

การพัฒนาหัวเผาเชื้อเพลิงสำหรับเม็ดเชื้อเพลิงระดับอุตสาหกรรม  
DEVELOPMENT OF AN INDUSTRIAL BURNER FOR BIOMASS PELLET



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2558

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การพัฒนาหัวเผาเชื้อเพลิงสำหรับเม็ดเชื้อเพลิงระดับอุตสาหกรรม  
DEVELOPMENT OF AN INDUSTRIAL BURNER FOR BIOMASS PELLET



T143847



ส.พ.  
๓๖๓๖๓ ก

เลขหมู่..... 2068  
เลขทะเบียน..... 143847  
วันเดือนปี..... 104 ต.ค. 2559

4681000๙  
.....  
.....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2558

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# DEVELOPMENT OF AN INDUSTRIAL BURNER FOR BIOMASS PELLET



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
BACHELOR OF ENGINEERING IN MECHANICAL ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
2015

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโทปีการศึกษา 2558

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การพัฒนาหัวเผาเชื้อเพลิงสำหรับเม็ดเชื้อเพลิงระดับอุตสาหกรรม

DEVELOPMENT OF AN INDUSTRIAL BURNER FOR BIOMASS PELLETT

ผู้จัดทำ

1. นายณัฐเวทย์ กลิ่นชู รหัสประจำตัว 55010407
2. นายธนภาค พิธญาประภา รหัสประจำตัว 55010507
3. นายปคุณ ประสงค์สิ่งดี รหัสประจำตัว 55010690



*ชินรัช*  
(รศ.ดร.ชินรัช เอียรพงษ์)

อาจารย์ที่ปรึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การพัฒนาหัวเผาเชื้อเพลิงสำหรับเม็ดเชื้อเพลิงระดับอุตสาหกรรม

นายณัฐเวทย์ กลิ่นชู 55010407

นายธนภาค พิรญาประภา 55010507

นายปคุณ ประสงค์สิงห์ 55010690

รศ.ดร. ชินรัชต์ เขียรพงษ์ อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.ดร. จารวัตร เจริญสุข อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

ปีการศึกษา 2558

## บทคัดย่อ

ในปัจจุบันพลังงานทดแทนหรือพลังงานทางเลือกเป็นที่สนใจและมีการพัฒนาอย่างแพร่หลาย และหนึ่งในนั้นคือระบบการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลเม็ด (Pellet biomass burner) ซึ่งงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลแบบเม็ดสำหรับการเผาไหม้ สำหรับนำไปใช้ในอุตสาหกรรมโดยหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลแบบเม็ดมีกำลังการผลิต 100 kW โดยในส่วนของพัฒนานั้นได้มีการออกแบบเตาเผาสำหรับเม็ดใหม่ทั้งหมดซึ่งมุ่งเน้นไปที่การนำอากาศเข้าห้องเผาไหม้ 2 ช่องทางเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงแบบเม็ด เพราะชีวมวลแบบเม็ดนั้นมีข้อจำกัดเรื่องเวลาในการติดไฟและพื้นที่รับความร้อนภายในเชื้อเพลิง โดยจากการคำนวณการป้อนเชื้อเพลิงเข้าเตาปฏิกรณ์นั้นพบว่าควรป้อนเชื้อเพลิงด้วยอัตราการไหล 3.2482 kg/10 นาที เพราะเวลาที่ใช้ในการเผาไหม้เชื้อเพลิงจากเริ่มติดไฟจนหมดลงคือ 10 นาที และควรใส่อากาศเข้าไปในห้องเผาไหม้ที่ปริมาณ 0.03446 kg/s ซึ่งเมื่ออากาศเข้าไปในเตาปฏิกรณ์นั้นจะถูกแบ่งเป็นสองส่วนคือเข้า Primary air pipe ที่ 0.01723 kg/s และเข้า Secondary air channel ที่ 0.01866 kg/s การเผาไหม้นั้นจะทำให้เกิน 120% excess air เพราะจะทำให้อุณหภูมิเฉลี่ยรอบๆ ห้องเผาไหม้สูงสุดที่ 1,297 องศาเซลเซียสและเกิดความปั่นป่วนจากการหมุนวนของอากาศคือ ค่า Turbulent intensity เท่ากับ 266.19% หลังจากนั้นจะนำรูปแบบที่ได้ทำการออกแบบไว้มาสร้างเตาปฏิกรณ์จริงๆ และนำผลการจำลองที่ได้ทำการทดสอบไว้มาเปรียบเทียบกับผลการทดลองจริงต่อไปในอนาคต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## DEVELOPMENT OF AN INDUSTRIAL BURNER FOR BIOMASS PELLET

NATTAWET      KLINCHU      55010407

TANAPAK      PEERAYAPRAPA      55010507

PAKHUN      PRASONGSINGDEE      55010690

Assc.Prof. Dr.Chinaruk Thianpong      Advisor

Assc.Prof. Dr Jarruwat Charoensuk      Co.Advisor

Year 2015

### ABSTRACT

The renewable energy has been developed extensively. One of them is Pellet biomass burner. This project aims to develop a pellet biomass burner with for industrial use. The biomass burner has a capacity of 100 kW. The development of the design of furnace, which focuses on the air channel in the combustion chamber consist of 2 channels. It increases efficiency in the combustion of the pellet fuel because pellet fuel is a time limitation on the fire and heat areas within the fuel. By calculating the fuel entering into the furnace, it is found that should enter the fuel flow rate 3.2482 kg / 10 minutes. Because of the time used in fuel combustion fire from start until the fire extinguished by 10 minutes and should put air into the combustion chamber volume flow rate 0.03446kg/s. When the air into the reactor will be divided two parts consist of Primary air pipe 0.01723kg/s and Secondary air channel 0.01866kg/s. From the simulation burning will be the condition 120% excess air because will make the average temperature around the combustion chamber, the highest is 1,297 °C and turbulent intensity was 266.19%. After that the model was designed to build the reactor and use result of simulation test compare with real experiment in the future.

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยดี ก็เพราะด้วยความเอาใจใส่ แนะนำ และช่วยเหลือในด้านต่าง ๆ เสมอมาจาก รศ.ดร.ชินรักษ์ เจริญพงษ์ อาจารย์ที่ปรึกษา และรศ.ดร.จารุวัตร เจริญสุข อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ซึ่งต้องขอขอบพระคุณเป็นอย่างมาก เพราะหากไม่มีอาจารย์ทั้ง 2 ท่านนี้ก็คงไม่อาจทำให้ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้เลย

ขอขอบคุณพี่ น้องทั้งหลายที่ได้เข้ามาช่วยเหลือในด้านต่างๆในการทำโครงการนี้และต้องขอขอบพระคุณบุคคลสำคัญที่สุดที่ทำให้ข้าพเจ้ามีวันนี้ ก็คือ บิดา มารดา อันเป็นที่เคารพรักยิ่ง ซึ่งได้เลี้ยงดูผู้เขียนมาเป็นอย่างดี พร้อมทั้งให้โอกาสในการศึกษาอย่างเต็มที่ และยังให้กำลังใจ เอาใจใส่เสมอมา ในทุก ๆ ด้านอันหาที่เปรียบมิได้ ข้าพเจ้าขอระลึกในพระคุณอันสุดประมาณ และขอกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

นายณัฐเวทย์ กลิ่นชู  
นายธนาภาค พิรญาประภา  
นายปคุณ ประสงค์สิ่งดี

## สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย .....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	II
กิตติกรรมประกาศ .....	III
สารบัญ .....	IV
สารบัญตาราง .....	VIII
สารบัญรูป .....	IX
บทที่ 1 บทนำ .....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ .....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา .....	1
1.3 ผลที่คาดว่าจะได้รับ .....	1
1.4 ขอบเขตการศึกษา .....	2
1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน .....	2
บทที่ 2 วรรณกรรมปริทัศน์และทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง .....	3
2. เชื้อเพลิง .....	3
2.1 เชื้อเพลิงแข็ง .....	3
2.1.1 เชื้อเพลิงชีวมวล .....	4
2.1.1.1 ชีวมวลจากข้าว .....	5
2.1.1.2 ชีวมวลจากข้าวโพด .....	5
2.1.1.3 ชีวมวลจากอ้อย .....	6
2.1.1.4 ชีวมวลจากมันสำปะหลัง .....	6
2.1.1.5 ชีวมวลจากปาล์มน้ำมัน .....	6
2.1.1.6 ชีวมวลจากไม้ยางพารา .....	7
2.1.1.7 ชีวมวลจากไม้ยูคาลิปตัส .....	7
2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง .....	8
2.2.1 ตัวเลขการหมุนวน (Swirl number) .....	8
2.2.2 อัตราส่วนระหว่างความหนืดของการไหลแบบปั่นป่วน .....	9
2.2.3 วัสดุที่มีความพรุน (Porous media) .....	10
2.2.3.1 วัสดุที่มีความพรุนในเตาเผา .....	11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

### หน้า

2.2.4 ความสามารถในการซึมผ่าน (Permeability) .....	12
2.3 ปฏิกริยาเผาไหม้.....	12
2.3.1 อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง (Air-fuel Ratio).....	13
2.3.2 การผสมกันระหว่างเชื้อเพลิงกับออกซิเจน (Mixing) .....	14
2.3.3 อุณหภูมิ (Temperature).....	15
2.3.4 เวลาที่เชื้อเพลิงอยู่ในห้องเผาไหม้ (Time).....	15
2.3.5 กลไกการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง.....	15
2.3.5.1 การทำแห้ง (Drying).....	15
2.3.5.2 การปล่อยสารระเหย (Devolatilization).....	16
2.3.5.3 การจุดติดไฟของสารระเหย (Ignition of Volatile).....	16
2.3.5.4 การเผาไหม้สารระเหย (Combustion of Volatile).....	16
2.3.5.5 การจุดติดไฟของถ่านชาร์ (Ignition of Char Particle).....	17
2.3.5.6 การเผาไหม้ถ่านชาร์ (Combustion of Residual Char Particle). 17	
2.4 สมการควบคุม.....	17
2.4.1 แบบจำลองความปั่นป่วนชนิด $k-\epsilon$ .....	18
2.5 การคำนวณอัตราการไหลของอากาศ.....	20
2.5.1 สมการเบอร์นูลลีและการหาพลังงานสูญเสียเนื่องจากความฝืดในระบบท่อ... 20	
2.5.1.1 ผลกระทบของมลพิษ .....	20
2.6 การเกิดมลพิษจากการเผาไหม้ .....	21
2.6.1 มลพิษ.....	21
2.6.2 ผลกระทบของมลพิษ.....	21
2.6.3 การเกิดมลพิษจากการเผาไหม้.....	22
2.6.3.1 อนุภาคจุลสาร.....	22
2.6.3.2 คาร์บอนมอนอกไซด์.....	23
2.6.3.3 สารประกอบไฮโดรคาร์บอน.....	24
2.6.3.4 แก๊สเรือนกระจก.....	24
บทที่ 3 การออกแบบและการคำนวณ .....	26
3.1 สมการการเผาไหม้ .....	26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

## หน้า

3.1.1 สมการการเผาไหม้สำหรับเชื้อเพลิงชีวมวล.....	26
3.1.2 สมการการเผาไหม้สำหรับเชื้อเพลิงชีวมวลฝุ่น .....	26
3.1.1.1 เชื้อเพลิงชีวมวล (ความชื้น 5 %) ที่ 100% stoichiometry.....	26
3.2 ปริมาณเชื้อเพลิงและอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้.....	28
3.2.1 ปริมาณอากาศที่ต้องใช้ในการเผาไหม้.....	28
3.2.2. ปริมาณเชื้อเพลิงที่ต้องใช้ในการเผาไหม้.....	28
3.3 เงื่อนไขในการออกแบบขนาดของห้องเผาไหม้.....	29
3.4 แบบของหัวเผาและหลักการทำงานของส่วนต่างๆ.....	30
3.5 การคำนวณปริมาณอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ.....	31
3.6 การคำนวณAdiabatic flame temperature ที่ Excess air 120%-150%.....	34
บทที่ 4 อุปกรณ์และเงื่อนไขการทดลอง .....	36
4.1 ส่วนประกอบต่างๆที่ใช้ในการจำลองและหน้าที่.....	36
4.1.1 Head.....	36
4.1.2 Lower head.....	37
4.1.3 Primary air pipe.....	38
4.1.4 Perforation.....	38
4.1.5 Combustion zone.....	39
4.1.6 Connect pipe.....	40
4.1.7 Inner base.....	41
4.1.8 Outer base.....	42
4.2 วิธีการจำลองในโปรแกรมANSYS 2016 .....	43
4.2.1 ขั้นตอนพื้นฐานในการจำลอง.....	43
4.2.2 การจำลองการไหลของอากาศ.....	44
4.2.2.1 หน้าจอแสดงผลของโปรแกรมANSYS.....	46
4.2.3 การจำลองการเผาไหม้.....	48
4.3 เงื่อนไขการจำลองการไหลของอากาศ.....	49
4.4 การแบ่งชิ้นงานในการจำลอง.....	50
4.4.1 จำลองการไหลของอากาศเพื่อหาความเร็วในการไหลที่ทางเข้า.....	50

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.4.2	จำลองการไหลเพื่อหาค่าความปั่นป่วนในห้องเผาไหม้.....	50
4.4.3	จำลองการไหลเพื่อหาความเร็วในการไหลออกเตาปฏิกรณ์.....	51
4.4.4	จำลองการเผาไหม้.....	52
4.5	การบันทึกผลการจำลอง.....	52
4.5.1	ตารางบันทึกผลการแบ่งอากาศเป็นสองทางเพื่อเข้าห้องเผาไหม้.....	52
4.5.2	ตารางบันทึกผลอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในห้องเผาไหม้.....	53
บทที่ 5	ผลการทดลองและการอภิปราย .....	54
5.1	ผลการจำลองการไหลของอากาศ .....	54
5.1.1	ผลการจำลองการแบ่งอากาศเป็น2ส่วนก่อนเข้าห้องเผาไหม้.....	54
5.1.2	ผลการไหลของอากาศภายในห้องเผาไหม้.....	55
5.1.3	ผลของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นภายในห้องเผาไหม้.....	60
บทที่ 6	สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ .....	62
6.1	สรุปผลการทดลอง .....	62
6.2	ข้อเสนอแนะ .....	62
6.2.1	ด้านการอนุรักษ์พลังงาน .....	62
6.2.2	ด้านการนำเชื้อเพลิงออก.....	62
6.2.3	ด้านการหมุนวนของอากาศภายในเตา .....	62
6.2.4	ด้านปริมาณอากาศ ทุติยภูมิ และ ตติยภูมิ .....	63
บรรณานุกรม	.....	64
ภาคผนวก	.....	66
ภาคผนวก ก	.....	67

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างปริมาณออกซิเจน น้ำ และถ่านในเชื้อเพลิงแข็งชนิดต่างๆ.....	4
ตารางที่ 2.2 แสดงค่า HHV และ LHV ของเชื้อเพลิงชีวมวล.....	8
ตารางที่ 2.3 แสดง คุณสมบัติของ ซิลิคอนคาร์ไบด์ (SiC) อะลูมินาออกไซด์ (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) และ เซอร์โคเนียออกไซด์ (ZrO <sub>2</sub> ).....	11
ตารางที่ 2.4 องค์ประกอบของอากาศที่ใช้ในการสันดาป.....	13
ตารางที่ 2.5 แก๊สเรือนกระจก.....	25
ตารางที่ 2.6 ศักยภาพการทำให้เกิดภาวะตลกร้อนของแก๊สเรือนกระจก.....	25
ตารางที่ 3.1 แสดงการวิเคราะห์เชื้อเพลิง ณ สภาพนำส่ง.....	26
ตารางที่ 3.2 แสดงการวิเคราะห์เชื้อเพลิง ณ สภาพนำส่ง .....	27
ตารางที่ 3.3 แสดงค่าAF ratioที่ปริมาณExcess air 100%-150%.....	27
ตารางที่ 3.4 แสดงค่าปริมาณการใช้อากาศที่ AF ratio 100%-150% excess air .....	28
ตารางที่ 3.5 ค่าพลังงานความร้อน ของ Eucalyptus bark pellet .....	28
ตารางที่ 3.6 การแบ่งอากาศเข้าห้องเผาไหม้ที่120% excess air .....	32
ตารางที่ 3.7 การแบ่งอากาศเข้าห้องเผาไหม้ที่130% excess air.....	32
ตารางที่ 3.8 การแบ่งอากาศเข้าห้องเผาไหม้ที่140% excess air .....	32
ตารางที่ 3.9 การแบ่งอากาศเข้าห้องเผาไหม้ที่150% excess air .....	33
ตารางที่ 3.10 แสดง Adiabatic flame temperatureเกิดขึ้นในห้องเผาไหม้ .....	45
ตารางที่ 4.1 แสดงเงื่อนไขการจำลองที่Excess air 120-150%.....	49
ตารางที่ 4.2 แสดงบันทึกผลการจำลองหาความเร็วอากาศที่ทางเข้าห้องเผาไหม้ที่Excess air 120-150%.....	52
ตารางที่ 4.3 แสดงผลการจำลองการอุณหภูมิการเผาไหม้ที่Excess air 120-150% .....	53
ตารางที่ 5.1 แสดงผลการแบ่งอากาศเข้าห้องเผาไหม้ .....	55
ตารางที่ 5.2 แสดงความเร็วและความปั่นป่วนที่เกิดขึ้นในห้องเผาไหม้ .....	59
ตารางที่ 5.3 แสดงอุณหภูมิสูงสุดและอุณหภูมิเฉลี่ยที่เกิดขึ้นในห้องเผาไหม้ .....	60

## สารบัญรูปภาพ

รูปที่		หน้า
รูปที่ 2.1	ชีวมวลในประเทศไทย .....	5
รูปที่ 2.2	ลักษณะโครงสร้างของ swirl generator .....	8
รูปที่ 2.3	ขั้นตอนการระเหยไอน้ำและการให้ความร้อนแก่อนุภาคเชื้อเพลิง .....	16
รูปที่ 2.4	ตัวอย่างลักษณะของอนุภาคจุลสาร .....	23
รูปที่ 3.1	แสดงชิ้นส่วนต่างๆของหัวเผา .....	30
รูปที่ 4.1	Head ที่ถูกออกแบบด้วยโปรแกรม Solid works .....	36
รูปที่ 4.2	Dimension ของ Head (ด้านบน) .....	36
รูปที่ 4.3	Dimension ของ Head (ด้านหน้า) .....	37
รูปที่ 4.4	Lower head ที่ถูกออกแบบด้วยโปรแกรม Solid works .....	37
รูปที่ 4.5	Dimension ของ Lower head .....	37
รูปที่ 4.6	Primary air pipe ที่ถูกออกแบบด้วยโปรแกรม Solid works .....	38
รูปที่ 4.7	Dimension ของ Primary air pipe (ด้านหน้า) .....	38
รูปที่ 4.8	Perforation ที่ถูกออกแบบด้วยโปรแกรม Solid works .....	38
รูปที่ 4.9	Dimension ของ Perforation (ด้านหน้า) .....	39
รูปที่ 4.10	Combustion zone ที่ถูกออกแบบด้วยโปรแกรม Solid works .....	39
รูปที่ 4.11	Dimension ของ Combustion zone (ด้านหน้า) .....	40
รูปที่ 4.12	Connect pipe ที่ถูกออกแบบด้วยโปรแกรม Solid works .....	40
รูปที่ 4.13	Dimension ของ Connect pipe (ด้านข้าง) .....	41
รูปที่ 4.14	Inner base ที่ถูกออกแบบด้วยโปรแกรม Solid works .....	41
รูปที่ 4.15	4.15 Dimension ของ Inner base (ด้านข้าง) .....	42
รูปที่ 4.16	Outer base ที่ถูกออกแบบด้วยโปรแกรม Solid works .....	42
รูปที่ 4.17	Dimension ของ Outer base (ด้านข้าง) .....	43
รูปที่ 4.18	แสดงการแบ่งอีลิเมนต์ของชิ้นงานที่ใช้จำลอง .....	45
รูปที่ 4.19	แสดงการกำหนดสมการที่ใช้จำลอง .....	46
รูปที่ 4.20	แสดงการกำหนดเงื่อนไขที่ขอบเขตต่างๆ .....	47
รูปที่ 4.21	แสดงการกำหนดเงื่อนไขporous mediaที่ primary air pipe .....	47
รูปที่ 4.22	แสดงการกำหนดการตั้งค่าสมการการเผาไหม้ .....	48
รูปที่ 4.23	แสดงการกำหนดการลักษณะของเชื้อเพลิงที่ใช้ในการจำลอง .....	48
รูปที่ 4.24	แสดงการกำหนดพื้นที่ที่เกิดการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง .....	49
รูปที่ 5.1	แสดงContour ของความดันและความเร็วของอากาศในเตาปฏิกรณ์ .....	54

## สารบัญรูปร่างภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
รูปที่ 5.2 ความเร็วในแนวแกนYที่เกิดขึ้นในห้องเผาไหม้ .....	55
รูปที่ 5.3 แสดงความเร็วในแนวแกนYที่เกิดขึ้นรอบPrimary air pipe .....	55
รูปที่ 5.4 แสดงความเร็วในแนวแกนYที่เกิดขึ้นในห้องเผาไหม้ ที่130% excess air .....	56
รูปที่ 5.5 แสดงความเร็วในแนวแกนYที่เกิดขึ้นรอบPrimary air pipe ที่130% excess air .....	56
รูปที่ 5.6 แสดงความเร็วในแนวแกนYที่เกิดขึ้นในห้องเผาไหม้ ที่140% excess air .....	56
รูปที่ 5.7 แสดงความเร็วในแนวแกนYที่เกิดขึ้นรอบPrimary air pipe ที่140% excess air .....	57
รูปที่ 5.8 แสดงความเร็วในแนวแกนYที่เกิดขึ้นในห้องเผาไหม้ ที่150% excess air .....	57
รูปที่ 5.9 แสดงความเร็วในแนวแกนYที่เกิดขึ้นรอบPrimary air pipe ที่150% excess air .....	57
รูปที่ 5.10 แสดงความเร็วในการหมุนวนในห้องเผาไหม้ ที่120% excess air .....	58
รูปที่ 5.11 แสดงความเร็วในการหมุนวนในห้องเผาไหม้ ที่130% excess air .....	58
รูปที่ 5.12 แสดงความเร็วในการหมุนวนในห้องเผาไหม้ ที่140% excess air .....	58
รูปที่ 5.13 แสดงความเร็วในการหมุนวนในห้องเผาไหม้ ที่150% excess air .....	59
รูปที่ 5.14 แสดงอุณหภูมิที่เกิดในห้องเผาไหม้ ที่120% excess air .....	60
รูปที่ 5.15 แสดงอุณหภูมิที่เกิดในห้องเผาไหม้ ที่130% excess air .....	60
รูปที่ 5.16 แสดงอุณหภูมิที่เกิดในห้องเผาไหม้ ที่140% excess air .....	60
รูปที่ 5.17 แสดงอุณหภูมิที่เกิดในห้องเผาไหม้ ที่150% excess air .....	61
รูปที่ 1ก Dimension ของ Head .....	67
รูปที่ 2ก Dimension ของ Lower head .....	68
รูปที่ 3ก Dimension ของ Primary air pipe and Perforation .....	69
รูปที่ 4ก Dimension ของ Combustion zone .....	70
รูปที่ 5ข Dimension ของ Connect pipe and Inner base .....	71
รูปที่ 6ก Dimension ของ Outer base .....	72

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

เชื้อเพลิงที่ทั่วโลกกำลังใช้อยู่ทุกวันนี้ ส่วนใหญ่มาจากแหล่งเชื้อเพลิงธรรมชาติ เช่น ถ่านหิน ปิโตรเลียม และแก๊สธรรมชาติ เป็นต้น ซึ่งเชื้อเพลิงเหล่านี้เป็นสาเหตุหลักที่ทำให้เกิดภาวะโลกร้อนและมลพิษทางอากาศ ซึ่งเชื้อเพลิงเหล่านี้วันยิ่งหมดลงไป เนื่องจากทั่วโลกมีแนวโน้มความต้องการทางด้านการใช้พลังงานสูงขึ้น จึงทำให้เชื้อเพลิงเหล่านี้มีปริมาณลดน้อยลงอย่างรวดเร็ว ทำให้เกิดความตระหนักที่จะคิดค้นหาพลังงานทางเลือกอื่นมาทดแทนพลังงานจากฟอสซิล ซึ่งพลังงานทางเลือกดังกล่าวจะต้องเป็นพลังงานที่ยั่งยืน ไม่ต้องกังวลว่าพลังงานนี้จะหมดไปสามารถวนกลับมาใช้ใหม่ได้ อีกทั้งจะต้องส่งผลกระทบต่อมลภาวะน้อยกว่า หนึ่งในนั้นคือ ความร้อนจากการเผาไหม้ในเตาปฏิกรณ์ ซึ่งเตาปฏิกรณ์นั้นมีการออกแบบไว้หลากหลายรูปแบบ แต่ละแบบจะถูกออกแบบมาให้ทำงานกับลักษณะเชื้อเพลิงที่แตกต่างกันตามวัตถุดิบที่ถูกนำมาใช้ในการเผาไหม้

งานวิจัยนี้จะออกแบบเตาปฏิกรณ์ที่ใช้กับเชื้อเพลิงชีวมวลชนิดเม็ดเนื่องจากเชื้อเพลิงชนิดเม็ดนั้น จัดหาได้ง่ายและสะดวกต่อการเก็บรักษา การขนส่ง ดังนั้นเป้าหมายด้านศึกษาในครั้งนี้จึงต้องการออกแบบเตาปฏิกรณ์เพื่อใช้เชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด (เปลือกไม้ยูคาลิปตัส) ในการเผาไหม้เป็นเชื้อเพลิงหลัก ซึ่งจะก่อให้เกิดการพัฒนาขึ้นเป็นหัวเผาชีวมวลในอนาคตสำหรับใช้ในงานอุตสาหกรรมและเชิงพาณิชย์ต่อไป

### 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. พัฒนาดันแบบหัวเผาของเตาปฏิกรณ์ให้สามารถทำปฏิกิริยาการเผาไหม้ได้ที่กำลังการผลิต ขนาด 100 kW
2. พัฒนาส่วนประกอบต่างๆของเตาปฏิกรณ์ให้สามารถเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลแบบเม็ด โดยมุ่งเน้นศึกษาที่การออกแบบช่องอากาศแบบ2ทิศทาง
3. จำลองการไหลของอากาศในเตาปฏิกรณ์รวมทั้งจำลองการเผาไหม้ที่การเผาไหม้แบบมีExcess air 120-150%

### 1.3 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถนำวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรหรือเชื้อเพลิงชีวมวลที่เหลือใช้ซึ่งเป็นเชื้อเพลิงสะอาด มาทำให้เกิดประโยชน์อย่างมีศักยภาพและสามารถลดการใช้เชื้อเพลิงหลักได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ได้ต้นแบบเตาเผาชีวมวลที่มีช่องอากาศ2ทาง ซึ่งมีความเหมาะสมสำหรับเชื้อเพลิงชีวมวลแบบเม็ด เพื่อให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ มีการใช้เชื้อเพลิงให้เกิดความคุ้มค่ามากที่สุด และเกิดมลพิษทางอากาศน้อยที่สุด

#### 1.4 ขอบเขตการศึกษา

1. คำนวณและออกแบบหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลแบบเม็ด ในเชิงสมดุลมวลและกำลังการผลิตความร้อนที่ 100 kW
2. จำลองการไหลของอากาศและการเผาไหม้ในห้องเผาไหม้ที่ออกแบบให้มีทางเข้าอากาศ2ทางที่ Excess air 120-150% เพื่อนำผลที่ได้มาปรับปรุงรูปแบบของเตาปฏิกรณ์ให้มีประสิทธิภาพดีขึ้น

