

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาพฤติกรรมการเผาไหม้ชีวมวลในเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียน  
BIOMASS COMBUSTION BEHAVIORS IN A CIRCULATING FLUIDIZED-  
BED

มนตรี วงศ์บุบผา  
รัตนะ เจียมจันทร์  
วัชระ ชามหตรี

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน..... 72070  
วัน,เดือน,ปี..... - 8 ส.ย. 2550

b. 112 430 26  
i. ....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2549

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาพฤติกรรมเผาไหม้ชีวมวลในเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียน  
FLUIDIZED BIOMASS COMBUSTION BEHAVIORS IN A CIRCULATING -  
BED

โดย

มนตรี วงศ์บุบผา  
รัตนะ เจียมจันทร์  
วัชระ ชามนตรี

อาจารย์ที่ปรึกษา  
รศ.ดร.พงษ์เจต พรหมวงศ์

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2549

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2549

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การศึกษาพฤติกรรมการเผาไหม้ชีวมวลในเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียน

**BIOMASS COMBUSTION BEHAVIORS IN A CIRCULATING  
FLUIDIZED-BED**

ผู้จัดทำ

- |                         |                       |
|-------------------------|-----------------------|
| 1. นายมนตรี วงศ์บุบผา   | รหัสประจำตัว 47015402 |
| 2. นายรัตนะ เจียมจันทร์ | รหัสประจำตัว 47015403 |
| 3. นายวัชระ ชามนตรี     | รหัสประจำตัว 47015404 |



อาจารย์ที่ปรึกษา

(รศ.ดร. พงษ์เจต พรหมวงศ์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การศึกษาพฤติกรรมเผาไหม้ชีวมวลในเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียน

มนตรี วงศ์บุบผา

รัตนะ เจียมจันทร์

วัชระ ชามนตรี

รศ.ดร.พงษ์เจต พรหมวงศ์

ปีการศึกษา 2549

### บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์นี้ ได้นำเสนอถึงการศึกษาในเชิงทดลองเกี่ยวกับพฤติกรรม การเผาไหม้ในเตาเผาแบบฟลูอิดไดซ์เบดและการศึกษาถึงอิทธิพลของผนังเตาเผาที่เป็นแบบผิวเรียบทางด้านล่าง และฟริบอร์คใหญ่โดยนำไซโคลนใส่ไว้ด้านใน กรณีของการทดลองได้ทำการทดลองที่อัตราการไหลเชิงมวลของแกลบที่ 6-12 kg/hr โดยทำการปรับเปอร์เซ็นต์ของอากาศส่วนเกิน 3 ค่า คือ 20%, 40%, และ 60% โดยทำการวัดและสังเกตการณ์กระจายอุณหภูมิในตำแหน่งต่างๆภายในเตา, ไข้ถ้ำ, ล้วนที่ออกมาที่ก๊าซไอเสีย จากการทดลองอัตราการไหลเชิงมวลของแกลบที่ 9 kg/hr และอากาศส่วนเกินที่ 40% มีการเผาไหม้ดีที่สุด หลังจากนั้นทำการปรับที่อุณหภูมิห้องต่อที่อุณหภูมิเป็นอัตราส่วน 3 ค่า คือ 50%/50% , 40%/60% , 30%/70% ตามลำดับ จากการทดลองพบว่าที่อากาศ 40%/60% มีการเผาไหม้ดีที่สุด ซึ่งจะมีอุณหภูมิไอเสียระหว่าง 700-750°C ส่วนอุณหภูมิในห้องเผาไหม้อยู่ที่ 950°C จากการวิเคราะห์ก๊าซไอเสียปริมาณของก๊าซ CO อยู่ระหว่าง 100-300 ppm ก๊าซ NO อยู่ระหว่าง 100-300 ppm และประสิทธิภาพการเผาไหม้อยู่ระหว่าง 92-97%

# FLUIDIZED BIOMASS COMBUSTION BEHAVIORS IN A CIRCULATING - BED

Montree Wongbubpha

Rattana Jeamjun

Watchara Samontree

Assoc.Prof.Dr. Pongjet Promvonge Advisor

## ABSTRACT

The thesis presents an experimental study of influences of wavy surfaces of a fluidized-bed on rice husk combustion characteristics. The experiments were made of the fluidized bed with a large freebord having a cyclone inside. Each type of the beds was tested for the same 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 flyash, smoke and exhaust gas emissions were observed and measured by a gas analyzer. Optimum test run was found at the excess air of 40% and mass flow rates of rice husk of 9 kg/hr. Varying primary air per secondary air at 50%/50%, 40%/60%, and 30%/70% 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%/60%. 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 92%to97%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี ด้วยคำสั่งสอน , ให้คำแนะนำ , ให้คำปรึกษาและความกรุณาของ รศ.ดร.พงษ์เจต พรหมวงศ์ ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์และที่ปรึกษาผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่านและขอกราบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณท่านอาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลทุกท่าน ที่ได้ถ่ายทอดวิชาความรู้ให้แก่กลุ่มของข้าพเจ้า ขอขอบพระคุณยิ่ง

ขอขอบคุณบิดา มารดาและญาติ ๆ ของผู้วิจัยที่ให้กำลังใจ เลี้ยงดูและคอยอบรมสั่งสอนให้กลุ่มของผู้วิจัยก้าวมาถึงวันนี้

ขอขอบคุณนายมณฑา เทียมเมือง รวมทั้งรุ่นพี่และเพื่อนๆ ที่คอยให้คำแนะนำและความช่วยเหลืออย่างดีตลอดมา

ขอขอบคุณรุ่นพี่ปริญญาโท เอก ทุกคน ได้แก่ พี่เดียร์ พี่โอ พี่หลง พี่ไคด์ ที่ได้ให้คำแนะนำในการทำงาน รวมทั้งช่วยเหลือ การช่วยประกอบชิ้นส่วนเตาเผา

ขอขอบคุณรุ่นน้องปริญญาตรีปี 2 ได้แก่ น้องทีป น้องทิส น้องอม ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้ลงแรงช่วยเหลือในการทดลอง

มนตรี วงศ์บุบผา  
รัตนะ เจียมจันทร์  
วัชระ ชามนตรี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญรูป.....	XI
รายการคำย่อและสัญลักษณ์.....	XIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	2
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....	3
1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	3
1.5 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.6 ขั้นตอนการศึกษา.....	3
1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 บทนำ.....	5
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.2.1 งานวิจัยภายในประเทศ.....	5
2.2.1.1 งานวิจัยของ วุฒิ แจ่มอัน และคณะ.....	5
2.2.1.2 งานวิจัยของ ดิษฐพร ตุงสาโสธานนท์.....	6
2.2.1.3 งานวิจัยของ วิศิษฐ์ สีสลาผาดิกุล.....	8
2.2.1.4 งานวิจัยของ เสรีย์ ตู๊ประกาย.....	9
2.2.1.5 งานวิจัยของ ศศิวิมล สูงสว่าง.....	10
2.2.1.6 งานวิจัยของ สุวิทย์ เตีย และคณะ.....	11
2.2.2 งานวิจัยในต่างประเทศ.....	11
2.2.2.1 งานวิจัยของ W.Permchart และคณะ.....	11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา IV ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.2.2.2 งานวิจัยของ Teng และคณะ.....	13
2.2.2.3 งานวิจัยของLIN, C.H. และคณะ.....	15
บทที่ 3 ทฤษฎี.....	18
3.1 เชื้อเพลิงชีวมวล.....	18
3.1.1 ประเภทของเชื้อเพลิงชีวมวล.....	18
3.1.2 คุณลักษณะของเชื้อเพลิงชีวมวล.....	19
3.2 ทฤษฎีการเผาไหม้.....	19
3.2.1 การผสม.....	20
3.2.2 การติดไฟหรือการลุกไหม้.....	21
3.3 การเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง.....	21
3.4 เปอร์เซ็นต์อากาศส่วนเกิน (Percent Excess air).....	24
3.5 ทฤษฎีฟลูอิด ไคเซชั่น.....	24
3.5.1 ประเภทของฟลูอิด ไคเซชั่น.....	24
3.5.2 ลักษณะฟลูอิด ไคเซชั่น.....	25
3.5.3 ข้อได้เปรียบและเสียเปรียบของฟลูอิด ไคเซชั่น.....	27
3.5.4 ทฤษฎีการคำนวณฟลูอิด ไคเซชั่น.....	28
3.5.5 แผ่นกระจายของไหล.....	32
3.6 กระบวนการเผาไหม้อนุภาคในฟลูอิด ไคเซชั่น.....	35
3.7 การลุกติดไฟของอนุภาคในฟลูอิด ไคเซชั่น (Ignition of coal particle in fluidized bed).....	36
3.8 วิธีการไหลเวียนย้อนกลับ.....	37
บทที่ 4 การออกแบบและการคำนวณ.....	39
4.1 บทนำ.....	39
4.2 การออกแบบเตาเผา.....	39
4.2.1 ลักษณะของเตาเผา.....	40
4.2.2 ระบบการป้อนเชื้อเพลิงและอากาศ.....	40
4.3 การคำนวณปริมาณอากาศที่ต้องการในการเผาไหม้ทางทฤษฎี.....	41

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.4 การคำนวณคุณสมบัติทางกายภาพต่างๆของเม็ดที่เป็นเกลบ.....	44
4.4.1 การหาสัดส่วนช่องว่าง(Void fraction, $\epsilon_m$ ) และความกลม (Sphericity, $\phi_s$ )ของเกลบ.....	44
4.4.2 เส้นผ่าศูนย์กลางของทรงกลมเทียบเท่ากับเกลบ(diameter of sphere having the volume, $d_p$ ).....	45
4.4.3 ความหนาแน่นของเกลบ.....	45
4.4.4 การหาปริมาณความชื้น.....	45
4.4.5 การหาความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดซ์เบด ( $U_{mf}$ ).....	46
4.4.6 ความเร็วสุดท้ายของการฟลูอิดไดซ์(Terminal Velocity of Particles, $U_t$ )....	48
4.5 การคำนวณหาความสัมพันธ์ระหว่างขนาดหอตกลงต่อแผ่นกระจายลม.....	49
4.6 การคำนวณหาความเร็วและReในเตาเผา.....	51
บทที่ 5 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง.....	53
5.1 บทนำ.....	53
5.2 การจัดเตรียมอุปกรณ์และเครื่องมือในการทดลอง.....	53
5.2.1 เตาเผาฟลูอิดไดซ์เบด.....	53
5.2.2 ระบบป้อนเชื้อเพลิง.....	54
5.2.3 ชุดป้อนอากาศปฐมภูมิและอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน.....	56
5.2.4 ระบบวัดอัตราการไหลของอากาศ.....	57
5.2.5 ระบบวัดอุณหภูมิ.....	59
5.2.6 ชุดอุ่นเตาเผา.....	60
5.2.7 ระบบดักจับฝุ่นขี้เถ้า.....	61
5.2.8 เครื่องวิเคราะห์ก๊าซไอเสีย.....	61
5.3 การติดตั้งอุปกรณ์ในการทดลอง.....	62
5.4 การอุ่นเตา.....	63
5.5 การทดลองและบันทึกผลการทดลอง.....	63

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา VI ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 6 ผลการทดลองและวิจารณ์.....	65
6.1 บทนำ.....	65
6.2 ผลกระทบของเตาเผาเคลือบฟลูอิดไดซ์เบด.....	65
6.2.1 เตาเผาเคลือบแบบผนังเตาเป็นแบบผิวเรียบพรีบอร์ดใหญ่.....	65
6.2.2 เตาเผาเคลือบแบบผนังเตามีผิวเรียบพรีบอร์ดใหญ่แบบมีไซโคลนอนอยู่ด้านใน ..	72
6.2.3 เปรียบเทียบแต่ละกรณีของเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดชนิดต่างๆ.....	77
บทที่ 7 สรุปและข้อเสนอแนะ.....	88
7.1 สรุปผล.....	88
7.2 ข้อเสนอแนะ.....	88
บรรณานุกรม.....	90
ภาคผนวก.....	92
ภาคผนวก ก.....	93
ภาคผนวก ข.....	97

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา VII ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 องค์ประกอบของเชื้อเพลิงแกลบ.....	42
4.2 ปริมาณอากาศกรณีอัตราส่วนผสมพอดี (Stoichiometric)ที่ใช้ในการทดลอง.....	44
4.3 ตารางแสดงขนาดของรูและจำนวนรูของเบด.....	51
4.4 ค่า Re และ ความเร็วการไหลที่ตำแหน่งต่างๆของเตาเผาที่ใช้ในการทดลอง.....	52
ก-1 คุณสมบัติของแกลบ.....	94
ก-2 การเปรียบเทียบเชื้อเพลิง.....	95
ก-3 ปริมาณชีวมวลในปี 2540 และ 2544.....	96
ก-4 ปริมาณการใช้ชีวมวลโดยเฉลี่ยต่อโรง.....	96



# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	ไดอะแกรมการทดลองของเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดแบบผิวคลื่น .....6
2.2	ไดอะแกรมการทดลองของเตาเผาออร์เทคหลายชั้น(MVC).....7
2.3	แสดงส่วนประกอบทั้ง 5 ส่วนที่นำมาประกอบเป็นตัวเตา .....8
2.4	แผนภาพของเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง .....9
2.5	เตาเผาใหม่แบบฟลูอิดไดซ์เบด ..... 10
2.6	ไดอะแกรมการทดลองของเตาเผา conical FBC..... 11
2.7	ลักษณะของเตาเผาต้นแบบฟลูอิดไดซ์เบดแบบอากาศหมุนวน..... 13
2.8	ไดอะแกรมของระบบเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบด(VFBC)..... 14
3.1	องค์ประกอบของเชื้อเพลิงแข็ง..... 22
3.2	ปฏิกิริยาการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง..... 22
3.3	แบบจำลองการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง..... 23
3.4	บริเวณการเกิดการเผาไหม้..... 23
3.5	ลักษณะชั้นเชื้อเพลิงระหว่างการเผาไหม้..... 23
3.6	แสดงระดับของเบดในห้องทดลอง..... 25
3.7	ลักษณะของฟลูอิดไดซ์เบด..... 26
3.8	แสดงความดันที่เกิดขึ้น ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ในชุดการทดลอง..... 29
3.9	ความสัมพันธ์ระหว่างความกลมและความพรุนของเบด..... 31
3.10	ลักษณะของตัวกระจายแบบแผ่นเจาะรู..... 33
3.11	คุณภาพของฟลูอิดไดซ์เบดที่เกิดจากแผ่นกระจายของไหลต่างชนิดกัน..... 34
3.12	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า $C_{d,or}$ กับเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ ( $Re_r$ )..... 35
3.13	รูปแบบการลุกติดไฟของอนุภาค : a, b, เป็น preignition และ c, d, e เป็น postignition..... 36
3.14	รูปแสดงวิธีการทำให้เกิดการไหลหมุนเวียนย้อนกลับ..... 37
4.1	แสดงลักษณะของเตาเผาแบบต่างๆที่ได้ทำการออกแบบ (ก) เตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดแบบผิวเรียบปริบอร์คใหญ่ (ข) เตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดแบบผิวคลื่นปริบอร์คใหญ่..... 39
4.2	ลักษณะการป้อนของเชื้อเพลิงแกลบ..... 40

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.1 แสดงลักษณะของเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดแบบผิวเรียบพรีบอร์ใหญ่ .....	54
5.2 ระบบป้อนเชื้อเพลิงกลบ.....	55
5.3 Inverter.....	55
5.4 Motor.....	56
5.5 Screw Feed.....	56
5.6 Hopper.....	56
5.7 แสดง Blower และ Motor.....	57
5.8 ลักษณะของแผ่นออริฟิส.....	57
5.9 มานอมิเตอร์.....	58
5.10 ดิจิตอลมานอมิเตอร์.....	58
5.11 เครื่องมือวัดความเร็วลม testo 445.....	59
5.12 เทอร์โมคัปเปิล.....	59
5.13 เครื่องบันทึกข้อมูล Fluke 2680A.....	60
5.14 แสดงถังแก๊สและหัวเผา.....	60
5.15 Cyclone.....	61
5.16 เครื่องวิเคราะห์ก๊าซไอเสีย TESTO TESTO 350M XL.....	61
5.17 แสดงแผนผังอุปกรณ์การทดลองเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบด.....	62
6.1 แสดงอุณหภูมิตามแนวรัศมีของเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดแบบผนังเตาเป็นแบบผิวเรียบอัตรา ป้อน 9kg/hr อากาศส่วนเกิน 40%, 60%, และ 80%.....	65
6.2 แสดงอุณหภูมิตามแนวความสูงของเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดแบบผนังเตาเป็นแบบผิวเรียบอัตรา ป้อน 9kg/hr อากาศส่วนเกิน 40%, 60%, และ 80%.....	66
6.3 แสดงอุณหภูมิตามแนวรัศมีของเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดแบบผนังเตาเป็นแบบผิวเรียบอัตรา ป้อน 6, 7.5, 9kg/hr อากาศส่วนเกิน 60% .....	67
6.4 แสดงอุณหภูมิตามแนวความสูงของเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดแบบผนังเตาเป็นแบบผิวเรียบอัตรา ป้อน 6, 7.5, 9kg/hr อากาศส่วนเกิน 60%.....	68

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.5	แสดงอุณหภูมิตามแนวรัศมีของเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดแบบผนังเตาเป็นแบบผิวเรียบที่ปรับเปลี่ยนลมด้านหลัก ต่อ ลมด้านรอง เป็น50%/50%, 40%/60%, 30%/70%, 20%/80%, และ 10%/90% ตามลำดับ.....69
6.6	แสดงอุณหภูมิตามแนวความสูงของเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดแบบผนังเตาเป็นแบบผิวเรียบที่ปรับเปลี่ยนลมด้านหลัก ต่อ ลมด้านรอง เป็น50%/50%, 40%/60%, 30%/70%, 20%/80%, และ 10%/90% ตามลำดับ.....70
6.7	แสดงอุณหภูมิตามแนวรัศมีของเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดแบบมีไซโคลนอนอยู่ด้านในอัตราการป้อน 9kg/hr ที่อากาศส่วนเกิน 40% ปรับเปลี่ยนลมด้านหลัก ต่อ ลมด้านรอง เป็น50%/50%, 40%/60%, และ 30%/70% ตามลำดับ..... 71
6.8	แสดงอุณหภูมิตามแนวรัศมีของเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดแบบมีไซโคลนอนอยู่ด้านในที่ปรับเปลี่ยนลมด้านหลัก ต่อ ลมด้านรอง เป็น50%/50%, 40%/60%, 30%/70% และ ตามลำดับ.....72
6.9	แสดงอุณหภูมิตามแนวรัศมีของเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดแบบมีไซโคลนอนอยู่ด้านในอัตราการป้อน 9kg/hr ที่อากาศส่วนเกิน20%, 40% ,60% ตามลำดับ.....73
6.10	แสดงอุณหภูมิตามแนวรัศมีของเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดแบบมีไซโคลนอนอยู่ด้านในอัตราการป้อน 9kg/hr ที่อากาศส่วนเกิน20%, 40% ,60% ตามลำดับ..... ..76
6.11	แผนภูมิแสดงปริมาณก๊าซ O <sub>2</sub> และ CO <sub>2</sub> เทียบกับตำแหน่งความสูงของเตา ที่ Excess Air 20%อัตราส่วนลมหลักต่อลมรอง40%:60% .....78
6.12	แผนภูมิแสดงปริมาณก๊าซ NO <sub>x</sub> เทียบกับตำแหน่งความสูงของเตา ที่ Excess Air 20%อัตราส่วนลมหลักต่อลมรอง40%:60%.....78
6.13	แผนภูมิแสดงปริมาณก๊าซ COเทียบกับตำแหน่งความสูงของเตา ที่ Excess Air 20%อัตราส่วนลมหลักต่อลมรอง40%:60%.....79
6.14	แผนภูมิแสดงปริมาณก๊าซ O <sub>2</sub> และ CO <sub>2</sub> เทียบกับตำแหน่งความสูงของเตา ที่ Excess Air 40%อัตราส่วนลมหลักต่อลมรอง40%:60%.....79
6.15	แผนภูมิแสดงปริมาณก๊าซ NO <sub>x</sub> เทียบกับตำแหน่งความสูงของเตา ที่ Excess Air 40%อัตราส่วนลมหลักต่อลมรอง40%:60%.....80
6.16	แผนภูมิแสดงปริมาณก๊าซ COเทียบกับตำแหน่งความสูงของเตา ที่ Excess Air 40%อัตราส่วนลมหลักต่อลมรอง40%:60%.....80

6.17	แผนภูมิแสดงปริมาณก๊าซ O <sub>2</sub> และ CO <sub>2</sub> เทียบกับตำแหน่งความสูงของเตา	
	ที่ Excess Air 60%อัตราส่วนลมหลักต่อลมรอง40%:60%.....	81
6.18	แผนภูมิแสดงปริมาณก๊าซ NO <sub>x</sub> เทียบกับตำแหน่งความสูงของเตา	
	ที่ Excess Air 60%อัตราส่วนลมหลักต่อลมรอง40%:60%.....	81
6.19	แผนภูมิแสดงปริมาณก๊าซ COเทียบกับตำแหน่งความสูงของเตา	
	ที่ Excess Air 60%อัตราส่วนลมหลักต่อลมรอง40%:60%.....	82
6.20	เก้าอี้ที่ได้จากเตาผิวเรียบ อัตราป้อนแกลบ 9 kg/hr อากาศส่วนเกิน 20% ลมหลัก	
	ต่อลมรอง 50%/50%.....	83
6.21	เก้าอี้ที่ได้จากเตาผิวเรียบ อัตราป้อนแกลบ 9 kg/hr อากาศส่วนเกิน 20% ลมหลัก	
	ต่อลมรอง 40%/60%.....	83
6.22	เก้าอี้ที่ได้จากเตาผิวเรียบ อัตราป้อนแกลบ 9 kg/hr อากาศส่วนเกิน 20% ลมหลัก	
	ต่อลมรอง 30%/70%.....	84
6.23	เก้าอี้ที่ได้จากเตาผิวเรียบ อัตราป้อนแกลบ 9 kg/hr อากาศส่วนเกิน 40% ลมหลัก	
	ต่อลมรอง 50%/50%.....	84
6.24	เก้าอี้ที่ได้จากเตาผิวเรียบ อัตราป้อนแกลบ 9 kg/hr อากาศส่วนเกิน 40% ลมหลัก	
	ต่อลมรอง 40%/60%.....	85
6.25	เก้าอี้ที่ได้จากเตาผิวเรียบ อัตราป้อนแกลบ 9 kg/hr อากาศส่วนเกิน 40% ลมหลัก	
	ต่อลมรอง 30%/70%.....	85
6.26	เก้าอี้ที่ได้จากเตาผิวเรียบ อัตราป้อนแกลบ 9 kg/hr อากาศส่วนเกิน 60% ลมหลัก	
	ต่อลมรอง 50%/50%.....	86
6.27	เก้าอี้ที่ได้จากเตาผิวเรียบ อัตราป้อนแกลบ 9 kg/hr อากาศส่วนเกิน 60% ลมหลัก	
	ต่อลมรอง40%/60%.....	86
6.28	เก้าอี้ที่ได้จากเตาผิวเรียบ อัตราป้อนแกลบ 9 kg/hr อากาศส่วนเกิน 60% ลมหลัก	
	ต่อลมรอง 30%/70%.....	87

## รายการคำย่อและสัญลักษณ์

$A_0$	พื้นที่หน้าตัดครออร์ฟิส , ( $m^2$ )
AF	อัตราส่วนของอากาศต่อเชื้อเพลิง
$AF_{ac}$	อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงทางปฏิบัติ
$AF_{th}$	อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงทางทฤษฎี
Ar	เลขอาคิมิดีส (Archimedes number)
$C_p$	specific heat, ( $J/kg.K$ )
$C_d$	Drag Coefficient, ไร้มิติ
$D_c$	เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อทิ้งแก๊สลอย
$d_p$	ขนาดของอนุภาค
g	สัมประสิทธิ์แรงโน้มถ่วงของโลก , ( $m/s^2$ )
MW	มวลโมเลกุล , (kmol)
$m_a$	มวลของอากาศแห้ง , (kg)
$m_g$	ปริมาณไอน้ำในอากาศสูงสุดที่อุณหภูมิใด ๆ , (kg)
$m_v$	มวลของไอน้ำ , (kg)
$m_{air}$	อัตราการไหลของอากาศ , (kg/s)
$m_{fuel}$	อัตราการป้อนแก๊ส , (kg/min)
n	จำนวน โมล
P	ความดันของอากาศขึ้น , (Pa)
$P_a$	ความดันย่อยของอากาศแห้ง , (Pa)
$P_g$	ความดันของอากาศอิมิตัวที่อุณหภูมิใด ๆ , (Pa)
$P_v$	ความดันไอ , (Pa)
$Q_{ac}$	อัตราการไหลจริงเชิงปริมาตร , ( $m^3/s$ )
R	รัศมีภายในของเตาฟลูอิดไดซ์เบด, (m)
$R_a$	ค่าคงที่ของอากาศ , ( $kJ/kg.K$ )
$R_v$	ค่าคงที่ของไอน้ำ , ( $kJ/kg.K$ )
n	จำนวนรอบของมอเตอร์, rpm
$L_{mf}$	height of a minimum fluidized bed, m
$L_f$	height of a bubbling fluidized bed, m

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ XIII อ่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## รายการคำย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

h	ความสูงของเตาเผา, m
H	ความสูงของ Free board, m
FEZ	Free Entrainment Zone
SEZ	Swirling Effect Zone
$N_{or}$	จำนวนรูของออริฟิสต่อพื้นที่หน้าตัดของแผ่นกระจายลม
$W_{sa}$	งานของปั๊มจริง (actual pumping work)
$W_{si}$	งานของปั๊มทางจริง (ideal pumping work)
U	ความหนืดของก๊าซ
ID	เส้นผ่านศูนย์กลางภายในเตาเผา
OD	เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของเตาเผา
$Re_p$	$\frac{d_p U_o \rho_g}{\mu}$ ค่าเรย์โนลด์สเบอร์ของอนุภาค
RTD	residenc time distribution
TDH	ค่าความสูงของการหลุดลอย (transport disengaging height), m
U	ความเร็ว (m/sec)
$U_{mf}$	ความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไดซ์
$U_t$	terminal Velocity of a falling particle, ( m/s)
U	ความเร็ว, (m/s)
$U_{or}$	ความเร็วของก๊าซที่ผ่านแผ่นออริฟิส
$U_o$	superficial fluid velocity
r/R	พิกัดในแนวรัศมีภายในเตาฟลูอิดไดซ์เบด โดยอ้างอิงจากกึ่งกลางเตา
T	อุณหภูมิ, ( $^{\circ}C$ )
$T_{db}$	อุณหภูมิกระเปาะแห้ง, ( $^{\circ}C$ )
$T_{wb}$	อุณหภูมิกระเปาะเปียก, ( $^{\circ}C$ )
V	ปริมาตร, ( $m^3$ )
x	ความสูงของเตาฟลูอิดไดซ์เบด โดยอ้างอิงจากแผ่นเบด, (m)
x/D	ความสูงของเตาฟลูอิดไดซ์เบดต่อเส้นผ่าศูนย์กลางเตา โดยอ้างอิงจากแผ่นเบด
$\phi$	ความชื้นสัมพัทธ์

## รายการคำย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

$\omega$	อัตราส่วนความชื้น , (kg/kg-dry air)
$\rho_a$	ความหนาแน่นของอากาศ , (kg/m <sup>3</sup> )
$\rho_g$	ความหนาแน่นของอากาศอิมิตัวที่อุณหภูมิใด ๆ , (kg/m <sup>3</sup> )
$\rho_v$	ความหนาแน่นของไอน้ำ , (kg/m <sup>3</sup> )
$\rho_w$	ความหนาแน่นของน้ำ , (kg/m <sup>3</sup> )
$\gamma$	น้ำหนักจำเพาะ , (N/m <sup>3</sup> )
$\rho_p$	ความหนาแน่นของอนุภาคของแข็ง
$\rho_g$	ความหนาแน่นของก๊าซ
$\Delta h$	ความสูงของระดับน้ำในมานอมิเตอร์ , (m)
$\Delta P_d$	ความดันตกคร่อมผ่านแผ่นกระจายลม
$\phi_s$	ค่าความกลม (sphericity) ของอนุภาค
$\varepsilon$	Void Fraction, ไม่มีหน่วย
$\varepsilon_f$	สัดส่วนช่องว่างของเบดขณะเกิดการฟลูอิดไดซ์
$\varepsilon_{mf}$	สัดส่วนช่องว่างของเบดที่ความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไดซ์
$Effn$	ประสิทธิภาพการเผาไหม้

# บทที่ 1

## บทนำ

ในปัจจุบันจะเห็นได้ว่าความต้องการทางด้านการใช้พลังงานของประเทศมีแนวโน้มสูงขึ้นตามความเจริญของประเทศ และ จำนวนประชากรที่เพิ่มขึ้น แต่ ทรัพยากรก็บมีน้อยลง เราควรใช้เชื้อเพลิงที่มีอยู่อย่างคุ้มค่า และ พยายามหาแหล่งพลังงานจากเชื้อเพลิงชนิดอื่นเข้ามาทดแทน ซึ่งพลังงานที่ใช้ส่วนใหญ่จะเป็นพลังงานที่มาจากแหล่งเชื้อเพลิง ได้แก่ ถ่านหิน, ปิโตรเลียม, ก๊าซธรรมชาติ เป็นต้น ซึ่งแหล่งพลังงานเหล่านี้เป็นแหล่งพลังงานที่ใช้แล้วหมดไป ประกอบกับเกิดวิกฤตการณ์ของพลังงานมีราคาที่สูงขึ้น ดังนั้น ภาครัฐและเอกชนจึงมีนโยบายที่จะหาพลังงานอื่น ๆ มาช่วยทดแทนพลังงานที่ใช้กัน ในปัจจุบัน เช่น พลังงานจากแสงอาทิตย์, พลังงานลม แต่พลังงานในรูปแบบดังกล่าวนี้จะต้องนำมาผ่านกระบวนการผลิตที่ยุ่งยากและต้องใช้เครื่องมือที่ทันสมัยและมีราคาแพงมากจึงทำให้ยากที่จะนำพลังงานเหล่านี้มาใช้เพราะมีต้นทุนในการผลิตสูง หรือความพยายามที่จะนำน้ำมันเชื้อเพลิงมาผสมรวมกับสารสกัดจากพืช เพื่อนำมาผสมกันและนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงใหม่เช่นการนำน้ำมันดีเซลผสมกับน้ำมันปาล์ม เรียกว่า "ไบโอดีเซล"

เมื่อลองทำการศึกษาและพิจารณาพบว่าหากสามารถหาแหล่งพลังงานที่สามารถใช้ได้ไม่มีวันหมดและก่อมลพิษน้อยกว่าเชื้อเพลิงที่มีใช้กันอยู่ในปัจจุบัน พบว่าเชื้อเพลิงชีวมวลที่เป็นเศษเหลือจากการเกษตรสามารถนำมาใช้เป็นพลังงานได้ในรูปของพลังงานความร้อน อาทิเช่น ฟางข้าว, เปลือกถั่ว, ชั่งข้าวโพด และแกลบ ฯลฯ ซึ่งวัสดุดังกล่าวสามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงได้ดี พลังงานที่ได้เหล่านี้เรา เรียกว่า พลังงานจากชีวมวล (Biomass Energy) เป็นพลังงานที่มีการหมุนเวียนโดยธรรมชาติอีกแหล่งหนึ่ง ที่ได้รับความสนใจมานานจากทั่วทุกมุมโลก เพราะเป็นการใช้แหล่งพลังงานที่มีอยู่ในธรรมชาติทดแทนพลังงานจากซากสัตว์ที่ทิ้งในรูปของเชื้อเพลิงและพลังงานความร้อน โดยการนำเอาเศษวัสดุทางการเกษตร พืช หรือมูลสัตว์ต่างๆมาใช้เป็นแหล่งผลิตพลังงาน ทำให้มีต้นทุนในการผลิตค่อนข้างต่ำและเป็นการเปลี่ยนวิธีกำจัดเศษวัสดุที่เหลือจากการเกษตรโดยการนำมาหมักเวียนใช้ให้เกิดประโยชน์ นอกจากนี้แหล่งพลังงานมวลชีวภาพยังถือว่าเป็นแหล่งพลังงานที่สามารถใช้ได้โดยไม่มีวันหมดถ้ามนุษย์สามารถรักษาสมดุลระหว่างการนำมาใช้และการสร้างคืนให้แก่ธรรมชาติ อย่างไรก็ตามการนำเอาแหล่งมวลชีวภาพต่างๆมาใช้ประโยชน์ ก็มีทั้งข้อดีและข้อเสียเหมือนกันกับแหล่งพลังงานจากหลายๆแหล่ง ดังนั้นการศึกษา วิจัย และพัฒนาเทคโนโลยีต่างๆ เพื่อใช้ในการเปลี่ยนแหล่งมวลชีวภาพให้เป็นพลังงานตามที่มนุษย์ต้องการจึงไม่มีวันจบสิ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าหากปล่อยวัสดุเหลือใช้ดังกล่าวทิ้งไว้จะทำให้เกิดปัญหามลพิษทางด้านสภาวะแวดล้อม และจากการศึกษาจะพบว่าประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรม ทั่วทุกภาคของประเทศประกอบ อาชีพเกษตรกรรมแล้วมีการทำนากันมาก เมื่อเก็บเกี่ยวผลผลิตเรียบร้อยแล้วจะต้องนำข้าวเปลือกไปสี เพื่อให้ได้เมล็ดข้าวออกมาสำหรับบริโภค

แกลบคือวัสดุที่เหลือจากการสีข้าวซึ่งถ้าสีข้าว 1 ตันจะได้แกลบออกมาประมาณ 220 กิโลกรัม ค่าความร้อนของแกลบมีค่าประมาณ 3,600 kcal/kg. จึงน่าจะนำแกลบไปใช้เป็นเชื้อเพลิง ผลิตพลังงานความร้อนต่อไป เพื่อใช้ให้เกิดประโยชน์และมีประสิทธิภาพสูงสุด

## 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในการที่จะนำแกลบมาเป็นแหล่งเชื้อเพลิงในการผลิตพลังงานความร้อน จำเป็นที่จะต้อง หาเทคโนโลยีหรือเทคนิคมาประยุกต์ใช้ในการออกแบบสร้างเตาเผา อาทิเช่น เตาเผาไซโคลน, เตาเผาฟลูอิด ไคซ์เบด, เตาเผาออร์ทเทค เป็นต้น ในที่นี้จะให้ความสำคัญกับเทคโนโลยีฟลูอิด ไคซ์เบด เนื่องด้วยแกลบจัดเป็นเชื้อเพลิงแข็งชนิดหนึ่งและเป็นเชื้อเพลิงแข็งที่เบามากหากจะใช้เทคโนโลยี ฟลูอิด ไคซ์เบดจากการศึกษา พบว่า วิธีการของฟลูอิด ไคซ์เบดนั้นต้องการห้องเผาไหม้ (ฟรีบอร์ด) ที่ สูงมากเพื่อลดอัตราการหลุดลอยของอนุภาคเชื้อเพลิงและทำให้อนุภาคอยู่ในห้องเผาไหม้นานขึ้น

จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าเตาเผาแกลบฟลูอิด ไคซ์เบดที่ใช้โดยทั่วไปแล้วจะเป็นห้องเผา ไหม้แบบทรงกระบอกผิวเรียบขนาดใหญ่และมีความสูงมาก ซึ่งหากจะนำเตาเผาแกลบฟลูอิด ไคซ์เบดที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมมาประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมภายในครัวเรือน ควรจะมีขนาดเล็ก และมีเสถียรภาพทางอุณหภูมิที่ดี

ดังนั้น จึงเกิดแนวความคิดที่จะนำเทคนิคฟลูอิด ไคซ์เบดแบบผิวคลื่น และ ฟรีบอร์ดใหญ่ เข้ามาใช้ในการเผาไหม้เชื้อเพลิงแกลบ ซึ่งสามารถทำให้การคลุกเคล้าของเชื้อเพลิงแกลบกับอากาศ และระยะเวลาที่เชื้อเพลิงอยู่ในห้องเผาไหม้นานขึ้น สามารถที่จะทำให้ห้องเผาไหม้มีขนาดเล็กและ สั้นลงได้

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. ศึกษาและพัฒนาเตาเผาแกลบฟลูอิด ไคซ์เบด
2. ทำการศึกษาถึงอิทธิพลของหอตดลองลักษณะต่างๆทั้ง 2 แบบต่อลักษณะการเผาไหม้
3. ศึกษาถึงอิทธิพลของเตาเผาลักษณะต่างๆต่อการกระจายอุณหภูมิในตำแหน่งต่างๆภายใน เตา, ขี้เถ้าที่ออกมากับก๊าซไอเสีย
4. ศึกษาถึงผลของการปรับเปลี่ยนลมด้านหลัก และ ลมด้านรอง
5. ศึกษาถึงอิทธิพลของเตาเผาแบบที่มีการนำไซโคลนใส่ไว้ด้านใน

### 1.3 สมมติฐานของการศึกษา

สมมติให้ระบบที่ทำการศึกษายเป็นระบบแบบอะเดียบติกและเชื้อเพลิงแกลบที่ใช้ในการทดลองเป็นแกลบขนาดปกติ ( 2 มม. x 8 มม.)

