสันดาป ประสิทธิภาพการสันดาป เพิ่มขึ้น 0.5% คาร์บอนในเชื้อเพลิงลดลงจาก 30% เป็น 26% ที่ทางออกของเตาจะมีปริมาณ NO_x ต่ำกว่า 50 ppm.
- สมรรถนะการดำเนินงาน การเผาไหม้ DUC และ CWF ในเตาเผาแบบวอร์เทค เริ่มต้นในช่วงเริ่มต้นจะเผาไหม้โพรเพน 30 นาที เพื่อเพิ่มอุณหภูมิให้สูงถึง $1,650^\circ F$ สำหรับ DUC ($1,700^\circ F$ สำหรับ CWF) จาก Start – up จะฉีดยาก CWF และ DUC เข้าเตาเผาใช้เวลาประมาณ 30 นาที การเผาไหม้จะเข้าสู่สภาวะสม่ำเสมอ DUC และ CWF จะแตกต่างกันที่ช่วงเริ่มต้นใหม่หลังจากหยุดให้ DUC 25 นาที ยังสามารถลุกไหม้อีกครั้งถ้าอุณหภูมิห้องเผาไหม้สูงกว่า $1,200^\circ F$ อย่างไรก็ตาม CWF มีอุณหภูมิวิกฤตที่ $1,350^\circ F$ ระหว่างช่วงเริ่มต้นใหม่ อัตราการไหลของอากาศปฐมภูมิเป็นปัจจัยสำคัญ อากาศปฐมภูมิที่มากเกินไป จะลดอุณหภูมิในห้องเผาไหม้และทำให้การเริ่มต้นใหม่ได้ลำบาก อัตราการไหลที่ต่ำ ทำให้อุณหภูมิห้องเผาไหม้ลดลง ภาระที่สามารถยอมรับได้ของการเผาไหม้อยู่ในช่วง 3.9 lb/hr (33% load) ถึง 20.5 lb/hr (170% load) ซึ่งให้ค่า Turn-down Ratio 5 : 1 ภาระที่ต่ำที่สุดในการศึกษาครั้งนี้คือ 3.3 lb/hr พบว่า เปลวไฟสลับ และไม่เสถียร การหมุนวนอ่อน
- ผนังอิฐภายในเตาเผา จะเกิดการสึกกร่อน เป็นผลมาจาก “ Sand blasting” ของการเคลื่อนที่อย่างรวดเร็วของอนุภาคดำนหินในการไหลหมุนวนที่รุนแรง

ข้อเสนอแนะ

1. แก๊สไอเสียที่เกิดจากการเผาไหม้ควรที่จะมีมลพิษน้อยที่สุด
2. เชื้อเพลิงที่เผาไหม้ไม่หมดไม่ควรออกไปกับไอเสียควรส่งกลับเข้าเตาเผาไหม้อีกครั้ง
3. เชื้อเพลิงควรมีขนาดเล็กและมีความชื้นต่ำ
4. ควรป้อนเชื้อเพลิงเข้าเตาเผาด้วยอัตราป้อนที่คงที่
5. จำนวนช่องอากาศปฐมภูมิและอากาศทุติยภูมิจะต้องอยู่ในตำแหน่งที่เหมาะสมเพื่อให้เชื้อเพลิงและอากาศเกิดการคลุกเคล้าได้ทั่วถึงและเกิดการเผาไหม้ในทุกส่วนของห้องเผาไหม้
6. ควรนำความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ทดลองต้มน้ำเพื่อนำมาใช้ประโยชน์ต่อไป
7. ในการทดลองครั้งนี้ควรทดลองใช้จำนวนช่องอากาศทุติยภูมิเริ่มจากจำนวนน้อยๆ แล้วค่อยเพิ่มจำนวนช่องอากาศทุติยภูมิให้มากขึ้นแล้วสังเกตการเปลี่ยนแปลง
8. ชี้อัดที่เกิดจากการเผาไหม้แล้วจะตกไปสู่ส่วนล่างของเตา เมื่อมีปริมาณมากขึ้นจะทำให้เกิดการฟุ้งกระจายผสมเชื้อเพลิง ทำให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้ลดลงต้องทำช่องระบายชี้อัดออกที่ส่วนล่างของเตา

จากการศึกษางานวิจัยในอดีตจะพบว่าได้มีการศึกษาเฉพาะผลที่เกิดขึ้นจากรูปแบบเตาเผา ซึ่งได้แก่ เตาเผาแบบไซโคลนในงานของ สุพจน์ นานาโชค , เตาเผาแบบฟลูอิด ไคซ์เบคในงานวิจัยของ สุวิทย์ เตีย เป็นต้น และเตาเผาแบบวอร์เทคในงานวิจัยของ นิวัต พิริยะรุ่งโรจน์ และอิทธิพลของอัตราส่วนของอากาศต่อการเผาไหม้ , อิทธิพลของการปรับเปลี่ยนชนิดของเชื้อเพลิงที่มีผลต่อการเผาไหม้ เช่น เตาเผาแบบฟลูอิด ไคซ์เบคในงานวิจัยของ สุวิทย์ เตีย และสำหรับเตาเผาแบบวอร์เทคในงานวิจัยของ Sen Nieh ใช้ถ่านหินผงเป็นเชื้อเพลิงและงานวิจัยของนิวัต พิริยะรุ่งโรจน์ ใช้แกลบเป็นเชื้อเพลิง และจากการงานวิจัยทั้งหมดยังไม่มียานวิจัยใด ๆ ศึกษาถึงอิทธิพลความชื้นของเชื้อเพลิงแกลบที่มีผลต่ออุณหภูมิภายในเตาเผาและก๊าซไอเสียที่เกิดขึ้นหลังจากการเผาไหม้ของแกลบที่มีความชื้นและศึกษาถึงผลของความชื้นที่เหมาะสมสำหรับเตาเผาแบบวอร์เทคที่ใช้ในการวิจัยนี้เพราะฉะนั้นอิทธิพลของความชื้นของเชื้อเพลิงแกลบจึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจในการนำมาศึกษาหาผลที่เกิดขึ้นกับการเผาไหม้ของแกลบ ซึ่งจะได้ทำการศึกษาในงานวิจัยนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

ทฤษฎี

ในการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งนั้นมีความยุ่งยากซับซ้อนกว่าเชื้อเพลิงก๊าซและของเหลวมาก เนื่องจากการทำปฏิกิริยาของออกซิเจนกับคาร์บอนที่มีอยู่ในเชื้อเพลิงจะต้องอาศัยพื้นผิวใหม่ของเชื้อเพลิงในการเกิดออกซิเจนไปจับตัวกับคาร์บอนส่วนที่เหลือ ในเชื้อเพลิงเพื่อเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ที่ต่อเนื่องจนกระทั่งเกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ ดังนั้นจึงควรจะทำการศึกษาถึงทฤษฎีการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงแข็ง, ทฤษฎีความชื้นและองค์ประกอบของก๊าซไอเสียที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้

3.1 เชื้อเพลิงชีวมวล [2]

เชื้อเพลิงที่ใช้ในการเผาไหม้สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ เชื้อเพลิงที่ได้จากการทับถมตัวของซากพืชซากสัตว์ ภายใต้ผิวโลกหรือที่เรียกว่าเชื้อเพลิงดึกดำบรรพ์ (Fossil fuel) ได้แก่ ถ่านหิน น้ำมัน และก๊าซธรรมชาติ เชื้อเพลิงอีกประเภทหนึ่งคือ เชื้อเพลิงชีวมวล (Biomass) ซึ่งเป็นวัสดุที่ได้จากสิ่งมีชีวิต เช่น ไม้ ชี้อเลื้อย และแกลบข้าว เป็นต้น เชื้อเพลิงประเภทชีวมวลนี้ส่วนใหญ่จะได้จากสิ่งที่เหลือทิ้งจากการเกษตร ซึ่งสามารถหาได้ง่ายโดยเฉพาะอย่างยิ่งในบริเวณที่มีการทำเกษตรกรรม

3.1.1 ประเภทของเชื้อเพลิงชีวมวล

เชื้อเพลิงชีวมวลสามารถแยกประเภทได้เป็น 4 ประเภท คือ

3.1.1.1 เชื้อเพลิงชีวมวลที่ได้จากไม้ (Forest biomass) ซึ่งสามารถแยกออกเป็น ไม้เนื้ออ่อน (Soft wood) และ ไม้เนื้อแข็ง (Hard wood) ในเชื้อเพลิงประเภทนี้จะมีปริมาณของลิกนิน (Lignin) อยู่ประมาณ 40 เปอร์เซ็นต์ในไม้เนื้อแข็ง ตัวอย่างของเชื้อเพลิงประเภทนี้ได้แก่ เศษไม้ เปลือกไม้ และชี้อเลื้อย

3.1.1.2 เชื้อเพลิงชีวมวลที่ได้จากการเกษตร (Agriculture biomass) ส่วนใหญ่จะเป็นของเหลือใช้จากการเกษตร เช่น แกลบข้าว, ฟางข้าว ซึ่งสารพวกนี้จะมีปริมาณลิกนินต่ำโดยประมาณ 0 – 20 เปอร์เซ็นต์

3.1.1.3 เชื้อเพลิงชีวมวลที่ได้จากอุตสาหกรรม (Industrial biomass) เช่น เชื้อเพลิงที่ได้จากการผลิตน้ำตาล คือ ชานอ้อย นอกจากนี้ยังมีกากสับปะรดที่ได้จากโรงงานผลิตสับปะรดกระป๋อง เชื้อเพลิงประเภทนี้จะมีปริมาณความชื้นสูงมาก

3.1.1.4 เชื้อเพลิงที่ได้จากของเหลือใช้จากคน (Domestic waste) ได้แก่ เชื้อเพลิงจากขยะเทศบาล เป็นต้น

3.1.2 คุณลักษณะของเชื้อเพลิงชีวมวล

เชื้อเพลิงชีวมวล โดยทั่วไปจะเป็นเชื้อเพลิงที่แตกต่างกันตามประเภทของเชื้อเพลิงชีวมวลและการที่เชื้อเพลิงชีวมวลมีปริมาณความชื้นและองค์ประกอบที่แตกต่างกัน จึงทำให้ค่าความร้อน (Heating Value) ของเชื้อเพลิงชีวมวลมีค่าแตกต่างกันด้วยดังนี้

ชานอ้อย	มีค่าความร้อน	1,900	กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม
ขยะ	มีค่าความร้อน	2,000	กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม
แกลบ	มีค่าความร้อน	3,300	กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม
ขี้เลื่อย	มีค่าความร้อน	4,000	กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม

เชื้อเพลิงชีวมวลที่นิยมนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงให้ความร้อนส่วนมากจะเป็นขี้เลื่อยและแกลบ เพราะให้ปริมาณความร้อนสูงกว่าจากการเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของชีวมวลที่เป็นแกลบและขี้เลื่อยพบว่า

ขี้เลื่อย

ข้อดี มีคุณลักษณะในการเป็นเชื้อเพลิงที่ดี เนื่องจากเมื่อเกิดการเผาไหม้จะได้ปริมาณขี้เถ้า น้อยกว่า 2% และไม่มีปริมาณซัลเฟอร์เลย ทำให้เกิดมลพิษในอากาศน้อยมาก

ข้อเสีย มีปริมาณความชื้นสูง 20 – 50 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งขึ้นอยู่กับเวลาที่ปล่อยทิ้งไว้หลังจากถูกผลิตมา เสียค่าใช้จ่ายในการขนส่งสูง และมีความหนาแน่นต่ำ (400 – 600 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) ดังนั้นจึงต้องเสียเนื้อที่ในการเก็บมาก

แกลบ

ข้อดี มีคุณสมบัติในการเป็นเชื้อเพลิงได้ดีพอสมควรและราคาถูกมาก

ข้อเสีย เมื่อถูกเผาไหม้จะมีปริมาณขี้เถ้าสูงพอประมาณ 15.7 – 21.3 เปอร์เซ็นต์ มีปริมาณความชื้นสูง

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเชื้อเพลิงชีวมวล โดยวิธีการวิเคราะห์ทางเคมีทำให้ทราบองค์ประกอบของเชื้อเพลิงชีวมวลของขี้เลื่อยและแกลบดังนี้

ขี้เลื่อย

ธาตุคาร์บอน	ประมาณ	50 – 53	เปอร์เซ็นต์
ออกซิเจน	ประมาณ	40 – 41	เปอร์เซ็นต์
ไฮโดรเจน	ประมาณ	6 – 7	เปอร์เซ็นต์
ไนโตรเจนรวมขี้เถ้า	ประมาณ	1 – 2	เปอร์เซ็นต์

แกลบ

ธาตุคาร์บอน	ประมาณ	40 – 42	เปอร์เซ็นต์
ออกซิเจน	ประมาณ	36 – 37	เปอร์เซ็นต์
ไฮโดรเจน	ประมาณ	5	เปอร์เซ็นต์

ไนโตรเจน	ประมาณ	1	เปอร์เซ็นต์
ซีดี	ประมาณ	14 – 17	เปอร์เซ็นต์

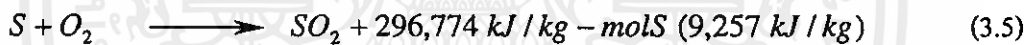
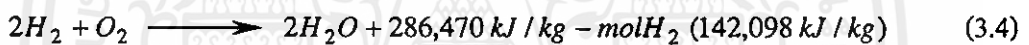
3.2 ทฤษฎีการเผาไหม้ [2]

ปฏิกิริยาการเผาไหม้ (Combustion reaction) หมายถึง ปฏิกิริยาทางเคมีที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วระหว่างออกซิเจนกับสารเผาไหม้ได้ (combustible element) ของเชื้อเพลิงชนิดหนึ่ง ๆ สารเผาไหม้ได้ในที่นี้มีธาตุหลัก 3 ตัว คือ คาร์บอน ไฮโดรเจน และกำมะถัน สำหรับกำมะถันขณะเกิดปฏิกิริยากับออกซิเจนจะให้ความร้อนไม่มากนักเมื่อเปรียบเทียบกับคาร์บอนและไฮโดรเจน ในทางตรงกันข้ามกลับเพิ่มปัญหาในด้านการกัดกร่อนชิ้นส่วนหรืออุปกรณ์ รวมทั้งทำให้เกิดปัญหาหมอกพิษในอากาศ

สำหรับการเผาไหม้ของคาร์บอนกับออกซิเจนนั้น เขียนเป็นสมการได้ดังนี้



เราสามารถเขียนสมการการเผาไหม้รวมได้เป็น



ซึ่งจะพบว่าปฏิกิริยาการเผาไหม้เป็นปฏิกิริยาคายความร้อน โดยปลดปล่อยความร้อนออกมาด้วยหลังจากเกิดปฏิกิริยาเป็นสารประกอบใหม่

การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงต้องอาศัยปัจจัยที่สำคัญ 3 ประการ คือ

1. เวลาในการเผาไหม้ต้องนานเพียงพอ เพื่อให้เชื้อเพลิงเผาไหม้อย่างสมบูรณ์หมด
2. อุณหภูมิระหว่การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงต้องสูงเพียงพอที่จะทำให้เกิดการเผาไหม้อย่างต่อเนื่อง
3. การผสมผสานระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศจะต้องอยู่ในลักษณะการไหลผสมแบบปั่นป่วน (turbulence)

3.2.1 การผสม

การรวมตัวที่ติระหว่างเชื้อเพลิงกับออกซิเจน ก็คือ การที่อนุภาคของเชื้อเพลิงสัมผัสกับโมเลกุลของออกซิเจนได้อย่างทั่วถึง ในกรณีที่เชื้อเพลิงเป็นก๊าซ การผสมกันนั้นจะเป็นไปได้ง่าย แต่ถ้าเชื้อเพลิงเป็นของแข็งหรือของเหลว การผสมกันนั้นก็จะต้องยุ่งยากมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใด การนำเอกสารไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกรณีที่เชื้อเพลิงเป็นของเหลว ส่วนใหญ่ก็จะมีกรทำให้เป็นอนุภาคเล็ก ๆ ก่อนหรือเป็นฝอย แล้วจึงจะทำการเผาไหม้ซึ่งจะทำให้รวมตัวได้ง่ายกับอากาศและเกิดการลุกไหม้ได้ดีเหมือนเชื้อเพลิงที่เป็นก๊าซ

ส่วนเชื้อเพลิงที่เป็นของแข็งนั้น แต่ละโมเลกุลของออกซิเจนจะสัมผัสกับพื้นผิวของเชื้อเพลิงเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ให้ก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ซึ่งเป็นก๊าซที่ติดไฟได้พร้อมกับได้ความร้อนออกมาส่วนหนึ่ง จากนั้นออกซิเจนจะเข้าไปผสมกับคาร์บอนมอนนอกไซด์ทำให้เกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ คือ เกิดคาร์บอนไดออกไซด์ในที่สุดซึ่งเป็นก๊าซที่ไม่ติดไฟได้เองแล้วพร้อมกับได้ความร้อนออกมาด้วย

ฉะนั้นกระบวนการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงที่เป็นของแข็งนั้นจะประกอบด้วยพฤติกรรม 4 ขั้นตอน คือ

1. เริ่มต้นด้วยออกซิเจนสัมผัสกับพื้นผิวของเชื้อเพลิงที่เป็นคาร์บอน
2. เกิดการรวมตัวของคาร์บอนกับออกซิเจนกลายเป็นก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ออกมาพร้อมกับความร้อน
3. มีการปล่อยก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ที่ได้จากการเผาไหม้ออกจากผิวของเชื้อเพลิง
4. มีการรวมตัวกันของคาร์บอนมอนนอกไซด์กับออกซิเจนอีกครั้งจนกระทั่งกลายเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

ดังนั้นจะกล่าวได้ว่า อัตราการเผาไหม้นั้นขึ้นอยู่กับสาเหตุที่กล่าวมาแล้ว และสามารถเร่งปฏิกิริยาการเกิดได้โดยการบดเชื้อเพลิงที่เป็นของแข็งให้เป็นผงซึ่งเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวในการสัมผัสให้มากขึ้น

3.2.2 การติดไฟหรือการลุกไหม้

การลุกไหม้ของเชื้อเพลิงหรืออัตราการรวมตัวกันทางเคมีของเชื้อเพลิงกับอากาศนั้นขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ การเผาไหม้จะเกิดขึ้นอย่างช้า ๆ ในตอนแรกและเกิดต่อไปเรื่อย ๆ ความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ก็จะไปเพิ่มอุณหภูมิของเชื้อเพลิงและอากาศให้มากขึ้น ทำให้อัตราการเผาไหม้เพิ่มขึ้นด้วย ฉะนั้นสิ่งที่ต้องการสำหรับการเผาไหม้แบบเกิดขึ้นได้เอง (spontaneous combustion) นั้นต้องมี

1. บริเวณที่จำกัดสำหรับการสะสมความร้อน
2. สารเชื้อเพลิง
3. อากาศ

การลุกไหม้นั้นไม่ได้เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นได้เองส่วนใหญ่จะใช้ปริมาณความร้อนจากภายนอกช่วยเร่งปฏิกิริยาการเผาไหม้ และให้ปริมาณความร้อนออกมาเพิ่มขึ้น นอกจากนั้นสิ่งที่สำคัญสำหรับการเผาไหม้แบบต่อเนื่องก็คือ อุณหภูมิ ซึ่งถ้าอุณหภูมิต่ำเกินไปก็ทำให้เชื้อ

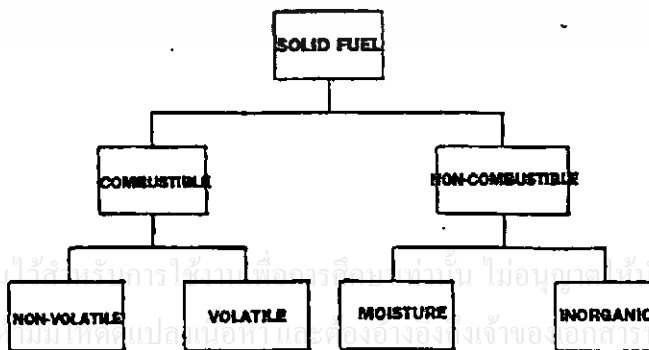
เพลิงไม่สามารถลุกไหม้แบบต่อเนื่องได้ แต่ถ้าอุณหภูมิของการเผาไหม้สูง การลุกไหม้ก็จะเกิดต่อไปได้เรื่อยๆ

ดังนั้นการติดไฟหรือการลุกไหม้นั้นขึ้นอยู่กับหลายสิ่ง เช่น ชนิดของสารเชื้อเพลิง, สถานะของเชื้อเพลิง และอัตราส่วนของเชื้อเพลิงกับอากาศ

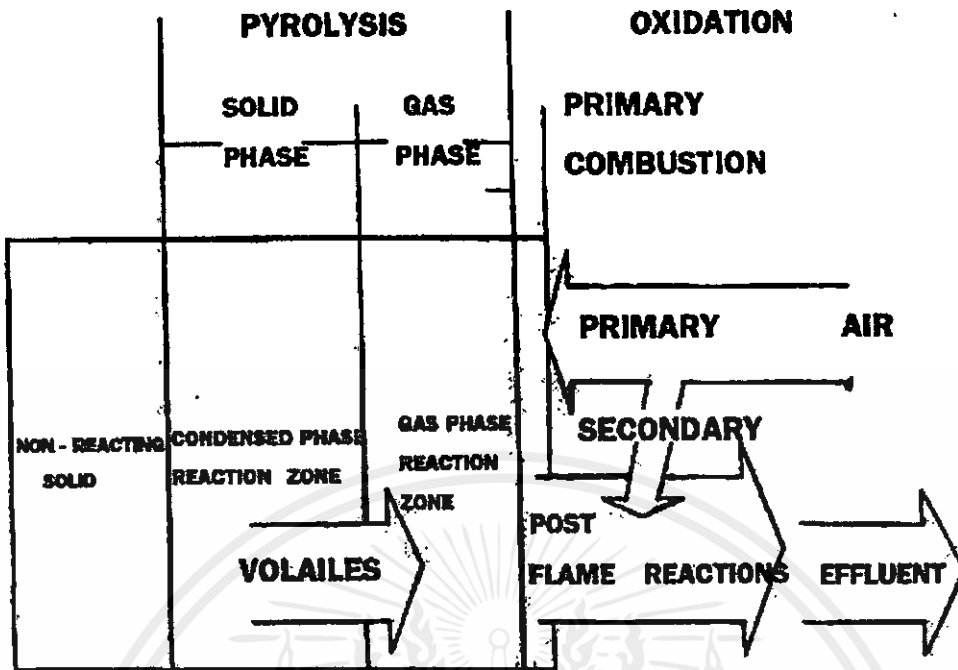
3.3 การเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง

เชื้อเพลิงแข็งที่มีใช้อยู่ในปัจจุบันมีหลายชนิด เช่น ถ่านหิน ฟืน ขี้เลื่อย แกลบ ฟางข้าว โปด เป็นต้น ขบวนการการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง จะมีความแตกต่างไปจากเชื้อเพลิงเหลว และแก๊ส เพราะว่า คุณสมบัติของเชื้อเพลิงแข็ง มักจะเป็นสารประกอบที่มีส่วนผสมของสารต่างๆ ภายในไม่แน่นอน นอกจากนี้ การเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งยังขึ้นอยู่กับขนาดของอนุภาคเชื้อเพลิงแข็งด้วย เพราะเชื้อเพลิงแข็งประกอบไปด้วยสารประกอบต่างๆ ซึ่งมีทั้งเผาไหม้ได้ และไม่สามารถเผาไหม้ได้ดังรูปที่ 3.1

สารที่ไม่สามารถเผาไหม้ได้ เรียกว่า สารเฉื่อย (Inert) สารเฉื่อยนี้สามารถเปรียบเทียบได้กับก๊าซไนโตรเจนในอากาศ ซึ่งจะไม่ช่วยในการเผาไหม้ แต่ในบางครั้งสารเฉื่อยเหล่านี้ก็อาจจะเกิดปฏิกิริยาได้ในบางขบวนการของการเผาไหม้ โดยเฉพาะในขบวนการเผาไหม้ที่อุณหภูมิสูงๆ สารเฉื่อยที่อยู่ในเชื้อเพลิงแข็ง สามารถแบ่งออกได้ 2 ชนิด คือ ความชื้น และสารประกอบเคมีที่ประกอบขึ้นเป็นขี้เถ้า สารอนินทรีย์เหล่านี้โดยมากจะเป็นพวกซิลิเกต(Silicates) ซัลไฟด์ (Sulfides) และเกลือฮาโลเจน (Halogen salt) เป็นต้น เมื่อเกิดการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง สารเหล่านี้จะกลายเป็นขี้เถ้า บางส่วนจะตกในห้องที่เผาไหม้ ส่วนที่มีน้ำหนักเบาจะปลิวไปกับไอเสียที่เรียกว่า เถ้าลอย (Fly ash) เชื้อเพลิงแข็งที่สามารถแยกได้เป็นส่วนที่ระเหยได้ (Volatile) และส่วนที่ไม่ระเหย (Non-volatile) ในส่วนที่ไม่ระเหยนี้ ประกอบด้วยคาร์บอน สารประกอบคาร์บอน C_xH_y , โดยที่ค่า x มีค่ามากกว่า y มากๆ หรือเป็นสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงนั่นเอง ส่วนสารที่ระเหยได้ในที่นี้ หมายถึง สารประกอบที่ระเหยใช้ในช่องของการเผาไหม้ ซึ่งจะประกอบไปด้วยสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำๆ หลักในการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งปฏิกิริยาที่จะเกิดขึ้นดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.1 องค์ประกอบของเชื้อเพลิงแข็ง



รูปที่ 3.2 ปฏิกริยาการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง

3.3.1 แบบจำลองการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง

แบบจำลองการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งที่นิยมใช้ในปัจจุบันมีอยู่ 2 แบบ คือ

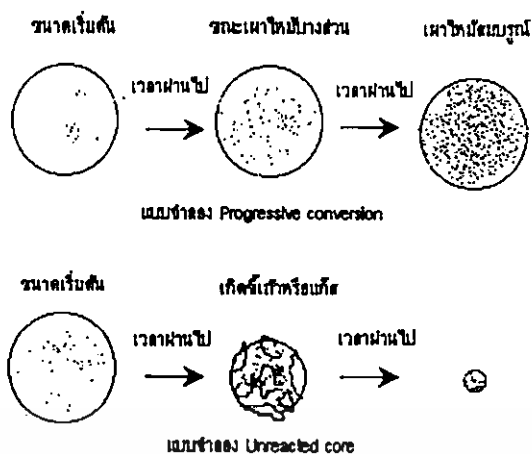
1. แบบจำลอง Progressive conversion ใช้อธิบายเมื่อในระหว่างการเกิดปฏิกริยาการเผาไหม้ ขนาดของเชื้อเพลิงไม่เปลี่ยนแปลง และเมื่อทำการเผาไหม้แล้ว ไม่เกิดขี้เถ้า ผลิตภัณฑ์ที่ได้คงรูปเดิม เช่น การเผาแร่กำมะถัน
2. แบบจำลอง Unreacted core ใช้อธิบายเมื่อทำการเผาไหม้แล้ว ขนาดของเชื้อเพลิงเปลี่ยนไป เช่น ไม้, แกลบ, ถ่านหิน เป็นต้น

โดยจะมุ่งเน้นศึกษาที่แบบจำลอง Unreacted core ซึ่งเป็นแบบจำลองที่ใช้อธิบายการเผาไหม้ของ แกลบ

3.3.2 แบบจำลอง Unreacted core

ปฏิกริยาการเผาไหม้จะเกิดขึ้นครั้งแรกที่ผิวนอกสุดของเชื้อเพลิง หลังจากนั้นบริเวณที่เกิดปฏิกริยาจะค่อยๆ กินลึกเข้าไปภายใน ทั้งบริเวณที่ได้ทำปฏิกริยาไปแล้วในสภาพขี้เถ้า ดังนั้นที่เวลาใดๆ ส่วนลึกเข้าไปภายในชั้นเชื้อเพลิง หรือที่เรียกว่า แก่น จะค่อยๆ มีขนาดลดลงในระหว่างการทำปฏิกริยา

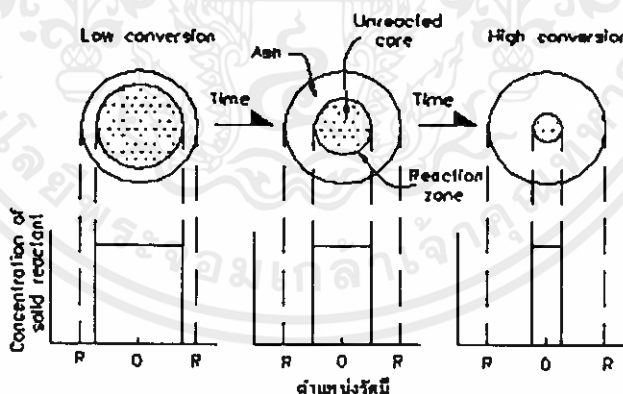
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 แบบจำลองการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง



รูปที่ 3.4 บริเวณการเกิดการเผาไหม้



รูปที่ 3.5 ลักษณะชั้นเชื้อเพลิงระหว่างการเผาไหม้

ปฏิกิริยาของแบบจำลองนี้ สามารถแบ่งออกเป็น 5 ขั้นตอนคือ

1. อากาศแพร่กระจายผ่านชั้นฟิล์มเข้าสู่ชั้นชี้ไถ้
2. อากาศผ่านชั้นชี้ไถ้เข้าสู่ผิวของเชื้อเพลิง ในส่วนที่ยังไม่ทำปฏิกิริยา
3. เกิดปฏิกิริยาระหว่างอากาศกับผิวของเชื้อเพลิง
4. ผลิตภัณฑ์ในรูปของแก๊สที่เกิดจากการเผาไหม้ซึมผ่านชั้นชี้ไถ้กลับสู่ชั้นฟิล์มของแก๊ส

5. ผลลัพธ์ที่แก๊สซึมผ่านชั้นฟิล์มกลับคืนสู่ภายนอกบรรยากาศรอบๆ โดยความต้านทานในแต่ละชั้นตอนอาจจะแตกต่างกันมากชั้นตอนที่มีความต้านทานสูงสุดจะเป็นตัวควบคุมอัตราการความเร็วของการเผาไหม้

สิ่งที่มีผลต่ออัตราการความเร็วในการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง

1. อุณหภูมิ โดยทั่วไปชั้นตอนของปฏิกิริยาเคมีจะไวต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ
2. เวลาของการแพร่กระจายของอากาศผ่านชั้นฟิล์ม หรือชั้นขี้เถ้า
3. ขนาดของเชื้อเพลิง
4. ความต้านทานของชั้นขี้เถ้ากับชั้นฟิล์ม โดยปกติความต้านทานของชั้นขี้เถ้าจะสูงกว่าชั้นฟิล์มมากดังนั้นค่าความต้านทานของชั้นฟิล์มจึงอาจตัดทิ้งได้
5. ความต้านทานรวม ซึ่งรวมทั้งความต้านทานของแก๊สฟิล์มชั้นขี้เถ้า และปฏิกิริยาการเผาไหม้

3.4 อากาศชื้น [11]

อากาศชื้นเป็นก๊าซอุดมคติที่ประกอบด้วยอากาศแห้งและไอน้ำความดันต่ำ ซึ่งโดยทั่วไปอากาศชื้นมีภาวะการใช้งานที่อุณหภูมิหนึ่ง ๆ ซึ่งต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤตของไอน้ำ จึงทำให้เมื่ออากาศชื้นเปลี่ยนสถานะอาจมีการระเหยหรือการควบแน่นของไอน้ำเข้ามาเกี่ยวข้องด้วย ผลก็คือจะทำให้เกิดของผสมสองสถานะ

ในการวิเคราะห์ก๊าซผสมอุดมคติที่เป็นอากาศชื้นจะกำหนดข้อสมมติฐานดังต่อไปนี้

1. ขณะเกิดการควบแน่นของไอน้ำความดันต่ำในอากาศชื้น น้ำควบแน่นนั้นจะไม่ละลายก๊าซองค์ประกอบของอากาศ
2. ในอากาศชื้นเฉพาะสถานะก๊าซเท่านั้นจะสมมติให้เป็นก๊าซผสมอุดมคติ (ในสถานะก๊าซประกอบด้วยอากาศแห้งและไอน้ำความดันต่ำ)
3. ถ้าหากปรากฏอากาศชื้น (สถานะไอ) ร่วมกับสถานะน้ำควบแน่น ภายใต้ความดันและอุณหภูมิหนึ่ง ๆ สมดุลสถานะระหว่างสถานะไอน้ำกับสถานะน้ำควบแน่นนั้นจะไม่ขึ้นอยู่กับอากาศแห้งที่ประกอบรวม ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่า ภายใต้สมดุลสถานะระหว่างอากาศชื้นกับน้ำควบแน่นที่ความดันและอุณหภูมิหนึ่ง ๆ ความดันย่อยของไอน้ำในอากาศชื้นนั้นจะเท่ากับความดันอิ่มตัวที่อุณหภูมิขณะนั้น

3.4.1 อากาศแห้งและอากาศชื้น

อากาศในบรรยากาศนั้นปกติประกอบด้วยอากาศแห้ง (dry air) และไอน้ำความดันต่ำในอากาศหรือบรรยากาศนั้นเรียกว่า อากาศชื้น (Atmospheric air) อากาศแห้งมีองค์ประกอบเป็นไนโตรเจน 78.10%, ออกซิเจน 20.95%, อาร์กอน 0.92% โดยโมล และที่เหลือเป็นก๊าซอื่น ๆ การวิเคราะห์อากาศชื้นนั้นจะเป็นการวิเคราะห์ของผสมที่ซึ่งประกอบด้วยอากาศแห้งและไอน้ำนั่นเอง

องค์ประกอบของอากาศชื้นที่เป็นอากาศแห้งจะมีปริมาณคงที่ ส่วนองค์ประกอบที่เป็นไอน้ำในอากาศชื้นนั้นจะเปลี่ยนแปลง ทั้งนี้ ขึ้นอยู่กับการระเหยตัวของน้ำจากมหาสมุทร, แม่น้ำ, ลำคลอง, ทะเลสาบ รวมถึงจากร่างกายของมนุษย์เข้าสู่บรรยากาศหรือการควบแน่นของไอน้ำออกจากอากาศชื้นนั้น

3.4.2 ความดันย่อยของอากาศและความดันไอ

อากาศชื้นสามารถสมมติให้เป็นก๊าซผสมอุดมคติได้ ดังนั้นความดันของอากาศชื้น (P) ย่อมเท่ากับ ผลบวกของความดันย่อยของอากาศแห้ง (P_a) และความดันไอ (P_v) ซึ่งเขียนเป็นสมการดังนี้

$$P = P_a + P_v$$

ความดันย่อยของอากาศแห้ง (P_a) หมายถึงความดันในส่วนที่กระทำโดยโมเลกุลของอากาศแห้งในอากาศชื้นนั้น

ความดันไอ (P_v) หมายถึง ความดันในส่วนที่กระทำโดยโมเลกุลของไอน้ำที่มีอยู่ในอากาศชื้น ในกรณีที่อากาศชื้นอยู่ในภาวะอิ่มตัวที่อุณหภูมิใดอุณหภูมิหนึ่ง ความดันไอก็คือความดัน ไออิ่มตัวหรือความดันอิ่มตัวที่อุณหภูมินั้น

ภายใต้ภาวะอิ่มตัวของอากาศชื้นที่อุณหภูมิใด ๆ พบว่า

$$P_v = P_{sat @ T} \text{ (ภายใต้ภาวะอิ่มตัว)}$$

3.4.3 อัตราส่วนความชื้น

ปริมาณไอน้ำในอากาศชื้นสามารถกำหนดได้ในหลาย ๆ ลักษณะตามนิยามของอัตราส่วนความชื้น (humidity ratio, ω) หรือความชื้นสัมพัทธ์ (relative humidity, ϕ) ดังนี้

อัตราส่วนความชื้น (ω) หมายถึง มวลของไอน้ำที่มีอยู่ในอากาศชื้นต่อหนึ่งหน่วยมวลของอากาศแห้ง มีหน่วยเป็น kg/kg-dry air หรืออาจเรียกว่า ความชื้นสัมบูรณ์หรือความชื้นจำเพาะ

พิจารณาอากาศชื้น ที่ P, T ซึ่งยึดครองปริมาตร V อัตราส่วนความชื้นที่สภาวะนี้พิจารณาจากกฎของดาลตันภายใต้ปริมาตร V และอุณหภูมิ T เดียวกับอากาศชื้น (ซึ่งพิจารณาเป็นก๊าซผสมอุดมคติ) นั้นพบว่าอากาศแห้งมีความดันย่อยเท่ากับ P_a ปริมาตรเท่ากับ V และอุณหภูมิเท่ากับ T และไอน้ำมีความดันย่อยเท่ากับ P_v ปริมาตรเท่ากับ V และอุณหภูมิเท่ากับ T ดังนั้น

$$\omega = \frac{m_v}{m_a} = \frac{P_v V / R_v T}{P_a V / R_a T} = \frac{P_v R_a}{P_a R_v} \quad (3.6)$$

ในที่นี้ $R_a = 0.2870 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$ และ $R_v = 0.46152 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$ แทนค่าในสมการ (3.6) จะได้

$$\omega = 0.622 \frac{P_v}{P_a} = \frac{0.622 P_v}{P - P_v} \quad (3.7)$$

โดยที่ P คือ ความดันของอากาศชื้นหรือความดันทั้งหมด

ในที่นี้สำหรับอากาศแห้งนั้นจะไม่มีไอน้ำเป็นองค์ประกอบ ดังนั้นอัตราส่วนความชื้น $\omega = 0$ หากเพิ่มไอน้ำ (ความชื้น) ให้กับอากาศแห้งนั้น พบว่าอัตราส่วนความชื้นจะเพิ่มขึ้น และถ้าเพิ่มไอน้ำต่อไปจนกระทั่งถึงจุดหนึ่งซึ่งอากาศชื้นนั้นจะไม่สามารถรับไอน้ำได้อีกต่อไป แสดงว่าอากาศได้รับไอน้ำในปริมาณสูงสุดและอิ่มตัว อากาศชื้นที่สภาวะนี้เรียกว่า อากาศอิ่มตัว (Saturated air) ซึ่งที่สภาวะอิ่มตัวนี้ความดัน ไอก็คือความดันอิ่มตัวที่อุณหภูมิขณะนั้นของอากาศชื้น

3.4.4 ความชื้นสัมพัทธ์

การบ่งบอกปริมาณไอน้ำในอากาศชื้น โดยคำนึงถึงผลต่อความรู้สึกสบายของมนุษย์ในบรรยากาศทั้งนี้ จะเปรียบเทียบปริมาณไอน้ำในอากาศชื้นที่อุณหภูมิหนึ่ง ๆ กับปริมาณไอน้ำสูงสุดที่อากาศสามารถรับไว้ได้ภายใต้อุณหภูมิเดียวกัน อัตราส่วนที่ได้นี้เรียกว่าความชื้นสัมพัทธ์ (ϕ)

ความชื้นสัมพัทธ์ (ϕ) หมายถึงอัตราส่วนของปริมาณไอน้ำในอากาศ (m_v) ต่อปริมาณไอน้ำสูงสุดในอากาศอิ่มตัวที่อุณหภูมิเดียวกัน (m_g)

$$\phi = \frac{m_v}{m_g} = \frac{P_v V / R_v T}{P_g V / R_v T} = \frac{P_v}{P_g} \quad (3.8)$$

โดยที่ $P_g = P_{sat @ T}$

ดังนั้นจากสมการ (3.7) และ (3.8) จะได้

$$\phi = \frac{\omega P}{(0.622 + \omega) P_g} \quad (3.9)$$

และ

$$\omega = \frac{0.622 \phi P_g}{P - \phi P_g} \quad (3.10)$$

จากสมการ (3.8) นั้นพบว่าความชื้นสัมพัทธ์ก็คือ อัตราส่วนของความดันไอของไอน้ำในอากาศ (เศษส่วนโดยโมลของไอน้ำในอากาศ) ต่อความดันไอของไอน้ำในอากาศอิ่มตัวที่อุณหภูมิเดียวกัน (เศษส่วนโดยโมลของไอน้ำในอากาศอิ่มตัว) ความชื้นสัมพัทธ์จะมีค่าตั้งแต่ 0 – 100% หรือเขียนเป็นสมการในรูปของ

$$\phi = \frac{P_v}{P_g} = \frac{v_g}{v_v} = \frac{\rho_v}{\rho_g} \quad (3.11)$$

3.4.5 อุณหภูมิกระเปาะแห้งและอุณหภูมิกระเปาะเปียก

อุณหภูมิกระเปาะแห้ง (Dry bulb temperature , T_{db}) หมายถึงอุณหภูมิของอากาศชื้นซึ่งชั้บอบบนเทอร์โมมิเตอร์แบบธรรมดา

อุณหภูมิกระเปาะเปียก (Wet bulb temperature , T_{wb}) หมายถึงอุณหภูมิของอากาศชื้นซึ่งชั้บอบบนเทอร์โมมิเตอร์โดยมีผ้ากอซเปียกหุ้มอยู่ที่กระเปาะ ขณะวัดอุณหภูมิต้องทำให้อากาศไหลผ่านด้วยความเร็วไม่ต่ำกว่า 3 เมตรต่อวินาที ทั้งนี้ต้องการให้เกิดการถ่ายเทความร้อนอยู่ใน

แบบของการพาความร้อนมากกว่าการแผ่รังสีความร้อน กระบวนการที่เกิดขึ้นขณะวัดอุณหภูมิ กระเปาะเปียกนี้เรียกว่า กระบวนการทำให้อากาศอิ่มตัวแบบอะเดียแบติก

3.5 การอบแห้ง [13]

การอบแห้ง หมายถึง กระบวนการลดความชื้น ซึ่งส่วนใหญ่ใช้การถ่ายเทความร้อนไปยัง ส่วนที่ชื้น เพื่อไล่ความชื้นออกจากวัสดุโดยการระเหย โดยใช้ความร้อนที่ได้รับจากอากาศร้อน หรือความร้อนแฝงของการระเหย

