

หัวเผาวัสดุพรุนแบบไม่มีการผสมเชื้อเพลิงกับอากาศมาก่อนสำหรับเชื้อเพลิงแก๊ส

Nonpremixed Porous Burners for Gaseous Fuels

พีรยุทธ ทองเต็ม และ สำเร็จ จักรใจ*

ห้องปฏิบัติการวิจัยเครื่องยนต์และการเผาไหม้ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี แขวงบางมด เขตทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140

โทร 0-2470-9128 โทรสาร 0-24270-9111 *อีเมลล์ sumrueng.jug@kmutt.ac.th

บทคัดย่อ

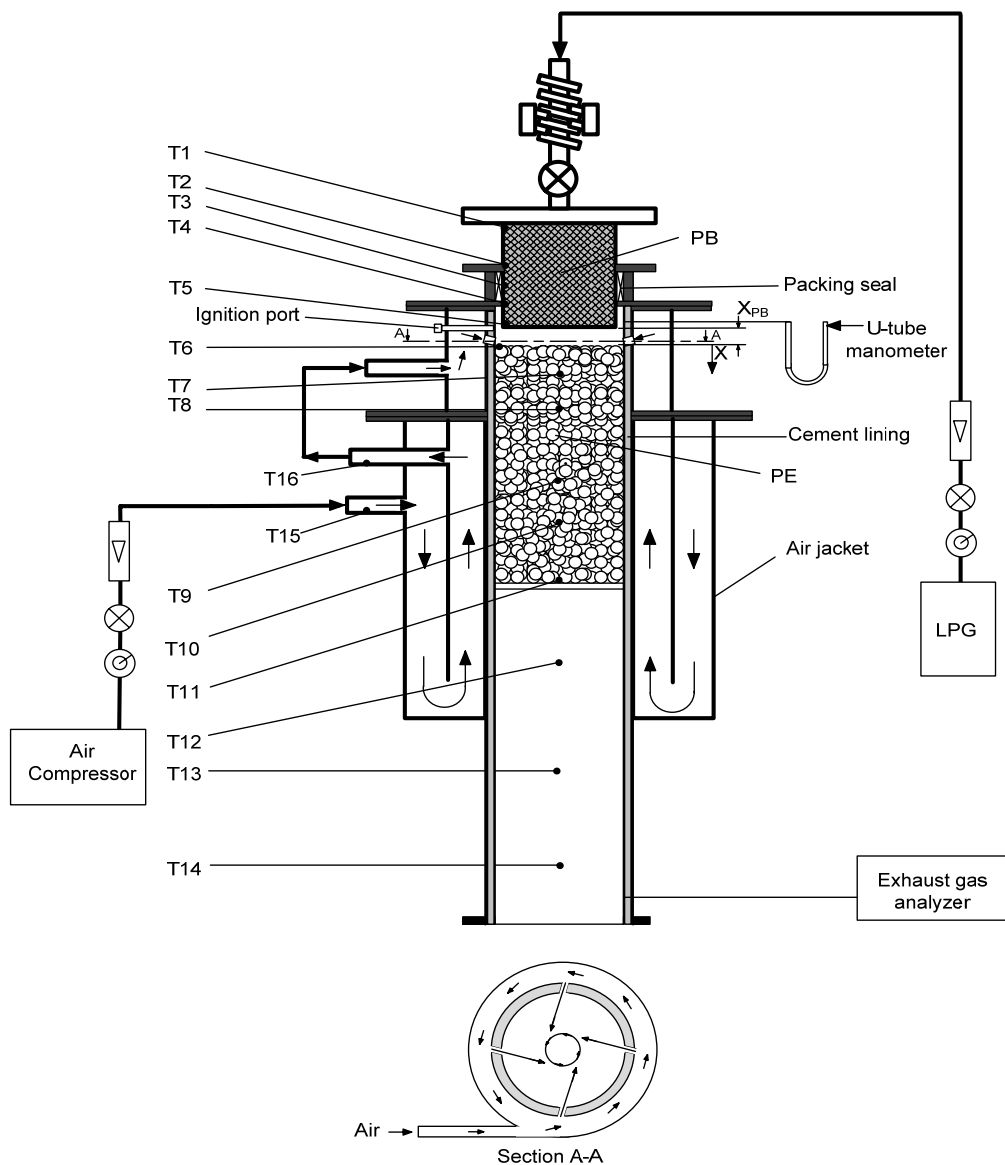
หัวเผาวัสดุพรุน (porous burner) มีข้อดีที่เหนือกว่าหัวเผาที่ให้เปลวไฟอิสระทั่วไป กล่าวคือก่อให้เกิดการอุ่นไอน้ำตามธรรมชาติภายในวัสดุพรุนได้อย่างมีประสิทธิภาพ จึงให้อัตราการเผาไหม้ที่สูง การเผาไหม้ในสภาวะไอน้ำบางส่วนได้ และปลดปล่อยปริมาณมลพิษ CO และ NO_x ต่ำ จึงได้รับความนิยมใช้งานแพร่หลายมากขึ้น อย่างไรก็ตามหัวเผาวัสดุพรุนส่วนใหญ่เป็นแบบผสมกันมาก่อน (premixed-porous burner) ทำให้มีข้อจำกัดในการใช้งานเกี่ยวกับความปลอดภัยที่ต่ำ ในงานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาและพัฒนาหัวเผาวัสดุพรุนแบบไม่มีการผสมเชื้อเพลิงกับอากาศมาก่อน (nonpremixed porous burner) เพื่อเพิ่มความปลอดภัยในการใช้งานให้สูงขึ้น หัวเผาวัสดุพรุนประกอบด้วยวัสดุพรุนสองส่วน คือ porous burner (PB) ทำหน้าที่กระจายเชื้อเพลิงให้ไหลเต็มหน้าตัดก่อนที่จะไปผสมกับอากาศแล้วเข้าไปเผาไหม้ใน porous emitter (PE) ต่อไป หัวเผาวัสดุพรุนตามการศึกษาสามารถทำงานได้ทั้งในแบบ premixed และ nonpremixed ขึ้นอยู่กับการปรับระยะห่างระหว่างวัสดุพรุนทั้งสองชนิด ถ้าวัดวัสดุพรุนทั้งสองชนิดติดกันระยะห่างระหว่างวัสดุพรุนมีค่าเท่ากับศูนย์ ($X_{PB} = 0$ มม) หัวเผาจะทำงานแบบ nonpremixed และ จะเป็นแบบ premixed เมื่อวัสดุพรุนทั้งสองอยู่ห่างกันเพราะช่องว่างที่เกิดขึ้นจะทำหน้าที่เป็นห้องผสม (mixing chamber) ในการทดลองจะศึกษาอิทธิพลของตัวแปรที่สำคัญๆ ได้แก่ ค่าอัตราส่วนสมมูล (equivalence ratio) อัตราการเผาไหม้ (firing rate) ระยะห่างระหว่างวัสดุพรุนที่มีผลต่อการเผาไหม้ในวัสดุพรุน การปลดปล่อยแก๊ส CO และ NO_x ที่ทางออกของหัวเผา และ ประสิทธิภาพการแผ่รังสีความร้อน (radiation efficiency) เชื้อเพลิงที่ใช้ในการทดลองคือแก๊สหุงต้ม ผลการทดลองพบว่าหัวเผาวัสดุพรุนแบบ nonpremixed ให้ขอบเขตการเผาไหม้ (flammability limit) ที่กว้าง โดยมีค่าอัตราส่วนสมมูลอยู่ในช่วง 0.23-0.99 ปลดปล่อยปริมาณ CO ประมาณ 120 ppm และ ให้ปริมาณ NO_x ต่ำใกล้เคียงกับหัวเผาวัสดุพรุนแบบ premixed คือประมาณ 110 ppm อย่างไรก็ตามหัวเผาวัสดุพรุนแบบ nonpremixed ให้ประสิทธิภาพในการแผ่รังสีความร้อนสูงกว่า ถึง 3-13% เมื่อเทียบกับแบบ premixed ที่เงื่อนไขทดลองเดียวกัน

