

การพัฒนาหัวเผาวัสดุพรุนแบบทรงกรวยโดยการเผาไหม้แบบจ่ายอากาศเป็นชั้น Development of a Conical Porous Burner by Air Staged Combustion

กาญจนา วรณญาติ ทรงสุภา พุ่มชุมพล อำไพศักดิ์ ทิบุญมา และ อภินันต์ นามเขต*

Kanjana Wannayat, Songsupa Pumchumpol, Umphisak Teeboonma and Apinunt Namkhat*

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Ubon Ratchathani University

*E-mail: apinunt.n@ubu.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการวิเคราะห์สมรรถนะของหัวเผาวัสดุพรุนแบบทรงกรวยโดยการเผาไหม้แบบจ่ายอากาศเป็นชั้น เพื่อแสดงประสิทธิภาพเชิงความร้อน (η_{th}) และการปลดปล่อยมลพิษ การทดสอบสมรรถนะการเผาไหม้ของหัวเผาใช้การทดสอบตามมาตรฐาน DIN EN 203-2 หม้อภาชนะหุงต้มในการทดลองใช้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 45 เซนติเมตร และน้ำต้มปริมาณ 30.6 กิโลกรัม โดยวัสดุพรุนถูกนำมาประยุกต์ใช้กับหัวเผาวัสดุพรุนแบบจ่ายอากาศเป็นชั้น ซึ่งจะนำผลการทดลองมาเปรียบเทียบกับหัวเผาแบบดั้งเดิม (CB) ซึ่งข้อมูลที่ได้นี้จะประโยชน์สำหรับการออกแบบชุดหัวเผาประสิทธิภาพสูงในอนาคต โดยมีตัวแปรที่ศึกษาคือ ตำแหน่งการจ่ายอากาศส่วนที่สอง (ชั้นที่ 1, ชั้นที่ 2 และชั้นที่ 3) และปริมาณการจ่ายอากาศส่วนที่สอง (Q_{air}) คือ 100, 200, 400, 600, 800 และ 1,000 ลิตรต่อชั่วโมง โดยมีค่าความพรุนของวัสดุพรุนคงที่ที่ 0.44 ผลการศึกษาพบว่า กรณีการจ่ายอากาศส่วนที่สอง ณ ตำแหน่งชั้นที่ 2 ด้วยปริมาณอากาศเท่ากับ 600 ลิตรต่อชั่วโมง ให้ค่า η_{th} สูงที่สุดเท่ากับ 58.65% และปลดปล่อยมลพิษคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ต่ำกว่า 306.47 ppm ที่สภาวะอากาศส่วนเกิน 0% นอกจากนี้ หัวเผาวัสดุพรุนให้ค่า η_{th} สูงกว่าหัวเผา CB อย่างไรก็ดีตาม การปลดปล่อยมลพิษ CO ยังอยู่ในระดับที่ค่อนข้างสูงเนื่องจากมีความดันตกคร่อมเกิดขึ้นภายในหัวเผาสูง

คำสำคัญ: วัสดุพรุน ประสิทธิภาพเชิงความร้อน การปลดปล่อยมลพิษ เตาแก๊สหุงต้ม

Abstract

The purpose of this research was to study the performance analysis of a conical porous burner by air staged combustion. The thermal efficiency (η_{th}) and pollutants were evaluated. Burner combustion performance was tested according to DIN EN 203-2, with a 45 cm diameter cooking pot and 30.6 kg of boiled water. Porous materials were applied to an air staging porous media burner. The experimental results were then compared with conventional burner (CB). This information will be useful for the design of future high-efficiency burners. The study variables were the secondary air supply position (stage#1, stage#2 and stage#3) and the flow rate of the secondary air supply (Q_{air}) was 100, 200, 400, 600, 800 and 1,000 L/h with a constant porosity of 0.44. The results showed that in the case of secondary air supply at stage#2 with 600 L/h yields the maximum η_{th} of 58.65%, while the concentration of carbon monoxide (CO) is lower than 306.47 ppm at 0% air excess. In addition, the porous media burner yields higher η_{th} than that of the CB.

However, this burner emits relatively high CO due to the high-pressure drop generated inside porous media burner.

Keywords: Porous Medium, Thermal Efficiency, Pollutants Emission, Cooking Burner

บทนำ

แก๊สปิโตรเลียมเหลว หรือ แอลพีจี (Liquefied Petroleum Gas, LPG) เป็นส่วนผสมระหว่างโพรเพน (Propane) และบิวเทน (Butane) ที่ได้จากกระบวนการแยกแก๊สธรรมชาติและการกลั่นปิโตรเลียม เป็นพลังงานที่มีอยู่อย่างจำกัดและมีความต้องการใช้อย่างแพร่หลายในประเทศไทย ทั้งในภาคครัวเรือน ภาคอุตสาหกรรม หรือแม้กระทั่งภาคการขนส่ง โดยจากข้อมูลสถิติพลังงานของประเทศไทยปี พ.ศ. 2566 ของสำนักงานนโยบายและแผนพลังงานพบว่า มีการนำแก๊สแอลพีจีไปใช้ในภาคอุตสาหกรรมปิโตรเลียมเคมีในปริมาณที่สูงถึง 38% รองลงมาคือการใช้ในภาคครัวเรือนอยู่ที่ 35% ภาคการขนส่ง 15% และภาคอุตสาหกรรม 11% (สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน, 2566) จะเห็นได้ว่า ปริมาณการใช้ในภาคครัวเรือนในสภาวะการณ์ปัจจุบันยังคงมีปริมาณค่อนข้างสูง ถึงแม้ว่าประเทศไทยจะสามารถผลิตแก๊สแอลพีจีได้เอง แต่เนื่องจากความต้องการใช้ในปริมาณที่มาก ส่งผลให้ประเทศไทยต้องตระหนักถึงการพึ่งพาตนเองให้มากยิ่งขึ้น ปัจจุบันแก๊สแอลพีจีถูกนำมาใช้สำหรับเตาแก๊สหุงต้มทั้งในภาคครัวเรือนและอุตสาหกรรม ซึ่งในขณะเดียวกันเตาแก๊สหุงต้มที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันยังมีประสิทธิภาพเชิงความร้อนค่อนข้างต่ำ ทำให้การสูญเสียพลังงานไปอย่างน่าเสียดาย

