

การพัฒนาหัวเผาเชื้อเพลิงระดับอุตสาหกรรมที่มีการอุ่นอากาศก่อนการเผาไหม้

DEVELOPMENT OF AN INDUSTRIAL BURNER WITH PREHEATED AIR

ปกัส ชูโชติสิริ
ผไทรัช สีดา
สมิทธิ เกษตรภิบาล

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2557

การพัฒนาหัวเผาเชื้อเพลิงระดับอุตสาหกรรมที่มีการอุ่นอากาศก่อนการเผาไหม้

DEVELOPMENT OF AN INDUSTRIAL BURNER WITH PREHEATED AIR

ปภัส	ชูโชติสิริ
ผไทรัช	สีดา
สมิทธิ์	เกษตรภิบาล

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2557

DEVELOPMENT OF AN INDUSTRIAL BURNER WITH PREHEATED AIR

PAPUS CHUCHOTSIRI
PATHAIRUSH SEEDA
SMITH KASETPIBARL

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
2014

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2557

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การพัฒนาหัวเผาเชื้อเพลิงระดับอุตสาหกรรมที่มีการอุ่นอากาศก่อนการเผาไหม้
DEVELOPMENT OF AN INDUSTRIAL BURNER WITH PREHEATED AIR

ผู้จัดทำ

- | | |
|--------------------------|-----------------------|
| 1. นายปภัส ชูโชติสิริ | รหัสประจำตัว 54010776 |
| 2. นายผไทรัช สีดา | รหัสประจำตัว 54010837 |
| 3. นายสมิทธิ์ เกษตรภิบาล | รหัสประจำตัว 54011325 |



(รศ.ดร.ชินรักษ์ เขียรพงษ์)

อาจารย์ที่ปรึกษา

การพัฒนาหัวเผาเชื้อเพลิงระดับอุตสาหกรรมที่มีการอุ่นอากาศก่อนการเผาไหม้

นายปภัส	ชูโชติศิริ	54010776
นายผไทรัช	สีดา	54010837
นายสมิทธิ์	เกษตริบาล	54011325
รศ.ดร. ชินรัชช์	เจียรพงษ์	อาจารย์ที่ปรึกษา
รศ.ดร. จารุวัตร	เจริญสุข	อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
ปีการศึกษา 2557		

บทคัดย่อ

ในปัจจุบันพลังงานทดแทนหรือพลังงานทางเลือกเป็นที่สนใจและมีการพัฒนาอย่างแพร่หลาย และหนึ่งในนั้นคือระบบการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลฝุ่น (Pulverized biomass burner) ซึ่งงานวิจัยนี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลที่มีการอุ่นอากาศก่อนการเผาไหม้สำหรับนำไปใช้ในอุตสาหกรรมโดยหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลมีกำลังการผลิต 100 kW โดยในส่วนของพัฒนานั้นได้มีการออกแบบชิ้นส่วนเพิ่มเติม ของทางเข้าเชื้อเพลิงชีวมวลและตำแหน่งการวางหัวจุดเปลวไฟนำร่องจากแก๊ส LPG รวมถึงการออกแบบ ฐานตั้ง และ หน้าแปลนที่จะนำไปเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ชิ้นอื่นๆในชุดการทดลอง สำหรับส่วนของการทดลองเพื่อทดสอบการเผาไหม้ภายในหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลนั้นได้ทำการทดลองดังต่อไปนี้ ทำการทดลองระบบป้อนอากาศสำหรับหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวล จากผลการทดลองพบว่าสำหรับอากาศในทางเข้าส่วนปฐมภูมินั้นสามารถป้อนปริมาณอากาศโดยมวลได้ในช่วง 0.01268–0.03268 kg/s และสำหรับอากาศในทางเข้าส่วนทุติยภูมินั้นสามารถป้อนปริมาณอากาศโดยมวลได้ในช่วง 0.05665-0.20213 kg/s ทำการทดลองเพื่อศึกษาอิทธิพลของตัวแปรที่มีผลต่อการทำงานของหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวล เช่น ลักษณะการหมุนวนของอากาศภายในหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวล ตำแหน่งของเปลวไฟนำร่อง จากผลการทดลองพบว่า ใบปิดที่ทำการติดตั้งนั้นทำให้เกิดการหมุนวนของอากาศที่ใจกลางของหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวล และ ตำแหน่งของเปลวไฟนำร่องนั้นอยู่ในตำแหน่งที่เชื้อเพลิงชีวมวลสามารถเข้าปะทะได้อย่างสมบูรณ์ ทำการทดลองปรับสัดส่วนของปริมาณอากาศส่วนเกิน และ ปริมาณอากาศของทางเข้าส่วนปฐมภูมิและทุติยภูมิ จากผลการทดลองพบว่า ณ สัดส่วนของอากาศที่แตกต่างกันปริมาณอากาศส่วนเกินที่เหมาะสมสำหรับการเผาไหม้ของเปลวไฟเชื้อเพลิงชีวมวลที่จะให้อุณหภูมิที่แกนกลางหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลสูงสุดก็แตกต่างกันไปด้วย และ การแบ่งสัดส่วนอากาศทางเข้าปฐมภูมิที่ 50% โดยมวล และทุติยภูมิที่ 50% โดยมวลนั้นเปลวไฟเชื้อเพลิงชีวมวลจะมีอุณหภูมิที่แกนกลางหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลเฉลี่ยที่ใกล้เคียงกันทั้งหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวล และ เกิดการเสถียรภาพของเปลวไฟภายในหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลเมื่อทำการทดลองที่ปริมาณอากาศ ณ จุดที่ 0.56 เมตรจากหัวจุดเปลวไฟนำร่อง มากกว่า 0.0328 kg/s ขึ้นไป สำหรับการอุ่นอากาศก่อนการเผาไหม้พบว่าอุณหภูมิของอากาศก่อนการเผาไหม้นั้นมีการเพิ่มขึ้นและคงที่ประมาณ 195-200 องศาเซลเซียส โดยใช้เวลาในการอุ่นอากาศจนถึงสภาวะคงที่ประมาณ 40-45 นาที หลังจากเริ่มทำการทดลอง จากผลการทดลองข้างต้นสามารถนำผลลัพธ์ที่ได้มาใช้ในการพัฒนาคุณภาพการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงชีวมวลภายในหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลให้ได้ดียิ่งขึ้นในด้านต่างๆ เช่น การอนุรักษ์พลังงาน, ความปลอดภัย, คุณภาพของเชื้อเพลิงชีวมวล

DEVELOPMENT OF AN INDUSTRIAL BURNER WITH PREHEATED AIR

Papus	Chuchotsiri	54010776
Pathairush	Seeda	54010837
Smith	Kasetpibarl	54011325
Assoc.Prof. Dr.Chinaruk	Thianpong	Advisor
Assoc.Prof. Dr Jarruwat	Charoensuk	Co.Advisor
Year 2014		

ABSTRACT

The renewable energy has been developed extensively. One of them is pulverized biomass burner. This project aims to develop a pulverized biomass burner with preheated air for industrial use. The biomass burner has a capacity of 100 kW. In the part of the fabrication, the feeder pipe is fabricated to be the way of the biomass fuel inlet, primary air inlet and, the position of the spark igniter. Including the base plate and end cover flange. In the path of experimentation, the first experimentation is found out the mass flow rate of the air from the blower. The result shows that at the primary air inlet, the air mass flow rate is around 0.01268-0.03268 kg/s and at the secondary air inlet, the air mass flow rate is around 0.05665-0.020213 kg/s. Secondly, the second experimentation is studying the parameter that effect on the biomass burner, for example, the circulating of the air in the middle of the biomass burner, the position of the spark igniter. The result shows that the swirl plate makes the air swirl in the middle of the biomass burner and the position of spark igniter is proper for the biomass fuel to crash the pilot flame. Thirdly, the third experimentation is found out the condition for operating the biomass burner by varying the excess air and the air splitting configuration between primary air inlet and secondary air inlet. The result shows that in each condition of the air splitting configuration ,there is the appropriate excess air for the biomass flame to give the highest temperature inside the biomass burner and the primary air inlet 50% and secondary air inlet 50% the biomass give the stable temperature for every position inside the biomass burner. The biomass flame is unstable when the air mass flow rate at the 0.56 m from the pilot flame exceeding 0.0328 kg/s. In the preheated air, the temperature of the preheated air is rising to 195-200 degree Celsius within 40-45 minutes from the beginning of the experiment. Finally, the result of the all experimentation can use to develop the biomass burner in further in the term of conserving energy, safety, and the quality of the biomass fuel.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาโทฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยดี ก็เพราะด้วยความเอาใจใส่ แนะนำ และช่วยเหลือในด้านต่าง ๆ เสมอมาจาก รศ.ดร.ชินรัชช์ เขียรพงษ์ อาจารย์ที่ปรึกษา และรศ.ดร.จารุวัตร เจริญสุข อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ซึ่งต้องขอขอบพระคุณเป็นอย่างมาก เพราะหากไม่มีอาจารย์ทั้ง 2 ท่านนี้ก็คงไม่อาจทำให้ปริญญาโทฉบับนี้สำเร็จลงได้เลย

ขอขอบคุณสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา และชมรม Automotive ที่เอื้อเพื่อให้ยืมเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในโครงการนี้ และขอขอบคุณพี่อาร์ม พี่เบิร์ด โอ๊ค วี และพี่ๆในห้องโปรเจกอาจารย์จารุวัตร รวมถึงเพื่อน พี่ น้องทั้งหลายที่ได้เข้ามาช่วยเหลือในด้านต่างๆในการทำโครงการนี้

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

นายปลั่ง	ชูโชติสิริ
นายไพรัช	สีดา
นายสมิทธิ์	เกษตรภิบาล

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
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
2.2 เชื้อเพลิง	4
2.2.1 แก๊สเชื้อเพลิง	4
2.2.1.1 คุณสมบัติของแก๊สเชื้อเพลิง	4
2.2.2 เชื้อเพลิงเหลว	6
2.2.2.1 คุณสมบัติของเชื้อเพลิงเหลว	6
2.2.3 เชื้อเพลิงแข็ง	6
2.2.3.1 ชีวมวลจากข้าว	8
2.2.3.2 ชีวมวลจากข้าวโพด	8
2.2.3.3 ชีวมวลจากอ้อย	9
2.2.3.4 ชีวมวลจากมันสำปะหลัง.....	9
2.2.3.5 ชีวมวลจากปาล์มน้ำมัน.....	9
2.2.3.6 ชีวมวลจากไม้ยางพารา	10
2.2.3.7 ชีวมวลจากไม้ยูคาลิปตัส	10
2.3 ปฏิกริยาเผาไหม้	11
2.3.1 อัตราส่วนของอากาศต่อเชื้อเพลิง (Air-Fuel Ratio)	12
2.3.2 การผสมกันระหว่างเชื้อเพลิงกับออกซิเจน (Mixing)	13
2.3.3 อุณหภูมิ (Temperature)	13
2.3.4 เวลาที่เชื้อเพลิงอยู่ในห้องเผาไหม้ (Time)	13
2.3.5 กลไกการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง	13
2.3.5.1 การทำแห้ง (Drying)	14

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.3.5.2 การปล่อยสารระเหย (Devolatilization)	14
2.3.5.3 การจุดติดไฟของสารระเหย (Ignition of Volatile)	15
2.3.5.4 การเผาไหม้สารระเหย (Combustion of Volatile)	15
2.3.5.5 การจุดติดไฟของถ่านชาร์ (Ignition of Char Particle)	15
2.3.5.6 การเผาไหม้ถ่านชาร์ (Combustion of Residual Char Particle) ..	15
2.4 การคำนวณอัตราการไหลของอากาศ	15
2.4.1 สมการเบอร์นูลลีและการหาพลังงานสูญเสียเนื่องจากความฝืดในระบบท่อ	15
2.4.1.1 สมการเบอร์นูลลี	15
2.4.1.2 พลังงานสูญเสียเนื่องจากความฝืดในระบบท่อ	16
2.5 หลักการทำงานของ Pressure gage, Rota meter และ Pitot tube	18
2.5.1 หลักการทำงานของ Pressure gage	18
2.5.2 หลักการทำงานของ Rota meter	19
2.5.3 หลักการทำงานของ Pitot tube	20
2.6 มลพิษจากการเผาไหม้	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 สารปรกอบไฮโดรคาร์บอน	23
2.6.3.4 แก๊สเรือนกระจก	24
บทที่ 3 การออกแบบและการคำนวณ	26
3.1 สมการการเผาไหม้	26
3.1.1 สมการการเผาไหม้สำหรับเชื้อเพลิงแก๊ส LPG	26
3.1.2 สมการการเผาไหม้สำหรับเชื้อเพลิงชีวมวลฝุ่น	26
3.1.2.1 เชื้อเพลิงชีวมวลฝุ่น (ความชื้น 7.98 %) ที่ 100% stoichiometry ..	26
3.1.2.2 เชื้อเพลิงชีวมวลฝุ่น (ความชื้น 7.98 %) ที่ 130% stoichiometry ..	28
3.2 แบบของหัวเผาและหลักการทำงานของส่วนต่างๆ	29
3.3 การคำนวณปริมาณแก๊ส LPG	30
3.4 การคำนวณปริมาณอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ	31
บทที่ 4 อุปกรณ์และเงื่อนไขการทดลอง	33
4.1 Feeder pipe	33
4.2 End cover flange	34

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.3 การหล่อปูนทนไฟ (Refractory)	35
4.3.1 วัสดุและอุปกรณ์	35
4.3.2 ขั้นตอนการทำงาน	36
4.4 ทำการเจาะตัวโครงสร้างภายนอก	37
4.5 ชุดหัวจุด (Spark igniter)	37
4.6 ฐานตั้งหัวเผา	38
4.7 วิธีการทดลองและการบันทึกผลการทดลอง	39
4.7.1 การวัดค่าปริมาณอากาศของระบบป้อนอากาศ	39
4.7.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการควบคุมอากาศ	39
4.7.1.2 เงื่อนไขการทดลอง	41
4.7.1.3 การบันทึกผลการทดลอง	41
4.7.1.4 ขั้นตอนการทดลอง	41
4.7.2 การดูลักษณะเปลวไฟนําร่อง และ การหมุนวนของอากาศ	41
4.7.2.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	41
4.7.2.2 เงื่อนไขการทดลอง	42
4.7.2.3 การบันทึกผลการทดลอง	42
4.7.2.4 ขั้นตอนการทดลอง	42
4.7.3 การหาขั้นตอนดำเนินการหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลและลักษณะ ทางกายภาพของเปลวไฟของเชื้อเพลิงชีวมวล.....	43
4.7.3.1 ชีวมวลฝุ่นสำหรับการทดลอง	43
4.7.3.2 เงื่อนไขการทดลอง	43
4.7.3.3 การบันทึกผลการทดลอง	44
4.7.3.4 ขั้นตอนการทดลอง	44
4.7.4 การทดลองหาขั้นตอนดำเนินการที่เหมาะสมของหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวล	44
4.7.4.1 เงื่อนไขการทดลอง	44
4.7.4.2 การบันทึกผลการทดลอง	45
บทที่ 5 ผลการทดลองและการอภิปราย	46
5.1 ผลการทดลองของระบบป้อนอากาศ	46
5.1.1 ผลการทดลองระบบป้อนอากาศส่วนที่สอง	46
5.1.2 ผลการทดลองระบบป้อนอากาศส่วนที่สอง	47
5.2 ผลการทดลองการดูลักษณะเปลวไฟนําร่อง และ การหมุนวนของอากาศ	47
5.3 ผลการทดลองการหาขั้นตอนดำเนินการหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวล และลักษณะทางกายภาพของเปลวไฟของเชื้อเพลิงชีวมวล	49

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.4 ผลการทดลองการทดลองห่าย่นการดำเนินการที่เหมาะสม ของหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวล	50
บทที่ 6 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	56
6.1 สรุปผลการทดลอง	56
6.2 ข้อเสนอแนะ	56
6.2.1 ด้านการอนุรักษ์พลังงาน	56
6.2.2 ด้านอุปกรณ์การวัด	56
6.2.3 ด้านการหมุนวนของอากาศภายในเตา	56
6.2.4 ด้านปริมาณอากาศ หุติยภูมิ และ ตติยภูมิ	57
บรรณานุกรม	58
ภาคผนวก	60
ภาคผนวก ก	60
ภาคผนวก ข	62

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
ตารางที่ 2.1	ตัวอย่างส่วนประกอบ (โดยปริมาตร) ของแก๊สเชื้อเพลิงต่าง ๆ	5
ตารางที่ 2.2	ตัวอย่างค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิงต่าง ๆ ที่ความดัน 1 บรรยากาศ และอุณหภูมิ 25°C	5
ตารางที่ 2.3	ลักษณะทั่วไปของผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียม	6
ตารางที่ 2.4	ตัวอย่างปริมาณออกซิเจน น้ำ และเถ้าในเชื้อเพลิงแข็งชนิดต่างๆ	7
ตารางที่ 2.5	แสดงค่า HHV และ LHV ของเชื้อเพลิงชีวมวล	10
ตารางที่ 2.6	องค์ประกอบของอากาศที่ใช้ในการสันดาป	11
ตารางที่ 2.7	แสดงค่าความขรุขระของท่อที่ทำจากวัสดุต่างๆ	17
ตารางที่ 2.8	แสดงค่าประสิทธิภาพต้านทานการไหลของวาล์วและข้อต่อต่างๆ	18
ตารางที่ 2.9	แก๊สเรือนกระจก	24
ตารางที่ 2.10	ศักยภาพการทำให้เกิดภาวะดลกร้อนของแก๊สเรือนกระจก	25
ตารางที่ 3.1	แสดงส่วนประกอบของเชื้อเพลิงชีวมวลฟืนอัดที่ใช้ในการศึกษา	27
ตารางที่ 3.2	แสดงการวิเคราะห์เชื้อเพลิง ณ สภาพนำส่ง	27
ตารางที่ 3.3	แสดงปริมาณไอเสียที่ 100% Stoichiometry	28
ตารางที่ 3.4	แสดงปริมาณไอเสียที่ 130% Stoichiometry	28
ตารางที่ 4.1	แสดงเงื่อนไขการทดลองการวัดปริมาณอากาศ	41
ตารางที่ 4.2	แสดงเงื่อนไขการทดลองการดูลักษณะเปลวไฟนาร์อง และการหมุนวนของอากาศ	42
ตารางที่ 4.3	แสดงเงื่อนไขของการเผาเชื้อเพลิงชีวมวล	43
ตารางที่ 4.4	แสดงการการปรับสัดส่วนของอากาศภายในหัวเผา	44
ตารางที่ 4.5	แสดงการบันทึกผลการกระจายของอุณหภูมิภายในหัวเผา	45
ตารางที่ 1ก	ตารางบันทึกผลการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวล ที่เงื่อนไขการทดลองที่แตกต่างกัน	60

สารบัญญรูปภาพ

รูปที่		หน้า
รูปที่ 2.1	ชีวมวลในประเทศไทย	8
รูปที่ 2.2	ขั้นตอนการระเหยไอน้ำและการให้ความร้อนแก่อนุภาคเชื้อเพลิง	14
รูปที่ 2.3	การพิจารณาพลังงานเมื่อมีการติดตั้งบีม กังหันน้ำ และพลังงานสูญเสียเนื่องจากความฝืด	16
รูปที่ 2.4	Pressure gage และหลักการของหลอดบัวร์ดอง	19
รูปที่ 2.5	หลักการทำงานของ Rota meter	20
รูปที่ 2.6	Pitot tube	20
รูปที่ 2.7	ตัวอย่างลักษณะของอนุภาคจุลสาร	22
รูปที่ 3.1	แสดงชิ้นส่วนต่างๆของหัวเผา	29
รูปที่ 3.2	ทิศทางการไหลของอากาศภายในเตาเผา	30
รูปที่ 4.1	Feeder pipe ที่ถูกออกแบบด้วยโปรแกรม Solidworks	33
รูปที่ 4.2	Dimension ของ Feeder pipe (ด้านข้าง)	33
รูปที่ 4.3	Dimension ของ Feeder pipe (ด้านหน้า)	34
รูปที่ 4.4	ชิ้นงานจริง ของ Feeder pipe	34
รูปที่ 4.5	End cover flange ที่ถูกออกแบบด้วยโปรแกรม Solidworks	34
รูปที่ 4.6	Dimension ของ End cover flange	35
รูปที่ 4.7	ชิ้นงานจริง ของ End cover flange	35
รูปที่ 4.8	ภาพขั้นตอนการผสมปูน	36
รูปที่ 4.9	ภาพขั้นตอนการติดบล็อกหล่อ	36
รูปที่ 4.10	ภาพขั้นตอนการเทปูน	36
รูปที่ 4.11	ภาพหลังจากเสร็จสิ้นการเทปูน	37
รูปที่ 4.12	ชุดหัวจุด (Spark igniter) ด้านหน้า	37
รูปที่ 4.13	ชุดหัวจุด (Spark igniter) ด้านหลัง	38
รูปที่ 4.14	ฐานตั้งหัวเผา ที่ถูกออกแบบด้วยโปรแกรม Solidworks	38
รูปที่ 4.15	ฐานตั้งหัวเผา	38
รูปที่ 4.16	แสดงระบบป้อนอากาศก่อนเข้าหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวล	39
รูปที่ 4.17	Blower ผลิตอากาศส่วนที่ 1	39
รูปที่ 4.18	Blower ผลิตอากาศส่วนที่ 2	40
รูปที่ 4.19	Butterfly valve	40
รูปที่ 4.20	Orifice plate	40
รูปที่ 4.21	แสดงแผงควบคุมปริมาณแก๊ส LPG	42
รูปที่ 4.22	ชีวมวลฝุ่นสำหรับการทดลอง	43
รูปที่ 4.23	แสดงตำแหน่งของ Thermocouple สำหรับวัดผลการทดลอง	45
รูปที่ 4.24	แสดงตำแหน่งของ Thermocouple ที่สอดเข้าไปในเตาเผา	45

สารบัญรูปรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
รูปที่ 5.1	กราฟแสดงอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศที่วัดได้จาก blower ตัวที่ 1 ที่ตำแหน่งการเปิดวาล์ว 1 แตกต่างกัน 46
รูปที่ 5.2	กราฟแสดงอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศที่วัดได้จาก blower ตัวที่ 2 ที่ตำแหน่งการเปิดวาล์ว 2 แตกต่างกัน 47
รูปที่ 5.3	ลักษณะการหมุนวนของอากาศภายในหัวเผา 48
รูปที่ 5.4	แสดงตำแหน่งของเปลวไฟนาร์่องที่ปริมาณแก๊ส LPG 3.5 ลิตรต่อนาที จากด้านหน้าของเตาเผา 48
รูปที่ 5.5	แสดงลักษณะของเปลวไฟที่ปริมาณแก๊ส LPG 3.5 ลิตรต่อนาที จากด้านหลังของเตาเผา 49
รูปที่ 5.6	รูปเปลวไฟของ LPG และ Sawdust ที่ปริมาณเชื้อเพลิง 0.3801 kg/min 49
รูปที่ 5.7	รูปเปลวไฟเมื่อปิด LPG เหลือเพียง Sawdust ปริมาณเชื้อเพลิง 0.3801 kg/min 50
รูปที่ 5.8	แนวโน้มของอุณหภูมิในหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลเมื่อทำการแบ่งอากาศ Primary 30% และ Secondary 70% จากนั้นทำการเพิ่มปริมาณอากาศ ส่วนเกิน 0% 10% 20% 30% ตามลำดับ 51
รูปที่ 5.9	แนวโน้มของอุณหภูมิในหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลเมื่อทำการแบ่งอากาศ Primary 40% และ Secondary 60% จากนั้นทำการเพิ่มปริมาณอากาศ ส่วนเกิน 0% 10% 20% 30% ตามลำดับ 51
รูปที่ 5.10	แนวโน้มของอุณหภูมิในหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลเมื่อทำการแบ่งอากาศ Primary 50% และ Secondary 50% จากนั้นทำการเพิ่มปริมาณอากาศ ส่วนเกิน 0% 10% 20% 30% ตามลำดับ 52
รูปที่ 5.11	แนวโน้มของอุณหภูมิในหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลเมื่อทำการแบ่งอากาศ Primary 60% และ Secondary 40% จากนั้นทำการเพิ่มปริมาณอากาศ ส่วนเกิน 0% 10% 20% 30% ตามลำดับ 52
รูปที่ 5.12	แนวโน้มของอุณหภูมิในหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลเมื่อทำการเพิ่มอากาศ Primary 30% 40% 50% 60% ตามลำดับ 53
รูปที่ 5.13	แนวโน้มของอุณหภูมิในหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลเมื่อทำการเพิ่มอากาศ Primary 30% 40% 50% 60% ตามลำดับ และปริมาณอากาศส่วนเกิน 10% 53
รูปที่ 5.14	แนวโน้มของอุณหภูมิในหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลเมื่อทำการเพิ่มอากาศ Primary 30% 40% 50% 60% ตามลำดับ และปริมาณอากาศส่วนเกิน 20% 54
รูปที่ 5.15	แนวโน้มของอุณหภูมิในหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลเมื่อทำการเพิ่มอากาศ Primary 30% 40% 50% 60% ตามลำดับ และปริมาณอากาศส่วนเกิน 30% 54
รูปที่ 5.16	แสดงผลของการอุ่นอากาศตั้งแต่เริ่มจุดเปลวไฟนาร์่องจนถึงช่วงที่อุณหภูมิของอากาศอุ่นเข้าสู่สภาวะคงตัว 55
รูปที่ 1ข	Dimension ของ End cover 62
รูปที่ 2ข	Dimension ของ Middle cover 63

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่

	หน้า
รูปที่ 3ข Dimension ของ Reactor	64
รูปที่ 4ข Dimension ของ Swirl plate	65
รูปที่ 5ข Dimension ของ Front cover	66
รูปที่ 6ข Dimension ของ Feeder pipe	67
รูปที่ 7ข Dimension ของ เต้าเผา	68

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

เชื้อเพลิงที่ทั่วโลกกำลังใช้อยู่ทุกวันนี้ ส่วนใหญ่มาจากแหล่งเชื้อเพลิงธรรมชาติ เช่น ถ่านหิน ปิโตรเลียม และแก๊สธรรมชาติ เป็นต้น ซึ่งเชื้อเพลิงเหล่านี้เป็นสาเหตุหลักที่ทำให้เกิดภาวะโลกร้อน และมลพิษทางอากาศ ซึ่งเชื้อเพลิงเหล่านี้กำลังจะหมดลงไป เนื่องจากทั่วโลกมีแนวโน้มความต้องการทางด้านการใช้พลังงานสูงขึ้น จึงทำให้เชื้อเพลิงเหล่านี้มีปริมาณลดน้อยลงเรื่อยๆ ทำให้เกิดความตระหนักที่จะคิดค้นหาพลังงานทางเลือกอื่นมาทดแทนพลังงานจากฟอสซิล ซึ่งพลังงานทางเลือกดังกล่าวจะต้องเป็นพลังงานที่ยั่งยืน ไม่ต้องกังวลว่าพลังงานนี้จะหมดไป อีกทั้งจะต้องส่งผลกระทบทางมลภาวะน้อยกว่า หนึ่งในนั้นคือ แก๊สจากชีวมวลโดยการเผาไหม้ในเตาปฏิกรณ์ โดยเตาดังกล่าวนั้นผ่านการออกแบบมากมาย ซึ่งแต่ละแบบจะถูกออกแบบมาแตกต่างกันตามวัตถุดิบที่ถูกนำมาใช้ในการผลิตแก๊ส

งานวิจัยนี้จะพัฒนาระบบการนำเชื้อเพลิงและการติดตั้งอุปกรณ์วัดอุณหภูมิ โดยนำแก๊ส LPG มาใช้เป็นเชื้อเพลิงเพื่อเป็นการนำร่อง ซึ่งแก๊ส LPG เป็นเชื้อเพลิงที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับแก๊สสังเคราะห์จากชีวมวล จัดหาได้ง่ายและสะดวกต่อการศึกษาในครั้งนี้มากที่สุด จากนั้นจะทำการใช้เชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด (ชีลื้อย) ในการเผาไหม้เป็นเชื้อเพลิงหลัก ซึ่งจะทำให้เกิดการพัฒนาขึ้นเป็นหัวเผาชีวมวลในอนาคตสำหรับใช้ในงานอุตสาหกรรมและเชิงพาณิชย์ต่อไป

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. พัฒนาด้านแบบหัวเผาของเตาปฏิกรณ์ให้สามารถทำปฏิกิริยาการเผาไหม้ได้ที่กำลังการผลิต ขนาด 100 kW
2. พัฒนาส่วนประกอบต่างๆของเตาปฏิกรณ์ให้สามารถเผาไหม้ได้ด้วยเชื้อเพลิงชีวมวล โดยใช้เชื้อเพลิงแก๊สแอลพีจีเป็นเชื้อเพลิงนำร่อง

