

หัวเผาไฟวัสดุพอร์ซเซรามิกซ์โดยใช้น้ำมันดีเซลเป็นเชื้อเพลิง

Ceramic Porous Burner Using Diesel Oil

พิพัฒน์ อมตฉายา บัณฑิต กฤตาคม และสาริต ทุลไธสง

Pipatana Amatachaya Bundit Krittacom and Sarthit Toolthaisong

ห้องปฏิบัติการวิจัยการพัฒนาในเทคโนโลยีของวัสดุพอร์ซ

Development In Technology Of Porous Materials Research Laboratory: DITO-Lab

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

744 ถนนสุรนารายณ์ อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000 โทรศัพท์: 044-233-073, โทรสาร: 044-233-074

E-mail: pipatana.am@rmuti.ac.th bundit.kr@rmuti.ac.th และ sarthit.to@rmuti.ac.th

บทคัดย่อ

การเผาไหม้ของน้ำมันดีเซลในหัวเผาไฟวัสดุพอร์ซเซรามิกซ์ได้ถูกทำการทดลอง เพื่อศึกษากลไกการระเหยของน้ำมันเชื้อเพลิงและพฤติกรรมการเผาไหม้ วัสดุพอร์ซเซรามิกซ์จะทำมาจากซิลิคอนคาร์ไบด์ (SiC) มีโครงสร้างเป็นแบบรังผึ้งมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 96 มิลลิเมตรหนา 10 มิลลิเมตร วางซ้อนทับกันเป็นชั้นวัสดุพอร์ซจำนวน 10 แผ่น โดยทำการศึกษา 2 ค่าความพอร์ซ (ϵ) คือ 0.15 และ 0.22 น้ำมันเชื้อเพลิงจะป้อนเข้าสู่ระบบด้วยการหยดจากด้านบนผ่านชั้นวัสดุพอร์ซ เกิดการระเหยกลายเป็นไอ นำไปสู่การเผาไหม้บริเวณด้านล่างชั้นวัสดุพอร์ซ อุณหภูมิตลอดแนวความยาวของหัวเผาไฟถูกตรวจวัดและแสดงในรูปโครงสร้างทางอุณหภูมิ ขณะเดียวกันแก๊สไอเสียก็ถูกตรวจวัดที่ตำแหน่งขาออกของระบบด้วยเช่นกัน จากการทดลองพบว่าการนำความร้อนจะมีความสำคัญต่อกลไกการระเหยของน้ำมันดีเซลในชั้นวัสดุพอร์ซมากกว่าการแผ่รังสี เปลวไฟพอร์ซ $\epsilon = 0.15$ เสถียรปั่นป่วนเกือบเต็มหน้าตัด และให้โครงสร้างทางอุณหภูมิที่กระจายได้กว้างกว่าพอร์ซ $\epsilon = 0.22$ เมื่อค่าอัตราการจ่ายอากาศหมุนวน (Q_A) ลดลงและอัตราการจ่ายเชื้อเพลิง (Q_F) เพิ่มขึ้น โครงสร้างทางอุณหภูมิจะเปลี่ยนจากสามเหลี่ยมเป็นสี่เหลี่ยมคางหมูที่กว้างขึ้น สำหรับปริมาณแก๊สไอเสีย (CO และ NO_x) จะขึ้นอยู่กับอิทธิพลของ Q_F และ ϵ เป็นหลัก ซึ่งมีค่าต่ำอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

Abstract

The combustion of diesel oil in the ceramic porous burner was examined to investigate evaporation mechanism and combustion behavior. The honeycomb ceramic porous material was made of Silicon Carbide (SiC) having 96 mm in diameter and 10 mm thick. Ten ceramic plates were stacked together to form a porous burner. Two porosities (ϵ), i.e., 0.15 and 0.22, were studied. The fuel was supplied dropwise from the top through the porous burner and evaporated within the porous media followed by the combustion on the bottom side. Axial profiles of temperature along the burner length were measured. The pollutant emission characteristics were also monitored at the burner exit. From experimental study, conduction mode of heat transfer was more significantly than radiation one for the evaporation within ceramic porous media. The stable flame of $\epsilon = 0.15$ was turbulently achieved by occurring almost throughout the cross section area of the inner burner resulting in the temperature profile was wider than that the case for $\epsilon = 0.22$. A triangular shape of the temperature profile was changed as trapezoidal shape with fuel input load (Q_F) and decreasing in flow rate of swirling air (Q_A). The level of CO and NO_x depended strongly on Q_F and ϵ ; the observed level of them were acceptable range.

คำหลัก: วัสดุพอร์ซเซรามิกซ์, น้ำมันดีเซล, การเผาไหม้

Key words: Ceramic porous material, Diesel oil, Combustion

RECEIVED 19 November, 2010

ACCEPTED 12 March, 2011

1. บทนำ

โดยทั่วไปวิธีการเผาไหม้เชื้อเพลิงเหลว (Liquid fuels) จะต้องทำให้น้ำมันเชื้อเพลิงแตกตัวเป็นฝอยละออง (Liquid droplets) ที่ละเอียด ซึ่งนิยมใช้หัวฉีด (Atomizer) เป็นตัวสร้างฝอยละอองดังกล่าว เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวต่อปริมาตรของน้ำมันเชื้อเพลิงให้สูงขึ้น ส่งผลให้ปริมาณการถ่ายเทความร้อนจากแก๊สร้อนโดยรอบสู่ผิวละอองน้ำมันเพิ่มขึ้น ทำให้อัตราการระเหยกลายเป็นไอสูงขึ้น และการผสมคลุกเคล้าระหว่างไอน้ำมันกับอากาศมีความสม่ำเสมอยิ่งขึ้น จนทำให้ได้การเผาไหม้ที่สมบูรณ์และสามารถนำความร้อนไปใช้ประโยชน์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตามวิธีดังกล่าวยังมีจุดอ่อน คือ มีความจำเป็นต้องใช้หัวฉีดความดันสูงเพื่อทำให้เกิดการแตกตัวเป็นฝอยละอองน้ำมันเชื้อเพลิง ห้องเผาไหม้ต้องมีขนาดใหญ่เพื่อรองรับการฟุ้งกระจายของฝอยละอองน้ำมันเชื้อเพลิง ทำให้ค่าความเข้มของการเผาไหม้ (Combustion intensity) มีค่าต่ำ และยังคงคำนึงถึงคุณลักษณะของละอองน้ำมัน (Ballistic characteristics) อีกด้วย นอกจากนี้ห้องเผาไหม้ยังต้องรักษาการกระจายอุณหภูมิที่สูงตลอดห้องเผาไหม้เพื่อให้ละอองน้ำมันเชื้อเพลิงสามารถระเหยกลายเป็นไอเกิดการเผาไหม้ได้อย่างเต็มที่ จากข้อเสียดังกล่าว แนวคิดการนำเอาวัสดุพรุนมาประยุกต์ใช้ในการเผาไหม้เชื้อเพลิงเหลวจึงได้ถูกศึกษาและพัฒนาขึ้น ซึ่งจุดเด่นของวัสดุพรุนได้อธิบายในบทความเรื่องหัวพ่นไฟแบบวัสดุพรุนโดยใช้น้ำมันดีเซลเป็นเชื้อเพลิง [1] ไว้อย่างละเอียด

