



การเผาไหม้น้ำมันดีเซลในหัวพ่นไฟวัสดุพอร์ซันชนิดเม็ดกลมอัดแน่นที่มีโครงสร้าง แบบเนื้อเดียวและกึ่งเนื้อเดียว

บัณฑิต กฤตาคม^{1*} พิพัฒน์ อมตฉายา¹ คมเพชร อินลา¹ และสาริต ทูลไธสง²

Combustion of diesel oil on the packed-bed sphere porous burner structured as homogeneous and semi- homogeneous

Bundit Krittacom,^{1*} Pipatana Amatachaya,¹ Kompet Inla,¹ and Sarthit Toolthaisong²

¹ห้องปฏิบัติการวิจัยการพัฒนาในเทคโนโลยีของวัสดุพอร์ซัน, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

²สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล, คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน, นครราชสีมา

*ผู้ติดต่อ ผศ.ดร.บัณฑิต กฤตาคม, อีเมล: bundit.kr@rmuti.ac.th

¹Development in Technology of Porous Materials Research Laboratory (DITO-Lab), Rajamangala University of Technology Isan Nakhonratchasima

²Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering and Architecture, Rajamangala University of Technology Isan, Nakhonratchasima

*Corresponding author: Asst. Prof. Dr.Bundit Krittacom, E-mail:bundit.kr@rmuti.ac.th

บทคัดย่อ

การเผาไหม้น้ำมันดีเซลในหัวพ่นไฟวัสดุพอร์ซันได้ถูกทำการทดลอง โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษากลไกการระเหยและพฤติกรรม การเผาไหม้น้ำมันเชื้อเพลิง ในการทดลองวัสดุพอร์ซันที่ใช้จะมีลักษณะโครงสร้างเป็นเม็ดกลมอัดแน่นที่มีการจัดเรียงตัวแตกต่างกัน 2 รูปแบบ ได้แก่ แบบเนื้อเดียวซึ่งเลือกใช้เซรามิกส์ ชนิดคอร์ดิไรท์ที่มีค่าความพรุน (ϕ) เท่ากับ 0.395 และอีกแบบคือ แบบกึ่งเนื้อเดียวจะเลือกใช้ หินตุ้ปลา ($\phi = 0.391$) น้ำมันเชื้อเพลิงป้อนเข้าสู่ระบบด้วยการหยดจากด้านบนผ่านชั้นวัสดุพอร์ซันเกิดการระเหยกลายเป็นไอ นำไปสู่ การเผาไหม้บริเวณด้านล่างชั้นวัสดุพอร์ซัน เพื่ออธิบายถึงกลไกการระเหยและพฤติกรรมของการเผาไหม้น้ำมันดีเซล อุณหภูมิตลอดแนว ความยาวของหัวพ่นไฟถูกตรวจวัดและนำเสนอในรูปของโครงสร้างทางอุณหภูมิ รวมทั้งแก๊สไอเสียก็จะตรวจวัดที่ตำแหน่งทางขาออกของระบบ จากการศึกษาพบว่าเมื่อเพิ่มอัตราการจ่ายอากาศหมุนวน (Q_A) โครงสร้างทางอุณหภูมิมีแนวโน้มลดลงในวัสดุพอร์ซันทั้ง 2 รูปแบบ แต่มี แนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอัตราการจ่ายน้ำมันเชื้อเพลิง (Q_F) และได้ข้อสังเกตที่น่าสนใจคือ โครงสร้างทางอุณหภูมิของหัวพ่นไฟแบบหินตุ้ปลา จะมีค่าสูงกว่า แบบเซรามิกส์คอร์ดิไรท์ นอกจากนี้ยังพบว่าอุณหภูมิที่ตำแหน่งผิวล่างชั้นวัสดุพอร์ซันจะสูงกว่าอุณหภูมิจุดเดือด (T_b) ของน้ำมันดีเซลทุกสภาวะการทดลอง แสดงให้เห็นว่าน้ำมันดีเซลระเหยได้หมดในชั้นวัสดุพอร์ซัน สำหรับปริมาณ CO และ NO_x ที่ปล่อย ออกมาจากหัวพ่นไฟวัสดุพอร์ซันชนิดเม็ดกลมอัดแน่นของงานวิจัยนี้ อยู่ในเกณฑ์ที่ต่ำยอมรับได้

คำสำคัญ: น้ำมันดีเซล หัวพ่นไฟวัสดุพอร์ซัน วัสดุพอร์ซันชนิดเม็ดกลมอัดแน่น โครงสร้างทางอุณหภูมิ

Abstract

The combustion of diesel oil in the porous burner was examined to investigate evaporation mechanism and combustion behavior of the liquid fuel. In experiment, two different structures, i.e., homogeneous and semi- homogeneous models, of packed-bed sphere porous media were used. The first one, homogeneous structure, was employed by Cordierite ceramic having porosity (ϕ) of 0.395. On the other hand, the pebble ($\phi = 0.391$) was chosen as semi-homogeneous structure. The fuel was supplied drop-wise from the top through the porous burner and evaporated in the porous media followed by the combustion on the bottom side. To clarify the evaporation and combustion phenomenon of diesel oil, an axial profile of temperature along the burner length was measured and reported in the form of temperature profile. The pollutant-emission characteristics were also monitored at the burner exit. From the study, it was found that the temperature profile of the both cases decreased with the flow rate of swirling air (Q_A) increasing. But, the temperature profile explicitly increased with the rate of fuel input (Q_F).

Remarkably, the temperature profile of the pebble case was higher than those of the Cordierite ceramic case. In addition, the temperature at the bottom surface of porous matrix was higher than boiling temperature of diesel oil in all experimental conditions of the present study. The levels of CO and NO_x in the present packed-bed sphere porous burner were acceptable range.

Keywords: Diesel oil, Porous burner, Packed-bed sphere porous materials, Temperature profile

บทนำ

โดยทั่วไปหัวพ่นไฟ (Burner) ที่ใช้เชื้อเพลิงเหลว (Liquid fuels) จะมีวิธีการเผาไหม้น้ำมันเชื้อเพลิงโดยใช้หัวฉีดความดันสูง (High-pressure atomizer) กระทำกับน้ำมันเชื้อเพลิงให้แตกตัวเป็นฝอยละออง (Liquid droplets) ที่ละเอียดมาก ๆ เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวต่อปริมาตรน้ำมันเชื้อเพลิงให้สูงขึ้นซึ่งเป็นการเพิ่มปริมาณการถ่ายเทความร้อนจากแก๊สร้อนโดยรอบสู่ผิวละอองน้ำมันทำให้อัตราการระเหยกลายเป็นไอสูงขึ้นทำให้ได้การเผาไหม้ที่สมบูรณ์สามารถนำความร้อนไปใช้อย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตามวิธีดังกล่าวยังมีจุดอ่อน คือมีความจำเป็นต้องใช้หัวฉีดแรงดันสูงเพื่อทำให้เกิดการแตกตัวเป็นฝอยละอองน้ำมันเชื้อเพลิง ห้องเผาไหม้ต้องมีขนาดใหญ่เพื่อรองรับการฟุ้งกระจายของละอองน้ำมันเชื้อเพลิงส่งผลให้ค่าความเข้มของการเผาไหม้ (Combustion intensity) มีค่าต่ำ และยังคงคำนึงถึงคุณลักษณะของละอองน้ำมัน (Ballistic characteristics) อีกด้วย นอกจากนี้ห้องเผาไหม้ยังต้องรักษาการกระจายของอุณหภูมิที่สูงตลอดห้องเผาไหม้เพื่อให้แน่ใจว่าละอองน้ำมันเชื้อเพลิงสามารถระเหยกลายเป็นไอและผสมกับอากาศแล้วเกิดการเผาไหม้ได้อย่างเต็มที่ จากข้อเสียดังกล่าว วัสดุพูนจึงเป็นอีกแนวคิดที่นำมาประยุกต์ใช้ในการเผาไหม้เชื้อเพลิงเหลวดังกล่าว ซึ่งวัสดุพูนมีลักษณะเด่น คือ มีอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวสัมผัสต่อปริมาตรสูง ส่งผลให้มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนมาก นอกจากนี้วัสดุพูนยังมีความสามารถในการแผ่รังสีความร้อนสูงเมื่อเทียบกับวัสดุทั่วไป สามารถเปลี่ยนรูปพลังงานความร้อนระหว่างการพาและการแผ่รังสีความร้อนได้เป็นอย่างดี

