



KKU Engineering Journal

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

การศึกษาสมบัติของวัสดุพอร์นที่มีผลต่อสมรรถนะของหัวเผาวัสดุพอร์นแบบผสมล่าช้าด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

A numerical study of porous medium properties effect on late mixing porous burner performance

กนกกาญจน์ ว่องวัชรพร*

Kanokkarn Wongwatcharaphon*

ศูนย์วิจัยเทคโนโลยีการเผาไหม้และพลังงานทางเลือก วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
Combustion Technology and Alternative Energy Research Center (CTAE), College of Industrial technology, King Mongkut's
University of Technology North Bangkok, Thailand, 10800.

Received February 2013

Accepted April 2013

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ คือ ศึกษาอิทธิพลของสมบัติวัสดุพอร์นที่ทำหน้าที่เป็นห้องเผาไหม้ (PC) ในหัวเผาวัสดุพอร์นแบบผสมล่าช้า (LMPB) ที่มีต่อโครงสร้างทางความร้อน และประสิทธิภาพการแผ่รังสี ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พิจารณาการไหลและการถ่ายเทความร้อนแบบ 1 มิติ ปฏิกริยาการเผาไหม้แบบ Single step first order reaction โดยมีตัวแปรที่ศึกษา คือ ความพอร์น (Porosity) และสัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีความร้อน (Absorption coefficient) โดยสมรรถนะของ LMPB จะถูกแสดงอยู่ในรูปของอุณหภูมิการเผาไหม้สูงสุด และประสิทธิภาพการแผ่รังสีความร้อน จากการศึกษาสรุปได้ว่า วัสดุพอร์นที่มีค่าความพอร์นอยู่ในช่วง 0.4 - 0.6 และสัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีความร้อนเท่ากับ 100 มีความเหมาะสมที่สุดในการทำหน้าที่เป็นห้องเผาไหม้ของ LMPB

คำสำคัญ : การเผาไหม้ ผสมล่าช้า วัสดุพอร์น

Abstract

The objective of this research is to investigate the effect of properties of porous combustor (PC) of the late mixing porous burner (LMPB) on the thermal structure and radiant output efficiency by mean of numerical modeling. The flow and heat transfer are one-dimensional. The combustion reaction is considered as a single-step first order reaction. The parametric study is a porosity and absorption coefficient. The results indicate that the optimum property of porous medium that is used as porous combustor of LMPB is a porosity in the range of 0.4 - 0.6 and absorption coefficient is 100.

Keywords : Combustion, Late mixing, Porous medium

*Corresponding author:

Email address: kwpp@kmutnb.ac.th

1. บทนำ

ภารกิจด้านพลังงาน ซึ่งมุ่งเน้นการใช้เชื้อเพลิงที่มีประสิทธิภาพและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม เพื่อตอบสนองทั้งด้านความมั่นคงทางพลังงาน เศรษฐกิจ และสิ่งแวดล้อม เป็นสิ่งสำคัญที่ผลักดันให้เกิดการศึกษาถึงแนวทางการบริหารจัดการด้านพลังงานที่มีประสิทธิภาพทั้งในระดับประเทศและในระดับจังหวัด เช่น ในงานวิจัยของ Suntivarakorn และคณะ [1] รวมถึงการสร้างสรรค์นวัตกรรมการเผาไหม้ใหม่ๆ หัวเผาวัสดุพูนนับเป็นเทคโนโลยีทางด้านการเผาไหม้ที่ได้รับความสนใจและถูกพัฒนาขึ้นในช่วงไม่กี่ทศวรรษที่ผ่านมา เนื่องจากการเผาไหม้ภายในวัสดุพูนนั้น ส่วนผสมของเชื้อเพลิงกับอากาศ จะได้รับการอุ่นด้วยความร้อนจากไอเสียโดยอาศัยการหมุนเวียนความร้อนผ่านโครงสร้างของวัสดุพูนเอง โดยไม่จำเป็นต้องมีการติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเพิ่มเติมในกระบวนการเผาไหม้แต่อย่างใด ซึ่งจะทำให้ได้การเผาไหม้ในลักษณะ excess enthalpy flames ความเร็วของเปลวไฟสูงกว่าการเผาไหม้ในบรรยากาศเปิดทั่วไป ขอบเขตการเผาไหม้กว้าง ประสิทธิภาพการแผ่รังสีสูง ในขณะที่การปลดปล่อยมลภาวะต่ำทั้งในโตรเจนออกไซด์และคาร์บอนมอนอกไซด์ [2]

Echigo และคณะ [3] ได้ทำการศึกษากการเผาไหม้ของเปลวไฟชนิดผสมมาก่อนภายในหัวเผาวัสดุพูน โดยการใช้วัสดุพูนแบบชั้นเดียว (Single layer) ผลการศึกษาสรุปได้ว่า การเผาไหม้ในหัวเผาวัสดุพูนให้อุณหภูมิการเผาไหม้ที่และความเร็วในการเผาไหม้ (Burning velocity) ที่สูงกว่าการเผาไหม้แบบปกติที่ค่าอัตราส่วนสมมูล (Equivalence ratio) เดียวกัน นอกจากนี้ความเร็วในการเผาไหม้ (Burning velocity) ค่าความเข้มของการเผาไหม้ (Combustion intensity) และความเข้มของการแผ่รังสีความร้อนที่ได้มีค่าสูง

