

การวิเคราะห์สมรรถนะจากแบบจำลองของห้องเผาไหม้
เครื่องกำเนิดไอน้ำแบบท่อขด

SIMULATION ANALYSIS ON THE PERFORMANCE OF A
COMBUSTION CHAMBER FOR SPIRAL – TUBE STEAM GENERATOR

วัชรินทร์ กลับสูงเนิน

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ปีการศึกษา 2562
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

การวิเคราะห์สมรรถนะจากแบบจำลองของห้องเผาไหม้
เครื่องกำเนิดไอน้ำแบบท่อชุด

วัชรินทร์ กลับสูงเนิน

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ปีการศึกษา 2562
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การวิเคราะห์สมรรถนะจากแบบจำลองของห้องเผาไหม้เครื่องกำเนิดไอน้ำแบบท่อขด

Simulation Analysis on the Performance of a Combustion Chamber for Spiral-Tube Steam Generator

ชื่อ - นามสกุล

ว่าที่ร้อยตรีหญิงวัชรินทร์ กลับสูงเนิน

สาขาวิชา

วิศวกรรมเครื่องกล

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์บุญฤทธิ์ ประสาทแก้ว, D.Eng.

ปีการศึกษา


2562

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ขวัญชัย จ้อยเจริญ, ปร.ด.)



กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์กิตติพงษ์ เจาจารีก, D.Eng.)



กรรมการ

(อาจารย์สถาพร ทองวิค, วศ.ด.)



กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์บุญฤทธิ์ ประสาทแก้ว, D.Eng.)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต



คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิวกร อ่างทอง, Ph.D.)

วันที่ 10 เดือน มกราคม พ.ศ. 2563

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การวิเคราะห์สมรรถนะจากแบบจำลองของห้องเผาไหม้เครื่องกำเนิดไอน้ำแบบท่อขด
ชื่อ - นามสกุล	ว่าที่ร้อยตรีหญิงวัชรินทร์ กลีบสูงเนิน
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์บุญฤทธิ์ ประสาทแก้ว, D.Eng.
ปีการศึกษา	2562

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและสร้างห้องเผาไหม้เครื่องกำเนิดไอน้ำแบบท่อขดที่มีขนาดเล็กหรือมีค่ากำลังการผลิตไอน้ำต่อน้ำหนักสูง งานวิจัยนี้รายงานผลการวิเคราะห์สมรรถนะด้วยแบบจำลองสมการทางคณิตศาสตร์ของห้องเผาไหม้เครื่องกำเนิดไอน้ำแบบท่อขด (STSG) เพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบห้องเผาไหม้เครื่องกำเนิดไอน้ำแบบท่อขดต้นแบบ โดยห้องเผาไหม้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 450 มิลลิเมตร ความสูง 100 มิลลิเมตร

การศึกษางานวิจัยนี้เป็นการจำลองระบบเพื่อวิเคราะห์ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของห้องเผาไหม้เครื่องกำเนิดไอน้ำแบบท่อขด (STSG) โดยห้องเผาไหม้มีอัตราการเผาไหม้คงที่ แต่มีการติดตั้งหัวเผาไหม้ด้วยจำนวนที่แตกต่างกัน ตั้งแต่ 1 ถึง 4 หัวเผา จากนั้นเพื่อวิเคราะห์ความน่าเชื่อถือของแบบจำลองสมการทางคณิตศาสตร์ จึงมีการนำผลจากแบบจำลองสมการทางคณิตศาสตร์ไปเปรียบเทียบกับผลการทดลอง โดยหัวเผาแก๊สหุงต้มที่ใช้มีขนาด 5-20 กิโลวัตต์

ผลจากการวิเคราะห์แบบจำลองสมการทางคณิตศาสตร์พบว่าห้องเผาไหม้ที่ใช้หัวเผาไหม้จำนวน 3 หัวเผา มีความเหมาะสมที่จะนำมาติดตั้งกับการใช้งานจริง เนื่องจากความยาวของเปลวไฟที่เหมาะสมส่งผลให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของระบบที่ห้องเผาไหม้มีการติดตั้งหัวเผาแบบ 3 หัวเผา สูงกว่ารูปแบบอื่น โดยที่ค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนแบบ 3 หัวเผา และแบบ 4 หัวเผา มีค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนใกล้เคียงกัน

คำสำคัญ: แบบจำลองคอมพิวเตอร์ เครื่องกำเนิดไอน้ำขนาดกะทัดรัด เครื่องกำเนิดไอน้ำแบบท่อขด

Thesis Title Simulation Analysis on the Performance of a Combustion Chamber for Spiral–Tube Steam Generator
Name – Surname Acting Sub Lt. Watcharin Glabsungneon
Program Mechanical Engineering
Thesis Advisor Assistant Professor Boonrit Prasartkaew, D.Eng.
Academic Year 2019

ABSTRACT

The objective of this research was to design and build a combustion chamber for a compact spiral-tube steam generator with a high power to weight ratio. This research used performance analysis of the mathematical equation model of the combustion chamber for the spiral tube steam generator (STSG) to provide guidance in designing the combustion chamber for the spiral-tube steam generator prototype. The combustion chamber has the internal diameter of 450 millimeters and the height of 100 millimeters.

The system simulation was conducted to analyze the thermal efficiency of the combustion chamber for the spiral–tube steam generator (STSG) with a stable combustion rate, but there were various numbers of burners installed with 1 to 4 burners. In order to analyze the reliability of the mathematical equation model, there was a comparison between the result of the mathematical equation model and the experimental result of the LPG burner with 5-20 kilowatts.

The analysis of the mathematical equation model showed that the combustion chamber with 3 burners was suitable to be installed for actual use according to the appropriate flame length. The combustion chamber with 3 burners had the most thermal efficiency. The combustion chamber with 3 burners and 4 burners had similar thermal efficiency.

Keywords: computer simulation model, power to weight ratio, spiral-tube steam generator

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณที่ปรึกษามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ผู้ช่วยศาสตราจารย์ บุญย์ฤทธิ์ ประสาทแก้ว ขอขอบคุณที่ปรึกษาจากสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.) จากโครงการภาคีบัณฑิต อ. ธนิสร์ วิทย์ธนาวัฒน์ ขอขอบคุณ อ. ศีขรินทร์ โกมลศิริญ จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือที่สนับสนุนเวลาในการสอนและให้คำแนะนำต่างๆในการใช้โปรแกรมวิเคราะห์ผล ให้คำปรึกษา ข้อเสนอแนะ ตลอดระยะเวลาทำงานวิจัย และขอขอบคุณ ผศ.ดร.ขวัญชัย จ้อยเจริญ และ ดร.สถาพร ทองวิค และ ผศ.ดร.กิติพงษ์ เจาจารีก กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิ ที่กรุณาเสียสละเวลาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณมารดา ครอบครัวที่ให้การสนับสนุนและให้กำลังใจข้าพเจ้าเสมอมา ขอขอบคุณคณาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลทุกท่านที่ได้ถ่ายทอดศาสตร์ความรู้ทางด้านวิชาการต่างๆ ให้แก่ข้าพเจ้า รวมไปถึงเจ้าหน้าที่ประจำภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและเจ้าหน้าที่ประจำศูนย์และสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.) ทุกท่านที่คอยให้ความสะดวกในด้านการเอกสารและการใช้อุปกรณ์ต่างๆ ตลอดระยะเวลาที่ทำการศึกษา ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัยที่คอยให้คำปรึกษาในงานด้านเอกสารต่างๆ ตลอดหลักสูตร ขอขอบคุณทุกท่านที่ไม่ได้กล่าวชื่อนามในที่นี้ที่มีส่วนทำให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้มีความก้าวหน้าและสำเร็จได้ในที่สุด

สุดท้ายนี้ ข้าพเจ้าหวังว่างานวิจัยนี้ จะเป็นประโยชน์แก่ผู้สนใจเกี่ยวกับการออกแบบโครงสร้างและการคำนวณผลทางพลศาสตร์ของไหลโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการเผาไหม้สำหรับเครื่องกำเนิดไอน้ำแบบท่อขด หากงานวิจัยนี้เกิดข้อผิดพลาดประการใด ข้าพเจ้าต้องขออภัยเอาไว้ ณ ที่นี้ด้วย

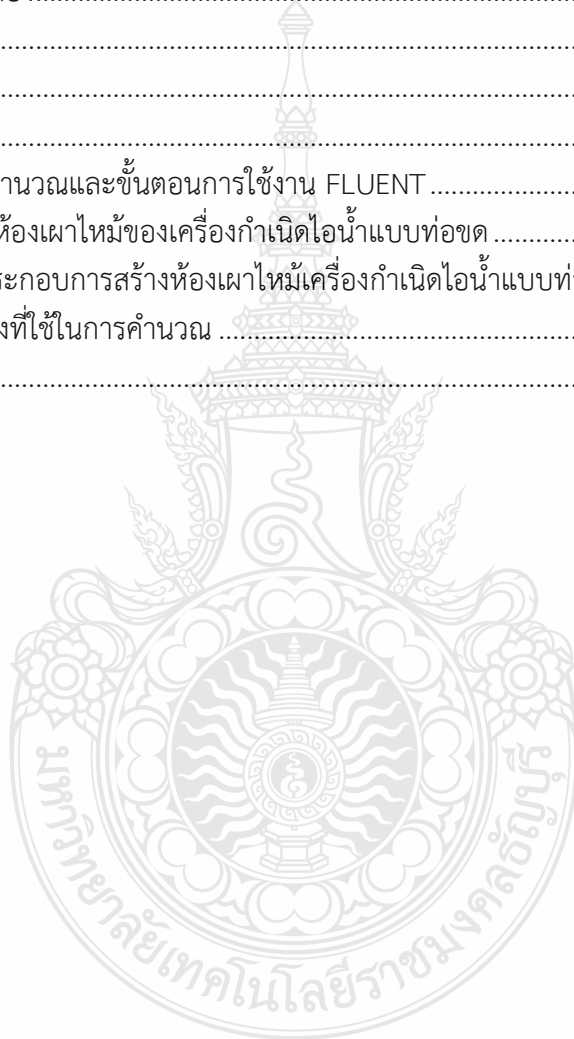
วัชรินทร์ กลับสูงเนิน

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	(3)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	(4)
กิตติกรรมประกาศ.....	(5)
สารบัญ.....	(6)
สารบัญตาราง.....	(8)
สารบัญรูป.....	(9)
บทที่ 1 บทนำ.....	12
1.1 ความเป็นมาของงานวิจัย.....	12
1.2 วัตถุประสงค์.....	13
1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....	13
1.4 ขั้นตอนการศึกษา.....	13
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	13
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	14
2.1 ทฤษฎีเครื่องยนต์สันดาปภายนอก.....	14
2.2 สมการพื้นฐานสำหรับการไหล.....	15
2.3 ทฤษฎีการถ่ายเทความร้อน.....	22
2.4 ทฤษฎีการเผาไหม้.....	24
2.5 สมการควบคุมพื้นฐาน.....	34
2.6 สรุปสาระสำคัญจากเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	36
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	42
3.1 บทนำ.....	42
3.2 แผนการดำเนินงานวิจัย.....	42
3.3 สถานที่ทำการติดตั้งและทดสอบ.....	44
3.4 เครื่องมือและวิธีการทดลอง.....	45
3.5 วิธีการทดสอบและการบันทึกผล.....	45
3.6 เงื่อนไขและขอบเขตของข้อมูลในการจำลอง และทดสอบ.....	45
3.7 การวิเคราะห์ผลกระทบของ Mesh ต่อการคำนวณ.....	46
3.8 การวิเคราะห์แบบจำลองสมการทางคณิตศาสตร์.....	49
3.9 การทดสอบการใช้งานจริง.....	50
บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล.....	53
4.1 ผลการวิเคราะห์ผลกระทบของ Mesh ต่อการคำนวณ.....	53
4.2 ผลการวิเคราะห์แบบจำลองสมการทางคณิตศาสตร์ของห้องเผาไหม้.....	57

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
4.3 ผลการทดสอบใช้งานจริงกับห้องเผาไหม้.....	66
4.4 การเทียบผลของแบบจำลองกับการทดสอบ	68
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ	69
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	69
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	70
บรรณานุกรม	71
ภาคผนวก.....	72
ภาคผนวก ก การคำนวณและขั้นตอนการใช้งาน FLUENT	73
ภาคผนวก ข แบบห้องเผาไหม้ของเครื่องกำเนิดไอน้ำแบบท่อชุด	82
ภาคผนวก ค รูปประกอบการสร้างห้องเผาไหม้เครื่องกำเนิดไอน้ำแบบท่อชุด และการทดลอง	84
ภาคผนวก ง ตารางที่ใช้ในการคำนวณ	93
ประวัติผู้เขียน	101



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 Flammability limit ของก๊าซผสมระหว่างเชื้อเพลิงต่างๆ-อากาศ.....	28
ตารางที่ 2.2 วิธีเผาไหม้ประเภทต่างๆ.....	29
ตารางที่ 3.1 ข้อมูลที่ใช้ในวิเคราะห์แบบจำลองสมการทางคณิตศาสตร์แทนค่าใน Boundary Condition และใช้ในการทดสอบใช้งานจริง.....	45
ตารางที่ 3.2 การปรับค่า Mesh Sizing เพื่อหาค่า Mesh ที่เหมาะสม	48
ตารางที่ 4.1 อุณหภูมิเทียบกับเวลาในการทดสอบ.....	66
ตารางที่ 5.1 เปรียบเทียบอุณหภูมิการทดสอบระหว่างการวิเคราะห์แบบจำลอง และการทดสอบจริง	69
ตารางที่ ก.1 องค์ประกอบคิดเป็นร้อยละโดยน้ำหนักของแก๊สหุงต้ม(LPG).....	74
ตารางที่ ก.2 ค่าของตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณแบบ 1 หัวเผาไหม้จากการคำนวณเชิงตัวเลข CFD.....	75
ตารางที่ ก.3 ค่าของตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณแบบ 2 หัวเผาไหม้จากการคำนวณเชิงตัวเลข CFD.....	75
ตารางที่ ก.4 ค่าของตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณแบบ 3 หัวเผาไหม้จากการคำนวณเชิงตัวเลข CFD.....	75
ตารางที่ ก.5 ค่าของตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณแบบ 4 หัวเผาไหม้จากการคำนวณเชิงตัวเลข CFD.....	76



สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 ค่าความเร็ว u ในการไหลแบบปั่นป่วน.....	18
รูปที่ 2.2 รูปแบบกระแสเปลวไฟของ Slot Burner.....	26
รูปที่ 2.3 ความเร็วของการเผาไหม้แบบกระแสราบเรียบของอากาศผสมชนิดต่างๆ.....	27
รูปที่ 2.4 Diffusion flame ลักษณะต่างๆ.....	30
รูปที่ 2.5 ลักษณะและความยาวของ Jet diffusion flame.....	31
รูปที่ 2.6 ลักษณะการไหลของก๊าซรอบๆ Flame stabilizer (เปลวไฟโพเรน-อากาศ อุณหภูมิห้อง ความดัน บรรยากาศ).....	32
รูปที่ 2.7 Blow off limit จาก flame stabilizer รูปทรงกระบอก (เปลวไฟโพเรน-อากาศ อุณหภูมิห้อง ความดัน บรรยากาศ).....	33
รูปที่ 2.8 แสดงรูปร่างลักษณะพื้นฐาน (Basic Geometry) ของห้องเผาไหม้แบบทรงกระบอก.....	37
รูปที่ 2.9 แสดงปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์โดยเฉลี่ยที่ทางออกจากงานวิจัยของ.....	38
รูปที่ 2.10 แสดงผลการกระจายตัวของอุณหภูมิจากงานวิจัยของ Chaouki Ghenai.....	38
รูปที่ 2.11 แสดงอุณหภูมิที่แกนกลางห้องเผาไหม้ในกรณีเลื่อนต่ำ แห่งของรูอากาศเจือจางจาก.....	39
รูปที่ 2.12 ภาพมุมมองต่างๆของเตาที่สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	40
รูปที่ 2.13 ภาพแสดงรูปร่างทางความร้อน.....	40
รูปที่ 2.14 การปล่อยโดยเปลี่ยนความเร็วของเชื้อเพลิง.....	41
รูปที่ 2.15 แสดงรูปร่างของคาร์บอนที่จะเกาะภายในเตา.....	41
รูปที่ 3.1 ตำแหน่งและระยะการวัดผลของอุณหภูมิ และความเร็วการไหลของการวิเคราะห์ Mesh... 46	
รูปที่ 3.2 การสร้าง Mesh ที่ 1 หัวเผาไหม้.....	46
รูปที่ 3.3 การสร้าง Mesh ที่ 2 หัวเผาไหม้.....	47
รูปที่ 3.4 การสร้าง Mesh ที่ 3 หัวเผาไหม้.....	47
รูปที่ 3.5 การสร้าง Mesh ที่ 4 หัวเผาไหม้.....	48
รูปที่ 3.6 วิธีการดำเนินการวิเคราะห์แบบจำลองสมการทางคณิตศาสตร์.....	49
รูปที่ 3.7 การทดสอบวัดผล และตำแหน่งของอุปกรณ์ของห้องเผาไหม้เครื่องกำเนิดไอน้ำแบบท่อขด.....	50
รูปที่ 3.8 Model ตำแหน่งทางเข้าอากาศ ทางเข้าเชื้อเพลิง และทางออกไอเสียของ แบบจำลองห้องเผาไหม้เครื่องกำเนิดไอน้ำแบบท่อขด.....	51
รูปที่ 3.9 ตำแหน่งการวัดอุณหภูมิของแบบจำลองห้องเผาไหม้เครื่องกำเนิดไอน้ำแบบท่อขด.....	51
รูปที่ 3.10 ตำแหน่งการวัดอุณหภูมิของการทดสอบใช้จริงกับห้องเผาไหม้เครื่องกำเนิดไอน้ำ แบบท่อขด.....	52
รูปที่ 3.11 การทดสอบใช้งานจริงกับห้องเผาไหม้แบบ 3 หัวเผา.....	52
รูปที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์ค่าอุณหภูมิจากผลกระทบของ Mesh แบบ 1 Burner.....	53

สารบัญรูป(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์ค่าความเร็วการไหลจากผลกระทบของ Mesh แบบ 1 Burner.....	54
รูปที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์ค่าอุณหภูมิจากผลกระทบของ Mesh แบบ 2 Burner.....	54
รูปที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์ค่าความเร็วการไหลจากผลกระทบของ Mesh แบบ 2 Burner.....	55
รูปที่ 4.5 ผลการวิเคราะห์ค่าอุณหภูมิจากผลกระทบของ Mesh แบบ 3 Burner.....	55
รูปที่ 4.6 ผลการวิเคราะห์ค่าความเร็วการไหลจากผลกระทบของ Mesh แบบ 3 Burner.....	56
รูปที่ 4.7 ผลการวิเคราะห์ค่าอุณหภูมิจากผลกระทบของ Mesh แบบ 4 Burner.....	56
รูปที่ 4.8 ผลการวิเคราะห์ค่าความเร็วการไหลจากผลกระทบของ Mesh แบบ 4 Burner.....	57
รูปที่ 4.9 แบบจำลองอุณหภูมิของห้องเผาไหม้แบบ 1 หัวเผา (ด้านบน).....	57
รูปที่ 4.10 แบบจำลองความเร็วการไหลของห้องเผาไหม้แบบ 1 หัวเผา (ด้านบน).....	58
รูปที่ 4.11 แบบจำลองอุณหภูมิของห้องเผาไหม้แบบ 1 หัวเผา (ด้านข้าง).....	58
รูปที่ 4.12 แบบจำลองความเร็วการไหลของห้องเผาไหม้แบบ 1 หัวเผา (ด้านข้าง).....	59
รูปที่ 4.13 แบบจำลองอุณหภูมิของห้องเผาไหม้แบบ 2 หัวเผา (ด้านบน).....	59
รูปที่ 4.14 แบบจำลองความเร็วการไหลของห้องเผาไหม้แบบ 2 หัวเผา (ด้านบน).....	60
รูปที่ 4.15 แบบจำลองอุณหภูมิของห้องเผาไหม้แบบ 2 หัวเผา (ด้านข้าง).....	60
รูปที่ 4.16 แบบจำลองความเร็วการไหลของห้องเผาไหม้แบบ 2 หัวเผา (ด้านข้าง).....	61
รูปที่ 4.17 แบบจำลองอุณหภูมิของห้องเผาไหม้แบบ 3 หัวเผา (ด้านบน).....	61
รูปที่ 4.18 แบบจำลองความเร็วการไหลของห้องเผาไหม้แบบ 3 หัวเผา (ด้านบน).....	62
รูปที่ 4.19 แบบจำลองอุณหภูมิของห้องเผาไหม้แบบ 3 หัวเผา (ด้านข้าง).....	62
รูปที่ 4.20 แบบจำลองความเร็วการไหลของห้องเผาไหม้แบบ 3 หัวเผา (ด้านข้าง).....	63
รูปที่ 4.21 แบบจำลองอุณหภูมิของห้องเผาไหม้แบบ 4 หัวเผา (ด้านบน).....	63
รูปที่ 4.22 แบบจำลองความเร็วการไหลของห้องเผาไหม้แบบ 4 หัวเผา (ด้านบน).....	64
รูปที่ 4.23 แบบจำลองอุณหภูมิของห้องเผาไหม้แบบ 4 หัวเผา (ด้านข้าง).....	64
รูปที่ 4.24 แบบจำลองความเร็วการไหลของห้องเผาไหม้แบบ 4 หัวเผา (ด้านข้าง).....	65
รูปที่ 4.25 กราฟแสดงผลจากการทดสอบและเก็บผลใช้งานจริงของห้องเผาไหม้ เครื่องกำเนิดไอน้ำแบบท่อขดแบบ 3 หัวเผา.....	67
รูปที่ 4.26 กราฟแสดงผลจากการเทียบผลของแบบจำลองกับการทดสอบ.....	68
รูปที่ ก.1 การเลือก Solver.....	76
รูปที่ ก.2 การเลือก Energy Equation.....	77
รูปที่ ก.3 การเลือก Turbulent Model.....	77
รูปที่ ก.4 การเลือก Radiation Model.....	78
รูปที่ ก.5 การเลือก Combustion Model.....	78
รูปที่ ก.6 การกำหนด Boundary Condition.....	79
รูปที่ ก.7 การเลือก Solution Method.....	79

สารบัญรูป(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ ก.8 การกำหนดค่าเริ่มต้นสำหรับการจำลอง.....	80
รูปที่ ก.9 การกำหนด Residual Monitors.....	80
รูปที่ ก.10 รอบการคำนวณสำหรับบันทึกข้อมูลของการจำลอง.....	81
รูปที่ ก.11 จำนวนรอบการคำนวณของการจำลอง.....	81
รูปที่ ข.1 แบบห้องเผาไหม้เครื่องกำเนิดไอน้ำแบบท่อขด.....	83
รูปที่ ข.2 แบบด้านหน้า, ด้านข้าง และด้านบน ของห้องเผาไหม้เครื่องกำเนิดไอน้ำแบบท่อขด.....	83
รูปที่ ค.1 ชั้นส่วนโครงสร้างห้องเผาไหม้.....	85
รูปที่ ค.2 ชั้นส่วนโครงสร้างห้องเผาไหม้ส่วนฝา.....	85
รูปที่ ค.3 การวางเซรามิกซ์เปเปอร์เพื่อเป็นฉนวนภายในห้องเผาไหม้.....	86
รูปที่ ค.4 การวางแบบหล่อคอนกรีตทนไฟ.....	86
รูปที่ ค.5 การเทคอนกรีตทนไฟภายในห้องเผาไหม้.....	87
รูปที่ ค.6 การเทคอนกรีตทนไฟที่ฝาปิดห้องเผาไหม้.....	87
รูปที่ ค.7 การประกอบโครงสร้างเข้ากับห้องเผาไหม้.....	88
รูปที่ ค.8 การประกอบฝาห้องเผาไหม้.....	88
รูปที่ ค.9 การติดตั้งระบบป้อนอากาศ.....	89
รูปที่ ค.10 การติดตั้งระบบป้อนแก๊สหลัก.....	89
รูปที่ ค.11 การติดตั้งระบบป้อนแก๊สแยก 3 ช่องทาง.....	90
รูปที่ ค.12 การติดตั้งระบบไฟฟ้า.....	90
รูปที่ ค.13 ทดลองเดินระบบการเผาไหม้และแก้ไขปรับปรุงระบบ.....	91
รูปที่ ค.14 ทดลองเดินระบบการเผาไหม้ และปรับจูนระบบ.....	91
รูปที่ ค.15 ทดลองเดินระบบการเผาไหม้ และเก็บข้อมูลการทดลอง.....	92

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาของงานวิจัย

ในช่วงที่โลกมีความเจริญก้าวหน้ามากขึ้นมีการขยายตัวของอุตสาหกรรม การเติบโตขึ้นของชุมชนเมือง ประชากรที่เพิ่มมากขึ้น และการใช้รถใช้ถนนที่เพิ่มมากขึ้นก่อให้เกิดปัญหามลภาวะที่เพิ่มมากขึ้น แต่เชื้อเพลิงหรือแหล่งพลังงานกลับมีปริมาณลดน้อยลง การควบคุมมลภาวะและการใช้พลังงานอย่างคุ้มค่าเป็นประเด็นที่ต้องได้รับความสนใจ ทั้งนี้ปัญหาการใช้พลังงานความร้อนและเชื้อเพลิงอย่างไรประสิทธิภาพจากภาคอุตสาหกรรม จึงมีผลทำให้เกิดการคิดค้นการนำพลังงานทดแทนหรือแม้แต่การหาแหล่งพลังงานเชื้อเพลิงเกรดต่ำเข้ามาแทนที่การใช้พลังงานเชื้อเพลิงประสิทธิภาพสูง แต่ในปัจจุบันโรงไฟฟ้าชีวมวลประสบปัญหาในด้านการเผาไหม้ของเครื่องยนต์สันดาปภายใน เนื่องจากเครื่องยนต์สันดาปภายในนิยมใช้เชื้อเพลิงประสิทธิภาพสูงในการเผาไหม้ ซึ่งเมื่อต้องการประหยัดพลังงานเชื้อเพลิง เพื่อลดต้นทุน จึงมีการเปลี่ยนแปลงในด้านพลังงานโดยใช้เชื้อเพลิงแก๊สซิฟิเคชันที่มาจาก การเผาไหม้ชีวมวลทดแทนในภาคอุตสาหกรรมทำให้เกิดปัญหาในกระบวนการเผาไหม้ภายในเครื่องยนต์ซึ่งเป็นผลมาจากน้ำมันทาร์ทำให้เครื่องยนต์เกิดคราบน้ำมันทาร์สะสม ซึ่งส่งผลกระทบต่อการทำงานของชิ้นส่วนที่มีการเคลื่อนที่ภายในห้องเผาไหม้เครื่องยนต์ จึงเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการสึกหรอของเครื่องยนต์สันดาปภายใน โดยจำเป็นต้องมีการซ่อมบำรุงรักษาอย่างต่อเนื่องและมีภาระค่าใช้จ่ายในส่วนนี้สูง

จากปัญหาข้างต้นจึงมีแนวคิดในการพัฒนาเครื่องกำเนิดไอน้ำแบบท่อขดซึ่งเป็นเครื่องยนต์สันดาปภายนอกประเภทหนึ่ง เพราะมีกลไกการทำงานที่ไม่ซับซ้อนเหมาะสมกับการนำมาใช้งานกับพลังงานเชื้อเพลิงแก๊สซิฟิเคชันที่มาจาก การเผาไหม้ชีวมวล เนื่องจากโครงสร้างและส่วนประกอบภายในของเครื่องกำเนิดไอน้ำแบบท่อขดไม่มีชิ้นส่วนในการเคลื่อนที่ใดๆ มีเพียงห้องเผาไหม้เท่านั้น โดยอาศัยการป้อนเชื้อเพลิงแก๊สซิฟิเคชันที่มาจาก การเผาไหม้ชีวมวลเข้าสู่ห้องเผาไหม้เพื่อให้เกิดพลังงานความร้อน จึงไม่ส่งผลกระทบต่อกลไกการทำงานของเครื่องกำเนิดไอน้ำแบบท่อขด แต่ใช้เพียงพลังงานความร้อนที่ได้จากห้องเผาไหม้ส่งผ่านไปยังหม้อต้มไอน้ำแบบท่อขด (Water Tube Boiler) ทำให้น้ำที่อยู่ภายในท่อเกิดความร้อนและเปลี่ยนแปลงสถานะกลายเป็นไอน้ำเพื่อนำไปใช้ในระบบการขับเคลื่อนเครื่องยนต์ในโรงไฟฟ้าชีวมวลขนาดเล็ก โดยเครื่องกำเนิดไอน้ำแบบท่อขดมีข้อดีในด้านการใช้เชื้อเพลิงเกรดต่ำ มีขนาดกะทัดรัดและมีพื้นผิวในการแลกเปลี่ยนความร้อนและการเผาไหม้ได้ดี

แต่ในที่นี้จะศึกษาการวิเคราะห์สมรรถนะด้วยแบบจำลองสมการทางคณิตศาสตร์ของห้องเผาไหม้เครื่องกำเนิดไอน้ำแบบท่อขด (STSG) เพื่อศึกษาความร้อนภายในห้องเผาไหม้ของเครื่องกำเนิดไอน้ำแบบท่อขด (STSG) ที่ห้องเผาไหม้มีอัตราการเผาไหม้คงที่ โดยวิเคราะห์แบบจำลองสมการทางคณิตศาสตร์ที่มีจำนวนหัวเผาไหม้ที่แตกต่างกัน ตั้งแต่ 1 ถึง 4 หัวเผา จากนั้นวิเคราะห์ความน่าเชื่อถือของแบบจำลองโดยการนำผลจากแบบจำลองไปทดลองกับการใช้งานจริงและเปรียบเทียบผล โดยหัวเผาไหม้แก๊สสูงที่มีขนาด 5-20 กิโลวัตต์

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อวิเคราะห์สมรรถนะด้วยแบบจำลองสมการทางคณิตศาสตร์ของห้องเผาไหม้เครื่องกำเนิดไอน้ำแบบท่อขด (STSG) โดยวิเคราะห์อุณหภูมิ และความเร็วในการไหลที่เกิดขึ้นภายในห้องเผาไหม้ของเครื่องกำเนิดไอน้ำแบบท่อขด

1.2.2 เพื่อวิเคราะห์ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของห้องเผาไหม้ โดยมีจำนวนหัวเผาไหม้ที่ 1, 2, 3 และ 4 หัวเผาไหม้ ตามลำดับ

1.2.3 เพื่อวิเคราะห์ความน่าเชื่อถือของแบบจำลองที่สร้างขึ้น โดยนำผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมมาทำการทดลองใช้งานจริง และเปรียบเทียบผลกับการจำลอง

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1.3.1 วิเคราะห์แบบจำลองสมการทางคณิตศาสตร์แบบไฟไนต์วอลุ่ม

1.3.2 วิเคราะห์แบบจำลองสมการทางคณิตศาสตร์ของอุณหภูมิ และความเร็วในการไหลที่เกิดขึ้นภายในห้องเผาไหม้ของเครื่องกำเนิดไอน้ำแบบท่อขด โดยมีการเปรียบเทียบชุดหัวเผาไหม้ที่ 1, 2, 3 และ 4 จากอุณหภูมิ และความเร็วในการไหลที่ได้ในการเผาไหม้

1.3.3 เปรียบเทียบผลที่ได้จากแบบจำลองสมการทางคณิตศาสตร์ของการเผาไหม้กับผลการทดลอง เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

1.3.4 ในการวิจัยนี้ใช้แก๊ส LPG เป็นเชื้อเพลิงในการจำลองและทดลอง

1.3.5 หัวเผาไหม้แก๊สหุงต้มที่ใช้มีขนาด 5-20 กิโลวัตต์

1.4 ขั้นตอนการศึกษา

1.4.1 เขียนแบบห้องเผาไหม้ของเครื่องกำเนิดไอน้ำแบบท่อขด

1.4.2 วิเคราะห์แบบจำลองสมการทางคณิตศาสตร์ที่มีหัวเผาแก๊สจำนวน 1, 2, 3 และ 4 หัวเผาไหม้ ตามลำดับ

1.4.3 ทดลองใช้งานจริง

1.4.4 นำผลจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มาเปรียบเทียบกับผลการทดลอง เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

1.4.5 สรุปผลการวิจัยและทำรายงานการวิจัย

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 เพื่อเป็นพื้นฐานสำหรับการออกแบบเครื่องยนต์สันดาปภายนอกและไปประยุกต์ใช้ในการผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก และการคำนวณตัวแปรต่างๆที่ใช้ในการจำลองการไหลภายในท่อ

1.5.2 เพื่อจะเป็นแนวทางในการพัฒนา และทำการปรับปรุงประสิทธิภาพของเครื่องยนต์สันดาปภายนอกให้เหมาะสมกับผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กในอนาคต

1.5.3 สามารถประยุกต์ความรู้การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้กับงานวิจัยด้านอื่นๆ ได้

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การวิจัยนี้ผู้วิจัยได้ศึกษาค้นคว้าข้อมูลต่างๆที่เกี่ยวข้องจากเอกสารตำราและงานวิจัย การศึกษาอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อและระบบการทำงานในห้องเผาไหม้ จะต้องมีความเข้าใจในส่วนพื้นฐานและหลักการทำงานในเรื่องการแลกเปลี่ยนความร้อน หรือแม้แต่การถ่ายเทความร้อนและการเผาไหม้ ซึ่งจะเป็นประโยชน์ที่ทำงานวิจัยนี้บรรลุตามวัตถุประสงค์ที่ได้ตั้งไว้ซึ่งแบ่งเป็นหัวข้อดังต่อไปนี้

2.1 ทฤษฎีเครื่องยนต์สันดาปภายนอก

เครื่องยนต์เป็นส่วนประกอบสำคัญที่ทำให้รถยนต์มีความแตกต่างไปจากรถที่ใช้แรงจลุลากหรือการขับเคลื่อนจากแรงภายนอกเครื่องยนต์จะเป็นต้นกำลังในการสร้างพลังงานที่ใช้ขับเคลื่อนรถให้เคลื่อนที่ได้ เครื่องยนต์ ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานความร้อนเป็นพลังงานกล มีการเผาไหม้ภายนอกเป็นการเผาไหม้จากภายนอกเครื่องยนต์ แล้วนำความร้อนจากการเผาไหม้ที่ได้ไปใช้งาน เช่น เครื่องจักรไอน้ำที่ใช้ในการขับเคลื่อนหัวจักรรถไฟในอดีตที่อาศัยการต้มน้ำให้ร้อนด้วยเตาที่มีเชื้อเพลิงเป็นฟืน แล้วจึงนำไอน้ำไปขับเคลื่อนเครื่องจักรไอน้ำ เมื่อเครื่องจักรไอน้ำทำงานจึงขับเคลื่อนให้ล้อของหัวรถจักรหมุนได้และขับเคลื่อนรถได้ และการเผาไหม้ภายใน คือ เครื่องยนต์ที่มีการระเบิดหรือเผาไหม้ส่วนผสมของเชื้อเพลิงกับอากาศเกิดขึ้นภายในเครื่องยนต์ แรงระเบิดจากการเผาไหม้จะถูกเปลี่ยนเป็นพลังงาน เพื่อใช้ในการขับเคลื่อน ในยุคแรกๆของการพัฒนารถยนต์ได้มีการคิดค้นหาแหล่งพลังงานหรือต้นกำลังในการทำให้รถเคลื่อนที่ได้หลากหลายชนิด เช่น แรงแลม พลังไอน้ำ พลังงานไฟฟ้า ฯลฯ แต่สุดท้ายจึงเห็นว่าการนำเครื่องยนต์แบบสันดาปภายในมาใช้ในการขับเคลื่อนรถเป็นวิธีที่มีปัญหาน้อยที่สุด ตั้งแต่นั้นมาเป็นเวลากว่า 120 ปีที่ได้มีการใช้เครื่องยนต์สันดาปภายในควบคู่กับรถยนต์มาตลอด และรถยนต์ยังครอบคลุมไปถึงรถที่เคลื่อนที่ด้วยพลังงานอื่นๆ เช่น รถไฟฟ้า หรือรถไฮบริดจ์ ที่ใช้ได้ทั้งพลังไฟฟ้าและเครื่องยนต์สันดาปภายในด้วยเครื่องยนต์แบบสันดาปภายในที่ใช้กับกับรถยนต์มาตั้งแต่ยุคแรกเริ่มเมื่อ 120 กว่าปีก่อน กับเครื่องยนต์ที่ใช้กับ รถยนต์ ในยุคปัจจุบัน ยังคงมีโครงสร้างและหลักการการทำงานที่แทบจะไม่แตกต่างกัน ความแตกต่างระหว่าง เครื่องยนต์ของรถยนต์รุ่นเก่ากับรุ่นปัจจุบันมีความแตกต่างกันในเรื่องของรูปทรงที่กะทัดรัด และประสิทธิภาพการทำงานที่สูงขึ้นนับร้อยเท่า เช่น เครื่องยนต์แบบสูบเดี่ยวของรถยนต์คันแรกของโลก มีความจุกระบอกสูบ 958 ซีซี. ให้กำลังเทียบเท่ากับม้าประมาณ 0.8 ตัว แต่เครื่องยนต์ของรถรุ่นที่จำหน่ายในท้องตลาดปัจจุบันจะเฉลี่ยอยู่ที่ ประมาณ 60 ไปจนถึง 100 กว่าแรงม้าต่อเครื่องยนต์ที่ความจุ 1 ลิตรและไม่อาจเทียบได้กับเครื่องยนต์ของรถแข่งที่สามารถผลิตแรงม้าออกมาได้มากเป็นหลายร้อยแรงม้าเมื่อเทียบกับความจุเครื่องยนต์ 1 ลิตรเท่ากัน นี้คือ วิวัฒนาการของสิ่งที่เกิดขึ้นในช่วงร้อยกว่าปี เครื่องยนต์แบบสันดาปภายในได้แก่ เครื่องยนต์ที่มีการระเบิดหรือเผาไหม้ส่วนผสมของเชื้อเพลิงกับอากาศเกิดขึ้นภายในเครื่องยนต์ แรงระเบิดจากการเผาไหม้จะถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานเพื่อใช้ในการขับเคลื่อนตัวรถ เมื่อเอาอากาศกับน้ำมันเชื้อเพลิงป้อนเข้าสู่เครื่องยนต์

และให้มีกระบวนการจุดระเบิดขึ้นส่วนผสมทั้งสองชนิดภายในกระบอกสูบ เครื่องยนต์จะทำงานหรือเกิดการหมุนที่เพลาค้อเหวี่ยงของเครื่องยนต์ทำให้ได้พลังงานจากการหมุนของเครื่องยนต์นี้ไปใช้ในการขับเคลื่อนรถยนต์อีกทีหนึ่ง ความแตกต่างจากเครื่องยนต์สันดาปภายนอก เครื่องยนต์แบบสันดาปภายใน จะมีกระบวนการเผาไหม้ของอากาศกับเชื้อเพลิงเกิดขึ้นภายในเครื่องยนต์ในกระบอกสูบ แต่เครื่องยนต์สันดาปภายนอกเป็นการเผาไหม้จากภายนอกเครื่องยนต์ แล้วจึงนำความร้อนจากการเผาไหม้ที่ได้นั้นไปใช้งาน เครื่องจักรไอน้ำที่ใช้ในการขับเคลื่อนหัวจักรรถไฟในอดีต ที่อาศัยการต้มน้ำให้ร้อนด้วยเตาที่มีเชื้อเพลิงเป็นฟืน แล้วจึงนำเอาไอน้ำไปขับเคลื่อนเครื่องจักรไอน้ำอีกต่อหนึ่ง เมื่อเครื่องจักรไอน้ำทำงานจึงสามารถขับเคลื่อนให้ล้อของหัวรถจักร หมุนได้ และขับเคลื่อนรถได้ แต่ก็ด้วยประสิทธิภาพที่ต่ำมากเพราะต้องสูญเสียพลังงานในการขับเคลื่อนไปหลายขั้นตอนกว่าจะถึงล้อรถความนิยมน้อยลงไปในแทบไม่เหลือให้เห็นในปัจจุบัน

2.2 สมการพื้นฐานสำหรับการไหล

การคำนวณพลศาสตร์ของไหล (Computational Fluid Dynamics, CFD) เป็นเครื่องมือช่วยแก้ปัญหาที่ซับซ้อนที่เกี่ยวข้องกับการไหล โดยใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (Numerical Method) คำนวณเพื่อประมวลผลเฉลยของสมการอนุพันธ์ย่อยที่มีความซับซ้อน ซึ่งมีความยุ่งยากในการหาผลเฉลยด้วยวิธีแมนตรง หลักสำคัญในการคำนวณพลศาสตร์ของไหลต้องเกี่ยวข้องกับสมการบังคับ ซึ่งสมการบังคับพื้นฐานของพลศาสตร์ของไหลได้แก่ สมการความต่อเนื่อง (Continuity Equation) เหล่านี้จะได้มาจากหลักทางกายภาพ 3 หลักด้วยกันคือ กฎการอนุรักษ์มวล (Conservation of Mass) กฎการอนุรักษ์โมเมนตัม (Conservation of Momentum) และกฎการอนุรักษ์พลังงาน (Conservation of Energy) และสมการบังคับที่ได้จะอยู่ในรูปของสมการอนุพันธ์ย่อยที่อธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้น หลังจากนั้นใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขประมาณผลเฉลยของสมการอนุพันธ์ สำหรับระเบียบวิธีเชิงตัวเลขที่ใช้กันทั่วไปได้แก่ ระเบียบวิธีผลต่างสืบเนื่อง (Finite Difference) ระเบียบวิธีจำกัดมูลฐาน (Finite-Element) และระเบียบวิธีปริมาตรสืบเนื่อง (Finite Volume) เป็นต้น

2.2.1. กฎอนุรักษ์มวล

เมื่อพิจารณาปริมาตรควบคุมของของไหลต่อเนื่อง การส่งถ่ายมวลเข้าออกปริมาตรควบคุมจะเป็นไปตามหลักการอนุรักษ์มวลสามารถเขียนในรูปสมการคือ

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \bar{u}) = 0 \quad (2.1)$$

2.2.2 กฎอนุรักษ์โมเมนตัม

หลักการอนุรักษ์โมเมนตัมเป็นการประยุกต์ใช้กฎการเคลื่อนที่ข้อที่ 2 ของนิวตันและเมื่อพิจารณาปริมาตรควบคุมจะได้ว่า อัตราการเปลี่ยนแปลงสุทธิของโมเมนตัมของปริมาตรควบคุมเท่ากับ

ผลรวมของอัตราการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมภายในปริมาตรควบคุมกับโมเมนตัมสุทธิที่ไหลผ่านผิวควบคุม ดังสมการ

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint_V \rho \bar{u} dV + \iint_S \rho \bar{u} (\bar{u} \cdot d\bar{S}) \quad (2.2)$$

แรงลัพธ์สุทธิที่กระทำต่อปริมาตรควบคุมแบ่งเป็น 2 ชนิด คือ ชนิดแรกเป็นแรงเนื่องจากสนามดึงดูด (Field Force) ซึ่งได้แก่ แรงโน้มถ่วงโลก (Body Force) และแรงเนื่องจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ชนิดที่สองเป็นกระทำที่ผิว (Surface Force) ซึ่งแบ่งออกเป็นแรงในแนวตั้งฉากได้แก่ความดัน ความเค้นอัดหรือดึง แรงในแนวขนานกับผิว ได้แก่ ความเค้นเฉือน ดังสมการ

$$\iiint_V \rho \bar{f} dV + \iint_S \bar{\sigma} d\bar{S} \quad (2.3)$$

ดังนั้นสมการโมเมนตัม คือ

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint_V \rho \bar{u} dV + \iint_S \rho \bar{u} (\bar{u} \cdot d\bar{S}) = \iiint_V \rho \bar{f} dV + \iint_S \bar{\sigma} d\bar{S} \quad (2.4)$$

ใช้ทฤษฎีของเกาส์ช่วยในการเปลี่ยนรูปสมการดังนี้

$$\iint_S \rho \bar{u} (\bar{u} \cdot d\bar{S}) = \iiint_V \nabla \cdot (\rho \bar{u} \bar{u}) dV \quad (2.5)$$

$$\iint_S \bar{\sigma} d\bar{S} = \iiint_V \nabla \cdot \bar{\sigma} dV \quad (2.6)$$

จะได้สมการโมเมนตัมในรูปสมการอนุพันธ์เชิงย่อยดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho \bar{u} + \nabla \cdot (\rho \bar{u} \bar{u}) = \rho \bar{f} + \nabla \cdot \bar{\sigma} \quad (2.7)$$

เรียกสมการว่าสมการนาเวียร์-สโตคส์ (Navier-Stokes Equation) และสามารถเขียนสมการให้อยู่ในรูปเทนเซอร์ (Tensor) ดังนี้

$$\frac{\partial(\rho u_j)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j u_k)}{\partial x_k} = \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_i} + \rho f_j \quad (2.8)$$

เมื่อพิจารณาแยกเทอม $\rho u_j u_k$ เป็น ρu_k และ u_j แล้วจัดรูปสมการอนุพันธ์เชิงย่อยจะได้

$$p \frac{\partial u_j}{\partial t} + u_j \frac{\partial p}{\partial t} + u_j \frac{\partial(\rho u_k)}{\partial x_k} + \rho u_k \frac{\partial u_j}{\partial x_k} = \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_i} + \rho f_i \quad (2.9)$$

ใช้สมการความต่อเนื่องเพื่อกำจัดเทอมที่สองและสาม จะได้สมการนาเวียร์-สโตคส์ ดังนี้

$$p \frac{\partial u_j}{\partial t} + \rho u_k \frac{\partial u_j}{\partial x_k} = \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_i} + \rho f_i \quad (2.10)$$

$$\sigma_{ij} = -p \delta_{ij} + \tau_{ij} \quad (2.11)$$

สำหรับของไหลแบบนิวตัน (Newtonian Fluid) ซึ่งความเค้นเฉือนเป็นสัดส่วนโดยตรงกับ อัตราการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของไหล ได้เทนเซอร์ความเค้นเฉือน (Shear Stress Tensor) คือ

$$\tau_{ij} = \lambda \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} + \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (2.12)$$

แทนค่าความเค้นเฉือนในสมการลงในสมการด้านบนได้เทนเซอร์ความเค้น (Stress Tensor) คือ

$$\sigma_{ij} = -p \delta_{ij} + \lambda \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} + \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (2.13)$$

เมื่อ μ คือ สัมประสิทธิ์ความหนืดสัมบูรณ์ (Absolute or Dynamic Viscosity Coefficient)

λ คือ สัมประสิทธิ์ความหนืดอันดับสอง (Second Viscosity Coefficient)

δ_{ij} คือ Kronecker Delta (มีค่าเป็น 1 เมื่อ $i = j$ และมีค่าเป็น 0 เมื่อ $i \neq j$)

สโตคส์ (Stokes) ตั้งสมมุติฐานความสัมพันธ์ระหว่าง μ และ λ ไว้ดังนี้

$$\lambda = -\frac{2}{3} \mu \quad (2.14)$$

แทนค่าเทนเซอร์ความเค้นในสมการนาเวียร์-สโตคส์ ได้สมการนาเวียร์-สโตคส์ที่สมบูรณ์ คือ

$$p \frac{\partial u_j}{\partial t} + \rho u_k \frac{\partial u_j}{\partial x_k} = -\frac{\partial p}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\lambda \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + \rho f_j \quad (2.15)$$

เมื่อพิจารณาการไหลให้เป็นการไหลแบบไม่อัดตัวและค่าสัมประสิทธิ์ความหนืดสัมบูรณ์มีค่าคงที่ ทำให้เทอมที่สองทางด้านขวามือของสมการมีค่าเป็นศูนย์และเทอมที่สามารถจัดรูปสมการใหม่เป็น

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] = \mu \left[\frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right) + \frac{\partial^2 u_j}{\partial x_i \partial x_i} \right] = \mu \frac{\partial^2 u_j}{\partial x_i \partial x_i} \quad (2.16)$$

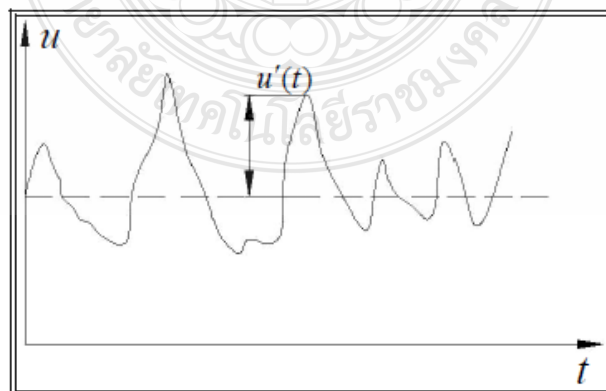
จะได้สมการนาเวียร์-สโตคส์ สำหรับกรณีไหลแบบอัดตัวไม่ได้และค่าสัมประสิทธิ์ความหนืดสัมบูรณ์มีค่าคงที่ดังนี้

$$\rho \frac{\partial u_j}{\partial t} + \rho u_k \frac{\partial u_j}{\partial x_k} = -\frac{\partial p}{\partial x_j} + \mu \frac{\partial^2 u_j}{\partial x_i \partial x_i} + \rho f_i \quad (2.17)$$

สมการสองสมการนี้เรียกว่าสมการนาเวียร์-สโตคส์จากการเฉลี่ยของเรย์โนลด์ (Reynolds-Averaged Navier-Stokes Equation, RANS) จะสังเกตเห็นได้ว่าสมการที่ได้นี้จะมีรูปแบบคล้ายคลึงกับสมการนาเวียร์-สโตคส์ เพียงแต่มีเทอมของ ค่าความเค้นของเรย์โนลด์ (Reynolds Stress) เพิ่มขึ้นในสมการ ซึ่งเป็นผลมาจากการไหลที่เป็นแบบปั่นป่วนนั่นเอง เทอมความเค้นของเรย์โนลด์ที่เพิ่มขึ้นมานี้เป็นผลทำให้จำนวนตัวแปรมีมากกว่าจำนวนสมการที่มีอยู่ ทำให้ไม่สามารถแก้สมการได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องอาศัยแบบจำลองความปั่นป่วนเพื่อทำให้ปัญหาเป็นแบบปิด ซึ่งจะได้กล่าวถึงแบบจำลองนี้ต่อไป

2.2.3 การไหลแบบปั่นป่วน

การไหลแบบปั่นป่วน คือ ค่าของตัวแปรที่เกี่ยวข้องมีความไม่คงที่มีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา เช่น ความเร็ว ดังแสดงในรูป 2.1 ค่าของความเร็วในการไหลแบบปั่นป่วนเป็นการเปลี่ยนแปลงที่ทำให้มีความยุ่งยากในการคำนวณหาค่าตัวแปร เพื่อให้สามารถคำนวณได้ง่ายจึงให้คุณสมบัติต่างๆ ที่พิจารณาแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนปริมาณเฉลี่ยไม่ขึ้นกับเวลา เช่น u v หรือ p กับส่วนที่กระเพื่อม (Fluctuation) เช่น u' v' หรือ p'



รูปที่ 2.1 ค่าความเร็ว u ในการไหลแบบปั่นป่วน

เมื่อทำการเฉลี่ยปริมาณใดๆ ในสมการควบคุมตลอดช่วงเวลาช่วงหนึ่ง ทำให้เกิดตัวแปรขึ้นมาใหม่ ส่งผลให้มีจำนวนตัวแปรไม่รู้ค่ามากกว่าจำนวนสมการที่มีอยู่ จึงจำเป็นต้องอาศัยแบบจำลองความปั่นป่วน (Turbulence Model) เข้ามาช่วย เพื่อทำให้ปัญหาที่เกิดขึ้นเป็นปัญหาแบบปิด (Close Problem) ให้สามารถหาผลเฉลยได้

สมการบังคับของการไหลแบบปั่นป่วน สำหรับของไหลที่อัดตัวไม่ได้ มีอุณหภูมิคงที่และค่าสัมประสิทธิ์ความหนืดสัมบูรณ์มีค่าคงที่ ดังนี้

สมการความต่อเนื่อง

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0 \quad (2.18)$$

สมการนาเวียร์-สโตคส์

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (2.19)$$

จากการสมมติให้ตัวแปรต่างๆ สามารถแบ่งออกเป็นส่วนของค่าเฉลี่ยและส่วนของการกระเพื่อม ตัวอย่างเช่น ตัวแปรใดๆ ϕ แบ่งออกเป็น

$$\phi = \bar{\phi} + \phi' \quad (2.20)$$

จากนั้นทำการเฉลี่ยในช่วงเวลาหนึ่ง (Time-Averaging) จะได้

$$\phi(x) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^{t+T} \phi(x, t) dt \quad (2.21)$$

ซึ่งเมื่อทำการเฉลี่ยแล้วจะทำให้ค่าเฉลี่ยในส่วนของการกระเพื่อมมีค่าเป็นศูนย์และจะได้ค่าเฉลี่ยของผลคูณทั้งสองตัวแปรเป็น

$$\overline{(\phi\beta)} = \overline{\phi\beta} + \overline{\phi'\beta'} \quad (2.22)$$

เมื่อแทนค่าตัวแปรต่างๆ ด้วยผลรวมของค่าเฉลี่ยและส่วนของการกระเพื่อม แล้วทำการเฉลี่ยในช่วงเวลาหนึ่ง จะได้สมการบังคับเป็น

สมการความต่อเนื่องสำหรับค่าเฉลี่ยในช่วงเวลา

$$\overline{\frac{\partial u_i}{\partial x_i}} = 0 \quad (2.23)$$

สมการนาเวียร์-สโตคส์ สำหรับค่าเฉลี่ยในช่วงเวลา

$$\frac{\partial \rho \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \rho \overline{u_i u_j}}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\mu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right] + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (2.24)$$

สมการนาเวียร์-สโตคส์จากการเฉลี่ยของเรย์โนลด์ เป็นสมการที่มีรูปแบบคล้ายคลึงกับสมการนาเวียร์-สโตคส์ เพียงแต่มีเทอมของค่าความเค้นของเรย์โนลด์ (Reynolds Stress) เพิ่มขึ้นมาในสมการ ซึ่งเป็นผลมาจากการไหลที่เป็นแบบปั่นป่วน เทอมความเค้นของเรย์โนลด์ที่เพิ่มขึ้นมานี้เป็นผลทำให้จำนวนตัวแปรมากกว่าจำนวนสมการที่มีอยู่ทำให้ไม่สามารถแก้สมการได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องอาศัยแบบจำลองความปั่นป่วนเพื่อทำให้ปัญหาเป็นแบบปิด ซึ่งจะได้กล่าวถึงแบบจำลองนี้ต่อไป

2.2.4 แบบจำลองความปั่นป่วน

การหาผลเฉลยของสมการความต่อเนื่องและสมการนาเวียร์-สโตคส์จากการเฉลี่ยของเรย์โนลด์ (RANS) ต้องอาศัยแบบจำลองความปั่นป่วนในการคำนวณหาค่าความเค้นจากเรย์โนลด์ ซึ่งจะช่วยให้ไม่ต้องหาค่าของความกระเพื่อม แต่จะหาเฉพาะค่าเฉลี่ยเท่านั้น การเลือกใช้แบบจำลองความปั่นป่วนจะต้องเลือกให้เหมาะสมกับพฤติกรรมการไหลที่เกิดขึ้น จึงจะสามารถคำนวณได้อย่างแม่นยำ ซึ่งจะใช้เวลาอันน้อยที่สุด แบบจำลองความปั่นป่วนที่ใช้มีหลายแบบ เช่น แบบจำลองความปั่นป่วน $k-\epsilon$ แบบจำลองความปั่นป่วน RAG $k-\epsilon$ แบบจำลองความปั่นป่วน The Shear-Stress Transport (SST) แบบจำลองความปั่นป่วน Reynolds Stress Model (RSM) เป็นต้น และในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงแบบจำลองที่นำมาใช้สำหรับงานวิจัยนี้ คือ แบบจำลองความปั่นป่วน $k-\epsilon$ เป็นแบบจำลองความปั่นป่วนที่นิยมใช้กันแพร่หลาย เป็นแบบจำลองที่สร้างขึ้นโดย Launder and Spalding ซึ่งจะใช้สมมติฐานของบัสซิเนส (Boussinesq Hypothesis) เพื่อประมาณค่าความเค้นของเรย์โนลด์ ดังนี้

$$\tau_{ij} = -\rho \overline{u'_i u'_j} = \mu_t \left[\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right] - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (2.25)$$

เมื่อ k คือพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน (Turbulent Kinetic Energy)

$$k = \frac{1}{2} \overline{u'_i u'_i} = \frac{1}{2} (\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2}) \quad (2.26)$$

μ_t คือค่าความหนืดของความปั่นป่วน (Turbulent Eddy Viscosity)

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (2.27)$$

โดยที่ ϵ คือ อัตราการสลายตัวของความปั่นป่วน (Turbulent Dissipation Rate) C_μ คือ ค่าคงที่ รูปแบบสมการที่ใช้สำหรับแบบจำลองความปั่นป่วน $k-\epsilon$ มีดังนี้

2.2.2.2 สมการพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \epsilon \quad (2.28)$$

2.2.2.3 สมการของอัตราการสลายตัวของความปั่นป่วน

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} G_k - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (2.29)$$

เมื่อ σ_k และ σ_ϵ คือ Prandtl Number ของการไหลแบบปั่นป่วน สำหรับ k และ ตามลำดับ G_k คือเทอมการสร้างความปั่นป่วน (Turbulent Production)

$$G_k = -\tau_{ij} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \quad (2.30)$$

เมื่อประยุกต์ใช้สมมติฐานของบูลซิเนสจะได้ว่า

$$G_k = \mu_t S^2 \quad (2.31)$$

เมื่อ S คือ เทนเซอร์ความเครียด (Train Tensor) หาได้จาก

$$S = \sqrt{2 S_{ij} S_{ij}} \quad (2.32)$$

และ S_{ij} คืออัตราความเครียดเฉลี่ย (Mean Strain Rate) โดย

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left[\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right] \quad (2.33)$$

สำหรับค่าคงที่ในแบบจำลองความปั่นป่วน ซึ่งได้มาจากการทดลองต่างๆ ได้แก่

$$C_{1\epsilon} = 1.44, \quad C_{2\epsilon} = 1.92, \quad C_\mu = 0.09, \quad \sigma_k = 1.0, \quad \sigma_\epsilon = 1.3$$

2.3 ทฤษฎีการถ่ายเทความร้อน

2.3.1 รูปแบบการถ่ายเทความร้อน (Modes of heat transfer)

การถ่ายเทความร้อนแบ่งออกเป็นสามลักษณะได้แก่ การนำความร้อน การพาความร้อน และการแผ่ความร้อน

1 การนำความร้อน (Heat conduction)

การนำความร้อนคือกระบวนการที่ความร้อน(พลังงานที่เคลื่อนที่ด้วยอิทธิพลของอุณหภูมิที่แตกต่างกัน)เคลื่อนที่ผ่านตัวกลางชนิดเดียวหรือหลายชนิดซึ่งมีอุณหภูมิต่างกัน จากอุณหภูมิสูงไปยังอุณหภูมิต่ำกว่า โดยโมเลกุลของตัวกลางที่เป็นของแข็งที่บดแน่นหรือเป็นของไหลที่อยู่นิ่ง การนำความร้อนจะเกิดได้ดีและดากในโลหะเพราะจะมีโมเลกุลที่เล็กเคลื่อนที่ได้ด้วยอัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการนำความร้อนโดยสามารถหาได้โดยอาศัย Fourier's law ซึ่งเขียนเป็นรูปสมการได้ดังนี้

$$q_x = -ka \frac{dT}{dx} \quad (2.34)$$

เมื่อ q_x คือ อัตราการนำความร้อนในทิศทาง x (W)
 a คือ อัตราการนำความร้อนในทิศทางตั้งฉากกับ x (m^2)
 k คือ ค่าการนำความร้อนของวัสดุ (Thermal conductivity)(W / m.K)
 $\frac{dT}{dx}$ คือ เกรเดียนต์ของอุณหภูมิ ณ จุดที่พิจารณา (K / m)

ค่าการนำความร้อนเป็นสมบัติของวัสดุซึ่งสามารถหาได้จากตารางหรือแผนภูมิในกรณีที่อยู่รายละเอียดของวัสดุที่เกี่ยวข้อง ในกรณีที่ไม่รู้รายละเอียดที่เกี่ยวข้องโดยครบบถ้วนก็อาจต้องหาค่าการนำความร้อนโดยการทดลองซึ่งโดยทั่วไปโลหะจึงค่าการนำความร้อนสูงกว่าอโลหะ

2 การพาความร้อน (Heat convection)

การพาความร้อนเป็นการถ่ายเทความร้อนที่เกิดจากการเคลื่อนพาของไหลโดยเฉพาะอย่างยิ่งการถ่ายเทความร้อนระหว่างพื้นผิวของของแข็งกับของไหลที่พัดผ่านบนพื้นผิวของของแข็งนั้น อัตราการพาความร้อนสามารถคำนวณได้จากการใช้กฎของนิวตัน (Newton's law of cooling)

$$q = ah(T_w - T_f) \quad (2.35)$$

เมื่อ q คืออัตราการพาความร้อน (W)
 a คือพื้นที่ของการพาความร้อน (m^2)
 h คือสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (W / $m^2.K$)
 T_w คืออุณหภูมิพื้นผิวของของแข็ง (K)
 T_f คืออุณหภูมิของของไหล (K)

การพาความร้อนสารแบ่งตามลักษณะการไหลได้สองแบบคือ

-การพาความร้อนแบบบังคับ (Forced convection) คือการถ่ายเทความร้อนระหว่างผิวของของแข็งและของไหล โดยถูกของไหลบังคับให้ไหลไปตามช่องทางโดยแรงภายนอก(เช่น ใบพัดลมแบบบี้ม) ทั้งแบบไหลภายในท่อ (Internal flow) และไหลภายนอกท่อ (External flow)

-การพาความร้อนแบบอิสระ (Free convection) เกิดขึ้นเมื่อการเคลื่อนที่ของของไหลไม่ได้เกิดจากการบังคับโดยกลไกจากภายนอก แต่เกิดขึ้นเองภายในของของไหลจากการผลักดันของแรงลอยตัวนี้เป็นผลจากความแตกต่างของความหนาแน่นในของไหลซึ่งเกิดจากความแตกต่างของอุณหภูมิอีกต่อหนึ่ง กล่าวคือเมื่อมีการถ่ายเทความร้อนระหว่างพื้นผิวของแข็งกับของไหล ทำให้อุณหภูมิของของไหลไม่เท่ากันสม่ำเสมอ เช่น ในการให้ความร้อนแก่ของไหลจากพื้นผิวให้ความร้อนนั้น ของไหลที่อยู่ติดกับผิวจะมีอุณหภูมิสูงขึ้น ทำให้ความหนาแน่นลดลงจึงลอยตัวขึ้น ของไหลส่วนอื่นที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าจะเคลื่อนที่เข้าแทน ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของของไหลขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนมีความแตกต่างกัน ซึ่งสัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบบังคับมีค่าสูงกว่าค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบอิสระและสัมประสิทธิ์การพาความร้อนในของเหลวจะมีค่าสูงกว่ามาก ซึ่งเป็นผลโดยตรงของความหนาแน่น นอกจากนี้การถ่ายเทความร้อนในขณะที่มีการเปลี่ยนสถานะ เช่น จากของเหลวกลายเป็นไอ(การเดือด)หรือจากไอกลายเป็นของเหลว(การควบแน่น)จะมีค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนสูงมากเมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่มีการเปลี่ยนสถานะ

3 การแผ่รังสี (Radiation)

ในการถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีความร้อนนั้น เป็นการส่งความร้อนไปในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งเคลื่อนที่ด้วยความเร็วแสง การแผ่รังสีความร้อนสามารถผ่านสุญญากาศได้ ซึ่งต่างจากการนำความร้อนและการพาความร้อนที่จะต้องอาศัยตัวกลางในการถ่ายเทความร้อนพลังงานการแผ่รังสีที่ปลดปล่อยจากวัสดุสามารถคำนวณได้จาก Steafun - Boltzman's law คือ

$$q_{rad} = A\epsilon\sigma T^4 \quad (2.36)$$

เมื่อ	q_{rad}	คืออัตราการเปล่งพลังงานรังสี (W)
	A	คือพื้นที่ผิวที่เปล่งพลังงานรังสี (m^2)
	ϵ	คือสภาพการเปล่งรังสีของพื้นผิวมีค่าระหว่าง 0 ถึง 1
	σ	คือค่าคงที่ที่สเฟาน-โบลท์ซามานน์ มีค่าเท่ากับ $5.67 \times 10^{-8}(W / m^2.K^4)$
	T	คืออุณหภูมิของพื้นผิว (K)

จะเห็นว่าอัตราการเปล่งพลังงานรังสีเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิยกกำลังสี่ ตามปกติการแผ่รังสีความร้อนจะมีค่าน้อยตัดทิ้งได้ เว้นแต่เมื่อพื้นผิวมีอุณหภูมิสูงมาก การแผ่รังสีมีความสำคัญเช่นกันในระบบอุณหภูมิต่ำมากๆ ซึ่งได้มีการทำให้เป็นสุญญากาศเพื่อจัดการนำความร้อนและการพาความร้อน

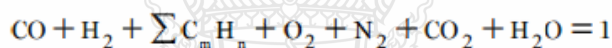
2.4 ทฤษฎีการเผาไหม้

ในการคำนวณการเผาไหม้จะหาจากปริมาณของเชื้อเพลิง สำหรับเชื้อเพลิงแข็งและเชื้อเพลิงเหลวจะที่มีมวล 1 kg และสำหรับเชื้อเพลิงก๊าซใช้ที่ $1 m_N^3$ เป็น หน่วย m_N^3 หมายถึงปริมาตรที่สภาวะที่ความดัน 0.1013 MPa หรือที่ความดัน 1 บรรยากาศ อุณหภูมิ 0°C หรือ 273.15 °K แสดงปริมาณอากาศหรือปริมาณก๊าซเชื้อเพลิงต่างๆ แล้วจะสามารถกำหนดปริมาณสัมบูรณ์ของก๊าซเหล่านั้นได้ ซึ่งง่ายต่อการนำไปใช้งาน

ในเชื้อเพลิงแข็งและเชื้อเพลิงเหลว จะแสดงปริมาณสัดส่วนโดยมวล (kg/kg_f) ของคาร์บอน ไฮโดรเจน กำมะถัน ออกซิเจน ไนโตรเจน ความชื้น และขี้เถ้าในเชื้อเพลิงด้วย C, H, S, O, N, w, a ตามลำดับ

$$C + H + S + O + N + w + a = 1$$

กรณีของเชื้อเพลิงก๊าซ แสดงสัดส่วนโดยปริมาตร m_N^3 / m_{N-f}^3 ของคาร์บอนมอนอกไซด์ ไฮโดรเจน ก๊าซไฮโดรคาร์บอน ออกซิเจน ไนโตรเจน คาร์บอนไดออกไซด์ไอน้ำ ฯลฯ ซึ่งเป็นองค์ประกอบด้วย CO, H₂, C_mH_n, O₂, N₂, CO₂, H₂O ตามลำดับ



สมการที่แสดงความสัมพันธ์เชิงปริมาณที่เกิดขึ้นทั้งก่อนและหลังปฏิกิริยาเผาไหม้เรียกว่า สมการปฏิกิริยาเผาไหม้ เช่น ไฮโดรเจนและออกซิเจน เมื่อเกิดการเผาไหม้จะได้ไอน้ำ ซึ่งได้ตามสมการต่อไปนี้



ปฏิกิริยาในห้องเผาไหม้ H₂ และ O₂ จะไม่เปลี่ยนเป็น H₂O ทั้งหมดทันทีแต่จะเกิดขึ้นเมื่อผ่านกระบวนการทำให้เกิดปฏิกิริยาพื้นฐานจนได้ H₂ O ในขณะเดียวกันก็จะเกิดปฏิกิริยาที่ H₂ O สลายตัวย้อนกลับกลายเป็น H₂ กับ O₂ ดังนั้น H₂, O₂ และ H₂O จะอยู่ด้วยสัดส่วนค่าหนึ่งซึ่งขึ้นอยู่กับอุณหภูมิในสภาวะสมดุล เคมี โดยทั่วไปสัดส่วนของผลิตภัณฑ์ต่อสารตั้งต้นจะมีค่าที่สูงมาก หากอุณหภูมิของก๊าซไม่ทำให้เกิดการเผาไหม้

2.4.1 ปฏิกิริยาการเผาไหม้

ปฏิกิริยาเผาไหม้ที่ติดนั้นจะต้องมีเป็นการเกิดปฏิกิริยาที่มีอุณหภูมิสูงและมีการเคลื่อนที่ของความเร็วสูงจะประกอบไปด้วยอะตอมและอนุภาคอิสระที่มีคุณสมบัติของการเกิดปฏิกิริยาได้อย่างรวดเร็ว อิทธิพลทางกลศาสตร์ของก๊าซ คือ ปฏิกิริยาการเผาไหม้ที่เกิดกระบวนการแล้วได้ผลลัพธ์เป็นปฏิกิริยาคายความร้อนในสถานะก๊าซ ไม่ว่าเชื้อเพลิงจะเป็นของแข็งหรือของเหลว เมื่อเกิดการเผาไหม้จะกลายเป็นไอ หลังจากนั้นจะทำปฏิกิริยาคายความร้อนในสถานะก๊าซที่เกิดขึ้นในก๊าซเชื้อเพลิงกับสาร