3.5.1 ความชื้นในวัสดุ

ความชื้นเป็นตัวบอกปริมาณของน้ำที่มีอยู่ในวัสดุ เมื่อเทียบกับมวลของวัสดุชื้นหรือแห้ง ความชื้นในวัสดุสามารถแสดงได้เป็น 2 แบบ คือ ความชื้นมาตรฐานเปียก (อัตราส่วนความชื้นมาตรฐานเปียก)

$$MC_{wet} = \frac{WW - DW}{WW} \times 100 \quad (3.12)$$

ความชื้นแบบนี้เป็นที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางในวงการค้าทั่วไปมักจะอ้างถึงในรูปของเปอร์เซ็นต์

ความชื้นมาตรฐานแห้ง (อัตราส่วนความชื้นมาตรฐานแห้ง)

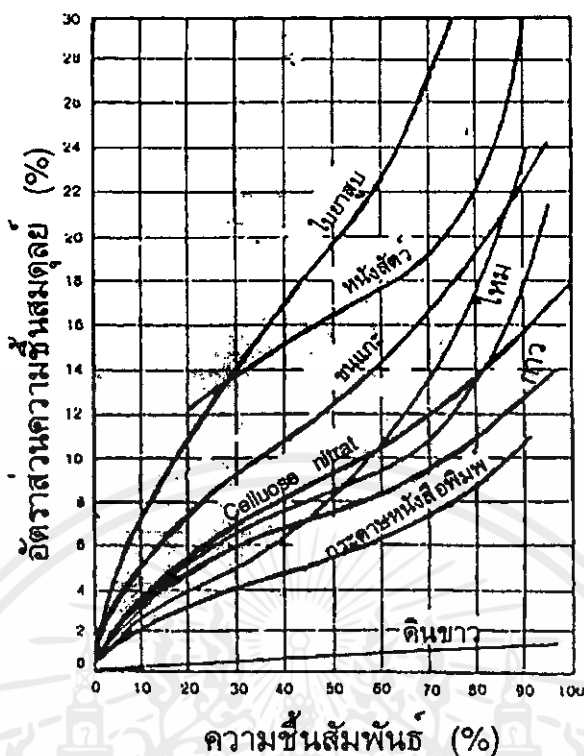
$$MC_{dry} = \frac{WW - DW}{DW} \times 100 \quad (3.13)$$

ความชื้นแบบนี้เป็นที่นิยมใช้กันในการวิเคราะห์ของ กระบวนการอบแห้งทางทฤษฎี เพราะให้การคำนวณสะดวกขึ้น ซึ่งเป็นเพราะมวลของวัสดุแห้งจะมีค่าคงที่หรือเกือบคงที่ระหว่างการอบแห้ง หรือว่าเกือบคงที่ก็เพราะผลผลิตทางการเกษตรเป็นสิ่งมีชีวิต มีการหายใจดังนั้นมีการเผาผลาญสารอาหารทำให้มวลแห้งลดลง ส่วนใหญ่แล้วมวลแห้งจะลดลงเพียงเล็กน้อย

3.5.2 อัตราส่วนความชื้นสมดุล

เมื่อวางวัสดุเปียกไว้ในก๊าซ (หรืออากาศ) ที่อุณหภูมิคงที่และความชื้นคงที่วัสดุนั้น จะแห้งขึ้นหรือลดความชื้นเพิ่มจนกระทั่งเข้าสู่สภาวะสมดุลในขณะนั้น ความชื้นในวัสดุจะมีความดันไอเท่ากับความดันไอของก๊าซ (อากาศ) ที่อยู่รอบ ๆ ด้วย อัตราส่วนความชื้นสมดุลจะขึ้นอยู่กับประเภทของวัสดุ, อุณหภูมิและความชื้นของก๊าซ (อากาศ) ซึ่งได้มีการทดลองวัดไว้สำหรับวัสดุประเภทต่าง ๆ ดังแสดงในรูป เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.6. แสดงอัตราส่วนความชื้นสมดุลสำหรับวัสดุประเภทต่าง ๆ ที่อุณหภูมิ 25°C

3.5.3 อัตราส่วนความชื้นอิสระ

อัตราส่วนความชื้นในวัสดุที่สามารถกำจัดได้โดยการอบแห้งจะเท่ากับผลต่างระหว่างอัตราส่วนความชื้นเริ่มแรกของวัสดุและอัตราส่วนความชื้นสมดุล ภายใต้เงื่อนไขการอบแห้งนั้น ๆ อัตราส่วนความชื้นที่กำจัดออกได้ที่มีชื่อเรียกว่า อัตราส่วนความชื้นอิสระ

3.5.4 อัตราส่วนความชื้นวิกฤต

ในระหว่างการอบแห้ง อัตราส่วนความชื้นที่อัตราของการอบแห้งเปลี่ยนจากช่วงการอบแห้งแบบคงที่เป็นช่วงของการอบแห้งแบบลดลง มีชื่อเรียกว่า อัตราส่วนความชื้นวิกฤต ค่าของอัตราส่วนความชื้นวิกฤตนี้จะเปลี่ยนตามประเภทของวัสดุ, วิธีการอบแห้ง, เงื่อนไขการอบแห้ง เป็นต้น นอกจากนี้ในบางครั้งค่าวิกฤตจะไม่ปรากฏให้ชัดเจนก็มี ค่าอัตราส่วนความชื้นวิกฤตของวัสดุประเภทต่าง ๆ มีการทดลองวัดไว้ โดยทั่วไปถ้าอัตราการอบแห้งยิ่งสูงและชื้นของวัสดุยิ่งหนา ค่าอัตราส่วนความชื้นวิกฤตก็ยิ่งสูง

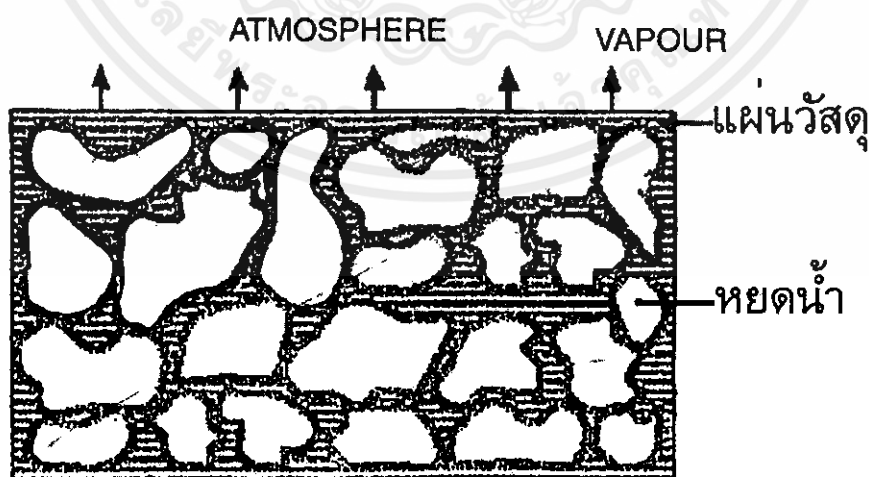
3.5.5 วิธีการลดความชื้น

ในกรณีที่ต้องการอากาศหรือก๊าซที่มีความชื้นต่ำ เพื่อใช้ในการปฏิบัติการอบแห้งหรือวิธีการอื่น ๆ วิธีการลดความชื้นของอากาศสามารถแบ่งได้ดังนี้

1. วิธีการลดความชื้นโดยการดูดซับ วิธีนี้จะดูดซับไอน้ำออกจากอากาศชื้น โดยการป้อนอากาศชื้นผ่านชั้นที่บรรจุสารดูดความชื้น หรือ ฟลูอิดไดซ์เบคของสารดูดความชื้น
2. วิธีการลดความชื้นโดยการดูดกลืน วิธีนี้ถ้าใช้สารดูดกลืนความชื้นที่เป็นของแข็งจะทำได้โดยการบรรจุสารในวัสดุ แต่ถ้าหากเป็นของเหลวก็จะทำการพ่นให้เป็นฝอย
3. วิธีการลดความชื้นโดยการอัดความดัน วิธีนี้อาศัยหลักการที่ว่าเมื่อความดันรวมของก๊าซผสมมีค่าสูงขึ้น ความชื้นอิ่มตัวจะมีค่าน้อยลง วิธีการนี้จะใช้ในกรณีที่ทำเป็นเท่านั้นเพราะอุปกรณ์มีราคาค่อนข้างแพง
4. วิธีการลดความชื้นโดยการทำให้เย็น วิธีการนี้ทำได้โดยการสัมผัสอากาศโดยตรงกับผนังวัสดุ
5. วิธีการใช้ความร้อน เป็นวิธีการใช้ความร้อนจากอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนในการทำให้อากาศร้อนเข้าไปไล่ความชื้นที่มีอยู่ในวัสดุระเหยออกไป

3.5.6 กลไกที่เกิดขึ้นระหว่างการอบแห้ง

วัสดุที่ตั้งทิ้งไว้ในห้องที่มีความชื้นไม่สูงมาก สักครู่จะสังเกตเห็นว่า ผิวหน้าของวัสดุนั้นแห้งลง โดยไม่ต้องให้ความร้อนหรือเปิดพัดลมเป่า ที่เป็นเช่นนี้เพราะ โมเลกุลของน้ำที่เกาะติดอยู่ที่ผิวหน้าค่อย ๆ ระเหยกลายเป็น โมเลกุลของไอน้ำแล้วลอยแทรกตัวเข้าไปในโมเลกุลของอากาศ ทั้งนี้เกิดขึ้นได้เพราะในอากาศยังมีความชื้น ไม่สมบูรณ์ โมเลกุลของน้ำในวัสดุค่อย ๆ ระเหยไปที่ละชั้น จนกระทั่งถึงเนื้อวัสดุ ดังรูปที่ 3.7 แสดงการระเหยของน้ำจากผิวหน้า พอน้ำบนผิวหน้าของวัสดุเริ่มหมดไป น้ำที่อยู่ในช่องว่างของเนื้อวัสดุก็จะค่อย ๆ ระเหยออกมา จนถึงเนื้อในซึ่งจะมีน้ำคงที่อยู่เล็กน้อย ทั้งนี้มีความสมดุลระหว่างความดันไอน้ำในชั้นบรรยากาศ ซึ่งเรียกว่าวัสดุอยู่ในสภาวะที่มีความชื้นสมดุล โดยพิจารณาจากกระบวนการที่แสดงได้ดังรูปที่ 3.8

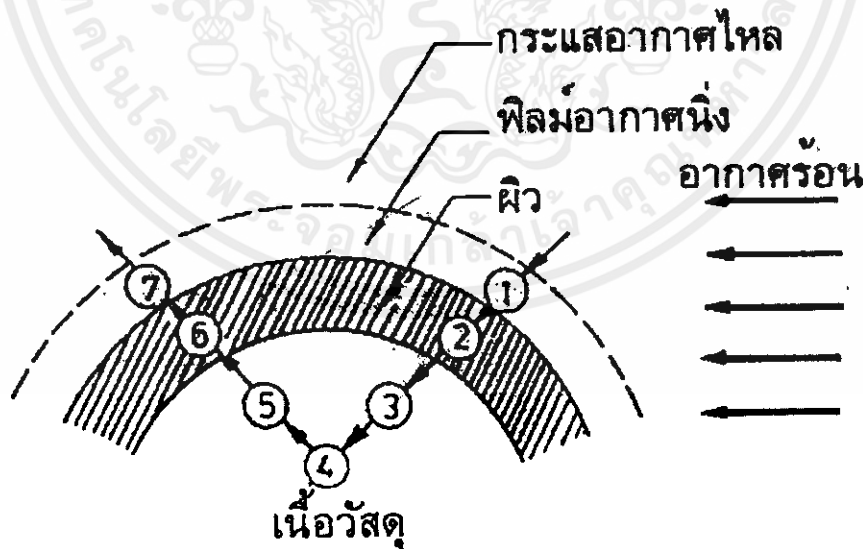


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 3.7 แสดงน้ำบนผิวหน้าวัสดุที่ระเหยสู่ชั้นบรรยากาศ ถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนของการระเหยของน้ำที่อยู่ในวัสดุต่าง ๆ นั้นมีลำดับดังต่อไปนี้

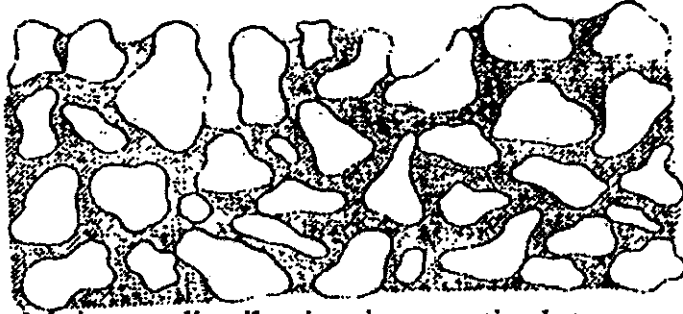
1. พลังงานความร้อนจากอากาศผ่านมายังชั้นของอากาศบาง ๆ ที่อยู่รอบ ๆ ผิวหน้าของวัสดุ
2. ความร้อนผ่านชั้นอากาศบาง ๆ จนกระทั่งถึงผิวหน้าของวัสดุ
3. พลังงานความร้อนทะลุผ่านชั้นผิวหน้าแล้วจะค่อย ๆ ถ่ายเทให้กับเนื้อวัสดุชั้นในจนกระทั่งถึงจุดกึ่งกลางภายในวัสดุ
4. ความชื้นที่อยู่ภายในเนื้อของวัสดุ หลังจากได้รับพลังงานความร้อน ความชื้นที่มีอยู่ในครั้งแรกก็จะถูกเปลี่ยนแปลงไป ความชื้นจะค่อย ๆ ซึมผ่านชั้นเนื้อวัสดุภายใน
5. ความชื้นหรือไอน้ำจะซึมผ่านเนื้อภายในมาถึงผิวหน้าของวัสดุ
6. เป็นขั้นตอนที่ความชื้นหรือไอน้ำแพร่ผ่านมาถึงชั้นของอากาศบาง ๆ
7. ความชื้นหรือไอน้ำแพร่ผ่านพ้นชั้นของอากาศบาง ๆ เข้าสู่บรรยากาศ หรือกระแสลมที่พัดผ่าน

แต่ละขั้นตอนมีความยากง่ายของการซึมผ่านของไอน้ำไม่เท่ากัน ก็ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางกายภาพของแต่ละวัสดุ และความชื้นที่ซึมผ่านออกมาจะถูกอากาศพัดพาไปทำให้ความชื้นจากภายในของวัสดุซึมผ่านออกมาแทนที่ ถ้าเพิ่มความเร็วของอากาศมากขึ้น ก็จะทำให้อัตราการซึมผ่านของความชื้นจะสูงขึ้นด้วย อย่างไรก็ตามอัตราการซึมผ่านย่อมต้องช้ากว่าอัตราการพาเอาความชื้นไปจากผิวหน้าของวัสดุ ระบบการอบแห้งจึงถูกควบคุมด้วยอัตราการซึมผ่านเนื้อของวัสดุ



เอกสารรูปที่ 3.8 การถ่ายเทความร้อนและมวลในการวัดศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Drying- gas flow



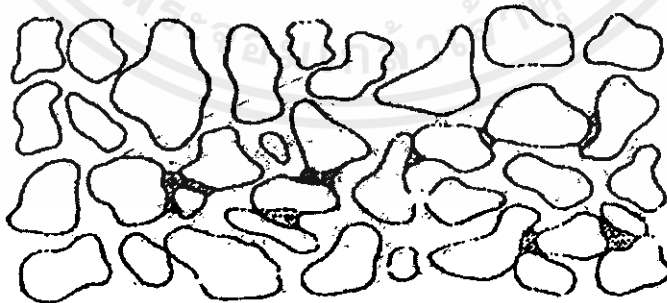
Moisture distribution in a particulate-solid bed during the first falling-rate period

Drying- gas flow



Moisture distribution in a particulate-solid bed during the second falling-rate period

Drying- gas flow



Moisture distribution in a solid bed toward the end of the drying process

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.9 แสดงน้ำในวัสดุที่เกิดการระเหย

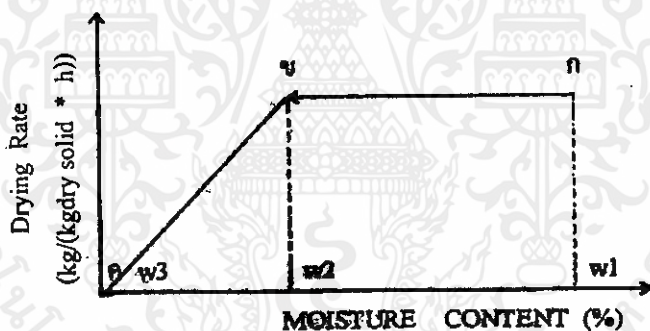
3.5.7 อัตราการอบแห้งหรืออัตราการระเหยของความชื้น (Drying rate)

การระเหยของน้ำจากวัสดุของของแข็งจะมีอัตราเร็วที่แตกต่างกัน แล้วแต่สถานะของบรรยากาศและสถานะของกระบวนการหรือเครื่องอบแห้งที่ใช้ แต่เมื่อพิจารณาโดยละเอียดแล้วจะพบว่าไม่ว่าจะเป็นวัสดุใดก็ตาม กรรมวิธีการอบแห้งแบบใดก็ตามจะมีอัตราการระเหยอยู่ 2 แบบ คือ

3.5.7.1 อัตราการอบแห้งแบบคงที่ (Constant rate of drying)

วัสดุที่นำมาอบแห้งนั้นส่วนใหญ่มีความชื้นสูงถึง 60 ถึง 70 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้น โมเลกุลของน้ำจึงมีการแทรกตัวอยู่ทั่วไปทั้งภายในและบนผิวของวัสดุนั้น โมเลกุลของน้ำเหล่านี้มีโอกาสหลุดและระเหยเป็นไอได้ง่าย น้ำที่อยู่บริเวณผิวหน้าและส่วนที่ลึกเข้าไปในเนื้อไม่มาก จะมีอัตราการระเหยอย่างสม่ำเสมอ ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 3.10 จะเป็นช่วงระยะจาก ก ถึง ข และช่วงนี้ อุณหภูมิของวัสดุจะมีค่าคงที่เกือบตลอด

แต่ถ้าวัสดุมีรูพรุน (Porous) น้ำที่ระเหยมาจากภายในของวัสดุ การกระจายความชื้นที่ผิวหน้าของวัสดุจะมีค่าคงที่ นั่นแสดงว่า อัตราการระเหยของความชื้นที่ผิวมีค่าเท่ากับอัตราการเคลื่อนที่ของความชื้นผ่านภายในมาที่ผิวหน้าของวัสดุ ฉะนั้น ตัวควบคุมให้อัตราการอบแห้งคงที่จะเป็นอัตราการระเหยของความชื้นที่ผิวหน้าของวัสดุเท่านั้น



รูปที่ 3.10 แสดงอัตราการระเหยที่ขนาดความชื้นต่าง ๆ

กลไกการเคลื่อนที่ของความชื้นจะไม่ขึ้นอยู่กับธรรมชาติของวัสดุ แม้ว่าอุณหภูมิที่ตรงผิวยังคงที่ แต่ระดับอุณหภูมิขึ้นอยู่กับการส่งผ่านความร้อนไปยังผิว ถ้าความร้อนส่งผ่านโดยการพา การนำและการแผ่รังสี อุณหภูมิของผิววัสดุจะอยู่ระหว่างอุณหภูมิกระเปาะเปียกของอากาศร้อนกับจุดเดือดของน้ำ แต่ถ้าความร้อนถูกส่งผ่านโดยวิธีการพาเพียงอย่างเดียว อุณหภูมิที่ผิวจะเข้าใกล้อุณหภูมิกระเปาะเปียกของอากาศร้อนและถ้าเป็นการนำความร้อนทั้งหมดที่ได้จากอากาศร้อนมาใช้ในการระเหยของน้ำที่ผิวแล้วจะสามารถสร้างสมดุลระหว่างอัตราการส่งผ่านความร้อนไปยังวัสดุกับอัตราการระเหยของน้ำจากผิววัสดุ ซึ่งเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

อัตราการอบแห้ง = สัมประสิทธิ์การระเหย \times พื้นที่ผิว \times (ความชื้นสมบูรณ์ - ความชื้นในบรรยากาศ)

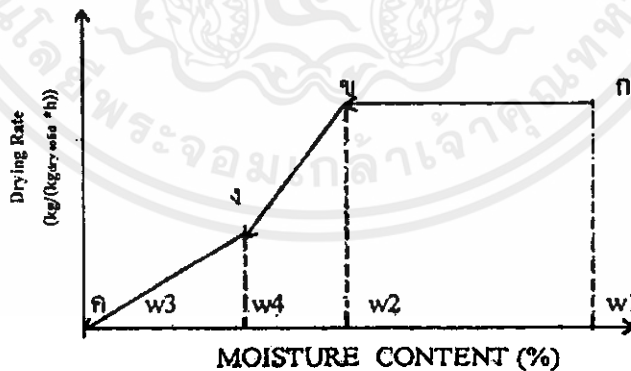
ประมาณความร้อนที่ต้องนำมาใช้ในการระเหยก็มีอัตราคงที่เช่นกัน ดังนั้นจึงสามารถเขียนในรูปของสมการทางคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

$$\text{อัตราการอบแห้ง} = \text{อัตราการถ่ายเทความร้อนของวัสดุ}$$

3.5.7.2 อัตราการอบแห้งแบบไม่คงที่ (Falling rate of drying)

เมื่อวัสดุมีความชื้นลดลงถึงจุดหนึ่งแล้ว น้ำที่คงที่ในวัสดุจะเป็นส่วนที่อยู่ลึกจากผิวหน้าเข้าไปน้ำจำนวนนี้ได้รับความร้อนจากภายนอกได้ยากและจำนวนน้อย จึงทำให้อัตราการระเหยของน้ำภายในเนื้อของวัสดุลดลงจากระยะเริ่มต้นอย่างสม่ำเสมอ ถ้าพิจารณาจากรูปที่ 3.10 จะเป็นช่วง ข ถึง ค และที่จุด จ จะเรียกสภาวะนี้ว่า สภาวะความชื้นวิกฤต เพราะหลังจากจุดนี้ไปแล้วอัตราการอบแห้งจะลดลงตลอดไปจน ไม่มีการระเหยของน้ำอีกต่อไป คือ ที่จุด ค

ในช่วงอัตราการอบแห้งลดลงนี้ บางครั้งวัสดุบางประเภทที่มีรูพรุน หรือชั้นเยื่อพืชจะแบ่งออกเป็น 2 ระยะ คือ ระยะแรกเป็นบริเวณการอบแห้งของวัสดุที่ไม่อึดตัว เนื่องจากความชื้นที่ตรงผิวซึ่งระเหยทั้งหมดไม่สามารถรักษาสภาพอึดตัว โดยการเคลื่อนที่ของความชื้นจากภายในเนื้อวัสดุได้อีกต่อไป ดังนั้น อัตราการอบแห้งในบริเวณอึดตัวจะลดลงทำให้อัตราการอบแห้งที่ตรงผิวทั้งหมดลดลงด้วยส่วนปัจจัยที่มีผลต่อระยะนี้ขึ้นอยู่กับตัวแปรภายนอก เช่น อุณหภูมิ, ความดัน, ความชื้นและอัตราการไหลของอากาศ แต่ไม่ขึ้นกับธรรมชาติของวัสดุ ส่วนระยะที่สองเป็นบริเวณที่การเคลื่อนที่ของความชื้นภายในตัวควบคุม (ตัวแปรภายนอกไม่มีผลอีกต่อไป) เป็นระยะที่ผิวจะมีความชื้นลดลงเป็นอย่างมาก เนื่องจากการเคลื่อนที่ของน้ำภายในออกมาที่ผิวช้ามาก จึงเป็นสาเหตุที่ทำให้อัตราการอบแห้งลดลงอย่างรวดเร็ว ช่วงเวลาที่อัตราการอบแห้งลดลงสิ้นสุดเมื่อความชื้นเป็นศูนย์ ซึ่งเกิดขึ้นกับวัสดุประเภทไฮโกรสโคปิก พิจารณาได้จากรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11. แสดงอัตราการอบแห้งลดลงที่มีสองระยะ

ดังนั้นเมื่อการแพร่ของของเหลว (Liquid diffusion) เป็นตัวควบคุมอัตราการอบแห้ง การเคลื่อนที่ของความชื้นภายในเนื้อวัสดุออกมาสู่ภายนอกจะมีลักษณะคล้ายกับการนำความร้อน

3.5.8 ตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการอบแห้ง

โดยทั่วไปมักจะคิดอยู่เสมอว่าทำอย่างไรจึงจะอบแห้งผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้ให้แห้งและได้เป็นปริมาณมาก ๆ บางครั้งก็ทำไม่ได้เพราะปัจจัยต่าง ๆ ที่มีอยู่รอบตัวนั้น เป็นสาเหตุให้การคาดคะเนผิดพลาดได้ง่าย สำหรับการอบแห้งแล้วปัจจัยที่สำคัญมีดังนี้

1. ความเร็วของอากาศ
2. ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ
3. อุณหภูมิของอากาศ
4. เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง
5. ชนิดของวัสดุที่นำมาอบแห้ง

3.6 อัตราส่วนสมมูล (Equivalence ratio)

ในการเผาไหม้จริงปริมาณอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้อาจจะมากกว่าหรือน้อยกว่าทางทฤษฎี ถ้าปริมาณอากาศที่ใช้มากกว่าปริมาณอากาศทางทฤษฎีจะเรียกว่า อัตราส่วนผสมบาง (Lean Mixture) ตรงกันข้ามหากปริมาณอากาศที่ใช้น้อยกว่าจะเรียกว่า อัตราส่วนผสมหนา (Rich Mixture) เพื่อความสะดวกในการแสดงปริมาณของอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้จริง จึงกำหนดให้อยู่ในรูปของอัตราส่วนของอากาศต่อเชื้อเพลิง $(A/F)_{stoic} = (m_{air}/m_{fuel})_{stoic}$ และอัตราส่วนสมมูล (Equivalence ratio, Φ) จะหมายถึง

$$\Phi = \frac{(A/F)_{Stoic}}{(A/F)_{Actual}} = \frac{(F/A)_{Actual}}{(F/A)_{Stoic}} \quad (3.14)$$

Fuel – rich mixtures , $\Phi > 1$ มีเชื้อเพลิงมาก อากาศน้อย

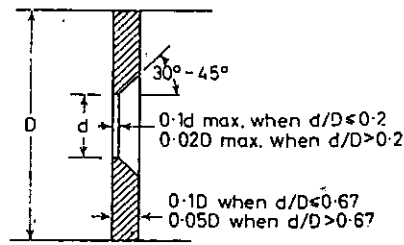
Stoichiometric mixtures , $\Phi = 1$ ปริมาณอากาศที่ใช้เท่ากับปริมาณที่ต้องใช้ทางทฤษฎี

Fuel – lean mixtures , $\Phi < 1$ มีเชื้อเพลิงน้อย อากาศมาก

3.7 ออร์ฟิส (Orifice)

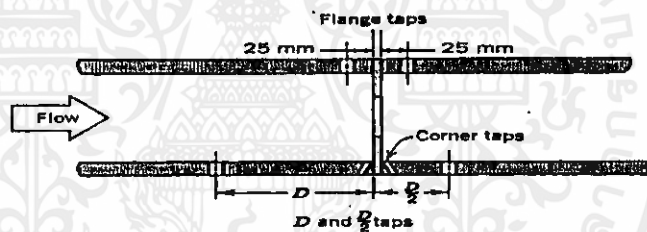
ออร์ฟิสชนิดต่าง ๆ คล้ายคลึงกันสามารถอธิบายด้วยกันได้แต่ละชนิดแตกต่างกันที่ Pressure tapping ซึ่งออร์ฟิสมาตรฐานกำหนดคั้งนี้รูปร่างลักษณะรายละเอียดของออร์ฟิสได้แสดงหน้าตัดต่างๆ ดังรูปที่ 3.12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.12 แผ่นออริฟิสมาตรฐาน

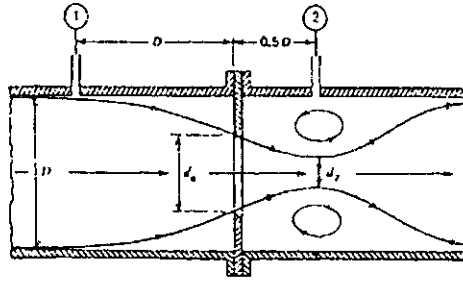
แผ่นออริฟิสเป็นแผ่นบางๆ ที่ถูกจับยึดระหว่างขอบของท่อเนื่องจากมีรูปทรงเรขาคณิตอย่างง่ายๆ ดังนั้นจึงมีราคาถูก และง่ายในการติดตั้ง หรือการย้ายตำแหน่งแต่อย่างไรก็ตามขอบของแผ่น อาจจะมีการสึกกร่อนได้ อันเนื่องจากการชนของอนุภาคเล็กๆ ที่กระจายอยู่ในของไหล ข้อเสียอีกประการก็คือ เนื่องจากไม่สามารถควบคุมการขยายของด้านล่างของกระแส ทำให้มี Head loss ต่ำกว่าที่สูงมาก จุดวัดความดันสำหรับออริฟิสนั้นสามารถกำหนดตำแหน่งได้หลายตำแหน่งดังแสดงในรูปที่ 3.13 เนื่องจากตำแหน่งของจุดวัดความดันมีอิทธิพลต่อการหาสัมประสิทธิ์การไหล



รูปที่ 3.13 แสดงโครงสร้างเชิงเรขาคณิต และจุดวัดความดันของออริฟิส

สำหรับการวัด อัตราการไหลของของไหลภายในท่อและจัดได้ว่า ออริฟิสเป็นเครื่องมือวัดที่ขีดขวางการไหลของพื้นที่หน้าตัดให้ของไหล ไหลผ่านออริฟิสมีขนาดน้อยกว่าพื้นที่หน้าตัดของท่อ ดังรูป 3.14 ดังนั้นเมื่อนำออริฟิสไปติดตั้งกับท่อซึ่งมีของไหล ไหลผ่านจะทำให้เกิดความดันตกคร่อมออริฟิสซึ่งความดันตกคร่อมนี้จะแปรเปลี่ยนไปตามอัตราการไหล กล่าวคือถ้าอัตราการไหลมีค่าสูง ความดันตกคร่อมออริฟิสก็จะมีค่าสูง และถ้าอัตราการไหลมีค่าต่ำความดันตกคร่อมออริฟิสก็จะมีค่าต่ำ โดยทั่วไปออริฟิสจะถูกนำไปใช้ในการหาอัตราการไหลที่สถานะสม่ำเสมอเท่านั้นไม่นิยมนำไปใช้วัดอัตราการไหลที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา (Dynamic Response)

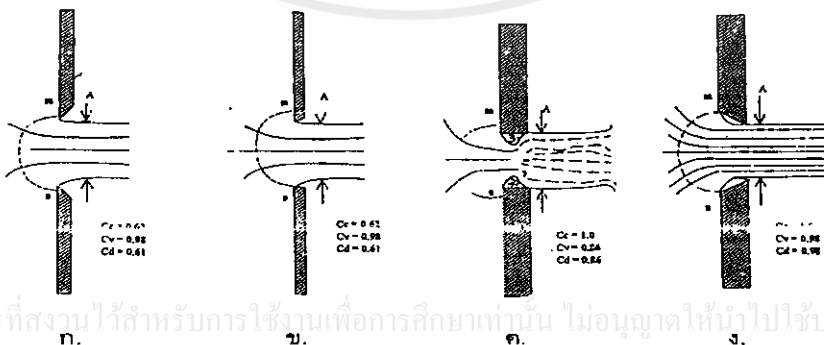
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.14 แสดงการไหลผ่านแผ่น ออร์ฟิส (Orifice)

ในบรรดาเครื่องมือวัดอัตราการไหลทั้งหลาย ออร์ฟิสถือว่าเป็นเครื่องมือที่มีผู้นำไปใช้อย่างกว้างขวางมากที่สุด ดังนั้นการทดลองชุดนี้จึงได้มีการนำเอาการวัดอัตราการไหลแบบออร์ฟิสมาใช้ ออร์ฟิสมาตรฐานที่มีขอบคม ดังรูป 3.15 ก หรือของเป็นรูปสี่เหลี่ยม ดังรูปที่ 3.15 ข นั้นจะสัมพันธ์ลำน้ำที่ไหลผ่านในลักษณะที่เป็นการสัมพันธ์แบบเส้นส่วนออร์ฟิส ดังรูปที่ 3.15 ค และ ง นั้นไม่ใช่เป็นออร์ฟิสมาตรฐาน ทั้งนี้เพราะลำน้ำที่ไหลผ่านรูออร์ฟิสนั้น ถูกกระทบจากความหนาของแผ่นวัดดูกับความหนาของผิวและ รัศมีของความโค้ง ดังนั้นจึงต้องมีการสอบเทียบเพื่อความถูกต้อง

ข้อดีของออร์ฟิส คือมีราคาต่ำกว่าเครื่องมือวัดชนิดอื่นๆ ที่อาศัยหลักการวัดเดียวกัน และสะดวกในการสร้างเพราะมีรูปร่างที่ไม่ซับซ้อน รวมทั้งมีข้อมูลของการทำวิจัยเกี่ยวกับพฤติกรรมในการวัดของไหลที่มีเงื่อนไขต่างไว้อย่างมากมาย ของไหลเมื่อไหลผ่าน Square - edged orifice ซึ่งเป็นออร์ฟิสที่นำมาใช้ในการศึกษาในครั้งนี้ จะมีทิศทางการไหลเป็น ไปดังรูป สมมุติว่าของไหลก่อนเข้าปะทะกับออร์ฟิสมีความเร็วคงที่ตลอดหน้าตัดของท่อ (หน้าตัดวงกลม) เท่ากับ V_1 เมตรต่อวินาที ของไหลที่บริเวณด้านหลังของออร์ฟิส จะลักษณะเป็นลำของไหล ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางของลำของไหลลดลงเรื่อยๆ จนกระทั่งที่มีค่าเท่ากับ $D/2$ เมตร ณ.บริเวณจุดวัดความดันที่ 2 ซึ่งถือได้ว่าเป็นจุดที่มีพื้นที่หน้าตัดของการไหลน้อยที่สุด (Vena Contracta) ของลำเจ็ดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะณใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.15 ออร์ฟิสแบบต่างๆ

ของลำเจ็ทจะมีขนาดเพิ่มขึ้นเมื่อของไหลเคลื่อนที่ผ่านจุดที่ 2 ไปแล้ว จุดที่ 2 หรือเรียกว่าจุด Vena Contracta ถือได้ว่าเป็นจุดที่ของไหลที่มีความเร็วเฉลี่ยสูงสุด หรือ มีความดันสถิตย์ต่ำสุด (จากสมการของเบอร์นูลลี)

สมมติฐานเบื้องต้นสำหรับการวัดอัตราการไหลด้วยออริฟิสในการทดลองนี้คือของไหลที่อยู่ภายในท่อไม่สามารถอัดตัวได้ ความเร็วของของไหลมีค่าคงที่ตลอดหน้าตัด (โดยไม่คิดบริเวณที่เรียกว่า บริเวณกระแสไหลวน) ของไหลไม่มีความหนืดและการไหลเกิดขึ้นเป็นการไหลแบบสม่ำเสมอ (อัตราการไหลมีค่าคงที่เมื่อเทียบกับเวลา)

สมการของเบอร์นูลลีสามารถนำมาใช้อธิบายคุณสมบัติในการไหลที่จุดต่างๆภายในท่อได้ ดังนั้นสมการเบอร์นูลลี สำหรับจุดที่ 1 และจุดที่ 2 ของการไหล คือ

$$Q_{ac} = C_d A_o \sqrt{\frac{2g(P_1 - P_2)}{\rho g \left[1 - \left(\frac{D_o}{D_i} \right)^4 \right]}} \quad (3.15)$$

เมื่อ

V = ความเร็วเฉลี่ยของของไหล (m/s)

P = ความดันสถิตย์ของของไหล (N/m²)

γ = น้ำหนักจำเพาะ (Specific weight, N/m³)

Subscript 1 = ค่าที่จุดที่ 1 ในทางทฤษฎี (อยู่ทางด้านหน้าของออริฟิส)

Subscript 2 = ค่าที่จุดที่ 2 ในทางทฤษฎี (อยู่ทางด้านหลังของออริฟิส)

A_o = พื้นที่หน้าตัดรูออริฟิส (m²)

D_o = เส้นผ่านศูนย์กลางของรูออริฟิส (m)

D_i = เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ (m)

C_d = สัมประสิทธิ์การไหลผ่าน (Discharge coefficient)

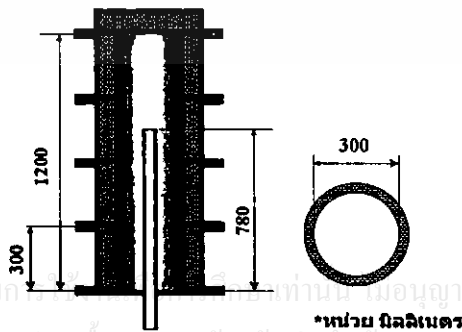
g = สัมประสิทธิ์แรงโน้มถ่วงของโลก (m/s²)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การดำเนินการวิจัย

ในการทดลองนี้เป็นการศึกษาถึงอิทธิพลความชื้นของเกลบที่มีต่อการเผาไหม้ในเตาเผาแบบวอร์เทค ซึ่งเตาเผาแบบวอร์เทคที่ใช้ในการทดลองนี้เป็นเตาเผารูปทรงกระบอก และ ท่อทิ้งไถ่ล่อยด้านใน โดยประกอบขึ้นจากชิ้นส่วนหลายๆ ส่วนซึ่งแต่ละส่วนมีผนังของห้องเผาไหม้ที่ประกอบขึ้นจากท่อเหล็กทรงกระบอก 2 ชั้นมีความสูงเท่ากับ 300 มิลลิเมตร ท่อเหล็กชั้นนอกมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 400 มิลลิเมตร ท่อเหล็กชั้นใน มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 300 มิลลิเมตร โดยท่อเหล็กชั้นนอกมีความหนา 4 มิลลิเมตร ชั้นในมีความหนา 6 มิลลิเมตร ตามลำดับ ช่องว่างระหว่างท่อเหล็กทั้งสองจะถูกหล่อด้วยปูนทนไฟที่มีความหนา 40 มิลลิเมตร เพื่อลดการถ่ายเทความร้อนจากห้องเผาไหม้ ที่ส่วนล่างของแต่ละส่วนจะมีแผ่นเหล็กลักษณะวงแหวนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกเท่ากับ 480 มิลลิเมตร และ เส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 300 มิลลิเมตร เชื่อมปิดอยู่เพื่อรองรับปูนทนไฟ และ ที่วงแหวนเจาะรูขนาด 12 มิลลิเมตร ตามแนวรัศมีจำนวน 12 รู ระยะจากขอบเท่ากับ 20 มิลลิเมตร ไว้สำหรับยึดน๊อตเพื่อประกอบเตาแต่ละส่วนเข้าด้วยกัน โดยความหนาของแผ่นเหล็กวงแหวนนี้มีค่าเท่ากับ 6 มิลลิเมตร ที่ขอบบนของแต่ละชั้นส่วนก็เช่นเดียวกัน มีแผ่นเหล็กลักษณะวงแหวนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกเท่ากับ 480 มิลลิเมตร และ เส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 400 มิลลิเมตร มีความหนาเท่ากับ 6 มิลลิเมตร เชื่อมติดอยู่เพื่อยึดประกอบกับส่วนอื่นๆ ท่อทิ้งไถ่ล่อยด้านในทำจากสแตนเลสมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกเท่ากับ 73 มิลลิเมตร มีความหนาเท่ากับ 3 มิลลิเมตร มีความสูงเท่ากับ 780 มิลลิเมตร ที่ส่วนบนและส่วนล่างสุดของเตาเผาจะมีฝาปิดอยู่ โดยฝาปิดด้านบนเป็นแผ่นเหล็กมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 480 มิลลิเมตร โดยมีปูนทนไฟหล่ออยู่ภายใน ฝาปิดด้านล่างเป็นแผ่นเหล็กวงแหวนมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกเท่ากับ 480 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 81 มิลลิเมตร มีความหนาเท่ากับ 6 มิลลิเมตร



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรรณการวิจัยเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.1 แสดงลักษณะของเตาเผาแบบวอร์เทค

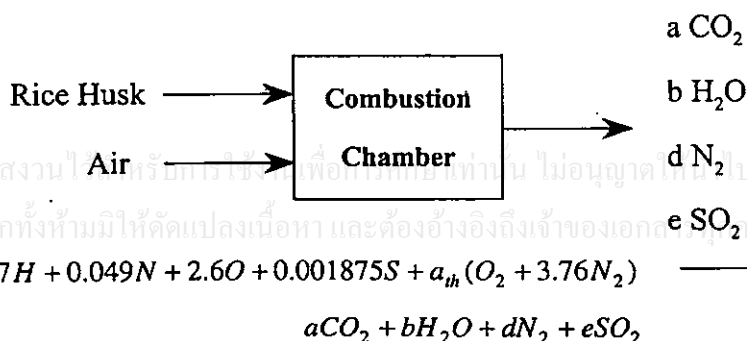
โดยหลักการทำงานของเตาเผาจะใช้อากาศ 2 ส่วน อากาศส่วนที่ 1 เป็นอากาศที่ใช้ลำเลียง แกลบเข้าเตาเผาโดยใช้ Blower เป็นแหล่งจ่ายอากาศทำให้เกิดการไหลของอากาศผ่านท่อซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับภายในเท่ากับ 50 มิลลิเมตร มีความหนาเท่ากับ 3 มิลลิเมตร และ อากาศส่วนที่ 2 (Secondary air) เป็นอากาศไหลเข้าเพื่อช่วยให้เกิดการหมุนวนของเชื้อเพลิงในเตาเผาให้มากขึ้น โดยใช้ Blower เป็นแหล่งจ่ายอากาศ อากาศส่วนที่ 2 นี้ถูกแบ่งออกเป็น 8 ส่วนเท่าๆ กันไหลผ่านท่ออากาศที่เส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 10 มิลลิเมตร มีความหนาเท่ากับ 2 มิลลิเมตร ตำแหน่งของท่ออากาศมีระดับความสูงอยู่ที่ 150 และ 450 มิลลิเมตร โดยวัดจากด้านล่างของเตาเผา ซึ่งอัตราการไหลของอากาศทั้ง 2 ส่วนนี้ควบคุมอัตราการไหลด้วยวาล์วควบคุมและวัดค่าอัตราการไหลโดยใช้ ออร์ฟิส