จากปัจจัยดังกล่าว จึงเป็นสาเหตุทำให้เกิดแนวความคิดที่จะพัฒนาการออกแบบและสร้างเตาแก๊สหุงต้มที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบันให้มีประสิทธิภาพเชิงความร้อนที่สูงขึ้น เช่น การนำหลักการอนุส่วนผสม (Mixture) มาประยุกต์ใช้งาน ซึ่งจะนำเอาวัสดุพอร์ (Porous medium) เข้ามาช่วยในการอนุส่วนผสม เนื่องจากวัสดุพอร์มีลักษณะเด่นคือ สามารถเป็นได้ทั้งตัวรับความร้อนและตัวแผ่รังสีความร้อน โดยความร้อนจากการเผาไหม้จะแผ่รังสีมายังส่วนผสมและอนุให้มีอุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งจะช่วยให้เตามีประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงขึ้นและลักษณะเด่นของวัสดุพอร์อีกข้อคือมีพื้นที่ผิวต่อปริมาตรสูง ซึ่งทำให้ส่งผลต่อการถ่ายเทความร้อนทั้งการนำความร้อน (Conduction) การพาความร้อน (Convection) และการแผ่รังสีความร้อน (Radiation) จึงช่วยส่งเสริมการถ่ายเทความร้อนจากหัวเผาไปยังหม้อภาชนะได้ดีขึ้น จากลักษณะดังกล่าวทำให้การเผาไหม้ภายในวัสดุพอร์นั้นช่วยส่งเสริมการเผาไหม้ภายในตัวเอง จากทางออกของหัวเผา (Downstream) ไปยังด้านทางเข้าของหัวเผา (Upstream) ทำให้การเผาไหม้เกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์มากขึ้น สามารถทำให้อุณหภูมิการเผาไหม้สูงกว่าทางทฤษฎี และส่งผลให้เกิดเปลวไฟแบบซูเปอร์อะเดียบาติก (Super adiabatic flame) ทำให้ความเร็วในการเผาไหม้ (Burning velocity) เพิ่มขึ้น อีกทั้งความเข้มของการแผ่รังสีในท้องเผาไหม้มากขึ้น ดังนั้น อุณหภูมิภายในท้องเผาไหม้จึงสูงสม่ำเสมอและขยายช่วงการทำงานของเตาให้สามารถเผาไหม้ที่สภาวะเฉื่อยจนได้มากกว่าขอบเขตการติดไฟ หรือสามารถเผาไหม้เชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนต่ำที่ไม่สามารถเผาไหม้ในหัวเผาทั่วไปได้ (ณัฐวุฒิ, 2544; วสันต์, 2547; ภาณุวัฒน์, 2543) ผ่านมามีงานวิจัยที่ศึกษาการนำวัสดุพอร์มาใช้กับหัวเผาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อน เช่น Yoksenakul and Jugjai (2011) ทำการออกแบบหัวเผาวัสดุพอร์โดยการเปลี่ยนจากหัวเผาแบบดั้งเดิม (CB) มาเป็นแบบวัสดุพอร์ (Self-aspirating Porous Medium Burner, SPMB) โดยที่หัวเผาแบบ SPMB จะให้เปลวไฟแบบผิงลงไปในหัวเผาวัสดุพอร์ โดยเผาไหม้ให้ค่า CO น้อยกว่า 200 ppm และค่า NOx น้อยกว่า 98 ppm ต่อมา อาวุธและจารุวัตร (2551) ได้เปรียบเทียบพฤติกรรมการเผาไหม้ของแก๊สปิโตรเลียมเหลวในหัวเผาวัสดุพอร์กับหัวเผาแบบหมุนวนพบว่า เมื่อทำการเผาไหม้ด้วยหัวเผาวัสดุพอร์จะให้อุณหภูมิและประสิทธิภาพการเผาไหม้มีค่ามากกว่าหัวเผาแบบหมุนวน เนื่องจากวัสดุพอร์มีส่วนช่วยส่งเสริมการเผาไหม้ แต่ยังมีข้อเสียที่

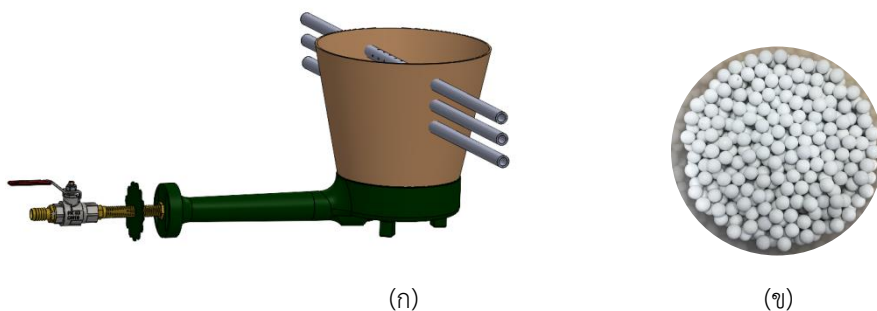
สำคัญคือปริมาณการปลดปล่อยมลพิษ เช่น CO ที่สูง เนื่องจากเกิดความดันตกคร่อมภายในเตาสูง จึงเหนี่ยวนำอากาศส่วนแรกมาใช้ในการเผาไหม้ได้น้อยลง ต่อมาอาชิน (2556) และคำณวน (2557) ได้พัฒนาหัวเผาให้มีการเพิ่มปริมาณอากาศในการเผาไหม้มากขึ้น โดยการออกแบบหัวเผาให้เป็นแบบวงแหวนชนิดมีการเหนี่ยวนำอากาศด้วยตัวเองสำหรับเชื้อเพลิงแก๊สและเชื้อเพลิงเหลว ตามลำดับ พบว่าเปลวไฟสามารถติดฝั่งและมีเสถียรภาพในชั้นวัสดุพูน และการมีรูทางเข้าอากาศส่วนที่สองช่วยให้หัวเผาสามารถเหนี่ยวนำอากาศมาช่วยในการเผาไหม้ได้มากขึ้น ส่งผลให้สามารถลดการปลดปล่อยมลพิษ CO เมื่อเทียบกับหัวเผากรณีที่ไม่มีการนำอากาศส่วนที่สอง ทั้งนี้ปริมาณการปลดปล่อยมลพิษ CO ยังถือว่าสูงกว่าค่ามาตรฐานที่กำหนด (Thailand industrial standard, 2006) ดังนั้นหัวเผาวัสดุพูนที่ผ่านมายังคงมีปริมาณการปลดปล่อยมลพิษค่อนข้างสูง เนื่องจากเป็นหัวเผาที่อาศัยการเหนี่ยวนำอากาศด้วยตัวเองเพื่อใช้ในการเผาไหม้ ซึ่งเหนี่ยวนำได้น้อยเนื่องจากอิทธิพลของความดันตกคร่อมที่สูงภายในหัวเผาวัสดุพูน อภิสิทธิ์และคณะ (2565) ได้ปรับปรุงหัวเผาใหม่โดยการเติมอากาศแบบบังคับที่ได้จากเครื่องอัดอากาศ เพื่อให้มีอากาศเพียงพอต่อการเผาไหม้ แต่ปัญหาที่พบคือเปลวไฟไม่เสถียรภายในหัวเผา (เกิดการไหลย้อนกลับของเปลวไฟ หรือ Flashback) เนื่องจากห้องเผาไหม้ของหัวเผามีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอก ส่งผลให้ความเร็วในการลามของเปลวไฟสามารถเอาชนะความเร็วการไหลของแก๊สส่วนผสมได้ง่าย (Turns, 2011) ทำให้ปริมาณการปลดปล่อยมลพิษ CO ยังคงสูงกว่าค่ามาตรฐานที่กำหนด (Thailand industrial standard, 2006)

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะทำการพัฒนาหัวเผาวัสดุพูนใหม่ให้มีห้องเผาไหม้เป็นรูปทรงกรวยเพื่อป้องกันการไหลย้อนกลับของเปลวไฟ และศึกษาการเติมอากาศส่วนที่สอง (2nd Air Supply) แบบบังคับจากเครื่องอัดอากาศให้แก่หัวเผาวัสดุพูนเพื่อให้มีอากาศเพียงพอต่อการเผาไหม้โดยการจ่ายอากาศแบบเป็นชั้น ซึ่งทำการติดตั้งตำแหน่งการจ่ายอากาศส่วนที่สอง 3 ตำแหน่งคือ ด้านล่าง (stage#1) กึ่งกลาง (stage#2) และด้านบน (stage#3) ของชั้นวัสดุพูนภายในหัวเผา และปรับปริมาณการจ่ายอากาศต่าง ๆ ดังนี้ 100, 200, 400, 600, 800 และ 1,000 ลิตรต่อชั่วโมง โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของตำแหน่งการจ่ายอากาศและปริมาณการจ่ายอากาศต่อประสิทธิภาพเชิงความร้อน (η_{th}) และการปลดปล่อยมลพิษ และนำผลการทดลองที่ได้ไปเปรียบเทียบกับหัวเผาแบบดั้งเดิมที่มีขายโดยทั่วไป (CB) เพื่อให้เห็นแนวทางการพัฒนาหัวเผาต่อไปในอนาคต ซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อการใช้งานทั้งในภาคอุตสาหกรรมและครัวเรือน

