

พฤติกรรมการเผาไหม้ชีวมวลในเตาเผาฟลูอิดไคซ์เบดที่มีคريبแนวขวาง

BIOMASS COMBUSTION BEHAVIOR IN A FLUIDIZED-BED WITH  
TRANSVERSE RIBS



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของงานวิจัยที่สนับสนุนโดยศูนย์วิจัยวิศวกรรมภาคอุตสาหกรรมแห่งชาติ

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2552

KMITL-2009-EN-M-030-105

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

พฤติกรรมการเผาไหม้ชีวมวลในเตาเผาฟลูอิดไคซ์เบดที่มีครีบนแนวขวาง

**BIOMASS COMBUSTION BEHAVIOR IN A FLUIDIZED-BED WITH  
TRANSVERSE RIBS**



T104508

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน.....104508  
วัน,เดือน,ปี..... 4 พ.ย. 2552

b. 121 A0600  
i.....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาดมหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2552

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในเท่านั้น ไม่ควรนำออกเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**BIOMASS COMBUSTION BEHAVIOR IN A FLUIDIZED-BED WITH  
TRANSVERSE RIBS**



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

**2009**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไปอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
KMITL-2009-EN-M-030-105  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**COPYRIGHT 2009**

**FACULTY OF ENGINEERING**

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ พฤติกรรมการเผาไหม้ชีวมวลในเตาเผาฟลูอิดไคซ์เบดที่มีครีบนแนวขวาง  
Thesis Title Biomass Combustion Behavior in a Fluidized-Bed with Transverse Ribs  
นักศึกษา นายจิตติวัฒน์ ผูนลาวงษ์  
รหัสประจำตัว 48060351  
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล  
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.พงษ์เจต พรหมวงค์  
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMIL-2009-EN-M-030-105

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ลายมือชื่อ
รศ.ดร.ชินรัชย์	เชียรพงษ์
รศ.ดร.จารุวัตร	เจริญสุข
ผศ.มณฑล	ใจกุศล
รศ.ดร.สมิทธิ์	เอี่ยมสอาด
รศ.ดร.พงษ์เจต	พรหมวงค์

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันพฤหัสบดีที่ 9 กรกฎาคม พ.ศ. 2552 เวลา 10.00-12.00 น.

สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 3 ห้องประชุม 2

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร.กอบชัย เดชหาญ)

คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์

วันที่ 9 กรกฎาคม พ.ศ. 2552

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	พฤติกรรมการณ์เผาไหม้ชีวมวลในเตาเผาฟลูอิดไคซ์เบดที่มีกริบ
	แนวขวาง
นักศึกษา	นายจิตติวัฒน์ ผุณกลางย์
รหัสนักศึกษา	48060351
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
พ.ศ.	2552
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.พงษ์เจต พรหมวงศ์

### บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการศึกษาในเชิงทดลองเกี่ยวกับอิทธิพลของเตาเผาฟลูอิดไคซ์เบดต่อพฤติกรรมการณ์เผาไหม้แกลบ โดยทำการทดลองในเตาเผาแกลบ 4 ลักษณะ คือ เตาฟลูอิดไคซ์เบดทรงกลมมีเฟรียบอร์ดใหญ่, เตาฟลูอิดไคซ์เบดทรงกลมมีเฟรียบอร์ดใหญ่และมีกริบขวาง, เตาฟลูอิดไคซ์เบดทรงสี่เหลี่ยมมีเฟรียบอร์ดใหญ่, และเตาฟลูอิดไคซ์เบดทรงสี่เหลี่ยมมีเฟรียบอร์ดใหญ่และมีกริบขวาง กรณีของการทดลองได้ทำการทดลองที่อัตราการไหลเชิงมวลของแกลบ ที่ 8.64 kg/hr โดยทำการปรับปริมาณอากาศส่วนเกินที่ 40 - 70% จากนั้นทำการวัดและสังเกตการณ์การกระจายอุณหภูมิในตำแหน่งต่างๆภายในเตา, ขี้เถ้า และควันที่ออกมาพร้อมกับก๊าซไอเสีย จากการทดลองพบว่าเตาฟลูอิดไคซ์เบดทรงสี่เหลี่ยมมีเฟรียบอร์ดใหญ่ ที่เปอร์เซ็นต์อากาศส่วนเกินเท่ากับ 50% จะมีการกระจายตัวของห้องเผาไหม้เสถียรที่สุดอุณหภูมิจะอยู่ระหว่าง 900-960 °C และเตาฟลูอิดไคซ์เบดทรงสี่เหลี่ยมมีเฟรียบอร์ดใหญ่และมีกริบขวาง ที่เปอร์เซ็นต์อากาศส่วนเกินเท่ากับ 40% จะมีอุณหภูมิสูงสุดประมาณ 1000 °C จากการวิเคราะห์ก๊าซไอเสียที่ทางออกปริมาณของ ก๊าซ CO อยู่ระหว่าง 290-365 ppm และ ก๊าซ NO<sub>x</sub> อยู่ระหว่าง 192-285 ppm และก๊าซ O<sub>2</sub> อยู่ระหว่าง 8.55%-20.69% และ ก๊าซ CO<sub>2</sub> อยู่ระหว่าง 4.12%-6.8% ประสิทธิภาพการเผาไหม้จะอยู่ระหว่าง 98.7%-99.5%

<b>Thesis Title</b>	Biomass combustion behavior in a fluidized-bed with transverse ribs
<b>Student</b>	Mr. Thitiwat Phunlawong
<b>Student ID.</b>	48060352
<b>Degree</b>	Master of Engineering
<b>Program</b>	Mechanical Engineering
<b>Year</b>	2009
<b>Thesis Advisor</b>	Assoc.Prof.Dr. Pongjet Promvonge

### ABSTRACT

This thesis presents an experimental study of influence of transverse ribs of a fluidized-bed on rice husk combustion characteristics. The experiments were made in 4 type of the fluidized bed: The cylindrical combustor with a large freeboard, The cylindrical combustor with a large freeboard and transverse ribs, The rectangular combustor with a large freeboard and The rectangular combustor with a large freeboard and transverse ribs. The large freeboard having transverse ribs inside was designed to produce a good mixing between fuel and air and to increase residence time of fuel particles. The study was made by feeding the mass flow rates of rice husk at 8.64 kg/hr with excess air between 40 and 70%. Temperature distributions inside the bed were measured at selected locations and fly ash, smoke and exhaust gas emissions were observed and measured by a gas analyzer. From experimental results, it is found that for the case of the rectangular combustor with a large freeboard and transverse ribs with 40% excess air provides the best and stable combustion with the maximum temperature about 1000°C. From exhaust gas emission measurements, it is seen that CO is in a range of 290-365 ppm, CO<sub>2</sub> between 4.12%-6.8%, O<sub>2</sub> between 8.55%-20.69%, NO<sub>x</sub> between 192-285 ppm. and combustion efficiency ranging from 98.9% to 99.5%

# กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้อย่างดี ด้วยคำแนะนำ และคำปรึกษาจาก รศ.ดร. พงษ์เจต  
พรหมวงศ์ ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ข้าพเจ้ารู้สึกทราบบ้างในความอนุเคราะห์จากท่าน  
และขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณท่านอาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลทุกท่าน ที่ได้ถ่ายทอดวิชาความรู้ให้แก่  
ข้าพเจ้า ขอขอบพระคุณยิ่ง

ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ในภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอม  
เกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกคนที่ให้คำแนะนำต่างๆ และคอยให้กำลังใจเสมอมา

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัวของข้าพเจ้าที่เป็นกำลังใจ  
และให้การสนับสนุนในทุกเรื่องๆ ทำให้ข้าพเจ้าสามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี  
คุณค่าและประโยชน์อันพึงมาจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอบแต่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

จิตติวัฒน์ ผูนลาวงษ์

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	IX
สารบัญรูป.....	X
รายการคำย่อและสัญลักษณ์.....	XV
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	3
1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....	3
1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	3
1.5 ขอบเขตการวิจัย.....	3
1.6 โครงสร้างของวิทยานิพนธ์.....	4
บทที่ 2 วรรณกรรมปริทรรศน์.....	5
2.1 เตาเผาชนิดต่างๆ.....	5
2.1.1 เตาแบบตะกรับ.....	5
2.1.2 เตาเผาไซโคลน.....	6
2.1.3 เตาเผาฟลูอิดซ์เบด.....	6
2.1.4 เตาเผาแบบวอร์เทค.....	7
2.2 หลักการและแนวคิด.....	7
2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	8
2.3.1 งานวิจัยภายในประเทศ.....	8
2.3.2 งานวิจัยในต่างประเทศ.....	12
บทที่ 3 ทฤษฎีพื้นฐานที่ใช้ในการวิจัย.....	17
3.1 บทนำ.....	17
3.1.1 รู้จักเชื้อเพลิงที่นำมาใช้.....	17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.1.2 การเผาไหม้ และกระบวนการเผาไหม้.....	17
3.1.3 การไหลของของไหล.....	18
3.2 ชนิดของเชื้อเพลิงชีวมวล, คุณสมบัติ, ส่วนประกอบ และคุณลักษณะการเผาไหม้	
.....	18
3.2.1 ชนิดของเชื้อเพลิงชีวมวล.....	18
3.1.1.1 เชื้อเพลิงชีวมวลจากไม้.....	19
3.1.1.2 ชีวมวลจากการเกษตร.....	19
3.1.1.3 เชื้อเพลิงชีวมวลจากอุตสาหกรรม.....	19
3.1.1.4 เชื้อเพลิงชีวมวลจากของเหลือใช้จากคนและสัตว์.....	20
3.2.2 ส่วนประกอบของเชื้อเพลิงชีวมวล.....	20
3.2.3 คุณลักษณะการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงชีวมวล.....	21
3.2.3.1 ขนาดและความหนาแน่นของเชื้อเพลิงชีวมวล.....	21
3.2.3.2 องค์ประกอบหลักของเชื้อเพลิงชีวมวล.....	22
3.3 เชื้อเพลิงแกลบ.....	22
3.4 คุณสมบัติบางประการทางเทอร์โมไดนามิกส์.....	24
3.5 ทฤษฎีการเผาไหม้.....	24
3.5.1 ปฏิกิริยาเคมีของการเผาไหม้.....	25
3.5.2 การผสม.....	26
3.5.3 การติดไฟหรือการลุกไหม้.....	27
3.5.4 การเผาไหม้อุณหภูมิเชื้อเพลิงแข็ง.....	29
3.5.5 แบบจำลองการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง.....	29
3.5.6 ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง.....	31
3.6 ประสิทธิภาพการเผาไหม้.....	33
3.7 ทฤษฎีฟลูอิดไดนามิกส์.....	33
3.7.1 ประเภทของฟลูอิดไดนามิกส์.....	33
3.7.2 ลักษณะฟลูอิดไดนามิกส์.....	33
3.7.3 ข้อได้เปรียบและเสียเปรียบของฟลูอิดไดนามิกส์.....	35
3.7.3.1 ข้อได้เปรียบ.....	35
3.7.3.2 ข้อเสียเปรียบ.....	36

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.7.4 ทฤษฎีการคำนวณฟลูอิดเซชัน.....	36
3.7.5 แผ่นกระจายของไหล.....	41
3.8 กระบวนการเผาไหม้อนุภาคในฟลูอิดเซชัน.....	43
3.9 การลुकคิดไฟของอนุภาคในฟลูอิดเซชัน.....	44
3.10 การปรับปรุงการเผาไหม้.....	45
3.10.1 การปรับปรุงการออกแบบห้องเผาไหม้.....	45
3.10.2 เทคนิคการเผาไหม้แบบเป็นขั้นตอน.....	46
3.10.3 การเตรียมส่วนผสมของเชื้อเพลิง.....	46
3.10.4 การสร้างเสถียรภาพของเปลวไฟ.....	47
3.10.5 วิธีการไหลหมุนเวียนย้อนกลับ.....	47
3.10.6 การหมุนทวนของอากาศทุติยภูมิ.....	49
3.10.7 การอุ่นอากาศ.....	50
บทที่ 4 การออกแบบและการคำนวณ.....	51
4.1 บทนำ.....	51
4.2 การออกแบบเตาเผา.....	51
4.2.1 ลักษณะของเตาเผา.....	52
4.2.2 ระบบการป้อนเชื้อเพลิงและอากาศ.....	53
4.3 การคำนวณปริมาณอากาศที่ต้องการในการเผาไหม้ทางทฤษฎี.....	54
4.4 การคำนวณคุณสมบัติทางกายภาพต่างๆของเบดที่เป็นเกลบ.....	57
4.4.1 การหาสัดส่วนช่องว่าง(Void fraction, $\epsilon_m$ ) และความกลม(Sphericity, $\phi_s$ ) ของเกลบ.....	57
4.4.2 เส้นผ่านศูนย์กลางของทรงกลมเทียบเท่ากับเกลบ(diameter of sphere having the volume, $d_p$ ).....	58
4.4.3 ความหนาแน่นของเกลบ.....	58
4.4.4 การหาปริมาณความชื้น.....	58
4.4.5 การหาความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดเซชัน ( $U_{mf}$ ).....	59
4.4.6 ความเร็วสุดท้ายของการฟลูอิดเซชัน(Terminal Velocity of Particles, $U_t$ ).....	61

เอกสารนี้เป็นเอกสาร 4.5 การคำนวณหาความสัมพันธ์ระหว่างขนาดห่อท่อต่อแผ่นกระจายลมโดยนำค่า.....62  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.6 การคำนวณหาความเร็วและ Re ในตาเผา.....	64
<b>บทที่ 5 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง.....</b>	<b>66</b>
5.1 บทนำ.....	66
5.2 การจัดเตรียมอุปกรณ์และเครื่องมือในการทดลอง.....	66
5.2.1 เตาเผาฟลูอิดไชน์เบด.....	66
5.2.2 ระบบป้อนเชื้อเพลิง.....	68
5.2.3 ชุดป้อนอากาศปฐมภูมิและอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน.....	69
5.2.4 ระบบวัดอัตราการไหลของอากาศ.....	70
5.2.5 ระบบวัดอุณหภูมิ.....	71
5.2.6 ชุดอุ่นตาเผา.....	71
5.2.7 ระบบดักจับฝุ่นขี้เถ้า.....	72
5.2.8 เครื่องวิเคราะห์ก๊าซไอเสีย.....	72
5.3 การติดตั้งอุปกรณ์ในการทดลอง.....	73
5.4 การอุ่นตาเผา.....	74
5.5 การทดลองและบันทึกผลการทดลอง.....	74
<b>บทที่ 6 ผลการทดลอง.....</b>	<b>76</b>
6.1 บทนำ.....	76
6.2 ผลกระทบของตาเผาเกลบฟลูอิดไชน์เบด.....	76
6.2.1 เตาเผาเกลบฟลูอิดไชน์เบดแบบทรงกระบอกผนังตาเป็นแบบผิวเรียบ ฟรี บอร์ดใหญ่.....	76
6.2.2 เตาเผาเกลบฟลูอิดไชน์เบดแบบผนังตาเป็นแบบทรงกระบอกแบบมีคريبขวาง ฟรีบอร์ดใหญ่.....	81
6.2.3 เตาเผาเกลบฟลูอิดไชน์เบดแบบผนังตาเป็นแบบทรงสี่เหลี่ยมผิวเรียบ ฟรีบอร์ดใหญ่.....	84
6.2.4 เตาเผาเกลบฟลูอิดไชน์เบดแบบผนังตาเป็นแบบทรงสี่เหลี่ยมมีคريبขวาง ฟรีบอร์ดใหญ่.....	90
6.2.5 เปรียบเทียบแต่ละกรณีของตาเผาฟลูอิดไชน์เบดชนิดต่างๆ.....	95

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้และขอสงวนสิทธิ์ในนามของเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 7 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	101
7.1 สรุปผล.....	101
7.2 ข้อเสนอแนะ.....	101
บรรณานุกรม.....	103
ภาคผนวก.....	106
ภาคผนวก ก. คุณสมบัติของเชื้อเพลิงแกลบ.....	107
ภาคผนวก ข. ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	113
ประวัติผู้เขียน.....	120



# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 ส่วนประกอบของเชื้อเพลิงชีวมวลต่างๆ.....	20
3.2 คุณสมบัติของเชื้อเพลิงชีวมวล.....	21
3.3 การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ.....	22
3.4 คุณสมบัติของเชื้อเพลิงแกลบ.....	23
3.5 ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงชนิดต่างๆ.....	23
3.6 ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงชีวมวล.....	32
4.1 องค์ประกอบของเชื้อเพลิงแกลบ.....	54
4.2 ปริมาณอากาศกรณีอัตราส่วนผสมพอดี (Stoichiometric)ที่ใช้ในการทดลอง.....	57
4.3 ตารางแสดงขนาดของรูและจำนวนรูของเบด.....	63
4.4 ค่า Re และ ความเร็วการไหลที่ตำแหน่งต่างๆของเตาเผาที่ใช้ในการทดลอง.....	65
ก-1 ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงชนิดต่างๆ.....	108
ก-2 คุณสมบัติของแกลบ.....	109
ก-3 การเปรียบเทียบเชื้อเพลิง.....	109
ก-4 แสดงรายละเอียดพื้นที่ปลูก ผลผลิตพืชหลัก และไม้ยางพารา ปี 2543/2544 และ 2544/2545 .....	110
ก-5 ศักยภาพชีวมวลในประเทศไทยปี 2544/2545.....	111
ก-6 ปริมาณการใช้ชีวมวลโดยเฉลี่ยต่อโรง.....	112

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ส่วนประกอบทั้ง 5 ส่วนที่นำมาประกอบเป็นตัวเตาของเสรีย ตู๊ประกาย.....	9
2.2 ไคอะแกรมการทดลองของเตาเผาฟลูอิโดซ์เบดแบบผิวคลื่น.....	10
2.3 แผนผังอุปกรณ์การทดลองเตาเผาฟลูอิโดซ์เบดของวิศิษฐ์ ลีลาผาดิกุล.....	11
2.4 การฉีดอากาศหตุติขุมิที่ระดับความสูงที่ต่างกันของ C. H. LIN, J. T. TENG and C. S. CHYANG.....	13
2.5 แบบจำลองของ 30 kW <sub>th</sub> atmospheric bubbling fluidised bed pilot plan of CIEMAT ของ L. Armesto , A. Bahillo , K. Veijonen, A.Cabanillas , and J. Otero 10.....	14
2.6 ไคอะแกรมการทดลองของเตาเผาของ W. Permchart และคณะ.....	15
3.1 ส่วนประกอบต่างๆที่เกี่ยวข้องต่อการศึกษา.....	18
3.2 คุณสมบัติของเชื้อเพลิงชีวมวล.....	19
3.3 องค์ประกอบของเชื้อเพลิงแข็ง.....	28
3.4 ปฏิกิริยาการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง.....	28
3.5 กระบวนการการเผาไหม้อุณหภูมิ.....	29
3.6 แบบจำลองการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง.....	30
3.7 บริเวณการเกิดการเผาไหม้.....	30
3.8 ลักษณะชั้นเชื้อเพลิงระหว่างการเผาไหม้.....	30
3.9 แสดงระดับของเบดในห้องทดลอง.....	34
3.10 ลักษณะของฟลูอิโดซ์เบด.....	35
3.11 แสดงความดันที่เกิดขึ้น ณ ตำแหน่งต่างๆ ในชุดการทดลอง.....	38
3.12 ความสัมพันธ์ระหว่างความกลสมและความพรุนของเบด.....	39
3.13 ลักษณะของตัวกระจายแบบแผ่นเจาะรู.....	41
3.14 คุณภาพของฟลูอิโดซ์เบดที่เกิดจากแผ่นกระจายของไหลต่างชนิดกัน.....	42
3.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า C <sub>d,or</sub> กับเรย์โนลด์นัมเบอร์ (Re <sub>c</sub> ).....	43
3.16 รูปแบบการลุกติดไฟของอนุภาค : a, b, เป็น preignition และ c, d, e เป็น postignition.....	44
3.17 ปรัชญาการ Recirculation.....	48
3.18 การฉีดอากาศหตุติขุมิเข้าสู่ห้องเผาไหม้.....	49

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.1 ลักษณะของเตาเผาแบบต่างๆที่ได้ทำการออกแบบ (ก) เตาเผาฟลูอิดไคซ์เบดแบบทรงกระบอก ผิวเรียบฟริบอร์คใหญ่ (ข) เตาเผาฟลูอิดไคซ์เบดแบบทรงกระบอกมีครีบบางฟริบอร์คใหญ่ (ค) เตาเผาฟลูอิดไคซ์เบดแบบทรงสี่เหลี่ยมผิวเรียบฟริบอร์คใหญ่ (ง) เตาเผาฟลูอิดไคซ์เบดแบบ ทรงสี่เหลี่ยมมีครีบบางฟริบอร์คใหญ่.....	52
4.2 รายละเอียดของเตาที่คิดครีบบ.....	53
4.3 ลักษณะการป้อนของเชื้อเพลิงแกลบ.....	53
5.1 ลักษณะของเตาเผาแบบต่างๆ (ก) เตาเผาฟลูอิดไคซ์เบดแบบทรงกระบอกผิวเรียบและฟริบอร์ค ใหญ่ (ข) เตาเผาฟลูอิดไคซ์เบดแบบทรงกระบอกมีครีบบและฟริบอร์คใหญ่ (ค) เตาเผาฟลูอิดไคซ์ เบดแบบทรงสี่เหลี่ยมผิวเรียบ ฟริบอร์คใหญ่ (ง) เตาเผาฟลูอิดไคซ์เบดแบบทรงสี่เหลี่ยมมีครีบบ ฟริบอร์คใหญ่.....	67
5.2 ระบบป้อนเชื้อเพลิงแกลบ.....	68
5.3 Inverter.....	68
5.4 Motor.....	69
5.5 Screw Feed.....	69
5.6 Hopper.....	69
5.7 Blower และ Motor.....	70
5.8 ลักษณะของแผ่นออริฟิส.....	70
5.9 Inclined Manometer.....	70
5.10 เครื่องมือวัดความเร็วลม testo 445.....	71
5.11 เทอร์โมคัปเปิล.....	71
5.12 Data logger.....	71
5.13 ถังแก๊สและหัวเผา.....	72
5.14 Cyclone.....	72
5.15 เครื่องวิเคราะห์ก๊าซไอเสีย TESTO 350M XL.....	73
5.16 แผนผังอุปกรณ์การทดลองเตาเผาฟลูอิดไคซ์เบด .....	73
6.1 อุณหภูมิตามแนวรัศมีของเตาเผาฟลูอิดไคซ์เบดแบบทรงกระบอกผนังเตาเป็นแบบผิวเรียบ ฟริบอร์คใหญ่ อัตราป้อน 9 kg/hr อากาศส่วนเกิน 40%, 60%, และ 80%.....	77

## สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.2 การกระจายอุณหภูมิตามแนวแกนของเตาเผาฟลูอิดไอซ์เบดแบบทรงกระบอกผนังเตาเป็นแบบผิวเรียบฟริบอร์คใหญ่ ที่อัตราการป้อน 9 kg/hr อากาศส่วนเกิน 40%, 60%, และ 80%.....	78
6.3 การกระจายอุณหภูมิตามแนวแกนของเตาเผาฟลูอิดไอซ์เบดแบบทรงกระบอกผนังเตาเป็นแบบผิวเรียบที่ปรับเปลี่ยนลมด้านหลัก(Primary air) เป็น 50%, 40%, 30%, 20%, และ 10% .....	78
6.4 การกระจายอุณหภูมิตามแนวรัศมีของเตาเผาฟลูอิดไอซ์เบดแบบทรงกระบอกผนังเตาเป็นแบบผิวเรียบ ฟริบอร์คใหญ่ปรับเปลี่ยนลมด้านหลัก(Primary air) เป็น 50%, 40%, 30%, 20%, และ 10%.....	79
6.5 ปริมาณของไอเสียที่ค่าลมหลักต่างๆ ของเตาเผาแกลบฟลูอิดไอซ์เบดทรงกระบอกแบบผิวเรียบ ที่อัตราการป้อน 9 kg/hr ค่าอากาศส่วนเกิน 60%.....	80
6.6 ประสิทธิภาพการเผาไหม้ที่ค่าลมหลักต่างๆ ของเตาเผาแกลบฟลูอิดไอซ์เบดทรงกระบอกแบบผิวเรียบ ที่อัตราการป้อน 9 kg/hr ค่าอากาศส่วนเกิน 60%.....	80
6.7 การกระจายอุณหภูมิตามแนวรัศมีของเตาเผาฟลูอิดไอซ์เบดแบบทรงกระบอกมีคิริบขวาง ฟริบอร์คใหญ่อากาศส่วนเกิน 60% ที่ปรับเปลี่ยนลมด้านหลัก (Primary air) เป็น 50%, 60%, 70%, 80%, และ 90% .....	82
6.8 การกระจายอุณหภูมิตามแนวแกนของเตาเผาฟลูอิดไอซ์เบดแบบทรงกระบอกมีคิริบขวาง ฟริบอร์คใหญ่อากาศส่วนเกิน 60% ที่ปรับเปลี่ยนลมด้านหลัก (Primary air) เป็น 50%, 40%, 30%, 20%, และ 10%.....	83
6.9 ปริมาณของไอเสียที่ค่าลมหลักต่างๆ ของเตาเผาแกลบฟลูอิดไอซ์เบดทรงกระบอกแบบมีคิริบขวาง ที่อัตราการป้อน 9 kg/hr ค่าอากาศส่วนเกิน 60%.....	84
6.10 ประสิทธิภาพการเผาไหม้ที่ค่าลมหลักต่างๆ ของเตาเผาแกลบฟลูอิดไอซ์เบดทรงกระบอกแบบมีคิริบขวาง ที่อัตราการป้อน 9 kg/hr ค่าอากาศส่วนเกิน 60%.....	84
6.11 การกระจายอุณหภูมิตามแนวขวางของเตาเผาฟลูอิดไอซ์เบดแบบทรงสี่เหลี่ยมแบบผิวเรียบ ฟริบอร์คใหญ่ที่อัตราการป้อน 7.24-10.43 kg/hr อากาศส่วนเกิน 50%.....	86
6.12 การกระจายอุณหภูมิตามแนวแกนของเตาเผาฟลูอิดไอซ์เบดทรงสี่เหลี่ยมแบบผิวเรียบ ฟริบอร์คใหญ่ โดยเปรียบเทียบอัตราการป้อนตั้งแต่ 7.24-10.23 kg/hr ที่ค่าอัตราอากาศส่วนเกิน 50%.....	87

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.13 การกระจายอุณหภูมิตามแนวแกนของเตาเผาฟลูอิดไคซ์เบดแบบสี่เหลี่ยมแบบผิวเรียบ ฟรีบอร์คใหญ่ อัตราป้อน 8.64 kg/hr อากาศส่วนเกิน 40%, 50%, 60%, และ 70%.....	87
6.14 การกระจายอุณหภูมิตามแนวขวางของเตาเผาฟลูอิดไคซ์เบดแบบทรงสี่เหลี่ยมแบบผิวเรียบ ฟรีบอร์คใหญ่ อัตราป้อน 8.64 kg/hr ที่อากาศส่วนเกิน 40%, 50%, 60% และ 70% .....	88
6.15 ปริมาณของไอเสียที่ค่าอากาศส่วนเกินต่างๆ ของเตาเผาแกลบฟลูอิดไคซ์เบดทรงสี่เหลี่ยมแบบผิวเรียบ ที่อัตราการป้อน 8.64 kg/hr.....	89
6.16 ปริมาณของ O <sub>2</sub> ที่ค่าอากาศส่วนเกินต่างๆ ของเตาเผาแกลบฟลูอิดไคซ์เบดทรงสี่เหลี่ยมแบบผิวเรียบ ที่อัตราการป้อน 8.64 kg/hr.....	89
6.17 ประสิทธิภาพการเผาไหม้ที่ค่าอากาศส่วนเกินต่างๆ ของเตาเผาแกลบฟลูอิดไคซ์เบดทรงสี่เหลี่ยมแบบผิวเรียบ ที่อัตราการป้อน 8.64 kg/hr.....	90
6.18 การกระจายอุณหภูมิตามแนวขวางของเตาเผาฟลูอิดไคซ์เบดแบบทรงสี่เหลี่ยมแบบมีคิริบขวาง ฟรีบอร์คใหญ่ อัตราป้อน 8.64 kg/hr อากาศส่วนเกิน 40%, 50%, 60% และ 70%.....	92
6.19 การกระจายอุณหภูมิตามแนวแกนของเตาเผาฟลูอิดไคซ์เบดแบบทรงสี่เหลี่ยมแบบมีคิริบขวาง ฟรีบอร์คใหญ่ อัตราป้อน 8.64 kg/hr อากาศส่วนเกิน 40%, 50%, 60% และ 70%.....	93
6.20 ปริมาณของไอเสียที่ค่าอากาศส่วนเกินต่างๆ ของเตาเผาแกลบฟลูอิดไคซ์เบดทรงสี่เหลี่ยมแบบมีคิริบขวาง ที่อัตราการป้อน 8.64 kg/hr.....	94
6.21 ปริมาณของ O <sub>2</sub> ที่ค่าอากาศส่วนเกินต่างๆ ของเตาเผาแกลบฟลูอิดไคซ์เบดทรงสี่เหลี่ยมแบบมีคิริบขวาง ที่อัตราการป้อน 8.64 kg/hr.....	94
6.22 ประสิทธิภาพการเผาไหม้ที่ค่าอากาศส่วนเกินต่างๆ ของเตาเผาแกลบฟลูอิดไคซ์เบดทรงสี่เหลี่ยมแบบมีคิริบขวาง ที่อัตราการป้อน 8.64 kg/hr.....	95
6.23 เปรียบเทียบผลของการกระจายอุณหภูมิตามแนวแกนของเตาเผาแกลบฟลูอิดไคซ์เบดทรงสี่เหลี่ยมและทรงกลม ที่อากาศส่วนเกิน 60%.....	96
6.24 เปรียบเทียบผลของการกระจายอุณหภูมิตามแนวรัศมีและแนวแกนของเตาเผาแกลบฟลูอิดไคซ์เบดทรงกลมกับทรงสี่เหลี่ยมที่อากาศส่วนเกิน 60%.....	97
6.25 เปรียบเทียบผลของการกระจายอุณหภูมิตามแนวขวางของเตาเผาแกลบฟลูอิดไคซ์เบดทรงสี่เหลี่ยมผิวเรียบกับมีคิริบขวาง ที่อากาศส่วนเกิน 60%.....	98
6.26 เปรียบเทียบผลของการกระจายอุณหภูมิตามแนวแกนของเตาเผาแกลบฟลูอิดไคซ์เบดทรงสี่เหลี่ยมผิวเรียบกับมีคิริบขวาง ที่อากาศส่วนเกิน 60%.....	99

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.27 เปรียบเทียบผลของการกระจายอุณหภูมิตามแนวแกนของเตาเผาเคลือบฟลูอิโดซ์เบด 4 ลักษณะที่อากาศส่วนเกิน 60%.....	99
6.28 เปรียบเทียบผลของการกระจายอุณหภูมิตามแนวรัศมีและแนวขวางของเตาเผาเคลือบฟลูอิโดซ์ เบด 4 ลักษณะที่อากาศส่วนเกิน 60%.....	100



ประสิทธิภาพสูง แต่ปัญหาคือโครงการเหล่านี้ไม่สามารถผลักดันให้มีการนำไปปฏิบัติได้โดยง่าย ทั้งนี้ เนื่องจากรัฐบาลยังไม่มียุทธศาสตร์ที่ชัดเจนในการสนับสนุนให้ผลิตพลังงานจากชีวมวลในรูปแบบต่าง ๆ เพราะเห็นว่าโครงการเหล่านี้เป็นเพียงแหล่งพลังงานทดแทนเท่านั้น ไม่ใช่แหล่งพลังงานหลัก[1]

โดยทั่วไปแล้ว เชื้อเพลิงชีวมวลเป็นเชื้อเพลิงที่ค่อนข้างมีความชื้นสูง เช่น กากอ้อย ไม้ยางพารา เส้นใยปาล์ม เป็นต้น ถ้าหากจะนำไปใช้ในการเผาไหม้ควรมีการลดความชื้นเสียก่อน เนื่องจากความชื้นจะส่งผลให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้ต่ำลง และยังคงเสียค่าใช้จ่ายเพิ่มเติมในส่วนนี้ แต่ถ้าหากเป็นเชื้อเพลิงแกลบ แล้วความชื้นโดยเฉลี่ยจะอยู่ที่ประมาณ 10-15 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากในกระบวนการสีข้าวนั้น จำเป็นจะต้องลดความชื้นลงให้ต่ำกว่า 15 เปอร์เซ็นต์ก่อน และถึงแม้ว่าเชื้อเพลิงแกลบ จะมีปริมาณน้ำที่ประมาณ 18-20 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งสูงกว่าเชื้อเพลิงชีวมวลอื่น (โดยทั่วไปแล้วเชื้อเพลิงชีวมวลจะมีปริมาณน้ำที่ต่ำกว่าประมาณ 1-2 เปอร์เซ็นต์) แต่ถ้าหากทำการเผาไหม้ในระบบปิด ที่มีการควบคุมและมีการกำจัดอนุภาคที่ดีจากเครื่องแยกอนุภาคจากก๊าซทิ้ง ก็จะสามารถลดกลิ่นและปัญหาจากฝุ่นละอองลงได้มาก นอกจากนี้เชื้อเพลิงที่มีขนาดใหญ่จะมีพื้นที่ผิวต่อปริมาตรจะน้อยจะทำให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้ต่ำ ถ้าหากจะนำมาเผาไหม้จะต้องผ่านกระบวนการย่อยเสียก่อน เชื้อเพลิงชีวมวลอื่นๆที่มีขนาดใหญ่ เช่น เศษไม้จากยางพารา และอื่นๆ แต่เชื้อเพลิงแกลบมีขนาดพอเหมาะที่จะมาใช้ในการเผาไหม้ เมื่อพิจารณาในแง่ของพลังงานความร้อน ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงแกลบกับเชื้อเพลิงเชิงพาณิชย์ต่างๆ ค่าความร้อนของแกลบเป็นตัวเลขที่น่าสนใจ เนื่องจากมีค่าความร้อนที่สูงกว่าถ่านหินที่มาจากบางแหล่ง ส่วนในแง่ของมลพิษ จะพบว่าโดยทั่วไปแล้วเชื้อเพลิงแกลบจะมีปริมาณกำมะถันน้อยมาก (แกลบมีกำมะถันประมาณ 0.05 เปอร์เซ็นต์ น้ำมันเตามีประมาณ 2 เปอร์เซ็นต์ ถ่านหินมี 0.3-3.8 เปอร์เซ็นต์) ดังนั้น การเผาไหม้จะทำให้เกิดซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในปริมาณที่ค่อนข้างต่ำ นอกจากนี้ยังสามารถย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติ ในประเทศไทยมีการใช้เชื้อเพลิงชีวมวลต่างๆ และแกลบกันมาแต่โบราณแล้ว แต่ประสิทธิภาพการเผาไหม้นั้นค่อนข้างต่ำ เพราะใช้วิธีการเผาไหม้ในเตาเปิด จึงเกิดการสูญเสียความร้อน ทำให้ได้ปริมาณความร้อนน้อยกว่าที่ควรจะได้รับ และที่สำคัญทำให้เกิดมลพิษทางอากาศดังนั้น เพื่อให้การเผาไหม้เกิดประสิทธิภาพการเผาไหม้มากที่สุดและสภาพอากาศที่ออกจากปล่องไฟเป็นมลพิษน้อยที่สุด จึงต้องทำการเผาไหม้ในเตาเผาแบบปิด

จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าเตาเผาแกลบฟลูอิดไคซ์เบดที่ใช้โดยทั่วไปแล้ว จะเป็นห้องเผาไหม้แบบทรงกระบอกผิวเรียบขนาดใหญ่และมีความสูงมาก ซึ่งหากจะนำเตาเผาแกลบฟลูอิดไคซ์เบดที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมมาประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมภายในครัวเรือน ควรจะมีขนาดเล็กและมีเสถียรภาพทางอุณหภูมิที่ดี

ดังนั้น จึงเกิดแนวความคิดที่จะนำเทคนิคฟลูอิดไคซ์เบดแบบมีกริบขวาง และ ฟรีบอร์ด

อากาศและระยะเวลาที่เชื้อเพลิงอยู่ในห้องเผาไหม้นานขึ้น สามารถที่จะทำให้ห้องเผาไหม้มีขนาดเล็กและสั้นลงได้

## 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. ออกแบบพัฒนาปรับปรุงและเก็บข้อมูลของเตาเผาฟลูอิดไคซ์เบดขนาดเล็กโดยใช้แกลบเป็นเชื้อเพลิงเพื่อการพัฒนาเตาเผาฟลูอิดไคซ์เบดสำหรับการนำพลังงานไปใช้ต่อไป
2. เพื่อหาคุณลักษณะทางด้านเทคนิคในการการทำงานของเตาเผาชนิดนี้
3. สามารถควบคุมระดับอุณหภูมิการเผาไหม้ไม่เกิน 1000 °C
4. เปรียบเทียบการกระจายอุณหภูมิในตำแหน่งต่างๆภายในเตา มลพิษ และขี้เถ้าที่ออกมากับก๊าซไอเสีย

## 1.3 สมมติฐานของการศึกษา

สมมติให้ระบบที่ทำการศึกษาเป็นระบบแบบอะเดียบาติก เชื้อเพลิงแกลบที่ใช้ในการทดลองเป็นแกลบขนาดปกติ (2 mm x 8 mm) และข้อมูลถูกเก็บที่เงื่อนไขสภาวะคงตัว

## 1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย

เตาเผาที่ใช้ในการทดลองนี้เป็นเตาเผาฟลูอิดไคซ์เบดแบบมีคิริบวาง และ ฟรีบอร์ดใหญ่ สำหรับเตาเผาแกลบฟลูอิดไคซ์เบดที่มีอยู่เดิม พบว่าจะต้องมีความสูงของห้องเผาไหม้ที่สูงมากเพื่อลดอัตราการหลุดลอยของอนุภาคเชื้อเพลิงและทำให้อนุภาคอยู่ในห้องเผาไหม้นานขึ้น ดังนั้นจึงอาศัยเทคนิคฟลูอิดไคซ์เบดแบบมีคิริบวาง และ ฟรีบอร์ดใหญ่ เข้ามาใช้ในการเผาไหม้เชื้อเพลิงแกลบ ทำให้สามารถลดความสูงของห้องเผาไหม้ได้ ไม่เกิดการแยกชั้นของการไหลของอนุภาค ช่วยให้เชื้อเพลิงสามารถอยู่ภายในห้องเผาไหม้นานขึ้นทำให้มีเวลาเพียงพอในการทำปฏิกิริยา

## 1.5 ขอบเขตการวิจัย

1. ทดลองเผาไหม้แกลบในเตาเผาฟลูอิดไคซ์เบดแบบทรงกระบอกผิวเรียบ และฟรีบอร์ดใหญ่
2. ทดลองเผาไหม้แกลบในเตาเผาฟลูอิดไคซ์เบดแบบทรงกระบอกมีคิริบวาง และฟรีบอร์ดใหญ่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ทดลองเผาไหม้แกลบในเตาเผาฟลูอิโดซ์เบดแบบทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า และฟริบอร์คใหญ่
4. ทดลองเผาไหม้แกลบในเตาเผาฟลูอิโดซ์เบดแบบทรงสี่เหลี่ยมมีคิริบวาง และฟริบอร์คใหญ่
5. เชื้อเพลิงแกลบที่ใช้ในการทดลองเป็นแกลบขนาดปกติ (ประมาณ 2 mm x 8 mm)
6. ใช้อากาศส่วนเกิน 40%, 50%, 60% และ 70% ของอัตราส่วนผสมของอากาศแบบพอดิ อัตราการป้อนของเชื้อเพลิงแกลบที่ 8.64 kg/hr
7. ทำการวัดการกระจายอุณหภูมิภายใน ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ในแนวแกนที่กำหนดไว้ของเตาเผา 11 ตำแหน่ง การกระจายอุณหภูมิในแนวรัศมี 5 ตำแหน่ง อุณหภูมิห้องผสม 1 ตำแหน่ง อุณหภูมิไอเสีย 1 ตำแหน่ง
8. วิเคราะห์ก๊าซไอเสียที่เกิดขึ้น และ ชี้อ้าว เนื่องจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงของเตาเผา

## 1.6 แก์โครงของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 7 บทด้วยกันคือ

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาของงานวิจัย ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ สมมติฐาน ทฤษฎีที่ใช้ ขอบเขตของการวิจัย และขั้นตอนการศึกษา

บทที่ 2 กล่าวถึงเตาเผาชนิดต่างๆ หลักการและแนวคิด และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บทที่ 3 กล่าวถึงทฤษฎีการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงแข็ง, ทฤษฎีความชื้นและองค์ประกอบของก๊าซไอเสียที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ และพื้นฐานของระบบ

บทที่ 4 กล่าวถึงการออกแบบและการคำนวณซึ่งการออกแบบเตาเผาฟลูอิโดซ์เบดแบบมีคิริบวางนี้ได้นำหลักการของการของการทำให้เกิดการไหลหมุนเวียนย้อนกลับมาประยุกต์ร่วมกับหลักการของฟลูอิโดซ์เบด

บทที่ 5 กล่าวถึงการจัดเตรียมอุปกรณ์และเครื่องมือในการทดลอง การติดตั้งอุปกรณ์ในการทดลอง การอุ่นเตา การทดลองและบันทึกผลการทดลอง

บทที่ 6 กล่าวถึงผลการทดลอง

บทที่ 7 กล่าวถึงสรุปผลและข้อเสนอแนะ

## บทที่ 2

### วรรณกรรมปริทรรศน์

ในบทนี้จะกล่าวถึงส่วนหลัก ๆ 3 ส่วน คือ เตาเผาชนิดต่างๆ หลักการและแนวคิด และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ในส่วนของเตาเผาจะกล่าวถึงเตาเผาชนิดต่างๆที่ใช้สำหรับการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง เช่นถ่านหินหรือเชื้อเพลิงชีวมวล ข้อดีข้อเสียของเตาเผาแต่ละชนิด ในส่วนของหลักการและแนวคิดจะกล่าวถึงการนำเตาเผามาประยุกต์ ดัดแปลงและพัฒนาการใช้งานให้ตามความเหมาะสม ในส่วนของงานวิจัยที่เกี่ยวข้องจะกล่าวถึงงานวิจัยทางที่เกี่ยวข้องกับเตาเผาที่ได้ทำผ่านมา

#### 2.1 เตาเผาชนิดต่างๆ

ปัจจุบันนี้จะเห็นได้ว่าความต้องการพลังงานมีปริมาณเพิ่มมากขึ้นอย่างต่อเนื่อง ๆ จากมีการพัฒนาทางด้านอุตสาหกรรมอย่างรวดเร็ว ซึ่งในขณะนี้โดยส่วนใหญ่เชื้อเพลิงที่มีใช้กันอยู่ในอุตสาหกรรมเป็นเชื้อเพลิงจำพวกน้ำมันและถ่านหิน เพื่อให้ได้มาซึ่งพลังงานความร้อนมาใช้ในอุตสาหกรรมต่อไป เมื่อทำการพิจารณาก็จะเห็นได้ว่าราคาของเชื้อเพลิงเหล่านี้มีราคาค่อนข้างสูงขึ้นไปและจะหมดไปในอนาคตอันใกล้นี้ โดยเฉพาะเชื้อเพลิงพวกถ่านหินหากมีการควบคุมการเผาไหม้ไม่ดีแล้วจะก่อให้เกิดมลพิษออกสู่สิ่งแวดล้อม เพราะฉะนั้นควรจะหาแหล่งเชื้อเพลิงใหม่ ๆ มาทดแทนเพื่อให้ได้พลังงานความร้อนมาใช้ในอุตสาหกรรม เมื่อทำการศึกษาก็จะเห็นได้ว่าประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรม ซึ่งจะมีเชื้อเพลิงชีวมวลซึ่งถือว่าเป็นเชื้อเพลิงแข็งอยู่อย่างมากมายไม่ว่าจะเป็นแกลบ, ฟางข้าว, ชี้อ้อย และกากมันสำปะหลัง เป็นต้น แต่ยังไม่มีการนำมาใช้ให้เป็นประโยชน์มากนัก และอุปกรณ์เครื่องมือที่จะทำให้ได้มาซึ่งพลังงานความร้อนจากเชื้อเพลิงเหล่านี้ ออกมาใช้ นั่นคือ เตาเผา ซึ่งจากการศึกษาพบว่าพอจะแยกประเภทของเตาเผาที่มีใช้อยู่ในปัจจุบัน

##### 2.1.1 เตาแบบตะกรับ

เตาชนิดนี้ในปัจจุบันใช้กันอยู่ในโรงสีข้าว โดยใช้แกลบเป็นเชื้อเพลิง ตะกรับที่ใช้มีอยู่ด้วยกัน 2 แบบ คือ แบบเรียบ (Flat grate) แบบขั้นบันไดเอียงเป็นมุม (Inclined step grate) เตาแบบนี้เชื้อเพลิงจะไหลลงบนตะกรับเอียงเป็นขั้นบันไดและเกิดการเผาไหม้โดยการเผาภายในเตา ซึ่งเป็นการก่อโดยใช้ไอจู่และชี้อ่างจะไหลลงสู่ด้านล่างของตะกรับ

ข้อดี	ข้อเสีย
<ul style="list-style-type: none"><li>- ราคาถูก</li><li>- โครงสร้างไม่ซับซ้อน</li><li>- ค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานถูก</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>- ประสิทธิภาพต่ำ</li><li>- เชื้อเพลิงถูกเผาไหม้ไม่หมด</li><li>- ต้องใช้คนเขี่ยชี้ออกจากเตา</li></ul>

### 2.1.2 เตาเผาไซโคลน (Cyclone Furnaces)

การเผาไหม้ในเตาไซโคลน นำมาใช้ในราวปลายคริสต์ทศวรรษที่ 1930 นับเป็นระบบเผาไหม้ถ่านหินระบบที่สามที่ได้รับการพัฒนาขึ้นมา เตาเผาไซโคลนได้รับการออกแบบจากแนวคิดที่ต้องการให้ใช้ได้กับถ่านหินทุกชนิด โดยเฉพาะอย่างยิ่งถ่านหินเกรดต่ำ จึงเป็นที่นิยมใช้กันในปัจจุบัน เตาเผาลักษณะนี้เผาถ่านหินที่มีปริมาณขี้เถ้าสูง และอุณหภูมิอ่อนตัวของขี้เถ้าที่  $1425^{\circ}\text{C}$  หรือต่ำกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับระบบถ่านหินผง

ข้อดี	ข้อเสีย
<ul style="list-style-type: none"> <li>- ปริมาณฝุ่นขี้เถ้าจากการเผาไหม้น้อย</li> <li>- ขนาดของเตามีขนาดเล็ก</li> <li>- ราคาการเตรียมเชื้อเพลิงต่ำ</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ต้องใช้ความดันของพัดลมเป่าลมแรงสูง</li> <li>- เกิดการรวมกันของออกไซด์ของไนโตรเจน <math>\text{NO}_x</math> เพิ่มมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูง ซึ่งเป็นมลภาวะทางอากาศในกระบวนการเผาไหม้</li> </ul>

ในปัจจุบันเตาเผาชนิดนี้ถูกนำมาพัฒนาตัดแปลงให้สามารถใช้กับเชื้อเพลิงแข็งชนิดอื่น เช่น แกลบและขี้เลื่อย เป็นต้น

### 2.1.3 เตาเผาฟลูอิดไคซ์เบด (Fluidized – Bed Combustor)

เป็นเตาเผาที่มีการนำมาใช้เมื่อไม่นานมานี้ เชื้อเพลิงจะถูกพ่นเข้าไปให้แผ่กระจายตลอดช่วงตะแกรงจ่ายอากาศ อากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ถูกเป่าผ่านตะแกรงออกมา โดยมีความเร็วสูงขึ้นเพียงพอที่จะทำให้อนุภาคเชื้อเพลิงไหลแบบของไหล คือ ทำให้มันลอยขึ้นขณะเผาไหม้ สำหรับคาร์บอนที่ไม่เผาไหม้จะถูกส่งเก็บไว้ในเครื่องแยกไซโคลน (Cyclone Separation) เพื่อส่งกลับให้เกิดการสันดาปอีกครั้งหนึ่ง สามารถจำกัดค่ามลพิษจากเชื้อเพลิงระหว่างการสันดาป การจำกัดค่ามลพิษที่ได้ผล คือ เพิ่มปูนขาวโดยตรงเข้าสู่เตาเผา

ข้อดี	ข้อเสีย
<ul style="list-style-type: none"> <li>- การเผาไหม้สมบูรณ์</li> <li>- ประหยัด</li> <li>- มีการสันดาปที่อุณหภูมิต่ำ</li> <li>- ใช้เชื้อเพลิงได้หลายชนิด</li> <li>- ประหยัดวัสดุก่อสร้าง</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- การป้อนถ่านหินปูนขาวเข้าสู่เบดร่วมกันยังมีปัญหาอยู่</li> </ul>

### 2.1.4 เตาเผาแบบวอร์เทค (Vortex Combustor)

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

เตาเผาแบบ Vortex เป็นอุปกรณ์เผาไหม้เชื้อเพลิง โดยใช้อากาศปฐมภูมิและอากาศทุติยภูมิ อากาศปฐมภูมิจะเป็นตัวพาเชื้อเพลิง ซึ่งถูกบังคับมาด้วย Feed screw เข้ายังห้องเผาไหม้ในแนวสัมผัสกับผิวด้านใน แล้วจะไหลในลักษณะหมุนวนเป็นเกลียว (Helical Motion) ขึ้นสู่ด้านบนห้องเผาไหม้ ภายใต้อิทธิพลของแรงหนีศูนย์กลาง (Centrifugal Force) ของไหลจะไหลวนพาเชื้อเพลิงไปในทิศทางเดียวกัน ตามแนวแกนสู่ทางออก ซึ่งมีลักษณะเป็นแกนท่ออยู่กลางห้องเผาไหม้ ขณะที่เชื้อเพลิงและอากาศผสมกันและส่งตัวขึ้นสู่ด้านบนนั้นจะมีอากาศทุติยภูมิ ออกจากหัวฉีดที่ฝั่งไว้ข้างเตาในตำแหน่งต่างๆ ช่วยในการเพิ่มเกลียวลักษณะเกลียวจะดีขึ้น ข้อดีคือ ช่วยเพิ่มเวลาในการเผาไหม้ (Residence time) ในเวลาที่เผาไหม้สมบูรณ์ เนื่องจากการไหลวน (Swirl flow) และการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulence flow) ซึ่งเอื้ออำนวยต่อการคลุกเคล้าของอากาศกับเชื้อเพลิง

## 2.2 หลักการและแนวคิด

มีรายงานจำนวนมากของเตาเผาหลายชนิดที่มีการใช้วัสดุชีวมวล หรือถ่านหินเป็นเชื้อเพลิง ในจำนวนเหล่านั้นเทคโนโลยีฟลูอิดไคซ์เบด ดูเหมือนว่าจะเป็นเทคโนโลยีที่เหมาะสมสำหรับการเปลี่ยนเชื้อเพลิงแข็งหรือเศษเหลือจากการเกษตรเป็นพลังงาน เนื่องจากว่ามีข้อได้เปรียบตามธรรมชาติคือสามารถเปลี่ยนเชื้อเพลิงได้ตามความเหมาะสม ทำงานที่อุณหภูมิต่ำ เงื่อนไขการทำงานที่อุณหภูมิคงที่ แต่อย่างไรก็ตาม Wan และ Chyang[12] รายงานว่าการใช้วิธีการของเทคนิคฟลูอิดไคซ์เบดนั้นต้องการห้องเผาไหม้ (ฟริบอร์ค) ที่สูงมาก เพื่อลดอัตราการหลุดลอยของอนุภาคเชื้อเพลิงและทำให้อนุภาคอยู่ในห้องเผาไหม้นานขึ้น ในเตาเผาฟลูอิดไคซ์เบดนั้นอาจต้องมีความสูงรวมของฟริบอร์คมากกว่า 15 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของเบด โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับการใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เชื้อเพลิงแข็งที่เบามาก วิธีการนี้อาจจะไม่เหมาะสำหรับการใช้แลกเปลี่ยนเชื้อเพลิงในเตาเผาขนาดเล็กเพื่อจุดประสงค์ในการประยุกต์ใช้ในการอบแห้ง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องแก้ไขปรับปรุงเตาเผาเพื่อให้มีประสิทธิภาพในการใช้กับเชื้อเพลิงแข็งที่มีน้ำหนักเบา

