

การจำลองเชิงตัวเลขของห้องเผาไหม้ในเครื่องยนต์กังหันก๊าซขนาดเล็ก (200 กิโลวัตต์)

Numerical simulation of small gas turbine combustor (200kw)

กิตติภาส วศินารมณ^{1*}, จารุวัตร เจริญสุข²

^{1,2} ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ถนนฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520 *โทรศัพท์ 083-0458234

E-mail: fluidking@hotmail.com¹, kcjaruw@kmitl.ac.th²

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอถึงขั้นตอนการพัฒนาห้องเผาไหม้เครื่องยนต์กังหันก๊าซขนาดเล็กโดยใช้โปรแกรมจำลองการถ่ายเทความร้อนในสภาวะการไหล FLUENT เป็นเครื่องมือในการพัฒนา โดยที่จะใช้ผลการวิเคราะห์ทางเทอร์โมไดนามิกส์ที่มีอยู่ในการกำหนดเงื่อนไขการทำงานของห้องเผาไหม้ที่เหมาะสม[1]โดยเงื่อนไขการทำงานของห้องเผาไหม้ประกอบด้วย อัตราการไหลของอากาศเข้าสู่ห้องเผาไหม้ที่ 1.33 Kg/s อุณหภูมิอากาศเข้าสู่ห้องเผาไหม้ที่ 737k อัตราการไหลของเชื้อเพลิงโพรเพนเข้าสู่ห้องเผาไหม้ที่ 0.0147 Kg/s และความดันที่ทางออกของห้องเผาไหม้ที่ 4 บรรยากาศ ขั้นตอนการพัฒนาจะประกอบด้วย การวิเคราะห์สภาวะการไหลและปรับปรุงรูปทรงของห้องเผาไหม้เพื่อให้เอื้อต่อการเกิดการเผาไหม้ที่มีประสิทธิภาพสูงโดยมีวัตถุประสงค์หลักคือเพื่อให้ได้ค่าประสิทธิภาพการเผาไหม้สูงที่สุดที่เงื่อนไขการทำงาน ในขั้นตอนการออกแบบจากการจำลองพบว่าเชื้อเพลิงสามารถเผาไหม้ได้หมดใน Primary zone แต่การ Recover dissociation ใน Secondary zone ยังทำได้ไม่ดีจึงทำให้สาร CO ออกจากห้องเผาไหม้เป็นปริมาณสูงถึง 230 ppm ผลการจำลองการเผาไหม้ด้วยแบบจำลองการเผาไหม้โพรเพน 2 ชั้นของห้องเผาไหม้ที่ออกแบบปรากฏว่าได้ห้องเผาไหม้ที่มีค่าประสิทธิภาพการเผาไหม้เท่ากับ 90 %

คำสำคัญ: ห้องเผาไหม้, การเผาไหม้, เครื่องยนต์กังหันก๊าซ

Abstract

The objective of this paper is providing of the development methodology on small gas turbine combustor by exploitation of fluid transport simulation software (FLUENT). Initially, we have to designate the proper operating condition of the engine and also the combustor via thermodynamics analysis result from [1]. The combustor operating condition comprising of air mass flow rate at 1.33 Kg/s, Inlet air temperature at 737k, Propane mass flow rate 0.0147Kg/s, and the blockage pressure of turbine 4 atm at the exit port of combustor. The development strategy is incorporating the analysis on complex transport phenomena in the concrete idea, re-designing of the combustor shape in order to achieve high combustion efficiency at the designated operating condition. On the design process, simulation result showed that fuel was completely burned within a primary zone of the combustor but the recovery

dissociation process in the secondary zone was not complete. Result on CO released from the combustor was at the rate of 230ppm. The simulation of designed combustor using 2-step propane combustion indicates 90% combustion efficiency of the combustor.

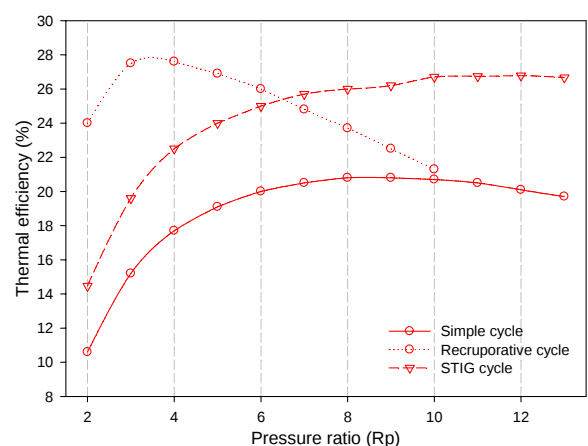
Key words: Gas turbine combustor, micro-gas turbine, combustion

