

การพัฒนาระบบหัวฉีดของหัวเผาก๊าซแอลพีจีในอุตสาหกรรมเซรามิกส์ : Part 1

The Development of LPG Burner in Ceramics industry: Part 1

ภรณ์เพ็ญ ลภีรัตน์กุล¹, จารุวัตร เจริญสุข^{1,*}

¹ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

* ติดต่อ: โทรศัพท์: 023 264 197, โทรสาร: 023 264 198

E-mail: kcjaruw@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้กล่าวถึงการพัฒนาหัวเผาก๊าซแอลพีจีแบบกึ่งอัตโนมัติที่ใช้ในอุตสาหกรรมเซรามิกส์จากหัวเผาเดิมที่มีย่านการทำงานที่อัตราการไหลสูง ซึ่งได้นำหลักการสมดุลของสปริงกับความดันของก๊าซที่สัมพันธ์กับตำแหน่งของวาล์วเข็มมาประยุกต์ใช้ ทำให้ขนาดหัวฉีดปรับเปลี่ยนตามอัตราการไหลเชื้อเพลิง โดยได้ทำการปรับเปลี่ยนอัตราการไหลตั้งแต่ย่าน 1 L/Min จนถึง 5 L/Min ซึ่งเพิ่มทีละ 0.5 L/Min ที่ความดันใช้งานเท่ากับ 2 บาร์ ภายใต้ค่าคงที่สปริง 0.85 N/m จากนั้นบันทึกเปอร์เซ็นต์ออกซิเจนก่อนการเผาไหม้และการกระจายตัวของอุณหภูมิ พร้อมทั้งสังเกตความยาว สี และรูปแบบของเปลวไฟ พบว่าเมื่อเปรียบเทียบกับหัวเผาเดิมก่อนการปรับปรุง หัวเผาใหม่มีอัตราการเหนียวนำอากาศสูง ให้เปลวไฟสั้น สีน้ำเงิน และมีลักษณะการสั่นกระเพื่อมน้อยลง มีอุณหภูมิไอเสียสูงมากกว่า 700°C ในทุกๆเงื่อนไขการทดลอง ขณะที่หัวเผาแบบเก่ามีอัตราการเหนียวนำอากาศน้อยกว่า ให้เปลวไฟสีส้มและไม่มีความเสถียร เปลวไฟสั้นตามสภาพแวดล้อม อุณหภูมิไอเสียมีค่าประมาณ 600°C

คำสำคัญ: หัวเผาแอลพีจี เตาอบเซรามิกส์ การเหนียวนำอากาศ

Abstract

This paper describes about the development of semi-automatic LPG burner in ceramics industry for a replacement of the existing burner which has a limited operation range at high flow rate. The relationship between the balance of spring and LPG pressure with position of the needle valve has resulted in variation of nozzle area with fuel flow rate. Oxygen concentration prior to combustion, temperature distribution including the visible flame length, illuminating color and shape of flame were observed while adjusting fuel flow rate from 1 L/Min up to 5 L/Min by 0.5 L/Min increment. The supply pressure was at 2 bars with 0.85 N/m spring constant. It is found that the new burner has higher primary air entrainment, shorter and more stable blue flame length than the old burner. In addition, it has higher flue gas temperature of about 700°C for all conditions while the old one is about 600°C.

