

## คุณลักษณะการแผ่รังสีของหัวเผาไหม้แบบวัสดุพรุนชนิดเซรามิกซ์เซลูลาร์เปิด

### Radiation Emission Characteristics of a Ceramic Open-Cellular Porous Burner

บัณฑิต กฤตาคม<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup> ห้องปฏิบัติการถ่ายเทความร้อนและการเผาไหม้ในวัสดุพรุน (Heat Transfer and Combustion in Porous Media Laboratory: HC-POM)

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

744 ถนนสุรนารายณ์ ต. ในเมือง อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000

\*ผู้ติดต่อ: E-mail: bundit.kr@rmutt.ac.th, โทรศัพท์: (664) 4233073, โทรสาร: (664) 4233074

#### บทคัดย่อ

คุณลักษณะการแผ่รังสีของหัวเผาไหม้แบบวัสดุพรุนชนิดเซรามิกซ์เซลูลาร์เปิดได้ถูกทำการศึกษาโดยการทดลองและการคำนวณ ซึ่งการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นจะเป็นแบบการผสมเชื้อเพลิงก่อนเข้าสู่ระบบการเผาไหม้ ในที่นี้จะเป็นการผสมกันระหว่างก๊าซมีเทนและอากาศ (Methane-air premixed combustion) ในการทดลองนั้น วัสดุพรุนแบบเซรามิกซ์ชนิด Cordierite-alumina open-cellular จะถูกนำมาติดตั้งในหัวเผา (Burner) โดยมีคุณสมบัติทางกายภาพคือ ค่าความพรุน (Porosity,  $\phi$ ) และจำนวนช่องต่อหนึ่งหน่วยนิ้ว (Pores per inch, PPI) เท่ากับ 0.837 และ 6 ตามลำดับ การวัดรังสีที่แผ่ออกมาจากหัวเผาจะใช้เครื่องมือวัดชนิดผิวหน้าสองสี (A two-color radiometry) สำหรับการวิเคราะห์ทางทฤษฎี สมการอนุพันธ์พลังงานของสถานะแก๊สจะพิจารณาพลังงานที่ปลดปล่อยออกมาจากการเผาไหม้ ซึ่งจลนศาสตร์เคมีของกลไกการเผาไหม้จะทำการคำนวณโดยกลไกเดี่ยวของสมการอาร์เรเนียส (A single-step Arrhenius rate expression) ส่วนกรณีสมการอนุพันธ์พลังงานของสถานะของแข็งจะพิจารณาการแผ่รังสีในวัสดุพรุน ซึ่งการหาผลเฉลยของสมการการแผ่รังสีความร้อน (Radiative transfer equation) จะใช้วิธีการหาผลเฉลยแบบประมาณ ของสมการ  $P_1$  (The  $P_1$  approximation) จากการศึกษาจะพบว่าสถานะเสถียรของการเผาไหม้ในหัวเผาชนิดนี้จะถูกกำหนดด้วยการเป่าดับ (Blow-off) และการย้อนกลับ (Flash-back) ของเปลวไฟ โดยแสดงผ่านปริมาณอัตราส่วนสมมูล (Equivalence ratio,  $\Phi$ ) กล่าวคือสถานะเสถียรอยู่ในช่วงอัตราส่วนสมมูลการเป่าดับประมาณ 0.48 ถึง 0.5 และการย้อนกลับของเปลวไฟจะต่ำกว่า 0.62 สำหรับปริมาณการแผ่รังสีจะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนสมมูลและอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงผสมก่อน (การศึกษาครั้งนี้จะแสดงผลอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงผสมก่อนอยู่ในรูปเลขเรย์โนลด์, Reynolds number, Re) ผลการเปรียบเทียบระหว่างการคำนวณและการทดลองของ ฟลักซ์การแผ่รังสีไปข้างหน้า (Forward radiative heat flux) และอุณหภูมิผิวของหัวเผาแบบวัสดุพรุน มีความสอดคล้องกันอย่างสมเหตุสมผล ดังนั้นการวิเคราะห์ทางทฤษฎีของการศึกษาครั้งนี้จึงมีความน่าเชื่อถือ

**คำหลัก:** คุณลักษณะการแผ่รังสี, วัสดุพรุนชนิดเซลูลาร์เปิดเซรามิกซ์, หัวเผาแบบวัสดุพรุน

## **Abstract**

An experimental and numerical study of a ceramic open-cellular porous burner, in which methane-air premixed combustion occurs, were performed to determinate the radiation emission characteristics of the burner. In the experimental operation, a cordierite-alumina open-cellular porous material (CA) having porosity of 0.873 and pores per inch (PPI) of 6 was examined. Radiant output from the porous burner was measured based on a two-color radiometry. For the theoretical analysis, the energy liberation due to combustion was taken into account on the energy equation of gas phase and the chemical kinetics of gas phase reactions was governed by a single-step Arrhenius rate expression. The effect of radiation was also considered in the energy equation of solid phase (a porous burner) and the equation of radiative transfer was solved using  $P_1$  approximation. The stable combustion of the present burner was characterized by flash-back limits, where the equivalence ratio ( $\Phi$ ) was around 0.48 to 0.5, and blow-off limits ( $\Phi$  of less than 0.62). The radiant outputs depended on  $\Phi$  and Reynolds number (Re). Predicted results of the forward radiative heat flux and the burner surface temperature were reasonably compared with experimental data. The validity of the present theoretical model for predicting the radiation from a porous burner is confirmed.