#### 1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. ทำการศึกษาและค้นคว้าแหล่งที่มาของต้นแบบเตาปฏิกรณ์เพื่อออกแบบเตาปฏิกรณ์ชีวมวลสำหรับเชื้อเพลิงชนิดเม็ดและมีกำลังการผลิตความร้อนที่ 100 kW โดยใช้ชีวมวลอัดเม็ด (เปลือกไม้ยูคาลิปตัส) เป็นเชื้อเพลิงหลัก
2. ทำการคำนวณอัตราการป้อนเชื้อเพลิงและอากาศเพื่อการทดลองในเชิงสมดุลมวล และกำลังการผลิตที่ 100 kW
3. จำลองการไหลของอากาศในห้องเผาไหม้ของเตาเผาเพื่อดูลักษณะการหมุนวนของอากาศที่ไหลในห้องเผาไหม้และนำผลที่ได้มาปรับปรุงช่องทางเข้าอากาศทั้ง2ทิศทาง
4. จำลองการเผาไหม้ในห้องเผาไหม้ของเตาเผาเพื่อดูลักษณะของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในห้องเผาไหม้และนำผลที่ได้มาปรับปรุงช่องทางเข้าอากาศทั้ง2ทิศทาง
5. นำผลการจำลองที่ Excess air 120%-150% มาวิเคราะห์ว่าควรเลือกใช้ปริมาณอากาศเท่าไรในการเผาไหม้เพื่อให้การเผาไหม้ดีที่สุด
6. ทำการสรุปผลการทดลอง และทำข้อเสนอแนะสำหรับการพัฒนาต้นแบบหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลแบบเม็ดต่อไปในอนาคต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

# วรรณกรรมปริทัศน์และทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

### 2. เชื้อเพลิง

เชื้อเพลิงที่ใช้ในการเผาไหม้สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ เชื้อเพลิงที่ได้จากการ ทั่บถมตัวของซากพืชซากสัตว์ ภายใต้ผิวโลกภายใต้อุณหภูมิและความดันสูงเป็นเวลานานนับล้านปีหรือที่ เรียกว่า “เชื้อเพลิงดึกดำบรรพ์” (Fossil Fuel) ได้แก่ ถ่านหิน น้ำ มัน และก๊าซธรรมชาติ เชื้อเพลิง อีกประเภทคือ เชื้อเพลิงชีวมวล(Biomass) ซึ่งเป็นวัสดุที่ได้จากสิ่งมีชีวิตซึ่งมีองค์ประกอบพวกเซลลูโลสเป็นหลัก เช่น ไม้ ชี้เลื้อย และ แกลบข้าว เป็นต้น

#### 2.1 เชื้อเพลิงแข็ง

เชื้อเพลิงแข็งเกิดขึ้นตามธรรมชาติ ได้แก่ ไม้ ชีวมวลรูปแบบต่าง ๆ พืต ถ่านหินลิกไนต์ ถ่านหินบิทูมินัส และถ่านหินแอนทราไซต์ ขยะจากที่อยู่อาศัยและจากอุตสาหกรรมบางประเภทก็จัดว่าเป็นเชื้อเพลิงแข็งเช่นเดียวกัน องค์ประกอบของเชื้อเพลิงแข็งนอกจากจะประกอบด้วยคาร์บอนและไฮโดรเจนเป็นส่วนมากแล้วยังประกอบด้วย ออกซิเจน ไนโตรเจน กำมะถัน น้ำ และเถ้า อีกด้วย ตัวอย่างเช่น ไม้มีออกซิเจนอยู่ถึง 45 เปอร์เซ็นต์ (โดยมวลและไม่รวมน้ำกับเถ้า) ในขณะที่ถ่านหินแอนทราไซต์มีอยู่เพียง 2 เปอร์เซ็นต์เท่านั้น (ดูตารางที่ 2.1 ประกอบ)

ความชื้นในเชื้อเพลิงแข็งปรากฏอยู่สองรูปแบบคือเป็นน้ำอิสระ (free water) แทรกตัวอยู่ระหว่างผนังเซลล์ของไม้หรือในรูพรุนเล็ก ๆ ของถ่านหินซึ่งน้ำจะถูกดูดซับเข้าไปโดยอิทธิพลของความตึงผิว (capillary effect) และเป็นน้ำที่ถูกดูดกลืนไว้อย่างเชิงกายภาพ (physical absorption หรือ bound water) ความชื้นในเชื้อเพลิงแข็งมีผลกระทบโดยตรงต่ออัตราการเผาไหม้และประสิทธิภาพโดยรวมของการเผาไหม้

เถ้าในเชื้อเพลิงแข็งคือสารอนินทรีย์ที่เหลืออยู่หลังจากที่เชื้อเพลิงเผาไหม้หมดแล้ว ไม้มีเถ้าเล็กน้อยมากในขณะที่ถ่านหินมีสูงถึง 10 เปอร์เซ็นต์หรือมากกว่า คุณสมบัติของเถ้ามีความสำคัญมาก ในการออกแบบอุปกรณ์เผาไหม้และอุปกรณ์การถ่ายโอนความร้อน ทั้งนี้เพื่อหาทางลดปัญหาจากการเกิดสแลก (slag fouling) การกัดกร่อน (erosion) และการผุกร่อน (corrosion) ลงได้

ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างปริมาณออกซิเจน น้ำ และเถ้าในเชื้อเพลิงแข็งชนิดต่างๆ

เชื้อเพลิง	ออกซิเจน, % (หลักอ้างอิงแห้ง และไม่คิดเถ้า)	ความชื้น, % (ไม่คิดเถ้า)	เถ้า, % (หลักอ้างอิงแห้ง)
ไม้	45	15-50	0.1-1.0
ฟีด	35	90	0.1-10
ถ่านหินลิกไนต์	25	30	> 5
ถ่านหินบิทูมินัส	5	5	> 5
ถ่านหินแอนทราไซต์	2	4	> 5
เชื้อเพลิงจากขยะ	40	24	10-15

องค์ประกอบของเชื้อเพลิงแข็งจะถูกรายงานในลักษณะตามที่ได้รับมา (as-received basis) หรือในลักษณะหลักอ้างอิงแห้ง (dry basis) หรือในลักษณะหลักอ้างอิงแห้งและไม่คิดเถ้า (dry, ash-free basis) ดังนั้นการระบุองค์ประกอบของเชื้อเพลิงแข็งต้องระบุเงื่อนไขให้ถูกต้องเพราะเกี่ยวข้องกับการคำนวณหาค่าความร้อนทางสูงและทางต่ำโดยตรง ทำให้ช่วยพิจารณาได้อย่างถูกต้องว่าความร้อนแฝงของน้ำที่เกี่ยวข้องในปฏิกิริยาการเผาไหม้เป็นอิสระ (free water) หรือน้ำที่ถูกดูดกลืนในเชื้อเพลิง (bound water) หรือน้ำที่เกิดจากไฮโดรเจนในเชื้อเพลิง

### 2.1.1 เชื้อเพลิงชีวมวล (Biomass)

เชื้อเพลิงชีวมวลส่วนมากเป็นเซลลูโลส ( $C_6H_{10}O_5$ ) และลิกนิน ( $C_{40}H_{44}O_6$ ) สามารถแยกประเภทได้เป็น 4 ประเภท คือ

1. เชื้อเพลิงชีวมวลที่ได้จากไม้ (Forest Biomass) ซึ่งสามารถแยกออกเป็น ไม้เนื้ออ่อน (Soft Wood) และไม้เนื้อแข็ง (Hard Wood) ในเชื้อเพลิงประเภทนี้จะมีปริมาณของลิกนิน (Lignin) อยู่ประมาณ 40 เปอร์เซ็นต์ในไม้เนื้อแข็ง ตัวอย่างของเชื้อเพลิงประเภทนี้ได้แก่ เศษไม้ เปลือกไม้ และขี้เลื่อย
2. เชื้อเพลิงชีวมวลที่ได้จากการเกษตร (Agriculture Biomass) ส่วนใหญ่จะเป็นของเหลือใช้จากการเกษตร เช่น ข้าว ฟางข้าว แกลบ ฟางข้าวโพด ซึ่งสารพวกนี้จะมีปริมาณลิกนินต่ำโดยประมาณ 0-20 เปอร์เซ็นต์
3. เชื้อเพลิงชีวมวลที่ได้จากอุตสาหกรรม (Industrial Biomass) เช่น เชื้อเพลิงที่ได้จากการผลิตน้ำตาล คือ ชานอ้อย นอกจากนี้ยังมีกากสับประรดที่ได้จากโรงงานผลิตสับประรดกระป๋อง เชื้อเพลิงประเภทนี้จะมีปริมาณความชื้นสูงมาก
4. เชื้อเพลิงที่ได้จากของเหลือใช้จากคน (Domestic Waste) ได้แก่ เชื้อเพลิงจากขยะเทศบาล เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



กากใยปาล์ม



ไม้พิน



ซังข้าวโพด



เหง้ามันสำปะหลัง



กะลามะพร้าว



แกลบ

รูปที่ 2.1 ชีวมวลในประเทศไทย

### 2.1.1.1 ชีวมวลจากข้าว

1. แกลบ จากข้อมูลผลผลิตทางการเกษตรของสำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร ในปีเพาะปลูก 2549 – 2550 มีปริมาณการผลิตข้าวทั้งประเทศเท่ากับ 28.61 ล้านตัน และคิดเป็นปริมาณแกลบเท่ากับ 3.95 ล้านตัน โดยมีการนำแกลบเหล่านี้มาใช้งาน คิดเป็นปริมาณรวม 0.86 ล้านตัน หากนำปริมาณแกลบคงเหลือดังกล่าวมาหักด้วยปริมาณการสูญเสียของแกลบ ที่เกิดจากการขัดสี และการฟุ้งกระจายทั้งในระหว่างกระบวนการต่างๆ และการขนส่ง ดังนั้นปริมาณแกลบคงเหลือที่สามารถนำมาใช้งานได้จะมีค่าสุทธิเท่ากับ 3.09 ล้านตัน และคิดเป็นค่าพลังงานความร้อนเทียบเท่า 843 kJ มีประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าเท่ากับ 320 MW

2. ฟางข้าว จากข้อมูลผลผลิตทางการเกษตรของกรมส่งเสริมการเกษตรปีเพาะปลูก 2549 – 2550สามารถประเมินปริมาณฟางข้าว เท่ากับ 34.04 ล้านตัน เมื่อนำมาคิดปริมาณที่เก็บรวบรวมได้ (ฟางข้าว มีประสิทธิภาพในการเก็บรวบรวม 10%) ปริมาณฟางข้าวคงเหลือที่สามารถนำมาใช้งานได้จะมีค่าสุทธิเท่ากับ 3.40 ล้านตัน และคิดเป็นค่าพลังงานความร้อนเท่ากับ 926.10 kJ คิดเป็นประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าเท่ากับ 352 MW

### 2.1.1.2 ชีวมวลจากข้าวโพด

1. ซังข้าวโพด จากข้อมูลผลผลิตทางการเกษตรของกรมส่งเสริมการเกษตร ในปีเพาะปลูก 2549 – 2550 มีปริมาณการผลิตข้าวโพดทั้งประเทศเท่ากับ 4.40 ล้านตัน และคิดเป็นปริมาณซังข้าวโพดเท่ากับ 0.84 ล้านตัน โดยมีการนำชีวมวลเหล่านี้มาใช้ในภาคต่างๆ คิดเป็นปริมาณรวม 74,000 ตัน ทำให้อเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริมาณชีวมวลคงเหลือมีค่าเท่ากับ 0.43 ล้านตัน คิดเป็นค่าพลังงานความร้อนเท่ากับ 124.6 kJ คิดเป็นประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าเท่ากับ 47.31 MW

### 2.1.1.3 ชีวมวลจากอ้อย

1. ยอดและใบอ้อย จากข้อมูลผลผลิตทางการเกษตรของกรมส่งเสริมการเกษตรปี 2549 – 2550 มีปริมาณการผลิตอ้อยทั้งประเทศเท่ากับ 70 ล้านตัน คิดเป็นชีวมวลประเภท ยอดและใบอ้อย เท่ากับ 16.8 ล้านตัน เมื่อนำมาคิดประสิทธิภาพในการเก็บรวบรวม (40 %) จะมีชีวมวลคงเหลือสุทธิ 6.72 ล้านตัน คิดเป็นค่าพลังงานความร้อนเท่ากับ 1,935.7 kJ คิดเป็นประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าเท่ากับ 735 MW

2. กากอ้อย จากข้อมูลผลผลิตทางการเกษตรของกรมส่งเสริมการเกษตรปี 2549 – 2550 สามารถประเมินปริมาณของกากอ้อย เท่ากับ 21 ล้านตัน ชีวมวลประเภทนี้มีการนำไปใช้อย่างกว้างขวางในภาคอุตสาหกรรม โดยปัจจุบันได้ถูกแปรไปเป็นเชื้อเพลิงเพื่อผลิตพลังงานความร้อนในโรงงานผลิตน้ำตาล และบางโรงงานนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตไฟฟ้า จึงทำให้ชีวมวลประเภทนี้หมดไปกับการใช้ในโรงงานเป็นหลัก แม้แต่มีความต้องการใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมอื่นๆแต่ก็ไม่มีวัตถุดิบมาป้อน รวมทั้งโรงงานผลิตน้ำตาลหรือโรงผลิตไฟฟ้าจากกากอ้อยหลายโรงได้เริ่มเสาะหาเชื้อเพลิงประเภทอื่นๆมาใช้ร่วมกับกากอ้อย เนื่องจากภาวะขาดแคลนของกากอ้อย

### 2.1.1.4 ชีวมวลจากมันสำปะหลัง

1. ลำต้นมันสำปะหลัง จากข้อมูลผลผลิตทางการเกษตรของกรมส่งเสริมการเกษตรปี 2549 – 2550 มีปริมาณการผลิตมันสำปะหลังทั้งประเทศเท่ากับ 17.6 ล้านตัน และคิดเป็นปริมาณลำต้นมันสำปะหลัง 2.11 ล้านตัน เมื่อนำปริมาณชีวมวลคงเหลือดังกล่าวมาคิดประสิทธิภาพในการเก็บรวบรวม (40%) จะมีปริมาณชีวมวลสุทธิเท่ากับ 0.84 ล้านตัน และคิดเป็นค่าพลังงานความร้อนเทียบเท่า 198 kJ และคิดเป็นประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าเท่ากับ 75 MW

2. เหน้้ำมันสำปะหลัง จากข้อมูลผลผลิตเหน้้ำมันสำปะหลัง สามารถประเมินปริมาณเหน้้ำมันได้เท่ากับ 1.76 ล้านตัน เมื่อนำปริมาณชีวมวลคงเหลือดังกล่าวมาคิดประสิทธิภาพในการเก็บรวบรวม (40%) จะมีปริมาณชีวมวลสุทธิเท่ากับ 0.7 ล้านตัน และคิดเป็นค่าพลังงานความร้อนเทียบเท่า 131 kJ และคิดเป็นประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าเท่ากับ 50 MW ในปัจจุบันแทบไม่มีการนำเอาเหน้้ำมันสำปะหลังมาใช้ผลิตพลังงาน เนื่องจากการเก็บรวบรวมมีความยากลำบาก และต้นทุนการขนส่งสูง

### 2.1.1.5 ชีวมวลจากปาล์มน้ำมัน

1. ทางใบและก้านปาล์ม จากข้อมูลผลผลิตของกรมส่งเสริมการเกษตรในปีเพาะปลูก 2549 – 2550 มีปริมาณการผลิตปาล์มน้ำมันทั้งประเทศเท่ากับ 8.75 ล้านตัน และคิดเป็นปริมาณทางใบ และก้าน เท่ากับ 2.36 ล้านตัน เมื่อคิดประสิทธิภาพในการเก็บรวบรวม (65%) และการนำไปใช้ประโยชน์ จะมีปริมาณชีวมวลคงเหลือสุทธิ 1.54 ล้านตัน คิดเป็นค่าพลังงานความร้อนเทียบเท่า 481 kJ และคิดเป็นประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าเท่ากับ 183 MW

2. กากใบปาล์ม จากข้อมูลผลผลิตปาล์มน้ำมัน มีปริมาณของกากใบปาล์มที่ได้ เท่ากับ 1.31 ล้านตัน โดยชีวมวลประเภทนี้จะถูกใช้เป็นเชื้อเพลิงในโรงงานอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์ม เมื่อหักปริมาณที่  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถูกใช้งานออกจะมีชีวมวลคงเหลือสุทธิ 0.23 ล้านตัน คิดเป็นค่าพลังงานความร้อน 81.3 kJ และคิดเป็นประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าเท่ากับ 31 MW

3. กะลาปาล์ม จากข้อมูลผลผลิตปาล์มน้ำมัน สามารถประเมินปริมาณกะลาปาล์มได้เท่ากับ 0.53 ล้านตัน โดยมีการใช้ชีวมวลประเภทนี้ในภาคอุตสาหกรรมเพื่อเป็นเชื้อเพลิง คิดเป็นปริมาณรวม 18,000 ตัน และใช้ในประเภทอื่นๆ 147,000 ตัน ดังนั้นจะมีชีวมวลคงเหลือสุทธิ 0.31 ล้านตัน คิดเป็นค่าพลังงานความร้อน 114 kJ และและคิดเป็นประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าเท่ากับ 43 MW

4. ทะลายปาล์ม จากข้อมูลผลผลิตปาล์มน้ำมัน สามารถประเมินปริมาณของทะลายปาล์มได้เท่ากับ 2.01 ล้านตัน โดยมีการนำชีวมวลประเภทนี้ถูกนำมาใช้ในการผลิตไฟฟ้า คิดเป็นปริมาณรวม 80,000 ตัน และใช้ในประเภทอื่นๆ เช่น ทำปุ๋ยและเพาะเห็ด คิดเป็นปริมาณ 160,000 ตัน ดังนั้นจะมีชีวมวลคงเหลือสุทธิ 1.13 ล้านตัน คิดเป็นค่าพลังงานความร้อน 385 kJ และและคิดเป็นประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าเท่ากับ 146 MW

#### 2.1.1.6 ชีวมวลจากไม้ยางพารา

1. ชี้อ้อยและเศษไม้ยางพารา จากรายงานของสถาบันวิจัยยางพารา ทำให้ทราบว่าในแต่ละปีจะต้นยางพาราที่มีอายุเกิน 25 ปี ซึ่งครบรอบที่จะต้องทำการตัดฟัน คิดเป็นพื้นที่ยางพาราที่ถูกตัดฟัน 500,000 ไร่ต่อปี จะได้ปริมาณของไม้ยางพารา 200 ล้านตัน ซึ่งไม้ยางพาราที่ถูกตัดจะนำไปเข้ากระบวนการแปรรูปไม้เพื่อผลิตเฟอร์นิเจอร์ ดังนั้นจะมีชีวมวลที่ได้ภายหลังกระบวนการผลิต คิดเป็นเศษไม้ 3.6 ล้านตัน และชี้อ้อย 8 ล้านตัน เมื่อหักปริมาณที่ถูกนำไปใช้ประโยชน์ จะมีเศษไม้คงเหลือ 3.55 ล้านตัน คิดเป็นพลังงานความร้อน 1,862 kJ และพลังงานไฟฟ้า 707 MW ในส่วนของชี้อ้อยจะมีปริมาณคงเหลือ 1,037 kJ และพลังงานไฟฟ้า 394 MW

#### 2.1.1.7 ชีวมวลจากไม้ยูคาลิปตัส

1. ไม้ยูคาลิปตัสจะถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมกระดาษเป็นส่วนใหญ่ โดยผลผลิตของไม้ยูคาลิปตัสทั้งประเทศ มีปริมาณรวม 6.8 ล้านตันต่อปี มีชีวมวลเกิดขึ้น คือ ไม้ฟืนและเปลือกไม้ โดยไม้ฟืนจะถูกนำไปใช้ในการผลิตไฟฟ้า สำหรับเปลือกไม้จะนำไปใช้เพื่อเป็นเชื้อเพลิงในการให้ความร้อน แต่ยังมีปริมาณการใช้งานน้อย เมื่อประเมินจำนวนของชีวมวลคงเหลือ พบว่าจะมีไม้ฟืนคงเหลือเท่ากับ 0.57 ล้านตัน คิดเป็นพลังงานความร้อน 167 kJ และพลังงานไฟฟ้า 63.5 MW สำหรับเปลือกไม้ยูคาลิปตัสมีปริมาณคงเหลือ 0.61 ล้านตัน คิดเป็นพลังงานความร้อน 186 kJ และพลังงานไฟฟ้า 70.5 MW

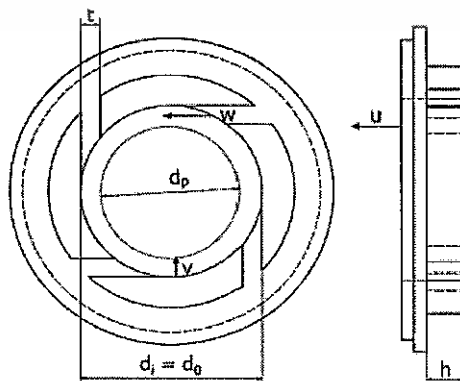
ตารางที่ 2.2 แสดงค่า HHV และ LHV ของเชื้อเพลิงชีวมวล

คุณสมบัติ	Moisture (%)	Ash (%)	Volatile Matter (%)	Fixed Carbon (%)	HHV (kJ/kg)	LHV (kJ/kg)
แกลบ	12.00	12.65	56.46	18.88	14,755	13,517
ฟางข้าว	10.00	10.39	60.70	18.90	13,650	12,330
ชานอ้อย	50.73	1.43	41.98	5.86	9,243	7,368
ใบอ้อย	9.20	6.10	67.80	16.90	16,794	15,479
ไม้ยางพารา	45.00	1.59	45.70	7.71	10,365	8,600
เส้นใยปาล์ม	38.50	4.42	42.68	14.39	13,127	11,400
กะลาปาล์ม	12.00	3.50	68.20	16.30	18,267	16,900
ทะลายปาล์ม	58.60	2.03	30.46	8.90	9,196	7,240
ต้นปาล์ม	48.40	1.20	38.70	11.70	9,370	7,556
ทางปาล์ม	78.40	0.70	16.30	4.60	3,908	1,760
ซังข้าวโพด	40.00	0.90	45.42	13.68	11,298	9,615
ลำต้นข้าวโพด	41.70	3.70	46.46	8.14	11,704	9,830
เหง้ำมันสำปะหลัง	59.40	1.50	31.00	8.10	7,451	5,494
เปลือกไม้ยูคาลิปตัส	60.00	2.44	28.00	9.56	6,811	4,917

## 2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

### 2.2.1 ตัวเลขการหมุนวน (Swirl number)

เชื้อเพลิงชนิดเม็ดนั้นมีข้อเสียคือพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงมีค่าน้อยทำให้ การเผาไหม้ที่เกิดขึ้นนั้นไม่สมบูรณ์ จึงจำเป็นต้องออกแบบการนำอากาศเข้าห้องเผาไหม้ให้มีลักษณะหมุนวน หากตัวเลขการหมุนวนมีค่ามากก็จะทำให้อัตราส่วนความหนืดแบบปั่นป่วน(Turbulence viscosity ratio)มากขึ้นตามไปด้วย ซึ่งเราได้ทำการออกแบบทางเข้าอากาศลำดับที่2(Secondary air channel)มีลักษณะดังภาพ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนรูปที่ 2.2 ลักษณะโครงสร้างของ swirl generator ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถคำนวณค่าตัวเลขการหมุนวน( $S_g$ )ได้ดังสมการที่ 2.1

$$S_g = \frac{\pi \cdot (r_0^2 - r_p^2) \cdot (r_f - \frac{t}{2})}{n \cdot t \cdot h \cdot r_0} \quad (2.1)$$

ซึ่งตัวเลขหมุนวนนั้นแบ่งได้3ช่วงคือ

1. หมุนวนแบบอ่อน:  $S_g < 0.6$

2. หมุนวนแบบวิกฤต:  $S_g = 0.6$

3. หมุนวนแบบรุนแรง:  $S_g > 0.6$

ข้อดี: ในการใช้งานจริงนั้น การเผาไหม้ของอากาศส่วนเกินที่ถูกเพิ่มขึ้นจากปริมาณอากาศทางทฤษฎีที่ต้องใช้ในการเผาไหม้ของสารชีวมวล ถ้าอัตราการเติมอากาศส่วนเกินสูงเกินไปจะทำให้อุณหภูมิในการเผาไหม้ลดต่ำลงและประสิทธิภาพในการเผาไหม้ลดต่ำลงแต่ทว่าเชื้อเพลิงชนิดเม้นนั้นต้องการอากาศส่วนเกินมากกว่าเชื้อเพลิงชนิดอื่น ทำให้จำเป็นต้องมีการออกแบบอากาศให้มีความหมุนวนเพื่อเพิ่มความปั่นป่วนที่มากเพียงพอเพื่อลดปริมาณอากาศส่วนเกินที่ใช้ในการเผาไหม้ อีกทั้งทำให้การสูญเสียความร้อนเนื่องจากอากาศส่วนเกินลดลง

ข้อเสีย: หากตัวเลขการหมุนวนมีค่ามากเกินไปจะทำให้เกิดความดันตก(Pressure drop)ในหัวเผาได้ ซึ่งส่งผลต่อประสิทธิภาพการเผาไหม้

### 2.2.2. อัตราส่วนระหว่างความหนืดของการไหลแบบปั่นป่วน(Turbulent viscosity ratio, $\beta$ )

เพื่อที่จะวัดค่าการผสมภายในห้องเผาไหม้นั้น เราจะใช้ค่าTurbulent viscosity ratio ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างความหนืดของการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent Viscosity,  $\mu_{turb}$ ) กับความหนืดของการไหลแบบราบเรียบ (Laminar Viscosity,  $\mu_{lam}$ ) เป็นดรรชนีวัดการผสมดังสมการที่ 2.2

$$\beta = \frac{\mu_{turb}}{\mu_{lam}} \quad (2.2)$$

ซึ่งค่า Turbulent viscosity ratio ที่วัดได้นี้ เกิดขึ้นเนื่องจากผลของความหนืดของการไหลแบบปั่นป่วนมีค่าสูงขึ้นตามความแรงของกระแสไหลหมุนวนที่ทำให้เกิดความเร็วในแนวสัมผัสมากขึ้น เป็นการเพิ่มแรงหนีศูนย์กลางทำให้บริเวณการไหลวนขยายตัวออกตามแนวรัศมี และมีขนาดใหญ่ขึ้นตามความยาว นั้นหมายความว่าบริเวณที่เกิดการผสมกันได้ดีมีขนาดใหญ่ขึ้นนั่นเอง ถ้าบริเวณใดมีค่า Turbulent viscosity ratio มากขึ้นก็จะทำให้บริเวณนั้นเกิดการผสมกันดีขึ้น และสามารถวัดการผสมของทั้งห้องเผาไหม้ได้โดยการหาค่าเฉลี่ยของค่าTurbulent viscosity ratio ทั้งห้องเผาไหม้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.2.3 วัสดุที่มีความพรุน (Porous media)

ความพรุน (porosity,  $\epsilon$ ) คือ อัตราส่วนร้อยละของปริมาตรช่องว่างในเนื้อวัสดุพรุน (pore space,  $V_p$ ) กับปริมาตรรวม (bulk volume,  $V_b$ ) ของวัสดุพรุน (porous material) เป็นต้น ดังสมการที่ 2.3

$$\epsilon = \frac{V_b - V_s}{V_b} \times 100\% \quad (2.3)$$

โดยที่  $V_s$  คือ ปริมาตรเนื้อของแข็ง (solid volume) ในวัสดุพรุน ความพรุนเป็นคุณสมบัติทางกายภาพที่สำคัญของวัสดุพรุน ซึ่งนอกจากจะมีความสัมพันธ์กับปริมาตรรวมและความหนาแน่นรวม (bulk density) ของวัสดุพรุนแล้ว (Mohsenin, 1986) ยังบ่งบอกถึงความสามารถในการถ่ายเทความร้อนและความต้านทานการไหลของอากาศผ่านวัสดุ Jaeger et al. (2007) กล่าวว่าความพรุนของหินมีส่วนช่วยลดแรงสั่นสะเทือนในชั้นหินใต้ดิน 2 ในผลิตภัณฑ์อาหาร ความพรุนเป็นคุณสมบัติที่มีผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ 2 เช่น พื้นผิวเนื้อสัมผัส 2 กล 2 ความรู้สึกรับรตของผู้บริโภคและการดูดซับน้ำมันของอาหารระหว่างการปรุงจากการทอดและการเก็บรักษา (Petrauskas, 2007; Adedeji and Ngadi, 2011) การอบแห้งเมล็ดธัญพืชโดยทั่วไปใช้วิธีการเป่าลมร้อนผ่านชั้นเมล็ด ซึ่งขนาดของช่องว่างระหว่างเมล็ดธัญพืช (ความพรุน) เป็นปัจจัยที่มีผลต่อการใช้พลังงานของพัดลมและอัตราการถ่ายเทความร้อนระหว่างลมและเมล็ดธัญพืช (Chung and Lee, 1985; Raffray and Pulsifer, 2003)

