



COMBUSTION OF BIO-DIESEL OIL ON THE PACKED-BEDSPHERE POROUS  
BURNERSTRUCTURED AS HOMOGENEOUS AND SEMI-HOMOGENEOUS

The Engineering Institute of Thailand under H.M. The King's Patronage

The Engineering Institute of Thailand  
under H.M. The King's Patronage

การเผาไหม้น้ำมันใบโอดีเซลในหัวพ่นไฟวัสดุพรุนชนิดเม็ดกลมอัดแน่น  
ที่มีโครงสร้างแบบเนื้อเดียวและกึ่งเนื้อเดียว

COMBUSTION OF BIO-DIESEL OIL ON THE PACKED-BED SPHERE POROUS BURNER  
STRUCTURED AS HOMOGENEOUS AND SEMI-HOMOGENEOUS

คุณเพ็ชร อินลา<sup>1,\*</sup> บันทิต กฤตาคม<sup>2</sup> มงคล คชาพันธ์<sup>1</sup> และรติภัทร แสงโชติ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>วิทยาลัยเทคโนโลยีพนมวันที่นครราชสีมา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมยานยนต์ E-mail: kompetme@gmail.com

<sup>2</sup>มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ห้องปฏิบัติการวิจัยการพัฒนาในเทคโนโลยีของวัสดุพรุน E-mail: bundit.kr@rmuti.ac.th

บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้เป็นการทดลองใช้น้ำมันใบโอดีเซลเป็นเชื้อเพลิงในหัวพ่นไฟวัสดุพรุน เพื่อศึกษาลักษณะของน้ำมันเชื้อเพลิง และพฤติกรรมการเผาไหม้ วัสดุพรุนที่ใช้ในการทดลองเป็นชนิดเม็ดกลมอัดแน่นที่มีการจัดเรียงตัวกัน 2 รูปแบบ ได้แก่ แบบเนื้อเดียวซึ่งเลือกใช้เซรามิกซ์ ชนิดคอร์ดิริท์ ที่มีค่าความพรุน เท่ากับ 0.391 และอีกแบบคือแบบกึ่งเนื้อเดียวจะเลือกใช้หินทรายป่าที่มีค่าความพรุน เท่ากับ 0.395 ตามลำดับ น้ำมันเชื้อเพลิงป้อนเข้าสู่ระบบด้วยการหยดจากด้านบนผ่านชั้นวัสดุพรุน เกิดการระเหย กลายเป็นไอ นำไปสู่การเผาไหม้บนบริเวณด้านล่างชั้นวัสดุพรุน อุณหภูมิลดลงตามความยาวของหัวพ่นไฟอยู่ต่อเนื่องและแสดงในลักษณะโครงสร้างทางอุณหภูมิ ขณะเดียวกันแก๊สไออกซิเจนจะจัดเรียงตัวเป็นชั้นๆ ตามอัตราการจ่ายอากาศที่มีความต่างกัน ( $Q_A$ ) โครงสร้างทางอุณหภูมิมีแนวโน้มลดลงในวัสดุพรุนทั้ง 2 รูปแบบ แต่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอัตราการจ่ายน้ำมันเชื้อเพลิง ( $Q_F$ ) และได้ข้อสังเกตที่น่าสนใจคือ โครงสร้างทางอุณหภูมิของหัวพ่นไฟแบบหินทรายป่าจะมีค่าสูงกว่าแบบเซรามิกซ์คอร์ดิริท์ สำหรับปริมาณ  $CO$  และ  $NO_x$  ที่ปล่อยออกมายังหัวพ่นไฟวัสดุพรุนชนิดเม็ดกลมอัดแน่นของงานวิจัยนี้อยู่ในเกณฑ์ที่ต่ำยอมรับได้

คำสำคัญ: น้ำมันใบโอดีเซล, หัวพ่นไฟวัสดุพรุน, วัสดุพรุนชนิดเม็ดกลมอัดแน่น, น้ำมันใบโอดีเซล

ABSTRACT

This research investigated the experiment of using Bio-diesel oil as fuel in porous burner to investigate evaporation mechanism and combustion behavior. There are two appearance structures of packed-bed sphere porous media, i.e., homogeneous and semi-homogeneous models, were used. The first one, homogeneous structure, was employed by Cordierite ceramic having porosities of 0.391. On the other hand, the pebble having porosities of 0.395 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. Axial profiles of temperature along the burner length were measured. 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. 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. The levels of  $CO$  and  $NO_x$  in the present packed-bed sphere porous burner were acceptable range.

KEYWORDS: Bio-diesel oil, porous burner, packed-bed sphere, structured semi-homogeneous

Kompet Inla<sup>1</sup> Bundit Krittacom<sup>2</sup> Mongkol Kathapant<sup>1</sup> and Ratipat Sangchot<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Phanomwa College of Technology Nakhonratchasima, Faculty of Engineering, Automotive Engineering

<sup>2</sup>Rajamangala University of Technology Isan Nakhonratchasima, Faculty of Engineering, Mechanical Engineering, Development in Technology of Porous Materials Research Laboratory (DITO-Lab)

## 1. บทนำ

นักวิจัยและวิศวกรหลายกลุ่ม [3-1] ได้ทำการศึกษา วิจัย และพัฒนาอย่างกว้างขวางเกี่ยวกับการเผาไฟหม้อน้ำเชื้อเพลิงเหลวด้วยเทคโนโลยีของวัสดุพรุน ในช่วงต้นปลายของศตวรรษที่ 19 หรือประมาณ 20 ปีที่ผ่านมา เนื่องจากวัสดุพรุนมีลักษณะเด่น คือ มีอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวสัมผัสด้วยตัวตัวสูง ส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนมาก นอกจากนี้วัสดุพรุน ยังมีค่าความสามารถในการแพร่รังสีความร้อนสูงเมื่อเทียบกับวัสดุทึบทั่วไปสามารถเปลี่ยนรูปพลังงานความร้อนระหว่างการเผาและการแพร่รังสีความร้อนได้ เป็นอย่างดี

