

การส่งเสริมการถ่ายเทความร้อนในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีการควบแน่นโดยใช้วัสดุพรุนที่ ทำงานร่วมกับหัวเผาวัสดุพรุน

Heat Transfer Enhancement in a Condensing Porous Heat Exchanger integrated with Porous Medium Burner

อุษา มากมูล^{1*}, พชร มะกะ², วสันต์ โยคเสนะกุล², และ สำเร็จ จักรใจ²

¹สถาบันพัฒนาและฝึกอบรมโรงงานต้นแบบ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี (บางขุนเทียน)

49 ซอยเทียนทะเล 25 ถนนบางขุนเทียน-ชายทะเล แขวงท่าข้าม เขตบางขุนเทียน กรุงเทพฯ 10150

²ห้องปฏิบัติการวิจัยเครื่องยนต์และการเผาไหม้ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

126 ถนนประชาอุทิศ แขวงบางมด เขตทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140

*ติดต่อ: E-mail: usa.mak@kmutt.ac.th, โทรศัพท์ 0-2470-7429 โทรสาร 0-2452-3455

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ทำการพัฒนาเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีการควบแน่นโดยใช้วัสดุพรุน (Condensing Porous Heat Exchanger, CPHE) ทำงานร่วมกับหัวเผาวัสดุพรุน (Porous Medium burner, PB) เพื่อส่งเสริมการถ่ายเทความร้อนและเพิ่มสมรรถนะของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน การถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้นทั้งสามโหมดในเวลาเดียวกัน คือการนำความร้อน การพาความร้อน และการแผ่รังสี หัวเผา PB สามารถทำงานได้ดีทั้งกับการป้อนเชื้อเพลิงก๊าซและเชื้อเพลิงเหลวโดยไม่มีการสเปรย์ และปลดปล่อยมลพิษทั้งก๊าซคาร์บอนออกไซด์ (CO) และออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x) ในปริมาณต่ำ สมรรถนะของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน CPHE ซึ่งได้แก่ ประสิทธิภาพเชิงความร้อนและประสิทธิผลขึ้นอยู่กับหลายตัวแปร โดยมีตัวแปรที่สำคัญ คือ อัตราป้อนความร้อน รูปแบบการเผาไหม้ และขนาดของวัสดุพรุน ผลจากการทดลองพบว่า เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนมีค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนและประสิทธิผลที่ค่อนข้างสูง โดยมีค่าสูงสุดเท่ากับ 89.61% และ 0.9961 ตามลำดับ เนื่องจากวัสดุพรุนที่อยู่ภายในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนช่วยส่งเสริมสัมประสิทธิ์การพาความร้อนภายนอกกลุ่มท่อ น้ำ อีกทั้งน้ำในไอเสียยังเกิดการควบแน่นจากสถานะแก๊สกลายเป็นของเหลวอีกด้วย โดยขนาดวัสดุพรุนที่เหมาะสมคือ 15 มิลลิเมตร การเผาไหม้แบบแพร่ (Non-premixed flame) ให้ประสิทธิภาพและประสิทธิผลสูงกว่าการเผาไหม้แบบผสมมาก่อน (Premixed flame) และมีการปลดปล่อย CO และ NO_x อยู่ในช่วงที่ไม่เกิน 535 และ 174 ppm ที่สภาวะปราศจากอากาศส่วนเกิน ตามลำดับ ตลอดช่วงอัตราการป้อน 5 ถึง 20 กิโลวัตต์ และ 5 ถึง 11 กิโลวัตต์ ของเชื้อเพลิงก๊าซแอลพีจีและเชื้อเพลิงเหลวน้ำมันก๊าด ตามลำดับ

คำหลัก: เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีการควบแน่น; เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนวัสดุพรุน; การเผาไหม้เชื้อเพลิงเหลวโดยไม่ใช้การสเปรย์; เตาเผาวัสดุพรุน; การเผาไหม้แบบมลพิษต่ำ

Abstract

This research is a development of an enhanced heat transfer condensing porous heat exchanger (CPHE) which is integrated with a Porous medium burner (PB). The heat exchanger is filled up with the inert alumina balls which are used as the porous medium in order to enhance heat transfer rate. Convective heat transfer coefficient on the tube exterior (h_o) is increased and all three modes of heat transfer, including conduction, convection, and radiation, occur simultaneously. The PB can be operated by supplying of both gaseous fuel and liquid fuel with low emission of CO and NO_x. Performances of the CPHE in terms of thermal efficiency and effectiveness are influenced by the many key parameters, such as firing rate, premixed or non-premixed combustion modes, and diameter of the alumina ball.

The experimental results show that, the CPHE has high thermal efficiency and high effectiveness with the maximum values of 89.61% and 0.9961, respectively. Condensation of the vapor in exhaust gas is achieved. Using of 15 mm diameter of alumina ball yields the best performance and the operation in non-premixed flame mode gives higher thermal efficiency and higher effectiveness than those of the premixed flame mode. The emission of CO and NO_x are lower than 535 ppm and 173 ppm at 0% air excess, respectively, entire the operating range of 5 to 20 kW and 5 to 11 kW of LPG and Kerosene, respectively.

Keywords: Condensing heat exchanger, condensing porous heat exchanger, porous medium burner, liquid combustion without spray, low NO_x combustion.

