

หัวพันไฟวัสดุพรุนเชื้อเพลิงแก๊สแอลพีจีที่ใช้หินตุ้ปลาเป็นวัสดุพรุน แบบเม็ดกลมอัดแน่น

The LPG Porous Burner using the Pebbles as Packed-bed Sphere Porous Medium

พิพัฒน์ อมตฉายา บัณฑิต กฤตาคม*

ห้องปฏิบัติการการวิจัยในเทคโนโลยีของวัสดุพรุน (DITO-Lab)
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลคณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000

Pipatana Amatachaya Bundit Krittacom*

Development in Technology of Porous Materials Research Laboratory (DITO-Lab),
Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering and Architecture,
Rajamangala University of Technology Isan, Muang, Nakhonrachasima, 30000
Tel: 0-4423-3073 E-mail: bundit.kr@rmuti.ac.th

บทคัดย่อ

พฤติกรรมการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงผสมระหว่างอากาศกับแก๊สแอลพีจี (Liquid Petroleum Gas, LPG) ก่อนเข้าสู่ระบบการเผาไหม้ (Premixed-gas combustion) ของหัวพันไฟวัสดุพรุนได้ทำการศึกษาดูการทดลองในงานวิจัยนี้ วัสดุพรุนที่ใช้ในการทดลองเป็นแบบเม็ดกลมอัดแน่นที่ทำมาจากหินตุ้ปลา (pebbles) ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย (d) และค่าความพรุน (ϵ) เท่ากับ 1.55 cm และ 0.396 ตามลำดับ อัตราการไหลเชิงปริมาตรของเชื้อเพลิงแก๊สผสมก่อน (volumetric premixed-gas flow rate, V_{mix}) ระหว่างแอลพีจีกับอากาศถูกจ่ายเข้าไปยังชั้นวัสดุพรุนในช่วงความเร็ว 5 – 30 m^3/h และอัตราส่วนสมมูลของเชื้อเพลิง (equivalence ratio, Φ) ที่ใช้ในการทดลองจะพิจารณาอ้างอิงตามสถานะเสถียรของการเผาไหม้ จากการศึกษาพบว่าเสถียรภาพการเผาไหม้มีค่า Φ อยู่ในช่วง 0.5 – 0.9 โครงสร้างทางอุณหภูมิ (T) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของ Φ และ V_{mix} สำหรับปริมาณ CO และ NO_x ที่ปล่อยออกมาจากหัวพันไฟวัสดุพรุนชนิดนี้อยู่ในเกณฑ์ที่ต่ำ ซึ่งมีค่าไม่เกิน 100 ppm ทั้งสองปริมาณ

คำหลัก แก๊สแอลพีจี วัสดุพรุนเม็ดกลมอัดแน่น เชื้อเพลิงแก๊สผสมก่อน

Abstract

A combustion behavior of premixed gas between air and LPG (Liquid Petroleum Gas) was experimentally investigated in this research. The pebbles having average diameter (d) of 1.55 cm and porosity (ϵ) of 0.396 were employed as the packed-bed sphere porous medium. The volumetric premixed-gas flow rate (V_{mix}) in the range of 5 – 30 m^3/h was supplied to the porous matrix and the equivalence ratio (Φ) operated in the examination depended on a stable combustion. From the experiment, it was found that the value of Φ of stable flame was in the range of 0.5 – 0.9. Temperature profile (T) increased as Φ and V_{mix} increased. The amount of exhaust gases (CO and NO_x) released from the present gas porous burner was in the low level which not over than 100 ppm in the both gases.

Keywords: Gas burner, porous media, packed-bed sphere porous media, equivalence ratio

1. บทนำ

หัวพันไฟหรือหัวเผาแฟร์รังสีแบบวัสดุพรุน (porous radiant burner) ที่ใช้แก๊สเป็นเชื้อเพลิง มีการใช้ประโยชน์อย่างกว้างขวางในหลายวัตถุประสงค์ [1] ยกตัวอย่างเช่น ใช้ในขบวนการผลิตกระดาษ การทำให้กระดาษแห้ง (paper drying) การเคลือบเงากระดาษ (paper finishing) ใช้ในอุตสาหกรรมสิ่งทอ การอบและการทำให้เส้นใยแห้ง (baking and textile drying) การผลิตไอน้ำในหม้อต้มน้ำทางอุตสาหกรรม การหล่อ การหลอมเหล็ก หรือแม้แต่การสร้างความอบอุ่นภายในบ้านเรือน (domestic radiant heater) ก็มีการใช้ประโยชน์จากหัวเผาชนิดนี้ โดยข้อดีที่โดดเด่นของหัวเผาแก๊สวัสดุพรุนมีสองข้อหลัก ๆ คือ มีความสามารถในการแผ่รังสีได้สูงและปลดปล่อยมลพิษจากการเผาไหม้ในปริมาณที่ต่ำ ด้วยข้อดีดังกล่าวจึงเป็นเหตุผลให้นักวิจัยและวิศวกรจำนวนมาก [2-7] มีความสนใจและศึกษาเกี่ยวกับหัวเผาชนิดนี้ทั้งด้วยวิธีการทดลองและทางทฤษฎี เพื่อที่จะพัฒนาสมรรถนะให้ดียิ่งขึ้น