Keywords: LPG burner, Ceramics furnace, Primary air entrainment

1. บทนำ

ในปัจจุบันอุตสาหกรรมต่างๆ ภายในประเทศเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้มีการบริโภคพลังงานเพิ่มมากขึ้น เมื่อพลังงานนั้นวันยังมีน้อยลงตรงข้ามกับราคาที่สูงขึ้นอย่างต่อเนื่องผู้ประกอบการต่างก็ได้รับผลกระทบไม่เว้นแม้แต่อุตสาหกรรมเซรามิกส์ซึ่งใช้ก๊าซแอลพีจี (Liquefied petroleum gas, LPG) เป็นเชื้อเพลิงให้กับเตาเผา ดังนั้นผู้ประกอบการที่สามารถแก้ไขปัญหาในส่วนนี้ได้ก็จะเป็นผลดีกับธุรกิจมากขึ้น และการแก้ปัญหานี้ยังรวมถึงการปรับปรุงประสิทธิภาพของหัวเผาให้มีการเผาไหม้ที่ดีและลดการใช้ก๊าซแอลพีจีอย่างสิ้นเปลืองด้วย โดยหัวเผาก๊าซแอลพีจี ที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน เป็นแบบเปลวไฟผสมก่อนการเผาไหม้(ในย่านอัตราการไหลสูง) ใช้หลักการพ่นเชื้อเพลิงผ่านหัวฉีดและเหนี่ยวนำอากาศเข้าสู่ห้องเผาไหม้ ซึ่งจะเผาไหม้ได้ดีในย่านอัตราการไหลสูง เพราะสามารถเหนี่ยวนำอากาศเข้าสู่ห้องเผาไหม้ได้มาก แต่เมื่อทำการลดอัตราการไหลลง จะเกิดการเผาไหม้ที่ไม่ดี กลายเป็นการเผาไหม้แบบเปลวไฟผสมกันขณะเผาไหม้ ซึ่งการเพิ่มอัตราการเหนี่ยวนำอากาศ (primary air entrainment) ในย่านที่มีอัตราการไหลต่ำถือเป็นทางเลือกหนึ่งที่ต้องได้รับการพัฒนาเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพการเผาไหม้ และนอกจากนี้ยังช่วยยืดระยะเวลาในการก่อตัวของเขม่า จากการศึกษพบว่า การเพิ่มอัตราการเหนี่ยวนำอากาศ 10% จากปริมาณอากาศที่ต้องการใช้ในปริมาณสัมพันธ์ (stoichiometric) สามารถลดการเกิดเขม่าได้มากที่สุดถึง 70% [1] และยังพบว่าอุณหภูมิของอากาศที่ถูกเหนี่ยวนำก็มีผลต่อการเหนี่ยวนำเช่นกัน ซึ่งอากาศโดยรอบหัวฉีดแอลพีจีที่มีอุณหภูมิต่ำสามารถถูกเหนี่ยวนำได้มากกว่าอากาศที่มีอุณหภูมิสูงถึง 22% [4] อีกทั้งลักษณะทางกายภาพของหัวเผายังถือเป็นปัจจัยสำคัญที่ต้องนำมาพิจารณาเพื่อเพิ่มอัตราการเหนี่ยวนำอากาศ กล่าวคือถ้าหากนอชเชิลทำให้เกิดความดันแตกต่างสูงก็จะทำให้เกิดสุญญากาศและเหนี่ยวนำอากาศได้มากนั่นเอง ซึ่งจากการ

เปรียบเทียบนอชเชิลแบบคอนเวอร์เจนซ์และแบบออริฟิส พบว่าแบบออริฟิสสามารถเหนี่ยวนำอากาศได้มากกว่าและหากยิ่งลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง และเพิ่มอัตราการไหลก็ยิ่งเหนี่ยวนำได้มากขึ้นเช่นกัน [2] นอกจากนี้ศึกษาอัตราการเหนี่ยวนำอากาศที่เป็นผลเนื่องมาจากการปรับเปลี่ยนประเภทของนอชเชิลแล้วยังได้มีการศึกษา หัวฉีดที่เป็น group hole nozzle และ single hole nozzle ปรากฏว่าแบบแรกสามารถสเปรย์ได้สั้น แต่สามารถเพิ่มอัตราการเหนี่ยวนำได้มากกว่า single hole เนื่องจากบริเวณที่เกิดการสเปรย์กว้างทำให้สามารถเพิ่มอัตราการเกิดโมเมนตัมซึ่งสัมพันธ์กับปริมาณอากาศที่ถูกเหนี่ยวนำที่เพิ่มมากขึ้น [3], [4] ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นในการศึกษาพัฒนาหัวฉีดก๊าซแอลพีจีโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มอัตราการเหนี่ยวนำอากาศและปรับปรุงสมรรถนะของการเผาไหม้ให้ดียิ่งขึ้น โดยทดลองเปรียบเทียบปริมาณอากาศที่ถูกเหนี่ยวนำก่อนการเผาไหม้ระหว่างหัวฉีดแอลพีจีแบบเก่าและหัวฉีดที่ได้รับการพัฒนาแล้ว ทั้งนี้โดยให้เป็นแนวทางการศึกษาและพัฒนาเพื่อนำไปใช้ในอุตสาหกรรมเซรามิกส์ต่อไป

