

หัวฟันทไฟวัสดุพรุนเชื้อเพลิงแก๊สแอลพีจีที่ใช้อะลูมินา-คอร์ดีไรท์เม็ดกลมเป็นวัสดุพรุนแบบเม็ดกลมอัดแน่น

The LPG Porous Burner using Alumina-Cordierite Ball as Packed-bed Sphere Porous Media

บัณฑิต กฤตาคม พิพัฒน์ อมตฉายา และปฐวิตรี วรามิตร

Bundit Krittacom, Pipatana Amatachaya and Pathiwat Waramit

ห้องปฏิบัติการวิจัยการพัฒนาในเทคโนโลยีของวัสดุพรุน

(Development in Technology of Porous Materials Research Laboratory: DITO-Lab)

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

744 ถนนสุรนารายณ์ ต. ในเมือง อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000

โทรศัพท์ 044-233-073 โทรสาร 044-233-074

E-mail: bundit.kr@rmuti.ac.th

บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้ได้นำเสนอการทดลองเกี่ยวกับพฤติกรรม การเผาไหม้ของแก๊สแอลพีจี (LPG) ในหัวฟันทไฟวัสดุพรุน แบบเม็ดกลมอัดแน่น ซึ่งทำมาจากอะลูมินา-คอร์ดีไรท์เม็ดกลม ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (d) และค่าความพรุน (ϵ) เท่ากับ 1.55 cm และ 0.396 ตามลำดับ อัตราเร็วเชิงปริมาตรของ เชื้อเพลิงแก๊สผสมก่อน (V_{mix}) ระหว่างแอลพีจีกับอากาศ ถูกส่งเข้ามายังชั้นวัสดุพรุนในช่วงความเร็ว 5 – 30 m³/h โดยพิจารณาอ้างอิงกับสถานะเสถียรของการเผาไหม้ และ แสดงค่าด้วยอัตราส่วนสมมูลของเชื้อเพลิง (Φ) เพื่ออธิบายถึง พฤติกรรมการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง อุณหภูมิตลอดแนวความ ยาวของหัวฟันทไฟถูกตรวจวัดและแก๊สไอเสีย (CO และ NO_x) จะตรวจวัดที่ตำแหน่งด้านออกของหัวฟันทไฟ จากการศึกษา พบว่าเสถียรภาพการเผาไหม้ในการทดลองนี้มีค่า Φ อยู่ในช่วง 0.76 – 1.2 โครงสร้างทางอุณหภูมิมิมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตาม การเพิ่มขึ้นของ Φ และ V_{mix} สำหรับปริมาณ CO และ NO_x ที่ ปลดปล่อยออกมาจากหัวฟันทไฟวัสดุพรุนแบบนี้อยู่ในเกณฑ์ต่ำที่ ยอมรับได้

Abstract

This research paper proposes an experiment of the combustion behavior of LPG (Liquid Petroleum Gas) on a packed-bed sphere porous burner. Alumina-Cordierite ball having average diameter (d) of 1.55 cm and porosity (ϵ) of

0.396 was employed as porous medium. The volumetric premixed-gas velocity (V_{mix}) in the range of 5 – 30 m³/h was supplied to the porous matrix by regarding with stable flame and reporting in term of equivalence ratio (Φ). To clarify the combustion behavior, the temperature along the burner length was measured and the exhaust gases, CO and NO_x, were monitored at the exit burner. From the experiment, it was found that the value of Φ of stable flame was in the range of 0.76 – 1.2. Temperature profile increased with Φ and V_{mix} . The amount of CO and NO_x released from the present gas porous burner was acceptable low level.

1. บทนำ

หัวเผาหรือหัวฟันทไฟแผ่รังสีแบบวัสดุพรุน (Porous radiant burner) ที่ใช้แก๊สเป็นเชื้อเพลิง มีการใช้ประโยชน์อย่าง กว้างขวางในหลายวัตถุประสงค์ [1] ยกตัวอย่าง เช่น ใช้ใน ขบวนการผลิตกระดาษ การทำให้กระดาษแห้ง (Paper drying) การเคลือบเงากระดาษ (Paper finishing) ใช้ในอุตสาหกรรม สิ่งทอ การอบและการทำให้เส้นใยแห้ง (Baking and textile drying) การผลิตไอน้ำในหม้อต้มน้ำทางอุตสาหกรรม การหล่อ การหลอมเหล็ก หรือแม้แต่การสร้างความอบอุ่นภายใน บ้านเรือน (Domestic radiant heater) ก็มีการใช้ประโยชน์ จากหัวเผาแบบนี้แล้ว ข้อดีที่โดดเด่นของหัวเผาแก๊สวัสดุพรุน มีสองข้อหลัก ๆ คือ มีความสามารถในการแผ่รังสีได้สูงและ

ปลดปล่อยมลพิษจากการเผาไหม้ในปริมาณที่ต่ำ ด้วยสาเหตุนี้เป็นเหตุผลให้นักวิจัยและวิศวกรจำนวนมาก [2-7] มีความสนใจและศึกษาเกี่ยวกับหัวเผาชนิดนี้ ทั้งด้วยวิธีการทดลองและทางทฤษฎี เพื่อที่จะพัฒนาสมรรถนะให้ดียิ่งขึ้น