จากลักษณะเด่นของวัสดุพูนดังกล่าว นักวิจัยหลายกลุ่ม (Kaplan & Hall, 1995; Takami M. et al., 1998) ได้นำเอาวัสดุพูนมาประยุกต์ใช้กับการเผาไหม้เชื้อเพลิงเหลวด้วยการสเปรย์เชื้อเพลิงเหลว พร้อมทั้งป้อนอากาศเข้าไปในชั้นวัสดุพูนพบว่าละอองน้ำมันเชื้อเพลิงสามารถระเหยและผสมกับอากาศเกิดการเผาไหม้ในชั้นวัสดุพูนได้เอง (Self sustaining combustion) จากการศึกษาเชิงทดลองที่ได้

ทำให้เชื่อได้ว่าการเผาไหม้เชื้อเพลิงเหลวโดยใช้วัสดุพูนนี้จะดีกว่าการสเปรย์แบบปกติ (Conventional open spray flame) เพราะลักษณะการเผาไหม้ที่สมบูรณ์กว่า ผลจากการเผาไหม้มีค่าต่ำ อย่างไรก็ตามการป้อนเชื้อเพลิงยังคงต้องพึ่งพาหัวฉีดแรงดันสูง เพื่อพ่นให้เป็นฝอยละออง ซึ่งยุ่งยากต่อการนำไปใช้ด้วยเหตุนี้จึงมีแนวคิดใหม่ในการเผาไหม้เชื้อเพลิงเหลวโดยใช้การหยดเชื้อเพลิงลงบนวัสดุพูนแทนการสเปรย์เข้าไปในวัสดุพูน ซึ่งเชื้อเพลิงยังคงระเหยภายในชั้นวัสดุพูน และผสมกับอากาศบริเวณทางออกของชั้นวัสดุพูนแล้วเกิดการเผาไหม้ ดังแสดงในผลการศึกษานักวิจัยหลายกลุ่ม ได้แก่ Takami et al. (Takami et al., 1998) ศ.ดร.สำเริง จักรใจ และคณะ (Jugjai et al., 2002; Jugjai & Polmart, 2003; Jugjai & Phothiya, 2006) รวมทั้งงานวิจัยที่ผ่านมาของทีมงานผู้เขียนบทความนี้ (Amatachaya & Krittacom, 2009; Krittacom et al., 2011) เป็นต้น จากการศึกษาเชิงการทดลองของการเผาไหม้แบบใหม่นี้ พบว่าสามารถเผาไหม้เชื้อเพลิงเหลวได้อย่างสมบูรณ์มีผลกระทบบ้าง ห้องเผาไหม้มีขนาดเล็กเมื่อเทียบกับแบบปกติ และไม่จำเป็นต้องใช้หัวฉีดความดันสูงทำให้ง่ายต่อการนำไปใช้งาน ซึ่งวัสดุพูนในระบบการเผาไหม้เชื้อเพลิงแบบหยดนี้จะมีความสำคัญมากในการส่งเสริมการระเหยแสดงพฤติกรรมเป็นตัวกระจายเชื้อเพลิงเหลวและอุณหภูมิที่ต่ำ เพราะให้อุณหภูมิสูงเกิน Leiden frost temperature ทั้งยังมีกลไกการแผ่รังสีความร้อนและการนำความร้อนตลอดทั้งชั้นวัสดุพูน นำไปสู่การจุดติดไฟได้เองพร้อมช่วยส่งเสริมการเผาไหม้

จากหลักการดังกล่าวกลุ่มผู้วิจัยได้เคยทำการศึกษาเชิงทดลองความเป็นไปได้ในการใช้หินตุ้ปลา (Pebbles) เป็นวัสดุพูนในหัวพ่นไฟที่มีน้ำมันดีเซลเป็นเชื้อเพลิง (Amatachaya & Krittacom, 2009; Krittacom et al., 2011) ซึ่งผลการศึกษา ก็ประสบความสำเร็จอย่างดี อย่างไรก็ตามการทดลองดังกล่าว ยังไม่อาจชี้ชัดได้ถึงลักษณะพฤติกรรมที่แท้จริงของเปลวไฟภายในชั้นหินตุ้ปลา เนื่องจากหินตุ้ปลาที่ถูกคัดเลือกมาทำวัสดุพูนนั้นแม้จะคัดเลือกอย่างพิถีพิถันให้มีขนาดใกล้เคียงและเท่ากันเสมือนเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous material)



แต่ในความเป็นจริงก็เป็นเรื่องยากเพราะหินดับลาเหล่านี้เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติยากต่อการควบคุมลักษณะรูปร่าง ดังนั้นวัตถุประสงค์หลักของงานวิจัยนี้ จึงมุ่งเน้นที่จะศึกษาถึงคุณลักษณะการเผาไหม้ของเปลวไฟและกลไกการระเหยเชื้อเพลิงจากอิทธิพลของโครงสร้างการจัดเรียงตัวในชั้นวัสดุพอรุนเพื่อให้มีความเข้าใจอย่างลึกซึ้งยิ่งขึ้น กลุ่มผู้วิจัยได้ทำการสร้างหัวพ่นไฟหรืออุปกรณ์การทดลองที่มีขนาดวิธีการทดลองคล้ายคลึงกับงานวิจัยที่ผ่านมา (Amatachaya & Knittacom, 2009) แต่มีการศึกษาเพิ่มเติมโดยนำเซรามิกส์เม็ดชนิดคอร์ติไรท์ที่มีขายทั่วไปในเชิงพาณิชย์มาเป็นวัสดุพอรุนทดลองอีกชนิดเพื่อให้รู้และเข้าใจอย่างแท้จริงเกี่ยวกับหัวพ่นไฟชนิดนี้ รวมทั้งสร้างข้อมูลที่สามารถประยุกต์ใช้งานได้จริงในทางอุตสาหกรรมต่อไป

รายการสัญลักษณ์

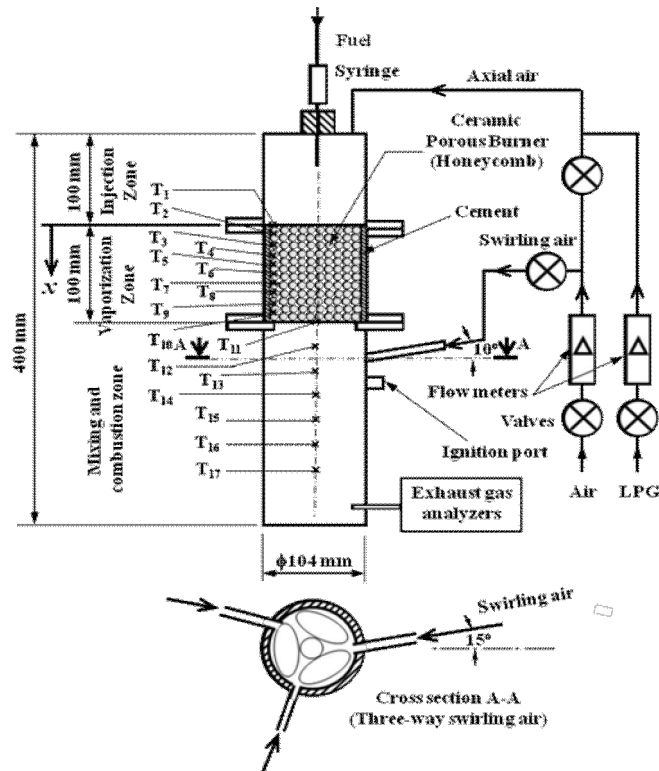
CO_2	คาร์บอนไดออกไซด์ (ppm)
d	เส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยของเม็ดกลมอัดแน่น (cm)
NO_x	ไนโตรเจนออกไซด์ (ppm)
ppm	หนึ่งหน่วยต่อล้านส่วน
Q_A	อัตราการจ่ายอากาศหมุนวน (l/min)
Q_F	อัตราการจ่ายน้ำมันเชื้อเพลิง (cc/min)
T_b	อุณหภูมิจุดเดือด ($^{\circ}\text{C}$)
T	อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)
T_{Max}	อุณหภูมิสูงสุดของการเผาไหม้ ($^{\circ}\text{C}$)
V_S	ปริมาตรช่องว่าง (cm^3)
V_T	ปริมาตรทั้งหมด (cm^3)

x	ความยาวของหัวพ่นไฟ (mm)
ϕ	ค่าความพอรุน

วัสดุอุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์การทดลอง

รูปที่ 1 แสดงอุปกรณ์การทดลองของหัวพ่นไฟวัสดุพอรุนชนิดเม็ดกลมอัดแน่นโดยใช้น้ำมันดีเซลเป็นเชื้อเพลิง ซึ่งแบ่งออกได้ 3 ขอบเขตที่สำคัญ ประกอบไปด้วยขอบเขตที่หนึ่งเป็นส่วนที่ป้อนน้ำมันเชื้อเพลิง (Injection zone) โดยการหยदन้ำมันจากชุดจ่ายเชื้อเพลิง (Syringe) ลงสู่วัสดุพอรุนเม็ดกลมอัดแน่น ขอบเขตที่สองเป็นการอุ่นน้ำมันเชื้อเพลิงและเกิดการระเหย (Vaporization zone) ภายในชั้นวัสดุพอรุนหรือเป็นตำแหน่งของวัสดุพอรุนอาจเรียกขอบเขตนี้ว่า หัวพ่นไฟวัสดุพอรุน (Porous burner) ซึ่งวัสดุพอรุนที่ทำการทดลองมี 2 แบบ คือ เซรามิกส์คอร์ติไรท์ และหินดับลาที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ย (d) คือ 0.75 cm และ 0.70 cm ตามลำดับ บรรจุอยู่ข้างในท่อสแตนเลสที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกเท่ากับ 104 mm และหนาเท่ากับ 2 mm นอกจากนี้เพื่อกันความร้อนสูญเสียสู่ภายนอกจึงหล่อปูนทนไฟ (Cement) หนา 0.5 cm ภายในท่อสแตนเลสตลอดช่วงที่มีการบรรจุวัสดุพอรุน (100 mm) ขอบเขตสุดท้าย คือ ส่วนที่มีการคลุกเคล้าระหว่างอากาศหมุนวนกับไอน้ำมันเชื้อเพลิงและเกิดการเผาไหม้ (Mixing and combustion zone)



รูปที่ 1 แผนผังอุปกรณ์การทดลองของหัวพ่นไฟวัสดุพ่นชนิดเม็ดกลมอัดแน่นโดยใช้น้ำมันดีเซลเป็นเชื้อเพลิง

จากส่วนประกอบทั้งหมดของหัวพ่นไฟแบบนี้จะมีหลักการทำงานคือ เมื่อน้ำมันเชื้อเพลิงถูกหยดลงมาจากด้านบนสุดของระบบ เข้าสู่ผิวด้านบนของชั้นวัสดุพ่นในขอบเขตที่หนึ่ง น้ำมันเชื้อเพลิงจะไหลผ่านชั้นวัสดุพ่น (ขอบเขตที่สอง) และจะระเหยกลายเป็นไอจนหมดในชั้นวัสดุพ่นนี้ หลังจากนั้นน้ำมันเชื้อเพลิงจะไหลลงมาสู่บริเวณทางออกของชั้นวัสดุพ่นเข้าสู่ขอบเขตที่สาม ผสมกับอากาศที่ป้อนเข้ามาทางด้านข้างของห้องเผาไหม้ในลักษณะหมุนวนแบบสามทาง (Three-way swirling air flow) เกิดการผสมคลุกเคล้ากันอย่างรุนแรงนำไปสู่การจุดติดไฟ (Ignition) และเผาไหม้ในที่สุด เปลวไฟที่เกิดขึ้นจะแผ่รังสีความร้อนย้อนกลับไปยังชั้นวัสดุพ่นทำให้มีความร้อนหมุนเวียนภายในระบบเป็นวัฏจักรเกิดการเผาไหม้อย่างต่อเนื่อง トラบที่มีเชื้อเพลิงป้อนหยดลงมาบนชั้นวัสดุพ่นด้วยเหตุนี้เพื่อให้เข้าใจถึงปรากฏการณ์การเผาไหม้กลไกการระเหยของเชื้อเพลิงและการส่งถ่ายความร้อนระหว่างชั้นวัสดุพ่นกับเปลวไฟที่เกิดขึ้น อุณหภูมิตามแนวแกนและปริมาณแก๊สไอเสียจึงถูกตรวจวัดโดยอุณหภูมิ

