



KKU Engineering Journal

<http://www.en.kku.ac.th/enjournal/th/>

พลັกซ์การแผ่รังสีความร้อนของหัวเผาวัสดุพูนชนิดเซลลูลาร์เปิดเชื้อเพลิงแก๊ส Radiation heat flux of the open-cellular porous gas burner

บัณฑิต กฤตาคม*¹⁾ พิพัฒน์ อมตฉายา¹⁾ และอิทธิพล วรพันธ์²⁾

Bundit Krittacom*¹⁾, Pipatana Amatachaya¹⁾ and Ittiphol Worapun²⁾

¹⁾ห้องปฏิบัติการวิจัยการพัฒนาในเทคโนโลยีของวัสดุพูน สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน จังหวัดนครราชสีมา 30000

Development in Technology of Porous Materials Research Laboratory (DITO-Lab)

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering and Architecture, Rajamangala University of Technology Isan, Nakhonrachasima, Thailand, 30000

²⁾สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน จังหวัดนครราชสีมา 30000

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering and Architecture, Rajamangala University of Technology Isan, Nakhonrachasima, Thailand, 30000.

Received December 2012

Accepted September 2013

บทคัดย่อ

พลັกซ์การแผ่รังสีความร้อนจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงผสมก่อนระหว่างอากาศกับแก๊สมีเทนในหัวเผาวัสดุพูนชนิดเซลลูลาร์เปิดได้ถูกทำการศึกษาโดยการทดลองและการคำนวณ ในการทดลองนั้นใช้หัวเผาที่ทำจากวัสดุพูนแบบเซรามิกสังเคราะห์ชนิดอะลูมินา-คอร์ดีไรท์ (Al-Co) โดยมีค่าจำนวนช่องต่อหนึ่งหน่วยนิ้ว (PPI) เท่ากับ 20 และมีความพูน (Φ) เป็น 0.875 การวัดรังสีที่แผ่ออกมาจากหัวเผาจะใช้เครื่องมือวัดชนิดผิวหน้า สองสี สำหรับการวิเคราะห์ทางทฤษฎี สมมติให้จลนศาสตร์เคมีของกลไกการเผาไหม้ในสถานะแก๊ส (สมการพลังงาน) เป็นแบบกลไกเดี่ยวของสมการอาร์รีเนียส ส่วนการคำนวณหาผลเฉลยของการส่งถ่ายการแผ่รังสีความร้อนในสมการพลังงานของสถานะของแข็ง สมการการแผ่รังสีความร้อนในหัวเผาวัสดุพูนใช้วิธีการประมาณแบบ P_1 สภาวะเสถียรของการเผาไหม้ในหัวเผาชนิดนี้ถูกกำหนดด้วยการเป่าดับของเปลวไฟ ซึ่งมีค่าอัตราส่วนสมมูล (Φ) ประมาณ 0.48 ถึง 0.5 และการย้อนกลับของเปลวไฟ (Φ มีค่าประมาณ 0.58 ถึง 0.64) ปริมาณการแผ่รังสีจะขึ้นอยู่กับ Φ และเลขเรย์โนลด์ส์ (Re) ผลการคำนวณของพลັกซ์การแผ่รังสีไปข้างหน้าแบบไร้หน่วย (Ψ^+) และอุณหภูมิผิวของหัวเผา (T_s) เมื่อเปรียบเทียบกับ การทดลอง พบว่ามีความสอดคล้องกันเป็นอย่างดี ดังนั้นความแม่นยำของการวิเคราะห์ทางทฤษฎีจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของงานวิจัยนี้ จึงมีความน่าเชื่อถือ

คำสำคัญ : เชื้อเพลิงผสมก่อน พลັกซ์การแผ่รังสีความร้อน วัสดุพูนชนิดเซลลูลาร์เปิด หัวเผาวัสดุพูน

*Corresponding author. Tel.: +66-8-1954-4711

Email address: bundit.kr@rmuti.ac.th

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 20 and porosity (ϕ) of 0.875 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 0.58 to 0.64). 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. Reasonable 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 : Open-cellular porous material, Premixed gas, Porous burner, Radiation heat flux

1. บทนำ

หัวเผาแผ่รังสีแบบวัสดุพรุน (Porous radiant burner) ใช้ประโยชน์กันอย่างกว้างขวางในหลายวัตถุประสงค์ ยกตัวอย่างเช่น ใช้ในกระบวนการผลิตกระดาษ การทำให้กระดาษแห้ง (Paper drying) การเคลือบเงากระดาษ (Paper finishing) ใช้ในอุตสาหกรรมสิ่งทอ การอบและการทำให้เส้นใยแห้ง (Baking and textile drying) หรือแม้แต่การสร้างควมอบอุ่นภายในบ้านเรือน (Domestic radiant heater) ก็มีการใช้ประโยชน์จากหัวเผาแบบนี้แล้ว ข้อดีที่โดดเด่นของหัวเผาแบบวัสดุพรุนมีสองข้อ คือ มีความสามารถในการแผ่รังสีได้สูงและมลพิษจากการเผาไหม้ที่ปลดปล่อยออกมามีปริมาณต่ำ ด้วยสาเหตุนี้ เป็นเหตุผลให้นักวิจัยและวิศวกรจำนวนมาก มีความสนใจ และศึกษาเกี่ยวกับหัวเผานี้ ทั้งด้วยวิธีการทดลอง และทางทฤษฎี เพื่อที่จะพัฒนาสมรรถนะให้ดียิ่งขึ้น Echigo และคณะ [1] เป็นกลุ่มงานวิจัยแรกที่เสนอผลงานการเผาไหม้ในวัสดุพรุน ทั้ง การทดลองและทฤษฎี โดยพบว่าวัสดุพรุนจะช่วยส่งเสริมการเผาไหม้ให้ดียิ่งขึ้น