ออกซิเดชัน เชื้อเพลิงไม่ว่าจะเป็นก๊าซ ของเหลว หรือของแข็งจะประกอบด้วยอะตอมของ C, H, O ที่ทำพันธะกัน ในรูปแบบต่างๆ อะตอมเหล่านี้จะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนอย่างรวดเร็ว ทำให้เกิดแสงและความร้อน จากการทำปฏิกิริยาออกซิเดชัน และเชื้อเพลิงจะกลายเป็น CO₂, H₂O ซึ่งแล้วแต่จุดประสงค์ของการทำงานด้วย ปฏิกิริยาระหว่างไฮโดรเจนและออกซิเจนที่ได้สัดส่วนตามทฤษฎีที่เหมาะสมเป็นการใช้ความร้อนที่เกิดขึ้นให้มีประสิทธิภาพมากที่สุด โดยมีสมการดังต่อไปนี้



สมการทางด้านซ้ายแสดงสภาวะก่อนทำปฏิกิริยาและด้านขวาแสดงสภาวะหลังทำปฏิกิริยา ซึ่งจากสมการพบว่ากระบวนการที่เกิดขึ้นระหว่างทางความร้อนจากเปลวไฟทำให้อุณหภูมิสูงตั้งนั้น H₂O จึงสลายตัว (Dissociation) ทำให้เกิดสารประกอบมีทั้ง H₂, O₂, OH, H, O เมื่อหลุดจากเปลวไฟจะออกมาทำปฏิกิริยาจนหมดและจะสิ้นสุดลง จะได้สมดุลทางเคมีตามสมการ เมื่อก่อนจะถึงจุดนั้น ปฏิกิริยาจะดำเนินต่อไปโดยผ่านกระบวนการพื้นฐานจำนวนมากดังนี้



M คือโมเลกุลที่มีการแลกเปลี่ยนพลังงานทางเคมี ระหว่างการทำปฏิกิริยาเท่านั้น เรียกว่าปฏิกิริยาเบื้องต้น ซึ่งปฏิกิริยาเหล่านี้จะเกิดขึ้นแบบสองกระบวนการ คือ การเกิดปฏิกิริยาไปข้างหน้าในทิศทางตามลูกศรและการเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับในทิศทางย้อนลูกศร ปฏิกิริยาเผาไหม้จะเกิดต่อไปเรื่อยๆ ไม่สิ้นสุด และในก๊าซเผาไหม้จะมีสารที่เป็นสื่อกลางทำให้ปฏิกิริยารวมอยู่ด้วย ปฏิกิริยาการแยกตัว หรือ การแยกตัวที่เกิดจากความร้อน และความเข้มข้นทางเคมีอยู่ในภาวะคงที่ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงเมื่อเวลาเปลี่ยนไป จะได้สมดุลเคมีปรากฏการณ์จากการแยกตัวนี้สามารถเห็นได้ชัดเจนเมื่ออุณหภูมิสูงเกิน 2000 K ปรากฏการณ์นี้ทำให้เกิดปฏิกิริยาการปลดปล่อยความร้อนจากการเผาไหม้ออกมาไม่หมดทำให้อุณหภูมิก๊าซเผาไหม้ลดต่ำลง

2.4.2 การติดไฟกับการเคลื่อนที่ของเปลวไฟ

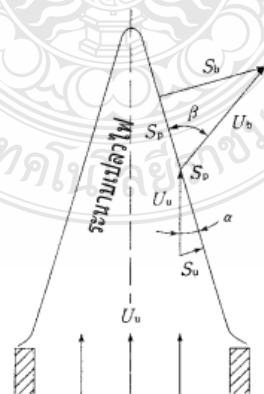
-การติดไฟหรือการจุดไฟ ในการรักษาอุณหภูมิของห้องเผาไหม้ที่มีส่วนผสมระหว่างก๊าซให้คงที่ และมีอุณหภูมิสูง ที่เวลาไม่มากนักจะเกิดการติดไฟหรือเกิดการระเบิด เรียกว่า การจุดระเบิด

ล่าช้า เมื่อทำการจุดประกายไฟด้วยอุณหภูมิที่สูง จะทำให้เกิดเปลวเล็กๆ ขึ้น แล้วเปลวนั้นจะเกิดการกระจายตัวและติดไฟอันเนื่องมาจากก๊าซผสมที่อยู่ภายในห้องเผาไหม้ อุณหภูมิในการติดไฟของเชื้อเพลิงชนิดแข็งโดยทั่วไปจะวัดด้วยเครื่องมือที่เรียกว่า Wearometer ส่วนในเชื้อเพลิงชนิดเหลวจะใช้วิธีวัดที่เรียกว่า Crucible method และในเชื้อเพลิงชนิดสุดท้ายคือเชื้อเพลิงก๊าซจะมีวิธีในการวัดอุณหภูมิที่เรียกว่า Bomb method

-ความเร็วในการเผาไหม้กับความเร็วของเปลวไฟ เปลวไฟมีคุณสมบัติในการเคลื่อนที่ด้วยตัวเองโดยอาศัยการนำความร้อน การแพร่ของโมเลกุล และปฏิกิริยาเคมีที่รวดเร็วเป็นแรงขับเคลื่อน ความเร็วในการเคลื่อนที่ของเปลวไฟ ในขณะที่ความเร็วในการเคลื่อนที่ของเปลวไฟเคลื่อนที่มากกระทบกับก๊าซผสมที่ยังไม่เกิดการเผาไหม้ ความเร็วของการเผาไหม้ คือ ปริมาตรของอากาศผสมที่ยังไม่เกิดการเผาไหม้ และที่ความเร็วของเปลวไฟขึ้นอยู่กับกาลไหลของก๊าซ ลักษณะของเปลวไฟ เป็นความเร็วของการเผาไหม้ชนิด Premix ที่มีกาลไหลแบบราบเรียบ (Premixed-laminar flame) จะมีค่าการเผาไหม้ที่มีประสิทธิภาพแค่นั้นขึ้นขึ้นอยู่กับประเภทของเชื้อเพลิง ส่วนผสม อุณหภูมิและความดันของอากาศ วิธีวัดความเร็วของการเผาไหม้แบบกระแสราบเรียบหลายวิธีได้แก่

- (1) แบบ Slot Burner
- (2) แบบลูกโป่งแต้มฟองสบู่
- (3) แบบ Flat flame Burner
- (4) แบบ Dual flame Burner
- (5) แบบ Bunsen Burner

-วิธีการตรวจสอบแบบ Slot Burner จะทำการพ่นก๊าซออกมาจากหัวฉีดโดยมีอัตราส่วนระหว่างความยาวต่อความกว้างของเปลวไฟ ทำให้เกิดเปลวไฟรูปสามเหลี่ยม และเมื่อวาดรูปจะได้รูปการกระจายตัวของเปลวไฟเป็นทางสามเหลี่ยมดังรูปที่ 2.2 เนื่องจากความเร็วของการเผาไหม้เท่ากับความเร็วในทิศทางตั้งฉากกับการกระจายตัวของก๊าซผสมที่ยังไม่เผาไหม้



รูปที่ 2.2 รูปแบบกระแสเปลวไฟของ Slot Burner

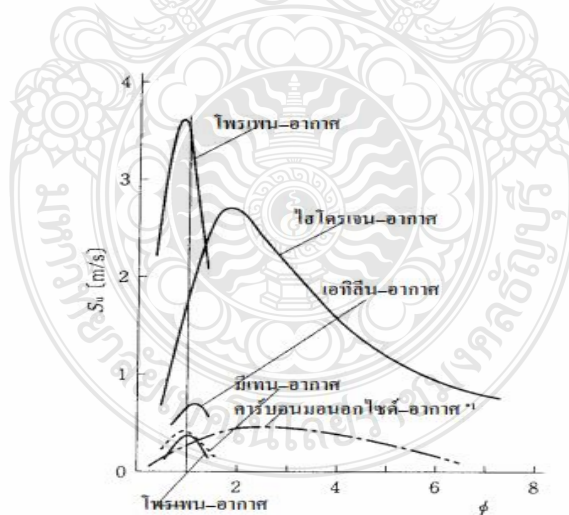
$$S_u = U_u \sin \alpha \text{ [m/s]} \quad (2.37)$$

ถ้าวัดความเร็วของก๊าซผสมที่ยังไม่เกิดการเผาไหม้และหามุม α ที่เกิดการก๊าซผสมทำกับระนาบเปลวไฟแล้ว จะสามารถหาความเร็วการเผาไหม้ได้

สำหรับวิธีการตรวจสอบแบบ Bunsen Burner จะสามารถคำนวณหาความเร็วของการเกิดเผาไหม้ได้ ซึ่งปกติความเร็วของการเผาไหม้ คือ การหาปริมาตรของก๊าซผสมที่ยังไม่เกิดการเผาไหม้ต่อพื้นที่ในแนวระนาบของเปลวไฟเมื่อเทียบกับเวลา

$$S_u = \frac{V}{A_f} \text{ [m/s]} \quad (2.38)$$

V เป็นอัตราการไหลโดยปริมาตรของก๊าซผสมที่ยังไม่เกิดการเผาไหม้ เป็นพื้นที่เปลวไฟที่คำนวณได้จากภาพถ่ายเปลวไฟโดยนำเปลวไฟหมุนรอบแกน รูปที่ 2.3 แสดงค่าความเร็วของการเผาไหม้แบบกระแสราบเรียบที่วัดด้วยวิธี (1-5) หรือเลือกวิธีใดวิธีหนึ่ง ในเชื้อเพลิงประเภทไฮโดรคาร์บอน เช่น มีเทน เอทิลีน โพรเพน ที่มีอัตราส่วนที่ผสมที่เท่ากับอากาศ ประมาณ 1.1 ความเร็วของการเผาไหม้จะมีประสิทธิภาพสูงสุด แต่คาร์บอนมอนอกไซด์หรือไฮโดรเจน จะมีค่าตั้งแต่ 2 ขึ้นไป คุณสมบัติของความเร็วในการเผาไหม้จะขาดสมดุลในสถานะที่ไม่มีการถ่ายเทความร้อน ดังนั้น เมื่อเพิ่มอุณหภูมิของการเผาไหม้ในสถานะที่ไม่มีการถ่ายเทความร้อน ความร้อนจะสูงขึ้น และความเร็วของการเผาไหม้จะเพิ่มขึ้นด้วย นอกจากนี้กรณีที่เพิ่มความดันย่อยของอากาศจะได้ผลเช่นเดียวกัน



1*รวมไฮโดรเจน 1.5 % และไอน้ำ 1.35%

รูปที่ 2.3 ความเร็วของการเผาไหม้แบบกระแสราบเรียบของอากาศผสมชนิดต่างๆ

ขีดจำกัดในการเผาไหม้ เกิดจากก๊าซที่ผสมไว้แล้วจะมีช่วงความเข้มข้นที่ติดไฟได้ช่วงหนึ่งซึ่งขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและความดัน หากความเข้มข้นของเชื้อเพลิงสูงกว่าหรือต่ำกว่าช่วงนั้น เปลวไฟจะไม่

ติดไฟ ค่าต่ำสุดของช่วงความเข้มข้นนี้เรียกว่า Lean flammability limit และค่าสูงสุดเรียกว่า Rich ขีดจำกัดในการติดไฟ ค่าเหล่านี้จะขึ้นอยู่กับวิธีวัดด้วย ดังนั้นจึงกำหนดวิธีวัด Flammability limit โดยนำตัวอย่างก๊าซผสมไว้แล้วใส่ลงในหลอดแก้วที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในไม่น้อยกว่า 50 mm โดยไม่ต้องพิจารณาการสูญเสียความร้อนที่ผนังหลอดภายใต้ความดันบรรยากาศให้หลอดแก้วนี้ยาว 1.5-2 m และมีปลายปิดข้างหนึ่ง ความเข้มข้นของก๊าซผสมไว้เมื่อจุดไฟที่ปลายเปิด เปลวไฟจะลามไปถึงปลายปิดอีกด้านความเป็นไปได้ 50% จะถือว่าเป็นขีดจำกัดในการติดไฟ การที่เปลวเคลื่อนขึ้นข้างบนจะมีขีดจำกัดการติดไฟกว้างกว่าการเคลื่อนลงข้างล่าง ตัวอย่างแสดงไว้ในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ขีดความสามารถในการติดไฟของก๊าซผสมระหว่างเชื้อเพลิงต่างๆ-อากาศ

ชื่อเชื้อเพลิง	Lean flammability	Rich flammability	ชื่อเชื้อเพลิง	Lean flammability	Rich flammability
ไฮโดรเจน	4.0	75	บิวเทน	1.6-1.7	9.7-10
คาร์บอนมอนอกไซด์	12.5	74	1.3-บิวเทน	2.0	12
มีเทน	5.0	15	เบนซิน	1.3	7.9
อีเทน	3.0	12.4	โทลูอีน	1.2	7.1
โพรเพน	2.1	9.5	โซลีน	1.1	6.4-6.6
บิวเทน	1.8	8.4	ไซโครเฮกเซน	1.3	7.8
เฮกเซน	1.2	7.4	อะเซตัลดีไฮด์	4.0	36
เอทิลีน	2.7	36	อะซีโตน	2.6	13
อะเซทิลีน	2.5	100(81)	อัมโมเนีย	15	28
โพรพิลีน	2.0	11.0			

-ปรากฏการณ์ Quenching เมื่อนำของแข็งวางไว้ในเปลวไฟ เปลวไฟที่บริเวณใกล้พื้นผิวจะเย็นลงและความเร็วของปฏิกิริยาลดลง ทำให้ไม่สามารถเกิดเปลวไฟต่อไปได้ ดังนั้นภายในระยะห่างจากพื้นผิวค่าหนึ่งภายใต้ความดัน บรรยากาศจะมีค่าไม่เกิน 1 mm จะไม่เกิดเปลวไฟที่มองเห็นได้ด้วยตาเปล่า ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า Quenching กล่าวคือ เครื่องยนต์เบนซินจะทำการปล่อยไฮโดรคาร์บอนที่ไม่เผาไหม้ ซึ่งเกิดจาก Quenching ที่มีสัดส่วนในปริมาณสูง เมื่อนำแผ่นวัสดุ 2 แผ่นวางขนานไว้ในก๊าซผสมที่ติดไฟได้โดยค่อยๆ ลดระยะห่างให้สามารถเข้าใกล้กันเรื่อยๆ ปรากฏว่าเปลวไฟไม่สามารถลามผ่านช่องว่างระหว่างวัสดุไปได้ เรียกว่า Flat-plate quenching distance

2.4.3 กระบวนการเผาไหม้ในทางปฏิบัติ

2.4.3.1 การเผาไหม้ประเภทต่างๆ

การเผาไหม้เชื้อเพลิงก๊าซ แบ่งออกเป็นการเผาไหม้ด้วย Burner และการเผาไหม้ในห้องเผาไหม้เพื่อให้เกิดเปลวไฟที่นิ่งและสม่ำเสมอโดยมีจุดประสงค์ในการเผาไหม้ก๊าซผสมที่อยู่ในห้องเผาไหม้

ด้วยการเคลื่อนที่หรือการลามของเปลวไฟ นอกจากนี้ถ้าแบ่งวิธีการเผาไหม้ได้เป็น Premix-combustion, Partial premix combustion และ Diffuse combustion โดย Premix combustion จะนำเชื้อเพลิงกับอากาศมาผสมให้เข้ากันก่อนแล้วจึงนำไปเผาไหม้ เปลวไฟจะลามไปในก๊าซ Premix เอง ในขณะที่ Diffuse combustion จะใช้เชื้อเพลิงกับอากาศ หรือก่อนเชื้อเพลิงกับอากาศ ทำให้เกิดการเผาไหม้ตรงที่เชื้อเพลิงกับออกซิเจน วิธีนี้จะทำให้เปลวไฟไม่เคลื่อนที่ ส่วน Partial premix-combustion จะมีลักษณะอยู่ระหว่างทั้งสองวิธี โดยใช้ก๊าซ Premix ที่มีความเข้มข้นสูงกว่า Flammability limit แทนเชื้อเพลิง นอกจากนี้การเผาไหม้ยังแบ่งตามการไหลของก๊าซอีกด้วย เปลวไฟว่าเป็นการไหลราบเรียบหรือปั่นป่วน การเผาไหม้กระแสราบเรียบ และการเผาไหม้กระแสปั่นป่วน เมื่อการไหลเปลี่ยนจากราบเรียบเป็นปั่นป่วน ลักษณะของเปลวไฟจะเปลี่ยนแปลง โดยนอกจากจะมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้นแล้ว ในการเผาไหม้แบบ Premix combustion ความเร็วของเปลวไฟยังเพิ่มขึ้น และในการเผาไหม้แบบ Diffuse combustion นั้น Combustion rate พื้นที่ผิวของเปลวไฟจะเพิ่มขึ้น เมื่อจำแนกการแบ่งประเภทได้ 3 ประเภท จะได้ผลดังตารางที่ 2.2 การแบ่งตัวอย่างเป็นประเภท A, B, C คือการเผาไหม้กระแสราบเรียบ แบบ Diffuse combustion ด้วย Burner การเผาไหม้กระแสปั่นป่วน แบบ Premix ในห้องเผาไหม้

ตารางที่ 2.2 วิธีเผาไหม้ประเภทต่างๆ

วิธีแบ่งประเภท	เกณฑ์ A	เกณฑ์ B	เกณฑ์ C
ชื่อ	การเผาไหม้ด้วย Burner	Premix combustion	การเผาไหม้กระแสราบเรียบ
	การเผาไหม้ในภาชนะ	Partial premix combustion Diffuse combustion	การเผาไหม้กระแสปั่นป่วน

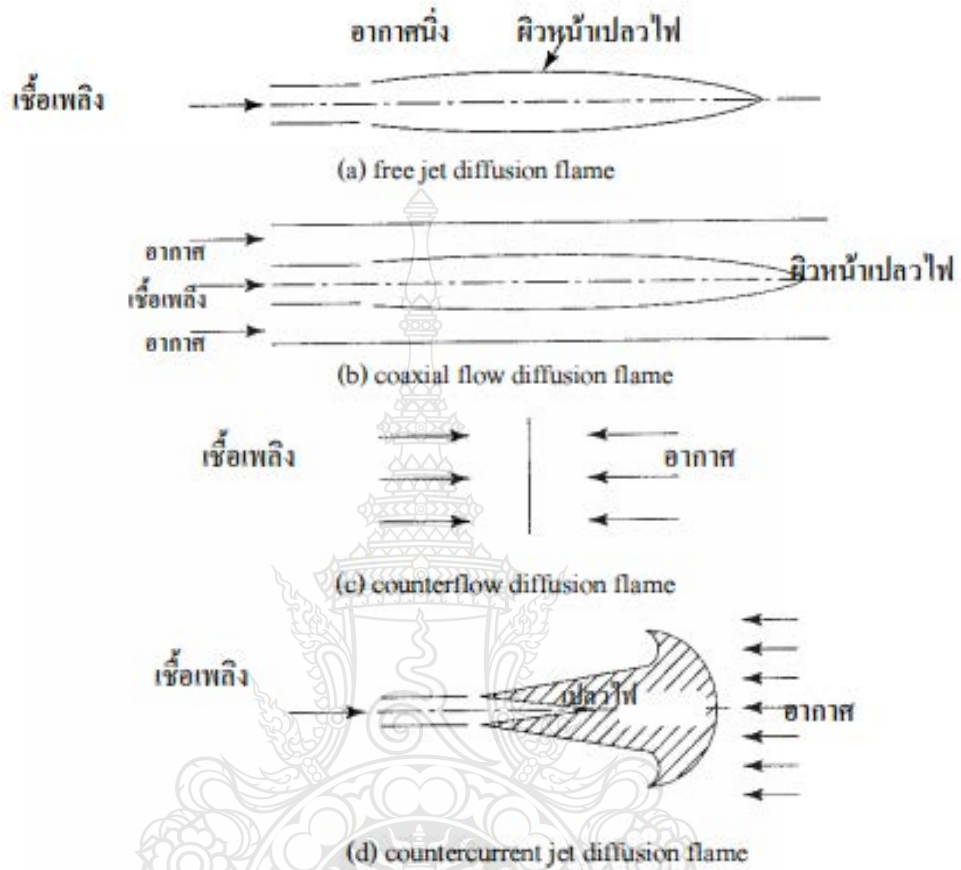
2.4.3.2 ความสามารถของอุปกรณ์เผาไหม้

เนื่องจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงจำเป็นต้องใช้ในการเกิดปฏิกิริยา ดังนั้น ปริมาณเชื้อเพลิงที่สามารถเผาไหม้ได้ในห้องเผาไหม้จึงมีขีดจำกัดเมื่อเทียบกับปริมาณ ความร้อนที่เกิดขึ้นในห้องเผาไหม้จะแสดงอัตราการเกิดความร้อนในห้องเผาไหม้ ยิ่งอัตราการเกิดความร้อนยิ่งมากเท่าไรห้องเผาไหม้ก็จะเล็กลงเท่านั้น เพื่อให้เกิดข้อได้เปรียบ เชื้อเพลิงและ Burner ประเภทต่างๆ จะมีขีดความสามารถไม่เท่ากัน ในกรณีของการเผาไหม้ด้วย Burner จะใช้อัตราการเกิดความร้อนของห้องเผาไหม้ซึ่งเป็นค่าที่แสดงปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นต่อห้องเผาไหม้ที่เวลาหนึ่ง

2.4.3.3 Diffuse combustion

เปลวไฟแบบ Diffusion flame มีหลายประเภท เช่น Free jet diffusion flame (รูปที่ 2.4 (a)) ซึ่งเกิดขึ้นที่ ผิวหน้าของ fuel jet ที่พ้นจาก Burner port ออกมาในอากาศที่หยุดนิ่ง Coaxial flow diffusion flame (รูปที่ 2.4 (b)) ซึ่งเกิดขึ้นที่ผิวหน้าของกระแสเชื้อเพลิงที่พ้นออกมาจาก Burner port โดยมีแกนตรงกันกับกระแสอากาศ Counterflow diffusion flame (รูปที่ 2.4 (c)) ซึ่งเกิดขึ้นที่ผิว

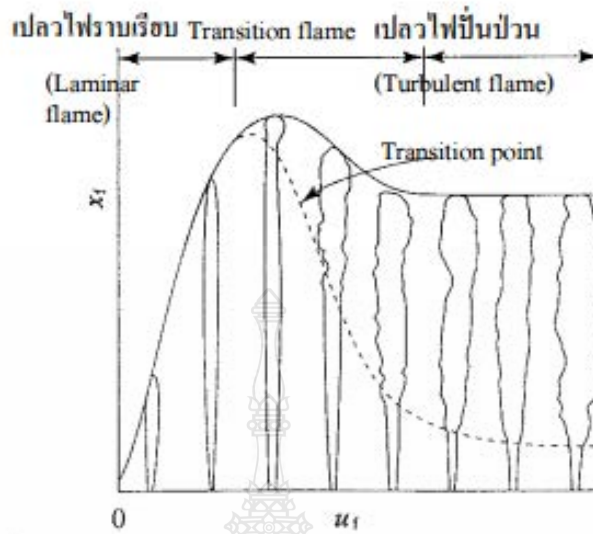
กระทบระหว่างกระแสเชื้อเพลิงกับกระแสอากาศที่มีทิศ ทางตรงข้ามกัน และ Countercurrent jet diffusion flame (รูปที่ 2.4 (d)) ที่เกิดขึ้นที่ผิวหน้าของ Fuel jet ที่พ้นสวน กระแสอากาศออกมา



รูปที่ 2.4 Diffusion flame ลักษณะต่างๆ

เปลวไฟแบบ Coaxial flow diffusion flame ที่กระแสเชื้อเพลิงมีความเร็วสูงกว่ากระแส อากาศรอบๆ Free jet diffusion flame จะเรียกรวมๆ กันว่า Jet diffusion flame ซึ่งความเร็ว เชื้อเพลิง u_f ของเปลวไฟเปล่านั้นจะมีผลต่อความยาว x_f ของเปลวไฟดังรูปที่ 2.5 เมื่อเชื้อเพลิงมีค่า ความเร็วไหลต่ำจะเกิดเปลวไฟราบเรียบ ที่ไม่เกิดการปั่นป่วน พบว่า

$$x_f \propto \frac{u_f d^2}{D_{fu}} \quad (2.39)$$



รูปที่ 2.5 ลักษณะและความยาวของ Jet diffusion flame

d เป็นเส้นผ่านศูนย์กลางของ Burner และ D_{fu} เป็นสัมประสิทธิ์การแพร่ ความยาวของเปลวไฟจะแปรผันตามกำลังสองของเส้นผ่านศูนย์กลางของปาก Burner และ แปรผันตามความเร็วของเชื้อเพลิง ซึ่งสอดคล้องกับค่าที่วัดได้จริงที่แสดงในรูปที่ 2.5

เมื่อเชื้อเพลิงมีความเร็วสูง ที่ปลายเปลวไฟจะเกิดการปั่นป่วนขึ้น เมื่อกระแสเชื้อเพลิงมีความเร็วเพิ่มขึ้น จุด Transition point ที่เริ่มเกิดการปั่นป่วนจะค่อยๆ เลื่อน ต่ำลงเข้าหาฐานของเปลวไฟ เมื่อเชื้อเพลิงมีความเร็วอยู่ในช่วงเปลวไฟปั่นป่วนซึ่งเปลวไฟเกือบทั้งเปลวจะเปลี่ยนเป็นเปลวไฟปั่นป่วน จะต้องเปลี่ยนค่า D_{fu} ในสมการ (2.39) เป็นสัมประสิทธิ์การแพร่หุนวนซึ่งมีสมการดังนี้

$$\epsilon = \nu u' \propto d \cdot u_f \quad (2.40)$$

สมการ (2.40) จึงได้เป็น

$$x_f \propto \frac{u_f d^2}{d \cdot u_f} = d \quad (2.41)$$

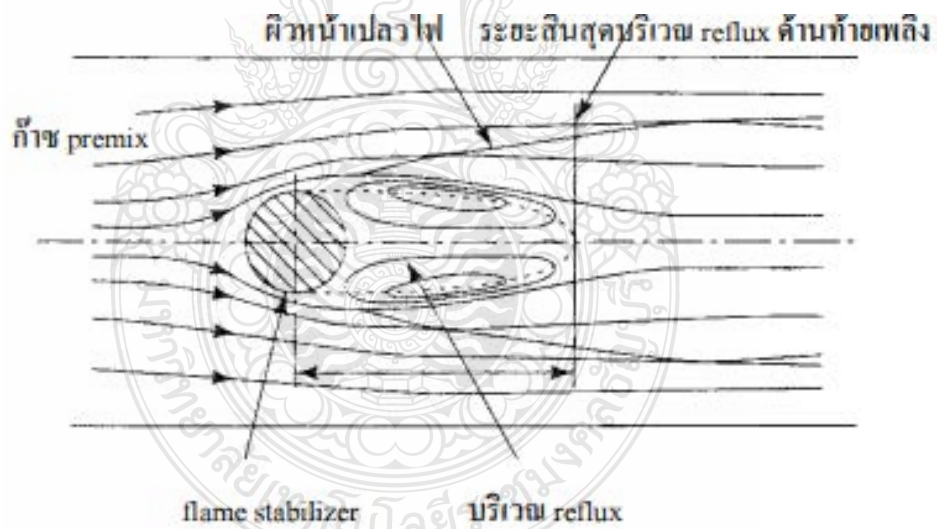
ทั้งนี้ ϵ เป็นความยาวผสม และ u' เป็นระดับสัมบูรณ์ของความปั่นป่วน จากสมการนี้จะได้ความยาวของ Diffusion flame กระแสปั่นป่วนจะไม่ขึ้นกับความเร็วของเชื้อเพลิงแต่จะแปรผันตามเส้นผ่านศูนย์กลางของปาก Burner เท่านั้น ซึ่งก็สอดคล้องกับค่าที่วัดได้จริงในรูปที่ 2.5

2.4.3.4 การศึกษาเสถียรภาพของเปลวไฟ

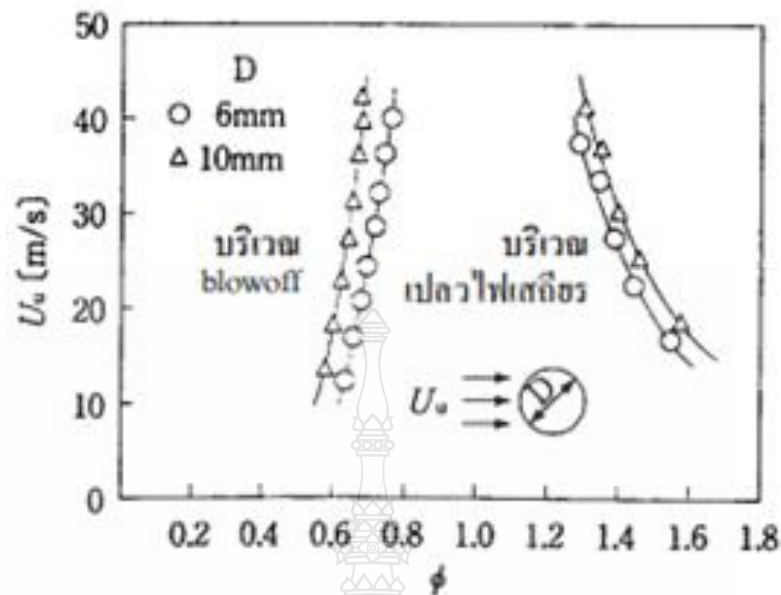
คือการทำให้อเปลวไฟมีเสถียรภาพในกระแสก๊าซ Premix ความเร็วสูง หรือการทำให้อเปลวไฟมีเสถียรภาพที่ปลายเพลิงของ Burner ซึ่งอยู่ในกระแสอากาศปฐมภูมิวิธีการรักษาเสถียรภาพทำได้โดยใช้

- (1) วิธี Flame stabilizer
- (2) วิธี Swirler
- (3) วิธี Countercurrent jet

ด้วยวิธีที่กล่าวข้างต้น จะทำการสร้างบริเวณที่มีการกักกลับไหลย้อนหรือ บริเวณที่เกิดกระแสความเร็วต่ำขึ้น แล้วทำให้อเปลวไฟมีเสถียรภาพในบริเวณนั้น วิธี Flame stabilizer คือการนำวัตถุที่มีรูปร่างเป็นทรงกระบอกจางกลม ทรงกลม พื้นผิวรูปตัว V หรือพื้นผิวรูปกรวยกลม ฯลฯ มาตั้งขวางซึ่งจะกักก๊าซและอุณหภูมิสูงไว้บริเวณที่ปิดล้อม แล้วทำการจุดไฟให้กระแสก๊าซ Premix ความเร็วสูง ลักษณะการไหลของก๊าซรอบๆ ที่แสดงไว้ในรูปที่ 2.6 และรูปที่ 2.7 แสดง Blowoff limit ของเปลวไฟในกรณีที่ว่าท่อทองแดงเส้นผ่านศูนย์กลาง D ที่ให้ความเย็นด้วยน้ำไว้ในกระแสก๊าซ premix ระหว่างโพรเพน-อากาศจะพบว่าความเร็วกระแสที่ระนาบหน้าตัดที่ตัดผ่านศูนย์กลางของ Flame stabilizer ยังมีค่าสูงเท่าไร อัตราส่วนที่เท่ากันทำให้อเปลวไฟมีเสถียรภาพ ในช่วงที่แคบลงเป็นการนำอุปกรณ์ที่ทำให้กระแสเกิดการตีเกลียว ด้วยความดันลบบริเวณศูนย์กลาง เพื่อทำให้อเปลวไฟมีเสถียรภาพ



รูปที่ 2.6 ลักษณะการไหลของก๊าซรอบๆ ตัวควบคุมเปลวจากไฟโพรเพน-อากาศ อุณหภูมิห้อง ความดันบรรยากาศ



รูปที่ 2.7 การจำกัดการระเบิดจาก flame stabilizer รูปทรงกระบอก

Countercurrent jet จะเป็นวิธีพ่น Jet ส่วนกับกระแสด้วยความสม่ำเสมอแล้วทำให้เปลวไฟมีเสถียรภาพ บริเวณกระแสความเร็วต่ำใกล้ๆ กับจุดหยุดนิ่ง มีทั้งวิธีพ่น Fuel jet ส่วนกระแสอากาศและวิธีพ่น Jet ของอากาศ หรือก๊าซเผาไหม้อุณหภูมิปกติหรืออุณหภูมิสูงส่วนกับกระแสแก๊ส Premix นอกจากนี้ยังมีวิธีคว้านปากหัวพ่น Fuel jet ให้กว้างขึ้นเป็นชั้นบันได หรือวิธีบากร่องบนผนังวิธีเหล่านี้ล้วนเป็น Flame stabilizer เช่นกัน

2.4.4 ประสิทธิภาพของการใช้เชื้อเพลิง

ประสิทธิภาพของการใช้เชื้อเพลิงสามารถหาได้จาก

$$\eta = \frac{-\left(\left(\frac{A}{F}+1\right)h_{\text{prod}}-\left(\frac{A}{F}\right)h_A-h_F\right)}{\text{LHV}} \quad (2.42)$$

- เมื่อ $\frac{A}{F}$ คือ อัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิง
 h_{prod} คือ เอนทัลปีรวมของผลิตภัณฑ์
 h_A คือ เอนทัลปีของอากาศ
 h_F คือ เอนทัลปีของเชื้อเพลิง
 LHV คือ Lower Heating Value

ประสิทธิภาพของการใช้เชื้อเพลิงแสดงถึงความสามารถในการใช้เชื้อเพลิงในการเผาไหม้ ยิ่งค่าประสิทธิภาพสูง แสดงว่าหัวเผามีความสามารถในการผสมเชื้อเพลิงกับอากาศและทำให้เกิดการเผาไหม้ได้ดี

2.5 สมการควบคุมพื้นฐาน

โดยสมการควบคุมพื้นฐานจะประกอบไปด้วยสมการดังต่อไปนี้

1) Continuity equation:

$$\nabla(\rho\vec{v}) = 0 \quad (2.43)$$

สมการ mass balance สำหรับกลศาสตร์ของไหลโดยที่ ∇ คือเกรดีเียน ρ คือความหนาแน่น \vec{v} คือเวกเตอร์ของความเร็ว

2) RNG k – ϵ turbulent model – k equation:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M \quad (2.44)$$

เป็นสมการของ k คือ kinetic energy ซึ่งแสดงถึงการเกิดหรือการสร้างเทอร์บูแลนซ์

$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i)$ เป็นเทอมของการไหล Convective term และ $\frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M$ เป็นเทอมของค่าสัมประสิทธิ์ความหนืดเทอร์บูแลนซ์ Turbulence viscosity โดยที่ μ_{eff} เป็นเทอมของของแรง Force term

3) RNG k – ϵ turbulent model – ϵ equation:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_\epsilon \mu_{eff} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right) + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} - R_\epsilon \quad (2.45)$$

