

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

การศึกษาพฤติกรรมการเผาไหม้ของเตาแก๊สแรงดันต่ำ แบบเวอร์ติคอลพอร์ทด้วยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

อนิรุตต์ มัทธจักร^{1*} ถนัดกิจ ชะนะกุล¹ มานะ วิชางาม¹ ธนรัฐ ศรีวีระกุล¹
บงกช จันทมาส¹ เสฏฐวรรธ สุจริตภวัตสกุล² และ สุทธิศักดิ์ พงศ์ธนาพาณิช³

¹ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

² ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (MTEC)

³ วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

¹ 85 ถนนโชคชัย-เดชอุดม ตำบลเมืองศรีไค อำเภวารินชำราบ จังหวัดอุบลราชธานี 34190

² 114 อุทยานวิทยาศาสตร์ประเทศไทย ถนนพหลโยธิน ตำบลคลองหนึ่ง อำเภอคลองหลวง จังหวัดปทุมธานี 12120

³ 1518 ถนนประชาราษฎร์ 1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพมหานคร 10800

รับบทความ 9 กรกฎาคม 2562 แก้ไขบทความ 29 เมษายน 2563 ตอรับบทความ 30 เมษายน 2563

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมการเผาไหม้ของเตาแก๊สแรงดันต่ำแบบเวอร์ติคอลพอร์ทโดยใช้วิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics, CFD) ซึ่งแบบจำลองถูกสร้างขึ้นโดยใช้โปรแกรม Fluent 6.3 โดยได้ทำการศึกษาและสร้างขอบเขตพื้นที่ของแบบจำลองในลักษณะ 3 มิติ (3D - Model) ที่มีขนาดเท่ากับเตาที่ใช้งานจริง ซึ่งผลที่ได้จากแบบจำลองจะถูกยืนยันผลด้วยการทดลองจากการวัดอุณหภูมิที่จุดต่าง ๆ รอบหัวเตาและภาชนะ นอกจากนี้ยังศึกษาเปรียบเทียบผลการจำลองระหว่างเตาแก๊สแบบเวอร์ติคอลพอร์ทแบบดั้งเดิม (Conventional Burner) ซึ่งมีมุมเอียงเท่ากับ 90 องศา และมุมเอียงเท่ากับ 90 องศา (CB-S90I90) และเตาแก๊สแบบเวอร์ติคอลพอร์ทที่มีเปลวไฟแบบหมุนวน (Swirl Burner, SB) ที่มีมุมเอียงและมุมเอียงของรูหัวเตาแก๊สต่างกัน 2 รูปแบบคือ เตา SB-S90I13 และเตา SB-S30I90 จากการศึกษา พบว่าอุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลองของเตา CB-S90I90 มีอุณหภูมิใกล้เคียงกับการทดลอง โดยมีค่าคลาดเคลื่อนสูงสุดไม่เกินร้อยละ 9 และจากแบบจำลอง พบว่า เตา SB-S90I13 มีอุณหภูมิและ Heat Flux สูงกว่าเตา CB-S90I90 โดยมีค่าสูงสุดเท่ากับ 1,445 เคลวิน และ 5,291 วัตต์ต่อตารางเมตร ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่า เตา SB-S90I13 มีพฤติกรรมการเผาไหม้และการถ่ายเทความร้อนสู่ภาชนะที่ดีกว่าเตา CB-S90I90 จึงส่งผลให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตา SB-S90I13 ดีกว่าเตา CB-S90I90 และโดยคิดเป็นร้อยละของการประหยัดเท่ากับ 6.93

คำสำคัญ : พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ; เตาแก๊สแบบเวอร์ติคอลพอร์ท; การไหลแบบหมุนวน; พฤติกรรมการเผาไหม้

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

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

A Study on Influence of Swirl Angle of Burner Port on Behavior of Heat Transfer to a Vessel of High-pressure Cooking Stove by Computational Fluid Dynamics

Anirut Matthujak^{1*} Thanatkit Chanakul¹ Mana Wichangarm¹
Thanarath Sriveerakul¹ Bongkot Chanthamas¹ Sedthawatt Sucharitpwatskul²
and Sutthisuk Phongthanapanich³

¹ Faculty of Engineering, Ubon Ratchathani University

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

³ College of Industrial Technology, King Mongkut's University of Technology North Bangkok

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

³ 1518 Pracharat 1 Road, Wongsawang Sub-district, Bang Sue District, Bangkok 10800

Received 9 July 2019; Revised 29 April 2020; Accepted 30 April 2020

Abstract

The objective of this research is to study the combustion characteristic of a low-pressure vertical port burner using computational fluid dynamics (CFD). The simulation model was created using Fluent 6.3 in 3D-model of the same size of the burner. The CFD results were verified by measuring the temperature around the burner head and a vessel. Moreover, the results of conventional vertical port burner, having the swirl angle of 90° and the inclination angle of 90° (CB-S90I90) and two swirl port burners (SB), being SB-S90I13 and SB-S30I90, were compared. The temperatures obtained from CFD and experiments were similar, which the error was less than 9%. From the CFD's results, the temperature and heat flux of the SB-S90I13 burner were higher than those of the CB-S90I90 burner. The maximum temperature and heat flux of SB-S90I13 burner were 1,445 K and 5,291 W/m², respectively. It was implied that the combustion characteristic and heat transfer to the vessel of SB-S90I13 burner was better than that of CB-S90I90 burner. It was resulted that the thermal efficiency of SB-S90I13 burner was better than that of CB-S90I90 burner, which was the percentage energy saving of 6.93%.

