การทำนายการจุดระเบิดเองและการเผาไหม้ในสเปร์ยดีเซลโดยใช้แบบจำลองเฟลมเลท
Prediction of Auto-ignition and Combustion in Diesel Spray using Flamelet Model

อิศเรศ ธุชกัลยา* และ ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต
ต.คลองหนึ่ง อ.คลองหลวง จ.ปทุมธานี 12121
*ติดต่อ: disares@engr.tu.ac.th, โทรศัพท์: 02-5643001-9 ต่อ 3276, โทรสาร: 02-5643023

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ จะศึกษาและพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการเผาไหม้ของสเปร์ยสำหรับประยุกต์ใช้ในเครื่องยนต์ดีเซล โดยจะเริ่มพัฒนาจากแบบจำลองสเปร์ยของ Beck [1] ซึ่งสามารถทำนายการกระจายตัวของสเปร์ยได้ค่อนข้างถูกต้องแม่นยำ และสำหรับการเผาไหม้ จะใช้แบบจำลอง unsteady flamelet ร่วมกับ reaction progress variable ในการคำนวณ ในการสร้าง flamelet library จะใช้กลไกจลนศาสตร์ทางเคมีแบบโครงร่าง (skeleton chemical kinetic mechanisms) ของ Liu และคณะ [2] ซึ่งมีจำนวนส่วนประกอบเคมี 43 ชนิดและสมการเคมีทั้งหมด 185 สมการ โดยผลการทำนายที่ได้จากแบบจำลองนี้ จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองของ Akiyama และคณะ [3] ซึ่งผลการเปรียบเทียบอยู่ในเกณฑ์ที่น่าพึงพอใจ ทั้งการพัฒนารูปร่างของเปลวและระยะลอยตัวของเปลว
คำหลัก: การเผาไหม้ / ดีเซล / แบบจำลอง / เฟลมเลท / สเปร์ย

Abstract

This research investigates on the development of a spray combustion model for diesel engine applications. This spray model is originated from work of Beck [1] in which the model can predict the distribution of spray quite accurately. For combustion analysis, the unsteady flamelet combining with reaction progress variable approach is employed here. For constructing the flamelet library, the skeleton chemical kinetic mechanisms of Liu *et al*. [2] consisting of 43 chemical components and 185 reactions are applied. The results predicted by present developed model are compared with the experimental data of Akiyama *et al.* [3]. The present simulation results are relatively satisfactory with the luminosity flames, both in the flame formation and the lifted-off length.
Keywords: Combustion / Diesel / Model / Flamelet / Spray

1. บทนำ

จากข้อได้เปรียบทางด้านการประหยัดน้ำมันและการเผาไหม้ที่สะอาดกว่า จึงทำให้เทคนิคการฉีดน้ำมันโดยตรงเข้ามามีบทบาทมากขึ้นในเครื่องยนต์ในปัจจุบัน ทั้งในระบบที่จุดระเบิดด้วยแรงอัดและประกายไฟ ดังนั้นจะเห็นได้ว่า มีงานวิจัยจำนวนมากพยายามพัฒนาเทคนิคทางด้านนี้ ทั้งการเพิ่มความดันให้กับหัวