

คุณลักษณะตัวแปรเชิงความร้อนของหัวเผาชนิดวัสดุพรุนแบบเหนี่ยวนำอากาศด้วยตัวเอง

Investigation of the thermal characteristics on a Self-aspirating Porous Medium Burner

มกร ลักขณา* และ เอนก บุญกว้าง

สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน

833 ถนนพระราม 1 แขวงวังใหม่ เขตปทุมวัน กรุงเทพมหานคร 10330

E-mail: Makorn@pit.ac.th, Tel: +66(0)-2-104-9099 Ext.3014

E-mail: Anek.jet@gmail.com, Tel: +66(0)-2-104-9099 Ext.3060

Makorn Lakkana* and Anek Bunkwang

Pathumwan Institute of Technology

833 Rama 1 Road, Wangmai, Pathumwan, Bangkok 10330, Thailand

E-mail: Makorn@pit.ac.th, Tel: +66(0)-2-104-9099 Ext.3014

E-mail: Anek.jet@gmail.com, Tel: +66(0)-2-104-9099 Ext.3060

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ คือ การศึกษาถึงคุณลักษณะตัวแปรเชิงความร้อนของหัวเผาชนิดวัสดุพรุนแบบเหนี่ยวนำอากาศด้วยตัวเองที่ส่งผลต่อโครงสร้างทางความร้อนและสมรรถนะของหัวเผาด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบ 1 มิติ ทั้งการเผาไหม้ภายในวัสดุพรุน(submerged flame) และการเผาไหม้ส่วนที่สองแบบแพร่ชนิดเจ็ต (jet diffusion flame) การพิจารณาปฏิริยาการเผาไหม้แบบ single-step arrhenius rate equation และแก๊ส LPG ถูกใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับการศึกษาเพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาหัวเผาชนิดวัสดุพรุน ตัวแปรที่ศึกษาคือ ความร้อนที่ป้อนหัวเผา (firing rate) อัตราส่วนสมมูล (equivalence ratio) ความหนาเชิงแสง (optical thickness) และความพรุน (porosity) การรายงานผลการศึกษาของหัวเผาถูกนำเสนอในรูปของอุณหภูมิของแก๊สและของแข็ง (gas and solid temperature) ของการเผาไหม้ทั้งสองส่วน สมรรถนะของหัวเผาถูกนำเสนอในรูปของประสิทธิภาพการหมุนเวียนความร้อนและการแผ่รังสีความร้อน ผลการจำลองพบว่า Equivalence ratio และ Firing rate ส่งผลกระทบบต่อตำแหน่งเปลวไฟ (combustion location) อุณหภูมิทั้งสองสถานะของหัวเผา (gas and solid temperature) ความยาวของเปลวไฟส่วนที่สอง (jet flame) และสมรรถนะของหัวเผาวัสดุพรุน (burner performance) มากกว่าตัวแปรอื่นๆอย่างเป็นนัยสำคัญ และการพัฒนาหัวเผาชนิดวัสดุพรุนแบบเหนี่ยวนำอากาศด้วยตัวเองควรมุ่งเน้นไปที่การปรับปรุงประสิทธิภาพการเหนี่ยวนำอากาศส่วนแรกของหัวเผา อีกทั้งความยาวเปลวไฟส่วนที่สองที่สั้นลงจะช่วยเพิ่มปริมาณพลังงานรังสีความร้อนที่ถูกแผ่กลับไปยังหัวเผาชนิดวัสดุพรุน ดังนั้นการปรับปรุงรูปร่างของหัวเผาชนิดวัสดุพรุนเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการเหนี่ยวนำอากาศส่วนที่สองก็สมควรถูกละเลย

คำสำคัญ: วัสดุพรุน, เหนี่ยวนำอากาศด้วยตัวเอง, หมุนเวียนความร้อน, เปลวไฟแบบแพร่ชนิดเจ็ต

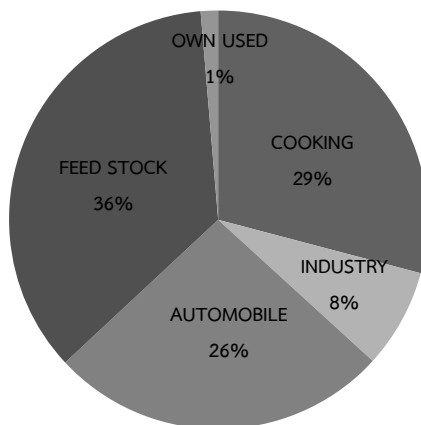
Abstract

The research deals with the investigation of the thermal characteristics on which affect flame structures and thermal performance of a self-aspirating porous medium burner (SPMB). The simulation of SPMB is analyzed using one dimensional, volume-average approach and local thermal non-equilibrium model coupling with adopting the basic jet theorem (Composite Variable by Schvab-Zelovich Transformation) on cylindrical laminar jet in case of the combustion of free jet of fuel issuing into quiescent air. The rate of fuel consumption is described by single-step arrhenius rate equation and liquefied petroleum gas (LPG) is served as fuel. The predicted results are used for further improvement of SPMB. Thermal characteristics that are investigated are firing rate, equivalence ratio, optical thickness and porosity. Both gas-solid temperature profiles throughout simulation domain are reported and burner performance is presented by heat recirculation and radiant output efficiencies. Predicted results show that the effect of equivalence ratio and firing rate is significant and strong influence on combustion location, temperature structures, post flame length and burner performance. Further improvement of SPMB should be focused on: firstly, primary air entrainment, secondly, the entrainment of jet diffusion flames for the beneficial radiation feedback of jet diffusion flame.

Keywords: porous medium, Self-aspirating, heat recirculation, jet diffusion flame

1. บทนำ

ปัจจุบันหัวเผาที่ทำงานภายใต้สภาวะความดันบรรยากาศมีปริมาณเพิ่มมากขึ้นและมีบทบาทในชีวิตประจำวันของมนุษย์ เช่น หัวเผาความดันต่ำ (low pressure) ที่พบในครัวเรือน และหัวเผาความดันสูง (high pressure) ที่พบในอุตสาหกรรมอาหารขนาดเล็ก ขนาดกลาง (SME) ฯลฯ และเราทราบกันดีในชื่อเตาแก๊สแบบหัวฟู (Conventional burner, CB) ซึ่งหัวเผาเหล่านี้ส่วนใหญ่ใช้แก๊ส LPG (Liquefied Petroleum Gas) เป็นเชื้อเพลิงในการเผาไหม้ จากสถิติการใช้พลังงานแก๊ส LPG ของประเทศไทยปี พ.ศ. 2557 ภาคครัวเรือนคิดเป็นปริมาณมากถึง 29 เปอร์เซ็นต์ของการใช้แก๊ส LPG ทั้งหมดดังรูปที่ 1 และแนวโน้มการบริโภครวมทั้งราคาของแก๊ส LPG เพิ่มขึ้นทุกๆ ปี [1]



รูปที่ 1 สัดส่วนรวมของปริมาณการใช้แก๊ส LPG ในประเทศไทย พ.ศ. 2557 [1]

