อิทธิพลค่าความพรุนของวัสดุพรุนตัวเปล่งรังสีที่มีต่อพฤติกรรมการเผาไหม้ของหัวพ่นไฟเชื้อเพลิงเหลวชนิดวัสดุพรุนแบบสองชั้น

Effect of Porous–Emitter Porosity on the Combustion Behavior of a Bi-layer Liquid Porous Burner

สุคารทร ปราณปัญญา, พงศกร เกิดมงคล, สุวัจน์ แยกโคกสูง, ธนาวุฒิ ครุฑสระน้อย และบัณฑิต กฤตาคม *

ห้องปฏิบัติการวิจัยการพัฒนาในเทคโนโลยีของวัสดุพรุน
(Development in Technology of Porous Materials Research Laboratory: DiTo-Lab)
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ และ สถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
744 ถนนสุรนารายณ์ ตำบลในเมือง อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000
*ติดต่อ: E-mail: Panpanya60@gmail.com และ bundit.kr@rmuti.ac.th, โทรศัพท์ 044 233 073, โทรสาร 044 233 074

บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้ทำการศึกษาอิทธิพลค่าความพรุนของวัสดุพรุนตัวเปล่งรังสี (ε_{PE}) ที่มีต่อพฤติกรรมการเผาไหม้ของหัวพ่นไฟวัสดุพรุนเชื้อเพลิงเหลวชนิดเม็ดกลมอัดแน่นแบบสองชั้น วัสดุพรุนที่ใช้ในการทดลอง คือ หินตู้ปลา (Pebbles) ซึ่งหัวพ่นไฟจะแบ่งออกเป็นสองชั้น คือ ชั้นบนเรียกว่าวัสดุพรุนหัวพ่นไฟ(PB)บรรจุด้วยหินตู้ปลาที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย (d_{PB}) เท่ากับ 1.0 cm มีค่า ε_{PB} คือ 0.412 ส่วนชั้นล่างเรียกว่าวัสดุพรุนตัวแผ่รังสี (PE) จะใช้หินตู้ปลาที่มี d_{PE} แตกต่างกัน 2 ค่า ได้แก่ 1.5 และ 2.0 cm มีค่า ε_{PE} คือ 0.425 และ 0.475 ตามลำดับ เชื้อเพลิงถูกจ่ายให้กับระบบด้วยการหยด (Q_F) จากด้านบนไหลผ่าน PB เกิดการระเหยกลายเป็นไอผสมกับอากาศแบบสี่ทิศทาง (Q_A) ที่ PE ซึ่งมีระยะห่างจากขอบล่างของ PB (X) เท่ากับ 2.5 cm และเกิดการเผาไหม้ขึ้นภายในชั้น PE นี้ จากการทดลองพบว่าโครงสร้างทางอุณหภูมิ (T) เพิ่มขึ้นตาม Q_A อย่างชัดเจนจนถึง Q_A = 20 m^3/hr แต่เมื่อเพิ่ม Q_A ต่อไปอีกพบว่า T มีแนวโน้มลดลง ส่วนกรณีอิทธิพลของ PE พบว่า T มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตาม Q_F และยังได้ข้อสังเกตว่าอุณหภูมิการเผาไหม้กรณี ε_{PE} = 0.475 สูงกว่ากรณี ε_{PE} = 0.425 เพราะวัสดุมีพื้นที่สัมผัสมากกว่าทำให้มีระยะเวลาผสมคลุกเคล้ากับไอน้ำมันเชื้อเพลิงได้นานกว่าจึงเกิดการเผาไหม้ดียิ่งขึ้น ส่วน CO จะมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตาม Q_A สำหรับ NO_x จะมีแนวโน้มลดต่ำลงตาม Q_A ที่เพิ่มขึ้น และ Q_F ที่ลดลงแต่ CO และ NO_x ที่ได้จากการเผาไหม้ของหัวพ่นไฟทั้งสองค่า ε_{PE} จะมีระดับไม่แตกต่างกันมากนัก

