

การศึกษาการเผาไหม้แบบผสมก่อนในวัสดุพรุนด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข

Numerical investigation of premixed combustion in porous media

ณัฐพงษ์ อุทัยวิทย์ และ วาতিต ภัคดี*

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต ปทุมธานี 12121

*อีเมลล์ pwatit@engr.tu.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาปรากฏการณ์การเผาไหม้แบบราบเรียบในวัสดุพรุนแบบอิ่มตัวด้วยของไหล (fluid-saturated porous media) โดยอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการเผาไหม้แบบผสมก่อน (Premixed Combustion) ซึ่งอยู่ในรูปของชุดสมการที่ใช้อธิบายพฤติกรรมของการเผาไหม้สองมิติ ชุดสมการถูกเปลี่ยนให้อยู่ในรูปไร้มิติ (Nondimensionalized) คำตอบจากการแก้ชุดสมการได้มาจากการใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขร่วมกับวิธีไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ โดยที่โดเมนการคำนวณเป็นช่องสี่เหลี่ยมปิดบรรจุด้วยวัสดุพรุนที่มีการเผาไหม้ของผสมสารตั้งต้น (reactant mixture) จากขอบด้านซ้าย ขณะที่ด้านอื่นที่เหลือหุ้มฉนวน

ผลที่ได้จากการคำนวณด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขมีความสอดคล้องกับลักษณะทางกายภาพ พบว่าค่าของอุณหภูมิในวัสดุพรุนแปรผันตรงกับอัตราส่วนสมมูล และค่า Darcy number ซึ่งแปรผันตรงกับค่าความสามารถการซึมผ่านของของไหลในวัสดุพรุนมีผลต่อพฤติกรรมการไหลของก๊าซในวัสดุพรุนอย่างมีนัยสำคัญ

คำสำคัญ: การเผาไหม้แบบผสมก่อน, วัสดุพรุนอิ่มตัว, ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข

Abstract,

This research is to numerically investigate behaviors of the two-dimensional laminar premixed combustion in porous media. The governing equations are formulated into the form of vorticity-stream function. This set of equations is non-dimensionalized and numerically solved based on finite difference algorithm. The rectangular computational domain filled with saturated porous media is subjected to premixed mixture coming into the domain from the left, while the other boundaries are well insulated. The reasonable computed results are obtained. It is found that temperature within the medium is directly proportional to an equivalence ratio. The Darcy number which is a direct function of permeability of the porous medium has a significant effect on gas flow behaviors.

Keywords: premixed combustion, saturated porous media, numerical simulation

1. บทนำ

การเผาไหม้ในวัสดุพรุนกำลังได้รับความสนใจอย่างกว้างขวางซึ่งการเผาไหม้ในวัสดุพรุน สามารถรักษาเสถียรภาพของเปลวไฟ (Flame stability) ในช่วงส่วนผสมที่บางกว่าการเผาไหม้แบบธรรมดาและเนื่องจากการถ่ายเทความร้อนจากส่วนของแข็งภายในวัสดุพรุนที่มาอุ่นก๊าซผสมให้มีอุณหภูมิสูงพอสำหรับการเกิดปฏิกิริยาเคมี ซึ่งจากการเผาไหม้ที่ส่วนผสมบางนี้ส่งผลไปยังค่าของ NO_x และ CO ลดลง ด้วยคุณลักษณะของการเผาไหม้ในวัสดุพรุนที่เหนือกว่าการเผาไหม้แบบธรรมดา จึงทำให้การเผาไหม้แบบวัสดุพรุน (porous burners) เป็นที่นิยมใช้อย่างแพร่หลายในภาคอุตสาหกรรม

ในช่วงระยะเวลาประมาณ 10 ปีที่ผ่านมาได้มีการมีผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับ หัวเผาวัสดุพรุน (porous burner) เกิดขึ้นหลายงาน ทั้งการศึกษาทางทฤษฎี และการทดลอง [1-6] ซึ่งมีงานวิจัยที่น่าสนใจแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ที่ใช้อธิบายพฤติกรรมของการเผาไหม้ในหัวเผาแบบวัสดุพรุน [1-3] งานเหล่านี้จะเป็นงานที่เป็นการเปรียบเทียบกันระหว่างผลการทดลองที่อาศัยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขกับผลการทดลองซึ่ง [1] ได้ทำการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบ 2 มิติ ที่พิจารณาสมการการส่งผ่านสถานะ (phase) ระหว่าง ก๊าซกับของแข็งในการเผาไหม้ในวัสดุพรุนซึ่งแบ่งออกเป็น 2 แบบจำลองคือ honeycomb และแบบแผ่นแยก (separate plates) และนำมาเปรียบเทียบกับผลการทดลอง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสมบัติของวัสดุพรุนมีผลต่ออัตราการเผาไหม้ ต่อมาในปี 1999 [2] ได้มีการศึกษาถึงการเผาไหม้แบบ 1 มิติเผาไหม้ชั้นตอนเดียว โดยศึกษาถึงความสามารถในการติดไฟในวัสดุพรุนโดยให้เชื้อเพลิงเป็น hydrocarbon – air mixture และการถ่ายเทความร้อน การสูญเสียความร้อนของของแข็งที่อยู่ภายในวัสดุพรุนและผลกระทบจากการไหลแบบ และปี 2000 [3] ได้มีการศึกษาถึงการเผาไหม้โดยที่มีการใช้เชื้อเพลิงในการเผาไหม้เป็นแบบผสม (premixed fuel) โดยให้เชื้อเพลิงเป็นก๊าซมีเทน (methane) กับอากาศ (air) และรูปแบบของงานเป็นสี่เหลี่ยมเป็น แบบ 2 มิติสำหรับวัสดุพรุน

ในส่วนการวิจัยที่เป็นเชิงการทดลอง[4-6] ศ.ดร.สำเริงและคณะ [4] ศึกษาการเผาไหม้จากหัวเผาวัสดุพรุนโดยใช้ Kerosene เป็น

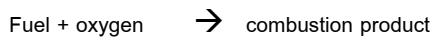
เชื้อเพลิง และได้มีการติดตั้งอุปกรณ์วัดความร้อนชนิด N-type ไว้ 17 ตำแหน่งภายในห้องเผาไหม้ และศึกษาถึงการเผาไหม้โดยมีการเปรียบเทียบระหว่างในกรณีที่มีวัสดุพอร์กับกรณีที่ไม่วัสดุพอร์และค่าของอุณหภูมิเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าความหนาของวัสดุพอร์ ต่อมาในปี 2004 Jia และ Wen H.Hsieh [5] ทำการทดลองเพื่อวิเคราะห์ก๊าซที่ได้จากการเผาไหม้คือ NO_x และ CO และศึกษาถึงผลกระทบของอัตราสมมูล(Equivalence ratio) ต่อค่าของอุณหภูมิการเผาไหม้ , ค่าความเร็วเปลวไฟ โดยให้เชื้อเพลิงเป็น Liquid petroleum gas (LPG) และเมื่อไม่นานนี้ Alavandia และ Agrawalb [6] ศึกษาค่าของอุณหภูมิ, NO_x และ CO โดยให้เชื้อเพลิงเป็นมีเทน (methane) และ ไฮโดรเจนกับคาร์บอนมอนอกไซด์ (H_2/CO) เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของเชื้อเพลิงกับอากาศ

สำหรับงานวิจัยนี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปรากฏการณ์ของการเผาไหม้ และค่าของพารามิเตอร์ต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการเผาไหม้แบบผสมกันในวัสดุพอร์โดยอาศัยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (Numerical method) เพื่อวิเคราะห์ การกระจายอุณหภูมิ Temperature distribution) อัตราการใช้สารตั้งต้น (consumption rate of reactances) ได้แก่ สารผสม (เชื้อเพลิงและออกซิเจน) และผลกระทบ ต่อค่าของอุณหภูมิ, ค่าความเข้มข้นและรูปแบบการไหลเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น อัตราส่วนสมมูล (equivalence ratio), Darcy number สมการกำกับที่อยู่ในรูป vorticity-stream function แบบไร้มิติที่ถูกพัฒนาขึ้นสามารถใช้ศึกษางานประยุกต์ของการเผาไหม้ในวัสดุพอร์ได้อย่างกว้างขวาง

2. รูปแบบของปัญหา

การทำงานวิจัยนี้ศึกษาการเผาไหม้แบบราบเรียบ(Laminar flow) โดยมีอากาศเป็นตัวกลางโดยสมการกำกับของปัญหาเป็นแบบไร้มิติ (Dimensionless) งานวิจัยนี้ เพื่อศึกษาพฤติกรรมของการเผาไหม้ในวัสดุพอร์ โดยให้ความสำคัญกับอิทธิพลที่มีผลต่ออัตรา การเผาไหม้ อุณหภูมิ อัตราการเผาไหม้สารตั้งต้นงานวิจัยนี้ได้พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อศึกษาปัญหาโดยอาศัยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขเพื่อแก้ปัญหาภายใต้สมมติฐานดังนี้

1. ปัญหาที่การศึกษาเป็นแบบ 2 มิติ (x-y coordinate)
2. ปฏิกิริยาการเผาไหม้เป็นแบบราบเรียบ(Laminar combustion)
3. ปฏิกิริยาทางเคมีแบบขั้นตอนเดียว (Single step)



4. การเผาไหม้เป็นแบบ Premixed combustion

- 5 วัสดุพอร์ที่ทำการศึกษเป็นวัสดุที่บรรจุด้วยไหลอิ่มตัว (Fluid-Saturated porous media) และวัสดุพอร์มีความสมดุลทางความร้อน (thermal equilibrium) [7-8]

