

เตาเผาชีวมวลแบบฟลูอิดไดซ์เบด  
BIOMASS FIRED FLUIDIZED - BED COMBUSTOR



โดย



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2544

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน **46014**  
วัน, เดือน, ปี **27 ก.พ. 2546**

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

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

11955151

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2544

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง


เรื่อง เตาเผาชีวมวลแบบฟลูอิดไดซ์เบด

BIOMASS FIRED FLUIDIZED – BED COMBUSTOR

ผู้จัดทำ

1. นายกิตติพงศ์ สุขศรีเมือง รหัสประจำตัว 42515762
2. นายจิรัฏฐ์ ป่าโสม รหัสประจำตัว 42515771
3. นายถาวร บุญจำเนียร รหัสประจำตัว 42515772
4. นายนิสิต ทองประกอบ รหัสประจำตัว 42515775



  
(รศ.ดร.พงษ์เจต พรหมวงศ์) อาจารย์ที่ปรึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เตาเผาชีวมวลแบบฟลูอิดไดซ์เบด

นายกิตติพงษ์	สุขศรีเมือง	42515762
นายจิรภุช	ป่าโสม	42515771
นายถาวร	บุญจำเนียร	42515772
นายนิสิต	ทองประกอบ	42515775
รศ.ดร.พงษ์เจต	พรหมวงค์	อาจารย์ที่ปรึกษา ปีการศึกษา 2544

### บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์นี้ได้นำเสนอการออกแบบสร้างและทดสอบเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดโดยใช้เกลบเป็นเชื้อเพลิง ซึ่งมีลักษณะเป็นทรงกระบอกที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเตาเท่ากับ 300 มิลลิเมตร มีความสูง 1200 มิลลิเมตร โดยอากาศที่ใช้ประกอบด้วยอากาศปฐมภูมิและอากาศทุติยภูมิซึ่งจะไหลเข้าไปภายในเตาตามแนวเส้นสัมผัส ในการวัดจะกำหนดอัตราการไหลเชิงมวลของเกลบคงที่เท่ากับ 0.2 กิโลกรัม/นาที่ และทำการปรับอัตราส่วนมวล,  $\Phi$ , เท่ากับ 0.8, 1.0 และ 1.2 ในการเผาแต่ละครั้งจะกำหนดอัตราส่วนของอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศปฐมภูมิต่ออากาศทุติยภูมิเท่ากับ 100 : 0, 85 : 15 และ 75 : 25 จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าที่อัตราส่วนมวล 1:2 โดยมีอัตราส่วนอากาศปฐมภูมิต่ออากาศทุติยภูมิ 75 : 25 อุณหภูมิเฉลี่ยภายในเตาจะมีค่าสูงสุดเท่ากับ 929 องศาเซลเซียส และที่ระยะ 60 มิลลิเมตรจากกึ่งกลางเตาตามแนวรัศมีจะเป็นตำแหน่งที่มีอุณหภูมิเฉลี่ยสูงสุด

## BIOMASS FIRED FLUIDIZED – BED COMBUSTOR

Kittipong Suksrimaung 42515762

Chirat Pasom 42515771

Thawarn Boonjumnian 42515772

Nisit Tongprakap 42515775

Assoc.Prof.Dr. Pongjet Promvonge Advisor

### ABSTRACT

The project presents the design and test of a fluidized-bed combustor using rice husk as fuel. The combustor has a cylindrical shape with 300 mm in diameter and 1200 mm height. There are two supply air sources for the combustor : primary air and secondary air , entering tangentially into the combustor. The fuel mass flow rate is 0.2 kg / min and kept constant throughout. The equivalence ratio is set to be 0.8 , 1.0 and 1.2 for each test run. For each run , the volumetric air flow rate ratio of primary air to secondary air is adjusted to be 100 : 0 , 85 : 15 and 75 : 25 . The experiment shows that maximum temperature inside the combustor is found to be 929 °C for the air flow rate ratio of 75 : 25 and at about 60 mm from the core in the middle part is the area of peak temperature .

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้สำเร็จได้เพราะความช่วยเหลือ ข้อเสนอแนะ และกำลังใจจากบุคคลหลายท่าน ทางผู้จัดทำโครงการขอขอบพระคุณทุกท่านมา ณ โอกาสนี้

1. รศ.ดร.พงษ์เจต พรหมวงษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการที่ได้ให้ข้อเสนอแนะและคำปรึกษา ที่ทำให้โครงการนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี
2. อาจารย์วัชระ เพิ่มชาติ ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร สจล. ที่ให้คำแนะนำต่างๆ
3. อาจารย์ทุกท่านที่ได้ถ่ายทอดวิชาความรู้อันเป็นพื้นฐานในการนำไปใช้ในโครงการนี้และในอนาคตต่อไป
4. พี่ปริญญาท (พี่ลิ่ง , พี่หลุง , พี่สุ) ที่ได้ให้คำแนะนำและร่วมทำโครงการนี้
5. พี่มณฑา เนียมเมือง ที่คอยช่วยเหลือในด้านเทคนิคต่างๆ
6. เพื่อนๆและน้องๆทุกคนที่ให้กำลังใจมาตลอด
7. ขอรกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ สำหรับกำลังใจและกำลังใจทรัพย์เพื่อโครงการวิจัยนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ

หน้าที่

บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูป	VI
สารบัญตาราง	VIII
รายการสัญลักษณ์	IX
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	1
1.3 ขอบเขตงานวิจัย	2
1.4 วิธีดำเนินงานวิจัย	2
บทที่ 2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
บทที่ 3 ทฤษฎีฟลูอิดไดเซชัน	6
3.1 ประเภทฟลูอิดไดเซชัน	6
3.2 ลักษณะของฟลูอิดไดเซชัน	6
3.3 ข้อได้เปรียบและเสียเปรียบของฟลูอิดไดเซชัน	8
3.4 ทฤษฎีการคำนวณฟลูอิดไดเซชัน	9
3.5 แผนกระจายของไหล	14
3.6 การหมุนวนของอากาศทุดิยุมิ	20
3.7 การวัดอัตราการไหล	20
บทที่ 4 ทฤษฎีการเผาไหม้	25
4.1 เชื้อเพลิงชีวมวล	25
4.1.1 ประเภทของเชื้อเพลิงชีวมวล	25
4.1.2 คุณสมบัติของเชื้อเพลิงชีวมวล	25
4.2 การเผาไหม้	27
4.2.1 ปฏิริยาเคมี	28
4.2.2 การผสม	29
4.2.3 การติดไฟหรือการลุกไหม้	30
4.2.4 การเผาไหม้เชื้อเพลิงที่เป็นของแข็ง	30

## สารบัญ (ต่อ)

หน้าที่

4.2.5 อุณหภูมิ	31
4.2.6 การปั่นป่วน	31
4.2.7 เวลา	32
4.3 การเผาไหม้ในระบบฟลูอิดไดซ์เบด	32
4.4 กลไกการถ่ายเทความร้อน	33
4.4.1 การนำความร้อนในแนวรัศมี	34
4.4.2 การพาความร้อนแบบบังคับสำหรับการไหลภายในท่อ	34
4.4.3 การพาความร้อนแบบอิสระ	37
บทที่ 5 การดำเนินงานวิจัย	39
5.1 อุปกรณ์ในการทดลอง	39
5.2 วิธีการทดลอง	46
5.3 ผลการทดลอง	47
บทที่ 6 สรุป วิจารณ์และข้อเสนอแนะ	52
6.1 สรุป	52
6.2 วิจารณ์และข้อเสนอแนะ	52
บรรณานุกรม	54
ภาคผนวก	55
ภาคผนวก ก. การคำนวณออกแบบห้องเผาไหม้	56
ภาคผนวก ข. การคำนวณหาการสูญเสียความร้อน	61
ภาคผนวก ค. การคำนวณหาอัตราส่วนของอากาศกับเชื้อเพลิง	67
ภาคผนวก ง. ตารางผลการทดลอง	73
ภาคผนวก จ. แบบรายละเอียดของเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบด	92

## สารบัญรูป

หน้าที่

รูปที่ 3.1 แสดงระดับของเบดในหอทดลอง	6
รูปที่ 3.2 ลักษณะของฟลูอิดไดซ์เบด	8
รูปที่ 3.3 แสดงความดันที่เกิดขึ้น ณ ตำแหน่งต่างๆในชุดการทดลอง	10
รูปที่ 3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความกลมและความพรุนของเบด	12
รูปที่ 3.5 ลักษณะของตัวกระจายแบบแผ่นเจาะรู	15
รูปที่ 3.6 ลักษณะของตัวกระจายแบบตะแกรง	15
รูปที่ 3.7 ลักษณะของตัวกระจายแบบแผ่นอัด	16
รูปที่ 3.8 ลักษณะของตัวกระจายแบบแซนวิช	16
รูปที่ 3.9 ลักษณะของตัวกระจายแบบท่อ	17
รูปที่ 3.10 ลักษณะของตัวกระจายแบบมีหมวก	17
รูปที่ 3.11 ลักษณะของตัวกระจายแบบแผ่นกรอง	17
รูปที่ 3.12 ลักษณะของตัวกระจายแบบผสม	18
รูปที่ 3.13 ลักษณะของตัวกระจายแบบแผ่นเจาะรูหรือตะแกรงประยุกต์	18
รูปที่ 3.14 คุณภาพของฟลูอิดไดซ์ขึ้นเกิดจากแผ่นกระจายของไหลต่างกัน	19
รูปที่ 3.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า $C_{10}$ กับเรย์โนลด์นัมเบอร์ ( $Re_p$ )	20
รูปที่ 3.16 ท่อเวนจูร์ชนิดที่ทางเข้ามีลักษณะเป็นรูปกรวย	21
รูปที่ 3.17 Standard orifice plate	21
รูปที่ 3.18 แสดงโครงสร้างเรขาคณิต และจุดวัดความดันของออร์ฟิส	22
รูปที่ 3.19 แสดงการไหลผ่านแผ่นออร์ฟิส	22
รูปที่ 3.20 ออร์ฟิสแบบต่างๆ	23
รูปที่ 4.1 การเผาไหม้ในเตาแบบชนิดนิ่ง	32
รูปที่ 4.2 การเผาไหม้ในเตาแบบฟลูอิดไดซ์เบด	33
รูปที่ 4.3 แสดงหน้าตัดของห้องเผาไหม้	34
รูปที่ 5.1 เตาเผาฟลูอิดไดซ์เบด	39
รูปที่ 5.2 ห้องเผาไหม้	40
รูปที่ 5.3 ห้องอุ่นเบด	40
รูปที่ 5.4 ห้องเผาไหม้ที่มีระบบป้อนอากาศทุติยภูมิ	40
รูปที่ 5.5 ฝาครอบ	41
รูปที่ 5.6 แผ่นกระจายลม	41
รูปที่ 5.7 ระบบป้อนอากาศปฐมภูมิ	42
รูปที่ 5.8 หัวเผา	42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

หน้าที่

รูปที่ 5.9 เทอร์โมคัปเปิ้ล	42
รูปที่ 5.10 Digital indicator	43
รูปที่ 5.11 มานอมิเตอร์	43
รูปที่ 5.12 แผ่นออริฟิส	43
รูปที่ 5.13 เครื่องป้อนเกลบ	44
รูปที่ 5.14 ไชโคลน	44
รูปที่ 5.15 ถังก๊าซ	45
รูปที่ 5.16 ไดอะแกรมอุปกรณ์การทดลอง	45
รูปที่ 5.17 การกระจายของอุณหภูมิที่อัตราส่วนสมมูล 0.8 อากาศปฐมภูมิ 100 % อากาศหตุยภูมิ 0 %	47
รูปที่ 5.18 การกระจายของอุณหภูมิที่อัตราส่วนสมมูล 0.8 อากาศปฐมภูมิ 85 % อากาศหตุยภูมิ 15 %	47
รูปที่ 5.19 การกระจายของอุณหภูมิที่อัตราส่วนสมมูล 0.8 อากาศปฐมภูมิ 75 % อากาศหตุยภูมิ 25 %	48
รูปที่ 5.20 การกระจายของอุณหภูมิที่อัตราส่วนสมมูล 1.0 อากาศปฐมภูมิ 100 % อากาศหตุยภูมิ 0 %	48
รูปที่ 5.21 การกระจายของอุณหภูมิที่อัตราส่วนสมมูล 1.0 อากาศปฐมภูมิ 85 % อากาศหตุยภูมิ 15 %	49
รูปที่ 5.22 การกระจายของอุณหภูมิที่อัตราส่วนสมมูล 1.0 อากาศปฐมภูมิ 75 % อากาศหตุยภูมิ 25 %	49
รูปที่ 5.23 การกระจายของอุณหภูมิที่อัตราส่วนสมมูล 1.2 อากาศปฐมภูมิ 100 % อากาศหตุยภูมิ 0 %	50
รูปที่ 5.24 การกระจายของอุณหภูมิที่อัตราส่วนสมมูล 1.2 อากาศปฐมภูมิ 85 % อากาศหตุยภูมิ 15 %	50
รูปที่ 5.25 การกระจายของอุณหภูมิที่อัตราส่วนสมมูล 1.2 อากาศปฐมภูมิ 75 % อากาศหตุยภูมิ 25 %	51
รูปที่ ค.1 จุดวัดความดันของออริฟิสมิเตอร์	70

## สารบัญตาราง

หน้าที่

ตารางที่ 3.1 ตัวอย่างค่าความพรุนของอนุภาคชนิดต่างๆ	12
ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติของเชื้อเพลิงขี้เลื่อย	26
ตารางที่ 4.2 คุณสมบัติของเชื้อเพลิงแกลบ	27
ตารางที่ 4.3 คุณสมบัติทางกายภาพของแกลบ	27
ตารางที่ ค.1 แสดงการคำนวณการหาปริมาณของออกซิเจนที่ใช้ในการเผาไหม้	68
ตารางที่ ค.2 แสดงปริมาณอากาศที่ใช้ในการทดลอง	70
ตารางที่ ค.3 แสดงความสูงของระดับน้ำในมานอมิเตอร์	72
ตารางที่ ง.1 ผลการทดลองที่อัตราส่วนสมมูล 0.8 อากาศปฐมภูมิ 100 % อากาศหตุยภูมิ 0 %	74
ตารางที่ ง.2 ผลการทดลองที่อัตราส่วนสมมูล 0.8 อากาศปฐมภูมิ 85 % อากาศหตุยภูมิ 15 %	76
ตารางที่ ง.3 ผลการทดลองที่อัตราส่วนสมมูล 0.8 อากาศปฐมภูมิ 75 % อากาศหตุยภูมิ 25 %	78
ตารางที่ ง.4 ผลการทดลองที่อัตราส่วนสมมูล 1.0 อากาศปฐมภูมิ 100 % อากาศหตุยภูมิ 0 %	80
ตารางที่ ง.5 ผลการทดลองที่อัตราส่วนสมมูล 1.0 อากาศปฐมภูมิ 85 % อากาศหตุยภูมิ 15 %	82
ตารางที่ ง.6 ผลการทดลองที่อัตราส่วนสมมูล 1.0 อากาศปฐมภูมิ 75 % อากาศหตุยภูมิ 25 %	84
ตารางที่ ง.7 ผลการทดลองที่อัตราส่วนสมมูล 1.2 อากาศปฐมภูมิ 100 % อากาศหตุยภูมิ 0 %	86
ตารางที่ ง.8 ผลการทดลองที่อัตราส่วนสมมูล 1.2 อากาศปฐมภูมิ 85 % อากาศหตุยภูมิ 15 %	88
ตารางที่ ง.9 ผลการทดลองที่อัตราส่วนสมมูล 1.2 อากาศปฐมภูมิ 75 % อากาศหตุยภูมิ 25 %	90

## รายการสัญลักษณ์

$A_0$	พื้นที่หน้าตัดรูออริฟิส, $m^2$
$A_p$	พื้นที่หน้าตัดของท่อลมปฐมภูมิ, $m^2$
$A_s$	พื้นที่หน้าตัดของท่อลมทุติยภูมิ, $m^2$
$C_d$	สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน
$D$	เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ, $m$
$d_0$	เส้นผ่านศูนย์กลางรูของออริฟิส, $m$
$d_p$	เส้นผ่านศูนย์กลางของทรงกลมที่มีปริมาตรเทียบเท่า, $m$
$f$	ตัวประกอบเสียดทาน
$Gr_L$	แกรสซอพนัมเบอร์
$g$	ค่าแรงโน้มถ่วงของโลก, $m/s^2$
$g_c$	ค่าคงตัวของการแปลงหน่วยของค่าแรงโน้มถ่วงของโลก
$h$	สัมประสิทธิ์การพาความร้อน, $W/m^2 \cdot K$
$h_L$	การสูญเสียเนื่องจากความดัน, $m - air$
$k$	ค่าสภาพการนำความร้อน, $W/m \cdot K$
$L$	ความสูงของเตา, $m$
$L_0$	ความสูงของเบดเริ่มต้น, $m$
$L_{mf}$	ความสูงของเบดขณะเริ่มเกิดฟลูอิดไดซ์เซชัน, $m$
$m_a$	มวลของอากาศ, $kg$
$m_f$	มวลของเชื้อเพลิง, $kg$
$Nu_D$	นัสเซิลท์นัมเบอร์
$P_r$	พรานท์นัมเบอร์
$\Delta P_b$	ความดันตกคร่อมภายในเบด, $N/m^2$
$\Delta P_d$	ความดันตกคร่อมของแผ่นกระจายลม, $N/m^2$
$Q_{ac}$	อัตราการไหลของอากาศในทางปฏิบัติ, $m^3/s$
$q_r$	อัตราการถ่ายเทความร้อน, $kW$
$Ra_L$	เรย์เลย์นัมเบอร์
$Re_D$	เรย์โนลด์นัมเบอร์ภายในท่อ
$Re_p$	เรย์โนลด์นัมเบอร์ของอนุภาค
$r$	รัศมีของเตา, $m$
$T_s$	อุณหภูมิผิว, $^{\circ}K$
$T_f$	อุณหภูมิฟิล์ม, $^{\circ}K$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## รายการสัญลักษณ์ (ต่อ)

$T_\alpha$	อุณหภูมิของของไหล, °K
$U$	ความเร็วของของไหลที่ไหลผ่านเบดที่เป็นของแข็ง, m/s
$U_m$	ความเร็วเฉลี่ย, m/s
$U_{mf}$	ความเร็วที่เริ่มเกิดฟลูอิดไดซ์เซชัน, m/s
$U_T$	ความเร็วหลุดลอย, m/s
$\beta$	สัมประสิทธิ์การขยายตัว
$\epsilon_0$	สัดส่วนช่องว่างขณะเบดนิ่ง
$\epsilon_{mf}$	สัดส่วนช่องว่างขณะเริ่มเกิดฟลูอิดไดซ์เซชัน
$\phi$	อัตราส่วนสมมูล
$\phi_s$	ค่าความกลมเทียบเท่าของอนุภาคของแข็ง
$\mu$	ความหนืดสมบูรณ์, N.s/m <sup>2</sup>
$\nu$	ความหนืดจลน์, m <sup>2</sup> /s
$\rho_g$	ความหนาแน่นของของไหล, kg/m <sup>3</sup>
$\rho_s$	ความหนาแน่นของอนุภาคของแข็ง, kg/m <sup>3</sup>



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมา

ปัจจุบันประเทศไทยกำลังเผชิญปัญหาด้านพลังงานเนื่องจากน้ำมันมีราคาสูงขึ้น และประเทศไทยเป็นประเทศที่กำลังพัฒนา ปริมาณความต้องการด้านพลังงานจึงมีมากและพลังงานที่ใช้ส่วนใหญ่เป็นน้ำมันดิบที่ต้องสั่งซื้อจากต่างประเทศ ทำให้มีผลกระทบต่อสถานะทางเศรษฐกิจของประเทศ ฉะนั้นการแก้ปัญหาด้านพลังงานเชื้อเพลิงนั้นควรส่งเสริมให้มีการใช้พลังงานจากเชื้อเพลิงภายในประเทศให้มากที่สุด แหล่งของพลังงานที่เป็นทรัพยากรธรรมชาติที่มีอยู่คือ แหล่งสำรองของหินน้ำมันบริเวณด้านเหนือและด้านใต้ของอำเภอแม่สอด จังหวัดตาก แหล่งถ่านหินคุณภาพต่ำ (ลิกไนต์) ที่แม่เมาะ จังหวัดลำปาง จังหวัดกระบี่ และที่อำเภอถ้ำเขวาสันรินทร์ จังหวัดสุรินทร์ เป็นต้น นอกจากนี้ทรัพยากรดังกล่าวแล้ว เชื้อเพลิงชีวมวลคุณภาพต่ำที่เป็นผลพลอยได้จากผลิตผลทางด้านเกษตรกรรม เช่น ชีวเอทานอล แกลบ ชานอ้อย ก็สามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงได้เป็นอย่างดี เนื่องจากประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรมจึงทำให้มีปริมาณของเชื้อเพลิงชีวมวลอยู่เป็นจำนวนมาก แต่ยังไม่มีการนำมาใช้ให้เกิดประโยชน์อย่างเต็มที่ สำหรับโครงการนี้ได้นำแกลบมาใช้เป็นเชื้อเพลิงเพราะว่าจากการสำรวจพบว่ามีปริมาณแกลบอยู่เป็นจำนวนมากและทั่วประเทศเพราะมีการทำนาเกือบทั่วประเทศ จากสถิติประเทศไทยมีปริมาณแกลบประมาณ 4.4 – 4.6 ล้านตันต่อปี และเมื่อทำการเปรียบเทียบศักยภาพทางความร้อนเท่ากับน้ำมันดิบ 1.46 – 1.53 ล้านตัน [7] เพราะฉะนั้นจะเห็นได้ว่าแกลบเป็นเชื้อเพลิงที่น่าสนใจในการนำมาใช้งานในการผลิตพลังงานความร้อนออกมาใช้งานต่อไป

เนื่องจากแกลบเป็นเชื้อเพลิงคุณภาพต่ำ และวิธีการที่ใช้เผาไหม้แกลบนั้นก็เป็นการเผาไหม้โดยให้แกลบลุกไหม้ในเตาเปิดธรรมดา ทำให้ได้ปริมาณความร้อนน้อยกว่าที่ควรจะได้และทำให้เกิดมลพิษทางอากาศเนื่องจากเถ้าที่ได้จากการเผาไหม้ ฉะนั้นวิธีการที่จะเผาไหม้เชื้อเพลิงคุณภาพต่ำให้มีประสิทธิภาพของการเผาไหม้ที่ดีที่สุดและสภาพอากาศที่ออกจากปล่องไฟเป็นมลพิษน้อยที่สุดนั้นควรจะทำการเผาไหม้ในฟลูอิดไดซ์เบด ซึ่งเป็นเทคนิคที่ได้มีผู้นำมาใช้เผาไหม้เป็นเชื้อเพลิงพวกถ่านหินให้ผลดีมาแล้ว

### 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เนื่องจากเชื้อเพลิงชีวมวลเป็นเชื้อเพลิงได้นำมาใช้ผลิตพลังงานให้เป็นประโยชน์นานแล้ว แต่การเผาไหม้ที่ใช้น้ำมันยังไม่เหมาะสมกับการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล เตาเผาที่นำเอาน้ำมันมาใช้ได้กับเชื้อเพลิงชีวมวลคือเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบด จึงน่าจะมีการพัฒนานำเอาเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดมาเผาเชื้อเพลิงชีวมวล เพื่อให้ได้พลังงานนำมาใช้ทดแทนเชื้อเพลิงชนิดอื่นๆได้ เพราะเทคโนโลยีทางฟลูอิดไดซ์เบดนี้สามารถที่จะศึกษาภายในประเทศเราได้ โดยโครงการที่มีจุดประสงค์เพื่อหาข้อมูลเบื้องต้น ดังต่อไปนี้

1. ออกแบบและสร้างเครื่องมือที่ใช้ในการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลแบบฟลูอิดไดซ์เบด
2. ศึกษาหาอิทธิพลของแฟคเตอร์ต่างๆที่มีผลต่อประสิทธิภาพของเตาเผาชีวมวลแบบฟลูอิดไดซ์เบด คือ
  - 2.1 อัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิง
  - 2.2 ความเร็วของอากาศที่ใช้ในการฟลูอิดไดซ์
  - 2.3 การกระจายของอุณหภูมิภายในเตา
  - 2.4 อากาศหุติยภูมิที่มีผลต่อการเผาไหม้

### 1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1. เตาเผาแบบฟลูอิดไดซ์เบด โดยใช้หลักการของเตาเผาแบบวอร์เทค
2. พฤติกรรมการเผาไหม้แบบที่อัตราส่วนสมมูล 0.8 , 1.0 และ 1.2
3. อัตราส่วนของอากาศป้อนภูมิต่ออากาศหุติยภูมิที่ 100 : 0 , 85 : 15 และ 75 : 25

### 1.4 วิธีดำเนินงานวิจัย

1. ศึกษาและค้นคว้าข้อมูลของเตาเผาแบบฟลูอิดไดซ์เบด
2. คำนวณออกแบบและสร้างเตาเผาแบบฟลูอิดไดซ์เบด
3. ทำการทดลอง
4. ปรับปรุงแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้น
5. ทำการทดลองซ้ำและเก็บข้อมูล
6. สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง



## บทที่ 2

### งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในปัจจุบันได้มีการศึกษาในเรื่องของการนำกลับมาเป็นเชื้อเพลิงเพื่อที่จะลดต้นทุนต่างๆ และได้มีการค้นคว้ารูปแบบของเตาเผาที่เหมาะสมสำหรับประเทศไทยและต่างประเทศ รวมไปถึงระบบการทำงานต่างๆที่จะทำให้ได้เตาเผาที่มีประสิทธิภาพ งานวิจัยที่เกี่ยวข้องมีดังนี้

อดิศักดิ์ ชูจินดา [3] ได้ศึกษาและออกแบบเตาเผาเคลือบสำหรับเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบฟลูอิดไดซ์เบด ขนาด 10 ตันต่อชั่วโมง โดยได้ทำการทดลองที่ปริมาณการใช้เคลือบในการเผาไหม้ 150 กิโลกรัม/ชั่วโมง และมีการปรับตั้งระบบควบคุมอุณหภูมิที่  $319^{\circ}\text{C}$  อัตราการไหลของอากาศโดยปริมาตร 1.1096 กิโลกรัม/วินาที มีการนำเอาอากาศร้อนจากเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบดที่ผ่านการใช้งานมาแล้วกลับมาใช้ 70 % และอีก 30 % เป็นความร้อนที่ได้มาจากการเผาไหม้ของเคลือบในเตาเผาเคลือบ ทำการทดลองที่ความสูงชั้นถ่านตะแกรงขณะเผาไหม้ที่ 30, 45, 50 และ 60 เซนติเมตรตามลำดับ อุณหภูมิที่ได้จากการทดลองทั้งหมดจะเป็น 293, 296, 296, และ  $297^{\circ}\text{C}$  ตามลำดับ อุณหภูมิที่ได้จากการทดลองจะดีกว่าที่ออกแบบเนื่องมาจากมีการแกว่งของอุณหภูมิเมื่ออุณหภูมิเพิ่มไปที่  $322^{\circ}\text{C}$  ชุดควบคุมก็จะตัดวงจรควบคุมการป้อนเคลือบและระบบไประบายไอน้ำเคลือบ อุณหภูมิในช่วงนี้จะเพิ่มขึ้นไปอีก  $10^{\circ}\text{C}$  แล้วอุณหภูมิจึงเริ่มลดลงจนกระทั่งอุณหภูมิที่ชุดควบคุมลดลงเหลือ  $316^{\circ}\text{C}$  ชุดควบคุมก็จะตัดวงจรการป้อนและไประบายไอน้ำก็จะทำงานอีกครั้งหนึ่ง อุณหภูมิที่ลดลงมาและแกว่งอยู่ในช่วง  $300 - 305^{\circ}\text{C}$  สภาวะการทดลองที่เหมาะสมจะอยู่ที่ความสูงเบด 50 เซนติเมตร โดยใช้อัตราการป้อนเคลือบ 126 กิโลกรัม/ชั่วโมง อุณหภูมิที่ทางออกของระบบที่จะนำไปใช้ประโยชน์  $296^{\circ}\text{C}$  ประสิทธิภาพเชิงความร้อนรวมของระบบประมาณ 61 – 63 %

ในการทดลองถ้าความสูงชั้นถ่าน คือ ถ่านต่ำกว่า 30 เซนติเมตร จะมีผลต่อการเผาไหม้ของเคลือบที่จะเข้ามา เคลือบจะร่วงลงมากองบนตะแกรงผลทำให้อุณหภูมิแกว่งไม่แน่นอน แต่ถ้าความสูงของชั้นถ่านมากคือ 60 เซนติเมตร จะมีผลต่อการเกิดไซโคลน การทดลองที่ความสูงถ่าน 30 - 60 เซนติเมตร เมื่อนำค่าที่ได้ทั้งหมดไปคำนวณหาประสิทธิภาพรวมทั้งระบบ พบว่าค่าที่ได้มีค่าใกล้เคียงกัน คือจะอยู่ในช่วง 60 %

Yamashita [12] ได้วิจัยแหล่งพลังงานจากธรรมชาติที่มีอยู่ในโลก บางชนิดที่มีในโลก บางชนิดก็ไม่สามารถนำมาใช้ประโยชน์อย่างแท้จริงได้ แต่เคลือบสามารถใช้ประโยชน์ได้หลายอย่าง เช่น การนำมาเป็นแหล่งพลังงานความร้อน เตาเผาเคลือบที่ใช้กันอยู่หลายปีในประเทศญี่ปุ่น และความหนาแน่นของฝุ่นที่สร้างปัญหาให้กับระบบ ในการที่จะให้อากาศและชี้เข้า - ออก ในปริมาณที่ต้องการ ออกแบบและใช้แรงของอากาศให้หมุนรอบๆไซโคลน

ศศิวิมล สูงสว่าง [2] ได้ศึกษาการทำงานและกลไกการทำงานของเครื่องมือวิจัยเตาเผาไหม้แบบฟลูอิดไดซ์เบดแบบต่อเนื่อง จากนั้นเก็บข้อมูลการวิจัยโดยมีตัวแปรที่พิจารณาคือ อัตราการไหล เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของอากาศและอุณหภูมิของการเผาไหม้ เพื่อที่จะหาความสัมพันธ์กับสัมประสิทธิ์ความร้อนที่เกิดขึ้น ซึ่งทำให้ได้สภาวะที่เหมาะสมของการเผาไหม้แกลบในฟลูอิดไดซ์เบด

ในการทดลองมีการแปรความเร็วของอากาศจาก 20.62 เมตร / วินาที ถึง 45.67 เมตร / วินาที และอุณหภูมิของการเผาไหม้จาก 500 ถึง 800 °C จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าสภาวะที่เหมาะสมในการเผาไหม้แกลบในฟลูอิดไดซ์เบดคือที่ความเร็วของอากาศ 32.77 เมตร / วินาที และอุณหภูมิของการเผาไหม้ประมาณ 700 °C ซึ่งจากการคำนวณจะให้ประสิทธิภาพของการเผาไหม้ร้อยละ 96.91 โดยมีอัตราการป้อนแกลบ 3.05 กิโลกรัม / ชั่วโมง นอกจากนี้ได้มีการเปรียบเทียบแกลบที่ได้จากการเผาไหม้ตามวิธีที่ใช้ในปัจจุบันกับแกลบที่ได้จากการเผาไหม้ในฟลูอิดไดซ์เบด พบว่าประสิทธิภาพของการเผาไหม้โดยฟลูอิดไดซ์เบดจะสูงกว่าประมาณร้อยละ 47 - 53

Xuan N. V. [12] ได้ศึกษาเตาเผาแกลบ 2 ชนิด ในประเทศเวียดนาม แบบแรกคือ Inclined step – grate และแบบที่สองคือ Vortex type

เตาเผาแบบแรกจะเรียกว่า IGC (Inclined Grate and Cylindrical Combustion Chamber) มีลักษณะเป็นกล่องอยู่ทางด้านล่างที่ทำจากอิฐทนไฟ ในส่วนนี้จะเป็นห้องเผาไหม้ด้วย ภายในห้องเผาไหม้จะมีการวางตะแกรงเอียงซึ่งทำจากเหล็กหล่อ ส่วนบนจะเป็นเหล็กทรงกระบอก แกลบจะผ่านทางที่บรรจุแกลบที่ติดกับตัวเตาแล้วผ่านผิวหน้าของตะแกรงในห้องเผาไหม้ ส่วนอากาศจะเข้ามาทางด้านล่างของตะแกรงจะเกิดการเผาไหม้ที่หน้าตะแกรง และแก๊สร้อนที่ได้จะถูกดูดโดยพัดลมผ่านท่อออกไป

เตาแบบที่สอง PNF (Pneumatics – Fed Furnace) มีส่วนประกอบหลักสองส่วนคือ ห้องเผาไหม้และระบบการป้อนแกลบ โดยลักษณะโครงสร้างคล้ายกับแบบ IGC แต่ต่างกันที่แกลบที่จะเข้ามาทางกรวยที่มี Vibration Motor และผ่านมาที่ทางเข้าอากาศปฐมภูมิ (Primary Air) อากาศและแกลบถูกเป่าโดยพัดลมเป่า (Blower) ไปยังห้องเผาไหม้ โดยส่งเข้าไปในแนวสัมผัส (Tangent) แกลบที่ถูกเผาไหม้จะตกลงสู่ด้านล่าง อากาศร้อนจะลอยขึ้นด้านบน อากาศทุติยภูมิ (Secondary Air) ถูกส่งมาในแนวสัมผัสด้วย ซึ่งเป็นตัวจับฝุ่นเพื่อให้อากาศร้อนมีความสะอาดมากขึ้น และอากาศร้อนจะถูกดูดโดยพัดลมผ่านท่อด้านบนออกไป

ในการทดสอบหาประสิทธิภาพของเตาเผาจะใช้ท่อลมยาว 6 เมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.6 เมตร และติดตั้งอุปกรณ์ในการวัดอุณหภูมิ ความดัน และอุปกรณ์วิเคราะห์แก๊ส จากการทดลองของเตาทั้งสองแบบจะพบว่า เตาแบบแรก ในการอบข้าวเปลือก 367 กิโลกรัม / ชั่วโมง ใช้แกลบในการเผาไหม้ 20 – 25 กิโลกรัม / ชั่วโมง ประสิทธิภาพ 70 – 75 % ซึ่งจะลดความชื้นของข้าวเปลือกจาก 26 % ลงเหลือ 14 % มาตรฐานเปียก และอุณหภูมิในการอบแห้งเฉลี่ย 42 °C เตาเผาแบบที่สอง อบข้าวเปลือก 20 ตัน / วัน ใช้แกลบประมาณ 10 – 12 กิโลกรัม / ชั่วโมง มีประสิทธิภาพ 70 – 84 อุณหภูมิในการอบแห้ง 29 – 30 °C และเตาเผาแบบที่สองนี้จะให้อากาศร้อนที่สะอาดกว่าแบบแรก

Singh et.al. [12] ได้ออกแบบเตาเผาไซโคลนใช้ในการอบข้าวเปลือก 1 ตัน ให้ลดความชื้นจาก 35 % ลดลงเหลือ 14 % มาตรฐานแห้ง โดยมีลักษณะรูปทรงกระบอกและรูปกรวยด้านล่างมี Cyclone Chamber อยู่ด้านล่าง เตามีความจุ 0.34 ลูกบาศก์เมตร มีท่อทางออกที่ตอนล่างของรูปกรวย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นทางออกของแก๊สเชื้อเพลิงและมีแผ่นเหล็กเจาะรูติดกับทางออกเพื่อดักเขม่าในกรวย และถูกปล่อยออกมาเป็นวงๆ ทางช่องด้านข้างของกรวย Cyclone Chamber จะประกอบด้วย Cylinder ที่มีความยาว 70 เซนติเมตร กว้าง 40 เซนติเมตร พร้อมทำมุมกับตัวเตา 30 องศา



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### ทฤษฎีฟลูอิดไดเซชัน

ฟลูอิดไดเซชันเป็นปรากฏการณ์ที่อนุภาคของแข็งขนาดเล็กถูกทำให้อยู่ในสภาพคล้ายของไหล ด้วยการพองโดยก๊าซหรือของเหลวที่ไหลผ่านเบดของแข็งขึ้นไปด้านบนด้วยอัตราการไหลค่าหนึ่ง โดยมีการถ่ายเทมวลสาร ความร้อน และปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นในขณะที่มีการสัมผัสระหว่างอนุภาคของแข็ง

#### 3.1 ประเภทของฟลูอิดไดเซชัน [1]

กระบวนการฟลูอิดไดเซชันแบ่งตามลักษณะการเกิดได้สองแบบ คือ

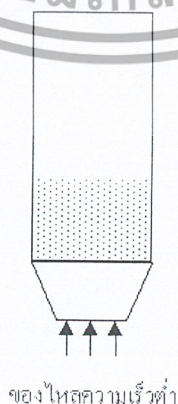
3.1.1 ฟลูอิดไดเซชันสองสถานะ (Two - phases fluidization) หมายความว่าในหอตกลง หรือเบดที่ใช้งานจะประกอบด้วยสองสถานะคือ ของแข็งกับของไหล ของไหลนี้อาจจะเป็นก๊าซหรือของเหลวก็ได้ ดังนั้นฟลูอิดไดเซชันจึงแบ่งออกอีก 2 ประเภท คือ

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

3.1.2 ฟลูอิดไดเซชันสามสถานะ (Three - phases fluidization) หมายความว่าภายในหอตกลงจะประกอบด้วยของสามสถานะในเวลาเดียวกันคือ ของแข็ง, ของเหลวและก๊าซ สำหรับฟลูอิดไดเซชันสามสถานะเป็นกระบวนการที่พัฒนามาจากฟลูอิดไดเซชันสองสถานะ

