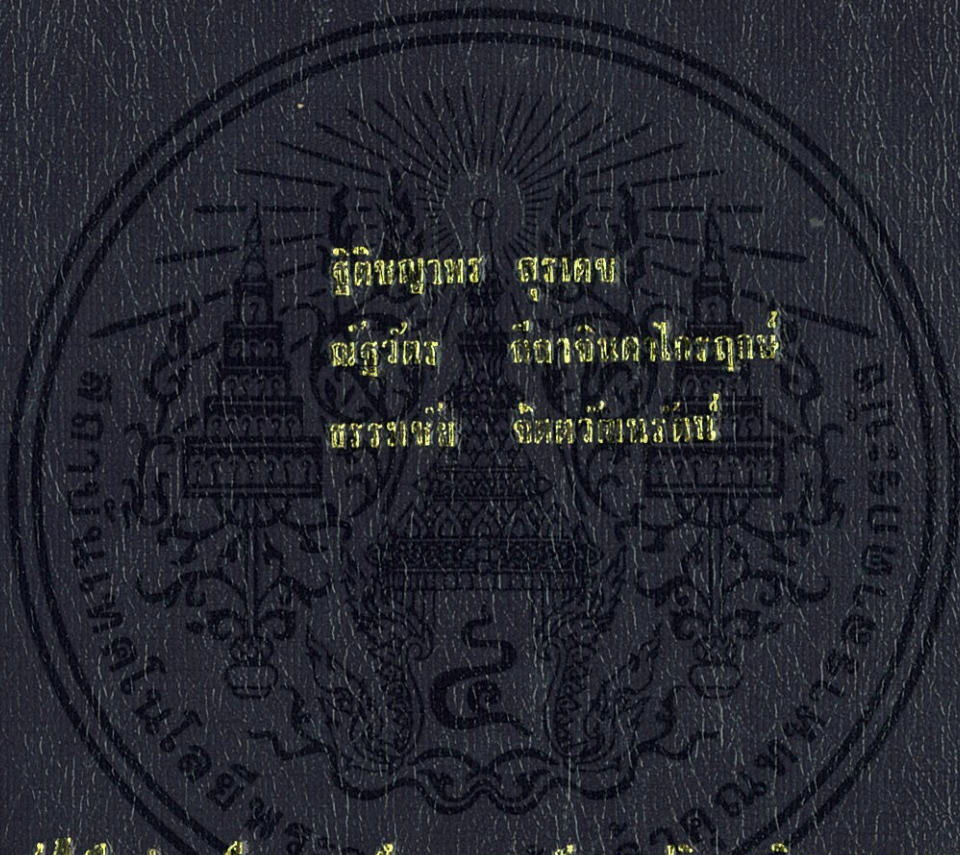


หม้อเผาเชื้อเพลิงชีวมวลบดฝุ่น
THE PULVERIZED BIOMASS BURNER



สุติขณูชาทร สุรเดช
ฉวีวัตร ศิลาจินดาไพโรฤกษ์
สรรพนันท์ จิตต์วิสัยนรรัตน์

ปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2556

หัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลชนิดฝุ่น
THE PULVERIZED BIOMASS BURNER



ปริญญาานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2556

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

THE PULVERIZED BIOMASS BURNER

THITICHAYAPORN SURADET
NATTHAWAT LEELAJINDAKRAIRERK
THAMMACHAI JITTAWATTANARAT



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

2013

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2556

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง หัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลชนิดฝุ่น

The pulverized biomass burner

ผู้จัดทำ

1. นางสาวฐิติชญาพร สุรเดช รหัสประจำตัว 53010407
2. นายณัฐวัตร สีลาจินดาไกรฤกษ์ รหัสประจำตัว 53010511
3. นายธรรมชัย จิตตวัฒน์รัตน์ รหัสประจำตัว 53010704



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลชนิดฝุ่น

นางสาวฐิติชญา พรสุรเดช	53010407
นายณัฐวัตร สีลาจินดาไกรฤกษ์	53010511
นายธรรมชัย จิตตวัฒน์รัตน์	53010704
รศ.ดร.จารุวัตร เจริญสุข อาจารย์ที่ปรึกษา	
ปีการศึกษา 2556	

บทคัดย่อ

ในปัจจุบันเชื้อเพลิงจากฟอสซิลมีการถูกใช้อย่างมากทั้งในภาคอุตสาหกรรมและในภาคครัวเรือน ซึ่งทำให้ปริมาณน้ำมันและถ่านหินลดลงไปอย่างรวดเร็ว จึงมีการคิดค้นพลังงานทดแทนมาใช้ ซึ่งได้จากพลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม พลังงานคลื่น และพลังงานชีวมวล ในที่นี้จะให้ความสนใจเกี่ยวกับการนำเชื้อเพลิงชีวมวลจากการนำฝุ่นชีวมวลมาใช้ โดยการออกแบบหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลฝุ่นให้สามารถใช้กับหม้อไอน้ำ เพื่อผลิตไอน้ำและนำไปใช้ในภาคอุตสาหกรรม เช่น การผลิตไฟฟ้า การอบอาหาร เป็นต้น ซึ่งขอบเขตของการศึกษานี้จะต้องออกแบบหัวเผาให้มีความเหมาะสมกับเตาเผาขนาด 1 MW และทำการศึกษาด้านอิทธิพลของตัวแปรที่มีผลต่อการทำงานของหัวเผา เช่น อัตราส่วนอากาศเชื้อเพลิง การกระจายตัวของอนุภาค และย่านของการทำงาน เป็นต้น โดยหัวเผาที่ทำการศึกษาจะใช้เชื้อเพลิงแก๊สแอลพีจี ควบคู่กับฝุ่นชีวมวล ซึ่งการทำงานของหัวเผานี้ในตอนเริ่มเดินเครื่องจะใช้แก๊สแอลพีจี ในการจุดระเบิดก่อน แล้วจากนั้นจึงค่อยใช้ฝุ่นชีวมวลนี้ผสมเข้าไปจนถึงจุดที่พอเหมาะแก่การใช้ฝุ่นชีวมวลเพียงอย่างเดียว แล้วเราจึงปิดระบบการฉีดเชื้อเพลิงแก๊สแอลพีจีโดยคาดหวังว่าการศึกษาในครั้งนี้ จะทำให้ได้มาซึ่งต้นแบบหัวเผา (burner) ที่มีความเหมาะสมสำหรับเชื้อเพลิงฝุ่นชีวมวลเพื่อให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ ใช้เชื้อเพลิงให้เกิดความคุ้มค่ามากที่สุด และเกิดมลพิษทางอากาศน้อยที่สุด ซึ่งในการศึกษาได้จำลองสภาวะการเผาไหม้ที่ 500 kW ของเชื้อเพลิงชีวมวล พบว่าช่วงการใช้งานของแก๊สแอลพีจี ที่เหมาะสำหรับการอุ่นหัวเผาอยู่ในช่วงประมาณ 6-7 L/min หรือ 1.59×10^{-4} - 1.86×10^{-4} kg/s

คำหลัก: หัวเผา, เชื้อเพลิงฝุ่นชีวมวล, แก๊สแอลพีจี

The pulverized biomass burner

Thitichayaporn	Suradet	53010407
Natthawat	Leelajindakraierk	53010511
Thammachai	Jittawattanarat	53010704
Assoc.Prof.Dr.Jaruwat Charoensuk		Advisor
Year 2556		

Abstract

In the recent year, fossil fuels are being used both in industry and in the household. This had to rapid decrease of oil and coal reserved. Thus the invention of renewable energy are introduced such as solar energy, wind energy, tidal energy and biomass. Here we will focus on the burner firing pulverized biomass. It is designed to be used with the boiler to produce steam used in various industries such as manufacturing of electricity, baking food, etc. The scope of the study will limit to the 1MW burner and the influence of variables that affect the operation of burner such as air fuel ratio, distribution of temperature and stage of operation etc. This burner are used with LPG gas and pulverized biomass. At the beginning LPG gas will be used for ignition and then pulverized biomass are introduced. When it is mixed properly the burner will use only pulverized biomass. Expectation of this study will lead to a biomass burner prototype that obtain an appropriate operating condition for a biomass to complete combustion, most effectively consumes fuel and causes the least air pollution. From the study using the burning simulation at 500 kW of biomass fuel, the result shows that the appropriate range for the usage of LPG is between 6-7 L/min or 1.59×10^{-4} - 1.86×10^{-4} kg/s.

Keywords: Burner, Pulverized biomass, LPG gas

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ด้วยคำแนะนำและคำปรึกษา จาก รองศาสตราจารย์ ดร.จรรูวัตร เจริญสุข อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญาานิพนธ์ คณะผู้จัดทำปริญญาานิพนธ์รู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์และขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง อีกทั้งขอบพระคุณคณะกรรมการสอบปริญญาานิพนธ์ สำหรับคำแนะนำเพิ่มเติมทำให้วิทยานิพนธ์มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ นาย ชินภัทร ฐระการ ที่คอยให้ความช่วยเหลือให้คำแนะนำ ในเรื่องการทำเนื้องานการทดลอง และคำแนะนำต่างๆอีกทั้งให้กำลังใจต่อผู้วิจัยอย่างใกล้ชิดทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอกราบของพระคุณ บิดา มารดา อันเป็นที่เคารพยิ่งซึ่งได้เลี้ยงดูพร้อมทั้งให้โอกาสทางการศึกษาอย่างเต็มที่และยังให้กำลังใจอย่างเสมอมาในทุกๆด้านอันหาที่เปรียบไม่ได้

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง สาขาเครื่องกล ที่ให้โอกาสผู้ทำปริญญาานิพนธ์เข้ามารับการศึกษาและทำการทดลองที่ภาควิชาแห่งนี้ คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ คณะผู้จัดทำขอขอบแต่ผู้มีพระคุณทุกท่าน ขออำนาจคุณพระศรีรัตนตรัยอำนวยการอำนวยพรความสุขสวัสดิ์จงมีแต่ทุกท่าน

ฐิติชญาพร สุรเดช

ณัฐวัตร สีลาจินดาไกรฤกษ์

ธรรมชัย จิตตวัฒน์รัตน์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป.....	VII
สัญลักษณ์.....	X
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	1
1.3 ผลที่คาดว่าจะได้รับ.....	1
1.4 ขอบเขตการศึกษา.....	2
1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	2
บทที่ 2 วรรณกรรมปริทัศน์และทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.2 เชื้อเพลิง.....	4
2.3 การเผาไหม้.....	13
2.4 สมการพื้นฐานของแบบจำลอง.....	17
2.5 หลักการทำงานของ Pressure gage, Rotameter และ Pitot tube.....	25
2.6 สมการเบอร์นูลลีและการหาพลังงานสูญเสียเนื่องจากความฝืดในระบบท่อ.....	27
2.7 มลพิษจากการเผาไหม้.....	31
บทที่ 3 การออกแบบและการคำนวณ	
3.1 สมการการเผาไหม้.....	37
3.2 การคำนวณและการออกแบบหัวเผา.....	41
3.3 การคำนวณระบบทางเดินแก๊สแอลพีจี.....	54
บทที่ 4 อุปกรณ์และเงื่อนไขการทดลอง	
4.1 หัวเผา.....	56
4.2 ฐานรองหัวเผา.....	60
4.3 ระบบทางเดินแก๊สแอลพีจี.....	60

4.4 ระบบป้อนอากาศ.....	62
4.5 การทดลองของระบบป้อนอากาศ.....	63
4.6 การทดลองการจุดระเบิดและอุ่นหัวเผา.....	65
4.7 การศึกษาลักษณะการหมุนของอากาศภายในหัวเผา.....	66
บทที่ 5 ผลการทดลองและการอภิปราย	
5.1 ผลการทดลองจากการเปิดวาล์วที่ตำแหน่งต่างๆ.....	67
5.2 การอภิปรายระบบป้อนอากาศส่วนที่ 1,2 และ 3.....	71
5.3 ผลการทดลองจากการวัดอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ.....	73
5.4 ผลการทดลองการศึกษาลักษณะการหมุนของอากาศภายในหัวเผา.....	75
บทที่ 6 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	
6.1 สรุปผลการทดลอง.....	77
6.2 ข้อเสนอแนะ.....	78
เอกสารอ้างอิง.....	79
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก.....	81
ภาคผนวก ข.....	86

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ตัวอย่างส่วนประกอบ (โดยปริมาตร) ของแก๊สเชื้อเพลิงต่าง ๆ.....	5
2.2 ตัวอย่างค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิงต่าง ๆ ที่ความดัน 1 บรรยากาศและ 25°C.....	6
2.3 ลักษณะทั่วไปของผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียม.....	6
2.4 ตัวอย่างปริมาณออกซิเจน น้ำ และเถ้าในเชื้อเพลิงแข็งชนิดต่าง ๆ	8
2.5 แสดงค่า HHV และ LHV ของเชื้อเพลิงชีวมวล.....	12
2.6 องค์ประกอบของอากาศที่ใช้ในการสันดาป.....	13
2.7 ตัวแปร ϕ , γ_{eff} และ s_u ในสมการความต่อเนื่องสำหรับแก๊ส.....	20
2.8 แสดงค่าความขรุขระของผนังท่อ.....	30
2.9 แสดงค่าประสิทธิภาพด้านทานการไหลของวาล์วและข้อต่อต่างๆ.....	30-31
2.10 ก๊าซเรือนกระจก.....	35
2.11 ศักยภาพการทำให้เกิดภาวะดลกร้อนของก๊าซเรือนกระจก.....	36
3.1 แสดงส่วนประกอบของเชื้อเพลิงฝุ่นชีวมวลอัดที่ใช้ในการศึกษา.....	38
3.2 แสดงการวิเคราะห์เชื้อเพลิง ณ สภาพนำส่ง.....	39
3.3 แสดงปริมาณไอเสียที่ 100%Stoichiometry.....	40
3.4 แสดงปริมาณไอเสียที่ 130% Stoichiometry.....	41
3.5 แสดงตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณการออกแบบหัวเผา.....	41-42
3.6 ผลการคำนวณการออกแบบหัวเผา.....	44
3.7 ข้อมูลที่ใช้ในการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล.....	47
4.1 แสดงเงื่อนไขการทดลองป้อนอากาศ 1.....	63
4.2 แสดงเงื่อนไขการทดลองป้อนอากาศ 2 และ3.....	64
4.3 แสดงเงื่อนไขการทดลองการอุ่นหัวเผา.....	65

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	2
2.1 ซิวมวลในประเทศไทย.....	9
2.2 ขั้นตอนการระเหยไอน้ำและการให้ความร้อนแก่อนุภาคเชื้อเพลิง.....	16
2.3 การกระจายตัวของอนุภาคโดยใช้วิธี Lagrangian ผ่านเซลล์.....	21
2.4 Pressure gage และหลักการของหลอดบูร์ดอง.....	25
2.5 หลักการทำงานของ Rotameter.....	26
2.6 Pitot tube.....	27
2.7 แสดงการเปลี่ยนแปลงค่าเฮดในระบบท่อ.....	28
2.8 การพิจารณาพลังงานเมื่อมีการติดตั้งปั๊ม กังหันน้ำ และพลังงานสูญเสียเนื่องจากความฝืด.....	29
2.9 ตัวอย่างลักษณะของอนุภาคจุลสาร.....	33
3.1 ภาพตัดสองมิติของหัวเผาขนาด 1 MW ที่มุม 135°.....	45
3.2 ภาพตัดสามมิติของหัวเผาขนาด 1 MW ที่มุม 135°.....	45
3.3 ภาพตัดสองมิติของหัวเผาขนาด 1 MW ที่มุม 90°.....	46
3.4 ภาพตัดสามมิติของหัวเผาขนาด 1 MW ที่มุม 90°.....	46
3.5 จำนวนกริดที่ใช้ในการหากกริดอิสระ.....	47
3.6 ผลของลอคของอุณหภูมิที่จำนวนกริดต่างๆ.....	48
3.7 การกระจายตัวของอุณหภูมิของหัวเผาที่มีมุมทางออกของผนัง ห้องเผาไหม้เป็น 135° และ 90°.....	49
3.8 การกระจายตัวของความเข้มข้นของสารระเหยของหัวเผาที่มีมุมทางออกของผนัง ห้องเผาไหม้เป็น 135° และ 90°.....	49
3.9 เส้นทางเดินของอนุภาคที่แสดงถึงสัดส่วนเชิงมวลของอนุภาคชาร์ ระหว่างการเผาไหม้, (Pre-Chamber 90°).....	50
3.10 เส้นทางเดินของอนุภาคที่แสดงถึงสัดส่วนเชิงมวลของอนุภาคชาร์ ระหว่างการเผาไหม้, (Pre-Chamber 135°).....	50
3.11 ลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิที่เกิดจากการเป่าดับ (k), (Pre-chamber 135°).....	51
3.12 การกระจายตัวของอุณหภูมิในช่วงการทำงานที่ (a) 1 MW, (b) 750 kW, (c) 500 kW, (d) 450 kW, (e) 400 kW, (f) 350 kW และ (g) 250 kW.....	52
3.13 การกระจายตัวของความเข้มข้นของสารระเหยในช่วงการทำงานที่ (a) 1 MW, (b) 750 kW, (c) 500 kW, (d) 450 kW, (e) 400 kW, (f) 350 kW และ (g) 250 kW.....	52
3.14 แสดงชิ้นส่วนต่างๆของหัวเผา.....	53

4.1	แสดงชิ้นส่วนต่างๆของหัวเผา.....	56
4.2	บล็อกหล่อ.....	57
4.3	วัสดุอุปกรณ์สำหรับการหล่อปูน.....	57
4.4	การตกแต่งชิ้นงานให้เรียบ.....	58
4.5	เทพูนและก่ออิฐ.....	58
4.6	จุดยึดเกาะของอิฐระหว่างชั้น.....	58
4.7	ชั้นก่ออิฐชั้นที่สอง.....	59
4.8	ชิ้นส่วนที่ก่อปูนและอิฐทนไฟเรียบร้อยแล้ว.....	59
4.9	หัวเผาที่ประกอบเรียบร้อยแล้ว.....	59
4.10	ฐานรองหัวเผา.....	60
4.11	แผนภาพการทำงานของทางเดินท่อแก๊สก่อนเข้าหัวเผา.....	61
4.12	ทางเดินท่อแก๊สแอลพีจีก่อนเข้าหัวเผา.....	61
4.13	แสดงระบบป้องกันอากาศก่อนเข้าหัวเผา.....	62
4.14	ภาพรวมของการติดตั้งหัวเผาเพื่อทำการทดสอบ.....	63
4.15	แสดงตำแหน่งของการวาง Thermocouple.....	66
5.1	กราฟแสดงอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศส่วนที่ 1 ตำแหน่งการเปิดวาล์ว 1 ต่างๆกัน.....	67
5.2	กราฟแสดงอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศส่วนที่ 2 และ 3 เมื่อเปิดวาล์ว 2 ที่ 100% Valve opened.....	68
5.3	กราฟแสดงอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศส่วนที่ 2 และ 3 เมื่อเปิดวาล์ว 2 ที่ 90% Valve opened.....	68
5.4	กราฟแสดงอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศส่วนที่ 2 และ 3 เมื่อเปิดวาล์ว 2 ที่ 80% Valve opened.....	69
5.5	กราฟแสดงอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศส่วนที่ 2 และ 3 เมื่อเปิดวาล์ว 2 ที่ 70% Valve opened.....	69
5.6	กราฟแสดงอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศส่วนที่ 2 และ 3 เมื่อเปิดวาล์ว 2 ที่ 60% Valve opened.....	69
5.7	กราฟแสดงอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศส่วนที่ 2 และ 3 เมื่อเปิดวาล์ว 2 ที่ 50% Valve opened.....	70
5.8	กราฟแสดงอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศส่วนที่ 2 และ 3 เมื่อเปิดวาล์ว 2 ที่ 40% Valve opened.....	70
5.9	กราฟแสดงอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศส่วนที่ 2 เมื่อวาล์ว 3 ถูกปิด.....	71
5.10	แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิที่ย่านการทำงานที่ (a) 1 MW, (b) 750 kW, (c) 500 kW, (d) 450 kW, (e) 400 kW, (f) 350 kW และ (g) 250 kW.....	71

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.11 กราฟแสดงการเลือกย่านการเปิดวาล์ว 1.....	72
5.12 กราฟแสดงการเลือกย่านการเปิดวาล์ว 2.....	72
5.13 กราฟแสดงผลอุณหภูมิกับตำแหน่งการวัดต่างๆ ณ การเปิดวาล์ว 1, 2 ที่ 40 %.....	73
5.14 กราฟแสดงผลอุณหภูมิกับตำแหน่งการวัดต่างๆ ณ การเปิดวาล์ว 1, 2 ที่ 50 %.....	74
5.15 แสดงตำแหน่งการวัดอุณหภูมิภายในหัวเผา.....	74
5.16 แสดงการหมุนวนของริบบิ้นที่บริเวณด้านหน้าของหัวเผา.....	75
5.17 แสดงการเกิด Recirculating flow ที่บริเวณกลางหัวเผา.....	75
5.18 แสดงผลการจำลองการเกิด Recirculating flow ภายในหัวเผา.....	76
6.1 ตัวอย่างเครื่องมือวัด vortex meter, venture meter, thermal mass flow meter.....	78



สัญลักษณ์

HHV	ค่าความร้อนทางสูง
LHV	ค่าความร้อนทางต่ำ
h_{fg}	ค่าความร้อนแฝงในการระเหยของน้ำ
m_{fuel}	มวลของเชื้อเพลิง
m_{H_2O}	มวลของน้ำ
AF	อัตราส่วนอากาศเชื้อเพลิง
r	พิกัดตามแนวรัศมี
$\bar{\rho}$	ความหนาแน่นเฉลี่ย
\tilde{u}	ความเร็วตามแนวแกนเฉลี่ย
\tilde{v}	ความเร็วตามแนวรัศมีเฉลี่ย
\bar{S}_m	Source term ของการถ่ายโอนระหว่างมวลของอนุภาคและก๊าซ
μ_{eff}	Effective viscosity
$\bar{S}_{m,u}, \bar{S}_{m,v}, \bar{S}_{m,w}$	การถ่ายเทโมเมนตัมที่เกิดขึ้นในปริมาตรควบคุมเนื่องจากมวลจากอนุภาคของแข็ง ทิศทางการเคลื่อนที่ตามแนวแกน,ตามแนวรัศมี และตามแนวเส้นรอบวงกลม ตามลำดับ
G_b	การกำเนิดของพลังงานปั่นป่วนเนื่องจากแรงลอยตัว
G_k	การกำเนิดของพลังงานจลน์ปั่นป่วนเนื่องจากเกรเดียนต์ความเร็วเฉลี่ย
S_{\emptyset}	Source Term ที่เกิดหรือสลายตัวเนื่องจากการทำปฏิกิริยา
D_{eff}	Conduction Coefficient
\emptyset	อัตราส่วนมวล
S_h	Source Term ปฏิกิริยาความร้อนและการถ่ายโอนความร้อน
R_v	อัตราการเกิดปฏิกิริยาของสารระเหย
μ_i	ความหนืดของการปั่นป่วน
λ	การนำความร้อน
Γ	การแพร่ของโมเลกุลของแต่ละ specie
H	เอนทัลปี
m	ความเร็วตามแนวแกน (u, v)
k	พลังงานจลนศาสตร์ของความปั่นป่วน
ϵ	อัตราการสลายตัว
Y_i	เศษส่วนเชิงมวลของแต่ละ specie
L_v	ความร้อนแฝงของการเปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นก๊าซของถ่านหิน
c_p	ความจุความร้อนจำเพาะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

T_p	อุณหภูมิ
A_p	พื้นที่หน้าตัดของอนุภาค
P_{ox}	ความดันย่อยของออกซิเจนของก๊าซรอบข้างที่พื้นผิวของการเผาไหม้อนุภาค
R	อัตราจลนศาสตร์ที่รวมกันระหว่างปฏิกิริยาทางเคมีที่อยู่ภายในอนุภาคซาร์และการแพร่จาก ซาร์ที่มีลักษณะเป็นรูพรุน
R_i	อัตราสุทธิของการผลิตโดยสปีชีส์ i ที่ได้จากการทำปฏิกิริยาทางเคมี
S_i	อัตราของการก่อตัวโดยการเพิ่มขึ้นของกระจายตัวจากแหล่งอื่นๆ
Sc_t	turbulent Schmidt number
μ_t	ความหนืดของการปั่นป่วน
D_t	การแพร่กระจายของความปั่นป่วน
F_G	แรงโน้มถ่วงของโลก
F_B	แรงลอยตัว
F_D	แรงต้านการไหล
C_d	ค่า drag coefficient
A_f	พื้นที่หน้าตัดของท่อน
$A_a(y)$	พื้นที่หน้าตัดของวงแหวนระหว่าง ท่อและท่อนซึ่งแปรผันตามระดับความสูง y
V	ปริมาตรของท่อน
K_R	ค่าคงที่ของมิเตอร์
p_t	ความดันรวม (Total Pressure)
p_s	ความดันสถิต (Static Pressure)
V_d	ความเร็วที่กึ่งกลางท่อ
z	ความสูง
v	ความเร็วของของไหล
g	ความเร่งโน้มถ่วง
P	ความดัน
γ	น้ำหนักจำเพาะ
H_p	พลังงานหรือเอนทัลปีที่อุปกรณ์ทำงานทำให้แก่ระบบ เช่น บีบ, คอมเพรสเซอร์ เป็นต้น
H_L	พลังงานที่สูญเสียเนื่องจากความฝืดในระบบท่อหรือเอนทัลปีความฝืด
H_T	พลังงานหรือเอนทัลปีให้แก่อุปกรณ์ทำงานในระบบ เช่น กังหัน เป็นต้น
H_{Lf}	ค่าความสูญเสียหลัก
L	ความยาวท่อ
g	ความเร่งโน้มถ่วง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

D	เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ
f	ค่าตัวประกอบความเสียดทาน
Re	Remolds number
ε	ค่าความขรุขระ
H_{Le}	ค่าความสูญเสียรอง
K	สัมประสิทธิ์ความต้านทานการไหลซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดและขนาดของอุปกรณ์
\dot{W}	Thermal Throughput
\dot{M}_{fuel}	Fuel mass flow rate
\dot{M}_a	Air flow rate
\dot{V}_a	Air volume flow rate
ρ_a	Air density
AT	Ambient Temperature
\dot{V}	Air volume flow
%air	Air flow (%)
A	Air port
OD	Air nominal Outer Diameter
t	Pipe thickness
OD _{Gas pipe}	Gas pipe OD _{Gas pipe}
V	Air axial velocity
T _{in}	Air inlet temperature
P	Air axial momentum
L_{air}	Air angular momentum
θ_v	Air angular velocity
$\phi_{swirl\ vane}$	Swirl vane angle(°)
$V_{flow\ slip\ velocity}$	Angular flow slip velocity
\dot{M}	อัตราการไหลเชิงมวล
\dot{V}	อัตราการไหลเชิงปริมาตร
T	อุณหภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Subscripts

1	อากาศส่วนที่ 1
2	อากาศส่วนที่ 2
3	อากาศส่วนที่ 3
LPG	แก๊สแอลพีจี
Air	อากาศ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ในยุคปัจจุบันจะเห็นได้ว่าทุกประเทศมีความต้องการทางด้านการใช้พลังงานสูงและมีแนวโน้มที่สูงขึ้นเรื่อยๆ ซึ่งพลังงานส่วนมากที่นำมาใช้จะเป็นพลังงานที่มาจากแหล่งเชื้อเพลิงธรรมชาติ เช่น ถ่านหิน ปิโตรเลียม และแก๊สธรรมชาติ เป็นต้น ซึ่งแหล่งพลังงานเหล่านี้เป็นแหล่งพลังงานที่ใช้แล้วหมดไปทำให้เกิดความตระหนักและสนใจที่จะหาแหล่งพลังงานใหม่มาทดแทนพลังงานจากฟอสซิลซึ่งในปัจจุบันมีพลังงานทางเลือกที่มากขึ้น เช่น พลังงานทดแทนจากแสงอาทิตย์ พลังงานลม พลังงานคลื่นและ พลังงานชีวมวล เป็นต้น ในที่นี้จะเป็นการศึกษาและนำพลังงานชีวมวลมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในการเผาไหม้ในภาคอุตสาหกรรมโดยการนำฝุ่นชีวมวลมาเป็นแหล่งเชื้อเพลิง ในการผลิตความร้อนและนำไปใช้กับหม้อไอน้ำ (Boiler) ในโรงงานอุตสาหกรรมจึงจำเป็นต้องหาเทคโนโลยีหรือเทคนิคมาประยุกต์ใช้ในการออกแบบหัวเผาไหม้ให้มีความเสถียรและเผาไหม้ได้ต่อเนื่องกับเชื้อเพลิงที่นำมาใช้ โดยในที่นี้จะสนใจหัวเผาเชื้อเพลิงแข็ง ในลักษณะที่เป็นผงซึ่งงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษา สร้างและติดตั้งหัวเผาให้มีความเหมาะสมกับการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลดังกล่าว ซึ่งคาดว่าในอนาคตจึงสามารถนำหัวเผาที่ถูกสร้างขึ้นมาประยุกต์ใช้ในงานอุตสาหกรรมและเชิงพาณิชย์ต่อไป

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. สร้างหัวเผาตามแบบที่ได้ออกแบบไว้แล้วให้มีความเหมาะสมสำหรับเชื้อเพลิงฝุ่นชีวมวล
2. ออกแบบระบบป้อนอากาศและระบบจุดระเบิดด้วยเชื้อเพลิงแก๊สแอลพีจี

1.3 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้นำวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรและอุตสาหกรรมทางการเกษตรเป็นแหล่งพลังงานทางเลือกซึ่งเป็นพลังงานสะอาดอีกทั้งยังได้เทคโนโลยีที่สามารถนำเชื้อเพลิงชีวมวลที่เหลือใช้มาทำให้เกิดประโยชน์อย่างมีศักยภาพและสามารถลดการใช้เชื้อเพลิงหลักได้
2. ได้ต้นแบบหัวเผา (burner) ที่มีความเหมาะสมสำหรับเชื้อเพลิงฝุ่นชีวมวล เพื่อให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ มีประสิทธิภาพการเผาไหม้สูง ใช้เชื้อเพลิงให้เกิดความคุ้มค่ามากที่สุด และเกิดมลพิษทางอากาศน้อยที่สุด
3. ในการพัฒนาครั้งนี้สามารถนำไปต่อยอดให้ใช้กับเชื้อเพลิงชีวมวลชนิดอื่นจากภาคการเกษตรให้เกิดประโยชน์อย่างสูงสุดจึงเป็นการส่งเสริมทางการเกษตรอีกทางหนึ่งได้เช่นกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 ขอบเขตการศึกษา

1. สร้างหัวเผาตามแบบที่ได้รับให้มีความเหมาะสมสำหรับเตาเผาขนาด 1 MW
2. ใช้แก๊สแอลพีจี ในการเริ่มต้นการเผาไหม้ และใช้ฝุ่นชีวมวลเป็นเชื้อเพลิงหลักในการเผาไหม้ต่อไป

1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน

ในการศึกษาและการวิเคราะห์รวมถึงการสร้างหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลชนิดฝุ่นจำเป็นต้องมีการวางแผนและกำหนดระยะเวลาในการดำเนินงานดังแสดงในรูปที่ 1.1



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

วรรณกรรมปริทัศน์และทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ธนภัทร์ ภักดีวรวิทย์ [1] ได้ทำการศึกษาการจำลองเชิงคณิตศาสตร์สำหรับการเผาไหม้เชื้อเพลิงผงเพื่อประยุกต์ใช้กับการจำลองการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลโดยสนใจที่มุมผนังบริเวณทางออกที่ 90 และ 135 องศา พบว่าที่ 90 องศา อนุภาคของเชื้อเพลิงมีการกระจายตัวมากขึ้นและมีเสถียรภาพในการเผาไหม้ดีกว่า

H.H. Liakos, K.N. Theologos, A.G. Boudouvis และ N.C Markatos [6] ได้ศึกษาอิทธิพลของขนาดอนุภาคในการเผาไหม้ถ่านหินผงโดยในตอนเริ่มต้นของการเผาไหม้จะใช้อนุภาคที่มีขนาดต่างกันคือ 20, 100 และ 200 ไมครอน ซึ่งผลพบว่าที่ขนาดอนุภาค 20 ไมครอนมีการกระจายตัวของอุณหภูมิในห้องเผาไหม้สูงกว่ากรณีอื่นๆ อันเนื่องมาจากอัตราการเผาไหม้เกิดขึ้นได้ดีภายในอนุภาคที่มีขนาดเล็ก

อุกฤษฏ์ สหพัฒน์สมบัติ, ปานชีวา อุดมทรัพย์, เอกรัตน์ ไวยนิิตย์, ธนกร ตันธนวัฒน์ [2] ได้ศึกษาคุณภาพของชีวมวลสำหรับเชื้อเพลิงไม้อัดแท่งโดยศึกษาเศษไม้ยางพารา ทางปาล์ม ทะลายปาล์ม และลำต้นปาล์ม พบว่า ทะลายปาล์มให้ความร้อนสูงสุดถึง 19.3 MJ/kg และยังสามารถทดสอบหาปริมาณโลหะหนักพบว่า ชีวมวลทั้งสี่ที่กล่าวมานั้นมีโพแทสเซียม ซัลเฟอร์ และโลหะหนักอื่นๆ ปริมาณสูงกว่ามาตรฐาน เราจึงไม่นำเศษไม้เหล่านี้มาใช้เป็นเชื้อเพลิง

Ayhan Demirbas [4] ได้ศึกษาเกี่ยวกับลักษณะเฉพาะการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงชีวมวลที่แตกต่างกันพบว่าเชื้อเพลิงชีวมวลให้ความร้อนน้อยกว่าแต่เมื่อใช้ร่วมกันจะสามารถช่วยลด Greenhouse gas ได้ เชื้อเพลิงมีราคาถูก ช่วยลดมลพิษทางน้ำ และดินได้

Gang Lu, Yong Yan, Steve Cornwell, Michael Whitehouse, Gerry Riley [5] ศึกษาผลกระทบของการเผาไหม้ร่วมกันระหว่างถ่านหินกับเชื้อเพลิงชีวมวลโดยพิจารณาจาก ลักษณะและความเสถียรของเปลวไฟ โดยการใช้ถ่านหินผสมกับเชื้อเพลิงชีวมวล 5 ชนิดที่ต่างกันในส่วนโดยมวลที่ต่างกันพบว่า การเพิ่มขึ้นของเชื้อเพลิงชีวมวลมีผลต่อลักษณะของเปลวไฟ เสถียรภาพของเปลวไฟ และความสว่างของเปลวไฟ

2.2 เชื้อเพลิง [3]

2.2.1 แก๊สเชื้อเพลิง

แก๊สเชื้อเพลิงหลักคือ แก๊สธรรมชาติและแก๊สปิโตรเลียมเหลว นอกจากนี้แก๊สเชื้อเพลิงยังสามารถผลิตได้จาก ถ่านหิน ไม้ แก๊สธรรมชาติ และปิโตรเลียมอีกด้วย แก๊สเชื้อเพลิงที่สำคัญและนิยมใช้กันมากในปัจจุบันมีดังนี้