### 1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย

เตาเผาที่ใช้ในการทดลองนี้เป็นเตาเผาฟลูอิด ไคซ์เบดแบบผิวคลื่น และ ฟรีบอร์ดใหญ่ สำหรับเตาเผาแกลบฟลูอิด ไคซ์เบดที่มีอยู่เดิม พบว่าจะต้องมีความสูงของห้องเผาไหม้ที่สูงมากเพื่อลดอัตราการหลุดลอยของอนุภาคเชื้อเพลิงและทำให้อนุภาคอยู่ในห้องเผาไหม้นานขึ้น ดังนั้นจึงอาศัยเทคนิคฟลูอิด ไคซ์เบดแบบผิวคลื่น และ ฟรีบอร์ดใหญ่ เข้ามาใช้ในการเผาไหม้เชื้อเพลิงแกลบ ทำให้สามารถลดความสูงของห้องเผาไหม้ได้ ไม่เกิดการแยกชั้นของการไหลของอนุภาค ช่วยให้เชื้อเพลิงสามารถอยู่ภายในห้องเผาไหม้นานขึ้นทำให้มีเวลาเพียงพอในการทำปฏิกิริยา

### 1.5 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ทดลองเผาไหม้แกลบในเตาเผาฟลูอิด ไคซ์เบดแบบผิวเรียบ และ ฟรีบอร์ดใหญ่
2. ทดลองเผาไหม้แกลบในเตาเผาฟลูอิด ไคซ์เบดแบบผิวเรียบ และ ฟรีบอร์ดใหญ่โดยการนำไซโคลนใส่ไว้ด้านใน
3. เชื้อเพลิงแกลบที่ใช้ในการทดลองเป็นแกลบขนาดปกติ ( ประมาณ 2 มม. x 8 มม.)
4. ใช้อากาศส่วนเกิน 20%, 40% และ 60% ของอัตราส่วนผสมของอากาศแบบพอดี อัตราการป้อนของเชื้อเพลิงแกลบอยู่ระหว่าง 0.1–0.2 kg/min
5. ทำการศึกษาถึงผลกระทบของการปรับเปลี่ยนลมด้านหลัก ต่อ ลมด้านรอง เป็นสัดส่วน 50% / 50%, 40% / 60%, 30% / 70% ของอากาศส่วนเกิน 60%
6. ทำการวัดการกระจายอุณหภูมิภายใน ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ในแนวแกนที่กำหนดไว้ของเตาเผา 11 ตำแหน่ง การกระจายอุณหภูมิในแนวรัศมี 5 ตำแหน่ง อุณหภูมิห้องผสม 1 ตำแหน่ง อุณหภูมิไอเสีย 1 ตำแหน่ง
7. วิเคราะห์ก๊าซไอเสียที่เกิดขึ้น และ จี๊ดี้ เนื่องจากเผาไหม้เชื้อเพลิงของเตาเผา

### 1.6 ขั้นตอนการศึกษา

1. ศึกษางานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้องกับเตาเผาชีวมวลแบบวอร์เทค, ฟลูอิด ไคซ์เบดและไซโคลน รวมทั้งปัญหา, ข้อจำกัดและอุปสรรคที่เกิดขึ้นจากการทดลอง
2. ศึกษาถึงทฤษฎีการเผาไหม้, ทฤษฎีฟลูอิด ไคซ์เบดและหลักการคำนวณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ออกแบบสร้างและทดสอบเตาเผาเกลือแบบฟลูอิดไดซ์เบดแบบผิวคลื่นในการเก็บข้อมูลที่จะศึกษาถึงผลกระทบต่อการใช้ไอน้ำภายในเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดซึ่งแบ่งออกเป็น ส่วนประกอบ ของการทดลองออกเป็น 2 กรณีหลัก ๆ คือ
  - 3.1 ทำการทดลองการใช้ไอน้ำเตาเผาเกลือแบบฟลูอิดไดซ์เบดแบบผนังเตาเป็นแบบผิวเรียบ และพรีบอร์ดใหญ่
  - 3.2 ทำการทดลองการใช้ไอน้ำเตาเผาเกลือแบบฟลูอิดไดซ์เบดกรณีผนังเตาเป็นแบบผิวเรียบ และ พรีบอร์ดใหญ่โดยการใช้โคลนใส่ไว้ด้านใน
4. ทำการทดลองตามเงื่อนไขที่ได้ทำการกำหนดขึ้น
5. บันทึกผลการทดลอง
6. สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะเพื่อการพัฒนา และการปรับปรุง

### 1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. หาแหล่งพลังงานทางเลือกที่สะอาด หาได้ง่าย ราคาถูก มาใช้ทดแทนแหล่งพลังงานหลักที่มีใช้อยู่เดิม
2. นำวัสดุที่เหลือใช้มาใช้ให้เกิดประโยชน์ในด้านพลังงานความร้อน เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาต่อไป
3. สามารถนำเกลือที่เหลือใช้จากกระบวนการสีข้าวมาใช้ให้เป็นประโยชน์มากยิ่งขึ้นกว่าที่เป็นอยู่
4. สามารถประยุกต์ความร้อนเพื่อการอบแห้งผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรหรือนำไปผลิตไอน้ำเพื่อนำไปใช้ในงานอุตสาหกรรมต่างๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ
5. เชื้อเพลิงชีวมวลเป็นเชื้อเพลิงที่ไม่มีการปล่อยกำมะถันในสิ่งแวดล้อม ซึ่งจะช่วยลดการเกิดฝนกรดได้

## บทที่ 2

# งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 บทนำ

ปัจจุบันประเทศไทยกำลังพัฒนาไปสู่การเป็นประเทศทางด้านอุตสาหกรรม การดำเนินการต่าง ๆ ในภาคอุตสาหกรรมจำเป็นต้องหาแหล่งพลังงานมาใช้จำนวนมาก ซึ่งปัจจุบันได้มีการนำพลังงานมาใช้ในหลายรูปแบบเช่นพลังงานฟอสซิล ได้แก่ก๊าซธรรมชาติ, น้ำมันดิบ, ถ่านหิน เป็นต้น นอกจากนี้ยังใช้พลังงานจากธรรมชาติเช่นชีวมวล, พลังงานน้ำ ตลอดจนพลังงานจากแสงอาทิตย์ แต่ปริมาณการใช้ยังมีไม่มากเท่าใดนัก การนำพลังงานฟอสซิลมาใช้อย่างฟุ่มเฟือยก่อให้เกิดปัญหาการนำเข้าเชื้อเพลิงจากต่างประเทศ การนำเข้าเพลิงชีวมวลมาเผาเพื่อเป็นพลังงานจะช่วยลดความต้องการการนำเข้าพลังงานลงได้ในระดับหนึ่ง และยังเป็นการรักษาสภาพแวดล้อมอีกด้วย

### 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

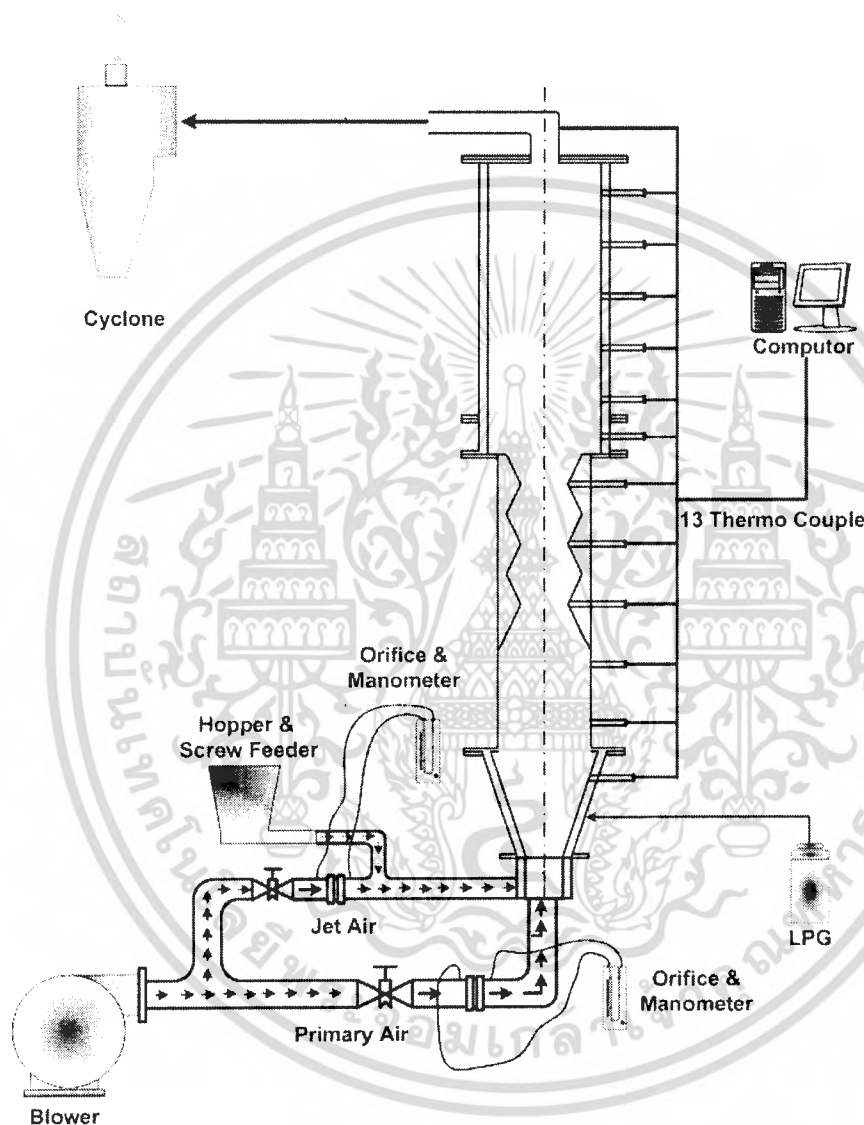
การค้นคว้าวิจัยเกี่ยวกับคุณลักษณะของเตาเผาเพื่อให้เหมาะสมต่อการใช้งาน สำหรับประเทศไทยมีการค้นคว้าวิจัยเตาเผาหลายประเภทด้วยกันเช่นเตาเผาออร์เทก, เตาเผาฟลูอิด ไคซ์เบด หรือ เตาเผาไซโคลน เป็นต้น ซึ่งจากอดีตจนถึงปัจจุบันได้มีนักวิจัยทั้งในและต่างประเทศมากมาย

#### 2.2.1 งานวิจัยภายในประเทศ

2.2.1.1 งานวิจัยของ วุฒิ แจ่มอัน และคณะ [1] ได้ทำการศึกษาลักษณะของ การเปลี่ยนแปลงผนังของห้องเผาไหม้โดยที่ในการทดลองจะยังคงความสูงของแต่ละหอการทดลองไว้ที่ความสูงค่าเดียวกัน คือ 2,400 mm ที่ขนาดของห้องเผาไหม้ปกติ 200 mm ซึ่งสำหรับกรณีนี้ คือ กรณีเตาเผาแกลบลูอิด ไคซ์เบดแบบผนังเตาเป็นแบบผิวเรียบ ฟริบอร์ใหญ่ ทำการทดลองเพื่อทำการเปรียบเทียบผลที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงผนังของห้องเผาไหม้โดยจะทำการทดลองที่ อัตราการป้อนเชื้อเพลิงค่าเดียว คือ 9 kg/hr และแน่นอนว่าการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงแข็งจำเป็นต้องมี ปริมาณเปอร์เซ็นต์ของอากาศส่วนเกินในปริมาณที่มาก ดังนั้นจึงทำการศึกษาที่ค่าเปอร์เซ็นต์ของ อากาศส่วนเกิน 40%, 60%, และ 80% ตามลำดับ เพื่อหาเปอร์เซ็นต์อากาศส่วนเกินที่เหมาะสมที่สุด และศึกษาผลของการปรับเปลี่ยนลมด้านหลัก ต่อ ลมด้านรอง เป็น 50%/50%, 40%/60%, 30%/70%, 20%/80%, และ 10%/90% ตามลำดับ ทำการปรับอัตราการไหลของเชื้อเพลิงระหว่าง 6-12 kg/hr เพื่อหาขอบการติดไฟของเตา ทำให้ทราบว่าหลักการของฟลูอิด ไคซ์เบดยังคงมีความเหมาะสมที่จะ ประยุกต์ใช้งานในการเผาไหม้ หากแต่ว่าจำเป็นต้องมีขนาดของความสูงที่มากกว่าที่ได้ทำการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทดลองจึงจะให้ผลดี กรณีเตาเผาแกลบฟลูอิดไคซ์เบดแบบผึ่งเตาเป็นแบบผิวเรียบ จะมีการควบคุมเงื่อนไขของการเผาไหม้หรือการทดลองที่ยากมาก จึงทำการขยายพรีบอร์ดใหญ่ด้านบนทำให้สามารถลดการหลุดลอยของแกลบได้ดี ทำให้มีระยะเวลาในการเผาไหม้ที่นานขึ้น สำหรับผลของการกระจายอุณหภูมิตามแนวรัศมีมีความสม่ำเสมอตลอดทั้งหน้าตัดของห้องเผาไหม้

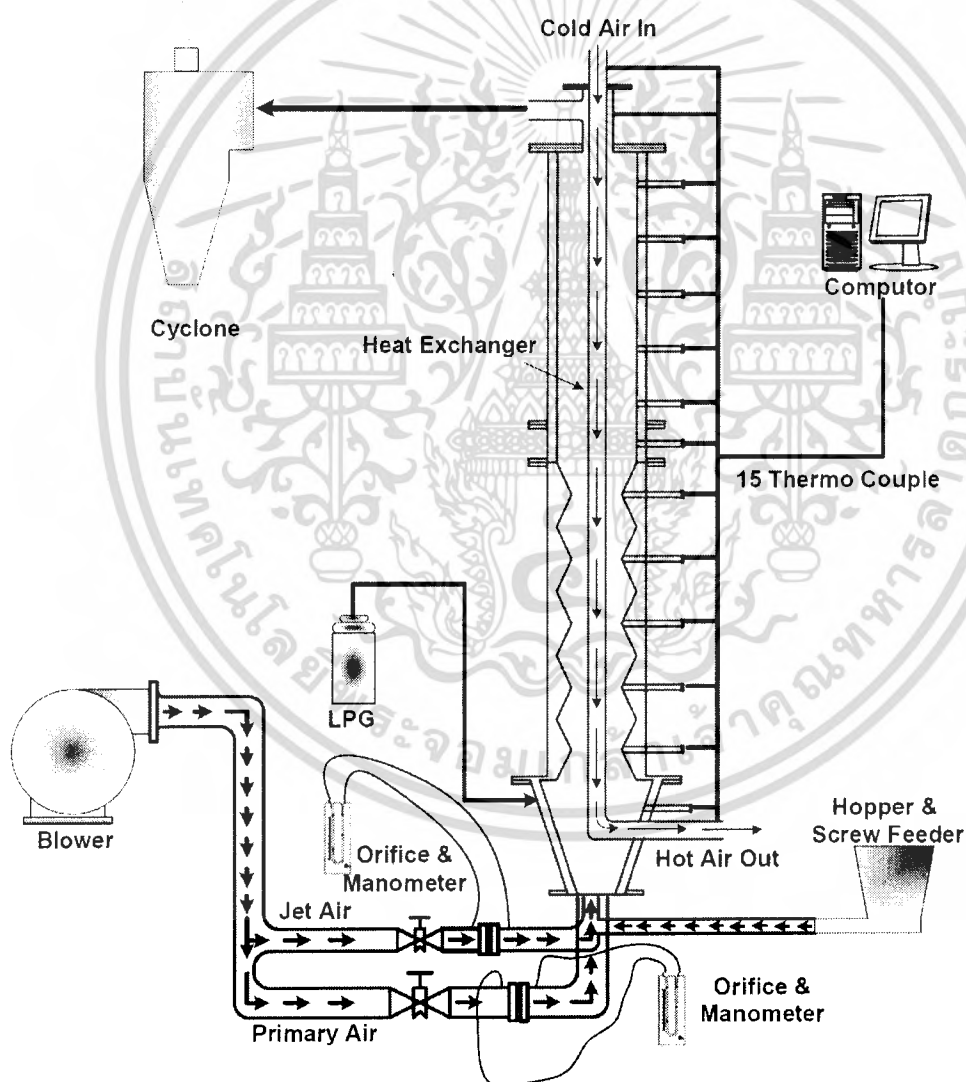


รูปที่ 2.1 ไลอะแกรมการทดลองของเตาเผาฟลูอิดไคซ์เบดแบบผิวคลื่น

2.2.1.2 งานวิจัยของ ดิษฐพร ตุงโสทรานนท์ [2] ได้ทำการศึกษาเตาเผาแกลบแบบฟลูอิดไคซ์เบดที่มีผิวคลื่น ห้องเผาไหม้มีลักษณะเป็นท่อทรงกระบอก มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 200 มิลลิเมตร (D) สูง 2.4 เมตร ผิวคลื่นมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1D เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.5D และได้ทำการทดลองกับเตา 4 แบบ คือ เตาเผาฟลูอิดไคซ์เบด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

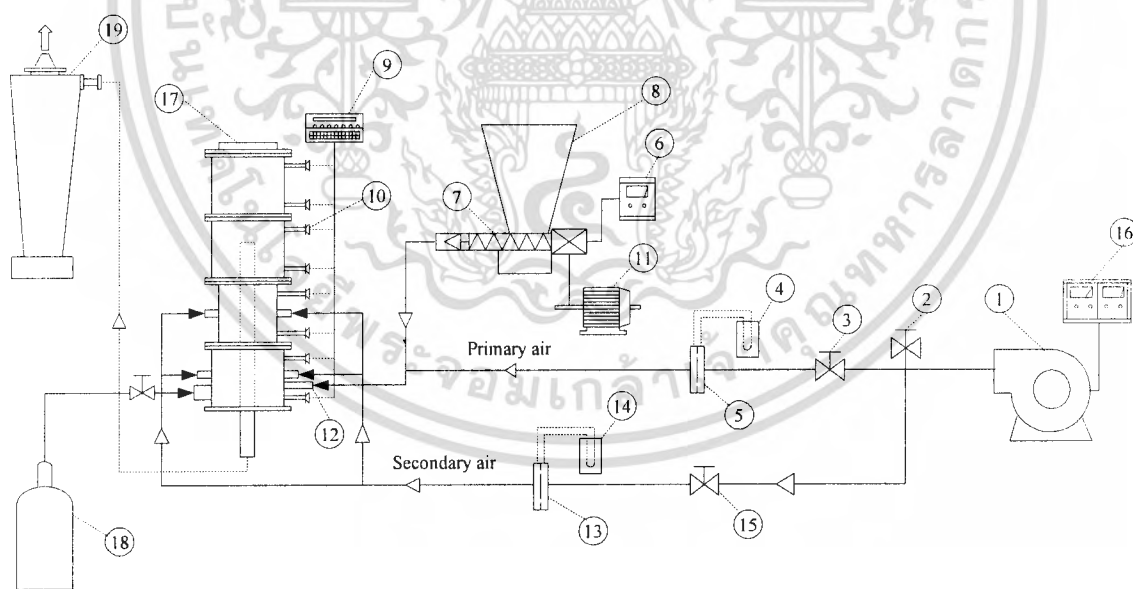
แบบผิวเรียบ เต้าเผาฟลูอิดไดซ์เบดแบบมีคอคอด เต้าเผาฟลูอิดไดซ์เบดแบบคลื่นล่าง และ เต้าเผาฟลูอิดไดซ์เบดแบบคลื่นบน ใช้เชื้อเพลิงแกลบขนาดปกติ ประมาณ 2 ม.ม. x 8 ม.ม. ใช้อากาศส่วนเกิน 15%, 30%, 45%, 60%, และ 75% ของอัตราการไหลของอากาศทั้งหมด 95 kg/hr และ อัตราการป้อนเชื้อเพลิงแกลบอยู่ระหว่าง 10-15.5 kg/hr อัตราการไหลของอากาศในอุปกรณ์ แลกเปลี่ยนความร้อน 0%, 20%, 40%, 60%, 80%, และ 100% ของอัตราการไหลของอากาศทั้งหมด 95 kg/hr ทดลองกับเต้าเผาที่อากาศส่วนเกิน 45% ทดลองการใช้ทรายเป็นเบด วัดการกระจายตัวของอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่าง ๆ แล้วทำการวิเคราะห์ก๊าซไอเสียที่เกิดขึ้น ซึ่งผลการทดลองเต้าเผาฟลูอิดไดซ์แบบผิวคลื่นทำให้การเผาไหม้ดีขึ้นกว่าแบบผิวเรียบ แต่ประสิทธิภาพการเผาไหม้ยังไม่ดีพอจากการที่เชื้อเพลิงมีการหลุดลอยออกจากห้องเผาไหม้เร็วเกินไป



รูปที่ 2.1 โค้ดอะแกรมการทดลองของเต้าเผาฟลูอิดไดซ์เบดแบบผิวคลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**2.2.1.3 งานวิจัยของ วิศิษฐ์ ลีลาผาติกุล [3]** ศึกษาชั้นวอร์เทคของเตาเผาเคลือบ ที่มีอิทธิพลต่อการเผาไหม้ภายในเตาซึ่งเตาเผาไหม้มีลักษณะเป็นท่อทรงกระบอก มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 300 มิลลิเมตร (D) โดยมีแกนกลางภายในเป็นท่อทึงไอเสีย และมีการติดตั้งตำแหน่งท่อฉีดอากาศไว้ใ้ในแนวสัมผัสรอบ ๆ ผนังเตาเผาไหม้ เพื่อทำให้เกิดการไหลหมุนวนของอากาศภายใน ขนาดของเตาเผาไหม้ส่วนบนและส่วนล่าง ถูกออกแบบให้สามารถปรับเปลี่ยนขนาดจาก 1.0D เป็น 0.75D และ 0.5D ตามที่ได้ออกแบบไว้ การเปลี่ยนขนาดเตาเผาส่วนบนและส่วนล่างนี้ ก่อให้เกิดการหมุนวนหลายชั้นภายในเตาเผาไหม้ รายละเอียดของอุปกรณ์ในการทดลองสามารถดูได้จากรูปที่ 2.1 โดยพิจารณาความสัมพันธ์ของการกระจายอุณหภูมิสูงสุดภายในเตา เมื่อทำการปรับค่าอัตราส่วนสมมูล ( $\Phi$ ) เท่ากับ 0.8, 1.0 และ 1.2 โดยแต่ละการทดลอง จะกำหนดอัตราส่วนของอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศทุกชนิดต่ออัตราการไหลของอากาศทั้งหมด ( $\lambda$ ) เท่ากับ 0.0, 0.15, และ 0.25 ที่อัตราการไหลของเชื้อเพลิงเคลือบที่เท่ากับ 0.3 kg/min. จากการทดลองเตาเผาส่วนบนและส่วนล่างที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 0.5D และ 1.0D ตามลำดับ ที่ค่า  $\Phi$  เท่ากับ 0.8 และที่ค่า  $\lambda$  เท่ากับ 0.0 พบว่าอุณหภูมิสูงสุดภายในเตาเผาเท่ากับ 1,192 องศาเซลเซียส ที่บริเวณวงแหวนของห้องเผาไหม้ โดยควันที่เกิดจากการเผาไหม้มีปริมาณน้อย และจากการวิเคราะห์ก๊าซไอเสียของเตาเผาออร์เทค พบว่าประกอบด้วย ก๊าซออกซิเจน เท่ากับ 1.5%, ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เท่ากับ 18.3% และ ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ เท่ากับ 205 ppm.

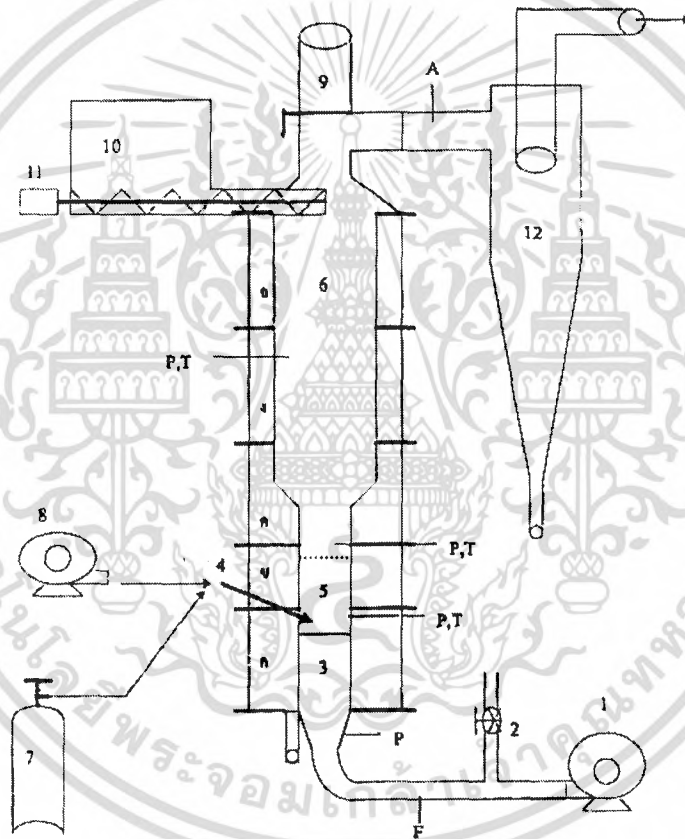


- |               |                  |                    |                           |                   |
|---------------|------------------|--------------------|---------------------------|-------------------|
| (1) Blower    | (2) Ball valve   | (3) Globe valve    | (4) U-tube manometer      | (5) Orifice meter |
| (6) Inverter  | (7) Screw feeder | (8) Hopper         | (9) Temperature indicator | (10) Thermocouple |
| (11) Motor    | (12) Primary air | (13) Orifice meter | (14) U-tube manometer     | (15) Globe valve  |
| (16) Inverter | (17) Combustor   | (18) LPG           | (19) Cyclone              |                   |

**รูปที่ 2.2** โดอะแกรมการทดลองของเตาเผาออร์เทคหลายชั้น(MVC)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**2.2.1.4 งานวิจัยของ เสรีย์ ตู่ประกาย [4]** ศึกษาและออกแบบเตาเผาภาคตะกอนแบบฟลูอิดไดซ์เบด โดยใช้ภาคตะกอนจากโรงบำบัดน้ำเสียห้วยขวาง เป็นข้อมูลพื้นฐานส่วนรายละเอียดของอุปกรณ์ทดลองสามารถดูได้จากรูปที่ 2.2 โดยลักษณะเตาเผาเป็นรูปทรงกระบอกหล่อด้วยคอนกรีตทนไฟ บริเวณส่วนเผาไหม้มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.2 เมตร ส่วนขยายด้านบนมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.4 เมตร ใช้ก๊าซ LPG เป็นเชื้อเพลิงป้อนหัวเผา พบว่าสภาพที่เหมาะสมในการดำเนินการอยู่ที่ อัตราการป้อนก๊าซ LPG 4.35 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ปริมาณอากาศสำหรับฟลูอิดไดซ์ 32 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง อากาศผสม LPG ที่หัวเผา 7.5 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง ศึกษาอัตราการป้อนการตะกอนที่ 10, 15, 20, 25, 30 กิโลกรัมต่อชั่วโมงพบว่า ประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงสุดเท่ากับ 95.62 % ที่อัตราการป้อน 15 กิโลกรัมต่อชั่วโมง และประสิทธิภาพการทำลายภาคตะกอนสูงสุดเท่ากับ 95.89 % ที่อัตราการป้อนภาคตะกอน 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 |

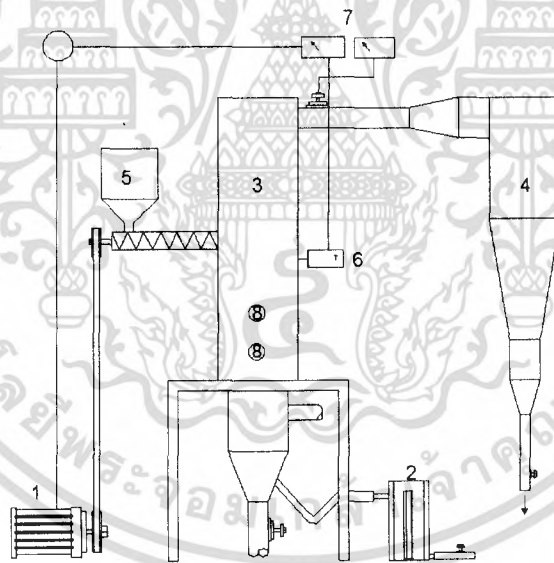
**รูปที่ 2.3** แสดงส่วนประกอบทั้ง 5 ส่วนที่นำมาประกอบเป็นเตาเผา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**2.2.1.5 งานวิจัยของ ศศิวิมล สูงสว่าง [5]** ได้ทำการวิจัยการเผาไหม้ของแกลบ โดยใช้เตาเผาแบบฟลูอิดไดซ์เบดเพื่อทำการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมของการเผาไหม้แกลบที่ทำให้ได้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพและคุ้มทุน ซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อเทคโนโลยีในการเปลี่ยนพลังงานเคมีที่มีอยู่แกลบที่เหลือใช้ให้เป็นพลังงานความร้อนเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป

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

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าสภาวะที่เหมาะสมในการเผาไหม้แกลบในเตาเผาแบบฟลูอิดไดซ์เบดคือ ความเร็วของอากาศเท่ากับ 32.77 m/s และอุณหภูมิของการเผาไหม้มีค่าประมาณ



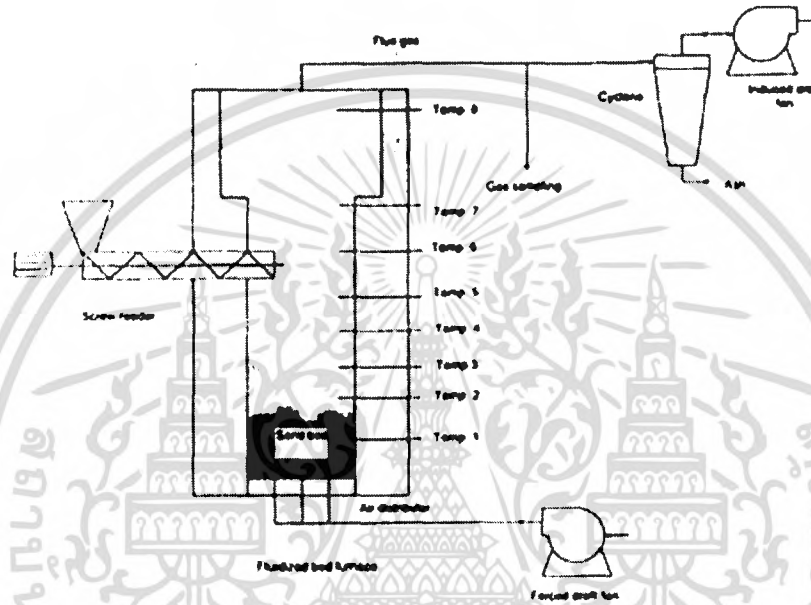
1. มอเตอร์
2. เครื่องวัดความเร็วของอากาศ
3. ฟลูอิด ไดซ์เบดคอลลัมน์
4. ไซโคลน
5. เครื่องป้อนวัสดุดิบ
6. เครื่องวัดอุณหภูมิ
7. เครื่องควบคุมอุณหภูมิ
8. ช่องสำหรับดูดการเผาไหม้ภายในคอลัมน์

**รูปที่ 2.4** แผนภาพของเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

700 องศาเซลเซียส ซึ่งประสิทธิภาพของการเผาไหม้ที่คำนวณได้มีค่าเท่ากับ ร้อยละ 96.91 โดยที่ กำหนดอัตราการป้อนแกลบไว้ที่ 3.05 kg/hr และชี้แกลบที่ได้จากการเผาไหม้เมื่อนำมาเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เปรียบเทียบกับวิธีการที่มีใช้อยู่พบว่าประสิทธิภาพของการเผาไหม้แบบฟลูอิดไดซ์เบดมีค่าสูงกว่าประมาณร้อยละ 47 – 53

2.2.1.6 งานวิจัยของ สุวิทย์ เตีย และคณะ [6] ได้ทำการศึกษาการเผาไหม้ชีวมวลในเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบด ซึ่งได้ทำการนำเตาฟลูอิดไดซ์เบดมาใช้เชื้อเพลิงชีวมวล ได้แก่ กากมันสำปะหลัง , เปลือกถั่วลิสง และฟางข้าว เพื่อทำการศึกษาถึงผลของอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงที่มีผลต่อการเผาไหม้ โดยที่ทำการกำหนดอัตราการป้อนเชื้อเพลิงให้มีค่าคงที่ คือ 15 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ซึ่งอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัยแสดงได้ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.5 เตาเผาไหม้แบบฟลูอิดไดซ์เบด

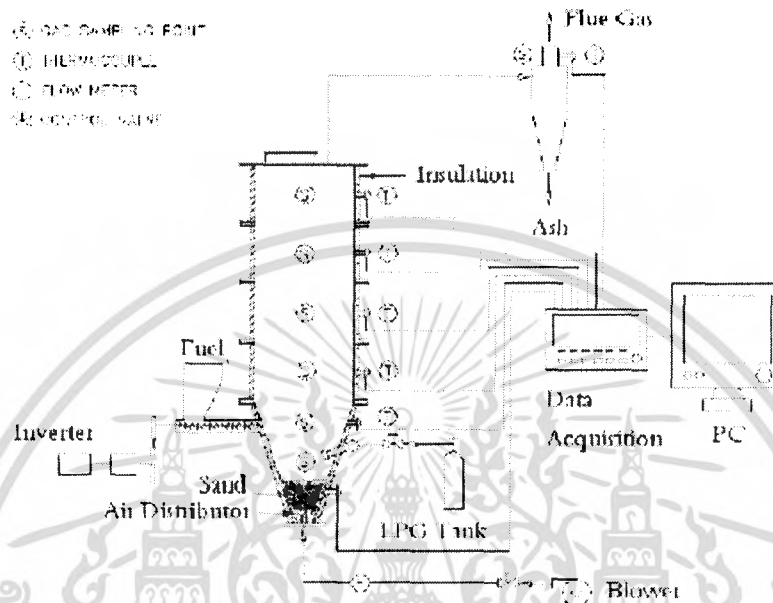
จากการทดลองพบว่า ค่าอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงที่ทำให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้สูงสุดของกากมันสำปะหลัง, เปลือกถั่วลิสง และฟางข้าว มีค่าเท่ากับ 7.25 , 6.0 และ 7.15 ตามลำดับจะได้ค่าประสิทธิภาพการเผาไหม้เท่ากับ 99.71% , 99.07% และ 97.92% ตามลำดับ และพบว่าอุณหภูมิเหนือเบดสูงกว่าอุณหภูมิในเบด เป็นเพราะชีวมวลที่ใช้มีปริมาณสารระเหยสูง ส่วนปริมาณก๊าซพิษได้แก่ ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์เฉลี่ยอยู่ในช่วง 290 – 340 ppm ส่วนสารประกอบออกไซด์ของไนโตรเจน ( $\text{NO}_x$ ) จะมีน้อยมากประมาณ 120 – 200 ppm

## 2.2.2 งานวิจัยในต่างประเทศ

2.2.2.1 งานวิจัยของ W.Permchart และคณะ [15] ได้ทำการศึกษาทดลองการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงแกลบภายในเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดทรงกรวย (conical FBC) โดยใช้ทรายเป็นเ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งมีขนาดประมาณ 0.3-0.5 mm ซึ่งได้ทำการศึกษาอุณหภูมิและแก๊สไอเสียที่เกิดขึ้นตามความสูงของเตาเผา และเชื้อเพลิงแกลบที่ใช้จะมีความชื้นประมาณ 10.3% อัตราการป้อนของเชื้อเพลิงแกลบ 2 ค่า คือ 37.3 และ 82.4 kg/hr แล้วในแต่ละอัตราทำการปรับเปลี่ยนอากาศส่วนเกิน 6 ค่า คือ 20, 40, 60, 80, 100 และ 120%



รูปที่ 2.6 โคอะแกรมการทดลองของเตาเผา conical FBC

ใช้เครื่องมือวิเคราะห์ก๊าซไอเสีย Testo-350 M โดยทำการวัดส่วนประกอบของก๊าซ ( $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$  และ  $\text{NO}$ ) ในก๊าซไอเสียโดยตัวอย่างในการทดสอบจะทำการวัดช่องวัดพิเศษภายในเตาเผาและที่ทางออกของไซโคลนและนำจี๊ดที่ได้จากการเผาไหม้สำหรับวิเคราะห์ส่วนประกอบของจี๊ดที่ยังไม่เผาไหม้ไปวิเคราะห์ พื้นฐานของการวิเคราะห์การสูญเสียความร้อนมีอยู่ด้วยกัน 2 ตัวแปรคือคาร์บอนที่ยังเผาไหม้ภายในจี๊ดและการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์จากการทดลองสามารถสรุปได้ว่า รูปแบบของอุณหภูมิตามแนวแกนของเตาเผา Conical FBC อัตราการป้อนเชื้อเพลิงซึ่งเป็นผลกระทบที่ชัดเจนต่ออากาศส่วนเกินและความสูงของเบดซึ่งเป็นอิทธิพลของอุณหภูมิรูปแบบของ  $\text{CO}$  และ  $\text{NO}$  ตามแนวแกนมีค่าสูงสุดอัตราการป้อนของเชื้อเพลิงและอากาศส่วนเกิน อย่างไรก็ตาม  $\text{CO}$  และ  $\text{NO}$  ตามแนวแกนมีผลมาจากความสูงของเบดประสิทธิภาพการเผาไหม้ของเตาเผา Conical FBC สำหรับการเผาแกลบอยู่ในช่วงระหว่าง 81 ถึง 86% ภายใต้เงื่อนไขการทดสอบที่ต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**2.2.2.2 งานวิจัยของ Teng และคณะ [19]** ได้ทำการศึกษาคุณลักษณะการเผาไหม้ของขยะยางในเตาเผาต้นแบบฟลูอิดไคซ์เบดแบบอากาศหมุนวน เตาเผานี้จะถูกออกแบบให้มีการเผาไหม้ขยะยางในปริมาณ 120 kg/hr. ส่วนประกอบของเตาเผาสร้างจากวัสดุทนไฟ การศึกษานี้กำหนดให้มีความร้อนสูญเสียที่ออกไปสู่สิ่งแวดล้อมคิดได้ว่ามีค่าน้อยมาก (น้อยกว่า 5%) ลักษณะของตัวเตาเผาสามารถแบ่งเป็น 4 ส่วนใหญ่คือ Windbox, Distributor (ตัวกระจายลม), Combustion Chamber (ห้องเผาไหม้) และ Freeboard

Windbox ถูกแบ่งเป็น 2 ส่วนแยกออกจากกัน ปริมาตรของส่วนหนึ่งเป็น 2 เท่าของอีกส่วนหนึ่ง อากาศปฐมภูมิจะถูกควบคุมแยกกันในแต่ละส่วน ตัวกระจายลมจะถูกออกแบบให้มีลักษณะที่ลาดเอียง จุดประสงค์ของการออกแบบ Windbox และตัวกระจายลมก็เพื่อการไหลหมุนวนของวัสดุเบดภายในเตาเผา ห้องเผาไหม้มีขนาดฐาน 0.7 X 1.4 เมตร และมีความสูง 2 เมตร ภายในห้องเผาไหม้แบ่งออกเป็นส่วนที่มีความเร็วสูงกับส่วนที่มีความเร็วต่ำ เหนือส่วนของ Windbox ตัวเล็กจะเป็นส่วนที่มีความเร็วสูง