1. บทนำ

เครื่องยนต์กังหันก๊าซขนาดเล็กที่มีการปรับปรุงวัฏจักรได้มีการกล่าวถึงมากขึ้น ด้วยความสามารถในการพัฒนาประสิทธิภาพของอุปกรณ์และอุณหภูมิทางเข้าเทอร์ไบน์ได้สูงขึ้นในระยะหลัง[2]ซึ่งได้แก่ค่าประสิทธิภาพไอเซนทรอปิกส์ของคอมเพรสเซอร์และเทอร์ไบน์ ค่าประสิทธิผลการแลกเปลี่ยนความร้อนของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน และค่าประสิทธิภาพการเผาไหม้ส่งผลให้ค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเครื่องยนต์มีค่าสูงขึ้นจนอยู่ในระดับที่น่าสนใจ อีกทั้งข้อเด่นที่น่าสนใจหลายประการ อาทิเช่น ความสามารถในการนำไปใช้กับเชื้อเพลิงที่หลากหลาย การเผาไหม้ที่สมบูรณ์ ส่วนประกอบของเครื่องยนต์ที่มีชิ้นส่วนเคลื่อนไหวน้อย และความซับซ้อนน้อย ลักษณะการเคลื่อนไหวน้อยของชิ้นส่วนจะก่อให้เกิดแรงกระทำแบบสม่ำเสมอจึงไม่มีข้อจำกัดเรื่องความเร็วรอบการทำงาน การบำรุงรักษาจึงทำให้เป็นไปโดยง่าย นอกจากนี้ เมื่อเปรียบเทียบกับอัตราการผลิตพลังงานกลที่เท่ากัน เครื่องยนต์กังหันก๊าซจะมีขนาดเล็กกว่าเครื่องยนต์ลูกสูบมาก และด้วยความซับซ้อนของทั้งชิ้นส่วนเครื่องยนต์ที่น้อยกว่า จึงทำให้เครื่องยนต์กังหันก๊าซมีศักยภาพในการใช้เป็นหน่วยผลิตกระแสไฟฟ้าสำหรับการใช้งานในพื้นที่ห่างไกลที่มีต้นทุนในการจ่ายกระแสไฟฟ้าสูง หรือการผลิตกระแสไฟฟ้าในลักษณะของวิสาหกิจชุมชน

เป็นที่ทราบกันดีว่าค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเครื่องยนต์กังหันก๊าซขนาดเล็กที่ใช้วัฏจักรมาตรฐานนั้นมีค่าน้อยกว่าเครื่องยนต์ลูกสูบมาก เนื่องจากข้อจำกัดเรื่องอุณหภูมิทางเข้าเทอร์ไบน์จึงทำให้เกิดแนวคิดในการปรับปรุงวัฏจักรพื้นฐานซึ่งมี

อยู่หลายทางเลือกเช่น Regenerative หรือ STIG ในการหาเงื่อนไขการทำงานของห้องเผาไหม้ที่เหมาะสม (Operating condition) งานวิจัยนี้จะนำผลการวิเคราะห์ทางเทอร์โมไดนามิกส์ที่ได้จากการวิเคราะห์ทางเทอร์โมไดนามิกส์ ที่เงื่อนไขค่าประสิทธิภาพการอัดของคอมเพรสเซอร์ และค่าประสิทธิภาพการขยายตัวของเทอร์ไบน์มีค่าเท่ากับ 83% และประสิทธิภาพการเผาไหม้ของห้องเผาไหม้มีค่าเท่ากับ 96% โดยมีค่าประสิทธิผลการแลกเปลี่ยนความร้อนที่ 0.8 อุณหภูมิทางเข้าเทอร์ไบน์สูงสุดที่ 1200K เท่ากันในวัฏจักรแต่ละแบบซึ่งได้แก่ วัฏจักรมาตรฐาน วัฏจักร Regenerative และวัฏจักร STIG จากนั้นจะวิเคราะห์หาปริมาณอากาศที่ไหลเข้าเครื่องยนต์เพื่อให้ได้พลังงานกลสุทธิ 200KW (Rated power) วิธีการวิเคราะห์ในรายละเอียดสามารถอ้างอิงได้จาก [1]



รูปที่ 1 ผลการวิเคราะห์ทางความร้อนของเครื่องยนต์กังหันก๊าซวัฏจักรต่างๆที่เงื่อนไขประสิทธิภาพของอุปกรณ์เท่ากันและอุณหภูมิทางเข้าเทอร์ไบน์เท่ากันที่ 1200 เคลวิน

ถึงขั้นตอนนี้จะได้อธิบายการทำงานของเครื่องยนต์และเงื่อนไขการทำงานของแต่ละอุปกรณ์ที่จะใช้เป็นเป้าหมายเบื้องต้นในการออกแบบพัฒนาอุปกรณ์ย่อยซึ่งได้แก่ คอมเพรสเซอร์ ห้องเผาไหม้เทอร์โบ เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน โดยวัฏจักรที่เหมาะสมที่เลือกได้แก่วัฏจักร Recuporative โดยทำงานที่อัตราส่วนการอัดที่ 4 อุณหภูมิอากาศที่ทางเข้าห้องเผาไหม้ที่ 737k อุณหภูมิทางเข้าเทอร์โบที่ 1200K เครื่องยนต์ทำงานที่อัตราส่วนผสมของอากาศและเชื้อเพลิงที่ส่วนผสมบางโดยมีเปอร์เซ็นต์ส่วนผสมอากาศส่วนเกินเท่ากับ 233% จะได้ค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงที่สุดที่ประมาณ 28% ที่เงื่อนไขค่าประสิทธิภาพของอุปกรณ์ตามที่ได้ระบุไว้ และเพื่อให้ได้พลังงานกล (rated power) 200KW จะสามารถคำนวณหาปริมาณอากาศได้เท่ากับ 1.33 Kg/s และจากส่วนผสมอากาศส่วนเกินที่ 233% จะทำให้สามารถหาปริมาณการฉีดเชื้อเพลิงโปรเพนเข้าสู่ห้องเผาไหม้ได้เท่ากับ 0.0147 Kg/s

ดังนั้นเงื่อนไขการทำงานของห้องเผาไหม้ที่จะต้องออกแบบ คือทำงานที่อัตราการไหลอากาศที่ 1.33 Kg/s โดยมีอุณหภูมิอากาศที่ทางเข้าเท่ากับ 737k และอัตราการฉีดเชื้อเพลิงที่ 0.0147 Kg/s