เป็นสมการของ ϵ คือ Turbulent dissipation แสดงถึงการสลายเทอร์บูแลนซ์ $\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \epsilon u_i)$ เป็นเทอมของการไหลหรือการเคลื่อนที่ Convective term และ $\frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_\epsilon \mu_{eff} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right) + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} - R_\epsilon$ เป็นเทอมของค่าสัมประสิทธิ์ความหนืดเทอร์บูแลนซ์ Turbulence viscosity โดยที่ μ_{eff} เป็นเทอมของของแรง Force term

4) Ideal gas equation:

$$P = \rho RT \quad (2.46)$$

เป็นสมการแสดงสถานะของของไหลที่แปรตามความดัน ความหนาแน่น และอุณหภูมิ

5) Energy equation in term of enthalpy (H) of all species:

$$\nabla \cdot (\rho \vec{v} H) = \nabla \cdot \left(\frac{k_t}{c_p} \nabla H \right) \quad (2.47)$$

เป็นสมการอนุรักษ์พลังงานที่เขียนในรูปแบบของ Enthalpy $\nabla \cdot (\rho \vec{v} H)$ เป็นเทอมของการไหลที่พาพลังงานไปด้วย และ $\nabla \cdot \left(\frac{k_t}{c_p} \nabla H \right)$ เป็นเทอมของเกรเดียนของเอนทัลปี ซึ่งหมายถึงการเปลี่ยนแปลงพลังงานในเนื้อสาร

6) Radiation equation:

$$(a + \sigma_s) I(r, s) = a n^2 \frac{\sigma T^4}{\pi} + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} I(r, s') \phi(s, s') d\Omega' \quad (2.48)$$

เป็นสมการในการแผ่รังสีทางความร้อน Radiation $(a + \sigma_s) I(r, s)$ เป็นเทอมของ Absorption $a n^2 \frac{\sigma T^4}{\pi}$ เป็นเทอมของ Emission และ $\frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} I(r, s') \phi(s, s') d\Omega'$ เป็นเทอมของ Scattering

7) Mean mixture fraction in term of atomic mass fraction:

$$f = \frac{Z_i - Z_{i,ox}}{Z_{i,fuel} - Z_{i,ox}} \quad (2.49)$$

สมการของ mixture fraction เป็นสัดส่วนของผสมระหว่างสารใดๆ ออกซิเจน และเชื้อเพลิง ซึ่งคำนวณจากสัดส่วนโมล (mass fraction)

8) Mean mixture fraction transport equation:

$$\nabla \cdot (\rho \vec{v} \bar{f}) = \nabla \cdot \left(\frac{\mu_t}{\sigma_t} \nabla \bar{f} \right) \quad (2.50)$$

สมการ mixture fraction สร้างเป็นสมการอนุรักษ์มวลหรือสมการการถ่ายโอนมวล $\nabla \cdot (\rho \vec{v} \bar{f})$ เป็นเทอมของการเปลี่ยนแปลงของ mixture fraction ที่ถูกการไหลพาไป $\nabla \cdot \left(\frac{\mu_t}{\sigma_t} \nabla \bar{f} \right)$ เป็น การเปลี่ยนแปลงของ mixture fraction ในสารทั้งหมด

9) Mixture fraction variance transport equation:

$$\nabla \cdot (\rho \overline{v'f'^2}) = \nabla \cdot \left(\frac{\mu_t}{\sigma_t} \nabla \overline{f'^2} \right) + C_g \mu_t (\nabla \bar{f})^2 - C_d \rho \frac{\epsilon}{k} \overline{f'^2} \quad (2.51)$$

เป็นสมการ mixture fraction variance ซึ่งคือ การแปรผันของ mixture fraction มาสร้างเป็นสมการอนุรักษ์การแปรผันมวลหรือสมการการถ่ายโอนการแปรผันมวล และเทอม $\nabla \cdot (\rho \overline{v'f'^2})$ mixture fraction variance ที่ถูกการไหลพาไป โดยที่ $\nabla \cdot \left(\frac{\mu_t}{\sigma_t} \nabla \overline{f'^2} \right) + C_g \mu_t (\nabla \bar{f})^2 - C_d \rho \frac{\epsilon}{k} \overline{f'^2}$ เป็นเทอมการเปลี่ยนแปลงของ mixture fraction variance ในสสารทั้งหมด โดยการคำนวณ mixture fraction และ mixture fraction variance ต้องคำนวณพร้อมกันแล้วนำค่าที่ได้มาอินทิเกรตร่วมกับเอนทาลปี เพื่อให้ได้พลังงานที่เกิดจากการเผาไหม้ของสารแต่ละชนิด

2.6 สรุปสาระสำคัญจากเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปัจจุบันวิธีการเผาไหม้เชื้อเพลิง โดยใช้เชื้อเพลิงเกรดต่ำเพื่อใช้ในการเผาไหม้เป็นที่ยอมรับมากขึ้น และได้มีการศึกษาอย่างจริงจัง ทั้งทางด้านทฤษฎีและการทดลอง และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการวิจัยนี้ผู้วิจัยได้ศึกษาค้นคว้าข้อมูลรายละเอียดต่างๆที่เกี่ยวข้องจากเอกสารตำราและงานวิจัย การศึกษาอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อและระบบการทำงานในห้องเผาไหม้ จะต้องมีความเข้าใจในส่วนพื้นฐานและหลักการการทำงานในเรื่องการแลกเปลี่ยนความร้อน หรือแม้แต่การถ่ายเทความร้อนและการเผาไหม้

โดยทำการศึกษาและอ้างอิงจากงานวิจัยต่างๆที่เกี่ยวข้องเพื่อประกอบการทำงานวิจัยนี้และศึกษาความเป็นไปได้ของการศึกษากระบวนการในการคิด ทดสอบและวิเคราะห์ ซึ่งใช้ความน่าเชื่อถือจากงานวิจัยต่างๆที่ผ่านมาดังนี้

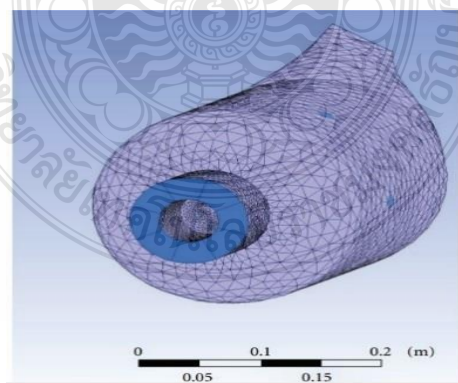
Gupta.A.K.[1] พบว่า ขนาดของเปลวไฟจะเพิ่มขึ้น เมื่อลดความเข้มข้นของ O_2 ในอากาศและเพิ่มอุณหภูมิของอากาศ นอกจากนั้นระยะห่างระหว่างเปลวไฟกับหัวฉีดเชื้อเพลิงจะลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิของอากาศ การเกิด NO_x ที่อากาศอุณหภูมิ 1150 องศาเซลเซียส ลดลงจาก 2800 ppm ที่ความเข้มข้นของ O_2 ในอากาศร้อยละ 21 เหลือ 40 ppm ที่ความเข้มข้นของ O_2 ในอากาศร้อยละ 2 เปอร์เซ็นต์

Hasegawa T. และ Tanaka R.[2] ทำการทดลองการเผาไหม้แบบ HiTAC โดยใช้อากาศอุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส LPG เป็นเชื้อเพลิง ใช้ก๊าซ N_2 เจือจางอากาศให้มีความเข้มข้นของ O_2 ร้อยละ 21 และร้อยละ 3 พบว่า ที่ความเข้มข้นของ O_2 ร้อยละ 21 เปลวไฟมีขนาดเล็ก สีเหลือง มีความสว่างมาก แต่มีความเข้มข้นของ O_2 ร้อยละ 3 เปลวไฟจะมีขนาดใหญ่ สีเขียว มีความสว่างน้อยและอุณหภูมิของเปลวไฟมีความสม่ำเสมอ

Gouldin, Depsky and Lee [3] แสดงผลการวิเคราะห์การเกิดการไหลแบบเวอร์เทค (Toroidal Vortex) ของการไหลหมุนวนเป็นเกลียวแบบหมุนตามกันคือ การทดลองแบบมีและไม่มีปฏิกิริยาการเผาไหม้ ของการฉีดเชื้อเพลิงและอากาศแบบหมุนวนทางเดียวและหมุนวนทางสวนทางกัน

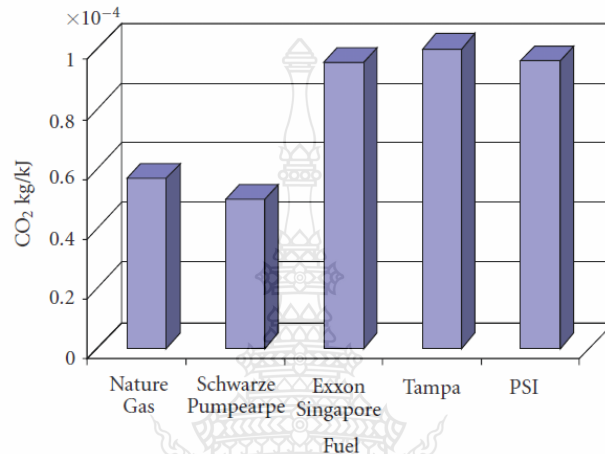
ภายในห้องเผาไหม้ โดยการเผาไหม้เป็นแบบที่มีการผสมผสานระหว่างอากาศและเชื้อเพลิงก่อน (Premixed) ได้ผลว่าบริเวณการไหลแบบเวอร์ทเกิดขึ้นเมื่อเป็นการการฉีดเชื้อเพลิงและอากาศแบบเชื้อเพลิงหมุนวนสวนทางกัน แต่กลับพบว่ามีการไหลแบบเวอร์ทเกิดขึ้นในกรณีที่มีการฉีดอากาศและเชื้อเพลิงหมุนวนทางเดียวกันแบบมีปฏิริยาการเผาไหม้ แต่ขนาดความกว้างของบริเวณการไหลแบบเวอร์ทเล็กกว่ากรณีที่หมุนวนสวนทางกันและมีค่าพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน (Turbulence Kinetic Energy K) ต่ำกว่าบริเวณการไหลแบบเวอร์ทเกิดขึ้นในการหมุนวนทั้งหมวนตามกันและสวนทางกัน และได้สรุปว่าเป็นเช่นนี้เพราะปัจจัยที่มีอิทธิพลที่ทำให้เกิดการไหลแบบเวอร์ทไม่ได้มีเพียงแค่ว่าความรุนแรงของการไหลแบบหมุนวนเป็นเกลียวเท่านั้น แต่ยังมีปัจจัยเรื่องรูปแบบการกระจายความเร็ว (Velocity Profile) ของความเร็วตามแนวแกนการไหล (U) และความเร็วตามแนวเส้นสัมผัส (W) ที่บริเวณทางออกของ Nozzle อีกด้วย เช่นถ้าเปรียบเทียบกระแสการไหลหมวนของค่าหนึ่งที่มีความรุนแรงของการไหลแบบหมุนวนเป็นเกลียวเท่ากัน แต่มีรูปแบบการกระจายความเร็วต่างกัน ผลของบริเวณตามแนวแกนการไหลก็จะแตกต่างกัน ซึ่งถ้าเป็นเช่นนี้แล้วการผสมก็แตกต่างกัน ถึงแม้ว่าจะมีผลค่าความรุนแรงของการไหลแบบหมุนวนเป็นเกลียวซึ่งจะได้ค่าความรุนแรงของการไหลแบบหมุนวนเป็นเกลียวเท่ากัน งานวิจัยนี้จึงมีจุดประสงค์ในการศึกษาระดับของค่าความรุนแรงของการหมุนวนเป็นเกลียวของกระแสอากาศกับเชื้อเพลิงต่อการผสมผสานภายในบริเวณของห้องเผาไหม้ แบบที่ยังไม่มีปฏิริยาการเผาไหม้ อันเป็นแนวทางการปรับปรุงประสิทธิภาพและเสถียรภาพของห้องเผาไหม้ โดยการปรับปรุงอากาศพลศาสตร์ของการเผาไหม้ (Combustion Aerodynamics)

Chaouki Ghenai [4] ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงในห้องเผาไหม้ของเครื่องยนต์กังหันแก๊สขนาดเล็กโดยการเปรียบเทียบผลการจำลองการเผาไหม้ระหว่างการใช้เชื้อเพลิงมีเทน (CH_4) กับแก๊สเชื้อเพลิงผสม (Syngas) โดยใช้รูปร่างลักษณะพื้นฐาน (Basic Geometry) ของห้องเผาไหม้แบบทรงกระบอก (Can Type) และใช้แบบจำลองการไหลปั่นป่วนกับแบบจำลองการเผาไหม้เป็น Standard k-epsilon และ Non-premixed Combustion



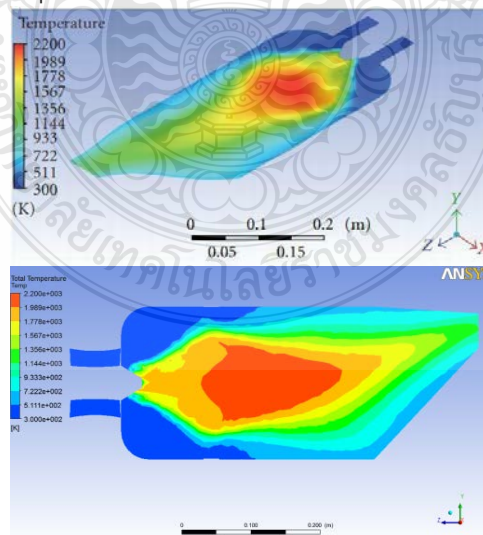
รูปที่ 2.8 แสดงรูปร่างลักษณะพื้นฐาน (Basic Geometry) ของห้องเผาไหม้แบบทรงกระบอกของ Chaouki Ghenai [4]

โดยพบว่าในกรณีที่กำหนดอัตราการไหลเชื้อเพลิงเท่ากันปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ที่เกิดขึ้นในกรณีที่ใช้เชื้อเพลิงผสมทุกชนิดที่นำมาศึกษามีค่าน้อยกว่าของมีเทน แต่เมื่อปรับอัตราการไหลของเชื้อเพลิงเพื่อให้ได้พลังงานที่เท่ากันพบว่ามีเชื้อเพลิงผสม Schwarze Pumpe เพียงชนิดเดียวที่ยังคงมีค่าปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) น้อยกว่ามีเทน แต่เมื่อปรับอัตราการไหลของเชื้อเพลิงเพื่อให้ได้พลังงานที่เท่ากันพบว่ามีเชื้อเพลิงผสม Schwarze Pumpe เพียงชนิดเดียวที่ยังคงมีค่าปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) น้อยกว่ามีเทน ตามภาพ



รูปที่ 2.9 แสดงปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์โดยเฉลี่ยที่ทางออกจากงานวิจัยของ Chaouki Ghenai [4]

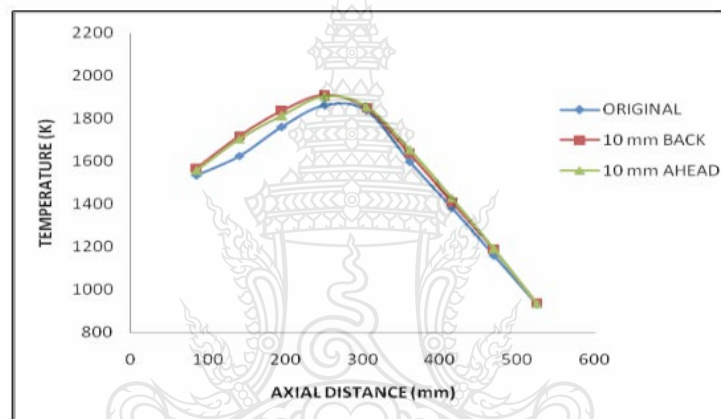
งานวิจัยของ Chaouki Ghenai [4] ตามภาพที่ 3 โดยมีบริเวณสีแดงที่แสดงถึงอุณหภูมิสูงสุดที่เกิดจากการเผาไหม้ที่มีอุณหภูมิประมาณ 2,200 เคลวิน ซึ่งสอดคล้องกับอุณหภูมิของเปลวไฟทางทฤษฎี (Adiabatic Flame Temperature)



รูปที่ 2.10 แสดงผลการกระจายตัวของอุณหภูมิจากงานวิจัยของ Chaouki Ghenai [4]

ภาพแสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิ และปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่แกนกลางของห้องเผาไหม้จากการจำลองกรณีพื้นฐาน (Base Case) ด้วยโปรแกรม ANSYSFLUENT

Firoj, Nikul and Mihir [5] ได้ทำการจำลองการเผาไหม้เพื่อศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนตัวแปรในห้องเผาไหม้ เช่น อัตราส่วนสมมูล มุมของอุปกรณ์สร้างการไหลวน (Swirler) และที่รูอากาศเฉื่อย โดยใช้รูปร่างลักษณะและแบบจำลองการไหลปั่นป่วนกับแบบจำลองการเผาไหม้เดียวกันกับงานวิจัยของ Chaouki Ghenai [4] โดยพบว่าที่มุมของอุปกรณ์สร้างการไหลวน (Swirler) เท่ากับ 60 องศา จะทำให้เกิดไนโตรเจนออกไซด์และอุณหภูมิที่ทางออกน้อยกว่า เมื่อเทียบกับที่มุม 30 และ 45 องศา ส่วนในกรณี que เพิ่มอัตราส่วนสมมูลจะทำให้อุณหภูมิและการเกิดไนโตรเจนออกไซด์เพิ่มขึ้นตามปริมาณเชื้อเพลิงที่เพิ่มมากขึ้น และในกรณีเลื่อนตำแหน่งของรูอากาศเฉื่อยไปข้างหน้าหรือไปข้างหลัง 10 มิลลิเมตร ไม่ได้ส่งผลต่ออุณหภูมิและการเกิดไนโตรเจนออกไซด์มากนักตามภาพ



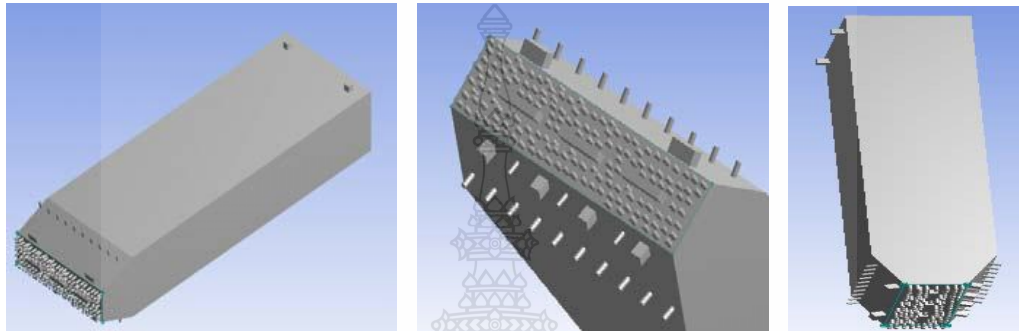
รูปที่ 2.11 แสดงอุณหภูมิที่แกนกลางห้องเผาไหม้ในกรณีเลื่อนของรูอากาศเฉื่อยจากงานวิจัยของ Firoj, Nikul and Mihir [5]

Rabou, et al. [6] ได้ทำการทดลองวัดประสิทธิภาพเครื่องยนต์กังหันแก๊สที่ใช้เชื้อเพลิงชีว-มวล แต่เนื่องด้วยข้อจำกัดของการทดลองจะสามารถวัดค่าที่ใช้คำนวณประสิทธิภาพของเครื่องยนต์ได้ในตำแหน่งที่ติดอุปกรณ์วัดค่าไว้เท่านั้น จึงได้มีการนำวิธีการคำนวณด้วยคอมพิวเตอร์มาช่วยในการคำนวณ ซึ่งวิธีการคำนวณนี้มีชื่อว่า Computational Fluid Dynamic (CFD) โดยวิธีการทาง CFD นี้จะสามารถคำนวณและจำลองพฤติกรรมของการไหลและการเผาไหม้ที่มีความต่อเนื่องได้

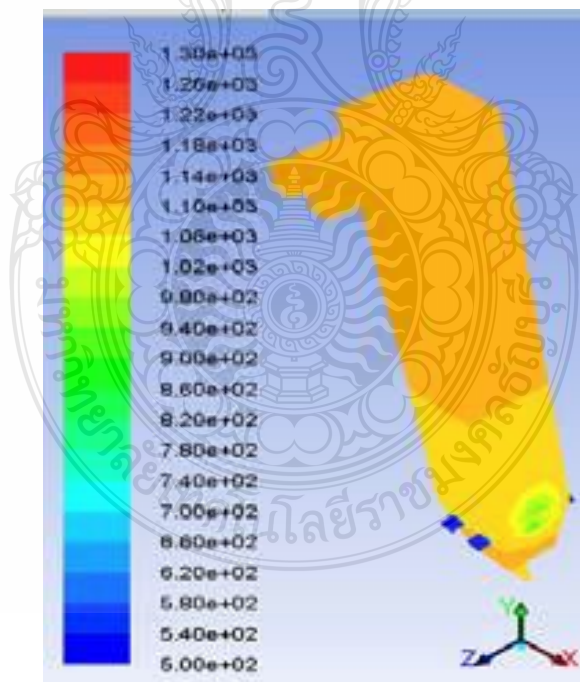
Farzad and Hamed [7] ได้นำวิธีการทาง CFD มาสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อสังเกตพฤติกรรมของการเผาไหม้ของ Burner โดยพบว่าการใช้แบบจำลองแบบ β -PDF จำลองผลการกระจายตัวของอุณหภูมิได้ดีกว่าแบบจำลองแบบ Eddy Dissipation

Martin Miltner, et al. [8] ได้นำวิธีการทาง CFD มาสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อสังเกตพฤติกรรมของการเผาไหม้ของห้องเผาไหม้ที่ใช้ในการทดลอง โดยข้อดีของวิธีการทาง CFD คือช่วยทำนายผลการทดลองเพื่อให้สามารถจำกัดขอบเขตในการทดลองให้แคบลงได้

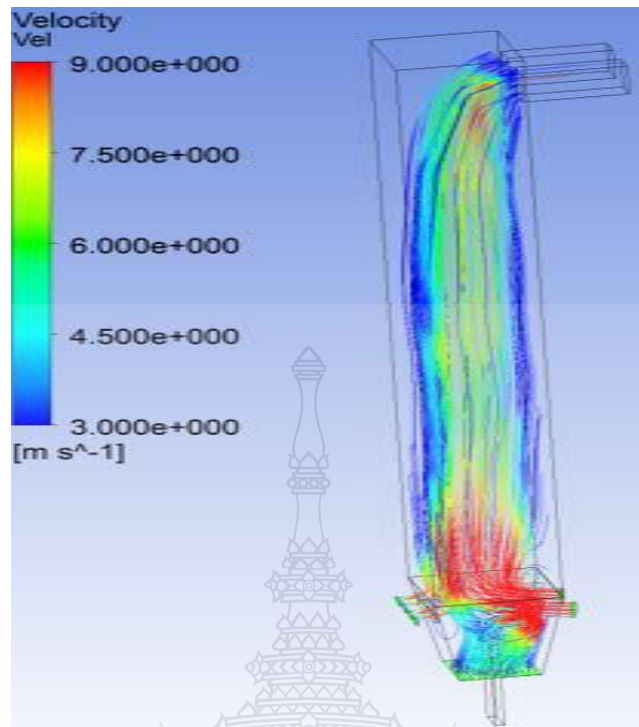
Eman Tora, Erik Dahlquist [9] ได้ศึกษาวิธีการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อจำลองการไหลของของมวลและการกระจายความร้อนภายในเตาเผาไหม้ เพื่อให้เกิดการสมดุลในการใช้งาน รวมถึงการกำจัดตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อการใช้งาน โดยมีการหาค่าตัวแปรในด้านความร้อนและอุณหภูมิที่มีผลต่อการเผาไหม้ภายในห้องเผาไหม้ และส่งผลต่อประสิทธิภาพการใช้งานและทำการปรับปรุงให้เหมาะสม ทั้งในเรื่องของอุณหภูมิ พลังงานความร้อน เชื้อเพลิง ความชื้นในอากาศ และปริมาณคาร์บอนที่เกิดขึ้นภายในเตาเผา



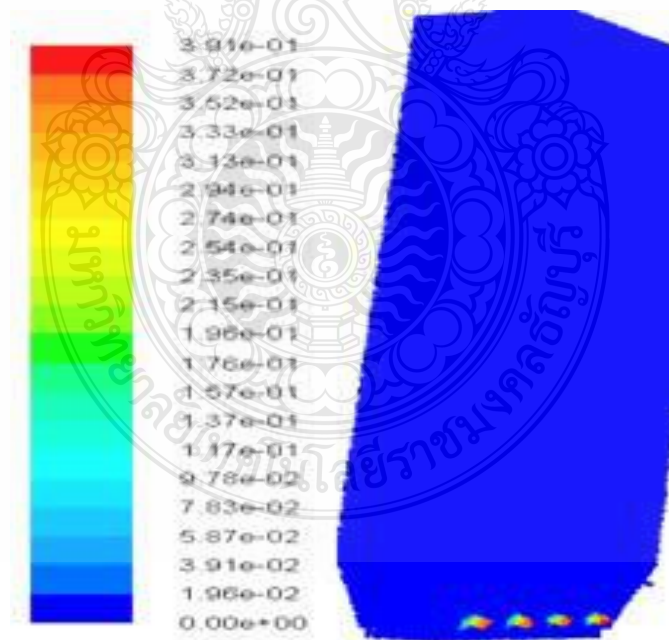
รูปที่ 2.12 ภาพมุมมองต่างๆของเตาที่สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์



รูปที่ 2.13 ภาพแสดงรูปร่างทางความร้อน

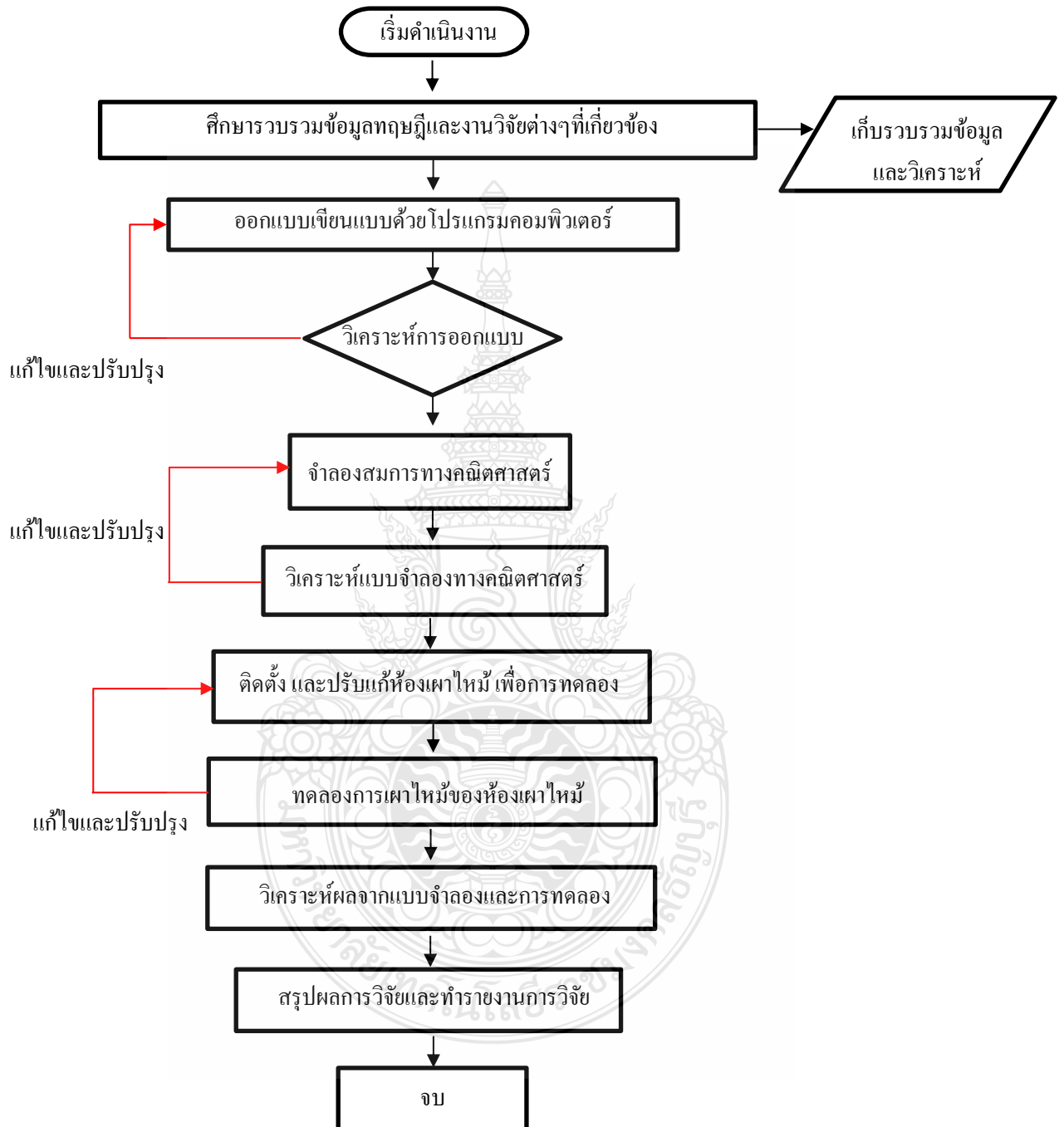


รูปที่ 2.14 การปล่อยโดยเปลี่ยนความเร็วของเชื้อเพลิง



รูปที่ 2.15 แสดงรูปร่างของคาร์บอนที่จะเกาะภายในเตา

ผังงานการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องกำเนิดไอน้ำแบบท่อขัดและการทดลอง



3.2.1 ศึกษาค้นคว้าข้อมูล

3.2.1.1 ทำการค้นคว้าหาข้อมูลจากตำราที่เกี่ยวข้อง เช่น หนังสือ การถ่ายเทความร้อน (Heat transfer) การไหลของของไหล (Fluid mechanics) การเผาไหม้ (Combustion) พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่ม

3.2.1.2 สืบค้นข้อมูลจากอินเทอร์เน็ต ทบทวนงานวิจัยในเว็บไซต์ที่เกี่ยวข้อง เช่น (www.scidirect.com)

3.2.1.3 สอบถามและปรึกษาขอคำแนะนำจากผู้เชี่ยวชาญเฉพาะด้าน

3.2.2 การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของห้องเผาไหม้เครื่องกำเนิดไอน้ำแบบท่อชุด (STSG)

3.2.2.1 ออกแบบเขียนแบบห้องเผาไหม้เครื่องกำเนิดไอน้ำแบบท่อชุดด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

3.2.2.2 วิเคราะห์แบบจำลองสมการคณิตศาสตร์ในส่วนของห้องเผาไหม้ด้วยโปรแกรม

3.2.2.3 วิเคราะห์แบบจำลองสมการคณิตศาสตร์หาประสิทธิภาพเชิงความร้อนของ (STSG) โดยมีการจำลองหัวเผาด้วยจำนวนที่แตกต่างกัน ตั้งแต่ 1 ถึง 4 หัวเผา

3.2.3 การทดลองห้องเผาไหม้เครื่องกำเนิดไอน้ำแลท่อชุด

3.2.3.1 ในการวิจัยนี้ใช้แก๊ส LPG เป็นเชื้อเพลิงในการทดสอบและศึกษา

3.2.3.2 ทำการเขียนแบบห้องเผาไหม้ของเครื่องกำเนิดไอน้ำแบบท่อชุด

3.2.3.3 ติดตั้ง และปรับแก้ห้องเผาไหม้ เพื่อการทดลอง

3.2.3.4 ทดลองการเผาไหม้ของห้องเผาไหม้

3.2.3.5 เปรียบเทียบผลที่ได้จากแบบจำลองสมการคณิตศาสตร์ของระบบการเผาไหม้กับผลการทดลอง เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

3.2.3.6 สรุปผลการวิจัยและทำรายงานการวิจัย

3.3 สถานที่ทำการติดตั้งและทดสอบ

สถานที่ทำการติดตั้ง และทดสอบภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ตำบลคลองหก อำเภอคลองหลวง จังหวัดปทุมธานี และสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.) ฝ่ายวิศวกรรม 35 หมู่ 3 เทคโนโลยีธานี ตำบลคลองห้า อำเภอคลองหลวง จังหวัดปทุมธานี 12120

3.4 เครื่องมือและวิธีการทดลอง

- 3.4.1 เครื่องคอมพิวเตอร์ 1 เครื่อง
- 3.4.2 โปรแกรมที่ใช้ในการจำลองสมการคณิตศาสตร์
- 3.4.3 ห้องเผาไหม้เครื่องกำเนิดไอน้ำแบบท่อชุด (STSG)
- 3.4.4 แอมมิเตอร์
- 3.4.5 เทอร์โมคัปเปิล
- 3.4.6 Data Logger
- 3.4.7 Air Rotameter
- 3.4.8 Gas Rotameter

3.5 วิธีการทดสอบและการบันทึกผล

- 3.5.1 จำลองสมการทางคณิตศาสตร์แบบไฟไนต์วอลุ่ม
- 3.5.2 จำลองสมการทางคณิตศาสตร์โดยวิเคราะห์อุณหภูมิ และความเร็วของการไหลที่เกิดขึ้นภายในห้องเผาไหม้ของเครื่องกำเนิดไอน้ำแบบท่อชุด โดยมีการเปรียบเทียบจำนวนหัวเผาไหม้ที่เหมาะสมที่สุด ชุดหัวเผาแก๊ส (Burner) จากพลังงานความร้อนและอุณหภูมิที่ได้ในการเผาไหม้
- 3.5.3 นำผลการทดลองที่ได้จากการวิเคราะห์แบบจำลองสมการทางคณิตศาสตร์มาทดสอบใช้งานจริงเปรียบเทียบและวิเคราะห์ผลความเป็นไปได้ทั้งในทางทฤษฎีและการปฏิบัติ เพื่อหาความแม่นยำและสอดคล้องกันของงานวิจัย