การเข้าใจถึงกลไกการเผาไหม้และปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการการเผาไหม้นั้นจะทำให้เราสามารถควบคุมปริมาณแก๊สมลพิษ รวมถึงการปรับปรุงประสิทธิภาพทางความร้อนของหัวเผาได้ ซึ่งหัวเผาแบบ CB ที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในประเทศไทยส่วนมากจะมีประสิทธิภาพทางความร้อนค่อนข้างต่ำ (น้อยกว่า 30%) [2] ในการปรับปรุงประสิทธิภาพทางความร้อนของหัวเผา กระบวนการเผาไหม้ภายในวัสดุพอร์ซเลนได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้งาน เนื่องจากเป็นเทคโนโลยีการเผาไหม้ที่สะอาดและมีประสิทธิภาพสูง เกือบครึ่งศตวรรษที่ผ่านมาได้มีนักวิจัยจำนวนมากได้ทำการศึกษาอย่างจริงจัง โดยคนแรกที่น่าเสนอแนวความคิดนี้ รู้จักกันในชื่อหลักการหมุนเวียนความร้อน Wienberg [3] การเผาไหม้ภายในหัวเผาวัสดุพอร์ซเลนจะมีการหมุนเวียนความร้อนผ่านโครงสร้างของแข็งจากบริเวณด้านหลังเปลวไฟ (downstream) ไปสู่บริเวณด้านหน้าเปลวไฟ (upstream) ด้วยการแผ่รังสีความร้อนและการนำความร้อนในเนื้อของแข็ง (porous) ที่เชื่อมต่อกันเป็นโครงข่ายทำให้ได้การเผาไหม้ในลักษณะ excess enthalpy flames ซึ่งการเผาไหม้ที่ได้จะมีความเร็วของเปลวไฟสูงกว่าการเผาไหม้ในบรรยากาศเปิดทั่วไป ขอบเขตการเผาไหม้ที่กว้าง ประสิทธิภาพการแผ่รังสีสูง ในขณะที่การปลดปล่อยมลภาวะต่ำทั้งในโตรเจนออกไซด์ (NO_x) และคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) [4] ต่อมา Barra and Ellzey [5] ได้ทำการศึกษากลไกการหมุนเวียนความร้อนภายในหัวเผาวัสดุพอร์ซเลน โดยกำหนดให้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เป็นแบบ 1 มิติ ขึ้นกับเวลา (time-dependent) และกระบวนการทางเคมีเผาไหม้เป็นแบบ multi-step chemical kinetics เกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ (complete chemistry) ผลการศึกษา อัตราส่วนความเร็วของเปลวไฟ (flame speed ratio) ถูกนำเสนอด้วยอัตราส่วนระหว่างความเร็วเปลวไฟภายในวัสดุพอร์ซเลน (effective flame speed) ต่อความเร็วเปลวไฟแบบราบเรียบ (laminar flame speed) ประสิทธิภาพในการหมุนเวียนพลังงานของหัวเผา (energy recirculation efficiency) ถูกรายงานในรูปแบบเปอร์เซ็นต์ระหว่างอัตราส่วนของพลังงานที่ถูกหมุนเวียนกลับไปสู่วัสดุพอร์ซเลนเพื่ออุ่นส่วนผสม (preheat zone) ต่อปริมาณความร้อนที่ป้อนเข้าหัวเผา (firing rate) อีกทั้งประสิทธิภาพการแผ่รังสีของหัวเผา (radiant output efficiency) ก็ถูกนำเสนอเช่นกัน ผลจากการศึกษาหัวเผาวัสดุพอร์ซเลนด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์พบว่าการถ่าย

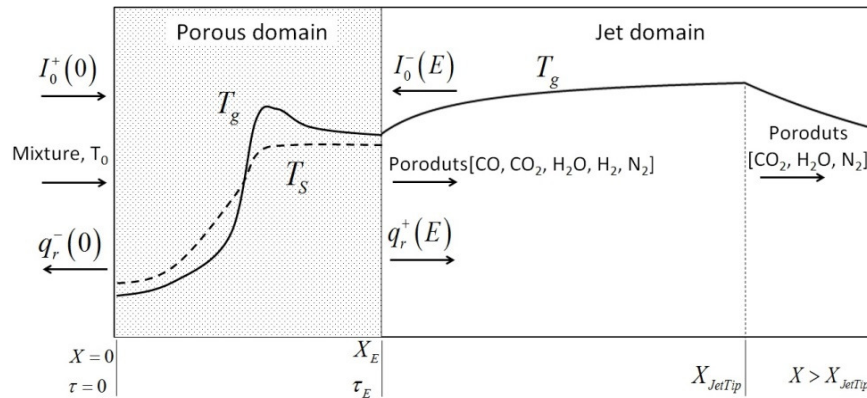
โณพลังงานโดยการแผ่รังสีมีบทบาทที่สำคัญอย่างมากกับกระบวนการการถ่ายโอนพลังงานของหัวเผา อีกทั้งแนวโน้มผลการจำลองมีความสอดคล้องกับการทดลองสำหรับความยาวของหัวเผาที่แตกต่างกัน ในปี ค.ศ. 2011 Yoksenakul and Jugjai [6] ได้ทำการออกแบบหัวเผาวัสดุพอร์นที่เหนี่ยวนำอากาศด้วยตัวเอง (SPMB) โดยการพัฒนาจากหัวเผาแบบหัวฟู่ (Conventional Burner, CB) ซึ่งยังคงคุณลักษณะเดิมไว้คือ ท่อผสม (mixing tube) หัวฉีด (fuel nozzle diameter) และความดันตกคร่อมหัวเผา (pressure drop) ค่า Peclet number เพื่อการออกแบบความสูงของชั้นวัสดุพอร์น ขนาดความโตของเม็ดวัสดุพอร์น (Al_2O_3) และความดันตกคร่อมตลอดทั้งหัวเผา ซึ่งทราบค่าจากการคำนวณโดยใช้สมการของ Ergun ผลการทดลองพบว่าประสิทธิภาพการแผ่รังสีของหัวเผา (radiant output efficiency) มีค่าเท่ากับ 23 % และช่วงการทำงานของหัวเผามีค่าเท่ากับ 2.65 (23 to 61 kW) ค่ามลภาวะที่เกิดจาก SPMB มีค่าต่ำกว่า CB ตลอดช่วงการทำงาน ค่า CO น้อยกว่า 200 ppm และค่า NO_x น้อยกว่า 98 ppm

ในงานวิจัยนี้จะการศึกษาถึงคุณลักษณะตัวแปรเชิงความร้อนของหัวเผาชนิดวัสดุพอร์นแบบเหนี่ยวนำอากาศด้วยตัวเองที่ส่งผลต่อโครงสร้างทางความร้อนและสมรรถนะของหัวเผาด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบ 1 มิติ และพิจารณาปฏิกิริยาการเผาไหม้แบบ single-step arrhenius rate equation พร้อมทั้งแนวทางในการพัฒนาหัวเผาชนิดวัสดุพอร์น โดยมีตัวแปรที่ศึกษาคือความร้อนที่ป้อนหัวเผา (firing rate) อัตราส่วนสมมูล (equivalence ratio) ความหนาเชิงแสง (optical thickness) และความพรุน (porosity) การนำเสนอผลการศึกษาของหัวเผาจะถูกแสดงอยู่ในรูปของอุณหภูมิของแก๊สและแข็ง (gas and solid temperature) ของทั้งสองส่วนคือ Porous domain และ Jet domain ตามลำดับ สมรรถนะของหัวเผาจะถูกแสดงอยู่ในรูปประสิทธิภาพการหมุนเวียนความร้อนและการแผ่รังสีความร้อน

2. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

รูปที่ 2 แสดงลักษณะทางกายภาพของแบบจำลองหัวเผาชนิดวัสดุพอร์นแบบเหนี่ยวนำอากาศด้วยตัวเอง (SPMB) จะเห็นว่าแบบจำลองประกอบด้วยสองส่วนคือ porous domain เป็นการจำลองการเผาไหม้แบบเปลวไฟผสมกันมาก่อนบางส่วน (partially premixed flame) ซึ่งบริเวณการเผาไหม้ (combustion zone) นั้นจะเกิดขึ้นภายในวัสดุพอร์น และส่วนของ jet domain จำลองการเผาไหม้แบบแพร่ชนิดเปลวไฟแบบเจ็ต (jet diffusion flame) โดยเชื้อเพลิงบางส่วนที่ยังไม่ได้เกิดการสันดาปกับออกซิเจนภายในวัสดุพอร์นจะเกิดการสันดาปกับอากาศที่บริเวณดังกล่าวจนสมบูรณ์ (complete combustion) การจำลองกำหนดให้เชื้อเพลิง (แก๊ส LPG) ผสมคลุกเคล้ากับอากาศบางส่วนตามอัตราส่วนสมมูล (ϕ) ที่อุณหภูมิบรรยากาศ ($30^\circ C$) ที่สภาวะส่วนผสมแบบหนา (Rich) เนื่องจากจำกัดการเหนี่ยวนำอากาศส่วนแรก (primary aeration) ของหัวเผาแบบเหนี่ยวนำอากาศด้วยตัวเอง (CB) [7] จะถูกป้อนเข้าไปสู่หัวเผาในส่วนวัสดุพอร์น (porous domain) จากนั้นเอนทัลปีของส่วนผสมจะเพิ่มขึ้นโดยกระบวนการหมุนเวียนความร้อนของวัสดุพอร์นก่อนที่จะเกิดกระบวนการเผาไหม้ภายในวัสดุพอร์น (submerged flame) โดยวัสดุพอร์นที่ใช้ในการจำลองคืออะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) และแก๊สผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการเผาไหม้ภายในวัสดุพอร์นจะประกอบด้วยแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) น้ำ (H_2O) แก๊ส

ไนโตรเจน (N_2) และแก๊สไฮโดรเจน (H_2) เนื่องจากเป็นแก๊สส่วนประกอบหลักของการเผาไหม้แบบส่วนผสมหนา [8] หลังจากนั้นกระบวนการการเผาไหม้สมบูรณ์จะเกิดขึ้นบริเวณส่วนยอดของเปลวไฟแบบแพร่ (jet flame tip) ซึ่งแก๊สที่ปรากฏในผลิตภัณฑ์จะประกอบด้วยสามชนิดหลักด้วยกันคือ CO_2 , H_2O และ H_2 ตามลำดับ



รูปที่ 2 ลักษณะทางกายภาพและโครงสร้างทางความร้อนของแบบจำลอง

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ถูกกำหนดให้เป็นการจำลองที่ต่อเนื่องกันของโมเดลทั้งสองส่วน คือส่วน Porous domain ประยุกต์หลักการโครงสร้างทางความร้อนและการแผ่รังสีแบบ 1 มิติ วิธีการเฉลี่ยปริมาตรจริง (volume-average approach) และ Local thermal non-equilibrium สำหรับ Jet domain นำเอาทฤษฎีพื้นฐานการเผาไหม้แบบแพร่ ชนิดเปลวไฟแบบเจ็ตของ Schvab-Zelovich Transformation [9] โดยการจำลองนั้นจะเริ่มจากการจำลอง Jet domain เป็นลำดับแรก เพื่อคำนวณปริมาณการแผ่รังสีความร้อนของเปลวไฟไปสู่หัวเผาในส่วนของวัสดุพอร์น (porous domain) หลังจากนั้นโปรแกรมก็จะคำนวณโครงสร้างทางความร้อนภายในหัวเผาส่วนวัสดุพอร์น พร้อมทั้งค่าคุณลักษณะของหัวเผ่าอื่นที่เกี่ยวข้อง รายละเอียดเพิ่มเติมของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของหัวเผ่าชนิดวัสดุพอร์นแบบเหนี่ยวนำอากาศด้วยตัวเองตามเอกสารอ้างอิงที่ [10] เช่น ค่าจำเพาะต่างๆของหัวเผ่าขอบเขตและสมมุติฐานของแบบจำลอง การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง ฯลฯ เป็นต้น

2.1 สมการการเผาไหม้ในส่วนวัสดุพอร์น (porous domain)

ระบบสมการทางคณิตศาสตร์ในส่วนของหัวเผ่าชนิดวัสดุพอร์นแบบเหนี่ยวนำอากาศด้วยตัวเอง สามารถแสดงได้ดังนี้

สมการอนุรักษ์พลังงานสำหรับสถานะแก๊ส

$$\rho_g c_{pg} \varepsilon \frac{\partial T_g}{\partial t} + \rho_g u_g c_{pg} \varepsilon \frac{\partial T_g}{\partial x} = \lambda_g \varepsilon \frac{\partial^2 T_g}{\partial x^2} - h_v (T_g - T_s) + \varepsilon h_o w \quad (1)$$

สมการอนุรักษ์พลังงานสำหรับสถานะของแข็ง

$$\rho_s c_{ps} (1 - \varepsilon) \frac{\partial T_s}{\partial t} = \lambda_{s,eff} \frac{\partial^2 T_s}{\partial x^2} - \frac{\partial q_r^n}{\partial x} + h_v (T_g - T_s) \quad (2)$$

สมการอนุพันธ์มวลย่อย

$$\rho_g \varepsilon \frac{\partial y}{\partial t} + \rho_g u_g \varepsilon \frac{\partial y}{\partial x} = D \rho_g \varepsilon \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} + \varepsilon W \quad (3)$$

อัตราการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้แบบ single-step arrhenius rate

$$W = A \rho (1-y) \exp(-E / RT) \quad (4)$$

เพื่อให้สามารถคำนวณสมการอนุพันธ์พลังงานสถานะของแข็งได้ สมการอนุพันธ์ของฟลักซ์การแผ่รังสีสุทธิ (divergence of net radiative heat flux, $\frac{\partial q_r^n}{\partial x}$) ซึ่งเป็นฟังก์ชันกับค่าความหนาเชิงแสง (optical thickness, τ)

$$\frac{\partial q_r^n(\tau)}{\partial x} = 4\pi k_b(\tau) - 2\pi k \left[I_0 E_2(\tau) + I_0 E_2(\tau_0 - \tau) + \int_0^{\tau} I_b(\tau') E_1(|\tau - \tau'|) d\tau' \right] \quad (5)$$

$$\text{และ } E_n(\tau) = \int_0^1 \mu^{n-2} \exp(-\tau / \mu) d\mu \quad (6)$$

โดยที่ $n=1, 2, 3$

สมการอนุพันธ์เพื่อการคำนวณฟลักซ์การแผ่รังสีสุทธิ

$$q_r(\tau) = q_r^+(\tau) + q_r^-(\tau) \quad (7)$$

โดยวิธีการคำนวณแบบ forward and backward half-rang ดังต่อไปนี้

$$q_r^+(\tau) = 2\pi [I_0 E_3(\tau) + \int_0^{\tau} I_b(\tau') E_2(\tau - \tau') d\tau'] \quad (8)$$

$$q_r^-(\tau) = -2\pi [I_0 E_3(\tau_0 - \tau) + \int_{\tau}^{\tau_0} I_b(\tau') E_2(\tau' - \tau) d\tau'] \quad (9)$$

$$\text{โดยที่ } I_b = \frac{\sigma T_s^4}{\pi}$$

2.2 สมการการเผาไหม้แบบแพร่ชนิดเปลวไฟแบบเจ็ต (Jet domain)