จะตรวจวัดด้วยเทอร์โมคัปเปิลชนิดเอ็น (N-type thermocouples) จำนวน 17 ชิ้น ที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกเท่ากับ 1 mm และแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม ตามตำแหน่งการติดตั้งในระบบได้ดังนี้ กลุ่มที่หนึ่งเทอร์โมคัปเปิลจำนวน 10 ชิ้น จะติดตั้งตามแนวแกนที่ผิวด้านในของปูนทนไฟ และสัมผัสกับผิวด้านนอกของวัสดุพ่น สาเหตุที่ไม่สอดเทอร์โมคัปเปิลจนทะลุถึงตำแหน่งตรงกลาง เนื่องจากไม่ต้องการให้ขัดขวางการไหลของน้ำมันเชื้อเพลิงผ่านชั้นวัสดุพ่น ซึ่งอาจจะมีผลกระทบต่อกลไกการระเหยได้ สำหรับกลุ่มที่สองเทอร์โมคัปเปิลจำนวน 7 ชิ้น จะติดตั้งในตำแหน่งกึ่งกลางของระบบตามแนวแกน สำหรับการตรวจวัดหาปริมาณแก๊สไอเสียที่เกิดขึ้น จะตรวจวัดที่ด้านล่างของท่อสแตนเลส เนื่องจากเป็นตำแหน่งที่แก๊สไอเสียไหลออกจากกระบอก โดยทำการตรวจวัดหาปริมาณออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x) และคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ด้วยเครื่องวิเคราะห์แก๊สไอเสีย (Exhaust analyzer) ยี่ห้อ Testo รุ่น M350 นำเสนอค่าที่วัดได้โดยปรับค่าเทียบกับออกซิเจนส่วนเกิน 0 % ในพื้นฐานแห้ง (Correction by 0% excess oxygen on dry basis)



การทดลองหาค่าความพรุน

วิธีการหาค่าความพรุน (Porosity, ϕ) ของวัสดุพรุนแบบอัดเม็ดกลมอัดแน่น มีขั้นตอนดังต่อไปนี้ นำวัสดุพรุนบรรจุลงในภาชนะรูปทรงกระบอกที่มีความสูง 10 cm และเส้นผ่าศูนย์กลางภายในเท่ากับ 9.5 cm จนเต็มภาชนะเติมน้ำให้เต็มภาชนะหรือถึงระดับด้านบนของผิววัสดุพรุนทิ้งไว้ประมาณ 10 นาที เพื่อให้ น้ำซึมเข้าไปในเนื้อวัสดุพรุนแล้วเทน้ำออกจากภาชนะ จากนั้นตวงน้ำที่ทราบปริมาตรแน่นอนด้วยภาชนะตวง ในที่นี้คือ บีกเกอร์ (Beaker) แล้วทำการเติมน้ำจากบีกเกอร์อีกครั้งให้เต็มภาชนะจนถึงระดับผิวด้านบนของวัสดุพรุน อ่านค่าปริมาตรน้ำที่เติมลงไปจากบีกเกอร์ ปริมาตรน้ำที่เติมลงไปนี้ คือ ปริมาตรช่องว่างที่น้ำเข้าไปแทนที่ได้ (Void-space volume, V_s) นำปริมาตรน้ำนี้ไปหารกับปริมาตรทรงกระบอกภายในทั้งหมด (Total or bulk volume, V_T) จะสามารถคำนวณหาค่าความพรุน (ϕ) ได้ดังสมการ

$$\text{Porosity } (\phi) = \frac{V_s}{V_T} \quad (1)$$

ซึ่งในงานวิจัยนี้เลือกใช้เซรามิกส์คอร์ติไรท์และหินตุ้ปลาที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยเท่ากับ 0.75 และ 0.70 cm ตามลำดับ ซึ่งจากการทดลองหาค่าความพรุนซ้ำๆ หลายครั้งพบว่าเซรามิกส์คอร์ติไรท์และหินตุ้ปลา มีค่า V_s เป็น 351 และ 373 cm^3 ดังนั้นจากสมการ (1) ค่า ϕ ที่ได้คือ 0.45 และ 0.52 ตามลำดับ

วิธีการทดลอง

การทดลองของหัวฟ่นไฟแบบนี้จะดำเนินการเป็น 2 ขั้นตอนใหญ่ๆ ดังต่อไปนี้

1. ขั้นตอนแรกช่วงการอุ่นวัสดุพรุน (Preheating period) ทำการเปิดท่อลมบนในแนวแกน (Axial air) เพียงเล็กน้อย พร้อมทั้งจ่ายแก๊สแอลพีจี (LPG) เข้าสู่ระบบ โดยให้อัตราส่วนทั้งสองมีความเหมาะสมต่อการเผาไหม้ จากนั้นทำการจุดเชื้อเพลิงแก๊สโดยใช้ไฟล่อ (Pilot flame) ที่ตำแหน่งช่องติดไฟ (Ignition port) เมื่อเกิดการเผาไหม้แล้ว รอจนกว่าวัสดุพรุนมีอุณหภูมิสูงเพียงพอต่อการระเหยของน้ำมันเชื้อเพลิงหรือสูงกว่าอุณหภูมิจุดเดือด (Boiling temperature, T_b) ของน้ำมันดีเซล ทำการปิดแก๊ส LPG และป้อนน้ำมันเชื้อเพลิงลงบนวัสดุพรุน แต่ลมในแนวแกนยังคงเปิดอยู่เพื่อไล่แก๊สออก

จากชั้นของวัสดุพรุน รวมทั้งช่วยให้น้ำมันหรือไอน้ำมันเชื้อเพลิงเคลื่อนตัวได้อย่างสะดวกขณะผ่านชั้นวัสดุพรุน

2. ขั้นตอนที่สองช่วงการเผาไหม้ (Combustion period) ทำการหยดน้ำมันเชื้อเพลิงลงบนวัสดุพรุน (Q_F) ด้วยชุดควบคุมเชื้อเพลิง (Syringe) ในปริมาณที่เหมาะสมต่อการจุดติดไฟพร้อมกับค่อยๆ ลดลมในแนวแกนจนปิดสนิท ขณะเดียวกันเปิดอากาศหมุนวนเข้าสู่ระบบทางด้านข้าง (Q_A) ทำให้อากาศและไอน้ำมันที่ระเหยออกมาจากชั้นวัสดุพรุนผสมคลุกเคล้ากันอย่างรุนแรง และเกิดเปลวไฟที่บริเวณดังกล่าวเมื่อระบบเกิดการเผาไหม้เรียบร้อยแล้ว ทำการปรับ Q_A ตามสัดส่วนที่ต้องการศึกษา รอจนกระทั่งการเผาไหม้อยู่ในสภาวะคงที่ (Steady state) ทำการบันทึกข้อมูลการทดลอง ได้แก่ อุณหภูมิตามแนวแกน, อัตราการป้อนเชื้อเพลิง (Fuel input load, Q_F), อัตราการจ่ายอากาศหมุนวนสามทาง (Three way swirling air, Q_A) และมลภาวะที่เกิดการเผาไหม้ ในที่นี้จะนำเสนอปริมาณของ NO_x และ CO

สภาวะและเงื่อนไขการทดลอง

การทดลองเพื่อศึกษาการเผาไหม้น้ำมันดีเซลในหัวฟ่นไฟวัสดุพรุนชนิดเม็ดกลมอัดแน่น จะจ่ายน้ำมัน (Q_F) ทั้งหมด 5 ค่า คือ 1.11, 1.68, 2.26, 3.36 และ 6.1 cc/min ตามลำดับ สำหรับอากาศหมุนวน (Q_A) จะจ่ายเริ่มต้นที่ 140 l/min และเพิ่มขึ้นทีละ 20 l/min ไปจนกว่าการเผาไหม้ของหัวฟ่นไฟจะดับ (Flame extinction) แต่ไม่เกิน 450 l/min เนื่องจากเป็นข้อจำกัดของอุปกรณ์วัดอัตราการไหลของอากาศในงานวิจัยครั้งนี้

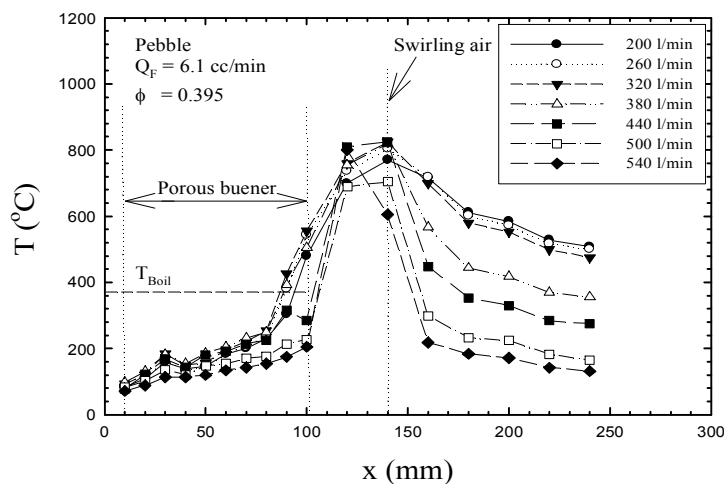
ผลการศึกษา

อิทธิพลอัตราการจ่ายอากาศหมุนวนสามทาง (Q_A)

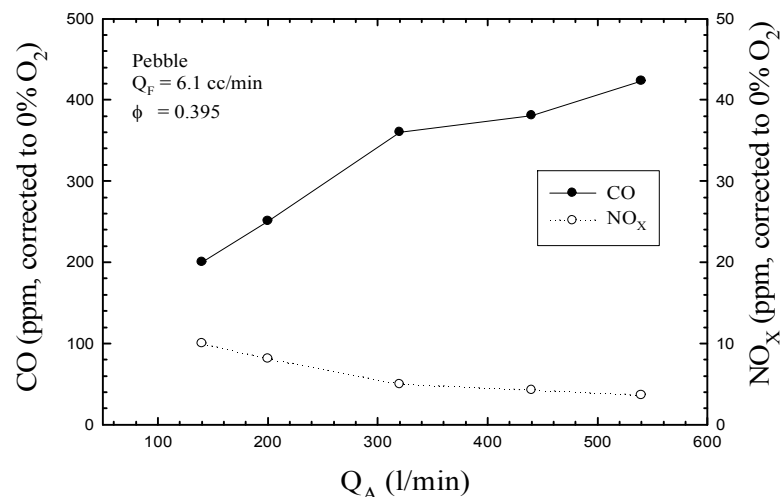
รูปที่ 2 แสดงอิทธิพลของอัตราการจ่ายอากาศหมุนวนสามทาง (Q_A) ต่อโครงสร้างทางความร้อน ซึ่งแสดงอยู่ในรูปการกระจายตัวของอุณหภูมิตามแนวแกนภายในอุปกรณ์การทดลอง ในที่นี้จะเรียกว่า โครงสร้างทางอุณหภูมิ (Temperature profile) และเป็นการทดลองที่สภาวะการเผาไหม้ของน้ำมันดีเซล $Q_F = 6.1 \text{ cc/min}$ ในวัสดุพรุนชนิดหินตุ้ปลาที่มีค่า $\phi = 0.395$ พบว่า โครงสร้างทางอุณหภูมิมีแนวโน้มลดลงเมื่อค่า Q_A เพิ่มขึ้น ปรากฏการณ์เช่นนี้สามารถอธิบายได้ตามความเป็นจริงของอากาศส่วนเกิน

(Excess air) เนื่องจากระบบได้รับอากาศเกินความจำเป็น ส่งผลให้อัตราส่วนผสมกับไอน้ำมันดีเซลเกิดเป็นสภาวะการเผาไหม้ไอดีบาง (Lean combustion) ย่อมทำให้อุณหภูมิต่ำลง ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณ CO ที่เกิดขึ้นดังแสดงในรูปที่ 3 กล่าวคือ ปริมาณ CO สูงขึ้นตามค่า Q_A ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ สำหรับปริมาณ NO_x ที่เกิดขึ้นจะมีค่าต่ำกว่า 10 ppm เพราะระดับอุณหภูมิการเผาไหม้มีค่าต่ำ และมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณ Q_A ที่

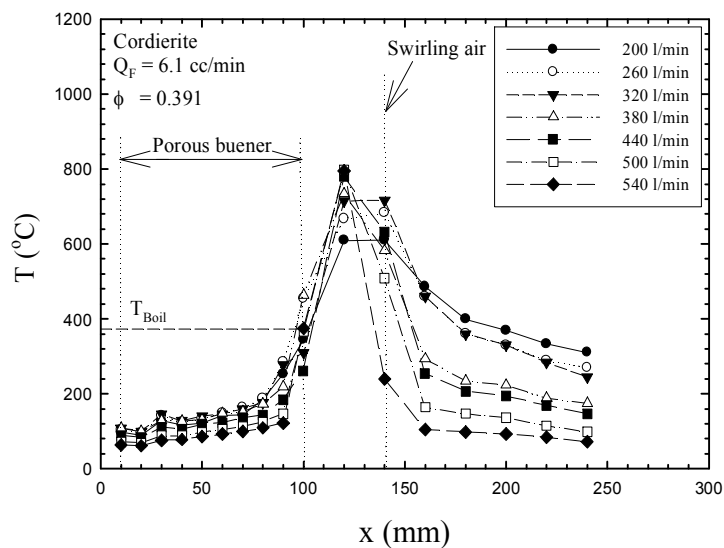
เพิ่มขึ้น เนื่องจากอุณหภูมิการเผาไหม้ที่ลดต่ำลง นอกจากนี้ยังสังเกตได้ว่าตำแหน่งอุณหภูมิสูงสุด (Maximum temperature, T_{Max}) ที่วัดได้ ในที่นี้เปรียบเสมือนเป็นตำแหน่งของเปลวไฟ (Flame position) จะเคลื่อนตัวจากตำแหน่งอากาศหมุนวน (Swirling air) ย้อนกลับไปยังชั้นวัสดุพูน ($x = 100$ mm) ตามปริมาณ Q_A ที่เพิ่มขึ้น อธิบายได้ว่าเป็นการรักษาเสถียรภาพของเปลวไฟเพื่อลดการสูญเสียความร้อนสู่บรรยากาศของการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ของกรณี Q_A สูง ๆ



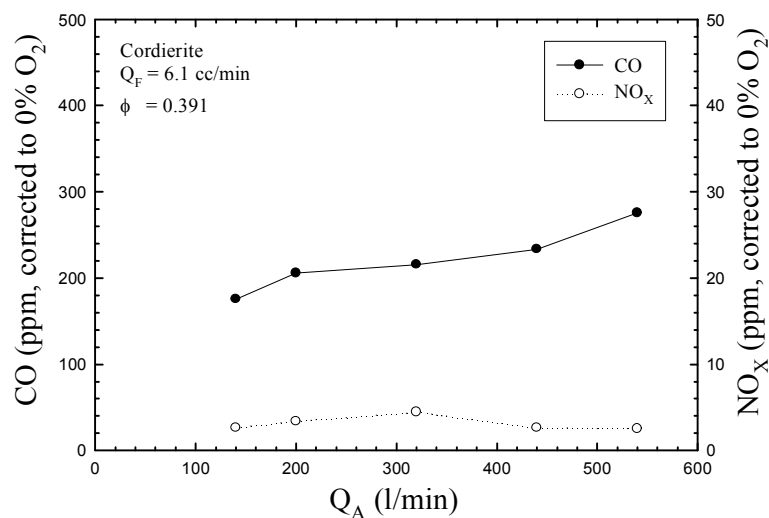
รูปที่ 2 โครงสร้างทางอุณหภูมิตามแนวแกนของหัวพ่นไฟวัสดุพูนชนิดหินตุ้ปลา (กึ่งเนื้อเดียว) ที่สภาวะ $Q_F = 6.1$ cc/min และ $\phi = 0.395$