3 สมการกำกับ

ซึ่งสมการที่ใช้ในการคำนวณในการการไหล อัตราการใช้สารตั้งต้นเป็นดังนี้

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{1}{\varepsilon} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{u}{\varepsilon^2} \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{v}{\varepsilon^2} \frac{\partial u}{\partial y} = \frac{1}{\rho_f} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{v}{\varepsilon} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) - \frac{\mu u}{\rho k} \quad (2)$$

$$\frac{1}{\varepsilon} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{u}{\varepsilon^2} \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{v}{\varepsilon^2} \frac{\partial v}{\partial y} = \frac{1}{\rho_f} \frac{\partial P}{\partial y} + \frac{v}{\varepsilon} \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - \frac{\mu v}{\rho k} \quad (3)$$

$$\sigma \frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \alpha \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + T^* \quad (4)$$

$$\text{โดยที่ } T^* = \Delta H_{ACE} \exp(-E / RT) \quad (5)$$

$$\sigma = \frac{[\varepsilon(\rho_p)_f + (1 - \varepsilon)(\rho_p)_s]}{(\rho_p)_f} \quad (6)$$

ε = ค่าความพรุน (Porosity)

$$\varepsilon \rho \frac{\partial C}{\partial t} + u \rho \frac{\partial C}{\partial x} + v \rho \frac{\partial C}{\partial y} = \rho D \left[\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \right] + C^* \quad (7)$$

ในงานวิจัยนี้สมการกำกับถูกแปลงให้อยู่ในรูปแบบไร้มิติ (Dimensionless) ซึ่งกำหนดโดยตัวแปรไร้มิตินี้

$$\left. \begin{aligned} \bar{t} &= \frac{tU}{L}, \quad \bar{u} = \frac{u}{U}, \quad \bar{v} = \frac{v}{U}, \quad \bar{x} = \frac{x}{L}, \\ \bar{y} &= \frac{y}{L}, \quad \bar{T} = \frac{T}{T_{ref}}, \quad \bar{C} = \frac{C}{C_{ref}} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial \bar{x}} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial \bar{y}} = 0$$

$$\varepsilon \frac{\partial \bar{u}}{\partial \bar{t}} + \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial \bar{x}} + \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial \bar{y}} = \varepsilon \frac{v}{UL} \left(\frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial \bar{x}^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial \bar{y}^2} \right) - \frac{\mu \bar{u}}{\rho k} \frac{L}{U} \quad (9)$$

$$\varepsilon \frac{\partial \bar{v}}{\partial \bar{t}} + \bar{u} \frac{\partial \bar{v}}{\partial \bar{x}} + \bar{v} \frac{\partial \bar{v}}{\partial \bar{y}} = \varepsilon \frac{v}{UL} \left(\frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial \bar{x}^2} + \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial \bar{y}^2} \right) - \frac{\mu \bar{v}}{\rho k} \frac{L}{U} \quad (10)$$

จากสมการ Continuity(1) และ สมการ Momentum ทั้งแกน x และแกน y (9),(10) สามารถจัดรูปแบบสมการได้ใหม่ซึ่งเรียกว่า stream function – vorticity equation

$$\frac{\partial^2 \bar{\psi}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{\psi}}{\partial y^2} = -\bar{\omega} \quad (11)$$

$$\varepsilon \frac{\partial \bar{\omega}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{\omega}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{\omega}}{\partial y} = \frac{\varepsilon}{\text{Re}} \left[\frac{\partial^2 \bar{\omega}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{\omega}}{\partial y^2} \right] \quad (12)$$

$$-\frac{\varepsilon^2 \bar{\omega}}{\text{Re} Da}$$

โดย Re=Reynolds number

$$Da = \text{Darcy number} = \frac{K}{H^2}$$

K = ค่าความสามารถในการซึมผ่าน

โดยที่ องค์ประกอบความเร็ว

$$\text{แนวแกน x: } \frac{\partial \bar{\psi}}{\partial y} = \bar{u} \quad (13)$$

$$\text{แนวแกน y: } -\frac{\partial \bar{\psi}}{\partial x} = \bar{v} \quad (14)$$

$$\sigma \left(\frac{\partial \bar{T}}{\partial t} \right) + \bar{u} \frac{\partial \bar{T}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{T}}{\partial y} = \frac{1}{Pe} \left[\left(\frac{\partial^2 \bar{T}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{T}}{\partial y^2} \right) \right] + T^*$$

$$T^+ = \frac{L}{U} \Delta H A C_a C_f \text{Exp}(-E/RT) / \rho C_p \text{ เป็นพจน์}$$

ของ ผลจากปฏิกิริยาทางเคมี (Chemical reaction)

สมการปฏิกิริยาของความเข้มข้นของอากาศ

$$\left(\frac{\partial C_a}{\partial t} \right) + \bar{u} \frac{\partial C_a}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial C_a}{\partial y} = \frac{1}{\text{ReSc}} \left[\left(\frac{\partial^2 C_a}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C_a}{\partial y^2} \right) \right] + C_a^+$$

$$C_a^+ = \frac{L}{U} A C_a C_f \text{Exp}(-E/RT) / \rho$$

สมการปฏิกิริยาของความเข้มข้นของเชื้อเพลิง

$$\left(\frac{\partial C_f}{\partial t} \right) + \bar{u} \frac{\partial C_f}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial C_f}{\partial y} = \frac{1}{\text{ReSc}} \left[\left(\frac{\partial^2 C_f}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C_f}{\partial y^2} \right) \right] + C_f^+$$

$$\text{โดยที่ } C_a^+ = r C_f^+$$

$$Pe = UL / D$$

$$\text{Re} = UL / \nu$$

$$\text{Sc} = \nu / D$$

$$C^+ = \text{อัตราการผลิตปฏิกิริยา}$$

$$r = \text{อัตราส่วนเชื้อเพลิงต่ออากาศ}$$

4.เงื่อนไขขอบเขตและเงื่อนไขเริ่มต้น (Boundary condition and initial condition)