#### 3.2 ลักษณะฟลูอิดไดเบด [5]

เบด (Bed) หมายถึงอาณาเขตในหอตกลงที่มีอนุภาคของแข็งบรรจุอยู่ ไม่ว่าอนุภาคของแข็งนั้นจะอยู่นิ่งหรือเคลื่อนไหวด้วยของไหลในหอตกลง จะระดับตั้งแต่แผ่นโลหะที่ทำเป็นตะแกรงรองรับหรือเป็นตัวกระจายของไหลจนถึงระดับสูงสุด คือผิวหน้าของอนุภาคของแข็งที่อยู่ในหอตกลง ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แสดงระดับของเบดในหอตกลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปรากฏการณ์ฟลูอิดไดเซชันเกิดขึ้นได้หลายลักษณะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบบางประการ เช่น ความเร็วของของไหล ชนิดของเม็ดวัสดุที่ประกอบกันเป็นเบด ลักษณะของแผ่นกระจายของไหล เมื่อความเร็วของของไหลเปลี่ยนแปลงไปจะทำให้ความดันตกในเบดเปลี่ยนแปลงไปด้วย ดังรูปที่ 3.2 ลำดับเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นเมื่อค่อยๆ เพิ่มความเร็วของของไหลสรุปได้ดังนี้คือ

3.2.1 เมื่อป้อนของไหลด้วยความเร็วต่ำๆ ของไหลจะไหลผ่านช่องว่างระหว่างอนุภาคของแข็งไปโดยไม่ทำให้อนุภาคของแข็งเคลื่อนที่ เบดลักษณะนี้เรียกว่า เบดนิ่ง (Fixed bed)

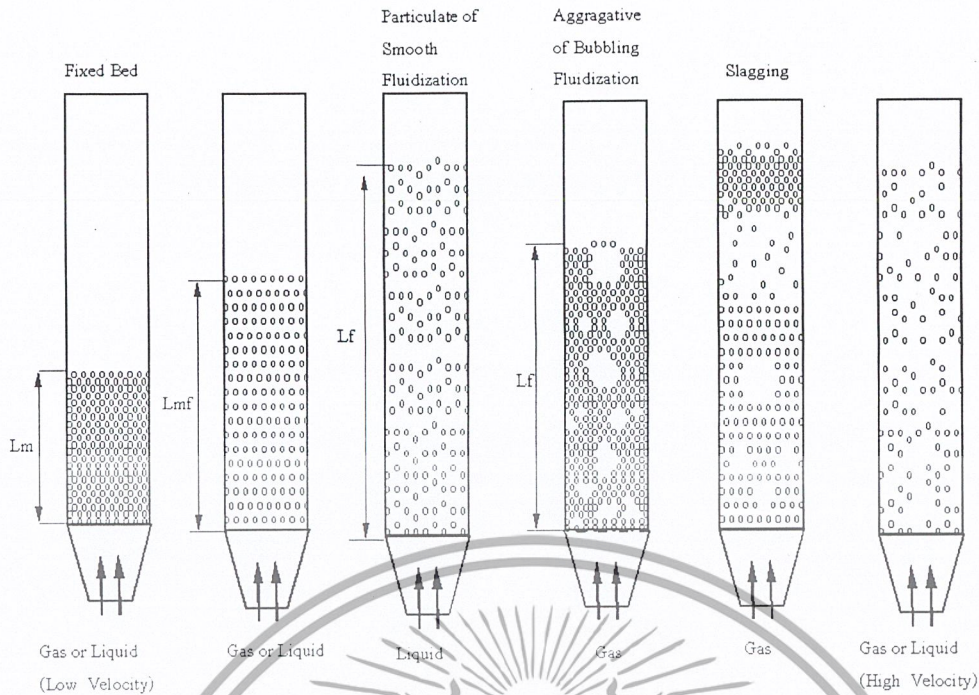
3.2.2 เมื่อความเร็วของของไหลสูงขึ้นอนุภาคของแข็งจะเคลื่อนที่ห่างออกจากกัน ลักษณะเช่นนี้เรียกว่า เบดขยาย (Expanded bed)

3.2.3 เมื่อเพิ่มความเร็วของของไหลขึ้นอีกจนถึงจุดๆหนึ่ง ซึ่งแรงเสียดทานระหว่างอนุภาคของแข็งกับของไหลสมดุลกับน้ำหนักของอนุภาคของแข็ง และแรงกระทำระหว่างอนุภาคของแข็งในแนวตั้งหายไป อนุภาคของแข็งที่ประกอบกันเป็นเบดจะลอยตัวเป็นอิสระ แรงกระทำเนื่องจากความดันตกในเบดระนาบตัดใดๆ ของเบดจะเท่ากับน้ำหนักของของไหลและอนุภาคของแข็งระหว่างหน้าตัดนั้นๆ เบดในสภาพเช่นนี้เป็นเบดที่เริ่มฟลูอิดไดซ์ เรียกเบดในลักษณะนี้ว่า อินซิเพียนฟลูอิดไดซ์เบด (Incipiently fluidized bed) หรือเบดที่มีสภาพฟลูอิดไดเซชันต่ำสุด (Minimum fluidization)

3.2.4 เมื่อของไหลมีความเร็วมากกว่าความเร็วที่กล่าวในหัวข้อ 3.2.3 อนุภาคของแข็งจะเคลื่อนที่ห่างออกจากกันมากขึ้นตามความเร็วของของไหล จะเริ่มเกิดฟองก๊าซ (Bubbles) เกิดขึ้นอนุภาคของแข็งเริ่มไหลหมุนเวียนดีขึ้น เมื่อความเร็วของของไหลเพิ่มสูงขึ้น จะทำให้เกิดการผสมผสานและการไหลเวียนของของแข็งจะรุนแรงยิ่งขึ้น เบดในลักษณะเช่นนี้เรียกว่า บับเบิ้ลฟลูอิดไดซ์เบด (Bubbling fluidized bed) ส่วนของเบดที่ไม่รวมฟองเรียกว่า อิมัลชันเฟส (Emulsion phase)

3.2.5 ฟลูอิดไดซ์เบดที่สามารถบ่งบอกระดับเบดได้เรียกว่า ฟลูอิดไดซ์เบดแบบหนาแน่น (Dense phase fluidized bed) และเมื่อความเร็วของของไหลมากกว่าความเร็วหลุดลอย (Terminal velocity) อนุภาคของของแข็งจะหลุดลอยไปกับกระแสการไหลของของไหล สถานะเรียกว่า ฟลูอิดไดซ์เบดแบบเจือจาง (Lean phase fluidized bed) หรือการขนถ่ายด้วยของไหล (Pneumatic or Hydraulic transport)

3.2.6 ฟลูอิดไดซ์เบดที่ของไหลเป็นของเหลว การขยวตัวของเบดเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ การลอยตัวและการหมุนรอบตัวเองของอนุภาคของแข็งเป็นไปอย่างช้าๆ เราเรียกเบดแบบนี้ว่าเบดสม่ำเสมอ (Smoothly fluidized bed) ฟลูอิดไดซ์เบดที่ของไหลเป็นก๊าซลักษณะของเบดจะแตกต่างจากของเหลวมาก เพราะว่าเมื่อความเร็วของก๊าซสูงกว่าความเร็วที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดเซชันแล้วก๊าซส่วนหนึ่งยังทำหน้าที่ให้เกิดการลอยตัวของอนุภาคของแข็งเหมือนเดิม แต่มีอีกส่วนหนึ่งรวมตัวแล้วเกิดเป็นฟองก๊าซเกิดขึ้น ฟองก๊าซจะแทรกตัวสูงขึ้นมายังบนผิวหน้าของเบดและแตกตัวในที่สุด การเคลื่อนที่ของอนุภาคของแข็งภายในเบดจะเคลื่อนที่อย่างไม่เป็นระเบียบ



รูปที่ 3.2 ลักษณะของฟลูอิดไดซ์เบด

### 3.3 ข้อได้เปรียบและเสียเปรียบของฟลูอิดไดซ์เซน [1]

เป็นการเปรียบเทียบการได้เปรียบและการเสียเปรียบระหว่างการใช้เทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดกับเทคนิคอื่นๆ ดังมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

#### 3.3.1 ข้อได้เปรียบ

1. เนื่องจากอนุภาคของแข็งที่เคลื่อนที่อยู่ตลอดเวลา ทำให้เกิดการผสมกันอย่างรวดเร็วจึงสม่ำเสมอ อนุภาคภายในเบดคงที่ตลอด ซึ่งต่างจากเบดนิ่งซึ่งอนุภาคจะไม่เท่ากันตลอดทั้งเบด
2. การทำงานด้วยฟลูอิดไดซ์เบดจะเสียพลังงานน้อยกว่า เพราะแรงเสียดทานและแรงดันตกคร่อมเบดน้อยกว่าแบบบรรจุมาก
3. มีการจัดเรียงตัวของอนุภาคของแข็ง อนุภาคที่มีน้ำหนักน้อยจะอยู่ส่วนบน ส่วนอนุภาคที่มีน้ำหนักมากกว่าจะอยู่ด้านล่าง ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการแยกขนาดของอนุภาคของแข็งได้ นอกจากนี้แรงเสียดทานต่อการไหลของของไหลมีน้อยกว่ามาก
4. จากคุณสมบัติที่คล้ายของไหลจึงสามารถทำงานแบบต่อเนื่องได้ คือ ปล่อยให้ของแข็งไหลออกจากเบดและไหลเติมเข้าไปในเบดได้ การควบคุมก็จะทำได้ง่าย
5. พื้นที่สัมผัสระหว่างอนุภาคของแข็งกับของไหลจะมีมากกว่าเมื่อเทียบกับเบดนิ่งที่มีอนุภาคของแข็งเท่ากัน จึงมีประโยชน์ในการใช้งานที่มีการถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวลสาร
6. ที่อนุภาคของไหลหมุนเวียนอยู่ภายในเบด อนุภาคของแข็งนี้สามารถจะเป็นตัวนำความร้อนจากแหล่งความร้อนให้กับของไหลได้มากกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.2 ข้อเสียเปรียบ

1. เนื่องจากการผสมกันอย่างรวดเร็ว บางครั้งอนุภาคของของแข็งมีช่วงเวลาอยู่ในเบดสั้นเกินไป เมื่อทำงานแบบต่อเนื่องจึงทำให้ผลลัพธ์เลวลง หรืออนุภาคของแข็งมีคุณสมบัติทางกายภาพไม่ตรงตามข้อกำหนด
2. การสิ้นสະเทือนของหอตลอดหรือเกิดการกัดกร่อนเนื่องจากอนุภาคของแข็งมากระทบกับผนังหอตลอด
3. เวลาที่ของไหลสัมผัสกับอนุภาคของแข็งสั้นมาก จึงต้องใช้เบดสูงๆหรือเบดหลายๆชั้นซึ่งเปลืองเงินลงทุนมาก
4. มักเกิดฟองก๊าซในเบด ทำให้การสัมผัสกันไม่ดีเป็นการสูญเสียเปลือง ถ้ายังเป็นกระบวนการที่มีการเปลี่ยนแปลงทางเคมีจะต้องใช้ตัวเร่งช่วยแล้ว ทำให้เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงลดลง
5. ใช้กับอนุภาคของแข็งที่เป็ยกหรือเป็นยางไม่ได้ เพราะเกิดการเกาะเป็นก้อนใหญ่และตกตะกอนมายังส่วนล่างของเบด
6. การทำงานมีข้อจำกัด เพราะถ้ามีความเร็วของของไหลมากเกินไปเม็ดของแข็งก็จะออกมาจากเบดไปพร้อมกับของไหล
7. ในปฏิกิริยาที่ทำให้ตัวเร่งมีขนาดลดลง จะต้องปรับความเร็วของก๊าซเพื่อไม่ให้ตัวเร่งปลิวทำให้ได้ผลิตผลน้อยลง

### 3.4 ทฤษฎีการคำนวณฟลูอิดไดเซชัน [5]

ขณะที่ของของไหลไหลผ่านขึ้นมาด้านใกล้ผนัง ความเร็วของไหลจะต่ำมากหรือเกือบไม่มีการไหลเลยเนื่องจากเกิดแรงเสียดทาน เมื่อในหอตลอดที่บรรจุอนุภาคของแข็งมีอิทธิพลของฝาผนังเกิดขึ้น ขอบเขตการไหลชนิดเรียบจะสูงมากขึ้น พื้นที่ในการไหลของของไหลในหอตลอดจะลดน้อยลง หรือเส้นผ่านศูนย์กลางที่ทำงานที่แท้จริงของของไหลเล็กกว่าเดิมมาก ประสิทธิภาพการทำงานจะน้อยลงด้วย

ตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อการเกิดฟลูอิดไดเซชันคือ

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

ความสูงของเบดเมื่อเริ่มฟลูอิดไดเซชันสามารถหาได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\frac{L_0}{L_{mf}} = \frac{1 - \varepsilon_{mf}}{1 - \varepsilon_0} \quad (3.1)$$

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

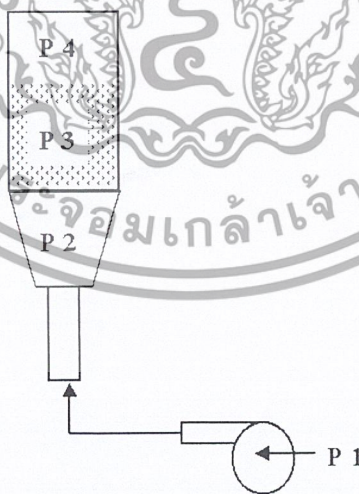
$$(\text{แรงพยุงของของไหล}) + (\text{แรงต้านทานการไหล}) = (\text{น้ำหนักของอนุภาคของแข็งในเบด}) \quad (3.2)$$

$$(\text{ความดันลดในเบด}) (\text{พื้นที่หน้าตัดของคอลัมน์}) = (\text{ปริมาตรของเบด}) (\text{แฟรคชันของของแข็ง}) (\text{น้ำหนักจำเพาะของของแข็ง}) \quad (3.3)$$

$$\Delta P_b A_t = W = (A_t L_{mf}) (1 - \varepsilon_{mf}) (\rho_s - \rho_g) \frac{g}{g_c} \quad (3.4)$$

จัดเทอมใหม่สำหรับสภาพฟลูอิดไดเซชันต่ำสุด

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



รูปที่ 3.3 แสดงความดันที่เกิดขึ้น ณ ตำแหน่งต่างๆในชุดการทดลอง

จากสมการความดันตกคร่อมที่ผ่านเบดหนึ่งจะได้ว่า กลไกของความดันตกคร่อมในเบดที่ใช้ อนุภาคของแข็งขนาดสม่ำเสมอแล้ว พบว่าความดันตกคร่อมนี้เป็นสัดส่วนกับแฟกเตอร์ 2 แฟกเตอร์ คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{\Delta P_b}{L} g_c = \frac{150(1-\epsilon_{mf})\mu U}{\epsilon_{mf}^3 (\phi_s d_p)^2} + \frac{1.75(1-\epsilon_{mf})\rho_g U^2}{\epsilon_{mf}^3 (\phi_s d_p)} \quad (3.6)$$

เทอมแรกทางด้านขวาของสมการ 3.6 แทนการสูญเสียความดันเนื่องจากผลของความเสียดทาน เทอมที่สองเป็นผลของการสูญเสียพลังงานจลน์ที่  $Re_p < 20$  โดยที่แรงเสียดทานจะมีค่ามากกว่า ดังนั้นสมการที่ 3.6 สามารถตัดเทอมที่สองได้เป็น

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

ที่  $Re_p > 1000$  ผลของการสูญเสียพลังงานจลน์จะมีค่ามากกว่าผลของแรงเสียดทาน สมการที่ 3.6 จัดใหม่ได้เป็นดังนี้

$$\frac{\Delta P_b}{L} g_c = \frac{1.75(1-\epsilon_{mf})\rho_g U^2}{\epsilon_{mf}^3 (\phi_s d_p)} \quad (3.8)$$

ซึ่งสมการของ Ergun นี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับสมการที่ 3.6 ได้ เมื่อเบดอยู่ที่จุดเริ่มเกิดฟลูอิดไดเซชัน ดังนั้นจะแทนสมการที่ 3.6 ลงในสมการที่ 3.5 ในขณะที่เริ่มเกิดฟลูอิดไดเซชันได้ตั้งสมการที่ 3.9

$$\frac{1.75}{\epsilon_{mf}^3 \phi_s} \left[ \frac{d_p U_{mf} \rho_g}{\mu} \right]^2 + \frac{150(1-\epsilon_{mf})(U_{mf} d_p \rho_g)}{\mu \epsilon_{mf}^3 \phi_s^2} = \frac{d_p^3 \rho_g (\rho_s - \rho_g) g}{\mu^2} \quad (3.9)$$

ในเบดที่ใช้อุณหภูมิของแข็งขนาดเล็กจะทำให้สามารถใช้ความเร็วของของไหลเพียงเล็กน้อยก็ทำให้เกิดฟลูอิดไดเซชันได้แล้ว เพราะฉะนั้นความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดเซชันเมื่อ  $Re_p < 20$  สามารถคำนวณได้จาก

$$U_{mf} = \frac{(\phi_s d_p)^2 (\rho_s - \rho_g) g \epsilon_{mf}^3}{150 \mu (1 - \epsilon_{mf})} \quad (3.10)$$

สำหรับอนุภาคของแข็งขนาดใหญ่ต้องใช้ความเร็วของไหลสูงมากจึงทำให้อนุภาคของแข็งลอยเป็นอิสระได้ ดังนั้นความเร็วต่ำสุดของของไหลที่จะทำให้เกิดฟลูอิดไดเซชันเมื่อ  $Re_p > 1000$  สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$U_{mf} = \sqrt{\frac{\phi_s d_p (\rho_s - \rho_g) g \epsilon_{mf}^3}{1.75 \rho_g}} \quad (3.11)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าความพรุนของเบด ( $\epsilon_{mf}$ ) มีค่าเท่ากับปริมาตรช่องว่างหารด้วยปริมาตรของเบด เป็นค่าที่วัดได้โดยตรง เช่น โดยการแทนที่ด้วยของเหลว ดังแสดงตัวอย่างค่าความพรุนของอนุภาคที่ความกลมและขนาดอนุภาคต่างๆในตารางที่ 3.1

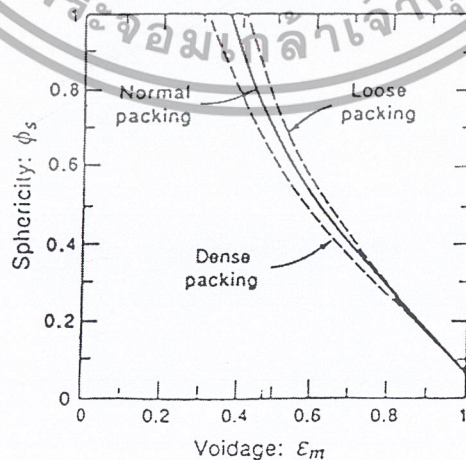
Particle	Size, $d_p$ (mm)						
	0.02	0.05	0.07	0.10	0.20	0.30	0.40
Sharp sand $\phi_s = 0.67$	-	0.60	0.59	0.58	0.54	0.50	0.49
Round sand $\phi_s = 0.86$	-	0.56	0.52	0.48	0.44	0.42	-
Mixed round sand	-	-	0.42	0.42	0.41	-	-
Coal and glass powder	0.72	0.67	0.64	0.62	0.57	0.56	-
Anthracite $\phi_s = 0.63$	-	0.62	0.61	0.60	0.56	0.53	0.51
Absorption carbon	0.74	0.72	0.71	0.69	-	-	-
Fischer – Tropsch catalyst $\phi_s = 0.58$	-	-	-	0.58	0.56	0.55	-
Carborundum	-	0.61	0.59	0.56	0.48	-	-

ตารางที่ 3.1 ตัวอย่างค่าความพรุนของอนุภาคชนิดต่างๆ [13]

ค่าความกลมของอนุภาค ( $\phi_s$ ) ไซบิงบอกถึงรูปร่างว่าอนุภาคเบี่ยงเบนจากทรงกลมมากน้อยเพียงใด นิยามว่า

$$\phi_s = \frac{\text{พื้นที่ผิวของทรงกลมเมื่อปริมาตรเท่ากัน}}{\text{พื้นที่ผิวของอนุภาค}} \quad (3.12)$$

จากรูปที่ 3.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความกลมและความพรุนของเบด จะเห็นว่าเมื่อความกลมของอนุภาคลดลง ค่าความพรุนจะเพิ่มขึ้น



รูปที่ 3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความกลมและความพรุนของเบด [13]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

$$\frac{1}{\phi_s \varepsilon_{mf}^3} = 14 \quad (3.13)$$

$$\frac{(1 - \varepsilon_{mf})}{\phi_s^2 \varepsilon_{mf}^3} = 11 \quad (3.14)$$

แทนค่าสมการที่ 3.14 ลงในสมการที่ 3.9 แล้วค่า  $U_{mf}$  จะได้

$$U_{mf} = \frac{\mu}{d_p \rho_g} \sqrt{\left\{ (33.7)^2 + \frac{0.0408 d_p^3 \rho_g (\rho_s - \rho_g) g}{\mu^2} \right\} - 33.7} \quad (3.15)$$

สมการที่ 3.15 นี้ มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน 34% ในช่วง  $0.001 < Re_p < 4000$

ความเร็วเริ่มหลุดลอยหรือความเร็วตกอิสระของอนุภาคของแข็งเป็นความเร็วของของไหลที่ไหลผ่านฟลูอิดไลซ์เบดถูกจำกัดด้วยความเร็วต่ำสุด ความเร็วเริ่มหลุดลอยแสดงได้ดังสมการ

$$U_T = \left[ \frac{4 d_p (\rho_s - \rho_g) g}{3 \rho_g C_d} \right]^{1/2} \quad (3.16)$$

โดยที่  $C_d$  เป็นค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานซึ่งหามาจากการทดลอง และจากการทดลองพบว่า  $C_d$  ขึ้นอยู่กับค่า  $Re_p$  ดังสมการ

$$C_d = \frac{24}{Re_p} \quad \text{เมื่อ } Re_p < 0.4 \quad (3.17)$$

$$C_d = \frac{10}{\sqrt{Re_p}} \quad \text{เมื่อ } 0.4 < Re_p < 500 \quad (3.18)$$

$$C_d = 0.43 \quad \text{เมื่อ } 500 < Re_p < 200000 \text{ หรือ } 1000 < Re_p \quad (3.19)$$

แทนค่าจากสมการ 3.17, 3.18 และ 3.19 ลงในสมการที่ 3.16 แล้วหาค่า  $U_T$  จะได้

$$U_T = \frac{g(\rho_s - \rho_g)d_p^2}{18\mu} \quad \text{เมื่อ } Re_p < 0.4 \quad (3.20)$$

$$U_T = d_p \left[ \frac{4(\rho_s - \rho_g)^2 g^2}{225\rho_g\mu} \right]^{\frac{1}{3}} \quad \text{เมื่อ } 0.4 < Re_p < 500 \quad (3.21)$$

$$U_T = \left[ \frac{3.1g(\rho_s - \rho_g)d_p}{\rho_g} \right]^{\frac{1}{2}} \quad \text{เมื่อ } 500 < Re_p < 200000 \text{ หรือ } 1000 < Re_p \quad (3.22)$$

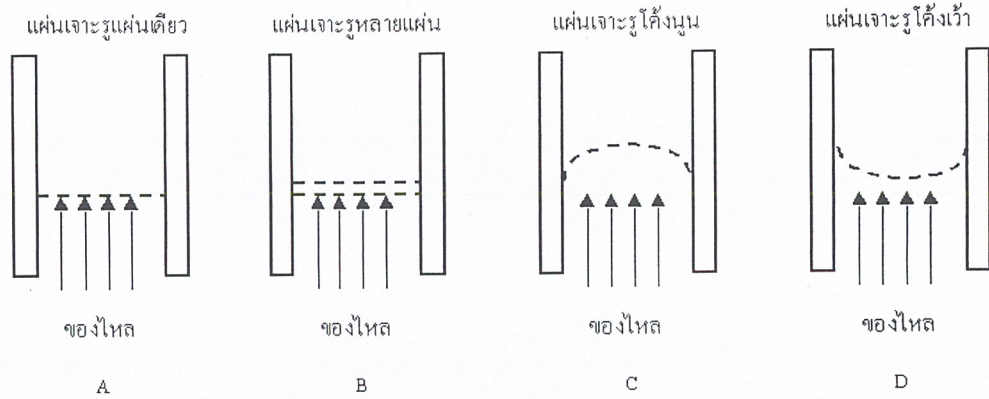
เพื่อหลีกเลี่ยงมีอนุภาคของแข็งหลุดลอยออกจากเบด ความเร็วของของไหลที่ใช้ในระบบฟลูอิดไดซ์เบดจะต้องมีค่าอยู่ระหว่างความเร็ว  $U_{mf}$  และความเร็ว  $U_T$  ในการคำนวณหาความเร็ว  $U_{mf}$  เนื่องจากอนุภาคของแข็งมีการกระจายขนาด ดังนั้นขนาดของอนุภาคของแข็งที่ใช้จะเป็นขนาดโดยเฉลี่ย ส่วนการคำนวณความเร็ว  $U_T$  จะใช้ขนาดของอนุภาคของแข็งที่เล็กที่สุดปะปนอยู่ในเบด

### 3.5 แผ่นกระจายของไหล

หน้าที่ของแผ่นกระจายของไหลคือ เป็นอุปกรณ์ป้องกันเพื่อไม่ให้อนุภาคหลุดลงมาด้านล่างและสามารถให้ของไหลไหลผ่านได้ โดยสามารถกระจายของไหลออกได้เต็มพื้นที่ผิวหน้าตัดของตัวเครื่อง โดยที่ความเร็วของของไหลที่เหนือแผ่นกระจายของไหลควรมีค่าเท่ากันทุกจุด และองค์ประกอบที่สำคัญอีกส่วนหนึ่งที่ทำให้ลักษณะของกลุ่มอนุภาคอยู่ในสถานะเสมือนของไหลได้ดีหรือไม่ก็คือ ความดันตกคร่อม โดยของไหลที่ไหลผ่านแผ่นกระจายของไหล ถ้าหากความดันตกคร่อมน้อยเกินไปจะไม่ดี ความดันตกคร่อมโดยทั่วไปจะต้องไม่ต่ำกว่า 10 % ของความดันตกคร่อมที่เกิดจากการไหลของของไหลผ่านกลุ่มอนุภาคขณะลอยตัว

ลักษณะของแผ่นกระจายของไหลแบบต่างๆมีดังต่อไปนี้

3.5.1 แบบแผ่นเจาะรู (Perforate plate) แผ่นกระจายของไหลแบบแผ่นเจาะรูนั้น ทำได้โดยการนำแผ่นวัสดุมาเจาะรูให้มีรูปร่างและขนาดตามที่ต้องการ โดยทั่วไปถ้าเจาะรูน้อยลักษณะของอนุภาคเหนือแผ่นกระจายในขณะลอยตัว หรืออยู่ในสถานะเสมือนของไหลจะมีผลทำให้ความหนาแน่นไม่สม่ำเสมอ จะมีฟองอากาศใหญ่เกิดขึ้น โดยเฉพาะเมื่อความเร็วสูงๆ ดังนั้นจำนวนรูและการเจาะจึงมีส่วนสำคัญ แผ่นกระจายของไหลแบบนี้ใช้กันมากในห้องปฏิบัติการและเครื่องทดลองขนาดกลาง เพราะทำง่าย ราคาถูก และมีคุณสมบัติที่พอสมควร แสดงได้ในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.5 ลักษณะของตัวกระจายแบบแผ่นเจาะรู

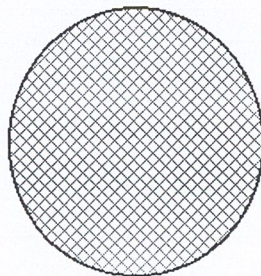
ในกรณีของขนาดตัวเครื่องใหญ่มาก ถ้าใช้แผ่นกระจายของไหลแบบดังกล่าวจะมีปัญหาเรื่องการรับน้ำหนัก หรือเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความร้อนทำให้งอหรือบิดโค้ง จึงดัดแปลงทำเป็นแบบโค้งดังแสดงในรูปที่ 3.5 C และรูปที่ 3.5 D

สำหรับในรูป C นั้นจะช่วยลดหรือแก้ปัญหาการเกิดฟอง และการผ่านไปเป็นช่องที่มักเกิดขึ้นตรงกลางแผ่นรูเจาะได้ดี

สำหรับในรูป D นั้น ถ้าเจาะรูด้านข้างๆ ให้มากกว่าตรงกลางแล้วจะทำให้เกิดความสม่ำเสมอภายในกลุ่มอนุภาคเหนือแผ่นกระจายของไหลมากยิ่งขึ้น

3.5.2 แบบตะแกรง ( Sieves ) แผ่นกระจายของไหลแบบนี้เป็นตะแกรงเหมือนมุ้งลวดเหมาะสำหรับตัวเครื่องขนาดเล็ก เพราะตะแกรงจะรับน้ำหนักมากๆ ไม่ได้ และอีกประการหนึ่งความดันของการไหลผ่านตะแกรงจะต่ำมาก ดังนั้นจึงจะบรรจุกลุ่มอนุภาคไว้ด้านล่างของตะแกรงเป็นกลุ่มอยู่กับที่ นอกจากจะช่วยให้ความดันลดของแผ่นกระจายเพิ่มขึ้นเท่าลึบค่าต่ำสุดของค่าที่ต้องการ และยังช่วยให้ลักษณะการไหล ( Profile ) ของของไหลเป็นแบบเรียบไม่เหมือนลึบสภาพของไหลที่ไหลอยู่ในท่อโดยทั่วไป ซึ่งมีความเร็วบริเวณส่วนกลางท่อจะสูงกว่าข้างๆ

ตะแกรงนั้นถ้าใช้ในกรณีรับน้ำหนักมากๆ อาจต้องใช้ร่วมกับแผ่นเจาะรูโดยใส่ตะแกรงให้อยู่ในระหว่างแผ่นเจาะรู ซึ่งทำให้นอกจากจะแข็งแล้วยังไม่จำเป็นต้องเจาะรูบนแผ่นให้เล็กมากซึ่งจะเสียเวลามากกว่า แสดงได้ดังรูปที่ 3.6



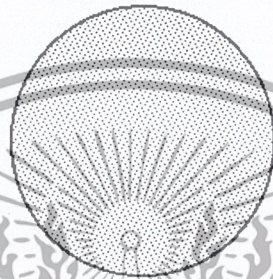
รูปที่ 3.6 ลักษณะของตัวกระจายแบบตะแกรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5.3 แบบแผ่นอัด ( Sintered plate ) เป็นแผ่นกระจายของไหลแบบที่ทำจากการนำเอาวัสดุที่จะนำเอามาทำแผ่นกระจายของไหลที่มีขนาดเล็ก และอัดเป็นก้อนติดกัน โดยที่แผ่นวัสดุดังกล่าวเมื่อถูกอัดแล้วก็ยังยอมให้ของไหลไหลผ่านได้

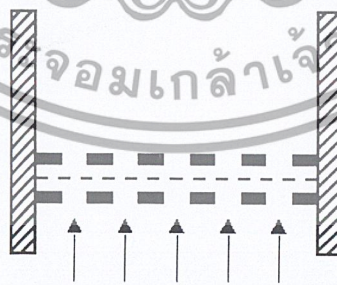
แผ่นกระจายของไหลแบบนี้เป็นแบบที่ตีที่สุด ทำให้เกิดสถานะเสมือนของไหลที่ตีมาก การเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของกลุ่มสถานะเสมือนของไหลน้อยมาก ขนาดของช่องเล็กกลึงมีการใช้งานตั้งแต่ขนาดเล็กจนถึงปานกลาง

ข้อเสียของแผ่นกระจายของไหลแบบนี้ก็คือ เวลาของไหลไหลผ่านจะเกิดความดันตกอย่างมาก ทำให้สูญเสียพลังงาน หรือค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับแบบอื่นๆที่กล่าวมาแล้ว ดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 ลักษณะของตัวกระจายแบบแผ่นอัด

3.5.4 แบบแซนวิช ( Sandwich ) เป็นแผ่นกระจายของไหลแบบที่มีลักษณะคล้ายกับแบบที่ 1 และ 2 แต่จะมีกลุ่มอนุภาคกึ่งอยู่ระหว่างแผ่นดังกล่าวด้วย ระบบการกระจายของไหลแบบนี้จะทำให้การกระจายของของไหลสม่ำเสมอขึ้น และในกรณีที่มีความร้อนเกิดขึ้นด้วยจะสามารถแยกส่วนล่างออกของแผ่นกระจายของไหลจากความร้อนดังกล่าวได้ดี แต่ไม่เหมาะสมสำหรับกรณีที่เป็นของไหลมีอนุภาคที่เล็กปนอยู่ เพราะจะทำให้เกิดการอุดตันได้เมื่อใช้งานไปสักระยะหนึ่งทำให้ของไหลไหลผ่านได้สะดวกไม่เกิดความดันตกสูงกว่ที่ต้องการ แสดงได้ดังรูปที่ 3.8

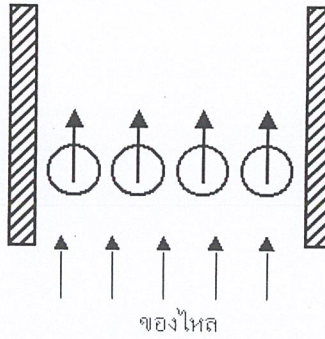


ของไหล

รูปที่ 3.8 ลักษณะของตัวกระจายแบบแซนวิช

3.5.5 แบบท่อ หรือท่อเจาะรู ในกรณีที่เป็นอนุภาคขนาดใหญ่อาจใช้แบบท่อวางขนานกันแล้วให้ของไหลไหลผ่านท่อหรือเจาะรูบนท่อแล้วของไหลไหลผ่านท่อ ผ่านรูดังกล่าว แสดงได้ดังรูปที่ 3.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



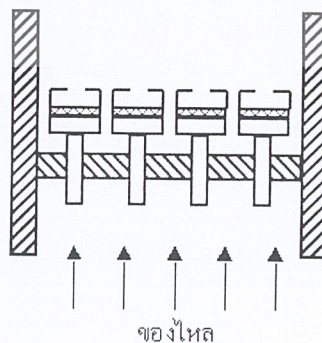
รูปที่ 3.9 ลักษณะของตัวกระจายแบบท่อ

3.5.6 แบบมีหมวก ( Bubble cap ) เป็นแผ่นกระจายของไหลแบบคล้ายกับที่ใช้ในหอกลับ ( Bubble plate) เพื่อไม่ให้อนุภาคไหลผ่านแผ่นกระจายของไหลลงไปสู่ด้านล่าง แต่ก็ไม่ดีหลายประการด้วยกัน เช่น ทำให้เกิดกองอยู่เป็นหย่อมๆบนแผ่น อาจทำให้เกิดการไม่สม่ำเสมอของคุณสมบัติภายในตัวเครื่องได้ การเกิดติดกันบนแผ่นและติดกันบนแผ่นกระจายยากต่อการสร้าง ดังแสดงได้ดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 ลักษณะของตัวกระจายแบบมีหมวก

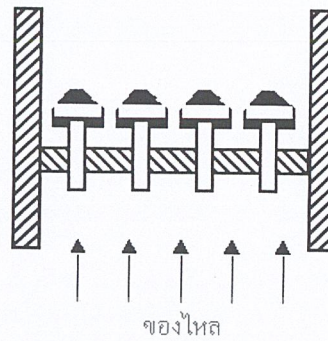
3.5.7 แบบแผ่นกรอง ( Multiple filter plate) เป็นแผ่นกระจายของไหลแบบที่เหมาะสมมากสำหรับอนุภาคขนาดเล็กๆที่ไม่ต้องการให้หล่นผ่านแผ่นกระจายของไหลลงไปข้างล่างแต่ก็มีข้อเสีย เช่น ของไหลที่ไหลผ่านจะต้องไม่มีสารที่ทำให้เกิดการอุดตัน ดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 ลักษณะของตัวกระจายแบบแผ่นกรอง

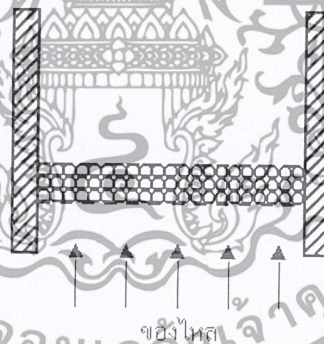
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5.8 แบบระบบผสม (Mixing nozzle system) เป็นระบบกระจายของไหลโดยให้หัวพ่นของไหลอยู่ทางด้านล่างของกลุ่มอนุภาค ทำให้เกิดการหมุนเวียนภายในกลุ่มอนุภาคดีขึ้นดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 ลักษณะของตัวกระจายแบบผสม