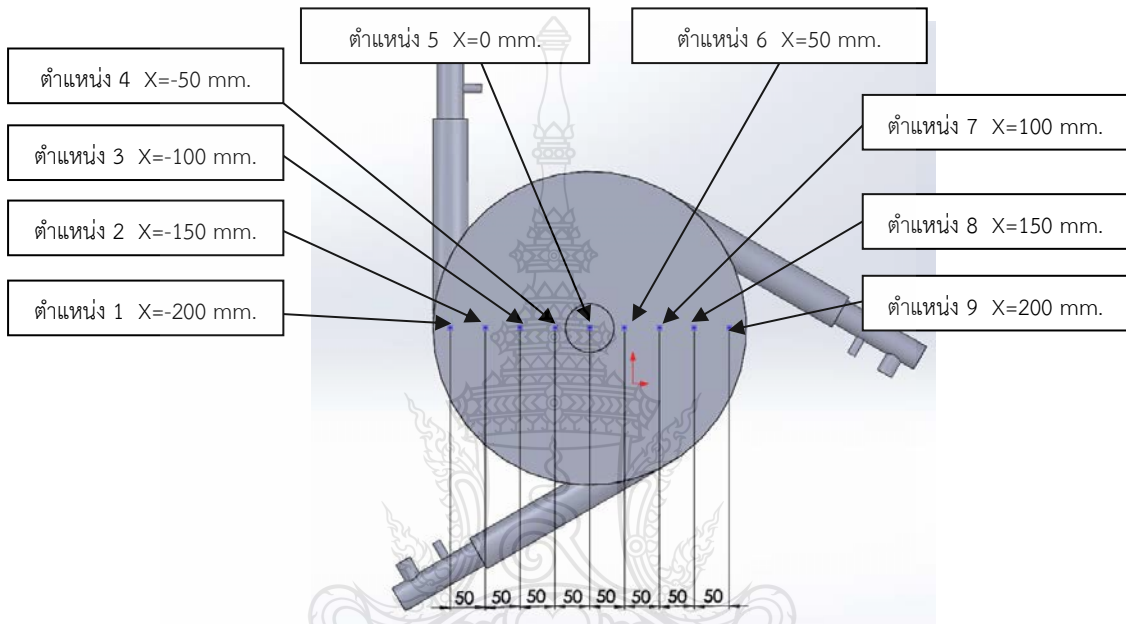
3.6 เงื่อนไขและขอบเขตของข้อมูลในการจำลอง และทดสอบ

ตารางที่ 3.1 ข้อมูลที่ใช้ในวิเคราะห์แบบจำลองสมการทางคณิตศาสตร์แทนค่าใน Boundary Condition และใช้ในการทดสอบใช้งานจริง

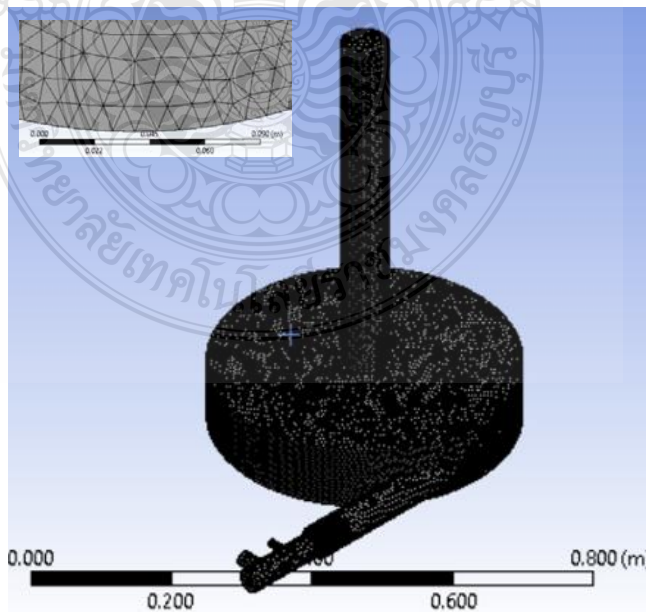
จำนวน (Burner)	อัตราป้อนเชื้อเพลิง LPG (kg/h)	อัตราป้อนอากาศ (kg/h)	อุณหภูมิ เชื้อเพลิง LPG (K)	อุณหภูมิอากาศ (K)
1	1.5	23.28	300	318.15
2	0.75	11.64	300	318.15
3	0.5	7.76	300	318.15
4	0.375	5.82	300	318.15

3.7 การวิเคราะห์ผลกระทบของ Mesh ต่อการคำนวณ

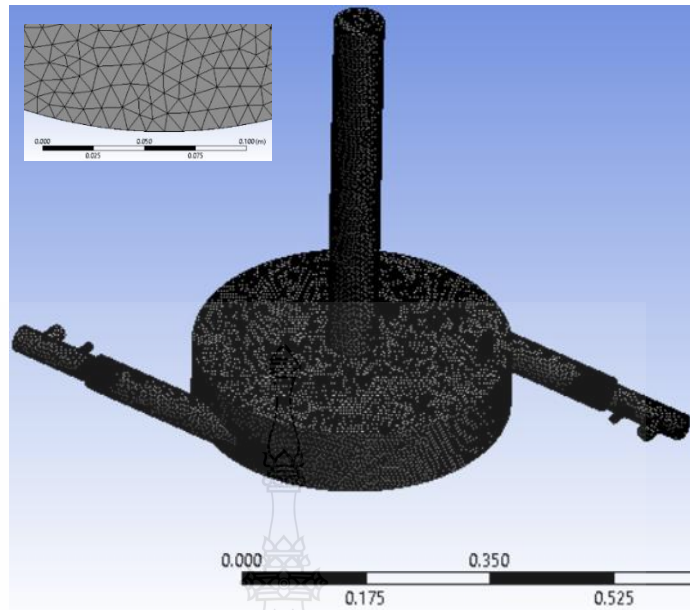
จำนวนของ Mesh ส่งผลต่อเวลาที่ใช้ในการคำนวณและผลที่ได้จากการคำนวณ โดยจำนวน Mesh ที่น้อยเกินไปจะใช้เวลาในการคำนวณน้อย แต่ผลที่ได้อาจมีความคลาดเคลื่อนสูง จำนวน Mesh ที่สูงเกินไปจะใช้เวลาในการคำนวณมาก แต่ผลที่ได้มีความแม่นยำ งานวิจัยแต่ละงานจะมีจำนวน Mesh ที่เหมาะสมแตกต่างกัน แต่ในงานวิจัยนี้กำหนด Mesh สำหรับการจำลองเป็นแบบ Tetrahedrons และทำการปรับ Mesh Sizing เพื่อหาค่า Mesh ที่เหมาะสม



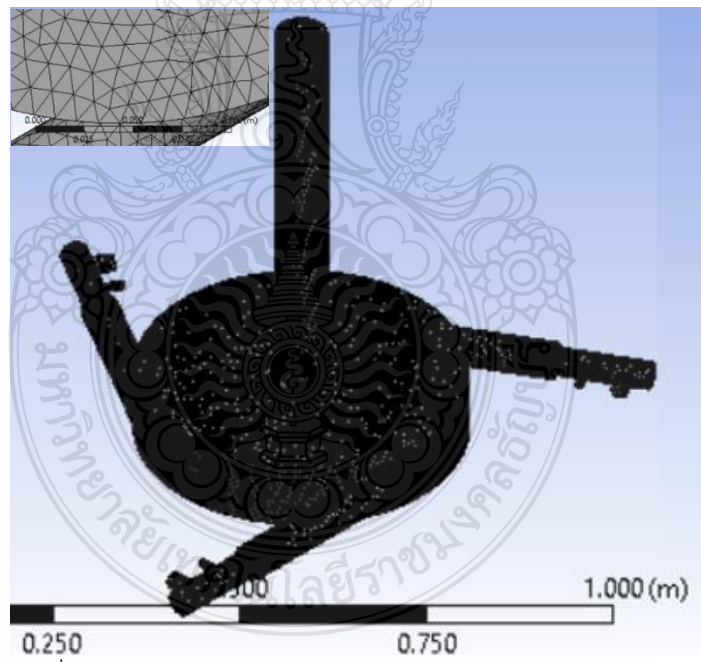
รูปที่ 3.1 ตำแหน่งและระยะการวัดผลของอุณหภูมิ และความเร็วการไหลของการวิเคราะห์ Mesh



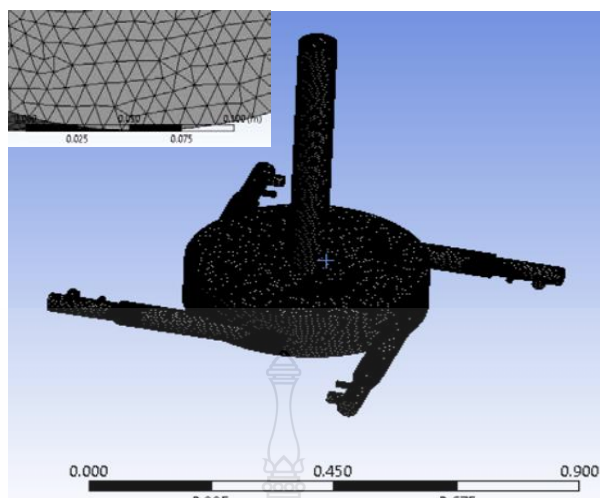
รูปที่ 3.2 การสร้าง Mesh ที่ 1 หัวเผาไหม้



รูปที่ 3.3 การสร้าง Mesh ที่ 2 หัวเสาไหม้



รูปที่ 3.4 การสร้าง Mesh ที่ 3 หัวเสาไหม้

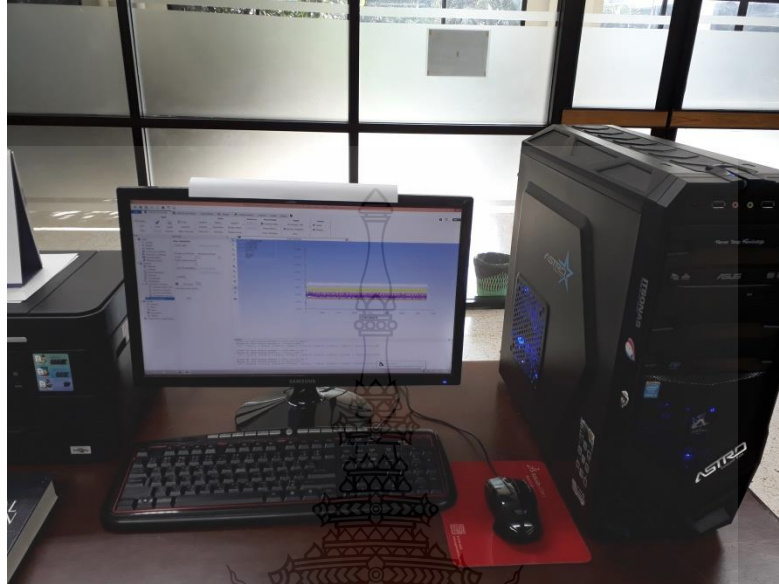


รูปที่ 3.5 การสร้าง Mesh ที่ 4 หัวเผาไหม้

ตารางที่ 3.2 การปรับค่า Mesh Sizing เพื่อหาค่า Mesh ที่เหมาะสม

Burner	No. Case	Mesh Sizing	Statistics	
		(m)	Nodes	Elements
1	1	0.007	225,930	1,225,757
	2	0.009	183,177	985,960
	3	0.011	165,567	889,182
2	1	0.007	355,570	1,922,499
	2	0.009	311,997	1,678,788
	3	0.011	294,489	1,581,472
3	1	0.007	472,156	2,547,463
	2	0.009	428,809	2,303,773
	3	0.011	411,673	2,209,202
4	1	0.007	588,973	3,170,540
	2	0.009	544,660	2,923,073
	3	0.011	527,936	2,831,252

3.8 การวิเคราะห์แบบจำลองสมการทางคณิตศาสตร์ ขั้นตอนการใช้ FLUENT



รูปที่ 3.6 วิธีการดำเนินการวิเคราะห์แบบจำลองสมการทางคณิตศาสตร์

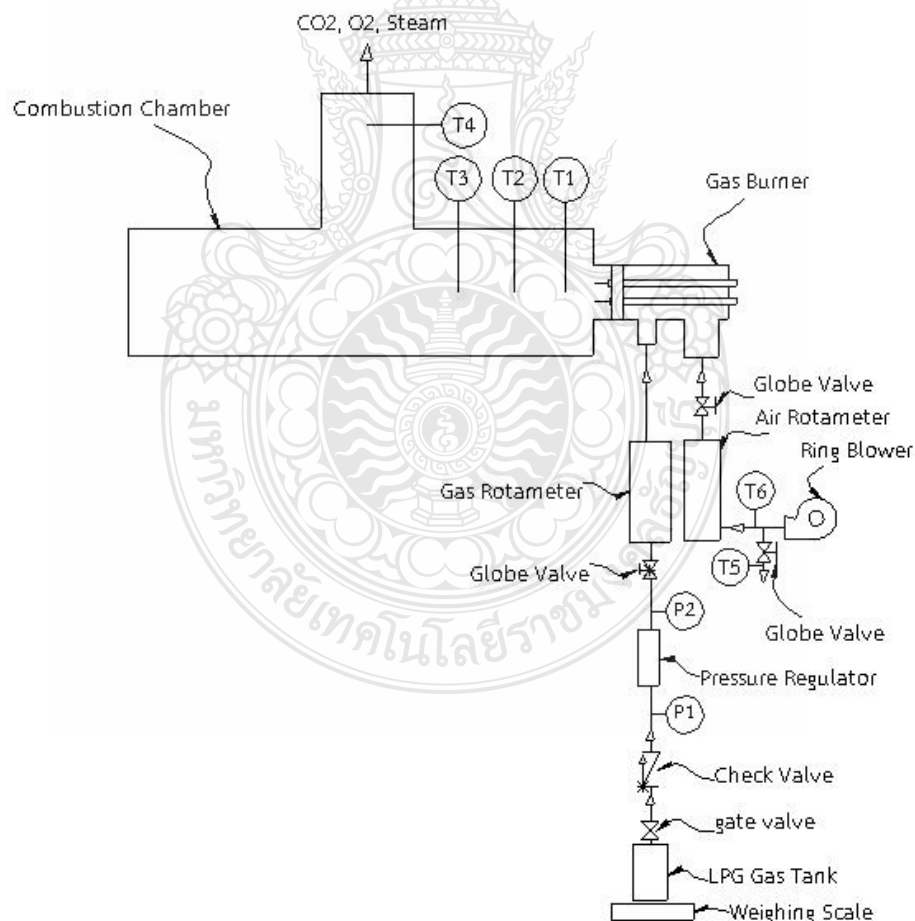
สำหรับขั้นตอนการใช้ FLUENT สามารถแบ่งเป็นขั้นตอนได้ดังนี้

- 1) กำหนด Solver เป็นแบบ Pressure Based และ Time เป็นแบบ Steady
- 2) เลือกใช้ Energy Equation จาก Model
- 3) เลือก Turbulent Model สำหรับการไหลเป็น RNG k-epsilon
- 4) เลือก Radiation Model โดยกำหนดแบบ Discrete Ordinates
- 5) เลือก Species Model การเผาไหม้เป็นแบบ Non-Premixed Combustion โดยกำหนดให้เชื้อเพลิงเป็น C_3H_8 และ C_4H_{10}
- 6) กำหนด Boundary Condition โดยเลือก Type ของทางเข้าเชื้อเพลิงและอากาศเป็นแบบ Mass-flow-inlet และกำหนดอัตราการไหลของเชื้อเพลิง, อากาศและอุณหภูมิตามกรณีที่ศึกษา
- 7) กำหนด Solution Method เป็นแบบ SIMPLE และเลือก Second order upwind
- 8) กำหนดค่าเริ่มต้นสำหรับการจำลองโดยเลือกแบบ Hybrid Initialization
- 9) กำหนด Residual Monitors เท่ากับ 10^{-3}
- 10) กำหนด Iteration บันทึกข้อมูลทุกๆ 1,000 รอบ
- 11) กำหนด Calculation Iteration

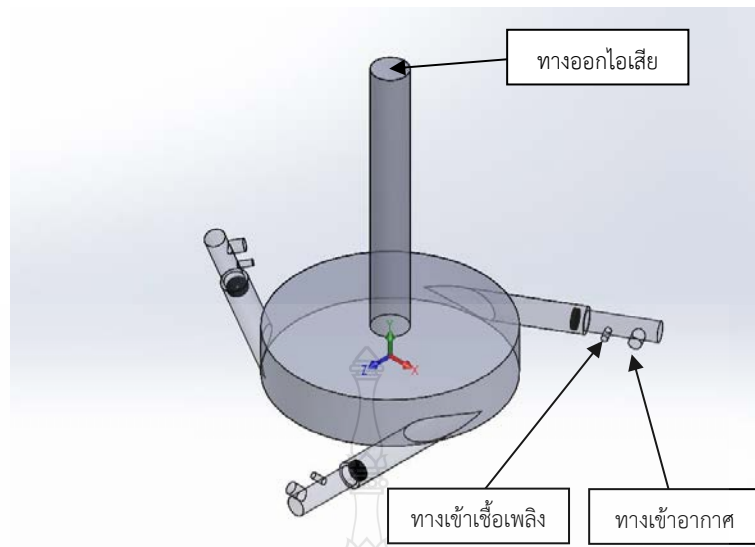
3.9 การทดสอบการใช้งานจริง

นำผลที่ได้จากการวิเคราะห์แบบจำลองสมการทางคณิตศาสตร์ ที่ให้ค่าทางความร้อนที่เหมาะสมที่สุด ทั้งในด้านต้นทุนและประสิทธิภาพเชิงความร้อน มาพิสูจน์ข้อเท็จจริงโดยการทดสอบดังต่อไปนี้

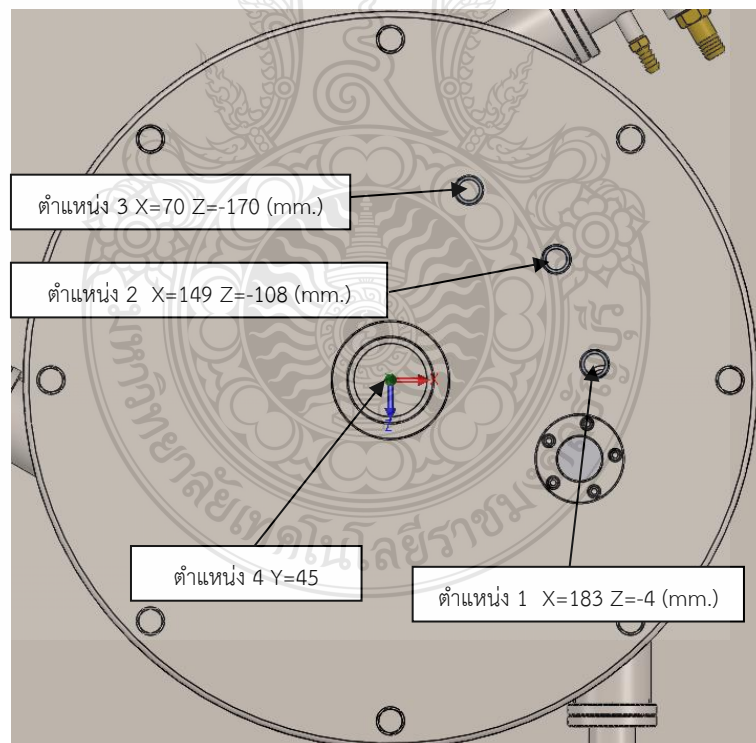
- การทดสอบจะเดินเครื่องและเก็บข้อมูลอุณหภูมิทุก 1 นาที เก็บผลใช้เวลาที่ 180 นาที
- การทดสอบจะใช้อัตราป้อนแก๊สคงที่ 1.5 kg/h
- การทดสอบจะใช้อัตราป้อนอากาศต่อเชื้อเพลิง (A/F) ที่ 15.5:1
- การวัดค่าอัตราการป้อนแก๊สจะใช้ตลับชั่ง 2 ตำแหน่ง และ Gas Rotameter
- การวัดค่าอัตราการป้อนอากาศจะใช้ Air Rotameter
- การวัดค่าของอุณหภูมิห้องเผาไหม้ทั้ง 3 จุด, ค่าของอุณหภูมิไอเสีย, ค่าของอุณหภูมิไอน้ำ, ค่าของอุณหภูมิอากาศป้อน, ค่าของอุณหภูมิมบรรยากาศจะวัดโดย Thermocouple Type B และ Type K โดยบันทึกผลด้วย Data Logger
- การวัดค่าของกระแสไฟฟ้าจะใช้ Ammeter



รูปที่ 3.7 การทดสอบวัดผลและตำแหน่งของอุปกรณ์ของห้องเผาไหม้เครื่องกำเนิดไอน้ำแบบท่อขด



รูปที่ 3.8 Model ตำแหน่งทางเข้าอากาศ, ทางเข้าเชื้อเพลิง และทางออกไอเสีย ของแบบจำลองห้องเผาไหม้เครื่องกำเนิดไอน้ำแบบท่อชุด



รูปที่ 3.9 ตำแหน่งการวัดอุณหภูมิของแบบจำลองห้องเผาไหม้เครื่องกำเนิดไอน้ำแบบท่อชุด



รูปที่ 3.10 ตำแหน่งการวัดอุณหภูมิของการทดสอบใช้จริงกับห้องเผาไหม้เครื่องกำเนิดไอน้ำแบบท่อชุด



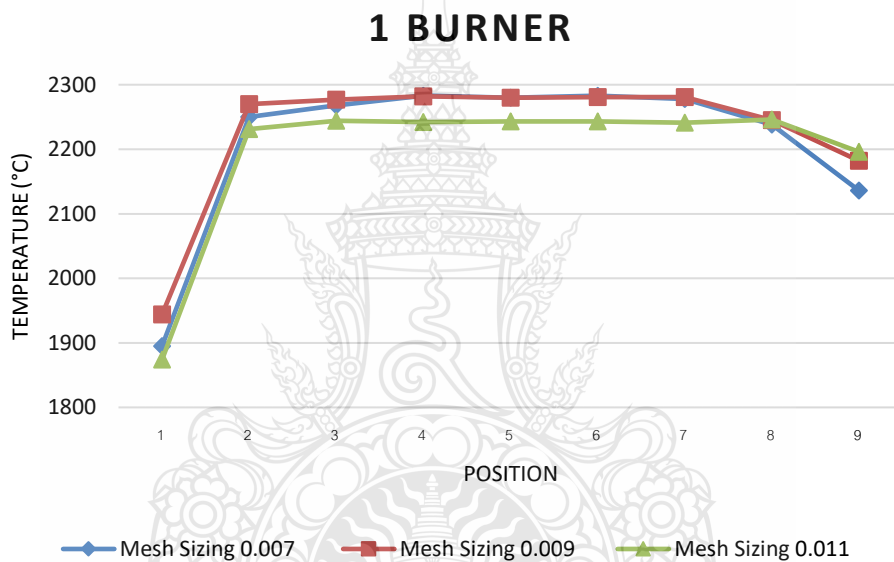
รูปที่ 3.11 การทดสอบใช้งานจริงกับห้องเผาไหม้แบบ 3 หัวเผา

บทที่ 4

ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

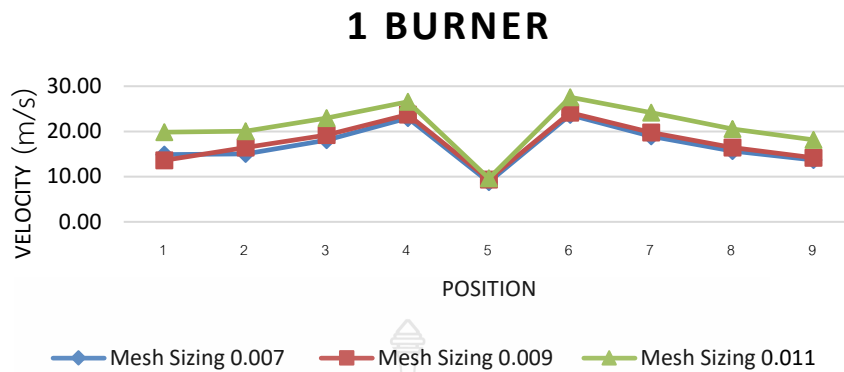
จากการวิเคราะห์แบบจำลองสมการทางคณิตศาสตร์ของห้องเผาไหม้เครื่องกำเนิดไอน้ำแบบท่อชุด (STSG) ในการวิเคราะห์ข้อมูลแบ่งเป็น 4 ตัวอย่างข้อมูล และ 1 ผลการทดสอบใช้งานจริงกับห้องเผาไหม้เครื่องกำเนิดไอน้ำแบบท่อชุด

4.1 ผลการวิเคราะห์ผลกระทบของ Mesh ต่อการคำนวณ



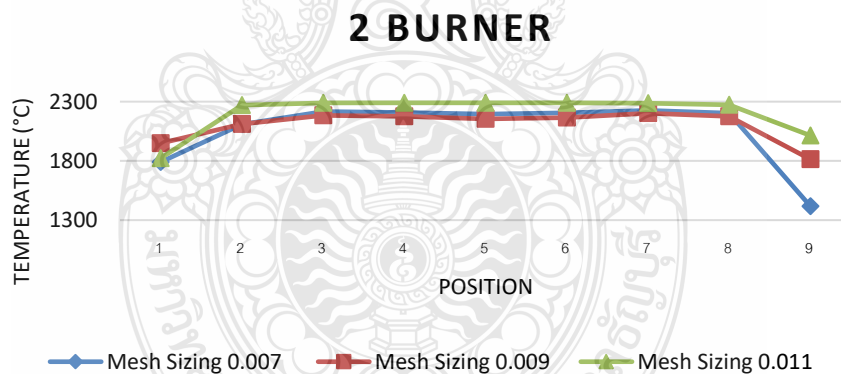
รูปที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์ค่าอุณหภูมิจากผลกระทบของ Mesh แบบ 1 Burner

ผลการวิเคราะห์ค่าของอุณหภูมิจากผลกระทบของ Mesh แบบ 1 Burner พบว่าที่ Mesh Sizing 0.007 m. กับ Mesh Sizing 0.009 m. มีค่าอุณหภูมิแต่ละจุดที่ใกล้เคียงกัน และค่าอุณหภูมิของ Mesh Sizing 0.011 m. แต่ละจุดมีความแตกต่างจาก Mesh Sizing 0.007 m เฉลี่ยอยู่ที่ 37 °C จะเห็นว่า Mesh ส่งผลต่อการคำนวณเพียงเล็กน้อย แต่เวลาที่ใช้ในการคำนวณจะเพิ่มมากขึ้นตามจำนวน Mesh ที่เพิ่มขึ้น จากผลดังกล่าวจึงเลือกกรณีของ Mesh Sizing 0.009 m. เนื่องจากผลที่ได้ไม่แตกต่างจากกรณี Mesh Sizing 0.007 m.



รูปที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์ค่าความเร็วการไหลจากผลกระทบของ Mesh แบบ 1 Burner

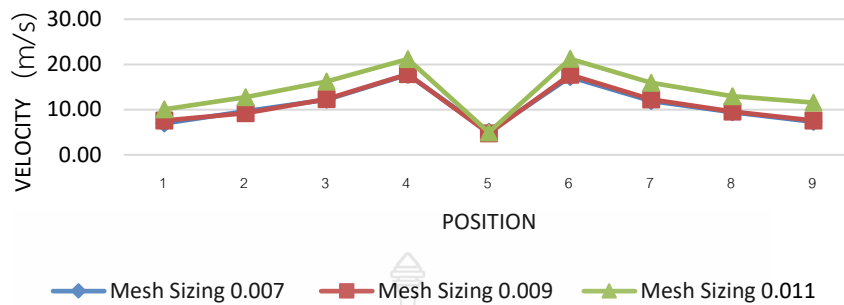
ผลการวิเคราะห์ค่าความเร็วการไหลจากผลกระทบของ Mesh แบบ 1 Burner พบว่าที่ Mesh Sizing 0.007 m. กับ Mesh Sizing 0.009 m. มีค่าความเร็วการไหลแต่ละจุดที่ใกล้เคียงกัน และค่าความเร็วการไหลของ Mesh Sizing 0.011 m. แต่ละจุดมีความแตกต่างจาก Mesh Sizing 0.007 m. เฉลี่ยอยู่ที่ 4.93 m/s จะเห็นว่า Mesh ส่งผลต่อการคำนวณเพียงเล็กน้อย แต่เวลาที่ใช้ในการคำนวณจะเพิ่มมากขึ้นตามจำนวน Mesh ที่เพิ่มขึ้น จากผลดังกล่าวจึงเลือกกรณีของ Mesh Sizing 0.009 m. เนื่องจากผลที่ได้ไม่แตกต่างจากกรณี Mesh Sizing 0.007 m.



รูปที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์ค่าอุณหภูมิจากผลกระทบของ Mesh แบบ 2 Burner

ผลการวิเคราะห์ค่าของอุณหภูมิจากผลกระทบของ Mesh แบบ 2 Burner พบว่าที่ Mesh Sizing 0.007 m. กับ Mesh Sizing 0.009 m. มีค่าอุณหภูมิแต่ละจุดที่ใกล้เคียงกัน และค่าอุณหภูมิของ Mesh Sizing 0.011 m. แต่ละจุดมีความแตกต่างจาก Mesh Sizing 0.007 m. เฉลี่ยอยู่ที่ 94 °C จะเห็นว่า Mesh ส่งผลต่อการคำนวณเพียงเล็กน้อย แต่เวลาที่ใช้ในการคำนวณจะเพิ่มมากขึ้นตามจำนวน Mesh ที่เพิ่มขึ้น จากผลดังกล่าวจึงเลือกกรณีของ Mesh Sizing 0.009 m. เนื่องจากผลที่ได้ไม่แตกต่างจากกรณี Mesh Sizing 0.007 m.

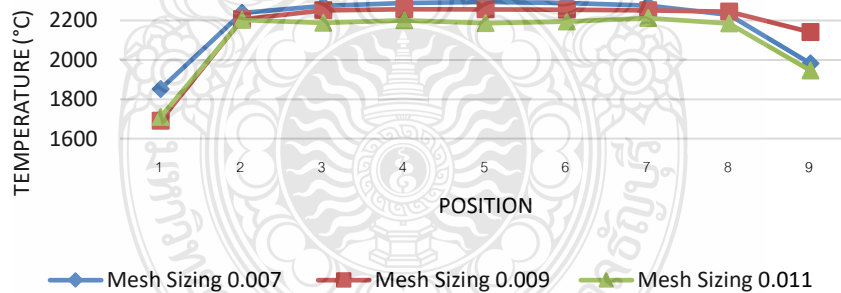
2 BURNER



รูปที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์ค่าความเร็วการไหลจากผลกระทบของ Mesh แบบ 2 Burner

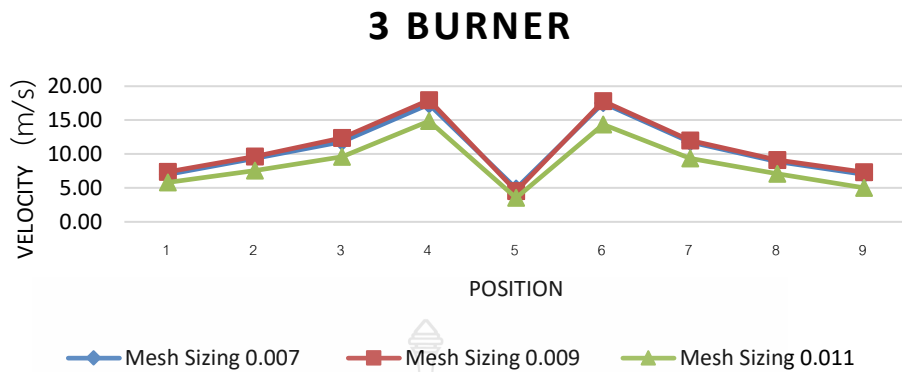
ผลการวิเคราะห์ค่าความเร็วการไหลจากผลกระทบของ Mesh แบบ 2 Burner พบว่าที่ Mesh Sizing 0.007 m. กับ Mesh Sizing 0.009 m. มีค่าความเร็วการไหลแต่ละจุดที่ใกล้เคียงกัน และค่าความเร็วการไหลของ Mesh Sizing 0.011 m. แต่ละจุดมีความแตกต่างจาก Mesh Sizing 0.007 m. เฉลี่ยอยู่ที่ 4.06 m/s จะเห็นว่า Mesh ส่งผลต่อการคำนวณเพียงเล็กน้อย แต่เวลาที่ใช้ในการคำนวณจะเพิ่มมากขึ้นตามจำนวน Mesh ที่เพิ่มขึ้น จากผลดังกล่าวจึงเลือกกรณีของ Mesh Sizing 0.009 m. เนื่องจากผลที่ได้ไม่แตกต่างจากกรณี Mesh Sizing 0.007 m.

3 BURNER



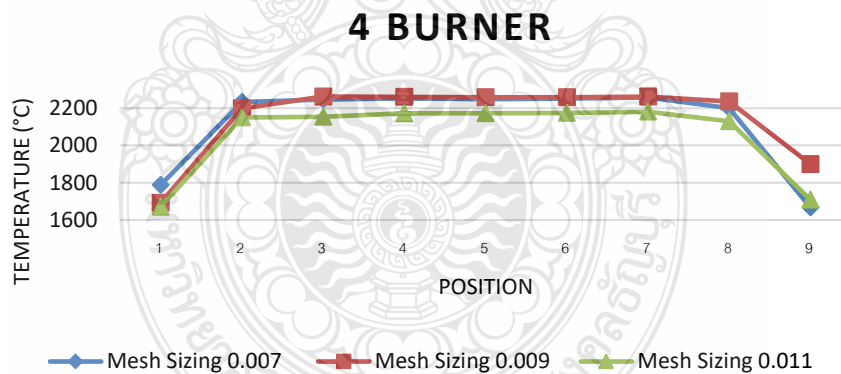
รูปที่ 4.5 ผลการวิเคราะห์ค่าอุณหภูมิจากผลกระทบของ Mesh แบบ 3 Burner

ผลการวิเคราะห์ค่าของอุณหภูมิจากผลกระทบของ Mesh แบบ 3 Burner พบว่าที่ Mesh Sizing 0.007 m. กับ Mesh Sizing 0.009 m. มีค่าอุณหภูมิแต่ละจุดที่ใกล้เคียงกัน และค่าอุณหภูมิของ Mesh Sizing 0.011 m. แต่ละจุดมีความแตกต่างจาก Mesh Sizing 0.007 m. เฉลี่ยอยู่ที่ 108 °C จะเห็นว่า Mesh ส่งผลต่อการคำนวณเพียงเล็กน้อย แต่เวลาที่ใช้ในการคำนวณจะเพิ่มมากขึ้นตามจำนวน Mesh ที่เพิ่มขึ้น จากผลดังกล่าวจึงเลือกกรณีของ Mesh Sizing 0.009 m. เนื่องจากผลที่ได้ไม่แตกต่างจากกรณี Mesh Sizing 0.007 m.