1. บทนำ

พลังงานที่ได้จากกระบวนการเผาไหม้ในปัจจุบันมีบทบาทสำคัญต่อชีวิตประจำวันของมนุษย์มากโดยหลักการการเผาไหม้ทั่วไปทั้งการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงแก๊สเชื้อเพลิงเหลวและเชื้อเพลิงแข็งต่างก็ต้องการให้เกิดการเผาไหม้ที่มีประสิทธิภาพสูงและประหยัดต้นทุนหรือเชื้อเพลิง ดังนั้น การที่จะนำพลังงานความร้อนมาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุดต้องอาศัยอุปกรณ์ที่มีสมรรถนะที่ดีคือทั้งมีประสิทธิภาพการเผาไหม้และการถ่ายเทความร้อนที่ดี นอกเหนือจากนั้นคือมีการปลดปล่อยมลพิษในปริมาณที่ต่ำ

ในปัจจุบัน กระบวนการอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับพลังงานความร้อนส่วนใหญ่มีเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (heat exchanger) เป็นองค์ประกอบ โดยอาศัยเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับเพิ่มอุณหภูมิ ลดอุณหภูมิหรือหมุนเวียนความร้อนจากของไหลกลับมาใช้ใหม่ เช่น อุตสาหกรรมน้ำมัน เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจะถูกใช้สำหรับการเพิ่มอุณหภูมิ (heater) ของน้ำมันดิบ สำหรับเปลี่ยนสถานะของไอที่ออกมาจากหอกลั่นให้เป็นของเหลว และสำหรับการลดอุณหภูมิของน้ำมันหรือแก๊สและอุตสาหกรรมอื่น ๆ เครื่องอุ่นหรือเครื่องทำให้ร้อนล่วงหน้า (preheater) จุดประสงค์ก็เพื่อทำให้ของไหลร้อนล่วงหน้า ซึ่งเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อนของกระบวนการ จึงมีนักวิจัยจากสถาบันต่างๆ ได้ทำการศึกษาและทดลองเกี่ยวกับการเพิ่มสมรรถนะการเผาไหม้และอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนด้วยเทคนิคต่างๆ เช่นการหมุนเวียนความร้อนโดยใช้วัสดุพอร์น เนื่องจากวัสดุพอร์นมีความแข็งแรง ทนความร้อนสูง มีอัตราส่วนพื้นที่ผิวต่อปริมาตรสูง มีค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีและการดูดกลืนความร้อนสูง ส่งเสริมการถ่ายเทความร้อน

รวมทั้งแบบการแผ่รังสีและการพาความร้อนให้ดียิ่งขึ้น ก่อให้เกิดการหมุนเวียนความร้อนในตัวเองขณะเผาไหม้ได้เป็นอย่างดีจึงส่งผลให้ได้การเผาไหม้ของเปลวไฟในลักษณะที่เรียกว่า “Excess enthalpy flame” [1] ซึ่งทำให้ได้อุณหภูมิการเผาไหม้ที่สูงกว่าอุณหภูมิการเผาไหม้ทางทฤษฎี (adiabatic flame temperature) ในสภาวะเดียวกันทำให้การเผาไหม้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้นได้ ความเร็วในการเผาไหม้ (burning velocity) และค่าความเข้มของการเผาไหม้ (combustion intensity) สูง รวมถึงค่าความเข้มของการแผ่รังสีความร้อน (radiative heat flux) ที่สูง [2]

จากลักษณะเด่นดังกล่าวของวัสดุพอร์นได้มีนักวิจัยหลายกลุ่มนำวัสดุพอร์นมาประยุกต์ใช้กับการเผาไหม้เชื้อเพลิงแก๊ส [3, 4] และการเผาไหม้เชื้อเพลิงเหลวด้วยการสเปรย์เชื้อเพลิงเหลวพร้อมทั้งป้อนอากาศเข้าไปในชั้นวัสดุพอร์น [5, 6] โดยการเผาไหม้ดังกล่าวจะเกิดขึ้นภายในชั้นของวัสดุพอร์น พบว่าเปลวไฟที่เกิดขึ้นสามารถที่จะเสถียรอยู่ได้ภายในชั้นของวัสดุพอร์น นอกจากนี้การเผาไหม้เชื้อเพลิงภายในวัสดุพอร์นยังช่วยขยายขอบเขตการเผาไหม้ (flammability limits) ให้กว้างขึ้นทำให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้เผาไหม้เชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนต่ำๆ ซึ่งไม่สามารถเผาไหม้ได้ในอุปกรณ์เผาไหม้แบบปกติ [7] ซึ่งทางห้องปฏิบัติการเผาไหม้และเครื่องยนต์ (Combustion and Engine Research Laboratory, CERL) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรีก็ได้พัฒนาหัวเผาวัสดุพอร์นแบบที่ไม่ต้องมีการสเปรย์ [8-15] มาอย่างต่อเนื่องกว่า 20 ปี ซึ่งผลจากการทดลองพบว่าหัวเผาวัสดุพอร์นมีความยืดหยุ่นสูงสามารถเผาไหม้ได้ทั้งรูปแบบเปลวไฟชนิดผสมมาก่อน (premixed flame) และแบบเปลวไฟชนิดแพร่ (diffusion flame) และสามารถเผาไหม้

