

ฟลักซ์การแผ่รังสีความร้อนของหัวเผาเชื้อเพลิงแก๊สชนิดวัสดุพอร์นเซลลูลาร์เปิด
บัณฑิต กฤตาคม* พิปัตนา อมตฉายา และอิทธิพล วรพันธ์

Radiation Heat Flux of the Gas Burner using Open-cellular Porous Media

Bundit Krittacom* Pipatana Amatachaya and Ittipon Worapun

ห้องปฏิบัติการการวิจัยในเทคโนโลยีของวัสดุพอร์น สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
จังหวัดนครราชสีมา 30000

*Correspondent author. E-mail: bundit.kr@rmuti.ac.th

บทคัดย่อ

ฟลักซ์การแผ่รังสีความร้อนจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงผสมก่อนระหว่างอากาศกับแก๊สมีเทนในหัวเผาวัสดุพอร์นชนิดเซลลูลาร์เปิดได้ทำการศึกษาโดยการทดลองและการคำนวณในการทดลองใช้วัสดุพอร์นแบบเซรามิกชนิดอะลูมินา-โคบอลต์ไธไรต์ (Al-Co) มาติดตั้งในหัวเผาโดยมีค่าจำนวนช่องต่อหนึ่งหน่วยนิ้ว (PPF) เท่ากับ 13 และมีความพอร์น (Φ) เป็น 0.872 การวัดรังสีที่แผ่ออกมาจากหัวเผาใช้เครื่องมือวัดรังสีชนิดผิวหน้าสองสี สำหรับการวิเคราะห์ทางทฤษฎี ใช้จลนศาสตร์เคมีของกลไกการเผาไหม้ในสถานะแก๊ส (สมการพลังงาน) เป็นแบบกลไกเดี่ยวโดยใช้สมการอาร์เรเนียสสำหรับการคำนวณหาการส่งถ่ายการแผ่รังสีความร้อนในสมการพลังงานของสถานะของแข็ง สมการการแผ่รังสีความร้อนในหัวเผาวัสดุพอร์นหาผลเฉลยด้วยวิธีการประมาณค่าแบบ P_1 สภาวะเสถียรของการเผาไหม้ในหัวเผานี้ได้กำหนดด้วยการเป่าดับของเปลวไฟ ซึ่งมีค่าอัตราส่วนสมมูล (Φ) ประมาณ 0.48 ถึง 0.5 และการย้อนกลับของเปลวไฟ (Φ มีค่าประมาณ 0.62 ถึง 0.76) ปริมาณการแผ่รังสีขึ้นอยู่กับ Φ และเลขเรย์โนลด์ (Re) ผลการคำนวณของฟลักซ์การแผ่รังสีไปข้างหน้าแบบไร้หน่วย (Ψ^+) และอุณหภูมิผิวของหัวเผา (T_s) เมื่อเปรียบเทียบกับ การทดลอง พบว่ามีความสอดคล้องกันอย่างสมเหตุสมผล ดังนั้นความแม่นยำของการวิเคราะห์ทางทฤษฎีจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของงานวิจัยนี้จึงมีความน่าเชื่อถือ

คำสำคัญ: ฟลักซ์การแผ่รังสีความร้อน หัวเผาวัสดุพอร์น เชื้อเพลิงผสมก่อน วัสดุพอร์นชนิดเซลลูลาร์เปิด

Abstract

Radiation heat flux from the combustion of the methane-air premixed gas on an open-cellular porous burner was investigated experimentally and numerically. In the experiment, an alumina-cordierite (Al-Co) having pores per inch (PPI) of 13 and porosity (ϕ) of 0.872 was examined. Radiant output from the porous burner was measured based on a two-color radiometry. For the analysis, we assumed that the chemical kinetics of gas-phase (energy equation) reactions was governed by a single-step Arrhenius rate expression. To evaluate the radiative transports in the solid-phase energy equation, the equation of transfer for the radiation field in a porous burner was solved using the P_1 approximate method. The stable combustion of the present burner was characterized by flash-back limits, where the equivalence ratio (Φ) was around 0.48 to 0.5, and blow-off limits (Φ was around 0.62 to 0.76). The radiant outputs depended on Φ and Reynolds number (Re). Predicted results of the dimensionless forward radiative heat flux (Ψ^+) and the burner surface temperature (T_s) were reasonably compared with experimental data. Satisfactory agreement between theory and experiment was obtained, and thereby the validity of the present theoretical model for predicting the radiation from a porous burner was confirmed.

Keywords: Radiation heat flux, Porous burner, Premixed gas, Open-cellular porous material