วิธีการวิจัย

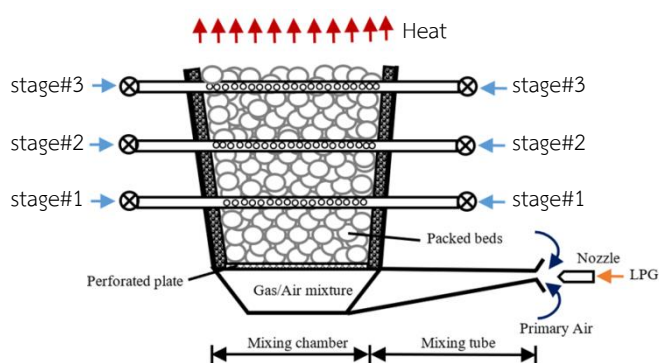
หัวเผาวัสดุพูนที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้แสดงดังภาพที่ 1(ก) โดยการดัดแปลงจากเตาแก๊สหุงต้มขนาด KB-5 ที่มีขายทั่วไปในท้องตลาด ซึ่งนำเอาหัววงแหวนบนหัวเผาทิ้งและแทนที่ด้วยชุดหัวเผาวัสดุพูนแบบเม็ดกลมอัดแน่น ซึ่งมีห้องเผาไหม้ขนาดความสูง 14 เซนติเมตร และความกว้างปากทางออกของหัวเผาคือ 18 เซนติเมตร โดยวัสดุพูนที่ใช้คือเม็ดอะลูมินา มีชื่อทางเคมีคือ อะลูมิเนียมออกไซด์ (Aluminium Oxide: Al_2O_3) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 มิลลิเมตร แสดงดังภาพที่ 1(ข) ซึ่งมีค่าความพรุน (Porosity, ϵ) เท่ากับ 0.44 วางอยู่บนชั้นแผ่นตะแกรง วิธีการหาค่า ϵ อาศัยหลักการทดลองโดยการเทน้ำ เริ่มจากการนำเม็ดอะลูมินาใส่ลงไปในภาชนะบรรจุจนเต็ม จากนั้นเติมน้ำให้เต็มภาชนะและทิ้งไว้ประมาณ 5 นาที เพื่อให้ น้ำซึมเข้าไปในเนื้อวัสดุพูนแล้วเทน้ำออกจากภาชนะ จากนั้นตวงน้ำที่ทราบปริมาตรแน่นอนด้วยภาชนะตวง เช่น บีกเกอร์ แล้วทำการเติมน้ำอีกครั้งให้เต็มภาชนะเหมือนเดิมจนถึงระดับผิวด้านบนของวัสดุพูน และอ่านค่าปริมาตรน้ำที่เติมลงไปจากบีกเกอร์ ปริมาตรน้ำที่เติมลงไปนี้คือปริมาตรช่องว่างที่น้ำเข้าไปแทนที่ได้ (Void-Space Volume, V_s) นำปริมาตรน้ำนี้ไปหารกับปริมาตรของภาชนะที่บรรจุทั้งหมด (Total or Bulk Volume, V_T) จะสามารถหาค่า ϵ ได้ดังสมการที่ (1)

$$\text{Porosity } (\epsilon) = \frac{V_s}{V_T} \quad (1)$$

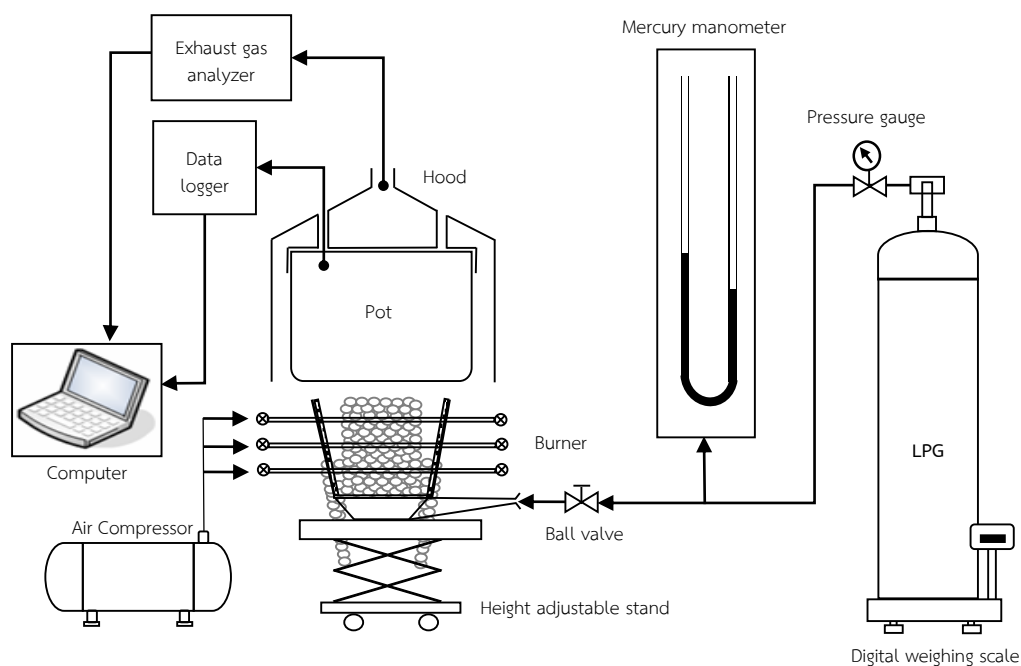


ภาพที่ 1 โครงสร้างหัวเผาวัสดุพูนแบบทรงกรวย (ก) และวัสดุพูนชนิดเม็ดกลมอัดแน่น (ข)

หลักการทำงานของหัวเผาแสดงดังภาพที่ 2 เริ่มจากเชื้อเพลิงแก๊ส LPG ถูกป้อนด้วยความเร็วสูงผ่านหัวฉีดแก๊ส ซึ่งจะเหนี่ยวนำเอาอากาศส่วนแรก (Primary air) เข้าไปผสมกันในท่อผสมเรียกว่าส่วนผสม จากนั้นส่วนผสมของเชื้อเพลิง และอากาศจะไหลผ่านชั้นของวัสดุพูน และถูกจุดติดไฟในชั้นของวัสดุพูน ภายในชั้นวัสดุพูนความร้อนจากการเผาไหม้จะถ่ายเทไปในทุกทิศทาง ซึ่งจะทำให้แก๊สผสมที่อยู่ด้านล่างถูกอุ่นให้ร้อนก่อนการเผาไหม้ จากนั้นแก๊สผสมที่ถูกอุ่นจะถูกใช้ในการเผาไหม้ ซึ่งจะทำให้อุณหภูมิของการเผาไหม้เพิ่มสูงขึ้นส่งผลให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเพิ่มสูงขึ้นตาม แต่ในขณะเดียวกันผลของวัสดุพูนจะทำให้เกิดความดันตกคร่อมภายในหัวเผาเพิ่มสูงขึ้น ดังนั้นปริมาณอากาศส่วนแรกที่ถูกเหนี่ยวนำโดยธรรมชาติ (Natural draft) จะไม่สามารถเข้าไปในห้องเผาไหม้ได้อย่างเพียงพอ ส่งผลให้เกิดการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ ดังนั้นจึงมีการติดตั้งท่อเติมอากาศส่วนที่สอง (Secondary air) เพื่อเพิ่มอากาศในการเผาไหม้ให้เพียงพอ โดยทำการติดตั้งทั้งหมด 3 ระดับ คือ ชั้นที่ 1 (stage#1) จะอยู่ใกล้ทางเข้าชั้นวัสดุพูน ชั้นที่ 2 (stage#2) จะอยู่กึ่งกลางชั้นวัสดุพูน และชั้นที่ 3 (stage#3) จะอยู่ใกล้ทางออกชั้นวัสดุพูน ซึ่งท่อเติมอากาศจะแทรกเข้าไปในชั้นของวัสดุพูนและมีการเจาะรูขนาดเล็ก (เส้นผ่านศูนย์กลาง 3 มิลลิเมตร) กระจายโดยรอบท่อที่อยู่ภายในหัวเผา เพื่อให้อากาศที่เติมเข้าไปสามารถกระจายเข้าไปในชั้นของวัสดุพูนได้อย่างสม่ำเสมอ ซึ่งทั้ง 3 ท่อ จะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากันคือ 13 มิลลิเมตร โดยท่อชั้นที่ 2 (stage#2) จะอยู่ตำแหน่งกึ่งกลางความสูงของหัวเผา ในขณะเดียวกัน ท่อชั้นที่ 1 (stage#1) จะอยู่ด้านล่างท่อชั้นที่ 2 (stage#2) มีระยะห่าง 3.5 เซนติเมตร และท่อชั้นที่ 3 (stage#3) จะอยู่ด้านบนท่อชั้นที่ 2 (stage#2) มีระยะห่าง 3.5 เซนติเมตร เช่นเดียวกัน โดยในการทดลองจะทำการเติมอากาศที่ชั้นใดชั้นหนึ่งเพียงชั้นเดียวเท่านั้น จากนั้นทำการทดสอบในชั้นที่เหลือตามลำดับ อีกทั้งปริมาณการเติมอากาศทำการปรับ 6 ค่า คือ 100, 200, 400, 600, 800 และ 1,000 ลิตรต่อชั่วโมง โดยแหล่งจ่ายอากาศส่วนที่สองนี้ได้จากเครื่องอัดอากาศ (Air compressor)