รูปที่ 4.6 ผลการวิเคราะห์ค่าความเร็วการไหลจากผลกระทบของ Mesh แบบ 3 Burner

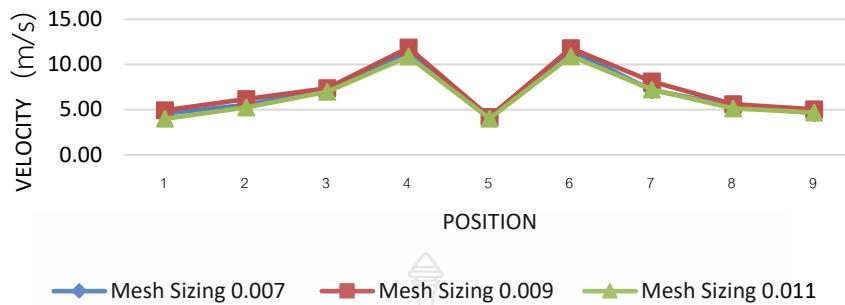
ผลการวิเคราะห์ค่าความเร็วการไหลจากผลกระทบของ Mesh แบบ 3 Burner พบว่าที่ Mesh Sizing 0.007 m. กับ Mesh Sizing 0.009 m. มีค่าความเร็วการไหลแต่ละจุดที่ใกล้เคียงกัน และค่าความเร็วการไหลของ Mesh Sizing 0.011 m. แต่ละจุดมีความแตกต่างจาก Mesh Sizing 0.007 m เฉลี่ยอยู่ที่ 2.23 m/s จะเห็นว่า Mesh ส่งผลต่อการคำนวณเพียงเล็กน้อย แต่เวลาที่ใช้ในการคำนวณจะเพิ่มมากขึ้นตามจำนวน Mesh ที่เพิ่มขึ้น จากผลดังกล่าวจึงเลือกกรณีของ Mesh Sizing 0.009 m. เนื่องจากผลที่ได้ไม่แตกต่างจากกรณี Mesh Sizing 0.007 m.



รูปที่ 4.7 ผลการวิเคราะห์ค่าอุณหภูมิจากผลกระทบของ Mesh แบบ 4 Burner

ผลการวิเคราะห์ค่าของอุณหภูมิจากผลกระทบของ Mesh แบบ 4 Burner พบว่าที่ Mesh Sizing 0.007 m. กับ Mesh Sizing 0.009 m. มีค่าอุณหภูมิแต่ละจุดที่ใกล้เคียงกัน และค่าอุณหภูมิของ Mesh Sizing 0.011 m. แต่ละจุดมีความแตกต่างจาก Mesh Sizing 0.007 m. เฉลี่ยอยู่ที่ 76 °C จะเห็นว่า Mesh ส่งผลต่อการคำนวณเพียงเล็กน้อย แต่เวลาที่ใช้ในการคำนวณจะเพิ่มมากขึ้นตามจำนวน Mesh ที่เพิ่มขึ้น จากผลดังกล่าวจึงเลือกกรณีของ Mesh Sizing 0.009 m. เนื่องจากผลที่ได้ไม่แตกต่างจากกรณี Mesh Sizing 0.007 m.

4 BURNER

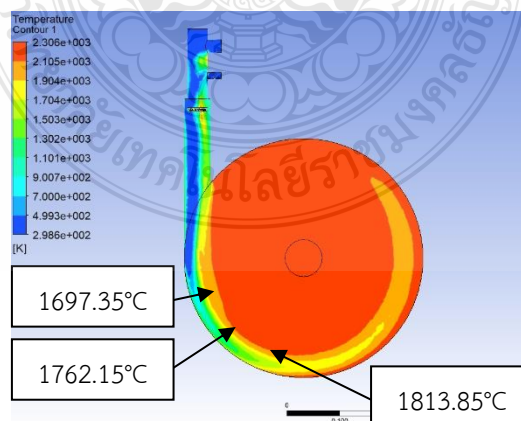


รูปที่ 4.8 ผลการวิเคราะห์ค่าความเร็วการไหลจากผลกระทบของ Mesh แบบ 4 Burner

ผลการวิเคราะห์ค่าความเร็วการไหลจากผลกระทบของ Mesh แบบ 4 Burner พบว่าที่ Mesh Sizing 0.007 m. กับ Mesh Sizing 0.009 m. และ Mesh Sizing 0.011 m. มีค่าความเร็วการไหลแต่ละจุดที่ใกล้เคียงกัน โดย Mesh Sizing 0.011 m. แต่ละจุดมีความแตกต่างจาก Mesh Sizing 0.007 m เฉลี่ยอยู่ที่ 0.28 m/s จะเห็นว่า Mesh ส่งผลต่อการคำนวณเพียงเล็กน้อย แต่เวลาที่ใช้ในการคำนวณจะเพิ่มมากขึ้นตามจำนวน Mesh ที่เพิ่มขึ้น จากผลดังกล่าวจึงเลือกกรณีของ Mesh Sizing 0.009 m. เนื่องจากเมื่อเทียบผลการวิเคราะห์ระหว่างค่าความเร็วการไหล กับ ค่าของอุณหภูมิ กรณี Mesh Sizing 0.009 m. จึงมีความเหมาะสมที่จะนำมาวิเคราะห์

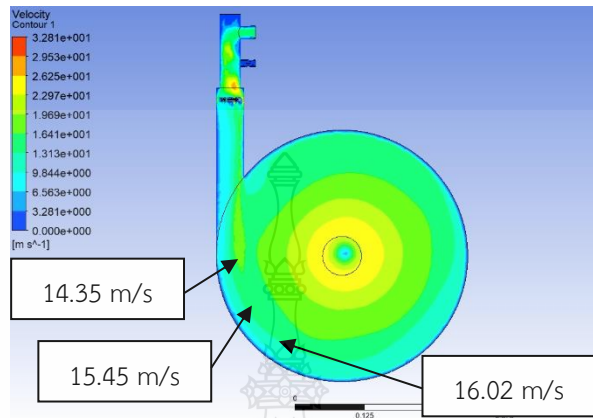
4.2 ผลการวิเคราะห์แบบจำลองสมการทางคณิตศาสตร์ของห้องเผาไหม้

ตัวอย่างที่ 1



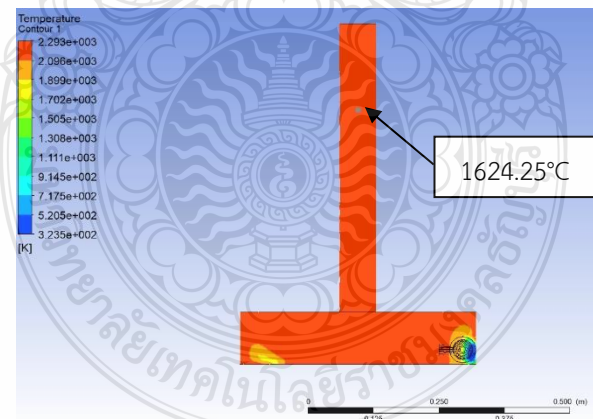
รูปที่ 4.9 แบบจำลองอุณหภูมิของห้องเผาไหม้แบบ 1 หัวเผา (ด้านบน)

ผลจากการวิเคราะห์แบบจำลองสมการทางคณิตศาสตร์ของห้องเผาไหม้แบบ 1 หัวเผาพบว่า มีการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ไม่สม่ำเสมอ ส่งผลให้อุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้มี อุณหภูมิที่สูงบางจุด และบางจุดมีอุณหภูมิต่ำ



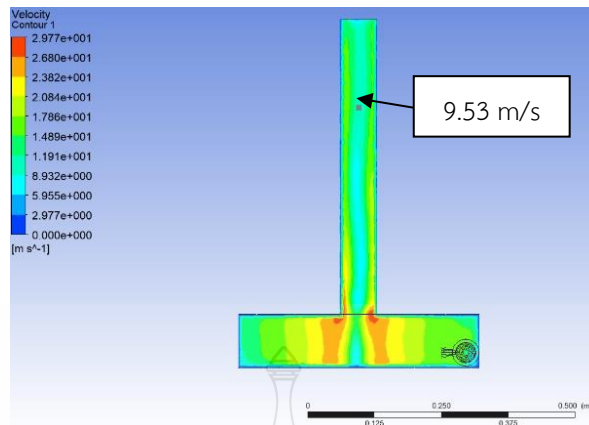
รูปที่ 4.10 แบบจำลองความเร็วการไหลของห้องเผาไหม้แบบ 1 หัวเผา (ด้านบน)

ผลจากการวิเคราะห์แบบจำลองสมการทางคณิตศาสตร์ของห้องเผาไหม้แบบ 1 หัวเผาพบว่า มีความเร็วการไหลของแก๊สสูงในช่วงหน้าหัวเผาไหม้ โดยมีความเร็วในการไหลอยู่ที่ 16.02 m/s ส่งผลให้อุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ไม่สม่ำเสมอ



รูปที่ 4.11 แบบจำลองอุณหภูมิของห้องเผาไหม้แบบ 1 หัวเผา (ด้านข้าง)

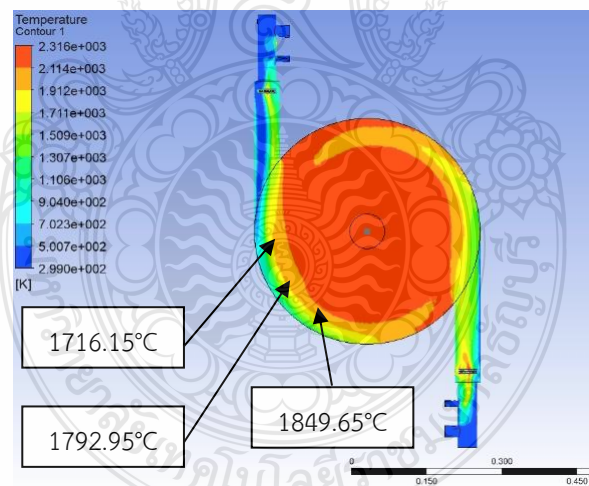
ผลจากการวิเคราะห์แบบจำลองสมการทางคณิตศาสตร์ของห้องเผาไหม้แบบ 1 หัวเผาพบว่า อุณหภูมิที่ตรงทางออกของไอเสียมีอุณหภูมิอยู่ที่ 1624.25 °C มีการกระจายตัวของอุณหภูมิที่สม่ำเสมอ ทั้งทางออก โดยมีค่าประสิทธิภาพการเผาไหม้แบบ 1 หัวเผาไหม้เท่ากับ 80.97%



รูปที่ 4.12 แบบจำลองความเร็วการไหลของห้องเผาไหม้แบบ 1 หัวเผา (ด้านข้าง)

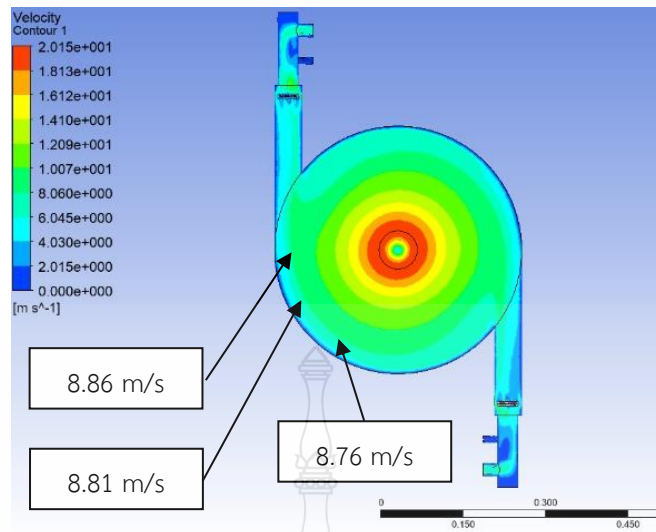
ผลจากการวิเคราะห์แบบจำลองสมการทางคณิตศาสตร์ของห้องเผาไหม้แบบ 1 หัวเผาพบว่ามีความเร็วการไหลของแก๊สไม่สม่ำเสมอตรงทางออกของไอเสีย โดยมีความเร็วในการไหลอยู่ที่ 9.53 m/s ส่งผลให้อุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ไม่สูงมาก

ตัวอย่างที่ 2



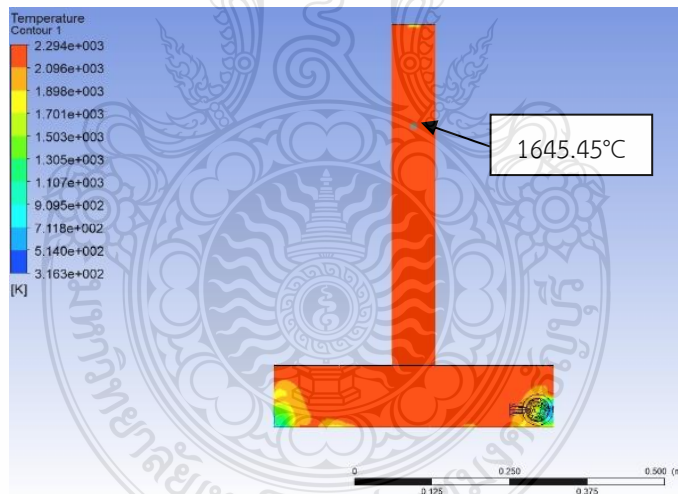
รูปที่ 4.13 แบบจำลองอุณหภูมิของห้องเผาไหม้แบบ 2 หัวเผา (ด้านบน)

ผลจากการวิเคราะห์แบบจำลองสมการทางคณิตศาสตร์ของห้องเผาไหม้แบบ 2 หัวเผา พบว่ามีการกระจายตัวของอุณหภูมิที่ไม่สม่ำเสมอ ส่งผลให้อุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ไม่สูงมาก และส่งผลให้อุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้มีอุณหภูมิสูงกว่าแบบจำลองของห้องเผาไหม้แบบ 1 หัวเผาเล็กน้อย



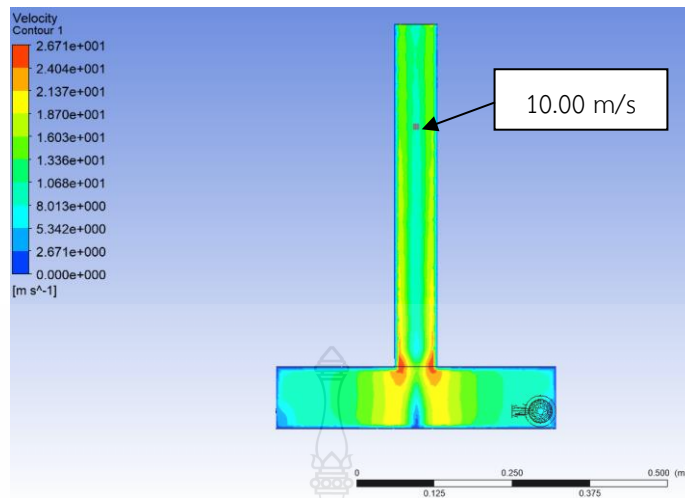
รูปที่ 4.14 แบบจำลองความเร็วการไหลของห้องเผาไหม้แบบ 2 หัวเผา (ด้านบน)

ผลจากการวิเคราะห์แบบจำลองสมการทางคณิตศาสตร์ของห้องเผาไหม้แบบ 2 หัวเผาพบว่ามีความเร็วในการไหลอยู่ที่ 8.76 m/s ความเร็วการไหลภายในห้องเผาไหม้มีความสม่ำเสมอ



รูปที่ 4.15 แบบจำลองอุณหภูมิของห้องเผาไหม้แบบ 2 หัวเผา (ด้านข้าง)

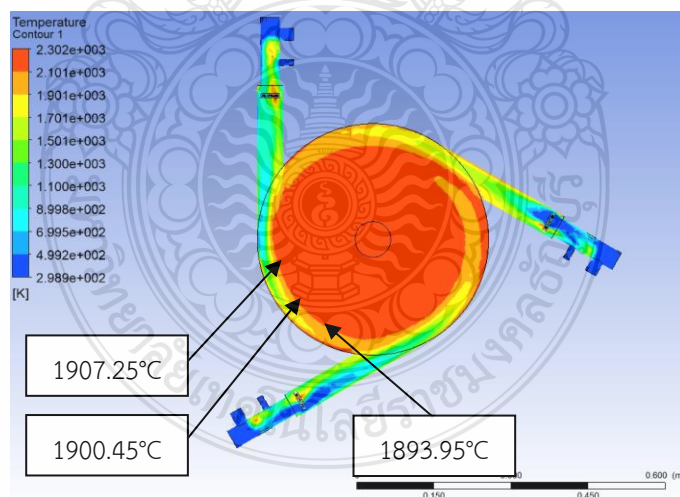
ผลจากการวิเคราะห์แบบจำลองสมการทางคณิตศาสตร์ของห้องเผาไหม้แบบ 2 หัวเผาพบว่าอุณหภูมิที่ตรงทางออกของไอเสียมีอุณหภูมิอยู่ที่ 1645.45 °C มีการกระจายตัวของอุณหภูมิที่สม่ำเสมอทั้งทางออก โดยมีค่าประสิทธิภาพการเผาไหม้แบบ 2 หัวเผาไหม้เท่ากับ 81.69%



รูปที่ 4.16 แบบจำลองความเร็วการไหลของห้องเผาไหม้แบบ 2 หัวเผา (ด้านข้าง)

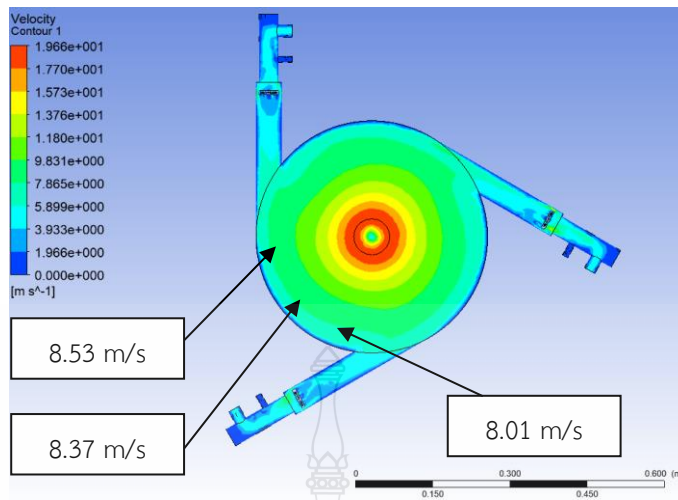
ผลจากการวิเคราะห์แบบจำลองสมการทางคณิตศาสตร์ของห้องเผาไหม้แบบ 2 หัวเผาพบว่ามีความเร็วการไหลของแก๊สไม่สม่ำเสมอตรงทางออกของไอเสีย โดยมีความเร็วในการไหลอยู่ที่ 10.00 m/s ส่งผลให้อุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ไม่สูงมาก

ตัวอย่างที่ 3



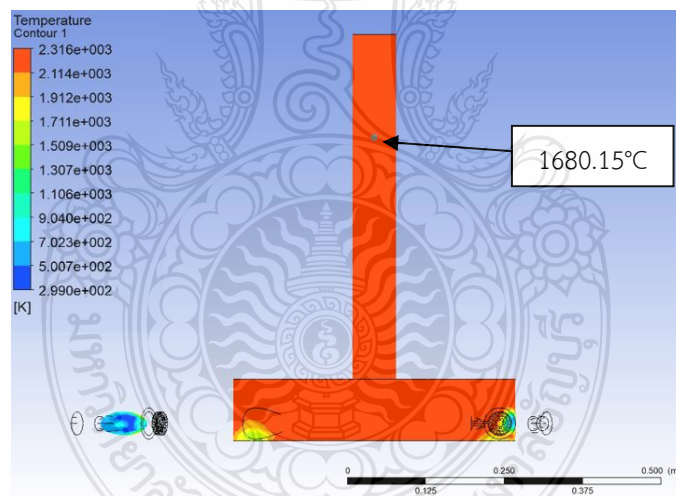
รูปที่ 4.17 แบบจำลองอุณหภูมิของห้องเผาไหม้แบบ 3 หัวเผา (ด้านบน)

ผลจากการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของห้องเผาไหม้แบบ 3 หัวเผาพบว่ามีกระจายตัวของอุณหภูมิที่สม่ำเสมอ ส่งผลให้อุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้เพิ่มสูงขึ้นกว่าแบบจำลองห้องเผาไหม้แบบ 1 หัวเผา, 2 หัวเผา และมีอุณหภูมิที่เท่าๆกัน กับแบบจำลองห้องเผาไหม้แบบ 4 หัวเผา



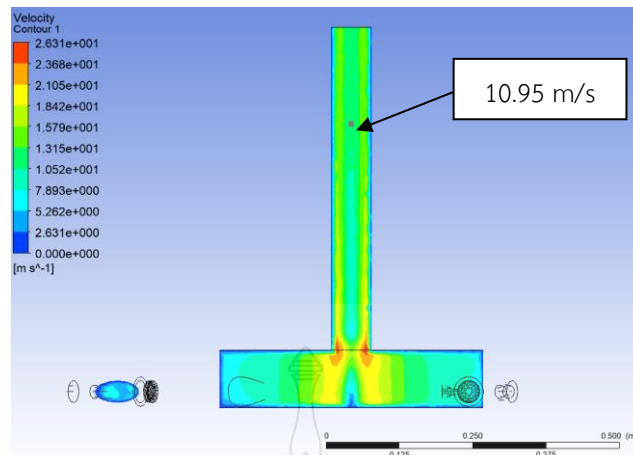
รูปที่ 4.18 แบบจำลองความเร็วการไหลของห้องเผาไหม้แบบ 3 หัวเผา (ด้านบน)

ผลจากการวิเคราะห์แบบจำลองสมการทางคณิตศาสตร์ของห้องเผาไหม้แบบ 3 หัวเผาพบว่ามีความเร็วในการไหลอยู่ที่ 8.01 m/s ความเร็วการไหลภายในห้องเผาไหม้มีความสม่ำเสมอ



รูปที่ 4.19 แบบจำลองอุณหภูมิของห้องเผาไหม้แบบ 3 หัวเผา (ด้านข้าง)

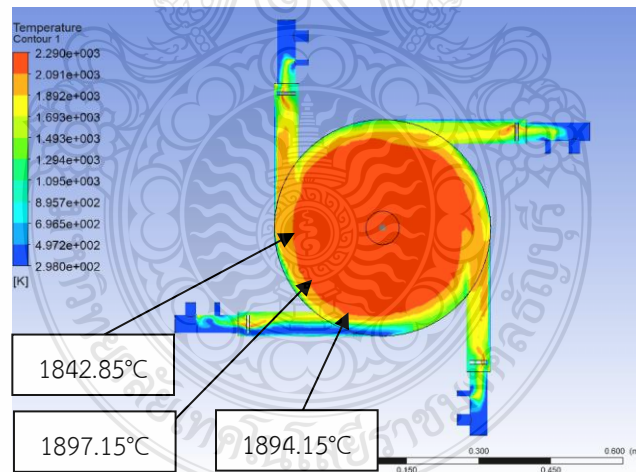
ผลจากการวิเคราะห์แบบจำลองสมการทางคณิตศาสตร์ของห้องเผาไหม้แบบ 3 หัวเผาพบว่าอุณหภูมิที่ตรงทางออกของไอเสีย มีอุณหภูมิอยู่ที่ 1680.15 °C มีกระจายตัวของอุณหภูมิต่ำเสมอทั้งทางออก และมีอุณหภูมิที่สูงกว่าแบบจำลองห้องเผาไหม้แบบ 1 หัวเผา และแบบจำลองห้องเผาไหม้แบบ 2 หัวเผา และมีอุณหภูมิที่ใกล้เคียงกัน กับแบบจำลองห้องเผาไหม้แบบ 4 หัวเผา โดยมีค่าประสิทธิภาพการเผาไหม้แบบ 3 หัวเผาใหม่เท่ากับ 82.23%



รูปที่ 4.20 แบบจำลองความเร็วการไหลของห้องเผาไหม้แบบ 3 หัวเผา (ด้านข้าง)

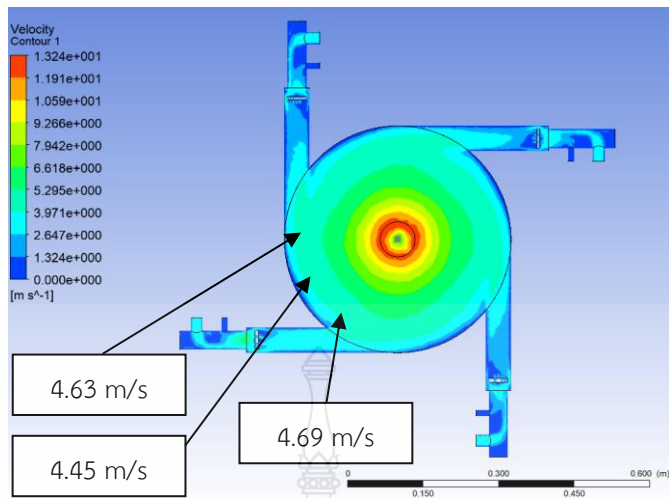
ผลจากการวิเคราะห์แบบจำลองสมการทางคณิตศาสตร์ของห้องเผาไหม้แบบ 3 หัวเผาพบว่ามีความเร็วการไหลของแก๊สสม่ำเสมอตรงทางออกของไอเสีย โดยมีความเร็วในการไหลอยู่ที่ 10.95 m/s ส่งผลให้อุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้สูง

ตัวอย่างที่ 4



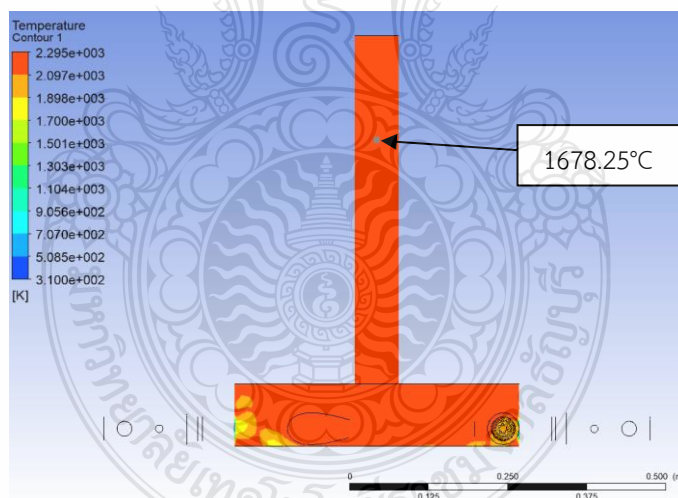
รูปที่ 4.21 แบบจำลองอุณหภูมิของห้องเผาไหม้แบบ 4 หัวเผา (ด้านบน)

ผลจากการวิเคราะห์แบบจำลองสมการทางคณิตศาสตร์ของห้องเผาไหม้แบบ 4 หัวเผาพบว่าการกระจายตัวของอุณหภูมิที่สม่ำเสมอ ส่งผลให้อุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้เพิ่มสูงขึ้นกว่าแบบจำลองห้องเผาไหม้แบบ 1 หัวเผา, 2 หัวเผา และมีอุณหภูมิที่เท่าๆกัน กับแบบจำลองห้องเผาไหม้แบบ 3 หัวเผา



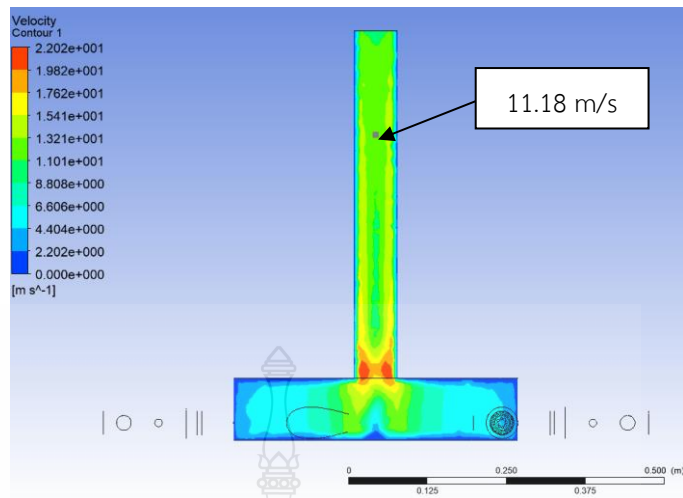
รูปที่ 4.22 แบบจำลองความเร็วการไหลของห้องเผาไหม้แบบ 4 หัวเผา (ด้านบน)

ผลจากการวิเคราะห์แบบจำลองสมการทางคณิตศาสตร์ของห้องเผาไหม้แบบ 4 หัวเผาพบว่ามีความเร็วในการไหลอยู่ที่ 4.69 m/s ความเร็วการไหลภายในห้องเผาไหม้มีความสม่ำเสมอ



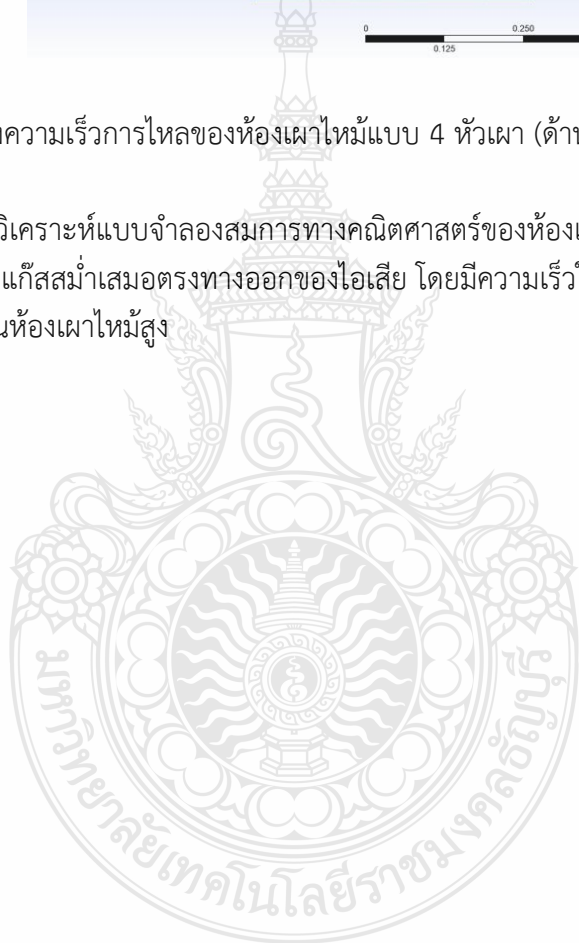
รูปที่ 4.23 แบบจำลองอุณหภูมิของห้องเผาไหม้แบบ 4 หัวเผา (ด้านข้าง)

ผลจากการวิเคราะห์แบบจำลองสมการทางคณิตศาสตร์ของห้องเผาไหม้แบบ 4 หัวเผาพบว่าอุณหภูมิที่ตรงทางออกของไอเสีย มีอุณหภูมิอยู่ที่ 1678.25 °C มีกระจายตัวของอุณหภูมिसม่่าเสมอทั้งทางออก และมีอุณหภูมิที่สูงกว่าแบบจำลองห้องเผาไหม้แบบ 1 หัวเผา และแบบจำลองห้องเผาไหม้แบบ 2 หัวเผา และมีอุณหภูมิที่เท่าๆกันกับแบบจำลองห้องเผาไหม้แบบ 3 หัวเผา โดยมีค่าประสิทธิภาพการเผาไหม้แบบ 4 หัวเผาไหม้เท่ากับ 82.21%



รูปที่ 4.24 แบบจำลองความเร็วการไหลของห้องเผาไหม้แบบ 4 หัวเผา (ด้านข้าง)

ผลจากการวิเคราะห์แบบจำลองสมการทางคณิตศาสตร์ของห้องเผาไหม้แบบ 4 หัวเผาพบว่ามีความเร็วการไหลของแก๊สสม่ำเสมอตรงทางออกของไอเสีย โดยมีความเร็วในการไหลอยู่ที่ 11.18 m/s ส่งผลให้อุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้สูง



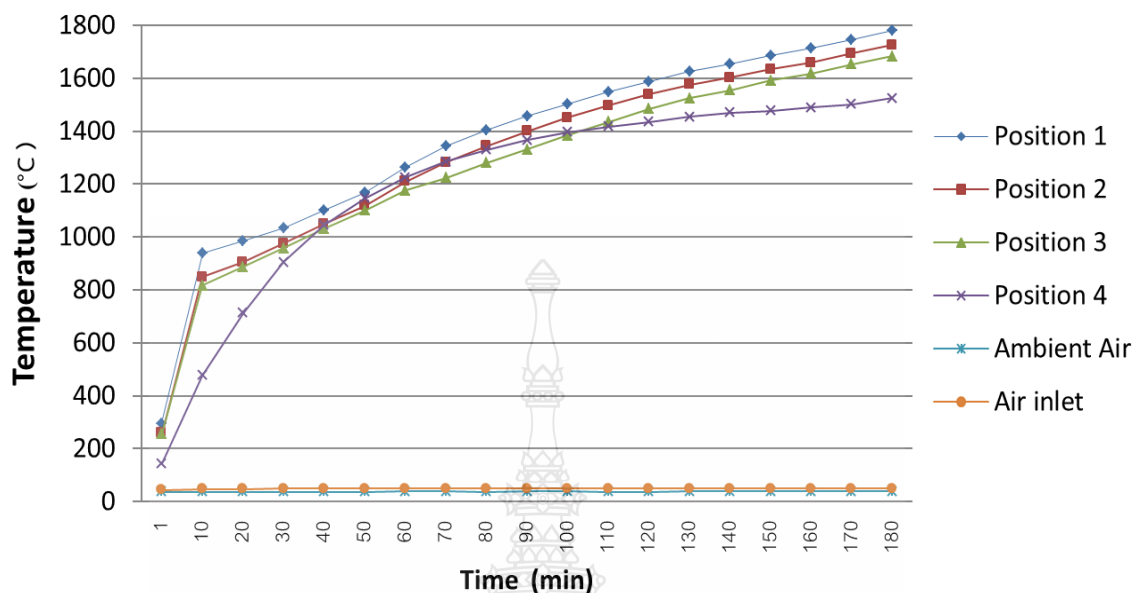
4.3 ผลการทดสอบใช้งานจริงกับห้องเผาไหม้

ตารางที่ 4.1 อุณหภูมิเทียบกับเวลาในการทดสอบ

No	Position 1 °C	Position 2 °C	Position 3 °C	Position 4 °C	Ambient Air °C	Air inlet °C
1	296.5	258.8	256.5	143.8	37.1	43.6
3	938.6	847.9	816.5	476.4	37.0	47.0
5	983.6	905.0	886.4	712.3	36.8	47.8
7	1032.7	974.6	957.9	905.0	36.8	48.3
9	1101.2	1049.2	1031.7	1046.0	36.6	48.3
11	1166.8	1118.0	1100.6	1145.9	36.7	48.3
13	1264.1	1209.0	1176.3	1225.1	37.6	48.7
15	1344.3	1280.9	1223.7	1284.6	37.6	48.9
17	1404.6	1342.8	1279.5	1328.7	37.3	48.6
19	1456.3	1400.1	1331.9	1366.1	37.9	49.1
21	1503.3	1450.6	1384.2	1395.4	38.0	49.1
23	1547.2	1497.2	1434.2	1417.5	37.5	48.8
25	1587.2	1539.2	1483.6	1435.7	37.5	48.8
27	1625.4	1575.4	1524.2	1455.0	37.7	48.8
29	1655.4	1602.1	1554.0	1470.2	37.7	48.8
31	1685.6	1633.0	1591.4	1477.2	37.6	48.8
33	1713.0	1659.3	1618.3	1490.1	38.0	48.9
35	1746.3	1694.3	1653.0	1501.6	38.4	49.1
37	1780.0	1725.5	1683.5	1525.0	38.1	48.9