2. วรณกรรมปริทัศน์

การศึกษาการเผาไหม้ในห้องเผาไหม้นั้นจะต้องมีการศึกษาตัวแปรหลายตัวที่จะมีผลกระทบต่อกันและกัน อย่างเช่น ลักษณะการไหลภายในห้องเผาไหม้, การถ่ายเทความร้อน, การผสมกันของเชื้อเพลิงและอากาศ, อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี และการก่อเกิดความร้อน เป็นต้น แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (CFD) ได้เข้ามามีบทบาทในการใช้เป็นเครื่องมือช่วยในการศึกษาการเผาไหม้ทั้งในเชิงคุณภาพและปริมาณ ทั้งนี้ด้วยข้อได้เปรียบของต้นทุนการสร้างแบบจำลอง CFD ที่ต่ำกว่าการสร้างชุดทดสอบ และมีแนวคิดพื้นฐานทางทฤษฎีที่มีความน่าเชื่อถือสูงโดยเป็นกฎทางกายภาพที่สามารถเข้าใจได้และเอื้อต่อการวิเคราะห์ปรากฏการณ์การเผาไหม้ที่เกิดขึ้นในเชิงลึก อีกทั้งยังสามารถ

เข้าถึงข้อมูลคุณสมบัติของสสารการไหลได้ทั่วทั้งสสารการไหล อย่างไรก็ตามในการใช้แบบจำลองการเผาไหม้ให้ได้มีประสิทธิภาพนั้น ผู้ใช้งานจะต้องเข้าใจและตระหนักถึงข้อจำกัดของแบบจำลองปรากฏการณ์การเผาไหม้ที่เลือกใช้

การไหลภายในห้องเผาไหม้นั้นมีอิทธิพลต่อกระบวนการเผาไหม้เป็นอย่างมาก ดังที่ได้มีการศึกษาลักษณะการไหลภายในห้องเผาไหม้ (Isothermal flow) ของผู้วิจัยหลายท่าน ลักษณะการไหลภายในห้องเผาไหม้สามารถนำสามารถนำไปวิเคราะห์เชิงคุณภาพของปรากฏการณ์การเผาไหม้ได้เป็นอย่างดี อย่างเช่นวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อน, ความเสถียรของการเผาไหม้ [3] ได้มีการศึกษาและเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วนในการทำนายการไหลภายในห้องเผาไหม้ โดยเปรียบเทียบกับผลจากการทดลองพบว่าแบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วน (RANS turbulence model) เกือบทุกแบบให้ผลที่สอดคล้องกับผลการทดลองเป็นอย่างดี [3] จากการวิจัยพบว่าในกรณีที่มีการเผาไหม้ร่วมด้วยจะทำให้การไหลผิดไปจาก isothermal flow เพียงเล็กน้อย ด้วยความซับซ้อนที่น้อยลงของแบบจำลองดังนั้นจึงมีการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนและความเสถียรของเปลวไฟจาก isothermal flow ของผู้วิจัยหลายท่าน

เนื่องจากปรากฏการณ์การเผาไหม้นั้นเป็นปรากฏการณ์ที่มีความซับซ้อนสูงมีความสัมพันธ์ของตัวแปรหลายตัวด้วยกันดังนั้นจึงพบว่าการใช้แบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วน RANS ร่วมกับแบบจำลองการเผาไหม้ต่างๆ นั้นมีความผิดพลาดในการทำนายเชิงปริมาณของตัวแปรหลายๆตัว อย่างเช่น ปริมาณเชื้อเพลิงที่ไม่เผาไหม้ [4] และการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ อีกทั้งยังประสบปัญหาของ solution convergence แม้จะใช้การแบ่งปริมาตรควบคุมที่มีความละเอียดสูงก็ตาม [6] เนื่องจากปรากฏการณ์การเผาไหม้นั้นมีความสัมพันธ์กับความปั่นป่วนของการไหลเป็นอย่างมากทั้งในส่วนของการผสมกันของเชื้อเพลิงและ

อากาศ, อัตราการเกิดปฏิกิริยา, การถ่ายเทความร้อน ดังนั้นประสิทธิภาพของการทำนายการไหลแบบปั่นป่วนจึงมีบทบาทสำคัญในการจำลองกระบวนการเผาไหม้เป็นอย่างมาก เนื่องจาก RANS solver ไม่ได้มีการ resolve การไหลแบบปั่นป่วนโดยตรง หากแต่ใช้การจำลองการไหลแบบปั่นป่วน โดยในสมการการถ่ายเทค่าคุณสมบัติจะเพิ่มผลของการถ่ายเทเนื่องจากการไหลแบบปั่นป่วนเพิ่มเติม นอกเหนือจากการถ่ายเทแบบราบเรียบ ผลที่ได้จึงเป็นค่าเฉลี่ยของค่าคุณสมบัติที่ได้รับผลกระทบจากการถ่ายเทจากการไหลแบบปั่นป่วนบนพื้นฐานแนวคิดของแบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วนที่เลือกใช้ ด้วยเหตุนี้ RANS solver จึงมีความผิดพลาดสูงในการทำนายเชิงปริมาณของกระบวนการเผาไหม้ ในการศึกษาเชิงปริมาณของห้องเผาไหม้ที่ต้องการความแม่นยำสูงนั้นในปัจจุบันนิยมใช้แบบจำลอง LES ในการศึกษา[6] LES solver นั้นมีการ resolve การไหลแบบปั่นป่วนโดยตรงโดยใช้ Time-dependent Navier Stroke equation (Grid filtered) ใน turbulent length scale ที่ใหญ่ และใช้การ model ใน turbulent length scale เล็กลงมา จึงทำให้ LES มีการทำนายเชิงปริมาณของกระบวนการเผาไหม้ที่ดีกว่า RANS เนื่องจากทำนายผลจากการไหลแบบปั่นป่วนได้แม่นยำกว่า อย่างไรก็ตาม LES ต้องใช้ต้นทุนในการคำนวณที่สูงกว่า RANS มากและการทำ validation ของ Sub-grid turbulent model (SGS) ที่มีอยู่อย่างจำกัด แม้ว่า RANS จะมีข้อจำกัดในการทำนายเชิงปริมาณของกระบวนการเผาไหม้ แต่ในปัจจุบันก็ยังมีการใช้ RANS ในการศึกษากระบวนการเผาไหม้ในเชิงคุณภาพได้เป็นอย่างดี เนื่องจากมีต้นทุนการคำนวณที่ต่ำกว่า LES มาก เพียงแต่ผู้ใช้ต้องเข้าใจและตระหนักรู้ถึงความน่าเชื่อถือและข้อจำกัดของ RANS ในการใช้งานเป็นสำคัญ

