

<http://journal.rmutp.ac.th/>

การจำลองพฤติกรรมการเผาไหม้ของเตาประหยัดแก๊ส S-10 ด้วยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

ภัทราวรรณ ชิมขม¹ อนิรุตต์ มัทธจักร^{1*} มานะ วิชางาม¹ ธนรัฐ ศรีวีระกุล¹
และ เสฏฐวรธ สัจจิตภวัตสกุล²

¹ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

² ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (MTEC)

¹ 85 ถนนโชคชัย-เดชอุดม ตำบลเมืองศรีโค อำเภวารินชำราบ จังหวัดอุบลราชธานี 34190

² 114 อุทยานวิทยาศาสตร์ประเทศไทย ถนนพหลโยธิน ตำบลคลองหนึ่ง อำเภอคลองหลวง จังหวัดปทุมธานี 12120

รับบทความ 8 กรกฎาคม 2562 แก้ไขบทความ 8 พฤษภาคม 2563 ตอรับบทความ 13 พฤษภาคม 2563

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมการเผาไหม้ของเตาประหยัดแก๊ส S-10 ด้วยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics, CFD) ในการสร้างแบบจำลองใช้โปรแกรมสำเร็จรูป Fluent 6.3 เพื่อสร้างแบบจำลอง 3 มิติ (3D Model) ที่มีขนาดเท่ากับเตาจริง โดยทำการศึกษาพฤติกรรมการเผาไหม้ของเตาที่ความดันแก๊สแอลพีจีเท่ากับ 4 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ซึ่งพฤติกรรมการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นจะถูกแสดงผลในรูปของเวกเตอร์ความเร็วและแถบสีอุณหภูมิ การจำลองจะถูกยืนยันผลกับการทดลองด้วยการวัดความเร็วของของไหลและอุณหภูมิการเผาไหม้รอบภาชนะ จากการศึกษา พบว่า ความเร็วของของไหลและการกระจายตัวของอุณหภูมิการเผาไหม้ที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของเตา ที่ได้จากแบบจำลองและการทดลองมีค่าความสอดคล้องกันโดยมีความคลาดเคลื่อนไม่เกินร้อยละ 10.35 และ 11.87 เมื่อเทียบผลความเร็วและอุณหภูมิกับการทดลองตามลำดับ แบบจำลองที่สร้างขึ้นสามารถอธิบายพฤติกรรมการไหลและการเผาไหม้ของเตาประหยัดแก๊ส S-10 ได้อย่างชัดเจน นอกจากนี้จากผลการจำลองจะแสดงให้เห็นว่า สามารถใช้แบบจำลองดังกล่าวนี้ไปประยุกต์ใช้เพื่อออกแบบและปรับปรุงประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาประหยัดแก๊ส S-10 ให้สูงขึ้นต่อไปได้ในอนาคต

คำสำคัญ : พฤติกรรมการเผาไหม้; เตาประหยัดแก๊ส S-10; พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทร: +66 4535 3309, อีเมล: anirut.m@ubu.ac.th

<http://journal.rmutp.ac.th/>

Simulation on Combustion Behavior of Gas-saving Burner S-10 by Computational Fluid Dynamics

Phattharawan Chimchom¹ Anirut Matthujak^{1*} Mana Wichangarm¹

Thanarath Sriveerakul¹ and Sedthawatt Sucharitpwatskul²

¹ Faculty of Engineering, Ubon Ratchathani University

² National Metal and Materials Technology Center, National Science and Technology Development Agency

¹ 85 Chokchai-Det Udom Rd., Mueang Si Khai Sub-district, Warin Chamrap District, Ubon Ratchathani 34190

² 114 Thailand Science Park, Phahonyothin Road, Khlong Nueng, Khlong Luang, Pathum Thani 12120

Received 8 July 2019; Revised 8 May 2020; Accepted 13 May 2020

Abstract

The objective of this research is to study the combustion behavior of a gas-saving burner S-10 using computational fluid dynamics (CFD). The simulation model was created using Fluent 6.3 in 3D-model of the same size of the burner. LPG pressure of 4 psi was released for this study. The combustion behavior was shown in temperature contour and velocity vector. The CFD results were verified by measuring the temperature around the burner head with a vessel. From the study, it was found that the CFD's results of flow velocity and combustion temperature distributions were validated with the experimental values. The CFD's result errors were less than 10.35% and 11.87%, comparing with the velocity and temperature measurement, respectively. The fluid flow and combustion behaviors can be described by this CFD model. Moreover, the CFD model of the gas-saving burner S-10 can be applied to improve the thermal efficiency of the burner in the future.