จากลักษณะเด่นของวัสดุพูรุนดังกล่าว ได้มีนักวิจัยหลายกลุ่ม [3 ,2] นำเอาวัสดุพูรุนมาประยุกต์ใช้กับการเผาไหม้ เชื้อเพลิง เหวอ ด้วยการสเปรย์เชื้อเพลิงเหลว พร้อมทั้งป้อนอากาศเข้าไปในชั้นวัสดุพูรุนบว่ำลองน้ำมันเชื้อเพลิงสามารถระเหยและผสมกับอากาศแล้ว เกิดการเผาไหม้ในชั้นวัสดุพูรุนได้เอง (Self-sustaining combustion) อย่างไรก็ตามการป้อนเชื้อเพลิงของงานวิจัยเหล่านี้ยังคงต้องพึ่งพาหัวฉีดแรงดันสูงเพื่อพ่นให้เป็นฝอยละเอียงซึ่งยุ่งยากต่อการนำไปใช้ ด้วยเหตุนี้จึงมีแนวคิดใหม่ในการเผาไหม้ เชื้อเพลิงเหลวโดยใช้การหยดเชื้อเพลิงลงบนวัสดุพูรุนแทนการสเปรย์เข้าไปในวัสดุพูรุน ซึ่งเชื้อเพลิงยังคงระเหยภายในชั้นวัสดุพูรุน และผสมกับอากาศบริเวณทางออกของชั้นวัสดุพูรุน แล้วเกิดการเผาไหม้ ดังแสดงในผลการศึกษาของนักวิจัยหลายกลุ่มได้แก่ Takami และคณะ [3] ศ.ดร. สำเริง จักรใจ และคณะ [6-4] รวมทั้งงานวิจัยที่ผ่านมาของทีมงานผู้เขียนบทความนี้ [11-7] เป็นต้น จากการศึกษาเชิงทดลองของ การเผาไหม้แบบใหม่นี้พบว่าสามารถเผาไหม้เชื้อเพลิงเหลวได้อย่างสมบูรณ์เมื่อมีลักษณะตัวห้องเผาไหม้มีขนาดเล็กเมื่อเทียบกับแบบปกติ (Conventional open spray flame) และไม่จำเป็นต้องใช้หัวฉีดความดันสูงทำให้ง่ายต่อการนำไปใช้งานซึ่งวัสดุพูรุนในระบบการเผาไหม้ เชื้อเพลิงแบบหยดนี้จะมีบทบาทสำคัญมากในการส่งเสริมการระเหยและส่งพุ่ติกรรมเป็นตัวกระจาด เชื้อเพลิงเหลวและอุ่นไอน้ำเลือดที่ดี เพราะให้อุณหภูมิสูงเกิน Leiden frost temperature [12] ทั้งยังมีกลไกการแพร่รังสีความร้อนและ การนำความร้อนตลอดทั้งชั้นวัสดุพูรุน นำไปสู่การจัดติดไฟได้เองและช่วยส่งเสริมการเผาไหม้

จากหลักการตั้งกล่าวก่อนผู้วิจัยได้เคยทำการศึกษาเชิงทดลองความเป็นไปได้ในการใช้หินตุ๊ปลา (Pebbles) เป็นวัสดุพูนในหัวพ่นไฟที่มีน้ำมันดีเซลเป็นเชื้อเพลิง [8,7] ซึ่งผลการศึกษาประสบความสำเร็จอย่างดี อย่างไรก็ตามการทดลองดังกล่าวอย่างไม่อาจซึ้งได้ถึงลักษณะพฤติกรรมที่แท้จริงของเปลวไฟภายในชั้นหินตุ๊ปลา เนื่องจากหินตุ๊ปลาที่ถูกตัดเลือกมาทำวัสดุพูนนั้นแม้จะคัดเลือกอย่างพิถีพิถันให้มีขนาดใกล้เคียงและเท่ากันสมมูลเป็นเนื้อดีกวักัน (Homogeneous material) แต่ในความเป็นจริงก็เป็นเรื่องยาก เพราะหินตุ๊ปลาเหล่านี้เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติยากต่อการควบคุมลักษณะรูปร่าง ดังนั้นวัตถุประสงค์หลักของงานวิจัยนี้ จึงมุ่งเน้นที่จะศึกษาถึงคุณลักษณะการเผาไหม้ของเปลวไฟและกลไกการระเหยเชื้อเพลิงจากอิทธิพลของโครงสร้างการจัดเรียงตัวในชั้นวัสดุพูนเพื่อให้เข้าใจอย่างลึกซึ้งยิ่งขึ้น กลุ่มผู้วิจัยได้ทำการสร้างหัวพ่นไฟหรืออุปกรณ์การทดลองที่มีขนาดวิธีการทดลองคล้ายคลึงกับงานวิจัยที่ผ่านมา [7] ศึกษาเพิ่มเติมโดยนำอาเซรามิกซ์นีดกลอมชนิดครุดิโรท์ที่มีข่ายทั่วไปในเชิงพาณิชย์มาเป็นวัสดุพูนและเปลี่ยนเชื้อเพลิงเป็นน้ำมันใบโอดีเซล เพื่อเพิ่มและขยายขอบเขตให้เข้าใจอย่างแท้จริงเกี่ยวกับหัวพ่นไฟชนิดนี้ รวมทั้งใช้เป็นข้อมูลในการประยุกต์ใช้งานได้จริงในทางอุตสาหกรรมต่อไปและใช้กับน้ำมันทางเลือกอื่น ๆ

## 2. รายการสัมลักษณ์

## CO ก้าวครั้งหนึ่งนอกใจด้วย

## ๔ เส้นผ่าศูนย์กลางของเมืองอุดรธานี

NO ໃນໂຕຮຈນອອກໃຈດໍ

หน่วยวัดความเข้มข้นของแก๊สต่อกล้านส่วน

## Ω คํัตราการจ่ายอากาศหมุน (l/min)

### คุณภาพการจ่ายน้ำมันเชื้อเพลิง (cc/min)

T คณห晕มิจดเตี๊ออด (°C)

b 4 4

T อุณหภูมิสูงสุดของการเผาไหม้ (°C)

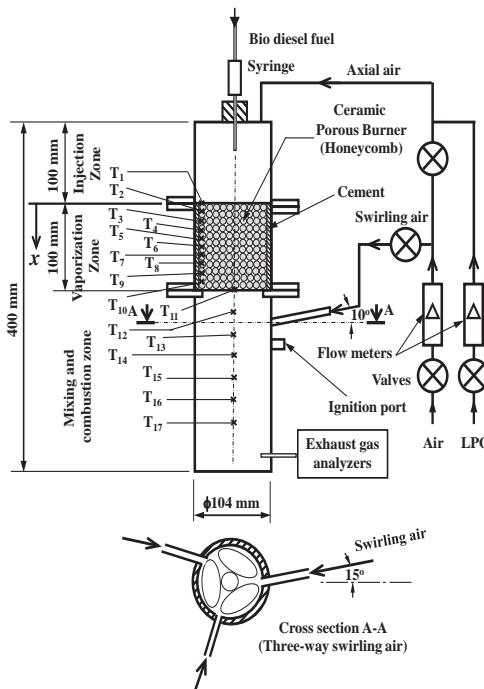
$V_s$	ปริมาตรช่องว่าง (cm <sup>3</sup> )
$V_t$	ปริมาตรห้องหมุด (cm <sup>3</sup> )
$x$	ความยาวของหัวพ่นไฟ (mm)
$\phi$	ค่าความพรุน

### 3. อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

#### 3.1 อุปกรณ์การทดลอง

รูปที่ 1 แสดงอุปกรณ์การทดลองของหัวพ่นไฟวัสดุพรุนชนิดเม็ดกลมอัดแน่นโดยใช้น้ำมันใบโอดีเซลเป็นเชื้อเพลิง ซึ่งแบ่งออกได้ 3 ขอบเขตที่สำคัญ ประกอบไปด้วย ขอบเขตที่หนึ่งเป็นส่วนที่ป้อนน้ำมันเชื้อเพลิง (Injection zone) โดยการหยดน้ำมันจากชุดจ่ายเชื้อเพลิง (Syringe) ลงสู่วัสดุพรุนเม็ดกลมอัดแน่น ขอบเขตที่สองเป็นการอุ่นน้ำมันเชื้อเพลิงและเกิดการระเหย (Vaporization zone) ภายในชั้nwัสดุพรุนหรือเป็นตำแหน่งของวัสดุพรุนอาจเรียกขอบเขตนี้ว่า หัวพ่นไฟวัสดุพรุน (Porous burner, PB) ซึ่งวัสดุพรุนที่ทำการทดลอง 2 แบบ คือ เซรามิกซ์ คอร์ตไดโรท์และหินตุ้ปลา ที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ย คือ 0.70 cm และ 0.75 cm ตามลำดับ บรรจุอยู่ข้างในห้องสแตนเลสที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกเท่ากับ 104 mm และหนาเท่ากับ 2 mm นอกจากนี้เพื่อป้องกันความร้อนสูญเสียสู่ภายนอกและให้แผ่นเซรามิกซ์วางอยู่อย่างเสถียร จึงหล่อปูนทนไฟ (Cement) หนา 0.5 cm ภายในห้องสแตนเลส ตลอดช่วงที่มีการบรรจุวัสดุพรุน (100 mm) ขอบเขตสุดท้ายคือ ส่วนที่มีการคลุกเคล้าระหว่างอากาศหมุนวนกับไอน้ำมันเชื้อเพลิงและเกิดการเผาไหม้ (Mixing and combustion zone)

จากส่วนประกอบทั้งหมดของหัวพ่นไฟแบบนี้จะมีหลักการทำงานคือ เมื่อน้ำมันเชื้อเพลิงถูกหยดลงมาจากด้านบนสุดของระบบ (Fuel load input,  $Q_f$ ) เข้าสู่ผู้ด้านบนของชัnnวัสดุพรุนใน (ส่วนแรก Fuel injection) น้ำมันเชื้อเพลิงจะไหลผ่าน PB และจะระเหยโดยเป็นไอน้ำมันในชัnn PB นี้ หลังจากนั้นไอน้ำมันเชื้อเพลิงจะไหลลงมาสู่บริเวณทางออกของชัnn PB เข้าสู่ (ส่วนที่สาม Combustion chamber) ผสมกับอากาศที่ป้อนเข้ามาทางด้านข้างของห้องเผาไหม้ในลักษณะหมุนวนแบบสามทาง (Three-way swirling air flow,  $Q_a$ ) เกิดการผสมคลุกเคล้ากันอย่างรุนแรงนำไปสู่การจุดติดไฟ (Ignition) และเผาไหม้ในที่สุด เปลาไฟ ที่เกิดขึ้นจะแพร่รังสีความร้อนย้อนกลับไปยังชัnnวัสดุพรุนทำให้มีความร้อนหมุนเวียนภายในระบบเป็นวัฏจักรเกิดการเผาไหม้อย่างต่อเนื่อง ทราบที่มีเชื้อเพลิงป้อนหยดลงมาบนชัnnวัสดุพรุน เพื่อให้เข้าใจถึงปรากฏการณ์การเผาไหม้ และกลไก การระเหยของเชื้อเพลิงและการส่งถ่ายความร้อนระหว่างชัnnวัสดุพรุนกับเปลาไฟที่เกิดขึ้น อุณหภูมิตามแนวแกนและปริมาณแก๊สไอเสียจึงถูกตรวจสอบ ดังรายเอียดต่อไปนี้ เทอร์โมคัปเปิลชนิดเอ็น (N-type thermocouples) จำนวน 17 ชิ้น ที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 mm จะถูกติดตั้งในตำแหน่งที่ก่อให้เกิดการเผาไหม้ตามแนวแกน โดยแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม กล่าวคือ กลุ่มที่ 1 มีจำนวน 10 ชิ้น ( $T_1 - T_{10}$ ) จะติดตั้งไว้ใน Porous burner zone เพื่อดูถูกต้องการอุ่นน้ำมันเชื้อเพลิงและคุณลักษณะ การเผาไหม้ กลุ่มที่ 2 มีจำนวน 7 ชิ้น ( $T_{11} - T_{17}$ ) จะติดตั้งไว้ใน Combustion zone เพื่อดูถูกต้องการของเปลาไฟที่เกิดขึ้นโดยเทอร์โมคัปเปิลทั้งหมดนี้จะต่อเข้ากับเครื่อง Data logger รุ่น MW 100 ยี่ห้อ Yokokawa และเชื่อมต่อไปยังคอมพิวเตอร์



รูปที่ 1 แผนผังอุปกรณ์การทดลองของหัวพ่นไฟวัสดุพูนชนิดเม็ดกลมอัดแน่นโดยใช้น้ำมันใบโอดีเซลเป็นเชื้อเพลิง

เพื่อประเมินผลและบันทึกค่าขณะทำการทดลอง ในส่วนของแก๊สไอเสียไหล่หัวที่เกิดขึ้นจะให้ผลจากกระบวนการทางด้านล่างของหัวสแตนเลส และถูกตรวจน้ำทาระมานอกไซด์ของไนโตรเจน ( $\text{NO}_x$ ) และคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ด้วยเครื่องวิเคราะห์แก๊สไอเสีย (exhaust gas analyzer) ยี่ห้อ Testo รุ่น M 350 ซึ่งปริมาณแก๊สไอเสียที่วัดได้จะนำเสนอด้วยค่าที่มีการปรับเทียบกับออกซิเจนส่วนเกิน 0 % ในพื้นฐานแห้ง (Correction by 0% excess oxygen on dry basis)