เชื้อเพลิงได้สามชนิด คือ เชื้อเพลิงแก๊ส เชื้อเพลิงเหลว และเชื้อเพลิงผสม นับว่าเป็นการพัฒนาหัวเผาวัสดุพรุนแบบที่ไม่ต้องมีการสเปรย์ที่มีประสิทธิภาพสูง ในขณะเดียวกันก็มีการศึกษาถึงการนำความร้อนไปใช้ประโยชน์ โดยปริญา[16] ได้ทำการศึกษาเตาเผาไหม้แบบพื้นผิว (Surface Combustor Heater, SCH) เพื่อวิเคราะห์หารูปแบบการจัดเรียงกลุ่มท่อน้ำ (Tube arrangement) ที่เปลวไฟสามารถลามเข้าไปติดในกลุ่มท่อน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ เพื่อจะทำให้เกิดโครงสร้างอุณหภูมิที่พึงประสงค์ คือให้ตำแหน่งอุณหภูมิสูงในบริเวณกลุ่มท่อน้ำ ซึ่งส่งผลต่อการส่งเสริมสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนของเตาเผาไหม้ และทำให้เข้าใจถึงกลไกการถ่ายเทความร้อนของเตาเผาไหม้แบบ SCH โดยพบว่าการพาความร้อนและการแผ่รังสีความร้อนเป็นโหมดการถ่ายเทความร้อนหลักของการถ่ายเทความร้อนไปยังกลุ่มท่อน้ำ การแผ่รังสีความร้อนจะมีอิทธิพลมากเมื่อเตาเผาไหม้ทำงานในช่วงส่วนผสมหนา (rich-burn) เนื่องจากอุณหภูมิการเผาไหม้มีค่าสูงช่วยส่งเสริมการแผ่รังสีความร้อนไปยังกลุ่มท่อ ในทางตรงกันข้ามการพาความร้อนจะมีอิทธิพลมากขึ้นเมื่อเตาเผาไหม้ทำงานในส่วนผสมเจือจาง (lean-burn) เนื่องจากความเร็วในการไหลที่สูงขึ้นจะช่วยให้เกิดชั้นผิวความร้อน (thermal boundary layer) รอบผิวท่อให้บางลงมากขึ้น ช่วยส่งเสริมการพาความร้อนไปยังกลุ่มท่อในขณะที่การนำความร้อนไม่ค่อยจะมีอิทธิพลช่วยส่งเสริมการถ่ายเทความร้อนไปยังกลุ่มท่อมากนัก

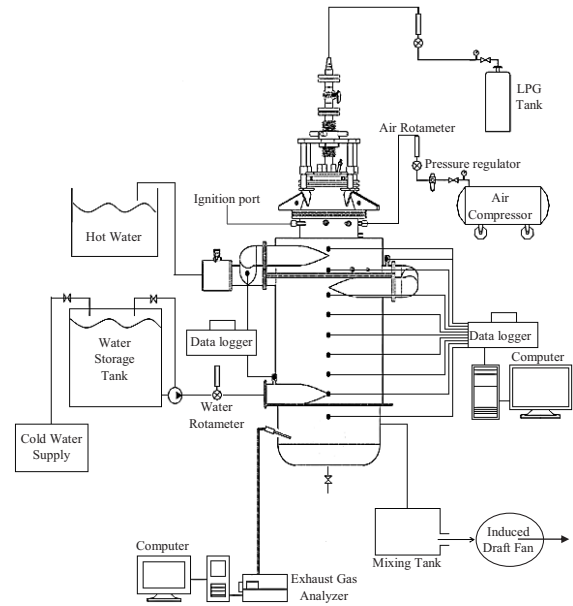
ดังนั้นงานวิจัยในครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและพัฒนาอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนวัสดุพรุน โดยนำไปใช้กับหัวเผาวัสดุพรุนแบบเป็นขั้นที่ได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง [17] พร้อมทั้งหาทางปรับปรุงสมรรถนะการทำงานให้มีประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงสุดแต่ปลดปล่อยมลพิษต่ำสุดเท่าที่จะทำได้ เพื่อนำไปประยุกต์ใช้งานจริงในอุตสาหกรรมในอนาคต

2. วิธีการดำเนินการทดลอง

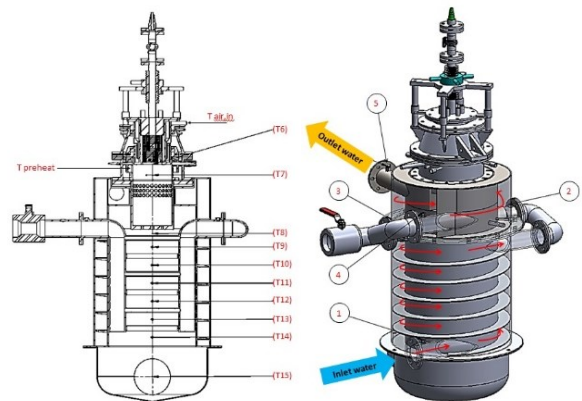
2.1 เครื่องมือและอุปกรณ์การทดลอง

รูปที่ 1 แสดงแผนภาพของอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง ประกอบไปด้วยสองส่วนหลักๆ คือ หัวเผาวัสดุพรุน (Porous Medium burner, PB) ซึ่งการเผาไหม้จะเกิดขึ้นภายในหัวเผาวัสดุพรุนและทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดของพลังงานความร้อน และเครื่อง

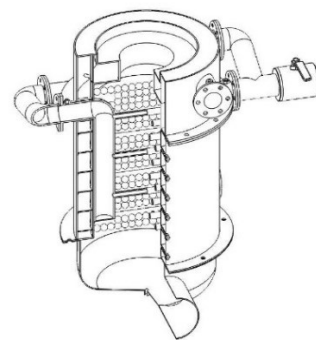
แลกเปลี่ยนความร้อนวัสดุพรุน (Condensing porous heat exchanger, CPHE) ทำหน้าที่ดูดซับพลังงานความร้อนจากการเผาไหม้เพื่อนำไปใช้ประโยชน์ให้ได้มากที่สุด



รูปที่ 1 แผนภาพชุดอุปกรณ์การทดลอง



รูปที่ 2 ตำแหน่งการติดตั้ง Thermocouples และทิศทางการไหลของน้ำภายในหัวเผาวัสดุพรุนและเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน CPHE



รูปที่ 3 การบรรจุเม็ดหินวัสดุพรุนภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน CPHE