Sathe และคณะ [4] ได้ศึกษากลไกการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นภายในหัวเผาวัสดุพูน จากผลการศึกษา พบว่าการนำความร้อนและการแผ่รังสีความร้อนของวัสดุพูนมีบทบาทอย่างมากต่อตำแหน่งของเปลวไฟ และการหมุนเวียนความร้อนเพื่อไปใช้ในส่วนผสมก่อนการเผาไหม้

อย่างไรก็ตามงานวิจัยที่ผ่านมาเป็นการศึกษาเกี่ยวกับการเผาไหม้แบบเปลวไฟชนิดผสมมาก่อนที่เกิดขึ้นภายในวัสดุพูน ซึ่งมีความเสี่ยงต่อการติดไฟ (Autoignition) ในบริเวณที่ไม่พึงประสงค์ (Undesirable location) ซึ่งเป็นอันตรายอย่างยิ่งในทางปฏิบัติ เนื่องจากเชื้อเพลิงกับอากาศมีเวลานานในการผสมและทำปฏิกิริยาเคมีในห้องผสม (Mixing chamber) ก่อนที่จะเข้าไปเผาไหม้ในหัวเผาวัสดุพูน

Wongwatcharaphon และคณะ [5] ได้นำเสนอหลักการของการเผาไหม้ในหัวเผาวัสดุพูนแบบใหม่ที่มีความปลอดภัยสูงที่มีชื่อว่าหัวเผาวัสดุพูนแบบ LMPB (Late mixing porous burner) เนื่องจากการจ่ายเชื้อเพลิงและอากาศเข้าสู่บริเวณการเผาไหม้ถูกออกแบบให้แยกออกจากกันและการผสมที่เกิดขึ้นเป็นการผสมแบบล่าช้า (Late mixing) ก่อนเข้าไปเผาไหม้ในหัวเผาวัสดุพูน ซึ่งหัวเผาวัสดุพูนลักษณะนี้มีข้อดีมากมาย ได้แก่ มีความปลอดภัยสูง มีบริเวณการอุ่น (Preheat Zone) ที่มากกว่าหัวเผาวัสดุพูนแบบผสมมาก่อน ผลการศึกษาสรุปได้ว่าในกรณีที่ใช้วัสดุพูนชนิดเดียวกันในการทำห้องเผาไหม้หัวเผาวัสดุพูนแบบการผสมล่าช้าให้ประสิทธิภาพการถ่ายเทรังสีที่สูงกว่าการเผาไหม้ในหัวเผาวัสดุพูนทั่วไปแบบชั้นเดียว (Single layer conventional porous burner) ในขณะที่มีการปลดปล่อยคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ต่ำกว่า นอกจากนี้ในงานวิจัยยังได้รายงานผลการศึกษาถึงอิทธิพลของอัตราส่วนสมมูลและอัตราการป้อนเชื้อเพลิงที่มีผลต่อโครงสร้างทางความร้อน และประสิทธิภาพการแผ่รังสี อย่างไรก็ตามอิทธิพลของสมบัติของวัสดุพูนที่นำมาใช้เป็นห้องเผาไหม้ซึ่งมีผลอย่างมากต่อการนำความร้อนและการแผ่รังสีความร้อนของวัสดุพูนยังไม่ได้ทำการรายงาน

ในงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาถึงอิทธิพลของสมบัติของวัสดุพูนทำหน้าที่เป็นห้องเผาไหม้ (PC) ที่มีต่อโครงสร้างทางความร้อน และประสิทธิภาพการแผ่รังสีด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบ 1 มิติ และพิจารณาปฏิกิริยาการเผาไหม้แบบ Single step first order reaction โดยมีลักษณะทางกายภาพของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และอุปกรณ์การทดลองเหมือนกับงานของ

Wongwatcharaphon และคณะ [5] โดยมีตัวแปรที่ศึกษา คือ ความพรุน (Porosity) และสัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีความร้อน (Absorption coefficient) ของวัสดุพรุน โดยสมรรถนะของ LMPB จะถูกแสดงอยู่ในรูปของอุณหภูมิการเผาไหม้สูงสุด และประสิทธิภาพการแผ่รังสีความร้อน

2. วิธีการวิจัย

การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ในการศึกษาการเผาไหม้ของหัวเผาวัสดุพรุนผสมแบบช้า เริ่มต้นจากการรวบรวมสมการที่เกี่ยวข้องในการคำนวณ จากนั้นทำการเปลี่ยนรูปสมการให้อยู่ในรูปตัวแปรไร้หน่วย และแปลงให้อยู่ในรูป Finite differences และใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (Numerical method) ในการแก้สมการต่อไป

2.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการเผาไหม้ในวัสดุพรุนผสมแบบล่าช้า