Echigo และทีมงาน [2, 3] เป็นกลุ่มงานวิจัยแรกที่เสนอผลงานการเผาไหม้ในวัสดุพรุนทั้งการทดลองและทฤษฎี โดยพบว่าวัสดุพรุนจะช่วยส่งเสริมการเผาไหม้ให้ดียิ่งขึ้น เนื่องจากการหมุนเวียนพลังงานด้วยการแผ่รังสี (Radiation recirculation) จากบริเวณเปลวไฟไปยังไอคัสผสม (Unburned gas mixture) ที่กำลังส่งมายังระบบ Khanna และคณะ [4] ทำการทดลองสร้างหัวพ่นไฟวัสดุพรุนที่ทำมาจากเซรามิกส์ชนิด Partially stabilized zirconia (PSZ) พบว่าประสิทธิภาพการแผ่รังสีจะแปรผกผันกับความเร็วของเปลวไฟ และปริมาณแก๊สไอเสีย (CO และ NO_x) จะขึ้นกับความเร็วของเปลวไฟ (Flame speed) Mital และคณะ [5] ได้ทำการศึกษาทั้งการทดลองและทฤษฎีของการแผ่รังสีจากหัวเผาเซรามิกส์ที่เปลวไฟฝังตัวอยู่ในวัสดุพรุน Bouma และ De Goey [6] ได้สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของหัวเผาวัสดุพรุนชนิดเซรามิกส์ขึ้น โดยเลือกใช้กลไกโครงร่างในการทำนายปรากฏการณ์การเผาไหม้ที่เกิดขึ้น และยังทำการทดลอง เพื่อยืนยันผลการใช้กลไกดังกล่าวโดยเน้นที่มลพิษที่ถูกปล่อยออกมา Leonardi และคณะ [7] ได้พัฒนาแบบจำลองทางทฤษฎีในการทำนายประสิทธิภาพความร้อนของหัวเผาวัสดุพรุน พวกเขาแสดงให้เห็นว่าผลการคำนวณสำหรับอุณหภูมิพื้นผิวของหัวเผา อุณหภูมิทางออกของแก๊ส และประสิทธิภาพการแผ่รังสีที่ได้จากผลการคำนวณมีความสอดคล้องกันเป็นอย่างดีกับข้อมูลการทดลอง Krittacom และคณะ [8, 9] ได้ทำการทดลองและสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อศึกษาคุณลักษณะการแผ่รังสีของหัวเผาไหม้แบบวัสดุพรุนเซลล์รูเปิดชนิดเซรามิกส์ซึ่งการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นจะเป็นแบบการผสมเชื้อเพลิงก่อนเข้าสู่ระบบการเผาไหม้ (แก๊สมีเทนและอากาศ) จากการศึกษาจะพบว่าสถานะเสถียรของการเผาไหม้ในหัวเผาชนิดนี้จะอยู่ในช่วงอัตราส่วนสมมูล (Equivalence ratio, Φ) ของการเป่าดับ (Blow-off) ประมาณ 0.48 ถึง 0.5 และการย้อนกลับของเปลวไฟ (Flash-back) จะต่ำกว่า 0.62

ผลการเปรียบเทียบระหว่างการคำนวณและการทดลองมีความสอดคล้องกันอย่างสมเหตุสมผล

จากงานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้น จะพบว่าการศึกษาและพัฒนาเกี่ยวกับหัวพ่นไฟหรือหัวเผาแผ่รังสีจะนิยมใช้วัสดุพรุนชนิดเซรามิกส์ซึ่งมีโครงสร้างทางกายภาพที่มีค่าความพรุนสูง ๆ เช่น เซลลูโลสเปิด (Open-cellular) โครงข่าย (Reticulated media) เส้นใย (Fibrous) เป็นต้น ซึ่งมีเหตุผลหลักคือความร้อนที่จะนำไปใช้งานต้องการให้อยู่ในรูปของการแผ่รังสีความร้อนอย่างไรก็ตาม ในการประยุกต์ใช้ในบางงาน ความยาวของเปลวไฟ (Flame length) เป็นสิ่งที่ต้องการ เช่น การค้ำน้ำในหม้อน้ำอุตสาหกรรม การเผาขยะ เป็นต้น ซึ่งวัสดุพรุนที่มีค่าความพรุนสูง ๆ จะไม่มีเปลวไฟที่ลามออกไปจากหัวเผา แต่วัสดุพรุนที่มีค่าความพรุน ต่ำ ๆ เช่น แบบเม็ดกลมอัดแน่น (Packed-bed sphere) และแบบชิ้นส่วน (Discrete element) [1] เป็นต้น จะสามารถช่วยส่งเสริมให้เกิดการเผาไหม้ด้านนอกวัสดุพรุนได้ ส่งผลให้มีความยาวเปลวไฟเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าหัวเผาหรือหัวพ่นไฟที่ทำการศึกษาที่ผ่านมายังมีส่วนที่ต้องปรับปรุงและค้นคว้าเพิ่มเติมอีกหลายอย่าง ไม่ว่าจะเป็นการสร้างหัวพ่นไฟให้มีโครงสร้างไม่ยุ่งยาก ผลิตหรือติดตั้งได้ง่าย แต่สามารถทำให้เปลวไฟเสถียรได้ไม่ลำบาก มีการทำนายการเผาไหม้โดยใช้กลไกทางจลนศาสตร์ที่มีคณิตศาสตร์ไม่ซับซ้อนในการแก้ปัญหา แต่ให้ผลการทำนายที่แม่นยำ