Keywords : CFD; Vertical Port Burner; Swirling Flow; Combustion Characteristics

* Corresponding Author. Tel.: +6645 353 309, E-mail: anirut.m@ubu.ac.th

1. บทนำ

ในปัจจุบันทั่วโลกประสบปัญหาสถานการณ์วิกฤติด้านพลังงาน เนื่องจากพลังงานที่ใช้มีปริมาณน้อยลง และจะหมดลงในเวลาอันใกล้หากไม่มีการพบแหล่งพลังงานใหม่ นอกจากนี้ ราคาของพลังงานยังสูงค่าเพิ่มสูงขึ้นอีกด้วย ดังนั้น จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีการใช้พลังงานอย่างคุ้มค่าหรือใช้พลังงานให้มีประสิทธิภาพที่สุด ซึ่งเป็นการลดการใช้พลังงานนั่นเอง นอกจากนี้ปัญหาด้านสิ่งแวดล้อม ปัญหามลพิษก็เป็นอีกปัญหาหนึ่งที่ทั่วโลกให้ความสนใจ และเป็นปัญหาที่เกี่ยวข้องกับการใช้พลังงานโดยตรงซึ่งเกิดจากการปลดปล่อย ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) หรือที่เรียกกันทั่วไปว่า ก๊าซเรือนกระจก เป็นจำนวนมาก ซึ่งเป็นก๊าซที่เป็นผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง ไม่ว่าจะเป็นเชื้อเพลิงชีวมวลหรือเชื้อเพลิงปิโตรเลียม โดยเฉพาะอย่างยิ่งการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่เป็นผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียมซึ่งมีการใช้อย่างกว้างขวาง เป็นสาเหตุหลักของการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ดังนั้น หากใช้พลังงานให้มีประสิทธิภาพ นอกจากจะสามารถลดปัญหาด้านวิกฤตพลังงานแล้วยังช่วยลดปัญหาโลกร้อนที่ประสบอยู่ในปัจจุบันอีกด้วย [1]

จากการจัดหาและความต้องการการใช้แก๊ส LPG ของประเทศไทยในปี 2556-2560 [1] พบว่า ภาคครัวเรือนมีการใช้ LPG สูงที่สุดคิดเป็นร้อยละ 35 ของปริมาณการใช้ทั้งหมดในประเทศ รองลงมาคือ ภาคปิโตรเลียมร้อยละ 32 ภาคการขนส่งร้อยละ 22 และภาคอุตสาหกรรมร้อยละ 10 ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่า ภาคครัวเรือนเป็นภาคส่วนที่ใช้แก๊ส LPG ในอัตราส่วนที่มีแนวโน้มสูงขึ้นทุก ๆ ปี ดังนั้น หากต้องการลดการใช้แก๊ส LPG ในประเทศไทย ภาคครัวเรือนจึงควรได้รับความสนใจก่อนเป็นอันดับแรก ซึ่งหากสามารถลดการใช้แก๊ส LPG ในภาคครัวเรือนได้ จะช่วยให้ประเทศไทยลดการนำเข้าแก๊ส LPG และลดการใช้แก๊ส LPG ได้ ภาคครัวเรือนเป็นภาคส่วนที่ต้องใช้แก๊ส LPG ในเตาแก๊สหุงต้มเพื่อประกอบอาหาร

แต่เนื่องจากลักษณะของเปลวไฟของเตาแก๊สหุงต้มที่ใช้เป็นแบบพุ่งชน (Impinging Flame Jet) ซึ่งจะทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนที่สูง [2] ดังนั้น ต้องใช้ปริมาณ LPG ค่อนข้างมาก แต่เตาแก๊สหุงต้มที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันนั้นมีการเผาไหม้ในลักษณะเปิด จึงไม่สามารถนำความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้มาใช้ประโยชน์ได้อย่างเต็มที่ เพราะการถ่ายเทความร้อนจากเปลวไฟไปยังภาชนะถูกจำกัดโดยการพาความร้อน (Convection) เป็นส่วนใหญ่ ทั้งยังมีการสูญเสียความร้อนเป็นจำนวนมากไปกับแก๊สไอเสียโดยการพาความร้อน (Convection) และสูญเสียความพลังงาน ความร้อนของเปลวไฟจากการแผ่รังสีความร้อน (Radiation) อีกด้วย จึงทำให้เตาแก๊สหุงต้มที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันมีประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงสุดไม่เกินร้อยละ 35 [3] ซึ่งถือว่ายังไม่สูงเท่าที่ควร

ดังนั้น จึงมีงานวิจัยเพื่อศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาแก๊สหุงต้มอย่างต่อเนื่อง โดยใน ค.ศ.1996 S. Jugjai และ S. Sanitjai [4] ได้ปรับปรุงปรับปรุงเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาแก๊สหุงต้มโดยอาศัยหลักหมุนเวียนความร้อน (Preheat) แต่เนื่องจากเตาแก๊สที่มีอยู่นั้นเป็นหัวเตาขนาดเล็ก ต่อมา พ.ศ. 2544 N. Rungsimuntuchat [5] จึงได้ขยายขนาดเตาที่ใหญ่ขึ้นโดยใช้กับเตาขนาด KB-10 ซึ่งสามารถเพิ่มประสิทธิภาพความร้อนได้ร้อยละ 12 จากงานวิจัยที่ผ่านมา [3] - [5] พบว่ามีความสนใจในการศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาแก๊สแรงดันสูง ซึ่งเป็นหัวเตาที่ใช้แก๊สสูงกว่า 5.79 กิโลวัตต์ [5] หรือตามท้องตลาดเรียกว่า เตาหัวฟู หรือ เตา KB ซึ่งเป็นเตาแก๊สที่มีใหญ่กว่าเตาแก๊สหุงต้มที่ใช้ในครัวเรือน เช่น เตาแก๊ส KB-5, KB-7, KB-8 และ KB-10 โดยมีขนาดหัวเตา 5, 7, 8 และ 10 นิ้ว ตามลำดับ เท่านั้น

ต่อมา พ.ศ. 2558 Ch. Prakobdee et al. [6] ได้ทำการเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือนแบบเวอร์ติคอลพอร์ท ดังแสดงใน

