

การติดตั้งกลุ่มท่อในหัวพ่นไฟวัสดุพรุนที่ใช้แอลพีจีเป็นเชื้อเพลิง

The installation of water tube-bank in a porous burner using LPG as fuel

วาทิ ศรีบุญญา, พัทธน์ อมตฉายา และบัณฑิต กฤตาคม*

ห้องปฏิบัติการวิจัยการพัฒนาเทคโนโลยีของวัสดุพรุน
(Development in Technology of Porous Materials Research Laboratory: DiTo-Lab)
สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
744 ถนนสุรนารายณ์ ตำบลในเมือง อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000
*ติดต่อ: E-mail: o.dady@hotmail.com และ bundit.kr@rmuti.ac.th, โทรศัพท์ 044 233 073, โทรสาร 044 233 074

บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้ได้นำเสนอปัจจัยที่มีผลกระทบต่อโครงสร้างทางอุณหภูมิก่อการเผาไหม้ (T) และประสิทธิภาพ ($\mathcal{E}$) ของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบกลุ่มท่อที่ติดตั้งในหัวพ่นไฟวัสดุพรุนเชื้อเพลิงแก๊สโดยใช้น้ำเป็นสารทำงาน วัสดุพรุนที่ใช้เป็นแบบเม็ดกลมอัดแน่นทำจากอะลูมินา-คอร์ดีไรท์ (Al-Co) มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ย 7 mm และค่าความพรุน (ϕ) 0.395 อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนทำมาจากท่อสแตนเลสขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก 19 mm และหนา 1 mm จัดเรียงแบบกลุ่มท่อแนวตรงติดตั้งอยู่ด้านล่างของหัวพ่นไฟวัสดุพรุนซึ่งเป็นตำแหน่งที่อยู่ของเปลวไฟเสถียรจากการทดลองพบว่า T ของหัวพ่นไฟมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนผสม (Φ) และอัตราเร็วเชิงปริมาตรของเชื้อเพลิงแก๊สผสมก่อน (V_{mix}) ที่เพิ่มขึ้น แต่ T มีแนวโน้มลดลงเมื่ออัตราการไหลของน้ำ (Q_w) ผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนเพิ่มขึ้น สำหรับ $\mathcal{E}$ มีแนวโน้มสูงขึ้นตาม Φ และ V_{mix} ที่เพิ่มขึ้น แต่ $\mathcal{E}$ มีแนวโน้มลดลงตาม Q_w ที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าค่า $\mathcal{E}$ ที่สูงสุดของการทดลองนี้คือ 56 % ที่สภาวะ $\Phi = 0.80$, $V_{mix} = 20 \text{ m}^3/\text{hr}$ และ $Q_w = 5 \text{ L/min}$ สำหรับปริมาณ CO และ NO_x ที่ปล่อยออกมาจากหัวพ่นไฟวัสดุพรุนชนิดนี้อยู่ในเกณฑ์ต่ำที่ยอมรับได้

คำหลัก: หัวพ่นไฟวัสดุพรุนเชื้อเพลิงแก๊ส, อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน, แอลพีจี

Abstract

This paper was to present the effect of factors to the profile of combustion temperature (T) and effectiveness ($\mathcal{E}$) of the heat exchanger installed on a gas porous burner using LPG as fuel. Water was used as the working fluid. The examined porous media in the present study was Alumina-Cordierite (Al-Co) having average diameters of 7 mm and porosity (ϕ) of 0.395. The heat exchanger was made of stainless tube with outer diameter of 19 mm and thickness of 1 mm. The configuration of heat exchanger was constructed as an in-line tube banks and was attached below the porous burner. The stable flame was located in this position. From the experiment, it was found that T was increased with equivalent ratio (Φ) and volumetric premixed-gas velocity (V_{mix}). But, the trend of T was decreased with the water flow rate fed into heat exchanger (Q_w) increasing. The level of $\mathcal{E}$ was increased with Φ and V_{mix} . However, the level of $\mathcal{E}$ was decreased as increasing Q_w . In addition, it was observed that the maximum of T in the present experiment was 56 % at $\Phi = 0.80$, $V_{mix} = 20 \text{ m}^3/\text{hr}$ and $Q_w = 5 \text{ L/min}$. The level of CO and NO_x released from the present gas porous burner was in the acceptable low level.

Keywords: Gas porous burner, Heat exchanger, LPG.

TSF-18

1. บทนำ

หัวพ่นไฟหรือหัวเผาแฟรงส์แบบวัสดุพรุน (Porous radiant burner) ที่ใช้แก๊สเป็นเชื้อเพลิง มีการใช้ประโยชน์อย่างกว้างขวางในหลายวัตถุประสงค์ [1] ยกตัวอย่าง เช่น ใช้ในขบวนการผลิตกระดาษ การทำให้กระดาษแห้ง (Paper drying) การเคลือบเงากระดาษ (Paper finishing) ใช้ในอุตสาหกรรมสิ่งทอ การอบและการทำให้เส้นใยแห้ง (Baking and textile drying) การผลิตไอน้ำในหม้อต้มน้ำทางอุตสาหกรรม การหล่อ การหลอมเหล็ก หรือแม้แต่การสร้างความร้อนภายในบ้านเรือน (Domestic radiant heater) ก็มีการใช้ประโยชน์จากหัวเผานี้ โดยข้อดีที่โดดเด่นของหัวเผาแก๊สวัสดุพรุนมีสองข้อหลัก ๆ คือ มีความสามารถในการแฟรงส์ได้สูงและปลดปล่อยมลพิษจากการเผาไหม้ในปริมาณที่ต่ำ ด้วยข้อดีดังกล่าวจึงเป็นเหตุผลให้นักวิจัยและวิศวกรจำนวนมาก [2-8] มีความสนใจและศึกษาเกี่ยวกับหัวเผานี้ ทั้งด้วยวิธีการทดลองและทางทฤษฎี เพื่อที่จะพัฒนาสมรรถนะให้ดียิ่งขึ้น