โดเมนที่ใช้ในการคำนวณเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีขนาดความกว้าง W และมีความยาว L โดยที่ทางซ้ายของโดเมนมีอากาศผสมกับเชื้อเพลิงไหลเข้าตลอดเวลาส่วนด้านบน – ล่างของโดเมนหุ้มฉนวน ซึ่งมีเงื่อนไขเริ่มต้น (Initial condition) เป็นดังนี้

1. ค่าของความเข้มข้นของอากาศและเชื้อเพลิง มีค่าเท่ากับ 0
2. ค่าของ อุณหภูมิ มีค่าเท่ากับ 1 ทั่วทั้งโดเมน
3. กำหนดค่าความเร็ว ทั้ง แนวแกน x, y เท่ากับ 0 ทั่วทั้ง

โดเมน

4. ค่าของ Stream function เท่ากับ 0 ทั่วทั้งโดเมน

5. ค่าของ Vorticity เท่ากับ 0 ทั่วทั้งโดเมน

และมีเงื่อนไขขอบเขต (Boundary condition) เป็นดังนี้

1. ขอบเขตทางเข้า (Inflow boundary) $X = 0, 0 \leq Y \leq L$

1.1 ค่าความเข้มข้นของอากาศและเชื้อเพลิงบริเวณทางเข้าของโดเมนตามลำดับ

$$C_a = 1, C_f = r C_a / \phi$$

r = อัตราส่วนเชื้อเพลิงกับอากาศ ในงานวิจัยนี้ให้ $r = 1/16.37$

ϕ = อัตราส่วนสมมูล (Equivalence ratio)

- 1.2 ค่าของ อุณหภูมิ บริเวณทางเข้าของโดเมน

$$T = T_s$$

- 1.3 ค่าของความเร็วทั้งแนวแกน x และ y บริเวณทางเข้ามีค่าเท่ากับ

$$u = 6(y - y^2), v = 0 \quad \text{ตามลำดับ}$$

- 1.4 ค่าของ Stream function มีค่าเท่ากับ

$$\psi = 6 - 12y$$

- 1.5.ค่าของ Vorticity มีค่าเท่ากับ

$$\omega = 3y^2 - 2y^3$$

2. ขอบเขตบน – ล่าง (upper and lower boundary):

$$0 \leq X \leq W, Y = 0, H$$

- 2.1 ค่าของความเข้มข้นของอากาศและเชื้อเพลิง มีค่าเท่ากับ

$$\frac{\partial C_f}{\partial y} = 0, \frac{\partial C_a}{\partial y} = 0$$

- 2.2 ค่าของ อุณหภูมิ มีค่าเท่ากับ

$$\frac{\partial T}{\partial y} = 0$$

2.3 ความเร็วทั้งแนวแกน x และ y บริเวณขอบบน-ขอบล่างของโดเมนมีค่าเท่ากับ

$$u = 0, v = 0 \text{ ตามลำดับ}$$

2.4 ค่าของ Stream function บริเวณขอบบน-ขอบล่าง มีค่าเท่ากับ

$$\frac{\partial \psi}{\partial y} = 0, \psi = 0 \text{ ตามลำดับ}$$

2.5 ค่าของ Vorticity บริเวณขอบบน-ขอบล่าง มีค่าเท่ากับ

$$\frac{\partial v}{\partial x} = \omega, \frac{\partial \psi^2}{\partial y^2} = \omega \text{ ตามลำดับ}$$

3. ขอบเขตทางออก (outflow boundary); $X = W, 0 \leq Y \leq L$

3.1 ค่าของความเข้มข้นของอากาศและเชื้อเพลิงมีค่าเท่ากับ

$$\frac{\partial C_f}{\partial x} = 0, \frac{\partial C_a}{\partial x} = 0$$

3.2 ค่าของ อุณหภูมิ มีค่าเท่ากับ

$$\frac{\partial T}{\partial x} = 0$$

3.3 ค่าของความเร็วทั้งแนวแกน x และ y มีค่าเท่ากับ

$$\frac{\partial u}{\partial x} = 0, \frac{\partial v}{\partial x} = 0 \text{ ตามลำดับ}$$