4.1 การคำนวณปริมาณอากาศที่ต้องการใช้ในการเผาไหม้ทางทฤษฎี

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบของเชื้อเพลิงแกลบ

องค์ประกอบ	เปอร์เซ็นต์	มวล โมเลกุล	จำนวน โมล
คาร์บอน , C	38.0	12	3.1667
ไฮโดรเจน , H	5.7	1	5.7
ไนโตรเจน , N	0.69	14	0.049
ออกซิเจน , O	41.6	16	2.6
ซัลเฟอร์ , S	0.06	32	0.001875
ขี้เถ้า , ash	19.8		

เนื่องจากกำหนดให้เป็นการเผาไหม้ทางทฤษฎีคือมีการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ โดยที่เชื้อเพลิง ทำปฏิกิริยากับอากาศแห้งเป็นผลให้เกิดผลิตภัณฑ์ใหม่คือ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) , น้ำ (H_2O) และ ไนโตรเจน (N_2) เนื่องจากในเชื้อเพลิงแกลบมีส่วนผสมของซัลเฟอร์รวมอยู่ด้วยทำให้เกิดเป็นซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) เมื่อเราทำการพิจารณาเชื้อเพลิงจำนวน 1 kmol เพราะฉะนั้นสมการ การเผาไหม้สามารถเขียนได้เป็น

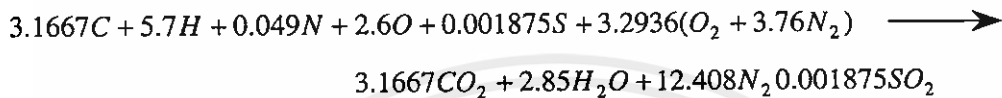


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์การใช้งาน ไม่อนุญาตให้ผู้อื่นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสาร

ทำการสมมูลสมการจะได้เป็น

$$\begin{array}{llll}
 C : & 3.1667 & = a & \longrightarrow a = 3.1667 \\
 H : & 5.7 & = 2b & \longrightarrow b = 2.85 \\
 S : & 0.001875 & = e & \longrightarrow e = 0.001875 \\
 O : & 2.6 + 2a_{th} & = 2a + b + 2e & \longrightarrow a_{th} = 3.2936 \\
 N : & 0.049 + a_{th}(2 \times 3.76) & = 2d & \longrightarrow d = 12.406
 \end{array}$$

ทำการแทนค่าตัวแปรลงในสมการข้างต้น จะได้



ทำการหาค่าจำนวน โมลของอากาศแห้งมีค่าเท่ากับ

$$4.76a_{th} = 4.76 \times 3.2936 = 15.678 \text{ kmol}$$

แต่เนื่องจากสมการข้างต้นที่ทำการหาค่าเป็นอากาศแห้ง แต่ในการทดลองไม่สามารถทำให้เป็นอากาศแห้งได้ เพราะฉะนั้นจะต้องทำการรวมเอาปริมาณความชื้นที่มีอยู่ในอากาศเข้าไปในสมการการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงด้วย โดยที่จะทำการกำหนดสภาวะอากาศมาตรฐานดังนี้

อากาศมีอุณหภูมิกระเปาะแห้ง (Dry-bulb temperature) เท่ากับ 33°C

ความชื้นสัมพัทธ์ (Relative Humidity , RH) เท่ากับ 53%

เพราะฉะนั้นทำการหาค่าความดันย่อยในอากาศที่สภาวะนี้ได้เท่ากับ

ทำการเปิดตาราง จะได้

$$P_{sat,H_2O} @ 33^\circ\text{C} = 5.0752 \text{ kPa}$$

$$\begin{aligned}
 \therefore P_{v,air} &= \phi_{air} P_{sat,H_2O} = 0.53 \times 5.0752 \\
 &= 2.690 \text{ kPa}
 \end{aligned}$$

สมมติว่าเป็นก๊าซอุดมคติ จำนวน โมลของละอองน้ำในอากาศ ($N_{v,air}$) เท่ากับ

$$\left(\frac{N_{v,air}}{N_{total}} \right) = \left(\frac{P_{v,air}}{P_{total}} \right)$$

$$N_{v,air} = \left(\frac{P_{v,air}}{P_{total}} \right) N_{total}$$

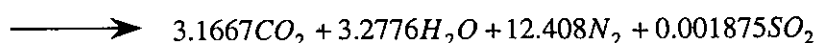
$$N_{v,air} = \left(\frac{2.690 \text{ kPa}}{101.325 \text{ kPa}} \right) \times (15.678 + N_{v,air}) \text{ kmol}$$

$$\therefore N_{v,air} = 0.4276 \text{ kmol}$$

สมการการเผาไหม้ซึ่งรวมละอองน้ำได้แก่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณี $3.1667C + 5.7H + 0.049N + 2.6O + 0.001875S + 0.4276H_2O + 3.2936(O_2 + 3.76N_2)$ นำไปใช้



จากนั้นทำการหาอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง จากสมการ

$$AF = \frac{m_{air}}{m_{fuel}}$$

มวลของอากาศเท่ากับ

$$\begin{aligned} m_{air} &= n_{air} \times MW_{air} = (n_{dryair} \times MW_{dryair}) + (n_{v,air} \times MW_{v,air}) \\ &= (3.2936 \times 4.76 \text{ kmol})(28.97 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}) + (0.4276 \text{ kmol} \times 18 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}) \\ &= 461.875 \text{ kg} \end{aligned}$$

มวลของเชื้อเพลิงเท่ากับ

$$\begin{aligned} m_{fuel} &= n_{fuel} \times MW_{fuel} = (n_C \times MW_C) + (n_H \times MW_H) + (n_N \times MW_N) + (n_O \times MW_O) \\ &\quad + (n_S \times MW_S) \\ &= (3.1667 \times 12) + (5.7 \times 1) + (0.0049 \times 14) + (2.6 \times 16) + (0.001875 \times 32) \text{ kg} \\ &= 86.046 \text{ kg} \end{aligned}$$

ดังนั้น

$$\begin{aligned} AF &= \frac{461.875 \text{ kg}}{86.046 \text{ kg}} \\ &= 5.368 \end{aligned}$$

การทดลองนี้ทำการกำหนดอัตราการป้อนแกลบเท่ากับ 0.2, 0.25 และ 0.3 kg/min เพราะฉะนั้นจะต้องทำการหาอัตราการไหลของอากาศที่เข้าสู่ห้องเผาไหม้ในทางทฤษฎี สามารถหาได้โดย

กรณีอัตราการป้อนแกลบเท่ากับ 0.2 kg/min

$$\begin{aligned} \text{อัตราการไหลของอากาศ} &= AF \times \text{อัตราการป้อนแกลบ} \\ &= 5.368 \times 0.2 \text{ kg/min} \\ &= 1.0736 \text{ kg/min} \\ &= 0.01789 \text{ kg/s} \end{aligned}$$

กรณีอัตราการป้อนแกลบเท่ากับ 0.25 kg/min

$$\begin{aligned} \text{อัตราการไหลของอากาศ} &= 5.368 \times 0.25 \text{ kg/min} \\ &= 1.342 \text{ kg/min} \\ &= 0.02237 \text{ kg/s} \end{aligned}$$

กรณีอัตราการป้อนแกลบเท่ากับ 0.3 kg/min

$$\begin{aligned} \text{อัตราการไหลของอากาศ} &= 5.368 \times 0.3 \text{ kg/min} \\ &= 1.6104 \text{ kg/min} \\ &= 0.02684 \text{ kg/s} \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองได้กำหนดให้มีการเปลี่ยนค่าอัตราส่วนสมมูลที่ใช้กับการทดลองเพราะฉะนั้นจะต้องทำการหาอัตราการป้อนอากาศที่แต่ละอัตราส่วนสมมูล โดยทำการกำหนดให้อัตราการป้อนเชื้อเพลิงให้มีค่าคงที่ สามารถหาได้จากสมการ

$$\Phi = \left(\frac{AF_{stoic}}{AF_{Act}} \right)$$

ที่ $\Phi = 0.8$ จะได้

$$0.8 = \left(\frac{5.368}{AF_{act}} \right)$$

$$AF_{act} = \frac{5.368}{0.8}$$

$$= 6.71$$

เพราะฉะนั้นที่อัตราส่วนสมมูล 0.8 และอัตราการป้อนแก๊สเท่ากับ 0.2 kg/min สามารถอัตราการใช้ของอากาศได้เท่ากับ

$$\dot{m}_{air} = 6.71 \times 0.0033 \text{ kg/s}$$

$$= 0.02214 \text{ kg/s}$$

ตารางที่ 4.2 แสดงปริมาณอากาศที่ใช้ในการทดลองกรณีอัตราการป้อนแก๊สเท่ากับ 0.2 kg/min

Φ	Primary air (kg/s)			Secondary air (kg/s)		
	100%	85%	75%	0%	15%	25%
0.8	0.0224	0.0190	0.0168	0	0.0034	0.0056
1.0	0.0179	0.0152	0.0134	0	0.0027	0.0045
1.2	0.0149	0.0127	0.0112	0	0.0022	0.0037

ตารางที่ 4.3 แสดงปริมาณอากาศที่ใช้ในการทดลองกรณีอัตราการป้อนแก๊สเท่ากับ 0.25 kg/min

Φ	Primary air (kg/s)			Secondary air (kg/s)		
	100%	85%	75%	0%	15%	25%
0.8	0.0280	0.0238	0.0210	0	0.0042	0.0070
1.0	0.0224	0.0190	0.0168	0	0.0034	0.0056
1.2	0.0186	0.0158	0.0140	0	0.0028	0.0047

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่สามารถนำออกจำหน่ายหรือเผยแพร่โดยไม่ผ่านการคัดค้าน
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 แสดงปริมาณอากาศที่ใช้ในการทดลองกรณีอัตราการป้อนกลับเท่ากับ 0.3 kg/min

Φ	Primary air (kg/s)			Secondary air (kg/s)		
	100%	85%	75%	0%	15%	25%
0.8	0.0336	0.0285	0.0252	0	0.0050	0.084
1.0	0.0268	0.0228	0.0201	0	0.0040	0.0067
1.2	0.0224	0.0190	0.0168	0	0.0034	0.0056

4.2 การคำนวณความสูงของระดับน้ำของมาโนมิเตอร์

ทำการพิจารณาการไหลของกลับเท่ากับ 0.2 kg/min จากสมการที่นำมาใช้จะต้องทราบค่าตัวแปรต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

อัตราการป้อนกลับ

$$\dot{m}_{fuel} = 0.2 \text{ kg/min}$$

ความหนาแน่นของอากาศ

$$\rho_a = 1.184 \text{ kg/m}^3$$

ความหนาแน่นของน้ำ

$$\rho_w = 1000 \text{ kg/m}^3$$

เส้นผ่านศูนย์กลางของท่ออากาศปฐมภูมิ

$$D_p = 0.0762 \text{ m}$$

เส้นผ่านศูนย์กลางของออริฟิสสำหรับท่ออากาศปฐมภูมิ

$$d_p = 0.04572 \text{ m}$$

เส้นผ่านศูนย์กลางของท่ออากาศทุติยภูมิ

$$D_s = 0.0508 \text{ m}$$

เส้นผ่านศูนย์กลางของออริฟิสสำหรับท่ออากาศทุติยภูมิ

$$d_s = 0.032 \text{ m}$$

อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงในทางทฤษฎี

$$AF = 5.368$$

Discharge Coefficient (จากภาคผนวก ข)

$$C_d = 0.62$$

พื้นที่หน้าตัดของท่ออากาศปฐมภูมิ

$$A_p = \frac{\pi D_p^2}{4}$$

$$= \frac{\pi \times (0.0762)^2}{4}$$

$$= 4.56 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

พื้นที่หน้าตัดของท่ออากาศทุติยภูมิ

$$A_s = \frac{\pi D_s^2}{4}$$

$$= \frac{\pi \times (0.0508)^2}{4}$$

$$= 2.027 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

ในการทดลองจะทำการคำนวณหาค่าความสูงของระดับน้ำในมาโนมิเตอร์ที่ให้ ณ อัตราส่วนสมมูล (Equivalence ratio) ต่าง ๆ โดยทำการหาได้จากสมการ

$$\Phi = \frac{AF_{ac}}{AF_{th}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับอาจารย์ผู้สอนเพื่อใช้ในการสอน ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับการทดลองนี้ได้กำหนดค่าอัตราส่วนผสมไว้เท่ากับ 0.8, 1.0 และ 1.2

จากอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง จะสามารถหาค่าอัตราการไหลของอากาศได้ดังนี้

อัตราการไหลของแกลบเท่ากับ 1 kg/min ต้องใช้อัตราการไหลของอากาศเท่ากับ 5.368 kg/min

อัตราการไหลของแกลบเท่ากับ 0.2 kg/min ต้องใช้อัตราการไหลของอากาศเท่ากับ 1.0736 kg/min

หรือ อัตราการไหลของอากาศเท่ากับ 0.0179 kg/s

สำหรับการทดลองจะทำการแบ่งปริมาณอากาศที่ใช้ออกเป็น 2 ส่วน คือ

1. อากาศปฐมภูมิ (Primary air) จะเข้าสู่เตาเผาพร้อมกับเชื้อเพลิงแกลบทางด้านข้างในแนวสัมผัสของเตาเผา
2. อากาศทุติยภูมิ (Secondary air) จะเข้าสู่เตาเผาทางด้านข้างในแนวสัมผัสเพื่อให้เกิดการหมุนวนภายในเตา โดยจะเข้าสู่เตาเผา 2 ระดับ คือ ระยะ 15 และ 45 cm จากฐานเตา

กรณีที่ 1 อัตราการไหลของอากาศปฐมภูมิ 100% อากาศทุติยภูมิ 0% อัตราส่วนผสม (Φ) เท่ากับ 0.8 จะสามารถคำนวณระดับน้ำในमानometer ของท่ออากาศปฐมภูมิได้เป็น

อัตราการไหลของอากาศปฐมภูมิจะเท่ากับ $0.0179 \times 1 \times \frac{1}{0.8} = 0.0224 \text{ kg/s}$

จากสมการ
$$\dot{m}_p = \frac{CA_p}{\sqrt{1-\beta^4}} \sqrt{2\rho\Delta P}$$

เมื่อ
$$A_p = \frac{\pi d_p^2}{4} = \frac{\pi \times (0.04572 \text{ m})^2}{4}$$

$$= 1.642 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$\beta = \frac{d_p}{D_p} = \frac{0.04572}{0.0762} = 0.6$$

ทำการแทนค่าจะได้ว่า

$$0.0224 \text{ kg/s} = \frac{0.62 \times 1.642 \times 10^{-3} \text{ m}^2}{\sqrt{1-(0.6)^4}} \sqrt{2 \times 1.184 \text{ kg/m}^3 \times \Delta P}$$

$$0.0224 = \frac{1.018 \times 10^{-3}}{0.933} \sqrt{2.368 \times \Delta P}$$

$$421.47 = 2.368 \times \Delta P$$

$$\Delta P = 177.98 \text{ N/m}^2$$

จากสมการ
$$\Delta P = \rho g \Delta h$$

$$\therefore \Delta h = \frac{\Delta P}{\rho g}$$

แทนค่า
$$\Delta h = \frac{177.98 \text{ N/m}^2}{1000 \text{ kg/m}^3 \times 9.81 \text{ m/s}^2}$$

$$\Delta h = 0.018 \text{ m}$$

$$= 18.14 \text{ mm}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามนำไปใช้ในงานอื่นนอกเหนือจากนี้ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณีที่ 2 อัตราการไหลของอากาศปฐมภูมิ 85% , อากาศทุติยภูมิ 15% อัตราส่วนสมมูล (Φ) เท่ากับ 0.8 จะหาระดับน้ำในमानอมิเตอร์ของอากาศปฐมภูมิได้เป็น

$$\text{อัตราการไหลของอากาศปฐมภูมิเท่ากับ } 0.0179 \times 0.85 \times \frac{1}{0.8} = 0.0190 \text{ kg/s}$$

แทนค่าลงในสมการจะได้เป็น

$$0.0190 \text{ kg/s} = \frac{0.62 \times 1.642 \times 10^{-4} \text{ m}^2}{\sqrt{1 - (0.6)^4}} \sqrt{2 \times 1.184 \text{ kg/m}^3 \times \Delta P}$$

$$303.81 = 2.368 \times \Delta P$$

$$\Delta P = 128.30 \text{ N/m}^2$$

แทนค่าลงในสมการ

$$\Delta h = \frac{\Delta P}{\rho g}$$

$$\Delta h = \frac{128.30 \text{ N/m}^2}{1000 \text{ kg/m}^3 \times 9.81 \text{ m/s}^2}$$

$$\Delta h = 0.01307 \text{ m}$$

$$= 13.07 \text{ mm}$$

ทำการหาระดับน้ำในमानอมิเตอร์ของอากาศทุติยภูมิ

$$\text{อัตราการไหลของอากาศทุติยภูมิเท่ากับ } 0.0179 \times 0.15 \times \frac{1}{0.8} = 3.36 \times 10^{-3} \text{ kg/s}$$

จากสมการ

$$\dot{m}_s = \frac{CA_{ts}}{\sqrt{1 - \beta^4}} \sqrt{2\rho\Delta P}$$

โดยที่

$$A_{ts} = \frac{\pi d_s^2}{4} = \frac{\pi \times (0.032 \text{ m})^2}{4} = 8.04 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$\beta = \frac{0.032}{0.0508} = 0.63$$

แทนค่าลงในสมการจะได้ว่า

$$3.36 \times 10^{-3} \text{ kg/s} = \frac{0.62 \times 8.04 \times 10^{-4} \text{ m}^2}{\sqrt{1 - (0.63)^4}} \sqrt{2 \times 1.184 \text{ kg/m}^3 \times \Delta P}$$

$$3.36 \times 10^{-3} \text{ kg/s} = \frac{4.98 \times 10^{-4} \text{ m}^2}{0.918} \sqrt{2.368 \text{ kg/m}^3 \times \Delta P}$$

$$38.28 = 2.368 \times \Delta P$$

$$\Delta P = 16.164 \text{ N/m}^2$$

จากสมการ

$$\Delta h = \frac{\Delta P}{\rho g}$$

จะได้

$$\Delta h = \frac{16.164 \text{ N/m}^2}{1000 \text{ kg/m}^3 \times 9.81 \text{ m/s}^2}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับศึกษาเท่านั้น ไม่ควรนำออกจำหน่ายโดยไม่ได้รับอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอก ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= 0.00164 \text{ m}$$

$$= 1.64 \text{ mm}$$

กรณีที่ 3 อัตราการไหลของอากาศปฐมภูมิ 75% , อากาศทุติยภูมิ 25% และอัตราส่วนสมมูลเท่ากับ 0.8 จะหาระดับน้ำในमानอมิเตอร์ของอากาศปฐมภูมิได้เป็น

อัตราการไหลของอากาศปฐมภูมิเท่ากับ $0.0179 \times 0.75 \times \frac{1}{0.8} = 0.0168 \text{ kg/s}$

เพราะฉะนั้นทำการแทนค่าลงในสมการจะได้เป็น

$$0.0168 \text{ kg/s} = \frac{0.62 \times 1.642 \times 10^{-4} \text{ m}^2}{\sqrt{1 - (0.6)^4}} \sqrt{2 \times 1.184 \text{ kg/m}^3 \times \Delta P}$$

$$\Delta P = 99.83 \text{ N/m}^2$$

ดังนั้นระดับในमानอมิเตอร์เท่ากับ

$$\Delta h = \frac{\Delta P}{\rho g}$$

$$\Delta h = \frac{99.83 \text{ N/m}^2}{1000 \text{ kg/m}^3 \times 9.81 \text{ m/s}^2}$$

$$= 0.01018 \text{ m}$$

$$= 10.18 \text{ mm}$$

อัตราการไหลของอากาศทุติยภูมิเท่ากับ $0.0179 \times 0.25 \times \frac{1}{0.8} = 5.59 \times 10^{-3} \text{ kg/s}$

แทนค่าลงในสมการจะได้เป็น

$$5.59 \times 10^{-3} \text{ kg/s} = \frac{0.62 \times 8.04 \times 10^{-4} \text{ m}^2}{\sqrt{1 - (0.63)^4}} \sqrt{2 \times 1.184 \text{ kg/m}^3 \times \Delta P}$$

$$\Delta P = 44.74 \text{ N/m}^2$$

หาระดับน้ำในमानอมิเตอร์ได้เท่ากับ

$$\Delta h = \frac{44.74 \text{ N/m}^2}{1000 \text{ kg/m}^3 \times 9.81 \text{ m/s}^2}$$

$$= 0.00456 \text{ m}$$

$$= 4.56 \text{ mm}$$

ตารางที่ 4.5 แสดงความสูงของระดับน้ำในमानอมิเตอร์ของอากาศปฐมภูมิและทุติยภูมิที่อัตราการป้อนแกลบเท่ากับ 0.2 kg/min

Φ	Δh ของ Primary air (mm)			Δh ของ Secondary air (mm)		
	100%	85%	75%	0%	15%	25%
0.8	18.09	13.07	10.18	0	1.64	4.56
1.0	11.58	8.37	6.51	0	1.05	2.92
1.2	8.04	5.81	4.52	0	0.73	2.03

ตารางที่ 4.6 แสดงความสูงของระดับน้ำในมานอมิเตอร์ของอากาศปฐมภูมิและทุติยภูมิที่อัตราการป้อนแกลบเท่ากับ 0.25 kg/min

Φ	Δh ของ Primary air (mm)			Δh ของ Secondary air (mm)		
	100%	85%	75%	0%	15%	25%
0.8	28.27	20.42	15.90	0	2.57	7.13
1.0	18.09	13.07	10.18	0	1.64	4.56
1.2	12.56	9.08	7.07	0	1.14	3.17

ตารางที่ 4.7 แสดงความสูงของระดับน้ำในมานอมิเตอร์ของอากาศปฐมภูมิและทุติยภูมิที่อัตราการป้อนแกลบเท่ากับ 0.3 kg/min

Φ	Δh ของ Primary air (mm)			Δh ของ Secondary air (mm)		
	100%	85%	75%	0%	15%	25%
0.8	40.17	29.41	22.90	0	3.69	10.26
1.0	26.05	18.82	14.65	0	2.36	6.57
1.2	18.09	13.07	10.18	0	1.64	4.56

4.3 การเตรียมความชื้น

การทดลองนี้เป็นการศึกษาถึงอิทธิพลความชื้นของเชื้อเพลิงแกลบที่มีผลต่อคุณลักษณะทางการเผาไหม้ เพราะฉะนั้นจะต้องทำการกำหนดสัดส่วนความชื้นในเชื้อเพลิงให้มีค่าตามปริมาณความชื้นที่ได้ทำการกำหนดเอาไว้ เนื่องจากแกลบที่นำมาทำการทดลองเป็นวัตถุดิบที่ได้จากโรงสีซึ่งโดยปกติแล้วจะมีความชื้นที่ไม่เท่ากัน เพราะฉะนั้นจะต้องนำมาทำการปรับอัตราส่วนความชื้นให้มีปริมาณที่เท่ากัน โดยทำการนำแกลบที่ได้มาไปอบแล้วทำการฉีดพรมน้ำลงไป ในแกลบที่แห้งสนิทแล้วให้มีปริมาณความชื้นโดยน้ำหนักตามที่ได้ทำการกำหนดไว้ คือ 7% , 11% และ 15% โดยถือว่าแกลบแห้งไม่มีความชื้นอยู่เลย ซึ่งการอบนั้นได้ถือเอามาตรฐานของ ASTM-D-3173-73 [14] มาเป็นมาตรฐานในการทดลองนี้ โดยสามารถเขียนเป็นขั้นตอนได้ดังต่อไปนี้

1. นำแกลบที่ได้จากโรงสีใส่ในถาดอะลูมิเนียมขนาดใหญ่
2. นำถาดที่ได้ใส่แกลบไว้วางลงในเตาอบแล้วทำการอบที่อุณหภูมิ 105°C โดยที่จะทำการนำเอาแกลบที่อบออกมาซั่งทุก ๆ 2 ชั่วโมง จนกระทั่งน้ำหนักของแกลบที่ทำการอบไม่มีการเปลี่ยนแปลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์โดยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ทำการเตรียมเชื้อเพลิงแกลบให้มีความชื้นตามที่ได้กำหนดไว้โดยการนำแกลบที่ได้จากการอบซึ่งน้ำหนักจากนั้นฉีดพรมน้ำลงในแกลบให้มีน้ำหนักเท่ากับปริมาณความชื้นที่ได้กำหนดไว้ ซึ่งเราใช้สมการความชื้นดังนี้

$$MC_{wet} = \frac{WW - DW}{WW} \times 100 \quad (4.1)$$

โดยที่ MC_{wet} คือ ปริมาณความชื้นตามมาตรฐานเปียก (%)

WW คือ น้ำหนักของแกลบเปียก (kg)

DW คือ น้ำหนักของแกลบแห้ง (kg)

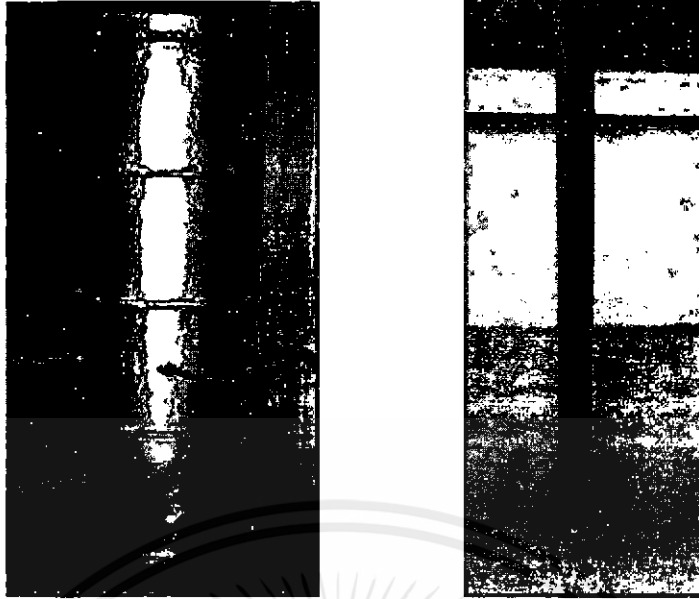
4. นำแกลบที่มีปริมาณความชื้นตามกำหนดใส่ถุงพลาสติกและมัดปากถุงให้เรียบร้อย จากนั้นนำไปเก็บไว้ในที่ ๆ มีการควบคุมอุณหภูมิที่แน่นอน ควรจะรีบนำไปทำการทดลองโดยเร็วเพื่อป้องกันความคลาดเคลื่อนของความชื้นในเชื้อเพลิงเนื่องจากปริมาณความชื้นในอากาศ

4.4 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

ในการทดลองนี้ทำการศึกษาดังผลของความชื้นของแกลบต่อคุณลักษณะทางการเผาไหม้ภายในเตาเผาแบบบอร์เทค โดยที่จะศึกษาถึงการกระจายอุณหภูมิภายในเตาเผาและก๊าซไอเสียที่ออกจากห้องเผาไหม้เพื่อศึกษาผลที่เกิดจากปริมาณความชื้นในเชื้อเพลิงแกลบ ซึ่งอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัยมีอยู่มากมายสามารถแบ่งออกได้เป็นส่วน ๆ ได้แก่

4.4.1 ส่วนของเตาแบบบอร์เทค

ลักษณะของตัวเตาเป็นรูปทรงกระบอก ตัวเตาทำจากเหล็ก ซึ่งทำการแบ่งขนาดของเตาออกเป็น 4 ชั้น เพื่อสะดวกในการประกอบ ซึ่งแต่ละชั้นส่วน มีความสูง 300 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน (I.D.) 300 มิลลิเมตร หนา 6 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก(O.D.) 400 มิลลิเมตร หนา 4 มิลลิเมตร ระหว่างทั้งสองชั้นทำการหล่อด้วยปูนทนไฟ ที่ชั้นแรกและชั้นที่สองจะมีท่อติดอากาศทุกขุมมีจำนวน 8 ท่อ แบ่งเป็นชั้นละ 4 ท่อ แต่ละท่อจะทำมุมกันเท่ากับ 90 องศา เพื่อป้องกันอากาศทุกขุมเข้าสู่ห้องเผาไหม้ในแนวสัมผัสเพื่อให้เกิดการหมุนวนภายในเตาเผาเพิ่มขึ้น ท่อแกนกลางซึ่งเป็นท่อทิ้งเถ้าลอยทำจากท่อสแตนเลส SS-304 มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 75 มิลลิเมตร มีความสูง 1,100 มิลลิเมตร โดยจะมีส่วนที่ยื่นเข้าไปในเตาเท่ากับ 780 มิลลิเมตร และส่วนด้านข้างของเตาจะทำการเจาะรูขนาด 22 มิลลิเมตร เพื่อใช้สำหรับเสียบเทอร์โมคัพเปิ้ลจำนวน 8 รู โดยแต่ละรูจะห่างกันเท่ากับ 150 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.2 แสดงภาพของเตาเผาแบบวอร์เทคและท่อทิ้งเถ้าที่ใช้ทดลอง

4.4.2 ชุดป้อนอากาศปฐมภูมิและทุติยภูมิ

ประกอบด้วย Blower ชนิดใบพัดคู่ ของ EBARA FAN Capacity $100 \text{ m}^3/\text{min}$

Pressure 200 mm.Aq Speed 4050 min^{-1}



รูปที่ 4.3 แสดง Blower และ Motor

Motor ใช้เป็นตัวขับ Blower ขนาด 7.5 kw 1400 rpm 15 A 380 V 4 Pole

เอกสารนี้เป็นเอกสาร Driving motor เป็นตัวตัดต่อการทำงานของมอเตอร์ ขนาด 4 Pole 1800 rpm 19.5 ด้านการค้ำ

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 แสดง DC Supply

DC Supply เป็นตัวจ่ายไฟเลี้ยงให้ Driving motor ขนาด 3 A 70 V max

แผ่นออริฟิส ใช้ในการวัดอัตราการไหลของอากาศปฐมภูมิและอากาศทุติยภูมิ ใช้ตาม

มาตรฐาน ANSI/API 2530



รูปที่ 4.5 แสดงแผ่นออริฟิส

วาล์ว ที่ใช้ในการปรับปริมาณอากาศปฐมภูมิ ใช้ gate valve ขนาด 3 นิ้ว และอากาศ
ทุติยภูมิใช้ gate valve ขนาด 2 นิ้ว

มานอมิเตอร์ ใช้วัดอัตราการไหลของอากาศโดยใช้น้ำเป็นตัวกลาง มี 2 ตัว ที่อากาศ
ปฐมภูมิ และ อากาศทุติยภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 แสดงमानอมิเตอร์

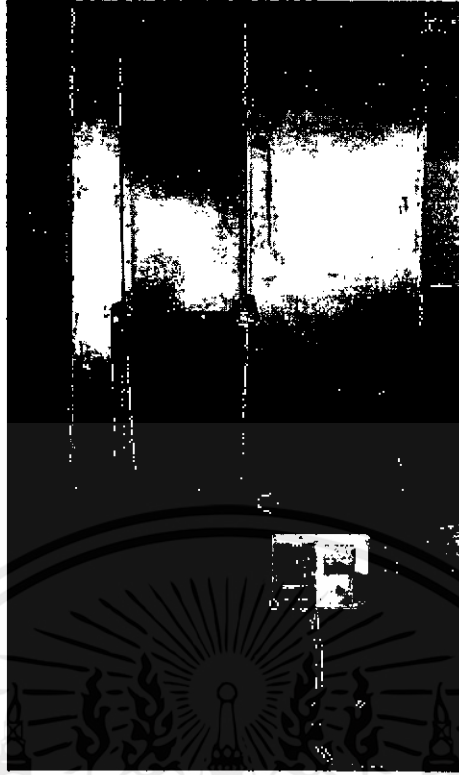
ชุดแยกอากาศหตุติยภูมิ แยกออกเป็น 8 ท่อ เท่าๆ กัน โดยใช้หางปลาเป็นตัวยึดกับสาย
ยางที่ต่อจากท่อของอากาศหตุติยภูมิ ใช้สายยางขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1 เซนติเมตร



รูปที่ 4.7 แสดงชุดแยกอากาศหตุติยภูมิ

4.4.3 ชุดป้อนเชื้อเพลิงแก๊ส

ประกอบด้วยอินเวอร์เตอร์ ชนิด FR-A024-0.2KP ใช้ในการควบคุมความเร็วรอบของ
มอเตอร์ที่ใช้ในการขับใบเกลียวที่ใช้ในการป้อนแก๊สเพื่อใช้ในการควบคุมอัตราการไหลของแก๊ส การค่า
ไม่ว่าการปรับความเร็วรอบได้สูงสุดที่ 1600 รอบต่อนาที 1.5 แอมแปร์ เจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
มอเตอร์ ใช้ในการขับใบเกลียว ขนาด 0.2 กิโลวัตต์



รูปที่ 4.8 แสดงชุดป้อนเชื้อเพลิงกลับ



เอกสารรูปที่ 4.9 แสดงมอเตอร์และชุดสายพาน เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.4 ชุดอุ้มเตา

ประกอบด้วย ถังแก๊ส LPG ขนาด 15 kg และหัวเผา ขนาด 2 นิ้ว



รูปที่ 4.10 แสดงถังแก๊ส



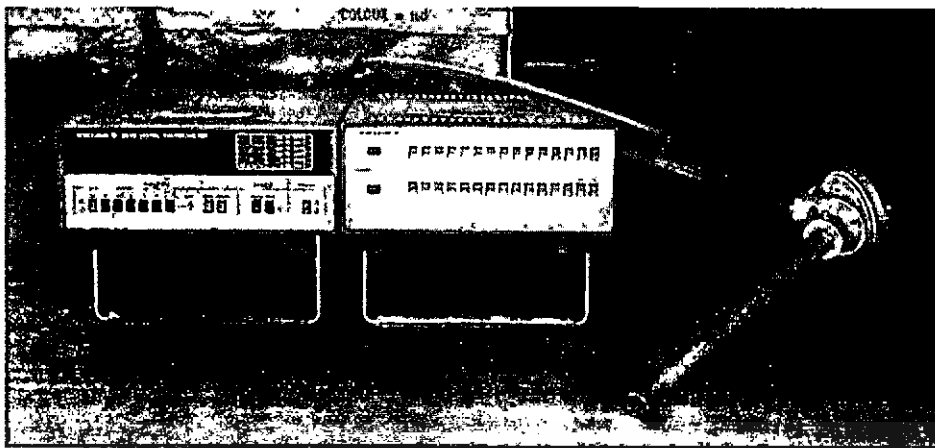
รูปที่ 4.11 แสดงหัวเผา

4.4.5 ชุดอุปกรณ์วัดและอ่านค่าอุณหภูมิ

ดิจิทัล อินดิเคเตอร์ (Digital Indicator) ใช้ในการอ่านค่าจากเทอร์โมคัพเปิ้ล ซึ่ง

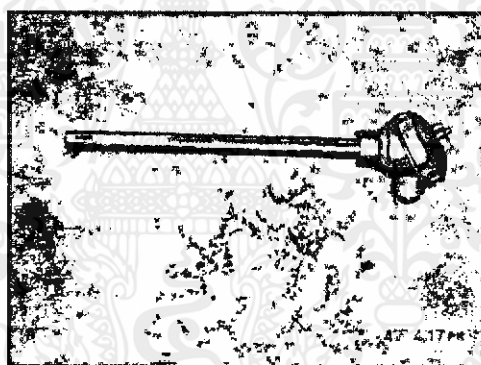
สามารถอ่านค่าได้ 30 ช่องสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 แสดงเทอร์โมคัพเบิลและ ดิจิตอล อินดิเคเตอร์

เทอร์โมคัพเบิล แบบ Type K สามารถวัดอุณหภูมิได้ตั้งแต่ -200°C ถึง 1370°C ใช้ในการวัดการกระจายอุณหภูมิภายในเตาเผา จำนวนทั้งหมด 8 ตัว



รูปที่ 4.13 แสดงเทอร์โมคัพเบิล

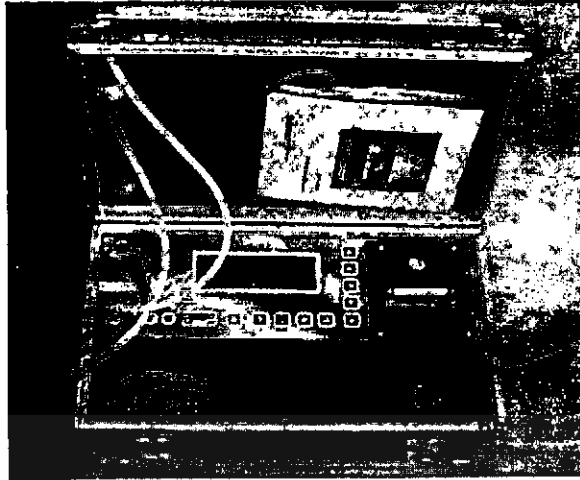
4.4.6 ชุดวิเคราะห์ก๊าซไอเสีย

เครื่องวิเคราะห์ก๊าซไอเสีย ยี่ห้อ Visit รุ่น 01-LLR ซึ่งสามารถวิเคราะห์ก๊าซไอเสียที่ออกจากเตาเผา โดยมีช่วงของการใช้งานดังนี้

ตารางที่ 4.8 แสดงช่วงของปริมาณก๊าซไอเสียที่สามารถวิเคราะห์ได้

Gas	Range[ppm]
O ₂	0 – 21 %
CO ₂	0 – 25 %
CO	0 – 4,000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเท่านั้น ไม่ควรเผยแพร่ให้ผู้อื่นได้ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ทางกลุ่มเนื้อหา และ ยังอาจมีลิขสิทธิ์ในบางส่วนของเอกสารนี้ ซึ่งจะมีการนำไปใช้



รูปที่ 4.14 แสดงเครื่องวิเคราะห์ก๊าซไอเสีย

4.4.7 ชุดกำจัดแก๊ส

ชุดไซโคลน เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการดักแก๊สที่ออกจากเตาเผา เพื่อไม่ให้ฟุ้งกระจายในอากาศ โดยที่ไซโคลนนี้สามารถดักอนุภาคแก๊สที่มีขนาดใหญ่ได้อย่างสมบูรณ์ โดยมีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอกซึ่งด้านล่างมีลักษณะเป็นกรวย ก๊าซไอเสียและแก๊สที่ออกจากเตาเผา จะเข้าไซโคลนทางด้านบนในแนวสัมผัสเพื่อทำให้เกิดการหมุนวนภายในเป็นผลให้แก๊สตกลงสู่ก้น ไซโคลนและก๊าซไอเสียจะออกปล่องด้านล่างของไซโคลน ซึ่งแสดงได้ดังรูป



รูปที่ 4.15 แสดงไซโคลน

4.5 ขั้นตอนการทดลอง

ในการทดลองจะต้องทำการเตรียมอุปกรณ์การทดลองให้เรียบร้อย โดยทำการกำหนด ซึ่งสามารถเขียนเป็นขั้นตอนได้ดังนี้

1. ทำการอุ่นเตาโดยใช้เชื้อเพลิงก๊าซ LPG จนกระทั่งอุณหภูมิภายในเตาเผามีค่าประมาณ 400°C จากนั้นทำการเริ่มป้อนเชื้อเพลิงแก๊สที่ความชื้น 7% เข้าสู่ห้องเผาไหม้พร้อมกับอากาศปฐมภูมิ จนกระทั่งอุณหภูมิภายในเตาเผามีค่าประมาณ 750°C แล้วทำการนำเอาชุดอุ่นเตาด้วยเชื้อเพลิง LPG ออก
2. ทำการปรับอัตราการไหลของอากาศให้มีค่าเท่ากับผลที่คำนวณได้โดยเริ่มที่อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ 1.2 พร้อมทั้งอัตราการป้อนแก๊สให้มีค่าเท่ากับ 0.2 kg/min
3. ทำการปรับอัตราส่วนอากาศทุติยภูมิต่ออากาศทั้งหมด (λ) ให้มีค่าเท่ากับ 0.00
4. เริ่มทำการวัดอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้จำนวน 8 จุด โดยใช้เทอร์โมคัพเบิล Type K โดยที่ระยะปลายของเทอร์โมคัพเบิลอยู่ที่ระยะที่ 1 ทำการบันทึกผลการทดลองลงในตารางบันทึกผลเมื่อช่วงอุณหภูมิภายในค่อนข้างคงที่ และทำการวัดปริมาณก๊าซไอเสียที่ออกจากห้องเผาไหม้ แล้วบันทึกผลที่ได้
5. ทำการวัดอุณหภูมิโดยปรับระยะของปลายเทอร์โมคัพเบิลให้อยู่ที่ระยะที่ 2, 3, 4 และ 5 ตามลำดับ สำหรับเทอร์โมคัพเบิลตัวที่ 1 – 5 และ ระยะที่ 6 สำหรับเทอร์โมคัพเบิลตัวที่ 6 - 8
6. ทำการปรับอัตราการไหลของอากาศปฐมภูมิและอากาศทุติยภูมิให้มีค่า $\lambda = 0.15$ และ 0.25 ตามลำดับแล้วทำซ้ำข้อ 4 - 5
7. ทำการปรับอัตราส่วนสมมูลให้มีค่าเท่ากับ 1.0 และ 0.8 ตามลำดับ แล้วทำการทดลองซ้ำข้อ 3 - 6
8. ทำการเปลี่ยนเชื้อเพลิงแก๊สที่มีความชื้น เท่ากับ 11% และ 15% ตามลำดับ และทำการทดลองซ้ำข้อ 2 - 7
9. ทำการปรับอัตราการป้อนแก๊สให้มีค่าเท่ากับ 0.25 และ 0.3 kg/min ทำการทดลองซ้ำข้อ 2 - 8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะณใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