2. องค์ประกอบเชื้อเพลิง

เชื้อเพลิงที่เลือกใช้ในงานวิจัยนี้คือ LPG โดยในการทดลองจะใช้ก๊าซหุงต้มของการปิโตรเลียมแห่งประเทศไทย ซึ่งประกอบไปด้วย โพรเพน (C_3H_8) 60% mol และบิวเทน (C_4H_{10}) 40% โดยมีค่าความร้อน (HHV) เท่ากับ 45.6 MJ/kg (ที่มา: การปิโตรเลียมแห่งประเทศไทย) ซึ่งจะเห็นได้ว่าองค์ประกอบของ LPG มีก๊าซไฮโดรคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก ไม่มีองค์ประกอบของไนโตรเจนและซัลเฟอร์

3 วิธีการทดลอง

รูปที่ 1 แสดงชุดทดสอบพฤติกรรมการณ์การเผาไหม้และสมรรถนะเบื้องต้นของหัวเผาโดยใช้แอลพีจีเป็นเชื้อเพลิง โดยชุดทดสอบถูกสร้างให้มีการเผาไหม้แบบผสมก่อน (premixed) และแบ่งออกเป็นสามส่วนคือ ส่วนที่หนึ่งเป็นท่อผสม (mixing pipe) ระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศส่วนที่หนึ่ง ทำมาจากเหล็กหล่อ มี

ลักษณะคล้ายรูปทรงกรวย สูง 375 mm. ปลายท่อมี่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 40 mm โดยที่บริเวณด้านยอดกรวย ได้ทำการติดตั้งหัวฉีดแสดงดังรูปที่ 2 ติดตั้งอยู่ห่างจากท่อผสมเป็นระยะ 60 mm เพื่อให้อากาศส่วนที่หนึ่งถูกเหนี่ยวนำเข้าสู่ท่อผสม โดยอาศัยแรงดันสูญญากาศที่เกิดขึ้นจากการฉีดเชื้อเพลิงด้วยความเร็วสูง

ส่วนที่สองคือหัวเผา (Burner) ทำจากสแตนเลส มีลักษณะเป็นทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 38 mm สูง 200 mm ส่วนสุดท้ายคือท่อสำหรับเก็บบันทึกอุณหภูมิและก๊าซไอเสียที่ได้จากการเผาไหม้ (Measuring pipe) ทำจากเหล็ก มีลักษณะเป็นทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 154 mm สูง 750 mm โดยทำการติดตั้งห่างจากปลายของหัวเผาเป็นระยะ 90 mm เพื่อให้เกิดการเหนี่ยวนำอากาศส่วนที่สองที่ใช้ในการเผาไหม้

รูปที่ 2 แสดงลักษณะหัวฉีดแอลพีจีแก๊สที่ใช้กันอยู่ทั่วไปเทียบกับหัวฉีดใหม่ที่ได้รับการพัฒนาให้เป็นแบบกึ่งอัตโนมัติ ซึ่งนำหลักการสมมูลของสปริงที่สัมพันธ์กับพื้นที่ทางออกของหัวนอชเซลมาประยุกต์ใช้ โดยที่อัตราการไหลต่ำ พื้นที่ทางออกของหัวนอชเซลจะแคบ เนื่องจากแรงดันของเชื้อเพลิงไม่สามารถเอาชนะแรงต้านของสปริง ส่งผลให้เชื้อเพลิงมีความเร็วสูง จึงเกิดการเหนี่ยวนำอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้เข้าสู่หัวเผาได้มาก ในขณะที่เมื่อใช้งานที่อัตราการไหลสูง หัวเผาก็สามารถเหนี่ยวนำอากาศเข้าสู่หัวเผาได้มากเช่นกัน เพราะความเร็วของเชื้อเพลิงมีค่ามากตามอัตราการไหลที่เพิ่มขึ้น

การทดลองในกรณีหัวฉีดแอลพีจีแบบเก่าที่สามารถปรับอัตราการไหลเชื้อเพลิงได้ โดยเริ่มจากอัตราการไหล 1 L/Min ภายใต้ความดันใช้งาน 2 บาร์ จากนั้นปรับให้มีอัตราการไหลเพิ่มขึ้นเป็น 1.5, 2, 2.5, 3, 3.5, 4, 4.5 และ 5 L/Min โดยใช้ Flow meter (0-5 L/m) เป็นอุปกรณ์ในการวัดและควบคุมอัตราการไหลของเชื้อเพลิง ส่วนในการบันทึกค่าอุณหภูมิจะบันทึกอุณหภูมิทั้งหมด 9 ระดับความสูงแสดงดังรูปที่ 1 ซึ่งตำแหน่งวัด T_1 อยู่ที่ทางออกหัวเผา ที่ระดับความสูง