บทนำ

หัวเผาแผ่รังสีแบบวัสดุพรุน (Porous radiant burner) ได้มีการใช้ประโยชน์อย่างกว้างขวางในหลายวัตถุประสงค์ ยกตัวอย่างเช่น ใช้ในขบวนการผลิตกระดาษ การทำให้กระดาษแห้ง (Paper drying) การอบและการทำให้เส้นใยแห้ง (Baking and textile drying) หรือแม้แต่การสร้างความอบอุ่นภายในบ้านเรือน (Domestic radiant heater) ก็มีการใช้ประโยชน์จากหัวเผาแบบนี้แล้ว ข้อดีที่โดดเด่นของหัวเผาแบบวัสดุพรุนมีสองข้อ คือ หนึ่งมีความสามารถในการแผ่รังสีได้สูงและสองมลพิษจากการเผาไหม้ที่ปลดปล่อยออกมามีปริมาณต่ำ ด้วยเหตุผลนี้ทำให้นักวิจัยและวิศวกรจำนวนมากมีความสนใจและศึกษาเกี่ยวกับหัวเผานี้กัน ทั้งด้วยวิธีการทดลองและทางทฤษฎี เพื่อพัฒนาสมรรถนะให้ดียิ่งขึ้น Echigo และคณะ (1986) เป็นกลุ่มงานวิจัยแรกที่เสนอผลงานการเผาไหม้ในวัสดุพรุน ทั้งการทดลองและทฤษฎี โดยพบว่าวัสดุพรุนจะช่วยส่งเสริมการเผาไหม้ให้ดียิ่งขึ้นเนื่องจากการหมุนเวียนพลังงานด้วยการแผ่รังสี (Radiation recirculation) (Weinberg, 1996) จากบริเวณเปลวไฟไป

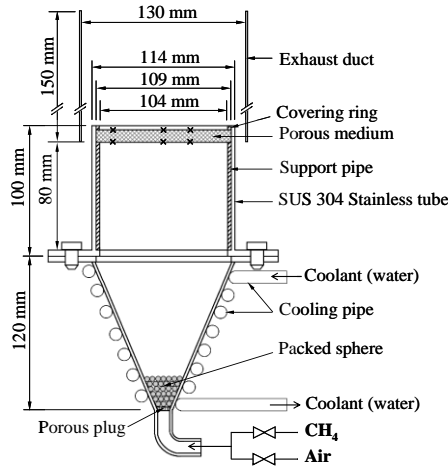
ยังไอคัสผสม (Unburned gas mixture) ที่กำลังส่งมายังระบบ กลุ่มนักวิจัย Hanamura และ Echigo (1991) ได้ทำการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ขึ้นมาเพื่อทำนายตำแหน่งและการเคลื่อนตัวของเปลวไฟ (Dynamics of flame) ที่เกิดขึ้นภายในวัสดุพอร์ซัน ด้วยอิทธิพลของปริมาณรังสีที่แผ่ออกมาจากการเผาไหม้ ต่อมา Khanna และคณะ (1994) ทำการทดลองหั่วเผาวัสดุพอร์ซันที่ทำมาจากเซรามิกซ์ ชนิด Partially stabilized zirconia (PSZ) พบว่าประสิทธิภาพ การแผ่รังสีแปรผกผันกับความเร็วของเปลวไฟ ต่อมา Mital และคณะ (1997) ได้ศึกษาทั้งด้วยการทดลองและทฤษฎีเกี่ยวกับการแผ่รังสีของหั่วเผาเซรามิกซ์ที่เปลวไฟฝังตัวอยู่ในวัสดุพอร์ซัน โดยมีการใช้วัสดุพอร์ซันแบบ 2 ชั้น (Two layers) พวกเขาพบว่าประสิทธิภาพการแผ่รังสีเพิ่มขึ้นตามค่าอัตราส่วนสมมูล (Equivalence ratio, Φ) และจำนวนช่องต่อหนึ่งหน่วยนิ้ว (PPI) ของชั้นวัสดุพอร์ซันตัวล่าง จากนั้น Pereira และคณะ (1998) ได้เสนอผลเปรียบเทียบแบบจำลองของกลไกการเผาไหม้ในวัสดุพอร์ซันเชื้อเพลิงแก๊สมีเทนแบบผสมก่อนประกอบไปด้วยกลไกการเผาไหม้แบบสมบูรณ์ (Full mechanism: FM) กลไกการเผาไหม้แบบโครงร่าง (Skeletal mechanism: SM) กลไกการเผาไหม้แบบสี่ขั้นตอน (4-step reduced mechanism: 4RM) และกลไกการเผาไหม้แบบเดี่ยว (1-step global mechanism: 1GM) จากผลการคำนวณและเปรียบเทียบพบว่า 4RM มีความแม่นยำและสอดคล้องกันเป็นอย่างดีกับ SM และ FM ในสภาวะไอคัสบาง (Lean mixture) แต่ในแบบ 1GM มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ (Reaction rate) สูงกว่าทุกกลไกทั้งยังให้ค่าของอุณหภูมิสูงสุด (Peak flame temperature) จากนั้นกลุ่มนักวิจัย Bouma และ De Goey (1999) ได้สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของหั่วเผาวัสดุพอร์ซันชนิดเซรามิกซ์ขึ้น โดยเลือกใช้แบบ SM ในการทำนายปรากฏการณ์การเผาไหม้ที่เกิดขึ้น และยังทำการทดลองเพื่อยืนยันผลการใช้กลไกดังกล่าว โดยเน้นที่ปริมาณมลพิษ จากการศึกษาพบว่าความสอดคล้องของแก๊สไอเสีย ระหว่างการทดลองและการคำนวณเป็นไปอย่างน่าพอใจ ซึ่งมีค่าความแตกต่างสูงสุดไม่เกินร้อยละ 15

จากงานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้น การศึกษาและการพัฒนาเกี่ยวกับหั่วเผาแผ่รังสีแบบวัสดุพอร์ซันยังคงมีส่วนที่ต้องปรับปรุงและค้นคว้าเพิ่มเติมอีกหลายอย่าง ไม่ว่าจะเป็นการสร้างหั่วเผาไหม้มีโครงสร้างไม่ยุ่งยาก สามารถทำให้เปลวไฟเสถียรได้ไม่ลำบาก และมีปริมาณการแผ่รังสีสูง (ไม่จำเป็นต้องมีวัสดุพอร์ซันหลายชั้น) รวมทั้งการทำนายการเผาไหม้โดยใช้กลไกการเผาไหม้ที่มีคณิตศาสตร์ที่ไม่ซับซ้อนในการแก้ปัญหา แต่ให้ผลการทำนายที่แม่นยำ ด้วยเหตุผลเหล่านี้งานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาทั้งการทดลองและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของหั่วเผาแผ่รังสีแบบวัสดุพอร์ซันชนิดเซลล์ลาร์เปิดแผ่นเดี่ยว ในการทำนายปรากฏการณ์การเผาไหม้ที่เกิดขึ้น ในงานวิจัยนี้เลือกใช้กลไกแบบเดี่ยว (1GM) ของสมการอาร์รีเนียสในการคำนวณ ขนาดของอุปกรณ์ วิธีการทดลองจะดำเนินการเหมือนกับงานวิจัยที่ผ่านมาของคณะผู้เชี่ยวชาญ (Krittacom and Kamiuto, 2009) ทั้งยังได้ขยายผลการค้นคว้าเกี่ยวกับลักษณะเฉพาะของการแผ่รังสี (Radiation emission characteristics) และ โครงสร้างอุณหภูมิ (Temperature profiles) ที่เกิดขึ้นภายในชั้นวัสดุพอร์ซันแบบ

เซลล์รูเปิดให้มีข้อมูล ความเข้าใจที่กว้างขวางและลึกซึ้งยิ่งขึ้น โดยวัสดุพอร์นที่เลือกใช้ในงานวิจัยนี้ ทำมาจากอะลูมินา-คอร์ดีไรท์ (Alumina-cordierite, Al-Co) ที่มีค่าจำนวนรูต่อหนึ่งหน่วยนิ้ว (PPI) และ (Porosity, Φ) เท่ากับ 13 และ 0.872 ตามลำดับ นอกจากนี้ผลการศึกษาทั้งจากการทดลองและการคำนวณ จะถูกนำมาเปรียบเทียบ เพื่ออธิบายผลและปรากฏการณ์จริงที่เกิดขึ้นได้อย่างถูกต้อง

อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

แผนผังอุปกรณ์การทดลองได้แสดงไว้ในรูป 1 ประกอบไปด้วย 4 ส่วนที่สำคัญ ได้แก่ ส่วนที่หนึ่งกระจายการไหลของไอดี (Conical flow distribution section) ส่วนที่สองห้องปรับการไหล (Plenum chamber) ส่วนที่สามหัวเผาวัสดุพอร์น (Porous burner) และส่วนสุดท้ายท่อไอเสีย (Exhaust duct) ซึ่งรายละเอียดของอุปกรณ์และขั้นตอนการทดลองได้อธิบายไว้แล้วในเอกสารอ้างอิงของ Krittacom และ Kamiuto (2009) และในที่นี้ขอสรุปโดยคร่าวๆ เพื่อทบทวนดังนี้ ไอดีผสมระหว่างมีเทนและอากาศถูกส่งจากด้านล่างของระบบ ผ่าน Porous plug และ Packed sphere ซึ่งเป็นส่วนที่ป้องกันเปลวไฟย้อนกลับจากการเผาไหม้ โดยความเร็วเชื้อเพลิงผสมมาเข้า (Mixture velocity, V_{mix}) จะถูกป้อนให้กับหัวเผาในช่วง 5.89×10^{-2} ถึง 19.62×10^{-2} m/s จนเมื่อไอดีไหลมาถึงวัสดุพอร์นที่ด้านบนสุดของห้องปรับการไหล การเผาไหม้จะเกิดขึ้น ในที่นี้ใช้ pilot flame ในการจุดไฟ หลังจากเกิดสถานะเสถียรของเปลวไฟ ทำการวัดอุณหภูมิของผิวด้านล่างและด้านบน (Lower and upper surface temperatures: $T_{s, low}$ and $T_{s, up}$) ของวัสดุพอร์น พร้อมกันนี้ก็ได้ทำการวัดรังสีที่แผ่ออกมาจากผิวด้านบนของวัสดุพอร์น ด้วยเครื่องมือวัดรังสีชนิดผิวน้ำสองสี (Two colors radiometer) สำหรับรายละเอียดของเครื่องมือวัดรังสีชนิดนี้ก็ได้แสดงไว้อย่างละเอียดแล้วเช่นกันในเอกสารอ้างอิงของ Krittacom และ Kamiuto (2009) ขอบเขตการเผาไหม้ถูกควบคุมด้วยการเป่าดับ (Blow-off limit) และการย้อนกลับ (Flash-back limit) ของเปลวไฟโดยขอบเขตดังกล่าวแสดงอยู่ในรูปของอัตราส่วนผสมมวล (Φ) ซึ่งการปรับค่า Φ นี้จะปรับพร้อมกันทั้งมีเทนและอากาศให้ได้สัดส่วนตามที่ต้องการ วัสดุพอร์นเซลล์รูเปิดชนิดอะลูมินา-คอร์ดีไรท์ที่ถูกนำมาทดสอบเป็นหัวเผาแฟรงก์ลีในงานวิจัยนี้มีค่าความพอร์นเท่ากับ 0.872 ค่า PPI เท่ากับ 13 และความหนาเท่ากับ 10.3 mm ส่งผลให้สมบัติทางกายภาพของการแผ่รังสี คือ สัมประสิทธิ์การสิ้นสุด (Extinction coefficient, β) และความหนาเชิงแสง (Optical thickness, τ_o) มีค่าเป็น 249.15 m^{-1} และ 2.57 ตามลำดับ