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาหาคุณลักษณะเปลวไฟที่เสถียรอยู่ด้านนอกของวัสดุพรุน โดยสร้างหัวพ่นไฟที่ใช้วัสดุพรุนแบบเม็ดกลมอัดแน่นชนิดเซรามิกส์อะลูมินา-คอร์ดีไรท์ (Alumina-Cordierite, Al-Co) ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย (Average diameter, d) เท่ากับ 1.55 cm และมีค่าความพรุนเมื่อทำการบรรจุในหัวพ่นไฟเท่ากับ 0.396 เชื้อเพลิงที่ใช้ในการทดลอง คือ แก๊สแอลพีจี (LPG) สำหรับผลการทดลองจะแสดงในรูปโครงสร้างอุณหภูมิ (Temperature profiles) รวมทั้งมีการตรวจวัดแก๊สไอเสีย (CO และ NO_x) เพื่อศึกษาพฤติกรรมของการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงแอลพีจี ซึ่งคณะผู้เขียนบทความนี้จึงเชื่อมั่นว่าผลการทดลองที่ได้จะเป็นข้อมูลเบื้องต้นที่สำคัญใน

การประยุกต์ใช้งานหัวพ่นไฟแก๊สตามวัตถุประสงค์ต่าง ๆ ที่ใช้งานได้จริงในทางอุตสาหกรรมต่อไป

2. รายการสัญลักษณ์

- d ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของอะลูมินา-คอร์ดีไรท์เม็ดกลม (m)
- H ความสูงของชั้นวัสดุพ่น (m)
- T โคจรสร้างทางอุณหภูมิ (°C)
- V_{mix} อัตราเร็วเชิงปริมาตรของเชื้อเพลิงแก๊สผสมก่อน (m/s)
- ϵ ความพ่น
- Φ อัตราส่วนสมมูลของเชื้อเพลิง

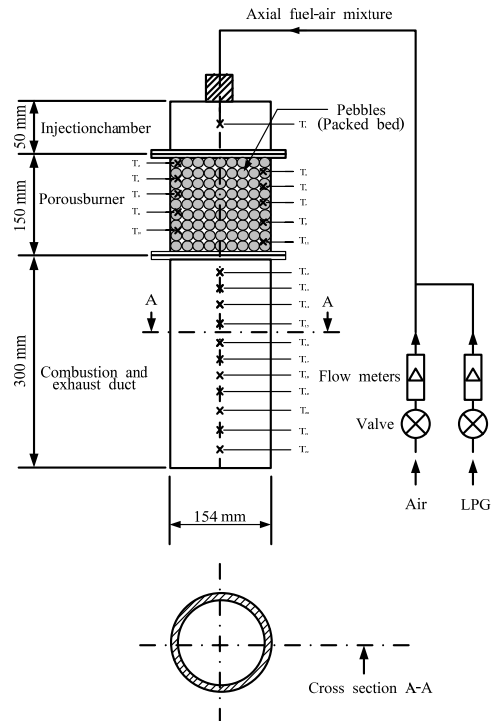
3. อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

3.1 อุปกรณ์การทดลอง

รูปที่ 1 แสดงอุปกรณ์การทดลองของหัวพ่นไฟแก๊สชนิดเม็ดกลมอัดแน่นที่ใช้แอลพีจีเป็นเชื้อเพลิง ซึ่งแบ่งออกได้ 3 ขอบเขตที่สำคัญ ประกอบไปด้วย ขอบเขตที่หนึ่งเป็นส่วนที่ป้อนเชื้อเพลิง (Injection zone) หรือการจ่ายไอดี (อากาศกับแก๊สแอลพีจี) เข้าสู่วัสดุพ่นชนิดเม็ดกลมอัดแน่น ขอบเขตที่สองเป็นการอุ่นไอดีหรือตำแหน่งการการติดตั้งวัสดุพ่น (Porous burner zone) ซึ่งวัสดุพ่นเป็นชนิดเม็ดกลมอัดแน่น (ในที่นี้เลือกใช้อะลูมินา-คอร์ดีไรท์) เรียงตัวบรรจุอยู่ข้างในท่อสแตนเลสที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกเท่ากับ 154 mm หนา 2 mm นอกจากนี้เพื่อกันความร้อนสูญเสียสู่ภายนอกจึงหล่อปูนทนไฟ (Cement) หนา 2 mm ภายในท่อสแตนเลสตลอดช่วงที่มีการบรรจุวัสดุพ่น (150 mm) และขอบเขตสุดท้ายคือการเผาไหม้และท่อไอเสีย (Combustion and exhaust duct zone)

จากส่วนประกอบทั้งหมดของหัวพ่นไฟแก๊สแบบนี้จะมีหลักการทำงาน คือ เมื่อไอดี (อากาศผสมกับ LPG) ไหลผ่าน Injection zone เข้าสู่ Porous burner zone ไอดีจะไหลผ่านชั้นวัสดุพ่น และจะมีระดับอุณหภูมิที่สูงขึ้น หลังจากนั้นไอดีจะไหลไปยังบริเวณทางออกของชั้นวัสดุพ่นเข้าสู่ขอบเขตที่สาม ก่อให้เกิดการจุดติดไฟ (Ignition) และเผาไหม้ในที่สุด (Combustion zone) เปลวไฟที่เกิดขึ้นจะแผ่รังสีความร้อน

