



## การศึกษาอิทธิพลของรูทางเข้าอากาศส่วนแรกต่อการปลดปล่อยมลพิษในหัวเผาวัสดุพรุน Investigation of Primary Air Hole Effects in the Emission of Pollutants in Porous Burners

ธฤติ อ่อนน้อม อำไพศักดิ์ ทีบุญมา และ อภินันต์ นามเขต\*  
Tharuebordee Onnom, 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

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของจำนวนรูทางเข้าอากาศส่วนแรกต่อการปลดปล่อยมลพิษของหัวเผาวัสดุพรุนแบบแผ่รังสีความร้อน หัวเผาถูกติดตั้งด้วยวัสดุพรุนที่มีโครงสร้างแบบรังผึ้งและแบบเส้นใยโลหะ เพื่อช่วยส่งเสริมการถ่ายเทความร้อน การถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้นทั้งสามโหมดในเวลาเดียวกัน คือการนำความร้อน การพาความร้อน และการแผ่รังสีความร้อน การทดสอบการปลดปล่อยมลพิษของเตาใช้การทดสอบตามมาตรฐาน DIN EN 203-2 หัวเผาที่ใช้ทดสอบมีขนาดความกว้าง 84 มิลลิเมตร และความยาว 340 มิลลิเมตร โดยทดสอบเตาที่อัตราการเผาไหม้ จาก 5 ถึง 11 กิโลวัตต์ หัวเผามีการปรับปรุงคือเจาะรูทางเข้าอากาศส่วนแรกที่ทำตำแหน่งใกล้คอคอของท่อผสม โดยมีการปรับเปลี่ยนตำแหน่งแถวในการเจาะ 3 ระดับคือ แถวที่ 1, 2 และ 3 โดยแต่ละแถวจะมีการปรับเปลี่ยนจำนวนรูทั้งหมด 3 ระดับเช่นกัน คือ จำนวน 2, 4 และ 6 รู ผลจากการศึกษาพบว่า หัวเผาแบบเส้นใยโลหะ (MFB) จะให้ค่าการเหนี่ยวนำอากาศส่วนแรกลดน้อยลง เมื่อเทียบกับหัวเผาแบบรังผึ้ง (HCB) และนำไปสู่การปลดปล่อยมลพิษ CO ที่เพิ่มสูงขึ้น การเพิ่มจำนวนรูทางเข้าอากาศส่วนแรกส่งผลให้เหนี่ยวนำอากาศได้มากขึ้น ซึ่งหัวเผาแบบ MFB ที่เหมาะสมที่สุดคือหัวเผา MFB-660 เนื่องจากให้ค่าการเหนี่ยวนำอากาศส่วนแรกมากที่สุดเท่ากับ 62.33% และผลจากการศึกษานี้จะช่วยให้นำไปสู่การพัฒนาหัวเผาวัสดุพรุนให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น และช่วยลดปริมาณการใช้พลังงานในอนาคตต่อไป

**คำสำคัญ :** หัวเผาแบบรังผึ้ง หัวเผาแบบเส้นใยโลหะ การเหนี่ยวนำอากาศส่วนแรก วัสดุพรุน

### Abstract

The aim of this paper is to study the effect of primary air hole on the emission of pollutants in porous radiant burners. The burner is filled up with the honeycomb porous plate and porous metal fiber which are used as the porous medium in order to enhance heat transfer rate. All three modes of heat transfer; including conduction, convection, and radiation, occurs simultaneously. The DIN EN 203-2 standard is applied to emission of pollutants test. A dimension of burner with 84 mm width and 340 mm length is examined. The burner with a firing rate from 5 to 11 kW is tested. The burner was improved by drilling a primary air hole near the throat of the mixing tube. The adjustment of the row position have 3 levels, namely rows 1, 2 and 3 and each row having to adjust the total number of holes in 3 levels as well, namely 2, 4 and 6 holes. The results found that



the metal fiber burner (MFB) have showed a significant decrease in primary air entrainment compare with the honeycomb burner (HCB) and leading to higher CO emissions. Increasing the number of primary air hole results in more air inductance. The most suitable MFB-type burner is the MFB-660, as it provides the highest primary air entrainment of 62.33%. The results of this study will lead to the development of more efficient porous material burners and help reduce the amount of energy consumption in the future.

**Keywords :** Honeycomb Burner, Metal Fiber Burner, Primary Air Entrainment, Porous Medium

## บทนำ

ในปัจจุบันมีการใช้ก๊าซหุงต้มหรือแก๊สแอลพีจีกันอย่างกว้างขวางทั้งในภาคครัวเรือนและภาคอุตสาหกรรม โดยจากข้อมูลสถิติพลังงานของประเทศไทยปี พ.ศ. 2563 ของสำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน พบว่ามีการใช้แก๊สแอลพีจีอยู่ที่ระดับ 5,740 พันตัน แบ่งเป็นใช้ในภาคอุตสาหกรรมปิโตรเคมีร้อยละ 39 ภาคครัวเรือนร้อยละ 35 ภาคขนส่งร้อยละ 13 และภาคอุตสาหกรรมร้อยละ 11 (สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน, 2563) ซึ่งแก๊สแอลพีจีเป็นเชื้อเพลิงที่สะอาด จุดติดไฟง่าย เผาไหม้ได้สมบูรณ์ ไม่มีเขม่าและซัลเฟอร์ ให้อุ่นได้ง่าย อีกทั้งสะดวกต่อการใช้งาน ซึ่งแก๊สแอลพีจีเป็นส่วนผสมระหว่างโพรเพน (Propane) และบิวเทน (Butane) ที่ได้มาจากกระบวนการแยกแก๊สธรรมชาติและการกลั่นปิโตรเลียม แต่แก๊สแอลพีจี เป็นพลังงานที่มีอยู่อย่างจำกัด ใช้แล้วหมดไป จึงจำเป็นต้องใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุดและมีประสิทธิภาพ

ในภาคครัวเรือนการใช้ก๊าซหุงต้มเป็นการนำไปใช้กับเตาแก๊สหุงต้มเป็นหลัก แต่เตาแก๊สหุงต้มที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันนั้นมีการเผาไหม้ในลักษณะเปิดจึงไม่สามารถนำความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้มาใช้ประโยชน์ได้อย่างเต็มที่เนื่องจากว่าการถ่ายเทความร้อนจากเปลวไฟไปยังภาชนะถูกจำกัดโดยการพาความร้อนเป็นส่วนใหญ่ ทั้งยังมีการสูญเสียความร้อนเป็นจำนวนมากไปกับแก๊สไอเสียโดยการพาความร้อน เตาแก๊สหุงต้มเป็นเตาแบบ Atmospheric Aerated Burners ที่มีผู้สนใจศึกษาถึงกลไกและกระบวนการเผาไหม้ในสถานะต่างๆ รวมถึงการเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาให้มีความสูงขึ้น เช่น การนำเอาความร้อนจากไอเสียจากการเผาไหม้กลับมาใช้เพื่อทำการอุ่นอากาศก่อนการเผาไหม้เพื่อเพิ่มอุณหภูมิของเปลวไฟและจะมีผลทำให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนมีค่าสูงขึ้น (ณัฐวุฒิ, 2544; Jugjai and Rungsimuntuchart, 2002; Pantangi et al., 2011; Muthukumar and Shyamkumar, 2011) ต่อมาได้มีการปรับปรุงรูทางออกของเปลวไฟจากแบบทั่วไป (Conventional Burner, CB) เป็นแบบหมุนวน (Swirl Burner, SB) ซึ่งพบว่าทำให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเพิ่มสูงขึ้นและช่วยลดปริมาณการปลดปล่อยมลพิษ (วสันต์, 2547; ภาณุวัฒน์, 2543; Hou et al., 2007) จากการศึกษาพบว่าเตาแก๊สหุงต้มมีข้อจำกัดในเรื่องของการเหนี่ยวนำอากาศส่วนแรกเพื่อใช้ในการเผาไหม้ เนื่องจากอากาศจะถูกเหนี่ยวนำโดยธรรมชาติด้วยแรงเฉือนจากลำพุ่งของแก๊สเชื้อเพลิง ดังนั้นถ้าออกแบบขนาดและมิติของหัวฉีดแก๊สเชื้อเพลิง ท่อผสม และรูทางออกเปลวไฟไม่ดีและไม่สัมพันธ์กันจะส่งผลกระทบต่อสมรรถนะการเหนี่ยวนำอากาศส่วนแรกได้ ซึ่งจะไปสู่ประสิทธิภาพการเผาไหม้ต่อไป ดังนั้นปริมาณการเหนี่ยวนำอากาศส่วนแรกจึงถือเป็นหัวใจสำคัญของการทำงานเตาแก๊สหุงต้ม จากความสำคัญของปริมาณอากาศส่วนแรกที่ใช้ในการเผาไหม้ จึงทำให้มีผู้ทำการศึกษาถึงคุณลักษณะการเหนี่ยวนำอากาศส่วนแรกของหัวเผาโดย Jones (1989) และ Pritchard et al. (1977) ศึกษาทางทฤษฎีถึงอิทธิพลของตัวแปรต่าง ๆ ที่ส่งผลกระทบต่อคุณลักษณะของการเหนี่ยวนำอากาศส่วนแรกที่ใช้ในการเผาไหม้ โดยอาศัยหลักการอนุรักษ์พลังงาน และโมเมนตัมของเจ็ทที่ไหลผ่านภายในหัวฉีดแก๊สและท่อผสม พบว่าการเหนี่ยวนำอากาศส่วนแรกขึ้นอยู่กับอัตราการบินเชื้อเพลิง ชนิดของแก๊สเชื้อเพลิง มิติของหัวฉีด มิติของท่อผสม และมิติของหัวเผา ต่อมา Singh et al. (1999) สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อศึกษาปริมาณการเหนี่ยวนำอากาศส่วนแรกแล้วเปรียบเทียบกับผลทางด้านทฤษฎี (Jones, 1989;



Pritchard et al., 1977) โดยทำการปรับความหนาแน่นของแก๊สเชื้อเพลิง พบว่าผลจากการศึกษาให้ค่าใกล้เคียงกับทฤษฎี โดยปริมาณการเหนี่ยวนำอากาศส่วนแรกจะสูงขึ้นเมื่อเพิ่มความหนาแน่นของแก๊สเชื้อเพลิง ต่อมา Singh et al. (2003) ศึกษาปริมาณอากาศส่วนแรกจากการทดลองเพื่อเปรียบเทียบกับผลทางด้านทฤษฎี (Jones, 1989; Pritchard et al., 1977) พบว่าผลจากการศึกษาให้ค่าใกล้เคียงกับทฤษฎี โดยปริมาณการเหนี่ยวนำอากาศส่วนแรกจะสูงขึ้นเมื่อเพิ่มสัดส่วนของขนาดท่อผสมต่อรูหัวฉีดแก๊ส และล่าสุด Namkhat and Jugjai (2010) ศึกษาลักษณะของการเหนี่ยวนำอากาศส่วนแรกของเตาแก๊สหุงต้มเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองเชิงทฤษฎีกับการทดลอง 2 แบบคือ Hot test และ Cold test พบว่า ปริมาณการเหนี่ยวนำอากาศส่วนแรก กรณีของ Hot test ต่ำกว่า Cold test ประมาณ 22% ปัจจุบันได้มีการนำเอาวัสดุพอร์มาประยุกต์ใช้สำหรับการเผาไหม้ ซึ่งมีข้อดีคือช่วยอุ่นแก๊สส่วนผสม (อากาศและเชื้อเพลิง) ให้สูงขึ้นก่อนการเผาไหม้ด้วยตนเอง ซึ่งจะช่วยให้อุณหภูมิจากการเผาไหม้เพิ่มสูงขึ้น แต่มีข้อเสียคือเกิดความดันตกคร่อมภายในเตาสูงขึ้น ส่งผลให้การเหนี่ยวนำอากาศส่วนแรกมีปริมาณลดน้อยลง

ดังนั้น ในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงการเหนี่ยวนำอากาศส่วนแรกของหัวเผาวัสดุพอร์ โดยการศึกษากิจกรรมของจำนวนรูทางเข้าอากาศส่วนแรกต่อการปลดปล่อยมลพิษจากการเผาไหม้ของหัวเผาวัสดุพอร์ ซึ่งจะเจาะรูที่ตำแหน่งใกล้คอคอดของท่อผสม โดยมีการปรับเปลี่ยนตำแหน่งแนวในการเจาะ 3 ระดับคือ แนวที่ 1 2 และ 3 โดยแต่ละแนวจะมีการปรับเปลี่ยนจำนวนรูทั้งหมด 3 ระดับเช่นกัน คือ จำนวน 2 4 และ 6 รู โดยแต่ละรูจะมีขนาดเท่ากันคือ 5 มิลลิเมตร ซึ่งทำการศึกษาและเปรียบเทียบกับหัวเผาวัสดุพอร์ 2 ชนิดคือ หัวเผาโครงสร้างแบบรังผึ้ง (Honeycomb Burner, HCB) และ หัวเผาโครงสร้างแบบเส้นใยโลหะ (Metal Fiber Burner, MFB) ซึ่งผลจากการศึกษานี้จะช่วยให้นำไปสู่การพัฒนาหัวเผาวัสดุพอร์ให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น และช่วยลดปริมาณการใช้พลังงานในอนาคตต่อไป

