

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การพัฒนาเตาเผาแกลบฟลูอิดไดซ์แบบผิวคลื่น

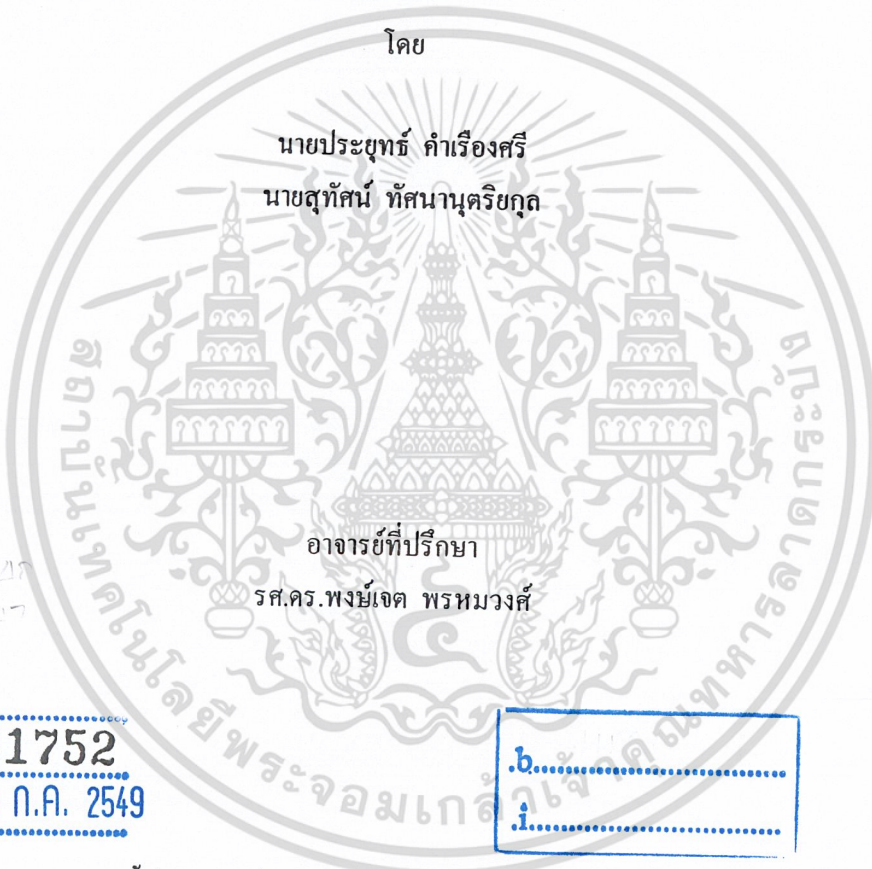
Development of a fluidized bed rice husk combustor with wavy surface



โดย

นายประยุทธ์ คำเรืองศรี  
นายสุทัศน์ ทัศนานุกริยกุล

อาจารย์ที่ปรึกษา  
รศ.ดร.พงษ์เจต พรหมวงค์



เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน **61752**  
วัน,เดือน,ปี **2 1 ก.ค. 2549**

b.....  
i.....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาคามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2547

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2547

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การพัฒนาเตาเผาแกลบฟลูอิดไดซ์แบบผิวคลื่น

Development of a fluidized bed rice husk combustor with wavy surface

คณะผู้จัดทำ

นายประยุทธ์ คำเรืองศรี รหัสประจำตัว 45015421

นายสุทัศน์ ทศนานุตรียกุล รหัสประจำตัว 45015485



อาจารย์ที่ปรึกษา

(รศ.ดร.พงษ์เจต พรหมวงศ์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การพัฒนาเตาเผาแกลบฟลูอิดไดซ์แบบผิวคลื่น

นายประยุทธ์ คำเรืองศรี 45015421

นายสุทัศน์ ทัศนานุตรีกุล 45015485

รศ.ดร.พงษ์เจต พรหมวงส์ อาจารย์ที่ปรึกษา  
ปีการศึกษา 2547

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์นี้ได้นำเสนอถึงคุณลักษณะการเผาไหม้ของเตาเผาแกลบฟลูอิดไดซ์เบดที่มีผิวคลื่นภายใน โดยทำการศึกษาถึงการกระจายอุณหภูมิตามตำแหน่งต่างๆภายในเตาเผา ขี้เถ้าเบาและควันจากก๊าซไอเสียได้ถูกวัดและสังเกต ตามลำดับ ในการทำการศึกษายะทำการกำหนดอัตราการไหลของอากาศจำนวน 2 ค่า คือ 82 kg/hr และ 92 kg/hr ในการทำการศึกษารถึงผลกระทบของปริมาณอากาศส่วนเกินได้ทำการปรับเปลี่ยนอัตราป้อนเชื้อเพลิงแกลบ คือ 9.0, 10.5, 12, 13.5, 15.0 และ 16.5 kg/hr ตามลำดับ กับอัตราการไหลของอากาศทั้งสองค่า โดยที่ในการทดลองนี้ ทำการกำหนดให้ การกระจายอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ไม่เกิน  $1,000^{\circ}\text{C}$  และจะไม่พิจารณาผลการทดลองในส่วนที่ไม่สามารถควบคุมการเผาไหม้ตามเงื่อนไขที่กำหนดขึ้นมาได้ จากการทดลองพบว่า ผลของผิวคลื่นภายในเตาสามารถช่วยทำให้เตาฟลูอิดไดซ์เบดมีขนาดเล็กลงได้ อุณหภูมิของไอเสีย ก่อนข้างมีความเสถียรและมีประสิทธิภาพการเผาไหม้สูงสุดอยู่ที่ 90 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Development of a fluidized bed rice husk combustor with wavy surface

Mr. Prayut Khumrungsri 45015421

Mr. Sutat Tassananutariyakul 45015485

Assoc.Prof.Dr. Pongjet Promvonge Advisor

## ABSTRACT

The project presents combustion characteristics of a fluidized bed rice husk furnace with wavy surface. The temperature distributions at selected locations inside the combustor are measured including fly ash and exhaust gas emissions, in this study. In the experiment, two mass flow rates of feeding air were used, namely, 82 kg/hr and 92 kg/hr. Effects of excess air on combustion characteristics were made by varying rice husk fuel feeding rate to be 9.0, 10.5, 12.0, 13.5, 15.0 and 16.5 kg/hr with the two air flow rates employed. The bed temperature was controlled to be under 1,000 °C and the case of bed temperature above 1,000 °C was not in consideration. The experimental result indicates that the use of wavy surface leads to small size of the bed and to combustion stability with combustion efficiency around 90%

### กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยได้ทำปริญญาานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ด้วยการให้คำปรึกษาและความเมตตากรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาานิพนธ์เล่มนี้ รศ.ดร.พงษ์เจต พรหมวงศ์ ที่ได้ให้คำแนะนำและแนวทางในการแก้ไขปัญหาคงงานวิจัยได้เป็นอย่างดีตลอดมา คณะผู้วิจัยจึงมีความรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่าน และขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณอาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลที่ได้ให้คำชี้แนะและช่วยเหลือต่างๆ

ขอขอบคุณผู้ที่ได้ให้เงินทุนสนับสนุนในการวิจัยในครั้งนี้ ซึ่งช่วยแบ่งเบาได้มาก

ขอขอบคุณ ศิษุพร ดุงโสธานนท์ นักศึกษาปริญญาโทที่คอยให้ความช่วยเหลือและแนะนำ การเก็บผลในการทดลองมาโดยตลอด จนผู้วิจัยได้ทำปริญญาานิพนธ์สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบคุณลุงมณฑา เทียมเมืองที่ให้คำชี้แนะและช่วยเหลือต่างๆ

ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา บุคคลที่มีความสำคัญที่สุดที่ได้ให้โอกาสและสนับสนุนในการศึกษา คณะผู้จัดทำจึงขอกราบขอบพระคุณมากไว้ ณ ที่นี้ด้วย

คณะผู้จัดทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมา.....	2
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	3
1.4 ขอบเขตของโครงการ.....	3
1.5 ขั้นตอนการศึกษา.....	3
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 ศศิวิมล สูงสว่าง.....	5
2.2 อภิชัย ทอดเทียนวงษ์.....	6
2.3 รัชชัย ท้าววิล และ สันติ วัชรอากาศไพบุลย์.....	7
2.4 เว็บบทจักร์ จิตวีพิทย์.....	8
2.5 สุพจน์ นำนำโชค.....	9
2.6 อธิศักดิ์ ชูจินดา.....	10
2.7 บุญเรือง ศรีสวัสดิ์.....	11
2.8 นิวัติ พิริยะรุ่งโรจน์.....	12
2.9 Tim T. Fu and Sen Nich.....	13
บทที่ 3 ทฤษฎี.....	15
3.1 เชื้อเพลิงชีวมวล.....	15
3.1.1 ประเภทของเชื้อเพลิงชีวมวล.....	15
3.1.2 คุณลักษณะของเชื้อเพลิงชีวมวล.....	16
3.2 ทฤษฎีการเผาไหม้.....	16
3.2.1 ปัจจัยที่มีผลต่อการเผาไหม้.....	17
3.2.1.1 การป้อนป้อนหรือการผสมลูกเกล็ดระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศ.....	17
3.2.1.2 อุณหภูมิที่สูงพอต่อขบวนการเผาไหม้.....	17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2.1.3 อัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างเชื้อเพลิงกับปริมาณอากาศ.....	18
3.2.1.4 เวลาที่เพียงพอในการเผาไหม้ให้สมบูรณ์ของเชื้อเพลิง.....	18
3.3 การเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง.....	18
3.3.1 แบบจำลองการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง.....	20
3.3.2 แบบจำลอง Unreacted core.....	20
3.4 อากาศชั้น.....	22
3.4.1 อากาศแห้งและอากาศชื้น.....	22
3.4.2 ความดันย่อยของอากาศและความดันไอ.....	22
3.4.3 อัตราส่วนความชื้น.....	23
3.4.4 ความชื้นสัมพัทธ์.....	23
3.4.5 อุณหภูมิกระเปาะแห้งและอุณหภูมิกระเปาะเปียก.....	24
3.5 อัตราส่วนสมมูล (Equivalence ratio).....	24
3.6 อุณหภูมิอะเดียแบติก (Adiabatic Flame Temperature).....	25
3.7 ทฤษฎีฟลูอิดไดเซชัน.....	25
3.7.1 ประเภทของฟลูอิดไดเซชัน.....	26
3.7.2 ลักษณะฟลูอิดไดเซชัน.....	26
3.7.3 ข้อได้เปรียบและเสียเปรียบของฟลูอิดไดเซชัน.....	28
3.7.4 ทฤษฎีการกำหนดฟลูอิดไดเซชัน.....	29
บทที่ 4 การออกแบบและคำนวณ.....	34
4.1 การออกแบบเตาเผาแบบเทคนิคอากาศหมุนวน.....	34
4.2 การคำนวณปริมาณอากาศที่ต้องการในการเผาไหม้ทางทฤษฎี.....	35
4.3 การคำนวณหาขนาดของเตาเผาโดยใช้ทฤษฎีฟลูอิดไดเซชัน.....	38
บทที่ 5 การดำเนินงานวิจัยและการทดลอง.....	45
5.1 อุปกรณ์ในการทดลอง.....	45
5.1.1 เตาเผากลมแบบที่มีผิวคลื่น.....	45
5.1.2 ชุดป้อนอากาศให้กับระบบ.....	46
5.1.3 ระบบป้อนเชื้อเพลิง.....	47
5.1.4 เครื่องมือที่ใช้ในการวัดการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเตา.....	49
5.1.5 ชุดอุ่นเตาเผา.....	50
5.1.6 ระบบดักจับฝุ่นนี้้ถ้า.....	51
5.1.7 ระบบวัดอัตราการไหลของอากาศ.....	51

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.2 ตำแหน่งและการติดตั้งของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง .....	52
5.3 การอุ่นตา .....	53
5.4 การทดลองและบันทึกผลการทดลอง .....	54
บทที่ 6 ผลการทดลองและวิจารณ์ .....	55
6.1 บทนำ .....	55
6.2 อัตราการไหลอากาศที่ 82 kg/hr .....	55
6.3 อัตราการไหลอากาศที่ 92 kg/hr .....	57
6.4 ผลของมลพิษและประสิทธิภาพการเผาไหม้ .....	58
บทที่ 7 สรุปและข้อเสนอแนะ .....	59
7.1 สรุปผลการทดลอง .....	59
7.2 ข้อเสนอแนะ .....	59
บรรณานุกรม .....	60
ภาคผนวก .....	61
ภาคผนวก ก. คุณสมบัติของเชื้อเพลิงแกลบ .....	62
ภาคผนวก ข. แบบเตาเผาที่มีผิวคลื่น .....	66
ภาคผนวก ค. ตารางบันทึกผลการทดลอง .....	73

## สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบของเชื้อเพลิงกลบ.....	35
--	----



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

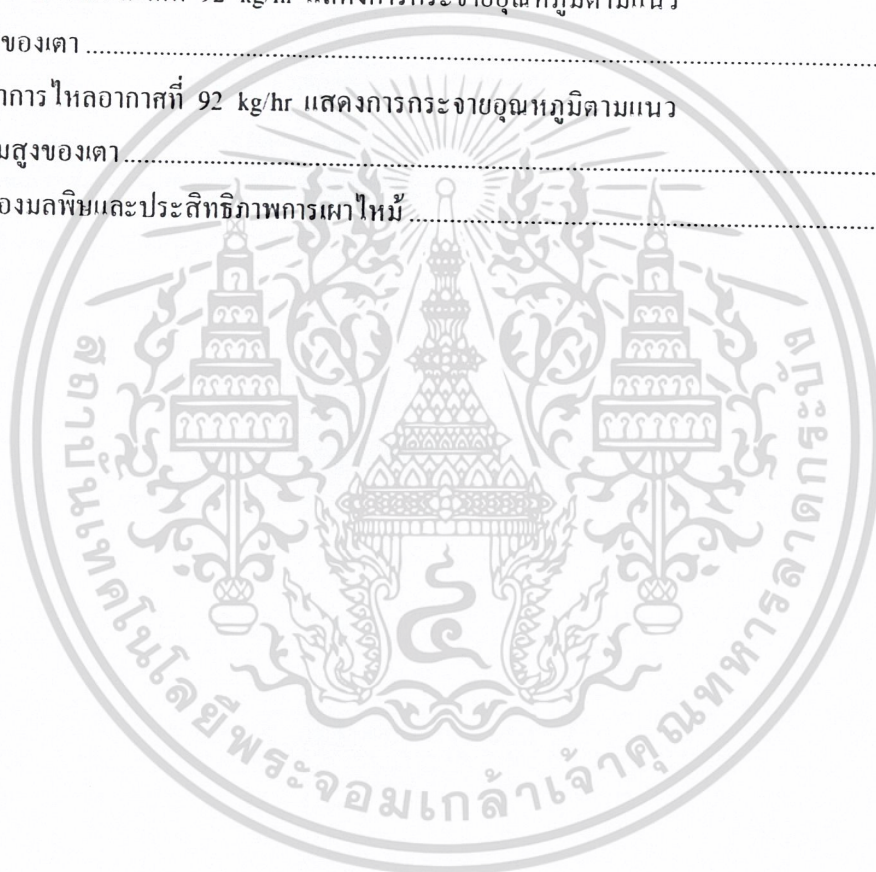
## สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 ลักษณะของห้องเผาไหม้แบบฟลูอิดไดซ์เบด.....	5
รูปที่ 2.2 แสดงลักษณะเตาเผาและอุปกรณ์ในการทดลอง.....	6
รูปที่ 2.3 เตาเผาเศษวัสดุทางการเกษตรแบบใช้อากาศหมุนวน.....	8
รูปที่ 2.4 แสดงแผนภูมิอุปกรณ์การทดลอง.....	8
รูปที่ 2.5 แสดงลักษณะของห้องเผาไหม้แบบจำลอง.....	10
รูปที่ 2.6 แสดงลักษณะของห้องเผาไหม้จริง.....	10
รูปที่ 2.7 แสดงองค์ประกอบต่างๆของเตา.....	11
รูปที่ 2.8 แสดงแผนผังและอุปกรณ์การทดลอง.....	12
รูปที่ 2.9 แสดงแผนภูมิอุปกรณ์การทดลอง.....	13
รูปที่ 3.1 องค์ประกอบของเชื้อเพลิงแข็ง.....	19
รูปที่ 3.2 ปฏิริยาการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง.....	19
รูปที่ 3.3 แบบจำลองการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง.....	20
รูปที่ 3.4 บริเวณการเกิดการเผาไหม้.....	21
รูปที่ 3.5 ลักษณะชั้นเชื้อเพลิงระหว่างการเผาไหม้.....	21
รูปที่ 3.6 แสดงระดับของเบดในหอตลอด.....	26
รูปที่ 3.7 ลักษณะของฟลูอิดไดซ์เบด.....	28
รูปที่ 3.8 แสดงความดันที่เกิดขึ้น ณ ตำแหน่งต่างๆในชุดการทดลอง.....	30
รูปที่ 3.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความกลบและความพรุนของเบด.....	32
รูปที่ 4.1 แสดงถึงลักษณะและรูปร่างของเตาเผาแกลบ.....	34
รูปที่ 5.1 เตาเผาแกลบแบบที่มีผิวกลิ้ง.....	45
รูปที่ 5.2 ชุดป้อนอากาศให้กับระบบ.....	46
รูปที่ 5.3 ระบบป้อนเชื้อเพลิงแกลบ.....	47
รูปที่ 5.4 Inverter.....	47
รูปที่ 5.5 Motor.....	48
รูปที่ 5.6 Screw Feed.....	48
รูปที่ 5.7 เทอร์โมคัปเปิลชนิด K.....	49
รูปที่ 5.8 Analog Input Module.....	49
รูปที่ 5.9 หัวเผา.....	50
รูปที่ 5.10 ถังเชื้อเพลิงก๊าซ LPG.....	50
รูปที่ 5.11 Cyclone.....	51
รูปที่ 5.12 แผ่นออริฟิส.....	52

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 5.13 มาโนมิเตอร์.....	52
รูปที่ 5.15 แสดงตำแหน่งและการติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	53
รูปที่ 6.1 อัตราการไหลอากาศที่ 82 kg/hr แสดงการกระจายอุณหภูมิตามแนว รัศมีของเตา.....	56
รูปที่ 6.2 อัตราการไหลอากาศที่ 82 kg/hr แสดงการกระจายอุณหภูมิตามแนว ความสูงของเตา.....	56
รูปที่ 6.3 อัตราการไหลอากาศที่ 92 kg/hr แสดงการกระจายอุณหภูมิตามแนว รัศมีของเตา.....	57
รูปที่ 6.4 อัตราการไหลอากาศที่ 92 kg/hr แสดงการกระจายอุณหภูมิตามแนว ความสูงของเตา.....	58
รูปที่ 6.5 ผลของมลพิษและประสิทธิภาพการเผาไหม้.....	58



# บทที่ 1

## บทนำ

ความต้องการในการใช้พลังงานในปัจจุบันนี้มีปริมาณมากขึ้นและประกอบด้วยแหล่งพลังงานหลักที่ใช้กันในปัจจุบันนี้ คือ พลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิล ที่มีอยู่ตามแหล่งต่างๆ มีอัตราการลดลงอย่างมาก ดังนั้นปัญหาเกี่ยวกับการขาดแคลนพลังงานจึงดูเหมือนว่าเป็นประเด็นสำคัญที่จะเป็นอุปสรรคต่อการพัฒนา จึงเกิดความคิด ริเริ่มในการที่จะหาแหล่งพลังงานแหล่งใหม่ขึ้นเป็นพลังงานทางเลือกทดแทนแหล่งพลังงานที่มีใช้อยู่เดิม โดยที่แหล่งพลังงานแหล่งใหม่ที่นำสนใจในการนำมาใช้เป็นพลังงานทดแทนเชื้อเพลิงฟอสซิลนั้น ควรจะเป็นแหล่งพลังงานที่หามาได้ง่าย ก่อมลพิษต่อสิ่งแวดล้อมน้อย สำหรับบทความนี้จะมุ่งประเด็นไปที่เชื้อเพลิงชีวมวลซึ่งเป็นผลผลิตจากการเกษตร คือ แกลบ ซึ่งมีอยู่ในปริมาณมากทั่วไปในโลก แกลบคือเปลือกนอกของเมล็ดข้าว คิดเป็น 20% โดยน้ำหนักของการเก็บเกี่ยวข้าวเปลือกอันจะก่อให้เกิดเป็นขยะประมาณได้ว่าในแต่ละปีมีข้าวเปลือกจากทั่วโลกมากกว่า 80 ล้านตัน เฉพาะที่ประเทศไทยมีโรงสีข้าวประมาณ 40,000 โรง และมีแกลบที่ได้จากการสี 4.4-4.6 ล้านตันต่อปี ซึ่งคิดเป็นค่าความร้อนเทียบเท่ากับปริมาณน้ำมันดิบ 1.46-1.53 ล้านตัน

เนื่องด้วยแกลบจัดเป็นเชื้อเพลิงแข็งชนิดหนึ่งและเป็นเชื้อเพลิงแข็งที่เบามาก ลักษณะการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงแข็งจะเป็นการเผาไหม้แบบ Diffusion คือ ก่อนเชื้อเพลิงจะติดไฟที่ผิวหน้าก่อน แล้วจึงค่อยๆ ลามเข้าไปข้างในก้อนเชื้อเพลิง และเชื้อเพลิงที่เผาไหม้ไปก่อนก็จะกลายเป็นขี้เถ้า (Ash) ขัดขวางการลามเข้าไปในก้อนเชื้อเพลิงของเปลวไฟ จึงทำให้เชื้อเพลิงมักจะเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ ต่างกับการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่เป็นของเหลวหรือก๊าซ ที่จะมีการผสมกันของเชื้อเพลิงและอากาศก่อน ที่เรียกว่า Premixed จึงทำให้การเผาไหม้สมบูรณ์กว่าการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง จากการศึกษาวิจัยรายงานจำนวนมากของเผาหลายชนิดที่มีการใช้วัสดุชีวมวลหรือถ่านหินเป็นเชื้อเพลิง ในจำนวนเหล่านั้นเทคโนโลยีฟลูอิดไคซ์เบดดูเหมือนว่าจะเป็นเทคโนโลยีที่เหมาะสมสำหรับการเปลี่ยนเชื้อเพลิงแข็งหรือเศษเหลือจากการเกษตรเป็นพลังงาน เนื่องจากมีข้อได้เปรียบตามธรรมชาติ คือ สามารถเปลี่ยนเชื้อเพลิงได้ตามความเหมาะสม ทำงานที่อุณหภูมิต่ำ เงื่อนไขการทำงานที่อุณหภูมิคงที่ แต่อย่างไรก็ตาม Wan และ Chyang 1998 [1] รายงานว่าการใช้วิธีการของฟลูอิดไคซ์เบดนั้นต้องการห้องเผาไหม้ (เฟรียบอร์ด) ที่สูงมากเพื่อลดอัตราการหลุดลอยของอนุภาคเชื้อเพลิงและทำให้อนุภาคอยู่ในห้องเผาไหม้นานขึ้น ในเตาเผาฟลูอิดไคซ์เบดนั้นอาจต้องมีความสูงรวมของเฟรียบอร์ดมากกว่า 15 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของเบด โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับการใช้เชื้อเพลิงแข็งที่เบามาก วิธีการนี้อาจจะไม่เหมาะสำหรับการใช้แกลบเป็นเชื้อเพลิงในเตาเผาขนาดเล็กเพื่อจุดประสงค์ในการประยุกต์ใช้ในการอบแห้ง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีเทคโนโลยีปรับปรุงเตาเผาเพื่อให้มีประสิทธิภาพในการใช้กับเชื้อเพลิงแข็งที่มีน้ำหนักเบา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เตาเผาแกลบฟลูอิดไดซ์เบดที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม โดยทั่วไปแล้วจะเป็นห้องเผาใหม่แบบทรงกระบอกผิวเรียบขนาดใหญ่และมีความสูงมาก ซึ่งหากจะนำเตาเผาแกลบฟลูอิดไดซ์เบดที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมมาประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมภายในครัวเรือน ควรจะมีขนาดเล็กและมีเสถียรภาพทางอุณหภูมิที่ดี แต่เตาฟลูอิดไดซ์เบดขนาดเล็กมีเสถียรภาพทางอุณหภูมิไม่ดีเท่าที่ควร

ดังนั้นเตาเผาแกลบฟลูอิดไดซ์เบดที่มีผิวกลื่นภายในโดยการทำผนังห้องเผาใหม่ให้มีผิวกลื่น เพื่ออาศัยผลของการเกิด circulation เพื่อทำให้ห้องเผาใหม่ของเตาเผาแกลบฟลูอิดไดซ์เบดมีขนาดเล็กลง และยังคงมีประสิทธิภาพเช่นเดียวกับเตาฟลูอิดไดซ์เบดขนาดใหญ่

1.1 ความเป็นมา

ประเทศไทยก็ได้มีแนวทางที่จะหาแหล่งพลังงานอื่นมาทดแทนเชื้อเพลิงที่ใช้ในปัจจุบัน ซึ่งต้องนำเข้ามาจากต่างประเทศ ทำให้ต้องสูญเสียเงินตรา และขาดดุลการค้ากับต่างประเทศมากขึ้น ดังนั้นถ้ามีการนำเอาสิ่งที่มีอยู่มากมายภายในประเทศทั้งที่ได้จากเกษตรกรรม เช่น ชีวเลื่อย ฟาง แกลบ ขยะกากตะกอน ฯลฯ มาประยุกต์ใช้ให้เกิดประโยชน์ในด้านพลังงาน ทดแทนการใช้ น้ำมัน ก๊าซ หรือ ถ่านหินก็สามารถช่วยลดการนำเข้าและยังสามารถลดปัญหามลพิษด้านสภาวะแวดล้อมได้ด้วย

ประเทศไทยได้ขึ้นชื่อว่าเป็นประเทศเกษตรกรรม พื้นที่แทบทุกภาคของประเทศจะมีการทำนา วัสดุที่เหลือจากการเก็บเกี่ยว คือ ฟางข้าว เมื่อมีการเก็บเกี่ยวแล้วต้องนำไปสี วัสดุที่เหลือจากโรงสี คือ แกลบ ซึ่งถ้าสีข้าว 1 ตัน จะได้แกลบออกมาถึง 220 กิโลกรัมหรือคิดเป็นร้อยละ 22 สำหรับประเทศไทยมีการประเมินไว้ว่าแต่ละปีจะมีแกลบประมาณ 4.4 ถึง 4.6 ล้านตัน โดยจะพบว่ามีปริมาณมาก และมีศักยภาพเชิงความร้อนเทียบเท่าการใช้ น้ำมันดิบ 1.46 ถึง 1.53 ล้านตัน เพราะฉะนั้น แกลบ จึงเป็นเชื้อเพลิงหนึ่งที่น่าสนใจ ค่าความร้อนของแกลบ (overall gross calorific value of rice husk) ประมาณ 2900 ถึง 4560 kcal/kg เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันเตา ที่มีค่าความร้อนประมาณ 9900 kcal/kg จะเห็นว่าค่าความร้อนของแกลบมีค่าประมาณครึ่งหนึ่งของน้ำมันเตาแต่ราคาถูกกว่ามาก

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

เนื่องจากเชื้อเพลิงชีวมวลเป็นเชื้อเพลิงได้นำมาใช้ผลิตพลังงานให้เป็นประโยชน์นานแล้ว แต่เตาเผาแบบฟลูอิดไดซ์เบดที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันมีขนาดใหญ่และมีความสูงมาก ซึ่งหากจะนำเตาเผาแกลบฟลูอิดไดซ์เบดที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมมาประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมภายในครัวเรือนควรจะมีขนาดเล็กและมีเสถียรภาพทางอุณหภูมิที่ดี แต่เตาฟลูอิดไดซ์เบดขนาดเล็กมีเสถียรภาพทางอุณหภูมิไม่ดีเท่าที่ควร จึงมีการออกแบบเตาเผาแกลบฟลูอิดไดซ์เบดที่มีผิวกลื่นภายในโดยการทำผนังห้องเผาใหม่ให้มีผิวกลื่นเพื่ออาศัย ผลของการเกิด circulation เพื่อทำให้ห้องเผาใหม่ของเตาเผาแกลบฟลูอิดไดซ์เบดมีขนาดเล็กลง และยังคงมีประสิทธิภาพเช่นเดียวกับเตาฟลูอิดไดซ์เบดขนาดใหญ่โดยโรงงานที่ทำมีวัตถุประสงค์ของการศึกษา ดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 1.2.1 เพื่อทำการออกแบบสร้าง และทดสอบเตาเผาแบบที่มีผิวคลื่นภายใน
- 1.2.2 เพื่อศึกษาพฤติกรรมการเผาไหม้ของเกลบในห้องเผาไหม้
- 1.2.3 เพื่อศึกษาการกระจายของอุณหภูมิและความเสถียรภาพของเปลวไฟที่เกิดขึ้นภายในเตาเผาแบบที่มีผิวคลื่นภายใน
- 1.2.4 เพื่อศึกษาปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อการกระจายอุณหภูมิภายในเตาเผาแบบที่มีผิวคลื่นภายใน ได้แก่ อัตราการไหลของเพลิง, ปริมาณอากาศส่วนเกิน
- 1.2.5 เพื่อศึกษาผลของก๊าซไอเสียที่เกิดขึ้น

### 1.3 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย

เตาเผาที่ใช้ในการทดลองนี้เป็นเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดที่มีผิวคลื่นภายในเป็นแนวคิดในการออกแบบซึ่งอาศัยเทคนิคของการเกิด circulation ของเชื้อเพลิงในห้องเผาไหม้เพื่อก่อให้เกิดความปั่นป่วน ซึ่งส่งผลทำให้เกิดการผสมกันระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงได้ดีขึ้นและเพื่อช่วยเพิ่มเวลาในการเผาไหม้และทำให้เปลวไฟภายในตามีความเสถียรยิ่งขึ้น

### 1.4 ขอบเขตของโครงการ

- 1.4.1 ศึกษาทฤษฎีการเผาไหม้
- 1.4.2 ออกแบบและสร้างเตาเผาแบบฟลูอิดไดซ์เบดที่มีผิวคลื่นภายใน
- 1.4.3 ทำการทดสอบการเผาไหม้เตาเผาแบบฟลูอิดไดซ์เบดที่มีผิวคลื่นภายใน
- 1.4.4 ทำการปรับแก้อัตราการไหลของอากาศจำนวน 2 ค่า คือ 82 kg/hr และ 92 kg/hr
- 1.4.5 ทำการปรับแก้อัตราการป้อนเชื้อเพลิงเกลบ คือ 9.0, 10.5, 12, 13.5, 15.0 และ 16.5 kg/hr ตามลำดับ กับอัตราการไหลของอากาศทั้งสองค่า
- 1.4.6 ทำการวัดอุณหภูมิเพื่อศึกษาพฤติกรรมและการกระจายของอุณหภูมิภายในเตาเผา
- 1.4.7 ทำการวัดอุณหภูมิที่ไอเสียทางออกดูการเปลี่ยนแปลงและความเสถียรภาพของอุณหภูมิของแต่ละสถานะ

### 1.5 ขั้นตอนการศึกษา

- 1.5.1 ทำการศึกษารวบรวมทฤษฎีการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง และคุณสมบัติต่างๆของเชื้อเพลิงเกลบ
- 1.5.2 ศึกษาและรวบรวมงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเตาเผาในอดีต เพื่อเป็นแนวทางในการศึกษาทดลอง
- 1.5.3 เลือกแบบและทำการทดลอง เพื่อหารูปแบบของผิวคลื่นโดยใช้ชุด Cold model
- 1.5.4 นำแบบที่ได้จากชุด Cold model มาออกแบบลูกคลื่นให้ได้สัดส่วนตามขนาดจริงของห้องเผาไหม้
- 1.5.5 สร้างและประกอบชุดผิวคลื่นเข้ากับในห้องเผาไหม้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5.6 ทำการทดลองหาค่าตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อคุณลักษณะการเผาไหม้ภายในเตาเผาแบบที่มีผิวกลิ้งและบันทึกผลการทดลอง

1.5.7 วิเคราะห์ผลการทดลอง

1.5.8 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

## 1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.6.1 สามารถเป็นต้นแบบในการออกแบบและสร้างเตาเผาแบบฟลูอิดไดซ์เบดที่มีผิวกลิ้งภายในให้มีขนาดเหมาะสมกับอุตสาหกรรมภายในครัวเรือน ให้มีขนาดเล็กและมีเสถียรภาพทางอุณหภูมิที่ดี

1.6.2 สามารถนำพลังงานความร้อนที่ได้จากเตาเผาแบบฟลูอิดไดซ์เบดที่มีผิวกลิ้งภายในไปประยุกต์ไปใช้ในงานด้านเกษตรกรรม เช่น การนำไปอบไล่ความชื้นพืชผลทางการเกษตรหรือนำไปประยุกต์ใช้ในงานด้านอุตสาหกรรมได้ เป็นต้น

1.6.3 สามารถนำวัสดุที่เหลือใช้ในทางการเกษตร มาใช้เป็นพลังงานทดแทนและนำมาหมุนเวียนใช้งานเพื่อก่อให้เกิดประโยชน์

1.6.4 ช่วยลดปริมาณแกลบที่เหลือใช้ในทางการเกษตรซ้ำยังเป็นการช่วยเร่งย่อยสลายแกลบที่เหลือใช้

