

การศึกษาการเผาไหม้ของก๊าซมีเทนและอากาศผสมในวัสดุพรุนแบบสองส่วน  
ที่มีการสร้างความร้อนด้วยวิธีเชิงตัวเลข  
Investigations of Premixed Methane-air Combustion in Two-section  
Porous Media with Heat Generation by Numerical Method

โสภณ สิ้นสร้าง และ บัณฑิต กฤตาคม\*

ห้องปฏิบัติการวิจัยในเทคโนโลยีของวัสดุพรุน สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน 744 ถนนสุรนารายณ์ ตำบลในเมือง อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา รหัสไปรษณีย์ 30000  
\*ติดต่อ: sophon.si@rmuti.ac.th, เบอร์โทรศัพท์ 0624939919

### บทคัดย่อ

การศึกษาเชิงตัวเลขของอิทธิพลของการเผาไหม้ของส่วนผสมของมีเทน-อากาศในเตาเผาวัสดุพรุนแบบสองส่วน โดยใช้ระเบียบวิธีผลต่างแบบจำกัด (Finite Difference Method, FDM) เพื่อแก้ปัญหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบไม่คงที่ของการเผาไหม้ เพื่อแสดงให้เห็นปรากฏการณ์ของการเผาไหม้ในวัสดุพรุน ผ่านสมการอนุรักษ์มวล โมเมนตัม และพลังงาน ความร้อนที่ไม่มีสมดุลระหว่างก๊าซกับของแข็งจะพิจารณารวมเป็นสมการเดียว วัสดุพรุนที่เลือกใช้จะเป็นชนิดเม็ดกลมอัดแน่นที่มีความพรุนแตกต่างกันทั้งสองส่วน จากการศึกษาพบว่าโครงสร้างทางอุณหภูมิมักมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยในทุก ๆ ความเร็วและอุณหภูมิทางเข้า ( $u_{in}$  และ  $T_{in}$ ) หรือของผสมระหว่างแก๊สมีเทนกับอากาศ แต่จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อค่าความร้อน ( $q$ ) ในชั้นวัสดุพรุนที่สองมีระดับสูงขึ้น

**คำหลัก:** วัสดุพรุน ; การเผาไหม้แบบพรีมิกซ์; วิธีเชิงตัวเลข ; แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

### Abstract

A numerical study of the influences combustion of methane-air mixtures in a two-section porous media combustor is performed. The finite difference method is used to solve a two-dimensional transient mathematical model of the combustion in order to reveal the phenomenon of the combustion in porous media. The conservative equations of mass, momentum and energy are solved. The spherical pack-bed type of porous media is applied. The results show that the temperature profile is little changed in all range of input velocity and temperature of premixed between methane and air. On the other hand, the trend of temperature is increased with increasing heat ( $q$ ) within the second porous.

**Keyword :** porous media ; premixed combustion ; numerical method ; mathematical model

### 1. บทนำ

การศึกษาเกี่ยวกับกลไกการถ่ายเทความร้อนจากการเผาไหม้ในชั้นวัสดุพรุนได้ศึกษาอย่างต่อเนื่องในช่วงราว 3 ทศวรรษที่ผ่านมา [1-5] ซึ่งจะมีทั้งการทดลองและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เนื่องจากมีการประยุกต์ใช้ประโยชน์จากวัสดุพรุนทางด้านความร้อนและการเผาไหม้อย่างมากมาย เช่น การผลิตกระดาษ อุตสาหกรรมพอลิเมอร์ การผลิตไอน้ำ การหลอมเหล็ก การปรับปรุงเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือน เป็นต้น [6, 7]

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จึงเป็นอีกวิธีที่นิยมดำเนินการอย่างกว้างขวาง ในการศึกษาเกี่ยวกับกลไกหรือพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนจากการเผาไหม้ในชั้นวัสดุพรุน โดยเฉพาะกรณีที่มีของไหลไหลเข้าไปในวัสดุพรุนที่มีความร้อนอยู่ [8, 9] อย่างไรก็ตามมองค้ความรู้ที่ได้รับนี้ ยังถือว่าไม่ครบถ้วนและขาดข้อมูลที่สำคัญในกรณีอื่น ๆ อีก

