

การตรวจสอบและการนำไปใช้ของแบบจำลองเปลวไฟแบบพ่นด้วย
ซอฟต์แวร์โอเพ่นซอร์สทางด้านพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

Validation and Implementation of Jet Flame Model by
Open Source Computational Fluid Dynamics Software

พนิต คำมา และ ชาคริต สุวรรณจำรัส*

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล ต.ศาลายา อ.พุทธมณฑล จ.นครปฐม 73170

*ติดต่อ: อีเมลล์ chakrit.suv@mahidol.ac.th, เบอร์โทรศัพท์ 662 889 2138 ext. 6416, เบอร์โทรสาร 662 889 2138 ext. 6429

บทคัดย่อ

ซอฟต์แวร์โอเพ่นซอร์ส (open source software) ทางด้านพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ หรือ CFD (computational fluid dynamics) ได้ถูกนำมาใช้จำลองเปลวไฟแบบพ่น (jet flame) ของก๊าซมีเทน ด้วยการใช้ภาษา C++ ในการเขียนสมการการไหลแบบปั่นป่วนชนิด LES (large eddy simulation) ร่วมกับตัวแปร mixture fraction และ infinitely-fast chemistry ผลการจำลองถูกนำไปตรวจสอบความถูกต้องด้วยผลการวัดความสูงของเปลวไฟของ Yi Zeng และคณะ (ค.ศ. 2011) โดยการปรับเปลี่ยนอัตราการไหลของก๊าซมีเทนระหว่าง 5.95 ถึง 23.81 มิลลิกรัมต่อวินาที และความดันบรรยากาศระหว่าง 50 ถึง 100 กิโลปาสกาล ผลการตรวจสอบพบว่าแบบจำลองเปลวไฟแบบพ่นที่ได้ถูกพัฒนาในงานวิจัยนี้มีค่าความคลาดเคลื่อนจากการทดลองเฉลี่ยร้อยละ 9.51 เมื่อใช้ค่าร้อยละ 90 ของอุณหภูมิสูงสุดของการจำลองการเผาไหม้เป็นค่าอ้างอิงต่ำที่สุดเพื่อแสดงความสูงของเปลวไฟ

คำหลัก: ความสูงเปลวไฟ, เปลวไฟแบบพ่น, LES, OpenFOAM, CFD.

Abstract

The open source software in the field of computational fluid dynamics or CFD had implemented to model the methane jet flame. The implementation performed by writing LES (large eddy simulation) turbulence flow equation together with mixture fraction and infinitely-fast chemistry using C++ language. Flame simulated results were validated with flame length of Yi Zeng et al., (2011) under methane flow rate of 5.95 - 23.81 mg/s and pressure of 50 – 100 kPa. The validation of the developed jet flame model obtained an average error of 9.51% when referred by 90% of maximum temperatures of combustion model was a lower value for a flame length.

Keywords: Flame length, jet flame, LES, OpenFOAM, CFD.

1. บทนำ

เปลวไฟแบบพ่นที่ไม่มีการผสมระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศก่อนการเผาไหม้เกิดจากการฉีด

ก๊าซเชื้อเพลิงผสมกับออกซิเจนในอากาศด้วยสัดส่วนที่เหมาะสม โดยอาศัยการแพร่ (diffusion) และการไหลแบบปั่นป่วน (turbulent flow) ของเชื้อเพลิงที่ถูก