ในปี ค.ศ. 1986 Echigo และคณะ [2-3] เป็นนักวิจัยกลุ่มแรกที่เสนอผลงานการเผาไหม้ในวัสดุพรุนทั้งการทดลองและทฤษฎีโดยพบว่าวัสดุพรุนจะช่วยส่งเสริมการเผาไหม้ให้ดียิ่งขึ้นเนื่องจากการหมุนเวียนพลังงานด้วยการแผ่รังสี (radiation recirculation) จากบริเวณเปลวไฟไปยังไอดีผสม (unburned gas mixture) ที่กำลังส่งมายังระบบ ในปี ค.ศ. 1994 Khanna และคณะ [4] ทำการทดลองสร้างหัวพันไฟวัสดุพรุนที่ทำมาจากเซรามิกชนิด Partially Stabilized Zirconia (PSZ) พบว่าประสิทธิภาพการแผ่รังสีจะแปรผกผันกับความเร็วของเปลวไฟ และปริมาณแก๊สไอเสีย (CO และ NO_x) จะขึ้นกับความเร็วของเปลวไฟ (flame speed) ในปี ค.ศ. 1997 Mital และคณะ [5] ได้ทำการศึกษาทั้งการทดลองและทฤษฎีของการแผ่รังสีจากหัวเผาเซรามิกที่เปลวไฟฝังตัวอยู่ในวัสดุพรุน ต่อมาในปี ค.ศ. 1999 Bouma และ De Goey [6] ได้สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของหัวเผาวัสดุพรุนชนิดเซรามิกขึ้น โดยเลือกใช้กลไกโครงสร้างในการทำนายปรากฏการณ์การเผาไหม้ที่เกิดขึ้น และยังทำการทดลองเพื่อยืนยันผลการใช้กลไกดังกล่าวโดยเน้นที่มลพิษที่ถูกปล่อยออกมา

เมื่อเริ่มเข้าสู่ศตวรรษที่ 20 Leonardi และคณะ [7] ได้พัฒนาแบบจำลองทางทฤษฎีในการทำนายประสิทธิภาพความร้อนของหัวเผาวัสดุพรุนขึ้นในปี ค.ศ. 2001 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าผลการคำนวณสำหรับอุณหภูมิพื้นผิวของหัวเผา อุณหภูมิทางออกของแก๊ส และประสิทธิภาพการแผ่รังสีที่ได้จากผลการคำนวณมีสอดคล้องกันเป็นอย่างดีกับข้อมูลการทดลอง ในปี ค.ศ. 2009 Krittacom และคณะ [8-9] ได้ทำการทดลองและสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อศึกษาคุณลักษณะการแผ่รังสีของหัวเผาไหม้แบบวัสดุพรุนเซลล์ลาร์เปิดชนิดเซรามิกซ์ ซึ่งการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นจะเป็นแบบการผสมเชื้อเพลิงก่อนเข้าสู่ระบบการเผาไหม้ (แก๊สมีเทนและอากาศ) จากการศึกษาจะพบว่าสภาวะเสถียรของการเผาไหม้ในหัวเผาชนิดนี้จะอยู่ในช่วงอัตราส่วนสมมูล (equivalence ratio, Φ) ของการเป่าดับ (blow-off) ประมาณ 0.48 ถึง 0.5 และการย้อนกลับของเปลวไฟ (flash-back) จะต่ำกว่า 0.62 ผลการเปรียบเทียบระหว่างการคำนวณและการทดลองมีความสอดคล้องกันอย่างสมเหตุสมผล

จากงานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้น จะพบว่าการศึกษาและพัฒนาเกี่ยวกับหัวพันไฟหรือหัวเผาแฟร์รังสีจะนิยมใช้วัสดุพรุนชนิดเซรามิกซ์ที่มีโครงสร้างทางกายภาพที่มีความพรุนสูง ๆ เช่น เซลล์ลาร์เปิด (open-cellular) โครงข่าย (reticulated media) เส้นใย (fibrous) เป็นต้น ซึ่งมีเหตุผลหลักคือความร้อนที่จะนำไปใช้งานต้องการให้อยู่ในรูปของการแผ่รังสีความร้อน อย่างไรก็ตามในการประยุกต์ใช้บางงาน ความยาวของเปลวไฟ (flame length) เป็นสิ่งที่ต้องการ เช่น การต้มน้ำในหม้อน้ำอุตสาหกรรม การเผาขยะ เป็นต้น ซึ่งวัสดุพรุนที่มีค่าความพรุนสูง ๆ จะไม่มีเปลวไฟที่ลามออกไปจากหัวเผา แต่วัสดุพรุนที่มีค่าความพรุนต่ำ ๆ เช่น แบบเม็ดกลมอัดแน่น (packed-bed sphere) [10-11] แบบชิ้นส่วน (discrete element) เป็นต้น จะสามารถช่วยส่งเสริมให้เกิดการเผาไหม้ด้านนอกวัสดุพรุนได้ ส่งผลให้มีความยาวเปลวไฟเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าหัวเผาหรือหัวพันไฟที่ทำการศึกษาที่ผ่านมามีส่วนที่ต้องปรับปรุงและค้นคว้าเพิ่มเติมอีกหลายอย่าง ไม่ว่าจะเป็นการสร้างหัวพันไฟให้มีโครงสร้างไม่ยุ่งยาก ผลิตหรือติดตั้งได้อย่างง่าย แต่สามารถทำให้เปลวไฟเสถียรได้ไม่ลำบาก มีการทำนายการเผาไหม้โดยใช้กลไกทางจลนศาสตร์ที่มี

คณิตศาสตร์ไม่ซับซ้อนในการแก้ปัญหา แต่ให้ผลการทำนายที่แม่นยำ

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาหาคุณลักษณะเปลวไฟที่เสถียรอยู่ด้านนอกของวัสดุพอร์น โดยสร้างหัวพ่นไฟที่ใช้วัสดุพอร์นแบบเม็ดกลมอัดแน่น ชนิดหินตุ้ปลา (pebbles) ที่มีค่าความพอร์น (porosity, ϵ) ต่ำ ๆ ซึ่งหินตุ้ปลาที่เลือกใช้ในการทดลองมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย (average diameter, d) เท่ากับ 1.55 cm และมีค่า ϵ เมื่อทำการบรรจุในหัวพ่นไฟเท่ากับ 0.362 เชื้อเพลิงที่ใช้ในการทดลอง คือ แก๊สแอลพีจี (LPG) สำหรับผลการทดลองจะแสดงในรูปโครงสร้างอุณหภูมิ (temperature profiles) รวมทั้งมีการตรวจวัดแก๊สไอเสีย (CO และ NO_x) เพื่อศึกษาพฤติกรรมการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงแอลพีจี ซึ่งเชื่อว่าการทดลองที่ได้จะเป็นข้อมูลเบื้องต้นที่สำคัญในการประยุกต์ใช้งานเกี่ยวกับการผลิตหรือสร้างหัวพ่นไฟแก๊สตามวัตถุประสงค์ต่าง ๆ ที่จะนำไปใช้งานได้จริงในทางอุตสาหกรรมต่อไป