เนื่องจากการหมุนเวียนพลังงานด้วยการแผ่รังสี (Radiation recirculation) [2] จากบริเวณเปลวไฟไปยังไฮโดรคาร์บอน (Unburned gas mixture) ที่กำลังส่งมายังระบบ Hanamura และคณะ [3] ได้ทำการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ขึ้นมาเพื่อทำนายตำแหน่งและการเคลื่อนตัวของเปลวไฟ (Dynamics of flame) ที่เกิดขึ้นภายในวัสดุพรุน ด้วยอิทธิพลของปริมาณรังสีที่จะแผ่ออกมาจากการเผาไหม้ในวัสดุพรุน Khanna และคณะ [4] ทำการทดลองหัวเผาวัสดุพรุนที่ทำมาจากเซอร์รามิกส์ ชนิด Partially stabilized zirconia (PSZ) พบว่าประสิทธิภาพการแผ่รังสีจะแปรผกผันกับความเร็วของเปลวไฟ และปริมาณแก๊สไอเสีย (CO และ NO_x) จะขึ้นกับความเร็วของเปลวไฟ (Flame speed) Mital และคณะ [5] ได้ศึกษาการแผ่รังสีของหัวเผาเซอร์รามิกส์ที่เปลวไฟฝังตัวอยู่ในวัสดุพรุน โดยมีการใช้วัสดุพรุนแบบ 2 ชั้น (Two layers) สร้างเป็นหัวเผา นั้นคือชั้นการกระจาย (Diffuser layer) และชั้นสนับสนุนเปลวไฟ (Flame support layer) พวกเขาได้ศึกษาทั้งด้วยการทดลองและทฤษฎี พบว่าประสิทธิภาพ

การแผ่รังสี จะเพิ่มขึ้นตามค่าอัตราส่วนสมมูล (Equivalence ratio Φ) และจำนวนช่องต่อหนึ่งหน่วยนิ้ว (PPI) ของชั้นสนับสนุนเปลวไฟ Pereira และคณะ [6] ได้เสนอผลเปรียบเทียบแบบจำลองของกลไกการเผาไหม้ในวัสดุพูนของแก๊สมีเทนผสมก่อน ประกอบไปด้วยกลไกสมบูรณ์ของการเผาไหม้ (Full mechanism: FM) กลไกโครงร่างของการเผาไหม้ (Skeletal mechanism: SM) กลไก ลดลงชนิดสี่ขั้นตอนการเผาไหม้ (4-step reduced mechanism: 4RM) และกลไกเดียวของการเผาไหม้ (1-step global mechanism: 1GM) จากผลการคำนวณและเปรียบเทียบ พบว่า 4RM มีความแม่นยำและสอดคล้องกันเป็นอย่างดีกับ SM และ FM ในการคำนวณที่สภาวะไอดีบาง (Lean mixture) ถูกส่งเข้าสู่ระบบ แต่ 1GM จะให้ค่าของอุณหภูมิเปลวไฟสูงสุด (Peak flame temperature) และอัตราการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ (Reaction rate) สูงกว่าทุกกลไก Bouma และคณะ [7] ได้สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของหัวเผาวัสดุพูนชนิดเซรามิกสี่ชั้น โดยเลือกใช้ SM ในการทำนายปรากฏการณ์การเผาไหม้ที่เกิดขึ้น และยังทำการทดลองเพื่อยืนยันผลการใช้กลไกดังกล่าว โดยเน้นที่มลพิษซึ่งถูกปล่อยออกมาจากการศึกษาพบว่าความสอดคล้องของแก๊สไอเสียระหว่างการทดลองและการคำนวณเป็นไปอย่างน่าพอใจ มีค่าความแตกต่างสูงสุดไม่เกิน 15%

จากงานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้นการศึกษาและการพัฒนาเกี่ยวกับหัวเผาแผ่รังสีแบบวัสดุพูนยังคงมีส่วนที่ต้องปรับปรุงและค้นคว้าเพิ่มเติมอีกหลายอย่าง ไม่ว่าจะเป็นการสร้างหัวเผาให้มีโครงสร้างไม่ยุ่งยากประกอบขึ้นอย่างง่าย แต่สามารถทำให้เปลวไฟเสถียรได้ไม่ลำบากและมีปริมาณการแผ่รังสีสูง (ไม่จำเป็นต้องมีวัสดุพูนหลายชั้น) รวมทั้งการทำนายการเผาไหม้โดยใช้กลไกการเผาไหม้ที่มีคณิตศาสตร์ที่ไม่ซับซ้อนในการแก้ปัญหา แต่ให้ผลการทำนายที่แม่นยำ ด้วยเหตุผลเหล่านี้งานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาทั้งการทดลองและ

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของหัวเผาแผ่รังสีแบบวัสดุพูนชนิดเซลลูลาร์เปิดแผ่นเดียว ในการทำนายปรากฏการณ์การเผาไหม้ที่เกิดขึ้นจะใช้กลไกเดียว (1GM) ของสมการอาร์เรเนียนส ขนาดของอุปกรณ์ วิธีการทดลอง และการคำนวณแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของหัวเผาชนิดนี้จะดำเนินการเหมือนกับงานวิจัยที่ผ่านมาของคณะผู้เขียนบทความ [8, 9] แต่มีวัตถุประสงค์หลักของงานวิจัยนี้ คือ เพื่อขยายผลการค้นหาเกี่ยวกับคุณลักษณะการแผ่รังสี (Radiation emission characteristics) และโปรไฟล์อุณหภูมิ (Temperature profiles) ที่เกิดขึ้นภายในชั้นวัสดุพูนแบบเซลลูลาร์เปิดให้มีข้อมูล ความเข้าใจที่กว้างขวางและลึกซึ้งยิ่งขึ้น โดยงานวิจัยนี้จะเลือกใช้วัสดุพูนเซลลูลาร์เปิดที่ทำมาจากอะลูมินา-คอร์ดีไรท์ (Alumina-cordierite, Al-Co) ที่มีค่าจำนวนรูต่อหนึ่งหน่วยนิ้ว (PPI) และ (Porosity, ϕ) เท่ากับ 20 และ 0.875 ตามลำดับ นอกจากนี้ผลการศึกษาทั้งจากการทดลองและการคำนวณ จะถูกนำมาเปรียบเทียบ เพื่ออธิบายผลและปรากฏการณ์จริงในหัวเผาแผ่รังสีแบบวัสดุพูนเซลลูลาร์เปิดอย่างละเอียด