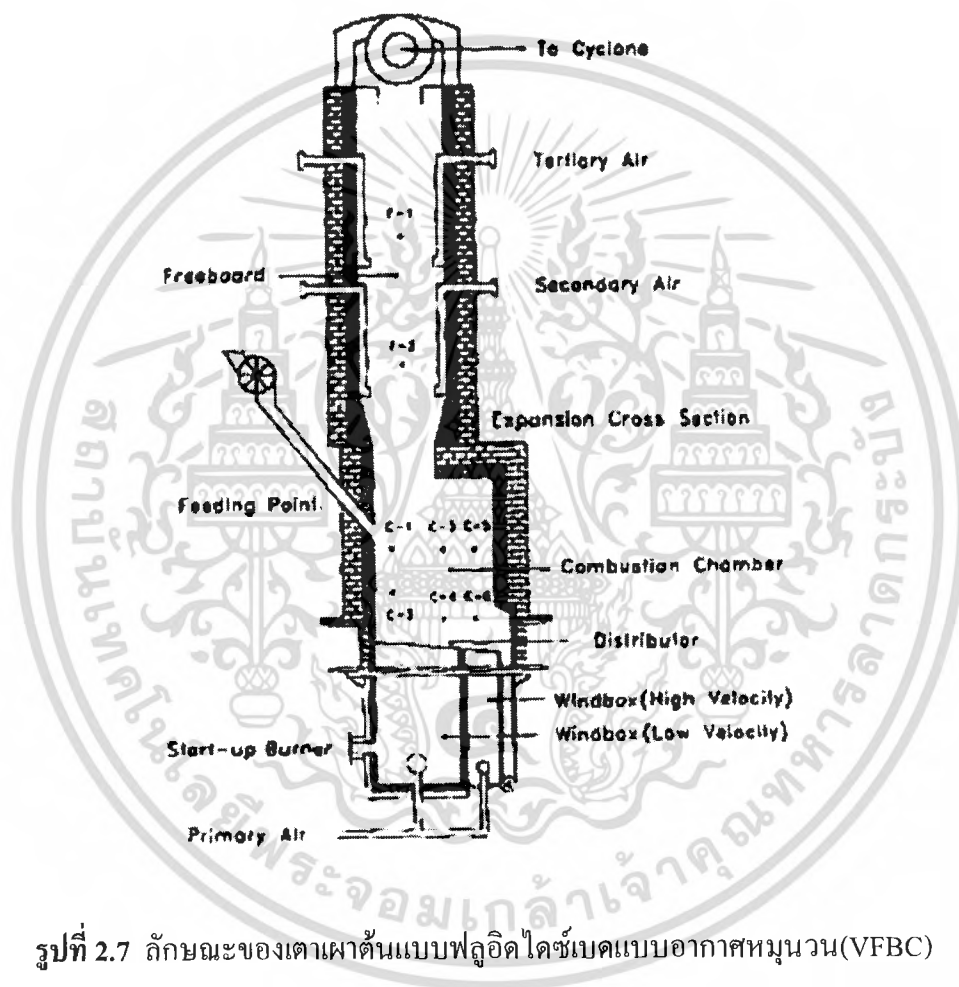
ส่วนของ Freeboard มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 เมตร และมีความสูง 4 เมตร หัวฉีดของอากาศทุติยภูมิจะถูกวางเป็น 2 ระดับบน Freeboard แต่ละระดับประกอบไปด้วยหัวฉีดจำนวน 4 หัววางไว้ให้มีระยะห่างเท่า ๆ กัน และมีการแบ่งระดับของหัวฉีดทั้ง 2 ระดับนี้เราเรียกส่วนต่างว่าอากาศทุติยภูมิ (Secondary Air) และเรียกส่วนบนว่าอากาศส่วนที่ 3 (Tertiary Air) ดังแสดงในภาพที่ 2.4 อากาศทั้ง 1 ส่วนนี้จะถูกอุ่นก่อนที่จะส่งเข้าไปใน Freeboard

ระบบป้อนเชื้อเพลิงนี้มีการป้อนเชื้อเพลิงเหนือเบด และมีการป้อนทั้งเศษยางกับหินปูน โดยทั้งเศษยางและหินปูนจะถูกส่งไปตามทางส่งเข้าไปในห้องเผาฟลูอิดไคซ์เบด จุดที่มีการป้อนจะอยู่ที่ด้านข้างของส่วนที่มีความเร็วต่ำ

ขยะยางได้ถูกนำมาทำเป็นเชื้อเพลิงในเตาเผา การศึกษานี้ได้ใช้เศษยาง 2 ขนาด คือ 10-20 มิลลิเมตรและ 50-100 มิลลิเมตร ส่วนประกอบและองค์ประกอบของธาตุของขยะยางและได้ใช้ทรายซิลิกาเป็นวัสดุเบดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 520 ไมโครเมตร ปริมาณกำมะถันที่สูงของขยะยางจะให้ปริมาณซัลเฟอร์ออกไซด์ที่สูงในการเผาไหม้ การทดลองนี้ได้ใช้หินปูนเป็นตัวลดการปล่อยซัลเฟอร์โดยขนาดเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางของหินปูนคือ 710 ไมโครเมตร อัตราส่วนของแคลเซียมต่อซัลเฟอร์กำหนดให้อยู่ที่ 3 ทุกการทดลอง

การเผาไหม้เศษยางที่มีขนาดแตกต่างกันในเตาเผาต้นแบบฟลูอิดไคซ์เบดแบบอากาศหมุนวนนั้น การใช้เศษยางขนาดใหญ่กว่าจะทำให้ปริมาณสารระเหยในปริมาณเล็กน้อยถูกเผาไหม้ใน Freeboard ผลการทดลองทำให้เห็นแล้วว่าอุณหภูมิเบดที่คงตัวจะเป็นการใช้ยางที่มีขนาดใหญ่กว่าเชื้อเพลิง

คุณลักษณะของการเผาไหม้มีความสำคัญและมีอิทธิพลจากอัตราการไหลของอากาศทุติยภูมิและอากาศส่วนที่ 3 การเพิ่มขึ้นของการฉีดอากาศทุติยภูมิและอากาศส่วนที่ 3 พร้อมกันจะทำให้เพิ่มความเข้มของการหมุนวนและความเร็วของแก๊สตามแกนใน Freeboard, ทั้งประสิทธิภาพการเผาไหม้, การปล่อยมลพิษมีผลเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของอากาศ



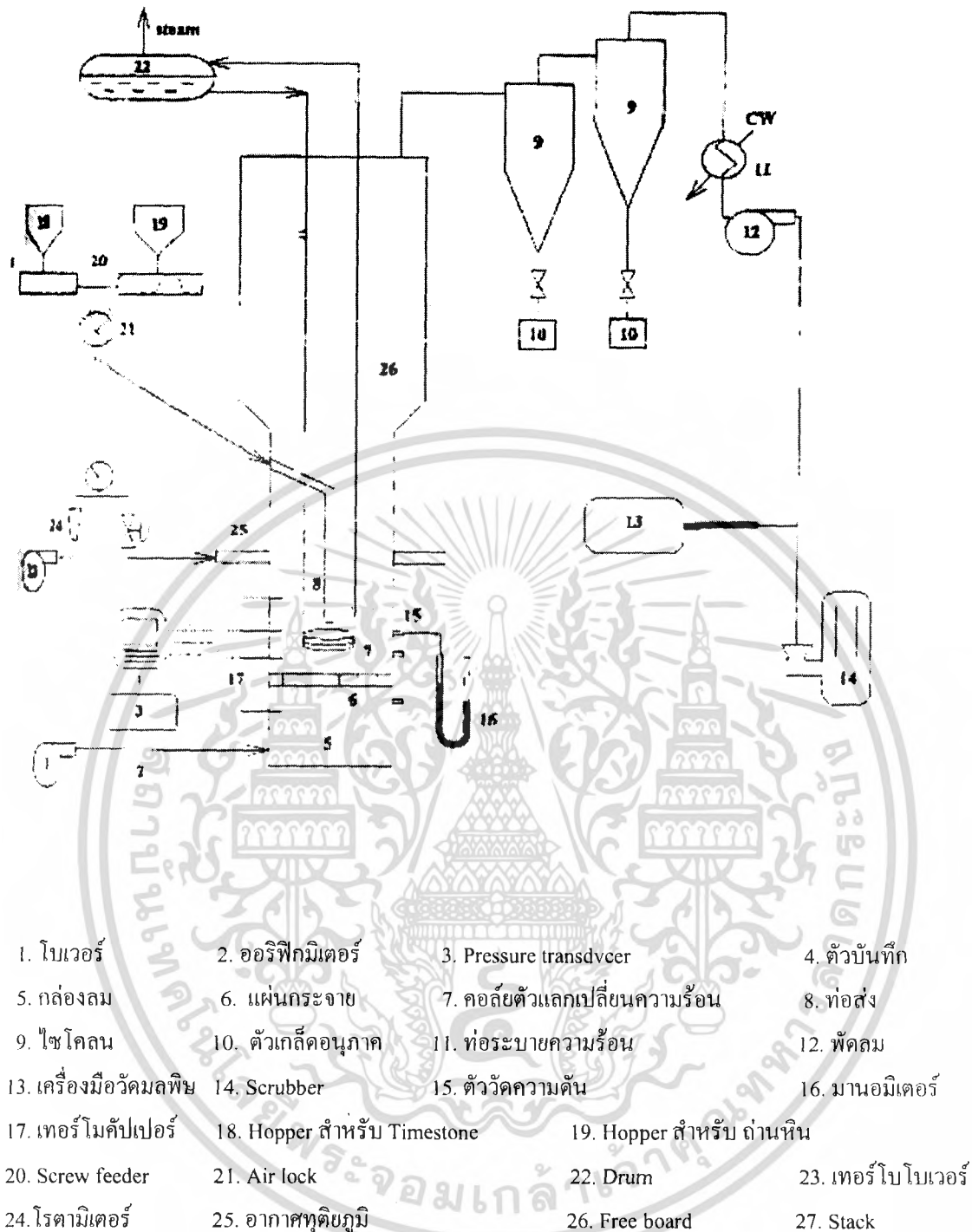
รูปที่ 2.7 ลักษณะของเตาเผาต้นแบบฟลูอิดไดซ์เบดแบบอากาศหมุนวน(VFBC)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.2.2.3 งานวิจัยของ LIN, C.H. และคณะ [9] ได้ทำการทดสอบการเผาไหม้

เตาเผาฟลูอิด ไคซ์เบดแบบหมุนวน ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 0.45 m. โดยใช้ถ่านหินบิทูมินัสที่พบภายในประเทศ 3 ชนิด (+3.5, -9.7 mm; +1.4, -3, -1.4 mm.) ใช้เป็นเชื้อเพลิงโดยอัตราการป้อนถ่านหินคงที่เท่ากับ 36 kg/hr. ส่วนอากาศปฐมภูมิถูกจัดที่ 95 % ของอากาศทางทฤษฎี ขณะที่ความเร็วเป็น 1.2 m/s (ประมาณ 3.5 เท่าของ umf) ไคอะแกรมของระบบการเผาไหม้สามารถดูได้จากรูป 2.5 เงื่อนไขการทำงานที่เหมาะสมสำหรับการศึกษานี้ทำการศึกษายาขนาของทรายในฟลูอิดไคซ์เบดและความเร็วของแก๊สที่ทำให้เกิดความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดปรากฏการณ์ฟลูอิด ไคซ์เซชัน ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.345 m/s อากาศฟลูอิดไคซ์ซึ่งและอากาศปฐมภูมิของการเผาไหม้ ซึ่งมาจาก 2 Blower แบบ Roots ขนาด 15 แรงม้า อากาศทุติยภูมิมาจากเทอร์โบโบเวอร์ขนาด 3 แรงม้า คอมเพรสเซอร์ขนาด 20 แรงม้าใช้สำหรับส่งอากาศผ่านท่อไปยังห้องเผาไหม้, ซึ่งเป็นการสร้างจากสเตนเลส (316) และหุ้มเซรามิกไฟเบอร์หนา 0.1 m. ความสูงของเตาเผาทั้งหมดเป็น 4.68 m. ความลึกของเบดเป็น 0.6 m. และความสูงของ Free board เป็น 2.5 m. โดยรายละเอียดของเตาเผาแสดงในรูปที่ 2 คอลย์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบปรับได้ที่อยู่ภายในเตาเผาเป็นตัวช่วยควบคุมอุณหภูมิด้วยการปรับพื้นที่ผิวของคอลย์ในเบด

การจัดวางหัวฉีด (สำหรับการฉีดอากาศทุติยภูมิ) ใน Free board แสดงในรูปที่ 27 การจัดวางนี้วางในแนวระดับและมุมของหัวฉีดเป็น 60 องศา มีการกำหนดความสูงของหัวฉีดของอากาศทุติยภูมิ ซึ่งเป็นตัวแปรที่สำคัญเมื่อจะทำการหาประสิทธิภาพของการเผาไหม้อย่างไรก็ตามระดับความสูงของการฉีดอากาศทุติยภูมิทั้งสาม (ที่ 0.9, 1.3 และ 1.85 ) เหนือแผ่นกระจายที่ทำการทดสอบเทอร์โมคัปเปิ้ลและแท่งความดันติดตั้งตามแนวตั้งของเตาเผาเพื่อใช้สำหรับวัดอุณหภูมิและความดัน ท่อไอเสียมีการหล่อเย็นที่ 200 °C ก่อนที่จะปล่อยออกไปยังบรรยากาศ อุณหภูมิของแก๊สไอเสียจะถูกเก็บไว้ในชุดไซโคลนทั้ง 2 และสกรับเบอะแบบเปียก



รูปที่ 2.8 ไลอะแกรมของระบบเตาเผาฟลูอิดไคซ์เบด(VFBC)

ผลลัพธ์จากการทดลองนี้ชี้ให้เห็นว่าอนุภาคของถ่านหินเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดใหญ่ประสิทธิภาพการเผาไหม้สูง ถ้าไม่มีการฉีดอากาศชุดยภูมิอัตราส่วนของอากาศส่วนเกินเกือบสูงจะทำให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้, ตำแหน่งของการฉีดอากาศชุดยภูมิควรจะอยู่ในตำแหน่งล่างในบริเวณเหนือช่วงการขยายตัวแต่ที่ตำแหน่งสูงกว่าสำหรับช่วงต่ำกว่าช่วงขยายตัวอย่างไรก็ตามประสิทธิภาพการเผาไหม้ซึ่งสูงเป็น 96 % ง่ายต่อการควบคุมภายใต้การศึกษาใน VFBC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษานี้เป็นการสนับสนุนให้เห็นว่าปริมาณการไม่เผาไหม้ของ CO ในแก๊สไอเสียหรือการไม่เผาไหม้สารระเหยในอนุภาคของถ่านหินของซีเอ็นเอสามารถเป็นลบในเงื่อนไขของการทำงานอย่างไรก็ตามการสูญเสียของคาร์บอนที่ไม่เผาไหม้ในเบดเป็นลบในค่าอื่นประสิทธิภาพของการเผาไหม้สามารถคำนวณได้ด้วยเปอร์เซ็นต์ของคาร์บอนที่ไม่ถูกเผาไหม้ในซีเอ็นเอ ในการเปรียบเทียบระหว่างผลลัพธ์จากการเผาไหม้ได้จากสมการ 1-3 มีความคล้ายคลึงกันและผลต่างเฉลี่ยระหว่างผลลัพธ์มีค่าน้อยกว่า 3% อย่างไรก็ตามวิธีจากสมการ 3 เป็นที่วางใจได้และมีจุดมุ่งหมายดีกว่า 2 วิธีอื่นสุดท้ายสำหรับ VFBC ก็ใช้การศึกษานี้ การปล่อย Nox ต่ำกว่า 100 ppm

จากงานวิจัยทั้งหมดยังไม่มียานวิจัยใด ๆ ที่ศึกษาถึงผลของการทำห้องเผาไหม้ให้เป็นผิวคลื่นที่ทำให้เกิด Recirculation เพราะฉะนั้นการศึกษาดังกล่าวถึงอิทธิพลของผิวคลื่น และ ฟริบอร์ใหญ่ ที่มีผลต่อการเผาไหม้ภายในเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดแบบผิวคลื่น และ ฟริบอร์ใหญ่ต่ออิทธิพลของการเผาไหม้รวมถึงมลพิษที่ออกมาจากเตาเผา ซึ่งล้วนแล้วเป็นสิ่งที่น่าสนใจในการนำมาศึกษาหาผลที่เกิดขึ้นกับการเผาไหม้ของแกลบภายในเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดแบบแบบผิวคลื่น และ ฟริบอร์ใหญ่ ดังนั้นจึงได้ทำการศึกษาในงานวิจัยนี้



72070

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### ทฤษฎี

ในการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งนั้นมีความยุ่งยากซับซ้อนกว่าเชื้อเพลิงก๊าซและของเหลวมาก เนื่องจากการทำปฏิกิริยาของออกซิเจนกับคาร์บอนที่มีอยู่ในเชื้อเพลิงจะต้องอาศัยพื้นผิวใหม่ของเชื้อเพลิงในการเกิดออกซิเจนไปจับตัวกับคาร์บอนส่วนที่เหลือในเชื้อเพลิงเพื่อเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ที่ต่อเนื่องจนกระทั่งเกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ ดังนั้นจึงควรจะทำการศึกษาถึงทฤษฎีการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงแข็ง, ทฤษฎีความชื้นและองค์ประกอบของก๊าซไอเสียที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้

#### 3.1 เชื้อเพลิงชีวมวล

เชื้อเพลิงที่ใช้ในการเผาไหม้สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ เชื้อเพลิงที่ได้จากการทับถมตัวของซากพืชซากสัตว์ ภายใต้อิทธิพลของโลกหรือที่เรียกว่าเชื้อเพลิงดึกดำบรรพ์ (Fossil fuel) ได้แก่ ถ่านหิน น้ำมัน และก๊าซธรรมชาติ เชื้อเพลิงอีกประเภทหนึ่งคือ เชื้อเพลิงชีวมวล (Biomass) ซึ่งเป็นวัสดุที่ได้จากสิ่งมีชีวิต เช่น ไม้ ขี้เลื่อย และแกลบข้าว เป็นต้น เชื้อเพลิงประเภทชีวมวลนี้ส่วนใหญ่จะได้จากสิ่งที่เหลือทิ้งจากการเกษตร ซึ่งสามารถหาได้ง่าย โดยเฉพาะอย่างยิ่งในบริเวณที่มีการทำเกษตรกรรม

##### 3.1.1 ประเภทของเชื้อเพลิงชีวมวล

เชื้อเพลิงชีวมวลสามารถแยกประเภทได้เป็น 4 ประเภท คือ

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

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

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

3.1.1.4 เชื้อเพลิงที่ได้จากของเหลือใช้จากคน (Domestic waste) ได้แก่ เชื้อเพลิงจากขยะเทศบาล เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.2 คุณลักษณะของเชื้อเพลิงชีวมวล

เชื้อเพลิงชีวมวลโดยทั่วไปจะเป็นเชื้อเพลิงที่แตกต่างกันตามประเภทของเชื้อเพลิงชีว-มวลและการที่เชื้อเพลิงชีวมวลมีปริมาณความชื้นและองค์ประกอบที่แตกต่างกัน จึงทำให้ค่าความร้อน (Heating Value) ของเชื้อเพลิงชีวมวลมีค่าแตกต่างกันด้วยดังนี้

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

#### แกลบ

แกลบที่ใช้ในการทดลองเป็นแกลบที่ได้จากส่วนประกอบของเมล็ดข้าว ซึ่งสามารถอธิบายที่มาของแกลบได้ดังนี้ เมล็ดข้าวเป็นผลชนิด คาริออปซิส (Caryopsis) ส่วนที่เป็นเมล็ดที่ติดแน่นอยู่กับผนังของรังไข่หรือเยื่อหุ้มผล สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วน คือ เปลือกใหญ่ (Lemma) เปลือกเล็ก (Pale) ประกอบกัน แบบตะขอพัน (Interlocking fold) ทั้งสองข้างตลอดแนวความยาว ภายในเปลือกที่หุ้มเมล็ดข้าวนี้มีช่องว่างระหว่างเม็ด และเปลือกที่ปลายทั้ง 2 ด้าน ผิวของเปลือกทั้งสองส่วนจะมีหนามแข็งเล็กๆติดอยู่โดยรอบทั่วไป

ข้อดี มีคุณสมบัติในการเป็นเชื้อเพลิงได้ดีพอสมควรและราคาถูกมาก

ข้อเสีย เมื่อถูกเผาไหม้จะมีปริมาณขี้เถ้าสูงพอประมาณ 15.7 – 21.3 เปอร์เซ็นต์ มีปริมาณความชื้นสูง

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเชื้อเพลิงชีวมวลโดยวิธีการวิเคราะห์ทางเคมีทำให้ทราบองค์ประกอบของเชื้อเพลิงชีวมวลของขี้เลื่อยและแกลบดังนี้

แกลบ			
ธาตุคาร์บอน	ประมาณ	40 – 42	เปอร์เซ็นต์
ออกซิเจน	ประมาณ	36 – 37	เปอร์เซ็นต์
ไฮโดรเจน	ประมาณ	5	เปอร์เซ็นต์
ไนโตรเจน	ประมาณ	1	เปอร์เซ็นต์
ขี้เถ้า	ประมาณ	14 – 17	เปอร์เซ็นต์
LHV	ประมาณ	12.27	MJ/kg

### 3.2 ทฤษฎีการเผาไหม้

ปฏิกิริยาการเผาไหม้ (Combustion reaction) หมายถึง ปฏิกิริยาทางเคมีที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วระหว่างออกซิเจนกับสารเผาไหม้ได้ (combustible element) ของเชื้อเพลิงชนิดหนึ่ง ๆ สารเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เผาไหม้ได้ในที่นี้มีธาตุหลัก 3 ตัว คือ คาร์บอน ไฮโดรเจน และกำมะถัน สำหรับกำมะถันขณะเกิดปฏิกิริยากับออกซิเจนจะให้ความร้อนไม่มากนักเมื่อเปรียบเทียบกับคาร์บอนและไฮโดรเจน ในทางตรงกันข้ามกลับเพิ่มปัญหาในด้านการกัดกร่อนชิ้นส่วนหรืออุปกรณ์ รวมทั้งทำให้เกิดปัญหามลพิษในอากาศ

การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงต้องอาศัยปัจจัยที่สำคัญ 3 ประการ คือ

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

### 3.2.1 การผสม

การรวมตัวที่ีระหว่างเชื้อเพลิงกับออกซิเจน ก็คือ การที่อนุภาคของเชื้อเพลิงสัมผัสกับโมเลกุลของออกซิเจนได้อย่างทั่วถึง ในกรณีที่เชื้อเพลิงเป็นก๊าซ การผสมกันนั้นจะเป็นไปได้ง่าย แต่ถ้าเชื้อเพลิงเป็นของแข็งหรือของเหลว การผสมกันนั้นก็ยุ่งยากมากขึ้น

ในกรณีที่เชื้อเพลิงเป็นของเหลว ส่วนใหญ่ก็จะมีการทำให้เป็นอนุภาคเล็ก ๆ ก่อนหรือเป็นฝอย แล้วจึงจะทำการเผาไหม้ซึ่งจะทำให้รวมตัวได้ง่ายกับอากาศและเกิดการลุกไหม้ได้ดีเหมือนเชื้อเพลิงที่เป็นก๊าซ

ส่วนเชื้อเพลิงที่เป็นของแข็งนั้น แต่ละโมเลกุลของออกซิเจนจะสัมผัสกับพื้นผิวของเชื้อเพลิงเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ให้ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ซึ่งเป็นก๊าซที่ติดไฟได้พร้อมกับให้ความร้อนออกมาส่วนหนึ่ง จากนั้นออกซิเจนจะเข้าไปผสมกับคาร์บอนมอนอกไซด์ทำให้เกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ คือ เกิดคาร์บอนไดออกไซด์ในที่สุดซึ่งเป็นก๊าซที่ไม่ติดไฟได้เองแล้วพร้อมกับให้ความร้อนออกมาด้วย

ฉะนั้นกระบวนการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงที่เป็นของแข็งนั้นจะประกอบด้วยพฤติกรรม 4 ขั้นตอน คือ

1. เริ่มต้นด้วยออกซิเจนสัมผัสกับพื้นผิวของเชื้อเพลิงที่เป็นคาร์บอน
2. เกิดการรวมตัวของคาร์บอนกับออกซิเจนกลายเป็นก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ออกมาพร้อมกับความร้อน
3. มีการปล่อยก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ได้จากการเผาไหม้ออกจากผิวของเชื้อเพลิง

4. มีการรวมตัวกันของคาร์บอนมอนนอกไซด์กับออกซิเจนอีกครั้งจนกระทั่งกลายเป็น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

ดังนั้นจะกล่าวได้ว่า อัตราการเผาไหม้ที่ขึ้นอยู่กัสาเหตุที่กล่าวมาแล้ว และสามารถเร่งปฏิกิริยาการเกิดได้โดยการบดเชื้อเพลิงที่เป็นของแข็งให้เป็นผงซึ่งเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวในการสัมผัสให้มากขึ้น

### 3.2.2 การติดไฟหรือการลุกไหม้

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

1. บริเวณที่จำกัดสำหรับการสะสมความร้อน
2. สารเชื้อเพลิง
3. อากาศ

การลุกไหม้ที่นั่นไม่ได้เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นได้เองส่วนใหญ่จะใช้ปริมาณความร้อนจากภายนอกช่วยเร่งปฏิกิริยาการเผาไหม้ และให้ปริมาณความร้อนออกมาเพิ่มขึ้น นอกจากนั้นสิ่งที่สำคัญสำหรับการเผาไหม้แบบต่อเนื่องก็คือ อุณหภูมิ ซึ่งถ้าอุณหภูมิต่ำเกินไปก็ทำให้เชื้อเพลิงไม่สามารถลุกไหม้แบบต่อเนื่องได้ แต่ถ้าอุณหภูมิของการเผาไหม้สูง การลุกไหม้ก็จะเกิดต่อไปได้เรื่อย ๆ

ดังนั้นการติดไฟหรือการลุกไหม้ที่ขึ้นอยู่กัหลายสิ่ง เช่น ชนิดของสารเชื้อเพลิง, สถานะของเชื้อเพลิง และอัตราส่วนของเชื้อเพลิงกับอากาศ

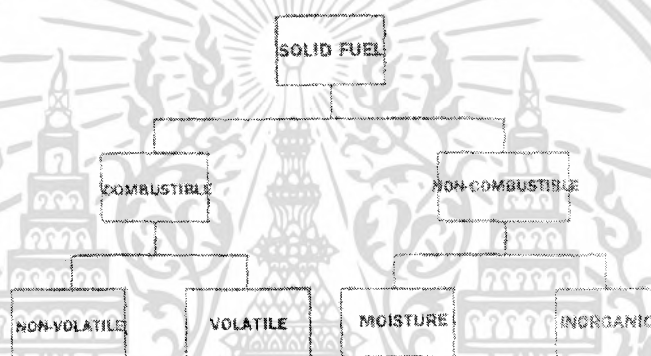
### 3.3 การเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง

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

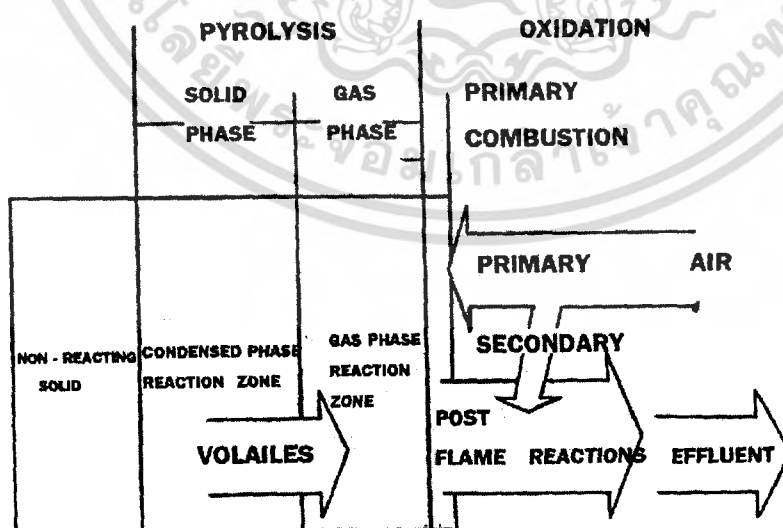
สารที่ไม่สามารถเผาไหม้ได้ เรียกว่า สารเฉื่อย (Inert) สารเฉื่อยนี้สามารถเปรียบเทียบได้กั ก๊าซไนโตรเจนในอากาศ ซึ่งจะไม่ช่วยในการเผาไหม้ แต่ในบางครั้งสารเฉื่อยเหล่านี้ก็อาจจะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกิดปฏิกิริยาได้ในบางขบวนการของการเผาไหม้ โดยเฉพาะในขบวนการเผาไหม้ที่อุณหภูมิสูงๆ สารที่อยู่ในเชื้อเพลิงแข็ง สามารถแบ่งออกได้ 2 ชนิด คือ ความชื้น และสารประกอบเคมีที่ประกอบขึ้นเป็นขี้เถ้า สารอนินทรีย์เหล่านี้โดยมากจะเป็นพวกซิลิเกต(Silicates) ซัลไฟด์ (Sulfides) และเกลือฮาโลเจน (Halogen salt) เป็นต้น เมื่อเกิดการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง สารเหล่านี้จะกลายเป็นขี้เถ้า บางส่วนจะตกในห้องที่เผาไหม้ ส่วนที่มีน้ำหนักเบาจะปลิวไปกับไอเสียที่เรียกว่า เถ้าลอย (Fly ash) เชื้อเพลิงแข็งที่สามารถแยกได้เป็นส่วนที่ระเหยได้ (Volatile) และส่วนที่ไม่ระเหย (Non-volatile) ในส่วนที่ไม่ระเหยนี้ ประกอบด้วยคาร์บอน สารประกอบคาร์บอน  $C_xH_y$  โดยที่ค่า x มีค่ามากกว่า y มากๆ หรือเป็นสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงนั่นเอง ส่วนสารที่ระเหยได้ในที่นี้ หมายถึง สารประกอบที่ระเหยใช้ในช่วงของการเผาไหม้ ซึ่งจะประกอบไปด้วยสารประกอบไฮโดรคาร์บอน ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำๆ หลักในการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งปฏิกิริยาที่จะเกิดขึ้นดังรูปที่ 3.2

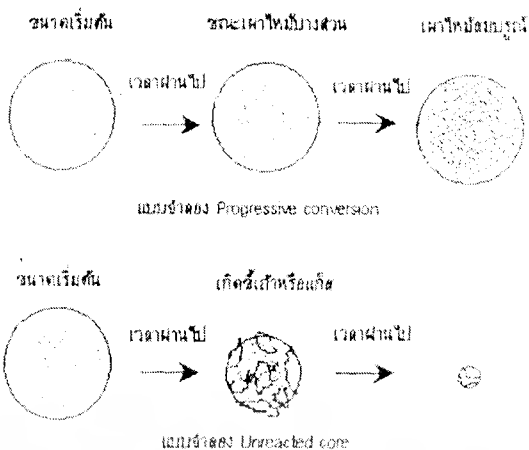


รูปที่ 3.1 องค์ประกอบของเชื้อเพลิงแข็ง

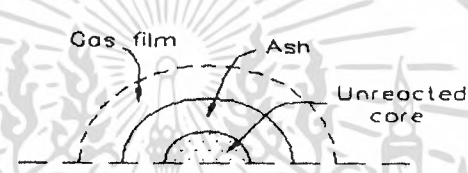


รูปที่ 3.2 ปฏิกิริยาการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง

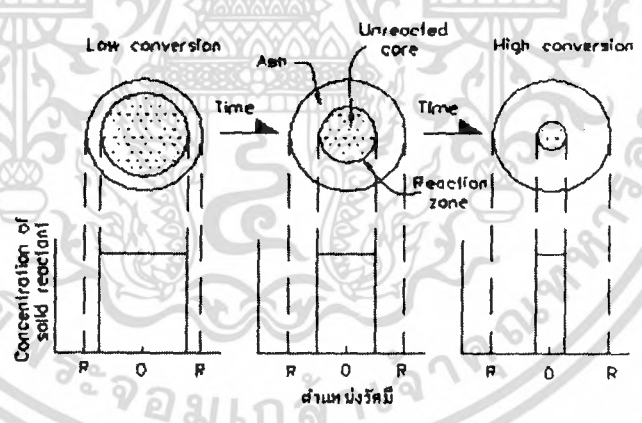
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 แบบจำลองการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง



รูปที่ 3.4 บริเวณการเกิดการเผาไหม้



รูปที่ 3.5 ลักษณะชั้นเชื้อเพลิงระหว่างการเผาไหม้

สิ่งที่มีผลต่ออัตราการเร็วในการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง

1. อุณหภูมิ โดยทั่วไปขั้นตอนของปฏิกิริยาเคมีจะไวต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ
2. เวลาของการแพร่กระจายของอากาศผ่านชั้นฟิล์ม หรือชั้นขี้เถ้า
3. ขนาดของเชื้อเพลิง
4. ความต้านทานของชั้นขี้เถ้ากับชั้นฟิล์ม โดยปกติความต้านทานของชั้นขี้เถ้าจะสูงกว่าชั้นฟิล์มมากดังนั้นค่าความต้านทานของชั้นฟิล์มจึงอาจจะตัดทิ้งได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ความต้านทานรวม ซึ่งรวมทั้งความต้านทานของแก๊สฟิล์มชั้นซีเถ้า และปฏิกิริยาการเผาไหม้

### 3.4 เปอร์เซนต์อากาศส่วนเกิน (Percent Excess air)

ในการเผาไหม้จริงปริมาณอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้จะมากกว่าหรือน้อยกว่าทางทฤษฎี ถ้าปริมาณอากาศที่ใช้มากกว่าปริมาณอากาศทางทฤษฎีจะเรียกว่าอัตราส่วนผสมบาง(Lean Mixture) ตรงกันข้ามหากปริมาณอากาศที่ใช้น้อยกว่าจะเรียกว่าอัตราส่วนผสมหนา(Rich Mixture) เพื่อความสะดวกในการแสดงปริมาณของอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้จริงจึงกำหนดให้อยู่ในรูปของเปอร์เซนต์อากาศส่วนเกิน (percent excess air) คือ ปริมาณที่บอกให้ทราบว่าปริมาณอากาศส่วนเกินที่เปอร์เซนต์โดยคิดจากอากาศทางทฤษฎีที่มีค่าเท่ากับ 100

$$\text{เปอร์เซนต์อากาศส่วนเกิน(percent excess air)} = \left[ \frac{(A/F)_{Actual}}{(A/F)_{Stoic}} - 1 \right] \times 100\% \quad (3.1)$$

### 3.5 ทฤษฎีฟลูอิดไดเซชัน

ฟลูอิดไดเซชันเป็นปรากฏการณ์ที่อนุภาคของแข็งขนาดเล็กถูกทำให้อยู่ในสภาพคล้ายของไหลด้วยการพุง โดยก๊าซหรือของเหลวที่ไหลผ่านเบดของแข็งขึ้นไปด้านบนด้วยอัตราการไหลค่าหนึ่ง โดยมีการถ่ายเทมวลสาร ความร้อน และปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นในขณะที่มีการสัมผัสระหว่างอนุภาคของแข็ง

#### 3.5.1 ประเภทของฟลูอิดไดเซชัน

กระบวนการฟลูอิดไดเซชันแบ่งตามลักษณะการเกิดได้สองแบบ คือ

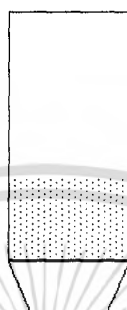
3.5.1.1 ฟลูอิดไดเซชันสองสถานะ (Two - phases fluidization) หมายความว่าในหอตลอด หรือเบดที่ใช้งานจะประกอบด้วยสองสถานะคือ ของแข็งกับของไหล ของไหลนี้อาจจะเป็นก๊าซหรือของเหลวก็ได้ ดังนั้นฟลูอิดไดเซชันจึงแบ่งออกอีก 2 ประเภท คือ

1. ก๊าซฟลูอิดไดเซชัน (Gas fluidization)
2. ฟลูอิดไดเซชันของของเหลว (Liquid fluidization)

3.5.1.2 ฟลูอิดไดเซชันสามสถานะ (Three - phases fluidization) หมายความว่าภายในหอตลอดจะประกอบด้วยของสามสถานะในเวลาเดียวกันคือ ของแข็ง, ของเหลวและก๊าซ สำหรับฟลูอิดไดเซชันสามสถานะเป็นกระบวนการที่พัฒนามาจากฟลูอิดไดเซชันสองสถานะ

### 3.5.2 ลักษณะฟลูอิดไคซ์เบด

เบด ( Bed ) หมายถึงอาณาเขตในหอทดลองที่มีอนุภาคของแข็งบรรจุอยู่ ไม่ว่าอนุภาคของแข็งนั้นจะอยู่นิ่งหรือเคลื่อนไหวยด้วยของไหลในห้องทดลอง จะระดับตั้งแต่แผ่นโลหะที่ทำเป็นตะแกรงรองรับหรือเป็นตัวกระจายของไหลจนถึงระดับสูงสุด คือผิวหน้าของอนุภาคของแข็งที่อยู่ในหอทดลอง ดังรูปที่ 3.6



ของไหลความเร็วต่ำ

รูปที่ 3.6 แสดงระดับของเบดในหอทดลอง

ปรากฏการณ์ฟลูอิดไคเซชันเกิดขึ้นได้หลายลักษณะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบบางประการ เช่น ความเร็วของของไหล ชนิดของเม็ดวัสดุที่ประกอบกันเป็นเบด ลักษณะของแผ่นกระจายของไหล เมื่อความเร็วของของไหลเปลี่ยนแปลงไปจะทำให้ความดันลดในเบดเปลี่ยนแปลงไปด้วย ดังรูปที่ 3.7 ถ้าดับเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นเมื่อค่อยๆ เพิ่มความเร็วของของไหลสรุปได้ดังนี้คือ

3.5.2.1 เมื่อป้อนของไหลด้วยความเร็วต่ำๆ ของไหลจะไหลผ่านช่องว่างระหว่างอนุภาคของแข็งไปโดยไม่ทำให้อนุภาคของแข็งเคลื่อนที่ เบดลักษณะนี้เรียกว่า เบดนิ่ง ( Fixed bed )

3.5.2.2 เมื่อความเร็วของของไหลสูงขึ้นอนุภาคของแข็งจะเคลื่อนที่ห่างออกจากกัน ลักษณะเช่นนี้เรียกว่า เบดขยาย ( Expanded bed )