Abstract

Porous burners offer the advantages over the free flame burners. Because of a self preheating of fresh mixture inside the combustion chamber, higher burning rate, lean burn and low pollution (i.e. CO, NO_x) are obtained. However, most of the previous studied are placed on the premixed combustions which unfortunately provide a very low safety in the operation. Therefore, the main objective of this studied is to developed a nonpremixed porous burner which can provides a more safety. A porous burner consisted of two porous sections. The first section is a porous burner (PB) which is contained with the stainless wires, in order to distribute the gas fuel flows uniformly entire the section. Thus they will be burned in the second section, i.e. porous emitter (PE). This burner can be operated in both premixed and nonpremixed combustion modes. The premixed mode was done when a mixing chamber is opened (i.e. gap between PB and PE is not zero). While a nonpremixed mode will be carried out if the mixing chamber is completely closed. The parametric studies were done on the effect of equivalence ratio, firing rate, and X_{PB} on the emission (CO, NO_x), also the radiation efficiency. LPG is used as the gas fuel in this study. It was found that a combustion in nonpremixed mode can be operated with a wider flammability limit (equivalence ratio between 0.23-0.99) than a premixed mode, which is still provide a low emission with CO emitted at about 120 ppm and NO_x at about 110 ppm. Moreover, the operation in a nonpremixed combustion mode provides higher radiation efficiency of about 3-13% compared with a premixed combustion mode.