2. รายการสัญลักษณ์

C_f	ความจุเฉพาะของสถานะแก๊ส (J/kg·K)
D_s	เส้นผ่านศูนย์กลางสมมูลสตรีท (m)
E_a	เทอมให้หน่วยพลังงานกระตุ้น ($=E/RT_\infty$)
G	รังสีความร้อนที่เกิดขึ้น (W/m^2)
h_i	เอนทาลปีจำเพาะ (kJ/kg)
h_v	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตร (W/m^3)
H_i	เอนทาลปีจำเพาะไร้หน่วย ($=h_i/C_{p,\infty}T_\infty$)
$I(x,\mu)$	ความเข้มการแผ่รังสี (W/m^2)
I_b	ความเข้มการแผ่รังสีแบบวัตถุดำ (W/m^2)
k	สัมประสิทธิ์การนำความร้อน ($W/m\cdot K$)
M	มวลโมเลกุล (kg/kmol)

N	จำนวนของก๊าซในขบวนการเผาไหม้ (=6)
P	ความดันสัมบูรณ์ (Pa)
PPI	จำนวนช่องต่อหนึ่งหน่วยนิ้ว
Pr _∞	เลขพรานด์ท ($=\mu_{\infty}C_{f\infty}/k_{\infty}$)
q _{Rx}	ฟลักซ์การแผ่รังสีตามทิศทางการไหลของเชื้อเพลิง (W/m ²)
q _R ⁺	ฟลักซ์การแผ่รังสีไปข้างหน้า (W/m ²)
R	ค่าคงที่ของแก๊ส
Re	เลขเรย์โนลด์ส์ ($=\rho_f u_f D_s/\mu_{\infty}$)
RR	อัตราการเกิดปฏิกิริยาแบบไร้หน่วย
T	อุณหภูมิ (K)
T _{mix}	อุณหภูมิของเชื้อเพลิงผสมขาเข้า (K)
u _f	ความเร็วของแก๊ส (m/s)
V _i	ความเร็วแพร่มวลของ i-th species (m/s)
V _{mix}	ความเร็วเชื้อเพลิงผสมขาเข้า (m/s)
W _i	อัตราการเกิดปฏิกิริยาของ i-th species
x ₀	ความหนาของวัสดุพอร์น (m)
Y _i	สัดส่วนมวลของ i-th species

สัญลักษณ์กรีก

β	สัมประสิทธิ์การสิ้นสุญญ
δ	อัตราส่วนระหว่างความหนาวัสดุพอร์นและเส้นผ่าศูนย์กลางสมมูลสตรีท ($=x_0/D_s$)
ϕ	ค่าความพรุน
Φ	อัตราส่วนสมมูล
ρ	ความหนาแน่น (kg/m ³)
ρ_f^*	ความหนาแน่นสถานะแก๊สไร้หน่วย ($=\rho_f/\rho_{f\infty}$)
μ	ความหนืด (Pa·s)
v_i	สัมประสิทธิ์สตอยชิโอเมตริกของ i-th species
σ	ค่าคงที่สเตฟาน-โบลท์แมนน์ (W/m ² ·K ⁴)
θ	อุณหภูมิไร้หน่วย ($=T/T_{\infty}$)

τ_0	ความหนาเชิงแสง ($=\beta^* x_0$)
ξ	พิกัดในทิศทางแนวการไหลของเชื้อเพลิงไร้หน่วย ($=x/x_0$)
ω	อัลเบโด
Ψ^+	ฟลักซ์การแผ่รังสีไปข้างหน้าไร้หน่วย ($=q_{Rx}^+/\sigma T_{\infty}^4$)

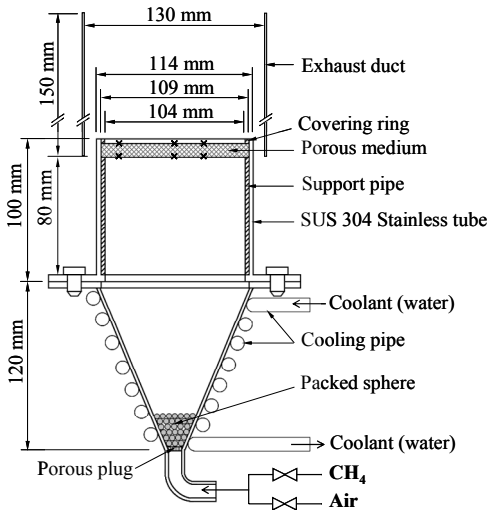
สัญลักษณ์ตัวห้อย

f	สถานะแก๊ส
low	ผิวด้านล่างของวัสดุพอร์น
s	สถานะของแข็ง (วัสดุพอร์น)
up	ผิวด้านบนของวัสดุพอร์น
∞	อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม

3. อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

แผนผังอุปกรณ์การทดลองได้แสดงไว้ในรูปที่ 1 ประกอบไปด้วย 4 ส่วนที่สำคัญ ได้แก่ ส่วนที่หนึ่งกระจายการไหลของไอดี (Conical flow distribution section) ส่วนที่สองห้องปรับการไหล (Plenum chamber) ส่วนที่สามหัวเผาวัสดุพอร์น (Porous burner) และส่วนสุดท้ายท่อไอเสีย (Exhaust duct) ซึ่งรายละเอียดของอุปกรณ์และขั้นตอนการทดลองได้อธิบายไว้แล้วในเอกสารอ้างอิงของ Kritacom และคณะ [8] และในที่นี้จะขอสรุปโดยคร่าว ๆ เพื่อทบทวนดังนี้ ไอดีผสมระหว่างมีเทนและอากาศจะถูกส่งจากด้านล่างของระบบ ผ่าน Porous plug และ Packed sphere ซึ่งเป็นส่วนที่ป้องกันเปลวไฟย้อนกลับจากการเผาไหม้ โดยความเร็วเชื้อเพลิงผสมขาเข้า (Mixture velocity, V_{mix}) จะถูกป้อนให้กับหัวเผาในช่วง 5.89×10^{-2} ถึง 19.62×10^{-2} m/s จนเมื่อไอดีไหลมาถึงวัสดุพอร์นที่ด้านบนสุดของห้องปรับการไหล การเผาไหม้จะเกิดขึ้น ในที่นี้จะใช้ pilot flame ในการจุดไฟ หลังจากเกิดสภาวะเสถียรของเปลวไฟ จะทำการวัดอุณหภูมิของผิวด้านล่างและด้านบน (Lower and upper surface temperatures: $T_{s, low}$ and $T_{s, up}$) ของวัสดุพอร์น

พร้อมกันนี้ก็ได้ทำการวัดรังสีที่แผ่ออกมาจากผิวด้านบนของวัสดุพอรุน ด้วยเครื่องมือวัดรังสีชนิดผิวหน้าสองสี (Two colors radiometer) สำหรับรายละเอียดของเครื่องมือวัดรังสีชนิดนี้ก็ได้แสดงไว้อย่างละเอียดแล้วเช่นกันในเอกสารอ้างอิงของ Krittacom et al. [8] ขอบเขตการเผาไหม้จะถูกควบคุมด้วยการเป่าดับ (Blow-off limit) และการย้อนกลับ (Flash-back limit) ของเปลวไฟ โดยขอบเขตดังกล่าวแสดงอยู่ในรูปของอัตราส่วนสมมูล (Φ) ซึ่งการปรับค่า Φ นี้จะปรับพร้อมกันทั้งมีเทนและอากาศให้ได้สัดส่วนตามที่ต้องการ สำหรับสมบัติทางกายภาพของวัสดุพอรุนเซลลูโลสเปิดอะลูมินา-คอร์ดีไรท์ที่ถูกนำมาทดสอบเป็นหัวเผาแผ่รังสีในงานวิจัยนี้ แสดงไว้ในตารางที่ 1



รูปที่ 1 แผนผังอุปกรณ์การทดลอง

ตารางที่ 1 คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุพอรุนเซลลูโลสเปิดชนิดอะลูมินา-คอร์ดีไรท์ (Al-Co)

สัมประสิทธิ์	สัญลักษณ์	ค่ากายภาพ
ค่าความพรุน	ϕ	0.875
จำนวนช่องต่อหนึ่งหน่วยนิ้ว	PPI	20
ความหนา	x_0	0.0103 m
สัมประสิทธิ์การสิ้นสุญ	β	365.89 m^{-1}
ความหนาเชิงแสง	τ_0	3.77

4. การวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์

4.1 แบบจำลองกายภาพและสมการควบคุมหลัก

รูปที่ 2 จะแสดงแบบจำลองกายภาพและพิกัดของระบบหัวเผาแผ่รังสีแบบวัสดุพอรุนเซลลูโลสเปิด โดยแบบจำลองกายภาพนี้จะแบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลัก ซึ่งส่วนที่หนึ่งและส่วนที่สามจะเป็นช่องว่างไม่มีวัสดุพอรุน (Free space) นิยามเป็นช่วงขาเข้า (Upstream region: $-\infty < x < 0$) และช่วงขาออก (Downstream region: $x_0 < x < \infty$) ตามลำดับ สำหรับส่วนตรงกลางเป็นวัสดุพอรุน (Porous medium region: $0 < x < x_0$) นอกจากนี้ยังมีสมมติฐานที่สำคัญเพื่อใช้ในการคำนวณด้วย กล่าวคือ

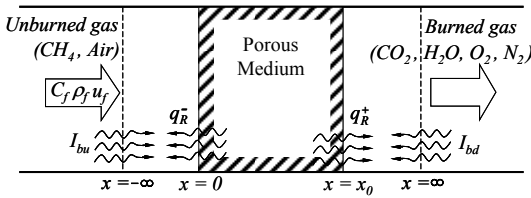
1) หัวเผาแผ่รังสีชนิดนี้มีความหนาเท่ากับ x_0 และที่ผิวขอบทั้งสองด้านของวัสดุพอรุนได้รับรังสีตกกระทบแบบวัตถุดำ (Blackbody radiation) ด้วยอุณหภูมิคงที่ $T_\infty (=298 \text{ K})$

2) แก๊สไอที่ส่งเข้าไปในระบบประกอบไปด้วยมีเทนและอากาศ (Methane and Air) ส่วนแก๊สไอเสียที่เกิดขึ้นจะประกอบไปด้วย คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ไอน้ำ (H_2O) ออกซิเจน (O_2) และไนโตรเจน (N_2) โดยพิจารณาแก๊สเหล่านี้เป็นแก๊สในอุดมคติ (Ideal gas) และไม่สามารถแผ่รังสีได้

3) วัสดุพอรุนพิจารณาให้เป็นวัตถุธา (Gray medium) ไม่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (Non-catalytic medium) มีสมบัติในการแผ่รังสี (Emitting radiation) ดูดซับรังสี (Absorbing radiation) และการกระจายรังสีแบบ Anisotropic (Anisotropically scattering radiation)