Keywords : Combustion Behavior; Gas-saving Burner S-10; CFD

* Corresponding Author. Tel.: +66 4535 3309, E-mail Address: anirut.m@ubu.ac.th

1. บทนำ

จากสถานการณ์ในปัจจุบันทั่วโลกประสบปัญหาวิกฤตการณ์ด้านพลังงาน เนื่องจากพลังงานที่ใช้มีปริมาณลดลงและราคาพลังงานยังมีมูลค่าเพิ่มสูงขึ้น ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งในการใช้พลังงานให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด จากสถิติการใช้พลังงานของกระทรวงพลังงาน [1] พบว่า ประเทศไทยมีการใช้เชื้อเพลิงปิโตรเลียมเหลวหรือแก๊สแอลพีจี (Liquefied Petroleum Gas, LPG) อย่างกว้างขวาง ซึ่งแก๊สแอลพีจีเป็นส่วนผสมของโพรเพน (Propane) และบิวเทน (Butane) หรือเป็นอย่างใดอย่างหนึ่ง เนื่องจากแก๊สแอลพีจีมีค่าความร้อนสูง เป็นเชื้อเพลิงสะอาดเผาไหม้ได้สมบูรณ์และสะดวกต่อการใช้งาน จึงเป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายทั้งในครัวเรือน ร้านอาหาร อุตสาหกรรม รถยนต์ และอื่น ๆ โดยภาคครัวเรือนจะเป็นภาคส่วนที่มีปริมาณการใช้แก๊สแอลพีจีสูงเป็นอันดับหนึ่งหรือสองของทุก ๆ ปี ซึ่งจะถูกนำไปใช้ในเตาแก๊สหุงต้มเพื่อเปลี่ยนค่าความร้อนของเชื้อเพลิงให้กลายเป็นพลังงานความร้อนในรูปแบบของเปลวไฟ แต่เนื่องจากลักษณะของเปลวไฟของเตาแก๊สหุงต้มที่ใช้เป็นแบบพุ่งชน (Impinging Flame Jet) ซึ่งจะทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนที่สูง และต้องใช้ปริมาณแก๊สแอลพีจีค่อนข้างมาก [2] แต่ด้วยลักษณะของเปลวไฟที่ให้ความร้อนแก่ภาชนะเป็นลักษณะเปิดสู่บรรยากาศ จึงทำให้เกิดการสูญเสียความร้อนเป็นจำนวนมาก ทำให้ไม่สามารถนำความร้อนมาใช้ประโยชน์ได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ อีกทั้งยังมีการสูญเสียความร้อนเป็นจำนวนมากไปกับแก๊สไอเสียโดยการพาความร้อน (Convection) และสูญเสียพลังงานความร้อนของเปลวไฟจากการแผ่รังสีความร้อน (Radiation) อีกด้วย ทำให้เตาแก๊สหุงต้มที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันมีประสิทธิภาพเชิงความร้อน (Thermal Efficiency, η_{th}) ที่ค่อนข้างต่ำเฉลี่ยร้อยละ 35 [3] ดังนั้นที่ผ่านมามีการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือนอย่างแพร่หลาย

โดยในปี ค.ศ. 1989 A. Tamir et al. [4] ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาหุงต้มที่ใช้แก๊สธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิง โดยการปรับปรุงจากหัวเตาแก๊สแบบทั่วไป (Conventional Burner, CB) ให้เป็นหัวเตาแก๊สแบบหมุนวน (Swirl Burner, SB) ซึ่งพบว่า เตา SB ที่ให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงสุดจะมีลักษณะเฉพาะคือ มุมม้วน (Inclination Angle, β) เท่ากับ 26 องศา และมุมเอียง (Swirl Angle, α) เท่ากับ 15 องศา โดยประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตา SB เพิ่มขึ้นร้อยละ 6 ซึ่งเป็นผลจากการหมุนวนของเปลวไฟ โดยแรงเฉือนจะส่งเสริมปัจจัยบวกต่าง ๆ คือระยะเวลาในการผสมของเชื้อเพลิงและอากาศ เวลาในการสัมผัสของเปลวไฟกับภาชนะ และการดึงดูดอากาศส่วนที่สอง (Secondary Air) เพิ่มขึ้น

ค.ศ. 1996 S. Jugjai et al. [5] ได้ทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพเชิงความร้อนใน Porous Radiant Recirculated Burner (PRRB) มีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือนให้มีประสิทธิภาพเชิงความร้อนเพิ่มขึ้น โดยการทำให้มีการหมุนเวียนของพลังงานความร้อนจากไอเสียที่เกิดจากการเผาไหม้ นำกลับมาอุ่นอากาศก่อนที่จะเข้าไปผสมกับเชื้อเพลิงภายในห้องเผาไหม้ (Preheat) จากการทดลอง พบว่าการอุ่นอากาศปฐมภูมิ (Primary Air) ทำให้เตา PRRB มีประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงกว่าการอุ่นอากาศทุติยภูมิ (Secondary Air) ส่งผลให้เตาแก๊สแบบ PRRB มีประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงกว่าเตาแก๊สที่ใช้กันทั่วไป

ค.ศ. 2007 U. Makmool et al. [6] ศึกษาเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือนชนิดแรงดันต่ำที่ใช้ในประเทศไทยตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 2312-2549 เป็นเตาแรงดันต่ำมีปริมาณการใช้แก๊สสูงสุดของแต่ละหัวเตาไม่เกิน 0.42 กิโลกรัมต่อชั่วโมง (kg/hr) หรือ 5.78 กิโลวัตต์ (kW) โดยทำการศึกษาด้วยวิธี Particle Image Velocimetry (PIV) เพื่อประเมินประสิทธิภาพเชิงความร้อนและวัดการปล่อย

แก๊ส CO พบว่า รูปแบบการจัดวางอุปกรณ์ การไหลของเปลวไฟเหมือนกันและปล่อยแก๊ส CO ในอัตราใกล้เคียงกัน (80–120 ส่วนในล้านส่วน (ppm)) แต่จะต่างกันที่ประสิทธิภาพเชิงความร้อน

ในปี ค.ศ. 2014 P. Boggavarapu et al. [7] ทำการศึกษาประสิทธิภาพเชิงความร้อนของหัวเตาแก๊สด้วย CFD ร่วมกับการทดลอง โดยใช้เชื้อเพลิง คือ Liquefied Petroleum Gas (LPG) และ Piped Natural Gas (PNG) ในรูปแบบ 3 มิติ รูปแบบการไหลแบบ Steady State และการถ่ายเทความร้อนที่ผิวหม้อเกิดจากการเผาไหม้ที่เตาแก๊ส ซึ่งจะอธิบายเกี่ยวกับการไหลและการถ่ายเทความร้อน ในการศึกษาได้มีการดัดแปลงโดยเพิ่ม Circular Insert และ Radiant Sheet ที่บริเวณรอบ ๆ หัวเตาแก๊ส ซึ่งจากการทำนายด้วย CFD ของหัวเตาที่มีการดัดแปลงพบว่า ที่อัตราการไหลของ LPG สูงสุด ประสิทธิภาพเชิงความร้อนจะเพิ่มขึ้นร้อยละ 4.9 ส่วนผลการทำนายของ PNG พบว่าอุณหภูมิจะลดลงเนื่องจากพลังงานของเชื้อเพลิงผสมกับอากาศน้อยกว่า จากผลการทดลอง พบว่า แบบจำลองสามารถนำมาปรับปรุงประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาแก๊สได้