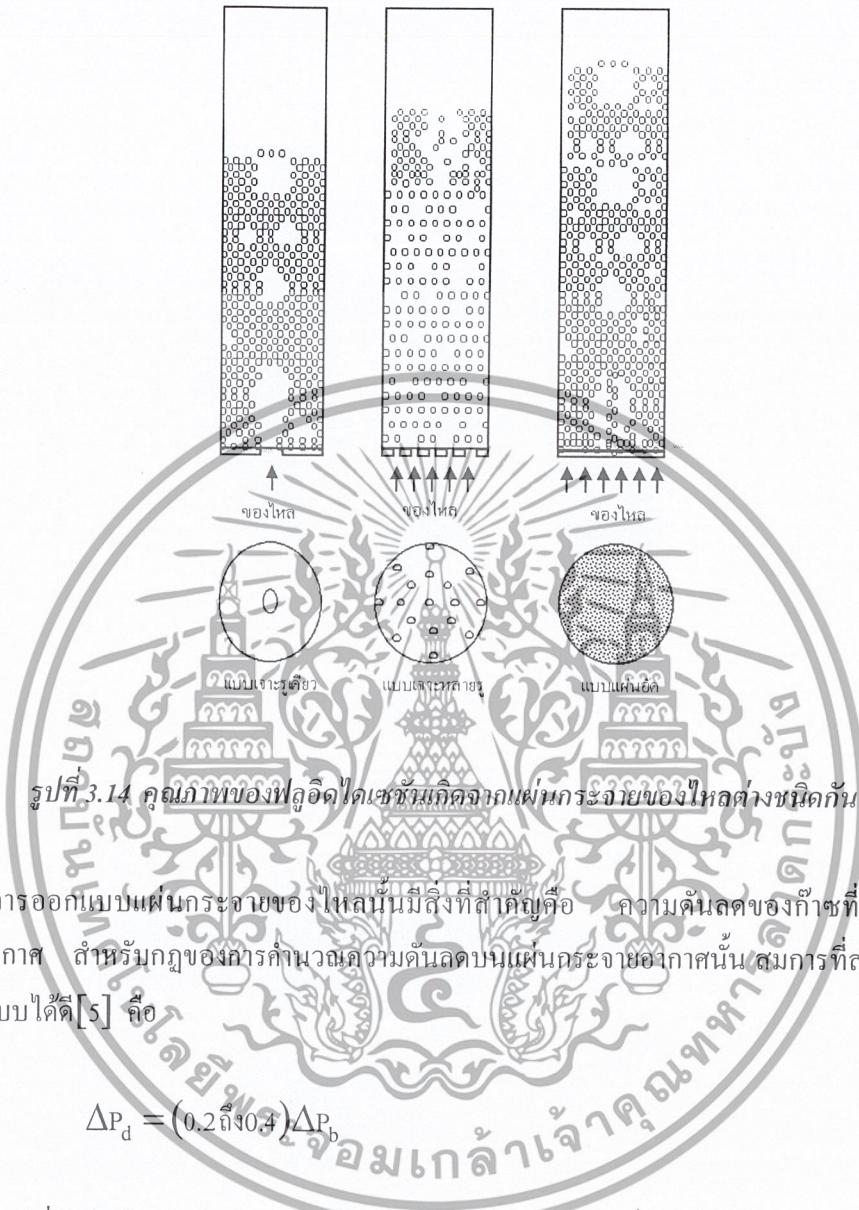
3.5.9 แบบแผ่นเจาะรูหรือตะแกรงประยุกต์ แผ่นกระจายของไหลแบบนี้มีลักษณะเช่นเดียวกับแบบที่ 1 และแบบที่ 2 แต่ด้านบนของแผ่นจะมีลูกถ้วยทรงกลมวางเรียงกันอยู่เป็นชั้นๆ ลูกถ้วยทรงกลมดังกล่าวจะต้องไม่อยู่ในสภาวะเสมือนของไหลเมื่อใช้งาน ลักษณะของแผ่นกระจายของไหลแบบนี้ทำให้ได้สภาพเสมือนของไหลที่มีลักษณะที่ดีมาก การสูญเสียความดันสามารถลดลงได้มากขนาดของอนุภาค จำนวนและชนิดของวัสดุมีส่วนต่อลักษณะของสภาวะการเสมือนของไหลและความดันลด ความดันลดของการไหลของของไหลผ่านแผ่นกระจายของไหลจะต่ำมากเมื่อเทียบกับแบบอื่นดังรูป 3.13



รูปที่ 3.13 ลักษณะของตัวกระจายแบบแผ่นเจาะรูหรือตะแกรงประยุกต์

ในขณะที่เกิดฟลูอิดไดซ์เบดด้วยความเร็วของของไหลต่ำสุด ลักษณะของเบดยังเป็นเนื้อเดียวกันอย่างสม่ำเสมอตลอดทั้งเบด จากนั้นถ้าเพิ่มความเร็วของของไหลให้มากขึ้น ความเร็วที่เพิ่มมากขึ้นนี้จะก่อตัวเป็นฟองก๊าซเกิดขึ้นซึ่งขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของตัวกระจายของไหลที่รองรับเบดว่าเป็นชนิดใด อย่างเช่น ตัวกระจายทำด้วยแผ่นโลหะเจาะรูฟองอากาศที่เกิดขึ้นจะมีขนาดใหญ่กว่าตัวกระจายของไหลที่เป็นรูพรุน ซึ่งเกิดจากใช้เม็ดโลหะขนาดเล็กมาอัดด้วยความดันอัดสูงๆจนติดกับแผ่นกระจายของไหล ตัวกระจายของไหลแบบหลังนี้ของไหลผ่านได้อย่างสม่ำเสมอ ฟองก๊าซจึงเกิดขึ้นได้เป็นจำนวนมาก

ตัวกระจายที่เป็นแผ่นเจาะรูของไหลจะผ่านออกไปเหมือนกับเจ็ท ( Jet ) จำนวนการเกิดของฟองก็ขึ้นอยู่กับจำนวนรูเจาะบนตัวกระจายดังแสดงในรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 คุณภาพของฟลูอิดไอเซชันเกิดจากแผ่นกระจายของไหลต่างชนิดกัน

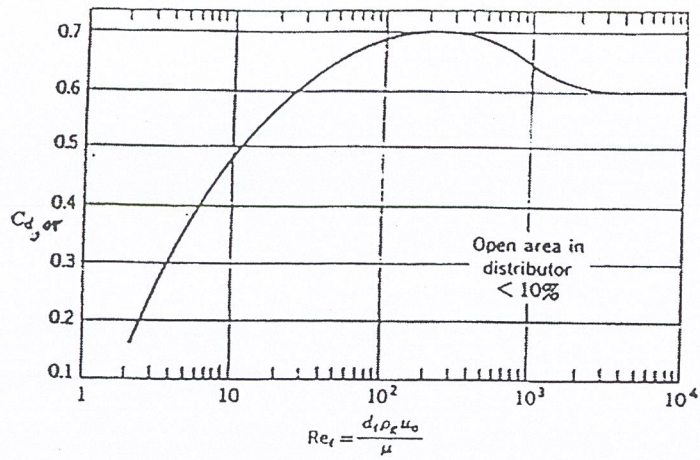
การออกแบบแผ่นกระจายของไหลนั้นมีสิ่งที่สำคัญคือ ความดันลดของก๊าซที่เกิดจากแผ่นกระจายอากาศ สำหรับกฎของการคำนวณความดันลดบนแผ่นกระจายอากาศนั้น สมการที่สามารถใช้ในการออกแบบได้ดี [5] คือ

$$\Delta P_d = (0.2 \text{ ถึง } 0.4) \Delta P_b \quad (3.23)$$

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

คำนวณหาความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านรูออริฟิสจากสมการ 3.24

$$U_{or} = C_{d,or} \left[ 2g_c \frac{\Delta P_d}{\rho_g} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3.24)$$



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

กำหนดจำนวนรูเจาะของตะแกรงต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ของตะแกรงหรือตัวกระจายได้จากสมการ

$$U_0 = \frac{\pi}{4} d_{or}^2 U_{or} N_{or} \quad (3.25)$$

### 3.6 การหมุนวนของอากาศตุยภูมิ

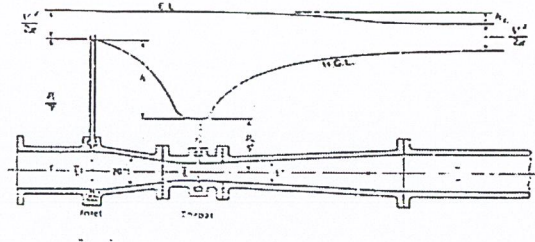
อากาศปฐมภูมิจะทำหน้าที่เป็นตัวพาอนุภาคของเชื้อเพลิงเข้ายังห้องเผาไหม้ในแนวตั้งจากด้านล่างของเชื้อเพลิงขึ้นสู่ด้านบนห้องเผาไหม้ ขณะที่เชื้อเพลิงและอากาศผสมกันและส่งตัวขึ้นสู่ด้านบนนั้นจะมีอากาศตุยภูมิเข้ามาในแนวสัมผัสกับผนังของเตา ทำให้เกิดการหมุนวนของอากาศและทำให้อนุภาคของเชื้อเพลิงหมุนวนไปด้วย ช่วยเพิ่มเวลาในการเผาไหม้ให้มากขึ้นทำให้การเผาไหม้สมบูรณ์ เนื่องจากการไหลวนของอากาศและการไหลแบบปั่นป่วนของอากาศ ซึ่งเอื้ออำนวยต่อการคลุกเคล้าของอากาศกับเชื้อเพลิง

### 3.7 การวัดอัตราการไหล

วิธีวัดอัตราการไหลนั้นจะมีอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับวัดอัตราการไหลมีหลายชนิดคือ ออร์ฟิส (Orifice), เวนจูรี (Venturi), ท่อวัด (Tube)

#### เวนจูรี (Venturi)

เวนจูรีคือที่ที่บีบเข้าหากันจะสามารถเปลี่ยนเสดความดันให้เป็นเสดความเร็วได้เป็นอย่างดีเช่นเดียวกัน ดังนั้นถ้าท่อทั้งสองนี้มารวมกันก็จะได้เครื่องมือวัดที่เรียกว่าท่อเวนจูรี ดังรูปที่ 3.16 ท่อเวนจูรีประกอบด้วยท่อที่มีคอคอด ของไหลที่คอคอดนี้จะมีความเร็วสูงและมีความดันต่ำ จากนั้นก็เป็นส่วนที่ค่อยๆ บานโตขึ้นช่วงที่ใช้สำหรับเปลี่ยนความเร็วกลับไปเป็นความดัน โดยมีพลังงานสูญเสียไปกับความเสียดทานไปเล็กน้อย



รูปที่ 3.16 ท่อเวนจูรีชนิดที่ทางเข้ามีลักษณะเป็นรูปกรวย

#### นอซเซิลสำหรับวัดอัตราการไหล (Flow nozzle)

นอซเซิลที่ใช้กับของเหลวจะมีลักษณะเหมือนท่อปลายตีบ แต่ถ้าเป็นแบบที่ใช้กับก๊าซหรือไอ ก็จะมีลักษณะตีบเข้าหากันในช่วงแรกและบานออกในช่วงหลัง ยังมีที่ใช้งานที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งคือ ใช้สำหรับทำให้เกิดลำน้ำที่มีความเร็วสูงเพื่อใช้ในกรณีดับเพลิง หรือเพื่อทำให้เกิดแรงสำหรับขับเคลื่อนกังหันไอน้ำ หรือกังหันน้ำแบบเพลลาตัน

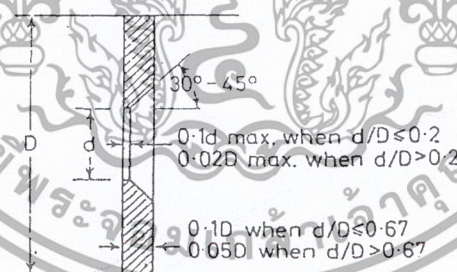
#### ท่อวัด (tube)

ท่อที่จะใช้เป็นเครื่องมือวัดนั้นจะต้องมีความยาวไม่มากไปกว่า 2 หรือ 3 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ ไม่มีความแตกต่างที่แน่ชัดระหว่างท่อวัดกับออริฟิสที่มีขอบหนา

#### ออริฟิส [14]

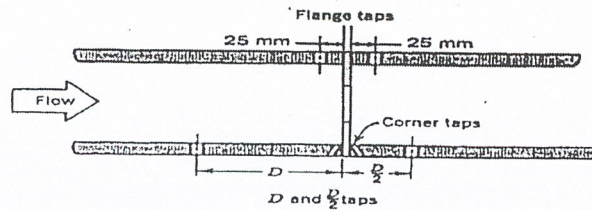
ออริฟิสชนิดต่างๆคล้ายคลึงกันสามารถอธิบายด้วยกันได้แต่ลักษณะที่แตกต่างกันที่ pressure tapping ซึ่ง orifice มาตรฐานกำหนดดังนี้

รูปร่างลักษณะ (description) ออริฟิส (orifice) ได้แสดงหน้าตัดต่างๆ ดังรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.17 Standard orifice plate

ออริฟิสเป็นแผ่นบางๆ ที่ถูกจับยึดระหว่างขอบของท่อเนื่องจากมีรูปทรงเรขาคณิตอย่างง่ายๆ ดังนั้นจึงมีราคาถูก และง่ายในการติดตั้ง หรือการย้ายตำแหน่ง แต่อย่างไรก็ตามขอบของแผ่น อาจจะมีการสึกกร่อนได้อันเนื่องมาจากการชนของอนุภาคเล็กๆ ที่กระจายอยู่ในของไหล ข้อเสียอีกประการก็คือ เนื่องจากไม่สามารถควบคุมการขยายของด้านล่างของกระแส ทำให้มี head loss ถาวรที่สูงมาก จุดวัดความดันสำหรับออริฟิสนั้นสามารถกำหนดตำแหน่งได้หลายตำแหน่ง ดังรูปที่ 3.18 เนื่องจากตำแหน่งของจุดวัดความดันมีอิทธิพลต่อการหาสัมประสิทธิ์การไหล



รูปที่ 3.18 แสดงโครงสร้างเรขาคณิต และจุดวัดความดันของออร์ฟิส

สำหรับการวัด อัตราการไหลของของไหลภายในท่อและจัดได้ว่า ออร์ฟิสเป็นเครื่องมือวัดที่เกิดขวางการไหลของพื้นที่หน้าตัดให้ของไหล ไหลผ่านออร์ฟิสมีขนาดน้อยกว่าพื้นที่หน้าตัดของท่อ ดังรูปที่ 3.19 ดังนั้นเมื่อนำเอาออร์ฟิสไปติดตั้งกับท่อซึ่งมีของไหลไหลผ่านจะทำให้เกิดความดันตกคร่อมออร์ฟิส ซึ่งความดันตกคร่อมนี้ จะแปรเปลี่ยนไปตามอัตราการไหลกล่าวคือถ้าอัตราการไหลมีค่าสูง ความดันตกคร่อมออร์ฟิสก็จะมีค่าสูง และถ้าอัตราการไหลมีค่าต่ำ ความดันตกคร่อมออร์ฟิสก็จะมีค่าต่ำ โดยทั่วไปออร์ฟิสจะถูกนำไปใช้ในการหาอัตราการไหลที่สถานะที่ Steady state เท่านั้นไม่นิยมนำไปใช้วัดอัตราการไหลที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา

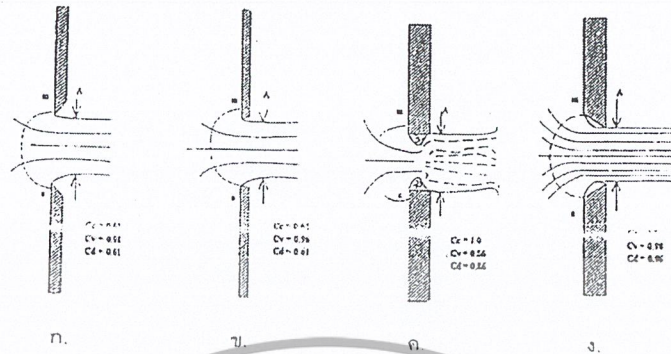


รูปที่ 3.19 แสดงการไหลผ่านแผ่นออร์ฟิส (Orifice)

ในบรรดาเครื่องมือวัดอัตราการไหลทั้งหลาย ออร์ฟิสถือว่าเป็นเครื่องมือที่มีผู้นำไปใช้อย่างกว้างขวางมากที่สุด ออร์ฟิสมาตรฐานที่มีขอบคม ดังรูปที่ 3.20ก หรือขอบเป็นรูปสี่เหลี่ยม ดังรูปที่ 3.20ข นั้นจะสัมพันธ์ลำน้ำที่ไหลผ่านในลักษณะที่เป็นการสัมพันธ์แบบเส้นผ่านออร์ฟิส ดังรูปที่ 3.20ค และ 3.20ง นั้นไม่ใช่เป็นออร์ฟิสมาตรฐาน ทั้งนี้เพราะลำน้ำที่ไหลผ่านรูออร์ฟิสนั้น ถูกกระทบจากความหนาของวัตถุกับความหยาบของผิวและรัศมีความโค้ง ดังนั้นจึงต้องมีการสอบเทียบเพื่อความถูกต้อง

ข้อดีของออร์ฟิสคือมีราคาต่ำกว่าเครื่องวัดชนิดอื่นๆ ที่อาศัยหลักการวัดเดียวกัน และสะดวกในการสร้างเพราะมีรูปร่างไม่ซับซ้อน รวมทั้งมีข้อมูลของการทำวิจัยเกี่ยวกับพฤติกรรมในการวัดของไหลที่มีเงื่อนไขต่างๆ ไว้อย่างมากมาย ของไหลเมื่อไหลผ่าน Square-edged orifice จะมีทิศทางการไหลเป็นไปดังรูป สมมุติว่าของไหลก่อนเข้าประทะกับออร์ฟิสมีความเร็วคงที่ตลอดหน้าตัดท่อ (หน้าตัดวงกลม) เท่ากับ  $V_1$  เมตรต่อวินาที ของไหลที่บริเวณด้านหลังของออร์ฟิส จะมีลักษณะเป็นลำของการไหล ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางของลำการไหลลดลงเรื่อยๆ จนกระทั่งมีค่าเท่ากับ  $D/2$  เมตร ณ บริเวณจุดวัดความดันที่ 2 ซึ่งถือได้ว่าเป็นจุดที่มีพื้นที่หน้าตัดของการไหลน้อยที่สุด (Vena Contracta) ของ jet ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง

ของ jet จะมีขนาดเพิ่มขึ้นเมื่อของไหลเคลื่อนที่ผ่านจุดที่ 2 ไปแล้ว จุดที่ 2 หรือเรียกว่าจุด Vena Contracta ถือได้ว่าเป็นจุดกึ่งกลางที่ของไหลที่มีความเร็วเฉลี่ยสูงสุดหรือ มีความดันสถิตต่ำสุด (จากสมการของ Bernulli)



รูปที่ 3.20 ออริฟิสแบบต่างๆ

การวัดอัตราการไหลโดยใช้แผ่นออริฟิส

เพื่อวัดหาอัตราไหลโดยใช้แผ่นออริฟิส เพื่อวัดหาความดันแตกต่างโดยต่อเข้ามานอมิเตอร์ และนำไปคำนวณหาอัตราการไหล แผ่นออริฟิสมีหลายชนิด ชนิดที่เลือกใช้เป็นแบบออริฟิสแบบที่มีจุดศูนย์กลางร่วม แสดงได้ดังสมการ

$$Q_{ac} = C_d A_0 \sqrt{\frac{2g(P_1 - P_2)}{\rho g \left(1 - \left(\frac{d_0}{D}\right)^4\right)}} \tag{3.26}$$

เมื่อกำหนดให้

- $A_0$  = พื้นที่หน้าตัดรูออริฟิส ( $m^2$ )
- $P$  = ความดันสถิตของของไหล ( $N/m^2$ )
- $d_0$  = เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ
- $D$  = เส้นผ่านศูนย์กลางกลางของรูออริฟิส
- $\gamma$  = น้ำหนักจำเพาะ (Specific weight,  $N/m^3$ )
- $C_d$  = Discharge Coefficient

Subscript 1t = ค่าที่จุดที่ 1 ในทางทฤษฎี

Subscript 2t = ค่าที่จุดที่ 2 ในทางทฤษฎี

**มานอมิเตอร์ ( manometer )**

มานอมิเตอร์นี้ใช้วัดความแตกต่างของความดันภายในท่อระหว่าง 2 จุด หรือระหว่างท่อ 2 ท่อ หรือระหว่างความดันอื่นที่ต้องการรู้ค่าความแตกต่างก็ได้ เราอาจใช้มานอมิเตอร์แบบวัดความแตกต่างของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความดันวัด โดยปกติแล้วมานอมิเตอร์แบบนี้ประกอบด้วยหลอดแก้วโค้ง ปลายแต่ละด้านนำไปต่อเข้ากับแหล่งความดันแตกต่าง ที่เราต้องการทราบค่า มอมิเตอร์แบบวัดความแตกต่างของความดันแบ่งออกได้ดังนี้

1. มานอมิเตอร์แบบไพโซมิเตอร์ (Two – piezometer manometer)
2. มานอมิเตอร์วัดความดัน แบบหลอดแก้วรูปตัวยูกลับทาง (Inverted U – tube manometer)
3. มานอมิเตอร์วัดความดันแตกต่าง แบบหลอดแก้วรูปตัว U (U – tube differential manometer)
4. มานอมิเตอร์แบบละเอียด (Micro manometer)

มานอมิเตอร์ความดันแตกต่างแบบหลอดแก้วรูปตัวยู มานอมิเตอร์ชนิดนี้ ประกอบด้วยหลอดแก้วที่โค้งงอเป็นรูปตัวยู ปลายทั้งสองของหลอดแก้วใช้ต่อเข้ากับแหล่งความดันแตกต่างที่ต้องการทราบค่า ซึ่งแสดงถึงมานอมิเตอร์แบบหลอดแก้วรูปตัวยูที่ใช้สำหรับวัดความดันแตกต่างของจุด A และจุด B ที่ส่วนล่างของมานอมิเตอร์ จะบรรจุของเหลวบ่งออกความดัน ซึ่งมีน้ำหนักมากกว่าของเหลวที่ต้องการวัดค่าความดันแตกต่าง และจะต้องไม่รวมตัวเข้าด้วยกัน



## บทที่ 4

### ทฤษฎีการเผาไหม้

#### 4.1 เชื้อเพลิงชีวมวล

เชื้อเพลิงที่ใช้ในการเผาไหม้สามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภทคือ เชื้อเพลิงที่ได้จากการทับถมตัวของซากพืชซากสัตว์ ภายใต้อิทธิพลของโลกหรือที่เรียกว่าเชื้อเพลิงดึกดำบรรพ์ (Fossil fuel) ได้แก่ ถ่านหิน น้ำมัน และก๊าซธรรมชาติ เชื้อเพลิงอีกประเภทหนึ่งคือ เชื้อเพลิงชีวมวล (Biomass) ซึ่งเป็นวัสดุที่ได้จากสิ่งมีชีวิต เช่น ไม้ ชี้อ่อน และแกลบข้าว เป็นต้น เชื้อเพลิงประเภทชีวมวลนี้ส่วนใหญ่จะได้สิ่งที่เหลือทิ้งจากการเกษตร ซึ่งสามารถหาได้ง่ายโดยเฉพาะอย่างยิ่งในบริเวณที่มีการทำเกษตรกรรม สำหรับประเทศที่กำลังพัฒนา เช่น ประเทศในกลุ่มอาเซียนจะมีความต้องการในการใช้เชื้อเพลิงชีวมวลมีค่าเท่ากับ 6 – 13 เปอร์เซ็นต์ ของปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ทั้งหมด[4]

#### 4.1.1 ประเภทของเชื้อเพลิงชีวมวล

เชื้อเพลิงชีวมวลสามารถแบ่งได้เป็น 4 ประเภทคือ

4.1.1.1 เชื้อเพลิงชีวมวลที่ได้จากไม้ (Forest biomass) ซึ่งสามารถแยกออกเป็นไม้เนื้ออ่อน (Soft wood) และไม้เนื้อแข็ง (Hard wood) ในเชื้อเพลิงประเภทนี้จะมีปริมาณของลิกไนท์อยู่ประมาณ 40 เปอร์เซ็นต์ในไม้เนื้อแข็ง ตัวอย่างของเชื้อเพลิงประเภทนี้ได้แก่ เศษไม้ เปลือกไม้ กิ่งไม้ และชี้อ่อน

4.1.1.2 เชื้อเพลิงชีวมวลที่ได้จากการเกษตร (Agriculture biomass) ส่วนใหญ่จะเป็นของที่เหลือทิ้งจากการเกษตร เช่น แกลบข้าว ซึ่งสารพวกนี้จะมีปริมาณลิกไนท์ต่ำประมาณ 0 – 20 เปอร์เซ็นต์

4.1.1.3 เชื้อเพลิงชีวมวลที่ได้จากอุตสาหกรรม (Industrial waste) เช่น เชื้อเพลิงที่ได้จากการผลิตน้ำตาลหรือชานอ้อย นอกจากนี้ก็ยังมีกากสับปรดที่ได้จากโรงงานผลิตสับปรดกระป๋อง เชื้อเพลิงประเภทนี้จะมีปริมาณความชื้นสูง

4.1.1.4 เชื้อเพลิงที่ได้จากของเหลือใช้จากคน (Domestic waste) ได้แก่ เชื้อเพลิงจากขยะเทศบาล เป็นต้น

#### 4.1.2 คุณสมบัติของเชื้อเพลิงชีวมวล

เชื้อเพลิงชีวมวลโดยทั่วไปจะเป็นเชื้อเพลิงแตกต่างกันตามประเภทของเชื้อเพลิงชีวมวล และการที่เชื้อเพลิงชีวมวลมีปริมาณความชื้น และองค์ประกอบที่แตกต่างกัน จึงทำให้ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงชีวมวลมีค่าแตกต่างกันด้วยดังนี้

ชานอ้อย	มีค่าความร้อน	1900	กิโลแคลอรี / กิโลกรัม
แกลบ	มีค่าความร้อน	3580	กิโลแคลอรี / กิโลกรัม
ชี้อ่อน	มีค่าความร้อน	4000	กิโลแคลอรี / กิโลกรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เชื้อเพลิงชีวมวลที่นิยมนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงให้ความร้อนส่วนมากจะเป็นเชื้อเพลิงชี้เลื้อยและ แกลบ เพราะให้ปริมาณความร้อนสูงจากการเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของเชื้อเพลิงชีวมวลที่เป็น แกลบข้าว และชี้เลื้อยพบว่า

#### ชี้เลื้อย

- ข้อดี มีคุณสมบัติในการเป็นเชื้อเพลิงที่ดี เนื่องจากเมื่อเผาไหม้แล้วจะได้ปริมาณเถ้าน้อยกว่า 2 เปอร์เซ็นต์ และไม่มีปริมาณซัลเฟอร์เลย จึงทำให้เกิดมลพิษในอากาศน้อยมาก
- ข้อเสีย มีปริมาณความชื้นสูง 20 – 50 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งขึ้นอยู่กับเวลาที่ปล่อยทิ้งไว้หลังจากถูกผลิตมา เสียค่าใช้จ่ายในการขนส่งสูง และมีความหนาแน่นต่ำ ( 400 – 600 กิโลกรัม / ลูกบาศก์เมตร ) ดังนั้นจึงต้องเสียเนื้อที่ในการเก็บมาก

#### แกลบ

- ข้อดี มีคุณสมบัติในการเป็นเชื้อเพลิงได้ดีพอสมควรและราคาถูก
- ข้อเสีย เมื่อถูกเผาไหม้จะมีปริมาณเถ้าสูงประมาณ 14 เปอร์เซ็นต์ และมีปริมาณความชื้นสูงประมาณ 10.3 เปอร์เซ็นต์

จากการวิเคราะห์หองค์ประกอบทางเคมีของเชื้อเพลิงชีวมวลโดยวิธี Ultimate Analysis ทำให้ทราบองค์ประกอบของเชื้อเพลิงชีวมวลชี้เลื้อยดังตารางที่ 4.1 และเชื้อเพลิงชีวมวลแกลบดังตารางที่ 4.2

องค์ประกอบ	เปอร์เซ็นต์
ชี้เถ้า	2
ความชื้น	20 – 50
คาร์บอน	50 – 53
ออกซิเจน	40 – 41
ไฮโดรเจน	6 – 7
ไนโตรเจนรวมชี้เถ้า	1 – 2
ค่าความร้อน (กิโลแคลอรี / กิโลกรัม)	4000

ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติของเชื้อเพลิงชี้เลื้อย [12]

องค์ประกอบ	เปอร์เซ็นต์
ความชื้น	10.3
ขี้เถ้า	14.0
คาร์บอน	38.0
ไฮโดรเจน	5.7
ไนโตรเจน	0.69
ออกซิเจน	41.6
ซัลเฟอร์	0.06
ค่าความร้อน (กิโลแคลอรี / กิโลกรัม)	3580

#### ตารางที่ 4.2 คุณสมบัติของเชื้อเพลิงแกลบ [6]

จากการที่เชื้อเพลิงชีววมมีองค์ประกอบที่แตกต่างกัน จึงทำให้มีความต้องการปริมาณอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ต่างกัน

แกลบที่ใช้ในการทดลองเป็นแกลบที่ได้จากส่วนประกอบของเมล็ดข้าว ซึ่งสามารถอธิบายที่มาของแกลบได้ดังนี้ เมล็ดข้าวเป็นผลชนิด คาริโอพซิส (Caryopsis) ส่วนที่เป็นเมล็ดที่ติดแน่นอยู่กับผนังของรังไข่หรือเยื่อหุ้มผล สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วน คือ เปลือกใหญ่ (Lemma) เปลือกเล็ก (Pale) ประกบกัน แบบตะขบฟัน (Interlocking fold) ทั้งสองข้างตลอดแนวความยาว ภายในเปลือกที่หุ้มเมล็ดข้าวนี้มีช่องว่างระหว่างเม็ด และเปลือกที่ปลายทั้ง 2 ด้าน ผิวของเปลือกทั้งสองส่วนจะมีหนามแข็งเล็กๆติดอยู่โดยรอบทั่วไป คุณสมบัติทางกายภาพของแกลบข้าวแสดงได้ดังตารางที่ 4.3

#### 4.2 การเผาไหม้ [2]

การเผาไหม้เป็นปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างเชื้อเพลิงกับสารออกซิไดซ์ ซึ่งส่วนใหญ่แล้วมักใช้ ออกซิเจนเป็นสารออกซิไดซ์ เมื่อเกิดการเผาไหม้ขึ้น เชื้อเพลิงจะถูกออกซิไดซ์และปลดปล่อยพลังงาน ความร้อนออกมา (สารทำปฏิกิริยาในการเผาไหม้คือเชื้อเพลิงกับอากาศ) และจะเปลี่ยนไปเป็นสารที่ได้จากการเผาไหม้ ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างสารทำปฏิกิริยาและสารที่ได้จากการเผาไหม้จะถูกกำหนดโดย สมการเคมี

ในการเผาไหม้ส่วนใหญ่จะไม่ใช้ออกซิเจนล้วนๆเพราะสิ้นเปลือง จะใช้อากาศซึ่งสามารถหาได้ในราคาถูกแทน ในอากาศมีออกซิเจนและไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบหลัก ส่วนก๊าซอื่นๆมีปะปนอยู่น้อยมากจนไม่มีความสำคัญ ออกซิเจนมีอยู่ในอากาศประมาณร้อยละ 21 และไนโตรเจนประมาณ ร้อยละ 79 โดยปริมาตร หรือมีออกซิเจนประมาณร้อยละ 23 และไนโตรเจนประมาณร้อยละ 77 โดย น้ำหนัก

การเผาไหม้สมมูลพอดีที่เรียกว่าการเผาไหม้ทางทฤษฎี ( Stoichiometric combustion หรือ Theoretical combustion ) ของเชื้อเพลิงไฮโดรคาร์บอนก็คือปฏิกิริยาทางเคมีที่มียอกซิเจนเพียงพอที่จะออกซิไดซ์คาร์บอนให้เป็นคาร์บอนไดออกไซด์ และออกซิไดซ์ไฮโดรเจนให้เป็นน้ำทั้งหมด

ถ้าสารผสมเชื้อเพลิงกับอากาศมีมากกว่าหรือน้อยกว่าค่าพอดี การเผาไหม้ก็ยังคงเกิดขึ้นได้แต่จะต้องมีค่าไม่ห่างจากค่าอากาศพอดีมากเกินไป สำหรับการเผาไหม้ที่มีอากาศเกินหรือที่เรียกว่าการเผาไหม้สารผสมบาง ( Fuel – lean combustion ) อากาศที่เกินจะไม่เข้าทำปฏิกิริยา หรืออีกนัยหนึ่งคืออากาศที่เหลือจากการทำปฏิกิริยา

สำหรับการเผาไหม้ที่มีอากาศน้อยกว่าอากาศพอดี หรือที่เรียกว่าการเผาไหม้สารผสมหนา ( Fuel – rich combustion ) ก็จะมีออกซิเจนไม่เพียงพอที่จะออกซิไดซ์เชื้อเพลิงไฮโดรคาร์บอนไปเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำได้เต็มที่ สารที่เกิดจากการเผาไหม้ก็จะเกิดเป็นสารผสมของคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ รวมทั้งไนโตรเจนด้วย และจะมีคาร์บอนมอนอกไซด์ และไฮโดรเจนด้วย

เนื่องจากส่วนประกอบของสารที่ได้จากการเผาไหม้จะแตกต่างกันสำหรับสารผสมบางและสารผสมหนา และเนื่องจากอัตราส่วนเชื้อเพลิงต่ออากาศพอดีจะขึ้นอยู่กับส่วนประกอบของเชื้อเพลิง ดังนั้นจึงมีการกำหนดส่วนประกอบของสารผสมในรูปของ อัตราส่วนเชื้อเพลิง/อากาศจริง ต่อ อัตราส่วนเชื้อเพลิง/อากาศพอดี หรือกลับกัน ซึ่งได้แก่

อัตราส่วนสมมูลของเชื้อเพลิง/อากาศ ( fuel/air equivalence ratio,  $\phi$  )

$$\phi = \frac{(FA)_{\text{actual}}}{(FA)_{\text{stoch}}} = \frac{(m_f/m_a)_{\text{actual}}}{(m_f/m_a)_{\text{stoch}}} \quad (4.1)$$

หรือ

$$\phi = \frac{(AF)_{\text{stoch}}}{(AF)_{\text{actual}}} = \frac{(m_a/m_f)_{\text{stoch}}}{(m_a/m_f)_{\text{actual}}} \quad (4.2)$$

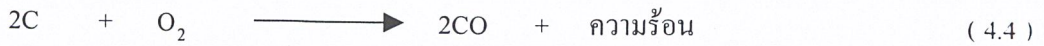
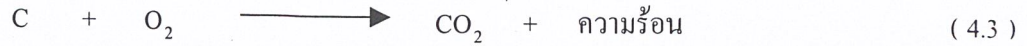
ในการเผาไหม้สารผสมกับเชื้อเพลิงกับอากาศเป็นไปได้ 3 ลักษณะคือ

1. สารผสมบาง ( fuel - lean mixture ) เป็นสารผสมที่มีอัตราส่วนสมมูลน้อยกว่าหนึ่ง (  $\phi < 1$  ) คือ มีเชื้อเพลิงน้อยกว่าอากาศ หรือมีอากาศเกินกว่าค่าพอดี ซึ่งอาจจะเป็นร้อยละของอากาศเกิน
2. สารผสมพอดี ( stoichiometric mixture ) เป็นสารผสมที่มีอัตราส่วนสมมูลเท่ากับหนึ่ง (  $\phi = 1$  ) คือ มีเชื้อเพลิงพอดีที่จะถูกออกซิไดซ์โดยออกซิเจนในอากาศได้หมด
3. สารผสมหนา ( fuel – rich mixture ) เป็นสารผสมที่มีอัตราส่วนสมมูลมากกว่าหนึ่ง (  $\phi > 1$  ) คือ มีเชื้อเพลิงมากเกินไปหรือมีออกซิเจนน้อยเกินไปที่จะออกซิไดซ์เชื้อเพลิงได้จนหมด

#### 4.2.1 ปฏิกิริยาเคมี [4]

เนื่องจากเชื้อเพลิงส่วนใหญ่ประกอบด้วยเชื้อเพลิงคาร์บอน ไฮโดรเจน และปริมาณธาตุอื่นๆ ปะปนอยู่บ้าง เช่น กำมะถัน เมื่อนำไปเผาไหม้จะเกิดปฏิกิริยาเคมี แสดงได้ด้วยสมการดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



การเผาไหม้เพื่อให้ได้ผลอย่างสมบูรณ์นั้นจะต้องมีส่วนที่พอดีกันระหว่างปริมาณเชื้อเพลิงกับปริมาณออกซิเจน ดังสมการการเผาไหม้ข้างต้น หรือมีปริมาณออกซิเจนมากกว่าปริมาณเชื้อเพลิงแต่ไม่ควรจะมากเกินไป เพราะจะทำให้สูญเสียความร้อนไปกับก๊าซโดยเปล่าประโยชน์ นอกจากนี้ยังต้องมีการผสมหรือสัมผัสกันระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงที่ดีที่สุด

ปริมาณของอากาศตามทฤษฎีคือปริมาณน้อยที่สุดของอากาศที่ต้องใช้ในการเผาไหม้เชื้อเพลิงอย่างสมบูรณ์จนคาร์บอน ไฮโดรเจน และกำมะถันเปลี่ยนเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ และก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ตามลำดับ แต่ในทางปฏิบัติจริงแล้วอากาศที่ต้องการตามทฤษฎีนั้นไม่เพียงพอที่จะทำให้การสันดาปที่สมบูรณ์ ปรากฏการณ์ที่เห็นได้ชัดทั้งสองอย่างของการสันดาปที่ไม่สมบูรณ์คือ การเกิดก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ และคาร์บอนในก๊าซที่ออกมา เพื่อแก้ปัญหานี้จึงต้องใช้ปริมาณอากาศที่มากเกินไป (Excess air) สำหรับการสันดาปที่สมบูรณ์

$$\% \text{อากาศมากเกินไป} = \frac{(\text{อากาศที่แท้จริง} - \text{อากาศที่ต้องการทางทฤษฎี})}{\text{อากาศที่ต้องการทางทฤษฎี}} \times 100 \quad (4.7)$$

ฉะนั้นขบวนการเผาไหม้ที่ดีควรจะประกอบด้วย

1. อัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างเชื้อเพลิงกับออกซิเจนหรืออากาศ
2. การผสมหรือสัมผัสกันอย่างทั่วถึงระหว่างเชื้อเพลิงกับออกซิเจนหรืออากาศ
3. การลุกไหม้ของผสม

#### 4.2.2 การผสม [1]

การรวมตัวที่ดีระหว่างเชื้อเพลิงกับออกซิเจน ก็คือการที่อนุภาคของเชื้อเพลิงสัมผัสกับโมเลกุลของออกซิเจนได้อย่างทั่วถึง ในกรณีที่เชื้อเพลิงเป็นก๊าซ การผสมกันนั้นจะเป็นไปได้ง่าย แต่ถ้าเชื้อเพลิงเป็นของแข็งหรือของเหลวการผสมกันนั้นก็จะยุ่งยากขึ้น

ในกรณีที่เชื้อเพลิงเป็นของเหลว ส่วนใหญ่ก็จะมีการทำให้เป็นอนุภาคนขนาดเล็กๆ ก่อน แล้วจึงจะทำการเผาไหม้ซึ่งจะทำให้การรวมตัวได้ง่ายกับอากาศและเกิดการลุกไหม้ได้ดี เหมือนเชื้อเพลิงที่เป็นก๊าซ