550 mm จากหัวฉีดเชื้อเพลิง ตำแหน่งวัด T_2 อยู่ที่ทางเข้าของท่อบันทึกผล ที่ระดับความสูง 620 mm จากหัวฉีดเชื้อเพลิง ส่วนตำแหน่ง $T_3 - T_9$ อยู่ห่างจากตำแหน่งวัดก่อนหน้าเป็นระยะเท่าๆกัน 100 mm โดยใช้ Thermocouple type K และใช้ Data logger เป็นอุปกรณ์ในการบันทึกผล นอกจากนี้ยังวัดก๊าซโดยใช้เครื่องวัดก๊าซ (Testo 350XL) ที่บริเวณท่อทางออกของท่อบันทึกผล ที่ระดับความสูง 1290 mm จากหัวฉีดเชื้อเพลิง (G_2) ซึ่งก๊าซที่ทำการเก็บผลคือ O_2 อีกทั้งยังได้ทำการบันทึกปริมาณ O_2 ก่อนการเผาไหม้ที่บริเวณท่อผสม ที่ระดับความสูง 270 mm จากหัวฉีดเชื้อเพลิง (G_1) เพื่อคำนวณอัตราการเหนี่ยวนำอากาศจาก

$$\dot{Y}_{O_2, \text{premixed}} = \frac{21 \times \dot{m}_{Air}}{\dot{m}_{fuel} + \dot{m}_{Air}}$$

ดังนั้น

$$\dot{m}_{Air} = \frac{\dot{Y}_{O_2, \text{premixed}} \times \dot{m}_{fuel}}{21 - \dot{Y}_{O_2, \text{premixed}}} \quad (1)$$

เมื่อ

$\dot{Y}_{O_2, \text{premixed}}$ คือ ปริมาณออกซิเจนที่วัดได้ (%)

\dot{m}_{Air} คือ ปริมาณอากาศที่ถูกเหนี่ยวนำ (kg/s)

\dot{m}_{fuel} คือ ปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ (kg/s)

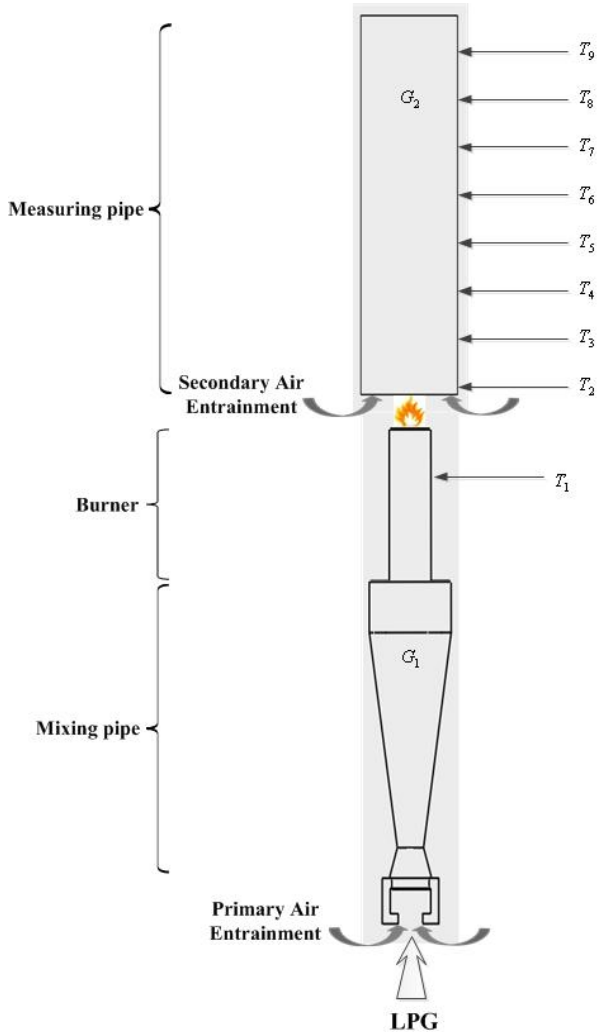
ทดลองเช่นเดียวกันในกรณีหัวฉีดแอลพีจีแบบกึ่งอัตโนมัติภายใต้ค่าคงที่สปริง 0.85 N/m และปรับเปลี่ยนอัตราการไหล โดยใช้ทุกเงื่อนไขเดียวกันกับกรณีหัวฉีดแบบเก่า

4. ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

4.1 อัตราการเหนี่ยวนำอากาศ

รูปที่ 3 แสดงเปอร์เซ็นต์ออกซิเจนในท่อผสมทั้งในกรณีหัวฉีดที่ใช้กันอยู่ทั่วไปและหัวฉีดที่พัฒนาให้เป็นแบบกึ่งอัตโนมัติในทุกๆ อัตราการไหลที่แสดงเป็นพลังงานความร้อน ซึ่งสังเกตเห็นได้อย่างชัดเจนว่ากรณีหัวฉีดที่พัฒนาแล้วมีปริมาณออกซิเจนในท่อผสมมากกว่าหัวฉีดเดิมในทุกๆ อัตราการไหล คิดเป็นอัตราเฉลี่ยที่เพิ่มขึ้น 19.96% และในรูปที่ 4 แสดงอัตราการเหนี่ยวนำอากาศต่อปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ไปในหน่วย kg/s แสดงให้เห็นว่าอากาศของหัวฉีดที่

พัฒนาแล้วถูกเหี่ยวนำสอดคล้องกับปริมาณออกซิเจนในรูปที่ 3 นอกจากนี้ยังสังเกตเห็นว่าที่อัตราการไหลสูงขึ้น ปริมาณอากาศยังถูกเหี่ยวนำได้มากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับหัวฉีดเก่า



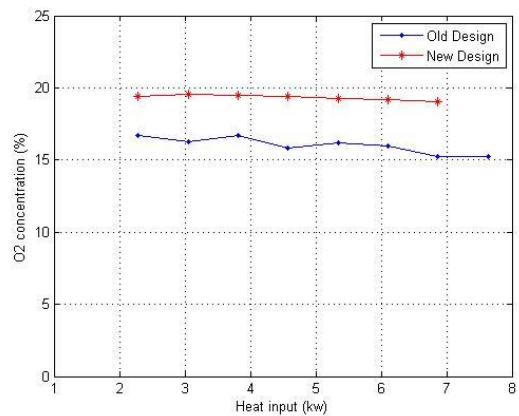
รูปที่ 1 แผนภาพส่วนต่างประกอบต่างๆ ในชุดทดลอง



ก.)

ข.)

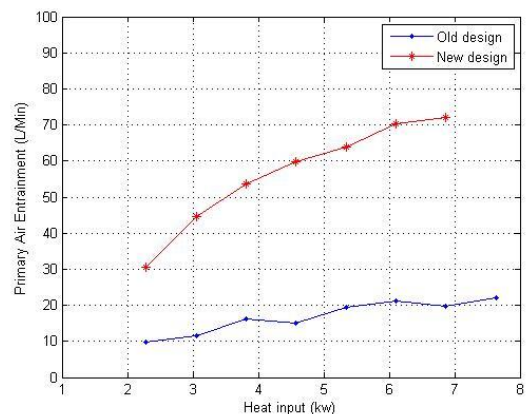
รูปที่ 2 ลักษณะ ก.) หัวฉีดเก่าและ ข.) หัวฉีดใหม่



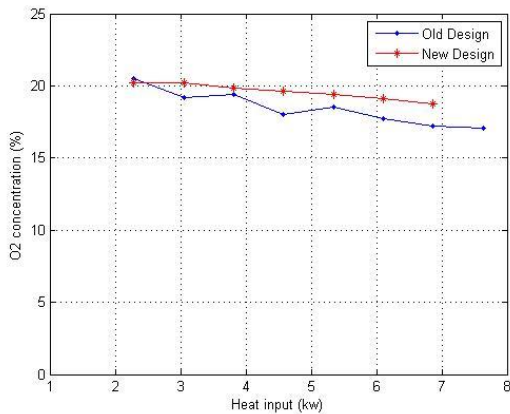
รูปที่ 3 เปอร์เซนต์ออกซิเจนที่ทุกๆ อัตราการไหลที่ G_1 ทั้งในกรณีหัวฉีดเก่าและหัวฉีดที่ได้รับการพัฒนาแล้ว

