วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2024.08.005

บทความวิจัย

การวิจัยและพัฒนาเตาแผ่รังสีเชื้อเพลิงคู่ก๊าซแอลพีจีและไบโอเอทานอลเพื่อการใช้งานเอนกประสงค์

อุษา มากมูล กราร์ [1*] และ กนกกาญจน์ จิรกุลสมโชค[2]

[1] ห้องปฏิบัติการวิจัยเทคโนโลยีการเผาไหม้, สถาบันพัฒนาและฝึกอบรมโรงงานต้นแบบ, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

[2] ศูนย์วิจัยเทคโนโลยีการเผาไหม้และพลังงานทางเลือก, ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องต้นกำลัง, วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

[*] ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: usa.mak@kmutt.ac.th

วันที่รับบทความ: 26 กุมภาพันธ์ 2567; วันที่ทบทวนบทความ: 23 พฤษภาคม 2567; วันที่ตอบรับบทความ: 24 พฤษภาคม 2567
วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 21 สิงหาคม 2567

บทคัดย่อ: บทความนี้คือการพัฒนาและทดสอบสมรรถนะเตาหุงต้มเชื้อเพลิงคู่ก๊าซแอลพีจีและไบโอเอทานอลเพื่อการประกอบอาหารและใช้งานอเนกประสงค์ในครัวเรือนและร้านอาหาร มีจุดมุ่งหมายเพื่อลดการพึ่งพาเชื้อเพลิงฟอสซิลที่การเผาไหม้ทำให้เกิดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่ส่งผลกระทบต่อสภาวะโลกร้อน ไบโอเอทานอลเป็นเชื้อเพลิงหมุนเวียนที่มีศักยภาพสูงในการใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับเตาหุงต้มทดแทนก๊าซแอลพีจี เนื่องจากเอทานอลสามารถผลิตได้เองในประเทศจากพืชผลทางการเกษตรจึงให้การปลดปล่อยคาร์บอนสุทธิเป็นศูนย์ เตาแผ่รังสีเชื้อเพลิงคู่นี้ หัวเผาประกอบด้วยโฟมเซรามิกที่ทำจากซิลิกอนคาร์ไบด์ มีความพรุนสูงและมีน้ำหนักเบา มีหัวฉีดร่วมเพียงตัวเดียวสำหรับการจ่ายเชื้อเพลิงสองชนิด การส่งเสริมการหมุนเวียนความร้อนภายในหัวเผาวัสดุพรุนส่งผลให้เตาสามารถทำงานได้อย่างมีเสถียรภาพได้ทั้งการเผาไหม้ก๊าซแอลพีจีและไบโอเอทานอลที่มีค่าความร้อนต่ำ อุณหภูมิการเผาไหม้จะเพิ่มขึ้นตามอัตราการป้อนความร้อนที่เพิ่มขึ้น การเพิ่มอากาศปฐมภูมิมีผลดีต่อการเผาไหม้ก๊าซแอลพีจีให้การปล่อยก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ (CO) ลดลง แต่มีผลตรงกันข้ามกับการเผาไหม้เอทานอลที่ CO กลับเพิ่มขึ้นเมื่ออากาศปฐมภูมิเพิ่มขึ้น การเผาไหม้ก๊าซแอลพีจีมีการปลดปล่อยมลภาวะที่น้อยกว่าการเผาไหม้ไบโอเอทานอลที่ทุกอัตราส่วนสมมูล รวมถึงก๊าซแอลพีจีมีช่วงการทำงานที่กว้างกว่าไบโอเอทานอล สภาวะการทำงานที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการเผาไหม้ไบโอเอทานอลของหัวเผาที่พัฒนาขึ้นนี้ คือที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิง 5.50 กิโลวัตต์ ซึ่งมีอุณหภูมิสูงสุดใกล้เคียงกับการเผาไหม้ก๊าซแอลพีจี

คำสำคัญ: เตาแผ่รังสี; เตาเอทานอล; เตาเชื้อเพลิงคู่; ก๊าซแอลพีจี; ไบโอเทานอล

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2024.08.005

บทความวิจัย

Research and Development of a Dual-Fuel Radiant Burner for Diverse Applications: Utilizing of Liquefied Petroleum Gas and Bio-Ethanol

Usa Makmool Grare[1*] and Kanokkarn Jirakulsomchok[2]

[1] Combustion Technology Research Laboratory (CBT), Pilot Development and Training Institute, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok, Thailand

[2] Combustion Technology and Alternative Energy Research Center (CTAE), Department of Power Engineering Technology, College of Industrial Technology, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Bangkok. Thailand

[*] Corresponding author, E-mail: usa.mak@kmutt.ac.th

Received: 26 February 2024; Revised 23 May 2024; Accepted: 24 May 2024
Online Published: 21 August 2024

Abstract: In this article, a dual-fuel radiant burner was developed and tested for home and restaurant cooking. It uses liquefied petroleum gas (LPG) and bioethanol with the aim of reducing reliance on fossil fuels, a primary source of greenhouse gas emissions. Bioethanol, as a renewable fuel, shows great promise in replacing LPG. It results in net zero carbon emissions because it can be domestically produced from agricultural waste and products. The burner head comprises lightweight, highly porous ceramic foam made of silicon carbide and incorporates a single conventional gas injector for supplying both fuels. The results showed that the burner provided relatively high stable combustion of both LPG and bioethanol with low calorific value. This is due to the advantage of internal heat circulation of combustion within a porous medium burner. The combustion temperature increases with the firing rate. Increasing primary air has a positive effect on LPG combustion, leading to reduced carbon monoxide (CO) emissions. However, it has the opposite effect on bioethanol combustion, resulting in increased CO emissions with higher primary air entrainments. Firing LPG yields higher combustion efficiency compared to bioethanol. Nevertheless, at a firing rate of 5.50 kW of bioethanol, the maximum temperature reached is similar to that of LPG at the same firing rate, representing the optimal condition for this developed burner using bioethanol as fuel.