จากข้อจำกัดดังกล่าวข้างต้นบทความวิจัยนี้จึงมีแนวคิดที่จะทำการศึกษาอิทธิพลของการเผาไหม้ของส่วนผสมของมีเทน-อากาศในเตาเผาวัสดุพรุนแบบสองส่วน โดยใช้ระเบียบวิธีผลต่างแบบจำกัด (Finite Difference Method, FDM)

## 2. รูปแบบกายภาพและสมการควบคุมหลัก

รูปที่ 1(ก) แสดงรูปแบบทางกายภาพของการศึกษาครั้งนี้ โดยอธิบายได้ว่าจะเป็นการเผาไหม้แบบผสมมาก่อนระหว่างแก๊สมีเทนกับออกซิเจนและไหลมายังห้องเผาไหม้ที่มีวัสดุพอรุนสองส่วนโดยส่วนแรกจะมีความพอรุน  $\epsilon_1$  และจะไหลต่อไปเกิดการเผาไหม้ในชั้นวัสดุพอรุนที่สองที่มีค่าความพอรุนเท่ากับ  $\epsilon_2$  โดยจะกำหนดให้เปลวไฟเสถียรจะติดอยู่ที่กึ่งกลางของชั้นวัสดุพอรุนที่สอง

สำหรับรูปที่ 1(ข) จะเป็นรูปแบบการคำนวณของบทความนี้ และหากพิจารณาพร้อมกับสมมุติฐานดังต่อไปนี้ คือ 1) การไหลอยู่ในแบบหนึ่งมิติและเป็นการไหลแบบไม่คงที่ (Unsteady state) 2) คุณสมบัติทางกายภาพคงที่ 3) กำหนดให้เปลวไฟเสถียรเป็นเสมือนแหล่งความร้อนที่อยู่ในชั้นวัสดุพอรุนที่สองมีค่าเป็น  $q_s$  4) การคำนวณพิจารณาสมการอนุรักษ์พลังงานเป็นแบบสมการเดียว จะทำให้มีสมการควบคุมหลัก (สมการอนุรักษ์มวล โมเมนตัม และพลังงาน) และขอบเขตการคำนวณ คือ สมการอนุรักษ์มวล :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\rho \frac{\partial u}{\partial x} \quad (1)$$

เมื่อ  $\rho$  = ความหนาแน่นของแก๊ส ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

$u$  = ความเร็ว ( $\text{m}/\text{s}$ )

สมการโมเมนตัม :

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{\partial(\rho u^2)}{\partial x} - \frac{\partial P}{\partial x} \quad (2)$$

เมื่อ  $P$  = ความดัน ( $\text{N}/\text{m}^2$ )

สมการพลังงาน :

$$\rho_s c_{ps} \frac{\partial T_s}{\partial t} = -\rho_s c_{ps} u_s \frac{\partial T_s}{\partial x} + \dot{q}_s + k_{eff} \frac{\partial^2 T_s}{\partial x^2} \quad (3)$$

เมื่อ  $\dot{q}_s$  = heat generation ( $\text{W}/\text{m}^3$ )

$k_{eff}$  = การนำความร้อนประสิทธิผล ( $\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$ )

$c_{ps}$  = ค่าความจุความร้อนที่ความดันคงที่ของวัสดุพอรุน ( $\text{J}/\text{kg}\cdot\text{K}$ )

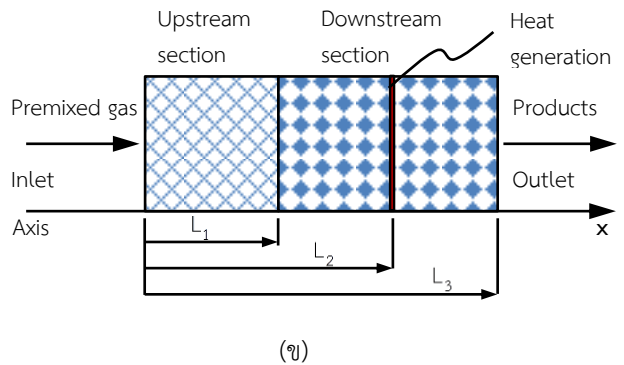
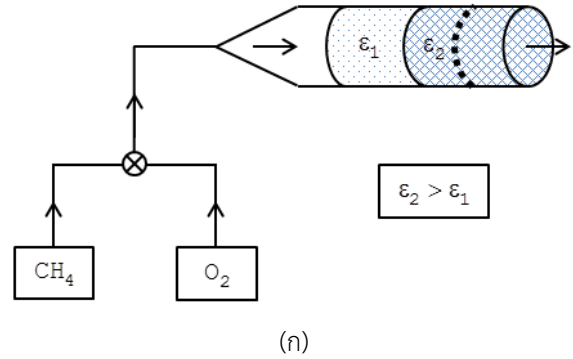
เงื่อนไขขอบเขต :