รายละเอียดเพิ่มเติมของอุปกรณ์การทดลองสามารถดูได้จาก Maka และคณะ [18] หัวเผาวัสดุพรุนประกอบด้วยสองส่วนหลักๆ คือ หัวเผา (Porous burner, PB) และวัสดุพรุนแผ่รังสี (Porous emitter, PE) ซึ่งสามารถปรับระยะห่างระหว่าง PB และ PE (X_{pb}) เพื่อเปลี่ยนรูปแบบการเผาไหม้ได้ โดย $X_{pb} = 0$ mm. คือไม่มีห้องผสม ให้รูปแบบการเผาไหม้แบบแพร่ (diffusion flame) แต่ถ้าระยะ $X_{pb} \neq 0$ คือมีช่องว่างระหว่าง PB และ PE จะให้รูปแบบการเผาไหม้แบบผสมมาก่อน (premixed flame) โดยรายละเอียดเพิ่มเติมสำหรับหัวเผานี้สามารถดูได้จากงานวิจัยของ Homrarueng และคณะ [17] สำหรับงานวิจัยนี้จะทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพและประสิทธิผลของหัวเผาและ CPHE ที่ระยะ $X_{pb} = 0$ mm. และ $X_{pb} = -20$ mm. (เลื่อน PB ออกจากตำแหน่งทางเข้าของ PE ไปทาง upstream เป็นระยะทาง 20 มิลลิเมตร) และใช้เชื้อเพลิงก๊าซแอลพีจีและน้ำมันก๊าดในการทดสอบ

ในการวัดอุณหภูมิได้ทำการติดตั้งตำแหน่งวัดทั้งหมด 17 จุด (แสดงดังรูปที่ 2) แบ่งออกเป็น การวัดอุณหภูมิของน้ำใช้ thermocouple Type N มีช่วงการวัดตั้งแต่ 0 ถึง 1260 °C และความคลาดเคลื่อน ± 2.2 °C จำนวน 5 จุด (T_1 ถึง T_5) และวัดอุณหภูมิของแก๊สจำนวน 12 จุด โดยแบ่งเป็น thermocouple Type B มีช่วงการวัดตั้งแต่ 400 ถึง 1,700 °C และความคลาดเคลื่อน ± 1 °C จำนวน 2 จุด (T_6 และ T_7) และ thermocouple Type N จำนวน 10 จุด (T_8 ถึง T_{15} , $T_{air,in}$ และ $T_{preheat}$) ติดตั้งภายใน CPHE ที่บรรจุเม็ดหิน aluminum oxide ไว้ภายใน (รูปที่ 3) ในการทดลองจะทำการเปรียบเทียบผลการทดลองที่ใช้เม็ดหินวัสดุพรุนที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 10 มิลลิเมตร 15 มิลลิเมตร และ 20 มิลลิเมตร และวัดแก๊สไอเสียจากการเผาไหม้ ณ ตำแหน่งทางออกของห้องเผาไหม้ด้วยเครื่องวิเคราะห์แก๊สไอเสีย (Exhaust gas analyzer) ที่มีช่วงการวัด 0 - 10,000 ppm สำหรับ CO และ 0 - 4,000 ppm สำหรับการวัด NO_x มีค่าความคลาดเคลื่อน ± 5 ppm

2.2. การคำนวณ

2.2.1 ประสิทธิภาพของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (effectiveness)

สำหรับค่าประสิทธิภาพของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนซึ่งใช้เป็นดัชนีชี้วัดว่าอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนนั้นสามารถทำงานได้ตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้หรือไม่ โดย

นิยาม Effectiveness, \mathcal{E} คือ สัดส่วนของอัตราการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นจริง (Q_{actual}) ต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุดที่เป็นไปได้ (Q_{max}) ซึ่งสามารถแสดงในรูปสมการได้ดังนี้

$$\mathcal{E} = \frac{Q_{actual}}{Q_{max}} = \frac{C_h (T_{h,i} - T_{h,o})}{C_{min} (T_{h,i} - T_{c,i})} \quad (2.1)$$

โดย $C_h = \dot{m}_h C_{p,h}$ คือ อัตราความจุความร้อนของของไหลร้อน C_{min} คือ อัตราความจุความร้อนต่ำสุด

2.2.2 ประสิทธิภาพเชิงความร้อน (Thermal efficiency)

ประสิทธิภาพเชิงความร้อนใช้ในการบ่งบอกถึงสมรรถนะของหัวเผาซึ่งแสดงถึงความสามารถในการถ่ายเทความร้อนไปยังอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งในงานวิจัยนี้จะแสดงออกมาในรูปประสิทธิภาพเชิงความร้อนโดยรวม (total thermal efficiency, η_{total}) ดังนี้

$$\eta_{total} = \eta_{up} + \eta_{tube} + \eta_{low} \quad (2.2)$$

$$\eta_{total} = \frac{Q_{up,exp}}{FR} + \frac{Q_{tube,exp}}{FR} + \frac{Q_{low,exp}}{FR} \quad (2.3)$$

โดย η_{up} , η_{low} คือ ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนส่วนบนและส่วนล่างตามลำดับ η_{tube} คือ ประสิทธิภาพเชิงความร้อนอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนกลุ่มท่อ

เมื่อ

$$Q_{up,exp} = \dot{m}_w \bar{C}_{p,up} (T_{up,out} - T_{up,in}) \quad (2.4)$$

$$Q_{tube,exp} = \dot{m}_w \bar{C}_{p,tube} (T_{tube,out} - T_{tube,in}) \quad (2.5)$$

$$Q_{low,exp} = \dot{m}_w \bar{C}_{p,low} (T_{low,out} - T_{low,in}) \quad (2.6)$$