แก๊สธรรมชาติ ประกอบด้วยไฮโดรคาร์บอนชนิดต่าง ๆ เช่น มีเทน อีเทน โพรเพน บิวเทน และ เพนเทน เป็นต้น โดยจะมีมีเทนเป็นส่วนประกอบหลักและมีไฮโดรคาร์บอนเป็นส่วนน้อย ในบางครั้งก็มีแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และแก๊สไนโตรเจนปนอยู่ด้วย การนำแก๊สธรรมชาติมาใช้ประโยชน์ทำได้โดยการอัดและหล่อเย็น จนกระทั่งสารประกอบไฮโดรคาร์บอนกลายเป็นของเหลวจากนั้นจึงแยกแก๊สธรรมชาติแห่งความดันสูงส่งไปตามท่อเพื่อนำใช้งาน

แก๊สปิโตรเลียมเหลว (liquefied petroleum gas, LPG) เกิดจากการแยกแก๊สโดยมีส่วนประกอบหลักคือ อีเทน โพรเพน และบิวเทน นอกจากนั้น แอลพีจี ยังรวมถึงแก๊สเหลวที่ได้จากการกลั่นน้ำมันดิบ เช่น เอทิลีน โพรพิลีน และ บิวทิลีน เป็นต้น

โพรดิวเซอร์แก๊ส (producer gas) คือแก๊สที่ผลิตโดยปล่อยอากาศในปริมาณที่น้อยกว่าค่าทางทฤษฎี (substoichiometric air) ผ่านชั้นความร้อนของ ถ่านหิน พिट ไม้ หรือของเหลือทางการเกษตร ส่วนประกอบหลักของโพรดิวเซอร์แก๊สคือ คาร์บอนมอนอกไซด์ ไฮโดรเจน ไนโตรเจน (มากถึง 55 เปอร์เซ็นต์) และคาร์บอนไดร็อกไซด์ในปริมาณเล็กน้อย การนำไปใช้งานอาจนำไปใช้ได้ทันทีที่ผลิตได้ ขณะยังร้อนอยู่หรือนำไปพอกให้สะอาดเพื่อกำจัดน้ำมันดินและเขม่าออกเสียก่อน

2.2.1.1 คุณสมบัติของแก๊สเชื้อเพลิง

คุณสมบัติที่สำคัญของแก๊สเชื้อเพลิง คือส่วนประกอบโดยปริมาตร ความหนาแน่น และค่าความร้อน เป็นต้น ตารางที่ 2.1 แสดงตัวอย่างของส่วนประกอบโดยปริมาตรของแก๊สเชื้อเพลิงบางชนิด

ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงคือค่าปริมาณความร้อนที่ปลดปล่อยต่อหนึ่งหน่วยมวลของเชื้อเพลิงนั้นอยู่ในสภาวะเริ่มต้นที่ 25°C ทำปฏิกิริยาอย่างสมบูรณ์กับออกซิเจนได้สารผลิตภัณฑ์ที่เย็นตัวลงมาที่ 25°C ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงมีสองค่าคือ ค่าความร้อนทางสูง (higher heating value, HHV) หรือ gross calorific value (gross C.V) ซึ่งเกิดขึ้นกรณีที่ไอน้ำในสารผลิตภัณฑ์การเผาไหม้กลั่นตัวเป็นน้ำ และค่าความร้อนทางต่ำ (lower heating value, LHV) หรือ net calorific value

(net C.V.) เกิดในกรณีที่ไอน้ำไม่กลั่นตัว ค่าความร้อนทางต่ำสามารถหาได้จากค่าความร้อนทางสูง โดยการหักค่าความร้อนแฝงที่ใช้ในการระเหยน้ำในสารผลิตภัณฑ์ออกจากค่าความร้อนทางสูง ดังนั้น ได้ความสัมพันธ์ระหว่าง 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} คือค่าความร้อนแฝงในการระเหยของน้ำที่ 25°C มีค่าเท่ากับ $2,440 \text{ kJ/kg } m_{\text{H}_2\text{O}}$ คือมวลของน้ำที่เกิดจากการเผาไหม้โดยรวมถึงน้ำที่มาจากความชื้นในเชื้อเพลิงและที่เกิดจากปฏิกิริยากับไฮโดรเจนในเชื้อเพลิง m_{fuel} คือมวลเชื้อเพลิงที่เผาไหม้ ค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิงหาได้จากการทดลองโดยชุดอุปกรณ์ที่เรียกว่าแคลอรีมิเตอร์ หรือคำนวณหาโดยวิธีทางเทอร์โมไดนามิกส์เมื่อทราบส่วนประกอบของแก๊สเชื้อเพลิงนั้น ตาราง 2.2 แสดงตัวอย่างค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิงบางชนิด

ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างส่วนประกอบ (โดยปริมาตร) ของแก๊สเชื้อเพลิงต่าง ๆ

ส่วนประกอบ	แก๊สธรรมชาติ	LPG	โพรพิลีนแก๊สจากถ่านหิน	โพรพิลีนแก๊สจากไม้
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 บรรยากาศและ 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
อะซีทิลีน(C ₂ H ₂)	54.05	49.89	52.22	48.17
แก๊สธรรมชาติ(ตัวอย่าง)	38.37	54.13	34.83	49.13
โพรพิลีนแก๊ส(ตัวอย่าง)	6.33	5.81	5.77	5.30

2.2.2 เชื้อเพลิงเหลว

เชื้อเพลิงเหลว หมายถึง เชื้อเพลิงที่อยู่ในสถานะของเหลวภายใต้อุณหภูมิและความดันปกติ เชื้อเพลิงเหลวที่ใช้กันทั่วไปในปัจจุบันเกือบทั้งหมดจะเป็นเชื้อเพลิงปิโตรเลียม การผลิตเชื้อเพลิงเหลวจะนำน้ำมันดิบที่ขุดได้จากบ่อน้ำมัน มากั่น แยกสลาย (แยกสลายด้วย Catalyst แยกสลายด้วยการทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจน เป็นต้น) ทำ Alkyltion กลั่นลำดับส่วน ฯลฯ เพื่อแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียมที่เหมาะสมกับวัตถุประสงค์การใช้งานแต่ละประเภท ตารางที่ 2.3 แสดงลักษณะทั่วไปของผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียม

ตารางที่ 2.3 ลักษณะทั่วไปของผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียม

เชื้อเพลิง	องค์ประกอบหลัก	ช่วงจุดเดือด[°C]	ค่าความร้อนสูง [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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2.1 คุณสมบัติของเชื้อเพลิงเหลว

ข้อดี

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

ข้อเสีย

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

2.2.3 เชื้อเพลิงแข็ง

เชื้อเพลิงแข็งเกิดขึ้นตามธรรมชาติ ได้แก่ ไม้ ชีวมวลรูปแบบต่าง ๆ พืช ถ่านหินลิกไนต์ ถ่านหินบิทูมินัส และถ่านหินแอนทราไซต์ ขยะจากที่อยู่อาศัยและจากอุตสาหกรรมบางประเภทก็จัดว่าเป็นเชื้อเพลิงแข็งเช่นเดียวกัน องค์ประกอบของเชื้อเพลิงแข็งนอกจากจะประกอบด้วยคาร์บอนและไฮโดรเจนเป็นส่วนมากแล้ว 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 คุณลักษณะของเถ้ามีความสำคัญมากในการออกแบบอุปกรณ์เผาไหม้และอุปกรณ์การถ่ายโอนความร้อน ทั้งนี้เพื่อหาทางลดปัญหาจากการเกิดสแลก (slag fouling) การกัดกร่อน (erosion) และการผุกร่อน (corrosion) ลงได้

ตารางที่ 2.4 ตัวอย่างปริมาณออกซิเจน น้ำ และเถ้าในเชื้อเพลิงแข็งชนิดต่าง ๆ

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

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

2.2.4 เชื้อเพลิงชีวมวล (Biomass) [12]

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 [12]

2.2.4.1 ชีวมวลจากข้าว

1) แกลบ จากข้อมูลผลผลิตทางการเกษตรของสำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร ในปีเพาะปลูก 2549 – 2550 มีปริมาณการผลิตข้าวทั่วประเทศเท่ากับ 28.61 ล้านตัน และคิดเป็นปริมาณแกลบเท่ากับ 3.95 ล้านตัน โดยมีการนำแกลบเหล่านี้มาใช้งาน คิดเป็นปริมาณรวม 0.86 ล้านตัน หากนำปริมาณแกลบคงเหลือดังกล่าวมาหักด้วยปริมาณการสูญเสียของแกลบ ที่เกิดจากการขัดสีและการฟุ้งกระจายทั้งในระหว่างกระบวนการต่างๆ และการขนส่ง ดังนั้นปริมาณแกลบคงเหลือที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถนำมาใช้งานได้จะมีค่าสุทธิเท่ากับ 3.09 ล้านตัน และคิดเป็นค่าพลังงานความร้อนเทียบเท่า 843 kJ มีประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าเท่ากับ 320 MW

2) ฟางข้าว จากข้อมูลผลผลิตทางการเกษตรของกรมส่งเสริมการเกษตรปี พะเพาะปลูก 2549 – 2550 สามารถประเมินปริมาณฟางข้าว เท่ากับ 34.04 ล้านตัน เมื่อนำมาคิด ปริมาณที่เก็บรวบรวมได้ (ฟางข้าวมีประสิทธิภาพในการเก็บรวบรวม 10%) ปริมาณฟางข้าวคงเหลือที่ สามารถนำมาใช้งานได้จะมีค่าสุทธิเท่ากับ 3.40 ล้านตัน และคิดเป็นค่าพลังงานความร้อนเท่ากับ 926.10 kJ คิดเป็นประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าเท่ากับ 352 MW

2.2.4.2 ชีวมวลจากข้าวโพด

1) ชังข้าวโพด จากข้อมูลผลผลิตทางการเกษตรของกรมส่งเสริมการเกษตร ในปี พะเพาะปลูก 2549 – 2550 มีปริมาณการผลิตข้าวโพดทั้งประเทศเท่ากับ 4.40 ล้านตัน และคิดเป็น ปริมาณชังข้าวโพดเท่ากับ 0.84 ล้านตัน โดยมีการนำชีวมวลเหล่านี้มาใช้ในภาคต่างๆ คิดเป็นปริมาณ รวม 74,000 ตัน ทำให้ปริมาณชีวมวลคงเหลือมีค่าเท่ากับ 0.43 ล้านตัน คิดเป็นค่าพลังงานความร้อน เท่ากับ 124.6 kJ คิดเป็นประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าเท่ากับ 47.31 MW

2.2.4.3 ชีวมวลจากอ้อย

1) ยอดและใบอ้อย จากข้อมูลผลผลิตทางการเกษตรของกรมส่งเสริมการเกษตรปี 2549 – 2550 มีปริมาณการผลิตอ้อยทั้งประเทศเท่ากับ 70 ล้านตัน คิดเป็นชีวมวลประเภท ยอดและ ใบอ้อย เท่ากับ 16.8 ล้านตัน เมื่อนำมาคิดประสิทธิภาพในการเก็บรวบรวม (40 %) จะมีชีวมวล คงเหลือสุทธิ 6.72 ล้านตัน คิดเป็นค่าพลังงานความร้อนเท่ากับ 1,935.7 kJ คิดเป็นประสิทธิภาพใน การผลิตไฟฟ้าเท่ากับ 735 MW

2) กากอ้อย จากข้อมูลผลผลิตทางการเกษตรของกรมส่งเสริมการเกษตรปี 2549 – 2550 สามารถประเมินปริมาณของกากอ้อย เท่ากับ 21 ล้านตัน ชีวมวลประเภทนี้มีการนำไปใช้อย่าง กว้างขวางในภาคอุตสาหกรรม โดยปัจจุบันได้ถูกแปรไปเป็นเชื้อเพลิงเพื่อผลิตพลังงานความร้อนใน โรงงานผลิตน้ำตาล และบางโรงงานนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตไฟฟ้า จึงทำให้ชีวมวลประเภทนี้ หหมดไปกับการใช้ในโรงงานเป็นหลัก แม้แต่มีความต้องการใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมอื่นๆแต่ก็ไม่มี วัตถุดิบมาป้อน รวมทั้งโรงงานผลิตน้ำตาลหรือโรงผลิตไฟฟ้าจากกากอ้อยหลายโรงได้เริ่มเสาะหา เชื้อเพลิงประเภทอื่น ๆ มาใช้ร่วมกับกากอ้อยเนื่องจากภาวะขาดแคลนของกากอ้อย

2.2.4.4 ชีวมวลจากมันสำปะหลัง

1) ลำต้นมันสำปะหลัง จากข้อมูลผลผลิตทางการเกษตรของกรมส่งเสริมการเกษตร ปี 2549 – 2550 มีปริมาณการผลิตมันสำปะหลังทั้งประเทศเท่ากับ 17.6 ล้านตัน และคิดเป็นปริมาณ ลำต้นมันสำปะหลัง 2.11 ล้านตัน เมื่อนำปริมาณชีวมวลคงเหลือดังกล่าวมาคิดประสิทธิภาพในการ

เก็บรวบรวม (40%) จะมีปริมาณชีวมวลสุทธิเท่ากับ 0.84 ล้านตัน และคิดเป็นค่าพลังงานความร้อนเทียบเท่า 198 kJ และคิดเป็นประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าเท่ากับ 75 MW

2) เหมืองถ่านหินสำหรับผลิตไฟฟ้า จากข้อมูลผลผลิตเหมืองถ่านหินสำหรับผลิตไฟฟ้า สามารถประเมินปริมาณเหมืองถ่านหินได้เท่ากับ 1.76 ล้านตัน เมื่อนำปริมาณชีวมวลคงเหลือดังกล่าวมาคิดประสิทธิภาพในการเก็บรวบรวม (40%) จะมีปริมาณชีวมวลสุทธิเท่ากับ 0.7 ล้านตัน และคิดเป็นค่าพลังงานความร้อนเทียบเท่า 131 kJ และคิดเป็นประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าเท่ากับ 50 MW ในปัจจุบันแทบไม่มีการนำเอาเหมืองถ่านหินสำหรับผลิตไฟฟ้ามาใช้ผลิตพลังงาน เนื่องจากการเก็บรวบรวมมีความยากลำบาก และต้นทุนการขนส่งสูง

2.2.4.5 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 มีปริมาณของกากใยปาล์มที่ได้เท่ากับ 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

2.2.4.6 ชีวมวลจากไม้ยางพารา

1) ชี้อ้อยและเศษไม้ยางพารา จากรายงานของสถาบันวิจัยยางพารา ทำให้ทราบว่าในแต่ละปีจะตัดยางพาราที่มีอายุเกิน 25 ปี ซึ่งครบรอบที่จะต้องทำการตัดฟัน คิดเป็นพื้นที่ยางพารา

ที่ถูกตัดพื้น 500,000 ไร่ต่อปี จะได้ปริมาณของไม้ยางพารา 200 ล้านตัน ซึ่งไม้ยางพาราที่ถูกตัดจะนำไปเข้ากระบวนการแปรรูปไม้เพื่อผลิตเฟอร์นิเจอร์ ดังนั้นจะมีชีวมวลที่ได้ภายหลังกระบวนการผลิตคิดเป็นเศษไม้ 3.6 ล้านตัน และขี้เลื่อย 8 ล้านตัน เมื่อหักปริมาณที่ถูกนำไปใช้ประโยชน์ จะมีเศษไม้คงเหลือ 3.55 ล้านตัน คิดเป็นพลังงานความร้อน 1,862 kJ และพลังงานไฟฟ้า 707 MW ในส่วนของขี้เลื่อยจะมีปริมาณคงเหลือ 1,037 kJ และพลังงานไฟฟ้า 394 MW

2.2.4.7 ชีวมวลที่ได้จากไม้ยูคาลิปตัส

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 [11]

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 การเผาไหม้ [13]

การเผาไหม้เป็นกระบวนการที่เชื้อเพลิงทำปฏิกิริยาทางเคมีกับออกซิเจนแล้วให้พลังงาน ความร้อนออกมาซึ่งเป็นปฏิกิริยาเคมีที่เกิดการออกซิเดชันอย่างรวดเร็วของสารประกอบอินทรีย์ที่มีอยู่ในเชื้อเพลิง ซึ่งในการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ของเชื้อเพลิงนั้นต้องมีปริมาณออกซิเจนที่เพียงพอ ส่วนใหญ่ไม่ใช่ออกซิเจนบริสุทธิ์ เพราะจะสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายสูงแต่จะใช้ ออกซิเจนในอากาศ ซึ่งจะมีทั้งก๊าซออกซิเจน และไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบหลัก ก๊าซอื่นมีน้อยมากจนไม่มีความสำคัญ องค์ประกอบของอากาศแสดงได้ดังตารางที่ 3.1 ในส่วนที่ช่วยในการสันดาป (ตัวออกซิไดซ์) ก็คือออกซิเจน ส่วนที่เหลือจัดอยู่ในกลุ่มไนโตรเจน ก๊าซเฉื่อย และความชื้นในอากาศ ร้อยละขององค์ประกอบของส่วนที่เหลือนี้จะเป็นไนโตรเจนโดยส่วนใหญ่

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 (Complete Combustion) ซึ่งเป็นการสันดาปของเชื้อเพลิงกับออกซิเจนจนหมด ในกรณีนี้คาร์บอนจะเผาไหม้กลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ไฮโดรเจนจะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนกลายเป็นไอน้ำ (H₂O) และถ้าในเชื้อเพลิงมีกำมะถันอยู่ ก็จะเผาไหม้กลายเป็นซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) เป็นต้น ดังสมการ



การเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ (Incomplete Combustion) เป็นการสันดาปที่เชื้อเพลิงเผาไหม้ไม่หมด หรือมีออกซิเจนไม่เพียงพอสำหรับการสันดาป มีผลทำให้มี คาร์บอน (C) ไฮโดรเจน (H₂) คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และอาจจะมีเชื้อเพลิงที่เหลือปะปนออกมากับผลที่ได้จากการเผาไหม้ สาเหตุที่ทำให้เกิดการสันดาปไม่สมบูรณ์มีหลายสาเหตุ เช่นมีปริมาณออกซิเจนไม่เพียงพอกับปริมาณเชื้อเพลิง หรือการที่เชื้อเพลิงกับออกซิเจนมีการผสมกันไม่ดีพอ และอาจเกิดจากการที่สารที่ได้จากการเผาไหม้มีการแตกตัวที่อุณหภูมิสูง เป็นต้น ดังสมการ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นในปฏิกิริยาการเผาไหม้ จะมีเสถียรภาพสูงเกิดในกรณีที่มีการเผาไหม้ สมบูรณ์ส่วนในกรณีที่มีอากาศมากเกินไปประกอบกันอุณหภูมิสูงจากการเผาไหม้มากเกินไป ก็จะทำให้ไนโตรเจนในแก๊สผลิตภัณฑ์เปลี่ยนรูปไปเป็นออกไซด์ของไนโตรเจน (NOx)

2.3.1 อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง (Air-fuel Ratio)

อัตราส่วนอากาศกับเชื้อเพลิงก็คือ อัตราส่วนระหว่างมวล (หรือจำนวนโมล) ของอากาศต่อมวล (หรือจำนวนโมล) ของเชื้อเพลิงในระหว่างการสันดาป โดยทั่วไปแบ่งออกเป็นอัตราส่วนอากาศกับเชื้อเพลิงทฤษฎี (AF_{th}) และอัตราส่วนอากาศกับเชื้อเพลิงจริง (AF_{act}) โดยที่ AF_{th} คำนวณตามสมการ (2.5)

$$AF_{th} = \frac{m_{air}}{m_{fuel}} = \frac{n_{air}}{n_{fuel}} \quad (2.5)$$

สิ่งที่สำคัญที่สุดคือต้องทราบปริมาณออกซิเจนหรืออากาศที่ต้องจ่ายสำหรับการเผาไหม้ที่สมบูรณ์การหาอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงจะคำนวณมาจากปฏิกิริยาการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ของเชื้อเพลิงและพลังงาน ที่ได้จะเป็นพลังงานสูงสุด ดังนั้นปริมาณอากาศที่น้อยที่สุดที่ต้องใช้ในกระบวนการสันดาป เพื่อทำให้เกิดกระบวนการสันดาปสมบูรณ์ของเชื้อเพลิงจะเรียกว่า อากาศตามทฤษฎี (Theoretical air หรือ Stoichiometric air) ซึ่งเป็นตัวบ่งบอกว่ามีปริมาณอากาศที่ใช้จริงเป็นกี่เปอร์เซ็นต์ของอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงในทางทฤษฎี คำนวณได้ตามสมการที่ 2.6

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

สำหรับกระบวนการสันดาปจริงอากาศที่ต้องการเชิงทฤษฎีนั้นไม่เพียงพอที่จะทำให้เกิดการสันดาปได้อย่างสมบูรณ์ นอกจากนั้นยังจะก่อให้เกิดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์หรืออะตอมคาร์บอนที่เผาไหม้ไม่หมด ทำให้พลังงานความร้อนออกมาน้อยกว่าการเผาไหม้สมบูรณ์ดังนั้นเพื่อป้องกันการเกิดปัญหาดังกล่าวจึงจำเป็นต้องป้อนอากาศให้เกินกว่าความต้องการเชิงทฤษฎีปริมาณอากาศที่เกินนี้เรียกว่าอากาศส่วนเกิน คำนวณได้จากการวัดปริมาณอากาศและเชื้อเพลิงที่ส่งเข้าสันดาปจริง ๆ ปริมาณอากาศและเชื้อเพลิงที่ใช้ตามทฤษฎีตามสมการที่ 2.7

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

ปริมาณอากาศส่วนเกินจะต้องมีการปรับปรุงควบคุมมิให้น้อยเกินไปจนเกิดการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์หรือมากเกินไปจนทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานความร้อนออกไปกับก๊าซไอเสียเนื่องจากออกซิเจนและไนโตรเจนในอากาศที่เกินมานี้มีได้ทำปฏิกิริยาใด ๆ ในการเผาไหม้นอกจากจะดูดพลังงานความร้อนจากการเผาไหม้และพาออกทิ้งไป

2.3.2 การผสมกันระหว่างเชื้อเพลิงกับออกซิเจน (Mixing)

การที่อนุภาคเชื้อเพลิงสัมผัสกับโมเลกุลออกซิเจนได้อย่างทั่วถึง เชื้อเพลิงที่เป็นของแข็งจะเกิดการผสมกันแบบไม่เป็นเนื้อเดียวกันทำให้มีพื้นที่ผิวของเชื้อเพลิงสัมผัสกับออกซิเจนจำกัด ดังนั้นควรจะมีพื้นที่ผิวสำหรับการเกิดปฏิกิริยาให้มากที่สุด ซึ่งอาจทำได้โดยการลดขนาดเชื้อเพลิงเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวให้มากขึ้นหรือการทำให้ก๊าซในเตาเผาเกิดการเคลื่อนไหวอย่างรุนแรงหรือปั่นป่วนเนื่องจากความปั่นป่วนจะช่วยทำลายเถ้าที่เกาะอยู่ที่ผิวเชื้อเพลิงให้หลุดออกไป เพื่อให้ออกซิเจนเข้าทำปฏิกิริยาได้ง่ายขึ้น

2.3.3 อุณหภูมิ (Temperature)

การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงแปรผันตามอุณหภูมิ เริ่มแรกจะเกิดขึ้นเป็นแบบช้า ๆ และเกิดต่อเนื่องไปเรื่อย ๆ ความร้อนที่ได้จะไปเพิ่มอุณหภูมิของเชื้อเพลิงและอากาศให้สูงขึ้น ทำให้อัตราการเผาไหม้เพิ่มขึ้น ดังนั้นปริมาณความร้อนจากภายนอกที่เพียงพอสำหรับการเริ่มปฏิกิริยาเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับการเผาไหม้ และจะทำให้ปฏิกิริยาดำเนินต่อไปได้ ปกติแล้วในการเผาไหม้นั้นต้องการให้มีอุณหภูมิสูงเท่าที่จะเป็นไปได้แต่อาจมีข้อจำกัดที่สำคัญ คือ ชนิดของเชื้อเพลิงซึ่งจะให้อุณหภูมิได้อย่างจำกัดที่ปริมาณแตกต่างกัน นอกจากนี้การที่อุณหภูมิสูงมากเกินไปอาจทำให้เกิดสารประกอบออกไซด์ของไนโตรเจนซึ่งเป็นก๊าซพิษ และเกิดแผลกเกาะติดผนังเตาทำให้ลดความสามารถในการถ่ายเทความร้อนและก่อให้เกิดปัญหาการกัดกร่อนได้ผนังเตาได้

2.3.4 เวลาที่เชื้อเพลิงอยู่ในห้องเผาไหม้ (Time)

เวลาที่เชื้อเพลิงอยู่ในเตาจำเป็นจะต้องมากกว่าเวลาที่เชื้อเพลิงต้องการเพื่อการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ แต่ในทางปฏิบัติเวลาที่ทำให้เกิดการสันดาปที่สมบูรณ์นั้นต้องยาวนานมาก ซึ่งสามารถแก้ปัญหาได้โดยการเพิ่มความสูงของ ห้องเผาไหม้เพื่อให้เชื้อเพลิงอยู่ในห้องเผาไหม้ได้นานมากขึ้นแต่จะส่งผลไปถึงเงินลงทุนที่สูงขึ้นด้วย

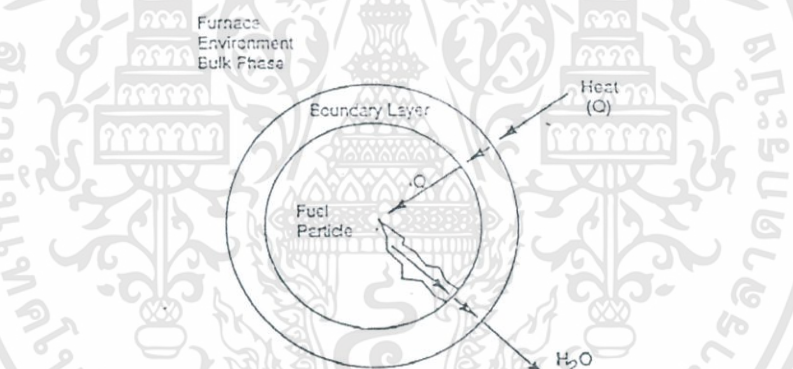
2.3.5 กลไกการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง

เชื้อเพลิงแข็งที่ใช้กันอยู่ทั่ว ๆ ไปมีหลายชนิด เช่น ถ่านไม้ ฟืน ถ่านหิน แกลบ ชี้เลื่อย เป็นต้น กระบวนการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งจะแตกต่างกับการเผาไหม้เชื้อเพลิงเหลวหรือเชื้อเพลิงที่เป็นแก๊ส เนื่องจากคุณสมบัติของเชื้อเพลิงแข็ง เป็นสารประกอบที่ส่วนผสมของสารต่าง ๆ มากมายและผสม

กันอยู่อย่างไม่เป็นเนื้อเดียวกัน อีกทั้งสัดส่วนของสารต่าง ๆ ภายในเชื้อเพลิงแข็งไม่แน่นอน นอกจากนี้ การเผาไหม้เชื้อเพลิงยังขึ้นอยู่กับขนาดอนุภาคเชื้อเพลิงแข็งด้วย เชื้อเพลิงแข็งประกอบด้วยสารต่าง ๆ ทั้งที่เผาไหม้ได้และเผาไหม้ไม่ได้ สารที่เผาไหม้ไม่ได้เรียกว่า สารเฉื่อย ขั้นตอนหรือกระบวนการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งในเตาเผาานั้น จะมีกระบวนการในการเผาไหม้อนุภาคเชื้อเพลิงตามลักษณะขั้นตอน ดังนี้

2.3.5.1 การทำแห้ง (Drying)

เป็นกระบวนการที่ใช้กำจัดความชื้นที่มีอยู่ในอนุภาคของเชื้อเพลิงชีวมวลขณะ เริ่มต้นรับความร้อนจากการเผาไหม้ในเตาเผา ปฏิกิริยาการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งเริ่มจากการที่อากาศเข้าไปผสมกับเชื้อเพลิงเกิดกระบวนการเผาไหม้ จากรูปที่ 3.1 ออกซิเจนจากอากาศจะเข้าไปทำปฏิกิริยาสัมผัสกับผิวของคาร์บอนและเกิดปฏิกิริยาของคาร์บอนดังต่อไปนี้



รูปที่ 2.2 ขั้นตอนการระเหยไอน้ำและการให้ความร้อนแก่อนุภาคเชื้อเพลิง

ที่มา : David A. Tillman (1991)

2.3.5.2 การปล่อยสารระเหย (Devolatilization)

เป็นกระบวนการสลายตัวของชีวมวลแล้วทำให้เกิดเป็นสารระเหย หลังจากปฏิกิริยาทั้งสามเกิด ขึ้นแล้ว จะได้ผลิตภัณฑ์ไพโรไลซิส ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้ต้องทำปฏิกิริยาต่อไปอีก โดยจะมีสถานะเป็นแก๊สและของแข็ง แก๊สจะประกอบไปด้วย CO , CO_2 , H_2 , O_2 , H_2O และสารประกอบไฮโดรคาร์บอนอีกเล็กน้อย รอบ ๆ อนุภาคของเชื้อเพลิงเมื่อปริมาณสารระเหยต่อพื้นที่ผิวของอนุภาคน้อย ออกซิเจนจะทำปฏิกิริยากับแก๊สเกิดการเผาไหม้แบบผสมแต่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน ในทางตรงกันข้ามถ้าหากปริมาณสารระเหยต่อพื้นที่ผิวมาก จะทำให้ออกซิเจนไม่สามารถเข้าทำปฏิกิริยากับแก๊สเป็นผลทำให้ไม่เกิดปฏิกิริยาหรือเกิดได้น้อย เพราะฉะนั้นต้องใช้เวลาเพื่อให้ปริมาณของสารระเหยเจือจางลงจึงจะเกิดปฏิกิริยา ส่วนของแข็งประเภทถ่านจะไม่เกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ในเวลานั้นเนื่องจาก

แก๊สจากกระบวนการไพโรไลซิสจะป้องกันไม่ให้ออกซิเจนเข้าทำปฏิกิริยาพร้อมกันนั้นอุณหภูมิก็ไม่สูงพอที่จะเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ หลังจากแก๊สต่าง ๆ เกิดปฏิกิริยาจะถ่ายเทความร้อนให้กับคาร์บอนให้มีอุณหภูมิสูงถึงจุดเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ และมีขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาดังต่อไปนี้



2.3.5.3 การจุดติดไฟของสารระเหย (Ignition of Volatile)

เป็นกระบวนการที่ทำให้เกิดการจุดประกายของสารระเหยที่ถูกปล่อยออกมา และอยู่ล้อมรอบอนุภาคของเชื้อเพลิง

2.3.5.4 การเผาไหม้สารระเหย (Combustion of Volatile)

เป็นกระบวนการเผาไหม้สารระเหย ทำให้เกิดเปลวไฟชั้นรอบ ๆ อนุภาคเชื้อเพลิงชีวมวล

2.3.5.5 การจุดติดไฟของถ่านชาร์ (Ignition of Char Particle)

เป็นกระบวนการจุดประกายบนผิวหน้าของถ่านที่เหลือ โดยเริ่มจากเป็นจุดเล็ก ๆ ที่ผิวด้านนอกแล้วค่อย ๆ ขยายออกไปจนเกิดทั่วทั้งอนุภาค

2.3.5.6 การเผาไหม้ถ่านชาร์ (Combustion of Residual Char Particle)

เป็นกระบวนการเผาไหม้อนุภาคของถ่านที่เหลือหลังจากที่สารระเหยระเหยออกมาจากอนุภาคของเชื้อเพลิงชีวมวลบางส่วนหรือหมดแล้ว เมื่อเผาไหม้หมดจะเหลือเป็นขี้เถ้า

2.4 สมการพื้นฐานของแบบจำลอง [1]

หัวข้อนี้กล่าวถึงสมการทางคณิตศาสตร์ในแบบจำลองการสันดาปของถ่านหินผงและชีวมวล โดยถูกนำไปใช้จำลองเชิงตัวเลขของสมการทางคณิตศาสตร์ในพิกัดทรงกระบอกและสองมิติโดยสมการทางคณิตศาสตร์จะถูกอธิบายถึงแบบจำลองของก๊าซในรูปของพิกัดทรงกระบอก

2.4.1 สมการแบบจำลองของก๊าซในรูปของพิกัดทรงกระบอก [7]

สมการที่ใช้ในการอธิบายการไหลของก๊าซสามารถเขียนในรูปพิกัดทรงกระบอกโดยพิจารณาห้องปฏิกรณ์เป็นแบบสมมาตรได้ตามสมการข้างล่างนี้

2.4.1.1 สมการความต่อเนื่อง

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \bar{\rho} \tilde{v}) + \frac{\partial}{\partial z} (\bar{\rho} \tilde{u}) = \bar{S}_m \quad (2.14)$$

\bar{S}_m คือ Source term ที่เกิดขึ้นโดยแสดงถึงการถ่ายเทจากอนุภาคสู่ก๊าซ

2.4.1.2 สมการอนุรักษ์โมเมนตัม

สมการอนุรักษ์โมเมนตัมถูกอธิบายในลักษณะของพิกัดทรงกระบอก 3 มิติ

ดังนี้

ทิศทางตามแนวรัศมี

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \bar{p} \tilde{v}) + \frac{\partial}{\partial z} (\bar{p} \tilde{u} \tilde{v}) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \mu_{\text{eff}} \frac{\partial \tilde{v}}{\partial r}) + \frac{\partial}{\partial z} (\mu_{\text{eff}} \frac{\partial \tilde{v}}{\partial z}) + \bar{S}_v + \bar{S}_{m,v} \quad (2.15)$$

ซึ่ง

$$\bar{S}_v = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \mu_{\text{eff}} \frac{\partial \tilde{v}}{\partial r}) + \frac{\partial}{\partial z} (\mu_{\text{eff}} \frac{\partial \tilde{v}}{\partial z}) + \frac{\bar{p} \tilde{v}^2}{r} - 2 \mu_{\text{eff}} \frac{\tilde{v}}{r^2} \quad (2.16)$$

$\bar{S}_{m,v}$ คือ การถ่ายโอนโมเมนตัมที่เกิดในปริมาตรควบคุมโดยอนุภาคของแข็งทิศทางตามแนวรัศมี

ทิศทางตามแนวแกน

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \bar{p} \tilde{v}) + \frac{\partial}{\partial z} (\bar{p} \tilde{u} \tilde{v}) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \mu_{\text{eff}} \frac{\partial \tilde{u}}{\partial r}) + \frac{\partial}{\partial z} (\mu_{\text{eff}} \frac{\partial \tilde{u}}{\partial z}) + \bar{S}_u + \bar{S}_{m,u} \quad (2.17)$$

ซึ่ง

$$\bar{S}_u = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \mu_{\text{eff}} \frac{\partial \tilde{u}}{\partial r}) + \frac{\partial}{\partial z} (\mu_{\text{eff}} \frac{\partial \tilde{u}}{\partial z}) \quad (2.18)$$

$\bar{S}_{m,u}$ คือ การถ่ายโอนโมเมนตัมที่เกิดในปริมาตรควบคุมโดยอนุภาคของแข็งทิศทางตามแนวแกน

ทิศทางตามเส้นสัมผัสกับเส้นรอบวงกลม (ตั้งฉากกับระนาบ r-z)

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \bar{p} \tilde{w}) + \frac{\partial}{\partial z} (\bar{p} \tilde{u} \tilde{w}) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \mu_{\text{eff}} \frac{\partial \tilde{w}}{\partial r}) + \frac{\partial}{\partial z} (\mu_{\text{eff}} \frac{\partial \tilde{w}}{\partial z}) + \bar{S}_w + \bar{S}_{m,w} \quad (2.19)$$