ส่วนเชื้อเพลิงที่เป็นของแข็งนั้น แต่ละโมเลกุลของออกซิเจนจะสัมผัสกับพื้นผิวของเชื้อเพลิง เกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ให้ก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ จากนั้นออกซิเจนจะเข้าไปผสมกับคาร์บอนมอนนอกไซด์ ทำให้เกิดปฏิกิริยาสมบูรณ์คือ เกิดคาร์บอนไดออกไซด์ในที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฉะนั้นขบวนการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงที่เป็นของแข็งนั้นจะประกอบด้วยพฤติกรรม 4 ข้อ ดังนี้

1. เริ่มต้นด้วยออกซิเจนสัมผัสกับพื้นผิวของคาร์บอน
2. เกิดก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ออกมา
3. มีการปล่อยก๊าซที่ได้จากการเผาไหม้ออกมาจากผิว
4. มีการรวมกัน ( ทำปฏิกิริยาเคมีกัน ) ระหว่างคาร์บอนมอนนอกไซด์กับออกซิเจน

ดังนั้นจะกล่าวได้ว่า อัตราการเผาไหม้นั้นขึ้นอยู่กับสาเหตุที่กล่าวมาแล้ว และสามารถเร่งปฏิกิริยาการเกิดได้โดยการบดเชื้อเพลิงที่เป็นของแข็งให้เป็นผง ซึ่งเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวในการสัมผัสให้มากขึ้น

#### 4.2.3 ติดไฟหรือการลุกไหม้ [1]

การลุกไหม้ของเชื้อเพลิงหรืออัตราการรวมตัวกันทางเคมีของเชื้อเพลิงกับออกซิเจนนั้นขึ้น โดยตรงกับอุณหภูมิ การเผาไหม้จะเกิดขึ้นในตอนแรกๆ และเกิดต่อไปเรื่อยๆ ความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ก็จะเพิ่มอุณหภูมิของเชื้อเพลิงกับอากาศให้มากขึ้น ทั้งให้อัตราการเผาไหม้เพิ่มขึ้นด้วย ฉะนั้นสิ่งที่ต้องการสำหรับการเผาไหม้เกิดขึ้นได้เอง ( Spontaneous combustion ) นั้นต้องมี

1. บริเวณที่จำกัดสำหรับสะสมความร้อน
2. สารเชื้อเพลิง
3. อากาศ

การลุกไหม้นั้น ไม่ได้เป็นขบวนการที่เกิดขึ้นได้เอง ส่วนใหญ่จะใช้ปริมาณความร้อนจากภายนอกช่วยเร่งปฏิกิริยาการเผาไหม้ และให้ปริมาณความร้อนออกมามากขึ้น นอกจากนั้นสิ่งที่สำคัญที่สุดสำหรับการเผาไหม้แบบต่อเนื่องก็คือ อุณหภูมิ ซึ่งถ้าอุณหภูมิต่ำเกินไปก็จะทำให้เชื้อเพลิงไม่สามารถลุกไหม้แบบต่อเนื่องได้ แต่ถ้าอุณหภูมิของการเผาไหม้สูงการลุกไหม้ก็จะเกิดต่อไปเรื่อยๆ

ดังนั้นการติดไฟหรือลุกไหม้นั้นขึ้นอยู่กับหลายสิ่ง เช่น ชนิดของเชื้อเพลิง สถานะของเชื้อเพลิง และอัตราส่วนของเชื้อเพลิงกับอากาศ

#### 4.2.4 การเผาไหม้เชื้อเพลิงที่เป็นของแข็ง [1]

ในกรณีที่เชื้อเพลิงเป็นของเหลวหรือก๊าซซึ่งทราบส่วนประกอบสามารถนำมาชี้สภาวะการเกิดของปฏิกิริยาการเผาไหม้ได้ แต่เชื้อเพลิงที่เป็นของแข็งซึ่งเกิดขึ้นตามธรรมชาติมักจะมีส่วนประกอบที่ไม่แน่นอน จึงทำให้เกิดปัญหาดังนี้คือ

1. เป็นการยากที่จะหาค่าต่ำสุดสำหรับการเปรียบเทียบการเกิดของการเผาไหม้เช่น อัตราส่วนของอากาศ อุณหภูมิของการเผาไหม้ และอัตราการเกิดปฏิกิริยาทั้งหมด

2. การเผาไหม้ไม่ได้เกิดเป็นแบบผสมเป็นเนื้อเดียวกัน เช่น ของเหลวหรือก๊าซที่ให้ปริมาณออกซิเจนเข้าไปมากกว่าปริมาณที่ต้องการให้เกิดปฏิกิริยาที่ผิวของเชื้อเพลิงทั้งหมดเพียงเล็กน้อย แต่การเกิดแบบไม่ผสมเป็นเนื้อเดียวกัน ( Heterogeneous ) ซึ่งจะมีพื้นผิวของเชื้อเพลิงในการสัมผัสกับออกซิเจน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จำกัด คือ จะเกิดปฏิกิริยาที่ผิวของเชื้อเพลิงเข้าไปเรื่อยๆ ฉะนั้น แม้ว่าจะให้ออกซิเจนมากเกินพอ ปริมาณออกซิเจนก็สามารถเกิดปฏิกิริยาเฉพาะที่พื้นผิวของเชื้อเพลิงที่มีอยู่เท่านั้น

จากปัญหา 2 ข้อของการเผาไหม้ของของแข็งนั้น จะเห็นว่าการออกแบบระบบของการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงที่เป็นของแข็งนั้นควรคำนึงถึงเหตุผลต่างๆดังนี้

ก. ควรจะให้พื้นที่ผิวสำหรับปฏิกิริยามากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ ซึ่งทำได้โดย

1. บดเชื้อเพลิงที่เป็นของแข็งให้เป็นอนุภาคที่เล็กเท่าที่จะเล็กได้ เพราะเมื่อขนาดของอนุภาคเล็กลงพื้นที่ผิวหน้าจะมากขึ้น
2. มีการทำให้ก๊าซในเตานั้นเกิดการเคลื่อนไหวอย่างรุนแรง เพื่อที่จะกวาดให้พื้นที่ผิวของของแข็งนั้นปราศจากสารประกอบที่เกิดจากปฏิกิริยา หรือเถ้า เช่น ใช้เทคนิคทางฟลูอิดไดเซชัน หรือ Spouted bed

ข. อัตราเร็วของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนั้นขึ้นอยู่กับอัตราเร็วที่พื้นผิวของเชื้อเพลิงสัมผัสหรือเกิดปฏิกิริยา ดังนั้นจะต้องมีเวลาที่ใช้ในการเผาไหม้อย่างพอเพียงเพื่อให้เชื้อเพลิงถูกเผาไหม้หมด

ค. ระหว่างการเผาไหม้ อุณหภูมิในการเผาไหม้ต้องสูงพอที่จะทำให้เกิดการเผาไหม้ที่ต่อเนื่องกัน

จากสาเหตุทั้ง 3 ข้อนี้ มักจะนำมาพิจารณาในรูปของ 3 ตัว คือ Time (เวลา) Turbulence (การปั่นป่วน) และ Temperature (อุณหภูมิ) โดยนำเหตุผลทั้งสามข้อมาพิจารณาในการหาแบบที่เหมาะสม ซึ่งสาเหตุแต่ละข้อนั้นจะเกี่ยวพันกัน

#### 4.2.5 อุณหภูมิ

ปกติแล้วในการเผาไหม้นั้นย่อมต้องการให้มีอุณหภูมิสูงเท่าที่จะเป็นไปได้ แต่การที่จะให้มีอุณหภูมิสูงมากน้อยแค่ไหนนั้นก็มีข้อจำกัดคือ ชนิดของเชื้อเพลิงที่ใช้ซึ่งสามารถให้อุณหภูมิที่แตกต่างกัน ในกรณีที่มีอุณหภูมิสูงเกินไปก็ทำให้เกิดการรวมตัวกันของสารที่ไม่ต้องการได้ เช่น สารประกอบของออกไซด์ของไนโตรเจน ( $\text{NO}_x$ ) และอาจทำให้เกิดข้อเสียได้ เช่น ทำให้เถ้ากลายเป็นซีโลส (Slag) เกาะติดอยู่ตามผนังที่เป็นเหล็กซึ่งทำหน้าที่ในการถ่ายเทความร้อน ทำให้เกิดการสึกกร่อนได้

#### 4.2.6 การปั่นป่วน

จุดประสงค์ในการทำให้เกิดการปั่นป่วนขึ้นก็เพื่อที่จะทำให้เกิดการสัมผัสกันระหว่างอากาศกับพื้นผิวของเชื้อเพลิง ทำให้เกิดปฏิกิริยาอย่างรวดเร็วและทำให้เกิดบริเวณของพื้นผิวที่จะเกิดปฏิกิริยาขึ้นใหม่

วิธีการหนึ่งที่สามารถทำให้เกิดการปั่นป่วนได้ก็คือ ให้ทิศทางการเคลื่อนที่ของปฏิกิริยา (Reactant) ที่ผ่านเตานั้นวกเวียน แต่ก็มีข้อจำกัดอยู่คือ ต้นทุนในการติดตั้งและการบำรุงรักษาแผ่นกั้น (Baffles) ที่สามารถทนต่อความร้อนสูงและทนต่อการกัดกร่อนนั้นสูง นอกจากนั้นการเพิ่มขึ้นของความแตกต่างของความดัน (Pressure drop) เนื่องจากแผ่นกั้นนั้นเป็นข้อที่ไม่ต้องการให้เกิดขึ้น ปัญหาที่เกิดกับเบคนี้ หรือเบคเคลื่อนที่ก็คือ การเกิดเป็นช่องว่างระหว่างอนุภาคของเชื้อเพลิงเมื่อมี

อัตราการไหลของอากาศที่ผ่านเบดนั้นสูง ฉะนั้นข้อจำกัดของอัตราเร็วของอากาศก็ขึ้นอยู่กับความเร็วตัวของเบด

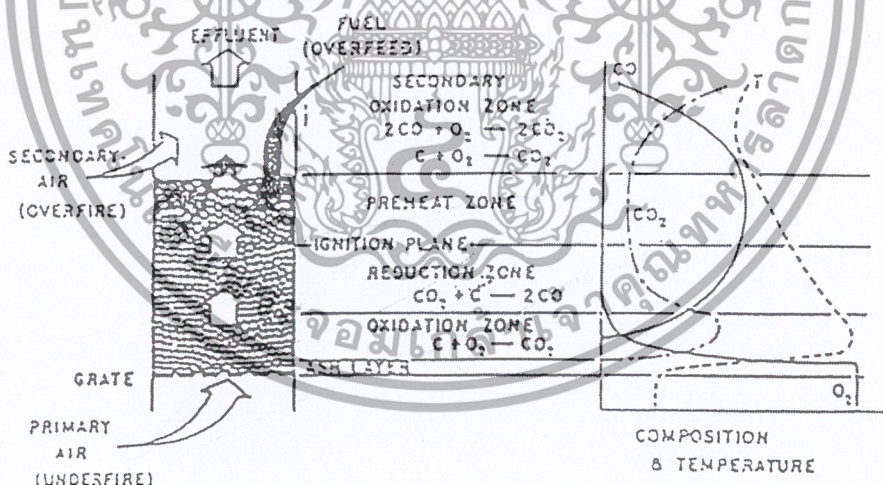
การรวมตัวกันระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงเนื่องด้วยการปั่นป่วนโดยธรรมชาติของเตาเผาแบบฟลูอิดไดซ์เบดนั้นเหมาะสม ทำให้เกิดการสัมผัสกันได้ดีระหว่างอนุภาคของของแข็งกับอากาศ นอกจากนี้ยังทำให้เกิดการเผาไหม้ซึ่งมีอนุภาคเล็กๆ สามารถหลุดลอยออกจากเตาได้ด้วย

#### 4.2.7 เวลา

เมื่อมีอุณหภูมิและการปั่นป่วนที่เหมาะสมแล้ว สิ่งที่ต้องนำมาพิจารณาอีกอย่างก็คือเวลา นั่นก็คือเวลาที่ให้เชื้อเพลิงอยู่ในเตาเผา นั้น ควรแน่ใจว่าทำให้เชื้อเพลิงเกิดการเผาไหม้ได้มากที่สุด แต่ต้องการให้ผลสมบูรณ์คือเชื้อเพลิงเกิดการเผาไหม้จนหมดนั้นย่อมเป็นไปได้ยาก เพราะต้องใช้เวลานานมากและทำให้ค่าใช้จ่ายสูงมากด้วย

### 4.3 การเผาไหม้ในระบบฟลูอิดไดซ์เบด [13]

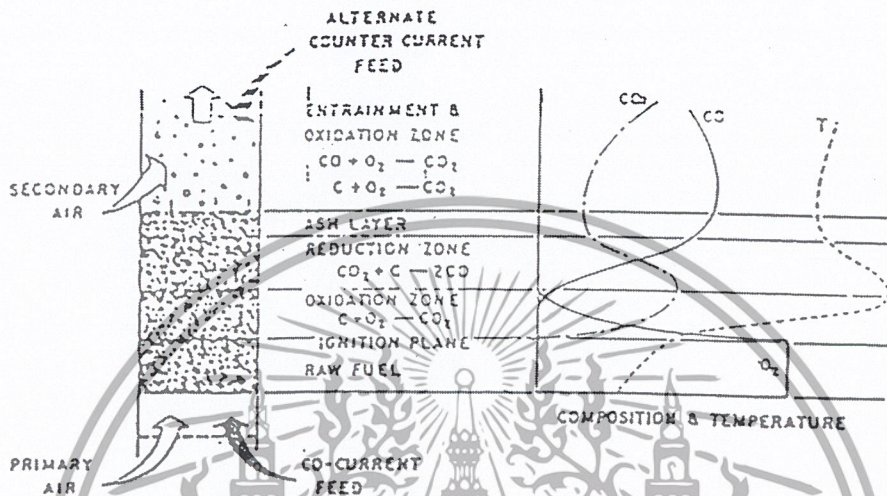
เชื้อเพลิงจะถูกพวยให้ลอยตัวด้วยก๊าซหรืออากาศที่เข้าสู่เตาเผาโรงงานโดยผ่านแผ่นกระจายลม เชื้อเพลิงจะมีสภาพคล้ายของไหลภายในเตาจะมีเบดที่ร้อน เช่น ทรายหรือเถ้าที่เกิดจากการเผาไหม้ เพื่อช่วยทำให้เกิดการผสมผสานของเชื้อเพลิงกับออกซิเจนได้ดี และช่วยให้เถ้าที่เกาะกับเชื้อเพลิงนั้นหลุดลอยออกไปกับก๊าซ ผิวของเชื้อเพลิงจึงสามารถสัมผัสกับออกซิเจนได้ตลอดเวลาทำให้เกิดการเผาไหม้ได้ดี



รูปที่ 4.1 การเผาไหม้ในเตาแบบเบดหนึ่ง [13]

หลักการทำงานของเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดแบบเบดหนึ่งเป็นหลักการทำงานที่ใช้ในเตาเผาโดยทั่วไป แสดงได้ดังรูปที่ 4.1 โดยมีเชื้อเพลิงวางไว้ที่ตะแกรง (Grate) ในห้องเผาไหม้ อากาศที่ใช้ในการเผาไหม้จะแบ่งเป็นสองส่วน ส่วนแรกหรืออากาศปฐมภูมิ (Primary air) จะป้อนเข้าทางด้านล่างของเตา และไหลผ่านพื้นผิวของเชื้อเพลิงแทรกตัวลอยไปยังชั้นบน เมื่อมีการเผาไหม้เกิดขึ้นอากาศส่วนนี้จะทำเอกซาร์เป็นเอกซาร์ที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปฏิกิริยาการเผาไหม้กับเชื้อเพลิง และให้ความร้อนพร้อมกับผลิตภัณฑ์จากการเผาไหม้ อันได้แก่ ก๊าซต่าง ๆ ออกมา อากาศส่วนที่สองหรืออากาศทุติยภูมิ (Secondary air) ซึ่งป้อนเข้าไปในห้องเผาไหม้ทางด้านบนจะเป็นตัวช่วยให้ก๊าซต่างๆซึ่งยังเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ ทำปฏิกิริยาการเผาไหม้อีกครั้งหนึ่งก่อนจะออกจากห้องเผาไหม้ไปทางขวามือของรูปที่ 4.1 จะแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและองค์ประกอบของก๊าซภายในห้องเผาไหม้ชนิดนี้ หากเพิ่มความเร็วของอากาศปฐมภูมิ



รูปที่ 4.2 การเผาไหม้ในเตาแบบฟลูอิดไคซ์เบด [13]

#### 4.4 กลไกการถ่ายเทความร้อน [6]

การกระจายอุณหภูมิในตัวกลางหนึ่งจะถูกควบคุมโดยอิทธิพลรวมของการถ่ายเทความร้อนทั้งสามแบบคือ การนำความร้อน การพาความร้อน และการแผ่รังสีความร้อน

การนำความร้อน เป็นรูปแบบหนึ่งของการถ่ายเทความร้อนในลักษณะของการเปลี่ยนแปลงพลังงานจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำโดยการเคลื่อนที่แบบจลน์ หรือการชนกันโดยตรงของโมเลกุลซึ่งเป็นลักษณะที่เกิดขึ้นในของไหลที่หยุดนิ่ง

เมื่อของไหลไหลผ่านวัตถุที่เป็นของแข็งหรือไหลผ่านภายในช่องทางการไหล โดยที่อุณหภูมิของของไหลและผิวของของแข็งมีค่าแตกต่างกัน การถ่ายเทความร้อนระหว่างของไหลและผิวของของแข็งจะเกิดขึ้นเมื่อของไหลเคลื่อนที่สัมผัสกับผิวของของแข็ง กลไกของการถ่ายเทความร้อนแบบนี้เรียกว่า การพาความร้อน ถ้าการเคลื่อนที่ของของไหลเกิดขึ้นโดยการทำขึ้นเองโดยใช้ปั๊มหรือพัดลมเป็นตัวทำให้เกิดแรงกระทำทำให้ของไหลไหลผ่านบนพื้นผิว การถ่ายเทความร้อนแบบนี้เรียกว่า การพาความร้อนแบบบังคับ (Force convection) ถ้าการเคลื่อนที่ของของไหลเกิดจากแรงลอยตัว ซึ่งมีผลมาจากความแตกต่างของความหนาแน่นที่เกิดจากความแตกต่างของอุณหภูมิภายในของไหล การถ่ายเทความร้อนแบบนี้เรียกว่า การพาความร้อนแบบอิสระ (Free convection)

การแผ่รังสีความร้อน คือพลังงานถูกส่งออกไปโดยสารซึ่งอุณหภูมิจำกัดแน่นอน การส่งออกของรังสีอาจเกิดขึ้นได้จากของเหลวและก๊าซ

#### 4.4.1 การนำความร้อนในแนวรัศมี

ระบบของรูปทรงกระบอกจะมีเกร็ดเฉือนอุณหภูมิอยู่ในทิศทางรัศมีเท่านั้น สามารถวิเคราะห์ได้โดยใช้วิธีมาตรฐานซึ่งเริ่มต้นด้วยสมการความร้อนในรูปที่เหมาะสม ทรงกระบอกกลวงหลายชั้นดังรูปที่ 4.3 ซึ่งผิวภายในและภายนอกสัมผัสกับของไหลที่อุณหภูมิแตกต่างกัน โดยไม่คิดความต้านทานหน้าสัมผัส อัตราการถ่ายเทความร้อนเขียนได้ดังสมการ 4.8



รูปที่ 4.3 แสดงหน้าตัดของห้องเผาไหม้

$$q_r = \frac{2\pi L(T_{\alpha,1} - T_{\alpha,4})}{\frac{1}{r_1 h_1} + \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{k_1} + \frac{\ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right)}{k_2} + \frac{\ln\left(\frac{r_4}{r_3}\right)}{k_3} + \frac{1}{r_4 h_4}} \quad (4.8)$$

#### 4.4.2 การพาความร้อนแบบบังคับสำหรับการไหลภายในท่อ

การถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อนนั้น ส่วนใหญ่เกิดขึ้นเนื่องจากการเคลื่อนที่ทั้งหมดของอนุภาคต่างๆของของไหล

สำหรับการไหลภายในท่อนั้นต้องคำนึงถึงการขยายตัวของช่วงบริเวณทางเข้า ซึ่งจะขึ้นอยู่กับว่าการไหลนั้นเป็นแบบลามินาร์หรือเทอร์บูเลนต์ เรย์โนลด์นัมเบอร์สำหรับการไหลภายในท่อกลมกำหนดเป็น

$$Re_D = \frac{\rho U_m D}{\mu} \quad (4.9)$$

เรย์โนลด์นัมเบอร์วิกฤติสำหรับการเปลี่ยนแปลงของการไหลจากลามินาร์เป็นเทอร์บูเลนต์ เริ่มต้นจาก  $Re_D \approx 2300$  และการไหลเป็นแบบเทอร์บูเลนต์เต็มที่ที่  $Re_D \geq 4000$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับการไหลแบบลามินาร์ที่ปรับตัวเต็มที่แล้วจะมีตัวประกอบเสียดทานคือ

$$f = \frac{64}{\text{Re}_D} \quad (4.10)$$

สำหรับการไหลแบบเทอร์บูเลนต์ที่ปรับตัวเต็มที่แล้วตัวประกอบความเสียดทานจะมีค่าขึ้นอยู่กับ เรย์โนลด์ส์นัมเบอร์และสภาวะของผิวท่อ ซึ่งจะมีค่าน้อยสำหรับผิวเรียบและเพิ่มมากขึ้นเมื่อความหยาบของผิวเพิ่มขึ้น สหพันธ์โดยประมาณเป็นดังนี้

$$f = 0.316 \text{Re}_D^{-1/4} \quad \text{สำหรับ } \text{Re}_D \leq 2 \times 10^4 \quad (4.11)$$

$$f = 0.184 \text{Re}_D^{-1/5} \quad \text{สำหรับ } \text{Re}_D \geq 2 \times 10^4 \quad (4.11)$$

$$f = (0.790 \ln \text{Re}_D - 1.64)^{-2} \quad \text{สำหรับ } 3000 \leq \text{Re}_D \leq 5 \times 10^6 \quad (4.12)$$

$\text{Nu}_D$  เรียกว่า นัสเซิลต์นัมเบอร์ (Nusselt number) ซึ่ง  $\text{Nu}_D$  เป็นฟังก์ชันของค่า Pr (Prandtl number) และค่า  $\text{Re}_D$  โดยที่

$$\text{Nu}_D = h \left( \frac{d}{k} \right) \quad (4.13)$$

สำหรับการไหลแบบลามินาร์ที่บริเวณทางเข้า ความยาวหรือระยะที่ต้องการสำหรับการปรับตัวของของไหล ผลลัพธ์จะขึ้นอยู่กับค่า Pr สำหรับเงื่อนไข  $T_s$  คงที่ Kay ได้ให้สหพันธ์โดยอยู่ในรูปของ

$$\bar{\text{Nu}}_D = 3.66 + \frac{0.668 (D/L) \text{Re}_D \text{Pr}}{1 + 0.04 [(D/L) \text{Re}_D \text{Pr}]^{2/3}} \quad \text{สำหรับ } T_s \text{ คงที่} \quad (4.14)$$

ผลลัพธ์นี้ใช้เฉพาะช่วงที่ค่ากำลังปรับตัว

$$\bar{\text{Nu}}_D = 1.86 \left( \frac{\text{Re}_D \text{Pr}}{L/D} \right)^{1/3} \left( \frac{\mu}{\mu_s} \right)^{0.14} \quad (4.15)$$

สำหรับ  $T_s$  คงที่

$$0.48 < \text{Pr} < 16700$$

$$0.0044 < (\mu/\mu_s) < 9.75$$

สมการสำหรับหา  $\text{Nu}_D$  สำหรับการไหลแบบเทอร์บูเลนต์ที่ปรับตัวเต็มที่แล้วในท่อกลมเรียบ Dittus – Boelter ได้เสนอสมการ

$$\text{Nu}_D = 0.023 \text{Re}_D^{4/5} \text{Pr}^n \quad (4.16)$$

โดยที่  $n = 0.4$  สำหรับการทำให้ร้อน ( $T_s > T_m$ )

$n = 0.3$  สำหรับการทำให้เย็น ( $T_s < T_m$ )

สมการนี้ได้รับการยืนยันจากผลการทดลองสำหรับเงื่อนไขดังนี้

$$0.7 \leq \text{Pr} \leq 160$$

$$\text{Re}_D \geq 10000$$

$$\frac{L}{D} \geq 10$$

สมการต่างๆนี้จะใช้เฉพาะกรณีที่ย่อยๆที่ความแตกต่างอุณหภูมิ ( $T_s - T_m$ ) ไม่มากนัก โดยคุณสมบัติต่างๆคิดที่  $T_m$  สำหรับการไหลที่แสดงลักษณะการแปรเปลี่ยนคุณสมบัติมากๆ Sieder และ Tate ได้แนะนำให้ใช้สมการ

$$\text{Nu}_D = 0.027 \text{Re}_D^{4/5} \text{Pr}^{1/3} \left( \frac{\mu}{\mu_s} \right)^{0.14} \quad (4.17)$$

สำหรับ  $0.7 \leq \text{Pr} \leq 16700$

$$\text{Re}_D \geq 10000$$

$$\frac{L}{D} \geq 10$$

โดยที่คุณสมบัติต่างๆยกเว้นค่า  $\mu_s$  หาที่  $T_m$  และ  $\mu_s$  คิดที่  $T_s$

$$\text{Nu}_D = \frac{\left( \frac{f}{8} \right) (\text{Re}_D - 1000) \text{Pr}}{1 + 12.7 \left( \frac{f}{8} \right)^{1/2} \left( \text{Pr}^{2/3} - 1 \right)} \quad (4.18)$$

สำหรับ  $0.5 < \text{Pr} < 2000$

$$3000 \leq \text{Re}_D \leq 5 \times 10^6$$

$$\frac{L}{D} \geq 10$$

#### 4.4.3 การพาความร้อนแบบอิสระ

การพาความร้อนแบบอิสระหรือการพาความร้อนแบบธรรมชาติ เกิดเนื่องจากแรงลอยตัวภายในของไหลขณะที่การพาความร้อนแบบบังคับนั้นเกิดจากแรงภายนอก การลอยตัวของของไหลเป็นผลมาจากการผสมกันของเกร็ดเย็นความหนาแน่นของของไหลและแรงจากน้ำหนักซึ่งเป็นสัดส่วนกับความหนาแน่น แรงจากน้ำหนักนั้นโดยปกติทั่วไปจะเนื่องมาจากความโน้มถ่วงของโลก แรงลอยตัวซึ่งก่อให้เกิดการเคลื่อนที่ของของไหลเกี่ยวข้องกับความแตกต่างของอุณหภูมิ

แกรสฮอฟฟ์นัมเบอร์,  $Gr_L$  เป็นอัตราส่วนของแรงลอยตัวต่อแรงจากความหนืดซึ่งกระทำต่อของไหล คงจำกัดได้ว่าการพาแบบบังคับ เรย์โนลด์ส์นัมเบอร์แทนอัตราส่วนของแรงจากความเฉื่อยต่อแรงจากความหนืดที่กระทำต่อของไหล เพราะฉะนั้นแกรสฮอฟฟ์นัมเบอร์ในการพาอิสระจะทำหน้าที่เหมือนกับเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ในการพาแบบบังคับทุกอย่าง โดยที่แกรสฮอฟฟ์นัมเบอร์สามารถเขียนได้เป็น

$$Gr_L = \frac{[g\beta L^3 (T_S - T_\infty)]}{\nu^2} \quad (4.19)$$

โดยที่  $\beta$  เป็นสัมประสิทธิ์การขยายตัวแสดงได้โดย

$$\beta = \frac{1}{T_\infty} \quad (4.20)$$

ในการพาความร้อนแบบอิสระความเร็วของการไหลที่เกิดขึ้นจากแรงลอยตัวเท่านั้น ดังนั้น  $Nu$  จะไม่ขึ้นอยู่กับ  $Re_L$

$$Nu = f(Gr_L, Pr) \quad (4.21)$$

นอกจากนี้ก็มีพารามิเตอร์ไร้มิติอื่นๆคือ เรย์เลย์นัมเบอร์ (Rayleigh number,  $Ra$ ) กำหนดเป็น

$$Ra = Gr_L Pr = \frac{g\beta L^3 (T_S - T_\infty) Pr}{\nu^2} = \frac{g\beta L^3 (T_S - T_\infty)}{\nu \alpha} \quad (4.22)$$

ซึ่งจะใช้แทน  $Gr_L$  เพื่อแสดงความเกี่ยวพันการถ่ายเทความร้อนในการพาอิสระ สำหรับกรณีเช่นนี้จะได้

$$Nu = f(Ra, Pr) \quad (4.23)$$

สมการเอมไพริคัลสำหรับการไหลภายนอกวัตถุที่เหมาะสมซึ่งได้พัฒนาขึ้นสำหรับวัตถุรูปทรงเรขาคณิตต่างๆที่วางในของไหล สหพันธ์นี้เหมาะสมในการคำนวณทางวิศวกรรมศาสตร์และโดยทั่วไปอยู่ในรูป

$$\bar{Nu} = (\bar{h}L) / k = C Ra_L^n \quad (4.24)$$

โดยที่

$$Ra_L = Gr_L Pr = \frac{g\beta(T_S - T_\infty)L^3}{\nu\alpha} \approx 10^9 \quad (4.25)$$

ถือตามความยาวเฉพาะ  $L$  ของรูปทรงและค่าของ  $n = 1/4$  และ  $n = 1/3$  สำหรับการไหลแบบลามินาร์และแบบเทอร์บูเลนต์ตามลำดับ ส่วนการไหลแบบเทอร์บูเลนต์นั้นค่า  $\bar{h}_L$  จะขึ้นอยู่กับค่า  $L$  ซึ่งแยกคิดเป็นช่วง เหมือนการพาแบบบังคับ นอกจากนี้ค่าคุณสมบัติต่างๆต้องหาที่อุณหภูมิฟิล์ม,  $T_f$

$$T_f = \frac{(T_S + T_\infty)}{2} \quad (4.26)$$

สำหรับแผ่นเรียบที่วางในแนวตั้ง Churchill และ Chu ได้แนะนำสมการซึ่งสามารถใช้ได้ตลอดช่วงทั้งหมดของ  $Ra_L$  ในรูป

$$\bar{Nu}_L = \left\{ 0.825 + \frac{0.387 Ra_L^{1/4}}{\left[ 1 + (0.492/Pr)^{9/16} \right]^{4/9}} \right\}^2 \quad (4.27)$$

สำหรับ  $10^{-9} < Ra_L < 10^{12}$

สำหรับการ (4.27) ใช้ได้ทั้งลามินาร์และเทอร์บูเลนต์ ส่วนสมการที่มีความแม่นยำกว่าใช้เฉพาะในช่วงลามินาร์คือ

$$\bar{Nu}_L = 0.68 + \frac{0.67 Ra_L^{1/4}}{\left[ 1 + (0.492/Pr)^{9/16} \right]^{4/9}} \quad (4.28)$$

สำหรับค่า  $0 < Ra_L < 10^9$

สำหรับสมการทั้งสองนี้ใช้กับกรณีอุณหภูมิที่ผิวของแผ่นเรียบคงที่ ถ้าเงื่อนไขที่ผิวเปลี่ยนเป็นฟลักซ์ความร้อนคงที่แทนแล้ว สมการทั้งสองยังคงใช้ได้และให้ความถูกต้องพอประมาณ

สมการสำหรับการพาความร้อนแบบอิสระแบบลามินาร์บนแผ่นเรียบในแนวตั้ง ในกรณีฟลักซ์ความร้อนที่ผิวคงที่ สมการ (4.27) และ (4.28) ยังสามารถใช้ได้กับทรงกระบอกยาว  $L$  ที่วางอยู่ในตั้ง ถ้าความหนาของบาวนด์รีเลเยอร์มากกว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของทรงกระบอก หรือเมื่อ

$$\frac{D}{L} \geq \frac{35}{(Gr_L)^{1/4}} \quad (4.29)$$

## บทที่ 5

### การดำเนินงานวิจัย

การดำเนินการวิจัยการทดลองในการทดลองนี้แบ่งเป็น 3 ขั้นตอนคือ ขั้นตอนการทดสอบเตาเผาเคลือบ การเก็บข้อมูล และขั้นตอนการวิเคราะห์ข้อมูล เพื่อหาประสิทธิภาพของเตาเผาเคลือบแบบฟลูอิดไดซ์เบด

#### 5.1 อุปกรณ์ในการทดลอง

อุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างเตาเผาเคลือบแบ่งเป็นส่วนต่างๆ ได้ดังนี้

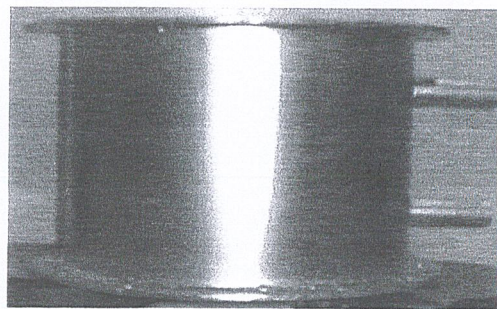
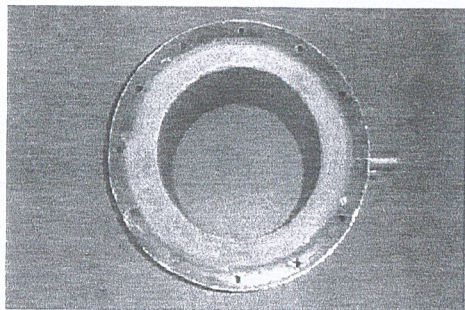


รูปที่ 5.1 เตาเผาฟลูอิดไดซ์เบด

##### 5.1.1 ห้องเผาไหม้

ประกอบไปด้วยโครงสร้างเหล็กทำเป็นลักษณะวงแหวนซ้อนกันอยู่ โดยที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของวงแหวนวงในสุดมีค่าเท่ากับ 300 มิลลิเมตร เหล็กมีความหนา 6 มิลลิเมตร ระหว่างวงแหวนจะมีปูนทนไฟซึ่งมีความหนา 40 มิลลิเมตร วงแหวนภายนอกจะเป็นเหล็กที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 386 มิลลิเมตร โดยใช้เหล็กหนา 4.5 มิลลิเมตร ด้านข้างจะมีท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 มิลลิเมตรสำหรับใส่เทอร์โมคัปเปิ้ลเพื่อวัดอุณหภูมิ 2 ท่อด้วยกัน ห้องเผาไหม้มีความสูง 300 มิลลิเมตร แสดงได้ดังรูปที่ 5.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.2 ห้องเผาไหม้

### 5.1.2 ห้องอุ่นเบด

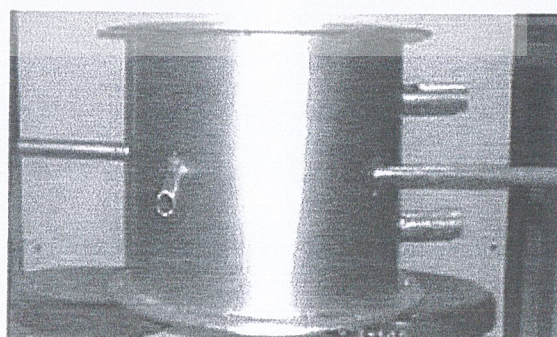
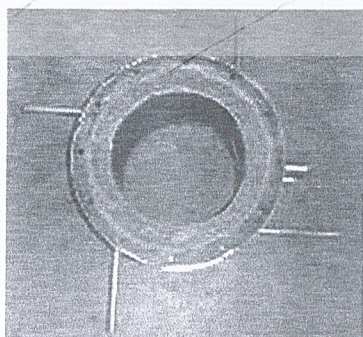
ประกอบด้วยโครงสร้างเหล็กทำเป็นวงแหวนซ้อนกันอยู่ แต่จะมีความแตกต่างจากห้องเผาไหม้คือ จะทำเป็นลักษณะกรวยขดตัด มีขนาดความสูง 300 มิลลิเมตร ระหว่างชั้นของวงแหวนจะมีปูนทนไฟซึ่งมีความหนา 40 มิลลิเมตร ในแต่ละด้านจะมีท่อซึ่งมีขนาดแตกต่างกันไปทั้งสี่ด้าน ทำไว้เพื่อใส่เทอร์คัปเปิ้ล, ระบบป้อนแก๊ส, ช่องดูไฟ (Sight glass) และหัวเผา (Burner) แสดงได้ดังรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.3 ห้องอุ่นเบด

### 5.1.3 ห้องเผาไหม้ที่มีระบบป้อนอากาศทุติยภูมิ

มีลักษณะเหมือนห้องเผาไหม้ จะต่างกันก็เพียงแต่มีท่อขนาดเล็ก 4 ท่อซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 10 มิลลิเมตร วางห่างกัน 90 องศา เพื่อที่จะให้อากาศเข้าไปตามแนวสัมผัสเพื่อที่จะทำให้เกิดการหมุนวนของอากาศ

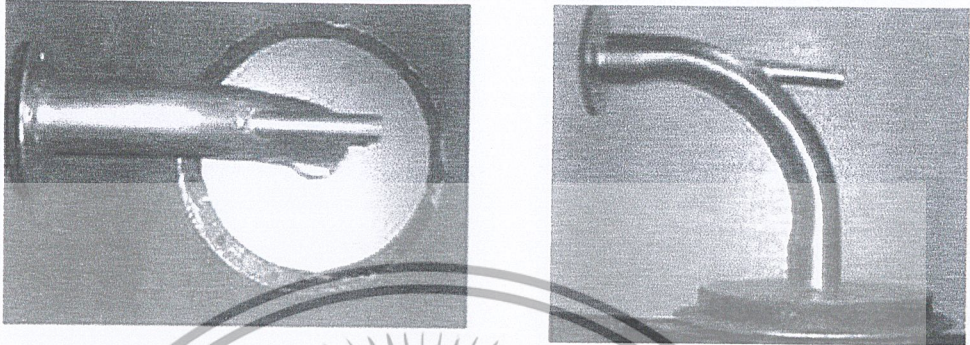


รูปที่ 5.4 ห้องเผาไหม้ที่มีระบบป้อนอากาศทุติยภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 5.1.4 ฝาครอบ