คำสำคัญ : หัวพ่นไฟวัสดุพรุนสองชั้น, ค่าความพรุน, น้ำมันดีเซล, การเผาไหม้

Abstract

The aim of this paper is to study the effect of porous–emitter porosity (ε_{PE}) on the combustion behavior of a bi-layer liquid porous burner. Porous media used in the experiment was pebbles. The present burner was divided into two regions: upper and lower-porous region. The pebbles having average diameter (d_{PB}) of 10 cm and ε_{PB} of 0.412 was packed in the upper one called as a porous burner (PB). The lower region was defined as the porous emitter (PE). Two d_{PE}, i.e. 1.5 and 2.0 cm, having different ε_{PE} of 0.425 and 0.475 were examined in the lower one. Fuel (Q_F) dropped from the top through PB and then, was evaporated at PE. Thus, the combustion was achieved in the PE after the vapor oil was mixed with four-way air flow (Q_A). The mixing location of air and fuel (X) was settled at 2.5 cm. form the PB bottom. In the experiment, it was found that the temperature

profile (T) was explicitly increased with Q_A but T was decreased for Q_A > 20 m^3/hr. The trend of T was increased with Q_F. The level of T in the case of ε_{PE} = 0.475 was higher than the case of ε_{PE} = 0.425. As this result, for a higher ε_{PE}, it was explained that a higher surface area for heat transfer of the pebbles and air was achieved. Then, a longer period of mixing time between oil vapor and air was obtained. The CO trended increase with Q_A. The NO_X trended to decrease as decreasing Q_A and increasing Q_F. However, the CO and NO_X released from two burner cases were very not different level.
Keyword: A bi-layer Porous burner, Porosity, Diesel oil, Combustion

1. บทนำ

การนำเอาวัสดุพรุนเข้ามาใช้ร่วมกับการเผาไหม้เชื้อเพลิงเหลวด้วยวิธีการหยดลงบนชั้นวัสดุพรุนเป็นเทคนิคช่วยในการทำให้เชื้อเพลิงเหลวเกิดการระเหยตัวกลายเป็นไอเชื้อเพลิงได้ดีดังปรากฏการศึกษาเชิงทดลองอย่างมากมายในช่วงตลอด 20 ปีที่ผ่านมา [1-5] ซึ่งทั่วไปจะเรียกการเผาไหม้เชื้อเพลิงเหลวด้วยเทคนิควัสดุพรุนนี้ว่าหัวพ่นไฟวัสดุพรุน (Porous burner, PB) แต่อย่างไรก็ตามกระบวนการเผาไหม้ด้วยวิธีดังกล่าวยังคงมีข้อเสียบางประการ คือ เชื้อเพลิงมีการระเหยตัวไม่หมดในชั้นวัสดุพรุนหัวพ่นไฟ (PB) ที่มีเพียงชั้นเดียวส่งผลให้ยังมีเชื้อเพลิงเหลวบางส่วนที่สามารถเผาไหม้ต่อไปได้อีก

