

การส่งเสริมการเผาไหม้เชื้อเพลิงเหลวของหัวพันไฟวัสดุพรุนโดยใช้วัสดุพรุนตัวแผ่นรังสี

Enhancement of Combustion of Liquid Fuel on Porous Burner using Porous Emitter

ทวีศิลป์ เล็กประดิษฐ์ และบัณฑิต กฤตาคม

Taveesin Lakpradit and Budit Krittacom

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: sugar_tree@hotmail.com และ bundit.kr@rmuti.ac.th

บทคัดย่อ

ความสามารถในการส่งเสริมการเผาไหม้ของน้ำมันดีเซลในหัวพันไฟวัสดุพรุน (PB) ที่มีการติดตั้งวัสดุพรุนตัวแผ่นรังสี (PE) ที่ตำแหน่งด้านทางออกของระบบได้ทำการทดลองในบทความนี้ โดย PE ติดตั้งห่างจาก PB เป็นระยะทาง 18 cm ในการทดลองเลือกใช้หินตุ้ปลาที่ผ่านการคัดขนาดอย่างพิถีพิถันให้มีรูปร่างทรงกลม และมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ย (d) สองขนาด คือ 0.62 และ 1.05 cm เพื่อใช้เป็นวัสดุพรุนในหัวพันไฟที่แตกต่างกัน 3 รูปแบบ ได้แก่ หัวพันไฟแบบมีเพียง PB ($d = 0.62$ cm) และอีกสองรูปแบบ คือ หัวพันไฟ PB ซึ่งติดตั้ง PE ที่มีขนาด d_{PE} แตกต่างกันสองขนาด จากการศึกษาปรากฏว่าเปลวไฟเสถียรจะเกิดขึ้นบริเวณช่องว่างระหว่างวัสดุพรุนทั้งสองชั้น ซึ่งเป็นตำแหน่งที่มีการจ่ายอากาศหมุนวนแบบสามทาง (Q_A) หัวพันไฟที่ติดตั้ง PE จะมีการเผาไหม้ที่ดีกว่าหัวพันไฟที่มีเพียง PB เนื่องจากมีโครงสร้างทางอุณหภูมิต่ำกว่าและปริมาณแก๊ส CO ที่ต่ำกว่า นอกจากนี้ยังสังเกตได้ว่าหัวพันไฟกรณี PE ใช้ d_{PE} เท่ากับ 1.05 cm จะส่งเสริมการเผาไหม้ได้ดีกว่า d_{PE} เท่ากับ 0.62

Abstract

Ability in the enhancement of combustion of diesel oil on porous burner (PB) installed porous emitter (PE) at the exit of burner was examined in this research paper. PE was constructed by lower than PB with distance of 18 cm. The pebbles carefully chosen in the same size like the solid sphere

homogeneously and differently had two average diameters (d), i.e., 0.62 and 1.05 cm, were adopted as porous media. Three structures of porous burner were experimented. First structure was only PB whereas two structures else were PB with PE having different two size of d_{PE} . From study, it was found that the stable flame was located between two porous sections which was the region of three-way swirling air supplying. A better combustion was achieved by the burner installed PE because a higher temperature profile and a lower level of CO from this burner type. Moreover, it was observed that the enhancement of combustion in the case of PE for $d_{PE} = 1.05$ cm. was better than the case of $d_{PE} = 0.62$ cm.

1. บทนำ

การเผาไหม้เชื้อเพลิงเหลวด้วยเทคโนโลยีของวัสดุพรุน (Porous medium) นั้น มีนักวิจัยและวิศวกรหลายกลุ่ม [1-3] ได้ทำการศึกษา วิจัย และพัฒนาอย่างกว้างขวางในช่วงตอนปลายของศตวรรษที่ 19 หรือประมาณ 20 ปีที่ผ่านมา เนื่องจากวัสดุพรุนซึ่งเป็นของแข็งที่มีช่องว่างผสมอยู่จะเป็นโครงสร้างที่มีอัตราส่วนพื้นที่ผิวต่อปริมาตรสูง สามารถทนต่ออุณหภูมิสูงได้ จึงส่งเสริมการถ่ายเทความร้อนและเปลี่ยนรูปพลังงานได้ระหว่างการพาความร้อน (Heat convection) กับการแผ่รังสีความร้อน (Thermal radiation) และยังพบว่าการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่เกิดขึ้นภายในวัสดุพรุนนั้นจะให้การเผาไหม้ที่มีการหมุนเวียนความร้อนในตัวเอง [4]

RECEIVED 21 February, 2013

ACCEPTED 20 March, 2013

ซึ่งการหมุนเวียนความร้อนที่เกิดขึ้นจะช่วยส่งเสริมการเผาไหม้ให้สมบูรณ์พร้อมปลดปล่อยมลพิษในปริมาณต่ำทั้ง CO และ NO_x เพราะวัสดุพูนจะมีการแผ่รังสีความร้อนกลับไปอุ่นอากาศหรือไอดีก่อนการเผาไหม้ ระบบจึงมีขนาดกะทัดรัด และสามารถเผาไหม้ส่วนผสมในสภาวะเจือจาง (Lean combustion) หรือเผาไหม้เชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนต่ำ ๆ ที่ไม่สามารถติดไฟได้ด้วยตนเอง

เมื่อเข้าสู่ศตวรรษที่ 20 การป้อนเชื้อเพลิงให้แก่ระบบด้วยวิธีการหยดเริ่มเข้ามาแทนที่การใช้สเปรย์ฉีดละอองน้ำมัน เพราะวิธีการหยดเป็นวิธีการที่ง่าย สะดวก ไม่ยุ่งยาก จึงมีนักวิจัยหลายกลุ่ม เช่น Jugjai และคณะ [5], Amatachaya และ Krittacom [6] และบัณฑิต กฤตาคม [7] ได้มุ่งเน้นศึกษาทดลองเกี่ยวกับการเผาไหม้เชื้อเพลิงเหลวที่จ่ายเข้าสู่วัสดุพูนด้วยการหยด ซึ่งวัสดุพูนในระบบการเผาไหม้เชื้อเพลิงเหลวแบบหยดนี้ จะมีบทบาท สำคัญมากในการส่งเสริมการระเหย (Evaporation) เนื่องจากวัสดุพูนจะแสดงพฤติกรรมเป็นทั้งตัวกระจายเชื้อเพลิงเหลวและตัวอุ่นไอเชื้อเพลิงที่ดี ทั้งยังมีกลไกการแผ่รังสีความร้อนและการนำความร้อนตลอดทั้งชั้นวัสดุพูน นำไปสู่การจุดติดไฟได้เองและช่วยส่งเสริมการเผาไหม้ อย่างไรก็ตามการระเหยของเชื้อเพลิงเหลวที่เกิดขึ้นด้วยวัสดุพูนเพียงชั้นเดียว ที่เรียกว่าวัสดุพูนหัวเผาหรือหัวพ่นไฟ (Porous burner, PB) นั้น ในบางสภาวะการจ่ายเชื้อเพลิงยังไม่สามารถส่งเสริมการระเหยของเชื้อเพลิงเหลวได้หมด ส่งผลให้มีการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์และบางสภาวะโดยเฉพาะที่อัตราการจ่ายเชื้อเพลิงสูง ๆ จะมีน้ำมันหยดไหลออกมาจากระบบ ด้วยเหตุนี้เทคนิคของวัสดุพูนตัวแผ่รังสี (Porous emitter, PE) จึงได้ถูกนำมาติดตั้งร่วมกับ PB เพื่อส่งเสริมกลไกการระเหยของเชื้อเพลิงเหลว ดังผลการทดลองของ Jugjai และคณะ [8-9] และ Krittacom และคณะ [10-11]