รูปที่ 3 อิทธิพลของ Q_A ที่มีต่อ CO และ NO_x สำหรับ การเผาไหม้น้ำมันดีเซลในหินตุ้ปลา (กึ่งเนื้อเดียว) ที่สภาวะ $Q_F = 6.1$ cc/min และ $\phi = 0.395$



รูปที่ 4 โครงสร้างทางอุณหภูมิตามแนวแกนของหัวพ่นไฟวัสดุพูนชนิดเซรามิกส์คอร์ดีไรท์ (เนื้อเดียว) ที่สภาวะ $Q_F = 6.1$ cc/min และ $\phi = 0.391$



รูปที่ 5 อิทธิพลของ Q_A ที่มีต่อ CO และ NO_x สำหรับการเผาไหม้น้ำมันดีเซลใน เซรามิกส์คอร์ดีไรท์ (เนื้อเดียว) ที่สภาวะ $Q_F = 6.1$ cc/min และ $\phi = 0.391$

รูปที่ 4 แสดงอิทธิพลของ Q_A ต่อโครงสร้างทางอุณหภูมิ ที่สภาวะการเผาไหม้ของน้ำมันดีเซล $Q_F = 6.1$ cc/min ในวัสดุพูนชนิดเซรามิกส์คอร์ดีไรท์ $\phi = 0.391$ พบว่า โครงสร้างทางอุณหภูมิมีแนวโน้มลดต่ำลงเมื่อค่า Q_A เพิ่มขึ้น ซึ่งอธิบายได้ด้วยอากาศส่วนเกิน (Excess air) เช่นเดียวกับ กรณีหินตุ้ปลา (รูปที่ 2) และผลที่ได้สอดคล้องกับปริมาณ

CO ดังแสดงในรูปที่ 5 กล่าวคือ CO เพิ่มขึ้น เมื่อ Q_A เพิ่มขึ้น สำหรับปริมาณ NO_x ที่เกิดขึ้น จะมีค่าต่ำกว่า 10 ppm เพราะระดับอุณหภูมิการเผาไหม้มีค่าต่ำ และมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยตามปริมาณ Q_A ที่เพิ่มขึ้นเป็นลักษณะคล้ายคลึงกับ กรณีหินตุ้ปลา นอกจากนี้ตำแหน่งของ T_{max} หรือตำแหน่งของ เปลวไฟ จะเคลื่อนตัวจากตำแหน่ง Swirling air ย้อนกลับไป

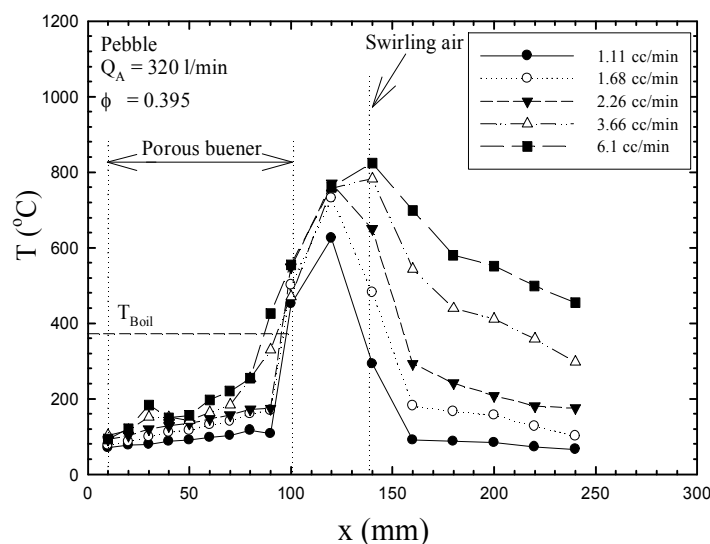
ยังชั้นวัสดุพูนตามปริมาณ Q_A ที่เพิ่มขึ้น เป็นลักษณะคล้ายคลึงกับกรณีหินตุ้ปลา ซึ่งอธิบายได้ด้วยเหตุผลของการรักษาเสถียรภาพของเปลวไฟและเพื่อลดการสูญเสียความร้อนสู่บรรยากาศของการเผาไหม้

นอกจากนี้หากเปรียบเทียบโครงสร้างทางอุณหภูมิของหินตุ้ปลา (รูปที่ 2) กับเซรามิกส์คอร์ติไรท์ (รูปที่ 4) จะพบว่าโครงสร้างทางอุณหภูมิของหินตุ้ปลามีค่าสูงกว่าเนื่องจากการจัดเรียงตัวของเม็ดหินตุ้ปลาจะมีโครงสร้างแบบไม่สม่ำเสมอเป็นเนื้อเดียว จึงทำให้เชื้อเพลิงและไอน้ำมันที่ระเหยเมื่อไหลในชั้นวัสดุพูนหินตุ้ปลาจะเกิดการไหลที่ช้ากว่าแบบเนื้อเดียวสม่ำเสมอที่เกิดจากการจัดเรียงตัวของเม็ดเซรามิกส์คอร์ติไรท์ ส่งผลให้เวลาในการแลกเปลี่ยนพลังงานระหว่างน้ำมันกับวัสดุพูนของกรณีหินตุ้ปลา (กึ่งเนื้อเดียว) มีอย่างเพียงพอ ก่อให้เกิดการระเหยกลายเป็นไอน้ำมันได้มากกว่าวัสดุพูนกรณีเม็ดเซรามิกส์คอร์ติไรท์ และนำไปสู่การเผาไหม้ที่สมบูรณ์และดีกว่า

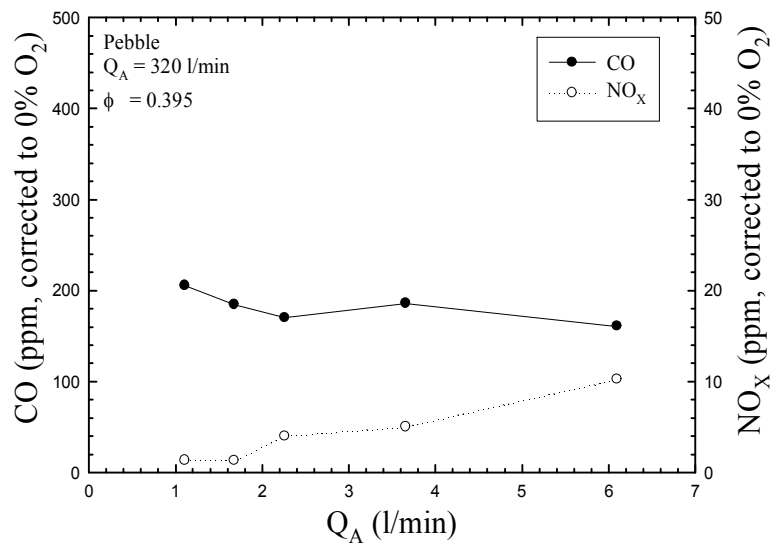
อิทธิพลของอัตราการจ่ายน้ำมันเชื้อเพลิง (Q_F)