การวัดปริมาตรของแข็งหรือปริมาตรช่องว่างของวัสดุพรุนเป็นขั้นตอนสำคัญในการหาค่าความพรุน วิธีการวัดปริมาตรทั้ง 2 นี้สามารถทำได้หลายวิธี วิธีที่ใช้หลักการพื้นฐานอย่างง่าย เช่น การวัดขนาด (dimension) โดยตรง หรือการแทนที่ด้วยของเหลว (liquid displacement method) (ASTM, 2005) มีข้อดีคือ ไม่ซับซ้อนและมีค่าใช้จ่ายต่ำ แต่มีข้อจำกัดในแง่ความละเอียดถูกต้องของการวัดและชนิดของวัสดุพรุนที่สามารถวัดได้ (Trefethen, 1969) วิธีที่ใช้เทคนิคและอุปกรณ์ที่มีความซับซ้อน เช่น การใช้วิธีอัลตราโซนิก (ultrasonic) (Petrauskas, 2007) หรือการใช้คุณสมบัติการเปลี่ยนแปลงของความจุไฟฟ้า (Matko, 2003) มีข้อจำกัดในแง่ของค่าใช้จ่ายที่สูงขึ้น วิธีการใช้การขยายตัวของก๊าซ (gas expansion) โดยใช้อุปกรณ์ที่เรียกว่า gas pycnometer เป็นวิธีที่ได้รับความนิยมมากวิธีหนึ่ง ซึ่งได้รับการพัฒนาทั้งทางด้านอุปกรณ์และเทคนิควิธีการจากนักวิจัยหลายกลุ่ม (Washburn and Bunting, 1922; Beranek, 1942; Champoux et al., 1991; Leclaire et al., 2003; Tamari, 2004; Tamari and Aguilar-Chávez, 2004; Salissou and Panneton, 2007) ดังนั้นการพัฒนาวิธีการวัดความพรุนของวัสดุโดยการเปรียบเทียบอัตราการลดลงของความดัน ซึ่งเป็นวิธีที่มีหลักการวัดความพรุนที่แตกต่างจากวิธีอื่นๆ ที่มีอยู่ ในปัจจุบัน โดยมีจุดประสงค์ดังนี้

1. ออกแบบและเสนอหลักการชุดทดสอบวัดความพรุนของวัสดุโดยการเปรียบเทียบอัตราการลดลงของความดัน
2. ทดสอบประสิทธิภาพเบื้องต้นของวิธีการวัดความพรุนโดยการเปรียบเทียบอัตราการลดลงของความดัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.2.3.1 วัสดุที่มีความพรุนในเตาเผา

วัสดุพรุน คือ ของแข็งที่ภายในเนื้อวัสดุมีช่องว่างหรือรูพรุนที่เชื่อมต่อกันเป็นโครงข่าย (Nield & Bejan 2006) วัสดุพรุนตามธรรมชาติ เช่น ไม้ เนื้อเยื่อปอดของมนุษย์ หินทราย และรังผึ้ง (แสดงดังภาพที่ 1) สมบัติที่สำคัญของวัสดุพรุนคือ มีพื้นที่ผิวต่อปริมาตรสูง (Area to volume ratio) ทำให้มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเท ความร้อนโดยการพาความร้อนสูง อีกทั้งวัสดุพรุนเป็นของแข็งที่มีค่าการนำความร้อนและการแผ่รังสีความร้อนสูงทำให้วัสดุพรุนสามารถเปลี่ยนรูปพลังงานความร้อนได้ดีระหว่างความร้อนในรูปของการพาและการแผ่รังสีจึงกล่าวได้ว่าวัสดุพรุนเป็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (Heat Exchanger) ที่มีประสิทธิภาพ สูงและมีขนาดกะทัดรัด อย่างไรก็ตามแม้ว่าวัสดุพรุนจะมีอยู่มากมายหลายชนิด แต่วัสดุพรุนที่สามารถนำมา ประยุกต์ใช้กับงานที่เกี่ยวข้องกับการเผาไหม้ ต้องทำมาจากวัสดุที่มีความต้านทานอุณหภูมิสูง (High temperature resistant) และมีอายุการใช้งานยาวนาน สามารถทนทานต่อการแตกร้าวเนื่องจากการยึดหรือหดของ โครงสร้างวัสดุพรุนในช่วงเริ่มทำงาน (Startup) และ ช่วงดับเตา (Shutdown)

ตารางที่ 2.2 แสดง คุณสมบัติของ ซิลิคอนคาร์ไบด์ (SiC) อะลูมินาออกไซด์ (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) และเซอร์โคเนียออกไซด์ (ZrO<sub>2</sub>) (Wongwatcharaphon, 2011)

สมบัติ	หน่วย	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiC	ZrO <sub>2</sub>
Maximum use temperature in air	°C	1900	1650	1800
Thermal expansion coefficient (20-1000 °C)	10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup>	8	4-5	10-13
Thermal conductivity at 20 °C	W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>	20-30	80-150	2-5
Thermal conductivity at 1000 °C	W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>	5-6	20-50	2-4
Maximum use temperature in air	°C	1900	1650	1800
Thermal expansion coefficient (20-1000 °C)	10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup>	8	4-5	10-13
Thermal conductivity at 20 °C	W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>	20-30	80-150	2-5
Thermal conductivity at 1000 °C	W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>	5-6	20-50	2-4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วัสดุพื้นฐานหลัก 3 ชนิดที่ใช้ในการผลิตเซรามิกที่ใช้สำหรับเป็นหัวเผาวัสดุพูนได้แก่ ซิลิคอนคาร์ไบด์ (SiC) อะลูมินาออกไซด์ (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) และเซอร์โคเนียมออกไซด์ (ZrO<sub>2</sub>) โดยที่ อะลูมินาออกไซด์ เป็นวัสดุที่ได้รับความนิยมที่สุดในการนำไปใช้เป็นหัวเผาวัสดุพูนในรูปแบบของ Packed bed (Afsharvahid et al., 2003; Trimis & Durst, 1996; Xiong et al., 1995) ซิลิคอนคาร์ไบด์มักนิยมนำไปใช้ผลิตเป็นหัวเผาวัสดุพูนในนำความร้อนและสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนที่สูงกว่าจึงได้เปรียบในแง่ของการถ่ายเทความร้อนภายในวัสดุพูน (Afsharvahid, et al., 2008; Alavandi & Agrawal, 2008) ส่วน เซอร์โคเนียม ออกไซด์ เหมาะกับการใช้งานที่มีอุณหภูมิสูงๆ เนื่องจากมีความต้านทานอุณหภูมิสูงที่สุด แต่กลับมีค่าการนำความร้อนที่ต่ำที่สุดในบรรดาวัสดุทั้ง 3 ชนิดนี้ (Cannon et al., 2000; DePoorter et al., 1992) ซึ่งการ จะเลือกวัสดุใดไปใช้งานนั้นยังต้องคำนึงถึงปัจจัยอื่นที่มีผลต่อการเผาไหม้ เช่น ชนิดของเชื้อเพลิง อัตราส่วน สมมูล ภาวะทางความร้อน อุณหภูมิการเผาไหม้ ขนาดและรูปร่างของหัวเผา และตำแหน่งของเปลวไฟที่ต้องการเป็นต้น เนื่องจากรูปร่างและคุณสมบัติเชิงความร้อนของวัสดุพื้นฐานที่นำมาใช้เป็นหัวเผาวัสดุพูนส่งผลโดยตรงกับโครงสร้างทางความร้อนของระบบการเผาไหม้ซึ่งสมบัติเชิงความร้อนที่สำคัญของวัสดุเหล่านี้ได้ถูกรวบรวมไว้ในตารางที่ 1 เพื่อใช้เป็นข้อมูลประกอบการตัดสินใจในการเลือกใช้งานและออกแบบ

#### 2.2.4 ความสามารถในการซึมผ่าน (Permeability)

การซึมผ่าน(Permeability) โดยอากาศสามารถซึมผ่านไปได้ โดยความสามารถในการซึมผ่านสามารถคำนวณได้ ดังสมการที่ 2.4

$$k = \frac{Q \mu t}{\Delta P} \quad (2.4)$$

### 2.3 ปฏิกริยาเผาไหม้

ปฏิกริยาเผาไหม้เป็นปฏิกริยาการรวมตัวกันของเชื้อเพลิงกับออกซิเจนอย่างรวดเร็ว พร้อมกับเกิดการลุกไหม้และการคายความร้อน ในการเผาไหม้ส่วนใหญ่จะไม่ใช้ออกซิเจนล้วน ๆ เพราะสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายมาก แต่จะใช้อากาศแทน โดยอากาศจะมีแก๊สออกซิเจนและแก๊สไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบหลัก ส่วนแก๊สอื่นมีปะปนอยู่น้อยมาก (ในอากาศมีแก๊สออกซิเจนประมาณร้อยละ 21 และแก๊สไนโตรเจนร้อยละ 79 โดยปริมาตรหรือแก๊สออกซิเจนประมาณร้อยละ 23 และแก๊สไนโตรเจนร้อยละ 77 โดยน้ำหนัก) ดังแสดงในตารางที่ 2.6

เชื้อเพลิงชีวมวลส่วนใหญ่ประกอบด้วยคาร์บอน (C), ไฮโดรเจน (H), ออกซิเจน (O), และธาตุอื่น ๆ ปะปนอยู่บ้างเช่น ไนโตรเจน (N) และกำมะถัน (S) ดังนั้นเมื่อนำเชื้อเพลิงชีวมวลไปเผาไหม้จะเกิดปฏิกริยาเคมีดังแสดงด้วยสมการต่อไป

ตารางที่ 2.3 องค์ประกอบของอากาศที่ใช้ในการสันดาป

องค์ประกอบ	ร้อยละองค์ประกอบ	
	โดยปริมาตร	โดยมวล
ออกซิเจน (O <sub>2</sub> )	21	23
ไนโตรเจน (N <sub>2</sub> )	79	77
O <sub>2</sub> : N <sub>2</sub>	1 : 3.76	1 : 3.35

การเผาไหม้สมบูรณ์ (Completed Combustion) ซึ่งเป็นการสันดาปของเชื้อเพลิงกับออกซิเจนจนหมด ในกรณีนี้ คาร์บอนจะเผาไหม้กลายเป็น คาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) ไฮโดรเจนจะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนกลายเป็นไอน้ำ (H<sub>2</sub>O) และถ้าในเชื้อเพลิงมีกำมะถันอยู่ ก็จะเผาไหม้กลายเป็น ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO<sub>2</sub>) เป็นต้น ดังสมการที่ 2.4-2.6



การเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ (Incomplete Combustion) เป็นการสันดาปที่เชื้อเพลิงเผาไหม้ไม่หมด หรือมีออกซิเจนไม่เพียงพอสำหรับการสันดาป มีผลทำให้มี คาร์บอน (C) ไฮโดรเจน (H) คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และอาจมีเชื้อเพลิงที่เหลือปะปนออกมากับผลที่ได้จากการเผาไหม้สาเหตุที่ทำให้เกิดการสันดาปไม่สมบูรณ์มีหลายสาเหตุ เช่นมีปริมาณออกซิเจนไม่เพียงพอกับปริมาณเชื้อเพลิง หรือการที่เชื้อเพลิงกับออกซิเจนมีการผสมกันไม่ดีพอ และอาจเกิดจากการที่สารที่ได้จากการเผาไหม้มีการแตกตัวที่อุณหภูมิสูง เป็นต้น ดังสมการที่ 2.7



สารผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นในปฏิกิริยาการเผาไหม้ จะมีเสถียรภาพสูงเกิดขึ้นในกรณีที่มีการเผาไหม้สมบูรณ์ส่วนในกรณีที่มีอากาศมากเกินไปประกอบกับอุณหภูมิสูงจากการเผาไหม้มากเกินไป ก็จะทำให้ไนโตรเจนในแก๊สผลิตภัณฑ์เปลี่ยนรูปไปเป็นออกไซด์ของไนโตรเจน (NO<sub>x</sub>) ซึ่งเป็นสารพิษ

### 2.3.1 อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง (Air-fuel Ratio)

เชื้อเพลิงแต่ละชนิดนั้นมีอัตราส่วนอากาศและเชื้อเพลิงในการเผาไหม้ได้อย่างสมบูรณ์แตกต่างกันโดยอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงก็คืออัตราส่วนระหว่างมวลของอากาศต่อมวลของเชื้อเพลิงในระหว่างการสันดาป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยทั่วไปแบ่งออกเป็นอัตราส่วนอากาศกับเชื้อเพลิงทางทฤษฎี ( $A/F_{th}$ ) และอัตราส่วนอากาศกับเชื้อเพลิงจริง ( $A/F_{act}$ ) โดยที่  $A/F_{th}$  คำนวณตามสมการที่ 2.8

$$A / F_{theore(mass)} = \frac{m_{air}}{m_{fuel}} \quad (2.8)$$

สิ่งสำคัญที่สุดคือต้องทราบปริมาณออกซิเจนหรืออากาศที่ต้องจ่ายสำหรับการเผาไหม้ที่สมบูรณ์การหาอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงจะคำนวณมาจากปฏิกิริยาการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ของเชื้อเพลิงและพลังงาน ที่ได้จะเป็นพลังงานสูงสุด ดังนั้นปริมาณอากาศน้อยที่สุดที่ต้องใช้ในกระบวนการสันดาป เพื่อทำให้เกิดกระบวนการสันดาปสมบูรณ์ของเชื้อเพลิงจะเรียกว่า อากาศตามทฤษฎี (Theoretical air หรือ Stoichiometric air) ซึ่งเป็นตัวบ่งบอกว่ามีปริมาณอากาศที่ใช้จริงเป็นกี่เปอร์เซ็นต์ของอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงในทางทฤษฎี คำนวณได้ตามสมการที่ 2.9

$$\%Theoretical\ air = \frac{A/F_{actual}}{A/F_{theore}} \times 100 \quad (2.9)$$

สำหรับกระบวนการสันดาปจริงอากาศที่ต้องการเชิงทฤษฎีนั้นไม่เพียงพอที่จะทำให้เกิดการสันดาปได้อย่างสมบูรณ์นอกจากนั้นยังจะก่อให้เกิดแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์หรืออะตอมคาร์บอนที่เผาไหม้ไม่หมด ทำให้พลังงานความร้อนน้อยกว่าการเผาไหม้สมบูรณ์ดังนั้นเพื่อป้องกันการเกิดปัญหาดังกล่าวจึงจำเป็นต้องป้อนอากาศให้เกินกว่าความต้องการเชิงทฤษฎีปริมาณอากาศที่เกินนี้เรียกว่าอากาศส่วนเกิน คำนวณได้จากการวัดปริมาณอากาศและเชื้อเพลิงที่ส่งเข้าสันดาปจริงๆ ปริมาณอากาศและเชื้อเพลิงที่ใช้ตามทฤษฎีตามสมการที่ 2.10

$$\%Excess\ Air = \frac{A/F_{actual} - A/F_{theore}}{A/F_{theore}} \times 100 \quad (2.10)$$

### 2.3.2 การผสมกันระหว่างเชื้อเพลิงกับออกซิเจน (Mixing)

เชื้อเพลิงที่เป็นของแข็งจะเกิดการผสมกันกับออกซิเจนแบบไม่เป็นเนื้อเดียวกันทำให้มีพื้นที่ผิวของเชื้อเพลิงสัมผัสกับออกซิเจนถูกจำกัด ดังนั้นควรจะมีพื้นที่ผิวสำหรับการเกิดปฏิกิริยาให้มากที่สุด ซึ่งอาจทำได้โดยการบดลดขนาดเชื้อเพลิงเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวให้มากขึ้นหรือการทำให้แก๊สในเตาเผาเกิดการเคลื่อนไหวย่างรุนแรงหรือปั่นป่วน เนื่องจากความปั่นป่วนจะช่วยทำลายเถ้าที่เกาะอยู่ที่ผิวเชื้อเพลิงให้หลุดออกไป เพื่อให้ ออกซิเจนเข้าทำปฏิกิริยาได้ง่ายขึ้น นอกจากนี้การที่อนุภาคเชื้อเพลิงสัมผัสกับโมเลกุลออกซิเจนได้อย่างทั่วถึงยังมีผลทำให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ยิ่งขึ้นอีกด้วย

### 2.3.3 อุณหภูมิ (Temperature)

การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงแปรผันตามอุณหภูมิ เริ่มแรกจะเกิดขึ้นเป็นแบบช้า ๆ และเกิดต่อเนื่องไปเรื่อยๆ ความร้อนที่ได้จะไปเพิ่มอุณหภูมิของเชื้อเพลิงและอากาศให้สูงขึ้น ทำให้อัตราการเผาไหม้เพิ่มขึ้น ดังนั้นปริมาณความร้อนจากภายนอกที่เพียงพอสำหรับการเริ่มปฏิกิริยาเป็นสิ่งที่จำเป็นสำหรับการเผาไหม้ และจะทำให้ปฏิกิริยาคำเนินต่อไปได้ ปกติแล้วในการเผาไหม้นั้นต้องการให้มีอุณหภูมิสูงเท่าที่จะเป็นไปได้แต่อาจมีข้อจำกัดที่สำคัญ คือ ชนิดของเชื้อเพลิงซึ่งจะให้อุณหภูมิได้อย่างจำกัดที่ปริมาณแตกต่างกัน นอกจากนี้การที่อุณหภูมิสูงมากเกินไปอาจทำให้เกิดสารประกอบออกไซด์ของไนโตรเจนซึ่งเป็นแก๊สพิษ และเกิดแอสล็กเกาะติดผนังเตาทำให้ลดความสามารถในการถ่ายเทความร้อนและก่อให้เกิดปัญหาการกัดกร่อนที่ผนังเตาได้

### 2.3.4 เวลาที่เชื้อเพลิงอยู่ในห้องเผาไหม้ (Time)

เวลาที่เชื้อเพลิงอยู่ในเตาจำเป็นจะต้องมากกว่าเวลาที่เชื้อเพลิงต้องการเพื่อการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ แต่ในทางปฏิบัติเวลาที่ทำให้เกิดการสันดาปที่สมบูรณ์นั้นต้องยาวนานมาก ซึ่งสามารถแก้ปัญหาได้โดยการเพิ่มขนาดของห้องเผาไหม้เพื่อให้เชื้อเพลิงอยู่ในห้องเผาไหม้ได้นานมากขึ้น แต่จะส่งผลไปถึงเงินลงทุนที่สูงขึ้นด้วย

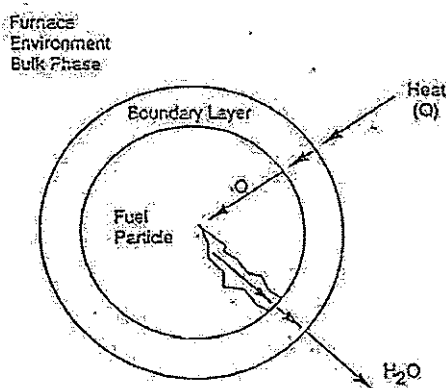
### 2.3.5 กลไกการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง

เชื้อเพลิงของแข็งที่ใช้กันอยู่ทั่ว ๆ ไปมีหลายชนิด เช่น ถ่านไม้ ฟืน ถ่านหิน แกลบ ชี้เลื่อย เป็นต้น กระบวนการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งจะแตกต่างกับการเผาไหม้เชื้อเพลิงเหลวหรือเชื้อเพลิงที่เป็นแก๊ส เนื่องจากคุณสมบัติของเชื้อเพลิงแข็งนั้นเป็นสารประกอบที่มีส่วนผสมของสารต่างๆมากมาย และผสมกันอยู่อย่างไม่เป็นเนื้อเดียวกัน อีกทั้งสัดส่วนของสารต่างๆภายในเชื้อเพลิงแข็งก็ไม่แน่นอน นอกจากนี้การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงยังขึ้นอยู่กับขนาดอนุภาคเชื้อเพลิงแข็งด้วย เชื้อเพลิงแข็งประกอบด้วยสารต่างๆ ทั้งที่เผาไหม้ได้และเผาไหม้ไม่ได้ สารที่เผาไหม้ไม่ได้เรียกว่า สารเฉื่อย ขั้นตอนหรือกระบวนการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งในเตาเผา นั้น จะมีกระบวนการในการเผาไหม้อนุภาคเชื้อเพลิงตามลักษณะขั้นตอนดังนี้

#### 2.3.5.1 การทำแห้ง (Drying)

เป็นกระบวนการที่ใช้กำจัดความชื้นที่มีอยู่ในอนุภาคของเชื้อเพลิงชีวมวลขณะเริ่มต้นรับความร้อนจากการเผาไหม้ในเตาเผา ปฏิกิริยาการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งเริ่มจากการที่อากาศเข้าไปผสมกับเชื้อเพลิงเกิดกระบวนการเผาไหม้ จากรูปที่ 2.3 ออกซิเจนจากอากาศจะเข้าไปทำปฏิกิริยาสัมผัสกับผิวของคาร์บอนและเกิดปฏิกิริยาของคาร์บอนดังต่อไปนี้





รูปที่ 2.3 ขั้นตอนการระเหยไอน้ำและการให้ความร้อนแก่อนุภาคเชื้อเพลิง

ที่มา : David A. Tillman (1991)

### 2.3.5.2 การปล่อยสารระเหย (Devolatilization)

เป็นกระบวนการสลายตัวของชีวมวลแล้วทำให้เกิดเป็นสารระเหย หลังจากปฏิกิริยาเกิดขึ้นแล้ว จะได้ผลิตภัณฑ์ไพโรไลซิส ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้ต้องทำปฏิกิริยาต่อไปอีก โดยจะมีสถานะเป็นแก๊สและของแข็ง แก๊สจะประกอบไปด้วย  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  และสารประกอบไฮโดรคาร์บอนอีกเล็กน้อย รอบ ๆ อนุภาคของเชื้อเพลิงเมื่อปริมาณสารระเหยต่อพื้นที่ผิวของอนุภาคน้อย ออกซิเจนจะทำปฏิกิริยากับแก๊สเกิดการเผาไหม้แบบผสมแต่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน ในทางตรงกันข้ามถ้าหากปริมาณสารระเหยต่อพื้นที่ผิวมาก จะทำให้ออกซิเจนไม่สามารถเข้าทำปฏิกิริยากับแก๊ส เป็นผลทำให้ไม่เกิดปฏิกิริยาหรือเกิดได้น้อย เพราะฉะนั้นต้องใช้เวลาเพื่อให้ปริมาณของสารระเหยเจือจางลงจึงจะเกิดปฏิกิริยา ส่วนของแข็งประเภทถ่านจะไม่เกิดปฏิกิริยา การเผาไหม้ในเวลานั้นเนื่องจากแก๊สจากกระบวนการไพโรไลซิสจะป้องกันไม่ให้ออกซิเจนเข้าทำปฏิกิริยาพร้อมกันนั้นอุณหภูมิก็ไม่สูงพอที่จะเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ หลังจากแก๊สต่าง ๆ เกิดปฏิกิริยาจะถ่ายเทความร้อนให้กับคาร์บอนให้มีอุณหภูมิสูงถึงจุดเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ และมีขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาดังต่อไปนี้



### 2.3.5.3 การจุดติดไฟของสารระเหย (Ignition of Volatile)

เป็นกระบวนการที่ทำให้เกิดการจุดประกายของสารระเหยที่ถูกปล่อยออกมา และอยู่ล้อมรอบอนุภาคของเชื้อเพลิงชีวมวล

### 2.3.5.4 การเผาไหม้สารระเหย (Combustion of Volatile)

เป็นกระบวนการเผาไหม้สารระเหยในอนุภาคของเชื้อเพลิงชีวมวล ทำให้เกิดเปลวไฟขึ้นรอบ ๆ อนุภาคเชื้อเพลิงชีวมวล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.5.5 การจุดติดไฟของถ่านชาร์ (Ignition of Char Particle)

เป็นกระบวนการจุดประกายบนผิวหน้าของถ่านที่เหลือ โดยเริ่มจากเป็นจุดเล็กๆ ที่ผิวด้านนอกแล้วค่อยๆ ขยายออกไปจนเกิดทั่วทั้งอนุภาค

2.3.5.6 การเผาไหม้ถ่านชาร์ (Combustion of Residual Char Particle)

เป็นกระบวนการเผาไหม้ของอนุภาคของถ่านที่เหลือหลังจากที่สารระเหยระเหยออกมาจากอนุภาคของเชื้อเพลิงชีวมวลบางส่วนหรือหมดแล้ว เมื่อเผาไหม้หมดจะเหลือเป็นขี้เถ้า

2.4 สมการควบคุม

พฤติกรรมการไหลของของไหลสามารถอธิบายได้ด้วยสมการหลัก 3 สมการคือ สมการกฏทรงมวล (Continuity Equation) สมการโมเมนตัม (Momentum Equation) และสมการพลังงาน (Energy Equation) สำหรับการไหลแบบปั่นป่วนจะสามารถอธิบายพฤติกรรมของการไหลได้โดยใช้แบบจำลองความปั่นป่วน งานวิจัยนี้สนใจแบบจำลองความปั่นป่วนชนิด Standard, RNG, Realizable  $k-\epsilon$  และ Standard  $k-\omega$  สำหรับการไหลที่มีอนุภาคสามารถอธิบายได้โดยเพิ่มสมการอัตราส่วนโดยมวลของอนุภาค (Conservation for Mass Fraction of Particles) เข้าไปในการคำนวณ

สมการกฏทรงมวล (Continuity Equation)

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho v_j) = 0 \tag{2.16}$$

สมการโมเมนตัม (Momentum Equation)

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho v_j v_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu_t \left( \frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho \delta_{ij} k \right] - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \rho g_i \tag{2.17}$$

สมการอัตราส่วนโดยมวลของอนุภาค (Conservation for Mass Fraction of Particles)

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho v_j Y_p) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\mu_t}{\sigma_Y} \frac{\partial Y_p}{\partial x_j} \right) \quad \text{โดยที่} \quad \sigma_Y = 0.7 \tag{2.18}$$

สมมติฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์อนุภาค

อนุภาคมีขนาดเล็กมากจึงไม่คิดผลของแรงโน้มถ่วง

อัตราส่วนโดยปริมาตรของอนุภาคมีค่าน้อยเพียงพอที่จะทำให้เกิดการชนกันระหว่างอนุภาค จึงไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมระหว่างอนุภาคกับอนุภาค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.4.1 แบบจำลองความปั่นป่วนชนิด $k-\varepsilon$

แบบจำลองความปั่นป่วนชนิดนี้มี 3 แบบคือ Standard, RNG และ Realizable โดยที่แต่ละแบบจะมีสมการ  $k$  เหมือนกัน ต่างกันตรงสมการ  $\varepsilon$  ซึ่งในแต่ละแบบจะมีการกำหนดตัวแปรและค่าคงที่ต่างกันไป

สมการพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน (Turbulent Kinetic Energy Equation)

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho v_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + P - \rho \varepsilon - \rho \varepsilon_p \quad (2.19)$$

สมการอัตราการแพร่ของพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน (Dissipation Rate Equation)

Standard  $k-\varepsilon$  Model [3]

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho v_j \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + (c_{\varepsilon 1} P - c_{\varepsilon 2} \rho \varepsilon) \frac{\varepsilon}{k} - s_\varepsilon \quad (2.20)$$

$$P = \mu_t \left( \frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) \quad \mu_t = c_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon}$$