เมื่อเร็ว ๆ นี้ คณะผู้เขียนบทความวิจัยได้นำเสนออิทธิพลของ PE ต่อการเผาไหม้เชื้อเพลิงเหลวในหัวพ่นไฟวัสดุพูน [12] ได้ข้อสังเกตว่า PE ที่มีค่าความพูนเท่ากับ 0.52 จะให้โครงสร้างทางอุณหภูมิและการเผาไหม้ที่ดีกว่า แต่ผลงานวิจัยนี้ยังมีข้อมูลและความความละเอียดไม่มีเพียงพอเนื่องจากไม่ได้แสดงผลการเปรียบเทียบระหว่างหัวพ่นไฟที่

ติดตั้งและไม่ติดตั้ง PE ที่เด่นชัด หรือเป็นรูปธรรม รวมทั้งไม่มีการนำเสนออิทธิพลของอัตราส่วนสมมูล (Equivalent ratio, Φ) ซึ่งเป็นปริมาณมาตรฐานที่ต้องรายงานผลเกี่ยวกับการเผาไหม้ และอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงไม่ได้แสดงในหน่วยที่เป็นสากล คือ W หรือ kW แต่ในบทความวิจัยดังกล่าวแสดงหน่วยเป็น cc/min ดังนั้นบทความวิจัยนี้จึงอ้างอิงจากงานวิจัยของบัณฑิต กฤตาคม และทวิศิลป์ เล็กประดิษฐ์ [12] จึงขอขยายผลการศึกษาและนำเสนอผลการเปรียบเทียบระหว่างหัวพ่นไฟที่ติดตั้งและไม่ติดตั้ง PE ให้เห็นเด่นชัดสำหรับหัวพ่นไฟที่ทำการเปรียบเทียบจะมีทั้งหมด 3 รูปแบบ ได้แก่ (1) หัวพ่นไฟแบบมีเพียง PB เลือกใช้หินดูปลาที่มีขนาด $d_{PB} = 0.62$ cm (2) หัวพ่นไฟแบบ PB ที่ติดตั้ง PE โดยวัสดุพูนทั้งสองชั้นใช้หินดูปลาที่มีขนาด $d_{PB} = d_{PE} = 0.62$ cm และ (3) หัวพ่นไฟแบบ PB ที่ติดตั้ง PE แต่ใช้หินดูปลาที่มีขนาด $d_{PB} = 0.62$ และ $d_{PE} = 1.05$ cm ตามลำดับ นอกจากนี้บทความวิจัยนี้ ยังได้เพิ่มเติมข้อมูลขอบเขตการเผาไหม้ (Flammability limit) ของหัวพ่นไฟทั้งสามรูปแบบ เพื่อสร้างองค์ความรู้และความเข้าใจที่ลึกซึ้งเกี่ยวกับอิทธิพลของ PE ต่อการเผาไหม้เชื้อเพลิงเหลวในหัวพ่นไฟวัสดุพูนชนิดเม็ดกลมอัดแน่น

2. รายการสัญลักษณ์

d	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของหินดูปลา (cm)
n_p	จำนวนเม็ดทรงกลมของหินดูปลา
ppm	หน่วยวัดความเข้มข้นของแก๊สต่อต้านส่วน
PB	วัสดุพูนหัวพ่นไฟ (Porous burner)
PE	วัสดุพูนตัวแผ่รังสี (Porous emitter)
T	โครงสร้างทางอุณหภูมิ (°C)
T_b	อุณหภูมิจุดเดือด (°C)
T_{max}	อุณหภูมิสูงสุด (°C)
V_s	ปริมาตรช่องว่าง (cm ³)
V_T	ปริมาตรทั้งหมด (cm ³)
Q_A	อัตราการจ่ายอากาศหมุนวนสามทาง (m ³ /s)
Q_F	อัตราการจ่ายน้ำมันเชื้อเพลิง (kW)
β	สัมประสิทธิ์การสิ้นสุญ (m ⁻¹)
ε	ความพูน

Φ อัตราส่วนสมมูลของเชื้อเพลิง

γ แฟกเตอร์ของการหาค่าสัมประสิทธิ์การสิ้นสุญ

τ ความหนาเชิงแสง

ตัวห้อย

PB วัสดุพูนตำแหน่งหัวพ่นไฟ

PE วัสดุพูนตัวแผ่รังสีความร้อน

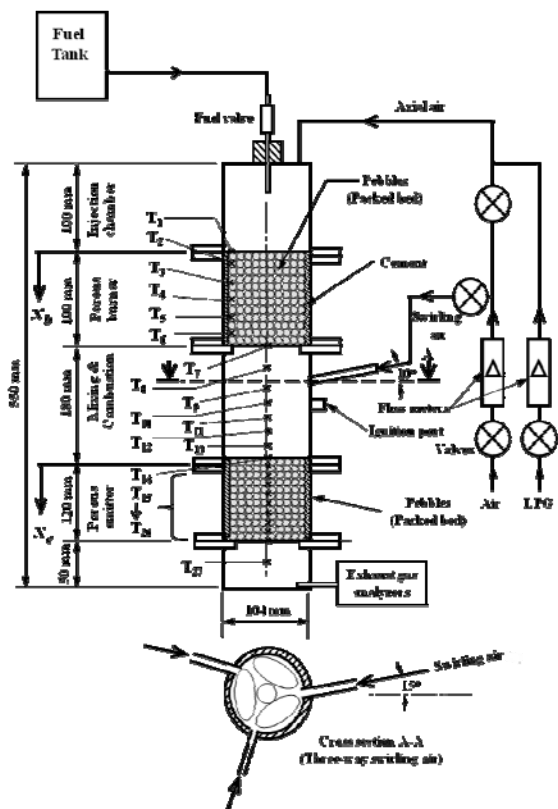
3. อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