จากลักษณะเด่นของวัสดุพรุนดังกล่าว นักวิจัยหลายกลุ่ม [2], [3] ได้นำเอาวัสดุพรุนมาประยุกต์ใช้กับการเผาไหม้เชื้อเพลิงเหลวด้วยการสเปรย์เชื้อเพลิงเหลวพร้อมทั้งป้อนอากาศเข้าไปในชั้นวัสดุพรุน พบว่าการเผาไหม้เชื้อเพลิงเหลวโดยใช้วัสดุพรุนจะดีกว่าการสเปรย์แบบปกติ (Conventional open spray flame) เพราะลักษณะการเผาไหม้ที่สมบูรณ์กว่ามลภาวะจากการเผาไหม้มีค่าต่ำ แต่ระบบการเผาไหม้แบบสเปรย์ต้องมีการป้อนเชื้อเพลิงด้วยหัวฉีดความดันสูงเพื่อพ่นให้เป็นละออง ซึ่งยุ่งยากต่อการนำไปใช้งาน ด้วยเหตุนี้การเผาไหม้เชื้อเพลิงเหลว โดยใช้การหยดเชื้อเพลิงลงบนชั้นวัสดุพรุน แทนการสเปรย์เข้าไปในวัสดุพรุนจึงถูกทำการศึกษา

และเสนอแนวคิดใหม่นี้โดย Takami และคณะ [4] จากการศึกษาพบว่า การเผาไหม้ของน้ำมันก๊าด (Kerosene) เกือบสมบูรณ์ตลอดค่าอัตราส่วนสมมูล (Equivalence ratio) อยู่ระหว่าง 0.5 - 0.9 และมีค่า Turn-down ratio เท่ากับ 5.8 อย่างไรก็ตามการวัดและอธิบายผล มีเพียงโครงสร้างทางความร้อนภายในห้องเผาไหม้เท่านั้น แต่ยังไม่มีการศึกษาบริเวณชั้นวัสดุพรุน ด้วยเหตุผลดังกล่าว ศาสตราจารย์ ดร. สำเริง จักรใจ และทีมงาน [5] ได้ทำการศึกษาเชิงทดลองการเผาไหม้เชื้อเพลิงเหลวที่มีลักษณะคล้ายคลึงกับ Takami และคณะ [4] โดยวัสดุพรุนทำมาจากตาข่ายสแตนเลส (Stainless wire-net) วางซ้อนทับกันหนา 75 mm พวกเขาทำการวัดอุณหภูมิตามแนวรัศมีและแนวแกนทั้งในห้องเผาไหม้และในชั้นวัสดุพรุน รวมทั้งยังวัดคุณลักษณะของแก๊สไอเสีย (Emission of pollutant) ที่เกิดขึ้น จากผลการศึกษาพบว่า การระเหยตัวของน้ำมันเชื้อเพลิงจะระเหยตัวกลายเป็นไอจนหมดภายในชั้นวัสดุพรุน เพราะได้รับอิทธิพลมาจากการแผ่รังสีความร้อนของเปลวไฟที่เผาไหม้อยู่ด้านล่างของชั้นวัสดุพรุน ซึ่งจะทำหน้าที่ช่วยและส่งเสริมการระเหยตัวกลายเป็นไอของเชื้อเพลิง แต่อย่างไรก็ตามตาข่ายสแตนเลส มักจะเกิดความเสียหายและเสียรูปร่างไปหลังจากหยุดการทดลอง นอกจากนี้ ศ. ดร. สำเริง จักรใจ และ ทีมงาน ได้เสนอแนวทางการเพิ่มประสิทธิภาพการคลุกเคล้าของอากาศหมุนวนกับไอเชื้อเพลิงให้ดียิ่งขึ้นโดยใช้อากาศหมุนวนแบบสามทาง (Three-way swirling air) [6] รวมทั้งได้เสนอการประยุกต์ใช้งานวัสดุพรุนที่ทำหน้าที่เป็นตัวแผ่รังสี (Porous emitter) ที่ติดตั้งด้านล่างเปลวไฟ เป็นเสมือนเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนโดยใช้น้ำเป็นสารทำงาน [7]

จากงานวิจัยที่ผ่านมาดังกล่าว คณะผู้วิจัยได้ทำการศึกษาเชิงทดลองจนสำเร็จเกี่ยวกับหัวพ่นไฟที่ใช้น้ำมันดีเซลเป็นเชื้อเพลิงหลายงานวิจัย [1], [8] โดยอุปกรณ์การทดลองที่สร้างขึ้นมีขนาด วิธีการทดลองคล้ายคลึงกับผลงานของ ศ. ดร. สำเริง จักรใจ และ ทีมงาน [5] สำหรับงานวิจัยนี้จะเลือกใช้เซรามิกซ์ชนิดซิลิคอนคาร์ไบด์ (SiC) แบบรังผึ้งเป็นวัสดุพรุนในหัวพ่นไฟ ซึ่งผลิตโดยสาขาวิชาออกแบบเซรามิกซ์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

แทนตาข่ายสแตนเลส เพื่อป้องกันการเสียหายหลังหยุดการทดลอง และยังคงใช้น้ำมันดีเซลเป็นเชื้อเพลิง เพราะจะได้เป็นข้อมูลเบื้องต้นและแนวทางในการปรับปรุงพัฒนาใช้น้ำมันทางเลือกอื่น ๆ ต่อไป เช่น ไบโอดีเซล หรือน้ำมันที่สกัดได้จากผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร เป็นต้น นอกจากนี้ยังศึกษาถึงอิทธิพลค่าความพรุนของแผ่นเซรามิกซ์แบบรังผึ้งที่มีต่อการเผาไหม้ เพื่อให้มีความเข้าใจมากยิ่งขึ้นในปรากฏการณ์และกลไกการระเหยน้ำมันดีเซล