## วิธีการวิจัย

หัวเผาวัสดุพอร์ที่ใช้ในการศึกษาในครั้งนี้แสดงดังภาพที่ 1 เป็นหัวเผาประเภทความดันสูง (High pressure) คือ ความดันแก๊สเชื้อเพลิงมากกว่า 500 มิลลิเมตรน้ำ หรือมากกว่า 0.049 bar มีหลักการทำงานโดยอาศัยการแผ่รังสีความร้อนจากหัวเผาสู่ชิ้นงาน ซึ่งนิยมใช้ในอุตสาหกรรมขนาดกลางและขนาดย่อม เช่น อุตสาหกรรมอาหาร เป็นต้น หัวเผามีขนาดความกว้าง 84 มิลลิเมตร และความยาว 340 มิลลิเมตร โดยมีท่อผสมยาวเท่ากับ 125 มิลลิเมตร หัวฉีดเชื้อเพลิงมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 0.7 มิลลิเมตร ซึ่งพบว่าหัวเผาแบบดั้งเดิมที่ใช้และมีขายทั่วไปตามท้องตลาดนั้น รูทางออกของเปลวไฟจะมีโครงสร้างแบบรังผึ้ง (Honeycomb Burner, HCB) แสดงดังภาพที่ 2(a) วัสดุทำมาจาก คอร์เดียไรท์ (Cordierite) มีความแข็งแรง ทนต่อการกัดกร่อน โครงสร้างมีลักษณะเป็นรูพอร์ สามารถทนความร้อนได้สูงระดับ 1,230 °C ลักษณะการทำงานคือ ส่วนผสมแก๊สเชื้อเพลิงและอากาศจะถูกกักเก็บในหัวเตาก่อนแล้วค่อย ๆ ปล่อยแก๊สออกมาตามรูพอร์ที่มีจำนวนมาก ขณะติดไฟเปลวไฟจะฝังอยู่ในรูพอร์ทำให้แผ่นรังผึ้งดังกล่าวร้อนและแผ่รังสีความร้อนออกมา ดังนั้น ในขณะที่ทำงานแผ่นจะมีสีแดงและร้อน วัตถุประสงค์ของการใช้งานจะเน้นไปที่การปิ้งหรือย่างเป็นหลัก หรือการอบ เป็นต้น การถ่ายเทความร้อนส่วนใหญ่อาศัยการแผ่รังสีความร้อนโดยเปลวไฟที่ฝังอยู่ในรูพอร์ของรังผึ้งและไอเสียร้อน แต่ข้อเสียของแผ่นรังผึ้งคือ รูพอร์อุดตันง่ายและทำความสะอาด และวัสดุมีความเปราะทำให้อายุการใช้งานต่ำ ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษารณีเปลี่ยนรูทางออกเปลวไฟใหม่ใช้หัวเผาโครงสร้างแบบเส้นใยโลหะ (Metal Fiber Burner, MFB) แสดงดังภาพที่ 2(b) วัสดุทำมาจาก โลหะผสมระหว่าง Fe, Cr และ Al เรียกว่า FeCrAlloy โครงสร้างมีลักษณะเป็นเส้นใยโลหะขนาดเล็กที่ถูกนำมาทอเป็นแผ่น โดยความหนาของแผ่นเส้นใยโลหะเท่ากับ 2 มิลลิเมตร น้ำหนักเส้นใยโลหะเท่ากับ 2,100 g/m<sup>2</sup> ทนความกัดกร่อนและความร้อนได้สูง อุณหภูมิในการทำงานสูงสุดประมาณ 1,300 องศาเซลเซียส มีค่าซึมผ่านอากาศ (Air permit) เท่ากับ 240 cc/min/cm<sup>2</sup> ลักษณะการทำงานคือ ส่วนผสมแก๊สเชื้อเพลิงและอากาศจะถูกกักเก็บในหัวเตาก่อนแล้วค่อย ๆ ปล่อยแก๊สซึมผ่านออกมาตามแผ่นเส้นใยโลหะ ขณะติดไฟ เปลวไฟจะฝังติดอยู่ใน

แผ่นเส้นใยโลหะ ทำให้แผ่นดังกล่าวร้อนและแผ่รังสีความร้อนออกมา ดังนั้นในขณะที่ทำงานแผ่นเส้นใยโลหะจะมีสีแดงและร้อน ข้อดีของแผ่นเส้นใยโลหะ คือมีความแข็งแรง และยืดหยุ่นสูง ดูแลรักษาง่าย ดังนั้นจึงมีอายุการใช้งานสูง แต่มีข้อจำกัดคือหายากและราคาค่อนข้างสูงจึงยังไม่เป็นที่นิยมใช้งานกันอย่างแพร่หลาย และเนื่องจากว่าหัวเผาดังกล่าวเป็นแบบ Atmospheric Aerated Burners ซึ่งอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้อาศัยการเหนี่ยวนำด้วยตัวเองของหัวเผาโดยธรรมชาติ ซึ่งแผ่นเส้นใยโลหะ (Metal fiber) เมื่อนำมาใช้เป็นรูทางออกของเปลวไฟจะก่อให้เกิดความดันตกคร่อมภายในเตาสูง ด้วยลักษณะของโครงสร้างของแผ่นเส้นใยโลหะ ซึ่งมีค่าซึมผ่านอากาศต่ำ ดังนั้น การเหนี่ยวนำอากาศส่วนแรกเพื่อใช้ในการเผาไหม้จะทำได้ลดน้อยลง จึงต้องทำการพัฒนาหัวเผาชนิด MFB ใหม่ เพื่อปรับปรุงให้มีการเหนี่ยวนำอากาศส่วนแรกให้มากขึ้น โดยการเจาะรูทางเข้าอากาศส่วนแรกที่บริเวณท่อผสม ไกลตำแหน่งคอคคอด โดยมีการปรับเปลี่ยนตำแหน่งแถวในการเจาะ 3 ระดับคือ แถวที่ 1, 2 และ 3 โดยแต่ละแถวจะมีการปรับเปลี่ยนจำนวนรูทั้งหมด 3 ระดับเช่นกัน คือ จำนวน 2, 4 และ 6 รู โดยแต่ละรูจะมีขนาดเท่ากันคือ 5 มิลลิเมตร โดยมีรายละเอียดของหัวเผาที่ใช้ในการทดสอบดังแสดงในตารางที่ 1



ภาพที่ 1 หัวเผาวัสดุพูนแบบแผ่รังสีความร้อน



(a)



(b)

ภาพที่ 2 โครงสร้างรูทางออกเปลวไฟ แบบรังผึ้ง (a) และแบบเส้นใยโลหะ (b)



ตารางที่ 1 รายละเอียดของหัวเผาที่ใช้ในการทดสอบ

ชื่อหัวเผา	โครงสร้างรูทางออกของเปลวไฟ	จำนวนรูทางเข้าอากาศส่วนแรก		
		แถวที่ 1	แถวที่ 2	แถวที่ 3
HCB	รังผึ้ง (Honeycomb)	-	-	-
MFB	เส้นใยโลหะ (Metal Fiber)	0	0	0
MFB-200	เส้นใยโลหะ (Metal Fiber)	2	0	0
MFB-400	เส้นใยโลหะ (Metal Fiber)	4	0	0
MFB-600	เส้นใยโลหะ (Metal Fiber)	6	0	0
MFB-620	เส้นใยโลหะ (Metal Fiber)	6	2	0
MFB-640	เส้นใยโลหะ (Metal Fiber)	6	4	0
MFB-660	เส้นใยโลหะ (Metal Fiber)	6	6	0
MFB-662	เส้นใยโลหะ (Metal Fiber)	6	6	2
MFB-664	เส้นใยโลหะ (Metal Fiber)	6	6	4
MFB-666	เส้นใยโลหะ (Metal Fiber)	6	6	6