CST-52

ฉีด [1] ภายหลังการเผาไหม้รูปร่างและความสูงของเปลวไฟแบบพ่นเป็นคุณสมบัติพื้นฐานที่สำคัญในการวิเคราะห์คุณสมบัติของการเผาไหม้และใช้ในการออกแบบหัวพ่นไฟ (burner) เนื่องจากการทดลองเพื่อศึกษารูปร่างและความสูงของเปลวไฟมีค่าใช้จ่ายด้านอุปกรณ์การทดลองสูง ดังนั้นระเบียบวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ หรือ CFD (computational fluid dynamics) จึงถูกนำมาใช้ทดแทนการทดลองด้วยการจำลองเปลวไฟแบบพ่น ซึ่งประกอบไปด้วยการคำนวณโดยใช้สมการพื้นฐานของการไหลควบคู่กับแบบจำลองการเผาไหม้เชิงเคมี การถ่ายเทความร้อนและแบบจำลองย่อยต่างๆ ซอฟต์แวร์ที่นิยมนำมาใช้ในการจำลองเปลวไฟ ได้แก่ ซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์ เช่น ANSYS [2] และ FLOW-3D [3] ซึ่งเป็นซอฟต์แวร์ที่มีค่าใช้จ่ายในลิขสิทธิ์ และซอฟต์แวร์โอเพ่นซอร์ส (open source software) ซึ่งไม่มีค่าใช้จ่ายในลิขสิทธิ์ OpenFOAM เป็นโอเพ่นซอร์สซอฟต์แวร์ที่ใช้ระเบียบวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ และถูกพัฒนาขึ้นด้วยภาษา C++ ซึ่งเปิดให้ผู้ใช้สามารถนำไปใช้และพัฒนาสมการการไหลภายในได้ [4] โค้ด (code) ที่พัฒนาขึ้นจะมีความเชื่อมั่นในการใช้วิเคราะห์และออกแบบหัวพ่นไฟเมื่อถูกนำไปใช้และตรวจสอบความถูกต้องกับผลการทดลอง Yi Zeng และคณะ [5] มีการทดลองศึกษาความสูงของเปลวไฟด้วยอัตราการฉีดก๊าซมีเทน (methane) ที่แตกต่างกันภายใต้ความดันบรรยากาศต่ำกว่า 100 kPa โดยเลือกใช้อุปกรณ์เผาไหม้ที่มีรูปร่างไม่ซับซ้อนและมีการอธิบายการทดลองได้อย่างชัดเจน ความสูงของเปลวไฟจากผลการทดลองของ Yi Zeng และคณะ จะถูกนำมาใช้เพื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองที่ถูกพัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ โค้ดที่ถูกพัฒนาในการจำลองเปลวไฟแบบพ่นนี้จะถูกนำไปใช้ในการปรับปรุงการเผาไหม้ของหัวพ่นไฟที่มีรูปร่างซับซ้อนต่อไป

2. แบบจำลองเปลวไฟแบบพ่น

แบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วนชนิด LES (large eddy simulation) ประกอบไปด้วยฟังก์ชันการกรอง

(filtered function) ซึ่งจะใช้เพื่อแยกขนาดสเกลใหญ่ (large scale) และขนาดสเกลเล็ก (small scale) ของการไหลออกจากกัน โดยการไหลด้วยสเกลเล็กจะถูกคำนวณและจำลองด้วยแบบจำลองสเกลกริดย่อย (sub-grid scale) ตามลำดับ [6] สมการที่ใช้ในการจำลองการเผาไหม้ที่มีการไหลแบบปั่นป่วนประกอบไปด้วยสมการอนุรักษ์มวล โมเมนตัม สปีชีส์ (species) และพลังงาน ซึ่งสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 1-4 ตามลำดับ

$$\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\rho} \tilde{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \bar{\rho} \tilde{u}_j}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{u}_j}{\partial x_i} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_j} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_i} (\bar{\rho}(\mu - \mu_t)) + \bar{\rho} g_i \quad (2)$$

$$\frac{\partial \bar{\rho} \tilde{Y}_k}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{Y}_k}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\left(\bar{\rho} D_k + \frac{\mu_t}{Sc} \right) \frac{\partial \tilde{Y}_k}{\partial x_i} \right) + \bar{\omega}_k \quad (3)$$

$$\frac{\partial \bar{\rho} \tilde{h}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{h}}{\partial x_i} = \frac{\partial \bar{p}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\bar{\rho} \left(\frac{k}{c_p} + \frac{\mu_t}{Pr} \right) \frac{\partial \tilde{h}}{\partial x_i} \right) + \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \bar{Q}_c - \bar{Q}_r \quad (4)$$

โดยที่ ρ คือ ความหนาแน่นของสาร

U_i คือ ความเร็วตามทิศทาง i

p คือ ความดัน

μ_t คือ ความหนืดของการไหลแบบปั่นป่วน

δ_{ij} คือ เดลตาไครเนกเกอร์ (Kronecker delta)

Y_k คือ สัดส่วนมวลของสปีชีส์ k

D_k คือ สัมประสิทธิ์การแพร่มวลของสปีชีส์ k

h คือ เอนทัลปี (enthalpy)

c_p คือ ความร้อนจำเพาะ

Pr คือ เลขพรันด์เทิล (Prandtl number) ของความปั่นป่วน [7]