ปี พ.ศ. 2556 N. Piyaprai et al. [8] ได้นำวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics, CFD) ในรูปแบบการไหลแบบปั่นป่วน k-ε ชนิด RNG คำนวณร่วมกับแบบจำลอง Species Transport แบบไม่มีปฏิกิริยาการเผาไหม้ มาช่วยศึกษาคุณลักษณะและพฤติกรรมการไหลผสมของอากาศและแก๊สเชื้อเพลิงภายในหัวเตา KB-5 ที่ค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมของแก๊สเชื้อเพลิงต่างกันจนได้ผลเป็นที่น่าพอใจ นอกจากนี้ยัง พบว่าผลการทำนายค่าการเหนี่ยวนำอากาศส่วนแรกใกล้เคียงกับผลจากการทดลอง เมื่อเปรียบเทียบผลที่ได้จากแบบจำลองกับผลการคำนวณจากสมการเชิงความร้อน มีความสอดคล้องกัน

อย่างไรก็ตามจากการศึกษาที่ผ่านมา พบว่าการพัฒนาประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาแก๊สส่วนใหญ่จะเป็นการศึกษาในด้านการทดลอง ถึงแม้ว่าจะมีการศึกษาด้วยวิธี CFD บ้างแล้วก็ตาม แต่เตาแก๊สที่ทำการศึกษาส่วนใหญ่จะเป็นเตาแก๊ส KB-5 เท่านั้น ถึงแม้ว่าจะมีการศึกษาเตาแก๊ส KB-8 และ KB-10 แต่การศึกษาวิจัยทั้งหมดที่ผ่านมาเป็นการศึกษาในด้านการทดลองเท่านั้น นอกจากนี้เตา KB-5 ยังมีการคิดค้นรูปแบบเตาแก๊สที่มีลักษณะคล้ายกับเตา KB-10 ซึ่งเรียกว่า เตาประหยัดแก๊ส S-10 [9] ดังแสดงในรูปที่ 1 และจากการศึกษาเบื้องต้น พบว่า เตาประหยัดแก๊ส S-10 มีการเผาไหม้ที่รุนแรงกว่าเตา KB-10 ทั่วไป โดยมีลักษณะเปลวไฟที่ดี ไม่มีเขม่า แสดงถึงการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ ถึงแม้ว่าจะเป็นเตาที่มีลักษณะการเผาไหม้ที่ดีก็ตาม แต่ยังไม่มีการวิจัยใดที่ทำการศึกษาพฤติกรรม การเผาไหม้ของเตาประหยัดแก๊ส S-10 ดังกล่าวเลย

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดในการศึกษาพฤติกรรมการเผาไหม้ของเตาประหยัดแก๊ส S-10 ด้วยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณร่วมกับการทดลอง เพื่ออธิบายพฤติกรรมการไหลและการเผาของเตาประหยัดแก๊ส S-10 เพื่อนำไปสู่การพัฒนาประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาต่อไปในอนาคต



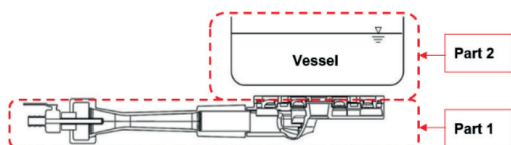
รูปที่ 1 เตาประหยัดแก๊ส S-10 [9]

2. ระเบียบวิธีวิจัย

ในงานวิจัยนี้แบ่งการศึกษออกเป็น 2 วิธี คือ การจำลองด้วยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณและการทดลอง โดยมีขั้นตอนดังนี้

2.1 พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

การจำลองด้วยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณของการศึกษานี้แบ่งขอบเขตการศึกษาเป็น 2 ส่วน (Part) คือ ส่วนที่ 1 (Part 1) เป็นการจำลองพฤติกรรมการไหลของของไหลภายในเตา กรณีไม่มีการเผาไหม้ และส่วนที่ 2 (Part 2) เป็นการจำลองพฤติกรรมการเผาไหม้ ดังแสดงในรูปที่ 2 ในการวิเคราะห์ ประมวลผล และแสดงผล ของการจำลอง Part 1 และ Part 2 จะใช้ FLUENT 6.3 โดยขั้นตอนก่อนการวิเคราะห์ ประมวลผล และแสดงผลนั้นจะทำการสร้างขอบเขตพื้นที่ กริด กำหนดเงื่อนไขขอบเขต และค่าตัวแปรต่าง ๆ กับการไหลของของไหลในส่วนที่ 1 และส่วนที่ 2 ที่แตกต่างกัน



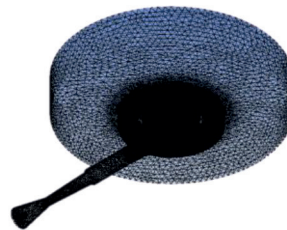
รูปที่ 2 บริเวณที่ใช้ในการศึกษาของแบบจำลองพฤติกรรมเผาไหม้ของเตาทั้ง 2 ส่วน

2.1.1 การจำลองในส่วนที่ 1 (Part1) กรณีไม่มีการเผาไหม้ (Cold Test Simulation)

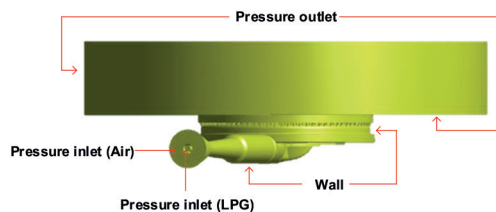
การจำลองของ Part 1 มีจุดประสงค์คือ เพื่อยืนยันผลของความเร็วที่ตำแหน่งต่าง ๆ จาก CFD และการทดลองและเพื่อนำผล Mass Fraction ของ C_3H_8 , C_4H_{10} , N_2 และ O_2 และ Mass Flow Rate ของ Mixture (air + LPG) ที่ได้จาก Part 1 บริเวณทางออกของรูหัวเตาไปกำหนดเป็น Inlet Data ของการจำลองใน Part 2