ตลอดระยะเวลาเกือบ 3 ทศวรรษที่ผ่านมา ในช่วงแรกของการศึกษาเกี่ยวกับหัวพ่นไฟหรือหัวเผาวัสดุพรุน จะเป็นการศึกษาเกี่ยวกับกลไกการแฟรงส์ ความร้อนของวัสดุพรุนเป็นหลัก แต่เมื่อเร็ว ๆ นี้ ได้มีการเริ่มสนใจถึงกลไกการเผาไหม้หรือเปลวไฟที่ลามออกมาจากชั้นวัสดุพรุน ดังในปี ค.ศ. 2012 ปรีชา ศรีสุวรรณ และคณะ [9] ได้ทำการศึกษาทดลองหัวพ่นไฟวัสดุพรุนที่มีค่าความพรุนต่ำ ๆ โดยใช้เชื้อเพลิงแก๊สแอลพีจี วัสดุพรุนที่ใช้เป็นชนิดหินตุ้ปลาจากการศึกษาพบว่าเปลวไฟที่เกิดขึ้นมีลักษณะยาวและเกิดเสถียรภาพการเผาไหม้มีค่า Φ อยู่ในช่วง 0.5 – 0.9 โครงสร้างทางอุณหภูมิสูงถึง 1100 °C สำหรับปริมาณ CO และ NO_x ที่ปล่อยออกมาอยู่ในเกณฑ์ต่ำที่ยอมรับได้ ในปีเดียวกัน ศาสตรา บุญมาก และคณะ [10] ได้ทำการทดลองเช่นเดียวกัน แต่ใช้วัสดุพรุนเป็นแบบเม็ดกลมอัดแน่นที่ทำมาจากอะลูมินา-คอร์ดีไรท์จากการศึกษาพบว่าเปลวไฟที่เกิดขึ้นมีลักษณะยาวและเกิดเสถียรภาพการเผาไหม้มีค่า Φ อยู่ในช่วง 0.76 – 1.2 และโครงสร้างทางอุณหภูมิมีค่าสูงกว่ากรณีหินตุ้ปลา คือ 1200 °C อย่างไรก็ตามการประยุกต์ใช้งานจากเปลวไฟที่ลามออกมา ยังไม่ได้นำเสนอหรือศึกษาโดยนักวิจัยกลุ่มดังกล่าวข้างต้น เพราะเปลวไฟที่ลามออกมา

มีศักยภาพที่จะสามารถนำไปใช้งานได้ เช่น การต้มน้ำ ในหม้อน้ำอุตสาหกรรม การเผาขยะ เป็นต้น

จากข้อโดดเด่นของเปลวไฟจากวัสดุพรุนที่มีค่าความพรุนต่ำ ๆ นี้ คณะผู้เขียนบทความจึงมีแนวคิดที่จะประยุกต์ใช้งานโดยทำการติดตั้งอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบกลุ่มท่อในหัวพ่นไฟวัสดุพรุนเชื้อเพลิงแก๊สบริเวณเปลวไฟที่ลามออกมาจากชั้นวัสดุพรุน และเลือกใช้น้ำเป็นสารทำงาน พร้อมทั้งศึกษาอิทธิพลของการติดตั้งอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบกลุ่มท่อที่มีต่อประสิทธิภาพ (Effectiveness, ϵ) และโครงสร้างทางอุณหภูมิของหัวพ่นไฟ (Temperature profile, T) วัสดุพรุนที่ใช้เป็นแบบเม็ดกลมอัดแน่นมีค่าความพรุน (Porosity, ϕ) ต่ำ ๆ ($\phi < 0.5$) ซึ่งคณะผู้เขียนบทความคาดหวังว่าผลการทดลองที่ได้จะเป็นข้อมูลเบื้องต้นที่สำคัญในการประยุกต์ใช้งานเกี่ยวกับการผลิตหรือสร้างอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ติดตั้งในหัวพ่นไฟวัสดุพรุนชนิดเชื้อเพลิงแก๊ส ตามวัตถุประสงค์ต่าง ๆ ที่จะนำไปใช้งานได้จริงในทางอุตสาหกรรมต่อไป

2. รายการสัญลักษณ์

d	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยวัสดุพรุน (mm)
$c_{p,c}$	ค่าความจุความร้อนที่ความดันคงที่ของของไหลเย็น (J/kg·K)
$c_{p,h}$	ค่าความจุความร้อนที่ความดันคงที่ของของไหลร้อน (J/kg·K)
H	ความหนาของชั้นวัสดุพรุน (cm)
m_c	อัตราการไหลเชิงมวลของของไหลเย็น (kg/m ³)
m_h	อัตราการไหลเชิงมวลของของไหลร้อน (kg/m ³)
$\dot{Q}$	อัตราการถ่ายเทความร้อน (Watt)
$\dot{Q}_{\max}$	อัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุด (Watt)
Q_w	อัตราการไหลของน้ำผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (L/min)
T	โครงสร้างทางอุณหภูมิ (°C)
$T_{C, in}$	อุณหภูมิน้ำทางเข้า (°C)
$T_{C, out}$	อุณหภูมิน้ำทางออก (°C)
$T_{h, in}$	อุณหภูมิแก๊สร้อนทางเข้า (°C)
$T_{h, out}$	อุณหภูมิแก๊สร้อนทางออก (°C)
V_{mix}	อัตราเร็วเชิงปริมาตรของเชื้อเพลิงแก๊สผสมก่อน (m ³ /hr)
X	ความยาวตลอดแนวหัวพ่นไฟวัสดุพรุน (cm)

TSF-18

- ε ประสิทธิภาพของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน
 ϕ ค่าความพรุน
 Φ อัตราส่วนสมมูล