รูปที่ 1 ซึ่งเป็นเตาแก๊สชนิดแรงดันต่ำโดยมีปริมาณการใช้แก๊ส LPG สูงสุดเพียง 5.78 กิโลวัตต์ ซึ่งมีการดัดแปลงหัวเตาจากแบบเดิมแบบเวอร์ติคอลพอร์ต (Conventional Burner) ซึ่งมีมุมเอียง (Swirl Angle, S) เท่ากับ 90 องศา และมุมเงย (Inclination Angle, I) เท่ากับ 90 องศา (CB-S90I90) ให้เป็นแบบหมุนวน (Swirl Burner, SB) โดยที่มีมุมเงยและมุมเอียงของหัวเตาแก๊สต่างกัน 2 รูปแบบคือ เตา SB-S90I13 และเตา SB-S30I90 จากการศึกษา พบว่า สามารถเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาจากแบบเดิมร้อยละ 54.2 เป็นร้อยละ 62 โดยคิดเป็นอัตราการประหยัด (Energy Saving) เท่ากับร้อยละ 14 แต่เนื่องจากข้อจำกัดในการทดลองจึงไม่สามารถอธิบายสาเหตุของการเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อนที่เกิดจากการปรับเปลี่ยนลักษณะหัวเตาให้เป็น SB ได้



รูปที่ 1 เตาแก๊สหัวตัมแบบเวอร์ติคอลพอร์ต

ในปี พ.ศ. 2559 M. Wichangarm et al. [7] ได้ ทำการศึกษาพฤติกรรมการไหลของของไหลในเตาแก๊สแรงดันสูงแบบประหยัดพลังงานกรณีที่ไม่มีการเผาไหม้ ด้วยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics, CFD) ซึ่งพบว่าความเร็วที่ได้จาก CFD มีความสอดคล้องกันกับการทดลองโดยมีค่าความคลาดเคลื่อนไม่เกินร้อยละ 9 และพบว่าแบบจำลองที่สร้างขึ้นสามารถอธิบายพฤติกรรมการไหลของของไหลในเตาแก๊สแรงดันสูงแบบประหยัดพลังงานได้เป็นอย่างดี ต่อมา พ.ศ. 2560 M. Wichangarm et al. [8], [9] ได้นำ อัตราการไหลเชิงมวล (Mass Flow Rate) และ สัดส่วนเชิงมวล

(Mass Fraction) ของ โพรเพน บิวเทน ไนโตรเจน และออกซิเจน ที่ได้จากการศึกษาในปี พ.ศ.2559 [7] มากำหนดเป็นข้อมูลเริ่มต้นของแบบจำลองที่มีการเผาไหม้กรณีที่ไม่มีการเผาไหม้ที่ปากเตาด้านบนโดยทำการจำลองด้วย CFD แบบ 3 มิติ ทั้งแบบ Full Model และแบบ Periodic Model พบว่า อุณหภูมิที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของเตาแก๊สประหยัดพลังงานที่ได้จากการจำลองทั้ง 2 แบบ มีความสอดคล้องกับการทดลอง โดยแบบ Full Model และแบบ Periodic Model มีค่าความคลาดเคลื่อนไม่เกินร้อยละ 5.86 และร้อยละ 5.46 ตามลำดับ นอกจากนี้ ยังพบว่า ผลจากแบบจำลองที่สร้างขึ้นสามารถอธิบายพฤติกรรมการเผาไหม้ของเตาแก๊สประหยัดพลังงานได้เป็นอย่างดี ต่อมา พ.ศ. 2561 M. Wichangarm et al. [10] และ A. Matthujak et al. [11] ได้ทำการศึกษาต่อเนื่องโดยทำการจำลองกรณีที่มีลักษณะที่ปากเตาด้านบน พบว่า อุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลองมีความสอดคล้องกันเป็นอย่างดีกับการทดลองโดยมีค่าความคลาดเคลื่อนไม่เกินร้อยละ 5.75 และยังพบว่า การไหลแบบหมุนวนมีผลต่อการถ่ายความร้อนสู่ภาชนะรวมถึงสามารถอธิบายผลของการถ่ายเทความร้อนไปยังภาชนะได้อีกด้วย

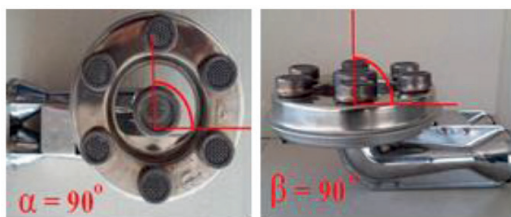
จากนั้นในปี พ.ศ. 2560 T. Chanakul et al. [12] จึงมีแนวคิดในการนำเอา CFD มาประยุกต์ใช้เพื่ออธิบายถึงพฤติกรรมการไหลของเตาแก๊สแรงดันต่ำแบบเวอร์ติคอลพอร์ต (Vertical Port Burner) โดยใช้อักษรย่อเป็น CB-S90I90 จากการศึกษาพบว่า ความเร็วที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของเตา CB-S90I90 ที่ได้จากการจำลองมีความสอดคล้องกันกับการทดลองโดยมีค่าความคลาดเคลื่อนไม่เกินร้อยละ 3 และยังพบว่า CFD สามารถอธิบายพฤติกรรมการไหลของเตา CB-S90I90 ได้ แต่การศึกษานี้ยังไม่ได้อธิบายถึงพฤติกรรมการเผาไหม้ที่เกิดขึ้น

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาพฤติกรรมการเผาไหม้ของเตาแก๊สแรงดันต่ำแบบเวอร์ติคอลพอร์ต (Vertical Port Burner) ด้วย CFD โดยเป็นการศึกษา

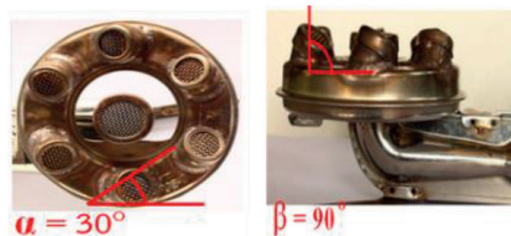
ต่อเนื่องจากงานวิจัยของ T. Chanakul et al. [12] นอกจากนี้ยังทำการศึกษาศึกษาพฤติกรรมการเผาไหม้ของเตาเวอร์ติคอลลพอร์ตที่มีการไหลแบบหมุนวน (Swirling Burner, SB) เปรียบเทียบกับหัวเตาแบบดั้งเดิม อีกด้วย