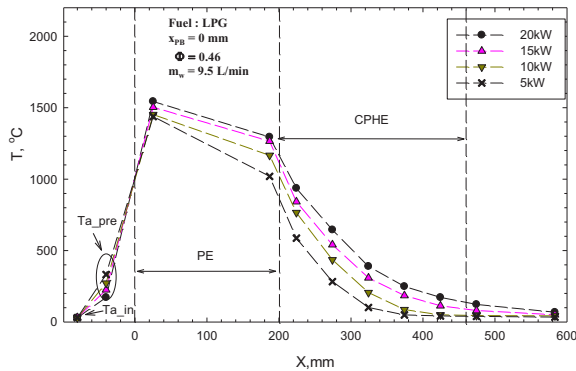
จากสมการที่ (2.4), (2.5) และ(2.6) ค่าปริมาณความร้อนจากการทดลองจะหาค่าได้จากผลคูณของอัตราการไหลเชิงมวลของน้ำ (\dot{m}_w) ค่าความร้อนจำเพาะของน้ำ (C_p) และผลต่างอุณหภูมิของน้ำเข้าและน้ำออกของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่สนใจ (ส่วนบน กลุ่มท่อ หรือส่วนล่าง) และ FR คือค่าอัตราการเผาไหม้หรืออัตราป้อนเชื้อเพลิง (firing rate)

3. ผลการทดลอง

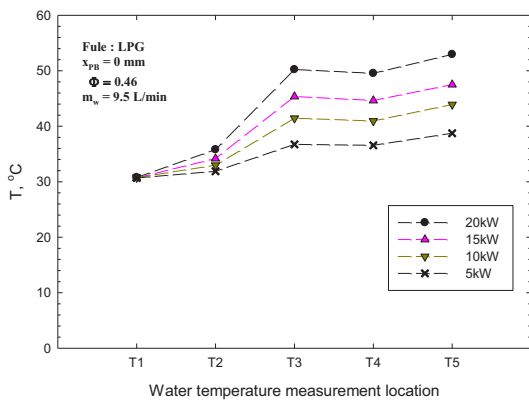
3.1 อิทธิพลของอัตราป้อนความร้อน (firing rate) ต่อโครงสร้างอุณหภูมิภายในเตาและในกลุ่มท่อน้ำ

รูปที่ 4 และรูปที่ 5 แสดงอิทธิพลของอัตราป้อนความร้อน (FR) ของเชื้อเพลิง LPG ต่อโครงสร้างอุณหภูมิการเผาไหม้

และอุณหภูมิของน้ำภายในชุดหัวเผา PB และ CPHE ตามลำดับ ที่ระยะ $X_{pb} = 0$ mm. โดยกำหนดให้อัตราส่วนสมมูลคงที่ที่ Φ เท่ากับ 0.46 และอัตราการไหลของน้ำ \dot{m}_w เท่ากับ 9.5 ลิตรต่ออนาที จากกราฟพบว่าเมื่อทำการเพิ่ม FR จาก 5 กิโลวัตต์ ถึง 20 กิโลวัตต์ อุณหภูมิมีแนวโน้มยกตัวสูงขึ้นตลอดความยาวของหัวเผาและเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน CPHE เนื่องจากอัตราป้อนความร้อนภายในห้องเผาไหม้เพิ่มสูงขึ้น เช่นเดียวกันยังส่งผลให้อุณหภูมิน้ำภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน CPHE สูงขึ้นด้วยเช่นกัน (รูปที่ 5) เนื่องจากอัตราการแลกเปลี่ยนความร้อนที่เพิ่มขึ้น การเพิ่มอัตราป้อนความร้อนโดยให้ Φ มีค่าคงที่ส่งผลให้เกิดการเพิ่มขึ้นทั้งอัตราการไหลของเชื้อเพลิงและอากาศ ความเร็วในการไหลของผสมไอดี (flow velocity) ไปทางปลายน้ำจึงมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งจะสังเกตได้ว่าอุณหภูมิการอุ่นอากาศทางต้นน้ำจะค่อยๆ ลดลงตามการเพิ่มขึ้นของอัตราการเผาไหม้เนื่องจากเวลาในถ่ายเทความร้อนลดลง



รูปที่ 4 อิทธิพลของ FR ต่อโครงสร้างอุณหภูมิภายในหัวเผาและเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน CPHE

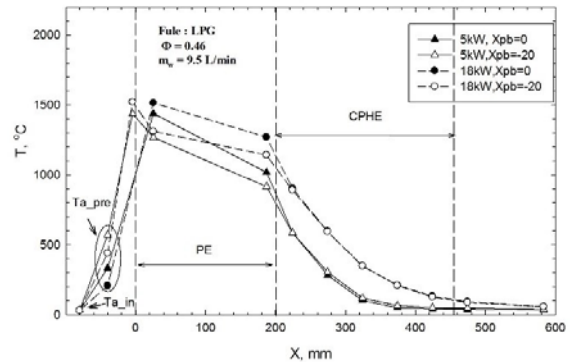


รูปที่ 5 อิทธิพลของ FR ต่ออุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ ใน CPHE

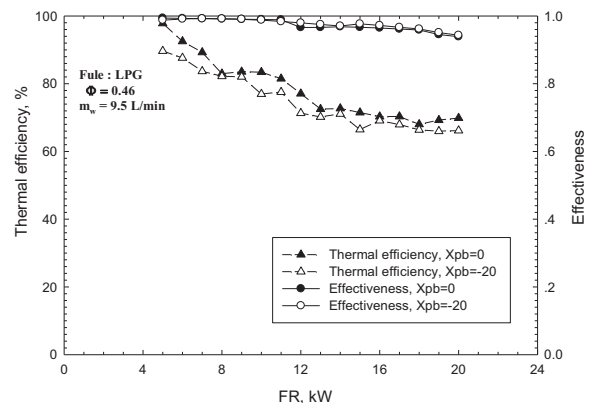
3.2 อิทธิพลของระยะ X_{pb} ต่อสมรรถนะของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