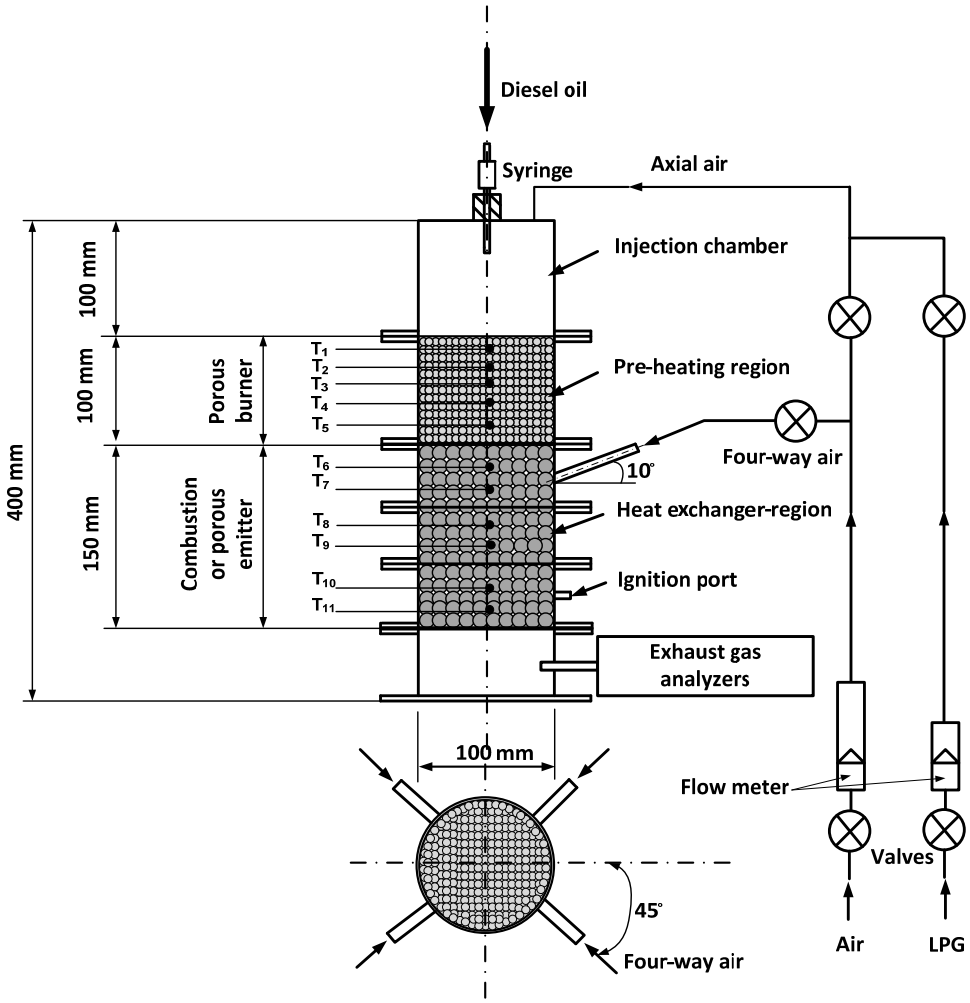
ด้วยปัญหาดังกล่าวจึงมีนักวิจัยหลายกลุ่มประยุกต์ใช้วัสดุพรุนตัวเปล่งรังสี (Porous emitter, PE) ร่วมกับวัสดุพรุนหัวพ่นไฟ (PB) [6-10] โดยติดตั้งให้แยกห่างจากกัน เพื่อให้เชื้อเพลิงคลุกเค้ากับอากาศที่จ่ายเข้ามาด้านข้างแล้วเกิดการเผาไหม้ในบริเวณช่องว่างนี้ แต่อย่างไรก็ตามการระเหยตัวของไอน้ำมันของหัวพ่นไฟแบบ PB และ PE แยกห่างกันนี้ไม่มีความต่อเนื่องโดยเฉพาะในกรณีที่มีการจ่ายเชื้อเพลิงในอัตราสูง ๆ หรือค่าอัตราส่วนสมมูลสูง กล่าวคือเมื่อไอเชื้อเพลิงระเหยออกมาและเกิดการเผาไหม้ในช่องว่างนั้น แม้ว่า PE จะช่วยส่งเสริมการระเหยโดยการแผ่รังสีความร้อนย้อนกลับไปยัง PB แล้วก็ตามแต่ด้วยปริมาณเชื้อเพลิงที่จ่ายเข้ามาในระบบมากเกินไปส่งผลให้มีน้ำมันบางส่วนไม่ได้เผาไหม้ในบริเวณกึ่งกลางระหว่าง PB และ PE จึงเป็นปัญหาที่ต้องแก้ไขต่อไป

ดังนั้นบทความนี้งานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดที่จะนำเอาวัสดุทั้งสองมาชิดติดกันเพื่อช่วยทำให้กลไกการระเหยของเชื้อเพลิงเหลวดียิ่งขึ้น ซึ่งจะเรียกเทคนิคนี้แบบนี้ว่าการเผาไหม้แบบกรอง (Filtration combustion) หรือการเผาไหม้เชื้อเพลิงด้วยวัสดุพรุนแบบสองชั้น (Bi–layer porous media) เพราะการเผาไหม้แบบวัสดุพรุนสองชั้นได้มีการศึกษาทดลองและประสบความสำเร็จมาแล้วในกรณีการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงแก๊ส [11-15] ผลการทดลองที่น่าสนใจคือโครงสร้างทางอุณหภูมิจะมีลำดับสูงตลอดในชั้นวัสดุพรุนทั้งสองไม่ใช่เฉพาะบริเวณที่มีการเผาไหม้เท่านั้นและเกิดขึ้นทุก ๆ การจ่ายเชื้อเพลิงทั้งที่มีค่าต่ำและสูงก็ยังเผาไหม้ได้หมดเป็นอย่างดี สำหรับบทความวิจัยนี้จะเลือกใช้วัสดุพรุนเม็ดกลมอัดแน่นที่ทำมาจากหินตู้ปลามาสร้างเป็นหัวพ่นไฟ กล่าวคือหินตู้ปลาที่มีค่าความพรุนเท่ากับ 0.412 (d_{PB}=1 cm) สร้างเป็น PB แต่ PE จะมีการศึกษาค่าความพรุนแตกต่างกัน 2 ค่าประกอบไปด้วย 0.425 (d_{PE}=1.5 cm) และ0.475 (d_{PE}=2.0 cm) ตามลำดับ

2. อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

รูปที่ 1 แสดงอุปกรณ์การทดลองของหัวพ่นไฟเชื้อเพลิงเหลวชนิดวัสดุพรุนแบบสองชั้นซึ่งแบ่งออกเป็น 3 ส่วนที่สำคัญประกอบด้วย ส่วนที่หนึ่งเป็นส่วนป้อนน้ำมันเชื้อเพลิง (Injection zone) โดยการหยดน้ำมันดีเซลจากจุดจ่ายน้ำมันเชื้อเพลิง (Syringe) ลงสู่วัสดุพรุนส่วนที่สองของระบบอุปกรณ์การทดลองนี้ ซึ่งจะเรียกวัสดุพรุนชั้นที่สองว่าวัสดุพรุนหัวพ่นไฟ (Porous burner, PB) จะทำหน้าที่อุ่นน้ำมันเชื้อเพลิงเพื่อให้เกิดการระเหยของน้ำมันเชื้อเพลิงซึ่งอาจเรียกช่วงนี้ว่าช่วงอุ่นความร้อน (Pre-heating region) วัสดุพรุนจะบรรจุอยู่ในท่อสแตนเลสที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกเท่ากับ 104 mm หนา 20 mm และมีฉนวนหุ้มหนา 50 mm เป็นระยะทางยาว 400 mm ลำดับส่วนสุดท้ายคือส่วนที่มีการติดตั้งวัสดุพรุนตัวเปล่งลังสี (Porous emitter, PE) กล่าวคือ เมื่ออากาศถูกจ่ายเข้ามาสู่ PE แบบสี่ทิศทางจะเกิดคลุกเคล้ากับ

ไอน้ำมันเชื้อเพลิงนั้นและเกิดการเผาไหม้ขึ้นโดยเปลวไฟ เกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้จะเกิดขึ้นภายในชั้นวัสดุพรุน ภายในเป็นวัฏจักรและเกิดการเผาไหม้อย่างต่อเนื่อง ตราบใดที่มีการหยดเชื้อเพลิงลงบนชั้นวัสดุพรุน ด้วยเหตุ



รูปที่ 1 แสดงแผนผังหัวพ่นไฟวัสดุพรุนตัวเปล่งรังสีที่มีต่อพฤติกรรมการเผาไหม้ของหัวพ่นไฟเชื้อเพลิงเหลว ชนิดวัสดุพรุนแบบสองชั้น