2. เปรียบวิธีวิจัย

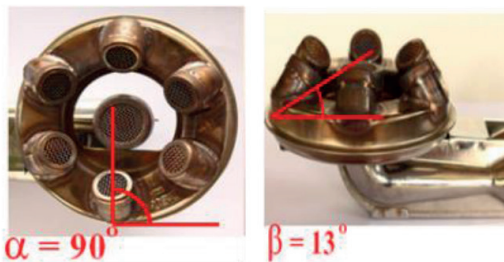
งานวิจัยนี้เป็นการจำลองพฤติกรรมเผาไหม้ของเตาแก๊สแรงดันต่ำแบบเวอร์ติคอลลพอร์ต รวมถึงทำการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการจำลองของเตา CB-S90I90 ซึ่งมีมุมเอียง (Swirl Angle, S or α) เท่ากับ 90 องศา และมุมเงย (Inclination Angle, I or β) เท่ากับ 90 องศา (CB-S90I90) กับเตาแก๊สแบบเวอร์ติคอลลพอร์ตที่มีเปลวไฟแบบหมุนวน (Swirl Burner, SB) ที่มีมุมเงยและมุมเอียงของรูหัวเตาแก๊สต่างกัน 2 รูปแบบ คือเตา SB-S90I13 และเตา SB-S30I90 ดังแสดงในรูปที่ 2 ซึ่งเป็นลักษณะหัวเตาที่ให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงสุดจากงานวิจัยของ Ch. Prakobdee et al. [6]



ค) เตา CB-S90I90



ข) เตา CB-S90I90

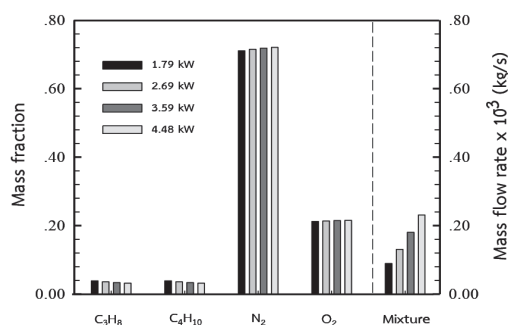


ค) เตา CB-S90I90

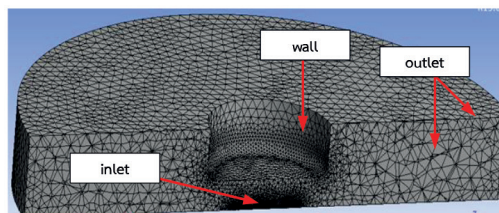
รูปที่ 2 ลักษณะเตา

2.1 พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

ในการศึกษาครั้งนี้จะนำค่า Mass Flow Rate และ Mass Fraction ของ โพรเพน บิวเทน ไนโตรเจน และออกซิเจน ที่นำมากำหนดเป็นเงื่อนไขขอบเขตของการศึกษาครั้งนี้ ได้มาจากผลการจำลองของ T. Chanakul et al. [12] ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 อัตราการไหลเชิงมวล (Mass Flow Rate) และอัตราส่วนเชิงมวล (Mass Fraction) ของส่วนประกอบในทอผสมด้านใน ที่ Firing Rate (Fr) ต่าง ๆ [12]



รูปที่ 4 Grid ของหัวเตาที่ใช้ในการศึกษา

การศึกษาครั้งนี้ใช้การจำลอง CFD แบบจำลอง 3 มิติ โดยพิจารณาการไหลแบบคงที่ (Steady State) และมีการเผาไหม้โดยใช้ Fluent 6.3 กริดที่ใช้ในการคำนวณจะสร้างโดย GAMBIT สำหรับขอบเขตพื้นที่และกริดที่ใช้ในการคำนวณ แสดงดังรูปที่ 4 ซึ่งกริดที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้เป็นกริดรูปทรงสามเหลี่ยมสี่ด้าน (Tetrahedral Grid)

การกำหนดเงื่อนไขขอบเขต คือ การกำหนดค่าของความเร็ว อุณหภูมิ และอัตราการป้อนเชื้อเพลิง โดยนำค่า Mass Fraction ดังแสดงในรูปที่ 2 [12] มากำหนดเงื่อนไขขอบเขต โดยการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตมีความสำคัญต่อความถูกต้องของผลการคำนวณเป็นอย่างมาก โดยจะต้องกำหนดให้ถูกต้องตามหลักความเป็นจริง โดยเงื่อนไขในการจำลองจะแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 เงื่อนไขการจำลอง CFD

Condition	Pattern
Solver	Pressure base
Inlet boundary condition	Mass flow rate of mixture (kg/s) Mass fraction of C_3H_8 , C_4H_{10} , O_2 , N_2
Outlet boundary condition	Pressure outlet (Air gage pressure outlet = 0 Pa)
Time	Steady state
Near-wall treatment method	Standard wall function
Turbulence model	Standard K-ε model
Other	Species transport Eddy dissipation combustion model Discrete ordinates (DO) Model

โดยสมการที่ใช้ในการคำนวณในการศึกษาประกอบไปด้วย

สมการอนุรักษ์มวล

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

สมการอนุรักษ์พลังงาน

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

โดยที่

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

$\alpha = \frac{k}{\rho c}$ คือ ค่าสภาพการแพร่กระจายความร้อนของวัสดุ

k คือ ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน

ρ คือ ความหนาแน่น

c คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะสมการอนุรักษ์โมเมนตัม

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

สมการอนุรักษ์มวลย่อย

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

สมการการเผาไหม้

โดยแบบจำลองการเผาไหม้ที่ใช้ในการศึกษา คือ สมการการเผาไหม้แบบ Eddy Dissipation Combustion Model ใช้ร่วมกับการแผ่รังสีความร้อน (Radiation Model) แบบ Discrete Ordinates (DO) Model

$$R_{i,r} = v'_{i,r} M_{w,i} A \rho \frac{\varepsilon}{k} \min_R \frac{Y_R}{v'_{R,r} M_{w,R}}$$

$$R_{i,r} = v'_{i,r} M_{w,i} A B \rho \frac{\varepsilon}{k} \frac{\sum_p Y_p}{\sum_j^N v''_{j,r} M_{w,j}} \quad (5)$$