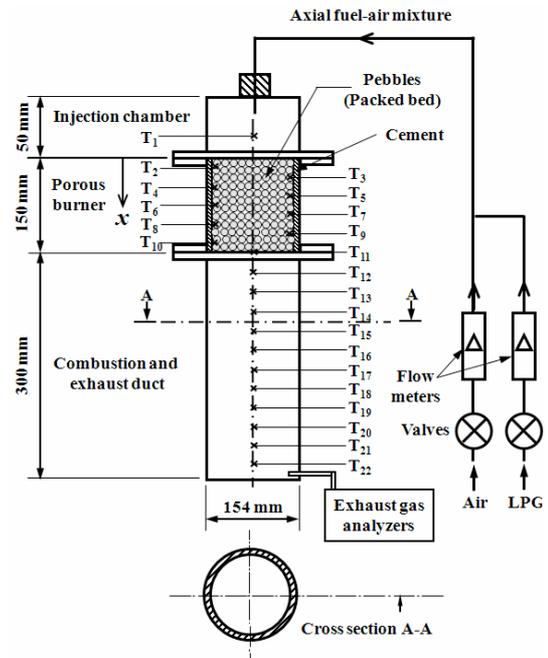
2. อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

2.1 อุปกรณ์การทดลอง

รูปที่ 1 แสดงอุปกรณ์การทดลองของหัวพ่นไฟวัสดุพอร์นแก๊สชนิดเม็ดกลมอัดแน่น (หินตุ้ปลา) ที่ใช้แอลพีจีเป็นเชื้อเพลิงซึ่งแบ่งออกได้เป็น 3 ขอบเขตที่สำคัญประกอบไปด้วย ขอบเขตที่หนึ่งเป็นส่วนที่ป้อนเชื้อเพลิง (Injection chamber zone) หรือการจ่ายไอดี (อากาศกับ LPG) เข้าสู่วัสดุพอร์นชนิดเม็ดกลมอัดแน่น ขอบเขตที่สองเป็นการอุ่นไอดีหรือตำแหน่งการติดตั้งวัสดุพอร์น (porous burner zone) ซึ่งวัสดุพอร์นเป็นชนิดเม็ดกลมอัดแน่นเรียงตัวบรรจุอยู่ข้างในท่อสแตนเลสที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกเท่ากับ 154 mm หนา 2 mm นอกจากนี้เพื่อกันความร้อนสูญเสียสู่ภายนอก จึงหล่อปูนทนไฟ (cement) หนา 2 mm ภายในท่อสแตนเลส ตลอดช่วงที่มีการบรรจุวัสดุพอร์น (150 mm) และขอบเขตสุดท้ายคือการเผาไหม้และท่อไอเสีย (combustion and exhaust duct zone)

จากส่วนประกอบทั้งหมดของหัวพ่นไฟแก๊สแบบนี้จะมีหลักการทำงาน คือ เมื่อไอดี (อากาศผสมกับ LPG) ไหลผ่าน Injection zone เข้าสู่ Porous burner zone

ไอดีจะไหลผ่านชั้นวัสดุพอร์น และจะมีระดับอุณหภูมิที่สูงขึ้น หลังจากนั้นไอดีจะไหลไปยังบริเวณทางออกของชั้นวัสดุพอร์นเข้าสู่ขอบเขตที่สาม ก่อให้เกิดการจุดติดไฟ (ignition) และเผาไหม้ในที่สุด (combustion zone) เปลวไฟที่เกิดขึ้นจะแผ่รังสีความร้อนย้อนกลับไปยังชั้นวัสดุพอร์น ทำให้มีความร้อนหมุนเวียนภายในระบบ เป็นวัฏจักรเกิดการเผาไหม้อย่างต่อเนื่อง ตราบที่มีเชื้อเพลิงป้อนมายังชั้นวัสดุพอร์น



รูปที่ 1 แผนผังอุปกรณ์การทดลองของหัวพ่นไฟแก๊สวัสดุพอร์นชนิดเม็ดกลมอัดแน่น

เพื่อให้เข้าใจถึงปรากฏการณ์การเผาไหม้ และการส่งถ่ายความร้อนระหว่างชั้นวัสดุพอร์นกับเปลวไฟที่เกิดขึ้น อุณหภูมิตามแนวแกนและแก๊สไอเสียจึงถูกตรวจวัด ดังรายละเอียดต่อไปนี้ เทอร์โมคัปเปิลชนิดเค (K-type thermocouples) จำนวน 22 ชิ้น ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.3 mm จะถูกติดตั้งในตำแหน่งกึ่งกลางของหัวพ่นไฟตามแนวแกน โดยแบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม กล่าวคือ กลุ่มที่ 1 มีเทอร์โมคัปเปิลเพียงชิ้นเดียวเท่านั้น (T_1) ที่ติดตั้งไว้ที่ Injection zone เพื่อเฝ้าระวังไม่ให้อุณหภูมิในตำแหน่งนี้สูงกว่าอุณหภูมิจุดติดไฟด้วยตัวเอง (spontaneous temperature) [11] ของ LPG กลุ่มที่ 2 มีจำนวน 10 ชิ้น (T_2 - T_{11}) จะติดตั้งไว้ใน Porous burner zone เพื่อดูกลไกการอุ่นเชื้อเพลิงและคุณลักษณะ