### 3.2 สภาวะและเงื่อนไขการทดลอง

การทดลองเพื่อศึกษาการเผาไหม้น้ำมันใบโอดีเซลในหัวพ่นไฟวัสดุพูนชนิดเม็ดกลมอัดแน่น จะจ่ายน้ำมัน ( $Q_F$ ) ทั้งหมด 5 ค่า คือ 5.98, 8.47, 11.37, 17.45 และ 30.41 kW ตามลำดับ สำหรับอากาศหมุนวน ( $Q_A$ ) จะจ่ายเริ่มต้นที่ 140 l/min และเพิ่มขึ้นทีละ 20 l/min ไปจนกว่าการเผาไหม้ของหัวพ่นไฟจะดับ (Flame extinction) แต่ไม่เกิน 450 l/min เนื่องจากเป็นข้อจำกัดของอุปกรณ์วัดอัตราการไหลของอากาศในงานวิจัยครั้งนี้

### 3.3 วิธีการหาค่าความพรุน

วิธีการหาค่าความพรุน ( $\text{Porosity, } \phi$ ) ของวัสดุพูนแบบอัดเม็ดกลมอัดแน่น มีขั้นตอนดังต่อไปนี้ นำวัสดุพูนใส่ลงในใบภาชนะรูปทรงกระบอกที่มีความสูง 10 cm และเส้นผ่าศูนย์กลางภายในเท่ากับ 9.5 cm จนเต็มภาชนะ เติมน้ำให้เต็มภาชนะหรือถึงระดับด้านบนผิววัสดุพูน ทั้งไวน้ำที่ 10 นาที เพื่อให้น้ำซึมเข้าไปในเนื้อวัสดุพูนแล้วเทน้ำออกจากภาชนะ จากนั้นตวงน้ำที่ทราบปริมาตรแน่นอนด้วยภาชนะตวงในที่นี้คือ บีกเกอร์ (Beaker) และทำการเติมน้ำอีกครึ่งให้เต็มภาชนะจนถึงระดับผิวด้านบนของวัสดุพูนอ่อนค่าปริมาตรน้ำที่เติมลงไปจากบีกเกอร์ ปริมาตรน้ำที่เติมลงไปนี้ คือ ปริมาตรซึ่งว่างที่น้ำเข้าไปแทนที่ได้ (Void-space volume,  $V_s$ ) นำปริมาตรน้ำนี้ไปหารกับปริมาตรของภายนอกภายในทั้งหมด (Total or bulk volume,  $V_T$ ) จะสามารถคำนวณหาค่าความพรุน ( $\phi$ ) ได้จาก

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

ชั่งในงานวิจัยนี้ใช้เซรามิกซ์คอร์ดิไรท์และหินตู้ปลา ที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยเท่ากัน 0.70 และ 0.75 cm ตามลำดับ จากการทดลองหาค่าความพรุนช้าๆ 略有ครั้ง พบว่าหินตู้ปลาและเซรามิกซ์คอร์ดิไรท์มีค่า  $V_s$  เป็น 373 และ 369 cm<sup>3</sup> ดังนั้นจากสมการ (1) ค่า  $\phi$  ที่ได้คือ 0.395 และ 0.391 ตามลำดับ

#### 4. ผลการทดลอง

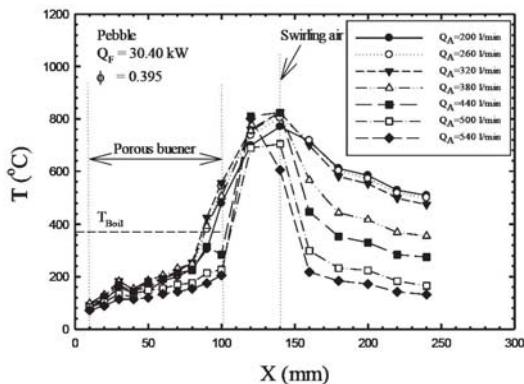
##### 4.1 อิทธิพลอัตราการจ่ายอากาศหมุนวนสามทาง ( $Q_A$ )

รูปที่ 2 แสดงอิทธิพลของอัตราการจ่ายอากาศหมุนวนสามทาง (Three way swirling air,  $Q_A$ ) ต่อโครงสร้างทางความร้อนชั่งแสดงอยู่ในรูปการกระจายตัวของอุณหภูมิตามแนวแกนภายในอุปกรณ์การทดลองชั่งในที่นี่เรียกว่า โครงสร้างทางความร้อนชั่ง (Temperature profile) และเป็นการทดลองที่สภาวะการจ่ายน้ำมันใบโอดีเซล  $Q_F = 30.41 \text{ kW}$  ในวัสดุพруนชนิดหินตู้ปลาซึ่งมีค่า  $\phi = 0.395$  พบว่าโครงสร้างทางความร้อนชั่งมีแนวโน้มลดต่ำลงเมื่อค่า  $Q_A$  เพิ่มขึ้น ปรากฏการณ์เช่นนี้สามารถอธิบายได้ตามความเป็นจริงของอากาศส่วนเกิน (Excess air) เนื่องจากระบบได้รับอากาศเกินความจำเป็นส่งผลให้อัตราส่วนผสมกับไอน้ำมันใบโอดีเซลเกิดเป็นสภาวะการเผาไหม้อดีบาง (Lean combustion) ย่อมทำให้อุณหภูมิต่ำลง ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณ CO ที่เกิดขึ้นดังแสดงในรูปที่ 3 กล่าวคือ ปริมาณ CO สูงขึ้นตามค่า  $Q_A$  ที่เพิ่มขึ้นซึ่งแสดงให้เห็นถึงการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ สำหรับปริมาณ NO<sub>x</sub> ที่เกิดขึ้นจะมีค่าต่ำกว่า 10 ppm เพราะระดับอุณหภูมิการเผาไหม้มีค่าต่ำ และมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณ  $Q_A$  ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากอุณหภูมิการเผาไหม้ที่ลดต่ำลง นอกจากนี้ยังสังเกตได้ว่าตำแหน่งอุณหภูมิสูงสุด (Maximum temperature,  $T_{Max}$ ) ที่วัดได้ ชั่งในที่นี่เปรียบเสมือนเป็นตำแหน่งของเปลวไฟ (Flame position) จะเคลื่อนตัวจากตำแหน่งอากาศหมุนวน (Swirling air,  $x = 140 \text{ mm}$ ) ย้อนกลับไปยังชั้นวัสดุพรุน ( $x = 100 \text{ mm}$ ) ตามปริมาณ  $Q_A$  ที่เพิ่มขึ้น กล่าวคือ  $T_{Max}$  จะย้ายไปอยู่ที่ตำแหน่ง  $x = 120 \text{ mm}$  หาก  $Q_A$  สูงเกิน 320 l/min เนื่องจากเป็นการรักษาเสถียรภาพของเปลวไฟเพื่อลดการสูญเสีย ความร้อนสู่บรรยากาศของการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ในกรณี  $Q_A$  สูง ๆ