Keywords: Radiant burner; ethanol burner; dual fuel burner; LPG; bioethanol

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2024.08.005

1. บทนำ

เตาแก๊สเป็นอุปกรณ์ให้ความร้อนเพื่อประกอบอาหารที่นิยมและใช้กันอย่างแพร่หลายในครัวเรือน ร้านอาหารทั้งในเขตเมืองและชนบท รวมถึงอุตสาหกรรมแปรรูปอาหารขนาดกลางละขนาดย่อม (SME) สำหรับภาคครัวเรือนของประเทศไทย เตาหุงต้มที่ใช้คือเตาก๊าซแอลพีจี หรือก๊าซปิโตรเลียมเหลว (Liquefied Petroleum Gas, LPG) มีสถานะเป็นของเหลวภายใต้แรงดันและบรรจุไว้ในถังทนแรงดันสูง เตาก๊าซแอลพีจีมีความเสถียรและความน่าเชื่อถือค่อนข้างสูง เนื่องจากเทคโนโลยีนี้ได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง อย่างไรก็ตาม แอลพีจีเป็นเชื้อเพลิงฟอสซิล ทำให้เกิดการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และก๊าซเรือนกระจกอื่น ๆ จากการเผาไหม้ ที่ส่งผลต่อสภาวะโลกร้อน หลาย ๆ ประเทศในภูมิภาคต่าง ๆ จึงมีความพยายามในการผลักดันนโยบายให้เกิดการลดใช้หรือลดการพึ่งพาพลังงานจากฟอสซิล เพื่อช่วยชะลอและลดอัตราเร่งการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเฉลี่ยของโลก

ภาคครัวเรือนของไทย มีสัดส่วนการใช้แอลพีจีค่อนข้างสูง รายงานสถิติการใช้พลังงานจากก๊าซแอลพีจี ในไตรมาสแรกของปี 2566 กว่า 175 พันตันต่อเดือน หรือเท่ากับร้อยละ 32 ของการใช้ก๊าซแอลพีจีภายในประเทศ [1] ยิ่งไปกว่านั้น ปัจจุบันรัฐบาลยกเลิกการอุดหนุนราคาก๊าซแอลพีจีภาคครัวเรือน โดยมีนโยบายลอยตัวราคาก๊าซเพื่อให้เป็นไปตามกลไกราคาพลังงานของตลาดโลก ส่งผลให้ผู้บริโภคมีภาระด้านการใช้จ่ายเพื่อพลังงานเพิ่มสูงขึ้นมาก ดังนั้น การกระตุ้นและส่งเสริมให้ภาคครัวเรือนมีทางเลือกในการใช้พลังงานมากขึ้น เช่น การหันมาใช้เชื้อเพลิงประเภทแอลกอฮอล์ ได้แก่ ไบโอเอทานอล เนื่องจากเอทานอลเป็นพลังงานหมุนเวียนที่สามารถผลิตได้เองในประเทศจากผลผลิตทางการเกษตร ทำให้การปลดปล่อยคาร์บอนสุทธิเป็นศูนย์ อีกหนึ่งความข้อได้เปรียบของเอทานอล คือ ในสภาวะปกติ เอทานอลมีสถานะเป็นของเหลว ทำให้ง่ายต่อการจัดเก็บและการขนส่ง นอกจากนี้ยังมีความหนาแน่นของพลังงานเชิงปริมาตรที่ค่อนข้างสูง (6.28 kWh/l) ในปี 2565 มีการผลิตเอทานอลมากกว่า 1,580 ล้านลิตร (4.5 ล้านลิตร/วัน) ในประเทศ และตั้งเป้าจะผลิตให้ได้กว่า 5.8 ล้านลิตรต่อวันภายในปี 2579 [2] ปัจจุบัน เอทานอลนอกจากจะถูกใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับอุตสาหกรรมเคมีแล้วยังถูกนำไปผสมเชื้อเพลิงสำหรับรถยนต์ทั้งแบบเครื่องยนต์ดีเซลและเครื่องยนต์เบนซินเพื่อลดการใช้พลังงานจากปิโตรเลียมลง อย่างไรก็ตาม การศึกษาและวิจัยการใช้เอทานอลเป็นเชื้อเพลิงโดยตรงในเตาเพื่อให้ความร้อนและปรุงอาหารในครัวเรือนยังมีการรายงานออกมาอย่างจำกัด งานวิจัยนี้จึงเสนอนวัตกรรมที่จะสามารถผลักดันให้เกิดการใช้เชื้อเพลิงเอทานอลในภาคครัวเรือนมากขึ้น และเพื่อให้การใช้งานเตาให้ความร้อนมีความยืดหยุ่นด้านเชื้อเพลิงที่ใช้ทดแทนหรือทำให้เกิดการลดการใช้ก๊าซแอลพีจีในภาคครัวเรือน ถึงแม้ในปัจจุบันจะมีการนำเอทานอลมาใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับให้ความร้อนในการประกอบอาหาร แต่เนื่องจากเอทานอลมีความไวไฟสูงและมีความหนืดต่ำ จึงมีการผสมกับสารทำให้ข้นกลายเป็นเจลเอทานอลเพื่อให้มีความปลอดภัยมากขึ้น และนิยมนำไปใช้ในร้านอาหารเพื่อการอุ่นมากกว่าการประกอบอาหารในครัวเรือน นอกจากนั้น เอทานอลยังมีค่าความร้อนต่ำ (~29 MJ/kg) เมื่อเทียบกับก๊าซแอลพีจี (~50 MJ/kg)

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2024.08.005

งานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีการเผาไหม้แบบให้อุณหภูมิสูงกว่าทางทฤษฎี (Super Adiabatic Combustion) โดยทำให้เกิดการหมุนเวียนความร้อนภายในเตาด้วยการปรับแต่งห้องเผาไหม้หรือหัวเผาให้เป็นวัสดุพรุน ช่วงการทำงานของหัวเผาแบบวัสดุพรุนค่อนข้างกว้างโดยเฉพาะการเผาไหม้แบบเชื้อเพลิงเจือจาง (Lean Combustion) ซึ่งลักษณะดังกล่าวมีข้อได้เปรียบเหนือการเผาไหม้แบบปกติ (Free-flame Combustion) หลายประการ ยกตัวอย่าง เช่น ให้อุณหภูมิการเผาไหม้สูงกว่าเปลวไฟแบบปกติที่สภาวะเดียวกัน [3] ความเร็วในการเผาไหม้ (Burning Velocity) สูงขึ้น [4] ความเข้มของการเผาไหม้มีค่าสูง (High Combustion Intensity) ส่งผลให้สามารถออกแบบห้องเผาไหม้ที่มีขนาดเล็กลง รวมถึงฟลักซ์ความร้อนที่ได้จากการแผ่รังสี (Radiative Heat Flux) มีค่าสูงและสม่ำเสมอ การปลดปล่อยมลพิษต่ำเมื่อเทียบกับการเผาไหม้แบบปกติ สามารถเผาเชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนต่ำ [5] ซึ่งเตาเผาทั่วไปไม่สามารถเผาไหม้ได้ เมื่อเร็วๆนี้ งานวิจัยของ Goa et. al, 2023 [6] ทำการพัฒนาหัวเผาน้ำมันดีเซลโดยประยุกต์ใช้วัสดุพรุนชนิดโฟมเซรามิก เพื่อศึกษาหลักการผลกระทบของโครงสร้างโฟมเซรามิก ลักษณะการระเหย และการแผ่รังสีของเชื้อเพลิงเหลวภายในวัสดุพรุนโดยใช้น้ำมันดีเซลที่มีต่ออุณหภูมิและการปล่อยก๊าซเรือนกระจก ผลการวิจัยพบว่า โครงสร้างโฟมเซรามิกที่แตกต่างกันมีผลอย่างมากต่ออุณหภูมิและการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในห้องเผาไหม้ และก่อนหน้านี้ Sinha and Muthukumar [7] ทำการศึกษาอิทธิพลของพารามิเตอร์ต่างๆ ต่อประสิทธิภาพเชิงความร้อนของหัวเผาวัสดุพรุนด้วยเตาชนิดอัดความดันที่ใช้น้ำมันก๊าดเป็นเชื้อเพลิง (Kerosene Pressure Stove) และพบว่าเตาวัสดุพรุนมีประสิทธิภาพเชิงความร้อนเพิ่มขึ้นกว่า 15% เมื่อเทียบกับเตาแรงดันน้ำมันก๊าดทั่วไป (Conventional Kerosene Pressure Stove) สำหรับการใช้เชื้อเพลิงประเภทแอลกอฮอล์ Toledo et al. [8] ประยุกต์ใช้หัวเผาวัสดุพรุนในกระบวนการผลิตก๊าซไฮโดรเจนด้วยเมทานอลและเอทานอลโดยกระบวนการเผาไหม้บางส่วน อย่างไรก็ตามงานวิจัยดังกล่าวนี้ยังต้องใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อระเหยเชื้อเพลิงเหลวก่อนป้อนเข้าสู่หัวเผา

งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ที่จะพัฒนาเตาแผ่รังสีเชื้อเพลิงคู่เอนกประสงค์ สามารถใช้งานในการประกอบอาหารหลากหลาย ได้แก่ ต้ม ผัด ทอด อบ ปิ้งย่าง ที่มีความยืดหยุ่นสูงสามารถใช้งานได้ทั้งก๊าซแอลพีจีซึ่งเป็นเชื้อเพลิงหลักที่ใช้อยู่ในครัวเรือนปัจจุบันและยังสามารถใช้เชื้อเพลิงไบโอเอทานอล โดยไม่จำเป็นต้องติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจากภายนอกเพื่อใช้ในการระเหย ใช้หัวฉีดร่วมเพียงหนึ่งหัวฉีด และมีการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีการเผาไหม้ในวัสดุพรุนที่ส่งเสริมให้เกิดการหมุนเวียนความร้อนภายในเพื่ออุ่นส่วนผสมให้มีอุณหภูมิสูงขึ้น ทำให้อุณหภูมิการเผาไหม้สูงกว่าการเผาไหม้แบบทั่วไป โดยคงรักษารูปแบบเตาที่ใช้งานกันทั่วไปในปัจจุบันและเหมาะสำหรับการใช้งานที่ต้องการกำลังไฟหรือพลังงานความร้อนขนาดครัวเรือนและอุตสาหกรรมขนาดกลางและขนาดย่อม (5-15 kW) โดยมีจุดมุ่งหมายเพื่อให้การใช้งานเตาหุงต้มมีความยืดหยุ่นด้านเชื้อเพลิง ช่วยให้ผู้ใช้งานมีความสะดวกในการจัดหาเชื้อเพลิงเมื่อเกิดวิกฤติด้านพลังงานขึ้น นอกเหนือจากนั้น ยังช่วยเพิ่มความมั่นคงด้านพลังงาน ลดการพึ่งพาพลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิลที่สร้าง

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2024.08.005

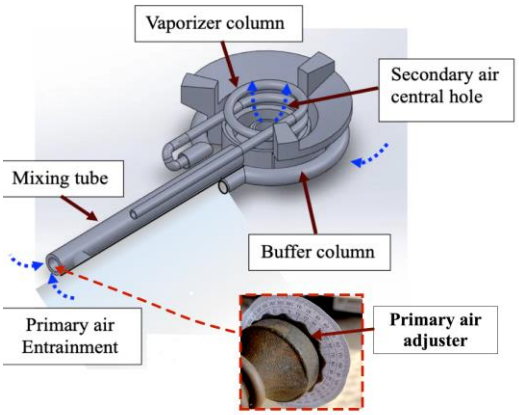
ผลกระทบเชิงลบต่อสิ่งแวดล้อม ส่งเสริมนโยบายของประเทศเพื่อการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสุทธิเป็นศูนย์ (Net Zero Emissions)

2. อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

2.1 โครงสร้างเตาและอุปกรณ์การทดลอง

รูปที่ 1 แสดงวิธีการระเหยเอทานอลด้วยการจ่ายเอทานอลให้ไหลผ่านขดท่อที่ติดตั้งรอบหัวเผาวัสดุพรุนชนิดแผ่นโฟมเซรามิกที่มีโครงร่างตาข่ายแบบสุ่ม น้ำหนักเบาและมีความพรุนสูง ทำให้ช่วงเวลาในการติดไฟสั้น สามารถเข้าสู่สภาวะสมดุลได้อย่างรวดเร็ว เมื่อมีการเผาไหม้เกิดขึ้นจะมีการแผ่รังสีความร้อนจากหัวเผาวัสดุพรุนไปยังขดท่อเอทานอล ทำให้เอทานอลการเกิดระเหยก่อนจ่ายเข้าหัวฉีดแก๊ส การเผาไหม้เกิดภายในโพรงของวัสดุพรุน เกิดการถ่ายเทความร้อนที่แบบแผ่รังสีความร้อนให้กับภาชนะหุงต้ม ซึ่งแตกต่างจากเตาก๊าซแบบดั้งเดิมที่มีการพุ่งชนของเปลวไฟกับภาชนะหุงต้ม (Impinging Flame) ส่งผลให้เตาชนิดแผ่รังสีมีประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงและการเผาไหม้สมบูรณ์ เนื่องจากเปลวไฟไม่ได้ถูกรบกวนด้วยการถูกทำให้เย็นตัวจากการชนภาชนะผิวเย็นกว่า (Quenching) หัวเผา (รูปที่ 2) มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 เซนติเมตร ผนังเตาและห้องผสมทำมาจากเหล็กหล่อ หัวเผาถูกปรับเปลี่ยนจากเตาแก๊สทั่วไปที่มีรูทางออกเปลวไฟขนาดเล็กเรียงเป็นระนาบตามแนวเส้นรอบวงของวงแหวนเป็นวัสดุพรุนโฟมเซรามิกที่มีความพรุนสูงทำมาจากซิลิกอนคาร์ไบด์ (SiC) มีความหนา 12 มิลลิเมตร ความหนาแน่นเชิงเส้นของช่องว่าง 10 ต่อนิ้ว (10 PPI) มีความพรุน (Porosity) โดยประมาณ 80% ทนความร้อนได้มากกว่า 1,200 องศาเซลเซียส และเพื่อป้องกัน

รูปที่ 1 ท่อระเหยเอทานอลที่รับความร้อนจากเตาวัสดุพรุนแผ่รังสี



รูปที่ 2 โครงสร้างเตาเชื้อเพลิงร่วมเอทานอลและแอลพีจี

การเกิดเปลวไฟย้อนกลับ (Flame Flashback) ไปยังห้องผสมและหัวฉีด จึงทำการติดตั้งตาข่ายสแตนเลส 304 ความถี่สูง (60 mesh) ที่ทางออกจากห้องผสมด้านบน (ด้านล่างแผ่นโฟมเซรามิก) นอกจากจะทำหน้าที่เป็นตัวช่วยป้องกันไฟย้อนกลับ (Flame Arrestor) ตาข่ายลวดนี้ยังทำหน้าที่ช่วยดูดซับความร้อน (Heat Absorber) เพื่ออุ่นไอดีที่ไหลผ่านให้มีอุณหภูมิสูงขึ้นก่อนเกิดการเผาไหม้ในห้องเผาไหม้ [9] หัวฉีดก๊าซมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 มิลลิเมตร ติดตั้งบริเวณทางเข้าท่อผสมเพื่อจ่าย

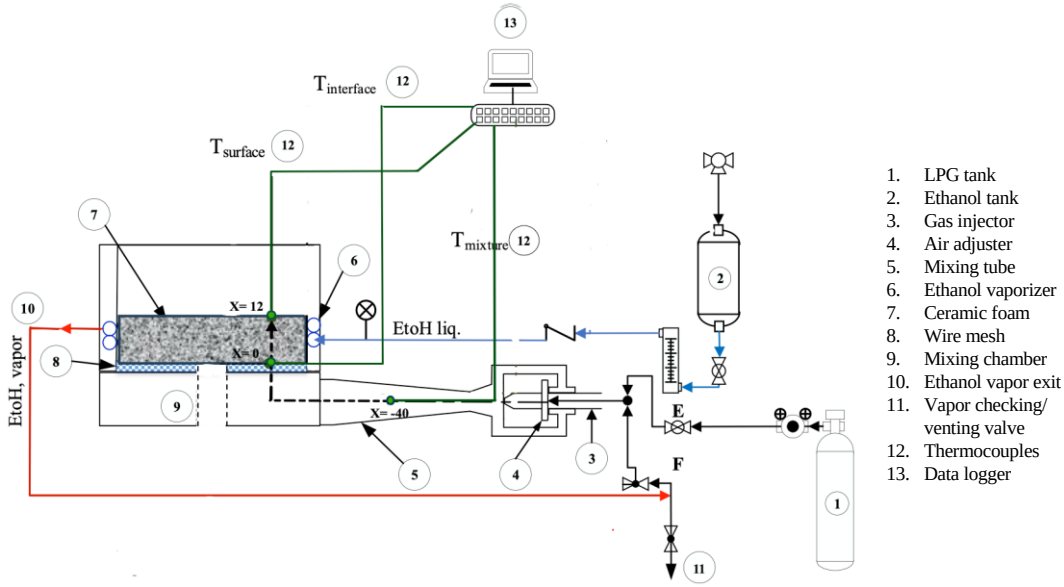
วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2024.08.005

เชื้อเพลิงก๊าซเข้าไปผสมกับอากาศปฐมภูมิ (Primary Air) ที่ถูกเหนี่ยวนำ (Self-aspirating) จากการถ่ายเทโมเมนตัมจากการฉีดแก๊สด้วยความเร็วสูงเข้าท่อผสม โดยมีวาล์วที่สามารถหมุนปรับองศาการเปิดเพื่อควบคุมปริมาณอากาศ (แสดงในรูปที่ 2) ตามทฤษฎีอากาศส่วนนี้สามารถเหนี่ยวนำได้ไม่เกินร้อยละ 70 ของปริมาณอากาศทั้งหมดที่ต้องการเพื่อการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ [10, 11] นอกจากนั้น โครงสร้างของเตายังมีรูแกนกลางด้านล่างของหัวเผาเพื่อเป็นช่องทางเข้าของอากาศทุติยภูมิสำหรับการเผาไหม้ (รูปที่ 2) สำหรับงานวิจัยนี้อากาศทุติยภูมิ (Secondary Air) ถูกเหนี่ยวนำด้วยแรงลอยตัว (Buoyancy Force) จากเปลวไฟที่ร้อนและมีความหนาแน่นต่ำกว่าอากาศ โดยไม่ใช้เครื่องอัดอากาศ ที่ทางออกท่อระเหยเชื้อเพลิงจะเชื่อมต่อกับท่อที่มีการขยายหน้า ตัดท่อให้มากขึ้น (Buffer Column)เพื่อทำหน้าที่ลดความปั่นป่วนของไอระเหยก่อนเข้าสู่หัวฉีดก๊าซต่อไป

2.2 วิธีการทดลอง

รูปที่ 3 แสดงแผนผังอุปกรณ์การทดลองและเครื่องมือวัดเพื่อวัดอุณหภูมิการเผาไหม้และความร้อนภายในเตาด้วยการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิล type-K (Inconel, Nickel-Chromium-Iron, Ø 1 mm, ±1 °C) รวม 3 ตำแหน่ง ตำแหน่งแรก (x=0) เพื่ออุณหภูมิที่รอยต่อ ($T_{interface}$) ระหว่างตาข่ายกับโฟมเซรามิก ตำแหน่งที่สอง (x=-40) เพื่อวัดอุณหภูมิของส่วนผสม ($T_{mixture}$) หรือไอดีระหว่างก๊าซเชื้อเพลิงกับอากาศปฐมภูมิภายในท่อผสมทางต้นน้ำจากระยะอ้างอิงที่รอยต่อ interface และตำแหน่งที่สาม (x=12) เพื่อวัดอุณหภูมิผิวบนของโฟมเซรามิก ($T_{surface}$) และทำการตรวจวัดองค์ประกอบของไอเสียผ่านปล่องควัน (ไม่ถูกแสดงในรูป) โดยใช้เครื่องวิเคราะห์ไอเสียแบบแห้ง (Testo Flue Gas Analyzer, Model 300) สำหรับตรวจวัด CO (0–10,000 ±5 ppm) CO_2 และ O_2 ความคลาดเคลื่อน ±0.1% ก๊าซแอลพีจีที่ใช้ในการทดลองนี้มีองค์ประกอบของโพรเพนและบิวเทนประมาณ 60 และ 40 โดยปริมาตร เอทานอลที่ใช้เป็นชนิดเปียก (Hydrous Ethanol) มีความบริสุทธิ์ 95.6% โดยปริมาตร ตารางที่ 1 เปรียบเทียบคุณสมบัติของทางกายภาพและความร้อนของแอลพีจีและเอทานอล อัตราการป้อนเชื้อเพลิงควบคุมด้วยวาล์วรูเข็มและสอบเทียบอัตราการไหลของเอทานอลและ LPG ด้วยเครื่องช่างดิจิตอลความแม่นยำ 0.01 กรัม และ 0.05 กก. ตามลำดับ การจุดเตาเริ่มด้วยการจ่ายก๊าซแอลพีจีให้เผาไหม้จนอุณหภูมิที่หัวเผาเพิ่มขึ้นถึงค่ากำหนด 250 °C ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่เอทานอลระเหยเป็นไอได้สมบูรณ์ จึงทำการสลับเชื้อเพลิงเป็นไอเอทานอลแทนก๊าซแอลพีจี เมื่อการเผาไหม้เข้าสู่สภาวะสมดุล หรืออุณหภูมิคงที่ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงที่ทุกตำแหน่งวัดจึงทำการบันทึกผลและวัดปริมาณก๊าซไอเสีย ทดลองเปรียบเทียบอิทธิพลของตัวแปรควบคุม คือ ชนิดเชื้อเพลิงได้แก่ ก๊าซแอลพีจีและเอทานอล อัตราการป้อนเชื้อเพลิง (Firing Rate, FR) และองศาเปิดวาล์วสำหรับการเหนี่ยวนำอากาศปฐมภูมิ (θ) ตำแหน่งวาล์วอากาศปิดสุดคือ 0 องศา โดยทำการทดลองที่ เปิด 90 องศา 180 องศา และ 360 องศา ตามลำดับ ที่มีต่อโครงสร้างอุณหภูมิภายในเตาและปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ (CO) ในบทความนี้รายงานค่า CO ที่สภาวะปราศจากอากาศส่วนเกิน (0% Excess Air)