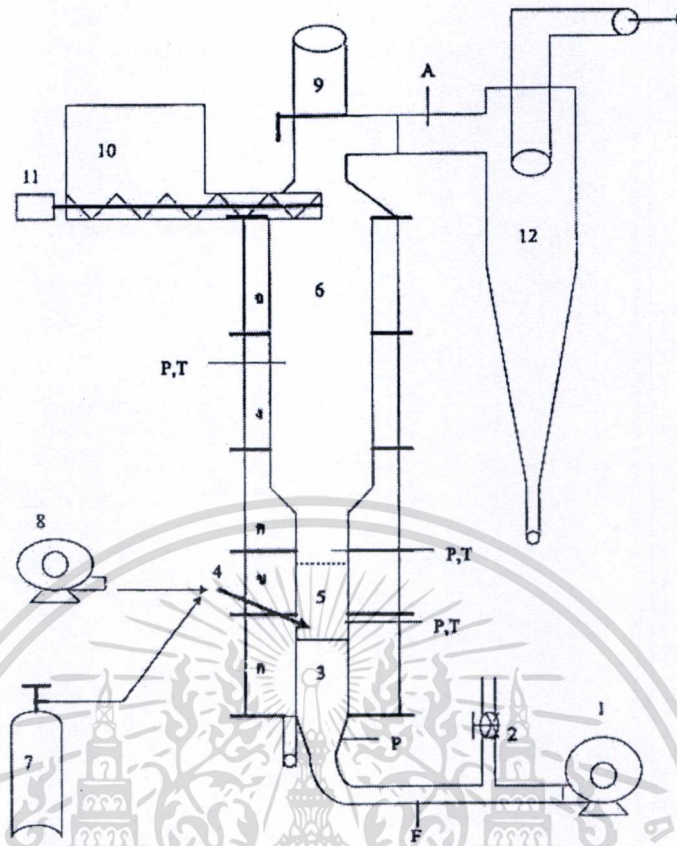
Nieh and Fu[13, 14] ได้ทำการทดลองเพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการเผาถ่านหินอย่างสะอาด Promvonge and Silapabanleng[15] ได้ทำการทดลองกับเตาเผาออร์เทคซึ่งมีลักษณะคล้ายคลึงกับเตาเผาของ Nieh and Fu[13] แต่ใช้แลกเปลี่ยนเชื้อเพลิงแทนการใช้ถ่านหิน ได้ศึกษาและรายงานพฤติกรรมของการเผาไหม้แลกเปลี่ยนในเตาเผาดังกล่าว ผลจากข้อได้เปรียบในเตาเผาต่อประสิทธิภาพการเผาไหม้รวมถึงอุปสรรคปัญหาในการกำจัด เนื่องจากแลกเปลี่ยนมีปริมาณเชื้อเพลิงสูงซึ่งไม่เหมือนถ่านหิน

ในการปรับปรุงการเผาไหม้ให้มีประสิทธิภาพสูงและเกิดมลพิษต่ำมีวิธีการอยู่หลายวิธีดังนี้  
1) การปรับปรุงการออกแบบห้องเผาไหม้ 2) การเตรียมส่วนผสมของเชื้อเพลิง 3) การสร้างเสถียรภาพของเปลวไฟด้วยการหมุนวน 4) การนำไอเสียกลับมาเผาไหม้ใหม่ 5) การเผาไหม้เป็นลำดับขั้นและอื่นๆ [16, 17]

## 2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.2.1 งานวิจัยภายในประเทศ

เสรีย์ ผู้ประกาย[2] ศึกษาและออกแบบเตาเผาจากตะกอนแบบฟลูอิดไคซ์เบดโดยใช้กากตะกอนจากโรงบำบัดน้ำเสียห้วยขวาง เป็นข้อมูลพื้นฐานส่วนรายละเอียดของอุปกรณ์ทดลองสามารถดูได้จากรูปที่ 2.1 โดยลักษณะเตาเผาเป็นรูปทรงกระบอก หล่อด้วยคอนกรีตทนไฟ บริเวณส่วนเผาไหม้มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.2 เมตร ส่วนขยายด้านบนมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.4 เมตร ใช้ก๊าซ LPG เป็นเชื้อเพลิงป้อนหัวเผา พบว่าสภาพที่เหมาะสมในการดำเนินการอยู่ที่ อัตราการป้อนก๊าซ LPG 4.35 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ปริมาณอากาศสำหรับฟลูอิดไคซ์ 32 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง อากาศผสม LPG ที่หัวเผา 7.5 ลูกบาศก์เมตร ต่อชั่วโมง ศึกษาอัตราการป้อนการตะกอนที่ 10, 15, 20, 25, 30 กิโลกรัมต่อชั่วโมงพบว่า ประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงสุดเท่ากับ 95.62 % ที่อัตราการป้อน 15 กิโลกรัมต่อชั่วโมง และประสิทธิภาพการทำลายกากตะกอนสูงสุดเท่ากับ 95.89 % ที่อัตราการป้อนกากตะกอน 10 กิโลกรัมต่อชั่วโมง

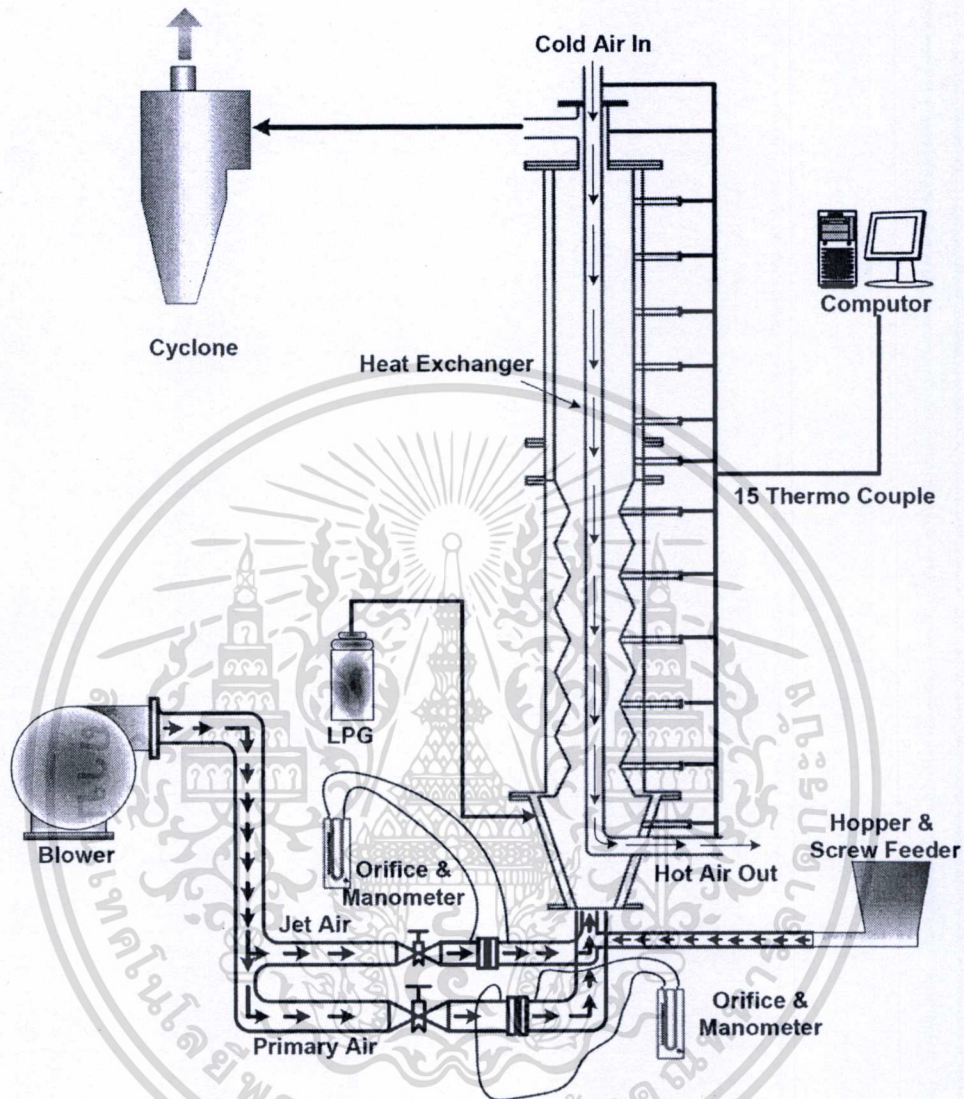


- |                         |                   |                    |                          |
|-------------------------|-------------------|--------------------|--------------------------|
| 1. Fluidized-air blower | 5. Sand bed       | 9. Butterfly valve | P-จุดวัดความดัน          |
| 2. By part              | 6. Freebord       | 10. Screw feeder   | T-จุดวัดอุณหภูมิ         |
| 3. Distributor          | 7. LPG tank       | 11. Motor          | A-จุดวัดก๊าซเผาไหม้      |
| 4. Preheat burner       | 8. Air compressor | 12. Cyclone        | F-จุดวัดอัตราการไหลอากาศ |

รูปที่ 2.1 แสดงส่วนประกอบทั้ง 5 ส่วนที่นำมาประกอบเป็นตัวเตาของเสรีย์ตู้ประกาย

ศิษฐพร ตุงโสทรานนท์[4] ได้ทำการศึกษาดเผาแกลบแบบฟลูอิโดซ์เบดที่มีฟิวคัลิน ห้องเผาไหม้มีลักษณะเป็นท่อทรงกระบอก มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 200 mm (D) สูง 2.4 m ฟิวคัลินมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1D เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.5D และได้ทำการทดลองกับเตา 4 แบบ คือ เตาเผาฟลูอิโดซ์เบดแบบฟิวเรียบ เตาเผาฟลูอิโดซ์เบดแบบมีคอกคอด เตาเผาฟลูอิโดซ์เบดแบบคลื่นล่าง และ เตาเผาฟลูอิโดซ์เบดแบบคลื่นบน ใช้เชื้อเพลิงแกลบขนาดปกติ ประมาณ 2x8 mm ใช้อากาศส่วนเกิน 15%, 30%, 45%, 60%, และ 75% ของอัตราการไหลของอากาศทั้งหมด 95 kg/hr และอัตราการป้อนเชื้อเพลิงแกลบอยู่ระหว่าง 10-15.5 kg/hr อัตราการไหลของอากาศในอุปกรณ์ แลกเปลี่ยนความร้อน 0%, 20%, 40%, 60%, 80%, และ 100% ของอัตราการไหลของอากาศทั้งหมด 95 kg/hr ทดลองกับเตาเผาที่อากาศส่วนเกิน 45% ทดลองการใช้ทรายเป็นเบด วัดการกระจายตัวของอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่าง ๆ แล้วทำการวิเคราะห์ก๊าซไอเสียที่เกิดขึ้น ซึ่งผล

การทดลองเตาเผาฟลูอิดไชน์แบบผิวคลื่นทำให้การเผาไหม้ดีขึ้นกว่าแบบผิวเรียบ แต่ประสิทธิภาพการเผาไหม้ยังไม่ดีพอ จากการที่เชื้อเพลิงมีการหลุดลอยออกจากห้องเผาไหม้เร็วเกินไป

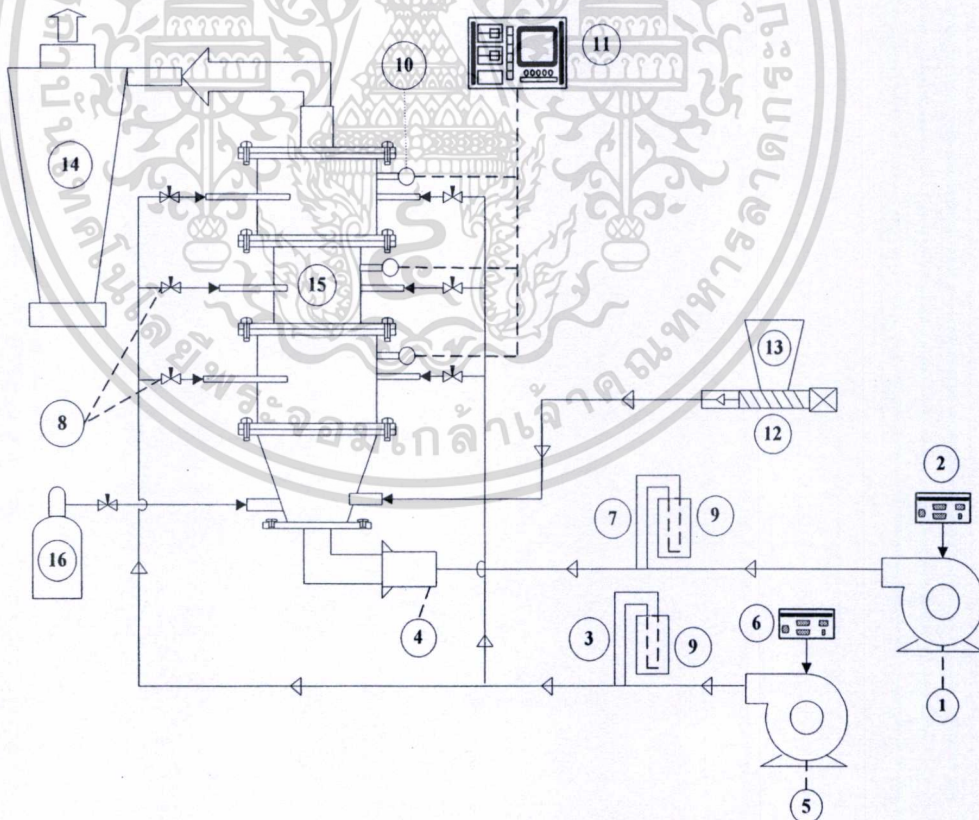


รูปที่ 2.2 โค้ดะแกรมการทดลองของเตาเผาฟลูอิดไชน์แบบผิวคลื่น

ยิ่งยง แก้วก่อเกียรติ[7] ศึกษาคุณลักษณะของการเผาไหม้เชื้อเพลิงแกลบในเตาเผาออร์ตเทคคู่ ห้องเผาไหม้ภายในมีความสูง 1.80 m เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.30 m ห้องเผาไหม้ถูกแบ่งเป็นสองชั้น ส่วนที่อยู่ตรงกลางระหว่างห้องเผาไหม้ทั้งสองชั้น ถูกออกแบบให้มีลักษณะเป็นกรวยและคอคอด ใช้เชื้อเพลิงแกลบขนาดปกติ (ประมาณ 2x8 mm) ความชื้นปกติ (11%) อัตราการป้อนเชื้อเพลิงแกลบอยู่ระหว่าง 12-18 kg/hr อากาศส่วนเกิน 14-182% ความเร็วอากาศตั้งแต่ 0.385-0.538 m/s อากาศที่ใช้ในห้องเผาไหม้มีสองส่วน คือ อากาศปฐมภูมิและอากาศทุติยภูมิ อากาศทุติยภูมิ ( $\lambda$ ) อยู่ที่ใช้ระหว่าง 0.00-0.30 พบว่า อิทธิพลจากอัตราการป้อนแกลบส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงระดับของอุณหภูมิในห้องเผาไหม้อย่างเด่นชัด มากกว่าอิทธิพลจากอากาศส่วนเกินหรือความเร็วอากาศ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แต่ทั้งนี้อิทธิพลจากอากาศส่วนเกินและความเร็วอากาศมีอิทธิพลอย่างยิ่งต่อความเสถียรและความคงตัวของเปลวไฟภายในห้องเผาไหม้

วิศิษฐ์ ลีลาผาติกุล[5] ศึกษาการเชิงทดลองตำแหน่งของ อากาศทุติยภูมิต่อการเผาไหม้ภายในเตาเผาฟลูอิดไอซ์เบด โดยตัวแปรที่ทำการทดลอง ได้แก่ ตำแหน่งการฉีดอากาศทุติยภูมิ, อัตราส่วนสมมูล และ อัตราส่วนการไหลเชิงปริมาตรของอากาศทุติยภูมิต่ออากาศทั้งหมด โดยห้องเผาไหม้ปฐมภูมิมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ (D) 0.3 m ส่วนห้องเผาไหม้ทุติยภูมิมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 0.225 m มีความสูงรวม เท่ากับ 1.2 m ซึ่งจะมีการติดตั้งท่อฉีดอากาศทุติยภูมิไว้ในแนวสัมผัสรอบ ๆ ผนังห้องเผาไหม้ มีทั้งสิ้น 3 ตำแหน่ง (H/D) คือ 1.5, 2.5 และ 3.5 เพื่อให้อากาศภายในเกิดการไหลแบบหมุนวน โดยแต่ละการทดลองกำหนดค่าอัตราส่วนการไหลเชิงปริมาตรของอากาศทุติยภูมิต่ออากาศทั้งหมด ( $\lambda$ ) คงที่ เท่ากับ 0.25 โดยกำหนดค่า equivalence ratio ( $\Phi$ ) เท่ากับ 0.9, 1.0 และ 1.1 ที่อัตราการไหลของเชื้อเพลิงแกลบคงที่เท่ากับ 0.2 kg/min จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ตำแหน่งการฉีดอากาศทุติยภูมิ (H/D) เท่ากับ 2.5,  $\Phi$  เท่ากับ 1.0 จะให้อุณหภูมิเฉลี่ยสูงสุดประมาณ 900 °C และพบว่าก๊าซไอเสียที่วัดจากทางออกท่อไอเสียประกอบด้วย  $O_2 = 12.8\%$ ,  $NO_x = 272$  ppm และ  $CO = 980$  ppm



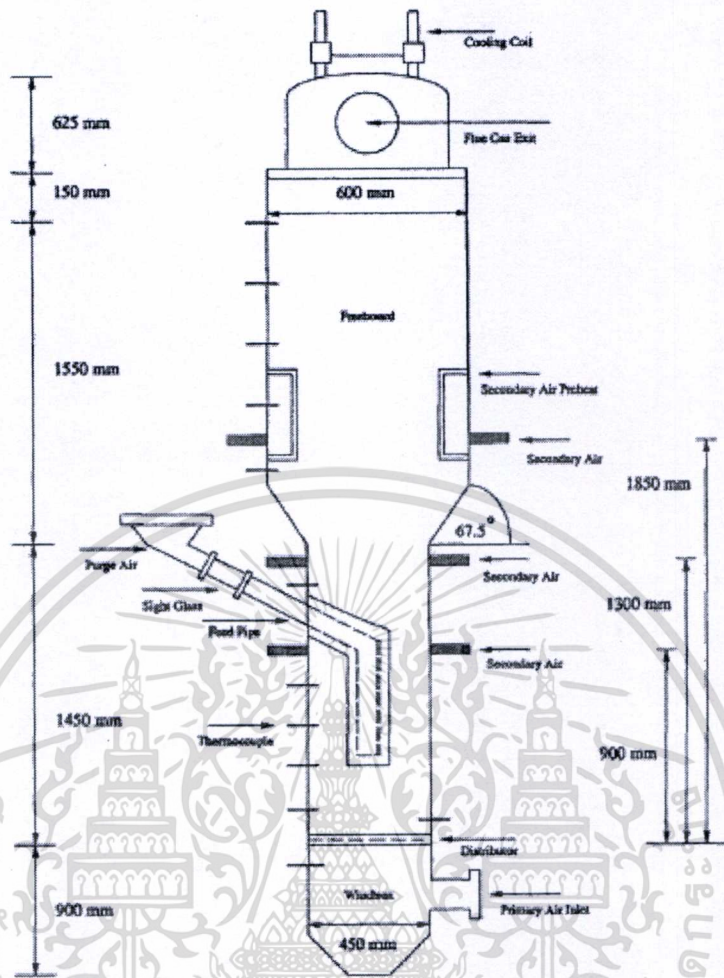
รูปที่ 2.3 ผังอุปกรณ์การทดลองเตาเผาฟลูอิดไอซ์เบดของวิศิษฐ์ ลีลาผาติกุล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2.2 งานวิจัยในต่างประเทศ

L.X. Zhou, Y. Li, T. Chen and Y. Xu[18] ใช้เทคนิค Phase-Doppler particle anemometer (PDPA) ในห้องเผาไหม้แบบไซโคลนที่มีการเพิ่มพื้นที่หน้าตัดอย่างทันทีทันใด (larger sudden expansion) ศึกษาผลจาก Swirl number ที่มีต่อพฤติกรรมการหมุนวนแบบปั่นป่วนของอนุภาคในของไหล ทั้งแบบสองสถานะ (2D-Phase) และสามสถานะ (3D-Phase) พฤติกรรมดังกล่าวเช่น โพรไฟล์ความเร็วตามแนวแกน (Axial velocity profile) ความเร็วตามแนวสัมผัส (Tangential velocity profile) ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของของไหลแบบสองสถานะ และระดับของความปั่นป่วน โดยที่ค่า swirl number ที่ใช้ในการทดลองคือ 0.47, 1.0, 1.5 และ 2.1 ผลที่ได้คือสภาวะความเร็วของอนุภาคกับก๊าซจะมีลักษณะเหมือนกับสนามความเร็วของก๊าซเพียงอย่างเดียวทุกค่า swirl number เมื่อเพิ่มค่า swirl number จะเพิ่มขนาดพื้นที่ของการหมุนวนของอนุภาค ความปั่นป่วนในทิศทางตามแนวแกนและตามแนวรัศมีจะลดลง แต่ความปั่นป่วนในทิศทางตามแนวรัศมีจะเพิ่มขึ้น การกระจายอนุภาคที่บริเวณแกนกลางใกล้ทางเข้าจะหายไปและเลื่อนไปอยู่บริเวณผนัง

C. H. LIN, J. T. TENG and C. S. CHYANG [11] ศึกษาการปล่อยมลพิษและประสิทธิภาพของการเผาไหม้ในเตาเผาออร์เทค-ฟลูอิดไคซ์เบด โดยใช้ถ่านหินขนาดต่างกันเป็นเชื้อเพลิง ทำการศึกษาเงื่อนไขการทดลองต่างๆ ที่มีผลต่อการปล่อยมลพิษและประสิทธิภาพการเผาไหม้ดังกล่าว ที่ประสิทธิภาพประมาณ 96% จะง่ายต่อการปฏิบัติงานในเตาเผาในอุณหภูมิในเบดอยู่ที่ประมาณ 850-880°C ขนาดของถ่านหินที่สูงขึ้นส่งผลให้ได้ประสิทธิภาพการเผาไหม้ที่สูง เนื่องจากอนุภาคขนาดเล็กนั้นมีอัตราการหลุดลอยที่สูงกว่าอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ นอกจากนี้การศึกษายังพบอีกว่าการฉีดอากาศทุติยภูมิที่ตำแหน่งความสูงมากเกินไปส่งผลให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้ต่ำกว่าการฉีดอากาศทุติยภูมิที่ระดับความสูงต่ำๆ และที่ความสูงปานกลางของเตาเผา และการใช้อากาศทุติยภูมิส่งผลให้ได้ประสิทธิภาพการเผาไหม้ที่สูงกว่าการใช้อากาศปฐมภูมิเพียงอย่างเดียว



รูปที่ 2.4 แสดงการฉีดอากาศทุติยภูมิที่ระดับความสูงที่ต่างกันของ C. H. LIN, J. T. TENG and C. S. CHYANG

Chun-Hung LIN, Jyh-Tong TENG, Chien-Song CHYANG and Cheng-Hsing HSU[11] ทำการศึกษาสนามการไหลในฟลูอิดของเตาเผาออร์เทก-ฟลูอิดไคซ์เบด (Vortexing Fluidized Bed, VFBC) บนพื้นฐานของการใช้สมการแบบจำลอง  $\kappa - \varepsilon$  และสร้างสมการสหสัมพันธ์ทั่วไป (General correlation) ของ vortex number ที่ประกอบไปด้วยพารามิเตอร์ที่จำเป็นต่อการออกแบบเตาเผาดังกล่าว คือ สัดส่วนของอากาศปฐมภูมิต่ออากาศทุติยภูมิ ความเร็วของอากาศทุติยภูมิ และเส้นผ่านศูนย์กลางของ imaginary circle พบว่า vortex number ที่เป็นตัวบ่งชี้ถึงค่าของการหมุนวน ซึ่งคล้ายคลึงกับค่า swirl number อันจะส่งผลคือเตาเผาใหม่จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเร็วของอากาศทุติยภูมิกับเพิ่มเส้นผ่านศูนย์กลางของ imaginary circle และลดสัดส่วนของอากาศปฐมภูมิต่ออากาศทุติยภูมิลง โดยงานวิจัยนี้ได้กำหนดให้สัดส่วนของอากาศปฐมภูมิต่ออากาศทุติยภูมิทั้งหมด 2 ค่าคือ 1:1 และ 2:1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

L. Armesto , A. Bahillo , K. Veijonen, A.Cabanillas , and J. Otero[21] ศึกษาการทดลองใช้แกลบเป็นเชื้อเพลิงที่มีประสิทธิภาพในเตาเผา 30 kW<sub>th</sub> atmospheric bubbling fluidised bed pilot plan of CIEMAT. อิทธิพลของตัวแปรที่แตกต่าง เช่น อุณหภูมิ, อัตราความเร็วของฟลูอิดไอซ์ในห้องเผาไหม้ที่มีประสิทธิภาพ และตรวจสอบปริมาณ CO ที่แผ่ออกมา ประสิทธิภาพในการเผาไหม้ในทุกการทดสอบจะมีค่ามากกว่า 97% คุณลักษณะของขี้เถ้าที่ออกจากเบด, ไชโคลน และจากตัวกรองของเสีย ได้ถูกศึกษาด้วย ในขี้เถ้าเบดที่ได้ สารประกอบโพแทสเซียมจะเพิ่มขึ้นตามชั่วโมงการทดลอง

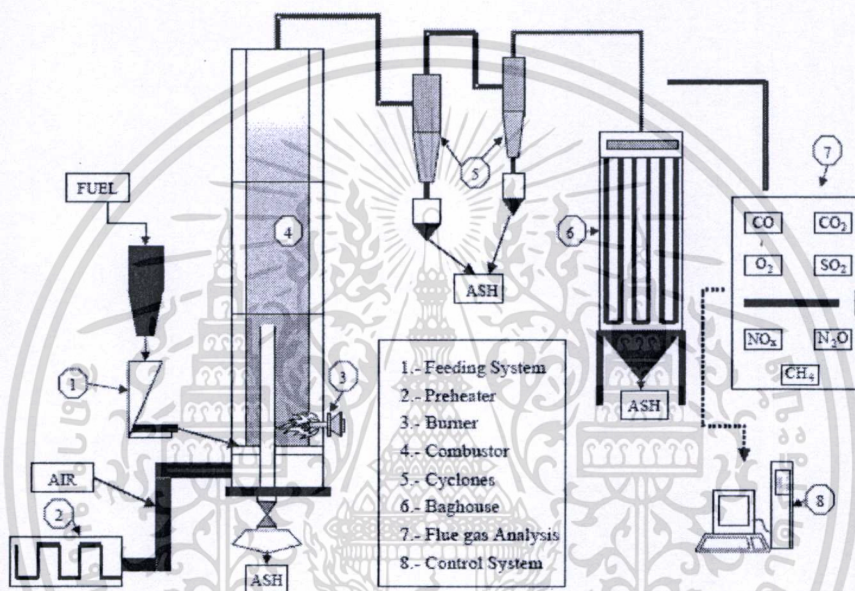
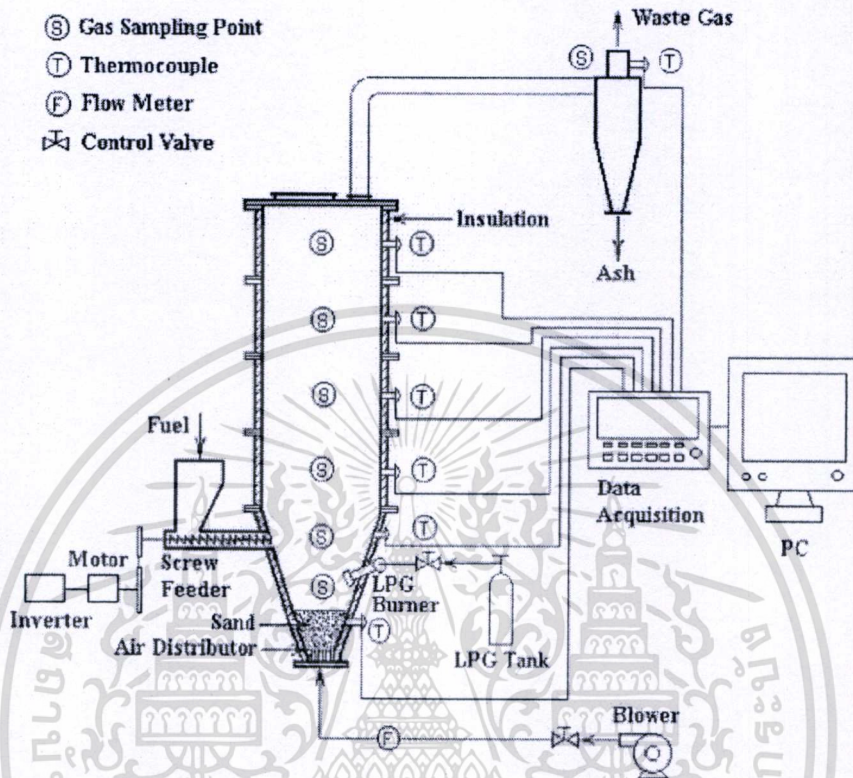


Fig. 1. Scheme of atmospheric bubbling fluidised bed pilot plant.

รูปที่ 2.5 แสดงแบบจำลองของ 30 kW<sub>th</sub> atmospheric bubbling fluidised bed pilot plan of CIEMAT ของ L. Armesto , A. Bahillo , K. Veijonen, A.Cabanillas , and J. Otero

W. Permchart, V.I. Kouprianov and L. Tantimuratha [19] ศึกษาการเผาไหม้แกลบในเตาเผาฟลูอิดไอซ์เบดโดยใช้ทรายซิลิกาเป็นวัสดุเบด และได้ศึกษาผลกระทบเนื่องจากอัตราป้อนแกลบ อากาศส่วนเกิน รวมไปถึงความสูงเบด อัตราป้อนแกลบที่ใช้คือ 37.3 และ 82.4 kg/hr อากาศส่วนเกินตั้งแต่ 20-120 % วัดทั้งการกระจายอุณหภูมิและปริมาณไอเสียต่างๆภายในห้องเผาไหม้และในท่อไอเสียเช่น CO, CO<sub>2</sub>, NO และ O<sub>2</sub> เป็นต้น ผลที่ได้คืออัตราป้อนแกลบส่งผลโดยตรงต่อโปรไฟล์อุณหภูมิตามแนวแกน ในขณะที่ความสูงเบดเป็นเพียงอิทธิพลรองลงไปเท่านั้น อิทธิพลจากอากาศส่วนเกินมีผลน้อยมากต่อการกระจายอุณหภูมิในห้องเผาไหม้ อัตราป้อนและอากาศส่วนเกินเป็นตัวแปรสำคัญมากต่อความเข้มข้นของ CO และ NO ตามแนวแกน ขณะที่ความเข้มข้นของ CO และ NO ดังกล่าวส่วนใหญ่เป็นอิสระต่อความสูงเบด ส่วนประสิทธิภาพการเผาไหม้อยู่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

86% ประสิทธิภาพทางความร้อนต่ำกว่าประสิทธิภาพการเผาไหม้ประมาณ 3% ในแต่ละเงื่อนไขการทดลอง



รูปที่ 2.6 โค้ดแกรมการทดลองของเตาเผาของ W. Permchart และคณะ

Sirisomboon, K., Kouprianov, V.I. and Keawklum, R.[9] ศึกษาการเผาไหม้ของแกลบในเตาเผาขนาด  $350 \text{ kW}_{th}$  และ  $400 \text{ kW}_{th}$  ที่อัตราป้อนแกลบและค่าอากาศส่วนเกินใกล้เคียงกัน แต่ปรับค่าความชื้นของเชื้อเพลิง ที่ค่าความชื้นคงที่อากาศส่วนเกิน 60% อุณหภูมิของเบดโดยทั่วไปในเตาเผาขนาด  $400 \text{ kW}_{th}$  มีค่าสูงกว่าในเตาเผาขนาด  $350 \text{ kW}_{th}$   $180\text{-}130^{\circ}\text{C}$  เนื่องจากการผสมของอากาศกับเชื้อเพลิงและเวลาในห้องเผาไหม้ที่ดีกว่า ในทั้งสองกรณีค่าความชื้นของเชื้อเพลิงและค่าอากาศส่วนเกินมีผลต่อค่า  $\text{CO}$  และ  $\text{NO}_x$  เมื่อค่าความชื้นเพิ่มจาก 11 เป็น 35% ค่า  $\text{NO}_x$  มีค่าลดลงประมาณ 40% ค่า  $\text{CO}$  เพิ่มขึ้น 87% และค่าประสิทธิภาพการเผาไหม้ลดลงจาก 96% เหลือ 90% เกิดจากการสูญเสียความร้อนในการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ เตาเผาขนาด  $400 \text{ kW}_{th}$  มีค่าการสูญเสียความร้อนต่ำกว่า ค่าประสิทธิภาพการเผาไหม้สูงกว่า และมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยกว่าเตาขนาด  $350 \text{ kW}_{th}$

จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าพลศาสตร์ของอากาศภายในห้องเผาไหม้ ลักษณะของเชื้อเพลิง การออกแบบห้องเผาไหม้ภายในและอื่นๆ ล้วนมีอิทธิพลต่อคุณลักษณะการเผาไหม้ทั้งสิ้น จากงานวิจัยที่ผ่านมาของคณะ ได้ผลดีเป็นที่น่าพอใจแต่ยังคงประสบปัญหาบางประการอยู่มาก อย่างไรก็ตาม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่ออนุญาตเห็นแก่ประโยชน์ของงานวิจัยนี้ ไม่สามารถนำเอกสารนี้ไปใช้ซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทางตัวเลขและข้อมูลทางเทคนิคอีกมาก ซึ่งเป็นสิ่งจำเป็นต่อการพัฒนาการนำพลังงานไป  
ประยุกต์ใช้กับการอบแห้งพืชผลทางการเกษตร งานวิจัยนี้จึงมีความสำคัญต่อการพัฒนาการใช้  
พลังงานดังกล่าว



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ทฤษฎีพื้นฐานที่ใช้ในการวิจัย

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานต่างๆ ที่เกี่ยวข้องในการวิจัย ซึ่งในการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งนั้นมีความยุ่งยากซับซ้อนกว่าเชื้อเพลิงก๊าซและของเหลวมาก เนื่องจากการทำปฏิกิริยาของออกซิเจนกับคาร์บอนที่มีอยู่ในเชื้อเพลิง จะต้องอาศัยพื้นผิวใหม่ของเชื้อเพลิงในการเกิดออกซิเจน ไปจับตัวกับคาร์บอนส่วนที่เหลือในเชื้อเพลิง เพื่อเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ที่ต่อเนื่องจนกระทั่งเกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ ดังนั้นจึงควรจะทำการศึกษาถึงทฤษฎีการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงแข็ง, ทฤษฎีความชื้นและองค์ประกอบของก๊าซไอเสียที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ และพื้นฐานของระบบ

### 3.1 บทนำ

ในการปรับปรุงการออกแบบเตาเผา ที่ใช้เชื้อเพลิงชีวมวล เพื่อผลิตความร้อน ประสิทธิภาพทางความร้อน (thermal performance) ของเตาเผา ขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพของการเปลี่ยนแปลงความร้อนของระบบ เช่น การเปลี่ยนแปลงพลังงานเคมีของเชื้อเพลิง ไปสู่พลังงานความร้อน ซึ่งต้องมีความเข้าใจในส่วนของการเผาไหม้ การถ่ายเทความร้อน การไหลของของไหลภายในเตาเผาและเชื้อเพลิงที่นำมาใช้มีผลต่อตัวแปรเหล่านี้อย่างไร กระบวนการที่ใช้พิจารณาประกอบไปด้วย

#### 3.1.1 รู้จักเชื้อเพลิงที่นำมาใช้

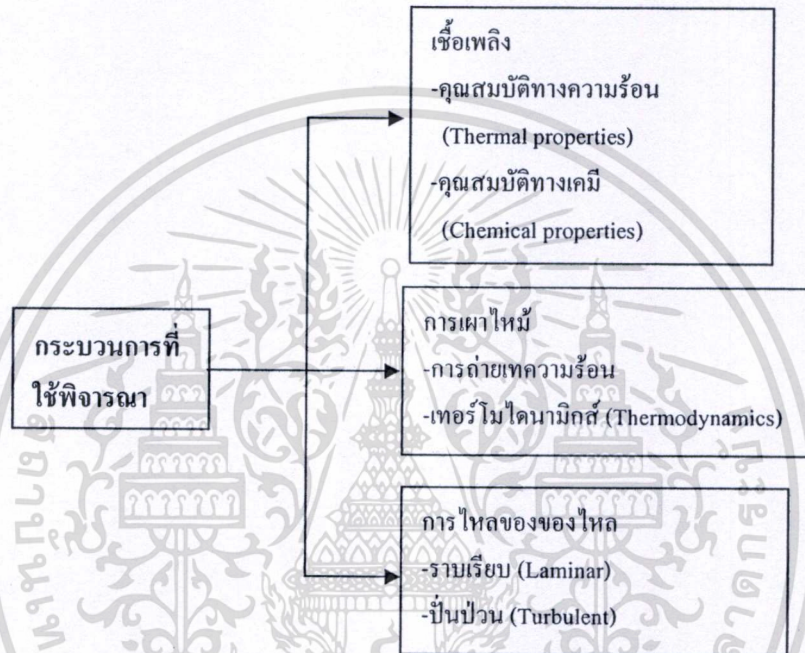
เชื้อเพลิงมีอยู่หลายชนิด ซึ่งแต่ละชนิดมีคุณสมบัติที่แตกต่างกันออกไป ไม่ว่าจะเป็นคุณสมบัติทางความร้อนหรือทางเคมี ดังนั้นจึงให้คุณลักษณะของการเผาไหม้ที่แตกต่างกันออกไปด้วยเช่นกัน

#### 3.1.2 การเผาไหม้ และกระบวนการเผาไหม้

การเผาไหม้เป็นกระบวนการระหว่างเชื้อเพลิง กับอากาศทำปฏิกิริยาต่อกัน ดังนั้นกระบวนการการเผาไหม้จึงขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของเชื้อเพลิง (รูปร่าง ความหนาแน่น ความชื้น ปริมาณคาร์บอนคงตัว สารระเหย ฯลฯ) และปริมาณของเชื้อเพลิง ในส่วนของอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ ได้แก่ ปริมาณอากาศ (อากาศปฐมภูมิและอากาศทุติยภูมิ) และเงื่อนไขภายนอกต่างๆ (อุณหภูมิ ความชื้น ฯลฯ)

### 3.1.3 การไหลของของไหล

การไหลของของไหลเป็นกลไกทางของไหล เช่น อากาศ ก๊าซ และไอ ความรู้ทางด้าน ทฤษฎีของไหลเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อทำความเข้าใจลักษณะการไหลของอากาศและก๊าซไอเสียผ่าน เตาเผา อุปกรณ์ และปล่อง การประยุกต์ใช้ทฤษฎีของไหลจำเป็นต้องมีความเข้าใจกระบวนการ การเผาไหม้ การถ่ายเทความร้อน ซึ่งมีความสำคัญในแง่ของ การเลือกความทนทานของวัสดุ ราคา หรือวิธีการออกแบบ การปรับปรุงประสิทธิภาพการเผาไหม้ การสูญเสียความร้อน ความปลอดภัย



รูปที่ 3.1 ส่วนประกอบต่างๆที่เกี่ยวข้องต่อการศึกษา

## 3.2 ชนิดของเชื้อเพลิงชีวมวล, คุณสมบัติ, ส่วนประกอบ และคุณลักษณะการเผาไหม้

### 3.2.1 ชนิดของเชื้อเพลิงชีวมวล

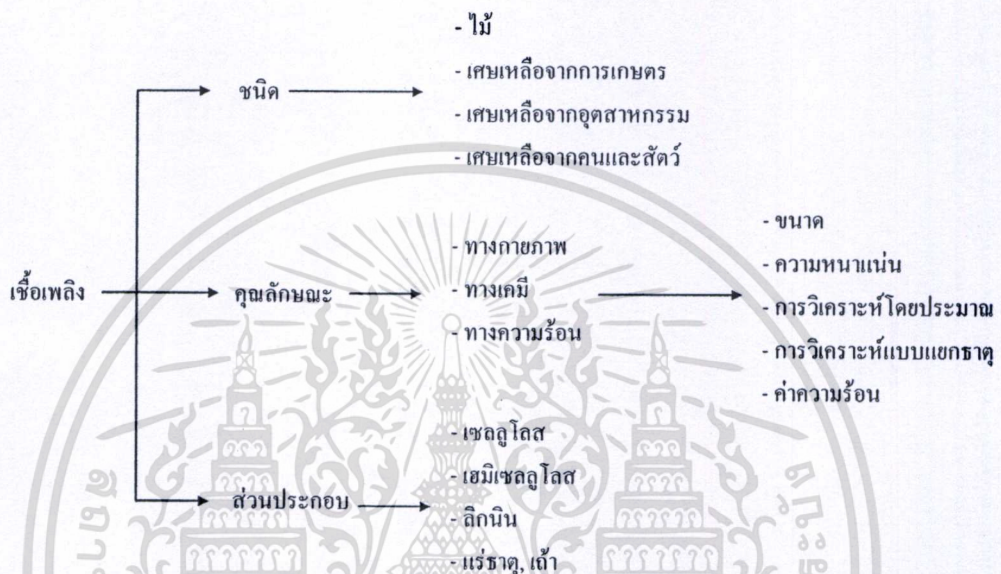
เชื้อเพลิงที่ใช้ในการเผาไหม้สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ เชื้อเพลิงที่ได้จากการ ทับถมตัวของซากพืชซากสัตว์ ภายใต้อิทธิพลของโลกหรือที่เรียกว่าเชื้อเพลิงดึกดำบรรพ์ (fossil fuel) ได้แก่ ถ่านหิน น้ำมัน และก๊าซธรรมชาติ เชื้อเพลิงอีกประเภทหนึ่ง คือ เชื้อเพลิงชีวมวล (biomass fuel) ซึ่งเป็นวัสดุที่ได้จากสิ่งมีชีวิต เช่น ไม้ ชีวชีวมวล และแกลบข้าว เป็นต้น เชื้อเพลิงประเภทชีว มวลนี้ส่วนใหญ่จะ ได้จากสิ่งที่เหลือทิ้งจากการเกษตร ซึ่งสามารถหาได้ง่ายโดยเฉพาะอย่างยิ่งใน บริเวณที่มีการทำเกษตรกรรม

เชื้อเพลิงสามารถจำแนกตามสถานะได้เป็นเชื้อเพลิงแข็ง เชื้อเพลิงเหลว และเชื้อเพลิงก๊าซ ซึ่งในที่นี้จะไม่กล่าวในส่วนของเชื้อเพลิงเหลว และเชื้อเพลิงก๊าซ แต่จะกล่าวในส่วนที่เป็น เชื้อเพลิงแข็งที่เป็นเชื้อเพลิงชีวมวลเท่านั้น จากรูปที่ 3.2 แสดงคุณสมบัติของเชื้อเพลิงชีวมวล ซึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้แบ่งเป็น 3 ส่วนด้วยกัน คือ การจำแนกชนิดของเชื้อเพลิงชีวมวล คุณลักษณะการเผาไหม้ และ ส่วนประกอบ

เชื้อเพลิงชีวมวลมีอยู่หลายชนิด แต่ละชนิดมีคุณสมบัติแตกต่างกัน ส่งผลให้คุณลักษณะของการเผาไหม้แตกต่างกันออกไปด้วยเช่นกัน ชนิดของเชื้อเพลิงชีวมวล(biomass fuel type) ส่วนประกอบ (constituents) และคุณลักษณะการเผาไหม้ (combustion characteristics) ล้วนมีความสำคัญและมีผลต่อการเผาไหม้ทั้งสิ้น



รูปที่ 3.2 คุณสมบัติของเชื้อเพลิงชีวมวล

3.2.1.1 เชื้อเพลิงชีวมวลจากไม้ แบ่งเป็น 2 ประเภท คือ ไม้เนื้อแข็ง (hard wood) และ ไม้เนื้ออ่อน (soft wood) ทั้งไม้เนื้อแข็งและไม้เนื้ออ่อน มีส่วนประกอบเซลลูโลส (cellulose) ประมาณ 40-45% ในไม้เนื้ออ่อนมีเฮมิเซลลูโลส (hemi cellulose) 20% ในไม้เนื้อแข็งมี 15-35 % ในไม้เนื้ออ่อนมีลิกนิน (lignin) 17-25% ใน ไม้เนื้อแข็งมี 15-35 % ตัวอย่างของเชื้อเพลิงประเภทนี้ ได้แก่ เศษไม้ เปลือกไม้ และขี้เลื่อย

3.2.1.2 เชื้อเพลิงชีวมวลจากการเกษตร เป็นของเหลือที่ได้จากการเกษตร เช่น แกลบ ฟาง ข้าว ใบอ้อย เศษไม้ยางพารา กากปาล์ม ชังข้าวโพด เหง้ามันสำปะหลัง เปลือกมะพร้าว ซึ่งสารพวกนี้จะมีปริมาณลิกนินต่ำ ประมาณ 0 – 20 เปอร์เซ็นต์

3.2.1.3 เชื้อเพลิงชีวมวลจากอุตสาหกรรม เช่น เชื้อเพลิงที่ได้จากการผลิตน้ำตาล คือ ชานอ้อย นอกจากนี้ยังมีกากสับประรดที่ได้จากโรงงานผลิตสับประรดกระป๋อง เชื้อเพลิงประเภทนี้จะมีปริมาณความชื้นสูงมาก

3.2.1.4 เชื้อเพลิงชีวมวลจากของเหลือใช้จากคนและสัตว์ ได้แก่ เชื้อเพลิงจากขยะเทศบาล เป็นต้น

### 3.2.2 ส่วนประกอบของเชื้อเพลิงชีวมวล

เชื้อเพลิงชีวมวลมีส่วนประกอบหลัก (major element) อยู่ 3 ส่วน คือ คาร์บอน ออกซิเจน และไฮโดรเจน รวมกันอยู่ในส่วนประกอบที่เป็นสารอินทรีย์รูปต่างๆ เช่น เซลลูโลส ( $C_6H_{10}O_5$ )<sub>x</sub> ซึ่งในกระบวนการการเผาไหม้จะเปลี่ยนเป็น คาร์บอนมอนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ บางส่วนจะอยู่ในรูปของ ชาร์ (char) และทาร์ (tar) นอกจากนี้ยังมี เฮมิเซลลูโลส ( $C_5H_8O_4$ )<sub>y</sub> เฮมิเซลลูโลสนี้ทำให้เกิดมีปริมาณก๊าซมากแต่ให้ทาร์และชาร์น้อย และ ลิกนิน ( $C_9H_{10}O_3(CH_3)O_{0.9-1.7}$ )<sub>z</sub> ถ้าเชื้อเพลิงชีวมวลมีปริมาณของลิกนินมากเท่าใด ก็จะทำให้ค่าความร้อนของการเผาไหม้สูง ส่วนประกอบเหล่านี้ขึ้นอยู่กับชนิดของพืชแต่ละชนิด เช่น เชื้อเพลิงชีวมวลชนิดหนึ่งมีคาร์บอน 50% ออกซิเจน 44% และไฮโดรเจน 6% สามารถเขียนเป็นสูตรอย่างง่าย (empirical formula) คือ  $CH_{1.44}O_{0.66}$  เชื้อเพลิงชีวมวลยังประกอบไปด้วย สารประกอบที่เป็นอนินทรีย์ซึ่งไม่สามารถที่จะเผาไหม้ได้ซึ่งจะกลายเป็นเถ้า(Ash)ในเวลาต่อมา แต่ไม่จำเป็นต้องเขียนลงไปเป็นสูตรอย่างง่าย เนื่องจากเป็นส่วนประกอบรอง (minor element) เถ้าของเชื้อเพลิงชีวมวลแต่ละชนิดมีปริมาณ ตั้งแต่ 1% เช่น ไม้ ไปจนถึง 20-25 % ในแกลบ องค์ประกอบของเถ้าจะประกอบไปด้วย  $CaO$ ,  $K_2O$ ,  $Na_2O$ ,  $MgO$ ,  $SiO_2$ ,  $Fe_2O_3$ ,  $P_2O_5$  และ  $Al_2O_3$  ซึ่งส่วนประกอบของเชื้อเพลิงชีวมวลเหล่านี้ล้วนมีความสำคัญซึ่งส่งผลต่อคุณลักษณะของการเผาไหม้ทั้งสิ้น

ตารางที่ 3.1 ส่วนประกอบของเชื้อเพลิงชีวมวลต่างๆ

ชนิดของเชื้อเพลิงชีวมวล	เซลลูโลส	เฮมิเซลลูโลส	ลิกนิน	เถ้า
ไม้เนื้ออ่อน(เฉลี่ย)	45.8	24.4	28	1.7
ไม้เนื้อแข็ง(เฉลี่ย)	45.2	31.3	21.7	2.7
ต้นสน	40	28.5	27.7	-
เปลือกไม้	24.8	29.8	43.8	1.6
ชานอ้อย	41.3	22.6	18.3	2.9
เปลือกมะพร้าว	36.3	25.1	28.7	0.7
กิ่งอ้อย	42.7	23.6	17.5	6.8
ฟางข้าวสาลี	30.5	28.9	16.4	11.2
แกลบ	31.3	24.3	18.3	23.5
ฟางข้าว	37	22.7	2.6	19.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.3 คุณลักษณะการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงชีวมวล

คุณสมบัติที่สำคัญของเชื้อเพลิงชีวมวลมีความสัมพันธ์บางอย่าง ต่อคุณลักษณะการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงชีวมวล เช่น ขนาด ความหนาแน่น องค์ประกอบหลักของเชื้อเพลิงชีวมวล ค่าความร้อนล้วนมีอิทธิพล โดยตรงต่อคุณลักษณะการเผาไหม้

คุณลักษณะที่สำคัญของเชื้อเพลิงชีวมวล คือ ขนาด (size) ความหนาแน่น การวิเคราะห์องค์ประกอบของเชื้อเพลิงชีวมวล (การวิเคราะห์แบบประมาณ proximate analysis และการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ ultimate analysis) ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงชีวมวลล้วนมีผลต่อคุณลักษณะการเผาไหม้ทั้งสิ้น

เชื้อเพลิงชีวมวล มีค่าความหนาแน่นหรือมีค่า bulk density ต่ำ ทำให้ต้องใช้เชื้อเพลิงในปริมาณสูงเพื่อให้ได้ความร้อนตามที่ต้องการ ส่งผลให้ยากต่อการลำเลียงเชื้อเพลิงเข้าห้องเผาไหม้ ปริมาณความชื้นและสารระเหยของเชื้อเพลิงชีวมวลค่อนข้างสูงทำให้เป็นข้อดี คือ ง่ายต่อการจุดติด แต่ความชื้นที่สูงทำให้การเผาไหม้ทำได้ยากขึ้น ซึ่งความชื้นที่สูงนี้มีผลอย่างยิ่งต่อค่าความร้อนของเชื้อเพลิง นำไปสู่การจุดติดที่ยากขึ้น ทำให้อุณหภูมิการเผาไหม้ลดลง ขัดขวางให้การเผาไหม้ไม่มีคุณภาพ การที่เชื้อเพลิงชีวมวลมีองค์ประกอบที่แตกต่างกัน จึงทำให้ค่าความร้อน (heating Value) ของเชื้อเพลิงชีวมวลมีค่าแตกต่างกัน ดังตาราง

ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติของเชื้อเพลิงชีวมวล

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

#### 3.2.3.1 ขนาดและความหนาแน่นของเชื้อเพลิงชีวมวล

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่สามารถนำออกไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.3.2 องค์ประกอบหลักของเชื้อเพลิงชีวมวล

#### การวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate analysis)

การวิเคราะห์แบบประมาณเป็นการวิเคราะห์แบบไม่ซับซ้อน เพื่อประมาณองค์ประกอบหลักของเชื้อเพลิงชีวมวลซึ่งมีอิทธิพลโดยตรงต่อคุณลักษณะการเผาไหม้ เช่น ความชื้น ปริมาณของสาร

การวิเคราะห์แบบประมาณเป็นการวิเคราะห์แบบไม่ซับซ้อน เพื่อประมาณองค์ประกอบหลักของเชื้อเพลิงชีวมวลซึ่งมีอิทธิพลโดยตรงต่อคุณลักษณะการเผาไหม้ เช่น ความชื้น ปริมาณของสารระเหย ปริมาณของคาร์บอนคงตัว(char) และปริมาณของเถ้า การวิเคราะห์องค์ประกอบแบบประมาณของทั้งหมดนี้มีความสัมพันธ์บางอย่าง ต่อคุณลักษณะการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงชีวมวล ยกตัวอย่างเช่น contribution of flaming and glowing combustion ในกระบวนการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล ขึ้นอยู่กับสัดส่วนของสารระเหยและคาร์บอนคงตัว ในขณะที่ความชื้นมีผลอย่างยิ่งต่อค่าความร้อนของเชื้อเพลิง

#### การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate analysis)

การวิเคราะห์แบบแยกธาตุเป็นการประมาณธาตุที่สำคัญเช่น C, H, O, N และ S หรือสารไม่บริสุทธิ์อื่น เช่น ฟอสฟอรัสและคลอรีน การวิเคราะห์แบบแยกธาตุและองค์ประกอบของก๊าซมีความสำคัญมากต่อการคำนวณมวลและพลังงานทั้งหมดในกระบวนการเผาไหม้ การที่เชื้อเพลิงชีวมวลมีปริมาณความชื้นและองค์ประกอบที่แตกต่างกัน จึงทำให้ค่าความร้อน (heating value) ของเชื้อเพลิงชีวมวลมีค่าแตกต่างกันด้วยดังนี้

ตารางที่ 3.3 การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ

การวิเคราะห์แบบประมาณ (%)	การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (%)
สารระเหย 55.6	คาร์บอน 38.0
คาร์บอนคงตัว 20.1	ไฮโดรเจน 5.7
ความชื้น 10.3	ไนโตรเจน 0.69
เถ้า 14.0	ออกซิเจน 41.6
	กำมะถัน 0.06
	เถ้า 14.0