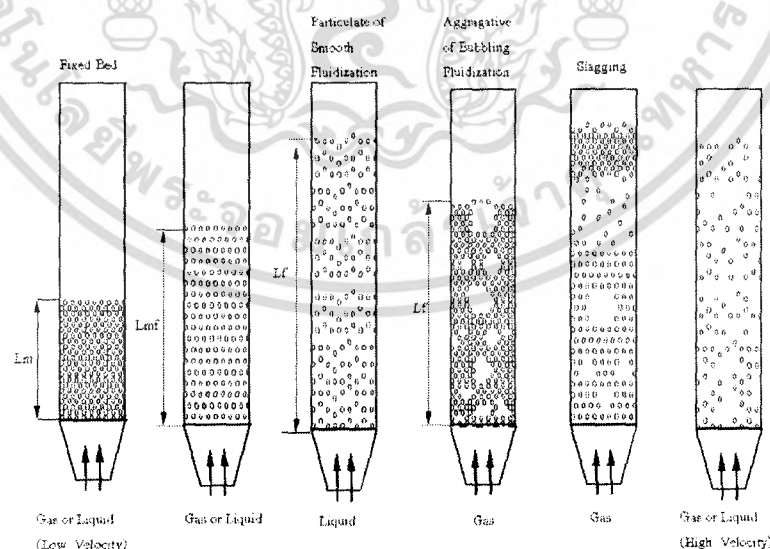
3.5.2.3 เมื่อเพิ่มความเร็วของของไหลขึ้นอีกจนถึงจุดๆหนึ่ง ซึ่งแรงเสียดทานระหว่างอนุภาคของแข็งกับของไหลสมดุลกับน้ำหนักของอนุภาคของแข็ง และแรงกระทำระหว่างอนุภาคของแข็งในแนวตั้งหายไป อนุภาคของแข็งที่ประกอบกันเป็นเบดจะลอยตัวเป็นอิสระ แรงกระทำเนื่องจากความดันลดในเบดระหนัดใดๆ ของเบดจะเท่ากับน้ำหนักของของไหลและอนุภาคของแข็งระหว่างหน้าตัดนั้นๆ เบดในสภาพเช่นนี้เป็นเบดที่เริ่มฟลูอิดไคซ์ เรียกเบดในลักษณะนี้ว่า อินซิเพียนฟลูอิดไคซ์เบด ( Incipiently fluidized bed ) หรือเบดที่มีสภาพฟลูอิดไคเซชันต่ำสุด ( Minimum fluidization )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5.2.4 เมื่อของไหลมีความเร็วมากกว่าความเร็วที่กล่าวในหัวข้อ 3.5.2.3 อนุภาคของแข็งจะเคลื่อนตัวห่างออกจากกันมากขึ้นตามความเร็วของของไหล จะเริ่มเกิดฟองก๊าซ ( Bubbles ) เกิดขึ้นอนุภาคของแข็งเริ่มไหลหมุนเวียนดีขึ้น เมื่อความเร็วของของไหลเพิ่มสูงขึ้น จะทำให้เกิดการผสมผสานและการไหลเวียนของของแข็งจะรุนแรงยิ่งขึ้น เภคในลักษณะเช่นนี้เรียกว่า บับบิลิงฟลูอิดไดซ์เบด ( Bubbiling fluidized bed ) ส่วนของเบคที่ไม่รวมฟองเรียกว่า อิมัลชันเฟส ( Emulsion phase )

3.5.2.5 ฟลูอิดไดซ์เบคที่สามารถบ่งบอกระดับเบคได้เรียกว่า ฟลูอิดไดซ์เบคแบบหนาแน่น ( Dense phase fluidized bed ) และเมื่อความเร็วของของไหลมากกว่าความเร็วขณะหลุดลอย ( Terminal velocity ) อนุภาคของของแข็งจะหลุดลอยไปกับกระแสการไหลของของไหลสถานะเรียกว่า ฟลูอิดไดซ์เบคแบบเจือจาง ( Lean phase fluidized bed ) หรือการขนถ่ายด้วยของไหล ( Pneumatic or Hydraulic transport )

3.5.2.6 ฟลูอิดไดซ์เบคที่ของไหลเป็นของเหลว การขยายตัวของเบคเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ การลอยตัวและการหมุนรอบตัวเองของอนุภาคของแข็งเป็นไปอย่างช้าๆ เราเรียกเบคแบบนี้ว่าเบคสม่ำเสมอ ( Smoothly fluidized bed ) ฟลูอิดไดซ์เบคที่ของไหลเป็นก๊าซลักษณะของเบคจะแตกต่างจากของเหลวมาก เพราะว่าเมื่อความเร็วของก๊าซสูงกว่าความเร็วที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดซ์ชันแล้วก๊าซส่วนหนึ่งยังทำหน้าที่ให้เกิดการลอยตัวของอนุภาคของแข็งเหมือนเดิม แต่มีอีกส่วนหนึ่งรวมตัวแล้วเกิดเป็นฟองก๊าซเกิดขึ้น ฟองก๊าซจะแทรกตัวองขึ้นมายังบนผิวหน้าของเบค และแตกตัวในที่สุด การเคลื่อนที่ของอนุภาคของแข็งภายในเบคจะเคลื่อนที่อย่างไม่เป็นระเบียบ



รูปที่ 3.7 ลักษณะของฟลูอิดไดซ์เบค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.5.3 ข้อได้เปรียบและเสียเปรียบของฟลูอิดไดเซชัน

เป็นการเปรียบเทียบการได้เปรียบและการเสียเปรียบระหว่างการใช้นิวเคลียสฟลูอิดไดเซชันกับเทคนิคอื่นๆ ดังมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

#### 3.5.3.1 ข้อได้เปรียบ

1. เนื่องจากอนุภาคของแข็งที่เคลื่อนที่อยู่ตลอดเวลา ทำให้เกิดการผสมกันอย่างรวดเร็วและสม่ำเสมอ อุณหภูมิภายในเบดคงที่ตลอด ซึ่งต่างจากเบดนิ่งซึ่งอุณหภูมิจะไม่เท่ากันตลอดทั้งเบด
2. การทำงานด้วยฟลูอิดไดเซชันเบดจะเสียพลังงานน้อยกว่า เพราะแรงเสียดทานและแรงดันตกคร่อมเบดน้อยกว่าแบบบรรจุมาก
3. มีการจัดเรียงตัวของอนุภาคของแข็ง อนุภาคที่มีน้ำหนักน้อยจะอยู่ส่วนบน ส่วนอนุภาคที่มีน้ำหนักมากกว่าจะอยู่ด้านล่าง ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการแยกขนาดของอนุภาคของแข็งได้ นอกจากนี้แรงเสียดทานต่อการไหลของของไหลมีน้อยกว่ามาก
4. จากคุณสมบัติที่คล้ายของไหลจึงสามารถทำงานแบบต่อเนื่องได้ คือ ปล่อยให้ของแข็งไหลออกจากเบดและไหลเติมเข้าไปในเบดได้ การควบคุมก็จะทำได้ง่าย
5. พื้นที่สัมผัสระหว่างอนุภาคของแข็งกับของไหล จะมีมากกว่าเมื่อเทียบกับเบดนิ่งที่มีอนุภาคของแข็งเท่ากัน จึงมีประโยชน์ในการใช้งานที่มีการถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวลสาร
6. ที่อนุภาคของไหลหมุนเวียนอยู่ภายในเบด อนุภาคของแข็งนี้สามารถจะเป็นตัวนำความร้อนจากแหล่งความร้อนให้กับของไหลได้มากกว่า

#### 3.5.3.2 ข้อเสียเปรียบ

1. เนื่องจากการผสมกันอย่างรวดเร็ว บางครั้งอนุภาคของของแข็งมีช่วงเวลาอยู่ในเบดสั้นเกินไป เมื่อทำงานแบบต่อเนื่องจึงทำให้ผลลัพธ์เลวลง หรืออนุภาคของแข็งมีคุณสมบัติทางกายภาพไม่ตรงตามข้อกำหนด
2. การสั่นสะเทือนของหอทดลองหรือเกิดการกัดกร่อนเนื่องจากอนุภาคของแข็งมากระทบกับผนังหอทดลอง
3. เวลาที่ของไหลสัมผัสกับอนุภาคของแข็งสั้นมาก จึงต้องใช้เบดสูงๆ หรือเบดหลายๆชั้นซึ่งเปลืองเงินลงทุนมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. มักเกิดฟองก๊าซในเบด ทำให้การสัมผัสกันไม่ดีเป็นการสูญเสีย ถ้ายังเป็นกระบวนการที่มีการเปลี่ยนแปลงทางเคมีจะต้องใช้ตัวเร่งช่วยแล้ว ทำให้เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงลดลง
5. ใช้กับอนุภาคของแข็งที่เป็ยหรือเป็นยางไม่ได้ เพราะเกิดการเกาะเป็นก้อนใหญ่และตกตะกอนมายังส่วนล่างของเบด
6. การทำงานมีข้อจำกัด เพราะถ้ามีความเร็วของของไหลมากเกินไป เม็ดของแข็งก็จะออกมาจากเบดไปพร้อมกับของไหล
7. ในปฏิกิริยาที่ทำให้ตัวเร่งมีขนาดลดลง จะต้องปรับความเร็วของก๊าซเพื่อไม่ให้ตัวเร่งปลิวทำให้ได้ผลิตภัณฑ์น้อยลง

### 3.5.4 ทฤษฎีการคำนวณฟลูอิดไดเซชัน

ขณะที่ของไหลไหลผ่านขึ้นมาด้านใกล้ผนัง ความเร็วของไหลจะต่ำมากหรือเกือบไม่มีการไหลเลยเนื่องจากเกิดแรงเสียดทาน เมื่อในหอตลอดที่บรรจุอนุภาคของแข็งมีอิทธิพลของฝาผนังเกิดขึ้น ขอบเขตการไหลชนิดเรียบจะสูงมากขึ้น พื้นที่ในการไหลของของไหลในหอตลอดจะลดน้อยลง หรือเส้นผ่านศูนย์กลางที่ทำงานที่แท้จริงของของไหลเล็กกว่าเดิมมาก ประสิทธิภาพการทำงานจะน้อยลงด้วย

ตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อการเกิดฟลูอิดไดเซชันคือ

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

ความสูงของเบดเมื่อเริ่มฟลูอิดไดเซชันสามารถหาได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\frac{L_0}{L_{mf}} = \frac{1 - \epsilon_{mf}}{1 - \epsilon_0} \quad (3.2)$$

ขณะที่อนุภาคของแข็งเริ่มลอยตัวเป็นอิสระแสดงว่า อนุภาคของแข็งกำลังอยู่ในสมดุลของแรง ซึ่งได้แก่แรงที่เกิดจากน้ำหนักของอนุภาคของแข็ง แรงพยุงของของไหล (

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Bouyance force) และแรงต้านการไหล (Drag force) อาจเขียนในสมการสมมูลแรงต่างๆได้ ดังนี้

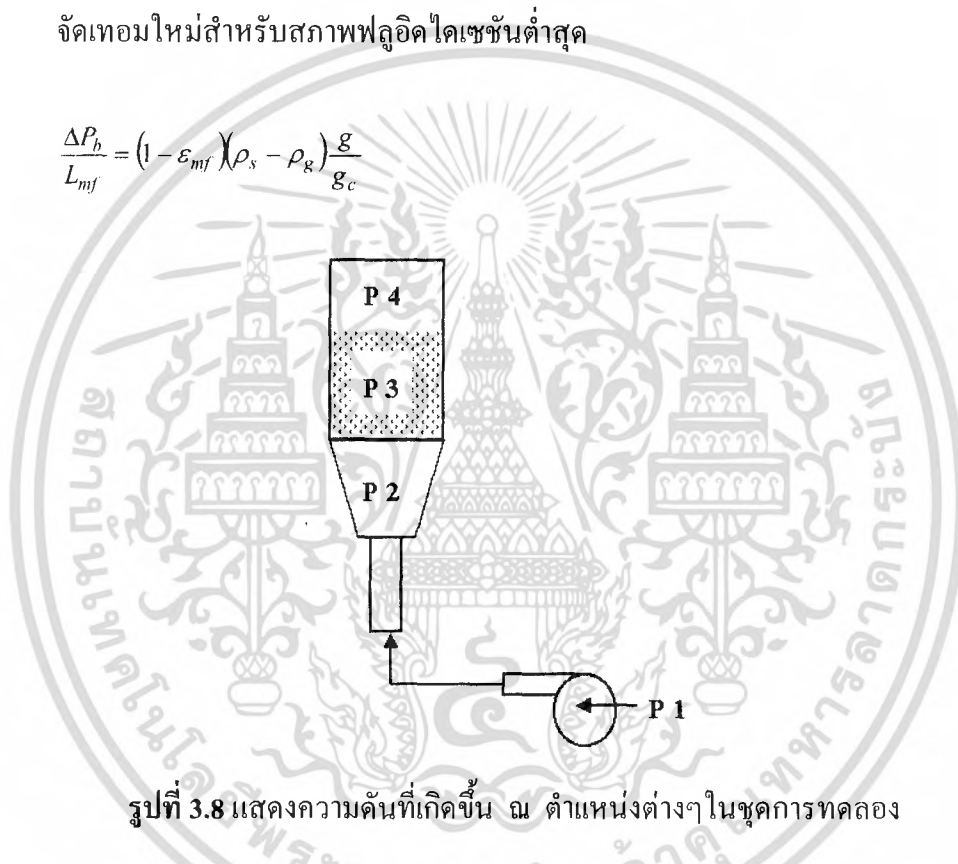
$$(\text{แรงพยุงของของไหล}) + (\text{แรงต้านทานการไหล}) = (\text{น้ำหนักของอนุภาคของแข็งในเบด}) \quad (3.3)$$

$$(\text{ความดันลดในเบด}) (\text{พื้นที่หน้าตัดของคอลัมน์}) = (\text{ปริมาตรของเบด}) (\text{แฟรคชันของของแข็ง}) (\text{น้ำหนักจำเพาะของของแข็ง}) \quad (3.4)$$

$$\Delta P_b A_t = W = (A_t L_{mf}) (1 - \epsilon_{mf}) (\rho_s - \rho_g) \frac{g}{g_c} \quad (3.5)$$

จัดเทอมใหม่สำหรับสภาพฟลูอิดไดเซชันต่ำสุด

$$\frac{\Delta P_b}{L_{mf}} = (1 - \epsilon_{mf}) (\rho_s - \rho_g) \frac{g}{g_c} \quad (3.6)$$



รูปที่ 3.8 แสดงความดันที่เกิดขึ้น ณ ตำแหน่งต่างๆในชุดการทดลอง

จากสมการความดันตกคร่อมที่ผ่านเบดหนึ่งจะได้ว่า กลไกของความดันตกคร่อมในเบดที่ใช้อนุภาคของแข็งขนาดสม่ำเสมอแล้ว พบว่าความดันตกคร่อมนี้เป็นสัดส่วนกับแฟลคเตอร์ 2 แฟลคเตอร์ คือ

$$\frac{\Delta P_b}{L} g_c = \frac{150(1 - \epsilon_{mf}) \mu U}{\epsilon_{mf}^3 (\phi_s d_p)^2} + \frac{1.75(1 - \epsilon_{mf}) \rho_g U^2}{\epsilon_{mf}^3 (\phi_s d_p)} \quad (3.7)$$

เทอมแรกทางด้านขวาของสมการ 3.7 แทนการสูญเสียความดันเนื่องจากผลของความเสียดทาน เทอมที่สองเป็นผลของการสูญเสียพลังงานจลน์ที่  $Re_p < 20$  โดยที่แรงเสียดทานจะมีค่ามากกว่า ดังนั้นสมการที่ 3.7 สามารถตัดเทอมที่สองได้เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{\Delta P_h}{L} g_c = \frac{150(1 - \varepsilon_{mf}) \mu U}{\varepsilon_{mf}^3 (\phi_s d_p)^2} \quad (3.8)$$

ที่  $Re_p > 1000$  ผลของการสูญเสียพลังงานจลน์จะมีค่ามากกว่าผลของแรงเสียดทาน สมการที่ 3.7 จัดใหม่ได้เป็นดังนี้

$$\frac{\Delta P_h}{L} g_c = \frac{1.75(1 - \varepsilon_{mf}) \rho_g U^2}{\varepsilon_{mf}^3 (\phi_s d_p)} \quad (3.9)$$

ซึ่งสมการของ Ergun นี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับสมการที่ 3.7 ได้ เมื่อเบดอยู่ที่จุดเริ่มเกิดฟลูอิดไอเซชัน ดังนั้นจะแทนสมการที่ 3.7 ลงในสมการที่ 3.6 ในขณะที่เริ่มเกิดฟลูอิดไอเซชันได้ดังสมการที่ 3.10

$$\frac{1.75}{\varepsilon_{mf}^3 \phi_s} \left[ \frac{d_p U_{mf} \rho_g}{\mu} \right]^2 + \frac{150(1 - \varepsilon_{mf}) (U_{mf} d_p \rho_g)}{\mu \varepsilon_{mf}^3 \phi_s^2} = \frac{d_p^3 \rho_g (\rho_s - \rho_g) g}{\mu^2} \quad (3.10)$$

ในเบดที่ไออนุภาคของแข็งขนาดเล็กจะทำให้สามารถใช้ความเร็วของของไหลเพียงเล็กน้อยก็ทำให้เกิดฟลูอิดไอเซชันได้แล้ว เพราะฉะนั้นความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไอเซชันเมื่อ  $Re_p < 20$  สามารถคำนวณได้จาก

$$U_{mf} = \frac{(\phi_s d_p)^2 (\rho_s - \rho_g) g \varepsilon_{mf}^3}{150 \mu (1 - \varepsilon_{mf})} \quad (3.11)$$

สำหรับอนุภาคของแข็งขนาดใหญ่ต้องใช้ความเร็วของไหลสูงมาๆ จึงทำให้อนุภาคของแข็งลอยเป็นอิสระได้ ดังนั้นความเร็วต่ำสุดของของไหลที่จะทำให้เกิดฟลูอิดไอเซชันเมื่อ  $Re_p > 1000$  สามารถคำนวณได้จากสมการ

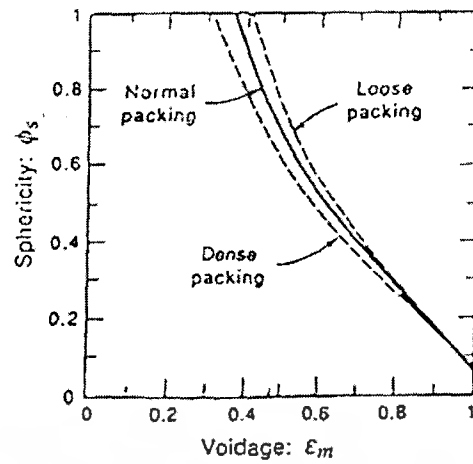
$$U_{mf} = \sqrt{\frac{\phi_s d_p (\rho_s - \rho_g) g \varepsilon_{mf}^3}{1.75 \rho_g}} \quad (3.12)$$

ค่าความกลมของอนุภาค ( $\phi_s$ ) ใช้นับบอกถึงรูปร่างว่าอนุภาคเบี่ยงเบนจากทรงกลมมากน้อยเพียงใด นิยามว่า

$$\phi_s = \frac{\text{พื้นที่ผิวของทรงกลม}}{\text{พื้นที่ผิวของอนุภาค}} \quad \text{เมื่อปริมาตรเท่ากัน} \quad (3.13)$$

จากรูปที่ 3.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความกลมและความพรุนของเบด จะเห็นว่าเมื่อความกลมของอนุภาคลดลง ค่าความพรุนจะเพิ่มขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความกลมและความพรุนของเบด

ถ้ายังไม่ทราบค่าของ  $\epsilon_{mf}$  และ  $\phi_s$  Wen และ Yu (1996) แนะนำให้ใช้สมการดังต่อไปนี้

$$\frac{1}{\phi_s \epsilon_{mf}^3} = 14 \quad (3.14)$$

$$\frac{(1 - \epsilon_{mf})}{\phi_s^2 \epsilon_{mf}^3} = 11 \quad (3.15)$$

แทนค่าสมการที่ 3.15 ลงในสมการที่ 3.10 แล้วค่า  $U_{mf}$  จะได้

$$U_{mf} = \frac{\mu}{d_p \rho_g} \left\{ (33.7)^2 + \frac{0.0408 d_p^3 \rho_g (\rho_s - \rho_g) g}{\mu^2} \right\}^{1/2} - 33.7 \quad (3.16)$$

สมการที่ 3.16 นี้ มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน 34 % ในช่วง  $0.001 < Re_p < 4000$

ความเร็วเริ่มหลุดลอยหรือความเร็วตกอิสระของอนุภาคของแข็งเป็นความเร็วของของไหลที่ไหลผ่านฟลูอิดไดซ์เบดถูกจำกัดด้วยความเร็วต่ำสุด ความเร็วเริ่มหลุดลอยแสดงได้ดังสมการ

$$U_T = \left[ \frac{4d_p(\rho_s - \rho_g)}{3\rho_g C_d} \right]^{1/2} \quad (3.17)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่  $C_d$  เป็นค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานซึ่งหาได้จากการทดลอง และจากการทดลองพบว่าค่า  $C_d$  ขึ้นอยู่กับค่า  $Re_p$  ดังสมการ

$$C_d = \frac{24}{Re_p} \quad \text{เมื่อ} \quad Re_p < 0.4 \quad (3.18)$$

$$C_d = \frac{10}{\sqrt{Re_p}} \quad \text{เมื่อ} \quad 0.4 < Re_p < 500 \quad (3.19)$$

$$C_d = 0.43 \quad \text{เมื่อ} \quad 500 < Re_p < 200000 \quad \text{หรือ} \quad 1000 < Re_p \quad (3.20)$$

แทนค่าจากสมการ 3.18, 3.19 และ 3.20 ลงในสมการที่ 3.17 แล้วหาค่า  $U_t$  จะได้

$$U_t = \frac{g(\rho_s - \rho_g)d_p^2}{18\mu} \quad \text{เมื่อ} \quad Re_p < 0.4 \quad (3.21)$$

$$U_t = d_p \left[ \frac{4(\rho_s - \rho_g)^2 g^2}{225\rho_g\mu} \right]^{1/3} \quad \text{เมื่อ} \quad 0.4 < Re_p < 500 \quad (3.22)$$

$$U_t = \left[ \frac{3.1g(\rho_s - \rho_g)d_p}{\rho_g} \right]^{1/2} \quad \text{เมื่อ} \quad 500 < Re_p < 200000 \quad \text{หรือ} \quad 1000 < Re_p \quad (3.23)$$

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

### 3.5.5 แผ่นกระจายของไหล

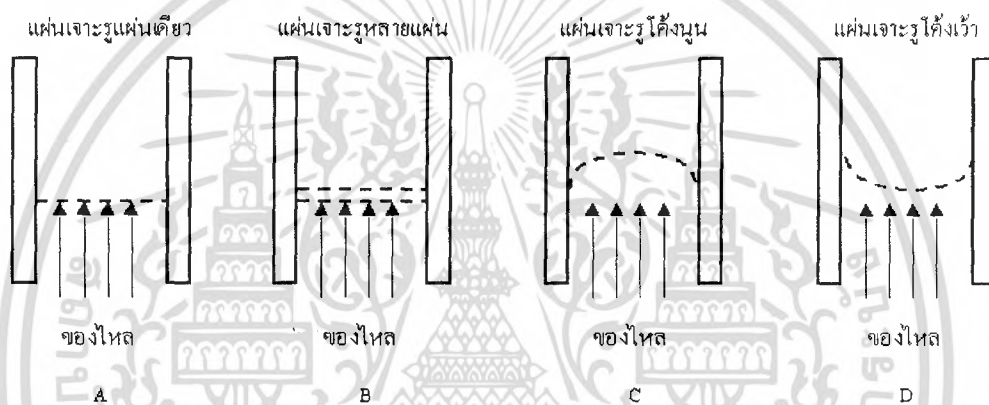
หน้าที่ของแผ่นกระจายของไหลคือ เป็นอุปกรณ์ป้องกันเพื่อมิให้อนุภาคหลุดลงมาด้านล่างและสามารถให้ของไหลไหลผ่านได้ โดยสามารถกระจายของไหลออกได้เต็มพื้นที่ผิวหน้าตัดของตัวเครื่อง โดยที่ความเร็วของของไหลที่เหนือแผ่นกระจายของไหลควรมีค่าเท่ากันทุกจุด และองค์ประกอบที่สำคัญอีกส่วนหนึ่งที่ทำให้ลักษณะของกลุ่มอนุภาคอยู่ในสภาวะเสมือนของไหลได้ดีหรือไม่ก็คือ ความดันตกคร่อม โดยของไหลที่ไหลผ่านแผ่นกระจายของไหล ถ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หากความดันตกคร่อมน้อยเกินไปจะไม่ดี ความดันตกคร่อมโดยทั่วไปจะต้องไม่ต่ำกว่า 10 % ของความดันตกคร่อมที่เกิดจากการไหลของของไหลผ่านกลุ่มอนุภาคขณะลอยตัว

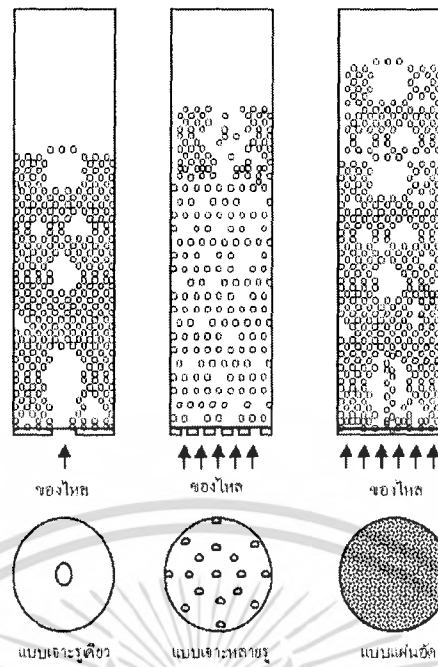
ลักษณะของแผ่นกระจายของไหลแบบต่างๆมีดังต่อไปนี้

3.5.5.1 แบบแผ่นเจาะรู ( Perforate plate ) แผ่นกระจายของไหลแบบแผ่นเจาะรูนั้น ทำได้โดยการนำแผ่นวัสดุมาเจาะรูให้มีรูปร่างและขนาดตามที่ต้องการ โดยทั่วไปถ้าเจาะรูน้อยลักษณะของอนุภาคเหนือแผ่นกระจายในขณะที่ลอยตัว หรืออยู่ในสภาวะเสมือนของไหลจะมีผลทำให้ความหนาแน่นไม่สม่ำเสมอ จะมีฟองอากาศใหญ่เกิดขึ้น โดยเฉพาะเมื่อความเร็วสูงๆ ดังนั้นจำนวนรูและการเจาะจึงมีส่วนสำคัญ แผ่นกระจายของไหลแบบนี้ใช้กันมากในห้องปฏิบัติการและเครื่องทดลองขนาดกลาง เพราะทำง่าย ราคาถูก และมีคุณสมบัติดีพอสมควร แสดงได้ในรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.10 ลักษณะของตัวกระจายแบบแผ่นเจาะรู

ในขณะที่เกิดฟลูอิดไดซ์เบดด้วยความเร็วของของไหลต่ำสุด ลักษณะของเบดยังเป็นเนื้อเดียวกันอย่างสม่ำเสมอตลอดทั้งเบด จากนั้นถ้าเพิ่มความเร็วของของไหลให้มากขึ้น ความเร็วที่เพิ่มมากขึ้นนี้จะก่อตัวเป็นฟองก๊าซเกิดขึ้นซึ่งขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของตัวกระจายของไหลที่รองรับเบดว่าเป็นชนิดใด อย่างเช่น ตัวกระจายทำด้วยแผ่นโลหะเจาะรูฟองอากาศที่เกิดขึ้นจะมีขนาดใหญ่กว่าตัวกระจายของไหลที่เป็นรูพรุน ซึ่งเกิดจากใช้เม็ดโลหะขนาดเล็กมาอัดด้วยความดันอัดสูงๆจนติดกับแผ่นกระจายของไหล ตัวกระจายของไหลแบบหลังนี้ของไหลผ่านได้อย่างสม่ำเสมอ ฟองก๊าซจึงเกิดขึ้นได้เป็นจำนวนมาก ตัวกระจายที่เป็นแผ่นเจาะรูของไหลจะผ่านออกไปเหมือนกับเจ็ท ( Jet ) จำนวนการเกิดของฟองก็ขึ้นอยู่กับจำนวนรูเจาะบนตัวกระจายดังแสดงในรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.11 คุณภาพของฟลูอิดไดเซชันเกิดจากแผ่นกระจายของไหลต่างชนิดกัน

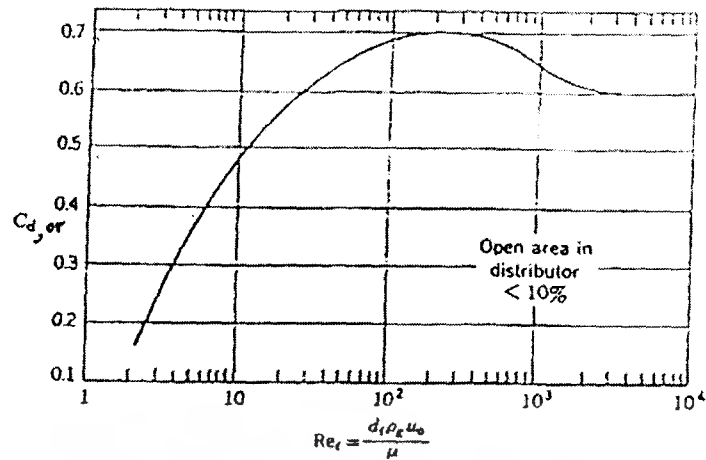
การออกแบบแผ่นกระจายของไหลนั้นมีสิ่งที่สำคัญคือ ความดันลดของก๊าซที่เกิดจากแผ่นกระจายอากาศ สำหรับกฎของการคำนวณความดันลดบนแผ่นกระจายอากาศนั้น สมการที่สามารถใช้ในการออกแบบได้ดี คือ

$$\Delta P_d = (0.2 \text{ ถึง } 0.4) \Delta P_b \quad (3.24)$$

โดยที่ค่า Reynolds Number ( $Re_c$ ) และเลือกค่าสัมประสิทธิ์ของออริฟิส (Orifice coefficient,  $C_{d,or}$ ) ที่เหมาะสมจากรูปที่ 3.11

คำนวณหาความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านรูออริฟิสจากสมการ 3.25

$$U_{or} = C_{d,or} \left[ 2g_c \frac{\Delta P_d}{\rho_g} \right]^{1/2} \quad (3.25)$$



รูปที่ 3.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $C_{d, or}$  กับเรย์โนลด์นัมเบอร์ ( $Re_r$ )

กำหนดจำนวนรูเจาะของตะแกรงต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ของตะแกรงหรือตัวกระจาย  
ได้จากสมการ

$$U_0 = \frac{\pi}{4} d_{or}^2 U_{or} N_{or} \quad (3.26)$$

### 3.6 กระบวนการเผาไหม้อนุภาคในฟลูอิดไดซ์เบด

เมื่ออนุภาคขนาดใหญ่กว่า 0.1 mm ถูกป้อนเข้าสู่เตาเผา จะเกิดปรากฏการณ์เป็นขั้นตอน  
ดังนี้

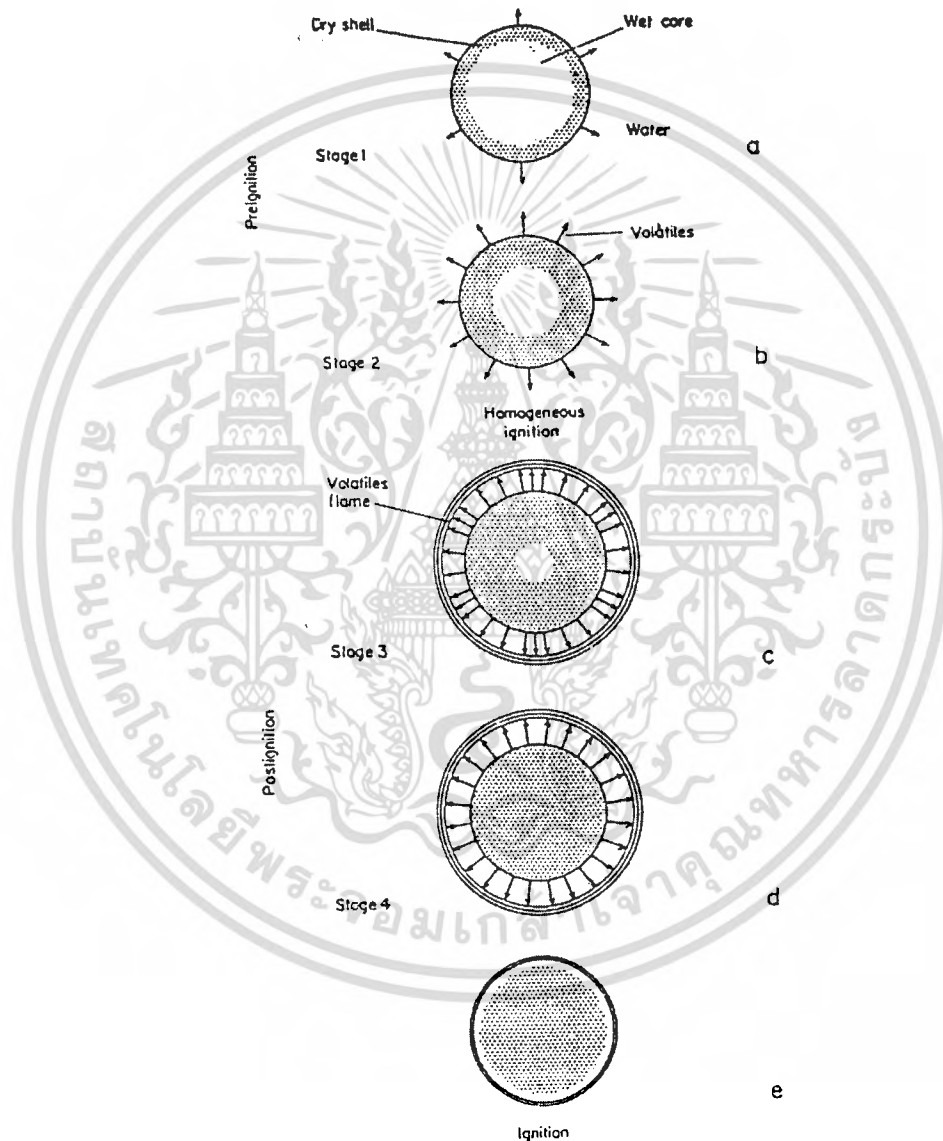
- ก. drying เป็นการกำจัดความชื้นในอนุภาค ขณะเริ่มต้นรับความร้อนในเตาเผา
- ข. devolatilization เป็นขั้นตอนการสลายตัวของอนุภาคเกิดเป็นสารระเหย
- ค. ignition of volatile เป็นกระบวนการที่ทำให้เกิดจากจุดประกายของสารระเหย ที่ถูกปล่อยออกมา และอยู่ล้อมรอบอนุภาค
- ง. combustion of volatile เป็นขบวนการเผาไหม้สารระเหย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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.7 การลุกติดไฟของอนุภาคในฟลูอิดไดซ์เบด (Ignition of coal particle in fluidized bed)

อุณหภูมิเบดเป็นตัวแปรที่สำคัญในการลุกติดไฟของอนุภาค เพื่อให้เกิดการเผาไหม้ด้วยตัวเองอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะช่วงอุ่นเตาเผา การศึกษาเกี่ยวกับอุณหภูมิติดไฟจะช่วยให้ประหยัดค่าใช้จ่ายในการอุ่นเบด เพราะไม่จำเป็นต้องอุ่นเบดด้วยเชื้อเพลิงอื่น (ก๊าซ/น้ำมัน) จนอุณหภูมิสูงเกินไป

Wildgger และ Agarwal ได้อธิบายถึงรูปแบบการลุกติดไฟของอนุภาคว่าสามารถแบ่งเป็น 2 เฟส (ดังรูปที่ 3.12)



รูปที่ 3.13 รูปแบบการลุกติดไฟของอนุภาค : a, b, เป็น preignition และ c, d, e เป็น postignition

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

- ขั้นตอนที่ 1 เมื่อนำอนุภาคใส่ลงในเบตร้อนจะเกิดการระเหยของความชื้นทันทีทำให้เกิดรอยต่อระหว่างส่วนที่แห้งซึ่งอยู่ภายนอก และส่วนที่ชื้นอยู่ภายในอนุภาค เมื่ออนุภาคได้รับความร้อนนานขึ้น ส่วนที่ชื้นจะมีขนาดเล็กลง ทำให้เกิดส่วนที่แห้งเพิ่มขึ้น

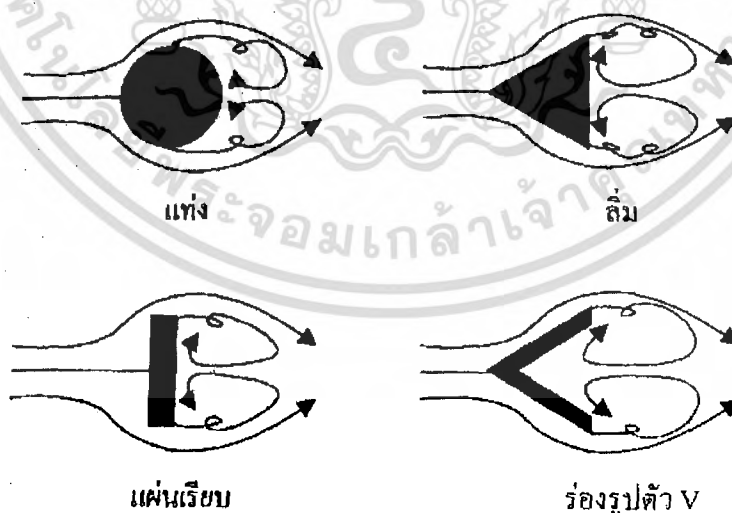
- ขั้นตอนที่ 2 อุณหภูมิในส่วนที่แห้งเริ่มเพิ่มสูงขึ้น และเกิดการระเหยออกมาของสารระเหย เนื่องจากการแตกของพันธะภายในโครงสร้างของอนุภาค

- post-ignition phase เป็นขั้นตอนที่เกี่ยวกับ drying และ devolatilization ภายใต้สภาวะออกซิเดชัน ทำให้เกิดเปลวไฟล้อมรอบอนุภาค ซึ่งแบ่งเป็น 2 ขั้นตอน

- ขั้นตอนที่ 1 เนื่องจากบริเวณผิวหน้าของอนุภาคมีปริมาณออกซิเจน และอุณหภูมิสูงเพียงพอทำให้เกิดการจุดประกายของสารระเหยออกมา เกิดเป็นเปลวไฟชั้นล้อมรอบอนุภาค ความร้อนจากเปลวไฟทำให้เกิด drying และ devolatilization เพิ่มขึ้น ในขั้นตอนนี้ drying จะเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์