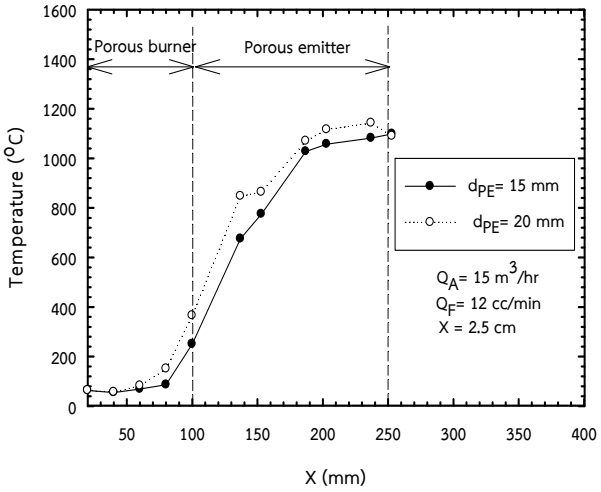
จากส่วนประกอบทั้งหมดของหัวพ่นไฟแบบนี้จะมีหลักการทำงาน คือ เมื่อน้ำมันเชื้อเพลิงถูกหยดลงมาจากด้านบนสุดของระบบผ่าน Injection zone จนมาถึงส่วนที่เป็นวัสดุพรุน Pre-heating region ที่มีอุณหภูมิต่อการระเหยจะทำให้เชื้อเพลิงกลายเป็นไอจนหมดในชั้นวัสดุพรุนหลังจากนั้นไอน้ำมันเชื้อเพลิงจะไหลลงมาสู่บริเวณทางออกของชั้นวัสดุพรุนเข้าสู่วัสดุพรุนในชั้นที่สอง Heat exchanger-region เกิดการผสมคลุกเคล้ากับอากาศที่ถูกจ่ายเข้ามาด้านข้างอย่างรุนแรง นำไปสู่การจุดติดไฟ (Ignition) และเกิดการเผาไหม้ ในที่สุดเปลวไฟที่เกิดขึ้นจะแผ่รังสีความร้อนย้อนกลับไปยังชั้นวัสดุพรุนทำให้มีความร้อนหมุนเวียน นี้เพื่อให้เข้าใจถึงปรากฏการณ์การเผาไหม้กลไกการระเหยของเชื้อเพลิง และการส่งถ่ายความร้อนระหว่างชั้นวัสดุพรุนชั้นแรกกับเปลวไฟที่เกิดขึ้นในวัสดุพรุนชั้นที่สองอุณหภูมิตามแนวแกนและแก๊สไอเสียจึงถูกตรวจวัด ดังรายละเอียดดังต่อไปนี้ เทอร์โมคัปเปิ้ลชนิดเค (K-type thermocouples) จำนวน 14 ชิ้นที่มีขนาด เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.1 mm จะถูกติดตั้งในระบบ และถูกตรวจวัดหาปริมาณออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x) คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ออกซิเจน (O_2) และคาร์บอนมอนนอกไซด์ (CO_2) ด้วยเครื่องวิเคราะห์แก๊สไอเสีย (Exhaust analyzer) ยี่ห้อ Testo รุ่น M350 นำเสนอปริมาณแก๊สไอเสีย

โดยปรับค่าเทียบกับออกซิเจนส่วนเกิน 0% ในพื้นฐานแห้ง(Correction by 0% excess oxygen on dry basis)

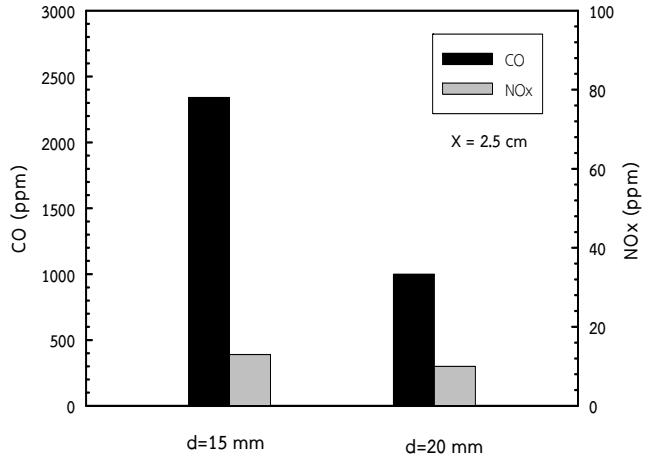
3. ผลการทดลอง

3.1 อิทธิพลของค่าความพรุนวัสดุพรุนตัวเปล่งรังสี (ε_{PE})

รูปที่ 3.1 แสดงการเปรียบเทียบอิทธิพลของค่าความพรุนวัสดุพรุนตัวเปล่งรังสี (ε_{PE}) ที่มีผลต่อโครงสร้างทางอุณหภูมิซึ่งแสดงอยู่ในรูปการกระจายตัวของอุณหภูมิตามแนวแกนภายในอุปกรณ์การทดลอง ในที่นี้จะเรียกว่าโครงสร้างทางอุณหภูมิ (Temperature profile, T) ของการเผาไหม้หัวพ่นไฟที่สภาวะ Q_A = 15 m^3/hr, Q_F = 12 cc/min และ X = 2.5 cm จากการทดลองพบว่าที่ ε_{PE} = 0.475 จะมี T สูงกว่าที่ ε_{PE} = 0.425 เนื่องจากที่ ε_{PE} = 0.475 มีค่าความพรุนมากกว่าทำให้มีช่องว่างในการเผาไหม้มากยิ่งขึ้น และจะได้การเผาไหม้ที่สมบูรณ์สอดคล้องกับปริมาณ CO และ NO_X ซึ่งแสดง ในรูปที่ 3.2 มีแนวโน้มลดต่ำลงตามการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ ส่วนปริมาณ NO_X แทบจะไม่มีการเปลี่ยนแปลง