ซึ่ง

$$\bar{S}_w = -\tilde{w} \left(\frac{\bar{p}}{r} + \frac{\mu_{\text{eff}}}{r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \mu_{\text{eff}}}{\partial r} \right) \quad (2.20)$$

$\bar{S}_{m,w}$ คือ การถ่ายโอนโมเมนตัมที่เกิดในปริมาตรควบคุมโดยอนุภาคของแข็งทิศทางตามเส้นสัมผัสกับเส้นรอบวงกลม

2.4.1.3 สมการการถ่ายเทความร้อนปั่นป่วนสำหรับ Standard และ RNG k-ε Model

Model

พลังงานจลนศาสตร์ของความปั่นป่วนและอัตราการสลายตัวถูกแสดงไว้ในสมการดังนี้

Turbulent kinetic energy

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \bar{\rho} \tilde{v} k) + \frac{\partial}{\partial z} (\bar{\rho} \tilde{u} k) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\mu_{\text{eff}}}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\mu_{\text{eff}}}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial z} \right) + G_k + G_b - \bar{\rho} \epsilon - Y_M + S_k \quad (2.21)$$

$$\text{ซึ่ง } G_k = \mu_{\text{eff}} \left\{ 2 \left[\left(\frac{\partial \tilde{u}}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial \tilde{v}}{\partial r} \right)^2 + \left(\frac{\tilde{v}}{r} \right)^2 \right] + \left(\frac{\partial \tilde{u}}{\partial r} + \frac{\partial \tilde{v}}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial \tilde{w}}{\partial z} \right)^2 + \left[r \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{\tilde{w}}{r} \right)^2 \right] \right\} \quad (2.22)$$

Dissipation rate

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \bar{\rho} \tilde{v} \epsilon) + \frac{\partial}{\partial z} (\bar{\rho} \tilde{u} \epsilon) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\mu_{\text{eff}}}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\mu_{\text{eff}}}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial z} \right) + C_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{\epsilon 3} G_b) + C_{\epsilon 2} \bar{\rho} \frac{\epsilon^2}{k} - R_\epsilon + S_\epsilon \quad (2.23)$$

เมื่อ G_k คือการกำเนิดของพลังงานจลนปั่นป่วนเนื่องจากเกรเดียนต์ความเร็วเฉลี่ย G_b คือการกำเนิดของพลังงานจลนปั่นป่วนเนื่องจากแรงลอยตัว Y_M แสดงถึงการสนับสนุนของการขยายตัวที่เปลี่ยนแปลงในความปั่นป่วนอัดตัวได้ต่ออัตราการกระจายทั้งหมด และ R_ϵ เป็นพจน์ที่ช่วยเพิ่มความแม่นยำสำหรับการไหลที่มีความเครียดเปลี่ยนแปลงอย่างกะทันหัน

2.4.1.4 การเคลื่อนย้ายของสเกลลาร์

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \bar{\rho} \tilde{v} \tilde{\phi}) + \frac{\partial}{\partial z} (\bar{\rho} \tilde{u} \tilde{\phi}) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r D_{\text{eff}} \frac{\partial \tilde{\phi}}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_{\text{eff}} \frac{\partial \tilde{\phi}}{\partial z} \right) + \bar{S}_\phi \quad (2.24)$$

$$D_{\text{eff}} = D_\phi + \frac{\mu_{\text{eff}}}{\sigma_{\phi, \epsilon}} \quad (2.25)$$

S_ϕ คือ Source Term ที่เกิดหรือสลายตัวเนื่องจากการทำปฏิกิริยา D_{eff} คือ Conduction Coefficient และ ϕ คือ อัตราส่วนมวล (Mass Fraction) ของปริมาณสเกลลาร์สำหรับแต่ละปัญหา สำหรับสมการอนุรักษ์พลังงาน ϕ จากสมการ (3.11) จะเปลี่ยนเป็น H (เอนทัลปี) โดยที่ S_h คือ Source Term ปฏิกิริยาความร้อนและการถ่ายโอนความร้อน / รังสีจากอนุภาค โดยสามารถหาได้ดังในสมการนี้

$$S_h = \text{LHV}_{\text{vol}} \cdot R_V \quad (2.26)$$

R_V คือ อัตราการเกิดปฏิกิริยาของสารระเหย และ LHV_{vol} คือ ค่า Low Heating Value ของสารระเหยในอนุภาค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.2 แบบจำลองของแก๊ส [17]

การเคลื่อนที่ของแก๊สได้อธิบายในระนาบสองมิติ โดยที่ Reynolds-average Navier-Stokes (RANS) ถูกกำหนดให้อยู่ในสภาวะคงตัว (Steady-State) และเสริมด้วยแบบจำลอง Standard $k-\varepsilon$ Turbulence ซึ่ง Governing Equation สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\nabla \cdot (\rho U \Phi) - \Gamma_{eff} \nabla^2 \Phi = S_\Phi \quad (2.27)$$

เมื่อ U คือเวกเตอร์ความเร็วเฉลี่ย ρ คือความหนาแน่น และ S_Φ คือ Source term โดยที่ Governing Equation ที่ใช้สำหรับแก้ไขปัญหาการเคลื่อนที่ของแก๊สประกอบด้วย มวล (m) ความเร็วตามแนวแกน (u, v) พลังงานจลนศาสตร์ของความปั่นป่วน (k) อัตราการสลายตัว (ε) เอนทัลปี (H) และเศษส่วนเชิงมวลของแต่ละ specie (Y_i) ดังแสดงในตารางที่ 2.7 ซึ่ง μ_i คือ ความหนืดของการปั่นป่วน λ คือ การนำความร้อน และ Γ คือการแพร่ของโมเลกุลของแต่ละ specie

ตารางที่ 2.7 ตัวแปร Φ , Γ_{eff} และ S_Φ ในสมการความต่อเนื่องสำหรับแก๊ส

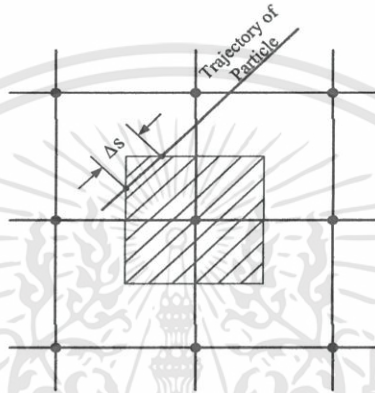
Parameter	Φ	Γ_{eff}	S_Φ
Continuity	1	0	\dot{m} , total mass transfer rate from particle phase
Momentum	u, v	$\mu + \mu_i$	F_D , drag forces of particles
Energy	H	$\lambda + \frac{\mu_i}{\sigma_H}$	S_H , reaction heats and convective / radiative heat transfers from particle phase
Species mass fraction	Y_i	$\Gamma + \frac{\mu_i}{\sigma_{Y_i}}$	S_b , chemical reaction rate involving component i
Turbulent kinetic energy	k	$\mu + \frac{\mu_i}{\sigma_k}$	$P_k - \rho \varepsilon$
Turbulent dissipation rate	ε	$\mu + \frac{\mu_i}{\sigma_\varepsilon}$	$C_1 \frac{\varepsilon}{k} P - C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{K}$

โดย $\mu_i = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon}$, $P_k = (\mu + \mu_i) \nabla U \cdot (\nabla U + (\nabla U)^T)$

ค่าคงที่ : $C_\mu = 0.09$, $C_1 = 1.44$, $C_2 = 1.92$

2.4.3 แบบจำลองของอนุภาค [7]

การกระจายตัวของอนุภาคถูกจำลองโดยใช้วิธี Lagrangian โดยสมมติว่าอนุภาคมีลักษณะเป็นทรงกลมและความหนาแน่นเริ่มต้นมีค่าคงที่ การถ่ายเทมวล โมเมนตัม และพลังงานของอนุภาคที่มีผลต่อ gas phase จะเกี่ยวข้องกับตำแหน่งที่อนุภาคเคลื่อนที่ผ่าน สามารถคำนวณได้โดยเทคนิค Particle Source In Cell Techniques (PSICT) [15] จากรูปที่ 2.3 แสดงการกระจายตัวของอนุภาคสำหรับแต่ละตำแหน่งทางเข้าและแต่ละกลุ่มของขนาด



รูปที่ 2.3 การกระจายตัวของอนุภาคโดยใช้วิธี Lagrangian ผ่านเซลล์

2.4.3.1 สมการอนุรักษ์มวล

$$\frac{dm_p}{dt} = R_m \quad (2.28)$$

R_m คืออัตราเชิงปริมาตรของมวลที่ออกจากอนุภาคสู่แก๊สโดยการปลดปล่อยสารระเหยหรือซารินในการเผาไหม้

2.4.3.2 สมการอนุรักษ์โมเมนตัมและการเคลื่อนที่เฉลี่ย

$$\frac{dm_p \tilde{u}_i}{dt} = \sum \bar{F}_i \quad (2.29)$$

พจน์ทางด้านขวาเกิดจากแรงภายนอก ซึ่งส่วนใหญ่เกิดจากแรงจุดที่กระทำต่ออนุภาค [7] ดังนั้นสมการสมดุลโมเมนตัมคือ

$$\frac{d\tilde{u}_p}{dt} = -\alpha(\tilde{u}_p \pm u_{disp} - \tilde{u}_g) \quad (2.30)$$

$$\frac{d\tilde{v}_p}{dt} = -\alpha(\tilde{v}_p \pm v_{disp} - \tilde{v}_g) + \frac{\tilde{w}^2}{r_p} \quad (2.31)$$

\tilde{u}_g, \tilde{u}_p คือความเร็วเฉลี่ยของแก๊สและอนุภาคตามลำดับ, r_p คือระยะจากแกนสมมาตรของอนุภาค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.3.3 สมการอนุรักษ์พลังงาน

สมดุลพลังงานเกิดจากผลรวมการถ่ายเทความร้อนของอนุภาคความร้อนจากการเผาไหม้ของซาร์ ความร้อนที่ปล่อยออกมากับการสูญเสียน้ำหนักของการเผาไหม้ซาร์ และความร้อนจากการระเหยในกระบวนการปล่อยสารระเหย ดังนั้นสมการอนุรักษ์พลังงานคือ

$$\frac{d(m_p c_p T_p)}{dt} = m_p \dot{Q}_t - c_p T_p \left(-\frac{dm_p}{dt} \right) - L_v \frac{dm_p}{dt} \quad (2.32)$$

$$\dot{Q}_t = \dot{Q}_{convect} + \dot{Q}_{rad.} + \dot{Q}_{comb.} \quad (2.33)$$

เมื่อ L_v คือความร้อนแฝงของการเปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นก๊าซของถ่านหิน (kJ/kmol)

c_p คือความจุความร้อนจำเพาะ (kJ/kmol-K)

T_p คืออุณหภูมิ

2.4.3.4 แบบจำลองการเผาไหม้ของซาร์ [14],[15]

สมมติฐานของอัตราการเกิดปฏิกิริยาจากพื้นผิวซาร์ถูกทำนายไว้สองรูปแบบโดยเกิดจากอัตราทางจลนศาสตร์หรือการแพร่

$$D_0 = C_1 \frac{[(T_p + T_\infty)/2]^{0.75}}{d_p} \quad (2.34)$$

โดยที่อัตราทางจลนศาสตร์

$$R = C_2 e^{-(E/RT_p)} \quad (2.35)$$

คืออัตราการเปลี่ยนแปลงเชิงมวลของอนุภาคน้ำหนักที่เกิดจากการเผาไหม้ซาร์

$$\frac{dm_p}{dt} = -A_p p_{ox} \frac{D_0 R}{D_0 + R} \quad (2.36)$$

เมื่อ A_p คือพื้นที่หน้าตัดของอนุภาค ($\frac{\pi d_p^2}{4}$), p_{ox} คือความดันย่อยของออกซิเจนของก๊าซรอบข้างที่พื้นผิวของการเผาไหม้อนุภาค และ R คือ อัตราจลนศาสตร์ที่รวมกันระหว่างปฏิกิริยาทางเคมีที่อยู่ภายในอนุภาคซาร์และการแพร่จากซาร์ที่มีลักษณะเป็นรูพรุน

2.4.4 แบบจำลองการเผาไหม้

แบบจำลองการเผาไหม้ที่ใช้ในการป้อนเข้าสู่โปรแกรมสำหรับการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลถูกอธิบายโดยสมการต่างๆในรูปของการจำลอง Non-Premixed Combustion และ Species Transport

2.4.4.1 การเผาไหม้แบบ Species Transport และ Finite-Rate Chemistry

แบบจำลองนี้สามารถคำนวณแบบจำลองโดยสมการอนุพันธ์พลังงานต่างๆ เช่น การพา การแพร่ และการเกิดปฏิกิริยาจากแหล่งอื่นๆ ในขณะที่ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นพร้อมกันในเวลาเดียวกันนั้นมาจากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นของสถานะเชิงมวล (volumetric reactions) ผนังที่เกิดจากการแลกเปลี่ยนความร้อน พื้นผิวอนุภาค และบริเวณที่มีความพรุนของอนุภาค โดยที่แบบจำลอง Species transport ถือว่าเป็นแบบจำลองที่มีประสิทธิภาพในการคำนวณทั้งกรณีที่ทำปฏิกิริยาและไม่ทำปฏิกิริยา

2.4.4.2 สมการ Species Transport

เมื่อเราเลือกสมการที่จะแก้ไขปัญหสมการอนุพันธ์ทางเคมี การคำนวณของโปรแกรมจะทำนาย mass fraction ของแต่ละสปีชีส์ ซึ่งสปีชีส์ Y_i ทั้งหมดถูกคำนวณโดยสมการของการพาและการแพร่จากสปีชีส์ i สมการอนุพันธ์นี้จะใช้ในลักษณะดังต่อไปนี้ เมื่อ Y_i คือ \emptyset จากสมการที่ (2.24)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_i) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} Y_i) = -\nabla \cdot \mathbf{J}_i + R_i + S_i \quad (2.37)$$

เมื่อ R_i คืออัตราสุทธิของการผลิตโดยสปีชีส์ i ที่ได้จากการทำปฏิกิริยาทางเคมี และ S_i คืออัตราของการก่อตัวโดยการเพิ่มขึ้นของกระจายตัวจากแหล่งอื่นๆ สมการในรูปแบบนี้จะทำการแก้ไขปัญหาคณิตศาสตร์ของ $N-1$ เมื่อ N คือตัวเลขทั้งหมดของสถานะของไหลทางเคมี เนื่องจาก mass fraction ของสารเคมีในแต่ละชนิดต้องมีผลรวมเท่ากับ 1 โดยที่ mass fraction N_{th} ถูกกำหนดให้เท่ากับหนึ่งลบด้วยผลรวมของ $N-1$ สำหรับการหาคำตอบ เพื่อที่จะลดข้อผิดพลาดจากการคำนวณ

2.4.4.3 การกระจายเชิงมวลสำหรับการไหลแบบปั่นป่วน

ในการไหลแบบปั่นป่วน (turbulent) คำนวณจากการแพร่เชิงมวลดังสมการ

$$\mathbf{J}_i = -\left(\rho D_{i,m} + \frac{\mu_t}{Sc_t}\right) \nabla Y_i - D_{T,i} \frac{\nabla T}{T} \quad (2.38)$$

เมื่อ Sc_t คือ turbulent Schmidt number ($\frac{\mu_t}{\rho D_t}$ เมื่อ μ_t คือความหนืดของการปั่นป่วน และ D_t คือการแพร่กระจายของความปั่นป่วน) ค่าเริ่มต้นสำหรับ Sc_t เท่ากับ 0.7 อันเนื่องจากการแพร่กระจายของความปั่นป่วน ซึ่งอิทธิพลของการแพร่แบบราบเรียบในการไหลแบบปั่นป่วนโดยทั่วไปนั้นน้อยมากและสามารถละทิ้งได้

2.4.4.4 สมการพลังงานสำหรับ Species Transport

องค์ประกอบสำหรับการไหลแบบผสมผสานในการแพร่ของสปีชีส์และเอนทัลปีคำนวณได้จากสมการ

$$\nabla \cdot \left[\sum_{i=1}^n h_i \bar{J}_i \right] \quad (2.39)$$

โดยทั่วไปเอนทัลปีไม่ควรที่จะตัดทิ้งในการคำนวณ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อใช้ในสมการ Lewis number ซึ่งใช้สำหรับการนำความร้อน

$$Le_i = \frac{k}{\rho c_p D_{i,m}} \quad (2.40)$$

2.4.4.5 การแพร่กระจายที่ตำแหน่งทางเข้า

สำหรับสถานะของความดันคำนวณโดยการเคลื่อนที่ทั้งหมดของสปีชีส์ที่ตำแหน่งทางเข้าซึ่งประกอบด้วยการพาและการแพร่ (สำหรับสถานะความหนาแน่นจะถูกคำนวณโดยการพาเพียงอย่างเดียว) ส่วนประกอบของการพานั้นถูกกำหนดโดยสปีชีส์ของ mass fraction ที่ป้อนเข้าสู่ทางเข้า แต่อย่างไรก็ตามส่วนประกอบของการแพร่ขึ้นอยู่กับเกรเดียนท์ของขอบเขตสปีชีส์จากการคำนวณในตำแหน่งทางเข้า ดังนั้นส่วนประกอบของการแพร่ (และการเคลื่อนที่ทั้งหมดที่ทางเข้า) จะไม่กำหนดให้เป็นนัยสำคัญ

2.4.4.6 การเผาไหม้แบบ Non-Premixed Combustion

ในการเผาไหม้แบบ non-premixed นั้น เชื้อเพลิงและออกซิโดซ์เซอร์ถูกป้อนจากท่อทางเข้าหรือแหล่งที่แยกจากกัน ก่อนแพร่เข้าสู่บริเวณทำปฏิกิริยา โดยในส่วนนี้จะแตกต่างกับ การเผาไหม้แบบ premixed ซึ่งตัวทำปฏิกิริยาได้ผสมกันในระดับโมเลกุลก่อนที่จะเผาไหม้ ตัวอย่างสำหรับการเผาไหม้แบบ non-premixed เช่น ห้องเผาไหม้ถ่านหินผง การเผาไหม้ของห้องเผาไหม้ในเครื่องยนต์ดีเซลและในอ่างไฟ ภายใต้สมมุติฐานที่ใช้สำหรับลักษณะการผสมกันของก๊าซแบบปั่นป่วน สัดส่วนย่อยของก๊าซผสมสามารถคำนวณได้จากพารามิเตอร์เดียวกันคือ Mixture fraction ซึ่งแทนด้วยสัญลักษณ์ f พารามิเตอร์นี้ถูกนิยามว่าเป็นสัดส่วนเชิงมวลของเชื้อเพลิงที่มีอยู่ในสปีชีส์ต่างๆที่ผสมกันอยู่ในห้องเผาไหม้ หรือกล่าวโดยอีกนัยหนึ่งได้ว่า f คือสัดส่วนเชิงมวลของธาตุในเชื้อเพลิงที่ไหม้และไม่ไหม้ (คาร์บอน ไฮโดรเจน ฯลฯ) ในสปีชีส์ทั้งหมด (CO_2 , H_2O , O_2 ฯลฯ) เพราะว่าจะอะตอมของธาตุได้ถูกอนุรักษ์ไว้ในปฏิกิริยาเคมี ดังนั้นสมการควบคุมการถ่ายเทจะไม่มีพจน์ของแหล่งกำเนิด นอกจากนี้ปัญหาการเผาไหม้ได้ถูกมองให้เป็นการทำปฏิกิริยาอย่างรวดเร็ว (fast kinetic) เมื่อเทียบกับอัตราการผสมกันของกระแสหมุนวนปั่นป่วน ดังนั้น ความซับซ้อนเนื่องมาจากการเข้าใกล้อัตราปฏิกิริยาแบบไม่เชิงเส้นจะไม่นำมาคิด ปฏิกิริยาของสารเคมีสามารถจำลองเป็นแบบสมดุลได้ด้วย

แบบจำลองสมดุลเคมี (Chemical equilibrium) เช่น แบบจำลองเปลวไฟราบเรียบคงที่ หรือแสดงได้จากสมดุลเคมีที่ใช้แบบจำลองเปลวไฟราบเรียบไม่คงที่

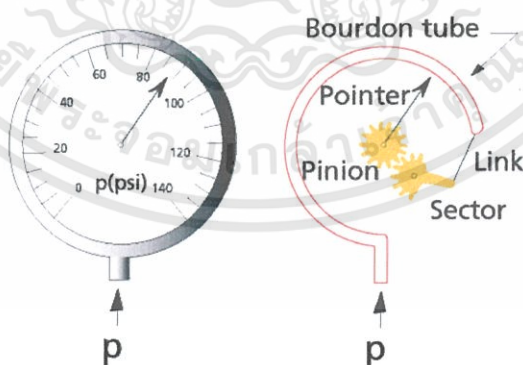
แบบจำลอง Non-premixed ของการเผาไหม้ผ่านหินจะมีการจำลองการกระจายตัวของ Mixture fraction ที่เป็นตัวแทนของเชื้อเพลิงสองชนิด คือ สารระเหย (Volatile) และถ่านชาร์ การกระจายตัวสำหรับสปีชีส์เดี่ยวจะไม่ถูกคำนวณแยกออกจาก Mixture fraction แต่จะเป็นค่าที่สัมพันธ์กับ Mixture fraction กล่าวคือความเข้มข้นของสปีชีส์จะได้มาจากการแปลงค่าของ Mixture fraction โดยมีความสัมพันธ์ระหว่าง Mixture fraction และ สปีชีส์ต่างๆที่แน่นอน ปฏิสัมพันธ์ของความปั่นป่วนและปฏิกิริยาเคมีจะถูกนำมาพิจารณา โดยใช้ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็น

2.5 หลักการทำงานของ Pressure gage, Rota meter และ Pitot tube [10]

ในหัวข้อนี้เป็นการอธิบายหลักการทำงานของ Pressure gage, Rota meter และ Pitot tube โดยอุปกรณ์ทั้งสามตัวมีการทำงานดังนี้

2.5.1 หลักการทำงานของ Pressure gage

Pressure gage เป็นอุปกรณ์ที่ใช้วัดความดัน โดยใช้หลักการของหลอดบัวร์ดองซึ่งเป็นหลอดที่มีพื้นที่หน้าตัดเป็นวงรีและงอเป็นส่วนโค้งของวงกลม โดยปลายด้านหนึ่งของหลอดเป็นปลายปิดต่อเข้ากับเข็มตรวจวัดตำแหน่งและระยะการเคลื่อนที่ ปลายอีกด้านหนึ่งเป็นปลายเปิดต่อเข้ากับสิ่งที่ต้องการวัดความดันดังรูปที่ 2.4 เมื่อหลอดได้รับความดันหรือความดันภายในหลอดมากกว่าความดันภายนอก หลอดจะเกิดความเครียดขึ้นและพยายามยืดตัวออกให้ตรงทำให้ปลายข้างที่ปิดเคลื่อนที่ โดยการเคลื่อนที่นี้เปลี่ยนแปลงตามความดันที่ได้รับ และเมื่อความดันลดลงหลอดจะเคลื่อนที่กลับเข้าสู่ตำแหน่งเดิม



รูปที่ 2.4 Pressure gage และหลักการของหลอดบัวร์ดอง

2.5.2 หลักการทำงานของ Rota meter

Rota meter เป็นอุปกรณ์ที่ใช้วัดอัตราการไหลของไหลโดยอาศัยการไหลผ่านท่อปิดซึ่งมีพื้นที่หน้าตัดที่ไม่สม่ำเสมอ (Tapered Tube) ซึ่งผ่านในท่อดังกล่าวจะบรรจุฟลูท (Float) ไว้ภายในดังรูปที่ 2.5 โดยหลักการทำงานคืออาศัยความสมดุลของแรงที่กระทำต่อฟลูทเมื่อมีของไหลไหลผ่านท่อ กล่าวคือ แรงโน้มถ่วงของโลก (Gravity, F_G) แรงลอยตัว (Buoyancy, F_B) (มีค่าน้อยมากเมื่อฟลูทอยู่ในอากาศ) และแรงต้านการไหล (Drag, F_D) ซึ่งสามารถแสดงดังสมการ

$$\sum F_y = 0 \quad (2.41)$$

$$F_D + F_B - F_G = 0 ; F_B \approx 0 \quad (2.42)$$

หรือ

$$C_d \frac{\rho_{\text{fluid}} V^2 A_f}{2} + \rho_{\text{fluid}} V_g - \rho_{\text{float}} V_g = 0 \quad (2.43)$$

ดังนั้น

$$Q = A_a(y) \sqrt{\frac{2(\rho_{\text{float}} - \rho_{\text{fluid}}) V_g}{\rho_{\text{fluid}} C_d A_f}} = K_R \cdot A_a(y) \quad (2.44)$$

จากสมการข้างต้นจะได้ สมการแสดงอัตราการไหลของของไหลเมื่อไหลผ่านท่อซึ่งมีความสัมพันธ์กับพื้นที่หน้าตัดของวงแหวนระหว่างท่อและฟลูท ซึ่งจะแปรผันตามระดับความสูงของฟลูทเมื่ออัตราการไหลเปลี่ยนไปโดยที่

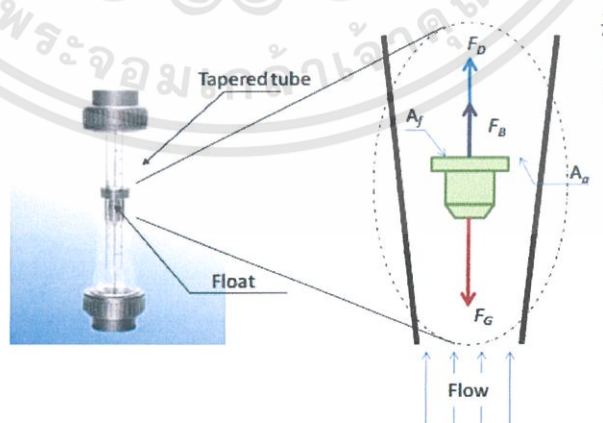
C_d คือ ค่า drag coefficient

A_f คือพื้นที่หน้าตัดของฟลูท

$A_a(y)$ คือพื้นที่หน้าตัดของวงแหวนระหว่างท่อและฟลูทซึ่งแปรผันตามระดับความสูง y

V คือปริมาตรของฟลูท

K_R คือค่าคงที่ของมิเตอร์



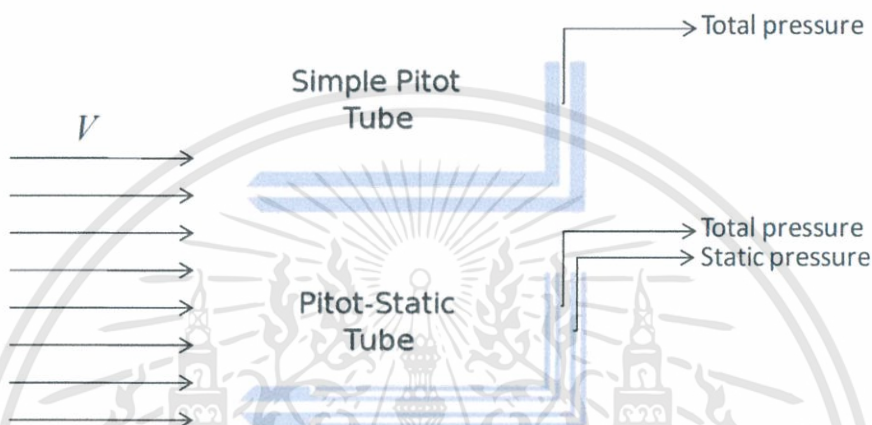
รูปที่ 2.5 หลักการทำงานของ Rota meter

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.3 หลักการทำงานของ Pitot tube

Pitot tube คือเครื่องมือวัดความเร็วของของไหลโดยอาศัยผลต่างของความดันที่เกิดขึ้นเมื่อมีของไหลไหลผ่านท่อดังกล่าว ท่อพิโทต์มีลักษณะดังรูปที่ 2.6 โดยความสัมพันธ์ของความเร็วกับความดันรวม (Total Pressure, p_t) และ ความดันสถิต (Static Pressure, p_s) มีความสัมพันธ์คือ

$$V = \sqrt{\frac{2(p_t - p_s)}{\rho_f}} \quad (2.45)$$



รูปที่ 2.6 Pitot tube

สำหรับการวัดอัตราการไหลของของไหลภายในท่อกลม โดยพิโทต์นั้นสามารถทำได้โดยการวัดค่าความเร็วที่ตำแหน่งกึ่งกลางท่อและสามารถคำนวณหาอัตราการไหลได้จากสมการ

$$Q = A \cdot 0.84 V_{cl} \quad (2.46)$$

โดยที่

A คือพื้นที่หน้าตัดของท่อ

V_{cl} คือความเร็วที่กึ่งกลางท่อ

2.6 สมการเบอร์นูลีและการหาพลังงานสูญเสียเนื่องจากความฝืดในระบบท่อ [17]

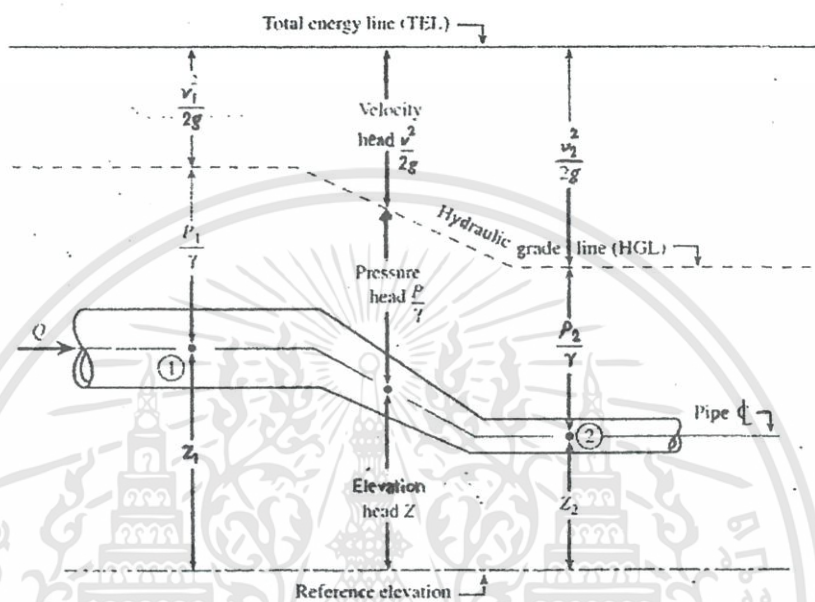
ในหัวข้อนี้เป็นการอธิบายสมการเบอร์นูลีและสมการในการหาพลังงานสูญเสียเนื่องจากความฝืดในระบบท่อ ซึ่งจะถูกนำไปใช้ในการออกแบบระบบท่ออากาศ ท่อแก๊ส ที่ใช้กับหัวเผา

2.6.1 สมการเบอร์นูลี

สมการเบอร์นูลีหรือสมการการอนุรักษ์พลังงาน โดยให้พลังงานเนื่องจากมวลของของไหลที่ไหลเข้าไปในจุดที่ 1 เท่ากับพลังงานอันเนื่องมาจากมวลของของไหลที่ไหลออกที่จุดที่สองเมื่อพิจารณาการไหลที่ไม่มีความเสียดทาน ไม่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ และไม่มีอุปกรณ์ป้อนงานหรืออุปกรณ์

ทำงานระหว่างจุด 1 และจุด 2 ดังรูปที่ 2.7 ซึ่งจะได้สมการในหน่วยของความสูงของของไหลหรือเรียกว่าเฮด ดังสมการที่ (2.47)

$$z_1 + \frac{v_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\gamma} = z_2 + \frac{v_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\gamma} \quad (2.47)$$



รูปที่ 2.7 แสดงการเปลี่ยนแปลงค่าเฮดในระบบท่อ [17]

เมื่อมีการติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันหรืออุปกรณ์ทำงานระหว่างจุด 1 และจุด 2 สมการของเบอร์นูลีจะถูกดัดแปลงเป็นดังสมการที่ (2.48)

$$z_1 + \frac{v_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\gamma} + H_p - H_L - H_T = z_2 + \frac{v_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\gamma} \quad (2.48)$$

โดยที่ z คือความสูง

v คือความเร็วของของไหล

g คือความเร่งโน้มถ่วง

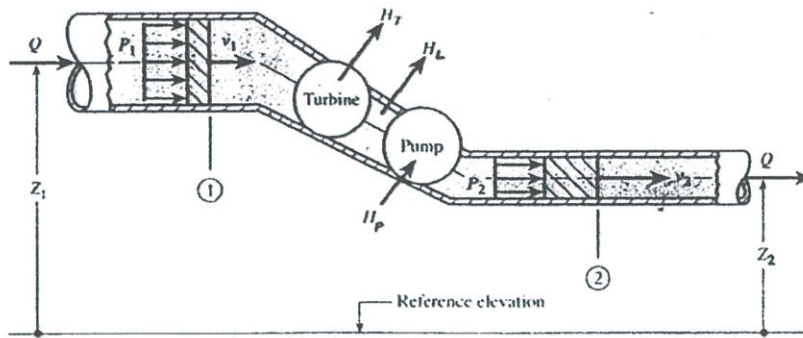
P คือความดัน

γ คือน้ำหนักจำเพาะ

H_p คือพลังงานหรือเฮดที่อุปกรณ์ทำงานทำให้แก่ระบบ เช่น ปั๊ม, คอมเพรสเซอร์ เป็นต้น

H_L คือพลังงานที่สูญเสียเนื่องจากความฝืดในระบบท่อหรือเฮดความฝืด

H_T คือพลังงานหรือเฮดที่ให้แก่อุปกรณ์ทำงานในระบบ เช่น กังหัน เป็นต้น



รูปที่ 2.8 การพิจารณาพลังงานเมื่อมีการติดตั้งปั๊ม กังหันน้ำ และพลังงานสูญเสียเนื่องจากความฝืด [17]

2.6.2 การหาพลังงานสูญเสียเนื่องจากความฝืดในระบบท่อ

พลังงานที่สูญเสียเนื่องจากความฝืดในระบบท่อสามารถแบ่งออกได้เป็น

1. การสูญเสียหลัก (Major loss) ที่เกิดจากความเสียดทานระหว่างผนังท่อกับของไหลที่ไหลภายในท่อ(ส่วนที่เป็นท่อตรง)
2. การสูญเสียรอง (Minor loss) ที่เกิดจากส่วนประกอบของท่อจำพวก ข้อต่อ ข้องอ ข้อลด ข้อขยาย และวาล์วชนิดต่างๆ ซึ่งการคำนวณพลังงานที่สูญเสียเนื่องจากความฝืดในระบบท่อเป็นดังนี้

2.6.2.1 การหาค่าสูญเสียหลัก (Major loss)

การหาค่าความสูญเสียหลักสามารถหาได้จากสมการที่ (2.49)

$$H_{Lf} = f \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g} \quad (2.49)$$

โดย H_{Lf} คือค่าความสูญเสียหลัก

L คือความยาวท่อ

v คือความเร็วของของไหล

g คือความเร่งโน้มถ่วง

D คือเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ

f คือค่าตัวประกอบความเสียดทาน

การหาค่าตัวประกอบความเสียดทานทำได้โดยการเปิด Moody diagram โดยพิจารณาค่า Remolds number (Re) และค่าความขรุขระสัมพัทธ์ ซึ่งมีสมการคือ