**Keywords:** Radiation emission characteristics, Ceramic open-cellular porous material, Porous burner

## **1. บทนำ**

หัวเผาแผ่รังสีแบบวัสดุพรุน (Porous radiant burner) ได้มีการใช้ประโยชน์อย่างกว้างขวางในหลายวัตถุประสงค์ ยกตัวอย่างเช่น ใช้ในขบวนการผลิตกระดาษ การทำให้กระดาษแห้ง (Paper drying) การเคลือบเงากระดาษ (Paper finishing) ใช้ในอุตสาหกรรมสิ่งทอ การอบและการทำให้เส้นใยแห้ง (Baking and textile drying) หรือแม้แต่การสร้างความอบอุ่นภายในบ้านเรือน (Domestic radiant heater) ก็มีการใช้ประโยชน์จากหัวเผาแบบนี้แล้ว ข้อดีที่โดดเด่นของหัวเผาแบบวัสดุพรุนมีสองข้อ คือ มีความสามารถในการแผ่รังสีได้สูงและมลพิษจากการเผาไหม้ที่ปลดปล่อยออกมามีปริมาณต่ำ ด้วยสาเหตุนี้ เป็นเหตุผลให้นักวิจัยและวิศวกรจำนวนมากมีความสนใจ และศึกษาเกี่ยวกับหัวเผานี้ ทั้งด้วยวิธีการทดลองและทางทฤษฎี เพื่อที่จะพัฒนาสมรรถนะให้ดียิ่งขึ้น Echigo และคณะ [1] เป็นกลุ่มงานวิจัยแรกที่เสนอผลงานการเผาไหม้ในวัสดุพรุนทั้งการทดลอง

และทฤษฎี โดยพบว่าวัสดุพรุนจะช่วยส่งเสริมการเผาไหม้ให้ดียิ่งขึ้นเนื่องจากการหมุนเวียนพลังงานด้วยการแผ่รังสี (Radiation recirculation) จากบริเวณเปลวไฟไปยังไอดีผสม (Unburned gas mixture) ที่กำลังส่งมายังระบบ Hanamura และคณะ [2] ได้ทำการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ขึ้นมาเพื่อทำนายตำแหน่งและการเคลื่อนตัวของเปลวไฟ (Dynamics of flame) ที่เกิดขึ้นภายในวัสดุพรุน ด้วยอิทธิพลของปริมาณรังสีที่จะแผ่ออกมาจากการเผาไหม้ในวัสดุพรุน Khanna และคณะ [3] ทำการทดลองหัวเผาวัสดุพรุนที่ทำมาจากเซรามิกซ์ ชนิด Partially stabilized zirconia (PSZ) พบว่าประสิทธิภาพการแผ่รังสีจะแปรผกผันกับความเร็วของเปลวไฟ และปริมาณแก๊สไอเสีย (CO และ  $\text{NO}_x$ ) จะขึ้นกับความเร็วของเปลวไฟ (Flame speed) Mital และคณะ [4] ได้ศึกษาการแผ่รังสีของหัวเผาเซรามิกซ์ที่เปลวไฟฝังตัวอยู่ภายในวัสดุพรุน โดยมีการใช้วัสดุพรุนที่มีคุณสมบัติทางกายภาพแตกต่างกันสองชนิดสร้างเป็นหัวเผาไหม้ ซึ่งประกอบไปด้วยชั้นการกระจาย (Diffuser layer) และ

ชั้นสนับสนุนเปลวไฟ (Flame support layer) พวกเขาได้ศึกษาทั้งด้วยการทดลองและทฤษฎี ซึ่งพบว่าประสิทธิภาพการแผ่รังสี จะเพิ่มขึ้นตามค่าอัตราส่วนสมมูล (Equivalence ratio  $\Phi$ ) และจำนวนช่องต่อหนึ่งหน่วยนิ้วของชั้นสนับสนุนเปลวไฟ Pereira และคณะ [5] ได้เสนอผลเปรียบเทียบแบบจำลองของสี่กลไกการเผาไหม้ในวัสดุพอรอนของแก๊สมีเทนผสมก่อน ประกอบไปด้วยกลไกสมบูรณ์ของการเผาไหม้ (Full mechanism: FM) กลไกโครงร่างของการเผาไหม้ (Skeletal mechanism: SM) กลไกสี่ขั้นตอนของการเผาไหม้ (4-step reduced mechanism: 4RM) และกลไกเดียวของการเผาไหม้ (1-step global mechanism: 1GM) จากผลการคำนวณและเปรียบเทียบ พบว่ากลไกสี่ขั้นตอนของการเผาไหม้ มีความแม่นยำและสอดคล้องกันเป็นอย่างดีกับกลไกโครงร่างของการเผาไหม้ และกลไกสมบูรณ์ของการเผาไหม้ ในกรณีนี้ที่ไอดีบาง (Lean mixture) ถูกส่งเข้าสู่ระบบเพื่อเกิดการเผาไหม้ แต่กลไกเดียวของการเผาไหม้ จะให้ค่าของอุณหภูมิสูงสุด (Peak flame temperature) และอัตราการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ (Reaction rate) สูงกว่าทุกกลไก Bouma และคณะ [6] ได้สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของหัวเผาวัสดุพอรอนชนิดเซรามิกซ์ขึ้น โดยเลือกใช้กลไกโครงร่าง ในการทำนายปรากฏการณ์การเผาไหม้ที่เกิดขึ้น และยังทำการทดลองเพื่อยืนยันผลการใช้กลไกดังกล่าวโดยเน้นที่มลพิษที่ถูกปล่อยออกมา จากการศึกษาพบว่า ความสอดคล้องของแก๊สไอเสีย ระหว่างการทดลองและการคำนวณเป็นไปอย่างน่าพอใจ ซึ่งมีค่าความแตกต่างสูงสุดไม่เกิน 15%

จากงานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้น จะพบว่าการศึกษาและพัฒนาเกี่ยวกับหัวเผาแผ่รังสีแบบวัสดุพอรอนชนิดเซรามิกซ์ยังคงมีส่วนที่ต้องปรับปรุงและค้นคว้าเพิ่มเติมอีกหลายอย่าง ไม่ว่าจะเป็นการสร้างหัวเผาให้มีโครงสร้างไม่ยุ่งยาก ประกอบขึ้นอย่างง่าย แต่สามารถทำให้เปลวไฟเสถียรได้ไม่ลำบากและมีปริมาณการแผ่รังสีสูง (ไม่จำเป็นต้องมีวัสดุพอรอนหลายชั้น) การทำนายการเผาไหม้โดยใช้กลไกการเผาไหม้ที่

มีคณิตศาสตร์ที่ไม่ซับซ้อนในการแก้ปัญหา แต่ให้ผลการทำนายที่แม่นยำ ด้วยเหตุผลเหล่านี้ งานวิจัยนี้จึงได้เสนอหัวเผาแผ่รังสีแบบวัสดุพอรอนชนิดเซรามิกซ์เซลล์เปิดแผ่นเดียว และในการทำนายปรากฏการณ์การเผาไหม้ที่เกิดขึ้นก็ใช้เพียง กลไกเดียวของสมการอาร์เรเนียสในการคำนวณ ซึ่งขนาดอุปกรณ์ วิธีการทดลอง และการคำนวณแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของหัวเผาชนิดนี้จะดำเนินการเหมือนกับการทดลองของ Krittacom และคณะ [7] เพียงแต่การศึกษาดังกล่าวพวกเขาได้เลือกใช้วัสดุพอรอนเป็นโลหะชนิดนิกเกิลโครม (Nickel-Chrome) เป็นหัวเผาแผ่รังสีวัสดุประสงค์หลักของการศึกษาก็เพื่อค้นหาคุณลักษณะการแผ่รังสี (Radiation emission characteristics) โครงสร้างอุณหภูมิ (Temperature profiles) เนื่องจากโดยส่วนใหญ่งานวิจัยที่ผ่านมาไม่ค่อยจะแสดงโครงสร้างอุณหภูมิของหัวเผา นอกจากนี้ผลการศึกษาทั้งสองจากการทดลองและการคำนวณ จะถูกนำมาเปรียบเทียบ อธิบายผลอย่างละเอียด เพื่อให้มีความเข้าใจมากยิ่งขึ้นถึงปรากฏการณ์จริงในหัวเผาแผ่รังสีแบบวัสดุพอรอนชนิดเซรามิกซ์

## 2. รายการสัญลักษณ์

$C_f$	ความจุจำเพาะของสถานะแก๊ส (J/kg·K)
$D_s$	เส้นผ่าศูนย์กลางสมมูลสตรีท (m)
$E_a$	เทอมไร้หน่วย activation energy ( $=E/RT_\infty$ )
$G$	incident radiation ( $W/m^2$ )
$h_i$	เอนทาลปีจำเพาะ (kJ/kg)
$h_v$	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตร
$H_i$	เทอมไร้หน่วยเอนทาลปีจำเพาะ ( $=h_i/C_{f,\infty}T_\infty$ )
$I(x,\mu)$	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

$Pr_{\infty}$	Prandlt number ( $=\mu_{f\infty} C_{f\infty}/k_{f\infty}$ )
$q_{Rx}$	ฟลักซ์การแผ่รังสีตามทิศทางการไหลของเชื้อเพลิง ( $W/m^2$ )
$q_R^+$	ฟลักซ์การแผ่รังสีไปข้างหน้า ( $W/m^2$ )
$R$	ค่าคงที่ของแก๊ส
$Re$	Reynolds number ( $=\rho_f u_f D_s/\mu_{f\infty}$ )
$RR$	เทอมไร้หน่วย Reaction rate ( $=\sum H_i V_i R S_i \rho_f^2 Pr_{\infty} \delta Y_{CH_4} Y_{O_2} \exp [-Ea/\theta_f]$ )
$RS_i$	เทอมไร้หน่วยที่ใช้ใน RR ( $=M_i A \rho_{f\infty}^2 D_s^2 / M_{CH_4} M_{O_2} \mu_{f\infty}$ )
$T$	อุณหภูมิ (K)
$T_{mix}$	อุณหภูมิของเชื้อเพลิงผสมขาเข้า (K)
$u_f$	ความเร็วของแก๊ส (m/s)
$V_i$	ความเร็วแพร่มวลของ i-th species (m/s)
$V_{mix}$	ความเร็วเชื้อเพลิงผสมขาเข้า (m/s)
$\dot{W}_i$	อัตราการเกิดปฏิกิริยาของ i-th species
$x_0$	ความหนาของวัสดุพอร์น (m)
$Y_i$	สัดส่วนมวลของ i-th species
<b>สัญลักษณ์กรีก</b>	
$\beta$	สัมประสิทธิ์ extinction
$\delta$	เทอมไร้หน่วยของอัตราส่วนระหว่างความหนาของวัสดุพอร์นและเส้นผ่าศูนย์กลางสมมูลสตรีท ( $=x_0/D_s$ )
$\phi$	ค่าความพอร์น
$\Phi$	อัตราส่วนสมมูล
$\rho$	ความหนาแน่น ( $kg/m^3$ )
$\rho_f^*$	เทอมไร้หน่วยของความหนาแน่นสถานะแก๊ส ( $=\rho_f/\rho_{f\infty}$ )
$\mu$	ความหนืด (Pa·s)
$v_i$	สัมประสิทธิ์ stoichiometric ของ i-th species
$\sigma$	ค่าคงที่ของ Stefan-Boltzmann's ( $W/m^2 \cdot K^4$ )
$\theta$	เทอมไร้หน่วยของอุณหภูมิ ( $=T/T_{\infty}$ )
$\tau_0$	ความหนาเชิงแสง ( $=\beta x_0$ )
$\xi$	เทอมไร้หน่วยพิกัดในทิศทางแนวการไหลของเชื้อเพลิง ( $=x/x_0$ )
$\omega$	Albedo