3.4 ค่าของ Stream function มีค่าเท่ากับ

$$\frac{\partial \psi}{\partial x} = 0$$

3.5 ค่าของ Vorticity มีค่าเท่ากับ

$$\frac{\partial \psi^2}{\partial x^2} = 0$$

ในการคำนวณในงานวิจัยนี้ใช้มีเทน(methane)เป็นเชื้อเพลิง ในการทดลอง โดยให้ค่าของอัตราส่วนสมมูล(equivalence ratio) = 0.5, 1.0, 1.5 ซึ่งสามารถนำมาหาค่าของความเข้มข้นของอากาศและเชื้อเพลิงที่ทางเข้าของโดเมน โดยหาได้จาก

$$\phi = \frac{rY_o}{Y_f}$$

Y_o = เศษส่วนมวลของอากาศ

Y_f = เศษส่วนมวลของเชื้อเพลิง

และค่าของ Diffusion coefficient สามารถหาจาก

$$Le = \frac{k}{\rho C_p \mu}$$

Le คือ Lewis number

k คือ Thermal conductivity

5. วิธีการคำนวณ

คำตอบของสมการที่อยู่ในรูปแบบสมการไร้มิติซึ่งถูกคำนวณด้วยวิธี Explicit method โดยอาศัยวิธีระเบียบเชิงตัวเลขโดยใช้วิธีทางไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์และกำหนดให้รูปร่างของงานเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่

มีอัตราส่วนของความกว้างต่อความยาวเป็น 1:2 และมีรูปแบบการไหลที่ทางเข้าเป็นแบบสมมาตรบน-ล่างโดยที่ตำแหน่งสมมาตรจะอยู่บริเวณกึ่งกลางชั้นงาน ดังนั้นในการคำนวณของงานนี้จึงคำนวณเพียงครึ่งหนึ่งของโดเมนทั้งหมดโดยคำนวณภายใต้ความละเอียดของกริดเท่ากับ

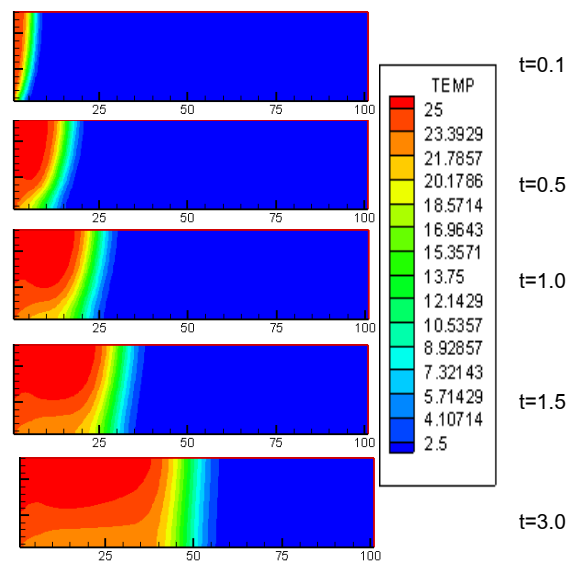
26 x 101 ขนาดของกริดในแนวแกน x โดยที่ $\Delta x = 0.02$

ในแนวแกน y $\Delta y = 0.02$

และช่วงเวลา(Time interval) $\Delta t = 0.001$

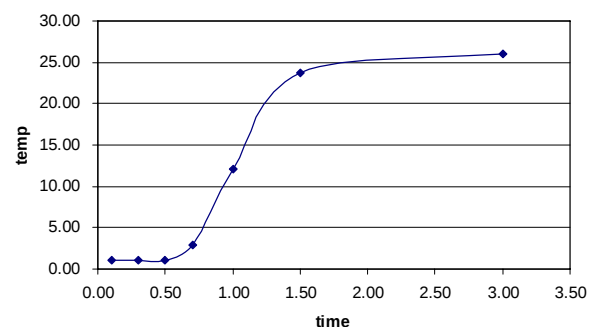
และก๊าซมีเทน(methane) เป็นเชื้อเพลิง ซึ่งมีอัตราส่วนของอากาศต่อเชื้อเพลิงเป็น 16.37:1

6. ผลการทดลองและการวิเคราะห์



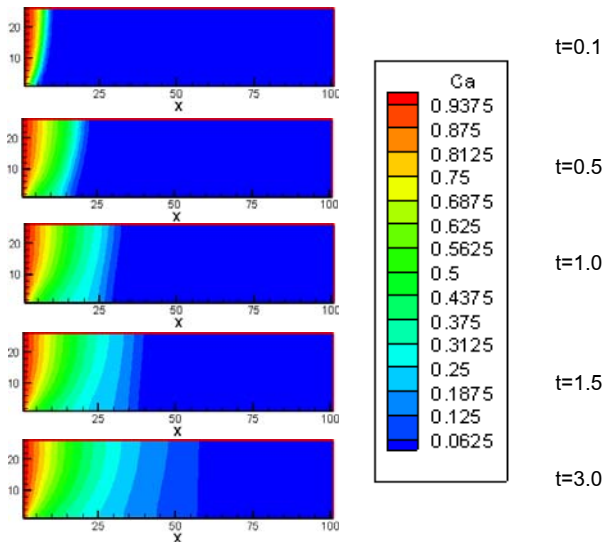
รูปที่ 1 การกระจายอุณหภูมิภายในโดเมนในเวลาต่างๆ