3.1 อุปกรณ์การทดลอง

แผนผังอุปกรณ์การทดลองของหัวพ่นไฟเชื้อเพลิงเหลวชนิดวัสดุพูนแบบเม็ดกลมอัดแน่นที่มีการติดตั้งวัสดุพูนตัวแผ่รังสี ได้แสดงไว้ในรูปที่ 1 ซึ่งแบ่งได้ 4 ส่วนสำคัญ คือ ส่วนที่หนึ่งห้องจ่ายน้ำมันเชื้อเพลิง (Injection chamber zone) ส่วนที่สอง วัสดุพูนหัวพ่นไฟ (Porous burner zone, PB) ส่วนที่สาม การนำอากาศเข้ามาคลุกเคล้ากับไอน้ำมันดีเซลเพื่อให้เกิดการเผาไหม้ (Mixing and combustion zone) และส่วนที่สี่ วัสดุพูนตัวแผ่รังสี (Porous emitter zone) ซึ่งรายละเอียดของอุปกรณ์และขั้นตอนการทดลองได้อธิบายไว้แล้วในงานวิจัยของ บัณฑิต กฤตาคม และทวีศิลป์ เล็กประดิษฐ์ [12] และในที่นี้ขอสรุปโดยคร่าว ๆ เพื่อทบทวนดังนี้ น้ำมันเชื้อเพลิงหยดจากถังเชื้อเพลิง (Fuel tank) ผ่านชุดจ่ายเชื้อเพลิงซึ่งเป็น วาล์วแบบเกลียว (Fuel valve) และห้องจ่ายน้ำมันเชื้อเพลิง (ส่วนที่ 1) ไปยัง PB (ส่วนที่ 2) น้ำมันเหลวเกิดการระเหยกลายเป็นไอและไหลผ่านลงมาถึงบริเวณห้องเผาไหม้ พร้อมผสมกับอากาศหมุนวน ที่จ่ายมาจากด้านข้างเกิดการคลุกเคล้า และการเผาไหม้ในที่สุด (ส่วนที่ 3) เปลวไฟที่เกิดขึ้นนี้จะแผ่รังสีความร้อนไปทุกทิศทางทุกทาง โดยเฉพาะ 2 ทิศทางที่มีนัยสำคัญ คือการแผ่รังสีไปยัง PE และย้อนกลับไป PB ส่งผลให้ PE ดูดซับเอาพลังความร้อนจากเปลวไฟไว้ นอกจากนี้แก๊สไอเสียก็ไหลออกจากระบบผ่าน PE จะถูกกักเก็บพลังงานไว้เช่นกัน ด้วยกลไกการถ่ายเทความร้อนแบบการพาและการนำ หลังจากนั้นพลังงานที่กักเก็บไว้จะแผ่รังสีความร้อนย้อนกลับยัง PB เสริมกับการแผ่รังสีของเปลวไฟเป็นการช่วยและส่งเสริมกลไกการระเหยของน้ำมันเชื้อเพลิง

ให้เป็นไอได้หมด ก่อให้เกิดการเผาไหม้สมบูรณ์และต่อเนื่อง ตราบใดที่ยังมีการจ่ายน้ำมันเชื้อเพลิงเข้าสู่ระบบ

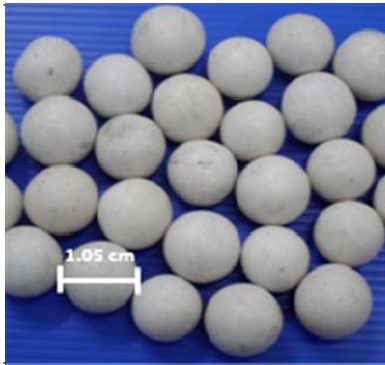
อุณหภูมิตามแนวแกน และแก๊สไอเสีย จะถูกตรวจวัดโดยใช้ เทอร์โมคัปเปิลชนิดเอ็น (N-type thermocouples) จำนวน 27 ชิ้น ที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.5 mm จะถูกติดตั้งในระบบโดยแบ่งออกเป็น 3 กลุ่มตามตำแหน่งติดตั้งได้ดังนี้ กลุ่มที่หนึ่งเทอร์โมคัปเปิลจำนวน 7 ชิ้น จะติดตั้งในส่วนที่ 2 (PB) ตามแนวแกนที่ผิวด้านในของปูนทนไฟ (Cement) และสัมผัสกับผิวด้านนอกของวัสดุพูน กลุ่มที่สองจำนวน 7 ชิ้น จะติดตั้งในตำแหน่งกึ่งกลางตามแนวแกนของส่วนที่ 3 และกลุ่มสุดท้ายจำนวน 13 ชิ้น ถูกติดตั้งในตำแหน่งกึ่งกลางตามแนวแกนของส่วนที่ 4 (PE) สำหรับปริมาณแก๊สไอเสียที่เกิดขึ้น ซึ่งไหลออกจากระบบทางด้านล่างผ่าน PE จะถูกตรวจวัดหาปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x) ด้วยเครื่องวิเคราะห์แก๊สไอเสีย (Exhaust analyzer) ยี่ห้อ Testo รุ่น 350 XL



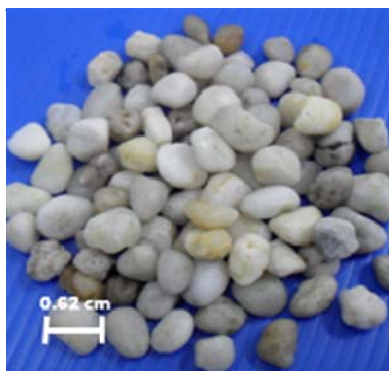
รูปที่ 1 แผนผังอุปกรณ์การทดลองของหัวพ่นไฟเชื้อเพลิงเหลวชนิดวัสดุพูนแบบเม็ดกลมอัดแน่น

3.2 สมบัติกายภาพของวัสดุพูน

วัสดุพูนชนิดเม็ดกลมอัดแน่นที่เลือกใช้ในงานวิจัยนี้ คือ หินตู้ปลา ซึ่งมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ย (d) จำนวน 2 ขนาด คือ 0.62 และ 1.05 cm ตามลำดับ ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2