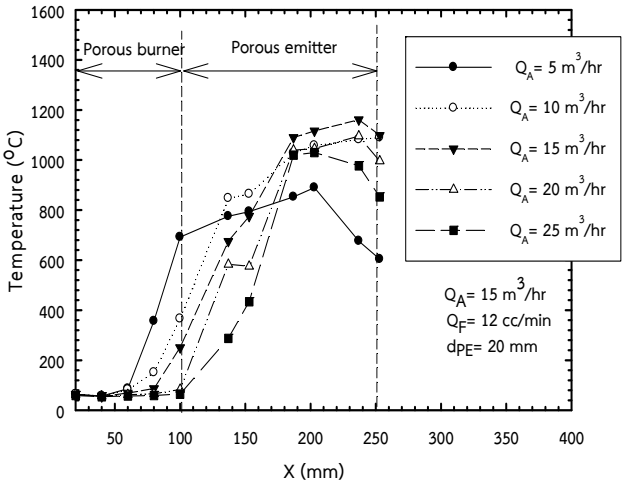
รูปที่ 3.1 อิทธิพลของ ε_{PE} ต่อ T



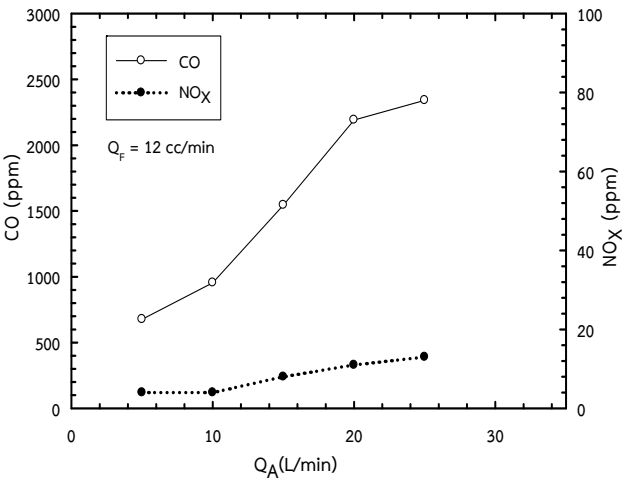
รูปที่ 3.2 อิทธิพลของ ε_{PE} ต่อ CO และ NO_X

3.2 อิทธิพลของอัตราการจ่ายอากาศ (Four-way supply air, Q_A)

รูปที่ 3.3 แสดงอิทธิพลของอัตราการจ่ายอากาศ (Q_A) ที่มีผลต่อโครงสร้างทางอุณหภูมิ (T) ที่สภาวะ Q_F = 12 cc/min, d_{PE} = 20 mm และ X = 2.5 cm T มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นที่ Q_A = 15 m^3/hr แต่ที่ Q_A = 25 m^3/hr โครงสร้างทางอุณหภูมิมีแนวโน้มลดต่ำลง เนื่องจากอากาศส่วนเกิน (Excess air) ที่เข้าไปในระบบทำให้การเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ สอดคล้องกับปริมาณ CO และ NO_X ซึ่งแสดงในรูปที่ 3.4 โดย CO มีแนวโน้มลดต่ำลงที่ Q_A = 15 m^3/hr แต่เมื่อ Q_A = 25 m^3/hr CO มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเนื่องมาจากอากาศส่วนเกิน (Excess air) ส่วน NO_X แทบจะไม่เปลี่ยนแปลง