1.3 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถนำวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรหรือเชื้อเพลิงชีวมวลที่เหลือใช้ซึ่งเป็นเชื้อเพลิงสะอาด มาทำให้เกิดประโยชน์อย่างมีศักยภาพและสามารถลดการใช้เชื้อเพลิงหลักได้
2. ได้ต้นแบบเตาเผาชีวมวลที่พัฒนามาจากเตาเผาเชื้อเพลิงแก๊ส ซึ่งมีความเหมาะสมสำหรับเชื้อเพลิงฝุ่นชีวมวล เพื่อให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ มีการใช้เชื้อเพลิงให้เกิดความคุ้มค่ามากที่สุด และเกิดมลพิษทางอากาศน้อยที่สุด

1.4 ขอบเขตการศึกษา

1. คำนวณและพัฒนาหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวล ในเชิงสมมูลมวลและกำลังการผลิตความร้อนที่ 100 kW
2. ใช้แก๊สแอลพีจี ในการเริ่มต้นการเผาไหม้ และใช้ชีวมวลอัดเม็ด (ซีลี้อย) ที่ถูกบดเป็นฝุ่น ในการเผาไหม้ต่อไป

1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. ทำการศึกษาและค้นคว้าแหล่งที่มาของตัวแปรต่างๆที่ใช้ในการคำนวณเพื่อสร้างชุดเผาไหม้และอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนในเชิงสมมูลมวลและกำลังการผลิตความร้อนที่ 100 kW โดยใช้ชีวมวลอัดเม็ด (ซีลี้อย) ที่ถูกบดเป็นฝุ่นเป็นเชื้อเพลิงหลัก
2. ทำการคำนวณอัตราการป้อนเชื้อเพลิงและอากาศเพื่อการทดลองในเชิงสมมูลมวล และกำลังการผลิตที่ 100 kW
3. ทำการคำนวณและออกแบบ ชุดการทดลองเพิ่มเติมเพื่อที่จะทำให้ชุดทดลองสามารถทำปฏิกิริยาเผาไหม้ และสามารถทำงานร่วมกับชุดการทดลองโดยรวมได้
4. ทำการทดลองคุณลักษณะการหมุนวนของอากาศภายในหัวเผาเชื้อเพลิงและลักษณะของเปลวไฟนำร่องสำหรับการจุดระเบิดของเชื้อเพลิงชีวมวล
5. ทำการทดลองเพื่อหาปริมาณอากาศส่วนเกินและปริมาณอากาศของทางเข้าส่วนปฐมภูมิ และทุติยภูมิที่เหมาะสมสำหรับการดำเนินการของหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวล
6. ทำการสรุปผลการทดลอง และทำข้อเสนอแนะสำหรับการพัฒนาต้นแบบหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลต่อไปในอนาคต

บทที่ 2

วรรณกรรมปริทัศน์และทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จิตพงษ์ กนกนัยการ, ประมินทร์ แจ่มไธสง ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับ การพัฒนาต้นแบบเตาปฏิกรณ์แก๊สสังเคราะห์จากชีวมวลโดยวัดการแบ่งอัตราส่วนอากาศพบว่าการแบ่งอากาศในส่วนของอากาศปฐมภูมิและอากาศทุติยภูมิต่างกันน้อยกว่าการทำกรจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ อาจจะต้องทำการลดขนาดหน้าแปลนประกบและตัดหรือปรับมุมของครีบนำกระแสการไหลของอากาศปฐมภูมิที่อยู่ในชั้นส่วน End Cover เพิ่มขึ้น เพื่อเพิ่มอัตราการการแบ่งอากาศในส่วนนี้ให้เพิ่มขึ้น

ฐิติชญพร สุระเดช, ณัฐวัตร สีลาจินดาไกรฤกษ์, ธรรมชัย จิตตวัณษรัตน์ ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับ หัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลชนิดฝุ่นพบว่าอุณหภูมิสูงสุดที่เกิดขึ้นจากการจุดหัวเผาด้วยแก๊สแอลพีจีสูงกว่าอุณหภูมิติดไฟของฝุ่นชีวมวล เมื่อใช้ปริมาณแก๊สแอลพีจี 6-7 L/min

Gang Lu, Yong Yan, Steve Cornwell, Michael Whitehouse, Gerry Riley ศึกษาผลกระทบของการเผาไหม้ร่วมกันระหว่างถ่านหินกับเชื้อเพลิงชีวมวลโดยพิจารณาจาก ลักษณะและความเสถียรของเปลวไฟ โดยการใช้ถ่านหินผสมกับเชื้อเพลิงชีวมวล 5 ชนิดที่ต่างกันในส่วนโดยมวลที่ต่างกันพบว่าการเพิ่มขึ้นของเชื้อเพลิงชีวมวลมีผลต่อลักษณะของเปลวไฟ เสถียรภาพของเปลวไฟ และความสว่างของเปลวไฟ

วิศิษฐ สีลาผาดิกุล, นพรัตน์คำพร ศึกษาเชิงทดลองเกี่ยวกับ ตัวแปรที่มีผลต่อพฤติกรรมการเผาไหม้ภายในห้องเผาไหม้แบบหมุนวน โดยตัวแปรที่ทำการทดลอง ได้แก่ ตำแหน่งของห้องเผาไหม้ทุติยภูมิ, ตำแหน่งการฉีดอากาศทุติยภูมิ, อัตราส่วนสมมูล และ อัตราส่วนการไหลเชิงปริมาตรของอากาศทุติยภูมิต่ออากาศทั้งหมด พบว่า ในขณะที่เกิดการเผาไหม้อากาศทุติยภูมิมีส่วนช่วย ทำให้เกิดความปั่นป่วนระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศ ส่งผลให้อากาศสามารถเข้าทำปฏิกิริยาการเผาไหม้กับเชื้อเพลิงได้อย่างทั่วถึง และผลการเปลี่ยนตำแหน่งของห้องเผาไหม้ทุติยภูมิของเตาเผาที่มีผลต่อการกระจายอุณหภูมิภายใน ทำให้เกิดความปั่นป่วนต่อการคลุกเคล้าระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศ

2.2 เชื้อเพลิง

2.2.1 แก๊สเชื้อเพลิง

เชื้อเพลิงแก๊สเป็นเชื้อเพลิงที่อยู่ในสถานะแก๊สภายใต้อุณหภูมิและความดันปกติ แบ่งออกเป็นแก๊สธรรมชาติซึ่งเกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ และแก๊สที่ผลิตขึ้นจากการแยกเชื้อเพลิงแข็งหรือเชื้อเพลิงเหลวอื่นๆ

แก๊สธรรมชาติหรือแก๊ส NGV เป็นเชื้อเพลิงที่มีสารประกอบไฮโดรคาร์บอน โดยมีธาตุคาร์บอนกับธาตุไฮโดรเจนจับตัวกันเป็นโมเลกุลเช่นเดียวกับน้ำมัน ธาตุสองชนิดนี้จะรวมตัวกันในสัดส่วนของอะตอมที่แตกต่างกันและให้สารประกอบที่ต่างกันด้วย โดยเริ่มตั้งแต่แก๊สมีเทน ซึ่งประกอบไปด้วยคาร์บอน 1 อะตอม และไฮโดรเจน 6 อะตอมจะได้สารประกอบชื่อมีเทน เป็นเช่นนี้ไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งระดับคาร์บอนเพิ่มเป็น 8 อะตอม และไฮโดรเจน 18 อะตอม สารประกอบที่ได้จะมีชื่อว่าออกเทน

แก๊สหุงต้มหรือแก๊ส LPG มีชื่อเป็นทางการว่าแก๊สปิโตรเลียมเหลว เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแยกน้ำมันดิบในโรงกลั่นน้ำมันหรือการแยกแก๊สธรรมชาติ ในโรงแยกแก๊สธรรมชาติ หรืออาจเกิดขึ้นเองในธรรมชาติตามบ่อน้ำมัน แก๊สปิโตรเลียมเหลวประกอบด้วยส่วนผสมของไฮโดรคาร์บอน 2 ชนิดคือ โพรเพนและบิวเทน ในอัตราส่วนเท่าใดก็ได้ หรืออาจจะเป็นโพรเพนบริสุทธิ์ 100% หรือบิวเทนบริสุทธิ์ 100% ก็ได้ สำหรับในประเทศไทย แก๊สหุงต้มส่วนใหญ่ได้จากโรงแยกแก๊สธรรมชาติ โดยใช้อัตราส่วนผสมของโพรเพนและบิวเทนประมาณ 70:30 ซึ่งจะให้ค่าความร้อนที่สูง ทำให้ผู้ใช้ประหยัดเวลาและค่าเชื้อเพลิง แก๊สปิโตรเลียมเหลวสามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงในการหุงต้ม ในครัวเรือน ในโรงงานอุตสาหกรรม และในยานพาหนะได้ เช่นเดียวกับแก๊สธรรมชาติที่สามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้า ในโรงงานอุตสาหกรรม และในยานพาหนะ

2.2.1.1 คุณสมบัติของแก๊สเชื้อเพลิง

คุณสมบัติของแก๊สเชื้อเพลิง คือส่วนประกอบโดยปริมาตร ความหนาแน่น และค่าความร้อน เป็นต้น ตารางที่ 2.1 แสดงตัวอย่างของส่วนประกอบโดยปริมาตรของแก๊สเชื้อเพลิงบางชนิด

ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงคือค่าปริมาณความร้อนที่ปลดปล่อยต่อหนึ่งหน่วยมวลของเชื้อเพลิงนั้น ซึ่งเชื้อเพลิงในสภาวะเริ่มต้นที่ 25°C ทำปฏิกิริยาเผาไหม้อย่างสมบูรณ์กับออกซิเจนจนได้สารผลิตภัณฑ์ในสภาวะสุดท้ายที่ 25°C ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงมีสองค่าคือ ค่าความร้อนทางสูง (higher heating value, HHV) ซึ่งคำนวณจากกรณีที่ไอน้ำในสารผลิตภัณฑ์กลั่นตัวเป็นน้ำ และค่าความร้อนทางต่ำ (lower heating value, LHV) คำนวณจากในกรณีที่ไอน้ำในสารผลิตภัณฑ์ไม่มีการกลั่นตัวเป็นน้ำ ค่าความร้อนทางต่ำสามารถคำนวณหาได้จากค่าความร้อนทางสูงโดยการหักค่าความร้อนแฝงที่ใช้ในการระเหยของน้ำในสารผลิตภัณฑ์ออกจากค่าความร้อนทางสูง ดังนั้นได้ความสัมพันธ์ระหว่าง HHV (หรือ gross C.V.) และ LHV (หรือ net C.V.) คือ

$$\text{LHV (หรือ net C.V.)} = \text{HHV (หรือ gross C.V.)} - (m_{\text{H}_2\text{O}}/m_{\text{fuel}})h_{\text{fg}} \quad (2.1)$$

เมื่อ h_{fg} คือค่าความร้อนแฝงที่ใช้ในการระเหยของน้ำที่อุณหภูมิ 25°C ซึ่งมีค่าเท่ากับ 2,440 kJ/kg โดย $m_{\text{H}_2\text{O}}$ คือมวลของน้ำที่เกิดจากการเผาไหม้รวมถึงน้ำที่มาจากความชื้นในเชื้อเพลิง และที่เกิดจากปฏิกิริยากับไฮโดรเจนในเชื้อเพลิง m_{fuel} คือมวลเชื้อเพลิงที่เผาไหม้ ค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิงหาได้จากการทดลองโดยชุดอุปกรณ์ที่เรียกว่าแคลอรีมิเตอร์ หรือคำนวณหาโดยวิธีทาง

เทอร์โมไดนามิกส์เมื่อทราบส่วนประกอบของแก๊สเชื้อเพลิงนั้น โดยตาราง 2.2 จะแสดงถึงตัวอย่างค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิงบางชนิด

ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างส่วนประกอบ (โดยปริมาตร) ของแก๊สเชื้อเพลิงต่าง ๆ

ส่วนประกอบ	แก๊สธรรมชาติ	LPG	โพรพิลเชอร์แก๊สจากถ่านหิน	โพรพิลเชอร์แก๊สจากไม้
CO	-	-	20 -30 %	18 - 25 %
H ₂	-	-	8 - 20 %	13 - 25 %
CH ₄	80 - 95 %	-	0.5 - 3 %	1 - 5 %
C ₂ H ₆	< 6	-	น้อยมาก	น้อยมาก
>C ₂ H ₆ *	< 4	100 %	น้อยมาก	น้อยมาก
CO ₂	< 5	-	3 - 9 %	5 - 10 %
N ₂	< 5	-	50 - 56 %	45 - 54 %
H ₂ O	-	-	-	5 -15 %

*รวมทั้งไฮโดรคาร์บอนที่หนักกว่า C₂H₆

ตารางที่ 2.2 ตัวอย่างค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิงต่าง ๆ ที่ความดัน 1 บรรยากาศ และอุณหภูมิ 25°C

แก๊สเชื้อเพลิง	HHV		LHV	
	(MJ/m ³)	(MJ/kg)	(MJ/m ³)	(MJ/kg)
ไฮโดรเจน (H ₂)	11.80	141.77	10.06	119.85
คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO)	11.77	10.10	11.77	10.10
มีเทน (CH ₄)	37.05	55.47	33.38	49.99
อีเทน (C ₂ H ₆)	64.93	51.87	59.38	47.46
โพรเพน (C ₃ H ₈)	92.38	50.34	85.04	46.33
บิวเทน (C ₄ H ₁₀)	119.80	49.52	110.59	45.71
เอทิลีน (C ₂ H ₄)	58.71	50.28	55.02	47.10
อะซิทีลีน (C ₂ H ₂)	54.05	49.89	52.22	48.17
แก๊สธรรมชาติ (ตัวอย่าง)	38.37	54.13	34.83	49.13
โพรพิลเชอร์แก๊ส (ตัวอย่าง)	6.33	5.81	5.77	5.30

2.2.2 เชื้อเพลิงเหลว

เชื้อเพลิงเหลว หมายถึง เชื้อเพลิงที่อยู่ในสถานะของเหลวภายใต้อุณหภูมิและความดันปกติ องค์ประกอบสำคัญของเชื้อเพลิงเหลวคือ คาร์บอนและไฮโดรเจน ซึ่งรวมตัวกันทางเคมีอยู่ในรูปของไฮโดรคาร์บอน วิธีการรวมตัวมีหลายแบบ ซึ่งทำให้เชื้อเพลิงเหลวแต่ละชนิดมีคุณสมบัติและลักษณะที่แตกต่างกัน ดังนั้นเชื้อเพลิงเหลวจึงถูกแบ่งตามชนิดของไฮโดรคาร์บอนที่เป็นองค์ประกอบ และตามภาคที่เหลือนหลังจากสารพวกโอระเหยได้ถูกนำออกไปแล้ว เชื้อเพลิงเหลวที่ใช้กันทั่วไปในปัจจุบันเกือบทั้งหมดจะเป็นเชื้อเพลิงปิโตรเลียม การผลิตเชื้อเพลิงเหลวจะนำน้ำมันดิบที่ขุดได้จากบ่อน้ำมัน มากลั่น แยกสลาย (แยกสลายด้วย Catalyst แยกสลายด้วยการทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจน เป็นต้น) ทำ Alkylation กลั่นลำดับส่วน ฯลฯ เพื่อแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียมที่เหมาะสมกับวัตถุประสงค์การใช้งานแต่ละประเภท ซึ่งตารางที่ 2.3 จะแสดงลักษณะทั่วไปของผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียมบางชนิด

ตารางที่ 2.3 ลักษณะทั่วไปของผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียม

เชื้อเพลิง	องค์ประกอบหลัก	ช่วงจุดเดือด [°C]	ค่าความร้อนทางสูง [MJ/kg]	วัตถุประสงค์การใช้งานหลัก
น้ำมันเบนซิน	C, H	30-210	46.1	เครื่องยนต์เบนซิน
น้ำมันก๊าด	C, H	160-300	46.0	เครื่องยนต์ขนาดเล็กสำหรับการเกษตร และใช้ในครัวเรือน
น้ำมันเบา	C, H	160-360	41.9	เครื่องยนต์ดีเซลขนาดเล็ก
น้ำมันหนัก	C, H (O, S)	250-360	42.8-46.5	หม้อไอน้ำเตาอุตสาหกรรม

2.2.2.1 คุณสมบัติของเชื้อเพลิงเหลว

ข้อดี

1. มีค่าความร้อนสูง
2. ราคาถูกเทียบต่อค่าความร้อนหนึ่งหน่วย
3. จัดเก็บและขนส่งสะดวก ไม่ค่อยเสื่อมสภาพระหว่างการจัดเก็บ
4. ประสิทธิภาพในการเผาไหม้สูง
5. มีซีเอ็นต่ำ
6. เผาไหม้ง่าย ใช้ระบบควบคุมอัตโนมัติได้ง่าย

ข้อเสีย

1. อุณหภูมิในการเผาไหม้สูง ทำให้เกิดความร้อนในบางจุดที่อาจสูงเกินไปได้ง่าย
2. น้ำมันหนักจะมีองค์ประกอบของกำมะถันมาก เป็นสาเหตุของมลพิษทางอากาศได้ง่าย
3. หัวเผาเชื้อเพลิง (Burner) บางชนิดจะทำให้เกิดเสียงดังได้ง่าย

2.2.3 เชื้อเพลิงแข็ง

เชื้อเพลิงแข็งเกิดขึ้นตามธรรมชาติ ได้แก่ ไม้ ชีวมวลรูปแบบต่าง ๆ พืต ถ่านหินลิกไนต์ ถ่านหินบิทูมินัส และถ่านหินแอนทราไซต์ ขยะจากที่อยู่อาศัยและจากอุตสาหกรรมบางประเภทก็จัดว่าเป็นเชื้อเพลิงแข็งเช่นเดียวกัน องค์ประกอบของเชื้อเพลิงแข็งนอกจากจะประกอบด้วยคาร์บอนและ

ไฮโดรเจนเป็นส่วนมากแล้ว ยังประกอบด้วย ออกซิเจน ไนโตรเจน กำมะถัน น้ำ และเถ้า อีกด้วย ตัวอย่างเช่น ไม้มีออกซิเจนอยู่ถึง 45 เปอร์เซ็นต์ (โดยมวลและไม่รวมน้ำกับเถ้า) ในขณะที่ถ่านหินแอนทราไซต์มีอยู่เพียง 2 เปอร์เซ็นต์เท่านั้น (ดูตารางที่ 2.4 ประกอบ)

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

เถ้าในเชื้อเพลิงแข็งคือสารอนินทรีย์ที่เหลืออยู่หลังจากที่เชื้อเพลิงเผาไหม้หมดแล้ว ไม้มีเถ้า น้อยมากในขณะที่ถ่านหินมีสูงถึง 10 เปอร์เซ็นต์หรือมากกว่า คุณลักษณะของเถ้ามีความสำคัญมาก ในการออกแบบอุปกรณ์เผาไหม้และอุปกรณ์การถ่ายโอนความร้อน ทั้งนี้เพื่อหาทางลดปัญหาจากการเกิดสแลก (slag fouling) การกัดกร่อน (erosion) และการผุกร่อน (corrosion) ลงได้

ตารางที่ 2.4 ตัวอย่างปริมาณออกซิเจน น้ำ และเถ้าในเชื้อเพลิงแข็งชนิดต่างๆ

เชื้อเพลิง	ออกซิเจน, % (หลักอ้างอิงแห้ง และไม่คิดเถ้า)	ความชื้น, % (ไม่คิดเถ้า)	เถ้า, % (หลักอ้างอิงแห้ง)
ไม้	45	15-50	0.1-1.0
พีต	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) ดังนั้นการระบุงค์ประกอบของเชื้อเพลิงแข็งต้องระบุเงื่อนไขให้ถูกต้องเพราะเกี่ยวข้องกับการคำนวณหาค่าความร้อนทางสูงและทางต่ำโดยตรง ทำให้ช่วยพิจารณาได้อย่างถูกต้องว่าความร้อนแฝงของน้ำที่เกี่ยวข้องในปฏิกิริยาการเผาไหม้เป็นอิสระ (free water) หรือน้ำที่ถูกดูดกลืนในเชื้อเพลิง (bound water) หรือน้ำที่เกิดจากไฮโดรเจนในเชื้อเพลิง

เชื้อเพลิงชีวมวล (Biomass)

เชื้อเพลิงชีวมวลส่วนมากเป็นเซลลูโลส ($C_6H_{10}O_5$) และลิกนิน ($C_{40}H_{44}O_6$) แบ่งได้เป็นสองชนิดคือ ชีวมวลชนิดไม้ (woody biomass) และชีวมวลชนิดไม่ใช่ไม้ (nonwoody biomass) ชีวมวลชนิดไม้ (ทั้งไม้เนื้ออ่อนและไม้เนื้อแข็ง) ได้แก่ กิ่งไม้ (limb wood) เศษไม้ (wood chips) ขี้เลื่อย (sawdust) ถ่านไม้ (charcoal) เศษเยื่อกระดาษ (pulp waste) เป็นต้น ส่วนชีวมวลชนิดไม่ใช่ไม้ ได้แก่ แกลบ (husks) ชานอ้อย (bagasse) ฟางข้าว (straws) ก้านรวงข้าว (stalks) เปลือกเมล็ด (pits) และมูลสัตว์แห้ง (manure) เป็นต้น



รูปที่ 2.1 ชีวมวลในประเทศไทย

2.2.3.1 ชีวมวลจากข้าว

1. แกลบ จากข้อมูลผลผลิตทางการเกษตรของสำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร ในปี พ.ศ. 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 จากข้อมูลผลผลิตทางการเกษตรของกรมส่งเสริมการเกษตรปี พ.ศ. 2549 – 2550 สามารถประเมินปริมาณฟางข้าว เท่ากับ 34.04 ล้านตัน เมื่อนำมาคิดปริมาณที่เก็บรวบรวมได้ (ฟางข้าวมีประสิทธิภาพในการเก็บรวบรวม 10%) ปริมาณฟางข้าวคงเหลือที่สามารถนำมาใช้งานได้จะมีค่าสุทธิเท่ากับ 3.40 ล้านตัน และคิดเป็นค่าพลังงานความร้อนเท่ากับ 926.10 kJ คิดเป็นประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าเท่ากับ 352 MW

2.2.3.2 ชีวมวลจากข้าวโพด

1. ซังข้าวโพด จากข้อมูลผลผลิตทางการเกษตรของกรมส่งเสริมการเกษตร ในปี พ.ศ. 2549 – 2550 มีปริมาณการผลิตข้าวโพดทั้งประเทศเท่ากับ 4.40 ล้านตัน และคิดเป็นปริมาณซังข้าวโพดเท่ากับ 0.84 ล้านตัน โดยมีการนำชีวมวลเหล่านี้มาใช้ในภาคต่างๆ คิดเป็นปริมาณรวม 74,000 ตัน ทำให้ปริมาณชีวมวลคงเหลือมีค่าเท่ากับ 0.43 ล้านตัน คิดเป็นค่าพลังงานความร้อนเท่ากับ 124.6 kJ คิดเป็นประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าเท่ากับ 47.31 MW

2.2.3.3 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 รวมทั้งโรงงานผลิตน้ำตาลหรือโรงผลิตไฟฟ้าจากกากอ้อยหลายโรงได้เริ่มเสาะหาเชื้อเพลิงประเภทอื่นๆมาใช้ร่วมกับกากอ้อยเนื่องจากภาวะขาดแคลนของกากอ้อย

2.2.3.4 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 สามารถประเมินปริมาณเหน้มันได้เท่ากับ 1.76 ล้านตัน เมื่อนำปริมาณชีวมวลคงเหลือดังกล่าวมาคิดประสิทธิภาพในการเก็บรวบรวม (40%) จะมีปริมาณชีวมวลสุทธิเท่ากับ 0.7 ล้านตัน และคิดเป็นค่าพลังงานความร้อนเทียบเท่า 131 kJ และคิดเป็นประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าเท่ากับ 50 MW ในปัจจุบันแทบไม่มีการนำเอาเหน้มันสำปะหลังมาใช้ผลิตพลังงาน เนื่องจากการเก็บรวบรวมมีความยากลำบาก และต้นทุนการขนส่งสูง

2.2.3.5 ชีวมวลจากปาล์มน้ำมัน

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

2. กากใยปาล์ม จากข้อมูลผลผลิตปาล์มน้ำมัน มีปริมาณของกากใยปาล์มที่ได้ เท่ากับ 1.31 ล้านตัน โดยชีวมวลประเภทนี้จะถูกใช้เป็นเชื้อเพลิงในโรงงานอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์ม เมื่อหักปริมาณที่ถูกใช้งานออกจะมีชีวมวลคงเหลือสุทธิ 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 และคิดเป็นประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าเท่ากับ 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 และคิดเป็นประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าเท่ากับ 146 MW

2.2.3.6 ชีวมวลจากไม้ยางพารา

1. ชี้อ้อยและเศษไม้ยางพารา จากรายงานของสถาบันวิจัยยางพารา ทำให้ทราบว่าในแต่ละปีจะตัดยางพาราที่มีอายุเกิน 25 ปี ซึ่งครบรอบที่จะต้องทำการตัดฟัน คิดเป็นพื้นที่ยางพาราที่ถูกตัดฟัน 500,000 ไร่ต่อปี จะได้ปริมาณของไม้ยางพารา 200 ล้านตัน ซึ่งไม้ยางพาราที่ถูกตัดจะนำไปเข้ากระบวนการแปรรูปไม้เพื่อผลิตเฟอร์นิเจอร์ ดังนั้นจะมีชีวมวลที่ได้ภายหลังกระบวนการผลิตคิดเป็นเศษไม้ 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

2.2.3.7 ชีวมวลจากไม้ยูคาลิปตัส

1. ไม้ยูคาลิปตัสจะถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมกระดาษเป็นส่วนใหญ่ โดยผลผลิตของไม้ยูคาลิปตัสทั้งประเทศ มีปริมาณรวม 6.8 ล้านตันต่อปี มีชีวมวลเกิดขึ้น คือ ไม้ฟืนและเปลือกไม้ โดยไม้ฟืนจะถูกนำไปใช้ในการผลิตไฟฟ้า สำหรับเปลือกไม้จะนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในการให้ความร้อน 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 2.5 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

ตารางที่ 2.5 (ต่อ) แสดงค่า HHV และ LHV ของเชื้อเพลิงชีวมวล

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
เหง้ามันสำปะหลัง	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

2.3 ปฏิกิริยาเผาไหม้

การเผาไหม้เป็นปฏิกิริยาการรวมตัวกันของเชื้อเพลิงกับออกซิเจนอย่างรวดเร็ว พร้อมกับเกิดการลุกไหม้และการคายความร้อน ในการเผาไหม้ส่วนใหญ่จะไม่ใช้ออกซิเจนล้วน ๆ เพราะสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายมากแต่จะใช้อากาศแทน โดยอากาศจะมีแก๊สออกซิเจนและแก๊สไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบหลัก ส่วนแก๊สอื่นมีปะปนอยู่น้อยมา (ในอากาศมีแก๊สออกซิเจนประมาณร้อยละ 21 และแก๊สไนโตรเจนร้อยละ 79 โดยปริมาตร หรือแก๊สออกซิเจนประมาณร้อยละ 23 และแก๊สไนโตรเจนร้อยละ 77 โดยน้ำหนัก) ดังแสดงในตารางที่ 2.6

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

ตารางที่ 2.6 องค์ประกอบของอากาศที่ใช้ในการสันดาป

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

การเผาไหม้สมบูรณ์ (Completed Combustion) ซึ่งเป็นการสันดาปของเชื้อเพลิงกับออกซิเจนจนหมด ในกรณีนี้ คาร์บอนจะเผาไหม้กลายเป็น คาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ไฮโดรเจนจะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนกลายเป็นไอน้ำ (H₂O) และถ้าในเชื้อเพลิงมีกำมะถันอยู่ ก็จะทำให้กลายเป็น ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) เป็นต้น ดังสมการที่ 2.1-2.3



การเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ (Incomplete Combustion) เป็นการสันดาปที่เชื้อเพลิงเผาไหม้ไม่หมด หรือมีออกซิเจนไม่เพียงพอสำหรับการสันดาป มีผลทำให้มี คาร์บอน (C) ไฮโดรเจน (H) คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และอาจมีเชื้อเพลิงที่เหลือปะปนออกมากับผลที่ได้จากการเผาไหม้สาเหตุที่ทำให้เกิดการสันดาปไม่สมบูรณ์มีหลายสาเหตุ เช่น มีปริมาณออกซิเจนไม่เพียงพอกับปริมาณเชื้อเพลิง หรือการที่เชื้อเพลิงกับออกซิเจนมีการผสมกันไม่ดีพอ และอาจเกิดจากการที่สารที่ได้จากการเผาไหม้มีการแตกตัวที่อุณหภูมิสูง เป็นต้น ดังสมการที่ 2.4



สารผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นในปฏิกิริยาการเผาไหม้ จะมีเสถียรภาพสูงเกิดในกรณีที่มีการเผาไหม้สมบูรณ์ส่วนในกรณีที่มีอากาศมากเกินไปประกอบกับอุณหภูมิสูงจากการเผาไหม้มากเกินไป ก็จะทำให้ไนโตรเจนในแก๊สผลิตภัณฑ์เปลี่ยนรูปไปเป็นออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x) ซึ่งเป็นสารพิษ

2.3.1 อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง (Air-fuel Ratio)

เชื้อเพลิงแต่ละชนิดนั้นมีอัตราส่วนอากาศและเชื้อเพลิงในการเผาไหม้ได้อย่างสมบูรณ์แตกต่างกัน โดย อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงก็คือ อัตราส่วนระหว่างมวลของอากาศต่อมวลของเชื้อเพลิงในระหว่างการสันดาป โดยทั่วไปแบ่งออกเป็นอัตราส่วนอากาศกับเชื้อเพลิงทางทฤษฎี (A/F_{th}) และอัตราส่วนอากาศกับเชื้อเพลิงจริง (A/F_{act}) โดยที่ A/F_{th} คำนวณตามสมการที่ 2.5

$$A / F_{theore(mass)} = \frac{m_{air}}{m_{fuel}} \quad (2.5)$$

สิ่งสำคัญที่สุดคือต้องทราบปริมาณออกซิเจนหรืออากาศที่ต้องจ่ายสำหรับการเผาไหม้ที่สมบูรณ์การหาอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงจะคำนวณมาจากปฏิกิริยาการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ของเชื้อเพลิงและพลังงาน ที่ได้จะเป็นพลังงานสูงสุด ดังนั้นปริมาณอากาศน้อยที่สุดที่ต้องใช้ในกระบวนการสันดาป เพื่อทำให้เกิดกระบวนการสันดาปสมบูรณ์ของเชื้อเพลิงจะเรียกว่า อากาศตามทฤษฎี (Theoretical air หรือ Stoichiometric air) ซึ่งเป็นตัวบ่งบอกว่ามีปริมาณอากาศที่ใช้จริงเป็นกี่เปอร์เซ็นต์ของอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงในทางทฤษฎี คำนวณได้ตามสมการที่ 2.6

$$\%Theoretical\ air = \frac{A/F_{actual}}{A/F_{theore}} \times 100 \quad (2.6)$$

สำหรับกระบวนการสันดาปจริงอากาศที่ต้องการเชิงทฤษฎีนั้นไม่เพียงพอที่จะทำให้เกิดการสันดาปได้อย่างสมบูรณ์นอกจากนั้นยังจะก่อให้เกิดแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์หรืออะตอมคาร์บอนที่เผาไหม้ไม่หมด ทำให้พลังงานความร้อนน้อยกว่าการเผาไหม้สมบูรณ์ดังนั้นเพื่อป้องกันการเกิดปัญหาดังกล่าวจึงจำเป็นต้องป้อนอากาศให้เกินกว่าความต้องการเชิงทฤษฎีปริมาณอากาศที่เกินนี้เรียกว่าอากาศส่วนเกิน คำนวณได้จากการวัดปริมาณอากาศและเชื้อเพลิงที่ส่งเข้าสันดาปจริงๆ ปริมาณอากาศและเชื้อเพลิงที่ใช้ตามทฤษฎีตามสมการที่ 2.7

$$\% \text{Excess Air} = \frac{A/F_{\text{actual}} - A/F_{\text{theore}}}{A/F_{\text{theore}}} \times 100 \quad (2.7)$$

2.3.2 การผสมกันระหว่างเชื้อเพลิงกับออกซิเจน (Mixing)

เชื้อเพลิงที่เป็นของแข็งจะเกิดการผสมกันกับออกซิเจนแบบไม่เป็นเนื้อเดียวกันทำให้มีพื้นที่ผิวของเชื้อเพลิงสัมผัสกับออกซิเจนถูกจำกัด ดังนั้นควรจะมีพื้นที่ผิวสำหรับการเกิดปฏิกิริยาให้มากที่สุด ซึ่งอาจทำได้โดยการบดลดขนาดเชื้อเพลิงเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวให้มากขึ้นหรือการทำให้แก๊สในเตาเผาเกิดการเคลื่อนไหวอย่างรุนแรงหรือปั่นป่วน เนื่องจากความปั่นป่วนจะช่วยทำลายฝ้าที่เกาะอยู่ที่ผิวเชื้อเพลิงให้หลุดออกไป เพื่อให้ออกซิเจนเข้าทำปฏิกิริยาได้ง่ายขึ้น นอกจากนี้การที่อนุภาคเชื้อเพลิงสัมผัสกับโมเลกุลออกซิเจนได้อย่างทั่วถึงยังมีผลทำให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ยิ่งขึ้นอีกด้วย

2.3.3 อุณหภูมิ (Temperature)

การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงแปรผันตามอุณหภูมิ เริ่มแรกจะเกิดขึ้นเป็นแบบช้า ๆ และเกิดต่อเนื่องไปเรื่อยๆ ความร้อนที่ได้จะไปเพิ่มอุณหภูมิของเชื้อเพลิงและอากาศให้สูงขึ้น ทำให้อัตราการเผาไหม้เพิ่มขึ้น ดังนั้นปริมาณความร้อนจากภายนอกที่เพียงพอสำหรับการเริ่มปฏิกิริยาเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับการเผาไหม้ และจะทำให้ปฏิกิริยาดำเนินต่อไปได้ ปกติแล้วในการเผาไหม้นั้นต้องการให้มีอุณหภูมิสูงเท่าที่จะเป็นไปได้แต่อาจมีข้อจำกัดที่สำคัญ คือ ชนิดของเชื้อเพลิงซึ่งจะให้อุณหภูมิได้อย่างจำกัดที่ปริมาณแตกต่างกัน นอกจากนี้การที่อุณหภูมิสูงมากเกินไปอาจทำให้เกิดสารประกอบออกไซด์ของไนโตรเจนซึ่งเป็นแก๊สพิษ และเกิดแผลกเกาะติดผนังเตาทำให้ลดความสามารถในการถ่ายเทความร้อนและก่อให้เกิดปัญหาการกัดกร่อนที่ผนังเตาได้

2.3.4 เวลาที่เชื้อเพลิงอยู่ในห้องเผาไหม้ (Time)

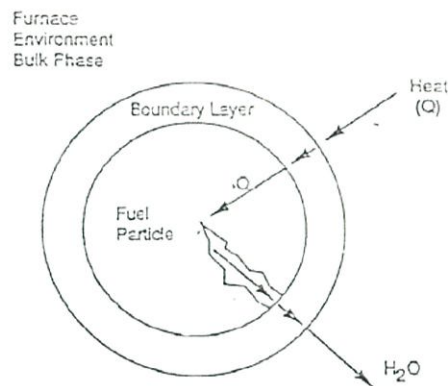
เวลาที่เชื้อเพลิงอยู่ในเตาจำเป็นจะต้องมากกว่าเวลาที่เชื้อเพลิงต้องการเพื่อการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ แต่ในทางปฏิบัติเวลาที่ทำให้เกิดการสันดาปที่สมบูรณ์นั้นต้องยาวนานมาก ซึ่งสามารถแก้ปัญหาได้โดยการเพิ่มขนาดของห้องเผาไหม้เพื่อให้เชื้อเพลิงอยู่ในห้องเผาไหม้ได้นานมากขึ้น แต่จะส่งผลไปถึงเงินลงทุนที่สูงขึ้นด้วย

2.3.5 กลไกการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง

เชื้อเพลิงของแข็งที่ใช้กันอยู่ทั่ว ๆ ไปมีหลายชนิด เช่น ถ่านไม้ ฝืน ถ่านหิน แกลบ ชี้อ้อย เป็นต้น กระบวนการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งจะแตกต่างกับการเผาไหม้เชื้อเพลิงเหลวหรือเชื้อเพลิงที่เป็นแก๊ส เนื่องจากคุณสมบัติของเชื้อเพลิงแข็งนั้นเป็นสารประกอบที่มีส่วนผสมของสารต่างๆมากมาย และผสมกันอยู่อย่างไม่เป็นเนื้อเดียวกัน อีกทั้งสัดส่วนของสารต่างๆภายในเชื้อเพลิงแข็งก็ไม่แน่นอน นอกจากนี้การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงยังขึ้นอยู่กับขนาดอนุภาคเชื้อเพลิงแข็งด้วย เชื้อเพลิงแข็งประกอบด้วยสารต่างๆ ทั้งที่เผาไหม้ได้และเผาไหม้ไม่ได้ สารที่เผาไหม้ไม่ได้เรียกว่า สารเฉื่อย ขั้นตอนหรือกระบวนการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งในเตาเผาานั้น จะมีกระบวนการในการเผาไหม้อนุภาคเชื้อเพลิงตามลักษณะขั้นตอนดังนี้

2.3.5.1 การทำแห้ง (Drying)

เป็นกระบวนการที่ใช้กำจัดความชื้นที่มีอยู่ในอนุภาคของเชื้อเพลิงชีวมวลขณะเริ่มต้นรับความร้อนจากการเผาไหม้ในเตาเผา ปฏิกิริยาการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งเริ่มจากการที่อากาศเข้าไปผสมกับเชื้อเพลิงเกิดกระบวนการเผาไหม้ จากรูปที่ 2.2 ออกซิเจนจากอากาศจะเข้าไปทำปฏิกิริยาสัมผัสกับผิวของคาร์บอนและเกิดปฏิกิริยาของคาร์บอนดังต่อไปนี้



รูปที่ 2.2 ขั้นตอนการระเหยไอน้ำและการให้ความร้อนแก่อนุภาคเชื้อเพลิง
ที่มา : David A. Tillman (1991)

2.3.5.2 การปล่อยสารระเหย (Devolatilization)

เป็นกระบวนการสลายตัวของชีวมวลแล้วทำให้เกิดเป็นสารระเหย หลังจากปฏิกิริยาเกิดขึ้นแล้ว จะได้ผลิตภัณฑ์ไพโรไลซิส ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้ต้องทำปฏิกิริยาต่อไปอีก โดยจะมีสถานะเป็นแก๊สและของแข็ง แก๊สจะประกอบไปด้วย CO , CO_2 , H_2 , O_2 , H_2O และสารประกอบไฮโดรคาร์บอนอีกเล็กน้อย รอบ ๆ อนุภาคของเชื้อเพลิงเมื่อปริมาณสารระเหยต่อพื้นที่ผิวของอนุภาคน้อย ออกซิเจนจะทำปฏิกิริยากับแก๊สเกิดการเผาไหม้แบบผสมแต่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน ในทางตรงกันข้ามถ้าหากปริมาณสารระเหยต่อพื้นที่ผิวมาก จะทำให้ออกซิเจนไม่สามารถเข้าไปทำปฏิกิริยากับแก๊สเป็นผลทำให้ไม่เกิดปฏิกิริยาหรือเกิดได้น้อย เพราะฉะนั้นต้องใช้เวลาเพื่อให้ปริมาณของสารระเหยเจือจางลงจึงจะเกิดปฏิกิริยา ส่วนของแข็งประเภทถ่านจะไม่เกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ในเวลานั้นเนื่องจากแก๊สจากกระบวนการไพโรไลซิสจะป้องกันไม่ให้ออกซิเจนเข้าไปทำปฏิกิริยาพร้อมกันนั้นอุณหภูมิก็ไม่สูงพอที่จะเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ หลังจากแก๊สต่าง ๆ เกิดปฏิกิริยาจะถ่ายความร้อนให้กับคาร์บอนให้มีอุณหภูมิสูงถึงจุดเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ และมีขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาดังต่อไปนี้



2.3.5.3 การจุดติดไฟของสารระเหย (Ignition of Volatile)

เป็นกระบวนการที่ทำให้เกิดการจุดประกายของสารระเหยที่ถูกปล่อยออกมา และอยู่ล้อมรอบอนุภาคของเชื้อเพลิงชีวมวล

2.3.5.4 การเผาไหม้สารระเหย (Combustion of Volatile)

เป็นกระบวนการเผาไหม้สารระเหยในอนุภาคของเชื้อเพลิงชีวมวล ทำให้เกิดเปลวไฟขึ้นรอบๆ อนุภาคเชื้อเพลิงชีวมวล

2.3.5.5 การจุดติดไฟของถ่านชาร์ (Ignition of Char Particle)

เป็นกระบวนการจุดประกายบนผิวหน้าของถ่านที่เหลือ โดยเริ่มจากเป็นจุดเล็กๆ ที่ผิวด้านนอกแล้วค่อยๆ ขยายออกไปจนเกิดทั่วทั้งอนุภาค

2.3.5.6 การเผาไหม้ถ่านชาร์ (Combustion of Residual Char Particle)

เป็นกระบวนการเผาไหม้อนุภาคของถ่านที่เหลือหลังจากที่สารระเหยระเหยออกมาจากอนุภาคของเชื้อเพลิงชีวมวลบางส่วนหรือหมดแล้ว เมื่อเผาไหม้หมดจะเหลือเป็นขี้เถ้า

2.4 การคำนวณอัตราการไหลของอากาศ

เราสามารถคำนวณอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศที่เข้าสู่ห้องเผาไหม้ได้จากสมการ 2.8 และอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศจากสมการ 2.9

$$\dot{Q} = VA \quad (2.8)$$

$$Q = \rho VA = \rho \dot{Q} \quad (2.9)$$

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

2.4.1 สมการเบอร์นูลลีและการหาพลังงานสูญเสียเนื่องจากความฝืดในระบบท่อ

ในหัวข้อนี้จะอธิบายสมการเบอร์นูลลีและการหาพลังงานสูญเสียเนื่องจากความฝืดในระบบท่อ ซึ่งจะถูกนำไปใช้ในการคำนวณความต้องการของอากาศ ที่ใช้กับหัวเผาชีวมวล

2.4.1.1 สมการเบอร์นูลลี

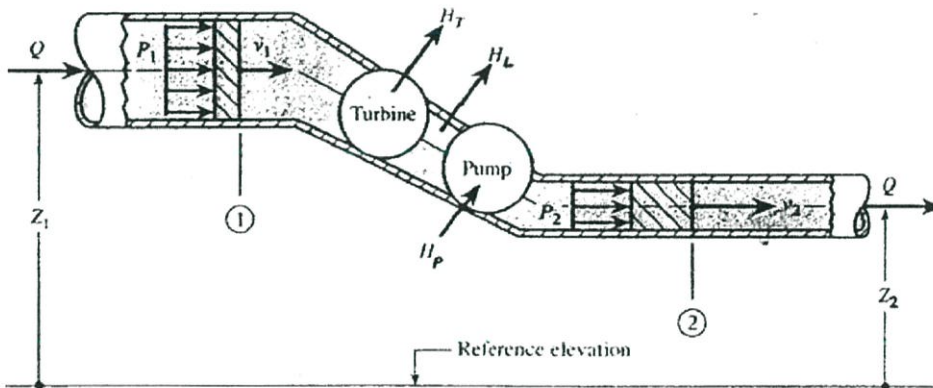
สมการเบอร์นูลลีหรือสมการอนุรักษ์พลังงานเป็นสมการที่ใช้สำหรับอธิบายของไหลที่มีการไหลอย่างสม่ำเสมอ โดยให้พลังงานเนื่องจากมวลของของไหลที่ไหลเข้าไปในจุดที่ 1 เท่ากับพลังงานอันเนื่องมาจากมวลของของไหลที่ไหลออกจากจุดที่ 2 เมื่อพิจารณาการไหลไม่มีความเสียดทาน ไม่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ และไม่มีการป้อนงาน ซึ่งจะได้สมการในหน่วยของความสูงของของไหลหรือเรียกว่า เสด ดังสมการที่ 2.10

$$z_1 + \frac{V_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\gamma} = z_2 + \frac{V_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\gamma} \quad (2.10)$$

เมื่อมีการติดตั้งอุปกรณ์ป้อนงานหรืออุปกรณ์ทำงานระหว่างจุด 1 และจุด 2 สมการของเบอร์นูลีจะถูกดัดแปลงเป็นดังสมการที่ 2.11

$$z_1 + \frac{V_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\gamma} + H_P - H_L - H_T = z_2 + \frac{V_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\gamma} \quad (2.11)$$

โดยที่ z คือความสูง
 V คือความเร็วของของไหล
 g คือความเร่งโน้มถ่วง
 P คือความดัน
 γ คือน้ำหนักจำเพาะ
 H_P คือเฮดที่อุปกรณ์ทำงานให้แก่ระบบ
 H_L คือเฮดที่สูญเสียเนื่องจากความฝืดในท่อ
 H_T คือเฮดที่ให้แก่อุปกรณ์ทำงานในระบบ



รูปที่ 2.3 การพิจารณาพลังงานเมื่อมีการติดตั้งปั๊ม กังหันน้ำ และพลังงานสูญเสียเนื่องจากความฝืด

2.4.1.2 พลังงานสูญเสียเนื่องจากความฝืดในระบบท่อ

สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท

1. การสูญเสียหลัก (Major loss) ที่เกิดจากความเสียดทานระหว่างผนังท่อกับของไหลที่ไหลภายในท่อ (ส่วนที่เป็นท่อตรง) การหาค่าความสูญเสียหลักสามารถหาได้จากสมการ 2.12

$$H_{L_f} = f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g} \quad (2.12)$$

- โดยที่ H_{Lr} คือค่าความสูญเสียหลัก
 L คือความยาวของท่อ
 V คือความเร็วของของไหล
 g คือความเร่งโน้มถ่วง
 D คือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ
 f คือค่าตัวประกอบความเสียดทาน

ซึ่งการหาค่าตัวประกอบความเสียดทานทำได้โดยการเปิด Moody diagram โดยการพิจารณาค่า Reynolds number (Re) และค่าความขรุขระสัมพัทธ์ ซึ่งหาได้จากสมการ 2.13 และ 2.14

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu} \quad (2.13)$$

$$\text{ค่าความขรุขระสัมพัทธ์} = \varepsilon / D \quad (2.14)$$

- โดยที่ ρ คือความหนาแน่นของของไหล
 V คือความเร็วของของไหล
 D คือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ
 μ คือความหนืดของของไหล
 ε คือค่าความขรุขระของท่อ ดูจากตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 แสดงค่าความขรุขระของท่อที่ทำจากวัสดุต่างๆ

TYPE OF PIPE	ABSOLUTE ROUGHNESS (ε)	
	inch	mm
GLASS OR PLASTIC	SMOOTH	SMOOTH
DRAWN TUBING	0.00006	0.0015
COMMERCIAL STEEL OR WROUGHT IRON	0.0018	0.046
ASPHALTED CAST IRON	0.0048	0.12
GALVANIZED IRON	0.006	0.15
CAST IRON	0.0102	0.26
RIVETED STEEL	0.072	1.8

2. การสูญเสียรอง (Minor loss) ที่เกิดจาก ส่วนประกอบของท่อจำพวก ข้อต่อ ข้องอ ข้อลด ข้อขยาย และวาล์วชนิดต่างๆ การหาค่าความสูญเสียรองสามารถหาได้จากสมการที่ 2.15

$$H_{Le} = K \frac{V^2}{2g} \quad (2.15)$$

- โดยที่ H_{Lc} คือค่าความสูญเสียหลัก
 K คือสัมประสิทธิ์ความต้านทานการไหลซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดและขนาดของอุปกรณ์
 V คือความเร็วของของไหล
 g คือความเร่งโน้มถ่วง

ตารางที่ 2.8 แสดงค่าประสิทธิ์ความต้านทานการไหลของวาล์วและข้อต่อต่างๆ

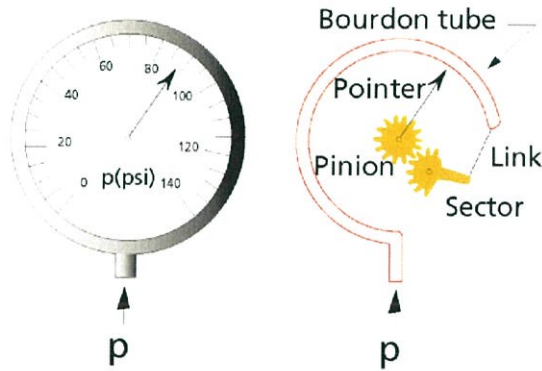
VALVE OR FITTING		K FACTOR
GLOBE VALVE	WIDE OPEN	10.0
	1/2 OPEN	12.5
GATE VALVE	WIDE OPEN	0.19
	3/4 OPEN	0.90
	1/2 OPEN	4.5
	1/4 OPEN	24.0
RETURN BEND		2.2
STANDARD TEE		1.8
STANDARD ELBOW		0.9
45° ELBOW		0.42
90° ELBOW		0.75
BALL CHECK VALVE		4.0

2.5 หลักการทำงานของ Pressure gage, Rota meter และ Pitot tube

ในหัวข้อนี้เป็นการอธิบายหลักการทำงานของ Pressure gage, Rota meter และ Pitot tube โดยอุปกรณ์ทั้งสามตัวมีการทำงานดังนี้

2.5.1 หลักการทำงานของ Pressure gage

Pressure gage เป็นอุปกรณ์ที่ใช้วัดความดัน โดยใช้หลักการของหลอดบัวร์ตองซึ่งเป็นหลอดที่มีพื้นที่หน้าตัดเป็นวงรีและงอเป็นส่วนโค้งของวงกลม โดยปลายด้านหนึ่งของหลอดเป็นปลายปิดต่อเข้ากับเข็มตรวจวัดตำแหน่งและระยะการเคลื่อนที่ ปลายอีกด้านหนึ่งเป็นปลายเปิดต่อเข้ากับสิ่งที่ต้องการวัดความดันดังรูปที่ 2.4 เมื่อหลอดได้รับความดันหรือความดันภายในหลอดมากกว่าความดันภายนอก หลอดจะเกิดความเครียดขึ้นและพยายามยืดตัวออกให้ตรงทำให้ปลายข้างที่ปิดเคลื่อนที่ โดยการเคลื่อนที่นี้เปลี่ยนแปลงตามความดันที่ได้รับ และเมื่อความดันลดลงหลอดจะเคลื่อนที่กลับเข้าสู่ตำแหน่งเดิม



รูปที่ 2.4 Pressure gage และหลักการของหลอดบูร์ดอง

2.5.2 หลักการทำงานของ Rota meter

Rota meter เป็นอุปกรณ์ที่ใช้วัดอัตราการไหลของไหลโดยอาศัยการไหลผ่านท่อปิดซึ่งมีพื้นที่หน้าตัดที่ไม่สม่ำเสมอ (Tapered Tube) ซึ่งผ่านในท่อดังกล่าวจะบรรจุฟลูว (Float) ไว้ภายในดังรูปที่ 2.5 โดยหลักการทำงานคืออาศัยความสมดุลของแรงที่กระทำต่อฟลูวเมื่อมีของไหลไหลผ่านท่อ กล่าวคือ แรงโน้มถ่วงของโลก (Gravity, F_G) แรงลอยตัว (Buoyancy, F_B) (มีค่าน้อยมากเมื่อวัตถุอยู่ในอากาศ) และแรงต้านการไหล (Drag, F_D) ซึ่งสามารถแสดงดังสมการ

$$\sum F_y = 0 \quad (2.16)$$

$$F_D + F_B - F_G = 0; F_B \approx 0 \quad (2.17)$$

หรือ

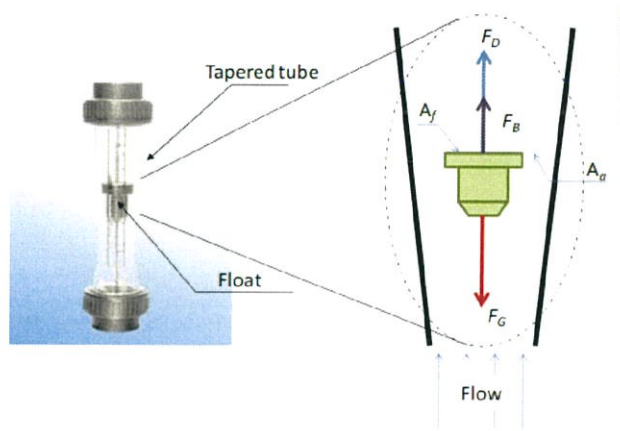
$$C_d \frac{\rho_{\text{fluid}} V^2 A_f}{2} + \rho_{\text{fluid}} \nabla_g - \rho_{\text{float}} \nabla_g = 0 \quad (2.18)$$

ดังนั้น

$$Q = A_a(y) \sqrt{\frac{2(\rho_{\text{float}} - \rho_{\text{fluid}}) \nabla_g}{\rho_{\text{fluid}} C_d A_f}} = K_R A_a(y) \quad (2.19)$$

- โดยที่ C_d คือ ค่า drag coefficient
 A_f คือพื้นที่หน้าตัดของฟลูว
 $A_a(y)$ คือพื้นที่หน้าตัดของวงแหวนระหว่าง ท่อและฟลูวซึ่งแปรผันตามระดับความสูง y
 ∇_g คือปริมาตรของฟลูว
 K_R คือค่าคงที่ของมิเตอร์

จากสมการข้างต้นจะได้ สมการแสดงอัตราการไหลเชิงปริมาตรของของไหลเมื่อไหลผ่านท่อ ซึ่งมีความสัมพันธ์กับพื้นที่หน้าตัดของวงแหวนระหว่างท่อและท่อน ซึ่งจะแปรผันตามระดับความสูงของท่อนเมื่ออัตราการไหลเปลี่ยนไป

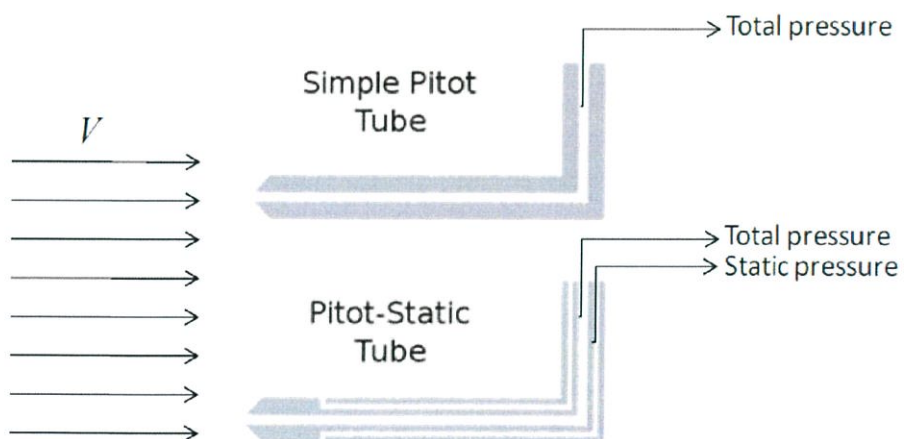


รูปที่ 2.5 หลักการทำงานของ Rota meter

2.5.3 หลักการทำงานของ Pitot tube

Pitot tube คือเครื่องมือวัดความเร็วของของไหลโดยอาศัยผลต่างของความดันที่เกิดขึ้นเมื่อมีของไหลไหลผ่านท่อดังกล่าว ท่อพิโตต์มีลักษณะดังรูปที่ 2.6 โดยความสัมพันธ์ของความเร็วกับความดันรวม (Total Pressure, P_t) และ ความดันสถิต (Static Pressure, P_s) มีความสัมพันธ์ดังสมการที่ 2.20

$$V = \sqrt{\frac{2(P_t - P_s)}{\rho_f}} \quad (2.20)$$



รูปที่ 2.6 Pitot tube

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 - NO_x
3. สารประกอบไฮโดรคาร์บอน-PAH, aldehydes, benzene
4. คาร์บอนมอนอกไซด์
5. ออกไซด์ของกำมะถัน - SO_x
6. ไดออกซินและฟูราน
7. แก๊สเรือนกระจก - CO_2 , N_2O , CH_4
8. กลิ่นและเสียง

2.6.2 ผลกระทบของมลพิษ

ตัวอย่างผลกระทบที่มีต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อม เช่น