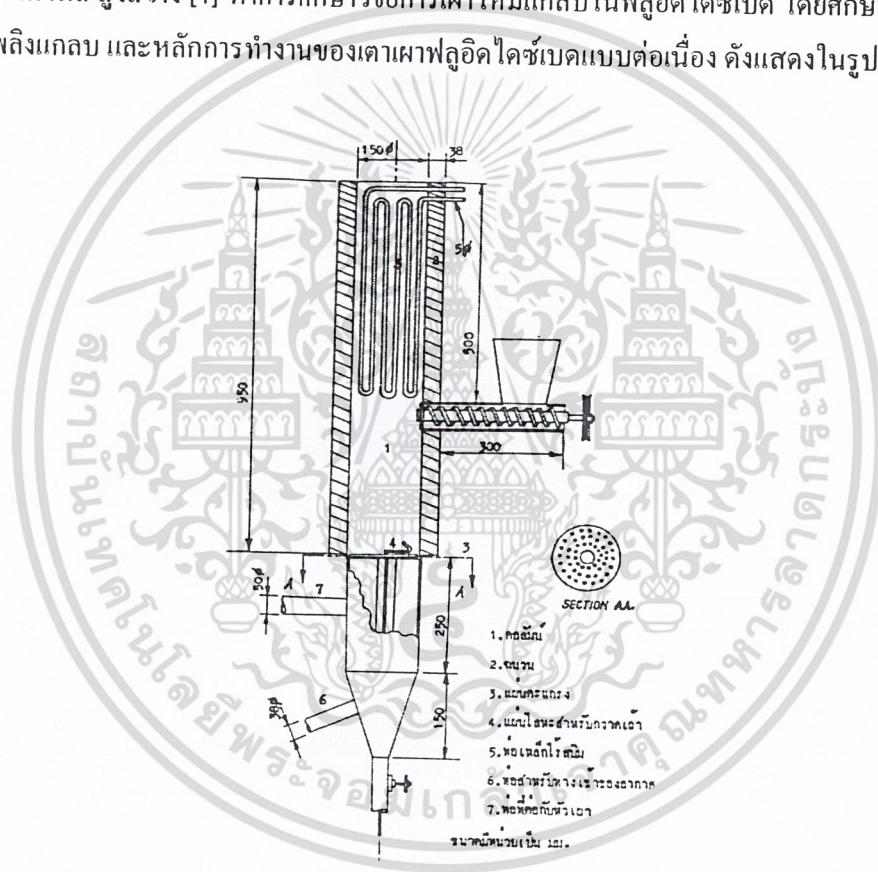
1.5.5 เพื่อเป็นแนวทางในการศึกษาและพัฒนาเตาเผาแบบฟลูอิดไดซ์เบดที่มีผิวกลิ้งภายในให้มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในปัจจุบันได้มีการศึกษาในเรื่องของการนำเกลบมาใช้เป็นเชื้อเพลิงเพื่อที่จะลดต้นทุนต่างๆ และได้มีการค้นคว้ารูปแบบของเตาเผาที่เหมาะสมสำหรับประเทศไทยและต่างประเทศ รวมไปถึงระบบการทำงานต่างๆที่จะทำให้ได้เตาเผาที่มีประสิทธิภาพงานวิจัยที่เกี่ยวข้องมีดังนี้

2.1 ศศิวิมล สูงสว่าง [1] ทำการศึกษาวิจัยการเผาไหม้เกลบในฟลูอิดไดซ์เบด โดยศึกษาคุณลักษณะของเชื้อเพลิงเกลบ และหลักการการทำงานของเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดแบบต่อเนื่อง ดังแสดงในรูปที่ 2.1

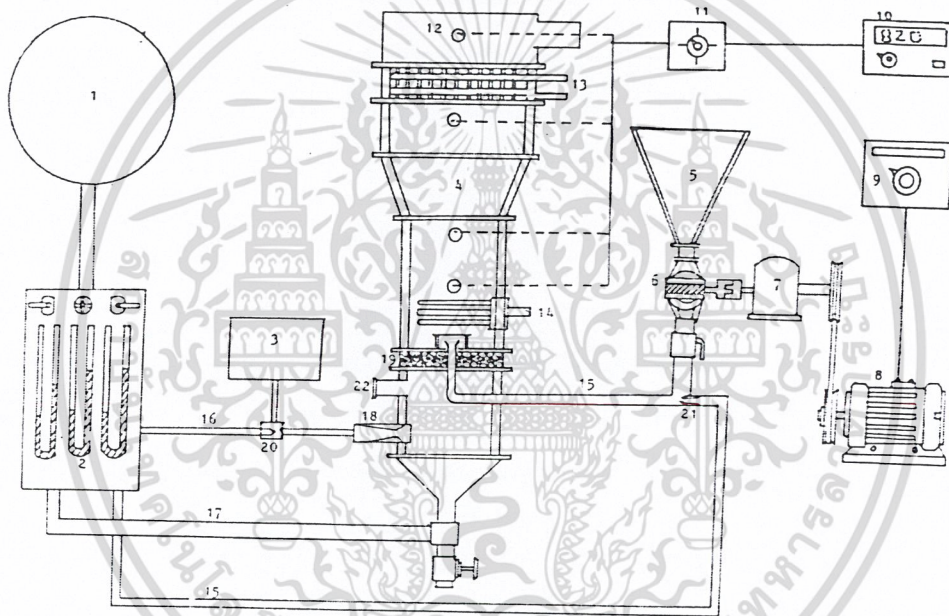


รูปที่ 2.1 ลักษณะของห้องเผาไหม้แบบฟลูอิดไดซ์เบด [1]

ทำการพิจารณาถึงตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อการเผาไหม้ เช่น อัตราการไหลของอากาศและอุณหภูมิของการเผาไหม้ เพื่อหาความสัมพันธ์กับประสิทธิภาพของความร้อนที่เกิดขึ้น เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมของการเผาไหม้เชื้อเพลิงเกลบในเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบด จากการทดลองทำการปรับค่าความเร็วของอากาศอยู่ในช่วง 20.62 ถึง 45.67 เมตรต่อวินาที และกำหนดอุณหภูมิของการเผาไหม้อยู่ในช่วง 500 ถึง 800 องศาเซลเซียส จากผลการทดลองพบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการเผาไหม้เกลบในเตาเผา ฟลูอิดไดซ์เบด เมื่ออัตราการป้อนเชื้อเพลิงเกลบเท่ากับ 3.05 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ความเร็วของอากาศที่ใช้เท่ากับ 32.77 เมตรต่อวินาที เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต่อนาที และอุณหภูมิของการเผาไหม้เท่ากับ 700 องศาเซลเซียส ซึ่งจะได้ประสิทธิภาพของการเผาไหม้ร้อยละ 96.91 นอกจากนี้ยังได้ทำการเปรียบเทียบขี้เถ้าแกลบที่ได้จากการเผาไหม้ที่ใช้อุณหภูมินี้กับขี้เถ้าแกลบจากการเผาไหม้ในฟลูอิดไคซ์เบด พบว่าประสิทธิภาพของการเผาไหม้โดยฟลูอิดไคซ์เบดจะสูงกว่าประมาณร้อยละ 47 ถึง 53

2.2 อภิษัย เทอดเทียนวงษ์ [2] ศึกษาทดลองและออกแบบเตาเผาไหม้ชีวมวลแบบฟลูอิดไคซ์เบด เพื่อศึกษาผลของอัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิง ความเร็วของอากาศในการฟลูอิดไคซ์เบด ขนาดของทรายที่ใช้ทำเบดที่มีผลต่อการเผาไหม้ และศึกษาถึงการถ่ายเทความร้อนระหว่างเบดกับท่อน้ำรับความร้อน การศึกษาทดลองได้ทำการออกแบบเตาเผาฟลูอิดไคซ์เบดแบบต่อเนื่อง ดังแสดงดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 แสดงลักษณะเตาเผาและอุปกรณ์ในการทดลอง [2]

- |                                     |                                    |
|-------------------------------------|------------------------------------|
| 1. ระบบอัดอากาศ                     | 12. Thermocouple                   |
| 2. เครื่องควบคุมความเร็วอากาศและน้ำ | 13. ท่อน้ำรับความร้อนเหนือเบด      |
| 3. ถังก๊าซ                          | 14. ท่อน้ำรับความร้อนในเบด         |
| 4. ฟลูอิดไคซ์เบดโคลัมน์             | 15. ท่ออากาศ                       |
| 5. ที่ใส่เชื้อเพลิงชีวมวล           | 16. ท่ออากาศผสมก๊าซเชื้อเพลิง      |
| 6. ระบบป้อนเชื้อเพลิงแบบหมุนวน      | 17. ท่ออากาศสำหรับการฟลูอิดไคซ์เบด |
| 7. เกียร์ทด                         | 18. หัวเผา                         |
| 8. มอเตอร์                          | 19. ตัวกระจายลม                    |

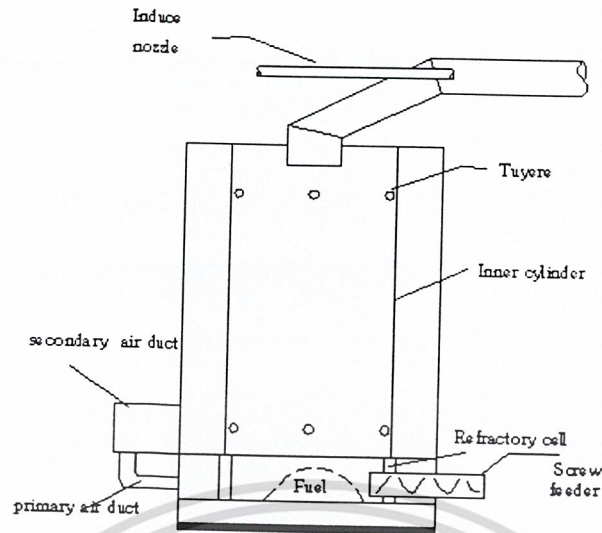
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- |                                  |                                   |
|----------------------------------|-----------------------------------|
| 9. เครื่องปรับความเร็วรอบมอเตอร์ | 20. ระบบผสมก๊าซเชื้อเพลิงกับอากาศ |
| 10. เครื่องอ่านอุณหภูมิ          | 21. หัวพ่นอากาศ                   |
| 11. Selector switch              | 22. ช่องคูไฟ                      |

เชื้อเพลิงชีวมวลที่ใช้ในการทดสอบ 2 ชนิดคือ เชื้อเพลิงชี้เตื่อย และเชื้อเพลิงแกลบ จากการทดลองพบว่า อัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงที่เหมาะสมต่อการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ และอุณหภูมิสูงสุดคือ 9:1 ถึง 10:1 อัตราการป้อนเชื้อเพลิงเท่ากับ 3 กิโลกรัมต่อชั่วโมง และที่อัตราการการป้อนเชื้อเพลิงเท่ากับ 4 กิโลกรัมต่อชั่วโมง อัตราส่วนของอากาศกับเชื้อเพลิงที่เหมาะสมเท่ากับ 8.5:1 เทียบเป็นอากาศมากเกินพอประมาณ 50 ถึง 80 เปอร์เซ็นต์ ความเร็วของอากาศมีค่า 2 ถึง 4 เท่าของความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไดซ์เบด (ประมาณ 85 เซนติเมตรต่อวินาที) เนื่องจากอัตราการป้อนเชื้อเพลิงที่มากกว่าจะให้อุณหภูมิการเผาไหม้สูงกว่า และใช้อัตราส่วนของอากาศกับเชื้อเพลิงที่ต่ำกว่า นอกจากนี้ขนาดของทรายที่ใช้ทำเบดที่มีขนาดเล็กกว่า (ประมาณ 40 ถึง 50 เมช) เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ อุณหภูมิสูงกว่า และอัตราส่วนของอากาศกับเชื้อเพลิงต่ำกว่า ทรายขนาดใหญ่กว่า (ประมาณ 30-40 เมช) ซึ่งช่วยลดการสูญเสียความร้อนไปกับก๊าซร้อนที่ออกจากเตาเผาได้ กรณีการถ่ายเทความร้อนของเตาฟลูอิดไดซ์เบดพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนระหว่างเบดกับท่อน้ำรับความร้อน มีค่าเพิ่มขึ้นตามความเร็วของอากาศ และขนาดของทรายที่เล็กกว่าจะให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสูงกว่าทรายขนาดใหญ่ สำหรับท่อน้ำรับความร้อนในเบดจะมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนอยู่ในช่วง 190 ถึง 260 วัตต์ต่อเมตร<sup>2</sup> พบว่ามีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนให้ท่อน้ำที่อยู่ในเบดสูงกว่า การถ่ายเทความร้อนระหว่างก๊าซร้อนกับท่อน้ำประมาณ 23 เท่า

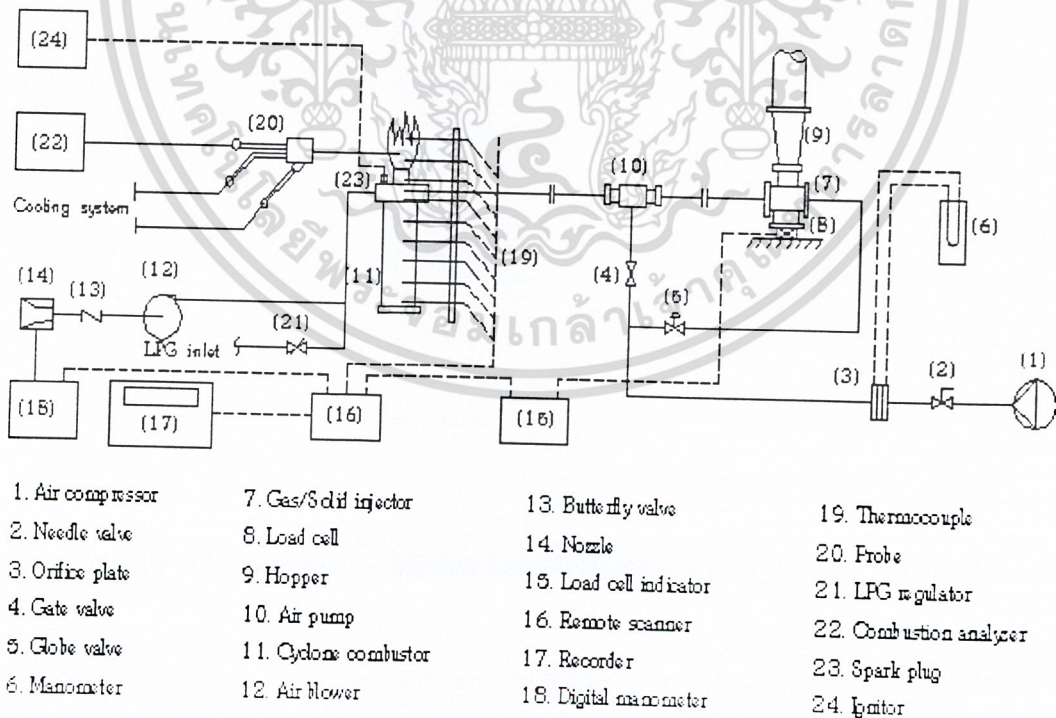
2.3 ธัชชัย ท้วถวิล และ สันติ วัชรอาภาไพบูลย์ [3] ทำการศึกษาทดลองเตาเผาเศษวัสดุทางการเกษตรแบบใช้อากาศหมุนวน ได้ทำการพัฒนาระบบการเผาไหม้เดิมให้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น โดยห้องเผาไหม้มีลักษณะดังรูปที่ 2.3

จากการทดลองทำการเก็บข้อมูลเพื่อศึกษาอัตราส่วนของอากาศต่อเชื้อเพลิง (A/F ratio) ที่มีผลต่ออุณหภูมิของก๊าซร้อน และทำการศึกษาถึงอิทธิพลของอัตราการไหลของอากาศที่ผ่านพัดลมดูดต่ออุณหภูมิของก๊าซร้อนที่อัตราส่วนของอากาศและเชื้อเพลิงคงที่ การทดลองให้อัตราการไหลของเชื้อเพลิงเท่ากับ 0.225 กิโลกรัมต่อนาที และกำหนดค่าอัตราการไหลของอากาศและเชื้อเพลิงมีค่า 5:1, 6:1, 7:1, 8:1 และ 9:1 ท่ออากาศปฐมภูมิและท่ออากาศทุติยภูมิเปิดประมาณ 30 และ 60 เปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ท่อตามลำดับ ช่องพัดลมดูดอากาศเปิดที่ 100 เปอร์เซ็นต์ จากการทดลองพบว่าที่อัตราส่วนของอากาศต่ออัตราส่วนของเชื้อเพลิงเท่ากับ 6:1 เป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดเนื่องจากอุณหภูมิของก๊าซร้อนสูงสุดเท่ากับ 595 องศาเซลเซียส และปริมาณความร้อนที่ได้รับอยู่ในปริมาณสูง และเมื่อทำการทดลองหาการเปลี่ยนแปลงช่องเปิดของพัดลมดูดที่ 0, 20, 60 และ 100 เปอร์เซ็นต์ ที่อัตราการส่วนของอากาศต่อเชื้อเพลิงเท่า 6:1 พบว่าอุณหภูมิสูงสุดของก๊าซร้อนเท่ากับ 639 องศาเซลเซียส โดยที่ไม่ใช้พัดลมดูดอากาศ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 เตาเผาเศษวัสดุทางการเกษตรแบบใช้อากาศหมุนวน [3]

2.4 เรือโทประจักษ์ จิตรพิทย์ [4] ทำการศึกษาวิจัยการเผาขี้เลื่อยในเตาเผาไซโคลน ได้ทำการศึกษารูปแบบการไหลของอนุภาคเชื้อเพลิงใช้ห้องเผาไหม้ที่ผลิตจากพลาสติกโอสแอลคาไรด์ (Alcaride) ลักษณะการเผาไหม้ของขี้เลื่อย ซึ่งทำการปรับเปลี่ยนค่าอัตราส่วนสมมูล,  $\Phi$  (Equivalence Ratio) ที่ค่าต่างๆ และทำการวิเคราะห์ห้องค้ประกอบของก๊าซไอเสียที่เกิดขึ้น



รูปที่ 2.4 แสดงแผนภูมิอุปกรณ์การทดลอง[4]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการทดลองใช้ห้องเผาไหม้แบบไซโคลนดังแสดงในรูปที่ 2.4 โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 155 มิลลิเมตร ขนาดของปากทางออกของห้องเผาไหม้เท่ากับ 68.5 มิลลิเมตร ความสูงของห้องเผาไหม้เท่ากับ 310 มิลลิเมตร

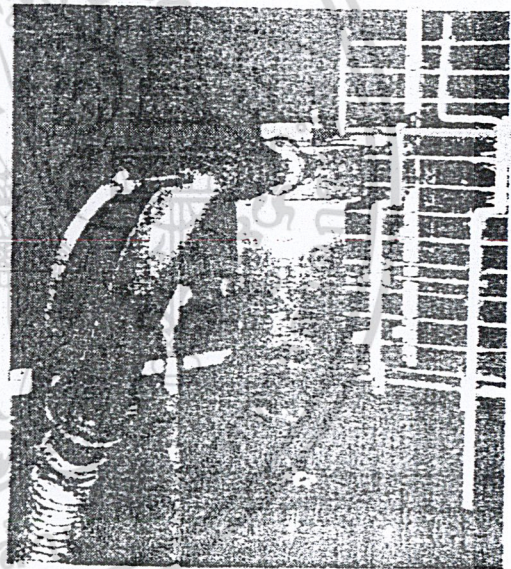
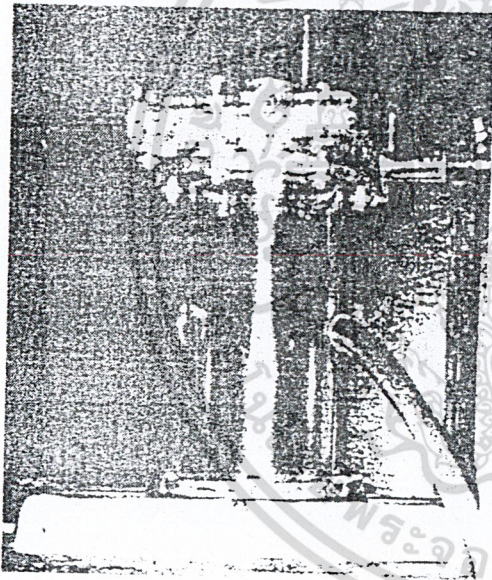
การสังเกตลักษณะการไหลของห้องเผาไหม้จำลองพบว่า อนุภาคของเชื้อเพลิงได้รับอิทธิพลจากแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางที่เกิดจากการหมุนวน และเกิดการเคลื่อนที่วนเป็นเกลียวสู่ก้นไซโคลนแล้วไหลย้อนกลับจากก้นไซโคลนตามแนวแกนออกสู่ปากทางออก การป้อนเฉพาอากาศปฐมภูมิลักษณะการไหลวนเป็นเกลียวเดียว กรณีที่ป้อนทั้งอากาศปฐมภูมิและอากาศทุติยภูมินั้นอนุภาคการเคลื่อนที่จะแยกตัวออกเป็น 2 กลุ่ม ถ้าการป้อนอากาศให้มีอัตราการไหลมากขึ้นจะทำให้ระยะห่างของเกลียวยาวขึ้น การทดลองหาลักษณะการแพร่กระจายอุณหภูมิของเปลวไฟ ที่ค่า  $\Phi < 1.5$  เป็นการที่ใช้ปริมาณอากาศส่วนเกินอยู่ในช่วงต่ำ จะเกิดการเผาไหม้บริเวณช่วงกลางจนถึงเหนือทางออกของห้องเผาไหม้ มีเชื้อเพลิงที่ไม่เกิดการเผาไหม้ตกค้างอยู่มาก ก๊าซไอเสียที่เกิดจากการเผาไหม้ประกอบด้วย ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) สูงมากประมาณ 3000 ppm ปริมาณออกซิเจน ( $O_2$ ) ไม่เกิน 10 เปอร์เซ็นต์ เปลวไฟไม่เสถียรเกิดการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ ช่วง  $\Phi$  มากกว่า 1.5 ถึง 2.0 การเผาไหม้เกิดเป็นบริเวณกว้างทั่วทั้งเตา เชื้อเพลิงถูกเผาไหม้หมดไม่มีตกค้างอยู่ เปลวไฟมีความเสถียรสูง องค์ประกอบของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์อยู่ในช่วง 900 ถึง 1000 ppm กรณีที่ค่า  $\Phi > 2.0$  ปริมาณอากาศที่ใช้มากเกินพอมากๆ การเผาไหม้เกิดขึ้นตั้งแต่บริเวณก้นของเตาเผาขึ้นมาบริเวณรอบๆผนังห้องเผาไหม้ ลักษณะของขี้เถ้าจะมีเชื้อเพลิงที่ไม่เผาไหม้ติดออกมามีจำนวนมาก อุณหภูมิของเปลวไฟอยู่ในช่วง 1000 ถึง 1100 องศาเซลเซียส ลักษณะของเปลวไฟไม่เสถียร

2.5 **สุพจน์ นำน้าโชค [5]** ได้ทำการศึกษาวิจัยการเผาไหม้เชื้อเพลิงในห้องเผาไหม้แบบไซโคลนชนิดอากาศเข้าหลายช่องทาง ศึกษาอิทธิพลของอากาศทุติยภูมิต่อลักษณะการเผาไหม้ โดยการทดลองใช้ห้องเผาไหม้แบบจำลอง เพื่อศึกษาลักษณะการไหลภายในของอนุภาคเชื้อเพลิงเชื้อเพลิงและห้องเผาไหม้จริงเพื่อศึกษาลักษณะของการเผาไหม้ภายใน ซึ่งองค์ประกอบของห้องเผาไหม้ทั้ง 2 มีลักษณะคล้ายคลึงกันคือ ทางเข้าของอากาศปฐมภูมิอยู่บริเวณส่วนบนของห้องเผาไหม้ไซโคลน บริเวณกึ่งกลางของห้องเผาไหม้จะมีอากาศทุติยภูมิป้อนเข้าทางด้านข้างในแนวสัมผัสและทางออกของก๊าซไอเสียอยู่บริเวณส่วนบนสุดของไซโคลน ดังแสดงในรูปที่ 2.5 และรูปที่ 2.6

การศึกษาลักษณะการไหลของอนุภาคเชื้อเพลิงพบว่า เมื่อทำการเพิ่มค่าอัตราการไหลของอากาศทุติยภูมิ และลดค่าอัตราการไหลของอากาศปฐมภูมิเพื่อให้ปริมาณอัตราการไหลของอากาศทั้งระบบมีปริมาณเท่าเดิม ทำให้ระยะพิทของเกลียวและความชันของเกลียวน้อยลง ส่งผลให้จำนวนเกลียวเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นการเพิ่มอัตราส่วนของอากาศทุติยภูมิ มีผลต่อการไหลเวียนของอนุภาคเชื้อเพลิงอยู่ภายในห้องเผาไหม้ได้นานขึ้น จึงทำให้เกิดการเผาไหม้ที่ดีขึ้น ส่วนการศึกษาลักษณะการเผาไหม้นั้น ทำการปรับค่าอัตราการไหลของเชื้อเพลิงในช่วง 0.128 ถึง 0.135 กิโลกรัมต่อนาที อัตราการไหลของอากาศอยู่ในช่วง 0.687 ถึง 1.010 กิโลกรัมต่อนาที และทำการลงที่ค่าอัตราการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไหลของอากาศหตุยภูมิเท่ากับ 15 เปอร์เซ็นต์ โดยทำการปรับค่า  $\Phi$  ในช่วง 1.0 ถึง 1.5 พบว่าในส่วนที่ทำการปรับค่า  $\Phi = 1.5$  ทำให้เกิดการเผาไหม้ในบริเวณกว้างทั่วทั้งห้องเผาไหม้ ก๊าซไอเสียประกอบด้วยก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ประมาณ 885 ถึง 2120 ppm ปริมาณออกซิเจนอยู่ในช่วง 7.1 ถึง 14.2 เปอร์เซ็นต์ อุณหภูมิสูงสุดประมาณ 1200 องศาเซลเซียส ซึ่งเกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์กว่าที่ค่า  $\Phi$  อื่นๆ การศึกษาถึงอิทธิพลของปริมาณอากาศหตุยภูมิต่อลักษณะการเผาไหม้ โดยคงที่ค่า  $\Phi = 1.5$  ทำการปรับค่าปริมาณอากาศหตุยภูมิให้มีค่าเท่ากับ 5, 10, และ 15 เปอร์เซ็นต์ พบว่าที่ปริมาณอากาศหตุยภูมิเท่ากับ 15 เปอร์เซ็นต์ การเผาไหม้เกิดขึ้นเป็นบริเวณกว้างคือ เกิดการเผาไหม้บริเวณก้นของห้องเผาไหม้จนถึงปากทางออก องค์กรประกอบของก๊าซไอเสียมีปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ค่าอยู่ในช่วง 885 ถึง 2120 ppm ปริมาณออกซิเจนประมาณ 7.1 ถึง 14.2 เปอร์เซ็นต์ เมื่อปรับค่าอากาศหตุยภูมิมากขึ้นจะเกิดการเผาไหม้บริเวณกว้างภายในห้องเผาไหม้ เนื่องจากอากาศหตุยภูมิจะทำให้อนุภาคของเชื้อเพลิงไหลวนภายในห้องเผาไหม้ได้นานขึ้น จึงเป็นเหตุให้มีเวลาในการเผาไหม้นานขึ้นด้วย

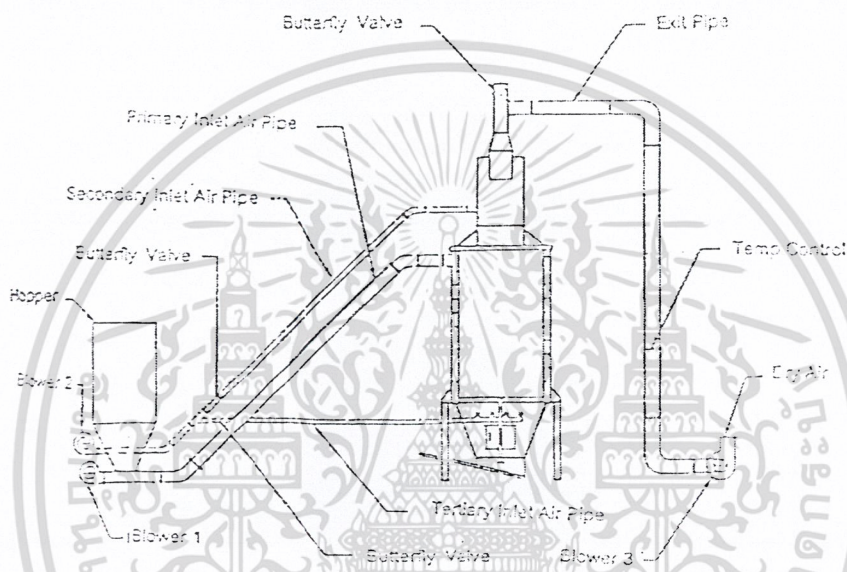


รูปที่ 2.5 แสดงลักษณะของห้องเผาไหม้แบบจำลอง

รูปที่ 2.6 แสดงลักษณะของห้องเผาไหม้จริง[5]

2.6 อติศักดิ์ ชูจินดา [6] ศึกษาและทำการออกแบบสร้างเตาเผาแก๊สสำหรับเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบฟลูอิดไดซ์เบดขนาด 10 ตันต่อชั่วโมง ลักษณะห้องเผาไหม้เป็นห้องเผาไหม้ทรงกระบอก ความสูง 2.75 เมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 1.37 เมตร ดังแสดงรายละเอียดในรูปที่ 2.7 อัตราการป้อนแก๊สเท่ากับ 120 ถึง 150 กิโลกรัมต่อชั่วโมง อัตราการไหลของอากาศ 1.11 กิโลกรัมต่อวินาที เชื้อเพลิงและอากาศถูกป้อนเข้าห้องเผาไหม้ในแนวสัมผัส เพื่อให้เชื้อเพลิงเกิดการไหลวนภายในห้องเผาไหม้ การทดลองปรับค่าความสูงของซีตาแก๊ส 30, 45, 50 และ 60 เซนติเมตร อุณหภูมิเฉลี่ยภายในประมาณ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่หรือนำไปใช้ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

293, 296, 296 และ 297 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ถ้าความสูงของซี่เต้าต่ำกว่า 30 เซนติเมตร เกิดผลต่อการเผาไหม้คือ แกลบจะเข้ามารวมกันอยู่บนตะแกรง ทำให้อุณหภูมิแกว่งในช่วงล่าง แต่ถ้าความสูงของซี่เต้าสูงกว่า 60 เซนติเมตร มีผลต่อการเกิดไซโคลน จากการทดลองพบว่าความสูงของเบดที่เหมาะสมเท่ากับ 50 เซนติเมตร อัตราการป้อนแกลบ 126 กิโลกรัมต่อชั่วโมง อุณหภูมิเฉลี่ยของอากาศร้อน 296 องศาเซลเซียส ประสิทธิภาพโดยรวมของระบบประมาณ 61 ถึง 63 เปอร์เซ็นต์ ประสิทธิภาพการเผาไหม้จากเปอร์เซ็นต์คาร์บอนในซี่เต้าเท่ากับ 85 ถึง 92 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณของคาร์บอนที่เผาไหม้จากการวิเคราะห์คาร์บอนในก๊าซเท่ากับ 94 เปอร์เซ็นต์



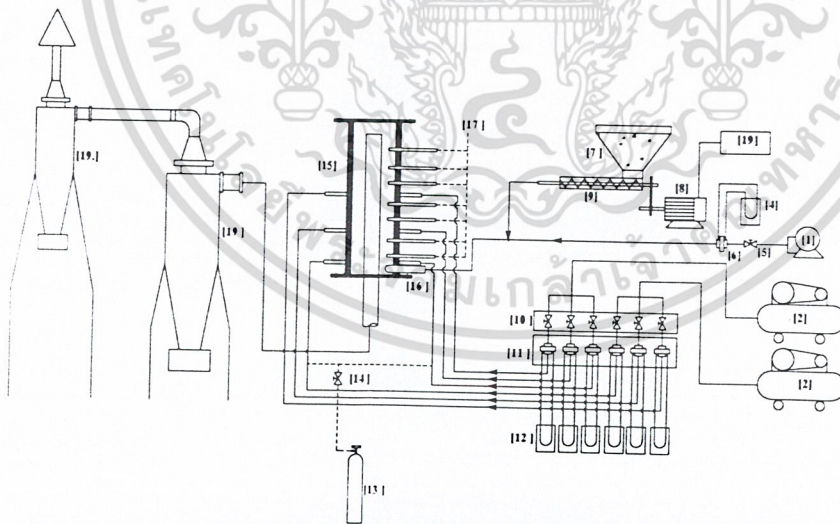
รูปที่ 2.7 แสดงองค์ประกอบต่างๆของเตา[6]