τ_{ij} คือ viscous stress tensor

Q_c คือ ความร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้ และ

Q_r คือ ความร้อนสูญเสียจากการแผ่รังสี

โดยที่เครื่องหมาย $-$ และ $\sim$ ของสมการคือ เวลาเฉลี่ยและค่าเฉลี่ยของ Favre ตามลำดับ [8]

ความหนืดของการไหลแบบปั่นป่วนสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 5 พลังงานจลน์เฉลี่ย (Favre-average kinetic energy) และอัตราการถดถอยของพลังงาน

CST-52

จลน์ (Favre-average kinetic dissipation rate) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 6 และ 7 ตามลำดับ

$$\mu_t = \bar{\rho} C_k \Delta \sqrt{\tilde{k}} \quad (5)$$

$$\frac{\partial \tilde{\rho} \tilde{k}}{\partial t} + \frac{\partial \tilde{\rho} \tilde{u}_i \tilde{k}}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{S_c} \right) \frac{\partial \tilde{k}}{\partial x_i} \right) + P - \bar{\rho} \tilde{\varepsilon} \quad (6)$$

$$\tilde{\varepsilon} = \frac{C_\varepsilon}{\Delta} \tilde{k}^{\frac{2}{3}} \quad (7)$$

โดยที่ C_k คือ ค่าคงที่

C_ε คือ ค่าคงที่

P คือ อัตราการสร้างพลังงานจลน์ของสเกลกริดย่อย (production rate of SGS kinetics energy)

สัดส่วนสารผสม (mixture fraction) ที่ใช้ในการแสดงความสัมพันธ์สัดส่วนมวลของเชื้อเพลิงและออกซิเจนซึ่งสัมพันธ์กับอุณหภูมิ แสดงได้ดังสมการที่ 8 จะถูกคำนวณด้วยการใช้รูปแบบสมการอนุพันธ์การไหล ซึ่งแสดงดังสมการที่ 9

$$Z = \frac{sY_F - Y_O + Y_{O,0}}{sY_{F,0} + Y_{O,0}} = \frac{\frac{sC_p}{Q}(T - T_{O,0}) + Y_O - Y_{O,0}}{\frac{sC_p}{Q}(T_{F,0} - T_{O,0}) - Y_{O,0}} \quad (8)$$

$$\frac{\partial \tilde{\rho} \tilde{Z}}{\partial t} + \frac{\partial \tilde{\rho} \tilde{u}_i \tilde{Z}}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\left(\bar{\rho} D_k + \frac{\mu_t}{S_c} \right) \frac{\partial \tilde{Z}}{\partial x_i} \right) \quad (9)$$

โดยที่ Z คือ สัดส่วนสารผสม

Y_F คือ สัดส่วนมวลของเชื้อเพลิง

Y_O คือ สัดส่วนมวลของออกซิเจน

$Y_{O,0}$ คือ สัดส่วนมวลของออกซิเจนในกระแสการไหลของออกซิเจน

$Y_{F,0}$ คือ สัดส่วนมวลของเชื้อเพลิงในกระแสการไหลของออกซิเจน

T คือ อุณหภูมิ

$T_{O,0}$ คือ อุณหภูมิของออกซิเจนในกระแสการไหลของออกซิเจน

$T_{F,0}$ คือ อุณหภูมิของเชื้อเพลิงในกระแสการไหลของออกซิเจน

s คือ อัตราส่วนปริมาณสัมพันธ์ที่ทำให้เกิดการเผาไหม้สมบูรณ์ และ

Q คือ อัตราการปลดปล่อยความร้อนเชื้อเพลิง

แบบจำลองการเผาไหม้ชนิด infinitely-fast chemistry ถูกเลือกใช้ในการคำนวณ โดยสมมุติเชื้อเพลิงและออกซิเจนไม่สามารถผสมกันได้ และแสดงความสัมพันธ์เป็นฟังก์ชันเชิงเส้นแบบเป็นช่วง (linear piecewise function) ของอุณหภูมิเปลวไฟดังสมการที่ 10 และ 11

$$T(Z) = ZT_{F,0} + (1-Z)T_{O,1} + \frac{QY_{F,0}}{C_p} Z \quad \text{if } Z < Z_{st} \quad (10)$$

$$T(Z) = ZT_{F,0} + (1-Z)T_{O,1} + \frac{QY_{F,0}}{C_p} Z_{st} \left(\frac{1-Z}{1-Z_{st}} \right) \quad \text{if } Z > Z_{st} \quad (11)$$