ผลการทดลองและการวิเคราะห์

ในการศึกษาวิจัยนี้ได้ทำการทดลองโดยวัดค่าอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่าง ๆ ภายในเตาเผาเพื่อศึกษาการกระจายของอุณหภูมิภายในเตาเผาแบบวอร์เทค ซึ่งมีลักษณะเป็นทรงกระบอกมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 300 มิลลิเมตร และความสูงจากฐานเตาเท่ากับ 1,200 มิลลิเมตร แกนกลางของห้องเผาไหม้จะประกอบด้วยท่อทึงเดี่ยวซึ่งเป็นท่อสแตนเลสที่มีความสูงจากฐานเตาเท่ากับ 780 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 75 มิลลิเมตร โดยที่ทำการกำหนดตำแหน่งการวัดในแนวความสูงของตัวเตาเป็นจำนวน 8 ตำแหน่งโดยที่แต่ละตำแหน่งห่างกันเป็นระยะ 15 เซนติเมตร และทำการวัดค่าอุณหภูมิในแนวรัศมีจำนวน 5 จุด ของเทอร์โมคัพเบิล 5 ตัวล่างจากฐานเตา และ 6 จุดของเทอร์โมคัพเบิล 3 ตัวบน และทำการบันทึกค่าที่อ่านได้จากดิจิตอลอินดิเคเตอร์ลงในตารางบันทึกผลการทดลอง ในการทดลองนี้ยังได้ทำการศึกษาของอิทธิพลของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีผลต่อการเผาไหม้โดยในการศึกษานี้ได้ทำการกำหนดค่าตัวแปรต่าง ๆ คือ

1. ความชื้นของแกลบเท่ากับ 7%, 11% และ 15% โดยน้ำหนัก
2. อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ 0.8, 1.0 และ 1.2
3. อัตราส่วนอากาศหุติยภูมิต่ออากาศทั้งหมดเท่ากับ 0.00, 0.15 และ 0.25
4. อัตราการป้อนแกลบเท่ากับ 0.2 , 0.25 และ 0.3 kg/min

ซึ่งผลที่ได้จากการทดลองสามารถทำการวิเคราะห์การกระจายของอุณหภูมิภายในเตาเผาและปริมาณก๊าซไอเสียที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงได้ดังต่อไปนี้

5.1 เชื้อเพลิงแกลบที่มีความชื้น 7% โดยน้ำหนัก

ในกรณีศึกษาอิทธิพลความชื้นของเชื้อเพลิงแกลบที่มีความชื้นเท่ากับ 7% โดยน้ำหนัก ซึ่งเป็นแกลบที่มีความชื้นน้อยกว่าปกติ จะทำการศึกษาดังอิทธิพลของอัตราส่วนสมมูล (Φ) และอัตราส่วนของอากาศหุติยภูมิต่ออากาศทั้งหมด (λ) ที่มีผลต่อการเผาไหม้ โดยที่กำหนดอัตราการป้อนแกลบไว้จำนวน 3 ค่า คือ 0.2, 0.25 และ 0.3 kg/min ซึ่งจากผลการทดลองจะสามารถทำการวิเคราะห์ถึงอิทธิพลต่าง ๆ ได้ดังต่อไปนี้

5.1.1 อิทธิพลของอัตราส่วนสมมูล (Equivalence ratio , Φ)

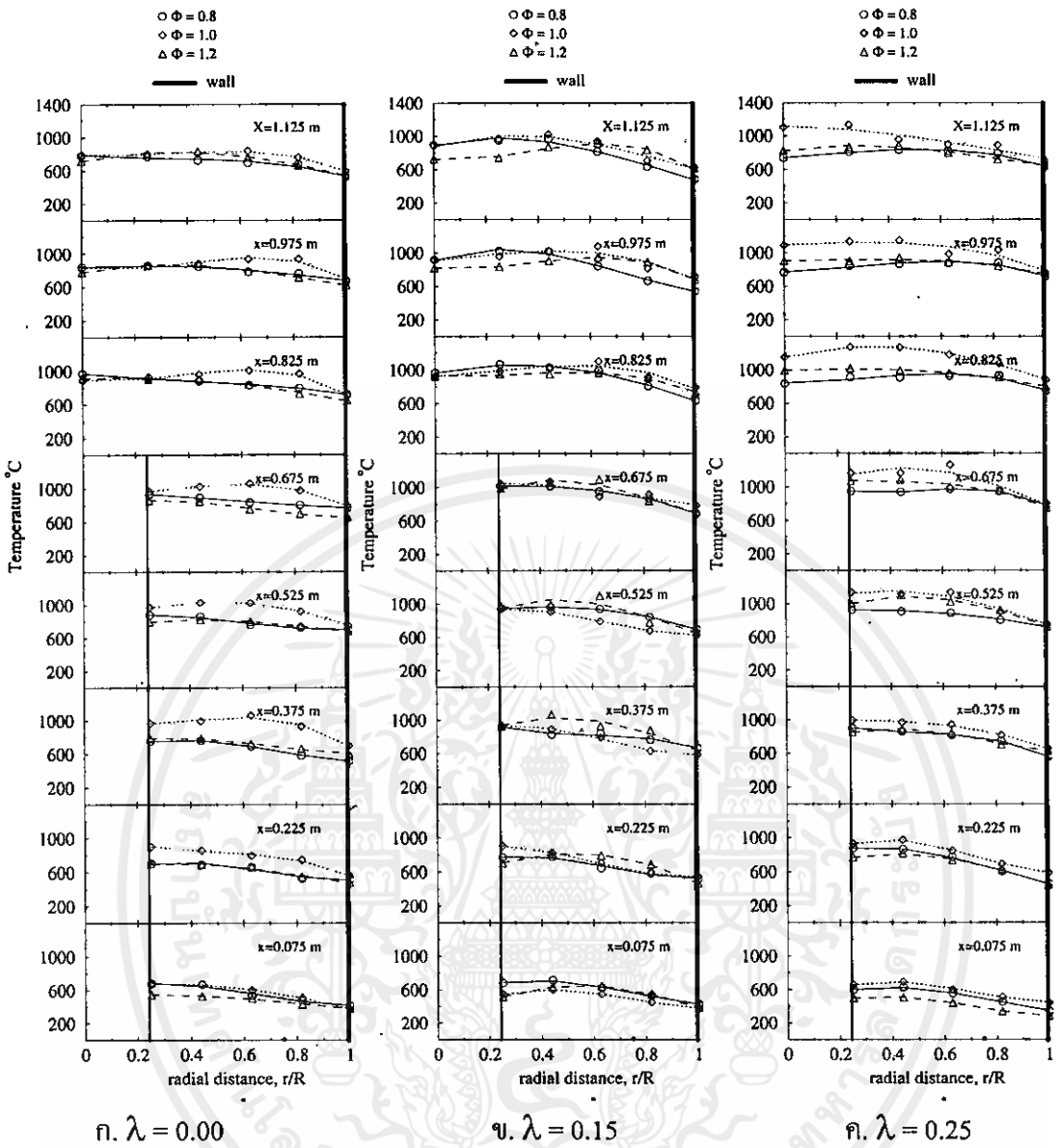
อัตราส่วนสมมูลเป็นค่าบ่งชี้ถึงอัตราส่วนของปริมาณอากาศต่อเชื้อเพลิงที่ใช้ในการเผาไหม้ ในการศึกษาจะทำการแบ่งกรณีศึกษาออกเป็น 3 กรณี คือ กรณีของอากาศที่ใช้ในการทดลองมากกว่าปริมาณอากาศทางทฤษฎีหรือเรียกว่าอากาศเกินพอ ($\Phi = 0.8$) กรณีที่สองเป็นกรณีของปริมาณอากาศที่ใช้ในการทดลองเท่ากับอากาศทางทฤษฎีหรือเรียกว่าอากาศพอดี ($\Phi = 1.0$) และ

กรณีี่สามเป็นกรณีของปริมาณอากาศที่ใช้น้อยกว่าอากาศที่คำนวณได้ทางทฤษฎี ($\Phi = 1.2$) อีกทั้งในการทดลองยังได้ทำการปรับเปลี่ยนค่าของอัตราส่วนอากาศหุติยภูมิต่ออากาศทั้งหมด (λ) จำนวน 3 กรณี ได้แก่ $\lambda = 0.00$, $\lambda = 0.15$ และ $\lambda = 0.25$ โดยที่จะศึกษาถึงผลที่เกิดขึ้นต่อการเผาไหม้ภายในเตาเผาแบบวอร์เทคเมื่อไม่มีการใส่อากาศหุติยภูมิและกรณีของการใส่อากาศหุติยภูมิแต่จะปรับแบ่งปริมาณของอากาศหุติยภูมิไม่เท่ากันเพื่อหาผลที่เกิดขึ้น โดยที่สามารถศึกษาได้จากการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเตาเผาและส่วนประกอบของก๊าซไอเสียที่ปล่อยออกมาเมื่อเกิดการเผาไหม้จากผลที่ได้จากการทดลองจะสามารถทำการวิเคราะห์เป็นกรณีต่าง ๆ ได้ดังนี้

5.1.1.1 กรณีศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนสมมูลเมื่อ $\lambda = 0.00$

กรณีนี้เป็นกรณีของการทดลองที่ใช้เฉพาะอากาศปฐมภูมิเพียงอย่างเดียว โดยที่อากาศจะเข้ามาพร้อมกับเชื้อเพลิงแกลบทางด้านล่างของเตาเผาในแนวสัมผัสเพื่อให้เกิดการหมุนวนเป็นวอร์เทค จากผลการทดลองเมื่อกำหนดให้อัตราการป้อนแกลบเท่ากับ 0.3 kg/min ซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้จากกราฟในรูปที่ 5.1 ก จะพบว่ากรณีที่ $\Phi = 0.8$ การกระจายตัวของอุณหภูมิจะให้อุณหภูมิสูงสุดโดยเฉลี่ยเมื่อเทียบในระดับความสูงเดียวกันของเตาเผาอยู่ที่ตำแหน่ง $r/R = 0.44$ หรือบริเวณกึ่งกลางวงแหวนของเตาและจะค่อย ๆ ลดต่ำลงจนอุณหภูมิจะต่ำที่สุดอยู่ที่ผนังเตาและเมื่อเปรียบเทียบอุณหภูมิในแนวความสูงของเตาพบว่าอุณหภูมิจะมีค่าที่บริเวณด้านล่างของเตาเผาและจะค่อย ๆ สูงขึ้น โดยจะมีอุณหภูมิสูงสุดอยู่ตำแหน่ง $x = 0.525 - 0.825$ เมตร ดังแสดงในรูปที่ 5.1 ก. เมื่อทำการปรับเปลี่ยนค่า $\Phi = 1.0$ พบว่าการกระจายตัวของอุณหภูมิจะมีลักษณะเช่นเดียวกับกรณีของ $\Phi = 0.8$ แต่จะให้อุณหภูมิที่แต่ละตำแหน่งสูงกว่าเกือบทุกตำแหน่ง สำหรับกรณีของ $\Phi = 1.2$ พบว่าการกระจายตัวของอุณหภูมิมิมีลักษณะเดียวกับสองกรณีแรก แต่จากกราฟจะพบว่าที่ตำแหน่งด้านล่างและกลางของเตาเผา (เทอร์โมคัพเบิลตัวที่ 1-5) การกระจายอุณหภูมิจะมีการกระจายที่ไม่ค่อยสม่ำเสมอแต่เมื่อถึงบริเวณด้านบนของเตา (เทอร์โมคัพเบิลตัวที่ 6-8) จะให้การกระจายของอุณหภูมิที่สม่ำเสมอมากขึ้น

เมื่อทำการวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซไอเสียที่เกิดจากการเผาไหม้จะพบว่าปริมาณของก๊าซออกซิเจนมีปริมาณสูงสุดที่ $\Phi = 0.8$ เนื่องจากเป็นกรณีของอากาศที่ใช้ในการทดลองมากกว่าปริมาณอากาศทางทฤษฎีทำให้มีปริมาณออกซิเจนที่เหลือจากการเผาไหม้มากกว่าปกติซึ่งจะแปรผันโดยตรงกับปริมาณอากาศที่ใช้ในการทดลอง ในขณะที่ปริมาณของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีปริมาณลดลงเมื่อค่าอัตราส่วนสมมูลเพิ่มขึ้นหรือแปรผกผันกัน เนื่องจากปริมาณที่ใช้ในการทดลองมากกว่าอากาศทางทฤษฎีทำให้มีปริมาณออกซิเจนที่ไม่ถูกใช้ในการทำปฏิกิริยาการเผาไหม้เพิ่มขึ้นทำให้สัดส่วนของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ลดลง และเมื่อพิจารณาปริมาณของคาร์บอนมอนอกไซด์พบว่าจะมีปริมาณมากที่สุด ในกรณีของอากาศที่ใช้ในการทดลองน้อยกว่าอากาศทางทฤษฎีหรือ $\Phi = 1.2$ เนื่องจากเป็นกรณีที่มีปริมาณออกซิเจนไม่เพียงพอต่อการเผาไหม้ทำให้เกิดปฏิกิริยาถึงขั้นตอนที่ออกซิเจนจับตัวกับคาร์บอนในเชื้อเพลิงเกิดเป็นคาร์บอน



รูปที่ 5.1 แสดงการกระจายอุณหภูมิภายในเตาเผาที่อัตราการป้อนเท่ากับ 0.3 kg/min และ ความชื้นของแกลบ 7%

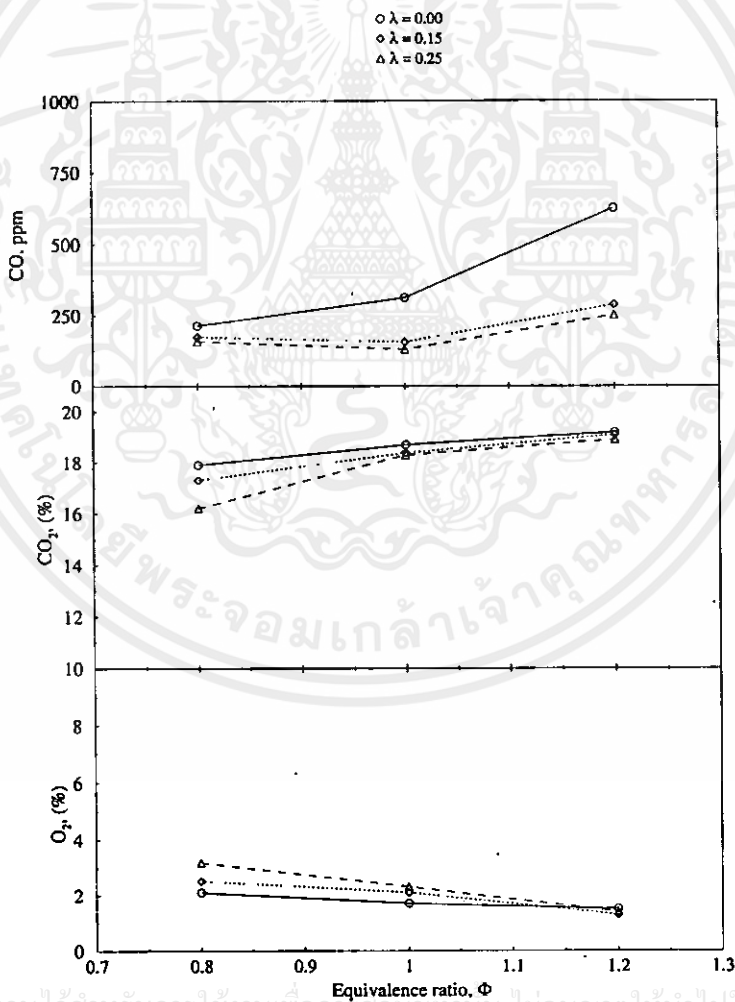
ซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิไม่สูงมากนักและปลดปล่อยพลังงานความร้อนออกมาน้อยกว่า อีกด้วย และเมื่อจะเกิดปฏิกิริยาในขั้นตอนต่อไปก็ไม่มีออกซิเจนที่เพียงพอในการเข้าทำปฏิกิริยาทำให้มีปริมาณคาร์บอนมอนนอกไซด์อยู่ที่ก๊าซไอเสียที่ปล่อยออกมามากด้วย

5.1.1.2 กรณีศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนสมมูลเมื่อ $\lambda = 0.15$

กรณีนี้เป็นกรณีของการศึกษาที่ทำการแบ่งปริมาณอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ ออกเป็นสองส่วน ได้แก่ อากาศปฐมภูมิและอากาศทุติยภูมิ โดยที่กำหนดให้อากาศปฐมภูมิมี ปริมาณเท่ากับ 85% ของอากาศทั้งหมดและอากาศทุติยภูมิเท่ากับ 15% ของอากาศทั้งหมด จากผล การทดลองกรณีของ $\Phi = 0.8$ พบว่าการกระจายตัวของอุณหภูมิบริเวณด้านล่างของเผาไหม้ก่อน

ข้างสม่ำเสมอกว่ากรณี $\lambda = 0.00$ ดังแสดงในรูปที่ 5.1 ข. แต่อุณหภูมิก็ยังคงมีค่าที่ด้านล่างของเตาเผาและจะค่อย ๆ สูงขึ้นและจะสูงสุดที่ตำแหน่ง $x = 0.675 - 0.825$ เมตร กรณีของ $\Phi = 1.0$ พบว่าการกระจายตัวของอุณหภูมิที่ค่อนข้างสม่ำเสมอและให้อุณหภูมิสูงสุดซึ่งสังเกตได้จากกราฟในรูปที่ 5.1 ซึ่งจะให้อุณหภูมิสูงสุดประมาณ 1,100 องศาเซลเซียส สำหรับกรณีของ $\Phi = 1.2$ การกระจายตัวของอุณหภูมิจะมีการกระจายตัวของอุณหภูมิที่ค่อนข้างสม่ำเสมอที่บริเวณกลางเตาเผาเนื่องจากผลของอากาศทุติยภูมิและยังให้อุณหภูมิที่ค่อนข้างสูง

เมื่อวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซไอเสียที่เกิดขึ้นในกรณีนี้พบว่าเมื่ออัตราส่วนสมมูลเพิ่มขึ้นปริมาณของออกซิเจนลดลงและคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มสูงขึ้นเช่นเดียวกับกรณีของ $\lambda = 0$ แต่ปริมาณของคาร์บอนมอนอกไซด์จะมีค่าต่ำที่สุดที่อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ 1.0 เนื่องจากผลของอากาศทุติยภูมิทำให้เชื้อเพลิงแกลบมีระยะเวลาที่อยู่ในห้องเผาไหม้นานขึ้นจึงเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ยิ่งขึ้น แต่กรณีของอัตราส่วนสมมูลเท่ากับ 1.2 ซึ่งเป็นกรณีของอากาศหรือออก-



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

รูปที่ 5.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างก๊าซไอเสียกับอัตราส่วนสมมูล เมื่ออัตราการป้อนแกลบเท่ากับ 0.3 kg/min ที่ความชื้นเท่ากับ 7%

ซิเจนไม่เพียงพอต่อการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ที่สมบูรณ์จึงส่งผลให้มีปริมาณของคาร์บอนมอนนอกไซด์ออกมาถึงแม้ว่าเชื้อเพลิงจะมีระยะเวลาที่อยู่ในห้องเผาไหม้นานขึ้นแต่ก็ไม่สามารถที่จะเกิดปฏิกิริยาได้อย่างสมบูรณ์เพราะมีออกซิเจนน้อยจึงทำให้โอกาสที่โมเลกุลของออกซิเจนจับตัวกับคาร์บอนในเชื้อเพลิงแกลบน้อยลงด้วย

5.1.1.3 กรณีศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนสมมูลเมื่อ $\lambda = 0.25$

กรณีนี้เป็นกรณีที่ทำกรแบ่งอากาศออกเป็นสองส่วนเช่นเดียวกับกรณีก่อนหน้านี้ แต่ปริมาณของอากาศทุกชนิดจะเท่ากับ 25% จากผลการทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 5.1 ค. จะพบว่าที่ $\Phi = 0.8$ การกระจายตัวของอุณหภูมิจะทำให้ค่าที่สม่ำเสมอ โดยจะมีอุณหภูมิสูงสุดโดยเฉลี่ยที่ตำแหน่ง $r/R = 0.44$ หรือบริเวณกึ่งกลางวงแหวนของเตาเผาในแนวรัศมีและจะค่อย ๆ ลดต่ำลงสู่ผนังเตาจนกระทั่งต่ำที่สุดที่ผนังเตาเมื่อเทียบในระดับเดียวกันและจะมีอุณหภูมิสูงสุดที่ตำแหน่ง $x = 0.675 - 0.825$ เมตร สำหรับกรณีของ $\Phi = 1.0$ และ $\Phi = 1.2$ ก็มีลักษณะเช่นเดียวกัน และยังพบว่าทั้งสามกรณีจะให้ค่าอุณหภูมิที่ใกล้เคียงกันทั่วทั้งเตาเผา แต่กรณีของ $\Phi = 1.0$ ให้อุณหภูมิที่สูงที่สุด เนื่องจากในกรณีนี้ไม่ต้องสูญเสียความร้อนในการทำให้อากาศส่วนเกินมีอุณหภูมิสูงขึ้นด้วย สำหรับกรณีของ $\Phi = 0.8$ และในกรณีของ $\Phi = 1.2$ นั้นมีปริมาณของออกซิเจนน้อยกว่าออกซิเจนที่ทำให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์จึงทำให้พลังงานความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้น้อยกว่าด้วย

เมื่อทำการวิเคราะห์ก๊าซไอเสียที่เกิดจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงแกลบภายในเตาเผาแบบวอร์เทค จะพบว่ามีความหนาแน่นของก๊าซไอเสียของกรณีนี้เช่นเดียวกับกรณีของ $\lambda = 0.15$ โดยพบว่าปริมาณของคาร์บอนมอนนอกไซด์ที่ปล่อยออกมาต่ำที่สุดเท่ากับ 156 ppm ในกรณีของ $\Phi = 1.0$ ซึ่งสามารถดูได้จากกราฟรูปที่ 5.2

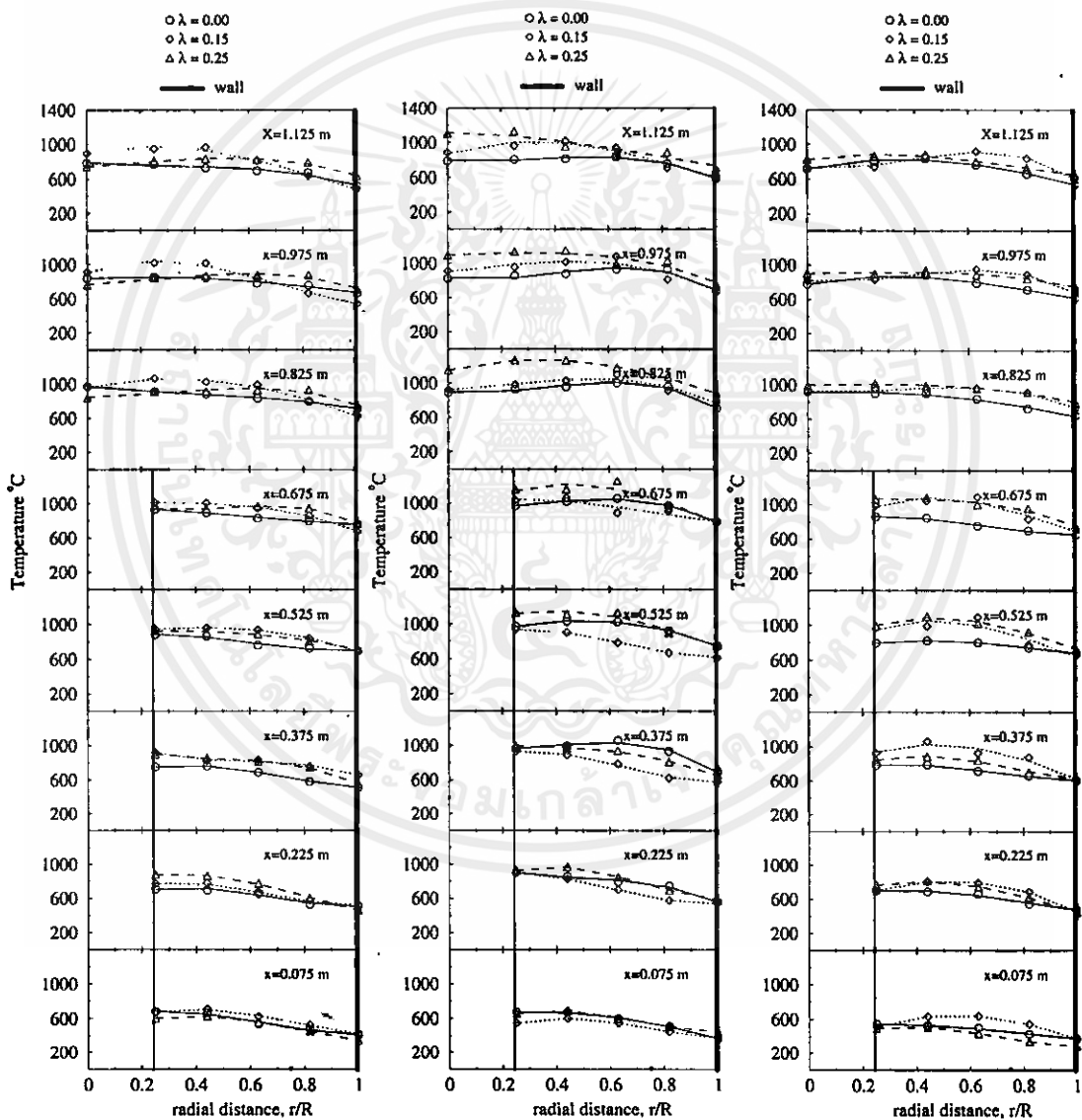
5.1.2 อิทธิพลของปริมาณอากาศทุกชนิดต่ออากาศทั้งหมด (λ)

ปริมาณของอัตราการไหลของอากาศทุกชนิดต่อปริมาณอัตราการไหลของอากาศทั้งหมด ($\lambda = m_s / m_f$) เป็นค่าที่บ่งชี้ถึงความรุนแรงของการไหลวนที่เกิดขึ้น โดยที่อากาศทุกชนิดนี้จะเป็นตัวช่วยให้เชื้อเพลิงสามารถเข้าผสมคลุกเคล้ากับอากาศได้ดีขึ้น เนื่องจากในการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงแข็งนั้นในระหว่างที่เกิดการเผาไหม้ไปสักระยะหนึ่งจะมีเชื้อเพลิงบางส่วนเกาะติดอยู่ที่ผิวของเชื้อเพลิงจึงทำให้อากาศหรือออกซิเจนใหม่เข้าทำปฏิกิริยาให้เกิดการเผาไหม้ได้ แต่ผลของอากาศทุกชนิดจะทำการฉีดเข้าสู่ห้องเผาไหม้ทำให้เกิดการไหลวนเพิ่มขึ้นส่งผลให้เชื้อเพลิงที่เกาะติดอยู่ที่ผิวหลุดออกจากเชื้อเพลิงที่เหลือได้มากขึ้นจึงส่งผลให้ออกซิเจนที่เหลือเข้าทำปฏิกิริยาการเผาไหม้เพิ่มขึ้น ซึ่งในการศึกษาได้ทำการกำหนดให้ค่า λ มีจำนวน 3 ค่า คือ 0.00, 0.15 และ 0.25 โดยผลที่ได้จากการทดลองเราสามารถวิเคราะห์ได้ดังนี้

5.1.2.1 กรณีศึกษาอิทธิพลของ λ เมื่อ $\Phi = 0.8$

การศึกษาค่าผลกรณอัตราส่วนสมมูลเท่ากับ 0.8 หรือกรณีที่อากาศที่ใช้ในการทดลองมากกว่าอากาศทางทฤษฎี จะพบว่าการกระจายตัวของอุณหภูมิจะให้อุณหภูมิต่ำที่บริเวณ

ด้านล่างของเตาเผาและจะค่อย ๆ มีอุณหภูมิสูงขึ้นเมื่อตำแหน่งพิจารณาในตำแหน่งของเทอร์โมคัพเปิ้ลที่สูงขึ้น การกระจายตัวของอุณหภูมิจะค่อนข้างสม่ำเสมอในทุก ๆ ระดับของเตาเผาในแนวความสูง ผลที่เกิดขึ้นจาก λ จะให้ผลที่ไม่ค่อยจะแตกต่างกันมากนักจะสังเกตได้จากรูปที่ 5.3 ก จะพบว่า การใส่อากาศหตุยภูมิ (กรณีของ $\lambda = 0.15$ และ 0.25) จะให้อุณหภูมิที่สูงกว่าเล็กน้อย เนื่องจากในกรณีนี้เป็นกรณีที่มีปริมาณของออกซิเจนมากกว่าที่ใช้ในการเผาไหม้ทางทฤษฎีและการไหลวนที่เกิดขึ้นจากอากาศปฐมภูมิทำให้เกิดความปั่นป่วนในห้องเผาไหม้เพียงพอแล้ว ซึ่งในกรณีอากาศเกินพลมที่เข้าห้องเผาไหม้จะมีความรุนแรงมากกว่าอีกสองกรณี ทำให้ผลของอากาศหตุยภูมิมีผลเล็กน้อย และมีปริมาณออกซิเจนที่เพียงพอต่อการเผาไหม้สมบูรณ์



ก. $\Phi = 0.8$

ข. $\Phi = 1.0$

ค. $\Phi = 1.2$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่สู่สาธารณะโดยไม่ผ่านการอนุญาต

รูปที่ 5.3 แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเตาเผาเมื่ออัตราการป้อนเชื้อเพลิงแกลบเท่ากับ 0.3 kg/min และความชื้นของแกลบ 7%

5.1.2.2 กรณีศึกษาอิทธิพลของ λ เมื่อ $\Phi = 1.0$

กรณีศึกษาอิทธิพลของ λ เมื่ออัตราส่วนสมมูลเท่ากับ 1.0 ดังแสดงในรูปที่ 5.3 ข จะพบว่า การกระจายอุณหภูมิในกรณีที่มี $\lambda = 0.00$ จะให้การกระจายอุณหภูมิที่สม่ำเสมอ บริเวณส่วนล่างและกลางเตา แต่เมื่อถึงด้านบนจะมีการกระจายที่ไม่ค่อยสม่ำเสมอ เนื่องจากด้านบนของเตาในกรณีนี้เกิดการหมุนวนที่น้อยลง ในขณะที่ $\lambda = 0.15$ จะให้การกระจายอุณหภูมิที่สม่ำเสมอมากขึ้นเมื่อขึ้นสู่ด้านบนของตัวเตา สำหรับกรณีของ $\lambda = 0.25$ จะเห็นได้ว่าจะให้การกระจายอุณหภูมิทั่วทั้งเตาที่สม่ำเสมอกว่าและมีอุณหภูมิที่สูงกว่าทั้งสองกรณี อีกทั้งให้อุณหภูมิเฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ 1272.0 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูป

5.1.2.3 กรณีศึกษาอิทธิพลของ λ เมื่อ $\Phi = 1.2$

กรณีนี้เป็นการศึกษาผลของปริมาณอากาศที่ใช้ในการทดลองน้อยกว่าอากาศที่คำนวณได้ในทางทฤษฎี ซึ่งผลที่เกิดขึ้นจากการให้ปริมาณอากาศที่น้อย ๆ ทำให้ความปั่นป่วนในเตาเผาที่เกิดขึ้นจากอากาศป้อนมีลดน้อยลง อีกทั้งปริมาณของออกซิเจนไม่เพียงพอ ปฏิกิริยาการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงที่ป้อนเข้าสู่เตาเผา ดังกรณีของ $\lambda = 0.00$ จะพบว่าให้อุณหภูมิต่ำ แต่ก็ยังให้การกระจายอุณหภูมิที่สม่ำเสมอเนื่องจากเกิดการผสมคลุกเคล้าของอากาศกับเชื้อเพลิงไม่ดีเท่าที่ควรจึงทำให้เกิดการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ แต่เมื่อมีการฉีดอากาศทุติยภูมิเข้าทางด้านข้างของเตาเผาเพื่อเพิ่มการหมุนวนภายในเตาเผาให้มากขึ้นดังกรณีของ $\lambda = 0.15$ และ 0.25 จะพบว่าให้อุณหภูมิภายในเตาเผาที่สูงขึ้นเนื่องจากการหมุนจะช่วยเพิ่มระยะเวลาของเชื้อเพลิงให้อยู่ในห้องเผาไหม้นานขึ้นซึ่งเปรียบเสมือนมีมันอากาศที่คอยดึงให้เชื้อเพลิงหลุดออกจากเตาเผาได้ยากขึ้นและยังทำให้ก๊าซที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้จากบริเวณด้านล่างของเตาที่เกาะติดอยู่กับเชื้อเพลิงกลบส่วนที่ยังไม่เกิดการเผาไหม้หลุดออกไปทำให้เกิดพื้นผิวใหม่ส่งผลให้ออกซิเจนส่วนที่เหลือสามารถเข้าทำปฏิกิริยากับคาร์บอนในกลบได้มากขึ้นจึงมีการปลดปล่อยพลังงานความร้อนออกมาเพิ่มขึ้นด้วย

5.2 เชื้อเพลิงกลบที่มีความชื้น 11% โดยน้ำหนัก

ในกรณีศึกษาอิทธิพลความชื้นของเชื้อเพลิงกลบที่มีความชื้นเท่ากับ 11% โดยน้ำหนัก ซึ่งเป็นกรณีของกลบที่มีความชื้นเท่ากับ ความชื้นของเชื้อเพลิงกลบปกติ จะทำการศึกษาดังอิทธิพลของอัตราส่วนสมมูล (Φ) และอัตราส่วนของอากาศทุติยภูมิต่ออากาศทั้งหมด (λ) ที่มีผลต่อการเผาไหม้ โดยที่กำหนดอัตราการป้อนกลบไว้จำนวน 3 ค่า คือ 0.2, 0.25 และ 0.3 kg/min ซึ่งจากผลการทดลองจะสามารถทำการวิเคราะห์ผลที่เกิดขึ้นได้ดังต่อไปนี้

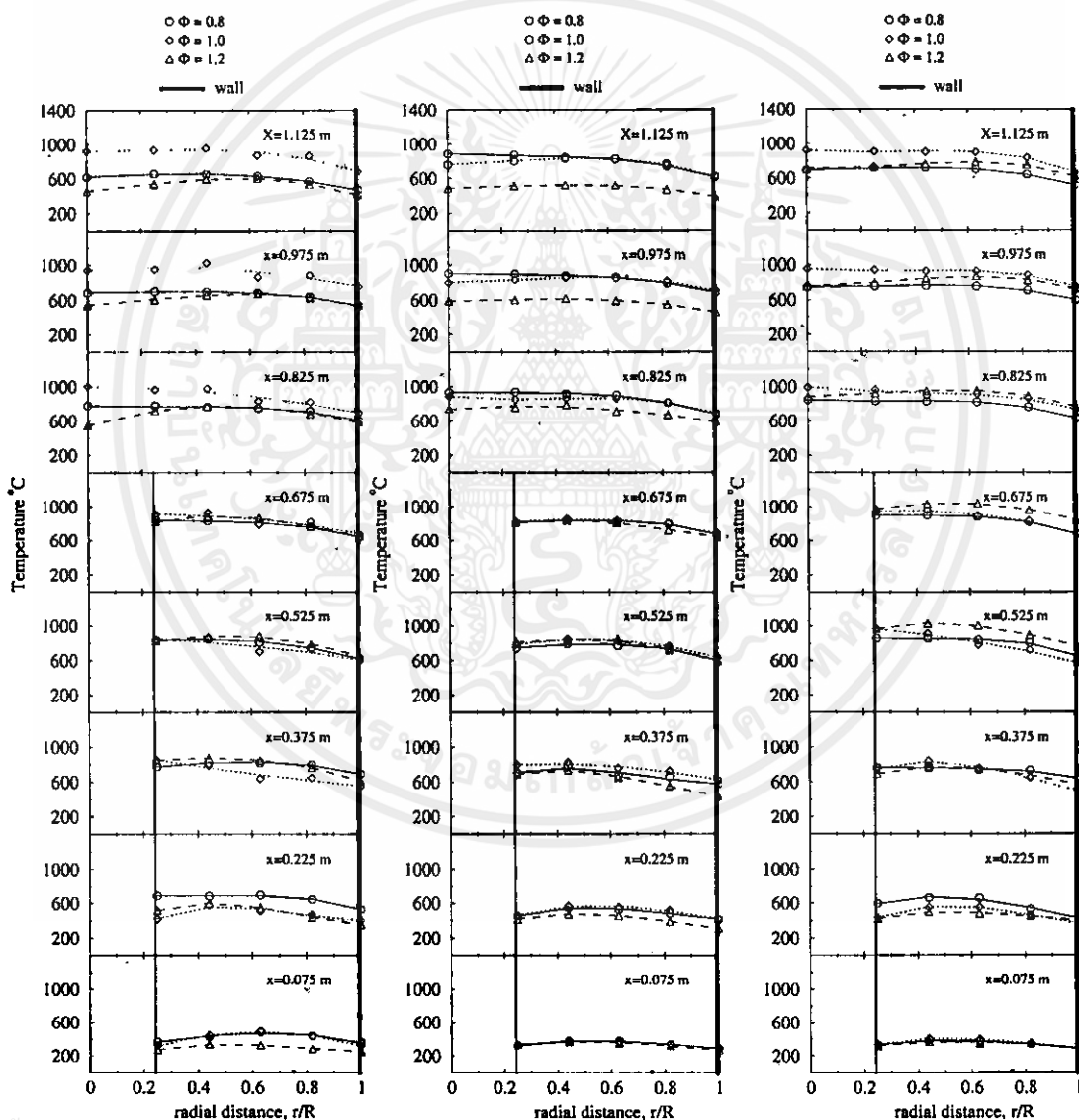
เอกสารนี้เป็น 5.2.1 อิทธิพลของอัตราส่วนสมมูล (Equivalence ratio, Φ) อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ในการศึกษาผลของอัตราส่วนระหว่างอากาศต่อเชื้อเพลิงที่มีผลต่อการเผาไหม้ของกลบที่มีความชื้นเท่ากับ 11% โดยน้ำหนัก ได้ทำการทดลองเป็น 3 กรณีเช่นเดียวกับความชื้นของ

แลกเปลี่ยนเท่ากับ 7% โดยน้ำหนัก คือ กรณีอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้มากกว่าอากาศที่คำนวณได้ทางทฤษฎี ($\Phi = 0.8$) กรณีที่สองเป็นกรณีของอากาศที่ใช้ในการทดลองเท่ากับปริมาณอากาศที่คำนวณได้ทางทฤษฎี ($\Phi = 1.0$) และกรณีสุดท้ายเป็นกรณีของอากาศที่ใช้น้อยกว่าอากาศที่คำนวณได้ทางทฤษฎี ($\Phi = 1.2$) และยังสามารถทำการทดลองกับสามอัตราการป้อนแลกเปลี่ยนคือ 0.2, 0.25 และ 0.3 kg/min ซึ่งผลที่ได้จากการทดลองจะสามารถวิเคราะห์ได้ดังนี้

5.2.1.1 กรณีศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนสมมูลเมื่อ $\lambda = 0.00$

จากผลการทดลองกรณีของอัตราการป้อนแลกเปลี่ยนเท่ากับ 0.3 kg/min และ $\lambda = 0.00$ เพื่อศึกษาผลที่เกิดขึ้นจากการปรับเปลี่ยนปริมาณของอากาศต่อเชื้อเพลิงที่ใช้ในการทดลองหรือ



ก. $\lambda = 0.00$

ข. $\lambda = 0.15$

ค. $\lambda = 0.25$

รูปที่ 5.4 แสดงการกระจายอุณหภูมิภายในเตาเผาที่อัตราการป้อนแลกเปลี่ยนเท่ากับ 0.3 kg/min และความชื้นของแลกเปลี่ยน 11%

อัตราส่วนสมมูล ดังแสดงในรูปที่ 5.4 ก เมื่อ $\Phi = 0.8$ จะพบว่าด้านล่างบริเวณที่มีการป้อนเชื้อเพลิง แกลบเข้าสู่ห้องเผาไหม้หรือตำแหน่งของเทอร์โมคัพเบิลตัวแรกจะมีอุณหภูมิค่าที่ต่ำที่สุดและเมื่อระดับสูงขึ้นไปจะให้อุณหภูมิต่ำ ๆ สูงขึ้นแต่จะมีค่าที่ไม่แตกต่างกันมาก ซึ่งสามารถเรียกได้ว่ามีค่าค่อนข้างสม่ำเสมอทั่วทั้งเตาและจะมีค่าเฉลี่ยสูงอยู่ ณ ตำแหน่ง $r/R = 0.44$ แต่จะให้อุณหภูมิต่ำกว่ากรณีของ $\Phi = 1.0$ เนื่องจากมีปริมาณอากาศที่มากจึงส่งผลให้จะต้องใช้ความร้อนในการอุ่นอากาศส่วนเกินให้มีอุณหภูมิสูงขึ้นอีกด้วย และเมื่อพิจารณากรณีของ $\Phi = 1.0$ เมื่อมีการให้อากาศป้อนเพียงอย่างเดียวจะพบว่าให้การกระจายอุณหภูมิที่สม่ำเสมอพอสมควรแต่จะไม่แตกต่างกับอีกสองกรณีมากนักในบริเวณด้านล่างของเตาเผา แต่บริเวณด้าน จะมีความแตกต่างที่เห็นได้อย่างชัดเจน เนื่องจากกรณีนี้มีปริมาณของออกซิเจนที่เพียงพอสำหรับการทำปฏิกิริยาการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงแกลบ เพื่อให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ แต่เมื่อการเผาไหม้สู่ด้านบนของเตาก็ยังให้อุณหภูมิที่สูงอีกด้วยจะพบว่าอุณหภูมิด้านบนของเตาเผาในกรณีนี้มีค่าเฉลี่ยประมาณ 1,000 องศาเซลเซียส สำหรับกรณี $\Phi = 1.2$ จะพบว่าจะให้อุณหภูมิด้านล่างของเตาเผาที่ต่ำกว่าอีกสองกรณีเนื่องจากปริมาณอากาศที่น้อยลงส่งผลให้มีความรุนแรงของอากาศน้อยลงความปั่นป่วนภายในห้องเผาไหม้จึงลดลงด้วย แต่เมื่อถึงบริเวณกลางเตาอุณหภูมิที่ให้ออกมาจะมีค่าใกล้เคียงกับกรณี $\Phi = 0.8$ และ 1.0 สำหรับด้านบนของเตาเผาจะให้อุณหภูมิต่ำลง เนื่องจากมีปริมาณออกซิเจนที่จะใช้ในการเผาไหม้น้อยลงจึงเกิดปฏิกิริยาน้อยลงด้วยส่งผลให้พลังงานความร้อนลดลง