รูปที่ 6 รูปที่ 7 และรูปที่ 8 แสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของรูปแบบการเผาไหม้แบบแพร่ ($X_{pb} = 0$ mm.) และแบบผสมมาก่อน ($X_{pb} = -20$ mm.) ต่อโครงสร้างอุณหภูมิการเผาไหม้และสมรรถนะของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน CPHE พบว่ารูปแบบการเผาไหม้ไม่ส่งผลกระทบต่อค่าประสิทธิภาพของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนนักแต่จะส่งผลชัดเจนยิ่งขึ้นต่อประสิทธิภาพเชิงความร้อนรวม (รูปที่ 7) คือเปลวไฟแบบแพร่ให้ค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงกว่าของเปลวไฟแบบผสมมาก่อนที่ทุกๆ อัตราป้อนความร้อน เนื่องจากการเผาไหม้แบบแพร่ให้ตำแหน่งของเปลวไฟหรือ reaction zone เข้าไปติดลึกเข้าไปภายในวัสดุพอรุน PE ทำให้อุณหภูมิภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนสูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีเผาไหม้แบบผสมมาก่อน (รูปที่ 6) ผลของการเผาไหม้ในชั้นวัสดุพอรุน PE ส่งผลให้เกิดการถ่ายเทความร้อนทั้งสาม

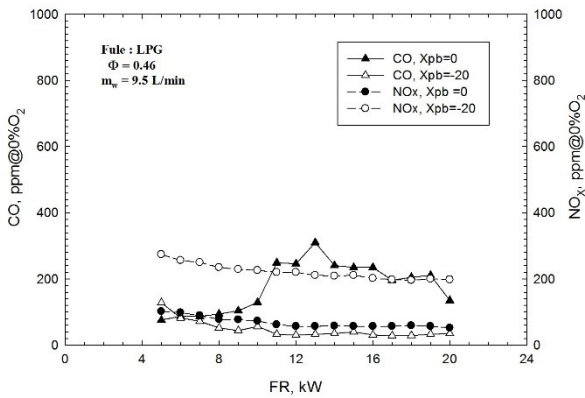
แบบ



รูปที่ 6 อิทธิพลของระยะ X_{pb} ต่อโครงสร้างอุณหภูมิภายในหัวเผาและเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน CPHE



รูปที่ 7 อิทธิพลของระยะ X_{pb} และ FR ต่อประสิทธิภาพทางความร้อนและประสิทธิภาพของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน CPHE



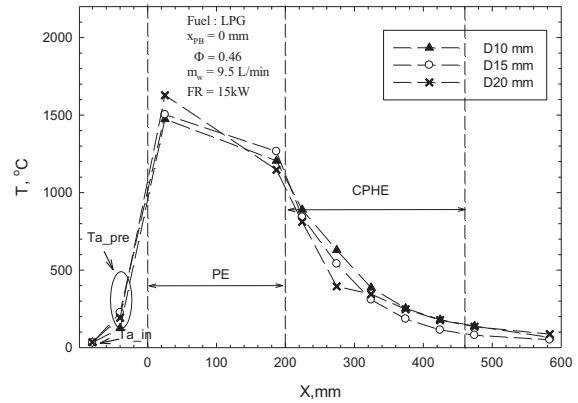
รูปที่ 8 อิทธิพลของระยะ X_{pb} และ FR ต่อการปลดปล่อยก๊าซ CO และ NO_x ของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน CPHE

คือ การแผ่รังสีความร้อน การนำความร้อน และการพาความร้อน จากวัสดุพูนไปยังอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน นอกเหนือจากนั้น ยังส่งผลให้ปริมาณการปลดปล่อย NO_x มีค่าลดลงอีกด้วย (รูปที่8) เนื่องจากข้อดีของวัสดุพูนที่ช่วยกระจายความร้อนทำให้อุณหภูมิสูงสุดมีค่าลดลงหรือลด peak temperature ส่งผลให้เกิด thermal- NO_x ลดลง [18] อย่างไรก็ตาม ที่อัตราป้อนความร้อนสูง การเผาไหม้แบบแพร่หรือไม่มีห้องผสมทำให้การผสมกันระหว่างเชื้อเพลิงและอากาศไม่ดีเท่าที่ควร ส่งผลให้การปลดปล่อยมลพิษ CO มีค่าค่อนข้างสูง

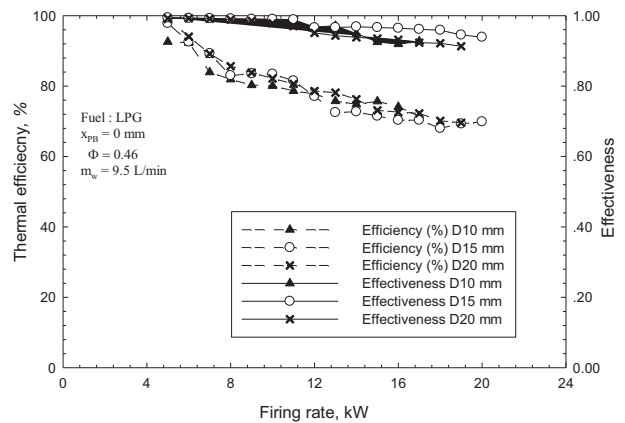
นอกจากนี้ พบว่าเมื่ออัตราการป้อนความร้อนเพิ่มขึ้นส่งผลให้ทั้งค่าประสิทธิภาพทางความร้อนและประสิทธิภาพของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนลดลง เนื่องจากระยะเวลาในการแลกเปลี่ยนความร้อน (residence time) ลดลงแต่ยังมีค่าค่อนข้างสูง โดยมีค่าสูงสุดเท่ากับ 89.61% และ 0.9961 สำหรับประสิทธิภาพทางความร้อนรวมและประสิทธิภาพตามลำดับ ที่อัตราป้อนความร้อน 5 กิโลวัตต์ และระยะ $X_{pb} = 0$ mm.