รูปที่ 3 แสดงลักษณะทางกายภาพของแบบจำลองส่วนการเผาไหม้แบบแพร่ชนิดเปลวไฟแบบเจ็ต ระบบสมการทางคณิตศาสตร์ในส่วนการเผาไหม้แบบแพร่ชนิดเปลวไฟแบบเจ็ตสามารถแสดงได้ดังนี้

สมการความต่อเนื่อง

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (10)$$

สมการอนุพันธ์โมเมนตัม

$$ru \frac{\partial u}{\partial x} + rv \frac{\partial u}{\partial r} = (v + \varepsilon) r \frac{\partial u}{\partial r} \quad (11)$$

สมการอนุพันธ์พลังงานสำหรับสถานะแก๊ส

$$ru \frac{\partial(T-T_\infty)}{\partial x} + rv \frac{\partial(T-T_\infty)}{\partial r} = (v + \varepsilon) \frac{\partial}{\partial r} r \frac{\partial(T-T_\infty)}{\partial r} + \frac{\dot{q}''' r}{\rho c} \quad (12)$$

สมการอนุรักษ์มวลย่อย

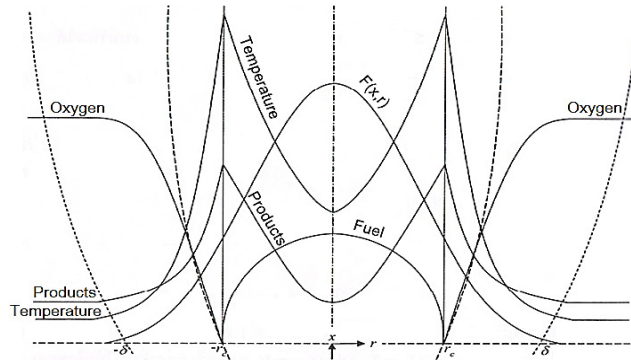
$$ru \frac{\partial y_j}{\partial x} + rv \frac{\partial y_j}{\partial r} = (v + \varepsilon) \frac{\partial}{\partial r} r \frac{\partial y_j}{\partial r} + \frac{\dot{w}_j''' r}{\rho} \quad (13)$$

สมการการแผ่รังสีของเปลวไฟแบบเจ็ต

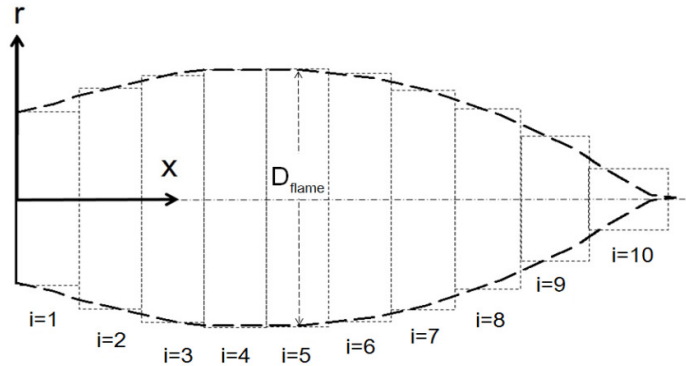
$$\dot{Q}_R = \int_{A_{burner}} \frac{\sigma \varepsilon_g T_g^4}{\pi} e^{-k_g l_m} dA \quad (14)$$

โดยที่ $L_m = 0.9 D_{flame}$

เพื่อทราบค่าการแผ่รังสีของเปลวไฟโดยกลุ่มแก๊สไอเสียของแต่ละปริมาตรส่วนไปยังจุดศูนย์กลางหัวเผาส่วนวัสดุพอรุน วิธี semi-infinite cylinder radiating to center of base ได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้ โดยเปลวไฟแบบเจ็ตหรือเปลวไฟส่วนที่สองถูกแบ่งออกเป็น 10 ส่วน ดังรูปที่ 4 ค่าเส้นผ่านศูนย์กลางการเฉลี่ยของแต่ละปริมาตรส่วน (D_{flame}) ถูกนำมาคำนวณเพื่อทราบค่าความยาวลำแสงเฉลี่ย (mean beam length; L_m) ในการคำนวณปริมาณพลังงานความร้อนโดยการแผ่รังสีจากกลุ่มแก๊สไอเสียไปยังจุดศูนย์กลางของหัวเผา ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีความร้อนเฉลี่ยของ Planck (planck-mean absorption coefficient)[11] และค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อน (emissivity) ของกลุ่มแก๊สไอเสียภายในเปลวไฟคำนวณโดยวิธีเศษส่วนโมลเฉลี่ย [12]



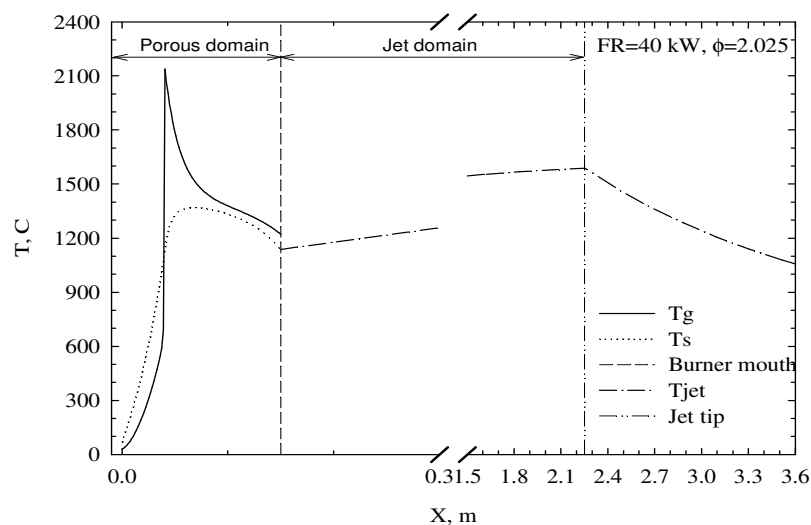
รูปที่ 3 ลักษณะทางกายภาพของแบบจำลองส่วนการเผาไหม้แบบแพร่ชนิดเปลวไฟแบบเจ็ต