รูปที่ 1 แสดงลักษณะทางกายภาพของหัวเผาวัสดุพรุนผสมแบบล่าช้า (Late mixing porous burner, LMPB) ซึ่งประกอบด้วย 3 ส่วนหลักๆ คือ วัสดุพรุนที่ทำหน้าที่อุ่นเชื้อเพลิง (Fuel-preheating porous medium, FP) วัสดุพรุนที่ทำหน้าที่เป็นห้องเผาไหม้ (Porous combustor, PC) และ Air jacket ที่ทำหน้าที่ในการอุ่นอากาศและเป็นฉนวนป้องกันการสูญเสียความร้อนจากระบบสู่สิ่งแวดล้อมไปในตัว โดยวัสดุพรุน FP และ PC จะถูกติดตั้งแยกออกจากกัน โดยมีช่องว่างซึ่งทำหน้าที่เป็นห้องผสม (Mixing chamber) คั่นอยู่ ระบบจ่ายเชื้อเพลิงและอากาศจะถูกแยกออกจากกัน เพื่อความปลอดภัยในการใช้งาน โดยเชื้อเพลิงกับอากาศจะมาพบกันและผสมกันอย่างรวดเร็วในห้องผสมก่อนที่จะเข้าไปเผาไหม้ในวัสดุพรุน PC ซึ่งแตกต่างกับหัวเผาวัสดุพรุนแบบผสมมาก่อนทั่วไป (Conventional premixed porous burner) ที่เชื้อเพลิงกับอากาศมีเวลาพบกันและผสมกันอย่างยาวนาน ซึ่งเสี่ยงต่อการจุดระเบิดในบริเวณไม่พึงประสงค์ เนื่องจากธรรมชาติของการเผาไหม้ในวัสดุพรุนนั้นมีอุณหภูมิการเผาไหม้และความเร็วในการเผาไหม้ที่สูง จึงไม่เหมาะสมในการใช้งานในทางปฏิบัติ นอกจากนี้ หัวเผาวัสดุพรุน

แบบผสมมาก่อนทั่วไปไม่มีบริเวณที่ใช้ในการอุ่น (Preheating-zone) ส่วนผสมเพียงบริเวณเดียว คือ บริเวณหน้าเปลวไฟก่อนเกิดการเผาไหม้ [2] ในขณะที่หัวเผา LMPB มีบริเวณการอุ่นถึง 3 บริเวณ คือ บริเวณการอุ่นเชื้อเพลิงในวัสดุพรุน FP บริเวณอุ่นอากาศใน Air jacket บริเวณอุ่นไอที่หน้าเปลวไฟในวัสดุพรุน PC ทำให้ LMPB มีประสิทธิภาพการแผ่รังสีที่สูงกว่า หัวเผาวัสดุพรุนแบบผสมมาก่อนทั่วไป [5]

สมการที่ใช้ในการคำนวณสามารถแสดงได้ดังนี้

ในส่วนของวัสดุพรุน FP, $-x_{FP} \leq x \leq -L$

$$(\tau_{-x_{FP}} \leq \tau \leq \tau_{-L}),$$

สมการอนุรักษ์พลังงานสำหรับสถานะก๊าซ

$$\rho_F c_F \varepsilon \frac{\partial T_F}{\partial t} + \rho_F u_F c_F \varepsilon \frac{\partial T_F}{\partial x} = \lambda_{FE} \frac{\partial^2 T_F}{\partial x^2} - h_v (T_F - T_s) \quad (1)$$

สมการอนุรักษ์พลังงานสำหรับสถานะของแข็ง

$$\rho_s c_s (1 - \varepsilon) \frac{\partial T_s}{\partial t} = \lambda_e \frac{\partial^2 T_s}{\partial x^2} - \frac{\partial q_r^n}{\partial x} + h_v (T_F - T_s) \quad (2)$$

โดยที่ $q_r^n(\tau) = q_r^+(\tau) + q_r^-(\tau)$,

$$q_r^+(\tau) = 2\pi \left[I_0^+(\tau_{-x_{FP}}) E_3(\tau_{-x_{FP}} - \tau) + \int_{\tau_{-x_{FP}}}^{\tau} I_b(\tau') E_2(\tau' - \tau) d\tau' \right] \quad (3)$$

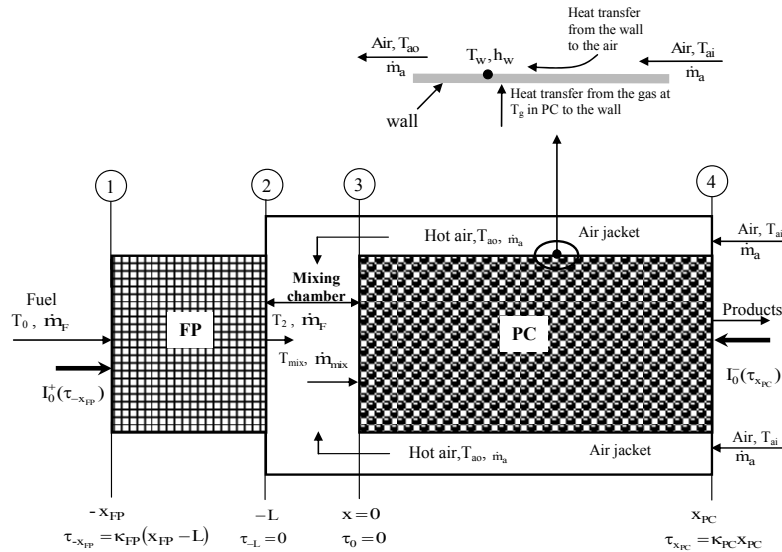
$$q_r^-(\tau) = -2\pi \left[I_0^-(\tau_{x_{PC}}) E_3(\tau_{x_{PC}} - \tau) + \int_0^{\tau_{x_{PC}}} I_b(\tau') E_2(\tau') d\tau' \right] E_3(\tau) - 2\pi \left[\int_{\tau}^{\tau_{-L}} I_b(\tau') E_2(\tau - \tau') d\tau' \right] \quad (4)$$

เมื่อ $\tau = \kappa_{FP}(-L - x)$ และ The divergence of net radiative heat flux $\left(\frac{\partial q_r^n(\tau)}{\partial x} \right)$ ในสมการที่ (2) สามารถ

คำนวณได้จากสมการที่ (5)

ในส่วน of วัสดุพรุน PC, $0 \leq x \leq x_{PC}$ ($\tau_0 \leq \tau \leq \tau_{x_{PC}}$)