1. บทนำ

ในช่วงที่ผ่านมา มีนักวิจัยหลายกลุ่มนำเอาวัสดุพรุน (porous-medium) มาใช้ร่วมกับการเผาไหม้เชื้อเพลิงแก๊ส [1, 2] พบว่าลักษณะเด่นของวัสดุพรุนซึ่งเป็นของแข็งที่มีความพรุนภายในมีอัตราส่วนพื้นที่ผิวต่อปริมาตรสูงสามารถทนต่ออุณหภูมิสูงได้จึงส่งเสริมการถ่ายเท

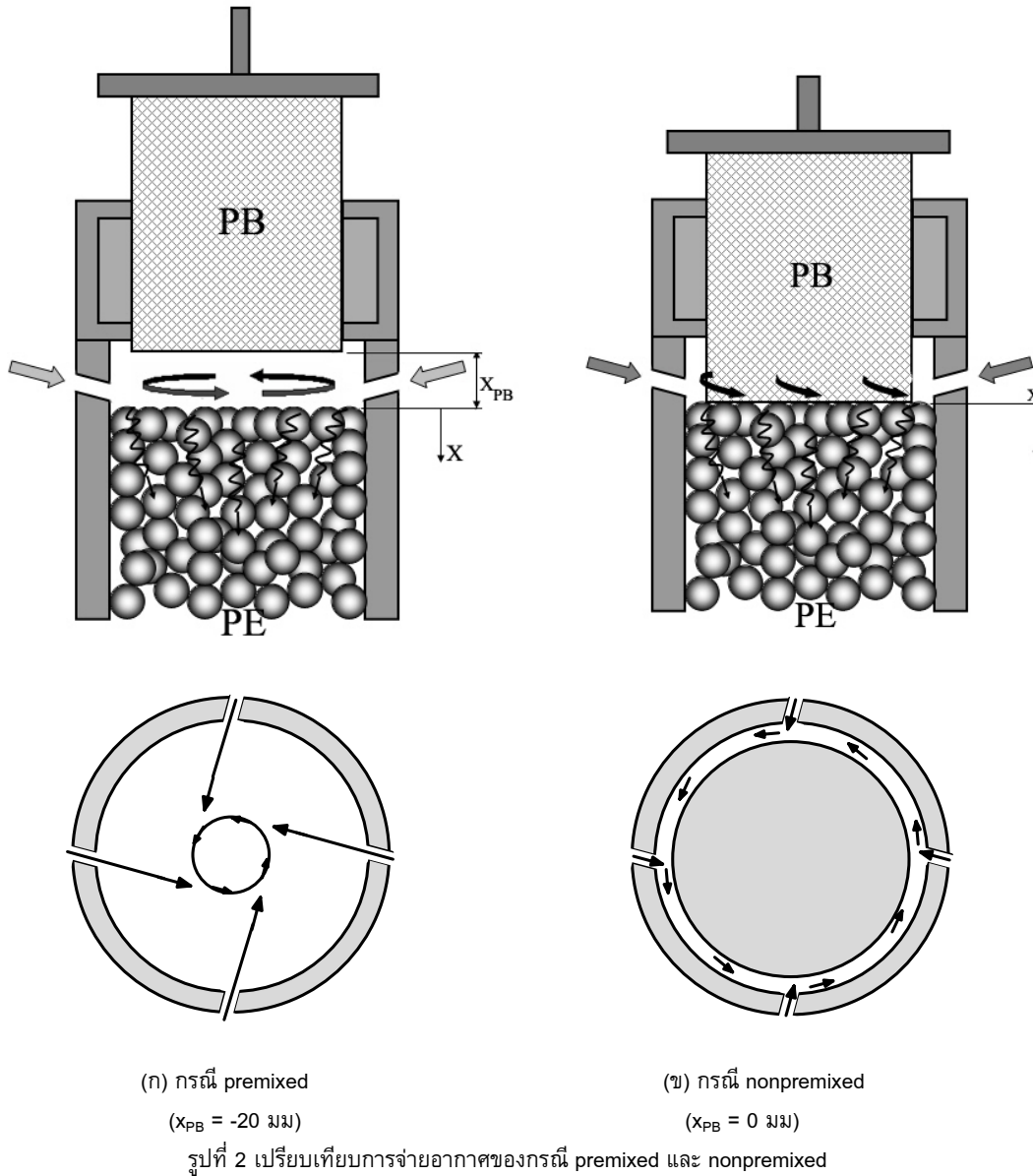


รูปที่ 1 หัวเผาวัสดุพูนแบบไม่มีการผสมเชื้อเพลิงกับอากาศมาก่อน

ความร้อนเปลี่ยนรูปพลังงานได้ดีระหว่างการพาความร้อน (thermal convection) และการแผ่รังสีความร้อน (thermal radiation) และ พบว่าการเผาไหม้เชื้อเพลิงแก๊สที่เกิดขึ้นภายในวัสดุพูนนั้นจะให้การเผาไหม้ที่มีการหมุนเวียนความร้อนในตัวเอง การหมุนเวียนความร้อนที่เกิดขึ้นนี้จะช่วยส่งเสริมการเผาไหม้ให้สมบูรณ์ ได้การเผาไหม้เป็นแบบ "excess-enthalpy flame" กล่าวคืออุณหภูมิการเผาไหม้สามารถสูงกว่าทางทฤษฎี (adiabatic flame temperature) [3] ของส่วนผสมที่สภาวะเริ่มต้นเดียวกันรวมทั้งปลดปล่อยมลพิษต่ำทั้ง CO และ NO_x [1] เพราะมีการอุ่นไอดีก่อนการเผาไหม้และความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ในสถานะแก๊สมีการถ่ายเทให้กับวัสดุพูนในสถานะของแข็งในทันทีทันใดจึงลดเวลา (residence time) ในการเกิด NO_x เพิ่มความเข้มการเผาไหม้ (combustion intensity) ระบบจึงมีขนาดกะทัดรัด ขยายขอบเขตการเผาไหม้ (flammability limits) [1] ให้