เป็นส่วนที่อยู่ด้านบนสุดของเตา ทำเป็นท่อโค้ง มีท่อสำหรับใส่เทอร์โมคัปเปิ้ลระหว่างท่อโค้ง ฐานของฝามีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 481 มิลลิเมตร ระหว่างชั้นของฝาจะมีซีเมนต์ทนไฟ แสดงได้ดังรูปที่ 5.5



รูปที่ 5.5 ฝาครอบ

#### 5.1.5 แผ่นกระจายลม

ทำหน้าที่คือเป็นอุปกรณ์ป้องกันเพื่อไม่ให้อนุภาคหลุดลงมาด้านล่างและสามารถให้ของไหลไหลผ่านได้ โดยสามารถกระจายของไหลออกได้เต็มพื้นที่ผิวหน้าตัดของตัวเครื่อง โดยที่ความเร็วของของไหลที่เหนือแผ่นกระจายของไหลควรมีค่าเท่ากันทุกจุด เป็นแผ่นสแตนเลสขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 292 มิลลิเมตร ตรงกลางเจาะรูขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 มิลลิเมตรตามแนวเส้นรอบวง เป็นลักษณะของแผ่นกระจายลมแบบเจาะหลายรู แสดงได้ดังรูปที่ 5.6

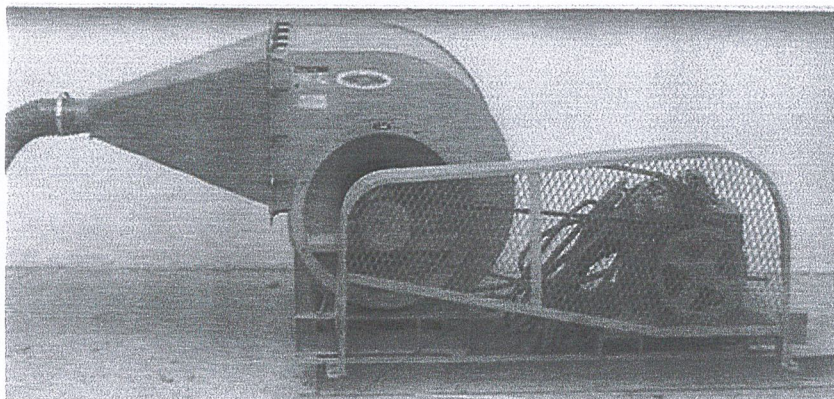


รูปที่ 5.6 แผ่นกระจายลม

#### 5.1.6 ระบบป้อนอากาศปฐมภูมิ (Primary air)

ยี่ห้อ EBARA FAN ประกอบไปด้วยมอเตอร์ขนาด 7.5 กิโลวัตต์ 3 เฟส พร้อมกับพัดลม แสดงได้ดังรูปที่ 5.7

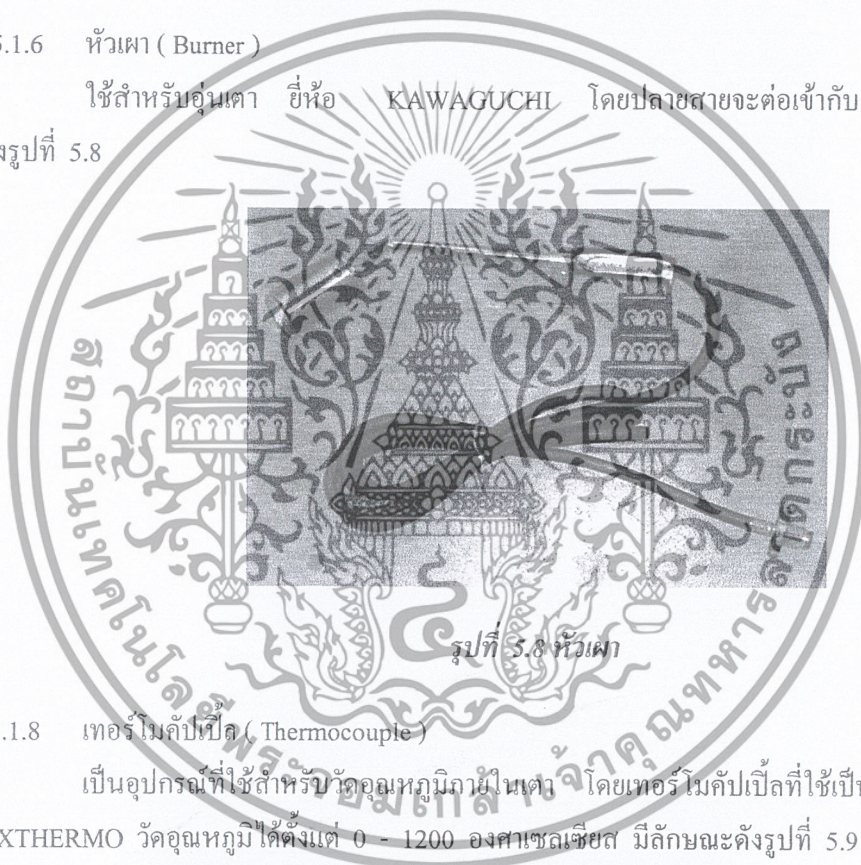
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.7 ระบบป้อนอากาศปรุมภูมิ

5.1.6 หัวเผา ( Burner )

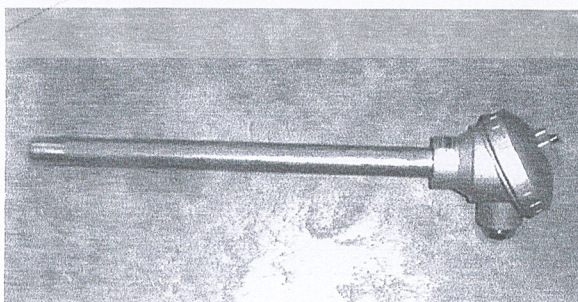
ใช้สำหรับอุ่นเตา ยี่ห้อ KAWAGUCHI โดยปลายสายจะต่อเข้ากับถังก๊าซ ซึ่งมีลักษณะดังรูปที่ 5.8



รูปที่ 5.8 หัวเผา

5.1.8 เทอร์โมคัปเปิ้ล ( Thermocouple )

เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับวัดอุณหภูมิภายในเตา โดยเทอร์โมคัปเปิ้ลที่ใช้เป็น Type K ยี่ห้อ MAXTHERMO วัดอุณหภูมิได้ตั้งแต่ 0 - 1200 องศาเซลเซียส มีลักษณะดังรูปที่ 5.9



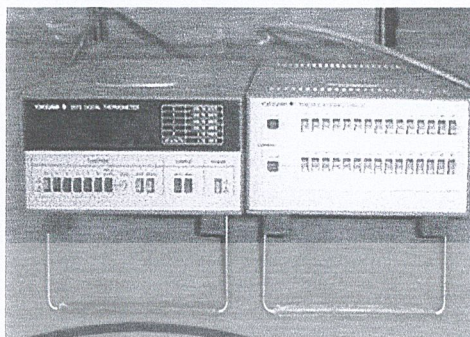
รูปที่ 5.9 เทอร์โมคัปเปิ้ล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.1.9 เครื่องมือวัดอุณหภูมิ (Digital Indicator)

เป็นอุปกรณ์แสดงผลการวัดอุณหภูมิ ยี่ห้อ YOGOGAWA รุ่น 2572 แสดงได้ดังรูปที่

5.10



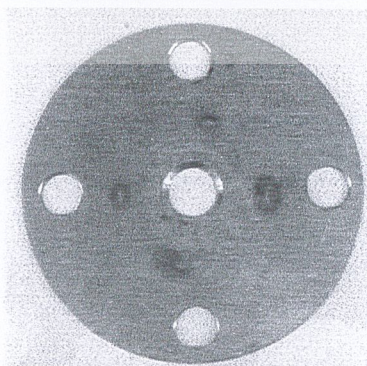
รูปที่ 5.10 Digital indicator

### 5.1.10 มานอมิเตอร์



รูปที่ 5.11 มานอมิเตอร์

### 5.1.11 แผ่นออริฟิส

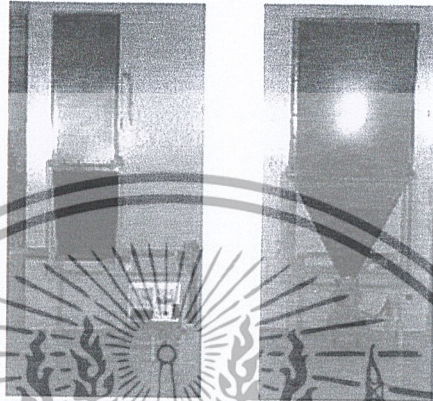


รูปที่ 5.12 แผ่นออริฟิส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.2.12 ระบบป้อนเกลบ

แบ่งเป็นสองส่วน ด้านบนเป็นโครงเหล็กทำเป็นสี่เหลี่ยมเอาไว้สำหรับเก็บเกลบ ด้านล่างทำเป็นกรวยสี่เหลี่ยม ทำการป้อนเกลบโดยใช้สกรูในการขนส่ง (Screw feeder) โดยอัตราการป้อนเกลบ 0.2 กิโลกรัม / นาที โดยใช้มอเตอร์ขนาด 0.2 กิโลวัตต์ 3 เฟส 1 ตัว พร้อมกับอินเวอร์เตอร์ไว้ปรับความเร็วรอบของมอเตอร์ แสดงได้ดังรูปที่ 5.13



รูปที่ 5.13 เครื่องป้อนเกลบ

### 5.1.13 ไซโคลน

เป็นท่อเหวี่ยงแยกฝุ่นจากการเผาไหม้ โดยต่อจากปล่องทางออกของเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบด จะมีพัดลมช่วยดูดไอเสีย ลักษณะของไซโคลนแสดงได้ดังรูปที่ 5.14

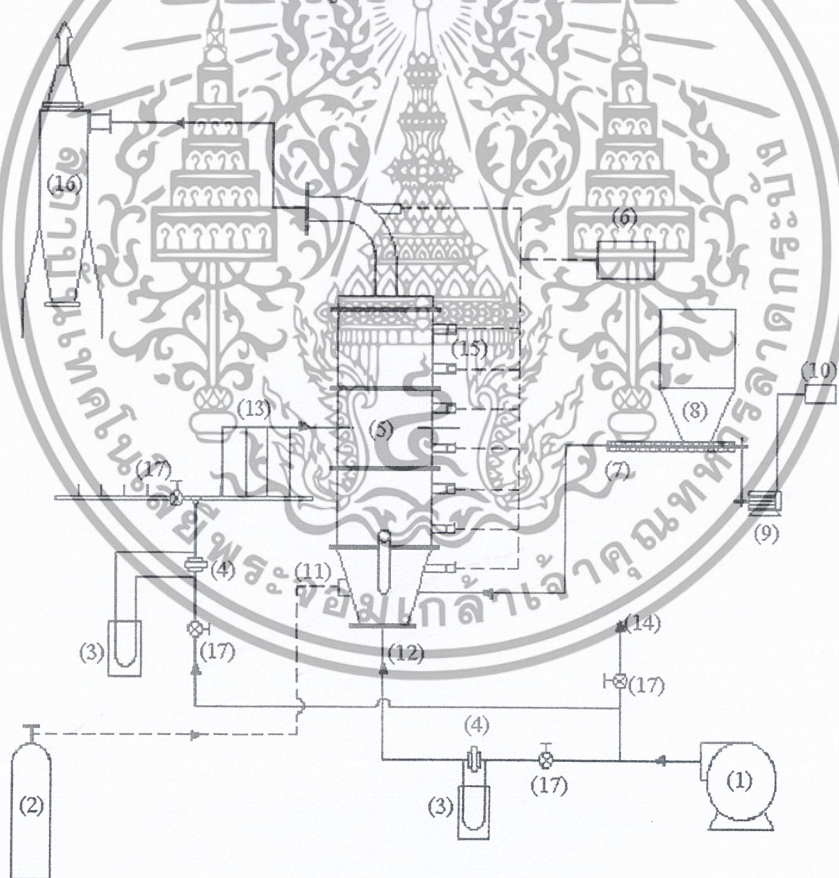


รูปที่ 5.14 ไซโคลน

5.1.14 อังก๊าซ



รูปที่ 5.15 อังก๊าซ



- (1) Blower (2) LPG supply (3) Manometer (4) Orifice plate (5) Fluidized-bed combustor
- (6) Indicator (7) Screw feeder (8) Hopper (9) Motor (10) Inverter (11) Burner (12) Primary air
- (13) Secondary air (14) Bypass air (15) Thermocouple (16) Cyclone (17) Gate valve

รูปที่ 5.16 ไดอะแกรมอุปกรณ์การทดลอง

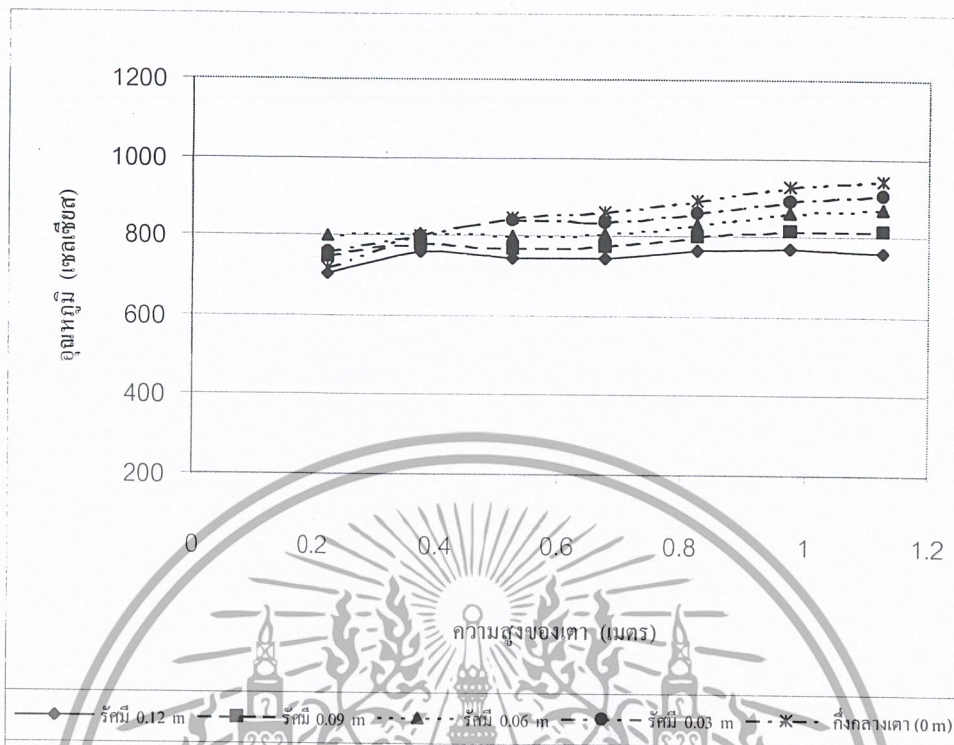
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.2 วิธีการทดลอง

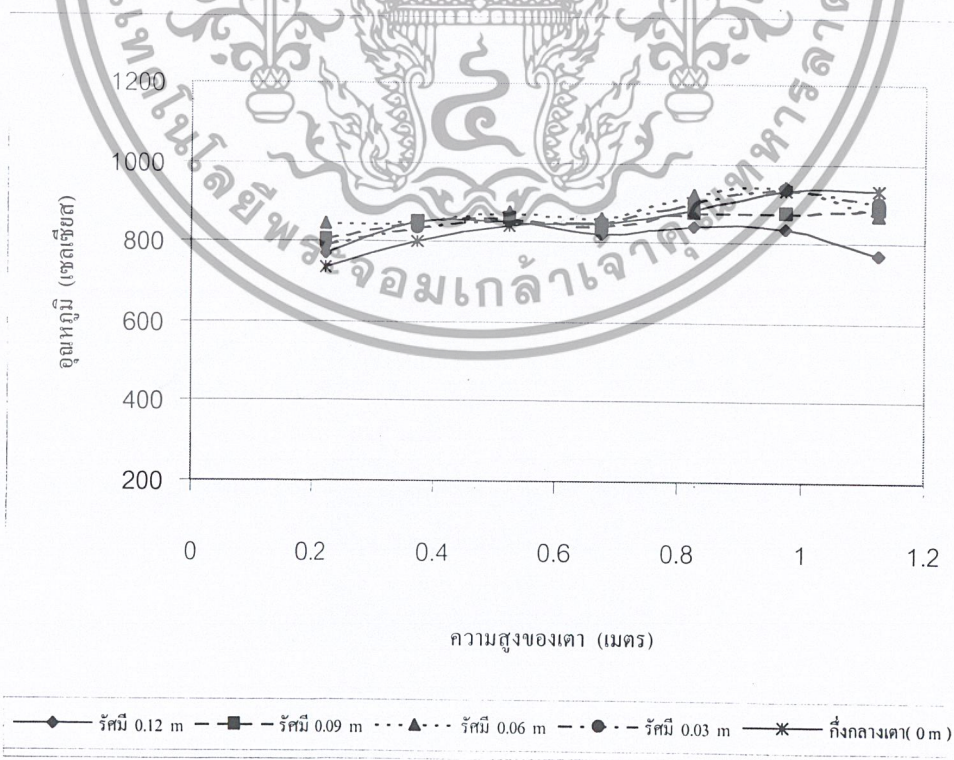
ทำการจัดเตรียมอุปกรณ์และเครื่องมือวัดดังรูปที่ 5.16

1. ทำการอุ่นเตาโดยใช้เชื้อเพลิงก๊าซแอลพีจีจนกระทั่งอุณหภูมิภายในเตามีค่าประมาณ  $500^{\circ}\text{C}$  จากนั้นทำการป้อนเชื้อเพลิงแอลกอฮอล์พร้อมกับอากาศปฐมภูมิจนกระทั่งอุณหภูมิภายในเตาประมาณ  $700^{\circ}\text{C}$  แล้วนำหัวเผาออกจากเตา
2. ทำการปรับอัตราการไหลของอากาศและอัตราการป้อนเชื้อเพลิงเพื่อให้ได้อัตราส่วนสมมูลตามที่กำหนดไว้คือ 1.0
3. ทำการปรับอัตราการไหลของปฐมภูมิ 75 เปอร์เซ็นต์ อากาศทุติยภูมิ 25 เปอร์เซ็นต์
4. ทำการวัดอุณหภูมิภายในเตาเผาโดยใช้เทอร์โมคัปเปิ้ล 9 จุด โดยทำการวัดที่ระยะ 150 มิลลิเมตร ตามแนวรัศมีของเตา แล้วทำการบันทึกผลการทดลอง
5. ปรับระยะของเทอร์โมคัปเปิ้ล 7 จุด ที่ระยะ 120 , 90 , 60 และ 30 มิลลิเมตร ตามลำดับตามแนวรัศมี โดยแต่ละตำแหน่งจะทำการวัดอุณหภูมิและบันทึกผลการทดลอง เทอร์โมคัปเปิ้ลด้านบนสุดไว้สำหรับวัดอุณหภูมิด้านออกจากเตา ส่วนเทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 9 ไว้สำหรับวัดอุณหภูมิบรรยากาศ โดยไม่ต้องทำการปรับตำแหน่ง
6. ทำการปรับอัตราส่วนของอากาศปฐมภูมิ 85 และ 100 เปอร์เซ็นต์ อากาศทุติยภูมิ 15 และ 0 ตามลำดับ แล้วทำการทดลองซ้ำข้อ 4 และข้อ 5
7. ทำการปรับอัตราส่วนสมมูลเป็น 1.2 และ 0.8 ตามลำดับแล้วทำการทดลองซ้ำข้อ 3 ถึง ข้อ 6

5.3 ผลการทดลอง

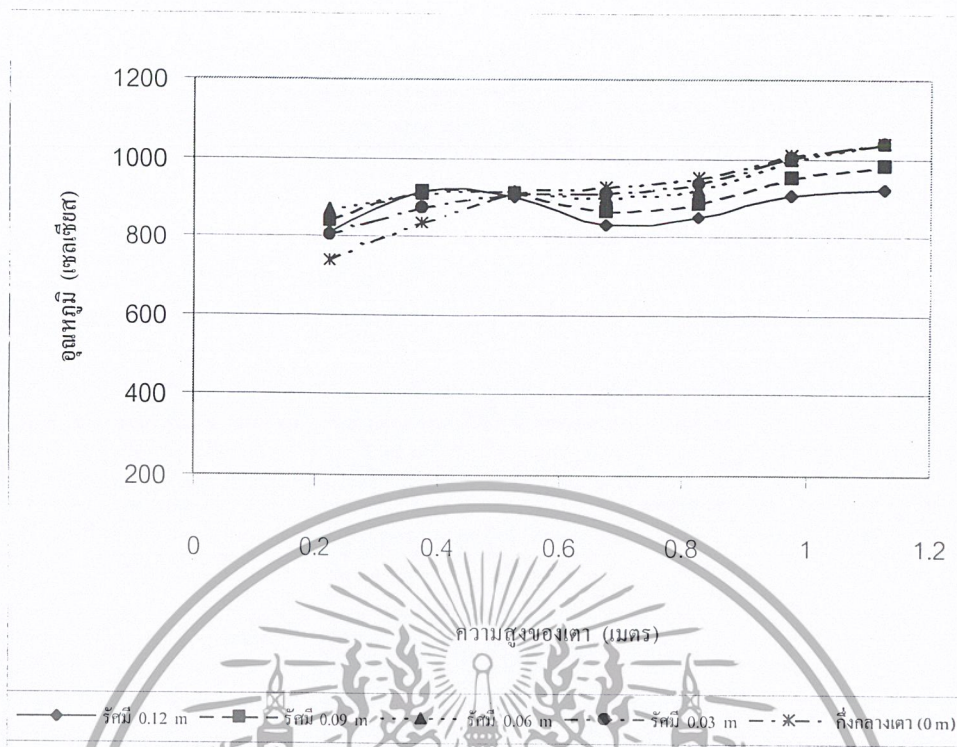


รูปที่ 5.17 การกระจายของอุณหภูมิที่อัตราส่วนสมมูล 0.8 อากาศ/ฐมภูมิ 100 % อากาศทุติยภูมิ 0 %

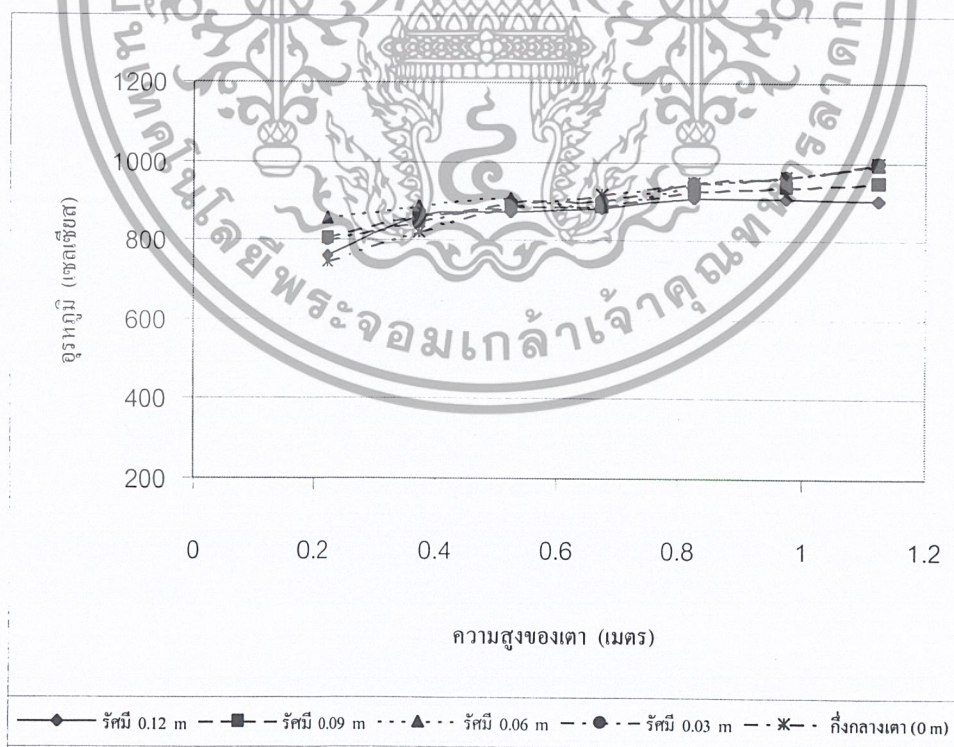


รูปที่ 5.18 การกระจายของอุณหภูมิที่อัตราส่วนสมมูล 0.8 อากาศ/ฐมภูมิ 85% อากาศทุติยภูมิ 15 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

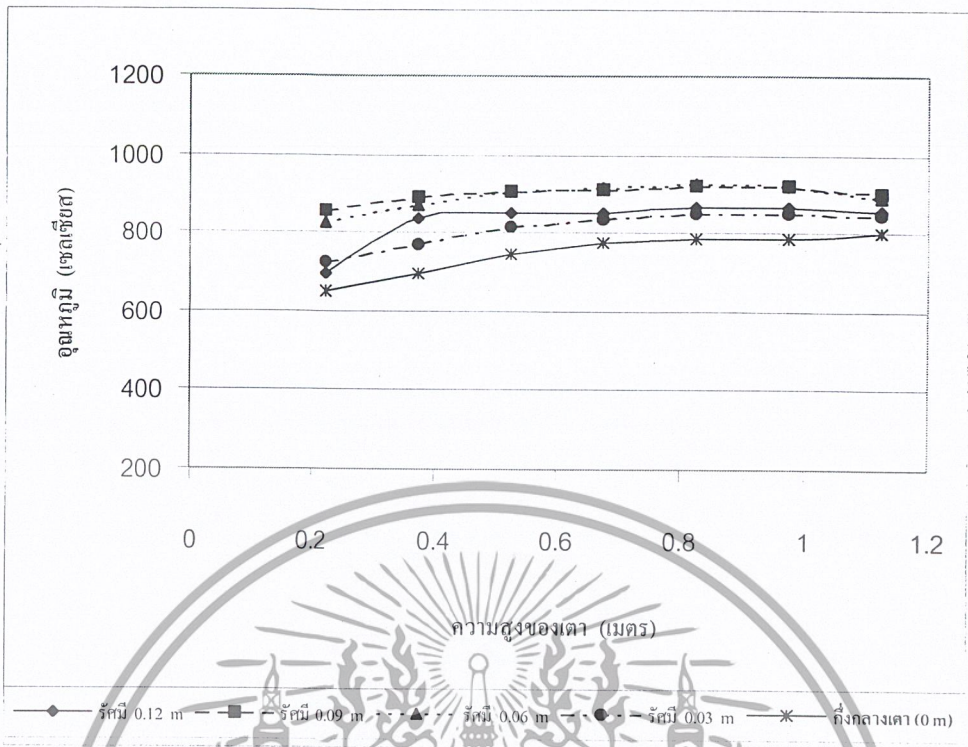


รูปที่ 5.19 การกระจายของอุณหภูมิต่ออัตราส่วนสมมูล 0.8 อากาศปฐมภูมิ 75% อากาศทุติยภูมิ 25 %

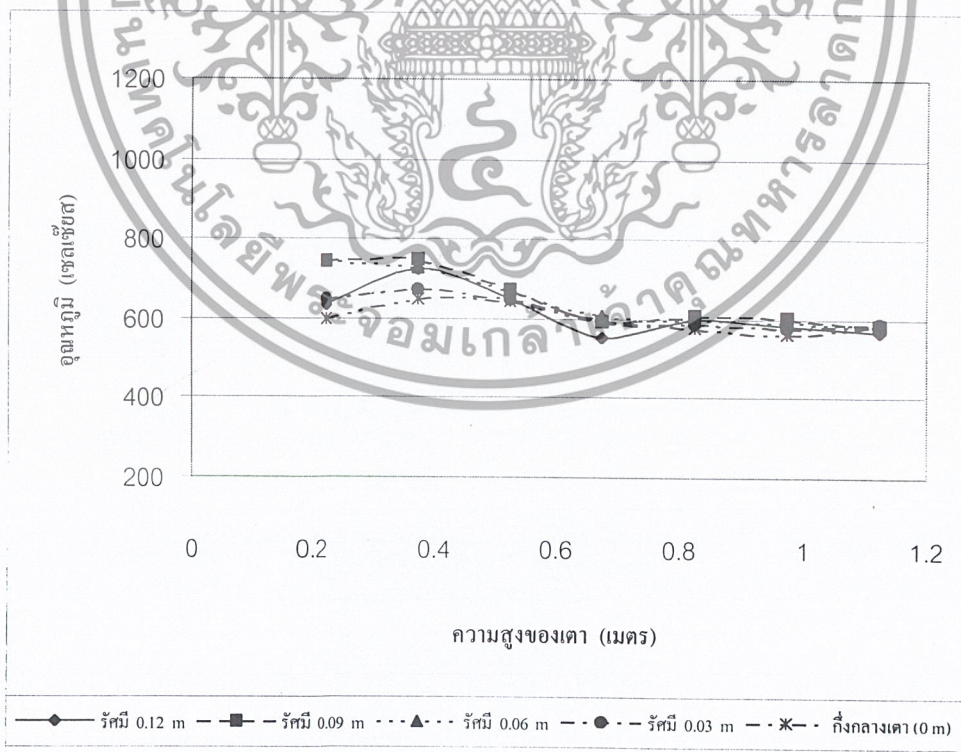


รูปที่ 5.20 การกระจายของอุณหภูมิต่ออัตราส่วนสมมูล 1.0 อากาศปฐมภูมิ 100 % อากาศทุติยภูมิ 0 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

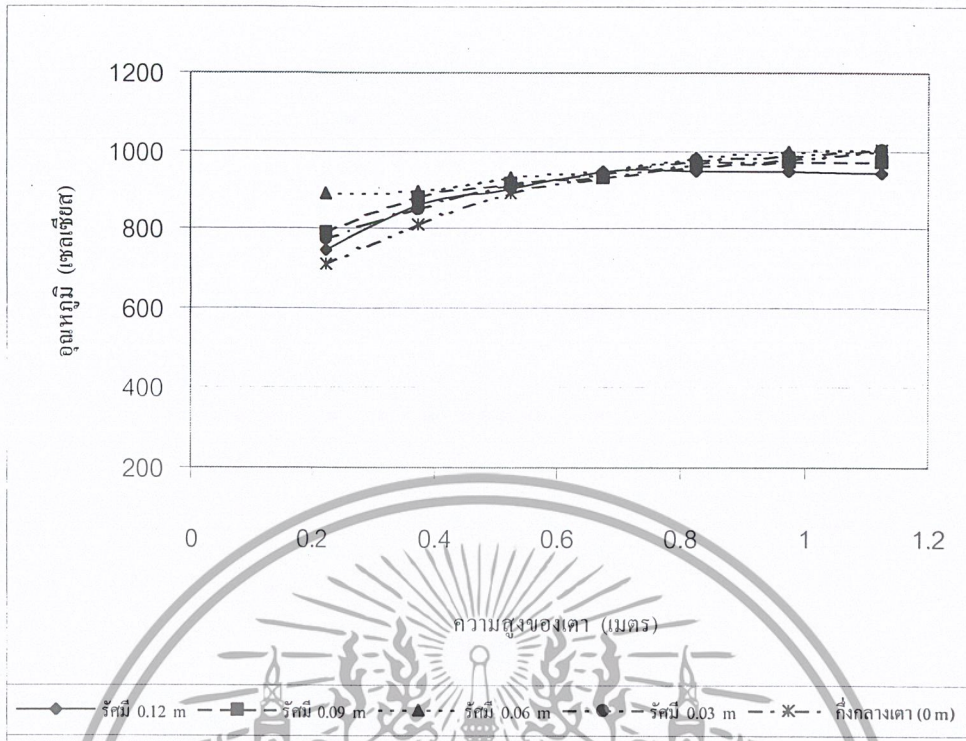


รูปที่ 5.21 การกระจายของอุณหภูมิที่อัตราส่วนสมมูล 1.0 อากาศปฐมภูมิ 85 % อากาศทุติยภูมิ 15 %

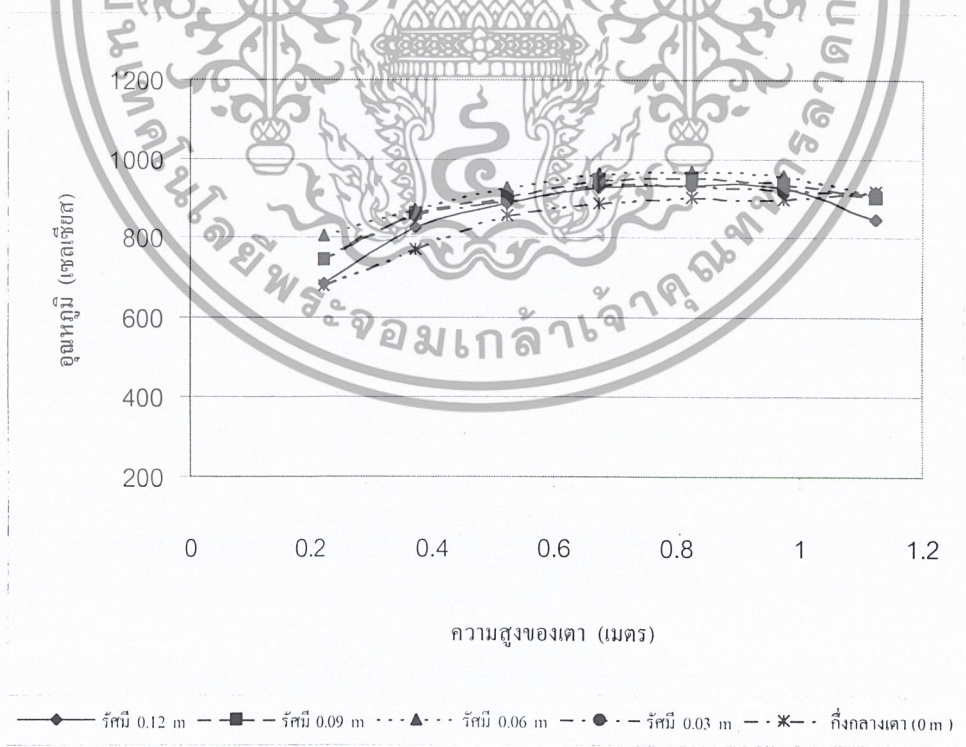


รูปที่ 5.22 การกระจายของอุณหภูมิที่อัตราส่วนสมมูล 1.0 อากาศปฐมภูมิ 75 % อากาศทุติยภูมิ 25 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

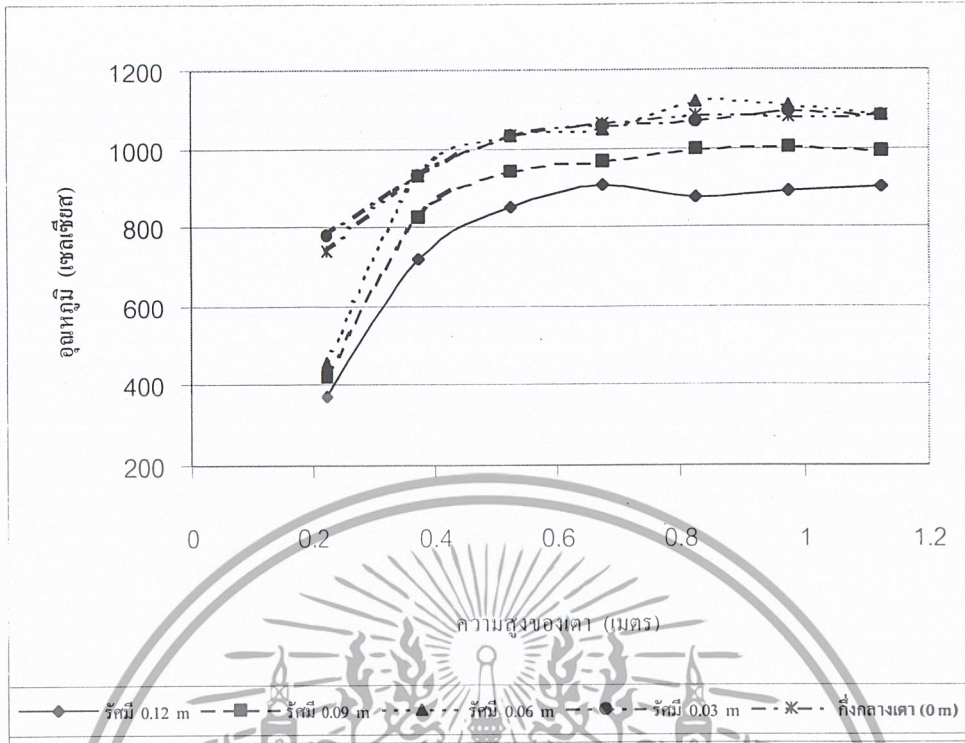


รูปที่ 5.23 การกระจายของอุณหภูมิต่ออัตราส่วนสมมูล 1.2 อากาศปฐมภูมิ 100 % อากาศทุติยภูมิ 0 %



รูปที่ 5.24 การกระจายของอุณหภูมิต่ออัตราส่วนสมมูล 1.2 อากาศปฐมภูมิ 85 % อากาศทุติยภูมิ 15 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.25 การกระจายของอุณหภูมิที่อัตราส่วนสมมูล 1.2 อากาศปฐมภูมิ 75 % อากาศทุติยภูมิ 25 %



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 6

### สรุป วิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 6.1 สรุป

ในโครงการนี้ได้ศึกษาออกแบบและสร้างเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดเพื่อใช้ในการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลที่ได้มาจากพืช โดยชีวมวลที่ใช้ในการทดลองคือแกลบ แกลบเป็นผลพลอยได้จากการสีข้าวซึ่งประเทศไทยเป็นประเทศที่มีการปลูกข้าวมากพอสมควร และแกลบมีราคาถูกมากเมื่อเทียบกับเชื้อเพลิงอื่นเพื่อนำมาเป็นพลังงานทดแทนซึ่งล้วนแต่สามารถนำมาประยุกต์ใช้เป็นเชื้อเพลิงได้เป็นอย่างดี จากการทดลองสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

ข้อสังเกตจากการทดลองพบว่า สามารถติดเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดได้ง่ายและสามารถทำให้เกิดการเผาอย่างต่อเนื่อง มีอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้สูงโดยไม่ใช้เชื้อเพลิงอื่นช่วยในการเผาไหม้นอกเสียจากขั้นตอนในการอุ่นเตา โดยการอุ่นเตาจะใช้ก๊าซหุงต้มเป็นเชื้อเพลิงในการอุ่นเตาเพื่อช่วยให้การเผาไหม้ที่เกิดขึ้นได้เองและต่อเนื่อง

อัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงแกลบที่เหมาะสมต่อการเผาไหม้ทางทฤษฎีคือ 4.583 : 1 โดยน้ำหนัก ในการทดลองนี้ได้กำหนดอัตราการป้อนเชื้อเพลิงแกลบคงที่เท่ากับ 0.2 กิโลกรัม / นาที อัตราส่วนสมมูล (Equivalence Ratio,  $\phi$ ) ที่ได้ทำการศึกษาคือ 0.8, 1.0 และ 1.2 และอัตราส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศป้อนต่ออากาศหุดยุมคือ 100 : 0, 85 : 15 และ 75 : 25 โดยอากาศหุดยุมจะถูกจ่ายในแนวสัมผัสกับผนังด้านในของห้องเผาไหม้ของเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบด ซึ่งจะช่วยให้ทำให้เกิดการผสมหรือสัมผัสกันอย่างทั่วถึงระหว่างเชื้อเพลิงแกลบกับอากาศมากขึ้น ตลอดจนเป็นการเพิ่มเวลาในการเผาไหม้ภายในเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดมากขึ้น ทำให้การเผาไหม้สมบูรณ์และมีประสิทธิภาพมากขึ้น ซึ่งผลจากการทดลองพบว่าเมื่ออัตราส่วนสมมูล,  $\phi = 1$  และอัตราส่วนระหว่างอากาศป้อนต่ออากาศหุดยุมที่ 100 : 0 จะทำให้การกระจายของอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ภายในเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดค่อนข้างที่เป็นไปอย่างสม่ำเสมอ และที่อัตราส่วนสมมูล,  $\phi = 1.2$  และอัตราส่วนระหว่างอากาศป้อนต่ออากาศหุดยุมที่ 75 : 25 จะทำให้ได้อุณหภูมิเฉลี่ยสูงสุดที่ได้จากการเผาไหม้เท่ากับ 929.2 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิเฉลี่ยสูงสุดของการทดลอง คำนวณค่อนข้างต่ำ ขี้เถ้าที่ออกมามีลักษณะละเอียด

#### 6.2 วิจัยและข้อเสนอแนะ

เตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดเป็นโครงการเริ่มต้น ซึ่งได้ทำการศึกษาลักษณะการกระจายของอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ของเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดและอัตราส่วนสมมูล ตั้งแต่เตาที่ออกจากเตา ควัน และก๊าซไอเสีย ที่เกิดจากการเผาไหม้ซึ่งเป็นการควบคุมในระดับหนึ่ง ฉะนั้นแล้วควรจะมีการศึกษาถึงตัวแปรอื่นๆอีก เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการออกแบบเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดที่มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น เช่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ศึกษาถึงการกระจายอุณหภูมิภายในเตาและปริมาณความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้เมื่อมีการ  
หุ้มฉนวนอย่างดีมาก
- ศึกษาถึงขนาดของห้องเผาไหม้ที่มีผลต่อการเผาไหม้
- ติดตั้งระบบการแลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อหาประสิทธิภาพของเตา
- ศึกษาถึงอัตราการไหลของเชื้อเพลิงแกลบ ที่อัตราการไหลต่าง ๆ กันที่มีผลต่อการเผาไหม้
- ศึกษาถึงความชื้นของเชื้อเพลิงแกลบที่มีผลต่อการเผาไหม้
- อิทธิพลของอากาศศุขยุมิที่เพิ่มมากขึ้นต่อการเผาไหม้ในเตาเผาฟลูอิดไคซ์เบด
- ศึกษาถึงขนาดของแกลบที่มีผลต่อการเผาไหม้



## บรรณานุกรม

- [1] สมศักดิ์ ดำรงค์เลิศ.ฟลูอิดไดเซชัน.สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย : กรุงเทพมหานคร,2524
- [2] ศศิวิมล สูงสว่าง.การเผาไหม้แกลบในเตาฟลูอิดไดซ์เบด.วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต.ภาคเคมีเทคนิค จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย,2526
- [3] บุญเรือง ศรีสวัสดิ์.การปรับปรุงสมรรถนะเตาเผาแกลบ.วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี,2540
- [4] อภิชัย เทอดเทียนวงศ์.เตาเผาไหม้ชีวมวลแบบฟลูอิดไดซ์เบด.วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี,2528
- [5] เจษฎาพันธ์ โอทอง, วุฒิพงษ์ ไสมรัมย์ และอัมภา บุญศรีรัตน์.ก๊าซฟลูอิดไดเซชัน. ปริญญาานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง,2541
- [6] พงษ์เจต พรหมวงศ์.การถ่ายเทความร้อน.ตำราชุดวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2541
- [7] พงษ์เจต พรหมวงศ์, ศุภชัย เลื่อนลอย และนิวัต พิริยะรุ่งโรจน์.การตรวจสอบเชิงทดลองของคุณลักษณะการเผาไหม้แกลบที่มีความชื้น.การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 15, 28-30 พฤศจิกายน 2544 มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
- [8] อุดสาห์ จิรากร และเชื้อ ชูขำ.เครื่องยนต์สันดาปภายใน.ซีเอ็ดยูเคชั่น : กรุงเทพมหานคร,2542
- [9] Frank P. Incropera and David P. Dewitt.Fundamental of Heat and Mass Transfer, fourth edition, John Wiley & Son : New York,1996
- [10] Willard W. Pulkrabek.Engineering Fundamental of the Internal Combustion Engine.Prentice-Hall International, Inc : New Jersey,1997
- [11] Robert W. Fox and Alan T. Mcdonal.Introduction to Fluid Mechanics, fifth edition. John Wiley & Son : New York,1998
- [12] อติศักดิ์ ชูจินดา.เตาเผาแกลบสำหรับเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบฟลูอิดไดซ์เบด. วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีอุณหภาพ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2540
- [13] เสรีย์ ผู้ประกาย. การศึกษาและออกแบบเตาเผาจากตะกอนแบบฟลูอิดไดซ์เบด, วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี , 2540
- [14] นิวัต พิริยะรุ่งโรจน์. การศึกษาเชิงการทดลองของเตาเผาแบบฟลูอิดไดซ์เบด . วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง , 2544



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการคำนวณออกแบบจะใช้ข้อมูลเบื้องต้นจากหัวข้อที่ 3.4 ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

### 1. การหาความสูงที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดเซชัน

จากสมการที่ 3.1

$$\frac{L_0}{L_{mf}} = \frac{1 - \epsilon_{mf}}{1 - \epsilon_0}$$

เมื่อ  $L_0$  คือความสูงของเบด ณ เวลาเริ่มต้น ( $t=0$ )

$L_{mf}$  คือความสูงของเบดเมื่อเกิดฟลูอิดไดเซชัน

$$L_{mf} = \frac{(1 - 0.601)}{(1 - 0.682)} (0.15)$$

$$L_{mf} = 0.188 \text{ m}$$

### 2. การหาความดันตกในเบด

จากรูปที่ 3.3 และสมการที่ 3.5

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

$$\Delta P_b = P_3 - P_4 = L_{mf} (1 - \epsilon_{mf}) (\rho_s - \rho_g) \left( \frac{g}{g_c} \right)$$

$$\Delta P_b = (0.188)(1 - 0.682)(735 - 1.15146)(1)$$

$$\Delta P_b = 43.872 \frac{\text{kgf}}{\text{m}^2}$$

$$\Delta P_b = 430 \text{ Pa}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3. ความเร็วที่เริ่มทำให้เกิดฟลูอิดไดเซชัน

คุณสมบัติของอากาศที่อุณหภูมิ  $30^{\circ}\text{C}$  [9]

$$\rho_g = 1.15146 \text{ kg/m}^3$$

$$\mu = 186.016 \times 10^{-7} \text{ N-s/m}^2$$

จากสมการที่ 3.10

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

$$U_{mf} = \frac{(0.225 \times 1.36 \times 10^{-3})^2 (735 - 1.15146) (9.81) (0.682)^3}{150 (186.016 \times 10^{-7}) (1 - 0.682)}$$

$$U_{mf} = 0.24 \text{ m/s}$$

### 4. ความสูงของเตา

$$H = U_{mf} t$$

$$H = (0.24)(5)$$

$$H = 1.2 \text{ m}$$

t คือเวลาที่ใช้ในการเผาไหม้แก๊สอย่างสมบูรณ์ (2 – 5 วินาที) . [4]

## 5. ความเร็วหลุดลอย

$$Re_p = \frac{d_p \rho_g U_{mf}}{\mu}$$

$$Re_p = \frac{(1.36 \times 10^{-3})(1.15146)(0.24)}{(186.016 \times 10^{-7})}$$

$$Re_p = 20.024$$

จากสมการที่ 3.18

$$C_d = \frac{10}{\sqrt{Re_p}} \quad : \text{ถ้าห้ } 0.4 < Re_p < 500$$

$$C_d = \frac{10}{\sqrt{20.024}}$$

$$C_d = 2.224$$

จากสมการที่ 3.16

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

$$U_T = \left\{ \frac{(4)(1.36 \times 10^{-3})(9.81)(735 - 1.15146)}{(3)(1.15146)(2.224)} \right\}^{\frac{1}{2}}$$

$$U_T = 4.765 \quad \text{m/s}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 6. ความดันลดบนแผ่นกระจาย

จากสมการที่ 3.23

$$\Delta P_d = 0.4 \Delta P_b$$

$$\Delta P_d = (0.4)(43.872) \frac{\text{kgf}}{\text{m}^2}$$

$$\Delta P_d = 17.5488 \frac{\text{kgf}}{\text{m}^2}$$

$$\Delta P_d = 172.15 \text{ Pa}$$





ภาคผนวก ข.

การคำนวณหาการสูญเสียความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการการสูญเสียความร้อนสมการที่ 4.8 และจากรูปที่ 4.3

$$q_r = \frac{2\pi L(T_{\alpha,1} - T_{\alpha,4})}{\frac{1}{r_1 h_1} + \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{k_1} + \frac{\ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right)}{k_2} + \frac{\ln\left(\frac{r_4}{r_3}\right)}{k_3} + \frac{1}{r_4 h_4}}$$

$$r_1 = 0.15 \text{ m}$$

$$r_2 = 0.156 \text{ m}$$

$$r_3 = 0.196 \text{ m}$$

$$r_4 = 0.2005 \text{ m}$$

$$T_{\alpha,1} = 1202.2^\circ \text{ K}$$

$$T_{\alpha,4} = 301.8^\circ \text{ K}$$

$$k_1 = 60.5 \text{ w/m}^\circ \text{ K}$$

$$k_2 = 1.3 \text{ w/m}^\circ \text{ K}$$

$$k_3 = 60.5 \text{ w/m}^\circ \text{ K}$$

$$U_m = 2.5025 \text{ m/s}$$

$$D = 0.3 \text{ m}$$

$$L = 1.2 \text{ m}$$

$$T_{\infty,1} = 1202.2^\circ \text{ K}$$

$$T_{\infty,4} = 301.8^\circ \text{ K}$$

$$T_s = 418^\circ \text{ K}$$

### 1. คัดที่สภาวะภายในเตา

คิดในลักษณะของการไหลภายในท่อ โดยคุณสมบัติของอากาศที่อุณหภูมิ  $1202.2^\circ \text{ K}$  เป็นดังนี้

$$\rho = 0.2897 \text{ kg/m}^3$$

$$k = 76.4254 \times 10^{-3} \text{ w/m}^\circ \text{ K}$$

$$\text{Pr} = 0.727802$$

$$\mu = 473.506 \times 10^{-7} \text{ N-s/m}^2$$

จากสมการที่ 4.9

$$Re_D = \frac{\rho U_m D}{\mu}$$

$$Re_D = \frac{(0.2897)(2.5025)(0.3)}{(473.506 \times 10^{-7})}$$

$$Re_D = 4593.231$$

จากค่า  $Re_D$  ที่คำนวณได้จะเลือกใช้สมการที่ 4.12

$$f = (0.79 \ln Re_D - 1.64)^2$$

$$f = (0.79 \ln 4593.231 - 1.64)^2$$

$$f = 0.03966$$

เลือกใช้สมการ 4.18

$$Nu_D = \frac{\left(\frac{f}{8}\right) (Re_D - 1000) Pr}{1 + 12.7 \left(\frac{f}{8}\right)^{0.5} (Pr^{2/3} - 1)}$$

$$Nu_D = \frac{\left(\frac{0.03966}{8}\right) (4593.231 - 1000) (0.727802)}{1 + 12.7 \left(\frac{0.03966}{8}\right)^{0.5} (0.727802^{2/3} - 1)}$$

$$Nu_D = 15.6331$$

จากสมการ 4.13

$$h = Nu_D \frac{k}{d}$$

$$h = 15.6331 \frac{(76.4254 \times 10^{-3})}{(0.3)}$$

$$h = 3.9826 \text{ w/m}^2 \text{ } ^\circ\text{K}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2. กิตสภาวะภายนอกเตา

คิดในลักษณะของการพาความร้อนแบบอิสระ

จากสมการที่ 4.26

$$T_f = \frac{(T_s + T_\alpha)}{2} = \frac{(145 + 28.8)}{2} = 86.9 \text{ } ^\circ\text{C} = 359.6 \text{ } ^\circ\text{K}$$

คุณสมบัติของอากาศที่อุณหภูมิ 338<sup>o</sup>K เป็นดังนี้

$$\rho = 0.9705 \text{ kg/m}^3$$

$$k = 30.7524 \times 10^{-3} \text{ w/m}^0\text{K}$$

$$\text{Pr} = 0.69802$$

$$\mu = 212.5362 \times 10^{-7} \text{ N}\cdot\text{s/m}^2$$

$$U = 22.01 \times 10^{-6} \text{ m}^3$$

จากสมการที่ 4.29

$$\frac{D}{L} \geq \frac{35}{\text{Gr}_L^{1/4}}$$

$$\frac{D}{L} = \frac{0.3}{1.2} = 0.25 \dots\dots\dots (A)$$

โดยที่สมการ 4.20

$$\beta = \frac{1}{T_f}$$

$$\beta = \frac{1}{301.8}$$

$$\beta = 3.313 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{K}^{-1}$$

จากสมการที่ 4.19

$$Gr_L = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L^3}{\nu^2}$$

$$Gr_L = \frac{(9.81)(3.313 \times 10^{-3})(418 - 301.8)(1.2^3)}{(22.01 \times 10^{-6})^2}$$

$$Gr_L = 1.347165 \times 10^{10}$$

$$\frac{35}{Gr_L^{r/4}} = \frac{35}{(1.347165 \times 10^{10})^{1/4}} = 0.1027 \quad \dots\dots\dots(B)$$

นำค่า (A) และ (B) ไปแทนค่าในสมการ 4.29 ซึ่งเป็นไปตามเงื่อนไข โดยจะทำให้ทรงกระบอกในแนวตั้งสามารถคิดในลักษณะแผ่นเรียบในแนวตั้งได้

จากสมการที่ 4.25

$$Ra_L = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L^3}{\nu\alpha}$$

$$Ra_L = \frac{(9.81)(3.313 \times 10^{-3})(418 - 301.8)(1.2)^3}{(22.01 \times 10^{-6})(31.5632 \times 10^{-6})}$$

$$Ra_L = 9393755229 = 9.39 \times 10^9$$

เลือกใช้สมการที่ 4.27

$$Nu_L = \left[ 0.825 + \frac{0.387(Ra_L)^{1/4}}{\left\{ 1 + \left( \frac{0.492}{Pr} \right)^{9/16} \right\}^{4/8}} \right]^2$$

$$\text{Nu}_L = \left[ 0.825 + \frac{0.387(9393755229)^{\frac{1}{6}}}{\left\{ 1 + \left( \frac{0.492}{0.69802} \right)^{\frac{9}{16}} \right\}^{\frac{8}{27}}} \right]^2$$

$$\text{Nu}_L = 246.7447$$

จากสมการที่ 4.24

$$h = \text{Nu}_L \frac{k}{L}$$

$$h = (246.7447) \frac{(30,7524 \times 10^{-3})}{(1.2)}$$

$$h = 6.3233 \text{ w/m}^2 \text{ } ^\circ\text{K}$$

แทนค่าในสมการที่ 4.8 จะได้

$$q_r = \frac{2\pi(1.2)(1202.2 - 301.8)}{\left\{ \frac{1}{(0.15)(3.9829)} \right\} + \left\{ \frac{\ln\left(\frac{0.156}{0.15}\right)}{60.5} \right\} + \left\{ \frac{\ln\left(\frac{0.196}{0.156}\right)}{1.3} \right\} + \left\{ \frac{\ln\left(\frac{0.2005}{0.196}\right)}{60.5} \right\} + \left\{ \frac{1}{(2.005)(6.3233)} \right\}}$$

$$q_r = 2572.209 \text{ W}$$

$$q_r = 2.572 \text{ kW} \quad \text{เป็นความร้อนที่สูญเสียออกจากเตา}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.2 คุณสมบัติทางเคมีของเชื้อเพลิงแกลบ นำมาคำนวณจากสมการการเผาไหม้จะได้  
ดังตาราง ค.1 [8]

ตาราง ค.1 แสดงการคำนวณการหาปริมาณของออกซิเจนที่ใช้ในการเผาไหม้

ส่วนประกอบ โดยน้ำหนัก	%โดยน้ำหนัก	สมการการเผาไหม้	น้ำหนักที่ต้องการต่อเชื้อ เพลิงต่อ 1 kg
C	38	$C + O_2 = CO_2$	$(32 / 12) \times 0.38 = 1.013$
H <sub>2</sub>	5.7	$2H_2 + O_2 = 2H_2O$	$(32 / 4) \times 0.057 = 0.456$
S	0.06	$S + O_2 = SO_2$	$1 \times 0.0006 = 0.0006$
O <sub>2</sub>	41.6		- 0.416
N <sub>2</sub>	0.69		
Ash	14		

$$\begin{aligned} \therefore \text{แกลบต้องการ } O_2 &= 1.013 + 0.456 + 0.0006 - 0.416 \\ &= 1.0541 \text{ kg} \end{aligned}$$

ออกซิเจนในอากาศ 23%

$$\left( \frac{100}{23} \right) (1.0541) = 4.583 \text{ kg / แกลบ 1 kg}$$

### 1. พิจารณาที่อัตราส่วนสมมูล ( $\phi$ ) 0.8

$$\text{จาก } \phi = 0.8 = \frac{(AF)_{\text{Stoich}}}{(AF)_{\text{Act}}}$$

$$(AF)_{\text{act}} = \frac{(AF)_{\text{Stoich}}}{\phi}$$

$$= \left( \frac{4.583}{0.8} \right)$$

$$(AF)_{\text{act}} = 5.73 \text{ kg / แกลบ 1 kg}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2. พิจารณาที่อัตราส่วนสมมูล ( $\phi$ ) 1.0

$$\text{จาก } \phi = 1.0 = \frac{(AF)_{\text{Stoich}}}{(AF)_{\text{Act}}}$$

$$(AF)_{\text{act}} = \frac{(AF)_{\text{Stoich}}}{\phi}$$

$$= \left( \frac{4.583}{1.0} \right)$$

$$(AF)_{\text{act}} = 4.583 \text{ kg / แกลป 1 kg}$$

## 3. พิจารณาที่อัตราส่วนสมมูล ( $\phi$ ) 1.2

$$\text{จาก } \phi = 1.2 = \frac{(AF)_{\text{Stoich}}}{(AF)_{\text{Act}}}$$

$$(AF)_{\text{act}} = \frac{(AF)_{\text{Stoich}}}{\phi}$$

$$= \left( \frac{4.583}{1.2} \right)$$

$$(AF)_{\text{act}} = 3.819 \text{ kg / แกลป 1 kg}$$

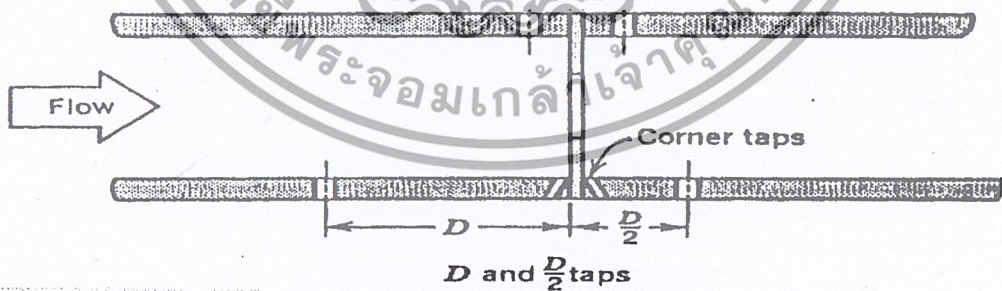
เมื่อ A/F ratio = 4.583

$$\begin{aligned} \text{ในการทดลองใช้เกลบที่มีอัตราการไหล} &= 0.2 \text{ kg/min} \\ \text{ฉะนั้นอากาศที่ใช้ในการทดลอง} &= 0.2 \times 5.73 \text{ kg/min} \\ &= 1.146 \text{ kg/min} \\ &= 0.0191 \text{ kg/s} \end{aligned}$$

ตารางที่ ค.2 แสดงปริมาณอากาศที่ใช้ในการทดลอง

$\phi$	Primary Air (kg/sec)			Secondary Air (kg/s)	
	100%	85%	75%	15%	25%
0.8	0.0191	0.0162	0.0143	0.00286	0.00477
1.0	0.0239	0.0203	0.0179	0.00358	0.00597
1.2	0.0159	0.0135	0.0119	0.00238	0.00397

ตัวอย่างการวัดอัตราการไหลของอากาศโดยใช้ ออร์ริฟิสมิเตอร์ [14]



รูปที่ ค.1 จุดวัดความดันของออร์ริฟิสมิเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างการคำนวณ ความสูงของระดับน้ำในมานอร์มิเตอร์  
กำหนดให้

1. Equivalent ratio เท่ากับ 1

2. อัตราส่วนของอากาศต่อเชื้อเพลิงเชิงทฤษฎี  $A/F_{ratio}$  = 4.583  $kg_{air}/kg_{fuel}$

3. อัตราการไหลของอากาศทั้งหมด = 0.2  $kg/min$

4. ใช้อากาศอากาศปฐมภูมิเท่ากับ 85 % = 0.0162  $kg/s$

5. ใช้อากาศทฤษฎีเท่ากับ 15% = 0.00286  $kg/s$

6. ความหนาแน่นของอากาศ  $\rho_a$  = 1.2  $kg/m^3$

7. ความหนาแน่นของแคลบ  $\rho_f$  = 735  $kg/m^3$

8. ความหนาแน่นของน้ำ  $\rho_w$  = 1000  $kg/m^3$

9. พื้นที่หน้าตัดอากาศท่อปฐมภูมิ  $A_p$  =  $1.64 \times 10^{-3}$   $m^2$

10. อัตราส่วน เบต้า ของท่อปฐมภูมิ  $\beta_p$  = 0.6

11. พื้นที่หน้าตัดอากาศท่ออากาศทฤษฎี  $A_s$  =  $8.04 \times 10^{-4}$   $m^2$

12. อัตราส่วน เบต้า ของอากาศทฤษฎี  $\beta_s$  = 0.62

13. สัมประสิทธิ์การไหลผ่าน  $C_d$  = 0.62

จากสมการ

ความสูงของระดับน้ำในมานอร์มิเตอร์ของอากาศปฐมภูมิ

$$\dot{m} = \frac{C_d A_p \sqrt{2 \rho_a \Delta P}}{\sqrt{1 - \beta_p^4}}$$

$$0.0162 = \frac{0.62 (1.64 \times 10^{-3}) \sqrt{(2 \times 1.2) \Delta P}}{\sqrt{1 - (0.6)^4}}$$

$$\Delta P = 92.059 \text{ N/m}^2$$

$$\Delta P = \rho_w g h$$

$$92.059 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} = 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \times \Delta h \text{ m}$$

$$\Delta h = 0.00939 \text{ m.}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการ

ความสูงของระดับน้ำในมานอรมิเตอร์ของอากาศหุติยภูมิ

$$\dot{m} = \frac{C A_p \sqrt{2 \rho_a \Delta P}}{\sqrt{1 - \beta_s^4}}$$

$$0.00286 = \frac{0.62(8.04 \times 10^{-4}) \sqrt{(2 \times 1.2) \Delta P}}{\sqrt{1 - (0.62)^4}}$$

$$\Delta P = 11.689 \text{ N/m}^2$$

$$\Delta P = \rho_w g h$$

$$11.689 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} = 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \times \Delta h \text{ m}$$

$$\Delta h = 0.00119 \text{ m}$$

ตารางที่ ค.3 แสดงความสูงของระดับน้ำในมานอรมิเตอร์

$\phi$	Primary Air (kg/sec)			Secondary Air (kg/s)	
	100%	85%	75%	15%	25%
0.8	0.01304	0.01473	0.00731	0.00119	0.00331
1.0	0.02042	0.01473	0.01145	0.00186	0.00519
1.2	0.00904	0.00651	0.00506	0.00083	0.00229

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ง.

ตารางผลการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 ผลการทดลองที่อัตราส่วนผสม 0.8 อากาศปฐมภูมิ 100 % อากาศหุติยภูมิ 0 %

X (mm)	ตำแหน่งเทอร์โมคัปเปิล	เวลาที่ใช้ในการทดลอง			อุณหภูมิเฉลี่ย (°C)
		3 นาที	6 นาที	9 นาที	
		อุณหภูมิ (°C)	อุณหภูมิ (°C)	อุณหภูมิ (°C)	
150	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 1	714.7	712.5	710.7	712.6
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 2	805.4	801.1	798.4	801.6
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 3	849.0	846.5	842.8	846.1
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 4	864.7	866.3	860.6	863.9
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 5	891.7	892.9	886.2	890.3
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 6	930.6	927.7	918.7	925.7
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 7	949.7	943.2	928.6	940.5
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 8	510.3	519.0	515.4	514.9
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 9	26.9	26.8	26.8	26.8
120	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 1	751.1	759.1	764.0	758.1
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 2	810.0	804.7	795.7	803.5
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 3	834.2	825.3	813.9	824.5
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 4	844.0	835.7	823.6	834.4
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 5	871.7	863.1	849.8	861.5
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 6	906.6	895.0	878.7	893.4
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 7	925.9	901.9	890.1	906.0
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 8	498.5	496.1	488.1	494.2
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 9	26.8	26.8	26.8	26.8
90	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 1	787.4	805.7	817.3	803.5
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 2	814.6	808.3	793.0	805.5
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 3	819.3	804.0	784.9	802.7
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 4	823.2	805.0	786.5	804.9
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 5	851.7	833.2	813.4	832.8
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 6	882.6	862.2	838.6	861.1
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 7	902.1	860.5	851.6	871.4
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 8	486.6	473.1	460.8	473.5
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 9	26.6	26.7	26.7	26.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง.1 ผลการทดลองที่อัตราส่วนผสม 0.8 อากาศปรุรวม 100 % อากาศหุติยภูมิ 0 % (ต่อ)

X (mm)	ตำแหน่งเทอร์โมคัปเปิ้ล	เวลาที่ใช้ในการทดลอง			อุณหภูมิเฉลี่ย (°C)
		3 นาที	6 นาที	9 นาที	
		อุณหภูมิ (°C)	อุณหภูมิ (°C)	อุณหภูมิ (°C)	
60	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 1	763.2	750.9	745.0	753.0
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 2	795.9	784.1	767.5	782.5
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 3	794.5	770.6	753.6	772.7
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 4	791.8	769.6	761.8	774.4
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 5	820.0	797.5	780.6	799.4
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 6	840.4	815.4	795.8	817.2
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 7	849.0	803.8	791.5	814.8
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 8	467.8	454.6	449.6	457.3
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 9	26.8	26.7	26.5	26.7
30	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 1	739.0	696.1	672.7	702.6
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 2	777.1	759.9	742.0	759.7
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 3	769.7	737.1	722.3	743.0
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 4	760.4	734.1	737.1	743.9
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 5	788.3	761.7	747.8	766.0
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 6	798.1	768.5	753.0	773.2
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 7	795.9	747.0	731.3	758.1
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 8	449.0	436.0	438.3	469.1
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 9	26.9	26.8	26.2	26.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง.2 ผลการทดลองที่อัตราส่วนผสม 0.8 อากาศปฐภูมิ 85 % อากาศทุติยภูมิ 15 %

X (mm)	ตำแหน่งเทอร์โมคัปเปิล	เวลาที่ใช้ในการทดลอง			อุณหภูมิเฉลี่ย (°C)
		3 นาที	6 นาที	9 นาที	
		อุณหภูมิ (°C)	อุณหภูมิ (°C)	อุณหภูมิ (°C)	
150	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 1	743.5	730.6	728.0	734.0
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 2	816.5	800.7	793.3	803.5
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 3	850.9	839.2	831.4	840.5
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 4	849.6	846.5	841.2	845.8
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 5	888.1	884.4	879.4	884.0
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 6	941.2	932.1	923.7	932.3
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 7	940.5	932.8	923.3	932.2
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 8	502.0	495.0	488.0	495.0
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 9	27.2	27.2	27.2	27.2
120	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 1	798.7	784.1	786.4	789.7
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 2	864.3	826.4	817.2	836.0
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 3	856.5	875.7	842.2	858.1
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 4	862.3	851.4	845.1	853.0
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 5	913.4	898.2	895.7	902.4
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 6	952.5	933.1	925.4	937.0
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 7	913.1	902.7	893.1	903.0
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 8	494.7	496.4	493.2	494.8
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 9	27.2	27.2	27.2	27.2
90	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 1	853.3	837.5	844.7	845.2
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 2	867.1	852.0	841.1	853.4
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 3	862.0	912.2	853.0	875.7
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 4	875.0	856.2	849.0	860.1
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 5	938.7	912.0	912.0	920.9
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 6	963.2	933.4	927.0	941.2
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 7	885.7	872.5	862.9	873.7
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 8	478.4	497.8	498.3	494.5
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 9	27.1	27.1	27.1	27.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง.2 ผลการทดลองที่อัตราส่วนผสม 0.8 อากาศปฐมภูมิ 85 % อากาศทุติยภูมิ 15 % (ต่อ)

X (mm)	ตำแหน่งเทอร์โมคัปเปิล	เวลาที่ใช้ในการทดลอง			อุณหภูมิเฉลี่ย (°C)
		3 นาที	6 นาที	9 นาที	
		อุณหภูมิ (°C)	อุณหภูมิ (°C)	อุณหภูมิ (°C)	
60	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 1	829.8	800.3	794.3	808.1
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 2	863.4	849.5	842.7	851.9
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 3	864.6	877.9	847.1	863.2
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 4	856.6	835.0	829.4	840.3
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 5	897.9	862.9	871.6	877.5
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 6	913.4	875.9	873.8	887.7
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 7	844.6	816.5	802.3	821.1
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 8	496.9	500.5	501.5	499.6
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 9	27.2	27.2	27.2	27.2
30	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 1	806.3	763.1	743.9	771.1
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 2	859.7	846.9	844.2	850.3
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 3	867.1	843.5	841.1	850.6
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 4	838.2	813.8	809.7	820.6
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 5	857.0	831.5	831.1	839.9
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 6	863.5	818.3	820.5	834.1
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 7	803.5	760.5	741.7	768.6
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 8	506.3	503.2	504.6	504.7
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 9	27.2	27.1	27.0	27.1

ตารางที่ ง.3 ผลการทดลองที่อัตราส่วนผสม 0.8 อากาศปฐมภูมิ 75 % อากาศทุติยภูมิ 25 %

X (mm)	ตำแหน่งเทอร์โมคัปเปิล	เวลาที่ใช้ในการทดลอง			อุณหภูมิเฉลี่ย (°C)
		3 นาที	6 นาที	9 นาที	
		อุณหภูมิ (°C)	อุณหภูมิ (°C)	อุณหภูมิ (°C)	
150	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 1	729.4	738.7	745.9	738.0
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 2	827.5	841.2	846.7	838.5
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 3	902.5	914.0	912.3	909.6
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 4	927.2	924.7	924.8	925.6
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 5	959.0	953.1	950.7	954.3
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 6	997.2	1006.2	1017.0	1006.8
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 7	1035.5	1043.0	1040.4	1039.6
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 8	528.1	517.8	517.2	521.0
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 9	27.0	27.2	27.1	27.1
120	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 1	787.7	810.1	818.0	805.3
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 2	861.7	877.1	886.2	875.0
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 3	911.0	914.0	918.3	914.4
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 4	919.2	910.1	909.8	913.0
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 5	947.3	936.1	933.7	939.0
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 6	1004.0	999.8	1000.2	1001.3
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 7	1042.9	1040.7	1035.1	1039.6
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 8	522.0	515.9	516.0	518.0
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 9	27.1	27.1	27.1	27.1
90	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 1	845.9	881.4	890.0	872.4
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 2	894.7	912.9	925.7	911.1
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 3	919.4	914.0	924.3	919.2
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 4	911.2	895.5	894.7	900.5
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 5	935.6	919.0	916.6	923.7
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 6	1010.8	993.4	983.3	995.8
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 7	1050.2	1038.3	1029.86	1039.4
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 8	515.9	513.9	514.8	514.9
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 9	27.2	27.2	27.2	27.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง.3 ผลการทดลองที่อัตราส่วนผสม 0.8 อากาศปฐภูมิ 75 % อากาศหุติยภูมิ 25 % (ต่อ)

X (mm)	ตำแหน่งเทอร์โมคัปเปิล	เวลาที่ใช้ในการทดลอง			อุณหภูมิเฉลี่ย (°C)
		3 นาที	6 นาที	9 นาที	
		อุณหภูมิ (°C)	อุณหภูมิ (°C)	อุณหภูมิ (°C)	
60	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 1	847.0	840.8	835.1	840.9
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 2	916.3	915.2	914.3	915.3
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 3	924.3	905.3	900.6	910.1
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 4	885.9	860.6	849.2	865.2
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 5	907.8	883.1	872.1	887.7
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 6	973.1	947.6	931.3	950.7
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 7	1016.6	976.9	947.9	980.5
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 8	519.4	518.2	517.4	518.3
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 9	27.2	27.2	27.2	27.2
30	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 1	848.0	800.1	780.2	809.4
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 2	937.8	917.5	902.8	919.4
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 3	929.2	896.5	876.8	900.8
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 4	860.6	825.7	803.7	830.0
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 5	879.9	841.2	827.3	849.5
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 6	935.4	901.7	879.2	905.4
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 7	983.0	915.5	866.1	921.5
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 8	522.8	522.4	520.0	521.7
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 9	27.4	27.3	27.2	27.3

ตารางที่ 3.4 ผลการทดลองที่อัตราส่วนผสม 1.0 อากาศปฐมภูมิ 100 % อากาศทุติยภูมิ 0 %

X (mm)	ตำแหน่งเทอร์โมคัปเปิล	เวลาที่ใช้ในการทดลอง			อุณหภูมิเฉลี่ย (°C)
		3 นาที	6 นาที	9 นาที	
		อุณหภูมิ (°C)	อุณหภูมิ (°C)	อุณหภูมิ (°C)	
150	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 1	730.9	749.4	749.4	743.2
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 2	812.2	829.2	828.3	823.2
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 3	876.6	889.1	889.8	885.2
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 4	909.4	923.6	925.6	919.5
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 5	938.5	950.5	953.8	947.6
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 6	952.2	965.6	907.4	962.7
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 7	981.6	997.2	1014.6	997.8
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 8	449.0	453.9	461.0	454.6
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 9	29.6	29.5	29.6	29.6
120	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 1	790.4	807.2	803.8	800.5
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 2	849.0	829.5	854.0	844.2
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 3	894.3	900.3	892.2	895.6
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 4	919.2	925.3	867.7	904.1
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 5	945.2	950.0	943.4	946.2
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 6	959.7	965.7	965.2	936.5
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 7	991.4	998.2	999.4	996.3
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 8	604.4	455.3	455.5	505.1
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 9	29.6	29.6	29.6	29.6
90	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 1	849.9	864.9	858.1	857.6
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 2	885.7	892.7	879.1	886.0
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 3	911.9	911.4	894.5	905.9
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 4	928.9	926.9	809.8	888.5
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 5	951.8	949.5	933.0	944.8
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 6	967.1	965.7	959.9	964.2
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 7	1001.1	999.2	984.1	994.5
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 8	759.7	456.7	449.9	555.4
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 9	29.6	29.5	29.5	29.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง.4 ผลการทดลองที่อัตราส่วนผสม 1.0 อากาศปฐภูมิ 100 % อากาศทุติยภูมิ 0 % (ต่อ)

X (mm)	ตำแหน่งเทอร์โมคัปเปิล	เวลาที่ใช้ในการทดลอง			อุณหภูมิเฉลี่ย (°C)
		3 นาที	6 นาที	9 นาที	
		อุณหภูมิ (°C)	อุณหภูมิ (°C)	อุณหภูมิ (°C)	
60	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 1	819.6	809.6	794.6	807.9
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 2	883.5	847.7	861.1	864.1
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 3	904.7	890.2	868.0	887.6
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 4	916.6	903.2	836.3	885.4
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 5	939.1	927.0	915.3	927.1
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 6	950.2	934.1	923.8	936.0
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 7	968.9	947.1	931.7	949.2
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 8	608.6	457.8	464.2	510.2
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 9	29.6	29.6	29.6	29.6
30	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 1	789.3	754.3	731.0	761.2
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 2	881.2	865.7	842.5	863.1
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 3	897.4	869.0	841.5	869.3
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 4	904.2	879.5	862.7	882.1
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 5	926.3	904.5	897.5	909.4
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 6	933.2	902.4	887.6	907.5
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 7	936.7	895.0	879.2	903.6
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 8	457.4	458.8	478.5	464.9
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 9	29.7	29.4	29.6	29.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.5 ผลการทดลองที่อัตราส่วนผสม 1.0 อากาศปฐภูมิ 85 % อากาศทุติยภูมิ 15 %