การจำลองในส่วนที่ 1 เริ่มจากการสร้างขอบเขตพื้นที่ของอากาศภายในเตาประหยัดแก๊ส S-10 ด้วยแบบจำลองในลักษณะ 3 มิติ (3D-model) ที่มีขนาดเท่ากับเตาจริง จากการศึกษาจำนวนกริดที่เหมาะสม (Grid Independent) โดยมีความละเอียดที่แตกต่างของจำนวน กริด ดังนี้ 9,497,524 Elements, 7,358,371 Elements, 4,535,482 Elements, 2,739,332 Elements และ 1,635,074 Elements

และเมื่อเปรียบเทียบผลของแบบจำลองกับการทดลองพบว่า มีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 9.02, 9.24, 9.33, 10.28 และ 11.06 ตามลำดับ รูปแบบกริดเป็นรูปทรงสามเหลี่ยมสี่ด้าน (Tetrahedral Grid) จากการศึกษาจำนวนกริดที่เหมาะสมจะเลือกใช้กริดขนาด 4,535,482 Elements ดังแสดงในรูปที่ 3ก)



ก) กริดที่ใช้ในการศึกษา (Mesh)



ข) เงื่อนไขขอบเขต (Boundary Conditions)

รูปที่ 3 กริดที่ใช้ในการศึกษา และเงื่อนไขขอบเขตการคำนวณส่วนที่ 1 (Part1)

สำหรับเงื่อนไขขอบเขตของส่วนที่ 1 กำหนดให้ทางเข้าในส่วนของ LPG กำหนดเป็น Pressure Inlet (LPG) คือ 4 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว (psi) เท่ากับความดันที่ใช้ในการทดลอง ส่วนบริเวณ Primary Air และบริเวณ Secondary Air กำหนดเป็น Pressure Inlet (Air) ปากเตาด้านบนกำหนดเป็น Pressure Outlet และบริเวณหัวเตากำหนดเป็น Wall แบบจำลองความปั่นป่วนแบบ RNG K-ε วิเคราะห์ร่วมกับ Species Transport Model ซึ่งเป็นการไหลแบบผสมและไม่มีการทำปฏิกิริยากัน และไม่มีการเผาไหม้ กำหนดอัตราส่วนโพรเพน:บิวเทน เป็น 70:30 [9] และพิจารณาการไหลแบบคงที่ (Steady State) สำหรับเงื่อนไขการคำนวณของ CFD แสดงในรูปที่ 3 ข) และตารางที่ 1

ตารางที่ 1 เงื่อนไขขอบเขตการคำนวณส่วนที่ 1

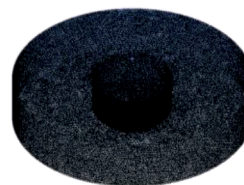
BOUNDARY CONDITION	MODEL
INLET BOUNDARY CONDITION	AIR GAUGE PRESSURE INLET = 0 Pa
	LPG GAUGE PRESSURE INLET = 4 psi
OUTLET BOUNDARY CONDITION	PRESSURE OUTLET (AIR GAUGE, PRESSURE OUTLET = 0 Pa)
SOLVER	PRESSURE BASE
TIME	STEADY STATE
NEAR-WALL TREATMENT METHOD	STANDARD WALL FUNCTION
TURBULENCE MODEL	RNG K- ϵ MODEL
OTHER	SPECIES TRANSPORT
PROPANE: BUTANE	70 : 30

2.1.2 การจำลองในส่วนที่ 2 (Part2) กรณีมีการเผาไหม้ (Hot Test Simulation)

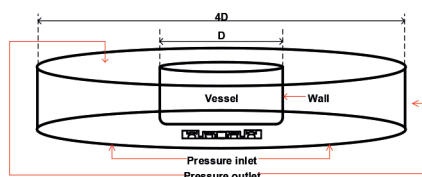
การจำลองของส่วนที่ 2 มีจุดประสงค์คือ เพื่อยืนยันผลของอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่าง ๆ จาก CFD กับ การทดลอง

การจำลอง Part 2 เริ่มจากการสร้างขอบเขตพื้นที่ของอากาศรอบ ๆ หัวเตาประหยัดแก๊ส S-10 และหม้อของแบบจำลองในลักษณะ 3 มิติ (3D - Model) ที่มีขนาดเท่ากับเตาจริง จากการศึกษาจำนวนกริดที่เหมาะสม (Grid Independent) โดยมีความละเอียดที่แตก ต่างของจำนวน กริด ดังนี้ 5,846,432 Elements, 4,138,935 Elements, 2,965,681 Elements, 1,857,495 Elements และ 998,482 Elements และเมื่อเปรียบเทียบผลของแบบจำลองกับการทดลอง พบว่า มีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 11.01, 11.19, 11.25, 12.38 และ 13.06 ตามลำดับ รูปแบบกริดเป็นรูปทรงสามเหลี่ยม

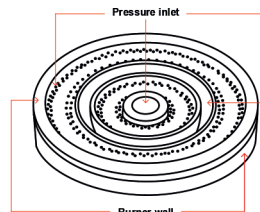
สี่ด้าน (Tetrahedral Grid) จากการศึกษาจำนวนกริดที่เหมาะสมจะเลือกใช้กริดขนาด 2,965,681 elements ดังแสดงในรูปที่ 4 ก)



ก) Mesh



ข) Boundary Conditions



ค) Burner head

รูปที่ 4 กริดที่ใช้ในการศึกษา และเงื่อนไขขอบเขตการคำนวณ Part 2

สำหรับเงื่อนไขขอบเขตของส่วนที่ 2 กำหนดให้ขอบเขตของอากาศรอบ ๆ หัวเตาเป็น Pressure Outlet หม้อเหนือหัวเตามีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง (D) 450 มิลลิเมตร (หม้อเบอร์ 45) และมีความสูงเท่ากับระดับน้ำในหม้อที่ใช้ในการทดลองคือ 210 มิลลิเมตร กำหนดให้ผนังหม้อมีอุณหภูมิคงที่เท่ากับ 395 เคลวิน เนื่องจากงานนี้เป็นงานที่เกี่ยวข้องกับการเผาไหม้ซึ่งจะมีการกระจายอุณหภูมิที่บริเวณหัวเตาระยะที่ห่างจากหม้อจึงสำคัญ งานวิจัยนี้กำหนดระยะห่างจากผนังหม้อเท่ากับ 4D แสดงรูปที่ 4 ข) สำหรับผนังของ