2.7 บุญเรือง ศรีสวัสดิ์ [7] ได้ศึกษาวิจัยปรับปรุงสมรรถนะของเตาเผาแกลบสำหรับอบแห้งข้าวเปลือกแบบฟลูอิดไชด์บด ต่อเนื่องจากงานวิจัยของ อธิศักดิ์ ชูจินดา โดยใช้ห้องเผาไหม้ในลักษณะเดิม และปรับปรุงในส่วนต่างๆดังนี้ ชุดกระจายลมด้านล่างเตาเผาแกลบ (tertiary air) หุ้มฉนวนบริเวณส่วนบนห้องเผาไหม้ ปรับปรุงชุดใบปาดซี่เต้าแกลบ เพิ่มความแข็งแรงของตัวรองรับตะแกรง ประตูทางเข้าห้องเผาไหม้ ระบบควบคุมต่างๆ ระบบส่งกำลังของใบปาดซี่เต้า และปรับปรุงชุดป้อนเชื้อเพลิงแกลบ อัตราการป้อนแกลบ 110 ถึง 136 กิโลกรัมต่อชั่วโมง เชื้อเพลิงและอากาศถูกป้อนเข้าห้องเผาไหม้ในแนวสัมผัสทำให้เกิดการไหลวนภายในห้องเผาไหม้ จากการทดลองพบว่าที่ความสูงของตะแกรง 30, 45, 50 และ 60 เซนติเมตร อากาศส่วนเกิน 260 ถึง 350 เปอร์เซ็นต์ อุณหภูมิเฉลี่ยก่อนออกจากระบบห้องเผาไหม้อยู่ในช่วง 295 ถึง 311 องศาเซลเซียส ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาทั้งระบบ 57 ถึง 73 เปอร์เซ็นต์ ประสิทธิภาพการเผาไหม้คาร์บอน 89 ถึง 96 เปอร์เซ็นต์ จากการทดลองความสูงของซี่เต้าในตะแกรงที่เหมาะสมเท่ากับ 50 เซนติเมตร โดยมีอัตราการป้อนแกลบ 110 กิโลกรัมต่อชั่วโมง และอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนเกิน 350 เปอร์เซ็นต์ ประสิทธิภาพเชิงความร้อนทั้งระบบ 73 เปอร์เซ็นต์ ประสิทธิภาพการเผาไหม้คาร์บอน 69 เปอร์เซ็นต์ ประสิทธิภาพของระบบเพิ่มขึ้นตามปริมาณอากาศส่วนเกิน และความสูงของชี้ถ้ำกลบบนตะแกรงไม่มีผลต่อประสิทธิภาพของระบบ

2.8 นีวัตี พิริยะรุ่งโรจน์ [8] ได้ทำการศึกษาทดลองเตาเผาออร์เทค ทำการศึกษาพฤติกรรมของการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงกลบในเตาเผาแบบออร์เทค โดยทำการวัดการกระจายอุณหภูมิภายในเตาเผาที่ตำแหน่งต่างๆ และก๊าซไอเสียที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ ในการทดลองปรับค่าอัตราการไหลของเชื้อเพลิงคงที่เท่ากับ 0.2 กิโลกรัมต่อหน้าที่ ค่า Equivalence ratio, ( $\Phi$ ) เท่ากับ 0.7, 0.8, 1.0 และ 1.2 ตามลำดับ การเผาไหม้กำหนดค่าอัตราส่วนของอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศตุนิยมต่ออัตราการไหลของอากาศทั้งหมด, ( $\lambda$ ) เท่ากับ 0, 0.2 และ 0.4 ลักษณะของเตาเผาและอุปกรณ์การทดลองดังแสดงในรูปที่ 2.8 จากการทดลองพบว่า ที่ค่า  $\Phi = 1.0$  มีการกระจายอุณหภูมิภายในเตาเผาสูงกว่าการกระจายอุณหภูมิที่ค่า  $\Phi$  อื่นๆ และผลของอัตราส่วนของอากาศตุนิยมต่ออัตราการไหลของอากาศทั้งหมดที่เหมาะสมต่อการเผาไหม้เท่ากับ  $\lambda = 0.4$  เนื่องจากการเพิ่มอากาศตุนิยมจะช่วยเพิ่ม การไหลวนของอากาศ ทำให้เชื้อเพลิงมีเวลาอยู่ในเตานานขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้สูงขึ้น อุณหภูมิสูงสุดของการเผาไหม้ประมาณ  $1135^{\circ}\text{C}$  และการวิเคราะห์ก๊าซไอเสียที่เกิดขึ้นมีค่าต่ำประกอบด้วย ออกซิเจนประมาณ 4.41 เปอร์เซ็นต์ คาร์บอนไดออกไซด์ 15.34 เปอร์เซ็นต์ คาร์บอนมอนอกไซด์ประมาณ 130.25 ppm และปริมาณของไนโตรเจนไดออกไซด์ ประมาณ 764 ppm

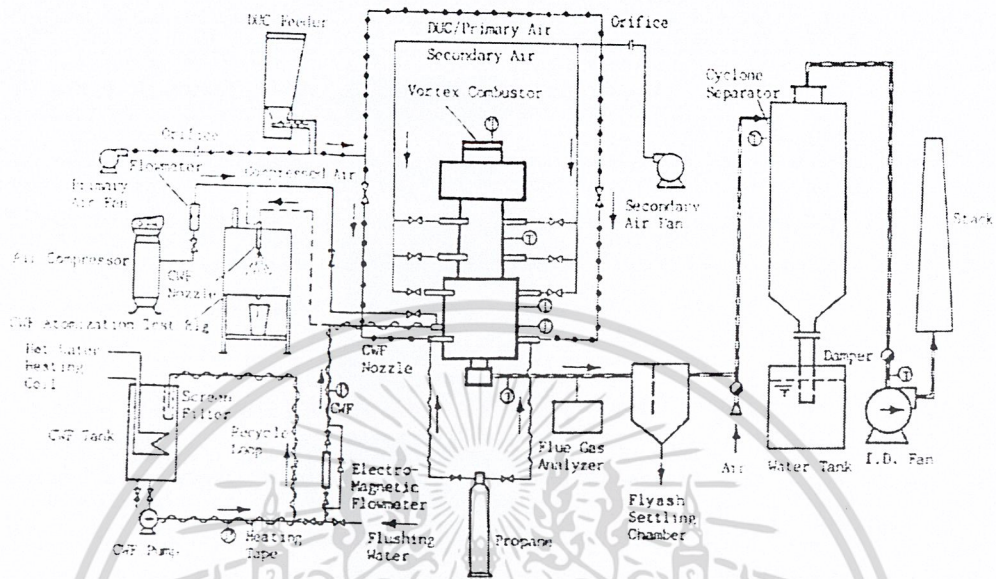


- |                   |                    |                      |                        |                   |                  |
|-------------------|--------------------|----------------------|------------------------|-------------------|------------------|
| 1. Blower         | 2. Air compressor1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

รูปที่ 2.8 แสดงแผนผังและอุปกรณ์การทดลอง[8]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.9 Tim T. Fu and Sen Nieh [9] ทำการศึกษาทดลองเตาเผาออร์เทค รายละเอียดของอุปกรณ์และลักษณะของเตาเผาแสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 แสดงแผนภูมิอุปกรณ์การทดลอง[9]

ใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงในการเผาไหม้ ซึ่งถ่านหินที่นำมาทดสอบมี 2 ชนิด คือ DUC (Dry Ultrafine Coal) เป็นเชื้อเพลิงถ่านหินที่นำมาบดให้เป็นผงเหมือนกับแป้งมีขนาดเท่ากับ  $11.5 \mu m$  และ CWF (Coal Water Fuel) เป็นเชื้อเพลิงถ่านหินที่มีน้ำปนอยู่มีลักษณะคล้ายกับโคลน การทดสอบทำการวัดอุณหภูมิภายในและวิเคราะห์ก๊าซไอเสียที่เกิดขึ้น

จากการทดลองพบว่า การเผาไหม้มีอัตราการความร้อนเท่ากับ  $0.15 \text{ MB/H}$  ( $0.15 \times 10^{-6} \text{ Btu/hr}$ ) และอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้บริเวณส่วนล่างของห้องเผาไหม้จะมีอุณหภูมิสูงสุดเท่ากับ  $2000^\circ \text{F}$  อุณหภูมิจะลดลงเมื่อความสูงของห้องเผาไหม้สูงขึ้น บริเวณส่วนบนสุดของห้องเผาไหม้มีอุณหภูมิต่ำกว่า  $1100^\circ \text{F}$  และบริเวณทางออกของท่อไอเสียอุณหภูมิเท่ากับ  $1650^\circ \text{F}$  จากการวิเคราะห์ก๊าซไอเสียที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ประกอบด้วย  $\text{O}_2$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_x$  และคาร์บอนที่ไม่เผาไหม้ ปริมาณของ  $\text{O}_2$  จะลดลงตามความสูงของห้องเผาไหม้ เนื่องจาก  $\text{O}_2$  ถูกนำไปใช้เพื่อเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ ปริมาณก๊าซ  $\text{CO}$  บริเวณส่วนล่างของห้องเผาไหม้เท่ากับ  $550 \text{ ppm}$  และบริเวณท่อทางออกของก๊าซไอเสียมีปริมาณ  $\text{CO}$  เท่ากับ  $250 \text{ ppm}$  อิทธิพลของอากาศสดุดีภูมิต่อการเผาไหม้โดยใช้เชื้อเพลิง DUC พบว่าประสิทธิภาพการเผาไหม้ในกรณีที่ไม่ใช้อากาศสดุดีภูมิเท่ากับ 98 เปอร์เซ็นต์ และกรณีที่ใช้อากาศสดุดีภูมิ ประสิทธิภาพการเผาไหม้เพิ่มขึ้นเท่ากับ 98.5 เปอร์เซ็นต์ เพราะเนื่องจากอากาศสดุดีภูมิทำให้เชื้อเพลิงและ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อากาศผสมกันได้ดีขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้เพิ่มขึ้น และปริมาณ  $\text{NO}_x$  ต่ำกว่า 50 ppm ปริมาณคาร์บอนในซีเมนต์ลดลงถึง 4 เปอร์เซ็นต์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### ทฤษฎี

การเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งนั้นมีความยุ่งยากซับซ้อนกว่าเชื้อเพลิงก๊าซและของเหลวมาก เนื่องจากการทำปฏิกิริยาของออกซิเจนกับคาร์บอนที่มีอยู่ในเชื้อเพลิงจะต้องอาศัยพื้นที่ผิวใหม่ของอนุภาคเชื้อเพลิงในการให้ออกซิเจนไปจับตัวกับคาร์บอนส่วนที่เหลือในเชื้อเพลิงเพื่อเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ที่ต่อเนื่องจนกระทั่งเกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ ดังนั้นจึงจำเป็นจะต้องทำการศึกษาถึงทฤษฎีการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงแข็งและตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อการเผาไหม้สำหรับเชื้อเพลิงแข็ง เพื่อเป็นแนวทางในการศึกษาและทำนายพฤติกรรมและลักษณะการเผาไหม้

#### 3.1 เชื้อเพลิงชีวมวล

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

##### 3.1.1 ประเภทของเชื้อเพลิงชีวมวล

เชื้อเพลิงชีวมวลสามารถแยกประเภทได้เป็น 4 ประเภท คือ

3.1.1.1 เชื้อเพลิงชีวมวลที่ได้จากไม้ (Forest biomass) ซึ่งสามารถแยกออกเป็นไม้เนื้ออ่อน (Soft wood) และไม้เนื้อแข็ง (Hard wood) ในเชื้อเพลิงประเภทนี้จะมีปริมาณของลิกนิน (Lignin) อยู่ประมาณ 40 เปอร์เซ็นต์ในไม้เนื้อแข็ง ตัวอย่างของเชื้อเพลิงประเภทนี้ได้แก่ เศษไม้ เปลือกไม้ และชี้อเลื้อย

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

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

3.1.1.4 เชื้อเพลิงที่ได้จากของเหลือใช้จากคน (Domestic waste) ได้แก่ เชื้อเพลิงจากขยะเทศบาล เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.2 คุณลักษณะของเชื้อเพลิงชีวมวล

เชื้อเพลิงชีวมวลโดยทั่วไปจะเป็นเชื้อเพลิงที่แตกต่างกันตามประเภทของเชื้อเพลิงชีวมวลและการที่เชื้อเพลิงชีวมวลมีปริมาณความชื้นและองค์ประกอบที่แตกต่างกัน จึงทำให้ค่าความร้อน (Heating Value) ของเชื้อเพลิงชีวมวลมีค่าแตกต่างกันด้วยดังนี้

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

เชื้อเพลิงแกลบที่ใช้ในการทดลองเป็นแกลบที่ได้จากส่วนประกอบของเมล็ดข้าว ซึ่งสามารถอธิบายที่มาของแกลบได้ดังนี้ เมล็ดข้าวเป็นผลชนิด คาริโอพซิส (Caryopsis) ส่วนที่เป็นเมล็ดที่ติดแน่นอยู่กับผนังของรังไข่หรือเยื่อหุ้มผล สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วน คือ เปลือกใหญ่ (Lemma) เปลือกเล็ก (Pale)ประกบกัน แบบตะขอยึด (Interlocking fold) ทั้งสองข้างตลอดแนวความยาวภายในเปลือกที่หุ้มเมล็ดข้าวนี้มีช่องว่างระหว่างเม็ด และเปลือกที่ปลายทั้ง 2 ด้าน ผิวของเปลือกทั้งสองส่วนจะมีหนามแข็งเล็กๆติดอยู่โดยรอบทั่วไป

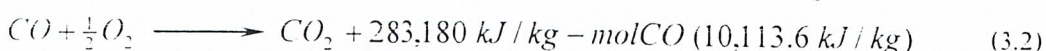
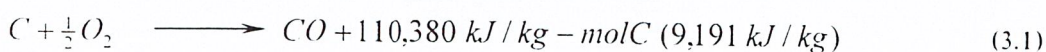
จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเชื้อเพลิงชีวมวลโดยวิธีการวิเคราะห์ทางเคมีทำให้ทราบองค์ประกอบของเชื้อเพลิงชีวมวลของขี้เลื่อยและแกลบ โดยประมาณดังนี้

ธาตุคาร์บอน	40 – 42	เปอร์เซ็นต์
ออกซิเจน	36 – 37	เปอร์เซ็นต์
ไฮโดรเจน	5	เปอร์เซ็นต์
ไนโตรเจน	1	เปอร์เซ็นต์
ขี้เถ้า	14 – 17	เปอร์เซ็นต์

### 3.2 ทฤษฎีการเผาไหม้

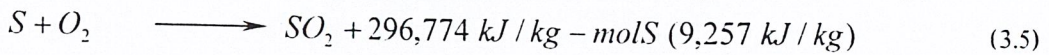
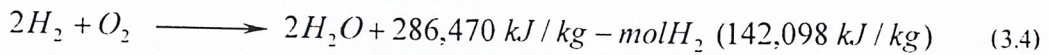
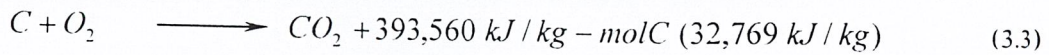
ปฏิกิริยาการเผาไหม้ (Combustion Reaction) หมายถึง ปฏิกิริยาทางเคมีที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วระหว่างออกซิเจนกับสารเผาไหม้ได้ (Combustible Element) ของเชื้อเพลิงชนิดหนึ่ง ๆ สารเผาไหม้ได้ในที่นี้มีธาตุหลัก 3 ตัว คือ คาร์บอน ไฮโดรเจน และกำมะถัน สำหรับกำมะถันขณะเกิดปฏิกิริยากับออกซิเจนจะให้ความร้อนไม่มากนักเมื่อเปรียบเทียบกับคาร์บอนและไฮโดรเจน ในทางตรงกันข้ามกลับเพิ่มปัญหาในด้านการก่อมลพิษขึ้นส่วนหรืออุปกรณ์รวมทั้งทำให้เกิดปัญหาหมอกพิษในอากาศ

สำหรับการเผาไหม้ของคาร์บอนกับออกซิเจนนั้น เขียนเป็นสมการได้ดังนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เราสามารถเขียนสมการการเผาไหม้รวมได้เป็น



ซึ่งจะพบว่าปฏิกิริยาการเผาไหม้เป็นปฏิกิริยาคายความร้อน โดยปลดปล่อยความร้อนออกมาด้วย หลังจากเกิดปฏิกิริยาเป็นสารประกอบใหม่ดังนั้นการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงต้องอาศัยปัจจัยที่จำเป็นอย่างยิ่ง 4 ประการซึ่งจะนำเสนอในหัวข้อถัดไป

### 3.2.1 ปัจจัยที่มีผลต่อการเผาไหม้

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

#### 3.2.1.1 การปั่นป่วนหรือการผสมคลุกเคล้าระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศ

การผสมหรือการสัมผัสกันอย่างทั่วถึงระหว่างเชื้อเพลิงกับออกซิเจน คือ การที่อนุภาคของเชื้อเพลิงสัมผัสกับโมเลกุลของออกซิเจนได้อย่างทั่วถึง ในกรณีที่เชื้อเพลิงเป็นก๊าซในการผสมจะเป็นไปได้ง่าย แต่ถ้าเป็นเชื้อเพลิงแข็งหรือของเหลวการผสมจะยุ่งยากขึ้น ในกรณีที่เชื้อเพลิงส่วนใหญ่เป็นของเหลวจะมีการทำให้เป็นอนุภาคเล็ก โดยใช้หัวพ่นแล้วจึงทำการเผาไหม้ ซึ่งจะช่วยให้รวมตัวกับอากาศได้ง่ายขึ้น

ส่วนเชื้อเพลิงที่เป็นของแข็งนั้น แต่ละโมเลกุลของออกซิเจนจะสัมผัสกับผิวของเชื้อเพลิงเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ให้ก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ จากนั้นออกซิเจนจะเข้าผสมกับก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ทำให้เกิดปฏิกิริยาสมบูรณ์ คือ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในที่สุด ดังนั้นจะกล่าวได้ว่า จุดประสงค์ของการทำให้เกิดการปั่นป่วนขึ้นก็เพื่อที่จะทำให้เกิดการสัมผัสกันระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิง ทำให้เกิดปฏิกิริยาอย่างรวดเร็วและทำให้เกิดบริเวณของพื้นผิวที่จะเกิดปฏิกิริยาขึ้นมาใหม่

#### 3.2.1.2 อุณหภูมิที่สูงพอต่อขบวนการเผาไหม้

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

1. อุณหภูมิสูงพอสำหรับขบวนการเผาไหม้

2. สารเชื้อเพลิง

3. อากาศที่เพียงพอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้เฉพาะเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

61752

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขบวนการเผาไหม้นั้นไม่ได้เป็นขบวนการที่เกิดขึ้นได้เอง โดยส่วนใหญ่จะใช้ปริมาณความร้อนจากภายนอกช่วยเร่งปฏิกิริยาการเผาไหม้ และให้ปริมาณความร้อนออกมามากขึ้น นอกจากนั้นสิ่งที่สำคัญสำหรับการเผาไหม้แบบต่อเนื่องก็คือ อุณหภูมิ ซึ่งถ้าอุณหภูมิต่ำเกินไปก็ทำให้เชื้อเพลิงไม่สามารถลุกไหม้แบบต่อเนื่องได้ แต่ถ้าอุณหภูมิการเผาไหม้สูงพอเพียง การลุกไหม้ก็จะเกิดต่อไปได้เรื่อย ๆ โดยปกติแล้วการเผาไหม้นั้นต้องการให้มีอุณหภูมิสูงเท่าที่จะเป็นไปได้ เพื่อให้เกิดการถ่ายเทความร้อนได้เร็ว แต่การที่จะให้อุณหภูมิจะสูงได้มากน้อยขึ้นอยู่กับชนิดของเชื้อเพลิงที่ใช้ ซึ่งจะสามารถให้อุณหภูมิที่แตกต่างกันในกรณีอุณหภูมิสูงเกินไปอาจทำให้เกิดการรวมตัวกันเป็นสารที่ไม่ต้องการได้ เช่น สารประกอบออกไซด์ของไนโตรเจน หรือ เกิดเถ้าหลอมรวมตัวเป็นซีโลส (slag) ก็จะเกาะติดอยู่บนผนังเหล็ก ที่ใช้ในการถ่ายเทความร้อนทำให้เกิดการกัดกร่อนได้

### 3.2.1.3 อัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างเชื้อเพลิงกับปริมาณอากาศ

อัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างเชื้อเพลิงกับปริมาณอากาศที่ใช้ในกระบวนการเผาไหม้ เพื่อให้ได้ผลอย่างสมบูรณ์นั้น จะต้องมีสัดส่วนที่พอดีกันระหว่างปริมาณเชื้อเพลิงกับปริมาณออกซิเจน ตามสมการเผาไหม้ ปริมาณของอากาศตามทฤษฎี (Theoretical air) คือปริมาณน้อยที่สุดของอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้เชื้อเพลิงอย่างสมบูรณ์ จนคาร์บอน, ไฮโดรเจน และกำมะถันเปลี่ยนเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์, น้ำ และ ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ตามลำดับ ในทางปฏิบัติจริงของอากาศที่ต้องการตามทฤษฎีไม่พอที่จะทำให้เกิดการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ การสันดาปที่ไม่สมบูรณ์ คือ การเกิดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ และ คาร์บอนในก๊าซไอเสีย

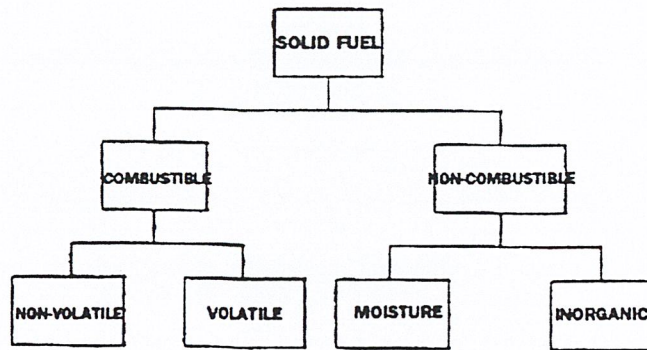
### 3.2.1.4 เวลาที่เพียงพอในการเผาไหม้ให้สมบูรณ์ของเชื้อเพลิง

เวลาที่เพียงพอในการเผาไหม้ให้สมบูรณ์ของเชื้อเพลิง คือเวลาที่เชื้อเพลิงอยู่ในเตาเผาควรรานพอที่จะทำให้เกิดการเผาไหม้มากที่สุด แต่การเผาไหม้เชื้อเพลิงอย่างสมบูรณ์เป็นไปได้ยากเพราะต้องใช้เวลานาน และเสียค่าใช้จ่ายสูง เนื่องจากต้องใช้เตาเผาที่มีความสูงมาก ๆ ในขณะที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากัน ดังนั้นจึงนำเทคนิคการหมุนวนความเร็วสูงของเตาเผาหรือเทคมาเพื่อช่วยให้เกิดการไหลหมุนวน (Recirculation Flow) ของเชื้อเพลิงกับอากาศ ขณะเกิดการเผาไหม้ภายใน ทำให้เวลาในการเผาไหม้นานขึ้นหรือหน่วงเวลาให้การเผาไหม้เกิดขึ้นนานที่สุด เพื่อให้การเผาไหม้ใกล้เคียงการเผาไหม้สมบูรณ์ที่สุด

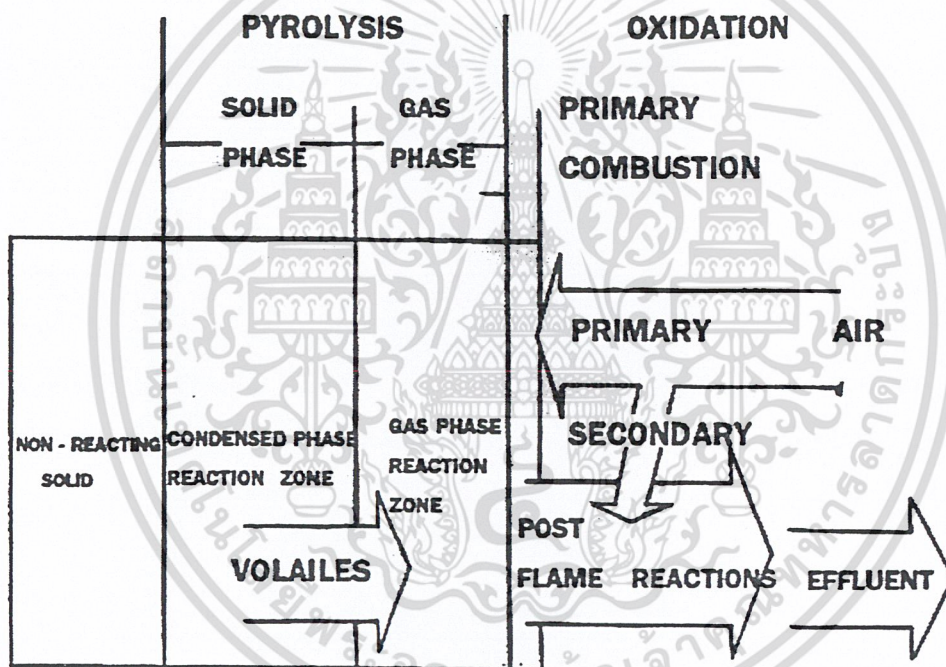
## 3.3 การเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง

เชื้อเพลิงแข็งที่เราใช้ในปัจจุบันมีหลายชนิด เช่น ถ่านหิน ฟืน ไม้เลื่อย แกลบ ฟางข้าว ชังข้าวโพด เป็นต้น ขบวนการการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง จะมีความแตกต่างไปจากเชื้อเพลิงเหลว และแก๊ส เพราะว่าคุณสมบัติของเชื้อเพลิงแข็ง มักจะเป็นสารประกอบที่มีส่วนผสมของสารต่างๆ ภายในไม่แน่นอน นอกจากนี้ การเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งยังขึ้นอยู่กับขนาดของอนุภาคเชื้อเพลิงแข็งด้วย เพราะเชื้อเพลิงแข็งประกอบไปด้วยสารประกอบต่างๆ ซึ่งมีทั้งเผาไหม้ได้ และไม่สามารถเผาไหม้ได้ดังรูปที่ 3.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 องค์ประกอบของเชื้อเพลิงแข็ง



รูปที่ 3.2 ปฏิกริยาการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง

สารที่ไม่สามารถเผาไหม้ได้ เรียกว่า สารเฉื่อย (Inert) สารเฉื่อยนี้สามารถเปรียบเทียบได้กับก๊าซในโตรเจนในอากาศ ซึ่งจะไม่ช่วยในการเผาไหม้ แต่ในบางครั้งสารเฉื่อยเหล่านี้ก็อาจจะเกิดปฏิกิริยาได้ในบางขบวนการของการเผาไหม้ โดยเฉพาะในขบวนการเผาไหม้ที่อุณหภูมิสูงๆ สารเฉื่อยที่อยู่ในเชื้อเพลิงแข็ง สามารถแบ่งออกได้ 2 ชนิด คือ ความชื้น และสารประกอบเคมีที่ประกอบขึ้นเป็นขี้เถ้า สารอินทรีย์เหล่านี้โดยมากจะเป็นพวกซิลิเกต (Silicates) ซัลไฟด์ (Sulfides) และเกลือฮาโลเจน (Halogen salt) เป็นต้น เมื่อเกิดการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง สารเหล่านี้จะกลายเป็นขี้เถ้า บางส่วนจะตกในห้องที่เผาไหม้ ส่วนที่มีน้ำหนักเบาจะปลิวไปกับไอเสียที่เรียกว่า เถ้าลอย (Fly Ash) เชื้อเพลิงแข็งที่สามารถแยกได้เป็นส่วนที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระเหยได้ (Volatile) และส่วนที่ไม่ระเหย (Non-Volatile) ในส่วนที่ไม่ระเหยนี้ ประกอบด้วยคาร์บอน สารประกอบคาร์บอน  $C_xH_y$  โดยที่ค่า  $x$  มีค่ามากกว่า  $y$  มากๆ หรือเป็นสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงนั่นเอง ส่วนสารที่ระเหยได้ในที่นี้ หมายถึง สารประกอบที่ระเหยใช้ในช่วงของการเผาไหม้ ซึ่งจะประกอบไปด้วย สารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำๆ หลักในการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งปฏิกิริยาที่จะเกิดขึ้น ดังรูปที่ 3.2

### 3.3.1 แบบจำลองการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง

แบบจำลองการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งที่นิยมใช้ในปัจจุบันมีอยู่ 2 แบบ คือ

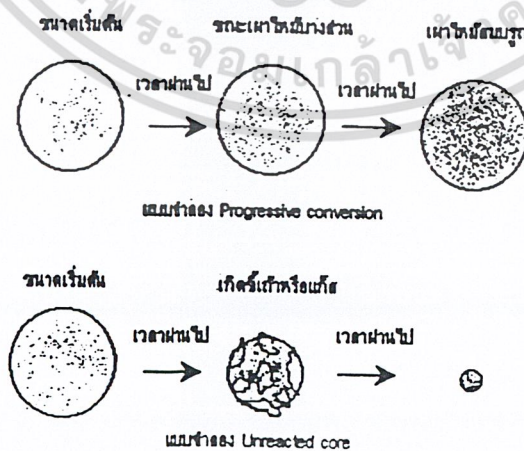
1. แบบจำลอง Progressive conversion ใช้อธิบายเมื่อในระหว่างการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ ขนาดของเชื้อเพลิงไม่เปลี่ยนแปลง และเมื่อทำการเผาไหม้แล้ว ไม่เกิดขึ้นเถ้าผลิตภัณฑ์ที่ได้คงรูปเดิม เช่น การเผาแร่กำมะถัน

2. แบบจำลอง Unreacted core ใช้อธิบายเมื่อทำการเผาไหม้แล้ว ขนาดของเชื้อเพลิงเปลี่ยนไป เช่น ไม้ แกลบ ถ่านหิน เป็นต้น

โดยจะมุ่งเน้นศึกษาที่แบบจำลอง Unreacted core ซึ่งเป็นแบบจำลองที่ใช้อธิบายการเผาไหม้ของ แกลบ

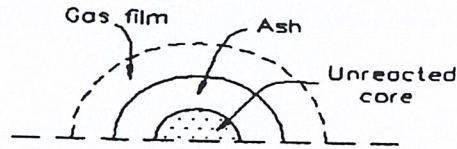
### 3.3.2 แบบจำลอง Unreacted core

ปฏิกิริยาการเผาไหม้จะเกิดขึ้นครั้งแรกที่ผิวนอกสุดของเชื้อเพลิง หลังจากนั้นบริเวณที่เกิดปฏิกิริยาจะค่อยๆ กินลึกเข้าไปภายใน ทั้งบริเวณที่ได้ทำปฏิกิริยาไปแล้วในสภาพขี้เถ้า ดังนั้นที่เวลาใดๆ ส่วนลึกเข้าไปภายในชั้นเชื้อเพลิง หรือที่เรียกว่า แก่น จะค่อยๆ มีขนาดลดลงในระหว่างการทำปฏิกิริยา

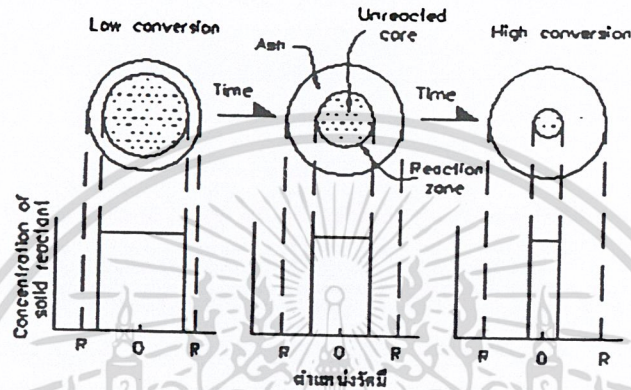


รูปที่ 3.3 แบบจำลองการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 บริเวณการเกิดการเผาไหม้



รูปที่ 3.5 ลักษณะชั้นเชื้อเพลิงระหว่างการเผาไหม้

ปฏิกิริยาของแบบจำลองนี้ สามารถแบ่งออกเป็น 5 ขั้นตอนคือ

1. อากาศแพร่กระจายผ่านชั้นฟิล์มเข้าสู่ชั้นชี้ถ้ำ
2. อากาศผ่านชั้นชี้ถ้ำเข้าสู่ผิวของเชื้อเพลิงในส่วนที่ยังไม่ทำปฏิกิริยา
3. เกิดปฏิกิริยาระหว่างอากาศกับผิวของเชื้อเพลิง
4. ผลิตภัณฑ์ในรูปของแก๊สที่เกิดจากการเผาไหม้ซึมผ่านชั้นชี้ถ้ำกลับสู่ชั้นฟิล์มของแก๊ส
5. ผลิตภัณฑ์แก๊สซึมผ่านชั้นฟิล์มกลับคืนสู่ภายนอกบรรยากาศรอบๆ โดยความต้านทานในแต่ละขั้นตอนอาจจะแตกต่างกันมากขั้นตอนที่มีความต้านทานสูงสุดจะเป็นตัวควบคุมอัตราการเร็วของการเผาไหม้

สิ่งที่มีผลต่ออัตราการเร็วในการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง

1. อุณหภูมิ โดยทั่วไปขั้นตอนของปฏิกิริยาเคมีจะไวต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ
2. เวลาของการแพร่กระจายของอากาศผ่านชั้นฟิล์ม หรือชั้นชี้ถ้ำ
3. ขนาดของเชื้อเพลิง
4. ความต้านทานของชั้นชี้ถ้ำกับชั้นฟิล์ม โดยปกติความต้านทานของชั้นชี้ถ้ำจะสูงกว่าชั้นฟิล์มมาก ดังนั้นค่าความต้านทานของชั้นฟิล์มจึงอาจตัดทิ้งได้
5. ความต้านทานรวม ซึ่งรวมทั้งความต้านทานของแก๊สฟิล์มชั้นชี้ถ้ำ และปฏิกิริยาการเผาไหม้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4 อากาศชื้น