ย้อนกลับไปยังชั้นวัสดุพ่นทำให้มีความร้อนหมุนเวียนภายในระบบเป็นวัฏจักรเกิดการเผาไหม้อย่างต่อเนื่อง ทรายที่มีเชื้อเพลิงป้อนมายังชั้นวัสดุพ่น



รูปที่ 1 แผนผังอุปกรณ์การทดลองของหัวพ่นไฟแก๊สวัสดุพ่นชนิดเม็ดกลมอัดแน่น

เพื่อให้เข้าใจถึงปรากฏการณ์การเผาไหม้ และการส่งถ่ายความร้อนระหว่างชั้นวัสดุพ่นกับเปลวไฟที่เกิดขึ้น อุณหภูมิตามแนวแกนและแก๊สไอเสียจึงถูกตรวจวัด ดังรายละเอียดต่อไปนี้ เทอร์โมคัปเปิลชนิดเค (K-type thermocouples) จำนวน 22 ชิ้น ที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.3 mm จะถูกติดตั้งในตำแหน่งกึ่งกลางของหัวพ่นไฟตามแนวแกน โดยแบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม กล่าวคือ กลุ่มที่ 1 มีเทอร์โมคัปเปิลเพียงชิ้นเดียวเท่านั้น (T_1) ที่ติดตั้งไว้ที่ Injection zone เพื่อตรวจสอบเฝ้าระวังไม่ให้อุณหภูมิในตำแหน่งนี้สูงกว่าอุณหภูมิจุดติดไฟด้วยตัวเอง (Spontaneous temperature) [10] ของแก๊สแอลพีจี กลุ่มที่ 2 มีจำนวน 10 ชิ้น (T_2-T_{11}) จะติดตั้งไว้ใน Porous burner zone เพื่อดูกลไกการอุ่นเชื้อเพลิงและคุณลักษณะการเผาไหม้ สำหรับกลุ่มสุดท้ายมีจำนวน 11 ชิ้น ($T_{12}-T_{22}$) จะติดตั้งไว้ใน Combustion and exhaust duct zone เพื่อดูพฤติกรรมของเปลวไฟที่เกิดขึ้น โดยเทอร์โมคัปเปิลทั้งหมดนี้จะต่อเข้ากับ

เครื่อง Data logger รุ่น MW 100 ยี่ห้อ Yokokawa และเชื่อมต่อ ไปยังคอมพิวเตอร์เพื่อประมวลผลและบันทึกค่า แบบต่อเนื่องขณะทำการทดลอง ในส่วนของแก๊สไอเสียที่เกิดขึ้นจะไหลออกจากระบบทางด้านล่างของท่อสแตนเลส และถูกตรวจวัดหาปริมาณออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x) และคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ด้วยเครื่องวิเคราะห์แก๊สไอเสีย (Exhaust gas analyzer) ยี่ห้อ Testo รุ่น M350

สำหรับเซรามิกส์เม็ดกลมชนิดอะลูมินา-คอร์ดีไรท์ (Alumina-Cordierite, Al-Co) ที่ใช้ในงานวิจัยนี้จะมีขนาด เส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยเท่ากับ 1.55 cm และมีค่าความพรุน เท่ากับ 0.396 ซึ่งแสดงไว้ในรูปที่ 2



รูปที่ 2 เซรามิกส์เม็ดกลมชนิดอะลูมินา-คอร์ดีไรท์ (Al-Co) ที่เลือกใช้เป็นวัสดุพรุนชนิดเม็ดกลมอัดแน่น

3.2 วิธีการทดลอง

ทำการจ่ายอากาศ (Axial air) พร้อมทั้งแก๊สเชื้อเพลิง (LPG) ในอัตราส่วนทั้งสองที่เหมาะสมกัน โดยปกติให้มี Φ มากกว่า ที่สภาวะอุณหภูมิจุดติดไฟด้วยตัวเองของ LPG [10] เพื่อให้เกิด การเผาไหม้ จากนั้นทำการจุดเชื้อเพลิงแก๊สให้ติดโดยใช้ไฟล่อ (Pilot flame) ตรงตำแหน่งช่องไฟล่อ (Ignition port) ของห้อง เผาไหม้ เมื่อไฟติดแล้วรอนจนกว่าอุณหภูมิของวัสดุพรุนหรือ ระบบอยู่ในสภาวะคงที่ (Steady state) ทำการปรับค่า Φ ให้อยู่ ในสภาวะที่สนใจจะศึกษา หลังจากนั้นปรับ V_{mix} เริ่มจาก 5 m³/hr สังเกตการติดไฟและรอนจนระบบอยู่ในสภาวะคงที่ อีกครั้ง ทำการเก็บข้อมูลผลการทดลองที่สภาวะนี้ ซึ่งข้อมูล การทดลองที่ทำการบันทึกค่านั้น ประกอบไปด้วยอุณหภูมิ ตลอดความยาวของหัวพ่นไฟ ปริมาณแก๊สไอเสียที่ปลดปล่อย