ศึกษาองค์ประกอบของก๊าซไอเสียที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ในกรณีของ $\lambda = 0.00$ เพื่อศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนสมมูลพบว่า เมื่ออัตราส่วนสมมูลเพิ่มขึ้นปริมาณของออกซิเจนที่เหลือจากการเผาไหม้มีปริมาณลดลงในขณะที่ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์มีปริมาณเพิ่มขึ้น เนื่องจากในกรณีที่ $\Phi = 0.8$ ได้ให้ปริมาณอากาศมากกว่าอากาศทางทฤษฎีจะส่งผลให้มีปริมาณออกซิเจนที่เหลือจากการเผาไหม้มากกว่าอีกกรณีของ $\Phi = 1.0$ และ 1.2 ตามลำดับ สำหรับปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ซึ่งเป็นก๊าซพิษจะพบว่าเมื่ออัตราส่วนสมมูลเพิ่มขึ้นปริมาณของคาร์บอนมอนอกไซด์จะมีปริมาณเพิ่มขึ้นตามไปด้วยหรือเรียกว่าจะแปรผันตรงกันสามารถดูได้จากรูปที่ 5.5

5.2.1.2 กรณีศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนสมมูลเมื่อ $\lambda = 0.15$

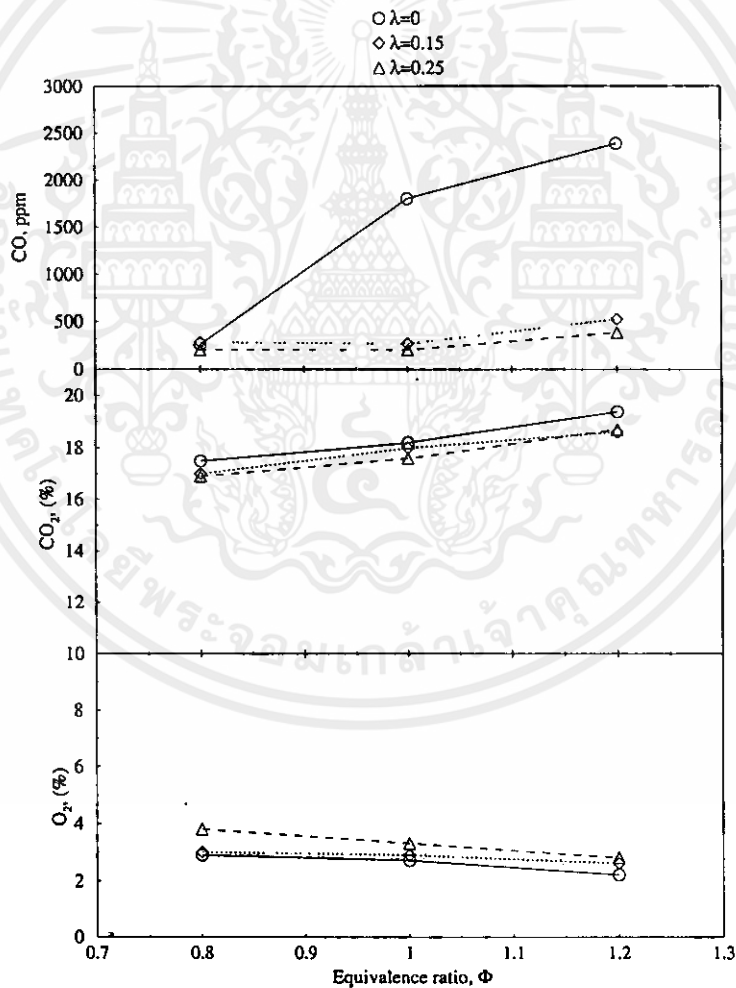
ในกรณีของ $\lambda = 0.15$ และความชื้นของเชื้อเพลิงแกลบเท่ากับ 11% โดยน้ำหนักที่อัตราการป้อนแกลบเท่ากับ 0.3 kg/min ดังแสดงในรูป 5.4 ข เมื่อทำการศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนสมมูลจะพบว่าการกระจายอุณหภูมิในกรณีของ $\Phi = 0.8$ และ 1.0 จะให้ลักษณะการกระจายที่สม่ำเสมอและมีอุณหภูมิที่ใกล้เคียงกันทั่วทั้งเตาเนื่องจากทั้งสองกรณีนี้เป็นกรณีของปริมาณออกซิเจนที่เพียงพอต่อการเผาไหม้จึงให้อุณหภูมิที่เกิดจากการเผาไหม้สูงตามไปด้วย ส่วนกรณีของ $\Phi = 1.2$ มีปริมาณของออกซิเจนไม่เพียงพอต่อการเผาไหม้เมื่อการเผาไหม้สู่ด้านบนปริมาณของออกซิเจนเหลือน้อยลงจึงทำให้เกิดการเผาไหม้ที่น้อยลงด้วยถึงแม้ว่าจะมีการฉีดอากาศทุติยภูมิเข้า

ช่วยในการหมุนวนแต่ตำแหน่งที่มีการฉีดจะอยู่ด้านล่างของห้องเผาไหม้จึงไม่แรงพอที่จะส่งผลถึงด้านบนของเตาเผา

การศึกษาองค์ประกอบของก๊าซไอเสียที่เกิดจากการเผาไหม้จากรูปที่ 5.5 จะพบว่าเมื่ออัตราส่วนสมมูลเพิ่มขึ้นปริมาณของออกซิเจนที่เหลือจากการเผาไหม้มีปริมาณลดลงและปริมาณของคาร์บอนไดออกไซด์มีปริมาณเพิ่มขึ้น สำหรับปริมาณของคาร์บอนมอนอกไซด์จะมีปริมาณต่ำที่สุดเมื่อ $\Phi = 1.0$ และจะมีปริมาณเพิ่มขึ้นเมื่อ $\Phi = 1.2$

5.2.1.3 กรณีศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนสมมูลเมื่อ $\lambda = 0.25$

กรณีศึกษาอิทธิพลของ Φ เมื่อปริมาณของอัตราการไหลอากาศทุติยภูมิต่อปริมาณของอากาศทั้งหมดเท่ากับ 0.25 เมื่อความชื้นของแกลบเท่ากับ 11% โดยน้ำหนักที่อัตราการป้อนแกลบเท่ากับ 0.3 kg/min ดังแสดงในรูป 5.4 ก จะพบว่าเมื่อ $\Phi = 0.8$ หรือเป็นกรณีของอากาศเกินพอจะให้การกระจายอุณหภูมิที่ตีพอสมควรทั่วทั้งเตาเผาแต่อุณหภูมิที่ให้ออกมาไม่สูงมากนักและ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 5.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างก๊าซไอเสียกับอัตราส่วนสมมูล เมื่ออัตราการป้อนแกลบเท่ากับ 0.3 kg/min ที่ความชื้น 11%

เมื่อถึงบริเวณด้านบนของเตาเผากรณีของ $\Phi = 1.0$ จะให้อุณหภูมิจากการเผาไหม้สูงที่สุดโดยเฉลี่ยประมาณ 950 องศาเซลเซียส เนื่องจากมีปริมาณของออกซิเจนที่มากเพียงพอต่อการเผาไหม้ดังกรณีของ $\Phi = 0.8$ แต่สูญเสียความร้อนในการอุ่นอากาศใหม่น้อยกว่า และจะเกิดการเผาไหม้ที่สูงกว่ากรณีของ $\Phi = 1.2$ ซึ่งมีออกซิเจนไม่เพียงพอต่อการเผาไหม้จึงให้อุณหภูมิที่ต่ำกว่ากรณี $\Phi = 1.0$ ถึงแม้ว่าจะมีการหมุนวนช่วยในการเพิ่มระยะเวลาของเชื้อเพลิงที่อยู่ในห้องเผาไหม้

การวิเคราะห์ห้องสัปรอบของก๊าซไอเสียที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ในกรณีของ $\lambda = 0.25$ เพื่อศึกษาผลของอัตราส่วนสมมูลพบว่า มีลักษณะเช่นกับสองกรณีก่อนหน้านี้ ดังแสดงได้ในรูปที่ 5.5

5.2.2 อิทธิพลของปริมาณอากาศทุกยุมิต่ออากาศทั้งหมด (λ)

ปริมาณของอัตราการไหลของอากาศทุกยุมิต่อปริมาณอัตราการไหลของอากาศทั้งหมด ($\lambda = m_s / m_f$) เป็นค่าที่บ่งชี้ถึงความรุนแรงของการไหลวนที่เกิดขึ้น โดยที่อากาศทุกยุมินี้จะเป็นตัวช่วยให้เชื้อเพลิงสามารถเข้าผสมคลุกเคล้ากับอากาศได้ดีขึ้น เนื่องจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงแข็งนั้นในระหว่างที่เกิดการเผาไหม้ไปสักระยะหนึ่งจะมีชิ้นเถ้าบางส่วนเกาะติดอยู่ที่ผิวของเชื้อเพลิงจึงทำให้อากาศหรือออกซิเจนใหม่เข้าทำปฏิกิริยาให้เกิดการเผาไหม้ได้ แต่ผลของอากาศทุกยุมิจะทำการฉีดเข้าสู่ห้องเผาไหม้ทำให้เกิดการไหลวนเพิ่มขึ้นส่งผลให้ชิ้นเถ้าที่เกาะติดอยู่ที่ผิวหลุดออกจากเชื้อเพลิงที่เหลือได้มากขึ้นจึงส่งผลให้ออกซิเจนที่เหลือเข้าทำปฏิกิริยาการเผาไหม้เพิ่มขึ้น ซึ่งในการศึกษาได้ทำการกำหนดให้ค่า λ มีจำนวน 3 ค่า คือ 0.00, 0.15 และ 0.25 โดยผลที่ได้จากการทดลองเราสามารถวิเคราะห์ได้ดังนี้

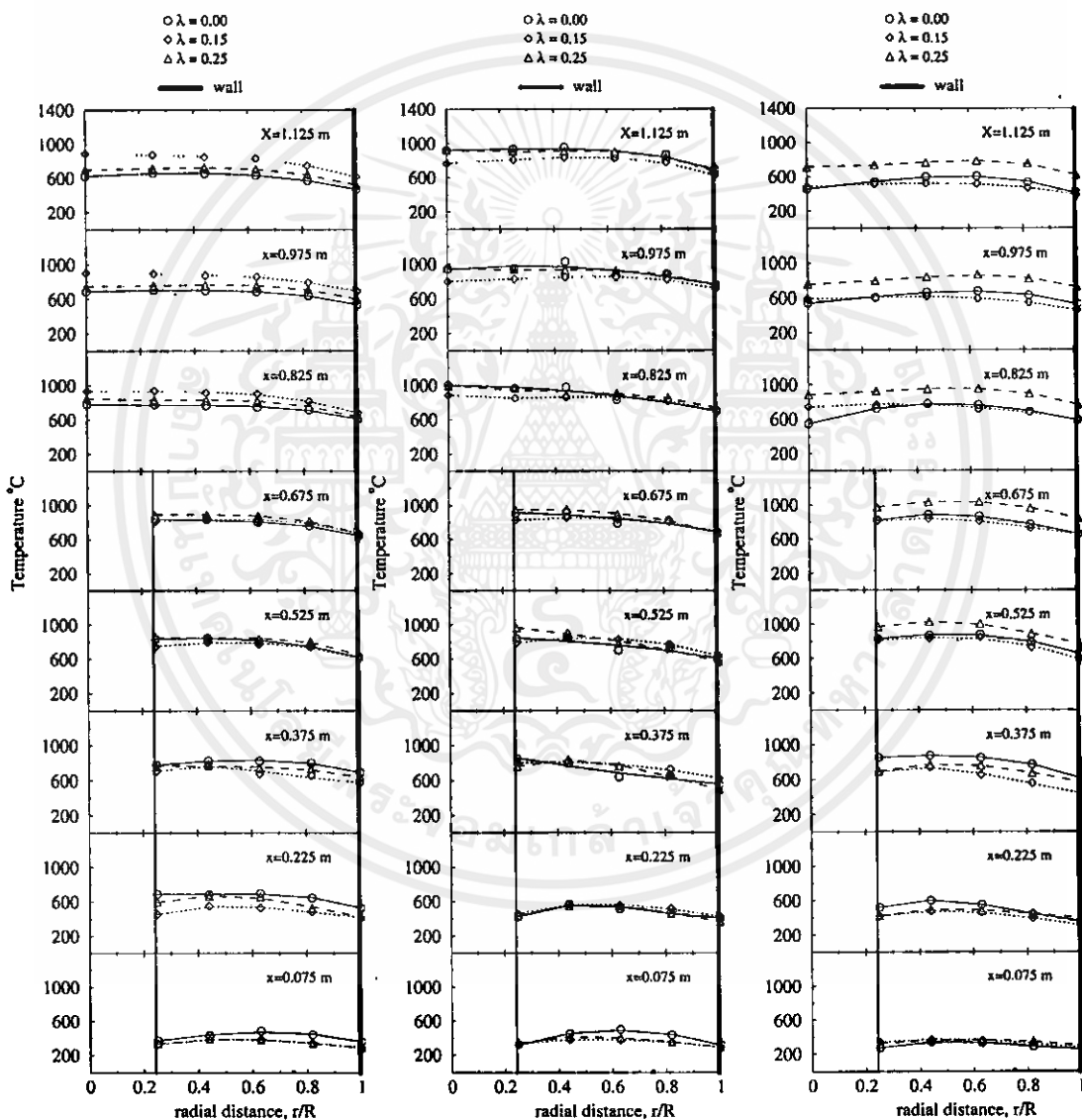
5.2.2.1 กรณีศึกษาอิทธิพลของ λ เมื่อ $\Phi = 0.8$

การศึกษาถึงอิทธิพลของ λ เมื่ออัตราส่วนสมมูลเท่ากับ 0.8 เมื่อความชื้นของแก๊สเท่ากับ 11% โดยน้ำหนัก ที่อัตราการป้อนแก๊สเท่ากับ 0.3 kg/min จะพบว่าผลของ λ ไม่มีผลต่อการเผาไหม้มากนักซึ่งจะสังเกตได้จากรูปที่ 5.6 ก สังเกตได้ว่าด้านล่างของเตาเผาจะมีอุณหภูมิที่ต่ำถึงแม้จะมีการฉีดอากาศช่วยในการเผาไหม้และจะมีค่าใกล้เคียงกันจนกระทั่งถึงบริเวณกลางเตาเนื่องจากเป็นกรณีที่มีปริมาณออกซิเจนที่เพียงพอต่อการเผาไหม้และเกิดการหมุนวนที่แรงเพียงพอเนื่องจากอากาศปฐมยุมิ แต่เมื่อขึ้นสู่ด้านบนจะพบว่าเมื่อมีการฉีดอากาศทุกยุมิเข้าช่วยจะให้อุณหภูมิที่สูงกว่ากรณีของการใส่อากาศปฐมยุมิเพียงอย่างเดียวเนื่องจากอากาศทุกยุมิช่วยให้เกิดการหมุนวนที่แรงพอที่จะทำให้เกิดขึ้นที่ด้านบนของห้องเผาไหม้ด้วยส่งผลให้มีความปั่นป่วนภายในห้องเผาไหม้มากกว่ากรณีที่ไม่มีอากาศทุกยุมิเลย

5.2.2.2 กรณีศึกษาอิทธิพลของ λ เมื่อ $\Phi = 1.0$

การศึกษาผลของ λ เมื่ออัตราส่วนสมมูลเท่ากับ 1.0 ซึ่งเป็นกรณีของอากาศที่ใช้ในการทดลองเท่ากับอากาศที่คำนวณได้ทางทฤษฎีจะพบว่า การฉีดอากาศทุกยุมิ (กรณี $\lambda = 0.15$ และ 0.25) จะให้อุณหภูมิที่สูงกว่ากรณีที่ไม่มีอากาศทุกยุมิ ซึ่งสังเกตได้จากบริเวณกลาง

เตาเผาในรูปที่ 5.6 ข ซึ่งผลของอากาศทุติยภูมินอกจากจะช่วยในการเพิ่มการหมุนวนแล้วยังช่วยในการเพิ่มพื้นที่ผิวใหม่ของเชื้อเพลิงแกลบเนื่องจากเมื่อเชื้อเพลิงแกลบเผาไหม้ไปได้ระยะหนึ่งจะมีจีเฝ้าเกาะติดอยู่กับเชื้อเพลิงแกลบทำให้ออกซิเจนที่เหลือไม่สามารถเข้าทำปฏิกิริยาการไหม้ต่อได้ทำให้เกิดการปลดปล่อยพลังงานความร้อนออกมาน้อยตามไปด้วย แต่เมื่อมีการฉีดอากาศทุติยภูมิจะทำให้จีเฝ้าที่ติดอยู่กับเชื้อเพลิงแกลบที่ยังไม่มีการเผาไหม้หลุดออกไปทำให้ออกซิเจนที่เหลือสามารถเข้าทำปฏิกิริยาการเผาไหม้ได้ต่อไป



ก. $\Phi = 0.8$

ข. $\Phi = 1.0$

ค. $\Phi = 1.2$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่าการนำเอกสารนี้ไปใช้ในรูปแบบใดก็ตาม

รูปที่ 5.6 แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเตาเผาเมื่ออัตราการป้อนเชื้อเพลิงแกลบเท่ากับ 0.3 kg/min และความชื้นของแกลบ 11%

5.2.2.3 กรณีศึกษาอิทธิพลของ λ เมื่อ $\Phi = 1.2$

การศึกษาผลของ λ เมื่ออัตราส่วนสมมูลเท่ากับ 1.2 กรณีของแกลบขึ้น 11% โดยน้ำหนัก ที่อัตราการป้อนแกลบเท่ากับ 0.3 kg/min ดังรูปที่ 5.6 ค พบว่าที่บริเวณด้านล่างของเตาเผาจะมีอุณหภูมิที่ต่ำและจะค่อยสูงขึ้นเมื่อเกิดการเผาไหม้ที่บริเวณกลางเตาและจะค่อย ๆ ลดลงเมื่อขึ้นสู่ด้านบนของเตาเผา ตำแหน่ง $r/R = 0.44 - 0.63$ จะให้อุณหภูมิโดยเฉลี่ยสูงที่สุด ผลของ $\lambda = 0.25$ จะให้ค่าอุณหภูมิที่สูงกว่ากรณีของ $\lambda = 0$ และ 0.15 เนื่องจากมีการฉีดอากาศทุติยภูมิมากขึ้นทำให้เกิดแรงของการหมุนวนเพิ่มขึ้นเพื่อช่วยให้เชื้อเพลิงสามารถอยู่ในห้องเผาไหม้ได้นานขึ้นอีกด้วย และอากาศสามารถเข้าผสมคลุกเคล้ากับเชื้อเพลิงได้ดีกว่ากรณีของการไม่ฉีดอากาศทุติยภูมิเลย เนื่องจากอากาศทุติยภูมิจะทำให้เกิดพื้นผิวใหม่ที่เกิดจากจีไ้ที่เกาะอยู่กับเชื้อเพลิงหลุดออกไปดังจะเห็นได้อย่างชัดเจนในกรณีของ $\lambda = 0.25$ ที่บริเวณด้านบนของเตาเผา

5.3 เชื้อเพลิงแกลบที่มีความชื้น 15% โดยน้ำหนัก

ในกรณีศึกษาอิทธิพลความชื้นของเชื้อเพลิงแกลบที่มีความชื้นเท่ากับ 15% โดยน้ำหนัก ซึ่งเป็นกรณีของแกลบที่มีความชื้นมากกว่าความชื้นของเชื้อเพลิงแกลบปกติ จะทำการศึกษาดังอิทธิพลของอัตราส่วนสมมูล (Φ) และอัตราส่วนของอากาศทุติยภูมิต่ออากาศทั้งหมด (λ) ที่มีผลต่อการเผาไหม้ โดยที่กำหนดอัตราการป้อนแกลบไว้จำนวน 3 ค่า คือ 0.2, 0.25 และ 0.3 kg/min ซึ่งจากผลการทดลองจะสามารถทำการวิเคราะห์ผลที่เกิดขึ้นได้ดังต่อไปนี้

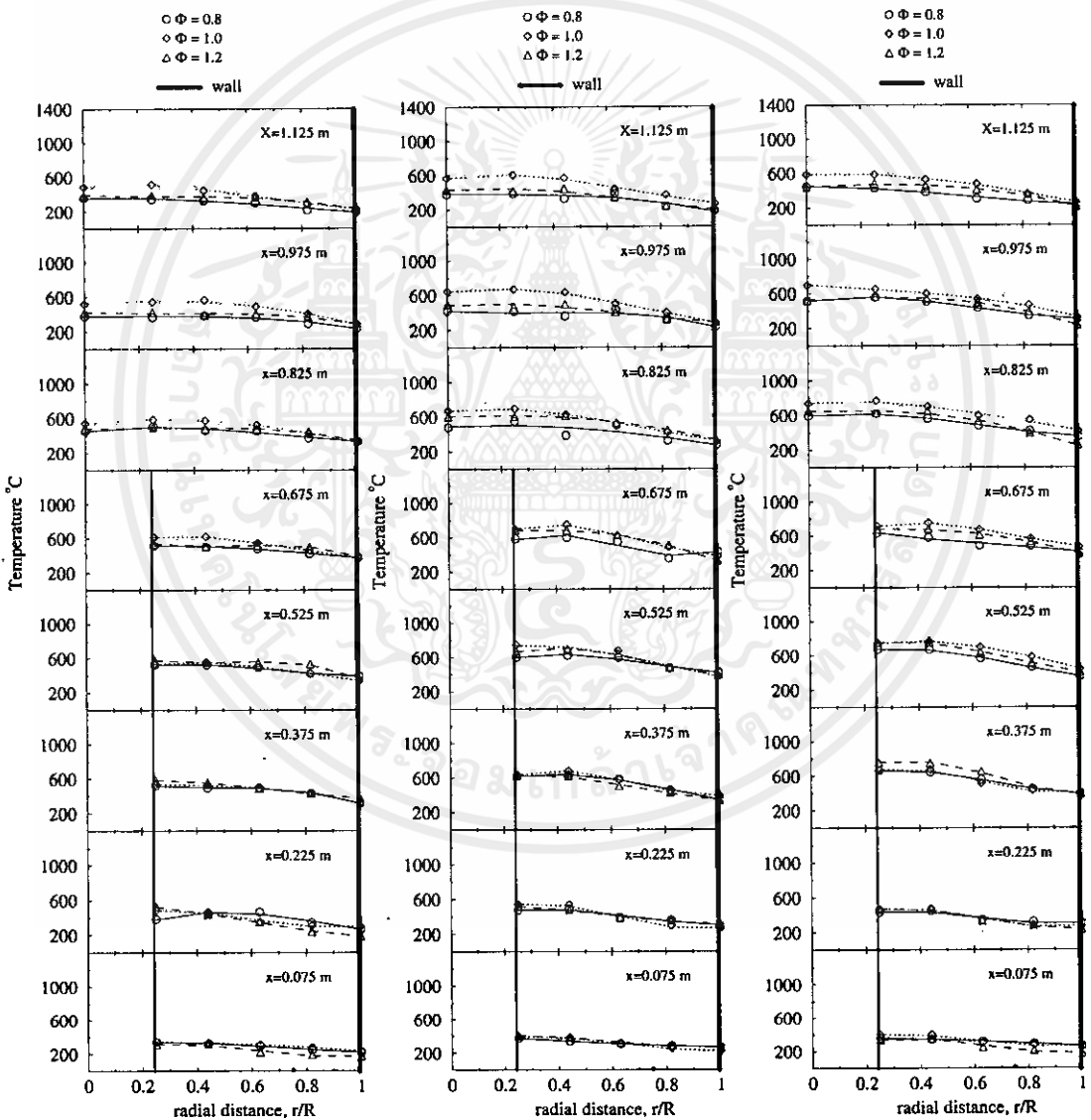
5.3.1 อิทธิพลของอัตราส่วนสมมูล (Equivalence ratio, Φ)

ในการศึกษาผลของ Φ ที่มีผลต่อการเผาไหม้ของแกลบที่มีความชื้นเท่ากับ 15% โดยน้ำหนัก จะแบ่งการทดลองออกเป็น 3 กรณีเช่นเดียวกับความชื้นของแกลบเท่ากับ 7% และ 11% โดยน้ำหนัก คือ กรณีอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้มากกว่าอากาศที่คำนวณได้ทางทฤษฎี ($\Phi = 0.8$) กรณีที่สองเป็นกรณีของอากาศที่ใช้ในการทดลองเท่ากับปริมาณอากาศที่คำนวณได้ทางทฤษฎี ($\Phi = 1.0$) และกรณีสุดท้ายเป็นกรณีของอากาศที่ใช้น้อยกว่าอากาศที่คำนวณได้ทางทฤษฎี ($\Phi = 1.2$) และยังสามารถทำการทดลองกับ 3 ค่าอัตราการป้อนแกลบคือ 0.2, 0.25 และ 0.3 kg/min โดยสามารถแบ่งการวิเคราะห์ได้ดังนี้

5.3.1.1 กรณีศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนสมมูล เมื่อ $\lambda = 0.00$

การศึกษาผลของอัตราส่วนสมมูลต่อคุณลักษณะการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงแกลบที่มีความชื้นเท่ากับ 15% โดยน้ำหนัก ณ อัตราการป้อนแกลบเท่ากับ 0.3 kg/min ดังแสดงในรูปที่ 5.7 ก ซึ่งเป็นกรณีของการฉีดอากาศปฐมภูมิซึ่งเข้าพร้อมกับเชื้อเพลิงแกลบเพียงอย่างเดียว $\lambda = 0.00$ จะพบว่าที่ค่าอัตราส่วนสมมูลเท่ากับ 1.0 จะให้ค่าอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ที่สูงกว่าอีกสองกรณี คือ กรณีของ $\Phi = 0.8$ และ $\Phi = 1.2$ เนื่องจากที่กรณีนี้มีปริมาณออกซิเจนที่เพียงพอต่อการเผาไหม้และ

จะไม่ต้องสูญเสียความร้อนในการทำให้อากาศที่เข้าไปใหม่มีอุณหภูมิสูงขึ้นในปริมาณมากเกินไป ความจำเป็นและในกรณีของ $\Phi = 1.2$ นั้นปริมาณของออกซิเจนไม่เพียงพอต่อการทำปฏิกิริยาเพื่อให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์จึงส่งผลให้มีอุณหภูมิที่ต่ำกว่าอีกด้วยและเมื่อสังเกตผลของความชื้นในเชื้อเพลิงแกลบที่ผลต่ออุณหภูมิภายในเตาเผาจะพบว่าที่ความชื้นเท่ากับ 15% กรณีที่มีการฉีดอากาศปฐมภูมิเพียงอย่างเดียวจะให้อุณหภูมิโดยเฉลี่ยประมาณ 500 องศาเซลเซียส ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิการติดไฟได้เองของเชื้อเพลิงแกลบซึ่งมีอุณหภูมิอยู่ที่ 400 องศาเซลเซียสจะพบว่าหากมีปัญหาในการป้อนแกลบเพียงชั่วขณะสามารถทำให้เตาดับลงได้เนื่องจากอุณหภูมิจะลดลงอย่างรวดเร็วและเมื่อมีการป้อนเชื้อเพลิงเข้าสู่เตาใหม่จะทำให้แกลบใหม่ไม่สามารถติดไฟได้ด้วยตัวเอง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่มอบให้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ใช้เพื่อประโยชน์ด้านการค้า

รูปที่ 5.7 แสดงการกระจายอุณหภูมิภายในเตาเผาที่อัตราการป้อนแกลบเท่ากับ 0.3 kg/min และความชื้นของแกลบ 15%

การศึกษาองค์ประกอบของก๊าซไอเสียที่เกิดจากการเผาไหม้เมื่อแกลบมีความชื้นเท่ากับ 15% โดยน้ำหนัก กรณี $\lambda = 0.00$ พบว่าเมื่ออัตราส่วนสมมูลเพิ่มขึ้นปริมาณของออกซิเจนจะลดลงเนื่องจากในกรณีของอัตราส่วนสมมูลมากขึ้นเป็นกรณีของการใช้อากาศในการทดลองลดลงทำให้ปริมาณของออกซิเจนที่เหลือน้อยลงด้วยแต่หากนำไปเปรียบเทียบกับกรณีของเชื้อเพลิงแกลบเท่ากับ 7% และ 11% โดยน้ำหนัก จะพบว่าปริมาณของออกซิเจนที่เหลือมากกว่ากรณีทั้งสองค่อนข้างมากเนื่องจากมีออกซิเจนส่วนหนึ่งที่เป็นองค์ประกอบของน้ำในแกลบหลุดออกมาด้วยเนื่องจากปฏิกิริยาการเผาไหม้ทำให้เกิดการระเหยของน้ำในแกลบออกมาสู่ห้องเผาไหม้ สำหรับปริมาณของคาร์บอนไดออกไซด์จะมีปริมาณเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่ออัตราส่วนสมมูลเพิ่มขึ้นเนื่องจากสัดส่วนของปริมาณของออกซิเจนที่ลดลง ปริมาณของคาร์บอนมอนอกไซด์ที่เกิดขึ้นจะมีปริมาณที่ค่อนข้างมากเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีของความชื้นเท่ากับ 7% และ 11% กรณีของ $\Phi = 1.2$ จะให้ปริมาณของคาร์บอนมอนอกไซด์ออกมามากที่สุดเท่ากับ 3,825 ppm

5.3.1.2 กรณีศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนสมมูล เมื่อ $\lambda = 0.15$

การศึกษาอิทธิพลของ Φ เมื่อ $\lambda = 0.15$ ในกรณีของเชื้อเพลิงแกลบมีความชื้นเท่ากับ 15% โดยน้ำหนัก ที่อัตราการป้อนแกลบเท่ากับ 0.3 kg/min ดังแสดงในรูปที่ 5.7 ข ที่ค่า $\Phi = 0.8$ จะพบว่าด้านล่างของเตาเผาจะมีอุณหภูมิที่ต่ำจะมีอุณหภูมิสูงที่ตำแหน่งติดกับท่อทิ้งเถ้า แต่เมื่อตำแหน่งในแนวความสูงของเตาเผาเพิ่มขึ้น จะมีอุณหภูมิที่ตำแหน่ง $r/R = 0.44$ และอุณหภูมิโดยเฉลี่ยที่เท่ากับ 500 องศาเซลเซียส กรณีของ $\Phi = 1.0$ ให้อุณหภูมิตัวบริเวณด้านล่างของเตาเผาเช่นกันแต่เมื่อถึงบริเวณกลางเตาจะให้อุณหภูมิที่สูงขึ้นและจะให้การกระจายอุณหภูมิที่สม่ำเสมอโดยสังเกตได้จากอุณหภูมิตั้งแต่กลางเตาจนกระทั่งถึงด้านบนของเตาเผา จะให้อุณหภูมิโดยเฉลี่ยเท่ากับ 600 องศาเซลเซียส และกรณีของ $\Phi = 1.2$ เป็นกรณีของอากาศที่ใช้ในการทดลองไม่เพียงพอต่อการเผาไหม้จะพบว่าการกระจายอุณหภูมิจะมีลักษณะใกล้เคียงกันกับทั้งสองกรณีแรกแต่จะให้อุณหภูมิที่ต่ำกว่ากรณีของ $\Phi = 1.0$ ถึงแม้ว่าจะมีอากาศชุดิยภูมิช่วยในการเผาไหม้ แต่เนื่องจากมีปริมาณออกซิเจนที่น้อยเกินไป

การศึกษาองค์ประกอบของก๊าซไอเสียที่เกิดจากการเผาไหม้ในกรณี $\lambda = 0.15$ เมื่อพิจารณาอิทธิพลของอัตราส่วนสมมูลพบว่ามีลักษณะเช่นเดียวกับกรณีของ $\lambda = 0.00$ คือปริมาณออกซิเจนจะลดลงและคาร์บอนไดออกไซด์จะเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนสมมูล ในขณะที่ปริมาณของคาร์บอนมอนอกไซด์ในกรณี $\Phi = 1.0$ ปล่อยออกมาน้อยที่สุดเท่ากับ 1,647 ppm ดังแสดงในรูปที่ 5.8

5.3.1.3 กรณีศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนสมมูล เมื่อ $\lambda = 0.25$

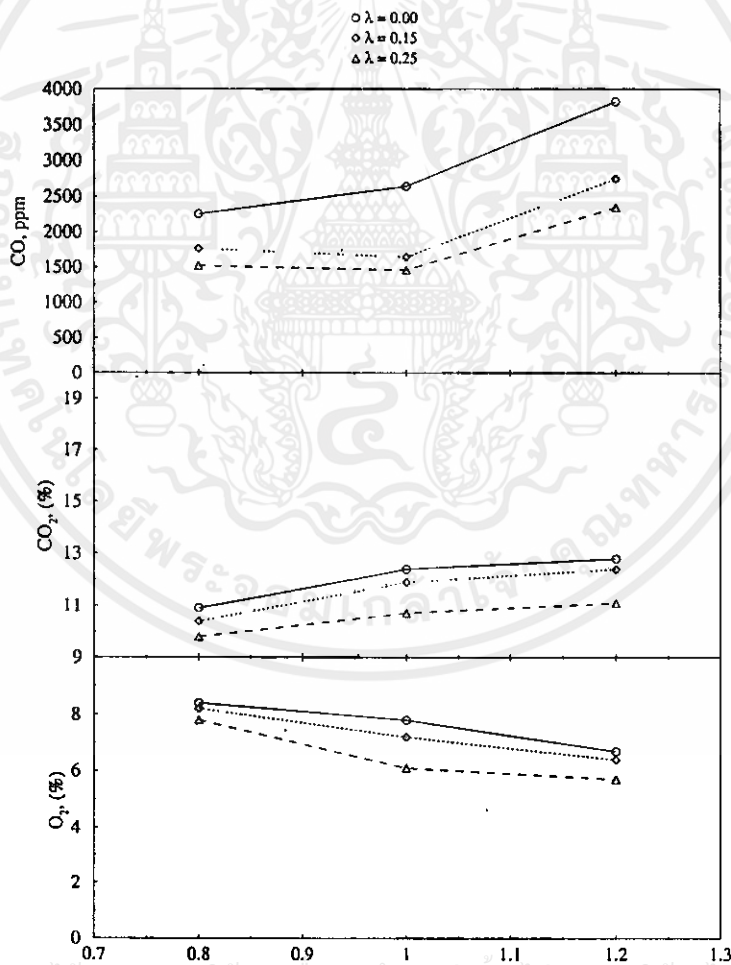
การศึกษาในกรณีของ $\lambda = 0.25$ เพื่อทำการศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนสมมูลของแกลบที่มีความชื้นเท่ากับ 15% โดยน้ำหนักและอัตราการป้อนแกลบเท่ากับ 0.3 kg/min จะพบว่ามี

แนวโน้มนั้นเช่นเดียวกับสองกรณีก่อนหน้านี้คือ $\Phi = 1.0$ จะให้อุณหภูมิสูงสุด โดยเฉลี่ยประมาณ 650 องศาเซลเซียส

การศึกษาองค์ประกอบของก๊าซไอเสียที่เกิดจากการเผาไหม้เพื่อศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนสมมูลก็มีแนวโน้มในทางเดียวกันกับสองกรณีก่อนหน้านี้เช่นกัน แต่จะมีการปล่อยปริมาณของคาร์บอนมอนอกไซด์ที่น้อยกว่าในกรณีของ $\Phi = 1.0$ คือเท่ากับ 1,462 ppm

5.3.2 อิทธิพลของปริมาณอากาศชุดิยภูมิต่ออากาศทั้งหมด (λ)

การศึกษาอิทธิพลของปริมาณอากาศชุดิยภูมิต่ออากาศทั้งหมดเพื่อศึกษาผลของการใส่อากาศชุดิยภูมิเพื่อช่วยในการหมุนวนและปริมาณของอากาศชุดิยภูมิต่ออากาศทั้งหมดเพื่อศึกษาเมื่อมีการปรับเพิ่มอากาศชุดิยภูมิมากขึ้นจะช่วยในการหมุนเผาไหม้เพิ่มขึ้นหรือไม่ โดยที่ในการศึกษาแบ่งออกเป็น 3 กรณี คือ กรณี $\lambda = 0.00$ เป็นกรณีของการให้อากาศปฐมภูมิเพียงอย่างเดียว กรณี $\lambda = 0.15$ เป็นกรณีของการแบ่งส่วนของอากาศทั้งหมดออกมาเป็นอากาศชุดิยภูมิเท่ากับ 15%



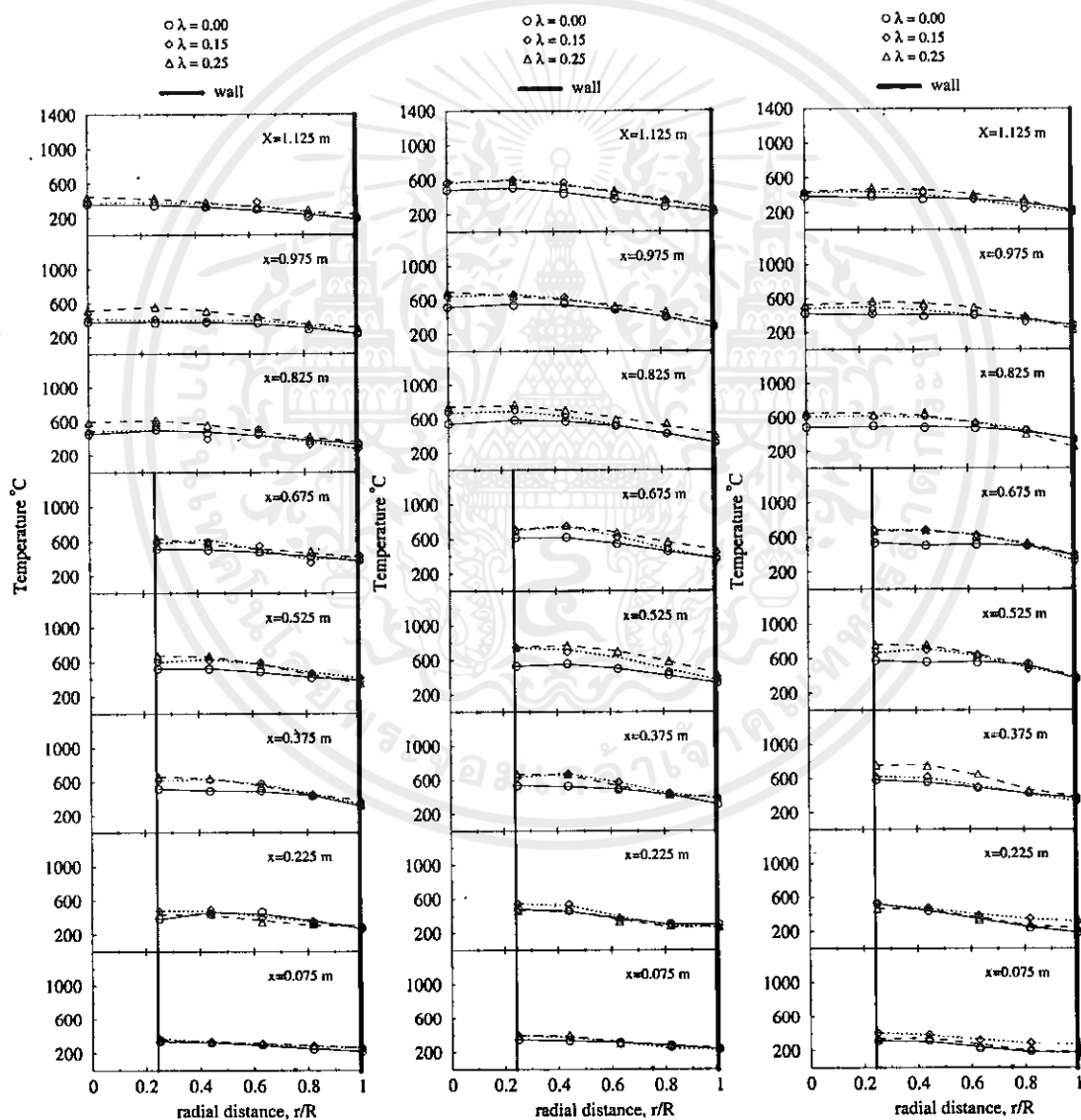
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อ ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

รูปที่ 5.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างก๊าซไอเสียกับอัตราส่วนสมมูล เมื่ออัตราการป้อนกลับเท่ากับ 0.3 kg/min ที่ความชื้น 15%

กรณี $\lambda = 0.25$ เป็นกรณีที่มีการฉีดอากาศชุดิยภูมิเข้าภายในห้องเผาไหม้เช่นกัน แต่จะมีปริมาณเท่ากับ 25% ของอากาศทั้งหมด ผลที่เกิดขึ้นจากการทดลองสามารถทำการวิเคราะห์ได้ดังนี้

5.3.2.1 กรณีศึกษาอิทธิพลของ λ เมื่อ $\Phi = 0.8$

ทำการศึกษาถึงอิทธิพลของ λ ในกรณีของปริมาณอากาศที่ใช้ในการทดลองเกินพอต่อปฏิกิริยาการเผาไหม้ ($\Phi = 0.8$) พบว่าผลของการฉีดอากาศชุดิยภูมิเข้าไปในห้องเผาไหม้เพื่อช่วยในการหมุนวนให้เชื้อเพลิงมีระยะเวลาอยู่ในห้องเผาไหม้นานขึ้นเพื่อจะสามารถจับตัวกับออกซิเจนในอากาศเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ได้มากขึ้นด้วย แต่เนื่องจากกรณีนี้มีปริมาณของออกซิเจนที่เพียงพอและความปั่นป่วนเนื่องจากอากาศชุดิยภูมิเพียงพอที่สามารถทำให้เกิดปฏิกิริยา



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ไปแจ้งหรือโฆษณาการค้า

รูปที่ 5.9 แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเตาเผาเมื่ออัตราการป้อนเชื้อเพลิงเท่ากับ 0.3 kg/min และความชื้นของแกลบ 15%

ที่สมบูรณ์ได้ แต่เนื่องจากแกลบในกรณีเป็นแกลบที่ขึ้นจึงเกิดปฏิกิริยาค่อนข้างยากกว่าในกรณีของแกลบแห้งเนื่องจากจะต้องมีกระบวนการในการไล่ความชื้นซึ่งเป็นสภาวะเหยในเชื้อเพลิงแข็งซึ่งจะใช้เวลาที่ยาวนานขึ้นจึงทำให้มีเวลาที่เชื้อเพลิงสามารถทำปฏิกิริยาการเผาไหม้ได้น้อยลงส่งผลให้พลังงานความร้อนน้อยลงด้วยและอุณหภูมิที่ให้ออกมาเกือบเท่ากับอุณหภูมิการติดไฟได้เองของแกลบอีกด้วยหากมีการควบคุมอัตราการป้อนไม่ดีพอก็จะเกิดการดับขึ้นได้