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง แสดงดังภาพที่ 3 โดยมีส่วนประกอบหลัก คือ ส่วนแรกเป็นชุดหัวเผาวัสดุพูน ซึ่งมี 2 ชนิดคือ หัวเผาโครงสร้างแบบรังผึ้ง (Honeycomb Burner, HCB) และหัวเผาโครงสร้างแบบเส้นใยโลหะ (Metal Fiber Burner, MFB) และส่วนที่สองเป็นชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดและเก็บข้อมูลในการทดลอง โดยอาศัยเครื่องวัดปริมาณแก๊สไอเสีย (Exhaust gas analyzer) ของบริษัท Entech รุ่น Testo 350 ซึ่งเป็น Electromechanical sensor วัดในลักษณะไอเสียแห้ง (Dry basis) ซึ่งค่าที่วัดได้จะมีความคลาดเคลื่อน 0.05 เปอร์เซ็นต์ และอุปกรณ์เก็บบันทึกค่าอุณหภูมิใช้ Data logger รุ่น Midi logger GL220 ในการเก็บบันทึกค่าอุณหภูมิของน้ำซึ่งจะทำการพ่วงกับคอมพิวเตอร์ ขั้นตอนการทดลอง เริ่มจากการเปิดแก๊สเชื้อเพลิงจากถังบรรจุก๊าซ ซึ่งจะใช้วาล์วปรับความดัน (Pressure regulator) เป็นตัวควบคุมปริมาณการไหลของแก๊สเชื้อเพลิง โดยมีการชั่งน้ำหนักของแก๊สเชื้อเพลิงที่ลดลงจากการทดลองด้วยเครื่องชั่งน้ำหนักดิจิทัล เพื่อคำนวณหาอัตราการไหลเชิงมวลของแก๊ส ( $\dot{m}_g$ ) ขณะเดียวกันความดันของแก๊สเชื้อเพลิงจะถูกวัดด้วยแมนอมิเตอร์ (Manometer) แบบปรอท จากนั้นแก๊สจะถูกพ่นออกจากหัวฉีด เข้าไปในท่อผสมอากาศที่อยู่รอบ ๆ ทางเข้าท่อผสมจะถูกเหนี่ยวนำผ่านช่องอากาศส่วนแรกเข้าไปในท่อผสมพร้อม ๆ กับแก๊สเชื้อเพลิง โดยอาศัยการถ่ายเทโมเมนตัมระหว่างแก๊สและอากาศโดยรอบ จากนั้นส่วนผสมของอากาศส่วนแรกและแก๊สเชื้อเพลิงจะถูกกักเก็บในหัวเตาก่อนแล้วค่อย ๆ ปล่อยแก๊สซึมผ่านออกมาตามรูทางออกของเปลวไฟและลุกติดไฟให้เปลวไฟชนิดผสมมาก่อน (Premixed flame) การวัดปริมาณการปลดปล่อยมลพิษจะทดสอบอ้างอิงตามมาตรฐาน DIN EN 203-2: 1997 โดยทำการเลือกขนาดของหม้อภาชนะ (Pot) ที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร (German Standards and Technical Rules, 1997) โดยใช้ระยะความสูงก้นหม้อ (H) ที่ระยะ 5 เซนติเมตร ซึ่งชุดดักไอเสีย (Hood) ที่ทำการวัดไอเสียสามารถครอบได้ เพื่อป้องกันการรบกวนจากอากาศภายนอก ในขณะที่ทำการวัดไอเสีย และเติมน้ำปริมาณ 30.6 กิโลกรัมลงในหม้อภาชนะ ทำการต้มน้ำจนถึงอุณหภูมิประมาณ 70 องศาเซลเซียส ให้เริ่มทำการวัดปริมาณแก๊สไอเสีย (CO, CO<sub>2</sub> และ NO<sub>x</sub>) เมื่อข้อมูลที่วัดได้เข้าสู่สถานะคงที่ให้ทำการบันทึกผล จากนั้นเมื่อน้ำใกล้เดือดให้ทำการปิดเตา และให้ทดสอบที่สถานะถัดไปโดยทำการเปลี่ยนหม้อและน้ำที่บรรจุใหม่ งานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองที่เงื่อนไขเดิมซ้ำ 3 ครั้ง เพื่อหาค่าเฉลี่ยในการรายงานผล ซึ่งในการทดลองจะทำการปรับค่าอัตราการ



ป้อนเชื้อเพลิงหรืออัตราการเผาไหม้ (Firing Rate, FR) จาก 5 ถึง 11 กิโลวัตต์ ซึ่งการควบคุมอัตราการเผาไหม้ (FR) สามารถทำได้ โดยการปรับค่าอัตราการไหลเชิงมวลของแก๊ส ( $\dot{m}_g$ ) ค่าอัตราการเผาไหม้ของเตา สามารถคำนวณหาได้ดังสมการ (1)

$$FR = \dot{m}_g \times LHV \quad (1)$$

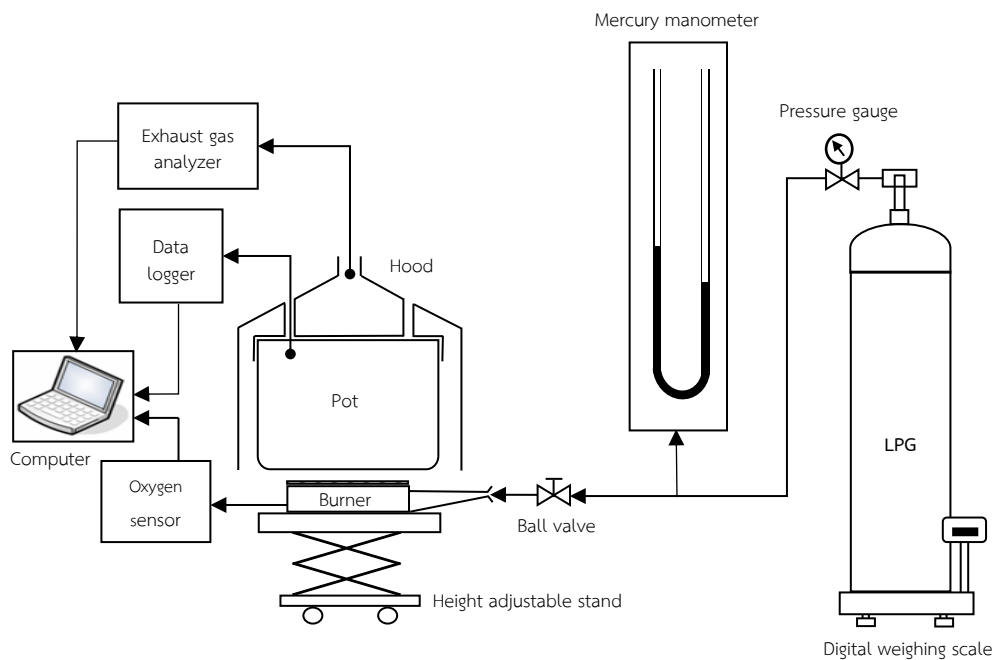
เมื่อ  $FR$  คือ อัตราการเผาไหม้ (kW)  
 $\dot{m}_g$  คือ อัตราการไหลเชิงมวลของแก๊ส (kg/s)  
 $LHV$  คือ ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง (kJ/kg)