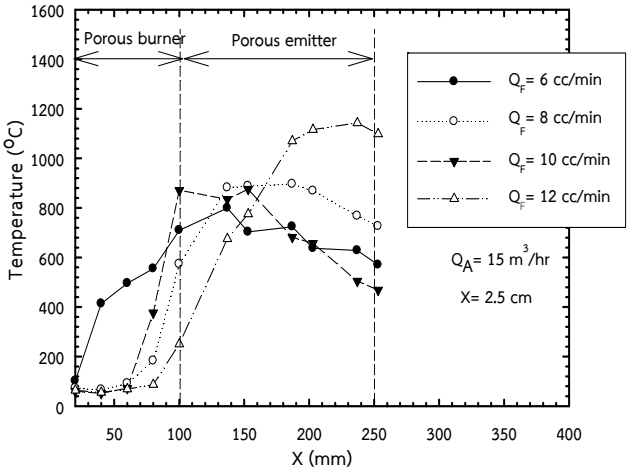
รูปที่ 3.3 อิทธิพลของ Q_A ต่อ



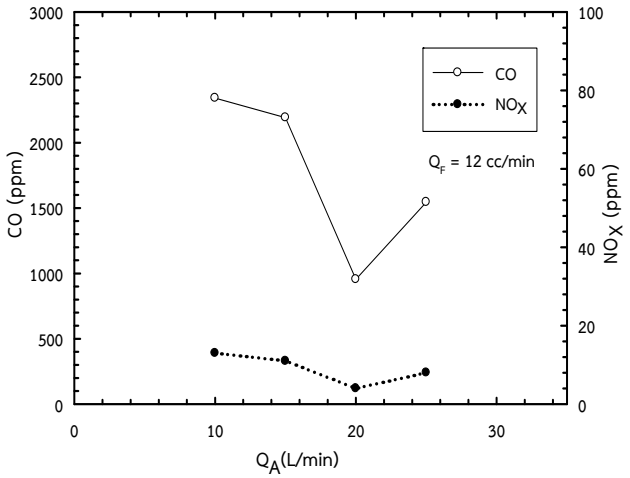
รูปที่ 3.4 อิทธิพลของ Q_A ต่อ CO และ NO_X

3.3 อิทธิพลของอัตราการจ่ายเชื้อเพลิง (Fuel rate input, Q_F)

รูปที่ 3.5 แสดงอิทธิพลของอัตราการจ่ายเชื้อเพลิง (Q_F) ที่มีผลต่อโครงสร้างทางอุณหภูมิ (T) ที่สภาวะ Q_A = 15 m^3/hr และ X = 2.5 cm จากการทดลองพบว่าเมื่อ Q_F โครงสร้างทางอุณหภูมิมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตลอดแนวความยาวของหัวพ่นไฟ เนื่องจากระบบได้รับเชื้อเพลิงเพิ่มมากขึ้นจะสังเกตเห็นได้ว่าที่ Q_F = 12 cc/min โครงสร้างทางอุณหภูมิมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นจนถึงทางออกของหัวพ่นไฟเนื่องจากการเผาไหม้หมดภายในชั้นวัสดุพรุนจนทำให้เปลวไฟนั้นลามออกมา สอดคล้องกับปริมาณ CO และ NO_X ซึ่งแสดงในรูปที่ 3.6 โดย CO มีแนวโน้มลดต่ำลง แต่จะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยที่ Q_F = 12 cc/min เนื่องจากเผาไหม้ไม่หมด และ NO_X แทบจะไม่เปลี่ยนแปลง



รูปที่ 3.5 อิทธิพลของ Q_F ต่อ T



รูปที่ 3.6 อิทธิพลของ Q_F ต่อ CO และ NO_X

4. สรุปผลการทดลอง

การศึกษาอิทธิพลค่าความพรุนของวัสดุพรุนตัวเปล่งรังสี (ε_{PE}) ที่มีต่อพฤติกรรมการเผาไหม้ของหัวพ่นไฟวัสดุพรุนเชื้อเพลิงเหลวชนิดเม็ดกลมอัดแน่นแบบสองชั้น สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

1. โครงสร้างทางอุณหภูมิ (T) ของหิน ε_{PE} = 0.475 มีแนวโน้มสูงกว่าโครงสร้างทางอุณหภูมิ (T) ของกรณี ε_{PE} = 0.425 เนื่องจากค่าความพรุนที่มีค่ามากกว่าจึงทำให้การเผาไหม้ดียิ่งขึ้น

