

## การศึกษาแบบการเผาไหม้ในห้องเผาไหม้แบบ CAN TYPE โดยวิธีเชิงตัวเลข A STUDY OF COMBUSTION CYTALYTIC IN CAN TYPE COMBUSTION CHAMBER USING COMPUTATIONAL FLUID DYNAMIC

รุ่ง แก้วกล้า, จุฑารัตน์ คุรุเจริญ และพิชัย อัมภมมงคล  
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ  
ถนนรังสิต-นครนายก ออกระวัง นนทบุรี  
โทรศัพท์ 0-2590-5474 โทรสาร 0-2590-5883 E-mail : klaewkla\_r@yahoo.com

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการศึกษาแบบการเผาไหม้ในห้องเผาไหม้ แบบ CAN TYPE โดยวิธีเชิงตัวเลข โดยศึกษาผลกระทบอันเกิดจากการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของหัวฉีดเชื้อเพลิง การเพิ่ม-ลดอัตราการไหลของปริมาณอากาศที่ทางเข้าห้องเผาไหม้ จากผลการวิเคราะห์แบบจำลองห้องเผาไหม้ พบว่าที่อัตราการไหลของอากาศที่ทางเข้าห้องเผาไหม้ 0.22 kg/s มีปริมาณก๊าซ CO ที่เหลือจากการเกิดปฏิกิริยาเผาไหม้ประมาณ 0.09 ของมวลอุณหภูมิในห้องเผาไหม้ช่วง Primary zone มีค่าประมาณ 773.7 K และบริเวณเจือจาง (Dilution Zone) อุณหภูมิที่ทางออกอยู่ที่ประมาณ 1,090 K ความเร็วภายในห้องเผาไหม้จะมีความเร็วสูงที่หัวฉีดเชื้อเพลิงและค่อยๆลดลงเมื่อมีการผสมระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิง และจะเพิ่มความเร็วขึ้นที่บริเวณทางออกของห้องเผาไหม้ จะพบว่าบริเวณ Primary zone จะมีการหมุนวนภายในห้องเผาไหม้เพื่อผสมผสานระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงทำให้การเผาไหม้มีแนวโน้มสมบูรณ์ขึ้น

คำสำคัญ: วิธีเชิงตัวเลข, ห้องเผาไหม้, เครื่องยนต์กังหันก๊าซ

### ABSTRACT

This paper presents a study of combustion in the combustion chamber by CFD to analysis of models CAN TYPE. By studying the impacts of changing the fuel injectors. The increase - the rate of flow of air into the combustion chamber. The results of modeling the combustion chamber at flow rate 0.22 kg/s. The volume of CO gas, the rest of the reaction burns about 0.09 .Temperature in the combustion chamber during the Primary zone is about 773.7 K and Dilution zone at the outlet is about 1,090 K. Vector of velocity increased at nearly for fuel injection and gradually decreased when the air fuel mixture. And to speed up the exit of the burner. It was found that the Primary zone will be swirling in the combustion chamber to the air fuel mixture tends to burn more completely.

**Keyword:** Computational Fluid Dynamic, CAN Combustor, Gas Turbine Engine

## 1. บทนำ

เนื่องจากในปัจจุบันสถานการณ์จากวิกฤติราคาพลังงานปรับตัวขึ้นสูง ทำให้การพัฒนาเศรษฐกิจของประเทศได้รับผลกระทบ ตลอดจนประชาชนได้รับผลกระทบโดยตรงจากราคาน้ำมันเชื้อเพลิงที่สูงขึ้น การสร้างโรงไฟฟ้าขนาดใหญ่เพื่อสนับสนุนความมั่นคงด้านความต้องการพลังงานในประเทศทำได้ยากขึ้น นโยบายด้านพลังงานที่เน้นไปในทางสนับสนุนการนำพลังงานหมุนเวียนมาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุดตามแผนพัฒนาพลังงานทดแทน 15 ปี (ปี2551-2565) [9] สนับสนุนพัฒนาต้นแบบเทคโนโลยีพลังงานทดแทนใหม่ๆ ให้มีความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ที่เพิ่มสูงขึ้น ส่งเสริมการใช้เทคโนโลยีใหม่ในการผลิตพลังงาน เชื้อเพลิงชีวภาพ พัฒนาต้นแบบ Green City และนำไปสู่ความเข้มแข็งระดับชุมชน สนับสนุนให้มีการส่งออกเทคโนโลยีพลังงานทดแทนในระดับภูมิภาคอาเซียน ซึ่งสอดคล้องกับแผนพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ ฉบับที่ 11 [11] ที่มุ่งเน้นยุทธศาสตร์การจัดการทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อมอย่างยั่งยืน การปรับกระบวนการพัฒนาและขับเคลื่อนประเทศไปสู่การเป็นเศรษฐกิจและสังคมคาร์บอนต่ำ และเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ซึ่งในอนาคตจะมีโครงข่ายไฟฟ้าอัจฉริยะ หรือ Smart Grid[8] เป็นโครงข่ายไฟฟ้าที่ใช้เทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสารมาบริหารจัดการ ควบคุมการผลิต ส่ง และจ่ายพลังงานไฟฟ้า สามารถรองรับการเชื่อมต่อระบบไฟฟ้าจากแหล่งพลังงานทางเลือกที่สะอาดที่กระจายอยู่ทั่วไป (Distributed Energy Resource : DER) และระบบบริหารการใช้สินทรัพย์ให้เกิดประโยชน์สูงสุด รวมทั้งให้บริการกับผู้เชื่อมต่อกับโครงข่ายผ่านมิเตอร์อัจฉริยะมีระบบการควบคุมระบบผลิตไฟฟ้าของสมาชิกในชุมชนที่ผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม ชีวภาพ ชีวมวล ด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก (Micro Turbine) เพื่อสร้างโรงไฟฟ้าเสมือน (Virtual Power Plant, VPP) แทนรูปแบบดั้งเดิม เช่น โรงไฟฟ้าถ่านหิน, ก๊าซ, เชื้อเพลิงฟอสซิลขนาดใหญ่ เป็นต้น