$\Psi^+$  เทอมไร้หน่วยฟลักซ์การแผ่รังสีไปข้างหน้า  
( $=q_{Rx}^+/\sigma T_{\infty}^4$ )

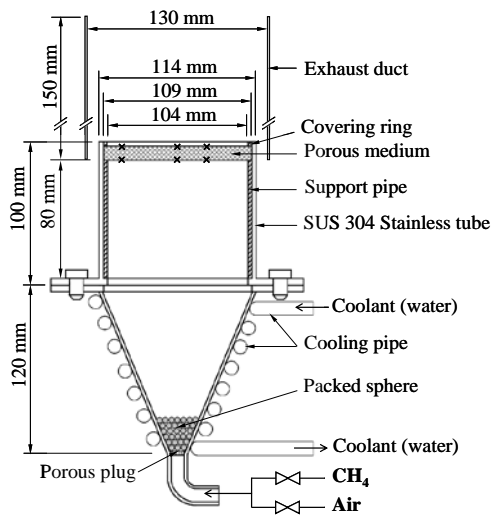
**สัญลักษณ์ตัวห้อย**

$f$	สถานะแก๊ส
$low$	ผิวด้านล่างของวัสดุพอร์น
$s$	สถานะของแข็ง (วัสดุพอร์น)
$up$	ผิวด้านบนของวัสดุพอร์น
$\infty$	อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม

**3. อุปกรณ์และวิธีการทดลอง**

แผนผังอุปกรณ์การทดลองได้แสดงไว้ในรูปที่ 1 ซึ่งประกอบไปด้วยสี่ส่วนที่สำคัญ ได้แก่ ส่วนที่หนึ่งกรวยกระจายการไหลของไอดี (A conical flow distribution section) ส่วนที่สองห้องปรับการไหล (A plenum chamber) ส่วนที่สามหัวเผาวัสดุพอร์น (A porous burner) และส่วนสุดท้ายท่อไอเสีย (An exhaust duct) ซึ่งรายละเอียดของอุปกรณ์และขั้นตอนการทดลองได้อธิบายไว้แล้วในเอกสารอ้างอิงของ Krittacom และคณะ [7] ซึ่งในที่นี้จะขอสรุปโดยคร่าวๆ เพื่อทบทวนดังนี้ ไอดีผสมระหว่างมีเทนและอากาศจะถูกส่งจากด้านล่างของระบบ ผ่าน Porous plug และ Packed sphere ซึ่งเป็นส่วนที่ป้องกันเปลวไฟย้อนกลับจากการเผาไหม้ โดยความเร็วเชื้อเพลิงผสมขาเข้า (Mixture velocity,  $V_{mix}$ ) จะถูกป้อนให้กับหัวเผาในช่วง  $5.89 \times 10^{-2}$  ถึง  $19.62 \times 10^{-2}$  m/s จนเมื่อไอดีไหลมาถึงวัสดุพอร์นที่ด้านบนสุดของห้องปรับการไหล การเผาไหม้จะเกิดขึ้น ในที่นี้จะใช้ pilot flame ในการจุดไฟ หลังจากเกิดสภาวะเสถียรของเปลวไฟ จะทำการวัดอุณหภูมิของผิวด้านล่างและด้านบน (Lower and upper surface temperatures:  $T_{s, low}$  and  $T_{s, up}$ ) ของวัสดุพอร์น พร้อมกันนี้ก็ทำการวัดรังสีที่แผ่ออกมาจากผิวด้านบนของวัสดุพอร์น ด้วยเครื่องมือวัดรังสีชนิดผิวหน้าสองสี สำหรับรายละเอียดของเครื่องมือวัดรังสีชนิดนี้ได้แสดงไว้แล้วเช่นกันในเอกสารอ้างอิงของ Krittacom และคณะ [7] ขอบเขตการเผาไหม้จะถูกควบคุมด้วยการเป่าดับ และการ

ย้อนกลับ ของเปลวไฟ โดยขอบเขตดังกล่าวแสดงอยู่ในรูปของอัตราส่วนสมมูล ( $\Phi$ ) ซึ่งการปรับค่าอัตราส่วนสมมูลนี้จะปรับพร้อมกันทั้งมีเทนและอากาศให้ได้สัดส่วนตามที่ต้องการ สำหรับคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุพอร์นแบบเซรามิกซ์ ชนิด Cordierite-alumina open-cellular ที่ถูกนำมาทดสอบเป็นหัวเผาแผ่นรังสีในงานวิจัยนี้ จะแสดงไว้ในตารางที่ 1



รูปที่ 1 แผนผังอุปกรณ์การทดลอง

ตารางที่ 1 คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุพอร์นแบบเซรามิกซ์ชนิด Cordierite-alumina open-cellular

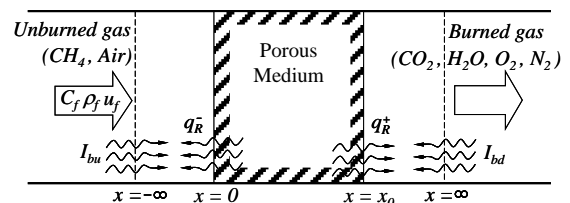
สัมประสิทธิ์	ค่ากายภาพ	
ค่าความพอร์น	$\phi$	0.837
จำนวนช่องต่อหนึ่งหน่วยนี้	PPI	6
ความหนา	$x_0$	0.0103 m
Extinction coefficient	$\beta^*$	115.4 $m^{-1}$
ความหนาเชิงแสง	$\tau_0$	1.188