2. โครงสร้างทางอุณหภูมิ (T) จะมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่ออัตราการจ่ายอากาศ (Q_A) เพิ่มสูงขึ้นแต่ T จะลดลงเมื่อ Q_A มีค่ามากขึ้น (ไม่เกิน 25 m^3/hr) ซึ่งในที่นี้อาจกล่าวได้ว่าเป็นอากาศส่วนเกิน (Excess air)

3. โครงสร้างทางอุณหภูมิ (T) เพิ่มสูงขึ้นเมื่ออัตราการจ่ายเชื้อเพลิง (Q_F) เพิ่มขึ้นเนื่องจากระบบได้รับพลังงานมากขึ้น

4. ปริมาณของ CO จะมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตามปริมาณ Q_A ที่เพิ่มขึ้นสำหรับปริมาณของ NO_x จะมีแนวโน้มลดต่ำลงตามปริมาณ Q_A ที่เพิ่มขึ้นและปริมาณ Q_F ที่ลดลงแต่จะมีค่าไม่เกิน 20 ppm เนื่องมาจากอุณหภูมิการเผาไหม้ต่ำ

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน (มทร.อีสาน) สำนักงานความร่วมมือเพื่อพัฒนาระหว่างประเทศ (สพร.) และห้องปฏิบัติการวิจัยการพัฒนาในเทคโนโลยีของวัสดุพรุน ที่ได้สนับสนุนสะฐานที่และเงินทุนเพื่อใช้ในการดำเนินงานวิจัยครั้งนี้จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีในการทดลองงานวิจัยนี้

6. เอกสารอ้างอิง

[1] บัณฑิต กฤตาคม (2554). หัวพ่นไฟอุตสาหกรรมและการประยุกต์ใช้วัสดุพรุนหัวพ่นไฟ. วารสาร

วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสยาม. ปีที่ 12 ฉบับที่ 1, หน้า 76-89.

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

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

[4] Jugjai S. Wongpanit N. Laoketkan T. and Nokkaew L. (2002). The Combustion of Liquid Fuels using a Porous Medium, *Experiment Thermal and Fluid Science 26*, No. 1, 15-23.

[5] Amatachaya P. and Krittacom B. (2009). The Combustion of Liquid Fuels using a Pack Bed. *Proceeding of International Conference on Power Engineering (ICOPE-09). Kobe, JAPAN.*

[6] Krittacom B. Amatachaya P. Srimuang W. and Imla K. (2012). The Combustion of Diesel Oil on Porous Burner installed Porous Emitter Downstream. *The Eighth KSME-JSME Thermal and Fluids Engineering Conference (TFEC8). Songdo Convensia Center, Incheon, KORE.*

[7] A. P. Aldushin, I. E. Rumanov, B. J. Matkowsky. (1999). Maximal energy accumuration in a superadiabatic filtration combustion wave, *Combustion and Flame* 118 76-90.

[8] Fabiano contarin, Alexei V. saveliev, Alexader A. Fridman, and Lawrence A. Kennedy. (2003). A reciprocal flow filtration combustor with embedded hert exchangers numerical study.

[9] J.P. Bingue, A.V. Saveliev, Lawrence A. Kennedy. (2004). Optimization of hydrogen production by filtration combustion of methane by oxygen enrichment and depletion.

[10] Valeri Bubnovich, Mario Toledo. (2006). Analytical modeling of filtration combustion in inert porous media.

[11] สำเริง จักรใจ (2547). การเผาไหม้, กรุงเทพฯ, สำนักพิมพ์จุฬาลงกรมหาวิทยาลัย.

[12] Weinberg, F. (1996). Heat-recirculating burners: principles and some recent development, *Combustion Science and Technology.* Vol. 121, pp. 3-22.

[13] วิกิพีเดีย สารานุกรมเสรี (2553). หมวดหมู่:หิน, [Online]: http : //th.wikipedia.org/wiki.

[14] Kamiuto, K. & Yee, S. S. (2005). Correlated radiative transfer through a packed bed of opaque Sphere, *International Communication in Heat and Mass Transfer*, Vol. 32 (1-2), pp.133-139.

[15] พิพัฒน์ อมตฉายา "การถ่ายเทความร้อน" ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล อีสาน นครราชสีมา