รูปที่ 4 ลักษณะทางกายภาพของเปลวไฟแบบเจ็ต

3. ผลการจำลองและการวิเคราะห์

ผลการจำลองหัวเผาชนิดวัสดุพูนแบบเหนียวนำอากาศด้วยตัวเองจะถูกแบ่งออกเป็นสองส่วนคือ ส่วนของวัสดุพูน (porous domain) ซึ่งมีความยาว (ความสูงของหัวเผา) เท่ากับ 0.15 เมตร และส่วนของการเผาไหม้เจ็ตเชื้อเพลิงแก๊ส (jet domain) หรือการเผาไหม้ส่วนที่สอง (post flame) ตัวแปรต่างๆ ที่ถูกนำมาใช้เพื่อการวิเคราะห์ของหัวเผาชนิดวัสดุพูนแบบเหนียวนำอากาศด้วยตัวเองแสดงดังตารางที่ 1 ตัวแปรอุณหภูมิถูกใช้เพื่อการนำเสนอผลการศึกษาหัวเผาวัสดุพูนซึ่งใช้อุณหภูมิบริเวณจุดศูนย์กลางของหัวเผา ตลอดช่วงความยาวของการเผาไหม้ทั้งสองส่วน ตามแนวแกน Axial (แกน x) แสดงดังรูปที่ 5 ในส่วนของ porous domain ซึ่งอุณหภูมิของแก๊สเขียนแทนด้วยเส้นทึบ (solid line) อุณหภูมิของของแข็งเขียนแทนด้วยเส้นจุด (dot line) และอุณหภูมิของแก๊สในส่วน jet domain เขียนแทนด้วยเส้นปะ-จุด (dash-dot line) สำหรับกรณีศึกษา (based case) กำหนดให้ค่าความร้อนที่ป้อนหัวเผา (firing rate, FR) เท่ากับ 40 kW ค่าความพูน (porosity, $\mathcal{E}$) เท่ากับ 0.419 ค่าอัตราส่วนสมมูล (equivalence ratio, ϕ) เท่ากับ 2.025 และค่าความหนาเชิงแสง (optical thickness, τ) เท่ากับ 8.84 สมรรถนะของหัวเผาถูกนำเสนอโดยประสิทธิภาพการหมุนเวียนความร้อน (heat recirculation efficiency) และประสิทธิภาพการแผ่รังสี (radiant output efficiency)



รูปที่ 5 โครงสร้างทางความร้อนของการเผาวัสดุพรุนตามแนวแกน Axial ที่จุดศูนย์กลาง

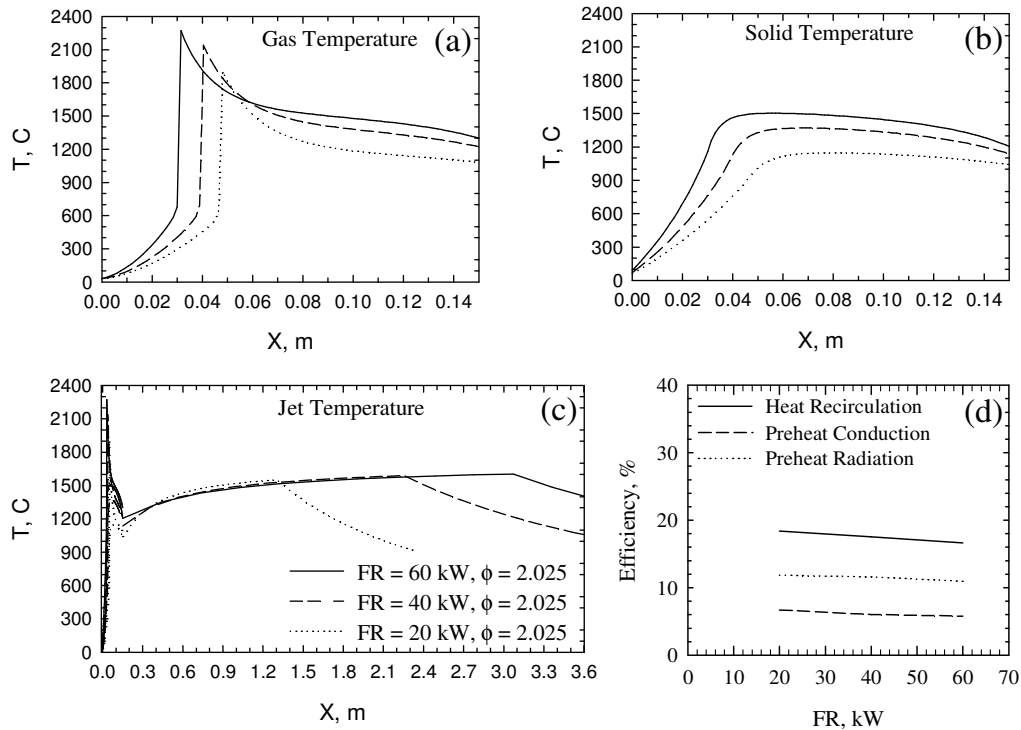
ตารางที่ 1 รายละเอียดของการจำลองและการวิเคราะห์ของหัวเผาชนิดวัสดุพรุนแบบเหนียวนำอากาศด้วยตัวเอง

Case study	Firing rate FR, (kW)	Equivalence ratio ϕ	Optical thickness τ	Porosity ϵ	Temperature (C)		Efficiency %
					Porous domain	Jet domain	
1	20	2.025	x	x	o	o	o
	40	2.025	x	x	o	o	o
	60	2.025	x	x	o	o	o
2	40	1.8	x	x	o	o	o
	40	2.025	x	x	o	o	o
	40	2.2	x	x	o	o	o
3	40	x	5.84	x	o	o	o
	40	x	8.84	x	o	o	o
	40	x	13.84	x	o	o	o
4	40	x	x	0.349	o	o	o
	40	x	x	0.419	o	o	o
	40	x	x	0.489	o	o	o

3.1 อิทธิพลของปริมาณความร้อนที่ป้อนหัวเผา (Firing rate)

รูปที่ 6 แสดงอิทธิพลของ Firing rate ต่อโครงสร้างอุณหภูมิภายในหัวเผาวัสดุพรุนที่ค่าอัตราส่วนสมมูลเท่ากับ 2.025 เมื่อ Firing rate เพิ่มขึ้น อุณหภูมิในระบบจะสูงขึ้นและตำแหน่งของเปลวไฟจะเคลื่อนไป

ทางด้าน Upstream (รูปที่ 6a-b) เนื่องจากการหมุนเวียนความร้อนของวัสดุพูนจากทางด้าน Downstream ไปอุ่น ส่วนผสมทางด้าน Upstream (preheat zone) ทำให้ความเร็วเปลวไฟภายในวัสดุพูน (effective flame speed) เพิ่ม



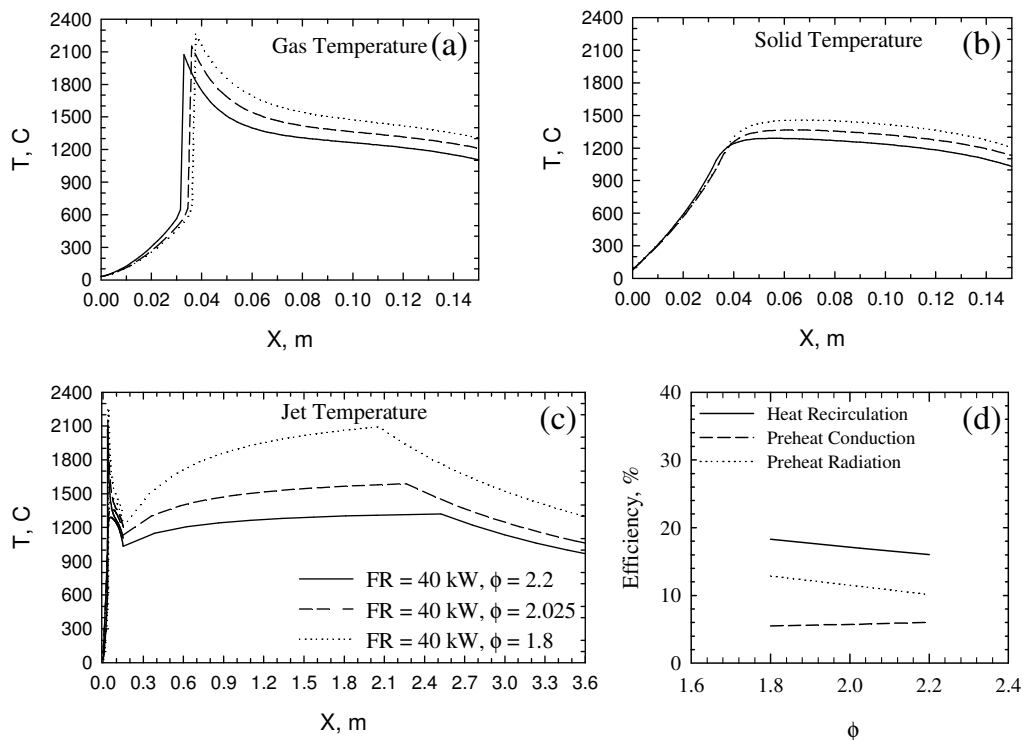
รูปที่ 6 อิทธิพลของ Firing rate ต่อโครงสร้างทางความร้อนของการเผาวัสดุพูน