X (mm)	ตำแหน่งเทอร์โมคัปเปิล	เวลาที่ใช้ในการทดลอง			อุณหภูมิเฉลี่ย (°C)
		3 นาที	6 นาที	9 นาที	
		อุณหภูมิ (°C)	อุณหภูมิ (°C)	อุณหภูมิ (°C)	
150	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 1	640.1	647.7	654.9	647.6
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 2	712.5	648.2	729.1	696.6
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 3	733.7	720.6	777.5	743.9
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 4	760.6	767.5	794.0	774.0
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 5	770.0	779.3	805.7	785.0
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 6	768.7	790.5	805.1	788.1
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 7	789.0	788.5	827.7	801.7
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 8	721.7	811.2	738.7	757.2
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 9	29.5	30.1	30.0	29.9
120	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 1	707.9	731.2	733.3	724.1
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 2	760.5	775.7	778.9	771.7
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 3	807.0	817.3	824.1	816.1
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 4	824.2	840.0	851.9	838.7
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 5	836.5	851.3	868.6	852.1
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 6	835.7	849.9	866.7	850.8
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 7	835.1	840.9	856.3	844.1
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 8	770.0	644.6	580.1	664.9
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 9	29.4	29.5	29.2	29.4
90	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 1	797.8	836.8	837.7	824.1
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 2	851.1	887.3	883.4	973.9
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 3	889.6	914.9	911.4	905.3
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 4	915.5	920.8	914.2	916.8
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 5	929.3	923.8	923.6	927.2
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 6	919.4	922.4	925.6	922.5
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 7	879.3	894.1	904.5	892.6
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 8	497.7	506.2	497.8	500.6
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 9	29.8	29.4	29.2	29.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.5 ผลการทดลองที่อัตราส่วนผสม 1.0 อากาศปฐมภูมิ 85 % อากาศทุติยภูมิ 15 % (ต่อ)

X (mm)	ตำแหน่งเทอร์โมคัปเปิล	เวลาที่ใช้ในการทดลอง			อุณหภูมิเฉลี่ย (°C)
		3 นาที	6 นาที	9 นาที	
		อุณหภูมิ (°C)	อุณหภูมิ (°C)	อุณหภูมิ (°C)	
60	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 1	883.2	820.4	873.1	858.9
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 2	891.6	884.4	898.5	891.5
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 3	920.4	909.5	892.2	907.4
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 4	926.6	911.0	895.8	911.1
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 5	934.9	919.2	907.7	920.6
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 6	931.3	926.4	911.5	923.1
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 7	904.1	907.0	898.5	903.2
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 8	485.2	482.4	469.5	479.0
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 9	29.0	29.2	29.1	29.1
30	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 1	709.5	689.1	686.1	694.8
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 2	839.5	828.6	835.9	834.7
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 3	875.1	844.1	834.9	852.0
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 4	658.9	841.1	849.4	849.8
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 5	870.8	857.7	864.9	864.5
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 6	872.0	863.1	869.2	868.1
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 7	857.1	853.0	858.2	856.1
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 8	450.6	448.3	435.2	444.7
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 9	29.5	29.5	29.5	29.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.6 ผลการทดลองที่อัตราส่วนผสม 1.0 อากาศปฐภูมิ 75 % อากาศทุติยภูมิ 25 %

X (mm)	ตำแหน่งเทอร์โมคัปเปิล	เวลาที่ใช้ในการทดลอง			อุณหภูมิเฉลี่ย (°C)
		3 นาที	6 นาที	9 นาที	
		อุณหภูมิ (°C)	อุณหภูมิ (°C)	อุณหภูมิ (°C)	
150	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 1	618.6	584.7	593.2	598.8
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 2	641.2	645.4	659.3	648.6
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 3	619.5	644.0	662.8	642.1
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 4	564.6	595.9	615.0	591.8
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 5	548.7	580.3	600.9	576.6
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 6	535.1	568.2	589.4	564.2
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 7	546.0	590.7	611.6	582.8
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 8	532.0	557.7	572.4	554.0
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 9	31.1	30.9	30.8	30.9
120	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 1	643.3	658.0	653.0	651.4
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 2	673.4	680.2	667.9	673.8
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 3	657.3	653.7	637.8	649.6
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 4	607.2	601.7	586.4	598.4
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 5	594.1	590.8	577.3	587.4
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 6	586.6	583.5	571.0	580.4
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 7	597.0	590.5	579.8	589.1
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 8	579.1	568.1	577.5	574.9
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 9	31.0	30.5	30.5	30.7
90	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 1	739.1	746.1	748.5	744.6
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 2	723.8	733.8	736.7	731.4
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 3	666.4	672.6	674.3	671.1
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 4	604.2	608.4	609.3	607.3
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 5	594.4	599.9	602.0	598.8
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 6	588.3	594.7	598.2	593.7
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 7	581.9	585.5	589.4	585.6
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 8	567.5	574.9	577.9	573.4
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 9	30.4	30.3	30.2	30.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.6 ผลการทดลองที่อัตราส่วนผสมมวล 1.0 อากาศปฐภูมิ 75 % อากาศหุติภูมิ 25 % (ต่อ)

X (mm)	ตำแหน่งเทอร์โมคัปเปิล	เวลาที่ใช้ในการทดลอง			อุณหภูมิเฉลี่ย (°C)
		3 นาที	6 นาที	9 นาที	
		อุณหภูมิ (°C)	อุณหภูมิ (°C)	อุณหภูมิ (°C)	
60	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 1	751.2	745.5	747.0	747.9
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 2	749.8	749.2	747.9	748.3
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 3	675.6	675.2	673.9	674.9
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 4	591.1	593.1	591.9	592.0
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 5	607.9	610.0	610.9	609.6
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 6	600.2	601.1	603.5	601.6
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 7	582.8	581.5	583.7	582.7
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 8	588.0	593.7	594.5	592.1
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 9	30.0	29.9	29.8	29.9
30	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 1	656.3	629.5	621.6	635.8
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 2	728.2	720.0	725.6	724.6
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 3	646.3	641.0	668.2	651.8
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 4	551.5	542.0	564.0	552.5
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 5	590.3	586.6	614.4	597.1
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 6	582.4	576.5	597.9	585.6
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 7	569.0	562.7	568.5	566.7
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 8	602.6	612.4	635.1	613.4
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 9	29.8	29.8	29.5	29.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ๓.7 ผลการทดลองที่อัตราส่วนผสมมวล 1.2 อากาศปฐภูมิ 100 % อากาศหุคยภูมิ 0 %

X (mm)	ตำแหน่งเทอร์โมคัปเปิล	เวลาที่ใช้ในการทดลอง			อุณหภูมิเฉลี่ย (°C)
		3 นาที	6 นาที	9 นาที	
		อุณหภูมิ (°C)	อุณหภูมิ (°C)	อุณหภูมิ (°C)	
150	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 1	710.6	719.3	706.9	712.3
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 2	812.4	815.2	800.6	809.4
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 3	902.7	899.0	881.2	894.3
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 4	942.8	938.2	919.8	933.6
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 5	976.0	975.2	959.1	970.1
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 6	980.2	981.1	969.7	977.0
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 7	1007.4	1008.4	993.9	1003.2
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 8	488.9	487.7	485.1	487.2
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 9	27.5	27.4	27.4	27.4
120	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 1	763.6	778.2	785.3	775.7
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 2	857.6	848.1	855.4	853.7
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 3	922.6	904.3	912.6	913.2
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 4	952.2	935.5	936.4	941.4
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 5	985.7	983.1	971.8	980.2
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 6	993.1	994.3	983.6	990.3
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 7	1010.0	1001.6	999.1	1003.6
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 8	499.0	492.4	493.2	496.9
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 9	27.4	27.4	27.4	27.4
90	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 1	816.5	837.1	863.7	839.1
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 2	902.7	881.0	910.1	897.9
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 3	942.5	909.5	943.9	932.0
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 4	961.6	932.8	952.9	949.1
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 5	995.4	969.0	984.5	983.0
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 6	1005.9	985.1	997.4	996.1
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 7	1012.6	999.7	1004.3	1005.4
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 8	509.1	497.0	501.2	502.4
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 9	27.3	27.3	27.3	27.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง.7 ผลการทดลองที่อัตราส่วนผสม 1.2 อากาศปฐภูมิ 100 % อากาศทุติยภูมิ 0 % (ต่อ)

X (mm)	ตำแหน่งเทอร์โมคัปเปิล	เวลาที่ใช้ในการทดลอง			อุณหภูมิเฉลี่ย (°C)
		3 นาที	6 นาที	9 นาที	
		อุณหภูมิ (°C)	อุณหภูมิ (°C)	อุณหภูมิ (°C)	
60	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 1	805.8	784.3	785.0	791.7
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 2	895.0	868.9	878.0	880.6
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 3	940.0	901.4	913.0	918.1
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 4	951.2	923.1	926.8	933.7
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 5	981.2	955.7	958.2	965.0
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 6	986.1	965.0	967.1	972.7
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 7	990.3	967.0	963.5	973.6
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 8	506.4	501.2	505.7	504.4
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 9	27.3	27.3	27.3	27.3
30	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 1	795.0	731.5	706.3	744.3
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 2	887.3	856.8	845.8	863.3
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 3	937.4	893.3	882.0	904.2
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 4	940.7	913.3	900.6	918.2
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 5	967.0	942.3	931.8	947.0
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 6	966.3	944.8	936.8	949.3
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 7	967.9	934.3	922.6	941.6
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 8	503.6	505.4	510.2	506.4
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 9	27.2	27.2	27.2	27.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ๖.8 ผลการทดลองที่อัตราส่วนผสมมวล 1.2 อากาศปฐมภูมิ 85 % อากาศทุติยภูมิ 15 %

X (mm)	ตำแหน่งเทอร์โมคัปเปิล	เวลาที่ใช้ในการทดลอง			อุณหภูมิเฉลี่ย (°C)
		3 นาที	6 นาที	9 นาที	
		อุณหภูมิ (°C)	อุณหภูมิ (°C)	อุณหภูมิ (°C)	
150	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 1	672.2	680.9	687.4	680.2
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 2	761.3	772.2	775.9	769.8
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 3	844.7	856.1	864.2	855.0
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 4	874.7	887.3	900.6	887.5
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 5	886.3	903.7	918.4	902.8
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 6	883.3	899.3	913.8	898.8
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 7	907.2	913.9	928.3	916.5
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 8	450.2	455.2	531.8	479.1
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 9	27.7	27.7	27.7	27.7
120	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 1	739.3	745.8	748.0	744.4
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 2	811.5	892.5	858.5	854.2
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 3	878.6	922.0	882.3	894.2
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 4	905.3	941.6	947.6	931.5
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 5	920.1	929.5	945.4	931.7
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 6	912.1	907.2	944.4	921.2
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 7	905.7	910.2	920.4	912.1
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 8	407.7	460.0	488.0	472.9
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 9	27.7	27.7	27.7	27.7
90	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 1	806.8	810.7	803.5	808.5
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 2	861.6	879.6	881.0	874.1
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 3	912.4	928.9	940.4	927.2
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 4	935.8	956.6	994.5	962.3
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 5	953.8	979.4	972.3	968.5
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 6	940.8	959.7	974.9	958.5
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 7	904.2	900.5	912.5	905.7
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 8	491.2	466.0	444.2	467.1
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 9	27.4	27.4	27.4	27.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ๓.๘ ผลการทดลองที่อัตราส่วนผสม 1.2 อากาศปฐภูมิ 85 % อากาศทุติยภูมิ 15 % (ต่อ)

X (mm)	ตำแหน่งเทอร์โมคัปเปิล	เวลาที่ใช้ในการทดลอง			อุณหภูมิเฉลี่ย (°C)
		3 นาที	6 นาที	9 นาที	
		อุณหภูมิ (°C)	อุณหภูมิ (°C)	อุณหภูมิ (°C)	
60	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 1	764.7	744.0	729.8	746.2
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 2	854.4	849.8	875.2	859.8
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 3	918.2	898.2	892.8	903.1
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 4	937.6	946.1	951.4	945.0
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 5	952.1	944.9	957.6	951.5
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 6	946.9	935.7	933.3	938.6
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 7	902.1	903.6	901.8	902.5
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 8	485.9	474.5	464.1	474.8
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 9	27.4	27.4	27.4	27.4
30	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 1	722.5	677.3	656.0	685.3
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 2	847.1	819.9	809.3	825.4
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 3	924.0	867.4	865.1	885.5
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 4	939.4	935.5	908.2	927.7
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 5	950.3	910.3	942.8	934.5
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 6	952.9	911.6	914.0	926.2
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 7	900.0	826.4	811.7	846.0
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 8	880.6	483.2	484.0	482.6
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 9	27.4	27.4	27.4	27.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ๓.9 ผลการทดลองที่อัตราส่วนผสม 1.2 อากาศปฐภูมิ 75 % อากาศทุติยภูมิ 25 %

X (mm)	ตำแหน่งเทอร์โมคัปเปิล	เวลาที่ใช้ในการทดลอง			อุณหภูมิเฉลี่ย (°C)
		3 นาที	6 นาที	9 นาที	
		อุณหภูมิ (°C)	อุณหภูมิ (°C)	อุณหภูมิ (°C)	
150	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 1	810.0	714.7	696.7	740.5
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 2	916.6	909.5	963.9	930.0
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 3	1001.5	1037.6	1057.3	1032.1
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 4	1033.6	1070.5	1094.1	1066.1
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 5	1064.0	1085.6	1100.0	1083.2
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 6	1052.6	1077.1	1110.0	1079.9
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 7	1052.8	1085.0	1109.8	1082.5
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 8	452.6	495.6	456.3	456.2
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 9	28.7	28.5	29.1	28.8
120	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 1	806.0	765.4	770.3	780.6
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 2	894.2	921.7	974.5	930.1
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 3	1020.2	1034.8	1039.7	1031.6
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 4	1019.0	1080.8	1070.6	1056.8
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 5	1096.5	1127.8	1081.5	1070.9
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 6	1087.9	1112.1	1083.5	1094.5
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 7	1068.8	1096.5	1087.4	1084.2
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 8	460.3	528.3	465.1	484.6
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 9	28.7	28.7	28.7	28.7
90	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 1	512.7	461.1	443.9	457.6
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 2	871.7	933.8	985.1	930.2
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 3	1038.9	1032.0	1022.0	1031.0
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 4	1004.4	1091.1	1047.0	1047.5
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 5	1129.0	1170.0	1063.0	1120.6
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 6	1123.7	1147.0	1057.0	1109.2
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 7	1084.7	1108.0	1065.0	1085.9
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 8	468.0	597.0	473.8	512.9
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 9	28.3	28.3	29.8	28.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง.9 ผลการทดลองที่อัตราส่วนผสม 1.2 อากาศปฐภูมิ 75 % อากาศทุติยภูมิ 25 % (ต่อ)

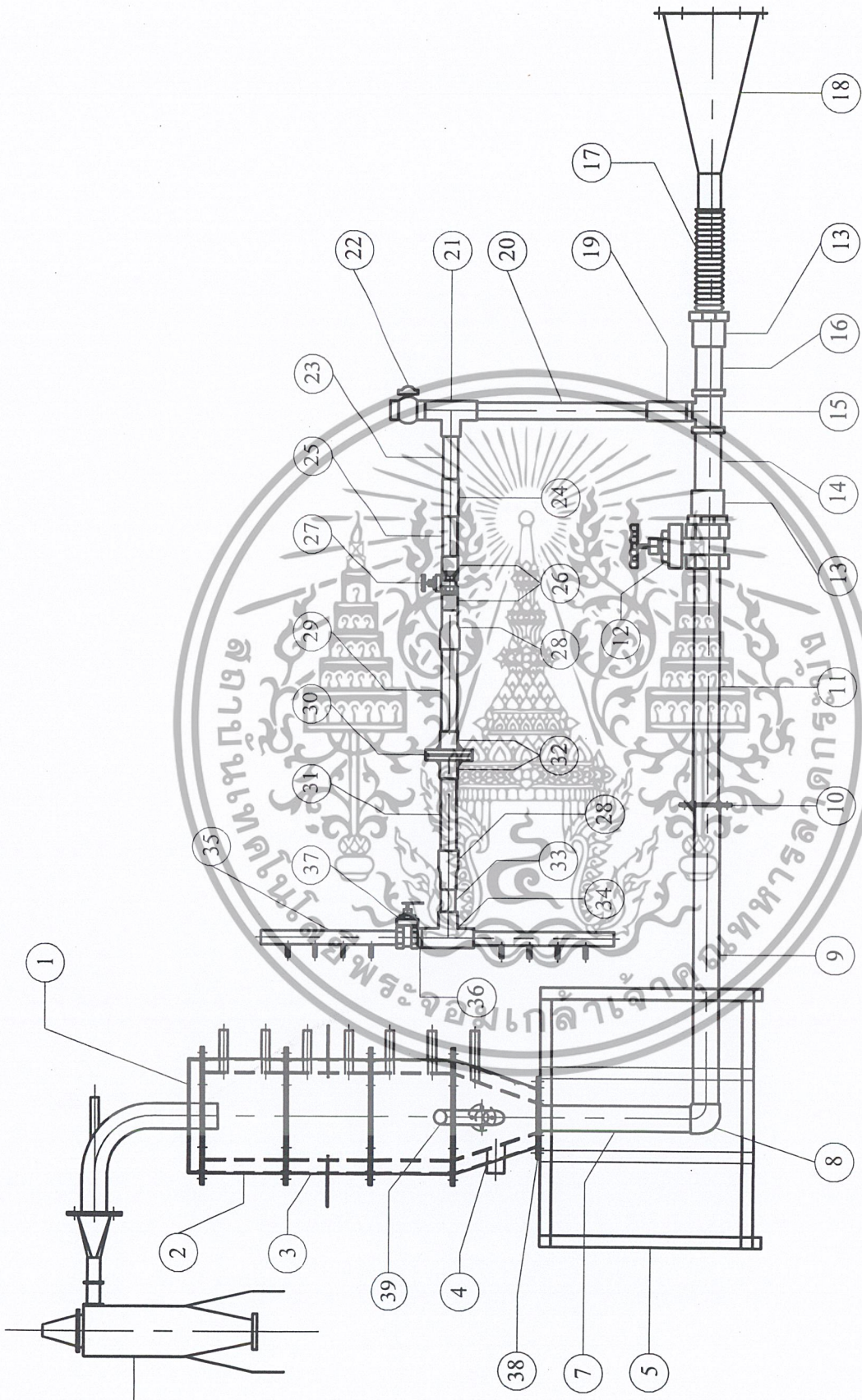
X (mm)	ตำแหน่งเทอร์โมคัปเปิล	เวลาที่ใช้ในการทดลอง			อุณหภูมิเฉลี่ย (°C)
		3 นาที	6 นาที	9 นาที	
		อุณหภูมิ (°C)	อุณหภูมิ (°C)	อุณหภูมิ (°C)	
60	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 1	452.5	422.4	394.1	422.9
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 2	916.6	851.9	707.1	825.2
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 3	986.9	956.1	882.7	941.9
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 4	966.3	978.9	955.9	967.0
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 5	1022.4	1003.8	971.5	999.2
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 6	1029.4	994.8	981.6	1001.9
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 7	1036.6	979.0	965.8	993.8
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 8	450.0	500.5	469.0	470.8
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 9	29.8	29.8	29.8	29.8
30	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 1	392.3	383.6	344.2	373.4
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 2	961.5	770.0	430.7	720.7
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 3	934.8	880.1	743.3	852.9
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 4	928.1	866.7	864.8	906.5
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 5	915.8	837.5	880.0	877.8
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 6	931.1	842.5	906.1	893.2
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 7	988.4	850.1	866.5	901.7
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 8	432.0	403.9	450.1	428.7
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 9	29.0	28.6	28.3	28.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก จ.  
แบบรายละเอียดของตาเผาฟลูอิดไดซ์เบด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ASSEMBLY

Biomass fired Fluidized-Bed Combustor	
Designed By	Thaworn Boonchamnal
Drawn By	Chirat Pasorn
	September 2001
	March 2002

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

39	SIGHT GLASS	st 37	Ø 60X30	1	
38	DISTRIBUTE PLATE	Stainless steel	Ø 292X1	1	
37	GATE VALVE	Cast iron	M00. 17 - 2532	1	
36	VALVE SOCKET	Cast iron	M00. 17 - 2532	1	
35	SECONDARY AIR PIPE	Cast iron	Ø 53X492	2	
34	TEE 90	Cast iron	M00. 17 - 2532	1	
33	SECONDARY AIR PIPE	Cast iron	Ø 53X119	1	
32	FLANGE	PVC	M00. 17 - 2532	2	
31	SECONDARY AIR PIPE	PVC	Ø 57X490	1	
30	ORIFICE PLATE	Stainless steel	Ø 165X3	1	
29	SECONDARY AIR PIPE	PVC	Ø 57X705	1	
28	REDUCING SOCKET	PVC	M00. 17 - 2532	2	
27	GATE VALVE	Brass	ASTM A 351	1	
26	VALVE SOCKET	PVC	Ø 53X174	2	
25	SECONDARY AIR PIPE	PVC	Ø 57X168	1	
24	SECONDARY AIR PIPE	Rubber	Ø 53X184	1	
23	SECONDARY AIR PIPE	PVC	M00. 17 - 2532	1	
22	GATE VALVE	PVC	ASTM A 351	1	
21	TEE 90	PVC	M00. 17 - 2532	1	
20	SECONDARY AIR PIPE	PVC	Ø 57X180	1	
19	SOCKET	PVC	M00. 1131 - 2535	1	
18	DUCT	st 37	390X480X683	1	
17	FLEXIBLE PIPE	Rubber	Ø 76.2X600	1	
16	PRIMARY AIR PIPE	PVC	Ø 89X250	1	
15	REDUCING 90 TEE	PVC	M00. 17 - 2532	1	
14	PRIMARY AIR PIPE	PVC	Ø 89X300	1	
13	VALVE SOCKET	PVC	M00. 17 - 2532	2	
12	GATE VALVE	Brass	ASTM A 351	1	
11	PRIMARY AIR PIPE	Cast iron	Ø 89X975	1	
10	ORIFICE PLATE	Stainless steel	Ø 180X3.18	1	
9	PRIMARY AIR PIPE	Cast iron	Ø 89X825	1	
8	ELBOW 90	Cast iron	M00. 17 - 2532	1	
7	PRIMARY AIR PIPE	Cast iron	Ø 286X260	1	
6	CYCLONE	st 37		1	
5	BASE	st 37	907X907X774	1	
4	PRE COMBUSTOR	st 37	Ø 481X300	1	
3	SECONDARY COLUMN	st 37	Ø 481X300	1	
2	COLUMN	st 37	Ø 481X300	2	
1	COVER	st 37	Ø 481X477	1	
Part No.	Part Name	Material	Dimension	Standard	Quantity

**BIOMASS FIRED FLUIDIZED - BED COMBUSTOR**

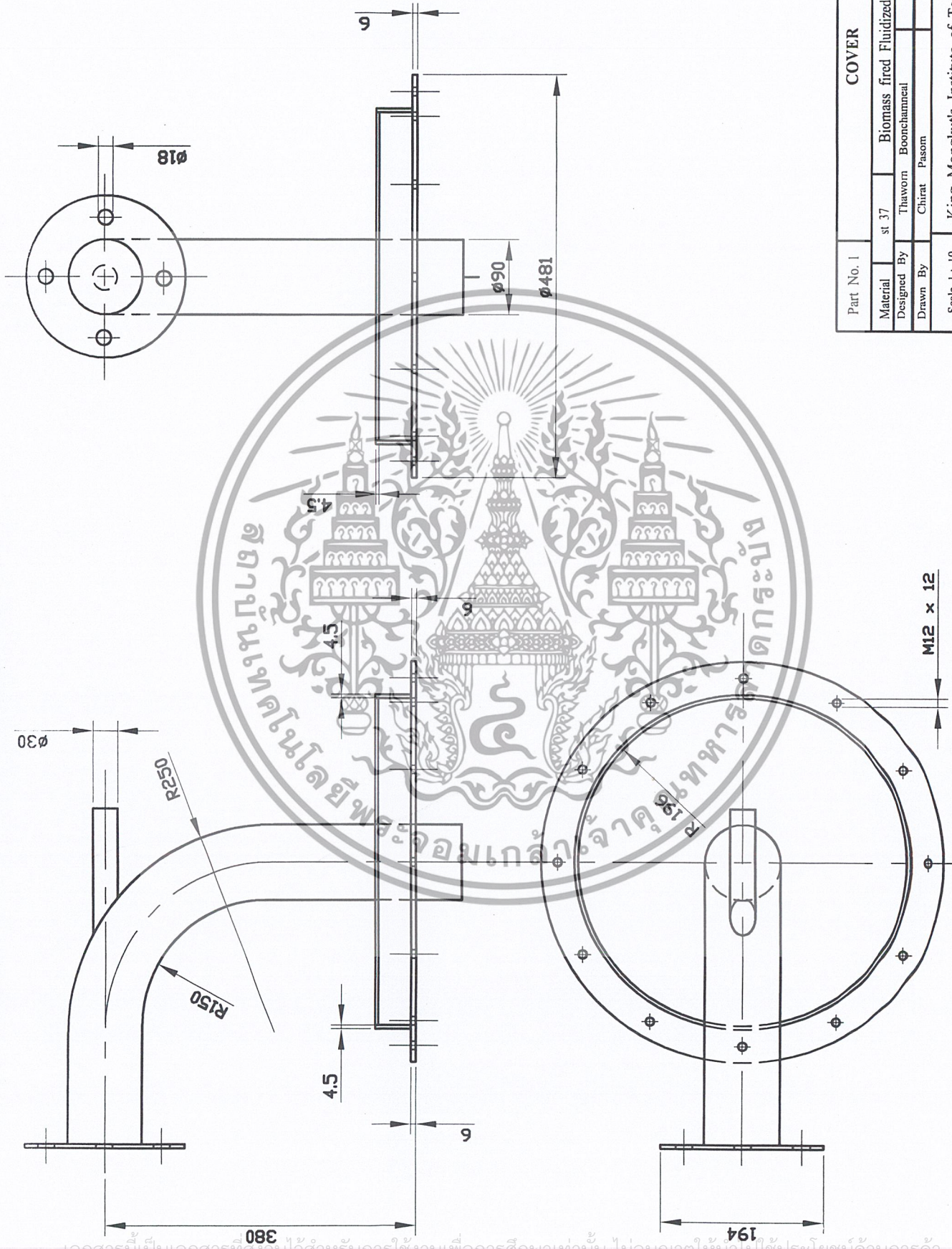
Designed By	Thawom Boonchamuel	September 2001
Drawn By	Chiratt Pasom	March 2002

**FACULTY OF ENGINEERING**

**DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING**

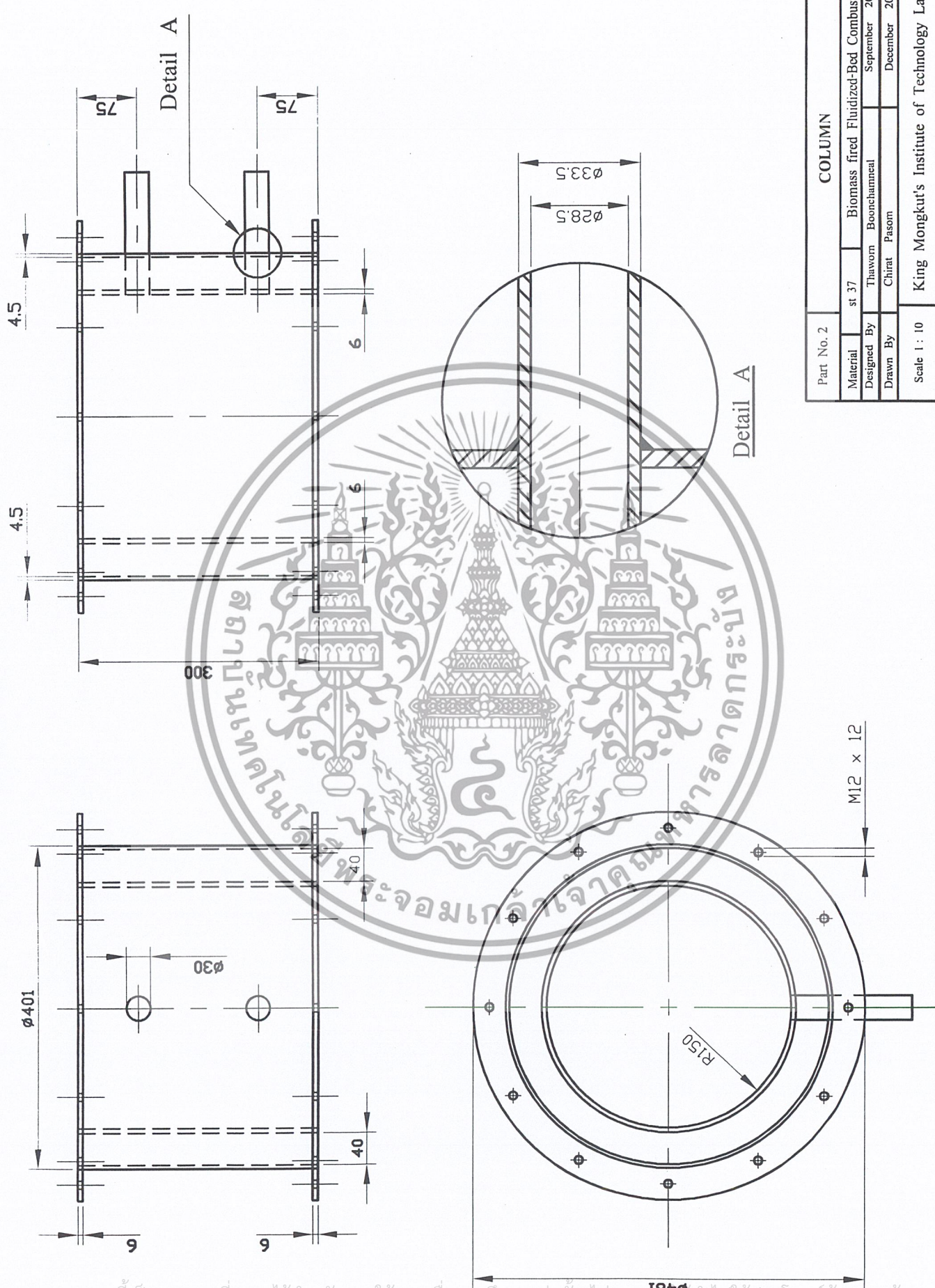
**King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



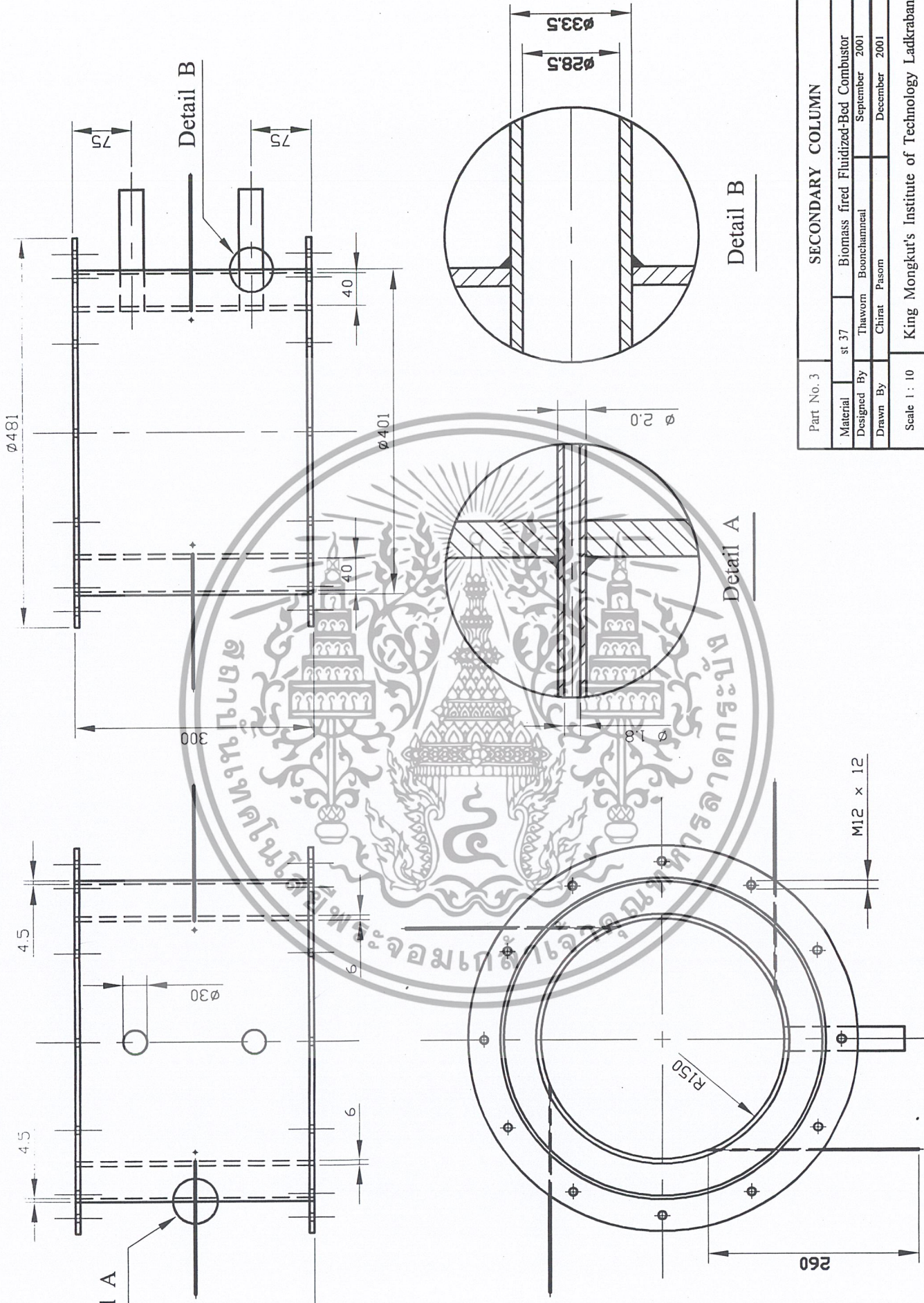
Part No. 1		COVER	
Material	st 37	Biomass fired Fluidized-Bed Combustor	
Designed By	Thaworn Boonchannuel	September 2001	
Drawn By	Chirat Pasom	December 2001	
Scale 1 : 10	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



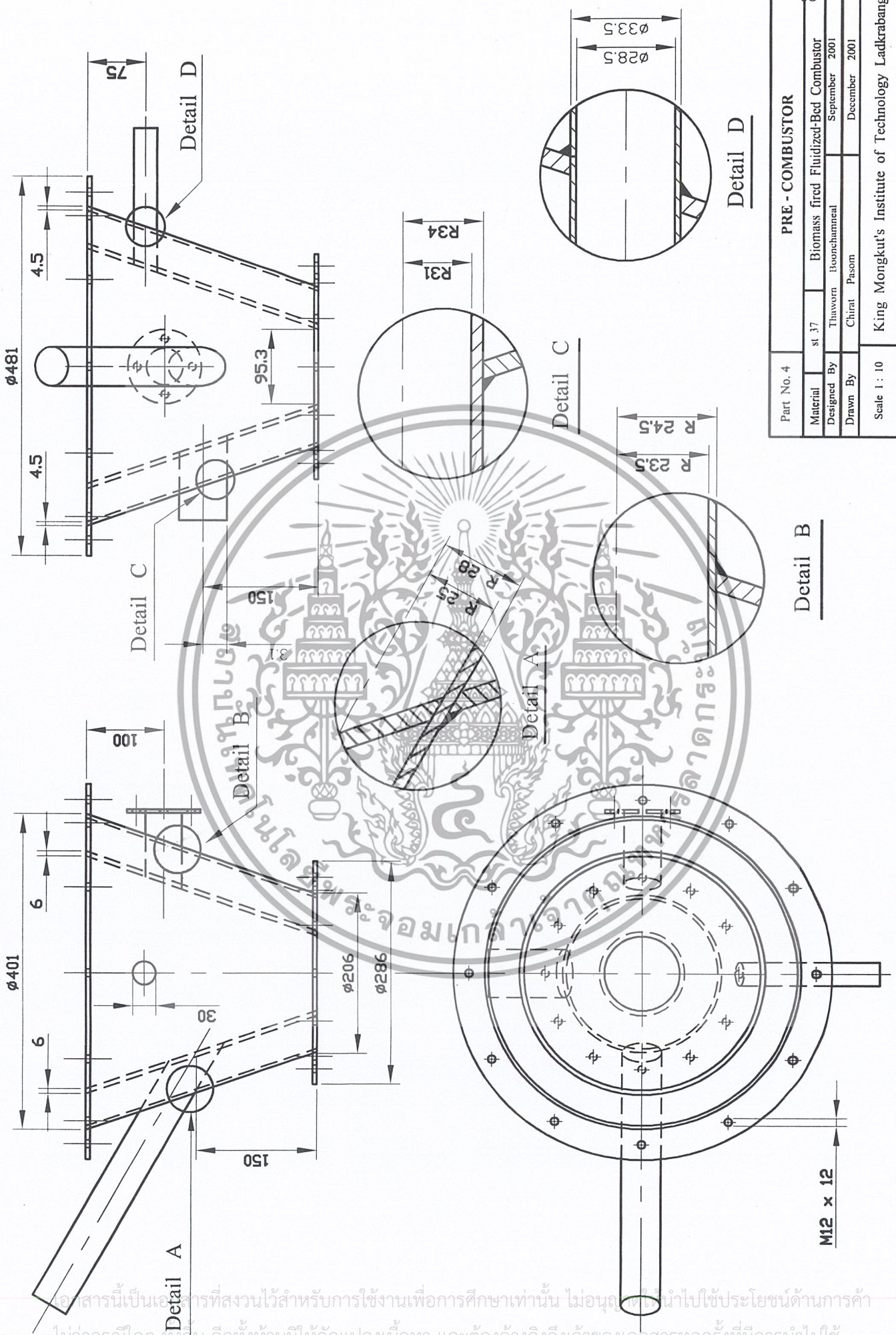
Part No. 2		COLUMN	
Material	st 37	Biomass fired Fluidized-Bed Combustor	
Designed By	Thawom Boonchammael	September 2001	
Drawn By	Chirat Pasom	December 2001	
Scale 1 : 10		King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Part No. 3		SECONDARY COLUMN		07
Material	st 37	Biomass fired Fluidized-Bed Combustor		
Designed By	Thaworn Boonchamneel	September 2001		
Drawn By	Chirat Pason	December 2001		
Scale 1 : 10		King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สละไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Part No. 4	<b>PRE - COMBUSTOR</b>		
Material	st.37	Biomass fired Fluidized-Bed Combustor	
Designed By	Thaworn Boonchamneal	September 2001	
Drawn By	Chirat Pasorn	December 2001	
Scale 1 : 10	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang		