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu} \quad (2.50)$$

$$\text{ค่าความขรุขระสัมพัทธ์} = \frac{\epsilon}{D} \quad (2.51)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งค่าความขรุขระ ϵ สามารถหาได้จากตารางที่ 2.8
 ตารางที่ 2.8 แสดงค่าความขรุขระของผนังท่อ [18]

TYPE OF PIPE	ABSOLUTE ROUGHNESS	
	ϵ (in)	ϵ (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

2.6.2.2 การหาค่าความสูญเสียรอง (Minor loss)

การหาค่าความสูญเสียรองสามารถหาได้จากสมการที่ (2.53)

$$H_{Le} = K \frac{v^2}{2g} \quad (2.53)$$

โดยที่ H_{Le} คือค่าความสูญเสียหลัก

K คือสัมประสิทธิ์ความต้านทานการไหลซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดและขนาดของอุปกรณ์
 โดยสามารถหาได้จากตารางที่ 2.9

ตารางที่ 2.9 แสดงค่าประสิทธิ์ความต้านทานการไหลของวาล์วและข้อต่อต่างๆ [18]

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

ตารางที่ 2.9 แสดงค่าประสิทธิ์ความต้านทานการไหลของวาล์วและข้อต่อต่างๆ (ต่อ)

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

2.7 มลพิษจากการเผาไหม้ [16]

2.7.1 มลพิษ

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

- อนุภาคจุลสาร - เขม่าถ่าน ซี้เถ้าลอย อนุภาคแขวนลอยในก๊าซอื่นๆ
- ออกไซด์ของไนโตรเจน-NO_x
- สารประกอบไฮโดรคาร์บอน-PAH,aldehydes,benzene
- คาร์บอนมอนอกไซด์
- ออกไซด์ของกำมะถัน -SO_x
- ไดออกซินและฟูราน
- ก๊าซเรือนกระจก – CO₂, N₂O ,CH₄
- กลิ่นและเสียง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7.2 ผลกระทบของมลพิษ

ตัวอย่างผลกระทบที่มีต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อม เช่น

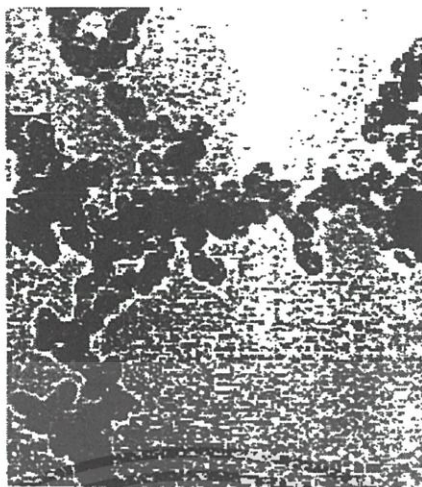
- ส่งผลกระทบต่อ การเปลี่ยนแปลงทางลบของสภาวะแวดล้อมทางอากาศ การเพิ่มขึ้นของปัญหาหมอกควัน ฝุ่น บังปริมาณรังสีแสงอาทิตย์ส่องมายังพื้นดิน ทิศนวิสัยลดลง และมีผลกระทบต่อสภาพบรรยากาศโลกโดยรวม
- ส่งผลต่อการเพิ่มอัตราการเจ็บป่วยและการเสียชีวิตของมนุษย์ที่ได้รับทั้งทางตรงและทางอ้อมในระยะสั้นและระยะยาว
- เป็นอันตรายต่อเหล่าพืชพันธุ์ไม้ พื้นที่ป่า ท้องทุ่ง แนวปะการัง และแหล่งนิเวศวิทยาอื่นๆ เนื่องจากมีสารพิษเป็นจำพวก SO_2 , PAN, C_2H_4 เป็นอันตรายต่อระบบสังเคราะห์แสงของพืช (Phytotoxicants)
- การตกสัมผัสหรือฝังตัวของมลพิษบนพื้นผิวสิ่งปลูกสร้าง อนุสรณ์สถาน วัสดุต่างๆ ทำให้เสื่อมคุณภาพและอาจสึกกร่อนได้ ดูไม่สวยงาม หากจะกำจัดหรือทำความสะอาด บำรุง ประปรง ก็ต้องเสียค่าใช้จ่ายและเวลา

อีกตัวอย่างที่เห็นได้ชัดเนื่องจากเกิดขึ้นในพื้นที่จากมลพิษของการเผาไหม้ คือ ผลจากการทำปฏิกิริยาระหว่างออกไซด์ของไนโตรเจนกับสารประกอบไฮโดรคาร์บอนถูก พิจารณาว่าเป็นสาเหตุสำคัญของการเกิดหมอกทางโฟโตเคมี (photochemical smog) โดยมีแสงแดดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเกิดโอโซน O_3 ที่เหลือเจือปนสารพิษอื่น ๆ กลายเป็นละอองลอยทุติยภูมิ (secondary aerosol) ออกมารวมกับอนุภาคจุลสาร และฝุ่นละอองในอากาศ หมอกทางโฟโตเคมี มีลักษณะเป็นกลุ่มหมอก ละอองลอยสี น้ำตาลหรือเหลืองคล้ำมักก่อตัวในบริเวณที่มีอากาศนิ่งเคลื่อนที่ เหนือเมืองใหญ่ๆ ที่มีการจราจรหนาแน่น เช่น เชียงใหม่ กรุงเทพฯ ลอนดอน ลอสแอนเจลิส หมอกทางโฟโตเคมีจะทำให้เยื่อเย้นตาระคายเคือง ทำลายความนุ่มของเนื้อเยื่อถุงลมในปอดของมนุษย์ ทำให้หายใจถี่ เหนื่อยล้า ปวดศีรษะ อาเจียน มีปัญหาเกี่ยวกับระบบหายใจเป็นโรคหืดหอบได้

2.7.3 การเกิดมลพิษจากการเผาไหม้

2.7.3.1 อนุภาคจุลสาร

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



รูปที่ 2.9 ตัวอย่างลักษณะของอนุภาคจุลสาร

ส่วนใหญ่จะมีขนาดอยู่ในช่วง 100 – 500 nm มีรูปร่างเกาะเป็นก้อนไม่ปกติ (irregular) ดังตัวอย่างในรูปที่ 2.9 ความเข้มข้นเชิงมวลและเชิงจำนวนจะมีค่าสูงมาก อนุภาคเขม่าจากการเผาไหม้คือ อนุภาคคาร์บอนที่มีส่วนของไฮโดรเจนด้วยอย่างน้อย 1% โดยมวล คิดเป็นสูตรเคมีอย่างง่าย คือ C_8H เขม่าจึงไม่ใช่ถ่านหรือคาร์บอนบริสุทธิ์ มักเกิดในบริเวณที่ส่วนผสมเชื้อเพลิงหนาเสมอ ซึ่งเป็นธรรมชาติของกลไกการเผาไหม้ที่มีส่วนผสมของเชื้อเพลิงและออกซิไดเซอร์จะไม่สม่ำเสมอทั้งหมดทั้งนี้เพราะขึ้นกับกลไกการผสมหรือความปั่นป่วน และสมบัติทางเคมีและสมบัติทางกายภาพ เขม่าเกิดได้ง่ายในเปลวไฟชนิดแพร่ผสมมากกว่าเปลวไฟชนิดผสมก่อน

2.7.3.2 คาร์บอนมอนอกไซด์

คาร์บอนมอนอกไซด์ที่เกิดจากการเผาไหม้ มีสาเหตุมาจากหลายประการ เช่น สภาวะการเผาไหม้แบบส่วนผสมหนาเกินไป การผสมคลุกเคล้ากันไม่ดีพอ ปริมาณอากาศไม่เพียงพอ นอกจากนี้ ยังมีสาเหตุมาจากสภาพการเผาไหม้ภายใต้อุณหภูมิต่ำก่อนข้างสูงจนทำให้เกิดการแตกสลายตัวของคาร์บอนไดออกไซด์ มาเป็นคาร์บอนมอนอกไซด์ได้



คาร์บอนมอนอกไซด์ที่เกิดขึ้นมีเวลาสั้นเกินไปในโซนการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ เนื่องจากต้องระบายก๊าซไอเสียออกทันที อุณหภูมิ และความดันลดลงอย่างทันทีทันใด ดังนั้น CO จะอยู่ในสภาวะสมดุลบางมากกว่าที่จะอยู่ในสภาวะสมดุลอย่างสมบูรณ์ ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงจาก CO เป็น CO_2 เกิดขึ้นไม่เต็มที่ เพราะถูกจำกัดด้วยการแย่งเข้าทำปฏิกิริยาของ OH กับ H



ปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์สามารถควบคุมได้จากอัตราส่วนสมมูล หรือปริมาณออกซิเจนในปฏิกิริยาการเผาไหม้ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์เป็นก๊าซที่ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น และเป็นพิษต่อร่างกายอย่างมาก จนอาจทำให้เสียชีวิตได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ในบริเวณที่มีความเข้มข้นของก๊าซสูง เมื่อร่างกายได้รับ CO ในระดับต่ำ จะทำให้ ร่างกาย สมอง และกล้ามเนื้อ ได้รับออกซิเจนไม่เพียงพอ ปฏิกิริยาตอบสนองของร่างกายจะช้าลงและขาดการตัดสินใจที่ดี เมื่อร่างกายรับก๊าซชนิดนี้เข้าไปในปริมาณมากๆ สามารถทำให้เสียชีวิตได้เหมือนอย่างเช่นที่เคยเป็นข่าวจากการติดเครื่องยนต์ของรถยนต์อยู่กับที่เป็นเวลานานๆ ในที่บริเวณอับการระบายอากาศไม่ดีพอ หรือโดยการรั่วของ CO เข้าไปในห้องโดยสารของรถยนต์

2.7.3.3 สารประกอบไฮโดรคาร์บอน

สารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่เกิดจากการเผาไหม้มีที่มาจากเชื้อเพลิงและสารหล่อลื่น โดยกระบวนการเหล่านี้คือ (i) การที่เชื้อเพลิงหลุดรอดจากการเผาไหม้ (ii) การแตกสลายตัวทางความร้อนของเชื้อเพลิง และ (iii) การทำปฏิกิริยากับก๊าซไอเสียบางส่วน สารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่ได้เกิดจากการเผาไหม้มีส่วนประกอบเป็นพวกกลุ่มพาราฟิน โอลีฟิน และอะโรมาติก ที่พบตามปกติ สาเหตุที่ทำให้เกิดสารประกอบไฮโดรคาร์บอนจากระบบการเผาไหม้ เนื่องจากหลายสาเหตุ เช่น คุณภาพการเผาไหม้ไม่ดี การจุดไม่ติด (misfire) การผสมกันไม่ดี ส่วนผสมบางหรือหนาเกินไป เกิดการดับของเปลวไฟในบริเวณที่มีการยืดของเปลวไฟ (flame stretching) ที่มากเกินไปตามระดับความเข้มข้นของความปั่นป่วนที่สูงมาก จนทำให้แนวเปลวไฟขาด ส่งผลให้เชื้อเพลิงบางส่วนหลุดลอดผ่านแนวเปลวไฟออกไปโดยไม่เกิดการติดไฟ เหตุอีกประการหนึ่ง คือ การบิบบดับของเปลวเพลิง (flame quenching) เกิดจากการลดลงของอุณหภูมิเปลวไฟจนดับไปเนื่องจาการการถ่ายเทความร้อนสูงเฉพาะบริเวณ โดยเฉพาะอย่างยิ่งช่องเล็กๆ ในห้องเผาไหม้ที่มีอุณหภูมิค่อนข้างต่ำมาก เมื่อเทียบกับอุณหภูมิเปลวไฟ เช่น ผนังห้องเผาไหม้ ช่องที่อยู่ระหว่างผิวด้านในกระบอกสูบโดยนับจากหัวลูกสูบ ลงมาถึงตำแหน่งแหวนลูกสูบ ช่องระหว่างแหวนลูกสูบ ช่องที่ร่องเกลียวสำหรับหัวเทียนบนฝา ลูกสูบเครื่องยนต์ ช่องระหว่างเขี้ยวหัวเทียน เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีสาเหตุเพิ่มเติม คือ การซึมซับไฮโดรคาร์บอน ในเศษกากเขม่าและคราบน้ำมันเครื่องในห้องเผาไหม้ที่ความดันสูง ทำให้ไม่ถูกเผาไหม้เมื่อมีการระบาย ไอเสีย ความดันลดลง ก็ระเหยและถูกระบายออกมาสู่บรรยากาศ

2.7.3.4 ก๊าซเรือนกระจก

บรรยากาศของโลกประกอบด้วย ไนโตรเจน ออกซิเจน และอาร์กอน เป็นองค์ประกอบหลักและมีไอน้ำ และคาร์บอนไดออกไซด์ อีกจำนวนเล็กน้อยในบรรยากาศ ไนโตรเจน ออกซิเจน และอาร์กอน ไม่ได้มีอิทธิพลต่ออุณหภูมิของโลก แต่ไอน้ำ และ คาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งเป็น ก๊าซเรือนกระจก (greenhouse gas) ชนิดหนึ่งแม้จะมีในปริมาณน้อย แต่มีความจำเป็น ต่อการรักษาอุณหภูมิในบรรยากาศของโลกให้คงที่ ก๊าซเรือนกระจกคือก๊าซที่สามารถดูดซับคลื่นรังสีอินฟราเรดหรือคลื่นรังสีความร้อนที่มาจากรังสีแสงอาทิตย์ได้ดี ก๊าซเหล่านี้ดูดซับรังสีความร้อนไว้ในเวลากลางวัน แล้วค่อยๆ แผ่รังสีความร้อนออกมาในเวลากลางคืน ทำให้อุณหภูมิ ในบรรยากาศโลกไม่เปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลัน ดังเช่นในดาวเคราะห์ดวงอื่นๆ ส่งผลให้สิ่งมีชีวิตในโลกสามารถดำรงอยู่ได้ อย่างไรก็ดี การเพิ่มขึ้นของก๊าซเรือนกระจกจะทำให้ชั้นบรรยากาศมีความสามารถในการกักเก็บรังสีความร้อนได้มากขึ้น ผลที่ตามมาคือ อุณหภูมิเฉลี่ยของชั้นบรรยากาศก็เพิ่มขึ้นด้วย ก๊าซเรือนกระจกมีทั้งที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ และเกิดจากกิจกรรมของมนุษย์ ซึ่งมีจำนวนหลายชนิด ก๊าซเรือนกระจกที่สำคัญ คือ ไอน้ำ คาร์บอนไดออกไซด์ โอโซน มีเทน ไนตรัสออกไซด์ และคลอโรฟลูออโรคาร์บอน (CFC) เป็นต้น

ตารางที่ 2.10 ก๊าซเรือนกระจก

ก๊าซเรือนกระจก	ปริมาณก๊าซในบรรยากาศ (ส่วนต่อล้านส่วน)
ไอน้ำ	40,000
คาร์บอนไดออกไซด์	360
มีเทน	1.7
ไนตรัสออกไซด์	0.3
โอโซน	0.01

แต่ก๊าซเรือนกระจกที่ถูกควบคุมโดยพิธีสารเกียวโต มีเพียง 6 ชนิด ซึ่งเกิดจากกิจกรรมของมนุษย์เท่านั้น ได้แก่ คาร์บอนไดออกไซด์ มีเทน ไนตรัสออกไซด์ ไฮโดรฟลูออโรคาร์บอน (HFC) เพอร์ฟลูออโรคาร์บอน (PFC) และซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์ (SF_6) ทั้งนี้ CFC ไม่ถูกกำหนดในพิธีสารเกียวโต เนื่องจากเป็นสารที่ถูกจำกัดการใช้ในข้อตกลงอื่นแล้ว ก๊าซเรือนกระจกแต่ละชนิด มีศักยภาพการทำให้เกิดภาวะโลกร้อน (global warming potential, GWP) ที่แตกต่างกัน ศักยภาพดังกล่าวนี้ ขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพในการแผ่รังสี ความร้อนของโมเลกุล และขึ้นอยู่กับอายุของก๊าซนั้นๆ ในบรรยากาศ และคิดเทียบกับการแผ่รังสีความร้อนของคาร์บอนไดออกไซด์ ในช่วงระยะเวลาหนึ่ง โดยค่า GWP ของก๊าซเรือนกระจกต่างๆ เป็นดังนี้

ตารางที่ 2.11 ศักยภาพการทำให้เกิดภาวะดลกร้อนของก๊าซเรือนกระจก

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



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การออกแบบและการคำนวณ

3.1 สมการการเผาไหม้

เชื้อเพลิงที่ใช้กับหัวเผาคือ แก๊ส LPG และฝุ่นชีวมวล โดยแก๊ส LPG จะใช้ในตอนเริ่มต้นของการจุดเตาเผาจากนั้นฝุ่นชีวมวลถึงค่อยถูกนำมาใช้ในการเผาไหม้ในเตาต่อไป ซึ่งสมการการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงทั้งสองชนิดเป็นดังนี้

3.1.1 สมการการเผาไหม้สำหรับเชื้อเพลิงแก๊ส LPG

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



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

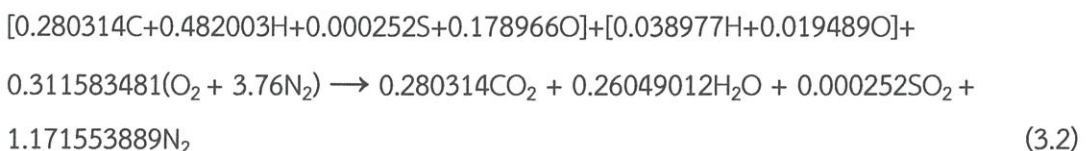
$$\text{อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง} = \frac{\text{ปริมาณอากาศ}}{\text{ปริมาณเชื้อเพลิง}} = \frac{748.176 \text{ kg}}{48.20 \text{ kg}} = 15.52 : 1$$

3.1.2 สมการการเผาไหม้สำหรับเชื้อเพลิงฝุ่นชีวมวล

ส่วนประกอบของเชื้อเพลิงฝุ่นชีวมวลอัดที่ใช้ในการศึกษา (ผลการทดสอบและวิเคราะห์จากสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย) โดยวิธีการวิเคราะห์การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงฝุ่นชีวมวลอาศัยข้อมูลจากตารางที่ 3.1 โดยคิดที่สภาพนำส่งดังนี้

3.1.2.1 ณ สภาพนำส่ง (ความชื้น 4.57 %) ที่ 100% stoichiometry

เมื่อวิเคราะห์เชื้อเพลิง ณ สภาพนำส่งตามที่แสดงไว้ดังตาราง 3.2 จะสามารถเขียนสมการเผาไหม้ได้ดังนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 แสดงส่วนประกอบของเชื้อเพลิงฟืนชีวมวลอัดที่ใช้ในการศึกษา [19]

คุณสมบัติ	สภาพนำส่ง	สภาพนำหนักแห้ง
ความชื้น,%	4.57	-
สารระเหย,%	66.91	70.11
ถ่านคงตัว,%	20.22	21.19
เถ้า,%	8.30	8.70
ไฮโดรเจน,%	6.58	6.36
คาร์บอน,%	45.92	48.12
ไนโตรเจน,%	0.00	0.00
ออกซิเจน,%	39.09	36.71
ซัลเฟอร์,%	0.11	0.11
ค่าความร้อนสูง	4,120 kcal/kg	4,320 kcal/kg
ค่าความร้อนต่ำ	3,790 kcal/kg	3,970 kcal/kg

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 แสดงการวิเคราะห์เชื้อเพลิง ณ สภาพนำส่ง

คุณสมบัติ	%m/m (dry)	Mass/per1kgfuel (as received)	Kmole/1kg fule	Kmol/kmole Reactive species and water content
คาร์บอน(C)	45.92	0.4382	0.0365	0.2803
ไฮโดรเจน(H)	6.58	0.0627	0.0627	0,4820
ไนโตรเจน(N)	0	0	0	0
ออกซิเจน(O)	39.09	0.3730	0.0233	0.1789
ซัลเฟอร์(S)	0.11	0.0010	3.280×10^{-5}	0.0002
เถ้า(ash)	8.30	0.0792	-	-
ไฮโดรเจนใน H ₂ O		0.0050	0.0050	0.0389
ออกซิเจนใน H ₂ O		0.0410	0.0025	0.0194
รวม			0.1300	1

จากสมการการเผาไหม้จะได้ว่า

$$\text{ปริมาณอากาศที่ต้องใช้} = 0.311583481 \times [32 + (3.76 \times 28)] = 42.774 \text{ kg}_{\text{air}}$$

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณเชื้อเพลิง (ไม่รวมเถ้า)} &= (0.280344 \times 12) + (0.482003 \times 1) + (0.000252 \times 32) + \\ &+ (0.178966 \times 16) + (0.038977 \times 1) + (0.019489 \times 16) = 7.068 \text{ kg}_{\text{fuel}} \end{aligned}$$

$$\text{ปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้} = 7.068452 / (1 - 0.0792069) = 7.676 \text{ kg}$$

$$\text{AF ratio}_{\text{ @ stoi excess air}} = 5.572 \text{ kg}_{\text{air}}/\text{kg}_{\text{fuel}}$$

ปริมาณไอเสียเป็นดังตารางที่ 3.3

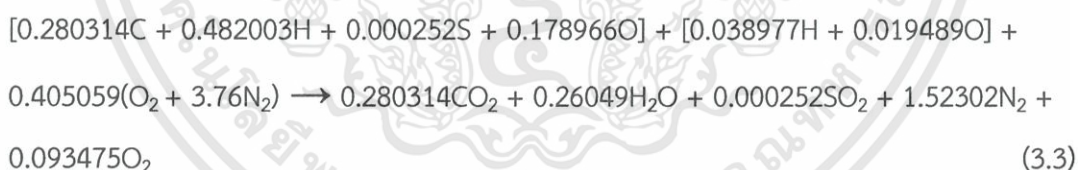
ตารางที่ 3.3 แสดงปริมาณไอเสียที่ 100% Stoichiometry

สารประกอบ	สัดส่วนโดยโมล	สัดส่วนโดยมวล
CO ₂	0.129	0.197
H ₂ O	0.120	0.074
SO ₂	0.000116	0.000257
N ₂	0.705	0.680
O ₂	0.043	0.048
ผลรวมของเลขคูลหน้าสารประกอบ 2.158		
มวลโมลเฉลี่ยของไอเสีย = 29.041 kg _{ไอเสีย} /kmol _{ไอเสีย}		

3.1.2.2 ณ สภาพนำส่ง (ความชื้น 4.57 %) ที่ 130% stoichiometry

เมื่อวิเคราะห์เชื้อเพลิง ณ สภาพนำส่งตามที่แสดงไว้ดังตาราง 3.2 จะสามารถเขียน

สมการเผาไหม้ได้ดังนี้



จากสมการการเผาไหม้จะได้ว่า

$$\text{ปริมาณอากาศที่ต้องใช้} = 0.405059 \times (32 + 3.76 \times 28) = 55.606 \text{ kg}_{\text{air}}$$

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณเชื้อเพลิง (ไม่รวมเถ้า)} &= (0.280314 \times 12) + 0.482003 + (0.000252 \times 32) + (0.178966 \\ &\times 16) + 0.038977 + (0.019489 \times 16) = 7.068 \text{ kg}_{\text{fuel}} \end{aligned}$$

$$\text{ปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้} = 7.068452 / (1 - 0.0792069) = 7.676 \text{ kg}$$

$$\text{AF ratio @ 30\% excess air} = 7.244 \text{ kg}_{\text{air}} / \text{kg}_{\text{fuel}}$$

ปริมาณไอเสียเป็นดังตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 แสดงปริมาณไอเสียที่ 130% Stoichiometry

สารประกอบ	สัดส่วนโดยโมล	สัดส่วนโดยมวล
CO ₂	0.163	0.247
H ₂ O	0.152	0.094
SO ₂	0.000147	0.000324
N ₂	0.684	0.658
ผลรวมของเลขคูลหน้าสารประกอบ 1.713		
มวลโมเลกุลของไอเสีย = 29.105 kg _{ไอเสีย} /kmol _{ไอเสีย}		

3.2 การคำนวณและการออกแบบหัวเผา

3.2.1 สมการที่ใช้ในการคำนวณและออกแบบหัวเผา

ตารางที่ 3.5 แสดงตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณการออกแบบหัวเผา

สัญลักษณ์	ความหมาย
\dot{W}	Thermal Throughput
\dot{M}_{fuel}	Fuel mass flow rate
\dot{M}_a	Air flow rate
\dot{V}_a	Air volume flow rate
ρ_a	Air density
AT	Ambient Temperature
\dot{V}	Air volume flow
%air	Air flow (%)
A	Air port

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.5 แสดงตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณการออกแบบหัวเผา (ต่อ)

สัญลักษณ์	ความหมาย
OD	Air nominal Outer Diameter
t	Pipe thickness
OD _{Gas pipe}	Gas pipe OD _{Gas pipe}
v	Air axial velocity
T _{in}	Air inlet temperature
P	Air axial momentum
L _{air}	Air angular momentum
θ _v	Air angular velocity
∅ _{swirl vane}	Swirl vane angle(°)
γ _{flow slip velocity}	Angular flow slip velocity

หมายเหตุ ตัวห้อย 1 หมายถึง Primary air

ตัวห้อย 2 หมายถึง Secondary air

ตัวห้อย 3 หมายถึง Tertiary air

สมการที่ใช้ในการคำนวณการออกแบบหัวเผามีดังนี้

$$\dot{M}_{\text{fuel}} = \frac{\dot{W}}{\text{Fuel LHV}} \quad (3.4)$$

$$\dot{M}_a = (1 + \text{excess air}) \times \text{AF} \times \dot{M}_a \quad (3.5)$$

$$\dot{V}_a = \frac{\dot{M}_a}{\rho_{a@25^\circ\text{C}} \times \frac{T_{@25^\circ\text{C}}(\text{K})}{AT(\text{K})}} \quad (3.6)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณาที่ Primary air

$$\dot{V}_1 = \% \text{ air}_1 \times \dot{V}_a \quad (3.7)$$

$$A_1 = \pi \times \left[\left(\frac{OD_1}{2} - t_1 \right)^2 - \left(\frac{OD_{\text{Gas pipe}}}{2} \right)^2 \right] \quad (3.8)$$

$$v_1 = \frac{\dot{V}_1 \times \left(\frac{T_{in1} (K)}{AT (K)} \right)}{A_1} \quad (3.9)$$

$$P_1 = \rho_{a@25^\circ C} \times \left(\frac{T_{@25^\circ C} (K)}{T_{in1} (K)} \right) \times v_1^2 \times A_1 \quad (3.10)$$

พิจารณาที่ Secondary air

$$\dot{V}_2 = \% \text{ air}_2 \times \dot{V}_a \quad (3.11)$$

$$A_2 = \pi \times \left[\left(\frac{OD_2}{2} - t_2 \right)^2 - \left(\frac{ID_{\text{air2}}}{2} \right)^2 \right] \quad (3.12)$$

$$v_2 = \frac{\dot{V}_2 \times \left(\frac{T_{in2} (K)}{AT (K)} \right)}{A_2} \quad (3.13)$$

$$P_2 = \rho_{a@25^\circ C} \times \left(\frac{T_{@25^\circ C} (K)}{T_{in2} (K)} \right) \times v_2^2 \times A_2 \quad (3.14)$$

$$L_2 = P_2 \times \text{air swirl number}_2 \quad (3.15)$$

$$\theta_{v_2} = \frac{\theta_{p_2} \times 100}{\dot{M}_a \times \% \text{ air}_2} \quad (3.16)$$

$$\phi_{\text{swirl vane2}} = \left[\tan^{-1} \left(\frac{\theta_{v_2}}{v_2} \right) \right] + v_{\text{flow slip velocity2}} \quad (3.17)$$

พิจารณาที่ Tertiary air

$$\dot{V}_3 = \% \text{ air}_3 \times \dot{V}_a \quad (3.18)$$

$$A_3 = \pi \times \left[\left(\frac{OD_3}{2} - t_3 \right)^2 - \left(\frac{ID_{\text{air3}}}{2} \right)^2 \right] \quad (3.19)$$

$$v_3 = \frac{\dot{V}_3 \times \left(\frac{T_{in3} (K)}{AT (K)} \right)}{A_3} \quad (3.20)$$

$$P_3 = v_3 \times \dot{M}_a \times \% \text{ air}_3 \quad (3.21)$$

$$L_3 = P_3 \times \text{air swirl number}_3 \quad (3.22)$$

$$\theta_{v_3} = \frac{\theta_{p_3} \times 100}{\dot{M}_a \times \% \text{ air}_3} \quad (3.23)$$

$$\phi_{\text{swirl vane3}} = \left[\tan^{-1} \left(\frac{\theta_{v_3}}{v_3} \right) \right] + v_{\text{flow slip velocity3}} \quad (3.24)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2 ผลการคำนวณการออกแบบหัวเผา

ในหัวข้อนี้เป็นการแสดงผลการคำนวณการออกแบบหัวเผาขนาด 1 MW ภายใต้สภาวะอากาศเกิน 30% โดยใช้สมการจากหัวข้อที่ 3.2 ในการคำนวณ ซึ่งให้ผลที่ได้เป็นดังตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.6 ผลการคำนวณการออกแบบหัวเผา

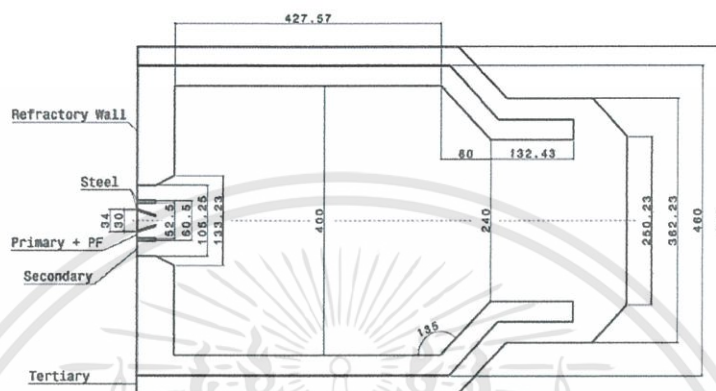
Fuel mass flow rate	0.06 kg/sec
Air flow rate	0.46 kg/sec
Air volume flow	0.40 m ³ /sec
พิจารณาที่ Primary Air	
Pri. air volume flow	0.04 m ³ /sec
Pri. air port	9.40x10 ⁻⁴ m ²
Pri. Air axial Velocity	42.63m/sec
Pri. Air axial momentum	1.94 kg-m/s ²
พิจารณาที่ Secondary Air	
Sec. air volume flow	0.267 m ³ /sec
Sec. air port	0.011m ²
Sec. Air axial Velocity	23.77 m/sec
Sec. air axial momentum	7.04 kg-m/s ²
Sec. air Angular momentum	7.26 kg-m/s ²
Sec. air Angular velocity	24.48 m/sec
Swirl vane angle	50.8°
พิจารณาที่ Tertiary Air	
Ter. air volume flow	0.10m ³ /sec
Ter. air port	0.025m ²
Ter. air axial Velocity	3.92m/sec
Ter. air axial momentum	0.45 kg-m/s ²
Ter. air Angular momentum	0.22 kg-m/s ²
Ter. air Angular velocity	1.96m/sec
Swirl vane angle	31.5°

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

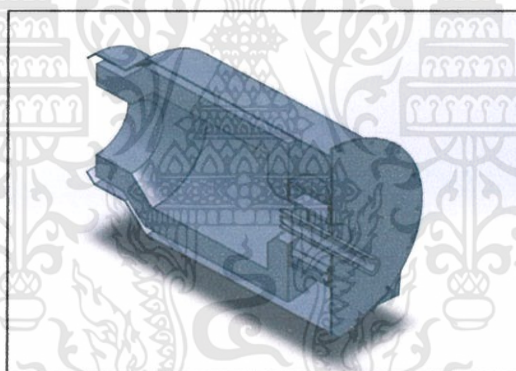
3.2.3 แบบของหัวเผาที่ใช้ศึกษา

ในหัวข้อนี้เป็นการแสดงรูปของหัวเผาที่นำมาใช้ศึกษา โดยแบบของหัวเผาดังกล่าวเป็นแบบที่ถูกออกแบบโดยนักศึกษาปริญญาโทที่ทำการวิจัยร่วมกันซึ่งมีลักษณะดังนี้

3.2.3.1 หัวเผาที่มีมุมทางออกของผนังห้องเผาไหม้เป็น 135°



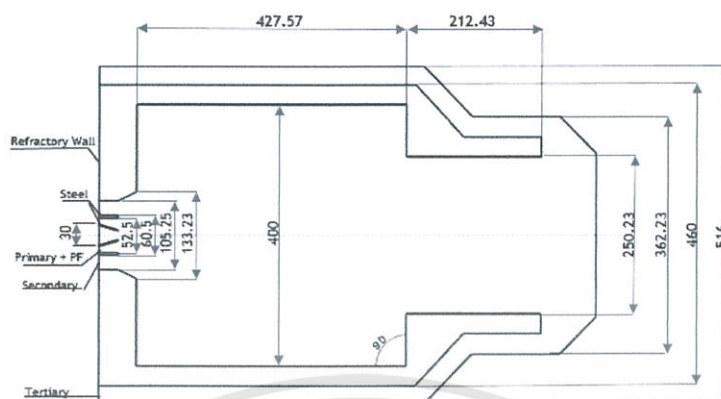
รูปที่ 3.1 ภาพตัดสองมิติของหัวเผาขนาด 1 MW ที่มีมุม 135° (unit in mm)



รูปที่ 3.2 ภาพตัดสามมิติของหัวเผาขนาด 1 MW ที่มีมุม 135°

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.3.2 หัวเผาที่มีมุมทางออกของผนังห้องเผาใหม่เป็น 90°



รูปที่ 3.3 ภาพตัดสองมิติของหัวเผาขนาด 1 MW ที่มีมุม 90° (unit in mm)



รูปที่ 3.4 ภาพตัดสามมิติของหัวเผาขนาด 1 MW ที่มีมุม 90°

3.2.4 การหากริตอิสระของหัวเผา

ในหัวข้อนี้จะเป็นการหากริตอิสระของหัวเผาที่ถูกออกแบบไว้โดยนักศึกษาปริญญาโทที่ทำการวิจัยร่วมกัน โดยใช้เงื่อนไขการของการจำลอง [1] ที่ถูกพิสูจน์แล้วโดย นาย ธนภัทร์ ภัคติวรรค์

3.2.4.1 เงื่อนไขของการจำลอง

เงื่อนไขที่ใช้ในการจำลองประกอบด้วย

1. แบบจำลอง Species transport สำหรับการเผาไหม้
2. แบบจำลอง Random walk models และ Turbulent standard k- ϵ models สำหรับการแพร่กระจายของอนุภาคที่มีความปั่นป่วน
3. เงื่อนไขในการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผง ดังตารางที่ 3.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.7 ข้อมูลที่ใช้ในการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล

Primary pipe : 10 %	Air flow rate (kg/s)	6.613×10^{-2}
	Swirl number	0.0
	Temperature (K)	308
Fuels flow rate		5.807×10^{-2}
Secondary pipe : 65 %	Air flow rate (kg/s)	2.645×10^{-1}
	Swirl number	1.03
	Temperature (K)	308
Tertiary pipe : 25 %	Air flow rate (kg/s)	1.102×10^{-1}
	Swirl number	1.03
	Temperature (K)	308
Excess air (%)		30