การเผาไหม้ สำหรับกลุ่มสุดท้ายมีจำนวน 11 ชั้น ($T_{12}-T_{22}$) จะติดตั้งไว้ใน Combustion and exhaust duct zone เพื่อดูพฤติกรรมของเปลวไฟที่เกิดขึ้น โดยเทอร์โมคัปเปิลทั้งหมดนี้จะต่อเข้ากับเครื่อง Data logger รุ่น MW 100 ยี่ห้อ Yokokawa และเชื่อมต่อไปยังคอมพิวเตอร์เพื่อประมวลผลและบันทึกค่าแบบต่อเนื่อง ขณะทำการทดลอง ในส่วนของแก๊สไอเสียที่เกิดขึ้น จะไหลออกจากระบบทางด้านล่างของท่อสแตนเลส และถูกตรวจวัดหาปริมาณออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x) และ คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ด้วยเครื่องวิเคราะห์แก๊สไอเสีย (exhaust gas analyzer) ยี่ห้อ Testo รุ่น M350 ซึ่งปริมาณแก๊สไอเสียที่วัดได้จะนำเสนอด้วยค่าที่มีการปรับเทียบกับออกซิเจนส่วนเกิน 0 % ในพื้นฐานแห้ง (Correction by 0% excess oxygen on dry basis)

สำหรับหินตุ้ปลาที่ใช้ในงานวิจัยนี้จะมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยเท่ากับ 1.55 cm และมีค่าความพรุนเท่ากับ 0.362 ซึ่งแสดงไว้ในรูปที่ 2



รูปที่ 2 หินตุ้ปลา (pebbles) ที่เลือกใช้เป็นวัสดุพรุนชนิดเม็ดกลมอัดแน่นในการทดลอง

2.2 วิธีการทดลอง

ทำการจ่ายอากาศ (axial air) พร้อมทั้งแก๊สเชื้อเพลิง (LPG) ในอัตราส่วนทั้งสองที่เหมาะสมกัน โดยปกติให้มี Φ มากกว่าที่สภาวะอุณหภูมิจุดติดไฟด้วยตัวเองของ LPG [12] เพื่อให้เกิดการเผาไหม้ จากนั้นทำการจุดเชื้อเพลิงแก๊สให้ติดโดยใช้ไฟล่อ (pilot flame) ตรงตำแหน่งช่องไฟล่อ (ignition port) ของห้องเผาไหม้ เมื่อไฟติดแล้วรอจนกว่าอุณหภูมิของวัสดุพรุนหรือระบบอยู่ในสภาวะคงที่ (steady state) ทำการปรับค่า Φ ให้อยู่ในสภาวะที่สนใจจะศึกษา หลังจากนั้นปรับ V_{mix} เริ่มจาก $5 \text{ m}^3/\text{hr}$ สังเกตการติดไฟและรอจนระบบอยู่ใน

สภาวะคงที่อีกครั้ง ทำการเก็บข้อมูลผลการทดลองที่สภาวะนี้ ซึ่งข้อมูลการทดลองที่ทำการบันทึกค่า นั้นประกอบไปด้วยอุณหภูมิตลอดความยาวของหัวพ่นไฟ ปริมาณแก๊สไอเสียที่ปลดปล่อยออกมา ได้แก่ คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x) ด้วยเครื่องวิเคราะห์แก๊สไอเสีย (exhaust gas analyzer) ที่ด้านขาออกจากหัวพ่นไฟ เพื่อนำมาเขียนและช่วยอธิบายพฤติกรรมของการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงแก๊สในหัวพ่นไฟวัสดุพรุนให้เข้าใจได้ถูกต้องยิ่งขึ้น

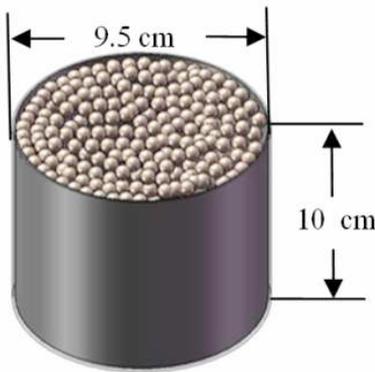
2.3 การหาค่าความพรุน

วิธีการหาค่าความพรุนของวัสดุพรุนแบบเม็ดกลมอัดแน่นในงานวิจัยนี้ ซึ่งมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ย (d) เท่ากับ 1.55 cm มีวิธีการคือ นำวัสดุพรุนใส่ลงในภาชนะรูปทรงกระบอกสูง (L) เท่ากับ 10 cm ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางทรงกระบอก (D) เท่ากับ 9.5 cm ทำให้ภาชนะบรรจุทรงกระบอกนี้มีปริมาตร (container volume, V_C) คือ $\pi D^2 L/4 = 708.821 \text{ cm}^3$ ดังแสดงในรูปที่ 3 เติมน้ำให้เต็มภาชนะหรือถึงระดับด้านบนผิววัสดุพรุนพอดีทิ้งไว้ 5 นาทีเพื่อให้ น้ำซึมเข้าไปในเนื้อวัสดุพรุน แล้วเทน้ำออกจากภาชนะทั้งหมด จากนั้นตวงน้ำที่ทราบปริมาตรแน่นอน (total volume, V_T) ด้วยภาชนะตวงในที่นี้ $V_T = 500 \text{ cm}^3$ แล้วเติมน้ำอีกครั้งให้เต็มภาชนะจนถึงระดับวัสดุพรุนพอดี ทำการอ่านค่าปริมาตรน้ำที่เติมลงไป (filling volume, V_{fill}) จากภาชนะตวง ปรากฏว่าปริมาตรน้ำ (V_T) 500 cm^3 จะเหลืออยู่ 244 cm^3 ทำให้ $V_{fill} = 500 - 244 \text{ cm}^3$ ปริมาตร V_{fill} นี้คือปริมาตรช่องว่างที่น้ำไปแทนที่ซึ่งก็คือปริมาตรความพรุน (void volume, V_E) นั่นเอง นำปริมาตร V_E นี้ไปหารกับปริมาตร V_C จะได้ค่าความพรุน (porosity, ϵ) โดยประมาณเท่ากับ 0.362 เพื่อให้เข้าใจยิ่งขึ้นจะขอแสดงวิธีการคำนวณหาค่าความพรุนเป็นสมการคณิตศาสตร์ตามลำดับดังต่อไปนี้