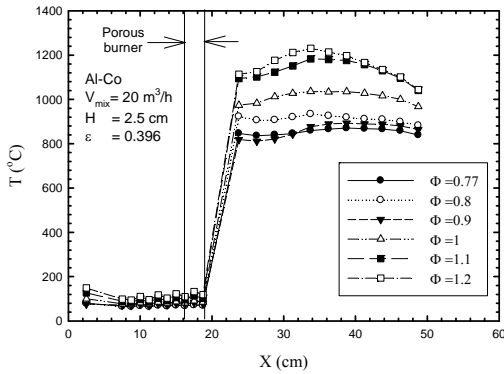
ออกมา ได้แก่ คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และออกไซด์ของ ไนโตรเจน (NO_x) ด้วยเครื่องวิเคราะห์แก๊สไอเสีย (Exhaust gas analyzer) ที่ด้านขาออกจากหัวพ่นไฟ เพื่อนำมาเขียนขึ้นและช่วย อธิบายพฤติกรรมของการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงแก๊สในหัวพ่นไฟ วัสดุพรุนให้เข้าใจยิ่งขึ้น

4. ผลการทดลอง

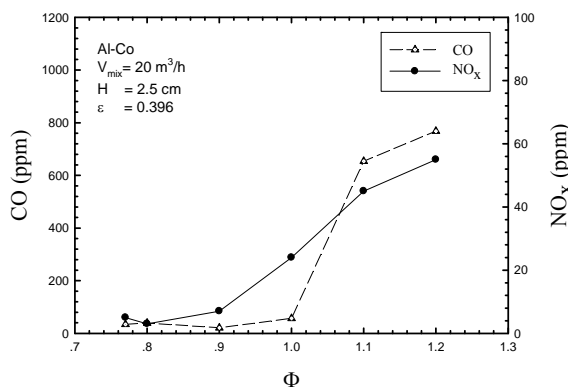
4.1 อิทธิพลของอัตราส่วนผสม (Φ)

รูปที่ 3 แสดงอิทธิพลของอัตราส่วนผสม (Equivalence ratio, Φ) ต่อโครงสร้างทางความร้อน ซึ่งแสดงอยู่ในรูปการกระจาย ตัวของอุณหภูมิตามแนวแกนตลอดความยาวของอุปกรณ์ การทดลอง ในที่นี้จะเรียกว่าโครงสร้างทางอุณหภูมิ (Temperature profile, T) โดยเป็นการทดลองที่สภาวะอัตรา ความเร็วเชิงปริมาตรของเชื้อเพลิงผสมก่อน (Volumetric premixed-gas velocity, V_{mix}) เท่ากับ 20 m/h³ ความหนาของ ชั้นวัสดุพรุน (Porous matrix height, H) คือ 2.5 cm และมีค่าความพรุน (porosity, ϵ) เท่ากับ 0.396 จากการทดลอง พบว่าเมื่อทำการเพิ่มค่า Φ จาก 0.77 ถึง 1.2 แนวโน้มของ T จะเพิ่มขึ้นอย่างเด่นชัดโดยเฉพาะเมื่อค่า $\Phi > 1$ ซึ่งปรากฏการ เช่นนี้เป็นไปตามกายภาพการเผาไหม้จริง เนื่องจากระบบ ได้รับเชื้อเพลิงที่เพิ่มหรือปริมาณไอผสมที่หนาขึ้น ย่อมทำให้ การเผาไหม้มีความรุนแรงและดียิ่งขึ้น ส่งผลให้อุณหภูมิ ในการเผาไหม้มีค่าสูงตามไปด้วย อย่างไรก็ตามการที่ T สูงขึ้น เมื่อ Φ เพิ่มขึ้น อาจไม่ได้แสดงถึงการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ขึ้น เสมอไป ดังจะพิจารณาด้วยรูปที่ 4 ซึ่งแสดงปริมาณแก๊ส คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ที่ปลดปล่อยออกมาจาก หัวพ่นไฟวัสดุพรุนชนิดนี้ พบว่า CO จะมีแนวโน้มแทบไม่มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อ Φ น้อยกว่าสภาวะสโตยชิโอมेटริก ($\Phi = 1$) แสดงถึงอยู่ในสภาวะการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ แต่หาก เพิ่มค่าให้ $\Phi > 1$ ปริมาณ CO จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จากประมาณไม่เกิน 100 เป็น 800 – 900 ppm ซึ่งพฤติกรรม การเผาไหม้ที่เกิดขึ้นนี้ สามารถอธิบายได้ด้วยส่วนผสมที่หนา ของการเผาไหม้ (Rich combustion) ทำให้การเผาไหม้ ไม่สมบูรณ์ สำหรับปริมาณออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x) ในรูปที่ 4 นั้น จะพบว่าเมื่อค่า Φ สูงขึ้น ปริมาณ NO_x

มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามไปด้วย มีสาเหตุมาจากระดับ T ในหัวพ่นไฟเพิ่มขึ้นจึงส่งเสริมให้เกิด NO_x มากยิ่งขึ้น



รูปที่ 3 โครงสร้างทางอุณหภูมิ (T) ตามแนวแกนของหัวพ่นไฟ ที่สภาวะ $H = 2.5$ cm, $\epsilon = 0.396$ และ $V_{mix} = 20$ m³/h