3.3 อิทธิพลของขนาดเม็ดหินวัสดุพูนต่อโครงสร้างอุณหภูมิจากสมรรถนะของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน CPHE

อิทธิพลของขนาดเม็ดวัสดุพูนต่อโครงสร้างอุณหภูมิจากในหัวเผาและเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน CPHE ที่อัตราป้อนความร้อน 15 กิโลวัตต์ แสดงดังรูปที่ 9 จากกราฟพบว่าขนาดของเม็ดหินวัสดุพูนส่งผลชัดเจนต่อโครงสร้างอุณหภูมิจากในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน โดยพบว่าเมื่อขนาดของเม็ดหินใหญ่ขึ้นอุณหภูมิสูงสุดภายใน



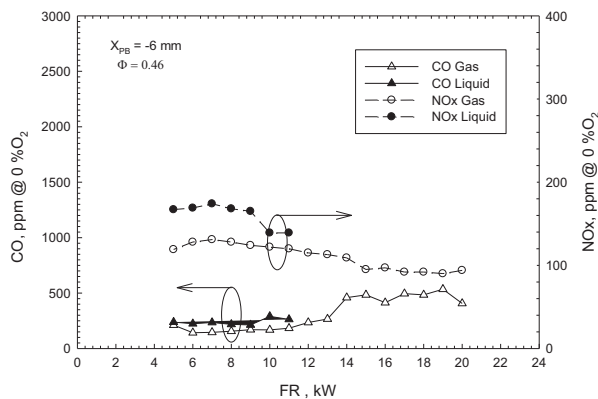
รูปที่ 9 อิทธิพลของขนาดเม็ดหินวัสดุพูนต่อโครงสร้างอุณหภูมิจากในหัวเผาและเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน CPHE



รูปที่ 10 อิทธิพลของขนาดเม็ดหินวัสดุพูนต่อประสิทธิภาพทางความร้อนและประสิทธิภาพของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน CPHE

ในห้องเผาไหม้สูงขึ้นแต่จะลดลงอย่างรวดเร็วที่บริเวณใกล้ทางออกหัวเผาก่อนเข้าของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน โดยเฉพาะเมื่อใช้เม็ดหินที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มิลลิเมตร ซึ่งมีความพรุนหรือช่องว่างมากเกินไป นอกเหนือจากนั้นยังมีพื้นที่ผิวสัมผัสน้อยในการส่งผ่านความร้อนทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ผิวท่อด้านนอกลดลง ส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนโดยการพาไปยังท่อน้ำแยงลง ทำให้ค่าประสิทธิภาพต่ำสุดเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้เม็ดหินขนาด 10 และ 15 มิลลิเมตร (รูปที่ 10) โดยการใช้เม็ดหินขนาด 15 มิลลิเมตร ให้ค่าประสิทธิภาพสูงสุดที่ทุกอัตราป้อนความร้อน อย่างไรก็ตามขนาดของเม็ดหินวัสดุพูนไม่ส่งผลต่อค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนรวมอย่างชัดเจน แต่จะมีค่าลดลงตามการเพิ่มขึ้นของอัตราการเผาไหม้ เนื่องจากระยะเวลาในการถ่ายเทความร้อนที่ลดลง

3.4 อิทธิพลของชนิดเชื้อเพลิงต่อการเผาไหม้



รูปที่ 10 อิทธิพลของชนิดเชื้อเพลิงต่อการปลดปล่อยก๊าซ CO และ NO_x ของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน CPHE

รูปที่ 10 แสดงสมรรถนะด้านการเผาไหม้ของชุดหัวเผา PB และเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน CPHE ซึ่งสามารถทำงานได้ดีโดยปลดปล่อยก๊าซมลพิษทั้ง CO และ NO_x ในปริมาณที่ค่อนข้างต่ำกว่ามาตรฐานที่กรมควบคุมมลพิษกำหนด [20] คือการปลดปล่อย CO และ NO_x อยู่ในช่วงที่ไม่เกิน 535 ppm และ 174 ppm ที่สภาวะปราศจากอากาศส่วนเกินตามลำดับในช่วงการทดสอบที่อัตราป้อน 5 ถึง 20 กิโลวัตต์ และ 5 ถึง 11 กิโลวัตต์ของเชื้อเพลิงก๊าซแอลพีจีและเชื้อเพลิงเหลว น้ำมันก๊าด ตามลำดับ

4. สรุปผล

งานวิจัยนี้ทำการพัฒนาเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีการควบแน่นโดยใช้วัสดุพรุน (Condensing Porous Heat Exchanger, CPHE) ให้ทำงานร่วมกับหัวเผาวัสดุพรุน (Porous Medium burner, PB) เพื่อส่งเสริมการถ่ายเทความร้อนและเพิ่มสมรรถนะของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนผลจากการศึกษาและทดสอบสมรรถนะพบว่า

4.1 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน CPHE มีสมรรถนะค่อนข้างสูง คือมีค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนและประสิทธิภาพผลสูงสุดเท่ากับ 89.61% และ 0.9961 ตามลำดับอีกทั้งน้ำในไอเสียยังเกิดการควบแน่นจากสถานะแก๊สกลายเป็นของเหลวอีกด้วย

4.2 ขนาดวัสดุพรุนที่เหมาะสมคือ 15 มิลลิเมตร และการเผาไหม้แบบแพร่ ($X_{pb} = 0$ mm.) ให้ประสิทธิภาพและประสิทธิภาพผลสูงกว่าการเผาไหม้แบบผสมมาก่อน ($X_{pb} = -20$ mm.)