$$\epsilon = \frac{V_T - V_{fill}}{V_C} = \frac{V_E}{V_C} \quad (1)$$

$$\epsilon = \frac{500 \text{ cm}^3 - 244 \text{ cm}^3}{708.821 \text{ cm}^3} = \frac{256 \text{ cm}^3}{708.821 \text{ cm}^3} \quad (2)$$

$$\epsilon = 0.362 \quad (3)$$



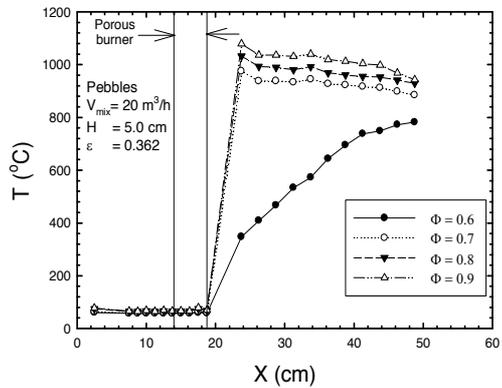
รูปที่ 3 อุปกรณ์ทดลองหาค่าความพรุน

3. ผลการทดลอง

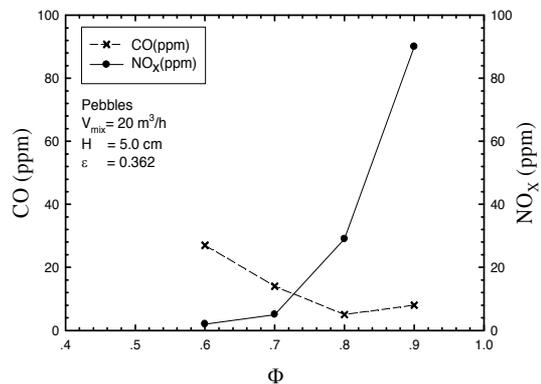
3.1 อิทธิพลของอัตราส่วนผสม (Φ)

รูปที่ 4 แสดงอิทธิพลของอัตราส่วนผสม (equivalence ratio, Φ) ต่อโครงสร้างทางความร้อน ซึ่งแสดงอยู่ในรูปการกระจายตัวของอุณหภูมิตามแนวแกนตลอดความยาวของอุปกรณ์การทดลอง ในที่นี้จะเรียกว่าโครงสร้างทางอุณหภูมิ (temperature profile, T) โดยเป็นการทดลองที่สภาวะอัตราการไหลเชิงปริมาตรของเชื้อเพลิงแก๊สผสมก่อน (volumetric premixed-gas flow rate, V_{mix}) เท่ากับ $20 \text{ m}^3/\text{h}$ ความหนาของชั้นวัสดุพรุน (porous matrix height, H) คือ 5 cm และมีค่าความพรุน (porosity, ϵ) เท่ากับ 0.362 จากการทดลองพบว่าเมื่อทำการเพิ่มค่า Φ จาก 0.6 ถึง 0.9 แนวโน้มของ T จะเพิ่มขึ้นอย่างเด่นชัด ซึ่งปรากฏการณ์เช่นนี้เป็นไปตามกายภาพการเผาไหม้จริง เนื่องจากระบบได้รับเชื้อเพลิงที่เพิ่มหรือปริมาณไฮโดรคาร์บอนที่หนาขึ้น ย่อมทำให้การเผาไหม้มีความรุนแรงและสมบูรณ์ยิ่งขึ้น ส่งผลให้อุณหภูมิในการเผาไหม้มีค่าสูงตามไปด้วย ซึ่งจะสอดคล้องกับปริมาณแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ดังแสดงในรูปที่ 5 กล่าวคือ CO (เปรียบเทียบกับออกซิเจนส่วนเกิน 0% ในพื้นฐานแห้ง) จะมีแนวโน้มลดลงเมื่อ Φ เพิ่มขึ้น สำหรับปริมาณออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x) ในรูปที่ 5 นั้น จะพบว่าเมื่อค่า Φ สูงขึ้น ปริมาณ NO_x ซึ่งเป็นค่าที่ทำการเปรียบเทียบกับออกซิเจนส่วนเกิน 0% ในพื้นฐานแห้ง มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามไปด้วย มีสาเหตุมาจากระดับ T ในหัวฟืนไฟเพิ่มขึ้นจึงส่งเสริมให้เกิด NO_x มากยิ่งขึ้น

อย่างไรก็ตามปริมาณ CO และ NO_x ทั้งสองค่าถือว่า มีระดับที่ต่ำ เพราะมีการเปลี่ยนแปลงไม่เกิน 50 ppm และ 100 ppm ตามลำดับ ซึ่งตามมาตรฐานการปลดปล่อย CO และ NO_x สู่บรรยากาศจะมีค่าแตกต่างกันออกไปตามการใช้งานและอุตสาหกรรมต่าง ๆ แต่ก็พอกล่าวเป็นภาพรวม ๆ ได้ว่า โดยทั่วไปมีค่าไม่เกิน $250 - 500 \text{ ppm}$ [12] (ทั้ง CO และ NO_x) ด้วยเหตุนี้จึงอาจกล่าวได้ว่าหัวฟืนไฟวัสดุพรุนชนิดตุ้ปลาที่ใช้เชื้อเพลิงเป็นแอลพีจีในงานวิจัยนี้ปลดปล่อยมลพิษสู่สิ่งแวดล้อมในเกณฑ์ที่ต่ำ มีความเหมาะสมและสามารถนำไปใช้งานได้ในงานอุตสาหกรรมจริงต่อไป



รูปที่ 4 อิทธิพลของ Φ ต่อโครงสร้างทางอุณหภูมิ (T) ที่สภาวะ $H = 5.0 \text{ cm}$ และ $V_{mix} = 20 \text{ m}^3/\text{h}$



รูปที่ 5 อิทธิพลของ Φ ต่อปริมาณ CO และ NO_x ที่สภาวะ $H = 5.0 \text{ cm}$ และ $V_{mix} = 20 \text{ m}^3/\text{h}$

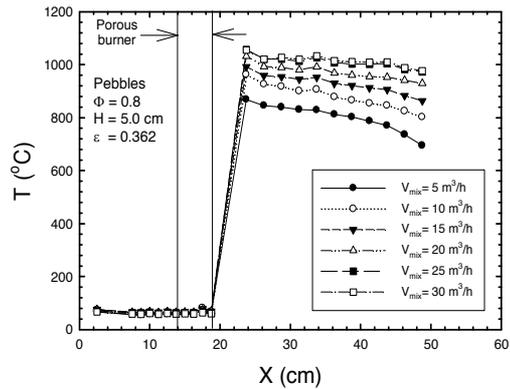
3.2 อัตราการไหลเชิงปริมาตรของเชื้อเพลิงแก๊สผสมก่อน

รูปที่ 6 แสดงอิทธิพลของอัตราการไหลเชิงปริมาตรของเชื้อเพลิงแก๊สผสมก่อน (volumetric premixed-gas

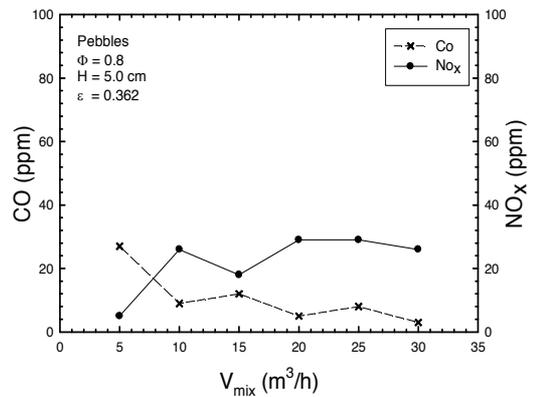
flow rate, V_{mix}) ต่อโครงสร้างทางอุณหภูมิจึง (T) โดยเป็นการทดลองที่สภาวะ $\Phi = 0.8$, $H = 5.0$ cm และ $\epsilon = 0.362$ จากการทดลองพบว่าเมื่อทำการเพิ่มค่า V_{mix} จาก 5 ถึง 30 m^3/h แนวโน้มของ T จะเพิ่มขึ้น เนื่องจากระบบมีอัตราการได้รับเชื้อเพลิงที่เพิ่มหรือเชื้อเพลิงป้อนเข้าสู่ระบบเร็วและมากขึ้น ย่อมทำให้การเผาไหม้มีความรุนแรงและสมบูรณ์ยิ่งขึ้น ส่งผลให้อุณหภูมิในการเผาไหม้มีค่าสูงตามไปด้วย ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณ CO ดังแสดงในรูปที่ 7 กล่าวคือ ปริมาณ CO (เปรียบเทียบกับ O_2 ส่วนเกิน 0 % ในพื้นฐานแห้ง) จะมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มค่า V_{mix} แสดงให้เห็นถึงการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ยิ่งขึ้น แต่อย่างไรก็ตามก็มีปริมาณไม่เกิน 40 ppm อยู่ในระดับที่ต่ำ สำหรับปริมาณ NO_x (เปรียบเทียบกับ O_2 ส่วนเกิน 0 %) จะพบว่าเมื่อค่า V_{mix} สูงขึ้น ปริมาณ NO_x มีแนวโน้มแทบจะไม่เพิ่มขึ้นเลย แต่ก็พอจะสังเกตเห็นว่ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยตาม V_{mix} อย่างไรก็ตามปริมาณของ NO_x ถือว่ามีค่าต่ำมาก ๆ อยู่ในช่วง 10 – 30 ppm