$c_\mu = 0.09 \quad c_{\varepsilon 1} = 1.44 \quad c_{\varepsilon 2} = 1.92 \quad \sigma_k = 1.0 \quad \sigma_\varepsilon = 1.3$

RNG  $k-\varepsilon$  Model [4]

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho v_j \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + (c_{\varepsilon 1} P - c_{\varepsilon 2}^* \rho \varepsilon) \frac{\varepsilon}{k} - s_\varepsilon \quad (2.21)$$

$$c_{\varepsilon 2}^* \equiv c_{\varepsilon 2} + \frac{c_\mu \rho \eta^3 (1 - \eta / \eta_0)}{1 + \beta \eta^3}$$

$$\eta \equiv S k / \varepsilon \quad , \quad \eta_0 = 4.38 \quad , \quad \beta = 0.012$$

$$c_{\varepsilon 1} = 1.42 \quad , \quad c_{\varepsilon 2} = 1.68 \quad , \quad c_\mu = 0.00845$$

Realizable  $k-\varepsilon$  Model [5]

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho v_j \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + \rho c_1 S \varepsilon - \rho c_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{V \varepsilon}} - s_\varepsilon \quad (2.22)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$c_1 = \max \left[ 0.43, \frac{\eta}{\eta+5} \right], \quad \eta = s \frac{k}{\varepsilon}, \quad s = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}}$$

$$c_\mu = \frac{1}{A_0 + A_s \frac{kU^*}{\varepsilon}}, \quad U^* = \sqrt{S_{ij}S_{ij} + \tilde{\Omega}_{ij}\tilde{\Omega}_{ij}}$$

$$\tilde{\Omega}_{ij} = \Omega_{ij} - 2\varepsilon_{ijk}\omega_k, \quad \Omega_{ij} = \bar{\Omega}_{ij} - \varepsilon_{ijk}\omega_k$$

$$A_0 = 4.04, \quad A_s = \sqrt{6} \cos \phi$$

$$\phi = \frac{1}{3} \cos^{-1}(\sqrt{6}W), \quad W = \frac{S_{ij}S_{jk}S_{ki}}{\tilde{s}}$$

$$\tilde{s} = \sqrt{S_{ij}S_{ij}}, \quad S_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right)$$

$$c_{\varepsilon 1} = 1.44, \quad c_2 = 1.9, \quad \sigma_k = 1.0, \quad \sigma_\varepsilon = 1.2$$

แบบจำลองความปั่นป่วนชนิด Standard  $k-\omega$  [6]

Turbulent Kinetic Energy Equation

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho v_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P - Y_k - S_k \quad (2.23)$$

Specific Dissipation Rate Equation

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho v_j \omega) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + \frac{\alpha}{\nu_t} P - Y_\omega - S_\omega \quad (2.24)$$

$$\mu_t = \frac{\rho k}{\omega}, \quad Y_k = \rho \beta^* k \omega, \quad Y_\omega = \rho \beta \omega^2$$

$$S_k = -\frac{3}{2} c_0 \beta^* \rho Y_P k \omega, \quad S_\omega = -\frac{3}{2} c_0 c_{\varepsilon 3} Y_P (\beta^* \omega)^2$$

$$\sigma_k = 2.0, \quad \sigma_\omega = 2.0, \quad \beta^* = 0.09, \quad c_0 = 3, \quad c_{\varepsilon 3} = 0.9$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.5 การคำนวณอัตราการไหลของอากาศ

ก่อนอื่นต้องทราบอัตราการไหลของอากาศ คือ ปริมาตรของอากาศที่เคลื่อนที่ผ่านจุดใดจุดหนึ่งในหนึ่งหน่วยเวลานะครับ ซึ่งอัตราการไหลของอากาศนี้จะมีความสัมพันธ์กับความเร็วเฉลี่ยของอากาศ และพื้นที่หน้าตัดของจุดที่อากาศเคลื่อนที่ผ่าน เราสามารถคำนวณอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศที่เข้าสู่ห้องเผาไหม้ได้จากสมการ 2.25 และอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศจากสมการ 2.26

$$\dot{Q} = VA \quad (2.25)$$

$$Q = \rho VA = \rho \dot{Q} \quad (2.26)$$

โดยที่  $\dot{Q}$  คืออัตราการไหลเชิงปริมาตรของของไหล  
 $Q$  คืออัตราการไหลเชิงมวลของของไหล  
 $V$  คือความเร็วของของไหล  
 $A$  คือพื้นที่หน้าตัดของทางเข้าของไหล  
 $\rho$  คือความหนาแน่นของของไหล

### 2.5.1 สมการเบอร์นูลีและการหาพลังงานสูญเสียเนื่องจากความฝืดในระบบท่อ

ในหัวข้อนี้จะอธิบายสมการเบอร์นูลีและการหาพลังงานสูญเสียเนื่องจากความฝืดในระบบท่อ ซึ่งจะถูกนำไปใช้ในการคำนวณความต้องการของอากาศ ที่ใช้กับหัวเผาชีวมวล

#### 2.5.1.1 สมการเบอร์นูลี

สมการเบอร์นูลีหรือสมการอนุรักษ์พลังงานเป็นสมการที่ใช้สำหรับอธิบายของไหลที่มีการไหลอย่างสม่ำเสมอ โดยให้พลังงานเนื่องจากมวลของของไหลที่ไหลเข้าไปในจุดที่ 1 เท่ากับพลังงานอันเนื่องมาจากมวลของของไหลที่ไหลออกจากจุดที่ 2 เมื่อพิจารณาการไหลไม่มีความเสียดทาน ไม่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ และไม่มีการป้อนงาน ซึ่งจะได้สมการในหน่วยของความสูงของของไหลหรือเรียกว่า เหนด ดังสมการที่ 2.27

$$z_1 + \frac{V_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\gamma} = z_2 + \frac{V_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\gamma} \quad (2.27)$$

เมื่อมีการติดตั้งอุปกรณ์ป้อนงานหรืออุปกรณ์ทำงานระหว่างจุด 1 และจุด 2 สมการของเบอร์นูลีจะถูกดัดแปลงเป็นดังสมการที่ 2.28

$$z_1 + \frac{V_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\gamma} + H_P - H_L - H_T = z_2 + \frac{V_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\gamma} \quad (2.28)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่	$z$	คือความสูง
	$V$	คือความเร็วของของไหล
	$g$	คือความเร่งโน้มถ่วง
	$P$	คือความดัน
	$\gamma$	คือน้ำหนักจำเพาะ
	$H_p$	คือเฮดที่อุปกรณ์ทำงานให้แก่ระบบ
	$H_L$	คือเฮดที่สูญเสียเนื่องจากความฝืดในท่อ
	$H_T$	คือเฮดที่ให้แก่อุปกรณ์ทำงานในระบบ

## 2.6 มลพิษจากการเผาไหม้

### 2.6.1 มลพิษ

มลพิษทางอากาศเป็นเรื่องที่วิตกกังวลของทุกประเทศทั่วโลก กิจกรรมของมนุษย์โดยเฉพาะงานอุตสาหกรรมการผลิต การขนส่ง เครื่องยนต์กลไกต่างๆ มลพิษปฐมภูมิ ได้แก่ มลพิษที่ถูกปล่อยออกโดยตรงสู่บรรยากาศ สำหรับการเผาไหม้มวลผลิตภัณฑ์ของการเผาไหม้เชื้อเพลิงไฮโดรคาร์บอนและออกซิเจนที่สมบูรณ์ออกมาเป็น คาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำ แต่ในความเป็นจริงแล้วการเผาไหม้ปกติ อากาศจะเป็นแหล่งให้ออกซิเจน และหากเชื้อเพลิงมีโมเลกุลของสารอื่นประกอบอยู่ด้วย อีกทั้งการเผาไหม้เกิดขึ้นไม่สมบูรณ์แบบตาม ทฤษฎี จึงมีการเกิดของสารประกอบอื่นๆ ด้วยหากปล่อยออกสู่บรรยากาศโดยตรง มลพิษที่สำคัญ ได้แก่

1. อนุภาคจุลสาร - เขม่าถ่าน ซี้เถ้าลอย อนุภาคแขวนลอยในแก๊สอื่นๆ
2. ออกไซด์ของไนโตรเจน -  $\text{NO}_x$
3. สารประกอบไฮโดรคาร์บอน-PAH, aldehydes, benzene
4. คาร์บอนมอนอกไซด์
5. ออกไซด์ของกำมะถัน -  $\text{SO}_x$
6. ไดออกซินและฟูราน
7. แก๊สเรือนกระจก -  $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{CH}_4$
8. กลิ่นและเสียง

### 2.6.2 ผลกระทบของมลพิษ

ตัวอย่างผลกระทบที่มีต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อม เช่น

1. ส่งผลกระทบต่อ การเปลี่ยนแปลงทางลบของสภาวะแวดล้อมทางอากาศ การเพิ่มขึ้นของปัญหาหมอกควัน ฝุ่น บังปริมาณรังสีแสงอาทิตย์ส่องมายังพื้นดิน ทิศนวิสัยลดลง และมีผลกระทบต่อสุขภาพบรรยากาศโลกโดยรวม
2. ส่งผลต่อการเพิ่มอัตราการเจ็บป่วยและการเสียชีวิตของมนุษย์ที่ได้รับทั้งทางตรงและทางอ้อมในระยะสั้นและระยะยาวที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. เป็นอันตรายต่อเหล่าพืชพันธุ์ไม้ พื้นที่ป่า ท้องทุ่ง แนวปะการัง และแหล่งนิเวศวิทยาอื่นๆ เนื่องจากมีสารพิษเป็นจำพวก  $\text{SO}_2$ , PAN,  $\text{C}_2\text{H}_4$  เป็นอันตรายต่อระบบสังเคราะห์แสงของพืช
4. การตกสัมผัสหรือฝังตัวของมลพิษบนพื้นผิวสิ่งปลูกสร้าง อนุสรณ์สถาน วัสดุต่างๆที่ทำให้เสื่อมคุณภาพและอาจสีกร่อนได้ ดูไม่สวยงาม หากจะกำจัดหรือทำความสะอาด บำรุงปรับปรุง ก็ต้องเสียค่าใช้จ่ายและเวลา

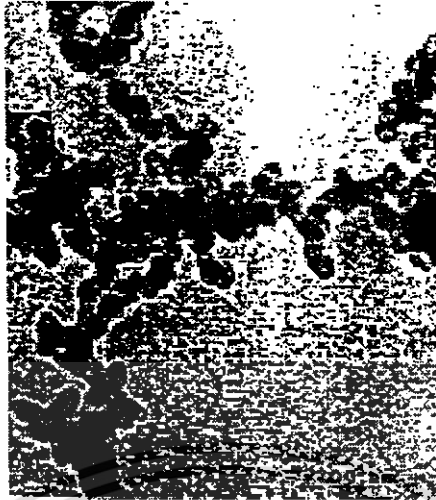
อีกตัวอย่างที่เห็นได้ชัดเนื่องจากเกิดขึ้นในพื้นที่จากมลพิษของการเผาไหม้ คือ ผลจากการทำปฏิกิริยาระหว่างออกไซด์ของไนโตรเจนกับสารประกอบไฮโดรคาร์บอนถูก พิจารณาว่าเป็นสาเหตุสำคัญของการเกิดหมอกทางโฟโตเคมี (photochemical smog) โดยมีแสงแดดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เกิดโอโซน  $\text{O}_3$  ที่เหลือเจือปนสารพิษอื่น ๆ กลายเป็นละอองลอยทุติยภูมิ (secondary aerosol) ออกมารวมกับอนุภาคจุลสาร และฝุ่นละอองในอากาศ หมอกทางโฟโตเคมี มีลักษณะเป็นกลุ่มหมอกละอองลอยสี น้ำตาลหรือเหลืองคล้ำมักก่อตัวในบริเวณที่มีอากาศนิ่งเคลื่อนที่ เหนือเมืองใหญ่ๆที่มีการจราจรหนาแน่น เช่น เชียงใหม่ กรุงเทพฯ ลอนดอน ลอสแอนเจลิส หมอกทางโฟโตเคมีจะทำให้ เยื่อชั้นตาระคายเคือง ทำลายความชุ่มชื้นของเนื้อเยื่อในปอดของมนุษย์ ทำให้หายใจถี่ เหนื่อยล้า ปวดศีรษะ อาเจียน มีปัญหาเกี่ยวกับระบบหายใจเป็นโรคหืดหอบได้

## 2.6.3 การเกิดมลพิษจากการเผาไหม้

### 2.6.3.1 อนุภาคจุลสาร

อนุภาคจุลสาร (particulate matter) จากการเผาไหม้ ประกอบด้วย อนุภาคเขม่า (soot) เศษเถ้าลอย (fly ash) และฝุ่นผงขนาดเล็กอื่นๆ ที่เกิดขึ้นจากโมเลกุลเชื้อเพลิงที่ไม่ถูกเผาไหม้หรือถูกเผาไหม้เพียงบางส่วนในเปลวไฟชนิดแพร่ผสม และในเปลวไฟชนิดผสมก่อน ที่ไม่สมบูรณ์ หรือบริเวณที่ส่วนผสมบางหรือหนาเกินไปต่อ การเผาไหม้ที่สมบูรณ์ หรืออาจเกิดจากการบีบอัดของเปลวไฟที่ผนังห้องเผาไหม้ อนุภาคจุลสารเหล่านี้มีส่วนประกอบของ อนุภาคเขม่า อินทรีย์สาร ซัลเฟต และกลุ่มออกไซด์ของโลหะในรูปเศษเถ้า มีขนาดและรูปร่างต่างกันไปในช่วงเล็กมาก 10 nm เป็นทรงกลม จนถึงขนาดใหญ่ 2000 nm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 ตัวอย่างลักษณะของอนุภาคจุลสาร

ส่วนใหญ่จะมีขนาดอยู่ในช่วง 100 – 500 nm มีรูปร่างเกาะเป็นก้อนไม่ปกติ (irregular) ดังตัวอย่างในรูปที่ 2.7 ความเข้มข้นเชิงมวลและเชิงจำนวนจะมีค่าสูงมาก อนุภาคเขม่าจากการเผาไหม้คืออนุภาคคาร์บอนที่มีส่วนของไฮโดรเจนด้วยอย่างน้อย 1% โดยมวล คิดเป็นสูตรเคมีอย่างง่าย คือ  $C_8H$  เขม่าจึงไม่ใช่ถ่านหรือคาร์บอนบริสุทธิ์ มักเกิดในบริเวณที่ส่วนผสมเชื้อเพลิงหนาเสมอ ซึ่งเป็นธรรมชาติของกลไกการเผาไหม้ที่มีส่วนผสมของเชื้อเพลิงและออกซิโดเซอร์จะไม่สม่ำเสมอทั้งหมดทั้งนี้เพราะขึ้นกับกลไกการผสมหรือความปั่นป่วน และสมบัติทางเคมีและสมบัติทางกายภาพ เขม่าเกิดได้ง่ายในเปลวไฟชนิดแพร่ผสมมากกว่าเปลวไฟชนิดผสมก่อน

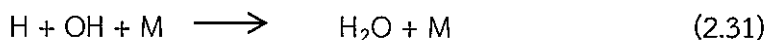
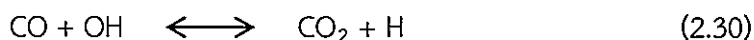
#### 2.6.3.2 คาร์บอนมอนอกไซด์

คาร์บอนมอนอกไซด์ที่เกิดจากการเผาไหม้ มีสาเหตุมาจากหลายประการ เช่น สภาพการเผาไหม้แบบส่วนผสมหนาเกินไป การผสมคลุกเคล้ากันไม่ดีพอ ปริมาณอากาศไม่เพียงพอ นอกจากนี้ ยังมีสาเหตุมาจากสภาพการเผาไหม้ภายใต้อุณหภูมิค่อนข้างสูงจนทำให้เกิดการแตกสลายตัวของคาร์บอนไดออกไซด์ มาเป็นคาร์บอนมอนอกไซด์ได้



คาร์บอนมอนอกไซด์ที่เกิดขึ้นมีเวลาสั้นเกินไปในโซนการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ เนื่องจากต้องระบายแก๊สไอเสียออกทันที อุณหภูมิ และความดันลดลงอย่างทันทีทันใด ดังนั้น CO จะอยู่ในสภาวะสมดุลบางมากกว่าที่จะอยู่ในสภาวะสมดุลอย่างสมบูรณ์ ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงจาก CO เป็น  $CO_2$  เกิดขึ้นไม่เต็มที่ เพราะถูกจำกัดด้วยการแย่งเข้าทำปฏิกิริยาของ OH กับ H ดังสมการที่ 2.30 และ 2.31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์สามารถควบคุมได้จากอัตราส่วนผสม หรือปริมาณออกซิเจนในปฏิกิริยาการเผาไหม้แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์เป็นแก๊สที่ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น และเป็นพิษต่อร่างกายอย่างมาก จนอาจทำให้เสียชีวิตได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ในบริเวณที่มีความเข้มข้นของแก๊สสูง เมื่อร่างกายได้รับ CO ในระดับต่ำ จะทำให้ร่างกาย สมอง และกล้ามเนื้อ ได้รับออกซิเจนไม่เพียงพอ ปฏิกิริยาตอบสนองของร่างกายจะช้าลง และขาดการตัดสินใจที่ดี เมื่อร่างกายรับแก๊สนี้เข้าไปในปริมาณมากๆ สามารถทำให้เสียชีวิตได้เหมือนอย่างเช่นที่เคยเป็นข่าวจากการติดเครื่องยนต์ของรถยนต์อยู่กับที่เป็นเวลานานๆ ในที่บริเวณอับการระบายอากาศไม่ดีพอ หรือโดยการรั่วของ CO เข้าไปในห้องโดยสารของรถยนต์

### 2.6.3.3 สารประกอบไฮโดรคาร์บอน

สารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่เกิดจากการเผาไหม้มีที่มาจากเชื้อเพลิงและสารหล่อลื่น โดยกระบวนการเหล่านี้คือ (i) การที่เชื้อเพลิงหลุดลอดจากการเผาไหม้ (ii) การแตกสลายตัวทางความร้อนของเชื้อเพลิง และ (iii) การทำปฏิกิริยากับแก๊สไอเสียบางส่วน สารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่ได้เกิดจากการเผาไหม้มีส่วนประกอบเป็นพวกกลุ่มพาราฟิน โอลิฟิน และอะโรมาติก ที่พบตามปกติ สาเหตุที่ทำให้เกิดสารประกอบไฮโดรคาร์บอนจากระบบการเผาไหม้ เนื่องมาจากหลายสาเหตุ เช่น คุณภาพการเผาไหม้ไม่ดี การจุดไม่ติด (misfire) การผสมกันไม่ดี ส่วนผสมบางหรือหนาเกินไป เกิดการดับของเปลวไฟในบริเวณที่มีการยืดของเปลวไฟ (flame stretching) ที่มากเกินไปตามระดับความเข้มข้นของความเป็นป่วนที่สูงมาก จนทำให้แนวเปลวไฟขาด ส่งผลให้เชื้อเพลิงบางส่วนหลุดลอดผ่านแนวเปลวไฟออกไปโดยไม่เกิดการติดไฟ เหตุอีกประการหนึ่ง คือ การดับดับของเปลวเพลิง (flame quenching) เกิดจากการลดลงของอุณหภูมิเปลวไฟจนดับไปเนื่องจาการถ่ายเทความร้อนสูงเฉพาะบริเวณ โดยเฉพาะอย่างยิ่งช่องเล็กๆ ในห้องเผาไหม้ที่มีอุณหภูมิค่อนข้างต่ำมาก เมื่อเทียบกับอุณหภูมิเปลวไฟ เช่น ผนังห้องเผาไหม้ ช่องที่อยู่ระหว่างผิวด้านในระบบลูกสูบโดยนับจากหัวลูกสูบลงมาถึงตำแหน่งแหวนลูกสูบ ช่องระหว่างแหวนลูกสูบ ช่องที่ร่องเกลียวสำหรับหัวเทียนบนฝาลูกสูบ เครื่องยนต์ ช่องระหว่างเขี้ยวหัวเทียน เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีสาเหตุเพิ่มเติม คือ การซึมซับไฮโดรคาร์บอนในเศษกากเขม่าและคราบน้ำมันเครื่องในห้องเผาไหม้ที่ความดันสูง ทำให้ไม่ถูกเผาไหม้ เมื่อมีการระบาย ไอเสียความดันลดลง ก็จะระเหยและถูกระบายออกมาสู่บรรยากาศ

### 2.6.3.4 แก๊สเรือนกระจก

บรรยากาศของโลกประกอบด้วย ไนโตรเจน ออกซิเจน และอาร์กอน เป็นองค์ประกอบหลัก และมีไอน้ำ และคาร์บอนไดออกไซด์ อีกจำนวนเล็กน้อยในบรรยากาศ ไนโตรเจน ออกซิเจน และอาร์กอน ไม่ได้มีอิทธิพลต่ออุณหภูมิของโลก แต่ไอน้ำ และ คาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งเป็นแก๊สเรือนกระจก (greenhouse gas) ชนิดหนึ่งแม้จะมีในปริมาณน้อย แต่มีความจำเป็น ต่อการรักษาอุณหภูมิในบรรยากาศของโลกให้คงที่ แก๊สเรือนกระจกคือแก๊สที่สามารถดูดซับคลื่นรังสีอินฟราเรดหรือคลื่นรังสีความร้อนที่มาจากรังสีแสงอาทิตย์ได้ดี แก๊สเหล่านี้ดูดซับรังสีความร้อนไว้ในเวลากลางวัน แล้วค่อยๆ แผ่รังสีความร้อนออกมาในเวลากลางคืน ทำให้ไม่หนาวเกินไป ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุณหภูมิ ในบรรยากาศโลกไม่เปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลัน ดังเช่นในดาวเคราะห์ดวงอื่นๆ ส่งผลให้สิ่งมีชีวิตในโลกสามารถดำรงอยู่ได้ อย่างไรก็ตาม การเพิ่มขึ้นของแก๊สเรือนกระจกจะทำให้ชั้นบรรยากาศมีความสามารถในการกักเก็บรังสีความร้อนได้มากขึ้น ผลที่ตามมาคือ อุณหภูมิเฉลี่ยของชั้นบรรยากาศก็เพิ่มขึ้นด้วย แก๊สเรือนกระจกมีทั้งที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ และเกิดจากกิจกรรมของมนุษย์ ซึ่งมีจำนวนหลายชนิด แก๊สเรือนกระจกที่สำคัญ คือ ไอน้ำ คาร์บอนไดออกไซด์ โอโซน มีเทน ไนตรัสออกไซด์ และคลอโรฟลูออโรคาร์บอน (CFC) เป็นต้น

ตารางที่ 2.4 แก๊สเรือนกระจก

แก๊สเรือนกระจก	ปริมาณแก๊สในบรรยากาศ (ส่วนต่อล้านส่วน)
ไอน้ำ	40,000
คาร์บอนไดออกไซด์	360
มีเทน	1.7
ไนตรัสออกไซด์	0.3
โอโซน	0.01

แต่แก๊สเรือนกระจกที่ถูกควบคุมโดยพิธีสารเกียวโต มีเพียง 6 ชนิด ซึ่งเกิดจากกิจกรรมของมนุษย์เท่านั้น ได้แก่ คาร์บอนไดออกไซด์ มีเทน ไนตรัสออกไซด์ ไฮโดรฟลูออโรคาร์บอน (HFC) เพอร์ฟลูออโรคาร์บอน (PFC) และซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์ (SF<sub>6</sub>) ทั้งนี้ CFC ไม่ถูกกำหนดในพิธีสารเกียวโต เนื่องจากเป็นสารที่ถูกจำกัดการใช้ในข้อตกลงอื่นแล้ว แก๊สเรือนกระจกแต่ละชนิด มีศักยภาพการทำให้เกิดภาวะโลกร้อน (global warming potential, GWP) ที่แตกต่างกัน ศักยภาพดังกล่าวนี้ ขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพในการแผ่รังสีความร้อนของโมเลกุล และขึ้นอยู่กับอายุของแก๊สนั้นๆ ในบรรยากาศ และคิดเทียบกับการแผ่รังสีความร้อนของคาร์บอนไดออกไซด์ ในช่วงระยะเวลาหนึ่ง โดยค่า GWP ของแก๊สเรือนกระจกต่างๆ เป็นดังนี้

ตารางที่ 2.5 ศักยภาพการทำให้เกิดภาวะโลกร้อนของแก๊สเรือนกระจก

แก๊สเรือนกระจก	อายุในชั้นบรรยากาศ (ปี)	ศักยภาพการทำให้เกิดโลกร้อน (เท่าของคาร์บอนไดออกไซด์)
คาร์บอนไดออกไซด์	200 – 450	1
มีเทน	9 – 15	23
ไนตรัสออกไซด์	120	296
CFC-12	100	10600
ซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์	3200	22000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### บทที่ 3

## การออกแบบและการคำนวณ

### 3.1 สมการการเผาไหม้

เชื้อเพลิงที่ใช้กับหัวเผาคือเชื้อเพลิงชีวแบบเม็ด ซึ่งสมการการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงเป็นดังนี้

#### 3.1.1 สมการการเผาไหม้สำหรับเชื้อเพลิงชีวมวล

ส่วนประกอบของเชื้อเพลิงชีวมวลฝุ่นที่ใช้ในการศึกษา โดยวิธีการวิเคราะห์การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงชีวมวลฝุ่น อาศัยข้อมูลจากตารางที่ 3.1 โดยคิดที่สภาพนำส่งดังนี้

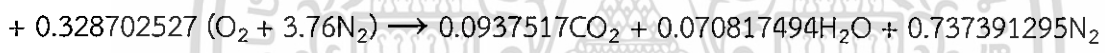
##### 3.1.1.1 เชื้อเพลิงชีวมวล (ความชื้น 5 %) ที่ 100% stoichiometry

เมื่อวิเคราะห์เชื้อเพลิง ณ สภาพนำส่งตามที่แสดงไว้ดังตาราง 3.1 จะสามารถเขียน

สมการเผาไหม้ได้ดังสมการ 3.1



$$[0.31437728C + 0.425300677H + 0.001697807N + 0.184105957O] + [0.049643482H + 0.024821741O]$$



ตารางที่ 3.1 แสดงการวิเคราะห์เชื้อเพลิง ณ สภาพนำส่ง

คุณสมบัติ	%m/m (dry)	Mass/1kgfuel (as received)	Kmole/1kg fuel	Kmole/kmole Reactive species and water content
คาร์บอน (C)	44.44	0.42218	0.035181667	0.035181667
ไฮโดรเจน (H)	5.01	0.047595	0.04795	0.047595
ไนโตรเจน (N)	0.28	0.00266	0.000	0.000
ออกซิเจน (O)	34.7	0.32965	0.020603125	0.020603125
ซัลเฟอร์ (S)	0.02	0.00019	5.9375E-06	5.9375E-06
เถ้า (ash)	15.55	0.147725	-	-
ไฮโดรเจนใน H <sub>2</sub> O		0.006	0.00555	0.049643
ออกซิเจนใน H <sub>2</sub> O		0.044	0.002777778	0.024822
รวม			0.111909063	1

ความหนาแน่นโดยปริมาตรมีค่าเท่ากับ 707.57 m<sup>3</sup>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการการเผาไหม้จะได้ว่า

$$\text{ปริมาณอากาศที่ต้องใช้} = 0.328702527 \times [32 + (3.76 \times 28)] = 45.124 \text{ kg}_{\text{air}}$$

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณเชื้อเพลิง (ไม่รวมถ้ำ)} &= (0.3143 \times 12) + (0.4253 \times 1) + (0.00169 \times 14) + (0.1841 \times 16) + \\ &(0.0496 \times 1) + (0.0248 \times 16) = 7.6125 \text{ kg}_{\text{fuel}} \end{aligned}$$

$$\text{ปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้} = 7.6125 / (1 - 0.1477) = 8.9317 \text{ kg}_{\text{fuel}}$$

$$\text{AF ratio @ sto} = 5.0498 \text{ kg}_{\text{air}} / \text{kg}_{\text{fuel}}$$