มากขึ้นกว่าความเร็วการไหลของส่วนผสมภายในวัสดุพูนที่เวลาเดียวกัน อีกทั้งส่งผลให้ความยาวเปลวไฟส่วนที่สองมีค่าเพิ่มมากขึ้น (รูปที่ 6c) และประสิทธิภาพการหมุนเวียนความร้อนลดลง (รูปที่ 6d) เนื่องจากระบวนการสันดาประหว่างเชื้อเพลิงกับออกซิเจนถูกจำกัดโดยปริมาณของอากาศส่วนแรก (primary aeration) ที่ถูกเหนี่ยวนำจากการฉีดเชื้อเพลิง LPG ที่ค่าอัตราส่วนผสมเท่ากับ 2.025 นั้นหมายความว่าเชื้อเพลิงอีกประมาณ 50% ถูกเผาไหม้กับอากาศส่วนที่สองโดยการเผาไหม้แบบแพร่ (post flame) โดยการหมุนเวียนความร้อนผ่านกระบวนการแผ่รังสีความร้อนของวัสดุพูนมีบทบาทความสำคัญมากกว่า เมื่อเทียบกับการหมุนเวียนความร้อนผ่านกระบวนการนำความร้อนโดยเนื้อวัสดุพูนเองที่เชื่อมต่อกันเป็นโครงข่าย ภายใต้สภาวะการเผาไหม้ส่วนผสมหนา และสอดคล้องกับการรายงานผลการพิจารณาประสิทธิภาพการหมุนเวียนความร้อนตามเอกสารอ้างอิงที่ [5]

3.2 อิทธิพลของอัตราส่วนผสม (Equivalence ratio)

รูปที่ 7 แสดงอิทธิพลของอัตราส่วนผสมต่อโครงสร้างอุณหภูมิภายในหัวเผาวัสดุพูนที่ค่า Firing rate เท่ากับ 40 kW เมื่ออัตราส่วนผสมเพิ่มมากขึ้น อุณหภูมิภายในระบบลดลงและตำแหน่งของเปลวไฟเคลื่อนไปทางด้าน Upstream และประสิทธิภาพการหมุนเวียนความร้อนลดลงเนื่องจากปริมาณความร้อนที่ถูกปลดปล่อยภายในหัว

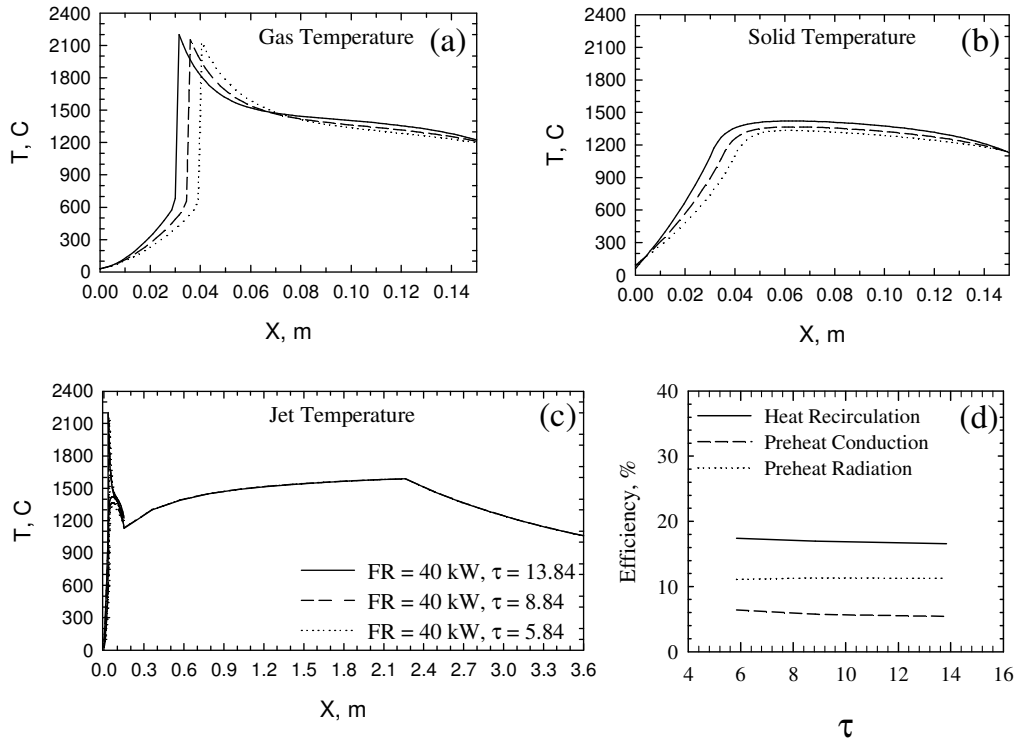
เผาส่วนวัสดุพุนลดลง ส่วนความยาวของเปลวไฟส่วนที่สองมีค่าเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากค่าอัตราส่วนสมมูลเพิ่มขึ้น อีกทั้งเปลวไฟส่วนที่สองที่ยาวจะส่งผลให้การแผ่รังสีความร้อนของเปลวไฟไปที่หัวเผามีค่าน้อยลงเช่นกัน



รูปที่ 7 อิทธิพลของอัตราส่วนสมมูลต่อโครงสร้างทางความร้อนของการเผาวัสดุพุน

3.3 อิทธิพลของค่าความหนาเชิงแสง (Optical thickness)