3.3 ขอบเขตการเผาไหม้

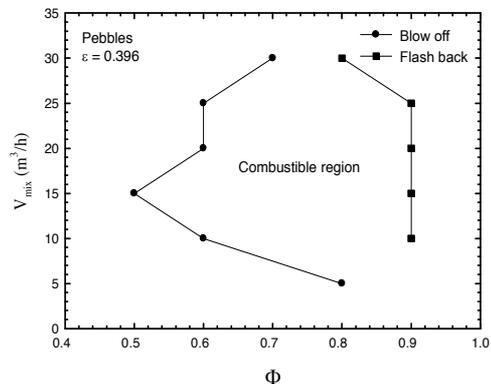
สภาวะขอบเขตเปลวไฟเสถียร (stability of combustion) ของหัวพ่นไฟวัสดุพูนแบบเม็ดกลมอัดแน่นชนิดหินตุ้ปลาถูกแสดงไว้ในรูปที่ 8 โดยมีขอบเขตการเป่าดับ (blow-off limit) คือปรากฏการณ์ที่เปลวไฟ (flame) เคลื่อนตัวออกจากผิวด้านล่างของชั้นวัสดุพูนและจะเกิดการดับ (extinguishment) ในที่สุด โดยแสดงผ่านอัตราส่วนสมมูล (Φ) มีค่าอยู่ในช่วงประมาณ 0.5 ถึง 0.6 ในทางตรงกันข้าม ถ้าเปลวไฟเคลื่อนตัวย้อนกลับหรือสวนทางกับทิศการจ่ายเชื้อเพลิงออกจากผิวด้านบนของชั้นวัสดุพูนแล้วเกิดการดับ จะเรียกว่าขอบเขตการย้อนกลับ (flash-back limit) ซึ่งจะมีค่า Φ อยู่ในช่วง 0.8-0.9 ขอบเขตการเผาไหม้ที่ได้นี้มีนัยสำคัญที่บ่งบอกให้ทราบว่าหัวพ่นไฟวัสดุพูนเม็ดกลมอัดแน่นชนิดหินตุ้ปลา ($H = 5.0$ cm และ $\epsilon = 0.362$) ที่ใช้แก๊สแอลพีจีเป็นเชื้อเพลิงในงานวิจัยนี้ มีเสถียรภาพของเปลวไฟหรือช่วงการเผาไหม้จะเกิดขึ้นเฉพาะในสภาวะส่วนผสมบาง (lean mixture) เท่านั้น และจากสภาวะขอบเขตเปลวไฟเสถียรที่ได้นี้ Turn down ratio (TD) มีค่าเท่ากับ 1.8: 1 ดังนั้นหัวพ่นไฟแบบนี้จึงเหมาะสมและสามารถที่จะนำไปประยุกต์ใช้ในงานที่เชื้อเพลิงมีค่าความร้อน (heating value) ต่ำ ๆ



รูปที่ 6 อิทธิพลของ V_{mix} ต่อโครงสร้างทางอุณหภูมิจึง (T) ที่สภาวะ $H = 5.0$ cm และ $\Phi = 0.8$



รูปที่ 7 อิทธิพลของ V_{mix} ต่อปริมาณ CO และ NO_x ที่สภาวะ $H = 5.0$ cm และ $\Phi = 0.8$

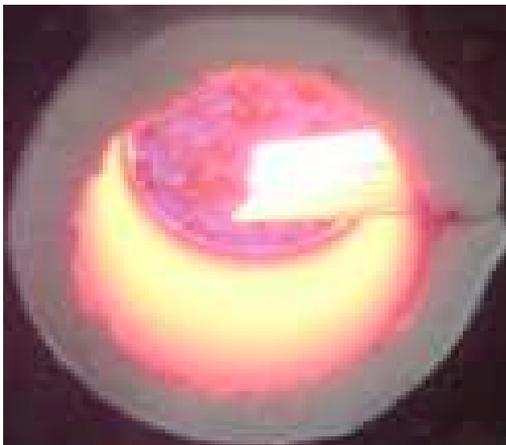


รูปที่ 8 ขอบเขตเปลวไฟเสถียรของหัวพ่นไฟวัสดุพูนเม็ดกลมอัดแน่นที่มี $\epsilon = 0.362$ และ $H = 5.0$ cm

3.4 ลักษณะเปลวไฟ

รูปที่ 9 แสดงภาพถ่ายคุณลักษณะเปลวไฟของ

หัวพันไฟวัสดุพูนแบบเม็ดกลมอัดชนิดหินตุ้ปลาที่ใช้แก๊สแอลพีจีเป็นเชื้อเพลิงของงานวิจัยนี้ โดยทำการถ่ายภาพจากด้านล่างหัวพันไฟหรือขาออกของแก๊สไอเสีย ที่สภาวะ $\Phi = 0.8$ และ $H = 5.0$ cm จากการสังเกตพบว่าไม่สามารถมองเห็นเปลวไฟได้ชัดเจน มีเพียงแสงสว่างจ้าสีชมพูอมเหลืองเป็นลักษณะของการเผาไหม้แบบไร้เปลวไฟ (flameless) แต่ที่บริเวณผิวล่างวัสดุพูนยังพอจะมองเห็นเป็นเปลวไฟสีฟ้า (blue flame) จึงอาจกล่าวได้ว่าตำแหน่งเปลวไฟเสถียรอาจอยู่บริเวณผิวล่างวัสดุพูน โดยเกิดขึ้นอยู่ด้านนอกชั้นวัสดุพูน นอกจากนี้หากพิจารณาร่วมกับโครงสร้างทางอุณหภูมิจากภาพ (รูปที่ 6) จะพบว่าในขอบเขต Combustion and exhaust duct ระดับอุณหภูมิจะค่อนข้างสูงและคงที่เป็นความยาวประมาณ 20 cm ซึ่งเป็นการสนับสนุนกลไกการเผาไหม้แบบ Flameless ที่ได้กล่าวในข้างต้น และเปลวไฟของหัวพันไฟแบบนี้มีความยาวลามออกมาจากชั้นวัสดุพูน ส่งผลให้มีความยาวเปลวไฟ (flame length) ประมาณ 20 cm ดังนั้นลักษณะเปลวไฟที่เกิดขึ้นนี้ จึงสอดคล้องกับวัตถุประสงค์ที่ทำการศึกษาในครั้งนี้ กล่าวคือต้องการได้เปลวไฟที่มีความยาวเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมต่อไป



รูปที่ 9 ลักษณะเปลวไฟของหัวพันไฟเชื้อเพลิง LPG ชนิดวัสดุพูนเม็ดกลมอัดแน่น ที่สภาวะ $H = 5.0$ cm และ $\Phi = 0.8$

4. สรุป

จากผลการศึกษาที่ได้รับ ประเด็นสำคัญของงานวิจัยนี้ สามารถสรุปได้ตามหัวข้อดังต่อไปนี้