5.3.2.2 กรณีศึกษาอิทธิพลของ λ เมื่อ $\Phi = 1.0$

เป็นกรณีการศึกษาถึงอิทธิพลของ λ เมื่ออัตราส่วนสมมูลเท่ากับ 1.0 ของเชื้อเพลิงแกลบที่มีความชื้นเท่ากับ 15% โดยน้ำหนักและอัตราการป้อนแกลบเท่ากับ 0.3 kg/min พบว่าเมื่อมีการเพิ่มปริมาณของ λ สามารถช่วยในการเผาไหม้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์มากขึ้นดังจะเห็นได้ในรูปที่ 5.9 ข ของบริเวณกลางเตาซึ่งกรณีของการให้อากาศชุดยุมิเข้าไปจะส่งผลให้อุณหภูมิบริเวณดังกล่าวมีอุณหภูมิที่สูงกว่ากรณีที่ไม่มีการฉีดอากาศชุดยุมิเข้าสู่ห้องเผาไหม้เลย

5.3.2.3 กรณีศึกษาอิทธิพลของ λ เมื่อ $\Phi = 1.2$

เป็นการศึกษากรณีของอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้จริงน้อยกว่าอากาศที่คำนวณได้ตามทฤษฎี ดังแสดงในรูปที่ 5.9 ค จะพบว่าเมื่อไม่มีอากาศชุดยุมิจะมีอุณหภูมิที่ได้จากการเผาไหม้ต่ำกว่ากรณีของการมีอากาศชุดยุมิฉีดเข้าห้องเผาไหม้เช่นกันกับกรณีก่อนหน้านี้ และเมื่อมีปริมาณของอากาศชุดยุมิมากขึ้น ($\lambda = 0.25$) พบว่าจะให้อุณหภูมิสูงที่สุดเนื่องจากความแรงของอากาศที่ฉีดเข้ามาในห้องเผาไหม้สามารถช่วยในการผสมคลุกเคล้าเชื้อเพลิงกับอากาศได้ดียิ่งขึ้นและช่วยให้เชื้อเพลิงที่เกาะติดอยู่หลุดออกทำให้สามารถเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ของออกซิเจนกับเชื้อเพลิงส่วนที่เหลือได้ดียิ่งขึ้นส่งผลให้อุณหภูมิสูงขึ้นด้วยและผลของการทำให้เวลาที่เชื้อเพลิงอยู่ในห้องเผาไหม้ยาวนานขึ้นทำให้มีเวลาในการทำให้สภาวะเหยที่มีอยู่ในเชื้อเพลิงที่ปริมาณความชื้นมากขึ้นหมดไปได้และสามารถเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ได้ดียิ่งขึ้นด้วย

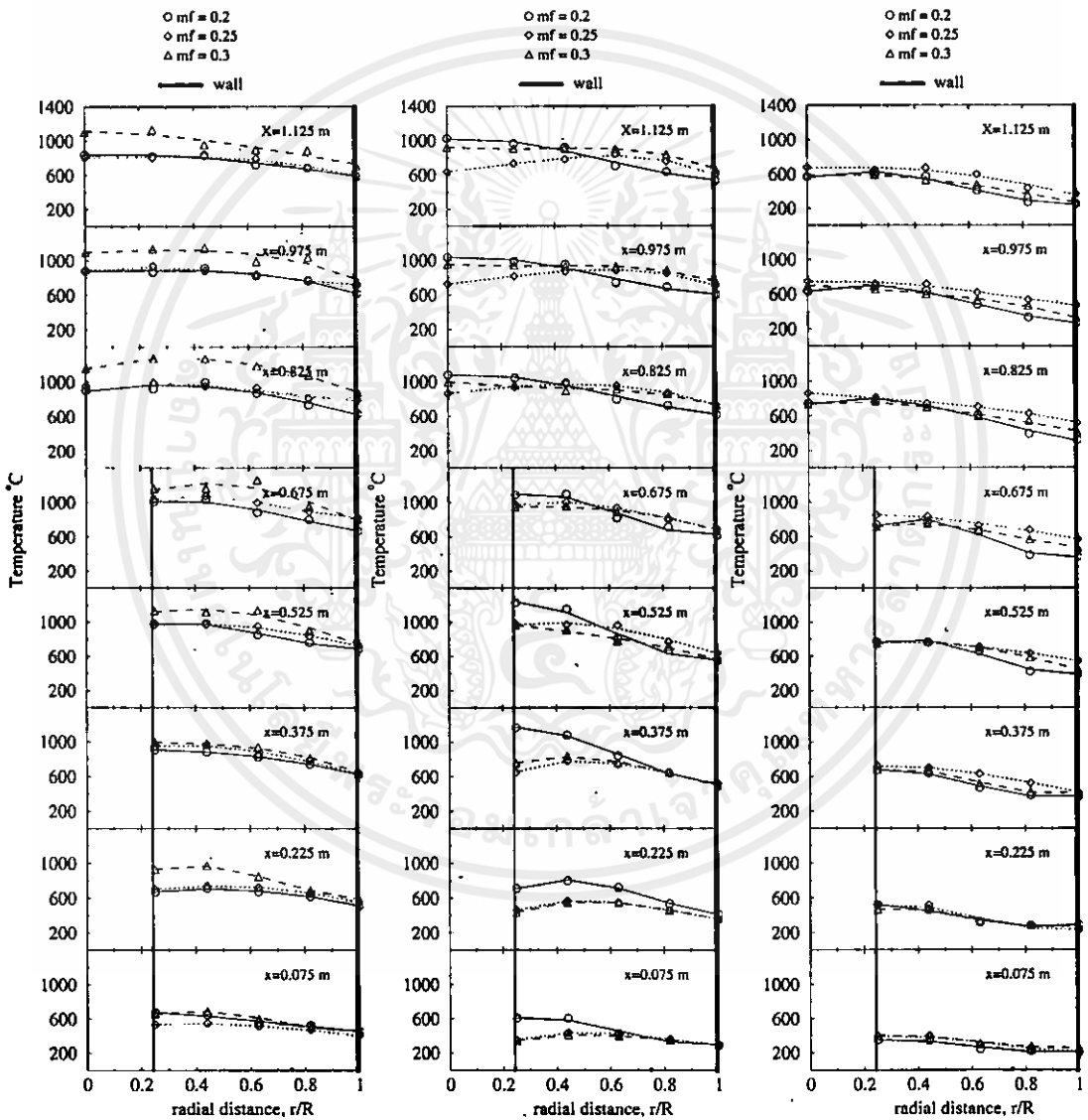
5.4 อิทธิพลของอัตราการป้อนแกลบ

การศึกษาคทดลองเพื่อศึกษาอิทธิพลของอัตราการป้อนแกลบที่มีต่อคุณลักษณะการเผาไหม้ในเตาเผาแบบบอร์เทคนี้ได้ทำการกำหนดอัตราการป้อนแกลบไว้ที่ 0.2, 0.25 และ 0.3 kg/min โดยทำการทดลองกับแกลบที่มีความชื้นเท่ากับ 7%, 11% และ 15% โดยน้ำหนัก สำหรับแต่ละอัตราการป้อน โดยจะพิจารณาถึงอุณหภูมิภายในเตาและก๊าซไอเสียที่ปล่อยออกมา ซึ่งผลการทดลองสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.10

5.4.1 อิทธิพลของอัตราการป้อนแกลบต่อการเผาไหม้ กรณีความชื้น 7%

จากผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 5.10 ก. พบว่าด้านล่างของเตาเผาจะมีอุณหภูมิต่ำและไม่เท่ากัน อีกทั้งยังมีเชื้อเพลิงที่ติดค้างอยู่และต้องอ้างอิงถึงค่าของอุณหภูมิที่แปรผันไปและจะค่อยๆ มีอุณหภูมิสูงจนกระทั่งถึงบริเวณกลางเตาและจะลดลงที่ด้านบนของเตา เมื่อพิจารณาในแนวรัศมีจะพบว่าอุณหภูมิจะสูงบริเวณกึ่งกลางของวงแหวน และผลของอัตราการป้อนแกลบพบ

ว่าอัตราการป้อนแกลบเท่ากับ 0.2 kg/min จะให้อุณหภูมิต่ำกว่า อัตราการป้อนแกลบเท่ากับ 0.25 และ 0.3 kg/min ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อปริมาณของแกลบน้อยจึงมีสารตั้งต้นในการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ได้น้อยจึงมีการปลดปล่อยพลังงานความร้อนน้อยมีผลให้อุณหภูมิภายในเตาเผาต่ำ และจะสังเกตได้อย่างชัดเจนที่ด้านบนของตัวเตา เมื่ออัตราการป้อนแกลบมากขึ้นอุณหภูมิด้านบนของเตาเผาจะสูงขึ้นด้วยเพราะยังคงมีสารตั้งต้นที่พอจะเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้มากกว่าอัตราการป้อนแกลบที่น้อยกว่า แต่อย่างไรก็ตามตำแหน่งที่อุณหภูมิสูงสุดจะอยู่ระหว่าง $x = 0.525 - 0.825$ เมตร เนื่องจากเป็นบริเวณที่เชื้อเพลิงเกิดการเผาไหม้มากที่สุด



ก. MC = 7%

ข. MC = 11%

ค. MC = 15%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อให้บริการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่หรือใช้เพื่อการพาณิชย์ด้านการค้า
รูปที่ 5.10 แสดงการกระจายอุณหภูมิภายในเตาเผาที่ $\Phi = 1.0$ และ $\lambda = 0.25$

การศึกษาองค์ประกอบก๊าซไอเสียที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ที่ความชื้นของแกลบเท่ากับ 7% โดยน้ำหนัก พบว่าปริมาณของก๊าซออกซิเจนที่เหลือจากการเผาไหม้ที่อัตราการป้อนเท่ากับ 0.2 kg/min มากที่สุด ดังรูปที่ 5.11 และอัตราการป้อนแกลบเพิ่มขึ้น ปริมาณของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มากขึ้นด้วยแสดงให้เห็นว่าการเผาไหม้ของแกลบที่เพิ่มขึ้น ปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์มีค่าใกล้เคียงกันมากซึ่งมีค่าต่ำแต่ที่อัตราการป้อนเท่ากับ 0.3 kg/min มีค่าน้อยที่สุด แสดงว่ามีการเผาไหม้ที่ดีและเมื่อสังเกตดูจากกราฟอุณหภูมิในรูปที่ 5.10 ก. ก็เห็นได้ว่าที่อัตราการป้อนแกลบเท่ากับ 0.3 kg/min มีอุณหภูมิสูงเนื่องจากเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ที่สมบูรณ์จึงเป็นผลให้มีปริมาณของคาร์บอนมอนอกไซด์ต่ำ

5.4.2 อิทธิพลของอัตราการป้อนแกลบต่อการเผาไหม้ กรณีความชื้น 11%

ผลของอัตราการป้อนแกลบที่มีต่อการเผาไหม้ในกรณีของแกลบที่มีความชื้นเท่ากับ 11% โดยน้ำหนัก แสดงได้ดังรูปที่ 5.10 ข. จะพบว่าด้านล่างของเตาเผาจะมีอุณหภูมิค่อนข้างต่ำและจะค่อย ๆ สูงขึ้นเมื่อขึ้นสู่ด้านบน แต่จะมีอุณหภูมิต่ำกว่าในกรณีของเชื้อเพลิงแกลบที่มีความชื้นเท่ากับ 7% และจะเห็นว่าด้านล่างถึงแม้ว่าจะมีอัตราการป้อนแกลบที่มากขึ้นแต่อุณหภูมิที่ได้จะมีค่าไม่แตกต่างกันมากนักเพราะเมื่ออัตราการป้อนแกลบมากขึ้นจะต้องใช้ปริมาณความร้อนในการไล่ความชื้นมากขึ้นด้วย แต่อย่างไรก็ตามเมื่อถึงบริเวณด้านบนของเตาเผาพบว่าเมื่ออัตราการป้อนมากขึ้นจะให้อุณหภูมิที่สูงขึ้นเนื่องจากยังคงมีปริมาณของแกลบเหลือพอที่จะเกิดการเผาไหม้ขึ้นอีกจึงส่งผลให้มีอุณหภูมิสูงมากกว่าอัตราการป้อนแกลบที่น้อยกว่า

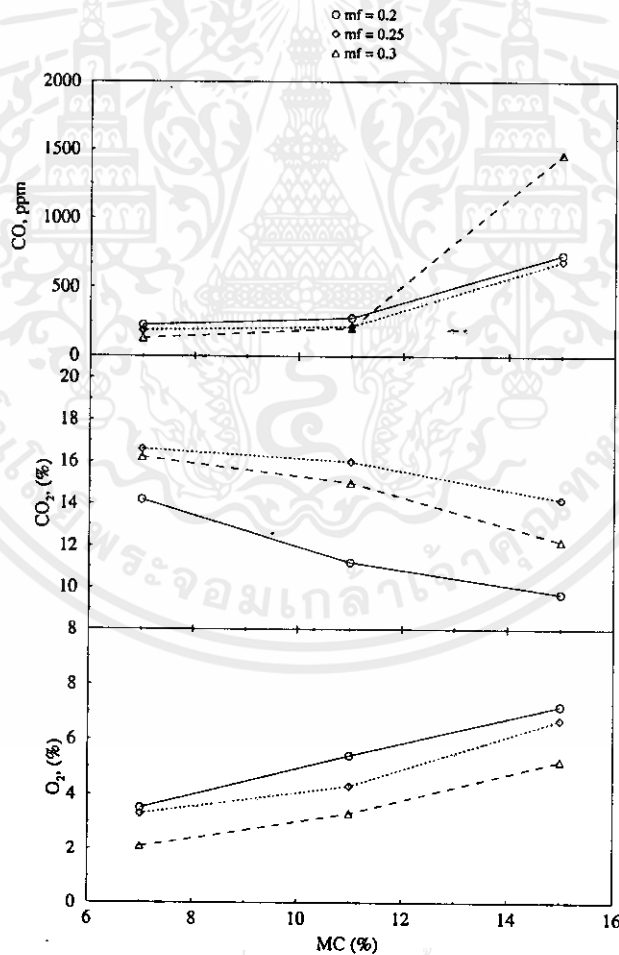
ผลของก๊าซไอเสียที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้สามารถวิเคราะห์ได้ว่าเมื่ออัตราการป้อนแกลบเพิ่มสูงขึ้นปริมาณของก๊าซออกซิเจนลดลงและปริมาณของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ลดลงเช่นกัน ซึ่งมีแนวโน้มเช่นเดียวกับกรณีของความชื้นเท่ากับ 7% แต่ปริมาณของออกซิเจนจะสูงกว่าและปริมาณของคาร์บอนไดออกไซด์จะน้อยกว่ากรณีของความชื้นเท่ากับ 7% เมื่อพิจารณาผลของคาร์บอนมอนอกไซด์ที่เกิดขึ้นก็มีลักษณะเดียวกับกรณีของความชื้น 7% คือ อัตราการป้อนแกลบเพิ่มขึ้นปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์จะต่ำกว่า

5.4.3 อิทธิพลของอัตราการป้อนแกลบต่อการเผาไหม้ กรณีความชื้น 15%

การศึกษาผลของอุณหภูมิที่อัตราการป้อนแกลบต่าง ๆ โดยที่เชื้อเพลิงแกลบมีค่าเท่ากับ 15% จะพบว่าอุณหภูมิด้านล่างของเตาเผามีค่าต่ำทั้งสามอัตราการป้อนและจะมีอุณหภูมิสูงขึ้นเมื่อตำแหน่งสูงขึ้นในแนวความสูง เมื่อทำการพิจารณาอิทธิพลของอัตราการป้อนแกลบจะพบว่าอัตราการป้อนแกลบเท่ากับ 0.25 kg/min จะให้อุณหภูมิสูงกว่าอัตราการป้อนแกลบเท่ากับ 0.2 kg/min เนื่องจากที่อัตราการป้อนแกลบสูงกว่าจะมีปริมาณของเชื้อเพลิงที่สามารถเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ได้มากกว่าซึ่งจะมีการปลดปล่อยพลังงานความร้อนออกมาสูงส่งผลให้มีอุณหภูมิสูงขึ้นด้วย แต่สำหรับอัตราการป้อนแกลบเท่ากับ 0.3 kg/min ให้อุณหภูมิต่ำกว่าอัตราการป้อนแกลบเท่ากับ 0.25 kg/min เนื่องจากเมื่ออัตราการป้อนแกลบสูงขึ้นปริมาณของแกลบที่อยู่ในเตาเผามากกว่า

อัตราการป้อนแกลบที่น้อยกว่าซึ่งหากเชื้อเพลิงนี้สามารถเกิดปฏิกิริยาได้อย่างสมบูรณ์จะสามารถให้อุณหภูมิที่สูงกว่า แต่ปัจจัยของการเผาไหม้ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของการเผาไหม้, เวลาที่ใช้ในการเผาไหม้ และความปั่นป่วนภายในห้องเผาไหม้ ซึ่งจากเหตุผลจะเห็นได้ว่าเมื่อแกลบที่มีความชื้นสูงเข้าสู่ห้องเผาไหม้มากจะต้องใช้พลังงานความร้อนมากในการไล่ความชื้นที่มีอยู่ในแกลบและเมื่อต้องใช้พลังงานความร้อนที่มีอยู่ในห้องเผาไหม้มากขึ้น ในขณะที่มีการปลดปล่อยพลังงานความร้อนที่เกิดปฏิกิริยาที่สมบูรณ์น้อยลงจึงส่งผลให้พลังงานความร้อนลดลงด้วย และเมื่อปริมาณความชื้นเพิ่มสูงขึ้นจะต้องใช้เวลาในการไล่ความชื้นที่มีอยู่ในเชื้อเพลิงแกลบนานขึ้นซึ่งกว่าที่เชื้อเพลิงจะเกิดปฏิกิริยาของคาร์บอนกับออกซิเจนซึ่งจะให้พลังงานร้อนสูงจะเกิดขึ้นบริเวณด้านบนของห้องเผาไหม้ แต่ไม่สามารถที่จะเกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์เชื้อเพลิงก็จะหลุดออกจากห้องเผาไหม้ไปเสียก่อน

การศึกษาผลของอัตราการป้อนแกลบต่อการเผาไหม้ในเตาเผาแบบวอร์เทคที่ความชื้นของเชื้อเพลิงแกลบเท่ากับ 15% พบว่าเมื่ออัตราการป้อนแกลบเพิ่มขึ้นปริมาณของออกซิเจนก็จะ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

รูปที่ 5.11 ความสัมพันธ์ระหว่างก๊าซไอเสียกับปริมาณความชื้นของแกลบ ที่อัตราการป้อนต่าง ๆ ใช้เมื่อ $\Phi = 1.0$ และ $\lambda = 0.25$

มากขึ้นด้วยเนื่องจากความชื้นในแกลบทำให้เกิดการเผาไหม้ที่แย่งและ ความชื้นในแกลบคือน้ำซึ่งจะประกอบด้วยไฮโดรเจนกับออกซิเจนแตกตัวออกทำให้มีปริมาณออกซิเจนมากขึ้นด้วยจึงส่งผลให้ปริมาณของออกซิเจนที่เหลือจากการเผาไหม้เพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการป้อนแกลบเพิ่มขึ้น และเมื่อพิจารณาปริมาณของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะพบว่าอัตราการป้อนแกลบเท่ากับ 0.25 kg/min ให้ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์มากที่สุดแสดงให้เห็นว่ามีการเผาไหม้ที่ดีกว่าอีกสองอัตราการป้อน และเมื่อพิจารณาที่อัตราการป้อนเดียวกันพบว่าเมื่อปริมาณความชื้นของเชื้อเพลิงมากขึ้นปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์น้อยลงแต่จะลดลงอย่างมากเมื่ออัตราการป้อนแกลบเท่ากับ 0.3 kg/min ที่ความชื้นของแกลบเท่ากับ 15% และผลของก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์จะพบว่าที่อัตราการป้อนแกลบเท่ากับ 0.3 kg/min ให้ปริมาณคาร์บอนมอนนอกไซด์ออกมามากที่สุดเนื่องจากเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์

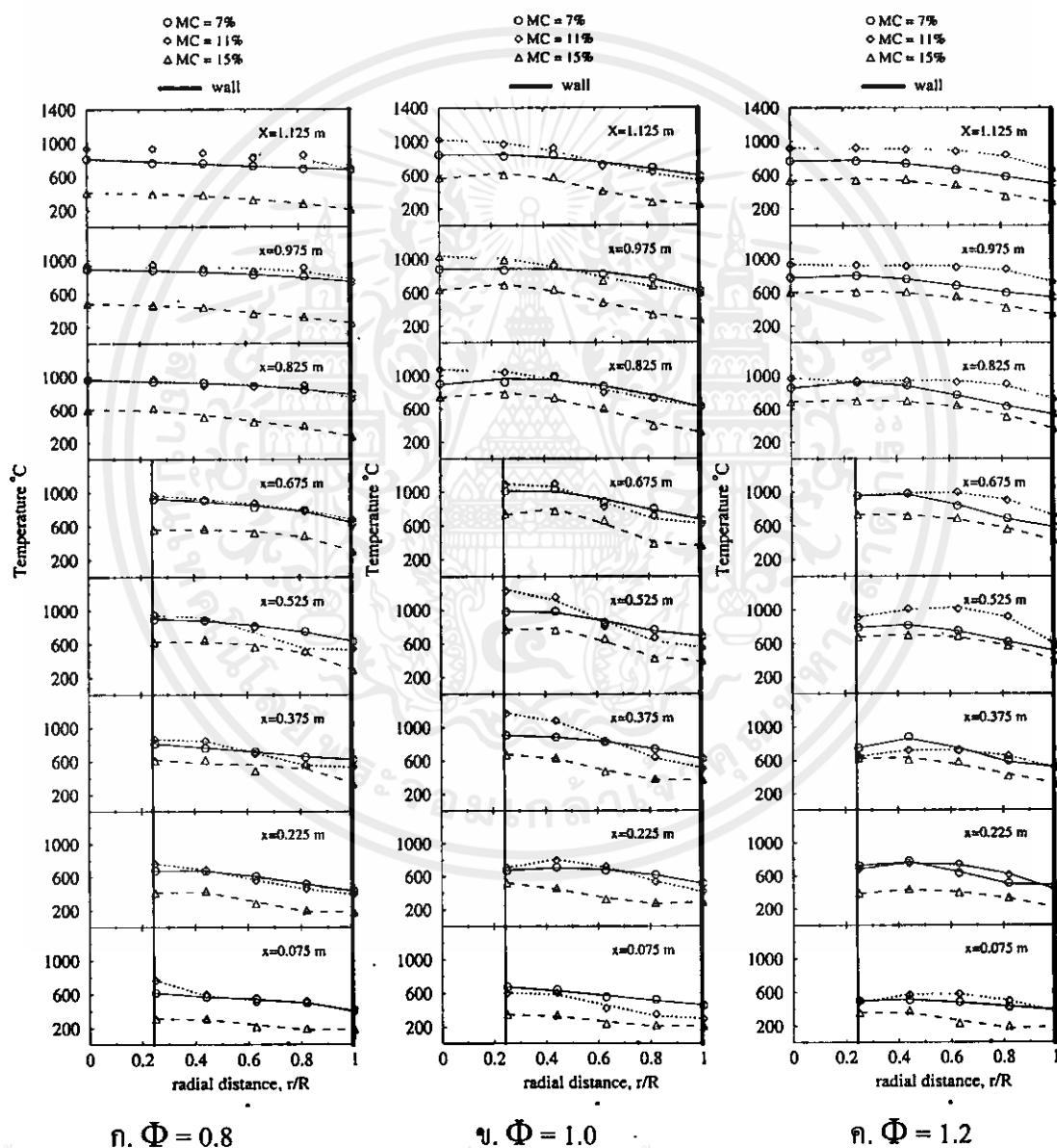
5.5 อิทธิพลของความชื้นของแกลบ

โดยปกติเชื้อเพลิงแกลบที่ได้จากระบวนการสีข้าวที่ได้จากโรงสีต่าง ๆ เมื่อนำมาทำการวัดเพื่อหาปริมาณความชื้นที่มีอยู่ในแกลบนั้นจะมีค่าอยู่ในช่วง 9 – 12% โดยน้ำหนักและในการทดลองนี้ผู้วิจัยได้นำแกลบที่ใช้ในการทดลองทำการทดสอบเพื่อหาค่าเฉลี่ยของปริมาณความชื้นที่มีอยู่ในแกลบที่ใช้ในการทดลองพบว่ามีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 11% เพราะฉะนั้นในการทดลองเพื่อศึกษาอิทธิพลของความชื้นของเชื้อเพลิงแกลบต่อคุณลักษณะการเผาไหม้นี้ได้ทำการกำหนดให้เชื้อเพลิงแกลบมีปริมาณความชื้นต่าง ๆ กันจำนวน 3 ค่า คือ ความชื้นเท่ากับ 7% โดยน้ำหนัก ซึ่งเป็นปริมาณความชื้นที่น้อยกว่าแกลบปกติ ความชื้นเท่ากับ 11% โดยน้ำหนัก เป็นกรณีของเชื้อเพลิงแกลบที่มีปริมาณความชื้นเท่ากับแกลบปกติ และความชื้นเท่ากับ 15% โดยน้ำหนัก เป็นกรณีของเชื้อเพลิงแกลบที่มีความชื้นมากกว่าแกลบปกติ และในการทดลองเราได้ใช้แกลบหยาบที่ได้จากโรงสีซึ่งถือใช้สมมติฐานที่ว่าแกลบที่นำมาใช้การทดลองมีขนาดเท่ากับคือขนาด 2 มม. x 8 มม. โดยในการทดลองเรานำเชื้อเพลิงแกลบที่ได้จากโรงสีโดยการบรรจุเชื้อเพลิงแกลบเหล่านี้ใส่ถุงดำและทำการมัดปากถุงให้แน่นเพื่อป้องกันอากาศภายนอกเข้าทำให้ปริมาณความชื้นในแกลบเปลี่ยนแปลงและจากการทดลองสามารถแสดงผลที่ได้ดังนี้

5.5.1 อิทธิพลของความชื้น กรณีของอัตราการป้อนแกลบเท่ากับ 0.2 kg/min

ในการศึกษาถึงอิทธิพลของความชื้นในเชื้อเพลิงแกลบที่มีผลต่อการเผาไหม้ เมื่ออัตราการป้อนแกลบมีค่าเท่ากับ 0.2 กิโลกรัมต่อนาที สามารถแสดงผลได้ดังกราฟรูปที่ 5.12 ซึ่งจากการแสดงการกระจายของอุณหภูมิภายในเตาเผาซึ่งเป็นค่าที่บ่งบอกถึงผลที่เกิดจากการเผาไหม้เนื่องจากหากมีอุณหภูมิสูงแสดงว่าเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงแกลบได้ดี ซึ่งจะพบว่าอุณหภูมิด้านล่างของเตาเผาจะมีค่าค่อนข้างต่ำกว่าบริเวณส่วนกลางและส่วนบนของเตาเผาทุก ๆ ความชื้นของ

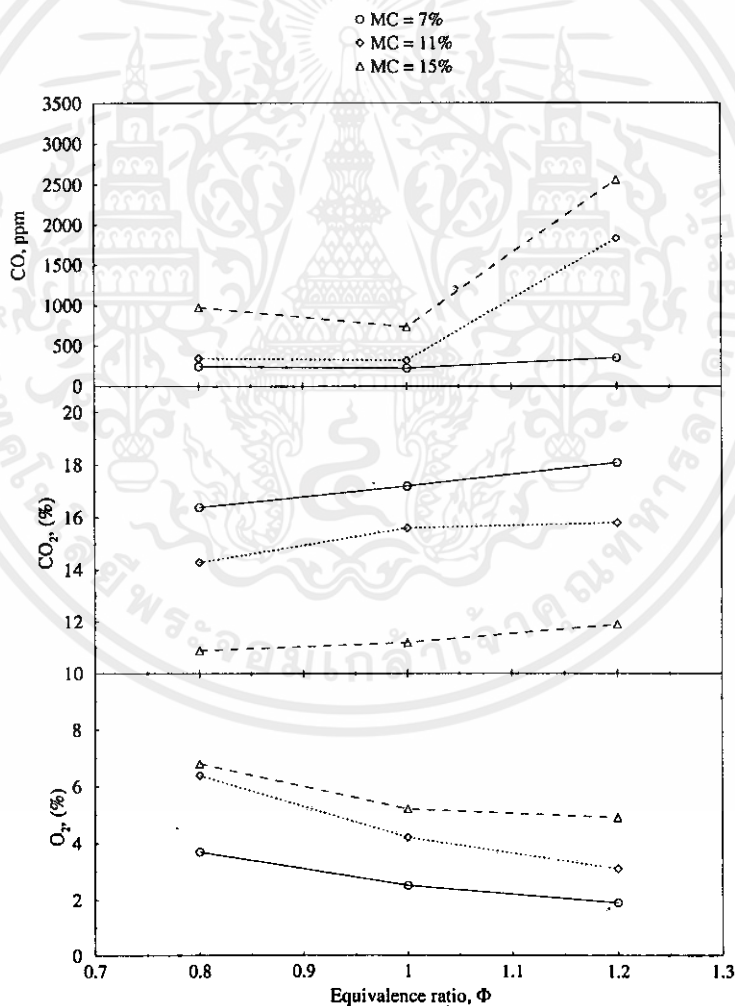
เชื้อเพลิงแกลบ แสดงให้เห็นว่าบริเวณดังกล่าวบริเวณดังกล่าวมีการเกิดปฏิกิริยาที่มีการปลดปล่อยพลังงานออกมาไม่สูง ซึ่งเป็นผลของความชื้นที่มีอยู่ในแกลบ แต่หากสังเกตให้ดีจะพบว่าความชื้นแกลบเท่ากับ 7% โดยน้ำหนักจะให้อุณหภูมิสูงตั้งแต่เทอร์โมคัพเบิลตัวที่ 3 เนื่องจากไม่ต้องใช้พลังงานมากในการทำให้ความชื้นในเชื้อเพลิงหมดไป และที่บริเวณด้านบนของเตาเผาพบว่าความชื้นเท่ากับ 7% และ 11% จะให้อุณหภูมิใกล้เคียงกัน เนื่องจากที่บริเวณดังกล่าวความชื้นของแกลบที่ความชื้นเท่ากับ 11% ไม่มีแล้วทำให้เกิดปฏิกิริยาของคาร์บอนและออกซิเจนซึ่งจะให้พลังงานที่สูงมากออกมาทำให้อุณหภูมิค่อนข้างสูงพอ ๆ กับแกลบที่มีความชื้นเท่ากับ 7% และเมื่อความชื้นของแกลบเท่ากับ 15% จะสังเกตได้ว่าให้อุณหภูมิที่ต่ำกว่าความชื้นอื่น ๆ ทั้งหมดนี้เนื่องจากจะต้อง



รูปที่ 5.12 แสดงการกระจายอุณหภูมิภายในเตาเผาที่อัตราการป้อนแกลบเท่ากับ 0.2 kg/min และ $\lambda = 0.25$

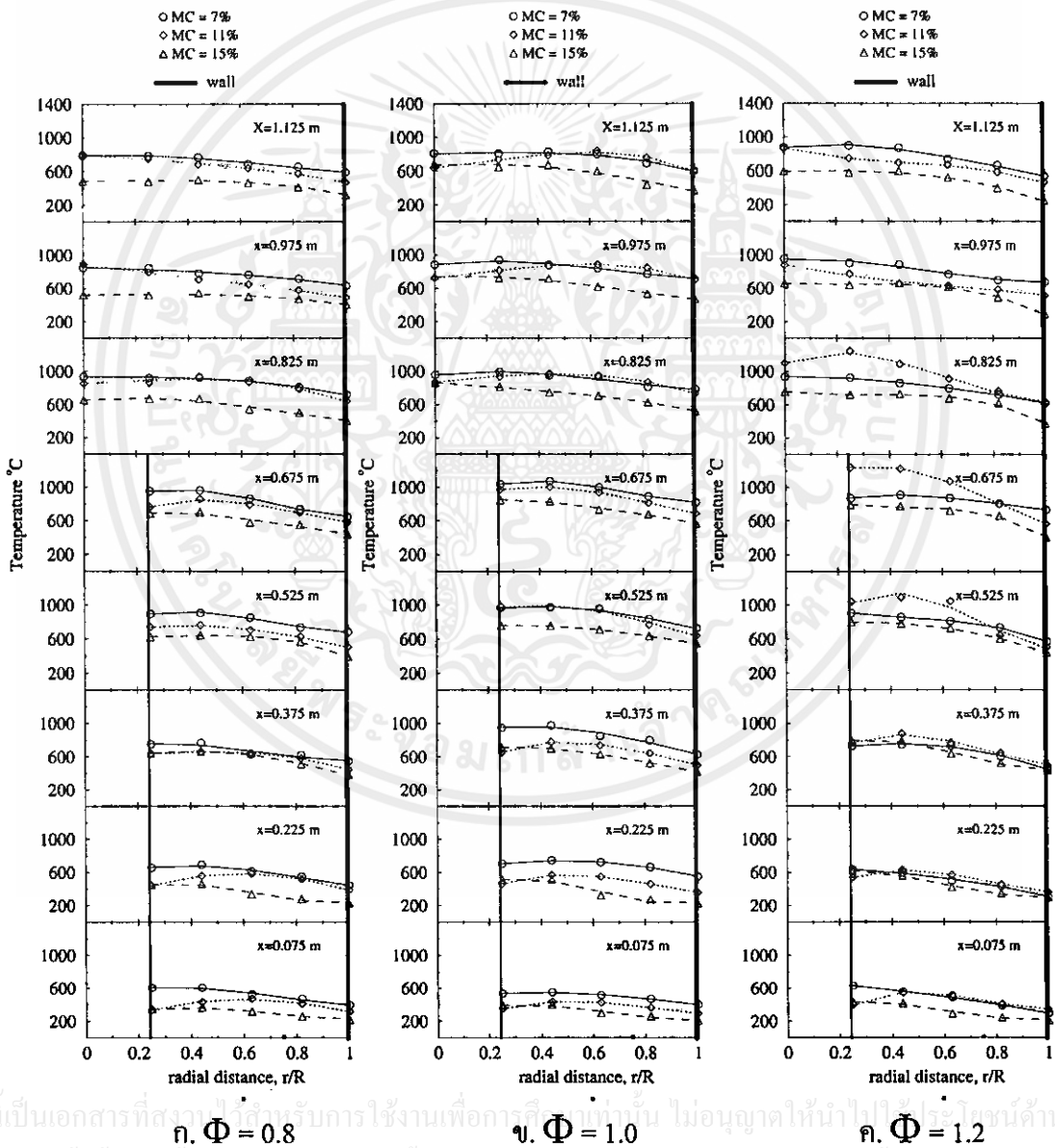
ใช้พลังงานในการไล่ความชื้นที่มีอยู่มากส่งผลให้อุณหภูมิต่ำและพลังงานที่เกิดจากปฏิกิริยาของคาร์บอนและออกซิเจนไม่สามารถเกิดขึ้นได้มากพอเชื้อเพลิงก็ต้องหลุดออกจากห้องเผาไหม้ไปก่อน ซึ่งแสดงให้เห็นในกรณีที่อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ 0.8 ซึ่งเป็นกรณีที่ใช้อากาศมากกว่าอากาศทางทฤษฎีทำให้ลมที่เข้าภายในเตาเผาผลทำให้เชื้อเพลิงหลุดออกจากห้องเผาไหม้เร็ว แต่หากให้อากาศน้อยกว่าอากาศทางทฤษฎีหรือกรณีของอัตราส่วนสมมูลเท่ากับ 1.2 แกลบที่มีปริมาณความชื้นเท่ากับ 15% ก็จะปลดปล่อยพลังงานที่ได้บริเวณด้านบนของเตาได้มากขึ้นดังแสดงในรูปที่ 5.12 ค.

ศึกษาองค์ประกอบของก๊าซไอเสียที่ออกจากเตาที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ที่ความชื้นของแกลบต่าง ๆ กันที่อัตราการป้อนแกลบเท่ากับ 0.2 kg/min ดังแสดงในรูปที่ 5.13 พบว่า เมื่อความชื้นเพิ่มขึ้นก๊าซออกซิเจนที่เหลือจากการเผาไหม้จะเพิ่มขึ้นด้วย แสดงให้เห็นว่าเกิดปฏิกิริยา



รูปที่ 5.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างองค์ประกอบของก๊าซไอเสียกับอัตราส่วนสมมูล เมื่อความชื้นในเชื้อเพลิงแกลบมีค่าต่างกัน ที่อัตราการป้อนแกลบเท่ากับ 0.2 kg/min

การเผาไหม้ที่น้อยลง ทำให้ปริมาณออกซิเจนที่ให้เกิดปฏิกิริยากับคาร์บอนในเชื้อเพลิงแกลบมีปริมาณเพิ่มขึ้นและเมื่อความชื้นในแกลบเพิ่มขึ้นออกซิเจนที่อยู่ในรูปของน้ำในแกลบมากขึ้นเมื่อเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้จะเกิดการแตกตัวออกมาเป็นออกซิเจนอิสระทำให้ปริมาณของออกซิเจนที่เหลือออกมาจากการเผาไหม้เพิ่มขึ้นด้วย และเมื่อพิจารณาผลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์พบว่าเมื่อปริมาณของคาร์บอนไดออกไซด์มีปริมาณลดลงเมื่อปริมาณความชื้นในแกลบเพิ่มขึ้นแสดงให้เห็นว่าเกิดการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์เนื่องจากปฏิกิริยาการเผาไหม้ที่สมบูรณ์จะได้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์กับน้ำออกมาเป็นผลิตภัณฑ์ และในขณะเดียวกันจะพบว่าปริมาณของคาร์บอนมอนอกไซด์มีปริมาณเพิ่มขึ้นเมื่อความชื้นในแกลบเพิ่มขึ้นซึ่งเป็นสารที่เกิดจากปฏิกิริยาการเผาไหม้ที่ไม่



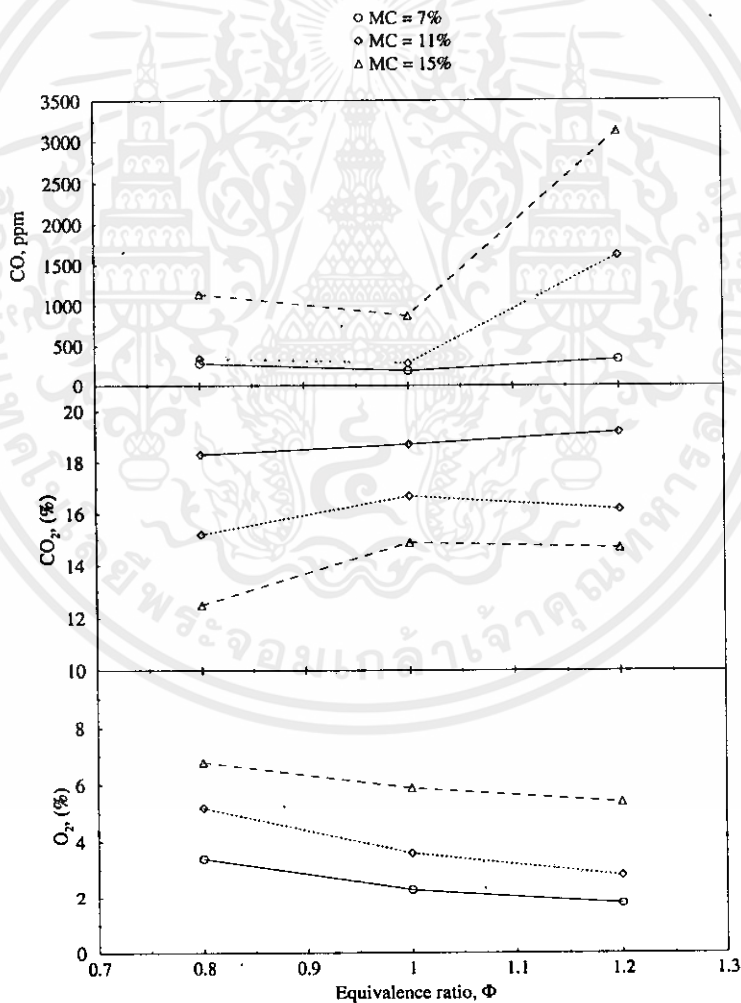
รูปที่ 5.14 แสดงการกระจายอุณหภูมิภายในเตาเผา ที่อัตราการป้อนแกลบเท่ากับ 0.25 kg/min และ $\lambda = 0.25$

สมบูรณ์และมีการปลดปล่อยพลังงานที่น้อยกว่ากรณีของการเกิดคาร์บอนไดออกไซด์จึงส่งผลให้อุณหภูมิภายในเตาเผาต่ำกว่าอีกด้วย

5.5.2 อิทธิพลของความชื้น กรณีของอัตราการป้อนแกลบเท่ากับ 0.25 kg/min

การศึกษาผลของความชื้นที่มีต่อการเผาไหม้ในกรณีของอัตราการป้อนเท่ากับ 0.25 kg/min สามารถแสดงผลการทดลองได้ดังรูปที่ 5.14 ซึ่งแนวโน้มของการกระจายอุณหภูมิจะเป็นไปในลักษณะเดียวกับกรณีของอัตราการป้อนแกลบเท่ากับ 0.2 kg/min แต่อุณหภูมิภายในเตาเผาจะมีค่าสูงกว่าเนื่องในกรณีนี้มีปริมาณของเชื้อเพลิงแกลบหรือเป็นสารตั้งต้นในการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้มากกว่ากรณีของอัตราการป้อนเท่ากับ 0.2 kg/min

การศึกษาองค์ประกอบของก๊าซไอเสียที่เกิดจากการเผาไหม้ในกรณีของอัตราการป้อนแกลบเท่ากับ 0.25 kg/min มีลักษณะเดียวกับกรณีของอัตราการป้อนแกลบเท่ากับ 0.2 kg/min เช่นกัน แต่ปริมาณของออกซิเจนที่เหลือจากการเผาไหม้มีปริมาณน้อยกว่าแสดงว่าเกิดการเผาไหม้ที่