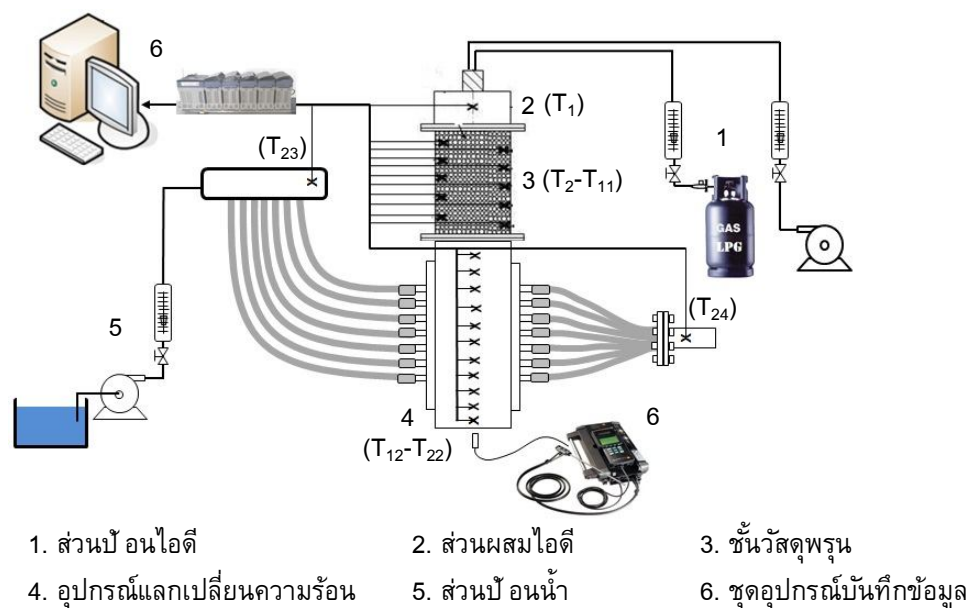
3. อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

3.1 อุปกรณ์การทดลอง

รูปที่ 1 แสดงแผนผังอุปกรณ์การทดลองซึ่งอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนจะเป็นชนิดกลุ่มท่อจัดเรียงแบบแนวตรงและใช้น้ำเป็นสารทำงาน โดยแบ่งออกได้เป็น 6 ส่วนที่สำคัญประกอบไปด้วย ส่วนที่หนึ่งเป็นส่วนที่ป้อนเชื้อเพลิงหรือการจ่ายไอดี (อากาศกับแอลพีจี) เข้าสู่หัวพ่นไฟวัสดุพอร์ซเลน ส่วนที่สองเป็นส่วนที่ผสมของไอดี (Injection chamber zone) ส่วนที่สามเป็นการอุ่นไอดีหรือตำแหน่งการติดตั้งวัสดุพอร์ซเลน (Porous burner zone) ซึ่งวัสดุพอร์ซเลนเป็นชนิด เม็ดกลมอัดแน่นเรียงตัวบรรจุอยู่ข้างในท่อสแตนเลสที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกเท่ากับ 154 mm หนา 2 mm นอกจากนี้เพื่อกันความร้อนสูญเสียสู่ภายนอก จึงหล่อปูนทนไฟ (Cement) หนา 2 mm ภายในท่อสแตนเลสตลอดช่วงที่มีการบรรจุวัสดุพอร์ซเลน (7.5 cm) ส่วนที่สี่คืออุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบกลุ่มท่อจัดเรียงแบบแนวตรงเป็นส่วนที่เกิดการเผาไหม้และท่อไอเสีย (Combustion and exhaust duct zone) ส่วนที่ห้าเป็นส่วนจ่ายน้ำเข้าสู่อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน และส่วนที่หกเป็นชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการบันทึกข้อมูลการทดลอง

จากส่วนประกอบทั้งหมดของหัวพ่นไฟแก๊สแบบนี้จะมีหลักการทำงาน คือ เมื่อไอดี (อากาศผสมกับแอลพีจี) ไหลผ่านส่วนผสมไอดี (Injection zone) เข้าสู่ชั้นวัสดุพอร์ซเลน (Porous burner zone) ไอดีจะไหลผ่านชั้นวัสดุพอร์ซเลน และจะมีระดับอุณหภูมิที่สูงขึ้น หลังจากนั้นไอดีจะไหลไปยังบริเวณทางออกของชั้นวัสดุพอร์ซเลนเข้าสู่ส่วนที่สี่ก่อให้เกิดการจุดติดไฟ (Ignition) และเผาไหม้ในที่สุด (Combustion zone) เปลวไฟที่เกิดขึ้นจะแผ่รังสีความร้อนย้อนกลับไปยังชั้นวัสดุพอร์ซเลน ทำให้มีความร้อนหมุนเวียนภายในระบบเป็นวัฏจักรเกิดการเผาไหม้อย่างต่อเนื่องตรงตามที่มีเชื้อเพลิงป้อนมาเข้าสู่ชั้นวัสดุพอร์ซเลน ซึ่งเป็นไปตามหลักการหมุนเวียนความร้อน จากนั้นความร้อนที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้จะถ่ายเทความร้อนให้กับน้ำในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนและจะได้น้ำร้อน (Heat water) ที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ต่างๆ ได้ตามวัตถุประสงค์ต่อไป

เพื่อให้เข้าใจถึงปรากฏการณ์การเผาไหม้การส่งถ่ายความร้อนระหว่างชั้นวัสดุพอร์ซเลนกับเปลวไฟและการแลกเปลี่ยนความร้อนของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบกลุ่มท่อที่เกิดขึ้น อุณหภูมิตามแนวแกนอุณหภูมิทางเข้าและทางออก พร้อมทั้งแก๊สไอเสียจึงถูกตรวจวัด ดังรายละเอียดต่อไปนี้ เทอร์โมคัปเปิลชนิดเค (K-type thermocouples) จำนวน 24 ชิ้น ที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.3 mm จะถูกติดตั้งในตำแหน่งกึ่งกลางของหัวพ่นไฟตามแนวแกน โดยแบ่งออกเป็น