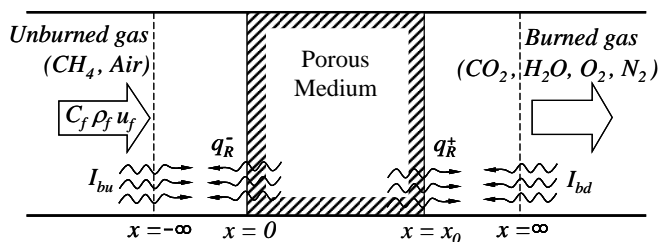


รูป 1 แผนผังอุปกรณ์การทดลอง

การวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์

แบบจำลองกายภาพและสมการควบคุมหลัก

รูป 2 แสดงแบบจำลองกายภาพและฟังก์ชันของระบบหัวเผาแฟรงสิแบบวัสดุพรุนเซลล์ดาร์เปิด โดยแบบจำลองกายภาพนี้ได้แบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลัก โดยส่วนที่หนึ่งและส่วนที่สามเป็นช่องว่างไม่มีวัสดุพรุน (Free space) นิยามเป็นช่วงขาเข้า (Upstream region: $-\infty < x < 0$) และช่วงขาออก (Downstream region: $x_0 < x < \infty$) ตามลำดับ สำหรับส่วนตรงกลางเป็นวัสดุพรุน (Porous medium region: $0 < x < x_0$) ซึ่งสมมติฐานที่สำคัญเพื่อใช้ในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นั้น ได้ใช้เช่นเดียวกับงานวิจัยที่ผ่านมา (Krittacom and Kamiuto, 2009) จึงไม่ขอกล่าวซ้ำในที่นี้ ดังนั้นการคำนวณการเผาไหม้จะวิเคราะห์ด้วยทฤษฎีเปลวไฟราบเรียบมาตรฐาน (A standard laminar flame theory) (Poinsot and Veynante, 2005) โดยมีสมการควบคุมหลัก ดังต่อไปนี้



รูป 2 แบบจำลองกายภาพและฟังก์ชันของระบบ

สมการอนุรักษ์พลังงาน (The equation of energy conservation) และสมการอนุรักษ์สปีชีส์ (The equation of species conservation) ในช่วงขาเข้าและช่วงขาออกของระบบ จำนวนจาก

$$\rho_r u_r \frac{\partial Y_i}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} (\rho_r Y_i V_i) = \dot{W}_i M_i, \quad (i = 1, 2, \dots, N-1) \quad (1)$$

$$\rho_r u_r C_r \frac{\partial T_r}{\partial x} + \sum_{i=1}^N \rho_r Y_i V_i C_{r,i} \frac{\partial T_r}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_r \frac{\partial T_r}{\partial x} \right) - \sum_{i=1}^N h_i \dot{W}_i M_i \quad (2)$$

เมื่อ ρ_r , u_r , T_r และ k_r เป็นความหนาแน่น (kg/m^3), ความเร็ว (m/s), อุณหภูมิ (K) และสัมประสิทธิ์การนำความร้อน ($\text{W/m}\cdot\text{K}$) ของสถานะแก๊ส ตามลำดับ สำหรับตัวแปรที่ห้อยด้วยตัว i ประกอบไปด้วย Y_i , V_i , \dot{W}_i , M_i และ h_i หมายถึง สัดส่วนมวล, ความเร็วในการแพร่ของมวล (m/s), อัตราการเกิดปฏิกิริยา, มวลโมเลกุล (kg/kmol) และเอนทาลปีจำเพาะ (kJ/kg) ของ i -th species นอกจากนี้ตัวแปร N ที่ปรากฏในวงเล็บของสมการที่ (1) กับในเทอมที่ 2 ของสมการที่ (2) หมายถึง จำนวนของแก๊สที่ทำการคำนวณ ซึ่งงานวิจัยนี้ได้ใช้แก๊ส 6 แก๊สในขบวนการเผาไหม้ ดังนี้ อากาศ, CH_4 , CO_2 , H_2O , O_2 และ N_2