4) จลนศาสตร์ทางเคมีของกลไกการเผาไหม้จะคำนวณโดยใช้ กลไกเดี่ยวของสมการอาร์เรเนียส และสมบัติทางกายภาพเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ

5) จะพิจารณาการเผาไหม้เป็นแบบหนึ่งมิติ ในช่วงสภาวะเสถียร และอัตราการไหลเชิงมวล (Mass flow rate: ρu) มีค่าคงที่ตลอดทั้งระบบ



รูปที่ 2 แบบจำลองกายภาพและพิกัดของระบบ

ภายใต้สมมติฐาน 5 ข้อข้างต้น การคำนวณการเผาไหม้จะวิเคราะห์ด้วยทฤษฎีเปลวไฟราบเรียบมาตรฐาน (A standard laminar flame theory) [10] โดยมีสมการควบคุมหลัก ดังต่อไปนี้

สมการเชิงมวล (Continuity equation) และสมการของสถานะ (Equation of state) แสดงได้ตามลำดับ คือ

$$\frac{\partial(\rho_f u_f)}{\partial x} = 0 \tag{1}$$

$$\rho_f = \bar{M}P/RT_f \tag{2}$$

สมการอนุพันธ์พลังงาน (The energy equation) และสมการอนุพันธ์มวล (The equation of species conservation) ในช่วงขาเข้า และช่วงขาออก ของระบบคำนวณจาก

$$\rho_f u_f \frac{\partial Y_i}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} (\rho_f Y_i v_i) = \dot{W}_i M_i, \tag{3}$$

(i = 1, 2, ..., N-1),

$$\rho_f u_f C_f \frac{\partial T_f}{\partial x} + \sum_{i=1}^N \rho_f Y_i v_{i,j} C_{f,i} \frac{\partial T_f}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_f \frac{\partial T_f}{\partial x} \right) - \sum_{i=1}^N h_i \dot{W}_i M_i. \tag{4}$$

ส่วนในช่วงวัสดุพอร์น สมการอนุพันธ์พลังงานจะพิจารณาทั้งสถานะแก๊สและของแข็งดังนี้

$$\rho_f u_f \frac{\partial Y_i}{\partial x} + \phi \frac{\partial}{\partial x} (\rho_f Y_i v_i) = \phi \dot{W}_i M_i \tag{5}$$

(i = 1, 2, ..., N-1)

$$\rho_f u_f C_f \frac{\partial T_f}{\partial x} + \phi \sum_{i=1}^N \rho_f Y_i v_{i,j} C_{f,i} \frac{\partial T_f}{\partial x} - h_v (T_f - T_s)$$

$$= \phi \frac{\partial}{\partial x} \left(k_f \frac{\partial T_f}{\partial x} \right) - \phi \sum_{i=1}^N h_i \dot{W}_i M_i, \tag{6}$$

$$\frac{1}{3} (1 - \phi) \frac{\partial}{\partial x} \left(k_s \frac{\partial T_s}{\partial x} \right) + h_v (T_f - T_s) - \frac{\partial q_{rx}}{\partial x} = 0 \tag{7}$$

$$\frac{\partial q_{rx}}{\partial x} = 4\beta(1 - \omega) \left(\sigma T_s^4 - \frac{G}{4} \right). \tag{8}$$

สำหรับกลไกเดี่ยวของสมการอาร์เรเนียส ที่ใช้ในการคำนวณครั้งนี้จะเป็นสมการเดียวกันกับที่ใช้ในเอกสารอ้างอิงของ Kittacom และคณะ [8] นั่นคือ

$$\dot{W}_i = v_i \dot{W} = v_i A [CH_4] [O_2] \exp(-E/RT) \tag{9}$$

เมื่อค่าความถี่ปฏิกิริยา (Frequency factor, A) พลังงานกระตุ้น (Activation energy, E) มีค่าเท่ากับ 1.75×10^{11} m³/kmol·s และ 1.4×10^6 kJ/kmol ตามลำดับ

สภาวะขอบเขต (Boundary conditions) ในการคำนวณสมการหลักควบคุม (Governing equations) กำหนดโดย

$$\left. \begin{aligned} x = -\infty & : T_f = T_{mix}, Y_{CH_4(O_2)} = Y_{CH_4(O_2),in} \\ x = 0 & : \frac{\partial T_s}{\partial x} = 0, \\ x = x_0 & : \frac{\partial T_s}{\partial x} = 0, \\ x = \infty & : \frac{\partial T_s}{\partial x} = 0, \frac{\partial Y_i}{\partial x} = 0. \end{aligned} \right\} \tag{10}$$

เพื่อให้สามารถคำนวณสมการอนุพันธ์พลังงานสถานะของแข็งได้ สมการอนุพันธ์ของฟลักซ์การแผ่รังสี (Divergence radiative heat flux, $\partial q_{rx} / \partial x$) และ Incident radiation (G) จำเป็นต้องทราบคำตอบ ดังนั้นในการหาค่าผลลัพธ์ปริมาณทั้งสอง สมการโดยประมาณของ P₁ (The P₁ approximation) จึงได้ถูกนำมาแก้ปัญหานี้โดยสมการโดยประมาณ P₁ และขอบเขตการคำนวณสามารถแสดงได้ดังนี้

$$\frac{\partial q_{rx}}{\partial x} + (1-\omega)\beta(G - 4\sigma T_s^4) = 0, \quad (11)$$

$$\frac{\partial G}{\partial x} + 3(1-\omega\tilde{g})\beta q_{rx} = 0, \quad (12)$$

$$\left. \begin{aligned} x = 0 : G + 2q_{rx} &= 4\sigma T_\infty^4, \\ x = x_0 : G - 2q_{rx} &= 4\sigma T_\infty^4, \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