รูปที่ 6 แสดงอิทธิพลของการจ่ายน้ำมันเชื้อเพลิงดีเซล (Q_F) ต่อโครงสร้างทางอุณหภูมิที่สภาวะ $Q_A = 320$ l/min

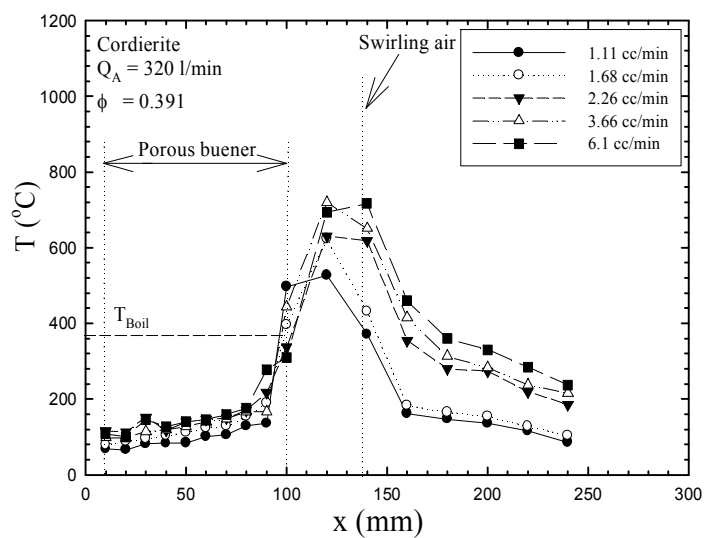
ในวัสดุพูนชนิดหินตุ้ปลาซึ่งมีค่า $\phi = 0.395$ พบว่า โครงสร้างทางอุณหภูมิมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตลอดความยาวในแนวแกนของอุปกรณ์ทดลองตามปริมาณ Q_F ที่จ่ายให้แก่ระบบ เนื่องจากระบบได้รับพลังงานหรือปริมาณเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้น ส่งผลให้มีการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ขึ้น พร้อมทั้งยังมีการแผ่รังสีความร้อนจากเปลวไฟและจากผนังห้องเผาไหม้ย้อนกลับไปยังวัสดุพูนมากขึ้น เป็นการช่วยส่งเสริมการระเหยตัวและเป็นการอุ่นน้ำมันดีเซล ซึ่งจะสอดคล้องกับปริมาณ CO ที่มีแนวโน้มลดลงตามค่า Q_F ที่เพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 7 สำหรับปริมาณ NO_x ที่เกิดขึ้น มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามค่า Q_F เพราะมีระดับอุณหภูมิการเผาไหม้ที่สูงขึ้นอย่างไรก็ตามปริมาณ NO_x จะมีค่าไม่เกิน 100 ppm นอกจากนี้ตำแหน่งของเปลวไฟ (T_{Max}) จะเคลื่อนตัวจากบริเวณใต้ชั้นวัสดุพูน ($x = 125$ mm) เข้าสู่ตำแหน่ง Swirling air ตามปริมาณ Q_F ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากระบบได้รับเชื้อเพลิงมากขึ้นส่งผลให้มีไอน้ำมันระเหยและไหลมาจากชั้นวัสดุพูนมากขึ้นตามไปด้วย ทำให้ไอน้ำมันไหลไปผสมกับอากาศเพื่อให้ได้สัดส่วนที่เพียงพอต่อการเผาไหม้ ด้วยเหตุนี้ความยาวของเปลวไฟ (Flame length) จึงขยายกว้างออกไปจนถึงตำแหน่ง Swirling air



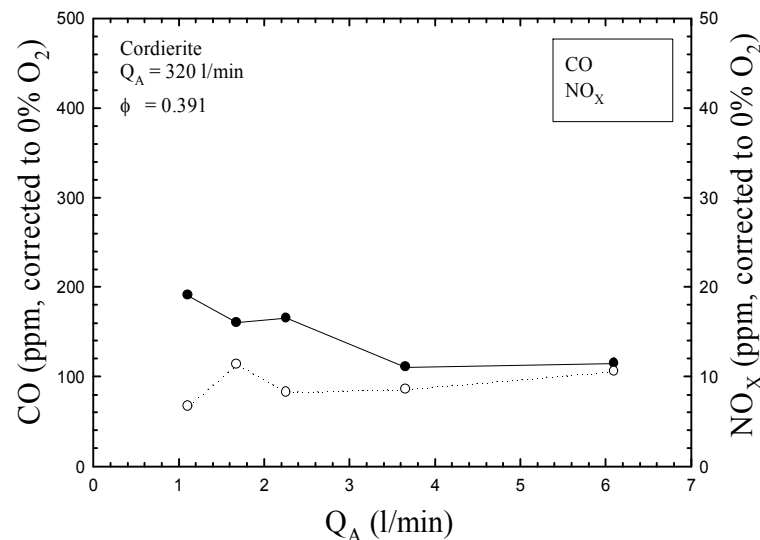
รูปที่ 6 โครงสร้างทางอุณหภูมิตามแนวแกนของหัวพ่นไฟวัสดุพูนชนิดหินตุ้ปลา (กึ่งเนื้อเดียว) ที่สภาวะ $Q_A = 140$ l/min และ $\phi = 0.395$



รูปที่ 7 อิทธิพลของ Q_F ที่มีต่อ CO และ NO_x สำหรับการเผาไหม้น้ำมันดีเซลในหินตุ้ปลา (กิ่งเนื้อเดียว) ที่สภาวะ $Q_A = 140 \text{ l/min}$ และ $\phi = 0.395$



รูปที่ 8 โครงสร้างทางอุณหภูมิตามแนวแกนของหัวพ่นไฟวัสดุพอร์ซเซรามิกส์คอร์ดไรท์ (เนื้อเดียว) ที่สภาวะ $Q_A = 140 \text{ l/min}$ และ $\phi = 0.391$



รูปที่ 9 อิทธิพลของ Q_A ที่มีต่อ CO และ NO_x สำหรับการเผาไหม้น้ำมันดีเซลใน เซรามิกส์คอร์ดีไรท์ (เนื้อเดียว) ที่สภาวะ $Q_A = 140$ l/min และ $\phi = 0.391$