สมการอนุรักษ์มวลและสมการอนุรักษ์พลังงาน (พิจารณาทั้งสถานะแก๊สและของแข็ง) ในช่วงวัสดุพอร์น แสดงได้ดังนี้

$$\rho_r u_r \frac{\partial Y_i}{\partial x} + \phi \frac{\partial}{\partial x} (\rho_r Y_i V_i) = \phi \dot{W}_i M_i, \quad (i = 1, 2, \dots, N-1) \quad (3)$$

$$\rho_r u_r C_r \frac{\partial T_r}{\partial x} + \phi \sum_{i=1}^N \rho_r Y_i V_i C_{r,i} \frac{\partial T_r}{\partial x} - h_v (T_r - T_s) = \phi \frac{\partial}{\partial x} \left(k_r \frac{\partial T_r}{\partial x} \right) - \phi \sum_{i=1}^N h_i \dot{W}_i M_i \quad (4)$$

$$\frac{1}{3} (1 - \phi) \frac{\partial}{\partial x} \left(k_s \frac{\partial T_s}{\partial x} \right) + h_v (T_r - T_s) - \frac{\partial q_{\text{Rx}}}{\partial x} = 0 \quad (5)$$

เมื่อ T_s และ k_s คือ อุณหภูมิ (K) และสัมประสิทธิ์การนำความร้อน ($\text{W/m}\cdot\text{K}$) ของสถานะของแข็ง ตามลำดับ ค่าตัวแปรอื่นๆ ที่ปรากฏในสมการอนุรักษ์พลังงานทั้งสองสมการ (สมการที่ (4) และ (5)) ได้แก่ h_v และ q_{Rx} หมายถึง สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตร (W/m^3) และฟลักซ์การแผ่รังสีตามทิศทางการไหลของเชื้อเพลิง (W/m^2)

สำหรับกลไกเคีวของสมการอาร์เรเนียส ที่ใช้ในการคำนวณครั้งนี้เป็นสมการเดียวกันกับที่ใช้ในเอกสารอ้างอิงของ Krittacom และ Kamiuto (Krittacom and Kamiuto, 2009) นั่นคือ

$$\dot{W}_i = v_i \dot{W} = v_i A [\text{CH}_4] [\text{O}_2] \exp(-E/RT) \quad (6)$$

เมื่อค่าความถี่ปฏิกิริยา (Frequency factor, A) พลังงานกระตุ้น (Activation energy, E) มีค่าเท่ากับ $1.75 \times 10^{11} \text{ m}^3/\text{kmol}\cdot\text{s}$ และ $1.4 \times 10^6 \text{ kJ/kmol}$ ตามลำดับ และ v_i คือ สัมประสิทธิ์สโตยชิโอเมตริกของ i-th species

ในการหาคำตอบของสมการอนุพันธ์พลังงานสถานะของแข็ง (สมการที่ (5)) อนุพันธ์ของ ฟลักซ์การแผ่รังสี (Divergence radiative heat flux, $\partial q_{\text{rx}}/\partial x$) และ Incident radiation (G) จำเป็นต้องทราบคำตอบ ดังนั้นในการหาผลลัพธ์ปริมาณทั้งสอง สมการโดยประมาณของ P_1 (The P_1 approximation) จึงได้ถูกนำมาแก้ปัญหานี้ สมการโดยประมาณ P_1 และขอบเขตการคำนวณสามารถแสดงได้ดังนี้

$$\frac{\partial q_{\text{rx}}}{\partial x} + (1 - \omega)\beta(G - 4\sigma T_s^4) = 0 \tag{7}$$

$$\frac{\partial G}{\partial x} + 3(1 - \omega\tilde{g})\beta q_{\text{rx}} = 0 \tag{8}$$

$$\left. \begin{aligned} x = 0 : G + 2q_{\text{rx}} &= 4\sigma T_\infty^4 \\ x = x_0 : G - 2q_{\text{rx}} &= 4\sigma T_\infty^4 \end{aligned} \right\} \tag{9}$$

เมื่อตัวแปรที่บ่งบอกถึงสมบัติทางกายภาพการแผ่รังสีความร้อนที่ปรากฏในสมการที่ (7) และ (8) นั้นประกอบไปด้วย β , ω และ σ ซึ่งเรียกว่า สัมประสิทธิ์การสิ้นสูญ (m^{-1}), อัลเบโด (Albedo) และค่าคงที่สเตฟาน-โบลท์แมนน์ ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}^4$) ตามลำดับ

เงื่อนไขขอบเขต (Boundary conditions) ในการคำนวณสมการหลักควบคุม (Governing equations) กำหนดโดย

$$\left. \begin{aligned} x = -\infty : T_f &= T_{\text{mix}}, Y_{\text{CH}_4(\text{O}_2)} = Y_{\text{CH}_4(\text{O}_2),\text{in}} \\ x = 0 : \partial T_s/\partial x &= 0 \\ x = x_0 : \partial T_s/\partial x &= 0 \\ x = \infty : \partial T_s/\partial x &= 0, \partial Y_i/\partial x = 0 \end{aligned} \right\} \tag{10}$$