### 3.3 เชื้อเพลิงแกลบ (Rice husk fuel) [23]

ค่าความร้อนของแกลบขึ้นอยู่กับแหล่งที่มาของแกลบนั้น โดยอยู่ที่ประมาณ 2900-4500 kcal/kg ซึ่งคิดเป็นประมาณ 40 % ของถ่านหินบิทูมินัส ข้อดีของแกลบ คือ มีปริมาณสารระเหยสูง

ทำให้ช่วยในการจุดติดได้เป็นอย่างดี มีความชื้นต่ำเมื่อเทียบกับเชื้อเพลิงชีวมวลอื่นและมีขนาดเล็ก  
 เอกสารฉบับนี้จัดทำขึ้นเพื่อเป็นข้อมูลเบื้องต้นในการศึกษาวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีการนำเอา  
 ไม้ว่ากรณิใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เหมาะเป็นเชื้อเพลิง ข้อเสียของแกลบคือ มีปริมาณขี้เถ้าสูง (ประมาณ 13-23 % โดยน้ำหนัก) เมื่อเทียบกับเชื้อเพลิงชีวมวลอื่น นอกจากนี้แกลบมีค่าความหนาแน่นหรือมีค่า bulk density ต่ำ เมื่อเทียบกับถ่านหินหลายชนิดที่อยู่ประมาณ 500–900 kg/m<sup>3</sup>

ตารางที่ 3.4 คุณสมบัติของเชื้อเพลิงแกลบ

การวิเคราะห์แบบประมาณ	ความชื้น	1.1 - 9.8	%
	คาร์บอนคงตัว	12.7 - 17.4	%
	สารระเหย	56.4 - 69.3	%
	ขี้เถ้า	15.8 - 24.9	%
การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ	คาร์บอน	38.2 - 45.8	%
	ซิลิกา	14.7	%
	ไฮโดรเจน	0.2 - 5.31	%
	ออกซิเจน	29.9 - 31.7	%
	กำมะถัน	0.07 - 0.12	%
Heating value		2900 - 4560	kcal/kg
Bulk density		95 - 107	kg/m <sup>3</sup>
ขนาดเฉลี่ย		8X2	mm

ตารางที่ 3.5 ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงชนิดต่างๆ

ประเภทของพลังงาน	ชนิดของพลังงาน	ค่าความร้อน: หน่วย/ก.ก.	
		กิโลแคลอรี	เมกะจูล
พลังงานเชิงพาณิชย์	แอนทราไซต์	7500	31.40
	ถ่านโค้ก	6600	27.63
	ถ่านหินน้ำแข็ง	6300	26.37
	ลิกไนต์(ดี)	4400	18.42
	ลิกไนต์(แจ่ม)	3610	15.11
	ลิกไนต์(กระบี่)	2600	10.88
	ลิกไนต์(แม่เมาะ)	2500	10.47
พลังงานหมุนเวียน	ถ่าน	6900	28.88
	ฟืน	3820	15.99
	<b>แกลบ</b>	<b>3440</b>	<b>14.40</b>
	ขี้เถ้า	2600	10.88
	อ้อย	1800	7.53
	ขยะ	1160	4.86

### 3.4 คุณสมบัติบางประการทางเทอร์โมไดนามิกส์ [24]

#### ความดันย่อยของของก๊าซผสมอุดมคติ (Partial pressure)

ความดันของก๊าซผสมอุดมคติ คือ ผลรวมของความดันย่อยของก๊าซแต่ละตัวที่อุณหภูมิเดียวกัน สามารถหาได้จากสมการที่ 3.1

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

ความดันย่อยมีความสัมพันธ์กับก๊าซผสมดังต่อไปนี้

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

เมื่อ  $\chi_i$  คือ สัดส่วน โมลของก๊าซผสม (mole fraction of species, i) หาได้จากสมการที่ 3.3

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

### 3.5 ทฤษฎีการเผาไหม้

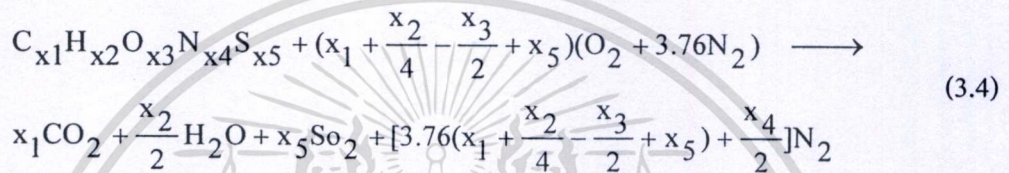
ปฏิกิริยาการเผาไหม้ (combustion reaction) หมายถึง ปฏิกิริยาทางเคมีที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วระหว่างออกซิเจนกับสารเผาไหม้ได้ (combustible element) ของเชื้อเพลิงชนิดหนึ่ง ๆ สารเผาไหม้ได้ในที่นี้มีธาตุหลัก 3 ตัว คือ คาร์บอน ไฮโดรเจน และกำมะถัน สำหรับกำมะถันขณะเกิดปฏิกิริยากับออกซิเจนจะให้ความร้อนไม่มากนักเมื่อเปรียบเทียบกับคาร์บอนและไฮโดรเจน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

การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงต้องอาศัยปัจจัยที่สำคัญ 3 ประการ คือ

1. เวลาในการเผาไหม้ต้องนานเพียงพอ เพื่อให้เชื้อเพลิงเผาไหม้อย่างสมบูรณ์จนหมด
2. อุณหภูมิระหว่างการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงต้องสูงเพียงพอที่จะทำให้เกิดการเผาไหม้อย่างต่อเนื่อง
3. การผสมผสานระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศจะต้องอยู่ในลักษณะการไหลผสมแบบปั่นป่วน (turbulence)

### 3.5.1 ปฏิกิริยาเคมีของการเผาไหม้

สมการด้านล่างเป็นสมการการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลที่สมบูรณ์ ซึ่งเกิดจาก คาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน ไนโตรเจน และกำมะถัน ทำปฏิกิริยากับอากาศในสัดส่วนที่ถูกต้อง ได้เป็น คาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ และซัลเฟอร์ไดออกไซด์ โดยไม่มีอย่างอื่นเหลืออยู่เลย ยกเว้นไนโตรเจน ซึ่งไม่ได้ทำปฏิกิริยาใดๆกับองค์ประกอบอื่นๆ เรียกว่าเป็น การเผาไหม้ที่สมบูรณ์ (complete combustion) ซึ่งปริมาณอากาศที่ต้องการใช้เป็นตัวออกซิไดซ์นั้นเพียงพอต่อการเผาไหม้เชื้อเพลิง จนหมดพอดีหรือใช้อากาศเกินเป็นศูนย์ (zero excess air หรือ stoichiometric combustion) จะทำให้ได้อุณหภูมิของการเผาไหม้และพลังงานความร้อนออกมาสูงที่สุด



ดังนั้นถ้าใช้อัตราส่วนของอากาศต่อเชื้อเพลิงที่น้อยกว่าตามทฤษฎี ก็จะทำให้ได้ค่าความร้อนที่ต่ำกว่าที่ควรจะได้ แต่ถ้าหากใช้ปริมาณอากาศต่อปริมาณเชื้อเพลิงที่มากกว่าทางทฤษฎีจะมีผลทำให้เกิดการสูญเสียความร้อนออกไปกับการเผาไหม้ด้วย อัตราส่วนของปริมาณอากาศต่อปริมาณของเชื้อเพลิงตามทฤษฎี (stoichiometric air fuel ratio) สามารถหาได้จากสมการที่ 3.5

$$(A/F)_{\text{stoic}} = \left( \frac{m_{\text{air}}}{m_{\text{fuel}}} \right)_{\text{stoic}} \quad (3.5)$$

แต่  $(A/F)_{\text{stoic}}$  ที่แท้จริงนั้นต้องหักปริมาณความชื้นที่มากับเชื้อเพลิงด้วย ซึ่งตัวแปรที่จะเป็นตัวบ่งบอกว่าการผสมกันระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงอยู่ในปริมาณเท่าใด เป็นการผสมกันระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงหนา บาง หรือพอดี ก็คือ อัตราส่วนสมมูล (equivalence ratio) ซึ่งสามารถหาได้จากสมการที่ 3.6

$$\Phi = \frac{(A/F)_{\text{stoic}}}{(A/F)} = \frac{(F/A)}{(F/A)_{\text{stoic}}} \quad (3.6)$$

ถ้า  $\Phi > 1$  จะเป็นการเผาไหม้แบบส่วนผสมเชื้อเพลิงหนา (fuel rich mixture) อาจทำให้ปริมาณออกซิเจนไม่เพียงพอต่อการเผาไหม้ ทำให้เกิดการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ มีปริมาณของ

คาร์บอนมอนอกไซด์เกิดขึ้น แต่ถ้า  $\Phi < 1$  เป็นการเผาไหม้แบบส่วนผสมเชื้อเพลิงบาง (fuel lean mixture) ส่วนการเผาไหม้แบบส่วนผสมพอดี (stoichiometry mixture) อัตราส่วนสมมูล  $\Phi = 1$  ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าการเผาไหม้เป็นแบบส่วนผสมพอดี ปริมาณอากาศที่ใช้ทางทฤษฎี คือ เปอร์เซ็นต์อากาศพอดี (percent stoichiometric air) ซึ่งมีความสัมพันธ์กับอัตราส่วนสมมูลสามารถหาได้ดังนี้

$$\% \text{ stoic air} = \frac{100\%}{\Phi} \quad (3.7)$$

ในทางปฏิบัติแล้วการที่จะทำให้ออกซิเจนในอากาศเข้าไปสัมผัส หรือทำปฏิกิริยากับเชื้อเพลิงได้อย่างพอดีแล้วเป็นสิ่งที่สามารถทำได้ยาก โดยเฉพาะการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง การที่มีออกซิเจนบางส่วนไม่สัมผัสกับเชื้อเพลิง ก็จะทำให้เผาไหม้ไม่สมบูรณ์ เกิดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) เขม่า (soot) และควัน (smoke) ทำให้ไม่ได้รับความร้อนอย่างที่ควรจะเป็น ดังนั้นจึงต้องมีการควบคุมการเผาไหม้ให้ปริมาณอากาศที่ใช้มีมากกว่าปริมาณอากาศทางทฤษฎี คือ ใช้ปริมาณอากาศส่วนเกินแต่ต้องไม่มากเกินไปจนมีการพาความร้อนออกไปจากระบบ เปอร์เซ็นต์ของอากาศส่วนเกิน คือ

$$\% \text{ excess air} = \frac{(1 - \Phi)}{\Phi} \cdot 100\% \quad (3.8)$$

ซึ่งกระบวนการเผาไหม้ที่กล่าวมา การใช้ปริมาณอากาศส่วนเกินเป็นเพียงวิธีหนึ่งที่จะทำให้เกิดการเผาไหม้ที่ได้ผลดีวิธีหนึ่งเท่านั้น นอกจากการใช้ปริมาณอากาศส่วนเกินแล้วยังต้องอาศัยปัจจัยอื่นร่วมด้วย ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อถัดๆ ไป

### 3.5.2 การผสม

การรวมตัวที่ดีระหว่างเชื้อเพลิงกับออกซิเจน ก็คือ การที่อนุภาคของเชื้อเพลิงสัมผัสกับโมเลกุลของออกซิเจนได้อย่างทั่วถึง ในกรณีที่เชื้อเพลิงเป็นก๊าซ การผสมกันนั้นจะเป็นไปได้ง่าย แต่ถ้าเชื้อเพลิงเป็นของแข็งหรือของเหลว การผสมกันนั้นก็จะต้องยุ่งยากมากขึ้น

ในกรณีที่เชื้อเพลิงเป็นของเหลว ส่วนใหญ่ก็จะมีการทำให้เป็นอนุภาคเล็ก ๆ ก่อนหรือเป็นฝอย แล้วจึงจะทำการเผาไหม้ซึ่งจะทำให้รวมตัวได้ง่ายกับอากาศและเกิดการลุกไหม้ได้ดีเหมือนเชื้อเพลิงที่เป็นก๊าซ

ส่วนเชื้อเพลิงที่เป็นของแข็งนั้น แต่ละโมเลกุลของออกซิเจนจะสัมผัสกับพื้นผิวของเชื้อเพลิงเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ให้ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ซึ่งเป็นก๊าซที่ติดไฟได้พร้อมกับได้รับความร้อนออกมาส่วนหนึ่ง จากนั้นออกซิเจนจะเข้าไปผสมกับคาร์บอนมอนอกไซด์ทำให้เกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ คือ เกิดคาร์บอนไดออกไซด์ในที่สุดซึ่งเป็นก๊าซที่ไม่ติดไฟได้เองแล้วพร้อมกับได้รับความร้อนออกมาด้วย

ฉะนั้นกระบวนการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงที่เป็นของแข็งนั้นจะประกอบด้วยพฤติกรรม 4 ขั้นตอน คือ

1. เริ่มต้นด้วยออกซิเจนสัมผัสกับพื้นผิวของเชื้อเพลิงที่เป็นคาร์บอน
2. เกิดการรวมตัวของคาร์บอนกับออกซิเจนกลายเป็นก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ออกมาพร้อมกับความร้อน
3. มีการปล่อยก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ได้จากการเผาไหม้ออกจากผิวของเชื้อเพลิง
4. มีการรวมตัวกันของคาร์บอนมอนอกไซด์กับออกซิเจนอีกครั้งจนกระทั่งกลายเป็น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

ดังนั้นจะกล่าวได้ว่า อัตราการเผาไหม้นั้นขึ้นอยู่กับสาเหตุที่กล่าวมาแล้ว และสามารถเร่งปฏิกิริยาการเกิดได้โดยการบดเชื้อเพลิงที่เป็นของแข็งให้เป็นผงซึ่งเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวในการสัมผัสให้มากขึ้น

### 3.5.3 การติดไฟหรือการลุกไหม้

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

1. บริเวณที่จำกัดสำหรับการสะสมความร้อน
2. สารเชื้อเพลิง
3. อากาศ

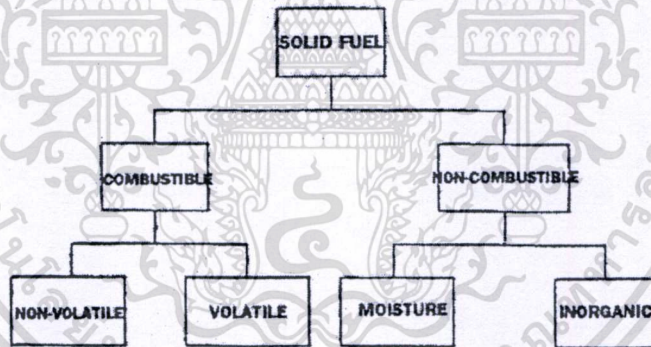
การลุกไหม้นั้นไม่ได้เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นได้เองส่วนใหญ่จะใช้ปริมาณความร้อนจากภายนอกช่วยเร่งปฏิกิริยาการเผาไหม้ และให้ปริมาณความร้อนออกมามากขึ้น นอกจากนั้นสิ่งที่สำคัญสำหรับการเผาไหม้แบบต่อเนื่องก็คือ อุณหภูมิ ซึ่งถ้าอุณหภูมิต่ำเกินไปก็ทำให้เชื้อเพลิงไม่สามารถลุกไหม้แบบต่อเนื่องได้ แต่ถ้าอุณหภูมิของการเผาไหม้สูง การลุกไหม้ก็จะเกิดต่อไปได้เรื่อย ๆ

ดังนั้นการติดไฟหรือการลุกไหม้นั้นขึ้นอยู่กับหลายสิ่ง เช่น ชนิดของสารเชื้อเพลิง สถานะของเชื้อเพลิง และอัตราส่วนของเชื้อเพลิงกับอากาศ

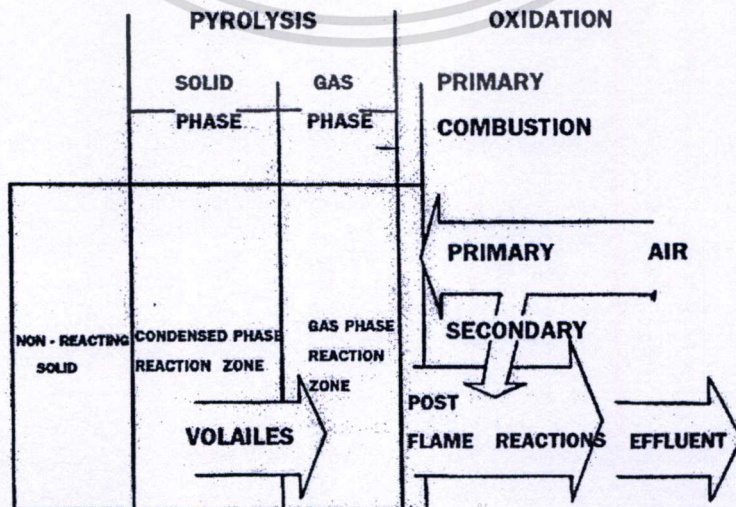
เชื้อเพลิงแข็งที่มีใช้อยู่ในปัจจุบันมีหลายชนิด เช่น ถ่านหิน ฟืน ไม้เลื่อย แกลบ ฟาง ข้าวโพด เป็นต้น ขบวนการการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง จะมีความแตกต่างไปจากเชื้อเพลิงเหลว และก๊าซ เพราะว่า คุณสมบัติของเชื้อเพลิงแข็ง มักจะเป็นสารประกอบที่มีส่วนผสมของสารต่างๆ

ด้วย เพราะเชื้อเพลิงแข็งประกอบไปด้วยสารประกอบต่างๆ ซึ่งมีทั้งเผาไหม้ได้ และไม่สามารถเผาไหม้ได้ดังรูปถัดไป

สารที่ไม่สามารถเผาไหม้ได้ เรียกว่า สารเฉื่อย (inert) สารเฉื่อยนี้สามารถเปรียบเทียบได้กับก๊าซในโคโรเจนในอากาศ ซึ่งจะไม่ช่วยในการเผาไหม้ แต่ในบางครั้งสารเฉื่อยเหล่านี้ก็อาจจะเกิดปฏิกิริยาได้ในบางขบวนการของการเผาไหม้ โดยเฉพาะในขบวนการเผาไหม้ที่อุณหภูมิสูงๆ สารเฉื่อยที่อยู่ในเชื้อเพลิงแข็ง สามารถแบ่งออกได้ 2 ชนิด คือ ความชื้น และสารประกอบเคมีที่ประกอบขึ้นเป็นขี้เถ้า สารอนินทรีย์เหล่านี้โดยมากจะเป็นพวกซิลิเกต (silicates) ซัลไฟด์ (sulfides) และเกลือฮาโลเจน (halogen salt) เป็นต้น เมื่อเกิดการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง สารเหล่านี้จะกลายเป็นขี้เถ้า บางส่วนจะตกในห้องที่เผาไหม้ ส่วนที่มีน้ำหนักเบาจะลอยไปกับไอเสียที่เรียกว่า เถ้าลอย (fly ash) เชื้อเพลิงแข็งที่สามารถแยกได้เป็นส่วนที่ระเหยได้ (volatile) และส่วนที่ไม่ระเหย (non-volatile) ในส่วนที่ไม่ระเหยนี้ ประกอบด้วยคาร์บอน สารประกอบคาร์บอน  $C_xH_y$  โดยที่ค่า x มีค่ามากกว่า y มากๆ หรือเป็นสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงนั่นเอง ส่วนสารที่ระเหยได้ในที่นี้ หมายถึง สารประกอบที่ระเหยใช้ในช่วงของการเผาไหม้ ซึ่งจะประกอบไปด้วยสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำๆ หลักในการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งปฏิกิริยาที่จะเกิดขึ้น ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 องค์ประกอบของเชื้อเพลิงแข็ง

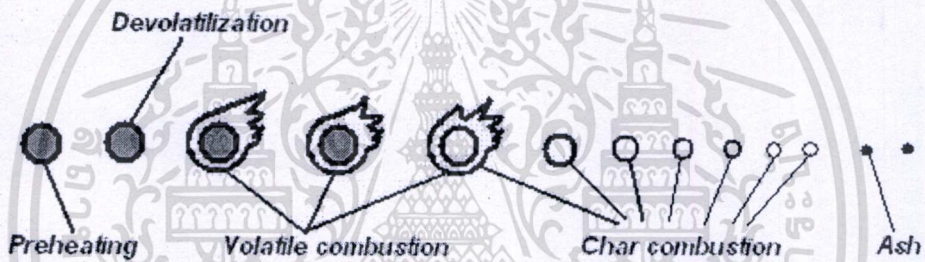


รูปที่ 3.4 ปฏิกิริยาการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเพื่อการศึกษาร่วมกัน ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.5.4 การเผาไหม้อนุภาคเชื้อเพลิงแข็ง

เชื้อเพลิงแข็งประกอบไปด้วยสารระเหย คาร์บอนคงตัว ความชื้น และเถ้า กระบวนการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งเขียนเป็นแผนภาพได้ดังรูปที่ 3.5 ซึ่งมีลำดับดังนี้ Preheating, devolatilization, volatile combustion, volatile และ char combustion เชื้อเพลิงแข็งเมื่อได้รับความร้อนจะเกิดการระเหยก่อน ก่อนที่จะมีการเผาไหม้สารระเหยนั่น ความร้อนส่วนหนึ่งที่เกิดจากการเผาไหม้สารระเหยจะถูกถ่ายเทให้แก่ผิวเชื้อเพลิงและมีการถ่ายโอนสารระเหยสู่เปลวไฟอย่างต่อเนื่องเมื่อสารระเหยที่ติดไฟได้เหล่านั้นถูกปล่อยออกมาจนหมดการเผาไหม้ในขั้นตอนนี้เรียกว่า การเผาไหม้ของสารระเหย (volatile combustion) จากนั้นจึงตามด้วยการเผาไหม้ของคาร์บอนแข็งที่เหลือ อันเนื่องมาจากการแพร่ของออกซิเจนเข้าหาผิวคาร์บอนจนทำให้คาร์บอนเกิดการเผาไหม้ร้อนแดงที่ผิว การเผาไหม้ในขั้นตอนนี้เรียกว่า การเผาไหม้ของคาร์บอน (carbon หรือ char combustion)



รูปที่ 3.5 กระบวนการการเผาไหม้อนุภาคแข็ง

### 3.5.5 แบบจำลองการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง

แบบจำลองการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งที่นิยมใช้ในปัจจุบันมีอยู่ 2 แบบ คือ

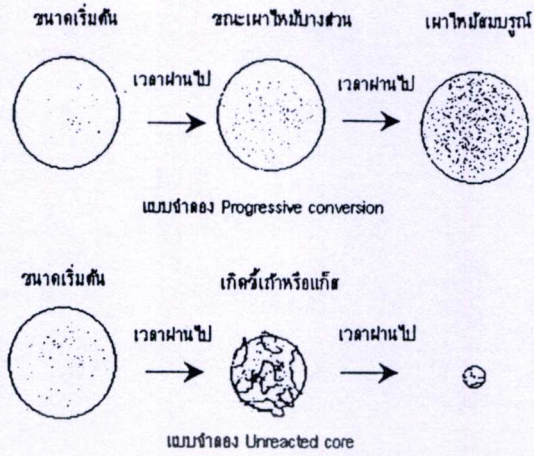
1. แบบจำลอง Progressive conversion ใช้อธิบายเมื่อในระหว่างการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ขนาดของเชื้อเพลิงไม่เปลี่ยนแปลง และเมื่อทำการเผาไหม้แล้ว ไม่เกิดจี้เถ้าผลิตภัณฑ์ที่ได้คงรูปเดิม เช่น การเผาแร่กำมะถัน
2. แบบจำลอง Unreacted core ใช้อธิบายเมื่อทำการเผาไหม้แล้ว ขนาดของเชื้อเพลิงเปลี่ยนไป เช่น ไม้, แกลบ, ถ่านหิน เป็นต้น

โดยจะมุ่งเน้นศึกษาที่แบบจำลอง Unreacted core ซึ่งเป็นแบบจำลองที่ใช้อธิบายการเผาไหม้ของ แกลบ

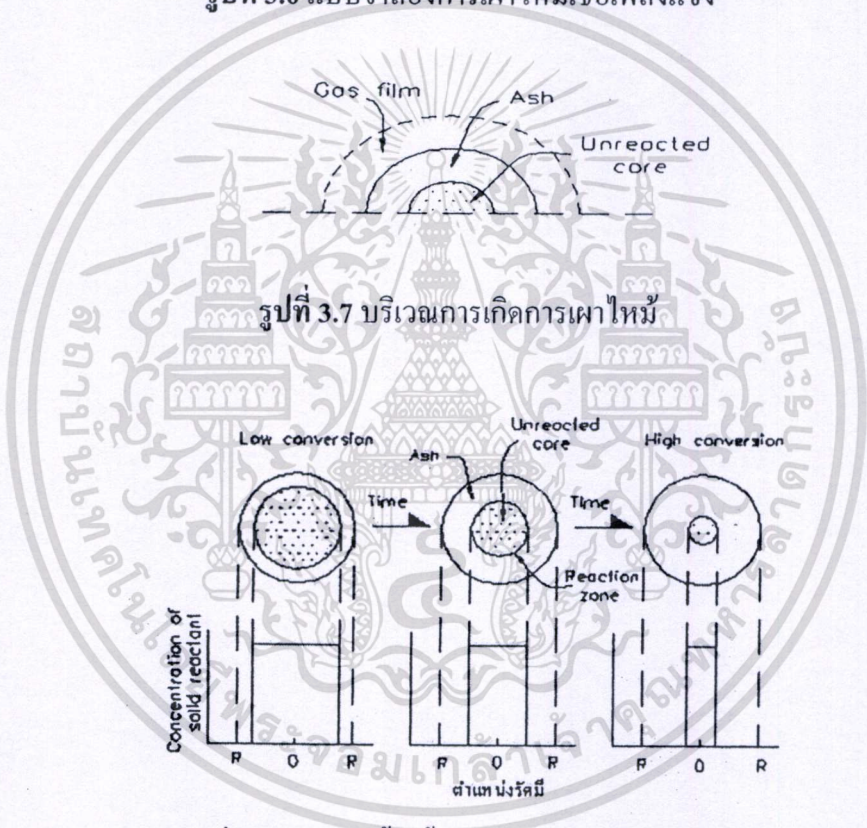
#### แบบจำลอง Unreacted core

ปฏิกิริยาการเผาไหม้จะเกิดขึ้นครั้งแรกที่ผิวนอกสุดของเชื้อเพลิง หลังจากนั้นบริเวณที่เกิดปฏิกิริยาจะค่อยๆ กินลึกเข้าไปภายใน ทั้งบริเวณที่ได้ทำปฏิกิริยาไปแล้วในสภาพจี้เถ้า ดังนั้นที่เวลาใดๆ ส่วนลึกเข้าไปภายในชั้นเชื้อเพลิง หรือที่เรียกว่า แก่น จะค่อยๆ มีขนาดลดลงในระหว่างการทำปฏิกิริยา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.6 แบบจำลองการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง



รูปที่ 3.8 ลักษณะชั้นเชื้อเพลิงระหว่างการเผาไหม้

ปฏิกิริยาของแบบจำลองนี้ สามารถแบ่งออกเป็น 5 ขั้นตอนคือ

1. อากาศแพร่กระจายผ่านชั้นฟิล์มเข้าสู่ชั้นขี้เถ้า
2. อากาศผ่านชั้นขี้เถ้าเข้าสู่ผิวของเชื้อเพลิงในส่วนที่ยังไม่ทำปฏิกิริยา
3. เกิดปฏิกิริยาระหว่างอากาศกับผิวของเชื้อเพลิง
4. ผลิตภัณฑ์ในรูปของก๊าซที่เกิดจากการเผาไหม้ซึมผ่านชั้นขี้เถ้ากลับสู่ชั้นฟิล์มของก๊าซ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ผลิตภัณฑ์ก๊าซซึมผ่านชั้นฟิล์มกลับคืนสู่ภายนอกบรรยากาศรอบๆ โดยความต้านทาน ในแต่ละชั้นตอนอาจจะแตกต่างกันมากขึ้นตอนที่มีความต้านทานสูงสุดจะเป็นตัวควบคุมอัตราการความเร็วของการเผาไหม้

สิ่งที่มีผลต่ออัตราการเร็วในการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง

1. อุณหภูมิ โดยทั่วไปขั้นตอนของปฏิกิริยาเคมีจะไวต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ
2. เวลาของการแพร่กระจายของอากาศผ่านชั้นฟิล์ม หรือชั้นชี้ไถ้
3. ขนาดของเชื้อเพลิง
4. ความต้านทานของชั้นชี้ไถ้กับชั้นฟิล์ม โดยปกติความต้านทานของชั้นชี้ไถ้จะสูงกว่าชั้นฟิล์มมากดังนั้นค่าความต้านทานของชั้นฟิล์มจึงอาจจะตัดทิ้งได้
5. ความต้านทานรวม ซึ่งรวมทั้งความต้านทานของก๊าซฟิล์มชั้นชี้ไถ้ และปฏิกิริยาการเผาไหม้

### 3.5.6 ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง

การที่เชื้อเพลิงชีวมวลมีปริมาณความชื้นและองค์ประกอบที่แตกต่างกัน จึงทำให้ค่าความร้อน (Heating Value) ของเชื้อเพลิงชีวมวลมีค่าแตกต่างกันด้วยดังตารางที่ 3.6

ค่าความร้อนเป็นค่าพลังงานความร้อนของเชื้อเพลิงเมื่อเทียบต่อ 1 หน่วยน้ำหนักหรือปริมาตรของเชื้อเพลิง โดยมีหน่วยเป็น kJ/kg, kcal/kg, Btu/lb หรือ kcal/litre เป็นต้น และมีคำจำกัดความ คือ ปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทหรือคายออกจากปฏิกิริยาการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงที่เกิดอย่างสมบูรณ์ (complete combustion) เพื่อให้ผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาการเผาไหม้ (ก๊าซไอเสีย) เย็นตัวลงจนมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิเริ่มต้นที่สภาวะมาตรฐานของเชื้อเพลิงและอากาศที่เผาไหม้ ซึ่งคำว่าสภาวะมาตรฐานในที่นี้คือความดันสมบูรณ์ 1 บรรยากาศ (atm) และอุณหภูมิ 25°C โดยปกติค่าความร้อนของเชื้อเพลิงแต่ละชนิดจะถูกกำหนดขึ้นจากการทดลองเผาเชื้อเพลิงในอุปกรณ์ที่เรียกว่า บอมบ์แคลอรีมิเตอร์ (Bomb calorimeter) ตามมาตรฐาน ASTM D 2015 ค่าความร้อนของการเผาไหม้ (Heat of combustion) จะกำหนดค่าความร้อนไว้ 2 ค่า คือ

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

ค่าความร้อนขั้นสูง คือ ค่าความร้อนของการเผาไหม้ที่กำหนดให้น้ำในผลิตภัณฑ์อยู่ในรูปของเหลว หรือน้ำเกิดเป็นผลอย่างหนึ่งของผลิตภัณฑ์

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

ค่าความร้อนขั้นต่ำ คือ ค่าความร้อนของการเผาไหม้ที่กำหนดให้น้ำในผลิตภัณฑ์อยู่ในรูปของไอน้ำ หรือน้ำเกิดเป็นผลอย่างหนึ่งของผลิตภัณฑ์ โดยที่

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

$$LHV = HHV - 9m_{H_2} h_{fg} \quad (3.9)$$

โดยที่

$m_w$  = มวลของไอน้ำที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ต่อหนึ่งหน่วยมวลของเชื้อเพลิง (เนื่องจากการเผาไหม้  $H_2$  ในเชื้อเพลิง แต่ไม่รวมถึงน้ำที่มาจากความชื้นในเชื้อเพลิง)

$m_{H_2}$  = มวลของไฮโดรเจนต่อหนึ่งหน่วยมวลของเชื้อเพลิง รู้ได้จากการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ

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

ตารางที่ 3.6 ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงชีวมวล

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

ทั้งนี้ค่าความร้อนสูง เป็นค่าที่นำเอาค่าความร้อนแฝง (Latent heat) ของไอน้ำที่ปะปนอยู่ในก๊าซไอเสียมารวมด้วย ในขณะที่ค่าความร้อนต่ำจะไม่นำค่าดังกล่าวมารวม เพราะสมมติฐานที่ว่าในกระบวนการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นจริงนั้นปริมาณไอน้ำที่เกิดขึ้นในก๊าซไอเสียจะไม่เกิดการควบแน่นและไม่คายพลังงานความร้อนแฝงออกมาให้ระบบ (อุณหภูมิของก๊าซไอเสียจะมีค่าสูงกว่าจุดเดือดของน้ำในก๊าซไอเสียเสมอ) แต่จะถูกทิ้งไปสู่บรรยากาศทางปล่องไอเสียแทน นั่นคือปริมาณความร้อนในส่วนนี้จะเป็ความร้อนที่ไม่ได้ถูกนำมาใช้ประโยชน์เลยในกระบวนการเผาไหม้ ดังนั้นจึงนิยมนำค่าความร้อนต่ำ มาเป็นค่าที่ใช้ในการคำนวณสมดุลความร้อนและประสิทธิภาพของเครื่องจักรอุปรกรณ์มากกว่าค่าความร้อนสูง เนื่องจากให้ผลการคำนวณที่ถูกต้อง

เอกสารและสะท้อนความเป็นจริงมากกว่าในแง่ของประสิทธิภาพเชิงความร้อนให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.6 ประสิทธิภาพการเผาไหม้ (Combustion efficiency)

การคำนวณประสิทธิภาพการเผาไหม้ในที่นี้เป็นการคำนวณ โดยสมมติให้ความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้สมบูรณ์มีประสิทธิภาพ 100 % จากนั้นหักลบด้วย ความร้อนสูญเสียเนื่องจากคาร์บอนที่เผาไหม้ไม่หมดในชี้เต้า ( $q_3$ ) และความร้อนสูญเสียเนื่องจากเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ ( $q_4$ )

$$\eta_{com} \equiv 100 - (\%q_3 + \%q_4) \quad [\%] \quad (3.10)$$

นอกจากประสิทธิภาพที่ทางความร้อนที่สูงแล้ว สิ่งที่ต้องคำนึงถึง คือ เรื่องของมลพิษ การปล่อยมลพิษของคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO), unburn hydrocarbons และ ออกไซด์ของไนโตรเจน ( $\text{No}_x$ ) ต้องอยู่ในระดับที่ต่ำที่สุดด้วย

### 3.7 ทฤษฎีฟลูอิดไอเซชัน

ฟลูอิดไอเซชันเป็นปรากฏการณ์ที่ อนุภาคของแข็งขนาดเล็กถูกทำให้อยู่ในสภาพคล้ายของไหลด้วยการพุง โดยก๊าซหรือของเหลวที่ไหลผ่านเบดของแข็งขึ้นไปด้านบน ด้วยอัตราการไหลค่าหนึ่ง โดยมีการถ่ายเทมวลสาร ความร้อน และปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นในขณะที่มีการสัมผัสระหว่างอนุภาคของแข็ง

#### 3.7.1 ประเภทของฟลูอิดไอเซชัน

กระบวนการฟลูอิดไอเซชันแบ่งตามลักษณะการเกิดได้สองแบบ คือ

3.7.1.1 ฟลูอิดไอเซชันสองสถานะ (two - phases fluidization) หมายความว่า ในหอตลอดหรือเบดที่ใช้งานจะประกอบด้วยสองสถานะ คือ ของแข็งกับของไหล ของไหลนี้อาจจะเป็นก๊าซหรือของเหลวก็ได้ ดังนั้น ฟลูอิดไอเซชันจึงแบ่งออกอีก 2 ประเภท คือ

1. ก๊าซฟลูอิดไอเซชัน (gas fluidization)
2. ฟลูอิดไอเซชันของของเหลว (liquid fluidization)

3.7.1.2 ฟลูอิดไอเซชันสามสถานะ (three - phases fluidization ) หมายความว่าภายในหอตลอดจะประกอบด้วยของสามสถานะในเวลาเดียวกัน คือ ของแข็ง, ของเหลว และก๊าซ สำหรับฟลูอิดไอเซชันสามสถานะเป็นกระบวนการที่พัฒนามาจากฟลูอิดไอเซชันสองสถานะ

#### 3.7.2 ลักษณะฟลูอิดไอซ์เบด

เบด (bed) หมายถึง อาณาเขตในหอตลอดที่มีอนุภาคของแข็งบรรจุอยู่ ไม่ว่าอนุภาคของแข็งนั้นจะอยู่นิ่งหรือเคลื่อนไหวด้วยของไหลในห้องทดลอง จะระดับตั้งแต่แผ่นโลหะที่ทำเป็นตะแกรงรองรับหรือเป็นตัวกระจายของไหลจนถึงระดับสูงสุด คือ ผิวหน้าของอนุภาคของแข็งที่อยู่ในหอตลอด ดังรูปที่ 3.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในการเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ของไหลความเร็วต่ำ

รูปที่ 3.9 แสดงระดับของเบคในหอทดลอง

ปรากฏการณ์ฟลูอิดิเซชันเกิดขึ้นได้หลายลักษณะ ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบบางประการ เช่น ความเร็วของของไหล ชนิดของเม็ดวัสดุที่ประกอบกันเป็นเบค ลักษณะของแผ่นกระจายของไหล เมื่อความเร็วของของไหลเปลี่ยนแปลงไปจะทำให้ความดันตกในเบคเปลี่ยนแปลงไปด้วย ดังรูปที่ 3.10 ลำดับเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นเมื่อค่อยๆ เพิ่มความเร็วของของไหลสรุปได้ดังนี้ คือ

3.7.2.1 เมื่อป้อนของไหลด้วยความเร็วต่ำๆ ของไหลจะไหลผ่านช่องว่างระหว่างอนุภาคของแข็งไปโดยไม่ทำให้อนุภาคของแข็งเคลื่อนที่ เบคลักษณะนี้เรียกว่า เบคนิ่ง (fixed bed)

3.7.2.2 เมื่อความเร็วของของไหลสูงขึ้นอนุภาคของแข็ง จะเคลื่อนที่ห่างออกจากกัน ลักษณะเช่นนี้ เรียกว่า เบคขยาย (expanded bed)

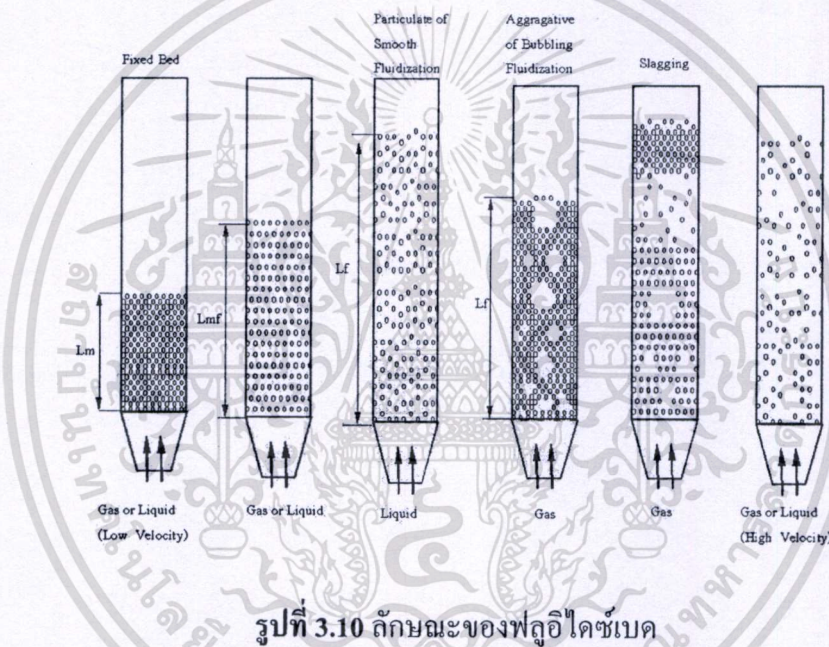
3.7.2.3 เมื่อเพิ่มความเร็วของของไหลขึ้นอีกจนถึงจุดๆหนึ่ง ซึ่งแรงเสียดทานระหว่างอนุภาคของแข็งกับของไหลสมดุลกับน้ำหนักของอนุภาคของแข็ง และแรงกระทำระหว่างอนุภาคของแข็งในแนวตั้งหายไป อนุภาคของแข็งที่ประกอบกันเป็นเบคจะลอยตัวเป็นอิสระ แรงกระทำเนื่องจากความดันตกในเบคระนาบตัดใดๆ ของเบคจะเท่ากับน้ำหนักของของไหลและอนุภาคของแข็งระหว่างหน้าตัดนั้นๆ เบคในสภาพเช่นนี้เป็นเบคที่เริ่มฟลูอิดิเซชัน เรียกเบคในลักษณะนี้ว่า อินซิเพียนฟลูอิดิเซชันเบค (incipiently fluidized bed) หรือเบคที่มีสภาพฟลูอิดิเซชันต่ำสุด (minimum fluidization)

3.7.2.4 เมื่อของไหลมีความเร็วมากกว่าความเร็วที่กล่าวในหัวข้อ 3.7.2.3 อนุภาคของแข็ง จะเคลื่อนที่ห่างออกจากกันมากขึ้นตามความเร็วของของไหล จะเริ่มเกิดฟองก๊าซ (bubbles) เกิดขึ้นอนุภาคของแข็งเริ่มไหลหมุนเวียนดีขึ้น เมื่อความเร็วของของไหลเพิ่มสูงขึ้น จะทำให้เกิดการผสมผสานและการไหลเวียนของของแข็งจะรุนแรงยิ่งขึ้น เบคในลักษณะเช่นนี้เรียกว่า บับบลิ้งฟลูอิดิเซชันเบค (bubbling fluidized bed) ส่วนของเบคที่ไม่รวมฟอง เรียกว่า อิมัลชันเฟส (emulsion phase)

3.7.2.5 ฟลูอิดิเซชันเบคที่สามารถบ่งบอกระดับเบคได้ เรียกว่า ฟลูอิดิเซชันเบคแบบหนาแน่น (dense phase fluidized bed) และเมื่อความเร็วของของไหลมากกว่าความเร็วขณะหลุดลอย (terminal velocity) อนุภาคของแข็งจะหลุดลอยไปกับกระแสการไหลของของไหล สถานะ

เรียกว่า ฟลูอิดไคซ์เบดแบบเจือจาง (lean phase fluidized bed) หรือการขนถ่ายด้วยของไหล (pneumatic or hydraulic transport)

3.7.2.6 ฟลูอิดไคซ์เบดที่ของไหลเป็นของเหลว การขยายตัวของเบดเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ การลอยตัวและการหมุนรอบตัวเองของอนุภาคของแข็งเป็นไปอย่างช้าๆ เราเรียกเบดแบบนี้ว่าเบดสม่ำเสมอ (smoothly fluidized bed) ฟลูอิดไคซ์เบดที่ของไหลเป็นก๊าซลักษณะของเบดจะแตกต่างจากของเหลวมาก เพราะว่าเมื่อความเร็วของก๊าซสูงกว่าความเร็วที่ทำให้เกิดฟลูอิดไคซ์ชันแล้ว ก๊าซส่วนหนึ่งยังทำหน้าที่ ให้เกิดการลอยตัวของอนุภาคของแข็งเหมือนเดิม แต่มีอีกส่วนหนึ่งรวมตัวแล้วเกิดเป็นฟองก๊าซเกิดขึ้น ฟองก๊าซจะแทรกตัวเองขึ้นมาถึงบนผิวหน้าของเบด และแตกตัวในที่สุด การเคลื่อนที่ของอนุภาคของแข็งภายในเบดจะเคลื่อนที่อย่างไม่เป็นระเบียบ



รูปที่ 3.10 ลักษณะของฟลูอิดไคซ์เบด

### 3.7.3 ข้อได้เปรียบและเสียเปรียบของฟลูอิดไคซ์ชัน

เป็นการเปรียบเทียบการได้เปรียบและเสียเปรียบระหว่างการใช้เทคนิคฟลูอิดไคซ์เบดกับเทคนิคอื่นๆ ดังมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

#### 3.7.3.1 ข้อได้เปรียบ

1. เนื่องจากอนุภาคของแข็งที่เคลื่อนที่อยู่ตลอดเวลา ทำให้เกิดการผสมกันอย่าง รวดเร็วและสม่ำเสมอ อุณหภูมิภายในเบดคงที่ตลอด ซึ่งต่างจากเบดนิ่งซึ่งอุณหภูมิจะไม่เท่ากันตลอดทั้งเบด

2. การทำงานด้วยฟลูอิดไคซ์เบดจะเสียพลังงานน้อยกว่า เพราะแรงเสียดทานและแรงดันตกคร่อมเบดน้อยกว่าแบบบรรจุมาก

3. มีการจัดเรียงตัวของอนุภาคของแข็ง อนุภาคที่มีน้ำหนักน้อยจะอยู่ส่วนบน ส่วนอนุภาคที่มีน้ำหนักมากกว่าจะอยู่ด้านล่าง ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการแยกขนาดของอนุภาคของแข็งได้ นอกจากนี้แรงเสียดทานต่อการไหลของของไหลมีน้อยกว่ามาก

4. จากคุณสมบัติที่คล้ายของไหลจึงสามารถทำงานแบบต่อเนื่องได้ คือ ปล่อยให้ของแข็งไหลออกจากเบคและไหลเติมเข้าไปในเบคได้ การควบคุมก็จะทำได้ง่าย

5. พื้นที่สัมผัสระหว่างอนุภาคของแข็งกับของไหลจะมีมากกว่า เมื่อเทียบกับเบคหนึ่งที่มีอนุภาคของแข็งเท่ากัน จึงมีประโยชน์ในการใช้งานที่มีการถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวลสาร

6. ที่อนุภาคของไหลหมุนเวียนอยู่ภายในเบค อนุภาคของแข็งนี้สามารถจะเป็นตัวนำความร้อนจากแหล่งความร้อนให้กับของไหลได้มากกว่า

### 3.7.3.2 ข้อเสียเปรียบ

1. เนื่องจากการผสมกันอย่างรวดเร็ว บางครั้งอนุภาคของของแข็งมีช่วงเวลาอยู่ในเบคสั้นเกินไป เมื่อทำงานแบบต่อเนื่องจึงทำให้ผลิตภัณฑ์แห้ง หรืออนุภาคของแข็งมีคุณสมบัติทางกายภาพไม่ตรงตามข้อกำหนด

2. การสั่นสะเทือนของหอตกลงหรือเกิดการกัดกร่อนเนื่องจากอนุภาคของแข็งมากระทบกับผนังหอตกลง

3. เวลาที่ของไหลสัมผัสกับอนุภาคของแข็งสั้นมาก จึงต้องใช้เบคสูงๆหรือเบคหลายๆชั้นซึ่งเปลืองเงินลงทุนมาก

4. มักเกิดฟองก๊าซในเบค ทำให้การสัมผัสกันไม่ดีเป็นการสูญเสียเปล่า ถ้ายังเป็นกระบวนการ ที่มีการเปลี่ยนแปลงทางเคมีจะต้องใช้ตัวเร่งช่วยแล้ว ทำให้เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงลดลง

5. ใช้กับอนุภาคของแข็งที่เปื่อยหรือเป็นยางไม่ได้ เพราะเกิดการเกาะเป็นก้อนใหญ่และตกตะกอนมายังส่วนล่างของเบค

6. การทำงานมีข้อจำกัด เพราะถ้ามีความเร็วของของไหลมากเกินไปเม็ดของแข็งก็จะออกมาจากเบคไปพร้อมกับของไหล

7. ในปฏิกิริยาที่ทำให้ตัวเร่งมีขนาดลดลง จะต้องปรับความเร็วของก๊าซเพื่อไม่ให้ตัวเร่งปลิวทำให้ได้ผลิตภัณฑ์น้อยลง

### 3.7.4 ทฤษฎีการคำนวณฟลูอิดไอเซชัน

ขณะที่ของของไหลไหลผ่านขึ้นมาด้านใกล้ผนัง ความเร็วของไหลจะต่ำมากหรือเกือบไม่มีการไหลเลยเนื่องจากเกิดแรงเสียดทาน เมื่อในหอตกลงที่บรรจุอนุภาคของของแข็งมีอิทธิพลของฝาผนังเกิดขึ้น ขอบเขตการไหลชนิดเรียบจะสูงมากขึ้น พื้นที่ในการไหลของของไหล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในหอคดลองจะลดน้อยลง หรือเส้นผ่านศูนย์กลางที่ทำงานที่แท้จริงของของไหลเล็กกว่าเดิมมาก ประสิทธิภาพการทำงานจะน้อยลงด้วย

ตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อการเกิดฟลูอิดไอเซชัน คือ

1. ความเร็วของของไหล
2. ตัวกระจายของไหล
3. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหอคดลอง
4. อนุภาคของแข็ง
5. ความหนาแน่นของของไหล
6. ความหนืด
7. ความสูงของเบด

ความสูงของเบดเมื่อเริ่มฟลูอิดไอเซชันสามารถหาได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\frac{L_0}{L_{mf}} = \frac{1 - \varepsilon_{mf}}{1 - \varepsilon_0} \quad (3.11)$$

ขณะที่อนุภาคของแข็งเริ่มลอยตัวเป็นอิสระแสดงว่า อนุภาคของแข็งกำลังอยู่ในสมดุลของแรง ซึ่งได้แก่ แรงที่เกิดจากน้ำหนักของอนุภาคของแข็ง แรงพยุงของของไหล (buoyance force) และแรงต้านการไหล (drag force) อาจเขียนในสมการสมดุลแรงต่างๆ ได้ดังนี้

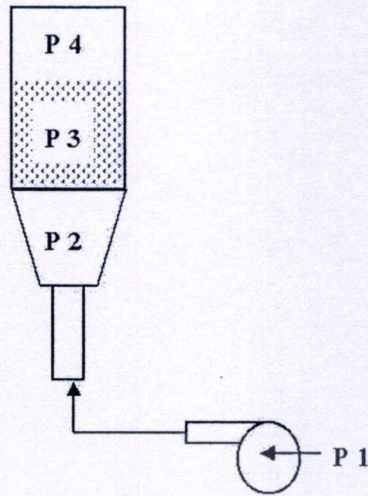
$$(\text{แรงพยุงของของไหล}) + (\text{แรงต้านทานการไหล}) = (\text{น้ำหนักของอนุภาคของแข็งในเบด}) \quad (3.12)$$

$$(\text{ความดันลดในเบด})(\text{พื้นที่หน้าตัดของคอลัมน์}) = (\text{ปริมาตรของเบด})(\text{สัดส่วนของของแข็ง})(\text{น้ำหนักจำเพาะของแข็ง}) \quad (3.13)$$

$$\Delta P_b A_t = W = (A_t L_{mf}) (1 - \varepsilon_{mf}) (\rho_s - \rho_g) \frac{g}{g_c} \quad (3.14)$$

จัดเทอมใหม่สำหรับสภาพฟลูอิดไอเซชันต่ำสุด

$$\frac{\Delta P_b}{L_{mf}} = (1 - \varepsilon_{mf}) (\rho_s - \rho_g) \frac{g}{g_c} \quad (3.15)$$



รูปที่ 3.11 แสดงความดันที่เกิดขึ้น ณ ตำแหน่งต่างๆในชุดการทดลอง

จากสมการความดันตกคร่อมที่ผ่านเบดนิ่งจะได้ว่า กลไกของความดันตกคร่อมในเบดที่ใช้นุภาคของแข็งขนาดสม่ำเสมอแล้ว พบว่าความดันตกคร่อมนี้เป็นสัดส่วนกับแฟลคเตอร์ 2 แฟลคเตอร์ คือ

$$\frac{\Delta P_b}{L} g_c = \frac{150(1-\varepsilon_{mf})\mu U}{\varepsilon_{mf}^3 (\phi_s d_p)^2} + \frac{1.75(1-\varepsilon_{mf})\rho_g U^2}{\varepsilon_{mf}^3 (\phi_s d_p)} \quad (3.16)$$

เทอมแรกทางด้านขวาของสมการ 3.12 แทนการสูญเสียความดันเนื่องจากผลของความเสียดทาน เทอมที่สองเป็นผลของการสูญเสียพลังงานจลน์ที่  $Re_p < 20$  โดยที่แรงเสียดทานจะมีค่ามากกว่า ดังนั้นสมการที่ 3.16 สามารถตัดเทอมที่สองได้เป็น

$$\frac{\Delta P_b}{L} g_c = \frac{150(1-\varepsilon_{mf})\mu U}{\varepsilon_{mf}^3 (\phi_s d_p)^2} \quad (3.17)$$

ที่  $Re_p > 1000$  ผลของการสูญเสียพลังงานจลน์ จะมีค่ามากกว่าผลของแรงเสียดทานสมการที่ 3.16 จัดใหม่ได้เป็นดังนี้

$$\frac{\Delta P_b}{L} g_c = \frac{1.75(1-\varepsilon_{mf})\rho_g U^2}{\varepsilon_{mf}^3 (\phi_s d_p)} \quad (3.18)$$

ซึ่งสมการของ Ergun นี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับสมการที่ 3.16 ได้ เมื่อเบดอยู่ที่จุดเริ่มเกิดฟลูอิดเซชัน ดังนั้นจะแทนสมการที่ 3.16 ลงในสมการที่ 3.15 ในขณะที่เริ่มเกิดฟลูอิดเซชันได้ดังสมการที่ 3.19

$$\frac{1.75}{\varepsilon_{mf}^3 \phi_s} \left[ \frac{d_p U_{mf} \rho_g}{\mu} \right]^2 + \frac{150(1-\varepsilon_{mf})(U_{mf} d_p \rho_g)}{\mu \varepsilon_{mf}^3 \phi_s^2} = \frac{d_p^3 \rho_g (\rho_s - \rho_g) g}{\mu^2} \quad (3.19)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในเบคที่ใช้อนุภาคของแข็งขนาดเล็ก จะทำให้สามารถใช้ความเร็วของของไหลเพียงเล็กน้อยก็ทำให้เกิดฟลูอิดเซชันได้แล้ว เพราะฉะนั้นความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดเซชันเมื่อ  $Re_p < 20$  สามารถคำนวณได้จาก

$$U_{mf} = \frac{(\phi_s d_p)^2 (\rho_s - \rho_g) g \varepsilon_{mf}^3}{150 \mu (1 - \varepsilon_{mf})} \quad (3.20)$$