### ตารางที่ 3.3 แสดงปริมาณไอเสียที่ 100% Stoichiometry

สารประกอบ	สัดส่วนโดยโมล	สัดส่วนโดยมวล
CO <sub>2</sub>	0.09375	0.141344
H <sub>2</sub> O	0.07081	0.043677
SO <sub>2</sub>	1.28E-05	3.469E-05
N <sub>2</sub>	0.73739	0.707462
ผลรวมของเลขตุลหน้าสารประกอบ 0.902		
มวลโมเลกุลของไอเสีย = 29.0368 kg <sub>ไอเสีย</sub> /kmol <sub>ไอเสีย</sub>		

ทำการคำนวณหาสมการเผาไหม้ที่ 100-150% excess air (เพื่อความสะดวกในการคำนวณทำการคำนวณในโปรแกรม Microsoft Excel) จะได้ค่า AF ratio ตามตารางที่ 3.4

### ตารางที่ 3.4 แสดงค่า AF ratio ที่ปริมาณ Excess air 100%-150%

Excess air (%)	AF
0	5.304299
10	5.834729
20	6.365159
30	6.895589
40	7.426019
50	7.956449

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 3.2 ปริมาณเชื้อเพลิงและอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้

### 3.2.1. ปริมาณอากาศที่ต้องใช้ในการเผาไหม้

ที่ จากการค่า AF ratio ที่คำนวณได้ในตารางที่ 3.4 จะสามารถนำไปคำนวณหาปริมาณของอากาศที่ต้องใช้ในการเผาไหม้ที่ เงื่อนไข Excess air ต่างๆ กันได้ตามสมการที่ 3.3

$$\dot{M}_{\text{air}} = \text{AF} \times \dot{M}_{\text{fuel}} \quad (3.3)$$

ซึ่งค่าอัตราการไหลของอากาศที่คำนวณได้แสดงดังตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 แสดงค่าปริมาณการใช้อากาศที่ AF ratio 100%-150% excess air

Excess air (%)	AF	mass flow rate	
0	5.304299	0.0287177	kg/s
10	5.834728	0.0315892	kg/s
20	6.365158	0.0344609	kg/s
30	6.895588	0.0373327	kg/s
40	7.426018	0.0402044	kg/s
50	7.956448	0.0430762	kg/s

### 3.2.2. ปริมาณเชื้อเพลิงที่ต้องใช้ในการเผาไหม้

จากเงื่อนไขการออกแบบที่ 100 kW สามารถใช้คำนวณหาปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้เผาไหม้ให้ได้ตามเงื่อนไข ซึ่งสามารถหาได้ดังนี้

ตารางที่ 3.6 ค่าพลังงานความร้อน ของ Eucalyptus bark pellet

Calorific Values (MJ/kg)	
LHV	17.27
HHV	18.47

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่เงื่อนไข 100 kW สามารถหาค่า mass flow rate ได้จากสมการที่ 3.4

$$Q = \dot{M}_f \times \text{HHV} \quad (3.4)$$

$$\dot{M}_f = \frac{100}{18.47 \times 10^3}$$

$$\dot{M}_f = 0.00541 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

### 3.3 เงื่อนไขในการออกแบบขนาดของห้องเผาไหม้

เมื่อหาปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ในการเผาไหม้ได้แล้วก็จะสามารถหาปริมาตรของห้องเผาไหม้ ที่เงื่อนไข 100 kW ได้ ซึ่งสามารถหาได้จากสมการที่ 3.5

$$\text{Volume of reactor} = \text{Solid fuel flow rate} \times \text{Residence time} \quad (3.5)$$

โดย Residence time สามารถหาได้จากการทดลองเผาไหม้จริง (ได้เวลาเท่ากับ 10 นาที)

$$V = \dot{V}_f \times t = \frac{\dot{M}}{\rho} \times t \quad (3.5)$$

$$V = \frac{0.00541}{707.575} \times 600 = 0.004591 \text{ m}^3$$

ซึ่งปริมาตรที่หาได้จากสมการที่ 3.5 นั้นจะเป็นเงื่อนไขหลักในการออกแบบห้องเผาไหม้

เนื่องจากออกแบบให้เตาปฏิกรณ์มีลักษณะเป็นทรงกระบอก กำหนดให้เส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 0.3 m

สามารถหาความสูงของเตาปฏิกรณ์ได้จากสมการที่ 3.6

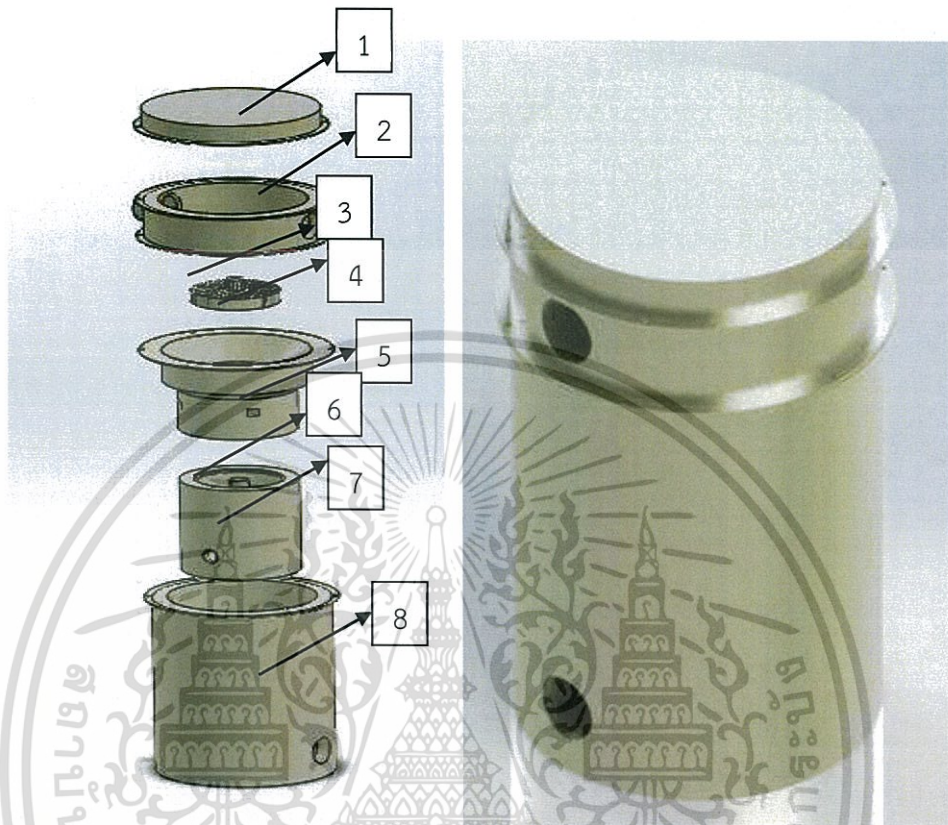
$$\text{ความสูงของเตาปฏิกรณ์} = \frac{V}{\pi R^2} \quad (3.6)$$

$$= \frac{0.004591}{\pi (0.15^2)} = 0.0649 \text{ m}$$

### 3.4 แบบของหัวเผาและหลักการทำงานของส่วนต่างๆ

ในหัวข้อนี้เป็นการแสดงแบบของหัวเผาและหลักการทำงานของส่วนต่างๆ โดยการอ้างอิงจากรูปที่

3.1



รูปที่ 3.1 แสดงชิ้นส่วนต่างๆของหัวเผา

จากรูปที่ 3.1 หัวเผาประกอบไปด้วยชิ้นส่วนต่างๆ 8 ชิ้นด้วยกัน โดยประกอบด้วยชิ้นส่วนต่างๆ ดังนี้

1. Head คือส่วนบนของเตาปฏิกรณ์ ทำหน้าที่เก็บกักความร้อนไว้ในเตาปฏิกรณ์  
 2. Lower head คือส่วนที่เชื่อมต่อกับHead มีช่องทางเข้าเชื้อเพลิงชีวมวลและช่องทางออกของแก๊สร้อนอยู่ที่บริเวณนี้

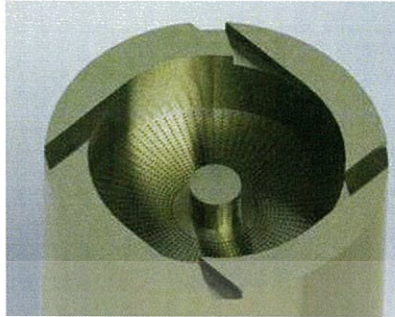
3. Primary air pipe คือส่วนที่นำอากาศเข้ากลางห้องเผาไหม้ ลักษณะเป็นท่อปลายตัน ถูกเจาะรูขนาดเล็กล้อมรอบผนังท่อเพื่อให้อากาศกระจายตัวรอบๆ ตรีกรับ เป็นช่องนำอากาศส่วนแรกในการช่วยทำปฏิกิริยาการเผาไหม้

4. Perforation คือส่วนที่รองรับเชื้อเพลิงเพื่อใช้ในการเผาไหม้ มีการเจาะรูเพื่อให้ขี้เถ้า (ash) ที่เกิดขึ้นตกลงไปสู่ด้านล่างของเตาปฏิกรณ์

5. Combustion zone ส่วนที่เกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ และมีการเจาะช่องอากาศที่2เพื่อใช้เสริมในการเผาไหม้ ซึ่งช่องอากาศที่สองนั้นมีการนำอากาศเข้าห้องเผาไหม้แบบสัมผัสกับผนังของเตาปฏิกรณ์ ก่อให้เกิดการหมุนวนของอากาศรอบๆห้องเผาไหม้ ทำให้เชื้อเพลิงบริเวณใกล้ๆผนังห้องเผาไหม้นั้นได้รับอากาศทั่วถึง ทำให้การเผาไหม้สมบูรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1 ช่องอากาศที่2 (secondary air channel) เป็นส่วนที่มีทางเข้าอากาศที่ก่อให้เกิดการ



หมุนวนของอากาศในท้องเผาไหม้ซึ่งค่าการหมุนวนนั้นถูกเรียกว่า Swirl number สามารถคำนวณได้จากสามารถคำนวณค่าตัวเลขการหมุนวน (Swirl number)ได้จากสมการที่3.7

$S_g$	n	$d_i$ (cm)	$d_p$ (cm)	t(cm)	h(cm)
1.4399	4	36	24	3	3

$$S_g = \frac{\pi \cdot (r_o^2 - r_p^2) \times r_i^{-1}}{n \cdot t \cdot h \cdot r_o} \quad (3.7)$$

ตัวเลขการหมุนวน (Swirl number) มีค่าเท่ากับ 1.4399

6. Connect pipe คือท่อโค้งรูปตัวแอล (L) ส่วนที่นำอากาศที่ไหลอยู่ล้อมรอบ Inner base แบ่งเข้า Primary air pipe

7. Inner base คือส่วนฐานรองรับห้องเผาไหม้และเป็นส่วนที่กั้นอากาศให้ไหลวนอยู่ภายในเตาปฏิกรณ์

8. Outer base คือส่วนฐานทำหน้าที่รองรับห้องเผาไหม้และส่วนประกอบต่างๆของเตาปฏิกรณ์ ผนังด้านล่างถูกเจาะรูเพื่อเป็นทางเข้าให้อากาศจากเครื่องเป่า (Blower)

### 3.5 การคำนวณปริมาณอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ

เนื่องจากทางเข้าอากาศที่ออกแบบไว้มีสองทางจึงจำเป็นต้องแบ่งอากาศให้เข้าทางเข้าได้อย่างเหมาะสม ซึ่งจะแบ่งได้ดังตารางที่ 3.7, 3.8, 3.9 และ 3.10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.7 การแบ่งอากาศเข้าห้องเผาไหม้ที่120% excess air

primary air(porous pipe)			secondary air(swirl air)		
%	Mass flow rate	Volume flow rate	%	Mass flow rate	Volume flow rate
40	0.013784388	0.011721418	60	0.020676582	0.01758213
50	0.017230485	0.014651773	50	0.018666359	0.01587275
60	0.020676582	0.017582127	40	0.016081786	0.01367499

ตารางที่ 3.8 การแบ่งอากาศเข้าห้องเผาไหม้ที่130% excess air

primary air(porous pipe)			secondary air(swirl air)		
%	Mass flow rate	Volume flow rate	%	Mass flow rate	Volume flow rate
40	0.014933087	0.012698203	60	0.02239963	0.0190473
50	0.018666359	0.015872754	50	0.018666359	0.0158727
60	0.02239963	0.019047305	40	0.014933087	0.0126982

ตารางที่ 3.9 การแบ่งอากาศเข้าห้องเผาไหม้ที่140% excess air

primary air(porous pipe)			secondary air(swirl air)		
%	Mass flow rate	Volume flow rate	%	Mass flow rate	Volume flow rate
40	0.016081786	0.013674988	60	0.024122679	0.02051248
50	0.020102232	0.017093735	50	0.020102232	0.01709373
60	0.024122679	0.020512482	40	0.016081786	0.01367499

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.10 การแบ่งอากาศเข้าห้องเผาไหม้ที่ 150% excess air

primary air(porous pipe)			secondary air(swirl air)		
%	Mass flow rate	Volume flow rate	%	Mass flow rate	Volume flow rate
40	0.017230485	0.014651773	60	0.025845727	0.02197766
50	0.021538106	0.018314716	50	0.021538106	0.01831472
60	0.025845727	0.021977659	40	0.017230485	0.01465177

ในหัวข้อนี้เป็นการแสดงการคำนวณปริมาณอัตราการไหลเชิงมวล โดยใช้สมการ Bernoulli equation และ Continuity แล้วนำค่าความต่างของความดันจาก Orifice plate มาแทนในสมการ

สมการ Bernoulli equation,

$$p_1 - p_2 = \frac{\rho}{2}(V_2^2 - V_1^2) = \frac{\rho V_2^2}{2} \left[ 1 - \left( \frac{V_1}{V_2} \right)^2 \right] \quad (3.8)$$

สมการ Continuity

$$(-\rho V_1 A_1) + (\rho V_2 A_2) = 0 \quad (3.9)$$

หรือ

$$V_1 A_1 = V_2 A_2 \quad \text{ดังนั้น} \quad \left( \frac{V_1}{V_2} \right)^2 = \left( \frac{A_2}{A_1} \right)^2 \quad (3.10)$$

แทนสมการ (3.10) ลงใน (3.8)

$$p_1 - p_2 = \frac{\rho V_2^2}{2} \left[ 1 - \left( \frac{A_2}{A_1} \right)^2 \right] \quad (3.11)$$

$$V_2 = \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho [1 - (A_2/A_1)^2]}} \quad (3.12)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

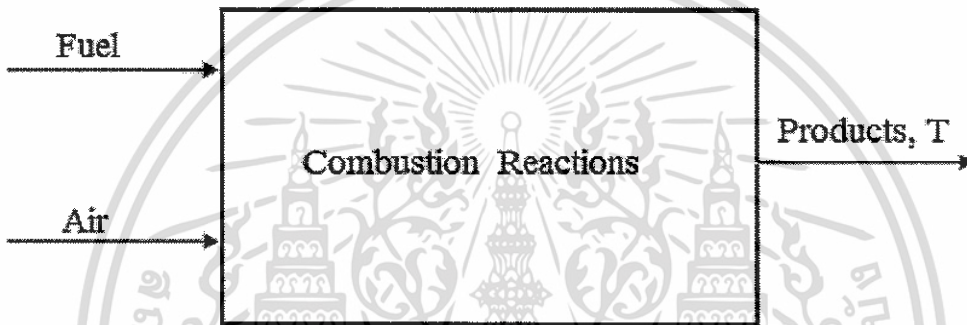
### 3.6 การคำนวณAdiabatic flame temperature ที่ Excess air 120%-150%

การคำนวณอุณหภูมิสูงสุดในห้องเผาไหม้สามารถหาได้จากสมการการเผาไหม้และทฤษฎีAdiabatic flame temperatureของปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นในห้องเผาไหม้

$$\Delta U = Q_p - W_p \quad (3.13)$$

$$H = U + pV \quad (3.14)$$

$$H_{\text{reactants}} = H_{\text{products}} \quad (3.15)$$



รูปที่ 3.3 แสดงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในห้องเผาไหม้

$$\sum H_{\text{reactants}}(T_i, p) = \sum H_{\text{products}}(T, p) \quad (3.16)$$

$$\sum H_{\text{reactants}}(T_i, p) = \sum n_i \int_{T_R}^T C_{p,i} dT \quad (3.17)$$

$$\sum H_{\text{reactants}}(T_i, p) = \sum n_i [\Delta H_{f,i}^0 + \overline{C_{p,i}}(T_{ad} - T_{ref})] \quad (3.18)$$

โดยสามารถหาค่า  $\Delta H_{f,i}^0$  และ  $\overline{C_{p,i}}$  ซึ่ง  $T_{ref}$  นั้นจะกำหนดเป็นอุณหภูมิของอากาศที่ส่งเข้าห้องเผาไหม้ จะสามารถหาค่า Adiabatic flame temperature ได้จากการวิเคราะห์ Ultimate analysis จากตารางที่ 3.1 และใช้สมการที่ 3.1 ซึ่งจำเป็นต้องใช้ตาราง Enthalpy of formation เข้าช่วยในการหาค่า  $\Delta H_{f,i}^0$  และ  $\overline{C_{p,i}}$  ของแต่ละองค์ประกอบในสมการเคมี และใช้โปรแกรม Excel ช่วยคำนวณเพื่อหาค่า Adiabatic flame temperature ( $T_{ad}$ ) ในสมการที่ 3.8 ที่แต่ละเงื่อนไข Excess air โดยค่าที่ได้นี้จะแสดงไว้ในตารางที่ 3.11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.11 Adiabatic flame temperatureเกิดขึ้นในห้องเผาไหม้

Excess air	Adiabatic Temperature(K)
120%	2166.35
130%	2198.78
140%	2102.32
150%	2098.64



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

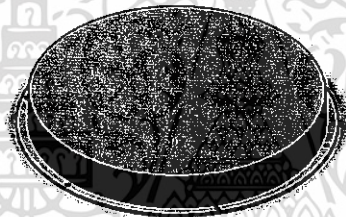
## บทที่ 4

### อุปกรณ์และเงื่อนไขการทดลอง

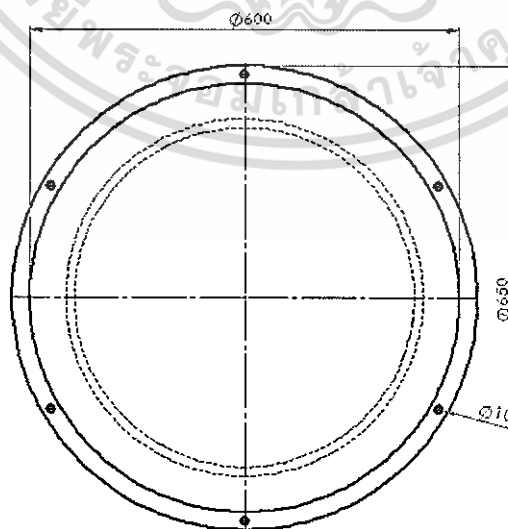
ในบทนี้จะกล่าวถึงชิ้นส่วนที่ถูกออกแบบในโปรแกรมSolid work 2014และขั้นตอนการจำลองการไหลของอากาศและการเผาไหม้ของเตาปฏิกรณ์ที่ได้ทำการออกแบบไว้

#### 4.1 ส่วนประกอบต่างๆที่ใช้ในการจำลองและหน้าที่

4.1.1 Head คือ ส่วนบนของเตาปฏิกรณ์ทำการสร้างขึ้นเพื่อเก็บกักความร้อนไว้ในเตาปฏิกรณ์โดยอาศัยหลักการออกแบบให้ขนาดของส่วนประกอบต่างๆเป็นไปตามมาตรฐานในระบบอุตสาหกรรม

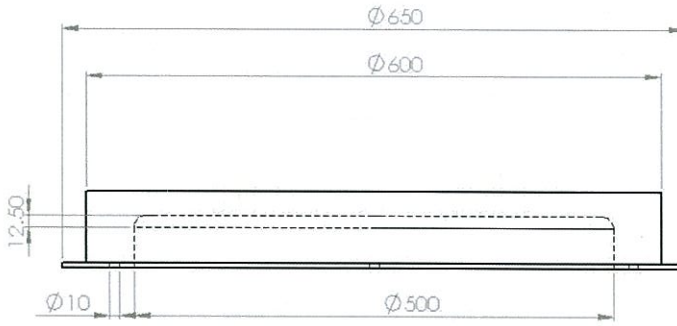


รูปที่ 4.1 Head ที่ถูกออกแบบด้วยโปรแกรม Solid works



รูปที่ 4.2 Dimension ของ Head (ด้านบน)

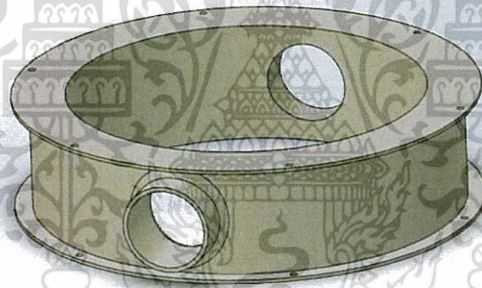
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



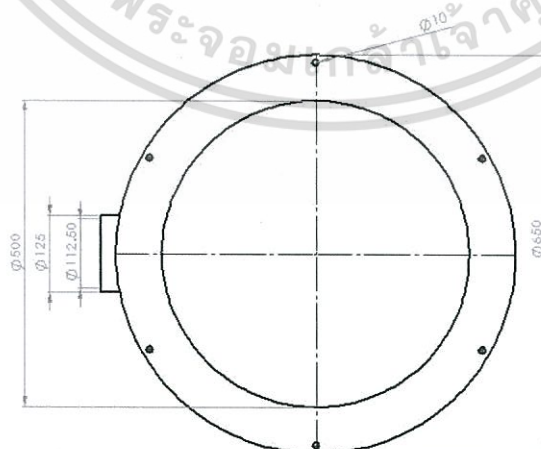
รูปที่ 4.3 Dimension ของ Head (ด้านหน้า)

#### 4.1.2 Lower head

คือ ส่วนที่เชื่อมต่อกับ Head และ Combustion zone มีช่องทางเข้าเชื้อเพลิงชีวมวลและช่องทางออกของแก๊สร้อนอยู่ที่บริเวณนี้โดยอาศัยหลักการออกแบบให้ขนาดของวงแหวนนั้นมีขนาดตามมาตรฐานของหน้าแปลน Furnace



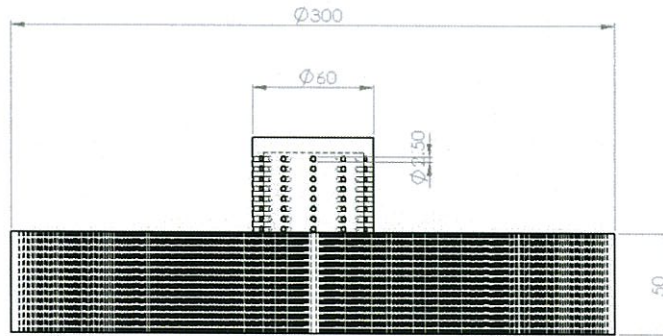
รูปที่ 4.4 Lower head ที่ถูกออกแบบด้วยโปรแกรม Solid works



รูปที่ 4.5 Dimension ของ Lower head

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้





รูปที่ 4.9 Dimension ของ Perforation (ด้านหน้า)

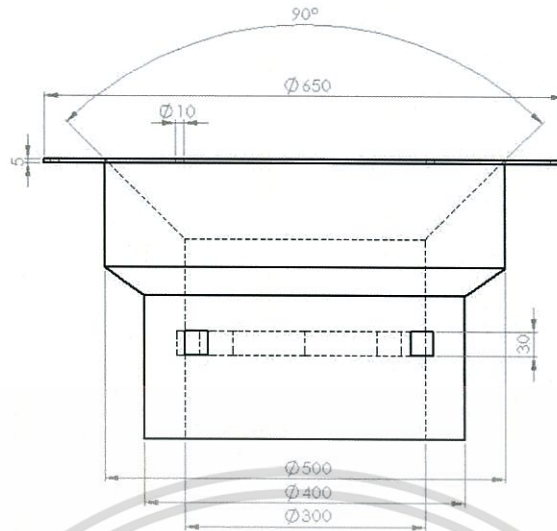
#### 4.1.5 Combustion zone

คือ ส่วนที่เกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ และมีการเจาะช่องอากาศที่ 2 เพื่อใช้เสริมในการเผาไหม้ ซึ่งช่องอากาศที่สองนั้นมีการนำอากาศเข้าห้องเผาไหม้แบบสัมผัสกับผนังของเตาปฏิกรณ์ ก่อให้เกิดการหมุนวนของอากาศรอบๆห้องเผาไหม้ ทำให้เชื้อเพลิงบริเวณใกล้ๆผนังห้องเผาไหม้นั้นได้รับอากาศทั่วถึงทำให้การเผาไหม้สมบูรณ์



รูปที่ 4.10 Combustion zone ที่ถูกออกแบบด้วยโปรแกรม Solid works

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.11 Dimension ของ Combustion zone (ด้านหน้า)

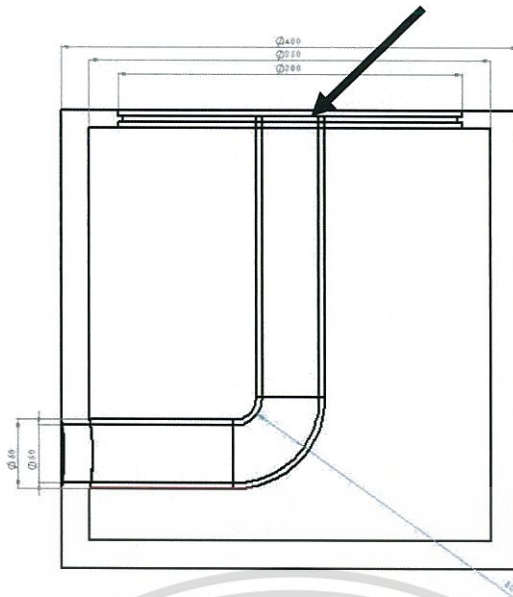
#### 4.1.6 Connect pipe

คือ ท่อโค้งรูปตัวแอล (L) เป็นส่วนที่นำอากาศที่ไหลอยู่ล้อมรอบ Inner base แบ่งเข้า Primary air pipe



รูปที่ 4.12 Connect pipe ที่ถูกออกแบบด้วยโปรแกรม Solid works

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.13 Dimension ของ Connect pipe (ด้านข้าง)

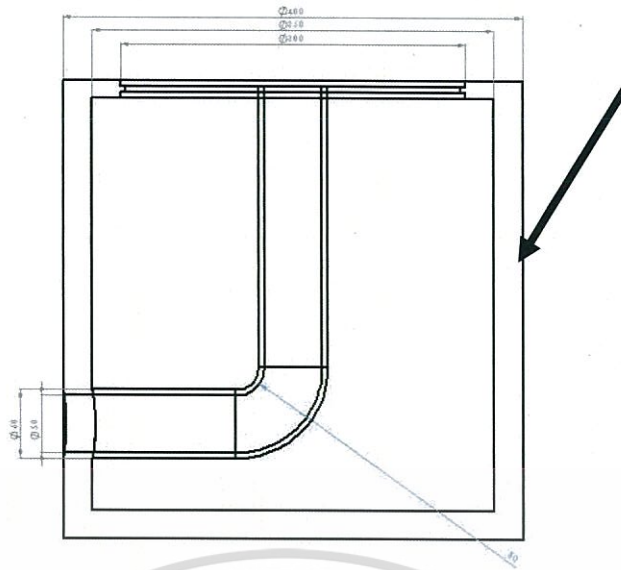
#### 4.1.7 Inner base

คือ ส่วนฐานรองรับห้องเผาไหม้และเป็นส่วนที่กั้นอากาศให้ไหลวนอยู่ในเตาปฏิกรณ์



รูปที่ 4.14 Inner base ที่ถูกออกแบบด้วยโปรแกรม Solid works

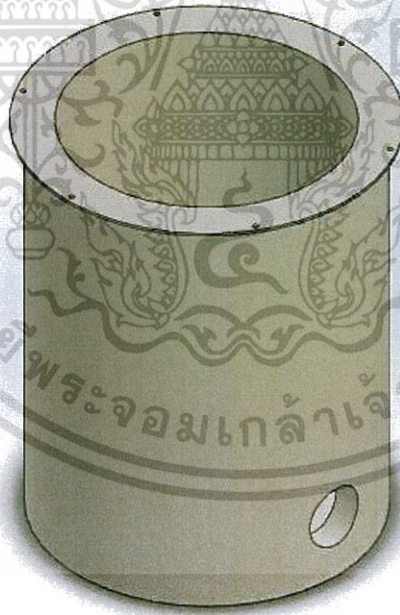
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.15 Dimension ของ Inner base (ด้านข้าง)