3. ขั้นตอนการออกแบบห้องเผาไหม้

เมื่อได้เงื่อนไขการทำงานแล้วขั้นตอนต่อไปคือการออกแบบรูปทรงห้องเผาไหม้โดยที่มีวัตถุประสงค์ในการออกแบบคือเพื่อให้ได้ค่าประสิทธิภาพการเผาไหม้สูงที่สุดที่เงื่อนไขการออกแบบ ซึ่งขั้นตอนการออกแบบนั้นจะสามารถเขียนได้ตามแผนภาพที่ 2

ในห้องเผาไหม้ชั้นในจะแบ่งออกเป็นพื้นที่การเผาไหม้ 3 ส่วนหลักๆด้วยกันคือ ส่วน Primary zone, Secondary zone และ Dilution zone ซึ่งในแต่ละส่วนจะมีหน้าที่และลักษณะทางกายภาพการไหลและการเกิดปฏิกิริยาที่แตกต่างกันในรายละเอียด ซึ่งผู้ออกแบบมีหน้าที่ที่ต้องออกแบบให้แต่ละส่วนของห้องเผาไหม้ทำหน้าที่ในส่วนของตัวเองอย่างถูกต้องจึงจะได้ห้องเผาไหม้ที่มีประสิทธิภาพสูงได้ ลำดับขั้นตอนการออกแบบจะมุ่งเน้นไปที่ primary zone และความดันสูญเสียในการไหลผ่านห้องเผาไหม้เป็นอันดับแรก ส่วน secondary zone จะได้แก้ไขปรับปรุงในลำดับถัดมา และในส่วนสุดท้าย dilution zone ส่วนนี้จะต้องถูกออกแบบช่องทางร่วมกับเทอร์ไบน์ด้วยจึงเป็นส่วนที่จะทำที่หลังสุด

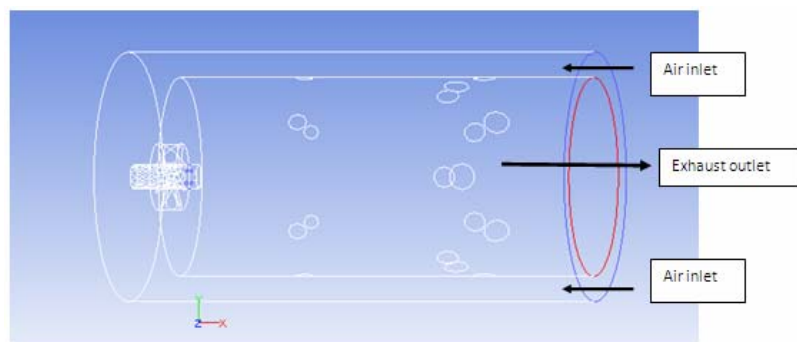
ในขั้นตอนแรกเป็นการออกแบบเบื้องต้น (Conceptual design) จะเป็นการเลือกลักษณะของห้องเผาไหม้และลักษณะการไหล การรักษาเสถียรภาพเปลวไฟใน primary zone โดยจะเป็นการออกแบบในเชิงคุณภาพและการคาดหมายเบื้องต้นถึงสิ่งที่จะเกิดขึ้นในเชิงคุณภาพมากกว่าเชิงปริมาณ ลักษณะของห้องเผาไหม้ที่ใช้ในการจำลองจะเป็นแบบ reverse flow combustor ซึ่งอากาศจากคอมเพรสเซอร์จะไหลเข้าสู่ห้องเผาไหม้ชั้นนอกโดยจะไหลในทิศทางที่สวนทางกับก๊าซร้อนจากการเผาไหม้ที่ไหลออกจากห้องเผาไหม้ชั้นในเข้าไปสู่ส่วนของเทอร์ไบน์ดังรูปที่ 4 ซึ่งอากาศที่ไหลเข้าห้องเผาไหม้ทั้งหมดจะไหลเข้าสู่ห้องเผาไหม้ชั้นในโดยไหลผ่านรูที่เจาะไว้บน liner ที่กั้นห้องเผาไหม้ชั้นนอกและชั้นใน และช่อง Swirl-vane ในส่วนบนสุดของห้องเผาไหม้

ในขั้นตอนที่สองจะเป็นการออกแบบประเมินลักษณะการไหลและมวลอากาศที่เข้าสู่ Primary

zone ตลอดจนค่าความดันสูญเสีย (combustor pressure loss) โดยใช้การไหลที่ยังไม่มีปฏิกิริยารวม (Isothermal flow) ในขั้นตอนนี้จะมีการประเมินลักษณะการไหลแบ่งออกเป็น 4 หัวข้อย่อยดังต่อไปนี้ คือ 1 ค่าความดันสูญเสีย 2 การไหลแบบ recirculation 3 การไหลแบบ swirl 4 ปริมาณอากาศที่ไหลเข้าสู่ primary zone