งานวิจัยที่ผ่านมาเสนอเกี่ยวกับการออกแบบเครื่องยนต์กังหันก๊าซ และการออกแบบเครื่องยนต์กังหันก๊าซขนาดเล็ก [3]การเกิดปฏิกิริยาเผาไหม้หลักที่เกิดขึ้นภายในห้องเผาไหม้ของเครื่องยนต์กังหันก๊าซเกิดขึ้นภายในบริเวณปฐมภูมิ (Primary Zone)รูปแบบอากาศพลศาสตร์การเผาไหม้ (Combustion Aerodynamics) ทำให้เกิดการหมุนวนตามแนวแกนการไหล (Recirculation) ซึ่งเป็นการเพิ่มระยะเวลาของการเผาไหม้ (Residence Time) ของอากาศและเชื้อเพลิงส่งผลให้การเผาไหม้มีประสิทธิภาพและเสถียรภาพสูงแต่วิธีการนี้จะทำให้เกิดความดันตกภายในห้องเผาไหม้สูงอันเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้พลังงานกลสุทธิ ( $W_{net}$ ) ที่ได้จากเครื่องลดลง ซึ่งจำเป็นต้องหาวิธีการอื่นที่เพิ่มการผสมผสาน (Mixing) ภายในห้องเผาไหม้ให้มากขึ้น โดยที่เพิ่มค่าความรุนแรงของการไหลแบบหมุนวนเป็นเกลียว ( $S_N$ ) ไม่มากนัก [2]ผลการวิเคราะห์การเกิดการไหลแบบวอร์เทกซ์ (Toroidal Vortex) ของการไหลหมุนวนเป็นเกลียวแบบหมุนตามกันคือ การทดลองแบบมีและไม่มีปฏิกิริยาการเผาไหม้ ของการฉีดเชื้อเพลิงและอากาศแบบหมุนวนทางเดียวและหมุนวนทางสวนทางกันภายในห้องเผาไหม้ โดยการเผาไหม้เป็นแบบที่มีการผสมผสานระหว่างอากาศและเชื้อเพลิงก่อน (Premixed) ได้ผลว่าบริเวณการไหลแบบวอร์เทกซ์เกิดขึ้นเมื่อเป็นการการฉีดเชื้อเพลิงและอากาศแบบเชื้อเพลิงหมุนวนสวนทางกัน แต่กลับพบว่ามีการไหลแบบวอร์เทกซ์เกิดขึ้นในกรณีที่มีการฉีดอากาศและเชื้อเพลิงหมุนวนทางเดียวกันแบบมีปฏิกิริยาการเผาไหม้ แต่ขนาดความกว้างของบริเวณการไหลแบบวอร์เทกซ์เล็กกว่ากรณีที่หมุนวนสวนทางกันและมีค่าพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน (Turbulence Kinetic Energy K) ต่ำกว่าบริเวณการไหลแบบวอร์เทกซ์เกิดขึ้นในการหมุนวนทั้งหมุนวนตามกันและสวนทางกัน และได้สรุปว่าเป็นเช่นนี้เพราะปัจจัยที่มีอิทธิพลที่ทำให้เกิดการไหลแบบวอร์เทกซ์ไม่ได้มีเพียงแค่ค่าความรุนแรงของการไหลแบบหมุนวนเป็นเกลียว ( $S_N$ )

เท่านั้น แต่ยังมีปัจจัยเรื่องรูปแบบการกระจายความเร็ว (Velocity Profile) ของความเร็วตามแนวแกนการไหล (U) และความเร็วตามแนวเส้นสัมผัส (W) ที่บริเวณทางออกของ Nozzle อีกด้วย เช่นถ้าเปรียบเทียบกระแสการไหลหมุนวนของคู่หนึ่งมีค่าความรุนแรงของการไหลแบบหมุนวนเป็นเกลียวเท่ากัน แต่มีรูปแบบการกระจายความเร็ว (Velocity Profile) ต่างกัน ผลของบริเวณตามแนวแกนการไหล (Toroidal Recirculation Zone) ก็จะแตกต่างกัน ซึ่งถ้าเป็นเช่นนี้แล้วการผสมผสาน (Mixing) ก็แตกต่างกันถึงแม้ว่าจะมีผลการวิเคราะห์นำเสนอเป็นค่าความรุนแรงของการไหลแบบหมุนวนเป็นเกลียวซึ่งจะได้ค่าความรุนแรงของการไหลแบบหมุนวนเป็นเกลียวเท่ากัน งานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาระดับของค่าความรุนแรงของการหมุนวนเป็นเกลียวของกระแสอากาศเชื้อเพลิงต่อการผสมผสาน (Mixing) ภายในบริเวณปฐมภูมิ (Primary Zone) ของห้องเผาไหม้ แบบที่ยังไม่มีปฏิกิริยาการเผาไหม้ อันเป็นแนวทางการปรับปรุงประสิทธิภาพและเสถียรภาพของห้องเผาไหม้ โดยการปรับปรุงอากาศพลศาสตร์ของการเผาไหม้ (Combustion aerodynamics) [6] ได้ศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการศึกษาเชิงทดลองของห้องเผาไหม้ของเครื่องยนต์กังหันก๊าซแบบส่วนผสมอากาศเชื้อเพลิงหนาบางเพื่อให้สามารถใช้ก๊าซที่มีค่าความร้อนต่ำได้ โดยทำการทดลองแบบไม่มีปฏิกิริยาการเผาไหม้ตามสภาวะการไหลที่ต้องการศึกษา แล้วทำการวัดขนาดของการหมุนวนตามแนวแกนการไหล (Toroidal Recirculation Zone) และการกระจายความเร็วทั้ง 3 มิติภายในบริเวณปฐมภูมิ (Primary Zone) ของห้องเผาไหม้ ได้พบว่า การไหลแบบหมุนวนเป็นเกลียวสวนทางกัน (Counter Swirl) ที่  $S_i$  และ  $S_0$  เป็น 0.61 และ 0.65 ตามลำดับ จะมีขนาดของ Reverse Region ของการไหลแบบวอร์เทค ที่มีขนาดใหญ่และยาวที่สุด [7] ได้ศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการกระจายตัวของอุณหภูมิตามแนวแกนของห้องเผาไหม้ในเครื่องยนต์กังหันก๊าซที่พัฒนามาจากเทอร์โบชาร์เจอร์ พบว่าเมื่อทำการเพิ่มอัตราการไหลของเชื้อเพลิง อุณหภูมิในแต่ละช่วงมีแนวโน้มลดลงเนื่องจาก รอบสูงขึ้น คอมเพรสเซอร์

ดูดอากาศมากขึ้น การเผาไหม้ภายในห้องเผาไหม้จึงมีอากาศมากกว่าเชื้อเพลิงมาก จึงทำให้อัตราส่วนผสมระหว่างเชื้อเพลิงที่ทดลองเครื่องยนต์สามารถเลี้ยงตัวเองได้ ถ้าลดอัตราการไหลของเชื้อเพลิงต่ำกว่าช่วงที่ทดลองเครื่องยนต์จะไม่สามารถเลี้ยงตัวเองอยู่ได้ ความเร็วรอบของเครื่องยนต์จะตกลงจนเครื่องดับ และถ้าเพิ่มอัตราการไหลของเชื้อเพลิงเพิ่มมากขึ้นกว่าช่วงที่ทดลองมากขึ้นเรื่อย ๆ ก็จะทำให้เปลวไฟลามออกไปที่ไบพัตเทอร์ไบน์ซึ่งอาจทำให้ไบพัตเสียหายได้ [4] ได้ศึกษาวิจัยพบว่า แบบจำลองความปั่นป่วน  $k-\epsilon$  ให้ผลการทำนายดีกว่าแบบจำลอง Standard  $k-\epsilon$  โดยเฉพาะปัญหาที่มีการถ่ายเทความร้อน และจากการจัดวางเทอร์ไบน์เลเตอร์ที่แตกต่างกัน 3 รูปแบบ วิเคราะห์ผลกระทบที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์หลัก เช่น  $Re$ ,  $h/w$  และ  $Pi/h$  ซึ่งแบบ Staggered ที่มีการจัดวางบนผนังด้านบนและด้านล่าง มีความเหมาะสมสำหรับใช้เป็นเส้นทางไหลและการถ่ายเทความร้อนในไบพัตกังหันก๊าซมากกว่า การวางบนผนังด้านล่างเพียงด้านเดียว การจัดวางบนผนังด้านบนและด้านล่างแบบ In-lined