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2024.08.005



รูปที่ 3 แผนภาพชุดอุปกรณ์ทดลองและการติดตั้งเครื่องมือวัด

ตารางที่ 1 คุณสมบัติทางกายภาพและความร้อนของเชื้อเพลงแอลพีจีกับเอทานอล

Parameter	LPG	Ethanol
Chemical formula	60%C_3H_8 40%C_4H_{10}	95.6%C_2H_5OH
Oxygen, O, %by mass	-	34.73
Stoichiometric air ratio, A/F, by mass	15.7	9
LHV, MJ/kg	45.5	27.43
Boiling point at 1atm,°C	-42	78.5
Auto Ignition, °C	410-580	366

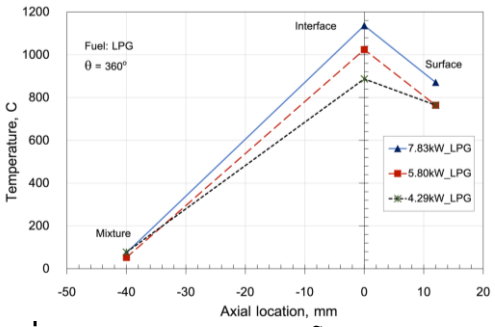
3. ผลการทดลอง

3.1 อิทธิพลของอัตราป้อนความร้อนและอากาศปฐมภูมิต่อคุณลักษณะการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงแอลพีจี

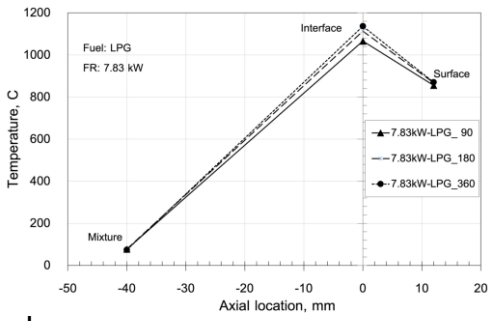
เนื่องจากวัตถุประสงค์ของการพัฒนาเตาเชื้อเพลิงร่วมนี้ คือสามารถใช้เชื้อเพลิงหุงต้มตั้งเดิมคือก๊าซแอลพีจีร่วมกับเอทานอล ในการทดลองเริ่มต้นจะทำการทดสอบด้วยก๊าซแอลพีจีเพื่อใช้ผลการทดสอบเป็นสภาวะอ้างอิงของเตาที่ถูกพัฒนาขึ้นนี้ รูปที่ 4 แสดงโครงสร้างอุณหภูมิภายในเตาในการเผาไหม้แอลพีจีที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิง FR= 4.29 kW – 7.83 kW โดยมีการควบคุมองศาช่องเปิดอากาศปฐมภูมิให้คงที่ θ = 360° จากรูปที่ 4 พบว่า เมื่ออัตราการป้อนเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้นส่งผลให้

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2024.08.005

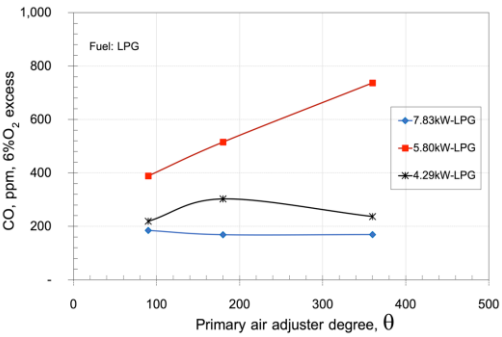
อุณหภูมิภายในเตาเพิ่มขึ้นทั้งที่บริเวณรอยต่อเหนือตาข่าย (Interface) และบนแผ่นวัสดุพรุน (Surface) ในขณะที่อุณหภูมิของผสม (Mixture) แทบจะไม่เปลี่ยนแปลง ทั้งนี้เนื่องจากมีการป้อนความร้อนเข้าสู่ระบบมากขึ้น รูปที่ 5 แสดงอิทธิพลของการปรับองศาช่องเปิดอากาศปฐมภูมิ (θ = 90°, 180°, 360°) ที่ FR = 7.83 kW จากกราฟพบว่า เมื่อองศาเปิดช่องเหนี่ยวนำอากาศมากขึ้นทำให้สามารถเหนี่ยวนำอากาศปฐมภูมิได้มากขึ้นส่งผลดีต่อการเผาไหม้ คืออุณหภูมิการเผาไหม้สูงขึ้น แต่ไม่ส่งผลกระทบต่อปริมาณการปลดปล่อยก๊าซ CO อย่างชัดเจน อย่างไรก็ตามการเปิดองศาช่องเหนี่ยวนำอากาศนี้ไม่ได้ส่งเชิงบวกต่อการเผาไหม้ที่ทุกอัตราการป้อนเชื้อเพลิง ดังแสดงในรูปที่ 6 ที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิงต่ำ FR = 4.29 kW พบว่าการเพิ่มองศาเปิดอากาศปฐมภูมิเพิ่มขึ้นส่งผลให้หัวความดัน (Pressure Head) ของของไหลรวมที่เข้าสู่ระบบลดลง การเหนี่ยวนำอากาศจึงมีประสิทธิภาพลดลง ซึ่งเป็นไปตามปรากฏการณ์เวนทูรี (Venturi Effect) โดยที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิง 5.80 kW มีการปลดปล่อย CO ที่สูงที่สุด ถึงแม้ว่าที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิง 4.29 kW จะมีความดันรวมของของไหลน้อยที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกันทั้ง 3 อัตราการป้อนเชื้อเพลิงก็ตาม แต่ปริมาณของอากาศที่ต้องการในการเผาไหม้ก็น้อยที่สุดเช่นกัน ซึ่งปริมาณของอากาศที่น้อยลงนี้ก็ยังคงเพียงพอที่จะทำให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ ทำให้ที่อัตราส่วนการป้อนเชื้อเพลิงที่ 4.29 kW นี้ก็ยังคงมีการปลดปล่อยก๊าซ CO ต่ำกว่าที่ 5.80 kW