สมการอนุรักษ์พลังงานสำหรับสถานะก๊าซ



รูปที่ 1 ลักษณะทางกายภาพของหัวเผาวัสดุพูนแบบผสมล่าช้า

$$\frac{\partial q_r^n(\tau)}{\partial x} = -2\kappa_{FP}\pi \left[\begin{aligned} & -2I_b(\tau) + \int_{\tau_{x_{FP}}}^{\tau_{x_L}} I_b(\tau')E_1(|\tau-\tau'|)d\tau' \\ & + I_0^+(\tau_{x_{FP}})E_2(\tau_{x_{FP}}-\tau) \end{aligned} \right] \quad (5)$$

$$-2\kappa_{PC}\pi \left[\begin{aligned} & I_0^-(\tau_{x_{PC}})E_3(\tau_{x_{PC}}) \\ & + \int_0^{\tau_{x_{PC}}} I_b(\tau')E_2(\tau')d\tau' \end{aligned} \right] E_2(\tau)$$

$$\text{เมื่อ } I_b(\tau) = \frac{\sigma T_s^4(\tau)}{\pi},$$

$$\int_{\tau_{x_{FP}}}^{\tau_{x_L}} I_b(\tau')E_1(|\tau-\tau'|)d\tau' = \int_{\tau_{x_{FP}}}^{\tau} I_b(\tau')E_1(\tau'-\tau)d\tau' + \int_{\tau}^{\tau_{x_L}} I_b(\tau')E_1(\tau-\tau')d\tau'$$

$$\text{และ } E_n(\tau) = \int_0^1 \eta^{n-2} e^{-\tau/\eta} d\eta, \quad n = 1, 2, 3.$$

สมการอนุพันธ์มวลและพลังงานภายในห้องผสมสามารถแสดงได้ ดังสมการดังต่อไปนี้

$$\dot{m}_{mix} = \dot{m}_F + \dot{m}_a \quad (6)$$

$$\dot{m}_{mix} h_{mix}(T_{mix}) = \dot{m}_F h_F(T_2) + \dot{m}_a h_a(T_{ao}) \quad (7)$$

$$\rho_g c_g \varepsilon \frac{\partial T_g}{\partial t} + \rho_g u_g c_g \varepsilon \frac{\partial T_g}{\partial x} = \lambda_g \varepsilon \frac{\partial^2 T_g}{\partial x^2} \quad (8)$$

$$+ \varepsilon h_o w - h_v(T_g - T_s) - \alpha U_w(T_g - T_w)$$

เทอมสุดท้ายทางด้านขวามือของสมการที่ (8) เป็นเทอมของการถ่ายเทความร้อนจากก๊าซร้อนในวัสดุพูน PC สู่ผนังห้องเผาไหม้เพื่อใช้ในการอุ่นอากาศใน Air jacket โดยที่อัตราการผลิตปฏิกิริยาการเผาไหม้เป็นไปตามสมการ Arrhenius สำหรับปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง ซึ่งแสดงดังสมการที่ (9)

$$w = Ap(1-y)e^{-E/RT} \quad (9)$$

สมการอนุพันธ์มวล

$$\rho_g \varepsilon \frac{\partial y}{\partial t} + \rho_g u_g \varepsilon \frac{\partial y}{\partial x} = D\rho_g \varepsilon \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} + \varepsilon w \quad (10)$$

สมการอนุพันธ์พลังงานสำหรับสถานะของแข็ง

$$\rho_s c_s (1-\varepsilon) \frac{\partial T_s}{\partial t} = \lambda_s \varepsilon \frac{\partial^2 T_s}{\partial x^2} - \frac{\partial q_r^n}{\partial x} + h_v(T_g - T_s) \quad (11)$$

โดยที่ $q_r^n(\tau) = q_r^+(\tau) + q_r^-(\tau)$,

$$q_r^+(\tau) = 2\pi \left[I_0^+(\tau_{-x_{FP}}) E_3(\tau_{-x_{FP}}) + \int_{\tau_{-x_{FP}}}^{\tau_{-L}} I_b(\tau') E_2(\tau') d\tau' \right] E_3(\tau) + 2\pi \left[\int_0^{\tau} I_b(\tau') E_2(\tau - \tau') d\tau' \right] \quad (12)$$

$$q_r^-(\tau) = -2\pi \left[I_0^-(\tau_{x_{PC}}) E_3(\tau_{x_{PC}} - \tau) + \int_{\tau}^{\tau_{x_{PC}}} I_b(\tau') E_2(\tau' - \tau) d\tau' \right] \quad (13)$$

$$\frac{\partial q_r^n(\tau)}{\partial x} = -2\pi\kappa_{PC} \left[I_0^+(\tau_{-x_{FP}}) E_3(\tau_{-x_{FP}}) + \int_{\tau_{-x_{FP}}}^{\tau_{-L}} I_b(\tau') E_2(\tau') d\tau' \right] E_2(\tau) - 2\pi\kappa_{PC} \left[-2I_b(\tau) + I_0^-(\tau_{x_{PC}}) E_2(\tau_{x_{PC}} - \tau) + \int_0^{\tau_{x_{PC}}} I_b(\tau') E_1(|\tau - \tau'|) d\tau' \right] \quad (14)$$