โดยที่

R คือ อัตราโมลาร์ของ Arrhenius

v' คือ สัมประสิทธิ์อัตราของสารตั้งต้น

M คือ มวลโมเลกุล

ρ คือ ความหนาแน่น

K คือ พลังงานจลน์แบบปั่นป่วน

ε คือ อัตราการกระจายตัว

v'' คือ สัมประสิทธิ์อัตราของสารผลิตภัณฑ์

A คือ ค่าคงที่ในการทดลองเท่ากับ 4.0

B คือ ค่าคงที่ในการทดลองเท่ากับ 0.5

Y คือ เศษส่วนมวล (Mass Fraction)

$$\nabla \cdot (I(\vec{r}, \vec{s}) \vec{s}) + (a + \sigma_s) I(\vec{r}, \vec{s})$$

$$= an^2 \frac{\sigma T^4}{\pi} + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} I(\vec{r}, \vec{s}') \Phi(\vec{s}, \vec{s}') d\Omega' \quad (6)$$

โดยที่

I คือ Radiation Intensity (แปรผันตามตำแหน่งและทิศทาง)

$\vec{r}$ คือ ตำแหน่งเวกเตอร์

$\vec{s}$ คือ ทิศทางของเวกเตอร์ในระบบพิกัดแกน

$\vec{s}'$ คือ การกระจายตัวของเวกเตอร์ในระบบพิกัดแกน

a คือ สัมประสิทธิ์การดูดซับ

σ_s คือ สัมประสิทธิ์การกระจายตัว

n คือ ดัชนีการหักเหแสง

T คือ อุณหภูมิ

Φ คือ Phase Function

Ω' คือ Solid Angle

สมการการคำนวณหาค่า Heat Flux

ในการแสดงผลจากการเผาไหม้ของหัวเตาในแบบต่างๆ จะแสดงผลจากการเปรียบเทียบ Heat Flux โดยคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$q_{\text{flux}} = \frac{q_{\text{total}}}{A_{\text{total}}} = \frac{q_{\text{bottompot}} + q_{\text{sidepot}}}{A_{\text{total}}} \quad (7)$$

โดยที่

$$q_{\text{bottompot}} = \frac{kA(T_1 - T_2)}{\Delta x} + \varepsilon \sigma A [T_1^4 - T_2^4]$$

$$q_{\text{sidepot}} = 2\pi Lk \left[\frac{(T_{\text{in}} - T_{\text{out}})}{\ln(r_{\text{in}} - r_{\text{out}})} \right] \quad (8)$$

โดยที่

q_{flux} คือ Heat Flux, วัตต์ต่อตารางเมตร

q_{total} คือ ค่าการถ่ายเทความร้อนทั้งหมด, วัตต์

$q_{\text{bottom pot}}$ คือ การถ่ายเทความร้อนบริเวณก้นหม้อ, วัตต์

$q_{\text{side pot}}$ คือ การถ่ายเทความร้อนบริเวณด้านข้างหม้อ, วัตต์

A_{total} คือ ผลรวมพื้นที่หน้าตัดทั้งหมดของหม้อ, ตารางเมตร

A คือ พื้นที่หน้าตัด, ตารางเมตร

Δx คือ ความหนาของผนังหม้อ, เมตร

L คือ ความสูงของระดับน้ำในหม้อ, เมตร

ε คือ ค่าการแผ่รังสีความร้อนของวัสดุ

σ คือ ค่าคงที่ของสเตฟาน, $W/m^2 \cdot K^4$

T คือ อุณหภูมิ, เคลวิน

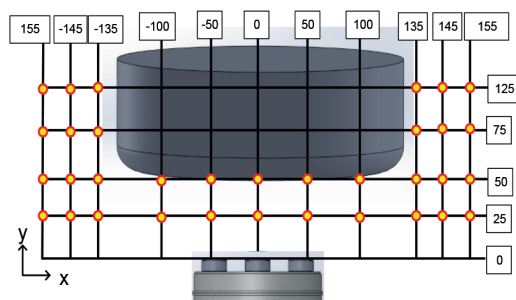
r คือ รัศมีของหม้อ, เมตร

k คือ ค่าการนำความร้อนของวัสดุ, วัตต์ต่อเมตร-เคลวิน

การคำนวณและการประมวลผลของแบบจำลองการเผาไหม้ กำหนดโดยเงื่อนไขการรู้เข้าคำตอบ (Convergence Criteria) เท่ากับ 10^{-12} เมื่อการทำนาย

ผลของค่าตอบสู่ค่า Convergence Criteria จนกระทั่งมีการทำนายซ้ำค่าเดิมที่เกิดขึ้น ถือว่าสามารถนำผลที่ได้มาใช้วิเคราะห์การเผาไหม้ได้

ในการทดลองจะทำการบันทึกอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่าง ๆ ตามรูปที่ 5 ด้วย Data Logger ที่มีค่าความถูกต้อง ± 1 เคลวิน ต่อเข้ากับ Type - K Thermocouple โดยทำการทดลอง 3 ครั้งแล้วหาค่าเฉลี่ย โดยทำเริ่มจากการบรรจุปริมาณน้ำให้มีระดับความสูงเท่ากับแบบจำลอง (75 มิลลิเมตร) จากนั้นทำการต้มน้ำจนมีอุณหภูมิ 363 เคลวิน แล้วจึงทำการวัดอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่าง ๆ ดังรูป