จากข้อสรุปงานวิจัยที่ผ่านมา การเผาไหม้ในส่วนของ Primary Zone จะมีความสำคัญมากในส่วนนี้ จึงมีการออกแบบเพื่อให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ ซึ่งบริเวณนี้จำเป็นต้องมีการผสมผสาน (Mixing) ระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงที่รวดเร็วและเพียงพอต่อการเผาไหม้ จึงต้องมีสร้างการไหลแบบหมุนวนเป็นเกลียว (Swirler) จะทำหน้าที่ฉีดอากาศให้หมุนวนเป็นเกลียว การหมุนวนเป็นเกลียวมีผลต่อการเผาไหม้ภายในบริเวณปฐมภูมิ (Primary zone) ซึ่งจากหลักการออกแบบที่ดีของเครื่องยนต์กังหันก๊าซ ต้องการให้เปลวไฟในห้องเผาไหม้ยังคงลุกไหม้ได้ในช่วงเงื่อนไขสำหรับการทำงานที่กว้าง เปลวไฟมีเสถียรภาพ การสร้างเปลวไฟที่มีเสถียรภาพในบริเวณปฐมภูมิ (Primary zone) ก็คือการฉีดกระแสของอากาศหรือเชื้อเพลิงเป็นรูปแบบการไหลหมุนวนเป็นเกลียว (Swirling Flow) การหมุนวนนี้จะช่วยให้การผสมผสาน (Mixing) ระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงดีขึ้นและเพิ่มประ

สิทธิภาพในการเผาไหม้ได้ แต่ถ้ามีการหมุนวนที่รุนแรงเกินไปก็สามารถทำให้เปลวไฟไม่มีเสถียรภาพ ในทางกลับกันถ้ามีน้อยเกินไปก็จะไม่ทำให้เกิดการไหลแบบหมุนวนเป็นเกลียว (Reversed Recirculation Zone) ซึ่งการเกิดการไหลแบบหมุนวนเป็นเกลียว (Reversed Recirculation Zone) วัดจากค่าความรุนแรงของการไหลแบบหมุนวนเป็นเกลียวหรือเรียกว่า Swirl Number ( $S_N$ ) ซึ่งจะต้องมีค่ามากกว่า 0.6 ( $S_N > 0.6$ ) ถึงจะเกิดการไหลในลักษณะแบบหมุนวนเป็นเกลียว

เนื้อหาในงานวิจัยของผู้วิจัยเป็นการศึกษารูปแบบการเผาไหม้ในห้องเผาไหม้แบบ CAN TYPE โดยวิธีเชิงตัวเลข โดยมีการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของหัวฉีดเชื้อเพลิง การเพิ่ม-ลดอัตราการไหลของปริมาณอากาศเข้าห้องเผาไหม้แบบ CAN TYPE เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงค่าต่างๆ ที่มีผลต่อการเผาไหม้ในห้องเผาไหม้ของแบบ CAN TYPE ที่ผู้วิจัยได้ออกแบบ

## 2. วิธีดำเนินการ

### 2.1 หลักการออกแบบห้องเผาไหม้ของเครื่องยนต์กังหันก๊าซ

ประเภทห้องเผาไหม้ของเครื่องยนต์กังหันก๊าซแบ่งได้เป็น 3 แบบใหญ่ๆ คือ (1) Tubular Chambers ประกอบด้วยเสื้อใน (Liner) รูปทรงกระบอกวางอยู่ในเสื้อนอก (Casing) รูปทรงกระบอก ห้องเผาไหม้แบบนี้ในห้องเผาไหม้ที่ควบคุมการเผาไหม้ได้ง่าย ในปัจจุบันห้องเผาไหม้ประเภทนี้มักจะใช้กับกังหันก๊าซขนาดเล็ก (2) Annular Chambers เป็นรูปแบบห้องเผาไหม้ที่มีลักษณะการออกแบบห้องเผาไหม้ที่ดีทำให้ความเร็วของอากาศที่เข้ามาภายในห้องเผาไหม้มีการเปลี่ยนแปลงน้อย และสามารถรองรับปริมาณอากาศที่เข้ามาภายในห้องเผาไหม้ปริมาณมากกว่าห้องเผาไหม้ประเภทอื่นเมื่อเทียบที่น้ำหนักที่เท่ากัน แต่การควบคุมประสิทธิภาพของการเผาไหม้ทำได้ยาก (3) Tuboannular Chambers

ประกอบด้วยเสื้อใน (Liner) รูปทรงกระบอกที่วางเรียงอยู่ในเสื้อนอกเพียงอันเดียว (Single Annular Casing) ห้องเผาไหม้รูปแบบนี้ เป็นการออกแบบเพื่อรวมข้อดีของ Annular Chambers กับ Tubular เข้าด้วยกัน มีข้อเสียคือ มีน้ำหนักมากกว่าห้องเผาไหม้แบบ Annular เพื่อให้ได้รูปร่างลักษณะของห้องเผาไหม้ของเครื่องยนต์กังหันก๊าซที่ดี มีประสิทธิภาพการเผาไหม้สูง คือเชื้อเพลิงต้องเผาไหม้สมบูรณ์ภายในห้องเผาไหม้ มีการจุดระเบิดที่นุ่มนวลและเชื่อถือได้ ถึงแม้จะต้องจุดระเบิดได้แม้มีอากาศเบาบาง และการจุดระเบิดแต่ละครั้งต้องไม่ทำให้เครื่องยนต์เกิดการเสียหายจนใช้การไม่ได้, มีความเสถียรภาพในการเผาไหม้ที่กว้าง สามารถเดินเครื่องได้แม้ว่าจะปรับเปลี่ยนปริมาณอากาศต่อเชื้อเพลิงของการเผาไหม้ให้เพิ่มขึ้นหรือลดลง, ความดันตกคร่อมในห้องเผาไหม้น้อย และมีการกระจายอุณหภูมิของก๊าซร้อนที่เหมาะสม ก๊าซร้อนที่ออกจากห้องเผาไหม้มีอุณหภูมิสูงไม่มีอุณหภูมิสูงจนทำให้กังหัน (Turbine) เกิดความเสียหายได้

บริเวณเสื้อใน (Liner) จะอยู่ใกล้กับส่วนบริเวณที่เกิดการเผาไหม้มากที่สุดจึงจำเป็นต้องทำด้วยวัสดุที่ทนความร้อนได้สูง ในส่วนของเสื้อใน (Liner) จะแบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลักๆ คือ บริเวณปฐมภูมิ (Primary Zone) ซึ่งเป็นส่วนหลักที่อากาศจะผสมกับเชื้อเพลิง ซึ่งการผสมผสาน (Mixing) ระหว่างอากาศและเชื้อเพลิงที่รวดเร็วและเพียงพอต่อการเผาไหม้ และมีความเสถียรภาพของเปลวไฟในห้องเผาไหม้ของเครื่องยนต์กังหันก๊าซยังคงลุกไหม้อยู่ในช่วงของเงื่อนไขสำหรับการทำงานที่กว้าง การออกแบบห้องเผาไหม้ในส่วนนี้จึงจำเป็นต้องออกแบบให้มีการฉีดอากาศและเชื้อเพลิงให้เป็นรูปแบบการหมุนวนเป็นเกลียว (Swirling Flow) การหมุนวนนั้น จะช่วยให้การผสมผสานระหว่างอากาศและเชื้อเพลิงดีขึ้น และในส่วนบริเวณปฐมภูมิ (Primary Zone) ก็ยังเป็นบริเวณที่เป็นจุดเริ่มต้นที่มีปฏิกิริยาการเผาไหม้