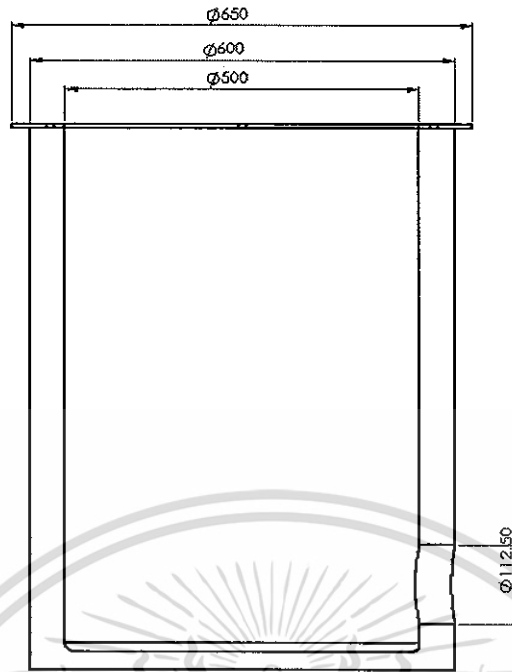
#### 4.1.8 Outer base

คือ ส่วนฐานที่ทำเพื่อรองรับห้องเผาไหม้และส่วนประกอบต่างๆของเตาปฏิกรณ์ ผนังด้านล่างถูกเจาะรูเพื่อเป็นทางเข้าให้อากาศจากเครื่องเป่า (Blower)



รูปที่ 4.16 Outer base ที่ถูกออกแบบด้วยโปรแกรม Solid works

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.17 Dimension ของ Outer base (ด้านข้าง)

#### 4.2 วิธีการจำลองในโปรแกรม ANSYS 2016

การจำลองกระบวนการทำงานของเตาปฏิกรณ์นั้นจะมุ่งเน้นไปที่อิทธิพลของทางเข้าอากาศ 2 ช่องทางที่ช่วยส่งเสริมให้การเผาไหม้ในเตาปฏิกรณ์เกิดอุณหภูมิสูงสุดและนำผลที่ได้จากการทดลองมาปรับปรุงเพื่อให้ได้รูปแบบเตาปฏิกรณ์ที่สามารถนำมาสร้างเป็นชิ้นงานจริงไว้ทำการทดลองต่อไป

##### 4.2.1 ขั้นตอนพื้นฐานในการจำลอง

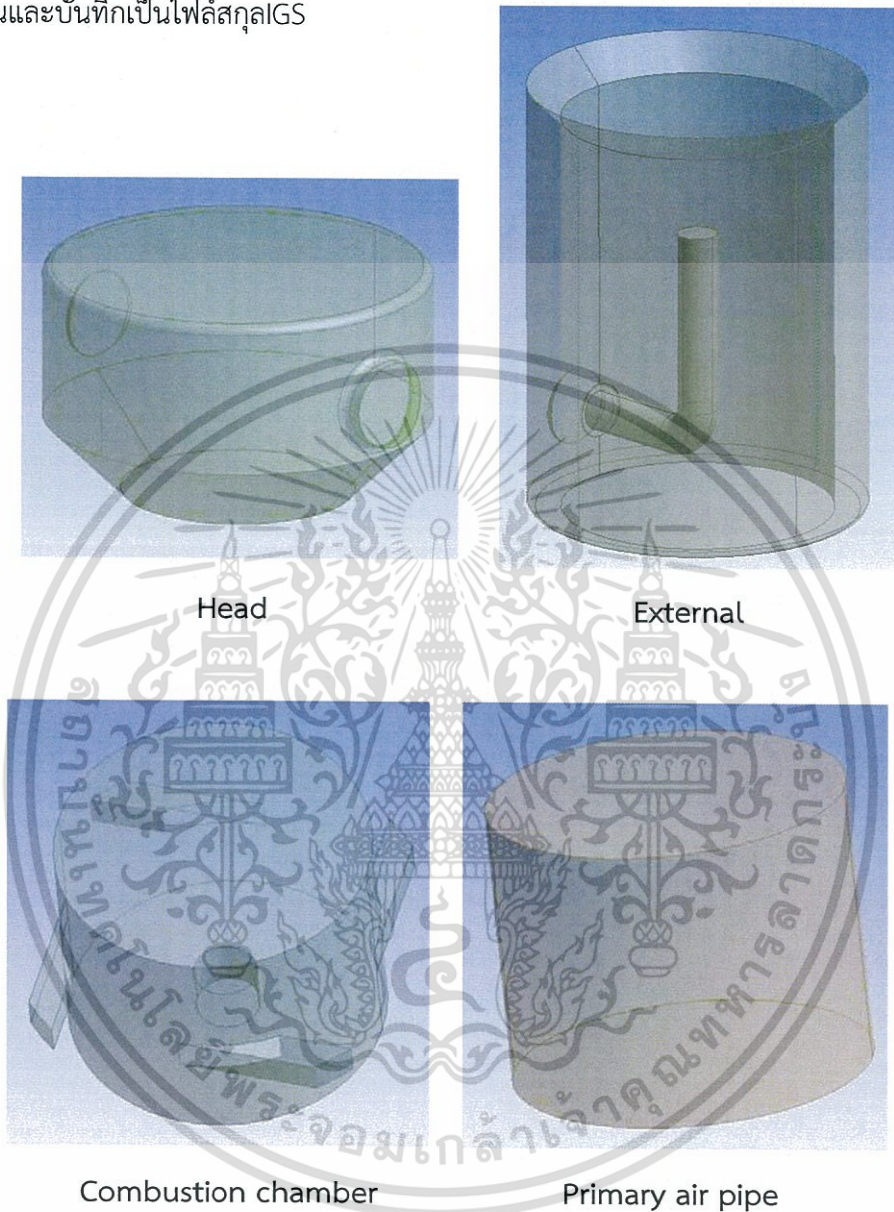
การจำลองกระบวนการทำงานในเตาปฏิกรณ์นั้นจะศึกษาเกี่ยวกับการไหลของอากาศและการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ซึ่งจำเป็นต้องใช้ฟังก์ชันในการจำลองที่เรียกว่า Fluent ซึ่งมีในโปรแกรม ANSYS 2016 การจำลองการไหลของอากาศนั้นผู้ทำการจำลองต้องทำตามขั้นตอนดังนี้

1. นำรูปแบบที่ได้ทำการออกแบบไว้มา subtract เอาส่วนของชิ้นงานออก ให้เหลือแต่ส่วนของอากาศที่มีอยู่ในเตาปฏิกรณ์เพราะว่าการจำลองการไหลนั้นต้องใช้ปริมาตรของอากาศในการจำลองเพื่อใช้คำนวณเชิงตัวเลข
2. แบ่งอีลิเมนต์ชิ้นงานออกเป็นอีลิเมนต์เล็กๆ เพื่อใช้คำนวณเชิงตัวเลขในการวิเคราะห์การไหล
3. กำหนดรูปแบบสมการที่ใช้ในการจำลองและค่าคงที่ต่างๆ ในสมการ
4. กำหนดขอบเขตต่างๆ ของชิ้นงานเพื่อใช้ในการสร้างเงื่อนไขในการจำลอง
5. วิเคราะห์ผลการจำลองจากข้อมูลต่างๆ ที่ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.2 การจำลองการไหลของอากาศ

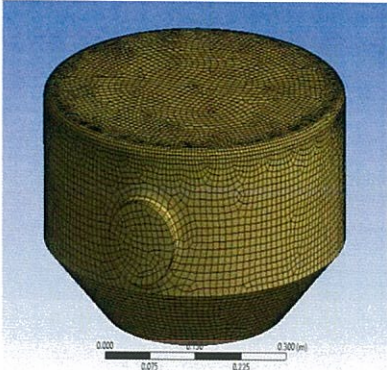
1. นำแบบที่ออกแบบไว้ในโปรแกรม solid work มาทำการตัดเอาเฉพาะส่วนที่เป็นอากาศที่ไหลอยู่ในชิ้นงานและบันทึกเป็นไฟล์สกุล IGS



2. นำไฟล์สกุล IGS ไปเปิดในโปรแกรม ANSYS Fluent เพื่อทำการแบ่งอีลิเมนต์ (Meshing) อากาศที่อยู่ในชิ้นงาน (การจำลองการไหลของอากาศจำเป็นต้องใช้พื้นที่ของอากาศที่อยู่ในชิ้นงาน)

3. การแบ่งอีลิเมนต์ (Meshing) สามารถแบ่งเป็นรูปแบบได้หลายรูปทรงแต่การใช้รูปทรงแบบ Hex dominant จะทำให้จำนวนอีลิเมนต์มีค่าน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับรูปทรงแบบอื่นๆ (ข้อจำกัด: รูปทรงต้องเป็นรูปทรงที่ไม่ซับซ้อน)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Head 90,371 อีลิเมนต์  
เมนต์(2มม. เล็กสุด1 มม.)



Combustion chamber 162,293 อีลิเมนต์ ขนาดอีลิ  
ขนาดอีลิเมนต์(5มม. เล็กสุด2 มม.)



External 647,750 อีลิเมนต์  
ขนาดอีลิเมนต์(5มม. เล็กสุด 2 มม.)



Primary air 4,119 อีลิเมนต์  
ขนาดอีลิเมนต์(2มม. เล็กสุด1 มม.)

รูปที่ 4.18 แสดงการแบ่งอีลิเมนต์ของชิ้นงานที่ใช้จำลอง

4. กำหนดขอบเขตของส่วนประกอบต่างๆในชิ้นงานเช่นทางเข้าอากาศ, ทางออกอากาศ, ส่วนที่เป็นวัสดุที่มีความพรุน (Porous media) และบริเวณที่ใส่เชื้อเพลิง

5. การตั้งค่ารูปแบบสมการที่ใช้จำลอง

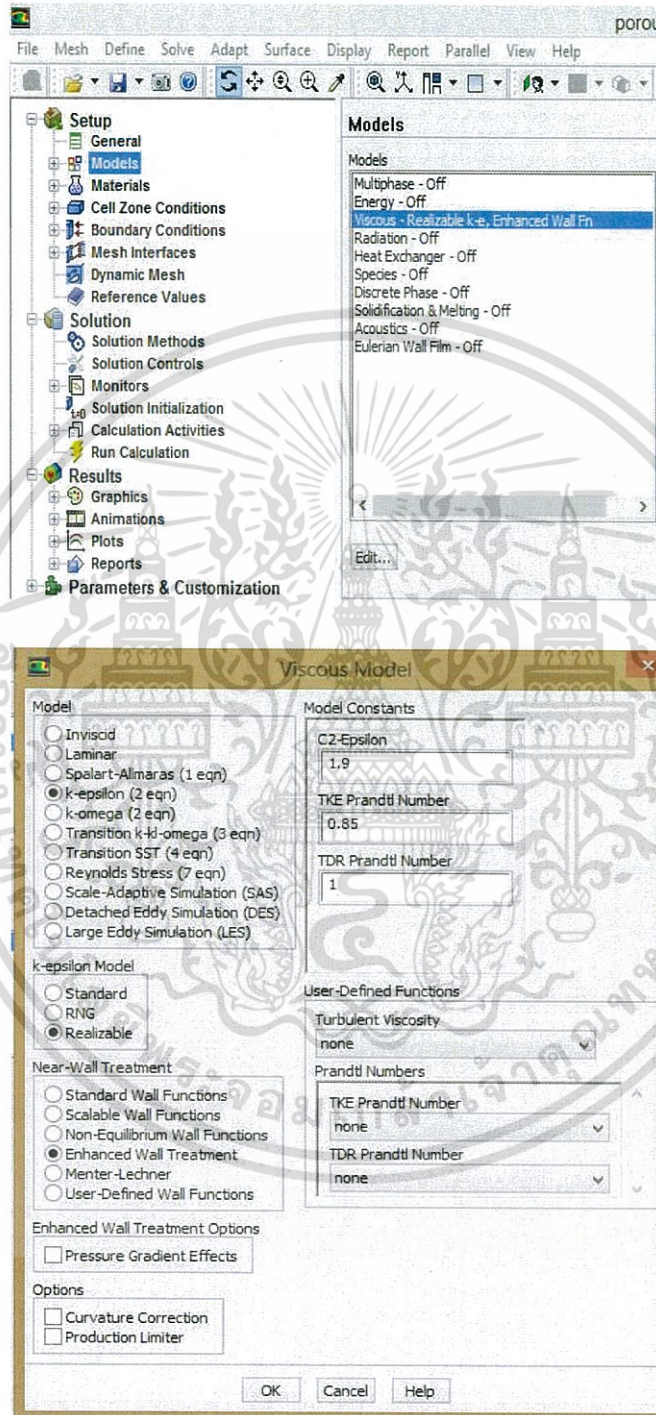
จากการค้นคว้าข้อมูลการจำลองการไหลในคอมพิวเตอร์พบว่า การจำลองการไหลในหัวเผาที่มีรูปทรงเป็นทรงกระบอกจำเป็นต้องใช้สมการต่างๆดังนี้

1. Turbulent kinetic energy: RNG K-  $\epsilon$  model
2. Velocity & Pressure: Realizable K-  $\epsilon$  model

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.2.1 หน้าจอแสดงผลของโปรแกรมANSYS

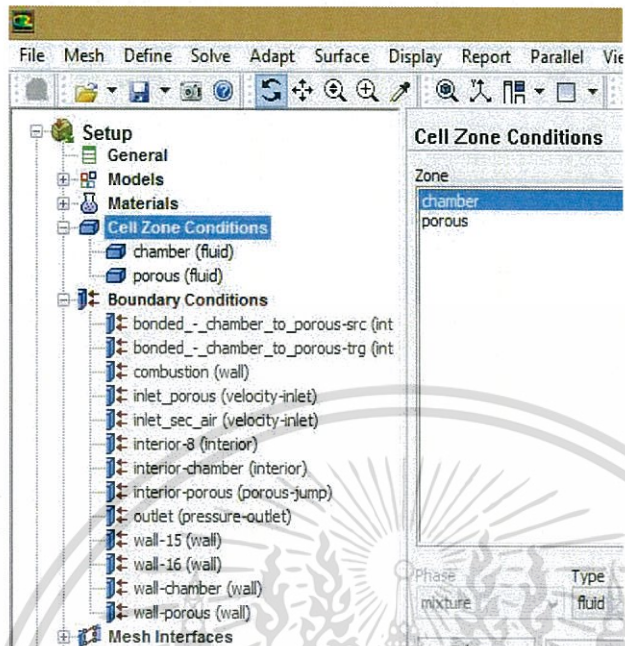
การกำหนดรูปแบบสมการที่ใช้จำลองพร้อมทั้งค่าคงที่



รูปที่ 4.19 แสดงการกำหนดสมการที่ใช้จำลอง

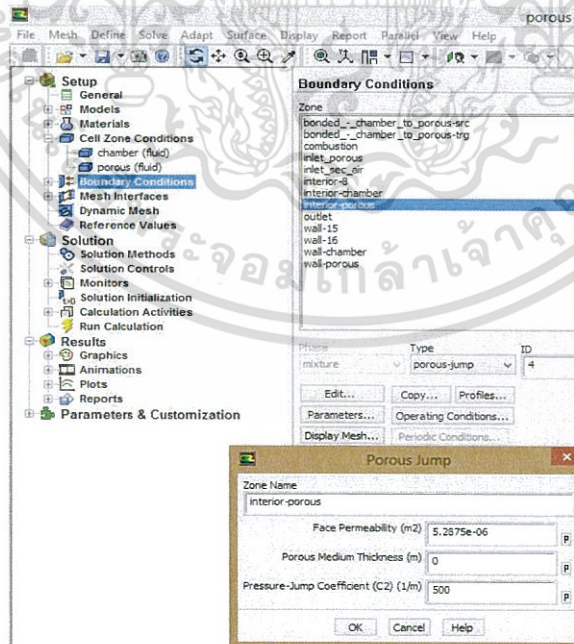
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การกำหนดขอบเขต(Boundary condition)



รูปที่ 4.20 แสดงการกำหนดเงื่อนไขที่ขอบเขตต่างๆ

การตั้งค่าค่าความพรุน(porosity)ของผนังท่อPrimary air pipeที่ทำหน้าที่กระจายอากาศสู่เชื้อเพลิง

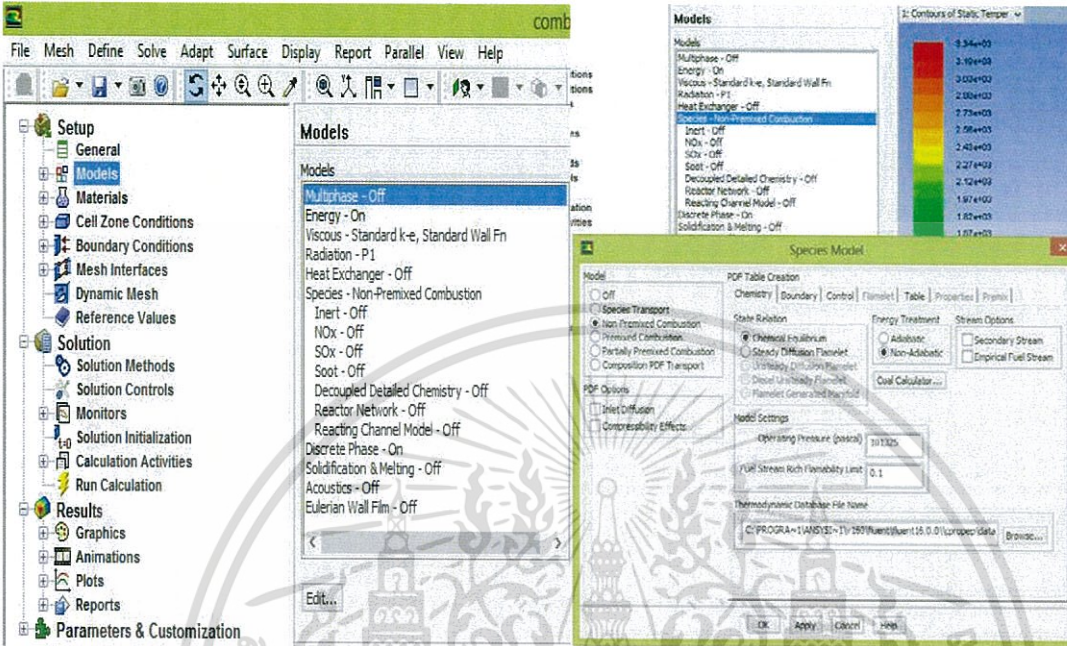


รูปที่ 4.21 แสดงการกำหนดเงื่อนไขporous mediaที่ primary air pipe

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

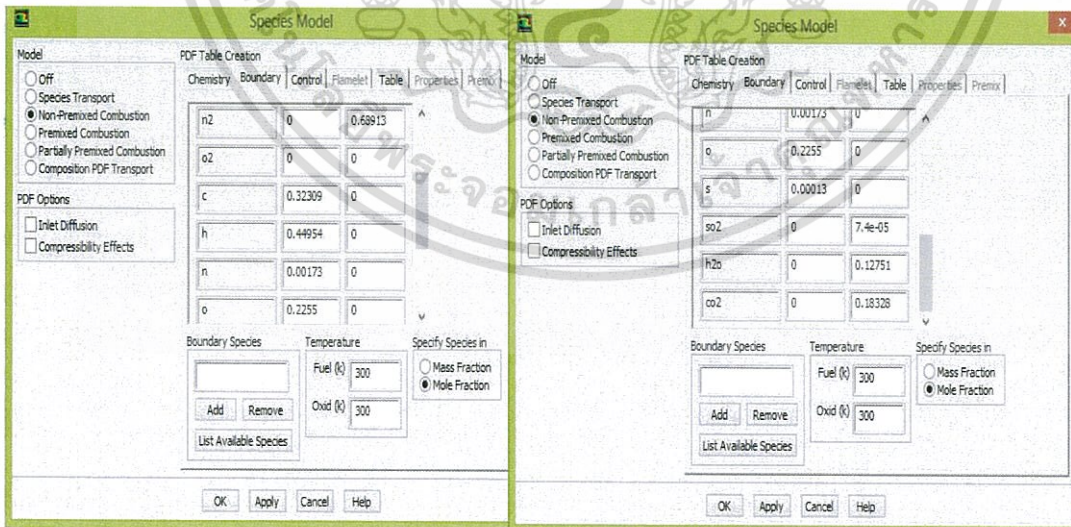
### 4.2.3 การจำลองการเผาไหม้

ตั้งค่าการทดสอบการเผาไหม้โดยเลือกใช้สมการ k-epsilon standard wall fn กำหนด radiation และกำหนด species ของเชื้อเพลิงดังภาพ



รูปที่ 4.22 แสดงการกำหนดการตั้งค่าสมการการเผาไหม้

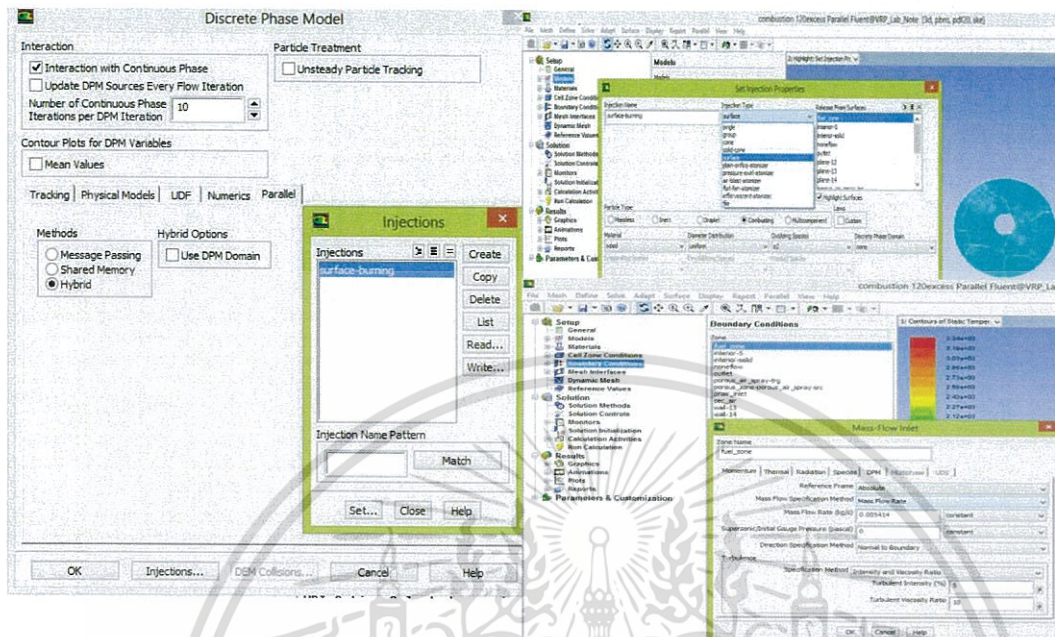
Species modelสามารถหาจากตารางultimate analysisที่กล่าวไปข้างต้น และใช้ค่า mole fraction มาใส่ข้อมูลเชื้อเพลิงได้ดังนี้



รูปที่ 4.23 แสดงการกำหนดคุณลักษณะของเชื้อเพลิงที่ใช้ในการจำลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำหนดdiscrete phase โดยตั้งค่าinjectionเพื่อกำหนดzoneที่เชื้อเพลิงถูกใช้เผาไหม้ และกำหนดmass flowrate ของเชื้อเพลิงจากที่คำนวณไว้แล้ว



รูปที่ 4.23 แสดงการกำหนดพื้นที่ที่เกิดการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง

### 4.3 เงื่อนไขการจำลองการไหลของอากาศ

ตารางที่ 4.1 แสดงเงื่อนไขการจำลองที่Excess air 120-150%

Excess air(%)	AF	mass flow rate	kg/s	volume flow rate	$m^3/s$	velocities	m/s
0	5.304299	0.028717	kg/s	0.02442	$m^3/s$	12.44312	m/s
10	5.834729	0.031589	kg/s	0.026862	$m^3/s$	13.68743	m/s
20	6.365159	0.034461	kg/s	0.029304	$m^3/s$	14.93174	m/s
30	6.895589	0.037333	kg/s	0.031746	$m^3/s$	16.17605	m/s
40	7.426019	0.040204	kg/s	0.034187	$m^3/s$	17.42037	m/s
50	7.956449	0.043076	kg/s	0.036629	$m^3/s$	18.66468	m/s

กำหนดเงื่อนไขในการจำลองโดยใช้ความเร็วของอากาศที่เข้าตาปฏิกิริยาที่เงื่อนไข Excess air ต่างๆโดยอากาศนั้นจะถูกแบ่งเป็น2ทางเพื่อเข้าห้องเผาไหม้

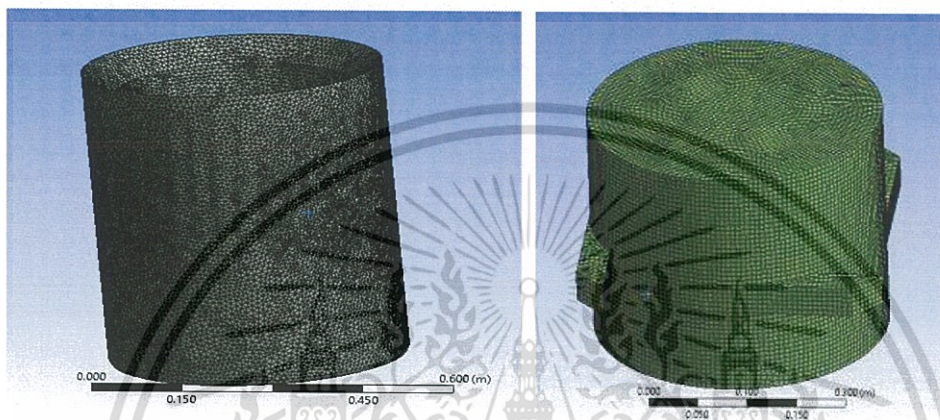
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.4 การแบ่งชิ้นงานในการจำลอง

### 4.4.1 จำลองการไหลของอากาศเพื่อหาความเร็วในการไหลที่ทางเข้า

หาความเร็วในการไหลของอากาศที่ทางเข้า Primary air pipe กับ Secondary air channel เพื่อประหยัดเวลาในการจำลองสามารถทำได้โดยใช้ 2 ชิ้นส่วนคือ

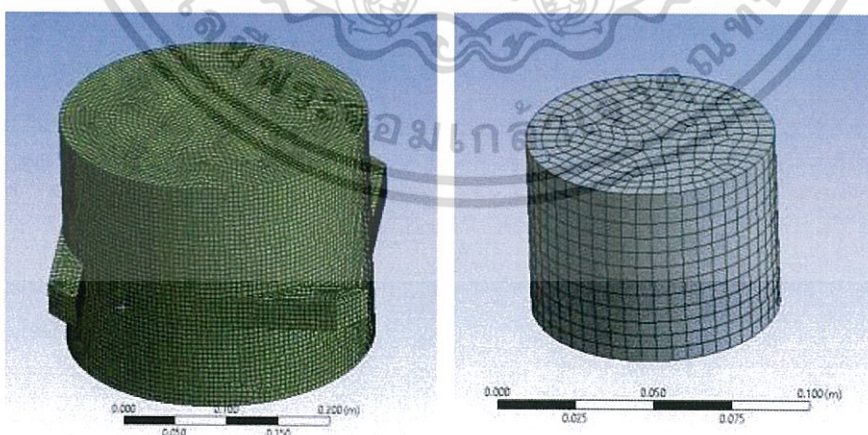
1. External
2. Combustion chamber



### 4.4.2 จำลองการไหลเพื่อหาค่าความปั่นป่วนในห้องเผาไหม้

เพื่อวิเคราะห์หาค่าความปั่นป่วนที่เกิดจาก Secondary air channel ในห้องเผาไหม้เพื่อประหยัดเวลาในการจำลองสามารถทำได้โดยใช้ 2 ชิ้นส่วนในการจำลอง คือ