1. ส่งผลกระทบต่อ การเปลี่ยนแปลงทางลบของสภาวะแวดล้อมทางอากาศ การเพิ่มขึ้นของปัญหาหมอกควัน ฝุ่น บังปริมาณรังสีแสงอาทิตย์ส่องมายังพื้นดิน ทัศนวิสัยลดลง และมีผลกระทบต่อสภาพบรรยากาศโลกโดยรวม
2. ส่งผลต่อการเพิ่มอัตราการเจ็บป่วยและการเสียชีวิตของมนุษย์ที่ได้รับทั้งทางตรงและทางอ้อมในระยะสั้นและระยะยาว
3. เป็นอันตรายต่อเหล่าพืชพันธุ์ไม้ พื้นที่ป่า ท้องทุ่ง แนวปะการัง และแหล่งนิเวศวิทยาอื่นๆ เนื่องจากมีสารพิษเป็นจำพวก SO_2 , PAN, C_2H_4 เป็นอันตรายต่อระบบสังเคราะห์แสงของพืช
4. การตกสัมผัสหรือฝังตัวของมลพิษบนพื้นผิวสิ่งปลูกสร้าง อนุสรณ์สถาน วัสดุต่างๆที่ทำให้เสื่อมคุณภาพและอาจสึกกร่อนได้ ดูไม่สวยงาม หากจะกำจัดหรือทำความสะอาด บำรุงปรับปรุง ก็ต้องเสียค่าใช้จ่ายและเวลา

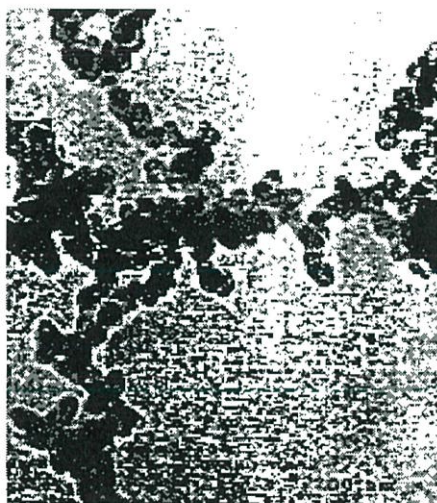
อีกตัวอย่างที่เห็นได้ชัดเนื่องจากเกิดขึ้นในพื้นที่จากมลพิษของการเผาไหม้ คือ ผลจากการทำปฏิกิริยาระหว่างออกไซด์ของไนโตรเจนกับสารประกอบไฮโดรคาร์บอนถูก พิจารณาว่าเป็นสาเหตุสำคัญของการเกิดหมอกทางโฟโตเคมี (photochemical smog) โดยมีแสงแดดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเกิดโอโซน O_3 ที่เหลือเจือปนสารพิษอื่น ๆ กลายเป็นละอองลอยทุติยภูมิ (secondary aerosol) ออกมารวมกับอนุภาคจุลสาร และฝุ่นละอองในอากาศ หมอกทางโฟโตเคมี มีลักษณะเป็นกลุ่มหมอก ละอองลอยสี น้ำตาลหรือเหลืองคล้ำมักก่อตัวในบริเวณที่มีอากาศนิ่งเคลื่อนที่ เหนือเมืองใหญ่ๆที่มีการจราจรหนาแน่น เช่น เชียงใหม่ กรุงเทพ ลอนดอน ลอสแอนเจลิส หมอกทางโฟโตเคมีจะทำให้

เยื่อใยน้ำตาลคายเคือง ทำลายความนุ่มของเนื้อเยื่อถุงลมในปอดของมนุษย์ 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 ที่เกิดขึ้นจากโมเลกุลเชื้อเพลิงที่ไม่ถูกเผาไหม้ หรือถูกเผาไหม้เพียงบางส่วนในเปลวไฟชนิดแพร่ผสม และในเปลวไฟชนิดผสมก่อน ที่ไม่สมบูรณ์ หรือ บริเวณที่ส่วนผสมบาง หรือหนาเกินไปต่อ การเผาไหม้ที่สมบูรณ์ หรืออาจเกิดจากการบีบอัดของเปลวไฟที่ผนังห้องเผาไหม้ อนุภาคจุลสารเหล่านี้มีส่วนประกอบของ อนุภาคเขม่า อินทรีย์สาร ซัลเฟต และกลุ่มออกไซด์ของโลหะในรูปเศษเถ้า มีขนาดและรูปร่างต่างกันไป ในช่วงเล็กมาก 10 nm เป็นทรงกลม จนถึงขนาดใหญ่ 2000 nm



รูปที่ 2.7 ตัวอย่างลักษณะของอนุภาคจุลสาร

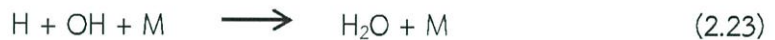
ส่วนใหญ่จะมีขนาดอยู่ในช่วง 100 – 500 nm มีรูปร่างเกาะเป็นก้อนไม่ปกติ (irregular) ดังตัวอย่างในรูปที่ 2.7 ความเข้มข้นเชิงมวลและเชิงจำนวนจะมีค่าสูงมาก อนุภาคเขม่าจากการเผาไหม้คือ อนุภาคคาร์บอนที่มีส่วนของไฮโดรเจนด้วยอย่างน้อย 1% โดยมวล คิดเป็นสูตรเคมีอย่างง่าย คือ C_8H เขม่าจึงไม่ใช่ถ่านหรือคาร์บอนบริสุทธิ์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

2.6.3.2 คาร์บอนมอนอกไซด์

คาร์บอนมอนอกไซด์ที่เกิดจากการเผาไหม้ มีสาเหตุมาจากหลายประการ เช่น สภาพการเผาไหม้แบบส่วนผสมหนาเกินไป การผสมคลุกเคล้ากันไม่ดีพอ ปริมาณอากาศไม่เพียงพอ นอกจากนี้ ยังมีสาเหตุมาจากสภาพการเผาไหม้ภายใต้อุณหภูมิค่อนข้างสูงจนทำให้เกิดการแตกสลายตัวของคาร์บอนไดออกไซด์ มาเป็นคาร์บอนมอนอกไซด์ได้



คาร์บอนมอนอกไซด์ที่เกิดขึ้นมีเวลาสั้นเกินไปในโซนการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ เนื่องจากต้องระบายแก๊สไอเสียออกทันที อุณหภูมิ และความดันลดลงอย่างทันทีทันใด ดังนั้น CO จะอยู่ในสถานะสมดุลบางมากกว่าที่จะอยู่ในสถานะสมดุลอย่างสมบูรณ์ ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงจาก CO เป็น CO₂ เกิดขึ้นไม่เต็มที่ เพราะถูกจำกัดด้วยการแย่งเข้าทำปฏิกิริยาของ OH กับ H ดังสมการที่ 2.22 และ 2.23



ปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์สามารถควบคุมได้จากอัตราส่วนผสม หรือปริมาณออกซิเจนในปฏิกิริยาการเผาไหม้แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์เป็นแก๊สที่ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น และเป็นพิษต่อร่างกายอย่างมาก จนอาจทำให้เสียชีวิตได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ในบริเวณที่มีความเข้มข้นของแก๊สสูง เมื่อร่างกายได้รับ CO ในระดับต่ำ จะทำให้ร่างกาย สมอง และกล้ามเนื้อ ได้รับออกซิเจนไม่เพียงพอ ปฏิกิริยาตอบสนองของร่างกายจะช้าลงและขาดการตัดสินใจที่ดี เมื่อร่างกายรับแก๊สชนิดนี้เข้าไปในปริมาณมากๆ สามารถทำให้เสียชีวิตได้เหมือนอย่างเช่นที่เคยเป็นข่าวจากการติดเครื่องยนต์ของรถยนต์อยู่กับที่เป็นเวลานานๆ ในที่บริเวณอับการระบายอากาศไม่ดีพอ หรือโดยการรั่วของ CO เข้าไปในห้องโดยสารของรถยนต์

2.6.3.3 สารประกอบไฮโดรคาร์บอน

สารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่เกิดจากการเผาไหม้มีที่มาจากเชื้อเพลิงและสารหล่อลื่น โดยกระบวนการเหล่านี้คือ (i) การที่เชื้อเพลิงหลุดลอดจากการเผาไหม้ (ii) การแตกสลายตัวทางความร้อนของเชื้อเพลิง และ (iii) การทำปฏิกิริยากับแก๊สไอเสียบางส่วน สารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่ได้เกิดจากการเผาไหม้มีส่วนประกอบเป็นพวกกลุ่มพาราฟิน โอลีฟิน และอะโรมาติก ที่พบตามปกติ สาเหตุที่ทำให้เกิดสารประกอบไฮโดรคาร์บอนจากระบบการเผาไหม้ เนื่องมาจากหลายสาเหตุ เช่น คุณภาพการเผาไหม้ไม่ดี การจุดไม่ติด (misfire) การผสมกันไม่ดี ส่วนผสมบางหรือหนาเกินไป เกิดการดับของเปลวไฟในบริเวณที่มีการยืดของเปลวไฟ (flame stretching) ที่มากเกินไปตามระดับความเข้มของความปั่นป่วนที่สูงมาก จนทำให้แนวเปลวไฟขาด ส่งผลให้เชื้อเพลิงบางส่วนหลุดลอดผ่านแนวเปลวไฟออกไปโดยไม่เกิดการติดไฟ เหตุอีกประการหนึ่ง คือ การดับดับของเปลวเพลิง (flame quenching) เกิดจากการลดลงของอุณหภูมิเปลวไฟจนดับไปเนื่องจาการถ่ายเทความร้อนสูงเฉพาะบริเวณ โดยเฉพาะอย่างยิ่งช่องเล็กๆ ในห้องเผาไหม้ที่มีอุณหภูมิค่อนข้างต่ำมาก เมื่อเทียบ

กับอุณหภูมิเปลวไฟ เช่น ผนังห้องเผาไหม้ ช่องที่อยู่ระหว่างผิวด้านในกระบอกสูบโดยนับจากหัวลูกสูบ ลงมาถึงตำแหน่งแหวนลูกสูบ ช่องระหว่างแหวนลูกสูบ ช่องที่ร่องเกลียวสำหรับหัวเทียนบนฝาสูบ เครื่องยนต์ ช่องระหว่างเขี้ยวหัวเทียน เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีสาเหตุเพิ่มเติม คือ การซึมซับไอไฮโดรคาร์บอน ในเศษกากเขม่าและคราบน้ำมันเครื่องในห้องเผาไหม้ที่ความดันสูง ทำให้ไม่ถูกเผาไหม้ เมื่อมีการระบาย ไอเสีย ความดันลดลง ก็จะระเหยและถูกระบายออกมาสู่บรรยากาศ

2.6.3.4 แก๊สเรือนกระจก

บรรยากาศของโลกประกอบด้วย ไนโตรเจน ออกซิเจน และอาร์กอน เป็นองค์ประกอบหลักและมีไอน้ำ และคาร์บอนไดออกไซด์ อีกจำนวนเล็กน้อยในบรรยากาศ ไนโตรเจน ออกซิเจน และอาร์กอน ไม่ได้มีอิทธิพลต่ออุณหภูมิของโลก แต่ไอน้ำ และ คาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งเป็นแก๊สเรือนกระจก (greenhouse gas) ชนิดหนึ่งแม้จะมีในปริมาณน้อย แต่มีความจำเป็น ต่อการรักษาอุณหภูมิในบรรยากาศของโลกให้คงที่ แก๊สเรือนกระจกคือแก๊สที่สามารถดูดซับคลื่นรังสีอินฟราเรดหรือคลื่นรังสีความร้อนที่มาจากรังสีแสงอาทิตย์ได้ดี แก๊สเหล่านี้ดูดซับรังสีความร้อนไว้ในเวลากลางวัน แล้วค่อยๆ แผ่รังสีความร้อนออกมาในเวลากลางคืน ทำให้อุณหภูมิ ในบรรยากาศโลกไม่เปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลัน ดังเช่นในดาวเคราะห์ดวงอื่นๆ ส่งผลให้สิ่งมีชีวิตในโลกสามารถดำรงอยู่ได้ อย่างไรก็ตาม การเพิ่มขึ้นของแก๊สเรือนกระจกจะทำให้ชั้นบรรยากาศมีความสามารถในการกักเก็บรังสีความร้อนได้มากขึ้น ผลที่ตามมาก็คือ อุณหภูมิเฉลี่ยของชั้นบรรยากาศก็เพิ่มขึ้นด้วย แก๊สเรือนกระจกมีทั้งที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ และเกิดจากกิจกรรมของมนุษย์ ซึ่งมีจำนวนหลายชนิด แก๊สเรือนกระจกที่สำคัญ คือ ไอน้ำ คาร์บอนไดออกไซด์ โอโซน มีเทน ไนตรัสออกไซด์ และคลอโรฟลูออโรคาร์บอน (CFC) เป็นต้น

ตารางที่ 2.9 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 (SF₆) ทั้งนี้ CFC ไม่ถูกกำหนดในพิธีสารเกียวโต เนื่องจากเป็นสารที่ถูกจำกัดการใช้ในข้อตกลงอื่นแล้ว แก๊สเรือนกระจกแต่ละชนิด มีศักยภาพการทำให้เกิดภาวะโลกร้อน (global warming potential, GWP) ที่แตกต่างกัน ศักยภาพดังกล่าวนี้ขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพในการแผ่รังสี ความร้อนของโมเลกุล และขึ้นอยู่กับอายุของแก๊สนั้นๆ ในบรรยากาศ และคิดเทียบกับการแผ่รังสีความร้อนของคาร์บอนไดออกไซด์ ในช่วงระยะเวลาหนึ่ง โดยค่า GWP ของแก๊สเรือนกระจกต่างๆ เป็นดังนี้

ตารางที่ 2.10 ศักยภาพการทำให้เกิดภาวะตลกร้อนของแก๊สเรือนกระจก

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

บทที่ 3

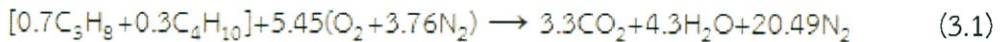
การออกแบบและการคำนวณ

3.1 สมการการเผาไหม้

เชื้อเพลิงที่ใช้กับหัวเผาคือ แก๊ส LPG และเชื้อเพลิงชีวมวลฝุ่น โดยแก๊ส LPG จะใช้ในตอนเริ่มต้นของการจุดเตาเผาจากนั้นเชื้อเพลิงชีวมวลฝุ่นถึงค่อยถูกนำมาใช้ในการเผาไหม้ในเตาต่อไป ซึ่งสมการการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงทั้งสองชนิดเป็นดังนี้

3.1.1 สมการการเผาไหม้สำหรับเชื้อเพลิงแก๊ส LPG

แก๊ส LPG มีโพรเพน $C_3H_8 = 70\%$ โดยปริมาตร และมีบิวเทน $C_4H_{10} = 30\%$ โดยปริมาตร สามารถเขียนสมการทางเคมีได้ดังสมการ 3.1



จากสมการทางเคมีจะได้ว่า

$$\text{ปริมาณเชื้อเพลิง} = (0.7 \times 44) + (0.3 \times 58) = 48.2 \text{ kg}$$

$$\text{ปริมาณอากาศ} = 5.45 \times [32 + (3.76 \times 28)] = 748.176 \text{ kg}$$

ดังนั้น

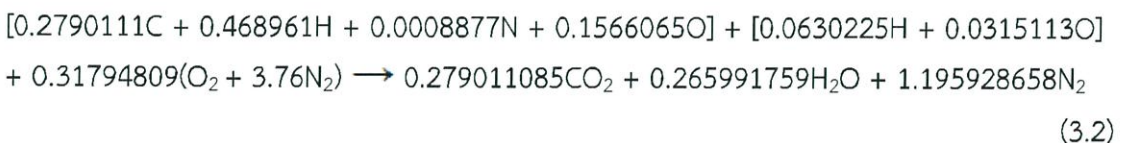
$$\text{อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง} = \frac{\text{ปริมาณอากาศ}}{\text{ปริมาณเชื้อเพลิง}} = \frac{748.176 \text{ kg}}{48.20 \text{ kg}} = 15.52 : 1$$

3.1.2 สมการการเผาไหม้สำหรับเชื้อเพลิงชีวมวลฝุ่น

ส่วนประกอบของเชื้อเพลิงชีวมวลฝุ่นที่ใช้ในการศึกษา โดยวิธีการวิเคราะห์การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงชีวมวลฝุ่น อาศัยข้อมูลจากตารางที่ 3.1 โดยคิดที่สภาพนำส่งดังนี้

3.1.2.1 เชื้อเพลิงชีวมวลฝุ่น (ความชื้น 7.98 %) ที่ 100% stoichiometry

เมื่อวิเคราะห์เชื้อเพลิง ณ สภาพนำส่งตามที่แสดงไว้ดังตาราง 3.1 จะสามารถเขียนสมการเผาไหม้ได้ดังสมการ 3.2



ตารางที่ 3.1 แสดงส่วนประกอบของเชื้อเพลิงชีวมวลฝุ่นอัดที่ใช้ในการศึกษา

คุณสมบัติ	สภาพน้ำส่ง	สภาพน้ำหนักแห้ง
ความชื้น,%	7.98	-
เถ้า,%	2.89	3.14
ไฮโดรเจน,%	6.60	7.17
คาร์บอน,%	47.11	51.19
ไนโตรเจน,%	0.17	0.19
ออกซิเจน,%	35.25	38.31
ซัลเฟอร์,%	0	0
ค่าความร้อนทางต่ำ	-	15787.05 kcal/kg

ตารางที่ 3.2 แสดงการวิเคราะห์เชื้อเพลิง ณ สภาพน้ำส่ง

คุณสมบัติ	%m/m (dry)	Mass/1kg _{fuel} (as received)	Kmole/1kg fuel	Kmole/kmole Reactive species and water content
คาร์บอน (C)	51.19	0.4710	0.0393	0.2700
ไฮโดรเจน (H)	7.17	0.0659	0.0660	0.4690
ไนโตรเจน (N)	0.19	0.0017	0.0001	0.0009
ออกซิเจน (O)	38.31	0.3525	0.0220	0.1566
ซัลเฟอร์ (S)	0	0	0	0
เถ้า (ash)	3.14	0.0289	-	-
ไฮโดรเจนใน H ₂ O		0.0089	0.0089	0.0630
ออกซิเจนใน H ₂ O		0.0709	0.0044	0.0315
รวม			0.1407	1

จากสมการการเผาไหม้จะได้ว่า

$$\text{ปริมาณอากาศที่ต้องใช้} = 0.3179 \times [32 + (3.76 \times 28)] = 43.6479 \text{ kg}_{\text{air}}$$

$$\text{ปริมาณเชื้อเพลิง (ไม่รวมเถ้า)} = (0.2790 \times 12) + (0.4689 \times 1) + (0.00088 \times 14) + (0.1566 \times 16) + (0.0630 \times 1) + (0.0315 \times 16) = 6.9018 \text{ kg}_{\text{fuel}}$$

$$\text{ปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้} = 6.9018 / (1 - 0.0289) = 7.1072 \text{ kg}_{\text{fuel}}$$

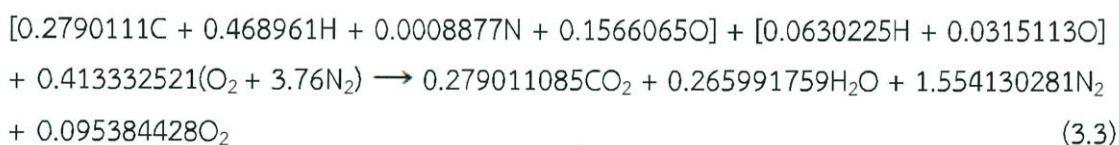
$$\text{AF ratio}_{@ \text{stoi}} = 6.1414 \text{ kg}_{\text{air}} / \text{kg}_{\text{fuel}}$$

ตารางที่ 3.3 แสดงปริมาณไอเสียที่ 100% Stoichiometry

สารประกอบ	สัดส่วนโดยโมล	สัดส่วนโดยมวล
CO ₂	0.1603	0.2429
H ₂ O	0.1528	0.0947
SO ₂	0	0
N ₂	0.6869	0.6624
ผลรวมของเลขคุดหน้าสารประกอบ 1.7409		
มวลโมเลกุลของไอเสีย = 29.0368 kg _{ไอเสีย} /kmol _{ไอเสีย}		

3.1.2.2 เชื้อเพลิงชีวมวลฝุ่น (ความชื้น 7.98 %) ที่ 130% stoichiometry

เมื่อวิเคราะห์เชื้อเพลิง ณ สภาพนำส่งตามที่แสดงไว้ดังตาราง 3.2 จะสามารถเขียนสมการเผาไหม้ได้ดังนี้



จากสมการการเผาไหม้จะได้ว่า

ปริมาณอากาศที่ต้องใช้ = $0.41333 \times (32 + 3.76 \times 28) = 56.7419 \text{ kg}_{\text{air}}$

ปริมาณเชื้อเพลิง (ไม่รวมเถ้า) = $(0.27901 \times 12) + (0.46896 \times 1) + (0.00088 \times 14) + (0.15661 \times 16) + (0.06302 \times 1) + (0.03151 \times 16) = 6.90234 \text{ kg}_{\text{fuel}}$

ปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ = $6.90234 / (1 - 0.0289) = 7.10775 \text{ kg}_{\text{fuel}}$

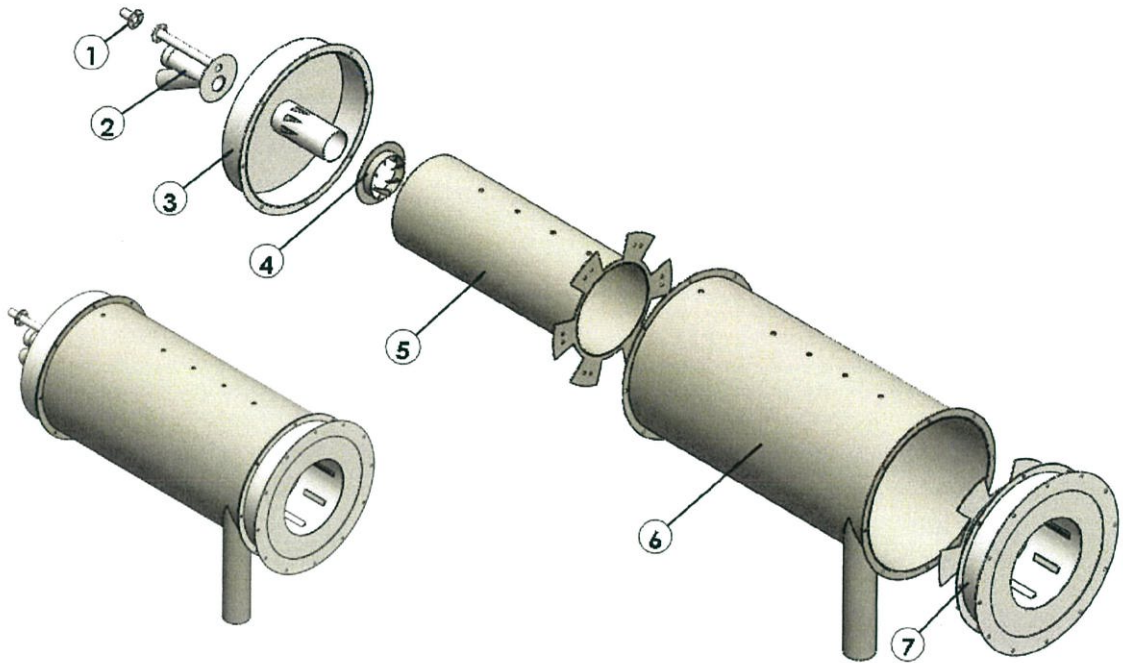
AF ratio @ 30% excess air = $7.98310 \text{ kg}_{\text{air}} / \text{kg}_{\text{fuel}}$

ตารางที่ 3.4 แสดงปริมาณไอเสียที่ 130% Stoichiometry

สารประกอบ	สัดส่วนโดยโมล	สัดส่วนโดยมวล
CO ₂	0.1271	0.2026
H ₂ O	0.1212	0.0790
SO ₂	0	0
N ₂	0.7082	0.7184
ผลรวมของเลขคุดหน้าสารประกอบ 2.1945		
มวลโมเลกุลของไอเสีย = 27.6036 kg _{ไอเสีย} /kmol _{ไอเสีย}		

3.2 แบบของหัวเผาและหลักการทำงานของส่วนต่างๆ

ในหัวข้อนี้เป็นการแสดงแบบของหัวเผาและหลักการทำงานของส่วนต่างๆ โดยการอ้างอิงจากรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แสดงชิ้นส่วนต่างๆของหัวเผา

จากรูปที่ 3.1 หัวเผาประกอบไปด้วยชิ้นส่วนต่างๆ 7 ชิ้นด้วยกัน โดยประกอบด้วยชิ้นส่วนต่างๆ ดังนี้

1. UV Sensor supporter เป็นส่วนที่ใช้ประกอบ UV Sensor ซึ่งชิ้นส่วนนี้จะประกอบติดกับ Feeder pipe โดยตรงส่วนปลายของ UV Sensor support จะมีหน้าแปลนและติดปะเก็นไว้ เพื่อลดอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจากการนำความร้อนมาจาก Feeder pipe เพราะ UV Sensor เป็นอุปกรณ์ที่บอบบาง ไม่สามารถทนอุณหภูมิสูงๆได้

2. Feeder pipe เป็นส่วนที่ประกอบไปด้วยท่อสามท่อ โดยท่อบนสุดจะเป็นท่อที่ใช้เชื่อมต่อกับ UV Sensor supporter ท่อตรงกลางเป็นท่อที่ใช้เป็นทางเข้าของแก๊ส LPG และมีตัว Spark igniter ประกอบอยู่ ส่วนท่อล่างสุดคือท่อที่ใช้เป็นทางเข้าของทั้งเชื้อเพลิงชีวมวลและอากาศส่วนที่หนึ่ง (Primary air) โดย Feeder pipe จะถูกเชื่อมติดอยู่กับ Front cover

3. Front cover เป็นส่วนที่ใช้ปิดส่วนหน้าของหัวเผา และมีท่อที่มีช่องให้อากาศที่ไหลมาจาก Middle cover ไหลผ่าน Swirl plate เข้าไปให้ Reactor (เรียกอากาศส่วนนี้ว่า Secondary air)

4. Swirl plate เป็นส่วนที่ทำให้อากาศที่เข้าไปใน Reactor เกิดการหมุนวน

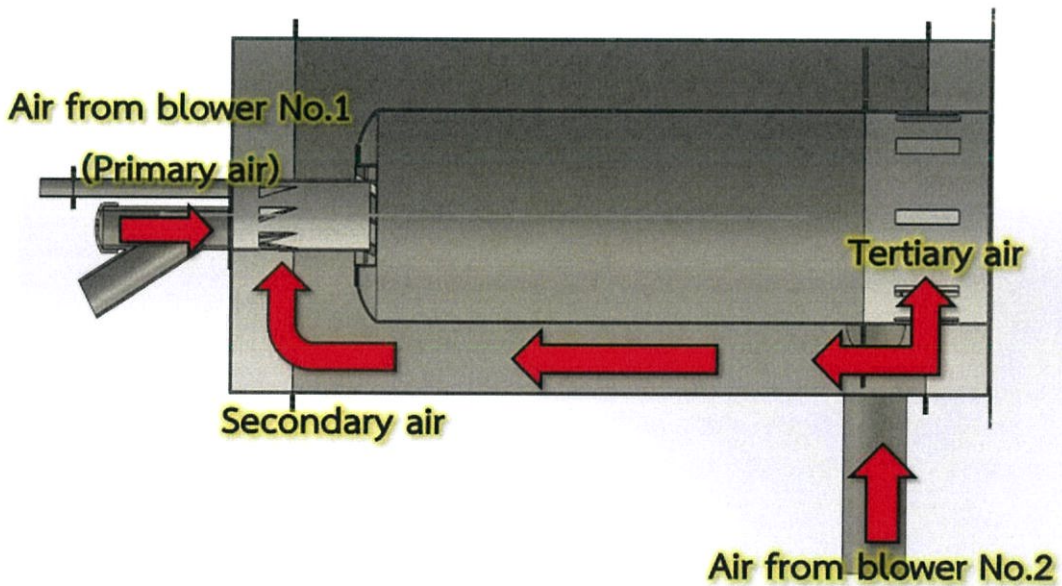
5. Reactor เป็นส่วนที่เกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงชีวมวลฝุ่น ความร้อนที่ได้จากส่วนนี้จะแลกเปลี่ยนกับ Secondary air ที่ไหลเข้ามา และบริเวณผิวของ Reactor จะมีรู 4 รูไว้สำหรับให้ Thermocouple วัดอุณหภูมิของเปลวไฟ

6.Middle cover เป็นส่วนที่มีช่องทางเข้าของอากาศที่ป้อนมาจาก Blower ตัวที่ 2 และเป็นส่วนที่บังคับทิศทางการไหลของกระแสอากาศให้มีการหมุนวนไปรอบๆ Middle cover โดยอากาศส่วนนี้จะได้รับความร้อนจาก Reactor และบริเวณผิวของ Middle cover จะมีรู 5 รูไว้สำหรับให้ Thermocouple วัดอุณหภูมิ โดยรูแรกสำหรับวัดอากาศส่วนที่สองที่ถูกอุ่นด้วย Reactor และอีก 4 รูที่เหลือมีไว้สำหรับสอด Thermocouple เข้าไปใน Reactor เพื่อวัดอุณหภูมิของเปลวไฟ