ส่วนผสมเชื้อเพลิงกับอากาศก่อนการเผาไหม้หรืออีกนัยหนึ่งคือสามารถเผาเชื้อเพลิงค่าความร้อนต่ำ ๆ ที่ไม่สามารถติดไฟได้ด้วยตัวเอง โดยทั่วไปหัวเผา วัสดุพูนจะทำงานเป็นแบบผสมเชื้อเพลิงกับอากาศมาก่อน [4-8] ซึ่งมีข้อจำกัดเรื่องความปลอดภัยในการทำงาน โดยเฉพาะในอุตสาหกรรมเพราะอาจจะเกิดการติดไฟของส่วนผสมระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศก่อนที่จะมาถึงห้องเผาไหม้ซึ่งอาจจะทำให้อุณหภูมิของส่วนผสมสูงขึ้นได้จึงมีการแก้ปัญหาโดยการให้เชื้อเพลิงกับอากาศผสมกันที่ห้องเผาไหม้เพื่อเพิ่มความปลอดภัยในการทำงาน

ในงานวิจัยนี้ได้พัฒนาหัวเผาวัสดุพูนแบบไม่มีการผสมเชื้อเพลิงกับอากาศมาก่อนโดยใช้เชื้อเพลิงแก๊ส เพื่อเพิ่มความปลอดภัยในการเผาไหม้และได้ศึกษาอิทธิพลค่าอัตราส่วนผสม (equivalence ratio) ระหว่างวัสดุพูน (X_{PB}) ที่มีผลต่อการโครงสร้างทาง



2. การทดลอง

2.1 อุปกรณ์การทดลอง

รูปที่ 1 แสดงหัวเผาวัสดุพอร์นแบบไม่มีการผสมมาก่อนซึ่งประกอบด้วยวัสดุพอร์นรูปทรงกระบอกสองชั้นวางอยู่ในท่อสแตนเลสกลวงรวมแกนตั้งอยู่ในแนวตั้ง ประกอบด้วยส่วนแรกคือวัสดุพอร์น PB (porous burner) วัสดุพอร์น PB ประกอบด้วยตาข่ายสแตนเลสขนาด 100 mesh/inch จำนวน 200 แผ่น วางอัดแน่นซ้อนกันยาว 75 มม. ในท่อสแตนเลสขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 60 มม. เพื่อทำหน้าที่กระจายเชื้อเพลิงแก๊สให้ไหลเต็มหน้าตัดท่อ ส่วนที่สองคือวัสดุพอร์น PE (porous emitter) วัสดุพอร์น PE นี้ประกอบด้วยก้อนหินขนาด 10 มม. บรรจุเต็มหน้าตัดในท่อสแตนเลสขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 75 มม. เป็นระยะทางยาว 160 มม. ทำหน้าที่ในการเผาไหม้ ระยะห่างระหว่างวัสดุ