2. รายการสัญลักษณ์

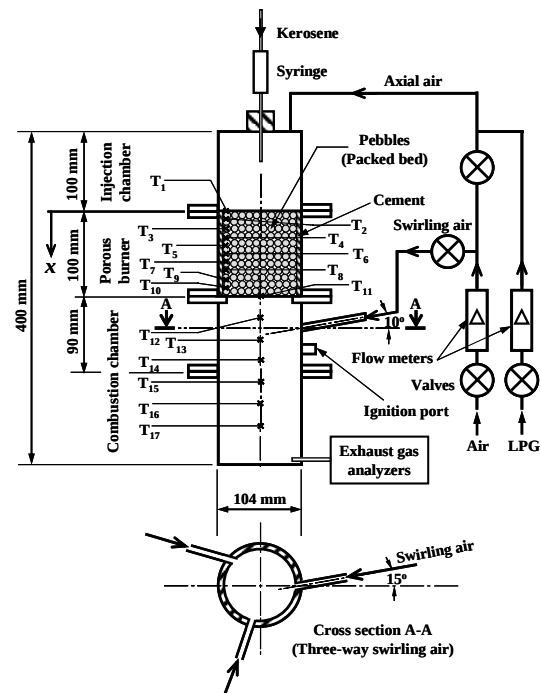
- d เส้นผ่าศูนย์กลางของรูพรุน (= 1.7 mm)
- D เส้นผ่าศูนย์กลางของแผ่นวัสดุพรุนเซรามิกซ์ (= 96 mm)
- n จำนวนรูพรุนบนแผ่นวัสดุพรุนเซรามิกซ์
- ppm หน่วยวัดความเข้มข้นของแก๊สต่อล้านส่วน
- Q_A อัตราการจ่ายอากาศหมุนวน (m/s)
- Q_F อัตราการจ่ายน้ำมันเชื้อเพลิง (kW)
- t ความหนาของแผ่นวัสดุพรุนเซรามิกซ์ (= 10 mm)
- T อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)

3. อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

3.1 อุปกรณ์การทดลอง

รูปที่ 1 แสดงอุปกรณ์การทดลองของหัวพ่นไฟวัสดุพรุนชนิดเซรามิกซ์โดยใช้น้ำมันดีเซลเป็นเชื้อเพลิง ซึ่งแบ่งออกได้ 3 ขอบเขตที่สำคัญ ประกอบไปด้วย ขอบเขตที่หนึ่งเป็นส่วนที่ป้อนน้ำมันเชื้อเพลิง (Injection zone) โดยการหยดน้ำมันจากชุดจ่ายเชื้อเพลิง (Syringe) ลงสู่วัสดุพรุนเซรามิกซ์ ขอบเขตที่สองเป็นการอุ่นน้ำมันเชื้อเพลิงและเกิดการระเหย (Vaporization zone) ภายในชั้นวัสดุพรุน ซึ่งวัสดุพรุนทำมาจากเซรามิกซ์ชนิดซิลิคอนคาร์ไบด์ (SiC) ที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 96 mm. หนา 10 mm วางซ้อนทับกันเป็นจำนวน 10 แผ่น บรรจุอยู่ข้างในท่อสแตนเลส ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกเท่ากับ 104 mm หนา 2 mm เพื่อกันความร้อนสูญเสียสู่ภายนอกและให้แผ่นเซรามิกซ์วางอยู่อย่างเสถียร จึงหล่อปูนทนไฟ (Cement) หนา 2 mm ภายในท่อสแตนเลส ตลอดช่วงที่มีการบรรจุวัสดุพรุน (100 mm) และ

ขอบเขตสุดท้ายคือ ส่วนที่มีการคลุกเคล้าระหว่างอากาศหมุนวนกับไอน้ำมันเชื้อเพลิงและเกิดการเผาไหม้ (Mixing & combustion zone)



รูปที่ 1 แผนผังอุปกรณ์การทดลองของหัวพ่นไฟวัสดุพรุนชนิดเซรามิกซ์โดยใช้น้ำมันดีเซลเป็นเชื้อเพลิง

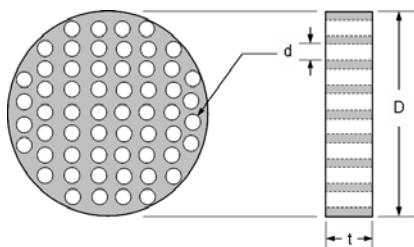
จากส่วนประกอบทั้งหมด หลักการทำงานของหัวพ่นไฟแบบนี้ ได้ดำเนินการเช่นเดียวกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ของคณะผู้วิจัย [1] ซึ่งอธิบายไว้อย่างละเอียดครบถ้วน ดังนั้นจึงไม่ขอกล่าวซ้ำอีกครั้งในบทความนี้ แต่การตรวจวัดอุณหภูมิตามแนวแกนของหัวพ่นไฟจะใช้เทอร์โมคัปเปิลชนิดเอ็น (N-type thermocouples) ที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.1 mm เพิ่มขึ้นจาก 13 ชิ้น เป็น 17 ชิ้น โดยแบ่งตำแหน่งการติดตั้งออกเป็น 2 กลุ่ม ดังนี้ กลุ่มที่หนึ่งเทอร์โมคัปเปิลจำนวน 11 ชิ้น จะติดตั้งตามแนวแกนที่ผิวด้านในของปูนทนไฟ และสัมผัสกับผิวด้านนอกของวัสดุพรุน สาเหตุที่ไม่สอดเทอร์โมคัปเปิลจนทะลุถึงตำแหน่งตรงกลาง เนื่องจากไม่ต้องการให้ขัดขวางการไหลของน้ำมันเชื้อเพลิงผ่านชั้นวัสดุพรุน ซึ่งอาจจะมีผลกระทบต่อกลไกการระเหยได้ สำหรับกลุ่มที่สองเทอร์โมคัปเปิลจำนวน 7 ชิ้น จะติดตั้งในตำแหน่งกึ่งกลางของระบบตามแนวแกน ส่วนการตรวจวัดหาปริมาณของ

แก๊สไอเสีย นั่นคือ ออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x) และ คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) จะใช้เครื่องวิเคราะห์แก๊สไอเสีย (Exhaust analyzer) ยี่ห้อ Testo รุ่น M350 โดยนำเสนอปริมาณ แก๊สไอเสียด้วยการปรับค่าเทียบกับออกซิเจนส่วนเกิน 0 % ใน พื้นฐานแห้ง (Correction by 0% excess oxygen on dry basis)

3.2 การหาความพรุนของแผ่นวัสดุพอร์ซเลน

ค่าความพรุน (ϵ) ของแผ่นพอร์ซเลนในงานวิจัยนี้จะคำนวณ จากโครงสร้างทางกายภาพที่มีลักษณะเป็นแบบรังผึ้ง (Honeycomb) โดยมีขนาดและมิติ ดังนี้ เส้นผ่านศูนย์กลาง (D) มีค่าเท่ากับ 96 mm ความหนา (t) ซึ่งคิดเพียงแผ่นเดียวมีค่า เท่ากับ 10 mm และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพอร์ซเลน (d) คือ 1.7 mm ดังแสดงในรูปที่ 2 ทำให้สามารถคำนวณหา ค่าความพรุนและจำนวนรูพอร์ซเลน (n) ได้จากสมการ

$$\begin{aligned} \text{ค่าความพรุน } (\epsilon) &= \frac{\text{ปริมาตรที่ว่างหรือความพรุน}}{\text{ปริมาตรทึบของวัสดุ}} \\ &= \frac{\left(\frac{\pi}{4}\right) d^2 t n}{\left(\frac{\pi}{4}\right) D^2 t} = \frac{nd^2}{D^2} \end{aligned} \quad (1)$$