ผลการคำนวณที่แสดงดังรูปที่ 1 พบว่าเมื่อเวลาเปลี่ยนแปลงไป อุณหภูมิจะค่อยๆ แพร่จากด้านทางเข้า (Inflow) ของโดเมน ไปยังทิศทางของ out flow (ทางขวาของโดเมน) เนื่องจากการเผาไหม้ของสารตั้งต้นที่ให้กับโดเมน

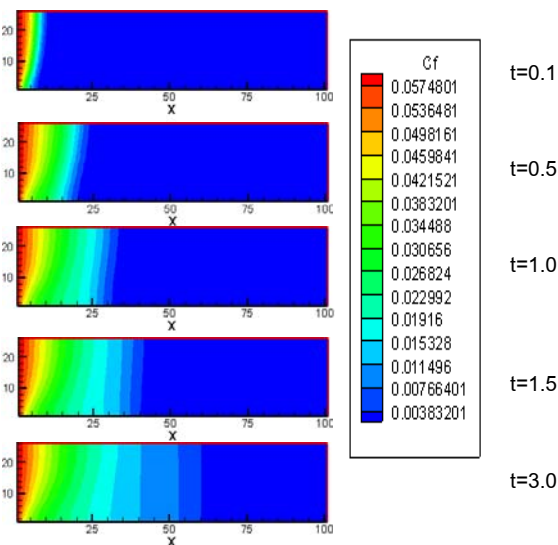


รูปที่ 2 อุณหภูมิที่เวลา $t = 0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 1.0, 1.5$ และ 3.0 ที่ตำแหน่ง $x=26, y=26$

จากการทดลองและรูปที่ 2 จะเห็นได้ว่าที่ตำแหน่งของงาน ณ ตำแหน่งเดียวกัน($x=26, y=26$) อุณหภูมิจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อเวลาเพิ่มมากขึ้น และมีการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิอย่างรวดเร็วขณะที่เกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ ในช่วงเวลา(t) ประมาณ 0.75-1.5 หลังจากนั้นค่าของอุณหภูมิจะมีการเปลี่ยนแปลงช้าลงจนเกือบคงที่ ซึ่งสอดคล้องกับ รูปที่ 1 ที่อุณหภูมิกระจายออกตามเวลา

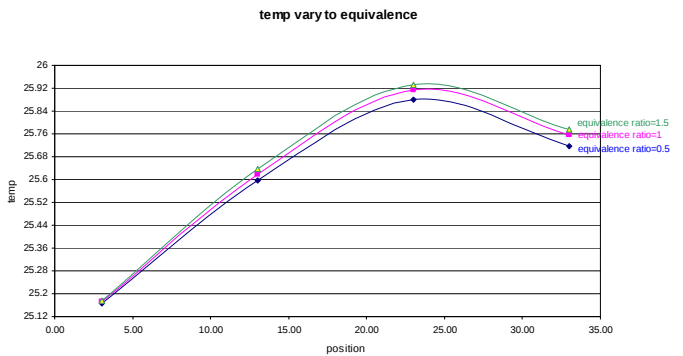


รูปที่ 3 การกระจายความเข้มข้นของอากาศ ภายในโดเมนในเวลาต่างๆ



รูปที่ 4 การกระจายความเข้มข้นของเชื้อเพลิง ภายในโดเมนในเวลาต่างๆ

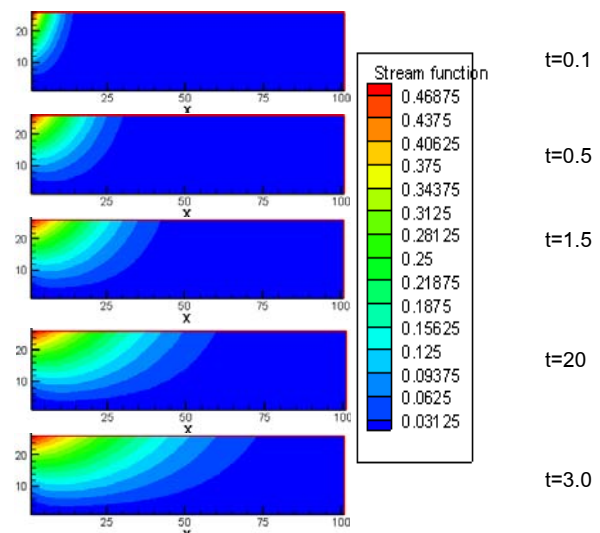
การกระจายความเข้มข้นของเชื้อเพลิงและอากาศที่แสดงในรูปที่ 3 และ 4 จะสังเกตเห็นว่าเมื่อเปลี่ยนแปลงผ่านไปค่าความเข้มข้นของอากาศและเชื้อเพลิงไปจะค่อยๆ แพร่จากด้านทางเข้า (Inflow) ของงานไปยังทิศทางของ out flow (ทางขวาของงาน)