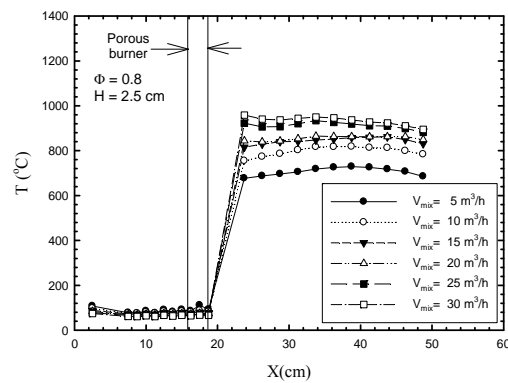


รูปที่ 4 อิทธิพลของ Φ ต่อปริมาณ CO และ NO_x ที่สภาวะ $H = 2.5$ cm, $\epsilon = 0.396$ และ $V_{mix} = 20$ m³/h

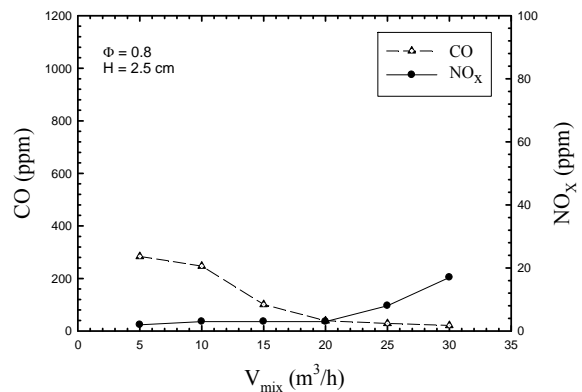
4.2 อัตราความเร็วเชิงปริมาตรของเชื้อเพลิงผสมก่อน (V_{mix})

รูปที่ 5 แสดงอิทธิพลของอัตราความเร็วเชิงปริมาตรของเชื้อเพลิงผสมก่อนระหว่าง LPG กับอากาศ (V_{mix}) ต่อโครงสร้างทางอุณหภูมิ (T) โดยเป็นการทดลองที่สภาวะ $\Phi = 0.8$, $H = 2.5$ cm และ $\epsilon = 0.396$ จากการทดลองพบว่าเมื่อทำการเพิ่มค่า V_{mix} จาก 5 ถึง 30 m³/h แนวโน้มของ T จะเพิ่มขึ้น เนื่องจากระบบมีอัตราการได้รับเชื้อเพลิงที่เพิ่มหรือเชื้อเพลิงป้อนเข้าสู่ระบบเร็วและมากขึ้น ข้อมทำให้การเผาไหม้มีความรุนแรงและสมบูรณ์ยิ่งขึ้น ส่งผลให้อุณหภูมิใน

การเผาไหม้มีค่าสูงตามไปด้วย ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณ CO ดังแสดงในรูปที่ 6 กล่าวคือปริมาณ CO จะมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย เมื่อเพิ่ม V_{mix} แสดงให้เห็นถึงการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ยิ่งขึ้น แต่อย่างไรก็ตามก็มีปริมาณไม่เกิน 300 ppm อยู่ในระดับที่ต่ำ สำหรับปริมาณ NO_x จะพบว่าเมื่อค่า V_{mix} สูงขึ้น ปริมาณ NO_x มีแนวโน้มแทบจะไม่เพิ่มขึ้นเลย แต่ก็พอจะสังเกตได้ว่ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยตาม V_{mix} อย่างไรก็ตามปริมาณของ NO_x ถือว่ามีค่าต่ำมาก ๆ (เปลี่ยนแปลงในช่วงไม่เกิน 20 ppm)



รูปที่ 5 โครงสร้างทางอุณหภูมิ (T) ตามแนวแกนของหัวพ่นไฟ ที่สภาวะ $H = 2.5$ cm, $\epsilon = 0.396$ และ $\Phi = 0.8$

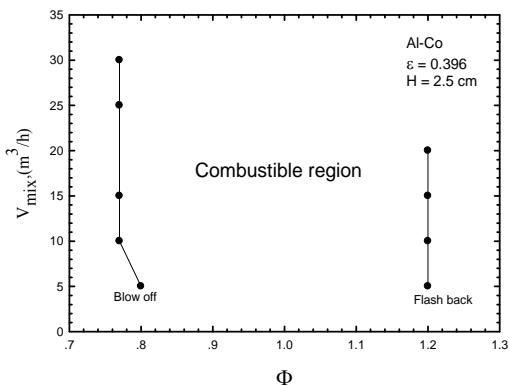


รูปที่ 6 อิทธิพลของ V_{mix} ต่อปริมาณ CO และ NO_x ที่สภาวะ $H = 2.5$ cm, $\epsilon = 0.396$ และ $\Phi = 0.8$

4.3 ขอบเขตการเผาไหม้

สภาวะขอบเขตเปลวไฟเสถียร (Stability of combustion) ของหัวพ่นไฟวัสดุพรมแบบเม็ดกลมอัดแน่นชนิดเซรามิกส์อะลูมินา-คอร์ดีไรท์ (Al-Co) ถูกแสดงไว้ในรูปที่ 7 โดยมี