1. Combustion chamber
2. Primary air pipe

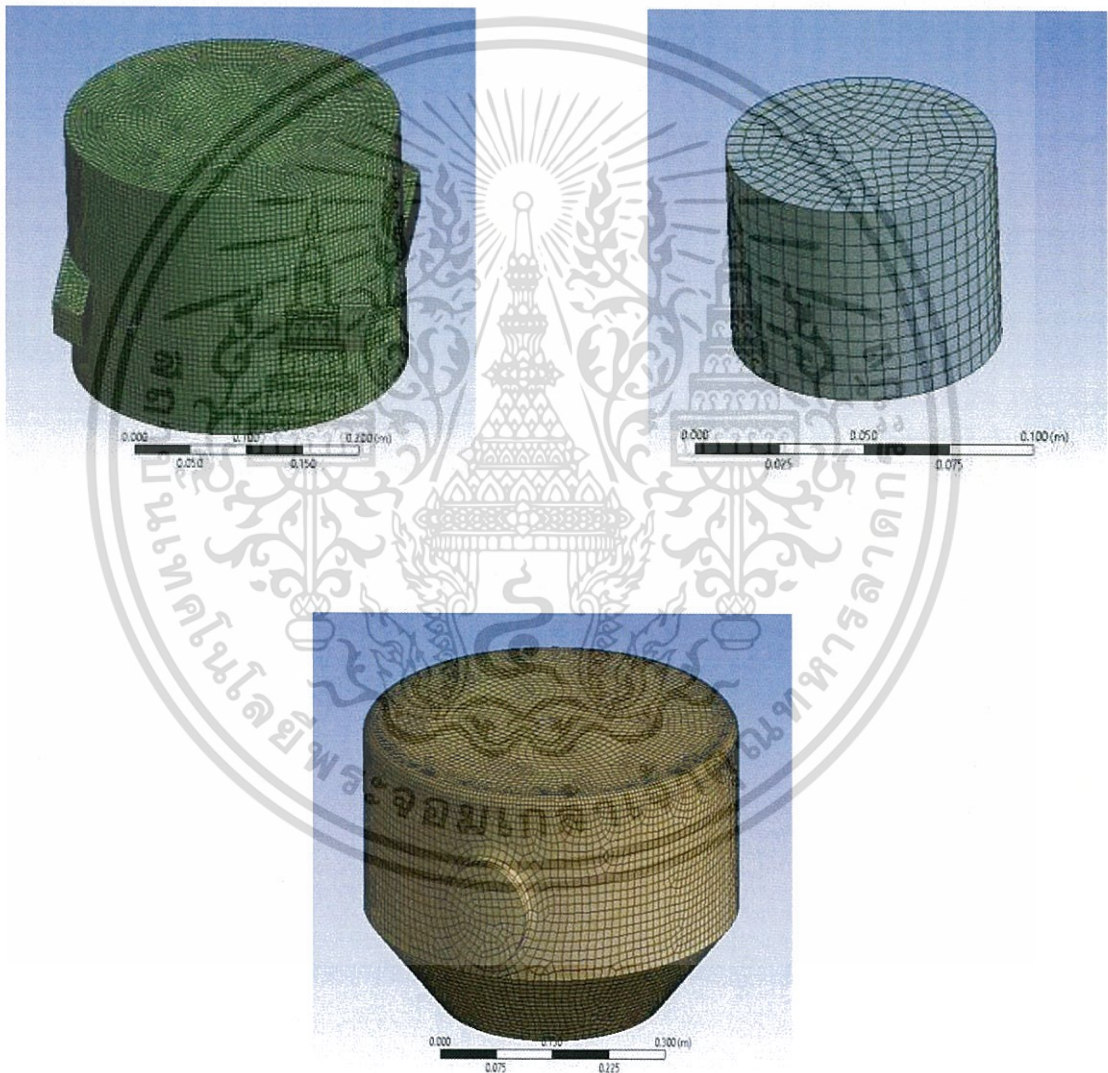


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.4.3 จำลองการไหลเพื่อหาความเร็วในการไหลออกเตาปฏิกรณ์

เพื่อวิเคราะห์หาค่าความเร็วของอากาศเมื่อไหลเข้าไปในห้องเผาไหม้และไหลออกจากเตาปฏิกรณ์ สามารถนำผลการจำลองมาวิเคราะห์การไหลของอากาศในบริเวณHeadของเตาปฏิกรณ์ได้เพื่อ ประหยัดเวลาในการจำลองสามารถทำได้โดยใช้3ชั้นส่วนคือ

1. Combustion chamber
2. Primary air pipe
3. Head

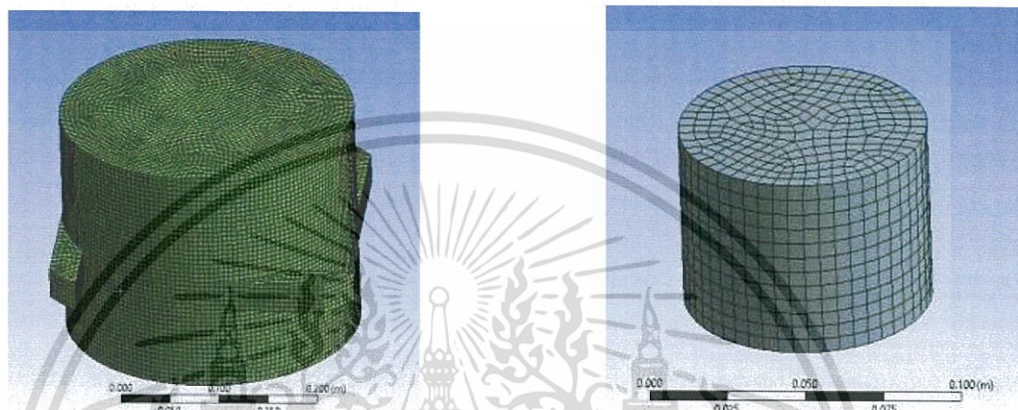


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.4.4 จำลองการเผาไหม้

เพื่อวิเคราะห์หาอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในห้องเผาไหม้และค่าอุณหภูมิสูงสุดรวมทั้งอุณหภูมิเฉลี่ยที่เกิดขึ้นของการเผาไหม้ที่ปริมาณ Excess air 120%-150% เพื่อประหยัดเวลาในการจำลองสามารถทำได้โดยใช้ชิ้นส่วน 2 ชิ้นในการจำลองคือ

1. Combustion chamber
2. Primary air pipe



#### 4.5 การบันทึกผลการจำลอง

##### 4.5.1 ตารางบันทึกผลการแบ่งอากาศเป็นสองทางเพื่อเข้าห้องเผาไหม้

ตารางที่ 4.2 แสดงผลการจำลองหาความเร็วอากาศที่ทางเข้าห้องเผาไหม้ที่ Excess air 120-150%

Excess air	Velocity inlet(m/s)	Primary air(m/s)	Secondary air(m/s)
120%			
130%			
140%			
150%			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.5.2 ตารางบันทึกผลอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในห้องเผาไหม้

ตารางที่ 4.3 แสดงผลการจำลองการอุณหภูมิการเผาไหม้ที่Excess air 120-150%

Excess air	Maximum temperature(K)	Average Temperature(K)
120%		
130%		
140%		
150%		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

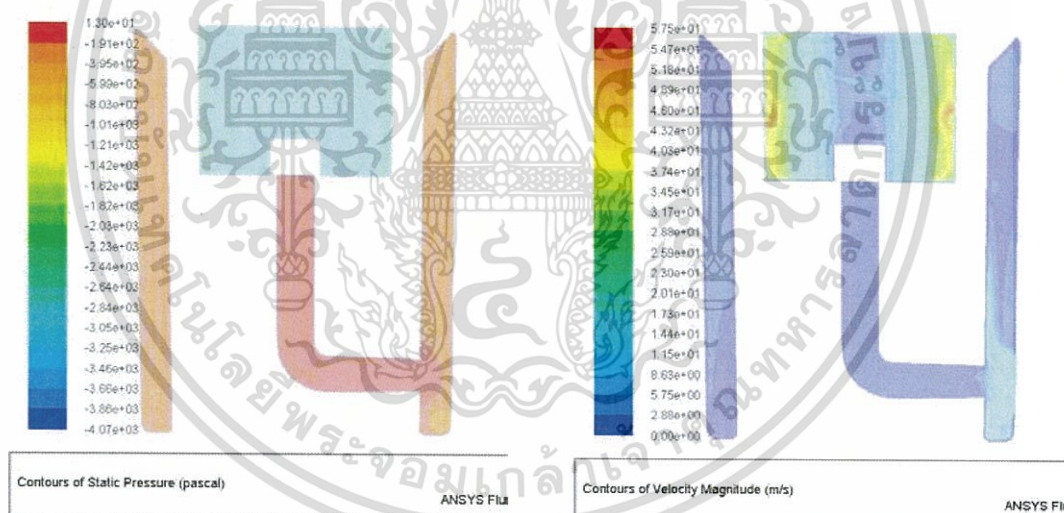
### ผลการทดลองและการอภิปราย

ในบทนี้จะนำเสนอผลการทดลองและการอภิปรายผลที่ได้จากการทดลองโดยผลการทดลองแบ่งเป็น 4 หัวข้อคือ ผลการจำลองการแบ่งอากาศเข้าห้องเผาไหม้ ลักษณะการหมุนวนของอากาศภายในห้องเผาเชื้อเพลิงชีวมวล ผลของอุณหภูมิสูงสุดในห้องเผาไหม้และผลของอุณหภูมิเฉลี่ยที่เกิดขึ้นในห้องเผาไหม้ในย่านการทดลองที่แตกต่างกัน

#### 5.1 ผลการจำลองการไหลของอากาศ

##### 5.1.1 ผลการจำลองการแบ่งอากาศเป็น 2 ส่วนก่อนเข้าห้องเผาไหม้

สามารถทำได้โดยการจำลองการไหลในโปรแกรม ANSYS Fluent ซึ่งจะได้แผนภาพแสดงผลความดันและความเร็วการไหลที่เกิดขึ้นในห้องเผาไหม้ ซึ่งสามารถหาความเร็วการไหลได้ดังที่แสดงไว้ในตาราง 5.1



รูปที่ 5.1 แสดงContour ของความดันและความเร็วของอากาศในเตาปฏิกรณ์

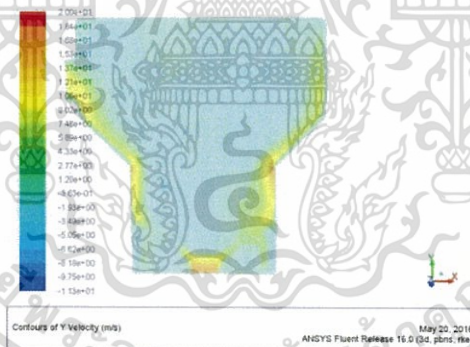
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.1 แสดงผลการแบ่งอากาศเข้าห้องเผาไหม้

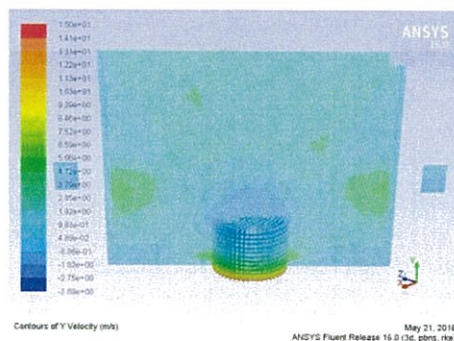
Excess air	Velocity inlet(m/s)	Primary air(m/s)	Secondary air (m/s)
120%	15.00	15.54	21.70
130%	16.17	16.78	34.02
140%	17.42	18.80	41.17
150%	18.66	22.42	56.37

### 5.1.2 ผลการไหลของอากาศภายในห้องเผาไหม้

เมื่อได้ค่าความเร็วการไหลของอากาศที่ทางเข้าของห้องเผาไหม้แล้วจึงนำมาใช้จำลองการไหลเพื่อพิจารณาContourของการไหลที่เกิดขึ้นในห้องเผาไหม้ โดยจะพิจารณาความปั่นป่วนจาก Turbulent Intensity และความเร็วสูงสุดในการไหล ในแต่ละเงื่อนไข Excess air ที่ 120% Excess air



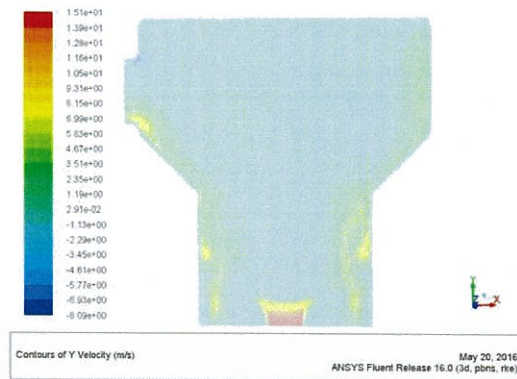
รูปที่ 5.2 แสดงความเร็วในแนวแกน Y ที่เกิดขึ้นในห้องเผาไหม้



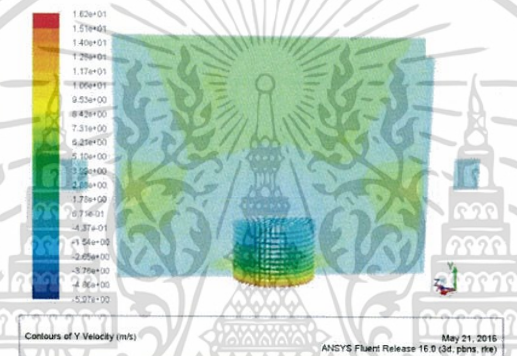
รูปที่ 5.3 แสดงความเร็วในแนวแกน Y ที่เกิดขึ้นรอบ Primary air pipe

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ 130% Excess air

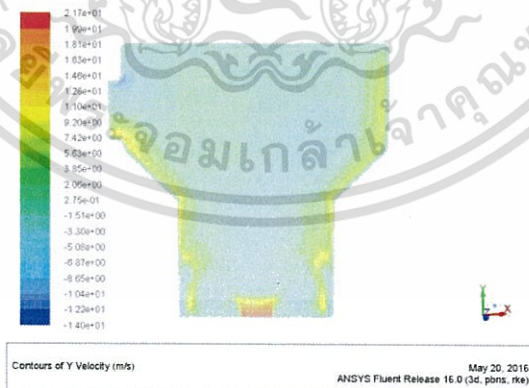


รูปที่ 5.4 แสดงความเร็วในแนวแกน Y ที่เกิดขึ้นในท้องเผาไหม้ ที่ 130% excess air



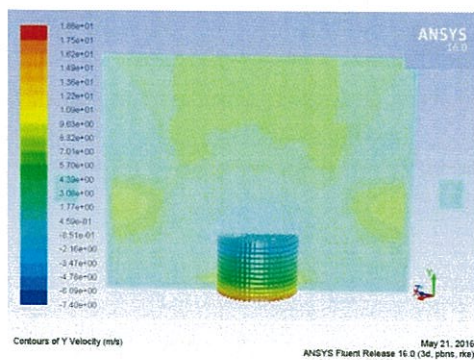
รูปที่ 5.5 แสดงความเร็วในแนวแกน Y ที่เกิดขึ้นรอบ Primary air pipe ที่ 130% excess air

ที่ 140% Excess air



รูปที่ 5.6 แสดงความเร็วในแนวแกน Y ที่เกิดขึ้นในท้องเผาไหม้ ที่ 140% excess air

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

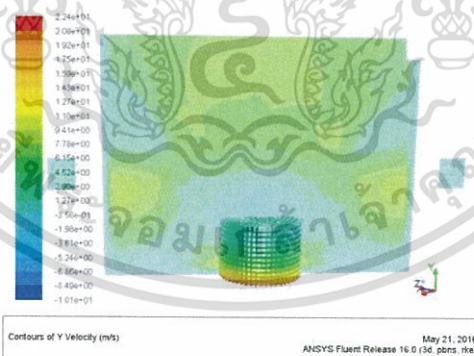


รูปที่ 5.7 แสดงความเร็วในแนวแกนYที่เกิดขึ้นรอบPrimary air pipe ที่140% excess air

ที่150% Excess air



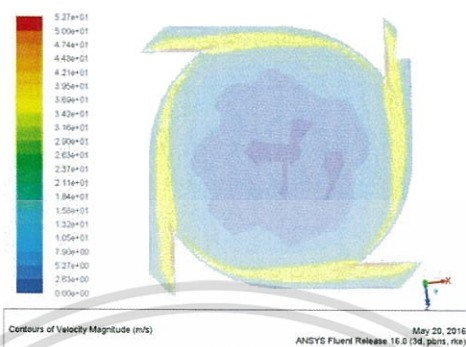
รูปที่ 5.8 แสดงความเร็วในแนวแกนYที่เกิดขึ้นในท้องเผาไหม้ ที่150% excess air



รูปที่ 5.9 แสดงความเร็วในแนวแกนYที่เกิดขึ้นรอบPrimary air pipe ที่150% excess air

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

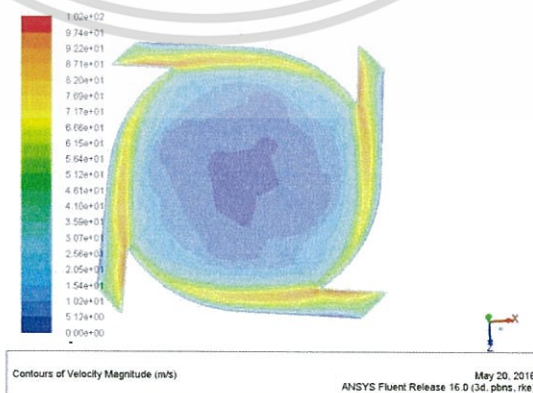
ความปั่นป่วนที่เกิดขึ้นในห้องเผาไหม้เนื่องจาก Secondary air channel โดยจะแสดงภาพตัดขวางของ ห้องเผาไหม้เพื่อดู Contour ของกระแสอากาศที่ไหลวน



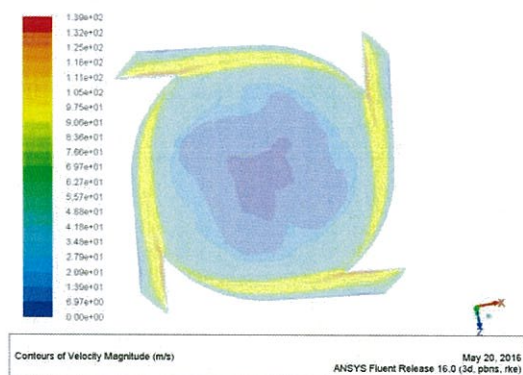
รูปที่ 5.10 แสดงความเร็วในการหมุนวนในห้องเผาไหม้ ที่ 120% excess air



รูปที่ 5.11 แสดงความเร็วในการหมุนวนในห้องเผาไหม้ ที่ 130% excess air



เอกสารนี้เป็นเอกสารรูปที่ 5.12 แสดงความเร็วในการหมุนวนในห้องเผาไหม้ ที่ 140% excess air โดยขอใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.13 แสดงความเร็วในการหมุนวนในห้องเผาไหม้ ที่ 150% excess air

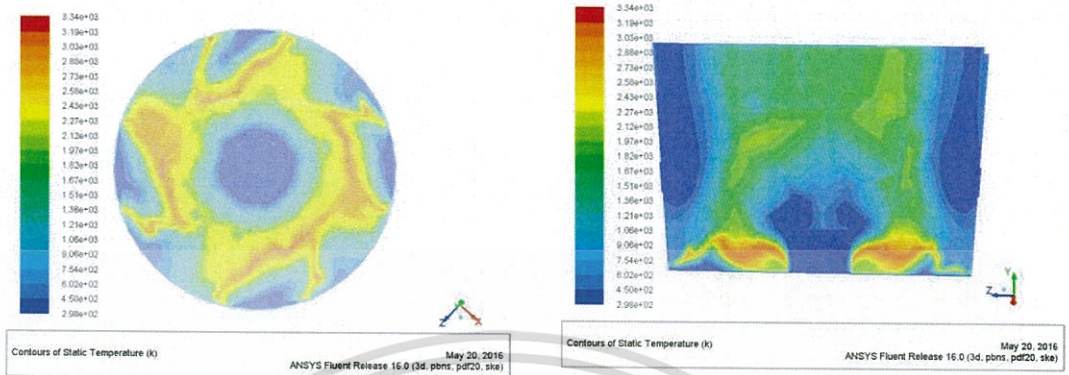
เมื่อนำผลการจำลอง(contour)ที่ได้มาวิเคราะห์จะสามารถหาค่าความเร็วในการไหลและความปั่นป่วนที่เกิดขึ้นในห้องเผาไหม้ได้ ซึ่งแสดงในตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 แสดงความเร็วและความปั่นป่วนที่เกิดขึ้นในห้องเผาไหม้

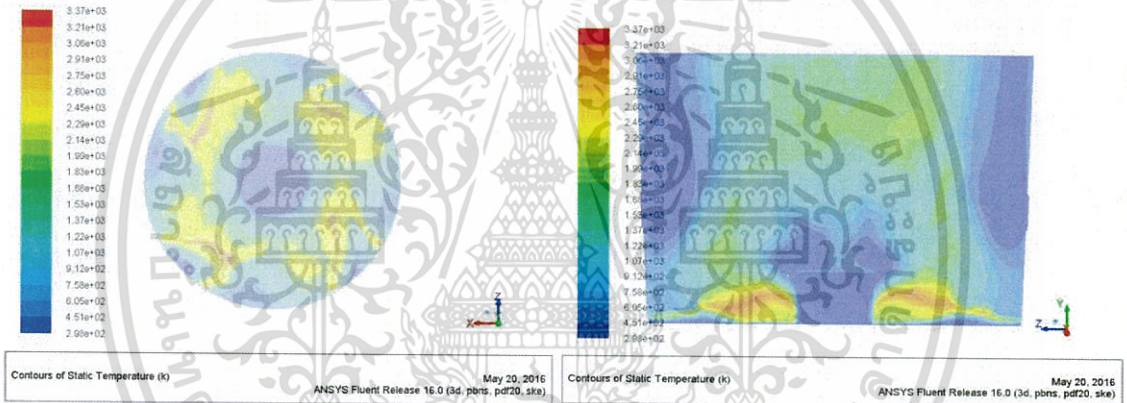
Primary air(m/s)	Secondary air(m/s)	Max. Velocity(m/s)	Max. Turbulent intensity
15.54	21.70	35.59	266.19%
16.78	34.02	55.79	357.46%
18.80	41.17	68.94	409.24%
22.42	56.37	93.58	494.76%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

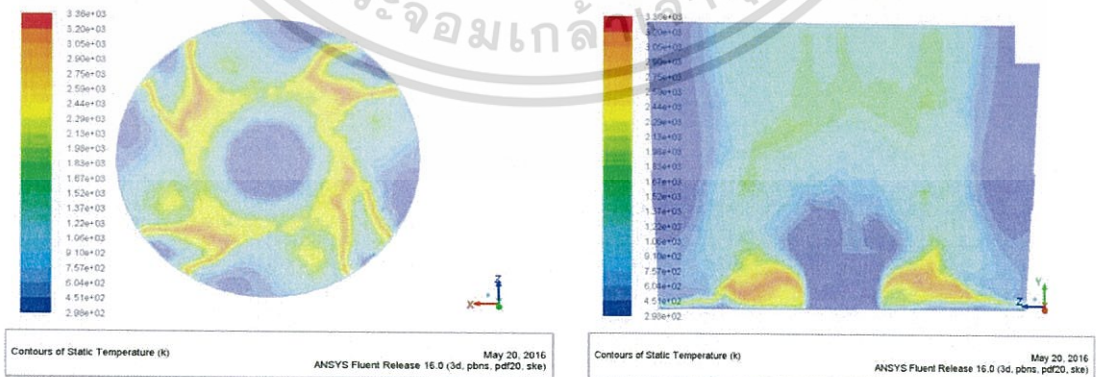
### 5.1.3 ผลของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นภายในห้องเผาไหม้



รูปที่ 5.14 แสดงอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในห้องเผาไหม้ ที่ 120% excess air

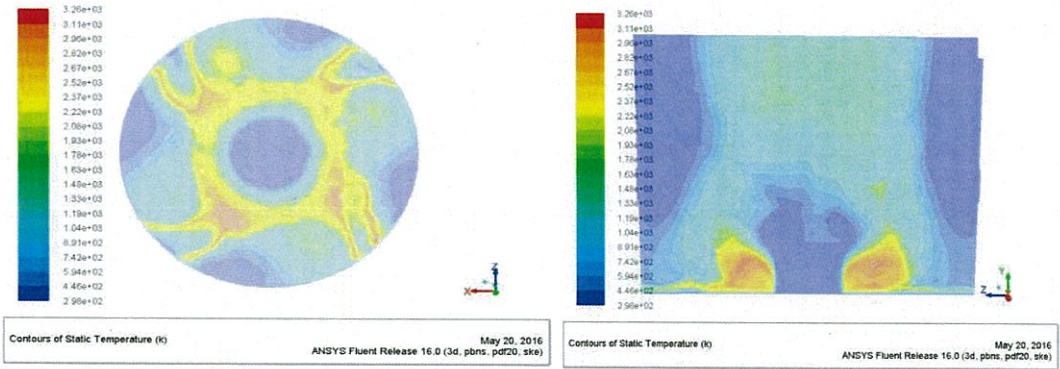


รูปที่ 5.15 แสดงอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในห้องเผาไหม้ ที่ 130% excess air



รูปที่ 5.16 แสดงอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในห้องเผาไหม้ ที่ 140% excess air

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.17 แสดงอุณหภูมิที่เกิดในห้องเผาไหม้ ที่ 150% excess air

ตารางที่ 5.3 แสดงอุณหภูมิสูงสุดและอุณหภูมิจเฉลี่ยที่เกิดขึ้นในห้องเผาไหม้

Excess air	Maximum temperature	Average temperature
120%	2140 K	1570 K
130%	2170 K	1400 K
140%	2160 K	1220 K
150%	2060 K	1100 K

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 6

# สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

### 6.1 สรุปผลการทดลอง

1. การจ่ายเชื้อเพลิงแบบเม็ดเข้าเตาปฏิกรณ์นั้นช่วงเวลาที่เหมาะสมสำหรับการจ่ายเชื้อเพลิงในแต่ละครั้งคือ 10 นาที เพราะว่า Resident time ของเชื้อเพลิงที่หาได้นั้นบ่งบอกถึงความสามารถในการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงว่าติดไปยากหรือง่ายแค่ไหน

2. จากผลการจำลองการไหลของอากาศพบว่าหากใช้ปริมาณอากาศที่ Excess air 150% จะทำให้ความปั่นป่วนในห้องเผาไหม้มีค่าสูงสุด เชื้อเพลิงจะสามารถคลุกเคล้าผสมกันทำให้การเผาไหม้นั้นทำได้สมบูรณ์

3. จากผลของการจำลองพบว่าที่ Excess air 120% สามารถทำให้การจำลองการเผาไหม้นั้นได้อุณหภูมิสูงสุด แต่ทว่าเชื้อเพลิงบริเวณขอบผนังของห้องเผาไหม้นั้นอาจจะไม่สามารถเผาไหม้ได้หมดเนื่องจากความปั่นป่วนที่เกิดขึ้นจาก Secondary air channel มีค่าน้อย อาจจะมีเชื้อเพลิงบริเวณขอบของห้องเผาไหม้หลงเหลืออยู่

### 6.2 ข้อเสนอแนะ

#### 6.2.1 ด้านการอนุรักษ์พลังงาน

เนื่องด้วยอุณหภูมิที่สูงมากภายในหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลทำให้เกิดการสูญเสียความร้อนออกสู่สิ่งแวดล้อมซึ่งสามารถทำการหุ้มฉนวนที่ผิวรอบนอกของตัวหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลเพื่อทำการอนุรักษ์พลังงานความร้อนไม่ให้สูญเสียไปกับสิ่งแวดล้อมรอบข้างได้