3.2.4.2 จำนวนกริดที่ใช้ในการหาคกริตอิสระ

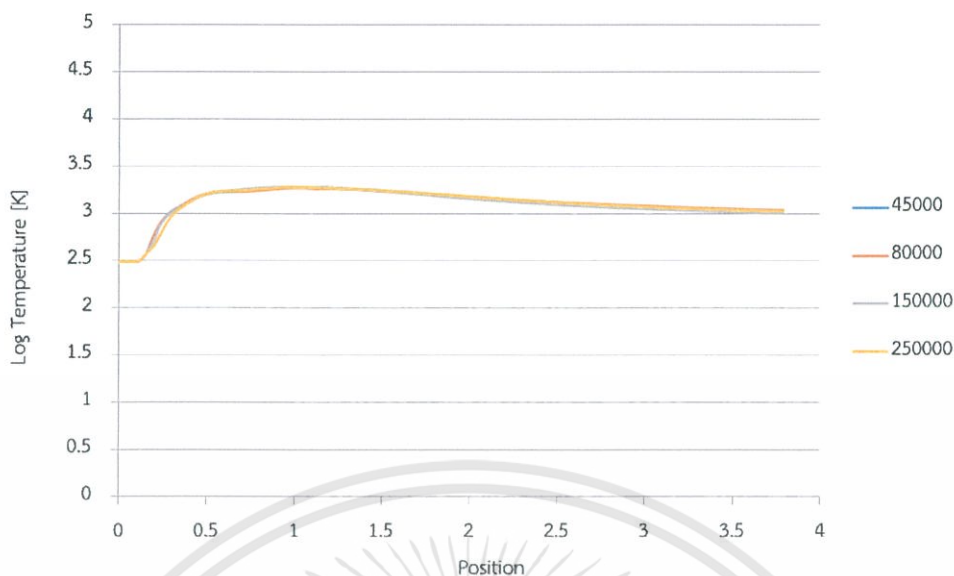
ในการหาคกริตอิสระนั้นเริ่มจากการเขียนรูปของหัวเผาและเขียนกริดโดยใช้โปรแกรม Gambit ซึ่งจำนวนกริดที่ใช้ในการหาคกริตอิสระแสดงดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 จำนวนกริดที่ใช้ในการหาคกริตอิสระ

3.2.4.3 ผลการวิเคราะห์จำนวนกริดที่เหมาะสม

ในการจำลองหัวเผานั้นจะใช้เงื่อนไขการจำลองและจำนวนกริด ดังหัวข้อ 3.2.4.1 และ 3.2.4.2 โดยจะจำลองผ่านโปรแกรม Fluent ซึ่งผลของอุณหภูมิและความหนาแน่นของสารระเหยที่จำนวนกริดต่างๆ แสดงดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 ผลของล๊อคของอุณหภูมิที่จำนวนกริดต่างๆ

จากผลที่ได้พบว่าแนวโน้มของล๊อคของอุณหภูมิที่จำนวนกริดต่างๆมีแนวโน้มที่คล้ายคลึงกัน จึงสรุปได้ว่าที่ 45,000 กริดเป็นกริดอิสระนอกจากนี้ที่จำนวนกริดดังกล่าวยังใช้เวลา น้อยที่สุดในการหาผลเฉลย

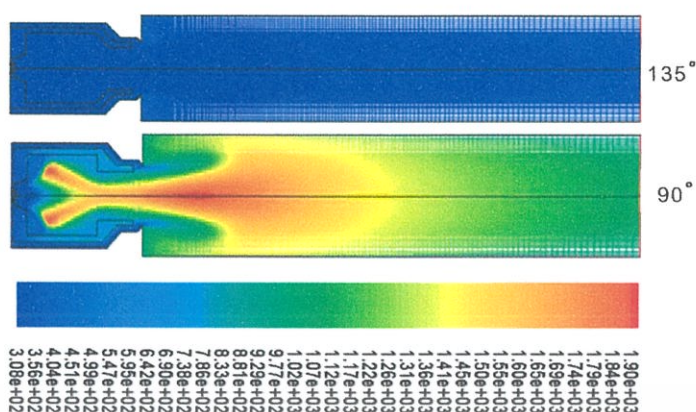
3.2.5 การศึกษาการวิเคราะห์ผลของการจำลองหัวเผา

ในหัวข้อนี้เป็นการศึกษาการวิเคราะห์ผลของการจำลองหัวเผาโดยใช้เงื่อนไขการจำลอง [1] ดังหัวข้อ 3.2.4.1 และ รูปของหัวเผาที่จำนวนกริด 45000 ดังในหัวข้อ 3.2.4.3 ซึ่งการวิเคราะห์ผล การจำลองที่ศึกษาแบ่งเป็น

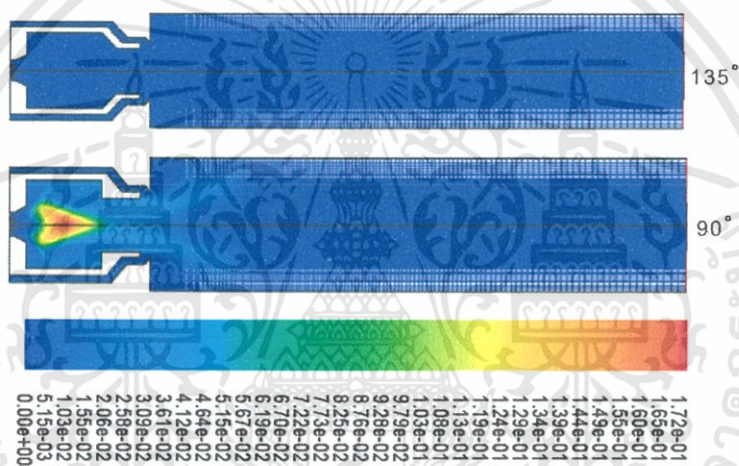
1. การวิเคราะห์ผลของการจำลองเพื่อหามุมทางออกของผนังห้องเผาไหม้ที่เหมาะสม
2. การวิเคราะห์ผลของการจำลองเพื่อหาช่วงการทำงานที่เหมาะสมของหัวเผาที่ผ่านการวิเคราะห์หามุมที่เหมาะสมมาแล้ว

3.2.5.1 การวิเคราะห์ผลของการจำลองเพื่อหามุมทางออกของผนังห้องเผาไหม้ที่เหมาะสม [1]

ผลของการจำลองหัวเผาที่มีมุมทางออกของผนังห้องเผาไหม้เป็น 135° และ 90° แสดงดังรูปที่ 3.7 และ 3.8

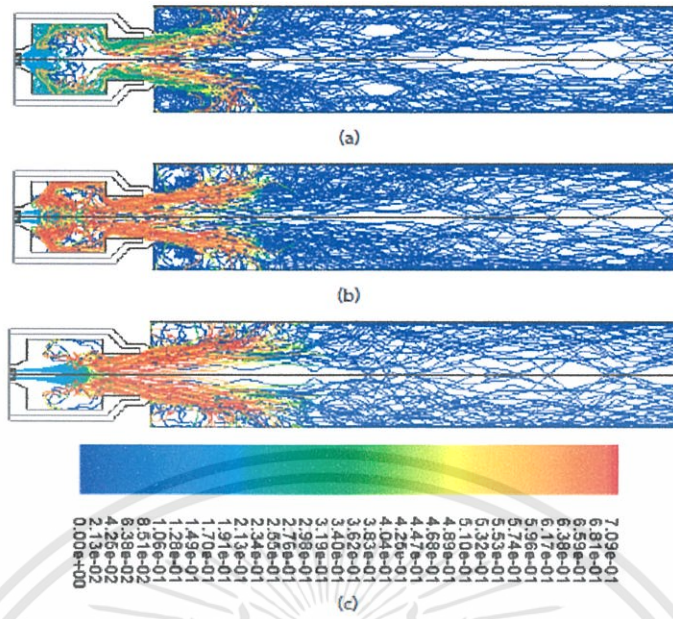


รูปที่ 3.7 การกระจายตัวของอุณหภูมิตัวของหัวเผาที่มีมุมทางออกของผนังห้องเผาไหม้เป็น 135° และ 90°

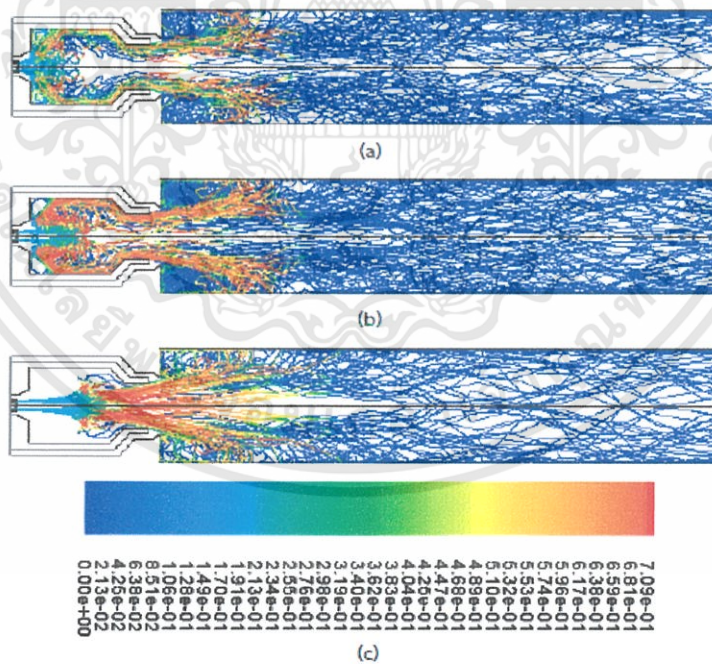


รูปที่ 3.8 การกระจายตัวของความเข้มข้นของสารระเหยของหัวเผาที่มีมุมทางออกของผนังห้องเผาไหม้เป็น 135° และ 90°

จากผลของการจำลองหัวเผาพบว่าที่มุมผนังทางออกของห้องเผาไหม้เป็น 90° มีอุณหภูมิสูงสุดสูงกว่ากรณีที่มีมุมผนังทางออกของห้องเผาไหม้เป็น 135° เนื่องจาก เส้นทางเดินของอนุภาคมีการฟุ้งกระจายที่มากกว่า และ Residence Time ภายใน Pre-chamber ที่มากกว่าดังรูปที่ 3.9 และ 3.10



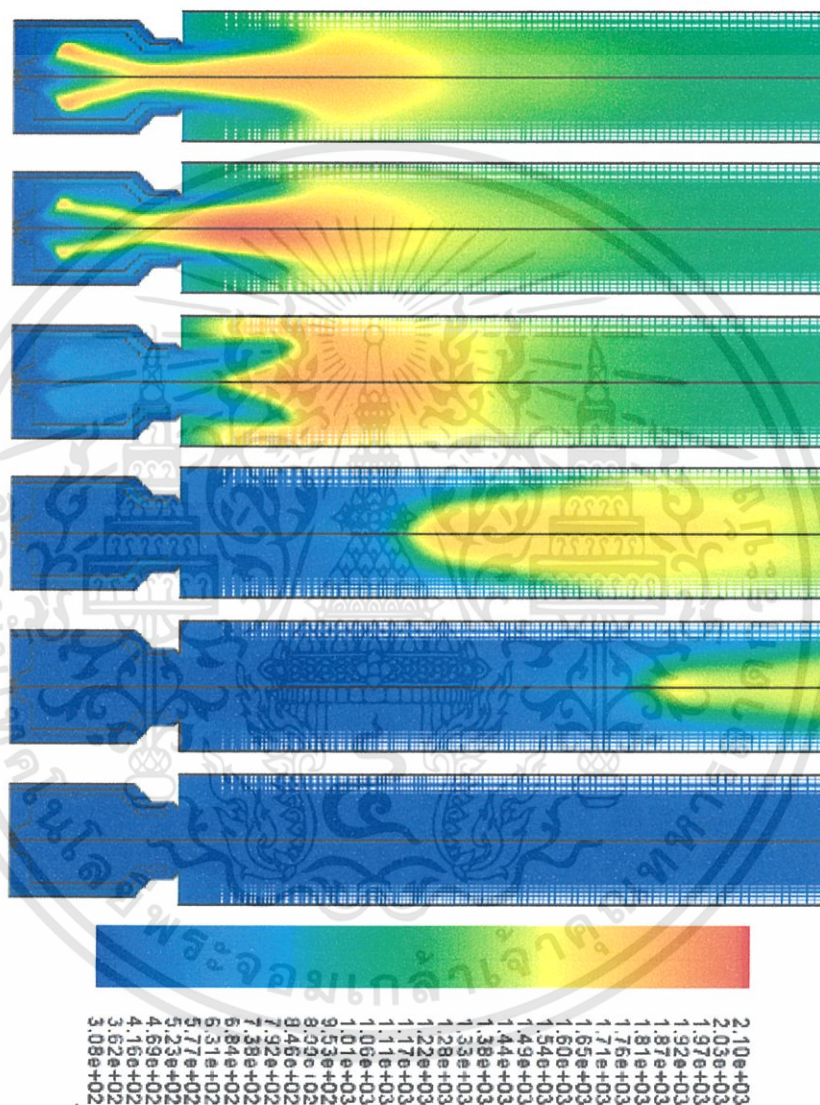
รูปที่ 3.9 เส้นทางการเดินของอนุภาคที่แสดงถึงสัดส่วนเชิงมวล
ของอนุภาคขาร์ระหว่างกาเหาะใหม่, (Pre-Chamber 90°)
(a) อนุภาคขนาดเล็ก 10-30, (b) กลาง 40-70, (c) ใหญ่ 80-100 ไมครอน



รูปที่ 3.10 เส้นทางการเดินของอนุภาคที่แสดงถึงสัดส่วนเชิงมวล
ของอนุภาคขาร์ระหว่างกาเหาะใหม่, (Pre-Chamber 135°)
(a) อนุภาคขนาดเล็ก 10-30, (b) กลาง 40-70, (c) ใหญ่ 80-100 ไมครอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

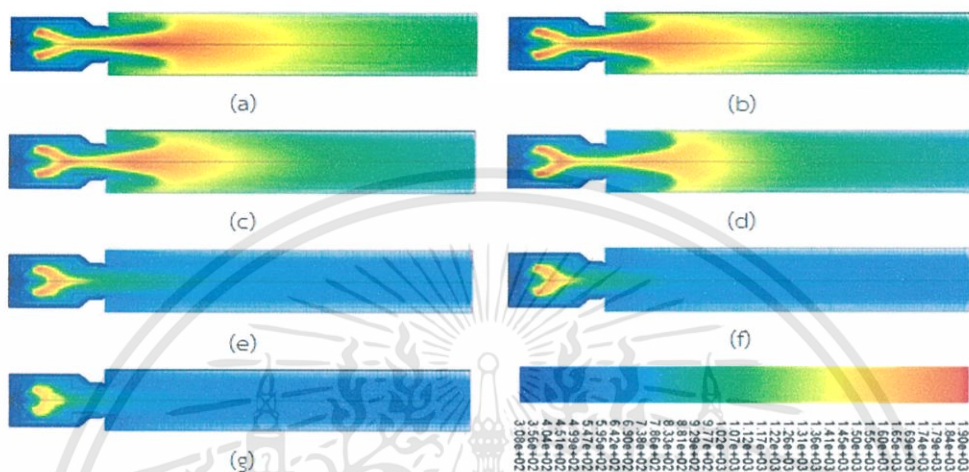
ส่งผลให้อนุภาคสามารถเกิดปฏิกิริยาได้อย่างต่อเนื่อง เป็นสาเหตุให้มีการกระจายตัวของอนุภาคที่มากกว่า นอกจากนี้ยังพบว่าเกิดปรากฏการณ์เป่าดับ (Blow-off) ในกรณีที่มีมุมผนังทางออกของห้องเผาไหม้เป็น 135° และความเข้มข้นของสารระเหยใน pre-chamber ที่มีมุมผนังทางออกของห้องเผาไหม้เป็น 135° น้อยกว่ากรณีที่มีมุมผนังทางออกของห้องเผาไหม้เป็น 90° ดังรูปที่ 3.11 จึงสามารถสรุปได้ว่ามุมทางออกของผนังห้องเผาไหม้ที่เหมาะสม คือ 90°



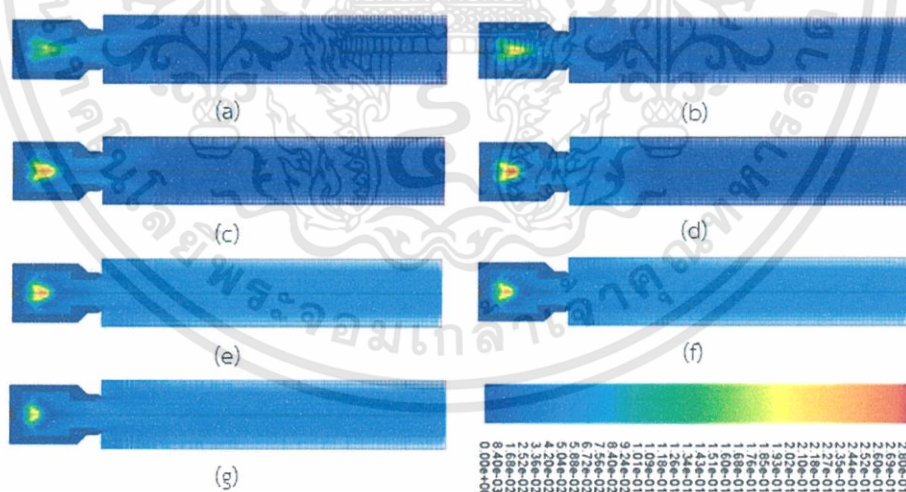
รูปที่ 3.11 ลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคที่เกิดจากการเป่าดับ (k), (Pre-chamber 135°)

3.2.5.2 การวิเคราะห์ผลของการจำลองเพื่อหาช่วงการทำงานที่เหมาะสมของหัวเผาที่มีมุมทางออกของผนังห้องเผาไหม้เป็น 90°

ผลการจำลองการทำงานของหัวเผาในช่วงการทำงานที่ (a) 1 MW, (b) 750 kW, (c) 500 kW, (d) 450 kW, (e) 400 kW, (f) 350 kW และ (g) 250 kW แสดงดังรูปที่ 3.12 และรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.12 การกระจายตัวของอุณหภูมิในช่วงการทำงานที่ (a) 1 MW, (b) 750 kW, (c) 500 kW, (d) 450 kW, (e) 400 kW, (f) 350 kW และ (g) 250 kW



รูปที่ 3.13 การกระจายตัวของความเข้มข้นของสารระเหยในช่วงการทำงานที่ (a) 1 MW, (b) 750 kW, (c) 500 kW, (d) 450 kW, (e) 400 kW, (f) 350 kW และ (g) 250 kW จากผลการจำลองการทำงานของหัวเผาพบว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. ช่วงการทำงานที่เหมาะสมคือ ช่วง 500 kW ถึง 1 MW เพราะมีการกระจายตัวของอุณหภูมิที่ดี, ความเข้มข้นของสารระเหยใน combustion chamber ต่ำ และยังคงเสถียรภาพของการเผาไหม้ไว้ได้

2. ที่ช่วงการทำงานต่ำกว่า 450 KW นั้นการเผาไหม้จะไม่สมบูรณ์ซึ่งพิจารณาได้จากอุณหภูมิที่ลดต่ำลงและปริมาณความเข้มข้นของสารระเหยใน combustion chamber ที่สูงขึ้นซึ่งหมายถึงปริมาณสารระเหยที่หลงเหลืออยู่มีปริมาณสูงขึ้น

3.2.6 แบบของหัวเผาและหลักการทำงานของส่วนต่างๆ

ในหัวข้อนี้เป็นการแสดงแบบของหัวเผาและหลักการทำงานของส่วนต่างๆ โดยการอ้างอิงจากการวิเคราะห์ผลของการจำลองดังที่กล่าวมาข้างต้นซึ่งแบบของหัวเผาเป็นรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 แสดงชิ้นส่วนต่างๆของหัวเผา

จากรูปที่ 3.14 หัวเผาประกอบไปด้วยชิ้นส่วนต่างๆ 9 ชิ้นด้วยกันโดยหน้าที่ของส่วนต่างเป็นดังนี้

1. Burner Nozzle Jacket เป็นตัวเชื่อมต่อระหว่างหัวเผา (Burner) กับเตาเผาซึ่งตรงส่วนนี้จะมีครีบบนที่คอยช่วยกำหนดทิศทางของอากาศส่วนที่สามติดอยู่

2. Refractory Nozzle Sheet เป็นแบบสำหรับการหล่อปูนทนไฟซึ่งตรงนี้จะเป็นส่วนที่คอยกำหนดองศาของมุมทางออกของหัวเผา

3. Burner Main Jacket เป็นทางเข้าของอากาศส่วนที่สามซึ่งภายในจะมีครีบบนคอยควบคุมทิศทางการไหลติดอยู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. Main Refractory Wall ทำหน้าที่เป็นห้องเผาไหม้ (Pre-chamber) สำหรับหัวเผาและแบบหล่อปูนทนไฟ

5. Swirl Box เป็นตัวรับอากาศส่วนที่สองเพื่อป้อนสู่ Swirl Unit

6. Swirl Unit เป็นตัวทำให้อากาศส่วนที่สองหมุนวนก่อนเข้าห้องเผาไหม้ (Pre-chamber)

7. End Plate เป็นแผ่นปิด Swirl Box

8. Pulverizer Nozzle เป็นหัวฉีดเชื้อเพลิงฝุ่นชีวมวล

9. Gas Nozzle เป็นหัวฉีดแก๊ส LPG ซึ่งใช้ในขั้นตอนเริ่มต้นของการจุดหัวเผา

ซึ่งการแยกส่วนประกอบของหัวเผาเป็นหลายชิ้นก็เพื่อให้ง่ายต่อการสร้างและการบำรุงรักษา รวมถึงการปรับเปลี่ยนมุมมองต่างๆ หากมีการปรับปรุงหรือทดลองในอนาคต เช่น มุมทางออกของอากาศส่วนที่สามที่สามารถเปลี่ยนได้โดยการทำให้ Refractory Nozzle Sheet ให้มีมุมเปลี่ยนไปหรือหากต้องการเปลี่ยนมุมการไหลเข้าของอากาศส่วนที่สองเราก็สามารถเปลี่ยนได้โดยการทำให้ Swirl Unit ให้มีมุมเปลี่ยนไป เป็นต้น

3.3 การคำนวณระบบทางเดินแก๊สแอลพีจี

3.3.1 ทางเดินระบบท่อแก๊สแอลพีจี

ในหัวข้อนี้เป็นการแสดงการคำนวณอัตราการไหลของแก๊สแอลพีจี และอัตราการไหลของอากาศโดยการคำนวณหาอัตราการไหลของแก๊สแอลพีจี และอัตราการไหลของอากาศจะใช้ข้อมูลต่างๆดังนี้

1. ค่าพลังงานความร้อนที่ต้องการใช้ในการอุ่นหัวเผา คือ 10 kw

2. คุณสมบัติของแก๊สแอลพีจี

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. อากาศส่วนเกิน 30%

6. อุณหภูมิอากาศแวดล้อม = 35°C

3.3.2 พิจารณาแก๊สแอลพีจี

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

$$\dot{M}_{LPG} = \frac{\text{พลังงานความร้อนที่ต้องการ}}{\text{LHV}} \quad (3.25)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้น

$$\dot{M}_{LPG} = \frac{10 \text{ kw}}{49,731.11 \text{ kJ/kg}} = 0.000201 \text{ kg/s} = 0.012 \text{ kg/min}$$

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

$$\dot{V}_{LPG} = \frac{\dot{M}}{\rho_{LPG} \times \sqrt{\frac{\rho_{air}}{\rho_{LPG}}}} \quad (3.26)$$

ดังนั้น

$$\dot{V}_{LPG} = \frac{0.000201}{2.11 \times \sqrt{\frac{1.2}{2.11}}} = 1.26 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s} = 7.58 \text{ L/min}$$

3.3.3 พิจารณาอากาศ

หาอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ (\dot{M}_{air}) จากสมการ

$$\dot{M}_{air} = AF_{@30\%} \times \dot{M}_{LPG} \quad (3.27)$$

ดังนั้น

$$\dot{M}_{air} = 20.1786 \times 0.000201 = 0.004056 \text{ kg}_{air}/\text{s}$$

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

$$\dot{V}_{air} = \frac{\dot{M}_{air}}{\rho_{Air@35^\circ\text{C}}} \times \frac{T_{@25^\circ\text{C}}}{T_{@35^\circ\text{C}}} \quad (3.28)$$

ดังนั้น

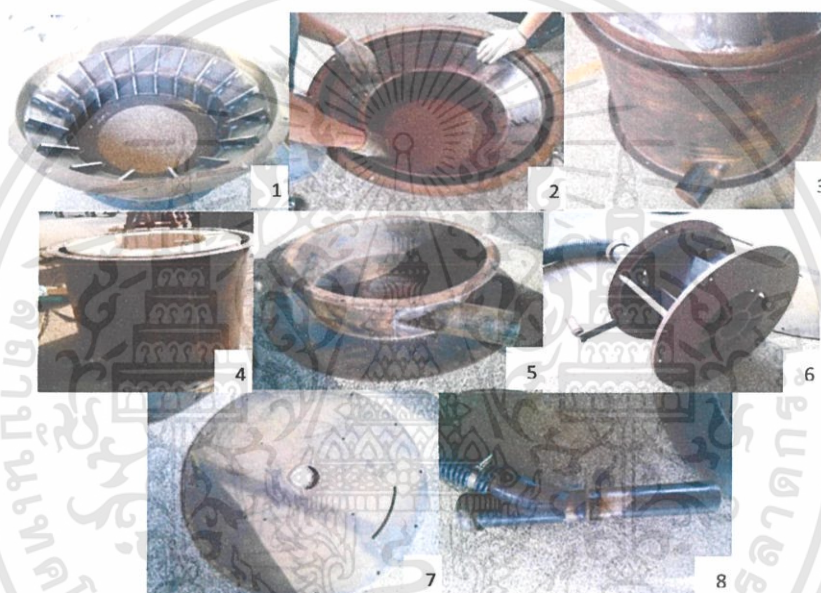
$$\dot{V}_{air} = \frac{0.004056}{1.176} \times \frac{273+25}{273+35} = 0.2002 \text{ m}^3/\text{s}$$

บทที่ 4

อุปกรณ์และเงื่อนไขการทดลอง

ในบทนี้จะกล่าวถึงหัวเผาที่ถูกสร้างขึ้นโดย แสดงขั้นตอนการหล่อปูนทนไฟสำหรับหัวเผาฐานที่ใช้รองหัวเผา อุปกรณ์ในระบบแก๊สแอลพีจี อุปกรณ์ที่ใช้ในระบบป้อนอากาศและเงื่อนไขการทดลอง รวมถึงวิธีการทดลอง

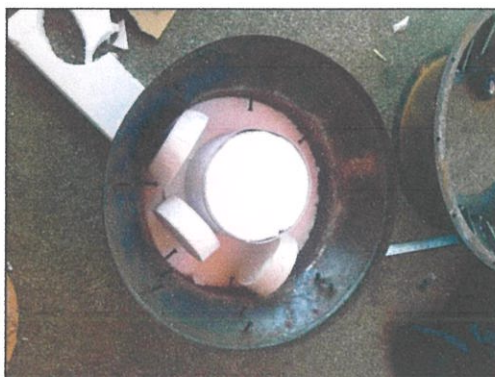
4.1 หัวเผา



รูปที่ 4.1 แสดงชิ้นส่วนต่างๆของหัวเผา

4.1.1 การทำบล็อกล้อ

ใช้โฟมและกระดาษแข็งเป็นวัสดุในการทำบล็อกล้อเพื่อให้รูปทรงภายในของหัวเผาใหม่เป็นไปตามแบบที่ต้องการ ได้มีการนำโฟมและกระดาษแข็งมาทำเป็นรูปทรงภายในของหัวเผาเพื่อให้สะดวกต่อการหล่อปูนทนไฟมากขึ้น



รูปที่ 4.2 บล็อกหล่อ

4.1.2 การหล่อปูนทนไฟ

4.1.2.1 วัสดุอุปกรณ์

- | | | |
|-------------------------------------|----------------|------------|
| 1. ถังปูน | 2. เกียงฉาบปูน | 3. ฟองน้ำ |
| 4. เพลผสมปูน | 5. จอบ | 6. อิฐทนไฟ |
| 7. โฟมแผ่น | 8. ค้อนยาง | |
| 9. ปูนทนไฟสำหรับงานฉาบ SRIC 30AM(W) | | |
| 10. ปูนทนไฟสำหรับงานก่อ SRIC 13S | | |



รูปที่ 4.3 วัสดุอุปกรณ์สำหรับการหล่อปูน

4.1.2.2 ขั้นตอนการหล่อปูนทนไฟ

- 1) เตรียมอุปกรณ์ที่ใช้ในการผสมปูนซึ่งปูนก่อดังกล่าวต้องผสมน้ำประมาณ 11% ของเนื้อปูน
- 2) เริ่มก่อปูนในชั้นส่วนหัวเผาชั้นที่ 2 ก่อนโดยการเทพูนต้องค่อยๆ เทแล้วเกลี่ยให้เรียบแล้วเทชั้นต่อไปจนกว่าจะเต็มดังรูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 การตกแต่งชิ้นงานให้เรียบ

3) ทำการเทปูนลงชั้นส่วนหัวเผาชั้นที่ 4 โดยชั้นนี้จะมีการเทพื้นก่อนแล้วก่อด้วยอิฐทนไฟขึ้นมาตามที่หลังดังรูป



รูปที่ 4.5 เทปูนและก่ออิฐ

4) ในระหว่างชั้นของอิฐทนไฟจะมีตะปูเชื่อมติดผนังไว้เพื่อเสริมความแข็งแรงและช่วยเป็นที่ยึดเกาะของอิฐทนไฟไว้ด้วย



รูปที่ 4.6 จุดยึดเกาะของอิฐระหว่างชั้น

5) ก่ออิฐชั้นที่สองให้ได้ตามที่ออกแบบไว้ แล้วรอนปูนแห้ง ทำการตรวจสอบแก้ไขและตกแต่งชิ้นงานที่เทปูนเพื่อความสมบูรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 ชั้นก่ออิฐชั้นที่สอง

6) ชิ้นงานหลังจากก่ออิฐและเทพูนเรียบร้อยแล้ว



รูปที่ 4.8 ชิ้นส่วนที่ก่อปูนและอิฐทนไฟเรียบร้อยแล้ว

7) หัวเผาที่ประกอบเรียบร้อยแล้ว



รูปที่ 4.9 หัวเผาที่ประกอบเรียบร้อยแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 ฐานรองหัวเผา

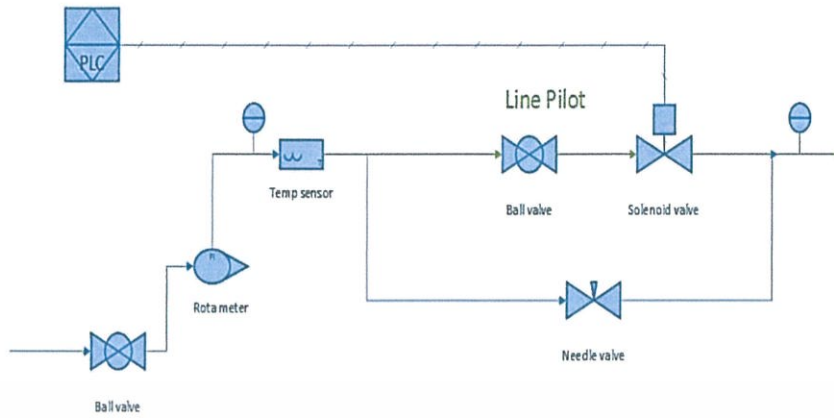


รูปที่ 4.10 ฐานรองหัวเผา

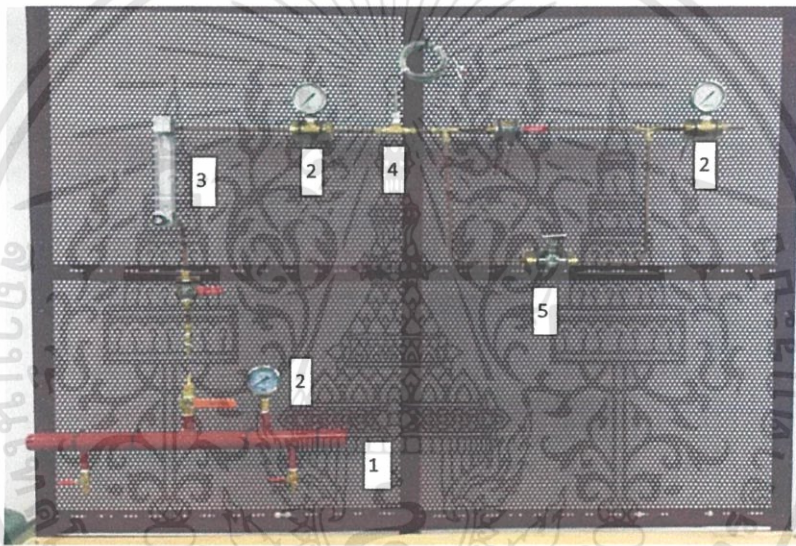
จากรูปแสดงฐานรองเพื่อวางหัวเผาเชื้อเพลิง สามารถรับน้ำหนักได้ประมาณ 2,000 กิโลกรัม ซึ่งได้ทำการติดล้อไว้ทั้งสี่ด้านเพื่อความสะดวกในการขนย้าย โดยเหล็กที่นำมาใช้เป็นเหล็กฉากที่เหลื่อใช้แล้ว

4.3 ระบบทางเดินแก๊สแอลพีจี

ทางเดินท่อแก๊สแอลพีจีทำขึ้นเพื่อ การควบคุมการจุดระเบิดของหัวเผาชีวมวลโดยการ ออกแบบผังวงจรทางเดินของแก๊สที่ใช้ในการจุดระเบิดและอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ในการควบคุม จากรูปที่ 4.10 แก๊สจะถูกส่งผ่านจากตัว Header โดยมี Ball valve เป็นตัวควบคุมเพื่อเปิดปิดแก๊สให้ผ่านไป ยัง Rota meter (ยี่ห้อ Nitto รุ่น K200 Model 2013 ช่วงการทำงาน 1-10 nL/min) เพื่อวัดอัตราการไหลของแก๊ส และวัดแรงดันโดย Pressure gage (ยี่ห้อ Nuovafima 2.5 ช่วงการทำงาน 0-4 bars) ก่อนเข้าอุปกรณ์ Temperature sensor จากนั้นก่อนเข้าหัวเผาจะมีท่อทางเดินแก๊ส 2 ทาง คือ ทางที่ใช้ Solenoid valve ซึ่งจะใช้ไฟฟ้าในการสั่งการเปิดปิดวาล์ว และทางที่ใช้ Needle valve (รุ่น SINV3-F-4N-SS) ในการเปิดปิดแก๊สซึ่งสามารถควบคุมได้ด้วยมือข้อดีของการมีทางเดินแก๊ส 2 ทาง คือเพื่อสะดวกในการซ่อมบำรุง เช่น หากSolenoid valve มีปัญหาไม่ว่าจะเนื่องจากไฟฟ้าดับหรือตัว Solenoid valve เสียก็ยังสามารถใช้ Needle valve ในการทำงานต่อไปได้และก่อนเข้าหัวเผาได้ติดตั้ง Pressure gage เพื่อวัดแรงดันก่อนเข้าหัวเผาอีกครั้งเพื่อดูได้ว่าความดันของแก๊สก่อนที่จะเข้าหัวเผาเป็นไปตามที่ต้องการ