#### 4. การวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์

##### 4.1 แบบจำลองกายภาพและสมการควบคุมหลัก

รูปที่ 2 จะแสดงแบบจำลองกายภาพและฟิสิกส์ของระบบหัวเผาแผ่นรังสีแบบวัสดุพอร์นชนิดเซรามิกซ์เซลูลาร์เปิด โดยแบบจำลองกายภาพนี้จะแบ่งออกเป็นสามส่วนหลัก ซึ่งส่วนที่หนึ่งและส่วนที่สามจะเป็นช่องว่างไม่มีวัสดุพอร์น (Free space) นิยามเป็น

ช่วงขาเข้า (Upstream region:  $-\infty < x < 0$ ) และช่วงขาออก (Downstream region:  $x_0 < x < \infty$ ) ตามลำดับ สำหรับส่วนตรงกลางเป็นวัสดุพอร์น (Porous medium region:  $0 < x < x_0$ ) นอกจากนี้ยังมีสมมติฐานที่สำคัญเพื่อใช้ในการคำนวณด้วย ดังรายละเอียดต่อไปนี้



รูปที่ 2 แบบจำลองกายภาพและฟิสิกส์ของระบบ

1) หัวเผาแผ่นรังสีชนิดนี้มีความหนาเท่ากับ  $x_0$  และที่ผิวขอบทั้งสองด้านของวัสดุพอร์นได้รับรังสีตกกระทบแบบวัตถุดำ (Blackbody radiation) ด้วยอุณหภูมิคงที่  $T_\infty$  (298 K)

2) แก๊สไอที่ส่งเข้าไปในระบบประกอบไปด้วยมีเทนและอากาศ (Methane and Air) ส่วนแก๊สไอเสียที่เกิดขึ้นจะประกอบไปด้วย ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $CO_2$ ) ไอน้ำ ( $H_2O$ ) ก๊าซออกซิเจน ( $O_2$ ) และก๊าซไนโตรเจน ( $N_2$ ) โดยพิจารณาแก๊สเหล่านี้เป็นแก๊สในอุดมคติ (Ideal gas) และไม่สามารถแผ่รังสีได้

3) วัสดุพอร์นพิจารณาให้เป็นวัตถุเทา (Gray medium) ไม่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (Non-catalytic medium) และมีคุณสมบัติในการแผ่รังสี (Emitting radiation) ดูดซับรังสี (Absorbing radiation) การกระจายรังสีแบบ Anisotropic (Anisotropically scattering radiation)

4) จลนศาสตร์ทางเคมีของกลไกการเผาไหม้จะคำนวณโดยใช้ กลไกเดี่ยวของสมการอาร์รีเนียส และคุณสมบัติทางกายภาพเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ

5) จะพิจารณาการเผาไหม้เป็นแบบหนึ่งมิติ ในช่วงสภาวะเสถียร และอัตราการไหลเชิงมวล (Mass flow rate:  $\rho_f u_f$ ) มีค่าคงที่ตลอดทั้งระบบ

ภายใต้สมมติฐานเหล่านี้การคำนวณการเผาไหม้จะวิเคราะห์ด้วยทฤษฎีเปลวไฟราบเรียบมาตรฐาน (A standard laminar flame theory) โดยมีสมการควบคุมหลัก ดังต่อไปนี้

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

$$\partial(\rho_f u_f) / \partial x = 0 \quad (1)$$

$$\rho_f = \bar{M}P / RT_f \quad (2)$$

สมการอนุรักษ์พลังงาน (The energy equation) และสมการอนุรักษ์มวล (The equation of species conservation) ในช่วงขาเข้า และช่วงขาออกของระบบ คำนวณจาก

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

$i = 1, 2, \dots, N-1,$

$$\rho_f u_f c_f \frac{\partial T_f}{\partial x} + \sum_{i=1}^N \rho_f Y_i v_i c_{f,i} \frac{\partial T_f}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left( k_f \frac{\partial T_f}{\partial x} \right) - \sum_{i=1}^N h_i \dot{W}_i M_i. \quad (4)$$

ส่วนในช่วงวัสดุพอรัน สมการอนุรักษ์พลังงาน จะพิจารณาทั้งสถานะแก๊สและของแข็ง ดังนี้

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

$(i = 1, 2, \dots, N-1),$

$$\rho_f u_f c_f \frac{\partial T_f}{\partial x} + \phi \sum_{i=1}^N \rho_f Y_i v_i c_{f,i} \frac{\partial T_f}{\partial x} - h_v (T_f - T_s) = \phi \frac{\partial}{\partial x} \left( k_f \frac{\partial T_f}{\partial x} \right) - \phi \sum_{i=1}^N h_i \dot{W}_i M_i, \quad (6)$$

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

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

สำหรับกลไกเดี่ยวของสมการอาร์เรเนียส ที่ใช้ในการคำนวณครั้งนี้จะเป็นสมการเดียวกันกับที่ใช้ในเอกสารอ้างอิงของ Krittacom และคณะ [7] นั่นคือ

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

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

สภาวะขอบเขต (Boundary conditions) ในการคำนวณสมการหลักควบคุม (Governing equations) กำหนดโดย

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

เพื่อให้สามารถคำนวณสมการอนุรักษ์พลังงานสถานะของแข็งได้ สมการอนุพันธ์ของฟลักซ์การแผ่รังสี (Divergence radiative heat flux,  $\partial q_{Rx} / \partial x$ ) และ Incident radiation (G) จำเป็นต้องทราบคำตอบ ดังนั้นในการหาผลลัพธ์ปริมาณทั้งสองสมการโดยประมาณของ  $P_1$  (The  $P_1$  approximation) จึงได้ถูกนำมาแก้ปัญหาโดยใช้สมการโดยประมาณ  $P_1$  และขอบเขตการคำนวณสามารถแสดงได้ดังนี้