4.3 หัวเผา PB สามารถทำงานร่วมกันได้ดีกับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน CPHE กับทั้งการป้อนเชื้อเพลิงก๊าซและเชื้อเพลิงเหลวโดยไม่มีการสเปรย์และปลดปล่อยมลพิษทั้งก๊าซคาร์บอนออกไซด์ (CO) และออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x) ในปริมาณต่ำตลอดช่วงอัตราการป้อน 5 ถึง 20 กิโลวัตต์ และ 5 ถึง 11 กิโลวัตต์ของเชื้อเพลิงก๊าซแอลพีจีและเชื้อเพลิงเหลว น้ำมันก๊าด ตามลำดับ

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ทำการทดลองที่ห้องปฏิบัติการเผาไหม้และเครื่องยนต์ (Combustion and Engine Research Laboratory, CERL) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี โดยได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจากมหาวิทยาลัยวิจัยแห่งชาติ (NRU)

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Weinberg, F.J., 1986. "Heat - Recirculating Burners: Principles and Some Recent Developments", Combustion Science and Technology, Vol. 121, pp. 3-22.
- [2] Sathe, S.B., Kulkarni, H.R., Peck, R.E. and Tong, T.W., 1990. "An Experimental and Theoretical Study of Porous Radiant Burner Performance", Twenty-Third Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh, pp. 1011-1018.
- [3] Mital, R., Gore, J.P. and Viskanta, R., 1997. "A Study of the Structure of Submerged Reaction Zone in Porous Ceramic Radiant Burner" COMBUSTION AND FLAME, Vol. 111, pp. 175-184.
- [4] Bakry, A.I., 2006. "Stabilized Premixed Combustion within Atmospheric Gas Porous Inert Medium (PIM) Burner", International Conference on Energy and Environment 2006 (ICEE 2006). 28-30 August 2006. Malaysia.
- [5] Kaplan, M. and Hall, M.J., 1995. "The Combustion of Liquid Fuels Within a Porous Media Radiant Burner", Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 11, No. 1, pp. 13-20.
- [6] 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.

[7] Takeno, T. and Sato, K., 1979. “An Excess Enthalpy Theory”, Combustion Science and Technology, Vol. 20, pp. 73-79.

[8] Jugjai, S., Wongpanit, N., Laoketkan, T. and Nokkaew, S., 2002. “The Combustion of Liquid fuel using a porous medium”, Experimental Thermal and Fluid Science, Vol.25/1, pp.15-23.

[9] Jugjai, S. and Polmart, N., 2003. “Enhancement of Evaporation and Combustion of Liquid Fuels Through Porous Media”, Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 27, No. 8, pp. 901-909.

[10] ชูติเดช ผ่องใส, 2547, คุณลักษณะการเผาไหม้และการปลดปล่อยมลพิษของหัวเผาเชื้อเพลิงเหลวแบบวัสดุพรุนชนิดไม่มีการแตกตัวเป็นฝอยละออง, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, หน้า18-50.

[11] กิตติศักดิ์ สุวรรณวิจิตร, 2548, การศึกษาอย่างต่อเนืองเกี่ยวกับการพัฒนาการเผาไหม้เชื้อเพลิงเหลวโดยวัสดุพรุนชนิดไม่มีการแตกตัวเป็นฝอยละออง, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, หน้า18-61.

[12] มกร ลักษณะ, 2548, การพัฒนาหัวเผาวัสดุพรุนสมรรถนะสูงเพื่อการเผาไหม้เชื้อเพลิงเหลวชนิดไม่มีการสเปรย์, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, หน้า14-65.

[13] พีรยุทธ ทองเต็ม, 2552, การศึกษาการเผาไหม้แบบเป็นขั้นตอนของหัวเผาวัสดุพรุนสำหรับเชื้อเพลิงแก๊สและเชื้อเพลิงเหลว, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

[14] พีระพงษ์ โตขลิบ, 2554, การพัฒนาหัวเผาวัสดุพรุนแบบเป็นชั้นด้วยเชื้อเพลิงผสม, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

[15] ณัฐวัฒน์ จิโรจน์ภิญโญ และคณะ, 2555, หัวเผาวัสดุพรุนระบบเชื้อเพลิงร่วมความยืดหยุ่นสูงสำหรับการเผาไหม้ในขนาด, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

[16] ปริญา ภูเกดสิน, 2553, การส่งเสริมการถ่ายเทความร้อนและการเผาไหม้แบบซูบเปอร์แอเดียแบติกภายในวัสดุพรุนที่มีกลุ่มท่อน้ำ, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

[17] Homrarueng, A. and Jugjai, S., 2014. “An Experimental Study on Combustion Performance of Flexible Porous Medium Burner (FPMB)”, The 5th TSME International Conference on Mechanical Engineering, 17-19 December, Chiangmai, Thailand.

[18] Maka, P., Kaewpradap, A. and Jugjai, S., 2014. "Development of a Novel Condensing Porous Heat Exchanger (CPHE) with integrated Porous Burner (PB)", The 5th TSME International Conference on Mechanical Engineering, 17-19 December, Chiangmai, Thailand.

[19] สำเริง จักรใจ, 2547, การเผาไหม้, สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, หน้า 49-79, 81-122, 514-533

[20] กรมควบคุมมลพิษ, กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, 2004, มาตรฐานคุณภาพอากาศและเสียง, แหล่งที่มา

http://www.pcd.go.th/info_serv/reg_std_airsnd03.html#s4. เข้าดูเมื่อ 20 มี.ค. 2559