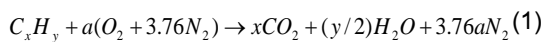
บริเวณถัดมาคือบริเวณส่วนกลาง (Secondary Zone) เป็นบริเวณที่มีการนำอากาศเข้า

มาเพื่อช่วยให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ และส่วนสุดท้ายคือบริเวณเจือจาง (Dilution Zone) เป็นบริเวณที่นำอากาศเข้ามาเพื่อช่วยลดอุณหภูมิของก๊าซร้อนให้เหมาะสมก่อนที่จะเข้ากังหัน (Turbine) การควบคุมอุณหภูมิของก๊าซร้อนให้พอเหมาะก่อนที่จะเข้ากังหัน (Turbine) เป็นสิ่งที่จำเป็นอย่างยิ่ง เพราะหากมีอุณหภูมิสูงเกินไป กังหันก็จะเสื่อมคุณภาพเร็ว

ทั้งนี้อากาศที่ไหลระหว่างเสื้อใน(Liner)และเสื้อนอก(Casing)นั้น นอกจากจะทำหน้าที่ช่วยให้เกิดการเผาไหม้แล้ว ยังทำหน้าที่ระบายความร้อนออกจากผนังของเสื้อในอีกด้วย

### 2.2 หลักการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์

อัตราส่วนอากาศกับเชื้อเพลิง(A/F-ratio) คืออัตราส่วนระหว่างมวล (หรือจำนวนโมล) ของอากาศต่อมวล(หรือจำนวนโมล) ของเชื้อเพลิงในระหว่างการสันดาป โดยทั่วไปแบ่งออกเป็นอัตราส่วนอากาศกับเชื้อเพลิงทฤษฎี  $(A/F)_{stoic}$  และอัตราส่วนอากาศกับเชื้อเพลิงจริง  $(A/F)_{stoic}$  มีความสัมพันธ์สำหรับเชื้อเพลิงไฮโดรคาร์บอนที่มีสูตร  $C_xH_y$  จะสามารถเขียนสมการการเผาไหม้ที่ Stoichiometry ได้ดังนี้



$$(A/F)_{stoic} = \left( \frac{m_{air}}{m_{fuel}} \right)_{stoic} = 4.76a \frac{MW_{air}}{MW_{fuel}} \quad (2)$$

อัตราส่วนสมมูล(Equivalent Ratio,  $\Phi$ ) เป็นค่าที่บอก ว่าส่วนผสมของเชื้อเพลิง Oxidizer เป็น Rich,Lean หรือ stoichiometric มีความสัมพันธ์ดังสมการ

$$\Phi = \frac{(A/F)_{stoic}}{(A/F)} = \frac{(F/A)}{(F/A)_{stoic}} \quad (3)$$

และ % excess air (อากาศส่วนเกิน) มีนิยามดังนี้

$$\% \text{ excess air} = \frac{(1 - \Phi)}{\Phi} \times 100\% \quad (4)$$

### 2.3 สมการพื้นฐานของการไหล

การไหลในงานวิจัยนี้ จะสมมติฐานว่าเป็นการไหลแบบสามมิติที่เกิดขึ้นในสภาวะคงตัว โดยของไหลเป็นแบบอัดตัวไม่ได้ สมการพื้นฐานของการไหลแบบราบเรียบก็คือ สมการความต่อเนื่องและสมการอนุรักษ์โมเมนตัม ที่ใช้ความเร็วเฉลี่ยเป็นตัวแปรตาม สำหรับการไหลแบบปั่นป่วน จะต้องนำเทอม fluctuation ของความเร็วและความดันเข้ามารวมในสมการเหล่านี้ด้วย ซึ่งจะแสดงสมการพื้นฐานสำหรับการไหลแบบปั่นป่วนในรูปแบบเทนเซอร์

Continuity equation

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (5)$$

Momentum equation

$$\bar{\rho} \bar{u}_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu_{eff} \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (6)$$

Turbulent kinetic energy equation

$$\bar{\rho} \bar{u}_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right\} + P - \rho \varepsilon \quad (7)$$

Dissipation equation

$$\bar{\rho} \bar{u}_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right\} + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} P - C_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (8)$$

Boussinesq approximation

$$\tau_{ij} = -\frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} + \mu_t \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (9)$$

เมื่อ

$$P = \tau_{ij} \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) = \mu_t \left[ 2 \left( \left( \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} \right)^2 \right) \right] +$$

$$\mu_t \left[ \left( \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} \right)^2 \right], \mu_{eff} = \mu + \mu_t, \mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon},$$

$$C_\mu = 0.09, \sigma_k = 1.0, C_{\varepsilon 1} = 1.44, C_{\varepsilon 2} = 1.92 \text{ และ } \sigma_\varepsilon = 1.3$$

เมื่อ  $\tau_{ij} = -\rho \overline{u'_i u'_j}$  ซึ่งเรียกพจน์  $\tau_{ij}$  นี้ว่า

Reynolds stresses หรือ Turbulent stresses

เนื่องจากพจน์ของ  $\tau_{ij}$  ที่เพิ่มเข้ามาของระบบสมการ ทำให้ไม่สามารถแก้ระบบสมการนี้ได้เพราะจำนวนของสมการนั้นน้อยกว่าจำนวนตัวแปรที่ไม่รู้ค่า ดังนั้นจึงจำเป็นต้องอาศัยการสร้างแบบจำลองความปั่นป่วน (Turbulence modeling) เพิ่มเข้ามาเพื่อช่วยในการคำนวณหาผลเฉลยของระบบสมการ แบบจำลองความปั่นป่วนที่ใช้ในที่นี้คือ แบบจำลองความปั่นป่วน standard  $k-\epsilon$  [1] ซึ่งจะใช้ Boussinesq Approximation ในการหาค่าของ Reynolds stress โดยสัมพันธ์กับความแปรผันเชิงเส้นคือ Eddy viscosity,  $\mu_t$  ซึ่ง Boussinesq hypothesis สำหรับการไหลแบบอัดตัวไม่ได้

### 3. ผลการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ศึกษารูปแบบการเผาไหม้ในห้องเผาไหม้แบบ CAN TYPE โดยวิธีเชิงตัวเลข ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาตัวแปรที่มีผลกระทบต่อการทำงานของห้องเผาไหม้ต่อไปนี้เป็น (1) การจัดวางตำแหน่งของหัวฉีดเชื้อเพลิง (2) การเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลเข้าของอากาศ

#### 3.1 แบบจำลอง

แบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์ เป็นห้องเผาไหม้แบบ CAN TYPE ซึ่งมีลักษณะการไหลของอากาศตามภาคตัดของตามรูปที่ 1 และรูปที่ 2 การกำหนดโครงข่ายตามรูปที่ 3 แบบจำลองที่เป็นต้นแบบในการวิเคราะห์ปัญหาประกอบด้วย 2 แบบจำลองเพื่อวิเคราะห์การจัดวางตำแหน่งของหัวฉีดเชื้อเพลิง มีผลกระทบต่ออุณหภูมิที่ทางออกของห้องเผาไหม้อย่างไร