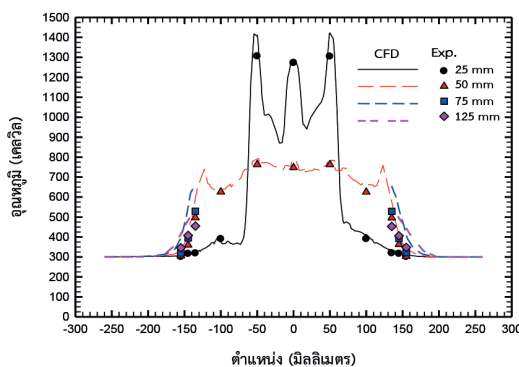


รูปที่ 5 ตำแหน่งการวัดอุณหภูมิในการเผาไหม้
(หน่วย: มิลลิเมตร)

3. ผลการคำนวณและการวิเคราะห์

รูปที่ 6 แสดงการเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิเปลวไฟที่ได้จาก CFD และการทดลองของเตา CB-S90I90 ที่ Firing Rate (Fr คือ ผลคูณระหว่างอัตราการไหลของ LPG กับค่าความร้อนของ LPG) เท่ากับ 4.48 กิโลวัตต์ จากผลจาก CFD พบว่า ที่ความสูงจากหัวเตา 25 มิลลิเมตร (แนวแกน y) ที่ ตำแหน่ง ± 50 มิลลิเมตร (แนวแกน x) เป็นจุดที่มีอุณหภูมิสูงที่สุด โดยมีอุณหภูมิเท่ากับ 1,304 เคลวิน เนื่องจากเป็นจุดที่ได้รับความร้อนโดยตรงจากเปลวไฟของหัวเตาด้านนอก และ ตำแหน่ง 0 มิลลิเมตร จะมีอุณหภูมิสูงรองลงมา โดยมีอุณหภูมิสูงสุดเท่ากับ 1,288 เคลวิน เนื่องจากเป็นจุดที่ได้รับความร้อนจากเปลวไฟของหัวเตาด้านใน

ส่วน ตำแหน่ง ± 100 มิลลิเมตร จะไม่ได้รับความร้อนจากเปลวไฟโดยตรงทำให้ตำแหน่งนี้มีอุณหภูมิตดลงอย่างมากโดยมีอุณหภูมิสูงสุดเท่ากับ 430 เคลวิน และ ที่ ตำแหน่ง ± 135 มิลลิเมตร, ± 145 มิลลิเมตร และ ± 150 มิลลิเมตร มีอุณหภูมิตดลงตามลำดับโดยที่ ตำแหน่ง ± 135 มิลลิเมตร เป็นจุดที่มีอุณหภูมิสูงที่สุด โดยมีอุณหภูมิเท่ากับ 656 เคลวิน

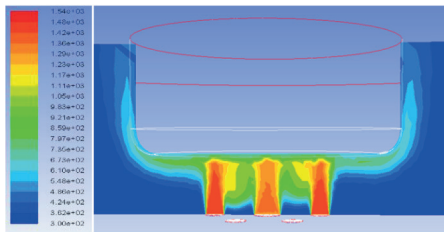


รูปที่ 6 การเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิเปลวไฟ
ที่ได้จาก CFD และการทดลองของเตา CB-S90I90
ที่ 4.48 กิโลวัตต์

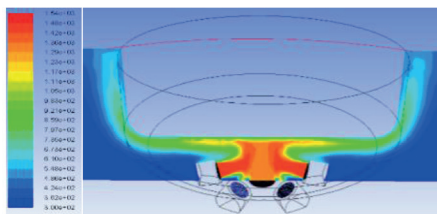
จากการพิจารณาในแนวรัศมีของเตา (แนวแกน x) พบว่า ที่ตำแหน่ง 0, ± 50 , ± 100 , ± 135 และ ± 150 มิลลิเมตร อุณหภูมิสูงที่สุดมีค่าเท่ากับ 1,288, 1304, 655, 656 และ 320 เคลวิน ตามลำดับ และเมื่อระยะห่างของหัวเตาในแนวแกนกับกันหม้อ (แนวแกน y) เพิ่มขึ้น อุณหภูมิจะมีค่าลดลงโดยมีอุณหภูมิสูงที่สุดที่ตำแหน่ง ± 50 มิลลิเมตร ซึ่งมีอุณหภูมิเท่ากับ 1,304, 763, 340 และ 320 เคลวิน ที่ตำแหน่งความสูง (แนวแกน) 25, 50, 75 และ 125 มิลลิเมตร ตามลำดับ โดยผลของอุณหภูมิจากการจำลองเมื่อเปรียบเทียบกับ การทดลองแล้วมีค่าที่ใกล้เคียงกันโดยมีค่าความเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 9

รูปที่ 7 แสดงแถบสีอุณหภูมิที่ระนาบกึ่งกลางหัวเตาของเตา CB-S90I90, SB-S90I13 และ SB-S30I90 ตามลำดับ พบว่า เตา CB-S90I90 มีลักษณะของ

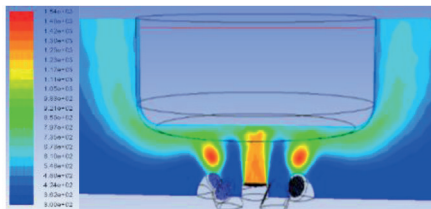
เปลวไฟพุ่งขึ้นชนกับผนังหม้อโดยที่เปลวไฟของแต่ละรูทางออกจะแยกกันพุ่งชนกันหม้อด้านล่างดังแสดงในรูปที่ 7 ก) ซึ่งมีความแตกต่างกับหัวเตา SB-S90I13 และ SB-S30I90 โดยที่เตา SB-S90I13 มีลักษณะของเปลวไฟพุ่งขึ้นโดยที่เปลวไฟที่บริเวณทางออกของท่อผสมด้านนอกจะพุ่งเข้าชนกับเปลวไฟของท่อผสมด้านในดังแสดงในรูปที่ 7 ข) ซึ่งเป็นผลมาจากผลของ $\beta = 13$ องศา จากลักษณะของการพุ่งชนกันของเปลวไฟทำให้เปลวไฟที่พุ่งชนกันหม้อมีขนาดใหญ่ขึ้นและพุ่งเข้าหาบริเวณจุดกึ่งกลางของหม้อ ในส่วนของเตา SB-S30I90 มีลักษณะของเปลวไฟของท่อผสมด้านในจะพุ่งขึ้นชนกับผนังหม้อด้านล่างบริเวณกึ่งกลางของหม้อดังแสดงในรูปที่ 7 ค) ส่วนเปลวไฟที่ทางออกของท่อผสมด้านนอกจะพุ่งชนผนังหม้อด้านล่างในลักษณะของการหมุนวน เนื่องจาก $\alpha = 30$ องศา