ขอบเขตการเป่าดับ (Blow off limit) คือ ปรากฏการณ์ที่เปลวไฟ (Flame) เคลื่อนตัวออกจากผิวด้านล่างของชั้นวัสดุพอรุนและจะดับ (Extinguishment) ในที่สุด โดยมีค่า Φ อยู่ในช่วงประมาณ 0.76 ถึง 0.8 ในทางตรงกันข้าม ถ้าเปลวไฟเคลื่อนตัวย้อนกลับหรือสวนทางกับทิศ การจ่ายเชื้อเพลิงออกจากผิวด้านบนของชั้นวัสดุพอรุน แล้วเกิดการดับ จะเรียกว่า ขอบเขตการย้อนกลับ (Flash back limit) ซึ่งค่า Φ จะมีค่าเท่ากับ 1.2 ขอบเขตการเผาไหม้ที่ได้นี้มีนัยสำคัญที่บ่งบอกให้ทราบว่าหัวพันไฟวัสดุพอรุนเม็ดกลมอัดแน่น Al-Co ($H = 2.5$ cm และ $\epsilon = 0.396$) ที่ใช้แก๊สแอลพีจีเป็นเชื้อเพลิงนั้น มีเสถียรภาพของเปลวไฟหรือช่วงการเผาไหม้ที่กว้าง เพราะสามารถเผาไหม้ได้ทั้งในสถานะส่วนผสมบาง (Lean mixture) และส่วนผสมหนา (Rich mixture) ดังนั้น หากจะนำไปประยุกต์ใช้งานจึงไม่ต้องกังวลในเรื่องการดับหรือควบคุมเสถียรภาพของเปลวไฟ

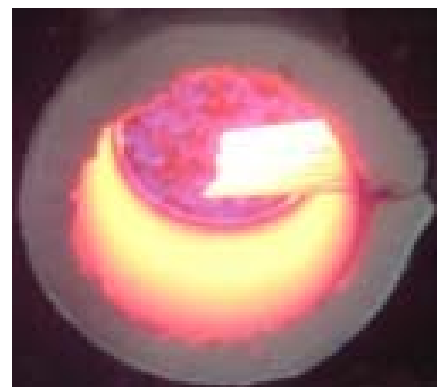


รูปที่ 7 ขอบเขตเปลวไฟเสถียรของหัวพันไฟชนิดวัสดุพอรุนเม็ดกลมอัดแน่นที่มี $\epsilon = 0.396$ และ $H = 2.5$ cm

4.4. ลักษณะเปลวไฟ

รูปที่ 8 แสดงภาพถ่ายคุณลักษณะเปลวไฟของหัวพันไฟวัสดุพอรุนแบบเม็ดกลมอัดชนิดเซรามิกสโอะลูมินา-คอร์ดีไรท์ (Al-Co) ที่ใช้แก๊สแอลพีจีเป็นเชื้อเพลิงของงานวิจัยนี้ โดยทำการถ่ายภาพจากด้านล่างหัวพันไฟหรือขาออกของแก๊สไอเสีย ที่สภาวะ $\Phi = 0.8$ และ $H = 2.5$ cm จากการสังเกตพบว่าไม่สามารถมองเห็นเปลวไฟได้ชัดเจน มีเพียงแสงสว่างจ้า สีมชมพูอมเหลือง เป็นลักษณะของการเผาไหม้แบบไร้เปลวไฟ

(Flameless) และที่บริเวณผิวล่างวัสดุพอรุนจะมองเห็นเปลวไฟสีฟ้า (Blue flame) จึงอาจกล่าวได้ว่าตำแหน่งเปลวไฟเสถียรอาจอยู่บริเวณผิวล่างวัสดุพอรุน โดยเกิดขึ้นอยู่ด้านบนนอกชั้นวัสดุพอรุน นอกจากนี้หากพิจารณาพร้อมกับโครงสร้างทางอุณหภูมิจากรูปที่ 6 จะพบว่าในขอบเขต Combustion and exhaust duct ระดับอุณหภูมิจะค่อนข้างสูงและคงที่เป็นความยาวประมาณ 20 cm ซึ่งเป็นการสนับสนุนกลไกการเผาไหม้แบบ Flameless ที่ได้กล่าวในข้างต้นและเปลวไฟของหัวพันไฟแบบนี้มีความยาวลามออกมาจากชั้นวัสดุพอรุนด้วยความยาวเปลวไฟ (Flame length) ประมาณ 20 cm ดังนั้นลักษณะเปลวไฟที่เกิดขึ้นนี้ จึงสอดคล้องกับวัตถุประสงค์ที่ทำการศึกษาในครั้งนี้ กล่าวคือต้องการได้เปลวไฟที่มีความยาวเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมต่อไป



รูปที่ 8 ลักษณะเปลวไฟของหัวพันไฟวัสดุพอรุนเม็ดกลมอัดแน่น ที่สภาวะ $H = 2.5$ cm และ $\Phi = 0.8$

5. สรุปผลการทดลอง

จากผลการศึกษาที่ได้รับ ประเด็นสำคัญของงานวิจัยนี้ สามารถสรุปได้ตามหัวข้อดังต่อไปนี้

- 1) โครงสร้างทางอุณหภูมิจาก (T) มีแนวโน้มสูงขึ้นตามค่า Φ ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากระบบได้รับเชื้อเพลิงที่เพิ่มหรือปริมาณไอดีผสมที่หนาขึ้น ช่วยทำให้การเผาไหม้มีความรุนแรงและดียิ่งขึ้น แต่การเผาไหม้สมบูรณ์ของหัวพันไฟชนิดนี้จะไม่เกิดขึ้น ที่สภาวะ $\Phi > 1$ เพราะปริมาณ CO เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว มีสาเหตุมาจากส่วนผสมที่หนาเกินความจำเป็น ทำให้เกิดการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ สำหรับปริมาณของ NO_x มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามค่า Φ ที่สูงขึ้น เพราะระดับอุณหภูมิของ