รูปที่ 2 แผ่นวัสดุพอร์ซเลนแบบรังผึ้งที่ใช้ในการทดลอง

ซึ่งในงานวิจัยนี้จำนวนรูที่ทำการเจาะในแผ่นพอร์ซเลน ชนิดซิลิคอนคาร์ไบด์ (SiC) คือ 478 และ 703 จากสมการที่ (1) ค่าความพรุนที่ได้คือ 0.15 และ 0.22 ตามลำดับ

3.3 วิธีการทดลอง

การทดลองของหัวพ่นไฟแบบนี้จะดำเนินการเป็นสองขั้นตอน ใหญ่ ดังต่อไปนี้

3.3.1 ขั้นตอนแรกช่วงการอุ่นวัสดุพอร์ซเลน (Preheating period)

ทำการเปิดท่อลมบนในแนวแกน (Axial air) เพียงเล็กน้อย พร้อมทั้งจ่ายแก๊สแอลพีจี (LPG) เข้าสู่ระบบโดยให้อัตราส่วน ทั้งสองมีความเหมาะสมต่อการเผาไหม้ จากนั้นทำการจุด เชื้อเพลิงแก๊สโดยใช้ไฟล่อ (Pilot flame) ที่ตำแหน่งช่องจุดไฟ (Ignition port) เมื่อไฟติดแล้ว รอจนกว่าวัสดุพอร์ซเลนร้อน และมี อุณหภูมิสูงเพียงพอต่อการระเหยของน้ำมันเชื้อเพลิง (ดีเซล) ทำการปิดแก๊ส LPG และป้อนน้ำมันเชื้อเพลิงลงบนวัสดุพอร์ซเลน แต่ลมในแนวแกนยังเปิดอยู่เพื่อไล่แก๊สออกจากชั้นของวัสดุพอร์ซเลน รวมทั้งช่วยให้น้ำมันหรือไอน้ำมันเชื้อเพลิงเคลื่อนตัวได้ อย่างสะดวกขณะผ่านชั้นวัสดุพอร์ซเลน

3.3.2 ขั้นตอนที่สองช่วงการเผาไหม้ (Combustion period)

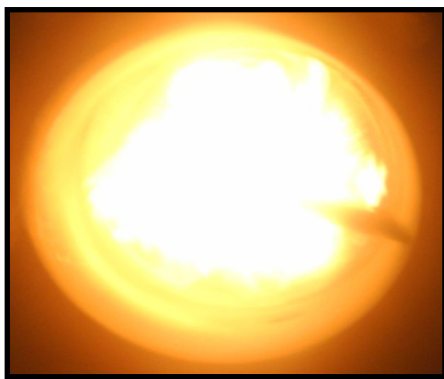
ทำการหยดน้ำมันเชื้อเพลิงลงบนวัสดุพอร์ซเลน ด้วยชุดควบคุม เชื้อเพลิง (Syringe) ในปริมาณที่เหมาะสมต่อการจุดติดไฟ พร้อมกับค่อย ๆ ลดลมในแนวแกนจนปิดสนิท ขณะเดียวกัน เปิดอากาศหมุนวนเข้าสู่ระบบทางด้านข้าง ทำให้อากาศและ ไอน้ำมันที่ระเหยออกมาจากชั้นวัสดุพอร์ซเลนผสมคลุกเคล้ากัน อย่างรุนแรง และเกิดเปลวไฟที่บริเวณดังกล่าว เมื่อระบบเกิด การเผาไหม้เรียบร้อยแล้ว ทำการปรับอัตราการหยดน้ำมันและ อัตราการไหลของอากาศหมุนวนตามสัดส่วนที่ต้องการศึกษา รอจนกระทั่งการเผาไหม้อยู่ในสภาวะเสถียร (Steady state) ทำการบันทึกข้อมูลการทดลอง ได้แก่ อุณหภูมิตามแนวแกน, อัตราการป้อนเชื้อเพลิง (Fuel input load, Q_F), อัตราการจ่าย อากาศหมุนวน (Flow rate of swirling air, Q_A) และมลภาวะที่ เกิดจากการเผาไหม้ (NO_x , CO และ O_2)

4. ผลและการวิเคราะห์

4.1 เติบโตภาพเปลวไฟของหัวพ่นไฟวัสดุพอร์ซเลน

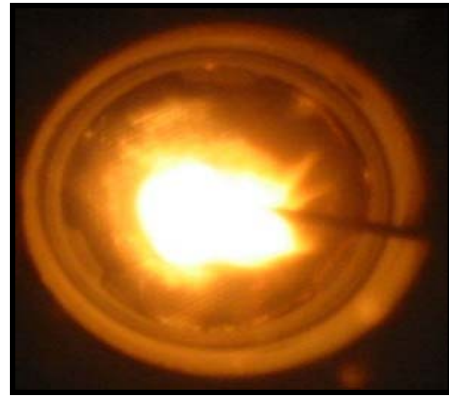
จากการทดลอง พบว่าการเผาไหม้ของน้ำมันดีเซลจะเกิดขึ้น ระหว่างบริเวณด้านล่างชั้นวัสดุพอร์ซเลนพอร์ซเลน กับอากาศ หมุนวนแบบสามทาง เนื่องจากบริเวณนี้ไอน้ำมันดีเซล จะระเหยผ่านชั้นวัสดุพอร์ซเลนออกมาผสมกับอากาศหมุนวน อย่างรุนแรงจนเป็นเนื้อเดียวกัน และมีอุณหภูมิสูงเพียงพอ ต่อการจุดติดไฟ ซึ่งลักษณะเปลวไฟของหัวพ่นไฟพอร์ซเลนที่มี

ความพรุน 0.15 และ 0.22 ได้แสดงไว้ในรูปที่ 3 และ 4 ตามลำดับ จากรูปที่ 3 เปลวไฟที่สังเกตได้จะมีลักษณะปั่นป่วนและหมุนวนเกือบทั่วทั้งหน้าตัดภายในของท่อสแตนเลส ซึ่งความร้อนจากเปลวไฟจะถ่ายเทให้กับผนังของห้องเผาไหม้ และย้อนกลับไปยังวัสดุพรุนโดยการแผ่รังสี ซึ่งวัสดุพรุนจะดูดซับพลังงานความร้อนเอาไว้เพื่อใช้ในการระเหยตัวของน้ำมันดีเซล เป็นไปตามหลักการหมุนเวียนพลังงานของ Weinberg [9] อย่างไรก็ตามก็ยังคงมีความร้อนบางส่วนสูญเสียไปกับแก๊สไอเสียเช่นกัน