ห้เตากำหนดเป็น Wall และกำหนดรูห้เตาเป็น Mass Flow Inlet ซึ่ง Mass Fraction ของ C_3H_8 , C_4H_{10} , N_2 และ O_2 และ Mass Flow Rate ของ LPG ได้จาก ผลการคำนวณ CFD ของ Part 1 สำหรับเงื่อนไข การคำนวณของ CFD ทำการกำหนดค่าเงื่อนไขขอบเขต จากงานวิจัยของ Boggavarapu และคณะ [7] แสดง ในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 เงื่อนไขขอบเขตการคำนวณส่วนที่ 2

BOUNDARY CONDITION	MODEL
INLET BOUNDARY CNDITION	MASS FLOW INLET (Part 1)
	MASS FRACTION OF C_3H_8 , C_4H_{10} , N_2 and O_2 (Part 1)
OUTLET BOUNDARY CONDITION	PRESSURE OUTLET (AIR GAUGE, PRESSURE OUTLET = 0 Pa)
SOLVER	PRESSURE BASE
TIME	STEADY STATE
NEAR-WALL TREATMENT METHOD	STANDARD WALL FUNCTION
TURBULENCE MODEL	STANDARD K-ε MODEL
RADIATION MODEL	DISCRETE ORDINATES (DO) RADIATION MODEL
COMBUSTION MODEL	EDDY DISSIPATION MODEL

โดยทั่วไปสมการที่เกี่ยวข้องในการแก้ปัญหาคา รไหลของของไหลจะประกอบด้วย สมการอนุรักษ์มวล (Mass-conservation Equation), สมการอนุรักษ์ พลังงาน (Energy Conservation Equation), และ สมการอนุรักษ์โมเมนตัม (Momentum Conservation Equation) ในการคำนวณ ดังนี้

1. สมการอนุรักษ์มวล

ในกรณีไหลอยู่ในสภาวะคงที่ $\frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$

$$\frac{\partial \rho u}{\partial x} + \frac{\partial \rho v}{\partial y} + \frac{\partial \rho w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

โดยที่

ρ คือ ความหนาแน่น

u คือ ความเร็วของของไหลในแนวแกน x

v คือ ความเร็วของของไหลในแนวแกน y

w คือ ความเร็วของของไหลในแนวแกน z

2. สมการอนุรักษ์พลังงาน

ในกรณีสภาวะคงที่ $\frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$

$$\begin{aligned} u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} + \sigma(T_s^4 - T_s^\infty) \\ = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + q'' \end{aligned} \quad (2)$$

โดยที่

$q'' = \dot{W}_A \Delta H$ คือ พลังงานที่เกิดจากปฏิกิริยาเคมีต่อ หน่วยปริมาตรของของไหล

$\alpha = \frac{k}{\rho c}$ คือ ค่าสภาพการแพร่กระจายความร้อน ของวัสดุ

$\sigma(T_s^4 - T_s^\infty)$ คือ สมการการแผ่รังสีความร้อน

3. สมการอนุรักษ์โมเมนตัม

ในกรณีสภาวะคงที่ $\frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$

$$\begin{aligned} \rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho v \frac{\partial u}{\partial y} + \rho w \frac{\partial u}{\partial z} \\ = -\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right) \end{aligned} \quad (3)$$

โดยที่

ρ คือ ความหนาแน่น

u คือ ความเร็วของของไหลในแนวแกน x

v คือ ความเร็วของของไหลในแนวแกน y

w คือ ความเร็วของของไหลในแนวแกน z

4. สมการอนุรักษ์มวลย่อย

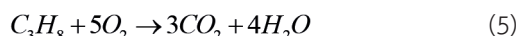
เนื่องจากการถ่ายเทพลังงานและการถ่ายโอนมวลที่มีความคล้ายกัน ดังนั้นด้วยวิธีการเดียวกันกับการหาสมการอนุรักษ์พลังงาน, สมการอนุรักษ์มวลย่อยดังสมการที่ 4

$$\rho u \frac{\partial Y_A}{\partial x} + \rho v \frac{\partial Y_A}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} \rho D_A \frac{\partial Y_A}{\partial y} + \dot{W}_A^m \quad (4)$$

5. สมการปฏิกิริยาการเผาไหม้

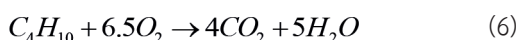
รูปแบบปฏิกิริยาเคมีสำหรับการเผาไหม้ที่มีสารประกอบของโพรเพน (Propane) และ สารประกอบบิวเทน (Butane) ดังต่อไปนี้

สารประกอบโพรเพน (Propane)



$$R_1 = \frac{d[C_3H_8]}{dt} = -8.6 \times 10^{11} \exp \left[\frac{-30}{R_u T} \right] [C_3H_{10}]^{0.15} [O_2]^{1.65}$$

สารประกอบบิวเทน (Butane)

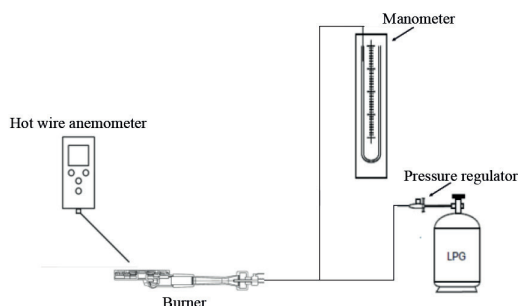


$$R_1 = \frac{d[C_4H_{10}]}{dt} = -7.4 \times 10^{11} \exp \left[\frac{-30}{R_u T} \right] [C_4H_{10}]^{0.15} [O_2]^{1.60}$$