โดยที่

$$\int_0^{\tau_{x_{PC}}} I_b(\tau') E_1(|\tau - \tau'|) d\tau' = \int_0^{\tau} I_b(\tau') E_1(\tau - \tau') d\tau' + \int_{\tau}^{\tau_{x_{PC}}} I_b(\tau') E_1(\tau' - \tau) d\tau'$$

$$\tau = \kappa_{PC}(x)$$

สมการอนุรักษ์พลังงานที่ Air jacket

$$\int_0^{x_{PC}} U_w (T_g - T_w) (2\pi r_{PC}) dx = h_w A_w \Delta T_{ln} \quad (15)$$

$$\dot{m}_a c_a dT_a = h_w (T_w - T_a) dA, \quad (16)$$

$$\Delta T_{ln} = \frac{T_{ai} - T_{ao}}{\ln \left[\frac{T_w - T_{ao}}{T_w - T_{ai}} \right]}$$

โดยอุณหภูมิของอากาศที่ทางเข้า T_{ai} มีค่าเท่ากับ อุณหภูมิห้อง (30 °C) T_{ao} ที่อยู่ในรูปของ T_w และ T_{ai} สามารถหาได้จากการอินทิเกรตสมการที่ (16) จากนั้นแทนค่า T_{ao} ลงในสมการที่ (15) จะได้

$$T_w = \frac{C \int_0^{x_{PC}} T_g(x) dx + (B-1) T_{ai}}{D}$$

$$\text{เมื่อ } B = \exp(-2\pi\kappa_{PC} x_{PC} h_w / \dot{m}_a c_a)$$

$$C = 2\pi\kappa_{PC} U_w \ln B / (h_w A_w)$$

$$D = C + B\kappa_{PC} - 1$$

โดยสมมติฐานที่ใช้ในการคำนวณแสดงอยู่ในงานวิจัยของ Wongwatcharaphon และคณะ [5] จากงานวิจัยที่ผ่านมาการรายงานสมรรถนะของหัวเผาวัสดุพูนสามารถรายงานได้หลายรูปแบบ ได้แก่ อุณหภูมิการเผาไหม้ ประสิทธิภาพการแผ่รังสี (Radiant output efficiency, η_{rad}) การปลดปล่อยมลภาวะของก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ และก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ขอบเขตการเผาไหม้ (Flammability limit) ความเร็วในการเผาไหม้ (Burning velocity) และ Turn down ratio เป็นต้น โดยในงานวิจัยนี้ สมรรถนะของหัวเผาจะแสดงอยู่ในรูปของอุณหภูมิการเผาไหม้ และประสิทธิภาพการแผ่รังสีความร้อน ซึ่งสามารถนิยามได้ดังนี้

$$\eta_{rad} = \frac{\text{output radiation}}{\text{firing rate}} \quad (17)$$

2.2 รายการสัญลักษณ์

A = area (m²), frequency factor of combustion (s⁻¹)

c = specific heat (Jkg⁻¹K⁻¹)

FR = firing rate (kW)

d_p = diameter of particle (m)

D = diffusion coefficient (m²s⁻¹)

E_n = exponential integral function

h = enthalpy (Jkg⁻¹)

h_o = heat of reaction (Wm⁻³)

h_v = volumetric heat transfer coefficient (Wm⁻³K⁻¹)

I = incident radiation (Wm⁻²)

L = length of mixing chamber (m)

$\dot{m}$ = mass flow rate (kgs⁻¹)

Nu = Nusselt number

Pr = Prandtl number

q_r = radiation flux (Wm^{-2})

r = radius (m)

R = gas constant ($Jmol^{-1}K^{-1}$)

Re = Reynolds number

t = time (s)

T = temperature (K, $^{\circ}C$)

u = interstitial gas velocity (ms^{-1})

U = overall heat transfer coefficient ($Wm^{-2}K$)

v = volume (m^3)

w = reaction rate ($kgm^{-3}s^{-1}$)

x = coordinate system (m)

y = product mole fraction

α = wall area to volume ratio (m^{-1})

ϵ = porosity

κ = absorption coefficient (m^{-1})

λ = thermal conductivity ($Wm^{-1}K^{-1}$)

λ_e = effective thermal conductivity ($Wm^{-1}K^{-1}$)

ρ = density (kgm^{-3})

σ = Stefan – Boltzmann constant ($Wm^{-2}K^{-4}$)

τ = optical thickness = κx

ตัวยก

$+$ = positive direction

$-$ = negative direction

n = net

ตัวห้อย

0 = ambient

a = air

ai = air inlet of air jacket

ao = air outlet of air jacket

ad = adiabatic

b = black body

F = fuel

FP = fuel-preheating porous medium

g = gas

mix = mixture

v = volumetric

w = wall

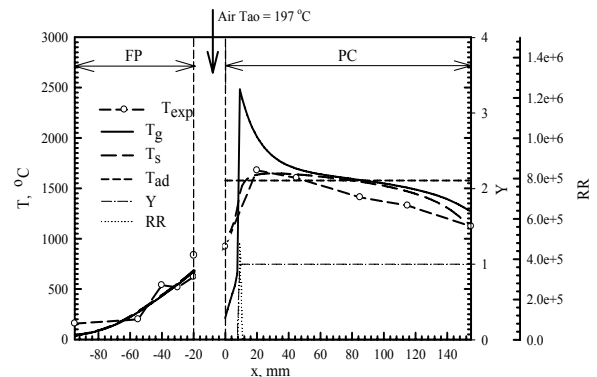
p = particle

PC = porous combustor

S = solid

3. ผลการวิจัยและอภิปราย

3.1 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Model Validation)