7.End cover เป็นส่วนหลังสุดของหัวเผา โดยส่วนนี้จะมีช่องให้อากาศจาก Middle cover ไหลเข้ามา (เรียกอากาศส่วนนี้ว่า Tertiary air) และหน้าแปลนของส่วน End cover จะใช้เชื่อมต่อกับด้านหลังของเตาเผา (Furnace)

ซึ่งการแยกส่วนประกอบของหัวเผาเป็นหลายชั้นก็เพื่อให้ง่ายต่อการสร้าง การบำรุงรักษา และหากมีการปรับปรุงหรือทดลองในอนาคต สามารถดูรายละเอียดเพิ่มเติมของชิ้นส่วนต่างๆได้ที่ภาคผนวก ข

เตาเผาที่ประกอบเสร็จสมบูรณ์แล้วจะมีทิศทางการไหลของอากาศดังรูปที่ 3.2 โดยอากาศที่ป้อนจาก Blower ตัวที่ 1 จะไหลเข้าผ่านทาง Feeder pipe (Primary air) ส่วนอากาศที่ป้อนจาก Blower ตัวที่ 2 จะไหลเข้าผ่านทาง Middle cover ซึ่งการไหลจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน โดยอากาศส่วนแรก (Secondary air) จะไหลเข้าผ่านทาง Front cover และผ่านไปยัง Swirl plate เข้าไปยัง Reactor และอากาศส่วนที่สอง (Tertiary air) จะไหลเข้าผ่านทาง End cover



รูปที่ 3.2 ทิศทางการไหลของอากาศภายในเตาเผา

3.3 การคำนวณปริมาณแก๊ส LPG

ในหัวข้อนี้เป็นการแสดงการคำนวณอัตราการไหลเชิงปริมาตรของแก๊ส LPG และอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศโดยการคำนวณหาอัตราการไหลของแก๊ส LPG และอัตราการไหลของอากาศ จะใช้ข้อมูลต่างๆดังนี้

1. ค่าพลังงานความร้อนที่ต้องการใช้ในการอุ่นหัวเผา คือ 5 kW
2. คุณสมบัติของแก๊ส LPG
 - 2.1 ค่า LHV = 49,731.11 kJ/kg
 - 2.2 ความหนาแน่น (ρ_{LPG}) = 2.11 kg/m³
3. ความหนาแน่นของอากาศ (ρ_{Air}) = 1.2 kg/m³
4. อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง = 15.52 : 1
5. อุณหภูมิอากาศแวดล้อม = 35°C

หาอัตราการไหลเชิงมวล (\dot{M}_{LPG}) จากสมการ

$$\dot{M}_{LPG} = \frac{\text{พลังงานความร้อนที่ต้องการ}}{LHV} \quad (3.4)$$

ดังนั้น

$$\dot{M}_{LPG} = \frac{5 \text{ kW}}{49,731.11 \text{ kJ/kg}} = 0.0001 \text{ kg/s} = 0.00603 \text{ kg/min}$$

หาอัตราการไหลเชิงปริมาตร (\dot{V}_{LPG}) จากสมการ

$$\dot{V}_{LPG} = \frac{\dot{M}}{\rho_{LPG}} \quad (3.5)$$

ดังนั้น

$$\dot{V}_{LPG} = \frac{0.0001}{2.11} = 4.7393 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s} = 2843 \text{ L/min}$$

3.4 การคำนวณปริมาณอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ

ในหัวข้อนี้เป็นการแสดงการคำนวณปริมาณอัตราการไหลเชิงมวล โดยใช้สมการ Bernoulli equation และ Continuity แล้วนำค่าความต่างของความดันจาก Orifice plate มาแทนในสมการ

สมการ Bernoulli equation,

$$p_1 - p_2 = \frac{\rho}{2}(V_2^2 - V_1^2) = \frac{\rho V_2^2}{2} \left[1 - \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^2 \right] \quad (3.6)$$

สมการ Continuity

$$(-\rho V_1 A_1) + (\rho V_2 A_2) = 0 \quad (3.7)$$

หรือ

$$V_1 A_1 = V_2 A_2 \quad \text{ดังนั้น} \quad \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^2 = \left(\frac{A_2}{A_1} \right)^2 \quad (3.8)$$

แทนสมการ (3.8) ลงใน (3.6)

$$p_1 - p_2 = \frac{\rho V_2^2}{2} \left[1 - \left(\frac{A_2}{A_1} \right)^2 \right] \quad (3.9)$$

$$V_2 = \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho \left[1 - (A_2 / A_1)^2 \right]}} \quad (3.10)$$

$$; \dot{m} = \rho V_2 A_2 \quad (3.11)$$

$$\dot{m}_{\text{actual}} = \frac{C A_t}{\sqrt{1 - (A_t / A_1)^2}} \sqrt{2\rho(p_1 - p_2)} \quad (3.12)$$

$$; \beta = D_t / D_1 \quad \text{จากนั้น} \quad (A_t / A_1)^2 = (D_t / D_1)^4 = \beta^4 \quad (3.13)$$

$$\dot{m}_{\text{actual}} = \frac{C A_t}{\sqrt{1 - \beta^4}} \sqrt{2\rho(p_1 - p_2)} \quad (3.14)$$

$$; K = \frac{C}{\sqrt{1 - \beta^4}} \quad (3.15)$$

$$\dot{m}_{\text{air}} = K A_t \sqrt{2\rho(p_1 - p_2)} \quad \text{เมื่อหน่วยของ } p \text{ คือ bar} \quad (3.16)$$

$$\text{ดังนั้นเราจะได้} \quad \dot{m}_{\text{air}} = K A_t \sqrt{200\rho(p_1 - p_2)} \quad \text{เมื่อหน่วยของ } p \text{ คือ mbar} \quad (3.17)$$

ตัวอย่างการคำนวณหาอัตราการไหลเชิงมวล จากสมการ (3.17) ที่ ID Fan 10 Hz, valve 2 open 30%, $p_1 - p_2 = 2.07643$ mbar, $k=0.7$, ความหนาแน่นของบรรยากาศ $\rho = 1.16104$ kg/m³ และพื้นที่หน้าตัด

$$A_t = 0.00369 \text{ m}^2$$

จากสมการ

$$\dot{m}_{\text{air}} = K A_t \sqrt{200\rho(p_1 - p_2)} \quad (3.17)$$

แทนค่าลงไปในสมการ 3.17

$$\dot{m}_{\text{air}} = 0.7(0.00368)\sqrt{200(1.16104)(2.07643)}$$

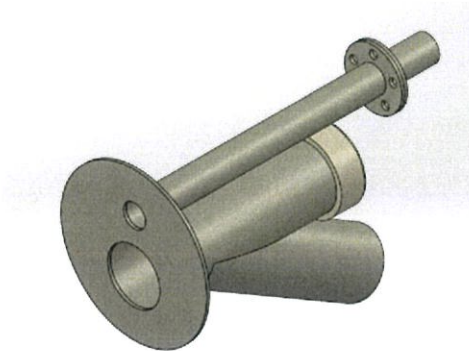
$$\dot{m}_{\text{air}} = 0.05656 \text{ Kg/s}$$

บทที่ 4 อุปกรณ์และเงื่อนไขการทดลอง

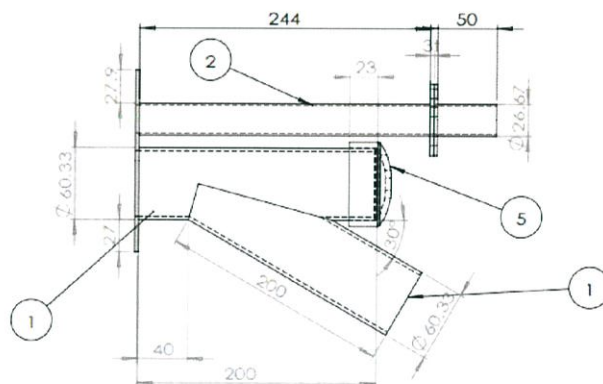
ในบทนี้จะกล่าวถึงชิ้นส่วนที่ถูกพัฒนาเพิ่มเติมและชิ้นส่วนที่ได้ทำการผลิตขึ้นใหม่โดย แสดง ขั้นตอนการหล่อปูนทนไฟ ฐานที่ใช้รองรับหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวล ท่อทางเข้าของอากาศปฐมภูมิและ เชื้อเพลิงชีวมวล รวมถึงขั้นตอนและวิธีการทดลอง

4.1 Feeder pipe

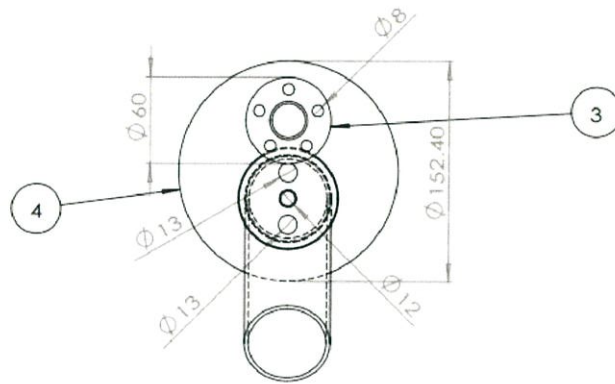
ทำการสร้างขึ้นเพื่อเป็นทางเข้าของเชื้อเพลิงและติดตั้งตัว Spark Igniter อีกทั้งมีช่องเพื่อให้ อุปกรณ์เครื่องมือวัดต่างๆทำงานได้อีกด้วย โดยอาศัยหลักการออกแบบให้ขนาดของส่วนประกอบ ต่างๆ เป็นไปตามมาตรฐานของท่อในระบบอุตสาหกรรม และเป็นไปตามขนาดของอุปกรณ์เครื่องมือ วัดที่มีอยู่แล้ว โดยถูกสร้างขึ้นมาจาก Stainless steel 304 ขนาด 2" Sch 10 และ 3/4" Sch 5



รูปที่ 4.1 Feeder pipe ที่ถูกออกแบบด้วยโปรแกรม Solidworks



รูปที่ 4.2 Dimension ของ Feeder pipe (ด้านข้าง)



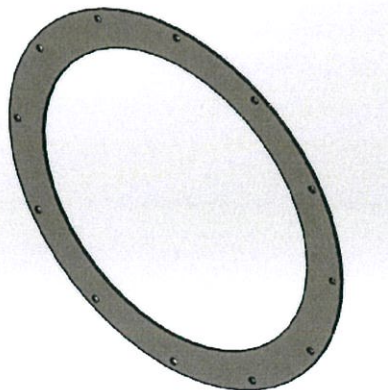
รูปที่ 4.3 Dimension ของ Feeder pipe (ด้านหน้า)



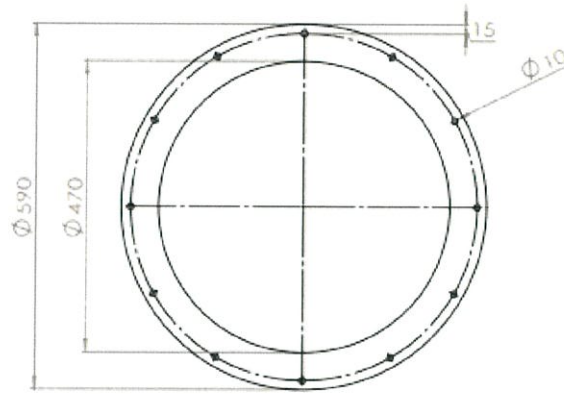
รูปที่ 4.4 ชิ้นงานจริง ของ Feeder pipe

4.2 End cover flange

ทำการสร้างวงแหวนเพื่อให้สามารถเชื่อมต่อระหว่าง End cover flange และ Furnace โดยอาศัยหลักการออกแบบให้ขนาดของวงแหวนนั้นมีขนาดตามมาตรฐานของหน้าแปลน Furnace



รูปที่ 4.5 End cover flange ที่ถูกออกแบบด้วยโปรแกรม Solidworks



รูปที่ 4.6 Dimension ของ End cover flange



รูปที่ 4.7 ชิ้นงานจริง ของ End cover flange

4.3 การหล่อปูนทนไฟ (Refractory)

4.3.1 วัสดุและอุปกรณ์

1. ถังผสมปูน
2. ถุงมือยาง
3. บล็อกหล่อ
4. ปูนทนไฟสำหรับงานก่อ SRIC 13S
5. แร่ใยหิน
6. ดินน้ำมัน

4.3.2 ขั้นตอนการทำงาน

1. เตรียมอุปกรณ์ที่ใช้ในการผสมปูนโดยปูนก่อดองผสมน้ำประมาณ 11% ของเนื้อปูน



รูปที่ 4.8 ภาพขั้นตอนการผสมปูน

2. ทำการวางบล็อกหล่อและติดแร่ใยหินในชิ้นงานเพื่อเป็นพื้นที่เผื่อสำหรับการขยายตัวของปูนในเวลาดำเนินงานจริง



รูปที่ 4.9 ภาพขั้นตอนการติดบล็อกหล่อ

3. นำปูนที่ผสมดีแล้วทำการเทลงไปในชิ้นงานโดยต้องค่อยๆ เททีละชั้น และเกลี่ยให้เรียบแล้วจึงเทพูนในชั้นถัดไป



รูปที่ 4.10 ภาพขั้นตอนการเทพูน

4. เมื่อเทพูนจนครบระยะที่ต้องการแล้วจึงรอนปูนแห้งและทำการถอดบล็อกหล่อออกเพื่อใช้สภาพพื้นผิวปูน



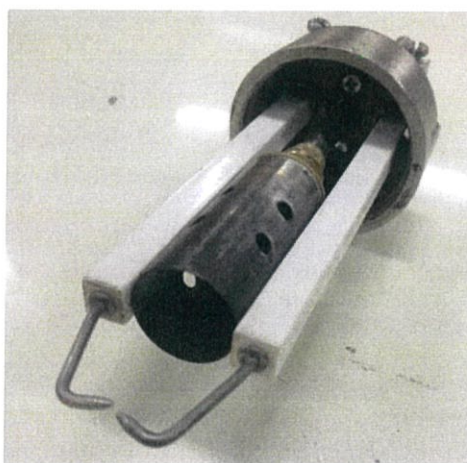
รูปที่ 4.11 ภาพหลังจากเสร็จสิ้นการเทพูน

4.4 ทำการเจาะตัวโครงสร้างภายนอก

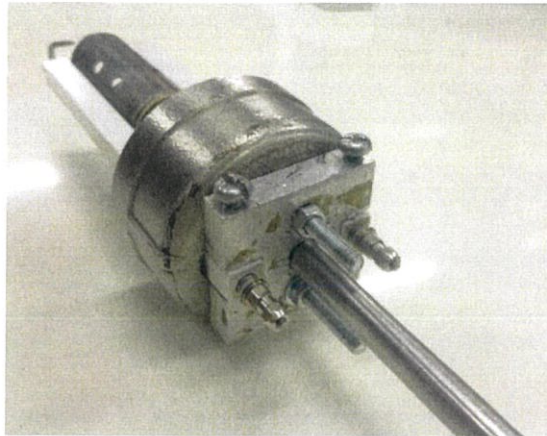
ทำการเจาะตัวโครงสร้างภายนอกและภายในเพื่อเป็นตำแหน่งสำหรับติดตั้งอุปกรณ์วัดค่าอุณหภูมิในจุดต่างๆ โดยใช้ตำแหน่งเฉลี่ยจากความยาวทั้งหมดของตัวโครงสร้างเพื่อให้ได้การเฉลี่ยของอุณหภูมิในจุดต่างๆ

4.5 ชุดหัวจุด (Spark igniter)

เป็นท่อลำเลียงแก๊ส LPG เข้ามาสู่หัวเผาและมีตัวทำให้เกิดประกายไฟเพื่อให้ LPG เกิดการจุดระเบิด



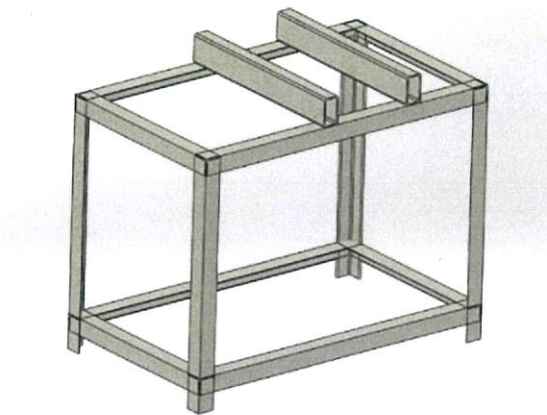
รูปที่ 4.12 ชุดหัวจุด (Spark igniter) ด้านหน้า



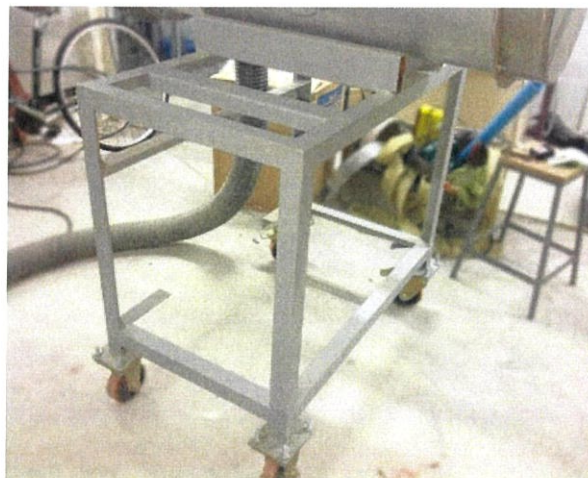
รูปที่ 4.13 ชุดหัวจุด (Spark igniter) ด้านหลัง

4.6 ฐานตั้งหัวเผา

ใช้สำหรับรองรับหัวเผาและทำให้ความสูงของหัวเผาสามารถเชื่อมต่อกับเตาเผา ซึ่งฐานตั้งหัวเผาทำมาจากเหล็กตัว L ขนาด 50x50 t3 ss400 สูง 77 cm ขนาด 60x100 cm



รูปที่ 4.14 ฐานตั้งหัวเผา ที่ถูกออกแบบด้วยโปรแกรม Solidworks



รูปที่ 4.15 ฐานตั้งหัวเผา

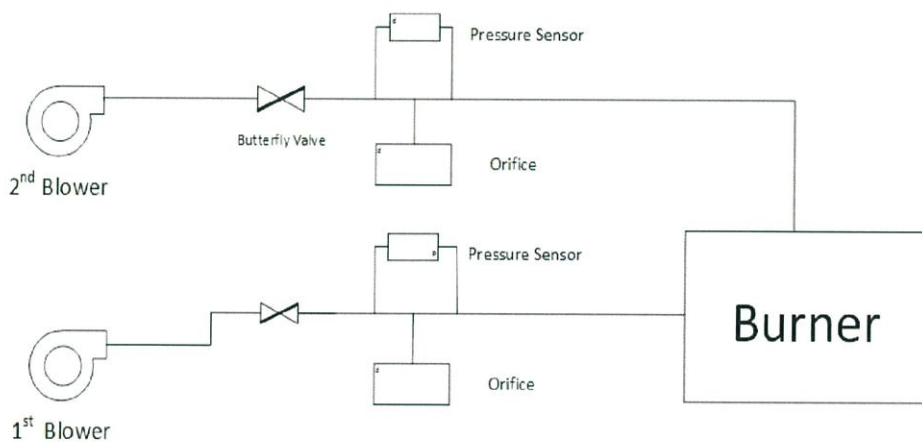
4.7 วิธีการทดลองและการบันทึกผลการทดลอง

4.7.1 การวัดค่าปริมาณอากาศของระบบป้อนอากาศ

ระบบป้อนอากาศทำขึ้นเพื่อป้อนอากาศเข้าสู่หัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลเพื่อให้เกิดการเผาไหม้ โดย ทางเข้าของอากาศสู่หัวเผาแบ่งเป็น 2 ทางเข้า คือ

1. ทางเข้าที่ 1 (Primary air) ใช้สำหรับการจุดติดเปลวไฟนำร่องและออกแบบไว้เพื่อส่งเชื้อเพลิงชนิดฝุ่นเข้าสู่หัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวล
2. ทางเข้าที่ 2 (Secondary air) เป็นอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้โดยตรง ซึ่งก่อนเข้าหัวเผาอากาศส่วนนี้จะผ่าน Swirl plate ทำให้เกิดการหมุนวนของอากาศภายในเตา

ทำการทดสอบระบบป้อนอากาศจาก Blower แต่ละตัว เพื่อใช้หาเงื่อนไขในการทดลอง สำหรับการทดลองที่ 4.7.2 และ 4.7.3 ต่อไป



รูปที่ 4.16 แสดงระบบป้อนอากาศก่อนเข้าหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวล

4.7.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการควบคุมอากาศ

1. Blower ผลิตอากาศส่วนที่ 1



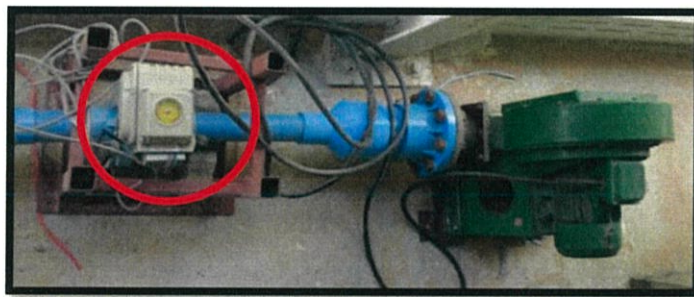
รูปที่ 4.17 Blower ผลิตอากาศส่วนที่ 1

2. Blower ผลิตอากาศส่วนที่ 2



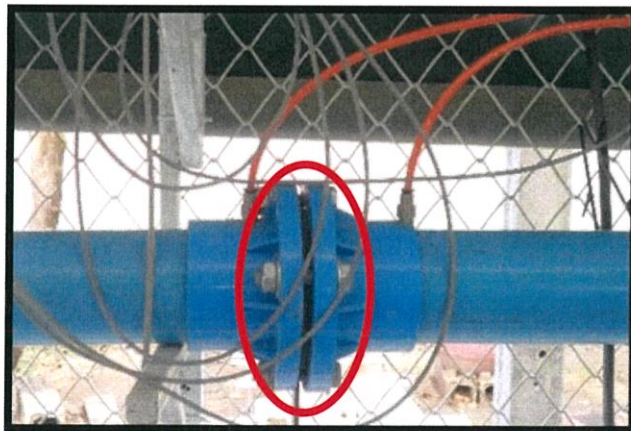
รูปที่ 4.18 Blower ผลิตอากาศส่วนที่ 2

3. Butterfly valve



รูปที่ 4.19 Butterfly valve

4. Orifice plate เพื่อทำการวัดอัตราการไหล



รูปที่ 4.20 Orifice plate

5. Pressure sensor ใช้สำหรับการวัดค่าความแตกต่างของความดันระหว่างทางเข้าและทางออกของ Orifice plate

4.7.1.2 เงื่อนไขการทดลอง

ตารางที่ 4.1 แสดงเงื่อนไขการทดลองการวัดปริมาณอากาศ

Induce draft fan (Hertz)	% Valve 1 open	% Valve 2 open
10	30-100	30-100

4.7.1.3 การบันทึกผลการทดลอง

ทำการวัดผลการไหลของอากาศโดยการติดตั้ง Orifice ระหว่างเส้นทางการไหลของอากาศและวัดค่า ความแตกต่างของความดันที่เกิดขึ้นระหว่างแผ่น Orifice จากนั้นจึงใช้สมการของ Bernoulli ในการคำนวณ Mass flow rate ต่อไป

4.7.1.4 ขั้นตอนการทดลอง

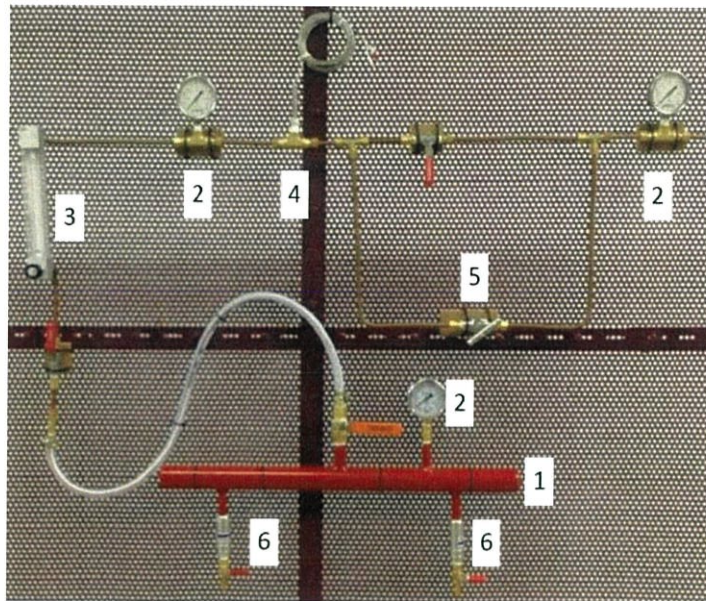
1. ทำการติดตั้งท่ออากาศเชื่อมต่อกับหัวเผาเชื้อเพลิง
2. ทำการเริ่มต้นระบบโดยการเปิด Induce draft fan และ blower แต่ละตัว
3. ปรับค่าปริมาณการเปิด valve ของ blower แต่ละตัวตามเงื่อนไขการทดลอง

4.7.2 การดูลักษณะเปลวไฟนําร่อง และ การหมุนวนของอากาศ

ทำการตรวจสอบลักษณะการหมุนวนของอากาศภายในหัวเผาเชื้อเพลิงเนื่องจากผลของ Swirl plate และ ลักษณะของเปลวไฟนําร่องที่ถูกจุดจากแก๊ส LPG โดยการเลือกปริมาณการเปิดวาล์วอากาศในแต่ละส่วนจากผลการทดลองที่ 4.7.1

4.7.2.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. แผงควบคุมปริมาณแก๊ส LPG ซึ่งประกอบด้วย
 1. Header สำหรับการต่อเข้ากับถังแก๊ส LPG
 2. Pressure gage สำหรับวัดความดันภายในระบบควบคุมปริมาณ LPG
 3. Rota meter สำหรับวัดอัตราการไหลของแก๊ส LPG
 4. Temperature sensor สำหรับการวัดอุณหภูมิของแก๊ส LPG ภายในระบบ
 5. Needle valve สำหรับการควบคุมปริมาณแก๊ส LPG
 6. Check valve สำหรับกั้นการไหลย้อนกลับของแก๊ส LPG



รูปที่ 4.21 แสดงแผงควบคุมปริมาณแก๊ส LPG

4.7.2.2 เงื่อนไขการทดลอง

สำหรับการหมวนของอากาศ ทำการเลือกใช้ Blower ตัวที่ 1 เป็น Primary air และใช้ Blower ตัวที่ 2 เป็น Secondary air จากนั้นทำการเปิด Primary air และ Secondary air ที่ 100% Valve open ทั้งคู่

สำหรับเปลวไฟนําร่องจากแก๊ส LPG ได้ทำการเลือกใช้ Blower ตัวที่ 1 เป็น Primary air และใช้ Blower ตัวที่ 2 เป็น Secondary air เพื่อจำลองปริมาณอากาศและลักษณะของเปลวไฟนําร่องที่จะเกิดขึ้นเมื่อใช้ในการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลฝุ่นที่กำลังการผลิต 100 kW

ตารางที่ 4.2 แสดงเงื่อนไขการทดลองการดูลักษณะเปลวไฟนําร่อง และการหมวนของอากาศ

ปริมาณแก๊ส LPG (Liter/min)	ปริมาณการเปิดวาล์ว (% Open)
3.5	Valve 1 40%
	Valve 2 50%

4.7.2.3 การบันทึกผลการทดลอง

ใช้กล้องถ่ายภาพในการบันทึกลักษณะทางกายภาพการหมวนของอากาศภายในหัวเผาเชื้อเพลิง และ ลักษณะของเปลวไฟนําร่องที่เกิดขึ้นในหัวเผาเชื้อเพลิง

4.7.2.4 ขั้นตอนการทดลอง

สำหรับการหมวนของอากาศ

1. ทำการเชื่อมต่อระบบป้อนอากาศของชุดทดลองเข้ากับหัวเผาเชื้อเพลิง
2. ทำการผูกปรับบังคับกับปลายแท่งเหล็กและยื่นแท่งเหล็กเข้าไปในบริเวณหัวเผาในช่วงกลางของ Reactor
3. บันทึกภาพเคลื่อนไหวการหมวนของริบบิ้นภายในหัวเผาเชื้อเพลิง

สำหรับการดูแลลักษณะของเปลวไฟนําร่อง

1. ทำการเชื่อมต่อระบบป้อนอากาศ และ ระบบการจ่ายแก๊ส LPG
2. ทำการจุดหัวเผาเชื้อเพลิงโดยใช้ปริมาณอากาศและปริมาณแก๊ส LPG ตามเงื่อนไขการทดลอง
3. ทำการบันทึกภาพลักษณะของเปลวไฟนําร่องที่เกิดขึ้นภายในหัวเผา