- ขั้นตอนที่ 2 อนุภาคเกิด devolatilization ต่อสารระเหยที่ระเหยออกมาจะถูกเผาไหม้เป็นเปลวไฟล้อมรอบอนุภาคและจะดับเหลือแต่อนุภาค เมื่อสารระเหยหมดหรือระเหยออกมาน้อยจนไม่สามารถติดไฟ

### 3.8 วิธีการไหลเวียนย้อนกลับ



รูปที่ 3.14 รูปแสดงวิธีการทำให้เกิดการไหลหมุนเวียนย้อนกลับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีนี้มีหลักการ คือ ลดและเปลี่ยนทิศทางการไหลของส่วนผสมให้ต่ำลงและไหลหมุนเวียนย้อนกลับจนส่วนผสมมีเวลามากเพียงพอที่จะทำให้เกิดการติดไฟด้วยตัวเองและเกิดการเผาไหม้อย่างต่อเนื่องได้ ทำได้โดยการนำวัตถุรูปทรงต่างๆ ไปวางขวางทิศทางการไหลของส่วนผสมดังแสดงในรูปที่ 3.14 ทำให้เกิดบริเวณที่มีความเร็วต่ำและหมุนเวียนย้อนกลับในกระแสหลักของการไหลของส่วนผสมซึ่งจะช่วยให้เกิดการเสถียรของเปลวไฟได้ดีขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

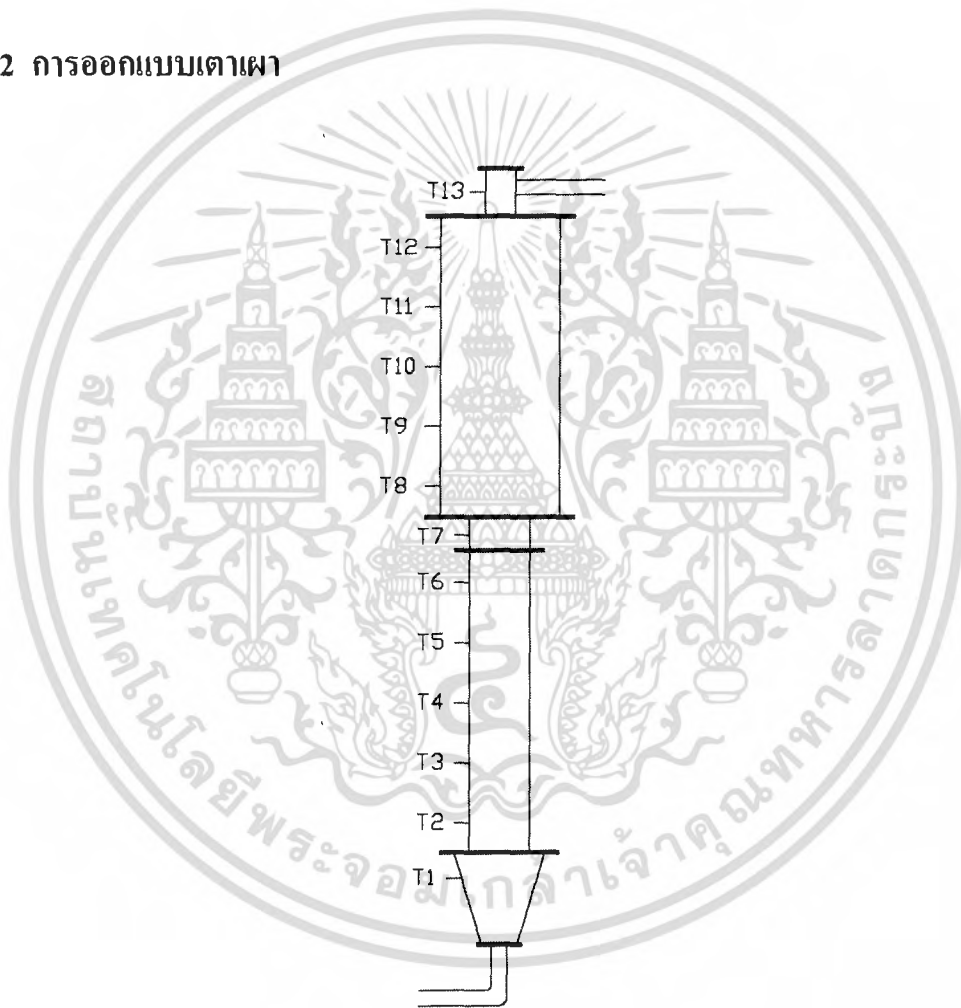
## บทที่ 4

### การออกแบบและการคำนวณ

#### 4.1 บทนำ

การออกแบบและการคำนวณเตาเผาฟลูอิด ไคซ์เบดแบบผิวกลิ้งนี้ได้นำหลักการของการของการทำให้เกิดการไหลหมุนเวียนย้อนกลับมาประยุกต์ร่วมกับหลักการของฟลูอิด ไคซ์เบด เพื่อที่จะให้ประสิทธิผลของเตาเผายังคงเดิมเมื่อมีการทำการลดขนาดลงมา

#### 4.2 การออกแบบเตาเผา



รูปที่ 4.1 แสดงลักษณะของเตาเผาแบบต่างๆที่ได้ทำการออกแบบเตาเผาฟลูอิด ไคซ์เบดแบบผิวเรียบฟริบอร์คใหญ่

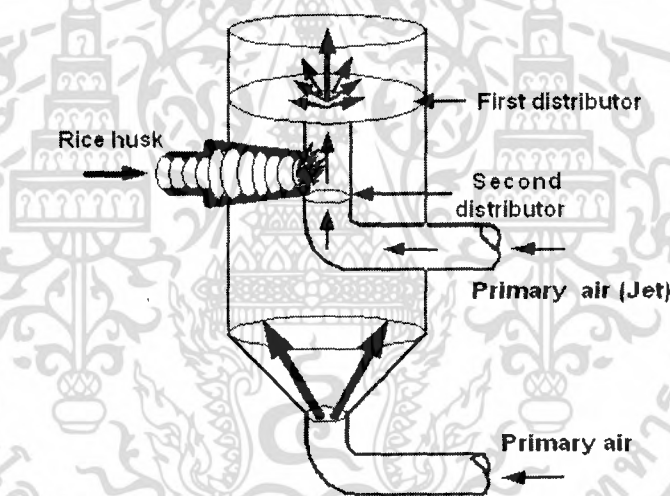
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.1 ลักษณะของเตาเผา

เตาฟลูอิดไดซ์เบดที่ได้ทำการออกแบบนี้มีทั้งสิ้น 2 ลักษณะ เพื่อที่จะได้ทำการเปรียบเทียบถึงผลที่เกิดขึ้นโดยที่เตาเผาทั้ง 2 แบบนี้จะพิจารณาที่ความสูงเดียวกันทั้งหมด คือ 2,400 mm. มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายในห้องเผาใหม่(ID) 200 mm. สำหรับพริบอร์คมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 400 mm. สำหรับเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดแบบผิวคลื่น ทำการติดตั้งผิวคลื่นมีความสูงต่อ 1 คลื่น คือ 200 mm. ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายในของคลื่น 200 mm และขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายในของคลื่น 100 mm จำนวน 3 ชุด

#### 4.2.2 ระบบการป้อนเชื้อเพลิงและอากาศ

การใช้ระบบการป้อนเชื้อเพลิงเป็นแบบเกลียว (Screw Feeder) โดยป้อนตรงเข้าสู่ท่อขนาด 45 mm. ซึ่งเป็นจุดตั้งลักษณะเข้าแบบตั้งฉาก ( $90^{\circ}$ ) กับท่อลม Nozzle Jet เป็นลมที่ช่วยพาอากาศเข้ามาผสมกับเชื้อเพลิงโดยใช้อากาศพาเชื้อเพลิงแกลบเข้าสู่ห้องเผาใหม่ทางด้านข้าง ดังแสดงในรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 ลักษณะการป้อนของเชื้อเพลิงแกลบ

ในการออกแบบดังกล่าวนี้ เพื่อป้องกันเปลวไฟย้อนกลับไปยังชุดป้อนเชื้อเพลิงซึ่งจะทำให้ไบเกลียวเสียหาย และยังช่วยลดการติดขัดของเชื้อเพลิงแกลบในท่อก่อนเข้าเตาเผา

อากาศที่ใช้ในการทดลองจะใช้อากาศด้วยกัน 2 ส่วน คือ อากาศปฐมภูมิส่วนที่ 1. (Primary Air) อากาศปฐมภูมิส่วนที่ 2.(Primary Air Jet) โดยอากาศปฐมภูมิเป็นอากาศที่ช่วยทำให้เกิดปรากฏการณ์ฟลูอิดไดซ์เซชันได้จาก Blower ที่มีขนาด 10 hp. เป็นแหล่งจ่ายอากาศเข้าหอตกลงในการทดลองกำหนดให้ใช้อากาศปฐมภูมิเข้าทางด้านล่างของเตาเผา โดยที่อากาศปฐมภูมิส่วนที่ 2. (Primary Air Jet) มีหน้าที่ช่วยลำเลียงเชื้อเพลิงแกลบเข้าสู่ห้องเผาใหม่ทางด้านข้าง

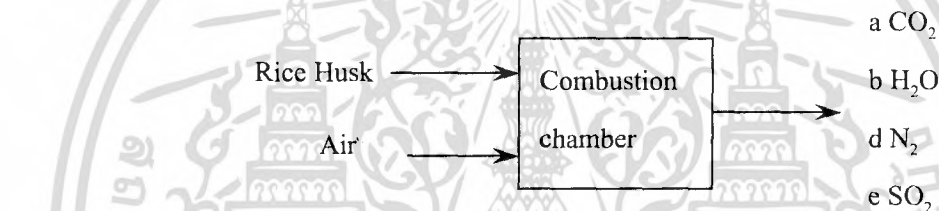
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3 การคำนวณปริมาณอากาศที่ต้องการในการเผาไหม้ทางทฤษฎี

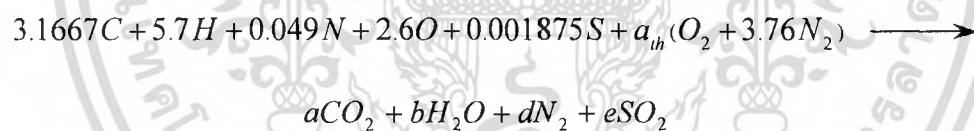
ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบของเชื้อเพลิงแกลบ

องค์ประกอบ	เปอร์เซ็นต์	น้ำหนักโมเลกุล	จำนวน โมล
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
ขี้เถ้า	19.8	-	-

การสมดุลปฏิกิริยาเคมี



สามารถเขียนเป็นปฏิกิริยาเคมีได้ดังนี้



ทำการสมดุลสมการจะได้

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

$$a = 3.1667$$

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

$$b = 2.85$$

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

$$e = 0.001875$$

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

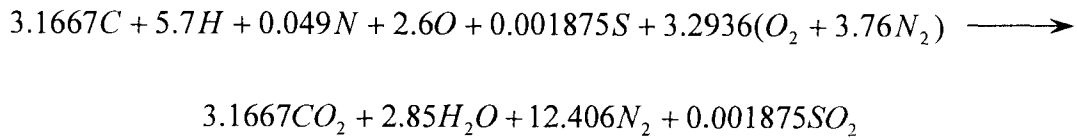
$$a_{th} = 3.2936$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

$$d = 12.406$$

ทำการแทนค่าลงในสมการจะได้



จำนวน โมลของอากาศแห้งจะปฏิกิริยาเคมีนี้มีค่าเท่ากับ

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

เนื่องจากการสมดุลสมการของเราใช้กับอากาศแห้ง แต่ในการทดลองไม่สามารถทำให้เป็นอากาศแห้งได้ เพราะฉะนั้นเราจะต้องทำการคิดปริมาณความชื้นในอากาศเข้าไปในสมการการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงด้วย โดยที่เราจะทำการกำหนดสถานะของอากาศดังนี้

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

ความชื้นสัมพัทธ์ ( Relative Humidity , RH ) เท่ากับ 53%

เพราะฉะนั้นทำการหาค่าความดันย่อยในอากาศที่สถานะนี้ได้เท่ากับ

เปิดค่าจากตาราง จะได้

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

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

จำนวน โมลของละอองน้ำในอากาศจากสมการ

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

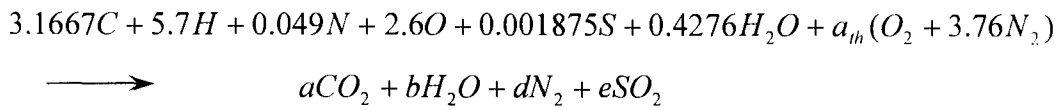
$$N_{v,H_2O,air} = \left( \frac{P_{v,air}}{P_{v,total}} \right) N_{v,total}$$

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

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

เพราะฉะนั้นทำการสมดุลสมการการเผาไหม้สำหรับอากาศชื้นใหม่จะได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ทำการสมดุลสมการจะได้

$$C : 3.1667 \longrightarrow = a$$

$$a = 3.1667$$

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

$$b = 3.2776$$

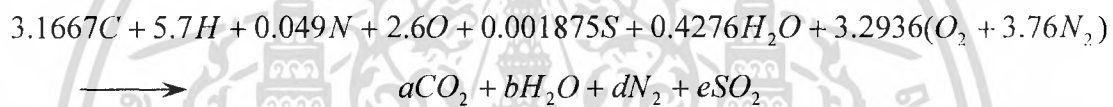
$$S : 0.001875 \longrightarrow = e$$

$$e = 0.001875$$

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

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

นำค่าตัวแปรที่ทำการคำนวณได้แทนค่ากลับในสมการจะได้สมการเผาไหม้ของอากาศชั้นกับเชื้อเพลิงแกลบที่อัตราการเผาไหม้พอ คือ



จากนั้นทำการหาอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง จากสมการ

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

มวลของอากาศเท่ากับ

$$m_{air} = n_{air} \times MW_{air} = (n_{dry\ air} \times MW_{dry\ air}) + (n_{H_2O} \times MW_{H_2O})$$

$$= (3.2936 \times 4.76 \text{ kmol}) \left(28.97 \frac{kg}{kmol}\right) + (0.4276 \text{ kmol} \times 18 \frac{kg}{kmol})$$

$$= 461.875 \text{ kg}$$

มวลของเชื้อเพลิงเท่ากับ

$$m_{fuel} = n_{fuel} \times MW_{fuel} = (n_C \times MW_C) + (n_H \times MW_H) + (n_N \times MW_N) + (n_O \times MW_O)$$

$$+ (n_S \times MW_S)$$

$$= (3.1667 \times 12) + (5.7 \times 1) + (0.049 \times 14) + (2.6 \times 16) + (0.001875 \times 32) \text{ kg}$$

$$= 86.046 \text{ kg}$$

ดังนั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\left(\frac{A}{F}\right)_{ratio} = \frac{461.875 \text{ kg}}{86.046 \text{ kg}}$$

$$= 5.368$$

จากสมการ (3.1) เปอร์เซ็นต์อากาศส่วนเกิน(percent excess air)

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

เพราะฉะนั้น ทำการหาอัตราการใช้ของอากาศที่ใช้ในการทดลองเมื่อกำหนดอัตราการไหลของเชื้อเพลิงเท่ากับ 15 kg/hr จะได้  
 กรณีสัดส่วนผสมพอดี (Stoichiometric)

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

$$A = 5.368 \times 9 \text{ kg/hr}$$

$$= 48.31 \text{ kg/hr}$$

ตารางที่ 4.2 ปริมาณอากาศกรณีสัดส่วนผสมพอดี (Stoichiometric) ที่ใช้ในการทดลอง

อัตราป้อนเชื้อเพลิงแกลป (kg/hr)	ปริมาณอากาศที่อัตราส่วนผสมพอดี (kg/hr)
6	32.21
7.5	40.26
9	48.31
10.5	56.36
12	64.42

#### 4.4 การคำนวณคุณสมบัติทางกายภาพต่างๆของเบดที่เป็นแกลป[3]

##### 4.4.1 การหาสัดส่วนช่องว่าง(Void fraction, $\varepsilon_m$ ) และความกลม(Sphericity, $\phi_s$ ) ของแกลป

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

จากการทดลองปริมาตรของ n-hexane ก่อนผสม = 55 mm.

ปริมาตรของแกลปและช่องว่าง = 20.5 mm.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

จากรูปที่ 3.9 เส้น normal Packing จะได้

$$\varepsilon_m = 0.85$$

$$\phi_s = 0.24$$

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

$$\begin{aligned}
 \text{ปริมาตรของเกล็ดและช่องว่าง} &= 20.5 \text{ ตารางมิลลิเมตร} \\
 \text{จำนวนของอนุภาค} &= 600 \text{ อนุภาค} \\
 \text{ปริมาตรของเกล็ด} &= \text{จำนวนของอนุภาค} \times \frac{\pi d_p^3}{6} \\
 &= \text{ปริมาตรของเกล็ดและช่องว่าง} \times (1 - \varepsilon_m) \\
 600 \times \pi \frac{d_p^3}{6} &= 20.5 \times (1 - 0.85) \\
 d_p^3 &= \frac{6 \times 20.5 \times 0.15 \times 7}{22 \times 600} \\
 &= 9.784 \times 10^{-3} \\
 d_p &= 0.214 \text{ cm.} \\
 &= 2.14 \times 10^{-3} \text{ m.}
 \end{aligned}$$

4.4.3 ความหนาแน่นของเกล็ด

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

4.4.4 การหาปริมาณความชื้น

$$\begin{aligned}
 \text{น้ำหนักของเกล็ดก่อนอบ} &= 3.0625 \text{ กรัม} \\
 \text{น้ำหนักของเกล็ดหลังอบ} &= 2.7545 \text{ กรัม}
 \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

เกลบ(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) kuni [14]

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

$$K_1 = \frac{1.75}{\varepsilon_{mf}^3 \phi_s^2} \quad (4.4)$$

$$K_2 = \frac{150(1 - \varepsilon_{mf})}{\varepsilon_{mf}^3 \phi_s^2} \quad (4.5)$$

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

$$\varepsilon_{mf} = 0.6675$$

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

แทนค่าในสมการหา Ar

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

สมการที่ใช้ในการคำนวณหาความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไลซ์

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

แทนค่า  $K_1, K_2, Ar$  จะได้

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

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

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

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  $U_{mf}$

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

#### 4.4.6 ความเร็วสุดท้ายของการฟลูอิดไดซ์ (Terminal Velocity of Particles, $U_t$ )

$$\text{แกลป, } \phi_s = 0.24$$

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

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

$$\text{อากาศ, } \rho_g = 1.2 \times 10^{-3}$$

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

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

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

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

$$U_t^* = 4.20045$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

#### 4.5 การคำนวณหาความสัมพัทธ์ระหว่างขนาดท่อทดลองต่อแผ่นกระจายลม

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

$$\varepsilon_{mf} = 0.6675$$

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

สภาวะอากาศที่อุณหภูมิ 55<sup>o</sup>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 Zuderweg [14] กล่าวว่า  $\Delta P_d = (0.2 \text{ ถึง } 0.4) \Delta P_b$  เลือกใช้ 0.3

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

$$= (0.3)(3588.357) \text{ Pa} = 1076.507 \text{ Pa}$$

Step II ตรวจสอบหาค่า Re เพื่อหาค่า  $Cd_{or}$  ของรู

$$Re_t = \frac{d_t u_o \rho_g}{\mu} \quad (4.13)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

$$= 21312.566 > 3000$$

∴ จากตาราง

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

Step III หา  $u_{or}$  จากสมการ

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

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

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

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

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

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทดลองค่าโดยเลือกกำหนดรู

ตารางที่ 4.3 ตารางแสดงขนาดของรูและจำนวนรูของเบด

ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง $d_{or}$ (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

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

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

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

#### 4.6 การคำนวณหาความเร็วและReในเตาเผา

อัตราการไหลของเตาเผาทั้งหมดที่ใช้ในการทดลอง  $1.569514715$  kg/min  
อากาศมีอุณหภูมิเฉลี่ยประมาณ  $55^\circ C$

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

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

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

$$Q_{air} = \frac{1.569514715}{1.063609035} = 1.47565004 \text{ m}^3/\text{min}$$

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

กรณี ทางเข้าเตาขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง  $79$  mm.

$$Re = \left\{ \frac{1.063609035}{197.816 \times 10^{-7}} \right\} \left\{ \frac{4 \times 0.024594167}{\pi \times 0.079} \right\} = 21312.5661$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{0.024594167}{(\pi/4)(0.079)^2} = 5.01750777 \text{ m/s}$$

กรณี เตาขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 200 mm.

$$Re = \left\{ \frac{1.063609035}{197.816 \times 10^{-7}} \right\} \left\{ \frac{4 \times 0.024594167}{\pi \times 0.2} \right\} = 8418.463$$

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{0.024594167}{(\pi/4)(0.2)^2} = 0.7828 \text{ m/s}$$

กรณี เตาขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเตา 400 m.m

$$Re = \left\{ \frac{1.063609035}{197.816 \times 10^{-7}} \right\} \left\{ \frac{4 \times 0.024594167}{\pi \times 0.4} \right\} = 4209.232$$

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{0.024594167}{(\pi/4)(0.4)^2} = 0.1957 \text{ m/s}$$

ตารางที่ 4.4 ค่า Re และ ความเร็วการไหลที่ตำแหน่งต่างๆของเตาเผาที่ใช้ในการทดลอง

	Re	V(m/s)
ทางเข้าเตาขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 79 mm.	21312.5661	5.01750777
กรณี เตาขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 200 mm.	8418.463	0.7828
กรณี เตาขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 100 mm.	4209.232	0.1957

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

# อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

### 5.1 บทนำ

การทดลองเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดแบบผิวเรียบเราสามารถแบ่งขั้นตอนในเป็น 4 ขั้นตอนคือ

1. การจัดเตรียมอุปกรณ์และเครื่องมือในการทดลองรวมทั้งการจัดเตรียมเชื้อเพลิง
2. การติดตั้งอุปกรณ์ในการทดลอง
3. การอุ่นเตา
4. การทดลองและบันทึกผลการทดลอง

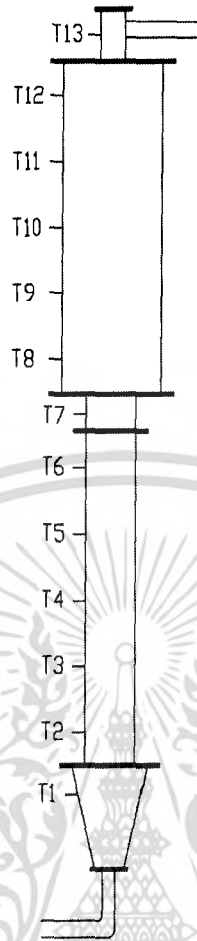
โดยจะกล่าวถึงรายละเอียดของแต่ละขั้นตอนที่ทำการทดลองมีดังนี้

### 5.2 การจัดเตรียมอุปกรณ์และเครื่องมือในการทดลอง

ในการศึกษาถึงการกระจายอุณหภูมิภายในเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดและองค์ประกอบของแก๊สที่เกิดจากการเผาไหม้ ซึ่งเป็นงานวิจัยเชิงการทดลอง การจัดเตรียมอุปกรณ์และเครื่องมือในการทดลองมีหลายชนิดประกอบเข้าด้วยกัน รายละเอียดต่างๆของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองมีดังนี้

#### 5.2.1 เตาเผาฟลูอิดไดซ์เบด

เตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดทั้ง 2 แบบ มีความสูงทั้งสิ้น 2,400 mm. มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายในห้องเผาไหม้ 200 mm. เส้นผ่าศูนย์กลางภายในฟรึบอร์ค 400 mm. และมีความสูงของห้องเผาไหม้ 2,100 mm. สำหรับห้องผสมมีลักษณะเป็นทรงกรวยมีความสูง 300 mm. ด้านนอกของผนังห้องเผาไหม้และห้องผสมได้ทำการหุ้มฉนวนเพื่อป้องกันความร้อนสูญเสียออกจากระบบ ที่ผนังของห้องเผาไหม้ได้ทำการติดตั้งตำแหน่งวัดอุณหภูมิทั้งสิ้น 11 ตำแหน่ง ตามระยะที่ได้ทำการกำหนดไว้ ใอเสียหลังจากเผาไหม้แล้วจะถูกวัดอุณหภูมิและนำออกจากห้องเผาไหม้ทางด้านบนของห้องเผาไหม้



รูปที่ 5.1 แสดงลักษณะของเตาเผาแบบ เตาเผาฟลูอิด ไคซ์เบดแบบผิวเรียบปริมาตรใหญ่

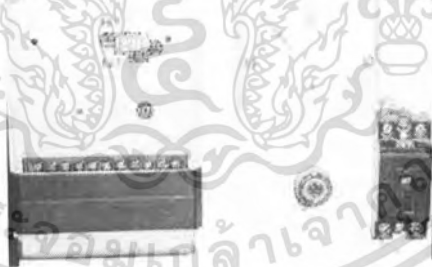
### 5.2.2 ระบบป้อนเชื้อเพลิง

ระบบป้อนเชื้อเพลิงสามารถป้อนเชื้อเพลิงเข้าเตาเผาอย่างต่อเนื่อง และสามารถปรับอัตราการไหลของเชื้อเพลิงตามที่ต้องการ ระบบป้อนเชื้อเพลิงประกอบด้วย Inverter, Motor, Screw Feed และ Hopper ดังแสดงในรูปที่ 5.2 ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้



รูปที่ 5.2 ระบบป้อนเชื้อเพลิงเกล็ด

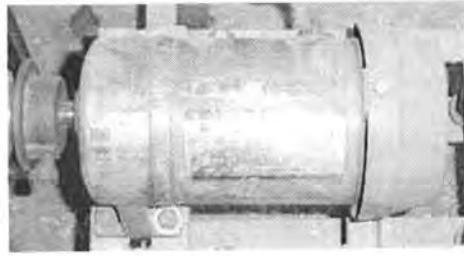
Inverter คือ อุปกรณ์ที่นำมาใช้สำหรับควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ เพื่อปรับอัตราการไหลของเชื้อเพลิง มีกำลังขับ 0.22 KW 1.5A Model FR-A024-0.2 KP โดย Inverter สามารถปรับความเร็วรอบสูงสุดเท่ากับ 1,650 RPM ดังแสดงในรูปที่ 5.3.



รูปที่ 5.3 Inverter

Motor เป็นต้นกำลังในการขับ Screw Feed ดังแสดงในรูปที่ 5.4 โดยมอเตอร์ที่ใช้มีขนาดกำลังขับเท่ากับ 1/4 Hp

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.4 Motor

Screw Feed เป็นอุปกรณ์ลำเลียงเชื้อเพลิงเข้าสู่ท่ออากาศปฐมภูมิ Screw Feed สร้างขึ้นจากเหล็ก ดังแสดงในรูปที่ 5.5



รูปที่ 5.5 Screw Feed

Hopper คืออุปกรณ์ที่ใช้สำหรับบรรจุเชื้อเพลิง ดังแสดงในรูปที่ 5.6 มีลักษณะเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยมสามารถบรรจุเกลือได้สูงสุดเท่ากับ  $0.05 \text{ m}^3$



รูปที่ 5.6 Hopper

### 5.2.3 ชุดป้อนอากาศปฐมภูมิและอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

ประกอบด้วย Blower ชนิดใบพัดแบบ Backward inclined Capacity  $100 \text{ m}^3/\text{min}$  Pressure  $200 \text{ mm.Aq}$  Speed  $4050 \text{ min}^{-1}$  สร้างความดันของพัดลมที่มากที่สุดเท่ากับ  $72.6$  เซนติเมตรของน้ำ มอเตอร์ที่ใช้ขับใบพัดลมเป็นชนิด 3 เฟส ขนาด  $10$  แรงม้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.7 แสดง Blower และ Motor

Motor ใช้เป็นตัวขับ Blower ขนาด 7.5 kw 1400 rpm 15 A 380 V 4 Pole  
วาล์วที่ใช้ในการปรับปริมาณอากาศปฐุมภูมิ ใช้ Gate valve ขนาด 3 นิ้วจำนวน 2 ตัวและ  
อากาศสำหรับอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนใช้ gate valve ขนาด 2 นิ้ว

#### 5.2.4 ระบบวัดอัตราการไหลของอากาศ

การวัดอัตราการไหลของอากาศปฐุมภูมิ และอากาศหตุยภูมิใช้ ออร์ฟิส (Orifice) และค่า  
ความดันตกคร่อมที่ผ่านออร์ฟิสสามารถอ่านค่าโดยใช้มาโนมิเตอร์ (Manometer) เพื่อนำมา  
เปรียบเทียบค่าอัตราการไหล ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

แผ่นออร์ฟิส (Orifice plate) แบ่งออกเป็น 2 ชุด คือ ใช้วัดอัตราการไหลของอากาศปฐุม  
ภูมิ และ อากาศหตุยภูมิ ดังแสดงในรูปที่ 5.8 การสร้างออร์ฟิสมิเตอร์ใช้มาตรฐาน (ANSI/API  
2530)



รูปที่ 5.8 ลักษณะของแผ่นออร์ฟิส

มานอมิเตอร์ (Manometer) ถูกแบ่งออกเป็น 2 ชุด โดยชุดแรกใช้วัดผลต่างของความดัน  
อากาศปฐุมภูมิ และชุดที่สอง ใช้วัดผลต่างของความดันอากาศหตุยภูมิ ซึ่งใช้น้ำเป็นของเหลวภายใน  
ทั้งสองชุด ดังแสดงในรูปที่ 5.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### รูปที่ 5.9 มานอมิเตอร์

ดิจิตอลมานอมิเตอร์ (Digital Manometer) ถูกนำมาใช้เป็นเครื่องมือวัดและเปรียบเทียบผลต่างความดันในรูปความสูงของน้ำ โดยถูกใช้ร่วมกับมานอมิเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 5.10



### รูปที่ 5.10 ดิจิตอลมานอมิเตอร์

เครื่องมือวัดความเร็วลม เป็นเครื่องมือที่ได้ถูกนำมาใช้ในการปรับเทียบแผ่นกับออร์ฟิสมาตรฐาน โดยเครื่องมือวัดความเร็วลมชนิดนี้ใช้หลักการของขดลวดความร้อนมีชื่อเรียกว่า Hot Wire

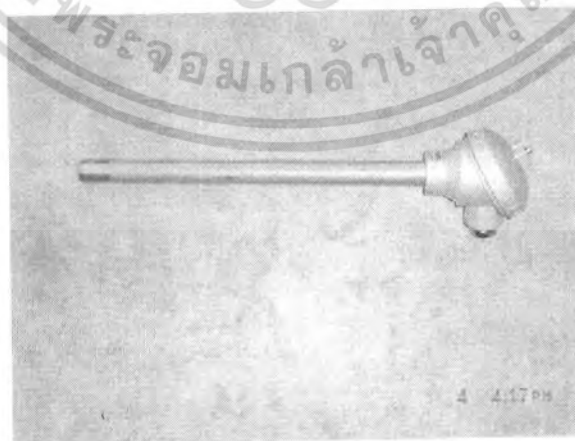
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.11 เครื่องมือวัดความเร็วลม testo 445

#### 5.2.5 ระบบวัดอุณหภูมิ

อุณหภูมิภายในเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบด จะวัดโดยใช้เทอร์โมคัปเปิลชนิด K จำนวน 13 ตัว วัดการกระจายอุณหภูมิภายในเตาเผา อุณหภูมิไอเสีย ดังแสดงในรูปที่ 5.12 ซึ่งสามารถทนอุณหภูมิสูงสุดเท่ากับ 1200 °C ความยาวของเทอร์โมคัปเปิลเท่ากับ 200 mm. เส้นผ่าศูนย์กลาง 8 mm. และนำมาต่อเข้ากับ Data Logger เพื่อแสดงผลของอุณหภูมิและบันทึกผลของอุณหภูมิเข้าสู่คอมพิวเตอร์ ตลอดระยะเวลาของการทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 5.12



รูปที่ 5.12 เทอร์โมคัปเปิล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.13 เครื่องบันทึกข้อมูล Fluke 2680A

### 5.2.6 ชุดอุ่นเตาเผา

ชุดอุ่นเตาเผาเป็นระบบที่มีความสำคัญอีกระบบหนึ่งคือ ก่อนทำการทดลองเผาไหม้ จะต้องทำการอุ่นเตาให้มีอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้สูงจนกระทั่งเชื้อเพลิงสามารถเผาไหม้ด้วยตัวเอง ระบบอุ่นเตาประกอบด้วย หัวเผา และ ถังเชื้อเพลิงก๊าซ LPG ซึ่งหัวเผามีขนาดเผาเท่ากับ 5.08 เซนติเมตร และสามารถปรับอัตราการไหลของเชื้อเพลิง LPG ดังแสดงในรูปที่ 5.14 ประกอบด้วย ถังแก๊ส LPG ขนาด 15 kg และหัวเผา ขนาด 2 นิ้ว

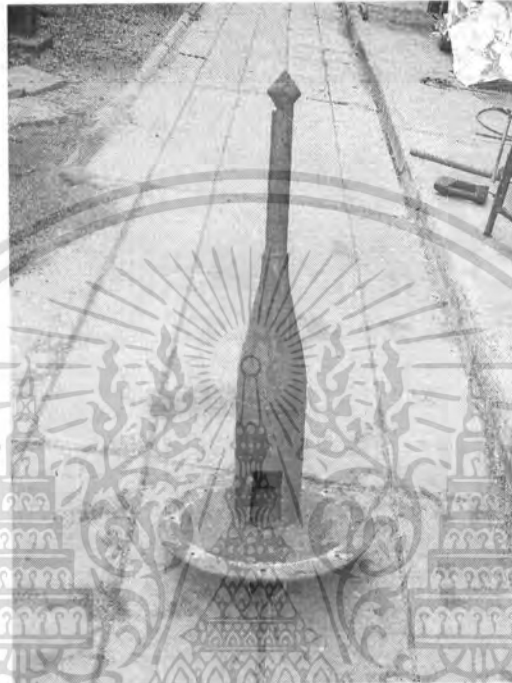


รูปที่ 5.14 แสดงถังแก๊สและหัวเผา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.2.7 ระบบดักจับฝุ่นซีเมนต์

เป็นระบบดักจับฝุ่นซีเมนต์ที่เกิดขึ้นหลังจากการเผาไหม้ โดยใช้หลักการของ Cyclone ดังแสดงในรูปที่ 5.15 ประกอบด้วยท่อทางเข้าทรงกระบอก ส่วน Cyclone เป็นกรวย และก๊าซไอเสียจะถูกปล่อยออกทางด้านบนของไซโคลน และซีเมนต์จะถูกดักและปล่อยออกลงสู่ถังเก็บซีเมนต์ เพื่อช่วยลดปริมาณมลพิษทางอากาศที่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง



รูปที่ 5.15 Cyclone

### 5.2.8 เครื่องวิเคราะห์ก๊าซไอเสีย

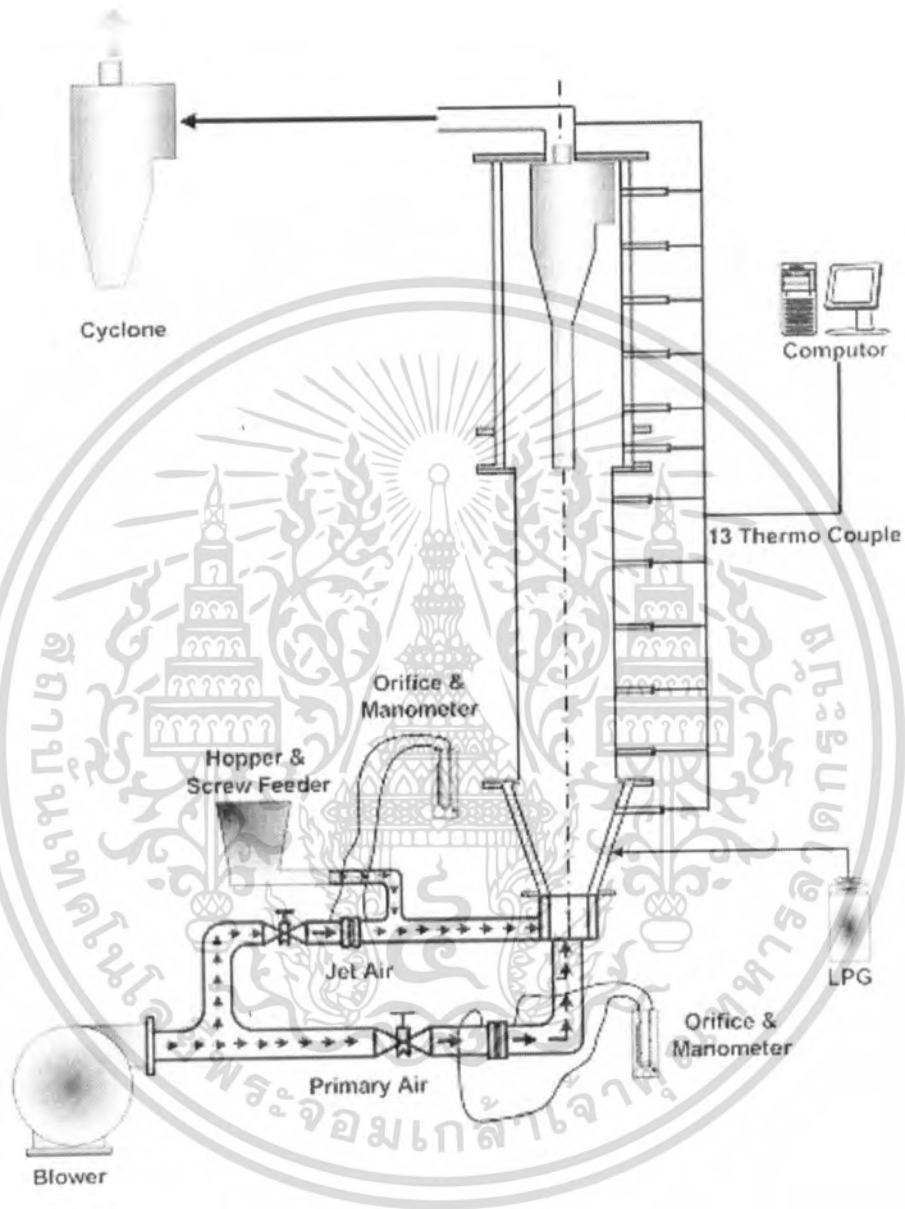
ก๊าซไอเสียที่เกิดขึ้นจากการทดลองสามารถวิเคราะห์ค่าปริมาณของแก๊สต่างๆที่ออกมาด้วยเครื่องวิเคราะห์ไอเสีย TESTO TESTO 350M XL ดังแสดงในรูปที่ 5.16