นอกจากนี้ในการคำนวณหาปริมาณการแผ่รังสีออกมาจากผิวด้านบนของหัวเผาชนิดนี้นั้นคำนวณมาจากฟลักซ์การแผ่รังสีไปยังหน้าที่ตำแหน่งผิวด้านขาออกของระบบ นั่นคือ

$$q_{\text{r}}^+(x_0) = \frac{1}{4} [G(x_0) + 2q_{\text{rx}}(x_0)] \tag{11}$$

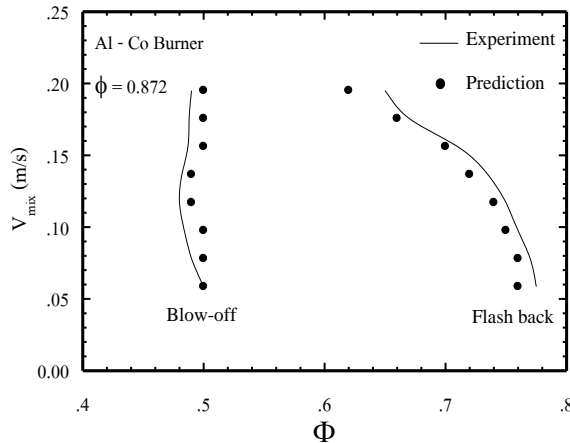
วิธีการคำนวณ

ในการคำนวณจะจัดสมการเชิงอนุพันธ์ต่าง ๆ เหล่านี้ให้อยู่ในรูปการคำนวณผลต่างโดยปริยาย (Implicit finite difference equation) ช่วงขาเข้าและขาออกของแบบจำลองกายภาพซึ่งแบ่งออกเป็นช่องเล็กที่เท่าๆ กัน (Node) จำนวน 100 Node ทั้งสองช่วง แต่ในช่วงวัสดุพอรุนจะแบ่งเป็น 200 Node ส่วนการคำนวณสมการโดยประมาณ P_1 แบ่งช่วงวัสดุพอรุนออกเป็น 400 Node เริ่มทำการคำนวณด้วยการสมมติโครงสร้างอุณหภูมิของ T_s และ T_f โดยที่ค่าอุณหภูมิสูงสุดของ T_f จะสูงกว่าจุดติดไฟ (Ignition point) ของมีเทนและเพียงพอต่อการทำให้แบบจำลองเกิดการเผาไหม้ได้ หลังจากนั้นจะได้ผลลัพธ์ชุดแรก คือ Y_p , G และ q_{rx} ออกมา ค่าผลลัพธ์ของตัวแปรที่ได้ทั้ง 3 ค่า (Y_p , G และ q_{rx}) จะถูกส่งไปใช้ในการคำนวณหา T_f และ T_s อีกครั้ง ซึ่งการหาค่าตอบจะกระทำด้วยวิธีการกำจัดแบบเกาส์ (Gaussian elimination) ผลลัพธ์ของอุณหภูมิทั้งสองจะนำกลับไปแทนที่ซ้ำในการหาค่าของ Y_p , G และ q_{rx} ครึ่งต่อไปอย่างต่อเนื่อง จนกว่าผลการเปรียบเทียบของอุณหภูมิระหว่างผลลัพธ์ก่อนหน้ากับผลลัพธ์ที่คำนวณได้ใหม่มีค่าความแตกต่างน้อยกว่า 10^{-4} จึงหยุดการคำนวณ

ผลและวิเคราะห์ผลการทดลอง

ขอบเขตการเผาไหม้และโครงสร้างอุณหภูมิ

สภาวะขอบเขตเปลวไฟเสถียรของหัวเผาวัสดุพอรุนเซลลูโลสาร์เปิดชนิดอะลูมินา-คอร์ดีไรท์ (Al-Co) ถูกแสดงไว้ในรูป 3 เมื่อขอบเขตการเป่าดับ (Blow-off limit) เป็นปรากฏการณ์ที่เปลวไฟ (Flame) เคลื่อนตัวออกจากผิวด้านบนของแผ่นวัสดุพอรุนและเกิดการดับ (Extinguishment) ในที่สุด โดยแสดงผ่านอัตราส่วนสมมูล (Φ) มีค่าอยู่ในช่วงประมาณ 0.48 ถึง 0.5 โดย Φ ของการเป่าดับในหัวเผาแบบนี้ จะมีค่าต่ำกว่าการเผาไหม้แบบปกติทั่วไป (Conventional combustion) ของเชื้อเพลิงมีเทน ($\Phi = 0.53$) (Annamalai and Puri, 2007) อาจเนื่องมาจากจุดเด่นของวัสดุพอรุน ที่มีพื้นที่ผิวสัมผัสต่อหน่วยปริมาตรสูง ทำให้สามารถเกิดการเผาไหม้ในสภาวะไอดีที่บางกว่าแบบปกติทั่วไป ในทางตรงกันข้ามถ้าเปลวไฟเคลื่อนตัวลงออกจากผิวด้านล่างของแผ่นวัสดุพอรุน และเกิดการดับ เรียกปรากฏการณ์นี้ว่าขอบเขตการย้อนกลับ (Flash-back limit) ซึ่งค่า Φ จะอยู่ในช่วง 0.62 ถึง 0.76 นอกจากนี้ผลการเปรียบเทียบระหว่างการทดลอง และการคำนวณด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีความสอดคล้องกันได้เป็นที่น่าพอใจทั้งการเป่าดับและการย้อนกลับ