รูปที่ 2 โครงสร้างทางความร้อนของระบบ

รูปที่ 2 แสดงโครงสร้างทางความร้อนภายใน FP และ PC ตามแนวแกน x (mm) ที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิง (Firing rate, FR) เท่ากับ 5 kW อัตราส่วนสมมูล (Equivalence ratio, Φ) เท่ากับ 0.7 โดยอัตราส่วนสมมูล คือ ปริมาณไ้หน่วยที่แสดงถึงความห่างไกลของส่วนผสมระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศในทางปฏิบัติกับทางทฤษฎี ซึ่งสามารถคำนวณหาได้จากสมการ ดังต่อไปนี้

$$\Phi = \frac{(A/F)_{stoic}}{(A/F)_{actual}} \quad (18)$$

โดยที่ $(A/F)_{\text{stoic}}$ คือ อัตราส่วนระหว่างมวลของอากาศกับมวลของเชื้อเพลิงในทางทฤษฎี

$(A/F)_{\text{actual}}$ คือ อัตราส่วนระหว่างมวลของอากาศกับมวลของเชื้อเพลิงในทางปฏิบัติ

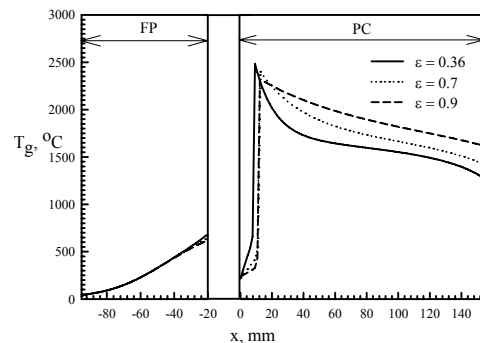
$\Phi < 1$ หมายความว่า ไอดีบาง (Fuel-lean mixture)

$\Phi > 1$ หมายความว่า ไอดีหนา (Fuel-rich mixture)

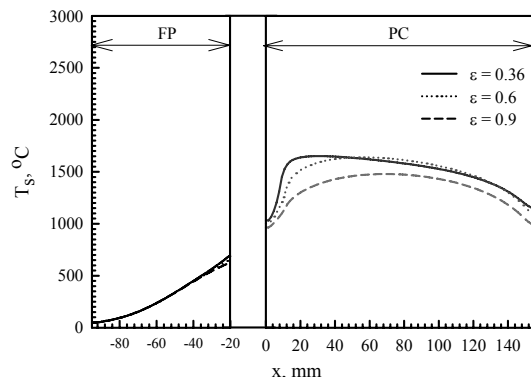
จากผลการคำนวณพบว่า ภายในวัสดุพอร์น FP อุณหภูมิของก๊าซ (T_g) และของแข็ง (T_s) มีค่าใกล้เคียงกันมาก เนื่องจากวัสดุพอร์นมีอัตราส่วนพื้นที่ผิวสัมผัสต่อปริมาตร (Surface area per volume ratio) สูงมาก ทำให้การแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างสถานะก๊าซกับของแข็งเกิดขึ้นได้ดี และเมื่อพิจารณาในวัสดุพอร์น PC พบว่า เมื่อเกิดการเผาไหม้ อุณหภูมิของก๊าซจะสูงขึ้นมาก และจะเกิดการถ่ายเทความร้อนจากเปลวไฟไปยังวัสดุพอร์น จากนั้นก็จะเกิดการถ่ายเทความร้อนไปยังด้าน Upstream และ Downstream โดยการนำและการแผ่รังสีความร้อนไปตามเนื้อวัสดุพอร์น ทำให้บริเวณ Pre-Flame อุณหภูมิของของแข็งจะสูงกว่าก๊าซที่ไหลเข้าสู่ระบบ จึงเกิดการถ่ายเทความร้อนจากของแข็งไปสู่ก๊าซซึ่งเป็นการอุ่นไอดีก่อนเกิดการเผาไหม้ซึ่งในบริเวณนี้เรียกว่า Solid Heating Zone ส่วนด้าน Post-Flame เมื่อก๊าซไอเสียร้อนซึ่งมีอุณหภูมิสูงกว่าของแข็งไหลผ่านวัสดุพอร์นออกจากระบบไปยังด้าน Downstream ก็จะมีการถ่ายเทความร้อนไปยังของแข็ง ทำให้ก๊าซไอเสียมีอุณหภูมิลดลงก่อนไหลออกจากระบบซึ่งในบริเวณนี้เรียกว่า Solid Cooling Zone จากผลการคำนวณ แสดงให้เห็นว่ามีการหมุนเวียนความร้อนจากไอเสียไปสู่ไอดีโดยอาศัยวัสดุพอร์นเป็นตัวกลางในการแลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งจะทำได้โดยอุณหภูมิการเผาไหม้ที่สูงกว่าอุณหภูมิการเผาไหม้แอดิแบติก (Adiabatic flame temperature) ที่ค่าอัตราส่วนสมมูลเดียวกัน โดยอุณหภูมิของอากาศร้อนที่ออกจาก Air jacket และประสิทธิภาพการแผ่รังสีที่คำนวณได้มีค่าเท่ากับ 197 °C และ 25.6% ตามลำดับ นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบผลการคำนวณกับผลการทดลอง พบว่าให้ผลสอดคล้องกันเป็นอย่างดี โดยที่ผลการคำนวณมีอุณหภูมิสูงกว่าผลการทดลอง เนื่องจากในการคำนวณไม่ได้พิจารณาผลของการ