(ก) $d = 1.05$ cm



(ข) $d = 0.62$ cm

รูปที่ 2 หินตู้ปลาที่เลือกใช้เป็นวัสดุพูนชนิดเม็ดกลมอัดแน่น

ขั้นตอนและวิธีการหาค่าความพูน (Porosity, ϵ) ของวัสดุพูนแบบเม็ดกลมอัดแน่น (หินตู้ปลา) ได้อธิบายไว้อย่างละเอียดในงานวิจัยของ บัณฑิต กฤตาคม และทวีศิลป์ เล็กประดิษฐ์ [12] แล้ว บทความวิจัยนี้จะไม่ขอกล่าวซ้ำอีกครั้ง ซึ่งในการทดลองหาค่าความพูนของหินตู้ปลาทั้ง 2 ขนาดนั้น จะได้ค่าปริมาตรช่องว่างที่น้ำเข้าไปแทนที่ (Void-space volume, V_s) เป็น 291.057 และ 322.148 cm^3 สำหรับหินตู้ปลาที่มีขนาด d เท่ากับ 0.62 และ 1.05 cm ตามลำดับ และสามารถคำนวณหาค่า ϵ ได้จาก

$$\epsilon = V_s/V_T \quad (1)$$

เมื่อ V_T คือ ปริมาตรทรงกระบอกภายในทั้งหมด (Total or bulk volume) ในงานวิจัยนี้คำนวณจากภาชนะรูปทรงกระบอกที่มีความสูง 10 cm และเส้นผ่าศูนย์กลางภายในเท่ากับ 9.5 cm ($V_T = 708.822 \text{ cm}^3$) ดังนั้นจากสมการ (1) ค่า ϵ ที่ได้คือ 0.410 ($d = 0.62$) และ 0.454 ($d = 1.05$ cm)

นอกจากนี้เพื่อแสดงถึงสมบัติและความสามารถในการดูดซับพลังงานและการแผ่รังสีความร้อนของวัสดุพูนทั้ง PB และ PE ค่าสัมประสิทธิ์การสั่นสูญ (Extinction coefficient, β) และความหนาเชิงแสง (Optical thickness, τ) ของชั้นวัสดุพูนเป็นตัวแปรที่มีความสำคัญอย่างมากที่ต้องพิจารณา ด้วยเหตุนี้ในบทความวิจัยนี้จึงได้นำเสนอค่าทั้งสองเพื่อช่วยในการอธิบายปรากฏการณ์การเผาไหม้และกลไกการระเหยที่เกิดขึ้นในหัวพ่นไฟวัสดุพูน ซึ่งค่า β และ τ สามารถคำนวณได้ดังนี้ [13]

$$\tau = x\beta \quad (2)$$

$$\beta = (2\gamma - 1) \left(\frac{\pi d^2 n_p}{4} \right) = \frac{1.5(2\gamma - 1)(1 - \epsilon)}{d} \quad (3)$$

$$\gamma = 1 + 1.5(1 - \epsilon) - 0.75(1 - \epsilon)^2 \quad (4)$$

จากสมการ (2) ถึง (4) ค่าตัวแปรต่าง ๆ ได้แก่ x , γ , β และ τ ของ PB และ PE ได้แสดงไว้ในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สมบัติทางกายภาพของวัสดุพูนที่ทำการศึกษาทดลอง

สมบัติทางกายภาพ	PB ($d_{PB} = 0.62$ cm)	PE (ขนาดของ d_{PE})	
		0.62 cm	1.05 cm
ϵ	0.410	0.410	0.454
x (m)	0.10	0.12	0.12
γ	1.623	1.623	1.595
β (m^{-1})	320.415	320.415	170.681
τ	32.041	38.449	20.482

4. ผลการทดลอง

4.1 อิทธิพลของอัตราส่วนสมมูล (Φ)

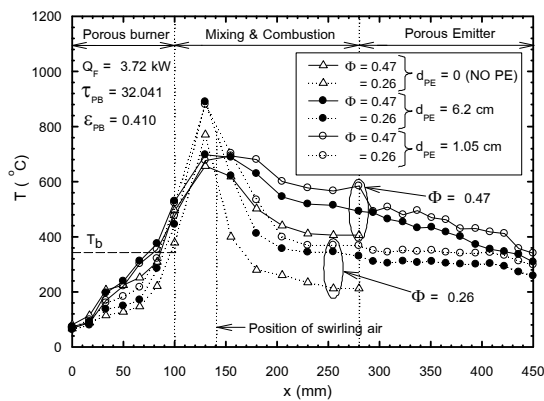
รูปที่ 3 แสดงการเปรียบเทียบอิทธิพลของอัตราส่วนสมมูล (Φ) ต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิตามแนวแกนตลอดความยาวของอุปกรณ์การทดลอง ในที่นี้จะเรียกว่าโครงสร้างทางอุณหภูมิ (Temperature profile, T) โดยเป็นการทดลองที่สภาวะอัตราการจ่ายน้ำมันเชื้อเพลิง (Fuel rate input, Q_F) เท่ากับ 3.72 kW วิธีการปรับเปลี่ยนค่า Φ เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงอัตราการจ่ายอากาศหมุนวนสามทาง (Three-way swirling air flow rate, Q_A) แต่กำหนดให้ค่า Q_F คงที่ จากรูปที่ 3 เป็นการทดลองเปรียบเทียบค่า T จากอิทธิพลของ Φ จำนวน 2 ค่า คือ 0.26 และ 0.47 พบว่าแนวโน้มของ T ในกรณี $\Phi = 0.47$ ของหัวพันไฟทั้ง 3 รูปแบบมีค่าสูงกว่ากรณี $\Phi = 0.26$ ซึ่งเป็นไปตามปรากฏการณ์การเผาไหม้ทั่วไป กล่าวคือ เมื่อระบบได้รับค่า Φ ลดลง ปริมาณการจ่าย Q_A จะเพิ่มขึ้น มีปริมาณอากาศส่วนเกิน (Excess air) สูงขึ้น ส่งผลให้อัตราส่วนผสมระหว่างอากาศกับไอน้ำมันดีเซลเกิดเป็นสภาวะการเผาไหม้ไอดีบาง (Lean combustion) ได้ อุณหภูมิการเผาไหม้ลดต่ำลง ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณ CO ที่เพิ่มสูงขึ้น และ NO_x ที่ลดลง ตามค่า Φ ที่ลดลง ดังแสดงในรูปที่ 4 และ 5 ตามลำดับ