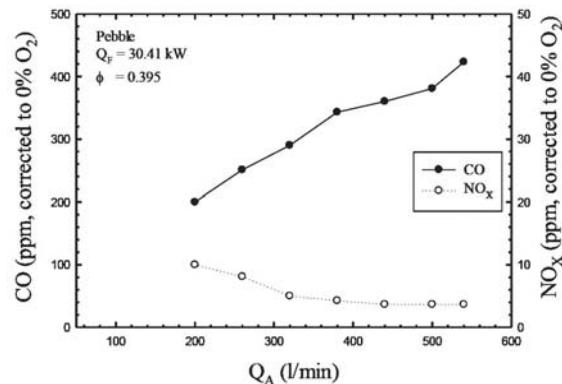
รูปที่ 4 แสดงอิทธิพลของ  $Q_A$  ต่อโครงสร้างทางความร้อนชั่งที่สภาวะการจ่ายของน้ำมันใบโอดีเซล (B5)  $Q_F = 30.41 \text{ kW}$  ในวัสดุพรุนชนิดเซรามิกซ์คอร์ดิไรท์ซึ่งมีค่า  $\phi = 0.391$  พบว่าโครงสร้างทางความร้อนชั่งมีแนวโน้มลดต่ำลงเมื่อค่า  $Q_A$  เพิ่มขึ้น ซึ่งอธิบายได้ด้วยอากาศส่วนเกิน (Excess air) เช่นเดียวกับกรณีหินตู้ปลา (รูปที่ 2) และผลที่ได้สอดคล้องกับปริมาณ CO ดังแสดงในรูปที่ 5 กล่าวคือ CO เพิ่มขึ้น เมื่อ  $Q_A$  เพิ่ม สำหรับปริมาณ NO<sub>x</sub> ที่เกิดขึ้นจะมีค่าต่ำกว่า 10 ppm เพราะระดับอุณหภูมิการเผาไหม้มีค่าต่ำ และมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยตามปริมาณ  $Q_A$  ที่เพิ่มขึ้นเป็นลักษณะคล้ายคลึงกับกรณีหินตู้ปลา นอกจากนี้ตำแหน่งของ  $T_{Max}$  หรือตำแหน่งของเปลวไฟ จะเคลื่อนตัวจากตำแหน่ง Swirling air ( $x = 140 \text{ mm}$ ) ย้อนกลับไปยังชั้นวัสดุพรุนตามปริมาณ  $Q_A$  ที่เพิ่มขึ้น โดยเฉพาะเมื่อ  $Q_A$  มากกว่า 320 l/min กล่าวคือ  $T_{Max}$  จะย้ายไปอยู่บริเวณ  $x = 120 \text{ mm}$  ซึ่งอธิบายได้ด้วยเหตุผลของการรักษาเสถียรภาพเปลวไฟและเพื่อลดการสูญเสียความร้อนสู่บรรยากาศของการเผาไหม้

นอกจากนี้หากเปรียบเทียบโครงสร้างทางความร้อนชั่งของหินตู้ปลา (รูปที่ 2) กับเซรามิกซ์คอร์ดิไรท์ (รูปที่ 4) จะพบว่าโครงสร้างทางความร้อนชั่งของหินตู้ปลา มีค่าสูงกว่าเนื่องจากการจัดเรียงตัวของเม็ดหินตู้ปลาจะมีโครงสร้างแบบไม่สม่ำเสมอเป็นเนื้อเดียว จึงทำให้เชื้อเพลิงและไอน้ำมันที่ระเหย เมื่อไหลในชั้นวัสดุพรุนจะเกิดการไหลที่ชักว่าแบบเนื้อเดียวที่มีการจัดเรียงตัวของเม็ดเซรามิกซ์คอร์ดิไรท์ที่เป็นแบบสม่ำเสมอ ก่อให้เกิดการแลกเปลี่ยนพลังงานระหว่างน้ำมันกับวัสดุพรุนอย่างเพียงพอ ซึ่งทำให้มีการระเหยเป็นไอน้ำมันของหินตู้ปลามากกว่าเซรามิกซ์คอร์ดิไรท์และนำไปสู่การเผาไหม้ที่สมบูรณ์และดีกว่า แต่เมื่อพิจารณาถึงรูปร่างของโครงสร้างทางความร้อนจะสังเกตเห็นว่ารูปร่างโครงสร้างทางความร้อนของเซรามิกซ์คอร์ดิไรท์ล้วนมีรูปร่างเป็นลีส์เหลี่ยมคงที่ (Trapezoidal shape) ซึ่งบ่งบอกให้ทราบว่าการเผาไหม้น้ำมันใบโอดีเซลในเซรามิกซ์คอร์ดิไรท์ไม่เกิดเฉพาะแต่บริเวณกึ่งกลางระหว่างผิวด้านล่างวัสดุพรุนกับอากาศหมุนวนเท่านั้นแต่จะลามยาวออกไปในช่วงทางออก ทำให้เปลวไฟในกรณีเซรามิกซ์คอร์ดิไรท์

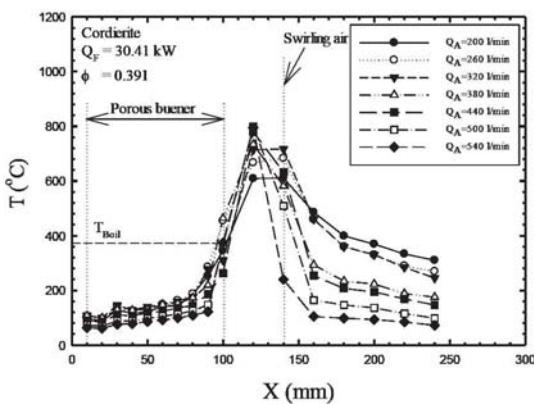
มีความยาวเพลวไฟ (Flame length) กว้างกว่าหินตุ้ปลา ด้วยอิทธิพลของไอน้ำมันที่ระเหยไม่หมดดังกล่าวนี้ ส่งผลให้การเผาไหม้ต้องตามยาวออกไป