ภาพที่ 2 หลักการทำงานของหัวเผาวัสดุพูนแบบทรงกรวยที่มีการจ่ายอากาศเป็นชั้น



ภาพที่ 3 ชุดอุปกรณ์การทดสอบสมรรถนะของหัวเผาวัสดุพูนแบบทรงกรวย

อุปกรณ์ และวิธีการทดสอบในงานวิจัยนี้ แสดงดังภาพที่ 3 เริ่มต้นจากการต่อสายแก๊สเชื้อเพลิงจากถังบรรจุแก๊ส LPG สู่หัวเผาวัสดุพูนที่มีการจ่ายอากาศเป็นชั้น โดยมีวาล์วปรับความดันแก๊สเป็นตัวควบคุมปริมาณการไหลของแก๊สเชื้อเพลิง ในขณะเดียวกันความดันของแก๊สเชื้อเพลิงจะถูกวัดด้วย มานอมิเตอร์ชนิดปรอทและทำการชั่งน้ำหนักของแก๊สเชื้อเพลิงที่ลดลง ระหว่างการทดลองด้วยเครื่องชั่งน้ำหนักดิจิทัล เพื่อคำนวณหาอัตราการไหลเชิงมวลของแก๊สเชื้อเพลิง ($\dot{m}_g$) และติดตั้ง เครื่องวัดปริมาณแก๊สไอเสียของบริษัท Entech รุ่น Testo 350 วัดในลักษณะแบบไอเสียแห้ง (Dry basis) ซึ่งค่าที่วัดได้จะมีความคลาดเคลื่อน 0.05% เพื่อตัดไอเสียจากชุดครอบไอเสีย (Hood) และอุปกรณ์เก็บบันทึกค่าอุณหภูมิใช้ Data Logger รุ่น Midi Logger GL220 ในการเก็บบันทึกค่าอุณหภูมิของน้ำ โดยเริ่มต้นจากการอุ่นหัวเผาเป็นเวลา 30 นาที จากนั้นปิดหัวเผาและวางหม้อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 45 เซนติเมตร ที่ฐานวางหม้อและเติมน้ำปริมาณ 30.6 กิโลกรัม ติดตั้งเทอร์โมคัปเปิล ชนิด K เพื่อวัดอุณหภูมิของน้ำในหม้อและเก็บบันทึกค่าอุณหภูมิด้วยเครื่องบันทึกข้อมูล จากนั้นเริ่มจุดหัวเผาใหม่อีกครั้ง ด้วยอัตราการป้อนเชื้อเพลิงตามเงื่อนไขการทดลอง และเริ่มต้นจับเวลา ในขณะเดียวกันอากาศจากถังอัดอากาศ (Air compressor) จะถูกป้อนเข้าสู่หัวเผาตำแหน่งชั้นที่ 1 (stage#1) โดยสามารถปรับอัตราการไหลด้วยเครื่องปรับอัตราการไหลเชิงปริมาตร (Flow Meter) ที่อัตราการไหลต่าง ๆ ตามเงื่อนไขการทดลอง ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 เงื่อนไขการทดสอบสมรรถนะของหัวเผา

ตัวแปร	ปริมาณ (หน่วย)
เส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีดแก๊สเชื้อเพลิง (d_j)	0.8 มิลลิเมตร
ความสูงชั้นวัสดุพูน (H)	14 เซนติเมตร
เส้นผ่านศูนย์กลางทางออกของหัวเผา (D)	18 เซนติเมตร
ระยะห่างกันหม้อถึงหัวเผา (h)	5 เซนติเมตร
เส้นผ่านศูนย์กลางเม็ดอะลูมินา (d)	15 มิลลิเมตร

ตัวแปร	ปริมาณ (หน่วย)
ค่าความพรุนเม็ดตะกั่ว (ε)	0.44
ตำแหน่งการจ่ายอากาศส่วนที่สอง	stage#1, stage#2 และ stage#3
ปริมาณการจ่ายอากาศส่วนที่สอง (Q_{air})	100, 200, 400, 600, 800 และ 1,000 ลิตรต่อชั่วโมง
อัตราการป้อนเชื้อเพลิง (FR)	6, 7, 8, 9, 10, 11 และ 12 กิโลวัตต์

เมื่อต้มน้ำจนถึงอุณหภูมิประมาณ 70°C ให้ทำการวัดปริมาณแก๊สไอเสีย จากนั้นต้มน้ำต่อไปเรื่อย ๆ และเมื่อน้ำมีอุณหภูมิถึง 90°C ให้บันทึกเวลาและปิดหัวเผา จากนั้นคำนวณหาประสิทธิภาพเชิงความร้อนของหัวเผา โดยอ้างอิงตามมาตรฐาน DIN EN 203-2:1997 (German Standards and Technical Rules, 1997) ดังสมการที่ (2)

$$\eta_{th} = \frac{m_{water} C_{p,water} (90 - T_{water,i})}{\dot{m}_g \times LHV \times t} \quad (2)$$

เมื่อ	η_{th}	คือ ประสิทธิภาพเชิงความร้อน (-)
	m_{water}	คือ มวลของน้ำทดสอบ (kg)
	$C_{p,water}$	คือ ค่าความจุความร้อนของน้ำ (kJ/kg.°C)
	$T_{water,i}$	คือ อุณหภูมิของน้ำเริ่มต้น (°C)
	$\dot{m}_g$	คือ อัตราการไหลเชิงมวลของแก๊สเชื้อเพลิง (kg/s)
	LHV	คือ ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง (kJ/kg)
	t	คือ เวลาที่ใช้ในการทดสอบ (s)