โดยที่ Z_{st} คือ สัดส่วนสารผสมที่จะทำให้การเผาไหม้สมบูรณ์ และ

$T_{F,1}$ คือ อุณหภูมิของเชื้อเพลิงในกระแสการไหลของเชื้อเพลิง

การแผ่รังสีความร้อนเป็นปัจจัยหลักสำคัญซึ่งส่งผลกระทบต่อปฏิกิริยาการเผาไหม้ โดยความร้อนสูญเสียจากการแผ่รังสี (Q_r) ในสมการอนุพันธ์พลังงาน สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ของสมการการแผ่รังสีความร้อน (radiative heat transfer equation, RTE) ตามกฎของพลังค์ (Planck's law) โดยไม่พิจารณาเขม่า (soot) และการกระจายรังสีความร้อน (radiation scattering) สามารถแสดงดังสมการที่ 12

$$\bar{Q}_r = k \left(4\pi I_b - \int_{4\pi} I d\Omega \right) = k_p (4\sigma T^4 - G) \quad (12)$$

โดยที่ σ คือ ค่าคงที่ของสเตฟาน-โบลต์ซมันน์ (Stefan-Boltzmann constant)

I คือ ความเข้มของการแผ่รังสี

I_b คือ ความเข้มของการแผ่รังสีของวัตถุดำ

G คือ รังสีตกกระทบ (irradiance)

k_p คือ สมประสิทธิ์การดูดกลืนเฉลี่ยของพลังค์ (Planck mean absorption coefficient)

แบบจำลอง fvDOM (finite volume discrete ordinate method) ถูกนำมาใช้ในการจำลองรังสีตกกระทบในสมการที่ 12 ด้วยการคำนวณค่ารังสีตกกระทบจากความเข้มของการแผ่รังสีตามการแบ่งมุม

CST-52

ของการแผ่รังสี (discrete solid angle) สามารถแสดง
ได้ดังสมการที่ 13

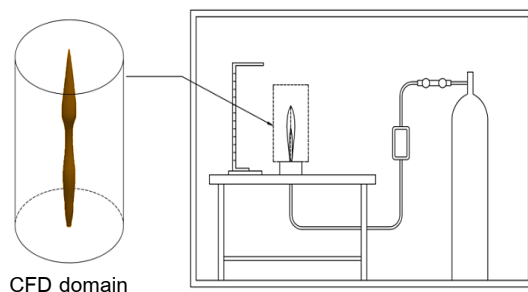
$$G = \int_{4\pi} I(\theta, \phi) d\Omega \quad (13)$$

$$\approx \sum_{k=1}^{M_\phi} \sum_{l=1}^{M_\theta} I^m(\theta_l^m, \phi_k^m) 2\sin\theta_l^m \sin\left(\frac{\Delta\theta_l^m}{2}\right) \Delta\phi_k^m$$