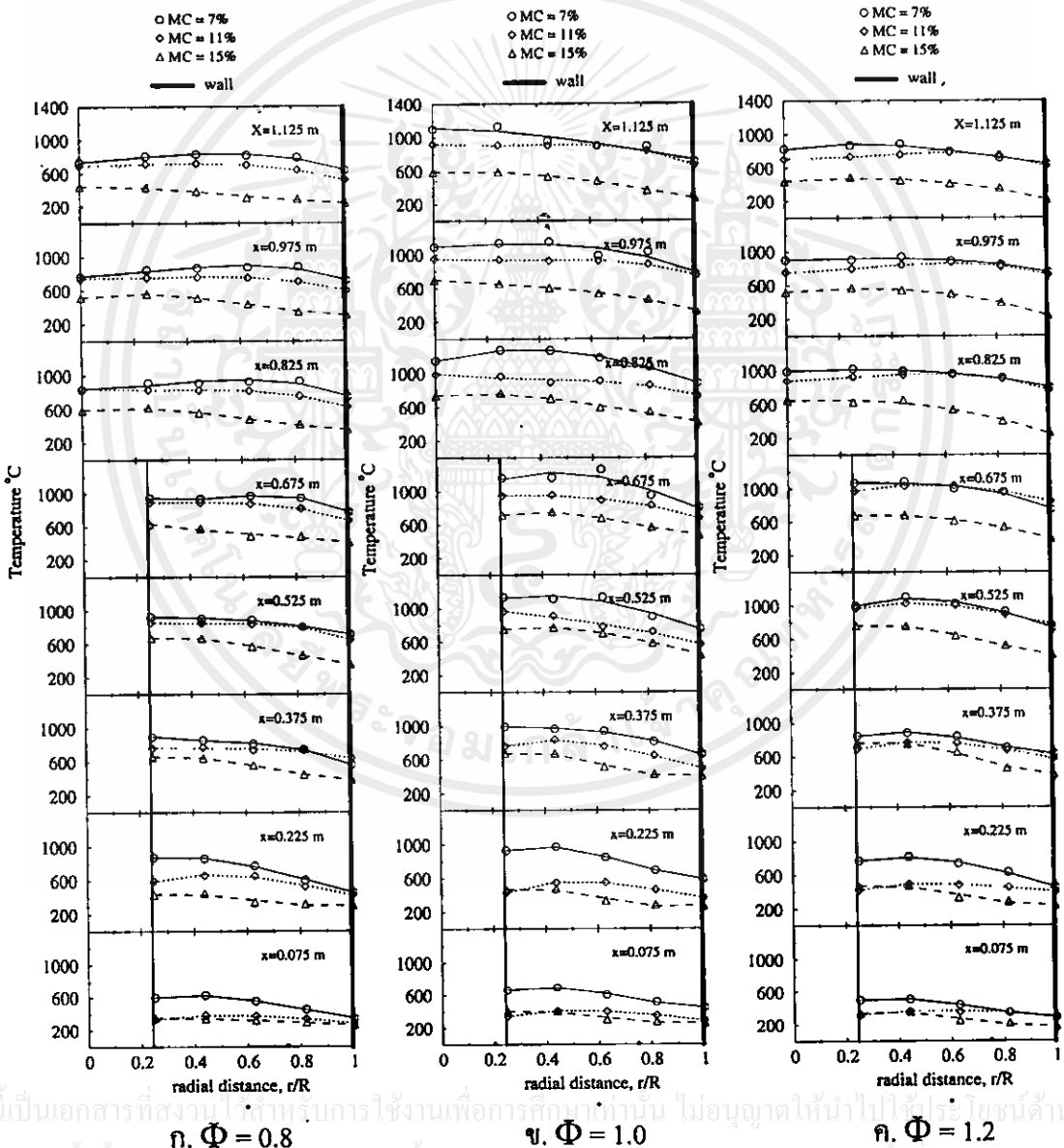


รูปที่ 5.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างองค์ประกอบของก๊าซไอเสียกับอัตราส่วนสมมูล เมื่อความชื้นในเชื้อเพลิงแกลบมีค่าต่างกัน ที่อัตราการป้อนแกลบเท่ากับ 0.25 kg/min

ดีกว่า และเมื่อพิจารณาปริมาณของคาร์บอนไดออกไซด์พบว่ามีปริมาณมากกว่ากรณีของอัตราการป้อนเท่ากับ 0.2 kg/min ปริมาณของคาร์บอนมอนอกไซด์มีปริมาณมากขึ้นเมื่อความชื้นเพิ่มขึ้นเช่นกันและเมื่อความชื้นเท่ากับ 15% ปล่องปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์มากที่สุดถึง 3,123 ppm

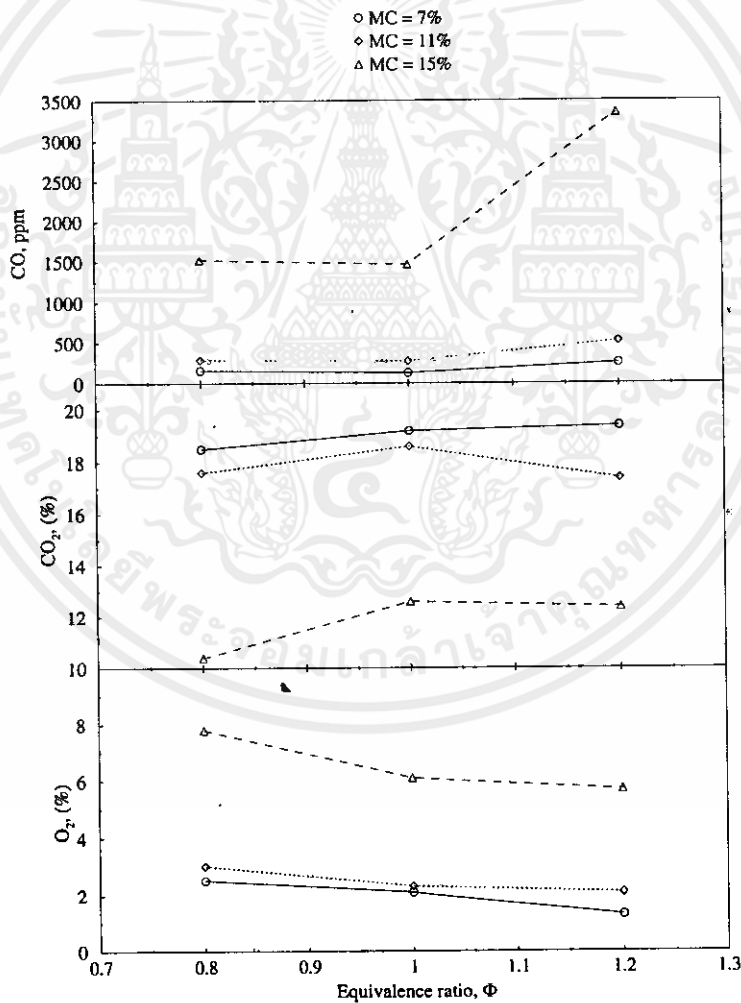
5.5.3 อิทธิพลของความชื้น กรณีของอัตราการป้อนเท่ากับ 0.3 kg/min

การศึกษาถึงอิทธิพลของความชื้นของแกลบต่ออุณหภูมิภายในเตาเผาที่อัตราการป้อนเท่ากับ 0.3 kg/min และทำการกำหนดอัตราส่วนอากาศต่อน้ำมันต่ออากาศทั้งหมดเท่ากับ 0.25 สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.16 ทำการพิจารณาที่อัตราส่วนสมมูล 0.8 พบว่าปริมาณความชื้นเท่ากับ 7% โดยน้ำหนัก ให้ปริมาณความร้อนออกมามากที่สุดแต่ด้านล่างของเตาเผา และเมื่อถึงบริเวณกลาง



รูปที่ 5.16 แสดงการกระจายอุณหภูมิภายในเตาเผาที่อัตราการป้อนเท่ากับ 0.3 kg/min และ $\lambda = 0.25$

เตาเผาปริมาณความชื้นเท่ากับ 11% จะให้ความร้อนใกล้เคียงกับความชื้นเท่ากับ 7% แต่ในขณะที่เดียวกันความชื้นเท่ากับ 15% ก็ยังคงให้อุณหภูมิที่ต่ำกว่าอยู่ และเมื่อถึงบริเวณด้านบนของเตาเผาพบว่าความชื้นเท่ากับ 7% และ 11% ให้อุณหภูมิที่เกือบจะเท่ากัน แต่ความชื้นเท่ากับ 15% ยังคงให้อุณหภูมิที่ต่ำกว่าเช่นเดิม เมื่อพิจารณาที่อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ 1.0 พบว่ามีลักษณะเดียวกับกรณีของอัตราส่วนสมมูลเท่ากับ 0.8 แต่จะให้อุณหภูมิที่ค่อนข้างสูงกว่าเนื่องจากไม่ต้องสูญเสียความร้อนไปในการทำให้อากาศส่วนเกินมีอุณหภูมิสูงเท่ากับอุณหภูมิภายในเตาเผาด้วย และเมื่อทำการพิจารณาที่อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ 1.2 พบได้อย่างชัดเจนว่าความชื้นเท่ากับ 7% โดยน้ำหนักให้ความร้อนสูงกว่าความชื้นเท่ากับ 11% และ 15% ตามลำดับ เนื่องจากกรณีนี้มีปริมาณอากาศน้อยกว่าทางทฤษฎีหรือมีปริมาณออกซิเจนไม่เพียงพอต่อการทำปฏิกิริยาการเผาไหม้และเมื่อแกลบมีความชื้นด้วยทำให้เกิดการรวมตัวของออกซิเจนกับคาร์บอนในเชื้อเพลิงได้ยากขึ้นเพราะการหมุนวนที่ไม่แรงพอไม่สามารถทำให้ไถ่ลอยที่ติดอยู่กับแกลบหลุดออกได้เป็นผลให้ออกซิเจนที่มีอยู่



รูปที่ 5.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างองค์ประกอบของก๊าซไอเสียกับอัตราส่วนสมมูล เมื่อความชื้นในเชื้อเพลิงแกลบมีค่าต่างกัน ที่อัตราการป้อนแกลบเท่ากับ 0.3 kg/min

น้อยไปทำปฏิกิริยากับคาร์บอนส่วนที่เหลือได้และเมื่อเกิดปฏิกิริยาไม่สมบูรณ์ซึ่งให้พลังงานค่อยข้างต่ำเป็นเวลานาน ทำให้อุณหภูมิภายในลดต่ำลงอีกด้วย

ทำการองค์ประกอบของวิเคราะห์ก๊าซไอเสียที่เกิดจากการเผาไหม้ที่อัตราการป้อน แกลบเท่ากับ 0.3 kg/min ดังแสดงในรูปที่ 5.17 พบว่าเมื่อปริมาณความชื้นเพิ่มขึ้นปริมาณของก๊าซออกซิเจนมีปริมาณเพิ่มขึ้นและหากสังเกตเปรียบเทียบกับสองกรณีก่อนหน้านี้พบว่าความชื้นแกลบเท่ากับ 7% และ 11% ในกรณีของอัตราการป้อนนี้มีค่าใกล้เคียงกันมากกว่าอีกสองกรณีก่อน และในขณะที่เดียวกันปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะเพิ่มขึ้นเมื่อมีความชื้นในเชื้อเพลิงของแกลบลดลง สำหรับปริมาณของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์จะมีปริมาณมากขึ้นเมื่อความชื้นมากขึ้นด้วย และปริมาตรของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ต่ำที่สุดเชื้อเพลิงแกลบ 7% ปล่อยมีค่าเท่ากับ 130 ppm และปริมาตรสูงสุดที่แกลบความชื้นเท่ากับ 15% ปล่อยออกมามีค่าเท่ากับ 2,348 ppm



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

สรุปและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผล

ในงานวิจัยนี้ทำการศึกษาถึงอิทธิพลของความชื้นของแกลบต่อคุณลักษณะการเผาไหม้ภายในเตาเผาแบบบอร์เทคโดยที่ทำการกำหนดอัตราส่วนสมมูลเท่ากับ 0.8, 1.0 และ 1.2 ซึ่งทำการปรับอัตราส่วนอากาศหุติยภูมิต่ออากาศทั้งหมด (λ) เท่ากับ 0.00, 0.15 และ 0.25 อีกทั้งปรับอัตราการป้อนแกลบเท่ากับ 0.2, 0.25 และ 0.3 kg/min และปริมาณความชื้นของแกลบเท่ากับ 7%, 11% และ 15% โดยน้ำหนัก ซึ่งจากผลการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้

1. แกลบที่ความชื้นเท่ากับ 7% โดยน้ำหนัก จากการทดลองจะพบว่า อัตราส่วนสมมูลที่เหมาะสมต่อการเผาไหม้ภายในเตาเผาแบบบอร์เทคมีค่าเท่ากับ 1.0 เนื่องจากให้การกระจายอุณหภูมิที่สม่ำเสมอและมีค่าสูงกว่ากรณีของ $\Phi = 0.8$ และ 1.2 ทุก ๆ อัตราการป้อน และผลจากการวัดปริมาณก๊าซไอเสียที่ออกจากเตาเผาจะพบว่าให้ปริมาณของก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ซึ่งเป็นก๊าซที่เกิดจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์มีปริมาณน้อยที่สุดเมื่อ $\Phi = 1.0$ สำหรับปริมาณอากาศหุติยภูมิต่ออากาศทั้งหมด (λ) ที่เหมาะสมมีค่าเท่ากับ 0.25 เนื่องจากให้การกระจายของอุณหภูมิสม่ำเสมอทั่วทั้งเตาเผา แต่อิทธิพลของ λ มีผลต่อการเผาไหม้เล็กน้อยในกรณีของ $\Phi = 0.8$ สำหรับการศึกษาผลของอัตราการป้อนพบว่าอัตราการป้อนเท่ากับ 0.3 kg/min ให้อุณหภูมิภายในเตาเผาสูงสุด

2. แกลบที่ความชื้นเท่ากับ 11% โดยน้ำหนัก จากการทดลองจะพบว่า อัตราส่วนสมมูลที่มีความเหมาะสมต่อการเผาไหม้ภายในเตาเผาแบบบอร์เทคมีค่าเท่ากับ 1.0 เนื่องจากให้การกระจายอุณหภูมิภายในเตาค่อนข้างสม่ำเสมอทั่วทั้งเตาเผาและให้ความร้อนที่สูงกว่าอีกสองกรณี ผลของก๊าซไอเสียที่ทำการวัดเมื่อออกจากเตาเผาพบว่าที่ $\Phi = 1.0$ ให้ปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์น้อยที่สุด อิทธิพลของค่า λ พบว่าเมื่อ $\Phi \geq 1.0$ จะส่งผลต่อการเผาไหม้ของแกลบค่อนข้างเห็นได้อย่างชัดเจนเนื่องจากผลของอากาศหุติยภูมิช่วยให้เชื้อเพลิงที่เกาะติดอยู่หลุดออกจากแกลบส่วนที่ยังไม่เกิดการเผาไหม้และช่วยเพิ่มเวลาของแกลบให้มีระยะเวลาอยู่ในเตาเผานานขึ้นอีกด้วย การศึกษาผลของอัตราการป้อนแกลบจะพบว่า อัตราการป้อนแกลบเท่ากับ 0.25 และ 0.3 kg/min ให้ผลของอุณหภูมิก่อนข้างใกล้เคียงกัน แต่หากทำการพิจารณาผลทางเศรษฐศาสตร์จะพบว่าอัตราการป้อนแกลบเท่ากับ 0.25 kg/min มีค่าที่ต่ำกว่าเนื่องจากความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงน้อยกว่าแต่อุณหภูมิที่ได้ออกมามีค่าเกือบเท่ากัน

3. แกลบที่ความชื้นเท่ากับ 15% โดยน้ำหนัก พบว่าผลที่ได้จากการทดลอง อัตราส่วนสมมูลที่มีความเหมาะสมต่อการเผาไหม้มีค่าเท่ากับ 1.0 เช่นเดียวกับกรณีของความชื้นของแกลบเท่ากับ 7% และ 11% โดยน้ำหนัก เนื่องจากให้การกระจายอุณหภูมิที่ค่อนข้างสม่ำเสมอและสูงกว่าอีกสอง

ของอัตราส่วนสมมูล และในขณะที่เดียวกันหากทำการพิจารณาผลของก๊าซไอเสียที่เกิดขึ้นจะพบว่าให้ปริมาณของก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์น้อยที่สุดอีกด้วย อิทธิพลของ λ พบว่าเมื่อ $\Phi \geq 1.0$ จะเห็นผลของอากาศหุ้ญมิได้อย่างชัดเจน แต่ในกรณีของ $\Phi = 0.8$ มีผลเล็กน้อย สำหรับอิทธิพลของอัตราการป้อนแกลบจะพบว่าอัตราการป้อนแกลบเท่ากับ 0.25 kg/min มีความเหมาะสมที่สุดเนื่องจากให้อุณหภูมิที่เกิดจากการเผาไหม้สูงสุดและปริมาณของก๊าซไอเสียน้อยที่สุดซึ่งสังเกตได้จากรูปที่ 5.10 และ 5.11

4. อิทธิพลของความชื้นของแกลบจะพบว่าเมื่อเชื้อเพลิงแกลบมีความชื้นน้อยลงจะส่งผลให้อุณหภูมิด้านล่างของเตาเผาสูงขึ้นเนื่องจากไม่ต้องใช้ปริมาณพลังงานร้อนในปริมาณมากเพื่อไล่ความชื้นที่มีอยู่ในเชื้อเพลิงซึ่งเป็นองค์ประกอบตัวหนึ่งที่มีอยู่ในเชื้อเพลิงแข็งจึงส่งผลให้อุณหภูมิภายในเตาสูงขึ้นด้วยและจะทำให้การกระจายอุณหภูมิภายในเตาสม่ำเสมออีกทั้งปริมาณของก๊าซไอเสียที่ออกมาน้อย โดยที่ปริมาตรของคาร์บอนมอนนอกไซด์ต่ำสุดที่ให้ออกมาเท่ากับ 130 ppm เมื่อเชื้อเพลิงแกลบมีความชื้นเท่ากับ 7% โดยน้ำหนัก และเมื่อปริมาณของความชื้นของแกลบมีค่าเท่ากับ 15% โดยน้ำหนัก หากมีสภาวะการเผาไหม้ที่ไม่เหมาะสมจะทำให้เกิดการดับลงได้เนื่องจากเมื่อความชื้นในเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้นจะต้องใช้ระยะเวลาในการไล่ความชื้นในเชื้อเพลิงยาวนานขึ้นตามไปด้วยและเมื่อสังเกตจากอุณหภูมิจะพบว่าอุณหภูมิมิค่าเกือบเท่ากับจุดการติดไฟได้เองของแกลบหากมีการป้อนอากาศที่มากเกินไปหรืออัตราการป้อนแกลบที่มากกว่า 0.3 kg/min ก็อาจจะส่งผลให้เกิดการดับของเตาได้ หรือหากเชื้อเพลิงแกลบมีปริมาณความชื้นที่เกินกว่า 15% โดยน้ำหนัก จะไม่มีความเหมาะสมต่อนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงเนื่องจากอุณหภูมิต่ำให้ออกค่อนข้างต่ำมากและเมื่อพิจารณาระบบการป้อนแกลบของงานวิจัยนี้ซึ่งจะใช้อากาศปฐมภูมินำเชื้อเพลิงแกลบเข้าสู่ห้องเผาไหม้ เมื่อแกลบมีปริมาณความชื้นเพิ่มมากทำให้การนำแกลบเข้าสู่ห้องเผาไหม้ได้ยากขึ้นเนื่องจากเมื่อแกลบเชื้อเพลิงมากขึ้นจะจับตัวเป็นก้อนและจะไม่ปลิวเข้าสู่ภายในเตาเผาส่งผลให้เกิดการเผาไหม้ที่ไม่สม่ำเสมอ

6.2 ข้อเสนอแนะ

1. ในการศึกษาขั้นต่อไปควรจะทำการศึกษาหุ้ญนวนเตาเพื่อป้องกันความร้อนที่สูญเสียไปกับสิ่งแวดล้อม
2. ควรใช้เทอร์โมคัพเบิล type R เนื่องจากสามารถวัดช่วงของอุณหภูมิภายในเตาได้กว้างขึ้น
3. ผนังด้านในของเตาควรจะเป็นสแตนเลสหรือปูนทนไฟที่หล่อเป็นเตาขึ้น
4. ควรจะติดตั้งระบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนกับเตาเผา
5. ควรมีการนำก๊าซร้อนที่ได้จากเตาเผาไปใช้ประโยชน์
6. ควรจะนำก๊าซร้อนที่ออกจากเตาไปอุ่นแกลบเพื่อไล่ความชื้นที่มีอยู่ในแกลบให้น้อยลงก่อนที่จะเข้าสู่ห้องเผาไหม้

บรรณานุกรม

- [1] นางสาวศศิวิมล สูงสว่าง. 2526 “การเผาไหม้แก๊สในฟลูอิดไดซ์เบด” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [2] นายอดิศักดิ์ ชูจินดา. 2540 “เตาเผาแก๊สสำหรับเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบฟลูอิดไดซ์เบด” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาเทคโนโลยีอุณหภาค สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- [3] นานบุญเรือง ศรีสวัสดิ์. 2541 “การปรับปรุงสมรรถนะเตาเผาแก๊ส” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาเทคโนโลยีการจัดการพลังงาน สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- [4] นายรัชชัย ท้วถวิล และนายสันติ วัชรอาภาไพบุลย์. 2534 “เตาเผาเศษวัสดุทางการเกษตรแบบใช้อากาศหมุนวน 2” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- [5] สุวิทย์ เตี้ย และคณะ. 2542 “การเผาไหม้ชีวมวลในเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบด” วารสารวิจัยพัฒนา มจร. ปีที่ 22 ฉบับที่ 2 (พฤษภาคม – สิงหาคม 2542), หน้า 47 - 63
- [6] นายอภิชัย เทอดเทียนวงษ์. 2528 “เตาเผาไหม้ชีวมวลแบบฟลูอิดไดซ์เบด” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- [7] นายสุพจน์ น้านาโชค. 2536 “การเผาไหม้จี้เลื้อยในห้องเผาไหม้แบบไซโคลนชนิดอากาศเข้าหลายช่องทาง” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- [8] นายนิวัติ พิริยะรุ่งโรจน์. 2544 “การศึกษาเชิงทดลองของเตาเผาแบบวอร์เทค” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [9] Nieh, S. , et al. “Testing of a 0.15 MBtu/hr Vortex Combustor.” Technical report to Naval Civil Engineering Laboratory. April 1989.
- [10] Stephen R. Turns. **An Introduction to Combustion.** McGraw – Hill. International Edition. 1996. pp 8-49
- [11] Yonus. A. Cengl Michael A. Boles. **Thermodynamic An Engineering Approach.** Second Edition. 1994. pp 733-746

- [12] กัญญา บุญเกียรติ. เชื้อเพลิงและการเผาไหม้. กรุงเทพฯ พิมพ์ครั้งที่ 1 สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. ปี 2544. หน้า 179-219
- [13] เรียวโซ โทเอ 2529 อุปกรณ์อบแห้งในอุตสาหกรรม กรุงเทพฯ พิมพ์ครั้งที่ 1 สมาคมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น) ปี 2529 หน้า 37-56
- [14] American Society for Testing and Materials. 1983 **Annual book of ASTM standards**. Philadelphia, Pa.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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 ทำเป็นเชื้อเพลิงอัดแท่งใช้แทนฟืนและใช้อบโดยวิธีไพโรไลซิส(Pyrolysis) เพื่อใช้แทนถ่าน เป็นต้น

คุณสมบัติทางกายภาพ

แกลบมีคุณสมบัติทางการเป็นเชื้อเพลิงได้เป็นอย่างดีพอสมควร แต่จะมีข้อเสียคือเมื่อทำการเผาไหม้แล้วแกลบจะมีปริมาณสูงถึงประมาณร้อยละ 15.8-24.9 ค่าความร้อนของแกลบจะอยู่ระหว่าง 2,900-4,580 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม ค่าความชื้น โดยประมาณ 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
Analysis	Sulphur	(%)	0.07-0.12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ในวงจำกัดเท่านั้น ไม่สามารถนำออกไปใช้
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก-2 การเปรียบเทียบเชื้อเพลิง

	เชื้อเพลิงแข็ง	เชื้อเพลิงเหลว	แก๊สเชื้อเพลิง
การขนส่ง	- ขนส่งง่ายแต่ลำบากในการขนย้าย	- ขนส่งง่ายและขนย้ายง่าย	- แก๊สธรรมชาติขนส่งและขนย้ายง่าย
การเก็บ	- ต้องใช้พื้นที่กว้าง	- ต้องใช้ถัง	- ต้องบรรจุในภาชนะพิเศษ
คุณสมบัติ	- คุณภาพเปลี่ยนแปลงไม่แน่นอน - ค่าความร้อนต่อหน่วยต่ำ - ชี้อ่อนมาก - ประสิทธิภาพในการสันดาปต่ำ - ต้องการอากาศส่วนเกินในการเผาไหม้เป็นจำนวนมาก - มีความยุ่งยากในการใช้ระบบควบคุมอัตโนมัติ	- คุณภาพค่อนข้างคงที่ - ค่าความร้อนต่อหน่วยน้ำหนักสูง - ประสิทธิภาพในการเผาไหม้สูง - ต้องการอากาศในการเผาไหม้น้อย - ใช้ระบบควบคุมอัตโนมัติได้ง่าย	- คุณภาพคงที่ - ค่าความร้อนต่อหน่วยน้ำหนักมีค่าสูง - ไม่มีชี้อ่อน - ประสิทธิภาพในการเผาไหม้สูงสุด - ต้องการอากาศส่วนเกินจำนวนน้อยมาก - ใช้ระบบควบคุมอัตโนมัติได้ง่าย
อุปกรณ์สันดาป	- ขนาดเล็กไม่ซับซ้อน	- ขนาดเล็ก	- ขนาดค่อนข้างใหญ่
มลภาวะ	- จำเป็นต้องมีการป้องกันการเกิดมลภาวะต่อบรรยากาศ	- จำเป็นต้องมีการป้องกันการเกิดมลภาวะต่อบรรยากาศ	- มีผลกระทบต่อการเกิดมลภาวะของบรรยากาศน้อย
ราคา	- ถูก	- ค่อนข้างแพง	- แพงที่สุดต่อความร้อน 1 หน่วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

ตารางที่ ก-4 ปริมาณการใช้ชีวมวลโดยเฉลี่ยต่อโรง

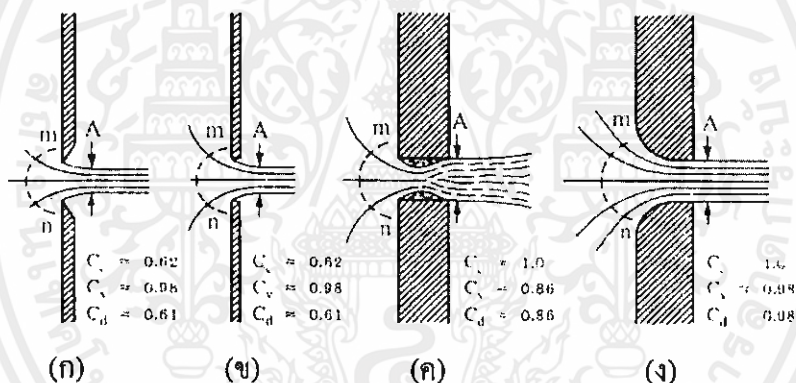
ชีวมวล	ปี พ.ศ.			
	ตะวันออกเฉียงเหนือ	เหนือ	กลาง	ใต้
ไม้พื้น	279.71	528.29	342.16	541.39
ซังข้าวโพด	1,008	178.23	1,250	-
ถ่านไม้	0.48	0.174	0.021	0.041
ต้นข้าวโพดเหลือทิ้ง	-	-	90	-
แกลบ	185.30	383.65	3,729.64	4.14
เส้นใย/เปลือกผลปาล์ม	-	-	70	14,390
ฟางข้าว	700	17	50	-
เส้นใย/เปลือกผล	-	66	21	101
มะพร้าว	352,805.83	525,984	174,594	-
กากอ้อย	-	-	80	-
ลำต้นมันสำปะหลัง	-	-	70	-
ต้นอ้อยเหลือทิ้งในไร่	-	-	90	-
กากถั่วเหลือง	-	-	-	-

ภาคผนวก ข

การวัดอัตราการไหลด้วยออริฟิส

ออริฟิส (Orifice)

ออริฟิสเป็นรูหรือช่องที่เจาะไว้บนผนังของถังหรือแผ่นวัตถุที่อยู่ในแนวตั้งฉากกับแกนของท่อแผ่นวัตถุนี้อาจจะอยู่ที่ปลายท่อหรือกลางท่อก็ได้ เรียกออริฟิสตามลักษณะข้อที่แท้จริงของผนังหรือแผ่นวัตถุที่มีความหนาอย่างมากเมื่อเปรียบเทียบกับขนาดของรูหรือช่องที่เจาะนั้น ออริฟิสมาตรฐานที่มีขอบคมตามรูปภาคผนวก ข-1.ก หรือขอบรูปสี่เหลี่ยมคางหมูรูปภาคผนวก ข-1.ข นั้น จะสัมพันธ์กับลำน้ำที่ไหลผ่านในลักษณะของการสัมผัสเป็นเส้น ส่วนออริฟิสในรูปภาคผนวก ข-1.ค และ ข-1.ง นั้น ไม่เป็นออริฟิสมาตรฐาน ทั้งนี้เพราะลำน้ำที่ไหลผ่านรูออริฟิสนั้นถูกกระทบจากความหนาของแผ่นวัตถุจากความหยาบของผิว และรัศมีของความโค้ง ดังนั้นจึงต้องสอบเทียบเมื่อต้องการความถูกต้องสูง



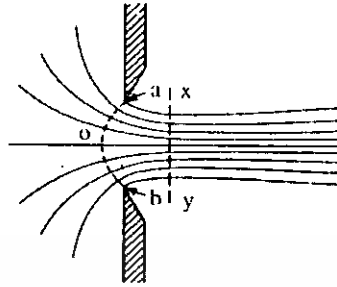
รูปที่ ข-1 ออริฟิสแบบต่าง ๆ

การหดตัวของเจ็ต (Jet contraction)

เมื่อลำน้ำไหลเข้าใกล้รูออริฟิสมันก็จะตีตัวเข้าหากันดังรูป ข-2 หลังจากผ่านรูออริฟิสแล้ว Streamline เหล่านี้ก็ยังคงตีตัวต่อไปจนกระทั่งถึงหน้าตัด xy ซึ่งเป็นหน้าตัดที่ streamline เหล่านั้นเริ่มขนานกัน โดยปกติแล้วหน้าตัดดังกล่าวนี้จะอยู่ห่างจากขอบด้านต้นน้ำของรูออริฟิส ประมาณ $0.5D_0$ เมื่อ D_0 เป็นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูออริฟิส ดังนั้น xy ก็จะเป็นหน้าตัดที่เล็กที่สุด หน้าตัด xy นี้มีชื่อเรียกว่า วินาคอนแทรกตา (vena contracta) ถัดจากวินาคอนแทรกตานั้นไปแล้วเส้นสตรีมไลน์ก็มักจะบานโตขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากผลกระทบจากความเสียดทาน

ตำแหน่งหน้าตัดที่เล็กที่สุดในรูป ข-1.ค นี้เรียกว่า เมิร์จวินาคอนแทรกตา (merged vena contracta) ทั้งนี้เพราะมันถูกล้อมรอบด้วยของไหลชนิดเดียวกันกับตัวของมัน รูปภาคผนวก ข-1.ง

นั้น ไม่มีวินาคอนแทรคตาทั้งนี้เพราะการลอบมุมที่ปากทางเข้านั้นก็ทำให้เส้นสตรีมไลน์ค่อย ๆ ดิบเข้าหาหน้าตัดของรูออริฟิส

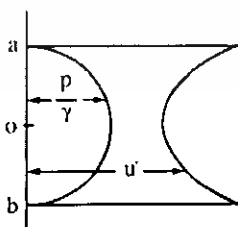


รูปที่ ข-2 แสดงการคอดตัวของเจ็ต

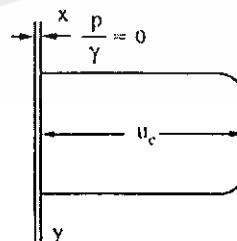
ความเร็วและความดันของเจ็ต (Jet velocity and pressure)

ความเร็วของเจ็ตหมายถึง ความเร็วเฉลี่ยของของไหลที่วินาคอนแทรคตาในรูป ข-1.ก กับ ข-1.ข และขอบทางด้านได้น้ำของรูออริฟิสของรูป ข-1.ค และ ข-1.ง ในทางปฏิบัติถือว่าความเร็วที่หน้าตัดเหล่านี้มีค่าคงที่ตลอดพื้นที่หน้าตัดยกเว้นพื้นที่รูวงแหวนที่อยู่รอบนอกรูป ข-1.ข ในทางปฏิบัติจะถือว่าความดันเจ็ตทั้ง 4 แบบของรูป ข. 1 นั้นมีค่าคงที่ตลอดเส้นผ่านศูนย์กลางของเจ็ตในหน้าตัดที่เส้นสตรีมไลน์ขนานกันและความดันดังกล่าวนี้จะต้องเท่ากับความดันในของไหลที่ล้อมรอบเจ็ตของหน้าตัดนั้น ที่หน้าตัด m-n ของรูป ข.1 ซึ่งเป็นตำแหน่งที่เส้นสตรีมไลน์เป็นส่วนโค้งของวงกลมนั้นจะมีหน้าตัดประสิทธิภาพของการไหล (หน้าตัดที่ตั้งฉากกับเส้นสตรีมไลน์) โดกว่าหน้าตัดที่เล็กที่สุด ดังนั้น ความเร็วเฉลี่ยที่หน้าตัด m-n ก็จะต่ำกว่าความเร็วของเจ็ต

ในรูปภาคผนวก ข-3.ก เป็นลักษณะการกระจายความเร็วและความดันที่หน้าตัด aob ของรูป ข.2 การเปลี่ยนแปลงนี้เป็นผลมาจากความโค้งของเส้นสตรีมไลน์และผลกระทบจากแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง



(ก)



(ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

รูปที่ ข-3 การเปลี่ยนแปลงความเร็วและความดันในเจ็ต

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัมประสิทธิ์การตีบตัว, C_c (Coefficient of contraction)

สัมประสิทธิ์การตีบตัว C_c เป็นอัตราส่วนระหว่างหน้าตัด A ของเจ็ต (รูปภาคผนวก ข.1) กับพื้นที่ A_0 ของรูออริฟิส นั่นก็คือ :

$$A = C_c \cdot A_0$$

สัมประสิทธิ์ความเร็ว C_v (Coefficient of velocity)

ความเร็วของเจ็ตที่ไม่มี ความเสียดทานนั้น มีชื่อเรียกว่า ความเร็วของของไหลในจินตนาการ ซึ่งในทางปฏิบัติถือว่าเป็นความเร็ว u_c ของรูป ข-3 แต่เนื่องจากในสภาพความเป็นจริงนั้นเจ็ตจะมีความเสียดทาน ดังนั้นความเร็วเฉลี่ยจริงก็จะน้อยกว่าความเร็วในจินตนาการ เรียกอัตราส่วน V/V_i ว่า สัมประสิทธิ์ความเร็วและใช้ C_v เป็นสัญลักษณ์ ดังนั้น

$$V = C_v \cdot V_i$$

สัมประสิทธิ์อัตราการไหล, C_d (Coefficient of discharge)

อัตราส่วนระหว่างอัตราการไหลจริงกับอัตราการไหลของของไหลในจินตนาการ Q_i (หมายถึงอัตราการไหลของของไหลที่ไม่มี ความเสียดทานและลำเจ็ตไม่เกิดการตีบตัว) นั้นเรียกว่า สัมประสิทธิ์อัตราการไหล ดังนั้น

$$Q = C_d \cdot Q_i$$

แต่ $Q = AV = (C_c \cdot A_0)(C_v \cdot V_i)$

และ $Q_i = A_0 V_i$

$$\therefore C_d = C_c \cdot C_v$$

การหาสัมประสิทธิ์ (Determining the coefficient)

ค่าสัมประสิทธิ์การตีบตัวนั้นสามารถหาได้ด้วยการใช้คาลิเปอร์วัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่วินาคอนแทรกตาของเจ็ต แล้วนำเอาพื้นที่หน้าตัดของเจ็ตนี้ไปเปรียบเทียบกับพื้นที่ของรูออริฟิส สัมประสิทธิ์การตีบตัวนี้ไว้อต่อการเปลี่ยนแปลงของขอบออริฟิส หรือผิวทางด้านต้นน้ำของออริฟิสมาก ถึงแม้ว่าจะเป็น การเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยก็ตาม ดังนั้นการลบมุมของขอบออริฟิสในรูป ข-1.ข หรือการทำให้ผิวของออริฟิสหยาบขึ้นเพียงเล็กน้อย ก็จะมีผลทำให้สัมประสิทธิ์การตีบตัวเพิ่มมากขึ้นอย่างเห็นได้ชัด

เอกสารนี้เป็นสำหรับความเร็วเฉลี่ย V ของเจ็ตอิสระสามารถหาได้จากความเร็วที่วัดตามแนวแกนของการกำเนิดด้วยปีโตทมิเตอร์เล็ก ๆ หรืออาจหาจากการหารอัตราการไหลด้วยพื้นที่หน้าตัดของเจ็ตก็ได้

นอกจากนี้ยังสามารถหาได้จากสมการเบอร์นูลลีที่ใช้ในเส้นทางการเคลื่อนที่ของเจ็ต ดังนั้นจึงสามารถหาสัมประสิทธิ์ความเร็ว C_v ได้โดยการหาร V ด้วย V_i

สัมประสิทธิ์อัตราการไหลก็เป็นสัมประสิทธิ์ที่สามารถหาค่าได้อย่างถูกต้อง และเป็นค่าที่ใช้งานมากกว่าหนึ่ง สามารถหาอัตราการไหลจริง Q ของของเหลวได้จากวิธีการทั่ว ๆ ไป เช่น หาจากปริมาตรหรือน้ำหนักในช่วงเวลาที่กำหนดให้ สำหรับแก๊สนั้นจะสามารถคำนวณหาอัตราการไหลได้จากการเปลี่ยนแปลงความดันและอุณหภูมิของแก๊สในภาชนะที่รู้ขนาด จะเห็นได้ว่าถ้าหากรู้สัมประสิทธิ์ถึงสองตัวแล้ว ก็จะสามารถคำนวณหาสัมประสิทธิ์ตัวที่สามได้ ดังนั้นสมการต่าง ๆ ก็จะเป็น :

$$\text{อัตราการไหลในจินตนาการ } Q_i = A_i V_i = A_i \sqrt{2g(\Delta H)} \quad (\text{ข.1})$$

$$\text{อัตราการไหลจริง } Q = AV = C_c A_0 [C_v \sqrt{2g(\Delta H)}] \quad (\text{ข.2})$$

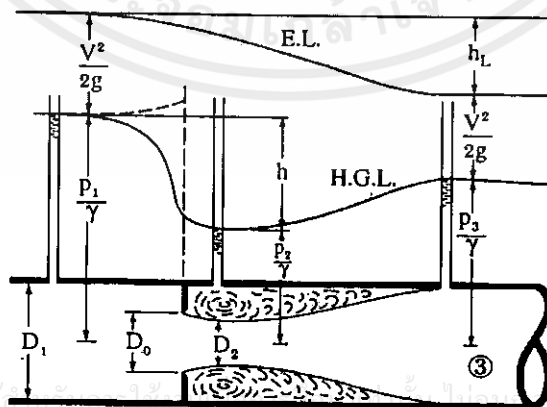
$$\text{และ } C_d = \frac{Q}{Q_i} = C_c C_v \quad (\text{ข.3})$$

เมื่อ : $\Delta H \equiv$ ความแตกต่างของพลังงานรวมระหว่างหน้าตัดทางด้านต้นน้ำกับหน้าตัดที่เล็กสุดของเจ็ต (หน้าตัด A ของรูป ข-3)

ออริฟิสมิเตอร์ (Orifice meter)

ออริฟิสที่อยู่ในท่อ (รูป ข-4) นี้สามารถนำมาใช้เป็นอุปกรณ์วัดความเร็วและอัตราการไหลได้ ออริฟิสอาจจะใช้ติดตั้งไว้ที่ปลายท่อเพื่อให้ส่งน้ำออกมาเป็นเจ็ตอิสระก็ได้ อัตราการไหลที่ไหลผ่านออริฟิสนี้มีค่า

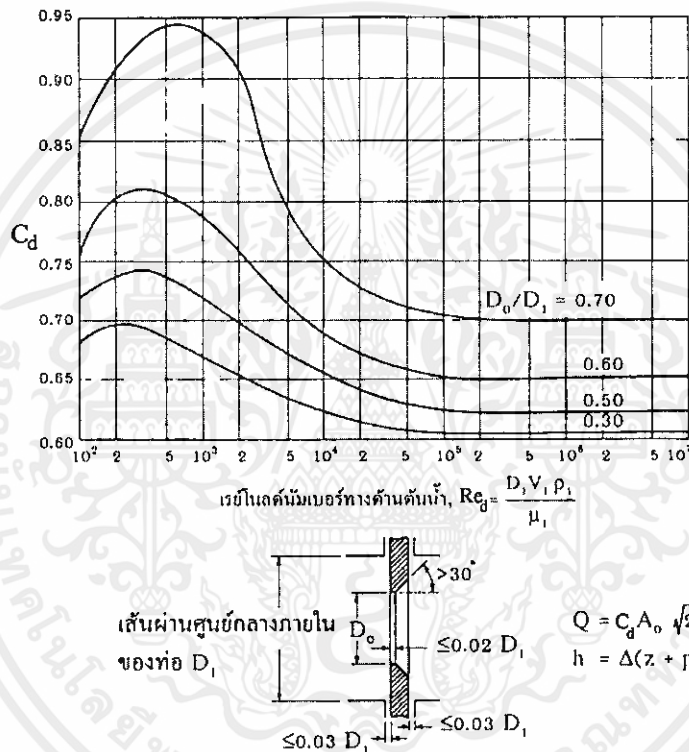
$$Q = C_d A_0 \sqrt{2g \left[\left(\frac{p_1}{\gamma} + Z_1 \right) - \left(\frac{p_2}{\gamma} + Z_2 \right) \right]} \quad (\text{ข.4})$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเท่านั้น ไม่ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