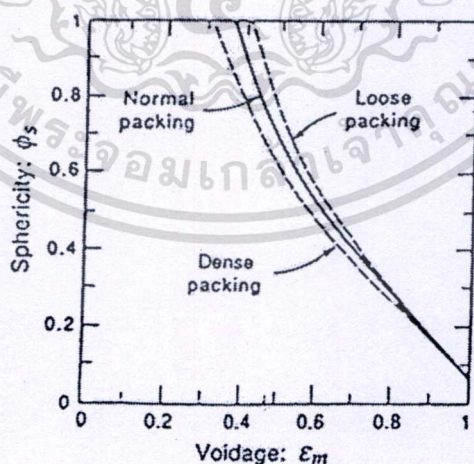
สำหรับอนุภาคของแข็งขนาดใหญ่ ต้องใช้ความเร็วของไหลสูงมาก ๆ จึงทำให้อนุภาคของแข็งลอยเป็นอิสระได้ ดังนั้นความเร็วต่ำสุดของของไหลที่จะทำให้เกิดฟลูอิดเซชันเมื่อ  $Re_p > 1000$  สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$U_{mf} = \sqrt{\frac{\phi_s d_p (\rho_s - \rho_g) g \varepsilon_{mf}^3}{1.75 \rho_g}} \quad (3.21)$$

ค่าความกลมของอนุภาค ( $\phi_s$ ) ใช้บ่งบอกถึงรูปร่าง ว่าอนุภาคเบี่ยงเบนจากทรงกลมมากน้อยเพียงใด นิยามว่า

$$\phi_s = \frac{\text{พื้นที่ผิวของทรงกลม}}{\text{พื้นที่ผิวของอนุภาค}} \quad \text{เมื่อปริมาตรเท่ากัน} \quad (3.22)$$

จากรูปที่ 3.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความกลมและความพรุนของเบค จะเห็นว่าเมื่อความกลมของอนุภาคลดลง ค่าความพรุนจะเพิ่มขึ้น



รูปที่ 3.12 ความสัมพันธ์ระหว่างความกลมและความพรุนของเบค

ถ้ายังไม่ทราบค่าของ  $\varepsilon_{mf}$  และ  $\phi_s$  Wen และ Yu แนะนำให้ใช้สมการดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{1}{\phi_s \varepsilon_{mf}^3} = 14 \quad (3.23)$$

$$\frac{(1 - \varepsilon_{mf})}{\phi_s^2 \varepsilon_{mf}^3} = 11 \quad (3.24)$$

แทนค่าสมการที่ 3.24 ลงในสมการที่ 3.19 แล้วค่า  $U_{mf}$  จะได้

$$U_{mf} = \frac{\mu}{d_p \rho_g} \sqrt{\left\{ (33.7)^2 + \frac{0.0408 d_p^3 \rho_g (\rho_s - \rho_g) g}{\mu^2} \right\}} - 33.7 \quad (3.25)$$

สมการที่ 3.25 นี้ มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน 34 % ในช่วง  $0.001 < Re_p < 4000$

ความเร็วเริ่มหลุดลอยหรือความเร็วตกอิสระของอนุภาคของแข็ง เป็นความเร็วของของไหลที่ไหลผ่านฟลูอิดไอซ์เบดถูกจำกัดด้วยความเร็วต่ำสุด ความเร็วเริ่มหลุดลอยแสดงได้ดังสมการ

$$U_T = \left[ \frac{4 d_p (\rho_s - \rho_g)}{3 \rho_g C_d} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3.26)$$

โดยที่  $C_d$  เป็นค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานซึ่งหาได้จากกรทลดอง และจากการทดลองพบว่าค่า  $C_d$  ขึ้นอยู่กับค่า  $Re_p$  ดังสมการ

$$C_d = \frac{24}{Re_p} \quad \text{เมื่อ} \quad Re_p < 0.4 \quad (3.27)$$

$$C_d = \frac{10}{\sqrt{Re_p}} \quad \text{เมื่อ} \quad 0.4 < Re_p < 500 \quad (3.28)$$

$$C_d = 0.43 \quad \text{เมื่อ} \quad 500 < Re_p < 200000 \quad \text{หรือ} \quad 1000 < Re_p \quad (3.29)$$

แทนค่าจากสมการ 3.27, 3.28 และ 3.29 ลงในสมการที่ 3.26 แล้วหาค่า  $U$  จะได้

$$U_t = \frac{g(\rho_s - \rho_g) d_p^2}{18\mu} \quad \text{เมื่อ} \quad Re_p < 0.4 \quad (3.30)$$

$$U_t = d_p \left[ \frac{4(\rho_s - \rho_g)^2 g^2}{225 \rho_g \mu} \right]^{\frac{1}{3}} \quad \text{เมื่อ} \quad 0.4 < Re_p < 500 \quad (3.31)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สวทช. ผลิตขึ้นเพื่อใช้ในการเรียนการสอนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$U_t = \left[ \frac{3.1g(\rho_s - \rho_g)d_p}{\rho_g} \right]^{1/2} \quad \text{เมื่อ } 500 < Re_p < 200000 \text{ หรือ } 1000 < Re_p \quad (3.32)$$

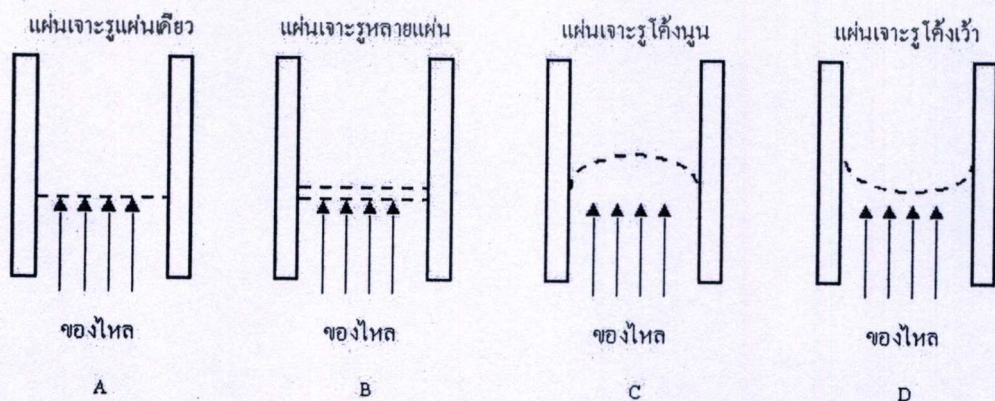
เพื่อหลีกเลี่ยงมิให้อนุภาคของแข็งหลุดลอยออกจากเบด ความเร็วของของไหลที่ใช้ในระบบฟลูอิดไคซ์เบดจะต้องมีค่าอยู่ระหว่างความเร็ว  $U_{mf}$  และความเร็ว  $U_t$  ในการคำนวณหาความเร็ว  $U_{mf}$  เนื่องจากอนุภาคของแข็งมีการกระจายขนาด ดังนั้นขนาดของอนุภาคของแข็งที่ใช้จะเป็นขนาดโดยเฉลี่ย ส่วนการคำนวณความเร็ว  $U_t$  จะใช้ขนาดของอนุภาคของแข็งที่เล็กที่สุดปะปนอยู่ในเบด

### 3.7.5 แผ่นกระจายของไหล

หน้าที่ของแผ่นกระจายของไหลคือ เป็นอุปกรณ์ป้องกันเพื่อมิให้อนุภาคหลุดลงมาด้านล่างและสามารถให้ของไหลไหลผ่านได้ โดยสามารถกระจายของไหลออกได้เต็มพื้นที่ผิวหน้าตัดของตัวเครื่อง โดยที่ความเร็วของของไหลที่เหนือแผ่นกระจายของไหลควรมีค่าเท่ากันทุกจุด และองค์ประกอบที่สำคัญอีกส่วนหนึ่งที่ทำให้ลักษณะของกลุ่มอนุภาคอยู่ในสภาวะเสมือนของไหลได้ดีหรือไม่ก็คือ ความดันตกคร่อม โดยของไหลที่ไหลผ่านแผ่นกระจายของไหล ถ้าหากความดันตกคร่อมน้อยเกินไปจะไม่ดี ความดันตกคร่อมโดยทั่วไปจะต้องไม่ต่ำกว่า 10% ของความดันตกคร่อมที่เกิดจากการไหลของของไหลผ่านกลุ่มอนุภาคขณะลอยตัว

ลักษณะของแผ่นกระจายของไหลแบบต่าง ๆ มีดังต่อไปนี้

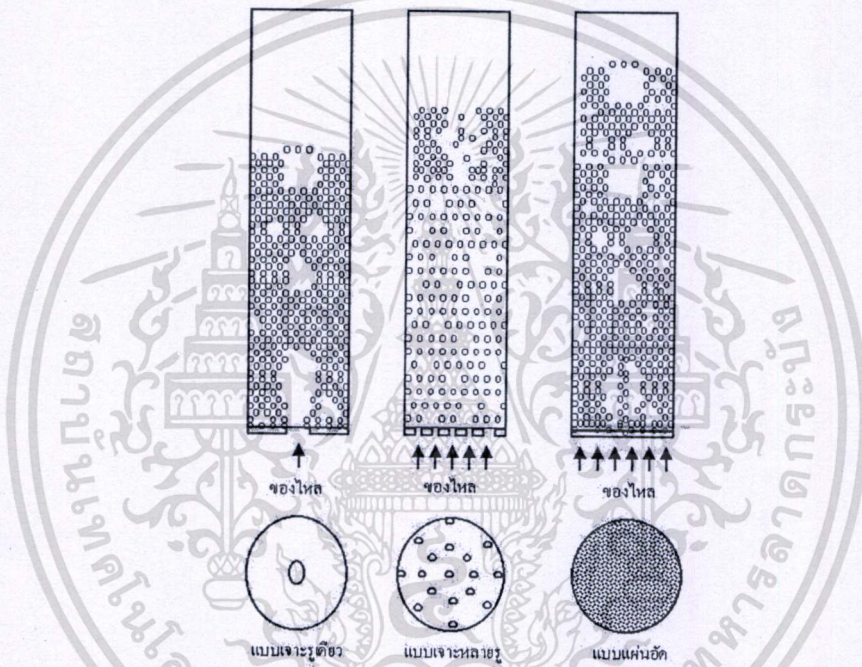
แบบแผ่นเจาะรู (perforate plate) แผ่นกระจายของไหลแบบแผ่นเจาะรูนั้น ทำได้โดยการนำแผ่นวัสดุมาเจาะรูให้มีรูปร่างและขนาดตามที่ต้องการ โดยทั่วไปถ้าเจาะรูน้อยลักษณะของอนุภาคเหนือแผ่นกระจายในขณะลอยตัว หรืออยู่ในสภาวะเสมือนของไหลจะมีผลทำให้ความหนาแน่นไม่สม่ำเสมอ จะมีฟองอากาศใหญ่เกิดขึ้น โดยเฉพาะเมื่อความเร็วสูงๆ ดังนั้นจำนวนรูและการเจาะจึงมีส่วนสำคัญ แผ่นกระจายของไหลแบบนี้ใช้กันมากในห้องปฏิบัติการและเครื่องทดลองขนาดกลาง เพราะทำง่าย ราคาถูก และมีคุณสมบัติดีพอสมควร แสดงได้ในรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 ลักษณะของตัวกระจายแบบแผ่นเจาะรู

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ส่วนหนึ่งควรใช้เฉพาะเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในขณะที่เกิดฟลูอิไดซ์เบดด้วยความเร็วของของไหลต่ำสุด ลักษณะของเบดยังเป็นเนื้อเดียวกันอย่างสม่ำเสมอตลอดทั้งเบด จากนั้นถ้าเพิ่มความเร็วของของไหลให้มากขึ้น ความเร็วที่เพิ่มมากขึ้นนี้จะก่อตัวเป็นฟองก๊าซเกิดขึ้น ซึ่งขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของตัวกระจายของไหลที่รองรับเบดว่าเป็นชนิดใด อย่างเช่น ตัวกระจายทำด้วยแผ่นโลหะเจาะรูฟองอากาศที่เกิดขึ้นจะมีขนาดใหญ่กว่าตัวกระจายของไหลที่เป็นรูพรุน ซึ่งเกิดจากใช้เม็ดโลหะขนาดเล็กมาอัดด้วยความดันอัดสูงๆจนติดกับแผ่นกระจายของไหล ตัวกระจายของไหลแบบหลังนี้ของไหลผ่านได้อย่างสม่ำเสมอ ฟองก๊าซจึงเกิดขึ้นได้เป็นจำนวนมาก ตัวกระจายที่เป็นแผ่นเจาะรูของไหลจะผ่านออกไปเหมือนกับเจ็ท (jet) จำนวนการเกิดของฟองก็ขึ้นอยู่กับจำนวนรูเจาะบนตัวกระจายดังแสดงในรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 คุณภาพของฟลูอิไดซ์เบดขึ้นเกิดจากแผ่นกระจายของไหลต่างชนิดกัน

การออกแบบแผ่นกระจายของไหลนั้นมีสิ่งที่สำคัญ คือ ความดันลดของก๊าซที่เกิดจากแผ่นกระจายอากาศ สำหรับกฎของการคำนวณความดันลดบนแผ่นกระจายอากาศนั้น สมการที่สามารถใช้ในการออกแบบได้ดี คือ

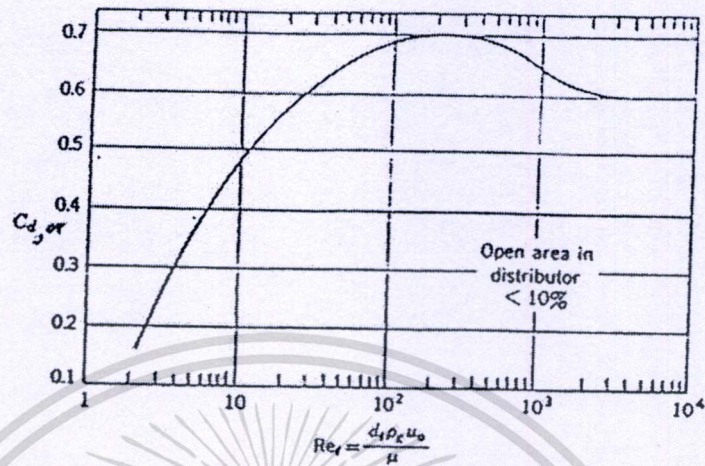
$$\Delta P_d = (0.2 \text{ ถึง } 0.4) \Delta P_b \quad (3.33)$$

โดยที่ค่า Reynolds Number (Re) และเลือกค่าสัมประสิทธิ์ของออริฟิส (Orifice coefficient,  $C_{d,or}$ ) ที่เหมาะสมจากรูปที่ 3.15

คำนวณหาความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านรูออริฟิสจากสมการ 3.34

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$U_{or} = C_{d,or} \left[ 2g_c \frac{\Delta P_d}{\rho_g} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3.34)$$



รูปที่ 3.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $C_{d,or}$  กับเรย์โนลด์นัมเบอร์ ( $Re_1$ )

กำหนดจำนวนรูเจาะของตะแกรงต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ของตะแกรง หรือตัวกระจายได้จากสมการ

$$U_0 = \frac{\pi}{4} d_{or}^2 U_{or} N_{or} \quad (3.35)$$

### 3.8 กระบวนการเผาไหม้อนุภาคในฟลูอิดไชเบด

เมื่ออนุภาคขนาดใหญ่กว่า 0.1 mm ถูกป้อนเข้าสู่เตาเผา จะเกิดปรากฏการณ์เป็นขั้นตอนดังนี้

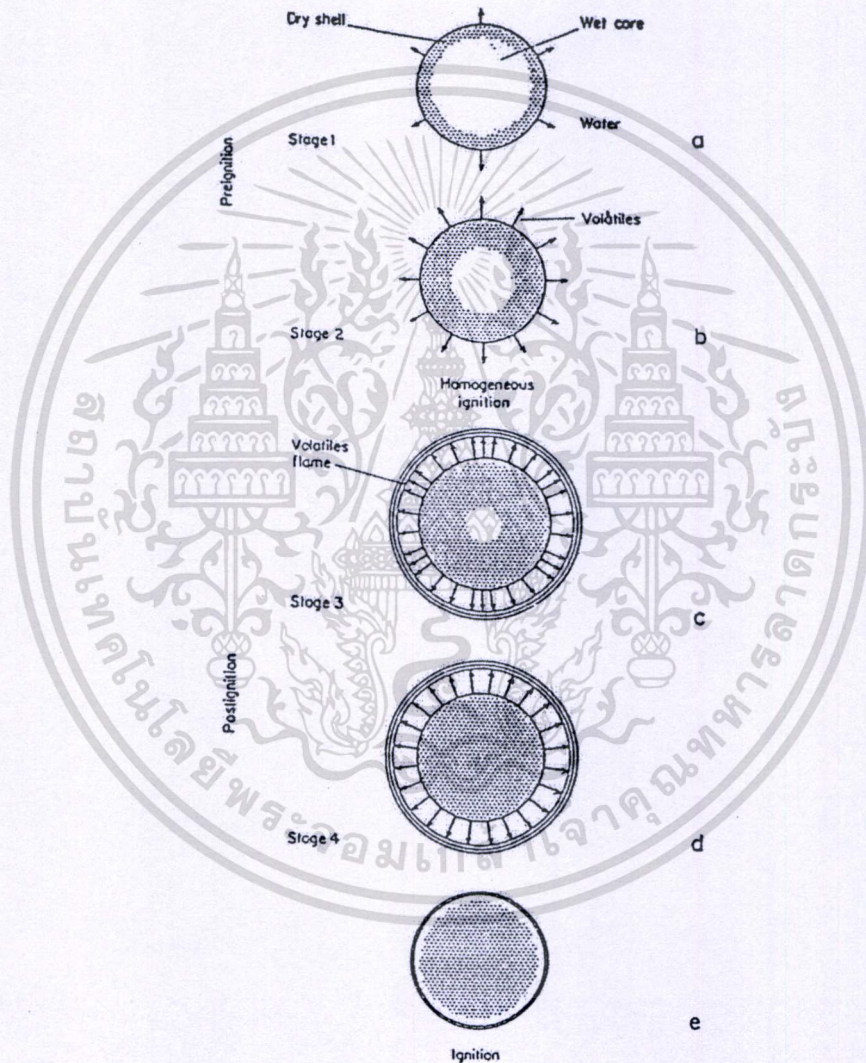
- ก. drying เป็นการกำจัดความชื้นในอนุภาค ขณะเริ่มต้นรับความร้อนในเตาเผา
- ข. devolatilization เป็นขั้นตอนการสลายตัวของอนุภาคเกิดเป็นสารระเหย
- ค. ignition of volatile เป็นกระบวนการที่ทำให้เกิดจากจุดประกายของสารระเหย ที่ถูกปล่อยออกมา และอยู่ล้อมรอบอนุภาค
- ง. combustion of volatile เป็นขบวนการเผาไหม้สารระเหย ทำให้เกิดเปลวไฟขึ้นล้อมรอบอนุภาค
- จ. ignition of char particle เป็นขบวนการจุดประกายบนผิวหน้าของอนุภาคที่เหลือ โดยเริ่มจากเป็นจุดเล็ก ๆ ที่ผิวด้านนอก แล้วค่อย ๆ ขยายออกไปจนเกิดทั่วทั้งอนุภาค
- ฉ. combustion of residual char particle เป็นขบวนการเผาไหม้อนุภาคที่เหลือ หลังจากที่สารระเหย ระเหยออกจากอนุภาคบางส่วนหรือหมดแล้ว เมื่อเผาไหม้หมดจะเหลือขี้เถ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.9 การลุกติดไฟของอนุภาคในฟลูอิดไชเบด

อุณหภูมิเบดเป็นตัวแปรที่สำคัญในการลุกติดไฟของอนุภาค เพื่อทำให้เกิดการเผาไหม้ด้วยตัวเองอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะช่วงอุ่นเตาเผา การศึกษาเกี่ยวกับอุณหภูมิติดไฟจะช่วยให้ประหยัดค่าใช้จ่ายในการอุ่นเบด เพราะไม่จำเป็นต้องอุ่นเบดด้วยเชื้อเพลิงอื่น (ก๊าซ/น้ำมัน) จนอุณหภูมิสูงเกินไป

Wildgger และ Agarwal ได้อธิบายถึงรูปแบบการลุกติดไฟของอนุภาค ว่าสามารถแบ่งเป็น 2 เฟส (ดังรูปที่ 3.16)



รูปที่ 3.16 รูปแบบการลุกติดไฟของอนุภาค : a, b, เป็น preignition และ c, d, e เป็น postignition

- pre-ignition phase เป็นขั้นตอนที่เกี่ยวกับ drying และ devolatilization ภายใต้สภาวะไฟโรไลซิส แบ่งเป็น 2 ขั้นตอน

- ขั้นตอนที่ 1 เมื่อนำอนุภาคใส่ลงในเบดร้อนจะเกิดการระเหยของความชื้นทันทีทำให้เกิดรอยต่อระหว่างส่วนที่แห้งซึ่งอยู่นอก และส่วนที่ชื้นอยู่ภายในอนุภาค เมื่ออนุภาคได้รับความร้อนนานขึ้น ส่วนที่ชื้นจะมีขนาดเล็กลง ทำให้เกิดส่วนที่แห้งเพิ่มขึ้น

- ขั้นตอนที่ 2 อุณหภูมิในส่วนที่แห้งเริ่มเพิ่มสูงขึ้น และเกิดการระเหยออกมาของสารระเหย เนื่องจากการแตกของพันธะภายในโครงสร้างของอนุภาค
  - post-ignition phase เป็นขั้นตอนที่เกี่ยวกับ drying และ devolatilization ภายใต้สภาวะออกซิเดชัน ทำให้เกิดเปลวไฟล้อมรอบอนุภาค ซึ่งแบ่งเป็น 2 ขั้นตอน
  - ขั้นตอนที่ 1 เนื่องจากบริเวณผิวหน้าของอนุภาคมีปริมาณออกซิเจน และอุณหภูมิสูงเพียงพอทำให้เกิดการจุดประกายของสารระเหยออกมา เกิดเป็นเปลวไฟชั้นล้อมรอบอนุภาค ความร้อนจากเปลวไฟทำให้เกิด drying และ devolatilization เพิ่มขึ้นในขั้นตอนนี้ drying จะเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์
  - ขั้นตอนที่ 2 อนุภาคเกิด devolatilization ต่อสารระเหยที่ระเหยออกมาจะถูกเผาไหม้เป็นเปลวไฟล้อมรอบอนุภาคและจะดับเหลือแต่อนุภาค เมื่อสารระเหยหมดหรือระเหยออกมาน้อยจนไม่สามารถติดไฟ

### 3.10 การปรับปรุงการเผาไหม้

จากเนื้อหาที่ได้กล่าวมาตามข้างต้น ถึงแม้ว่าปริมาณของ  $\text{CO}_2$  จะเป็นปริมาณที่บ่งบอกถึงความสมบูรณ์ของการเผาไหม้ก็ตาม แต่เมื่อพิจารณาให้ดีแล้ว ปริมาณ  $\text{CO}_2$  ส่งผลเสียอย่างร้ายแรงต่อสภาวะอากาศของโลก ดังนั้น การลดปริมาณของ  $\text{CO}_2$  จึงเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่ง สามารถทำได้โดยการลดอัตราการใช้เชื้อเพลิงให้น้อยลง (fuel consumption) แต่ให้พลังงานหรือประสิทธิภาพที่ดี ดังนั้นการปรับปรุงการเผาไหม้จึงเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่ง ในหัวข้อนี้จะเป็นการกล่าวถึงวิธีการในการปรับปรุงการเผาไหม้ให้ได้ประสิทธิภาพที่ดีดังกล่าว

ในการออกแบบและปรับปรุงการเผาไหม้ให้มีประสิทธิภาพสูงและเกิดมลพิษต่ำมีวิธีการอยู่หลายวิธีดังนี้ 1) การปรับปรุงการออกแบบห้องเผาไหม้ 2) การเตรียมส่วนผสมของเชื้อเพลิง 3) การสร้างเสถียรภาพของเปลวไฟด้วยวิธีการไหลหมุนเวียนย้อนกลับหรือการหมุนวน 4) การนำไอเสียกลับมาเผาไหม้ใหม่ 5) การเผาไหม้เป็นลำดับขั้นและอื่นๆ

ถ้าความเร็วการไหลของส่วนผสมมากกว่าค่าความเร็วของเปลวไฟ เปลวไฟจะถูกเป่าดับไป ความเร็วสูงสุดของส่วนผสมที่เกิดการเป่าดับของเปลวไฟ เรียกว่า ความเร็วเป่าดับ (blow-off velocity) ความเร็วเป่าดับขึ้นอยู่กับตัวแปรต่างๆ เช่น ชนิดของเชื้อเพลิงและออกซิโดซ์เซอร์ที่ใช้ อัตราส่วนผสม อุณหภูมิส่วนผสม ความดันห้องเผาไหม้ ความปั่นป่วนของกระแสการไหลเข้าสู่ห้องเผาไหม้ รูปร่างห้องเผาไหม้ เป็นต้น

#### 3.10.1 การปรับปรุงการออกแบบห้องเผาไหม้

ออกแบบห้องเผาไหม้ให้สามารถหน่วงเวลา ให้เชื้อเพลิงอยู่ในห้องเผาไหม้ให้นานที่สุด ก่อนที่จะออกไปภายนอก ทำให้การเผาไหม้มีความสมบูรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.10.2 เทคนิคการเผาไหม้แบบเป็นขั้นตอน

เทคนิคการเผาไหม้แบบแบ่งเป็นขั้นตอน เป็นเทคนิคการเผาไหม้ที่ควบคุมการเกิดมลพิษ โดยการควบคุมการผสมกันระหว่าง เชื้อเพลิงและออกซิเจนในลักษณะที่ป้องกันไม่ให้เกิดการเผาไหม้ในสภาวะอากาศส่วนเกินเป็นศูนย์ การผสมอาจเป็นไปในลักษณะที่ทำให้เกิดการเผาไหม้ในห้องเผาไหม้ภายใต้ค่าอัตราส่วนสมมูลที่แตกต่างกันหลายค่า จากไอดิบบางไปหาไอดีหนาหรือกลับกันก็ได้ต้องไม่ให้เกิดการเผาไหม้สภาวะอากาศส่วนเกินเป็นศูนย์อย่างเด็ดขาด เพื่อให้เป็นไปตามวัตถุประสงค์ดังกล่าว จึงต้องแบ่งอากาศออกเป็นหลายๆส่วน(หรือต้องการทำให้เชื้อเพลิงขาดอากาศ) แล้วป้อนเข้าสู่เตาเผาไหม้เพื่อเผาไหม้กับเชื้อเพลิงที่ตำแหน่งต่างๆกัน จึงเกิดการเผาไหม้แบบแบ่งเป็นหลายขั้นตอนขึ้นในห้องเผาไหม้และเพื่อควบคุมการเกิด thermal  $\text{NO}_x$  เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพสูงยิ่งขึ้น อาจมีการดึงความร้อนออกจากก๊าซร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้ในขั้นตอนปฐมภูมิ (primary combustion) เพื่อลดอุณหภูมิลงก่อนที่จะเผาไหม้ในขั้นตอนทุติยภูมิ (secondary combustion) การเผาไหม้แบบสองขั้นนี้จะช่วยให้พื้นที่เผาของเปลวไฟ(flame zone) ถูกขยายออกไป และลดอุณหภูมิสูงสุด (peak temperature) ของการเผาไหม้ ทำให้ลดปริมาณ  $\text{NO}_x$  ได้ นอกจากนี้การเผาไหม้เป็นขั้นตอนหรือการเผาไหม้ในห้องเผาไหม้ทุติยภูมิยังทำให้การเผาไหม้มีความสมบูรณ์มากขึ้นเนื่องจากในห้องเผาไหม้ทุติยภูมียังคงเหลือก๊าซหรืออนุภาคที่ยังเผาไหม้ไม่หมดในห้องเผาไหม้ปฐมภูมิ

### 3.10.3 การเตรียมส่วนผสมของเชื้อเพลิง

การทำให้เกิดการไหลแบบหมุนวนทำให้เกิดการผสมกันที่ดีของเชื้อเพลิง นำไปสู่การปล่อยมลพิษที่ต่ำและได้ประสิทธิภาพที่มากกว่า และยังทำให้มีการเผาไหม้ที่เสถียรมากกว่า การผสมกันมาก่อนของเชื้อเพลิงทำให้มีอัตราการเผาไหม้ที่สูงกว่า อัตราส่วนผสมของเชื้อเพลิง(A/F) หรือเปอร์เซ็นต์เชื้อเพลิงมีส่วนต่อความเสถียรของเชื้อเพลิง โดยที่ ส่วนผสมเชื้อเพลิงบาง (fuel lean mixture) มีเปอร์เซ็นต์เชื้อเพลิงต่ำความเร็วในการไหลเปลี่ยนแปลงได้ไม่มาก เมื่อเพิ่มความเร็วเพียงเล็กน้อยอาจทำให้เปลวไฟถูกเป่าดับ (blow out) ได้ ที่ส่วนผสมเชื้อเพลิงหนา (fuel rich mixture) มีเปอร์เซ็นต์เชื้อเพลิงสูงขึ้นทำให้มีช่วงของการติดไฟอยู่ได้ค่อนข้างกว้าง

การรวมตัวที่ติระหว่างเชื้อเพลิงกับออกซิเจน ก็คือ การที่อนุภาคของเชื้อเพลิงสัมผัสกับโมเลกุลของออกซิเจนได้อย่างทั่วถึง ในกรณีที่เชื้อเพลิงเป็นก๊าซ การผสมกันนั้นจะเป็นไปได้ง่าย แต่ถ้าเชื้อเพลิงเป็นของแข็งหรือของเหลว การผสมกันนั้นก็จะยุ่งยากมากขึ้น

ในกรณีที่เชื้อเพลิงเป็นของเหลว ส่วนใหญ่ก็จะมีการทำให้เป็นอนุภาคเล็ก ๆ ก่อนหรือเป็นฝอย แล้วจึงจะทำการเผาไหม้ซึ่งจะทำให้รวมตัวได้ง่ายกับอากาศและเกิดการลุกไหม้ได้ดีเหมือนเชื้อเพลิงที่เป็นก๊าซ

ส่วนเชื้อเพลิงที่เป็นของแข็งนั้น แต่ละโมเลกุลของออกซิเจนจะสัมผัสกับพื้นผิวของเชื้อเพลิงเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ให้ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ซึ่งเป็นก๊าซที่ติดไฟได้พร้อมกับได้

ความร้อนออกมาส่วนหนึ่ง จากนั้นออกซิเจนจะเข้าไปผสมกับคาร์บอนมอนอกไซด์ทำให้เกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ คือ เกิดคาร์บอนไดออกไซด์ในที่สุดซึ่งเป็นก๊าซที่ไม่ติดไฟได้เองแล้วพร้อมกับได้รับความร้อนออกมาด้วย

ฉะนั้นกระบวนการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงที่เป็นของแข็งนั้นจะประกอบด้วยพฤติกรรม 4 ขั้นตอน คือ

1. เริ่มต้นด้วยออกซิเจนสัมผัสกับพื้นผิวของเชื้อเพลิงที่เป็นคาร์บอน
2. เกิดการรวมตัวของคาร์บอนกับออกซิเจนกลายเป็นก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ออกมาพร้อมกับความร้อน
3. มีการปล่อยก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ได้จากการเผาไหม้ออกจากผิวของเชื้อเพลิง
4. มีการรวมตัวกันของคาร์บอนมอนอกไซด์กับออกซิเจนอีกครั้งจนกระทั่งกลายเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

ดังนั้นจะกล่าวได้ว่า อัตราการเผาไหม้นั้นขึ้นอยู่กับสาเหตุที่กล่าวมาแล้ว และสามารถเร่งปฏิกิริยาการเกิดได้โดยการบดเชื้อเพลิงที่เป็นของแข็งให้เป็นผงซึ่งเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวในการสัมผัสให้มากขึ้น

### 3.10.4 การสร้างเสถียรภาพของเปลวไฟ

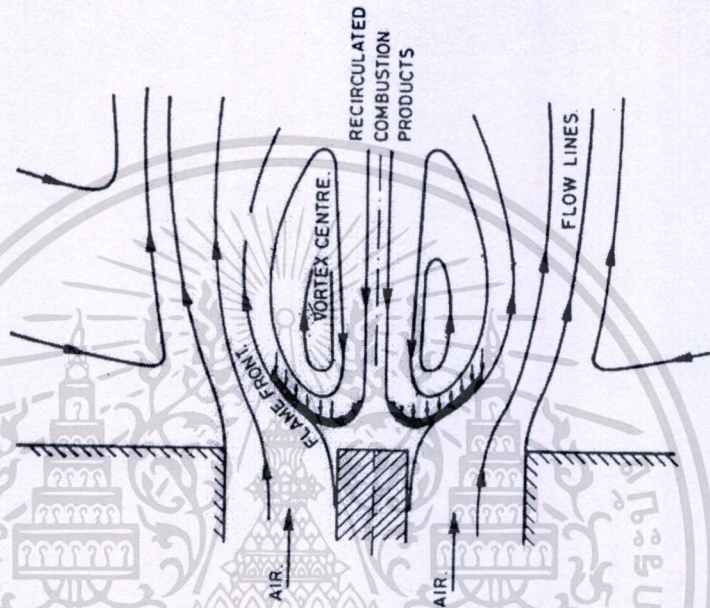
ถ้าความเร็วของการไหลของส่วนผสม สูงกว่าความเร็วเป่าดับแล้วจะเกิดการเป่าดับของเปลวไฟเพราะว่าเวลาที่จะทำให้เกิดการติดไฟเพื่อนำไปสู่การเผาไหม้นั้นสั้นเกินไป ดังนั้นจึงต้องทำให้เปลวไฟเกิดความเสถียร ซึ่งมีวิธีคือการใช้เปลวไฟลอย การใช้วัตถุขวางกั้น วิธีการไหลหมุนเวียนย้อนกลับ

### 3.10.5 วิธีการไหลหมุนเวียนย้อนกลับ

วิธีการไหลหมุนเวียนย้อนกลับนี้ ทำได้โดยการกีดขวางอนุภาคหรือการเพิ่มขึ้นอย่างทันทีทันใดของพื้นที่หน้าตัดของการไหล (rapid increase in flow area) หรือการนำอากาศหมุนวนเข้ามายังห้องเผาไหม้โดยตรง หรือจะเป็นการฉีดอากาศทุติยภูมิเข้ามาเพื่อเป็นการสร้างการหมุนวน

การใช้เทคนิควิธีการไหลหมุนเวียนย้อนกลับ หรือการหมุนวนของของไหลนี้เป็นการลดและเปลี่ยนทิศทางความเร็วการไหลของส่วนผสมให้ต่ำลงและไหลหมุนเวียนย้อนกลับจนส่วนผสมมีเวลามากพอที่จะทำให้เกิดการติดไฟด้วยตัวเองและเกิดการเผาไหม้อย่างต่อเนื่อง ทำให้โดยการสร้างวัตถุรูปทรงต่างๆเพื่อวางขวางทิศทางการไหลของส่วนผสม เพื่อให้เกิดบริเวณที่มีความเร็วต่ำและหมุนเวียนย้อนกลับในกระแสหลักของการไหลของส่วนผสม ซึ่งจะช่วยให้เกิดการเสถียรของเปลวไฟได้ดีโดยไม่ถูกเป่าให้ดับไปได้

อากาศปฐมภูมิจะทำหน้าที่เป็นตัวพาอนุภาคของเชื้อเพลิง เข้ายังห้องเผาไหม้ในแนวตั้งฉาก แล้วจะพองอนุภาคของเชื้อเพลิงขึ้นสู่ด้านบนห้องเผาไหม้ ขณะที่เชื้อเพลิงและอากาศผสมกันและส่งตัวขึ้นสู่ด้านบนนั้น จะมีอากาศทุติยภูมิเข้ามาในแนวสัมผัสกับผนังของเตา ทำให้เกิดการหมุนวนของอากาศและทำให้อนุภาคของเชื้อเพลิงหมุนตามไปด้วย ช่วยเพิ่มเวลาในการเผาไหม้ให้นานขึ้นทำให้การเผาไหม้สมบูรณ์ เนื่องจากการไหลวนของอากาศและการไหลแบบปั่นป่วนของอากาศ ซึ่งเอื้ออำนวยต่อการคลุกเคล้าของอากาศกับเชื้อเพลิง



รูปที่ 3.17 ปรากฏการณ์ Recirculation

การเคลื่อนที่ของอากาศในลักษณะวอร์เทก เป็นไปตามกฎอนุรักษ์โมเมนตัมเชิงมุม (conservation of angular momentum) ทำให้เกิดความเร็วและการหมุนในแนวรัศมีของอนุภาคต่างๆ (สามารถพิจารณาโมเลกุลของอากาศ และปริมาตรของอากาศ) จะมีค่าคงที่เป็นที่น่าสังเกตว่า gradient ความเร็วยังคงอยู่ในของไหลกับความเร็วในแนวเส้นสัมผัสต่ำที่ชั้นนอก (ใกล้บริเวณผนังท่อ) ซึ่งเรียกว่าระบบการไหลแบบ irrotational เมื่อมีผลการไหลที่มีความหนืดเข้ามาเกี่ยวข้องจะเทียบเท่ากับการกระจายความเร็วของอนุภาคผ่านเข้าไปในแนวรัศมีของท่อ ตามการขยายของท่อดีในท่อ ทำให้ชั้นความเร็วสูงไปเร่งชั้นความเร็วต่ำที่ทำให้ความเร็วเพิ่มขึ้น เรียกการไหลแบบ rotation และจะเกิดการถ่ายเทพลังงานจลน์ออกจากแนวแกนของท่อ สาเหตุที่มีการถ่ายเทพลังงาน (energy transfer) เพราะมีการทำความร้อนของเลเยอร์ชั้นนอก และการทำความเย็นของเลเยอร์ชั้นใน เมื่ออากาศไหลวนภายในท่อ อากาศที่ค้างอยู่จะไหลย้อนกลับไปยังศูนย์กลางของท่อตามแนวแกนแบบสวนทางกัน (counter flow) ที่เป็นเช่นนี้เพราะบังคับให้มีการหมุนวนในตอนแรกไปยังเส้นรอบวงของท่อ โดยแรงหนีศูนย์กลางที่มาจากการหมุนวนครั้งที่สอง มีการหมุนวนในทิศทางเชิงมุม (angular direction) อย่างเดียวกับตอนแรกโดยที่ viscous drag และความ

หนาแน่นแบบปั่นป่วนที่ชั้นขอบเขตระหว่างการหมุนทั้งสอง จะอยู่ระหว่างช่วงการหมุนชั้นนอก และการหมุนชั้นใน ในการเคลื่อนที่แบบ synchronous และมีผลต่างทางกายภาพอย่างเดี่ยว คือ กระแสทั้งสองเคลื่อนที่ในทิศทางเชิงเส้นตรงข้ามกัน และการหมุนชั้นในจะมีรัศมีน้อยกว่ารัศมีชั้นนอก (แตกต่างกับ ห้องเผาไหม้แบบไซโคลน คือ เป็นอุปกรณ์การเผาไหม้ที่ประยุกต์มาจาก ไซโคลนดักฝุ่น กล่าวคือ ของไหลซึ่งอาจปนกับอนุภาคของแข็งจะไหลแบบบังคับเข้าสู่ไซโคลน ในแนวสัมผัสกับผิวด้านในแล้วจะไหลลักษณะวนเป็นเกลียวหรือขดสปริง (helix Motion) 2 วง คือ วงแรกเรียกว่า การไหลวนรอบนอก (outer vortex) มีทิศทางไหลลงสู่ก้นไซโคลน วงที่สอง เรียกว่า การไหลวนภายใน (inner vortex) ภายใต้อิทธิพลของแรงหนีศูนย์กลาง (centrifugal force) มีทิศทางไหลวนกลับมาในแนวแกนออกสู่ปากไซโคลน ซึ่งการไหลวนของอากาศภายในเตาเผา ไซโคลนนี้นั้นจะใช้ปริมาณและความเร็วของอากาศมากกว่าการเกิดการหมุนวนใน เตาออร์ทเทค)

### 3.10.6 การหมุนทวนของอากาศทุติยภูมิ

เทคนิคในการสร้างการหมุนวนของของไหลอีกเทคนิคหนึ่ง คือ การใช้อากาศไหลเข้ามาตามท่อที่วางตัวในแนวสัมผัสกับห้องเผาไหม้ การใช้อากาศทุติยภูมิในการเผาไหม้เป็นการสร้างให้เกิด Suspension layer ซึ่ง suspension layer คือชั้นของอนุภาคที่กำลังถูกเผาไหม้ ซึ่ง suspension layer จะถูกสร้างขึ้นทันทีเมื่อระนาบของตำแหน่งที่ฉีดอากาศทุติยภูมิ เพื่อให้อนุภาคมีการผสมกันที่ดีและเพื่อลดการหลุดลอยของอนุภาค ทำให้การเผาไหม้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

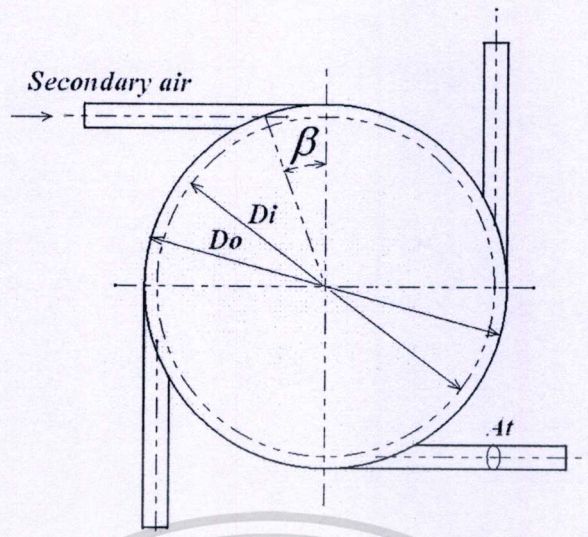
อากาศที่ใช้ในการเผาไหม้แบ่งเป็นสองส่วน คือ อากาศปฐมภูมิ และอากาศทุติยภูมิ อากาศทุติยภูมิที่ฉีดเข้ามาตามแนวสัมผัสของเตาจะเพิ่มความปั่นป่วนและการหมุนวน สัดส่วนอากาศเชิงปริมาตรของอากาศทุติยภูมิต่ออากาศทั้งหมด ( $\lambda$ ) สามารถหาได้ดังต่อไปนี้

$$\lambda = \frac{Q_p}{Q_s} \quad (3.36)$$

เมื่อ

$Q_p$  คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศปฐมภูมิ (l/min)

$Q_s$  คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศทุติยภูมิ (l/min)



รูปที่ 3.18 การฉีดอากาศทุติยภูมิเข้าสู่ห้องเผาไหม้

เมื่อ

- $\beta^\circ$  = มุมของการฉีดอากาศทุติยภูมิ  
 $D_i$  = เส้นผ่าศูนย์กลางจินตภาพ (Imaginary circle)  
 $D_o$  = เส้นผ่าศูนย์กลางห้องเผาไหม้

### 3.10.7 การอุ่นอากาศ

การอุ่นอากาศเผาไหม้ให้มีอุณหภูมิสูงมาก ประมาณ  $1000^\circ\text{C}$  (highly preheated air) ทำให้ปฏิกิริยาการเผาไหม้สูง อุณหภูมิการเผาไหม้สูง แต่กระจายอย่างสม่ำเสมอ ไม่กระจุกตัวอยู่บริเวณใดบริเวณหนึ่ง แต่จะถูกยึด จนกระจายออกไปในบริเวณกว้างในห้องเผาไหม้จนไม่เกิดบริเวณที่อุณหภูมิพุ่งสูงขึ้น มีการกระจายของอุณหภูมิสม่ำเสมอทั่วห้องเผาไหม้ ทำให้มีการถ่ายเทความร้อน (heat flux) มากขึ้นทำให้ประสิทธิภาพทางความร้อนสูงขึ้น ทำให้มีการปล่อยออกไซด์ของไนโตรเจนต่ำ

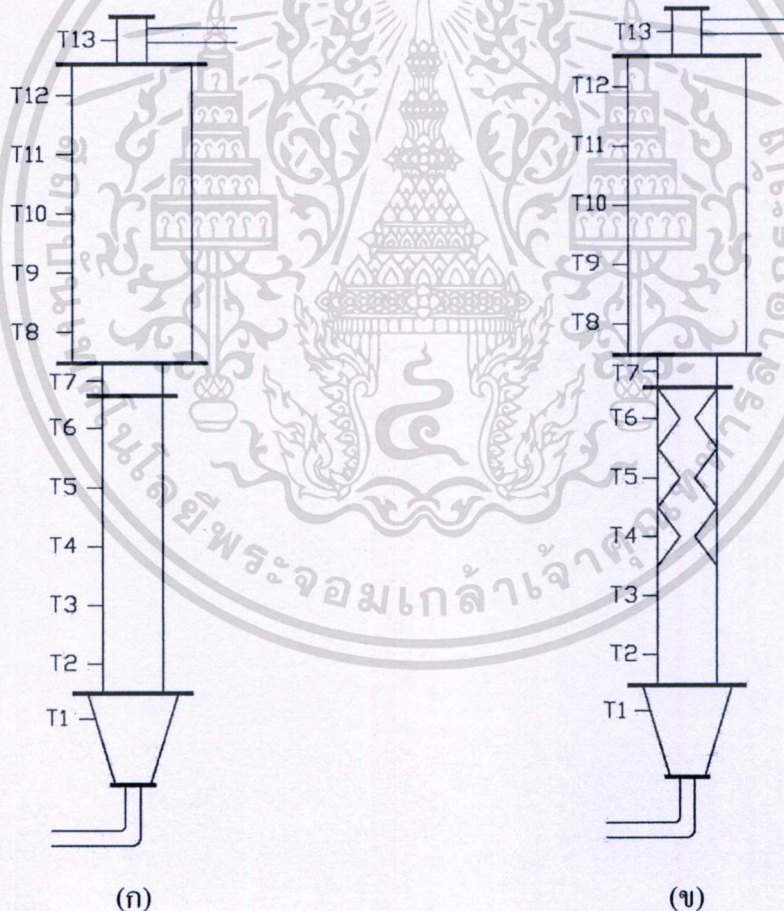
## บทที่ 4

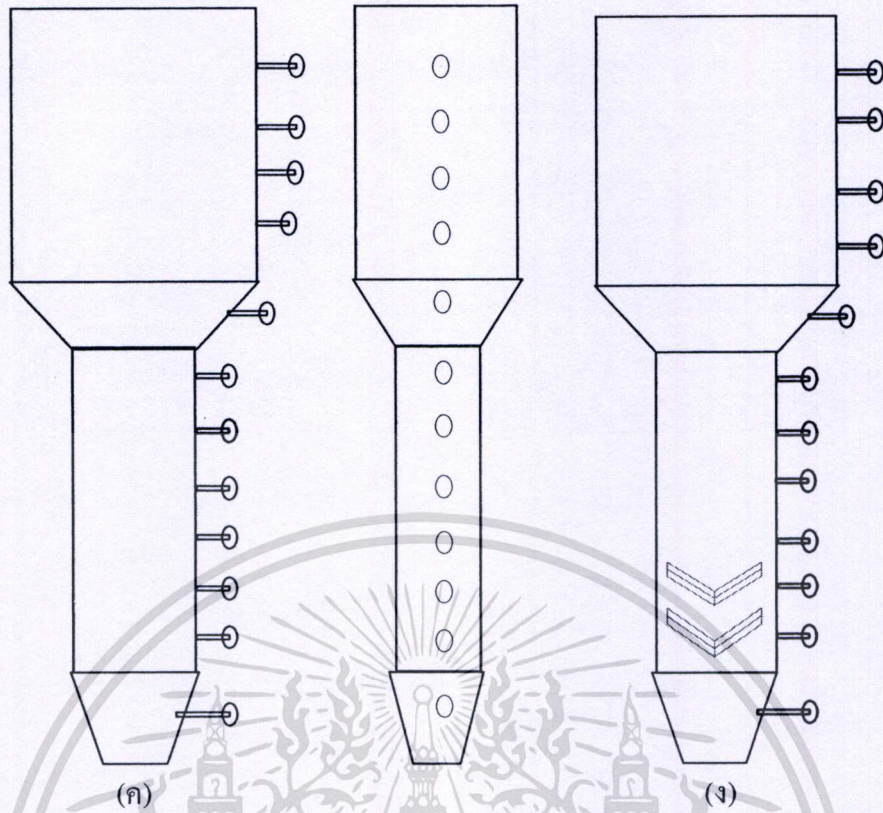
### การออกแบบและการคำนวณ

#### 4.1 บทนำ

หัวข้อที่สำคัญในบทนี้จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนใหญ่ ๆ ได้แก่ การออกแบบและการคำนวณ ซึ่งการออกแบบเตาเผาฟลูอิดซ์เบดแบบมีกริบขวางนี้ ได้นำหลักการของการของการทำให้เกิดการไหลหมุนเวียนย้อนกลับ มาประยุกต์ร่วมกับหลักการของฟลูอิดซ์เบดเพื่อที่จะให้ประสิทธิผลของเตาเผายังคงเดิมเมื่อมีการทำการลดขนาดลงมา

#### 4.2 การออกแบบเตาเผา

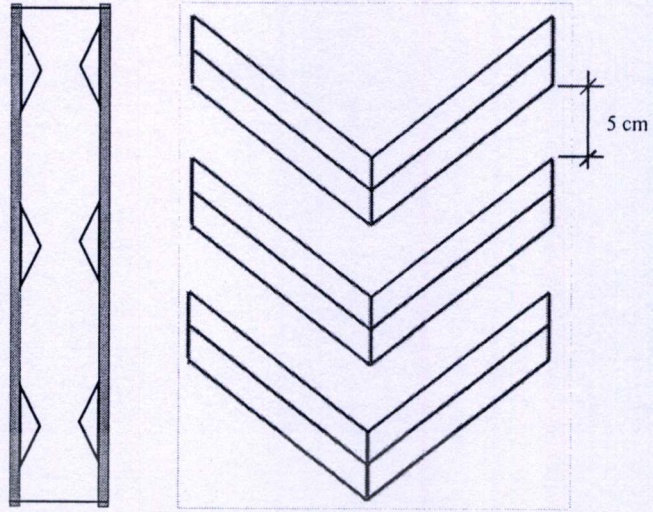




รูปที่ 4.1 แสดงลักษณะของเตาเผาแบบต่างๆที่ได้ทำการออกแบบ (ก) เตาเผาฟลูอิดไคซ์เบดแบบทรงกระบอกผิวเรียบฟริบอร์คใหญ่[3] (ข) เตาเผาฟลูอิดไคซ์เบดแบบทรงกระบอกมีครีบบางฟริบอร์คใหญ่[3] (ค) เตาเผาฟลูอิดไคซ์เบดแบบทรงสี่เหลี่ยมผิวเรียบฟริบอร์คใหญ่ (ง) เตาเผาฟลูอิดไคซ์เบดแบบทรงสี่เหลี่ยมมีครีบบางฟริบอร์คใหญ่

#### 4.2.1 ลักษณะของเตาเผา

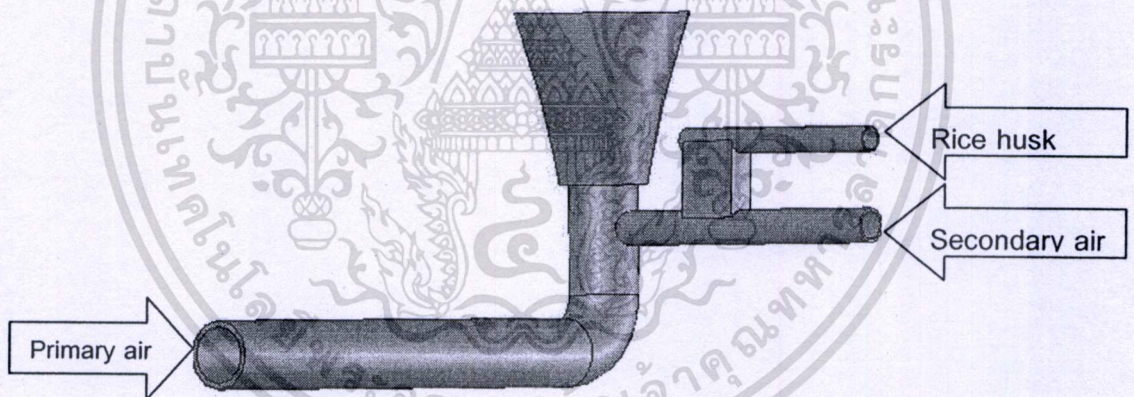
เตาฟลูอิดไคซ์เบดที่ได้ทำการออกแบบนี้มีทั้งสิ้น 2 ลักษณะ เพื่อที่จะได้ทำการเปรียบเทียบถึงผลที่เกิดขึ้น โดยที่เตาเผาทั้ง 2 แบบนี้จะพิจารณาที่ความสูงเดียวกันทั้งหมด คือ 2400 mm โดยรูปทรงของเตาเผาเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยม ในส่วนของห้องเผาใหม่จะมีขนาด กว้าง 300 mm สูง 1100 mm หน้า 100 mm สำหรับส่วนของฟริบอร์คใหญ่มีขนาด คือ กว้าง 600 mm สูง 850 mm หน้า 200 mm สำหรับครีบบ่ที่ติดตั้งนั้นทำจากเหล็กฉากขนาด 40x40x4 mm ออกแบบให้ทำมุม 60 องศา กับแนวการไหล[8] จำนวน 4 ชุด ติดตั้งที่ความสูงจากขอบล่างของห้องเผาใหม่ขึ้นมา 50 mm และระยะห่างของครีบบ่ 50 mm