นอกจากนี้รูปที่ 3 ยังพบข้อสังเกต คือ ในช่วง Mixing & Combustion ของหัวพันไฟกรณี $\Phi = 0.26$ จะให้ค่าอุณหภูมิสูงสุด (Maximum temperature, T_{max}) ที่มากกว่ากรณี $\Phi = 0.47$ ซึ่งตรวจพบที่ตำแหน่ง $x = 125$ mm (T_8) สามารถอธิบายได้ด้วยตำแหน่งของเปลวไฟ (Flame position) นั่นคือ T_{max} ที่แท้จริงไม่ได้ถูกวัดหรือไม่อยู่ในตำแหน่งนี้ เพราะตำแหน่งจากผิวด้านล่างของ PB (T_7 หรือ $x = 100$ mm) จนถึงตำแหน่งใต้การจ่ายอากาศหมุนวน (T_9 หรือ $x = 155$ mm) จะติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลเพียงจุดเดียวเท่านั้น คือ T_8 ซึ่งเป็นระยะทางที่กว้างมาก สาเหตุที่ไม่มีการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลบริเวณนี้เพิ่มนั้น เพราะอาจจะกระทบต่อพฤติกรรมของการเผาไหม้และกระบวนการคลุกเคล้าระหว่างไอน้ำมันดีเซลกับอากาศหมุนวน ด้วยเหตุนี้ตำแหน่ง T_{max} ที่แท้จริงของกรณี

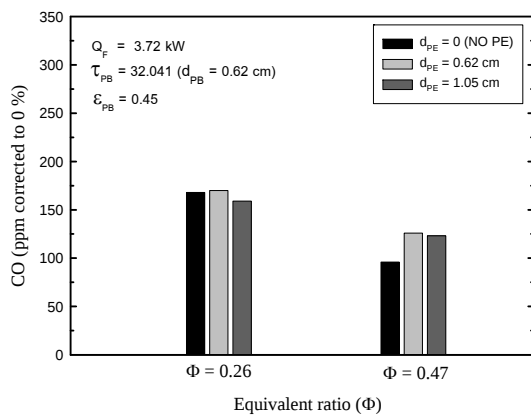
$\Phi = 0.47$ อาจอยู่ในบริเวณใกล้เคียงกับการจ่ายอากาศหมุนวนที่เป็นไปได้

พิจารณาการเปรียบเทียบของหัวพันไฟทั้ง 3 รูปแบบ จากรูปที่ 3 ได้แก่ รูปแบบที่ 1 หัวพันไฟแบบมีเพียง PB ($d_{PB} = 0.62$ cm) รูปแบบที่ 2 หัวพันไฟแบบติดตั้ง PE ที่เลือกใช้ $d_{PE} = 0.62$ cm และ รูปแบบที่ 3 หัวพันไฟแบบติดตั้ง PE ที่เลือกใช้ $d_{PE} = 1.05$ cm พบว่าระดับ T ของทั้ง 2 ค่า Φ ในรูปแบบที่ 1 มีค่าต่ำกว่าอีก 2 รูปแบบที่มีการติดตั้ง PE เพราะความร้อนที่ได้จากเปลวไฟของรูปแบบที่ 1 ถูกปล่อยสู่บรรยากาศไม่มีการนำกลับมาใช้ในระบบ แต่หากเปรียบเทียบอิทธิพลของ PE จะสังเกตได้ว่าในรูปแบบที่ 2 จะมี T ที่ต่ำกว่ารูปแบบที่ 3 เนื่องจากวัสดุของรูปแบบที่ 3 มีค่าความพรุน (Porosity, ϵ) มากกว่า ส่งผลให้มีอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวสัมผัสต่อปริมาตรสูงกว่า สามารถดูดซับหรือกักเก็บพลังงานจากการพาความร้อน (Heat convection) ของแก๊สไอเสียขณะไหลผ่าน PE ได้เต็มที่ ส่งผลให้มีการแผ่รังสีย้อนกลับไปยัง PB ได้ดีกว่า และช่วยส่งเสริมกลไกการระเหยของน้ำมันดีเซลเกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์กว่า ดังสังเกตได้จากอุณหภูมิที่ตำแหน่งด้านล่างของชั้น PB (T_7 หรือ $x = 100$ mm) พบว่า T_7 ของหัวพันไฟที่ติดตั้ง PE (รูปแบบที่ 2 และ 3) จะมีระดับสูงกว่าอุณหภูมิจุดเดือด (Boiling temperature, T_b) ของน้ำมันดีเซล [14] และมากกว่าหัวพันไฟแบบมีเพียง PB (รูปแบบที่ 1) ดังนั้นจึงยืนยันได้ว่า PE ช่วยส่งเสริมการระเหยและการเผาไหม้ของน้ำมันดีเซล

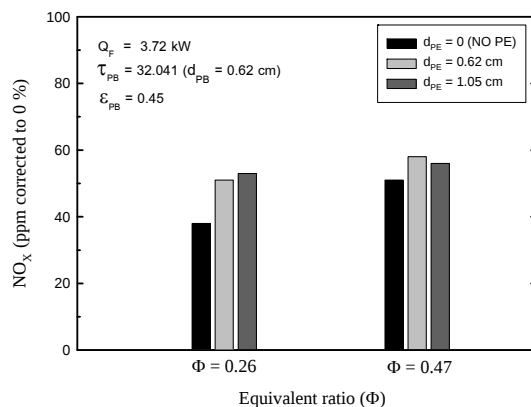
สำหรับการเปรียบเทียบปริมาณแก๊สไอเสีย พบว่าระดับ CO (รูปที่ 4) ของรูปแบบที่ 2 และ 3 (มีการติดตั้ง PE) จะสูงกว่ารูปแบบที่ 1 ที่ไม่ติดตั้ง PE เล็กน้อย เพราะอิทธิพลของอากาศส่วนที่สอง (Secondary air) จากภายนอกไหลเข้ามาในระบบช่วยเกิดการเผาไหม้ให้ดีขึ้น อย่างไรก็ตามระดับ CO มีปริมาณใกล้เคียงกัน ในช่วง 100 - 200 ppm สำหรับปริมาณ NO_x (รูปที่ 5) จะสูงขึ้น โดยเฉพาะเมื่อติดตั้ง PE เพราะตามระดับ T ที่สูงขึ้น อย่างไรก็ตามหัวพันไฟทุกรูปแบบล้วนมีปริมาณ NO_x ก่อนข้างต่ำไม่เกิน 60 ppm เพราะอุณหภูมิการเผาไหม้ไม่สูงเท่าที่ควร



รูปที่ 3 การเปรียบเทียบอรรถิพลของ Φ ต่อ T ของหัวพ่นไฟ 3 รูปแบบที่ $Q_F = 20$ kW



รูปที่ 4 การเปรียบเทียบอรรถิพลของ Φ ต่อปริมาณ CO ของหัวพ่นไฟ 3 รูปแบบ ที่ $Q_F = 20$ kW