โดยทดสอบที่ค่าอัตราการป้อนเชื้อเพลิง (FR) ตั้งแต่ 6 ถึง 12 กิโลวัตต์ การปรับและควบคุมค่า FR นั้นสามารถทำได้โดยการปรับค่าอัตราการไหลเชิงมวลของแก๊สเชื้อเพลิง ($\dot{m}_g$) ซึ่งค่าอัตราการป้อนเชื้อเพลิงของหัวเผาสามารถคำนวณหาได้ดังสมการที่ (3)

$$FR = \dot{m}_g \times LHV \quad (3)$$

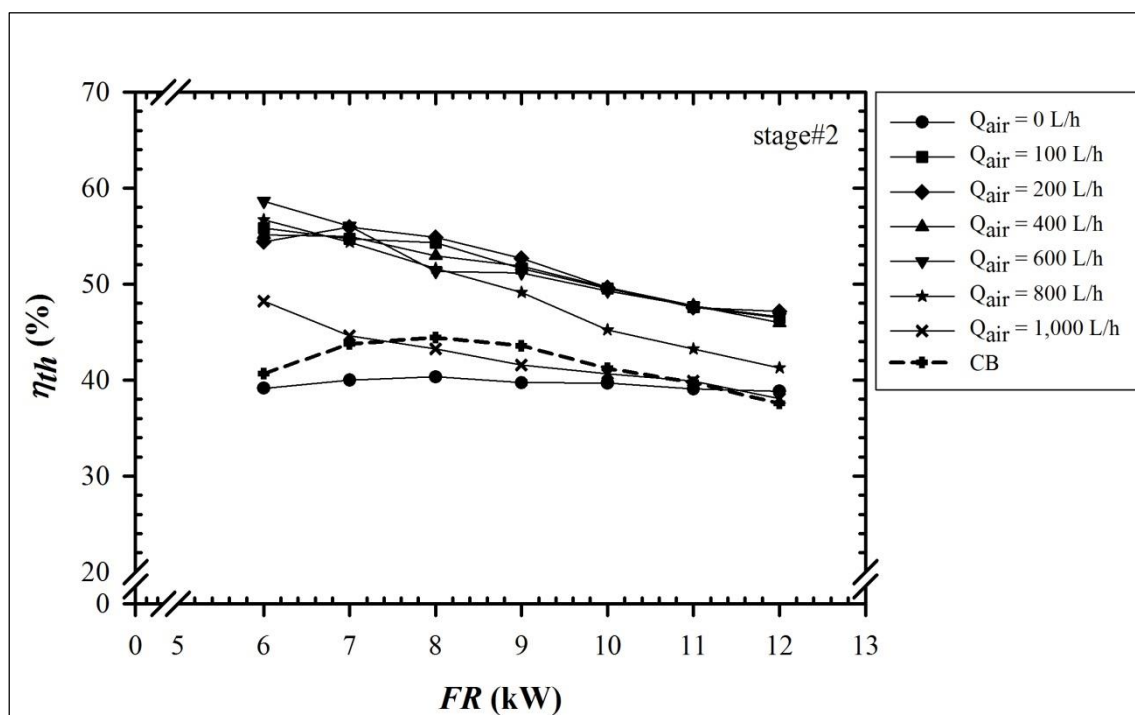
เมื่อทำการทดสอบที่ตำแหน่งการจ่ายอากาศชั้นที่ 1 (stage#1) เสร็จ ก็ให้เริ่มทำการทดลองที่ตำแหน่งชั้นที่ 2 (stage#2) และ ตำแหน่งชั้นที่ 3 (stage#3) ต่อไปตามลำดับ โดยทำการทดลองที่เงื่อนไขเดิมซ้ำ 3 ครั้ง เพื่อหาค่าเฉลี่ยในการรายงานผล ซึ่งเงื่อนไขที่ใช้ในการทดสอบในงานวิจัยนี้แสดงดังตารางที่ 1

ผลการวิจัย

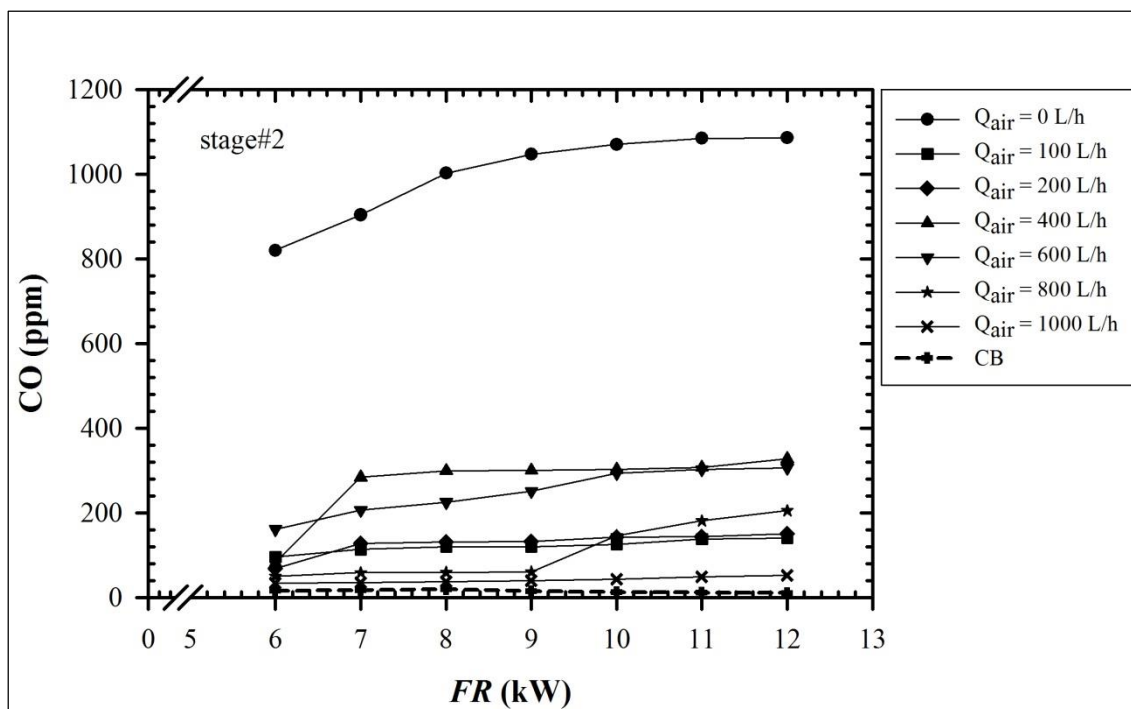
1. อิทธิพลของ FR และ Q_{air}

ภาพที่ 4 แสดงประสิทธิภาพเชิงความร้อน (η_{th}) ของหัวเผาวัสดุพูน ที่ค่า Q_{air} ต่างๆ โดยยกตัวอย่างกรณีการจ่ายอากาศส่วนที่สองที่ตำแหน่งชั้นที่ 2 (stage#2) และเปรียบเทียบผลการทดลองกับหัวเผาแบบดั้งเดิม (CB) พบว่า หัวเผาแบบ CB มีพฤติกรรมการเผาไหม้ที่แตกต่างจากหัวเผาแบบวัสดุพูนคือ รูปแบบค่า η_{th} ของหัวเผา CB ที่ได้จะมีลักษณะคล้ายรูป

ระวังคำว่า คือ ที่ค่า FR ต่ำ ๆ เปลวไฟจะสั้นและห่างจากกันหม้อภาชนะ ทำให้ความร้อนที่ถ่ายเทไปยังกันหม้อภาชนะมีค่าน้อย จากนั้นเมื่อเพิ่มค่า FR มากขึ้น ส่งผลให้เปลวไฟยาวขึ้นและไปสัมผัสกันหม้อภาชนะทำให้ความร้อนจากเปลวไฟถ่ายเทไปให้ภาชนะได้เต็มที่ อย่างไรก็ตาม เมื่อเพิ่มค่า FR มากจนเกินไปจะยิ่งทำให้เปลวไฟยาวและสั้นกันหม้อภาชนะทำให้ความร้อนจากเปลวไฟที่ผลิตได้สูญเสียไปกับสิ่งแวดล้อม ดังนั้นค่า η_{th} จะมีค่าน้อยลง ซึ่งพบว่า หัวเผา CB ให้ค่า η_{th} สูงที่สุดเท่ากับ 44.42% ที่ FR เท่ากับ 8 kW และเมื่อพิจารณาหัวเผาวัสดุพูน กรณีที่ไม่มีการเติมอากาศส่วนที่สอง ($Q_{air} = 0$ L/h) พบว่าค่า η_{th} มีค่าน้อยลงเมื่อเทียบกับหัวเผา CB เนื่องจากหัวเผาวัสดุพูนมีเม็ดอะลูมินาบรรจุเต็มภายในห้องเผาไหม้ จึงส่งผลให้เกิดความดันตกคร่อมภายในหัวเผาสูง ดังนั้นอากาศส่วนแรกที่ถูกเหนี่ยวมาโดยธรรมชาติที่บริเวณปากทางเข้าท่อผสมจะเข้ามาได้ยากขึ้น ทำให้อากาศไม่เพียงพอต่อการเผาไหม้ เกิดการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์และอุณหภูมิจากการเผาไหม้ที่ได้จะมีค่าต่ำ จึงส่งผลให้ค่า η_{th} มีค่าน้อยลง อย่างไรก็ตาม เมื่อเติมอากาศส่วนที่สองให้กับหัวเผาวัสดุพูนจะส่งผลให้ค่า η_{th} มีค่าเพิ่มมากขึ้นอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากมีอากาศเพียงพอต่อการเผาไหม้ เกิดการเผาไหม้สมบูรณ์ทำให้ได้อุณหภูมิจากการเผาไหม้ที่สูงขึ้น โดยเฉพาะที่ $Q_{air} = 600$ L/h จะให้ค่า η_{th} สูงที่สุด จากนั้นถ้าเติมอากาศส่วนที่สองมากเกินไป เช่น Q_{air} ตั้งแต่ 800 ถึง 1,000 L/h กลับส่งผลเสีย ให้ค่า η_{th} มีค่าน้อยลง ตามลำดับ เนื่องจากปริมาณอากาศที่มากเกินไปทำให้เกิดการเผาไหม้แบบส่วนผสมบาง (Lean burn) ส่งผลต่ออุณหภูมิการเผาไหม้ที่ลดน้อยลง โดยพบว่าที่ $Q_{air} = 600$ L/h และ $FR = 6$ kW จะให้ค่า η_{th} สูงที่สุดเท่ากับ 58.65 % และพฤติกรรมของการเผาไหม้ของหัวเผาวัสดุพูนจะให้ค่า η_{th} ลดลงเรื่อย ๆ ตามค่า FR ที่ป้อน ซึ่งแตกต่างจากหัวเผา CB ดังนั้นหัวเผาวัสดุพูนจะให้ค่า η_{th} สูงที่สุดที่ค่า FR ต่ำ ๆ ทั้งนี้ เนื่องจากหัวเผาดังกล่าวไม่จำเป็นต้องป้อนเชื้อเพลิงเยอะก็สามารถจุดติดและให้พลังงานความร้อนที่สูงได้ โดยอาศัยข้อดีของวัสดุพูนในการถ่ายเทความร้อนและกักเก็บความร้อนได้มากในตัวของมันเอง



ภาพที่ 4 ประสิทธิภาพเชิงความร้อนที่ FR และ Q_{air} ต่าง ๆ กรณี stage#2



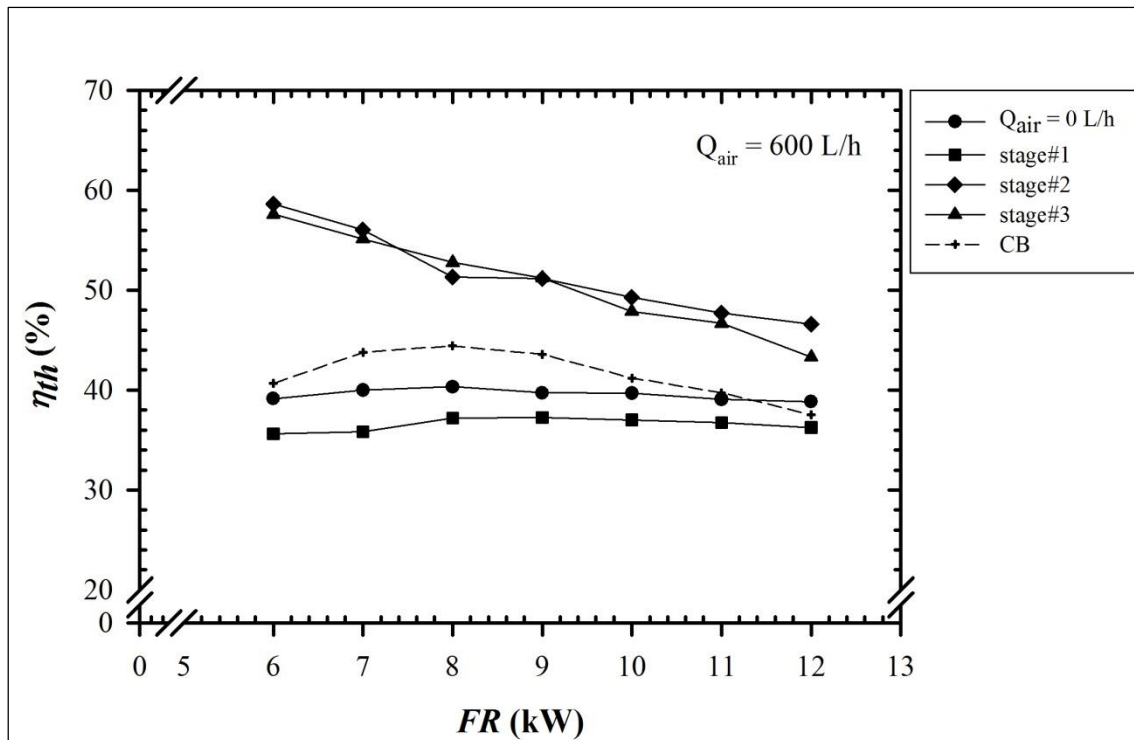
ภาพที่ 5 การปลดปล่อยมลพิษ CO ที่ FR และ Q_{air} ต่าง ๆ กรณี stage#2

ภาพที่ 5 แสดงการปลดปล่อยมลพิษ CO ของหัวเผาวัสดุพูน ที่ค่า Q_{air} ต่าง ๆ โดยยกตัวอย่างกรณีการจ่ายอากาศส่วนที่สองที่ตำแหน่งชั้นที่ 2 (stage#2) และเปรียบเทียบผลการทดลองกับหัวเผาแบบดั้งเดิม (CB) พบว่า หัวเผา CB ปลดปล่อยมลพิษ CO ต่ำกว่าหัวเผาวัสดุพูน ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 10.32 ถึง 19.82 ppm เนื่องจากหัวเผาวัสดุพูนมีเม็ดอะลูมินาบรรจุเต็มภายในห้องเผาไหม้ จึงส่งผลให้เกิดความดันตกคร่อมภายในหัวเผาสูง ดังนั้นอากาศส่วนแรกที่ถูกเหนี่ยวนำโดยธรรมชาติที่บริเวณปากทางเข้าท่อผสมจะเข้ามาได้ยากขึ้น ทำให้อากาศไม่เพียงพอต่อการเผาไหม้ เกิดการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ ซึ่งหัวเผาวัสดุพูนกรณีที่ไม่มีการเติมอากาศส่วนที่สอง ($Q_{air} = 0$ L/h) จะให้ค่า CO สูงที่สุดมากกว่าทุกกรณี โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 820 ถึง 1,086 ppm จากนั้นเมื่อเติมอากาศส่วนที่สองให้กับหัวเผาวัสดุพูน ส่งผลให้มีอากาศเพียงพอต่อการเผาไหม้ เกิดการเผาไหม้สมบูรณ์ ดังนั้นค่า CO จะมีค่าลดน้อยลง โดยเฉพาะอย่างยิ่งกรณีที่ $Q_{air} = 1,000$ L/h จะให้ค่า CO ต่ำและใกล้เคียงกับหัวเผา CB โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 33.62 ถึง 52.98 ppm อีกทั้งยังพบว่า การปลดปล่อยมลพิษ CO จะมีค่าเพิ่มมากขึ้นตามค่า FR เนื่องจากการเพิ่มค่า FR ดังกล่าวจะทำให้เปลวไฟยาวขึ้นและสัมผัสกันหม้อภาชนะที่เย็นกว่าอุณหภูมิของเปลวไฟจนเกิด Flame quenching effect เพิ่มสูงขึ้น ส่งผลให้เกิดการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์