รูปที่ 1 แผนผังอุปกรณ์การทดลอง

TSF-18

5 กลุ่ม กล่าวคือ กลุ่มแรกมีเทอร์โมคัปเปิลเพียงชิ้นเดียวเท่านั้น (T_1) ติดตั้งไว้ที่ Injection zone เพื่อเฝ้าระวังไม่ให้อุณหภูมิในตำแหน่งนี้สูงกว่าอุณหภูมิจุดติดไฟด้วยตัวเอง (Spontaneous temperature) ของแอลพีจี กลุ่มที่สองมีจำนวน 10 ชิ้น (T_2 - T_{11}) จะติดตั้งไว้ใน Porous burner zone เพื่อดูกลไกการอุ่นเชื้อเพลิงและคุณลักษณะการเผาไหม้ กลุ่มที่สามมีจำนวน 11 ชิ้น (T_{12} - T_{22}) จะติดตั้งไว้ใน Combustion and exhaust duct zone หรือส่วนของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อดูพฤติกรรมของเปลวไฟที่เกิดขึ้น กลุ่มที่สี่จำนวน 1 ชิ้น (T_{23}) ติดตั้งไว้ในท่อจ่ายน้ำทางเข้าอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน และกลุ่มสุดท้ายจำนวน 1 ชิ้น (T_{24}) ติดตั้งไว้ในท่อทางออกจากอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน โดยเทอร์โมคัปเปิลทั้งหมดนี้จะต่อเข้ากับ เครื่อง Data logger รุ่น MW 100 ยี่ห้อ Yokokawa และเชื่อมต่อไปยังคอมพิวเตอร์เพื่อประมวลผลและบันทึกค่าแบบต่อเนื่อง ขณะทำการทดลอง ในส่วนของแก๊สไอเสียที่เกิดขึ้น จะไหลออกจากระบบทางด้านล่างของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนและถูกตรวจวัดหาปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x) ด้วยเครื่องวิเคราะห์แก๊สไอเสีย (Exhaust gas analyzer) ยี่ห้อ Testo รุ่น M350 ซึ่งปริมาณแก๊สไอเสียที่วัดได้จะนำเสนอด้วยค่าที่มีการปรับเทียบกับออกซิเจนส่วนเกิน 0 % ในพื้นฐานแห้ง (Correction by 0% excess oxygen on dry basis)

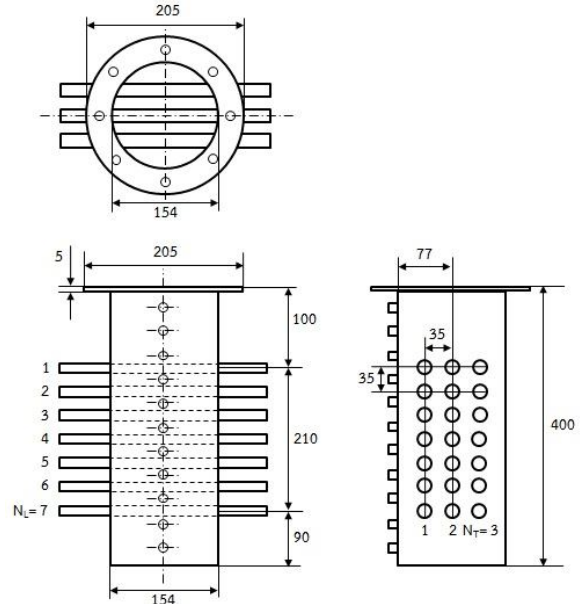
วัสดุพูนชนิดความพรุนต่ำที่เลือกใช้ในงานวิจัยนี้เป็นแบบเม็ดกลมอัดแน่นทำมาจากอะลูมินา-โคบอลต์ (Al-Co) มีค่า d เท่ากับ 7 mm และมีค่า ϕ เท่ากับ 0.395 บรรจุในหัวพันไฟซึ่งมีความหนา 7.5 cm

สำหรับอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน คณะผู้เขียนบทความ เลือกรูปแบบและติดตั้งกลุ่มท่อน้ำชนิดจัดเรียงแบบแนวตรง (In-line tube banks) เนื่องจากมีอิทธิพลต่อความดันลด (Pressure drop) ภายในหัวพันไฟวัสดุพูนต่ำ [11] โดยกลุ่มท่อน้ำทำมาจากท่อสแตนเลสขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก 19 mm และหนา 1 mm ซึ่งแสดงในรูปที่ 2

3.2. การคำนวณหาค่าประสิทธิภาพ

การคำนวณหาค่าประสิทธิภาพ (Effectiveness, ϵ) ของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบกลุ่มท่อในงานวิจัยนี้ หาได้ดังสมการต่อไปนี้ [11]

$$\epsilon = \frac{\dot{Q}}{\dot{Q}_{\max}} = \frac{\dot{m}_c c_{p,c} (T_{c,\text{out}} - T_{c,\text{in}})}{\dot{m}_h c_{p,h} (T_{h,\text{in}} - T_{c,\text{in}})} \quad (1)$$



รูปที่ 2 อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนเป็นแบบกลุ่มท่อที่มีการจัดเรียงแบบแนวตรง