นอกจากนี้ในการคำนวณหาปริมาณการแผ่รังสีออกมาจากผิวด้านบนของหัวเผาชนิดนี้นั้น จะคำนวณมาจากฟังก์ชันการแผ่รังสีไปยังข้างหน้าที่ตำแหน่งผิวด้านขาออกของระบบ นั่นคือ

$$q_r^+(x_0) = \frac{1}{4} [G(x_0) + 2q_{rx}(x_0)]. \quad (14)$$

4.2 วิธีการคำนวณ

เพื่อความสะดวกในการวิเคราะห์ สมการเหล่านี้จะถูกจัดให้อยู่ในรูปแบบสมการไร้หน่วย หลังจากนั้นสมการเชิงอนุพันธ์ต่าง ๆ ก็ถูกจัดรูปแบบอีกครั้งให้อยู่ในรูปการคำนวณผลต่างโดยปริยาย (Implicit finite difference equation) ในการคำนวณสมการอนุพันธ์พลังงานสถานะแก๊ส และสมการอนุกรมมวล ช่วงขาเข้าและขาออก (Upstream and downstream region) ของแบบจำลองกายภาพจะถูกแบ่งออกเป็นช่องเล็กที่เท่า ๆ กัน (Node) จำนวน 100 ช่องทั้งสองช่วง แต่ในช่วงวัสดุพวุน จะถูกแบ่งเป็น 200 ช่อง รวมไปถึงการคำนวณสมการอนุพันธ์พลังงานสถานะของแข็ง ก็ยังคงแบ่งเป็น 200 ช่องเช่นกัน ส่วนการคำนวณสมการโดยประมาณ P_1 จะแบ่งช่วงวัสดุพวุนออกเป็น 400 ช่อง

การคำนวณจะเริ่มด้วยการสมมติโครงสร้างอุณหภูมิของสถานะของแข็ง (T_s) และของแก๊ส (T_g) โดยที่ค่าอุณหภูมิสูงสุดของ T_g จะสูงกว่าจุดติดไฟ (Ignition point) ของมีเทนและเพียงพอต่อการทำให้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เกิดการเผาไหม้ได้ จะได้ผลลัพธ์ชุดแรกคือ สัดส่วนมวล (Y_i) ของแก๊สต่าง ๆ ค่า G และ q_{rx}

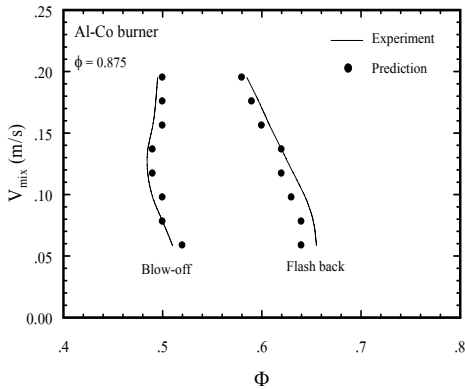
ออกมา โดยในการคำนวณหาค่า G และ q_{rx} นั้น จะใช้สมการโดยประมาณแบบ P_1 ในการหาคำตอบและทำการคำนวณด้วยวิธี Staggered lattic point [11] ค่าผลลัพธ์ของตัวแปรที่ได้ทั้ง 3 (Y_i , G และ q_{rx}) จะถูกส่งไปใช้ในการคำนวณของสมการอนุพันธ์พลังงานเพื่อหา T_g และ T_s อีกครั้ง ซึ่งการหาคำตอบจะกระทำด้วยวิธีการกำจัดแบบเกาส์ (Gaussian elimination) ผลลัพธ์ของอุณหภูมิทั้งสองจะนำกลับไปแทนที่ซ้ำในการหาค่าของ Y_i , G และ q_{rx} ต่อไปอย่างต่อเนื่อง จนกว่าผลการเปรียบเทียบของอุณหภูมิมะหว่างผลลัพธ์ก่อนหน้ากับที่คำนวณได้ใหม่มีค่าความแตกต่างน้อยกว่า 10^{-4} จึงหยุดการคำนวณ

5. การวิเคราะห์และผลการทดลอง

5.1 ขอบเขตการเผาไหม้และโครงสร้างอุณหภูมิ

สภาวะขอบเขตเปลวไฟเสถียรของหัวเผา วัสดุพวุนเซลลูลาร์เปิดชนิดอะลูมินา-คอร์ดิไรท์ (Al-Co) ถูกแสดงไว้ในรูปที่ 3 เมื่อขอบเขตการเป่าดับ (Blow-off limit) คือปรากฏการณ์ที่เปลวไฟ (Flame) เคลื่อนตัวออกจากผิวด้านบนของแผ่นวัสดุพวุนและเกิดการดับ (Extinguishment) ในที่สุด โดยแสดงผ่านอัตราส่วนสมมูล (Φ) มีค่าอยู่ในช่วงประมาณ 0.48 ถึง 0.5 โดย Φ ของการเป่าดับในหัวเผาแบบนี้ จะมีค่าต่ำกว่าการเผาไหม้แบบปกติทั่วไป (Conventional combustion) ของเชื้อเพลิงมีเทน ($\Phi = 0.53$) [12] อาจเนื่องมาจากจุดเด่นของวัสดุพวุน ที่มีพื้นที่ผิวสัมผัสต่อหน่วยปริมาตรสูง ทำให้สามารถเกิดการเผาไหม้ในสภาวะไอดีที่บางกว่าแบบปกติทั่วไป ในทางตรงกันข้ามถ้าเปลวไฟเคลื่อนตัวลงออกจากผิวด้านล่างของแผ่นวัสดุพวุน และเกิดการดับจะเรียกว่าขอบเขตการย้อนกลับ (Flash-back limit) ซึ่งค่า Φ จะอยู่ในช่วง 0.58 ถึง 0.64 นอกจากนี้ ผลการเปรียบเทียบระหว่างการทดลอง และการคำนวณด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะมีความ

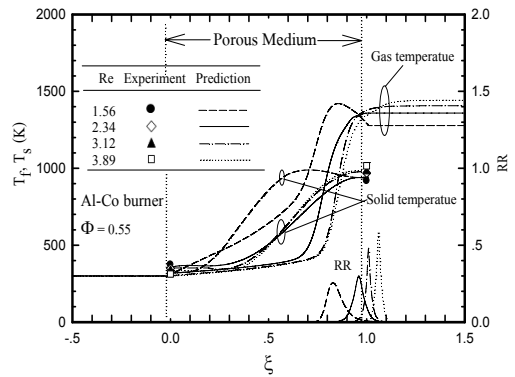
สอดคล้องกันได้เป็นที่น่าพอใจทั้งการเป่าดับและการย้อนกลับ



รูปที่ 3 ขอบเขตเปลวไฟเสถียร

5.2 โปรไฟล์อุณหภูมิ

รูปที่ 4 จะแสดงอิทธิพลของอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงผสมก่อน (Re) ที่มีต่อโปรไฟล์อุณหภูมิของทั้งสถานะแก๊สและของแข็งในระบบการเผาไหม้ และอัตราการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ (Reaction rate, RR) ที่สภาวะ $\Phi = 0.55$ จากรูปที่ 4 จะพบว่าตำแหน่งของอุณหภูมิแก๊สสูงสุดจะเกิดขึ้นในบริเวณใกล้ด้านทางออกหรือผิวหน้าด้านบน (Upper surface) ของวัสดุพอร์น และจะเคลื่อนตัวไปอยู่ที่บริเวณผิวหน้าด้านบนของหัวเผาเมื่อ Re เพิ่มขึ้น ดังจะสังเกตได้จากตำแหน่งของอัตราการเกิดปฏิกิริยา (RR) ที่เคลื่อนตัวตาม ค่า Re ที่เพิ่มขึ้น จากปรากฏการณ์นี้อาจกล่าวได้ว่าเปลวไฟของหัวเผาแบบวัสดุพอร์นชนิดเซลล์าร์เปิดชนิดนี้ สามารถเกิดขึ้นได้อย่างอิสระบริเวณผิวด้านบนของวัสดุพอร์น โดยเกิดขึ้นได้ทั้งภายในและภายนอกวัสดุพอร์น ตามการปรับค่า Re สำหรับผลเปรียบเทียบ ของอุณหภูมิของแข็งที่ผิวหน้าทั้งสองด้านของวัสดุพอร์นระหว่าง การคำนวณ ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และค่าที่วัดได้จากการทดลองมีความสอดคล้องกันเป็นอย่างดี



รูปที่ 4 โปรไฟล์อุณหภูมิของระบบ ที่ได้รับอิทธิพลจากอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงผสมก่อน (Re)

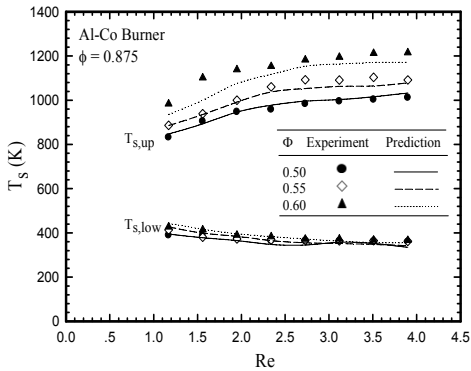
5.3 อุณหภูมิผิววัสดุพอร์น

รูปที่ 5 แสดงอุณหภูมิผิวของแผ่นวัสดุพอร์น (Surface temperature) พบว่าอุณหภูมิผิวด้านบนของวัสดุพอร์น ($T_{s, up}$) จะสูงขึ้นเล็กน้อยตามการเพิ่มขึ้นของ Re แต่ในกรณีของอุณหภูมิผิวด้านล่างของวัสดุพอร์น ($T_{s, low}$) กลับลดลงเล็กน้อยเมื่อ Re เพิ่มขึ้น นอกจากนี้เมื่อพิจารณาที่ค่า Re คงที่ใด ๆ พบว่า $T_{s, up}$ จะสูงขึ้นตามปริมาณที่เพิ่มขึ้นของ Φ ซึ่งปรากฏการณ์เช่นนี้เป็นไปตามกายภาพการเผาไหม้จริง เนื่องจากระบบได้รับเชื้อเพลิงที่เพิ่มหรือปริมาณไฮโดรคาร์บอนที่หนาขึ้น ย่อมทำให้การเผาไหม้มีความรุนแรงและสมบูรณ์ยิ่งขึ้น ส่งผลให้อุณหภูมิในการเผาไหม้มีค่าสูงตามไปด้วย

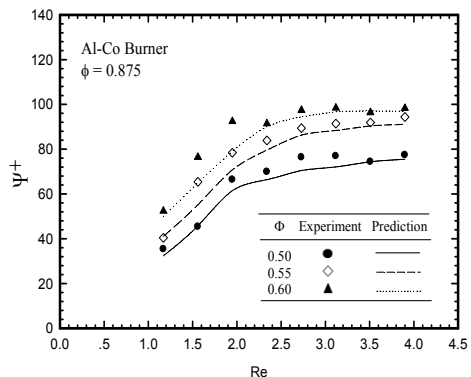
5.4 ค่าฟลักซ์แผ่รังสีไปข้างหน้าไร้หน่วย

รูปที่ 6 แสดงค่าฟลักซ์แผ่รังสีไปข้างหน้า ไร้หน่วย (Ψ^+) ของหัวเผาแผ่รังสีวัสดุพอร์น พบว่า ค่า Ψ^+ จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วตาม Re และจะเพิ่มขึ้นอีกเล็กน้อยหรือมีค่าเกือบคงที่หลังจาก Re มีค่ามากกว่า 3 และหากพิจารณาที่ค่า Re คงที่ จะได้ว่า Ψ^+ เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วตาม Φ ในการเปรียบเทียบผลที่คำนวณได้ทั้งสองรูปกับการทดลอง จะให้ผลความสอดคล้องกันเป็นอย่างดี แต่ก็สังเกตได้ว่าผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลองจะมีค่าที่สูงกว่า อาจเนื่องมาจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ไม่สามารถ