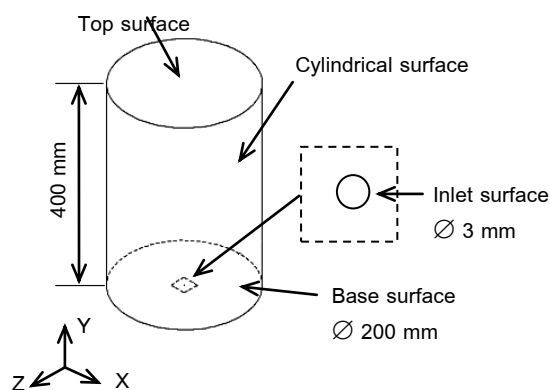
3. วิธีการจำลองเปลวไฟแบบพ่น

โดเมน (domain) ขอบเขตของปัญหา (boundary condition) และสภาวะในการจำลองเปลวไฟ พิจารณา
ได้จากการทดลองของ Yi Zeng และคณะ ซึ่งใช้
ห้องทดลองขนาด 3 x 2 x 2 เมตร ที่มีการควบคุม
ความดันของบรรยากาศภายในให้มีความดัน 50-100
กิโลปาสคาล ด้วยปั๊มสุญญากาศ มีการใช้ก๊าซมีเทน
(Methane) ที่มีความบริสุทธิ์ร้อยละ 99 ฉีดหรือพ่น
ออกจากหัวพ่นกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3
มิลลิเมตร ด้วยอัตราการไหล 5.95-23.81 มิลลิกรัมต่อ
วินาที การกำหนดโดเมนจึงใช้รูปทรงกระบอกที่มีเส้น
ผ่านศูนย์กลางและความสูง 200 และ 400 มิลลิเมตร
จากบริเวณที่เกิดการเผาไหม้ตามลำดับ แสดงดังรูปที่
1 ผิวของโดเมนที่ใช้ในการจำลองเปลวไฟจะมีการ
กำหนดขอบเขตของปัญหา โดยที่ผิวโดยรอบยกเว้น
ทางเข้าเชื้อเพลิง (inlet surface) ของโดเมนถูก
กำหนดให้เป็นขอบเขตแบบเปิด (open boundary) ซึ่ง
ผิวทางเข้าจะกำหนดค่าอัตราการไหลเข้าของก๊าซ
มีเทนแสดงดังรูปที่ 2 สมการของแบบจำลองเปลวไฟ
แบบพ่นจะถูกแปลงเป็นสมการไม่ต่อเนื่อง (discretize
equation) โดยใช้ระเบียบวิธีปริมาตรจำกัด (finite
volume method) ซึ่งใช้การแบ่งโดเมนการคำนวณ
เป็นเซลล์ (cell) หรือ กริด (grid) ย่อย แบบจำลองใน
งานวิจัยนี้จะทำการแบ่งกริดด้วยจำนวนกริดที่
เหมาะสม 95,100 กริด บริเวณที่เกิดการเผาไหม้หรือ
มีเปลวไฟจะแบ่งกริดให้มีความละเอียดด้วยขนาด
ความยาวสูงสุด 0.35 มิลลิเมตร และสามารถแสดง
ลักษณะการแบ่งกริดได้ดังรูปที่ 3 ผิวของกริดซึ่งทับ
ซ้อนกับผิวทางเข้าของเชื้อเพลิงของโดเมนจะถูก
กำหนดให้มีอัตราการไหลเข้าของเชื้อเพลิงเป็นค่าคงที่
ซึ่งประกอบด้วย 5.95, 11.90, 17.86 และ 23.81

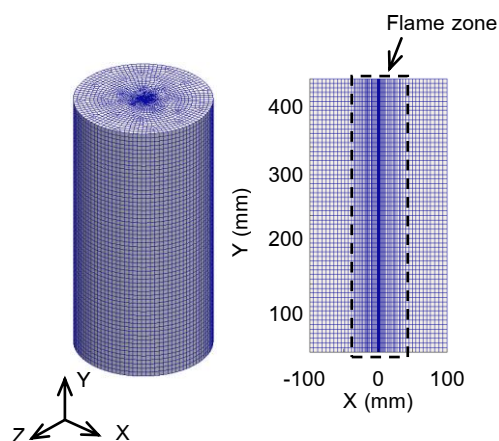
มิลลิกรัมต่อวินาที กริดภายในโดเมนจะถูกกำหนดค่า
ความดันอากาศเป็น 50, 60, 70, 80, 90 และ 100
กิโลปาสคาล และมีอุณหภูมิเริ่มต้นภายใน
กริด 285 องศาเซลเซียส ในทุกแบบจำลอง ดังนั้นการ
กำหนดสภาวะขอบเขตข้างต้นจึงทำให้มีแบบจำลอง
ทางพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณจำนวนทั้งสิ้น 24
แบบจำลองถูกนำมาใช้และตรวจสอบความถูกต้อง