อากาศชื้นเป็นก๊าซอุดมคติที่ประกอบด้วยอากาศแห้งและไอน้ำความดันต่ำ โดยทั่วไปอากาศชื้นมีภาวะการไชื้นงานที่อุณหภูมิหนึ่งๆซึ่งต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤตของไอน้ำ จึงทำให้เมื่ออากาศชื้นเปลี่ยนสถานะอาจมีการระเหยหรือการควบแน่นของไอน้ำเข้ามาเกี่ยวข้องกับผลก็คือจะทำให้เกิดของผสมสองสถานะ

ในการวิเคราะห์ก๊าซผสมอุดมคติที่เป็นอากาศชื้นจะกำหนดข้อสมมติฐานดังต่อไปนี้

1. ขณะเกิดการควบแน่นของไอน้ำความดันต่ำในอากาศชื้น น้ำควบแน่นนั้นจะไม่ละลายก๊าซองค์ประกอบของอากาศ

2. ในอากาศชื้นเฉพาะสถานะก๊าซเท่านั้นจะสมมติให้เป็นก๊าซผสมอุดมคติ (ในสถานะก๊าซประกอบด้วยอากาศแห้งและไอน้ำความดันต่ำ)

3. ถ้าหากปรากฏอากาศชื้น (สถานะไอ) ร่วมกับสถานะน้ำควบแน่น ภายใต้ความดันและอุณหภูมิหนึ่ง ๆ สมดุลเฟสระหว่างเฟสไอน้ำกับเฟสน้ำควบแน่นนั้นจะไม่ขึ้นอยู่กับอากาศแห้งที่ประกอบรวม ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่า ภายใต้สมดุลเฟสระหว่างอากาศชื้นกับน้ำควบแน่นที่ความดันและอุณหภูมิหนึ่ง ๆ ความดันย่อยของไอน้ำในอากาศชื้นนั้นจะเท่ากับความดันอิ่มตัวที่อุณหภูมินั้น

#### 3.4.1 อากาศแห้งและอากาศชื้น

อากาศในบรรยากาศนั้นปกติประกอบด้วยอากาศแห้ง (dry air) และไอน้ำความดันต่ำในอากาศหรือบรรยากาศนั้นเรียกว่า อากาศชื้น (atmospheric air) อากาศแห้งมีองค์ประกอบเป็นไนโตรเจน 78.10% , ออกซิเจน 20.95%, อาร์กอน 0.92% โดยโมล และที่เหลือเป็นก๊าซอื่น ๆ การวิเคราะห์อากาศชื้นนั้นจะเป็นการวิเคราะห์ของผสมที่ซึ่งประกอบด้วยอากาศแห้งและไอน้ำนั่นเอง องค์ประกอบของอากาศชื้นที่เป็นอากาศแห้งจะมีปริมาณคงที่ ส่วนองค์ประกอบที่เป็นไอน้ำในอากาศชื้นนั้นจะเปลี่ยนแปลง ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับการระเหยตัวของน้ำจากมหาสมุทร แม่น้ำ ลำคลอง ทะเลสาบ รวมถึงจากร่างกายของมนุษย์เข้าสู่บรรยากาศหรือการควบแน่นของไอน้ำออกจากอากาศชื้นนั้น

#### 3.4.2 ความดันย่อยของอากาศและความดันไอ

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

$$P = P_a + P_v \quad (3.6)$$

ความดันย่อยของอากาศแห้ง ( $P_a$ ) หมายถึงความดันในส่วนที่กระทำโดยโมเลกุลของอากาศแห้งในอากาศชื้นนั้น

ความดันไอ ( $P_v$ ) หมายถึงความดันในส่วนที่กระทำโดยโมเลกุลของไอน้ำที่มีอยู่ในอากาศชื้น ในกรณีที่อากาศชื้นอยู่ในภาวะอิ่มตัวที่อุณหภูมิใดอุณหภูมิหนึ่ง ความดันไอก็คือความดันไ้อิ่มตัวหรือความดันอิ่มตัวที่อุณหภูมินั้น

ภายใต้ภาวะอิ่มตัวของอากาศชื้นที่อุณหภูมิใด ๆ พบว่า

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4.3 อัตราส่วนความชื้น

ปริมาณไอน้ำในอากาศชื้นสามารถกำหนดได้ในหลาย ๆ ลักษณะตามนิยามของอัตราส่วนความชื้น (humidity ratio,  $\omega$ ) หรือความชื้นสัมพัทธ์ (relative humidity,  $\phi$ ) ดังนี้

อัตราส่วนความชื้น ( $\omega$ ) หมายถึงมวลของไอน้ำที่มีอยู่ในอากาศชื้นต่อหนึ่งหน่วยมวลของอากาศแห้ง มีหน่วยเป็น kg/kg-dry air หรืออาจเรียกว่า ความชื้นสัมบูรณ์หรือความชื้นจำเพาะ

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

$$\omega = \frac{m_v}{m_a} = \frac{P_v V / R_v T}{P_a V / R_a T} = \frac{P_v R_a}{P_a R_v} \quad (3.7)$$

ในที่นี้  $R_a = 0.2870 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$  และ  $R_v = 0.46152 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$  แทนค่าในสมการ (3.7) จะได้

$$\omega = 0.622 \frac{P_v}{P_a} = \frac{0.622 P_v}{P - P_v} \quad (3.8)$$

โดยที่  $P$  คือ ความดันของอากาศชื้นหรือความดันทั้งหมด

ในที่นี้สำหรับอากาศแห้งนั้นจะไม่มีไอน้ำเป็นองค์ประกอบ ดังนั้นอัตราส่วนความชื้น  $\omega = 0$  หากเพิ่มไอน้ำ (ความชื้น) ให้กับอากาศแห้งนั้น พบว่าอัตราส่วนความชื้นจะเพิ่มขึ้น และถ้าเพิ่มไอน้ำต่อไปจนกระทั่งถึงจุดหนึ่งซึ่งอากาศชื้นนั้นจะไม่สามารถรับไอน้ำได้อีกต่อไป แสดงว่าอากาศได้รับไอน้ำในปริมาณสูงสุดและอิ่มตัว อากาศชื้นที่สภาวะนี้เรียกว่า อากาศอิ่มตัว (saturated air) ซึ่งที่สภาวะอิ่มตัวนี้ ความดันไอก็คือความดันอิ่มตัวที่อุณหภูมิขณะนั้นของอากาศชื้น

### 3.4.4 ความชื้นสัมพัทธ์

การบ่งบอกปริมาณไอน้ำในอากาศชื้นโดยคำนึงถึงผลต่อความรู้สึกสบายของมนุษย์ในบรรยากาศ ทั้งนี้ จะเปรียบเทียบปริมาณไอน้ำในอากาศชื้นที่อุณหภูมิหนึ่ง ๆ กับปริมาณไอน้ำสูงสุดที่อากาศสามารถรับไว้ได้ภายใต้อุณหภูมิเดียวกัน อัตราส่วนที่ได้นี้เรียกว่าความชื้นสัมพัทธ์ ( $\phi$ )

ความชื้นสัมพัทธ์ ( $\phi$ ) หมายถึงอัตราส่วนของปริมาณไอน้ำในอากาศ ( $m_v$ ) ต่อปริมาณไอน้ำสูงสุด ในอากาศอิ่มตัวที่อุณหภูมิเดียวกัน ( $m_g$ )

$$\phi = \frac{m_v}{m_g} = \frac{P_v V / R_v T}{P_g V / R_v T} = \frac{P_v}{P_g} \quad (3.9)$$

โดยที่  $P_g = P_{sat @ T}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นจากสมการ (3.8) และ (3.9) จะได้

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

และ

$$\omega = \frac{0.622 \phi P_g}{P - \phi P_g} \quad (3.11)$$

จากสมการ (3.9) นั้นพบว่าความชื้นสัมพัทธ์ก็คือ อัตราส่วนของความดันไอของไอน้ำในอากาศ (เศษส่วนโดยโมลของไอน้ำในอากาศ) ต่อความดันไอของไอน้ำในอากาศอิ่มตัวที่อุณหภูมิเดียวกัน (เศษส่วนโดยโมลของไอน้ำในอากาศอิ่มตัว) ความชื้นสัมพัทธ์จะมีค่าตั้งแต่ 0 – 100% หรือเขียนเป็นสมการในรูปของ

$$\phi = \frac{P_v}{P_g} = \frac{v_g}{v_v} = \frac{\rho_v}{\rho_g} \quad (3.12)$$

### 3.4.5 อุณหภูมิกระเปาะแห้งและอุณหภูมิกระเปาะเปียก

อุณหภูมิกระเปาะแห้ง (dry bulb temperature,  $T_{db}$ ) หมายถึงอุณหภูมิของอากาศชื้นซึ่งจับอบบนเทอร์โมมิเตอร์แบบธรรมดา อุณหภูมิกระเปาะเปียก (wet bulb temperature,  $T_{wb}$ ) หมายถึงอุณหภูมิของอากาศชื้นซึ่งจับอบบนเทอร์โมมิเตอร์โดยมีผ้ากอซเปียกหุ้มอยู่ที่กระเปาะ ขณะวัดอุณหภูมิต้องทำให้อากาศไหลผ่านด้วยความเร็วไม่ต่ำกว่า 3 เมตรต่อวินาที ทั้งนี้ต้องการให้เกิดการถ่ายเทความร้อนอยู่ในแบบของการพาความร้อนมากกว่าการแผ่รังสีความร้อน กระบวนการที่เกิดขึ้นขณะวัดอุณหภูมิกระเปาะเปียกนี้เรียกว่า กระบวนการทำให้อากาศอิ่มตัวแบบอะเดียแบติก

### 3.5 อัตราส่วนสมมูล (Equivalence ratio)

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

$$\Phi = \frac{(A/F)_{Stoic}}{(A/F)_{Actual}} = \frac{(F/A)_{Actual}}{(F/A)_{Stoic}} \quad (3.13)$$

Fuel – rich mixtures	$\Phi > 1$	ปริมาณอากาศที่น้อยกว่าปริมาณที่ต้องใช้ทางทฤษฎี
Stoichiometric mixtures	$\Phi = 1$	ปริมาณอากาศที่ใช้เท่ากับปริมาณที่ต้องใช้ทางทฤษฎี
Fuel – lean mixtures	$\Phi < 1$	ปริมาณอากาศที่ใช้มากกว่าปริมาณที่ต้องใช้ทางทฤษฎี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หรือเขียนในรูปปริมาณอากาศส่วนเกิน (Excess Air)

$$EA = (1 + \Phi) \times 100\% \quad (3.14)$$

### 3.6 อุณหภูมิอะเดียแบติก (Adiabatic Flame Temperature)

ในกรณีไม่มีงานเกี่ยวข้องและไม่มีการเปลี่ยนแปลงพลังงานจลน์หรือพลังงานศักย์ พลังงานเคมีที่ปล่อยออกมาในระหว่างการเผาไหม้นั้นอาจสูญเสียไปสู่สิ่งแวดล้อม ในรูปของพลังงานความร้อนหรืออาจถูกใช้ไปในการเพิ่มอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ ถ้าการสูญเสียความร้อนมีค่าน้อยอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ก็จะสูง ค่าจำกัดของมันคือเมื่อไม่มีการสูญเสียความร้อนสู่สิ่งแวดล้อม ( $Q=0$ ) และ อุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ก็จะมีความสูงที่สุด ซึ่งเราเรียกอุณหภูมินี้ว่าอุณหภูมิเปลวอะเดียแบติก (Adiabatic flame temperature)

อุณหภูมิดังกล่าวนี้หาได้จากการให้  $Q$  และ  $W$  มีค่าเท่ากับศูนย์ในกฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์ ซึ่งจะได้ว่า

$$H_P = H_R \quad (3.15)$$

หรือ

$$\sum N_P (\bar{h}_f^0 + \bar{h} - \bar{h}^0)_P = \sum N_R (\bar{h}_f^0 + \bar{h} - \bar{h}^0)_R \quad (3.16)$$

เมื่อรู้สถานะของสารตั้งต้นเราก็สามารถหา  $H_R$  ได้โดยง่าย แต่การหา  $H_P$  นั้นไม่เป็นเรื่องที่ย่ง่ายนัก เพราะเรายังไม่รู้อุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ ดังนั้นการคำนวณเปลวอะเดียแบติก (Adiabatic flame temperature) จะต้องใช้วิธีสมมติค่าจนกว่าจะได้  $H_P = H_R$  (เรียกว่า “iterative procedure”) ถ้าเป็นการเผาไหม้ด้วยอากาศซึ่งประกอบด้วย  $N_2$  ส่วนใหญ่ ค่าอุณหภูมิแรกที่เราคงจะเดา คือการสมมติว่าผลิตภัณฑ์ทั้งหมดเป็น  $N_2$

อุณหภูมิสูงสุดในห้องเผาไหม้นั้นถูกจำกัดโดยความทนทานของวัตถุ ดังนั้นอุณหภูมิเปลวอะเดียแบติกจึงมีความสำคัญมากในการออกแบบห้องเผาไหม้ เครื่องยนต์กังหันก๊าซ และหัวฉีด อุณหภูมิสูงสุดที่เกิดขึ้นในอุปกรณ์เหล่านี้ที่จริงแล้วจะน้อยกว่าอุณหภูมิเปลวอะเดียแบติกมาก ทั้งนี้เนื่องจากการเผาไหม้อาจไม่สมบูรณ์ มีการสูญเสียความร้อนสู่สิ่งแวดล้อม รวมทั้งก๊าซบางชนิดอาจแยกตัวออก (Dissociate) อุณหภูมิสูงสุดในห้องเผาไหม้อาจควบคุมได้โดยการปรับแต่งปริมาณของอากาศส่วนเกิน (Excess air) ซึ่งเปรียบเสมือนการระบายความร้อน

### 3.7 ฤทธิ์ฟลูอิดไดซ์เซชัน

ฟลูอิดไดซ์เซชันเป็นปรากฏการณ์ที่อนุภาคของแข็งขนาดเล็กถูกทำให้อยู่ในสภาพคล้ายของไหล ด้วยการพองโดยก๊าซหรือของเหลวที่ไหลผ่านเบดของแข็งขึ้นไปด้านบนด้วยอัตราการไหลค่าหนึ่ง โดยมีการถ่ายเทมวลสาร ความร้อน และปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นในขณะที่มีการสัมผัสระหว่างอนุภาคของแข็ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.7.1 ประเภทของฟลูอิดไดซ์เซชัน

กระบวนการฟลูอิดไดซ์เซชันแบ่งตามลักษณะการเกิดได้สองแบบ คือ

3.7.1.1 ฟลูอิดไดซ์เซชันสองสถานะ (Two - phases fluidization) หมายความว่าในหอทดลองหรือเบดที่ใช้งานจะประกอบด้วยสองสถานะคือ ของแข็งกับของไหล ของไหลนี้อาจจะเป็นก๊าซหรือของเหลวก็ได้ ดังนั้นฟลูอิดไดซ์เซชันจึงแบ่งออกอีก 2 ประเภท คือ

1. ก๊าซฟลูอิดไดซ์เซชัน (Gas fluidization)

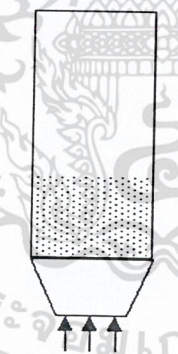
2. ฟลูอิดไดซ์เซชันของของเหลว (Liquid fluidization)

3.7.1.2 ฟลูอิดไดซ์เซชันสามสถานะ (Three - phases fluidization) หมายความว่าภายในหอทดลองจะประกอบด้วยของสามสถานะในเวลาเดียวกันคือ ของแข็ง, ของเหลวและก๊าซ สำหรับฟลูอิดไดซ์เซชันสามสถานะเป็นกระบวนการที่พัฒนามาจากฟลูอิดไดซ์เซชันสองสถานะ

### 3.7.2 ลักษณะฟลูอิดไดซ์เบด

เบด (Bed) หมายถึงอาณาเขตในหอทดลองที่มีอนุภาคของแข็งบรรจุอยู่ ไม่ว่าอนุภาคของแข็งนั้นจะอยู่นิ่งหรือเคลื่อนไหวด้วยของไหลในหอทดลองจะระดับตั้งแต่แผ่นโลหะที่ทำเป็นตะแกรงรองรับหรือเป็นตัวกระจายของไหลจนถึงระดับสูงสุดคือผิวหน้าของอนุภาคของแข็งที่อยู่ในหอทดลอง ดังรูปที่

3.6



ของไหลความเร็วต่ำ

รูปที่ 3.6 แสดงระดับของเบดในหอทดลอง

ปรากฏการณ์ฟลูอิดไดซ์เซชันเกิดขึ้นได้หลายลักษณะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบบางประการ เช่น ความเร็วของของไหล ชนิดของเม็ดวัสดุที่ประกอบกันเป็นเบด ลักษณะของแผ่นกระจายของไหล เมื่อความเร็วของของไหลเปลี่ยนแปลงไปจะทำให้ความดันลงในเบดเปลี่ยนแปลงไปด้วย ดังรูปที่ 3.7 ลำดับเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นเมื่อค่อยๆ เพิ่มความเร็วของของไหลสรุปได้ดังนี้คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.7.2.1 เมื่อป้อนของไหลด้วยความเร็วต่ำๆ ของไหลจะไหลผ่านช่องว่างระหว่างอนุภาคของแข็งไปโดยไม่ทำให้อนุภาคของแข็งเคลื่อนที่ เบลลักษณะนี้เรียกว่า เบลนิ่ง (Fixed bed)

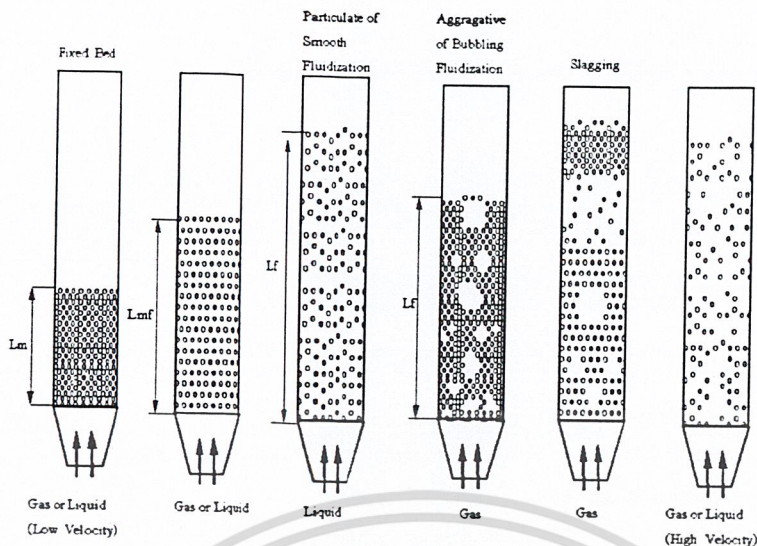
3.7.2.2 เมื่อความเร็วของของไหลสูงขึ้นอนุภาคของแข็งจะเคลื่อนที่ห่างออกจากกัน ลักษณะเช่นนี้เรียกว่า เบลขยาย (Expanded bed)

3.7.2.3 เมื่อเพิ่มความเร็วของของไหลขึ้นอีกจนถึงจุดๆหนึ่ง ซึ่งแรงเสียดทานระหว่างอนุภาคของแข็งกับของไหลสมดุลกับน้ำหนักของอนุภาคของแข็งและแรงกระทำระหว่างอนุภาคของแข็งในแนวตั้งหายไป อนุภาคของแข็งที่ประกอบกันเป็นเบลจะลอยตัวเป็นอิสระ แรงกระทำเนื่องจากความดันลดในเบลระนาบตัดใดๆ ของเบลจะเท่ากับน้ำหนักของของไหลและอนุภาคของแข็งระหว่างหน้าตัดนั้นๆ เบลในสภาพเช่นนี้เป็นเบลที่เริ่มฟลูอิดไดซ์ เรียกเบลในลักษณะนี้ว่า อินซิเพียนฟลูอิดไดซ์เบล (Incipiently fluidized bed) หรือเบลที่มีสภาพฟลูอิดไดซ์ขั้นต่ำสุด (Minimum fluidization)

3.7.2.4 เมื่อของไหลมีความเร็วมากกว่าความเร็วที่กล่าวในหัวข้อ 3.8.2.3 อนุภาคของแข็งจะเคลื่อนตัวห่างออกจากกันมากขึ้นตามความเร็วของของไหล จะเริ่มเกิดฟองก๊าซ ( Bubbles ) เกิดขึ้น อนุภาคของแข็งเริ่มไหลหมุนเวียนดีขึ้น เมื่อความเร็วของของไหลเพิ่มสูงขึ้น จะทำให้เกิดการผสมผสานและการไหลเวียนของของแข็งจะรุนแรงยิ่งขึ้น เบลในลักษณะเช่นนี้เรียกว่า บับบิลิงฟลูอิดไดซ์เบล (Bubbling fluidized bed) ส่วนของเบลที่ไม่รวมฟองเรียกว่า อิมัลชันเฟส (Emulsion phase)

3.7.2.5 ฟลูอิดไดซ์เบลที่สามารถบ่งบอกระดับเบลได้เรียกว่า ฟลูอิดไดซ์เบลแบบหนาแน่น (Dense phase fluidized bed) และเมื่อความเร็วของของไหลมากกว่าความเร็วขณะหลุดลอย (Terminal velocity) อนุภาคของแข็งจะหลุดลอยไปกับกระแสการไหลของของไหล สถานะเรียกว่า ฟลูอิดไดซ์เบลแบบเจือจาง (Lean phase fluidized bed) หรือการขนถ่ายด้วยของไหล (Pneumatic or Hydraulic transport)

3.7.2.6 ฟลูอิดไดซ์เบลที่ของไหลเป็นของเหลว การขยายตัวของเบลเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ การลอยตัวและการหมุนรอบตัวเองของอนุภาคของแข็งเป็นไปอย่างช้าๆ เราเรียกเบลแบบนี้ว่าเบลสม่ำเสมอ (Smoothly fluidized bed) ฟลูอิดไดซ์เบลที่ของไหลเป็นก๊าซลักษณะของเบลจะแตกต่างจากของเหลวมาก เพราะว่าเมื่อความเร็วของก๊าซสูงกว่าความเร็วที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดซ์ขั้นต่ำแล้วก๊าซส่วนหนึ่งยังทำหน้าที่ให้เกิดการลอยตัวของอนุภาคของแข็งเหมือนเดิม แต่มีอีกส่วนหนึ่งรวมตัวแล้วเกิดเป็นฟองก๊าซเกิดขึ้น ฟองก๊าซจะแทรกตัวเองขึ้นมาขยับบนผิวหน้าของเบลและแตกตัวในที่สุด การเคลื่อนที่ของอนุภาคของแข็งภายในเบลจะเคลื่อนที่อย่างไม่เป็นระเบียบ



รูปที่ 3.7 ลักษณะของฟลูอิด ไคซ์เบด

### 3.7.3 ข้อได้เปรียบและเสียเปรียบของฟลูอิดไคซ์เบด

เป็นการเปรียบเทียบการ ได้เปรียบและการเสียเปรียบระหว่างการใช้เทคนิคฟลูอิด ไคซ์เบดกับเทคนิคอื่นๆ ดังมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

ข้อดีของเทคนิคฟลูอิด ไคซ์เบด

1. เนื่องจากอนุภาคของแข็งที่เคลื่อนที่อยู่ตลอดเวลา ทำให้เกิดการผสมกันอย่างรวดเร็วและสม่ำเสมอ อุณหภูมิภายในเบดคงที่ตลอด ซึ่งต่างจากเบดนิ่งซึ่งอุณหภูมิจะไม่เท่ากันตลอดทั้งเบด
2. การทำงานด้วยฟลูอิด ไคซ์เบดจะเสียดพลังงานน้อยกว่า เพราะแรงเสียดทานและแรงดันตกคร่อมเบดน้อยกว่าแบบบรรจุมาก
3. มีการจัดเรียงตัวของอนุภาคของแข็ง อนุภาคที่มีน้ำหนักน้อยจะอยู่ส่วนบน ส่วนอนุภาคที่มีน้ำหนักมากกว่าจะอยู่ด้านล่าง ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการแยกขนาดของอนุภาคของแข็งได้ นอกจากนี้แรงเสียดทานต่อการไหลของของไหลมีน้อยกว่ามาก
4. จากคุณสมบัติที่คล้ายของไหลจึงสามารถทำงานแบบต่อเนื่องได้คือ ปล่อยให้ของแข็งไหลออกจากเบดและไหลเดิมเข้าไปในเบดได้ การควบคุมก็จะทำได้ง่าย
5. พื้นที่สัมผัสระหว่างอนุภาคของแข็งกับของไหล จะมีมากกว่าเมื่อเทียบกับเบดนิ่งที่มีอนุภาคของแข็งเท่ากัน จึงมีประโยชน์ในการใช้งานที่มีการถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวลสาร
6. ที่อนุภาคของไหลหมุนเวียนอยู่ภายในเบด อนุภาคของแข็งนี้สามารถจะเป็นตัวนำความร้อนจากแหล่งความร้อนให้กับของไหลได้มากกว่า

ข้อเสียของเทคนิคฟลูอิด ไคซ์เบด

1. เนื่องจากการผสมกันอย่างรวดเร็ว บางครั้งอนุภาคของของแข็งมีช่วงเวลากลับในเบดสั้นเกินไป เมื่อทำงานแบบต่อเนื่องจึงทำให้ผลิตภัณฑ์เหลว หรืออนุภาคของแข็งมีคุณสมบัติทางกายภาพไม่ตรงตามข้อกำหนด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. การสั้นสะท้อนของหอทดลองหรือเกิดการกักร้อนเนื่องจากอนุภาคของแข็งมากระทบกับผนังหอทดลอง

3. เวลาที่ของไหลสัมผัสกับอนุภาคของแข็งสั้นมาก จึงต้องใช้เบดสูงๆหรือเบดหลายชั้นซึ่งเปลืองเงินลงทุนมาก

4. มักเกิดฟองก๊าซในเบด ทำให้การสัมผัสกันไม่ดีเป็นการสูญเสียเปลว ถ้ายังเป็นกระบวนการที่มีการเปลี่ยนแปลงทางเคมีจะต้องใช้ตัวเร่งช่วยแล้ว ทำให้เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงลดลง

5. ใช้กับอนุภาคของแข็งที่เป็ยกหรือเป็นยางไม่ได้ เพราะเกิดการเกาะเป็นก้อนใหญ่และตกตะกอนมายังส่วนล่างของเบด

6. การทำงานมีข้อจำกัด เพราะถ้ามีความเร็วของของไหลมากเกินไปเมื่อดของแข็งก็จะออกมาจากเบดไปพร้อมกับของไหล

7. ในปฏิกิริยาที่ทำให้ตัวเร่งมีขนาดลดลง จะต้องปรับความเร็วของก๊าซเพื่อไม่ให้ตัวเร่งปลิวทำให้ได้ผลผลิตน้อยลง

### 3.7.4 ทฤษฎีการคำนวณฟลูอิดไดเซชัน

ขณะที่ของของไหลไหลผ่านขึ้นมาด้านใกล้ผนัง ความเร็วของไหลจะต่ำมากหรือเกือบไม่มีการไหลเลยเนื่องจากเกิดแรงเสียดทาน เมื่อในหอทดลองที่บรรจุอนุภาคของแข็งมีอิทธิพลของฝาผนังเกิดขึ้น ขอบเขตการไหลชนิดเรียบจะสูงมากขึ้น พื้นที่ในการไหลของของไหลในหอทดลองจะลดน้อยลง หรือเส้นผ่านศูนย์กลางที่ทำงานที่แท้จริงของของไหลเล็กกว่าเดิมมาก ประสิทธิภาพการทำงานจะน้อยลงด้วย

ตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อการเกิดฟลูอิดไดเซชันคือ

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

ความสูงของเบดเมื่อเริ่มฟลูอิด ไดเซชันสามารถหาได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\frac{L_0}{L_{mf}} = \frac{1 - \epsilon_{mf}}{1 - \epsilon_0} \quad (3.17)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขณะที่อนุภาคของแข็งเริ่มลอยตัวเป็นอิสระแสดงว่า อนุภาคของแข็งกำลังอยู่ในสมดุลของแรง ซึ่งได้แก่แรงที่เกิดจากน้ำหนักของอนุภาคของแข็ง แรงพยุงของของไหล (Bouyance force) และแรงต้านการไหล (Drag force) อาจเขียนในสมการสมดุลแรงต่างๆ ได้ดังนี้

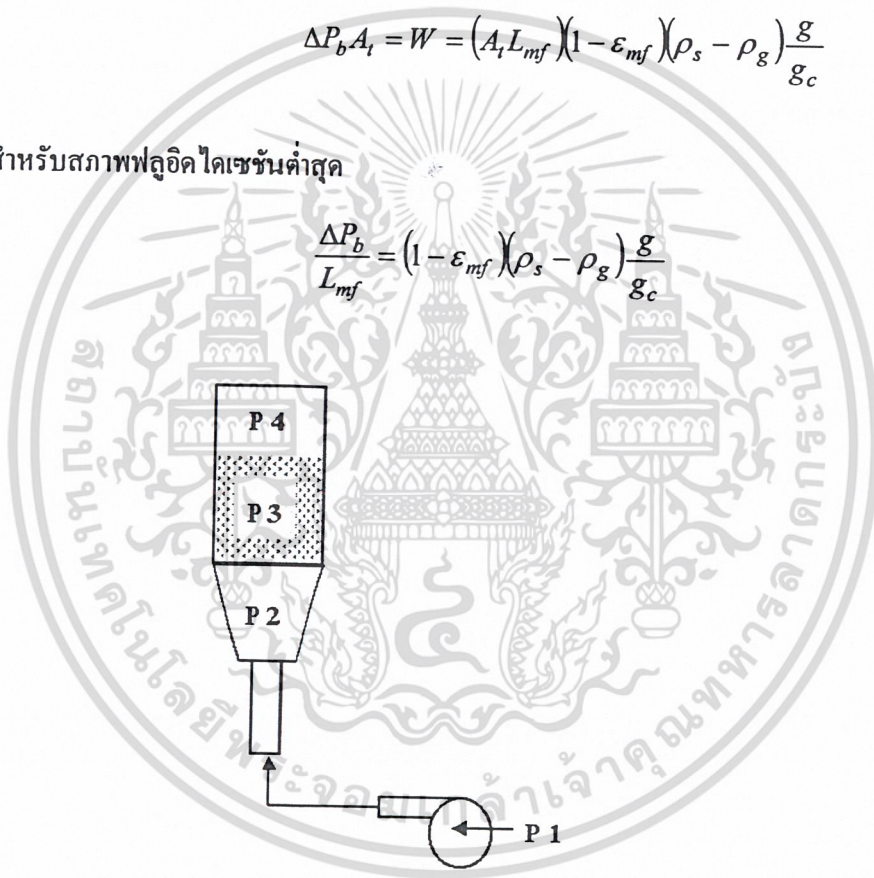
$$(\text{แรงพยุงของของไหล}) + (\text{แรงต้านทานการไหล}) = (\text{น้ำหนักของอนุภาคของแข็งในเบด}) \quad (3.18)$$

$$(\text{ความดันลดในเบด}) (\text{พื้นที่หน้าตัดของคอลัมน์}) = (\text{ปริมาตรของเบด}) (\text{แฟรคชันของของแข็ง}) (\text{น้ำหนักจำเพาะของของแข็ง}) \quad (3.19)$$

$$\Delta P_b A_t = W = (A_t L_{mf}) (1 - \epsilon_{mf}) (\rho_s - \rho_g) \frac{g}{g_c} \quad (3.20)$$

จัดเทอมใหม่สำหรับสภาพฟลูอิดไดเซชันต่ำสุด

$$\frac{\Delta P_b}{L_{mf}} = (1 - \epsilon_{mf}) (\rho_s - \rho_g) \frac{g}{g_c} \quad (3.21)$$



รูปที่ 3.8 แสดงความดันที่เกิดขึ้น ณ ตำแหน่งต่างๆ ในชุดการทดลอง

จากสมการความดันตกคร่อมที่ผ่านเบดหนึ่งจะได้ว่า กลไกของความดันตกคร่อมในเบดที่ใช้ อนุภาคของแข็งขนาดสม่ำเสมอแล้ว พบว่าความดันตกคร่อมนี้เป็นสัดส่วนกับแฟกเตอร์ 2 แฟกเตอร์ คือ

$$\frac{\Delta P_b}{L} g_c = \frac{150(1 - \epsilon_{mf}) \mu U}{\epsilon_{mf}^3 (\phi_s d_p)^2} + \frac{1.75(1 - \epsilon_{mf}) \rho_g U^2}{\epsilon_{mf}^3 (\phi_s d_p)} \quad (3.22)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

$$\frac{\Delta P_b}{L} g_c = \frac{150(1 - \epsilon_{mf}) \mu U}{\epsilon_{mf}^3 (\phi_s d_p)^2} \quad (3.23)$$