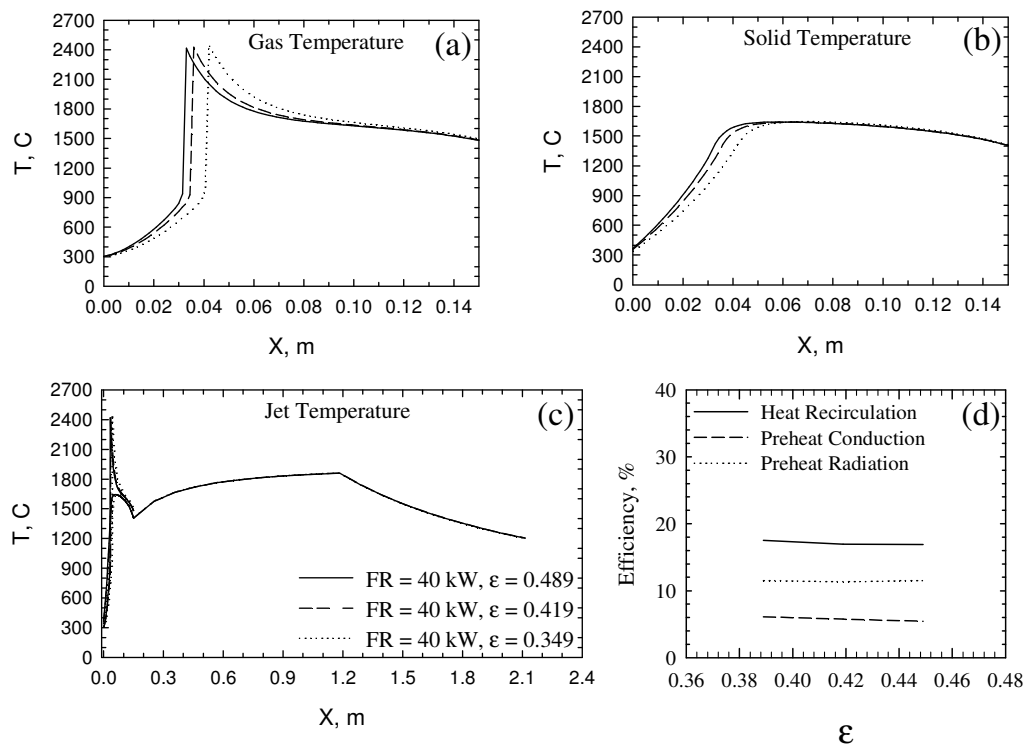
รูปที่ 8 แสดงอิทธิพลของความหนาเชิงแสงต่อโครงสร้างอุณหภูมิภายในหัวเผาวัสดุพุนที่ค่า Firing rate เท่ากับ 40 kW อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ 2.025 เมื่อค่าความหนาเชิงแสงเพิ่มมากขึ้นส่งผลต่ออุณหภูมิการเผาไหม้ สูงสุดน้อยมาก (รูปที่ 8a) และไม่ส่งผลต่อความยาวของเปลวไฟ (รูปที่ 8c) แต่ว่าแนวโน้มอุณหภูมิภายในระบบ เพิ่มขึ้น เพราะว่าวัสดุพุนมีสัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีความร้อนเพิ่มขึ้น ส่งผลให้อุณหภูมิของแข็งด้านหลัง เปลวไฟเพิ่มขึ้น (รูปที่ 8b) ดังนั้นวัสดุพุนจึงสามารถแผ่รังสีความร้อนออกไปทั้งทางด้าน upstream และ downstream ได้มากขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพการหมุนเวียนความร้อนอุณหภูมิของวัสดุพุนเปลี่ยนแปลงน้อย มาก (รูปที่ 8d) ซึ่งมีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ[13]



รูปที่ 8 อิทธิพลของความหนาแข็งแสงต่อโครงสร้างทางความร้อนของการเผาวัสดุพูน

3.4 อิทธิพลของค่าความพูน (Porosity)

รูปที่ 9 แสดงอิทธิพลของค่าความพูนต่อโครงสร้างอุณหภูมิภายในหัวเผาวัสดุพูนที่ค่า Firing rate เท่ากับ 40 kW อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ 2.025 เมื่อค่าความพูนเพิ่มมากขึ้น ตำแหน่งการเผาไหม้เคลื่อนที่ไปทางด้าน upstream เพิ่มมากขึ้นแต่ไม่ส่งผลต่ออุณหภูมิสูงสุดของการเผาไหม้เป็นอย่างเป็นนัยสำคัญ (รูปที่ 9a-b) ทั้งนี้ เนื่องจากการเพิ่มความพูนของวัสดุพูนทำให้ปริมาตรของช่องว่างในวัสดุพูนมากขึ้นส่งผลให้ความเร็วการไหลของแก๊สไอเสียลดลง การถ่ายเทความร้อนระหว่างสถานะแก๊สและของแข็งจึงแย่งลง ซึ่งสังเกตได้จากกราฟประสิทธิภาพการหมุนเวียนความร้อน (รูปที่ 9d) และไม่ส่งผลต่อความยาวของเปลวส่วนที่สองอย่างเป็นนัยสำคัญ (รูปที่ 9c)



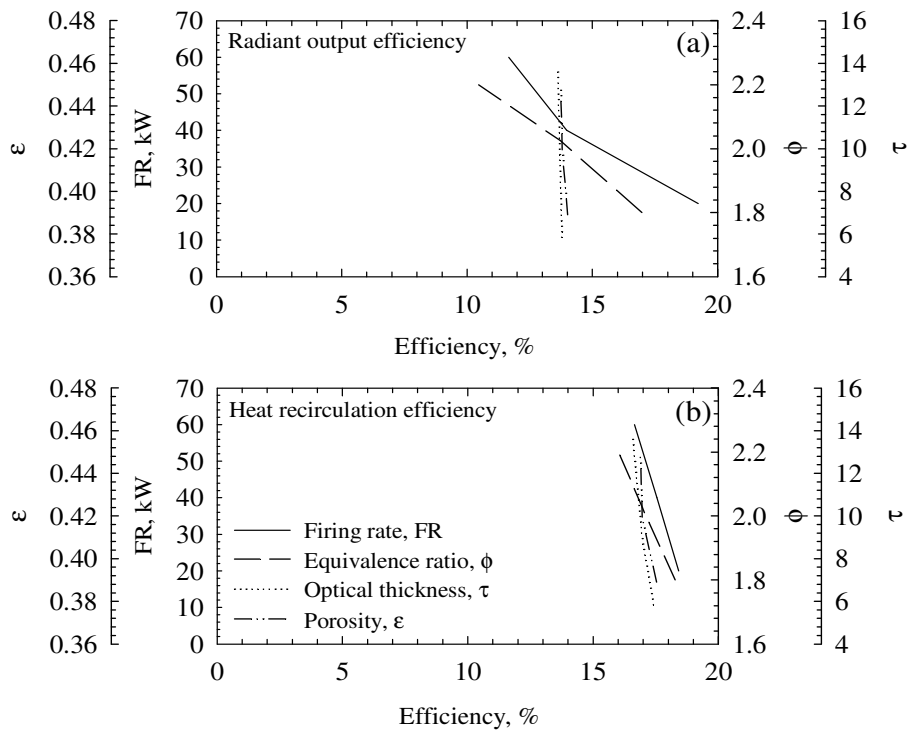
รูปที่ 9 อิทธิพลของค่าความพรุนต่อโครงสร้างทางความร้อนของการเผาวัสดุพูน

3.5 สมรรถนะของหัวเผาวัสดุพูน (Burner performance)