สูญเสียความร้อนจากระบบไปสู่สิ่งแวดล้อม โดยค่า Global energy balance ที่คำนวณได้มีค่าเท่ากับ 0.31% ซึ่งสามารถยืนยันได้ว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นี้เป็นแบบจำลองที่มีความแม่นยำเพียงพอ สามารถใช้ทำนายปรากฏการณ์การเผาไหม้ที่เกิดขึ้นในหัวเผา LMPB ได้

3.2 อิทธิพลของความพรุน (Porosity) ของวัสดุพอร์น PC



รูปที่ 3 อิทธิพลของความพรุนต่ออุณหภูมิของก๊าซ

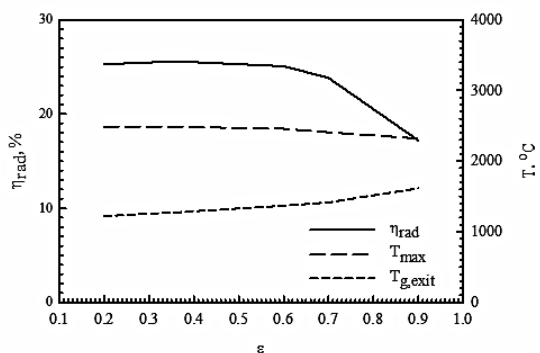


รูปที่ 4 อิทธิพลของความพรุนต่ออุณหภูมิของแข็ง

ความพรุน (Porosity) หมายถึง อัตราส่วนระหว่างปริมาตรช่องว่างภายในวัสดุพอร์นกับปริมาตรทั้งหมด เป็นสมบัติที่สำคัญอย่างหนึ่งของวัสดุพอร์น ค่าความพรุนที่มากหมายถึง วัสดุพอร์นที่มีช่องว่างมากมีเนื้อของแข็งน้อย ซึ่งค่าความพรุนนี้มีอิทธิพลต่อตัวแปรที่สำคัญที่ปรากฏอยู่ในสมการที่ใช้ในการแก้ปัญหาของ LMPB ได้แก่ สัมประสิทธิ์การนำความร้อนปรากฏ (Effective heat conductivity) ของวัสดุพอร์น ความเร็วในการไหลภายในวัสดุพอร์น และสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนต่อปริมาตรระหว่าง

สถานะก๊าซและของแข็ง (Volumetric heat transfer coefficient)

รูปที่ 3 และ 4 แสดงอิทธิพลของความพรุนของวัสดุพูน PC ต่ออุณหภูมิของสถานะก๊าซและสถานะของแข็งตามลำดับ ที่ อัตราการป้อนเชื้อเพลิง เท่ากับ 5 kW อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ 0.7 จากผลการคำนวณพบว่า เมื่อความพรุนของวัสดุพูน PC เพิ่มขึ้น ทำให้อุณหภูมิสูงสุดของการเผาไหม้มีแนวโน้มลดลง ในขณะที่อุณหภูมิของก๊าซไอเสียที่ไหลออกจากระบบทางด้านท้ายน้ำสูงขึ้น (แสดงในรูปที่ 5) ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มความพรุนของวัสดุพูนทำให้ปริมาตรของช่องว่างในวัสดุพูนมากขึ้น ส่งผลให้ ที่ค่าอัตราการป้อนเชื้อเพลิงและอัตราส่วนสมมูลเดียวกัน ความเร็วในการไหลของก๊าซลดลง การถ่ายเทความร้อนระหว่างสถานะก๊าซและของแข็งจึงแย่ง ซึ่งสังเกตได้จากความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของก๊าซ (T_g) และ อุณหภูมิของแข็ง (T_s) ที่มากขึ้นนั่นเอง และเมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4 พบว่าอุณหภูมิของของแข็งจะมีค่าลดลงตามการเพิ่มขึ้นของความพรุนเนื่องจากการถ่ายเทความร้อนระหว่างสถานะที่แย่ง

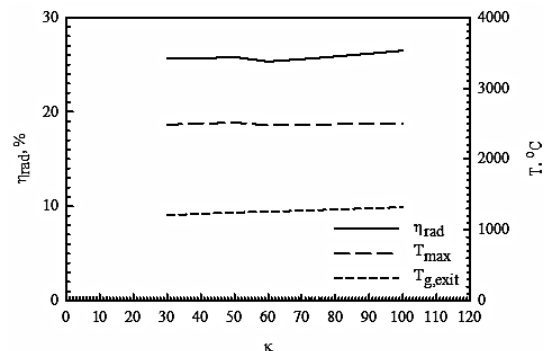


รูปที่ 5 อิทธิพลของความพรุนต่อประสิทธิภาพการแผ่รังสีความร้อน อุณหภูมิสูงสุดของการเผาไหม้ และอุณหภูมิไอเสีย

รูปที่ 5 แสดงอิทธิพลของความพรุนที่มีต่ออุณหภูมิสูงสุดของการเผาไหม้ (T_{max}) อุณหภูมิไอเสียที่ไหลออกจากระบบ ($T_{g, exit}$) และประสิทธิภาพการแผ่รังสีความร้อน (η_{rad}) จากผลการศึกษาพบว่า เมื่อความพรุนมากขึ้น อุณหภูมิสูงสุดของการเผาไหม้จะมีค่าลดลงเนื่องจากการสูญเสียความร้อนด้วยการพาความร้อนไปกับไอเสียมีค่ามากขึ้น ซึ่งสามารถสังเกตได้จากการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ

ไอเสียที่ไหลออกจากระบบ และเมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการแผ่รังสีของ LMPB พบว่า ที่ความพรุนน้อยกว่า 0.6 นั้น ความพรุนไม่ค่อยมีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพการแผ่รังสีความร้อนอย่างมีนัยสำคัญ แต่เมื่อความพรุนมีค่ามากกว่า 0.6 ประสิทธิภาพจะลดต่ำลงเมื่อความพรุนเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณเนื้อของแข็งในวัสดุพูนที่น้อยลง ทำให้การแผ่รังสีแย่ง ดังนั้นการเลือกใช้วัสดุพูนเพื่อมาทำหน้าที่เป็นห้องเผาไหม้ในเตา LMPB ควรจะเลือกวัสดุพูนที่มีความพรุนไม่เกิน 0.6 แต่อย่างไรก็ตามวัสดุพูนที่เลือกใช้ก็ไม่ควรมีค่าความพรุนที่ต่ำจนเกินไป เนื่องจากจะทำให้เกิดปัญหาของ pressure drop ที่จะทำให้เกิดอันตรายในการใช้งานได้ ซึ่งในงานวิจัยนี้แนะนำให้ใช้วัสดุพูนที่มีค่าความพรุนอยู่ระหว่าง 0.4 – 0.6

3.3 อิทธิพลของสัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีความร้อน (Absorption coefficient) ของวัสดุพูน PC



รูปที่ 6 อิทธิพลของสัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีความร้อนต่อประสิทธิภาพการแผ่รังสีความร้อน อุณหภูมิสูงสุดของการเผาไหม้ และอุณหภูมิไอเสีย

รูปที่ 6 แสดงอิทธิพลของสัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีความร้อนของวัสดุพูน PC ต่อ ประสิทธิภาพการแผ่รังสีความร้อน อุณหภูมิการเผาไหม้สูงสุด และ อุณหภูมิของก๊าซไอเสียที่ไหลออกจากระบบ ที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิงเท่ากับ 5 kW อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ 0.7 ค่าความพรุน 0.4 จากผลการศึกษาพบว่า สัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีความร้อนของวัสดุพูน PC ไม่มีอิทธิพลต่ออุณหภูมิของการเผาไหม้สูงสุด และ อุณหภูมิของก๊าซไอเสียอย่างมีนัยสำคัญ แต่จะมีผลต่อการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของแข็งด้านหลังเปลวไฟ เนื่องจากของแข็ง

ดูดกลืนความร้อนไว้ได้มากขึ้น ดังนั้นเนื้อวัสดุพูนจึงสามารถแผ่รังสีความร้อนออกไปทั้งทางด้าน upstream และ downstream ได้มากขึ้น ซึ่งส่งผลให้ประสิทธิภาพการแผ่รังสีสูงขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของสัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีความร้อนของวัสดุพูน PC ซึ่งผลการศึกษาในงานวิจัยนี้มีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ Kayal และ Chakravarty [6,7]

4. สรุป

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาถึงอิทธิพลของสมบัติของวัสดุพูนที่ทำหน้าที่เป็นห้องเผาไหม้ ภายในหัวเผาวัสดุพูนแบบผสมล้าช้า (LMPB) ที่มีต่อสมรรถนะของหัวเผาด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบ 1 มิติ และพิจารณาปฏิกิริยาการเผาไหม้แบบ Single step first order reaction โดยมีตัวแปรที่ศึกษา คือ ความพูน และสัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีความร้อน ของวัสดุพูน โดยสมรรถนะของ LMPB จะถูกแสดงอยู่ในรูปของอุณหภูมิการเผาไหม้สูงสุด และประสิทธิภาพการแผ่รังสีความร้อนจากการศึกษา สามารถสรุปได้ว่า วัสดุพูนที่มีค่าความพูนอยู่ระหว่าง 0.4-0.6 และสัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีความร้อนเท่ากับ 100 มีความเหมาะสมที่สุดในการทำหน้าที่เป็นห้องเผาไหม้ในหัวเผาวัสดุพูนแบบผสมล้าช้าเนื่องจากให้ประสิทธิภาพการแผ่รังสีความร้อนสูงที่สุด

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนและความเอื้อเฟื้อจากห้องปฏิบัติการวิจัยเครื่องยนต์และการเผาไหม้ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Suntivarakorn P, Theragulpisut S, Priprem S, Tudyu S. Strategy of energy management for Khon Kaen province. KKU Eng. J. 2005;32(6): 841-855. (In Thai).
- [2] Barra JA, Ellzey LJ. Heat recirculation and heat transfer in porous burners. Combust Flame. 2004; 137: 230-241.
- [3] Echigo R, Yoshizawa Y, Hanamura K, Tomimura T. Analytical and experimental studies on radiative propagation in porous media with internal heat generation, Proc. 8th Int. Heat Transfer Conf., San Francisco, CA. 1986; 2: 827-832.
- [4] Sathe SB, Peck RE, Tong TW. Flame stabilization and multi-mode heat transfer in inert porous media, a numerical study. Combust Sci Technol. 1990; 70: 93-109.
- [5] Wongwatcharaphon P, Tongtem P, Jugjai S. Numerical and experimental study of late mixing porous burner. J Energy Inst. 2013; 86: 15-23.
- [6] Kayal KT, Chakravarty M. Combustion of liquid fuel inside inert porous media: an analytical approach. Int J Heat Mass Tran. 2005; 48: 331-339.
- [7] Kayal KT, Chakravarty M. Combustion of suspended fine solid fuel in air inside inert porous medium: A heat transfer analysis. Int J Heat Mass Tran. 2007; 50: 3359-3365.