$$x = 0 ; \quad T_s(x=0) = T_{in} \quad (4ก)$$

$$x = L_1 ; \quad \left. \frac{dT_s}{dx} \right|_{x=L_1} = 0 \quad (4ข)$$

$$x = L_2 ; \quad \dot{q} = -k \left. \frac{dT_s}{dx} \right|_{x=L_2} \quad (4ค)$$

$$x = L_3 ; \quad \left. \frac{dT_s}{dx} \right|_{x=L_3} = 0 \quad (4ง)$$



รูปที่ 1 รูปแบบกายภาพและการคำนวณ

## 3. วิธีการคำนวณ

การคำนวณหรือหาผลเฉลยของสมการที่ (1) จะดำเนินการโดยจัดสมการเหล่านี้ให้อยู่ในรูปไร้มิติ หลังจากนั้นเลือกใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขแบบระเบียบวิธีผลต่างแบบจำกัด (Finite Difference Method, FDM) เพื่อแก้ปัญหาที่แสดงในรูปที่ 2 และในการคำนวณจะใช้เกณฑ์ในการตัดลีนคำตอบด้วย ค่าผลต่างระหว่างค่าคำตอบก่อนหน้ากับค่าปัจจุบันน้อยกว่า 0.0001

ตารางที่ 1 ตัวแปรทางกายภาพของวัสดุพอรุน

ตัวแปร	วัสดุพอรุนที่มีรูขนาดเล็ก (ขาเข้า)	วัสดุพอรุนที่มีรูขนาดใหญ่ (ขาออก)
	ความยาว (L)	5 cm
ความพอรุน ( $\epsilon$ )	0.36	0.45
ค่าการนำความร้อนประสิทธิผล ( $k_{eff}$ )	28.5 W/m-K	27.3 W/m-K
ความร้อนจำเพาะ ( $c_p$ )	650 J/kg-K	650 J/kg-K

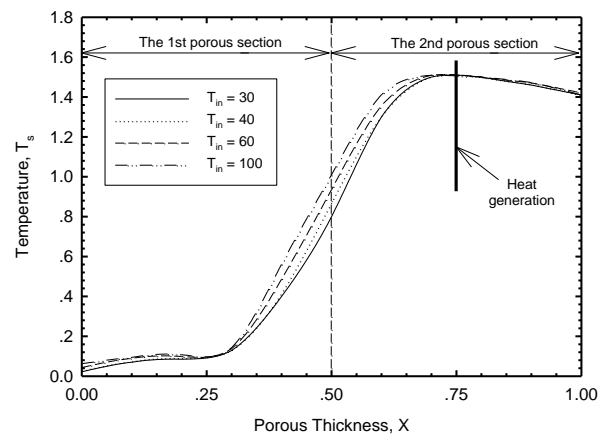
$$\begin{bmatrix} -(2A+1) & A & 0 & 0 \\ 0 & -(A+1) & A & 0 \\ 0 & 0 & -(A+1) & A \\ 0 & 0 & A & -(A+1) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_{s(1)}^{t+1} \\ \theta_{s(2)}^{t+1} \\ \theta_{s(3)}^{t+1} \\ \theta_{s(4)}^{t+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta\tau Q_f - \theta_{s(1)}^t - A \\ \Delta\tau Q_f - \theta_{s(2)}^t \\ \Delta\tau Q_f - \theta_{s(3)}^t + AH\Delta X \\ \Delta\tau Q_f - \theta_{s(4)}^t \end{bmatrix}$$