รูปที่ 10 แสดงประสิทธิภาพของหัวเผาวัสดุพูนโดยประสิทธิภาพการแผ่รังสีความร้อนไปทาง downstream (รูปที่ 10a) และประสิทธิภาพการหมุนเวียนความร้อน (รูปที่ 10b) โดยคำนวณจากสมการที่ 15 และ 16 ตามลำดับ จากผลการจำลองพบว่าตัวแปรที่มีผลกระทบต่อสมรรถนะของหัวเผามากที่สุดสองตัวแปรคือ ความร้อนที่ป้อนหัวเผาและอัตราส่วนสมมูล สำหรับการพัฒนาหัวเผาวัสดุพูนแบบเหนี่ยวนำอากาศด้วยตัวเองควรมุ่งเน้นไปที่การปรับปรุงการเหนี่ยวนำอากาศส่วนแรกของหัวเผา (primary aeration) ให้มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับการศึกษาการไหลของอากาศที่ผสมกับแก๊สเชื้อเพลิงในท่อผสมของหัวเตาแก๊สหุงต้มขนาด KB-5 โดยใช้การจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ [14] โดยที่กระบวนการเหนี่ยวนำเป็นผลมาจากการที่แก๊ส LPG ถูกฉีดออกจากหัวฉีดด้วยความเร็วสูงเหนี่ยวนำอากาศนิ่งที่อยู่บริเวณรอบๆปากทางท่อผสม (mixing tube) ผ่านกระบวนการถ่ายโอนโมเมนตัม

$$\text{Radiant output efficiency} = \frac{\text{output radiation}}{\text{firing rate}} \quad (15)$$

$$\text{Heat recirculation efficiency} = \frac{\text{Solid-to-gas convection in preheat zone}}{\text{firing rate}} \quad (16)$$



รูปที่ 10 ประสิทธิภาพของหัวเผาวัสดุพูน

4. สรุป

Equivalence ratio และ Firing rate ส่งผลกระทบต่อตำแหน่งเปลวไฟ (combustion location) โครงสร้างทางความร้อนของหัวเผา (gas and solid temperature) ความยาวของเปลวไฟส่วนที่สอง (jet flame) และสมรรถนะของหัวเผาวัสดุพูน (burner performance) อย่างเป็นนัยสำคัญมากกว่าตัวแปรอื่นๆ และการพัฒนาหัวเผานิคววัสดุพูนแบบเหนียวนำอากาศด้วยตัวเอง ควรมุ่งเน้นไปที่การปรับปรุงประสิทธิภาพการเหนียวนำอากาศส่วนแรกของหัวเผา อีกทั้งความยาวเปลวไฟส่วนที่สองที่สั้นลงจะช่วยเพิ่มปริมาณพลังงานรังสีความร้อนที่ถูกแผ่กลับไปที่หัวเผา ดังนั้นการปรับปรุงรูปร่างของหัวเผาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการเหนียวนำอากาศส่วนที่สองก็มีความสำคัญเช่นกัน

5. รายการสัญลักษณ์

A	=	Pre-exponential factor or Area	[m ²]
C _p	=	Specific heat capacity at Constant Pressure	[J/kg K]
D	=	Diffusivity of gas, Diameter	[m ² /s]
E	=	Activation Energy	[J/kmol]

E_n	=	Exponential Integral Function	[-]
FR	=	Firing rate	
h	=	Enthalpy	[J/kg]
h_v	=	Volumetric heat transfer coefficient	[W/m ³ K]
I_0	=	Intensity of Radiation on Inlet Plane	[W/m ²]
I_b	=	Black Body Radiation Intensity	[W/m ²]
I_e	=	Intensity of Radiation on Outlet Plane	[W/m ²]
Pr	=	Prandtl Number	[-]
q_r	=	Radiative Heat Flux	[W/m ²]
R	=	Universal Gas Constant	[J/kmol K]
R, r	=	Radius	[m]
t	=	Time	[s]
T	=	Temperature	[K]
T_o	=	Ambient Temperature	[K]
u	=	Axial velocity	[m/s]
W	=	Production Rate of Species or Sink Term	[kg/s m ³]
x	=	Distance	[m]
X	=	Dimensionless Distance	[-]
y	=	Mass Fraction of Species	[-]
U	=	Radial Velocity	[m/s]
ϵ	=	Porosity or Emissivity or Turbulent eddy diffusivity	[-]
K	=	Absorption Coefficient	[m ⁻¹]
λ, k	=	Thermal Conductivity	[W/m K]
ρ	=	Density	[kg/m ³]
σ	=	Stefan –Boltzmann Constant	[W/m ² K ⁴]
ϕ	=	Equivalence Ratio	[-]
τ	=	Optical Thickness	[-]
δ	=	Boundary	[-]
สัญลักษณ์กำกับบน			
+	=	Positive Direction	

-	=	Negative Direction
n	=	Net
s	=	Surface
สัญลักษณ์กำกับล่าง		
g	=	Gas
s	=	Solid
0,i	=	Initial
b	=	Black Body
C	=	Combustion
eff	=	Effective
E	=	Exit
m	=	Mean
P	=	Pressure constant
R,r, rad	=	Radiation
T	=	Temperature
∞	=	Infinity
JetTip	=	End of Jet Combustion

เอกสารอ้างอิง

- [1] สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน. (2014). ข้อมูลพลังงาน (Energy Database) [Online]. <http://www.eppo.go.th/info/index.html> [May 25, 2015].
- [2] Yoksenakul W. and Jugjai S. (2011). Improvement of Thermal Efficiency of Heat-recirculating Gas Burner, D.Eng Thesis, Department of Mechanical Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi (KMUTT).
- [3] F. J. Weinberg. Advanced combustion methods. Academic Press, London, 1986.
- [4] กนกกาญจน์ ว่องวัชรพร. หัวเผาวัสดุพรุนสมรรถนะสูง. Princess of Naradhiwas University Journal, 2556, ปีที่ 5 ฉบับที่ 1, หน้า 109-123.
- [5] Amanda J. Barra and Janet L. Ellzey. Heat recalculation and heat transfer in porous burners. Combustion and Flame, Vol. 137, February 2004, pp. 230-241.
- [6] Yoksenakul W. and Jugjai S. Design and development of a SPMB (self-aspirating, porous medium burner) with a submerged flame. Energy, Vol. 36, March 2011, pp. 3092-3100.

- [7] อภินันต์ นามเขต และ สำเร้ง จักรใจ. คุณลักษณะการเหนี่ยวนำอากาศส่วนแรกของหัวเผาแบบ Self – aspirating Primary Air Entrainment Characteristics of a Self – Aspirating Burner. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 21, 2550, หน้า 246-252.
- [8] Wakao N. and Kaguei S. Heat and Mass transfer in Packed beds, Gordon and Breach Science Publications, New York, 1982.
- [9] สำเร้ง จักรใจ. การเผาไหม้. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ, 2547.
- [10] Bunkwang A., Kaewpradap A., Jirakulsomchok K. and Jugjai S. Numerical Simulation of a Self-aspirating Porous Medium Burner. The 5th TSME International Conference on Mechanical Engineering, 2014.
- [11] Hongmei Zhang and Michael F. Modest. Evaluation of the Planck-mean absorption coefficients from HITRAN and HITEMP databases, Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer, May 2001, Vol. 73, pp. 649-653.
- [12] H. C. Hottel and A. F. Sarofin. Radiative Transfer, McGraw-Hill, New York, 1967.
- [13] Tarun K. Kayal and Mithiles Chakravarty. Combustion of suspended fine solid fuel in air inside inert porous medium: A heat transfer analysis. International Journal of Heat and Mass, 2007, Vol. 50, pp. 3359-3365.
- [14] ณรงค์ศักดิ์ ปิยะไพโร, ธนรัฐ ศรีวิระกุล, มานะ วิชางาม และ อภินันต์ นามเขต. การศึกษาการไหลของอากาศที่ผสมกับแก๊สเชื้อเพลิงในท่อผสมของหัวเตาแก๊สหุงต้มขนาด KB-5 โดยใช้การจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 27, 2556.