ที่  $Re_p > 1000$  ผลของการสูญเสียพลังงานจลน์จะมีค่ามากกว่าผลของแรงเสียดทาน สมการที่ 3.7 จัดใหม่ได้เป็นดังนี้

$$\frac{\Delta P_b}{L} g_c = \frac{1.75(1 - \epsilon_{mf}) \rho_g U^2}{\epsilon_{mf}^3 (\phi_s d_p)} \quad (3.24)$$

ซึ่งสมการของ Ergun นี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับสมการที่ 3.7 ได้ เมื่อเบคอยู่ที่จุดเริ่มเกิดฟลูอิดไดซ์เซชัน ดังนั้นจะแทนสมการที่ 3.7 ลงในสมการที่ 3.6 ในขณะที่เริ่มเกิดฟลูอิดไดซ์เซชันได้ตั้งสมการที่ 3.10

$$\frac{1.75}{\epsilon_{mf}^3 \phi_s} \left[ \frac{d_p U_{mf} \rho_g}{\mu} \right]^2 + \frac{150(1 - \epsilon_{mf}) (U_{mf} d_p \rho_g)}{\mu \epsilon_{mf}^3 \phi_s^2} = \frac{d_p^3 \rho_g (\rho_s - \rho_g) g}{\mu^2} \quad (3.25)$$

ในเขตที่โซ่อนุภาคของแข็งขนาดเล็กจะทำให้สามารถใช้ความเร็วของของไหลเพียงเล็กน้อยก็ทำให้เกิดฟลูอิดไดซ์เซชันได้แล้ว เพราะฉะนั้นความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดซ์เซชันเมื่อ  $Re_p < 20$  สามารถคำนวณได้จาก

$$U_{mf} = \frac{(\phi_s d_p)^2 (\rho_s - \rho_g) g \epsilon_{mf}^3}{150 \mu (1 - \epsilon_{mf})} \quad (3.26)$$

สำหรับอนุภาคของแข็งขนาดใหญ่ต้องใช้ความเร็วของไหลสูงมาก ๆ จึงทำให้อนุภาคของแข็งลอยเป็นอิสระได้ ดังนั้นความเร็วต่ำสุดของของไหลที่จะทำให้เกิดฟลูอิดไดซ์เซชันเมื่อ  $Re_p > 1000$  สามารถคำนวณได้จากสมการ

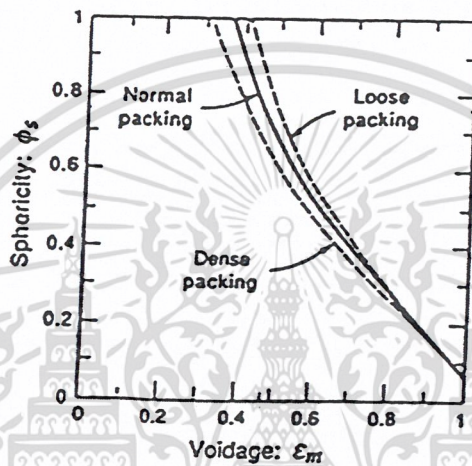
$$U_{mf} = \sqrt{\frac{\phi_s d_p (\rho_s - \rho_g) g \epsilon_{mf}^3}{1.75 \rho_g}} \quad (3.27)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าความกลมของอนุภาค ( $\phi_s$ ) ไซบ่งบอกถึงรูปร่างว่าอนุภาคเบี่ยงเบนจากทรงกลมมากน้อยเพียงใด นิยามว่า

$$\phi_s = \frac{\text{พื้นที่ผิวของทรงกลม}}{\text{พื้นที่ผิวของอนุภาค}} \quad \text{เมื่อปริมาตรเท่ากัน} \quad (3.28)$$

จากรูปที่ 3.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความกลมและความพรุนของเบด จะเห็นได้ว่าเมื่อความกลมของอนุภาคลดลง ค่าความพรุนจะเพิ่มขึ้น



รูปที่ 3.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความกลมและความพรุนของเบด

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

$$\frac{1}{\phi_s \epsilon_{mf}^3} = 14 \quad (3.29)$$

$$\frac{(1 - \epsilon_{mf})}{\phi_s^2 \epsilon_{mf}^3} = 11 \quad (3.30)$$

แทนค่าสมการที่ 3.30 ลงในสมการที่ 3.25 แล้วค่า  $U_{mf}$  จะได้

$$U_{mf} = \frac{\mu}{d_p \rho_g} \sqrt{\left\{ (33.7)^2 + \frac{0.0408 d_p^3 \rho_g (\rho_s - \rho_g) g}{\mu^2} \right\}} - 33.7 \quad (3.31)$$

สมการที่ 3.31 นี้ มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน 34% ในช่วง  $0.001 < Re_p < 4000$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเร็วเริ่มหลุดลอยหรือความเร็วตกอิสระของอนุภาคของแข็งเป็นความเร็วของของไหลที่ไหลผ่านฟลูอิดไดซ์เบดถูกจำกัดด้วยความเร็วต่ำสุด ความเร็วเริ่มหลุดลอยแสดงได้ดังสมการ

$$U_T = \left[ \frac{4d_p(\rho_s - \rho_g)}{3\rho_g C_d} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3.32)$$

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

$$C_d = \frac{24}{Re_p} \quad \text{เมื่อ} \quad Re_p < 0.4 \quad (3.33)$$

$$C_d = \frac{10}{\sqrt{Re_p}} \quad \text{เมื่อ} \quad 0.4 < Re_p < 500 \quad (3.34)$$

$$C_d = 0.43 \quad \text{เมื่อ} \quad 500 < Re_p < 200000 \quad \text{หรือ} \quad 1000 < Re_p \quad (3.35)$$

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

$$U_t = \frac{g(\rho_s - \rho_g)d_p^2}{18\mu} \quad \text{เมื่อ} \quad Re_p < 0.4 \quad (3.36)$$

$$U_t = d_p \left[ \frac{4(\rho_s - \rho_g)^2 g^2}{225\rho_g\mu} \right]^{\frac{1}{3}} \quad \text{เมื่อ} \quad 0.4 < Re_p < 500 \quad (3.37)$$

$$U_t = \left[ \frac{3.1g(\rho_s - \rho_g)d_p}{\rho_g} \right]^{\frac{1}{2}} \quad \text{เมื่อ} \quad 500 < Re_p < 200000 \quad \text{หรือ} \quad 1000 < Re_p \quad (3.38)$$

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

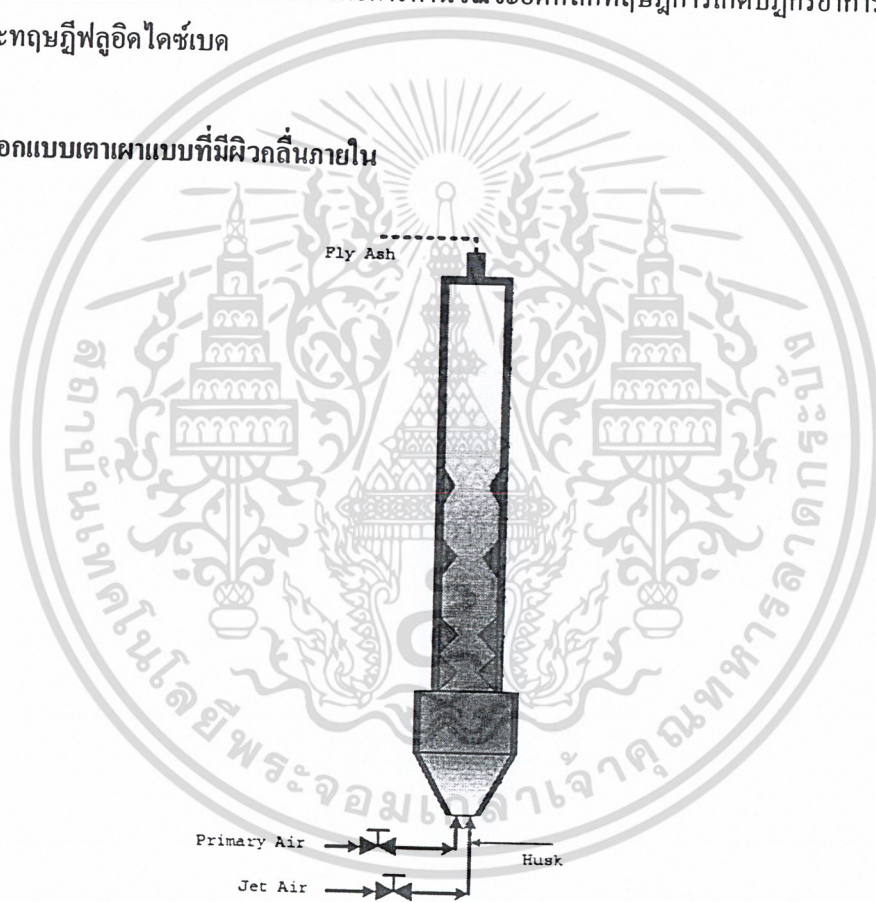
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### การออกแบบและการคำนวณ

เตาเผาแกลบที่สร้างขึ้นสำหรับการทดลองนี้ได้นำฟิวคัลลินมาใส่ในห้องเผาไหม้ เพื่อเพิ่มระยะเวลาของการเผาไหม้หรือหน่วงเวลาให้เกิดการเผาไหม้ที่นานที่สุดเนื่องจากการออกแบบผู้ออกแบบได้คำนึงถึงขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางที่เหมาะสมกับความสูง โดยต้องไม่มีขนาดใหญ่เกินไปและไม่สูงเกินไป ดังนั้นจึงจำเป็นต้องอาศัยการเพิ่มฟิวคัลลินเว้นช่วงช่วยในการออกแบบ ในในบทนี้จะกล่าวถึงหัวข้อสำคัญ 2 หัวข้อ คือ การออกแบบและการคำนวณ โดยการคำนวณจะยึดหลักทฤษฎีการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ของสสารและทฤษฎีฟลูอิดไดซ์เบด

#### 4.1 การออกแบบเตาเผาแบบที่มีฟิวคัลลินภายใน



รูปที่ 4.1 แสดงถึงลักษณะและรูปร่างของเตาเผาแกลบ

โดยส่วนประกอบของเตาที่ออกแบบขึ้นจะมีส่วนประกอบที่สำคัญ 3 ส่วนสำคัญดังนี้

1. ชุดห้องผสม ซึ่งมี 2 ส่วน ส่วนแรกมีลักษณะเป็นทรงกระบอกมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 300 มิลลิเมตร มีความสูง 300 มิลลิเมตร ส่วนล่างมีลักษณะเป็นทรงกรวย มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 300 และ 120 มิลลิเมตร ทำด้วยสแตนเลสส่วนผนังห้องผสมหล่อด้วยคอนกรีตหนา 100 มิลลิเมตรมีช่องใส่เทอร์โมคัปเปิลขนาด 20 มิลลิเมตร จำนวน 3 ตัว และมีช่องสำหรับใส่หัวเผาขนาด 5.08 เซนติเมตรอยู่บริเวณส่วนล่างของห้องผสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ห้องเผาไหม้ มีลักษณะเป็นทรงกระบอก 2 ท่อนประกบกันด้วยหน้าแปลน ภายในเป็นท่อ แสตนเลสขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 150 มิลลิเมตรและหล่อคอนกรีตหนา 100 มิลลิเมตร เนื่องจากแสตนเลสสามารถทนความร้อนได้สูง เพื่อเป็นฉนวนกันความร้อนและครอบทับด้วยท่อเหล็กขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 200 มิลลิเมตร เมื่อประกอบกันแล้วจะมีความสูง 1,500 มิลลิเมตร โดยจะทำการเจาะรูที่ด้านข้างของห้องเผาไหม้ขนาด 8 มิลลิเมตร เพื่อที่จะติดตั้งเทอร์โมคัปเบิลขนาด 8 มิลลิเมตรจำนวน 14 จุดตามแนวความสูงเพื่อทำการวัดการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเตาส่วนผิวกลืนเป็นชุดกรวย ซึ่งชุดล่างมีขนาด 0.5 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลาง จำนวน 1 ชั้น ทำด้วยเหล็กเชื่อมติดกับห้องเผาไหม้เดิม อีก 1 ชุดประกอบขึ้นใหม่มีหน้าแปลนเพื่อยึดติดกับห้องเผาไหม้เดิมส่วนกรวยตรงกลางและด้านบนมีขนาด 0.6 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลาง ทำด้วยเหล็กแล้วเชื่อมติดกับห้องเผาไหม้เดิม

3. ฝาครอบเตาและท่อทิ้งเถ้าลอย มีลักษณะเป็นเป็นทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 150 มิลลิเมตรหน้ามีความหนา 75 มิลลิเมตร ภายในหล่อด้วยคอนกรีตทนไฟและมีหน้าแปลนเหล็กเพื่อประกอบกับส่วนที่เป็นห้องเผาไหม้ ในส่วนของท่อทิ้งเถ้าลอยจะทำการเชื่อมติดกับกับส่วนที่เป็นฝาครอบเตา ความร้อนที่ร้อนและเถ้าจะลอยออกไปยังถังดักฝุ่นต่อไป

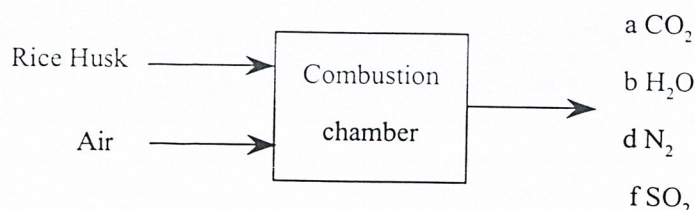
#### 4.2 การคำนวณปริมาณอากาศที่ต้องการในการเผาไหม้ทางทฤษฎี

ในการคำนวณหาปริมาณอากาศที่ต้องการทางทฤษฎีนั้นจำเป็นต้องรู้ถึงองค์ประกอบทางเคมีของเชื้อเพลิงแกลบ แล้วจึงนำไปทำการสมดุลสมการการเผาไหม้ทางปฏิกิริยาเคมีเพื่อนำไปหาอัตราส่วนของเชื้อเพลิงและอากาศที่เหมาะสมต่อการเผาไหม้ทางทฤษฎี

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบของเชื้อเพลิงแกลบ

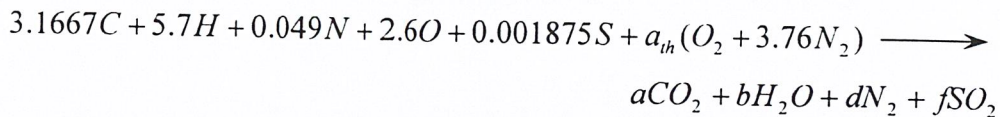
องค์ประกอบ	เปอร์เซ็นต์	น้ำหนักโมเลกุล	จำนวน โมล
คาร์บอน	38.0	12	3.1667
ไฮโดรเจน	5.7	1	5.7
ไนโตรเจน	0.69	14	0.049
ออกซิเจน	41.6	16	2.6
ซัลเฟอร์	0.06	32	0.001875
เถ้า	19.8	-	-

#### การสมดุลปฏิกิริยาเคมี



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

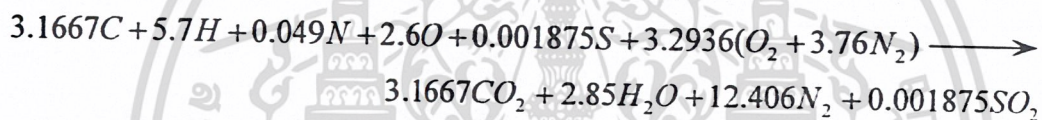
สามารถเขียนเป็นปฏิกิริยาเคมีได้ดังนี้



ทำการสมดุลสมการจะได้

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

ทำการแทนค่าลงในสมการจะได้สมการการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงแกลบ



จำนวนโมลของอากาศแห้งมีค่าเท่ากับ

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

เนื่องจากการสมดุลสมการใช้กับอากาศแห้ง แต่ในการทดลองไม่สามารถทำให้เป็นอากาศแห้งได้ เพราะฉะนั้นจะต้องทำการคิดปริมาณความชื้นในอากาศเข้าไปในสมการการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงด้วย โดยกำหนดสภาวะของอากาศดังนี้

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

ความชื้นสัมพัทธ์ (Relative Humidity, RH) เท่ากับ 53%

เพราะฉะนั้นทำการหาค่าความดันย่อยในอากาศที่สภาวะนี้ได้เท่ากับ เปิดค่าจากตาราง จะได้

$$\begin{aligned} P_{sat, H_2O @ 33^\circ\text{C}} &= 5.0752 \text{ kPa} \\ \therefore P_{v, air} = \Phi_{air} P_{sat, H_2O} &= 0.53 \times 5.0752 = 2.690 \text{ kPa} \end{aligned}$$

จำนวนโมลของละอองน้ำในอากาศจากสมการ

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

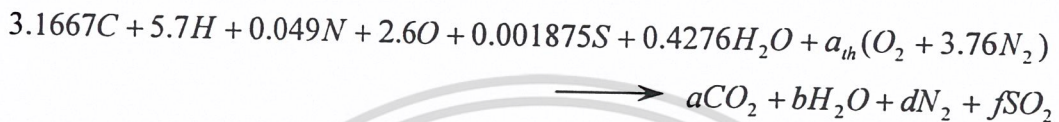
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

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

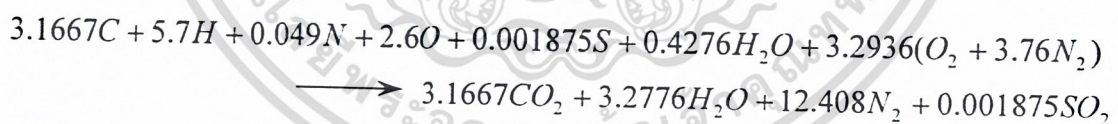
เพราะฉะนั้นทำการสมดุลสมการการเผาไหม้สำหรับอากาศชื้นใหม่จะได้ดังนี้



ทำการสมดุลสมการจะได้

$$\begin{array}{l} C : \quad 3.1667 \qquad \qquad \qquad = a \qquad \qquad \qquad \longrightarrow \qquad a = 3.1667 \\ H : \quad 5.7 + (0.4276 \times 2) \qquad = 2b \qquad \qquad \qquad \longrightarrow \qquad b = 3.2776 \\ S : \quad 0.001875 \qquad \qquad \qquad = f \qquad \qquad \qquad \longrightarrow \qquad f = 0.001875 \\ O : \quad 2.6 + 0.4276 + (a_{th} \times 2) \qquad = 2a + b + 2f \qquad \longrightarrow \qquad a_{th} = 3.2936 \\ N : \quad 0.049 + (a_{th} \times 3.76 \times 2) \qquad = 2d \qquad \qquad \qquad \longrightarrow \qquad d = 12.408 \end{array}$$

นำค่าตัวแปรที่ทำการคำนวณได้แทนค่ากลับในสมการจะได้สมการเผาไหม้ของอากาศชื้นกับเชื้อเพลิงแกลบที่อัตราการเผาไหม้พอ คือ



จากนั้นทำการหาอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง จากสมการ

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

มวลของอากาศเท่ากับ

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มวลของเชื้อเพลิงเท่ากับ

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

ดังนั้น

$$\begin{aligned}
 \left(\frac{A}{F}\right)_{ratio} &= \frac{461.875 \text{ kg}}{86.046 \text{ kg}} \\
 &= 5.368
 \end{aligned}$$

จากสมการอัตราส่วนสมมูล

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

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

#### 4.3 การกำหนดขนาดของเตาเผาโดยใช้ทฤษฎีฟลูอิดไดรซ์เบด

จากการทดลองปริมาตรของ n-heane ก่อนผสม = 55 ml.

ปริมาตรและช่องว่าง = 20.5 ml.

ปริมาตรหลังผสม = 58 ml.

$$\text{สัดส่วนของช่องว่างของเบด } \varepsilon_m = \frac{55 + 20.5 + 58}{20.5}$$

จากกราฟของ kunii และ Levenspiel เส้น nomal packing ที่  $\varepsilon_m = 0.85$  จะได้  $\phi_s = 0.2$

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

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเทียบเท่าของแกลบ  $d_R = 0.214 \text{ cm}$

แรงโน้มถ่วงโลก  $g = 980.665 \text{ g/cm.s}$

คุณสมบัติของอากาศที่อุณหภูมิ 35 °C

$$\rho_{air@35^\circ C} = 1.2 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^3$$

$$\mu_{air@35^\circ C} = 1.884 \times 10^{-4} \text{ g/cm.s}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$K_1 = \frac{1.75}{\varepsilon_{mf}^3 \phi_s} \quad (4.1)$$

$$K_2 = \frac{150(1 - \varepsilon_{mf})}{\varepsilon_{mf}^3 \phi_s^2} \quad (4.2)$$

เนื่องจากไม่ทราบค่า  $K_1$  ดังนั้น จากตารางที่ 4 Wen&Yu(1966)

$$\frac{1}{K_1} = 0.408$$

ดังนั้นจะได้

$$K_1 = 24.5098$$

แทนค่าลงในสมการที่ (4.1) จะได้

$$\begin{aligned} \varepsilon_{mf}^3 &= \frac{1.75}{24.5098 \times 0.2} \\ &= 0.357 \\ \varepsilon_{mf} &= 0.7 \end{aligned}$$

นำค่า  $\varepsilon_{mf} = 0.7$  แทนลงในสมการ (4.2) จะได้

$$K_2 = \frac{150 \times (1 - 0.71)}{(0.71)^3 \times (0.2)^2}$$

$$A_R = \frac{d_R^3 \rho_a (\rho_R - \rho_a) g}{\mu_a^2} \quad (4.3)$$

$$A_R = \frac{(0.214)^3 (0.0012)(0.8473 - 0.0012)(980.665)}{(0.00018)^2} = 301,175 \text{ cm}^2$$

สมการที่ใช้ในการคำนวณหาความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไลซ์เบด

$$K_1 \frac{(d_R U_{mf} \rho_a)^2}{\mu_a^2} + K_2 \frac{d_R U_{mf} \rho_a}{\mu_a} = A_R \quad (4.4)$$

แทนค่า  $K_1, K_2$  ที่ได้ลงในสมการ (4.4) จะได้

$$49.887U_{mf}^2 + 4,334.8765U_{mf} = 301,175.7$$

ดังนั้นจะได้

$$U_{mf} = 45.574 \text{ cm/s}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่อุณหภูมิ 950 °C

$$\rho_{a@950^{\circ}C} = 0.2892 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^3$$

$$\mu_{a@950^{\circ}C} = 4.7456 \times 10^{-4} \text{ g/cm.s}$$

แทนค่าลงในสมการ (4.3) จะได้

$$A_R = 10,453.6 \text{ cm}^2$$

แทนค่าต่างๆลงในสมการที่ 4

$$0.4168U_{mf}^2 + 396.254U_{mf} = 10,453.626$$

$$U_{mf} = 25.687 \text{ cm/s}$$

การคำนวณหาความเร็วสุดท้ายของฟลูอิดไดซ์  $U_t$

ค่าความกลม,  $\phi_s = 0.24$

ขนาดเฉลี่ยของเกล็ด,  $d_R = 0.214 \text{ cm}$

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

ตรวจสอบค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์

$$R_e = \frac{\rho_a U_{mf} d_R}{\mu_a} \quad (4.5)$$

$$U_t = \frac{g(\rho_R - \rho_a)^2 d_R^2}{18\mu_a}, R_e \leq 0.4 \quad (4.6)$$

$$U_t = d_R \left| \frac{4(\rho_R - \rho_a)^2 g^2}{255\rho_a\mu_a} \right|, 0.4 \leq R_e \leq 500 \quad (4.7)$$

แทนค่าต่างๆลงในสมการ (4.5) จะได้ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์

$$R_e = 66.4$$

ดังนั้นเลือกใช้สมการที่ (4.7) จะได้

$$U_t = 821.9586 \text{ cm/s}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคำนวณอัตราการไหลของอากาศที่ทางเข้าและทางออกเตาเผา

อัตราการไหลของอากาศที่ทางเข้า,  $Q_1$  (ที่สมมุติอุณหภูมิที่ทางเข้า  $35^\circ\text{C}$ )

อัตราการป้อน ปริมาณแกลบ,  $m_R = 6 \text{ kg/hr}$

อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง,  $(A/F)_{stoich} = 16.104$

$$Q_1 = \frac{m_R (A/F)_{stoich}}{\rho_a} \quad (4.8)$$

นำค่าต่างๆแทนในสมการ (4.8) จะได้

$$Q_1 = 80.52 \text{ m}^3/\text{hr}$$

อัตราการไหลของอากาศที่ทางออก,  $Q_2$  ( สมมุติอุณหภูมิที่ทางออก  $950^\circ\text{C}$  )

จากกฎของก๊าซ ที่ปริมาตรคงที่

$$\frac{Q_1}{T_1} = \frac{Q_2}{T_2} \quad (4.9)$$

นำค่าที่ได้แทนในสมการ (4.9) จะได้

$$Q_2 = 319.727 \text{ m}^3/\text{hr}$$

การคำนวณหาพื้นที่หน้าตัดที่เหมาะสมของเตาเผา

$$A = \frac{Q}{U_f} \quad (4.10)$$

ให้ปริมาณอากาศที่เหมาะสมมีค่า

$$U_f = 4.5U_{mf} \quad (4.11)$$

ที่อุณหภูมิ  $35^\circ\text{C}$

จากสมการ(4.11)จะได้

$$U_f = 2.05083 \text{ m/s}$$

จากสมการ(4.10)จะได้

$$A_1 = 0.010906 \text{ m}^2$$

ดังนั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$D_1 = 0.1178 \text{ m.}$$

$$= 11.78 \text{ cm.}$$

ที่อุณหภูมิ 950°C

จากสมการ(4.11)จะได้

$$U_f = 1.155915 \text{ m/s}$$

จากสมการ(4.10)จะได้

$$A_2 = 0.074 \text{ m}^2$$

ดังนั้น

$$D_2 = 0.30697 \text{ m.}$$

$$= 30.697 \text{ cm.}$$

พื้นที่หน้าตัดที่เหมาะสม

$$D_a = \frac{(D_1 + D_2)}{2}$$

$$= 0.212385 \text{ m.}$$

$$= 21.24 \text{ cm.}$$

การคำนวณความสูงของเตา

กำหนดให้

ความสูงของเบคหนึ่ง,

$$L_m = 0.2 \text{ m.}$$

สัดส่วนช่องว่างของเบคหนึ่ง,

$$\varepsilon_m = 0.85$$

$$\varepsilon_{mf} = 0.6676$$

จากสมการ

$$\frac{L_{mf}}{L} = \frac{1 - \varepsilon_m}{1 - \varepsilon_{mf}} \quad (4.12)$$

$$L_{mf} = 0.206897 \text{ m.}$$

( ที่อุณหภูมิ 35°C )

$$\rho_v = 1.2 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^3 = 0.0756 \text{ lb/ft}^3$$

$$\rho_R = 0.8473 \text{ g/cm}^3 = 53.38 \text{ lb/ft}^3$$

$$U_{mf} = 45.5265 \text{ cm/s} = 1.49363 \text{ ft/s}$$

$$d_R = 0.214 \text{ cm} = 0.007 \text{ ft}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความสัมพันธ์ระหว่าง  $L_{mf}$  กับ  $L_f$  จาก Kunii และ Levenspile

$$\frac{L_f}{L_{mf}} = \frac{10.978(U_f - U_{mf})^{0.738} d_R^{1.006} \rho_R^{0.376}}{U_{mf}^{0.137} \rho_a^{0.126}} \quad (4.13)$$

$$= 1.3112$$

จะได้

$$L_{f1} = 1.3112 \times 0.206897$$

$$= 0.271283 \text{ m.}$$

( ที่อุณหภูมิ 950°C )

$$\rho_a = 0.2892 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^3 = 0.0182196 \text{ lb/ft}^3$$

$$U_{mf} = 26.7656 \text{ cm/s} = 0.8781258 \text{ ft/s}$$

$$\rho_R = 0.8473 \text{ g/cm}^3 = 53.38 \text{ lb/ft}^3$$

จากสมการ (4.12) จะได้

$$\frac{L_f}{L_{mf}} = 1.27056$$

$$L_{f2} = 1.27056 \times 0.206897$$

$$= 0.262875 \text{ m}$$

ดังนั้นความสูงเหนือความสูงหลุคลอยเฉลี่ยเฉลี่ย

$$L_e = \frac{(L_{f1} + L_{f2})}{2}$$

$$= 0.267079 \text{ m.}$$

ความสูงของการหลุคลอย

$$L_f = L_m + L_e$$

$$= 0.4 + 0.267.79$$

$$= 0.667079$$

คำนวณความสูงหลุคลอยส่งผ่าน , TDH

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned} \text{TDH} &> 4.5 L_a \\ &> 4.5(0.267079) \\ &> 1.20186 \end{aligned}$$

ความสูงทั้งหมดของเตาเผา ( Total Combustion Height , TCH )

$$\begin{aligned} \text{TCH} &> \text{TDH} + L_a \\ &> 1.20186 + 0.267079 \\ &> 1.467 \quad \text{m.} \end{aligned}$$

ในการออกแบบจึงให้ความสูงทั้งหมดของเตา 1.5 m และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.15 m



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

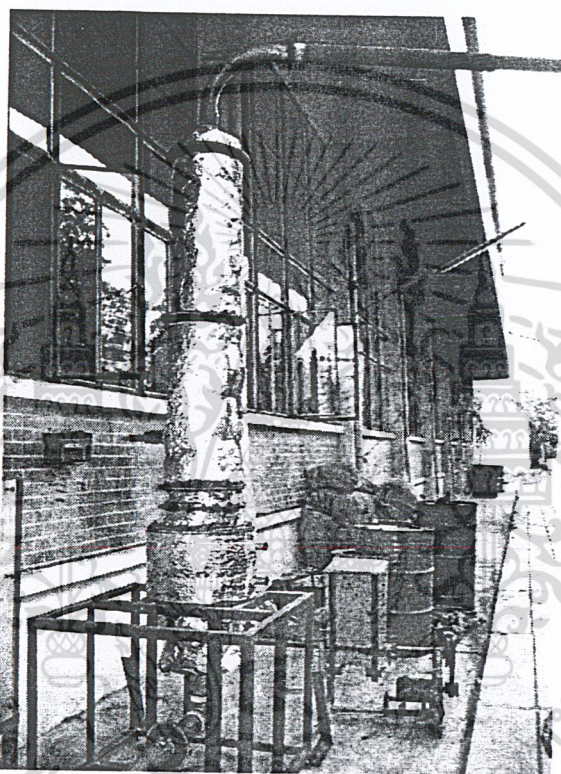
## บทที่ 5

### การดำเนินงานวิจัยและการทดลอง

#### 5.1 อุปกรณ์ในการทดลอง

อุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างเตาเผาแลกเปลี่ยนเป็นส่วนต่างๆ ได้ดังนี้