รูปที่ 2 เมทริกซ์การคำนวณหาผลเฉลย

#### 4. ผลการคำนวณ

##### 4.1 อิทธิพลของความเร็วส่วนผสม ( $u_{in}$ )

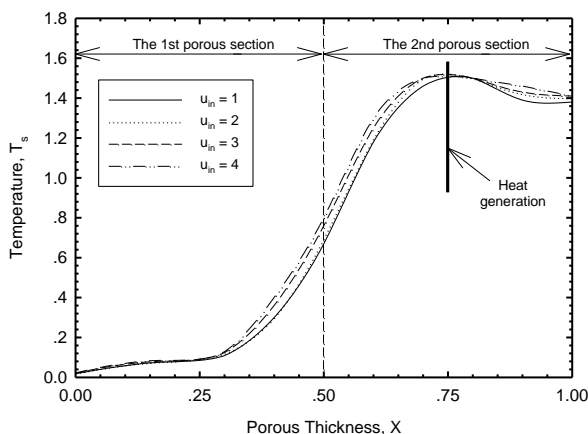
รูปที่ 3 แสดงอิทธิพลตัวแปรไร้หน่วยของความเร็วทางเข้า ( $u_{in}$ ) ของผสมระหว่างแก๊สมีเทนกับอากาศต่ออุณหภูมิของแข็งภายในวัสดุพอร์นทั้งสองส่วน ( $T_s$ ) พบว่าเมื่อความเร็วเพิ่มขึ้นในช่วงแรกก่อนถึงตำแหน่งการให้ค่าความร้อน ( $q$ ) อุณหภูมิ  $T_s$  จะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยตาม  $u_{in}$  เพราะหากส่วนผสมมีความเร็วสูงจะหมายถึงการส่งเชื้อเพลิงเข้าไปเผาไหม้ในปริมาณที่เพิ่มมากขึ้นจึงสามารถเกิดการส่งถ่ายพลังงานได้ดีกว่า แต่เมื่อถึงตำแหน่ง  $q$  จะมีแนวโน้มใกล้เคียงกันและลดลงเล็กน้อยเพราะได้รับพลังงานเท่ากัน



รูปที่ 4 อิทธิพลของ  $T_{in}$  ต่อ  $T_s$

##### 4.2 อิทธิพลของอุณหภูมิส่วนผสม ( $T_{in}$ )

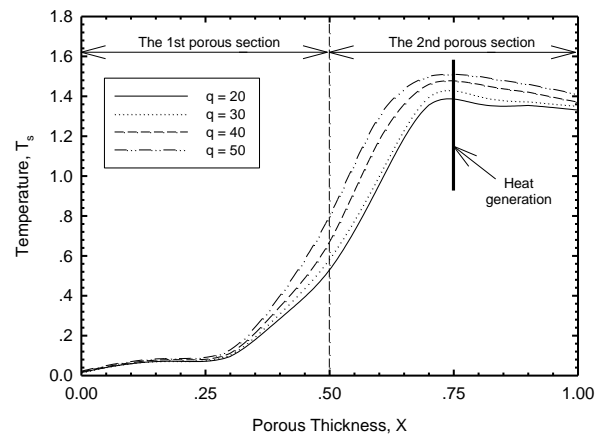
รูปที่ 4 แสดงอิทธิพลตัวแปรไร้หน่วยของอุณหภูมิทางเข้า ( $T_{in}$ ) ของผสมระหว่างแก๊สมีเทนกับอากาศต่ออุณหภูมิของแข็งภายในวัสดุพอร์นทั้งสองส่วน ( $T_s$ ) พบว่าเมื่อ  $T_{in}$  เพิ่มขึ้นในช่วงแรกก่อนถึงตำแหน่ง  $q$  ระดับ  $T_s$  จะสูงขึ้นตาม  $T_{in}$  เพราะเกิดจากวัสดุพอร์นได้รับความร้อนที่สูงขึ้น แต่เมื่อถึงตำแหน่ง  $q$  ระดับ  $T_s$  จะมีแนวโน้มใกล้เคียงกันแทบไม่เปลี่ยนแปลงเพราะได้รับพลังงานเท่ากัน