รูปที่ ข-4 ออริฟิสที่ทำจากโลหะที่ใช้สำหรับวัดอัตราการไหลในท่อ

จะเห็นว่าสมการดังกล่าวนี้มีรูปร่างคล้ายกับสมการของนอสเชิลมาก ยกเว้น A_2 ที่เปลี่ยนมาเป็น A_0 ซึ่งเป็นพื้นที่ของรูออริฟิส หน้าตัดของออริฟิสมิเตอร์แบบมาตรฐานนั้นมีลักษณะดังรูป ข-5 จะเห็นได้จากรูป ข-5 ว่าลักษณะของ C_d ที่แปรค่าตาม Re_d นั้นแตกต่างกับค่า C_d ของเวนจูรีมิเตอร์ และนอสเชิลที่ใช้วัดอัตราการไหลมาก จะเห็นได้ว่าที่ Re_d มีค่ามากสุดในช่วงของ Re_d เท่ากับ 200-600 ทั้งนี้เพราะในช่วงที่ Re_d มีค่าต่ำนี้ของไหลจะได้รับผลกระทบจากความหนืดมาก ผลกระทบดังกล่าวจะทำให้ C_v มีค่าน้อยและ C_d มีค่ามาก ค่า C_d นี้จะมีค่ามากกว่า C_v จนกระทั่ง C_v ถึงค่ามากที่สุดซึ่งมีค่าประมาณเท่ากับ 1 ดังนั้นเมื่อ Re_d ลดน้อยลงอีก ค่า C_d ก็จะลดน้อยลงเพราะค่า C_v จะลดน้อยลงไปเรื่อย ๆ



รูปที่ ข-5 ออริฟิสมิเตอร์แบบ VDI ที่มีรูวัดความดันที่หน้างาน

ข้อแตกต่างระหว่างออริฟิสมิเตอร์กับเวนจูรีมิเตอร์หรือนอสเชิลที่ใช้วัดอัตราการไหลก็คือในสองแบบหลังนั้นไม่มีคอขวดเกิดขึ้นจากการไหล ดังนั้น A_2 ก็จะเป็นพื้นที่ที่หน้าตัดช่วงแคบสุดของตัวเวนจูรีและมีขนาดคงที่ส่วน A_2 ของออริฟิสนั้นเป็นพื้นที่หน้าตัดของเจ็ต ซึ่งมีขนาดเล็กกว่า A_0 ที่เป็นรูออริฟิสและมีขนาดที่ไม่แน่นอนในทางปฏิบัตินั้นถือว่าสัมประสิทธิ์อัตราการไหลของเวนจูรีมิเตอร์หรือนอสเชิลที่ใช้วัดอัตราการไหลก็คือสัมประสิทธิ์ความเร็วนั่นเอง ส่วนออริฟิสนั้นจะถูกกระทบจากการแปรค่าของ C_d มากกว่าจากค่าของ C_v

สำหรับความแตกต่างของความดันนั้น จะวัดจากจุดที่อยู่ทางด้านเหนือหน้าของออริฟิสเป็นระยะทางประมาณ 1 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อกับวินาคอนแทรคตาซึ่งจะอยู่ทางด้าน

ได้นำของออร์ฟิสเป็นระยะทางประมาณ 0.5 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ ระยะห่างของ
 วนาคอนแทรกคานี้มีค่าไม่แน่นอน แต่จะน้อยลงเมื่อ D_0/D_1 เพิ่มขึ้น ความแตกต่างของความดันนี้ยัง
 สามารถวัดจากมุมทั้งสองด้านของแผ่นออร์ฟิสได้อีกด้วย ข้อดีของการมีรูวัดความดันที่หน้างาน
 ของท่อ ข้อหนึ่งก็คือไม่ต้องเจาะรูวัดความดันที่ตัวท่ออีก

ข้อดีของออร์ฟิสเมเตอร์ก็คือมีราคาถูกและมีปัญหาการใช้งานน้อย ส่วนข้อเสียที่สำคัญก็คือ
 มีความเสียดทานสูงกว่าเวนจูริมิเตอร์และนอสเชิล

แผ่นออร์ฟิส (ตามมาตรฐาน ANSI/API 2530)

ขนาดต่าง ๆ ของออร์ฟิส ตามตาราง ข-1 และผิวหน้าของออร์ฟิสจะต้องมีค่าความขรุขระ
 (roughness) ไม่เกิน 50×10^{-6} นิ้ว

ตาราง ข-1 ขนาดและมิติของออร์ฟิสมาตรฐาน

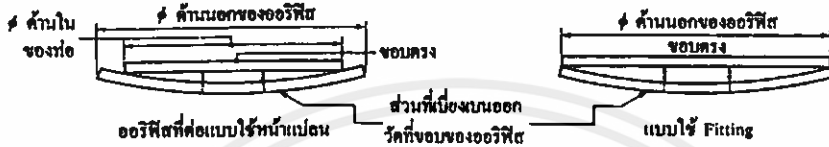


Nominal I.D.	1/2"	3/4"	1"	1 1/8"	1 1/2"	2"	2 1/2"	3"	4"	5"	6"	8"	10"	12"	14"	16"	18"	20"	24"	30"
le 0.87D	1132	1732	3744	1716	6764	3720	7764	6764	6720	3716	7720	16764	6720	10764	3716	7716	16764	6716	10764	17764
Comm. D	1.638	2.624	3.152	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
Comm. D	1.638	2.624	3.152	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
Comm. D	2.624	3.152	3.680	4.208	4.736	5.264	5.792	6.320	6.848	7.376	7.904	8.432	8.960	9.488	10.016	10.544	11.072	11.600	12.128	12.656
Orifice plate thickness "E"																				
ค่าต่ำสุด	0.115	0.115	0.115	0.116	0.115	0.116	0.116	0.115	0.116	0.116	0.116	0.116	0.116	0.116	0.116	0.116	0.116	0.116	0.116	0.116
ค่าสูงสุด	0.130	0.130	0.130	0.130	0.130	0.130	0.130	0.130	0.130	0.130	0.130	0.130	0.130	0.130	0.130	0.130	0.130	0.130	0.130	0.130
ค่าเฉลี่ย	0.125	0.125	0.125	0.125	0.125	0.125	0.125	0.125	0.125	0.125	0.125	0.125	0.125	0.125	0.125	0.125	0.125	0.125	0.125	0.125
ตารางขนาดรูของออร์ฟิส																				
Orifice Diam. d.																				
Inches																				
0.625	1/32	3/32	1/32	1/32	1/32	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
0.675	3/64	.....	3/64	3/64	3/64	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
0.700	1/16	.....	1/16	1/16	1/16	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
0.686	3/64	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
0.750	3/32	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
0.675	7/64	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
1.000	1/2	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
1.125	9/16	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
1.250	5/8	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
1.375	11/8	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
1.500	3/4	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
1.625	13/8	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
1.750	7/8	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
1.875	15/8	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
2.000	1	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
2.250	9/8	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
2.375	10/8	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
2.500	5/4	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
2.750	11/4	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
2.875	13/4	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
3.000	3/2	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
3.250	13/8	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
3.375	7/4	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
3.625	15/4	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
3.750	16/4	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
4.000	1/2	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
4.250	17/8	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
4.500	3/4	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
4.625	31/8	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
4.750	19/8	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
5.000	2	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....

เอกสารนี้เป็นเอกสารของบริษัทฯ ไม่ควรแก้ไข

ผิวหน้าทางด้านของไหลไหลเข้าจะต้องเรียบและตั้งฉากกับแนวท่อ เมื่อติดตั้งอยู่กับหน้าแปลน (flange) หรือ Fitting ค่าความเรียบ (flanness) จะต้องไม่เกินค่าที่กำหนดไว้ในตารางภาคผนวก ข-1 และในขนาดรูออร์ฟิสที่มากกว่า 9 นิ้ว ค่าความเรียบจะต้องมีค่าไม่ผิดไปมากกว่า $0.010 \left(\frac{D-d}{2} \right)$ เมื่อ D คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางวัดด้าน ในออร์ฟิสแบบหน้าแปลน (flange) และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางวัดด้านนอกในออร์ฟิสแบบ Fitting และ d คือ ขนาดรูของออร์ฟิส

ตาราง ข-2 ค่าเบี่ยงเบนที่ยอมรับได้ของแผ่นออร์ฟิส



ขนาดรูออร์ฟิส (นิ้ว)	ขนาด Nominal ของท่อ										
	2"	3"	4"	6"	8"	10"	12"	14"	16"	18"	20"
.125	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....
.250	.009	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....
.375	.006	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....
.500	.006	.012	....	....	....	....	....	....	....	....	....
.625	.007	.012	.017	....	....	....	....	....	....	....	....
.750	.007	.012	.018	.027	....	....	....	....	....	....	....
.875	.006	.011	.016	.020	.036	....	....	....	....	....	....
1.000	.006	.010	.015	.025	.036	.040	....	....	....	....	....
1.250	.004	.009	.014	.024	.034	.044	.044	....	....	....	....
1.500	.005	.009	.013	.023	.033	.043	.053	.067	....	....	....
1.750	....	.007	.011	.022	.032	.042	.052	.062	....	....	....
2.000	....	.005	.010	.020	.030	.041	.050	.065	.081	....	....
2.250	....	.004	.009	.019	.029	.039	.049	.063	.082	....	....
2.500	....	....	.008	.018	.028	.038	.048	.062	.082	.102	....
2.750	....	....	.008	.017	.027	.037	.047	.061	.081	.101	....
3.000	....	....	.005	.015	.025	.035	.045	.060	.080	.100	.120
3.250	....	....	....	.014	.024	.034	.044	.058	.078	.098	.118
3.500	....	....	....	.013	.023	.033	.043	.057	.077	.097	.117
3.750	....	....	....	.012	.022	.032	.042	.056	.076	.096	.116
4.000	....	....	....	.010	.020	.031	.041	.055	.075	.095	.115
4.500	....	....	....	.008	.018	.029	.039	.053	.073	.093	.113
5.000	....	....	....	.016	.026	.037	.047	.061	.081	.101	.120
5.500	....	....	....	.012	.022	.033	.043	.057	.077	.097	.117
6.000	....	....	....	.010	.021	.032	.042	.056	.076	.096	.116
6.500	....	....	....	....	.018	.028	.038	.052	.072	.092	.112
7.000	....	....	....	....	.018	.028	.040	.054	.074	.094	.114
7.500	....	....	....	....	.012	.023	.033	.047	.067	.087	.107
8.000	....	....	....	....	....	.020	.035	.055	.075	.095	.115
8.500	....	....	....	....	....	.018	.033	.053	.073	.093	.113
9.000	....	....	....	....	....	.015	.030	.050	.070	.090	.110
9"	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....

วิธีการปรับเทียบแผ่นออร์ฟิสที่ใช้ในการวัดอัตราการไหลของอากาศมีรายละเอียดดังนี้

1. ติดตั้งแผ่นออร์ฟิสเข้ากับท่ออากาศทุติยภูมิ โดยวัดอัตราการไหลของอากาศผ่านชุดมานอร์มิเตอร์ (อ่านค่าระดับความสูงของน้ำในมานอร์มิเตอร์) ตามตารางข้างต้น
2. นำ Anemometer วัดความเร็วของอากาศหลังจากผ่านชุดออร์ฟิส โดยขนาดของท่ออากาศทุติยภูมิ และขนาดของใบพัดของ Anemometer มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 50.8 มม.
3. อ่านค่าความเร็วจากเครื่อง Anemometer เพื่อหาค่าอัตราการไหลของอากาศ
4. นำค่าที่ได้จากการวัดด้วยเครื่อง Anemometer กับค่าทางทฤษฎี (ค่าที่ได้จากการคำนวณ) มา Fit Curve เพื่อหาค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด
5. นำค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด รวมกับค่าที่ได้จากการคำนวณ



วารสารพระจอมเกล้าลาดกระบัง

JOURNAL OF KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

ISSN 0858-8430 Vol. 9 No. 1 April 2001 ปีที่ 9 ฉบับที่ 1 เมษายน 2544 **2544**

บทความวิจัย

- อิทธิพลของขนาดของแถบต่อคุณลักษณะการเผาไหม้..... 1
สมศักดิ์ โพธิ์วิลเกียรติ์ นีวัติ พิริยะรุ่งโรจน์ พงษ์เจต พรหมวงค์
- อิทธิพลของความชื้นของแถบต่อคุณลักษณะการเผาไหม้..... 7
ศุภชัย เลื่อนลอย นีวัติ พิริยะรุ่งโรจน์ พงษ์เจต พรหมวงค์
- ผลของขนาดชิ้นสัดฝักต่ออัตราการหายใจ การผลิตเอทิลีนและอายุการเก็บรักษาที่ 12°C..... 13
ระติพร หาเรียนกิจ เจนจิรา เจริญยิ่ง
- ปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพของเจลเต้าหู้หลอด : ตอนที่ 1 พันธุ์ถั่ว การแช่ถั่ว และอุณหภูมิการเกิดเจล..... 18
น้ำทิพย์ วงษ์ประทีป บุร พิชกมุต
- ชนิดและวิธีการแปรรูปต่อส่วนประกอบทางเคมีในของเสียดจากตู้เกิดลูกไก่..... 25
วิชัย ศุภลักษณ์ อนุชา แสงโสภณ กนกรัตน์ ศรีกิจเกษมวัฒน์
- ผลของการเสริมยีสต์ *Saccharomyces cerevisiae* ที่มีชีวิตในสูตรอาหารต่อสมรรถภาพการผลิตในไก่กระตาง..... 31
อาทิตย์ ปลายมาศ หทัยรัตน์ พงศ์ทิพัฒนาการ

บทความวิชาการ

- เทคโนโลยีใหม่กับปัญหาการว่างงานในประเทศไทย..... 35
เกรียงศักดิ์ เจริญวงศ์ศักดิ์
- Building Theory from Multiple Case Studies in Operations Management
Is it Really Soft and Fuzzy?..... 42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไป *Duangpun Kritchanchai* ารค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึง

เรือโทประจักษ์ จิตวีพิทย์ [2] ได้ทำการวิจัยเตาเผาแบบไซโคลนโดยใช้เชื้อเพลิงเป็นเชื้อเพลิง งานวิจัยของ ธวัชชัย ท้วมวิท และสันติ วัชรอากาศไพบูลย์ [3] ได้ทำการศึกษาเตาเผาเศษวัสดุทางการเกษตรโดยใช้อากาศหมุนวนเพื่อปรับปรุงระบบเตาเผาเดิมให้มีความสมบูรณ์มากขึ้นและได้ทำการศึกษาอัตราส่วนของอากาศต่อเชื้อเพลิงที่มีผลต่อปริมาณความร้อนและอุณหภูมิของแก๊สร้อนที่ได้รับ งานวิจัยของ อติศักดิ์ ชูจินดา [4] และบุญเรือง ศรีสวัสดิ์ [5] ได้ทำการออกแบบสร้างและทดสอบเตาเผาถ่านสำหรับเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบฟลูอิดไคเซเบด งานวิจัยของ Sen Nieh และ Tim T.Fu [6] ได้ทำการทดสอบการไหลในเตาแบบจำลอง Cold Model เพื่อทำการศึกษาลักษณะการไหลของเชื้อเพลิง และ Hot Model ทำการศึกษาลักษณะการเผาไหม้ โดยใช้ถ่านหินผงเป็นเชื้อเพลิง และได้ทำการวิจัยต่อเนื่องโดยทดสอบเตาเผาแบบบอร์เทค โดยใช้เชื้อเพลิง Dry Ultrafine Coal และ Coal Water Fuel

เตาเผาที่ใช้ในการทดลองนี้เป็นเตาเผาแบบบอร์เทคซึ่งได้ทำการประยุกต์มาจากเตาเผาแบบไซโคลน, เตาฟลูอิดไคเซเบด, เตาถ่านหินผง โดยภายในห้องเผาไหม้ของเตาเผาแบบบอร์เทคมีการหมุนวนเป็นเกลียวและมีความปั่นป่วนทำให้มีการผสมของเชื้อเพลิงกับอากาศได้ดีขึ้น ซึ่งมีผลต่อการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ขึ้นและให้ปริมาณความร้อนออกมาเพิ่มขึ้น และก๊าซไอเสียที่ออกมาลดน้อยลง ห้องเผาไหม้แบบบอร์เทคนั้นมีการป้อนอากาศจากสองส่วนด้วยกันได้แก่ อากาศปฐมภูมิและอากาศทุติยภูมิ ซึ่งอากาศปฐมภูมิมีการป้อนในแนวสัมผัสทางด้านล่างของห้องเผาไหม้และอากาศทุติยภูมิมีการป้อนในแนวสัมผัสของห้องเผาไหม้แต่จะอยู่ที่ตำแหน่งสูงกว่าทางเข้าของอากาศปฐมภูมิ ซึ่งเป้าหมายของการเพิ่มอากาศทุติยภูมิเพื่อเพิ่มความปั่นป่วนภายในเตาเผาและให้อากาศเพียงพอต่อการเผาไหม้ทำให้การเผาไหม้ที่มีความสมบูรณ์

จากการศึกษาคุณสมบัติของเชื้อเพลิงถ่านเราพบว่าค่าความร้อนอยู่ในช่วง 2,900 – 4,560 kcal/kg แต่ถ่านจะมีข้อเสีย คือ มีปริมาณความชื้นค่อนข้างมาก และถ่านที่ได้จากแต่ละแหล่งวัตถุดิบจะมีความชื้นที่แตกต่างกันทำให้เรามุ่งที่จะทำการศึกษาถึงผลของปริมาณความชื้นที่มีผลต่ออุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้เพื่อจะทำการหาค่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสมสำหรับการใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับห้องเผาไหม้แบบบอร์เทคและเท่าที่ผ่านมายังไม่มีงานวิจัยใดที่ศึกษาผลของปริมาณที่

อยู่ในเชื้อเพลิงถ่านเพราะฉะนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งที่จะทำการศึกษาผลของปริมาณความชื้นที่มีผลต่ออุณหภูมิภายในเตาเผาเพื่อจะสามารถนำไปใช้ในทางปฏิบัติต่อไป

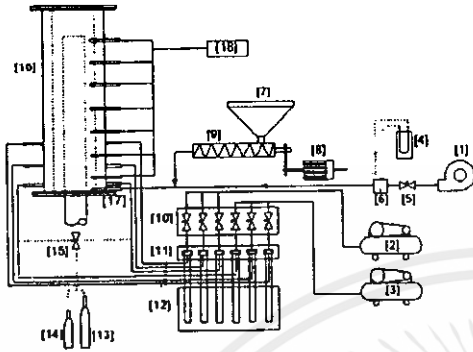
2. เครื่องมือและอุปกรณ์การทดลอง

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองสามารถแสดงได้ดังในรูปที่ 1 ซึ่งห้องเผาไหม้จะได้รับอากาศมาจากสองส่วนคือ อากาศปฐมภูมิจะได้รับจาก Blower (1) ซึ่งจะถูกควบคุมอัตราการไหลโดย Needle valve (5) และเราจะใช้ Orifice meter (4,6) ในการวัดอัตราการไหล อากาศจะไหลผ่านเข้าสู่ห้องเผาไหม้ในแนวสัมผัสทางด้านล่างของห้องเผาไหม้ ส่วนอากาศทุติยภูมิจะได้อากาศมาจาก Air compressor (2,3) ซึ่งจะถูกส่งผ่าน Needle valve (10) ทำการปรับอัตราการไหล และทำการวัดโดย Orifice meter (11,12) อากาศจะถูกส่งผ่านเข้าสู่ห้องเผาไหม้ในแนวสัมผัส ซึ่งอยู่สูงจากฐานของห้องเผาไหม้ สำหรับเชื้อเพลิงถ่านนั้นจะบรรจุอยู่ใน Hopper (7) และจะถูกลำเลียงโดย Screw feeder (9) ซึ่งจะได้รับค้ำถ่านจาก Motor (8) และได้ทำการควบคุมอัตราการป้อนถ่านโดย Inverter โดยถ่านจะเข้าสู่ถ่านลิ้งและเข้าสู่ห้องเผาไหม้พร้อมกับอากาศปฐมภูมิทำให้เกิดการผสมคลุกเคล้าระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศ

ก่อนเริ่มทำการทดลองนั้นเราจะตั้งอุณหภูมิห้องเผาไหม้ให้อุณหภูมิภายในเตาสูงพอที่จะสามารถทำให้เชื้อเพลิงถ่านนั้นติดไฟได้เอง ซึ่งจะประกอบด้วยชุดถ่านถ่านด้วยแก๊สเชื้อเพลิง LPG (13,14) โดยที่เราจะทำการอุ่นเตาจนกระทั่งอุณหภูมิภายในเตามีค่าประมาณ 400°C ต่อจากนั้นเราจะทำการป้อนอากาศปฐมภูมิพร้อมทั้งเชื้อเพลิงถ่านเข้าสู่ห้องเผาไหม้โดยเชื้อเพลิงถ่านรวมกับอากาศปฐมภูมิก่อนเข้าสู่ห้องเผาไหม้เรายังอุ่นเตาด้วย LPG ต่อจนกระทั่งอุณหภูมิภายในเตามีค่าประมาณ 700°C ซึ่งที่สภาวะนี้เชื้อเพลิงถ่านสามารถติดไฟได้เองแล้ว เรายังปิดชุดอุ่นเตาด้วย LPG

รูปที่ 2 แสดงห้องเผาไหม้แบบบอร์เทคซึ่งจะประกอบด้วยผนังห้องเผาไหม้ด้านนอกทำมาจากเหล็กกล้ามีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 0.2 เมตร ความสูงเท่ากับ 0.755 เมตร และด้านในจะใช้อิฐทนไฟความหนาเท่ากับ 0.03 เมตร ส่วนที่อก๊าซไอเสียจะเข้ามาจากท่อ สแตนเลสซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 0.078 เมตร ด้านข้างห้องเผาไหม้จะเจาะรูไว้สำหรับป้อนอากาศทุติยภูมิและทำการวัดอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ โดยที่เส้นผ่าน

ศูนย์กลางของรูเท่ากับ 0.005 เมตร โดยที่แต่ละรูมีระยะห่างกันเท่ากับ 0.1 เมตร



- 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. Oxygen 14. L.P.G. supply 15. Globe valve 16. Combustor
- 17. Primary air nozzle 18. Indicator

รูปที่ 1 โคอะแกรมอุปกรณ์การทดลอง

3. การเตรียมการและวิธีการทดลอง

ในการทดลองเราจะทำการเตรียมเชื้อเพลิงแกลบละเอียด (ขนาด 0.84 – 1.00 มม.) ให้มีค่าความชื้นเท่ากับความชื้นที่เราได้ทำการกำหนดไว้โดยใช้มาตรฐานความชื้นของ ASTM-D-3173-73 [7] ซึ่งสามารถเขียนเป็นขั้นตอนได้ดังนี้

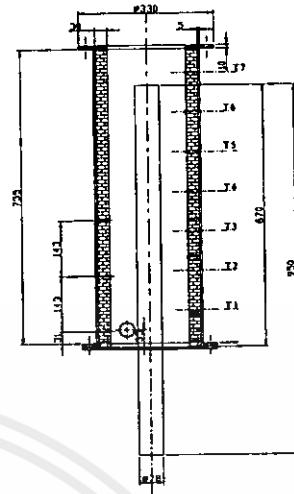
- ก. ทำการนำแกลบใส่ในถาดอะลูมิเนียมขนาดใหญ่
- ข. นำถาดที่ใส่แกลบไว้วางลงในเตาอบแล้วทำการอบที่อุณหภูมิ 105°C จนกระทั่งน้ำหนักของแกลบที่ทำการอบไม่มีการเปลี่ยนแปลง โดยทั่วไปเวลาที่ใช้ในการอบประมาณ 24 ชั่วโมง
- ค. ทำการเตรียมเชื้อเพลิงแกลบให้มีความชื้นโดยการฉีดสเปรย์น้ำลงในแกลบที่เตรียมไว้แล้วทำการชั่งน้ำหนักแกลบให้มีความชื้นโดยน้ำหนักตามที่กำหนดไว้ โดยใช้สมการความชื้น ดังนี้

$$MC_{wet} = \frac{WW - DW}{WW} \times 100 \quad (1)$$

โดยที่ MC คือ ปริมาณความชื้น (%)

WW คือ น้ำหนักของแกลบเปียก (kg)

DW คือ น้ำหนักของแกลบแห้ง (kg)



รูปที่ 2 ลักษณะของห้องเผาไหม้แบบวอร์เทค

จากนั้นเราทำการทดลองโดยขั้นตอนการทดลองสามารถอธิบายเป็นข้อ ๆ ได้ดังนี้

- 3.1 ทำการอุ่นเตาโดยใช้เชื้อเพลิง LPG จนกระทั่งอุณหภูมิภายในเตาประมาณ 400°C จากนั้นทำการเริ่มป้อนเชื้อเพลิงแกลบความชื้น 9.2% พร้อมกับอากาศปฐมภูมิ จนกระทั่งอุณหภูมิภายในเตาประมาณ 700°C แล้วทำการเอาชุดอุณหภูมิออก
- 3.2 ทำการปรับอัตราการไหลของอากาศโดยใช้ข้อมูลจากร่างที่ 1 เพื่อทำการคำนวณให้มีค่า Equivalence ratio เท่ากับ 0.8 พร้อมทั้งทำการปรับอัตราการป้อนเชื้อเพลิงแกลบให้มีค่าเท่ากับ 0.3 kg/min
- 3.3 ทำการวัดอุณหภูมิภายในเตาเผาจำนวน 7 จุด โดยใช้ Thermocouple type K โดยที่ทำการกำหนดระยะของ Thermocouple ไว้ที่ระยะที่ 1 และทำการบันทึกผลการทดลองลงตารางบันทึกผล
- 3.4 ทำการวัดอุณหภูมิและปรับระยะของ Thermocouple ให้อยู่ที่ระยะที่ 2, 3, 4 และ 5 ตามลำดับ
- 3.5 ทำการปรับค่า Equivalence ratio เท่ากับ 1.0 และ 1.2 ตามลำดับ แล้วทำการทดลองซ้ำข้อ 2 – 4
- 3.6 ทำการเปลี่ยนเชื้อเพลิงแกลบที่มีค่าความชื้น 12% และ 15% ตามลำดับ แล้วทำการทดลองซ้ำข้อ 2 – 5

ค่า Equivalence ratio เป็นค่าที่แสดงถึงปริมาณอากาศต่อเชื้อเพลิงที่ใช้ในการเผาไหม้จริงต่อทางทฤษฎี เราจะหาว่า Equivalence ratio ได้จากสมการต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้เพื่อวัตถุประสงค์อื่นใดได้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากผู้จัดทำ

$$\Phi = \frac{(m_o / m_f)_{act}}{(m_o / m_f)_{stoc}} \quad (2)$$

เมื่อ m_o คือ อัตราการไหลของอากาศ (kg/min)

m_f คือ อัตราการไหลของเชื้อเพลิง (kg/min)

โดยที่ $\Phi < 1$ คืออัตราส่วนผสมหนา (Rich)

$\Phi = 1$ คืออัตราส่วนผสมพอดี (Stoichiometric)

$\Phi > 1$ คืออัตราส่วนผสมบาง (Lean)

อัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศทุกชนิดต่ออากาศทั้งหมดเป็นค่าที่บ่งชี้ถึงความรุนแรงของวอร์เทคของการไหล ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\lambda = \frac{Q_s}{Q_T} \quad (3)$$

เมื่อ Q_s คือ อัตราการไหลของอากาศชนิดย่อย

Q_T คือ อัตราการไหลของอากาศทั้งหมด

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของเชื้อเพลิงแกลบ

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

4. การวิเคราะห์การทดลอง

การทดลองนี้ได้ศึกษาถึงผลของความชื้นของเชื้อเพลิงแกลบที่มีผลกระทบต่ออุณหภูมิภายในเตาเผาแบบวอร์เทค โดยที่ได้ทำการกำหนดค่าปริมาณความชื้นในเชื้อเพลิงไว้จำนวน 3 ค่าคือ 9.2% ,12% และ 15% โดยน้ำหนัก และได้ทำการหาค่า Equivalence ratio ที่เหมาะสมกับเตาเผาแบบวอร์เทคโดยที่ทำการทดลองกับค่า Equivalence ratio ที่ 0.8 , 1.0 , 1.2 และยังได้ทำการเปลี่ยนแปลงค่า λ เท่ากับ 0.2 , 0.3 และ 0.4

4.1 อิทธิพลของค่า Equivalence ratio

รูปที่ 3 (a) แสดงการกระจายอุณหภูมิที่ค่า Equivalence ratio เท่ากับ 0.8 จะเห็นว่ามีการกระจายอุณหภูมินั้นไม่ค่อยสม่ำเสมอ โดยที่อุณหภูมิจะมีค่าสูงสุดอยู่บริเวณจุดกึ่งกลางเตา

และอุณหภูมิลดต่ำลงที่ผนังเตา ส่วนด้านล่างของเตาเผาจะเห็นได้ว่ามีอุณหภูมิต่ำกว่าบริเวณด้านบนของเตาเพราะจะต้องใช้พลังงานส่วนหนึ่งไปไล่ความชื้นที่เข้ามาที่เชื้อเพลิงแกลบทำให้อุณหภูมิที่ได้จากการเผาไหม้มีค่าต่ำ ผลของการเพิ่มค่า λ เท่ากับ 0.4 จะให้อุณหภูมิสูงกว่าค่า λ ที่ 0.2 และ 0.3 เพราะว่าการเกิดการผสมคลุกเคล้าระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงเพิ่มมากขึ้นมีผลทำให้การเผาไหม้สมบูรณ์ยิ่งขึ้นส่งผลให้อุณหภูมิภายในเตาเผามีค่าสูงขึ้น

รูปที่ 3 (b) แสดงการกระจายอุณหภูมิที่ค่า Equivalence ratio เท่ากับ 1.0 จะเห็นว่ามีการกระจายอุณหภูมิก่อนข้างสม่ำเสมอ สำหรับผลของการเพิ่มอากาศทุกชนิดเมื่อมีการเพิ่มอากาศมากขึ้นจะทำให้อุณหภูมิกายในเตาเผาสูงขึ้น แต่เมื่ออากาศที่ใช้ในการเผาไหม้เพียงพอกับการเผาไหม้การเพิ่มอากาศทุกชนิดมากขึ้นก็จะไม่มีผลต่อการเพิ่มอุณหภูมิกายในเตาเผา ดังจะเห็นได้จาก λ เท่ากับ 0.3 และ 0.4 มีอุณหภูมิต่างกันไม่มากนัก

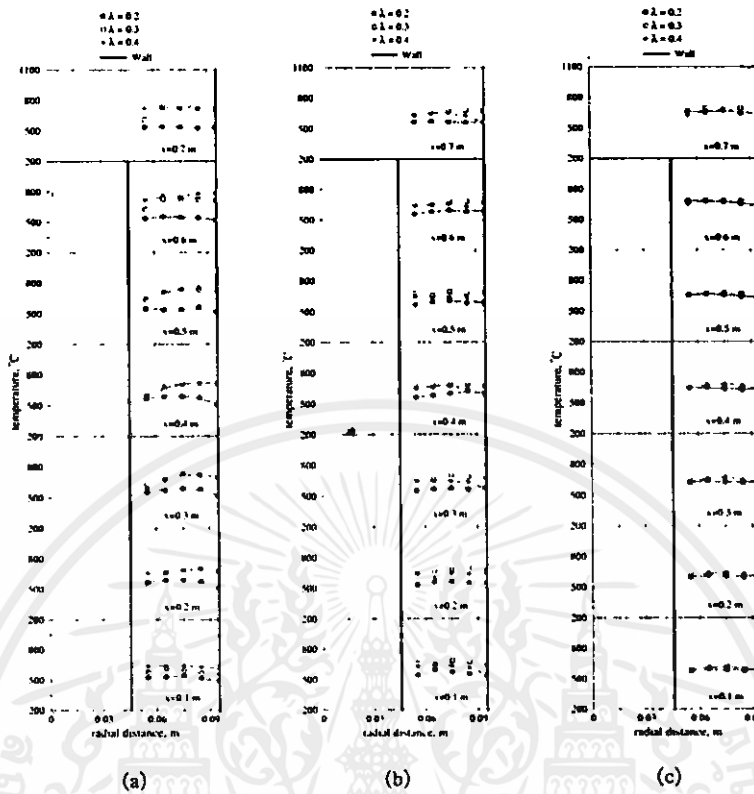
รูปที่ 3 (c) แสดงการกระจายอุณหภูมิที่ค่า Equivalence ratio เท่ากับ 1.2 จะพบว่ามีการกระจายอุณหภูมิก่อนข้างสม่ำเสมอเช่นเดียวกับกรณีค่า Equivalence ratio เท่ากับ 1.0

จากกราฟ ทั้งสามรูปเมื่อนำมาเปรียบเทียบกันเพื่อหาค่า Equivalence ratio ที่เหมาะสมกับเตาเผาพบว่าค่า Equivalence ratio เท่ากับ 1.0 เป็นค่าที่เหมาะสมเนื่องจากการกระจายอุณหภูมิมีก่อนข้างสม่ำเสมอและอุณหภูมิจากเตาเผามีค่าสูงสุดและผลของอากาศทุกชนิดจะมีผลต่ออุณหภูมิกายในเตาเผาเมื่อค่า Equivalence ratio < 1.0 เนื่องจากอากาศทุกชนิดนี้ทำให้เกิดการผสมคลุกเคล้ากับเชื้อเพลิงได้มากขึ้นส่งผลให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

4.2 อิทธิพลของความชื้น

รูปที่ 4 เป็นกราฟแสดงการกระจายอุณหภูมิกายในเตาเผา โดยที่กำหนดค่า Equivalence ratio ให้มีค่าเท่ากับ 1.0 และมีการเปลี่ยนแปลงค่าความชื้นเท่ากับ 9.2%,12% และ 15% โดยน้ำหนัก พร้อมทั้งเปลี่ยนแปลงค่า λ ตามค่า คือ 0.2 , 0.3 และ 0.4 ซึ่งผลการทดลองสามารถอธิบายได้ดังนี้

รูปที่ 4 (a) แสดงการกระจายอุณหภูมิกายในเตาเผาที่ค่าความชื้นเท่ากับ 9.2% เราจะพบว่ามีการกระจายของอุณหภูมิมีก่อนข้างสม่ำเสมอ โดยเฉพาะที่บริเวณด้านล่างของห้องเผาไหม้มีอุณหภูมิต่ำกว่าบริเวณกลางเตาเนื่องจากเป็นบริเวณที่มีการ



รูปที่ 3 กราฟการกระจายอุณหภูมิภายในเตาเผาที่ความชื้น 12% (a) $\Phi = 0.8$ (b) $\Phi = 1.0$ (c) $\Phi = 1.2$

ป้อนเชื้อเพลิงแกลบใหม่เข้าสู่ห้องเผาใหม่ทำให้ต้องใช้พลังงานส่วนหนึ่งในการเผาไหม้ความชื้นที่อยู่ในเชื้อเพลิงแกลบทำให้อุณหภูมิในบริเวณดังกล่าวมีค่าต่ำกว่าบริเวณด้านบนของเตาเผาและจะเห็นว่าเมื่อเพิ่มอากาศหุดยุมมากขึ้นจะทำให้อุณหภูมิภายในเตาเผาเพิ่มสูงขึ้นโดยที่อุณหภูมิสูงสุดที่ได้มีค่าประมาณ 1,000°C

รูปที่ 4 (b) แสดงการกระจายอุณหภูมิภายในเตาที่ค่าความชื้นเท่ากับ 12% จะเห็นได้คล้ายกับกรณีความชื้น 9.2% แต่อุณหภูมิสูงสุดภายในเตาเผามีค่าประมาณ 700°C ซึ่งเป็นผลจากปริมาณความชื้นของเชื้อเพลิงแกลบที่เพิ่มสูงขึ้นทำให้ต้องใช้พลังงานเพิ่มมากขึ้นในการทำให้ความชื้นในเชื้อเพลิงหมดไปทำให้ผลของอุณหภูมิที่ได้ลดต่ำลง

รูปที่ 4 (c) แสดงการกระจายอุณหภูมิภายในเตาเผาที่ค่าความชื้น 15% จะพบว่ามิตลักษณะเดียวกันกับทั้งสองกรณีข้างต้น แต่อุณหภูมิสูงสุดที่ได้จากเตาเผามีค่าประมาณ 600°C

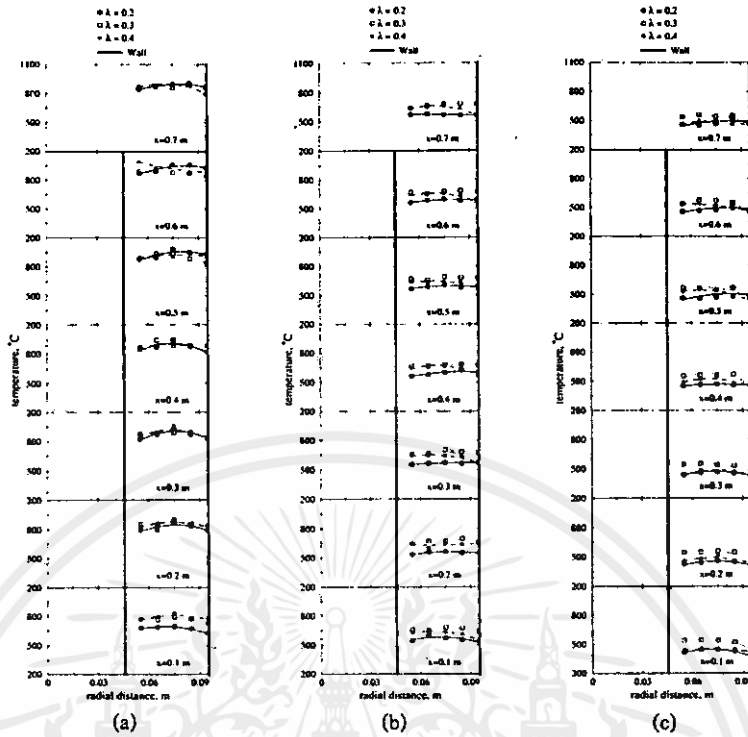
จากรูปทั้งสามรูปจะเห็นได้ว่าที่ปริมาณความชื้น 9.2% จะให้อุณหภูมิภายในเตาเผาสูงสุดเพราะที่ปริมาณความชื้น 9.2% จะใช้พลังงานน้อยที่สุดในการไล่ความชื้นออกจากเชื้อ

เพลิงเป็นผลให้อุณหภูมิภายในเตาเผาสูงกว่าที่ปริมาณความชื้นในเชื้อเพลิงมากกว่า และเป็นที่น่าสังเกตว่าเมื่อปริมาณความชื้นมีค่าเพิ่มมากขึ้นทำให้เกิดการติดไฟของเชื้อเพลิงแกลบยากขึ้นทำให้เป็นปัญหาในการเผาไหม้เพราะจะทำให้เกิดการเผาไหม้ดับลง ซึ่งเกิดจากอุณหภูมิภายในเตาสูงไม่เพียงพอต่อการจุดติดไฟได้เองของเชื้อเพลิงแกลบและยังยากต่อการป้อนแกลบเข้าสู่ห้องเผาใหม่

5. สรุปผลการทดลอง

ผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่าค่า Equivalence ratio เท่ากับ 1.0 ให้ผลของการกระจายอุณหภูมิภายในเตาที่สม่ำเสมอและมีค่าสูงสุด สำหรับผลของอากาศหุดยุมจะมีผลก็ต่อเมื่อค่า Equivalence ratio ≤ 1.0 ส่วนค่าปริมาณความชื้นที่มีอยู่ในเชื้อเพลิงแกลบมีผลต่ออุณหภูมิภายในเตา ดังจะเห็นได้ว่าปริมาณความชื้นที่ 15% และ 12% จะให้อุณหภูมิภายในเตาเผามีค่าต่ำกว่าปริมาณความชื้นที่ 9.2% เพราะฉะนั้นในการนำเชื้อเพลิงแกลบมานั้นเราควรจะมีการปรับค่าความชื้นให้ต่ำลงเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการเผาไหม้

Suppachal: Effect of Rice Husk Moisture on Combustion Characteristics



รูปที่ 4 กราฟการกระจายอุณหภูมิภายในเตาเผาที่ $\Phi = 1.0$ (a) ความชื้น 9.2% (b) ความชื้น 12% (c) ความชื้น 15%

กิตติกรรมประกาศ

บทความนี้สำเร็จไปได้ด้วยดีขอขอบคุณ สำนักงานกองทุนสนับสนุนงานวิจัย (สกว.) และภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานครที่ให้การสนับสนุนอุปกรณ์การทดลอง

เอกสารอ้างอิง

[1] สุพจน์ นำน้าโชค. "การเผาไหม้เชื้อเพลิงในห้องเผาไหม้แบบไซโคลนชนิดอากาศเข้าหลายช่องทาง" วิทยานิพนธ์ภาควิชาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2539.

[2] เรือโท ประจักษ์ จิตร์พิทย์. "การศึกษารูปแบบการไหลและลักษณะการสันดาปของห้องเผาไหม้แบบไซโคลนที่ใช้น้ำมันเป็นเชื้อเพลิง" วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล บัณฑิตวิทยาลัยสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2535.

[3] ธัชชัย ท้วตวิล และ สันติ วัชรอากาศาไพบูลย์. "เตาเผาวัชพืชมูลทางเกษตรโดยใช้อากาศหมุนวน" วิทยานิพนธ์ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2534.

[4] อติศักดิ์ ชูจินดา. "เตาเผาแก๊บสำหรับเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบฟลูอิดไดซ์เบด" วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาเทคโนโลยีพลังงานบัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าพระนาบุรี, 2540.

[5] บุญเรือง ศรีสวัสดิ์. "การปรับปรุงสมรรถนะเตาเผาแก๊บ" วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาเทคโนโลยีพลังงาน บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าพระนาบุรี, 2541.

[6] 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

[7] American Society for Testing and Materials. Annual book of ASTM standards. Philadelphia, Pa., 1983.

เอกสารนี้เป็น... ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีงานพิมพ์

ประวัติผู้เขียน

นายศุภชัย เลื่อนลอย เกิดเมื่อวันที่ 22 ธันวาคม 2519 ที่จังหวัดนครศรีธรรมราช สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร ปีการศึกษา 2541 และได้เข้าศึกษาต่อระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมเครื่องกล ณ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2542



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้