รูปที่ 4.2 แสดงรายละเอียดของเตาที่ติดครีบ

#### 4.2.2 ระบบการป้อนเชื้อเพลิงและอากาศ

การใช้ระบบการป้อนเชื้อเพลิงเป็นแบบเกลียว (screw feeder) โดยป้อนผสมกับอากาศในท่อลม primary air jet ขนาด 60 mm เป็นลมที่ช่วยพาอากาศเข้ามาผสมกับเชื้อเพลิงโดยใช้อากาศพาเชื้อเพลิงกลับเข้าสู่ห้องผสมทางด้านข้าง ดังแสดงในรูป



รูปที่ 4.3 ลักษณะการป้อนของเชื้อเพลิงแกลบ

ในการออกแบบดังกล่าวนี้ เพื่อป้องกันเปลวไฟย้อนกลับไปยังชุดป้อนเชื้อเพลิงซึ่งจะทำให้ใบเกลียวเสียหาย และยังช่วยลดการติดขัดของเชื้อเพลิงแกลบในท่อก่อนเข้าเตาเผา

อากาศที่ใช้ในการทดลองจะใช้อากาศด้วยกัน 2 ส่วน คือ อากาศปฐมภูมิ (primary air) อากาศทุติยภูมิ (secondary air) โดยอากาศปฐมภูมิเป็นอากาศที่ช่วยทำให้เกิดปรากฏการณ์ฟลูอิดไลซ์เซชันได้จาก blower ที่มีขนาด 10 hp เป็นแหล่งจ่ายอากาศเข้าหอทดลองในการทดลอง กำหนดให้ใช้อากาศปฐมภูมิเข้าทางด้านล่างของเตาเผา โดยที่อากาศทุติยภูมิส่วนที่ 2 (secondary air jet) มีหน้าที่ช่วยลำเลียงเชื้อเพลิงแกลบเข้าสู่ห้องเผาไหม้ทางด้านข้าง

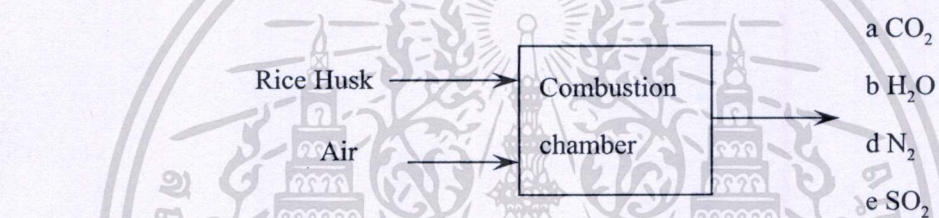
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3 การคำนวณปริมาณอากาศที่ต้องการในการเผาไหม้ทางทฤษฎี

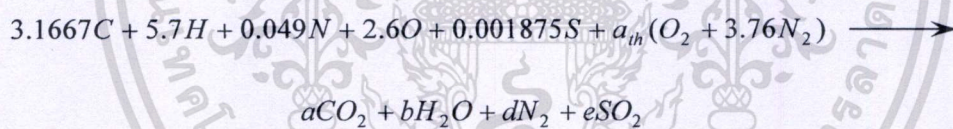
ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบของเชื้อเพลิงแกลบ

องค์ประกอบ	เปอร์เซ็นต์	น้ำหนักโมเลกุล	จำนวนโมล
คาร์บอน	38.0	12	3.1667
ไฮโดรเจน	5.7	1	5.7
ไนโตรเจน	0.69	14	0.049
ออกซิเจน	41.6	16	2.6
ซัลเฟอร์	0.06	32	0.001875
ชี้เถ้า	19.8	-	-

การสมดุลปฏิกิริยาเคมี



สามารถเขียนเป็นปฏิกิริยาเคมีได้ดังนี้



ทำการสมดุลสมการจะได้

$$C : \quad 3.1667 \quad \longrightarrow \quad = a$$

$$a = 3.1667$$

$$H : \quad 5.7 \quad \longrightarrow \quad = 2b$$

$$b = 2.85$$

$$S : \quad 0.001875 \quad \longrightarrow \quad = e$$

$$e = 0.001875$$

$$O : \quad 2.6 + 2a_{th} \quad \longrightarrow \quad = 2a + b + 2e$$

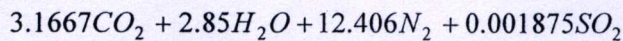
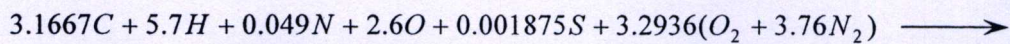
$$a_{th} = 3.2936$$

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

$$d = 12.406$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำการแทนค่าลงในสมการจะได้



จำนวนโมลของอากาศแห้งจะปฏิกิริยาเคมีนี้มีค่าเท่ากับ

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

เนื่องจากการสมดุลสมการของเราใช้กับอากาศแห้ง แต่ในการทดลองไม่สามารถทำให้เป็นอากาศแห้งได้ เพราะฉะนั้นเราจะต้องทำการคิดปริมาณความชื้นในอากาศเข้าไปในสมการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงด้วย โดยที่เราจะทำการกำหนดสถานะของอากาศดังนี้

อากาศมีอุณหภูมิกระเปาะแห้ง (dry-bulb temperature) เท่ากับ  $33^\circ\text{C}$

ความชื้นสัมพัทธ์ (relative humidity, RH) เท่ากับ 53%

เพราะฉะนั้นทำการหาค่าความดันย่อยในอากาศที่สถานะนี้ได้เท่ากับ

เปิดค่าจากตาราง จะได้

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

$$\therefore P_{v,air} = \Phi_{air} P_{sat,H_2O} = 0.53 \times 5.0752 = 2.690 \text{ kPa}$$

จำนวนโมลของละอองน้ำในอากาศจากสมการ

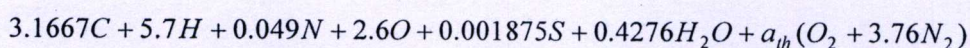
$$\left( \frac{N_{v,H_2O,air}}{N_{v,total}} \right) = \left( \frac{P_{v,air}}{P_{v,total}} \right) \quad (4.1)$$

$$N_{v,H_2O,air} = \left( \frac{P_{v,air}}{P_{v,total}} \right) N_{v,total}$$

$$= \left( \frac{2.690 \text{ kPa}}{101.325 \text{ kPa}} \right) \times (15.678 + N_{v,H_2O,air}) \text{ kmol}$$

$$\therefore N_{v,H_2O,air} = 0.4276 \text{ kmol}$$

เพราะฉะนั้นทำการสมดุลสมการการเผาไหม้สำหรับอากาศชื้นใหม่จะได้ดังนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ  $aCO_2 + bH_2O + dN_2 + eSO_2$  นั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำการสมมูลสมการจะได้

$$C : 3.1667 \longrightarrow = a$$

$$a = 3.1667$$

$$H : 5.7 + (0.4276 \times 2) \longrightarrow = 2b$$

$$b = 3.2776$$

$$S : 0.001875 \longrightarrow = e$$

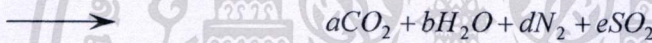
$$e = 0.001875$$

$$O : 2.6 + 0.4276 + (a_{th} \times 2) = 2a + b + 2e \longrightarrow a_{th} = 3.2936$$

$$N : 0.049 + (a_{th} \times 3.76 \times 2) = 2d \longrightarrow d = 12.408$$

นำค่าตัวแปรที่ทำการคำนวณได้แทนค่ากลับในสมการ จะได้สมการเผาไหม้ของอากาศ  
ขึ้นกับเชื้อเพลิงแกลบที่อัตราการเผาไหม้พอ คือ

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



จากนั้นทำการหาอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง จากสมการ

$$\left(\frac{A}{F}\right) = \frac{m_{air}}{m_{fuel}} \quad (4.2)$$

มวลของอากาศเท่ากับ

$$\begin{aligned} m_{air} &= n_{air} \times MW_{air} = (n_{dry\ air} \times MW_{dry\ air}) + (n_{H_2O} \times MW_{H_2O}) \\ &= (3.2936 \times 4.76 \text{ kmol}) \left(28.97 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}\right) + (0.4276 \text{ kmol} \times 18 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}) \\ &= 461.875 \text{ kg} \end{aligned}$$

มวลของเชื้อเพลิงเท่ากับ

$$\begin{aligned} m_{fuel} &= n_{fuel} \times MW_{fuel} = (n_C \times MW_C) + (n_H \times MW_H) + (n_N \times MW_N) + (n_O \times MW_O) \\ &\quad + (n_S \times MW_S) \\ &= (3.1667 \times 12) + (5.7 \times 1) + (0.049 \times 14) + (2.6 \times 16) + (0.001875 \times 32) \text{ kg} \\ &= 86.046 \text{ kg} \end{aligned}$$

ดังนั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ส่งไปลงบนสื่อออนไลน์ ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= 5.368$$

จากสมการ (3.8) เปอร์เซ็นต์อากาศส่วนเกิน (percent excess air)

$$\text{เปอร์เซ็นต์อากาศส่วนเกิน (percent excess air)} = \left[ \frac{(A/F)_{Actual}}{(A/F)_{Stoic}} - 1 \right] \times 100\%$$

เพราะฉะนั้น ทำการหาอัตราการไหลของอากาศที่ใช้ในการทดลองเมื่อกำหนดอัตราการไหลของเชื้อเพลิงเท่ากับ 8.64 kg/hr จะได้

กรณีอัตราส่วนผสมพอดี (stoichiometric)

$$\left( \frac{A}{F} \right) = 5.368$$

$$A = 5.368 \times 8.64 \text{ kg/hr} \\ = 46.6 \text{ kg/hr}$$

ตารางที่ 4.2 ปริมาณอากาศกรณีอัตราส่วนผสมพอดี (stoichiometric) ที่ใช้ในการทดลอง

อัตราป้อนเชื้อเพลิงแกลบ (kg/hr)	ปริมาณอากาศที่อัตราส่วนผสมพอดี (kg/hr)
7.24	38.86
8.64	46.40
10.43	55.97

#### 4.4 การคำนวณคุณสมบัติทางกายภาพต่างๆของเม็ดที่เป็นแกลบ

4.4.1 การหาสัดส่วนช่องว่าง(void fraction,  $\varepsilon_m$ ) และความกลม(sphericity,  $\phi_s$ ) ของแกลบ

$$\varepsilon_m = \frac{\text{void volume}}{\text{Volume of (particles + voids)}} \quad (4.3)$$

จากการทดลองปริมาตรของ n-hexane ก่อนผสม = 55 mm.

ปริมาตรของแกลบและช่องว่าง = 20.5 mm.

ปริมาตรหลังผสม = 58 mm.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned} \text{สัดส่วนของช่องว่างของเบด} &= \frac{55 + 20.5 - 58}{20.5} \\ &= 0.85 \end{aligned}$$

จากรูปที่ 3.12 เส้น normal packing จะได้

$$\varepsilon_m = 0.85$$

$$\phi_s = 0.24$$

#### 4.4.2 เส้นผ่านศูนย์กลางของทรงกลมเทียบเท่ากับแกลบ (diameter of sphere having the volume, $d_p$ )

$$\text{ปริมาตรของแกลบและช่องว่าง} = 20.5 \text{ ตารางมิลลิเมตร}$$

$$\text{จำนวนของอนุภาค} = 600 \text{ อนุภาค}$$

$$\begin{aligned} \text{ปริมาตรของแกลบ} &= \text{จำนวนของอนุภาค} \times \frac{\pi d_p^3}{6} \\ &= \text{ปริมาตรของแกลบและช่องว่าง} \times (1 - \varepsilon_m) \end{aligned}$$

$$600 \times \pi \frac{d_p^3}{6} = 20.5 \times (1 - 0.85)$$

$$d_p^3 = \frac{6 \times 20.5 \times 0.15 \times 7}{22 \times 600}$$

$$= 9.784 \times 10^{-3}$$

$$d_p = 0.214 \text{ cm.}$$

$$= 2.14 \times 10^{-3} \text{ m.}$$

#### 4.4.3 ความหนาแน่นของแกลบ

$$\text{น้ำหนักของแกลบ} = 10.5881 \text{ กรัม}$$

$$\text{ปริมาตรของแกลบ} = 83.3 \text{ ตารางมิลลิลิตร}$$

$$\begin{aligned} \text{ความหนาแน่นของแกลบ} &= \frac{10.5881}{83.3 \times (1 - .85)} \\ &= 0.8473 \text{ g/ml.} \end{aligned}$$

#### 4.4.4 การหาปริมาณความชื้น

$$\text{น้ำหนักของแกลบก่อนอบ} = 3.0625 \text{ กรัม}$$

$$\text{น้ำหนักของแกลบหลังอบ} = 2.7545 \text{ กรัม}$$

$$\text{น้ำหนักของน้ำในแกลบ} = 0.308 \text{ กรัม}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สํานักงานการศึกษานานาชาติให้การศึกษานานาชาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณร้อยละของความชื้นของแกลบ} &= \frac{0.308 \times 100\%}{3.0625} \\ &= 10.06\% \end{aligned}$$

#### 4.4.5 การหาความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิโดซ์เบด ( $U_{mf}$ )

แกลบ (rice husk),  $\phi_s = 0.24$

$$\rho_{\text{rice husk}} = 0.8473 \text{ g/cm}^3$$

$$d_p = 0.214 \text{ cm.} = 2.14 \times 10^{-3} \text{ m.}$$

ที่ 35 °C อากาศ (air)

$$\rho_g = 1.2 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^3, \mu = 1.8 \times 10^{-4} \text{ g/cm}^3$$

จาก Wan และ Yu (1965)

$$\frac{1}{K_1} = 0.0408, K_1 = 24.5098$$

$$K_1 = \frac{1.75}{\varepsilon_{mf}^3 \phi_s^2}$$

(4.4)

$$K_2 = \frac{150(1 - \varepsilon_{mf})}{\varepsilon_{mf}^3 \phi_s^2}$$

(4.5)

$$\varepsilon_{mf}^3 = \frac{1.75}{24.5098 \times 0.24} = 0.2975$$

$$\varepsilon_{mf} = 0.6675$$

$$K_1 = \frac{1.75}{0.2975 \times 0.24} = 24.5098$$

$$K_2 = \frac{150(1 - 0.6675)}{0.2975 \times 0.24} = 2911.4317$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อ  $0.2975 \times 0.24$  นั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Ar = \frac{d_p^3 \rho_g (\rho_R - \rho_g) g}{\mu^2} \quad (4.6)$$

แทนค่าในสมการหา Ar

$$Ar = \frac{0.214^3 \times 0.0012 \times (0.8473 - 0.0012) \times 981}{0.00018^2} = 301278.58$$

สมการที่ใช้ในการคำนวณหาความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดซ์

$$\frac{1.75 (d_p U_{mf} \rho_g)^2}{\varepsilon_{mf}^3 \phi_s \mu^2} + \frac{150(1 - \varepsilon_{mf}) d_p U_{mf} \rho_g}{\varepsilon_{mf}^3 \phi_s \mu} = \frac{d_p^3 \rho_g (\rho_R - \rho_g) g}{\mu^2} \quad (4.7)$$

แทนค่า  $K_1, K_2, Ar$  จะได้

$$K_1 \frac{[0.214 \times U_{mf} \times 0.0012]^2}{0.00018^2} + K_2 \frac{[0.214 \times U_{mf} \times 0.0012]}{0.00018} = 301278.58$$

$$49.8867 U_{mf}^2 + 4157.6425 U_{mf} = 301278.58$$

$$\therefore U_{mf} = 46.509 \text{ cm/s (ที่อุณหภูมิ } 35^\circ\text{C)}$$

ที่อุณหภูมิ  $950^\circ\text{C}$

$$\rho_g = 0.289020 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^3$$

$$\mu = 4.74560 \times 10^{-4} \text{ g/cm}^3$$

$$Ar = \frac{0.214^3 \times 0.2892 \times 10^{-3} \times (0.8473 - 0.2892 \times 10^{-3}) \times 981}{(4.7456 \times 10^{-3})^2} = 10457.19$$

แทนค่าเพื่อหา  $U_{mf}$

$$K_1 \frac{[0.214 \times U_{mf} \times 0.2892 \times 10^{-3}]^2}{(4.7456 \times 10^{-4})^2} + K_2 \frac{[0.214 \times U_{mf} \times 0.2892 \times 10^{-3}]}{(4.7456 \times 10^{-4})} = 10457.19$$

$$0.41685 U_{mf}^2 + 379.6885 U_{mf} = 10457.19$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่ข้อมูลนี้แก่บุคคลภายนอกโดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\therefore U_{mf} = 26.75 \text{ cm/s (ที่อุณหภูมิ } 950^\circ\text{C)}$$

#### 4.4.6 ความเร็วสุดท้ายของการฟลูอิด์ (terminal velocity of particles, $U_t$ )

แก๊ส,  $\phi_s = 0.24$

$$\rho_R = 0.8473 \text{ g/cm}^3$$

$$d_p = 0.214 \text{ cm}$$

อากาศ,  $\rho_g = 1.2 \times 10^{-3}$

$$\mu = 1.8 \times 10^{-4}$$

$$d_p^* = d_p \frac{[\rho_g (\rho_R - \rho_g) g]^{1/3}}{\mu^{1/3}} \quad (4.8)$$

แทนค่าจะได้

$$d_p^* = 0.214 \frac{[0.0012 \times (0.8473 - 0.0012) 980]^{1/3}}{(0.00018^2)^{1/3}}$$

$$d_p^* = 67.038$$

$$U_t^* = \left[ \frac{18}{(d_p^*)^2} + 2.335 - \frac{1.774\phi_s}{(d_p^*)^{0.5}} \right] \quad (4.9)$$

แทนค่าจะได้

$$U_t^* = \left[ \frac{18}{67.038^2} + 2.335 - \frac{1.774 \times 0.24}{(67.038)^{0.5}} \right]$$

$$U_t^* = 4.20045$$

$$U_t = U_t^* \left[ \frac{\mu (\rho_R - \rho_g) g}{\rho_g^2} \right]^{1/3} \quad (4.10)$$

$$\therefore U_t = 425.2758 \text{ cm/s}$$

#### 4.5 การคำนวณหาความสัมพัทธ์ระหว่างขนาดท่อทดลองต่อแผ่นกระจายลม

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางกลางทางเข้า  $0.079 \text{ m}$ ,  $L_{mf} = 1.3 \text{ m}$

$$\varepsilon_{mf} = 0.6675$$

$$\rho_{\text{เหล็ก}} = 0.8473 \times 10^3 \text{ kg/m}^3 \quad \{ \rho_{\text{เหล็ก}} = \rho_s \}$$

สภาวะอากาศที่อุณหภูมิ  $55^\circ \text{ C}$

$$\rho_{\text{air}} = 1.063609035 \text{ kg/m}^3 \quad \{ \rho_{\text{air}} = \rho_{\text{gas}} \}$$

$$\mu = 197.816 \times 10^{-7} \text{ N.s/m}^2$$

ความเร็วอากาศเข้าเตา  $u_0 = 5.01750777 \text{ m/s}$

Step I จากสมการในการหาความดันตกคร่อมในเบด

$$\frac{\Delta P_b}{L_{mf}} = (1 - \varepsilon_{mf})(\rho_s - \rho_g) \frac{g}{g_c} \quad (4.11)$$

$$\begin{aligned} \therefore \Delta P_b &= \frac{(1 - 0.6675)(0.8473 \times 10^3 - 1.063609035)(9.81)(1.3)}{1} \\ &= 3588.357 \text{ Pa} \end{aligned}$$

จาก  $\Delta P_d = (0.2 \text{ ถึง } 0.4) \Delta P_b$  เลือกใช้  $0.3$

$$\therefore \Delta P_d = 0.3 \Delta P_b \quad (4.12)$$

$$= (0.3)(3588.357) P_d = 1076.507 P_d$$

Step II ตรวจสอบหาค่า  $Re$  เพื่อหาค่า  $C_{d,or}$  ของรู

$$Re_i = \frac{d_i u_o \rho_g}{\mu} \quad (4.13)$$

$$= \frac{(0.079)(5.01750777)(1.063609035)}{197.816 \times 10^{-7}}$$

$$= 21312.566 > 3000$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

∴ จากตาราง

$$C_{d,or} = 0.6$$

Step III หา  $u_{or}$  จากสมการ

$$U_{or} = C_{d,or} \left\{ \frac{2\Delta Pd}{\rho_g} \right\}^{1/2} \quad (4.14)$$

$$U_{or} = (0.6) \left\{ \frac{(2)(1076.507)}{1.0693609035} \right\}^{1/2}$$

$$U_{or} = 26.995 \text{ m/s}$$

ตรวจสอบ  $\frac{u_0}{u_{or}} = \frac{5.01750777}{26.995} = 0.1858$  หรือ  $(18.586\%) > 10\%$

Step IV หาจำนวนรูต่อพื้นที่และขนาดของรู

$$U_0 = \frac{\pi}{4} d_{or}^2 u_{or} N_{or} \quad (4.15)$$

โดยที่  $N_{or}$  = จำนวนรูแผ่นกระจายลม

$d_{or}$  = ขนาดของ  $\phi$  รูของ orifice

แทนค่าในสมการ

$$5.01750777 = \left\{ \frac{\pi}{4} \right\} \{26.995\} d_{or}^2 N_{or}$$

$$N_{or} = \frac{0.23665454}{d_{or}^2}$$

ทดลองค่าโดยเลือกกำหนดรู

ตารางที่ 4.3 ตารางแสดงขนาดของรูและจำนวนรูของเบด

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $d_{or}$ (m)	0.002	0.0025	0.003
จำนวนรู $N_{or}$ ( $m^{-2}$ )	59163.635	37864.726	26294.948
จำนวนรู $N_{or}$ ( $cm^{-2}$ )	5.916	3.786	2.629

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เลือก  $d_{or} = 2.5 \text{ mm}$  จำนวนรูต่อพื้นที่  $3.786 \text{ รู/cm}^2$

$$\therefore A = \frac{\pi}{4} (7.9)^2 = 49.01669935 \text{ cm}^2$$

จำนวนรูทั้งหมด  $= 3.786 \times 49.01669935 = 185 \text{ รู}$

#### 4.6 การคำนวณหาความเร็วและReในเตาเผา

อัตราการไหลของเตาเผาทั้งหมดที่ใช้ในการทดลอง  $1.5695 \text{ kg/min}$

อากาศมีอุณหภูมิเฉลี่ยประมาณ  $55^\circ \text{C}$

$$\rho_{air} = 1.063609035 \text{ kg/m}^3, \mu_{air} = 197.816 \times 10^{-7} \text{ N.S/m}^2$$

$$\therefore Re = \rho \frac{VD}{\mu} = \left\{ \frac{\rho}{\mu} \right\} \left\{ \frac{4Q}{\pi} \right\}$$

$$\text{ทราบว่า } m_{air} = \rho_{air} Q_{air}$$

$$Q_{air} = \frac{1.569514715}{1.063609035} = 1.47565 \text{ m}^3/\text{min}$$

$$\therefore \text{อัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศ } Q = 0.024594167 \text{ m}^3/\text{s}$$

กรณี ทางเข้าเตาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง  $120 \text{ mm}$

$$Re = \left\{ \frac{1.063609035}{197.816 \times 10^{-7}} \right\} \left\{ \frac{4 \times 0.024594167}{\pi \times 0.12} \right\} = 14030.772$$

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{0.024594167}{(\pi/4)(0.12)^2} = 2.1746 \text{ m/s}$$

กรณี เตาขนาด  $300 \times 100 \text{ mm}$

เนื่องจากเตาเป็นทรงสี่เหลี่ยม

$$\text{ดังนั้น } d = \frac{4A}{p}$$

$p$  คือ เส้นรอบรูปสี่เหลี่ยม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$d = \frac{4(300 \times 100)}{(300 \times 2) + (100 \times 2)} = 150 \text{ mm}$$

$$\text{Re} = \left\{ \frac{1.063609035}{197.816 \times 10^{-7}} \right\} \left\{ \frac{4 \times 0.024594167}{\pi \times 1.5} \right\} = 11224.618$$

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{0.024594167}{(0.3)(0.1)} = 0.819 \text{ m/s}$$

กรณี เตาขนาด 600 x 200 mm.

$$d = \frac{4(600 \times 200)}{(600 \times 2) + (200 \times 2)} = 300 \text{ mm}$$

$$\text{Re} = \left\{ \frac{1.063609035}{197.816 \times 10^{-7}} \right\} \left\{ \frac{4 \times 0.024594167}{\pi \times 0.3} \right\} = 5612.309$$

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{0.024594167}{(0.6)(0.2)} = 0.2049 \text{ m/s}$$

ตารางที่ 4.4 ค่า Re และ ความเร็วการไหลที่ตำแหน่งต่างๆของเตาเผาที่ใช้ในการทดลอง

	Re	V(m/s)
ทางเข้าเตาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 120 mm.	14030.772	2.174
กรณี เตาขนาด 300 x 100 mm.	11224.618	0.819
กรณี เตาขนาด 600 x 200 mm.	5612.309	0.204

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

# อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

### 5.1 บทนำ

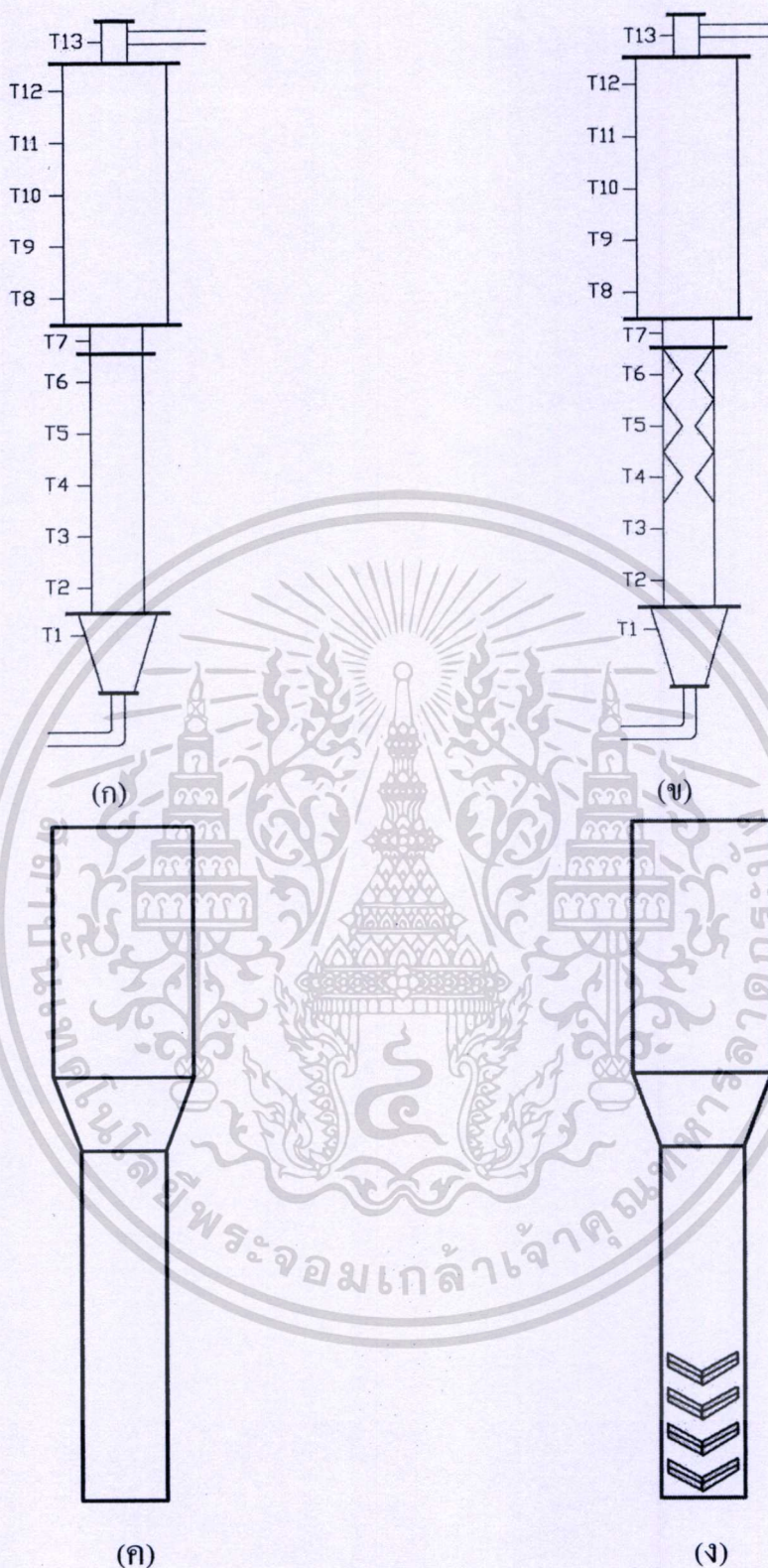
การทดลองเตาเผาฟลูอิโดซ์เบดขนาดเล็ก ก่อนการทดลองเก็บผลจะต้องมีการจัดเตรียม อุปกรณ์และเครื่องมือไว้ให้พร้อม และอุปกรณ์บางชิ้นจะต้องทำขึ้นมาเฉพาะสำหรับการทดลองนี้ โดยในการทดลองจะเริ่มจาก การเตรียมตัวเตา และต่ออุปกรณ์ต่างๆ ระบบ เตรียมเชื้อเพลิงแกลบ ระบบไฟฟ้า จากนั้นจึงทำการอุ่นเตาและเก็บผลการทดลองตามลำดับต่อไป

### 5.2 การจัดเตรียมอุปกรณ์และเครื่องมือในการทดลอง

ในการศึกษาถึง การกระจายอุณหภูมิภายในเตาเผาฟลูอิโดซ์เบดแบบมีคิริบขวางและ องค์ประกอบของแก๊สที่เกิดจากการเผาไหม้ ซึ่งเป็นงานวิจัยเชิงการทดลอง การจัดเตรียมอุปกรณ์ และเครื่องมือในการทดลองมีหลายชนิดประกอบเข้าด้วยกัน รายละเอียดต่าง ๆ ของอุปกรณ์ที่ใช้ ในการทดลองมี ดังนี้

#### 5.2.1 เตาเผาฟลูอิโดซ์เบด

เตาเผาฟลูอิโดซ์เบดทั้ง 4 แบบ มีความสูงทั้งสิ้น 2400 mm เตาเผาฟลูอิโดซ์เบดทรงกระบอก มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในห้องเผาไหม้ 200 mm เส้นผ่านศูนย์กลางภายในพรีบอร์ด 400 mm และมีความสูงของห้องเผาไหม้ 2100 mm สำหรับห้องผสมมีลักษณะเป็นทรงกรวยมีความสูง 300 mm ด้านนอกของผนังห้องเผาไหม้และห้องผสมได้ทำการหุ้มฉนวนเพื่อป้องกันความร้อนสูญเสียออกจากระบบ ที่ผนังของห้องเผาไหม้ได้ทำการติดตั้งตำแหน่งวัดอุณหภูมิทั้งสิ้น 11 ตำแหน่ง ตามระยะที่ได้ทำการกำหนดไว้ ใต้อุณหภูมิห้องเผาไหม้แล้วจะถูกวัดอุณหภูมิและนำออกจากห้องเผาไหม้ทางด้านบนของห้องเผาไหม้ กรณีการทดลองเตาเผาฟลูอิโดซ์เบดแบบทรงกระบอกมีคิริบขวาง ทำการติดตั้งคิริบจำนวน 3 ชุด มีความสูงทั้งสิ้น 600 mm โดยที่คิริบนี้มีระยะพิตเท่ากับ OD ของท่อทดลอง คิริบ 1 ชุดมีความสูงทั้งสิ้น 200 mm เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 200 mm เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 100 mm ดังรูป 5.1(ข) เตาเผาฟลูอิโดซ์เบดทรงสี่เหลี่ยมมีขนาดภายในห้องเผาไหม้คือ กว้าง 300 mm หนา 100 mm และ สูง 1100 mm สำหรับขนาดของพรีบอร์ดใหญ่ คือ กว้าง 600 mm หนา 200 mm และสูง 850 mm ดังรูป 5.1(ค) กรณีการทดลองเตาเผาฟลูอิโดซ์เบดที่ติดคิริบ ทำการติดตั้งคิริบขวางจำนวน 4 ชุด โดยมีระยะพิต 50 mm ดังรูป 5.1(ง)

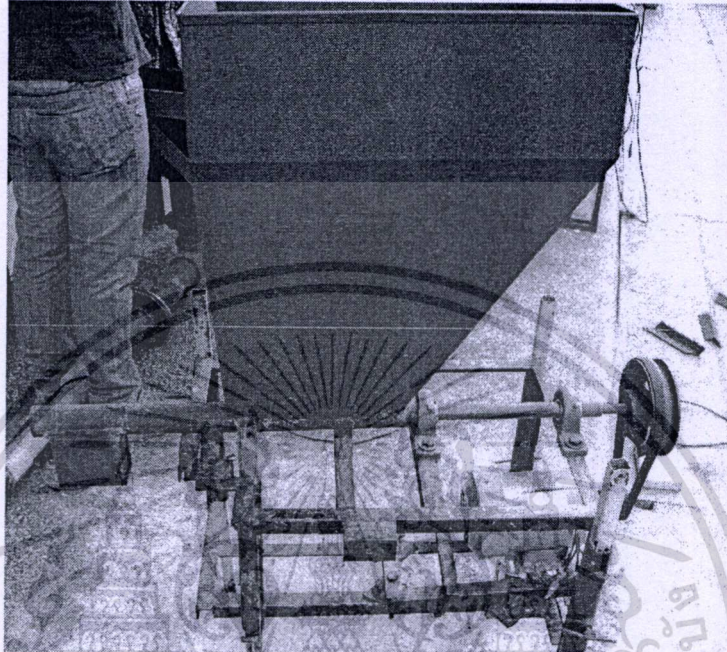


รูปที่ 5.1 แสดงลักษณะของเตาเผาแบบต่างๆ (ก) เตาเผาฟลูอิโดซ์เบดแบบทรงกระบอกผิวเรียบ และพรีบอร์ดใหญ่ [3] (ข) เตาเผาฟลูอิโดซ์เบดแบบทรงกระบอกมีกริบและพรีบอร์ดใหญ่ [3] (ค) เตาเผาฟลูอิโดซ์เบดแบบทรงสี่เหลี่ยมผิวเรียบ พรีบอร์ดใหญ่ (ง) เตาเผาฟลูอิโดซ์เบดแบบทรงสี่เหลี่ยมมีกริบ พรีบอร์ดใหญ่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

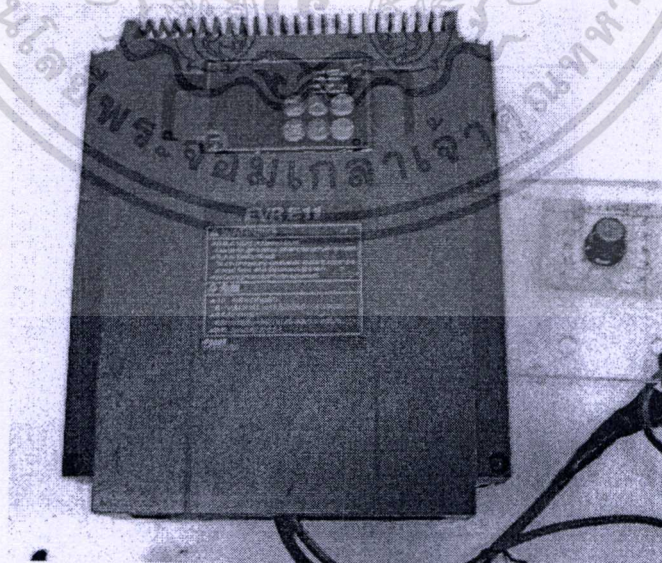
### 5.2.2 ระบบป้อนเชื้อเพลิง

ระบบป้อนเชื้อเพลิงสามารถป้อนเชื้อเพลิงเข้าเตาเผาอย่างต่อเนื่อง และสามารถปรับอัตราการไหลของเชื้อเพลิงตามที่ต้องการ ระบบป้อนเชื้อเพลิงประกอบด้วย inverter, motor, screw feed และ hopper ดังแสดงในรูปที่ 5.2



รูปที่ 5.2 ระบบป้อนเชื้อเพลิงเกลียว

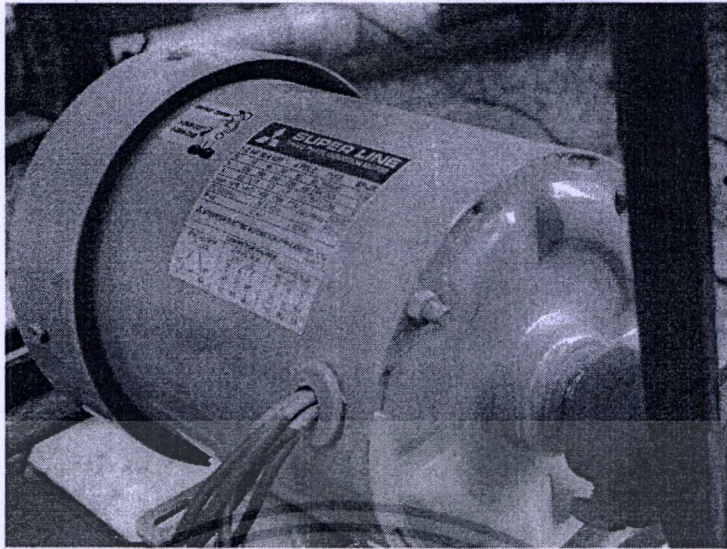
inverter คือ อุปกรณ์ที่นำมาใช้สำหรับควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ เพื่อปรับอัตราการไหลของเชื้อเพลิง ใช้ของ Fuji Type: FVR7 5E11S-4JE



รูปที่ 5.3 inverter

motor เป็นต้นกำลังในการขับ screw feed ดังแสดงในรูปที่ 5.4 โดยมีมอเตอร์ที่ใช้มีขนาดกำลังขับเท่ากับ 1/2 Hp

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.4 motor

screw feed เป็นอุปกรณ์ลำเลียงเชื้อเพลิงเข้าสู่ท่ออากาศปฐมภูมิ screw feed สร้างขึ้นจากเหล็ก คังแสดงในรูปที่ 5.5



รูปที่ 5.5 screw feed

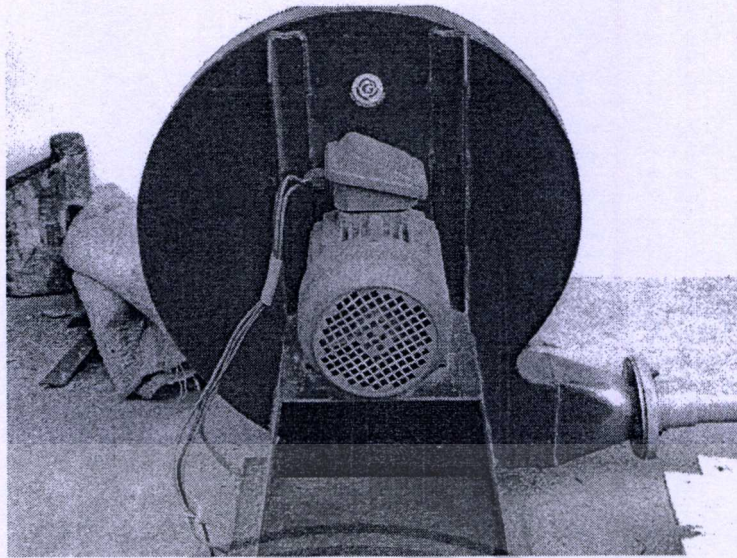
hopper คืออุปกรณ์ที่ใช้สำหรับบรรจุเชื้อเพลิง คังแสดงในรูปที่ 5.6 มีลักษณะเป็นรูปทรงสามเหลี่ยมสามารถบรรจุแลกเปลี่ยนได้สูงสุดเท่ากับ  $0.05 \text{ m}^3$



รูปที่ 5.6 hopper

### 5.2.3 ชุดป้อนอากาศปฐมภูมิ ประกอบด้วย blower ชนิดใบพัดแบบ backward inclined capacity $100 \text{ m}^3/\text{min}$ pressure $200 \text{ mm.Aq}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



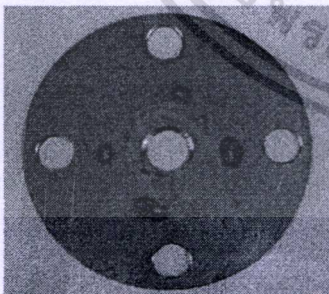
รูปที่ 5.7 แสดง blower และ motor

motor ใช้เป็นตัวขับ blower ขนาด 7.5 kw 2840 rpm 15 A 380 V 4 pole  
วาล์ว ที่ใช้ในการปรับปริมาณอากาศปฐุมภูมิ ใช้ gate valve ขนาด 3 นิ้วจำนวน 2 ตัว

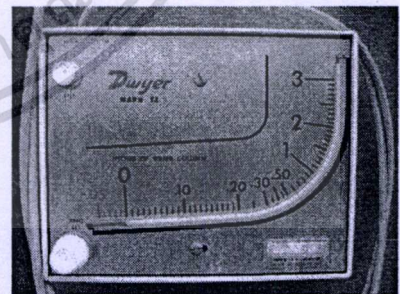
#### 5.2.4 ระบบวัดอัตราการไหลของอากาศ

การวัดอัตราการไหลของอากาศปฐุมภูมิ และอากาศหตุยภูมิ ใช้ ออร์ฟิส (orifice) และค่าความดันตกคร่อมที่ผ่านออร์ฟิสสามารถอ่านค่า โดยใช้ inclined manometer เพื่อนำมาเปรียบเทียบค่าความเร็วและอัตราการไหลของอากาศภายในท่อลำเลียง ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

แผ่นออร์ฟิส (orifice plate) แบ่งออกเป็น 2 ชุด คือ ใช้วัดอัตราการไหลของอากาศปฐุมภูมิ และ อากาศหตุยภูมิ ดังแสดงในรูปที่ 5.8 การสร้างออร์ฟิสมิเตอร์ใช้มาตรฐาน (ANSI/API 2530)



รูปที่ 5.8 ลักษณะของแผ่นออร์ฟิส



รูปที่ 5.9 inclined manometer

เครื่องมือวัดความเร็วลม เป็นเครื่องมือที่ได้ถูกนำมาใช้ในการปรับเทียบแผ่นกับออร์ฟิสมาตรฐาน โดยเครื่องมือวัดความเร็วลมชนิดนี้ใช้หลักการของขดลวดความร้อนมีชื่อ เรียกว่า hot wire

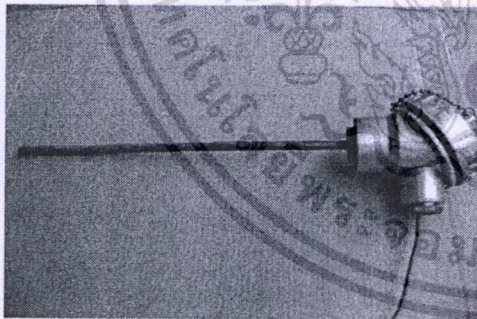
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



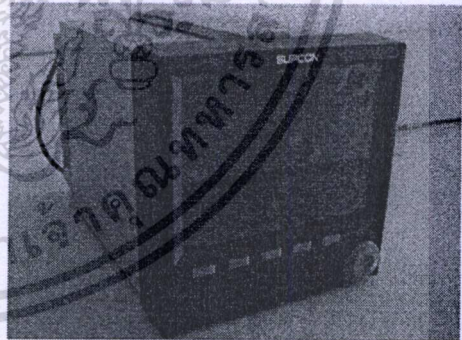
รูปที่ 5.10 เครื่องมือวัดความเร็วลม testo 445

### 5.2.5 ระบบวัดอุณหภูมิ

อุณหภูมิภายในเตาเผาฟลูอิดเบด จะวัดโดยใช้เทอร์โมคัปเปิลชนิด K จำนวน 12 ตัว วัดการกระจายอุณหภูมิภายในเตาเผาอุณหภูมิและไอเสีย แสดงในรูปที่ 5.11 ซึ่งสามารถทนอุณหภูมิสูงสุดเท่ากับ  $1200^{\circ}\text{C}$  ความยาวของเทอร์โมคัปเปิลเท่ากับ 200 mm เส้นผ่านศูนย์กลาง 8 mm และนำมาต่อเข้ากับ data logger เพื่อแสดงผลของอุณหภูมิและบันทึกผลของอุณหภูมิดังแสดงในรูปที่ 5.12



รูปที่ 5.11 เทอร์โมคัปเปิล

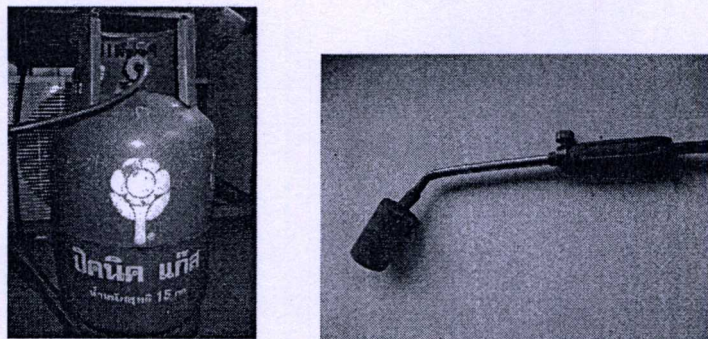


รูปที่ 5.12 data logger

### 5.2.6 ชุดอุ่นเตาเผา

ชุดอุ่นเตาเผาเป็นระบบที่มีความสำคัญอีกระบบหนึ่ง คือ ก่อนทำการทดลองเผาไหม้ จะต้องทำการอุ่นเตาให้มีอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้สูงจน กระทั่งเชื้อเพลิงสามารถเผาไหม้ด้วยตัวเอง ระบบอุ่นเตาประกอบด้วย หัวเผา และ ถังเชื้อเพลิงก๊าซ LPG ซึ่งหัวเผามีขนาดเผาเท่ากับ 5.08 cm และสามารถปรับอัตราการไหลของเชื้อเพลิง LPG ดังแสดงในรูปที่ 5.13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.13 แสดงถังแก๊สและหัวเผา

### 5.2.7 ระบบดักจับฝุ่นจี้ถ้ำ

เป็นระบบดักจับฝุ่นจี้ถ้ำที่เกิดขึ้นหลังจากการเผาไหม้ โดยใช้หลักการของ cyclone ดังแสดงในรูปที่ 5.14 ประกอบด้วยท่อทางเข้าทรงกระบอก ส่วน cyclone เป็นกรวย และก๊าซไอเสียจะถูกปล่อยออกทางด้านบนของไซโคลน และจี้ถ้ำจะถูกดักและปล่อยออกลงสู่ถังเก็บจี้ถ้ำ เพื่อช่วยลดปริมาณมลพิษทางอากาศที่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง



รูปที่ 5.14 cyclone

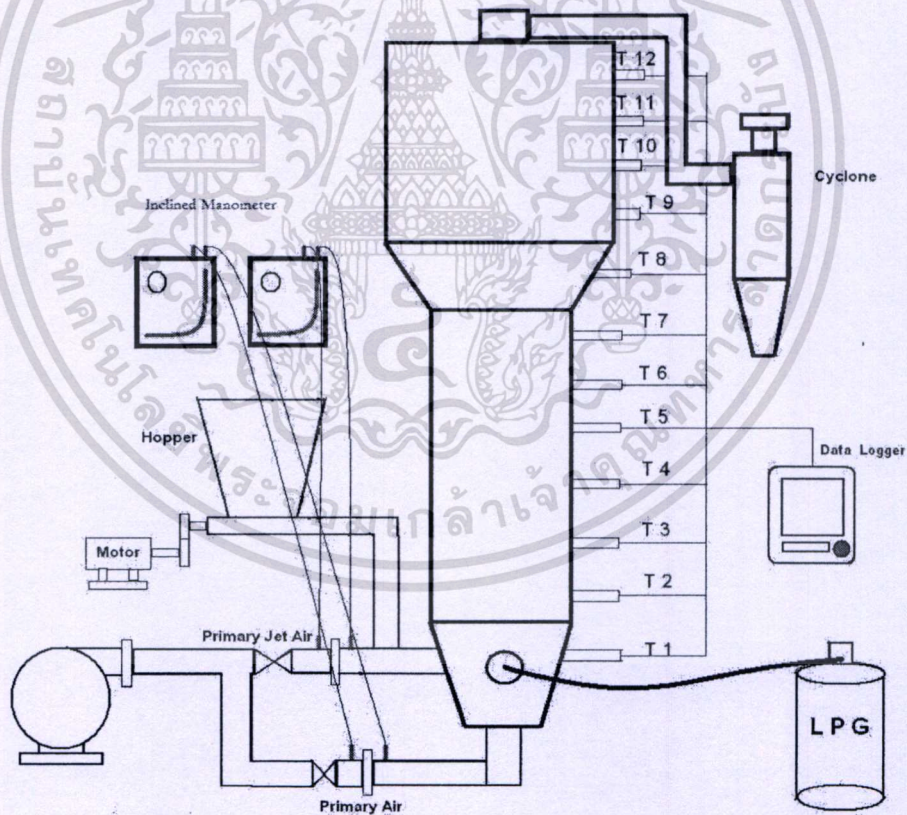
### 5.2.8 เครื่องวิเคราะห์ก๊าซไอเสีย

ก๊าซไอเสียที่เกิดขึ้นจากการทดลองสามารถวิเคราะห์ค่าปริมาณของแก๊สต่างๆที่ออกมาด้วยเครื่องวิเคราะห์ไอเสีย TESTO 350M XL ดังแสดงในรูปที่ 5.15



รูปที่ 5.15 เครื่องวิเคราะห์ก๊าซไอเสีย TESTO 350M XL

### 5.3 การติดตั้งอุปกรณ์ในการทดลอง



รูปที่ 5.16 แสดงแผนผังอุปกรณ์การทดลองเตาเผาฟลูอิดซ์เบด

การออกแบบเตาเผาฟลูอิดซ์เบดที่ใช้ในการทดลอง มีความสูงของห้องเผาไหม้และฟริบอร์คใหญ่ทั้งหมด 2400 mm ขนาดของห้องเผาไหม้ คือ กว้าง 300 mm หนา 100 mm สูง 1100 mm และมีรายละเอียดปลีกย่อยคงที่ได้กล่าวไปแล้วในตอนต้น ในการติดตั้งอุปกรณ์การทดลองนี้ ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลักการทำงานดังนี้ คือ อากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ได้มาจาก blower โดยใช้ needle valve และ inclined manometer ในการปรับอัตราการไหลและวัดอัตราการไหล ตามลำดับ ของอากาศปฐมภูมิ ส่วนของอากาศหุติภูมิสามารถปรับอัตราการไหล โดยใช้ needle valve และใช้ inclined manometer ในการวัดอัตราการไหลเช่นเดียวกัน การป้อนแกลบจะใช้ screw feeder ซึ่งสามารถควบคุมอัตราการป้อนแกลบโดยใช้ inverter ควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ ในตอนเริ่มทำการทดลองจำเป็นต้องใช้แก๊สเชื้อเพลิงเหลว LPG เพื่อช่วยในการอุ่นเตาทำให้อุณหภูมิภายใน เตาสูงจนสามารถทำให้เชื้อเพลิงแกลบเกิดการเผาไหม้ด้วยตัวเองได้ การวัดอุณหภูมิใช้เทอร์โมคัปเปิล type K จำนวน 12 ตัว เก็บค่าเข้าสู่คอมพิวเตอร์ วัดการกระจายอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ 11 จุด วัดอุณหภูมิห้องผสม 1 จุด การวัดการกระจายอุณหภูมิภายในเตาเผาจะวัดที่ตำแหน่งความสูงจากด้านล่างห้องผสม 400 mm, 600 mm, 800 mm, 1000 mm, 1200 mm, 1400 mm, 1550 mm, 1700 mm, 1900 mm, 2100 mm และ 2300 mm ตามลำดับ หลังจากนั้นส่วนผสมที่เกิดการเผาไหม้แล้วจะออกทางท่อที่ตำแหน่งกึ่งกลางของตัวเตาและขี้เถ้าจะถูกแยกออกด้วยไซโคลน