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

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

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

นอกจากนี้ในการคำนวณหาปริมาณการแผ่รังสีออกมาจากผิวด้านบนของหัวเผาชนิดนี้ นั้น จะคำนวณมาจากฟลักซ์การแผ่รังสีไปข้างหน้าตำแหน่งผิวของด้านขาออกของระบบ นั่นคือ

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

#### 4.2 วิธีการคำนวณ

เพื่อความสะดวกในการวิเคราะห์ สมการเหล่านี้จะถูกจัดให้อยู่ในรูปแบบสมการไร้นิพจน์ หลังจากนั้นสมการเชิงอนุพันธ์ต่างๆ ก็ถูกจัดรูปแบบอีกครั้งให้อยู่ในรูปการคำนวณผลต่างโดยปริยาย (Implicit finite difference equation) ในการคำนวณสมการอนุพันธ์พลังงานสถานะแก๊ส และสมการอนุพันธ์มวล ช่วงขาเข้าและขาออก (Upstream and downstream region) ของแบบจำลองกายภาพจะถูกแบ่งออกเป็นช่องเล็กที่เท่าๆ กัน (Node) จำนวน 100 ช่องทั้งสองช่วง แต่ในช่วงวัสดุพอร์ซเลน จะถูกแบ่งเป็น 200 ช่อง รวมไปถึงการคำนวณสมการอนุพันธ์พลังงานสถานะของแข็ง ก็ยังคงแบ่งเป็น 200 ช่องเช่นกัน ส่วนการคำนวณสมการโดยประมาณ  $P_r$  จะแบ่งช่วงวัสดุพอร์ซเลนออกเป็น 400 ช่อง

การคำนวณจะเริ่มด้วยการสมมติโครงสร้างอุณหภูมิของแก๊สที่มีค่าของอุณหภูมิสูงสุด สูงกว่าจุดติดไฟ (Ignition point) ของมีเทนและเพียงพอต่อการทำให้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เกิดการเผาไหม้ หลังจากนั้นจะได้ผลลัพธ์ของ  $G$  และ  $q_{rx}$  ออกมาจากการคำนวณด้วยวิธี Staggered lattice point [8] ในขณะเดียวกันสัดส่วนมวล ( $Y_i$ ) ของก๊าซต่างๆ ก็ได้ผลลัพธ์ออกมาเช่นเดียวกัน หลังจากที่ได้ผลลัพธ์ของ  $Y_i$ ,  $G$  และ  $q_{rx}$  แล้ว ค่าทั้งหมดจะถูกส่งไปใช้ในการคำนวณของสมการอนุพันธ์พลังงานเพื่อหา  $T_f$  และ  $T_s$  ซึ่งการหาค่าตอบจะกระทำด้วยวิธีการกำจัดแบบเกาส์ (Gaussian elimination) ผลลัพธ์ของอุณหภูมิทั้งสองจะนำกลับไปแทนที่ค่าในการหาค่าของ  $Y_i$ ,  $G$  และ  $q_{rx}$  ต่อไปอย่างต่อเนื่อง จนกว่าผลเปรียบเทียบของ

อุณหภูมิระหว่างผลลัพธ์ก่อนหน้ากับที่คำนวณได้ใหม่ มีค่าความแตกต่างน้อยกว่า  $10^{-4}$  จึงหยุดการคำนวณ

### 5. ผลและการวิเคราะห์

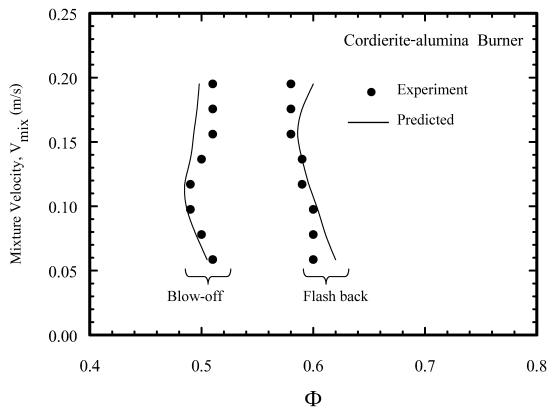
#### 5.1 ขอบเขตการเผาไหม้และโครงสร้างอุณหภูมิ

สภาวะขอบเขตเปลวไฟเสถียรของหัวเผาแบบวัสดุพอร์ซเลนชนิดเซรามิกซ์ Cordierite-alumina open-cellular ถูกแสดงไว้ในรูปที่ 3 เมื่อขอบเขตการเผาไหม้ คือปรากฏการณ์ที่เปลวไฟ (Flame) เคลื่อนตัวออกจากผิวด้านบนของแผ่นวัสดุพอร์ซเลน และจะดับ (Extinguishment) ในที่สุด โดยแสดงผ่านอัตราส่วนสมมูล ( $\Phi$ ) มีค่าอยู่ในช่วงประมาณ 0.48 ถึง 0.5 ในทางตรงกันข้าม ถ้าเปลวไฟเคลื่อนตัวลงออกจากผิวด้านล่างของแผ่นวัสดุพอร์ซเลน และเกิดการดับ นั่นก็คือขอบเขตการย้อนกลับ ซึ่งจะสูงกว่า 0.62 โดยอัตราส่วนสมมูลการเผาไหม้ของหัวเผาแบบนี้ จะมีค่าต่ำกว่าการเผาไหม้แบบปกติทั่วไป (Conventional combustion) ของเชื้อเพลิงมีเทน ซึ่งจะมีค่าเท่ากับ 0.53 อาจเนื่องมาจากจุดเด่นของวัสดุพอร์ซเลน ที่มีพื้นที่ผิวสัมผัสต่อหน่วยปริมาตรสูง ทำให้การเผาไหม้ในสภาวะไอดีที่บางกว่า (Leaner combustion) แบบปกติทั่วไป สามารถเกิดขึ้นได้ นอกจากนี้ผลการเปรียบเทียบระหว่างการทดลอง และการคำนวณด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จะมีความสอดคล้องกันได้เป็นที่น่าพอใจทั้งการเผาไหม้และการย้อนกลับ