ในส่วนของการวัดปริมาณอากาศส่วนแรกที่ใช้ในการเผาไหม้ ส่วนผสมของอากาศส่วนแรกและเชื้อเพลิงที่อยู่บริเวณ หัวเผาจะถูกดูดผ่านไปยังเครื่องวัดปริมาณแก๊สออกซิเจน (% $O_2$ ) เพื่อใช้ในการคำนวณหาปริมาณอากาศส่วนแรก (PA) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ (2)

$$PA = \frac{\%O_2}{(A/F)_{stoi.} \times (21 - \%O_2)} \times 100 \quad (2)$$

เมื่อ  $PA$  คือ ปริมาณอากาศส่วนแรกที่ใช้ในการเผาไหม้ (%)  
 $(A/F)_{stoi.}$  คือ ปริมาณอากาศต่อเชื้อเพลิงทางทฤษฎี (-)  
 $\%O_2$  คือ ปริมาณออกซิเจนที่วัดได้ (%)

การทดลองจะทำซ้ำเหมือนเดิมโดยการปรับอัตราการเผาไหม้ตั้งแต่ 5 ถึง 11 กิโลวัตต์ และปรับเปลี่ยนหัวเผาตามตารางที่ 1 เพื่อวัดปริมาณอากาศส่วนแรกที่ใช้ในการเผาไหม้ (PA) และปริมาณการปลดปล่อยมลพิษ (CO,  $CO_2$  และ NOx) โดยหัวเผาที่มี ประสิทธิภาพสูงจะสามารถเหนี่ยวนำปริมาณ PA เพิ่มสูงขึ้นใกล้เคียง 100% และปลดปล่อยมลพิษต่ำ



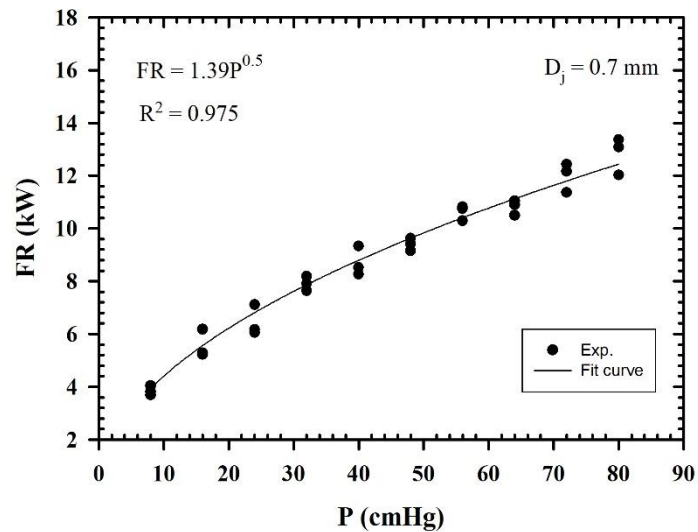
ภาพที่ 3 ชุดอุปกรณ์การทดลองหัวเผาวัสดุพูน

## ผลการวิจัย

หัวเผาวัสดุพูนที่ใช้ทดสอบใช้เชื้อเพลิงแก๊สแอลพีจี โดยมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางรูหัวฉีดเชื้อเพลิง ( $D_j$ ) เท่ากับ 0.7 มิลลิเมตร การทดสอบหาปริมาณการป้อนเชื้อเพลิงหรืออัตราการเผาไหม้ (FR) ในแต่ละความดันแก๊สเชื้อเพลิง (P) สามารถทำได้โดยการชั่งน้ำหนักของแก๊สเชื้อเพลิงในขณะที่ทำการจุดไฟและทำการจับเวลา เพื่อคำนวณหาปริมาณอัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิง ( $\dot{m}_g$ ) โดยทำการทดสอบที่ความดันแก๊สต่าง ๆ จากนั้นคำนวณหาค่า FR จากสมการ (1) ผลที่ได้แสดงดังภาพที่ 4 พบว่าเมื่อเพิ่มความดันแก๊สเชื้อเพลิงมากขึ้น ส่งผลให้ค่าอัตราการเผาไหม้เพิ่มสูงขึ้นตาม ผลที่ได้จากการทดลองสามารถสร้างสมการสหสัมพันธ์ระหว่าง FR และ P ดังสมการ (3)

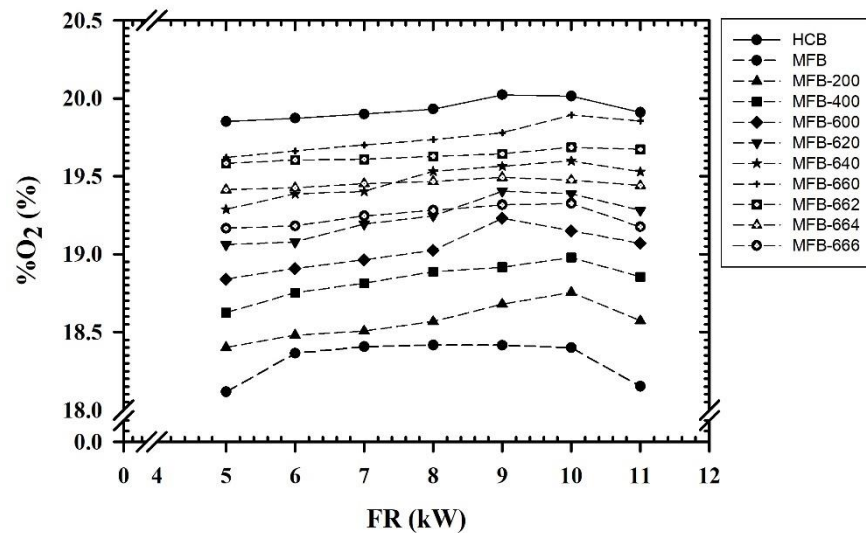
$$FR = 1.39P^{0.5} \quad (3)$$

ซึ่งสมการที่ได้จะช่วยออกแบบการทดลอง โดยในการวิจัยจะพิจารณาเลือกทดสอบอัตราการเผาไหม้ที่ 5 ถึง 11 kW เนื่องจากอยู่ในช่วงการทำงานของหัวเผา ดังนั้น ในการทดลองจริงการปรับความดันแก๊สเชื้อเพลิงที่ใช้ในการทดสอบเพื่อให้ได้ตามค่าอัตราการเผาไหม้ที่กำหนดสามารถคำนวณได้จากสมการ (3)