4. ผลการทดลอง

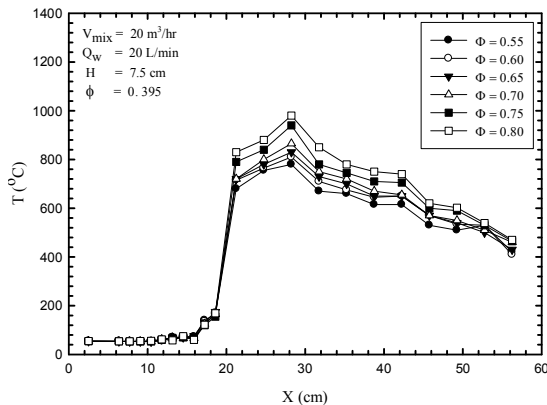
4.1 อิทธิพลของ Φ

รูปที่ 3 แสดงอิทธิพลของอัตราส่วนสมมูล (Φ) ที่มีต่อโครงสร้างทางความร้อน ซึ่งแสดงอยู่ในรูปการกระจายตัวของอุณหภูมิตามแนวแกนตลอดความยาวของอุปกรณ์ทดลอง ในที่นี้จะเรียกว่าโครงสร้างทางอุณหภูมิ (T) โดยเป็นการทดลองที่สภาวะ V_{mix} เท่ากับ $20 \text{ m}^3/\text{hr}$ H เท่ากับ 7.5 cm, Q_w เท่ากับ 20 L/min และ ϕ เท่ากับ 0.395 จากการทดลองพบว่าเมื่อทำการเพิ่มค่า Φ จาก 0.55 ถึง 0.80 แนวโน้ม T จะเพิ่มขึ้นอย่างเด่นชัด ซึ่งปรากฏการณ์เช่นนี้เป็นไปตามกายภาพการเผาไหม้จริง เนื่องจากระบบได้รับเชื้อเพลิงที่เพิ่มหรือปริมาณไอดีผสมที่หนาขึ้น ย่อมทำให้การเผาไหม้มีความรุนแรงและสมบูรณ์ยิ่งขึ้น [12]

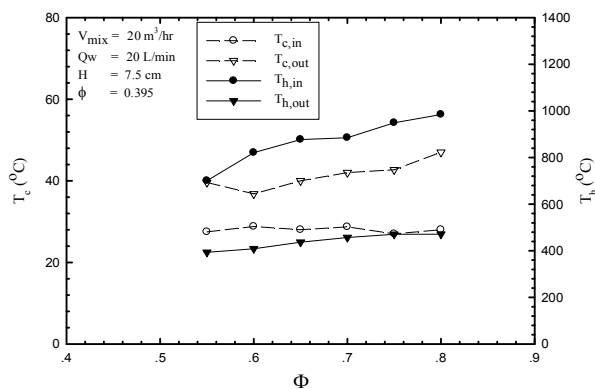
จากโครงสร้างทางอุณหภูมิ (T) ของรูปที่ 3 จะมีผลโดยตรงต่ออุณหภูมิน้ำที่ทางเข้า ($T_{c,\text{in}}$) และที่ทางออก ($T_{c,\text{out}}$) ของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ดังแสดงในรูปที่ 4 และเป็นการทดลองที่สภาวะเดียวกับรูปที่ 3 พบว่าระดับ $T_{c,\text{in}}$ จะค่อนข้างคงที่ เพราะทุกการทดลอง

TSF-18

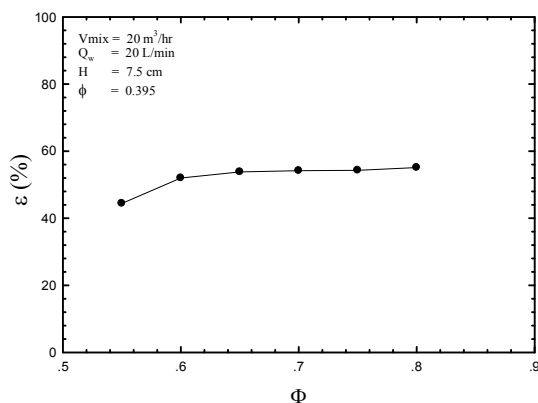
ของงานวิจัยนี้จะใช้อุณหภูมิทางเข้าให้คงที่ในช่วง 27-30 °C เท่านั้น แต่ในกรณีของ $T_{c,out}$ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เมื่อเพิ่มค่า Φ เพราะน้ำมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนความร้อนหรืออุณหภูมิที่สูงขึ้นตาม Φ เพิ่มขึ้นได้ไม่มากเท่าที่ควร ส่งผลให้ประสิทธิภาพ (ε) ของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อ Φ สูงขึ้น เพราะ ε คำนวณจากผลต่างของ $T_{c,out} - T_{c,in}$ ดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 3 อิทธิพลของ Φ ต่อ T

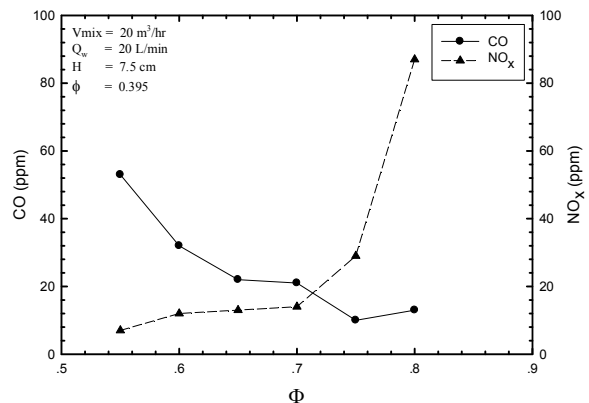


รูปที่ 4 อิทธิพลของ Φ ต่อ T_c และ T_h



รูปที่ 5 อิทธิพลของ Φ ต่อ ε

สำหรับปริมาณแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และปริมาณออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x) (เปรียบเทียบกับออกซิเจนส่วนเกิน 0 % ในพื้นฐานแห้ง) แสดงในรูปที่ 6 กล่าวคือ CO จะมีแนวโน้มลดลงเมื่อ Φ เพิ่มขึ้น และปริมาณออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x) พบว่าแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามค่า Φ ที่สูงขึ้น มีสาเหตุมาจากระดับ T ในหัวฟ่นไฟเพิ่มขึ้นจึงส่งเสริมให้เกิด NO_x มากยิ่งขึ้น อย่างไรก็ตามปริมาณ CO และ NO_x ทั้งสองค่าถือว่า มีระดับที่ต่ำ เพราะมีการเปลี่ยนแปลงไม่เกิน 60 ppm และ 100 ppm ตามลำดับ ซึ่งตามมาตรฐานการปลดปล่อย CO และ NO_x สู่บรรยากาศจะมีค่าแตกต่างกันออกไป ตามการใช้งานและอุตสาหกรรมต่าง ๆ แต่ก็พอกล่าวเป็นภาพรวม ๆ ได้ว่า โดยทั่วไปมีค่าไม่เกิน 250 – 500 ppm [12] (ทั้ง CO และ NO_x) จึงอาจกล่าวได้ว่างานวิจัยนี้ปลดปล่อยมลพิษสู่สิ่งแวดล้อมในเกณฑ์ที่ต่ำ มีความเหมาะสมและสามารถนำไปใช้งานได้ในงานอุตสาหกรรมจริงต่อไป