รูปที่ 1 การกำหนดโดเมนจากบริเวณที่เกิดการเผา
ไหม้หรือเปลวไฟ

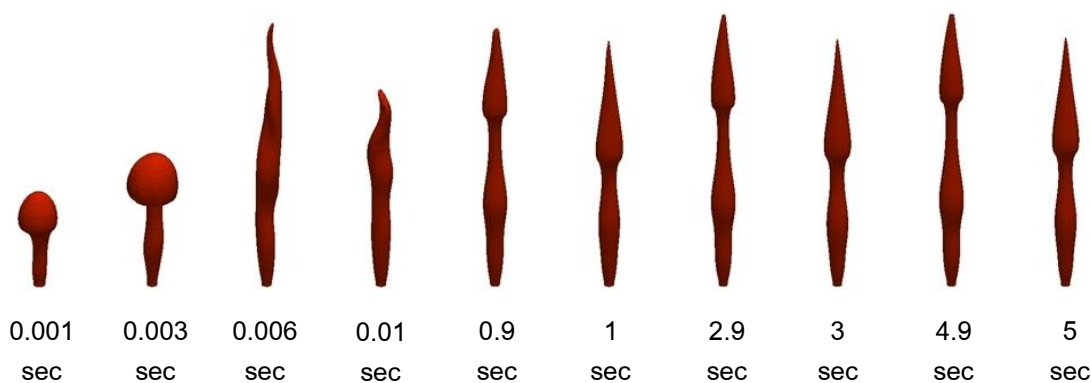


รูปที่ 2 การกำหนดขอบเขตของปัญหามโนโดเมน



รูปที่ 3 การแบ่งกริดภายในโดเมน

CST-52

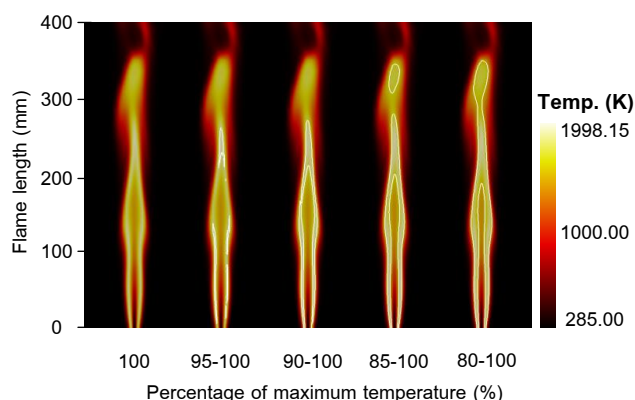


รูปที่ 4 ลักษณะของแบบจำลองเปลวไฟตั้งแต่เวลาเริ่มต้นจนกระทั่งเวลาที่เปลวไฟมีสภาวะคงที่ ด้วยอัตราการไหล 23.81 มิลลิกรัมต่อวินาที และความดัน 100 กิโลปาสกาล

4. ผลการทดลองและวิจารณ์

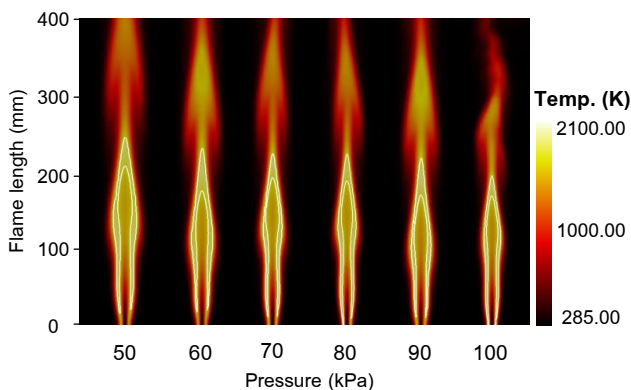
ผลการจำลองเปลวไฟแบบพบพบว่าที่เวลา 5 วินาที รูปร่างและความสูงของเปลวไฟมีสภาวะคงที่ (steady state) และคล้ายคลึงกับการทดลอง รูปที่ 4 แสดงผลการจำลองลักษณะของเปลวไฟตั้งแต่เวลาเริ่มต้นจนกระทั่งเวลาที่เปลวไฟมีสภาวะคงที่ เวลาดังกล่าวจึงถูกเลือกใช้เพื่อศึกษาและวัดผลการจำลอง การศึกษาทฤษฎีของการเผาไหม้ [9] พบว่าผิวของเปลวไฟแบบพ่นจะเกิดบริเวณที่อัตราส่วนปริมาณสัมพันธ์ (stoichiometric ratio) ระหว่างเชื้อเพลิงและออกซิเจนมีค่าที่ทำให้เกิดการเผาไหม้สมบูรณ์ และมีอุณหภูมิของการเผาไหม้สูงสุด แบบจำลองการเผาไหม้ชนิด infinitely-fast chemistry ถูกใช้คำนวณร่วมกับแบบจำลองการแผ่รังสีแบบ fvDOM และแสดงผลการคำนวณด้วยอุณหภูมิของเปลวไฟภายในโดเมนที่กำหนด การเลือกใช้บริเวณที่เกิดอุณหภูมิสูงสุดเพื่อกำหนดรูปร่างของเปลวไฟไม่สามารถใช้กับแบบจำลองเปลวไฟที่เกิดขึ้นได้ เนื่องจากผลการคำนวณอุณหภูมิสูงสุดไม่ได้เกิดขึ้นกับกริดที่ต่อเนื่องกัน ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องใช้อุณหภูมิเป็นช่วงเพื่อระบุผิวของเปลวไฟในโดเมน รูปที่ 5 แสดงแถบสีอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในเปลวไฟและใช้เส้นสีขาวในการกำหนดร้อยละของอุณหภูมิสูงสุดของการเผาไหม้ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการใช้อุณหภูมิสูงสุดของการเผาไหม้ (ร้อยละ 100) และร้อยละ 95-100