รูปที่ 5.16 เครื่องวิเคราะห์ก๊าซไอเสีย TESTO TESTO 350M XL

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.3 การติดตั้งอุปกรณ์ในการทดลอง



รูปที่ 5.17 แสดงแผนผังอุปกรณ์การทดลองเตาเผาฟลูอิดไคซ์เบด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบเตาเผาฟลูอิดไคซ์เบดที่ใช้ในการทดลอง มีความสูงของห้องเผาไหม้ทั้งหมด 2,400 mm. เส้นผ่าศูนย์กลางห้องเผาไหม้ 200 mm. และมีรายละเอียดปลีกย่อยดังที่ได้กล่าวไปแล้วในตอนต้น ในการติดตั้งอุปกรณ์การทดลองมีหลักการทำงานดังนี้ คือ อากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ได้มาจาก Blower โดยใช้ needle valve และ Orifice meter ในการปรับอัตราการไหลและวัดอัตราการไหล ตามลำดับ ของอากาศป้อนภูมิ ส่วนของอากาศทุกชนิดสามารถปรับอัตราการไหล โดยใช้ needle valve และใช้ Orifice meter ในการวัดอัตราการไหลเช่นเดียวกัน การป้อนแกลบจะใช้ Screw feeder ซึ่งสามารถควบคุมอัตราการป้อนแกลบโดยใช้ Inverter ควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ ในตอนเริ่มทำการทดลองจำเป็นต้องใช้แก๊สเชื้อเพลิงเหลว LPG เพื่อช่วยในการอุ่นเตาทำให้อุณหภูมิภายใน เตาสูงจนสามารถทำให้เชื้อเพลิงแกลบเกิดการเผาไหม้ด้วยตัวเองได้ การวัดอุณหภูมิใช้เทอร์โมคัปเปิล Type K จำนวน 13 ตัว เก็บค่าเข้าสู่คอมพิวเตอร์ วัดการกระจายอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ 11 จุด วัดอุณหภูมิห้องผสม 1 จุด วัดอุณหภูมิไอเสีย 1 จุด การวัดการกระจายอุณหภูมิภายในเตาเผาจะวัดที่ตำแหน่งความสูงจากด้านล่างเตา 400 mm., 600 mm., 800 mm., 1,000 mm., 1,200 mm., 1,350 mm., 1,500 mm., 1,700 mm., 1,900 mm., 2,100 mm. และ 2,300 mm. ตามลำดับ หลังจากนั้นส่วนผสมที่เกิดการเผาไหม้แล้วจะออกทางท่อทิ้งที่ตำแหน่งกึ่งกลางของตัวเตาและขี้เถ้าจะถูกแยกออกด้วย Cyclone

#### 5.4 การอุ่นเตา

ก่อนทำการทดลองต้องทำการอุ่นเตา เพื่อให้อุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้สูงขึ้นจนกระทั่งเชื้อเพลิงแกลบที่ป้อนเข้าไปสามารถเกิดการเผาไหม้ด้วยตัวเองได้ การอุ่นเตาใช้หัวเผา โดยมีแก๊ส LPG เป็นเชื้อเพลิง ขั้นตอนในการอุ่นเตาดังนี้ จุดไฟที่หัวเผาและทำการปรับวาล์วให้เปลวไฟที่หัวเผาเป็นสีน้ำเงิน หลังจากนั้นนำหัวเผาใส่เข้าตำแหน่งที่ใช้ในการอุ่นเตาบริเวณส่วนล่างของเตา จนกระทั่งอุณหภูมิภายในเตาสูงประมาณ  $500^{\circ}\text{C}$  -  $650^{\circ}\text{C}$  จึงเริ่มป้อนแกลบให้มีอัตราการไหลต่ำๆ เพื่อให้แกลบเผาไหม้และช่วยเพิ่มอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้จนอุณหภูมิสูงประมาณ  $700^{\circ}\text{C}$  -  $750^{\circ}\text{C}$  จึงหยุดป้อนเชื้อเพลิงแก๊สที่หัวเผา และนำหัวเผาออกจากห้องเผาไหม้ เนื่องจากอุณหภูมิสูงพอที่ทำให้เชื้อเพลิงแกลบสามารถเผาไหม้ด้วยตนเองอย่างต่อเนื่องแล้วจึงเริ่มทำการทดลอง

#### 5.5 การทดลองและบันทึกผลการทดลอง

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไหม้พร้อมกับอากาศปฐมภูมิ จนกระทั่งอุณหภูมิภายในเตาประมาณ  $700^{\circ}\text{C}$  -  $750^{\circ}\text{C}$  แล้วทำการเอาชุดอุ่นเตาออก

2. อัตราการป้อนของเชื้อเพลิงเคลือบเท่ากับ  $9\text{ kg/hr}$ , อัตราการไหลของอากาศ  $77.3\text{ kg/hr}$
3. บันทึกค่าอุณหภูมิภายในที่ตำแหน่งตามแนวแกนที่  $400\text{ mm.}$ ,  $600\text{ mm.}$ ,  $800\text{ mm.}$ ,  $1,000\text{ mm.}$ ,  $1,200\text{ mm.}$ ,  $1,350\text{ mm.}$ ,  $1,500\text{ mm.}$ ,  $1,700\text{ mm.}$ ,  $1,900\text{ mm.}$ ,  $2,100\text{ mm.}$  และ  $2,300\text{ mm.}$  ตามลำดับ ที่ระยะ  $r/R = 0.25$  บันทึกผลของอุณหภูมิ สังเกตลักษณะจี้เถ้า และควันที่เกิดจากการเผาไหม้ และวัดค่าไอเสียที่เกิดจากการเผาไหม้
4. ทำการทดลองซ้ำในข้อ 3 ที่ตำแหน่งตามแนวแกนที่กำหนดไว้ ที่ระยะ  $r/R = 0.25$ ,  $0.50$ ,  $0.75$  และ  $1.0$  ตามลำดับ (กรณีผนังเตาเป็นแบบผิวเรียบ)
5. อัตราการป้อนเชื้อเพลิงเคลือบอยู่ที่  $6-12\text{ kg/hr}$  แล้วทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ 3-4
6. ทำการทดลองผลของการปรับเปลี่ยนลมด้านหลัก และ ลมด้านรอง เป็นสัดส่วน  $50\%/50\%$ ,  $40\%/60\%$ ,  $30\%/70\%$  ตามลำดับ

\* $r/R$  คือ อัตราส่วนระหว่างตำแหน่งที่วัดอุณหภูมิในแนวรัศมีกับรัศมีภายในเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบด

## บทที่ 6

# ผลการทดลองและวิจารณ์

### 6.1 บทนำ

จากการทดลองนี้ได้มุ่งเน้นที่จะทำการศึกษาถึงผลกระทบของเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดที่มีลักษณะของห้องเผาไหม้ของเตาเผาแกลบฟลูอิดไดซ์เบดแบบผนังเตาเป็นแบบผิวเรียบ ฟริบอร์คใหญ่แบบมีไซโคลนอยู่ด้านใน

ซึ่งผลที่ได้จากการทดลองสามารถวิเคราะห์ผลการทดลอง ได้ดังต่อไปนี้

### 6.2 ผลกระทบของเตาเผาแกลบฟลูอิดไดซ์เบด

#### 6.2.1 เตาเผาแกลบฟลูอิดไดซ์เบดแบบผนังเตาเป็นแบบผิวเรียบ ฟริบอร์คใหญ่

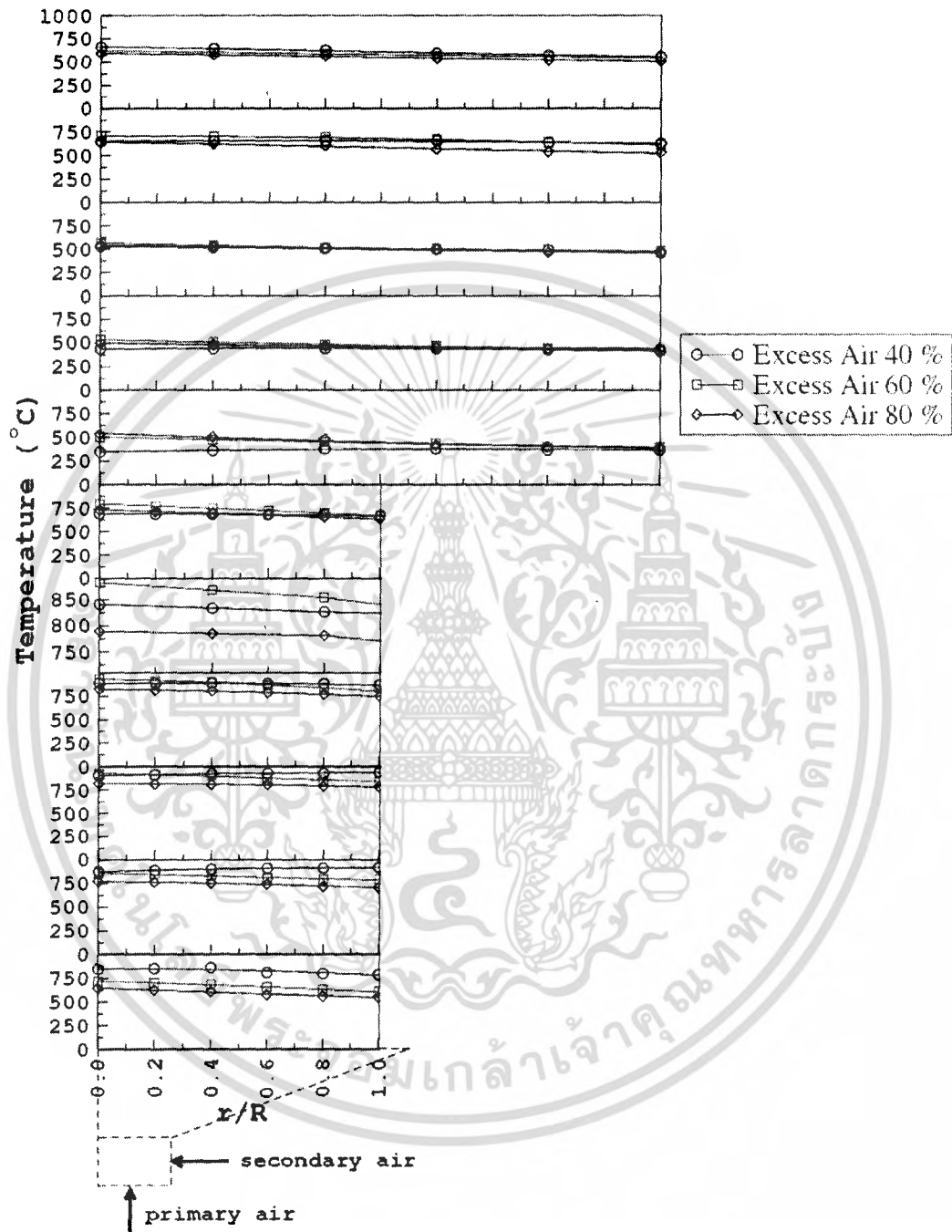
จากการศึกษาถึงอิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงผนังของห้องเผาไหม้โดยที่ในการทดลองจะยังคงความสูงของแต่ละหอการทดลองไว้ที่ความสูงค่าเดียวกัน คือ 2,400 mm ที่ขนาดของห้องเผาไหม้ปกติ 200 mm ซึ่งสำหรับกรณีนี้คือ กรณีเตาเผาแกลบฟลูอิดไดซ์เบดแบบผนังเตาเป็นแบบผิวเรียบ ฟริบอร์คใหญ่ และในการทดลองนี้ได้ทำการทดลองเพื่อทำการเปรียบเทียบผลที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงผนังของห้องเผาไหม้โดยจะทำการทดลองที่ อัตราการป้อนเชื้อเพลิงค่าเดียว คือ 9 kg/hr และแน่นอนว่าการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงแข็งจำเป็นต้องมีปริมาณเปอร์เซ็นต์ของอากาศส่วนเกินในปริมาณที่มาก ดังนั้นในการทดลองนี้จึงทำการศึกษาที่ค่าเปอร์เซ็นต์ของอากาศส่วนเกิน 40%, 60%, และ 80% ตามลำดับ เพื่อหาเปอร์เซ็นต์อากาศส่วนเกินที่เหมาะสมที่สุด จากการทดลองที่เปอร์เซ็นต์อากาศส่วนเกิน 60% มีความเหมาะสมที่สุด และ ทำการปรับอัตราการไหลของเชื้อเพลิงระหว่าง 6-12 kg/hr เพื่อหาขอบการติดไฟของเตา จากการทดลอง ทำให้ทราบว่าหลักการของฟลูอิดไดซ์เบดยังคงมีความเหมาะสมที่จะประยุกต์ใช้งานในการเผาไหม้ หากแต่ถ้าจำเป็นที่จะต้องมีความสูงที่มากกว่าที่ได้ทำการทดลองจึงจะให้ผลดี ที่ผ่านมาสำหรับ กรณีเตาเผาแกลบฟลูอิดไดซ์เบดแบบผนังเตาเป็นแบบผิวเรียบ จะมีการควบคุมเงื่อนไขของการเผาไหม้หรือการทดลองที่ยากมาก จึงทำการขยายฟริบอร์คใหญ่ด้านบนทำให้สามารถลดการหลุดลอยของแกลบได้ดี ทำให้มีระยะเวลาในการเผาไหม้ที่นานขึ้น สำหรับผลของการกระจายอุณหภูมิตามแนวรัศมีมีความสม่ำเสมอตลอดทั้งหน้าตัดของห้องเผาไหม้ ทุกๆค่าของเปอร์เซ็นต์อากาศส่วนเกิน(รูปที่ 6.1) และมีค่าอุณหภูมิสูงสุดอยู่ที่ประมาณ 950°C อุณหภูมิไอเสียทางออกสูงสุดอยู่ที่ 748°C ที่ค่าเปอร์เซ็นต์อากาศส่วนเกิน 60 % และศึกษาผลของการปรับเปลี่ยนลมด้านหลัก ต่อ ลมด้านรอง เป็น 50%/50%, 40%/60%, 30%/70%, 20%/80%, และ 10%/90% ตามลำดับ เมื่อมาพิจารณาผลของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุณหภูมิตามแนวความสูง (ความสูงอ้างอิงจากแผ่นกระจายลมต่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเตา  $x/D$ ) ที่ค่า  $(r/R) = 0.235, 0.400$  และ  $0.600$  ค่าต่างๆ (รูปที่ 6.2) พบว่าความเข้มข้นที่เกิดจากการเผาไหม้ (พิจารณาจากผลอุณหภูมิ)จะมีค่ามากที่สุดตั้งแต่ความสูง  $(x/D) = 4.00$  ขึ้นไปทุกค่าของเปอร์เซ็นต์อากาศส่วนเกินและเมื่อมาพิจารณาทางด้านออกของห้องเผาไหม้อุณหภูมิก็ยังคงไม่ตกลงมาแสดงถึงว่าเชื้อเพลิงยังคงมีการเผาไหม้ที่สูงอยู่แสดงว่าห้องเผาไหม้จำเป็นต้องมีความสูงกว่านี้

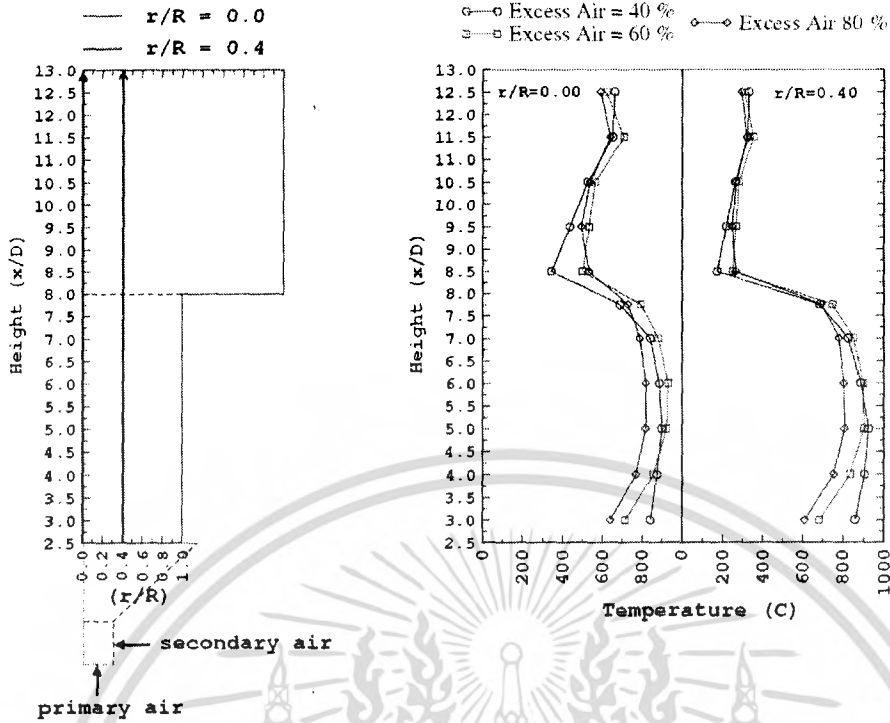


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



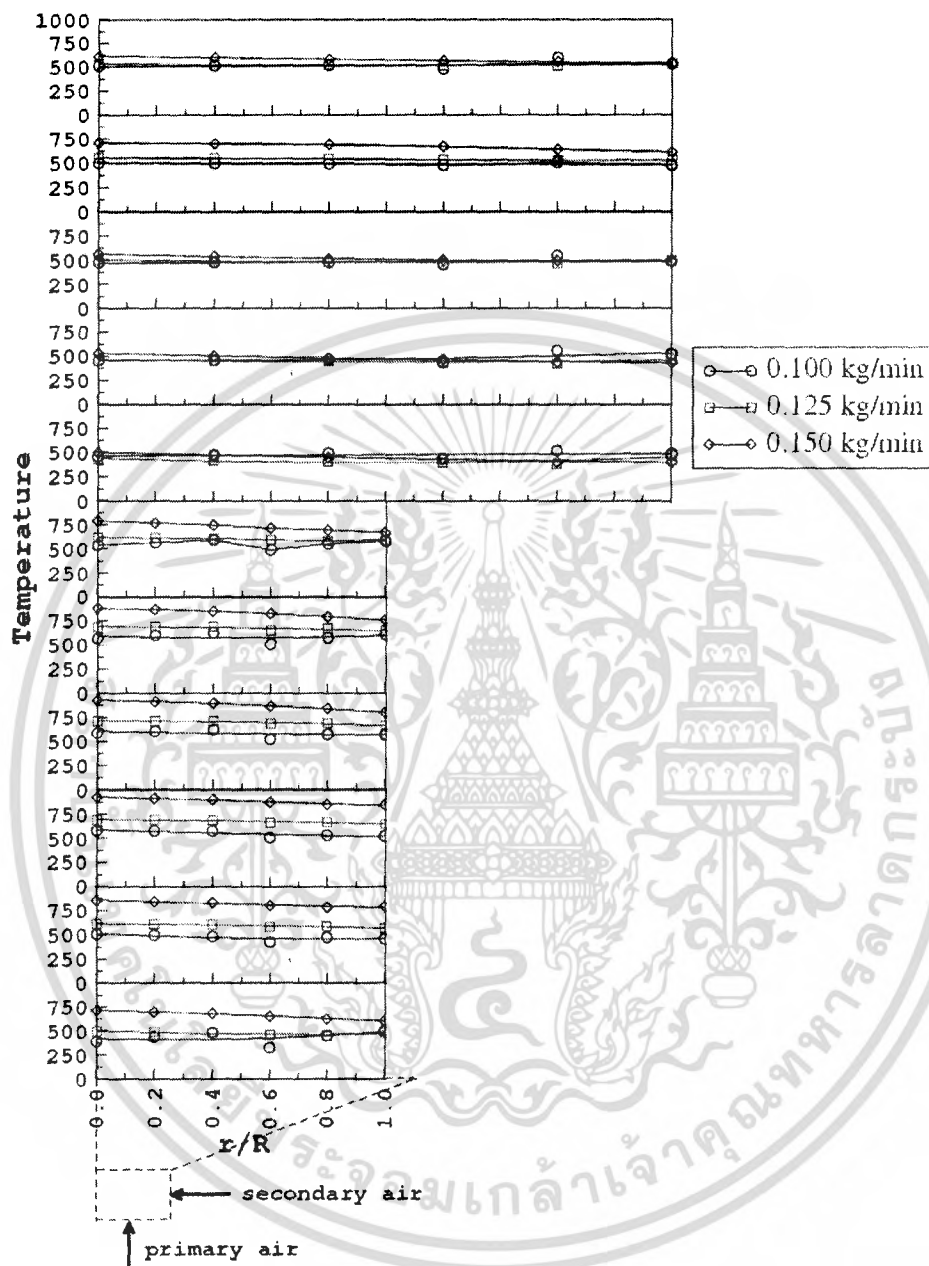
รูปที่ 6.1 แสดงอุณหภูมิตามแนวรัศมีของเตาเผาฟลูอิด ไลซ์แบบผนังเตาเป็นแบบผิวเรียบอัตรา  
ป้อน 9kg/hr อากาศส่วนเกิน 40%, 60%, และ 80%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



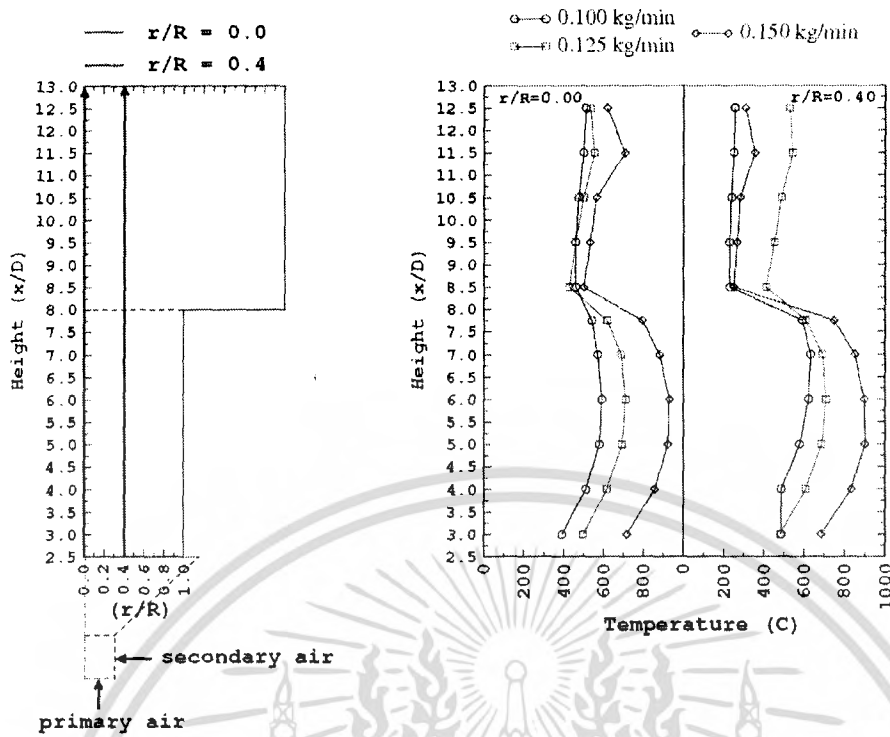
รูปที่ 6.2 แสดงอุณหภูมิตามแนวความสูงของเตาเผาฟลูอิด ไคซ์เบดแบบผนังเตาเป็นแบบผิวเรียบ อัตรา ป้อน 9kg/hr อากาศส่วนเกิน 40%, 60%, และ 80%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



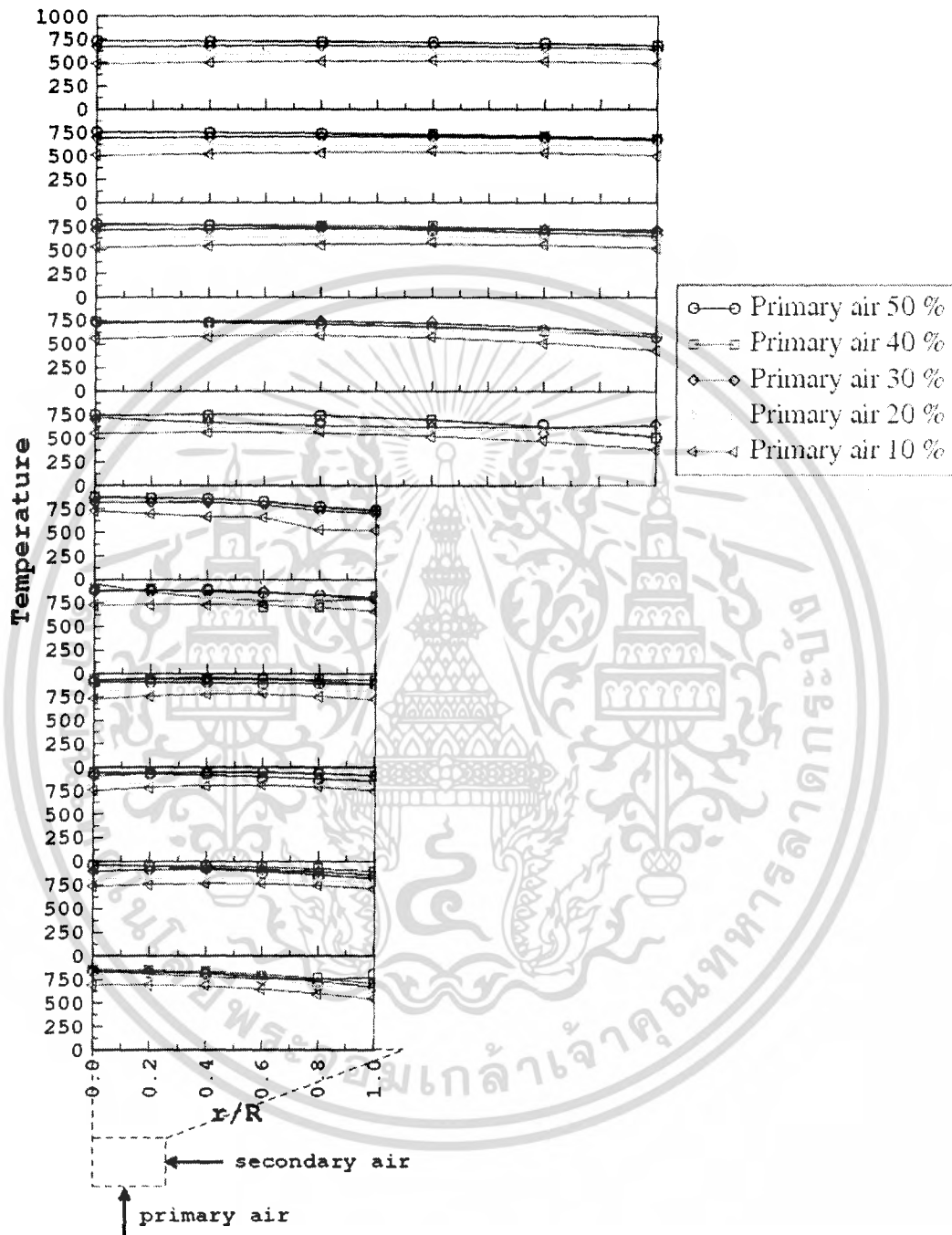
รูปที่ 6.3 แสดงอุณหภูมิตามแนวรัศมีของเตาเผาฟลูอิดไคซ์เบดแบบผนังเตาเป็นแบบผิวเรียบอัตรา  
ป้อน 6, 7.5, 9kg/hr อากาศส่วนเกิน 60%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



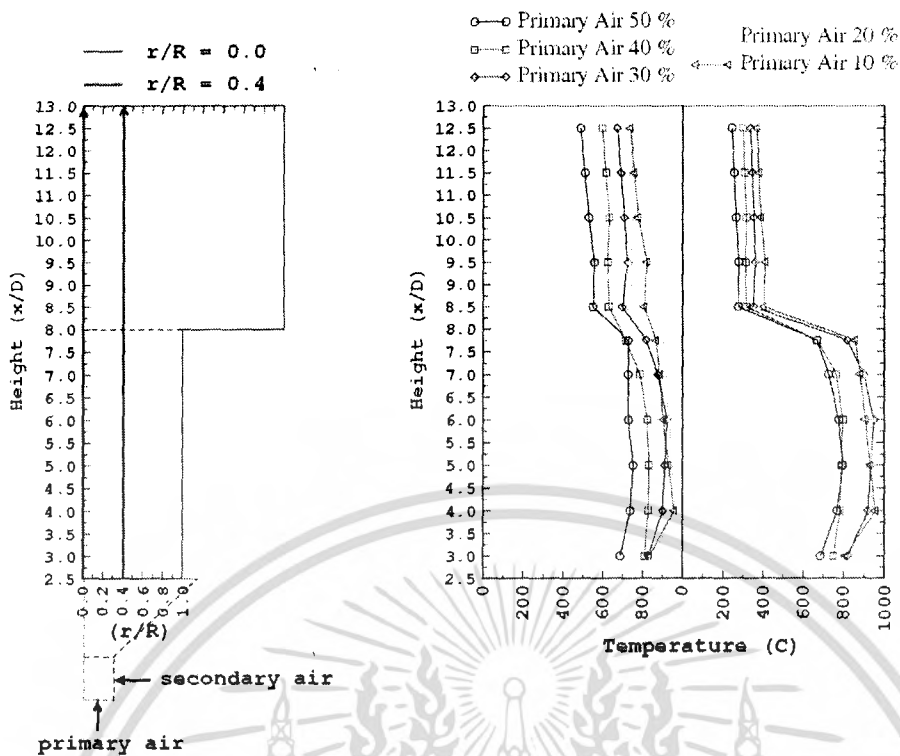
รูปที่ 6.4 แสดงอุณหภูมิตามแนวความสูงของเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดแบบผนังเตาเป็นแบบผิวเรียบ อัตรา ป้อน 6, 7.5, 9 kg/hr อากาศส่วนเกิน 60%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.5 แสดงอุณหภูมิตามแนวรัศมีของเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดแบบผนังเตาเป็นแบบผิวเรียบที่  
ปรับเปลี่ยนลมด้านหลัก ต่อ ลมด้านรอง เป็น 50%/50%, 40%/60%, 30%/70%, 20%/80%,  
และ 10%/90% ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.6 แสดงอุณหภูมิตามแนวความสูงของเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดแบบผนังเตาเป็นแบบผิวเรียบที่ปรับเปลี่ยนลมด้านหลัก ต่อ ลมด้านรอง เป็น 50%/50%, 40%/60%, 30%/70%, 20%/80%, และ 10%/90% ตามลำดับ

## 6.2.2 เตาเผาแกลบลฟลูอิดไดซ์เบดแบบผนังเตาเป็นแบบผิวเรียบ ฟริบอร์คใหญ่แบบมี

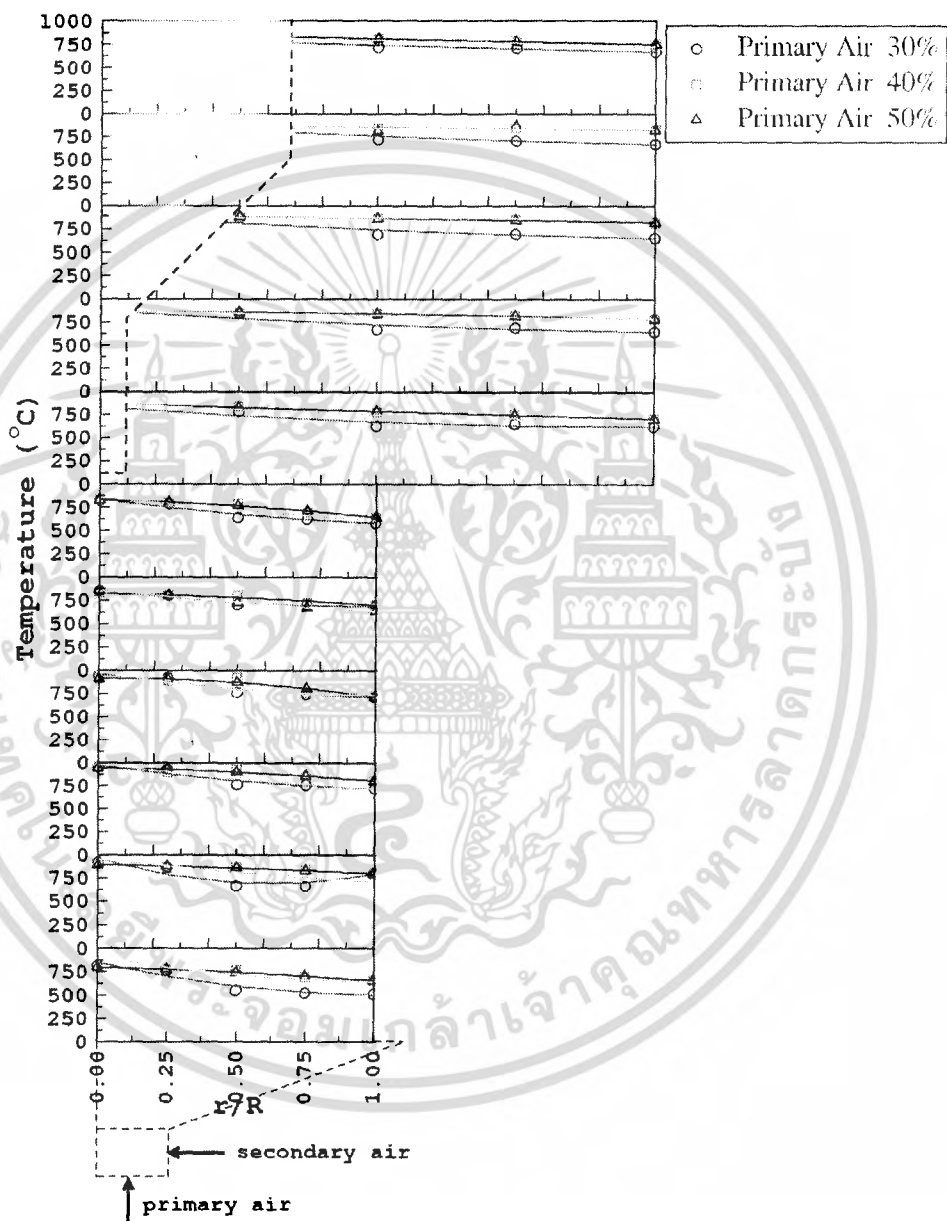
### ไซโคลนอยู่ด้านใน

จากการศึกษาถึงอิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงผนังของห้องเผาไหม้โดยที่ในการทดลองจะยังคงความสูงของแต่ละหอการทดลองไว้ที่ความสูงค่าเดียวกัน คือ 2,400 mm. ที่ขนาดของห้องเผาไหม้ปกติ 200 mm และได้ทำการปรับเปลี่ยนฟริบอร์คใหญ่โดยมีไซโคลนอยู่ด้านใน

ขนาดของไซโคลนในฟริบอร์คใหญ่จะมีขนาดความสูง 950 mm สำหรับกรณีนี้ คือ กรณีเตาเผาแกลบลฟลูอิดไดซ์เบดแบบผนังเตาเป็นแบบผิวเรียบด้านล่างและในการทดลองนี้ได้ทำการทดลองเพื่อทำการเปรียบเทียบผลที่เกิดขึ้นจะทำการทดลองที่ อัตราการป้อนเชื้อเพลิงค่าเดียวกัน คือ 9 kg/hr อากาศส่วนเกิน 60% และศึกษาผลของการปรับเปลี่ยนลมด้านหลัก ต่อ ลมด้านรอง เป็น 50%/50%, 40%/60%, 30%/70% ตามลำดับ จากการทดลอง ทำให้ทราบว่าเตาเผาแกลบลฟลูอิดไดซ์เบดแบบผนังเตาเป็นแบบผิวเรียบด้านล่าง ฟริบอร์คใหญ่แบบมีไซโคลนอยู่ด้านใน จะส่งผลดีกว่ากรณีผิวเรียบ ผลที่เกิดขึ้นนี้ก็มาจากการที่ได้ทำการติดตั้งไซโคลนเข้าไปโดยอาศัยผลของการเกิด

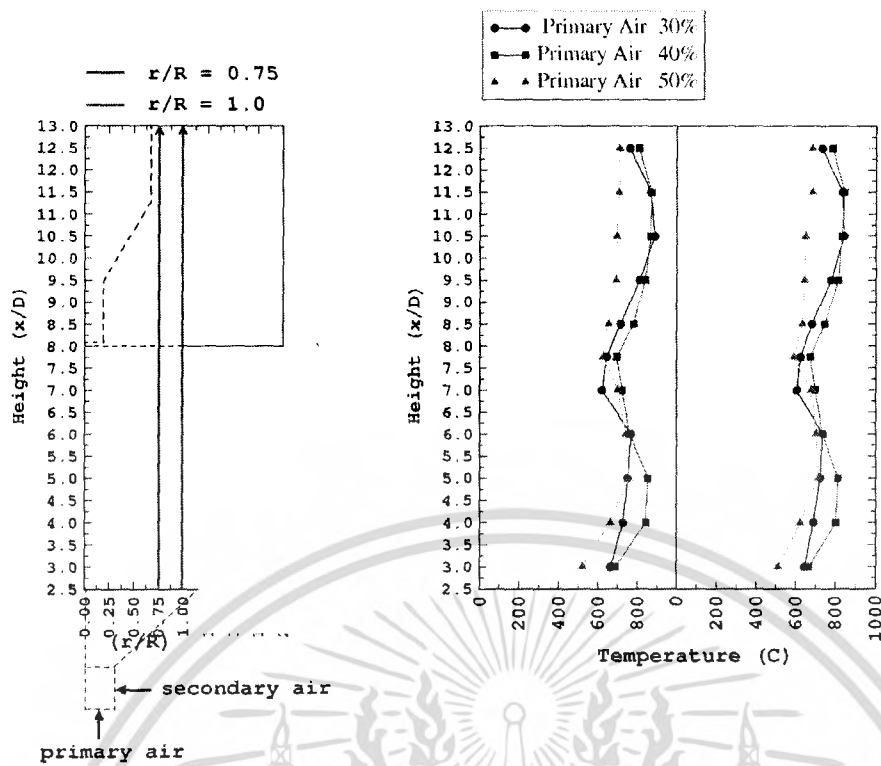
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การไหลวนไปมา (recirculation) ของเตา ทำให้เกิดการเผาไหม้ซ้ำในบริเวณเฟิร์บอร์คใหญ่ด้านบน  
ทำให้อุณหภูมิในบริเวณด้านบนมีอุณหภูมิสูงขึ้น