ภาพที่ 4 การสอบเทียบการทำงานของหัวเผา





ภาพที่ 5 ปริมาณออกซิเจนในแก๊สผสมระหว่างอากาศและเชื้อเพลิง

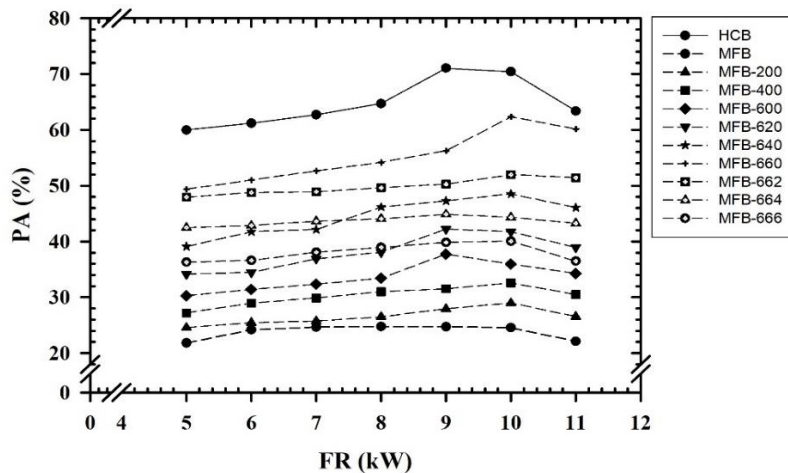
การทดสอบหาปริมาณอากาศที่ถูกเหนี่ยวนำเพื่อใช้ในการเผาไหม้ อาศัยการวัดปริมาณออกซิเจน (%O<sub>2</sub>) ภายในแก๊สผสมระหว่างอากาศและเชื้อเพลิงที่ตำแหน่งภายในหัวเผาก่อนเกิดการเผาไหม้ โดยทำการทดสอบที่ค่า FR ตั้งแต่ 5 ถึง 11 kW และเปรียบเทียบผลที่ได้ระหว่างหัวเผานิตต่าง ๆ ดังภาพที่ 5 พบว่า ทุกหัวเผาให้ผลการทดลองที่สอดคล้องกันคือ เมื่อเพิ่มค่า FR จะทำให้ค่า %O<sub>2</sub> เพิ่มมากขึ้น เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของความเร็วเจ็ทของเชื้อเพลิงที่ถูกฉีดออกมาจากหัวฉีดแก๊ส ส่งผลให้เกิดแรงเฉือนและสามารถเหนี่ยวนำอากาศที่อยู่ใกล้ ๆ บริเวณโดยรอบหัวฉีดเข้ามาได้มากขึ้น แต่เมื่อเพิ่มค่า FR มากจนเกินไป ปริมาณการเหนี่ยวนำอากาศจะเริ่มลดน้อยลง เนื่องจากลำเจ็ทของเชื้อเพลิงจะขยายออกและบดบังทางเข้าของอากาศ และเมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบระหว่างหัวเผาแบบ HCB และ MFB พบว่า หัวเผาแบบ MFB จะให้ค่า %O<sub>2</sub> ลดน้อยลงเนื่องจากหัวเผาดังกล่าวมีโครงสร้างของวัสดุพอร์ที่ก่อให้เกิดความดันตกคร่อมภายในเตาสูง ดังนั้น อากาศส่วนแรกซึ่งถูกเหนี่ยวนำโดยธรรมชาติจะถูกเหนี่ยวนำได้ยากขึ้น จากนั้นเมื่อทำการเจาะรูทางเข้าอากาศส่วนแรกที่เหมาะสำหรับเตา MFB เช่น กรณีเจาะแถวที่ 1 จำนวน 2 รู (MFB-200) พบว่าสามารถเหนี่ยวนำอากาศได้มากขึ้นโดยสังเกตจากปริมาณ %O<sub>2</sub> ที่เพิ่มขึ้นจากกรณีเตา MFB เนื่องจากการเพิ่มช่องทางในการเหนี่ยวนำอากาศได้มากขึ้น และเมื่อเจาะรูเพิ่มมากขึ้นจำนวนหลายรู และจำนวนหลายแถวยังสามารถเพิ่มปริมาณการเหนี่ยวนำอากาศได้มากยิ่งขึ้น แต่ถ้าเจาะรูมากจนเกินไป เช่น การเจาะรูเพิ่มตั้งแต่แถวที่ 3 เป็นต้นไป จะส่งผลให้การเหนี่ยวนำอากาศลดน้อยลง เนื่องจากเกิดการรั่วไหลของแก๊สออกจากท่อผสม ดังนั้นหัวเผาที่มีการเจาะรูทางเข้าอากาศส่วนแรกเหมาะสมที่สุดคือหัวเผา MFB-660 คือเจาะครบทั้ง 6 รูในแถวที่ 1 และ 2 ในขณะเดียวกันแถวที่ 3 ไม่มีการเจาะซึ่งพบว่าจะให้ค่าการเหนี่ยวนำอากาศส่วนแรกมากที่สุดของเตาชนิด MFB

การคำนวณหาปริมาณ PA ได้จากสมการ (2) โดยอาศัยค่า %O<sub>2</sub> ที่ได้จากภาพที่ 5 พบว่า ทุกหัวเผาให้ผลการทดลองที่สอดคล้องกันดังภาพที่ 6 คือ เมื่อเพิ่มค่า FR จะทำให้ค่า PA เพิ่มมากขึ้น เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของความเร็วเจ็ทของเชื้อเพลิงที่ถูกฉีดออกมาจากหัวฉีดแก๊ส ส่งผลให้เกิดแรงเฉือนและสามารถเหนี่ยวนำอากาศที่อยู่ใกล้ ๆ บริเวณโดยรอบหัวฉีดเข้ามาได้มากขึ้น แต่เมื่อเพิ่มค่า FR มากจนเกินไป ปริมาณ PA จะเริ่มลดน้อยลงเนื่องจากลำเจ็ทของเชื้อเพลิงจะขยายออกและบดบังทางเข้าของอากาศ และเมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบระหว่างหัวเผาแบบ HCB และ MFB พบว่า หัวเผาแบบ MFB จะให้ค่า PA ลดน้อยลง