ของอุณหภูมิสูงสุดไม่สามารถระบุผิวของเปลวไฟได้อย่างชัดเจน โดยร้อยละ 90-100 ของอุณหภูมิสูงสุดเป็นช่วงที่สามารถแสดงรูปร่างและความสูงของเปลวไฟได้สอดคล้องกับการทดลองของ Yi Zeng และคณะ ดังนั้นช่วงอุณหภูมินี้จึงถูกเลือกใช้ในการระบุและวัดความสูงในทุกๆ ผลการจำลองเปลวไฟแบบพ่นในงานวิจัยนี้ ผลการวิเคราะห์ความสูงของเปลวไฟจากแบบจำลองพบว่าความสูงของเปลวไฟจะเพิ่มขึ้นตามอัตราการไหลของก๊าซมีเทน และจะลดลงเล็กน้อยเมื่อความดันบรรยากาศถูกเพิ่มขึ้น โดยผลการจำลองรูปร่างของเปลวไฟที่ใช้อัตราการไหลของก๊าซมีเทน 17.86 มิลลิกรัมต่อวินาที ของความดันบรรยากาศ 50-100 กิโลปาสกาล แสดงในรูปที่ 6



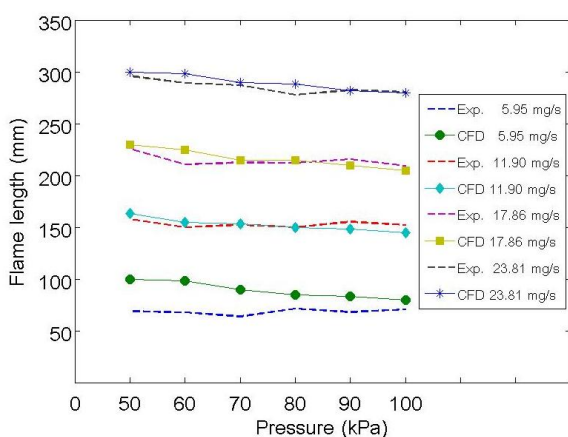
รูปที่ 5 ผิวของเปลวไฟที่ถูกระบุด้วยปริมาณร้อยละของอุณหภูมิเผาไหม้สูงสุด

CST-52



รูปที่ 6 ความสูงของเปลวไฟที่ความดัน 50, 60, 70, 80, 90 และ 100 กิโลปาสกาล ตามลำดับ

ผลการวิเคราะห์ความสูงของเปลวไฟของแบบจำลองถูกวัด และเปรียบเทียบกับผลการทดลองเปลวไฟของ Yi Zeng และคณะ ด้วยกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความสูงและความดันบรรยากาศในทุกๆ อัตราการไหลของก๊าซมีเทนแสดงดังรูปที่ 7 ผลการเปรียบเทียบแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองเปลวไฟแบบพ่นที่ได้พัฒนาในงานวิจัยนี้สามารถจำลองความสูงของเปลวไฟได้ใกล้เคียงกับผลการทดลอง และมีค่าความคลาดเคลื่อนของความสูงของแบบจำลองเปลวไฟจากผลการทดลองเป็นร้อยละ 31.02, 2.78, 2.66 และ 1.57 ที่อัตราการไหลของก๊าซมีเทน 5.95, 11.90, 17.86 และ 23.81 มิลลิกรัมต่อวินาที ตามลำดับ