ก) CB-S90I90

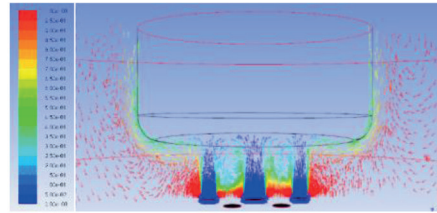


ข) SB-S90I13

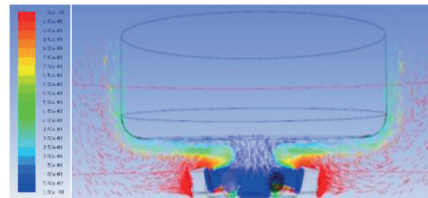


ค) SB-S90I90

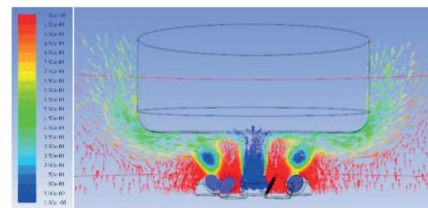
รูปที่ 7 แถบสีอุณหภูมิที่ระนาบกึ่งกลางหัวเตา



ก) CB-S90I90



ข) SB-S90I13

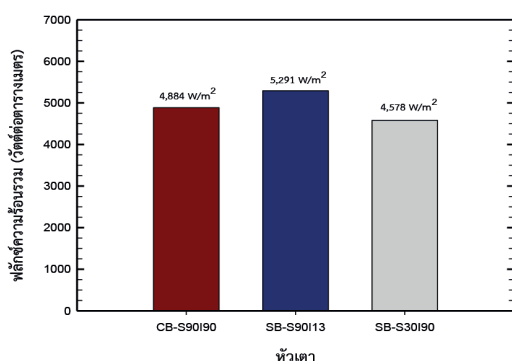


ค) SB-S30I90

รูปที่ 8 เวกเตอร์ความเร็วที่ระนาบกึ่งกลางหัวเตา

รูปที่ 8 แสดงเวกเตอร์ความเร็วที่ระนาบกึ่งกลางหัวเตาของเตา CB-S90I90, SB-S90I13 และ SB-S30I90 ตามลำดับ พบว่า ลักษณะการเหนี่ยวนำอากาศของเตา CB-S90I90 มีการเหนี่ยวนำอากาศในลักษณะแยกกันระหว่างท่อผสมด้านนอกกับท่อผสมด้านใน และมีการเหนี่ยวนำอากาศส่วนมากจากด้านล่างของเตาเพื่อไหลเข้ามาทำการเผาไหม้ดังแสดงในรูปที่ 8ก) ซึ่งจะแตกต่างกับเตา SB-S90I13 ที่มีการพุ่งชนกันของเปลวไฟ เนื่องจากผลของ $\beta = 13$ องศา จึงทำให้เตา SB-S90I13 มีการเหนี่ยวนำอากาศจากบริเวณด้านข้างของหัวเตามากกว่าบริเวณด้านล่างของหัวเตาก่อนที่จะพุ่งชนกันหม้อ ซึ่งจากผลของการพุ่งชนกันของเปลวไฟทำให้การเหนี่ยวนำอากาศบริเวณด้านล่างของหัวเตามีพื้นที่ในการเหนี่ยวนำน้อยลง และเป็นผลให้บริเวณด้านล่างของหัวเตา มีการพุ่งลงของอากาศอีกด้วย ดังแสดง

ในรูปที่ 8ข) ในส่วนของเตา SB-S30I90 มีการเหนี่ยวนำอากาศในลักษณะแยกกันระหว่างท่อผสมด้านนอกกับท่อผสมด้านในเช่นเดียวกับเตา CB-S90I90 และมีการเหนี่ยวนำอากาศส่วนมากจากด้านล่างของหัวเตาเข้ามาทำการเผาไหม้ ดังแสดงในรูปที่ 8 ค) โดยลักษณะการเหนี่ยวนำอากาศส่วนที่สอง (Secondary Air) จากบริเวณรอบหัวเตา และบริเวณด้านข้างของหม้อเข้ามาทำการเผาไหม้ของหัวเตาแต่ละชนิดมีลักษณะที่แตกต่างกัน ซึ่งเกิดจากจากผลของ β และ α ที่แตกต่างกันดังแสดงในรูปที่ 8 ก), 8 ข) และ 8 ค)



รูปที่ 9 การเปรียบเทียบฟลักซ์ความร้อนรวม (Total Heat Flux) บริเวณหม้อของหัวเตาแบบต่าง ๆ ที่ 4.48 กิโลวัตต์

รูปที่ 9 แสดงการเปรียบเทียบฟลักซ์ความร้อนรวม (Total Heat Flux) บริเวณหม้อของหัวเตาแบบต่าง ๆ ที่ 4.48 กิโลวัตต์ พบว่า เตา SB-S90I13 มี Heat flux สูงที่สุด รองลงมาคือเตา CB-S90I90 และ SB-S30I90 ตามลำดับ โดยมี Heat Flux เท่ากับ 5,291 วัตต์ต่อตารางเมตร, 4,884 วัตต์ต่อตารางเมตร และ 4,578 วัตต์ต่อตารางเมตร ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับอุณหภูมิการเผาไหม้ของหัวเตา SB-S90I13 ที่มีค่าสูงที่สุด จากการเปรียบเทียบ Heat Flux จึงสรุปได้ว่าเตาแบบ SB-S90I13 ให้ Heat Flux สูงที่สุดโดยสูงขึ้นร้อยละ 7.69 เมื่อเปรียบเทียบกับเตา CB-S90I90 ซึ่งมีความสอดคล้องกับผลการวิจัยที่ผ่านมาของ Ch.