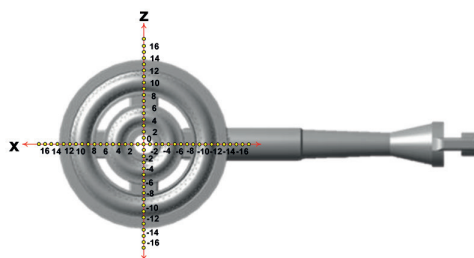
2.2 การทดลอง

2.2.1 การวัดความเร็วของของไหล

การวัดความเร็วของของไหลโดยไม่มีการเผาไหม้ทำได้โดยใช้เครื่องวัดความเร็วแบบ Hot-wire Anemometer ยี่ห้อ Testo-435 โดยมีความคลาดเคลื่อน 0.03 เมตรต่อวินาที หรือร้อยละ 5 ของค่าที่อ่านได้ ในการทดลองเริ่มโดยการเปิดแก๊สที่ความดัน 4 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว โดยที่ไม่มีการจุดติดไฟและวัดความเร็วของของไหลที่ตำแหน่งต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 5 โดยทำการวัด 3 ซ้ำ และนำผลที่ได้เปรียบเทียบกับผลการจำลองในส่วนที่ 1



ก)



ข)

รูปที่ 5 ก) แผนผังชุดทดลองการวัดความเร็วของของไหล ข) ตำแหน่งวัดความเร็วของของไหล (หน่วย: เซนติเมตร)

2.2.2 การวัดอุณหภูมิ

ก่อนการทดสอบต้องจุดเตาแก๊สโดยเปิดลิ้นควบคุมแก๊สที่ตำแหน่งเปลวไฟสูงสุดเป็นเวลา 15 นาที เพื่อจัดตั้งที่เคลือบหรือตกแต่งเตา ซึ่งอาจมีผลกระทบต่อ การทดสอบ จากนั้นตั้งเตาไว้ให้เย็นลงจนมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิห้องแล้วจึงนำไปทดสอบ ดังนี้

1. ติดตั้งวัสดุและอุปกรณ์ที่จำเป็นเพื่อใช้ในการทดสอบ เช่น ฐานรองภาชนะ, เตา S-10, ถังแก๊สแอลพีจี (LPG), ภาชนะ (หม้อเบอร์ 45) ดังแสดงในรูปที่ 6ก)

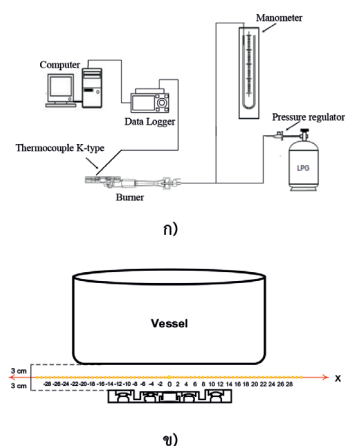
2. ชั่งน้ำหนักของน้ำเพื่อใช้ในการทดลองให้น้ำหนัก 30.6 กิโลกรัม ใส่ในภาชนะพร้อมทั้งวัดอุณหภูมิของน้ำก่อนนำไปต้ม

3. ปรับอัตราการป้อนแก๊สแอลพีจีที่ความดัน 4 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ที่ใช้ในการศึกษา

4. ต้มน้ำจนกระทั่งน้ำมีอุณหภูมิสูงประมาณ 90 องศาเซลเซียส

5. ทำการวัดอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 6 ข) โดยใช้ Thermocouple K-type ซึ่งมีความคลาดเคลื่อน ± 1.1 องศาเซลเซียส หรือร้อยละ 0.4 ของค่าที่อ่านได้ ในการวัดอุณหภูมิ และใช้ Data Logger ในการบันทึกข้อมูล

6. นำผลที่ได้จากการทดลองมาเปรียบเทียบกับแบบจำลองในส่วนที่ 2



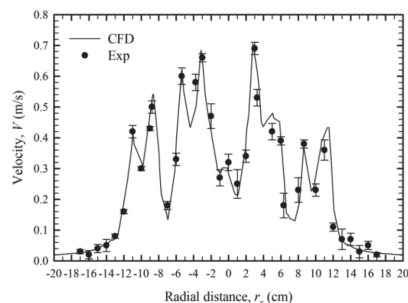
รูปที่ 6 ก) แผนผังชุดทดลองการวัดอุณหภูมิ

ข) ตำแหน่งในการวัดอุณหภูมิ (หน่วย: เซนติเมตร)

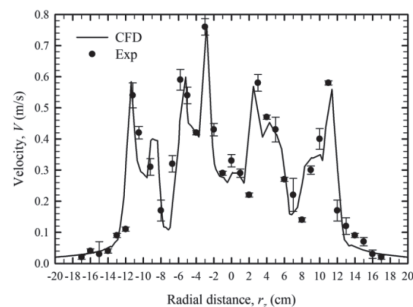
3. ผลจากการศึกษา

3.1 การเปรียบเทียบความเร็วของของไหลบริเวณรูทางออกหัวเตา

รูปที่ 7 แสดงการเปรียบเทียบความเร็วของของไหลที่ตำแหน่งต่าง ๆ ในแนวแกน x และ z (ดังในรูปที่ 5ข) พบว่า ความเร็วบริเวณใกล้กับขอบด้านข้างของเตาทั้งหัวเตาด้านในและด้านนอกจะมีค่าค่อนข้างต่ำ และความเร็วค่อย ๆ เพิ่มขึ้นบริเวณที่ใกล้รูทางออกหัวเตา ความเร็วเฉลี่ยสูงสุดจะอยู่บริเวณรูทางออกทางด้านในสุดของเตาโดยมีความเร็วสูงสุดเท่ากับ 0.72 เมตรต่อวินาที, 0.76 เมตรต่อวินาที ในแนวแกน x และ z ตามลำดับ ในขณะที่ความเร็วสูงสุดที่ได้จากการทดลองมีค่าเท่ากับ 0.7 เมตรต่อวินาที และ 0.76 เมตรต่อวินาที ในแนวแกน x และ z ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่า ความเร็วของของไหลที่ได้จากแบบจำลองมีความสอดคล้องกับผลการทดลอง โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยไม่เกินร้อยละ 8.31 และ 10.35 ในแนวแกน x และ z ตามลำดับ