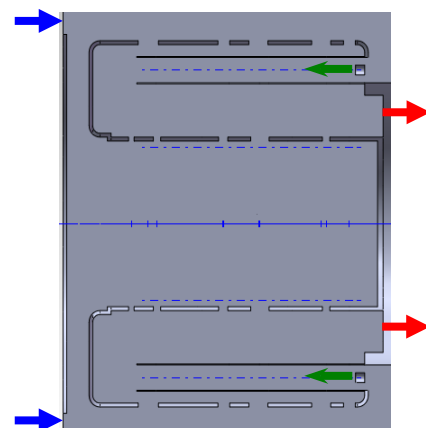
หลังจากการวิเคราะห์ผลกระทบที่เกิดจากการจัดวางตำแหน่งของหัวฉีดเชื้อเพลิงแล้ว ผู้วิจัยจะทำการเลือกแบบจำลองจากผลการวิเคราะห์ค่าอุณหภูมิที่ทางออกของห้องเผาไหม้ การเกิดการไหลหมุนวนเป็นเกลียวภายในห้องเผาไหม้ ค่า  $CO$  Mass Fraction แล้วนำแบบจำลองที่ได้จากการเลือกไปวิเคราะห์ผลกระทบของอุณหภูมิที่ทางออกของห้องเผาไหม้อีกครั้ง โดยเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลเข้าของ

อากาศที่ทางเข้าห้องเผาไหม้ ซึ่งสามารถสรุปเป็นแนวทางในการวิเคราะห์ปัญหาดังนี้ คือ

#### 3.1.1 การจัดวางตำแหน่งของหัวฉีดเชื้อเพลิง

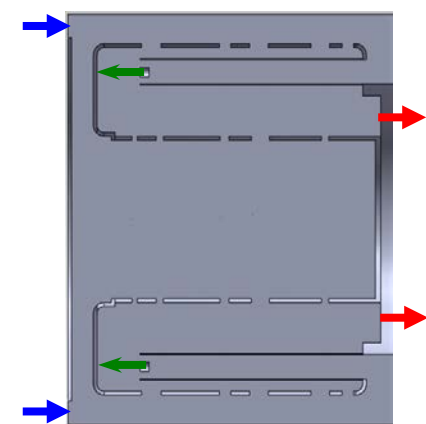
(1) ตำแหน่งของหัวฉีดเชื้อเพลิงอยู่ทางด้านซ้ายมือตามทิศทางของลูกศรสีเขียวตามรูปที่ 1(ก) ทางออกของอากาศผสมหลังจากเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้มีทิศทางตามลูกศรสีแดง ในส่วนของทางเข้าของอากาศทิศทางตามลูกศรสีน้ำเงิน

(2) ตำแหน่งของหัวฉีดเชื้อเพลิงอยู่ทางด้านซ้ายมือตามทิศทางของลูกศรสีเขียวตามรูปที่ 1(ข) ทางออกของอากาศผสมหลังจากเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้มีทิศทางตามลูกศรสีแดง ในส่วนของทางเข้าของอากาศทิศทางตามลูกศรสีน้ำเงิน



(ก) ตำแหน่งของหัวฉีดเชื้อเพลิงอยู่ทางด้าน

ซ้ายมือ



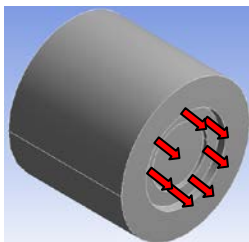
(ข) ตำแหน่งของหัวฉีดเชื้อเพลิงอยู่ทางด้าน

ซ้ายมือ

รูปที่ 1 ภาคตัดขวาง แสดงทิศทางเข้าของเงื่อนไขเริ่มต้นในการออกแบบ

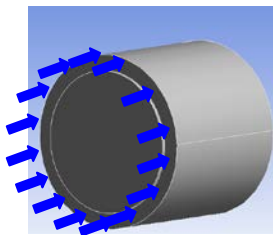
3.1.2 การเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลเข้าของอากาศ แบ่งเป็นการวิเคราะห์ 4 ลักษณะคือ ที่อัตราการไหลเข้า 0.22 kg/s, เพิ่มอัตราการไหลเข้าของอากาศอีก 20%,40%ของอัตราการไหลเข้าเดิม (0.264kg/s, 0.308kg/s) และลดอัตราการไหลเข้าของอากาศอีก 20%ของอัตราการไหลเข้าเดิม(0.176kg/s) ใช้การเปลี่ยนแปลงในลักษณะนี้กับรูปแบบของการวางตำแหน่งของหัวฉีดตามรูปที่ 1 (ก)

3.2 แบบจำลองแสดงทิศทางของปัญหาแบบ 3 มิติ ตามรูปที่ 2



(ก) รูปจำลอง 3 มิติ แสดงทิศทาง

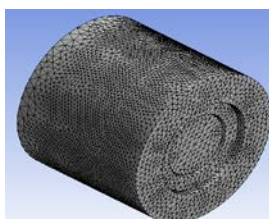
ออกของอากาศผสม



(ข) รูปจำลอง 3 มิติ แสดงทิศทาง

เข้าของอากาศ

รูปที่ 2 แบบจำลอง 3 มิติ แสดงทิศทางการกำหนดค่าเบื้องต้น



รูปที่ 3 รูปจำลองโครงข่าย Mesh 3 มิติ

3.3 แบบโครงข่าย Mesh 3 มิติ

ผู้วิจัยพบว่าโปรแกรมได้แจ้งเตือนการเกิด Reverse flow on Pressure Outlet บริเวณด้านทางออกของอากาศผสม จึงได้ดำเนินการหยุดโปรแกรมคำนวณชั่วคราว เพื่อปรับขนาดค่ากริดที่ทางออกใหม่ โดยเลือกใช้การปรับกริดแบบ Adaptive Grid แล้วก็ทำให้โปรแกรมทำการประมวลผลต่อ จากการปรับความละเอียดของกริดที่ทางออกพบว่า การแจ้งเตือนจะค่อยๆลดลงและก็หายไปในที่สุด

3.4 กำหนดเงื่อนไขสำหรับแบบจำลอง

การกำหนดค่าเบื้องต้นให้กับการวิเคราะห์แบบจำลองห้องเผาไหม้แบบ CAN TYPE

3.4.1 ข้อกำหนดจะตั้งสมมติฐานเบื้องต้นว่า

- (1) ของไหลเป็นชนิดอัดตัวไม่ได้
- (2) คุณสมบัติต่างๆของของไหลมีค่าคงที่
- (3) การไหลเกิดขึ้นใน 3 มิติ
- (4) การไหลอยู่ในสภาวะคงตัว

3.4.2 ทางเข้าของอากาศ กำหนดให้อากาศมีอัตราการไหลเข้า 0.22 kg/s ความดันที่ 1 บรรยากาศ อุณหภูมิอากาศปกติที่ 300K

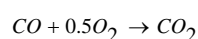
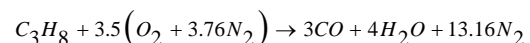
3.4.3 ทางเข้าของเชื้อเพลิง กำหนดให้อัตราการไหลของเชื้อเพลิงเข้า 0.0639 kg/s (คิดที่ปริมาณอากาศที่ใช้ในการสันดาปสมบูรณ์ 355 %) ความดันที่ 1 บรรยากาศ อุณหภูมิอากาศปกติที่ 300K เชื้อเพลิงที่ใช้เป็นโปรเพน ( $C_3H_8$ )