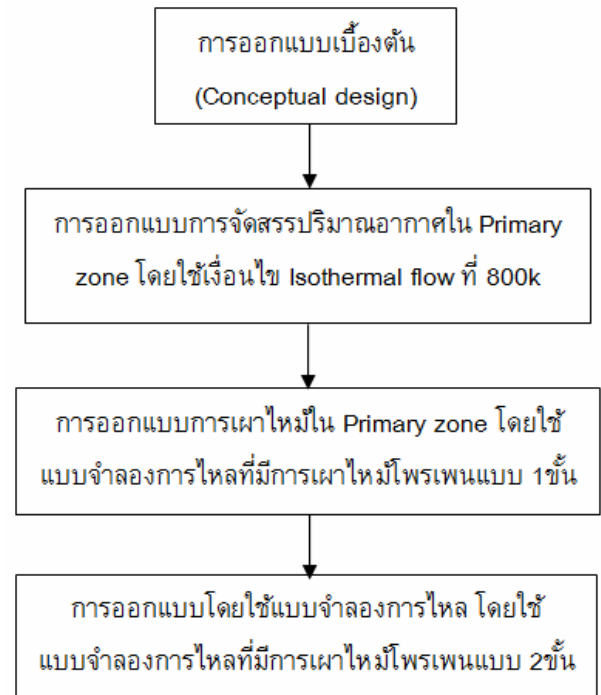
ขั้นตอนที่สามจะเป็นการออกแบบโดยใช้แบบจำลองการเผาไหม้แบบ 1 ขั้นซึ่งจะสามารถวิเคราะห์ได้ว่าเชื้อเพลิงสามารถเผาไหม้ได้หมดภายใน Primary zone หรือไม่ และลักษณะการไหลแบบ recirculation และ swirl flow มีความสามารถที่จะให้การถ่ายเทค่าคุณสมบัติได้อย่างทั่วถึงทั้งพื้นที่การเผาไหม้ใน primary zone และขนาดของพื้นที่หน้าตัดห้องเผาไหม้นั้นใหญ่พอที่จะให้เวลาในการเผาไหม้เกิดขึ้นได้หมดหรือไม่

ขั้นตอนสุดท้ายจะเป็นการออกแบบโดยใช้แบบจำลองการไหลที่มีการเผาไหม้โพเพนแบบ 2 ขั้น ซึ่งจะเพิ่มการพิจารณาปฏิกิริยาการเกิดและการบริโภค CO (Intermediate species) เพิ่มขึ้นมาจาก 1 Step global mechanism ทำให้มีความสามารถในการทำนายค่าประสิทธิภาพการเผาไหม้ได้แม่นยำขึ้นเนื่องจากสามารถทำนายการเกิดสาร CO ได้ และยังสามารถในการวิเคราะห์ปรากฏการณ์การ recovery dissociation ที่เกิดขึ้นใน Secondary zone ได้นอกจากการวิเคราะห์การเผาไหม้ใน Primary zone

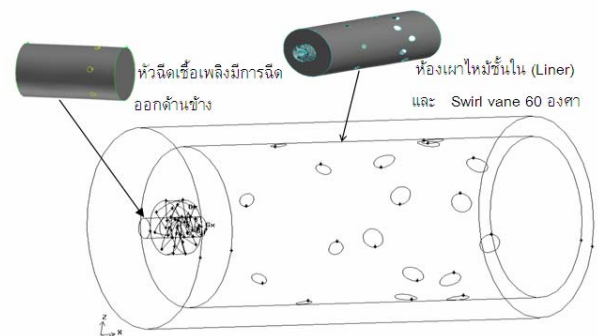


รูปที่ 4 แสดงการกำหนดเงื่อนไขขอบทางเข้าและทางออกของอากาศ

การจำลองการไหลจะมีการพิจารณาการไหลและการถ่ายเทแบบปั่นป่วนด้วยการโมเดลแบบ



รูปที่ 2 แสดงแผนภาพการออกแบบห้องเผาไหม้



รูปที่ 3 แสดงรูปทรงห้องเผาไหม้ที่กำลังออกแบบพัฒนาอยู่

Standard K-E การจำลองนี้จะพิจารณาสมการการถ่ายเททั้งหมด 12 สมการ ได้แก่ โมเมนตัมทั้ง 3

แกน สมการการถ่ายเทมวล สมการการถ่ายเทมวลสาร C_3H_8 O_2 CO_2 CO H_2O สมการพลังงาน สมการพลังงานความปั่นป่วน สมการการสูญเสียของความปั่นป่วน การ coupling สหามความเร็ว-ความดันทำแบบ SIMPLE algorithm ใช้การประมาณค่าคุณสมบัติที่พื้นผิวของปริมาตรควบคุมด้วยวิธีแบบต้นลมอันดับหนึ่ง (First order upwind scheme) โมเดลการเผาไหม้เลือกใช้การเผาไหม้โพรเพนแบบ 2 ขั้น (Propane 2 step mechanism Finite rate – Eddy dissipation) ซึ่งจะเปรียบเทียบกับอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีของการผสม (Turbulent mixing time scale) กับอัตราการเกิดปฏิกิริยาแบบอาร์เรเนียส (Arrhenius rate) แล้วจะเลือกใช้อัตราการเกิดปฏิกิริยาที่มีค่าน้อยกว่า รายละเอียดของสมการเคมีและสมการอัตราการเกิดปฏิกิริยาสามารถอ้างอิงได้จาก [1] โมเดลการเผาไหม้จะทำหน้าที่คำนวณอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีในแต่ละปริมาตรควบคุมซึ่งจะทำให้ทราบอัตราการเกิดและสูญสลายของมวลสาร (Species) ที่พิจารณา ตลอดจนการก่อกำเนิดหรือการดูดความร้อนจากปฏิกิริยาจากค่าคุณสมบัติค่าเอนทัลปีของสารต่าง ๆ ซึ่งค่าการก่อกำเนิด หรือ สูญสลายของมวลสารและพลังงานความร้อนในแต่ละปริมาตรควบคุมจะถูกคิดผ่าน source term ของสมการการถ่ายเทมวลสารและสมการพลังงานต่อไป เงื่อนไขขอบที่ใช้ (Boundary condition) ตามตารางที่ 1 และตารางที่ 2 ซึ่งได้มาจากการวิเคราะห์ทางเทอร์โมไดนามิกส์ สำหรับค่าคุณสมบัติที่ใช้ในส่วนผสม (Mixture property) สามารถอ้างอิงได้จาก [6] สำหรับรายละเอียดของแบบจำลองการไหลสามารถอ้างอิงได้จาก [1]