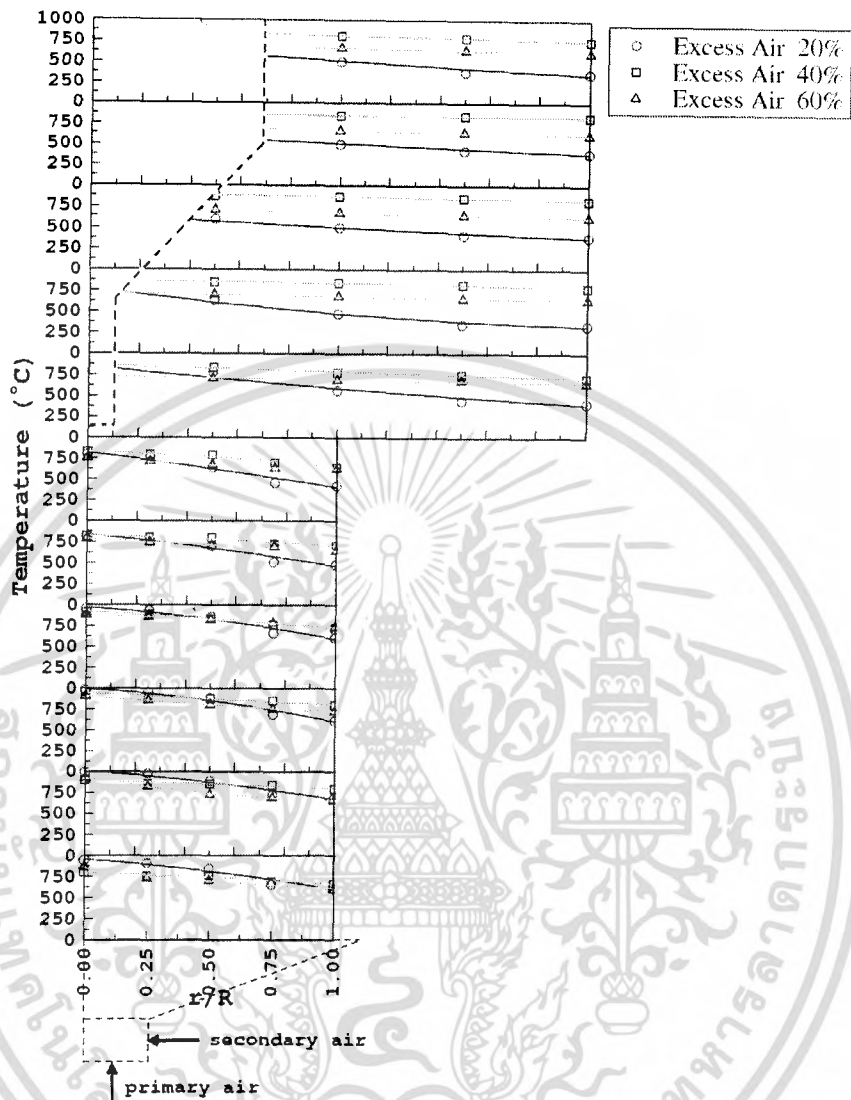
รูปที่ 6.7 แสดงอุณหภูมิตามแนวรัศมีของเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดแบบมีไซโคลนอนอยู่ด้านบนในอัตราการ  
ป้อน 9kg/hr ที่อากาศส่วนเกิน 40% ปรับเปลี่ยนลมด้านล่าง ต่อ ลมด้านล่าง เป็น 50%/50%,  
40%/60%, และ 30%/70% ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



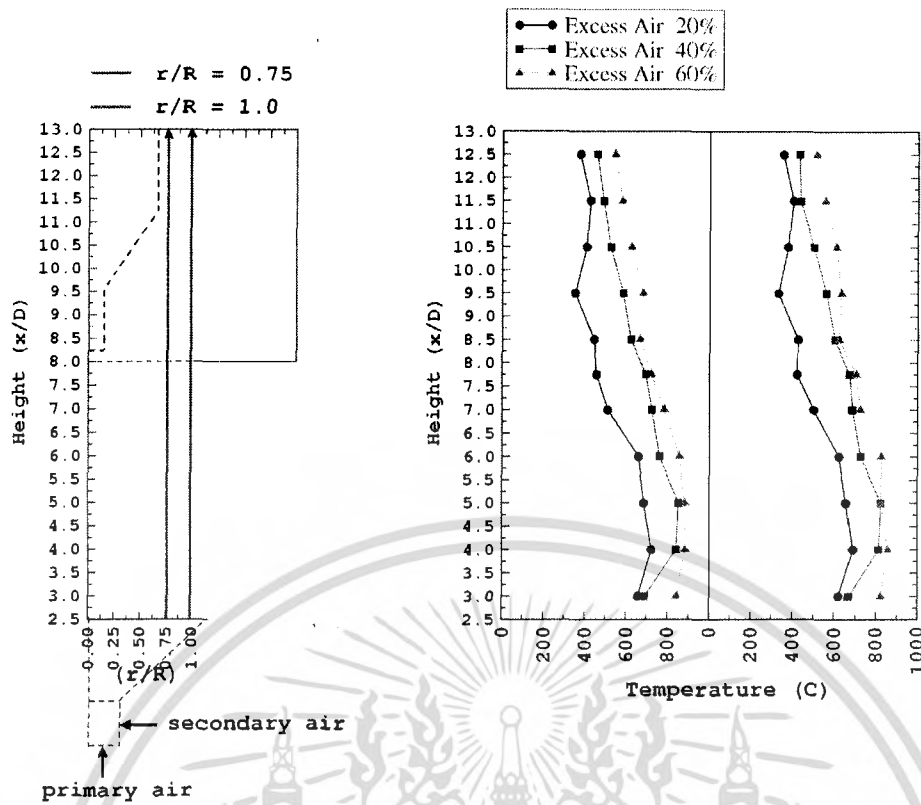
รูปที่ 6.8 แสดงอุณหภูมิตามแนวรัศมีของเตาเผาฟลูอิดไดซ์แบบมีไซโคลนอนอยู่ด้านในที่ปรับเปลี่ยนลมด้านหลัก ต่อ ลมด้านรอง เป็น 50%/50%, 40%/60%, 30%/70% และ ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.9 แสดงอุณหภูมิตามแนวรัศมีของเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดแบบมีไซโคลนอนอยู่ด้านในอัตราการป้อน 9kg/hr ที่อากาศส่วนเกิน 20%, 40% ,60% ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.10 แสดงอุณหภูมิตามแนวรัศมีของเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดแบบมีไซโคลนอนอยู่ด้านในที่อัตราการป้อน 9kg/hr ที่อากาศส่วนเกิน 20%, 40% ,60% ตามลำดับ

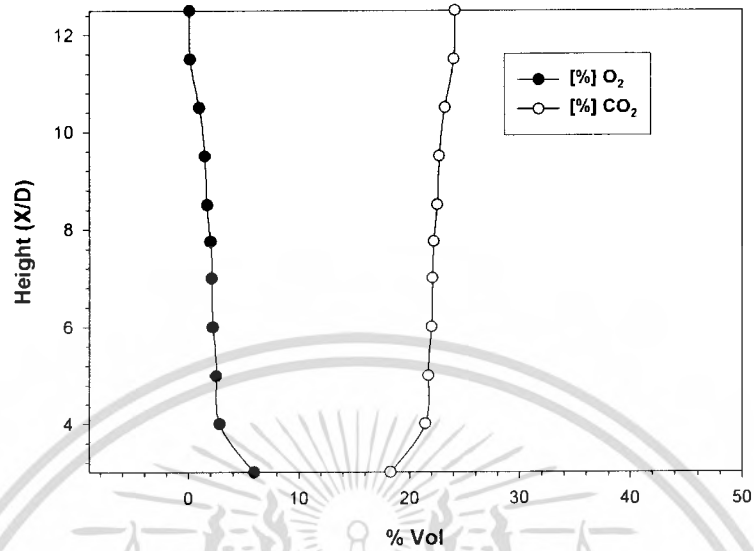
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับผลของการกระจายอุณหภูมิตามแนวรัศมีมีความสม่ำเสมอกว่าในกรณีอื่นๆ ของการทดลองตลอดทั้งหน้าตัดทุกตำแหน่งของความสูงห้องเผาไหม้ซึ่งหากจะพิจารณาจะรูปร่างของตัวเตาแล้วจะเห็นได้ว่ากรณีผิวเรียบ จะมีการราบเรียบ เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีของการทำเป็นผิวคลื่นส่งผลให้ความสม่ำเสมอของอุณหภูมิตลอดหน้าตัดมีความราบเรียบกว่า และจะมีค่าอุณหภูมิสูงสุดของห้องเผาไหม้อยู่ที่ประมาณ  $950\text{ }^{\circ}\text{C}$  อุณหภูมิไอเสียทางออกสูงสุดอยู่ที่  $750\text{ }^{\circ}\text{C}$

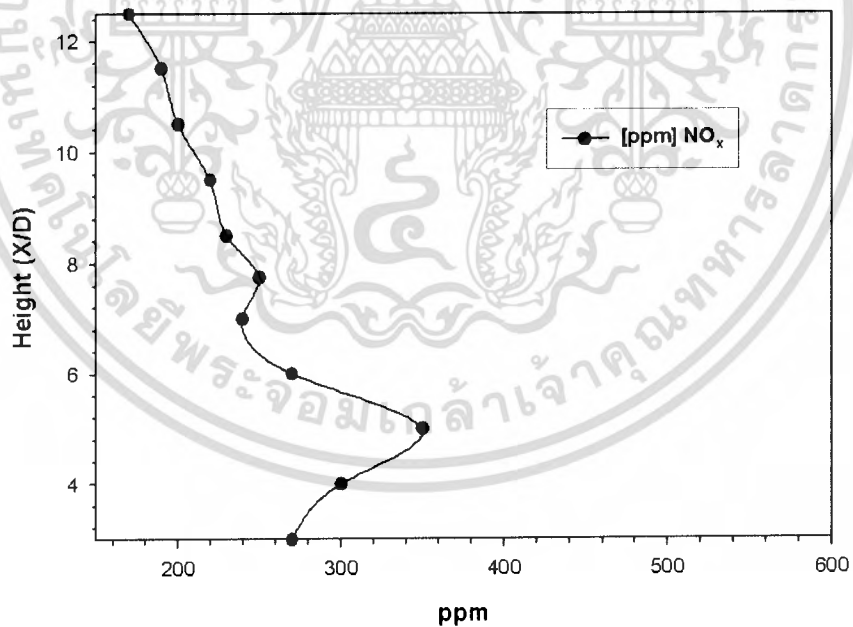


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แผนภูมิแสดงปริมาณของก๊าซต่าง ๆ ในกรณีที่ Excess Air 20% อัตราส่วนลมหลักต่อลมรอง  
40%:60% ได้ค่าที่ดีที่สุด

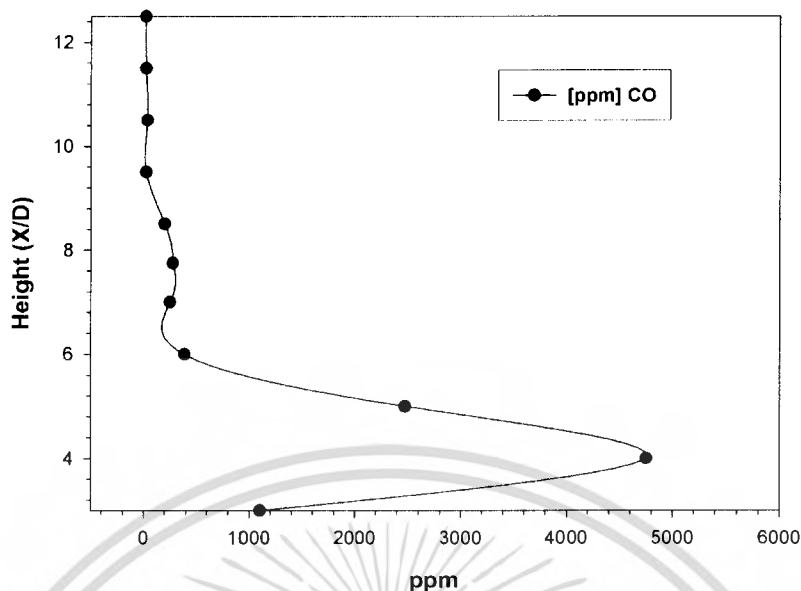


รูป 6.11 แผนภูมิแสดงปริมาณก๊าซ O<sub>2</sub> และ CO<sub>2</sub> เทียบกับตำแหน่งความสูงของเตา



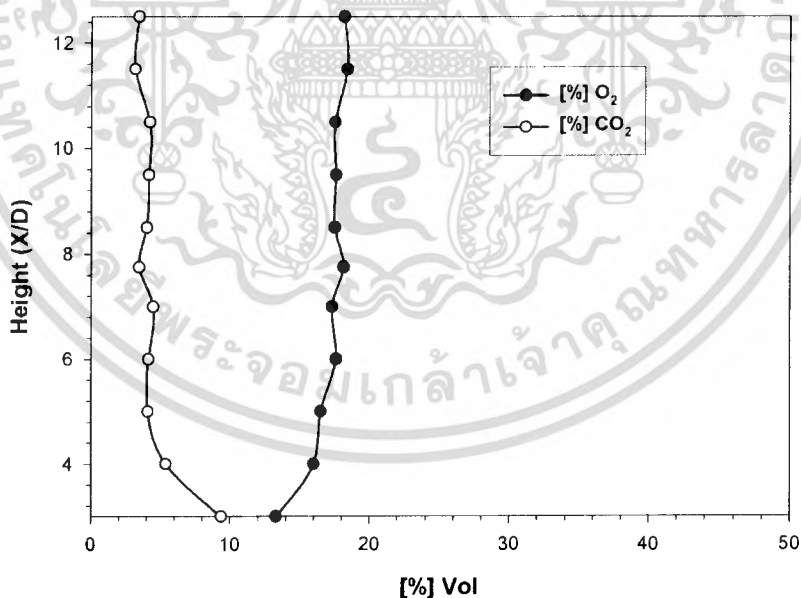
รูป 6.12 แผนภูมิแสดงปริมาณก๊าซ NO<sub>x</sub> เทียบกับตำแหน่งความสูงของเตา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



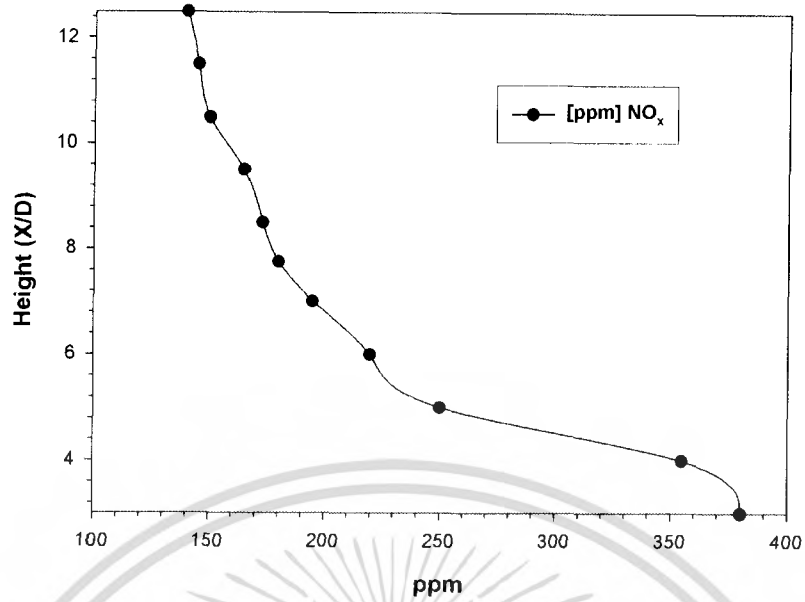
รูป 6.13 แผนภูมิแสดงปริมาณก๊าซ CO เทียบกับตำแหน่งความสูงของเตา

แผนภูมิแสดงปริมาณของก๊าซต่างๆ ในกรณีที่ Excess Air 40% อัตราส่วนลมหลักต่อสุมรอง 40%:60% ได้ค่าที่ดีที่สุด

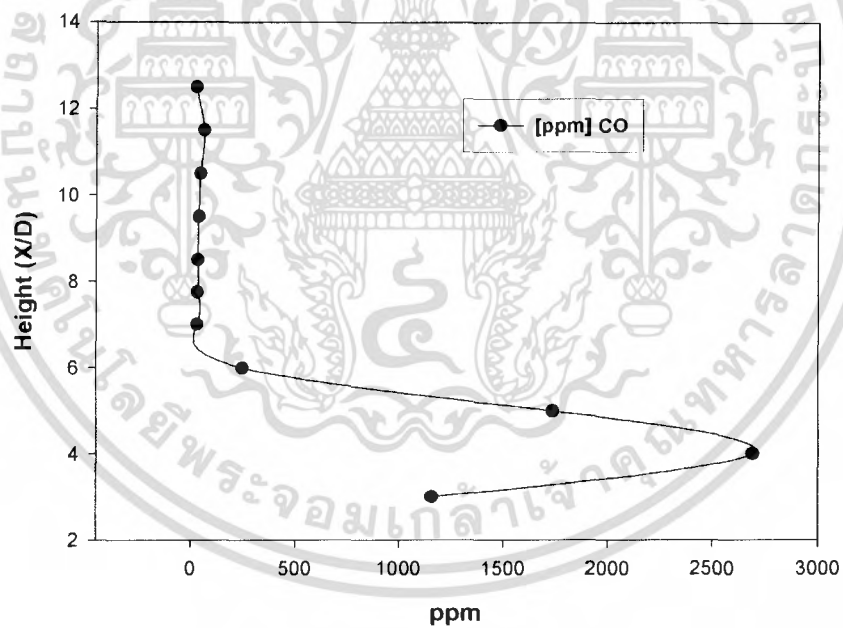


รูป 6.14 แผนภูมิแสดงปริมาณก๊าซ O<sub>2</sub> และ CO<sub>2</sub> เทียบกับตำแหน่งความสูงของเตา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



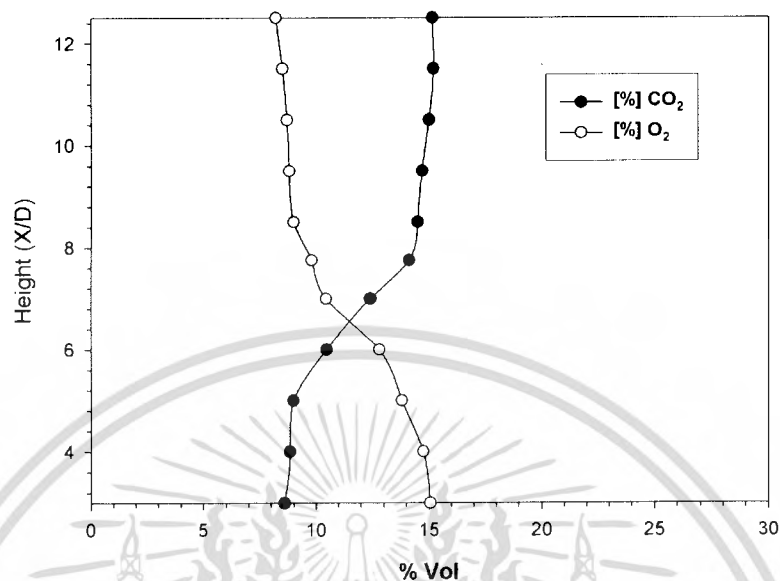
รูป 6.15 แผนภูมิแสดงปริมาณก๊าซ NO<sub>x</sub> เทียบกับตำแหน่งความสูงของเตา



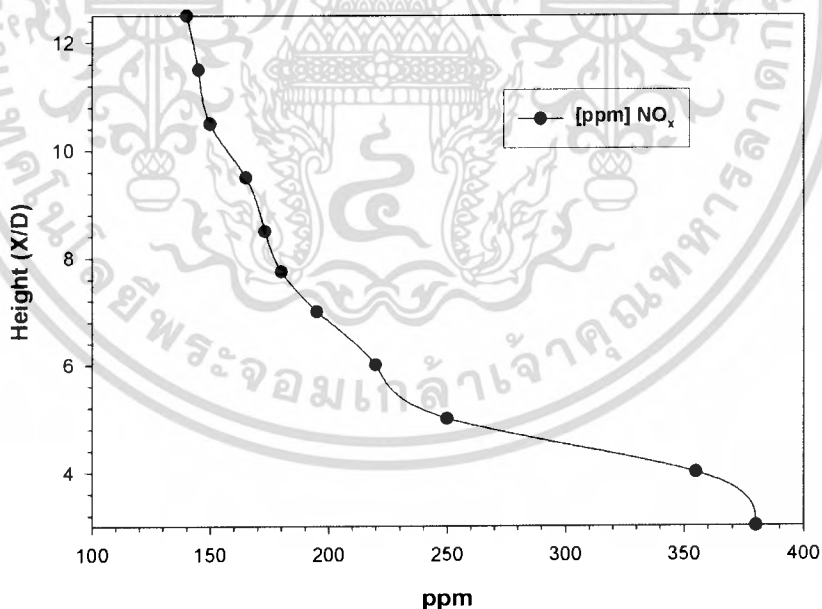
รูป 6.16 แผนภูมิแสดงปริมาณก๊าซ CO เทียบกับตำแหน่งความสูงของเตา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แผนภูมิแสดงปริมาณของก๊าซต่าง ๆ ในกรณีที่มี Excess Air 60% อัตราส่วนมวลหลักต่อลมรอง  
40%:60% ได้ค่าที่ดีที่สุด

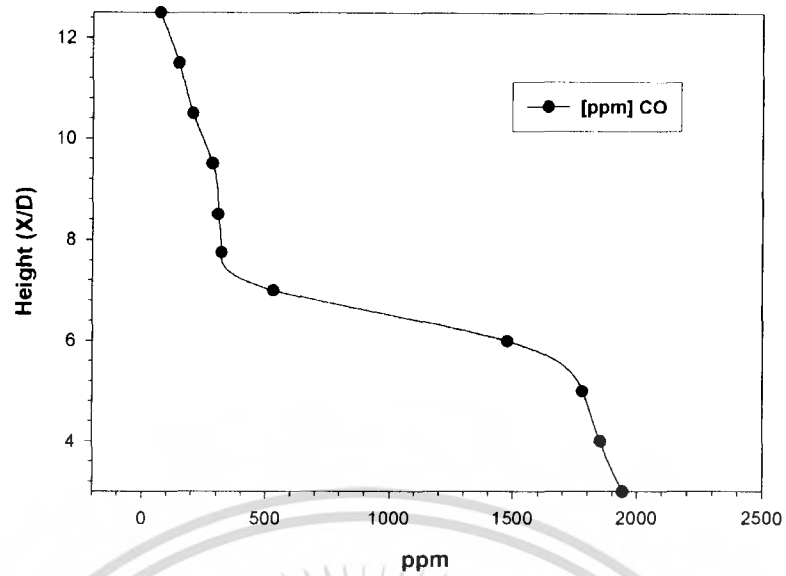


รูป 6.17 แผนภูมิแสดงปริมาณก๊าซ O<sub>2</sub> และ CO<sub>2</sub> เทียบกับตำแหน่งความสูงของเตา



รูป 6.18 แผนภูมิแสดงปริมาณก๊าซ NO<sub>x</sub> เทียบกับตำแหน่งความสูงของเตา

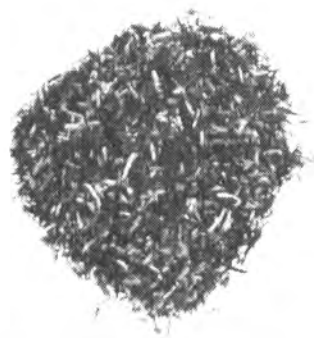
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 6.19 แผนภูมิแสดงปริมาณก๊าซ CO เทียบกับตำแหน่งความสูงของเตา



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

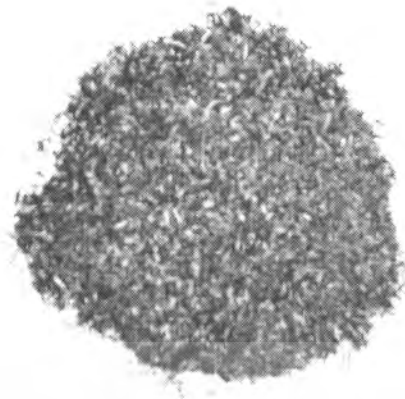


รูปที่ 6.20 ถั่วที่ได้จากเตาผิวเรียบ อัตราป้อนเมล็ด 9 kg/hr อากาศส่วนเกิน 20% ลมหลัก ต่อลมรอง 50%/50%

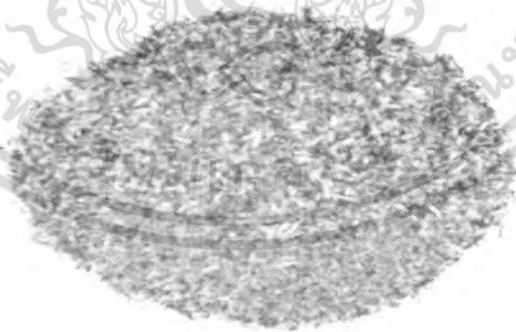


รูปที่ 6.21 ถั่วที่ได้จากเตาผิวเรียบ อัตราป้อนเมล็ด 9 kg/hr อากาศส่วนเกิน 20% ลมหลัก ต่อลมรอง 40%/60%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

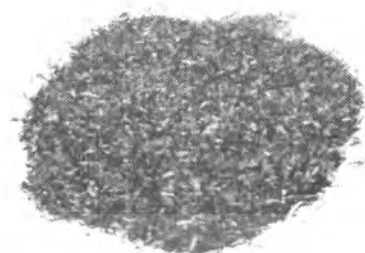


รูปที่ 6.22 เถ้าที่ได้จากเตาผิวเรียบ อัตราป้อนแกลบ 9 kg/hr อากาศส่วนเกิน 20% ลมหลัก ต่อลมรอง 30%/70%



รูปที่ 6.23 เถ้าที่ได้จากเตาผิวเรียบ อัตราป้อนแกลบ 9 kg/hr อากาศส่วนเกิน 40% ลมหลัก ต่อลมรอง 50%/50%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.24 ถ้ำที่ได้จากเตาผิวเรียบ อัตราป้อนแกลบ 9 kg/hr อากาศส่วนเกิน 40% ลมหลัก ต่อลมรอง 40%/60%



รูปที่ 6.25 ถ้ำที่ได้จากเตาผิวเรียบ อัตราป้อนแกลบ 9 kg/hr อากาศส่วนเกิน 40% ลมหลัก ต่อลมรอง 30%/70%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 6.26 เถ้าที่ได้จากเตาผิวนเรียบ อัตราป้อนแกลบ 9 kg/hr อากาศส่วนเกิน 60% ลมหลัก ต่อลมรอง 50%/50%



รูปที่ 6.27 เถ้าที่ได้จากเตาผิวนเรียบ อัตราป้อนแกลบ 9 kg/hr อากาศส่วนเกิน 60% ลมหลัก ต่อลมรอง 40%/60%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.28 เถ้าที่ได้จากเตาพิวรีียบ อัตราป้อนแกลบ 9 kg/hr อากาศส่วนเกิน 60% ลมหลัก ต่อลมรอง 30%/70%



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 7

# สรุปและข้อเสนอแนะ

### 7.1 สรุปผล

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาถึงผลกระทบของเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดที่มีการนำไซโคลนไว้ด้านใน การทดลองนี้ได้ทำการทดลองเพื่อทำการเปรียบเทียบผลที่เกิดขึ้น โดยทำการทดลองที่ อัตราการป้อนเชื้อเพลิง 9 kg/hr ที่ค่าเปอร์เซ็นต์ของอากาศส่วนเกิน 20%, 40%, และ 60% ตามลำดับ ซึ่งเปอร์เซ็นต์อากาศส่วนเกิน 40% ให้ผลดีที่สุด ปรับลมหลัก ต่อ ลมรองเป็นอัตราส่วน 3 ค่า คือ 50%/50% 40%/60% , 30%/70% ตามลำดับ ซึ่งอัตราส่วน 40%/60% ให้ผลทางด้านความร้อนดีที่สุด และจากการทดลองเราสามารถลดอัตราป้อนเชื้อเพลิงลงมาจากการทดลองเดิมมาก และ ยังมีอุณหภูมิที่สูงกว่าอีกด้วย

การติดตั้งไซโคลนไว้ด้านในจะช่วยให้การเผาไหม้มีความเหมาะสมกว่าเตาแบบอื่นๆ อุณหภูมิไอเสียมีค่าอยู่ระหว่าง 700 - 750 °C, อุณหภูมิสูงสุดของห้องเผาไหม้อยู่ที่ 950 °C, ปริมาณของการปล่อยก๊าซ CO อยู่ระหว่าง 100 - 300 ppm., ก๊าซ NO<sub>x</sub> อยู่ระหว่าง 100 - 300 ppm., ประสิทธิภาพการเผาไหม้ (Effm) อยู่ระหว่าง 92 - 97% เตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดแบบผิวเรียบด้านล่าง และติดตั้งไซโคลนไว้ด้านในมีความเหมาะสมที่สุดแก่การนำไปประยุกต์ใช้งาน มีอุณหภูมิของไอเสียทางออกอยู่ที่ 750 °C การควบคุมสภาวะการเผาไหม้เป็นไปได้ง่าย มีความสามารถในการผลิตพลังงานความร้อนที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้มาก

### 7.2 ข้อเสนอแนะ

เนื่องจากเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดทำการศึกษาถึงผลกระทบของเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดที่มีลักษณะของห้องเผาไหม้ที่ต่างชนิดกัน ซึ่งการทดลองได้มุ่งเน้นไปที่การศึกษาถึงการกระจายอุณหภูมิที่มีความราบเรียบสม่ำเสมอตลอดทั้งหน้าตัด, ผลของมลพิษที่เกิดขึ้น, ฉะนั้นควรจะมีการศึกษาถึงตัวแปรอื่น ๆ เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการออกแบบให้ได้เตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดที่มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น เช่น

1. ศึกษาถึงผลกระทบของขนาดและความสูงของเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดแบบคลื่นล่าง
2. ศึกษาถึงขนาดผิวคลื่นขนาดต่างๆและระยะพิตช์
3. ทำการวัดปริมาณมลพิษที่ตำแหน่งต่าง ๆ ภายในเตาเผา
4. ศึกษาถึงลักษณะของแผ่นกระจายลมแบบต่าง ๆ ว่ามีผลอย่างไรต่อการเผาไหม้
5. ศึกษาถึงการใส่เชื้อเพลิงชีวมวลชนิดอื่น ๆ เช่น ช้างข้าวโพด, จี้เถียว, ชานอ้อย, เปลือกถั่วลิสง กับเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดแบบคลื่นล่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. ศึกษาถึงการใช้วัสดุทำเบดหลายชนิด เช่น ทราย, ลูกเหล็กและลูกแก้ว เป็นต้น
7. ทำการศึกษาถึงผลของความสูงของวัสดุทำเบด
8. นำความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ไปใช้ให้เกิดประโยชน์มากกว่านี้ เช่นนำไปอบแห้งเมล็ดพืชหรือผลิตผลทางการเกษตร
9. ศึกษาถึงกรณีการใช้เชื้อเพลิงหลายชนิดมาผสมกันต่อการเผาไหม้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บรรณานุกรม

- [1] นายวุฒิ แจ่มอัน และ คณะ “การศึกษาพฤติกรรมการเผาไหม้แกลบในเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดผิวคลื่น” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าคุณทหารลาดกระบัง, 2548.
- [2] นายดิษฐพร ตุงโสธานนท์ “พฤติกรรมการเผาไหม้แกลบในเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดผิวคลื่น” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าคุณทหารลาดกระบัง, 2547.
- [3] วิศิษฐ์ สีสาคีกุล “เตาเผาแกลบวอร์เทคหลายชั้น” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล บัณฑิตวิทยาลัยสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าคุณทหารลาดกระบัง, 2545.
- [4] เสรีย์ ตู๊ประกาย “การศึกษาและออกแบบเตาเผาจากตะกอนแบบฟลูอิดไดซ์เบด” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต คณะพลังงานและวัสดุ, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2540
- [5] ศศิวิมล สูงสว่าง “การเผาไหม้แกลบในฟลูอิดไดซ์เบด” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2525.
- [6] สุวิทย์ เตีย และคณะ (2542) “ การเผาไหม้ชีวมวลในเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบด ” วารสารวิจัยและพัฒนา มจร. ปีที่ 22 ฉบับที่ 2 พฤษภาคม – สิงหาคม, หน้า 47 - 63.
- [7] สมศักดิ์ กীরตวิมลเศรษฐ์ “หลักการและการใช้งานเครื่องมือวัดอุตสาหกรรม” พิมพ์ครั้งที่ 3, สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย – ญี่ปุ่น), 2539.
- [8] สำเร้ง จักรใจ “การเผาไหม้” พิมพ์ครั้งที่ 1, สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2547
- [9] Teng H., Chyang C.S , and Chang S.H, “Character of Waste Tire Incineration in a Prototype Vortexing Fluidizedbed Combustor. Air & Waste Management Association”, 1997, Vol.49, pp. 49 – 57.
- [10] Lin. C.H., Teng J.T. and Chyang C.S., “ Evtuation of the Combustion Efficiency and Emission of Pollutants by Coal Particles in a Vortexing Fluidized Bed, Combustion and Flame”, 1997, Vol.110, pp. 163 – 172.
- [11] Nieh S. and Yang G., “Particle Flow Pattern in the Free board of a Vortexing Fluidized Bed, Powder Technology, 1987, Vol. 50, pp. 121 – 131.
- [12] Nieh, S. Yang G., Zhu A.Q and Zhao C.S. “Measurements of gas – particle flows and elutriation of an 18 inch i.d. cold Vartexing fluidized – bed combustion mode

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Powder Technology, 1992, Vol. 69, pp. 139 – 146.
- [13] Parmchart W., Kouprianov V.I. and Tantimuratha L. “Experimental study on a conical fluidized bed Combustor firing rice husk” The Second Regional Conference on Energy Technology Towards a Clean Enviroment, 12 – 14 February 2003, Phuket, Thailand.
- [14] Wan H., and Chyang. C.S., “Transport Disengaging Height and Elutriation Rate of a Vortexing Fluidized Bed Journal of Chemical Engineering of Japan”, 1998, Vol. 31, No. 6 pp. 977 – 986.
- [15] Stephen R., Turns, An Introduction to Combustion (Concepts And Applications). McGraw -- Hill International Editions, 1996, pp. 19.
- [16] Daizo K., Octave L., Fluidization Engineering, Butterworth-Heinemann. Second Editions, 1991.
- [17] CHN-900/CHNS-932 Instruction Manual, Version 2.2 ,Leco Corporation,1998

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา 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 มีความหนาแน่นไม่มากเป็นผลให้การขนส่งมีราคาแพง ปัจจุบันการใช้แกลบเป็นพลังงานอยู่ในวงจำกัดปริมาณการใช้แกลบน้อย โดยที่แกลบอาจนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงได้หลายวิธี เช่น ใช้เป็นเชื้อเพลิงโดยตรงในเตาเผาเพื่อผลิตความร้อนให้หม้อน้ำเพื่อผลิตไฟฟ้า ใช้ผลิตแก๊สเพื่อใช้กับเครื่องยนต์ ทำเป็นเชื้อเพลิงอัดแท่ง ใช้แทนฟืนและใช้อบโดยวิธีไพโรไลซิส(Pyrolysis) เพื่อใช้แทนถ่าน เป็นต้น

### คุณสมบัติทางกายภาพ

แกลบมีคุณสมบัติทางการเป็นเชื้อเพลิงได้เป็นอย่างดีพอสมควร แต่จะมีข้อเสียคือเมื่อทำการเผาไหม้แล้วแกลบจะมีปริมาณสูงถึงประมาณร้อยละ 15.8-24.9 ค่าความร้อนของแกลบจะอยู่ระหว่าง 2,900-4,580 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม ค่าความชื้นโดยประมาณ 1.1-9.8% กิโลกรัม

### ตารางที่ ก-1 คุณสมบัติของแกลบ

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก-2 การเปรียบเทียบเชื้อเพลิง

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก-3 ปริมาณชีวมวลในปี 2540 และ 2544

หน่วย :ตัน

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

หมายเหตุ \* ข้อมูลจากสำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร ปีเพาะปลูก 2540/44

\*\* ประมาณการ

ตารางที่ ก-4 ปริมาณการใช้ชีวมวลโดยเฉลี่ยต่อโรง

ชีวมวล	ปี พ.ศ.			
	ตะวันออกเฉียงเหนือ	เหนือ	กลาง	ใต้
ไม้ฟืน	279.71	528.29	342.16	541.39
ซังข้าวโพด	1,008	178.23	1,250	-
ถ่านไม้	0.48	0.174	0.021	0.041
ต้นข้าวโพดเหลืองทิ้ง	-	-	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	-
ต้นอ้อยเหลืองทิ้งในไร่	-	-	90	-
กากถั่วเหลือง	-	-	-	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



สืบค้นข้อมูลออนไลน์ของบทความและปริญาานิพนธ์ได้ที่

www.kmitl.info

บทความประกอบการสอบ วิชา 01054023 Project 2 ภาคเรียนที่ 2/2549 วันศุกร์ที่ 9 มีนาคม 2550

## การศึกษาพฤติกรรมการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลในเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียน<sup>1</sup>

มนตรี วงศ์บุบผา<sup>2</sup>, รัตนะ เจียมจันทร์<sup>2</sup>, วุชระ ชามนตรี<sup>2</sup>

.....  
รศ.ดร. พงษ์เจต พรหมวงศ์<sup>3</sup>

### บทคัดย่อ

ปริญาานิพนธ์นี้ ได้นำเสนอถึงการศึกษาในเชิงทดลองเกี่ยวกับพฤติกรรม การเผาไหม้ในเตาเผาแบบฟลูอิดไดซ์เบดที่มี แกลบเป็นเชื้อเพลิงชีวมวล และ ศึกษาถึงอิทธิพลของผนังเตาเผาที่เป็นแบบผิวเรียบด้านล่างและพรีบอร์ดใหญ่ด้านบนโดยนำไซโคลน ใส่ไว้ด้านในพรีบอร์ดเพื่อให้เชื้อเพลิงที่ยังเผาไหม้ได้ไม่สมบูรณ์และยังมีน้ำหนักมากตกลงไปในไซโคลนทำให้เกิดการเผาไหม้ซ้ำอีกครั้ง กรณีของการทดลองได้ทำการทดลองที่อัตราการไหลเชิงมวลของแกลบที่ 9 kg/hr โดยทำการปรับปริมาณอากาศส่วนเกินตามทฤษฎี 3 ค่า คือ 20%, 40%, และ 60% จากนั้นทำการปรับปริมาณลมหลักต่อลมรองเป็นอัตราส่วน 3 ค่า คือ 50%:50%, 40%:60% และ 30%:70% ตามลำดับ จากนั้นทำการทำการวัดและสังเกตการณ์การกระจายอุณหภูมิในเตาที่ตำแหน่งต่างๆ ซี้เก้ และ ก๊าซไอเสียจากการทดลองพบว่าที่อัตราส่วนของอากาศ 40%:60% มีการเผาไหม้ดีที่สุด ซึ่งจะมีอุณหภูมิไอเสียระหว่าง 650-850 °C ส่วนอุณหภูมิ สูงสุดในห้องเผาไหม้อยู่ระหว่าง 800-1000 °C จากการวิเคราะห์ที่ก๊าซไอเสียที่บริเวณทางออก ปริมาณของก๊าซ CO<sub>2</sub> อยู่ระหว่าง 120-300 ppm และ ปริมาณของก๊าซ NO<sub>x</sub> อยู่ระหว่าง 150- 220 ppm ประสิทธิภาพการเผาไหม้อยู่ระหว่าง 92-97%

### Abstract

The thesis presents an experimental study of influences of wavy surfaces of a fluidized-bed on rice husk combustion characteristics. The experiments were made of the fluidized bed the typical fluidized bed with a large freebord. Each type of the beds was tested for the same mass flow rates of rice husk ranging from 9 kg/hr and for percent excess air of 20%, 40% and 60 %. Varying primary air per secondary air at 50%:50%, 40%:60%, 30%:70% was studied. Temperature distributions inside the bed were measured at selected locations and flyash, smoke and exhaust gas emissions were observed and measured by a gas analyzer. Optimum test run was found at the excess air of 40%:60% . The experiment shows that cyclone at the top part can improve combustion performance and yields better combustion than the others for all test runs. From experimental results, maximum flue gas temperatures for each beds are found between 650 and 850°C and the maximum temperature in the combustor is about 800-1000°C. From exhaust gas emission measurements, it is found that CO is in a range of 120-300 ppm, NO<sub>x</sub> between 150 and 220 ppm and combustion efficiency ranging from 92 to 97 %.