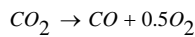
3.4.4 ทางออกของอากาศผสม กำหนดให้เป็น Pressure Outlet ที่ 1.5 เท่าของบรรยากาศ

#### 4.ผลการคำนวณ

การวิเคราะห์แบบจำลองเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้

4.1 สมการการเผาไหม้ การทำปฏิกิริยาของสมการการเผาไหม้ จะได้ดังต่อไปนี้





อัตราการเกิดปฏิกิริยาอาร์ฮีเนียสของสมการเผาไหม้ที่พิจารณาสามารถเขียนได้ดังนี้

$$R_1 = 5.62 \times 10^{11} \exp\left(\frac{-1.256 \times 10^8}{RT}\right) [C_3H_8]^{0.1} [O_2]^{1.65}$$

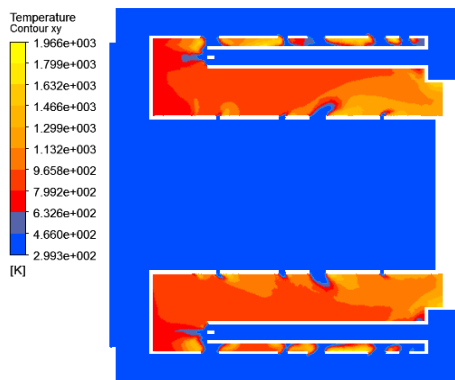
$$R_2 = 2.24 \times 10^{10} \exp\left(\frac{-1.7 \times 10^8}{RT}\right) [CO][O_2]^{0.5} [H_2O]^{0.5}$$

$$R_3 = 5.0 \times 10^{10} \exp\left(\frac{-1.7 \times 10^8}{RT}\right) [C_2O]$$

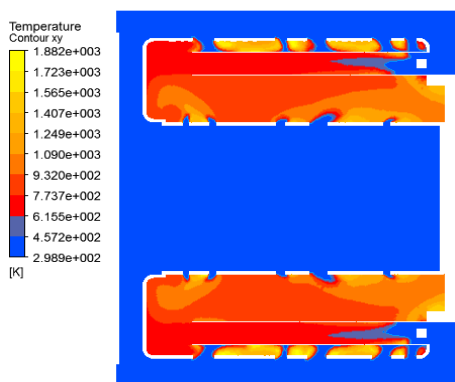
## 4.2 การวิเคราะห์ห้องเผาไหม้

### 4.2.1 การวิเคราะห์ห้องเผาไหม้ที่มีการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของของหัวฉีดเชื้อเพลิง

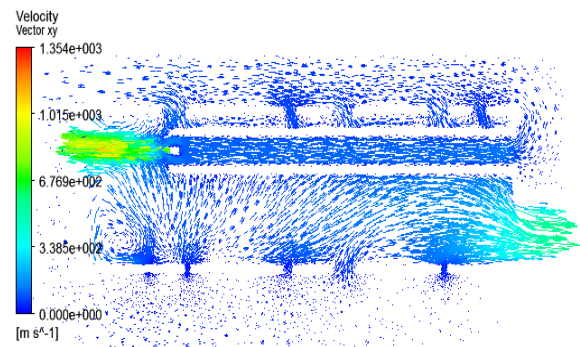
การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของของหัวฉีดเชื้อเพลิง



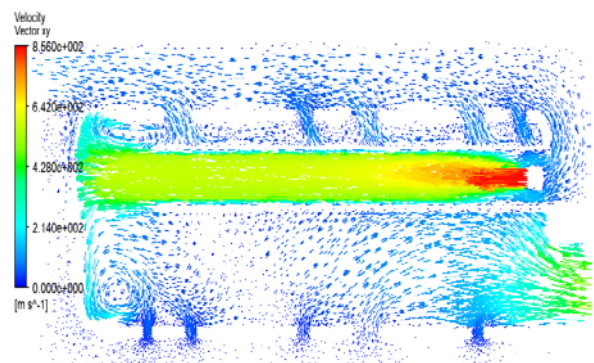
(ก) กรณีของหัวฉีดเชื้อเพลิงอยู่ด้านซ้าย  
รูปที่ 4 แสดงภาพตัดของ Temperature contour



(ข) กรณีของหัวฉีดเชื้อเพลิงอยู่ด้านบน  
รูปที่ 4 แสดงภาพตัดของ Temperature contour (ต่อ)



(ก) กรณีของหัวฉีดเชื้อเพลิงอยู่ด้านซ้าย



(ข) กรณีของหัวฉีดเชื้อเพลิงอยู่ด้านบน

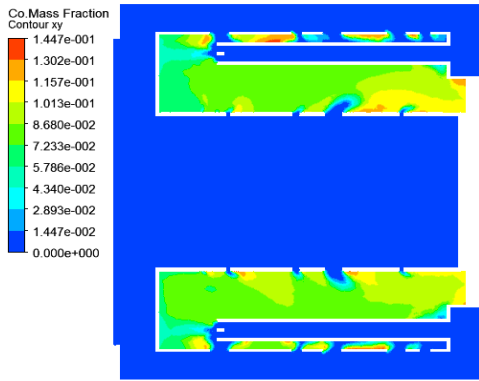
รูปที่ 5 แสดงภาพตัดของ ภาพขยายบริเวณหัวฉีดของเชื้อเพลิง

จากรูปที่ 4(ก)อุณหภูมิที่ทางออกของแบบจำลองที่มีหัวฉีดอยู่ทางด้านซ้ายจะมีอุณหภูมิประมาณ 1,466 K และจากรูปที่ 4(ข)อุณหภูมิของแบบจำลองที่มีตำแหน่งหัวฉีดอยู่ทางด้านขวามีอุณหภูมิประมาณ 1,090 K ซึ่งจากการเปรียบเทียบระหว่างอุณหภูมิที่ทางออกของทั้งสองแบบจำลองพบว่าแบบจำลองห้องเผาไหม้ที่มีหัวฉีดอยู่ทางด้านขวามีอุณหภูมิต่ำกว่า

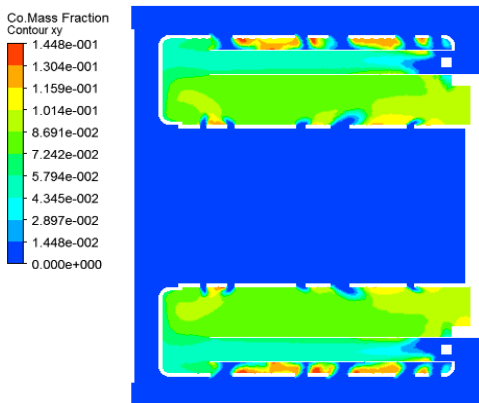
จากรูปที่ 5 แสดงภาพตัดของ ภาพขยายบริเวณหัวฉีดของเชื้อเพลิง ที่ตำแหน่งด้านซ้ายเยื้องลงมาด้านล่างของรูปจะมีรูปแบบการไหลหมุนวนเป็นเกลียวของแบบจำลองทั้งสองแบบซึ่งมีลักษณะที่คล้ายกัน แต่การไหลหมุนวนเป็นเกลียวที่เกิดขึ้นจากการย้ายตำแหน่งหัวฉีดไปไว้ด้านขวามือดังรูปที่5(ข)จะ