พอร์น PB และวัสดุพอร์น PE (X_{PB}) สามารถปรับได้อย่างอิสระโดยอาศัยการเลื่อนของวัสดุพอร์น PB ขึ้นหรือลงโดยชั้นสกรูด้านบนขณะที่วัสดุพอร์น PE ถูกยึดติดตายตัวอยู่กับที่ หัวเผาวัสดุพอร์นตามการศึกษานี้ได้รับการออกแบบมาเป็นพิเศษคือสามารถทำงานได้ทั้งในแบบ premixed และ nonpremixed ขึ้นอยู่กับการปรับระยะห่างระหว่างวัสดุพอร์นทั้งสองชนิด ดังแสดงในรูปที่ 2 ถ้าวัสดุพอร์นทั้งสองชนิดติดกัน ($X_{PB} = 0$ มม.) หัวเผาจะทำงานแบบ nonpremixed และจะเป็นแบบ premixed เมื่อวัสดุพอร์นทั้งสองอยู่ห่างกัน ($X_{PB} = -20$ มม.) เพราะช่องว่างที่เกิดขึ้นจะทำหน้าที่เป็นห้องผสม ในการทดลองนี้จะปรับระยะ $X_{PB} = -20$ มม. และ $X_{PB} = 0$ มม. วัสดุพอร์น PE จะห่อหุ้มด้วย air jacket เพื่ออุณหภูมิอากาศก่อนที่จะถูกจ่ายไปยังส่วนจ่ายอากาศซึ่งมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 5 มม. จำนวนสี่รูซึ่งจะทำให้อากาศไหลแบบ

หมุนวน (swirl) เมื่อระยะ $X_{PB} = -20$ มม ดังรูปที่ 2(ก) และจ่ายอากาศเป็นแบบวงแหวน (annular) เมื่อระยะ $X_{PB} = 0$ มม ดังรูปที่ 2(ข)

2.2 การวัด

คุณลักษณะในการเผาไหม้ประมาณได้จากการกระจายอุณหภูมิตลอดทั้งหัวเผาและแก๊สที่เผาไหม้ที่ออกมาจากทางออกหัวเผา โดยอุณหภูมิจะวัดอุณหภูมิภายในหัวเผาตั้งแต่ T_1-T_{14} ซึ่งใช้เทอร์โมคัปเปิ้ลสองชนิด ใน PE จะใช้เทอร์โมคัปเปิ้ล B-Type ซึ่งมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.5 มม สายบวกรทำจากโลหะผสมระหว่าง Pt 70% และ Rh 30% สายลบทำจากโลหะผสม Pt 94% และ Rh 6% สามารถใช้งานได้ในช่วงอุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ถึง ประมาณ 1700 องศาเซลเซียส จึงเหมาะอย่างยิ่งสำหรับการวัดอุณหภูมิในบริเวณการเผาไหม้ จำนวน 6 ตัวตำแหน่งที่วัดตั้งแต่ T_6-T_{11} วางตามแนวตรงกลางของวัสดุพูน PB ดังรูปที่ 1 ในวัสดุพูน PB ใช้เทอร์โมคัปเปิ้ล N-type ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.1 มม ประกอบด้วยสายบวกและสายลบ โดยสายบวกทำจากโลหะผสมระหว่าง Ni 10% และ Cr 90% ส่วนสายลบทำจากโลหะผสมระหว่าง Ni 95%+5% ของส่วนผสมระหว่าง Al, Mn และ Si สามารถใช้งานในสภาวะที่เป็น Oxidizing หรือ Inert ได้ดี ทนอุณหภูมิสูงสุดประมาณ 1260 องศาเซลเซียส จำนวน 5 ตัว ตำแหน่งที่วัดตั้งแต่ T_1-T_5 สอดเข้าไปตามช่องว่างเล็กๆระหว่างซีเมนต์ทนไฟกับ PB ตามตำแหน่ง ดังรูปที่ 1 และเทอร์โมคัปเปิ้ล N-type ยังได้ใช้บริเวณทางออกหัวเผาตามตำแหน่ง $T_{12}-T_{14}$ บริเวณทางเข้าอากาศ และ ทางออกอากาศหลังอุณหภูมิตามตำแหน่ง $T_{15}-T_{16}$ โดยเทอร์โมคัปเปิ้ลทั้งหมดนี้จะต่อเข้ากับ Data Logger รุ่น DT600 และคอมพิวเตอร์ตามลำดับเพื่อบันทึกค่าอุณหภูมิแบบต่อเนื่องขณะที่วัดสำหรับการวัดไอเสียจากการเผาไหม้ทำการวัดด้วยเครื่องวิเคราะห์ไอเสีย (exhaust gas analyzer) เป็นของบริษัท MESSTECHNIK EHEIM รุ่น Visit-01L ในการวัดค่า CO , CO_2 , O_2 , และ NO_x ลักษณะการวิเคราะห์ไอเสียเป็นแบบแห้ง (dry-basis) โดยวัดที่ตำแหน่งทางด้านขาออก (downstream) ของหัวเผาวัสดุพูน และ ความดันในห้องจ่ายอากาศ ΔP เทียบกับบรรยากาศวัดโดย U-tube manometer