2. อิทธิพลของ FR และ ตำแหน่งการจ่ายอากาศส่วนที่สอง

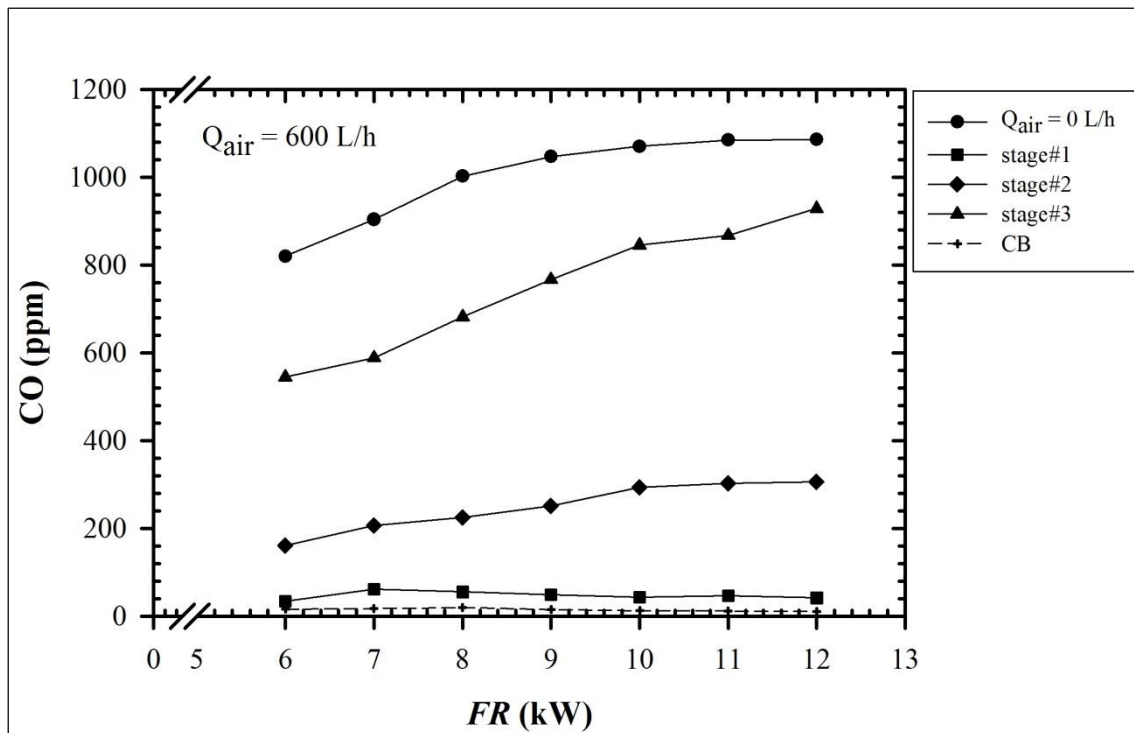
ภาพที่ 6 แสดงประสิทธิภาพเชิงความร้อน (η_{th}) ของหัวเผาวัสดุพูน ที่ตำแหน่งการจ่ายอากาศส่วนที่สองต่าง ๆ กรณี Q_{air} เท่ากับ 600 L/h และเปรียบเทียบผลการทดลองกับหัวเผาแบบดั้งเดิม (CB) พบว่า หัวเผาแบบวัสดุพูนกรณีที่ไม่มีการเติมอากาศส่วนที่สอง ($Q_{air} = 0$ L/h) จะให้ค่า η_{th} น้อยกว่าหัวเผาแบบ CB เนื่องจากหัวเผาวัสดุพูนนี้มีความดันตกคร่อมภายในหัวเผาสูง ทำให้การเหนี่ยวนำอากาศส่วนแรกในการเผาไหม้ไม่เพียงพอ เกิดการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์และอุณหภูมิการเผาไหม้ต่ำ จากนั้นเมื่อทำการเติมอากาศส่วนที่สองให้สำหรับหัวเผาวัสดุพูนที่ตำแหน่งชั้นที่ 1 (stage#1) พบว่า ยิ่งทำให้ η_{th} ลดน้อยลงมากกว่าเดิม ทั้งนี้เนื่องจากเปลวไฟติดที่ชั้นล่างสุดของวัสดุพูนทำให้ความร้อนปลดปล่อยออกมาด้านนอกหัวเผาได้น้อย ส่งผลให้กรณีนี้หม้อภาชนะได้รับความร้อนน้อยที่สุดในขณะเดียวกันเมื่อเติมอากาศชั้นที่ 2 (stage#2) และ 3 (stage#3) ส่งผลให้ตำแหน่งเปลวไฟขยับสูงขึ้นไปที่ทางออกของหัวเผา ทำให้หม้อภาชนะได้รับความร้อนเพิ่มมากขึ้นพบว่า

การจ่ายอากาศตำแหน่งชั้นที่ 3 (stage#3) ซึ่งอยู่ใกล้ปากทางออกของหัวเผา นั้น เปลวไฟล้นออกมาติดด้านนอกหัวเผาค่อนข้าง เยอะและไม่เสถียร เกิดการฉีกขาดของเปลวไฟ ดังนั้นการจ่ายอากาศตำแหน่งชั้นที่ 2 (stage#2) จะให้ค่า η_{th} สูงที่สุด มากกว่าทุกกรณี จึงเหมาะสมในการเลือกไปใช้งาน



ภาพที่ 6 ประสิทธิภาพเชิงความร้อนที่ FR และ ตำแหน่งการจ่ายอากาศส่วนที่สองต่าง ๆ กรณี $Q_{air} = 600$ L/h

ภาพที่ 7 แสดงการปลดปล่อยมลพิษ CO ของหัวเผาวัสดุพูน ที่ตำแหน่งการจ่ายอากาศส่วนที่สองต่าง ๆ กรณี Q_{air} เท่ากับ 600 L/h และเปรียบเทียบผลการทดลองกับหัวเผาแบบดั้งเดิม (CB) พบว่า หัวเผา CB ปลดปล่อยมลพิษ CO ต่ำกว่า หัวเผาวัสดุพูน ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 10.32 ถึง 19.82 ppm ในขณะเดียวกัน หัวเผาวัสดุพูนกรณีที่ไม่มีการเติมอากาศส่วนที่สอง ($Q_{air} = 0$ L/h) จะให้ค่า CO สูงที่สุดมากกว่าทุกกรณี โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 820 ถึง 1,086 ppm จากนั้นเมื่อมีการจ่ายอากาศส่วนที่สอง ซึ่งยกตัวอย่างกรณี $Q_{air} = 600$ L/h ไม่ว่าจะเป็น stage#1 stage#2 และ stage#3 ต่างให้ค่า CO ลดน้อยลงเมื่อเทียบกับกรณี $Q_{air} = 0$ L/h เนื่องจากมีอากาศเพียงพอต่อการเผาไหม้ ทำให้เกิดการเผาไหม้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น และพบว่า การเติมอากาศชั้นที่ 1 (stage#1) จะให้ค่า CO ต่ำกว่าการเติมอากาศชั้นที่ 2 (stage#2) และ 3 (stage#3) ตามลำดับ เนื่องจากเปลวไฟติดอยู่ที่ชั้นล่างของวัสดุพูน ทำให้แก๊สเชื้อเพลิงที่หลงเหลือจากการเผาไหม้ยังมีความสามารถในการเผาไหม้ต่อภายในชั้นวัสดุพูน ก่อนที่แก๊สดังกล่าวจะไหลออกด้านบนไปยังภายนอกหัวเผา ทำให้การเผาไหม้มีเวลานานขึ้น ดังนั้นการเผาไหม้จะสมบูรณ์