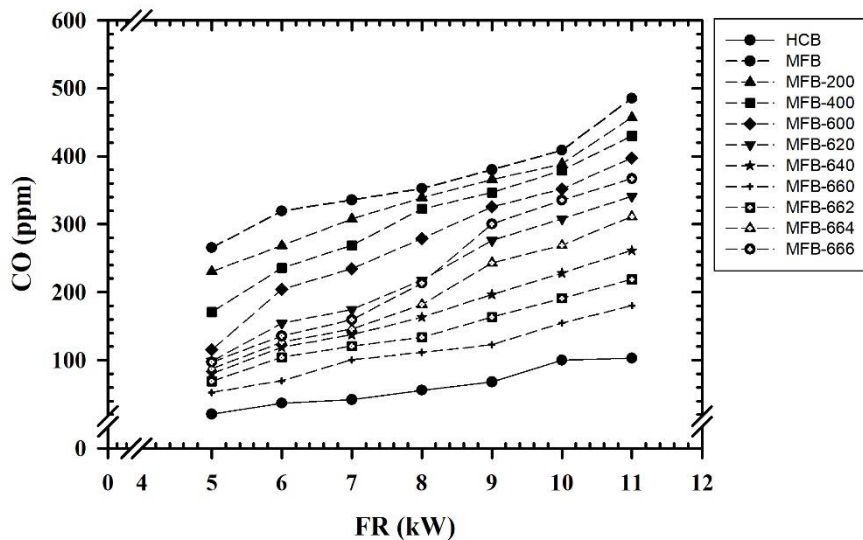




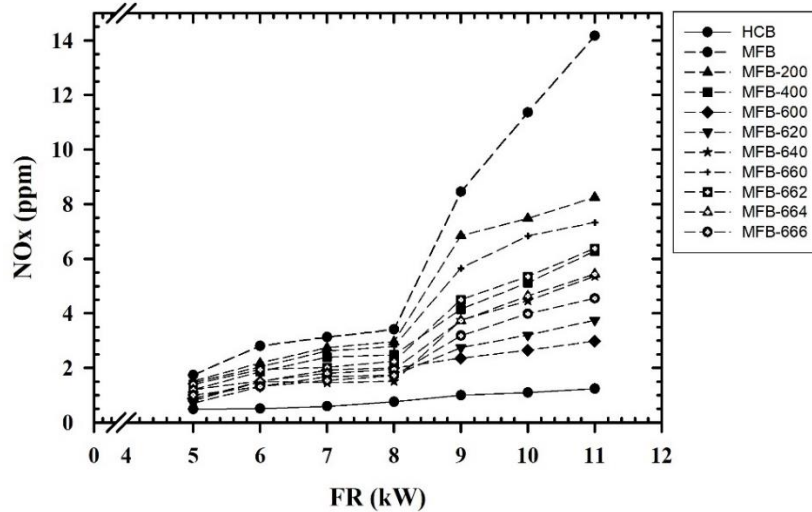
เนื่องจากหัวเผาดังกล่าวมีโครงสร้างของวัสดุพูนที่ทำให้เกิดความดันตกคร่อมภายในเตาสูง ดังนั้นอากาศส่วนแรกซึ่งถูกเหนี่ยวนำโดยธรรมชาติ จะถูกเหนี่ยวนำได้ยากขึ้น จากนั้นเมื่อทำการเจาะรูทางเข้าอากาศส่วนแรกที่ท่อผสมสำหรับเตา MFB เช่น กรณีเจาะแถวที่ 1 จำนวน 2 รู (MFB-200) พบว่าสามารถเหนี่ยวนำอากาศได้มากขึ้นโดยสังเกตจากปริมาณ PA ที่เพิ่มขึ้นจากกรณีเตา MFB และเมื่อเจาะรูเพิ่มมากขึ้นจำนวนหลายรู และจำนวนหลายแถว ยิ่งสามารถเพิ่มปริมาณการเหนี่ยวนำอากาศได้มากยิ่งขึ้น แต่ถ้าเจาะรูมากจนเกินไป เช่น การเจาะรูเพิ่มตั้งแต่แถวที่ 3 เป็นต้นไป จะส่งผลให้การเหนี่ยวนำอากาศลดน้อยลง เนื่องจากเกิดการรั่วไหลของแก๊สออกจากท่อผสม ดังนั้นหัวเผาที่มีการเจาะรูทางเข้าอากาศส่วนแรกที่เหมาะสมที่สุดคือหัวเผา MFB-660 คือเจาะครบทั้ง 6 รูในแถวที่ 1 และ 2 ในขณะที่เดียวกันแถวที่ 3 ไม่มีการเจาะ ซึ่งพบว่าจะให้ค่าการเหนี่ยวนำอากาศส่วนแรกมากที่สุดของเตาชนิด MFB



ภาพที่ 6 ปริมาณอากาศส่วนแรกที่ใช้ในการเผาไหม้



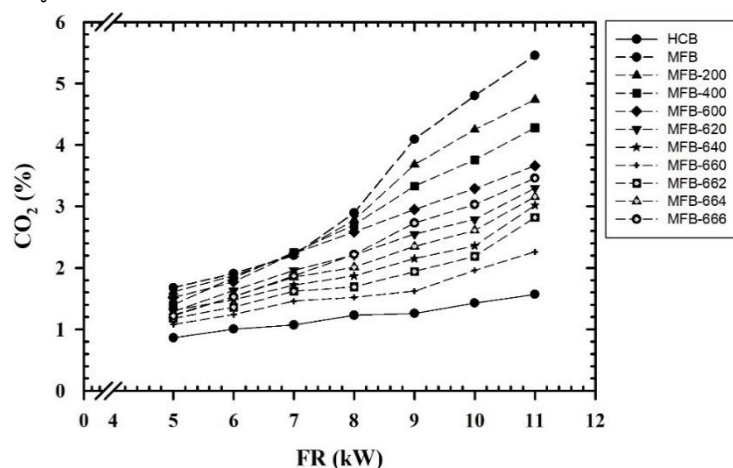
ภาพที่ 7 ปริมาณการปลดปล่อยมลพิษ CO



ภาพที่ 8 ปริมาณการปลดปล่อยมลพิษ NOx

การปลดปล่อยมลพิษ CO ของหัวเผาชนิดต่าง ๆ แสดงดังภาพที่ 7 ซึ่งพบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณ FR มากขึ้นจะทำให้ปริมาณ CO สูงขึ้นตาม เนื่องจากจะทำให้เปลวไฟยาวขึ้นและสัมผัสกันหม้อภาชนะและเกิด Flame quenching effect เพิ่มสูงขึ้น ส่งผลให้เกิดการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ และเมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบระหว่างหัวเผาแบบ HCB และ MFB พบว่า หัวเผา HCB ให้ค่า CO ต่ำกว่าหัวเผา MFB เนื่องจากมีปริมาณ PA สูงกว่า และหัวเผา MFB เมื่อมีการปรับปรุงเจาะรูทางเข้าอากาศมากขึ้นส่งผลทำให้มีอากาศเพียงพอต่อการเผาไหม้ เกิดการเผาไหม้สมบูรณ์ขึ้น (ค่า CO ลดน้อยลง)

การปลดปล่อยมลพิษ NOx ของหัวเผาชนิดต่าง ๆ แสดงดังภาพที่ 8 ซึ่งพบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณ FR มากขึ้นจะทำให้ปริมาณ NOx สูงขึ้นตาม เนื่องจากการเพิ่มอัตราการป้อนเชื้อเพลิงจะทำให้มีอุณหภูมิในการเผาไหม้สูงขึ้น ดังนั้นปริมาณ Thermal NOx หรือ Zeldovich-NOx (NOx ที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ที่มีอุณหภูมิสูง) จึงมีปริมาณที่เพิ่มสูงขึ้นตาม และเมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบระหว่างหัวเผาแบบ HCB และ MFB พบว่า หัวเผา MFB ให้ค่า NOx สูงกว่าหัวเผา HCB เนื่องจากคุณสมบัติของวัสดุพอร์ซันที่ทำมาจากเส้นใยโลหะส่งผลให้อุณหภูมิของเปลวไฟจากการเผาไหม้เพิ่มสูงขึ้น ดังนั้น ปริมาณการปลดปล่อยค่า Thermal NOx สูงขึ้นตาม