#### 6.2.2 ด้านการนำซีเถ้าออก

ตระกรับรองเชื้อเพลิงนั้นมีไว้เพื่อทำให้ซีเถ้าตกลงสู่ด้านล่างเตา ทำให้ห้องเผาไหม้นั้นไม่มีซีเถ้าหลงเหลืออยู่ ซึ่งซีเถ้าเหล่านั้นจะมีผลทำให้ประสิทธิภาพในการเผาไหม้ลดลง ควรจะมีการศึกษาเรื่องการถ่ายโอนมวลเพื่อออกแบบขนาดของรูระบายซีเถ้าให้เหมาะสมในอนาคต

#### 6.2.3 ด้านการหมุนวนของอากาศภายในเตา

เนื่องด้วยตัว Swirl channel ที่ทำการออกแบบนั้นมี 4 ช่องซึ่งในการจำลองนั้นทำการทดสอบที่เปิดช่องอากาศครบ 4 ช่อง อาจจะมีการปรับปรุงการเปิดช่องอากาศเพื่อทดสอบหาว่าจำนวนช่องอากาศนั้นมีผลต่อการเผาไหม้มากน้อยเพียงใด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 6.2.4 ด้านปริมาณอากาศปฐมภูมิและทุติยภูมิ

เนื่องด้วยการแบ่งของปริมาณอากาศภายในเตาระหว่าง ทุติยภูมิและตติยภูมินั้นยังเกิดขึ้นจากลักษณะโครงสร้างของหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลทำให้การเพิ่มหรือลดปริมาณอากาศที่ทางเข้าทั้งสองทางไม่สามารถปรับเปลี่ยนให้แตกต่างกันได้ จึงควรออกที่ควบคุมขนาดของช่องอากาศเพื่อปรับเปลี่ยนปริมาณอากาศที่เข้าห้องเผาไหม้ไว้ใช้ทดสอบประสิทธิภาพในการเผาไหม้ที่เงื่อนไขแตกต่างจากเดิม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บรรณานุกรม

- [1] กมลเทพ กิจเจริญเสรี, กิตติ ดิลกสัมพันธ์, ชนนัทธ บัญผ่อง และ ชาตรี เกตุทอง (2544) เตาเผาเชื้อเพลิงชีวมวลแบบวอร์เท็ค สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [2] กิตติพงศ์ สุขศรีเมือง, จิรัฏฐ์ ปาโสม, ถาวร บุญจำเนียร และ นิสิต ทองประกอบ (2544) เตาเผาชีวมวลแบบฟลูอิดไดซ์เบด สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [3] กิตติกร สาสุจิตต์. 2552. ‘การหาอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงที่เหมาะสมที่สุด สำหรับเตาเผาแกลบแบบไซโคลน.’ วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
- [4] Eugene L. Keating.(2007). Applied Combustion
- [5] Chung K. Law (2006) Combustion Physics
- [6] Sjaak Van Loo, Jaap Koppejan (2008). The Handbook of Biomass Combustion & Co-Firing
- [7] <http://www.froeling.com/en/products/pellet.html>
- [8] <http://www.omafra.gov.on.ca/english/engineer/facts/14-009.htm>
- [9] Sjaak Van Loo , Jaap Koppejan.(2008). The handbook of biomass combustion and co-firing
- [10] Thomas F. McGowan (Editor), Michael L. Brown (Associate Editor), William S. Bulpitt (Associate Editor), James L. Walsh, Jr. (Associate Editor). (2009). ‘Biomass and Alternate Fuel Systems: An Engineering and Economic Guide.’
- [11] กลุ่มพลังงานชีวมวลสำนักวิจัยค้นคว้าพลังงาน  
กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน.(2002). บทความคู่มือชีวมวล.
- [12] Parisa Sayad , Alessandro Schonborn , Jens Klingmann “ Experimental investigation of the stability limits of premixed syngas-air flames at two moderate swirl numbers. ” 16 April 2015. (references)
- [13] Jun Fu , Yuan Tang , Jianxing Li , Yi Ma , Wei Chen , Hong Li , “Four kind of the two-equation turbulence model’s research on flow field simulation performance of DPF’s porous media and swirl-type regeneration burner.”, 22 October 2015.
- [14] Adi Surjosatyo , Farid Nasir Ani , “Study of Enhancing the Swirl Burner Performance On a small scale Biomass Gasification. ” August 2011
- [15] Wojciech Jerzak , Monika Kuznia , “Experimental study of impact of swirl number as well as oxygen and carbon dioxide content in natural gas combustion air on flame flashback and blow-off.” 4 January 2016.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [16] Chien-Chou Tseng , Cheng-Jui Li “Numerical investigation of the inertial loss coefficient and the porous media model for the flow through the perforated sieve tray,” 24 December 2015.
- [17] N.G. Orfanoudakis , A. HatziaPOSTOLOU , K. Krallis , E. Mastorakos , K.Sardi , D.G.Pavlou& N.Vlachakis “Design , evaluation measurements and modeling of a small swirl stabilized laboratory Burner.” IFRF combustion Journal December 2005.



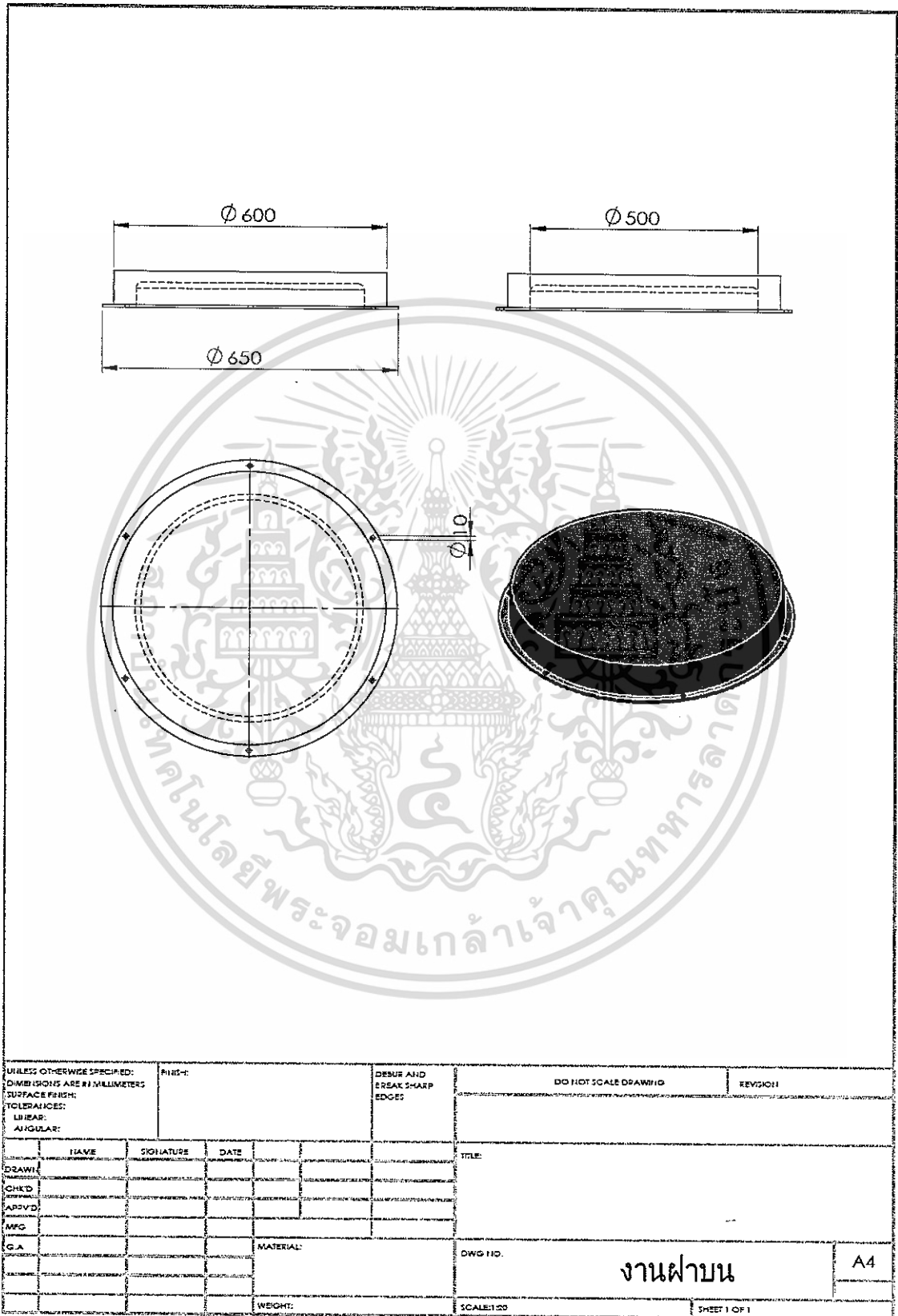
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



## ภาคผนวก

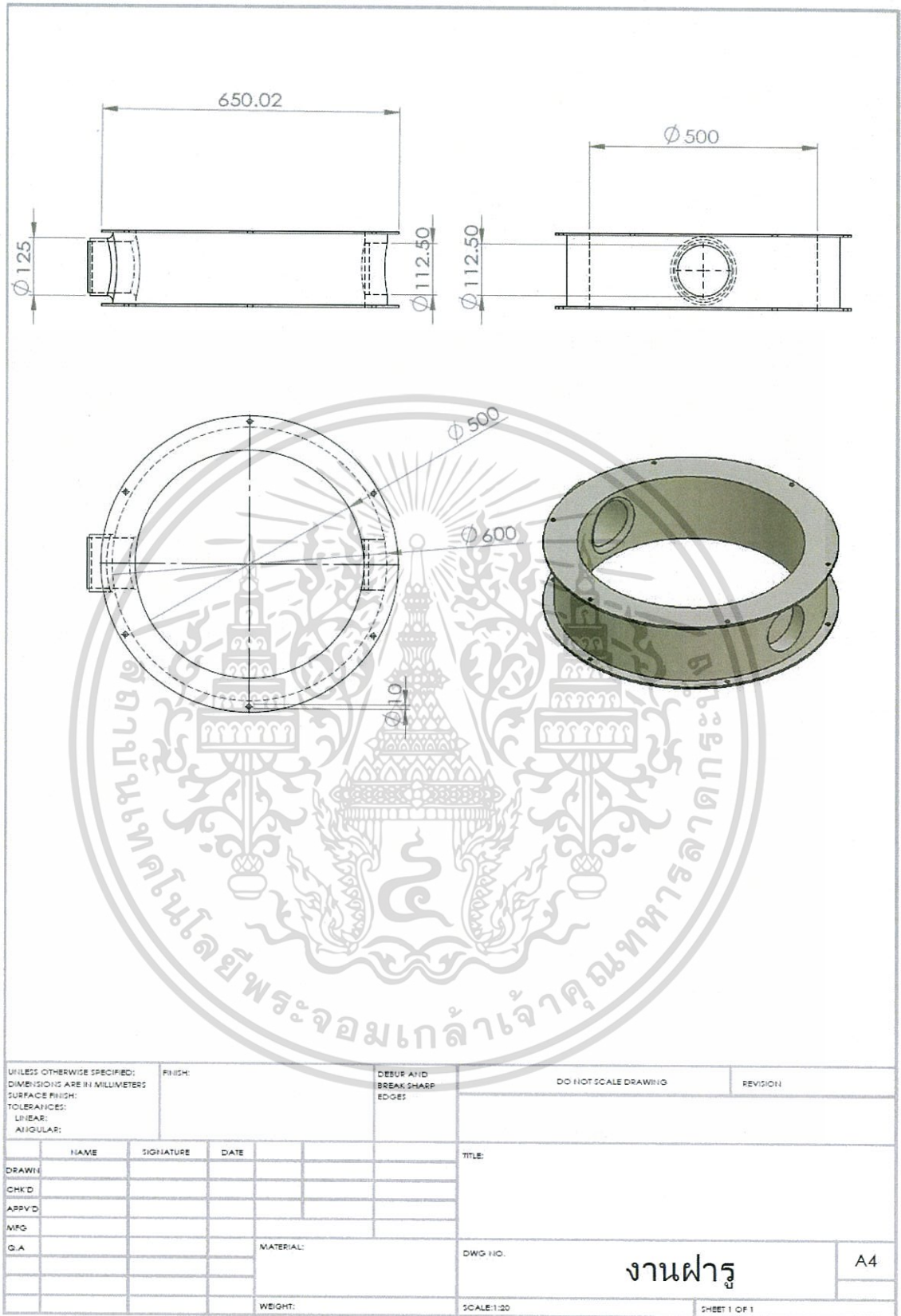
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก แสดงรายละเอียด และขนาด (เขียนแบบ) ของชิ้นส่วนต่างๆของเตาเผา



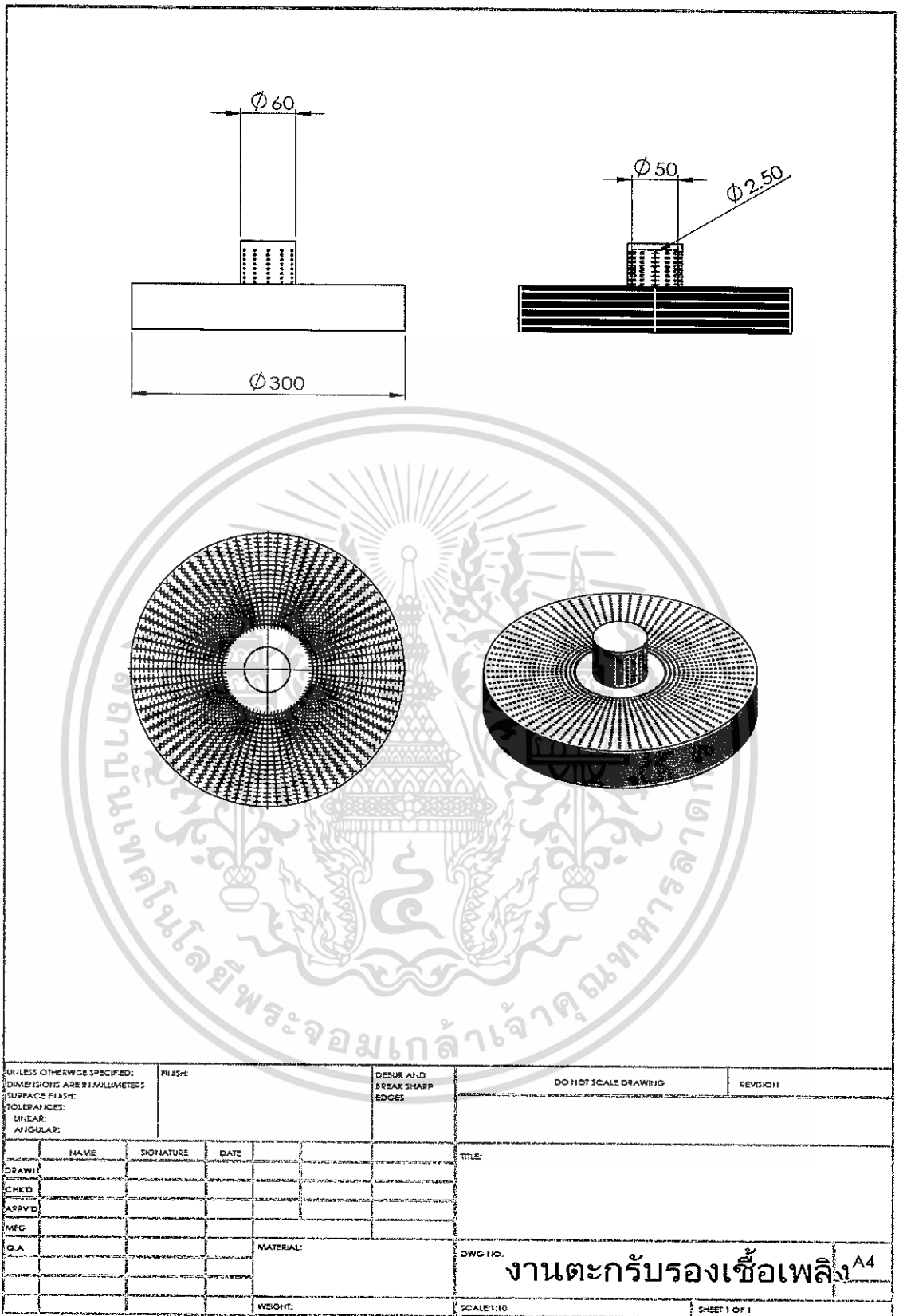
รูปที่ 1ก Dimension ของ Head

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



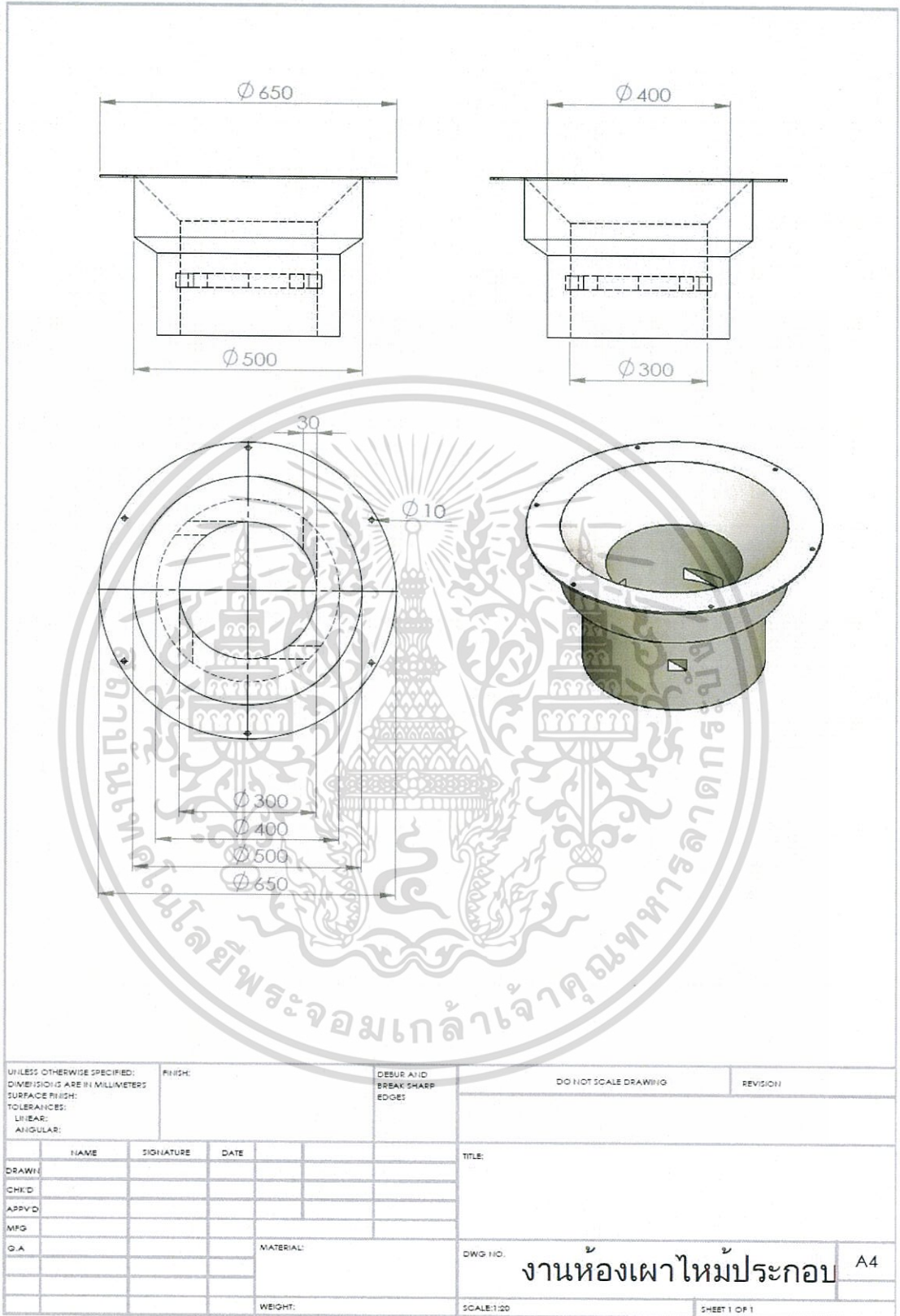
รูปที่ 1ก Dimension ของ Lower head

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



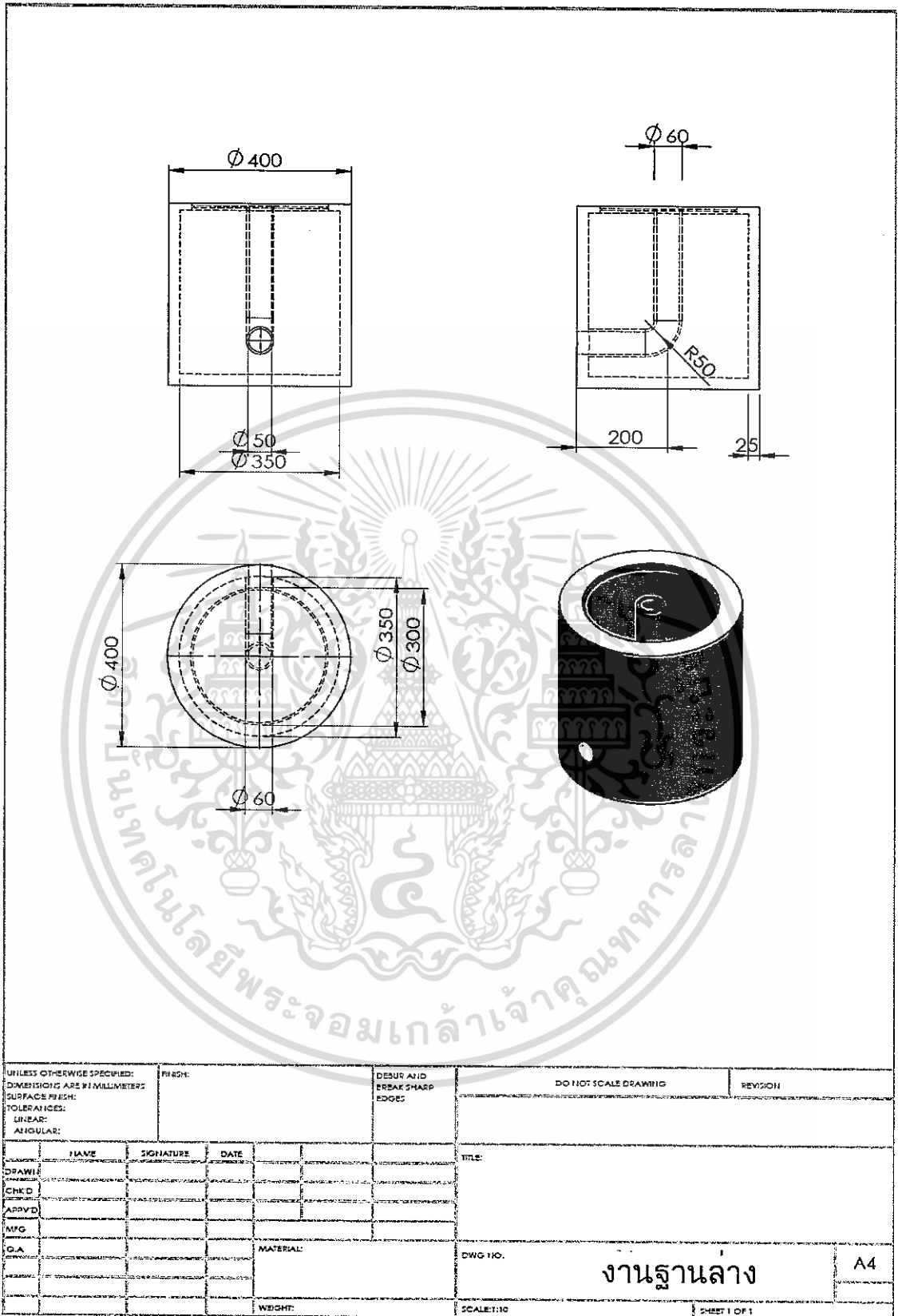
รูปที่ 1ก Dimension ของ Primary air pipe and Perforation

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



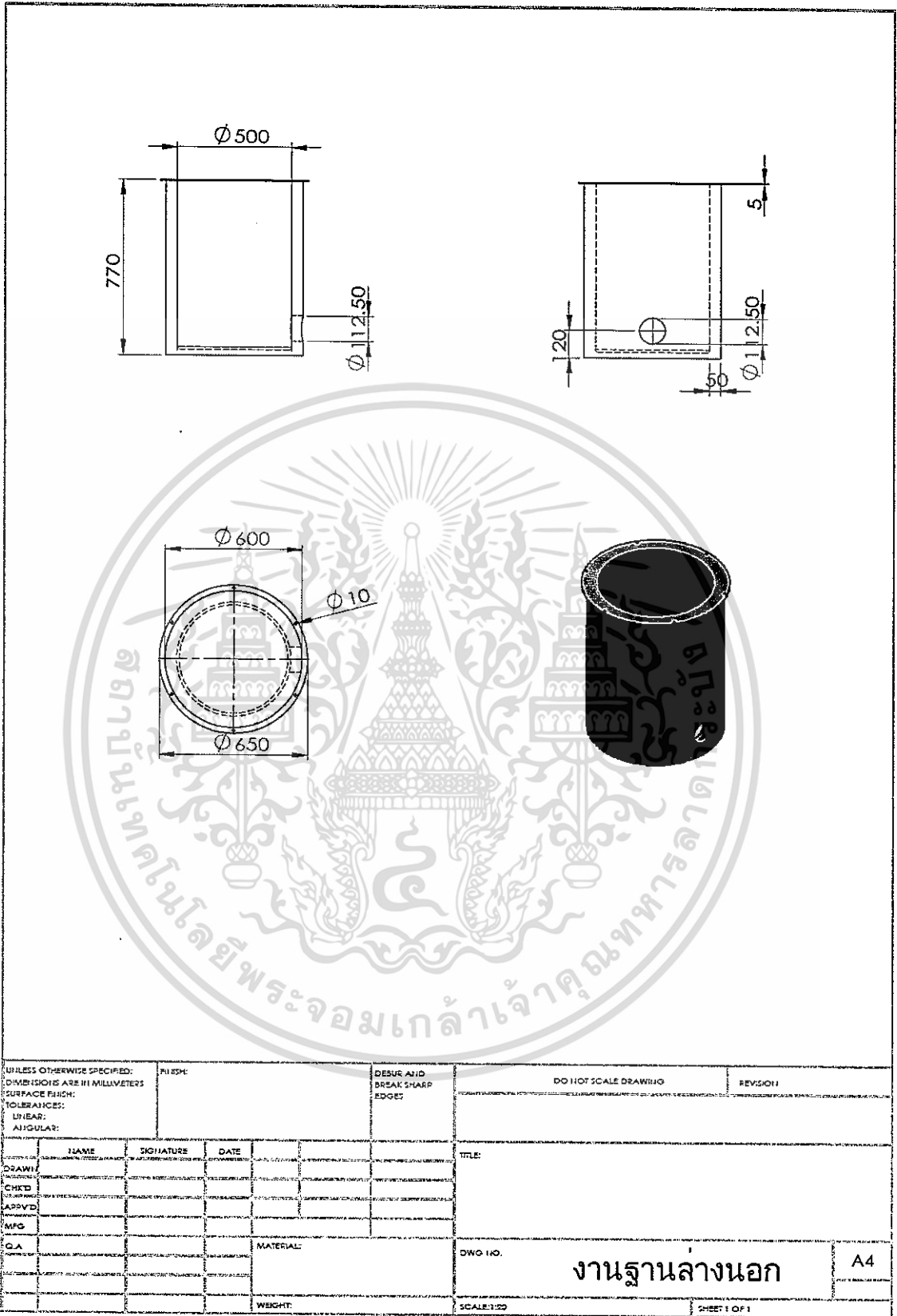
รูปที่ 1ก Dimension ของ Combustion zone

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1ก Dimension ของ Connect pipe and Inner base

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1n Dimension ของ Outer base

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้