#### 5.4 การอุ่นเตา

ก่อนทำการทดลองต้องทำการอุ่นเตา เพื่อให้อุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้สูงขึ้น จนกระทั่งเชื้อเพลิงแกลบที่ป้อนเข้าไปสามารถเกิดการเผาไหม้ด้วยตัวเองได้ การอุ่นเตาใช้หัวเผา โดยมีแก๊ส LPG เป็นเชื้อเพลิง ขั้นตอนในการอุ่นเตาดังนี้ จุดไฟที่หัวเผาและทำการปรับวาล์วให้เปลวไฟที่หัวเผาเป็นสีน้ำเงิน หลังจากนั้นนำหัวเผาใส่เข้าตำแหน่งที่ใช้ในการอุ่นเตาบริเวณ ส่วนล่างของเตา จนกระทั่งอุณหภูมิภายในเตาสูงประมาณ  $500^{\circ}\text{C}$  -  $650^{\circ}\text{C}$  จึงเริ่มป้อนแกลบให้มีอัตราการไหลต่ำๆ เพื่อให้แกลบเผาไหม้และช่วยเพิ่มอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้จนอุณหภูมิสูงประมาณ  $700^{\circ}\text{C}$  -  $750^{\circ}\text{C}$  จึงหยุดป้อนเชื้อเพลิงแก๊สที่หัวเผา และนำหัวเผาออกจากห้องเผาไหม้เนื่องจากอุณหภูมิสูงพอที่ทำให้เชื้อเพลิงแกลบสามารถเผาไหม้ด้วยตนเองอย่างต่อเนื่องแล้วจึงเริ่มทำการทดลอง

#### 5.5 การทดลองและบันทึกผลการทดลอง

1. ทำการอุ่นเตา โดยใช้เชื้อเพลิงแก๊ส LPG จนกระทั่งอุณหภูมิ ภายในเตามีค่าประมาณ  $500^{\circ}\text{C}$  -  $650^{\circ}\text{C}$  จากนั้นเริ่มป้อนเชื้อเพลิงแกลบ (มีขนาดประมาณ 2 mm x 8 mm) เข้าสู่ห้องเผาไหม้พร้อมกับอากาศปฐมภูมิ จนกระทั่งอุณหภูมิภายในเตาประมาณ  $700^{\circ}\text{C}$  -  $750^{\circ}\text{C}$  แล้วทำการเอาชุดอุ่นเตาออก

2. อัตราการป้อนของเชื้อเพลิงแกลบเท่ากับ 8.64 kg/hr แล้วปรับส่วนผสมให้อากาศส่วนเกินเป็น 40% จะต้องใช้อัตราการไหลของอากาศ 64.96 kg/hr

3. บันทึกค่าอุณหภูมิภายในที่ตำแหน่งตามแนวแกนที่ 400 mm, 600 mm, 800 mm, 1000 mm, 1200 mm, 1400 mm, 1550 mm, 1700 mm, 1900 mm, 2100 mm และ 2300 mm

ตามลำดับ บันที่กผลของอุณหภูมิ สังเกตลักษณะจี๊ดๆ และควันที่เกิดจากการเผาไหม้ และวัดค่าไอเสียที่เกิดจากการเผาไหม้

4. ทำการทดลองซ้ำในข้อ 3 ที่ตำแหน่งตามแนวแกนที่กำหนดไว้ ที่ระยะ  $w/W=1$ ,  $w/W=1/3$  และ  $w/W=2/3$

5. ยึดอัตราการป้อนเชื้อเพลิงที่ 8.64 kg/hr แล้วทำการปรับอัตราการไหลของอากาศ ดังนี้

5.1 ทดลองที่อากาศส่วนเกิน 50% ปรับอัตราการไหลของอากาศเป็น 69.60 kg/hr

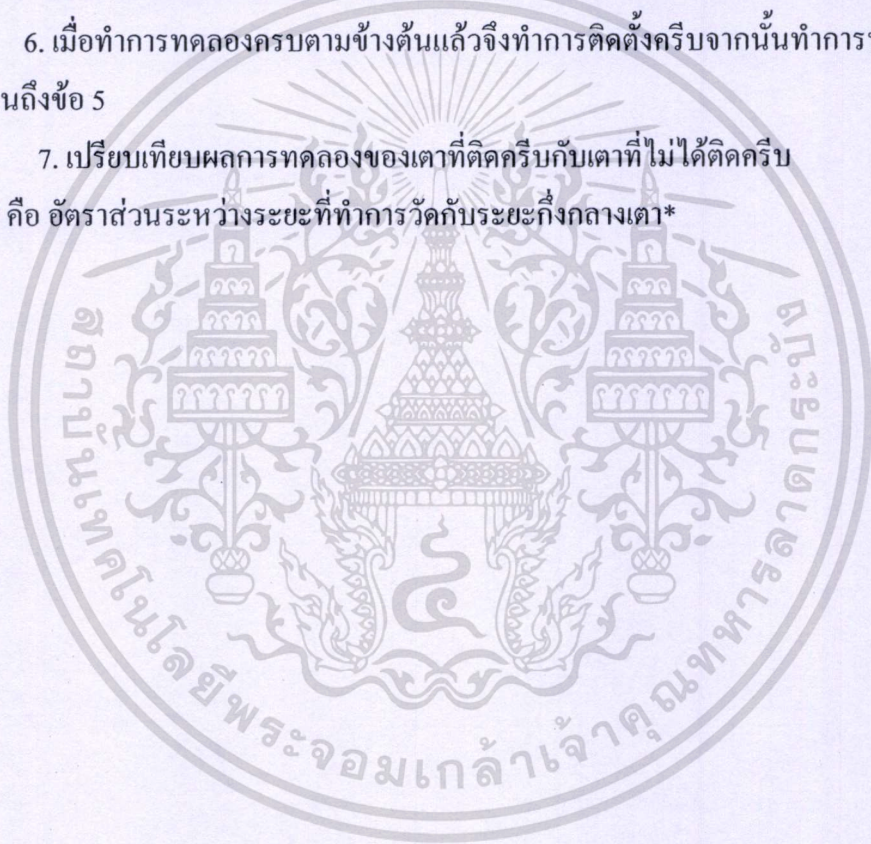
5.2 ทดลองที่อากาศส่วนเกิน 60% ปรับอัตราการไหลของอากาศเป็น 74.24 kg/hr

5.3 ทดลองที่อากาศส่วนเกิน 70% ปรับอัตราการไหลของอากาศเป็น 78.88 kg/hr

6. เมื่อทำการทดลองครบตามข้างต้นแล้วจึงทำการติดตั้งครีบกั้นจากนั้นทำการทดลองตั้งแต่ข้อ 1 จนถึงข้อ 5

7. เปรียบเทียบผลการทดลองของเตาที่ติดครีบกั้นกับเตาที่ไม่ได้ติดครีบกั้น

\*  $w/W$  คือ อัตราส่วนระหว่างระยะที่ทำการวัดกับระยะกึ่งกลางเตา\*



## บทที่ 6

### ผลการทดลอง

#### 6.1 บทนำ

ในบทนี้จะทำการอธิบายถึงผลพฤติกรรมของอุณหภูมิ การวิเคราะห์ก๊าซไอเสียที่เกิดขึ้นจากกระบวนการเผาไหม้ของแกลบ โดยจะอธิบายอิทธิพลและพฤติกรรมดังกล่าว เมื่อเปลี่ยนแปลง รูปทรงของกายของเตาเผา กรณีที่มีกรับขวางภายในเตาเผา ซึ่งผลที่ได้จากการทดลองสามารถวิเคราะห์ผลการทดลองได้ดังต่อไปนี้

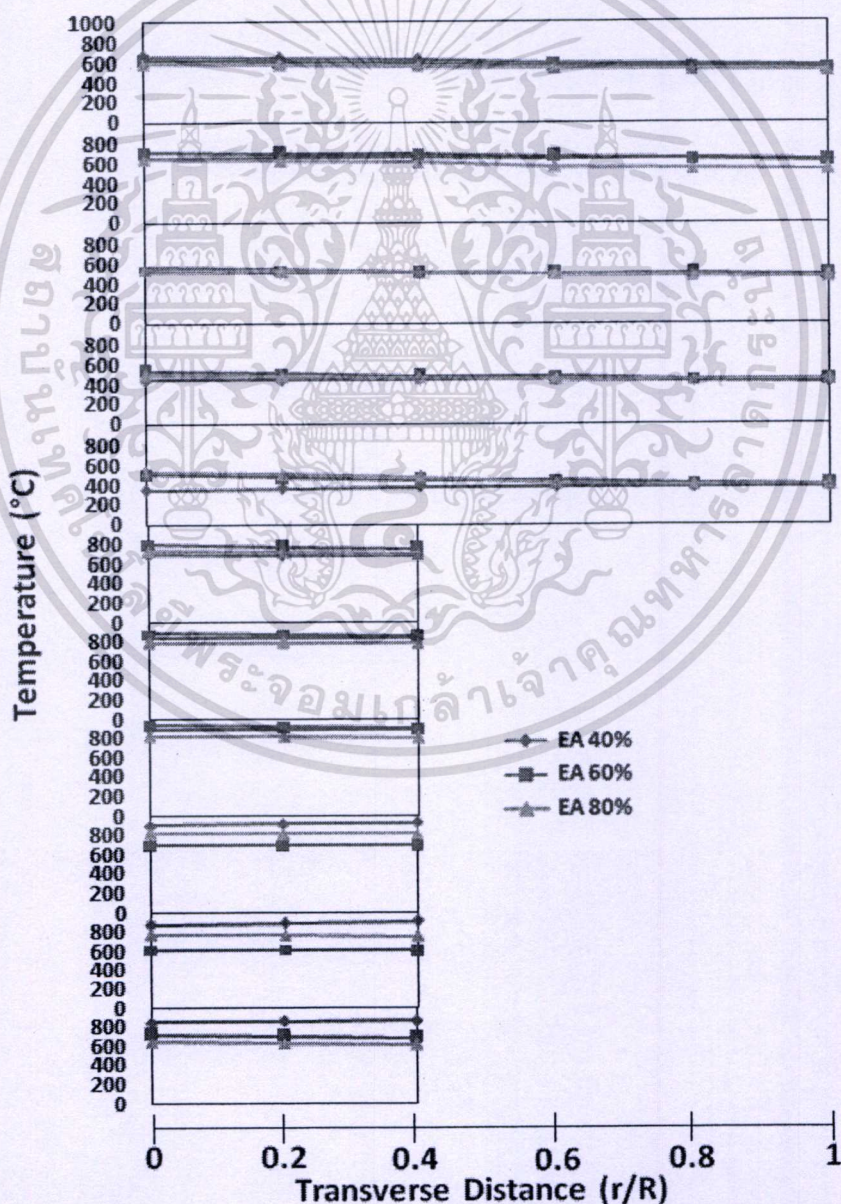
#### 6.2 ผลกระทบของเตาเผาแกลบฟลูอิดไคซ์เบด

##### 6.2.1 เตาเผาแกลบฟลูอิดไคซ์เบดแบบทรงกระบอกผนังเตาเป็นแบบคิเรียบ พรีบอร์ดใหญ่[3]

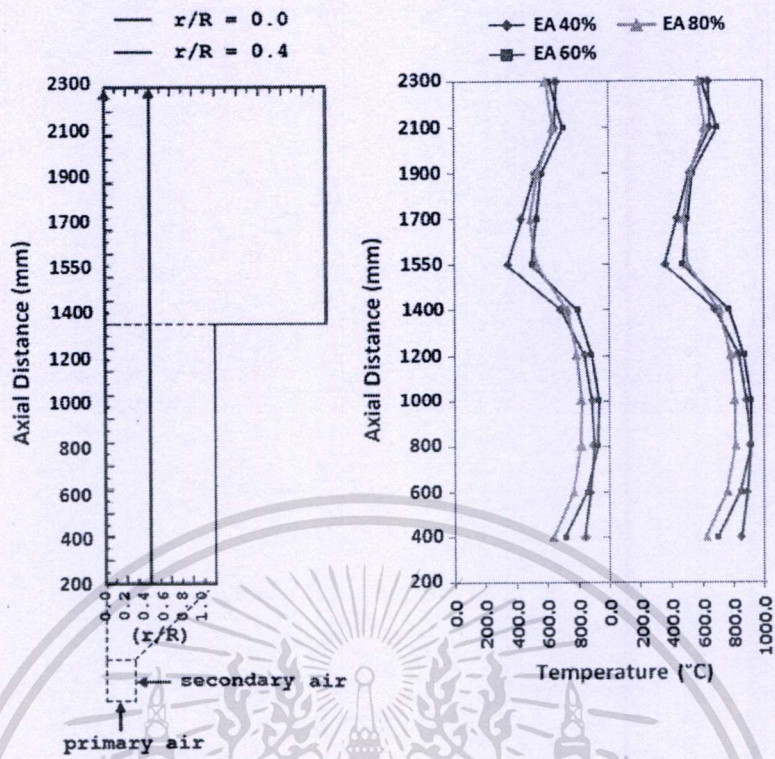
จากการศึกษาถึงอิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงผนังของห้องเผาไหม้ โดยที่ในการทดลองจะยังคงความสูงของแต่ละหอการทดลองไว้ที่ความสูงค่าเดียวกัน คือ 2400 mm ที่ขนาดของห้องเผาไหม้ปกติ 200 mm ซึ่งสำหรับกรณีนี้ คือ กรณีเตาเผาแกลบฟลูอิดไคซ์เบดแบบผนังเตาเป็นแบบคิเรียบ พรีบอร์ดใหญ่ และในการทดลองนี้ได้ทำการทดลองเพื่อทำการเปรียบเทียบผลที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงผนังของห้องเผาไหม้โดยจะทำการทดลองที่ อัตราการป้อนเชื้อเพลิงค่าเดียว คือ 9 kg/hr การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงแข็งจำเป็นต้องมีปริมาณเปอร์เซ็นต์ของอากาศส่วนเกินในปริมาณที่มาก จากการทดลองที่เปอร์เซ็นต์อากาศส่วนเกิน 60% มีความเหมาะสมที่สุด และ ทำการปรับอัตราการไหลของเชื้อเพลิงระหว่าง 6-12 kg/hr เพื่อหาขอบการติดไฟของเตา จากการทดลอง ทำให้ทราบว่าหลักการของฟลูอิดไคซ์เบดยังคงมีความเหมาะสมที่จะประยุกต์ใช้งานในการเผาไหม้ หากแต่่าจำเป็นที่จะต้องมีความสูงที่มากกว่าที่ได้ทำการทดลองจึงจะให้ผลดีที่ผ่านมาสำหรับ กรณีเตาเผาแกลบฟลูอิดไคซ์เบดแบบผนังเตาเป็นแบบคิเรียบ จะมีการควบคุมเงื่อนไขของการเผาไหม้หรือการทดลองที่ยากมาก จึงทำการขยายพรีบอร์ดใหญ่อันบนทำให้สามารถลดการหลุดลอยของแกลบได้ดี ทำให้มีระยะเวลาในการเผาไหม้ที่นานขึ้น สำหรับผลของการกระจายอุณหภูมิตามแนวรัศมีมีความสม่ำเสมอตลอดทั้งหน้าตัดของห้องเผาไหม้ ทุกๆค่าของเปอร์เซ็นต์อากาศส่วนเกิน (รูปที่ 6.1) และมีค่าอุณหภูมิสูงสุดอยู่ที่ประมาณ 950°C อุณหภูมิไอเสียทางออกสูงสุดอยู่ที่ 748°C ที่ค่าเปอร์เซ็นต์อากาศส่วนเกิน 60 % และศึกษาผลของการปรับเปลี่ยนอากาศปฐมภูมิ(Primary air) เป็น50%, 40%, 30%, 20%, และ 10% ตามลำดับ เมื่อลดเปอร์เซ็นต์ค่าอากาศปฐมภูมิลงและเพิ่มเปอร์เซ็นต์ค่าอากาศทุติยภูมิขึ้นในค่าที่เหมาะสม จะช่วยให้มีการสร้างการหมุนวนของอากาศ และอนุภาคหรือสารระเหยมีเวลามากในการหมุนวนและถูกเผาไหม้มากขึ้น

ขึ้น เกิดขึ้นของอนุภาคทำให้ความหนาแน่นของอนุภาคแกลบสูง ลดการหลุดลอยของอนุภาค มีไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดค้านเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

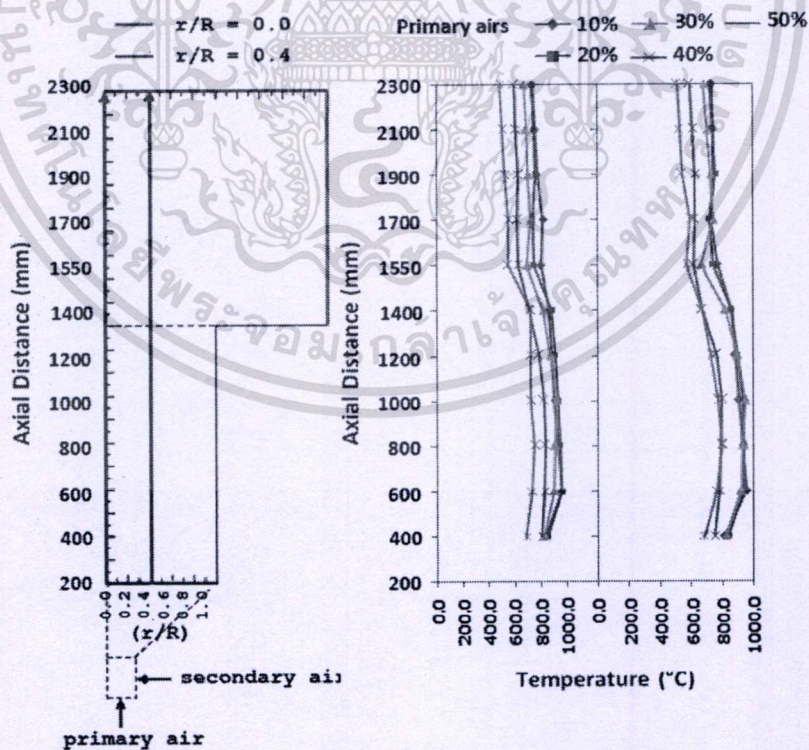
ขึ้น เกิดขึ้นของอนุภาคทำให้ความหนาแน่นของอนุภาคกลับสูง ลดการหลุดลอยของอนุภาค มีการผสมระหว่างเกลบและอากาศอย่างเข้มข้น การเผาไหม้มีความสมบูรณ์ แต่การเพิ่มปริมาณอากาศศุติยภูมิต้องอยู่ในปริมาณที่เหมาะสม ต้องไม่ลดค่าปริมาณอากาศปฐภูมิให้ต่ำกว่าค่าที่ต่ำสุดในที่สามารถทำการทดลองได้ เนื่องจากทำให้ปริมาณและความเร็วอากาศไม่เพียงพอต่อการเผาไหม้ ทั้งนี้การเพิ่มอากาศศุติยภูมิให้สูงขึ้นไม่เป็นผลดีเสมอไป เมื่อมาพิจารณาผลของอุณหภูมิตามแนวความสูง ที่ค่า  $(r/R) = 0.235, 0.400$  และ  $0.600$  ค่าต่างๆ (รูปที่ 6.3) พบว่าความเข้มข้นที่เกิดจากการเผาไหม้ (พิจารณาจากผลอุณหภูมิ) จะมีค่ามากตั้งแต่ความสูง 600 mm ขึ้นไปทุกค่าของเปอร์เซ็นต์อากาศส่วนเกิน และเมื่อมาพิจารณาทางด้านออกของห้องเผาไหม้อุณหภูมิก็ยังคงไม่ตกลงมาแสดงถึงว่าเชื้อเพลิงยังคงมีการเผาไหม้ที่สูงอยู่ แสดงว่าห้องเผาไหม้จำเป็นที่จะต้องมีความสูงกว่านี้



รูปที่ 6.1 การกระจายอุณหภูมิตามแนวรัศมีของเตาเผาฟลูอิดไคซ์เบดแบบทรงกระบอกผนังเตาเป็นแบบผิวเรียบ ปรีบอร์คใหญ่ อัตราป้อน 9 kg/hr อากาศส่วนเกิน 40%, 60%, และ 80%



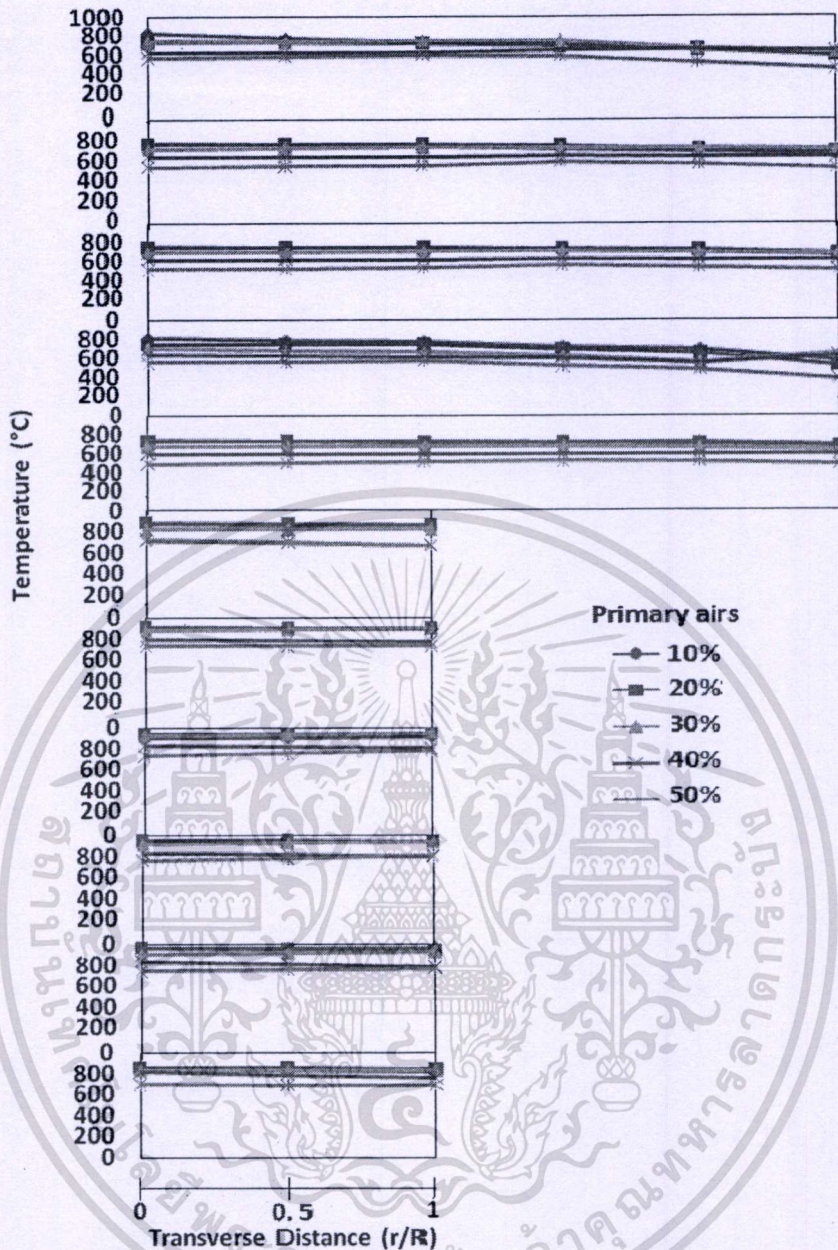
รูปที่ 6.2 การกระจายอุณหภูมิตามแนวแกนของเตาเผาฟลูอิดไคซ์เบดแบบทรงกระบอกผนังเตาเป็นแบบผิวเรียบ ปรีบอร์ตใหญ่ ที่อัตราป้อน 9kg/hr อากาศส่วนเกิน 40%, 60%, และ 80%



รูปที่ 6.3 การกระจายอุณหภูมิตามแนวแกนของเตาเผาฟลูอิดไคซ์เบดแบบทรงกระบอกผนังเตาเป็นแบบผิวเรียบที่ ปรับเปลี่ยนอากาศปฐมภูมิ(Primary air) เป็น 50%, 40%, 30%, 20%, และ 10%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

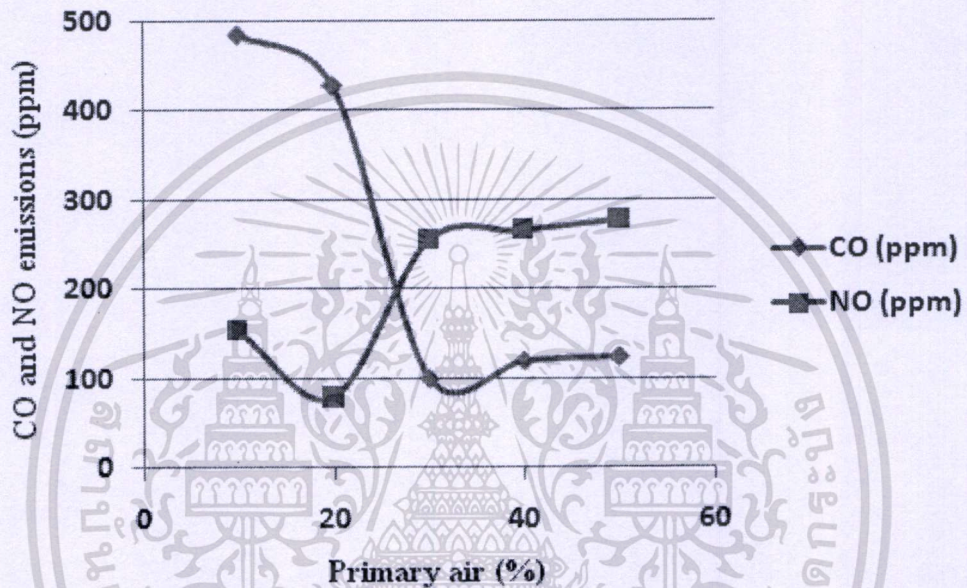


รูปที่ 6.4 การกระจายอุณหภูมิตามแนวรัศมีของเตาเผาฟลูอิดไคซ์เบดแบบทรงกระบอกผนังเตาเป็นแบบผิวเรียบ ฟริบอร์คใหญ่ปรับเปลี่ยนอากาศปฐมภูมิ (Primary air) เป็น 50%, 40%, 30%, 20%, และ 10% ตามลำดับ

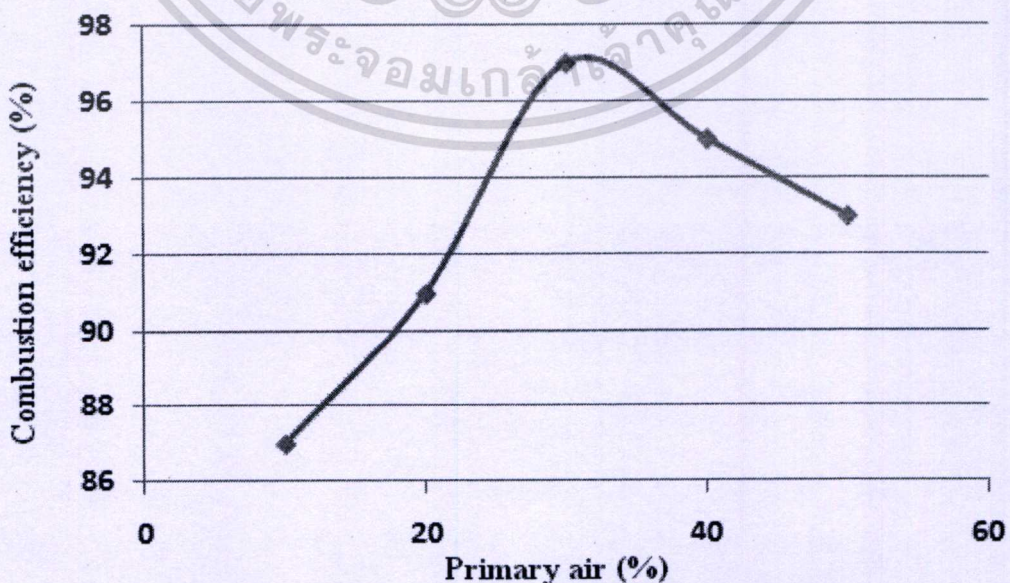
การปล่อยมลพิษจากการเผาไหม้ของเตาเผาแกลบฟลูอิดไคซ์เบดทรงกระบอกผิวเรียบ ที่ค่าอากาศส่วนเกิน 60% อัตราการป้อนเชื้อเพลิงที่ 9 kg/hr เมื่อลดเปอร์เซ็นต์ค่าอากาศปฐมภูมิลงและเพิ่มเปอร์เซ็นต์ค่าอากาศทุติยภูมิขึ้นในค่าที่เหมาะสม จะช่วยให้มีการสร้างการหมุนวนของอากาศและอนุภาคหรือสารระเหยมีเวลามากในการหมุนวนและถูกเผาไหม้มากขึ้น เกิดชั้นของอนุภาคทำให้ความหนาแน่นของอนุภาคแกลบสูง ลดการหลุดลอยของอนุภาค มีการผสมระหว่างแกลบและเถ้าอย่างเข้มข้น การเผาไหม้มีความสมบูรณ์ แต่การเพิ่มปริมาณอากาศทุติยภูมิต้องอยู่ในค่าที่เหมาะสม ต้องไม่ลดค่าปริมาณอากาศปฐมภูมิให้ต่ำกว่าค่าที่ต่ำสุดในที่สามารถทำการ

ทดลองได้ เนื่องจากทำให้ปริมาณและความเร็วอากาศไม่เพียงพอต่อการเผาไหม้ ทั้งนี้การเพิ่มอากาศหตุยภูมิให้สูงขึ้นไม่เป็นผลดีเสมอไป ปริมาณของการปล่อยมลพิษของก๊าซ CO อยู่ระหว่าง 100–500 ppm. โดยค่าอากาศปฐมภูมิที่ 30 % การก่อตัวของ CO มีค่าต่ำสุด

เป็นที่ทราบกันดีถึงการก่อตัวของ NO อันเนื่องจากการเผาไหม้ที่มีอุณหภูมิสูง ซึ่งผลการทดลองพบว่าที่อุณหภูมิไอเสียต่ำลงส่งผลให้ระดับของ NO ต่ำลงด้วย โดยปริมาณ NO อยู่ระหว่าง 100 – 300 ppm และประสิทธิภาพการเผาไหม้ที่ทำการวิเคราะห์จากเครื่องมือวัดประสิทธิภาพ Effn อยู่ระหว่าง 87–97%



รูปที่ 6.5 ปริมาณของไอเสียที่ค่าอากาศปฐมภูมิต่างๆ ของเตาเผาแก๊สฟลูอิดไดซ์เบดทรงกระบอกแบบผิวเรียบ ที่อัตราการป้อน 9 kg/hr ค่าอากาศส่วนเกิน 60%

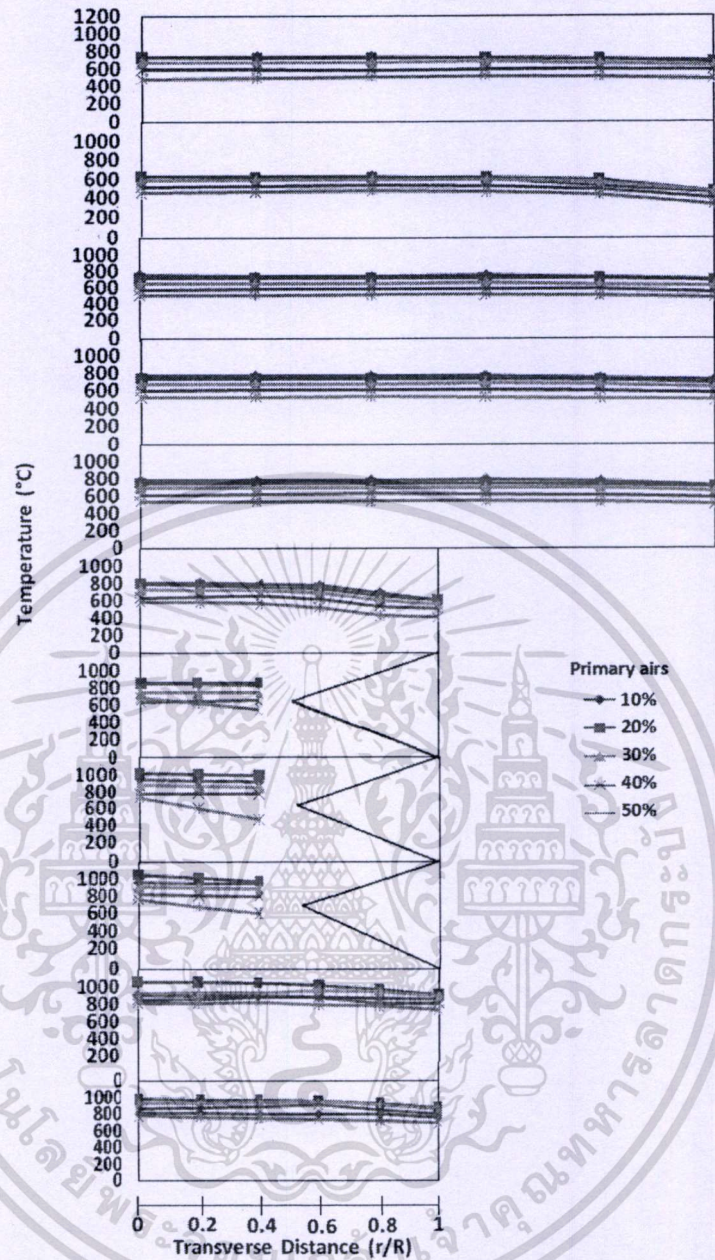


รูปที่ 6.6 ประสิทธิภาพการเผาไหม้ที่ค่าอากาศปฐมภูมิต่างๆ ของเตาเผาแก๊สฟลูอิดไดซ์เบดทรงกระบอกแบบผิวเรียบ ที่อัตราการป้อน 9 kg/hr ค่าอากาศส่วนเกิน 60%

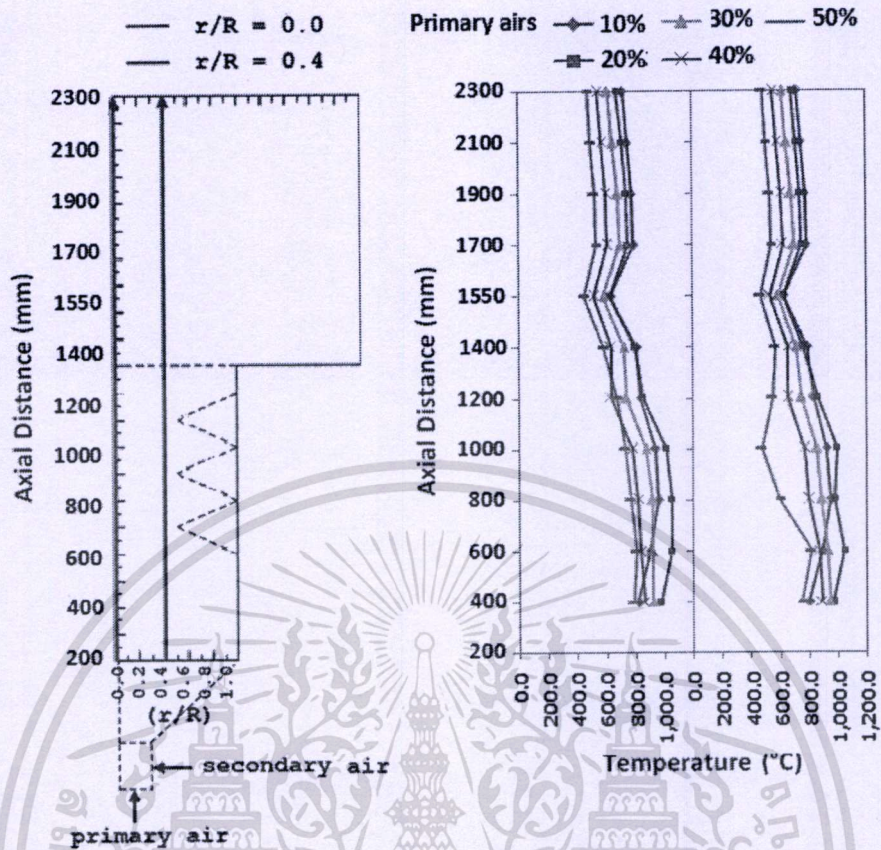
## 6.2.2 เตาเผาแลกเปลี่ยนฟลูอิดซ์เบดแบบผนังเตาเป็นแบบทรงกระบอกแบบมีครีบบาง ฟรีบอร์คใหญ่ [3]

จากการศึกษาถึงอิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงผนังของห้องเผาไหม้ โดยที่ในการทดลองจะยังคงความสูงของแต่ละหอการทดลองไว้ที่ความสูงค่าเดียวกัน คือ 2400 mm ที่ขนาดของห้องเผาไหม้ปกติ 200 mm และได้ทำการปรับเปลี่ยนขนาดของห้องเผาไหม้ที่บริเวณด้านล่างโดยทำการติดตั้งชุดครีบบนเข้าไป โดยครีบบมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่สุด 200 mm ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กสุด 100 mm มีความสูงต่อ 1 ครีบบเท่ากับ 200 mm (เส้นผ่านศูนย์กลางเล็กสุด 100 mm หรือ 0.5D และ ความสูงต่อ 1 คลื่นเท่ากับ 200 mm หรือ 1D) จำนวน 3 ชุดของครีบบมีความสูงรวมทั้งสิ้น 600 mm สำหรับกรณีนี้ คือ กรณีเตาเผาแลกเปลี่ยนฟลูอิดซ์เบดทรงกระบอกแบบผนังเตามีครีบบางและได้ทำการทดลองเพื่อทำการเปรียบเทียบผลที่เกิดขึ้นโดยใช้อัตราการป้อนเชื้อเพลิงค่าเดียวกัน คือ 9 kg/hr อากาศส่วนเกิน 60% และศึกษาผลของการปรับเปลี่ยนลมด้านหลักปรับเปลี่ยนลมด้านหลัก(Primary air) เป็น 50%, 40%, 30%, 20%, และ 10% ตามลำดับ ผลของการปรับค่าปริมาณอากาศปฐมภูมิมีลักษณะเหมือน กรณีฟลูอิดซ์เบดแบบทรงกระบอกผนังเตาเป็นแบบผิวเรียบ กล่าวคือ เมื่อลดเปอร์เซ็นต์ค่าอากาศปฐมภูมิลงและเพิ่มเปอร์เซ็นต์ค่าอากาศทุติยภูมิขึ้นในค่าที่เหมาะสม จะช่วยให้มีการสร้างการหมุนวนของอากาศและอนุภาคหรือสารระเหยมีเวลามากในการหมุนวนและถูกเผาไหม้มากขึ้น เกิดชั้นของอนุภาคทำให้ความหนาแน่นของอนุภาคแลกเปลี่ยนสูง ลดการหลุดลอยของอนุภาค มีการผสมระหว่างแลกเปลี่ยนและอากาศอย่างเข้มข้น การเผาไหม้มีความสมบูรณ์ แต่การเพิ่มปริมาณอากาศทุติยภูมิต้องอยู่ในปริมาณที่เหมาะสม ต้องไม่ลดค่าปริมาณอากาศปฐมภูมิให้ต่ำกว่าค่าที่ต่ำสุดในที่สามารถทำการทดลองได้ เนื่องจากทำให้ปริมาณและความเร็วอากาศไม่เพียงพอต่อการเผาไหม้ ทั้งนี้การเพิ่มอากาศทุติยภูมิให้สูงขึ้นไม่เป็นผลดีเสมอไป

จากการทดลอง ทำให้ทราบว่าเตาเผาแลกเปลี่ยนฟลูอิดซ์เบดแบบผนังเตาเป็นแบบมีครีบบนด้านล่าง ฟรีบอร์คใหญ่ จะส่งผลดีกว่กรณีผิวเรียบ ผลที่เกิดขึ้นนี้ก็มาจากการที่ได้ทำการติดตั้งครีบบนเข้าไปโดยอาศัยผลของการเกิดการไหลวนไปมา (recirculation) เมื่อมีการทำการเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดทำให้ความเร็วในการไหลมีการเปลี่ยนแปลง ทั้งเพิ่มขึ้นและลดลงส่งผลดีในการทำให้เกิดการผสมคลุกเคล้า และการนำเอาเชื้อเพลิงที่เกาะอยู่บนผิววนออกออกเพื่อให้ออกซิเจนสามารถที่จะเข้าไปทำปฏิกิริยากับคาร์บอนในส่วนที่เหลือได้มากขึ้น สำหรับผลของการกระจายอุณหภูมิตามแนวรัศมี มีความสม่ำเสมอว่าในกรณีเตาเผาแบบทรงกลมผิวเรียบ ตลอดทั้งหน้าตัดทุกตำแหน่งของความสูงห้องเผาไหม้ โดยมีค่าอุณหภูมิสูงสุดของห้องเผาไหม้อยู่ที่ประมาณ 1000 °C อุณหภูมิไอเสียทางออกสูงสุดอยู่ที่ 745.52°C

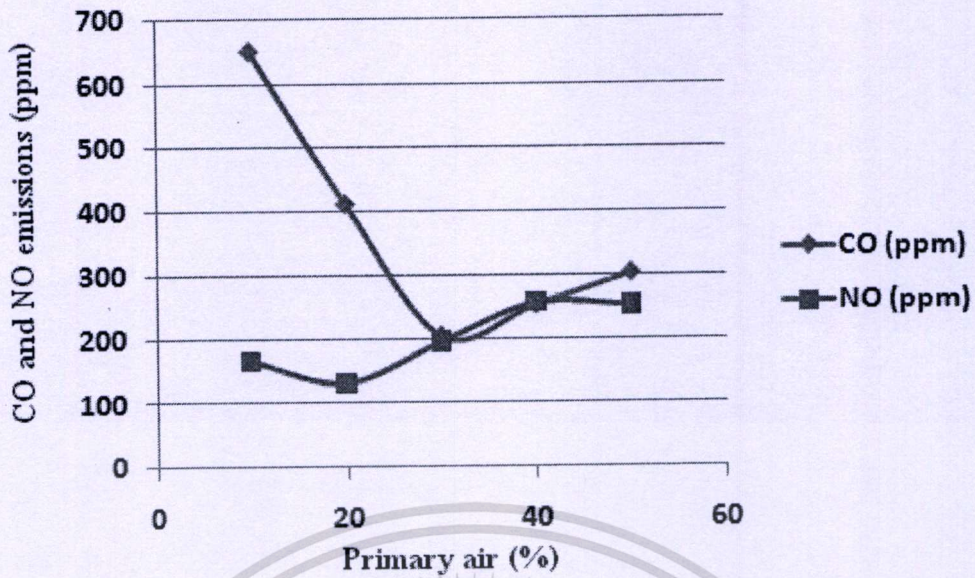


รูปที่ 6.7 การกระจายอุณหภูมิตามแนวรัศมีของเตาเผาฟลูอิดซ์เบดแบบทรงกระบอกมีกรีบขวาง  
 ฟริบอร์คใหญ่ อากาศส่วนเกิน 60% ที่ปรับเปลี่ยนลมด้านหลัก (Primary air) เป็น 50%, 60%,  
 70%, 80%, และ 90% ตามลำดับ

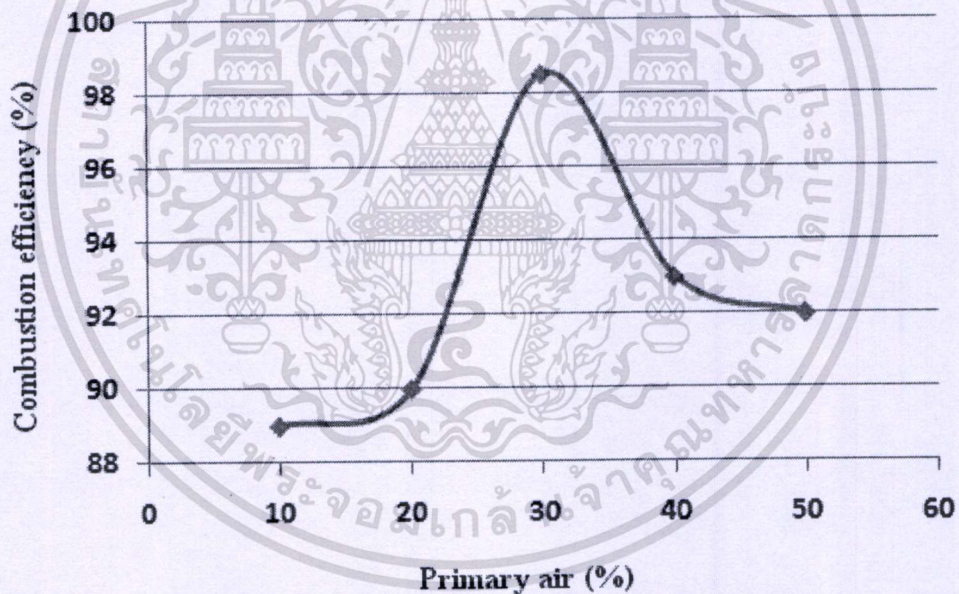


รูปที่ 6.8 การกระจายอุณหภูมิตามแนวแกนของเตาเผาฟลูอิดไคซ์เบดแบบทรงกระบอกมีคิริบขวาง ฟริบอร์คใหญ่ อากาศส่วนเกิน 60% ที่ปรับเปลี่ยนลมด้านหลัก (Primary air) เป็น 50%, 40%, 30%, 20%, และ 10% ตามลำดับ

การปล่อยมลพิษกรณีเตาเผาแกลบฟลูอิดไคซ์เบดทรงกระบอกมีคิริบขวาง เมื่อจัดวางคิริบเข้าไปในห้องเผาไหม้ จะส่งผลดีกว่ากรณีผิวเรียบ โดยเกิดการไหลวนไปมา (recirculation) เมื่อมีการทำการเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดทำให้ความเร็วในการไหลมีการเปลี่ยนแปลง ทั้งเพิ่มขึ้นและลดลงส่งผลดีในการทำให้เกิดการผสมคลุกเคล้า และการนำเอาเชื้อเพลิงที่เกาะอยู่บนผิวออกออก เพื่อให้ออกซิเจนสามารถที่จะเข้าไปทำปฏิกิริยากับคาร์บอนในส่วนที่เหลือได้มาก การลดเปอร์เซ็นต์ค่าอากาศปฐมภูมิลง และเพิ่มเปอร์เซ็นต์ค่าอากาศทุติยภูมิขึ้นในค่าที่เหมาะสมมีผลต่อการปล่อยมลพิษเหมือนกรณีเตาเผาแกลบฟลูอิดไคซ์เบดทรงกระบอกแบบผิวเรียบ โดยมีปริมาณการปล่อยมลพิษของก๊าซ CO อยู่ระหว่าง 200–700 ppm ก๊าซ NO อยู่ระหว่าง 100–300 ppm และประสิทธิภาพการเผาไหม้ที่ทำการวิเคราะห์ จากเครื่องมือวัดประสิทธิภาพ Effm อยู่ระหว่าง 89–99 %



รูปที่ 6.9 ปริมาณของไอเสียที่ค่าอากาศปฐมภูมิต่างๆ ของเตาเผาแกลบลฟลูอิดไดซ์เบดทรงกระบอกแบบมีครีบริบขวาง ที่อัตราการป้อน 9 kg/hr ค่าอากาศส่วนเกิน 60%



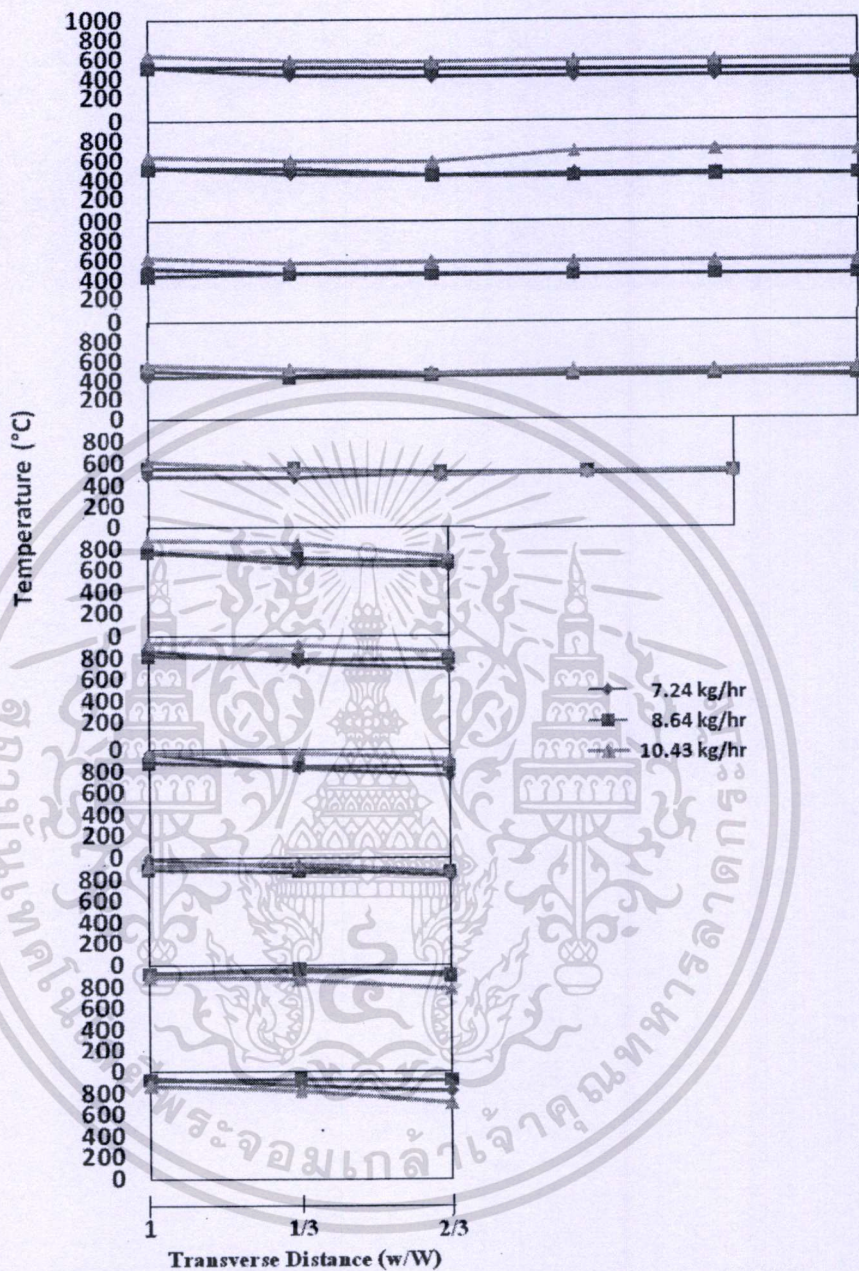
รูปที่ 6.10 ประสิทธิภาพการเผาไหม้ที่ค่าอากาศปฐมภูมิต่างๆ ของเตาเผาแกลบลฟลูอิดไดซ์เบดทรงกระบอกแบบมีครีบริบขวาง ที่อัตราการป้อน 9 kg/hr ค่าอากาศส่วนเกิน 60%