รูปที่ 4.11 แผนภาพการทำงานของทางเดินท่อแก๊สก่อนเข้าหัวเผา



รูปที่ 4.12 ทางเดินท่อแก๊สแอลพีจีก่อนเข้าหัวเผา

4.3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการควบคุมแก๊สแอลพีจี

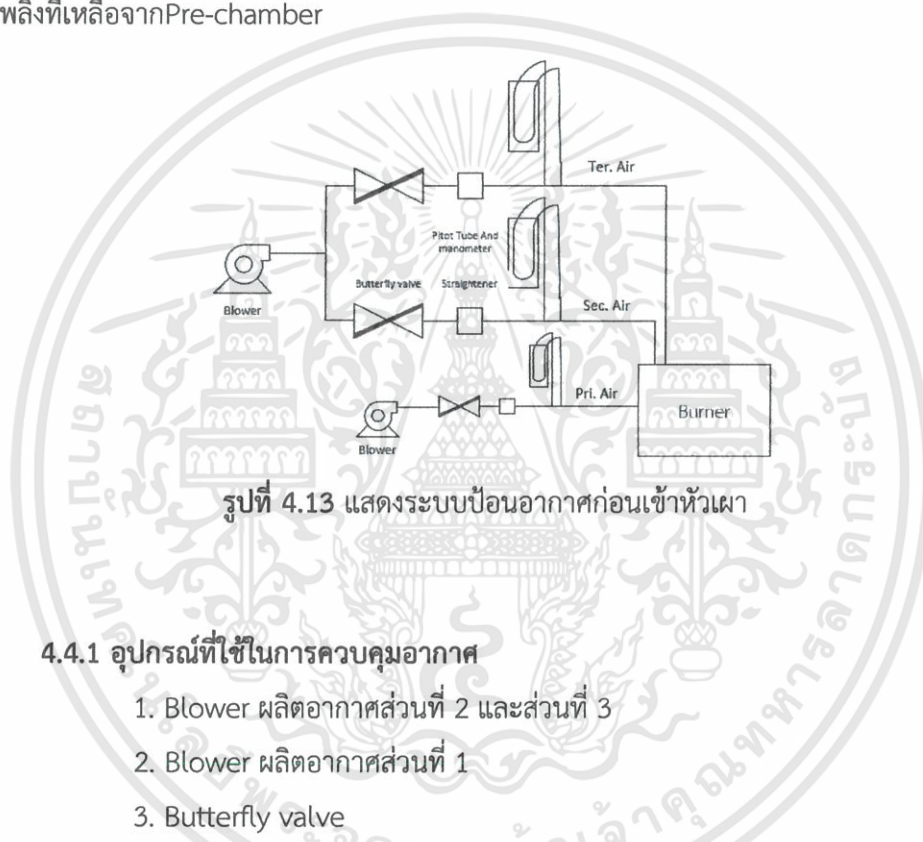
1. Header สามารถรับแรงดันได้สูงสุด 10 bars
2. Pressure gage ช่วงการทำงาน 0-4 bars
3. Rota meter ช่วงการทำงาน 1-10 L/min
4. Temperature sensor
5. Needle valve รุ่น SINV3-F-4N-SS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 ระบบป้อนอากาศ

ระบบป้อนอากาศทำขึ้นเพื่อป้อนอากาศเข้าสู่หัวเผาเพื่อให้เกิดการเผาไหม้โดย ทางเข้าของอากาศสู่หัวเผาแบ่งเป็น 3 ทางเข้า คือ

- 1) ทางเข้าที่ 1 (Primary air) ใช้สำหรับการจุดติดหัวเผาและออกแบบไว้เพื่อส่งเชื้อเพลิงชนิดฝุ่นเข้าสู่หัวเผา
- 2) ทางเข้าที่ 2 (Secondary air) เป็นอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้โดยตรง ซึ่งก่อนเข้าหัวเผาอากาศส่วนนี้จะผ่าน Swirl unit ทำให้เกิดการหมุนวนของอากาศภายในเตา
- 3) ทางเข้าที่ 3 (Tertiary air) ใช้สำหรับการหล่อเย็นเตา และเป็นอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่เหลือจาก Pre-chamber



รูปที่ 4.13 แสดงระบบป้อนอากาศก่อนเข้าหัวเผา

4.4.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการควบคุมอากาศ

1. Blower ผลิตอากาศส่วนที่ 2 และส่วนที่ 3
2. Blower ผลิตอากาศส่วนที่ 1
3. Butterfly valve
4. Straightener ช่วยให้อากาศกลายเป็น Fully developed flow ได้เร็วขึ้นซึ่งจะทำให้ความยาวของท่อสำหรับวัดอัตราการไหลสั้นลง
5. Pitot tube and Manometer ใช้วัดอัตราการไหล

4.5 การทดลองของระบบป้อนอากาศ

ในการทดลองระบบป้อนอากาศเพื่อหาช่วงการทำงานของระบบป้อนอากาศก่อนเข้าหัวเผา ซึ่งผลการทดลองที่ได้จากระบบป้อนอากาศนี้จะนำไปทดลองในหัวข้อที่ 4.6 ต่อไป โดยขั้นตอนการทดลองได้แบ่งการทดลองเป็น 2 การทดลอง ดังนี้



รูปที่ 4.14 ภาพรวมของการติดตั้งหัวเผาเพื่อทำการทดสอบ

4.5.1 การทดลองที่ 1 ระบบป้อนอากาศส่วนที่ 1

การทดลองที่ 1 เป็นการทดลองเพื่อหาอัตราการไหลของอากาศในระบบป้อนอากาศส่วนที่ 1 ซึ่งจะทำให้ได้ช่วงการใช้งานในการอุ่นเตาโดยเงื่อนไขการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 แสดงเงื่อนไขการทดลองป้อนอากาศ 1

อากาศส่วนที่ 1 เมื่อเปิด(%Valve opened)
100
90
80
70
60
50
40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5.2 การทดลองที่ 2 ระบบป้อนอากาศที่ 2 และ 3

การทดลองที่ 2 เป็นการทดลองเพื่อหาอัตราการไหลของอากาศในระบบป้อนอากาศส่วนที่ 2 และ 3 ซึ่งจะทำให้ได้ช่วงการใช้งานในการอุ่นหัวเผา โดยเงื่อนไขการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 แสดงเงื่อนไขการทดลองป้อนอากาศ 2 และ 3

อากาศส่วนที่ 2 เมื่อเปิด (%Valve opened)	อากาศส่วนที่ 3 เมื่อเปิด (%Valve opened)
100	0-100
90	0-100
80	0-100
70	0-100
60	0-100
50	0-100
40	0-100

4.5.3 การบันทึกผลของระบบป้อนอากาศ

ใช้อุปกรณ์การวัดคือมานอมิเตอร์ โดยบันทึกค่าผลต่างระหว่าง Static Pressure และ Dynamic Pressure จากความสูงของระดับน้ำที่ต่างกันบนมานอมิเตอร์และใช้สมการแบร์นูลลี มาคำนวณ volume flow rate

4.5.4 ขั้นตอนการทดลอง

1. ในขั้นแรกติดตั้งอุปกรณ์ของระบบป้อนอากาศและเครื่องมือวัดตามตำแหน่งดังรูปที่ 4.14
2. เปิดBlower ให้เริ่มการทำงาน
3. ปรับค่าอัตราการไหลโดยใช้ Butterfly valve ตามเงื่อนไขดังตารางที่ 4.1 และ 4.2 แล้วทำการบันทึกผล

4.6 การทดลองการจุดระเบิดและการอุ่นหัวเผา

4.6.1 เงื่อนไขการทดลองการจุดระเบิดและการอุ่นหัวเผา

ในการทดลองที่ 4.5 เป็นการทดลองเพื่อหาช่วงการใช้งานของระบบป้อนอากาศ จากผลการทดลองที่ 5.1 พบว่าช่วงของอากาศที่เหมาะสมในสภาวะการทำงานของหัวเผา 500 kW คือช่วงที่ 40% Valve opened - 50% Valve opened ดังนั้นในการทดลองนี้จึงเลือก ช่วงการทำงานของอากาศส่วนที่ 1 และ 2 ที่ 40% Valve opened - 50% Valve opened และอากาศส่วนที่ 3 เปิดที่ 0% Valve opened เพราะเป็นการทดลองเพื่อการอุ่นเตา โดยมีเงื่อนไขการทดลองดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 แสดงเงื่อนไขการทดลองการอุ่นหัวเผา

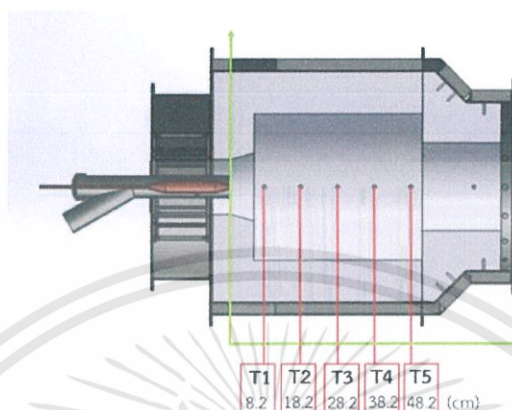
ครั้งที่	(%Valve opened)			แก๊สแอลพีจี (L/min)
	อากาศส่วนที่1	อากาศส่วนที่2	อากาศส่วนที่3	
1	40	40	0	4
2	40	40	0	5
3	40	40	0	6
4	40	40	0	7
5	50	50	0	4
6	50	50	0	5
7	50	50	0	6
8	50	50	0	7

4.6.2 ขั้นตอนการจุดระเบิด

1. เปิดอากาศส่วนที่ 1 โดยปรับค่าที่ 50% valve opened ซึ่งมีอัตราการไหลเชิงมวลเท่ากับ 0.038773 kg/s
2. เปิดหัวแก๊ส ปรับค่าอัตราการไหลแก๊สโดยใช้ needle valve คงอัตราการไหลไว้ที่ต้องการทดลอง
3. กดตัวจุดเคียวเพื่อทำการจุดหัวเผา

4.6.3 การบันทึกผลของการจุดระเบิดและการอุ่นหัวเผา

1. ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่เชื่อมต่อกับ Thermocouple บันทึกอุณหภูมิของเปลวไฟที่ระดับต่างๆ



รูปที่ 4.15 แสดงตำแหน่งของการวาง Thermocouple

4.7 การศึกษาลักษณะการหมุนของอากาศภายในหัวเผา

4.7.1 ขั้นตอนการทดลองการศึกษาลักษณะการหมุนดังนี้

1. นำริบบิ้นผ้ามาผูกติดกับแท่งเหล็ก
2. นำแท่งเหล็กที่ผูกติดกับริบบิ้นมาใส่ไว้ในรูที่ 1 ของตำแหน่ง Thermocouple
3. เปิดระบบป้อนอากาศต่ำสุดที่ 40% Valve opened
4. ทำการบันทึกภาพการหมุนของอากาศในเตาเผา
5. ทำการทดลองอีกครั้งโดยนำริบบิ้นใส่ไว้ในรูที่ 3 ดังรูปที่ 4.14

บทที่ 5

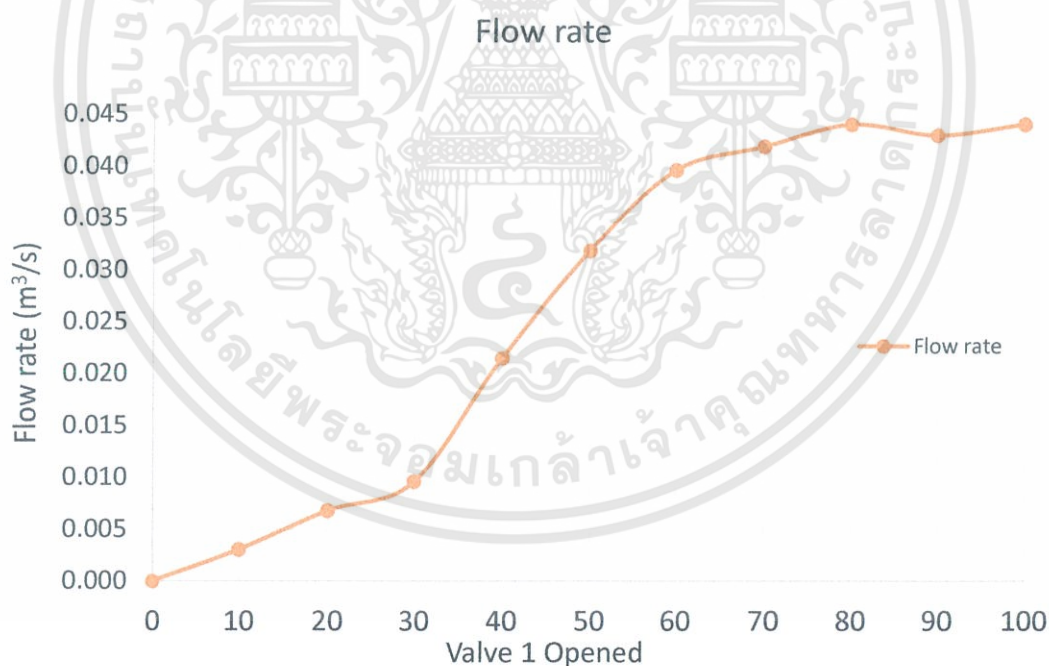
ผลการทดลองและการอภิปราย

บทนี้นำเสนอผลการทดลองและการอภิปรายผลที่ได้จากการทดลองโดยผลการทดลองแบ่งเป็น 3 หัวข้อคือ ผลการทดลองจากการเปิดวาล์วที่ตำแหน่งต่างๆ ผลการทดลองจากการวัดอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ และผลการทดลองการหาทิศทางการไหลของอากาศภายในหัวเผา

5.1 ผลการทดลองจากการเปิดวาล์วที่ตำแหน่งต่างๆและการอภิปรายหาย่านการเปิดวาล์ว

5.1.1 ผลการทดลองระบบป้อนอากาศส่วนที่ 1

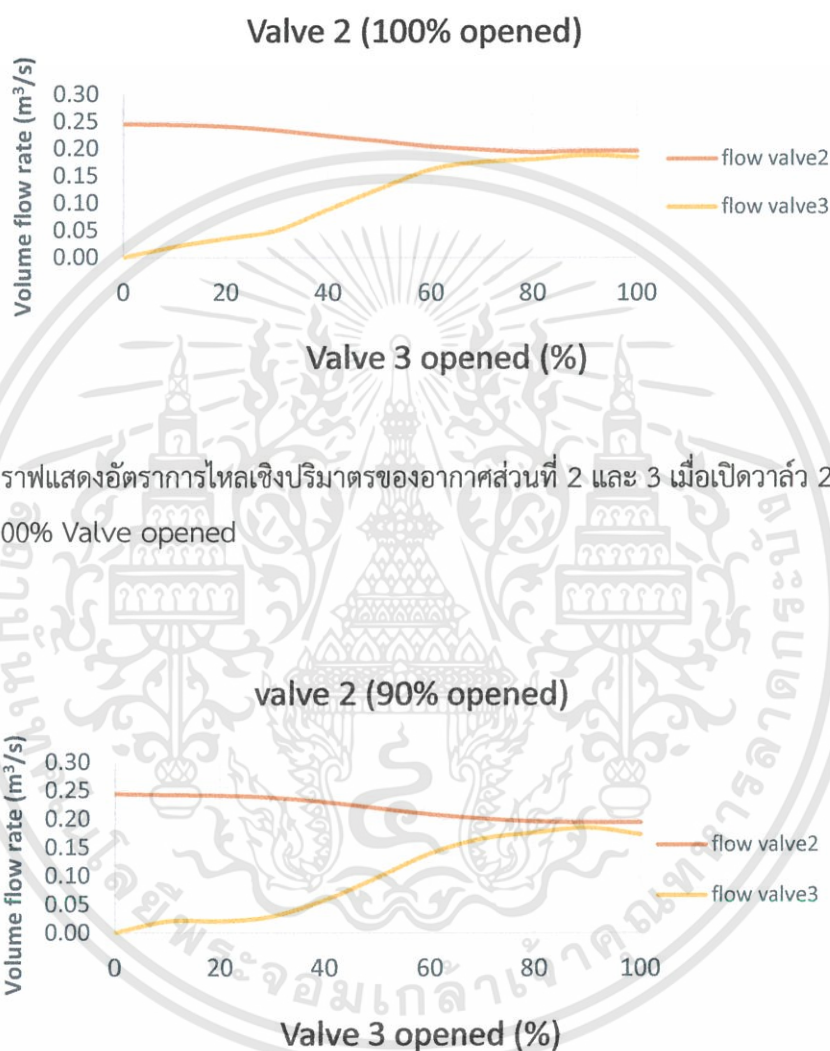
จากรูปที่ 5.1 เป็นกราฟแสดงอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศส่วนที่ 1 ที่ตำแหน่งการเปิดวาล์ว 1 ต่างๆกันซึ่งจากกราฟพบว่าอัตราไหลเชิงปริมาตรจะแปรผันตามเปอร์เซ็นต์การเปิดวาล์ว กล่าวคือเมื่อเปอร์เซ็นต์การเปิดวาล์วมากขึ้นอัตราการไหลเชิงปริมาตรจะมากขึ้นด้วย



รูปที่ 5.1 กราฟแสดงอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศส่วนที่ 1 ตำแหน่งการเปิดวาล์ว 1 ต่างๆกัน

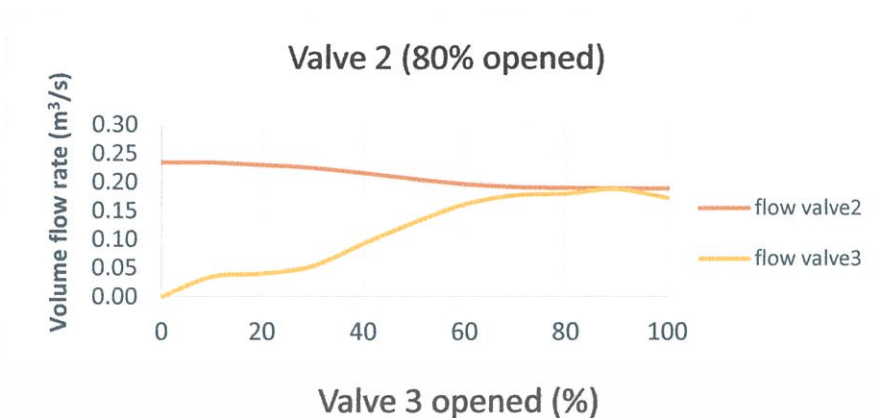
5.1.2 ผลการทดลองระบบป้อนอากาศที่ 2

จากรูปที่ 5.2-5.8 แสดงอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศที่ตำแหน่งวาล์วต่างๆกัน จากกราฟจะเห็นได้ว่า เมื่อวาล์วที่ 3 ถูกเปิดมากขึ้นจะทำให้อัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศส่วนที่ 3 มีค่าเพิ่มขึ้นแต่อัตราการไหลของอากาศส่วนที่ 2 มีค่าลดลง และเมื่อเปรียบเทียบกันจะพบว่าเมื่อหรีวาล์ว 2 ลงจะมีผลทำให้อัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศส่วนที่ 2 มีค่าลดลงด้วยเช่นกัน

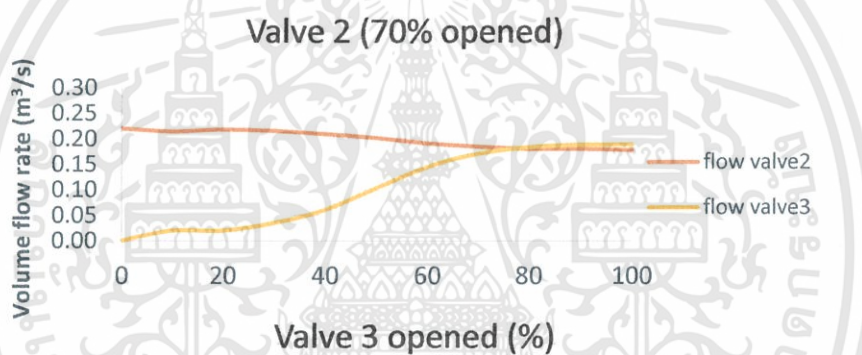


รูปที่ 5.2 กราฟแสดงอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศส่วนที่ 2 และ 3 เมื่อเปิดวาล์ว 2 ที่ 100% Valve opened

รูปที่ 5.3 กราฟแสดงอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศส่วนที่ 2 และ 3 เมื่อเปิดวาล์ว 2 ที่ 90% Valve opened



รูปที่ 5.4 กราฟแสดงอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศส่วนที่ 2 และ 3 เมื่อเปิดวาล์ว 2 ที่ 80% Valve opened

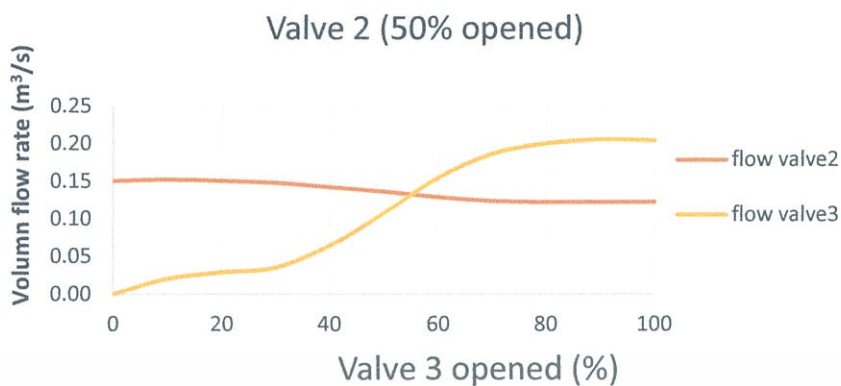


รูปที่ 5.5 กราฟแสดงอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศส่วนที่ 2 และ 3 เมื่อเปิดวาล์ว 2 ที่ 70% Valve opened

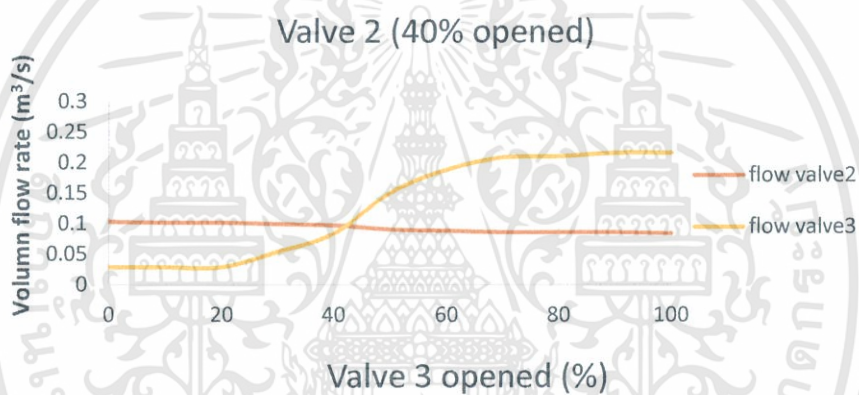


รูปที่ 5.6 กราฟแสดงอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศส่วนที่ 2 และ 3 เมื่อเปิดวาล์ว 2 ที่ 60% Valve opened

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



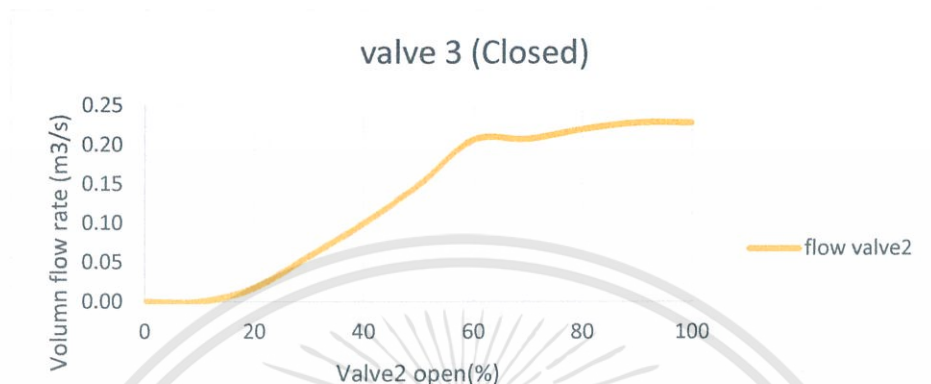
รูปที่ 5.7 กราฟแสดงอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศส่วนที่ 2 และ 3 เมื่อเปิดวาล์ว 2 ที่ 50% Valve opened



รูปที่ 5.8 กราฟแสดงอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศส่วนที่ 2 และ 3 เมื่อเปิดวาล์ว 2 ที่ 40% Valve opened

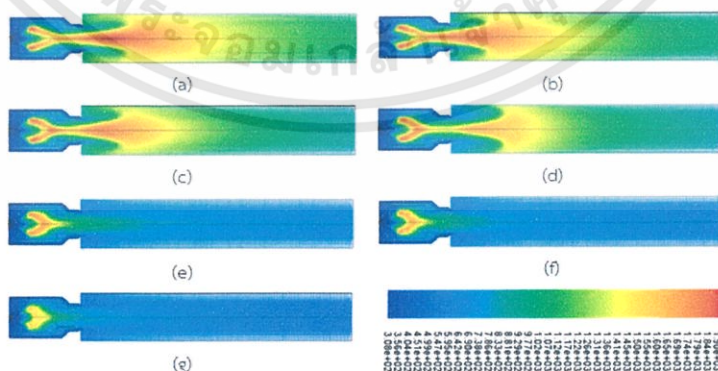
5.2 การอภิปรายระบบป้อนอากาศส่วนที่ 1 , 2 และ 3

จากผลการทดลองที่ได้ตามรูปที่ 5.2 - 5.8 ถูกนำมาปรับเพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์การเปิดวาล์วในการทดลองการวัดอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ เป็นดังรูปที่ 5.9



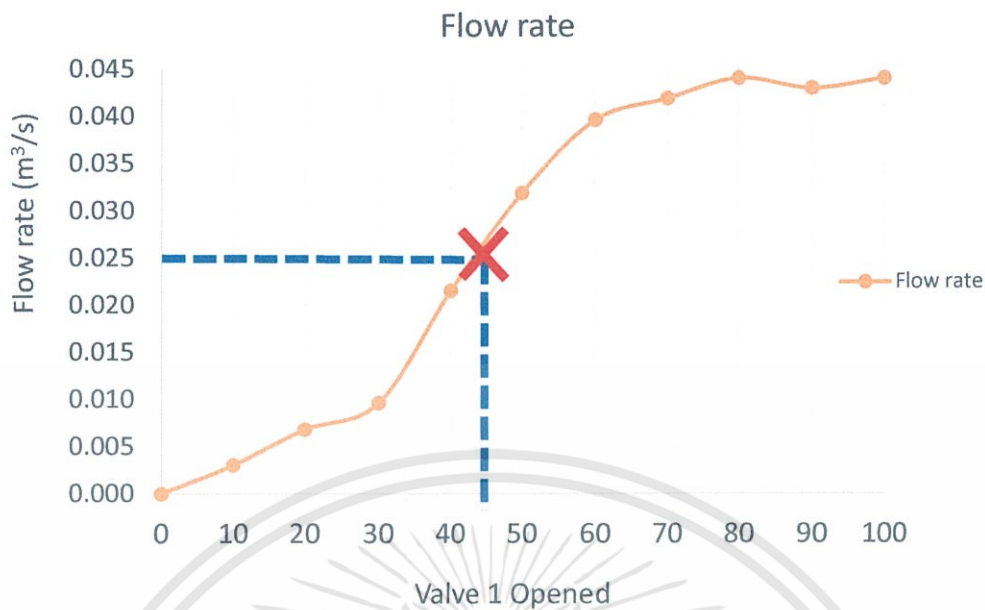
รูปที่ 5.9 กราฟแสดงอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศส่วนที่ 2 เมื่อวาล์ว 3 ถูกปิด

จากผลการจำลองดังรูปที่ 5.10 [1] พบว่าช่วงการทำงานที่เหมาะสมของการทำงานของหัวเผาอยู่ในช่วง 450 KW ถึง 1000 KW แต่เนื่องจากผลการจำลองอาจมีความคลาดเคลื่อนได้จึงเลือกทำการทดลองการวัดอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ โดยการจำลองการเผาไหม้ที่ 500 KW ของการเผาไหม้ด้วยเชื้อเพลิงแข็งซึ่งจะต้องใช้อัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศส่วนที่ 1 เท่ากับ $0.025 \text{ m}^3/\text{s}$ และอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศส่วนที่ 2 เท่ากับ $0.13 \text{ m}^3/\text{s}$ คือช่วงที่วาล์ว 1 และวาล์ว 2 เปิดที่ 40% Valve opened – 50% Valve opened ซึ่งเมื่อนำค่าดังกล่าวมา plot ลงบนกราฟในรูปที่ 5.8 และ 5.9 จะสามารถหาค่าการเปิดวาล์วได้ ดังรูปที่ 5.11 สำหรับวาล์ว 1 และรูปที่ 5.12 สำหรับวาล์ว 2

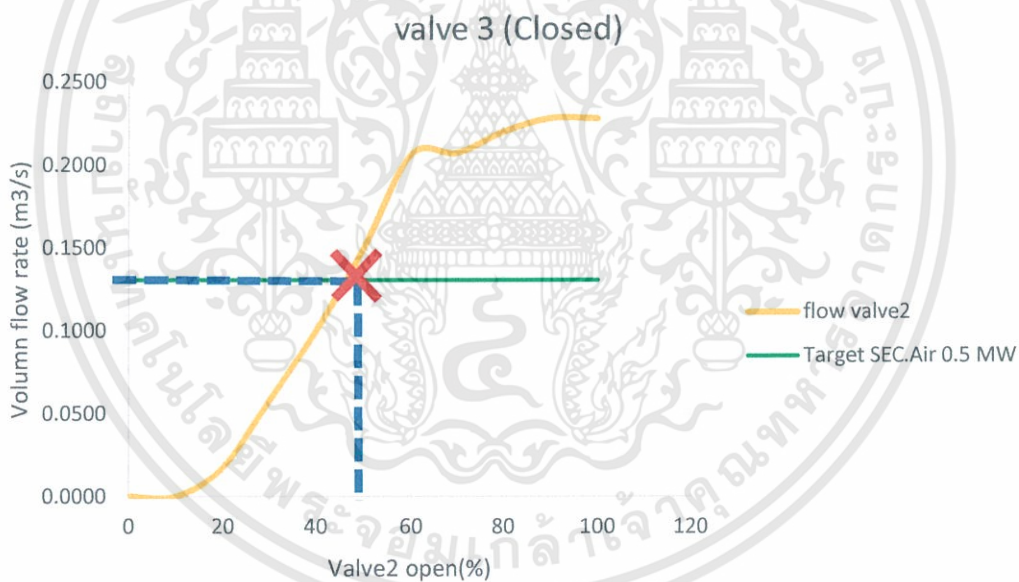


รูปที่ 5.10 แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิที่ย่านการทำงานที่ (a) 1 MW, (b) 750 kW, (c) 500 kW, (d) 450 kW, (e) 400 kW, (f) 350 kW และ (g) 250 kW

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.11 กราฟแสดงการเลือกย่านการเปิดวาล์ว 1



รูปที่ 5.12 กราฟแสดงการเลือกย่านการเปิดวาล์ว 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

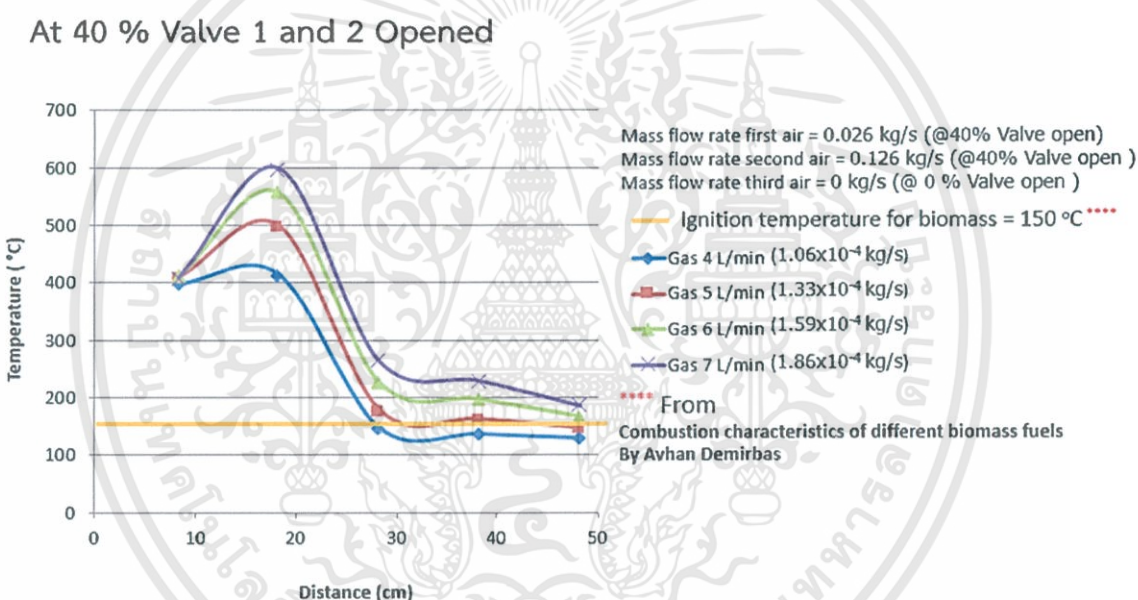
5.3 ผลการทดลองจากการวัดอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ

จากกราฟรูปที่ 5.13 และ 5.14 สามารถอธิบายผลการทดลองได้ดังนี้

5.3.1 ไม่ว่าจะเปิดวาล์ว 1 และ 2 ที่ 40 % หรือ 50 % อุณหภูมิสูงสุดเกิดขึ้นที่ตำแหน่ง 18.2 cm เนื่องจากที่ตำแหน่งการวัดดังกล่าวเป็นตำแหน่งที่สัมผัสกับ Inner cone ของเปลวไฟซึ่งที่บริเวณดังกล่าวเป็นบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงสุดในเปลวไฟ

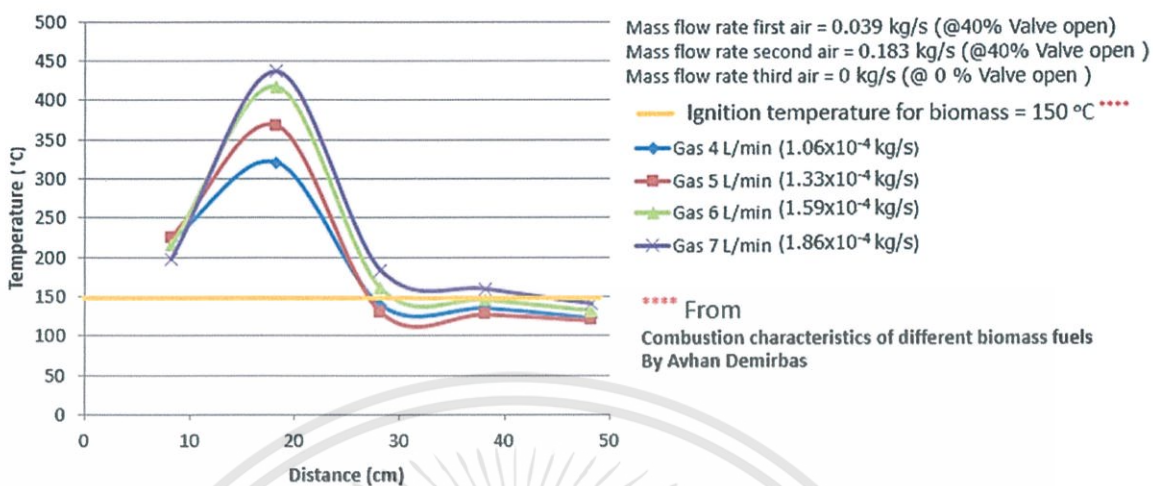
5.3.2 อัตราการไหลและความเร็วของอากาศที่การเปิดวาล์ว 1 และ 2 ที่ 40 % น้อยกว่าที่ 50 % จึงทำให้เกิดการพาความร้อนออกจากบริเวณเปลวไฟต่ำกว่าเป็นผลทำให้อุณหภูมิโดยรวมของการเปิดวาล์วที่ 40 % สูงกว่าการเปิดวาล์วที่ 50 % ซึ่งเมื่อพิจารณาที่ตำแหน่งอุณหภูมิสูงสุดพบว่า อุณหภูมิต่างกันถึง 160°C