รูปที่ 3 ลักษณะเปลวไฟของหัวพ่นไฟเซรามิกซ์ กรณี $\varepsilon = 0.15$ ที่สภาวะ $Q_F = 4.84 \text{ kW}$ และ $Q_A = 0.875 \text{ m/s}$

แต่หากพิจารณาเปลวไฟของเซรามิกซ์ที่มีความพรุน 0.22 ซึ่งแสดงในรูปที่ 4 จะมีลักษณะกระจุกหมุนวนปั่นป่วนอยู่บริเวณกึ่งกลางหน้าตัด ซึ่งลักษณะเช่นนี้อาจเนื่องมาจากน้ำมันเชื้อเพลิงไม่สามารถระเหยได้หมด เพราะวัสดุพรุนเซรามิกซ์ที่มีค่าความพรุนสูงกว่าจะมีเนื้อของวัสดุในการดูดซับความร้อนจากเปลวไฟได้น้อยกว่า แม้จะมีพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างวัสดุพรุนกับไอน้ำมันเชื้อเพลิงที่มากกว่าก็ตาม นั้นแสดงให้เห็นว่าอิทธิพลของการนำความร้อน (Conductive heat transfer) ภายในเซรามิกซ์แบบรังผึ้ง จะเป็นอีกตัวแปรหนึ่งที่มีความสำคัญไม่ยิ่งหย่อนไปกว่าการแผ่รังสีความร้อน (Radiative heat transfer) ในการหมุนเวียนพลังงานของหัวพ่นไฟแบบนี้

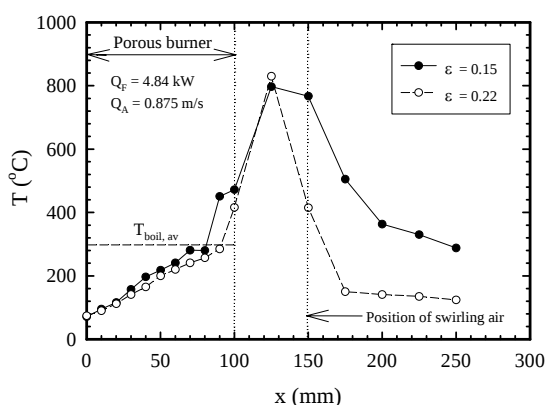


รูปที่ 4 ลักษณะเปลวไฟของหัวพ่นไฟเซรามิกซ์ กรณี $\varepsilon = 0.22$ ที่สภาวะ $Q_F = 4.84 \text{ kW}$ และ $Q_A = 0.875 \text{ m/s}$

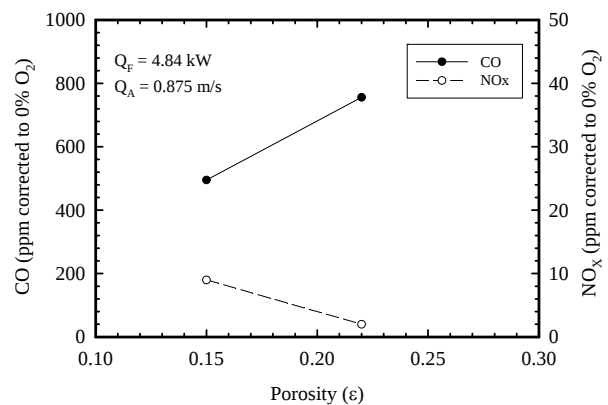
4.2 อิทธิพลของค่าความพรุน (ε)

รูปที่ 5 แสดงอิทธิพลค่าความพรุนของเซรามิกซ์แบบรังผึ้งต่อโครงสร้างทางความร้อนที่แสดงในรูปการกระจายตัวของอุณหภูมิตามแนวแกนภายในของอุปกรณ์การทดลอง ซึ่งในที่นี้ขอเรียกว่าโครงสร้างทางอุณหภูมิ (Temperature profile) และเป็นผลการทดลองที่สภาวะการจ่ายเชื้อเพลิง (Fuel input load, Q_F) เท่ากับ 4.84 kW และอัตราการจ่ายอากาศหมุนวน (Flow rate of swirling air, Q_A) เท่ากับ 0.875 m/s ตามหลักการของคุณสมบัติค่าความพรุนแล้ว วัสดุพรุนที่มีค่าความพรุนมากจะมีพื้นที่ผิวสัมผัสในการถ่ายเทความร้อนเพื่อเปลี่ยนสถานะของน้ำมันให้กลายเป็นไอได้สูงตามไปด้วย แต่ในการทดลองนี้เมื่อความพรุนเพิ่มจาก 0.15 เป็น 0.22 กลับให้ผลตรงกันข้ามสามารถอธิบายได้ว่าการอุ่นน้ำมันเชื้อเพลิงตลอดชั้นวัสดุพรุนจะใช้การถ่ายเทความร้อนในรูปแบบการนำมากกว่าการแผ่รังสี เนื่องจากอยู่ในสภาวะที่มีอุณหภูมิไม่สูงมากนัก ประมาณ $400 - 500^\circ\text{C}$ ดังนั้นโครงสร้างทางอุณหภูมิของแผ่นเซรามิกซ์แบบรังผึ้งกรณี $\varepsilon = 0.15$ จะมีค่าสูงกว่ากรณี $\varepsilon = 0.22$ ซึ่งเป็นปรากฏการณ์จริงของการนำความร้อน เพราะที่ความพรุนต่ำ ๆ จะมีปริมาตรหรือเนื้อวัสดุมากกว่า จึงเกิดการกักเก็บความร้อนได้ดีกว่า ส่วนวัสดุพรุนบริเวณผิวด้านล่าง ($x = 100 \text{ mm}$) จะได้รับการแผ่รังสีมาจากเปลวไฟเป็นไปตามหลักการแผ่รังสีของวัสดุพรุน ทำให้ที่ตำแหน่งนี้อุณหภูมิทั้งสองความพรุนมีค่าใกล้เคียงกัน ($\varepsilon = 0.15$ จะสูงกว่า $\varepsilon = 0.22$ เล็กน้อย)