รูปที่ 7 กราฟเปรียบเทียบความสูงเปลวไฟที่ได้จากแบบจำลองและผลการทดลองของ Yi Zeng และคณะ

5. สรุปผล

สมการการไหลแบบปั่นป่วนชนิด LES ร่วมกับสัดส่วนสารผสม แบบจำลอง infinitely-fast chemistry และสมการการแผ่รังสีความร้อน ถูกนำมาใช้จำลองเปลวไฟแบบพ่นด้วยระเบียบวิธีปริมาตรจำกัดโดยใช้โค้ดภาษา C++ ของซอฟต์แวร์ OpenFOAM ซึ่งเป็นโอเพ่นซอร์สซอฟต์แวร์ที่ไม่มีค่าลิขสิทธิ์ ผลการจำลองรูปร่างและความสูงของเปลวไฟถูกระบุได้ด้วยการกำหนดร้อยละ 90-100 ของอุณหภูมิสูงสุดของการเผาไหม้เป็นผิวของเปลวไฟ ผลการคำนวณความสูงของเปลวไฟแบบพ่นด้วยแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณถูกนำไปตรวจสอบความถูกต้องด้วยผลการทดลองของ Yi Zeng และคณะ จากผลการจำลองพบว่าความสูงของเปลวไฟจะเพิ่มขึ้นตามอัตราการไหลของก๊าซมีเทนที่เพิ่มขึ้น การเปลี่ยนแปลงความดันบรรยากาศค่อนข้างที่จะไม่มีผลต่อความสูงของเปลวไฟ โดยเมื่อความดันบรรยากาศเพิ่มขึ้นความสูงของเปลวไฟจะลดลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น การเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองและผลการทดลองแสดงให้เห็นถึงความแม่นยำ และความถูกต้องของโค้ดที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ โดยพบว่าค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของแบบจำลอง คือ 9.51% ซึ่งสามารถยอมรับได้ การเปรียบเทียบความสูงเปลวไฟของการจำลองด้วย CFD ทำให้เกิดความน่าเชื่อถือเพียงพอต่อการนำไปใช้งาน ซึ่งหากต้องการเพิ่มความน่าเชื่อถือก็สามารถนำอุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลองไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองอื่นๆ ที่นอกเหนือจากการทดลองของ Yi Zeng และคณะได้ โค้ดที่ได้ถูกพัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ สามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างของเปลวไฟ และปรับปรุงประสิทธิภาพของหัวพ่นไฟแบบใช้ก๊าซได้ต่อไปในอนาคต

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] McAllister, S. Chen, J.Y. and Fernandez-Pello, A.C. (2011). Fundamental of Combustion Processes, Springer, New York.

CST-52

- [2] Wang, W. and Tarek, E. (2011). Investigation of lifted jet flames stabilization mechanism using RANS simulations, *Fire Safety J.*, vol. 46, pp. 254-261.
- [3] Martinez, D.M., Jiang, X., Moulinec, C. and Emerson, D.R. (2013). Numerical investigation of the effect of fuel variability on the dynamics of syngas impinging jet flames, *Fuel*, Vol. 103, pp. 646-662.
- [4] OpenCFD Ltd (2011), OpenFOAM foundation, URL: <http://www.openfoam.com>, accesses on 01/08/2013.
- [5] Zeng, Y., Fang, J., Wang, J., Li, J., Tu, R. and Zhang, Y. (2013). Momentum-dominated methane jet flame at sub-atmospheric pressure, *Procedia Engineering*, vol. 62, pp. 924-931.
- [6] Yeoh, G.H. and Yuen, K.K. (2009). Computational fluid dynamics in fire engineering, Butterworth-Heinemann, USA.
- [7] Wikipedia, The Free Encyclopedia. Wikimedia Foundation URL: http://www.cfd-online.com/Wiki/Favre_averaging, accesses on 01/02/2014.
- [8] Wikipedia, The Free Encyclopedia. Wikimedia Foundation, URL: http://wikipedia.org/wiki/Schmidt_number, accesses on 01/02/2014.
- [9] Versteeg, H.K. and Malalasekera, W. (2007). An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method, 2nd ed., Prentice Hall, London.