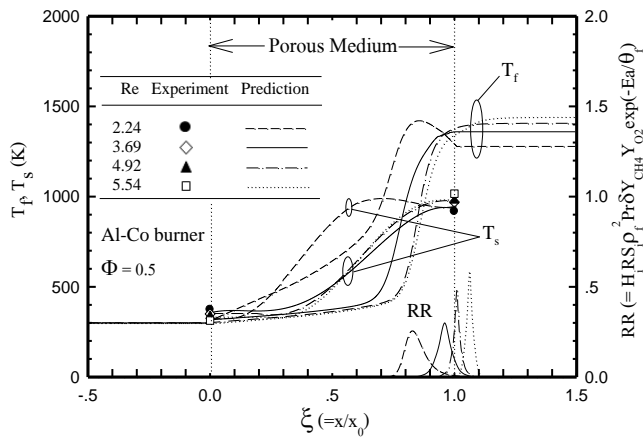
รูป 3 ขอบเขตเปลวไฟเสถียร

โครงสร้างอุณหภูมิตั้ง

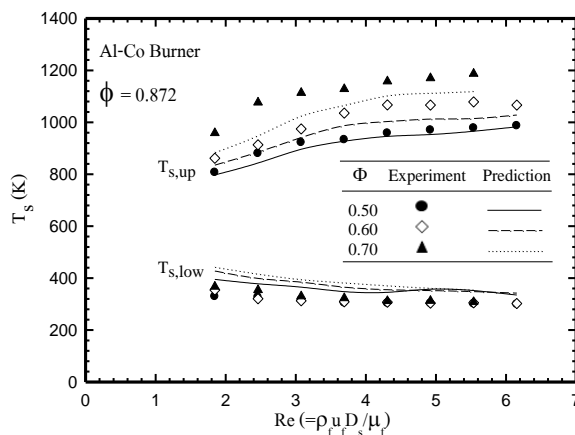
รูป 4 แสดงอิทธิพลของอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงผสมก่อน (Re) ที่มีต่อโครงสร้างอุณหภูมิตั้งทั้งสถานะแก๊สและของแข็งในระบบการเผาไหม้ และอัตราการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ (Reaction rate, RR) ที่สภาวะ $\Phi = 0.5$ จากรูปที่ 4 จะพบว่าตำแหน่งของอุณหภูมิตั้งสูงสุดจะเกิดขึ้นในบริเวณใกล้ด้านทางออกหรือผิวหน้าด้านบน (Upper surface) ของวัสดุพอร์ซเลน และเมื่อ Re เพิ่มขึ้น อุณหภูมิของทั้งสถานะแก๊สเคลื่อนตัวไปอยู่ที่บริเวณผิวหน้าด้านบนของหัวเผา ดังจะสังเกตได้จากตำแหน่งของอัตราการเกิดปฏิกิริยา (RR) ที่เคลื่อนตัวตาม ค่า Re ที่เพิ่มขึ้น จากปรากฏการณ์นี้จึงอาจกล่าวได้ว่าเปลวไฟของหัวเผาแบบวัสดุพอร์ซเลนเซลล์รูเปิดชนิดนี้ สามารถเกิดขึ้นได้อย่างอิสระบริเวณผิวด้านบนของวัสดุพอร์ซเลน โดยเกิดขึ้นได้ทั้งภายในและภายนอกวัสดุพอร์ซเลน ตามการปรับค่า Re สำหรับผลเปรียบเทียบ ของอุณหภูมิตั้งที่ผิวหน้าทั้งสองด้านของวัสดุพอร์ซเลนระหว่างการคำนวณด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และค่าที่วัดได้จากการทดลองมีความสอดคล้องกันเป็นอย่างดี

อุณหภูมิตั้งผิววัสดุพอร์ซเลน

รูป 5 แสดงอุณหภูมิตั้งผิวของแผ่นวัสดุพอร์ซเลน (Surface temperature) พบว่าอุณหภูมิตั้งผิวด้านบนของวัสดุพอร์ซเลน ($T_{s, up}$) สูงขึ้นเล็กน้อยตามการเพิ่มขึ้นของ Re แต่ในกรณีของอุณหภูมิตั้งผิวด้านล่างของวัสดุพอร์ซเลน ($T_{s, low}$) กลับลดลงเพียงเล็กน้อย นอกจากนี้เมื่อพิจารณาที่ค่า Re คงที่ใด ๆ พบว่า $T_{s, up}$ สูงขึ้นตามปริมาณที่เพิ่มขึ้นของ Φ ซึ่งปรากฏการณ์เช่นนี้เป็นไปตามกายภาพการเผาไหม้จริง เนื่องจากระบบได้รับเชื้อเพลิงที่เพิ่มขึ้นหรือปริมาณไออดีผสมที่หนาขึ้น ย่อมทำให้การเผาไหม้มีความรุนแรงและสมบูรณ์ยิ่งขึ้น ส่งผลให้อุณหภูมิตั้งผิวในการเผาไหม้มีค่าสูงตามไปด้วย



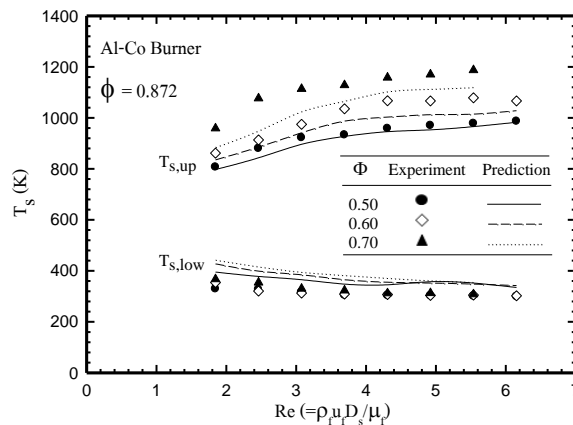
รูป 4 โครงสร้างอุณหภูมิของระบบ ที่ได้รับอิทธิพลจากอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงผสมก่อน (Re)