4.2 ปริมาณออกซิเจนหลังการเผาไหม้

รูปที่ 5 แสดงเปอร์เซนต์ออกซิเจนในส่วนเก็บบันทึกค่า (หลังการเผาไหม้) พบว่าหัวฉีดเก่ามีเปอร์เซนต์ออกซิเจนหลังการเผาไหม้น้อยกว่าหัวฉีดที่พัฒนาแล้วที่จุดเดียวกัน ซึ่งสอดคล้องกับรูปแบบเปลวไฟ โดยที่เปลวไฟในกรณีหัวฉีดใหม่ มีเปลวไฟที่สั้น สีน้ำเงิน และมีความแข็งแรง ออกซิเจนจึงแพร่เข้ามาในปริมาณที่มากกว่า ณ จุดเดียวกันกับเปลวไฟของหัวฉีดเก่าที่มีเปลวไฟยาว เป็นสีส้มและไม่มีประสิทธิภาพ



รูปที่ 4 อัตราการเหี่ยวนำอากาศต่อปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ไปที่ทุกๆ อัตราการไหลที่ G_1 ทั้งในกรณีหัวฉีดเก่าและหัวฉีดที่ได้รับการพัฒนาแล้ว

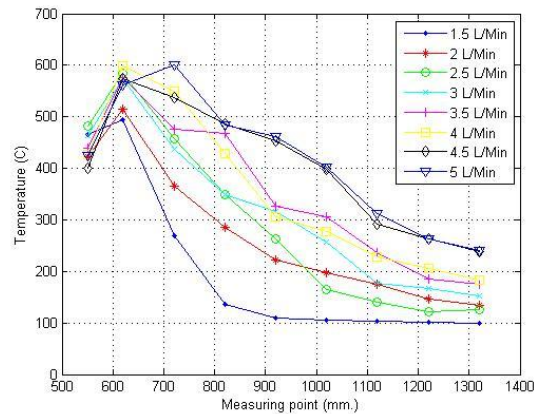


รูปที่ 5 เปอร์เซ็นต์ออกซิเจนที่ทุกๆ อัตราการไหลที่ G_2 ทั้งในกรณีหัวฉีดเก่าและหัวฉีดที่ได้รับการพัฒนาแล้ว

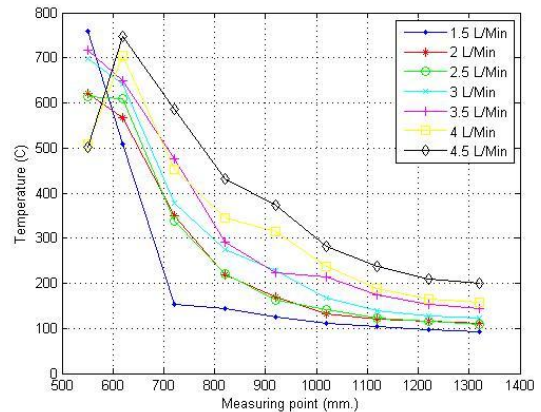
4.3 การกระจายตัวของอุณหภูมิ

ในรูปที่ 6 แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิ ณ จุด T_1 จนถึง T_9 ในทุกๆ อัตราการไหลเชื้อเพลิงของหัวฉีดแบบเก่า พบว่าอุณหภูมิเพิ่มขึ้นจากจุด T_1 จนมากที่สุดที่ T_2 ของทุกๆ อัตราการไหล หลังจากนั้นจึงมีแนวโน้มลดลงจนมีอุณหภูมิต่ำสุดที่จุด T_9 นอกจากนี้ยังพบว่า อุณหภูมิที่จุด T_2 หรืออุณหภูมิในการเผาไหม้เพิ่มสูงขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราการไหลสูงขึ้นอีกด้วย ในทำนองเดียวกัน รูปที่ 7 แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิ ณ จุด T_1 จนถึง T_9 ในทุกๆ อัตราการไหลเชื้อเพลิงของหัวฉีดแบบใหม่ซึ่งมีการกระจายตัวของอุณหภูมิล้ำกับหัวฉีดเก่า คือมีอุณหภูมิสูงสุด ณ จุด T_2 และสูงขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราการไหลเชื้อเพลิงเช่นเดียวกัน