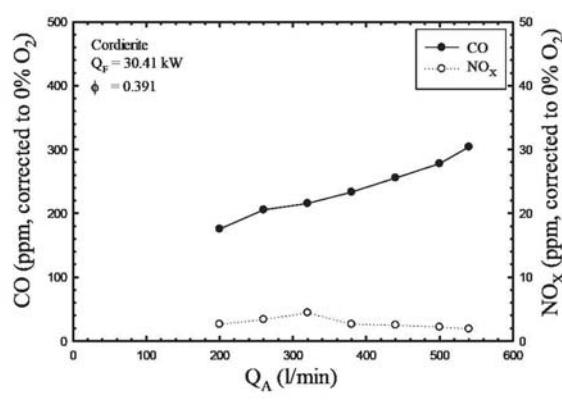
รูปที่ 2 โครงสร้างทางอุณหภูมิตามแนวแกนของหัวพ่นไฟ  
วัสดุพรุนชนิดหินตุ้ปลา (กึ่งเนื้อเดียว) ที่สภาวะ  
 $Q_F = 30.41 \text{ kW}$  และ  $\phi = 0.395$



รูปที่ 3 อิทธิพลของ  $Q_A$  ที่มีต่อ CO และ  $\text{NO}_x$  สำหรับการ  
เผาไหม้น้ำมันใบโอดีเซลในหินตุ้ปลา (กึ่งเนื้อเดียว)  
ที่สภาวะ  $Q_F = 30.41 \text{ kW}$  และ  $\phi = 0.395$



รูปที่ 4 โครงสร้างทางอุณหภูมิตามแนวแกนของ  
หัวพ่นไฟวัสดุพรุนชนิดเซรามิกซ์คอร์ดิเริท (เนื้อเดียว)  
ที่สภาวะ  $Q_F = 30.41 \text{ kW}$  และ  $\phi = 0.391$



รูปที่ 5 อิทธิพลของ  $Q_A$  ที่มีต่อ CO และ  $\text{NO}_x$  สำหรับการ  
เผาไหม้น้ำมันใบโอดีเซลในเซรามิกซ์คอร์ดิเริท (เนื้อเดียว)  
ที่สภาวะ  $Q_F = 30.41 \text{ kW}$  และ  $\phi = 0.391$

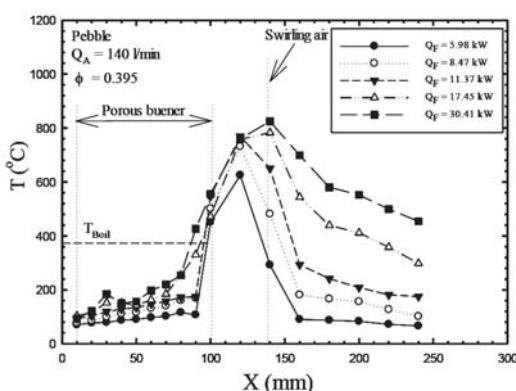
#### 4.2 อิทธิพลของการจ่ายน้ำมันเชื้อเพลิง ( $Q_F$ )

รูปที่ 6 แสดงอิทธิพลของการจ่ายน้ำมันเชื้อเพลิงใบโอดีเซล ( $Q_F$ ) ต่อโครงสร้างทางอุณหภูมิที่สภาวะ  $Q_A = 140 \text{ l/min}$  ในวัสดุพรุนชนิดหินตุ้ปลาซึ่งมีค่า  $\phi = 0.395$  พบว่าโครงสร้างทางอุณหภูมิมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามลดความยาวในแนวแกนของอุปกรณ์ ทดสอบตามปริมาณ  $Q_F$  ที่จ่ายให้แก่ระบบ เนื่องจากระบบได้รับพลังงานหรือปริมาณเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้น ส่งผลให้มี การเผาไหม้ที่สมบูรณ์ขึ้น พร้อมทั้งยังมีการแพร่ร้อนสีความร้อนจากเพลวไฟและผังห้องเผาไหม้ย้อนกลับไปยังวัสดุพรุนมากขึ้น เป็นการช่วยส่งเสริมการระเหยตัวและเป็นการอุ่นน้ำมันใบโอดีเซล ซึ่งจะสอดคล้องกับปริมาณ CO ที่มีแนวโน้มลดลงตามค่า  $Q_F$  ที่เพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 7 สำหรับปริมาณ  $\text{NO}_x$  ที่เกิดขึ้น มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามค่า  $Q_F$  เพราะมีระดับอุณหภูมิการเผาไหม้ที่สูงขึ้น อย่างไร

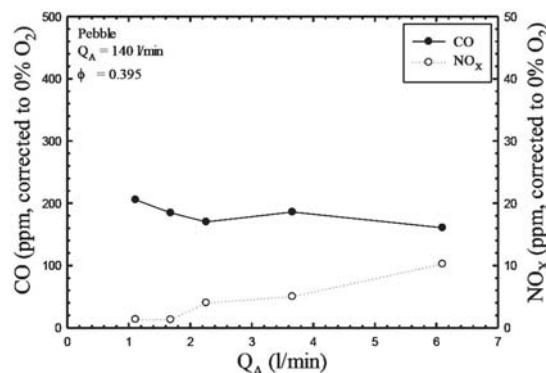
ก้าวตามปริมาณ  $NO_x$  จะมีค่าไม่เกิน 10 ppm นอกจากนี้ตำแหน่งของเพลวไฟ ( $T_{Max}$ ) จะเคลื่อนตัวจากบริเวณใต้ชั้น วัสดุพรุน ( $x = 120$  mm) เข้าสู่ตำแหน่ง Swirling air ( $x = 140$  mm) ตามปริมาณ  $Q_F$  ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากระบบได้รับเชื้อเพลิงมากขึ้นส่งผลให้มีไอน้ำมันระเหยและให้มามาจากชั้นวัสดุพรุนมากขึ้นตามไปด้วย ทำให้ไอน้ำมันเหลือไปสมกับอากาศเพื่อให้ได้สัดส่วนที่เพียงพอต่อการเผาไหม้ ด้วยเหตุนี้ความยาวของเพลวไฟ (Flame length) จึงขยายกว้างออกไปจนถึงตำแหน่ง Swirling air ทำให้โครงสร้างทางอุณหภูมิเป็นรูปสี่เหลี่ยมคงที่  $Q_F$  สูงๆ