ตารางที่ 1 แสดงเงื่อนไขขอบทางเข้าที่ใช้ในการจำลองการเผาไหม้

อัตราการไหลอากาศ	1.33Kg/s
อุณหภูมิอากาศ	737K
สัดส่วนโดยโมลของออกซิเจน	0.21

สัดส่วนโดยโมลของไนโตรเจน	0.79
พลังงานการไหลแบบปั่นป่วน	10%
ความยาวคุณลักษณะของการไหลแบบปั่นป่วน	0.5m

อัตราการไหลเชื้อเพลิง	0.0146Kg/s
อุณหภูมิเชื้อเพลิง	300K
สัดส่วนโดยโมลของโพรเพน	1
พลังงานการไหลแบบปั่นป่วน	10%
ความยาวคุณลักษณะของการไหลแบบปั่นป่วน	0.05m

ตารางที่ 2 แสดงเงื่อนไขขอบทางออกที่ใช้ในการจำลองการเผาไหม้

ความดันสุทธิ (Total pressure)	4 atm
-------------------------------	-------

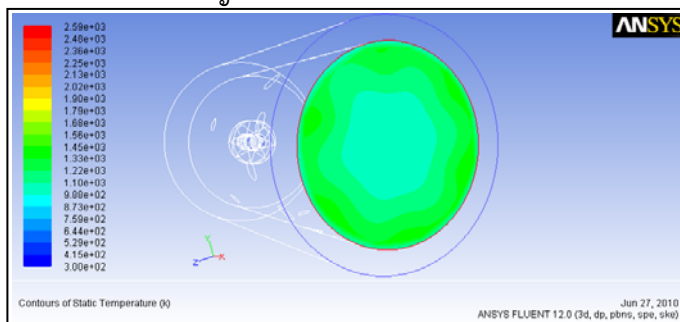
4. ผลการจำลองการไหลที่มีการเผาไหม้โพรเพนแบบ 1 ขั้น (1 step mechanism Finite rate – Eddy dissipation)

ในที่นี้จะแสดงผลการจำลองเฉพาะในกรณีของแบบจำลองการเผาไหม้โพรเพนแบบ 1 ขั้น (Propane 1 step mechanism Finite rate – Eddy dissipation) และแบบจำลองการเผาไหม้โพรเพนแบบ 2 ขั้น (Propane 2 step mechanism Finite rate – Eddy dissipation) และรูปทรงห้องเผาไหม้ที่ปรับปรุงล่าสุดแล้วเท่านั้น สำหรับรายละเอียดการพัฒนา รูปทรงห้องเผาไหม้ด้วยการจำลองการไหลในขั้นตอนอื่นที่เขียนในหัวข้อข้างต้นสามารถอ้างอิงได้จาก [1]

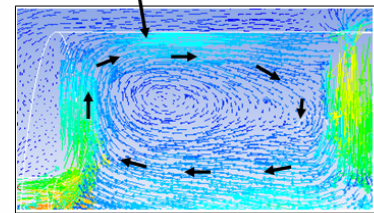
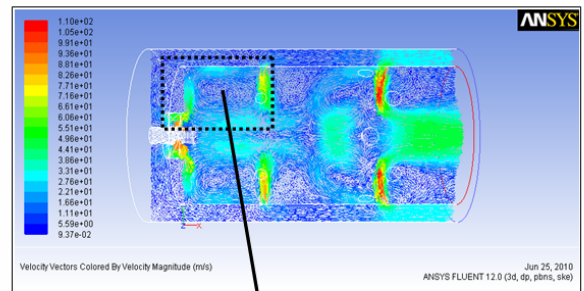
ผลการจำลองการไหลที่มีการเผาไหม้โพรเพนแบบ 1 ขั้น พบว่าปริมาณอากาศที่ไหลเข้าสู่ Primary zone มีค่าประมาณ 0.27 Kg/s ซึ่งมากกว่าปริมาณอากาศที่จะเผาไหม้เชื้อเพลิงได้หมดพอดีเล็กน้อย การไหลแบบ recirculation และ swirl flow ยังคงมีในลักษณะที่ใกล้เคียงกับในกรณีการจำลองแบบ isothermal flow ปริมาณเชื้อเพลิงที่ไม่เผาไหม้

ใน Primary zone มีค่าประมาณ 8.6×10^6 Kg/s คิดเป็นปริมาณเพียง 0.05 % ของเชื้อเพลิงที่ฉีดเข้าสู่ห้องเผาไหม้ทั้งหมด จากค่าปริมาณอากาศไหลที่เข้าสู่ Primary zone ที่ได้ใกล้เคียงกับค่าเป้าหมายและค่าเชื้อเพลิงที่ไม่เผาไหม้ใน Primary zone ที่มีค่าน้อยและด้วยลักษณะการไหลแบบ Recirculation และ Swirl flow ใน Primary zone ประกอบกับการจัดสรรปริมาณอากาศที่ถูกต้องส่งผลให้ห้องเผาไหม้สามารถที่จะรักษาอุณหภูมิที่สูงใน Primary zone ได้โดยที่มีอุณหภูมิสูงถึงกว่า 2000K ทำให้อัตราการเผาไหม้เชื้อเพลิงเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็วในบริเวณนี้ ทำให้เราสามารถสรุปได้ว่าการไหลการถ่ายเทใน Primary zone เป็นไปอย่างทั่วถึงและมีเวลามากพอ (Residence time) ที่จะให้เชื้อเพลิงและอากาศเผาไหม้ใน Primary zone ได้หมดทั้ง