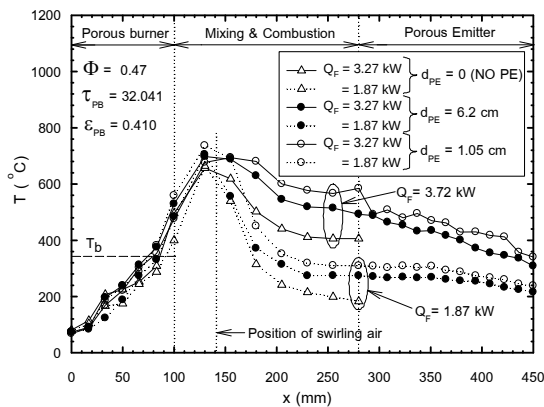
รูปที่ 5 การเปรียบเทียบอรรถิพลของ Φ ต่อปริมาณ NO_x ของหัวพ่นไฟ 3 รูปแบบ ที่ $Q_F = 20$ kW

4.2 อรรถิพลของอัตราการจ่ายน้ำมันเชื้อเพลิง (Q_F)

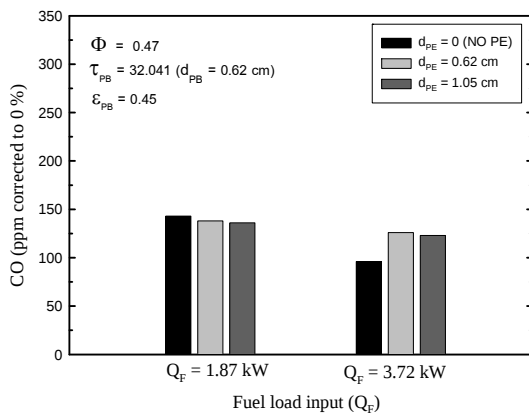
รูปที่ 6 แสดงการเปรียบเทียบอรรถิพลของอัตราการจ่ายน้ำมันเชื้อเพลิง (Q_F) ต่อโครงสร้างทางอุณหภูมิ (T) โดยเป็นการทดลองเปรียบเทียบอรรถิพลของ Q_F จำนวน 2 ค่า คือ 1.87 และ 3.72 kW ที่สภาวะ $\Phi = 0.47$ พบว่าแนวโน้มของ T ในกรณี $Q_F = 3.72$ kW ของหัวพ่นไฟทั้ง 3 รูปแบบมีค่าสูงกว่ากรณี $Q_F = 1.87$ kW เนื่องจากระบบมีอัตราการได้รับเชื้อเพลิงที่เพิ่มหรือเชื้อเพลิงป้อนเข้าสู่ระบบมากขึ้น ส่งผลให้การเผาไหม้มีความรุนแรงและสมบูรณ์ยิ่งขึ้น อุณหภูมิในการเผาไหม้มีค่าสูงตามไปด้วย ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณ CO ที่มีแนวโน้มลดลง และปริมาณ NO_x ที่สูงขึ้น ตามปริมาณ Q_F ที่เพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 7 และ 8 ตามลำดับ

พิจารณาการเปรียบเทียบของหัวพ่นไฟทั้ง 3 รูปแบบ จากรูปที่ 6 พบว่าระดับ T ของทั้ง 2 ค่า Q_F ในรูปแบบที่ 1 มีค่าต่ำกว่าอีก 2 รูปแบบที่มีการติดตั้ง PE ซึ่งมีเหตุผลเดียวกับรูปที่ 3 นั่นคือหัวพ่นไฟที่ติดตั้ง PE มีการนำพลังงานจากเปลวไฟกลับมาใช้ในระบบ และหากเปรียบเทียบอรรถิพลของ PE จะสังเกตได้ว่าในรูปแบบที่ 2 จะมี T ที่ต่ำกว่ารูปแบบที่ 3 ดังได้อธิบายเหตุผลอย่างละเอียดไว้ในรูปที่ 3 กล่าวคือค่า ε ของหัวพ่นไฟรูปแบบที่ 3 มีค่ามากกว่า สามารถดูดซับพลังงานจากการพาความร้อนของแก๊สไอเสียได้เต็มที่ ส่งผลให้มีการแผ่รังสีย้อนกลับไปยัง PB ได้ดีกว่า และช่วยส่งเสริมกลไกการระเหยของน้ำมันดีเซลเกิดการเผาไหม้ที่ดีกว่า ดังสังเกตได้ว่าอุณหภูมิที่ตำแหน่งด้านล่างของชั้น PB (T_b) ของหัวพ่นไฟที่ติดตั้ง PE (รูปแบบที่ 2 และ 3) จะมีระดับสูงกว่า T_b ของน้ำมันดีเซล [14] และมากกว่าหัวพ่นไฟแบบมีเพียง PB (รูปแบบที่ 1)

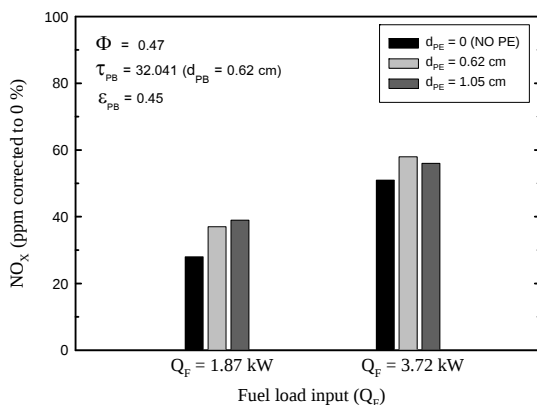
สำหรับการเปรียบเทียบปริมาณแก๊สไอเสีย พบว่าระดับ CO (รูปที่ 7) ของรูปแบบที่ 2 และ 3 (มีการติดตั้ง PE) จะสูงกว่า รูปแบบที่ 1 ที่ไม่ติดตั้ง PE เล็กน้อย เพราะอรรถิพลของอากาศจากภายนอกไหลเข้ามาในระบบช่วยให้เกิดการเผาไหม้ที่ดีขึ้น ส่วนปริมาณ NO_x (รูปที่ 8) ของหัวพ่นไฟที่ติดตั้ง PE จะสูงกว่าหัวพ่นไฟที่มีเพียง PB ซึ่งเป็นไปตามระดับ T ที่เกิดขึ้น



รูปที่ 6 การเปรียบเทียบอิทธิพลของ Q_F ต่อ T ของหัวพ่นไฟ 3 รูปแบบ ที่ $\Phi = 0.47$