รูปที่ 8 แสดงอิทธิพลของ  $Q_F$  ต่อโครงสร้างทางอุณหภูมิที่สภาวะ  $Q_A = 140$  l/min ในวัสดุพรุนเซรามิกซอร์ดิโรที่ซึ่งมีค่า  $\phi = 0.391$  พบว่าโครงสร้างทางอุณหภูมิมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณ  $Q_F$  ที่จ่ายให้แก่ระบบ เนื่องจากระบบได้รับพลังงาน หรือปริมาณเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้น แต่เมื่อพิจารณาปริมาณ CO ในรูปที่ 9 กลับพบว่าแม้จะเพิ่ม  $Q_F$  ให้กับระบบมากขึ้นปริมาณ CO กลับมีค่าเพิ่มขึ้นหรือแสดงให้เห็นว่าการเผาไหม้ไม่ได้มีความสมบูรณ์ตามไปด้วย อธิบายได้ดังนี้คืออย่างที่เข้าใจกันดีว่าโครงสร้าง การจัดเรียงตัวของเซรามิกซอร์ดิโรทค่อนข้างสัม่ำเสมอเป็นเชื้อเพลิงอาจทำให้การให้พลังงานเป็นไปอย่างสะดวกส่งผลให้มีเวลาในการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างไอน้ำมันเชื้อเพลิงกับวัสดุไม่เพียงพอจึงเกิดการระเหยได้น้อย ไอน้ำไปสู่การเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์เกิดการเผาไหม้ลามมาออกไปจนถึงช่วงทางออกหรือแก๊สไอลีสีด้วยเหตุนี้โครงสร้างทางอุณหภูมิจึงเกิดเป็นสี่เหลี่ยมคงที่อย่างชัดเจน และมีความยาวเพลวไฟที่กว้าง สำหรับปริมาณ  $NO_x$  ที่เกิดขึ้นในรูปที่ 9 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยตามค่า  $Q_F$  เพราะมีระดับอุณหภูมิการเผาไหม้ที่สูงขึ้นไม่มาก นอกจากนี้ตำแหน่งของเพลวไฟ ( $T_{Max}$ ) จะเคลื่อนตัวจากบริเวณใต้ชั้นวัสดุพรุน ( $x = 100$  mm) เข้าสู่ตำแหน่ง Swirling air ( $x = 140$  mm) ตามปริมาณ  $Q_F$  ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งอธิบายได้ด้วยเหตุผลการลามของเพลวไฟที่ขยายกว้างขึ้น ดังอธิบายในข้างต้น

นอกจากนี้หากเปรียบเทียบโครงสร้างทางอุณหภูมิของหินตุ้ปลา (รูปที่ 6) กับเซรามิกซอร์ดิโรท (รูปที่ 8) จะพบว่าโครงสร้างทางอุณหภูมิของหินตุ้ปลามีค่าสูงกว่าในช่วงชั้นวัสดุพรุนถึงตำแหน่งอากาศหมุน ( $0 \leq x \leq 140$  mm) แต่หลังจากนั้น ( $140 < x \leq 140$  mm) โครงสร้างทางอุณหภูมิของหินตุ้ปลาจะต่ำกว่าเซรามิกซอร์ดิโรท เนื่องจากโครงสร้างที่ชับช้อนไม่สัม่ำเสมอของหินตุ้ปลาจะก่อให้เกิดผลดีต่อการแลกเปลี่ยนความร้อนของไอน้ำมันกับวัสดุพรุนและเกิดการระเหยได้ดีกว่าเซรามิกซอร์ดิโรท จึงทำให้การเผาไหม้สมบูรณ์และลื้นสุดในช่วงระหว่างให้ผิววัสดุพรุนกับอากาศหมุน ( $140 \leq x \leq 140$  mm) ดังเห็นได้ชัดเจน เมื่อพิจารณารูปแบบโครงสร้างทางอุณหภูมิของหินตุ้ปลาจะเป็นสี่เหลี่ยมคงที่ที่แคบกว่าแบบเซรามิกซอร์ดิโรท และเพื่อยืนยันเหตุผลนี้หากเปรียบเทียบปริมาณ CO ของหินตุ้ปลา (รูปที่ 7) เซรามิกซอร์ดิโรท (รูปที่ 9) จะพบว่า CO ของเซรามิกซอร์ดิโรท มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นย่อมแสดงให้เห็นถึงการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์

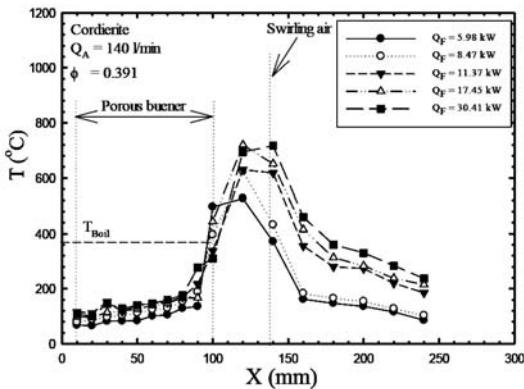


รูปที่ 6 โครงสร้างทางอุณหภูมิตามแนวแกนของหัวพ่นไฟวัสดุพรุนชนิดหินตุ้ปลา (กิงเน็อเดียว) ที่สภาวะ  $Q_A = 140$  l/min และ  $\phi = 0.395$

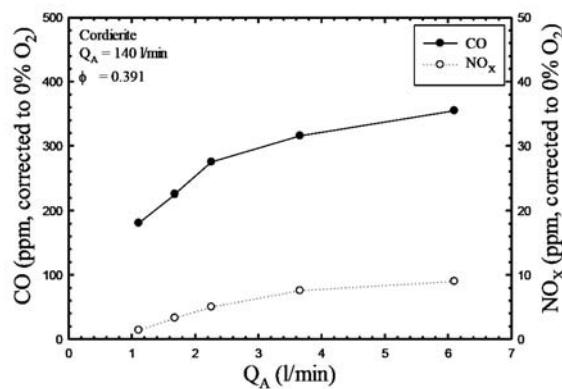


รูปที่ 7 อิทธิพลของ  $Q_F$  ที่มีต่อ CO และ  $NO_x$  สำหรับการเผาไหม้ไอน้ำมันไบโอดีเซลในหินตุ้ปลา (กิงเน็อเดียว)

ที่สภาวะ  $Q_A = 140$  l/min และ  $\phi = 0.395$



รูปที่ 8 โครงสร้างทางอุณหภูมิตามแนวแกนของหัวพ่นไฟ  
วัสดุพูนชนิดเซรามิกซ์คอร์ติโรท์ (เนื้อเตียว)  
ที่สภาวะ  $Q_A = 140 \text{ l/min}$  และ  $\phi = 0.391$



รูปที่ 9 อิทธิพลของ  $Q_A$  ที่มีต่อ CO และ  $\text{NO}_x$  สำหรับ  
การเผาไหม้น้ำมันใบโอดีเซลในเซรามิกซ์คอร์ติโรท์ (เนื้อเตียว)  
ที่สภาวะ  $Q_A = 140 \text{ l/min}$  และ  $\phi = 0.391$