4.7.3 การหาขั้นตอนดำเนินการหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลและลักษณะทางกายภาพของเปลวไฟของเชื้อเพลิงชีวมวล

ทำการทดลองการเผาเชื้อเพลิงชีวมวลฝุ่นที่กำลังการผลิต 100 kW โดยเลือกใช้ปริมาณอากาศสำหรับการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์จากการทดลองที่ 4.7.1 และทำการบันทึกภาพเปลวไฟของการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดที่ถูกบดเป็นฝุ่นและทำการเก็บระยะเวลาในแต่ละขั้นตอนของการดำเนินการหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวล

4.7.3.1 ชีวมวลฝุ่นสำหรับการทดลอง

ใช้ปริมาณเชื้อเพลิงชีวมวลฝุ่นตามเงื่อนไขการทดลอง และชนิดของเชื้อเพลิงฝุ่นคือ ซีลี้อย



รูปที่ 4.22 ชีวมวลฝุ่นสำหรับการทดลอง

4.7.3.2 เงื่อนไขการทดลอง

ตารางที่ 4.3 แสดงเงื่อนไขของการเผาเชื้อเพลิงชีวมวล

กำลังการผลิต (kW)	ปริมาณเชื้อเพลิง (kg/min)	ปริมาณอากาศ (kg/s)	ปริมาณวาล์วอากาศที่เปิด
100	0.3801	0.14985	Valve 1 40% Valve 2 50%

4.7.3.3 การบันทึกผลการทดลอง

การบันทึกลักษณะเปลวไฟของเชื้อเพลิงชีวมวล ใช้กล้องถ่ายภาพในการบันทึกลักษณะทางกายภาพของเปลวไฟจากเชื้อเพลิงที่สภาวะคงตัวจากบริเวณเชื่อมต่อระหว่าง หัวเผาเชื้อเพลิง และ เตาเผา

4.7.3.4 ขั้นตอนการทดลอง

1. ทำการติดตั้งระบบป้อนอากาศ และระบบป้อนเชื้อเพลิงแก๊ส LPG เข้ากับหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวล
2. ทำการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิล
3. ทำการเริ่มระบบป้อนอากาศโดยใช้ปริมาณอากาศที่เหมาะสม ตามผลการทดลองที่ 4.7.1
4. ทำการเริ่มระบบป้อนเชื้อเพลิงแก๊ส LPG และใช้ Spark Igniter ในการจุดเปลวไฟนําร่อง
5. ทำการวัดค่าอุณหภูมิโดยการรอให้อุณหภูมิอยู่ในสภาวะคงตัวและจับเวลาจนถึงสภาวะคงตัว
6. ทำการเริ่มการป้อนเชื้อเพลิงชีวมวลควบคู่ไปกับเชื้อเพลิงชีวมวลในกำลังการผลิต 100 kW และรอให้อุณหภูมิอยู่ในสภาวะคงตัวจากนั้นบันทึกผลเวลา
7. ทำการปิดการป้อนเชื้อเพลิงแก๊ส LPG และรอจนอุณหภูมิอยู่ในสภาวะคงตัวจากนั้นบันทึกผลเวลา

4.7.4 การทดลองห่าย่นการดำเนินการที่เหมาะสมของหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวล

ทำการทดลองปรับสัดส่วนของปริมาณอากาศส่วนเกิน และ ปริมาณอากาศของทางเข้าส่วนปฐมภูมิและทุติยภูมิเพื่อดูแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในแกนกลางของหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลเพื่อค้นหาปริมาณอากาศส่วนเกินที่เหมาะสมและปริมาณอากาศทางเข้าส่วนปฐมภูมิและทุติยภูมิที่เหมาะสมสำหรับการดำเนินการของหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวล

4.7.4.1 เงื่อนไขการทดลอง

ตารางที่ 4.4 แสดงการการปรับสัดส่วนของอากาศภายในหัวเผา

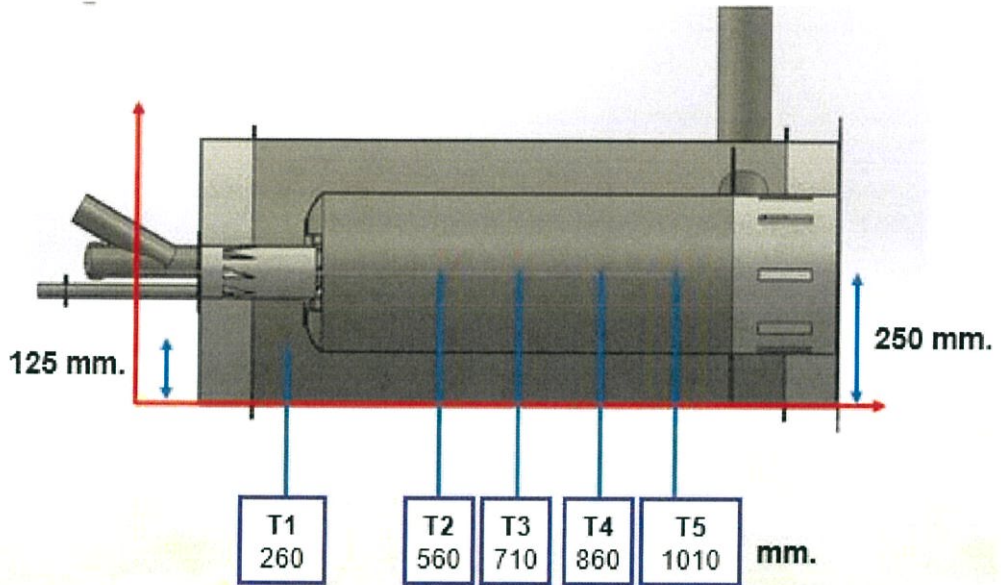
สัดส่วนอากาศปฐมภูมิและทุติยภูมิ	ปริมาณอากาศส่วนเกิน
Primary 30% Secondary 70%	0%,10%,20%,30%
Primary 40% Secondary 60%	0%,10%,20%,30%
Primary 50% Secondary 50%	0%,10%,20%,30%
Primary 60% Secondary 40%	0%,10%,20%,30%

4.7.4.2 การบันทึกผลการทดลอง

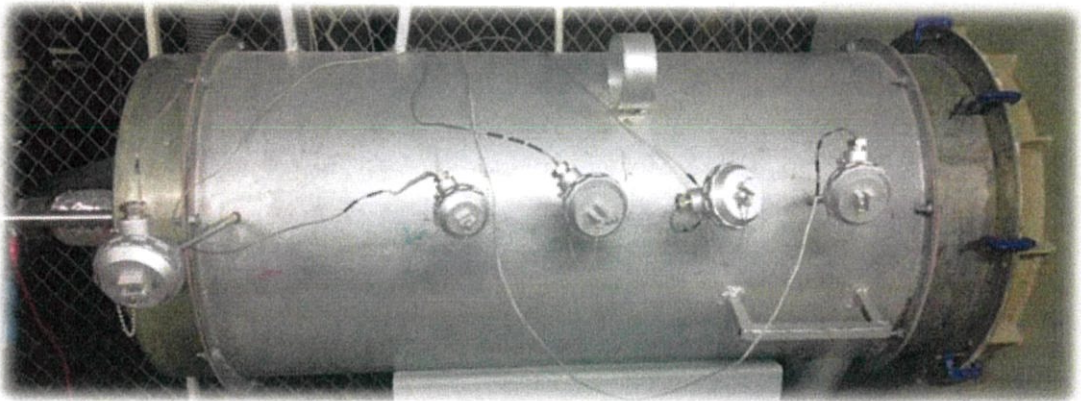
ทำการบันทึกผลของอุณหภูมิแต่ละจุดภายในหัวเผาตามตารางดังนี้

ตารางที่ 4.5 แสดงการบันทึกผลการกระจายของอุณหภูมิภายในหัวเผา

กำลังการผลิต (kW)	จุดที่ 1 (อุณหภูมิอากาศ)	จุดที่ 2 (0.56 m)	จุดที่ 3 (0.71 m)	จุดที่ 4 (0.86 m)	จุดที่ 5 (1.01 m)
100					



รูปที่ 4.23 แสดงตำแหน่งของ Thermocouple สำหรับวัดผลการทดลอง



รูปที่ 4.24 แสดงตำแหน่งของ Thermocouple ที่สอดเข้าไปในเตาเผา

บทที่ 5

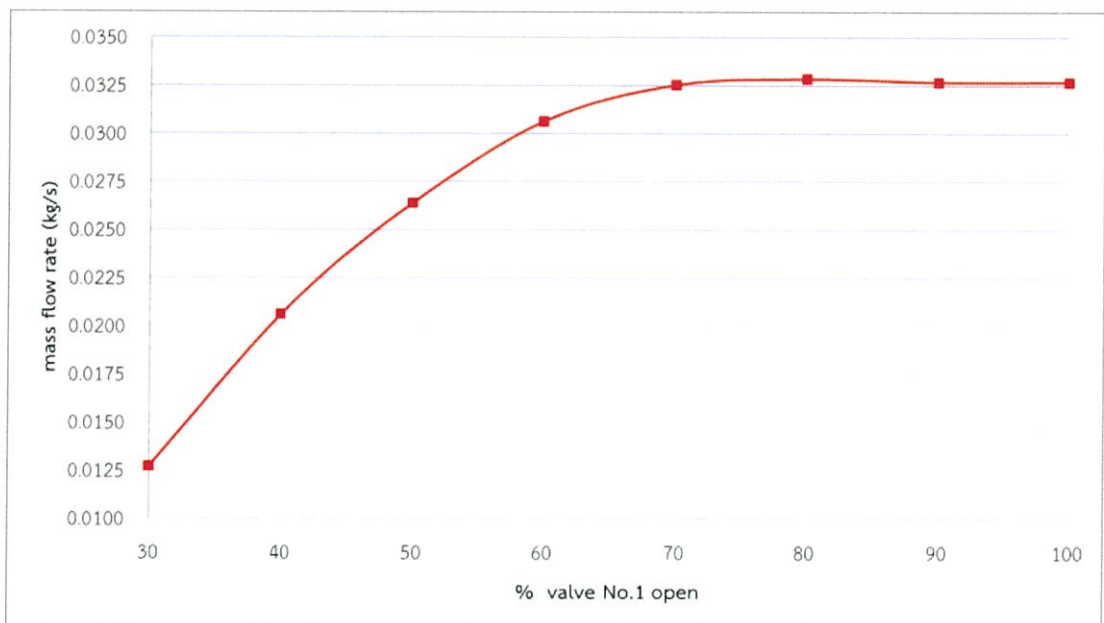
ผลการทดลองและการอภิปราย

ในบทนี้จะนำเสนอผลการทดลองและการอภิปรายผลที่ได้จากการทดลองโดยผลการทดลองแบ่งเป็น 4 หัวข้อคือ ผลการทดลองของระบบป้อนอากาศจาก Blower แต่ละตัว ผลของตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อการเผาไหม้ของหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวล เช่น ลักษณะการหมุนวนของอากาศภายในหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวล ตำแหน่งของเปลวไฟนําร่องเป็นต้น และ ผลของอุณหภูมิภายในหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลที่ย่านการทดลองที่แตกต่างกัน

5.1 ผลการทดลองของระบบป้อนอากาศ

5.1.1 ผลการทดลองระบบป้อนอากาศส่วนที่สอง

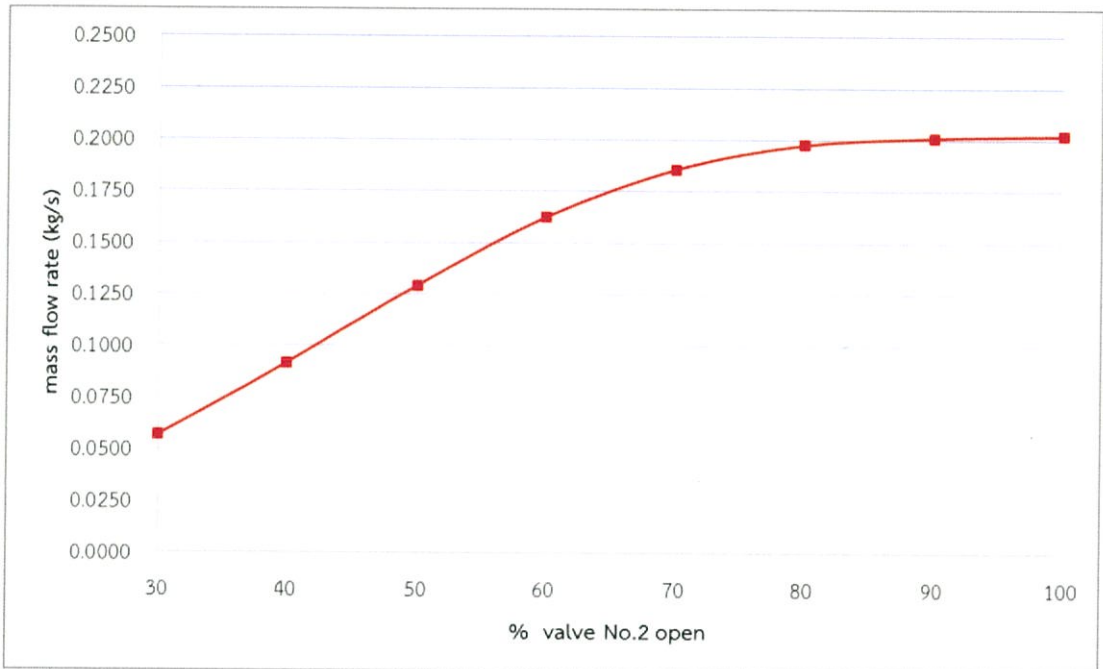
จากรูปที่ 5.1 เป็นกราฟที่แสดงอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศส่วนที่สอง ที่ตำแหน่งการเปิดวาล์ว 1 ที่แตกต่างกันไปโดยเริ่มจาก 30% จนถึง 100% ซึ่งจากกราฟพบว่าปริมาณอากาศจะแปรผันตามเปอร์เซ็นต์การเปิดวาล์วกล่าวคือเมื่อเปอร์เซ็นต์การเปิดวาล์วมากขึ้น จะมีผลทำให้อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศมากขึ้นด้วย จากการทดลองพบว่า อากาศในทางเข้าส่วนปฐมภูมิหรือส่วนที่หนึ่งนั้นสามารถป้อนปริมาณอากาศโดยมวลได้ในช่วง 0.01268–0.03268 kg/s และสำหรับอากาศในทางเข้าส่วนทุติยภูมินั้นสามารถป้อนปริมาณอากาศโดยมวลได้ในช่วง 0.05665-0.20213 kg/s



รูปที่ 5.1 กราฟแสดงอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศที่วัดได้จาก blower ตัวที่ 1 ที่ตำแหน่งการเปิดวาล์ว 1 แตกต่างกัน

5.1.2 ผลการทดลองระบบป้อนอากาศส่วนที่สอง

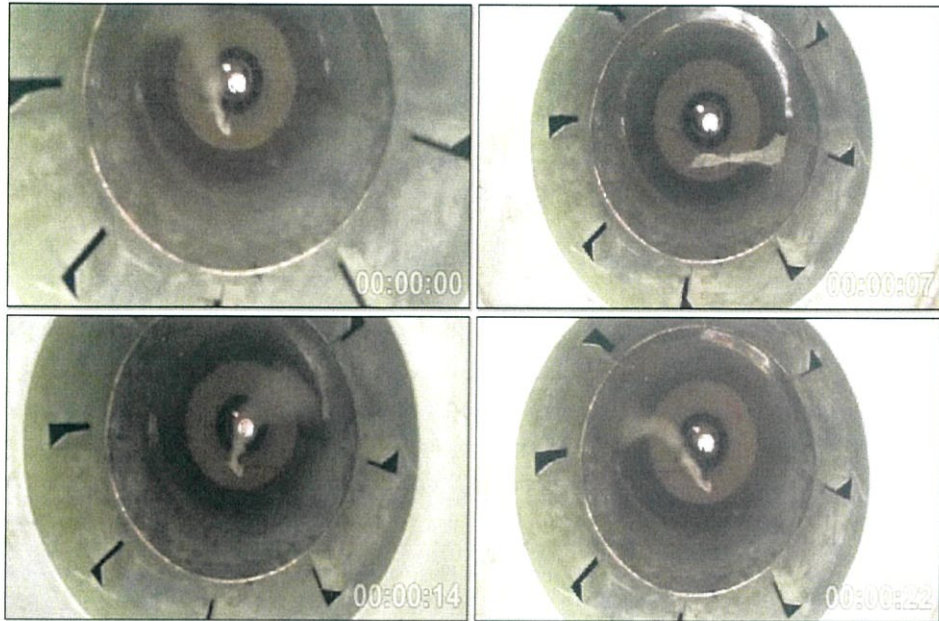
จากรูปที่ 5.2 เป็นกราฟที่แสดงอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศส่วนที่สอง ที่ตำแหน่งการเปิดวาล์ว 2 ที่แตกต่างกันไปโดยเริ่มจาก 30% จนถึง 100% ซึ่งจากกราฟพบว่าปริมาณอากาศจะแปรผันตามเปอร์เซ็นต์การเปิดวาล์ว กล่าวคือเมื่อเปอร์เซ็นต์ของการเปิดวาล์วมากขึ้นจะมีผลทำให้อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศมากขึ้นด้วย จากการทดลองพบว่า อากาศในทางเข้าส่วนทุติยภูมิหรือส่วนที่สอง นั้นสามารถป้อนปริมาณอากาศโดยมวลได้ในช่วง 0.05665-0.20213 kg/s



รูปที่ 5.2 กราฟแสดงอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศที่วัดได้จาก blower ตัวที่ 2 ที่ตำแหน่งการเปิดวาล์ว 2 แตกต่างกัน

5.2 ผลการทดลองการดูดลักษณะเปลวไฟนําร่อง และ การหมุนวนของอากาศ

จากรูปที่ 5.3 เป็นภาพแสดงผลการหมุนของริบบิ้นภายในใจกลางหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวล พบว่าลักษณะการหมุนของริบบิ้นมีการหมุนวนเป็นวงกลมซึ่งเหมาะสมแก่การทำให้เปลวไฟของเชื้อเพลิงชีวมวลมีการคลุกเคล้ากันระหว่างอากาศและเชื้อเพลิงชีวมวลฝุ่นได้ดียิ่งขึ้น

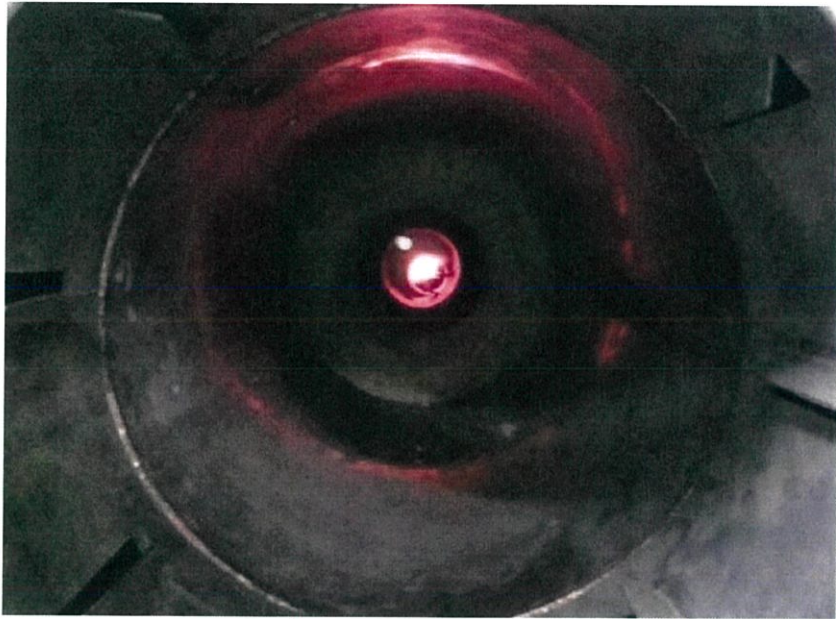


รูปที่ 5.3 ลักษณะการหมุนวนของอากาศภายในหัวเผา

จากรูปที่ 5.4 เป็นภาพแสดงตำแหน่งของเปลวไฟนําร่องจากแก๊ส LPG ที่ปริมาณ 3.5 ลิตร ต่อหน้าที่ พบว่าตำแหน่งของเปลวไฟนําร่องนั้นอยู่ในตำแหน่งที่เชื้อเพลิงชีวมวลฝุ่นจากระบบป้อนเชื้อเพลิงสามารถพุ่งเข้าปะทะได้อย่างสมบูรณ์



รูปที่ 5.4 แสดงตำแหน่งของเปลวไฟนําร่องที่ปริมาณแก๊ส LPG 3.5 ลิตรต่อหน้าที่ จากด้านหน้าของเตาเผา

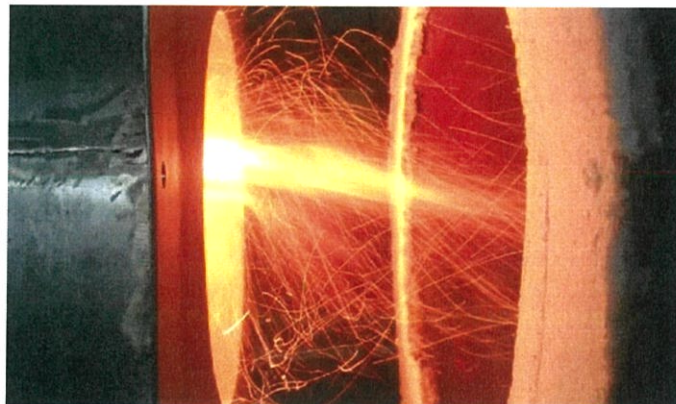


รูปที่ 5.5 แสดงลักษณะของเปลวไฟที่ปริมาณแก๊ส LPG 3.5 ลิตรต่อนาที จากด้านหลังของเตาเผา

5.3 ผลการทดลองการหาขั้นตอนดำเนินการหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลและลักษณะทางกายภาพของเปลวไฟของเชื้อเพลิงชีวมวล

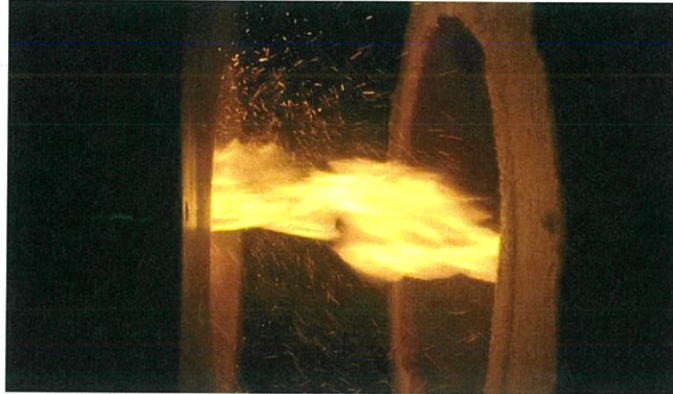
สำหรับขั้นตอนการดำเนินการของหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลที่เหมาะสมนั้นประกอบด้วยขั้นตอนหลัก 3 ขั้นตอนคือ ขั้นตอนของการจุดเปลวไฟนําร่อง ขั้นตอนของการเริ่มปล่อยเชื้อเพลิงชีวมวลฝุ่น และ ขั้นตอนของการปิดเปลวไฟนําร่องและปล่อยให้เปลวไฟของเชื้อเพลิงชีวมวลสามารถทำการเผาไหม้ได้ด้วยตัวเอง เมื่อทำการจับเวลาในแต่ละขั้นตอนเพื่อหาช่วงเวลาที่คุณสมบัติของแต่ละขั้นตอนเข้าสู่สภาวะคงตัว พบว่า ในขั้นตอนของการจุดเปลวไฟนําร่องนั้นอุณหภูมิจะเข้าสู่สภาวะคงตัวภายใน 10 นาที และในขั้นตอนของการเริ่มปล่อยเชื้อเพลิงชีวมวลฝุ่นควบคู่ไปกับเปลวไฟนําร่องนั้นอุณหภูมิจะเข้าสู่สภาวะคงตัวภายใน 3 นาที และขั้นตอนของการปิดเปลวไฟนําร่องเพื่อให้เปลวไฟของเชื้อเพลิงชีวมวลฝุ่นสามารถทำการเผาไหม้ได้ด้วยตัวเองนั้น อยู่ในช่วงเวลา 2 นาที

รูปที่ 5.6 แสดงภาพของเปลวไฟเชื้อเพลิงชีวมวลที่ขั้นตอนของการเริ่มปล่อยเชื้อเพลิงชีวมวลฝุ่นควบคู่ไปกับเปลวไฟนําร่องพบว่าลักษณะของการเผาไหม้นั้นมีความไม่สมบูรณ์ดีนัก ยังมีชีวมวลฝุ่นที่ยังไม่ถูกทำการเผาไหม้ลอยออกมา



รูปที่ 5.6 รูปเปลวไฟของ LPG และ Sawdust ที่ปริมาณเชื้อเพลิง 0.3801 kg/min

รูปที่ 5.7 แสดงภาพของเปลวไฟเชื้อเพลิงชีวมวลที่ขั้นตอนของการปิดเปลวไฟนําร่องเพื่อให้เปลวไฟของเชื้อเพลิงชีวมวลฝุ่นสามารถทำการเผาไหม้ได้ด้วยตัวเอง พบว่าลักษณะของการเผาไหม้นั้นมีความสมบูรณ์มากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับช่วงที่เปิดเปลวไฟนําร่องไว้ โดยที่ชีวมวลฝุ่นที่ยังไม่ถูกทำการเผาไหม้นั้นลดลงอย่างมาก



รูปที่ 5.7 รูปเปลวไฟเมื่อเปิด LPG เหลืองเพียง Sawdust ปริมาณเชื้อเพลิง 0.3801 kg/min

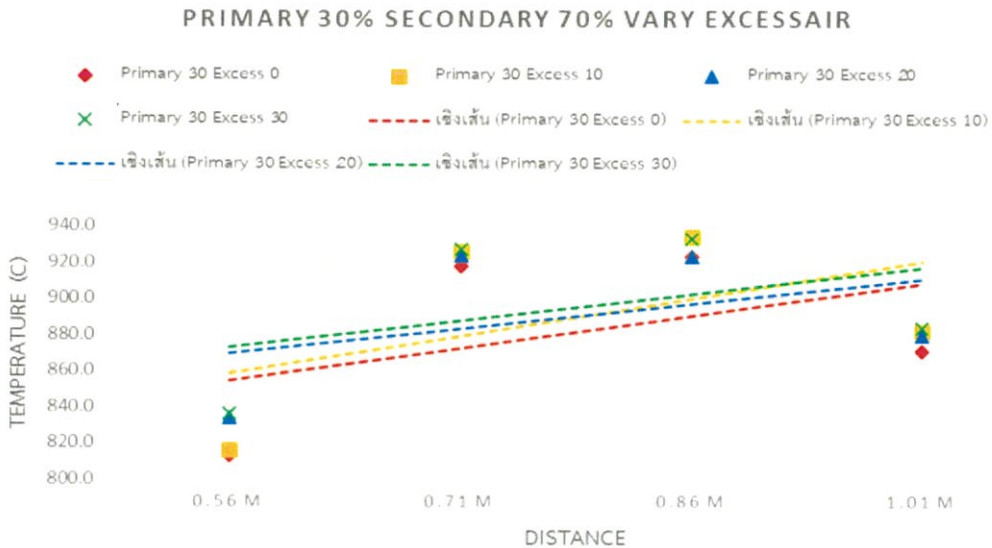
5.4 ผลการทดลองการทดลองหาแนวการดำเนินการที่เหมาะสมของหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวล

จากรูปที่ 5.8 ถึง 5.16 ในด้านของการเพิ่มปริมาณอากาศส่วนเกินจะพบว่าเมื่อเราทำการเพิ่มปริมาณ อากาศส่วนเกิน 10% 20% 30% ตามลำดับพบว่า สำหรับสัดส่วนอากาศ Primary 30% Secondary 70% นั้น อุณหภูมิของเปลวเพลิงชีวมวลจะสูงสุดที่ปริมาณอากาศส่วนเกิน 30% สำหรับสัดส่วนอากาศ Primary 40% Secondary 60% นั้น อุณหภูมิของเปลวเพลิงชีวมวลจะสูงสุดที่ปริมาณอากาศส่วนเกิน 0% สำหรับสัดส่วนอากาศ Primary 50% Secondary 50% นั้น อุณหภูมิของเปลวเพลิงชีวมวลจะสูงสุดที่ปริมาณอากาศส่วนเกิน 10% หรือสัดส่วนอากาศ Primary 60% Secondary 40% นั้น อุณหภูมิของเปลวเพลิงชีวมวลจะสูงสุดที่ปริมาณอากาศส่วนเกิน 10%