รูปที่ 6 อิทธิพลของ Φ ต่อปริมาณ CO และ NO_x

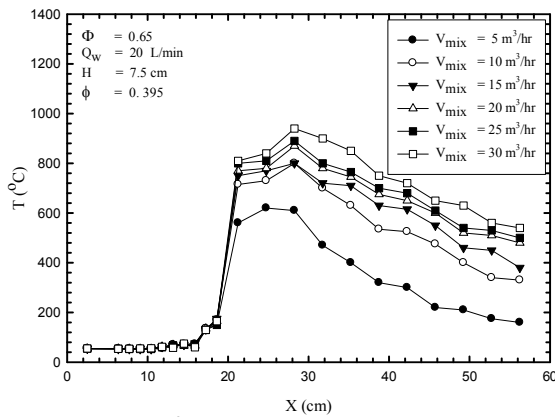
4.2 อิทธิพลของ V_{mix}

รูปที่ 7 แสดงอิทธิพลของ V_{mix} ที่มีต่อ T โดยเป็นการทดลองที่สภาวะ Φ เท่ากับ 0.65, H เท่ากับ 7.5 cm, Q_w เท่ากับ 20 L/min และ ϕ เท่ากับ 0.395 จากการทดลองพบว่าเมื่อทำการเพิ่มค่า V_{mix} จาก 5 ถึง 30 m^3/hr แนวโน้มของ T จะเพิ่มขึ้น เนื่องจากมีอัตราการป้อนเชื้อเพลิงเข้าสู่ระบบเร็วและมากขึ้น เกิดการเผาไหม้รุนแรงยิ่งขึ้นและต่อเนื่อง

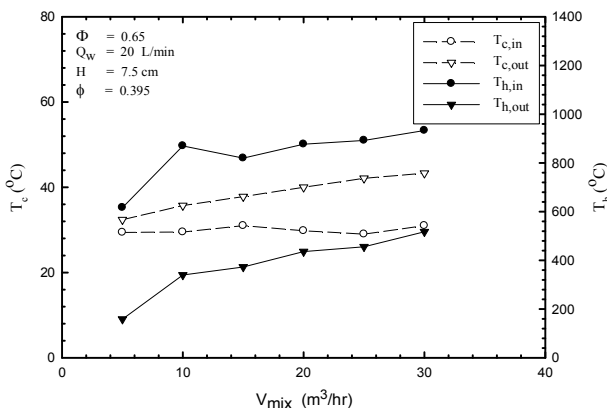
จาก T ที่เกิดขึ้นดังรูปที่ 7 จะส่งผลโดยตรงต่อ $T_{c,in}$ และ $T_{c,out}$ ของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน จึงได้แสดงในรูปที่ 8 เป็นการทดลองที่สภาวะเดียวกับรูปที่ 7 พบว่าระดับ $T_{c,in}$ ก่อนข้างจะคงที่ เพราะทุกการทดลอง

TSF-18

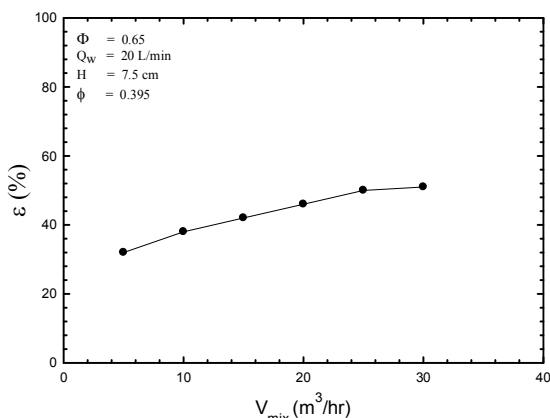
ของงานวิจัยนี้จะใช้อุณหภูมิทางเข้าให้คงที่ในช่วง 27-30 °C เท่านั้น แต่ในกรณีของ $T_{c,out}$ พบว่าจะเพิ่มขึ้นอย่างเด่นชัด เนื่องจากน้ำที่ไหลเข้าสู่อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนได้รับพลังงานหรือความร้อนมากขึ้นจากเปลวไฟที่มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นตามค่า V_{mix} จึงส่งผลให้ ε มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 9 ซึ่งอธิบายได้ด้วยผลต่างของ $T_{c,out} - T_{c,in}$ ที่มากขึ้นตาม V_{mix}