Prakobdee et al. [6] ซึ่งพบว่าเตา SB-S90I13 มีประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงขึ้น โดยคิดเป็นเปอร์เซ็นต์การประหยัดพลังงาน (% Energy saving) เท่ากับร้อยละ 6.93

4. สรุปผลการศึกษา

จากการศึกษาการจำลองพฤติกรรมเผาไหม้ของเตาแก๊สแรงดันต่ำแบบเวอร์ติคอลลพอร์ทโดยใช้วิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณพบว่า

1. เตา CB-S90I90 ให้ผลของอุณหภูมิจากการจำลองใกล้เคียงกับผลการทดลองโดยมีค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดไม่เกินร้อยละ 9

2. CFD สามารถอธิบายพฤติกรรมการเผาไหม้ของเตาแก๊สแรงดันต่ำแบบเวอร์ติคอลลพอร์ทได้เป็นอย่างดีชัดเจน โดยลักษณะของหัวเตาที่แตกต่างกันจะทำให้มีพฤติกรรมการไหลและการเผาไหม้ที่แตกต่างกัน

3. เตา SB-S90I13 ให้อุณหภูมิในการเผาไหม้สูงที่สุด รองลงมาคือ เตา CB-S90I90 และ SB-S30I90 โดยมีอุณหภูมิสูงสุดเท่ากับ 1,304 เคลวิน, 1,445 เคลวิน และ 1,288 เคลวิน ตามลำดับ

4. เตา SB-S90I13 ที่ให้ค่า Heat flux สูงที่สุด รองลงมาคือ CB-S90I90 และ SB-S30I90 โดยมี Heat Flux เท่ากับ 5,291 วัตต์ต่อตารางเมตร, 4,884 วัตต์ต่อตารางเมตร และ 4,578 วัตต์ต่อตารางเมตร ตามลำดับสอดคล้องกับอุณหภูมิการเผาไหม้ของแต่ละหัวเตา โดยเตา SB-S90I13 มี Heat Flux สูงกว่า CB-S90I90 คิดเป็นร้อยละ 7.69 ซึ่งสอดคล้องกับประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตา SB-S90I13 ที่สูงขึ้นเมื่อเทียบกับเตา CB-S90I90 [6] โดยคิดเป็นอัตราการประหยัด (Energy Saving) เท่ากับร้อยละ 6.93

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ที่ให้ทุนสนับสนุน

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Energy Policy and Planning Office. (2018). Energy Information. [Online]. Available: <http://www.eppo.go.th>
- [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] 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.
- [4] 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.
- [5] N. Rungsimuntuchat, "Application of Porous Medium for Energy Saving in Gas Cooker," M. Eng thesis, Department of Mechanical Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok, Thailand, 2011.
- [6] Ch. Prakobdee, A. Matthujak and B. Bunphet, "Thermal Efficiency Improvement of Vertical Port Cooking Burner Using Swirling Flow," in *Proceeding of the 29th Conference of Mechanical Engineering Network of Thailand*, Department of Mechanical Engineering, Office of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand, 2015, Paper no. AEC-22.
- [7] M. Wichangarm, A. Matthujak, T. Sriveerakul and S. Sucharitpwatskul, "Simulation of flow characteristics in an energy-saving high-pressure gas stove," in *Proceeding of the 29th Conference of Mechanical Engineering Network of Thailand*, Prince of Songkla University, Songkhla, Thailand, 2016. Paper no. CST0027.
- [8] M. Wichangarm, A. Matthujak, T. Sriveerakul, S. Sucharitpwatskul, and S. Phongthanapanich, "Simulation Study of LPG Cooking Burner," *International Journal of Engineering & Technology*, vol. 7, no. 3.7, pp. 142-144, Jul. 2018.
- [9] M. Wichangarm, A. Matthujak, T. Sriveerakul and S. Sucharitpwatskul, "Simulation on combustion characteristics of an energy-saving gas stove using Computational fluid dynamics," in *Proceeding of the 31st Conference of Mechanical Engineering Network of Thailand*, Srinakharinwirot University, Nakhon Nayok Province, Thailand, 2017, Paper no. CST21.
- [10] M. Wichangarm, A. Matthujak, T. Sriveerakul and S. Sucharitpwatskul, "Influence of whirling flow on combustion behavior of high pressure gas stove by computational fluid dynamics," in *Proceeding of the 32nd Conference of Mechanical*

- Engineering Network of Thailand*, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering and Architecture, Rajamangala University of Technology Isan, Mukdahan, Thailand, 2018, Paper no. AEC-01.
- [11] A. Matthujak, M. Wichangarm, T. Sriveerakul and S. Sucharitpwatskul, "Study of the influence of a high-pressure rotary gas stove on heat transfer behavior into a container by computational fluid dynamics," in *Proceeding of 14th Conference on Energy Network of Thailand (E-NETT 2019)*, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi and Suranaree University of Technology, Rayong, Thailand, 2018, Paper no. ECE-0005.
- [12] T. Chanakul, A. Matthujak, M. Wichangarm, T. Sriveerakul and S. Sucharitpwatskul, "The study of the flow behavior of household gas stove by vertical port using computational fluid dynamics," in *Proceeding of the 31st Conference of Mechanical Engineering Network of Thailand*, Srinakharinwirot University, Nakhon Nayok Province, Thailand, 2017, Paper no. CST15.