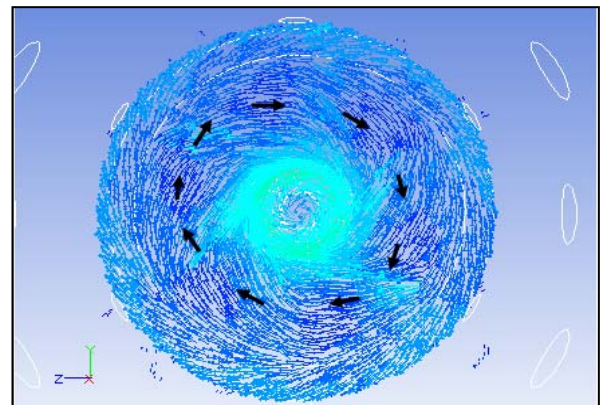
ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยที่หน้าตัดทางออกของห้องเผาไหม้มีค่าเท่ากับ 1201K ซึ่งได้ใกล้เคียงกับอุณหภูมิทางเข้าเทอร์ไบน์ที่ได้ออกแบบไว้ การกระจายอุณหภูมิพบว่าบริเวณขอบของพื้นที่หน้าตัดทางออกห้องเผาไหม้มีอุณหภูมิที่สูงกว่าตรงกลางห้องเผาไหม้อยู่มาดั่งแสดงในรูปที่ 5 เนื่องจากสนามความเร็วมีทิศทางทิศทางในแนว axial เป็นส่วนใหญ่ในบริเวณถัดจาก primary zone จึงทำให้การถ่ายเทค่าคุณสมบัติในแนวรัศมีทำได้โดยช้า อย่างไรก็ตามในขั้นตอนนี้ยังไม่ได้ออกแบบร่วมกับทางเข้าเทอร์ไบน์ การกระจายอุณหภูมิจึงยังไม่ได้เป็นประเด็นที่สำคัญในการออกแบบขั้นตอนนี้



รูปที่ 5 ภาพแสดงการกระจายอุณหภูมิทางออกของห้องเผาไหม้



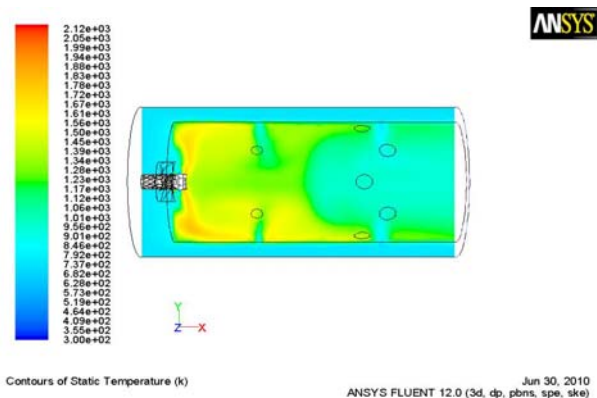
รูปที่ 6 แสดงการไหลแบบ recirculation ในบริเวณ Primary Zone ของห้องเผาไหม้



รูปที่ 7 แสดงการไหลแบบ Swirl flow บริเวณ Primary zone ของห้องเผาไหม้ชั้นใน

5. ผลการจำลองการไหลที่มีการเผาไหม้โพเพนแบบ 2 ขั้น (2 step mechanism Finite rate – Eddy dissipation)

การใช้แบบจำลองการไหลที่มีการเผาไหม้โพเพนแบบ 2 ขั้นนั้นจะเพิ่มการพิจารณาปฏิกิริยาการเกิดและการบริโภค CO (Intermediate species) เพิ่มขึ้นมาจาก 1 Step global mechanism ทำให้มีความสามารถในการทำนายค่าประสิทธิภาพการเผาไหม้ได้ดีขึ้น และยังสามารถวิเคราะห์ปฏิกิริยาในเชิงกายภาพที่เกิดขึ้นใน secondary zone ของห้องเผาไหม้ได้เป็นอย่างดี



รูปที่ 8 ภาพแสดงการกระจายอุณหภูมิในห้องเผาไหม้

จากการเผาดูปริมาณสารเชื้อเพลิงโพรเพนที่ไหลผ่านออกมาจาก Primary zone พบว่ามียังคงมีปริมาณที่น้อยอยู่ในระดับ 1.06×10^6 Kg/s ซึ่งคิดเป็นปริมาณเพียง 0.007 % ของปริมาณสารเชื้อเพลิงที่ฉีดเข้าสู่ห้องเผาไหม้ทั้งหมด อันเนื่องมาจากลักษณะการไหลและการถ่ายเทภายใน Primary zone พบทั้งการไหลแบบ Recirculation และ Swirl flow อย่างชัดเจน จึงทำให้การถ่ายเทค่าคุณสมบัติในสนามการไหลทำได้อย่างทั่วทั้งหน้าตัดของห้องเผาไหม้ดังจะสังเกตได้จากสนามการกระจายอุณหภูมิที่ทำได้ทั่วถึงใน Primary zone อีกทั้งด้วยลักษณะสนามการไหลการกักเก็บความร้อนที่ดีและมีการจัดสรรปริมาณอากาศที่เข้าสู่ Primary zone มีค่าเท่ากับ 0.27Kg/s ซึ่งเป็นปริมาณที่ใกล้เคียงกับปริมาณอากาศที่จะเผาไหม้ได้หมดพอดีโดยไม่เกิดการเจือจางความร้อน (Dilution) จากการเผาไหม้ จึงทำให้สามารถรักษาอุณหภูมิที่สูงเอาไว้ได้ที่อุณหภูมิประมาณ 1600 เคลวิน ด้วยอุณหภูมิที่สูงจึงทำให้อัตราการเผาไหม้เชื้อเพลิงมีค่าสูงส่งผลให้การเผาไหม้เชื้อเพลิงในปริมาณมากสามารถทำได้ทันภายในพื้นที่ไม่มากใน Primary zone ปริมาณ CO ที่เกิดขึ้นใน Primary zone มีปริมาณเท่ากับ 0.02 Kg/s ซึ่งเป็นปริมาณที่สูงดังที่คาดไว้เนื่องจากอุณหภูมิที่สูงใน Primary zone และการมีปริมาณออกซิเจนอย่างจำกัดเพียงพอต่อการเผาไหม้เชื้อเพลิง ทำให้