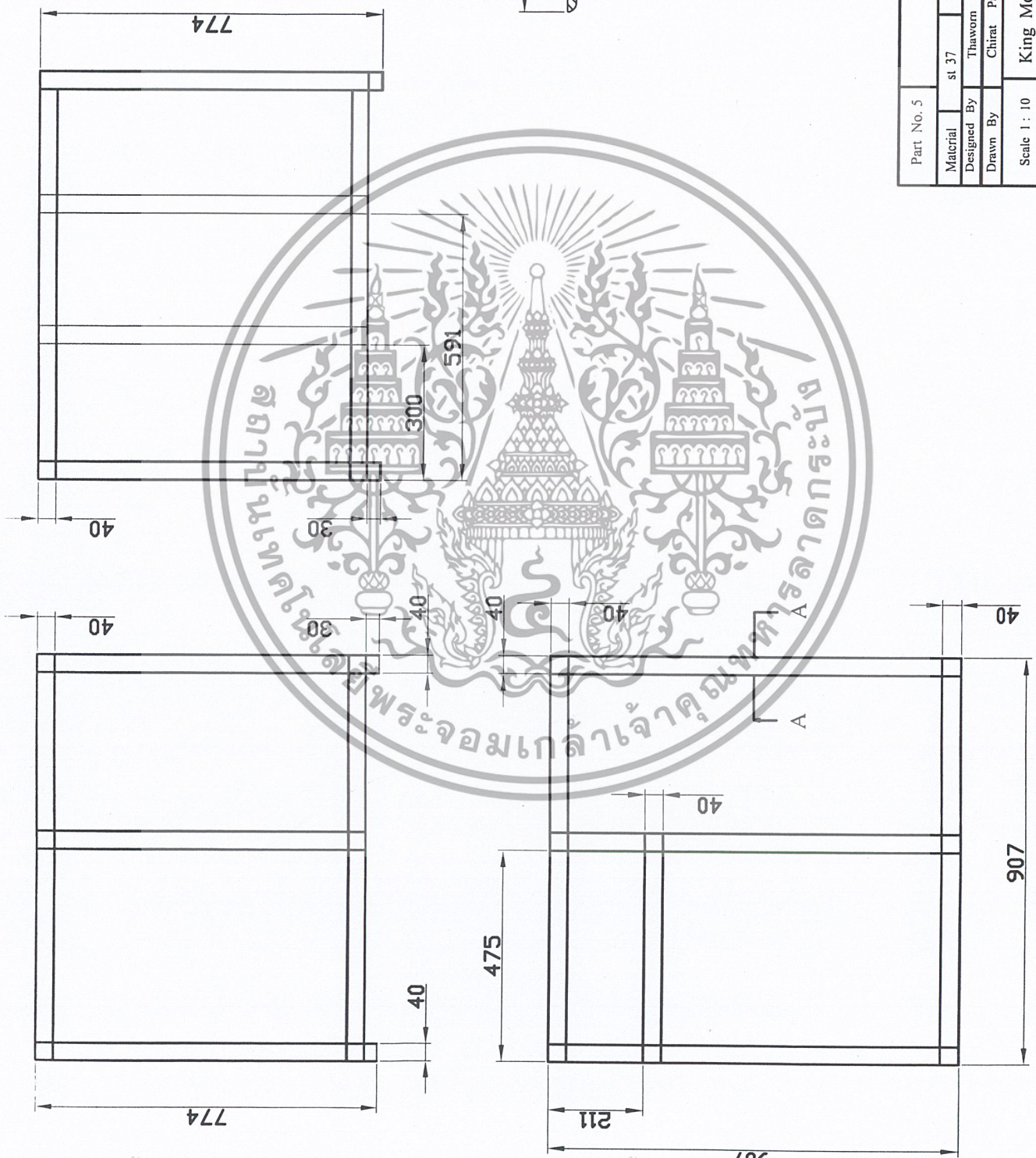
Detail B

Detail C

Detail D

Detail A

M12 x 12



Part No. 5		Biomass fired Fluidized-Bed Combustor	
Material	st 37	Designed By	Thaworn Boonchamneel
Drawn By	Chirat Pasom	September	2001
Scale 1 : 10		December	2001

BASE

Section A-A

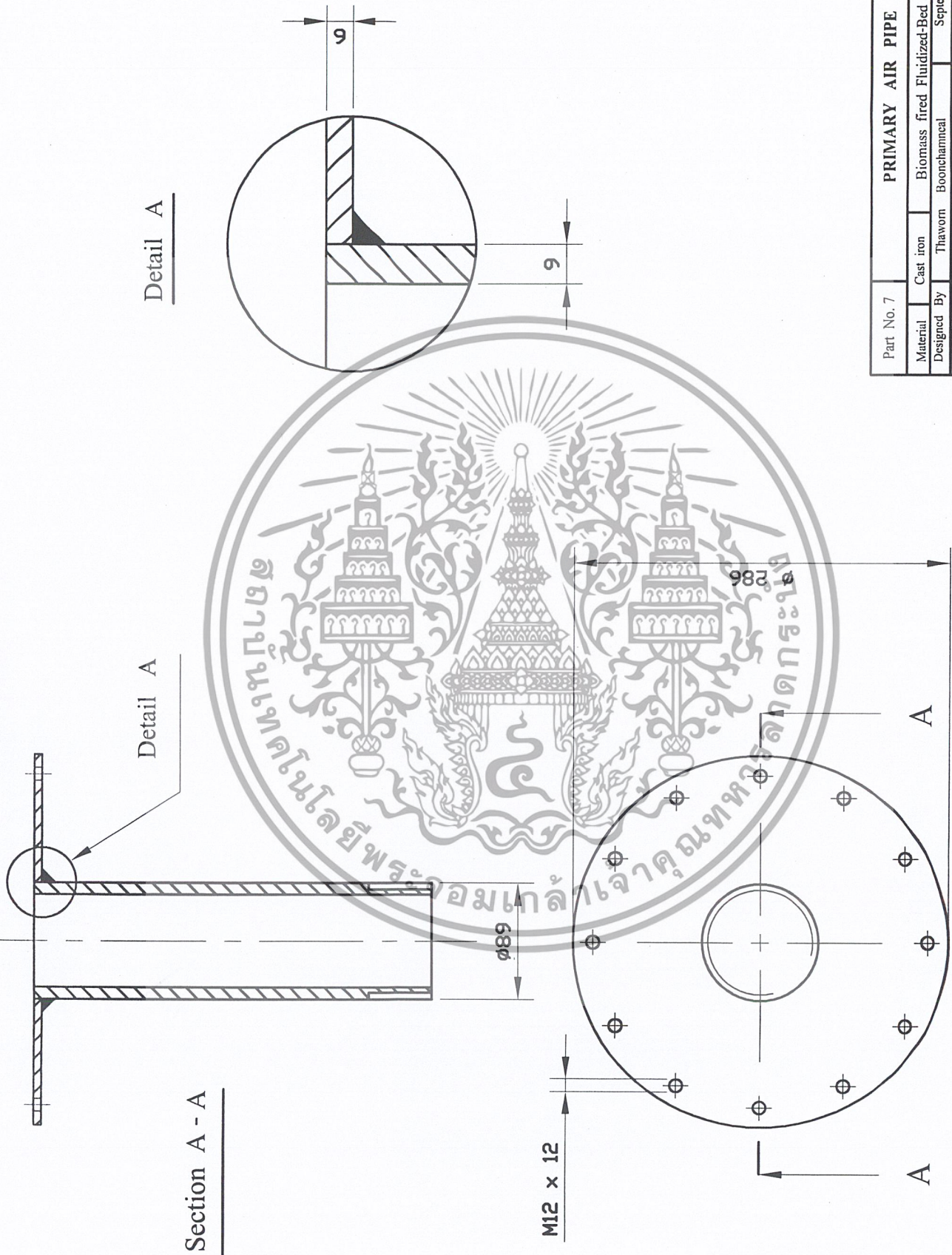
คำขออนุญาตใช้แบบร่างนี้เป็นของลิขสิทธิ์ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และสงวนไว้สำหรับการใช้งานเฉพาะที่สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังเท่านั้น

PRIMARY AIR PIPE

Part No. 7

Material	Cast iron	Biomass fired Fluidized-Bed Combustor
Designed By	Thaworn Boonchannal	September 2001
Drawn By	Chirat Pasom	December 2001

Scale 1 : 10 King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang



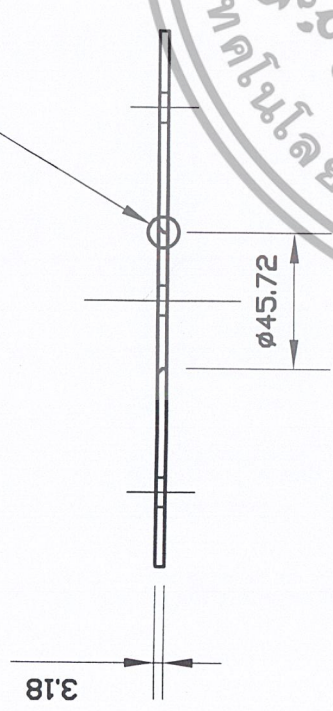
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



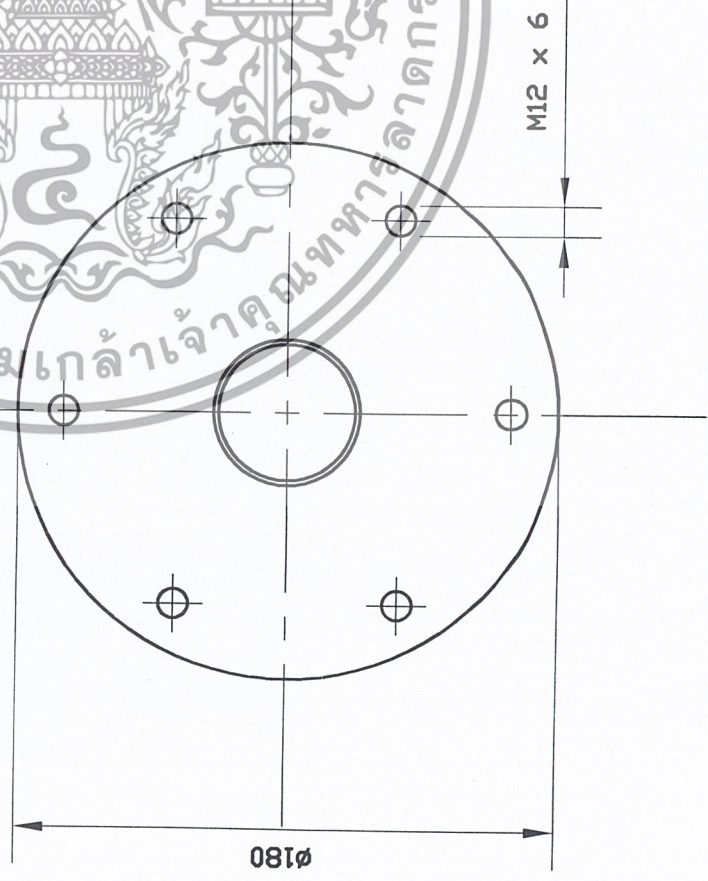
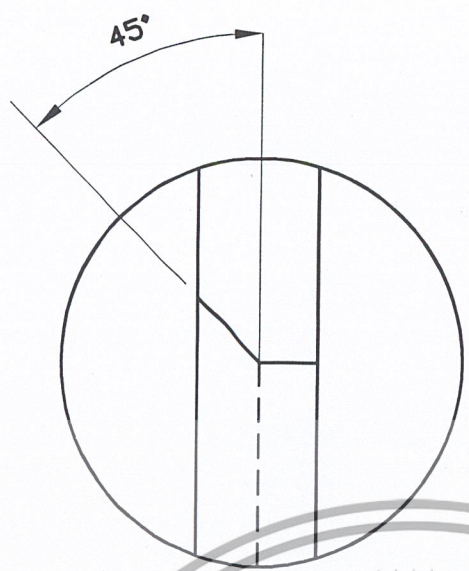
Part No. 9		PRIMARY AIR PIPE	
Material	Cast iron	Biomass fired Fluidized-Bed Combustor	Q
Designed By	Thaworn Boonchameal	September	2001
Drawn By	Chirat Pasorn	December	2001
Scale 1 : 10		King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่หรือดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Detail A

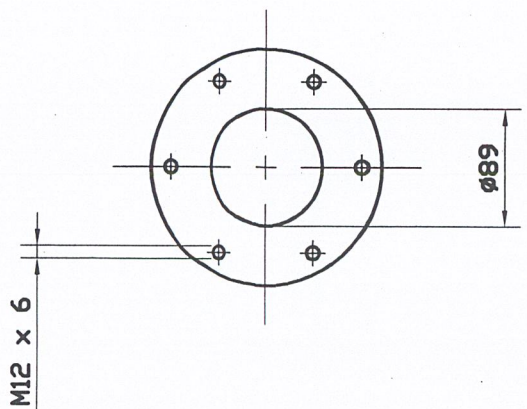


Detail A



Part No. 10	ORIFICE PLATE		
Material	Stainless steel	Biomass fired Fluidized-Bed Combustor	
Designed By	Thaworn Boonchamal	September 2001	
Drawn By	Chirat Pasom	December 2001	
Scale 1 : 10	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



M12 x 6

∅89

975

0810



PRIMARY AIR PIPE

Part No. 11

Material	Cast iron	Biomass fired Fluidized-Bed Combustor
Designed By	Thaworn Hanchumneul	September 2001
Drawn By	Chirak Pasorn	December 2001
Scale 1 : 10		
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Part No. 14		PRIMARY AIR PIPE		104
Material	PVC	Biomass fired Fluidized-Bed Combustor		
Designed By	Thaworn Boonchamee	September	2001	
Drawn By	Chirat Pason	December	2001	
Scale 1 : 10		King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Part No. 16		PRIMARY AIR PIPE		105
Material	PVC	Biomass fired Fluidized-Bed Combustor		
Designed By	Thaworn Booncharneal	September	2001	
Drawn By	Chirat Pasom	December	2001	
Scale 1 : 10				
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang				

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Part No. 17

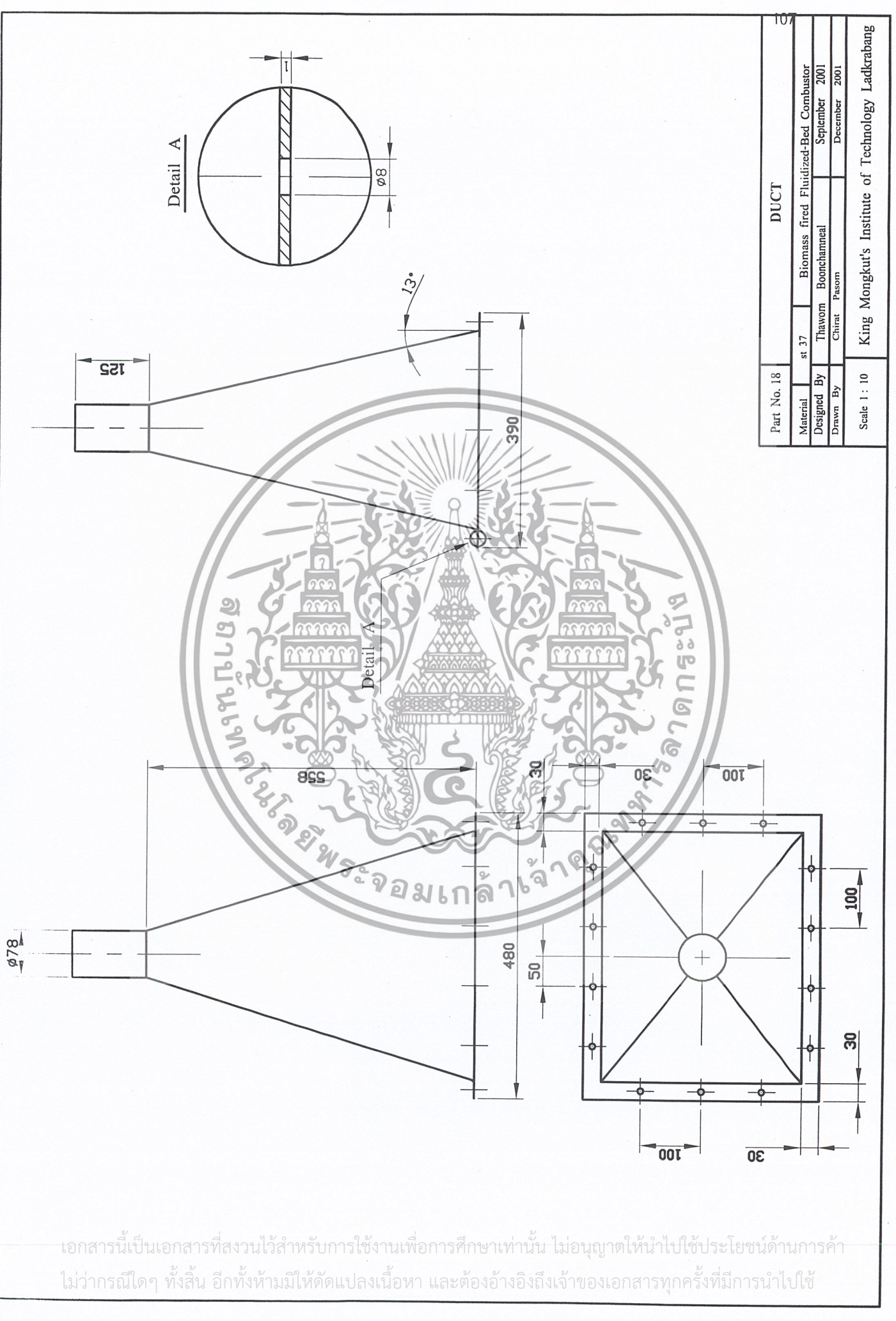
## FLEXIBLE PIPE

Material	Rubber	Biomass fired Fluidized-Bed Combustor
Designed By	Thaworn Boonchannal	September 2001
Drawn By	Chirat Pasom	January 2002

Scale 1 : 10

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



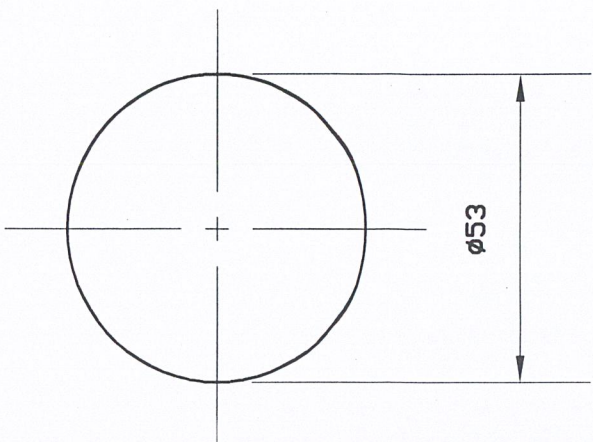
Part No. 18		DUCT		107
Material	st 37	Biomass fired Fluidized-Bed Combustor		
Designed By	Thaworn Boonchamee	September 2001		
Drawn By	Chirat Pasom	December 2001		
Scale 1 : 10		King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Part No. 20		SECONDARY AIR PIPE	
Material	PVC	Biomass fired Fluidized-Bed Combustor	
Designed By	Thiworn Boonchannuel	September 2001	
Drawn By	Chirat Pasom	December 2001	
Scale 1 : 10		King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang	



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Part No. 23		SECONDARY AIR PIPE	
Material	PVC	Biomass fired Fluidized-Bed Combustor	
Designed By	Thavorn Boonchamneel	September 2001	
Drawn By	Chirat Pasom	December 2001	
Scale 1 : 10		King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



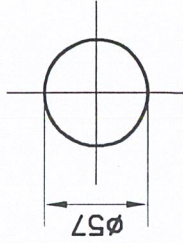
Part No. 24		SECONDARY AIR PIPE		110
Material	Rubber	Biomass fired Fluidized-Bed Combustor		
Designed By	Thuvorn Boontchumtel	September	2001	
Drawn By	Chirat Pasom	December	2001	
Scale 1 : 10		King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



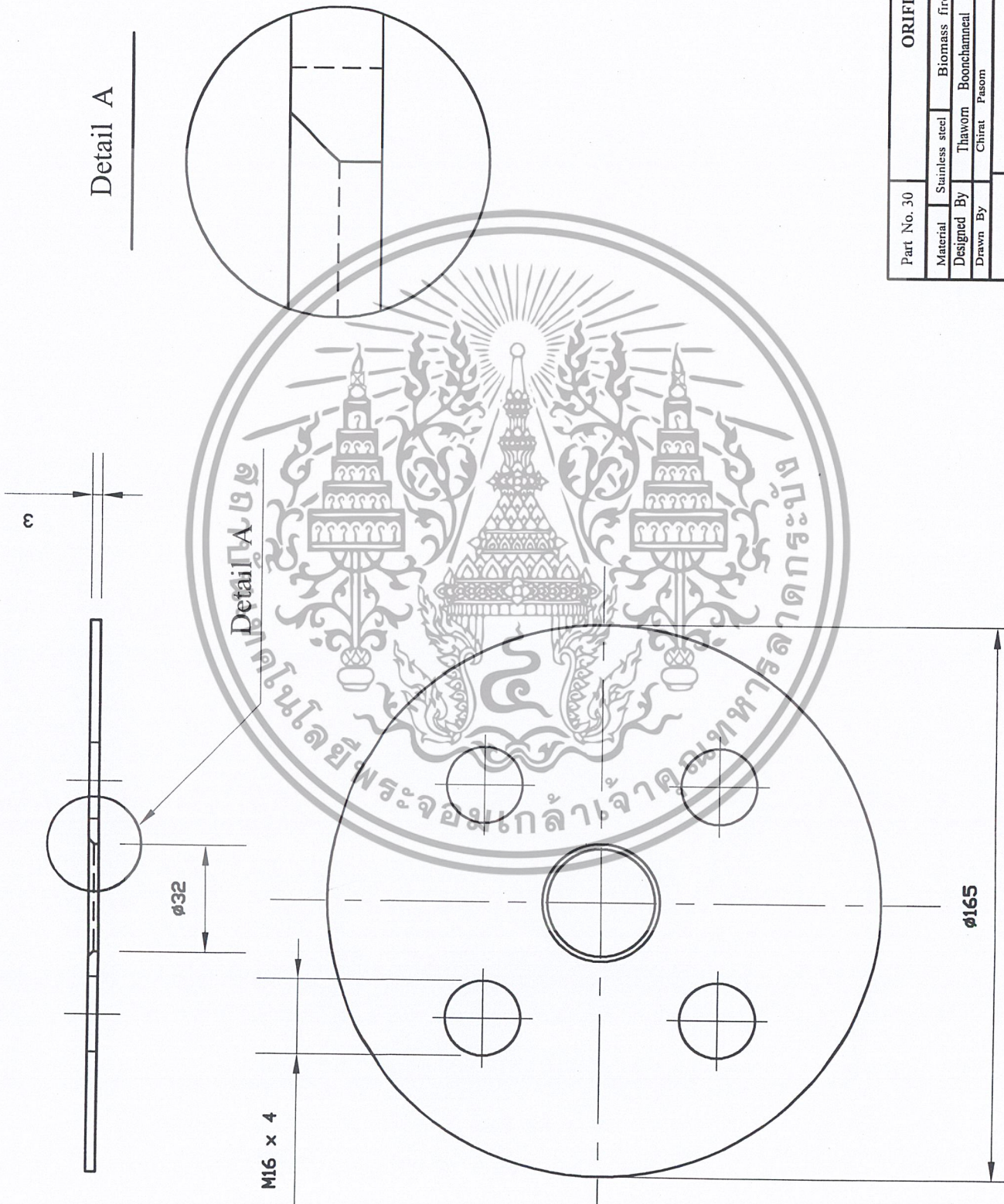
Part No. 25	SECONDARY AIR PIPE				111
Material	PVC	Biomass fired Fluidized-Bed Combustor			
Designed By	Thaworn Boonhammal	September 2001			
Drawn By	Chirat Pason	December 2001			
Scale 1 : 10	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang				

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Part No. 29	SECONDARY AIR PIPE			112
Material	PVC	Biomass fired Fluidized-Bed Combustor		
Designed By	Thaworn Hoonchirumal	September	2001	
Drawn By	Chirat Pisonn	December	2001	
Scale 1 : 10				
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang				

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Part No. 30		ORIFICE PLATE	
Material	Stainless steel	Biomass fired Fluidized-Bed Combustor	
Designed By	Thaworn Boonhamneel	September	2001
Drawn By	Chirat Pasom	December	2001
Scale 1 : 10		King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Part No. 31		SECONDARY AIR PIPE		114
Material	PVC	Biomass fired Fluidized-Bed Combustor		
Designed By	Thawom Boonchammal	September 2001		
Drawn By	Chirat Pasonn	December 2001		
Scale 1 : 10		King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



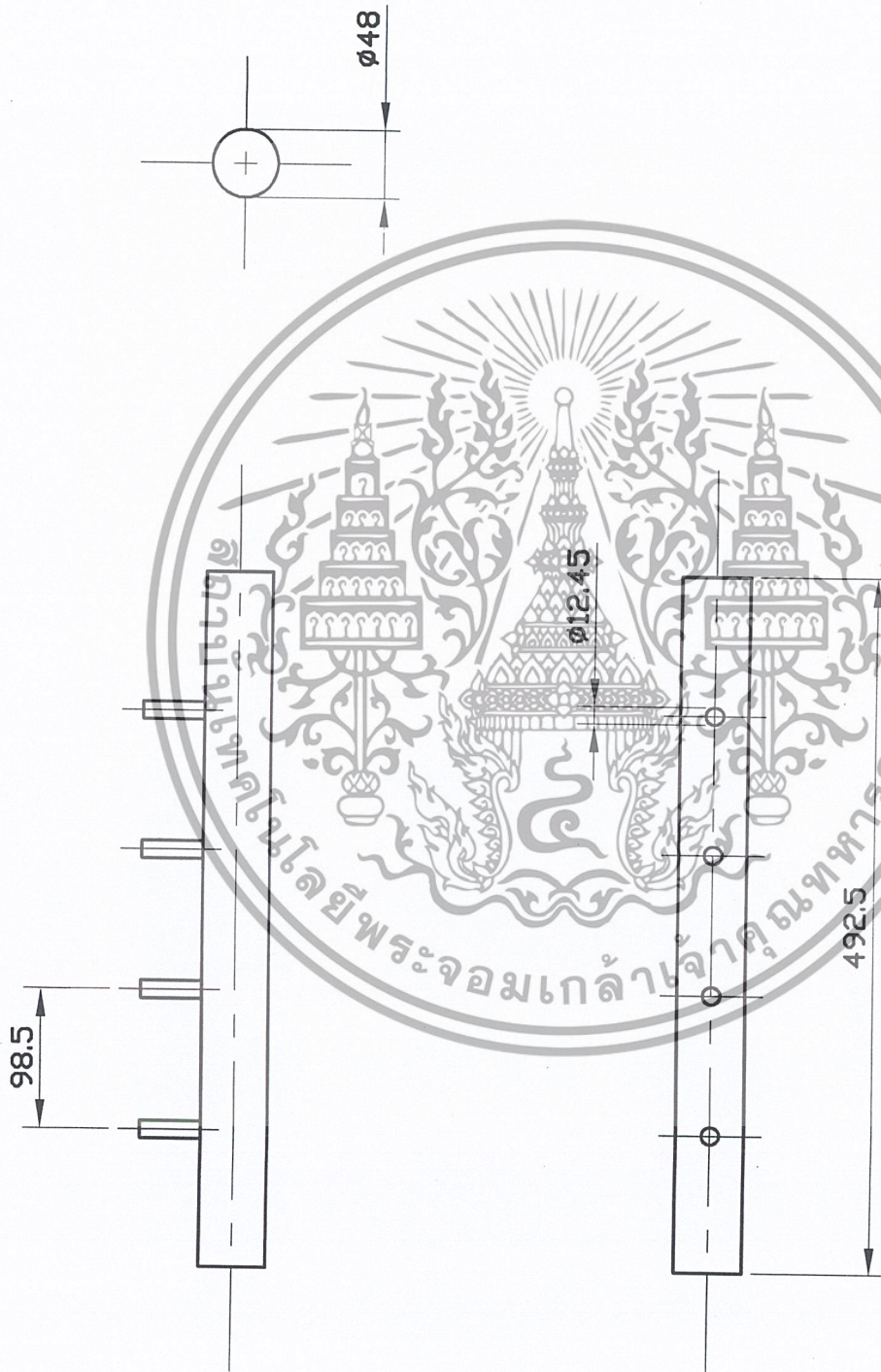
Part No. 33

## SECONDARY AIR PIPE

Material	Cast iron	Biomass fired Fluidized-Bed Combustor
Designed By	Thaworn Boonchamnol	September 2001
Drawn By	Chirat Pasorn	December 2001

Scale 1 : 10

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang



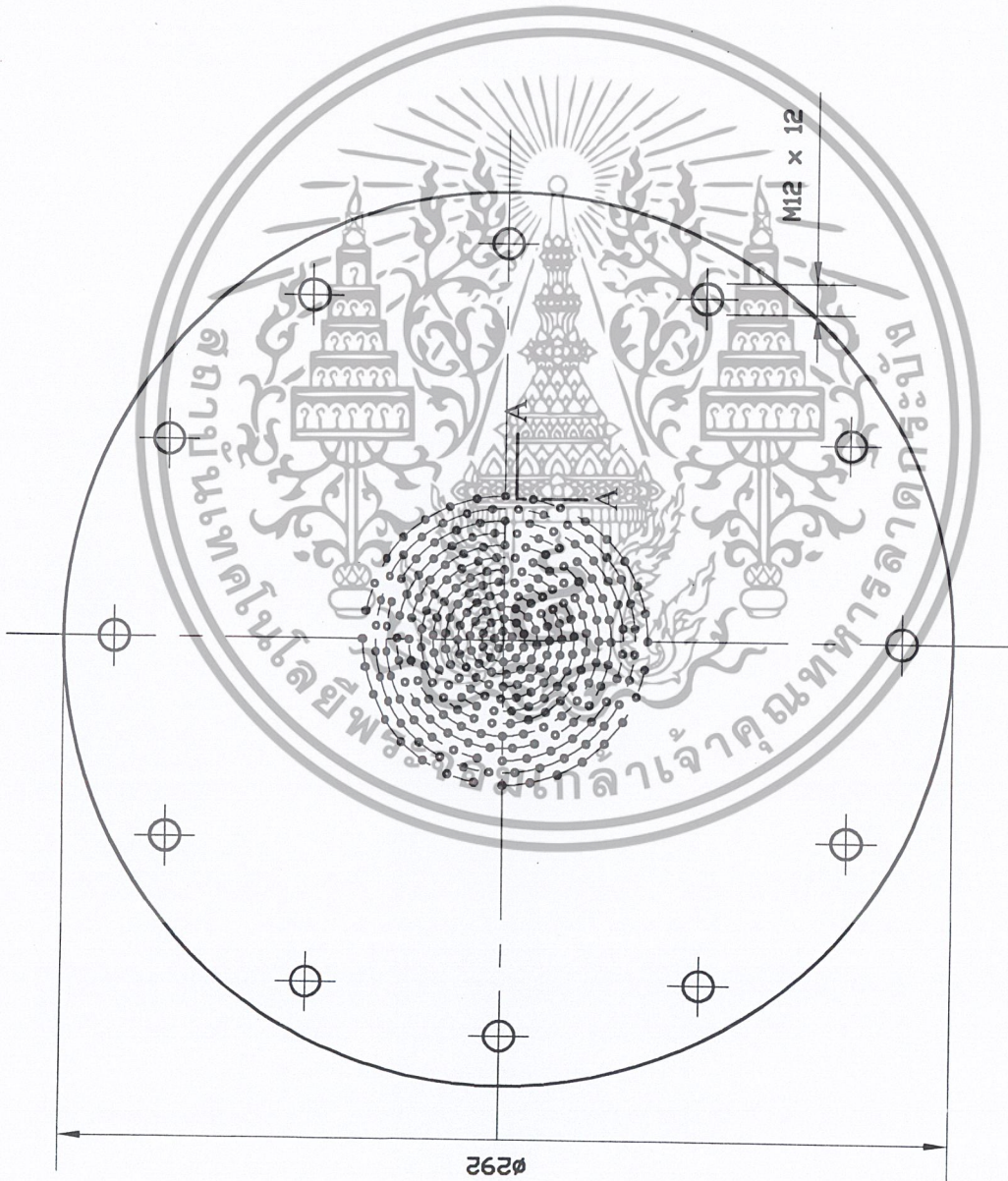
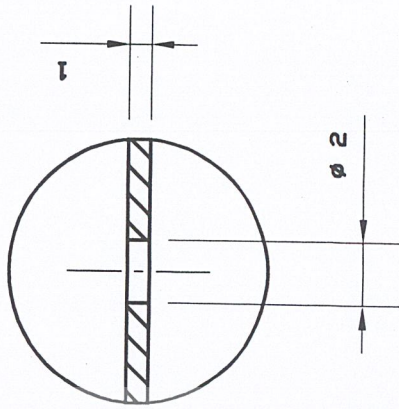
Part No. 35

## SECONDARY AIR PIPE

Material	Cast iron	Biomass fired Fluidized-Bed Combustor
Designed By	Thuworn Boonchameel	September 2001
Drawn By	Chirat Pasom	January 2002

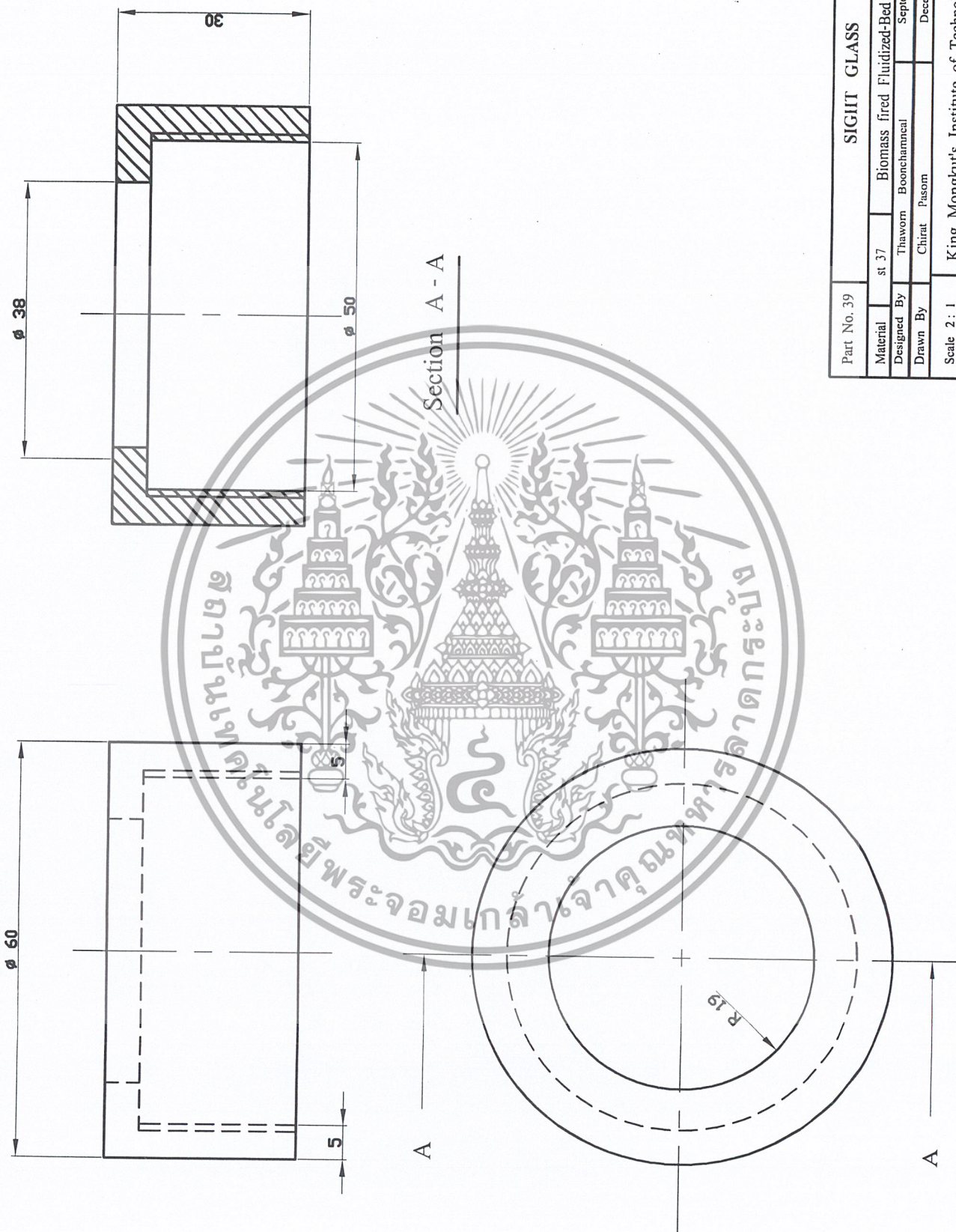
Scale 1 : 10  
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

Section A - A



Part No. 38		<b>DISTRIBUTE PLATE</b>	
Material	Stainless steel	Biomass fired Fluidized-Bed Combustor	
Designed By	Thaworn Boonchannuel	September 2001	
Drawn By	Chirat Pason	January 2002	
Scale 1 : 20			
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม้ ไม้ การณี เตฯ ทั้ง ลัน ยี่ ก ทั้ง ห้ มม ให้ ห้ ห้ แล ง เนื่อ ห้ และ ห้ อ ง อ ง อ ง ลึ ง จั ง ข อ ง เอก ส าร หุ ก ค ร ึ่ง ที่ ก ร ำ ก ำ ก ำ ก ำ



Part No. 39		SIGHT GLASS		110
Material	st 37	Biomass fired Fluidized-Bed Combustor		
Designed By	Thavorn Boonchannal	September	2001	
Drawn By	Chirat Pasom	December	2001	
Scale	2 : 1	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้