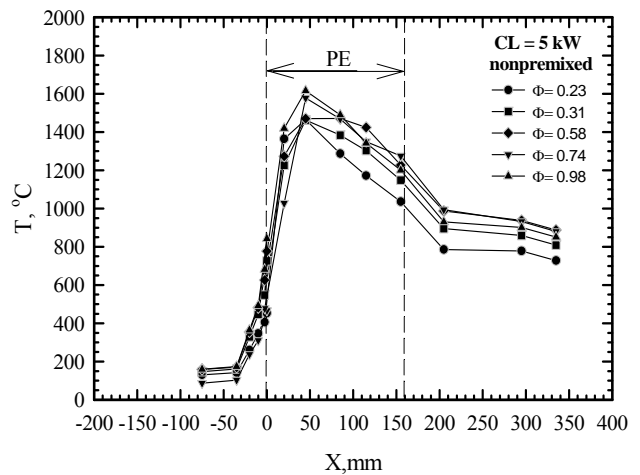
2.3 วิธีการทดลอง

ขั้นตอนการทดลองและการทำงานของหัวเผา ในตอนเริ่มต้นจะปรับระยะ $X_{PB} = -20$ มม ปลอ่ยเชื้อเพลิง LPG เข้าทางวัสดุพูน PB และอากาศไหลแบบหมุนวนเข้ามาทางด้านข้างของห้องเผาไหม้แล้วใช้เปลวไฟล่อ (pilot flame) เป็นตัวจุดไฟ จ่อทางช่องจุดไฟ (ignition port) เมื่อไฟติดแล้วจึงปรับค่าการป้อนเชื้อเพลิงให้ได้ตามที่ต้องการปรับปริมาณอากาศให้ปริมาณ O_2 จากเครื่องวิเคราะห์ ไอเสียมีค่าอยู่ระหว่าง 10% ถึง 11% ของอากาศส่วนเกินจากนั้นจะทำการอุ่นวัสดุพูนตาข่ายสแตนเลส (PB) และชั้นวัสดุพูนหิน (PE) ร้อนขึ้นจนกระทั่งอุณหภูมิไม่มีการเปลี่ยนแปลงตลอดทั้งเตาเผาวัสดุพูนทำการทดลองตามเงื่อนไขต่างๆ ที่ต้องการ

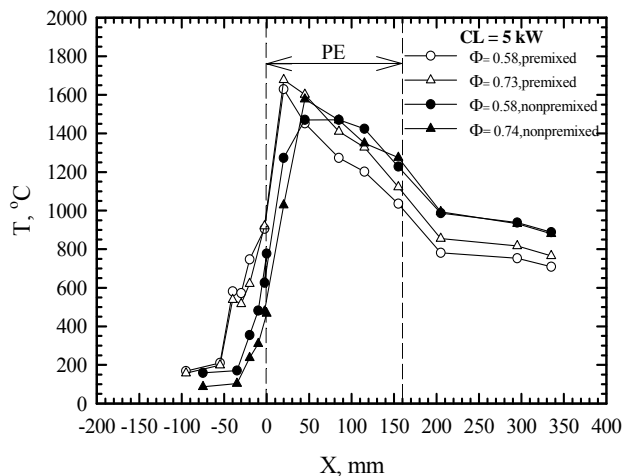
3. ผลการทดลอง

รูปที่ 3 แสดงอิทธิพลของค่าอัตราส่วนสมมูล Φ ต่อโครงสร้างทางความร้อน T ในห้องเผาไหม้ที่ firing rate (CL) เท่ากับ 5 kW ของกรณี nonpremixed ($X_{PB} = 0$ มม) ซึ่งการปรับค่า Φ กระทำได้โดยการปรับอัตราการไหลของอากาศแต่รักษาอัตราการป้อนเชื้อเพลิงให้คงที่พบว่าเมื่อค่า Φ สูงขึ้น อุณหภูมิจะสูงขึ้นตามค่า Φ ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎี

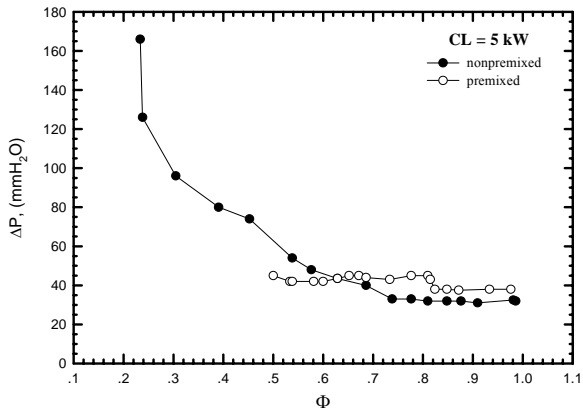
รูปที่ 4 เปรียบเทียบ T ระหว่าง premixed และ nonpremixed ที่ CL = 5 kW พบว่าเมื่อทำการลดระยะ $X_{PB} = -20$ มม จนเป็น $X_{PB} = 0$ มม การเผาไหม้ยังเกิดขึ้นได้โดยตำแหน่งเปลวไฟระบุโดยตำแหน่งอุณหภูมิสูงสุด จะเกิดลึกเข้าไปในวัสดุพูน PE มากขึ้นเนื่องจากการปรับเปลี่ยนการจ่ายอากาศในการเผาไหม้ จากการจ่ายอากาศแบบหมุนวนเมื่อระยะ $X_{PB} = -20$ มม เป็น จ่ายอากาศเป็นแบบวงแหวนเมื่อ $X_{PB} = 0$ มม ทำให้เชื้อเพลิงเจอกับอากาศภายในวัสดุพูน PE ทั้งหมด