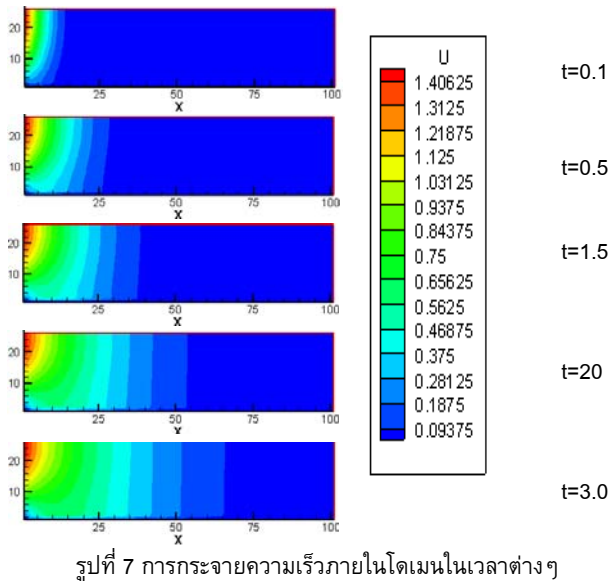
รูปที่ 5 ค่าของอุณหภูมิเมื่อเปลี่ยนแปลงค่าของ

Equivalence ratio = 1.0, 1.5, 0.5 ที่ $y=26$

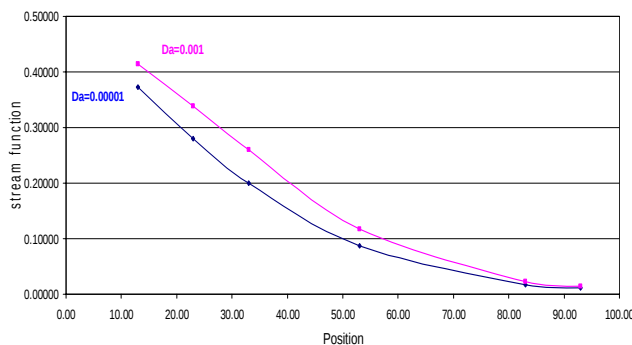
ผลของส่วนผสมระหว่างอากาศและเชื้อเพลิงสามารถวิเคราะห์ได้จาก รูปที่ 5 ซึ่งสังเกตได้ว่าเมื่อค่าของ equivalence ratio เปลี่ยนแปลงไปทำให้ค่าของอุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงตามไปด้วยเช่นกันซึ่งเมื่อค่า equivalence ratio มีค่าสูง อุณหภูมิจะมีค่าสูงขึ้นเช่นกันเนื่องจาก เมื่อ equivalence ratio = 1 หมายความว่าอัตราส่วนของ อากาศ ต่อ เชื้อเพลิงมีสัดส่วนที่เหมาะสมทางทฤษฎี ซึ่งส่งผลให้เกิดการเผาไหม้ อย่างสมบูรณ์ เมื่อค่าของอัตราส่วนสมมูล(Equivalence ratio) มีค่าน้อยกว่าหนึ่ง (lean)(ในการทดลอง=0.5) ซึ่งหมายถึงมีสัดส่วนของเชื้อเพลิงน้อยเกินไปจะทำให้เกิดการเผาไหม้ต่ำลงและเมื่อค่าของอัตราส่วนสมมูล(equivalence ratio)มากกว่าหนึ่ง(rich) พบว่าอุณหภูมิการเผาไหม้สูงขึ้นเล็กน้อยขณะที่มีอัตราการป้อนเชื้อเพลิงเพิ่มมากขึ้นเช่นกันซึ่งหมายถึงอัตราการป้อนอากาศและเชื้อเพลิงอาจส่งผลต่ออุณหภูมิการเผาไหม้ด้วย



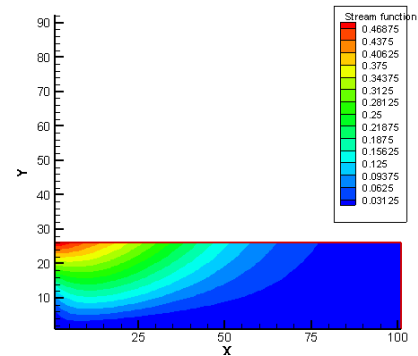
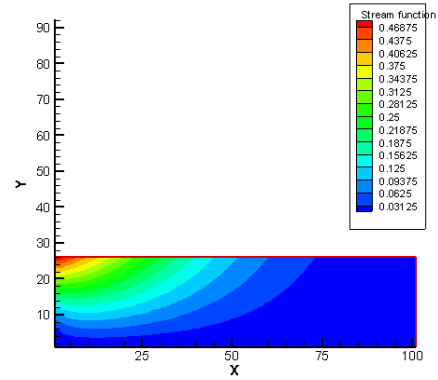
รูปที่ 6 Stream function ภายในโดเมนในเวลาต่างๆ



การกระจายของ Stream function (ψ) และ velocity (u) ในแกน x ซึ่งแสดงในรูปที่ 6 และ 7 เห็นได้ว่าเมื่อเวลาเปลี่ยนแปลงการกระจายของ stream function และ ค่าความเร็ว velocity ของ flow ที่ไหลในชั้นงานจะค่อยๆ แพร่จากด้านทางเข้า (Inflow) ของงาน ไปยังทิศทางของ out flow (ทางขวาของงาน)