รูปที่ 4 อัตราป้อนความร้อนและโครงสร้างอุณหภูมิภายในเตา: เชื้อเพลิงแอลพีจี



รูปที่ 5 อิทธิพลขององศาช่องเปิดอากาศปฐมภูมิต่อโครงสร้างอุณหภูมิภายในเตา: เชื้อเพลิงแอลพีจี

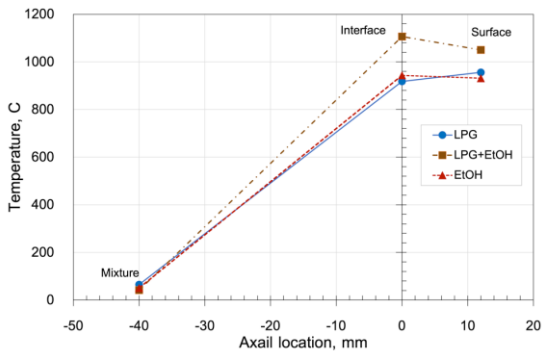


รูปที่ 6 อิทธิพลขององศาช่องเปิดอากาศปฐมภูมิต่อ CO: เชื้อเพลิงแอลพีจี

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2024.08.005

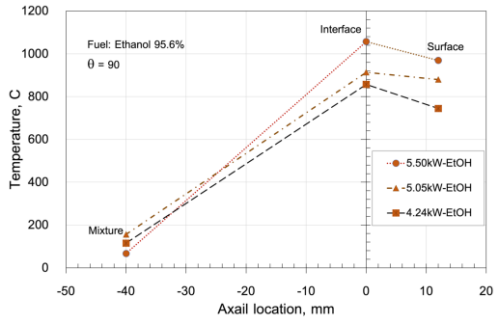
3.2 คุณลักษณะการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงเอทานอล

สำหรับการทดสอบหัวเผาด้วยเชื้อเพลิงเอทานอลชนิด Hydrous Ethanol พบว่า อุณหภูมิการเผาไหม้ใกล้เคียงกับการเผาไหม้เชื้อเพลิงแอลพีจี รูปที่ 7 แสดงโครงสร้างอุณหภูมิเมื่อทำการสลับเชื้อเพลิงจากก๊าซแอลพีจีเป็นเอทานอล พบว่าเมื่อเริ่มจ่ายไอเอทานอลเข้าไปเผาไหม้ร่วมกับก๊าซแอลพีจีอุณหภูมิการเผาไหม้เพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วจากอัตราการป้อนเชื้อเพลิงรวมที่เพิ่มขึ้น แต่เมื่อทำการปิดการจ่ายก๊าซแอลพีจีให้เหลือเพียงเอทานอล อุณหภูมิการเผาไหม้จะลดลง เท่ากับอุณหภูมิของการเผาไหม้ก๊าซแอลพีจีตอนตอนเริ่มต้น รูปที่ 8 แสดงอิทธิพลของอัตราการป้อนเชื้อเพลิงที่มีต่อโครงสร้างอุณหภูมิภายในเตาที่ใช้เชื้อเพลิงเอทานอลที่ FR =4.24 kW 5.05 kW และ 5.50 kW และองศาเปิดอากาศปฐมภูมิคงที่ที่ θ = 90° พบว่า การเพิ่มอัตราการป้อนเชื้อเพลิงเอทานอลให้ผลเช่นเดียวกับแอลพีจี คือ อุณหภูมิการเผาไหม้ภายในหัวเผาสูงขึ้นเมื่ออัตราป้อนเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้น นอกจากนั้นยังพบว่าอุ ณหภูมิการเผาไหม้สูงสุดสูงกว่า 1,100 °C ที่ FR= 5.50 kW อย่างไรก็ตาม ที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิงสูงนี้อุณหภูมิของไอดี (Mixture) ลดลงต่ำกว่าที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิงต่ำกว่า เนื่องจากอัตราการไหลของเชื้อเพลิงสูงทำให้ต้องการความร้อนที่ใช้ในการระเหยเชื้อเพลิงเหลวมากขึ้น รวมถึงที่อัตราส่วนการป้อนเชื้อเพลิงที่สูงอัตราไหลเชิงมวลเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้นส่งผลให้มีการเหนี่ยวนำอากาศเข้าสู่ระบบมากขึ้น ทำให้เกิดการหล่อเย็นที่บริเวณท่อผสมมากขึ้น อุณหภูมิของไอดีจึงลดลง นอกเหนือจากนั้น อิทธิพลขององศาเปิดอากาศปฐมภูมิต่อการเผาไหม้ของเอทานอลมีคุณลักษณะที่แตกต่างไปจากแอลพีจี ในรูปที่ 9 อิทธิพลขององศาเปิดอากาศปฐมภูมิที่ FR = 5.50 kW ซึ่งเป็นอัตราป้อนความร้อนของเชื้อเพลิงเอทานอลสูงที่สุดสำหรับงานวิจัยนี้ จากรูปพบว่า เมื่อปรับองศาเปิดเพิ่มขึ้น ปริมาณอากาศปฐมภูมิถูกเหนี่ยวนำได้มากขึ้น อุณหภูมิการเผาไหม้จะค่อยๆลดลง สันนิษฐานว่าเกิดการเผาไหม้แบบเจือจางเกินไป เนื่องจาก เอทานอลมีค่าความร้อนต่ำกว่าแอลพีจีค่อนข้างสูง นอกจากนั้นเอทานอลยังมีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบในโครงสร้างโมเลกุลทำให้เอทานอลมีคุณสมบัติเสมือนเชื้อเพลิงที่มีความเจือจางเมื่อเทียบกับก๊าซแอลพีจี แสดงดังรูปที่ 10 สังเกตได้ว่าที่บริเวณหัวเผามีความสว่างของการเผาไหม้หรือการแผ่รังสีลดลงเมื่อองศาเปิดอากาศปฐมภูมิเพิ่มขึ้นจาก θ = 90° 180° และ 360° ตามลำดับ เนื่องจากอุณหภูมิการเผาไหม้ลดลง