มีการไหลหมุนวนเป็นเกลียวที่แรงกว่า ส่งผลให้การผสมผสานระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงทำได้ดีกว่า



(ก) กรณีของหัวฉีดเชื้อเพลิงอยู่ด้านซ้าย



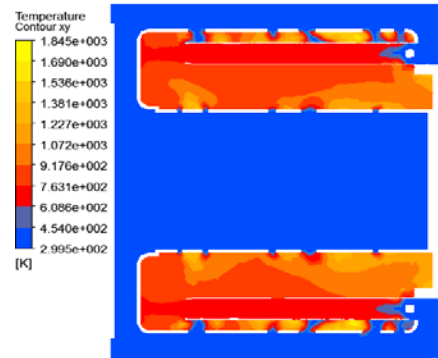
(ข) กรณีของหัวฉีดเชื้อเพลิงอยู่ด้านขวา

รูปที่ 6 แสดงภาพตัดของ CO Mass Fraction จากรูปที่ 6 แสดงภาพตัดขวางของค่า CO Mass Fraction ที่มีค่าหลงเหลือจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ จากรูปที่ 6 (ก) จะมีปริมาณการหลงเหลือของค่า CO Mass Fraction มากกว่าปริมาณที่หลงเหลือในการเผาไหม้ที่มีการย้ายหัวฉีดเชื้อเพลิงไปยังตำแหน่งทางขวามือ

หลังจากเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ของแบบจำลองทั้งสองแบบโดยพิจารณาจากอุณหภูมิที่ทางออกของห้องเผาไหม้ ลักษณะการไหลภายในห้องเผาไหม้ และค่าของ CO Mass Fraction ที่คงเหลือ ผู้วิจัยจึงใช้แบบจำลองห้องเผาไหม้ที่มีตำแหน่งหัวฉีดอยู่

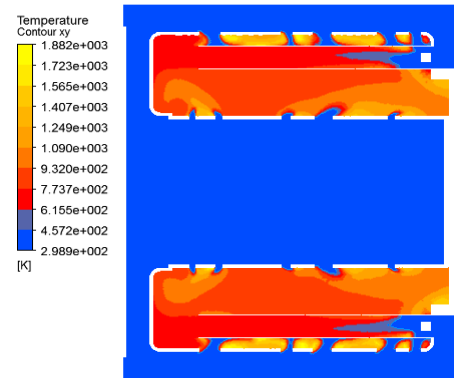
ทางด้านขวามือ ไปวิเคราะห์เพื่อหาผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของอากาศที่ทางเข้าต่อไป

#### 4.2.2 การวิเคราะห์ห้องเผาไหม้ ที่มีการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของอากาศที่ทางเข้า



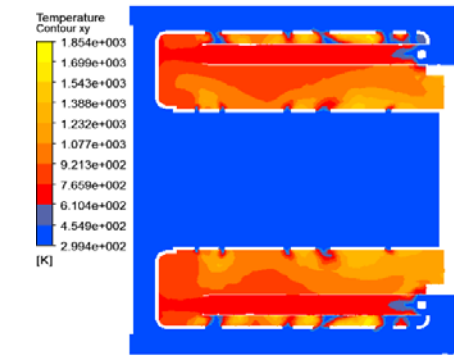
(ก) อัตราการไหลของอากาศที่ทางเข้า

0.176 kg/s อุณหภูมิที่ทางออกประมาณ 1,072K



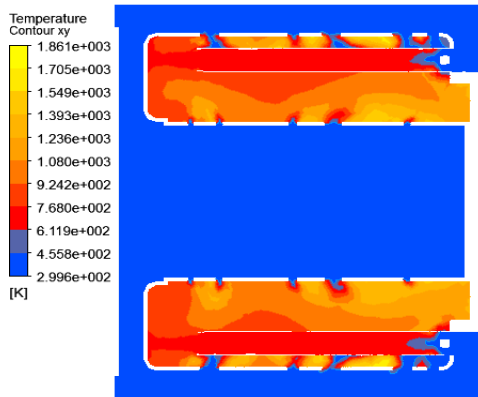
(ข) อัตราการไหลของอากาศที่ทางเข้า 0.22

kg/s อุณหภูมิที่ทางออกประมาณ 1,090K



(ค) อัตราการไหลของอากาศที่ทางเข้า 0.264

kg/s อุณหภูมิที่ทางออกประมาณ 1,232K



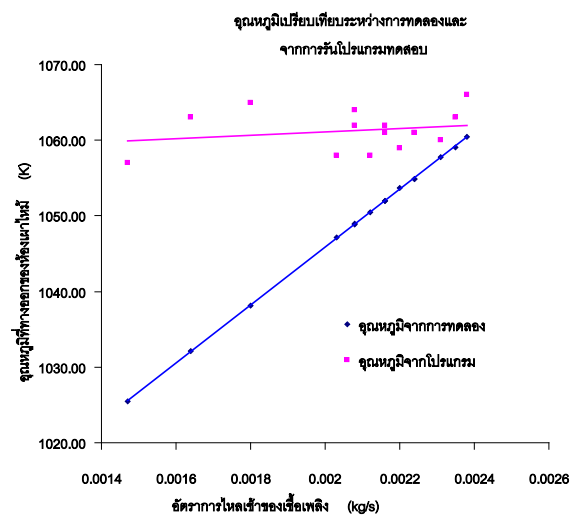
(ง) อัตราการไหลของอากาศที่ทางเข้า 0.308 kg/s อุณหภูมิที่ทางออกประมาณ 1,236 K รูปที่ 7 แสดงภาพตัดของ Temperature Contour

จากรูปที่ 7 พบว่าอุณหภูมิที่ทางออกของห้องเผาไหม้จะมีค่าเพิ่มขึ้น ตามอัตราการไหลของอากาศทางเข้าที่เพิ่มขึ้น สอดคล้องกับค่าของอุณหภูมิและอัตราการไหลของอากาศตามกราฟที่ 1 ซึ่งเป็นผลจากการทดลอง และค่าของอุณหภูมิที่ทางออกของห้องเผาไหม้ที่เกิดจากการวิเคราะห์ผลจากค่าอัตราการไหลของอากาศที่ทางเข้า 0.22 kg/s จะมีอุณหภูมิทางออกที่มีแนวโน้มคงที่

#### 4.3 การตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมคอมพิวเตอร์

จาก [7] เป็นการทดลองโดยใช้เทอร์โมของรถบรรทุก 18 ล้อ ยี่ห้อ IHI รุ่น RHC9 มาปรับปรุงและจำลองเป็นห้องเผาไหม้ ใช้ LPG เป็นเชื้อเพลิง เครื่องมือวัดประกอบด้วย เครื่องมือวัดอุณหภูมิ(วัดอุณหภูมิที่ตำแหน่งทางออกของห้องเผาไหม้) เครื่องมือวัดอัตราการไหลของอากาศและก๊าซ และ เครื่องมือวัดความดัน(วัดความดันก่อนเข้าห้องเผาไหม้) ตารางบันทึกผลการทดลองจะประกอบไปด้วย ค่าอัตราการไหลของเชื้อเพลิง (kg/s) อัตราการไหลของอากาศ (kg/s) อุณหภูมิทางออกของห้องเผาไหม้ (K) ความดันก่อนเข้าห้องเผาไหม้ (kPa) และความเร็วรอบ(rpm) ผู้วิจัยจึงนำผลจากตารางบันทึกผลการทดลอง นำมาวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Fluent โดย