รูปที่ 8 แสดงอิทธิพลของ Q_F ต่อโครงสร้างทางอุณหภูมิ ที่สภาวะ $Q_A = 320$ l/min ในวัสดุพูนเซรามิกส์คอร์ดีไรท์ ที่มีค่า $\phi = 0.391$ พบว่าโครงสร้างทางอุณหภูมิมิมีแนวโน้ม เพิ่มขึ้นตามปริมาณ Q_F ที่จ่ายให้แก่ระบบ เนื่องจากระบบ ได้รับพลังงาน หรือปริมาณเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้น ส่งผลให้มีการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ขึ้น ซึ่งเป็นไปตามปริมาณ CO ดังแสดงในรูปที่ 9 กล่าวคือปริมาณ CO มีแนวโน้มลดลงตาม ค่า Q_F ที่เพิ่มขึ้น สำหรับปริมาณ NO_x ที่เกิดขึ้นมีแนวโน้ม เพิ่มขึ้นตามค่า Q_F เพราะมีระดับอุณหภูมิการเผาไหม้ที่สูงขึ้น นอกจากนี้ตำแหน่งของเปลวไฟ (T_{Max}) จะเคลื่อนตัวจาก บริเวณใต้ชั้นวัสดุพูน ($x = 125$ mm) เข้าสู่ตำแหน่ง Swirling air ตามปริมาณ Q_F ที่เพิ่มขึ้น สามารถอธิบายได้ด้วย เหตุผลการลามของเปลวไฟหรือ Flame length ที่ขยายกว้างขึ้น และสัดส่วนการผสมกันระหว่างไอน้ำมันเชื้อเพลิงกับอากาศ เช่นเดียวกับกรณีวัสดุพูนชนิดหินตุ้ปลา (รูปที่ 6)

นอกจากนี้หากเปรียบเทียบโครงสร้างทางอุณหภูมิของหิน ตุ้ปลา (รูปที่ 6) กับเซรามิกส์คอร์ดีไรท์ (รูปที่ 8) จะพบว่า โครงสร้างทางอุณหภูมิของหินตุ้ปลามีค่าสูงกว่า เนื่องจาก เหตุผลเช่นเดียวกับที่อธิบายในหัวข้อ 4.1 ที่ผ่านมากล่าวคือ ด้วยโครงสร้างที่ซับซ้อนและไม่สม่ำเสมอของหินตุ้ปลา จะก่อให้เกิดผลดีต่อการแลกเปลี่ยนพลังงานของไอน้ำมัน เชื้อเพลิงกับเนื้อวัสดุพูน

สรุปผลการศึกษา

จากการศึกษาอิทธิพลต่างๆ ที่มีผลต่อการเผาไหม้น้ำมัน ดีเซลในวัสดุพูนชนิดเม็ดกลมอัดแน่นสามารถสรุป ผลการทดลองได้ดังนี้

1. โครงสร้างทางอุณหภูมิของทั้งกรณีหินตุ้ปลา และเม็ดเซรามิกส์มีแนวโน้มลดลงต่ำลงเมื่อค่า Q_A เพิ่มขึ้น ปรากฏการณ์เช่นนี้สามารถอธิบายได้ตามความเป็นจริงของ อากาศส่วนเกิน (Excess air) เนื่องจากระบบได้รับอากาศเกิน ความจำเป็นส่งผลให้อัตราส่วนผสมกับไอน้ำมันดีเซลเกิดเป็น สภาวะการเผาไหม้ไอดีบาง (Lean combustion) ย่อมทำให้ อุณหภูมิต่ำลง ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณ CO ที่สูงขึ้นตามค่า Q_A ที่เพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นถึงการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ สำหรับปริมาณ NO_x จะมีค่าต่ำกว่า 100 ppm เพราะระดับ อุณหภูมิการเผาไหม้มีค่าต่ำ และมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณ Q_A ที่เพิ่มขึ้น

2. โครงสร้างทางอุณหภูมิทั้งกรณีหินตุ้ปลาและเม็ดเซรามิกส์ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณ Q_F ที่จ่ายให้แก่ระบบ เนื่องจาก ระบบได้รับพลังงานหรือปริมาณเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้น ส่งผลให้มี การเผาไหม้ที่สมบูรณ์ขึ้น พร้อมทั้งยังมีการแผ่รังสีความร้อน จากเปลวไฟและผนังห้องเผาไหม้ย้อนกลับไปยังวัสดุพูนมากขึ้น เป็นการช่วยส่งเสริมการระเหยตัวของเชื้อเพลิงและเป็นการอุ่น



น้ำมันดีเซล ซึ่งจะสอดคล้องกับปริมาณ CO ที่มีแนวโน้มลดลงตามค่า Q_F ที่เพิ่มขึ้น สำหรับปริมาณ NO_x มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามค่า Q_F เพราะมีระดับอุณหภูมิการเผาไหม้ที่สูงขึ้น

3. โครงสร้างทางอุณหภูมิของหินตุ้ปลา (กึ่งเนื้อเดียว) มีค่าสูงกว่าเซรามิกส์คอร์ดีไรท์ (เนื้อเดียว) เนื่องจากหินตุ้ปลา มีโครงสร้างแบบไม่สม่ำเสมอ จึงทำให้เชื้อเพลิงและไอน้ำมันเมื่อไหลภายในชั้นวัสดุพอรุนเกิดการไหลที่ช้ากว่าแบบเนื้อเดียว ก่อให้เกิดการแลกเปลี่ยนพลังงานระหว่างน้ำมันกับวัสดุพอรุนอย่างยาวนานและเพียงพอส่งผลให้หัวพ่นไฟแบบหินตุ้ปลาเกิดการระเหยกลายเป็นไอน้ำมันมากกว่าแบบเซรามิกส์คอร์ดีไรท์

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน ที่ได้ให้ทุนสนับสนุนในการจัดงานวิจัยครั้งนี้ และคณะผู้เขียนบทความขอขอบคุณ นายประวิทย์ นนท์ชุตต นายวันชัย รักวงศ์ไทย นายวัชรพงษ์ มั่นเหมาะ นักศึกษาสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลซึ่งอยู่ในห้องปฏิบัติการวิจัยการพัฒนาในเทคโนโลยีของวัสดุพอรุน (Development in Technology of Porous Materials Research Laboratory, DITO-Lab) สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน ที่ได้ช่วยเก็บข้อมูลการทดลองบางส่วนจนทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

Amatachaya, P. & Krittacom, B. (2009, November). *The Combustion of Liquid Fuels using a packed Bed, paper present in the International Conference on Power Engineering 2009 (ICOPE- 09)*, Kobe international Conference Center, Kobe, JAPAN.

Jugjai, S., Wongpanit, N., Laoketkan, T. & Nokkaew, S. (2002). The combustion of liquid fuel using a porous medium. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 26, 15-23.

Jugjai, S. & Polmart, N. (2003). Enhancement of evaporation and combustion of liquid fuels through porous media. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 27, 901-909.

Jugjai, S. & Phothiya, C. (2006). Liquid fuels-fire porous combustor-heater. *Fuel*, 86, 1062-1068.

Kaplan, M. & Hall, M. J. (1995). The combustion of liquid fuels within a porous media radiant burner. *Experiment Thermal and Fluid Science*, 11(1), 13-22.

Krittacom, B., Amatachaya, P., Srimuang, W. & Inla, K. (2011, September). *The pack-bed sphere liquid porous burner, paper present in the International Conference on Fluids and Thermal Engineering 2011 (ICFTE 2011)*, Singapore.

Takami, H., Suzuki, T., Itaya, Y. & Hasatani, M. (1998). Performance of flammability of kerosene and NO_x emission in the porous burner. *Fuel*, 77(3), 165-171.

Tseng, C. J. & Howell, J. R. (1996). Combustion of liquid fuels in porous radiant burner. *Combustion Science and Technology*, 112, 141-161.