## 5. สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาอิทธิพลต่างๆ ที่มีผลต่อการเผาไหม้น้ำมันใบโอดีเซลในหัวพ่นไฟวัสดุพูนชนิดเม็ดกลมอัดแน่นสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

1) โครงสร้างทางอุณหภูมิของหัวพ่นที่หินตื้ปลาและเม็ดเซรามิกซ์มีแนวโน้มลดต่ำลงเมื่อค่า  $Q_A$  ที่เพิ่มขึ้น ปรากฏการณ์เช่นนี้สามารถอธิบายได้ตามความเป็นจริงของอากาศส่วนเกิน (Excess air) เนื่องจากระบบได้รับอากาศเกินความจำเป็นส่งผลให้อัตราส่วนผสมกับน้ำมันใบโอดีเซลเกิดเป็นสภาวะการเผาไหม้อี้ดีบง (Lean combustion) ย่อมทำให้อุณหภูมิต่ำลง

2) โครงสร้างทางอุณหภูมิทั้งกรณีหินตื้ปลาและเม็ดเซรามิกซ์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณ  $Q_F$  ที่จ่ายให้แก่ระบบ เนื่องจากระบบได้รับพลังงานหรือปริมาณเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้น ส่งผลให้มีการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ขึ้น พร้อมทั้งมีการแปรรังสีความร้อนจากเปลวไฟและผนังห้องเผาไหม้ย้อนกลับไปยังวัสดุพูนมากขึ้น เป็นการช่วยส่งเสริมการระเหยตัวและเป็นการอุ่นน้ำมันใบโอดีเซล

3) ปริมาณ CO จากหัวพ่นที่หินตื้ปลาและเม็ดเซรามิกซ์ มีระดับสูงขึ้นตามปริมาณ  $Q_A$  และ  $Q_F$  ที่เพิ่มขึ้น สำหรับ  $\text{NO}_x$  จะมีแนวโน้มลดลงเมื่อ  $Q_A$  เพิ่มขึ้นและ  $Q_F$  ลดลงแต่จะมีค่าต่ำกว่า 10 ppm เพราะระดับอุณหภูมิการเผาไหม้มีค่าต่ำ

4) โครงสร้างทางอุณหภูมิของหัวพ่นที่หินตื้ปลา (กึ่งเนื้อเตียว) มีค่าสูงกว่าเซรามิกซ์คอร์ติโรท์ (เนื้อเตียว) เนื่องจากหินตื้ปลาไม่โครงสร้างแบบไม่สม่ำเสมอ จึงทำให้เชื้อเพลิงและน้ำมันที่ระเหย เมื่อไหลภายใต้หัวพ่นจะสัมผัสถูกพูนเกิดการไหลที่ช้ากว่าแบบเนื้อเตียว ก่อให้เกิดการแลกเปลี่ยนพลังงานระหว่างน้ำมันกับวัสดุพูนอย่างยาวนานและเพียงพอ ส่งผลให้หัวพ่นไฟแบบหินตื้ปลาเกิดการระเหยกล้ายเป็นไอน้ำมันมากกว่าแบบเซรามิกซ์คอร์ติโรท์

## 6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณวิทยาลัยเทคโนโลยีพิพิธมวันที่ได้ให้ทุนสนับสนุนในการจัดทำงานวิจัยครั้งนี้ และคณะผู้เขียนขอขอบคุณนายนิวัฒน์ เกตุชาติ นักศึกษาสาขาวิชาศึกษาและพัฒนาห้องปฏิบัติการวิจัยการพัฒนาในเทคโนโลยีของวัสดุพูน (Development in Technology of Porous Materials Research Laboratory, DITO-Lab) สาขาวิชาศึกษาและพัฒนาห้องปฏิบัติการ คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ที่ได้ช่วยเก็บข้อมูลการทดลองบางส่วนจนทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

เครื่องอุปกรณ์วิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน ที่ได้ช่วยเก็บข้อมูลการทดลองบางส่วนจนทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

#### เอกสารอ้างอิง

- [1] Kaplan M. and Hall M.J., (1995). The Combustion of Liquid Fuels within a Porous Media Radiant Burner. *Experiment Thermal and Fluid Science* 11, No. 1, 13–22.
- [2] Tseng C.J. and Howell J.R., (1996). Combustion of Liquid Fuels in Porous Radiant Burner. *Combustion Science and Technology* 112, 141–161.
- [3] Takami H., Suzuki T., Itaya Y. and Hasatani M., (1998). Performance of Flammability of Kerosene and NO<sub>x</sub> Emission in the Porous Burner. *Fuel* 77, No. 3, 165–171.
- [4] Jugjai S., Wongpanit N., Laoketkan T. and Nokkaw L., (2002). “The Combustion of Liquid Fuels using a Porous Medium, *Experiment Thermal and Fluid Science* 26, No. 1, 15–23.
- [5] Jugjai S. and Polmart N., (2003). Enhancement of Evaporation and Combustion of Liquid Fuels”, *Experiment Thermal and Fluid Science* 27, No. 8, 901–909.
- [6] Jugjai S. and Phothiya C., (2006) Liquid Fuels–fire Porous Combustor–heater. *Fuel* 86, 1062–1068.
- [7] 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, 2009.
- [8] Krittacom B., Amatachaya P., Srimuang W. and Inla K., The Pack–Bed Sphere Liquid Porous Burner. *International Conference on Fluids and Thermal Engineering (ICFTE 2011)*. River View Hotel, SINGAPORE, 2011.
- [9] Krittacom B., Amatachaya P., Srimuang W. and Inla K., 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, KOREA, 2012.
- [10] ทวีศิลป์ เล็กประดิษฐ์. คณ.พีชร อินลา. บัณฑิต ภาควิชาคณ. พิพัฒน์ ออมตฉาวย และ โภคณ สินสร้าง. การเผาไหม้หม้อน้ำมันดีเซลในหัวพ่นไฟ วัสดุพรุนชนิดเม็ดกลมอัดแน่น. การประชุมวิชาการ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี จังหวัดอุบลราชธานี, 2555.
- [11] คณ.พีชร อินลา. บัณฑิต ภาควิชาคณ. พิพัฒน์ ออมตฉาวย และ โภคณ สินสร้าง. การเผาไหม้หม้อน้ำมันไปโอดีเซลในหัวพ่นไฟวัสดุพรุนชนิดเม็ดกลมอัดแน่น. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 26, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี จังหวัดเชียงราย, (2555).
- [12] สำเริง จักรใจ. การเผาไหม้. กรุงเทพฯ, สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2547.