เกิดการแตกตัว (Dissociation) ของ CO₂ ในบริเวณนี้ ใน Secondary zone นั้นมีการเพิ่มปริมาณออกซิเจนจากการจัดสรรอากาศ อีกทั้งอุณหภูมิลดลงจากการเจือจางความร้อนจึงทำให้เกิดปฏิกิริยา Recover dissociation กล่าวคือ CO จะรวมตัวกับ O₂ ซึ่งจะทำให้เกิดการคายความร้อนได้บางส่วนในบริเวณนี้ อย่างไรก็ตามจากผลการจำลองเราพบว่าปริมาณ CO ที่ไหลออกจากทางออกห้องเผาไหม้คิดเป็นปริมาณ 0.00014 Kg/s หรือ 230ppm ซึ่งยังคงเป็นปริมาณที่สูง คาดว่าเป็นผลจากความไม่เหมาะสมในการวางตำแหน่งของรู dilution ซึ่งวิเคราะห์ได้จากรูปที่ 8 จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิมีการลดลงอย่างรวดเร็วใน Secondary zone เนื่องจากปริมาณอากาศจำนวนมากที่ไหลย้อนกลับมาจากรู dilution เป็นผลให้ปฏิกิริยารวมตัวถูกหยุดเนื่องจากอุณหภูมิที่ต่ำเกินไป ส่งผลให้อุณหภูมิทางออกห้องเผาไหม้มีอุณหภูมิลดลงจากกรณีที่จำลองการเผาไหม้แบบ 1 ขึ้นถึง 120 เคลวิน เนื่องจาก CO ซึ่งยังมีศักยภาพในการคายความร้อนในห้องเผาไหม้ในบริเวณ Secondary zone ปริมาณมากได้หลุดลอยออกไปจากห้องเผาไหม้ จากการคำนวณค่าประสิทธิภาพการเผาไหม้โดยคิดจากอุณหภูมิทางออกจะได้ประสิทธิภาพการเผาไหม้เท่ากับ 90%

6.สรุปผลการทดลอง

จากผลการจำลองการเผาไหม้โพรเพนแบบ 1 ขึ้นแสดงให้เห็นว่า Primary zone ของห้องเผาไหม้ทำงานได้อย่างถูกต้องกล่าวคือสามารถเผาไหม้เชื้อเพลิงได้หมดเป็นที่น่าสนใจ สอดคล้องกับผลการจำลองการเผาไหม้โพรเพนแบบ 2 ขึ้น แต่การวิเคราะห์ปรากฏการณ์จากแบบจำลองการเผาไหม้โพรเพนแบบ 2 ขึ้นได้แสดงให้เห็นว่า Secondary zone ของห้องเผาไหม้ยังทำได้ไม่ดี กล่าวคือไม่สามารถ Recover dissociation ได้อย่างสมบูรณ์ส่งผลให้มีสาร CO ในก๊าซไอเสียเป็นปริมาณมากถึง 230 ppm และจากการคำนวณค่าประสิทธิภาพการเผาไหม้โดยคิดจากอุณหภูมิทางออกจะได้ประสิทธิภาพการเผาไหม้เท่ากับ 90%

7. ข้อเสนอแนะ

ควรพัฒนาห้องเผาไหม้ต่อการปรับเปลี่ยนตำแหน่งและขนาดของรู dilution ใหม่เพื่อให้ได้การกระจายของอุณหภูมิภายใน Secondary zone ที่เหมาะสม กล่าวคือมีพื้นที่มากพอและปริมาณอากาศที่มีอุณหภูมิที่เหมาะสมกับการเกิดปฏิกิริยารวมตัวของสาร CO และลักษณะสนามการไหลที่มีการถ่ายเทอย่างทั่วถึงทั้งพื้นที่

8. เอกสารอ้างอิง

- [1] กิตติภาส วศินารมณ(2553). การวิเคราะห์ทางความร้อนและการจำลองเชิงตัวเลขของห้องเผาไหม้เครื่องยนต์กังหันก๊าซขนาดเล็ก(200 กิโลวัตต์), วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง
- [2] Clair Soares(2007), *Microturbines application for distributed energy systems*, Elsevier Inc.
- [3] Wee chabthanom(2006), *Numerical model assessment for non-reacting turbulent flow prediction in a combustor*, Master thesis submitted Mechanical engineering King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
- [4] J. Collazo, J. Porteiro , D. Patino, J.L. Miguez, E. Granada, J. Moran(2009), *Simulation and experimental validation of a methanol burner*, fuel, Vol.88, pp. 326-334
- [5] C.A.Gonzalez, K.C.Wong, S.Armfield(2008), *Computational study of a micro-gas turbine engine combustor using large eddy simulation and Reynolds averaged turbulence models*, anziam, pp. c407-c.422
- [6] FLUENT12, Fluent material database