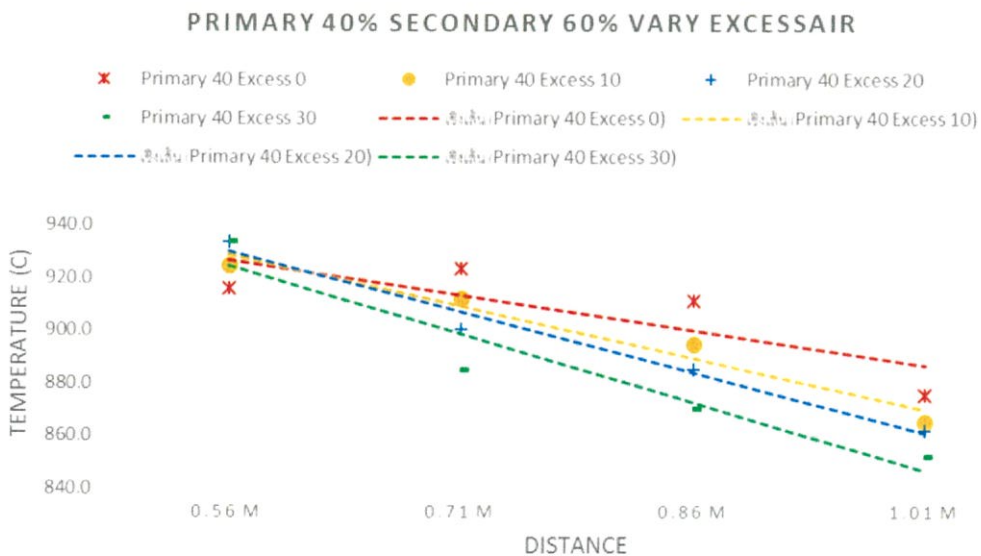
สำหรับสัดส่วนการแบ่งอากาศที่เหมาะสมระหว่าง Primary และ Secondary สำหรับการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงชีวมวลนั้นพบว่า ที่ปริมาณอากาศเกิน 0% นั้นอุณหภูมิของเปลวเพลิงชีวมวลจะใกล้เคียงกันทั้งหัวเผาที่ ปริมาณอากาศ Primary 40% Secondary 60% ส่วนปริมาณอากาศเกิน 10% นั้นอุณหภูมิของเปลวเพลิงชีวมวลจะใกล้เคียงกันทั้งหัวเผาที่ ปริมาณอากาศ Primary 50% Secondary 50% ส่วนปริมาณอากาศเกิน 20% นั้นอุณหภูมิของเปลวเพลิงชีวมวลจะใกล้เคียงกันทั้งหัวเผาที่ ปริมาณอากาศ Primary 50% Secondary 50 % ส่วนปริมาณอากาศเกิน 30% นั้น อุณหภูมิของเปลวเพลิงชีวมวลจะใกล้เคียงกันทั้งหัวเผาที่ปริมาณอากาศ Primary 40% Secondary 50% ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าปริมาณการแบ่งอากาศ Primary และ Secondary ที่เหมาะสมคือ Primary 40-50% และ Secondary 50-60%

สำหรับการเกิดอาการเสียเสถียรภาพของเปลวไฟภายในหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลพบว่า เกิดการเสถียรภาพของเปลวชีวมวลเมื่อทำการทดสอบที่ ปริมาณอากาศ ณ จุดที่ 0.56 เมตรจากหัวจุดเปลวไฟนําร่อง มากกว่า 0.0328 kg/s

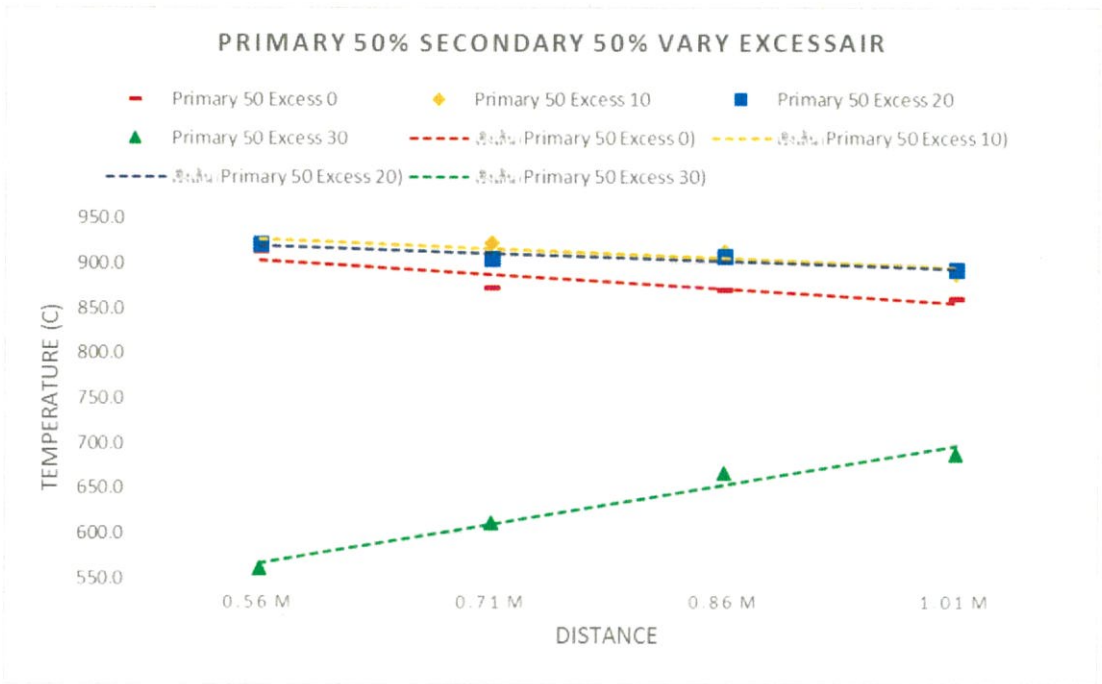
สำหรับการอุ่นอากาศก่อนการเผาไหม้พบว่าอุณหภูมิของอากาศก่อนการเผาไหม้นั้นมีการเพิ่มขึ้นและคงที่ประมาณ 195-200 องศาเซลเซียส โดยใช้เวลาในการอุ่นอากาศจนถึงภาวะเสถียรภาพประมาณ 35-40 นาที หลังจากเริ่มทำการทดลอง



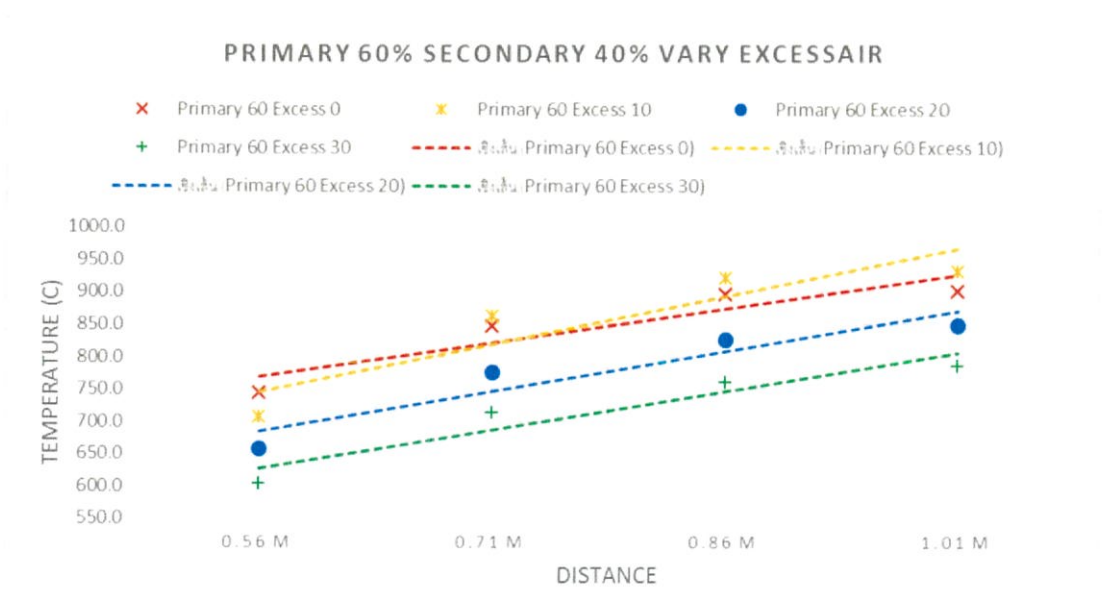
รูปที่ 5.8 แนวโน้มของอุณหภูมิในหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลเมื่อทำการแบ่งอากาศ Primary 30% และ Secondary 70% จากนั้นทำการเพิ่มปริมาณอากาศส่วนเกิน 0% 10% 20% 30% ตามลำดับ



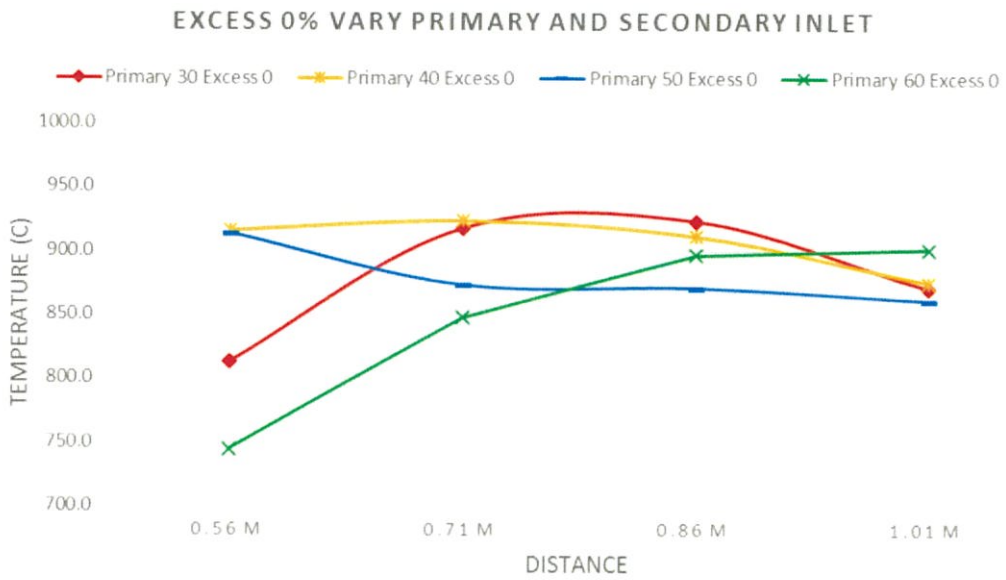
รูปที่ 5.9 แนวโน้มของอุณหภูมิในหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลเมื่อทำการแบ่งอากาศ Primary 40% และ Secondary 60% จากนั้นทำการเพิ่มปริมาณอากาศส่วนเกิน 0% 10% 20% 30% ตามลำดับ



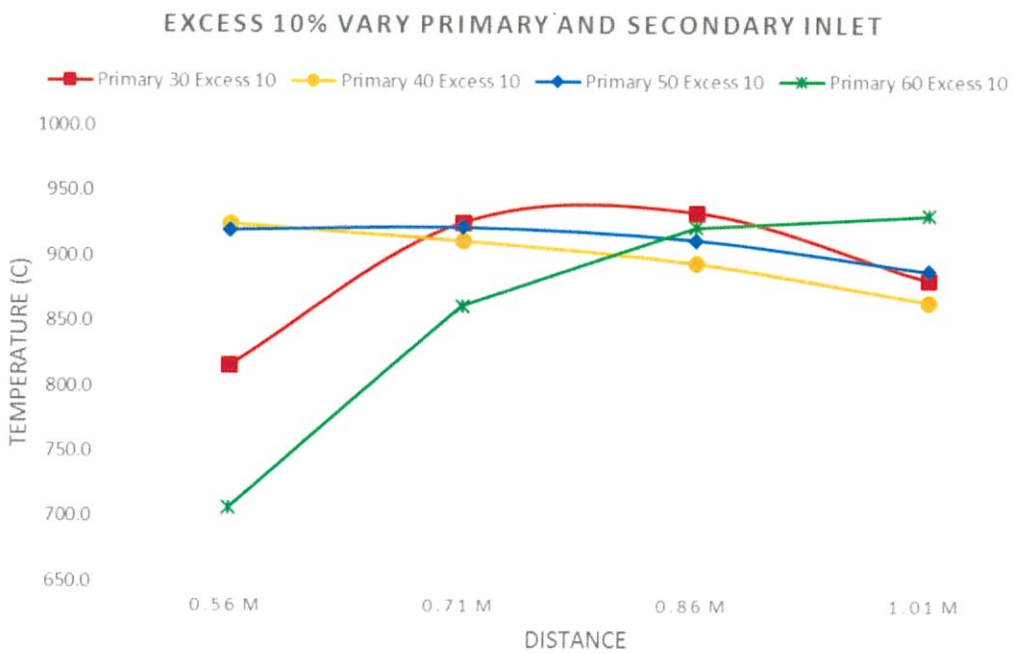
รูปที่ 5.10 แนวโน้มของอุณหภูมิในหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลเมื่อทำการแบ่งอากาศ Primary 50% และ Secondary 50% จากนั้นทำการเพิ่มปริมาณอากาศส่วนเกิน 0% 10% 20% 30% ตามลำดับ



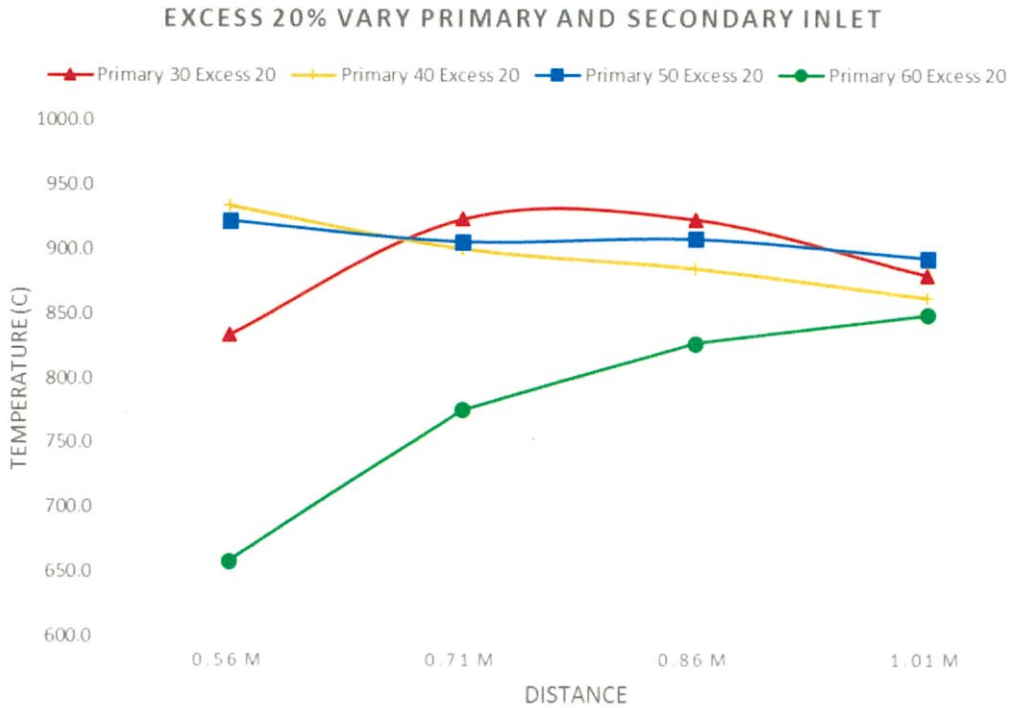
รูปที่ 5.11 แนวโน้มของอุณหภูมิในหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลเมื่อทำการแบ่งอากาศ Primary 60% และ Secondary 40% จากนั้นทำการเพิ่มปริมาณอากาศส่วนเกิน 0% 10% 20% 30% ตามลำดับ



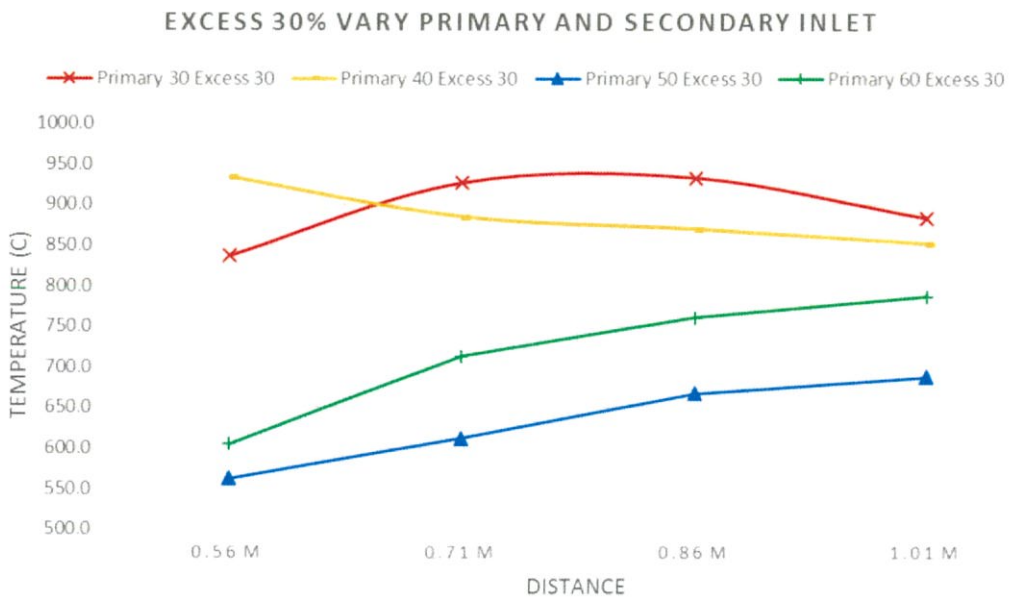
รูปที่ 5.12 แนวโน้มของอุณหภูมิในหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลเมื่อทำการเพิ่มอากาศ Primary 30% 40% 50% 60% ตามลำดับ



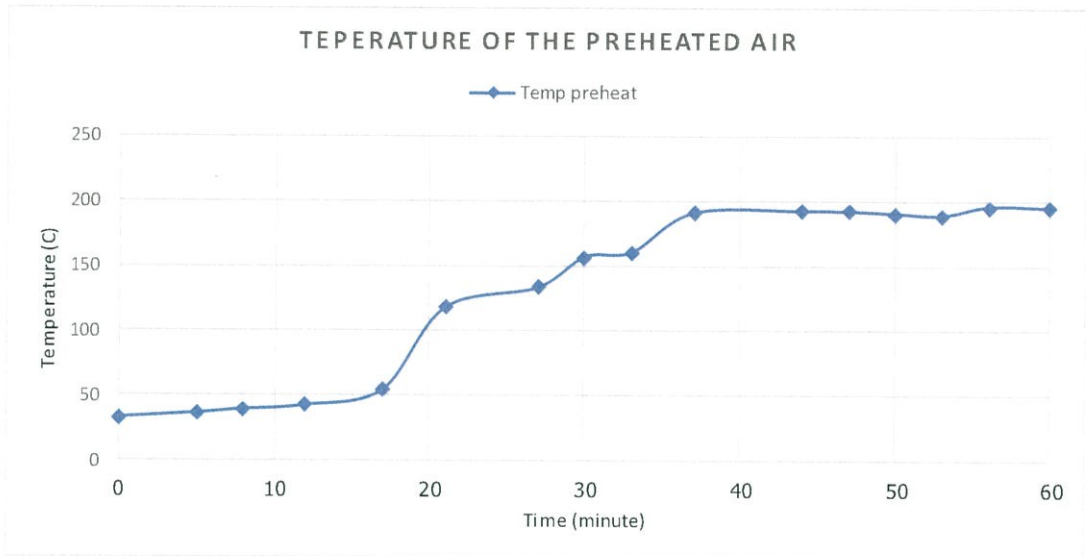
รูปที่ 5.13 แนวโน้มของอุณหภูมิในหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลเมื่อทำการเพิ่มอากาศ Primary 30% 40% 50% 60% ตามลำดับ และปริมาณอากาศส่วนเกิน 10%



รูปที่ 5.14 แนวโน้มของอุณหภูมิในหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลเมื่อทำการเพิ่มอากาศ Primary 30% 40% 50% 60% ตามลำดับ และปริมาณอากาศส่วนเกิน 20%



รูปที่ 5.15 แนวโน้มของอุณหภูมิในหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลเมื่อทำการเพิ่มอากาศ Primary 30% 40% 50% 60% ตามลำดับ และปริมาณอากาศส่วนเกิน 30%



รูปที่ 5.16 แสดงผลของการอุ่นอากาศตั้งแต่เริ่มจุดเปลวไฟนำร่องจนถึงช่วงที่อุณหภูมิของอากาศอุ่นเข้าสู่สภาวะคงตัว

รายละเอียดเกี่ยวกับการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลที่เงื่อนไขการทดลองที่ต่างกันได้ สามารถดูรายละเอียดเพิ่มเติมได้ที่ภาคผนวก ก

บทที่ 6

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการทดลอง

1. การจุดหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลนั้นช่วงเวลาที่เหมาะสมสำหรับแต่ละชั้นตอนคือ 10 นาที สำหรับการรอให้เปลวไฟนำร่องอยู่ในสถานะอุณหภูมิคงที่ 3 นาทีสำหรับการดำเนินการทับซ้อนกันระหว่างเชื้อเพลิงชีวมวลฝุ่นและเปลวไฟนำร่อง และ 2 นาทีสำหรับการรอให้เปลวไฟเชื้อเพลิงชีวมวลเข้าสู่สภาวะคงตัว

2. ปริมาณอากาศส่วนปฐมภูมิและทุติยภูมิที่แตกต่างกันนั้นทำให้เกิดลักษณะของเปลวไฟที่แตกต่างกันโดยในแต่ละเงื่อนไขจะมีปริมาณอากาศส่วนเกินที่แตกต่างกันด้วย สำหรับ อากาศปฐมภูมิ 30% อากาศทุติยภูมิ 70% ปริมาณอากาศที่เหมาะสมและให้อุณหภูมิเปลวไฟเชื้อเพลิงชีวมวลสูงสุดคือ 30% อากาศปฐมภูมิ 40% อากาศทุติยภูมิ 60% ปริมาณอากาศที่เหมาะสมและให้อุณหภูมิเปลวไฟเชื้อเพลิงชีวมวลสูงสุดคือ 0% อากาศปฐมภูมิ 50% อากาศทุติยภูมิ 50% ปริมาณอากาศที่เหมาะสมและให้อุณหภูมิเปลวไฟเชื้อเพลิงชีวมวลสูงสุดคือ 10% อากาศปฐมภูมิ 60% อากาศทุติยภูมิ 40% ปริมาณอากาศที่เหมาะสมและให้อุณหภูมิเปลวไฟเชื้อเพลิงชีวมวลสูงสุดคือ 10%

3. สำหรับด้านการแบ่งอากาศส่วนปฐมภูมิและทุติยภูมิที่เหมาะสมจะก่อให้เกิดลักษณะของอุณหภูมิแกนกลางที่สูงโดยเฉลี่ยทั่วกันทั้งเตาสำหรับสัดส่วนที่เหมาะสมคือ อากาศปฐมภูมิ 50% และ อากาศทุติยภูมิ 50%

6.2 ข้อเสนอแนะ

6.2.1 ด้านการอนุรักษ์พลังงาน

เนื่องจากอุณหภูมิที่สูงมากภายในหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลทำให้เกิดการสูญเสียความร้อนออกสู่สิ่งแวดล้อมซึ่งสามารถทำการหุ้มฉนวนที่มีรอบนอกของตัวหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลเพื่อทำการอนุรักษ์พลังงานความร้อนไม่ให้สูญเสียไปกับสิ่งแวดล้อมรอบข้างได้

6.2.2 ด้านอุปกรณ์วัด

ด้านอุปกรณ์การตรวจวัดการดับของเปลวไฟ (UV sensor) ในเตานั้นสามารถทำงานได้ดีเฉพาะในตอนที่เป็นเปลวไฟเชื้อเพลิงชีวมวลส่วนการตรวจวัดเปลวไฟนำร่องนั้นยังไม่สามารถทำได้ดี เนื่องจากตำแหน่งของหัวจุดเปลวไฟนำร่องและขนาดของเปลวไฟนำร่องที่มีขนาดเล็ก สามารถแก้ไขได้โดยการขยับตำแหน่งของหัวจุดเปลวไฟนำร่องให้เข้าไปในหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลมากกว่านี้

6.2.3 ด้านการหมุนวนของอากาศภายในเตา

เนื่องจากตัว Swirl plate เป็นแบบใบคกงที่ทำให้การหมุนวนของอากาศไม่สามารถปรับเปลี่ยนได้ซึ่งสามารถทำการพัฒนาและออกแบบตัว Swirl plate เพื่อหาองศาของ Swirl plate ที่เหมาะสมแก่การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงแต่ละชนิดให้เกิดการเผาไหม้ที่ติดต่อไปได้

6.2.4 ด้านปริมาณอากาศ ทุดิยภูมิ และ ตติยภูมิ

เนื่องด้วยการแบ่งของปริมาณอากาศภายในเตาระหว่าง ทุดิยภูมิและตติยภูมินั้นยังเกิดขึ้นจากลักษณะโครงสร้างของหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลทำให้การเพิ่มหรือลดปริมาณอากาศที่ทางเข้าทุดิยภูมินั้นส่งผลกับอากาศทั้งสองส่วนซึ่งในอนาคตสามารถทำการปรับลักษณะโครงสร้างภายในเพื่อให้สามารถปรับค่าแต่ละส่วนได้อย่างสมบูรณ์

บรรณานุกรม

กิตติกร สาสุจิตต์. 2552. การหาอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงที่เหมาะสมที่สุด สำหรับเตาเผาแกลบแบบไซโคลน. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

จิตพงษ์ กนกนัยการ และปรมิินทร์ แจ็งไธสง. 2554. รายงานการวิจัยเรื่องการพัฒนาต้นแบบเตาปฏิกรณ์ก๊าซสังเคราะห์จากชีวมวล. กรุงเทพฯ : สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

ฐิติชญพร สุรเดช ญัฐวัตร สีลาจินดาไกรฤกษ์ และธรรมชัย จิตต์วัฒน์. 2556. หัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลชนิดฝุ่น. กรุงเทพฯ : สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

นคร ทิพยาวงศ์. **พื้นฐานวิศวกรรมการเผาไหม้**

นวกัทร และทวิพล. 2555. การวัดและเครื่องมือวัด ประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร. ค้นหามือ 9 มกราคม 2557, แหล่งที่มา :

<http://teacher.buet.ac.bd/bhyeasin/images/bourdon%20tube1>

บริษัท อีเอ็ม กรุ๊ป จำกัด. "มาตรการพลังงานทดแทน : การผลิตพลังงานจากชีวมวล". แหล่งที่มา :

http://www.em-group.co.th/Technology_Biomass.html

มหาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. บทเรียนออนไลน์เรื่องการเผาไหม้และระบบพลังงานความร้อนร่วมของโรงจักรพลังไอน้ำ. แหล่งที่มา :

http://mte.kmutt.ac.th/elearning/Combution_and_Cogeneration

วิศิษฐ์ สีลาผาดิกุล และนพรัตน์คำพร 2550. การศึกษาและวิเคราะห์ตัวแปรที่มีผลต่อการกระจายอุณหภูมิภายในเตาเผาแกลบแบบหมุนวน. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่ง.

สำนักวิจัยค้นคว้าพลังงาน กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. พลังงานชีวมวล. แหล่งที่มา :

<http://www2.dede.go.th/kmmf/home.html>. 2555.

อาจารย์สมศักดิ์. เอกสารประกอบการสอนเรื่องการวัดอัตราการไหล. คณะวิศวกรรมศาสตร์ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.

ค้นหามือ 9 มกราคม 2557, แหล่งที่มา :

<http://somsak.me.engr.tu.ac.th/download/flow%20rate.pdf>

Charoensuk J. "The Application of Mathematical Model for Scaling Pulverized Coal Combustors." Ph.D. Thesis of University of London and the Diploma of Membership of the Imperial College. 1996.

Gang Lu, Yong Yan, Steve Cornwell, Michael Whitehouse, Gerry Riley. **Impact of co-firing coal and biomass on flame characteristics and stability.** 3 August 2007

M. A. Field. **Rate of Combustion of Size-Graded Fraction of Char from a low Rank Coal between 1200 K-2000K.** Combustion and Flame, 13:237-252,1969.

Rachwal. 2007. White ash of camp fire with burning piece of wood.