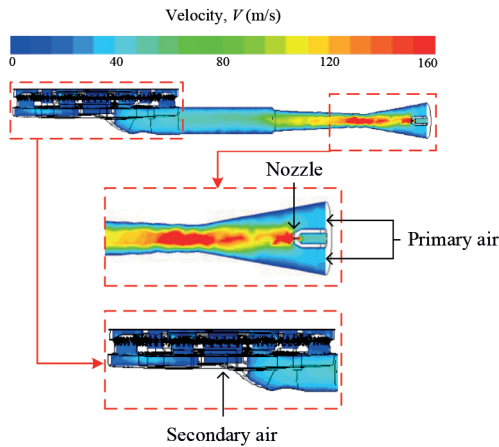


ก) แกน X

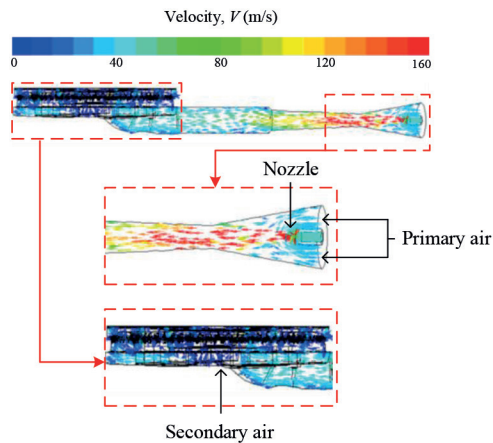


ก) แกน Y

รูปที่ 7 การเปรียบเทียบความเร็วของของไหลที่ตำแหน่งต่าง ๆ



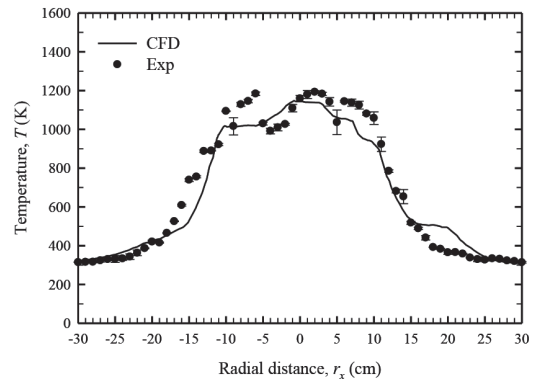
รูปที่ 8 แถบสีแสดงความเร็วที่ระนาบกึ่งกลางเตา



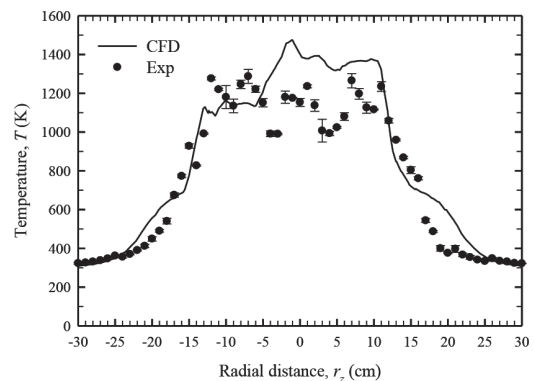
รูปที่ 9 เวกเตอร์แสดงความเร็วที่ระนาบกึ่งกลางเตา

รูปที่ 8 และรูปที่ 9 แสดงแถบสีและเวกเตอร์ความเร็วที่ระนาบกึ่งกลางเตา ตามลำดับ พบว่า การกระจายตัวของความเร็วที่ตำแหน่งต่าง ๆ โดยบริเวณหัวฉีดมีความเร็วสูงกว่าตำแหน่งอื่น ๆ เนื่องจากแก๊สแอลพีจีถูกปล่อยจากถังแก๊สด้วยแรงดันสูงผ่านหัวฉีด จึงทำให้เกิดความเร็วสูงบริเวณหัวฉีด (Nozzle) ซึ่งมีความเร็วเท่ากับ 161.31 เมตรต่อวินาที จากนั้นก็จะเหนี่ยวนำอากาศบริเวณ Primary Air เข้ามาผสมในท่อผสมก่อนเพื่อใช้ในการกระบวนการเผาไหม้ และบริเวณห้องเผาไหม้ยังมีช่องสำหรับ Secondary Air เพื่อช่วยเพิ่มอากาศในกระบวนการเผาไหม้ให้ดียิ่งขึ้น

3.2 การเปรียบเทียบอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่าง ๆ



ก) แกน X

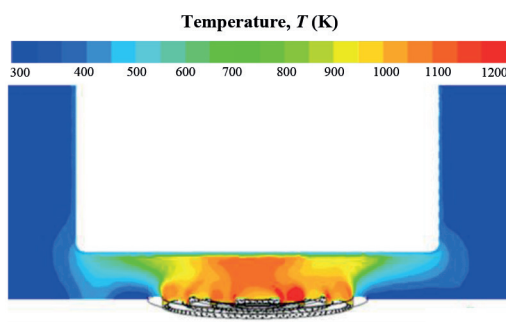


รูปที่ 10 การเปรียบเทียบอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่าง ๆ

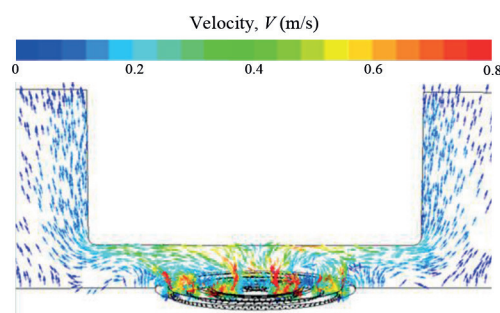
รูปที่ 10 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่าง ๆ ในแนวแกน x และ z (ดังในรูปที่ 6 ก)) พบว่า การกระจายตัวของอุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลองมีความสอดคล้องกับการทดลองจริง โดยอุณหภูมิบริเวณหัวเตาค่อนข้างจะใกล้เคียงกัน และค่อย ๆ ลดลงตามระยะทางที่ออกห่างจากหัวเตาโดยมีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยไม่เกินร้อยละ 10.63 และ 11.87 ในแนวแกน x และ z ตามลำดับ