แต่สูงกว่าจุดระเหยของน้ำมันดีเซล ($240 - 370^{\circ}\text{C}$) [10] จึงกล่าวได้ว่าวัสดุพอร์เซรามิกซ์แบบรังผึ้งทั้งสองค่าความพรุนสามารถทำให้น้ำมันดีเซลระเหยกลายเป็นไอน้ำมันอย่างสมบูรณ์ก่อนออกจากชั้นวัสดุพอร์ ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณ CO ที่วัดได้จากการเผาไหม้ ดังแสดงในรูปที่ 6 จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามค่าความพรุน เนื่องจากปริมาณ CO ที่ลดลงจะแสดงถึงการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ (Completed combustion) ยิ่งขึ้นและอาจอธิบายเพิ่มเติมได้ด้วยอุณหภูมิสูงสุดซึ่งเป็นตำแหน่งของเปลวไฟเสถียร (Flame stability) และการกระจายอุณหภูมิตลอดความยาวของหัวพ่นไฟ (โครงสร้างทางอุณหภูมิ) กล่าวคือ ในการทดลองทั้งสองค่าความพรุน อุณหภูมิสูงสุดล้วนอยู่ที่ตำแหน่ง $x = 125 \text{ mm}$ และอุณหภูมิสูงสุดของ $\varepsilon = 0.22$ มีค่าสูงกว่า $\varepsilon = 0.15$ โครงสร้างทางอุณหภูมิกรณี $\varepsilon = 0.22$ จะเป็นรูปสามเหลี่ยมเพื่อลดการสูญเสียความร้อน (Heat loss) และรักษาเสถียรภาพเปลวไฟ จึงทำให้เปลวไฟเกิดอยู่ระหว่างผิวด้านล่างวัสดุพอร์กับตำแหน่งการจ่ายอากาศหมุนวนเท่านั้น หมายความว่าเชื้อเพลิงอาจถูกเผาไหม้จนหมดในตำแหน่งนี้ แต่ในกรณีที่ $\varepsilon = 0.15$ การเผาไหม้เชื้อเพลิงจะลามกว้างไปยังบริเวณแก๊สไอเสีย (Flue gas) ก่อให้เกิดโครงสร้างทางความร้อนแบบสี่เหลี่ยมคางหมู แสดงให้เห็นว่าการเผาไหม้ของกรณี $\varepsilon = 0.15$ อาจไม่สมบูรณ์เท่ากับกรณี $\varepsilon = 0.22$ ส่วนปริมาณ NO_x ดังรูปที่ 6 ก็มีแนวโน้มลดลงตามอุณหภูมิสูงสุดของการเผาไหม้



รูปที่ 5 โครงสร้างทางอุณหภูมิตามแนวแกนภายในหัวพ่นไฟ ที่สภาวะ $Q_F = 4.84 \text{ kW}$ และ $Q_A = 0.875 \text{ m/s}$



รูปที่ 6 อิทธิพลของค่าความพรุนที่มีต่อ CO และ NO_x ที่สภาวะ $Q_F = 4.84 \text{ kW}$ และ $Q_A = 0.875 \text{ m/s}$

4.3 อิทธิพลของอัตราการจ่ายอากาศหมุนวน (Q_A)

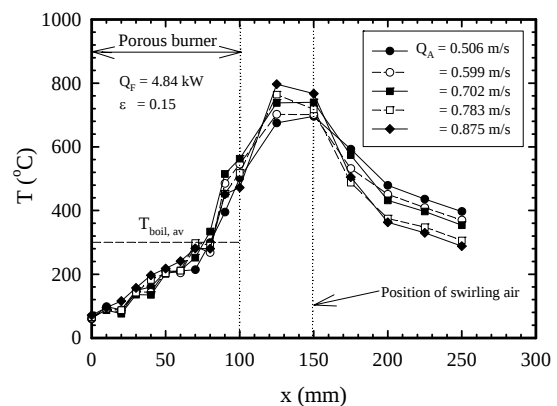
รูปที่ 7 แสดงอิทธิพลของอัตราการจ่ายอากาศหมุนวน (Q_A) ต่อโครงสร้างทางอุณหภูมิ ที่สภาวะ $\varepsilon = 0.15$ และ $Q_F = 4.84 \text{ kW}$ พบว่าเมื่อเพิ่มค่า Q_A อุณหภูมิภายในวัสดุพอร์ ระยะ $0 \leq x \leq 60 \text{ mm}$ จะมีแนวโน้มแทบไม่มีการเปลี่ยนแปลง แต่เมื่อระยะ $x \geq 60 \text{ mm}$ จนไปถึงทางออกหรือผิวหน้าด้านล่างของชั้นวัสดุพอร์ โครงสร้างทางอุณหภูมิจะสูงขึ้นสำหรับ Q_A เพิ่มขึ้นจาก 0.506 ถึง 0.702 m/s แต่จะลดต่ำลงเมื่อ Q_A เพิ่มขึ้นต่อไปอีกจาก 0.783 ถึง 0.875 m/s ซึ่งผลดังกล่าวอธิบายได้ด้วยโครงสร้างทางอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในขอบเขตการผสมและการเผาไหม้ของหัวพ่นไฟ กล่าวคือ ตำแหน่งอุณหภูมิสูงสุดที่วัดได้ (เปลวไฟเสถียร) สำหรับกรณี Q_A เท่ากับ 0.506 ถึง 0.702 m/s จะอยู่ที่ตำแหน่ง $x = 150 \text{ mm}$ แต่กรณี Q_A เท่ากับ 0.783 และ 0.875 m/s อุณหภูมิสูงสุดที่วัดได้กลับอยู่ที่ตำแหน่ง $x = 125 \text{ mm}$ เนื่องมาจากเปลวไฟที่เสถียรพยายามเคลื่อนตัวเข้าหาวัสดุพอร์เพื่อคลุกเคล้าผสมกับไอน้ำมันเชื้อเพลิงตามอากาศหมุนวนที่เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม ด้วยปริมาณอากาศที่จ่ายให้กับระบบเพิ่มขึ้น ทำให้การเผาไหม้ได้รับอากาศส่วนเกิน (Excess air) มากเกินความจำเป็น ในกรณี Q_A สูง ๆ เพื่อลดความร้อนสูญเสีย และรักษาสมดุลพลังงานของเปลวไฟ จึงเกิดการเผาไหม้เฉพาะในบริเวณที่มีการคลุกเคล้าระหว่างอากาศกับไอเชื้อเพลิงเท่านั้น ทำให้โครงสร้างทางอุณหภูมิเป็นสี่เหลี่ยมคางหมูแคบ ๆ หรือมี