##### 5.1.1 เตาเผาแลกเปลี่ยนแบบที่มีผิวคลื่น

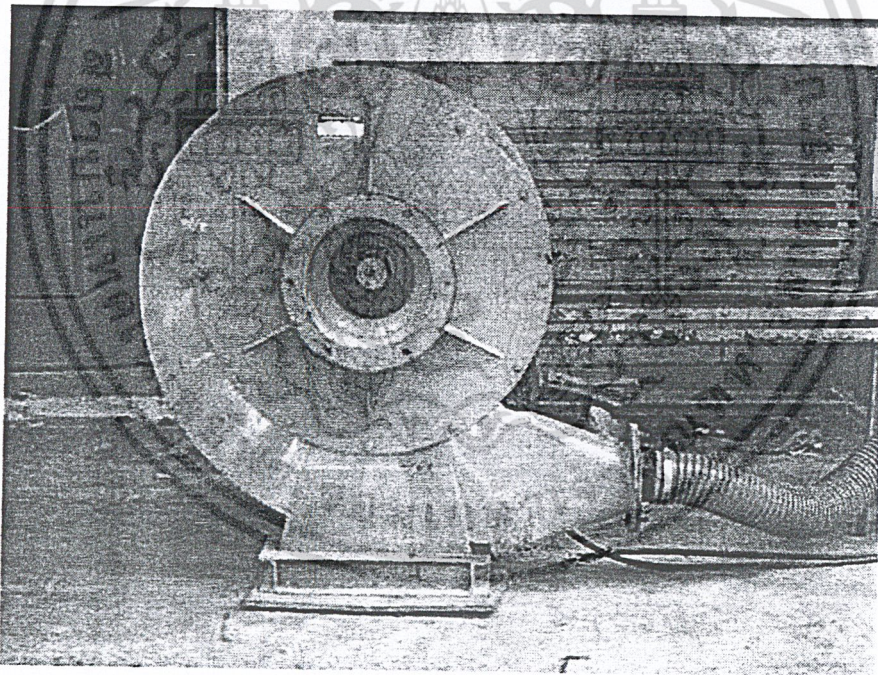


รูปที่ 5.1 เตาเผาแลกเปลี่ยนแบบที่มีผิวคลื่น

เตาเผาแลกเปลี่ยนแบบที่มีผิวคลื่นที่ใช้ในการทดลองมีลักษณะเป็นทรงกระบอกโดยแสดงไว้ในรูป 5.1 โดยมีส่วนประกอบที่สำคัญอยู่ 3 ส่วน โดยมี ชุดผสมอากาศกับเชื้อเพลิงแลกเปลี่ยน ซึ่งมีลักษณะเป็นทรงกระบอก 1 ท่อน และทรงกรวย 1 ท่อน ประกบกันด้วยหน้าแปลน ภายในเป็นเป็นท่อแสดงเลขขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 300 มิลลิเมตรโดยจะติดตั้งอยู่ทางด้านล่างของเตา โดยมีห้องเผาไหม้ มีลักษณะเป็นทรงกระบอก 4 ท่อนประกบกันด้วยหน้าแปลน ภายในเป็นท่อ แสดงเลขขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 150 มิลลิเมตรและหล่อคอนกรีตหนา 100 มิลลิเมตร และมีการเพิ่มชุดกรวยเข้าไปในห้องเผาไหม้ จำนวน 4 ชุด ซึ่งกรวย 1 ชุด มีกรวย 2 ตัวประกบกัน โดยใช้ด้านที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางที่น้อยที่สุดประกบกัน ด้วยการเชื่อม ชุดกรวยที่ใช้ในการทดลองมี 2 ขนาดดังนี้ ชุดกรวย 2 ชุดล่างมีขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลางกรวย 1,500 และ 750 มิลลิเมตร ชุดกรวย 2 ชุดบนมีขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลางกรวย 1,500 และ 900 มิลลิเมตร เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มิลลิเมตร ชุดกรวยมีความสูง 1,500 มิลลิเมตร เนื่องจากแอสแตนเลสสามารถทนความร้อนได้สูง เพื่อเป็นฉนวนกันความร้อนเพื่อไม่ให้มีความร้อนสูญเสียออกสู่สภาพแวดล้อมและครอบทับด้วยท่อเหล็กขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 200 มิลลิเมตร เมื่อประกอบกันแล้วจะมีความสูง 1,500 มิลลิเมตร โดยจะทำการเจาะรูที่ด้านข้างของห้องเผาไหม้ขนาด 8 มิลลิเมตร เพื่อที่จะติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลขนาด 8 มิลลิเมตรจำนวน 11 จุดตามแนวความสูงและเทอร์โมคัปเปิลขนาด 20 มิลลิเมตร จำนวน 3 ตัวที่ด้านข้างของผนังห้องผสม 1 ตัวที่ท่อทางออกด้านบนของห้องเผาไหม้ เพื่อทำการวัดการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเตาและส่วนบนสุดจะเป็นฝาครอบเตาและท่อทิ้งเถ้าลอย มีลักษณะเป็นเป็นทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 150 มิลลิเมตร หนาที่มีความหนา 75 มิลลิเมตร ภายในหล่อด้วยคอนกรีตทนไฟเพื่อรักษาอุณหภูมิภายในเตาไม่ให้มีความร้อนออกสู่สภาพแวดล้อมและมีหน้าแปลนเหล็กเพื่อประกอบกับส่วนที่เป็นห้องเผาไหม้ ในส่วนของท่อทิ้งเถ้าลอยจะทำการเชื่อมติดกับกับส่วนที่เป็นฝาครอบเตา ความร้อนที่ร้อนและเถ้าจะลอยออกไปยังถังดักฝุ่นต่อไป

### 5.1.2 ชุดป้อนอากาศให้กับระบบ

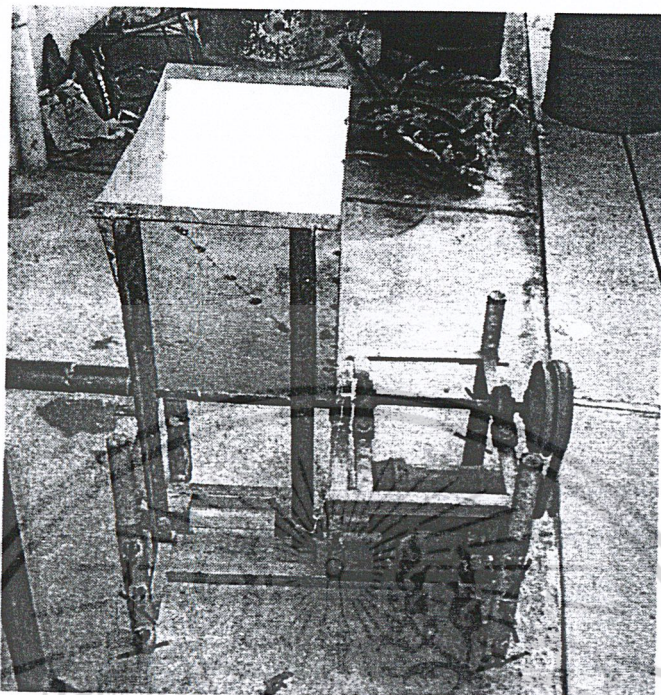


รูปที่ 5.2 ชุดป้อนอากาศให้กับระบบ

Blower ใช้มอเตอร์ขนาด 7 Hp เป็นแบบ Centrifugal สามารถป้อนอากาศให้มีอัตราการไหลสูงสุดเท่ากับ  $100 \text{ m}^3/\text{min}$  ความดันสูงสุดเท่ากับ  $200 \text{ mm.Aq}$  และความเร็วรอบเท่ากับ  $4,050 \text{ min}^{-1}$  ดังแสดงในรูปที่ 5.2

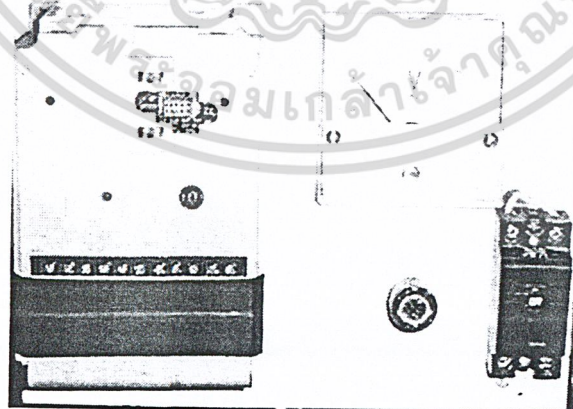
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.1.3 ระบบป้อนเชื้อเพลิง



รูปที่ 5.3 ระบบป้อนเชื้อเพลิงแกลบ

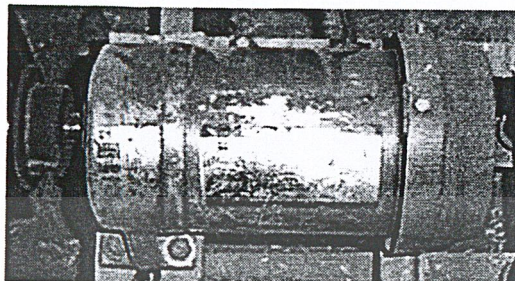
Hopper คืออุปกรณ์ที่ใช้สำหรับบรรจุเชื้อเพลิง ดังแสดงในรูปที่ 5.3 มีลักษณะเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยมสามารถบรรจุแกลบได้สูงสุดเท่ากับ  $0.05 \text{ m}^3$



รูปที่ 5.4 Inverter

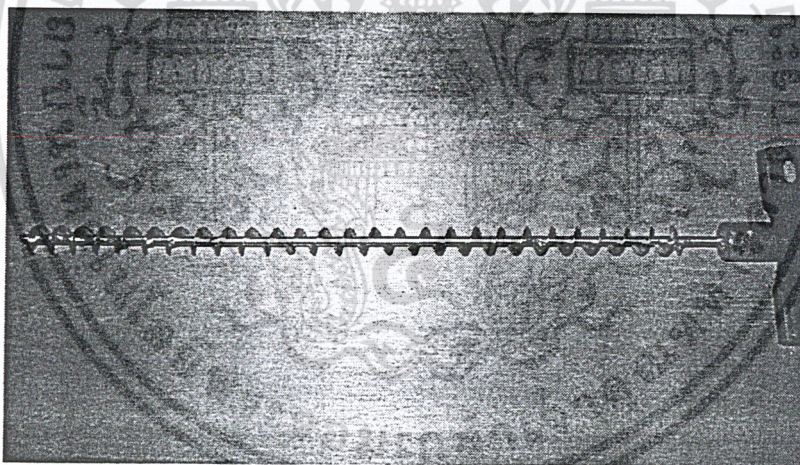
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Inverter คือ อุปกรณ์ที่นำมาใช้สำหรับควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ เพื่อปรับอัตราการไหลของเชื้อเพลิง มีกำลังขับ 0.22 KW 1.5A Model FR-A024-0.2 KP โดย Inverter สามารถปรับความเร็วรอบสูงสุดเท่ากับ 1,650 RPM ดังแสดงในรูปที่ 5.4



รูปที่ 5.5 Motor

Motor เป็นต้นกำลังในการขับ Screw Feed ดังแสดงในรูปที่ 5.5 โดยมีมอเตอร์ที่ใช้มีขนาดกำลังขับเท่ากับ 1/4 Hp

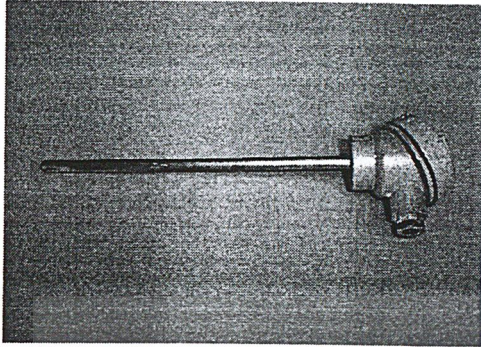


รูปที่ 5.6 Screw Feed

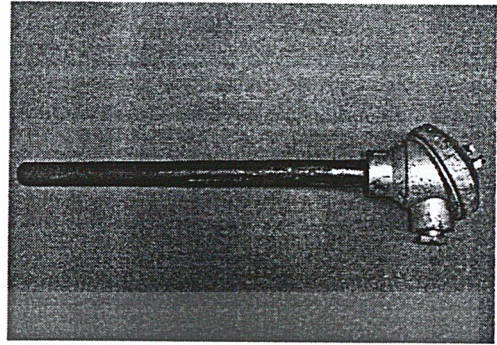
Screw Feed เป็นอุปกรณ์ลำเลียงเชื้อเพลิงเข้าสู่ท่ออากาศปฐมภูมิ Screw Feed สร้างขึ้นจากเหล็ก ดังแสดงในรูปที่ 5.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.1.4 เครื่องมือที่ใช้ในการวัดการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเตา



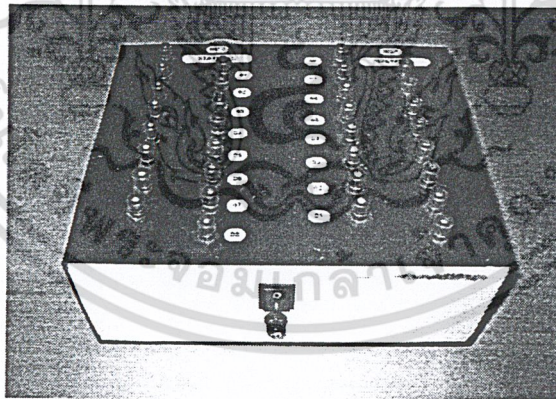
(ก)



(ข)

#### รูปที่ 5.7 เทอร์โมคัปเปิลชนิด K

เทอร์โมคัปเปิลชนิด K แสดงในรูปที่ 5.7 มีหน้าที่วัดอุณหภูมิภายในเตาเผา รูป (ก) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 มิลลิเมตร โดยจะทำการติดตั้งจำนวน 11 จุดตามแนวความสูงสามารถวัดอุณหภูมิได้ตั้งแต่ 0 - 1000 องศาเซลเซียส รูป (ข) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มิลลิเมตร โดยจะทำการติดตั้งจำนวน 3 จุดที่ด้านข้างของผนังห้องผสม 1 ตัวที่ท่อทางออกด้านบนของห้องเผาไหม้ สามารถวัดอุณหภูมิได้ตั้งแต่ 0 - 1200 องศาเซลเซียส



#### รูปที่ 5.8 Analog Input Module

จากรูปที่ 5.8 เป็นอุปกรณ์รับสัญญาณจากเทอร์โมคัปเปิลแล้วส่งสัญญาณเข้าไปที่คอมพิวเตอร์ เพื่อแสดงค่าอุณหภูมิเป็นตัวเลข สามารถใช้กับเทอร์โมคัปเปิลชนิด R, S, K, E, J, T, B

#### คุณสมบัติพิเศษ (FEATURES)

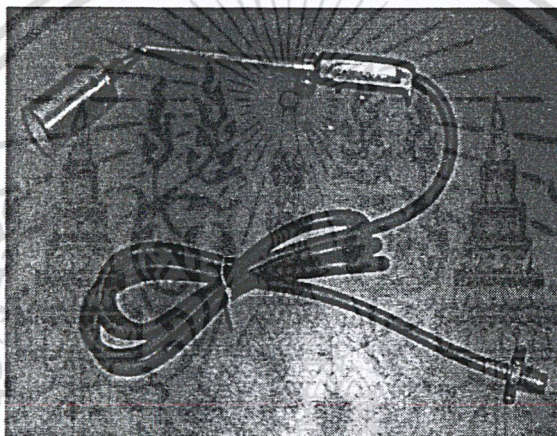
- 8 ช่อง Analog Input เลือกชนิดสัญญาณได้ (Programmable Analog Input) 13 ชนิด
- 1 ช่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- สัญญาณการสื่อสาร ตามมาตรฐาน RS 232/ RS 485
- แยกสัญญาณเข้า (Isolation) Analog ด้วย Relay, Digital ด้วย OPTOELECTRONICS
- ปรับอัตราเร็วในการรับ/ส่ง ข้อมูลอัตโนมัติ (Baud Rate Automatic Detection)

### 5.1.5 ชุดอุ่นเตาเผา

ชุดอุ่นเตาเผาเป็นระบบที่มีความสำคัญอีกระบบหนึ่งคือ ก่อนทำการทดลองเผาไหม้จะต้องทำการอุ่นเตาให้มีอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้สูงจนกระทั่งเชื้อเพลิงสามารถเผาไหม้ด้วยตัวเอง ระบบอุ่นเตาประกอบด้วย หัวเผา และ ถังเชื้อเพลิงก๊าซ LPG ซึ่งหัวเผามีขนาดเผาเท่ากับ 5.08 เซนติเมตร และสามารถปรับอัตราการไหลของเชื้อเพลิง LPG ดังแสดงในรูปที่ 5.9 และ 5.10 ประกอบด้วย ถังแก๊ส LPG ขนาด 15 kg และหัวเผา ขนาด 2 นิ้ว



รูปที่ 5.9 หัวเผา



รูปที่ 5.10 ถังเชื้อเพลิงก๊าซ LPG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.1.6 ระบบดักจับฝุ่นซีเมนต์

เป็นระบบดักจับฝุ่นซีเมนต์ที่เกิดขึ้นหลังจากการเผาไหม้ โดยใช้หลักการของ Cyclone ดังแสดงในรูปที่ 5.11 ประกอบด้วยท่อทางเข้าทรงกระบอก ส่วน Cyclone เป็นกรวย และก๊าซไอเสียจะถูกปล่อยออกทางด้านบนของไซโคลน และซีเมนต์จะถูกดักและปล่อยออกลงสู่ถังเก็บซีเมนต์ เพื่อช่วยลดปริมาณมลพิษทางอากาศที่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง



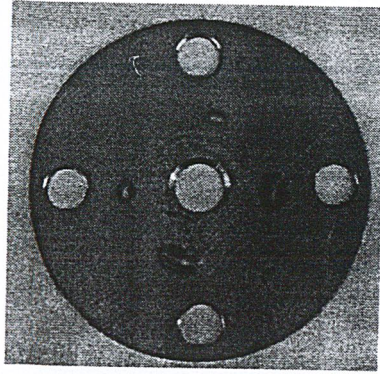
รูปที่ 5.11 Cyclone

### 5.1.7 ระบบวัดอัตราการไหลของอากาศ

การวัดอัตราการไหลของอากาศปฐมภูมิ และอากาศลำเลียงกลับใช้ ออร์ฟิส (Orifice) และค่าความดันตกคร่อมที่ผ่านออร์ฟิสสามารถอ่านค่าโดยใช้มาโนมิเตอร์ (Manometer) เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่าอัตราการไหล ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

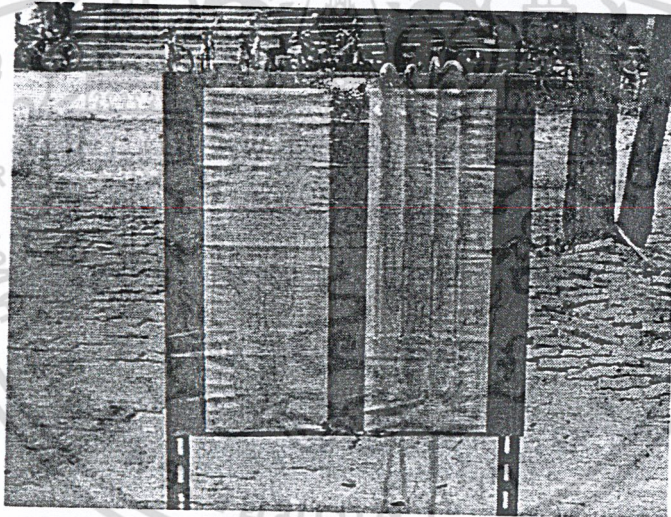
แผ่นออร์ฟิส (Orifice plate) แบ่งออกเป็น 2 ชุด คือ ออร์ฟิส 1 ใช้วัดอัตราการไหลของอากาศปฐมภูมิ และออร์ฟิส 2 ใช้วัดอัตราการไหลของอากาศลำเลียงกลับ ดังแสดงในรูปที่ 5.12 การสร้างออร์ฟิสมิเตอร์ใช้มาตรฐาน (ANSI/API 2530)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.12 แผ่นออริฟิส

มาโนมิเตอร์ (Manometer) ถูกแบ่งออกเป็น 2 ชุด โดยชุดแรกใช้วัดผลต่างของความดันอากาศปฐมภูมิ และชุดที่สอง ใช้วัดผลต่างของความดันอากาศลำเลียงแก๊ส ซึ่งใช้น้ำเป็นของเหลวภายในทั้งสองชุด ดังแสดงในรูปที่ 5.13

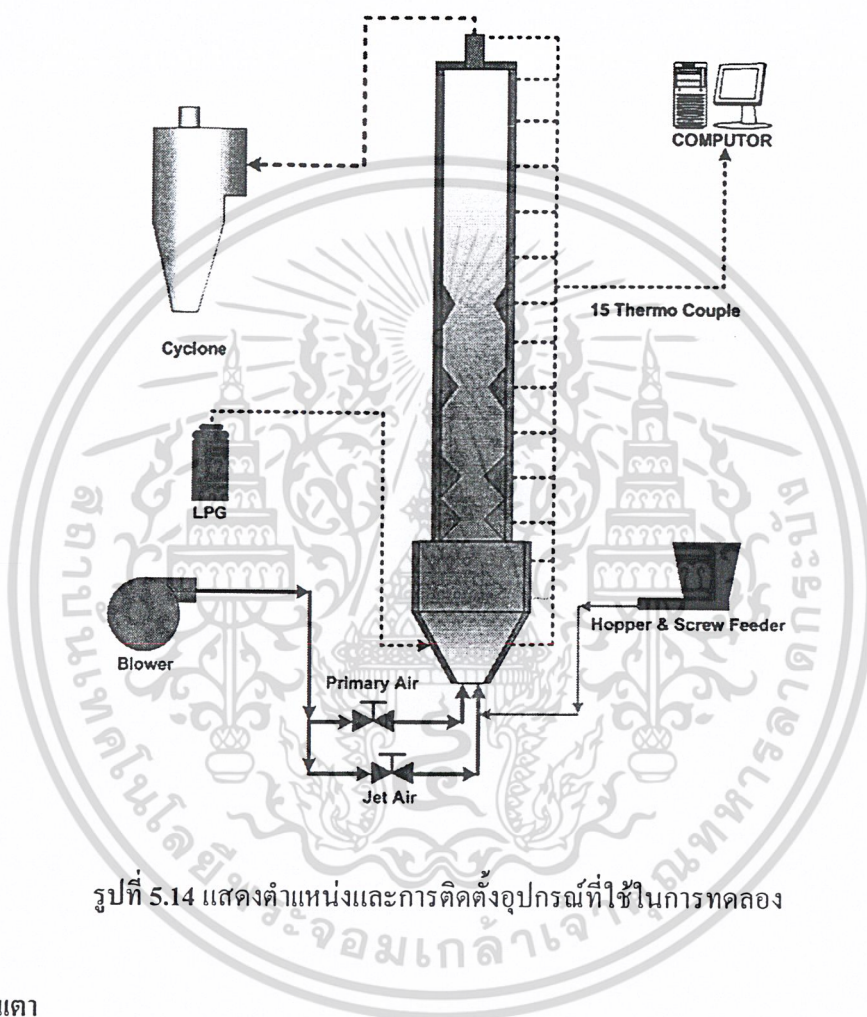


รูปที่ 5.13 มาโนมิเตอร์

## 5.2 ตำแหน่งและการติดตั้งของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

ตำแหน่งและการติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองจะแสดงไว้ในรูปที่ 5.14 ในแนวความสูงของเตาจะทำการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลจำนวน 14 จุดเพื่อวัดการกระจายตัวภายในเตา และอีก 1 จุดที่ทางออกส่วนบนสุดของเตาเพื่อทำการวัดอุณหภูมิไอเสียที่ท่อไอเสียโดยที่ไอเสียที่ออกมาจะนำไปผ่านถึง Cyclon เพื่อดักฝุ่นก่อนออกสู่สิ่งแวดล้อม โดยค่าที่ได้จะมาแสดงผลที่ Computer ผ่านทาง Analog Input Model เพื่อให้ทราบถึงการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเตา โดยอากาศที่ใช้จะถูกป้อนเข้าสู่ระบบโดย Blower โดยผ่านชุดแยกอากาศปฐมภูมิและอากาศลำเลียงแก๊ส โดยที่วาล์ว (Globe valve) และ ออริฟิส เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Orifice plate) จะถูกติดตั้งก่อนที่อากาศทั้ง 2 ส่วนจะถูกป้อนเข้าไปผสมกับเชื้อเพลิงและเผาไหม้ภายในเตา โดยที่อากาศทุติยภูมิหรืออากาศหลัก (Primary air) จะถูกป้อนเข้าสู่ทางด้านล่างของเตา ส่วนอากาศลำเลียงแกลบจะผ่าน Orifit เพื่อเพิ่มความเร็วดิ่งแกลบเข้ามาในท่อลำเลียงเข้าไปยังส่วนล่างของห้องผสมผสมกับอากาศปฐมภูมิในห้องผสม ระบบป้อนเชื้อเพลิงแกลบจะถูกควบคุมด้วยการปรับแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ Inverter ซึ่งต่ออยู่กับมอเตอร์ไฟฟ้าเพื่อลำเลียงเชื้อเพลิงแกลบเข้าสู่ระบบ



รูปที่ 5.14 แสดงตำแหน่งและการติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

### 5.3 การอุ่นเตา

ก่อนทำการทดลองต้องทำการอุ่นเตา เพื่อให้อุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้สูงขึ้นจนกระทั่งเชื้อเพลิงแกลบที่ป้อนเข้าไปสามารถเกิดการเผาไหม้ด้วยตัวเองได้ การอุ่นเตาใช้หัวเผาโดยมีแก๊ส LPG เป็นเชื้อเพลิง ขั้นตอนในการอุ่นเตาดังนี้ จุดไฟที่หัวเผาและทำการปรับวาล์วให้เปลวไฟที่หัวเผาเป็นสีน้ำเงิน หลังจากนั้นนำหัวเผาใส่เข้าตำแหน่งที่ใช้ในการอุ่นเตาบริเวณส่วนล่างของเตา จนกระทั่งอุณหภูมิภายในเตาสูงประมาณ  $400 - 500^{\circ}\text{C}$  จึงเริ่มป้อนแกลบให้มีอัตราการไหลต่ำๆ เพื่อให้แกลบเผาไหม้และช่วยเพิ่มอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้จนอุณหภูมิสูงประมาณ  $700 - 750^{\circ}\text{C}$  จึงหยุดป้อนเชื้อเพลิงแก๊สที่หัวเผา และนำหัวเผาออกจากห้องเผาไหม้ เนื่องจากอุณหภูมิสูงพอที่ทำให้เชื้อเพลิงแกลบสามารถเผาไหม้ด้วยตนเองอย่างต่อเนื่องแล้วจึงเริ่มทำการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 5.4 การทดลองและบันทึกผลการทดลอง

5.4.1 ทำการอุ่นเตาโดยใช้เชื้อเพลิงก๊าซแอลพีจีในเตาพร้อมกับป้อนอากาศปฐมภูมิเพียงเล็กน้อยอุณหภูมิในเตาเผามีค่าประมาณ  $450 - 500^{\circ}\text{C}$  จากนั้นทำการป้อนเชื้อเพลิงแกลบละเอียด น้อยจนกระทั่งอุณหภูมิภายในเตาประมาณ  $650 - 700^{\circ}\text{C}$  แล้วนำหัวเผาออกจากเตา

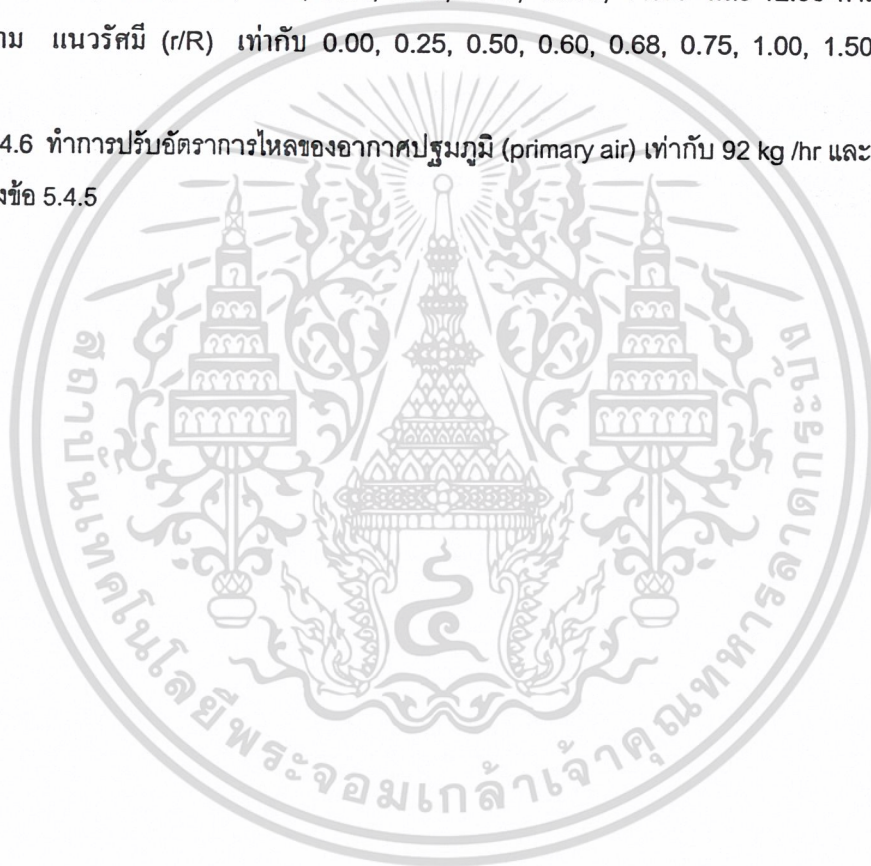
5.4.2 ปรับอัตราการไหลของอากาศปฐมภูมิ (primary air) เท่ากับ  $82 \text{ kg/hr}$

5.4.3 ปรับอัตราการไหลอากาศ (jet air) สำหรับใช้ในการลำเลียงแกลบเข้าสู่ห้องเผาไหม้

5.4.4 ปรับอัตราป้อนเป็น  $9.0, 10.5, 12.0, 13.5, 15.0$  และ  $16.5 \text{ kg/hr}$  ตามลำดับ

5.4.5 เมื่อการเผาไหม้มีความเสถียร ทำการบันทึกอุณหภูมิที่ตำแหน่งความสูง ( $x/D$ )  $0.47, 1.40, 2.33, 3.26, 4.19, 5.12, 6.05, 6.98, 7.91, 8.84, 9.77, 10.70, 11.63$  และ  $12.56$  ตามลำดับ และตำแหน่งตาม แนวรัศมี ( $r/R$ ) เท่ากับ  $0.00, 0.25, 0.50, 0.60, 0.68, 0.75, 1.00, 1.50$  และ  $1.875$  ตามลำดับ

5.4.6 ทำการปรับอัตราการไหลของอากาศปฐมภูมิ (primary air) เท่ากับ  $92 \text{ kg/hr}$  และทดลอง ข้อ 5.4.3 ถึงข้อ 5.4.5



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 6

### ผลการทดลองและวิจารณ์

#### 6.1 บทนำ

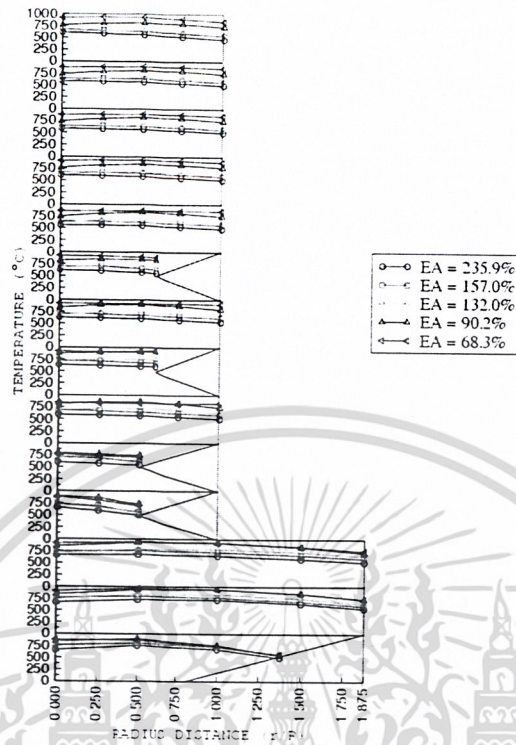
จากที่ได้ทำการทดลองที่ได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 5 ในการทดลองนี้มุ่งเน้นที่จะทำการศึกษาถึงผลของการกระจายอุณหภูมิภายในเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดแบบผิวคลื่น โดยการใส่ผิวคลื่นเข้าไปในห้องเผาไหม้เพื่อสร้างความปั่นป่วน (TURBULANCE) ของเชื้อเพลิงภายในและอัตราป้อนปริมาณแกลบที่มีผลต่อการเผาไหม้ โดยพิจารณาจาก การกระจายอุณหภูมิภายในเตาเผา เถ้าลอยที่ได้จากการเผาไหม้ โดยเงื่อนไขที่ใช้ในการทดลองกำหนด ดังนี้

1. อัตราการไหลอากาศที่ 82 kg/hr และ 92 kg/hr
3. อัตราป้อนปริมาณแกลบที่ 9.0, 10.5, 12.0, 13.5, 15.0 และ 16.5 kg/hr ตามลำดับ

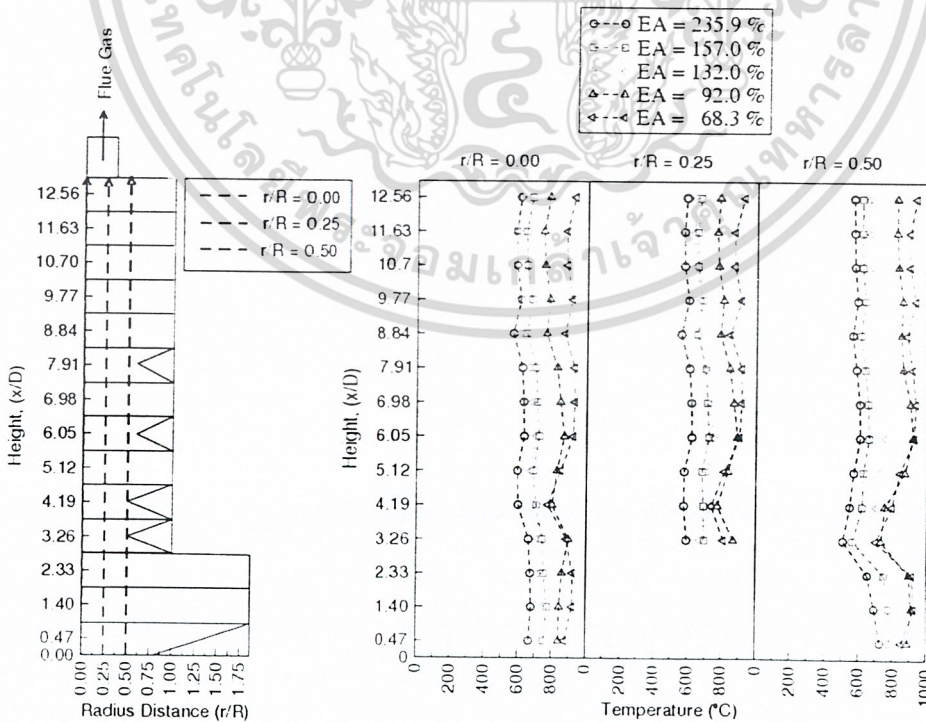
#### 6.2 อัตราการไหลอากาศที่ 82 kg/hr

เมื่อพิจารณารูปที่ 6.1 พบว่าการกระจายอุณหภูมิในแต่ละตำแหน่งตาม แนวรัศมีและแต่ละตำแหน่งความสูงนั้นค่อนข้างคงตัว และจะมีค่าเพิ่ม มากขึ้นเมื่อปริมาณอากาศส่วนเกินลดลง จนถึงค่าที่อากาศส่วนเกิน  $EA = 68.3\%$  นั้นแสดงให้เห็นว่ารูปร่างห้องเผาไหม้ที่เป็นผิวคลื่นเว้นช่วง ในการทดลองที่ปริมาณอากาศส่วนเกินลดลง(เนื่องจากการเพิ่มปริมาณเชื้อเพลิง)ช่วยให้การเผาไหม้ยังสมบูรณ์อยู่และอุณหภูมิสูงขึ้น แต่ก็ยังอยู่ในขอบเขตที่สามารถจะทำการทดลองได้โดยที่เชื้อเพลิงไม่หลุดลอยออกไปก่อนการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ การกระจายอุณหภูมิมียุคก่อนข้างสูงใกล้  $1,000^{\circ}\text{C}$  ทั้งยังมีความเสถียรภาพที่ดีและยังสามารถเพิ่มปริมาณเชื้อเพลิงให้มากขึ้นกว่าค่านี้ได้แต่จะทำให้อุณหภูมิเกิน  $1,000^{\circ}\text{C}$  ซึ่งอาจทำให้เกิด  $\text{NO}_x$  มากขึ้นและเกินขอบเขตที่กำหนดการทดลอง