ภาพที่ 9 ปริมาณการปลดปล่อยมลพิษ CO<sub>2</sub>



การปลดปล่อยมลพิษ CO<sub>2</sub> ของหัวเผาชนิดต่าง ๆ แสดงดังภาพที่ 9 ซึ่งพบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณ FR มากขึ้น จะทำให้ปริมาณ CO<sub>2</sub> เพิ่มสูงขึ้นตาม เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของอัตราการเผาไหม้ ส่งผลให้แก๊สเชื้อเพลิงทำปฏิกิริยากับอากาศและได้ผลิตภัณฑ์จากการเผาไหม้คือแก๊ส CO<sub>2</sub> มากยิ่งขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบระหว่างหัวเผาแบบ HCB และ MFB พบว่าหัวเผา HCB ให้ค่า CO<sub>2</sub> ต่ำกว่าหัวเผา MFB เนื่องจากหัวเผา HCB สามารถเหนี่ยวนำ PA ได้สูงกว่าจึงมีปริมาณเพียงพอต่อการเผาไหม้ และเกิดการเผาไหม้สมบูรณ์ และหัวเผา MFB เมื่อมีการปรับปรุงเจาะรูทางเข้าอากาศมากขึ้น ส่งผลดีทำให้มีอากาศเพียงพอต่อการเผาไหม้ เกิดการเผาไหม้สมบูรณ์ขึ้น (ค่า CO<sub>2</sub> ลดน้อยลง) แต่กรณีที่เจาะรูทางเข้าอากาศมากเกินไป เช่น การเจาะรูเพิ่มในตำแหน่งแถวที่ 3 จะส่งผลเสียคือ แก๊สผสมอากาศและเชื้อเพลิงที่อยู่ภายในท่อผสมเกิดการรั่วไหลออกสู่บรรยากาศภายนอก ทำให้ปริมาณอากาศส่วนแรกไม่เพียงพอต่อการเผาไหม้ เกิดการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ ดังนั้นค่า CO<sub>2</sub> เริ่มปรับตัวสูงขึ้น

### อภิปรายและสรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาอิทธิพลของจำนวนรูทางเข้าอากาศส่วนแรกต่อการปลดปล่อยมลพิษจากการเผาไหม้ของหัวเผาวัสดุพูน สามารถสรุปได้ดังนี้

1. การเพิ่มค่า FR ส่งผลต่อการเหนี่ยวนำอากาศส่วนแรก (PA) เพิ่มมากขึ้น เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของความเร็วเจ็ทเชื้อเพลิงและจะเกิดแรงเฉือนสูงทำให้อากาศโดยรอบถูกเหนี่ยวนำเข้าสู่ท่อผสมมากขึ้น
2. หัวเผา MFB มีความดันตกคร่อมภายในเตาสูงกว่าหัวเผา HCB เนื่องจากโครงสร้างของทางออกรูเปลวไฟที่มีค่าความพรุนต่ำมาก ส่งผลให้เหนี่ยวนำอากาศส่วนแรกได้ลดน้อยลง และปลดปล่อยมลพิษ CO เพิ่มสูงขึ้น
3. การเจาะรูทางเข้าอากาศส่วนแรกเพิ่มมากขึ้นเป็นการช่วยเพิ่มปริมาณการเหนี่ยวนำอากาศส่วนแรก แต่ไม่ควรเจาะมากเกินไปจะส่งผลให้แก๊สผสมระหว่างเชื้อเพลิงและอากาศรั่วออกจากหัวเผา
4. หัวเผา MFB ที่เหมาะสมในการเลือกใช้งานคือ MFB-660 เนื่องจากให้ค่า PA สูง และปลดปล่อยมลพิษ CO ต่ำใกล้เคียงกับหัวเผา HCB
5. ผลจากการศึกษาสามารถนำหัวเผาแบบ MFB มาใช้งานทดแทนหัวเผาแบบ HCB ได้จริงแต่จะต้องมีการปรับปรุงโดยเพิ่มรูทางเข้าอากาศส่วนแรกที่เหมาะสม

### กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ที่สนับสนุนทุนและอุปกรณ์ในการทำวิจัยในครั้งนี้

### เอกสารอ้างอิง

- ณัฐวุฒิ ริงสิมันตุชาติ. (2544). การประยุกต์ใช้วัสดุพูนเพื่อการประหยัดพลังงานในเตาแก๊สหุงต้ม [วิทยานิพนธ์หลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี]. TDC.thailis. <https://tdc.thailis.or.th/tdc/>.
- ภาณุวัฒน์ บุญโยประการ. (2543). การปรับปรุงหัวเตาแก๊สหุงต้มเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อนและประยุกต์ใช้ในครัวเรือน [วิทยานิพนธ์หลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี]. TDC.thailis. <https://tdc.thailis.or.th/tdc/>.



- วสันต์ โยคเสนะกุล. (2547). *หัวเผาเชื้อเพลิงแก๊สที่มีการหมุนเวียนความร้อนและการไหลแบบหมุนวน* [วิทยานิพนธ์หลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี]. TDC.thailis. <https://tdc.thailis.or.th/tdc/>.
- สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน. (ม.ป.ป.). ข้อมูลพลังงาน (Energy Database) ณ วันที่ 5 มีนาคม 2563. <http://www.eppo.go.th/index.php/th/energy-information>.
- German Standards and Technical Rules. (1997). *DIN EN 203-2: Gas-heated Catering Equipment*. Brussel: Management centre.
- Hou, S.S., Lee, C.Y. and Lin, T.H. (2007). Efficiency and emissions of a new domestic gas burner with a swirling flame. *Energy conversion and management*, 48(5), 1401-1410. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2006.12.001>.
- Jones, H.R.N. (1989). *The application of combustion principles to domestic gas burner design*. New York: British gas.
- Jugjai, S. and Rungsimuntuchart, N. (2002). High efficiency heat recirculating domestic gas burners. *Experimental thermal and fluid science*, 26, 581-592. [https://doi.org/10.1016/S0894-1777\(02\)00164-4](https://doi.org/10.1016/S0894-1777(02)00164-4).
- Muthukumar, P. and Shyamkumar, P.I. (2011). Development of novel porous radiant burners for LPG cooking applications. *Fuel*, 112, 562-566. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2011.09.006>.
- Namkhat, A. and Jugjai, S. (2010). Primary air entrainment characteristics for a self-aspirating burner: model and experiments. *Energy*, 35(4), 1701-1708. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2009.12.020>.
- Pantangi, V.K., Mishra, S.C., Muthukumar, P. and Reddy, R. (2011). Studies on porous radiant burners for LPG (liquefied petroleum gas) cooking applications. *Energy*, 36(10), 6074-6080. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.08.008>.
- Pritchard, R., Guy, J.J. and Cornner, N.E., (1977). *Handbook of industrial gas utilization engineering principles and practice*. New York: Van Nostrand Reinhold Company.
- Singh, G., Sundararajan, T. and Bhaskaran, K.A. (2003). Mixing and entrainment characteristics of circular and noncircular confined jets. *Journal of Fluids Engineering*, 125(5), 835-842. <https://doi.org/10.1115/1.1595676>.
- Singh, G., Sundararajan, T. and Shet, U.S.P. (1999). Entrainment and mixing studies for a variable density confined jet. *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, 35(2), 205-224. <https://doi.org/10.1080/104077899275335>.