### 6.2.3 เตาเผาแกลบลฟลูอิดไดซ์เบดแบบผนังเตาเป็นแบบทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า ปริมาตรใหญ่

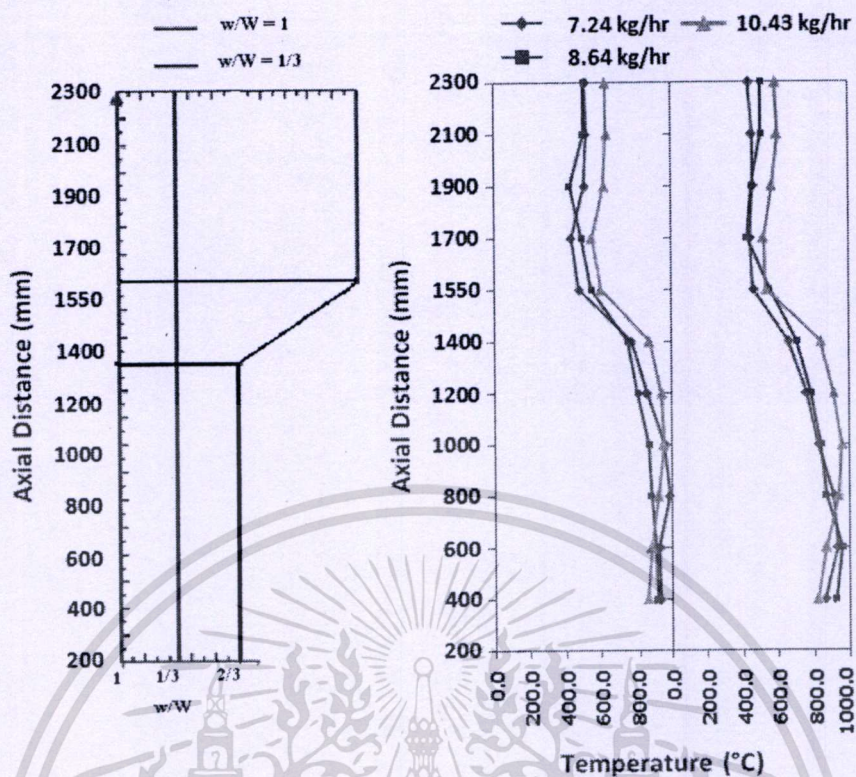
จากการศึกษาถึงอิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงผนังของห้องเผาไหม้ โดยในการทดลองจะยังความสูงของหอการทดลองไว้ที่ความสูงค่า 2400 mm ที่ขนาดของห้องเผาไหม้คือ กว้าง 300 mm หนา 100 mm และสูง 1100 mm ในการทดลองนี้ได้ทำการเปรียบเทียบผลที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ รูปที่ 6.11 แสดงการกระจายอุณหภูมิตามแนวแกนเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สมควรให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ตลอดจนความสูงของเตาเผาไหม้โดยเปรียบเทียบอัตราการป้อนตั้งแต่ 7.24-10.23 kg/hr ที่ค่าอัตราไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อากาศส่วนเกิน 50% พบว่าที่อัตราป้อน 10.23 kg/hr มีเปอร์เซ็นต์เชื้อเพลิงที่สูงขึ้น มีความหนาแน่นของเชื้อเพลิงสูง ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างช้าๆ ในของไหลและปฏิกิริยาการเผาไหม้เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วจากห้องเผาไหม้ขั้นแรก ระดับอุณหภูมิจะสูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับ 2 กรณี แต่ถ้าความหนาแน่นของอนุภาคที่มากเกินไป ทำให้ยากต่อการควบคุมให้เกิดการเผาไหม้ซึ่งเห็นได้จาก อุณหภูมิสูงสุดของการเผาไหม้มีค่าเกือบถึง 1000°C ซึ่งยากแก่การควบคุมการเผาไหม้ เนื่องจากงานวิจัยนี้พยายามควบคุมการเผาไหม้ไม่ให้มีอุณหภูมิสูงเกินกว่า 1000°C เพราะไม่ต้องการให้เกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์ และอายุการใช้งานของเตาเผา จึงทำการทดลองโดยยึดที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิงค่าเดียวคือ 8.64 kg/hr และแน่นอนว่าการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งจำเป็นต้องมีปริมาณเปอร์เซ็นต์อากาศส่วนเกินที่มาก ดังนั้นในการทดลองนี้จึงทำการศึกษาเปรียบเทียบที่ค่าเปอร์เซ็นต์ของอากาศส่วนเกินที่ 40% , 50% , 60% และ 70% ตามลำดับ เพื่อดูความแตกต่างของการกระจายอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ สำหรับผลของการกระจายอุณหภูมิตามแนวขวางมีความสม่ำเสมอตลอดทั้งหน้าตัดของห้องเผาไหม้ ทุก ๆ ค่าของเปอร์เซ็นต์อากาศส่วนเกิน (รูปที่ 6.14) และมีค่าอุณหภูมิสูงสุดอยู่ที่ประมาณ 960°C ที่ค่าเปอร์เซ็นต์อากาศส่วนเกิน 50% ส่วนอุณหภูมิไอเสียทางออกสูงสุดอยู่ที่ประมาณ 560°C ที่ค่าเปอร์เซ็นต์อากาศส่วนเกิน 60% เมื่อเพิ่มค่าเปอร์เซ็นต์อากาศส่วนเกินที่ใช้ในการทดลองจาก 40% เป็น 50, 60 และ 70% ตามลำดับ พบว่าอุณหภูมิตามแนวขวางของแต่ละจุดวัดลดลงตามการเพิ่มของค่าเปอร์เซ็นต์อากาศส่วนเกินดังกล่าว แต่จะกลับเพิ่มในช่วงฟรีบอร์ด อิทธิพลจากการใช้อากาศส่วนเกินที่ส่งผลต่อการเพิ่มหรือลดลงของอุณหภูมิในห้องเผาไหม้ มีสาเหตุอยู่ 2-3 ประการสาเหตุแรกที่เป็นเช่นนี้ คือ การใช้อากาศส่วนเกินสูงๆ ส่งผลให้มีการเผาไหม้มากเกินไป เกินความจำเป็นสำหรับการเผาไหม้ในตอนเริ่มต้น ทำให้อุณหภูมิการเผาไหม้ต่ำ เนื่องจากมีอัตราการเผาไหม้น้อยกว่าการใช้อากาศส่วนเกินต่ำๆ ประการที่สองคือ เมื่อใช้อากาศส่วนเกินต่ำๆอากาศจะมีความเร็วต่ำด้วย ทำให้เชื้อเพลิงอยู่ในห้องเผาไหม้นานและมีการผสมที่ดีกว่าในช่วงห้องเผาไหม้ เมื่อใช้ค่าอากาศส่วนเกินสูงขึ้น ทำให้อากาศมีความเร็วสูงอัตราการไหลคลอลอยสูงขึ้น เชื้อเพลิงจึงมีการเผาไหม้ต่อในช่วงฟรีบอร์ด เมื่อมาพิจารณาผลของอุณหภูมิตามแนวแกนค่าต่างๆ (รูปที่ 6.13) การกระจายอุณหภูมิตามแนวแกนของการใช้ค่าอากาศส่วนเกินต่ำ(40% และ 50%) จะลดต่ำลงตามแนวแกนของเตา เนื่องจากมีอัตราการเผาไหม้ที่ดีกว่า แสดงให้เห็นว่าเชื้อเพลิงถูกเผาไหม้หมดมากกว่าการเผาไหม้ที่ใช้อากาศส่วนเกินสูง(60 และ 70%) และในกรณีที่มีค่าอากาศส่วนเกินสูง พบว่าอุณหภูมียังคงมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากยังมีเชื้อเพลิงบางส่วนที่ยังไม่ถูกเผาไหม้ เนื่องจากมีความเร็วของอากาศสูงเกินไป นอกจากนี้การใช้ค่าอากาศส่วนเกินต่ำ (40%) ไม่สามารถปรับค่าอากาศส่วนเกินให้ต่ำกว่านี้ได้ เนื่องจากความเร็วของอากาศไม่เพียงพอในการพาให้อนุภาคออกไปจากห้องเผาไหม้ได้ดีพอ มีอัตราการเผาไหม้ที่ต่ำทำให้ถ้ามีการจับตัวกันเป็นก้อน ที่มีลักษณะเหมือนก้อนเค้กอยู่ภายในห้องเผาไหม้ ส่วนที่ค่าอากาศส่วนเกิน 70% พบว่าเมื่อใช้ค่าอากาศส่วนเกินมากกว่า 70% ส่งผลให้อากาศมีความเร็วสูงเกินไป

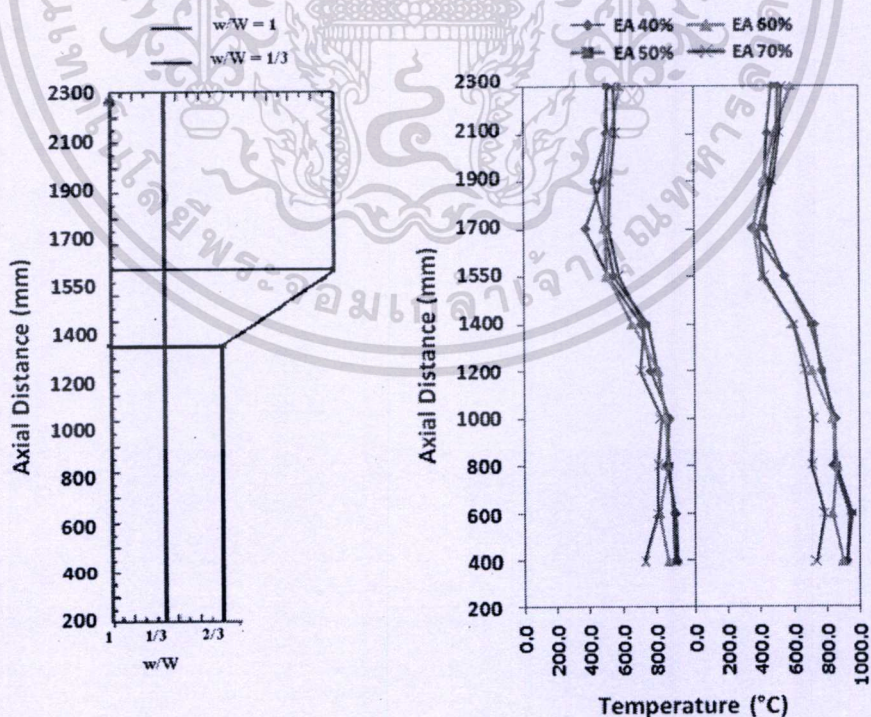
ส่งผลให้ขาดเสถียรภาพของเปลวไฟ และเชื้อเพลิงแกลบมีน้ำหนักเบาจึงง่ายต่อการหลุดลอย ซึ่งอาจแก้ปัญหานี้ได้โดยการเพิ่มความสูงของห้องเผาไหม้



รูปที่ 6.11 การกระจายอุณหภูมิตามแนวขวางของเตาเผาฟลูอิดไคซ์เบดแบบทรงสี่เหลี่ยมแบบผิวเรียบ ปริมาตรใหญ่ ที่อัตราป้อน 7.24-10.43 kg/hr อากาศส่วนเกิน 50%

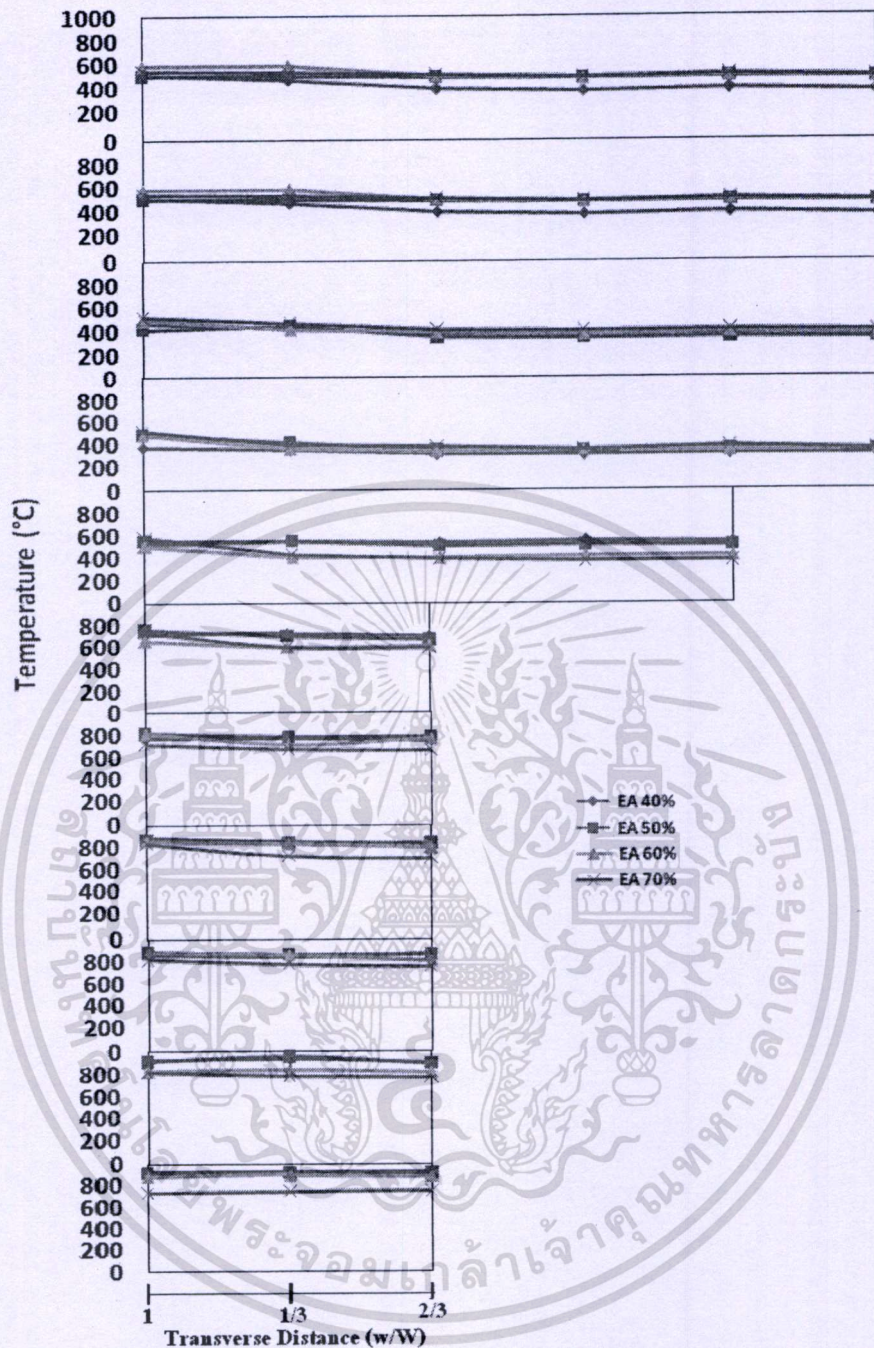


รูปที่ 6.12 การกระจายอุณหภูมิตามแนวแกนของเตาเผาฟลูอิดซ์เบดทรงสี่เหลี่ยมแบบผิวเรียบ ฟริบอร์ดใหญ่ โดยเปรียบเทียบอัตราการป้อนตั้งแต่ 7.24-10.23 kg/hr ที่ค่าอัตราอากาศส่วนเกิน 50%



ภาพที่ 6.13 การกระจายอุณหภูมิตามแนวแกนของเตาเผาฟลูอิดซ์เบดแบบสี่เหลี่ยมแบบผิวเรียบ ฟริบอร์ดใหญ่ อัตราป้อน 8.64kg/hr อากาศส่วนเกิน 40%, 50%, 60%, และ 70%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

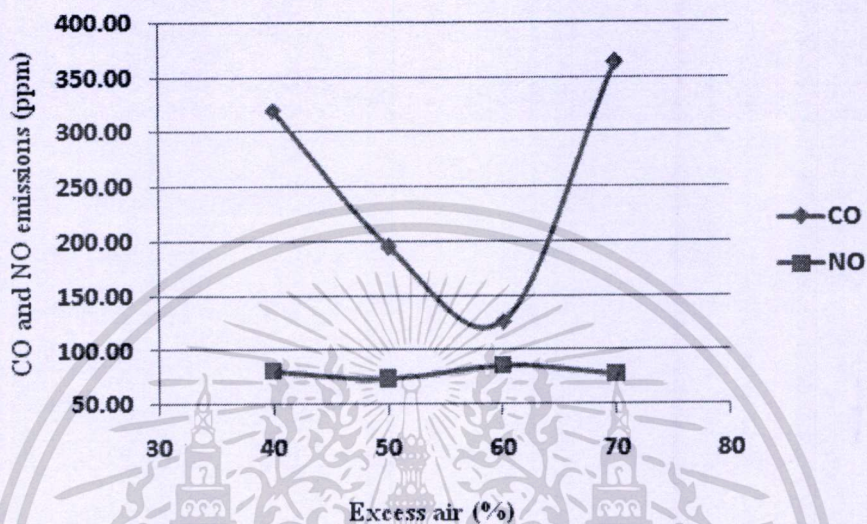


รูปที่ 6.14 การกระจายอุณหภูมิตามแนวขวางของเตาเผาฟลูอิดไอซ์เบดแบบทรงสี่เหลี่ยมแบบผิวเรียบ ฟริบอร์คใหญ่ อัตราป้อน 8.64 kg/hr ที่อากาศส่วนเกิน 40%, 50%, 60% และ 70%

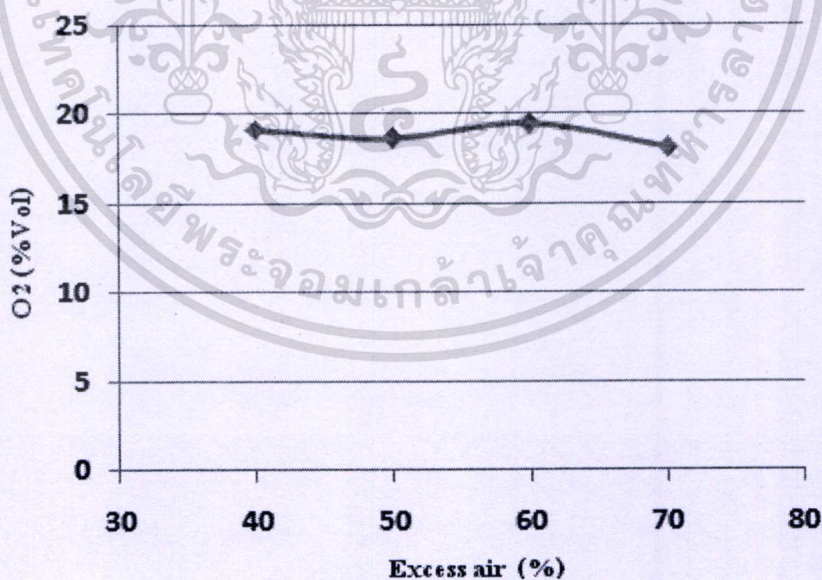
การปล่อยมลพิษของกรณีเตาเผาเคลือบฟลูอิดไอซ์เบดทรงสี่เหลี่ยมผิวเรียบ อิทธิพลจากการใช้อากาศส่วนเกินที่ส่งผลต่อการเพิ่มหรือลดลงของการปล่อยมลพิษ กล่าวคือ การใช้อากาศส่วนเกินสูงๆส่งผลให้มีการเผาไหม้มากเกินไป เกิดความจำเป็นสำหรับการเผาไหม้ในตอนเริ่มต้น ทำให้อุณหภูมิการเผาไหม้ต่ำ เนื่องจากมีอัตราการเผาไหม้น้อยกว่าการใช้อากาศส่วนเกินต่ำๆ ประการที่สองคือ เมื่อใช้อากาศส่วนเกินต่ำๆอากาศจะมีความเร็วต่ำด้วย ทำให้เชื้อเพลิงอยู่ในห้องเผาไหม้ได้นานและมีการผสมที่ดีกว่าในช่วงห้องเผาไหม้ เมื่อใช้อากาศส่วนเกินสูงขึ้น ทำให้ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อากาศมีความเร็วสูงอัตราการหลุดลอยสูงขึ้น โดยค่าอากาศส่วนเกินที่ 60% ให้ค่า CO ต่ำสุดอยู่ที่ประมาณ 125 ppm แต่เมื่อเพิ่มค่าปริมาณอากาศส่วนเกินเป็น 70% ปริมาณ CO จะมีค่าสูงขึ้นเนื่องจากความเร็วสูงเชื้อเพลิงจึงหลุดลอยออกไปก่อนที่การเผาไหม้จะสมบูรณ์

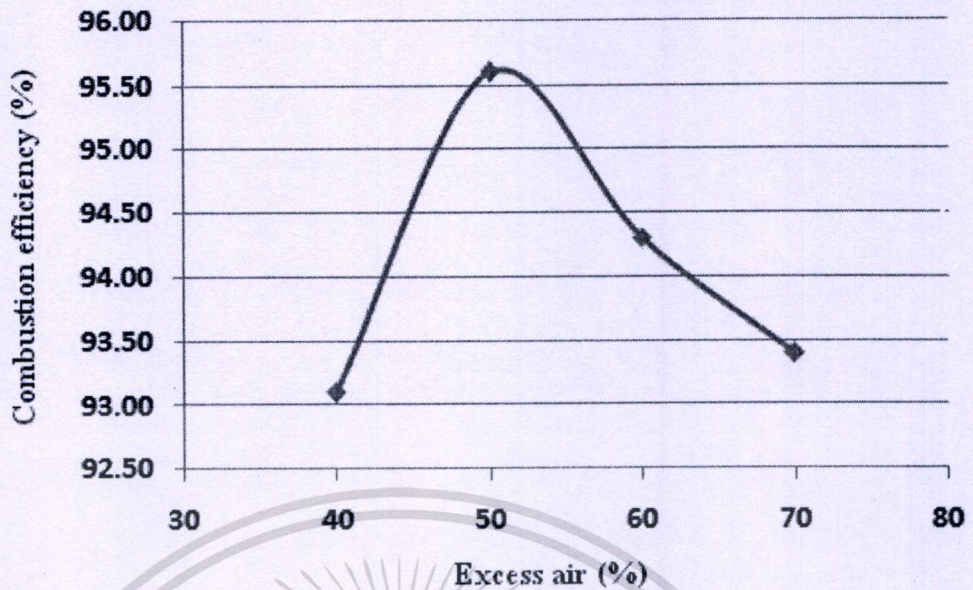
การก่อดตัวของ NO อยู่ระหว่าง 70-100 ppm และก๊าซ  $O_2$  อยู่ระหว่าง 18%-20% และประสิทธิภาพการเผาไหม้จะอยู่ระหว่าง 93%-96%



รูปที่ 6.15 ปริมาณของ ไอเสียที่ค่าอากาศส่วนเกินต่างๆ ของเตาเผาแก๊สฟลูอิดไดซ์เบดตรงสี่เหลี่ยมแบบผิวเรียบ ที่อัตราการป้อน 8.64 kg/hr



รูปที่ 6.16 ปริมาณของ  $O_2$  ที่ค่าอากาศส่วนเกินต่างๆ ของเตาเผาแก๊สฟลูอิดไดซ์เบดตรงสี่เหลี่ยมแบบผิวเรียบ ที่อัตราการป้อน 8.64 kg/hr



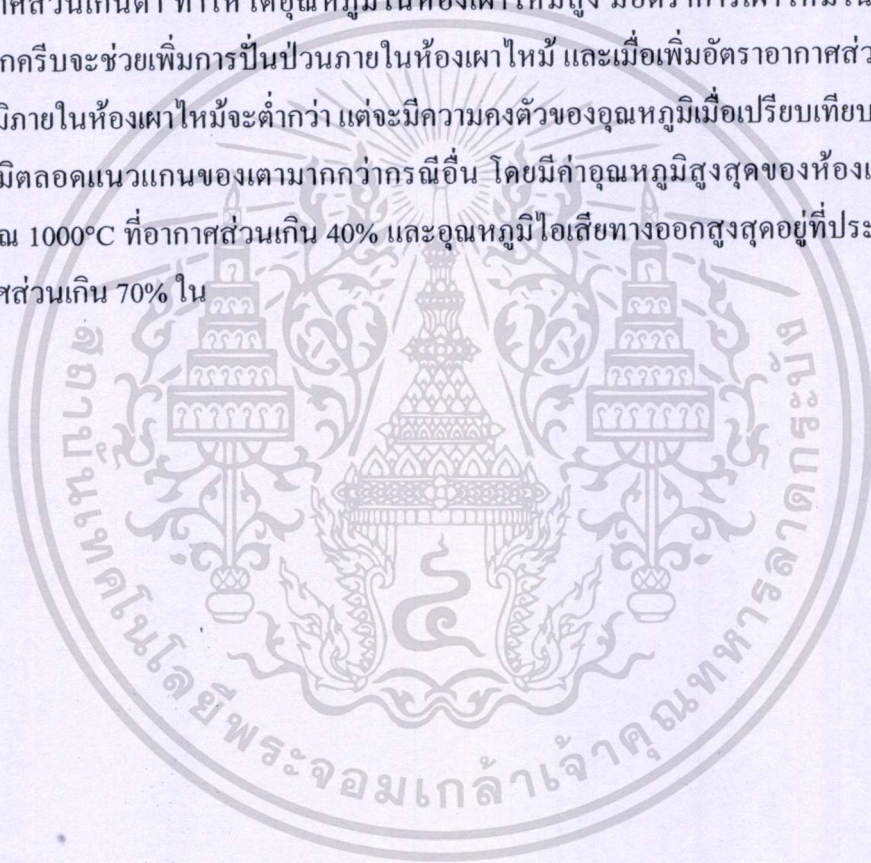
รูปที่ 6.17 ประสิทธิภาพการเผาไหม้ที่ค่าอากาศส่วนเกินต่างๆ ของเตาเผาแกลบฟลูอิดไคซ์เบด ทรงสี่เหลี่ยมแบบผิวเรียบ ที่อัตราการป้อน 8.64 kg/hr

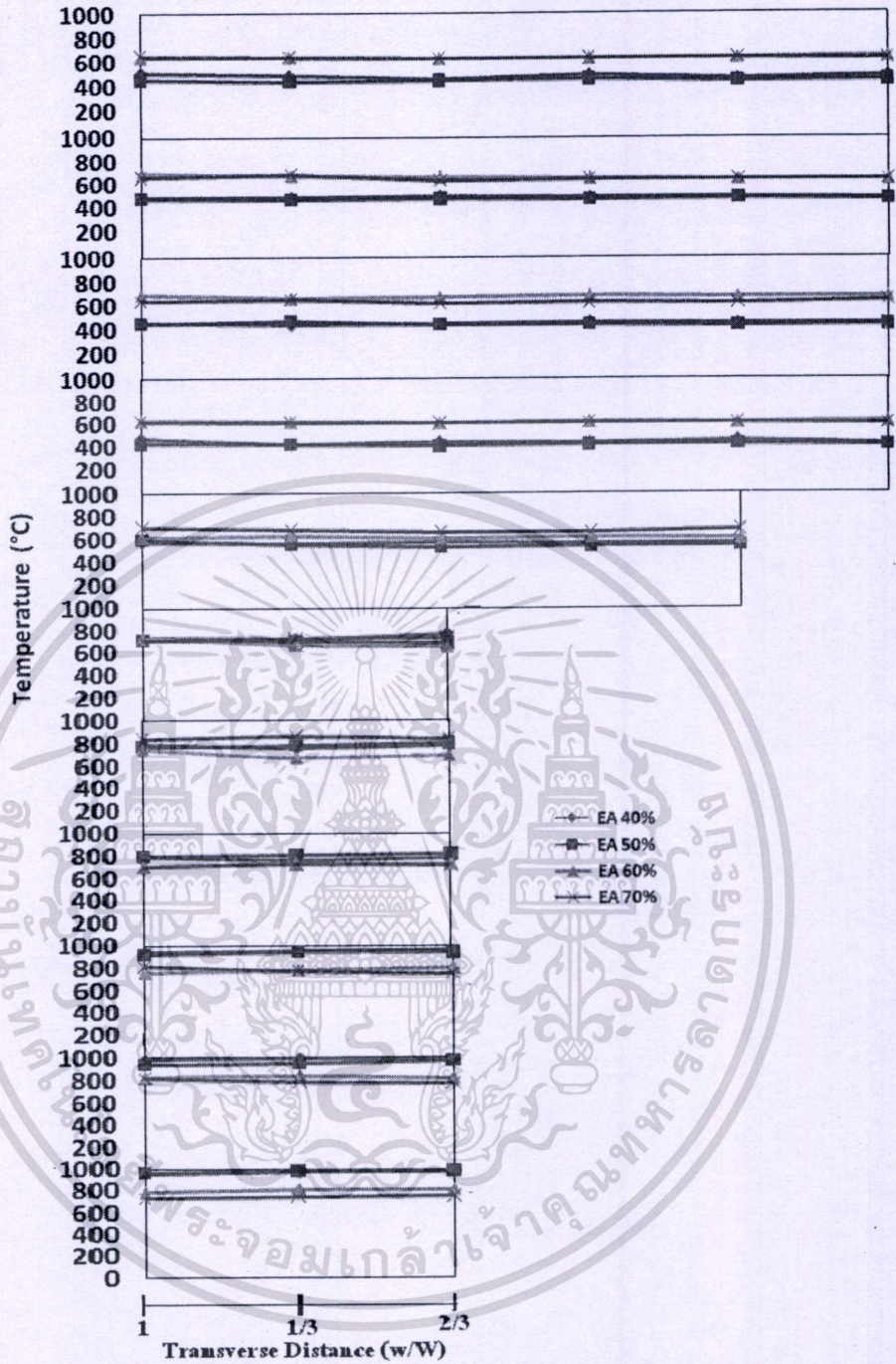
#### 6.2.4 เตาเผาแกลบฟลูอิดไคซ์เบดแบบผนังเตาเป็นแบบทรงสี่เหลี่ยมมีคิริบขวาง ฟริบอร์คใหญ่

จากการศึกษาถึงอิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงผนังของห้องเผาไหม้ โดยที่ในการทดลอง จะยังคงความสูงของแต่ละหอการทดลองไว้ที่ความสูงค่าเดียวกัน คือ 2400 mm ที่ขนาดของห้องเผาไหม้คือ กว้าง 300 mm หนา 100 mm และสูง 1100 mm และได้ทำการปรับเปลี่ยนขนาดของห้องเผาไหม้ที่บริเวณด้านล่าง โดยทำการติดตั้งชุดคิริบเข้าไป สำหรับคิริบที่ติดตั้งนั้นทำจากเหล็กฉากขนาด 40x40x4 mm ออกแบบให้ทำมุม 60 องศา กับแนวการไหล จำนวน 4 ชุด ติดตั้งที่ความสูงจากขอบล่างของห้องเผาไหม้ขึ้นมา 50 mm และระยะห่างของคิริบ 50 mm สำหรับกรณีนี้ คือ กรณีเตาเผาแกลบฟลูอิดไคซ์เบดแบบผนังเตาเป็นแบบมีคิริบขวางและในการทดลองนี้ได้ทำการทดลองเพื่อทำการเปรียบเทียบผลที่เกิดขึ้น โดยทำการทดลองที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิงค่าเดียวกัน คือ 8.64 kg/hr อากาศส่วนเกิน 40%, 50%, 60%, และ 70% ตามลำดับ จากการทดลอง ทำให้ทราบว่าเตาเผาแกลบฟลูอิดไคซ์เบดแบบผนังเตาเป็นแบบมีคิริบขวาง ฟริบอร์คใหญ่ จะส่งผลดีกว่าและมีความเสถียรมากกว่ากรณีผิวเรียบ ผลที่เกิดขึ้นนี้ก็มาจากการที่ได้ทำการติดตั้งคิริบเข้าไปโดยอาศัยผลของการเกิดการหมุนควง (Vortex) จึงช่วยเพื่อระยะเวลาที่เชื้อเพลิงอยู่ในห้องเผาไหม้ และระยะทางการเคลื่อนที่ของเชื้อเพลิงที่เป็นลักษณะหมุนควง จะช่วยเพิ่มการคลุกเคล้าของเชื้อเพลิงกับอากาศให้ดียิ่งขึ้น สำหรับผลของการกระจายอุณหภูมิตามแนวขวางและแนวแกนของ เตาเผาแกลบฟลูอิดไคซ์เบดแบบผนังเตาเป็นแบบมีคิริบขวาง (รูปที่ 6.18 และ 6.19) ยังคงมีลักษณะ

อุณหภูมิตามแนวแกนให้อุณหภูมิสูงสุดในห้องเผาไหม้ อุณหภูมิอาจเพิ่มขึ้นหรือลดลงตามความสูงของเตาเผาขึ้นอยู่กับอากาศส่วนเกินที่ถูกใช้ไปกับการเผาไหม้

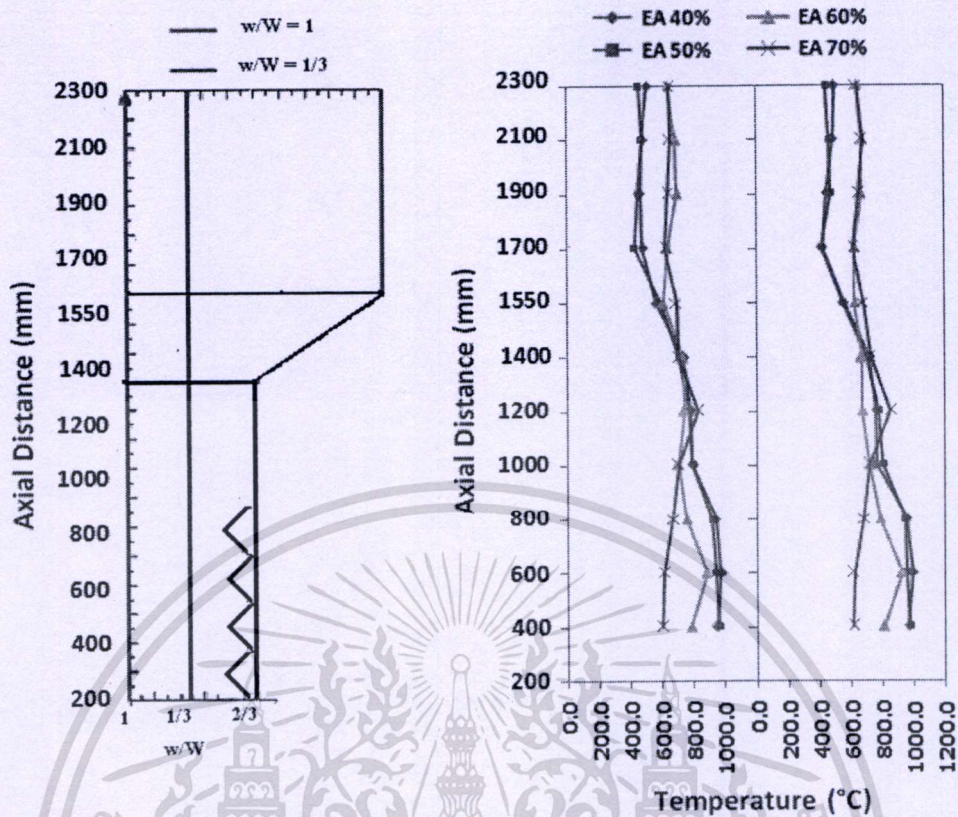
อิทธิพลจากการใช้อากาศส่วนเกิน ส่งผลต่อลักษณะและพฤติกรรมของการกระจายอุณหภูมิเหมือนกันกับเตาเผาแกลบลูอิโคซ์แบบผนังเรียบ เช่น การเพิ่มหรือลดลงของอุณหภูมิ อัตราการหลุดลอย เวลาที่จำเป็นสำหรับการเผาไหม้อนุภาคหรือสารระเหย อันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงอากาศส่วนเกิน ซึ่งจากวิเคราะห์ผลของกรณีเตาเผาแกลบลูอิโคซ์แบบผนังเรียบ ได้กล่าวถึงสาเหตุ 2-3 ประการ จากการเปลี่ยนแปลงค่าอากาศส่วนเกินที่มากเกินไป ความจำเป็นในตอนเริ่มต้นในการเผาไหม้ และความเร็วของอากาศที่กล่าวมาข้างต้น กล่าวคือ เมื่อใช้อากาศส่วนเกินต่ำ ทำให้ได้อุณหภูมิในห้องเผาไหม้สูง มีอัตราการเผาไหม้ในช่วงแรกสูง เนื่องจากครีบจะช่วยเพิ่มการปั่นป่วนภายในห้องเผาไหม้ และเมื่อเพิ่มอัตราอากาศส่วนเกินสูงขึ้น อุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้จะต่ำกว่า แต่จะมีความคงตัวของอุณหภูมิเมื่อเปรียบเทียบการกระจายอุณหภูมิตลอดแนวแกนของเตามากกว่ากรณีอื่น โดยมีค่าอุณหภูมิสูงสุดของห้องเผาไหม้อยู่ที่ประมาณ  $1000^{\circ}\text{C}$  ที่อากาศส่วนเกิน 40% และอุณหภูมิไอเสียทางออกสูงสุดอยู่ที่ประมาณ  $650^{\circ}\text{C}$  ที่อากาศส่วนเกิน 70% ใน





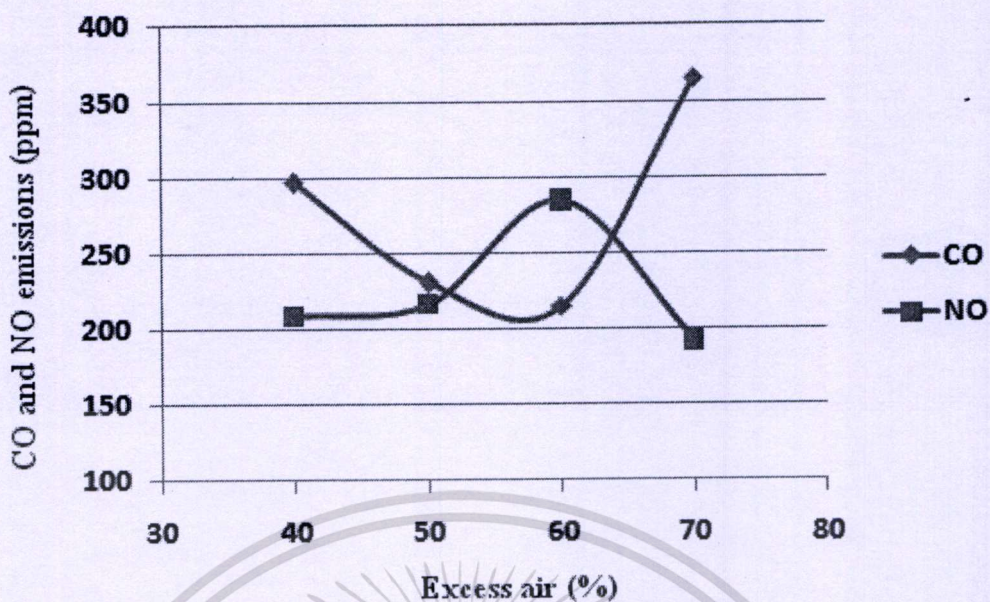
รูปที่ 6.18 การกระจายอุณหภูมิตามแนวขวางของเตาเผาฟลูอิดไคซ์แบบทรงสี่เหลี่ยมแบบมีกริบ  
 ขวาง ฟรีบอร์ดใหญ่ อัตราป้อน 8.64 kg/hr อากาศส่วนเกิน 40%, 50%, 60% และ 70%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

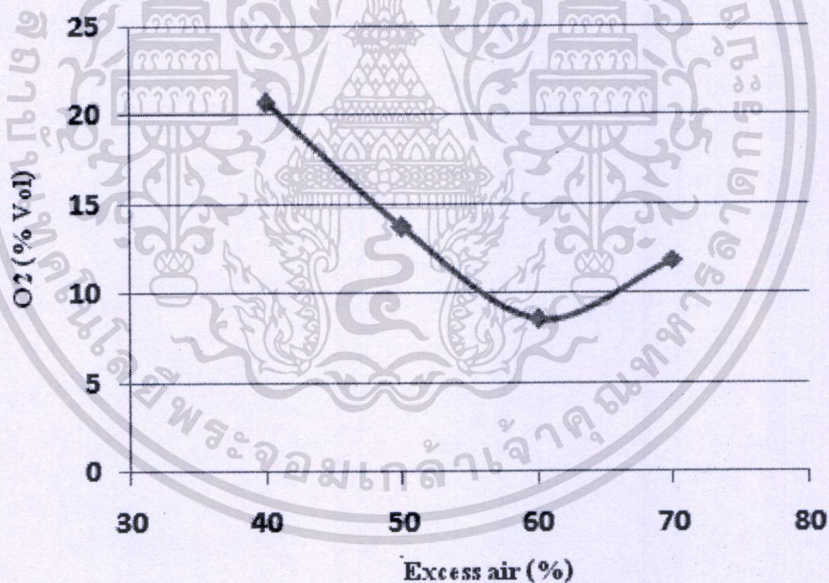


รูปที่ 6.19 การกระจายอุณหภูมิตามแนวแกนของเตาเผาฟลูอิดไคซ์เบดแบบทรงสี่เหลี่ยมแบบมีคิริบขวาง ปริมาณใหญ่ อัตราป้อน 8.64 kg/hr อากาศส่วนเกิน 40%, 50%, 60% และ 70%

การปล่อยมลพิษกรณีเตาเผาเคลือบฟลูอิดไคซ์เบดทรงสี่เหลี่ยมแบบมีคิริบขวาง เมื่อจัดวางคิริบขวางเข้าไปในห้องเผาใหม่จะการหมุนควงภายในห้องเผาใหม่ ช่วยเพิ่มการคลุกเคล้าของเชื้อเพลิงกับอากาศให้ดียิ่งขึ้น การปล่อย CO อยู่ระหว่าง 200-365 ppm และ ก๊าซ  $\text{NO}_x$  อยู่ระหว่าง 192-285 ppm และก๊าซ  $\text{O}_2$  อยู่ระหว่าง 8.55%-20.69% ประสิทธิภาพการเผาไหม้จะอยู่ระหว่าง 98.7%-99.5%

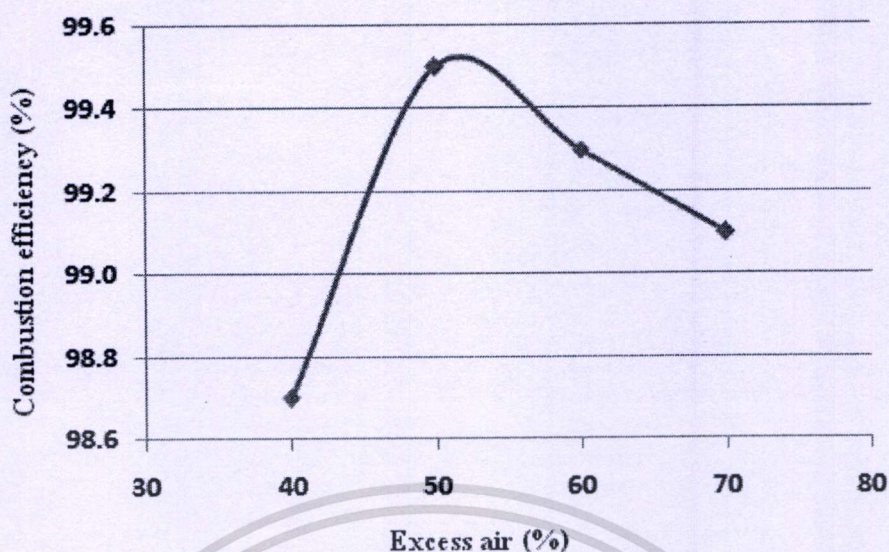


รูปที่ 6.20 ปริมาณของไอเสียที่ค่าอากาศส่วนเกินต่างๆ ของเตาเผาแกลบฟลูอิดไคซ์เบดทรงสี่เหลี่ยมแบบมีครีบขวาง ที่อัตราการป้อน 8.64 kg/hr



รูปที่ 6.21 ปริมาณของ O<sub>2</sub> ที่ค่าอากาศส่วนเกินต่างๆ ของเตาเผาแกลบฟลูอิดไคซ์เบดทรงสี่เหลี่ยมแบบมีครีบขวาง ที่อัตราการป้อน 8.64 kg/hr

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.22 ประสิทธิภาพการเผาไหม้ที่ค่าอากาศส่วนเกินต่างๆ ของเตาเผาเคลือบฟลูอิดโคईซ์เบดทรงสี่เหลี่ยมแบบมีครีบขวาง ที่อัตราการป้อน 8.64 kg/hr

#### 6.2.5 เปรียบเทียบแต่ละกรณีของเตาเผาฟลูอิดโคईซ์เบดชนิดต่างๆ

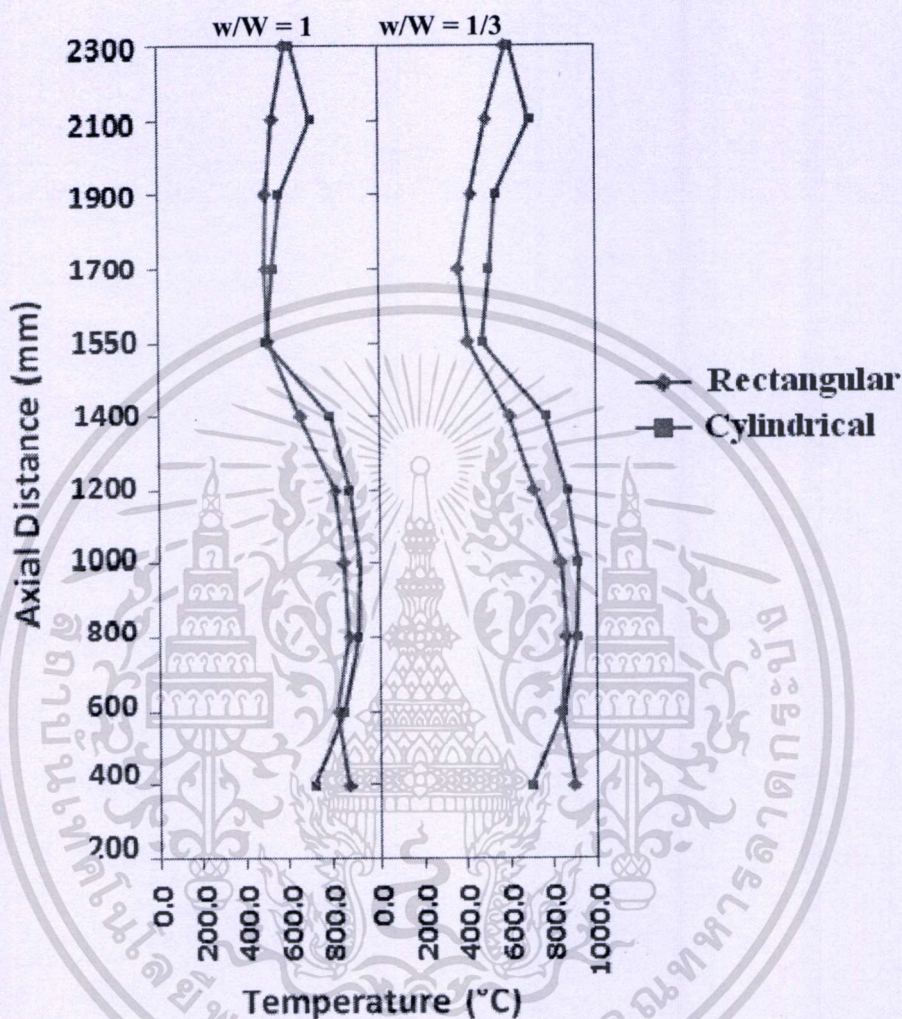
จากรูปที่ 6.23 และ 6.24 แสดงการกระจายอุณหภูมิของเตาเผาเคลือบฟลูอิดโคईซ์เบดทรงสี่เหลี่ยมและทรงกระบอก ที่อากาศส่วนเกิน 60% สังเกตได้ว่าค่าอุณหภูมิของเตาทั้งสองลักษณะมีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งถ้าเปรียบเทียบในด้านการถอดประกอบเตาเผาเคลือบฟลูอิดโคईซ์เบดทรงสี่เหลี่ยมจะสามารถถอดประกอบได้ง่ายกว่า

รูปที่ 6.25 และ 6.26 แสดงการกระจายอุณหภูมิของเตาเผาเคลือบฟลูอิดโคईซ์เบดทรงสี่เหลี่ยมผิวเรียบและแบบมีครีบขวาง ที่อากาศส่วนเกิน 60% พบว่าการกระจายอุณหภูมิของเตาเผาเคลือบฟลูอิดโคईซ์เบดทรงสี่เหลี่ยมแบบมีครีบขวางจะมีอุณหภูมิที่สูงกว่า โดยเฉพาะในช่วงฟรียบอร์ดและเมื่อสังเกตการกระจายอุณหภูมิตามแนวแกน จะมีการกระจายตัวที่ดีกว่าเตาเผาเคลือบฟลูอิดโคईซ์เบดทรงสี่เหลี่ยมผิวเรียบ เนื่องจากเมื่อทำการจัดวางครีบขวางไปในห้องเผาไหม้ จะทำให้เกิดการหมุนควงของเชื้อเพลิงภายในห้องเผาไหม้ จึงช่วยเพื่อระยะเวลาที่เชื้อเพลิงอยู่ในห้องเผาไหม้ จากระยะทางการเคลื่อนที่ของเชื้อเพลิงที่เป็นลักษณะหมุนควง และช่วยเพิ่มการคลุกเคล้าของเชื้อเพลิงกับอากาศให้ดียิ่งขึ้น

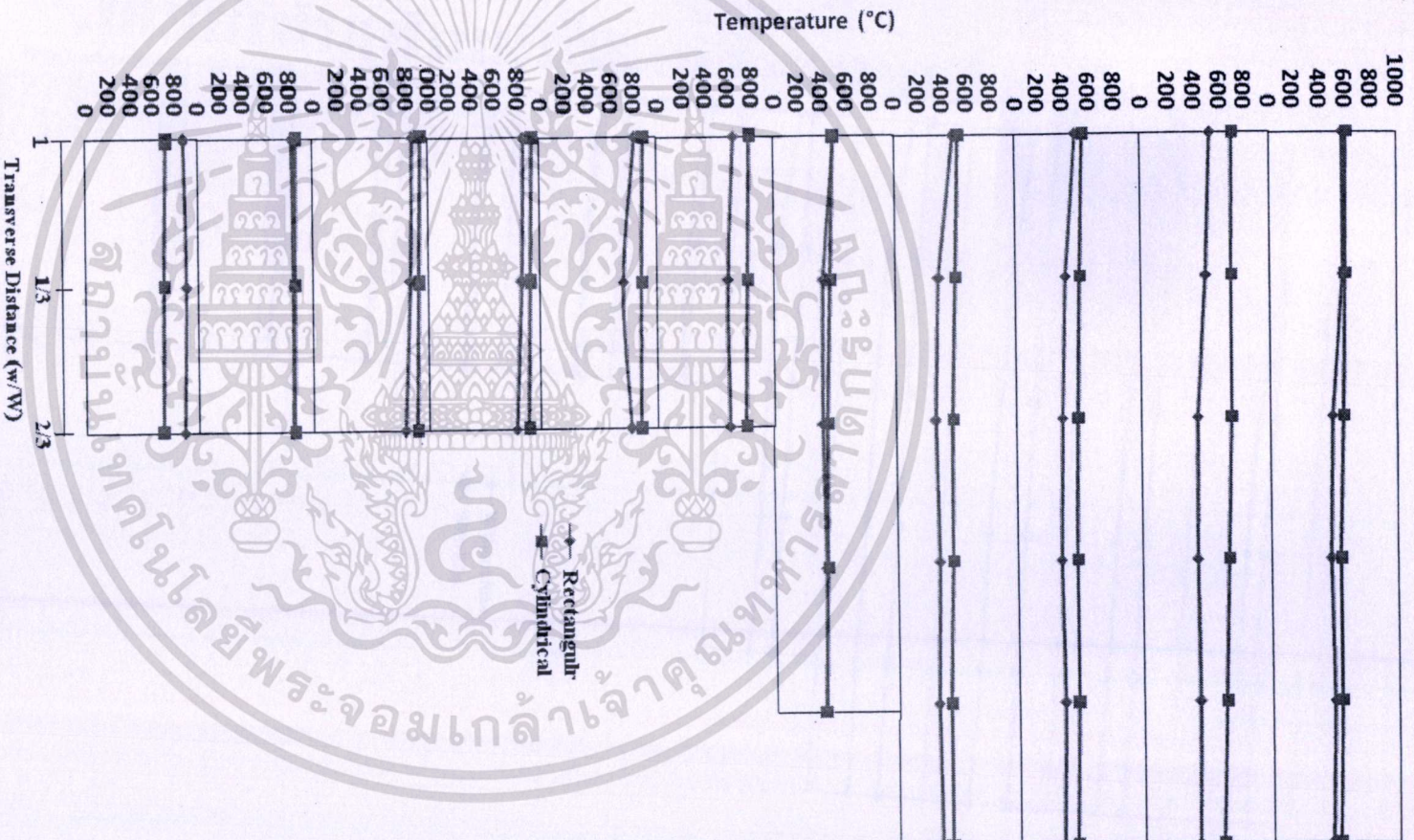
จากรูปที่ 6.27 และ 6.28 แสดงการกระจายการกระจายอุณหภูมิของเตาเผาเคลือบฟลูอิดโคईซ์เบด 4 ลักษณะ เตาทรงกระบอกจะมีค่าอุณหภูมิสูงสุดใกล้เคียงกับเตาเผาทรงสี่เหลี่ยม ที่อากาศส่วนเกิน 60% สังเกตได้ว่ามีการกระจายอุณหภูมิตามแนวแกนของเตาเผาทรงสี่เหลี่ยม มีครีบขวาง จะมีการกระจายที่เสถียรกว่ากรณีอื่นๆ เนื่องจากเมื่อจัดตั้งครีบขวางไปในห้องเผาไหม้ จะทำให้เกิดการหมุนควงของเชื้อเพลิงภายในห้องเผาไหม้ จึงช่วยเพื่อระยะเวลาที่เชื้อเพลิงอยู่ในห้องเผา

ไหม้ จากระยะทางการเคลื่อนที่ของเชื้อเพลิงที่เป็นลักษณะหมุนควง และช่วยเพิ่มการคลุกเคล้าของเชื้อเพลิงกับอากาศให้ดียิ่งขึ้น เกิดกระบวนการเผาไหม้อย่างต่อเนื่องจนถึงช่วงฟรียบอร์ดทำให้ไม่วักรณใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งหมันเม็ดดินแบลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

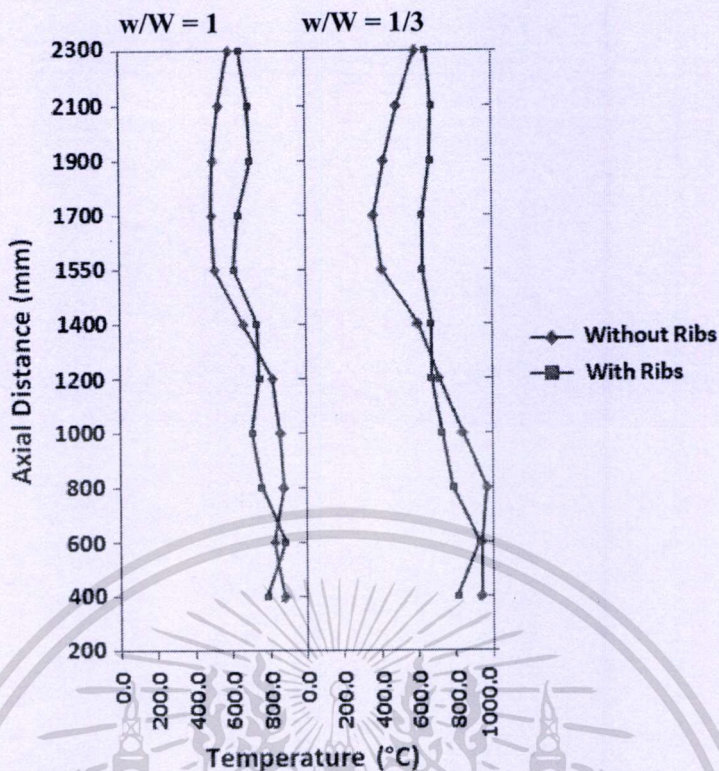
มีการกระจายตัวของอุณหภูมิตามแนวแกนมีความเสถียรมากกว่ากรณีอื่นๆ และการกระจายตัวตามแนวขวางของเตาเผาที่มีฟริบอร์คใหญ่ จะมีการกระจายอุณหภูมิที่ราบเรียบ และสม่ำเสมอ โดยเฉพาะในช่วงฟริบอร์ค