**Keywords:** biomass; combustion; heating value; fluidized-bed combustion

<sup>1</sup>ชื่ออังกฤษ “**BIOMASS COMBUSTION BEHAVIORS IN A CIRCULATING FLUIDIZED-BED**”

<sup>2</sup>นักศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมเครื่องกล สจล. รหัสประจำตัวนักศึกษา 47015402, 47015403 และ 47015404 ตามลำดับ

<sup>3</sup>รองศาสตราจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล โทร 02-3264197

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1. บทนำ

ในปัจจุบันจะเห็นได้ว่าความต้องการทางด้านการใช้พลังงานของประเทศมีแนวโน้มสูงขึ้นตามความเจริญของประเทศ ซึ่งพลังงานที่ใช้ส่วนใหญ่จะเป็นพลังงานที่มาจากแหล่งเชื้อเพลิง ได้แก่ ถ่านหิน, พีโตรเลียม, ก๊าซธรรมชาติ เป็นต้น ซึ่งแหล่งพลังงานเหล่านี้เป็นแหล่งพลังงานที่ใช้แล้วหมดไป ประกอบกับเกิดวิกฤตการณ์ของพลังงานมีราคาที่สูงขึ้น ดังนั้น ภาครัฐและเอกชนจึงมีนโยบายที่จะหาพลังงานอื่นๆ มาช่วยทดแทนพลังงานที่ใช้กันในปัจจุบัน เช่น นำน้ำมันเชื้อเพลิงมาผสมรวมกับสารสกัดจากพืช เพื่อนำมาผสมกันและนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงใหม่เช่นการนำน้ำมันดีเซลผสมกับน้ำมันปาล์ม เรียกว่า "ไบโอดีเซล"

เมื่อลองทำการศึกษาและพิจารณาพบว่าหากสามารถหาแหล่งพลังงานที่สามารถใช้ได้ไม่มีวันหมดและก่อมลพิษน้อยกว่าเชื้อเพลิงที่มีใช้กันอยู่ในปัจจุบัน และจากการศึกษาพบว่าเชื้อเพลิงชีวมวลที่เป็นเศษเหลือจากการเกษตรสามารถนำมาใช้เป็นพลังงานได้ในรูปของพลังงานความร้อน เพราะประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรม ทั่วทุกภาค

ของประเทศประกอบอาชีพเกษตรกรรมแล้วมีการทำนากันมาก เมื่อเก็บเกี่ยวผลผลิตเรียบร้อยแล้วจะต้องนำข้าวเปลือกไปสี เพื่อให้ได้เมล็ดข้าวออกมาสำหรับบริโภค

แกลบคือวัสดุที่เหลือจากการสีข้าวซึ่งถ้าสีข้าว 1 ตันจะได้แกลบออกมาประมาณ 220 กิโลกรัม ค่าความร้อนของแกลบมีค่าประมาณ 3600 kcal/kg จึงน่าจะนำแกลบไปใช้เป็นเชื้อเพลิงผลิตพลังงานความร้อนต่อไป เพื่อใช้ให้เกิดประโยชน์และมีประสิทธิภาพสูงสุด

### 1.1. วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. ศึกษาและพัฒนาเตาเผาแกลบฟลูอิดไดซ์เบด
2. ทำการศึกษาถึงอิทธิพลของหอตลอดลักษณะต่างๆ ทั้ง 2 แบบต่อลักษณะการเผาไหม้
3. ศึกษาถึงอิทธิพลของเตาเผาลักษณะต่างๆต่อการกระจายอุณหภูมิในตำแหน่งต่างๆภายในเตา, ขึ้นที่ที่ออกมา กับก๊าซไอเสีย

### 1.2. ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย

เตาเผาที่ใช้ในการทดลองนี้เป็นเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดแบบผิวเรียบ สำหรับเตาเผาแกลบฟลูอิดไดซ์เบดที่มีอยู่เดิม พบว่าจะต้องมีความสูงของห้องเผาไหม้ที่สูงมากเพื่อลดอัตราการหลุดลอยของอนุภาคเชื้อเพลิงและทำให้อนุภาคอยู่ในห้องเผาไหม้นานขึ้น ดังนั้นจึง

อาศัยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดแบบผิวเรียบ และ ฟริบอร์ตใหญ่ เข้ามาใช้ในการเผาไหม้เชื้อเพลิงแกลบ ทำให้สามารถลดความสูงของห้องเผาไหม้ได้ ไม่เกิดการแยกชั้นของการไหลของอนุภาค ช่วยให้เชื้อเพลิงสามารถอยู่ภายในห้องเผาไหม้นานขึ้นทำให้มีเวลาเพียงพอในการทำปฏิกิริยา

### 1.3. ขอบเขตของงานวิจัย

1. ทดลองเผาไหม้แกลบในเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดแบบผิวเรียบ และฟริบอร์ตใหญ่ด้านบนที่นำไซโคลนไลไว้ด้านใน
2. เชื้อเพลิงแกลบที่ใช้ในการทดลองเป็นแกลบขนาดปกติ (ประมาณ 2 มม. x 8 มม.)
3. ใช้อากาศส่วนเกิน 20%, 40% และ 60% อัตราป้อนเชื้อเพลิงแกลบ 9-12 kg/hr
4. ปรับที่อลมหลักต่อที่อลมรองเป็นอัตราส่วน 3 ค่า คือ 50%/50% , 40%/60% , 30%/70% , ตามลำดับ
5. ทำการวัดการกระจายอุณหภูมิภายใน ณ ตำแหน่งต่างๆ ในแนวแกนที่กำหนดไว้ของเตาเผา 11 ตำแหน่ง การกระจายอุณหภูมิในแนวรัศมี 6 ตำแหน่ง อุณหภูมิห้องผลม 1 ตำแหน่ง อุณหภูมิไอเสีย 1 ตำแหน่ง
6. วิเคราะห์ก๊าซไอเสียที่เกิดขึ้น เนื่องจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงของเตาเผา

### 1.4. ขั้นตอนการศึกษา

1. ศึกษาทฤษฎีในอดีตที่เกี่ยวข้องกับเตาเผาชีวมวลแบบวอร์เทค, ฟลูอิดไดซ์เบดและไซโคลน รวมทั้งปัญหา, ข้อจำกัดและอุปสรรคที่เกิดขึ้นจากการทดลอง
2. ศึกษาถึงทฤษฎีการเผาไหม้, ทฤษฎีฟลูอิดไดซ์เซชันและหลักการคำนวณ
3. ออกแบบสร้างและทดสอบเตาเผาแกลบแบบฟลูอิดไดซ์เบดแบบผิวเรียบในการเก็บข้อมูลที่จะศึกษาถึงผลกระทบต่อเตาเผาไหม้ภายในเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดซึ่งจะทดลองคือ
  - 3.1 ทำการทดลองการเผาไหม้เตาเผาแกลบฟลูอิดไดซ์เบดแบบผนังเตาเป็นแบบผิวเรียบ และฟริบอร์ตใหญ่ด้านบน
4. ทำการทดลองตามเงื่อนไขที่ได้ทำการกำหนดขึ้น
5. บันทึกผลการทดลอง
6. สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะเพื่อการพัฒนาและการปรับปรุง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

### 2.1. เชื้อเพลิงชีวมวล

เชื้อเพลิงที่ใช้ในการเผาไหม้สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ เชื้อเพลิงที่ได้จากการทับถมตัวของซากพืชซากสัตว์ภายใต้ผิวโลก หรือที่เรียกว่าเชื้อเพลิงดึกดำบรรพ์ (Fossil fuel) ได้แก่ ถ่านหิน น้ำมัน และก๊าซธรรมชาติ เชื้อเพลิงอีกประเภทหนึ่ง คือ เชื้อเพลิงชีวมวล (Biomass) ซึ่งเป็นวัสดุที่ได้จากสิ่งมีชีวิต เช่น ไม้ ชี้อเลื้อย และ แกลบข้าว เป็นต้น เชื้อเพลิงประเภทชีวมวลนี้ส่วนใหญ่จะได้จากสิ่งที่เหลือทิ้งจากการเกษตร ซึ่งสามารถหาได้ง่ายโดยเฉพาะอย่างยิ่งในบริเวณที่มีการทำเกษตรกรรม

#### 2.1.1. แกลบ

แกลบที่ใช้ในการทดลองเป็นแกลบที่ได้จากส่วนประกอบของ เมล็ดข้าว ซึ่งสามารถอธิบายที่มาของแกลบได้ดังนี้ เมล็ดข้าวเป็น ผลชนิด คาริออปซิส (Caryopsis) ส่วนที่เป็นเมล็ดที่ติดแน่นอยู่กับ ผักรังไข่หรือเยื่อหุ้มผล สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วน คือ เปลือกใหญ่ (Lemma) เปลือกเล็ก (Pale) ประกบกัน แบบตะขอพัน (Interlocking fold) ทั้งสองข้างตลอดแนวความยาว ภายใน เปลือกที่หุ้มเมล็ดข้าวนี้มีช่องว่างระหว่างเม็ด และเปลือกที่ปลายทั้ง 2 ด้าน ผิวของเปลือกทั้งสองส่วนจะมีหนามแข็งเล็กๆติดอยู่โดยรอบ ทั่วไป

ข้อดี มีคุณสมบัติในการเป็นเชื้อเพลิงได้ดีและราคาถูกมาก

ข้อเสีย เมื่อถูกเผาไหม้จะมีปริมาณเขม่าสูงพอประมาณ 15.7 –

21.3 เปอร์เซ็นต์ มีปริมาณความชื้นสูง

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเชื้อเพลิงชีวมวลโดย วิธีการวิเคราะห์ทางเคมีทำให้ทราบองค์ประกอบของเชื้อเพลิงชีวมวล ของชี้อเลื้อยและแกลบดังนี้

แกลบ

ธาตุคาร์บอน	ประมาณ 38	เปอร์เซ็นต์
ออกซิเจน	ประมาณ 41.6	เปอร์เซ็นต์
ไฮโดรเจน	ประมาณ 5.7	เปอร์เซ็นต์
ไนโตรเจน	ประมาณ 0.69	เปอร์เซ็นต์
ซีเถ้า	ประมาณ 198	เปอร์เซ็นต์
LHV	ประมาณ 12.27	MJ/kg

### 2.2. ทฤษฎีฟลูอิดไดเซชัน

ฟลูอิดไดเซชันเป็นปรากฏการณ์ที่อนุภาคของแข็งขนาดเล็กถูกทำให้ อยู่ในสภาพคล้ายของไหลด้วยการพองโดยก๊าซหรือของเหลวที่ไหล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผ่านเบตของแข็งขึ้นไปด้านบนด้วยอัตราการใช้ค่าหนึ่ง โดยมี การถ่ายเทมวลสาร ความร้อน และปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นในขณะที่มีการ สัมผัสระหว่างอนุภาคของแข็ง

#### 2.2.1. ประเภทของฟลูอิดไดเซชัน

กระบวนการฟลูอิดไดเซชันแบ่งตามลักษณะการเกิดได้สองแบบ

2.2.1.1. ฟลูอิดไดเซชันสองสถานะ (Two-phases fluidization) หมายความว่าในหอทดลอง หรือเบตที่ใช้งานจะ ประกอบด้วยสองสถานะ คือ ของแข็งกับของไหล ของไหลนี้อาจจะเป็น ก๊าซหรือของเหลวก็ได้ ดังนั้นฟลูอิดไดเซชันจึงแบ่งออกอีก 2 ประเภท คือ

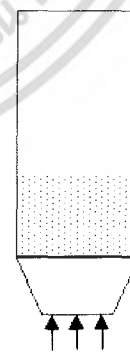
1. ก๊าซฟลูอิดไดเซชัน (Gas fluidization)

2. ฟลูอิดไดเซชันของของเหลว (Liquid fluidization)

2.2.1.2. ฟลูอิดไดเซชันสามสถานะ (Three-phases fluidization) หมายความว่าภายในหอทดลองจะประกอบด้วยของ สามสถานะในเวลาเดียวกันคือ ของแข็ง, ของเหลว และ ก๊าซ สำหรับฟลูอิดไดเซชันสามสถานะเป็นกระบวนการที่พัฒนามาจากฟลู อิดไดเซชันสองสถานะ

#### 2.2.2. ลักษณะฟลูอิดไดเซชันเบต

เบต (Bed) หมายถึงอาณาเขตในหอทดลองที่มีอนุภาค ของแข็งบรรจุอยู่ ไม่ว่าอนุภาคของแข็งนั้นจะอยู่นิ่งหรือเคลื่อนไหว ด้วยของไหลในหอทดลอง จากระดับตั้งแต่แผ่นโลหะที่ทำเป็น ตะแกรงรองรับหรือเป็นตัวกระจายของไหลจนถึงระดับสูงสุด คือ ผิวหน้าของอนุภาคของแข็งที่อยู่ในหอทดลอง ดังรูปที่ 1



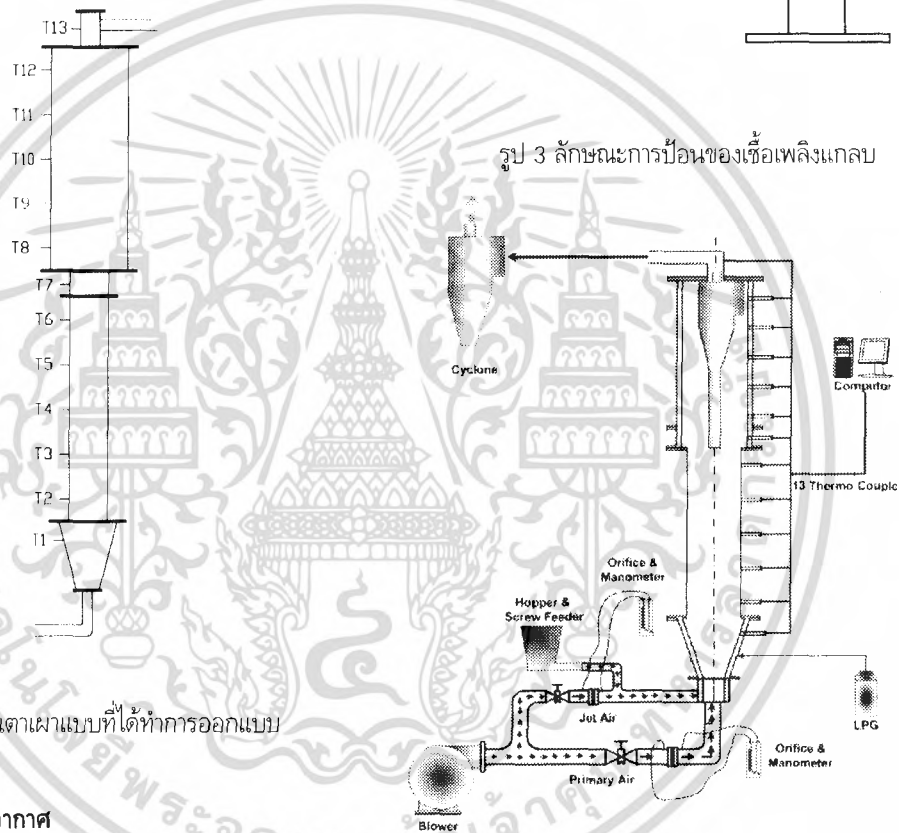
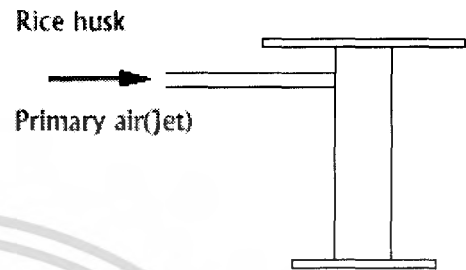
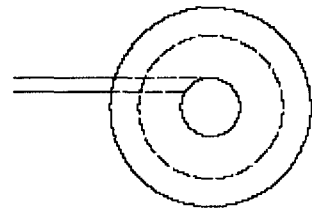
ของไหลความเร็วต่ำ

รูปที่ 1 แสดงระดับของเบตในหอทดลอง

3.การออกแบบเตาเผา

3.1.ลักษณะของเตาเผา

เตาฟลูอิดไดซ์เบดที่ได้ทำการออกแบบนี้มีลักษณะที่ความสูงคือ 2,400 mm. มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายในห้องเผาไหม้(ID) 200 mm. ส่วนของการออกแบบพรีบอร์ดใหญ่ด้านบนมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 400 mm.ส่วนของไซโคลนที่จะนำใส่ไว้ด้านบนมีขนาดความสูง 950 mm ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 152.4 mm



รูปที่ 2 แสดงลักษณะของเตาเผาแบบที่ได้ทำการออกแบบ

รูป 3 ลักษณะการป้อนของเชื้อเพลิงแกลบ

3.2.ระบบการป้อนเชื้อเพลิงและอากาศ

การใช้ระบบการป้อนเชื้อเพลิงเป็นแบบเกลียว (Screw Feeder) โดยป้อนตรงเข้าสู่ท่อขนาด 45 mm. ทางด้านล่างของห้องเผาไหม้ กับท่อลม Nozzle Jet เป็นลมที่ช่วยพาอากาศเข้ามาผสมกับเชื้อเพลิงโดยใช้อากาศพาเชื้อเพลิงแกลบเข้าสู่ห้องเผาไหม้ทางด้านล่าง ดังแสดงในรูปที่ 3

รูปที่ 4 การจัดระบบการทดลองของเตาเผาแกลบฟลูอิดไดซ์เบด

4.การคำนวณ

4.1.เปอร์เซ็นต์อากาศส่วนเกิน (Percent Excess air)

ในการแสดงปริมาณของอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้จริงกำหนดให้อยู่ในรูปของเปอร์เซ็นต์อากาศส่วนเกิน (percent excess air) คือ ปริมาณที่บอกให้ทราบว่าปริมาณอากาศส่วนเกินที่เปอร์เซ็นต์โดยคิดจากอากาศทางทฤษฎีที่มีค่าเท่ากับ 100 ถ้าหากปริมาณอากาศที่ใช้มากกว่าปริมาณอากาศทางทฤษฎีจะเรียกว่า อัตราส่วนผสมบาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Lean Mixture) ตรงกันข้ามหากปริมาณอากาศที่ใช้น้อยกว่าจะเรียกว่าอัตราส่วนผสมหนา (Rich Mixture)

$L_{mf}$  คือ ความสูง Reaction zone

$\rho_s$  คือ ความหนาแน่นของแกลบ

$\rho_g$  คือ ความหนาแน่นของอากาศ

$$EA = \left[ \frac{(A/F)_{Actual}}{(A/F)_{Stoic}} - 1 \right] \times 100\% \quad (1)$$

โดยที่

EA คือ เปอร์เซ็นต์อากาศส่วนเกิน (%)

$(A/F)_{Actual}$  คือ อัตราส่วนผสมในการเผาไหม้จริง

$(A/F)_{Stoic}$  คือ อัตราส่วนผสมในการเผาไหม้ทฤษฎี

ตรวจสอบหาค่า Re เพื่อหาค่า  $Cd_{or}$  ของรูจากตาราง

$$Re_t = \frac{d_t u_o \rho_g}{\mu} \quad (4)$$

#### 4.2. การหาความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดซ์เบด ( $u_{mf}$ )

จากการประยุกต์สมการของ ERGUN

หา  $u_{or}$  จากสมการ

$$\frac{1.75 (d_p u_{mf} \rho_g)^2}{\epsilon_{mf} \phi_s \mu} + \frac{15(1 - \epsilon_{mf}) d_p u_{mf} \rho_g}{\epsilon_{mf} \phi_s \mu} = \frac{d_p \rho_g (\rho_R - \rho_g) g}{\mu} \quad (2)$$

$$U_{or} = Cd_{or} \left\{ \frac{2 \Delta P d}{\rho_g} \right\}^{1/2} \quad (5)$$

โดยที่

$\epsilon_{mf}$  คือ สัดส่วนช่องว่างของแกลบ

$\phi_s$  คือ สัดส่วนความกลมของแกลบ

$d_p$  คือ เส้นผ่าศูนย์กลางของทลกลมเทียบเท่ากับแกลบ

$\rho_R$  คือ ความหนาแน่นของแกลบ

$\rho_g$  คือ ความหนาแน่นของอากาศ

$\mu$  คือ สัมประสิทธิ์ความเสียดทานของอากาศ

$g$  คือ ความเร่งจากแรงโน้มถ่วงของโลก

หาจำนวนรูต่อพื้นที่และขนาดของรู

$$U_o = \frac{\pi}{4} d_{or}^2 u_{or} N_{or} \quad (6)$$

โดยที่

$N_{or}$  คือ จำนวนรูแผ่นกระจายลม

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

#### 5. ผลการทดลอง

#### 4.3. การคำนวณหาความสัมพันธ์ระหว่างขนาดท่อทดลองต่อแผ่นกระจายลม

จากสมการในการหาความดันตกคร่อมในเบด

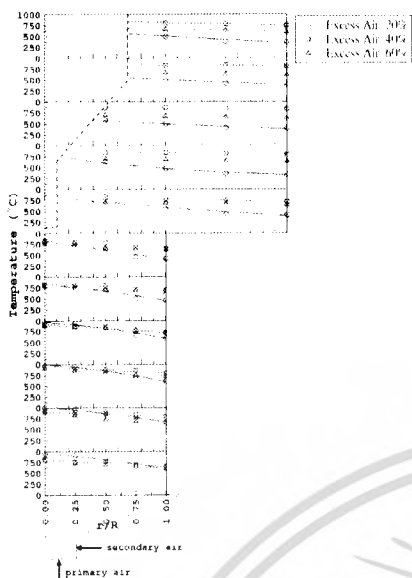
$$\frac{\Delta P_b}{L_{mf}} = (1 - \epsilon_{mf})(\rho_s - \rho_g) \frac{g}{g_c} \quad (3)$$

โดยที่

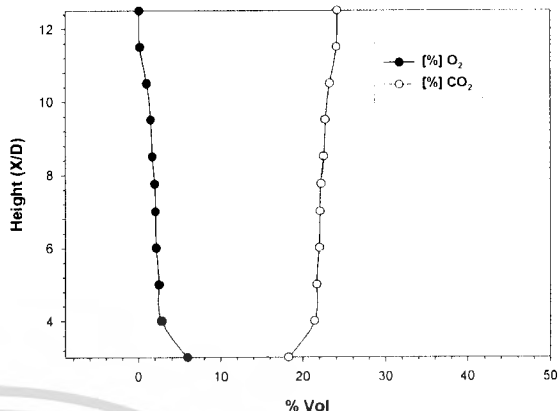
$\Delta P_b$  คือ ความดันตกคร่อมในเบด

จากการทดลองอัตราการไหลเชิงมวลของแกลบที่ 9 kg/hr และอากาศส่วนเกินที่ 40% มีการเผาไหม้ดีที่สุด หลังจากนั้นทำการปรับท่อลมหลักต่อท่อลมรองเป็นอัตราส่วน 3 ค่า คือ 50%/50% , 40%/60% , 30%/70% , ตามลำดับ จากการทดลองพบว่าที่อากาศ 40%/60% มีการเผาไหม้ดีที่สุดในแต่ละแบบ สำหรับเตาเผาแบบผิวคลื่นด้านล่างจะมีการเผาไหม้ดีกว่าเตาเผาแบบผิวเรียบซึ่งเตาเผาแบบผิวคลื่นจะมีอุณหภูมิไอเสียระหว่าง 700-750°C ส่วนอุณหภูมิในห้องเผาไหม้อยู่ที่ 950°C จากการวิเคราะห์ก๊าซไอเสียปริมาณของก๊าซ CO อยู่ระหว่าง 100-300 ppm ก๊าซ NO อยู่ระหว่าง 100-300 ppm และประสิทธิภาพการเผาไหม้อยู่ระหว่าง 92% - 97%

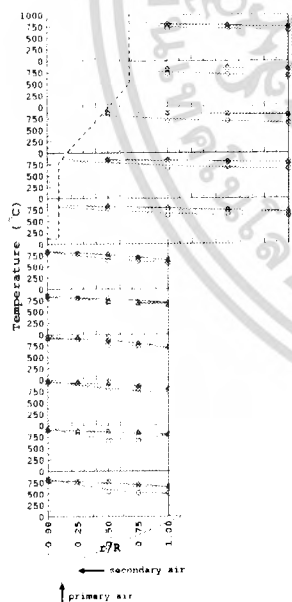
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



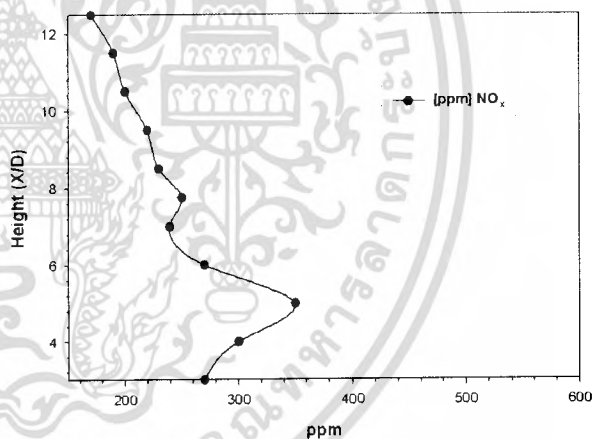
รูปที่ 5 แสดงอุณหภูมิตามแนวรัศมีของเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดแบบผงเตาเป็นแบบผิวเรียบอัตราป้อน 9kg/hr อากาศส่วนเกิน 20%, 40%, และ 60%



รูปที่ 7 แผนภูมิ แสดงปริมาณก๊าซ O<sub>2</sub> และ CO<sub>2</sub>เทียบกับตำแหน่งความสูงของเตาที่ Excess Air 20% อัตราส่วนลมหลักต่อลมรอง 40%:60%

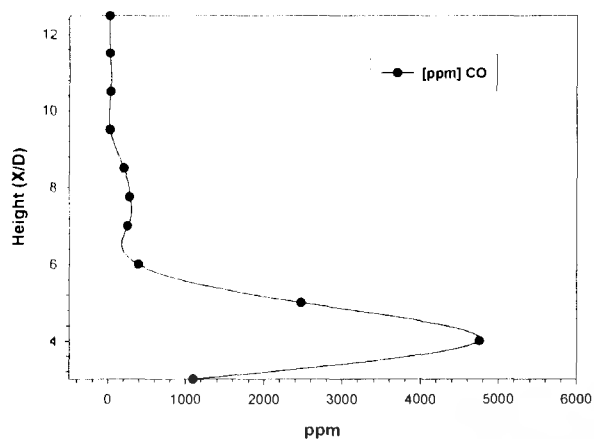


รูปที่ 6 แสดงอุณหภูมิตามแนวความสูงของเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดแบบผงเตาเป็นแบบผิวเรียบที่ปรับเปลี่ยนลมด้านหลักต่อลมด้านรองเป็น 50%/50%, 40%/60%, 30%/70%, ตามลำดับ

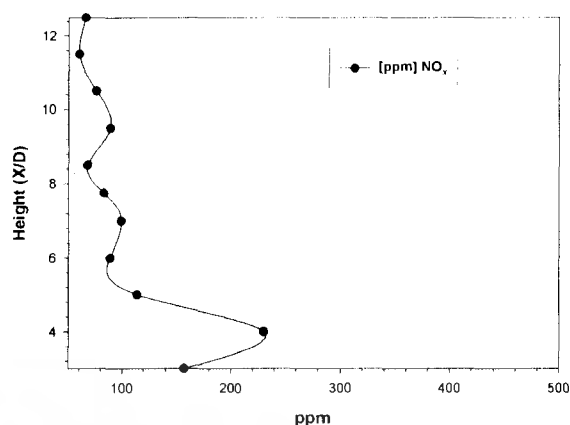


รูปที่ 8 แผนภูมิ แสดงปริมาณก๊าซ NO<sub>x</sub> เทียบกับตำแหน่งความสูงของเตาที่ Excess Air 20% อัตราส่วนลมหลักต่อลมรอง 40%:60%

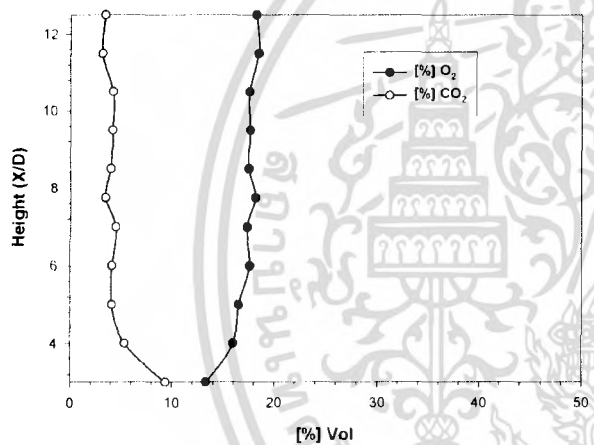
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



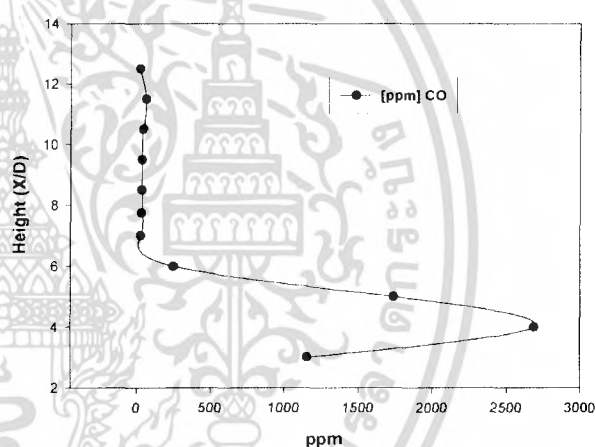
รูปที่ 9 แสดงปริมาณก๊าซ CO เทียบกับตำแหน่งความสูงของเตาที่ Excess Air 20% อัตราส่วนลมหลักต่อลมรอง 40%:60%



รูปที่ 11 แสดงปริมาณก๊าซ NOx เทียบกับตำแหน่งความสูงของเตาที่ Excess Air 40% อัตราส่วนลมหลักต่อลมรอง 40%:60%

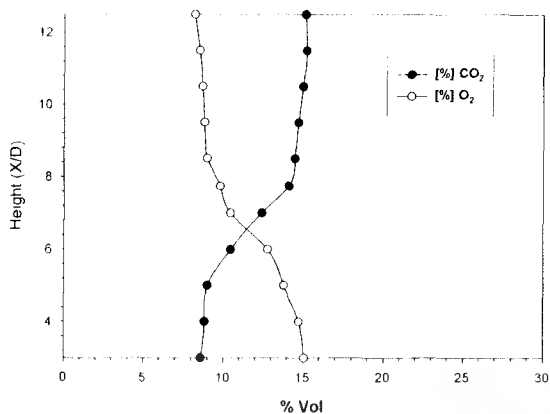


รูปที่ 10 แสดงปริมาณก๊าซ O<sub>2</sub> และ CO<sub>2</sub> เทียบกับตำแหน่งความสูงของเตาที่ Excess Air 40% อัตราส่วนลมหลักต่อลมรอง 40%:60%

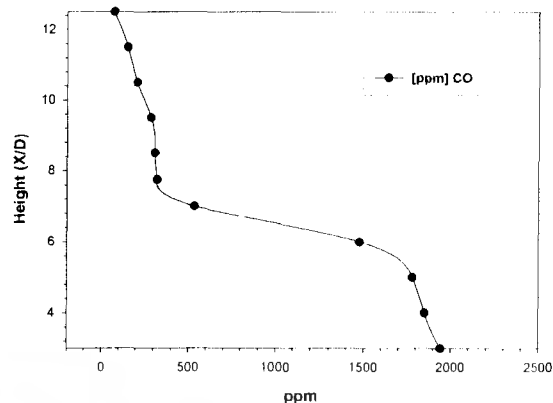


รูปที่ 12 แสดงปริมาณก๊าซ CO เทียบกับตำแหน่งความสูงของเตาที่ Excess Air 40% อัตราส่วนลมหลักต่อลมรอง 40%:60%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่13 แสดงปริมาณก๊าซ O<sub>2</sub> และ CO<sub>2</sub>เทียบกับตำแหน่งความสูงของเตาที่ Excess Air 60% อัตราส่วนลมหลักต่อลมรอง40%:60%



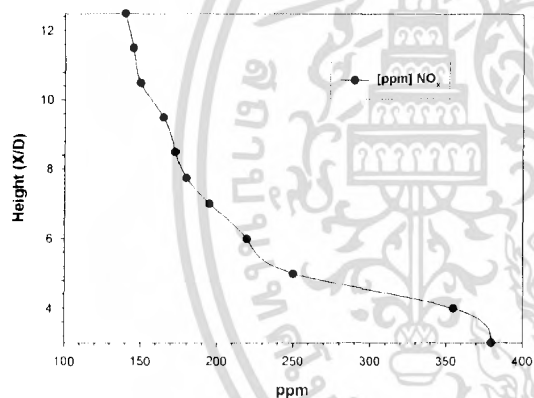
รูปที่15 แสดงปริมาณก๊าซ COเทียบกับตำแหน่งความสูงของเตาที่ Excess Air 60% อัตราส่วนลมหลักต่อลมรอง40%:60%

## 6.สรุปผลการทดลอง

- 1.ที่อากาศส่วนเกิน 40%อัตราป้อนเชื้อเพลิง 9 kg/hr กับเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดในการทดลองจะให้อุณหภูมิสูงสุด
- 2.การทำห้องเผาไหม้เป็นพรีบอร์ดใหญ่ทำให้เวลาในการเผาไหม้มากขึ้น เเผาไหม้เชื้อเพลิงได้นานขึ้น
- 3.รับเปลี่ยนกระแสลมหลักต่อกระแสลมรองที่สัดส่วน 40%/60% จะให้อุณหภูมิสูงสุด

## 7.ข้อเสนอแนะ

เนื่องจากเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดทำการศึกษาถึงผลกระทบของเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดที่มีลักษณะของห้องเผาไหม้ที่ต่างชนิดกัน ซึ่งการทดลองได้มุ่งเน้นไปที่การศึกษาถึงการกระจายอุณหภูมิที่มีความราบเรียบสม่ำเสมอตลอดทั้งหน้าตัด, ผลของมลพิษที่เกิดขึ้น, ฉะนั้นควรจะมีการศึกษาถึงตัวแปรอื่น ๆ เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการออกแบบให้ได้เตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดที่มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น



รูปที่14 แสดงปริมาณก๊าซ NO<sub>x</sub> เทียบกับตำแหน่งความสูงของเตาที่ Excess Air 60% อัตราส่วนลมหลักต่อลมรอง40%:60%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] นายวุฒิ แจ่มอัน “พฤติกรรมการเผาไหม้แกลบในเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดผิวคลื่น” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล บัณฑิตวิทยาลัยสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าคุณทหารลาดกระบัง, 2548.
- [2] นายดิษฐพร ตุงโสธานนท์ “พฤติกรรมการเผาไหม้แกลบในเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดผิวคลื่น” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล บัณฑิตวิทยาลัยสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าคุณทหารลาดกระบัง, 2547.
- [3] วิศิษฐ์ ลีลาผาติกุล “เตาเผาแกลบวอร์เทคหลายชั้น” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล บัณฑิตวิทยาลัยสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าคุณทหารลาดกระบัง, 2545.
- [4] เสรีย์ ตูประกาย “การศึกษาและออกแบบเตาเผาจากตะกอนแบบฟลูอิดไดซ์เบด” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต คณะพลังงานและวัสดุ, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2540
- [5] ศศิวิมล สูงสว่าง “การเผาไหม้แกลบในฟลูอิดไดซ์เบด” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2525.
- [6] สำเริง จักรใจ “การเผาไหม้” พิมพ์ครั้งที่ 1, สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2547
- [7] Teng H., Chyang C.S., and Chang S.H., “Character of Waste Tire Incineration in a Prototype Vortexing Fluidizedbed Combustor. Air & Waste Management Association”, 1997, Vol.49, pp. 49 – 57.
- [8] Lin. C.H., Teng J.T. and Chyang C.S., “Evaluation of the Combustion Efficiency and Emission of Pollutants by Coal Particles in a Vortexing Fluidized Bed, Combustion and Flame”, 1997, Vol.110, pp. 163 – 172.
- [9] Nieh S. and Yang G., “Particle Flow Pattern in the Free board of a Vortexing Fluidized Bed, Powder Technology, 1987, Vol. 50, pp. 121 – 131
- [10] Daizo K., Octave L., Fluidization Engineering. Butterworth-Heinemann. Second Editions, 1991.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้