ความยาวของเปลวไฟ (Flame length) สั้น ๆ ด้วยเหตุนี้ โครงสร้างทางอุณหภูมิของ Q_A ต่ำ ๆ จึงกระจายเป็น รูปสี่เหลี่ยมคางหมูกว้าง ๆ ตลอดช่วงการเผาไหม้และช่วง ขาออกของแก๊สไอเสีย ดังนั้นโครงสร้างทางอุณหภูมิกรณี Q_A มีค่าจาก 0.506 ถึง 0.702 m/s จึงมีความสามารถถ่ายเทความร้อนไปยังวัสดุพูนได้ดีกว่าโครงสร้างทางอุณหภูมิกรณี Q_A มีค่าจาก 0.783 ถึง 0.875 m/s เพราะการกระจายอุณหภูมิที่ ดีกว่าตลอดขอบเขตการผสมและเผาไหม้ นอกจากนี้หาก พิจารณาปริมาณ CO ที่ได้จาก การเผาไหม้ พบว่ามีแนวโน้มที่ เพิ่มขึ้นเล็กน้อยตามค่า Q_A อยู่ระหว่าง 400 ถึง 500 ppm ยังเป็น เหตุผลสนับสนุนลักษณะโครงสร้างทางอุณหภูมิที่เกิดขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 8 เนื่องจากปริมาณ CO ที่เพิ่มขึ้น จะแสดง การเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ยิ่งขึ้น แต่ก็อาจกล่าวได้ว่าไม่ค่อย แตกต่างกันมากนัก เพราะการเผาไหม้ได้รับเชื้อเพลิงใน ปริมาณเท่ากัน สำหรับปริมาณ NO_x (รูปที่ 8) จะมีแนวโน้มลด ต่ำลงตามค่าอุณหภูมิสูงสุดของการเผาไหม้

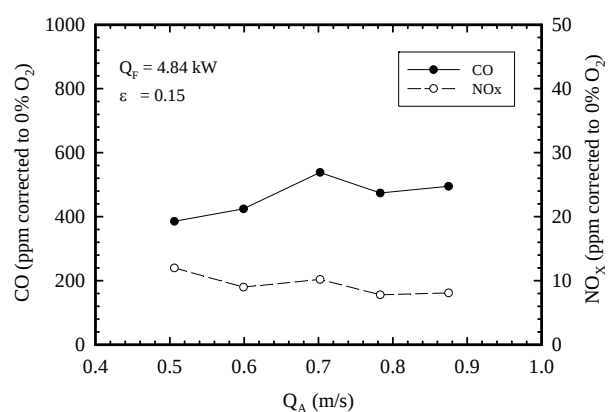
4.4 อิทธิพลของอัตราการจ่ายเชื้อเพลิง (Q_F)

จากรูปที่ 9 จะแสดงอิทธิพลของการจ่ายน้ำมันเชื้อเพลิง (Q_F) ต่อโครงสร้างทางอุณหภูมิ ที่สภาวะ $\varepsilon = 0.15$ และ $Q_A = 0.875$ m/s พบว่าเมื่อเพิ่มค่า Q_F แนวโน้มของโครงสร้าง ทางอุณหภูมิจะสูงและกว้างขึ้น เนื่องจากเมื่อระบบได้รับ เชื้อเพลิงมากขึ้นจะทำให้เกิดการระเหยของไอน้ำมันเพิ่มขึ้น ทำให้สามารถเกิดการเผาไหม้ได้ดียิ่งขึ้น ส่งผลให้อุณหภูมิของ เปลวไฟมีค่าสูงตาม Q_F ที่เพิ่ม และเปลวไฟก็แผ่รังสีกลับไปยัง วัสดุพูนได้มาก จึงทำให้ภายในชั้นวัสดุพูนมีแนวโน้ม อุณหภูมิที่สูงขึ้น และโครงสร้างทางอุณหภูมิช่วงการเผาไหม้ที่ สภาวะ $Q_F = 3.87$ kW เป็นรูปสามเหลี่ยม แต่ที่ Q_F เท่ากับ 4.07 และ 4.84 kW เป็นรูปสี่เหลี่ยมคางหมู เนื่องจากเมื่อเพิ่มปริมาณ เชื้อเพลิงเข้าไปให้กับระบบ เปลวไฟจะเลื่อนตำแหน่งออกจาก วัสดุพูนเข้าไปใกล้ตำแหน่งที่จ่ายอากาศหมุนวนเพราะ ไอน้ำมันที่เพิ่มขึ้นจะกระจายลามออกไป เพื่อให้เกิด การเผาไหม้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น ส่งผลให้อุณหภูมิสูงสุดตลอดแนว ความยาวของขอบเขตการผสมและการเผาไหม้ เกิดเปลวไฟ ปั่นป่วนรุนแรงเกือบเต็มพื้นที่หน้าตัดของท่อหัวพ่นไฟ ทำให้

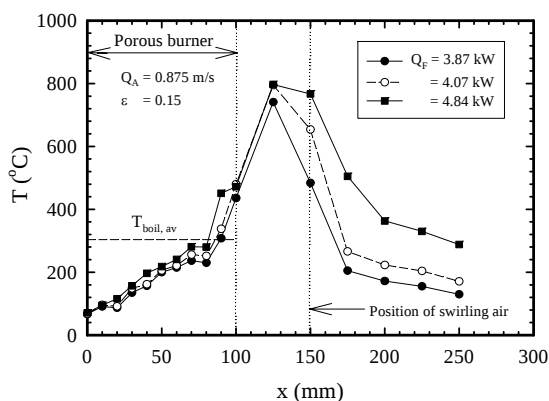
อุณหภูมิไอเสียสูงตามไปด้วย สำหรับปริมาณ CO ตามรูปที่ 10 มีปริมาณลดลงเมื่อ Q_F เพิ่มขึ้นจาก 3.87 เป็น 4.07 kW เนื่องจากการเผาไหม้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น แต่หากเพิ่ม Q_F ต่อไปเป็น 4.84 kW ปริมาณ CO ที่ได้กลับมีค่าเพิ่มขึ้น อาจเพราะมีเชื้อเพลิงมากจนไม่สามารถระเหยได้หมด ทำให้ สัดส่วนการผสมกันระหว่างไอน้ำมันกับอากาศหมุนวน ไม่เหมาะสม เกิดการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ สำหรับปริมาณ NO_x ที่ได้ในการทดลองจะมีแนวโน้มสูงขึ้นเล็กน้อยตาม Q_F ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากอิทธิพลของอุณหภูมิสูงสุดที่เพิ่มขึ้นของ การเผาไหม้ ดังรูปที่ 10



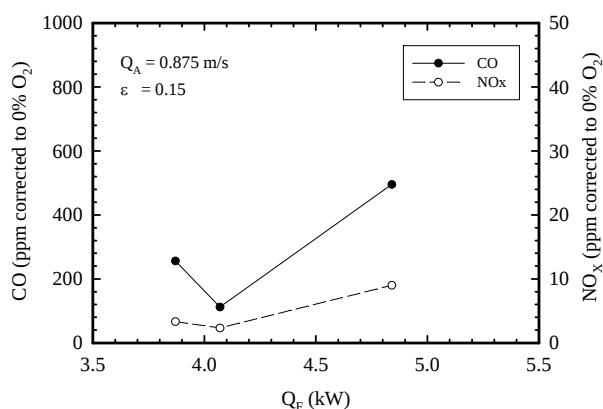
รูปที่ 7 โครงสร้างทางอุณหภูมิตามแนวแกนภายในหัวพ่นไฟ ที่สภาวะ $\varepsilon = 0.15$ และ $Q_F = 4.84$ kW