ภาพที่ 7 การปลดปล่อยมลพิษ CO ที่ FR และ ตำแหน่งการจ่ายอากาศส่วนที่สองต่าง ๆ กรณี Q_{air} = 600 L/h

อภิปรายและสรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาอิทธิพลของอัตราการป้อนเชื้อเพลิง (FR) ตำแหน่งการจ่ายอากาศส่วนที่สอง และอัตราการป้อนอากาศส่วนที่สอง (Q_{air}) ต่อประสิทธิภาพเชิงความร้อน และการปลดปล่อยมลพิษ สามารถสรุปได้ดังนี้

1. กรณีไม่เติมอากาศส่วนที่สอง เปลวไฟจะติดที่ทางออกของหัวเผา เนื่องจากขาดอากาศในการเผาไหม้ และเมื่อมีการเติมอากาศส่วนที่สอง ส่งผลให้เปลวไฟลามเข้ามาติดภายในหัวเผา ซึ่งการเติมอากาศในชั้นที่ 1 จะทำให้เปลวไฟมาติดที่ชั้นล่างของวัสดุพูน ส่วนกรณีการเติมอากาศชั้นที่ 2 และ 3 จะทำให้เปลวไฟมาติดที่ตรงกึ่งกลางของหัวเผา

2. ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของหัวเผามีค่าลดลงเมื่อเพิ่มค่า FR เนื่องจากการสูญเสียความร้อน และเมื่อเปรียบเทียบที่การจ่ายอากาศต่าง ๆ พบว่า การเติมอากาศส่งผลให้มีปริมาณอากาศเพียงพอต่อการเผาไหม้ ส่งผลให้เผาไหม้สมบูรณ์และประสิทธิภาพเชิงความร้อนเพิ่มสูงขึ้น แต่ถ้าเติมอากาศมากเกินไปจะทำให้ประสิทธิภาพลดน้อยลงได้

3. การเติมอากาศชั้นที่ 1 ให้ค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนต่ำที่สุด เนื่องจากเปลวไฟติดที่ชั้นล่างของวัสดุพูนทำให้ความร้อนไม่ออกมาด้านนอกของหัวเผา และพบว่า การเติมอากาศชั้นที่ 2 จะให้ค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงที่สุด

4. เมื่อเพิ่มค่า FR ส่งผลให้ค่า CO เพิ่มขึ้น เนื่องจากเปลวไฟที่ยาวขึ้นและสัมผัสกับกันหม้อภาชนะเย็นทำให้เผาไหม้ไม่สมบูรณ์ และเมื่อเติมอากาศส่วนที่สองให้กับหัวเผาวัสดุพูนมากขึ้น ยังส่งผลให้มีอากาศเพียงพอต่อการเผาไหม้เกิดการเผาไหม้สมบูรณ์ ดังนั้นค่า CO จะมีค่าลดน้อยลง

5. การเติมอากาศชั้นที่ 1 (stage#1) จะให้ค่า CO ต่ำกว่าการเติมอากาศชั้นที่ 2 (stage#2) และ 3 (stage#3) ตามลำดับ เนื่องจากเปลวไฟติดอยู่ที่ชั้นล่างของวัสดุพูน ทำให้แก๊สเชื้อเพลิงที่หลงเหลือจากการเผาไหม้ยังมีเวลาในการเผาไหม้ต่อภายในชั้นวัสดุพูน ก่อนที่แก๊สดังกล่าวจะไหลออกด้านบนไปยังภายนอกหัวเผา ทำให้การเผาไหม้มีเวลานานขึ้น

6. เงื่อนไขที่เหมาะสมในการเลือกใช้งานคือ กรณีการจ่ายอากาศชั้นที่ 2 (stage#2) Q_{air} เท่ากับ 600 L/h และ FR เท่ากับ 6 kW เนื่องจากให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงที่สุดและมีการปลดปล่อย CO ในระดับต่ำ

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ที่สนับสนุนทุน และอุปกรณ์ในการทำวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- คำนวน พลตรี. (2557). เตาเผาไหม้ในวัสดุพรมแบบวงแหวนที่มีการเหนี่ยวนำอากาศด้วยตนเองโดยใช้เชื้อเพลิงเหลว [วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี]. TDC.thailis. <https://tdc.thailis.or.th/tdc/>
- ณัฐภูมิ รังสิมันตุชาติ. (2544). การประยุกต์ใช้วัสดุพรมเพื่อการประหยัดพลังงานในเตาแก๊สหุงต้ม [วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี]. TDC.thailis. <https://tdc.thailis.or.th/tdc/>
- ภาณุวัฒน์ บุญโยประการ. (2543). การปรับปรุงหัวเตาแก๊สหุงต้มเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อนและประยุกต์ใช้ในครัวเรือน [วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี]. TDC.thailis. <https://tdc.thailis.or.th/tdc/>
- วันดี โยคเสนกุล. (2547). หัวเผาเชื้อเพลิงแก๊สที่มีการหมุนเวียนความร้อนและการไหลแบบหมุนวน [วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี]. TDC.thailis. <https://tdc.thailis.or.th/tdc/>
- สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน. (2566, 31 พฤษภาคม). ข้อมูลพลังงาน (Energy Database). <http://www.eppo.go.th/index.php/th/energy-information>
- อภิสิทธิ์ พรหมดอน, ปฐวิติ วรามิตร, อำไพศักดิ์ ทัพภูมา และอนันต์ นามเขต. (2565). การเผาไหม้ในหัวเผาวัสดุพรมที่มีการจ่ายอากาศเป็นชั้น. การประชุมวิชาการวิศวกรรมพาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ ครั้งที่ 7 (น. 179-190).
- อาชวิน เพชรสังคุณ. (2556). การพัฒนาหัวเผาวัสดุพรมแบบวงแหวนที่มีการเหนี่ยวนำอากาศด้วยตัวเองสำหรับเชื้อเพลิงแก๊ส [วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี]. TDC.thailis. <https://tdc.thailis.or.th/tdc/>
- อาวุธ ภิรัตน์กุล และจารุวัตร เจริญสุข. (2551). เตาเผาไหม้วัสดุพรมกับเตาเผาไหม้แบบหมุนวน (Part 1). การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 22 (น. 76-82).
- German Standards and Technical Rules. (1997). DIN EN 203-2: Gas-heated Catering Equipment. 17.
- Thailand industrial standard. (2006). Domestic gas stoves for use with liquefied petroleum gas. TIS 2312-2549.
- Turns, S. R. (2011). *An introduction to combustion: concepts and applications* (3rd Revised edition). McGraw Hill Higher Education.
- Yoksenakul, W. and Jugjai, S. (2011). Design and development of a SPMB (self-aspirating, porous medium burner) with a submerged flame. *Energy*, 36(5), 3092-3100. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.02.054>.