ค้นหาเมื่อ 18 กันยายน 2556, แหล่งที่มา :

<http://www.dreamstime.com/royalty-free-stock-photos-white-ash-camp-fire-image-4139498>

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ภาคผนวก ก อธิบายรายละเอียดเกี่ยวกับการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลที่เงื่อนไขการทดลองที่แตกต่างกัน

ตารางที่ 1ก ตารางบันทึกผลการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลที่เงื่อนไขการทดลองที่แตกต่างกัน

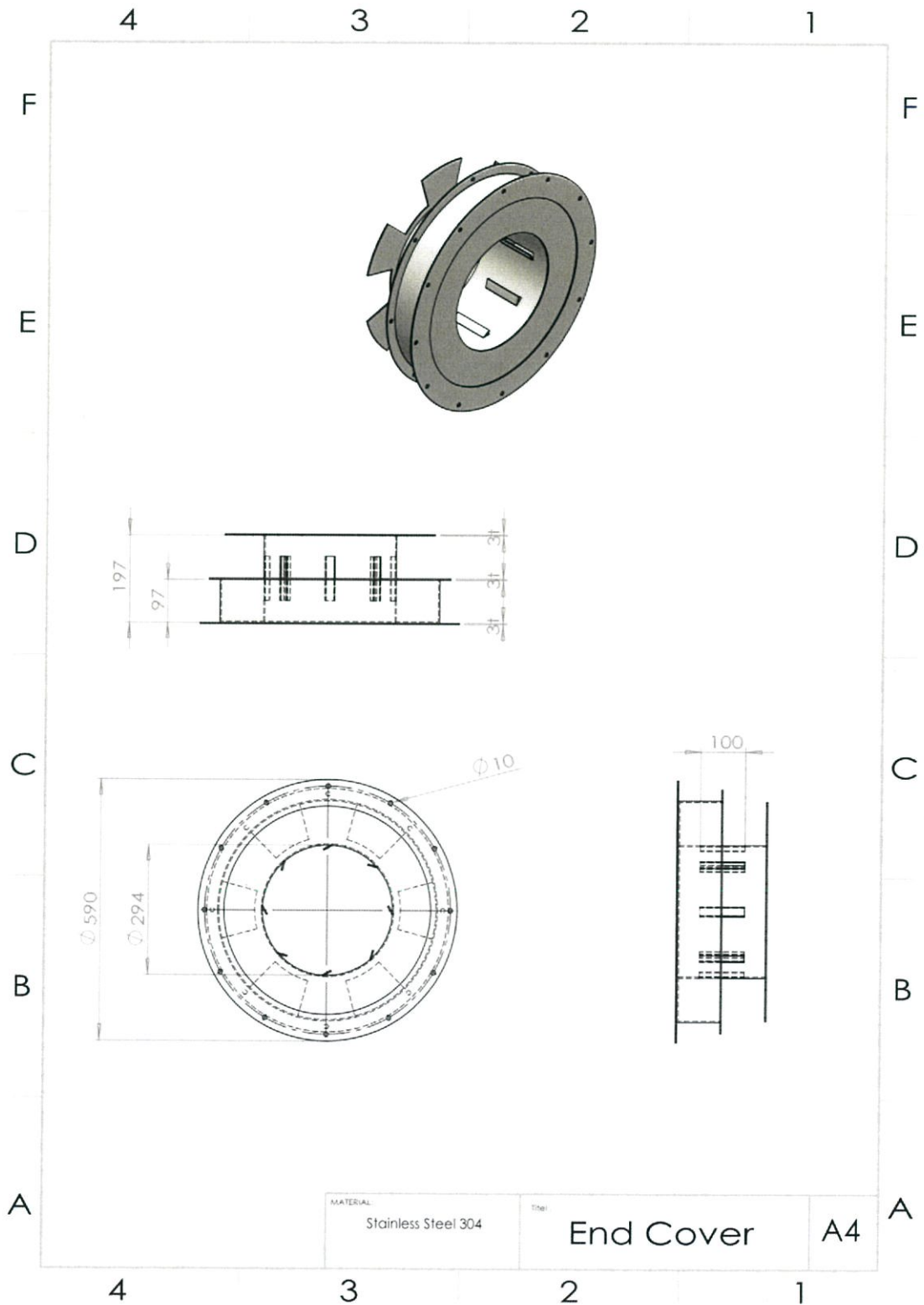
Condition	Preheated air temperature (C)	Temperature at 0.56 m (C)	Temperature at 0.71 m (C)	Temperature at 0.86 m (C)	Temperature at 1.01 m (C)
Primary 30% Excess 0%	117.8	813.0	917.6	923.2	870.8
Primary 30% Excess 10%	133.5	816.0	926.0	933.9	881.9
Primary 30% Excess 20%	156.8	833.7	923.3	922.9	879.7
Primary 30% Excess 30%	160.7	836.3	926.9	933.1	883.6
Primary 40% Excess 0%	190.7	915.7	923.4	911.3	875.3
Primary 40% Excess 10%	192.4	924.8	911.9	894.8	865.3
Primary 40% Excess 20%	192.2	933.7	900.3	885.0	862.2
Primary 40% Excess 30%	190.5	934.0	885.3	870.2	852.4
Primary 50% Excess 0%	189.0	913.6	873.3	870.9	861.3
Primary 50% Excess 10%	195.9	920.0	922.2	912.7	888.8
Primary 50% Excess 20%	195.1	922.0	905.8	907.7	892.9
Primary 50% Excess 30%	177.8	561.8	611.9	667.2	687.4

ตารางที่ 1ก (ต่อ) ตารางบันทึกผลการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลที่เงื่อนไขการทดลองที่แตกต่างกัน

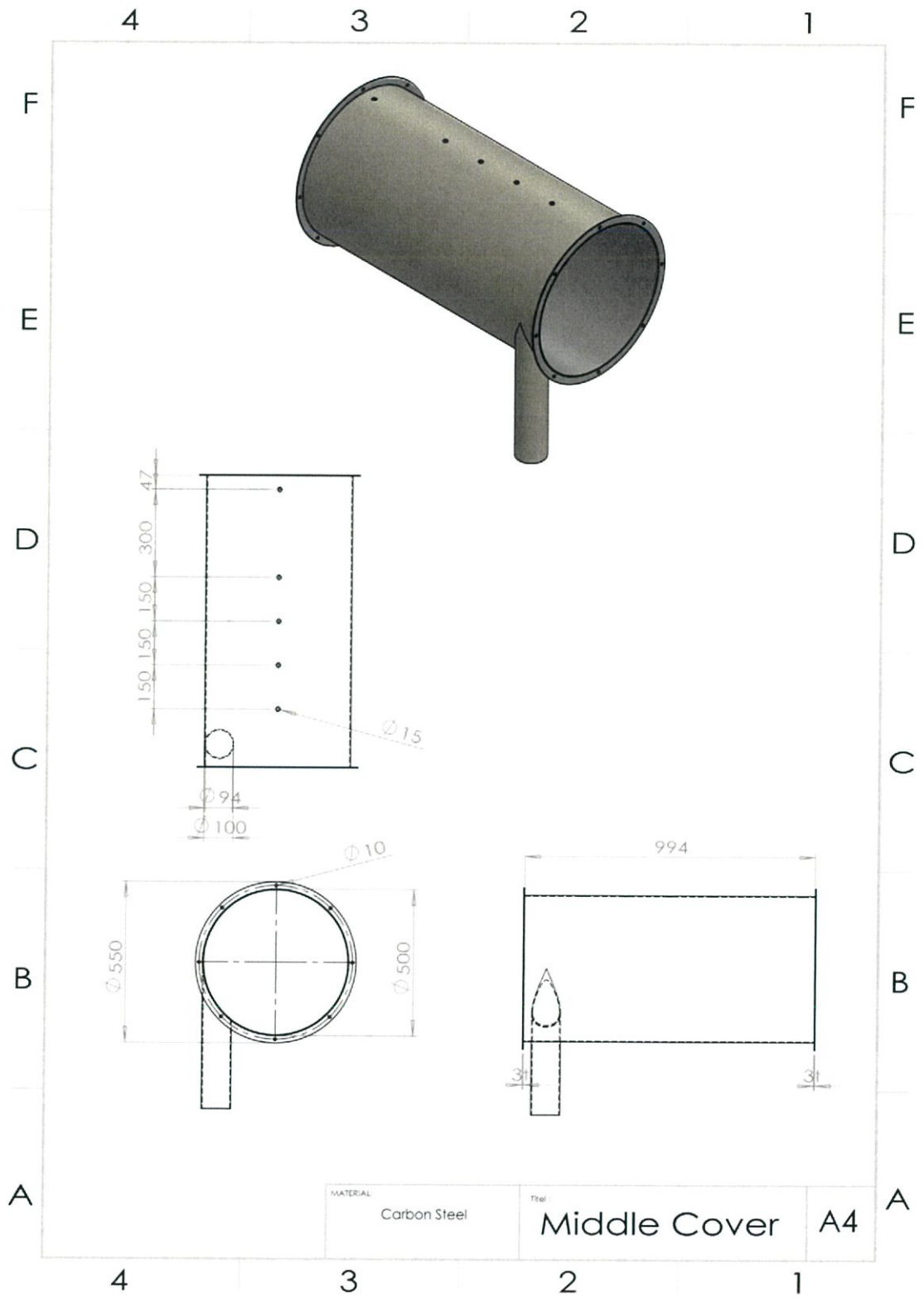
Primary 60% Excess 0%	198.2	744.3	847.5	896.4	901.1
Primary 60% Excess 10%	215.28	706.59	862.07	922.44	931.85
Primary 60% Excess 20%	213.64	658.44	775.58	827.18	848.89
Primary 60% Excess 30%	203.58	604.14	712.99	761.08	786.72

ภาคผนวก ข

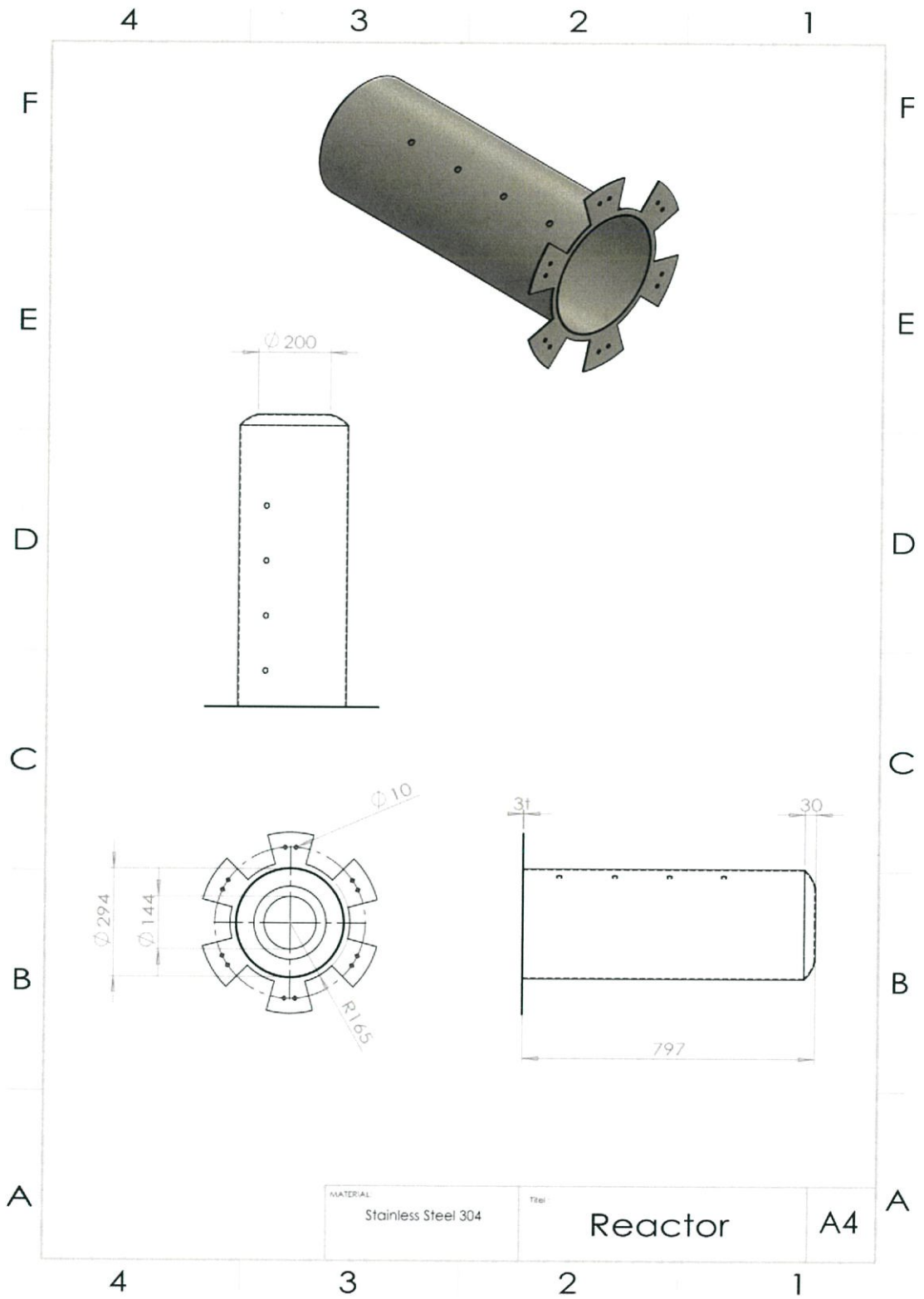
ภาคผนวก ข อธิบายรายละเอียดเกี่ยวกับแบบของชิ้นส่วนต่างๆของเตาเผา



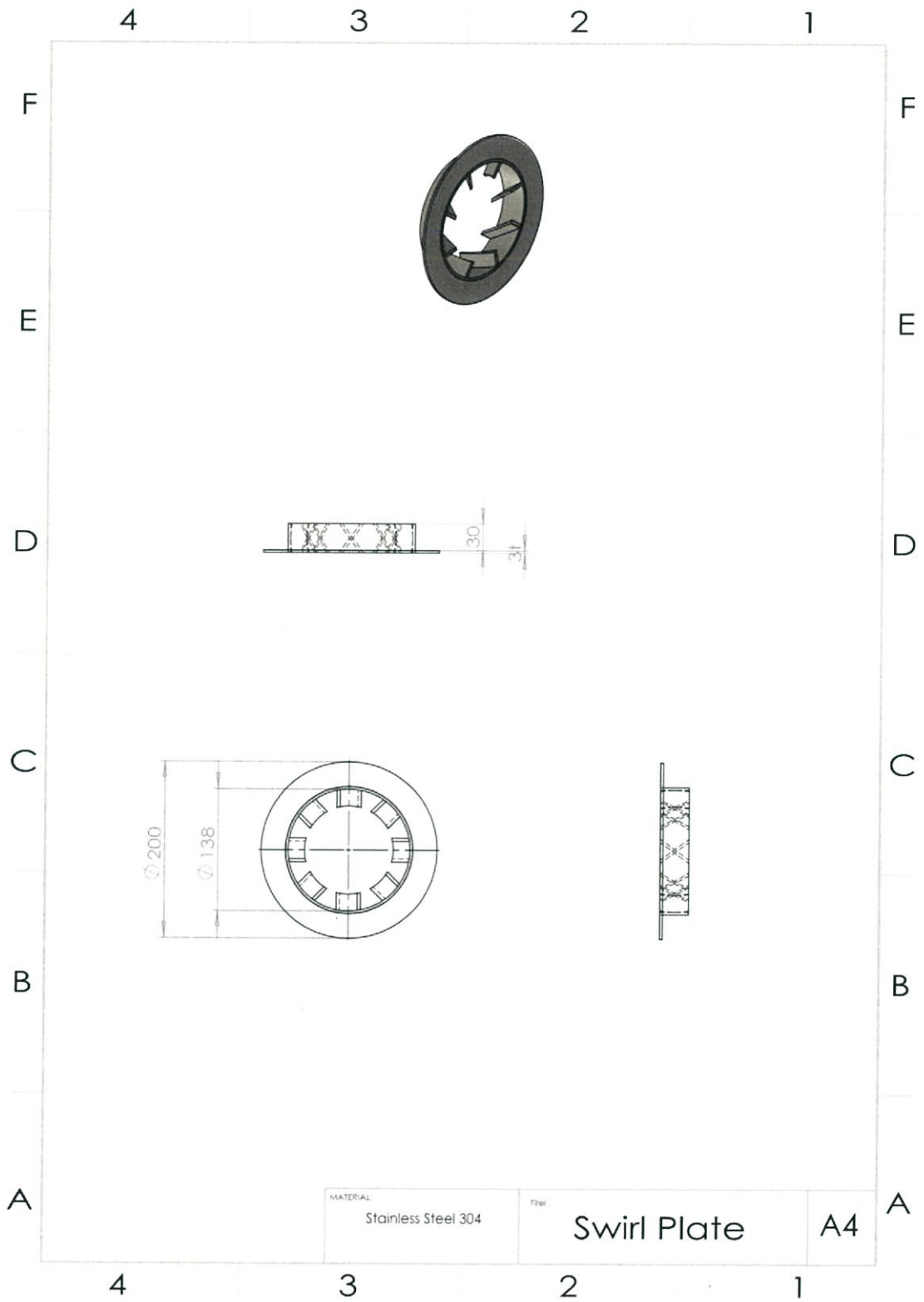
รูปที่ 1 ข Dimension ของ End cover



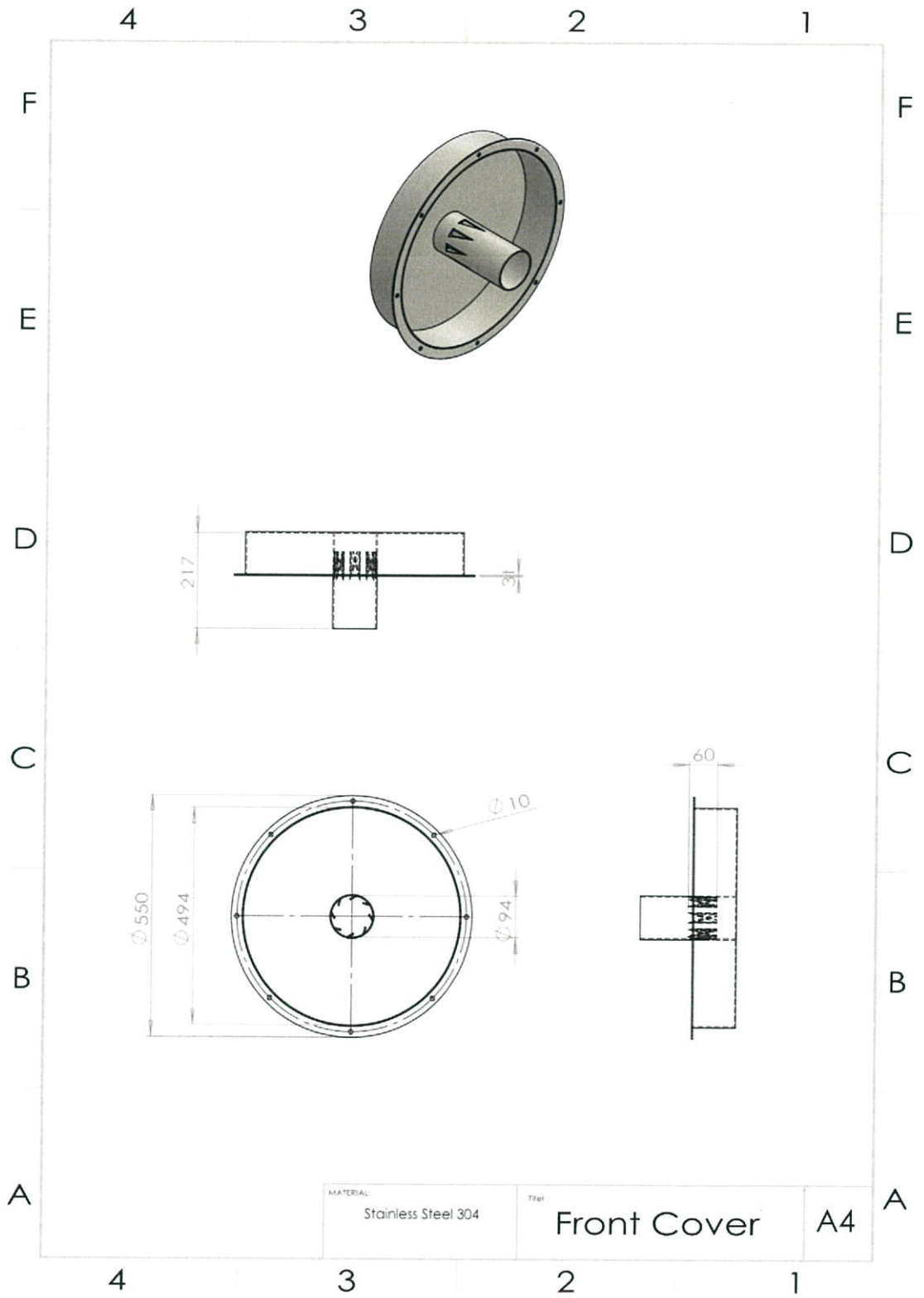
รูปที่ 2ข Dimension ของ Middle cover



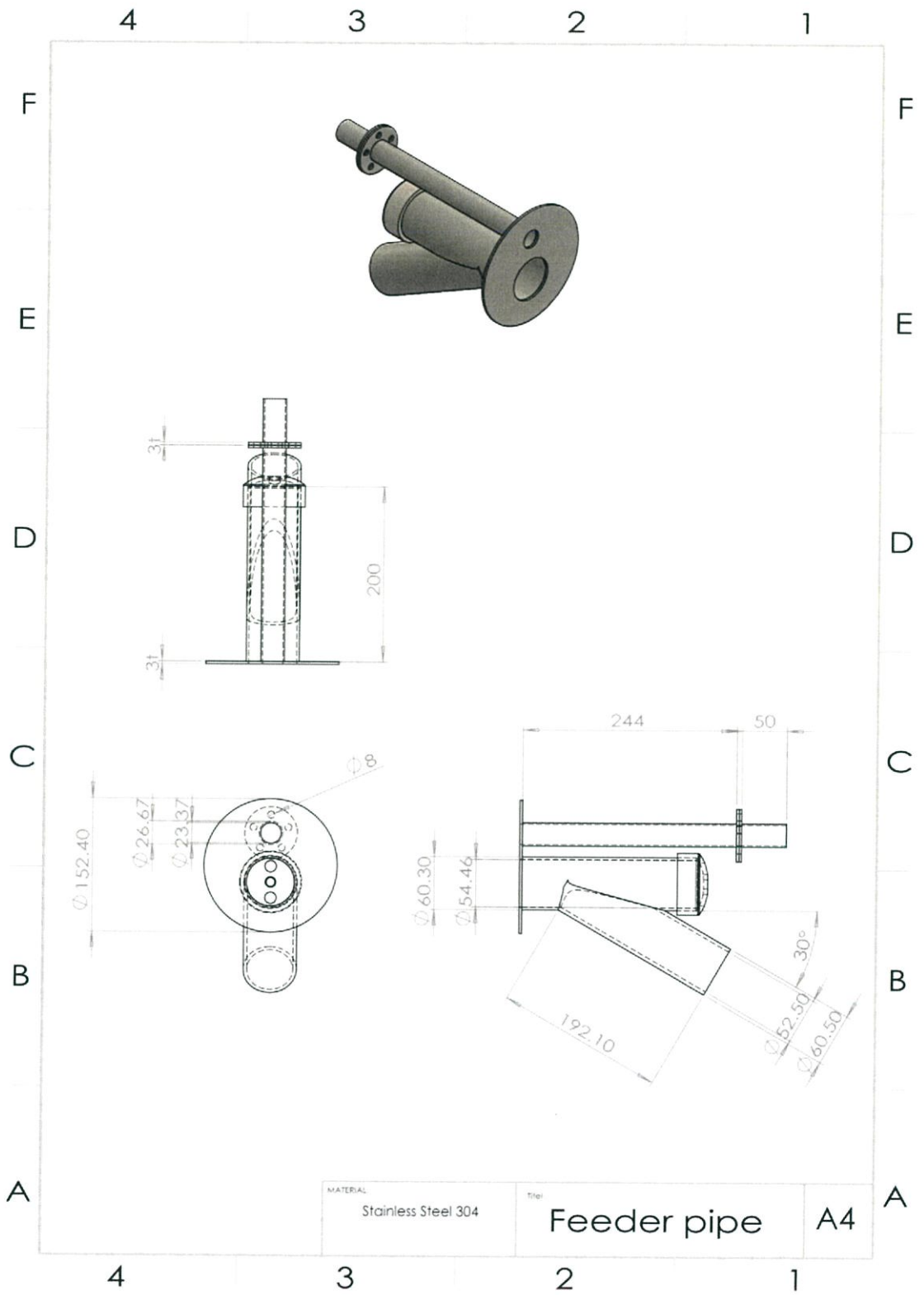
รูปที่ 3ข Dimension ของ Reactor



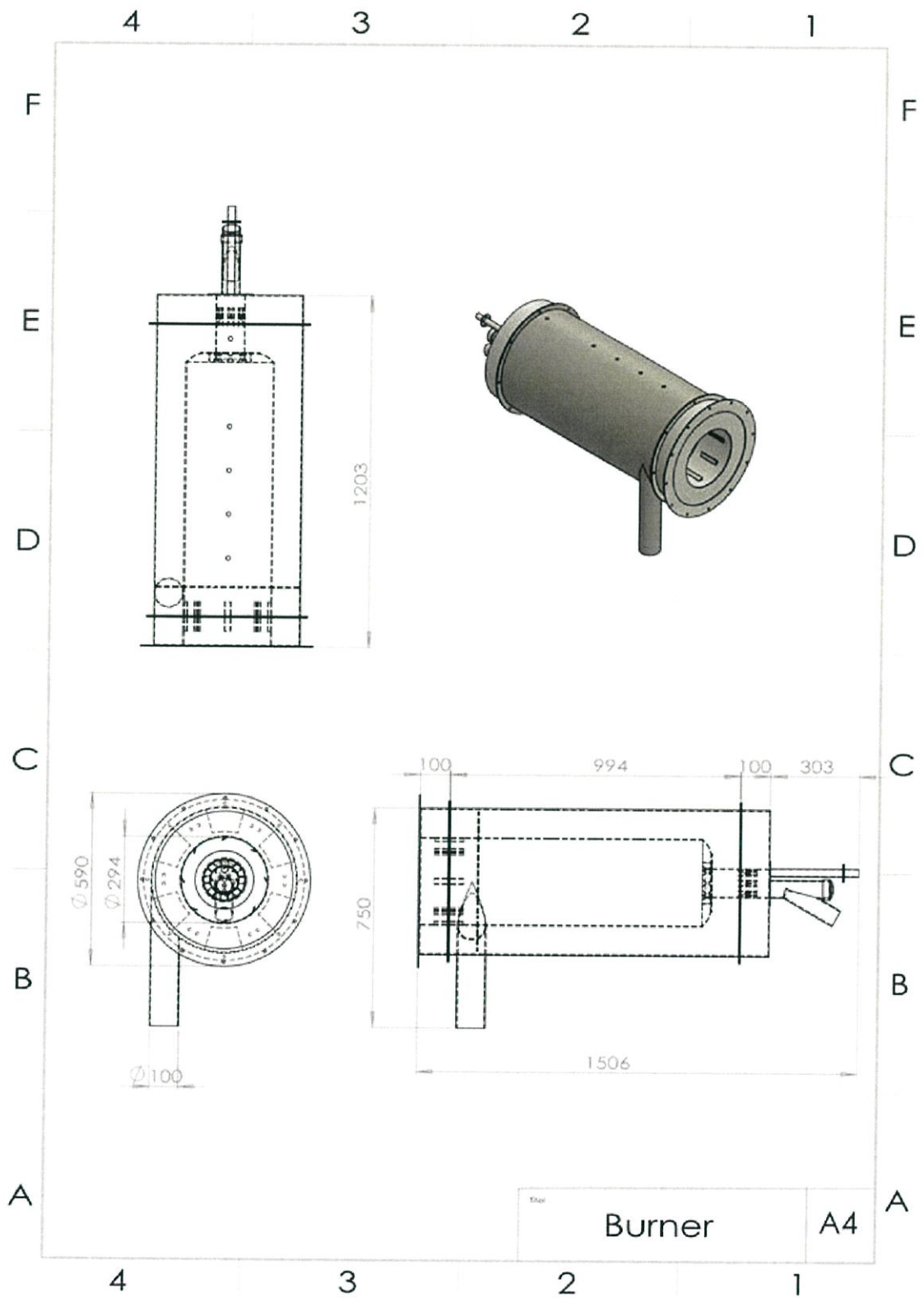
รูปที่ 4๖ Dimension ของ Swirl plate



รูปที่ 5 ข Dimension ของ Front cover



รูปที่ 6ข Dimension ของ Feeder pipe



รูปที่ 7๗ Dimension ของ เตาเผา