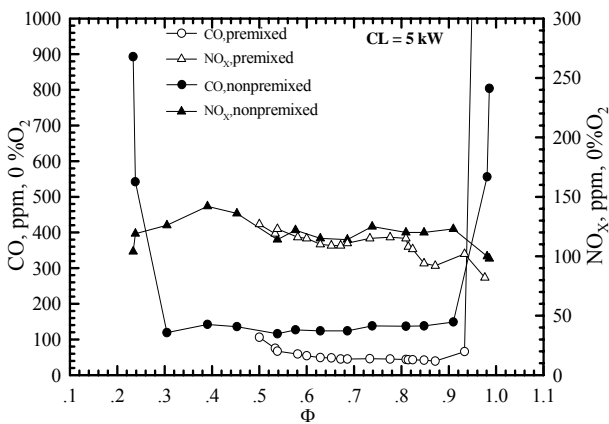
รูปที่ 3 อิทธิพลของ Φ ที่มีผลต่อ T กรณี nonpremixed ($X_{PB} = 0$ มม)



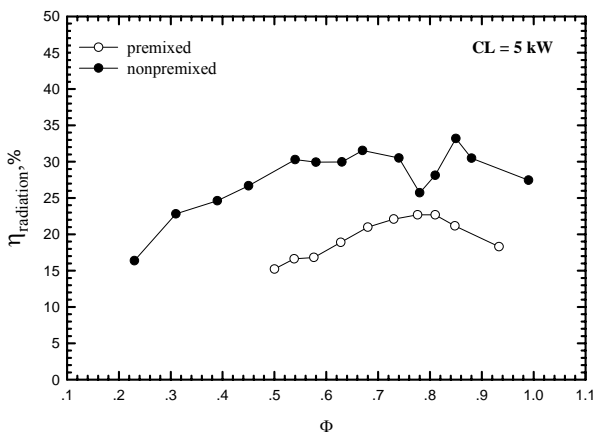
รูปที่ 4 เปรียบเทียบ T ระหว่างกรณี premixed และ nonpremixed



รูปที่ 5 อิทธิพลของ Φ ที่มีผลต่อความดันในห้องจ่ายอากาศ



รูปที่ 6 ค่ามลพิษที่ปลดปล่อย CO และ NO_x ระหว่างกรณี premixed และ nonpremixed



รูปที่ 7 ประสิทธิภาพการแผ่รังสีความร้อน

รูปที่ 5 แสดงค่า Φ ที่มีต่อความดัน ΔP ของการเผาไหม้ของกรณี premixed และ nonpremixed จากรูปพบว่าเมื่อค่า Φ สูงขึ้นความดันจะลดลงเพราะการปรับอัตราการไหลของอากาศลดลงทำให้ความดันลดลง และ กรณี nonpremixed จะมีความดันสูงกว่ากรณี premixed ที่ Φ น้อยกว่า 0.63 เนื่องจากไม่มีห้องผสม (mixing chamber) อากาศจะ

ผ่านช่องว่างเล็กๆ ระหว่างผนังห้องเผาไหม้กับ PB ทำให้ความดันสูงขึ้นเพราะอัตราการไหลของอากาศที่เข้าสูง แต่เมื่อ Φ มากกว่า 0.63 กรณี premixed จะมีความดันสูงกว่ากรณี nonpremixed เนื่องจากกรณี premixed มีการเผาไหม้ใกล้หน้าผิววัสดุพอรุน PE มากกว่ากรณี nonpremixed ส่งผลทำให้ความดันสูงขึ้น