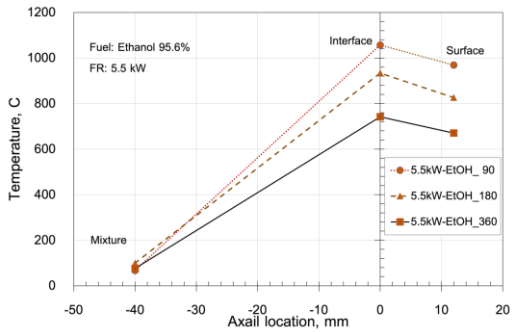


รูปที่ 7 โครงสร้างอุณหภูมิการเผาไหม้ภายในเตาในช่วงเวลาของการสลับเชื้อเพลิงแอลพีจีเป็นเอทานอล

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2024.08.005



รูปที่ 8 อิทธิพลของอัตราป้อนเชื้อเพลิงต่อโครงสร้างทางความร้อนของการเผาไหม้: เชื้อเพลิงเอทานอล



รูปที่ 9 อิทธิพลขององศาช่องเปิดอากาศปฐมภูมิต่อโครงสร้างอุณหภูมิการเผาไหม้: เชื้อเพลิงเอทานอล

(ก) θ= 90° (ข) θ= 180° (ค) θ=360°

รูปที่ 10 เปลวไฟปรากฏของเตาแผ่รังสีเชื้อเพลิงเอทานอลที่องศาเปิดวาล์วอากาศปฐมภูมิต่างๆ

3.3 เปรียบเทียบคุณลักษณะการเผาไหม้ระหว่างเชื้อเพลิงแอลพีจีและเอทานอล

รูปที่ 11 และรูปที่ 12 เปรียบเทียบอุณหภูมิสูงสุดของการเผาไหม้ (Peak Temp.) และ CO ตามลำดับ ระหว่างป้อนเชื้อเพลิงแอลพีและเอทานอลในเตาที่พัฒนาขึ้นนี้ เนื่องจากเตาถูกพัฒนาขึ้นจากเตาดั้งเดิมที่ใช้ก๊าซแอลพีจี โดยยังคงโครงสร้างหลักและองค์ประกอบหัวเผาเดิมชนิดแรงดันสูงขนาด KB5 จึงพบว่าการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงแอลพีจีมีประสิทธิภาพที่ดีกว่าการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงเอทานอลทั้งด้านอุณหภูมิการเผาไหม้ที่สูงกว่า (รูปที่ 11) และการปลดปล่อย CO ต่ำ ไม่เกิน 1,000 ppm (รูปที่ 12) ที่ทุกอัตราป้อนเชื้อเพลิง ซึ่งมีค่าต่ำกว่าค่าสูงสุดของ CO ที่กำหนดในมาตรฐานเตาหุงต้มของไทย มอก.2312-2545 [12] CO ไม่เกิน 2,000 ppm และของสหภาพยุโรป EN 203-1:1992 [13] CO ไม่เกิน 1,000 ppm ที่สภาวะปราศจากอากาศส่วนเกิน (0% excess air) ในขณะที่การเผาไหม้ของเอทานอลมีค่า CO มากกว่า 1,000 ppm ที่ทุกอัตราป้อนเชื้อเพลิงโดยเฉพาะที่อัตราส่วนสมมูล (Equivalence Ratio, ϕ) ต่ำ เนื่องจาก การเผาไหม้มีความเจือจางของเชื้อเพลิงสูง อย่างไรก็ตาม CO จะมีค่าลดลงเมื่ออัตราป้อนเชื้อเพลิงเอทานอลสูงขึ้นหรือมีความหนาแน่นของเชื้อเพลิงในส่วนผสมหรือไอดีมากขึ้น หมายเหตุอัตราส่วนสมมูลแสดงในรูปที่ 12 คืออัตราส่วนสมมูลโดยรวม (Overall Equivalence Ratio, $\phi_{overall}$) ซึ่งเป็นอัตราส่วนจากประเมินจากมวลอากาศรวมทั้งปฐมภูมิและทุติยภูมิที่เหนี่ยวนำหลังจากการเผาไหม้ส่วนแรก คำนวณโดยวิธีทางอ้อมจากการวัดก๊าซไอเสียที่บริเวณเหนือหัวเผา ตามสมการที่ 1 [14, 15]

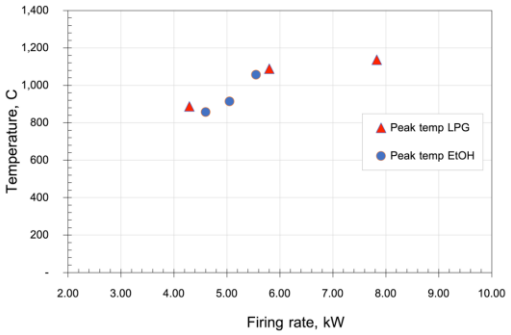
วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2024.08.005

$$\phi_{overall} = \frac{(21 - O_2)}{21} \quad (1)$$

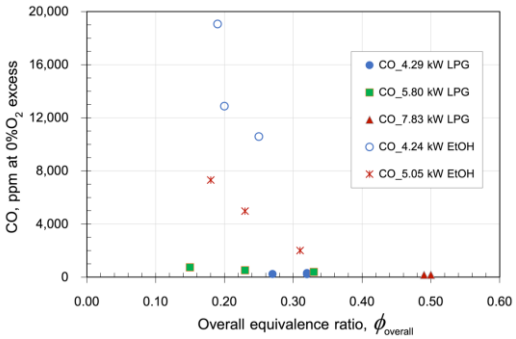
ซึ่งอัตราส่วนสมมูลโดยรวมจะมีค่าต่ำกว่าอัตราส่วนสมมูลที่แท้จริงจากปริมาณอากาศปฐมภูมิที่ถูกเหนี่ยวนำเข้าสู่ห้องผสม นอกจากนั้น การเผาไหม้ด้วยก๊าซแอลพีจีให้ช่วงการทำงานที่กว้างมากกว่าอัตราป้อนความร้อนสูงสุดของแอลพีจีมากกว่า 7.83 กิโลวัตต์ แต่ด้วยข้อจำกัดของเครื่องมือวัด จึงไม่ทำการทดสอบที่อัตราป้อนมากกว่านี้ ในขณะที่อัตราป้อนความร้อนสูงสุดของเอทานอล คือ 5.50 กิโลวัตต์ เนื่องจากเอทานอลมีค่าความร้อนต่ำกว่าก๊าซแอลพีจี จากขีดจำกัดของขนาดหัวฉีดที่ใช้ คือเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีดเท่ากับ 0.5 mm ซึ่งจะสามารถเพิ่มอัตราป้อนความร้อนของเอทานอลให้สูงขึ้นได้เมื่อปรับเปลี่ยนหัวฉีดก๊าซให้มีขนาดที่ใหญ่ขึ้นอย่างไรก็ตาม พบว่าอุณหภูมิสูงสุดของการเผาไหม้ของเอทานอลมีค่าใกล้เคียงกับการเผาไหม้แอลพีจีที่อัตราป้อนความร้อนใกล้เคียงกัน คือ 1,089 °C และ 1,056 °C สำหรับแอลพีจี (FR = 5.80 kW) และ เอทานอล (FR= 5.50 kW) ตามลำดับ แสดงให้เห็นถึงสภาวะการทำงานที่พึงประสงค์ของหัวเผาเมื่อป้อนเชื้อเพลิงเอทานอล คือให้อุณหภูมิการเผาไหม้สูงและปลดปล่อยก๊าซไอเสียหรือ CO ต่ำ เทียบเท่าก๊าซแอลพีจี

4. สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ทำการพัฒนาเตาหุงต้มเชื้อเพลิงร่วมที่สามารถป้อนเชื้อเพลิงได้ทั้งก๊าซแอลพีจีและเอทานอล เพื่อลดการพึ่งพาพลังฟอสซิลในภาคครัวเรือน จากการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีการเผาไหม้ในวัสดุพรุนโฟมเซรามิก SiC ที่มีความพรุนสูงและน้ำหนักเบา ส่งเสริมให้เกิดการหมุนเวียนความร้อนภายในทำให้เตาเผาไหม้ได้อุณหภูมิสูงถึงแม้จะใช้เอทานอลซึ่งเป็นเชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนต่ำ การทดสอบสมรรถนะการเผาไหม้ของเตาเปรียบเทียบการป้อนเชื้อเพลิงก๊าซแอลพีจีและเอทานอล ให้ผลสำคัญดังนี้



รูปที่ 11 อิทธิพลของอัตราการป้อนความร้อนต่ออุณหภูมิสูงสุดของการเผาไหม้



รูปที่ 12 อิทธิพลของอัตราการป้อนความร้อนและอัตราส่วนสมมูลต่อการปลดปล่อย CO

4.1 เมื่ออัตราป้อนเชื้อเพลิงทั้งแอลพีจีและเอทานอลสูงขึ้นอุณหภูมิการเผาไหม้ในหัวเผาสูงขึ้น การปลดปล่อยก๊าซ CO ลดลง

4.2 อิทธิพลขององศาเปิดอากาศปฐมภูมิส่งผลต่อการเผาไหม้ก๊าซแอลพีจีและเอทานอลในทิศทางตรงกันข้าม องศาเปิดฯมากขึ้นการเผาไหม้แอลพีจีให้อุณหภูมิสูงขึ้นและปลดปล่อยก๊าซ CO ลดลง แต่ส่งผล

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2024.08.005

ให้อุณหภูมิการเผาไหม้ของเอทานอลลดลงและปลดปล่อยก๊าซ CO เพิ่มขึ้น

4.3 การป้อนเชื้อเพลิงแอลพีจีให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้ที่ดีกว่าป้อนเอทานอลทั้งอุณหภูมิการเผาไหม้สูงกว่าและปลดปล่อยก๊าซ CO ต่ำกว่า

4.4 สภาวะการทำงานที่เหมาะสมของหัวเผาเมื่อใช้เชื้อเพลิงเอทานอล คือ อัตราป้อนความร้อน 5.50 กิโลวัตต์ ให้อุณหภูมิการเผาไหม้ใกล้เคียงกับก๊าซแอลพีจีที่อัตราป้อนความร้อนใกล้เคียงกัน

ผลจากการวิจัยนี้แสดงให้เห็นถึงศักยภาพในการนำเอทานอลมาใช้เป็นเชื้อเพลิงหุงต้มในครัวเรือนสูง ทั้งด้านอุณหภูมิการเผาไหม้สูงและอัตราการป้อนเชื้อเพลิงที่เหมาะสม แต่การปลดปล่อยก๊าซ CO ยังค่อนข้างสูงจึงยังต้องมีการวิจัยและพัฒนาต่อไปเพื่อให้เตามีประสิทธิภาพการเผาไหม้ที่ดีขึ้นและปลอดภัยต่อผู้ใช้งาน

5. กิตติกรรมประกาศ

ผลงานวิจัยนี้จัดทำขึ้นที่ห้องปฏิบัติการวิจัยเทคโนโลยีการเผาไหม้ สถาบันพัฒนาและฝึกอบรมต้นแบบ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

6. เอกสารอ้างอิง

[1] http://www.eppo.go.th/images/Energy-Statistics/energyinformation/Energy_Statistics/00All.pdf. (Accessed on 1 June 2023)

[2] https://www.dede.go.th/more_news.php?cid=81&filename=index. (Accessed on 20 June 2023)

[3] F.J. Weinberg; Heat-recirculating burners: principles and some recent developments, Combustion Science and Technology, 1986, 121, 3-22.

[4] S.B. Sathe; M.R. Kulkarni, R.E. Peck and T.W. Tong, An experimental and theoretical study of porous radiant burner performance, Symposium (International) on Combustion, 1991, 1011-1018.

[5] S.A. Lloyd, and F.J. Weinberg, A burner for mixtures of very low heat content, Nature, 1974, 251, 47-49.

[6] H. Gao, Y. Wang, S. Zong, Y. Ma, and C. Zhang, Experimental investigation of a self-sustained liquid fuel burner using inert porous media, Energies, 2023, 16, 5564.

[7] G.S. Sinha, P. Muthukumar, Journal of Physics: Conference Series, 2019, 1240, 012136.

[8] M. Toledo, F. Gonzalez, J. Ellzey, Hydrogen production from methanol and ethanol partial oxidation, Energy Fuels, 2014, 28(5), 3453-3459.

[9] A. Chaelek, U.M. Grare, and S. Jugjai, Self-aspirating/air-preheating porous medium gas burner, Applied Thermal Engineering, 2019, 153, 181-189.

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2024.08.005

[10] R. Pritchard, J.J. Guy and N.E. Connor, Handbook of industrial gas utilization: engineering principles and practice, Van Nostrand Reinhold Co., NY, USA, 1977.

[11] A. Namkhat and S. Jugjai, Primary air entrainment characteristics for a self-aspirating burner, Model and Experiments, 2010, 35(4), 1701–1708.

[12] TIS 2312-2549, Standard specification for domestic gas stoves for using liquefied fuel, 2006. (in Thai).

[13] EN 203-1:1992, European committee for standardization. Specification for gas heated catering equipment- Part 1: Safety requirements, 1992.

[14] J. X. Zhou, B. Moreau, C. Mounaïm-Rousselle and F. Foucher, Oil and Gas Science and Technology, Revue d'IFP Energies Nouvelles, 2016, 71, 49.

[15] S. Jugjai, Combustion, Chulalongkorn University Press, Bangkok, Thailand, 2004. (in Thai).