เมื่อพิจารณารูปที่ 6.2 ซึ่งเป็นการแสดงการกระจายอุณหภูมิตามแนวความสูงของเตา การกระจายตัวของอุณหภูมิบริเวณกลางเตา ( $r/R=0$ ) มีลักษณะที่ค่อนข้างจะสม่ำเสมอ บริเวณผิวคลื่นที่ปริมาณอากาศส่วนเกินมีค่าน้อย อุณหภูมิมีค่าลดลงกว่าบริเวณอื่นเล็กน้อยนั้นอาจเป็นเพราะว่าบริเวณนี้อากาศมีความเร็วสูงกว่าบริเวณอื่น เชื้อเพลิงที่เข้ามามากขึ้นอาจเผาไหม้ไม่ทันส่งผลให้อุณหภูมิลดต่ำลง ส่วนบริเวณ  $r/R=0.5$  สังเกตเห็นได้ว่าบริเวณห้องผสมอุณหภูมิจะมีค่าสูงกว่าอุณหภูมิบริเวณผิวคลื่นในห้องเผาไหม้ช่วงแรกนั้นอาจเป็นเพราะบริเวณนี้อากาศมีความเร็วสูงกว่าบริเวณห้องผสม



รูปที่ 6.1 อัตราการไหลอากาศที่ 82 kg/hr แสดงการกระจายอุณหภูมิตามแนวรัศมีของเตา



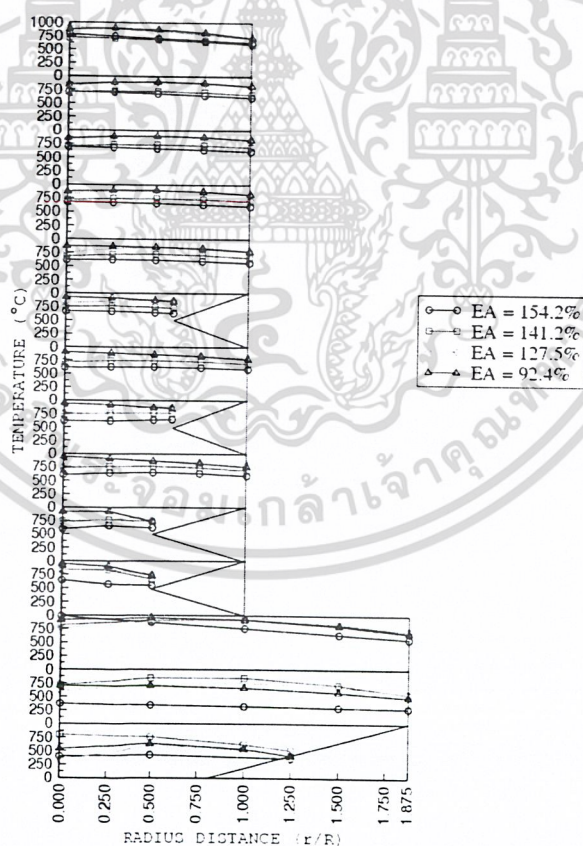
รูปที่ 6.2 อัตราการไหลอากาศที่ 82 kg/hr แสดงการกระจายอุณหภูมิตามแนวความสูงของเตา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 6.3 อัตราการไหลอากาศที่ 92 kg/hr

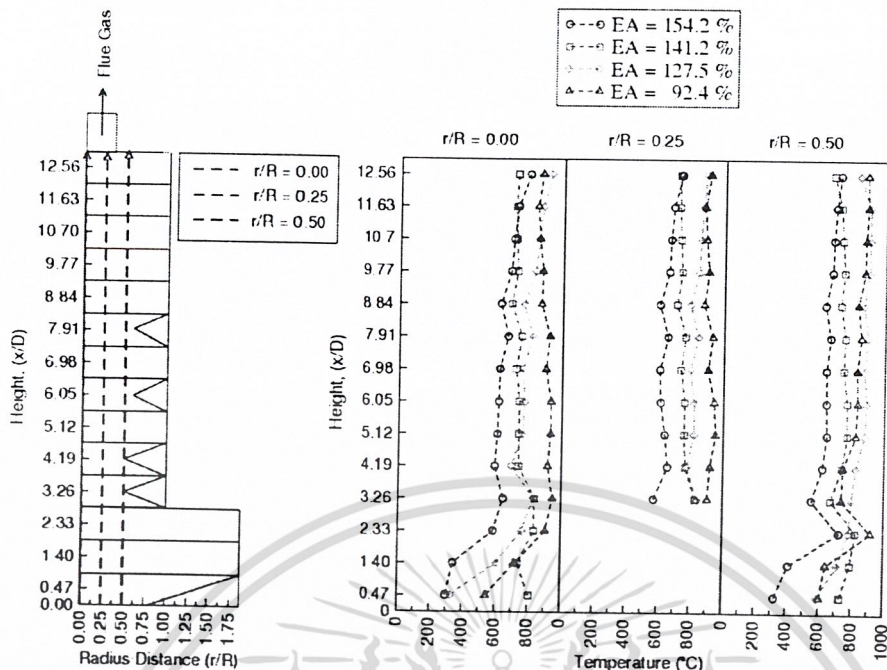
เมื่อพิจารณารูปที่ 6.3 พบว่าเมื่อทำการปรับเปลี่ยนปริมาณอากาศที่ใช้ในการทดลองมาเป็น 92 kg/hr ขอบเขตของการทดลองจะแคบลง ซึ่งมีทั้งการตัดอัตราการป้อนที่มีค่าน้อย(9,10.5 kg/hr)และเพิ่มอัตราการป้อนมากขึ้น(16.5 kg/hr) การกระจายอุณหภูมิในแต่ละตำแหน่งตามแนวรัศมีและแต่ละตำแหน่ง ความสูงจะมีการกระจายอุณหภูมิที่ราบเรียบพอสมควรแต่จะไม่ราบเรียบเหมือนกรณี 3(ก) ซึ่งอาจเป็นไปได้ว่าปริมาณอากาศที่เข้ามามากขึ้นที่พื้นที่หน้าตัดเท่าเดิมทำให้ความเร็วของอากาศมากขึ้น มีผลทำให้ความปั่นป่วนรุนแรงขึ้นการเผาไหม้จึงรุนแรง อุณหภูมิสูงขึ้นและไม่ราบเรียบ

เมื่อพิจารณารูปที่ 6.4 ซึ่งแสดงการกระจายอุณหภูมิตามแนวความสูงของเตา จะเห็นว่าอุณหภูมิจากห้องผสมบริเวณกลางเตา( $r/R=0$ )แต่ละช่วงปริมาณอากาศส่วนเกินมีค่าต่างกันพอสมควรเมื่อเทียบกับกรณีแรกแต่เริ่มมีค่าเข้าใกล้กันมากขึ้นเมื่อเข้าไปในห้องเผาไหม้ อุณหภูมิแต่ละช่วงการทดลองมีค่าสม่ำเสมอพอสมควร แต่ที่บริเวณ  $r/R=0.5$  อุณหภูมิในห้องผสมจะมีค่าสูงขึ้นก่อนเข้าห้องเผาไหม้และจะลดลงเมื่อผ่านผิวคลื่นนั้นอาจเป็นเพราะบริเวณนี้อากาศมีความเร็วสูงกว่าบริเวณห้องผสม



รูปที่ 6.3 อัตราการไหลอากาศที่ 92 kg/hr แสดงการกระจายอุณหภูมิตามแนวรัศมีของเตา

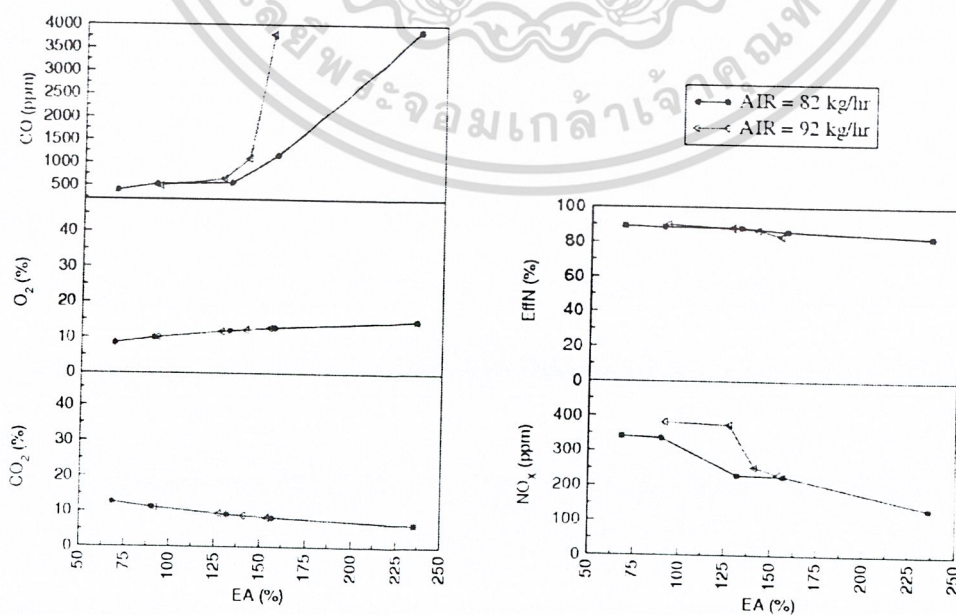
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.4 อัตราการไหลอากาศที่ 92 kg/hr แสดงการกระจายอุณหภูมิตามแนวความสูงของเตา

### 6.3 ผลของมลพิษและประสิทธิภาพการเผาไหม้

รูปที่ 6.5 การปล่อยก๊าซ CO<sub>2</sub> และ NO<sub>x</sub> นั้น จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อทำการลดปริมาณอากาศส่วนเกิน ที่ทั้งสองของอัตราการไหลของอากาศ ส่วนก๊าซ CO และ O<sub>2</sub> จะมีค่าลดลงเมื่อทำการลดปริมาณอากาศส่วนเกิน ที่ทั้งสองของอัตราการไหล สามารถอธิบายได้ซึ่งความเข้มข้นที่มากขึ้นและเริ่มเข้าใกล้ค่าที่เหมาะสมของเตาเผาถึงขณะนี้ สำหรับประสิทธิภาพที่วัดจากเครื่องมือวัดประสิทธิภาพ พบว่ามีค่าตั้งแต่ 80-90% และแนวโน้มเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เมื่อปริมาณอากาศส่วนเกินลดลงเข้าใกล้ค่าที่เหมาะสม



รูปที่ 6.5 ผลของมลพิษและประสิทธิภาพการเผาไหม้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 7

### สรุปและข้อเสนอแนะ

#### 7.1 สรุปผลการทดลอง

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นการทดลองและศึกษาการกระจายตัวของอุณหภูมิของเตาเผาฟลูอิดไคซ์เบดแบบผิวคลื่น โดยมีเพิ่มชุดกรวยเข้าไปในห้องเผาไหม้เพื่อสร้างความปั่นป่วน (TURBULANCE) ของเชื้อเพลิงภายในเตา ข้อมูลที่ได้จะนำมาวิเคราะห์ถึงปัญหาและสรุปผลการทดลองที่ได้นี้เพื่อเป็นประโยชน์และเป็นแนวทางในการศึกษาต่อไปโดยมีดังต่อไปนี้

จากการศึกษาและทดลอง โดยทำการวัดการกระจายอุณหภูมิและการปล่อยก๊าซไอเสีย รวมถึงความเสถียรภาพของการเผาไหม้ พบว่าที่ค่าอากาศส่วนเกิน ตั้งแต่ 50-100 % ให้ประสิทธิภาพและมีความเสถียรภาพทางเปลวไฟที่ดีมีความเสถียรของอุณหภูมิไอเสียเหมาะที่จะนำไปประยุกต์ใช้งาน ซึ่งแสดงถึงผลของการทำผนังห้องเผาไหม้เป็นผิวคลื่นสามารถที่จะลดขนาดของห้องเผาไหม้ลงได้

#### 7.2 ข้อเสนอแนะ

เนื่องจากเตาเผานี้ได้ทำการออกแบบและสร้างพร้อมทั้งยังทำการลดขนาดจากเตาเผา โดยการเพิ่มผิวคลื่นเข้าไปในห้องเผาไหม้และได้มุ่งเน้นถึงการศึกษาคุณลักษณะการกระจายของอุณหภูมิในแนวรัศมีเพื่อเป็นแนวทางในการศึกษาต่อไป

โดยมีข้อเสนอแนะเพื่อเป็นแนวทางดังต่อไปนี้

1. ศึกษาในส่วนพฤติกรรมของการเผาไหม้ของแก๊สในในห้องเผาไหม้แบบผิวคลื่น เพื่อให้สามารถอธิบายและวิเคราะห์เชิงทฤษฎีได้
2. ศึกษาและวิเคราะห์ก๊าซไอเสียที่ปล่อยออกมาจากการเผาไหม้เพื่อเป็นแนวทางในการศึกษาและวิเคราะห์โดยละเอียดต่อไป
3. ศึกษาการนำความร้อนที่ได้จากเตาเผาไปใช้ประโยชน์ทางด้านเกษตรกรรมเช่นการนำไปอบแห้งพืชผลทางการเกษตรหรือนำไปใช้ลดความชื้นในงานด้านอุตสาหกรรม เป็นต้น
4. ศึกษาและปรับปรุงชุดป้อนแก๊สแบบเดิมที่ส่งถ่ายเชื้อเพลิงแบบเกลียว (Screw Feed) ให้มีประสิทธิภาพในการส่งถ่ายเชื้อเพลิงแก๊สให้คงที่มากขึ้นกว่าในอดีต
5. กวรวหาแนวทางในการปรับปรุงชุดวัดอัตราการไหลให้มีความเที่ยงตรงและแม่นยำสำหรับการศึกษาและทดลองเตาเผาฟลูอิดไคซ์เบดต่อไป
6. ศึกษาถึงการใช้เชื้อเพลิงชีวมวลชนิดอื่นๆ เช่น ชานอ้อย ฟางข้าว กากปาล์ม ชีลื้อย เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บรรณานุกรม

- [1] นายรัชชัย ท้วถวิล และนายสันติ วัชรอาภาไพบูลย์. 2534 “เตาเผาเศษวัสดุทางการเกษตรแบบใช้ อากาศหมุนวน 2” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- [2] เรือโทประจักษ์ จิตรพิทย. 2536 “การศึกษารูปแบบการไหลและลักษณะการสันดาปของห้องเผาไหม้แบบไซโคลนที่ใช้เชื้อเพลิงเป็นเชื้อเพลิง” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- [3] นิวัติ พิริยะรุ่งโรจน์ (2544) “การศึกษาเชิงทดลองของเตาเผาแบบวอร์เทค” วิทยานิพนธ์ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล บัณฑิตวิทยาลัยสถาบันเทคโนโลยีพระ จอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [4] Sen Nieh and Tim T.Fu “Development of a Non-Slagging Vortex Combustor (VC) for Space/Water Heating Application”, Proc. 5<sup>th</sup> International Coal Conf., pp.761 – 768 , 1988
- [5] ศุภชัย เลื่อนลอย (2545) “อิทธิพลของความชื้นของแกลบต่อคุณลักษณะการเผาไหม้” วิทยานิพนธ์ ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล บัณฑิตวิทยาลัยสถาบัน เทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [6] วิศิษฐ์ ลีลาผาดิกุล (2545) “เตาเผาแกลบแบบวอร์เทคหลายชั้น” วิทยานิพนธ์ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล บัณฑิตวิทยาลัยสถาบันเทคโนโลยีพระ จอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [7] เสรีย์ คู่ประกาย “ การศึกษาและออกแบบเตาเผาตะกอนแบบฟลูอิดไดซ์เบด ” วิทยานิพนธ์ปริญญา วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต คณะพลังงานและวัสดุ . มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2540.
- [8] สติวิมล มูลสว่าง “ การเผาไหม้แกลบในฟลูอิดไดซ์เบด ” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตร มหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.2525.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ก.  
คุณสมบัติของเชื้อเพลิงแกลบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### คุณสมบัติของเชื้อเพลิงแกลบ (Rice Husk)

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

### คุณสมบัติทางกายภาพ

แกลบมีคุณสมบัติทางด้านการเป็นเชื้อเพลิงได้เป็นอย่างดีพอสมควร แต่จะมีข้อเสียคือเมื่อทำการเผาไหม้แล้วแกลบจะมีปริมาณสูงถึงประมาณร้อยละ 15.8-24.9 ค่าความร้อนของแกลบจะอยู่ระหว่าง 2,900-4,580 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม ค่าความชื้น โดยประมาณ 1.1-9.8% กิโลกรัม

### ตารางที่ ก-1 คุณสมบัติของแกลบ

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก-2 การเปรียบเทียบเชื้อเพลิง

	เชื้อเพลิงแข็ง	เชื้อเพลิงเหลว	แก๊สเชื้อเพลิง
การขนส่ง	- ขนส่งง่ายแต่ลำบาก ในการขนย้าย	- ขนส่งง่ายและขน ย้ายง่าย	- แก๊สธรรมชาติขนส่ง และขนย้ายง่าย
การเก็บ	- ต้องใช้พื้นที่กว้าง	- ต้องใช้ถัง	- ต้องบรรจุในภาชนะ พิเศษ
คุณสมบัติ	- คุณภาพเปลี่ยนแปลง ไม่แน่นอน - ค่าความร้อนต่อ หน่วยต่ำ - ชี้อัดมาก - ประสิทธิภาพในการ สันดาปต่ำ - ต้องการอากาศ ส่วนเกินในการเผา ไหม้เป็นจำนวนมาก - มีความยุ่งยากในการ ใช้ระบบควบคุม อัตโนมัติ	- คุณภาพค่อนข้าง คงที่ - ค่าความร้อนต่อ หน่วยน้ำหนักรวมสูง - ประสิทธิภาพในการ เผาไหม้สูง - ต้องการอากาศใน การเผาไหม้น้อย - ใช้ระบบควบคุม อัตโนมัติง่าย	- คุณภาพคงที่ - ค่าความร้อนต่อ หน่วยน้ำหนักรวมมีค่า สูง - ไม่มีชี้อัด - ประสิทธิภาพในการ เผาไหม้สูงสุด - ต้องการอากาศ ส่วนเกินจำนวนน้อย มาก - ใช้ระบบควบคุม อัตโนมัติง่าย
อุปกรณ์สันดาป	- ขนาดเล็กไม่ซับซ้อน	- ขนาดเล็ก	- ขนาดค่อนข้างใหญ่
มลภาวะ	- จำเป็นต้องมีการ ป้องกันการเกิด มลภาวะต่อ บรรยากาศ	- จำเป็นต้องมีการ ป้องกันการเกิด มลภาวะต่อ บรรยากาศ	- มีผลกระทบต่อ การเกิดมลภาวะของ บรรยากาศน้อย
ราคา	- ถูก	- ค่อนข้างแพง	- แพงที่สุดต่อความ ร้อน 1 หน่วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก-3 ปริมาณชีวะมวลในปี 2540 และ 2544

หน่วย :ตัน

ชีวะมวล	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

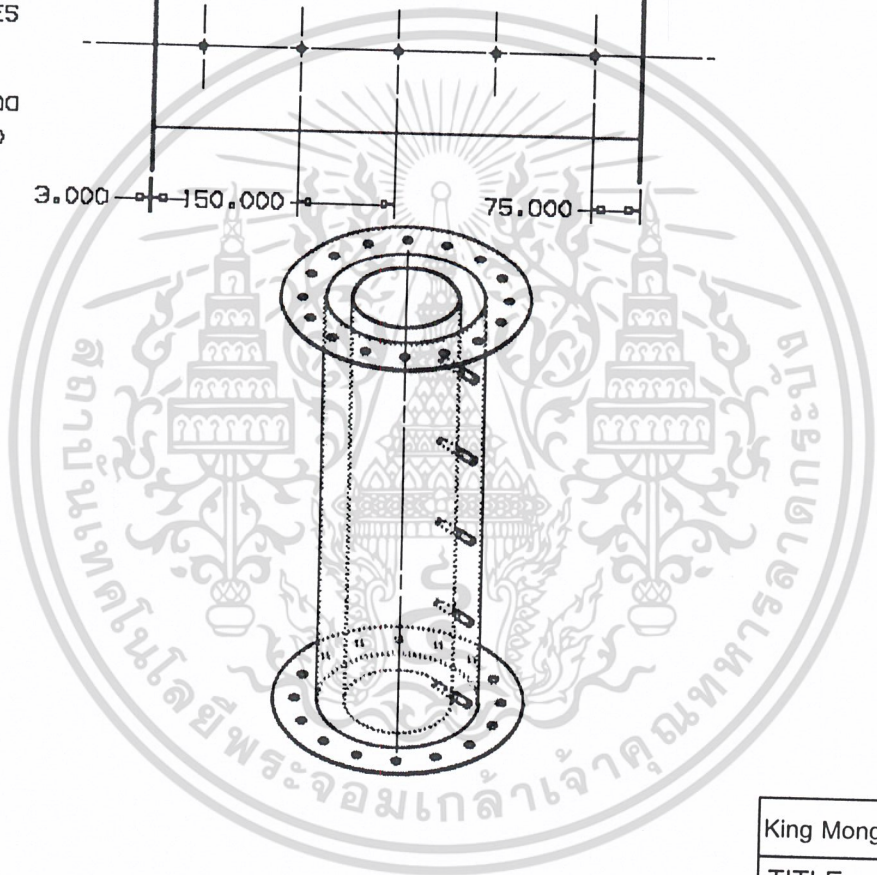
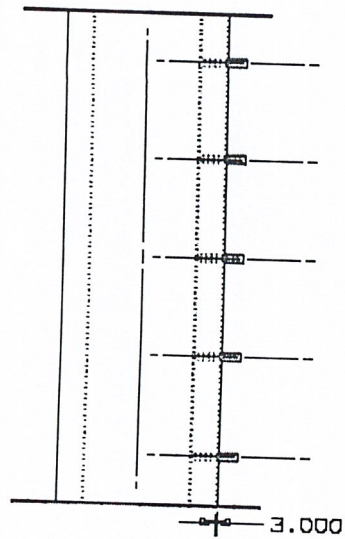
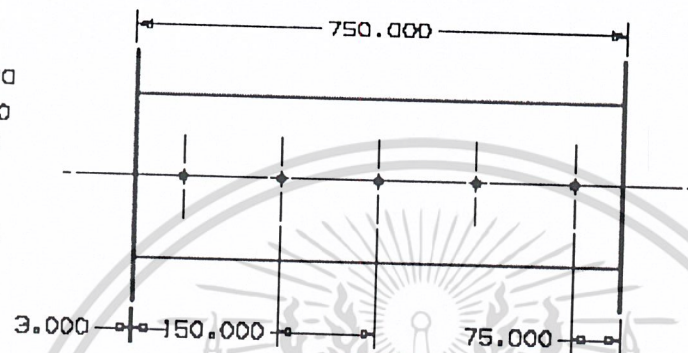
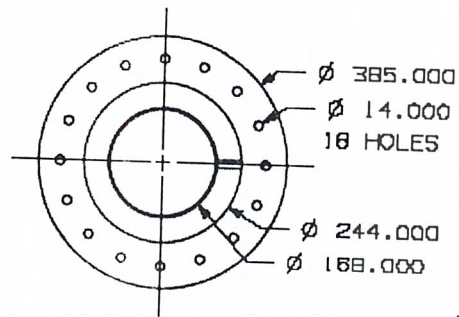
ตารางที่ ก-4 ปริมาณการใช้ชีวะมวลโดยเฉลี่ยต่อโรง

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

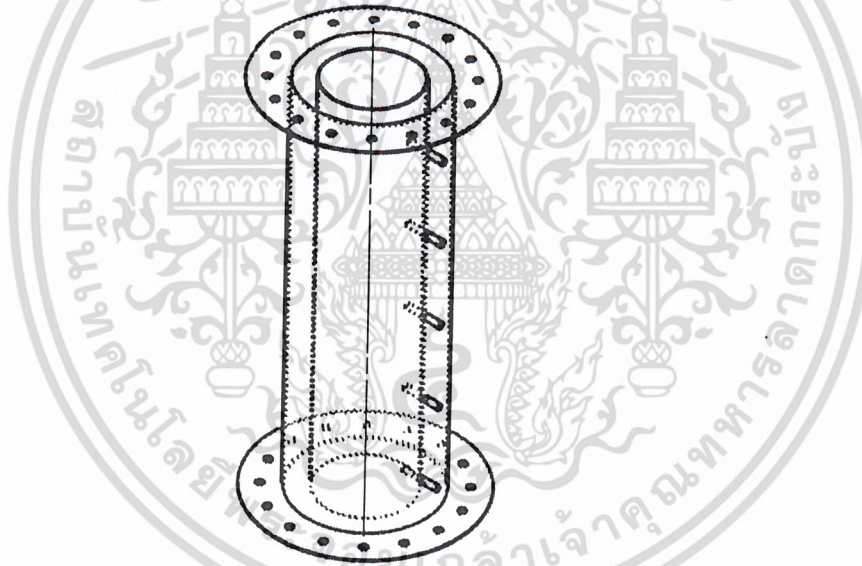
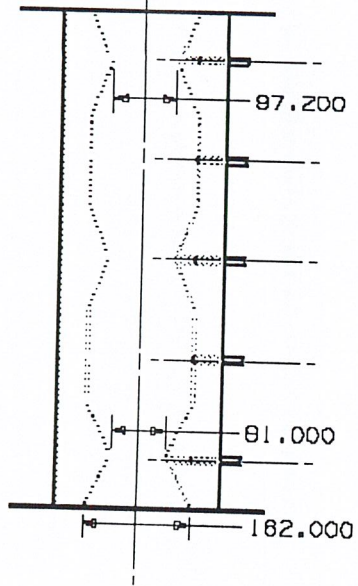
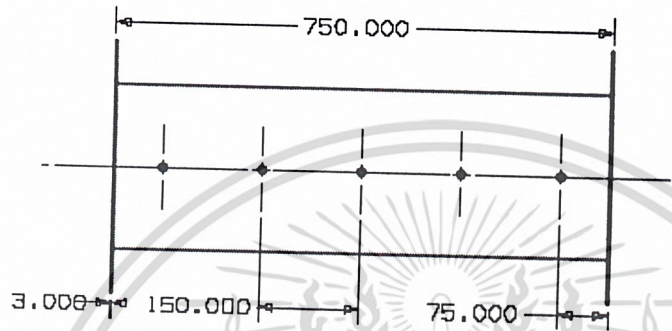
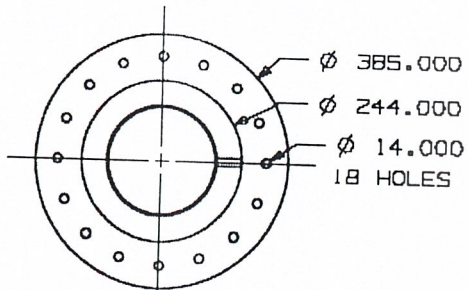
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang	
TITLE : ฟรีบอร์ด	
UNITS : mm	SCALE 1: 0.15