รูปที่ 3 อิทธิพลของ  $u_{in}$  ต่อ  $T_s$

##### 4.3 อิทธิพลของความร้อนในวัสดุพอร์นชั้นที่สอง ( $q$ )

รูปที่ 5 แสดงอิทธิพลตัวแปรไร้หน่วยค่าความร้อน ( $q$ ) ต่ออุณหภูมิของแข็งภายในวัสดุพอร์นทั้งสองส่วน ( $T_s$ ) พบว่าเมื่อ  $q$  เพิ่มขึ้น ระดับ  $T_s$  จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนในวัสดุพอร์นทั้งสองส่วน เนื่องจากระบบได้รับพลังงานมากขึ้นย่อมเกิดการส่งถ่ายความร้อนในปริมาณที่เข้มข้นมากขึ้น



รูปที่ 5 อิทธิพลของ  $q$  ต่อ  $T_s$

### 5. สรุปผลการศึกษา

- 1) ระดับ  $T_s$  จะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยตาม  $u_{in}$  ที่เพิ่มขึ้นในช่วงก่อนถึงตำแหน่ง  $q$  แต่เมื่อถึงตำแหน่ง  $q$  ระดับ  $T_s$  จะมีแนวโน้มใกล้เคียงกันและลดลงเล็กน้อย
- 2) ระดับ  $T_s$  จะสูงขึ้นตาม  $T_{in}$  ที่เพิ่มขึ้นในช่วงก่อนถึงตำแหน่ง  $q$  แต่เมื่อถึงตำแหน่ง  $q$  ระดับ  $T_s$  จะมีแนวโน้มใกล้เคียงกันแทบไม่เปลี่ยนแปลง
- 3) ระดับ  $T_s$  จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนใน วัสดุพอรุนทั้งสองส่วนเมื่อระบบได้รับ  $q$  เพิ่มขึ้น

### 6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนบทความขอขอบพระคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน ที่ได้สนับสนุนงบประมาณและค่าใช้จ่ายเพื่อนำเสนอในครั้งนี้

### 7. 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 presented in *Proceeding of the 8<sup>th</sup> International Heat Transfer Conference*, pp. 827-832.
- [2] Chaffin, C., Koenig, M., Koeroghlian, M. M., Matthews, R. D., Howell, J. R. and Nichols, S. P. (1991). Experimental investigation of premixed combustion within highly porous media, paper presented in *Proceeding of the ASME/JSME Thermal Energy Joint Conference*, Vol. 4, pp. 219-224.
- [3] Bouma, P. H. and De Goey, L. P. H., Premixed combustion on ceramic foam burner, *Combustion and Flame*, 1999, Vol. 119, pp. 133-143.
- [4] Bara, A. J. and Ellzey, J. L., Heat recirculation and heat transfer in porous burners, *Combustion and Flame*, 2004, Vol. 137, pp. 230-241.
- [5] Krittacom, B. and Kamiuto, K., Radiation emission characteristics of an opencellular porous burner, *JSME journal of Thermal Science and Technology*, Vol. 4(1), pp. 13-24.

[6] บัณฉิต กฤตาคม, หัวพ่นไฟอุตสาหกรรมและการประยุกต์ใช้วัสดุพอรุนในหัวพ่นไฟ, *วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสยาม*, ปีที่ 12 หน้าที่ 76-87.

[7] Krittacom, B. and Sinjapo, S. (2018). Development on thermal efficiency of domestic cooking burner using open-cellular porous media type of cover, paper presented in *the 4<sup>th</sup> International Conference on Composite Materials and Material Engineering 2019 (ICCMME2019)*, Tokyo, Japan, 19 - 22 January.

[8] Yoshizawa, Y., Ssaki, K. and Echigo, R., Analytical study of the structure of radiation controlled flame, *Int. J. Heat mass Transfer*, 1988, Vol. 31, pp. 311-319.

[9] Krittacom, B. (2018). Application of Thermoelectric (TE) Principle on the Cyclic Reversal Flow Combustion of Porous Burner (PB) (Invited speaker), paper presented in *the 5<sup>th</sup> Southeast Asia Conference on Thermoelectrics (SACT2018)*, Siem Reab, Cambodia, 14 – 17 December, 2018.