รูปที่ 7 อิทธิพลของ V_{mix} ต่อ T_c

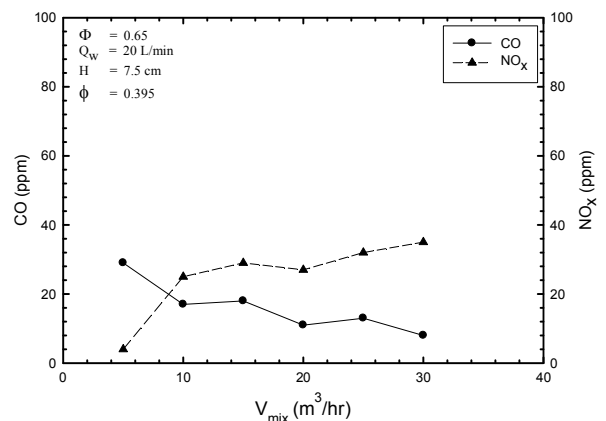


รูปที่ 8 อิทธิพลของ V_{mix} ต่อ T_c และ T_h



รูปที่ 9 อิทธิพลของ V_{mix} ต่อ ε

สำหรับปริมาณ CO และปริมาณ NO_x (เปรียบเทียบกับ O_2 ส่วนเกิน 0 % ในพื้นฐานแห้ง) จะแสดงในรูปที่ 10 กล่าวคือ ปริมาณ CO มีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มค่า V_{mix} แสดงให้เห็นถึงการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ยิ่งขึ้น แต่อย่างไรก็ตามก็มีปริมาณไม่เกิน 40 ppm อยู่ในระดับที่ต่ำ และปริมาณ NO_x พบว่าเมื่อค่า V_{mix} สูงขึ้น ปริมาณ NO_x มีแนวโน้มแทบจะไม่เพิ่มขึ้นเลย แต่ก็พอจะสังเกตได้ว่ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยตาม V_{mix} อย่างใดก็ตาม ปริมาณของ NO_x ถือว่ามีค่าต่ำมาก ๆ อยู่ในช่วง 10 – 40 ppm



รูปที่ 10 อิทธิพลของ V_{mix} ต่อปริมาณ CO และ NO_x

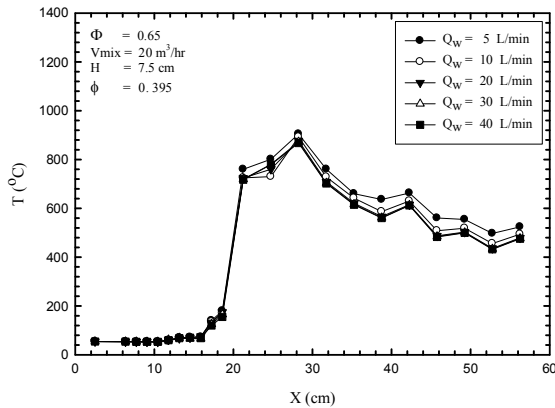
4.3 อิทธิพลของ Q_w

รูปที่ 11 แสดงอิทธิพลของ Q_w ที่มีผลต่อ T โดยเป็นการทดลองที่สภาวะ Φ เท่ากับ 0.65, V_{mix} เท่ากับ 20 m³/hr, H เท่ากับ 7.5 cm และ ϕ เท่ากับ 0.395 จากการทดลองพบว่าเมื่อทำการเพิ่มค่า Q_w จาก 5 ถึง 40 L/min พบว่าแนวโน้มของ T จะลดลง เนื่องจากระบบมีอัตราการได้รับเชื้อเพลิงหรือเชื้อเพลิงป้อนเข้าสู่ระบบเท่าเดิม แต่น้ำที่ไหลผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนมีความเร็วเพิ่มขึ้นจึงทำให้น้ำสามารถแลกเปลี่ยนความร้อนโดยการพาออกไปได้เร็วขึ้น ส่งผลให้ T ลดลงเมื่อ Q_w เพิ่มขึ้น

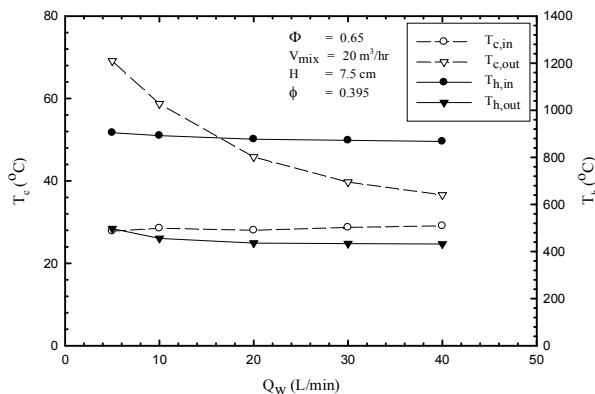
จาก T ที่เกิดขึ้นในรูปที่ 11 จะมีผลโดยตรงต่อ $T_{c,in}$ และ $T_{c,out}$ ของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ดังแสดงในรูปที่ 12 ซึ่งเป็นการทดลองที่สภาวะเดียวกันกับรูปที่ 11 พบว่าระดับ $T_{c,in}$ ก่อนข้างจะคงที่ เพราะกำหนดให้อยู่ในช่วง 27-30 °C สำหรับในกรณีของ $T_{c,out}$ พบว่าเมื่อทำการเพิ่มค่า Q_w จาก 5 ถึง 40 L/min แนวโน้มของ $T_{c,out}$ จะลดลงอย่างชัดเจน เนื่องจากระยะเวลาในการแลกเปลี่ยนความร้อนลดลง ส่งผลให้น้ำได้รับ

TSF-18

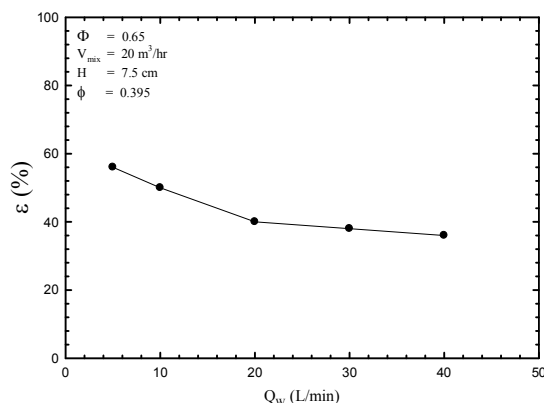
พลังงานหรือความร้อนจากเปลวไฟออกไปได้น้อยลง ดังนั้นค่า ε จึงมีแนวโน้มลดลงเมื่อ Q_w เพิ่มขึ้น ตามค่า $T_{c,out}$ ที่ลดลง ดังแสดงในรูปที่ 13