กราฟรูปที่ 8 แสดงผลของDarcy number มีผลต่อพฤติกรรมของการไหลของก๊าซ ซึ่งเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าของ Darcy number นั้นมีผลโดยตรงค่าของ Stream function คือเมื่อค่าของ Darcy number มีค่ามากจะทำให้ค่าของ stream function มีค่าสูงตาม และในขณะที่ค่าของ Darcy number มีค่าน้อยจะทำให้ค่าของ stream function มีค่าน้อยตามไปเช่นกัน เนื่องจากการที่ค่าของ Darcy number มีค่าน้อยค่าความสามารถของการซึมผ่านจะมีค่าน้อยเช่นกันซึ่งการที่ค่าความสามารถในการซึมผ่านมีค่าน้อยนั้นย่อมหมายความว่า การไหลของก๊าซเป็นไปอย่างช้าๆ เนื่องจากผลของความหนืดจากการที่มีส่วนของแข็ง แต่ในทางตรงกันข้ามถ้าค่าของDarcy number มีค่ามาก ค่าความสามารถในการซึมผ่านย่อมมีค่ามากเช่นกันซึ่งทำให้การไหลของก๊าซดีขึ้นซึ่งสอดคล้องกับรูปที่ 9 และ 10



7. สรุป

งานวิจัยนี้พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ศึกษาพฤติกรรม การเผาไหม้ในวัสดุพรุน ผลจากการคำนวณด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขมีความสอดคล้องกับลักษณะทางกายภาพ สามารถใช้อธิบายพฤติกรรมโดยรวมของการเผาไหม้เชื้อเพลิงมีเทน

1 ปฏิกริยาการเผาไหม้ ทำให้อุณหภูมิวัสดุพรุนเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จากนั้นจะเริ่มเข้าสู่ภาวะคงตัวหลังสิ้นสุดการเผาไหม้

2 ค่าของอัตราส่วนสมมูล (equivalence ratio) มีผลโดยตรงกับอุณหภูมิ โดยค่าของอุณหภูมิจะแปรผันตรงกับอัตราส่วนสมมูล โดยเฉพาะอย่างยิ่งถ้าอัตราส่วนสมมูลมีค่าน้อยกว่าหนึ่ง (ส่วนผสมบาง) จะส่งผลให้อุณหภูมิการเผาไหม้ลดต่ำลงอย่างมีนัยสำคัญ

3 ค่าของ Darcy number มีผลโดยตรงต่อพฤติกรรมการไหลของก๊าซ โดยการเปลี่ยนแปลงค่า Darcy number นั้นมีผลต่อค่าของ Stream function และความเร็วการไหล คือเมื่อค่าของ Darcy number มีค่ามากจะทำให้ค่าของ stream function มีค่าสูงตาม และเมื่อ Darcy number มีค่าน้อยจะทำให้ stream function มีค่าน้อยตามเช่นกัน ทั้งนี้เนื่องจาก Darcy number แปรผันตรงกับค่าความสามารถในการซึมผ่านของของไหลในวัสดุพรุน

8.เอกสารอ้างอิง

- [1] C. L. HACKERT, J. L. ELLZEY, AND O. A. EZEKOYE,1998"Combustion and Heat Transfer in Model Two-Dimensional Porous Burners "COMBUSTION AND FLAME 116,pp.177-191
- [2] L. di Mare a,T.A. Mihalik b, G. Continillo c,d, J.H.S. Lee b,1999 "Experimental and numerical study of amiability limits of gaseous mixtures in porous media" Experimental Thermal and Fluid Science 21,pp.117-123
- [3] G. BRENNER, K. PICKENA`CKER,O. PICKENA`CKER, D. TRIMIS,K. WAWRZINEK, and T. WEBER,2000 "Combustion and Heat Transfer in Model Two-Dimensional Porous Burners", COMBUSTION AND FLAME 123, pp.201-213
- [4] Sumrerng Jugjai , Narongsak Wongpanit, Thawatchai Laoketkan, Sorawut Nokkaew,2002"The combustion of liquid fuels using a porous medium" Experimental Thermal and Fluid Science 26,pp.15-23
- [5] Jia F. Liu , Wen H. Hsieh, 2004 "Experimental study of combustion of hydrogen-syngas/methane fuel mixtures in a porous burner", Combustion and Flame 138, pp.292-303
- [6] S.K. Alavandia, A.K. Agrawalb, 2008"Experimental study of combustion of hydrogen-syngas/methane fuel mixtures in a porous burner" INTERNATIONAL JOURNAL OF HYDROGEN ENERGY 33,pp.1407-1415
- [7]. Nield, D.A., Bejan,A., Convection in porous media,Springer,New York,1999
- [8] Al-Amiri, A.M.,2000, Analysis of Momentum and energy transfer in a lid-driven cavity filled with a porous medium, International Journal of Heat and Mass Transfer,43,pp.3513-3527