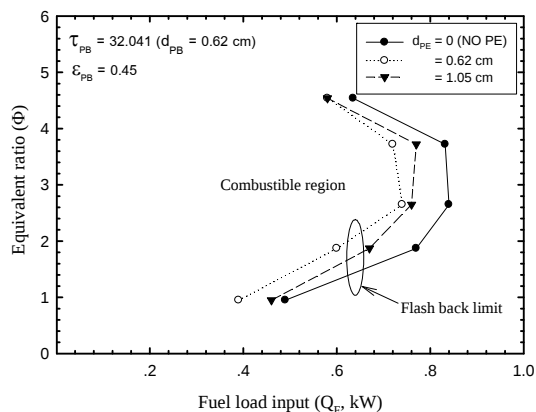
รูปที่ 7 การเปรียบเทียบอิทธิพลของ Q_F ต่อปริมาณ CO ของหัวพ่นไฟ 3 รูปแบบ ที่สถานะ $\Phi = 0.47$



รูปที่ 8 การเปรียบเทียบอิทธิพลของ Q_F ต่อปริมาณ NO_x ของหัวพ่นไฟ 3 รูปแบบ ที่สถานะ $\Phi = 0.47$

4.3 ขอบเขตการเผาไหม้

สถานะขอบเขตเปลวไฟเสถียร (Stability of combustion) หรือขอบเขตการเผาไหม้ (Flammability limit) ของหัวพ่นไฟเชื้อเพลิงเหลวแบบวัสดุพ่นเม็ดกลมอัดแน่นชนิดหินตู้ปลา ถูกแสดงไว้ในรูปที่ 9 โดยแสดงเพียงขอบเขตการย้อนกลับ (Flash back limit) เท่านั้น ซึ่งมีนิยาม คือ ปรากฏการณ์ที่เปลวไฟเคลื่อนตัวย้อนกลับหรือสวนทางกับทิศทางการจ่ายเชื้อเพลิง ซึ่งเปลวไฟจะเคลื่อนออกจากผิวด้านบนของชั้นวัสดุพ่น ($x = 0$ mm) และสุดท้ายเกิดการดับ ซึ่งหัวพ่นไฟทั้ง 3 รูปแบบมีขอบเขตการย้อนกลับอยู่ในช่วง 0.6 – 0.8 สำหรับขอบเขตการเป่าดับ (Blow-off limit) ไม่สามารถเกิดขึ้นในการทดลองของงานวิจัยนี้ เพราะข้อจำกัดของเครื่องวัดอัตราการไหลของอากาศ จากรูปที่ 9 ได้ข้อสังเกตว่า หัวพ่นไฟที่มีเพียง PB (รูปแบบที่ 1) มีขอบเขตการเผาไหม้ที่กว้างกว่าหัวพ่นไฟที่ติดตั้ง PE เพราะหัวพ่นไฟรูปแบบที่ 1 ได้รับอากาศในปริมาณที่เพียงพอต่อการเผาไหม้ เนื่องจากได้รับอากาศจาก 2 ส่วน ประกอบไปด้วยส่วนแรกเป็นอากาศจากภายนอกเข้ามาผสมกับไอน้ำมันเชื้อเพลิง และอีกส่วนคืออากาศหมุนวนแบบสามทิศทางที่จ่ายมาจากด้านข้างของหัวพ่นไฟ ทำให้เกิดการเผาไหม้ที่กว้างขึ้น เมื่อเปรียบเทียบหัวพ่นไฟที่ติดตั้ง PE ทั้งสองรูปแบบพบว่า ขอบเขตของการเผาไหม้ในหัวพ่นไฟรูปแบบที่ 2 ($d_{PE} = 0.62$ cm) แคบกว่ารูปแบบที่ 3 ($d_{PE} = 1.05$ cm) เกิดจากอิทธิพลในการแผ่รังสีย้อนกลับจาก PE ไปยัง PB ของหัวพ่นไฟรูปแบบที่ 2 มีค่ามากกว่ารูปแบบที่ 3 สามารถอธิบายปรากฏการณ์นี้ได้ด้วยค่าความหนาเชิงแสง (Optical thickness, τ) ใน PE กล่าวคือ แม้ว่าหัวพ่นไฟรูปแบบที่ 2 จะมีค่า ϵ ที่ต่ำกว่าแต่ความสามารถในการแผ่รังสีความร้อนจะถูกควบคุมด้วยค่า τ มากกว่า ซึ่งหัวพ่นไฟรูปแบบที่ 2 มีค่า τ_{PE} เท่ากับ 38.449 สูงกว่ารูปแบบที่ 3 ($\tau_{PE} = 20.482$) ส่งผลให้ PE มีการแผ่รังสีย้อนกลับไปยัง PB ได้มากกว่า ซึ่งขณะนี้ PB จะทำหน้าที่เป็นตัวช่วยระเหย (Evaporator) น้ำมันดีเซล แต่ขณะเดียวกันเมื่อ PB มีระดับ T สูงขึ้น PB จะเริ่มทำหน้าที่เป็นตัวแผ่รังสีความร้อน (Emitter) โดยเฉพาะการแผ่รังสีความร้อนสวนทางกับทิศทางการจ่ายเชื้อเพลิงจะทำให้เชื้อเพลิงเหลวระเหยและเกิดการเผาไหม้ก่อน



รูปที่ 9 ขอบเขตเปลวไฟเสถียรของหัวพ่นไฟเชื้อเพลิงเหลว ชนิดวัสดุพรมเม็ดกลมอัดแน่นทั้ง 3 รูปแบบ

5. สรุปผลการทดลอง

1) โครงสร้างทางอุณหภูมิ (T) ของหัวพ่นไฟทั้ง 3 รูปแบบ ในกรณี $\Phi = 0.47$ มีแนวโน้มสูงกว่ากรณี $\Phi = 0.26$ เนื่องจากอิทธิพลของอากาศส่วนเกิน (Excess air) ที่มีปริมาณเพิ่มขึ้น และระดับ T ในกรณี $Q_F = 3.72$ kW สูงกว่า ในกรณี $Q_F = 1.87$ kW เนื่องจากระบบการเผาไหม้ได้รับพลังงานหรือปริมาณเชื้อเพลิงที่เพิ่มมากขึ้น

2) โครงสร้างทางความร้อน (T) ของหัวพ่นไฟกรณีที่มีการติดตั้ง PE (รูปแบบที่ 2 และ 3) มีระดับสูงกว่ากรณีที่ไม่มี PE (รูปแบบที่ 1) เนื่องจากมีกลไกการระเหยที่ดีกว่า ซึ่งเป็นอิทธิพลของการแผ่รังสีความร้อนย้อนกลับของ PE มายัง PB

3) หัวพ่นไฟรูปแบบที่ 2 มีระดับโครงสร้างทางความร้อน (T) สูงกว่าหัวพ่นไฟรูปแบบที่ 3 เพราะวัสดุพรม PE ของรูปแบบที่ 3 มีค่าความพรุน (ϵ) มากกว่า สามารถดูดซับพลังงานจากการพาความร้อนของแก๊สไอเสียขณะไหลผ่าน PE ได้สูงกว่า ส่งผลให้มีการแผ่รังสีย้อนกลับไปยัง PB ได้ดีกว่า