5.3.3 อุณหภูมิที่ได้จากการอุ่นเตามีค่าสูงกว่าอุณหภูมิตัดไฟของเชื้อเพลิงชีวมวล

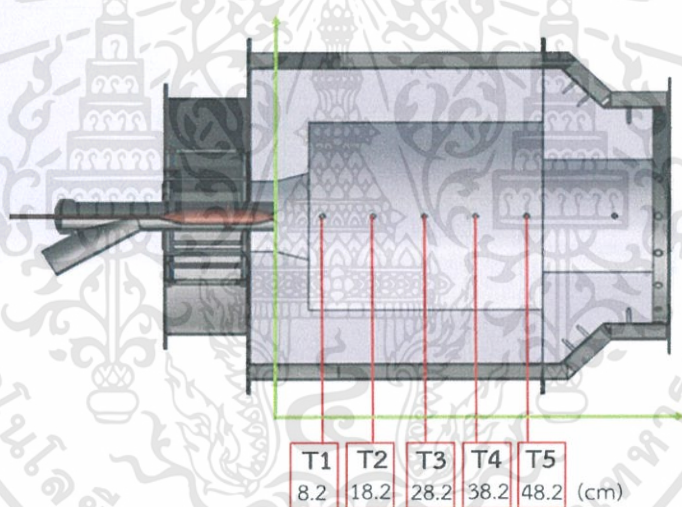


รูปที่ 5.13 กราฟแสดงผลอุณหภูมิกับตำแหน่งการวัดต่างๆ ณ การเปิดวาล์ว 1, 2 ที่ 40 %

At 50 % Valve 1 and 2 Opened



รูปที่ 5.14 กราฟแสดงผลอุณหภูมิกับตำแหน่งการวัดต่างๆ ณ การเปิดวาล์ว 1, 2 ที่ 50 %

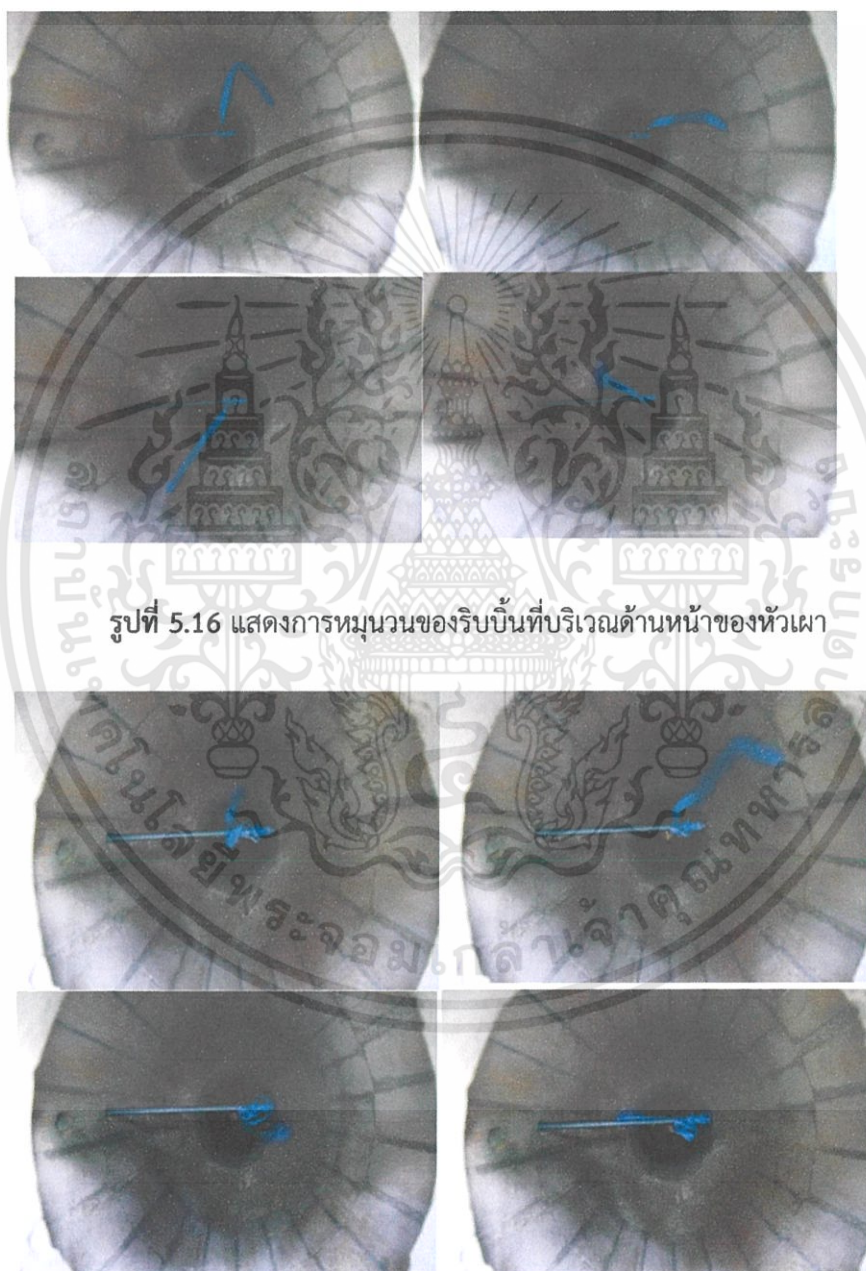


รูปที่ 5.15 แสดงตำแหน่งการวัดอุณหภูมิภายในหัวเผา

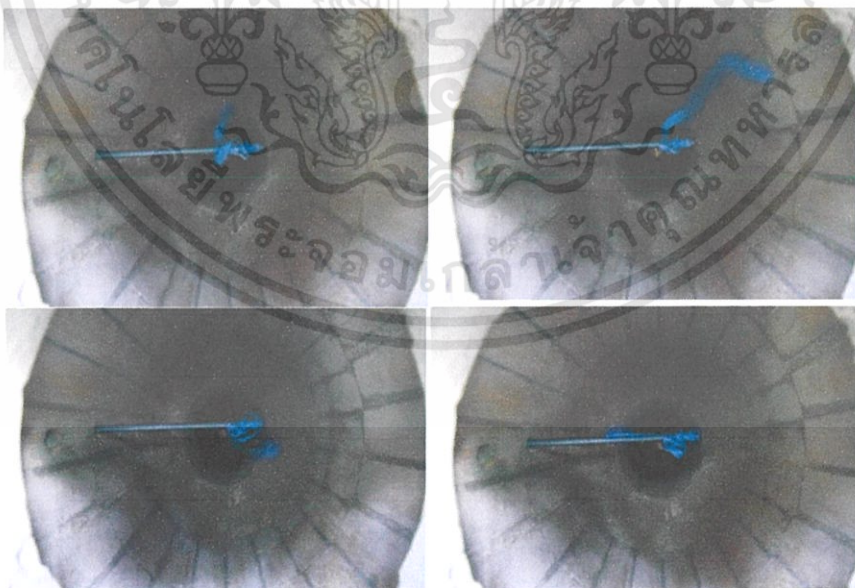
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.4 ผลการทดลองการศึกษาลักษณะการหมุนของอากาศภายในหัวเผา

จากผลการทดลองพบว่าอากาศที่บริเวณด้านหน้าของหัวเผาเกิดการไหลวนซึ่งสังเกตได้จากการหมุนของริบบิ้น ณ เวลาต่างๆ กัน ดังรูปที่ 5.16 และอากาศที่บริเวณกลางหัวเผามีการไหลแบบ Recirculating flow ซึ่งสังเกตได้จากการที่ริบบิ้นถูกดูดเข้าสู่ใจกลางของหัวเผา ดังรูปที่ 5.17 ซึ่งสอดคล้องกับผลการจำลองรูปที่ 5.18 [1] แสดงเวกเตอร์ของความเร็วของอากาศภายในหัวเผาซึ่งจากผลจำลองพบว่าที่บริเวณกลางหัวเผาเกิดการไหลแบบ Recirculating flow

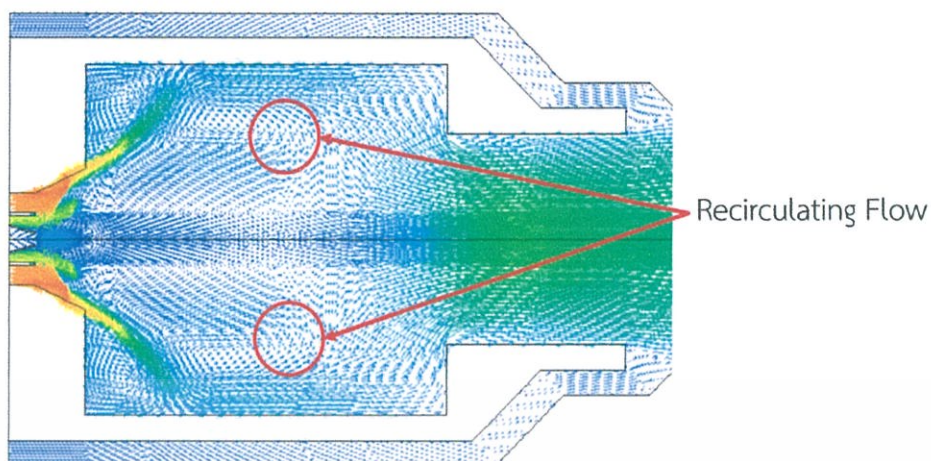


รูปที่ 5.16 แสดงการหมุนวนของริบบิ้นที่บริเวณด้านหน้าของหัวเผา



รูปที่ 5.17 แสดงการเกิด Recirculating flow ที่บริเวณกลางหัวเผา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.18 แสดงผลการจำลองการเกิด Recirculating flow ภายในหัวเผา



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการทดลอง

6.1.1 การจุดหัวเผาด้วยแก๊สแอลพีจีที่ปริมาณแก๊สดังแต่ 4-7 L/min หรือ 1.07×10^{-4} kg/s- 1.86×10^{-4} kg/s ไม่เกิดปรากฏการณ์เป่าดับ (Blow off) ที่สภาวะการจำลองการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลที่ 500 kW ด้วยปริมาณอากาศในช่วงของการเปิดวาล์วที่ 1 และ 2 ที่ 40% Valve open - 50% Valve open

6.1.2 อุณหภูมิสูงสุดที่เกิดขึ้นจากการจุดหัวเผาด้วยแก๊สแอลพีจีสูงกว่าอุณหภูมิติดไฟของฝุ่นชีวมวลทำให้มั่นใจได้ว่าที่ปริมาณแก๊สดังแต่ 6-7 L/min หรือ 1.59×10^{-4} kg/s - 1.86×10^{-4} kg/s และปริมาณอากาศในช่วงของการเปิดวาล์วที่ 1 และ 2 ที่ 40% Valve open - 50% Valve open นั้นเพียงพอต่อการจุดหัวเผาด้วยเชื้อเพลิงชีวมวล

6.1.3 อากาศบริเวณด้านหน้าของหัวเผามีการหมุนวนและอากาศในช่วงกลางของหัวเผามีการวนกลับ(Recirculating flow) ซึ่งสอดคล้องกับผลการจำลองการเผาไหม้

6.2 ข้อเสนอแนะ

6.2.1 ด้านการควบคุมอัตราการไหลของอากาศ

เนื่องจากอัตราการไหลของวาล์ว 2,3 มีค่าเพิ่มขึ้นและลดลงตามกันไม่สามารถแยกออกจากกันได้กล่าวคือผู้ใช้งานสามารถควบคุมอัตราการไหลของอากาศส่วนที่ 2 หรือ 3 ให้ได้ตามความต้องการเพียงตัวใดตัวหนึ่งเท่านั้น ฉะนั้นเพื่อให้สามารถปรับอัตราการไหลของอากาศทั้งส่วนที่ 2 และส่วนที่ 3 ให้ได้ต้องการจึงควรแยกท่อของอากาศส่วนที่ 2 และ 3 ออกจากกันและติดตั้ง Blower สำหรับอากาศส่วนที่ 3

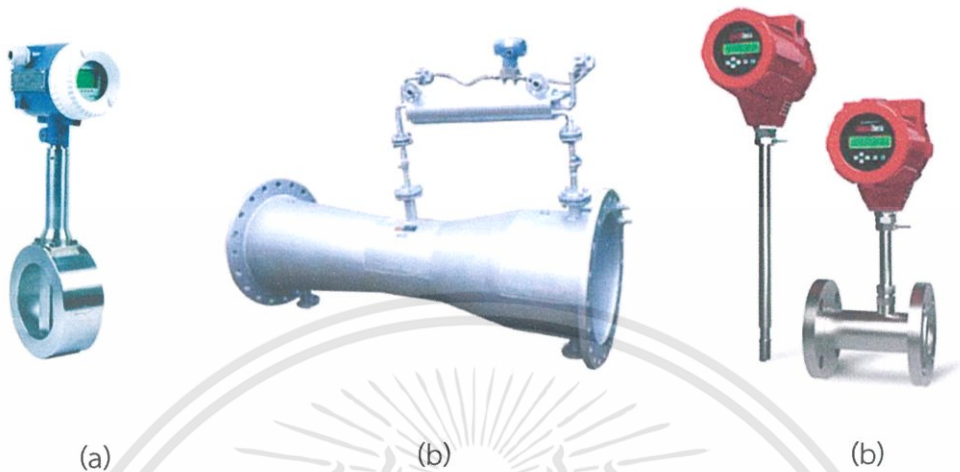
6.2.2 ด้านเครื่องมือวัด

ในปัจจุบันผู้ทดลองทำการวัดค่าอัตราการไหลโดยใช้ manometer ในการวัดซึ่งแน่นอนว่าการวัดจะมีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นโดยเกิดจากการตั้งแผงวัดระดับน้ำใน manometer รวมถึงการอ่านค่าของผู้ทดลอง ฉะนั้นเพื่อการวัดมีความแม่นยำมากยิ่งขึ้นจึงควรเปลี่ยนอุปกรณ์การวัดเป็นแบบอื่นเช่น

1. Vortex สามารถวัดความเร็วได้ตั้งแต่ 10-60 m/s
2. Venturi Meter สามารถวัดความเร็วได้ตั้งแต่ 10-200 m/s
3. Thermal mass flow meter สามารถวัดความเร็วได้ตั้งแต่ 0-80 m/s

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งอุปกรณ์การวัดในแต่ละแบบดังกล่าวก็มีความแม่นยำและหลักการใช้งานการติดตั้งที่แตกต่างกัน ด้วยแต่ทุกวิธีสามารถวัดได้แม่นยำกว่า manometer



รูปที่ 6.1 แสดงตัวอย่างเครื่องมือวัด (a) vortex meter, (b) venturi meter, (c) thermal mass flow meter

6.2.3 ด้านการเพิ่มอัตราการไหลของแก๊สแอลพีจี

ในตอนนี้อัตราการไหลของแก๊สแอลพีจีสูงสุดอยู่ที่ 7 L/min ซึ่งหากต้องการใช้แก๊สแอลพีจีในปริมาณมากกว่านี้จำเป็นต้องเปลี่ยนถังแก๊สเป็นแบบถังแก๊สสองหัวเพราะแก๊สที่ออกมาจากถังแก๊สสองหัวจะอยู่ในสถานะของเหลวและให้อัตราการไหลมากกว่าถังแก๊สแบบหัวเดียว ซึ่งในการใช้แก๊สสองหัวนั้นจำเป็นต้องติดตั้งหม้อต้มแก๊สด้วยเพื่อเปลี่ยนสถานะของแอลพีจีเหลวที่ออกมาจากถังให้เป็นแก๊สแอลพีจีก่อนนำไปใช้งานซึ่งปริมาณของแก๊สแอลพีจีที่จะได้ออกมาใช้งานย่อมขึ้นกับความสามารถของหม้อต้มแก๊สด้วยนั่นเอง แต่อย่างไรก็ตามวิธีดังกล่าวมีค่าใช้จ่ายสูงแต่สามารถเพิ่มอัตราการไหลของแก๊สแอลพีจีได้อย่างแน่นอน

เอกสารอ้างอิง

- [1] ธนภัทร์ ภักดีรวงศ์ (2556). การจำลองเชิงคณิตศาสตร์สำหรับการเผาไหม้เชื้อเพลิงผงสาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล, คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [2] อุกฤษฏ์สหพัฒน์สมบัติ, ปานชีวา อุดมทรัพย์, เอกรัตน์ ไวยนิตย์, ธนกร ต้นธนวัฒน์ (2551). การศึกษา เบื้องต้นถึงคุณภาพของชีวมวลสำหรับเชื้อเพลิงไม้อัดแท่ง, รวมบทความวิชาการ เล่มที่ 1 การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 22
- [3] สำเร็จ จักรใจ. การเผาไหม้. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2547.
- [4] AyhanDemirbas (2003). **Combustion characteristics of different biomass fuels**, Department of Chemical Engineering, Selcuk University, Konya, Turkey, 31 October 2003
- [5] 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
- [6] H.H. Liakos, K.N. Theologos, A.G. Boudouvis and N.C. Markatos "Pulverized coal char combustion: the effect of particle size on burner performance." Applied Thermal Engineering 18 (1998) 981-989
- [7] 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.
- [8] Rachwal. (2007). White ash of camp fire with burning piece of wood. ค้นหามาเมื่อ 18 กันยายน 2556, จาก <http://www.dreamstime.com/royalty-free-stock-photos-white-ash-camp-fire-image4139498>
- [9] อาจารย์สมศักดิ์. คณะวิศวกรรมศาสตร์ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล. มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์. เอกสารประกอบการสอนเรื่องการวัดอัตราการไหล. ค้นหามาเมื่อ 9 มกราคม 2557, จาก <http://somsak.me.engr.tu.ac.th/download/flow%20rate.pdf>
- [10] นวภัทรา และ ทวีพล. (2555). การวัดและเครื่องมือวัด ประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร. ค้นหามาเมื่อ 9 มกราคม 2557, จาก <http://teacher.buet.ac.bd/bhyeasin/images/bourdon%20tube1>
- [11] บริษัท อีเอ็ม กรุ๊ป จำกัด. "มาตรการพลังงานทดแทน : การผลิตพลังงานจากชีวมวล" [Online]. Available: http://www.em-group.co.th/Technology_Biomass.html
- [12] สำนักวิจัยค้นคว้าพลังงาน กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. "พลังงานชีวมวล." [online]. Available : <http://www2.dede.go.th/kmmf/home.html>. 2555.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [13] กิตติกร สาสุจิตต์. 2552. “การหาอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงที่เหมาะสมที่สุด สำหรับเตาเผาแกลบแบบไซโคลน.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- [14] M. A. Field. **Rate of Combustion of Size-Graded Fraction of Char form a low Rank Coal between 1200 K-2000K.** Combustion and Flame, 13:237-252,1969.
- [15] M. M. Baum and P. J. Street. **Predicting the Combustion Behavior of Coal Particles.** Combust. Sci. Tech.,3(5):231-243,1971.
- [16] นคร ทิพย์วงศ์. **พื้นฐานวิศวกรรมการเผาไหม้**
- [17] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงานกระทรวงพลังงาน. 2552. **คู่มือการอนุรักษ์พลังงานในระบบปั๊มน้ำและพัดลม.** ปทุมธานี : บริษัท ทีม เอ็นเนอร์ยี่ แมเนจเม้นท์ จำกัด
- [18] Anthony Esposito. 2009. **Fluid Power with Applications.** 7th ed. New Jersey : Pearson
- [19] สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย. 2555. **รายงานผลการทดสอบและวิเคราะห์ชีวมวลอัดแท่งจากหญ้าเนเปียร์.** ปทุมธานี



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 1 แสดงค่า Head, Velocity, Volume flow rate ของอากาศส่วนที่ 1 (Primary air)

Valve 1 open	SP (cm)	DP (cm)	Head(m)	Velocity (m/s)	Vol. flow rate (m ³ /s)
100	13.2	12.1	0.011	13.411	0.0319
90	13.2	12	0.012	14.007	0.0333
80	13.2	12	0.012	14.007	0.0333
70	13.1	12	0.011	13.411	0.0319
60	13	12.1	0.009	12.131	0.0288
50	12.9	12.4	0.005	9.042	0.0215
40	12.7	12.4	0.003	7.004	0.0166
30	12.6	12.5	0.001	4.044	0.0096
20	12.6	12.6	0.000	0.000	0.0000
10	12.6	12.6	0.000	0.000	0.0000
0	12.6	12.6	0.000	0.000	0.0000

ตารางที่ 2 แสดงค่า Head, Velocity, Volume flow rate เมื่อเปิดวาล์ว 2 ที่ 100%

Valve 2	Valve 3	Pipe 2 (3")		Pipe 3 (3")		Pipe 2			Pipe 3		
		SH (cm)	DH (cm)	SH (cm)	DH (cm)	Head (m)	Velocity (m/s)	Vol. flow rate (m ³ /s)	Head (m)	Velocity (m/s)	Vol. flow rate (m ³ /s)
100	100	8.1	17.4	8.1	16.4	0.093	38.994	0.1960	0.083	36.838	0.1852
100	90	8.1	17.4	8	16.6	0.093	38.994	0.1960	0.086	37.498	0.1885
100	80	8.2	17.3	8.3	16.2	0.091	38.573	0.1939	0.079	35.940	0.1807
100	70	8	17.5	8.5	16	0.095	39.411	0.1981	0.075	35.018	0.1760
100	60	7.7	17.8	9.1	15.5	0.101	40.637	0.2043	0.064	32.348	0.1626
100	50	7.3	18.4	10.4	14.3	0.111	42.601	0.2141	0.039	25.252	0.1269
100	40	6.8	18.9	11.4	13.3	0.121	44.479	0.2236	0.019	17.625	0.0886
100	30	6.3	19.5	12	12.6	0.132	46.456	0.2335	0.006	9.905	0.0498
100	20	5.9	19.9	12.1	12.4	0.140	47.843	0.2405	0.003	7.004	0.0352
100	10	5.7	20.1	12.2	12.3	0.144	48.522	0.2439	0.001	4.044	0.0203
100	0	5.7	20.2	12.3	12.3	0.145	48.690	0.2447	0.000	0.000	0.0000

ตารางที่ 3 แสดงค่า Head, Velocity, Volume flow rate เมื่อเปิดวาล์ว 2 ที่ 90%

Valve 2	Valve 3	Pipe 2 (3")		Pipe 3 (3")		Pipe 2			Pipe 3		
		SH (cm)	DH (cm)	SH (cm)	DH (cm)	Head (m)	Velocity (m/s)	Vol. flow rate (m ³ /s)	Head (m)	Velocity (m/s)	Vol. flow rate (m ³ /s)
90	100	8.3	17.4	8.7	15.9	0.091	38.573	0.1939	0.072	34.310	0.1725
90	90	8.3	17.4	8.2	16.5	0.091	38.573	0.1939	0.083	36.838	0.1852
90	80	8.2	17.5	8.6	16.1	0.093	38.994	0.1960	0.075	35.018	0.1760
90	70	8	17.8	9	15.6	0.098	40.029	0.2012	0.066	32.850	0.1651
90	60	7.6	18.1	9.9	14.6	0.105	41.434	0.2083	0.047	27.721	0.1393
90	50	7	18.6	11.1	13.4	0.116	43.550	0.2189	0.023	19.392	0.0975
90	40	6.5	19.3	11.9	12.7	0.128	45.747	0.2300	0.008	11.437	0.0575
90	30	6	19.7	12.1	12.3	0.137	47.328	0.2379	0.002	5.718	0.0287
90	20	5.8	19.9	12.2	12.3	0.141	48.014	0.2413	0.001	4.044	0.0203
90	10	5.8	20	12.2	12.3	0.142	48.184	0.2422	0.001	4.044	0.0203
90	0	5.7	20.1	12.3	12.3	0.144	48.522	0.2439	0.000	0.000	0.0000

ตารางที่ 4 แสดงค่า Head, Velocity, Volume flow rate เมื่อเปิดวาล์ว 2 ที่ 80%

Valve 2	Valve 3	Pipe 2 (3")		Pipe 3 (3")		Pipe 2			Pipe 3		
		SH (cm)	DH (cm)	SH (cm)	DH (cm)	Head (m)	Velocity (m/s)	Vol. flow rate (m ³ /s)	Head (m)	Velocity (m/s)	Vol. flow rate (m ³ /s)
80	100	8.5	17.2	8.7	15.9	0.087	37.715	0.1896	0.072	34.310	0.1725
80	90	8.5	17.2	8	16.6	0.087	37.715	0.1896	0.086	37.498	0.1885
80	80	8.4	17.2	8.4	16.3	0.088	37.932	0.1907	0.079	35.940	0.1807
80	70	8.4	17.3	8.5	16.1	0.089	38.146	0.1917	0.076	35.251	0.1772
80	60	8.2	17.6	9.1	15.4	0.094	39.203	0.1971	0.063	32.094	0.1613
80	50	7.7	18	10.2	14.3	0.103	41.037	0.2063	0.041	25.891	0.1301
80	40	7.2	18.5	11.2	13.3	0.113	42.983	0.2161	0.021	18.530	0.0931
80	30	6.7	19	11.9	12.6	0.123	44.845	0.2254	0.007	10.698	0.0538
80	20	6.5	19.3	12	12.4	0.128	45.747	0.2300	0.004	8.087	0.0406
80	10	6.2	19.5	12	12.3	0.133	46.632	0.2344	0.003	7.004	0.0352
80	0	6.2	19.5	12.1	12.1	0.133	46.632	0.2344	0.000	0.000	0.0000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5 แสดงค่า Head, Velocity, Volume flow rate เมื่อเปิดวาล์ว 2 ที่ 70%

Valve 2	Valve 3	Pipe 2 (3")		Pipe 3 (3")		Pipe 2			Pipe 3		
		SH (cm)	DH (cm)	SH (cm)	DH (cm)	Head (m)	Velocity (m/s)	Vol. flow rate (m ³ /s)	Head (m)	Velocity (m/s)	Vol. flow rate (m ³ /s)
70	100	9	16.7	8	16.6	0.077	35.482	0.1784	0.086	37.498	0.1885
70	90	8.9	16.8	8	16.6	0.079	35.940	0.1807	0.086	37.498	0.1885
70	80	8.9	16.8	8.2	16.4	0.079	35.940	0.1807	0.082	36.616	0.1840
70	70	8.7	17	8.7	15.8	0.083	36.838	0.1852	0.071	34.071	0.1713
70	60	8.4	17.3	9.7	14.8	0.089	38.146	0.1917	0.051	28.876	0.1451
70	50	7.9	17.8	10.9	13.5	0.099	40.232	0.2022	0.026	20.618	0.1036
70	40	7.5	18.2	11.8	12.7	0.107	41.826	0.2102	0.009	12.131	0.0610
70	30	7.2	18.5	12.1	12.4	0.113	42.983	0.2161	0.003	7.004	0.0352
70	20	7.1	18.7	12.2	12.3	0.116	43.550	0.2189	0.001	4.044	0.0203
70	10	7	18.2	12.2	12.3	0.112	42.793	0.2151	0.001	4.044	0.0203
70	0	6.9	18.7	12.2	12.2	0.118	43.924	0.2208	0	0.000	0.0000

ตารางที่ 6 แสดงค่า Head, Velocity, Volume flow rate เมื่อเปิดวาล์ว 2 ที่ 60%

Valve 2	Valve 3	Pipe 2 (3")		Pipe 3 (3")		Pipe 2			Pipe 3		
		SH (cm)	DH (cm)	SH (cm)	DH (cm)	Head (m)	Velocity (m/s)	Vol. flow rate (m ³ /s)	Head (m)	Velocity (m/s)	Vol. flow rate (m ³ /s)
60	100	10	15.9	7.8	16.9	0.059	31.059	0.1561	0.091	38.573	0.1939
60	90	10.1	15.9	7.1	17.1	0.058	30.794	0.1548	0.1	40.435	0.2032
60	80	10	15.9	7.9	16.9	0.059	31.059	0.1561	0.09	38.360	0.1928
60	70	9.8	16	8	16.2	0.062	31.839	0.1600	0.082	36.616	0.1840
60	60	9.7	16.1	8.3	15.8	0.064	32.348	0.1626	0.075	35.018	0.1760
60	50	9.4	16.4	10	14.5	0.070	33.830	0.1701	0.045	27.125	0.1363
60	40	9	16.8	11.1	13.4	0.078	35.711	0.1795	0.023	19.392	0.0975
60	30	8.5	17.1	11.9	12.6	0.086	37.498	0.1885	0.007	10.698	0.0538
60	20	8.4	17.4	12	12.3	0.090	38.360	0.1928	0.003	7.004	0.0352
60	10	8.1	17.5	12	12.2	0.094	39.203	0.1971	0.002	5.718	0.0287
60	0	8.1	17.5	12.2	12.2	0.094	39.203	0.1971	0	0.000	0.0000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 7 แสดงค่า Head, Velocity, Volume flow rate เมื่อเปิดวาล์ว 2 ที่ 50%

Valve 2	Valve 3	Pipe 2 (3")		Pipe 3 (3")		Pipe 2			Pipe 3		
		SH (cm)	DH (cm)	SH (cm)	DH (cm)	Head (m)	Velocity (m/s)	Vol. flow rate (m ³ /s)	Head (m)	Velocity (m/s)	Vol. flow rate(m ³ /s)
50	100	11.1	14.7	7.3	17.4	0.036	24.261	0.1219	0.101	40.637	0.2043
50	90	11.1	14.7	7.2	17.4	0.036	24.261	0.1219	0.102	40.837	0.2053
50	80	11.1	14.7	7.5	17.2	0.036	24.261	0.1219	0.097	39.824	0.2002
50	70	11	14.7	8.1	16.5	0.037	24.596	0.1236	0.084	37.059	0.1863
50	60	10.9	14.9	9.4	15.2	0.040	25.573	0.1285	0.058	30.794	0.1548
50	50	10.6	15.1	10.9	13.7	0.045	27.125	0.1363	0.028	21.396	0.1075
50	40	10.4	15.3	11.8	12.8	0.049	28.305	0.1423	0.01	12.787	0.0643
50	30	10.2	15.5	12.1	12.4	0.053	29.437	0.1480	0.003	7.004	0.0352
50	20	10.1	15.6	12.2	12.4	0.055	29.987	0.1507	0.002	5.718	0.0287
50	10	10	15.6	12.2	12.3	0.056	30.259	0.1521	0.001	4.044	0.0203
50	0	10.2	15.7	12.2	12.2	0.055	29.987	0.1507	0	0.000	0.0000

ตารางที่ 8 แสดงค่า Head, Velocity, Volume flow rate เมื่อเปิดวาล์ว 2 ที่ 40%

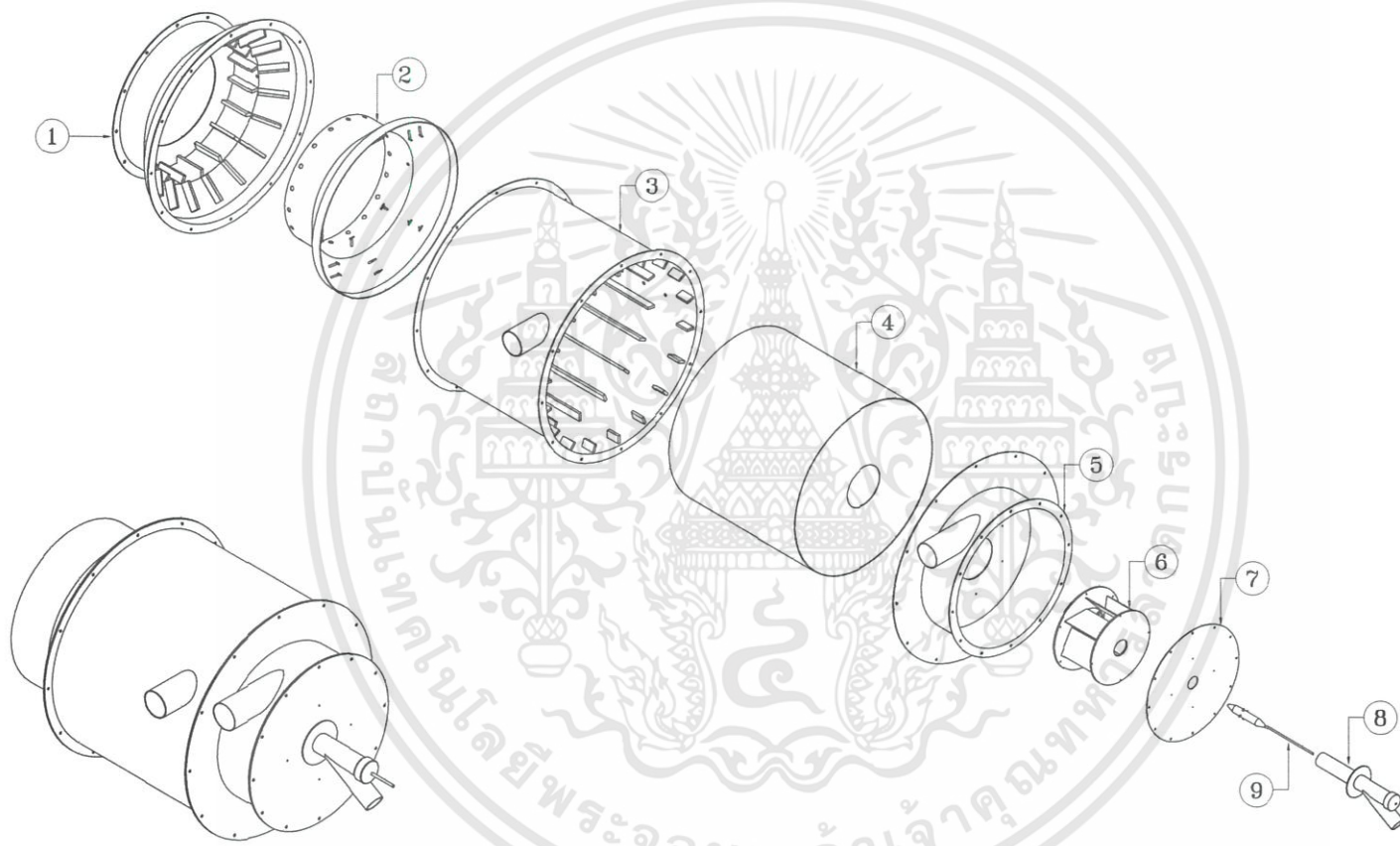
Valve 2	Valve 3	Pipe 2 (3")		Pipe 3 (3")		Pipe 2			Pipe 3		
		SH (cm)	DH (cm)	SH (cm)	DH (cm)	Head (m)	Velocity (m/s)	Vol. flow rate (m ³ /s)	Head (m)	Velocity (m/s)	Vol. flow rate(m ³ /s)
40	100	12	13.7	6.7	18	0.017	16.672	0.0838	0.113	42.983	0.2161
40	90	12	13.8	6.7	18	0.018	17.155	0.0862	0.113	42.983	0.2161
40	80	12	13.8	7	17.7	0.018	17.155	0.0862	0.107	41.826	0.2102
40	70	12	13.8	7.1	17.6	0.018	17.155	0.0862	0.105	41.434	0.2083
40	60	11.9	13.8	8	16.6	0.019	17.625	0.0886	0.086	37.498	0.1885
40	50	11.9	13.9	9.5	15	0.020	18.083	0.0909	0.055	29.987	0.1507
40	40	11.7	14	10.9	12.6	0.023	19.392	0.0975	0.017	16.672	0.0838
40	30	11.7	14.1	12	12.7	0.024	19.809	0.0996	0.007	10.698	0.0538
40	20	11.7	14.2	12.2	12.4	0.025	20.218	0.1016	0.002	5.718	0.0287
40	10	11.6	14.1	12.2	12.4	0.025	20.218	0.1016	0.002	5.718	0.0287
40	0	11.6	14.2	12.2	12.4	0.026	20.618	0.1036	0.002	5.718	0.0287