การเผาไหม้ในหัวพ่นไฟที่สูงขึ้น แต่ปริมาณ NO_x ที่ปลดปล่อยออกมาถือว่ามีความต่ำและไม่เกิน 100 ppm เนื่องจากการแผ่รังสีย้อนกลับของวัสดุพ่น

2) โครงสร้างทางอุณหภูมิจึงมีแนวโน้มสูงขึ้นตามค่า V_{mix} ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากระบบมีอัตราการได้รับเชื้อเพลิงที่เพิ่มหรือเชื้อเพลิงป้อนเข้าสู่ระบบเร็วและมากขึ้น ก่อให้เกิดการเผาไหม้ที่มีความรุนแรงและสมบูรณ์ยิ่งขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณ CO ที่มีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่ม V_{mix} ขึ้น ส่วนปริมาณ NO_x มีแนวโน้มแทบจะไม่เพิ่มขึ้นเลย แต่ก็พอจะสังเกตได้ว่ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย

3) สภาพของขอบเขตเปลวไฟเสถียร (Stability of combustion) ของหัวพ่นไฟวัสดุพ่นแบบเม็ดกลมอัดแน่นชนิดเซรามิกซ์ อะลูมินา-คอร์ดีไรท์ (Al-Co) มีค่า Φ ของขอบเขตการเผาไหม้ในช่วงประมาณ 0.76 ถึง 0.8 และการย้อนกลับที่ Φ เท่ากับ 1.2 ซึ่งหัวพ่นไฟแบบนี้มีเสถียรภาพของเปลวไฟหรือช่วงการเผาไหม้ที่กว้าง สามารถเผาไหม้ได้ทั้งในสถานะส่วนผสมบาง (Lean mixture) และส่วนผสมหนา (Rich mixture)

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ได้ให้เงินทุนสนับสนุนในการจัดทำงานวิจัยครั้งนี้ และคณะผู้เขียนบทความขอขอบคุณ นายอนุชา หุนสระน้อย นายปีเฉลิม ลาดจันทิก นายเฉลิมเดช เสวียงชัย นายปียะวัฒน์ ก้อนคำ และนายศาสตรา บุญมาก นักศึกษาสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ซึ่งทำงานวิจัยภายในห้องปฏิบัติการวิจัยการพัฒนาในเทคโนโลยีของวัสดุพ่น (Development in Technology of Porous Materials Research Laboratory: DITO-Lab) คณะวิศวกรรมศาสตร์ และสถาบันศึกษาระดับปริญญาโท มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ได้ช่วยเก็บข้อมูลการทดลองบางส่วนจนทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

- [1] บัณฑิต กฤดาคม, “หัวพ่นไฟอุตสาหกรรมและการประยุกต์ใช้วัสดุพ่นในหัวพ่นไฟ”, วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสยาม, ปีที่ 12 ฉบับที่ 1, พ.ศ. 2554, หน้า 76 – 87.
- [2] R. Echigo, Y. Yoshizawa, K. Hanamura and T. Tomimura, “Analytical and Experimental Studies on Radiative Propagation in Porous Media with Internal Heat Generation”, Proceeding of the 8th International Heat Transfer Conference, 1986, pp. 827-832.
- [3] Y. Yoshizawa, K. Ssaki, and R. Echigo, “Analytical Study of the Structure of Radiation Controlled Flame, International Journal of Heat & Mass Transfer”, Vol. 31, 1988, pp. 311-319.
- [4] V. Khanna, R. Goel and J. L. Ellzey, “Measurements of Emissions and Radiation for Methane Combustion within a Porous Medium Burner”, Combustion Science and Technology, Vol. 99, pp. 133-142, 1994.
- [5] R. Mital, J. P. Gore and R. Viskanta, “A Study of the Structure of Submerged Reaction Zone in Porous Ceramic Radiant burners”, Combustion and Flame, Vol. 111, 1997, pp. 175-184.
- [6] P. H. Bouma and L. P. H. De Goeij, “Premixed Combustion on Ceramic Foam Burner”, Combustion and Flame, Vol. 119, 1999, pp. 133-143.
- [7] S. A. Leonardi, R. Viskanta, and J. P. Gore, “Radiation and Thermal Performance Measurements of a Metal Fiber Burner”, JQSRT, Vol. 73, 2001, pp. 491-501,.
- [8] B. Krittacom, and K. Kamiuto, “Radiation Emission Characteristics of an Open-cellular Porous Burner, JSME Journal of Thermal Science and Technology, Vol.4 (1), 2009, pp. 13-24,.
- [9] บัณฑิต กฤดาคม, “คุณลักษณะการแผ่รังสีของหัวเผาไหม้วัสดุพ่นแบบเซรามิกซ์ชนิดเซลล์าร์เปิด”, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 23, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, เชียงใหม่, 4-7 พฤศจิกายน 2552.

[10] สำเร็จ จักรใจ, “การเผาไหม้”, กรุงเทพฯ, สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2547.