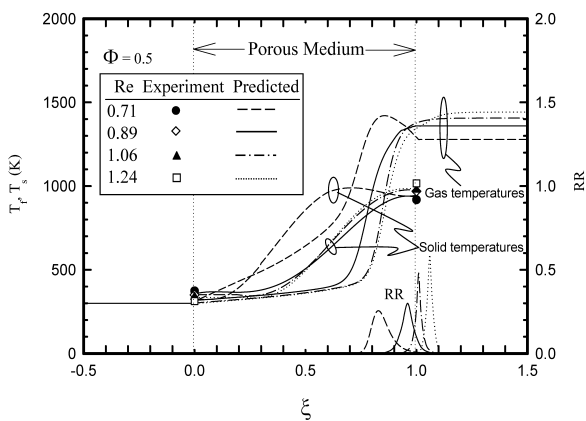
#### 5.2 โครงสร้างอุณหภูมิ

รูปที่ 4 จะแสดงอิทธิพลของอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงผสมก่อน (Re) ที่มีต่อโครงสร้างอุณหภูมิของทั้งสถานะแก๊สและของแข็งในระบบการเผาไหม้ และอัตราการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ (Reaction rate, RR) ที่สภาวะอัตราส่วนสมมูลเท่ากับ 0.5 จากรูปที่ 4 จะพบว่าตำแหน่งของอุณหภูมิแก๊สสูงสุดจะเกิดขึ้นในบริเวณใกล้ด้านขาออก หรือผิวหน้าด้านบน (Upper surface) ของวัสดุพอร์ซเลน และจะเคลื่อนตัวไปอยู่ที่บริเวณผิวหน้าด้านบนของหัวเผาเมื่อ Re เพิ่มขึ้น

ดังจะสังเกตเห็นได้จากตำแหน่งของอัตราการเกิดปฏิกิริยา (RR) ที่เคลื่อนตัวตาม ค่า Re ที่เพิ่มขึ้น จากปรากฏการณ์นี้อาจกล่าวได้ว่าเปลวไฟของหัวเผาแบบวัสดุพรุนชนิดเซรามิกซ์เซลูลาร์เปิดสามารถเกิดขึ้นได้อย่างอิสระบริเวณผิวด้านบนของวัสดุพรุน โดยเกิดขึ้นได้ทั้งภายในและภายนอกวัสดุพรุน ตามการปรับค่า Re สำหรับผลเปรียบเทียบ ของอุณหภูมิของแข็งที่ผิวหน้าทั้งสองด้านของวัสดุพรุนระหว่าง การคำนวณด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และค่าที่วัดได้จากการทดลองมีความสอดคล้องกันเป็นอย่างดี



รูปที่ 3 ขอบเขตเปลวไฟเสถียร

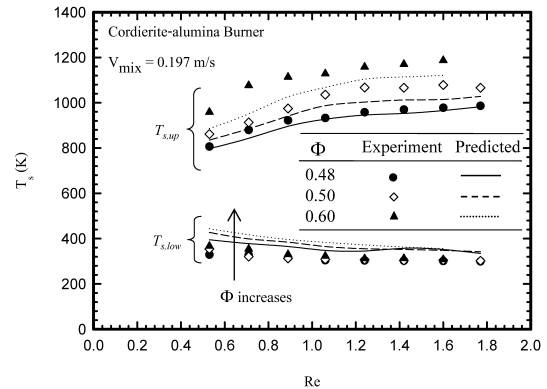


รูปที่ 4 โครงสร้างอุณหภูมิของระบบ ที่ได้รับอิทธิพลจากอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงผสมก่อน (Re)

### 5.3 อุณหภูมิผิวและฟลักซ์แผ่รังสีไปข้างหน้า

ตัวอย่างของอุณหภูมิผิวของวัสดุพรุนและค่าไร้หน่วยของฟลักซ์แผ่รังสีไปข้างหน้า ที่สภาวะ

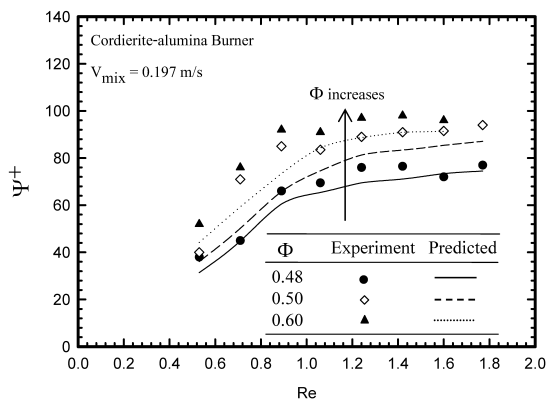
ความเร็วของเชื้อเพลิงผสม (Mixture velocity,  $V_{mix}$ ) เท่ากับ 0.197 m/s ได้ถูกแสดงไว้ในรูปที่ 5 และ 6 ตามลำดับ จากรูปที่ 5 อุณหภูมิผิวด้านบนของวัสดุพรุน ( $T_{s, up}$ ) จะสูงขึ้นเล็กน้อยตามการเพิ่มขึ้นของ Re แต่ในกรณีของอุณหภูมิผิวด้านล่างของวัสดุพรุน ( $T_{s, low}$ ) กลับลดลงเล็กน้อยเมื่อ Re เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าอุณหภูมิผิวด้านบนของวัสดุพรุน จะสูงขึ้นตามปริมาณที่เพิ่มขึ้นของ  $\Phi$  ซึ่งปรากฏการณ์เช่นนี้เป็นไปตามกายภาพการเผาไหม้จริง เนื่องจากระบบได้รับเชื้อเพลิงที่เพิ่มหรือปริมาณออกซิเจนที่หนาขึ้น ย่อมทำให้การเผาไหม้มีความรุนแรงและสมบูรณ์ยิ่งขึ้น ส่งผลให้อุณหภูมิในการเผาไหม้มีค่าสูงตามไปด้วย