รูปที่ 8 อิทธิพลของอัตราการจ่ายอากาศหมุนวนที่มีต่อ CO และ NO_x ที่สภาวะ $\varepsilon = 0.15$ และ $Q_F = 4.84$ kW



รูปที่ 9 โครงสร้างทางอุณหภูมิตามแนวแกนภายในหัวพ่นไฟ
ที่สภาวะ $\varepsilon = 0.15$ และ $Q_A = 0.875$ m/s



รูปที่ 10 อิทธิพลของอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงที่มีต่อ CO และ
NO_x ที่สภาวะ $\varepsilon = 0.15$ และ $Q_A = 0.875$ m/s

5. สรุปผล

จากการศึกษาอิทธิพลต่าง ๆ ที่มีผลต่อการเผาไหม้ของหัวพ่นไฟเซรามิกซ์แบบริงไฟฟ้โดยใช้ น้ำมันดีเซลเป็นเชื้อเพลิงสามารถสรุปผลการศึกษาดังต่อไปนี้

1) เปลวไฟจะเสถียรที่ตำแหน่งบริเวณการจ่ายอากาศหมุนวน โดยในกรณี $\varepsilon = 0.15$ เปลวไฟจะปั่นป่วนเกือบเต็มพื้นที่หน้าตัด แต่กรณี $\varepsilon = 0.22$ เปลวไฟจะกระจุกตัวอยู่บริเวณกึ่งกลางหน้าตัดเท่านั้น เพราะการถ่ายเทความร้อนที่มีความสำคัญต่อการระเหยของน้ำมันดีเซลในชั้นวัสดุพ่นคือการนำความร้อน มากกว่าการแผ่รังสี อย่างไรก็ตามการเผาไหม้กรณี $\varepsilon = 0.22$ อาจมีความสมบูรณ์มากกว่า

2) น้ำมันดีเซลสามารถระเหยได้หมดก่อนออกจากชั้นวัสดุพ่นเซรามิกซ์แบบริงไฟฟ้ เนื่องจากได้รับพลังงานที่ส่งถ่ายมาจากการแผ่รังสีของเปลวไฟ ทำให้มีอุณหภูมิสูงประมาณ 400 - 500 °C ซึ่งสูงกว่าจุดระเหยของน้ำมันดีเซล (240 - 370 °C) โดยเฉพาะในตำแหน่งใกล้กับผิวด้านล่างของวัสดุพ่น

3) โครงสร้างทางอุณหภูมิของหัวพ่นไฟวัสดุพ่นเซรามิกซ์แบบริงไฟฟ้ จะเปลี่ยนจากสามเหลี่ยมเป็นสี่เหลี่ยมคางหมูที่กว้างขึ้น เมื่อค่า ε และ Q_A ลดลง แต่เมื่อปริมาณ Q_F ลดลง โครงสร้างทางอุณหภูมิจะเปลี่ยนไปในทางตรงกันข้าม และยังพบว่าตำแหน่งอุณหภูมิสูงสุดหรือเปลวไฟจะเคลื่อนตัวออกจากผิวด้านล่างวัสดุพ่นเมื่อ Q_A สูงขึ้น

4) ปริมาณแก๊สไอเสียของ CO ที่ตรวจวัดได้จะขึ้นอยู่กับอิทธิพลของ Q_F และ ε เป็นหลัก แต่จะไม่ค่อยเปลี่ยนแปลงมากนักกับ Q_A สำหรับปริมาณแก๊สไอเสีย NO_x มีค่าค่อนข้างต่ำ และมีการเปลี่ยนแปลงบ้างเล็กน้อยตามค่าอุณหภูมิสูงสุดของการเผาไหม้ในสภาวะต่าง ๆ

6. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้เขียนบทความขอขอบพระคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน (มทร.อีสาน) ที่ได้สนับสนุนเงินทุนเพื่อใช้ในการดำเนินงานวิจัยครั้งนี้จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี และขอขอบพระคุณสาขาวิชาออกแบบเซรามิกซ์ มทร.อีสาน ที่ช่วยเหลืออนุเคราะห์ในการจัดเตรียมวัสดุเซรามิกซ์เพื่อผลิตเป็นวัสดุพ่น นอกจากนี้ขอขอบคุณ นายอดิศักดิ์ พิมพ์ทรัพย์ นายโอภาส โหตระไวศยะ และ นายสุรสิทธิ์ โทณศิษย์ นักศึกษาสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มทร.อีสาน ที่ได้ช่วยเก็บข้อมูลในการทดลองครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

[1] บัณฑิต ถกตาม, “หัวพ่นไฟแบบวัสดุพ่นโดยใช้น้ำมันดีเซลเป็นเชื้อเพลิง”, วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา, ปีที่ 21, ฉบับที่ 2, พ.ศ. 2553, หน้า 20 - 31.

- [2] Kaplan, M. and Hall, M.J., "The Combustion of Liquid Fuels within a Porous Media Radiant Burner", *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 11, No. 1, 1995, pp.13-20.
- [3] Tseng, C.-J., and Howell, J.R., "Combustion of Liquid Fuels in Porous Radiant Burner", *Combustion Science and Technology*, Vol. 112, 1996, pp. 141-161.
- [4] Takami, H., Suzuki, T., Itaya, Y., and Hasatani, M., "Performance of Flammability of Kerosene and NO_x Emission in the Porous Burner", *Fuel*, Vol. 77, No.3, 1998, pp. 165-171.
- [5] Jugjai, S., Wongpanit, N., Laoketkan, T., and Nokkaew, S., "The Combustion of Liquid Fuel using a Porous Medium", *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 26, 2002, pp. 15-23.
- [6] Jugjai, S. and Polmart, N., "Enhancement of Evaporation and Combustion of Liquid Fuels through Porous Media", *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 27, 2003, pp. 901-909.
- [7] Jugjai, S. and Phothiya, C., "Liquid Fuel-Fired Porous Combustor-Heater", *Fuel*, Vol. 86, 2007, pp. 1062-1068.
- [8] Jugjai, S. and Polmart, N., "Enhancement of Evaporation and Combustion of Liquid Fuels through Porous Media", *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 27, 2003, pp. 901-909.
- [8] Amatachaya, P. and Krittacom, B., "The Combustion of Liquid Fuels Using a Packed Bed", *Proceeding of International Conference on Power Engineering (ICOPE-09)*, Kobe, JAPAN, November 13-16, 2009.
- [9] Weinberg, F., "Heat-Recirculating Burners: Principles and Some Recent Developments", *Combustion Science and Technology*, Vol. 121, 1996, pp. 3-22.
- [10] Annamalai, K. and Puri, I. K., "Combustion Science and Engineering", CRC Press Taylor & Francis Group, New York, 2007, Chapter 4.