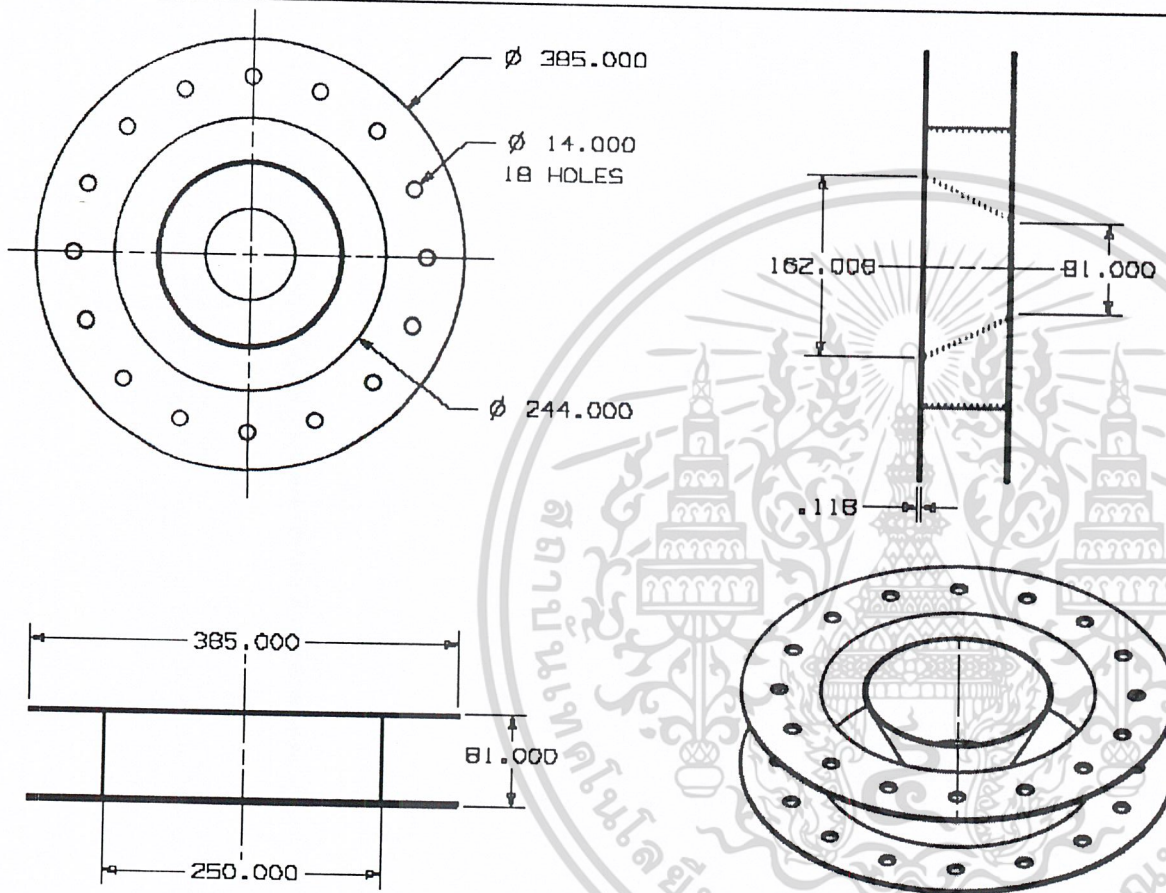


King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

TITLE : ห้องเผาไหม้มีผิวคลื่น

UNITS : mm

SCALE 1: 0.15

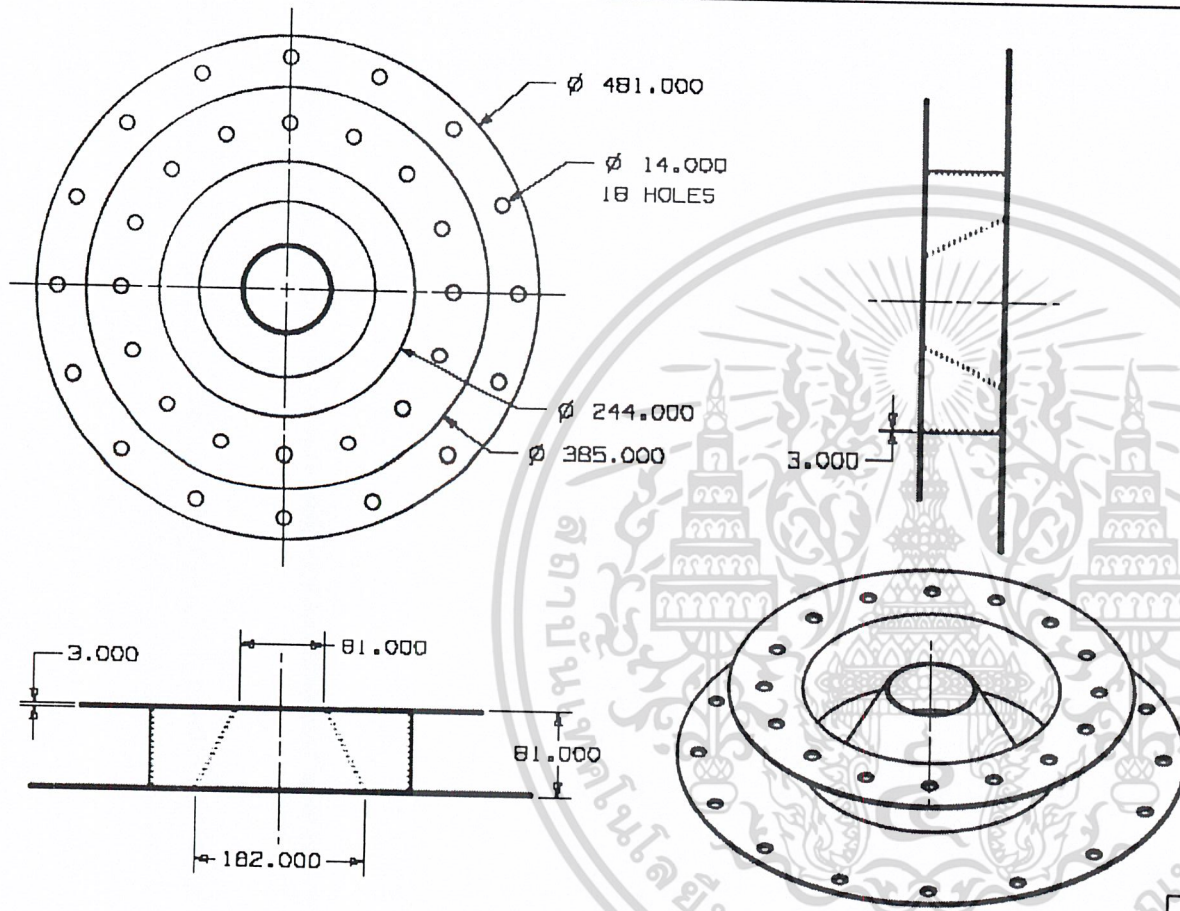


King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

TITLE : ห้องเผาไหม้มีผิวคลื่น

UNITS : mm

SCALE 1: 0.25

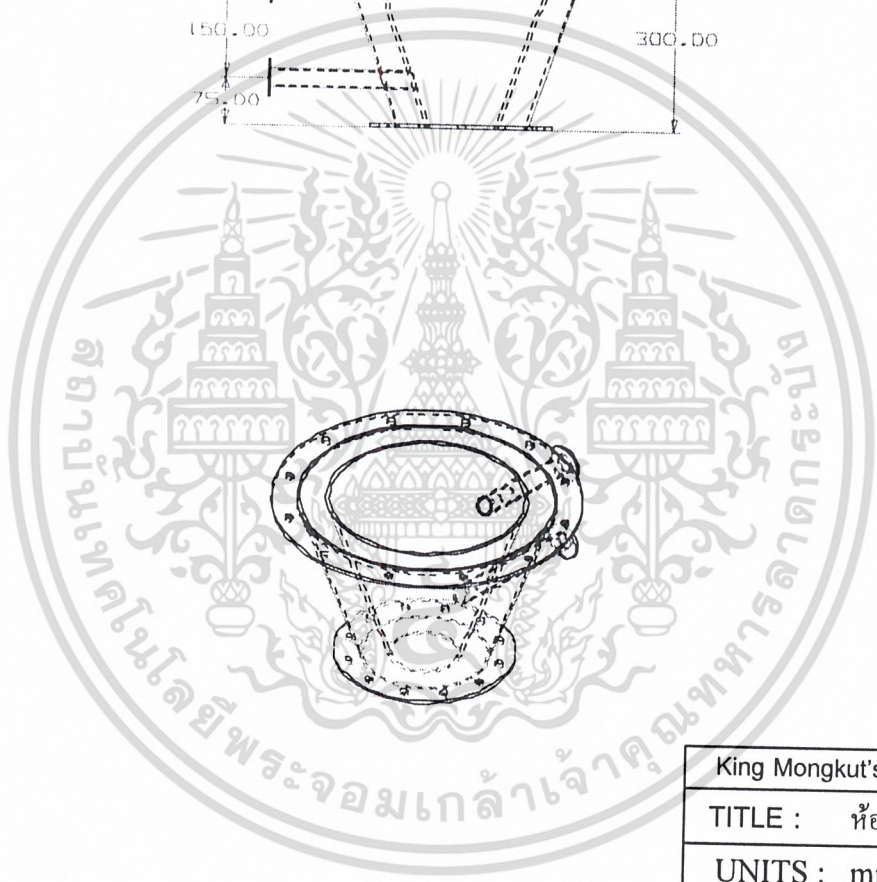
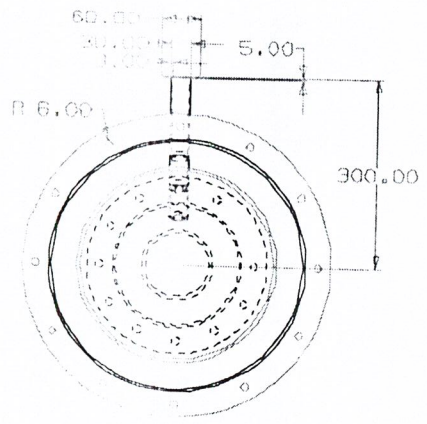
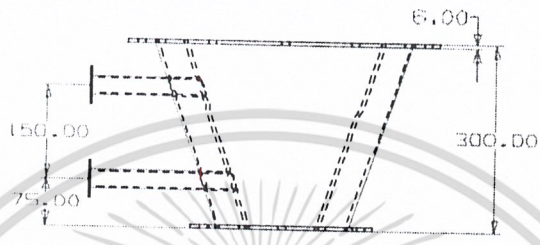
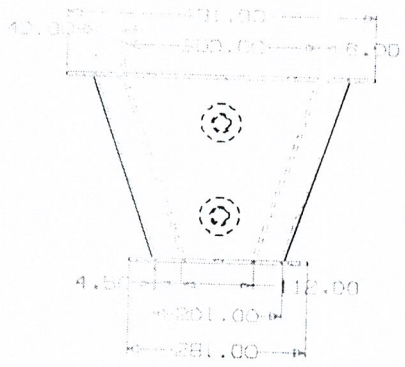


King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

TITLE : ห้องเผาไหม้มีฉนวนกัน

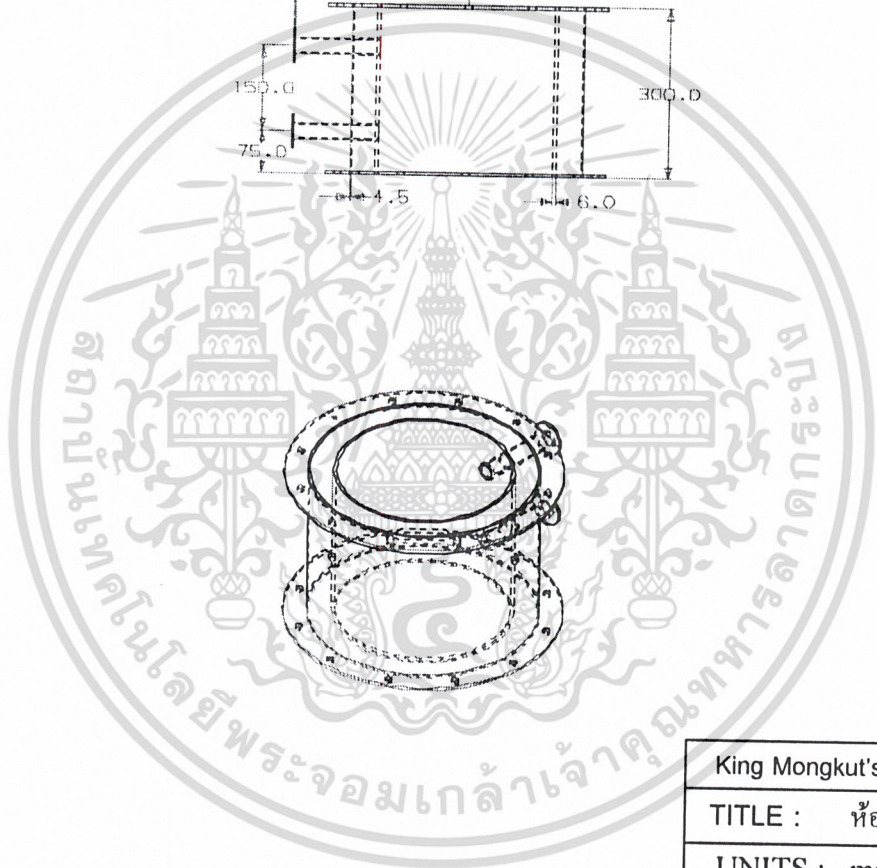
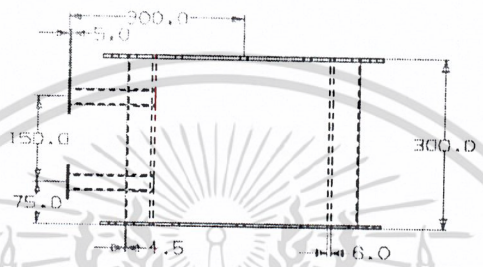
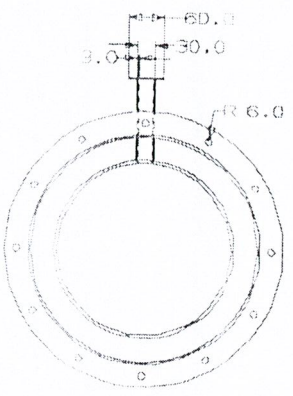
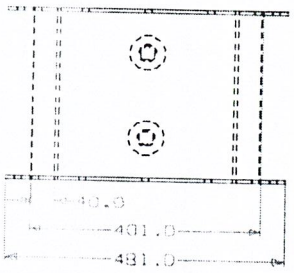
UNITS : mm

SCALE 1: 0.25



King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang	
TITLE : ห้องผสมเชื้อเพลิงกับอากาศ	
UNITS : mm	SCALE 1: 0.25

5.0



King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

TITLE : ห้องผสมเชื้อเพลิงกับอากาศ

UNITS : mm

SCALE 1: 0.25



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ตารางบันทึกผลอุณหภูมิ

#### การทดลองครั้งที่ 1

อัตราการไหลของอากาศ (Primary Air) : 82 kg/hr

อัตราการการป้อนเชื้อเพลิงแกลบ : 9 kg/hr

$x/D$ $r/R$	0.47	1.40	2.33	3.26	4.19	5.12	6.05
0.00	666.7577	679.3437	673.7222	661.9368	600.0587	596.0952	633.8080
0.25	-	-	-	590.8202	575.9060	577.6768	619.1490
0.50	728.7357	639.7467	651.4637	505.8278	-	567.6699	604.1148
0.60	-	-	-	-	-	-	595.3023
0.68	-	-	-	450.4730	-	-	-
0.75	-	-	-	-	-	557.7547	-
1.00	697.3240	720.7404	649.5609	-	-	502.1483	-
1.50	496.7103	673.0596	605.4210	-	-	-	-
1.875	-	519.0408	502.1975	-	-	-	-

$x/D$ $r/R$	6.98	7.19	8.84	9.77	10.70	11.63	12.56
0.00	629.4038	620.6043	565.8017	610.0932	585.1535	583.0387	606.6248
0.25	615.6013	603.5152	555.5747	596.4618	571.5833	568.5713	582.8077
0.50	610.0626	579.2782	556.0206	583.3859	567.5431	563.5058	560.4759
0.60	-	546.3694	-	-	-	-	-
0.68	-	-	-	-	-	-	-
0.75	586.0559	-	544.0261	565.2835	553.5879	548.9493	531.2309
1.00	534.4185	-	482.6218	511.7276	500.8559	492.5549	462.9802
1.50	-	-	-	-	-	-	-
1.875	-	-	-	-	-	-	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ผลการวิเคราะห์ก๊าซ

Testo t350 XL

SN : 00980047/GB

	Date : 22/01/2005	Date : 22/01/2005
	Time : 20.41.16	Time : 21.07.20
O <sub>2</sub> (%)	14.74	15.26
CO (ppm)	3865	
CO <sub>2</sub> (%)	6.32	5.8
NO (ppm)	115	81
NO <sub>2</sub> (ppm)	18.2	35.2
FT °C	291.3	292.3
NO <sub>x</sub> (ppm)	134	117
SO <sub>2</sub> (ppm)	34	54
H <sub>2</sub> (ppm)	436	1469
EffN (%)	82.8	86
EffG (%)	79.2	82.3
Ratio	0.0611	
AT °C	28.5	28.9
IT °C	28.9	28.8
Td °C	42.1	41
O/h (h)	2.4	2.5
Pump (l/m)	1.06	1.06
O <sub>2f</sub> (%)	3.3	3.3
CO <sub>2m</sub> (%)	21.2	21.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การทดลองครั้งที่ 2

อัตราการไหลของอากาศ (Primary Air) : 82 kg/hr

อัตราการการป้อนเชื้อเพลิงแกลบ : 10.5 kg/hr

$x/D$ $r/R$	0.47	1.40	2.33	3.26	4.19	5.12	6.05
0.00	753.9452	774.9650	751.4000	742.8237	704.8048	689.2180	722.2762
0.25	-	-	-	693.7396	689.4087	681.4536	722.6431
0.50	784.3216	779.0166	748.5700	562.5714	618.6900	626.3962	658.3115
0.60	-	-	-	-	-	-	680.8446
0.68	-	-	-	505.7233	-	-	-
0.75	-	-	-	-	-	645.6629	-
1.00	734.1145	750.8200	709.8536	-	-	582.6018	-
1.50	569.3200	728.0175	693.8100	-	-	-	-
1.875	-	572.4622	574.3917	-	-	-	-

$x/D$ $r/R$	6.98	7.19	8.84	9.77	10.70	11.63	12.56
0.00	710.7682	700.9353	647.4453	675.5238	646.3587	642.3602	675.7655
0.25	712.2729	712.2729	648.4143	677.6809	650.9148	646.7148	666.9048
0.50	652.4070	633.2479	605.1404	631.6842	613.6921	610.3438	611.6165
0.60	-	629.9892	-	-	-	-	-
0.68	-	-	-	-	-	-	-
0.75	669.1884	-	622.5547	641.3968	622.2997	618.3057	610.4564
1.00	613.1331	-	558.6173	577.7920	560.7170	552.9918	533.5151
1.50	-	-	-	-	-	-	-
1.875	-	-	-	-	-	-	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ผลการวิเคราะห์ก๊าซ

Testo t350 XL

SN : 00980047/GB

	Date : 23.01.2005	Date : 23.01.2005
	Time : 03.10.14	Time : 03.11.16
O <sub>2</sub> (%)	11.93	11.86
CO (ppm)	1169	905
CO <sub>2</sub> (%)	9.15	9.22
NO (ppm)	208	231
NO <sub>2</sub> (ppm)	18.6	16.9
FT °C	341.8	349.2
NO <sub>x</sub> (ppm)	227	248
SO <sub>2</sub> (ppm)	0	0
H <sub>2</sub> (ppm)	71	230
EffN (%)	88	88
EffG (%)	84.3	84.3
Ratio	0.0128	0.0098
AT °C	28.4	29
IT °C	28.3	28.4
Td °C	47.3	47.4
O/h (h)	2.7	2.7
Pump (l/m)	1.05	1.04
O <sub>2f</sub> (%)	3.3	3.3
CO <sub>2m</sub> (%)	21.2	21.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การทดลองครั้งที่ 3

อัตราการไหลของอากาศ (Primary Air) : 82 kg/hr

อัตราการการป้อนเชื้อเพลิงแกลบ : 12 kg/hr

$x/D$ $r/R$	0.47	1.40	2.33	3.26	4.19	5.12	6.05
0.00	771.0396	751.8324	720.4617	718.2950	710.6962	673.1978	702.2233
0.25	-	-	-	669.1592	734.8561	717.6769	750.2686
0.50	812.7341	814.4606	762.7466	578.9271	698.8101	728.5582	754.7349
0.60	-	-	-	-	-	-	730.3616
0.68	-	-	-	514.5351	-	-	-
0.75	-	-	-	-	-	697.4506	-
1.00	736.3409	833.9193	-	-	-	626.1027	-
1.50	543.2664	776.6471	746.0426	-	-	-	-
1.875	-	622.0322	634.3098	-	-	-	-

$x/D$ $r/R$	6.98	7.19	8.84	9.77	10.70	11.63	12.56
0.00	679.9358	666.7847	612.3496	615.4646	589.7812	585.7772	615.5125
0.25	729.4190	709.1491	661.1887	660.1517	634.3940	628.1155	635.2488
0.50	739.7677	707.0198	696.0712	692.1258	670.5148	663.9080	657.6456
0.60	-	660.5681	-	-	-	-	-
0.68	-	-	-	-	-	-	-
0.75	707.6769	-	664.4105	663.4358	641.7196	638.5075	625.9730
1.00	658.5377	-	599.7822	599.7822	576.5212	567.1893	544.7663
1.50	-	-	-	-	-	-	-
1.875	-	-	-	-	-	-	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ผลการวิเคราะห์ก๊าซ

Testo t350 XL

SN : 00980047/GB

	Date : 23.01.2005	Date :23.01.2005
	Time : 02.48.03	Time : 02.49.40
O <sub>2</sub> (%)	12.82	13.28
CO (ppm)	532	863
CO <sub>2</sub> (%)	8.26	7.8
NO (ppm)	222	183
NO <sub>2</sub> (ppm)	6.6	8.3
FT °C	377.3	372.3
NO <sub>x</sub> (ppm)	229	191
SO <sub>2</sub> (ppm)	0	0
H <sub>2</sub> (ppm)	46	107
EffN (%)	86	85.2
EffG (%)	82.4	81.6
Ratio	0.0064	0.0111
AT °C	27.6	28.2
IT °C	28.0	28.2
Td °C	45.8	45
O/h (h)	2.6	2.7
Pump (l/m)	1.05	1.04
O <sub>2r</sub> (%)	3.3	3.3
CO <sub>2m</sub> (%)	21.2	21.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การทดลองครั้งที่ 4

อัตราการไหลของอากาศ (Primary Air) : 82 kg/hr

อัตราการการป้อนเชื้อเพลิงแกลบ : 13.5 kg/hr

$x/D$ $r/R$	0.47	1.40	2.33	3.26	4.19	5.12	6.05
0.00	842.3434	845.6933	860.2917	895.7062	800.9190	828.1531	869.6366
0.25	-	-	-	865.7930	773.8689	834.5567	887.4128
0.50	890.5684	913.3115	896.2441	731.6146	752.7414	871.6952	918.2398
0.60	-	-	-	-	-	-	902.3280
0.68	-	-	-	636.8918	-	-	-
0.75	-	-	-	-	-	823.2270	-
1.00	768.7982	917.5865	934.0632	-	-	739.1143	-
1.50	544.8610	899.3990	860.4497	-	-	-	-
1.875	-	713.6817	696.7837	-	-	-	-

$x/D$ $r/R$	6.98	7.19	8.84	9.77	10.70	11.63	12.56
0.00	846.4597	826.8602	761.6493	780.0692	750.3918	742.3228	777.9326
0.25	866.0864	841.4880	785.6072	802.4973	773.1792	764.3314	780.0988
0.50	902.5975	856.9614	843.7451	851.5461	825.0917	815.2572	817.0100
0.60	-	817.5922	-	-	-	-	-
0.68	-	-	-	-	-	-	-
0.75	884.7923	-	830.8175	844.5053	817.7062	812.2893	812.6957
1.00	791.6418	-	743.4703	764.5837	733.0200	727.4088	721.4025
1.50	-	-	-	-	-	-	-
1.875	-	-	-	-	-	-	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ผลการวิเคราะห์ก๊าซ

Testo t350 XL

SN : 00980047/GB

	Date : 22.01.2005	Date : 22.01.2005
	Time : 23.17.24	Time : 23.17.58
O <sub>2</sub> (%)	9.95	9.45
CO (ppm)	562	475
CO <sub>2</sub> (%)	11.16	11.66
NO (ppm)	332	331
NO <sub>2</sub> (ppm)	4.1	4.5
FT °C	405.9	404.9
NO <sub>x</sub> (ppm)	336	336
SO <sub>2</sub> (ppm)	0	0
H <sub>2</sub> (ppm)	74	61
EffN (%)	88.4	88.9
EffG (%)	84.7	85.2
Ratio	0.005	0.0041
AT °C	27.9	28.1
IT °C	28.2	28.3
Td °C	50.3	51
O/h (h)	2.5	2.5
Pump (l/m)	1.07	1.06
O <sub>2ff</sub> (%)	3.3	3.3
CO <sub>2m</sub> (%)	21.2	21.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การทดลองครั้งที่ 5

อัตราการไหลของอากาศ (Primary Air) : 82 kg/hr

อัตราการการป้อนเชื้อเพลิงแกลบ : 15 kg/hr

$x/D$ $r/R$	0.47	1.40	2.33	3.26	4.19	5.12	6.05
0.00	876.4777	920.6557	921.4022	883.7631	775.4992	849.3088	921.1542
0.25	-	-	-	808.4253	737.9915	813.3977	901.0181
0.50	853.8426	928.0369	916.0715	700.4290	894.7649	840.5055	925.2502
0.60	-	-	-	-	-	-	923.9971
0.68	-	-	-	625.4106	-	-	-
0.75	-	-	-	-	-	853.8273	-
1.00	752.7502	942.0850	923.3569	-	-	828.8490	-
1.50	562.5356	897.9218	865.3955	-	-	-	-
1.875	-	706.5935	736.1330	-	-	-	-

$x/D$ $r/R$	6.98	7.19	8.84	9.77	10.70	11.63	12.56
0.00	928.0626	924.8923	862.2464	910.7454	879.8745	876.2522	925.0265
0.25	911.8190	911.4414	842.2358	907.1908	865.1938	865.5571	921.9872
0.50	933.1379	912.2050	879.1754	928.3800	893.4454	892.8057	929.3271
0.60	-	874.9792	-	-	-	-	-
0.68	-	-	-	-	-	-	-
0.75	924.9602	-	883.0075	919.2027	891.5484	891.8012	909.9539
1.00	903.8027	-	851.9290	876.5092	843.1138	851.9883	835.8960
1.50	-	-	-	-	-	-	-
1.875	-	-	-	-	-	-	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ผลการวิเคราะห์ก๊าซ

Testo t350 XL

SN : 00980047/GB

	Date : 23.01.2005	Date : 23.01.2005
	Time : 00.43.13	Time : 00.44.09
O <sub>2</sub> (%)	8.51	8.68
CO (ppm)	398	381
CO <sub>2</sub> (%)	12.61	12.44
NO (ppm)	339	337
NO <sub>2</sub> (ppm)	3.3	2.9
FT °C	426.8	428.3
NO <sub>x</sub> (ppm)	342	340
SO <sub>2</sub> (ppm)	7	6
H <sub>2</sub> (ppm)	44	40
EffN (%)	89.1	88.9
EffG (%)	85.4	85.2
Ratio	0.0032	0.0031
AT °C	29	29.2
IT °C	28.1	28.3
Td °C	52.3	52
O/h (h)	2.6	2.6
Pump (l/m)	1.06	1.06
O <sub>2r</sub> (%)	3.3	3.3
CO <sub>2m</sub> (%)	21.2	21.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การทดลองครั้งที่ 6

อัตราการไหลของอากาศ (Primary Air) : 92 kg/hr

อัตราการการป้อนเชื้อเพลิงแกลบ : 12 kg/hr

$x/D$ $r/R$	0.47	1.40	2.33	3.26	4.19	5.12	6.05
0.00	299.1900	342.9825	973.3810	646.3780	593.2349	607.1998	614.3531
0.25	-	-	-	573.6783	658.3543	639.4640	611.9433
0.50	324.1858	413.6670	879.5517	549.3867	617.6918	643.3370	639.1117
0.60	-	-	-	-	-	-	640.3372
0.68	-	-	-	503.4398	-	-	-
0.75	-	-	-	-	-	645.3137	-
1.00	266.5155	287.4893	762.3358	-	-	588.0195	-
1.50	252.9315	264.4348	618.9143	-	-	-	-
1.875	-	307.8130	572.8663	-	-	-	-

$x/D$ $r/R$	6.98	7.19	8.84	9.77	10.70	11.63	12.56
0.00	619.0872	666.3676	622.2699	682.0291	696.4744	721.0060	789.9567
0.25	605.8522	653.9933	602.2162	658.6745	667.0305	683.3308	731.3178
0.50	636.2995	660.3438	627.7240	668.5980	674.7107	688.2125	712.7207
0.60	-	621.1430	-	-	-	-	-
0.68	-	-	-	-	-	-	-
0.75	620.7383	-	602.7925	634.4233	639.4807	649.2252	683.8830
1.00	582.2470	-	560.4982	603.1888	611.3978	604.7587	625.4135
1.50	-	-	-	-	-	-	-
1.875	-	-	-	-	-	-	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ผลการวิเคราะห์ก๊าซ

Testo t350 XL

SN : 00980047/GB

	Date : 26.01.2005	Date : 26.01.2005
	Time : 04.58.40	Time : 04.59.26
O <sub>2</sub> (%)	12.73	13.89
CO (ppm)	3791	4758
CO <sub>2</sub> (%)	8.35	7.18
NO (ppm)	230	206
NO <sub>2</sub> (ppm)	2.3	1.7
FT °C	380.1	379
NO <sub>x</sub> (ppm)	232	203
SO <sub>2</sub> (ppm)	39	0
H <sub>2</sub> (ppm)	1084	296
EffN (%)	83.3	80.1
EffG (%)	79.8	76.7
Ratio	0.0454	0.0663
AT °C	29	29.3
IT °C	27.6	27.7
Td °C	46	43.8
O/h (h)	3	3
Pump (l/m)	0.89	0.88
O <sub>2f</sub> (%)	3.3	3.3
CO <sub>2m</sub> (%)	21.2	21.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การทดลองครั้งที่ 7

อัตราการไหลของอากาศ (Primary Air) : 92 kg/hr

อัตราการการป้อนเชื้อเพลิงแกลบ : 13.5 kg/hr

$x/D$ $r/R$	0.47	1.40	2.33	3.26	4.19	5.12	6.05
0.00	807.7196	737.6020	835.2862	836.5867	737.8820	736.8522	739.0281
0.25	-	-	-	829.6707	767.6246	758.9414	760.4990
0.50	731.1591	791.2106	872.4256	669.8253	735.7464	767.1160	765.4627
0.60	-	-	-	-	-	-	763.9433
0.68	-	-	-	596.3893	-	-	-
0.75	-	-	-	-	-	749.5860	-
1.00	660.2085	862.5982	916.3200	-	-	689.2112	-
1.50	487.6167	747.3920	855.0723	-	-	-	-
1.875	-	524.8383	680.7278	-	-	-	-

$x/D$ $r/R$	6.98	7.19	8.84	9.77	10.70	11.63	12.56
0.00	717.7210	749.3872	686.6649	720.7456	712.5772	706.5175	715.5308
0.25	736.2077	762.4206	708.5827	737.1740	727.2446	719.5022	720.5646
0.50	742.1261	749.8218	720.7933	740.6707	729.7577	717.1389	673.1511
0.60	-	722.4667	-	-	-	-	-
0.68	-	-	-	-	-	-	-
0.75	743.8858	-	718.4807	737.7888	730.0390	713.8828	644.9302
1.00	681.5138	-	654.4667	691.3778	686.2595	655.6480	598.4503
1.50	-	-	-	-	-	-	-
1.875	-	-	-	-	-	-	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ผลการวิเคราะห์ก๊าซ

Testo t350 XL

SN : 00980047/GB

	Date : 26.01.2005	Date : 26.01.2005
	Time : 03.38.00	Time : 03.38.54
O <sub>2</sub> (%)	12.20	11.57
CO (ppm)	492	499
CO <sub>2</sub> (%)	8.8	9.52
NO (ppm)	250	249
NO <sub>2</sub> (ppm)	1.7	1.4
FT °C	381.2	383.7
NO <sub>x</sub> (ppm)	252	251
SO <sub>2</sub> (ppm)	11	7
H <sub>2</sub> (ppm)	55	79
EffN (%)	86.8	87.5
EffG (%)	83.1	83.8
Ratio	0.0055	0.0052
AT °C	28.1	28.3
IT °C	27.3	27.4
Td °C	46.9	47.9
O/h (h)	2.9	2.9
Pump (l/m)	0.9	0.89
O <sub>2rf</sub> (%)	3.3	3.3
CO <sub>2m</sub> (%)	21.2	21.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การทดลองครั้งที่ 8

อัตราการไหลของอากาศ (Primary Air) : 92 kg/hr

อัตราการการป้อนเชื้อเพลิงแกลบ : 15 kg/hr

$x/D$ $r/R$	0.47	1.40	2.33	3.26	4.19	5.12	6.05
0.00	330.9709	607.5579	760.1399	831.7493	695.6795	758.0408	771.1281
0.25	-	-	-	844.0617	774.6604	821.9441	818.6409
0.50	593.0238	712.9902	870.1113	755.1760	822.6794	877.7917	888.1101
0.60	-	-	-	-	-	-	880.4646
0.68	-	-	-	654.7198	-	-	-
0.75	-	-	-	-	-	849.6930	-
1.00	499.9960	738.4324	915.3476	-	-	806.2588	-
1.50	338.3256	713.7478	852.7899	-	-	-	-
1.875	-	542.4532	726.1245	-	-	-	-

$x/D$ $r/R$	6.98	7.19	8.84	9.77	10.70	11.63	12.56
0.00	759.3516	815.4597	762.9835	832.5649	849.7491	874.8646	924.2700
0.25	795.8436	842.0664	791.1972	844.7835	852.4907	856.8101	884.2647
0.50	871.3424	894.2822	865.6604	901.6126	901.0023	900.3684	835.0739
0.60	-	864.6333	-	-	-	-	-
0.68	-	-	-	-	-	-	-
0.75	872.2150	-	857.5333	884.9642	883.4697	878.0439	787.2923
1.00	797.7915	-	777.7980	809.0942	813.4690	801.5150	700.4857
1.50	-	-	-	-	-	-	-
1.875	-	-	-	-	-	-	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ผลการวิเคราะห์ก๊าซ

Testo t350 XL

SN : 00980047/GB

	Date : 25.01.2005	Date : 25.01.2005
	Time : 22.27.12	Time : 22.28.56
O <sub>2</sub> (%)	8.53	11.75
CO (ppm)	251	652
CO <sub>2</sub> (%)	12.59	9.33
NO (ppm)	372	258
NO <sub>2</sub> (ppm)	2.3	1.2
FT °C	435.6	439.3
NO <sub>x</sub> (ppm)	374	260
SO <sub>2</sub> (ppm)	14	9
H <sub>2</sub> (ppm)	16	29
EffN (%)	89	85.3
EffG (%)	85	81.7
Ratio	0.002	0.007
AT °C	29.9	30.4
IT °C	32.2	32.4
Td °C	52.2	47.6
O/h (h)	2.8	2.8
Pump (l/m)	0.92	0.91
O <sub>2f</sub> (%)	3.3	3.3
CO <sub>2m</sub> (%)	21.2	21.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การทดลองครั้งที่ 9

อัตราการไหลของอากาศ (Primary Air) : 92 kg/hr

อัตราการการป้อนเชื้อเพลิงแกลบ : 16.5 kg/hr

$x/D$ $r/R$	0.47	1.40	2.33	3.26	4.19	5.12	6.05
0.00	546.7839	718.9672	905.6646	948.0238	916.7063	932.7256	932.6865
0.25	-	-	-	905.9928	920.9304	952.4454	941.7787
0.50	604.5656	642.7250	971.2970	734.3454	742.4243	821.5369	831.1576
0.60	-	-	-	-	-	-	869.6037
0.68	-	-	-	662.6172	-	-	-
0.75	-	-	-	-	-	843.5242	-
1.00	581.3263	700.2561	899.1962	-	-	754.1080	-
1.50	397.8160	585.0023	808.7598	-	-	-	-
1.875	-	476.6502	667.5243	-	-	-	-

$x/D$ $r/R$	6.98	7.19	8.84	9.77	10.70	11.63	12.56
0.00	899.3875	921.3466	868.1188	874.8304	852.9250	840.6080	867.9932
0.25	902.9238	929.8654	875.6374	902.5715	886.4280	876.6963	907.1973
0.50	825.6927	851.1010	828.5168	870.1319	873.8692	886.0604	883.9464
0.60	-	857.1797	-	-	-	-	-
0.68	-	-	-	-	-	-	-
0.75	854.4900	-	857.3495	899.2031	901.9128	903.4265	795.3007
1.00	762.2247	-	763.0287	811.2190	814.4220	811.8200	727.4497
1.50	-	-	-	-	-	-	-
1.875	-	-	-	-	-	-	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ผลการวิเคราะห์ก๊าซ

Testo t350 XL

SN : 00980047/GB

	Date : 25.01.2005	Date : 25.01.2005
	Time : 21.05.53	Time : 21.07.12
O <sub>2</sub> (%)	10.08	9.9
CO (ppm)	1100	1249
CO <sub>2</sub> (%)	11.03	11.21
NO (ppm)	300	293
NO <sub>2</sub> (ppm)	2.7	1.9
FT °C	450.3	456.4
NO <sub>x</sub> (ppm)	303	295
SO <sub>2</sub> (ppm)	6	0
H <sub>2</sub> (ppm)	141	155
EffN (%)	86.6	86.5
EffG (%)	83.0	82.9
Ratio	0.01	0.0115
AT °C	28.6	29.0
IT °C	27.7	28.0
Td °C	50.1	50.4
O/h (h)	2.8	2.8
Pump (l/m)	0.93	0.91
O <sub>2f</sub> (%)	3.3	3.3
CO <sub>2m</sub> (%)	21.2	21.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้