รูป 5 การเปรียบเทียบอุณหภูมิผิวของวัสดุพอร์นระหว่างการคำนวณกับผลการทดลอง

ค่าพลาซซ์แฟรงส์ไปข้างหน้าแบบไร้หน่วย

รูป 6 แสดงค่าพลาซซ์แฟรงส์ไปข้างหน้าแบบไร้หน่วย (Ψ^+) ของหัวเผาแฟรงส์วัสดุพอร์น พบว่าค่า Ψ^+ จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วตาม Re และจะเพิ่มขึ้นอีกเล็กน้อยหรือมีค่าเกือบคงที่หลังจาก Re มีค่ามากกว่า 5 และหากพิจารณาที่ค่า Re คงที่ ผลปรากฏว่า Ψ^+ เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วตาม Φ ในการเปรียบเทียบผลที่คำนวณได้ทั้งสองรูปกับการทดลองจะให้ผลความสอดคล้องกันเป็นอย่างดี แต่ก็สังเกตเห็นว่าผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลองมีค่าที่สูงกว่าอาจเนื่องมาจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ไม่สามารถคำนวณความซับซ้อนของกระบวนการเผาไหม้ที่แท้จริง กลไกการถ่ายเทความร้อนของวัสดุพอร์น และการแฟรงส์ได้อย่างครบถ้วน ทำให้คำตอบที่ได้จากการคำนวณมีค่าน้อยกว่าการทดลอง



รูป 6 การเปรียบเทียบอุณหภูมิผิวของวัสดุพอรุนระหว่างการคำนวณกับผลการทดลอง

สรุปผลการทดลอง

จากผลการศึกษาที่ได้รับ ประเด็นสำคัญของงานวิจัยนี้ สามารถสรุปได้ตามหัวข้อดังต่อไปนี้

- 1) สภาวะเสถียรของหัวเผาแฟรงก์สีจะอยู่ในช่วงอัตราส่วนสมมูล (Φ) การเป่าดับประมาณ 0.48 ถึง 0.5 และการย้อนกลับของเปลวไฟมีค่าเป็น $0.62 < \Phi < 0.76$
- 2) เปลวไฟมีการเคลื่อนตัวจากภายในวัสดุพอรุนไปยังบริเวณผิวหน้าด้านบนของแผ่นวัสดุพอรุนตาม Re ที่เพิ่มขึ้น และเกิดการเสถียรอยู่บริเวณผิวด้านทางออกของหัวพ่นไฟวัสดุพอรุนเซลล์าร์แบบเปิดชนิดอะลูมินา-คอร์ดีไรท์ (Al-Co) ที่มีค่า ϕ เท่ากับ 0.872
- 3) อุณหภูมิผิวด้านทางเข้าและทางออกของหัวเผาวัสดุพอรุน ปริมาณการแฟรงก์สีแสดงในรูปของฟลักซ์การแฟรงก์สีไปข้างหน้า (Ψ^+) ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนสมมูล (Φ) และอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงผสมก่อน (Re)
- 4) ผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎีของฟลักซ์การแฟรงก์สีไปข้างหน้า (Ψ^+) และอุณหภูมิผิวของหัวเผาแบบวัสดุพอรุน (T_u) มีความสอดคล้องกันเป็นอย่างดีกับผลการทดลองที่ได้

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนบทความขอขอบพระคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี (มทร.ธัญบุรี) ที่ได้สนับสนุนเงินทุนเพื่อใช้ในการดำเนินงานวิจัยครั้งนี้จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี และขอบพระคุณ Mr. Shinichi Saito จากมหาวิทยาลัยโออิตะ ประเทศญี่ปุ่น ในความอนุเคราะห์จัดส่งอุปกรณ์การทดลองบางอย่าง เพื่อใช้ในการศึกษาวิจัย จนทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

- Annamalai, K. and Puri, I. K. (2007). *Combustion science and engineering*. New York, USA: CRC Press.
- Bouma, P. H. and De Goey, L. P. (1999). H. Premixed combustion on ceramic foam burner. *Combustion and Flame*, 119, 133-143.
- Echigo, R., Yoshizawa, Y., Hanamura, K. and Tomimura, T. (1986, August). *Analytical and experimental studies on radiative propagation in porous media with internal heat generation*. Paper presented at the 8th International Heat Transfer Conference, 1986, San Francisco, USA.
- Hanamura, K. and Echigo, R. (1991). An analysis of flame stabilization mechanism in radiation burners. *Warme-und Stoffubertragung*, 26, 377-383.
- 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.
- Krittacom, B. and Kamiuto, K. (2009). Radiation emission characteristics of an open-cellular porous burner. *JSME Journal of Thermal Science and Technology*, 4, 13-24.
- 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.
- Pereira, J. C. F. and Zhou, X. Y. (1998). Comparison of four combustion models for simulating the premixed combustion in inert porous media. *Fire and Materials*, 22, 187-197.
- Poinsot, T. and Veynante, D. (2005). *Theoretical and numerical combustion* (2nd ed). Philadelphia, USA: R.T. Edwards, Inc.
- Weinberg, F. J. (1996). Heat-recirculating burners: principles and some recent developments. *Combustion Science and Technology*, 121, 3-22.