รูปที่ 11 แสดงแถบสีแสดงอุณหภูมิที่ระนาบกึ่งกลางเตา พบว่า การกระจายตัวของอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่าง ๆ จากผลของแบบจำลอง โดยมีอุณหภูมิ

สูงจะอยู่บริเวณหัวเตาและค่อย ๆ ลดลงตามระยะห่างจากหัวเตา โดยอุณหภูมิสูงสุดจาก CFD มีค่าเท่ากับ 1,438.3 เคลวิน และ 1,395.05 เคลวิน ในขณะที่อุณหภูมิสูงสุดที่ได้จากการทดลองที่ตำแหน่งใกล้เคียงกันมีค่าเท่ากับ 1333.2 เคลวิน และ 1,317.1 เคลวิน ในแนวแกน x และ z ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 10



รูปที่ 11 แพลตแสดงอุณหภูมิที่ระนาบกึ่งกลางเตา



รูปที่ 12 เวกเตอร์แสดงความเร็วที่ระนาบกึ่งกลางเตา

รูปที่ 12 แสดงเวกเตอร์แสดงความเร็วที่ระนาบกึ่งกลางเตา พบว่า ของผสมของแก๊สแอลพีจีและอากาศที่ไหลออกจากรูของหัวเตา จะมีความเร็วสูงสุดเท่ากับ 0.76 เมตรต่อวินาที โดยของผสมดังกล่าวจะเกิดการเผาไหม้และจะดึงอากาศส่วนที่สอง (Secondary Air) เข้ามาช่วยในการเผาไหม้ในบริเวณหัวเตา ซึ่งเป็นการส่วนให้เกิดการเผาไหม้สมบูรณ์มากขึ้น นอกจากนี้จะพบการเกิด Vortex ที่บริเวณหัวเตา ซึ่งเป็นที่ทราบกันดีว่าการเกิด Vortex จะช่วยส่งเสริมการเผาไหม้

ให้เกิดการเผาไหม้ที่รุนแรงซึ่งสอดคล้องกับการเผาไหม้ที่รุนแรงของเตาประหยัดแก๊ส S-10 นอกจากนี้ Vortex จะยังช่วยส่งเสริมการถ่ายเทความร้อนไปยังภาชนะอีกด้วย

4. สรุปผลการศึกษา

จากการศึกษาพฤติกรรมของการเผาไหม้ของเตาประหยัดแก๊ส S-10 ด้วยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณร่วมกับการทดลอง ที่ความดัน 4 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว สามารถสรุปได้ดังนี้

1. จากการยืนยันผลการจำลองพบว่า แบบจำลองมีความถูกต้องและน่าเชื่อถือ โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยไม่เกินร้อยละ 10.35 เมื่อเปรียบเทียบกับความเร็วที่ได้จากการทดลอง และมีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยไม่เกินร้อยละ 11.87 เมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิที่ได้จากการทดลอง

2. แบบจำลองสามารถใช้ในการอธิบายพฤติกรรมของไหลและการเผาไหม้ของเตาประหยัดแก๊ส S-10 ได้อย่างชัดเจน

3. แบบจำลองของเตาประหยัดแก๊ส S-10 สามารถนำไปประยุกต์ใช้เพื่อออกแบบและปรับปรุงประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาประหยัดแก๊ส S-10 ให้สูงขึ้นต่อไปได้ในอนาคต

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ นายณัฐพล ชูจิตร, นายพิทยาธ กาลพัฒน์, นายธนาธิป ทองเปราะ นักศึกษาปีที่ 4 ของห้องปฏิบัติการการประยุกต์ใช้ลำเจ็ทและการเผาไหม้ ที่ช่วยดำเนินงานวิจัย และขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี และโครงการยกระดับสมรรถนะนักวิจัยไทยเพื่อสร้างขีดความสามารถในการแข่งขัน มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ประจำปีงบประมาณ 2562 ที่ให้ทุนสนับสนุนการวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Energy Policy and Planning office (EPPO) Ministry of Energy. (2018). Energy statistics of Thailand 2018. [Online]. Available: <https://goo.gl/GCGy2G>
- [2] L.L. Dong, C.S. Cheung and C.W. Leung, “Heat Transfer from an Impinging Premixed Butane/Air Slot Flame Jets,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 45, no. 5, pp. 979 – 992, Feb. 2002.
- [3] W. Trewetaskson, “Efficiency Improvement of LPG Domestic Cooking Stove,” M.S. thesis, Dept. Chemical. Eng., King Mongkut’s University of Technology Thonburi, Bangkok, Thailand, pp. 1-92, 1998.
- [4] A. Tamir, I. Elperin and S. Yotzer, “Performance Characteristics of a Gas Burner with a Swirling Central Flame,” *Energy*, vol. 14, no. 7, pp. 373–382, 1989.
- [5] S. Jugjai and S. Sanitjai, “Parametric Studies of Thermal Efficiency in a Proposed Porous Radiant Recirculated Burner (PRRB): A Design Concept for the Future Burner,” *International Energy Journal*, vol. 18, no. 2, pp. 97–111, Dec. 1996.
- [6] U. Makmool, S. Jugjai, S. Tia, P. Vallikul and B. Fungtammasan, “Performance and analysis by particle image velocimetry (PIV) of cooker-top burners in Thailand,” *Energy*, vol. 32, no. 10, pp. 1986 – 1995, 2007.
- [7] P. Boggavarapu, B. Ray and R. V. Ravikrishna, “Thermal Efficiency of LPG and PNG-fired burners: Experimental and numerical studies,” *Fuel*, vol. 166, pp. 709 – 715, 2014.
- [8] N. Piyaprai, T. Sriveerakul and A. Namkhat, “CFD Simulation for Air-Fuel Gas Mixing Flow in Mixing Tube of a KB-5 Cooking Burner,” in *Proceeding of 27th Conference of Mechanical Engineering Network of Thailand*, Chon Buri, Thailand, 2013, Paper no. CST-2032.
- [9] PTT Public Company Limited. (2012). What is natural gas?. [Online]. Available: <https://goo.gl/2mrw7S>