*เวลาในการทดสอบ 180 นาที โดยเก็บข้อมูลทุก 1 นาที และนำข้อมูลมาแสดงผลทุก 5 นาที บันทึกผลด้วย Data Logger

อุณหภูมิเทียบกับเวลา

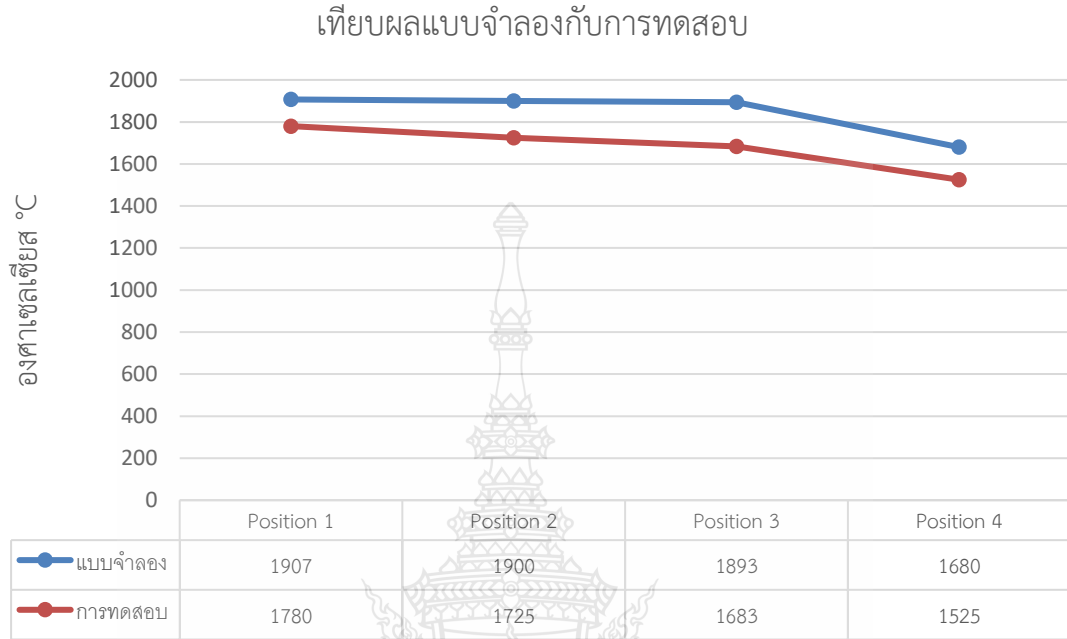


รูปที่ 4.25 กราฟแสดงผลจากการทดสอบและเก็บผลใช้งานจริงของห้องเผาไหม้เครื่องกำเนิดไอน้ำแบบท่อชุดแบบ 3 หัวเผา

ดำเนินการทดสอบกับห้องเผาไหม้ที่ 3 หัวเผากับห้องเผาไหม้เครื่องกำเนิดไอน้ำแบบท่อชุดเพื่อพิสูจน์และรองรับความเป็นไปได้ระหว่างงานจริงกับการทดสอบผลจากการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

จากกราฟแสดงว่าผลของอุณหภูมิของห้องเผาไหม้ที่ทำการทดสอบจริงมีค่าของอุณหภูมิที่ต่ำกว่าการวิเคราะห์แบบจำลองสมการทางคณิตศาสตร์ห้องเผาไหม้เครื่องกำเนิดไอน้ำแบบท่อชุด แบบ 3 หัวเผาไหม้เล็กน้อย

4.4 การเทียบผลของแบบจำลองกับการทดสอบ



รูปที่ 4.26 กราฟแสดงผลจากการเทียบผลของแบบจำลองกับการทดสอบ

จากกราฟแสดงผลจากการเทียบผลของแบบจำลองกับการทดสอบ จะเห็นได้ว่าผลจากการวิเคราะห์แบบจำลองสมการทางคณิตศาสตร์ห้องเผาไหม้เครื่องกำเนิดไอน้ำแบบท่อชุด แบบ 3 หัวเผาใหม่มีค่าของอุณหภูมิที่สูงกว่าการทดสอบแบบ 3 หัวเผาใหม่ โดยตำแหน่งการวัดที่ 1 มีอุณหภูมิต่างกันเท่ากับ 127 °C ตำแหน่งการวัดที่ 2 มีอุณหภูมิต่างกันเท่ากับ 175 °C ตำแหน่งการวัดที่ 3 มีอุณหภูมิต่างกันเท่ากับ 210 °C และตำแหน่งการวัดที่ 4 มีอุณหภูมิต่างกันเท่ากับ 155 °C

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

5.1.1 สรุปผลการวิเคราะห์แบบจำลองสมการทางคณิตศาสตร์ของห้องเผาไหม้เครื่องกำเนิดไอน้ำแบบท่อชุด (STSG)

ผลจากการวิเคราะห์แบบจำลองสมการทางคณิตศาสตร์ของห้องเผาไหม้เครื่องกำเนิดไอน้ำแบบท่อชุด (STSG) พบว่าจำนวนหัวเผาไหม้แบบ 3 หัวเผา มีความเหมาะสมที่จะนำมาติดตั้งกับการใช้งานจริง เนื่องจากความยาวของเปลวไฟทั้ง 3 หัวเผาไหม้หมุนวนมาถึงแต่ละหัวเผาไหม้พอดีส่งผลให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนแบบ 3 หัวเผาไหม้ สูงกว่าแบบ 1 หัวเผาไหม้ และแบบ 2 หัวเผาไหม้ โดยที่ค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนแบบ 3 หัวเผาไหม้ และแบบ 4 หัวเผาไหม้ มีค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนเท่าๆกันทั้ง 2 แบบจำลอง ดังนั้นจึงสามารถสรุปผลได้ว่าผลจากการวิเคราะห์แบบจำลองสมการทางคณิตศาสตร์ ที่ 3 หัวเผาไหม้ และ 4 หัวเผาไหม้ มีประสิทธิภาพเชิงความร้อนดีที่สุด ทั้งนี้ในการทดสอบขั้นต่อไปจึงเลือก ที่ 3 หัวเผาไหม้มาทดสอบจริงเพื่อเป็นการสอบเทียบความแม่นยำของแบบจำลองที่ทำการวิเคราะห์ผล

5.1.2 สรุปผลการทดสอบใช้งานจริงกับห้องเผาไหม้

จากการทดสอบใช้งานจริงพบว่า เมื่อนำผลที่ได้จากการวิเคราะห์แบบจำลองสมการทางคณิตศาสตร์ของห้องเผาไหม้เครื่องกำเนิดไอน้ำแบบท่อชุด (STSG) ที่ 3 หัวเผาไหม้มาทดสอบเปรียบเทียบค่าทางความร้อนและการกระจายตัวของความร้อนภายในห้องเผาไหม้ ที่ 3 หัวเผาไหม้ ค่าที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรมโดยใช้ตำแหน่งในการวัดอุณหภูมิเป็นตำแหน่งเดียวกันทั้งการคำนวณในโปรแกรมและการทดสอบจริง ซึ่งแบ่งตำแหน่งในการวัด 4 ตำแหน่ง ค่าที่ได้จากเทอร์โมคัปเปิลในการวัดแต่ละจุดได้ดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 เปรียบเทียบอุณหภูมิการทดสอบระหว่างการวิเคราะห์แบบจำลองและการทดสอบจริง

อุณหภูมิที่วัดได้จากการวิเคราะห์แบบจำลอง		อุณหภูมิที่วัดได้จากการทดสอบจริง	
ตำแหน่ง	องศาเซลเซียส °C	ตำแหน่ง	องศาเซลเซียส °C
1	1907	1	1780
2	1900	2	1725
3	1893	3	1683
4	1680	4	1525

*ตำแหน่งที่ 4 คือตำแหน่งวัดอุณหภูมิที่ท่อไอเสียออก

จากผลของอุณหภูมิที่วัดได้ทั้งในทฤษฎีตามการวิเคราะห์แบบจำลองสมการทางคณิตศาสตร์ และผลการวัดอุณหภูมิที่วัดได้จากการทดสอบจริงมีค่าความร้อนที่ใกล้เคียงกัน จึงทำให้งานวิจัยนี้มีความ

สอดคล้องและมีความเป็นไปได้จริงในทางปฏิบัติ เพื่อนำไปใช้งานและต่อยอดงานวิจัยต่อไปในส่วนอื่นได้ ทั้งในเรื่องประสิทธิภาพการใช้งานและจุดคุ้มทุน

ค่าความแตกต่างระหว่างการวิเคราะห์แบบจำลองและการทดสอบจริงมีความต่างในเรื่องของอุณหภูมิที่วัดได้ในแต่ละจุดคือในทางทฤษฎีการวิเคราะห์แบบจำลองสมการทางคณิตศาสตร์จะต้องกำหนดผนังของห้องเผาไหม้ทั้งหมดเป็นวัสดุชนิดเดียวกันและเป็นเนื้อเดียวกัน โดยตามงานวิจัยนี้ได้กำหนดผนังเป็นแบบฉนวน แต่ในทางปฏิบัติการทดสอบหรือการสร้างงานจริงยังมีความเสถียรน้อยในการสร้างฉนวนในแต่ละจุด จึงทำให้เกิดการสูญเสียความร้อน ทำให้ค่าของอุณหภูมิที่ได้มีความแตกต่างกัน

5.2 ข้อเสนอแนะ

เครื่องกำเนิดไอน้ำแบบท่อชุด นับเป็นงานวิจัยที่ได้รับความสนใจจากผู้ที่เกี่ยวข้องไม่น้อย เนื่องจากการนำเทคโนโลยีการกำเนิดไอน้ำที่ใหม่ โดยจะเปรียบท่อชุดเสมือนหม้อไอน้ำขนาดเล็ก แต่มีประสิทธิภาพการใช้งานสูงเหมาะสมต่อการนำไปประยุกต์ใช้งาน หรือวิจัยพัฒนาต่อยอด อีกทั้งยังมีต้นทุนในด้านพลังงานที่สามารถใช้ได้หลากหลายมีชิ้นส่วนที่น้อยกว่า จึงมีชิ้นส่วนที่สึกหรอน้อยทำให้ไม่ต้องบำรุงรักษาบ่อย อีกทั้งเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมโดยไม่สร้างมลภาวะและเนื่องจากการเผาไหม้อยู่ด้านนอกแบบต่อเนื่อง การใช้งานไม่ซับซ้อนและมีขนาดที่กะทัดรัด และเป็นเครื่องยนต์ต้นกำลังอีกประเภทหนึ่งที่มีความน่าสนใจในการพัฒนาต่อให้สามารถใช้งานได้กับงานหลากหลายประเภทมากขึ้น ด้วยต้นทุนในด้านพลังงานที่ไม่สิ้นสุด

บรรณานุกรม

- [1] Gupta, A.k. "Flame Characteristics and Challenges With High Temperature Air Combustion" Proc. 2nd International Seminar on High Temperature AirCombustion Jan. 17-18 , 2000.
- [2] Hasegawa. T., and Tanaka,R. "High Temperature Air Combustion" JSME International Journal. 4l :1079-1084.
- [3] Gouldin, F.C., Depsky J.S. and Lee S-L. "Volocity Field Characteristics of a Swirling FlowCombustion." AIAA Journal. Vol.23. No.1. (1985) : 95-102.
- [4] Chaouki Ghenai. "Combustion of Syngas Fuel in Gas Turbine Can Combustor." HindawiPublishing Corporation Advances in Mechanical Engineering. Vol.2010, Article ID342357, 13 pages.
- [5] Firoj, H. Pathan, Nikul, K. Patel and Mihir, V. Tadvi. "Numerical Investigation of the Combustion of Methane Air Mixture in Gas Turbine Can-Type Combustion Chamber."International Journal of Scientific & Engineering Research. Vol.3. Issue.10. (Oct2012).
- [6] Rabou, L.P.L.M., et al. Micro Gas Turbine Operation with Biomass Producer Gas.Contribution to the 15th European Biomass Conference, Berlin, May 2007.
- [7] Farzad Bazdidi-Tehrani and Hamed Zeinivand. "Presumed PDF modelingreactive twophaseflow in a three dimensional jet-stabilized model combustor." Energy Conversion and Management. 51 (2010) : 225-234.
- [8] "Process simulation and CFD calculations for the developmentof an innovative baled biomass-fired combustion chamber." Applied Thermal Engineering.27 (2007) : 1138-1143.
- [9] Eman Tora, Erik Dahlquist . "Fluent simulation of prevention of dioxins formation via controlling homogenous mass and heat transfer within circulated fluidized bed combustor." Future Energy Research Centre , Department Energy.75(2015)130-136.
- [10] Robert Peele, Mining Engineers' Handbook, vol.II, John Wiley & Sons, New York, 1966.
- [11] ดร.เสรี ศุภราทิตย์. หนังสือกลศาสตร์ของไหล (Fluid Machanics) สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยรังสิต
- [12] ผศ.ผ่องศรี ศิวราศักดิ์, หนังสือกลศาสตร์ของไหลประยุกต์ (Applied Fluid Machanics) สำนักพิมพ์ บริษัททรูปเพิ้ล กรุ๊ป จำกัด

ภาคผนวก



ภาคผนวก ก
การคำนวณและขั้นตอนการใช้งาน FLUENT



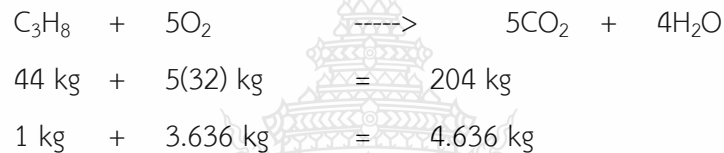
การคำนวณการออกแบบห้องเผาไหม้ของเครื่องกำเนิดไอน้ำแบบท่อชุด

การออกแบบได้มีการคำนวณในส่วนของห้องเผาไหม้ โดยมีขั้นตอนการคำนวณดังนี้
การวิเคราะห์องค์ประกอบของเชื้อเพลิง

การวิเคราะห์การเผาไหม้ของแก๊สหุงต้ม (LPG) เพื่อต้องการคำนวณหาอัตราการป้อนอากาศ
ตารางที่ ก.1 องค์ประกอบคิดเป็นร้อยละโดยน้ำหนักของแก๊สหุงต้ม(LPG)

องค์ประกอบ	ร้อยละโดยน้ำหนัก	น้ำหนักโมเลกุล (kg/mol)
โพรเพน C ₃ H ₈	70	44
บิวเทน C ₄ H ₁₀	30	58

ปริมาณร้อยละของแก๊สแต่ละชนิดในไอเสียแห้งที่เกิดขึ้นเมื่อวิเคราะห์ต่อ 1 kg



ดังนั้น 0.7 kg C₃H₈ จะใช้ O₂ = 3.636 × 0.7 = 2.545 kg



ดังนั้น 0.3 kg C₄H₁₀ จะใช้ O₂ = 3.586 × 0.3 = 1.075 kg

ได้ปริมาณ O₂ เพื่อการเผาไหม้ทั้งหมด = 2.545 + 1.075
= 3.6 kg

ในอากาศมี O₂ อยู่ร้อยละ 23.2 โดยน้ำหนัก

ดังนั้นจะต้องใช้อากาศ (ทฤษฎี) = 3.6/0.232

= 15.5 kg/kg_{LPG}

การคำนวณประสิทธิภาพการเผาไหม้จากการวิเคราะห์แบบจำลองสมการทางคณิตศาสตร์

สำหรับการคำนวณประสิทธิภาพการเผาไหม้สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.42)

$$\eta = \frac{-\left[\left(\frac{A}{F} + 1\right) h_{\text{prod}} - \left(\frac{A}{F}\right) h_A - h_F\right]}{\text{LHV}}$$

ตารางที่ ก.2 ค่าของตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณแบบ 1 หัวเผาไหม้จากการคำนวณเชิงตัวเลข CFD

Burner	Inlet Enthalpy		Outlet Enthalpy	A/F
	Air dh [J/kg]	fuel dh [J/kg]	dh P2 [J/kg]	
1	20246.874	-2329216	-80061.25	15.5

โดยกำหนดให้ค่า LHV ของก๊าซปิโตรเลียมเหลว (LPG) = 46607000 J/kg จากนั้นแทนค่าของตัวแปร

$$\eta = \left(-\frac{-((15.5+1)(-80061.25)-(15.5)(20246.874-(-2329216)))}{46607000} \right) \times 100$$

$$= 80.97 \%$$

ตารางที่ ก.3 ค่าของตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณแบบ 2 หัวเผาไหม้จากการคำนวณเชิงตัวเลข CFD

Burner	Inlet Enthalpy		Outlet Enthalpy	A/F
	Air dh [J/kg]	fuel dh [J/kg]	dh P2 [J/kg]	
2	20246.893	-2329215.9	-100532.12	15.5

โดยกำหนดให้ค่า LHV ของก๊าซปิโตรเลียมเหลว (LPG) = 46607000 J/kg จากนั้นแทนค่าของตัวแปร

$$\eta = \left(-\frac{-((15.5+1)(-100532.12)-(15.5)(20246.893-(-2329215.9)))}{46607000} \right) \times 100$$

$$= 81.69 \%$$

ตารางที่ ก.4 ค่าของตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณแบบ 3 หัวเผาไหม้จากการคำนวณเชิงตัวเลข CFD

Burner	Inlet Enthalpy		Outlet Enthalpy	A/F
	Air dh [J/kg]	fuel dh [J/kg]	dh P2 [J/kg]	
2	20246.766	-2329217.9	-115753.59	15.5

โดยกำหนดให้ค่า LHV ของก๊าซปิโตรเลียมเหลว (LPG) = 46607000 J/kg จากนั้นแทนค่าของตัวแปร

$$\eta = \left(-\frac{-((15.5+1)(-115753.59)-(15.5)(20246.766-(-2329217.9)))}{46607000} \right) \times 100$$

$$= 82.23 \%$$

ตารางที่ ก.5 ค่าของตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณแบบ 4 หัวเผาใหม่จากการคำนวณเชิงตัวเลข CFD

Burner	Inlet Enthalpy		Outlet Enthalpy	A/F
	Air dh [J/kg]	fuel dh [J/kg]	dh P2 [J/kg]	
2	20246.764	-2329215.6	-114971.93	15.5

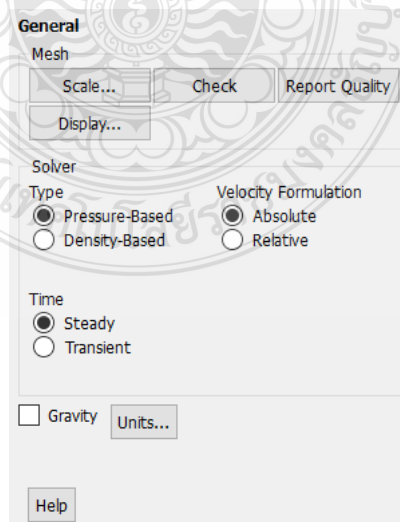
โดยกำหนดให้ค่า LHV ของก๊าซปิโตรเลียมเหลว (LPG) = 46607000 J/kg จากนั้นแทนค่าของตัวแปร

$$\eta = \left(-\frac{-((15.5+1)(-114971.93)-(15.5)(20246.764-(-2329215.6)))}{46607000} \right) \times 100$$

$$= 82.21 \%$$

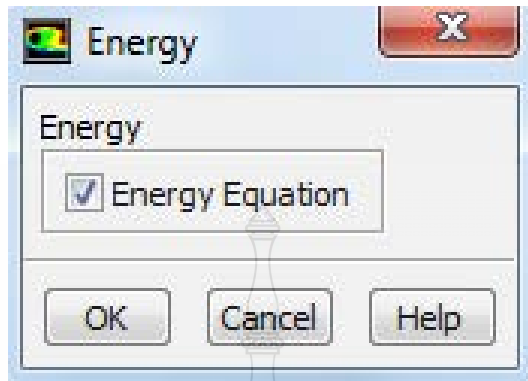
ขั้นตอนการใช้งาน FLUENT

สำหรับขั้นตอนแรกของ FLUENT ต้องกำหนด Type ของ Solver เป็น Pressure Based และ Steady ดังรูปที่ ก.1



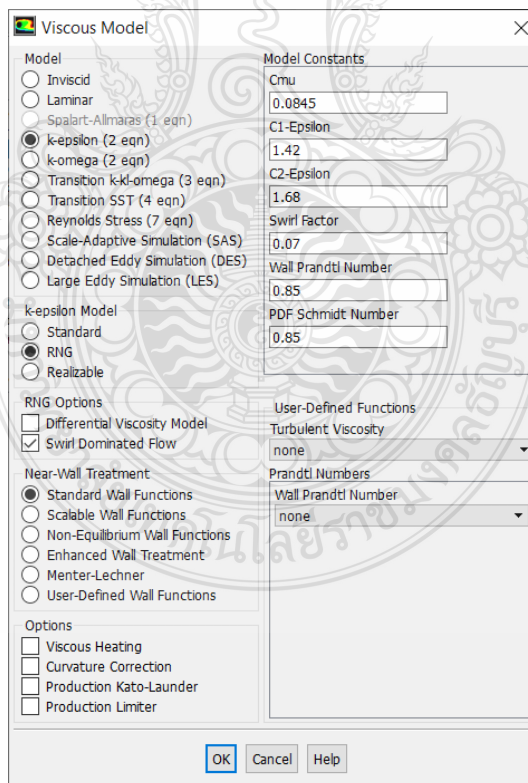
รูปที่ ก.1 การเลือก Solver

สำหรับการเผาไหม้ที่เกิดขึ้น ต้องมีสมการพลังงานเข้ามาเกี่ยวข้อง โดยสมการดังกล่าวสามารถกำหนดได้ จาก Model > Energy Equation ดังรูปที่ ก.2



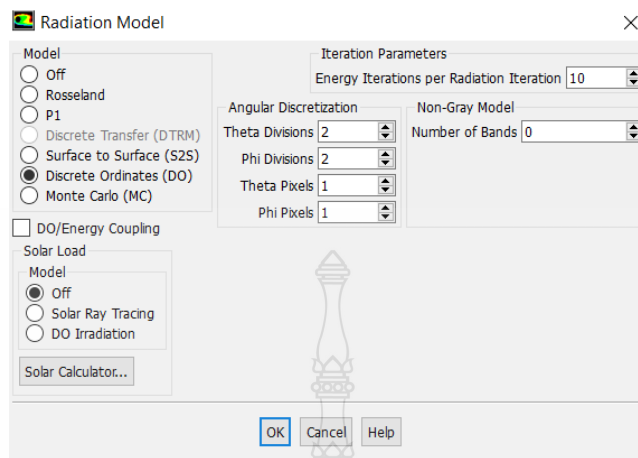
รูปที่ ก.2 การเลือก Energy Equation

สำหรับการจำลองการไหลแบบปั่นป่วน (Viscous Model) จะกำหนดเป็น RNG k-epsilon ซึ่งสามารถกำหนดได้จาก Model > k-epsilon ดังรูปที่ ก.3



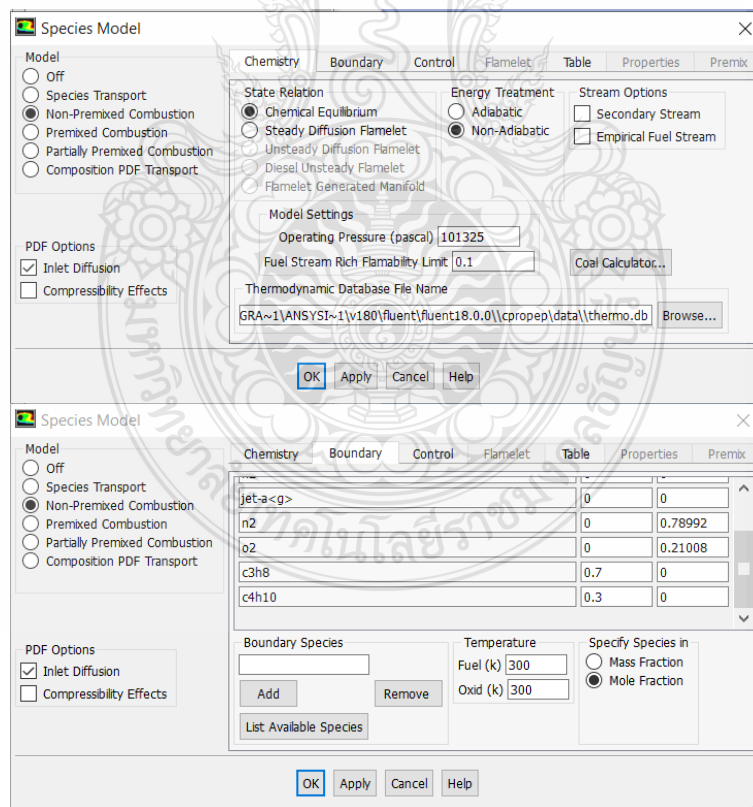
รูปที่ ก.3 การเลือก Turbulent Model

กำหนด Radiation Model โดยกำหนดแบบ Discrete Ordinates (Do) ดังรูปที่ ก.4



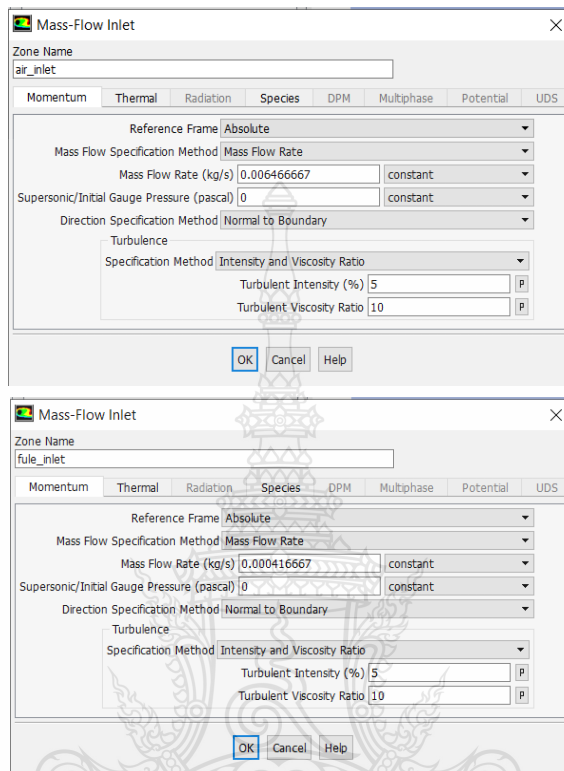
รูปที่ ก.4 การเลือก Radiation Model

กำหนดการเผาไหม้แบบ Non Premixed Combustion โดยกำหนดให้เชื้อเพลิงเป็น C_3H_8 และ C_4H_{10} เลือก Model



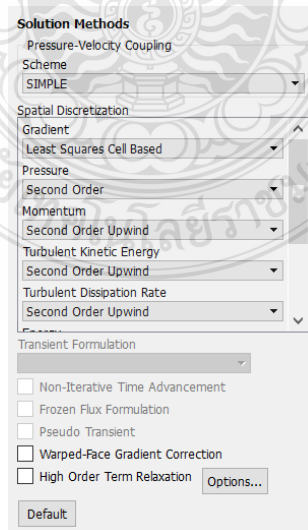
รูปที่ ก.5 การเลือก Combustion Model

กำหนดเงื่อนไขเบื้องต้นสำหรับเชื้อเพลิงและอากาศ จาก Boundary Condition โดยกำหนด Type ของทางเข้าเชื้อเพลิงและอากาศเป็น Mass-flow-inlet และกำหนดอัตราการไหล อุณหภูมิ และ สัดส่วนโดยมวลของเชื้อเพลิงและอากาศ ดังรูปที่ ก.6



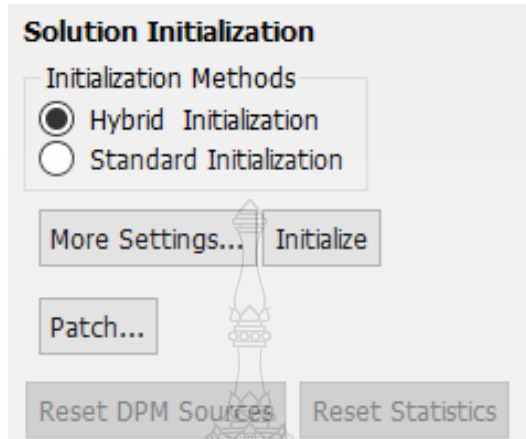
รูปที่ ก.6 การกำหนด Boundary Condition

กำหนด Solution Methods เป็นแบบ SIMPLE ดังรูปที่ ก.7



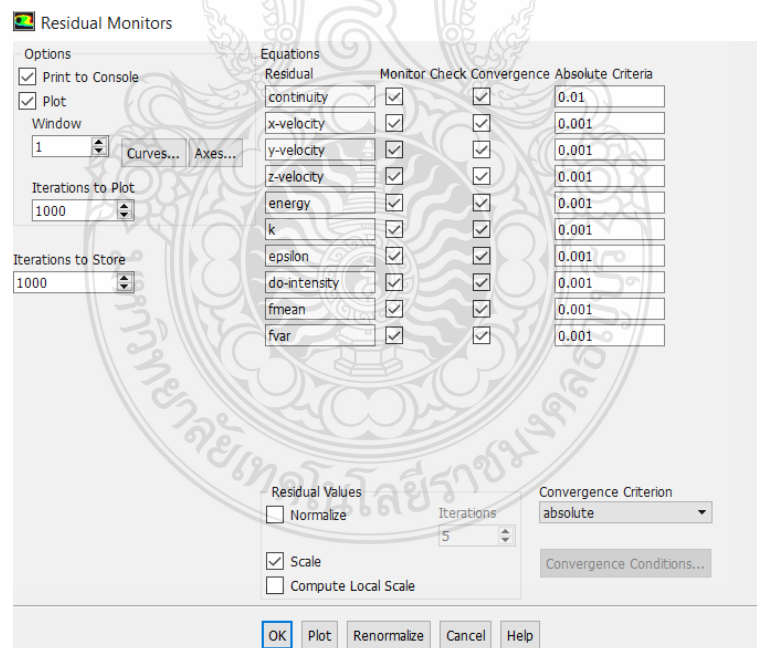
รูปที่ ก.7 การเลือก Solution Method

กำหนดค่าเริ่มต้นสำหรับการจำลองจาก Solution Initialization แบบ Hybrid Initialization ดังรูปที่ ก.8



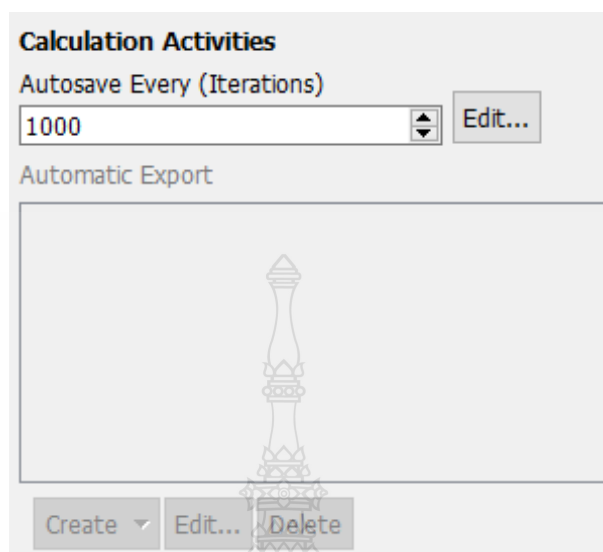
รูปที่ ก.8 การกำหนดค่าเริ่มต้นสำหรับการจำลอง

กำหนด Residual Monitors เท่ากับ 10^{-3} ดังรูปที่ ก.9



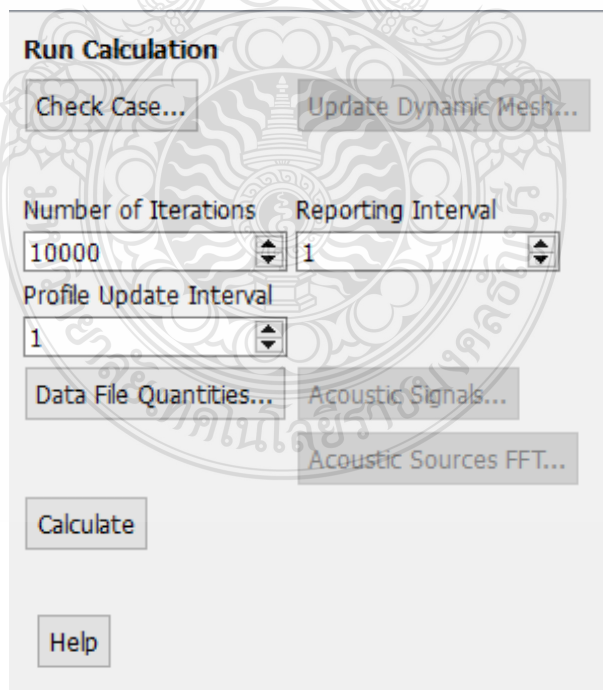
รูปที่ ก.9 การกำหนด Residual Monitors

กำหนด Calculation Iteration ที่ 1,000 รอบ แล้วบันทึกข้อมูล ดังรูปที่ ก.10



รูปที่ ก.10 รอบการคำนวณสำหรับบันทึกข้อมูลของการจำลอง

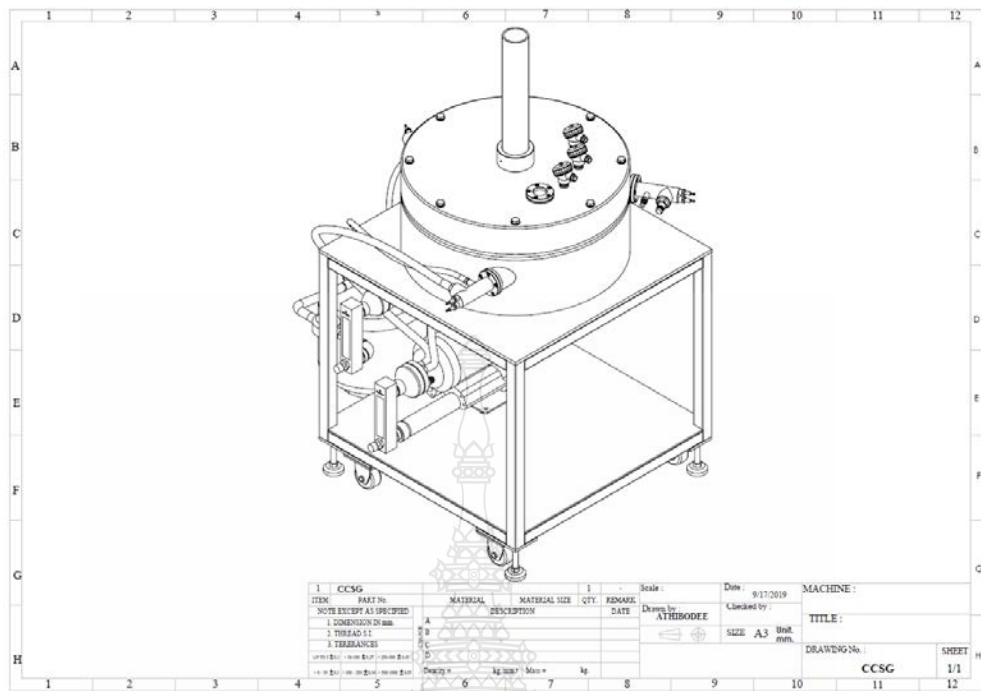
กำหนด Run Calculation ดังรูปที่ ก.11



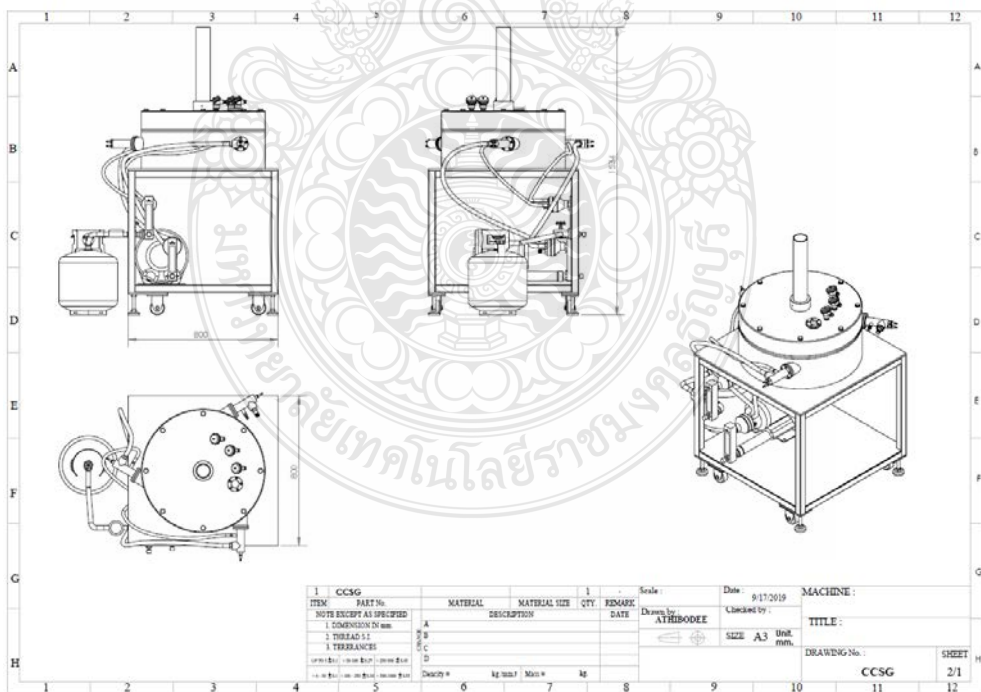
รูปที่ ก.11 จำนวนรอบการคำนวณของการจำลอง

ภาคผนวก ข.
แบบห้องเผาไหม้ของเครื่องกำเนิดไอน้ำแบบท่อชุด





รูปที่ ข.1 แบบห้องเผาไหม้เครื่องกำเนิดไอน้ำแบบท่อซด



รูปที่ ข.2 แบบด้านหน้า, ด้านข้าง และด้านบน ของห้องเผาไหม้เครื่องกำเนิดไอน้ำแบบท่อซด