รูปที่ 5 เปรียบเทียบอุณหภูมิผิวของวัสดุพรุนระหว่างการคำนวณกับผลการทดลอง

สำหรับกรณีรูปที่ 6 จะพบว่า ค่าไร้หน่วยฟลักซ์การแผ่รังสีไปข้างหน้า ( $\Psi^+$ ) จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วตาม Re และจะเพิ่มขึ้นอีกเล็กน้อยหรือมีค่าเกือบคงที่หลังจาก Re มีค่ามากกว่า 1 และหากพิจารณาที่ค่า Re คงที่ จะได้ว่า  $\Psi^+$  เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วตาม  $\Phi$  ในการเปรียบเทียบผลที่คำนวณได้ทั้งสองรูปกับการทดลองจะให้ผลความสอดคล้องเชิงแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน แต่ผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลองจะมีค่าที่สูงกว่า อาจเนื่องมาจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ไม่สามารถคำนวณความซับซ้อนของกระบวนการเผาไหม้จริง การถ่ายเทความร้อนของวัสดุพรุน และการแผ่รังสีได้อย่างครบถ้วน ทำให้ค่าที่ได้จากการคำนวณมีค่าน้อยกว่าการทดลอง





รูปที่ 6 เปรียบเทียบค่าไร้หน่วยฟลักซ์แผ่รังสี  
ไปข้างหน้าระหว่างการคำนวณกับผลการทดลอง

## 6. สรุปผล

จากผลการศึกษาที่ได้รับ ประเด็นสำคัญของ  
งานวิจัยนี้ สามารถสรุปได้ตามหัวข้อดังต่อไปนี้

1) สภาวะเสถียรของหัวเผาแผ่รังสีจะอยู่ในช่วง  
อัตราส่วนสมมูลการเผาดับประมาณ 0.48 ถึง 0.5 และการย้อนกลับของเปลวไฟจะต่ำกว่า 0.62

2) เปลวไฟจะเสถียรอยู่บริเวณผิวด้านขาออก  
ของแผ่นวัสดุพอร์ซเซรามิกซ์เซลูลาร์เปิด

3) อุณหภูมิผิวด้านขาเข้าและขาออกของหัว  
เผาวัสดุพอร์ซเซรามิกซ์แสดงในรูปของฟลักซ์  
การแผ่รังสีไปข้างหน้า ( $\Psi^+$ ) จะขึ้นอยู่กับอัตราส่วน  
สมมูล ( $\Phi$ ) และอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงผสมก่อน (Re)

4) ผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎี  
ของฟลักซ์การแผ่รังสีไปข้างหน้า ( $\Psi^+$ ) และอุณหภูมิ  
ผิวของหัวเผาแบบวัสดุพอร์ซเซรามิกซ์ ( $T_s$ ) มีความสอดคล้องกัน  
อย่างสมเหตุสมผลกับผลการทดลองที่ได้

## 7. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบพระคุณ Mr. Shinichi  
Saito จากมหาวิทยาลัยโออิตะ ประเทศญี่ปุ่น ในความ  
อนุเคราะห์จัดส่งอุปกรณ์การทดลองบางอย่าง เพื่อใช้  
ในการศึกษาวิจัย จนทำให้งานวิจัยชิ้นนี้สำเร็จลุล่วงไป  
ได้ด้วยดี

## 8. เอกสารอ้างอิง

- [1] Echigo, R., Yoshizawa, Y., Hanamura, K. and Tomimura, T. (1986). Analytical and experimental studies on radiative propagation in porous media with internal heat generation, paper present in *Proceeding of the 8<sup>th</sup> International Heat Transfer Conference 1986*, San Francisco, USA.
- [2] Hanamura, K. and Echigo, R. An analysis of flame stabilization mechanism in radiation burners, *Warme-und Stoffubertragung*, vol. 26, 1991, pp. 377-383.
- [3] Khanna, V., Goel, R. and Ellzey, J. L. Measurements of emissions and radiation for methane combustion within a porous medium burner, *Combustion Science and Technology*, vol. 99, 1994, pp. 133-142.
- [4] Mital, R., Gore, J. P. and Viskanta, R. A study of the structure of submerged reaction zone in porous ceramic radiant burners, *Combustion and Flame*, vol. 111, 1997, pp. 175-184.
- [5] Pereira, J. C.F. and Zhou, X. Y. Comparison of four combustion models for simulating the premixed combustion in inert porous media, *Fire and Materials*, vol. 22, 1998, pp. 187-197.
- [6] Bouma, P. H. and De Goey, L. P. H. Premixed combustion on ceramic foam burner, *Combustion and Flame*, vol. 119, 1999, pp. 133-143.
- [7] Krittacom, B. and Kamiuto, K. Radiation emission characteristics of an open-cellular porous burner, *JSME Journal of Thermal Science and Technology*, vol. 4, 2009, pp. 13-24.
- [8] Kamiuto, K., Saito, S. and Ito, K. Numerical model for combined conductive and radiative heat transfer in annular packed beds, *Numerical Heat Transfer, Part A*, vol. 23, 1993, pp. 433-443.