รูปที่ 6 เปรียบเทียบค่ามลพิษที่ปลดปล่อย CO และ NO_x ที่ CL = 5 kW ระหว่าง premixed และ nonpremixed พบว่า กรณี nonpremixed จะให้การปลดปล่อยปริมาณ CO ประมาณ 120 ppm ซึ่งมากกว่ากรณี premixed อยู่เกือบสองเท่า เพราะในกรณี nonpremixed อากาศเข้าผสมกับเชื้อเพลิงใน PE ทำให้เชื้อเพลิงบางส่วนไม่สามารถผสม และเกิดการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์กับอากาศได้หมดในวัสดุพอรุน PE จึงลืตลอดออกมาเผาไหม้นอกวัสดุพอรุน PE บางส่วน ในขณะที่ทั้งสองกรณีจะปลดปล่อยปริมาณ NO_x ต่ำใกล้เคียงกัน คือประมาณ 110 ppm โดยที่ T แตกต่างกัน ถึงแม้ว่ากรณี nonpremixed มีอุณหภูมิสูงสุดของการเผาไหม้จะต่ำกว่ากรณี premixed แต่อุณหภูมิตลอดทั้ง PE สูงกว่ากรณี premixed จึงทำให้มีเวลาในการก่อเกิด NO_x ที่ยาวนานขึ้น ดังแสดง T ในรูปที่ 4

รูปที่ 7 แสดงอิทธิพลของค่าอัตราส่วนสมมูลที่มีต่อประสิทธิภาพในการแผ่รังสีความร้อน ($\eta_{\text{radiation}}$) ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างพลังงานความร้อนที่แผ่รังสีออกมาทางด้าน downstream กับ พลังงานของเชื้อเพลิงที่ป้อนเข้าไป พบว่า ในกรณี nonpremixed ทุกค่า Φ ให้ประสิทธิภาพในการแผ่รังสีความร้อนออกสู่ภายนอก สูงกว่ากรณี premixed ถึง 3-13% เนื่องจาก กรณี nonpremixed ให้ตำแหน่งเปลวไฟเกิดลึกเข้าไปในวัสดุพอรุน PE อุณหภูมิตลอดทั้งวัสดุพอรุน PE สูงกว่ากรณี premixed จึงทำให้มีการแผ่รังสีออกสู่ภายนอกมากกว่าที่เงื่อนไขทดลองเดียวกัน

4. สรุปผลการศึกษา

หัวเผาวัสดุพอรุนแบบ nonpremixed ถึงแม้จะให้การปลดปล่อยปริมาณ CO ประมาณ 120 ppm ซึ่งมากกว่า หัวเผาวัสดุพอรุนแบบ premixed อยู่เกือบสองเท่า แต่ก็ยังมีอุณหภูมิที่สูงตลอดทั้งวัสดุพอรุน PE เพราะการเผาไหม้ไปเกิดภายในวัสดุพอรุน PE ลึกขึ้นแต่ยังคงให้ NO_x ต่ำใกล้เคียงกับ หัวเผาวัสดุพอรุนแบบ premixed แต่หัวเผาวัสดุพอรุนแบบ nonpremixed ให้ประสิทธิภาพในการแผ่รังสีความร้อนออกสู่ภายนอก สูงกว่าหัวเผาวัสดุพอรุนแบบ premixed จึงทำให้หัวเผาแบบ nonpremixed นำประโยชน์จากความร้อนที่แผ่รังสีออกมาใช้งานได้มากขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] Howell, J.R., Hall, M.J. and Ellzey, J.L., 1996, "Combustion Hydrocarbon Fuels within Porous Inert Media", *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 22, pp. 121-145.
- [2] Sathe, S.B., Kulkarni, H.R. and Tong, T.W., 1990, "An Experimental and Theoretical Study of Porous Radiant Burner Performance", *Twenty- Third Symposium (International) on Combustion*, Pittsburgh, The Combustion Institute, pp. 1011-1018.
- [3] Weinberg, F.J., 1986, "Heat-recalculating Burner : Principles and Some Recent Developments", *Combustion Science and Technology*, Vol. 121, pp. 3-22.
- [4] Y. Huang, C.Y.H. Chao , P. Cheng, 2002, Effects of preheating and operation conditions on combustion in a porous medium, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 45 (2002) 4315-4324.
- [5] Geir J. Rørtveit, Klaus Zepter, Øyvind Skreiberg, Morten Fossum and Johan E. Hustad, A comparison of low-NO_x burners for combustion of methane and hydrogen mixtures, *Proceedings of the Combustion Institute*, Volume 29, 2002/pp. 1123–1129.
- [6] O. Deutschmann, L.I. Maier, U. Riedel a, A.H.Stroemman, R.W. Dibble, Hydrogen assisted catalytic combustion of methane on platinum, *Catalysis Today* 59 (2000) 141–150.
- [7] S.K. Alavandi, A.K. Agrawal, Experimental study of combustion of hydrogen–syngas/methane fuel mixtures in a porous burner, *International Journal of Hydrogen Energy* 33 (2008) 1407–1415.
- [8] S.G. Kim ,T. Yokomori ,N.I. Kim ,S. Kumar . Maruyama ,K. Maruta ,Flame behavior in heated porous sand bed, *Proceedings of the Combustion Institute* 31 (2007) 2117–2124.