ภาคผนวก ค.
รูปประกอบการสร้างห้องเผาไหม้เครื่องกำเนิดไอน้ำแบบท่อขดและการทดลอง





รูปที่ ค.1 ชั้นส่วนโครงสร้างห้องเผาไหม้



รูปที่ ค.2 ชั้นส่วนโครงสร้างห้องเผาไหม้ส่วนฝา



รูปที่ ค.3 การวางเซรามิกซ์เปเปอร์เพื่อเป็นฉนวนภายในห้องเผาไหม้



รูปที่ ค.4 การวางแบบหล่อคอนกรีตทนไฟ



รูปที่ ค.5 การเทคอนกรีตทนไฟภายในห้องเผาไหม้



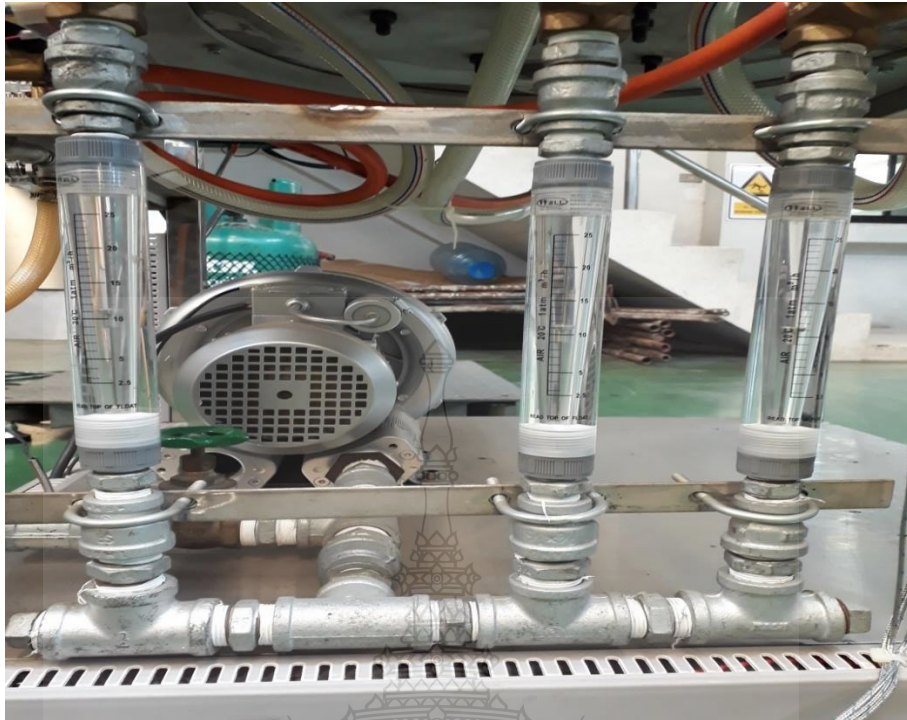
รูปที่ ค.6 การเทคอนกรีตทนไฟที่ฝาปิดห้องเผาไหม้



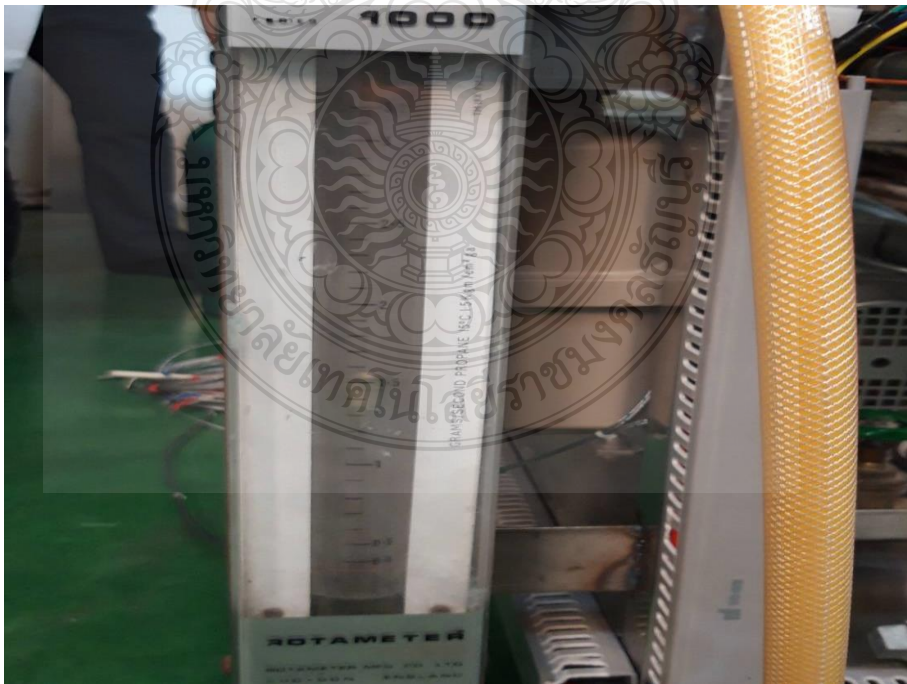
รูปที่ ค.7 การประกอบโครงสร้างเข้ากับห้องเผาไหม้



รูปที่ ค.8 การประกอบฝาห้องเผาไหม้



รูปที่ ค.9 การติดตั้งระบบป้อนอากาศ



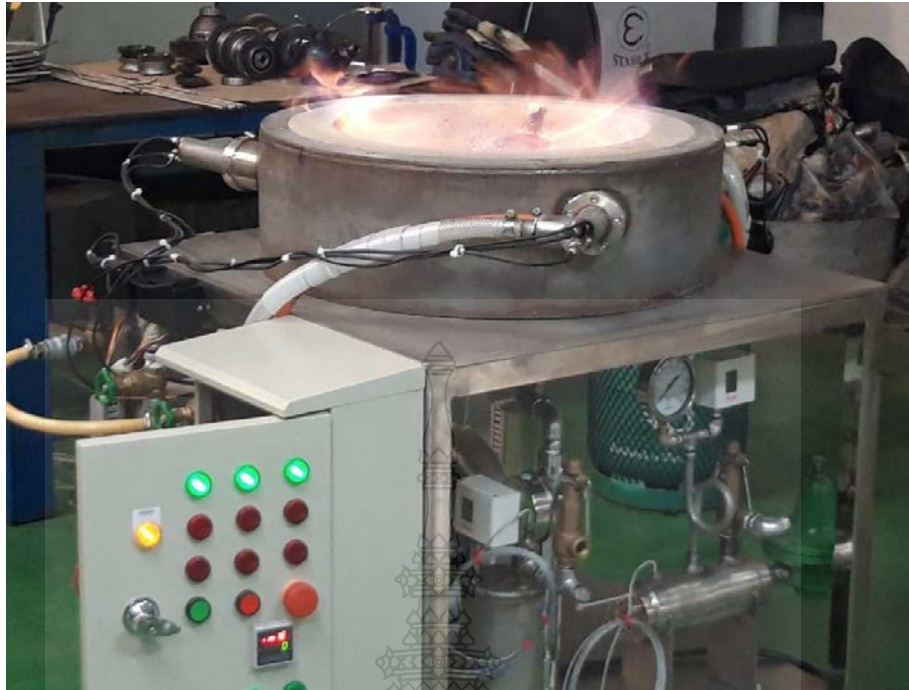
รูปที่ ค.10 การติดตั้งระบบป้อนแก๊สหลัก



รูปที่ ค.11 การติดตั้งระบบป้อนแก๊สแยก 3 ช่องทาง



รูปที่ ค.12 การติดตั้งระบบไฟฟ้า



รูปที่ ค.13 ทดลองเดินระบบการเผาไหม้และแก้ไขปรับปรุงระบบ



รูปที่ ค.14 ทดลองเดินระบบการเผาไหม้ และปรับจูนระบบ



รูปที่ ค.15 ทดลองเดินระบบการเผาไหม้ และเก็บข้อมูลการทดลอง



ภาคผนวก ง.
ตารางที่ใช้ในการคำนวณ



คอนกรีตทนไฟ

	คอนกรีตทนไฟชนิดทั่วไป					คอนกรีตทนไฟชนิดที่มีปริมาณซีเมนต์น้อย (LCC)			คอนกรีตทนไฟชนิดที่มีปริมาณซีเมนต์น้อยมาก (ULCC)
	NORMAL	ES SERIES	LW SERIES	CG SERIES	NEOCAS SERIES	C-SERIES	EAZYFLOW SERIES		
จุดเด่น	<ul style="list-style-type: none"> • สำหรับใช้กับงานหล่อทั่วไป 	<ul style="list-style-type: none"> • สำหรับงานที่ต้องการความแข็งแรงสามารถรับน้ำหนักได้ดี 	<ul style="list-style-type: none"> • เป็นฉนวนป้องกัน การสูญเสียความร้อนและช่วยประหยัดพลังงาน 	<ul style="list-style-type: none"> • สำหรับงานที่ต้องการความแข็งแรงทนต่อการบดสีและการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างฉับพลัน 	<ul style="list-style-type: none"> • เหมาะสำหรับงานที่ต้องการความทนทานสูง 	<ul style="list-style-type: none"> • เหมาะสำหรับงานที่ต้องการสูงเป็นพิเศษ • ทนต่อการกัดกร่อนของอัลคาไลน์ได้ดีเยี่ยม 	<ul style="list-style-type: none"> • มีคุณสมบัติโดดเด่น • เหมาะสำหรับบริเวณที่หล่อกว้างและซับซ้อน 	<ul style="list-style-type: none"> • เหมาะสำหรับใช้งานที่อุณหภูมิสูงกว่า 1,700 °C ที่ต้องการความแข็งแรงสูงทนต่อการบดสีและการกัดกร่อนจากปฏิกิริยาทางเคมี 	
ชื่อสินค้า	-CAST 13 -CAST 15 -CAST 16 -CAST 16 SP -CAST 18 -CAST 18 SP	-CAST 13 ES -CAST 15 ES	-CAST 10 LW -CAST 11 LW -CAST 13 LW -CAST 15 LW	-CAST 13 CG -CAST 14 CG -CAST 17 CG	-NEOCAS 1350 -NEOCAS 1450 -NEOCAS 1550 -NEOCAS 1650 -NEOCAS 1800	-C 58 -C 40 A -C 60 A -C 70 A	-EAZYFLOW 40 -EAZYFLOW 60 -EAZYFLOW 80 -EAZYFLOW 85	-C 82 -C 95 -ALCOM 90	

Properties of Products		คอนกรีตทนไฟชนิดทั่วไป (Conventional Castables)																	
		Normal Conventional Castable						Extra Strength (ES Series)		Lightweight (LW Series)						Coarse Grain (CG Series)			
		CAST 13	CAST 15	CAST 16	CAST 16 SP	CAST 18	CAST 18 SP	CAST 13 ES	CAST 15 ES	CAST 10 LW	CAST 11 LW	CAST 13 LW	CAST 15 LW	CAST 18 LW	CAST 13 CG	CAST 14 CG	CAST 17 CG		
Physical Properties : (Typical)																			
Maximum Service Temperature	°C	1300	1500	1600	1600	1800	1800	1800	1500	1000	1100	1300	1500	1800	1300	1400	1700		
Approximate Weight Required for Casting	kg/m ³	2010	2200	2300	2720	2720	2720	2010	2150	600	860	1300	1450	1450	2110	2220	2560		
Approximate Amount of Water Required for Casting	%	11	11	10	10	9	10	11	11	110	50	30	22	20	11	10	10		
Bulk Density after Drying at 110 °C	kg/m ³	2070	2125	2230	2250	2800	2800	2115	2150	580	1000	1400	1500	1650	2155	2290	2640		
Modulus of Rupture after Drying at 110 °C	kg/cm ²	70	70	70	70	100	120	80	80	3	7	25	30	30	60	80	70		
Cold Crushing Strength after Drying at 110 °C	kg/cm ²	360	300	400	400	650	650	450	400	6	40	125	150	150	380	380	350		
Permanent Linear Change after Heating at	%	+0.50	-0.50	-0.20	-0.20	-0.50	-0.50	+0.50	-1.00	-0.90	-0.80	-0.04	-0.80	-0.40	+0.50	-0.03	-0.60		
Thermal Conductivity at 400 °C	°C	1260	1480	1595	1595	1760	1760	1260	1480	925	1040	1260	1480	1760	1260	1370	1705		
at 600 °C	(W/m.K)	1.15	1.18	1.20	1.20	1.87	1.87	1.15	1.21	0.18	0.25	0.36	0.59	0.82	1.18	1.22	1.85		
at 1000 °C	(W/m.K)	1.18	1.23	1.25	1.25	1.87	1.87	1.18	1.26	0.20	0.30	0.38	0.60	0.76	1.23	1.27	1.85		
	(W/m.K)	1.30	1.38	1.40	1.40	1.90	1.90	1.30	1.41		0.40	0.42	0.63	0.73	1.38	1.42	1.87		
Chemical Composition : Approximate																			
Alumina (Al ₂ O ₃)	%	36.5	48.0	60.0	59.5	93.5	54.0	36.0	50.0	24.0	14.5	41.0	66.0	94.5	38.5	48.0	87.5		
Silica (SiO ₂)	%	52.0	40.0	33.0	32.5	0.2	0.2	50.0	37.0	44.0	54.5	42.0	15.0	0.5	49.0	38.0	5.0		
Iron Oxide (Fe ₂ O ₃)	%	1.5	1.5	1.4	1.4	0.2	0.2	1.5	1.5	1.0	0.5	1.5	1.5	0.1	1.5	1.5	1.5		

The given data are typical values of which the properties of the samples tested according to the procedure and standard of Siam Refractory generally accepted by our customers for many years. The above data cannot be used for specification or guarantee purpose. Siam Refractory reserves the right to update the above data and change our internal procedure and standard without any prior notice. Please request MSDS for safety information by contacting SRIC or authorized distributors

คอนกรีตทาไฟชนิดปรีมาทซ์และชนิดปรีมาทซ์แบบเตน้อยมาก (Low Cement Castables (LCC) & Ultra Low Cement Castable (ULCC))																	
Properties of Products	LCC										ULCC						
	Neocas Series					C Series					Eazyflow						
	NEOCAS 1350	NEOCAS 1450	NEOCAS 1550	NEOCAS 1650	NEOCAS 1750	NEOCAS 1800	C 58	C 40 A	C 60 A	C 70 A	EZYFLOW 40	EZYFLOW 60	EZYFLOW 80	EZYFLOW 85	C 82	ALCOM 90	C 95
Physical Properties : (Typical)																	
Minimum Service Temperature	1360	1450	1550	1650	1750	1800	1500	1400	1500	1600	1460	1600	1700	1750	1700	1750	1800
Approximate Weight Required for Casting	2170	2380	2580	2680	2900	3100	2430	2350	2500	2700	2450	2550	2800	3450	2850	3200	3200
Approximate Amount of Water Required for Casting	6.0-7.0	6.0-7.0	5.0-6.0	5.0-6.0	5.0-6.0	4.5-5.5	4.5-5.5	4.5-5.5	4.5-5.5	4.5-5.5	6.5-7.5	6.0-6.5	6.0-6.5	4.5-5.5	3.5-5.0	4.0-4.5	3.5-5.0
Bulk Density after Drying at 110 °C	2200	2400	2600	2700	2920	3120	2440	2380	2520	2720	2350	2500	2850	3000	2860	3250	3200
Modulus of Rupture after Drying at 110 °C	60	80	90	80	80	100	65	65	85	75	70	70	80	130	40	45	50
Cold Crushing Strength after Drying at 110 °C	500	700	700	600	550	700	550	550	750	800	300	550	500	700	350	250	500
Permanent Linear Change after Heating at	-0.90	-0.23	-0.15	-0.20	+0.15	-0.65	+0.70	+0.20	+0.50	negligible	-0.10	-0.05	+0.05	-0.35	+0.50	-0.20	+0.20
Thermal Conductivity at 400 °C	1.17	1.50	1.85	1.62	2.55	2.45	1.60	1.20	1.85	2.20	1.38	1.60	2.25	2.40	2.25	2.95	2.45
at 600 °C	1.21	1.53	1.85	1.62	2.30	2.25	1.60	1.25	1.85	2.05	1.38	1.60	2.14	2.20	2.14	2.62	2.25
at 1000 °C	1.31	1.58	1.87	1.67	2.15	2.10	1.65	1.39	1.87	2.00	1.48	1.62	2.05	2.05	2.05	2.57	2.10
Chemical Composition : Approximate																	
Alumina (Al ₂ O ₃)	42.0	50.0	60.0	68.0	85.0	95.0	58.0	44.0	61.0	72.0	45.0	60.0	80.0	85.0	82.0	90.0	94.5
Silica (SiO ₂)	45.0	37.0	29.0	24.0	7.0	3.0	38.0	52.0	34.0	23.0	51.0	33.0	12.0	9.0	12.0	5.0	4.8
Iron Oxide (Fe ₂ O ₃)	1.0	1.1	1.1	1.1	1.1	0.2	1.1	1.1	1.4	1.8	1.5	1.2	1.0	0.5	1.0	1.0	0.0

The given data are typical values of which the properties of the samples tested according to the procedure and standard of Siam Refractory generally accepted by our customers for many years.
 The above data cannot be used for specification or guarantee purpose. Siam Refractory reserves the right to update the above data and change our internal procedure and standard without any prior notice.
 Please request MSDS for safety information by contacting SRIC or authorized distributors

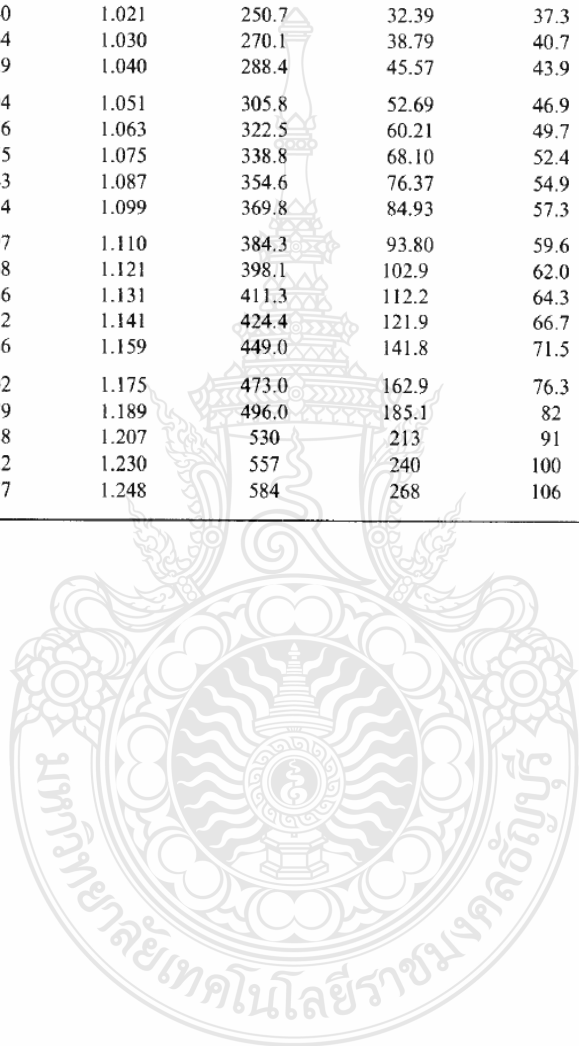
Specs	Standard Grade	High-Purity Grade	Zirconia Grade
Color	White	White	White
Maximum Use Limit	2300°F	2300°F	2552°F
Continuous Use Limit	2012°F	2012°F	2462°F
Density (PCF)	10-13	10-13	10-13
Organic Content (%)	< 5%	< 5%	< 5%
Tensile Strength (PSI)	75-90	30-40	75-90
Break Strength (PSI)	10-15	10-15	10-15
Thermal Conductivity @ 600°C (1112°F) @ 800°C (1472°F) @ 1000°C (1832°F)	W/mk (Btu in./hr/ft ² °F) 0.08 (0.55) 0.12 (0.80) 0.18 (1.25)	0.08 (0.55) 0.11 (0.75) 0.16 (1.15)	0.08 (0.55) 0.11 (0.76) 0.17 (1.18)

Table B.1 Selected properties of hydrocarbon fuels: enthalpy of formation,^a Gibbs function of formation,^a entropy,^a and higher and lower heating values all at 298.15 K and 1 atm; boiling points^b and latent heat of vaporization^c at 1 atm; constant-pressure adiabatic flame temperature at 1 atm;^d liquid density^e

Formula	Fuel	MW (kg/kmol)	\bar{h}_f° (kJ/kmol)	\bar{g}_f° (kJ/kmol)	\bar{s}° (kJ/kmol-K)	HHV [†] (kJ/kg)	LHV [†] (kJ/kg)	Boiling pt. (°C)	h_{fg} (kJ/kg)	T_{ad}^\dagger (K)	ρ_{liq}° (kg/m ³)
CH ₄	Methane	16.043	-74,831	-50,794	186.188	55,528	50,016	-164	509	2,226	300
C ₂ H ₂	Acetylene	26.038	226,748	209,200	200.819	49,923	48,225	-84	—	2,539	—
C ₂ H ₄	Ethene	28.054	52,283	68,124	219.827	50,313	47,161	-103.7	—	2,369	—
C ₂ H ₆	Ethane	30.069	-84,667	-32,886	229.492	51,901	47,489	-88.6	488	2,259	370
C ₃ H ₆	Propene	42.080	20,414	62,718	266.939	48,936	45,784	-47.4	437	2,334	514
C ₃ H ₈	Propane	44.096	-103,847	-23,489	269.910	50,368	46,357	-42.1	425	2,267	500
C ₄ H ₈	1-Butene	56.107	1,172	72,036	307.440	48,471	45,319	-63	391	2,322	595
C ₄ H ₁₀	n-Butane	58.123	-124,733	-15,707	310.034	49,546	45,742	-0.5	386	2,270	579
C ₅ H ₁₀	1-Pentene	70.134	-20,920	78,605	347.607	48,152	45,000	30	358	2,314	641
C ₅ H ₁₂	n-Pentane	72.150	-146,440	-8,201	348.402	49,032	45,355	36.1	358	2,272	626
C ₆ H ₆	Benzene	78.113	82,927	129,658	269.199	42,277	40,579	80.1	393	2,342	879
C ₆ H ₁₂	1-Hexene	84.161	-41,673	87,027	385.974	47,955	44,803	63.4	335	2,308	673
C ₆ H ₁₄	n-Hexane	86.177	-167,193	209	386.811	48,696	45,105	69	335	2,273	659
C ₇ H ₁₄	1-Heptene	98.188	-62,132	95,563	424.383	47,817	44,665	93.6	—	2,305	—
C ₇ H ₁₆	n-Heptane	100.203	-187,820	8,745	425.262	48,456	44,926	98.4	316	2,274	684
C ₈ H ₁₆	1-Octene	112.214	-82,927	104,140	462.792	47,712	44,560	121.3	—	2,302	—
C ₈ H ₁₈	n-Octane	114.230	-208,447	17,322	463.671	48,275	44,791	125.7	300	2,275	703
C ₉ H ₁₈	1-Nonene	126.241	-103,512	112,717	501.243	47,631	44,478	—	—	2,300	—
C ₉ H ₂₀	n-Nonane	128.257	-229,032	25,857	502.080	48,134	44,686	150.8	295	2,276	718
C ₁₀ H ₂₀	1-Decene	140.268	-124,139	121,294	539.652	47,565	44,413	170.6	—	2,298	—
C ₁₀ H ₂₂	n-Decane	142.284	-249,659	34,434	540.531	48,020	44,602	174.1	277	2,277	730
C ₁₁ H ₂₂	1-Undecene	154.295	-144,766	129,830	578.061	47,512	44,360	—	—	2,296	—
C ₁₁ H ₂₄	n-Undecane	156.311	-270,286	43,012	578.940	47,926	44,532	195.9	265	2,277	740

Table C.1 Selected properties of air at 1 atm°

T (K)	ρ (kg/m ³)	c_p (kJ/kg-K)	$\mu \cdot 10^7$ (N-s/m ²)	$\nu \cdot 10^6$ (m ² /s)	$k \cdot 10^3$ (W/m-K)	$\alpha \cdot 10^6$ (m ² /s)	Pr
100	3.5562	1.032	71.1	2.00	9.34	2.54	0.786
150	2.3364	1.012	103.4	4.426	13.8	5.84	0.758
200	1.7458	1.007	132.5	7.590	18.1	10.3	0.737
250	1.3947	1.006	159.6	11.44	22.3	15.9	0.720
300	1.1614	1.007	184.6	15.89	26.3	22.5	0.707
350	0.9950	1.009	208.2	20.92	30.0	29.9	0.700
400	0.8711	1.014	230.1	26.41	33.8	38.3	0.690
450	0.7740	1.021	250.7	32.39	37.3	47.2	0.686
500	0.6964	1.030	270.1	38.79	40.7	56.7	0.684
550	0.6329	1.040	288.4	45.57	43.9	66.7	0.683
600	0.5804	1.051	305.8	52.69	46.9	76.9	0.685
650	0.5356	1.063	322.5	60.21	49.7	87.3	0.690
700	0.4975	1.075	338.8	68.10	52.4	98.0	0.695
750	0.4643	1.087	354.6	76.37	54.9	109	0.702
800	0.4354	1.099	369.8	84.93	57.3	120	0.709
850	0.4097	1.110	384.3	93.80	59.6	131	0.716
900	0.3868	1.121	398.1	102.9	62.0	143	0.720
950	0.3666	1.131	411.3	112.2	64.3	155	0.723
1,000	0.3482	1.141	424.4	121.9	66.7	168	0.726
1,100	0.3166	1.159	449.0	141.8	71.5	195	0.728
1,200	0.2902	1.175	473.0	162.9	76.3	224	0.728
1,300	0.2679	1.189	496.0	185.1	82	238	0.719
1,400	0.2488	1.207	530	213	91	303	0.703
1,500	0.2322	1.230	557	240	100	350	0.685
1,600	0.2177	1.248	584	268	106	390	0.688



Section: Appendix A
Lower and Higher Heating Values of Gas, Liquid and Solid Fuels

Fuels	Lower Heating Value (LHV) [1]			Higher Heating Value (HHV) [1]			Density
	Btu/ft ³ [2]	Btu/lb [3]	MJ/kg [4]	Btu/ft ³ [2]	Btu/lb [3]	MJ/kg [4]	grams/ft ³
Gaseous Fuels @ 32 F and 1 atm							
Natural gas	983	20,267	47.141	1089	22,453	52.225	22.0
Hydrogen	290	51,682	120.21	343	61,127	142.18	2.55
Still gas (in refineries)	1458	20,163	46.898	1,584	21,905	50.951	32.8
Liquid Fuels	Btu/gal [2]	Btu/lb [3]	MJ/kg [4]	Btu/gal [2]	Btu/lb [3]	MJ/kg [4]	grams/gal
Crude oil	129,670	18,352	42.686	138,350	19,580	45.543	3,205
Conventional gasoline	116,090	18,679	43.448	124,340	20,007	46.536	2,819
Reformulated or low-sulfur gasoline	113,602	18,211	42.358	121,848	19,533	45.433	2,830
CA reformulated gasoline	113,927	18,272	42.500	122,174	19,595	45.577	2,828
U.S. conventional diesel	128,450	18,397	42.791	137,380	19,676	45.766	3,167
Low-sulfur diesel	129,488	18,320	42.612	138,490	19,594	45.575	3,206
Petroleum naphtha	116,920	19,320	44.938	125,080	20,669	48.075	2,745
NG-based FT naphtha	111,520	19,081	44.383	119,740	20,488	47.654	2,651
Residual oil	140,353	16,968	39.466	150,110	18,147	42.210	3,752
Methanol	57,250	8,639	20.094	65,200	9,838	22.884	3,006
Ethanol	76,330	11,587	26.952	84,530	12,832	29.847	2,988
Butanol	99,837	14,775	34.366	108,458	16,051	37.334	3,065
Acetone	83,127	12,721	29.589	89,511	13,698	31.862	2,964
E-Diesel Additives	116,090	18,679	43.448	124,340	20,007	46.536	2,819
Liquefied petroleum gas (LPG)	84,950	20,038	46.607	91,410	21,561	50.152	1,923
Liquefied natural gas (LNG)	74,720	20,908	48.632	84,820	23,734	55.206	1,621
Dimethyl ether (DME)	68,930	12,417	28.882	75,610	13,620	31.681	2,518
Dimethoxy methane (DMM)	72,200	10,061	23.402	79,197	11,036	25.670	3,255
Methyl ester (biodiesel, BD)	119,550	16,134	37.528	127,960	17,269	40.168	3,361
Fischer-Tropsch diesel (FTD)	123,670	18,593	43.247	130,030	19,549	45.471	3,017
Renewable Diesel I (SuperCetane)	117,059	18,729	43.563	125,294	20,047	46.628	2,835
Renewable Diesel II (UOP-HDO)	122,887	18,908	43.979	130,817	20,128	46.817	2,948
Renewable Gasoline	115,983	18,590	43.239	124,230	19,911	46.314	2,830
Liquid Hydrogen	30,500	51,621	120.07	36,020	60,964	141.80	268
Methyl tertiary butyl ether (MTBE)	93,540	15,094	35.108	101,130	16,319	37.957	2,811
Ethyl tertiary butyl ether (ETBE)	96,720	15,613	36.315	104,530	16,873	39.247	2,810
Tertiary amyl methyl ether (TAME)	100,480	15,646	36.392	108,570	16,906	39.322	2,913
Butane	94,970	19,466	45.277	103,220	21,157	49.210	2,213
Isobutane	90,060	19,287	44.862	98,560	21,108	49.096	2,118
Isobutylene	95,720	19,271	44.824	103,010	20,739	48.238	2,253
Propane	84,250	19,904	46.296	91,420	21,597	50.235	1,920
Solid Fuels	Btu/ton [2]	Btu/lb [5]	MJ/kg [4]	Btu/ton [2]	Btu/lb [5]	MJ/kg [4]	
Coal (wet basis) [6]	19,546,300	9,773	22.732	20,608,570	10,304	23.968	
Bituminous coal (wet basis) [7]	22,460,600	11,230	26.122	23,445,900	11,723	27.267	
Coking coal (wet basis)	24,600,497	12,300	28.610	25,679,670	12,840	29.865	
Farmed trees (dry basis)	16,811,000	8,406	19.551	17,703,170	8,852	20.589	
Herbaceous biomass (dry basis)	14,797,555	7,399	17.209	15,582,870	7,791	18.123	
Corn stover (dry basis)	14,075,990	7,038	16.370	14,974,460	7,487	17.415	
Forest residue (dry basis)	13,243,490	6,622	15.402	14,164,160	7,082	16.473	
Sugar cane bagasse	12,947,318	6,474	15.058	14,062,678	7,031	16.355	
Petroleum coke	25,370,000	12,685	29.505	26,920,000	13,460	31.308	

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ - สกุล ว่าที่ร้อยตรีหญิงวัชรินทร์ กลับสูงเนิน
วัน เดือน ปีเกิด 26 มกราคม 2529
ที่อยู่ 105/214 หมู่ 3 ตำบลลำผักกูด อำเภอธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี 12110
การศึกษา ปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมเครื่องจักรกลการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ประสบการณ์การทำงาน

- ผู้ช่วยผู้จัดการโรงงานวิจัยและพัฒนาผลิตภัณฑ์ บริษัทโรงงานไทยเซน จำกัด พศ. 2553 ถึง พศ.2555
- วิศวกรวิจัยและพัฒนาผลิตภัณฑ์ บริษัท เอส ซี จี (ไทยแลนด์) จำกัด พศ.2555 ถึง พศ.2556
- ลูกจ้างเหมา สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย พศ.2557 ถึง พศ.2558
- ผู้ช่วยนักวิจัย สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย พศ.2558 ถึง พศ.2560
- นักวิจัย สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย พศ.2560 ถึง ปัจจุบัน

เบอร์โทรศัพท์ 080-624 0568
อีเมล aaaawatcharin@gmail.com