1) โครงสร้างทางอุณหภูมิจากภาพ (T) มีแนวโน้มสูงขึ้นตาม

ค่า Φ ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากระบบได้รับเชื้อเพลิงที่เพิ่มหรือปริมาณไอดีผสมที่หนาขึ้น ย่อมทำให้การเผาไหม้มีความรุนแรงและสมบูรณ์ยิ่งขึ้น ซึ่งจะสอดคล้องกับปริมาณ CO กล่าวคือ CO จะมีแนวโน้มลดลงเมื่อ Φ เพิ่มขึ้น สำหรับปริมาณของ NO_x พบว่าเมื่อค่า Φ สูงขึ้นปริมาณ NO_x มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามไปด้วย มีสาเหตุมาจากระดับ T ในหัวพันไฟเพิ่มขึ้นจึงส่งเสริมให้เกิด NO_x มากยิ่งขึ้น อย่างไรก็ตามปริมาณ CO และ NO_x ทั้งสองค่าถือว่ามีระดับที่ต่ำ เพราะมีการเปลี่ยนแปลงไม่เกิน 50 ppm และ 100 ppm ตามลำดับ

2) โครงสร้างทางอุณหภูมิจากภาพ (T) มีแนวโน้มสูงขึ้นตามค่า V_{mix} ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากระบบมีอัตราการได้รับเชื้อเพลิงที่เพิ่มหรือเชื้อเพลิงป้อนเข้าสู่ระบบเร็วและมากขึ้น ก่อให้เกิดการเผาไหม้มีความรุนแรงและสมบูรณ์ยิ่งขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณ CO ที่มีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่ม V_{mix} ขึ้น ส่วนปริมาณ NO_x มีแนวโน้มแทบจะไม่เพิ่มขึ้นเลย แต่ก็พอจะสังเกตได้ว่ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย อย่างไรก็ตามปริมาณของ NO_x ถือว่ามีค่าต่ำมาก ๆ มีการเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วงไม่เกิน 10 - 30 ppm

3) สภาวะขอบเขตเปลวไฟเสถียร (stability of combustion) ของหัวพันไฟวัสดุพูนแบบเม็ดกลมอัดแน่นชนิดหินตุ้ปลาในงานวิจัยนี้ ($H = 5.0$ cm และ $\epsilon = 0.362$) มีค่า Φ ของขอบเขตการเผาไหม้ในช่วงประมาณ 0.5 - 0.6 และการย้อนกลับมีค่า Φ อยู่ในช่วง 0.8 - 0.9 ซึ่งหัวพันไฟแบบนี้มีเสถียรภาพของเปลวไฟหรือช่วงการเผาไหม้เกิดขึ้นเฉพาะในสภาวะส่วนผสมบาง (lean mixture) เท่านั้น โดยมีค่า Turn down ratio (TD) เท่ากับ 1.8: 1

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้เขียนบทความขอขอบพระคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน (มทร.อีสาน) นครราชสีมา ที่ได้ให้ทุนสนับสนุนในการจัดทำงานวิจัยครั้งนี้ และขอขอบคุณ นายอนุชา หุนสระน้อย นายปิยะวัฒน์ ก้อนคำ นายปีเฉลิม ลาดจันทิก และนายเฉลิมเดช เสวียงชัย นักศึกษาปริญญาตรีสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มทร.อีสาน ที่ได้ช่วยเก็บข้อมูลการทดลองบางส่วนจนทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

- [1] บัณฑิต กฤตาคม. 2554. หัวพันไฟอุตสาหกรรมและการประยุกต์ใช้วัสดุพูนในหัวพันไฟ. วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสยาม, 12: 76 – 87.
- [2] Echigo, R., Yoshizawa, Y., Hanamura, K. and Tomimura, T. 1986. Analytical and experimental studies on radiative propagation in porous media with internal heat generation. Proceeding of the 8th International Heat Transfer Conference, 1986: 827-832.
- [3] Yoshizawa, Y., Ssaki, K. and Echigo, R. 1988. Analytical study of the structure of radiation controlled flame, Int. J. Heat mass Transfer, 31: 311-319.
- [4] Khanna, V., Goel, R. and Ellzey, J. L. 1994. Measurements of emissions and radiation for methane combustion within a porous medium burner. Combustion Science and Technology, 99: 133-142.
- [5] Mital, R., Gore, J. P. and Viskanta, R. 1997. A study of the structure of submerged reaction zone in porous ceramic radiant burners. Combustion and Flame, 111: 175-184.
- [6] Bouma, P. H. and De Goey, L. P. H. 1999. Premixed combustion on ceramic foam burner. Combustion and Flame, 119: 133-143.
- [7] Leonardi, S. A., Viskanta, R. and Gore, J. P. 2001. Radiation and thermal performance measurements of a metal fiber burner. JQSRT, 73: 491-501.
- [8] Krittacom, B. and Kamiuto, K. 2009. Radiation emission characteristics of an open-cellular porous burner. JSME Journal of Thermal Science and Technology, 4(1): 13-24.
- [9] บัณฑิต กฤตาคม. 2552. คุณลักษณะการแผ่รังสีของหัวเผาไหม้วัสดุพูนแบบเซรามิกชนิดเซลล์าร์เปิด. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 23, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, เชียงใหม่, 4-7 พ.ย. 2552.
- [10] Amatachaya, P. and Krittacom, B. 2009. The combustion of liquid fuels using a packed bed. Proceeding of International Conference on Power Engineering 2009 (ICOPE- 09), Kobe, JAPAN, 2009.
- [11] บัณฑิต กฤตาคม และทวีศิลป์ เล็กประดิษฐ์. 2554. อิทธิพลของวัสดุพูนตัวแผ่รังสีต่อการเผาไหม้ของหัวพันไฟชนิดวัสดุพูนโดยใช้เชื้อเพลิงเหลว. วารสารวิชาการ วิศวกรรมศาสตร์ ม.อ., 4(2): 10-17.
- [12] สำเร็จ จักรใจ. 2547. การเผาไหม้. สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.