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ข

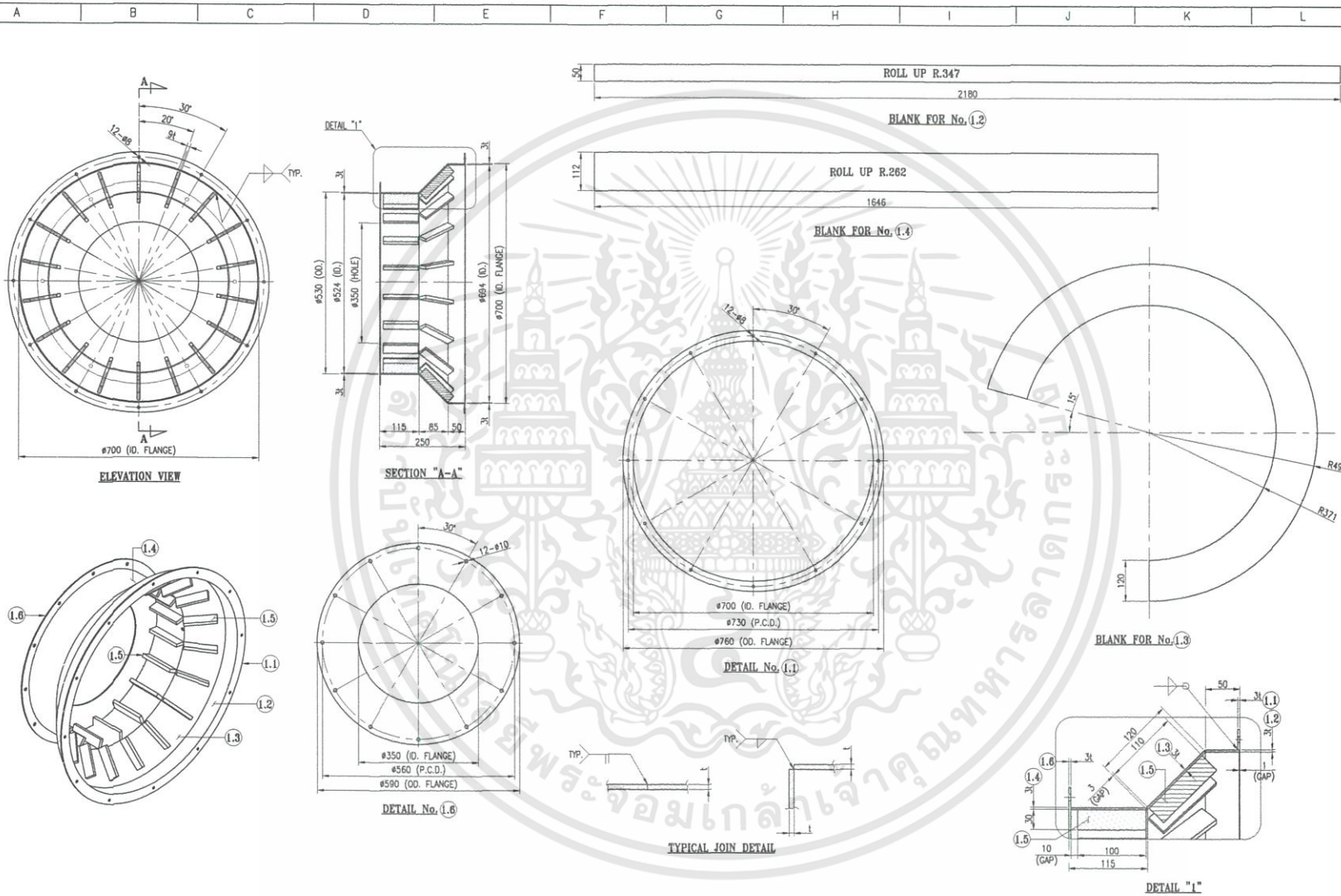
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



BIOMASS PULVERIZER BURNER

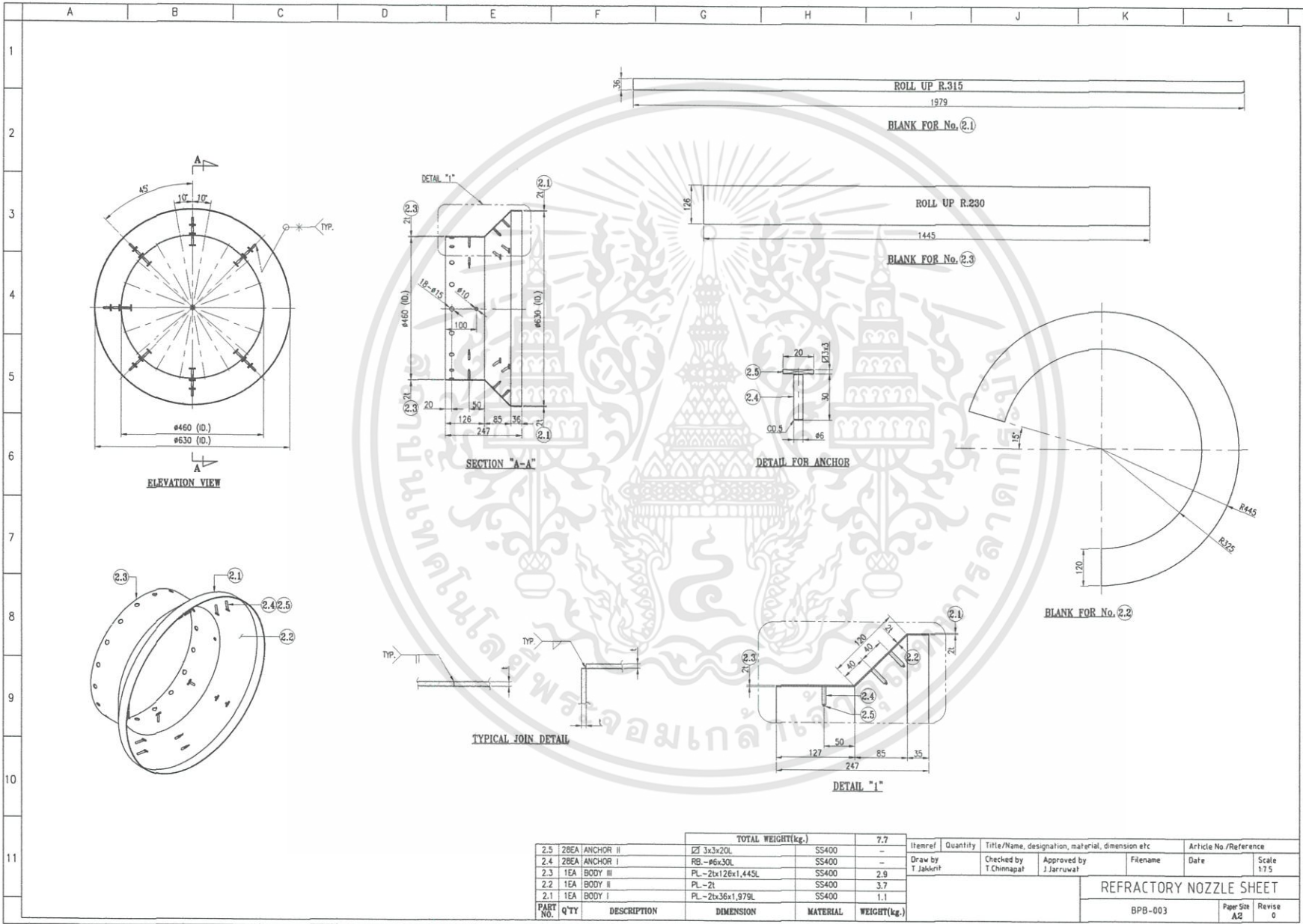
9	1UNIT	GAS NOZZLE	--	--	--
8	1UNIT	PULVERIZER NOZZLE	--	--	--
7	1UNIT	END PLATE	--	--	--
6	1UNIT	SWIRL UNIT	--	--	--
5	1UNIT	SWIRL BOX	--	--	--
4	1UNIT	MAIN REFRACTORY WALL	--	--	--
3	1UNIT	BURNER MAIN JACKET	--	--	--
2	1UNIT	REFRACTORY NOZZLE SHEET	--	--	--
1	1UNIT	BURNER NOZZLE JACKET	--	--	--
PART NO.	Q'TY	DESCRIPTION	DIMENSION	MATERIAL	WEIGHT(kg.)

Item/Ref	Quantity	Title/Name, designation, material, dimension etc	Article No./Reference		
Draw by T.Chinnapat	Checked by T.Chinnapat	Approved by J.Jarurwat	Filename	Date	Scale 1:10
Biomass Pulverizer Burner			BPB-002		
			Page Size A2	Revise 0	



		TOTAL WEIGHT(kg.)		27.2	
1.6	1EA FLANGE	PL-3xø410(0.)#590(00.)	SS400	4.1	
1.5	1LOT STIFFENER I	PL-90x30x3.960L	SS400	8.4	
1.4	1EA BODY II	PL-3x112x1.646L	SS400	4.3	
1.3	1EA BODY I	PL-3x	SS400	6.2	
1.2	1EA BODY I	PL-3x50x2.180L	SS400	2.6	
1.1	1EA FLANGE	PL-3x30x2.199L	SS400	1.6	
PART NO.	QTY	DESCRIPTION	DIMENSION	MATERIAL	WEIGHT(kg.)

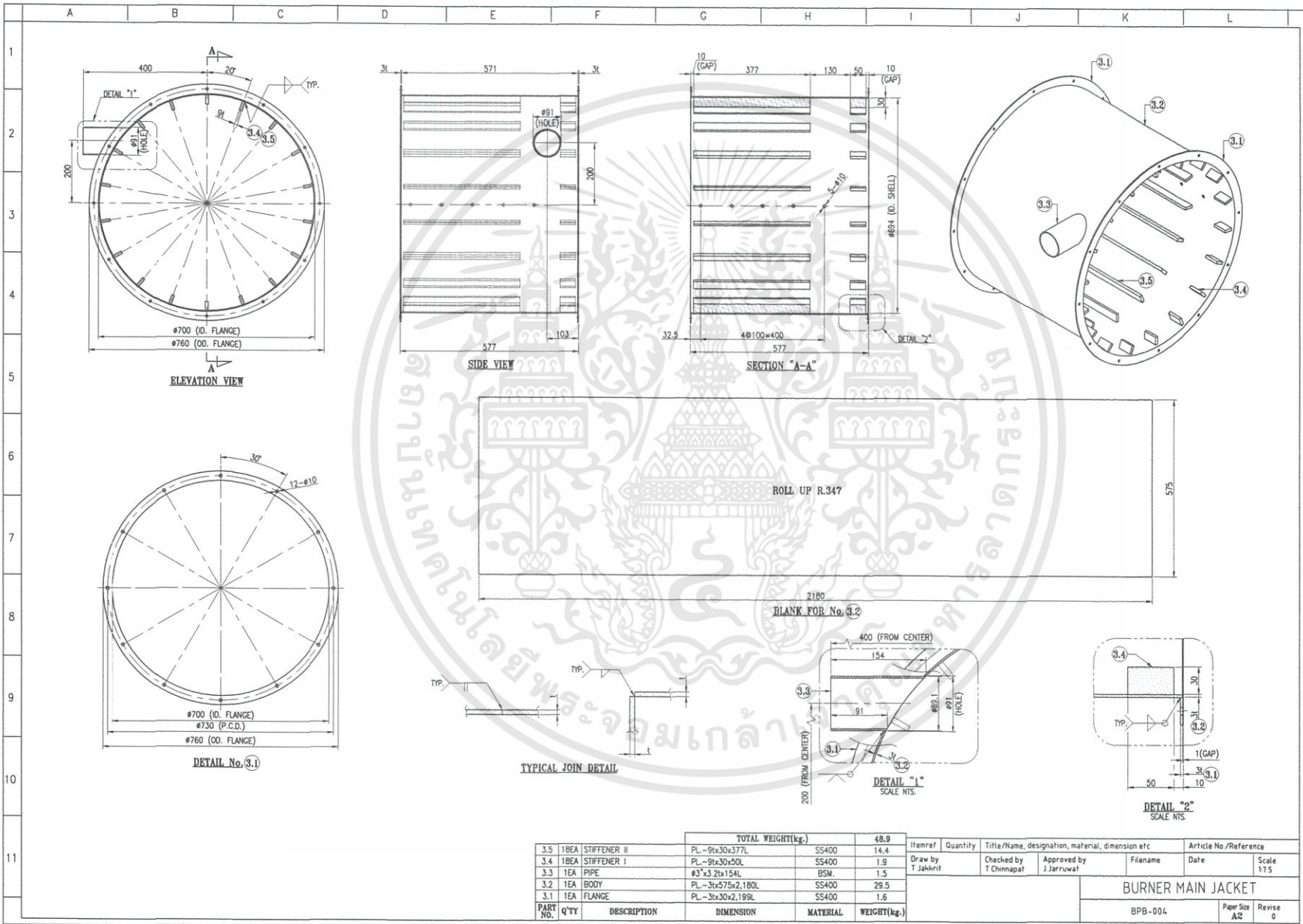
Itemref	Quantity	Title/Name, designation, material, dimension etc	Article No/Reference
Draw by T.Jakkrit	Checked by T.Chinnapat	Approved by J.Jarurwat	Filename Date Scale 1:7.5
DETAIL BURNER NOZZLE JACKET			
BPB-002		Paper Size A2	Revise 0



TOTAL WEIGHT(kg.)					7.7
2.5	2BEA ANCHOR II	12 3x3x20L	SS400	-	
2.4	2BEA ANCHOR I	RB-#6x30L	SS400	-	
2.3	1EA BODY II	PL-2tx126x1,443L	SS400	2.9	
2.2	1EA BODY II	PL-2t	SS400	3.7	
2.1	1EA BODY I	PL-2tx36x1,979L	SS400	1.1	

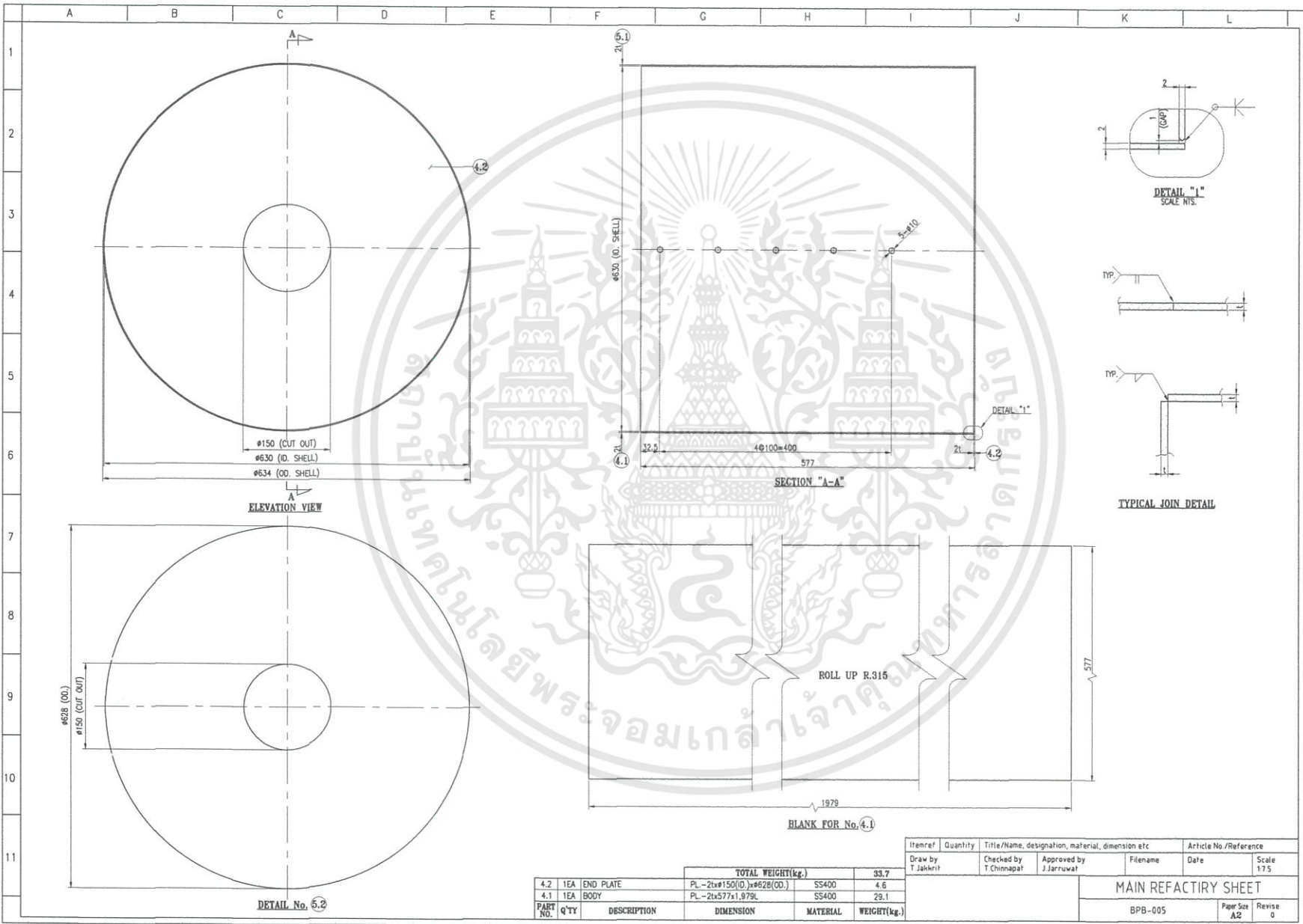
Itemref	Quantity	Title/Name, designation, material, dimension etc	Article No /Reference	
Draw by T Jakkrin	Checked by T Chinnapat	Approved by J Jaruwat	Filename	Date
			Scale	1:1.5

REFRACTORY NOZZLE SHEET				
BPB-003	Page Size A2	Revise 0		



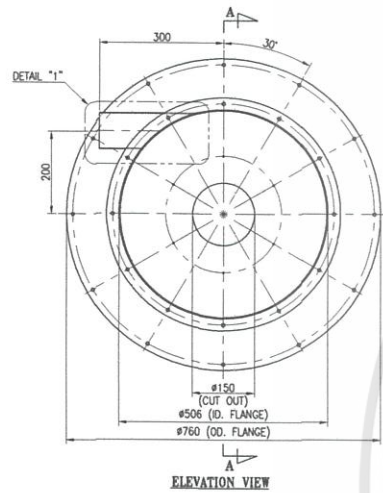
PART NO.	Q'TY	DESCRIPTION	DIMENSION	MATERIAL	WEIGHT(kg.)
3.5	18EA	STIFFENER II	PL-9tx30x377L	SS400	14.4
3.4	18EA	STIFFENER I	PL-9tx30x50L	SS400	1.9
3.3	1EA	PIPE	#3"x3.2tx154L	BSM	1.5
3.2	1EA	BODY	PL-3tx575x2,180L	SS400	29.5
3.1	1EA	FLANGE	PL-3tx30x2,189L	SS400	1.6
TOTAL WEIGHT(kg.)					48.9

Itemref	Quantity	Title/Name, designation, material, dimension etc	Article No/Reference
Draw by	Checked by	Approved by	Filename
T.Jakkrit	T.Chinnapat	J.Jarurwat	Date
BURNER MAIN JACKET			Scale 1:1.5
BPB-004			Paper Size A2
Revise 0			

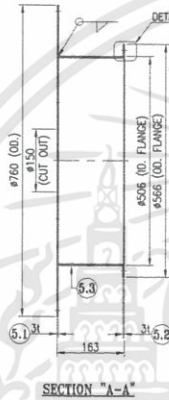


PART NO.	Q'TY	DESCRIPTION	DIMENSION	MATERIAL	WEIGHT(kg.)
4.2	1EA	END PLATE	PL-2t#150(O.D.)#628(O.D.)	SS400	33.7
4.1	1EA	BODY	PL-2t#577x1,979L	SS400	29.1
TOTAL WEIGHT(kg.)					62.8

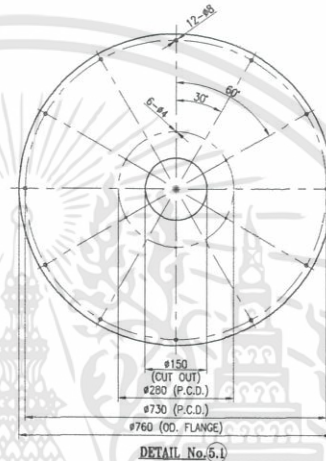
Item#	Quantity	Title/Name, designation, material, dimension etc	Article No./Reference		
Draw by T.Jakkrit	Checked by T.Chinapat	Approved by J.Jaruwat	Filename	Date	Scale 1:7.5
MAIN REFRACTORY SHEET					
BPB-005				Page Size A2	Revise 0



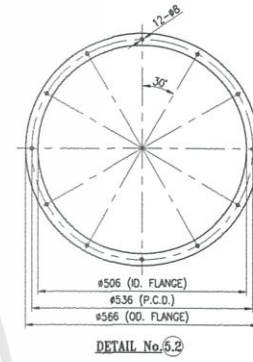
ELEVATION VIEW



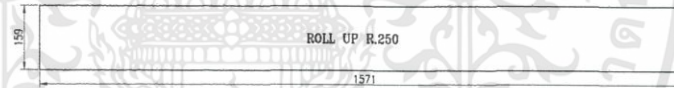
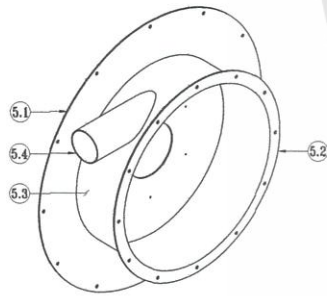
SECTION "A-A"



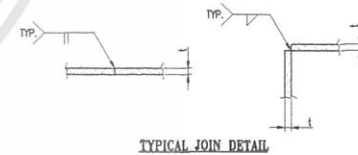
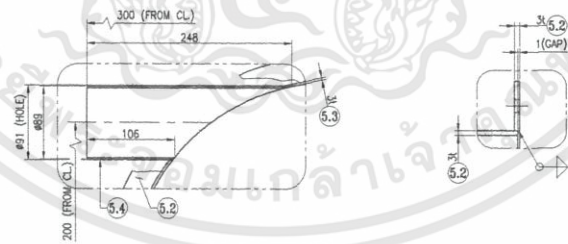
DETAIL No. 5.1



DETAIL No. 5.2



BLANK FOR No. 5.3



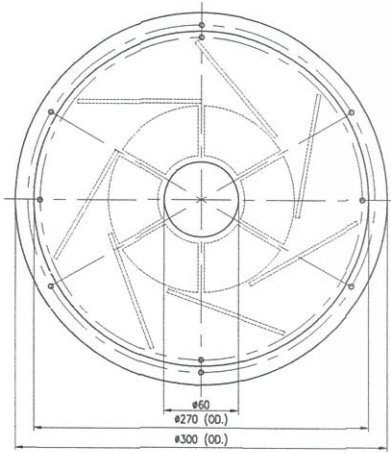
TYPICAL JOIN DETAIL

		TOTAL WEIGHT(kg.)			
PART NO.	Q'TY	DESCRIPTION	DIMENSION	MATERIAL	WEIGHT(kg.)
5.4	1EA	PIPE	ø3"x3.2x154L.	B5M.	17.4
5.3	1EA	BODY	PL-3x159x1.571	SS400	6
5.2	1EA	FLANGE	PL-3x30x1.59DL	SS400	1.1
5.1	1EA	FLANGE	PL-3xø150(O.D.)xø760(O.D.)	SS400	10.3

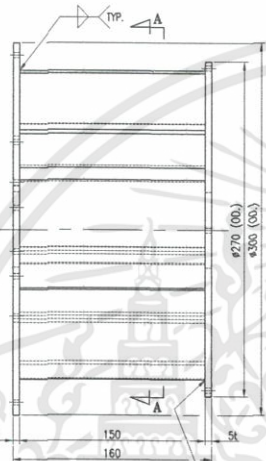
Itemref	Quantity	Title/Name, designation, material, dimension etc	Article No./Reference		
Draw by	Checked by	Approved by	Filename	Date	Scale
T.Jakkrit	T.Chinnapat	J.Jaruvat			1:75
SWIRL BOX					
			BPB-006	Paper Size A2	Revise 0

A B C D E F G H I J K L

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11



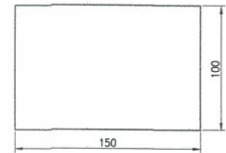
FRONT VIEW



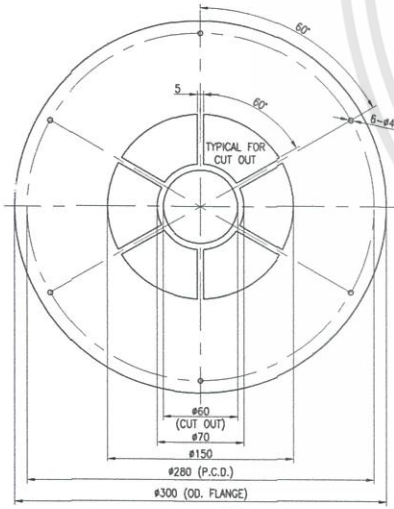
SIDE VIEW



SECTION "A-A"



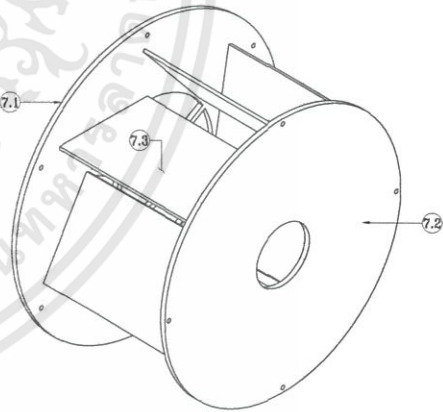
DETAIL No. 7.3



DETAIL No. 7.1

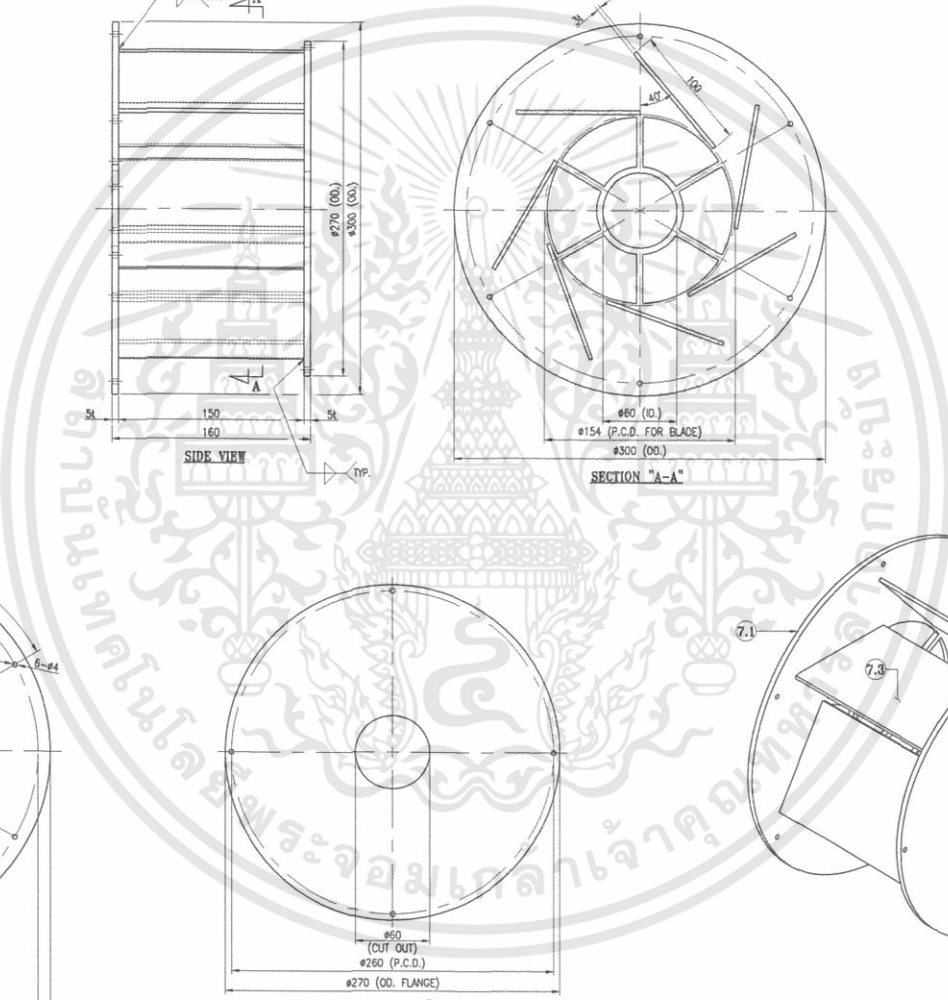


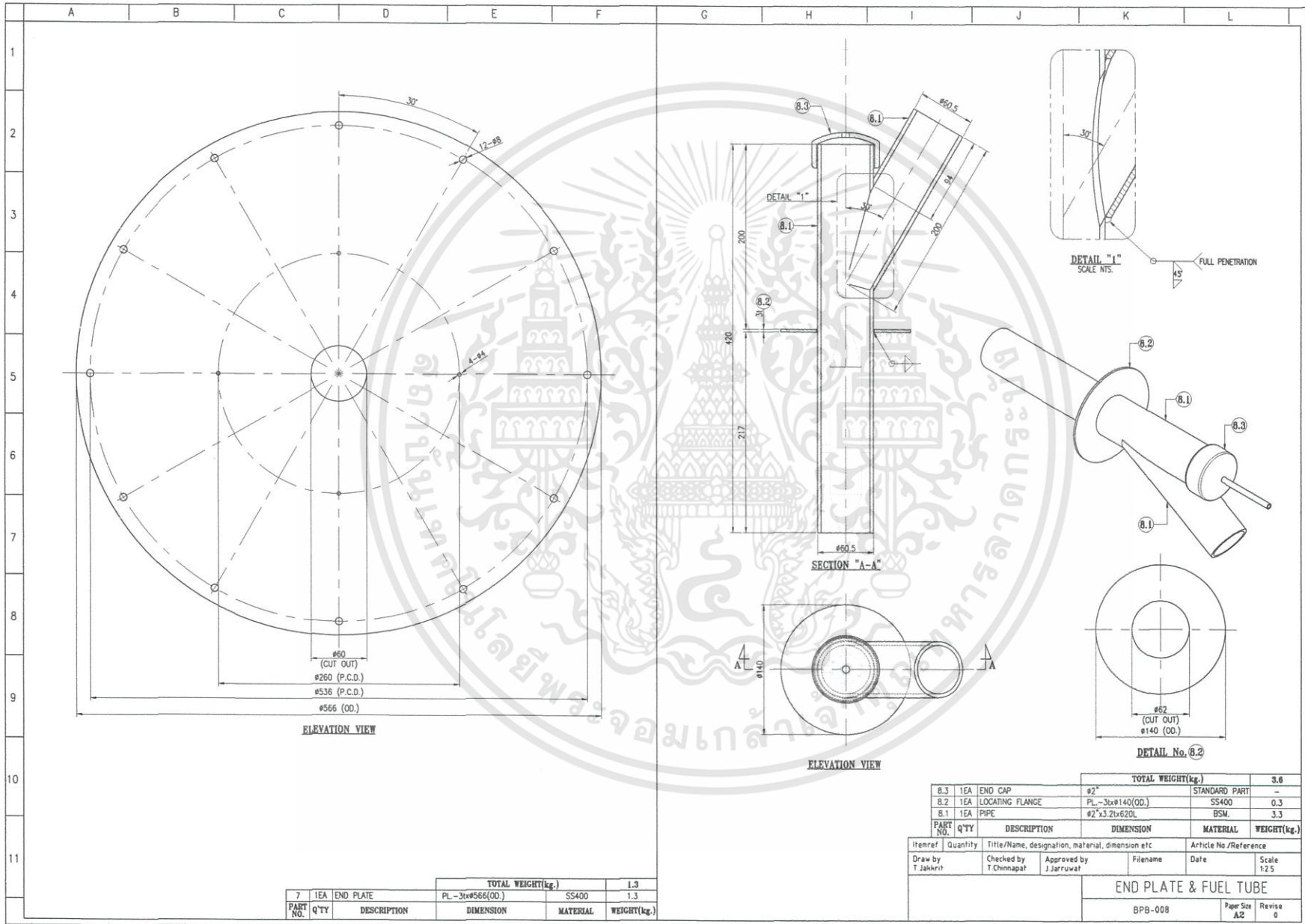
DETAIL No. 7.2



PART NO.	QTY	DESCRIPTION	DIMENSION	MATERIAL	WEIGHT(kg)
7.3	7EA	BLADE	PL-3x100x150L	SS400	8.1
7.2	1EA	FLANGE II	PL-Stx270(OD)	SS400	2.5
7.1	1EA	FLANGE I	PL-Stx300(OD)	SS400	1.6
					2

Itemref	Quantity	Title/Name, designation, material, dimension etc	Article No./Reference
Draw by T.Jakkrit	Checked by T.Chinapat	Approved by J.Jarruwat	Filename Date
SWIRL UNIT			
BPB-007		Page Size A2	Revise 0





TOTAL WEIGHT(kg.)					
7	1EA	END PLATE	PL-3tx#566(OD.)	SS400	
				1.3	
PART NO.	QTY	DESCRIPTION	DIMENSION	MATERIAL	WEIGHT(kg.)

TOTAL WEIGHT(kg.)					
8.3	1EA	END CAP	Ø2"	STANDARD PART	3.6
8.2	1EA	LOCATING FLANGE	PL-3txØ140(OD.)	SS400	0.3
8.1	1EA	PIPE	Ø2"x3.2tx620L	BSM.	3.3

Item/Ref	Quantity	Title/Name, designation, material, dimension etc	Article No /Reference
Draw by	Checked by	Approved by	Filename
T Jakkrit	T Chinnapat	J Jaruwat	Date
Scale 1:25			
END PLATE & FUEL TUBE			
BPB-008		Paper Size	Revise
		A2	0