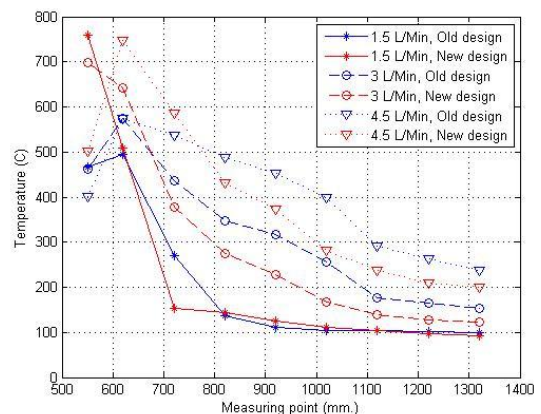
รูปที่ 8 แสดงการเปรียบเทียบการกระจายตัวของอุณหภูมิ ณ จุด T_1 จนถึง T_9 ในย่านอัตราการไหล 1.5, 3 และ 4.5 L/Min ของหัวฉีดเก่าและหัวฉีดที่ได้รับการพัฒนา พบว่าหัวฉีดใหม่ในทุกกรณีของอัตราการไหลที่จุด T_2 มีอุณหภูมิสูงกว่าโดยมีอุณหภูมิสูงสุดที่ $750\text{ }^{\circ}\text{C}$ ในขณะที่หัวฉีดเก่ามีอุณหภูมิสูงสุดอยู่ที่ $580\text{ }^{\circ}\text{C}$ นอกจากนี้หัวฉีดแบบใหม่ยังมีแนวโน้มเปลวไฟสั้นกว่าสังเกตได้จากความชันของกราฟ



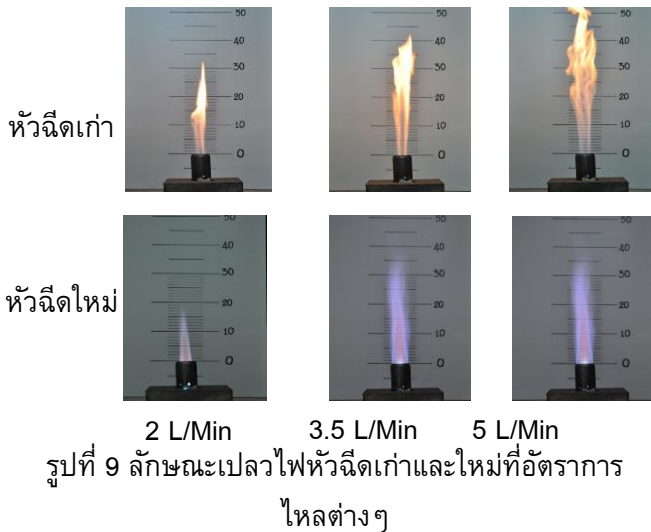
รูปที่ 6 การกระจายตัวของอุณหภูมิ ณ จุด T_1 จนถึง T_9 ของทุกๆ อัตราการไหลทั้งในกรณีหัวฉีดเก่า



รูปที่ 7 การกระจายตัวของอุณหภูมิ ณ จุด T_1 จนถึง T_9 ของทุกๆ อัตราการไหลทั้งในกรณีหัวฉีดใหม่



รูปที่ 8 เปรียบเทียบการกระจายตัวของอุณหภูมิ ณ จุด T_1 จนถึง T_9 ในย่านอัตราการไหล 1.5, 3 และ 4.5 L/Min ของหัวฉีดเก่าและหัวฉีดที่ใหม่



4.5 ลักษณะเปลวไฟ

รูปที่ 9 แสดงการเปรียบเทียบลักษณะเปลวไฟที่อัตราการไหล 2, 3.5 และ 5 L/Min ตามลำดับ พบว่าเปลวไฟในกรณีหัวฉีดใหม่ มีเปลวไฟที่สีนํ้าเงินและมีความแข็งแรง ในขณะที่เปลวไฟของหัวฉีดเก่ามีเปลวไฟยาว เป็นสีส้มและไม่มีความเสถียร และเมื่อเพิ่มอัตราการไหลเปลวไฟยังมีความยาวเพิ่มขึ้น

นอกจากที่กล่าวมาทั้งหมดแล้ว เมื่อสังเกตจากกราฟไม่ว่าจะเป็นเปอร์เซ็นต์ออกซิเจนก่อนการเผาไหม้ หลังการเผาไหม้ หรือแม้แต่ปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์หลังการเผาไหม้ จะเห็นว่าในกรณีหัวฉีดเก่าสามารถตรวจวัดค่าก๊าซต่างๆ ได้ตั้งแต่ที่อัตราการไหล 1.5 L/Min ($Q = 2.29$ kw) จนถึงอัตราการไหล 5 L/Min ($Q = 7.63$ kw) และในกรณีหัวฉีดใหม่สามารถตรวจวัดได้ตั้งแต่ 1.5 L/Min ($Q = 2.29$ kw) จนถึงอัตราการไหล 4.5 L/Min ($Q = 6.87$ kw) เนื่องจากที่อัตราการไหลต่ำๆ เกิดปรากฏการณ์เปลวไฟย้อนกลับ (flash back) และที่อัตราการไหลสูงๆ เกิดปรากฏการณ์เปลวไฟหลุดลอย (lift off) นั้นเอง

5. สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้มุ่งเน้นศึกษาสมรรถนะเบื้องต้นของหัวเผาแอลพีจีที่ได้รับการปรับปรุงให้เป็นแบบกึ่งอัตโนมัติ โดยได้นำหลักการสมดุลของสปริงที่สัมพันธ์กับพื้นที่ทางออกของหัวนอชเชิลมาประยุกต์ใช้ ซึ่งจากการทดลองพบว่า

1. หัวฉีดที่ได้รับการพัฒนาแล้วสามารถเพิ่มอัตราการเหนี่ยวนำอากาศได้มากกว่าหัวฉีดเดิมที่ทุกๆ อัตราการไหล โดยยิ่งเหนี่ยวนำได้มากขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราการไหล
2. รูปแบบเปลวไฟหัวฉีดใหม่มีเปลวไฟสีนํ้าเงินและมีความเสถียร เปลวไฟแข็งแรง มีอุณหภูมิไอเสียสูงมากกว่า 700°C ในทุกเงื่อนไขการทดลอง ในขณะที่หัวเผาแบบเก่ามีอัตราการเหนี่ยวนำอากาศน้อยกว่า ให้เปลวไฟสีส้มและไม่มีความเสถียร เปลวไฟสีนํ้าเงินตามสภาพแวดล้อม อุณหภูมิไอเสียมีค่าประมาณ 600°C
3. หัวฉีดเก่ามีเปอร์เซ็นต์ออกซิเจนหลังการเผาไหม้น้อยกว่าหัวฉีดที่พัฒนาแล้วที่จุดเดียวกัน ซึ่งสอดคล้องกับรูปแบบเปลวไฟ โดยที่เปลวไฟในกรณีหัวฉีดใหม่ มีเปลวไฟที่สีนํ้าเงินและมีความแข็งแรง ออกซิเจนจึงแพร่เข้ามาในปริมาณที่มากกว่า ณ จุดเดียวกันกับของเปลวไฟในหัวฉีดเก่าที่มีเปลวไฟยาว เป็นสีส้มและไม่มีความเสถียร นอกจากนี้ยังสังเกตแนวโน้มความยาวของเปลวไฟได้จากความชันของกราฟการกระจายตัวอุณหภูมิตั้งแต่จุด T_1 จนถึง T_0 ซึ่งหัวฉีดใหม่มีการลดลงของอุณหภูมิเร็วกว่า สอดคล้องกับเหตุผลที่กล่าวมาข้างต้น
4. ที่อัตราการไหลต่ำเกิดเปลวไฟย้อนกลับ (flash back) และที่อัตราการไหลสูงเกิดเปลวไฟหลุดลอย (lift off) ซึ่งควรนำเป็นกรณีศึกษาต่อไปรวมทั้งควรตรวจวัดปริมาณก๊าซไอเสียที่เกิดหลังการเผาไหม้ด้วย

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณอาจารย์และนักศึกษามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานครที่ช่วยให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี และบริษัท Happy one ที่เอื้อเฟื้อชุดหัวเผาที่ใช้ในการทดสอบ

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Shahad, Haroun.A.K., Mohammed, Yassar.K.A. (2000). Investigation of soot formation and temperature field in laminar diffusion flames of LPG-air mixture, *Energy Conversion and Management*, vol. 41(17), November 2000, pp.1897-1916.
- [2] Rahman, F., Umesh, D.B., Subbarao, D., Ramasamy, M. (2010). Enhancement of entrainment rates in liquid-gas ejectors, *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, vol. 49(10), October 2010, pp. 1128-1135
- [3] Moon, S., Matsumoto, Y., Nishida, K. and Gao, J. (2010). Gas entrainment characteristics of diesel spray injected by a group-hole, vol. 89(11), November 2010, pp. 3287-3299.
- [4] Namkhat, A. and Jugjai, S. (2010). Primary air entrainment characteristics for a self-aspirating burner: Model and experiments, *Energy*, vol. 35(4), April 2010, pp. 1701-1708.