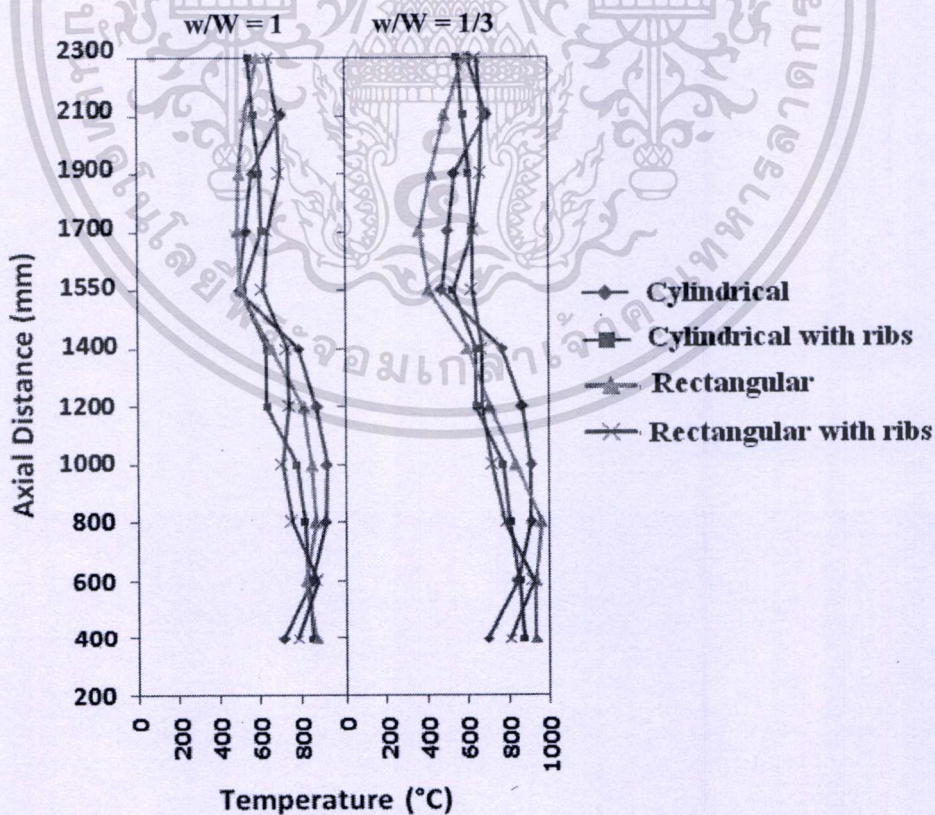
รูปที่ 6.23 เปรียบเทียบผลของการกระจายอุณหภูมิตามแนวแกนของเตาเผาเคลือบฟลูอิโดซ์เบด ทรงสี่เหลี่ยมและทรงกลม ที่อากาศส่วนเกิน 60%



รูปที่ 6.24 เปรียบเทียบผลของการกระจายอุณหภูมิตามแนวรัศมีและแนวขวางของตาเผาแบบ  
 ฟลูอิดเซดทรานส์เฟอร์ที่เปลี่ยน ที่อากาศส่วนเกิน 60%



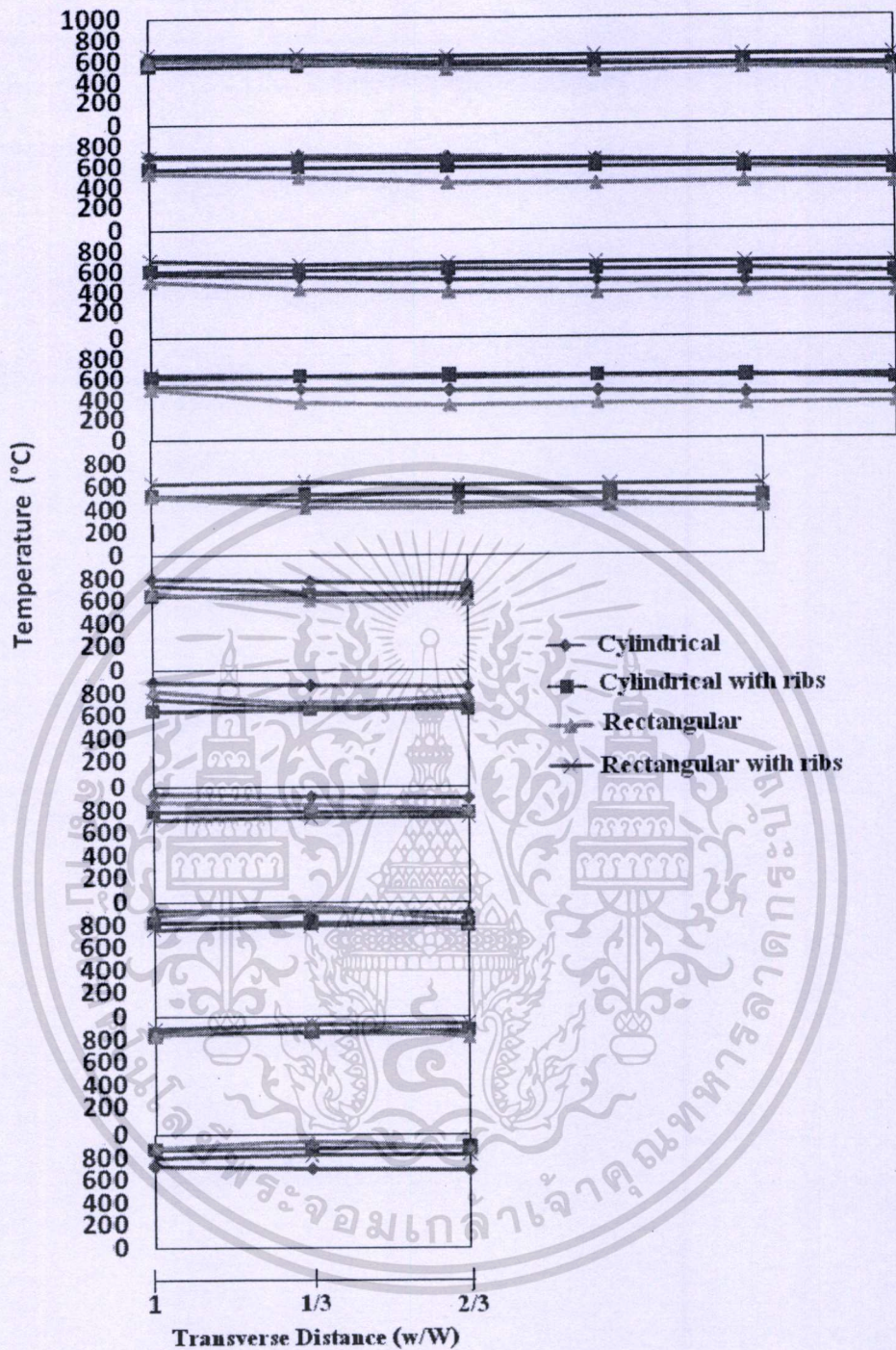
รูปที่ 6.26 เปรียบเทียบผลของการกระจายอุณหภูมิตามแนวแกนของเตาเผาเคลือบฟลูอิดซ์เบด ทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าเรียบกับมีค้ำขวาง ที่อากาศส่วนเกิน 60%



รูปที่ 6.27 เปรียบเทียบผลของการกระจายอุณหภูมิตามแนวแกนของเตาเผาเคลือบฟลูอิดซ์เบด 4

เอกสารนี้สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับอาจารย์ใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.28 เปรียบเทียบผลของการกระจายอุณหภูมิตามแนวรัศมีและแนวขวางของเตาเผาเกลบฟลูอิดไคซ์เบด 4 ลักษณะที่อากาศส่วนเกิน 60%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 7

# สรุปและข้อเสนอแนะ

### 7.1 สรุปผล

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาดังอิทธิพลของเตาเผาฟลูอิดไคซ์เบคที่มีลักษณะของห้องเผาไหม้ที่ต่างชนิดกัน การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงแข็งจำเป็นต้องมีปริมาณเปอร์เซ็นต์ของอากาศส่วนเกินในปริมาณที่มาก ดังนั้นในการทดลองนี้จึงทำการศึกษาที่ค่าเปอร์เซ็นต์ของอากาศส่วนเกิน 40%, 50%, 60%, และ 70% ตามลำดับ ซึ่งจากผลการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้

1. เตาเผาฟลูอิดไคซ์เบคทรงสี่เหลี่ยมและทรงกระบอกมีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งถ้าเปรียบเทียบในด้านการถอดประกอบเตาเผาเกลบฟลูอิดไคซ์เบคทรงเหลี่ยมจะสามารถถอดประกอบได้ง่ายกว่า
2. การติดตั้งผิวคลื่นที่ผนังเตาแบบสี่เหลี่ยมมีครีบบางผิวคลื่นด้านล่างจะช่วยให้การเผาไหม้มีความเหมาะสมและมีความเสถียรตามแนวความสูงกว่ากรณีอื่นๆ อุณหภูมิไอเสียมีค่าอยู่ระหว่าง 450 - 650°C, อุณหภูมิสูงสุดของห้องเผาไหม้อยู่ที่ 1000 °C ปริมาณของการปล่อยก๊าซ CO อยู่ระหว่าง 215 – 365 ppm., ก๊าซ NO อยู่ระหว่าง 193 – 286 ppm., ประสิทธิภาพการเผาไหม้ (Effm) อยู่ระหว่าง 98.7 – 99.5% เมื่อสังเกตการกระจายตัวตามแนวแกนเตาเผาฟลูอิดไคซ์เบคทรงสี่เหลี่ยมจะมีความเสถียรมากกว่าเตาเผาฟลูอิดไคซ์เบคทรงกระบอก และสามารถถอด ประกอบได้ง่ายกว่าเตาเผาฟลูอิดไคซ์เบคทรงกระบอก
3. การปรับเปลี่ยนผนังและรูปทรงของห้องเผาไหม้ กรณีของภาทรงสี่เหลี่ยม มีครีบบางส่งผลดีต่อการเผาไหม้ ทำให้เกิดการหมุนวน (Vortex) ได้ด้วยตัวเองภายในห้องเผาไหม้ ส่งผลดีต่อการเผาไหม้การกระจายอุณหภูมิตามแนวรัศมีมีค่าสม่ำเสมอตลอดหน้าตัด ทุกความสูงของเตาเผาที่ได้ทำการวัด และ ฟรีบอร์ดใหญ่ช่วยทำให้ระยะเวลาการเผาไหม้นานขึ้น จึงทำให้มีประสิทธิภาพดีขึ้น

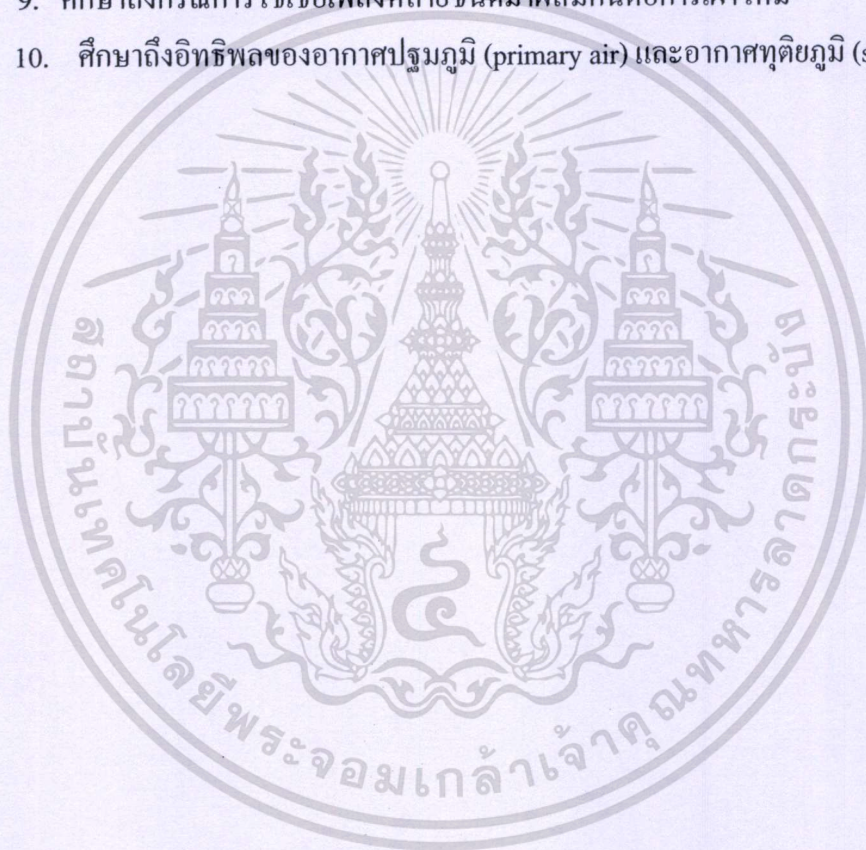
### 7.2 ข้อเสนอแนะ

เนื่องจากเตาเผาฟลูอิดไคซ์เบคทำการศึกษาดังอิทธิพลของ เตาเผาฟลูอิดไคซ์เบคที่มีลักษณะของห้องเผาไหม้ที่ต่างชนิดกัน ซึ่งการทดลองได้มุ่งเน้นไปที่การศึกษาดังการกระจายอุณหภูมิที่มีความราบเรียบสม่ำเสมอตลอดทั้งหน้าตัด, ผลของมลพิษที่เกิดขึ้น, ฉะนั้นควรจะมีการศึกษาถึงตัวแปรอื่น ๆ เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการออกแบบให้ได้เตาเผาฟลูอิดไคซ์เบคที่มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

1. ศึกษาถึงอิทธิพลของขนาดและความสูงของเตาเผาฟลูอิดไคซ์เบคติดครีบบที่ฟรีบอร์ด

เอกสารนี้เป็นเอกสาร 2. ศึกษาถึงขนาดผิวคลื่นขนาดต่างๆและระยะพิตซ์เมื่ออนุญาตให้เข้าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ทำการวัดปริมาณมลพิษที่ตำแหน่งต่าง ๆ ภายในเตาเผา
4. ศึกษาถึงลักษณะของแผ่นกระจายลมแบบต่าง ๆ ว่ามีผลอย่างไรต่อการเผาไหม้
5. ศึกษาถึงการใช้อุปกรณ์ชีวมวลชนิดอื่น ๆ เช่น ชังข้าวโพด, ขี้เลื่อย, ขานอ้อย, เปลือกถั่วลิสง กับเตาเผาฟลูอิดไคซ์เบดแบบเคลื่อนล่าง
6. ศึกษาถึงการใช้อุณหภูมิแบบหลายชนิด เช่น ทราบ, ลูกเหล็กและลูกแก้ว เป็นต้น
7. ทำการศึกษาถึงผลของความสูงของวัสดุทำเบด
8. นำความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ไปใช้ให้เกิดประโยชน์มากกว่านี้ เช่นนำไปอบแห้งเมล็ดพืชหรือผลิตผลทางการเกษตร
9. ศึกษาถึงกรณีการใช้อุปกรณ์หลายชนิดมาผสมกันต่อการเผาไหม้
10. ศึกษาถึงอิทธิพลของอากาศปฐมภูมิ (primary air) และอากาศทุติยภูมิ (secondary air)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



- [12] Wan H., and Chyang. C.S., "**Transport Disengaging Height and Elutriation Rate of a Vortexing Fluidized Bed**" Journal of Chemical Engineering of Japan", Vol.31, No. 6 pp. 977 – 986. , 1998.
- [13] Nieh, S. and Fu, T.T., "**Development of a Non-slugging Vortex Combustor (VC) for Space/Water Heating Application.**" Proceeding of The 5<sup>th</sup> International Coal Conference. Pittsburgh : 761-768.,1988.
- [14] Nieh, S. and Fu, T.T., "**A Non-slugging Vortex Combustor Firing Coal-Water Fuel For Commercial Heating Application.**" Proceeding of The 7<sup>th</sup> International Coal Conference., Pittsburgh : 223.,1990.
- [15] Promvongse, P. and Silapabanleng, K. "**Experimental Study of Combustion Characteristics in a Rice Husk Fired Vortex Combustor.**" Proceedings of the 36<sup>th</sup> Intersociety Energy Conversion Engineering Conference, Georgia: 2001-RE-17., 2001.
- [16] Billoud, G. Galland, M. Huynh, C. and Candel, S.M., "**Adaptive Active Control of Combustion Instabilities.**" Combustion Science and Technology. 81 : 257-283.,1992.
- [17] McManus, K.R. Poinso, T. and Candel, S.M., "**A Review of Active Control of Combustion Instabilities.**" Progress in Energy and Combustion Science.19 : 1-29., 1993.
- [18] Zhou, L.X. Li, Y., Chen, T. Xu, Y., "**Studies on the effect of Swirl Numbers on Strongly Swirling Turbulent Gas-Particle Flows Using a Phase-Doppler Particle Anemometer.**" Powder Technology. 112 : 79-86.,2000.
- [19] Permchart, W. Kouprianov, V.I. and Tantimuratha, L., "**Experimental Study on a conical Fluidized Bed Combustor Firing Rice Husk.**" 2<sup>nd</sup>. Regional Conference on Energy Technology Toward a Clean Environment., 2003
- [20] Wylen, V. Sonntag, E. and Borgnakke, C., **Founamental of Classical Thermodynamics.**, Fourth edition. USA: John Wiley & Sons, Inc
- [21] L. Armesto , A. Bahillo , K. Veijonen , A.Cabanillas , and J. Otero, "**Combustion behaviour of rice husk in a bubbling fluidised bed**" Biomass and Bioenergy, Volume23, Issue 3, Pages 171-179, September 2002
- [22] Stephen R., Turns, **An Introduction to Combustion (Concepts And Applications).** McGraw–Hill International Editions, pp. 19. , 1996.

- [23] Weizhang, W., “**Fluidized Bed Combustion of Rice Husk for Energy and Pozzolana.**”  
A Thesis submitted in partial fulfillment of the requirement of the requirements of the degree of master of Engineering. Asian Institute of technology.
- [24] Wylen, V., Sonntag, E. and Borgnakke, C. “**Fundamental of Classical Thermodynamics.**” Fourth edition. USA : John Wiley & Sons, Inc., 1993
- [25] Daizo K., Octave L., **Fluidization Engineering.** Butterworth-Heinemann. Second Editions,1991.
- [26] CHN-900/CHNS-932 **Instruction Manual**, Version 2.2 ,Leco Corporation,1998



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ก.

คุณสมบัติของเชื้อเพลิงแกลบ (Rice Husk)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 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 มีความหนาแน่นไม่มาก เป็นผลให้การขนส่งมีราคาแพง ปัจจุบันการใช้แกลบเป็นพลังงานอยู่ในวงจำกัดปริมาณการใช้แกลบน้อย โดยที่แกลบอาจนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงได้หลายวิธี เช่น ใช้เป็นเชื้อเพลิงโดยตรงในเตาเผา เพื่อผลิตความร้อนให้หม้อน้ำเพื่อผลิตไฟฟ้า ใช้ผลิตแก๊สเพื่อใช้กับเครื่องยนต์ ทำเป็นเชื้อเพลิงอัดแท่งใช้แทนฟืนและใช้อบ โดยวิธีไพโรไลซิส (Pyrolysis) เพื่อใช้แทนถ่าน เป็นต้น

### คุณสมบัติทางกายภาพ

แกลบมีคุณสมบัติทางด้านการเป็นเชื้อเพลิงได้เป็นอย่างดีพอสมควร แต่จะมีข้อเสีย คือ เมื่อทำการเผาไหม้แกลบจะมีปริมาณสูงถึงประมาณร้อยละ 15.8-24.9 ค่าความร้อนของแกลบจะอยู่ระหว่าง 2900-4580 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม ค่าความชื้น โดยประมาณ 1.1-9.8 % กิโลกรัม

ตารางที่ ก.1 ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงชนิดต่างๆ

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

ตารางที่ ก-2 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
Analysis	Hydrogen	(%)	0.2-5.31
	Oxygen	(%)	29.9-31.7
	Sulphur	(%)	0.07-0.12

ตารางที่ ก-3 การเปรียบเทียบเชื้อเพลิง

	เชื้อเพลิงแข็ง	เชื้อเพลิงเหลว	แก๊สเชื้อเพลิง
การขนส่ง	- ขนส่งง่ายแต่ลำบากในการขนย้าย	- ขนส่งง่ายและขนย้ายง่าย	- แก๊สธรรมชาติขนส่งและขนย้ายง่าย
การเก็บ	- ต้องใช้พื้นที่กว้าง	- ต้องใช้ถัง	- ต้องบรรจุในภาชนะพิเศษ
คุณสมบัติ	- คุณภาพเปลี่ยนแปลงไม่แน่นอน - ค่าความร้อนต่อหน่วยต่ำ - จี๊ไธ้มาก - ประสิทธิภาพในการสันดาปต่ำ - ต้องการอากาศส่วนเกินในการเผาไหม้เป็นจำนวนมาก - มีความยุ่งยากในการใช้ระบบ	- คุณภาพค่อนข้างคงที่ - ค่าความร้อนต่อหน่วยน้ำหนักสูง - ประสิทธิภาพในการเผาไหม้สูง - ต้องการอากาศในการเผาไหม้น้อย - ใช้ระบบควบคุมอัตโนมัติได้ง่าย	- คุณภาพคงที่ - ค่าความร้อนต่อหน่วยน้ำหนักมีค่าสูง - ไม่มีจี๊ไธ้มาก - ประสิทธิภาพในการเผาไหม้สูงที่สุด - ต้องการอากาศส่วนเกินจำนวนน้อยมาก - ใช้ระบบควบคุมอัตโนมัติได้ง่าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	ควบคุมอัตโนมัติ		
อุปกรณ์สันดาป	- ขนาดเล็กไม่ ซับซ้อน	- ขนาดเล็ก	- ขนาดค่อนข้างใหญ่
มลภาวะ	- จำเป็นต้องมีการ ป้องกันการเกิด มลภาวะต่อ บรรยากาศ	- จำเป็นต้องมีการ ป้องกันการเกิด มลภาวะต่อ บรรยากาศ	- มีผลกระทบต่อ การเกิดมลภาวะของ บรรยากาศน้อย
ราคา	- ถูก	- ค่อนข้างแพง	- แพงที่สุดต่อความ ร้อน 1 หน่วย

ตารางที่ ก-4 แสดงรายละเอียดพื้นที่ปลูก ผลผลิตพืชหลัก และ ไม้ยางพารา ปี 2543/2544 และ 2544/2545

(หน่วย: พันไร่ / พันตัน)

ชนิด	2543/44		2544/45	
	พื้นที่เก็บเกี่ยว	ผลผลิต	พื้นที่เก็บเกี่ยว	ผลผลิต
อ้อย	5,421	49,070	6,320	60,013
ข้าว	65,640	25,608	63,283	26,514
น้ำมันปาล์ม	1,303	3,256	1,456	4,089
ข้าวโพด	7,551	4,397	7,474	4,466
มันสำปะหลัง	7,068	19,064	6,176	16,868
สับปะรด	608	2,287	552	1,987
ไม้ยางพารา	11,558	2,378	11,590	2,424

ที่มา: สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร 2544/2545

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก-5 ศักยภาพชีวมวลในประเทศไทยปี 2544/2545

ชนิด	ผลผลิต (10 <sup>6</sup> kg)	วัสดุเหลือ ใช้	ปริมาณ วัสดุ เหลือใช้ (10 <sup>6</sup> kg)	ค่าความร้อน (MJ/kg)	พลังงาน (TJ)	เทียบเท่า น้ำมันดิบ (MT)	กำลังไฟฟ้า (MW)
อ้อย	60013.00	ชานอ้อย	3,615.00	14.40	52,056.04	1.23	764.21
		ยอดและใบ	17,870.19	17.39	310,762.62	7.36	4,105.92
ข้าว	26514.00	แกลบ	3,006.42	14.27	42,901.65	1.02	566.83
		ฟางข้าว	8,106.60	10.24	83,011.61	1.97	1,096.78
น้ำมันปาล์ม	4089.00	ทะลาย ปาล์ม	1,022.05	17.86	18,253.88	0.43	241.18
		เส้นใย	80.55	17.62	1,419.21	0.03	18.75
		กะลา	7.41	18.46	136.85	0.00	1.81
		ก้านทาง	10,647.76	9.83	104,667.44	2.48	1,382.91
		ทะลายตัวผู้	952.74	16.33	15,558.20	0.37	205.56
มะพร้าว	1396.00	เปลือก	300.68	16.23	4,880.11	0.12	64.48
		กะลา	84.43	17.93	1,513.83	0.04	20.00
		ทะลาย	57.66	15.40	888.03	0.02	11.73
		ทาง	254.11	16.00	4,065.71	0.10	53.72
มัน สำปะหลัง	16868.00	ต้น	604.14	18.42	11,128.34	0.26	147.03
ข้าวโพด	4466.00	ชัง	816.88	18.04	14,736.44	0.35	194.71
ถั่วลิสง	129.00	เปลือก	41.67	12.66	527.50	0.01	6.97
ฝ้าย	36.00	ลำต้น	116.35	14.49	1,685.94	0.04	22.27
ถั่วเหลือง	292.00	ลำต้นและ ใบ	590.97	19.44	11,488.51	0.27	151.79
ข้าวฟ่าง	145.00	ใบและต้น	117.64	19.23	2,262.18	0.05	45.14
เศษไม้	10268.00	กิ่งก้าน	2,669.68	14.98	39,991.81	0.95	528.39
<b>รวมวัสดุ</b>			<b>48,293.26</b>				

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานที่ไม่ใช่การค้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เหลือใช้							
รวมพลังงาน ทั้งหมด					721,935.91	17.10	9,630.18

ตารางที่ ก-6 ปริมาณการใช้ชีวมวลโดยเฉลี่ยต่อโรง

ชีวมวล	ปี พ.ศ.			
	ตะวันออกเฉียงเหนือ	เหนือ	กลาง	ใต้
ไม้ฟัน	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	-	-	-	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

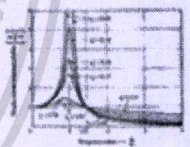
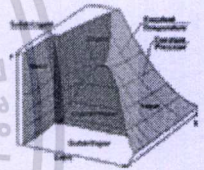
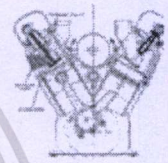
ME NETT  
21<sup>st</sup>

# การประชุมวิชาการ

เครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 21

วันที่ 17 - 19 ตุลาคม 2550

ณ โรงแรมเวลคัม จอมเทียน บีช จ.ชลบุรี

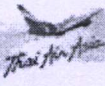


ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล กองวิศวกรรมศาสตร์

กองการศึกษา โรงเรียนนายเรืออากาศ



ผู้สนับสนุนหลัก



ผู้ร่วมสนับสนุน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การศึกษาพฤติกรรมการเผาไหม้ชีวมวลในเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดแบบ

## หมุนเวียน

FLUIDIZED BIOMASS COMBUSTION BEHAVIORS IN A CIRCULATING-  
BED

ฐิติวัฒน์ ผุนลาวงษ์ พงษ์ศักดิ์ คำมูล พงษ์เจต พรหมวงค์

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ถนน ฉลองกรุง เขต ลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520

โทรศัพท์ 0-2326-4197 โทรสาร 0-2326-4198 E-mail: [kppongje@kmitl.ac.th](mailto:kppongje@kmitl.ac.th)

Thitiwat Phunlawong Pongsak Kummul Pongjet Promvong

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering,

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520

Tel: 0-2326-4197, Fax: 0-2326-4198 E-mail: [kppongje@kmitl.ac.th](mailto:kppongje@kmitl.ac.th)

## บทคัดย่อ

บทความนี้ ได้นำเสนอถึงการศึกษาในเชิงทดลองเกี่ยวกับพฤติกรรม การเผาไหม้ในเตาเผาแบบฟลูอิดไดซ์เบดและการศึกษาถึงอิทธิพลของผนังเตาเผาที่เป็นแบบผิวเรียบ และฟรีบอร์ดใหญ่โดยนำไซโคลนใส่ไว้ด้านในกรณีของการทดลองได้ทำการทดลองที่อัตราการไหลเชิงมวลของแกลบที่ 6-12 kg/hr โดยทำการปรับเปอร์เซ็นต์ของอากาศส่วนเกิน 3 ค่า คือ 20%, 40% และ 60% โดยทำการวัด และสังเกตการกระจายอุณหภูมิในตำแหน่งต่างๆภายในเตา, ชี้อัด, คิวน์ที่ออกมาพร้อมกับไอเสีย จากการทดลองอัตราการไหลเชิงมวลของแกลบที่ 9 kg/hr และอากาศส่วนเกินที่ 60% มีการเผาไหม้ดีที่สุด หลังจากนั้นทำการปรับที่อุณหภูมิหลัก 3 ค่า คือ 50%, 40% และ 30% ของอากาศทั้งหมด ตามลำดับ จากการทดลองพบว่าที่อากาศ 40% มีการเผาไหม้ดีที่สุด ซึ่งจะมีอุณหภูมิไอเสียระหว่าง 700-750°C ส่วนอุณหภูมิในห้องเผาไหม้อยู่ที่ 950°C จากการวิเคราะห์ก๊าซไอเสียปริมาณของก๊าซ CO อยู่ระหว่าง 100-300 ppm ก๊าซ NO อยู่ระหว่าง 100-300 ppm และประสิทธิภาพการเผาไหม้อยู่ระหว่าง 97-99%

## ABSTRACT

This paper presents an experimental study of a fluidized-bed on rice husk combustion characteristics. The experiments were made of the fluidized bed with a large freeboard having a cyclone

inside. It was tested for the mass flow rates of rice husk ranging from 6-12 kg/hr and for percent excess air of 20%, 40% and 60%. Temperature distributions inside the bed were measured at selected locations and fly ash, smoke and exhaust gas emissions were observed and measured by a gas analyzer. Optimum test run was found at the excess air of 60% and mass flow rates of rice husk of 9 kg/hr. Varying primary air at 50%, 40% and 30% of total air was also studied. From experimental results, maximum flue gas temperatures for each beds are found between 700 and 750°C and the maximum temperature in the combustor is about 950°C for the case 40%. From exhaust gas emission measurements, it is found that CO is in a range of 100-300 ppm, NO between 100 and 300 ppm and combustion efficiency ranging from 97% to 99%

## 1. บทนำ

ในการที่จะนำแกลบมาเป็นแหล่งเชื้อเพลิง ในการผลิตพลังงานความร้อน จำเป็นที่จะต้องหาเทคโนโลยีหรือเทคนิคมาประยุกต์ใช้ในการออกแบบสร้างเตาเผา อาทิ เช่น เตาเผาไซโคลน, เตาเผาฟลูอิดไดซ์เบด, เตาเผาเวอร์เทค[7], [9], [11] เป็นต้น ในที่นี้จะให้ความสำคัญกับเทคโนโลยีฟลูอิดไดซ์เบด แต่เนื่องด้วยแกลบจัดเป็น

เชื้อเพลิงแข็งที่เบามากหากจะใช้เทคโนโลยีฟลูอิดไดซ์เบด ซึ่งจากการศึกษา พบว่า วิธีการของฟลูอิดไดซ์เบดนั้นต้องการห้องเผาไหม้ (ฟรีบอร์ด) ที่สูงมาก เพื่อลดอัตราการหลุดลอยของอนุภาคเชื้อเพลิงและทำให้อนุภาคอยู่ในห้องเผาไหม้นานขึ้น

จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า เตาเผาแลกเปลี่ยนฟลูอิดไดซ์เบดที่ใช้โดยทั่วไปจะเป็นห้องเผาไหม้แบบทรงกระบอก ผิวเรียบขนาดใหญ่และมีความสูงมาก[2], [4-6] ซึ่งหากจะนำเตาเผาแลกเปลี่ยนฟลูอิดไดซ์เบดที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมมาประยุกต์ใช้กับอุตสาหกรรมภายในครัวเรือนควรให้มีขนาดเล็กและมีเสถียรภาพทางอุณหภูมิที่ดีด้วย

ดังนั้น จึงเกิดแนวความคิดที่จะนำเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดแบบผิวเรียบ มีฟรีบอร์ดใหญ่[1] และเพิ่มการติดไซโคลนใส่เข้าไปด้านใน เข้ามาใช้ในการเผาไหม้เชื้อเพลิงแกลบ ซึ่งสามารถทำให้การคลุกเคล้าของเชื้อเพลิงแกลบกับอากาศ และระยะเวลาที่เชื้อเพลิงอยู่ในห้องเผาไหม้นานขึ้น สามารถที่จะทำให้ห้องเผาไหม้มีขนาดเล็กและสั้นลงได้

## 2. วัตถุประสงค์

จากแนวคิดดังกล่าวจึงได้ทำการศึกษาและพัฒนาเตาเผาแลกเปลี่ยนฟลูอิดไดซ์เบด และทำการศึกษาถึงอิทธิพลของหอตลอดที่มีผลต่อลักษณะการเผาไหม้ อีกทั้งศึกษาถึงอิทธิพลของเตาเผาลักษณะต่าง ๆ ต่อการกระจายอุณหภูมิในตำแหน่งต่าง ๆ ภายในเตา, ชี้อากาศออกมากับก๊าซไอเสีย และศึกษาถึงผลของการปรับเปลี่ยนลมที่เข้าตรงตามแนวแกน (ลมหลัก) และลมแนวเข้าตามแนวผิวท่อ (ลมรอง) โดยใช้เตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดแบบมีฟรีบอร์ดใหญ่และใส่ไซโคลนด้านใน เข้ามาใช้ในการเผาไหม้เชื้อเพลิงแกลบ ทำให้สามารถลดความสูงของห้องเผาไหม้ได้ ไม่เกิดการแยกชั้นของการไหลของอนุภาค ช่วยให้เชื้อเพลิงสามารถอยู่ภายในห้องเผาไหม้นานขึ้น ทำให้มีเวลาเพียงพอในการทำปฏิกิริยา

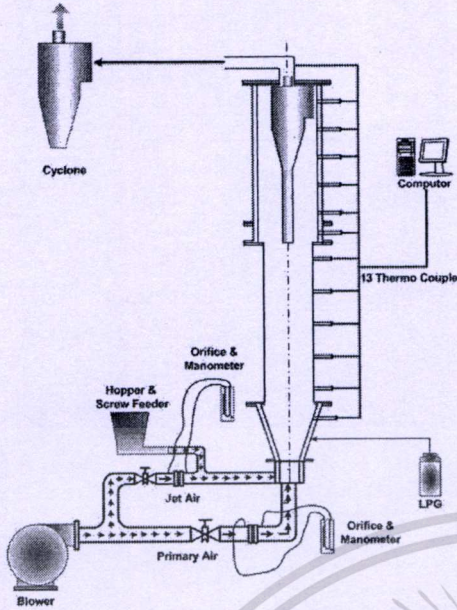
## 3. ขอบเขตของงานวิจัย

1. ทดลองเผาไหม้แกลบในเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดแบบมีฟรีบอร์ดใหญ่ และมีไซโคลนด้านใน
2. เชื้อเพลิงแกลบที่ใช้ในการทดลองเป็นแกลบขนาดปกติ (ประมาณ 2 mm x 8 mm)
3. ใช้อากาศส่วนเกิน 20%, 40% และ 60% ของอัตราส่วนผสมของอากาศแบบพอดี อัตราการป้อนของเชื้อเพลิงแกลบอยู่ระหว่าง 6 - 12 kg/hr
4. ทำการศึกษาถึงผลกระทบ ของการปรับเปลี่ยนลมที่เข้าตรงตามแนวแกน (ลมหลัก) เป็น 50%, 40% และ 30% จากลมที่เข้า

5. ทำการวัดการกระจายอุณหภูมิภายใน ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ในแนวแกนที่กำหนดไว้ของเตาเผา 11 ตำแหน่ง การกระจายอุณหภูมิในแนวรัศมี 5 ตำแหน่ง อุณหภูมิห้องผสม 1 ตำแหน่ง อุณหภูมิไอเสีย 1 ตำแหน่ง
6. วิเคราะห์ก๊าซไอเสียที่เกิดขึ้น และ ชี้อากาศเนื่องจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงของเตาเผา

## 4. อุปกรณ์และวิธีการ

เตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดมีขนาดความสูงห้องเผาไหม้ 2100 mm เส้นผ่าศูนย์กลางภายในห้องเผาไหม้ 200 mm เส้นผ่าศูนย์กลางภายในฟรีบอร์ด 400 mm สำหรับห้องผสมมีลักษณะเป็นทรงกรวยมีความสูง 300 mm ด้านนอกของผนังห้องเผาไหม้และห้องผสมได้ทำการหุ้มฉนวนเพื่อป้องกันความร้อนสูญเสียออกจากระบบ ที่ผนังของห้องเผาไหม้ได้ทำการติดตั้งตำแหน่งวัดอุณหภูมิทั้งสิ้น 11 ตำแหน่ง ตามระยะที่ได้ทำการกำหนดไว้แสดงดังรูปที่ 1 ไอเสียหลังจากเผาไหม้แล้วจะถูกวัดอุณหภูมิ และนำออกจากห้องเผาไหม้ทางด้านบนของห้องเผาไหม้ ระบบป้อนเชื้อเพลิงสามารถป้อนเชื้อเพลิงเข้าเตาเผาอย่างต่อเนื่อง และสามารถปรับอัตราการไหลของเชื้อเพลิงตามที่ต้องการ ระบบป้อนเชื้อเพลิงประกอบด้วย Inverter, Motor, Screw Feed และ Hopper การวัดอัตราการไหลของอากาศปฐมภูมิ และอากาศทุติยภูมิใช้ ออร์ฟิส (Orifice) และค่าความดันตกคร่อมที่ผ่านออร์ฟิส สามารถอ่านค่าโดยใช้มาโนมิเตอร์ (Manometer) เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่าอัตราการไหลและอุณหภูมิภายในเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบด ถูกวัดโดยเทอร์โมคัปเปิลชนิด K ก๊าซไอเสียที่เกิดขึ้นจากการทดลอง สามารถวิเคราะห์ค่าปริมาณของแก๊สต่าง ๆ ที่ออกมาด้วยเครื่องวิเคราะห์ไอเสีย TESTO 350M XL และสมมติให้ระบบที่ทำการศึกษาเป็นระบบแบบอะเดียบาติก และเชื้อเพลิงแกลบที่ใช้ในการทดลองเป็นแกลบขนาดปกติ (2 mm x 8 mm)



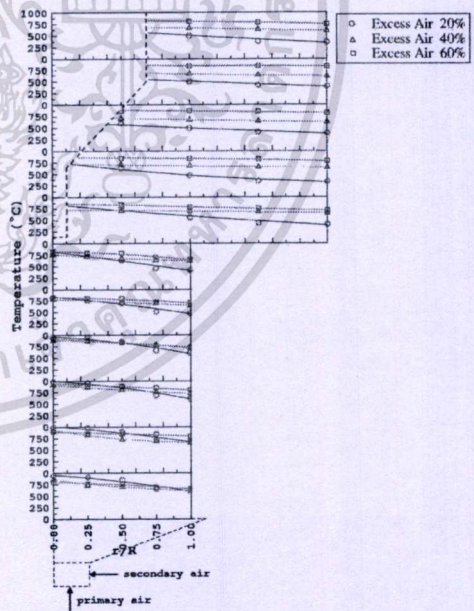
รูปที่ 1 แสดงแผนผังอุปกรณ์การทดลองเตาเผาฟลูอิดไคซ์เบด

#### 5. การทดลองและบันทึกผลการทดลอง

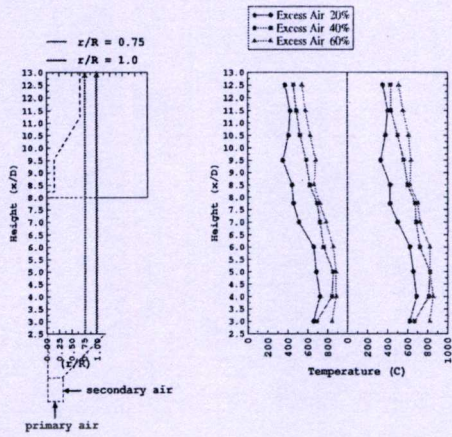
1. ทำการอุ่นเตา โดยใช้เชื้อเพลิงก๊าซ LPG จนกระทั่งอุณหภูมิ ภายในเตามีค่าประมาณ  $500^{\circ}\text{C}$  -  $650^{\circ}\text{C}$  จากนั้นเริ่มป้อนเชื้อเพลิง แกลบ (มีขนาดประมาณ  $2\text{ mm} \times 8\text{ mm}$ ) เข้าสู่ห้องเผาไหม้พร้อมกับอากาศป้อนรวมอุณหภูมิ จนกระทั่งอุณหภูมิภายในเตาประมาณ  $700^{\circ}\text{C}$  -  $750^{\circ}\text{C}$  แล้วทำการเอาชุดอุ่นเตา ออก
2. อัตราการป้อนของเชื้อเพลิงแกลบเท่ากับ  $9\text{ kg/hr}$ , อัตราการไหลของอากาศ  $77.3\text{ kg/hr}$
3. บันทึกค่าอุณหภูมิภายในที่ตำแหน่งตาม แนวแกนที่  $400\text{ mm}$ ,  $600\text{ mm}$ ,  $800\text{ mm}$ ,  $1000\text{ mm}$ ,  $1200\text{ mm}$ ,  $1350\text{ mm}$ ,  $1500\text{ mm}$ ,  $1700\text{ mm}$ ,  $1900\text{ mm}$ ,  $2100\text{ mm}$  และ  $2300\text{ mm}$  ตามลำดับ ที่ระยะ  $r/R = 0.25$  บันทึกผล ของอุณหภูมิ สังเกตลักษณะซีเ็ก และควันที่ เกิดจากการเผาไหม้ และวัดค่าไอเสียที่เกิด จากการเผาไหม้
4. ทำการทดลองซ้ำในข้อ 3 ที่ตำแหน่งตาม แนวแกนที่กำหนดไว้ ที่ระยะ  $r/R = 0.25$ ,  $0.50$ ,  $0.75$  และ  $1.0$  ตามลำดับ
5. อัตราการป้อนเชื้อเพลิงแกลบอยู่ที่  $6-12\text{ kg/hr}$  แล้วทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ 3-4
6. ทำการทดลองผลของการปรับเปลี่ยนลมด้าน หลัก เป็น  $50\%$ ,  $40\%$ , และ  $30\%$  ของลมเข้า ทั้งหมดตามลำดับ

#### 6. ผลการทดลอง

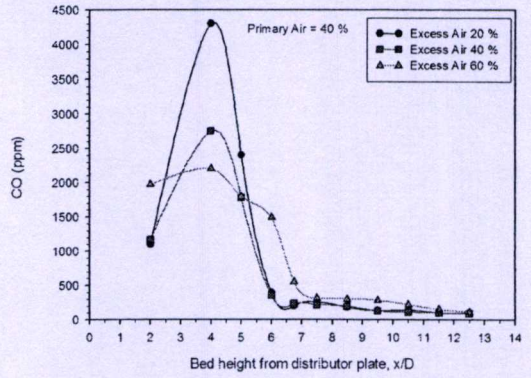
จากการทดลองอัตราการไหลเชิงมวลของแกลบที่  $9\text{ kg/hr}$  และอากาศส่วนเกินที่  $60\%$  มีการเผาไหม้ดีที่สุดใน หลังจากนั้นทำการปรับที่ลมหลัก 3 ค่า คือ  $50\%$ ,  $40\%$  และ  $30\%$  ของอากาศทั้งหมด ตามลำดับ สำหรับผลของการกระจายอุณหภูมิตามแนวรัศมีมีความสม่ำเสมอตลอด หน้าตัด ของห้องเผาไหม้ทุก ๆ ค่าของค่าอากาศส่วนเกิน (รูปที่ 2) และมีค่าอุณหภูมิสูงสุดอยู่ที่ประมาณ  $950^{\circ}\text{C}$  อุณหภูมิไอเสียที่ทางออกสูงสุดอยู่ที่  $750^{\circ}\text{C}$  ที่ค่าอากาศ ส่วนเกิน  $60\%$  เมื่อพิจารณาผลของอุณหภูมิตามแนว ความสูงที่ค่า  $(r/R) = 0.75$  และ  $1.0$  (รูปที่ 3) พบว่าความ เข้มข้นที่เกิดจากการเผาไหม้(พิจารณาจากผลอุณหภูมิ) จะมีความคงตั้งแต่ความสูง  $(x/D) = 4.0$  ขึ้นไปทุกค่า อากาศส่วนเกินและจากนั้นจะลดลง การกระจายอุณหภูมิ ตามแนวรัศมี และแนวความสูงของเตาเผาฟลูอิดไคซ์เบด แบบมีไซโคลนอยู่ด้านในที่ปรับเปลี่ยนลมหลักเป็น  $50\%$ ,  $40\%$  และ  $30\%$  ของลมเข้าทั้งหมด(รูปที่ 4 และ 5) พบว่า อุณหภูมิที่ลมหลัก  $40\%$  ของลมเข้าทั้งหมดมีค่าอุณหภูมิ สูงที่สุด ประมาณ  $970^{\circ}\text{C}$  อุณหภูมิไอเสียที่ทางออกสูงสุด อยู่ที่  $747^{\circ}\text{C}$  จากการวิเคราะห์ก๊าซไอเสียปริมาณของ ก๊าซ CO อยู่ระหว่าง  $100-300\text{ ppm}$  ก๊าซ NO อยู่ระหว่าง  $100-300\text{ ppm}$  และประสิทธิภาพการเผาไหม้อยู่ระหว่าง  $97-99\%$



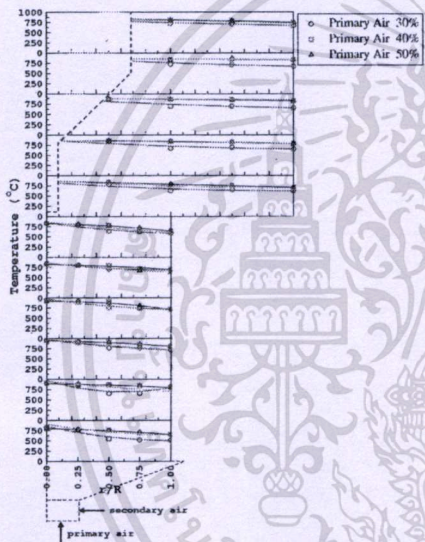
รูปที่ 2 การกระจายอุณหภูมิตามแนวรัศมีของเตาเผาฟลูอิดไคซ์เบดแบบมีไซโคลนอยู่ด้านในอัตราการป้อน  $9\text{ kg/hr}$  ที่อากาศส่วนเกิน  $20\%$ ,  $40\%$  และ  $60\%$



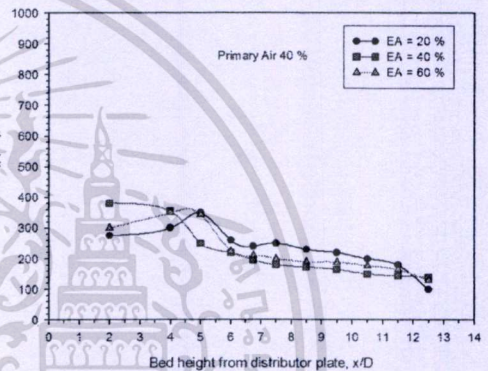
รูปที่ 3 การกระจายอุณหภูมิตามแนวความสูงของเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดแบบมีไซโคลนอยู่ด้านในที่อัตราการป้อนอากาศส่วนเกิน 20%, 40% และ 60%.



รูปที่ 6 ปริมาณ CO ที่ตำแหน่งต่างๆตามความสูงของเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดอัตราป้อนเชื้อเพลิง 9 kg/hr อากาศส่วนเกิน 20%, 40%, และ 60%



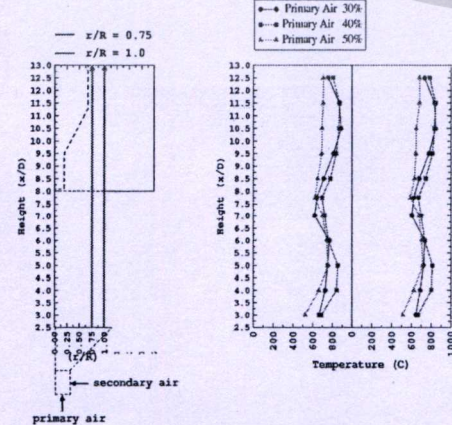
รูปที่ 4 การกระจายอุณหภูมิตามแนวรัศมีของเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดแบบมีไซโคลนอยู่ด้านใน ปรับเปลี่ยนลมด้านหลัก เป็น 50%, 40% และ 30% ของลมเข้าทั้งหมด



รูปที่ 7 ปริมาณ NO<sub>x</sub> ที่ตำแหน่งต่างๆตามความสูงของเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดอัตราป้อนเชื้อเพลิง 9 kg/hr อากาศส่วนเกิน 20%, 40%, และ 60%

7. สรุปผล

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาถึง ผลกระทบของเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดที่มีลักษณะของห้องเผาไหม้ การทดลองนี้ได้ทำการทดลองเพื่อทำการเปรียบเทียบผลที่เกิดขึ้นโดยทำการทดลองที่ อัตราการป้อนเชื้อเพลิง 9kg/hr และแน่นอนว่าการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงแข็งจำเป็นต้องมีปริมาณเปอร์เซ็นต์ ของอากาศส่วนเกินในปริมาณที่มาก ดังนั้นในการทดลองนี้ จึงทำการศึกษาที่ค่าเปอร์เซ็นต์ของอากาศส่วนเกิน 20%, 40% และ 60% ตามลำดับ และเปอร์เซ็นต์อากาศส่วนเกิน 60% ให้ผลดีที่สุด ปรับด้านลมหลักเป็น 30%, 40% และ 50% จากลมที่เข้าทั้งหมดที่อากาศส่วนเกิน 60% ซึ่งอัตราส่วน 40% ให้ผลทางด้านการเผาไหม้ และ ผลทางด้านความร้อนดีสุด โดยเตาเผาจะมีอุณหภูมิไอเสียระหว่าง 700-750°C ส่วนอุณหภูมิในห้องเผาไหม้อยู่ที่ 950°C จากการวิเคราะห์ก๊าซไอเสียปริมาณของก๊าซ CO อยู่ระหว่าง 100-300 ppm ก๊าซ NO อยู่ระหว่าง 100-300 ppm และ ประสิทธิภาพการเผาไหม้อยู่ระหว่าง 97 - 99%



รูปที่ 5 การกระจายอุณหภูมิตามแนวความสูงของเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดแบบมีไซโคลนอยู่ด้านในที่ปรับเปลี่ยนลมด้านหลัก เป็น 50%, 40% และ 30%

เอกสารนี้ฟลูอิดไดซ์เบดแบบมีไซโคลนอยู่ด้านในที่ปรับเปลี่ยนลมด้านหลัก เป็น 50%, 40% และ 30% ไม่ว่าการณ์ได้ทั้งหมด อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] วุฒิ แจ่มอัน และ คณะ, 2548. "การศึกษาพฤติกรรมการเผาไหม้แกลบในเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดผิวคลื่น" วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าคุณทหารลาดกระบัง
- [2] ดิษฐพร ตุงโสธานนท์, 2548. "พฤติกรรมการเผาไหม้แกลบในเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดผิวคลื่น" วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล บัณฑิตวิทยาลัยสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าคุณทหารลาดกระบัง
- [3] สำเร็จ จักรใจ, 2547. "การเผาไหม้" พิมพ์ครั้งที่ 1, สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- [4] สุวิทย์ เตีย และคณะ, 2542. " การเผาไหม้ชีวมวลในเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบด " วารสารวิจัยและพัฒนา มจร. ปีที่ 22 ฉบับที่ 2 พฤษภาคม-สิงหาคม, หน้า 47 - 63.
- [5] เสรีย์ ตูประกาย, 2540. "การศึกษาและออกแบบเตาเผาจากตะกอนแบบฟลูอิดไดซ์เบด" วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต คณะพลังงานและวัสดุ, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี,
- [6] ศศิวิมล สูงสว่าง, 2525. "การเผาไหม้แกลบในฟลูอิดไดซ์เบด" วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- [7] Lin. C.H., Teng J.T. and Chyang C.S., 1997. " Evaluation of the Combustion Efficiency and Emission of Pollutants by Coal Particles in a Vortexing Fluidized Bed, Combustion and Flame", Vol.110, pp. 163 – 172.
- [8] Stephen R., Turns, 1996. An Introduction to Combustion (Concepts And Applications). McGrawHill International Editions, pp. 19.
- [9] Nieh, S. Yang G., Zhu A.Q and Zhao C.S. 1992. "Measurements of gas – particle flows and elutriation of an 18 inch i.d. cold Vortexing fluidized – bed combustion mode Powder Technology, Vol. 69, pp. 139 – 146.
- [10] Daizo K., Octave L., 1991. Fluidization Engineering. Butterworth-Heinemann. Second Editions
- [11] Nieh S. and Yang G., 1987. "Particle Flow Pattern in the Free board of a Vortexing Fluidized Bed, Powder Technology, Vol. 50, pp. 121 – 131.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน

นายจิตติวัฒน์ ผุนลาวงษ์ เกิดเมื่อวันที่ 8 พฤษภาคม พ.ศ.2524 ที่จังหวัดนครสวรรค์ สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล จากภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ในปีการศึกษา 2545 และเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2548



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้