กำหนดเงื่อนไขให้ตรงกับผลการทดลองคือ อัตราการไหลของเชื้อเพลิง(kg/s),อัตราการไหลของอากาศห้องเผาไหม้ที่ 2 และความเร็วรอบที่ 2 (rpm) โดยใช้ข้อมูลตั้งแต่อัตราการไหลของเชื้อเพลิง 0.00147 kg/s จนถึงอัตราการไหลของเชื้อเพลิง 0.00238 kg/s จำนวน 15 รายการแรก ของผลการทดลอง ผลการเปรียบเทียบอุณหภูมิจากการทดลองกับอุณหภูมิของโปรแกรมทดสอบ ได้ดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 อุณหภูมิเปรียบเทียบระหว่างการทดลองและจากการใช้โปรแกรมทดสอบ

จากผลการเปรียบเทียบค่าของอุณหภูมิที่ได้จากการทดลองกับอุณหภูมิที่ได้จากการใช้โปรแกรมทดสอบมีความแตกต่างกันไม่เกิน 5 %

#### 5. สรุป

จากผลการการศึกษารูปแบบการเผาไหม้ในห้องเผาไหม้แบบ CAN TYPE โดยวิธีเชิงตัวเลข ห้องเผาไหม้ที่ออกแบบ ผลจากการวิเคราะห์การเผาไหม้ภายในห้องเผาไหม้ที่อัตราการไหลเข้าของอากาศ 0.22 kg/s มีปริมาณก๊าซ CO ที่เหลือจากการเกิดปฏิกิริยาเผาไหม้ประมาณ 0.09 ของมวล อุณหภูมิในห้องเผาไหม้ช่วง Primary zone มีค่าประมาณ 773.7 K ซึ่งจะอยู่ในช่วง [10] อุณหภูมิของจุดติดไฟ (Ignition Temperature) ของโปรเพน ซึ่งอยู่ระหว่าง 733-853 K และบริเวณเชื้อ

จาง (Dilution Zone) อุณหภูมิที่ทางออกอยู่ที่ประมาณ 1,090 K ลดลงจากอุณหภูมิเปลวไฟในอากาศ [10] 2,203 K ซึ่งเป็นค่าของอุณหภูมิที่เกิดจากปฏิกิริยาการเผาไหม้จริงของก๊าซโปรเพนโดยไม่มีกระบวนการระบายความร้อน (d) ความเร็วภายในห้องเผาไหม้จะมีความเร็วสูงที่หัวฉีดเชื้อเพลิงและค่อยๆลดลงเมื่อมีการผสมระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิง และจะเพิ่มความเร็วขึ้นที่บริเวณทางออกของห้องเผาไหม้ จะพบว่าบริเวณ Primary zone จะมีการหมุนวนภายในห้องเผาไหม้ เพื่อผสมผสานระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงทำให้การเผาไหม้มีแนวโน้มสมบูรณ์ขึ้น

ในอนาคตผู้วิจัยจะใช้แบบจำลองที่ได้นี้ไปวิเคราะห์การเผาไหม้ภายในห้องเผาไหม้ แบบ CAN TYPE โดยใช้น้ำมันหม้อแปลงเป็นเชื้อเพลิง สืบเนื่องจากน้ำมันหม้อแปลงเก่าที่ใช้แล้ว ได้ถูกส่งคืนคลังพัสดุของ กฟผ.ปีละประมาณ 600,000 ลิตร [5] หากนำมาผลิตเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยใช้เครื่องยนต์กังหันก๊าซขนาดเล็ก กระจายตัวอยู่ตามท้องถิ่นต่างๆ ซึ่งสอดคล้องกับแนวนโยบายหลักของประเทศในอนาคต จะสามารถประหยัดงบประมาณและเป็นการนำทรัพยากรที่มีอยู่มาใช้ประโยชน์อย่างคุ้มค่า

#### เอกสารอ้างอิง

- [1] B.E.Launder and D.B.Spalding," The Numerical Computational of Turbulent Flows," Comp. Met. App. Mech. Eng., Vol. 3, pp. 269-289,1974.
- [2] F.C. Gouldin, J.S. Depsky and S-L. Lee,"Volocity Field Characteristics of a Swirling Flow Combustion", AIAA Journal, Vol.23, No.1,pp.95-102,1985.
- [3] N.Syred, N.A. Chigier and J.M. Beer, "Flame Stabilization in Recirculation Zones of Jets With Swirl",Thirteenth Symposium on Combustion, The Combustion Institute, pp.617-624,1971.
- [4] กิตติศักดิ์ คู่วรัญญ. การศึกษาเชิงตัวเลขของการไหลแบบปั่นป่วนและการถ่ายเทความร้อนในใบกังหันก๊าซที่มีเทอร์ไบวเลเตอร์.วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต. สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล.จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, (2546).
- [5] นิรันดร์ สุวรรณสิทธิ์.การประเมินสมรรถนะของชุดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าดีเซลโดยใช้น้ำมันหม้อแปลงที่ใช้แล้ว.สาขาวิชาวิทยาศาสตร์(การจัดการอุตสาหกรรม).มหาวิทยาลัยเชียงใหม่,(2551).
- [6] ภาณุมาศ อรุณเดชาวัฒน์.การศึกษาเชิงทดลองของห้องเผาไหม้เครื่องยนต์กังหันก๊าซแบบส่วนผสมอากาศเชื้อเพลิงหนาบางเพื่อให้สามารถใช้ก๊าซที่มีความร้อนต่ำได้.วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต.สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล.สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง,(2546).
- [7] อภิลิทธิ์ เพียรสัมฤทธิ์, วชิระ อ่อนจันทร์, ชาญชัย สระทองกุ.ห้องเผาไหม้เครื่องยนต์แก๊สเทอร์ไบน์.ปริญญาานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต.สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง, (2544).
- [8] การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค.(2554,9.5).smart-grid, [ระบบออนไลน์],<http://161.200.85.41/pea-smartgrid/index.php/smart-grid> :<http://161.200.85.41/pea-smartgrid/>
- [9] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน.(2554,9.5).แผนพัฒนาพลังงานทดแทน 15 ปี (พ.ศ. 2551 –2565), [ระบบออนไลน์], <http://www.dede.go.th/dede/images /stories /y51y65.pdf> : <http://www.dede.go.th/dede/>

- [10] กรมธุรกิจพลังงาน กระทรวงพลังงาน.  
(2554,9.5).คุณสมบัติของก๊าซปิโตรเลียมเหลว  
,[ระบบออนไลน์],  
[http://www.doeb.go.th/knowledge/knowledge\\_article\\_Natural2.htm](http://www.doeb.go.th/knowledge/knowledge_article_Natural2.htm) : <http://www.doeb.go.th>
- [11] สำนักงานคณะกรรมการพัฒนาการเศรษฐกิจและ  
สังคมแห่งชาติ.(2554,9.5). แผนพัฒนาเศรษฐกิจ  
และสังคมแห่งชาติ ฉบับที่ 11(พ.ศ. 2555-2559),  
[ระบบออนไลน์],  
<http://www.nesdb.go.th/Default.aspx?tabid=395> : <http://www.nesdb.go.th/>