รูปที่ 11 อิทธิพลของ Q_w ต่อ T



รูปที่ 12 อิทธิพลของ Q_w ต่อ T_c และ T_h



รูปที่ 13 อิทธิพลของ Q_w ต่อ ε

5. สรุป

จากผลการศึกษาที่ได้รับ ประเด็นสำคัญของงานวิจัยนี้ สามารถสรุปได้ตามหัวข้อดังต่อไปนี้

1) โครงสร้างทางอุณหภูมิ (T) ของหัวพ่นไฟ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามค่า Φ และ V_{mix} ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจาก

ระบบได้รับเชื้อเพลิงเพิ่มมากขึ้นทำให้การเผาไหม้มีความรุนแรงและสมบูรณ์ยิ่งขึ้น แต่ T มีแนวโน้มลดลงเมื่อ Q_w เพิ่มขึ้น เพราะน้ำมีการแลกเปลี่ยนความร้อนออกไประหว่างไหลผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนเร็วขึ้น ซึ่งจะสอดคล้องกับปริมาณ CO และ NO_x กล่าวคือ CO จะมีแนวโน้มลดลงเมื่อ Φ และ V_{mix} เพิ่มขึ้น สำหรับปริมาณของ NO_x พบว่าเมื่อค่า Φ และ V_{mix} เพิ่มขึ้น ปริมาณ NO_x มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามไปด้วย อย่างไรก็ตาม ปริมาณ CO และ NO_x ทั้งสองค่าที่เกิดขึ้นถือว่าอยู่ในเกณฑ์ต่ำที่ยอมรับได้

2) อุณหภูมิ $T_{c,out}$ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตาม Φ และ V_{mix} ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากน้ำได้รับความร้อนเพิ่มขึ้นจากเปลวไฟที่มีระดับอุณหภูมิสูงขึ้น แต่ปริมาณ $T_{c,out}$ มีแนวโน้มลดลงเมื่อ Q_w เพิ่มขึ้น เพราะน้ำไหลผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนเร็วขึ้น

3) แนวโน้มของ ε จะเพิ่มขึ้นตาม Φ และ V_{mix} ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากน้ำได้รับความร้อนเพิ่มขึ้นจากเปลวไฟที่มีระดับอุณหภูมิสูงขึ้น แต่จะมีแนวโน้มลดลงตาม Q_w ที่เพิ่มขึ้น เพราะน้ำที่ไหลผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนมีความเร็วมากขึ้น

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณสำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน (EPPO) กระทรวงพลังงาน กองทุนเพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน ที่ให้ทุนสนับสนุนงานวิจัยในครั้งนี้ และคณะผู้เขียนบทความวิจัยขอขอบคุณนักศึกษาสาขาวิศวกรรมเครื่องกล คือ นายนิติพงศ์ ดีบ้านโสภณ นายทองอินทร์ สวนเพชร และนายสุรัชย์ ชัยศรี ซึ่งทำงานวิจัยภายในห้องปฏิบัติการวิจัยการพัฒนาในเทคโนโลยีของวัสดุพ่น (DiTo-Lab) คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน ที่ได้ช่วยเก็บข้อมูลการทดลองบางส่วนจนทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลงไปด้วยดี

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] บัณฑิต กฤตาคม. (2554). หัวพ่นไฟอุตสาหกรรมและการประยุกต์ใช้วัสดุพ่นในหัวพ่นไฟ. วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสยาม. 12: 76 – 87.
- [2] Yoshizawa, Y., Ssaki, K. and Echigo, R. (1988). Analytical study of the structure of radiation controlled

TSF-18

flame, Int. J. Heat mass Transfer, 31: 311-319.

- [3] Khanna, V., Goel, R. and Ellzey, J. L. (1994). Measurements of emissions and radiation for methane combustion within a porous medium burner. Combustion Science and Technology, 99: 133-142.
- [4] Mital, R., Gore, J. P. and Viskanta, R. (1997). A study of the structure of submerged reaction zone in porous ceramic radiant burners. Combustion and Flame, 111: 175-184.
- [5] Bouma, P. H. and De Goey, L. P. H. (1999). Premixed combustion on ceramic foam burner. Combustion and Flame, 119: 133-143.
- [6] Leonardi, S. A., Viskanta, R. and Gore, J. P. (2001). Radiation and thermal performance measurements of a metal fiber burner. JQSRT, 73: 491-501.
- [7] Krittacom, B. and Kamiuto, K. (2009). Radiation emission characteristics of an open-cellular porous burner. JSME Journal of Thermal Science and Technology, 4(1): 13-24.

- [8] บัณฑิต กฤตาคม. (2552). คุณลักษณะการแผ่รังสีของหัวเผาไหม้วัสดุพูนแบบเซรามิกชนิดเซลลูลาร์เปิด. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 23, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, เชียงใหม่, 4-7 พ.ย. 2552.
- [9] ปรีชา ศรีสุวรรณ และคณะ. (2555). การประยุกต์ใช้หินตุ้ปลาเป็นวัสดุพูนชนิดเม็ดกลมอัดแน่นในหัวพ่นไฟวัสดุพูนเชื้อเพลิงแก๊ส. การประชุมสัมมนาเชิงวิชาการพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 5, มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่, 18 - 20 ธันวาคม 2555.
- [10] ศาสตรา บุญมาก และคณะ. (2555). หัวพ่นไฟวัสดุพูนชนิดเม็ดกลมอัดแน่นที่ใช้แอลพีจีเป็นเชื้อเพลิง. การประชุมสัมมนาเชิงวิชาการพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 5, มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่, 18 - 20 ธันวาคม 2555.
- [11] Yunus A. cengle. Afshin J. Ghajar. (2007). Heat and mass transfer fundamentals and application, McGraw-Hill higher education (Asia).
- [12] สำเริง จักรใจ. (2547). การเผาไหม้. สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.