4) ปริมาณ CO ของหัวพ่นไฟรูปแบบที่ 2 และ 3 (มีการติดตั้ง PE) จะสูงกว่า รูปแบบที่ 1 ที่ไม่ติดตั้ง PE เล็กน้อย เพราะอิทธิพลของอากาศส่วนที่สอง (Secondary air) จากภายนอกไหลเข้ามาในระบบช่วยเกิดการเผาไหม้ให้ดีขึ้น สำหรับปริมาณ NO_x หัวพ่นไฟที่ติดตั้ง PE จะสูงกว่าหัวพ่นไฟที่มีเพียง PB เพราะระดับ T ที่สูงขึ้น แต่หัวพ่นไฟทุกรูปแบบ

ล้วนมีปริมาณ NO_x ก่อนข้างต่ำไม่เกิน 60 ppm เพราะอุณหภูมิการเผาไหม้ไม่สูงเท่าที่ควร

5) สภาพะขอบเขตเปลวไฟเสถียร (Stability of combustion) ซึ่งแสดงด้วยขอบเขตการย้อนกลับ (Flash back limit) ของหัวพ่นไฟเชื้อเพลิงเหลวแบบวัสดุพรมเม็ดกลมอัดแน่นชนิดหินดูปลาทั้ง 3 รูปแบบมีขอบเขตการย้อนกลับอยู่ในช่วง 0.6 – 0.8 และหัวพ่นไฟที่มีเพียง PB (รูปแบบที่ 1) มีขอบเขตการเผาไหม้ที่กว้างกว่าหัวพ่นไฟที่ติดตั้ง PE แต่หัวพ่นไฟรูปแบบที่ 2 แคบกว่ารูปแบบที่ 3 เพราะค่า τ_{PE} ของ PE ในหัวพ่นไฟรูปแบบที่ 2 สูงกว่า มีความสามารถในการแผ่รังสีย้อนกลับไปยัง PB ได้มากกว่า ซึ่ง PB จะทำหน้าที่เป็นทั้งตัวระเหย (Evaporator) และตัวแผ่รังสีความร้อน (Emitter) ซึ่งการแผ่รังสีความร้อนในทิศทางสวนกับการจ่ายเชื้อเพลิง จะทำให้เชื้อเพลิงเหลวระเหยและเกิดการเผาไหม้ก่อนจะมาถึงชั้น PB นำไปสู่ปรากฏการณ์เปลวไฟย้อนกลับ

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ได้ให้เงินทุนสนับสนุนในการจัดทำงานวิจัยครั้งนี้ และขอขอบคุณ นายนันทร สายสิญจน์ นายอนุกร โอบขุนทด และนายสงัด แสนดี นักศึกษาสาขาวิศวกรรมเครื่องกล ซึ่งทำงานวิจัยภายในห้องปฏิบัติการวิจัยการพัฒนาเทคโนโลยีของวัสดุพรม (Development in Technology of Porous Materials Research Laboratory: DITO-Lab) คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ได้ช่วยเก็บข้อมูลการทดลองบางส่วนจนทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลงไปด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

- [1] M. Kaplan, and M.J. Hall, "The Combustion of Liquid Fuels within a Porous Media Radiant Burner", Experiment Thermal and Fluid Science, Vol. 11 (1), 1995, pp. 13-22.
- [2] C.J. Tseng and J.R. Howell, "Combustion of Liquid Fuels in Porous Radiant Burner", Combustion Science and Technology, Vol. 112, 1996, pp. 141-161.

- [3] H. Takami, T. Suzuki, Y. Itaya, and M. Hasatani, "Performance of Flammability of Kerosene and NO_x Emission in the Porous Burner", Fuel, Vol. 77 (3), 1998, pp. 165-171.
- [4] F. Weinberg, "Heat-recirculating Burners: Principles and Some Recent Development", Combustion Science and Technology. Vol. 121, 1996, pp. 3-22.
- [5] S. Jugjai, N. Wongpanit, T. Laoketkan and L. Nokkaew, "The Combustion of Liquid Fuels using a Porous Medium", Experiment Thermal and Fluid Science, Vol. 26 (1), 2002, pp. 15-23.
- [6] P. Amatachaya and B. Krittacom, "The Combustion of Liquid Fuels using a Packed Bed", Proceeding of International Conference on Power Engineering (ICOPE-09), 2009, Kobe, JAPAN.
- [7] บัณฑิต กฤตาคม, "หัวพ่นไฟแบบวัสดุพรุนโดยใช้น้ำมันดีเซลเป็นเชื้อเพลิง", วารสารวิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา, ปีที่ 21 ฉบับที่ 2, 2553, หน้า 85 – 92.
- [8] S. Jugjai and N. Polmart, "Enhancement of Evaporation and Combustion of Liquid Fuels", Experiment Thermal and Fluid Science, Vol. 27 (8), 2003, pp. 901-909.
- [9] Jugjai, S. and C. Phothiya, "Liquid Fuels-fire Porous Combustor-heater", Fuel, Vol. 86, 2006, pp.1062-1068.
- [10] B. Krittacom, P. Amatachaya, W. Srimuang and K. Inla, "The Pack-Bed Sphere Liquid Porous Burner", International Conference on Fluids and Thermal Engineering (ICFTE 2011), 2011, River View Hotel, SINGAPORE.
- [11] B. Krittacom, P. Amatachaya, W. Srimuang and K. Inla, "The Combustion of Diesel Oil on Porous Burner installed Porous Emitter Downstream", The Eighth KSME-JSME Thermal and Fluids Engineering Conference (TFEC8), 2012, Songdo Convensia Center, Incheon, KOREA.
- [12] บัณฑิต กฤตาคม และทวีศิลป์ เล็กประดิษฐ์, "อิทธิพลของวัสดุพรุนตัวแปรรังสีต่อการเผาไหม้ของหัวพ่นไฟชนิดวัสดุพรุนโดยใช้เชื้อเพลิงเหลว", วารสารวิชาการวิศวกรรมศาสตร์ ม.อบ., ปีที่ 2 ฉบับที่ 2, 2554, หน้า 10 – 17.
- [13] K. Kamiuto and S. S. Yee, "Correlated Radiative Transfer through a Packed Bed of Opaque Sphere", International Communications in Heat and mass Transfer, Vol. 32 (1-2), 2005, pp. 133-139.
- [14] K. Annamalai and I. K. Puri, "Combustion Science and Engineering," New York, CRC Press, 2007.