คำนวณความซับซ้อนของกระบวนการ การเผาไหม้ที่แท้จริง กลไกการถ่ายเทความร้อนของวัสดุพอร์น และการแผ่รังสีได้อย่างครบถ้วน ทำให้คำตอบที่ได้จากการคำนวณมีค่าน้อยกว่าการทดลอง



รูปที่ 5 เปรียบเทียบอุณหภูมิผิวของวัสดุพอร์นระหว่างการคำนวณกับผลการทดลอง



รูปที่ 6 เปรียบเทียบค่าฟลักซ์แผ่รังสีไปข้างหน้าไว้หน่วยระหว่างการคำนวณกับผลการทดลอง

6. สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาเกี่ยวกับฟลักซ์การแผ่รังสี ความร้อนจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงผสมก่อนระหว่างอากาศกับแก๊สมีเทนในหัวเผาวัสดุพอร์นแบบเซลล์าร์เปิดชนิดอะลูมินา-คอร์ติไรท์ (Al-Co) ที่มีค่าความพอร์น (Φ) เท่ากับ 0.875 ทั้งด้วยวิธีการทดลองและการคำนวณด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ สามารถสรุปได้ว่า สภาวะ

เสถียรของหัวเผาแผ่รังสีในงานวิจัยนี้จะอยู่ในช่วงอัตราส่วนสมมูล (Φ) การเผาดับประมาณ 0.48 ถึง 0.5 และการย้อนกลับของเปลวไฟจะมีค่าเป็น $0.58 < \Phi < 0.64$ ซึ่งเปลวไฟที่เกิดขึ้นภายในขอบเขตการดับทั้งสองจะเสถียรอยู่บริเวณผิวด้านทางออกของแผ่นวัสดุพอร์น เซลล์าร์เปิดเท่านั้น อุณหภูมิผิวด้านบน ($T_{s, up}$) และด้านล่าง ($T_{s, low}$) ของหัวเผาวัสดุพอร์น ค่าปริมาณการแผ่รังสีความร้อน ซึ่งแสดงในรูปของฟลักซ์การแผ่รังสีไปข้างหน้า (Ψ^+) จะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนสมมูล (Φ) และอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงผสมก่อน (Re) เนื่องจากหัวเผาได้รับปริมาณเชื้อเพลิงที่เพิ่มขึ้น ทำให้การเผาไหม้มีความรุนแรงและสมบูรณ์ยิ่งขึ้น ส่งผลให้อุณหภูมิในการเผาไหม้มีค่าสูงตามไปด้วย นอกจากนี้ผลการเปรียบเทียบระหว่างผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎีและผลการทดลองของฟลักซ์การแผ่รังสีไปข้างหน้า (Ψ^+) และอุณหภูมิผิวทั้งสองด้านของหัวเผาแบบวัสดุพอร์น ($T_{s, up}$ และ $T_{s, low}$) ในงานวิจัยนี้ มีความสอดคล้องกันเป็นอย่างดี

7. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนบทความขอขอบพระคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรีสำหรับการสนับสนุนวิจัยในครั้งนี้ และขอขอบคุณ Mr. Shinichi Saito จากมหาวิทยาลัยโออิตะ ประเทศญี่ปุ่น ในความอนุเคราะห์จัดส่งอุปกรณ์การทดลองบางอย่าง เพื่อใช้ในการศึกษาวิจัย จนทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

8. เอกสารอ้างอิง

[1] Echigo R, Yoshizawa Y, Hanamura K, Tomimura T. Analytical and experimental studies on radiative propagation in porous media with internal heat generation. Proceeding of the 8th International Heat Transfer Conference; 1986; San Francisco, USA.

- [2] Weinberg FJ. Heat-recirculating burners: principles and some recent developments. *Combustion Science and Technology*. 1996; 121: 3-22.
- [3] Hanamura K and Echigo R. An analysis of flame stabilization mechanism in radiation burners. *Warme-und Stoffubertragung*. 1991; 26: 377-383.
- [4] Khanna V, Goel R, Ellzey JL. Measurements of emissions and radiation for methane combustion within a porous medium burner. *Combustion Science and Technology*. 1994; 99: 133-142.
- [5] Mital R, Gore JP, Viskanta R. A study of the structure of submerged reaction zone in porous ceramic radiant burners. *Combustion and Flame*. 1997; 111: 175-184.
- [6] Pereira JCF, Zhou XY. Comparison of four combustion models for simulating the premixed combustion in inert porous media. *Fire and Materials*. 1998; 22: 187-197.
- [7] Bouma PH, De Goey LPH. Premixed combustion on ceramic foam burner. *Combustion and Flame*. 1999; 119: 133-143.
- [8] Krittacom B, Kamiuto K. Radiation emission characteristics of an open-cellular porous burner. *JSME Journal of Thermal Science and Technology*. 2009; 4: 13-24.
- [9] Krittacom B. Radiation emission characteristics of a ceramic open-cellular porous burner. *Proceeding of the 23rd Conference of the Mechanical Engineering Network of Thailand (ME-NETT 23)*; 2009 Nov. 4-7; Chaingmai, Thailand. (in Thai)
- [10] Poinso T, Veynante D. *Theoretical and numerical combustion*. 2nd ed. R.T. Edwards, Inc.: USA; 2005.
- [11] Kamiuto K, Saito S, Ito K. Numerical model for combined conductive and radiative heat transfer in annular packed beds. *Numerical Heat Transfer, Part A*. 1993; 23: 433-443.
- [12] Annamalai K, Puri IK. *Combustion science and engineering*. CRC Press: New York: USA; 2007.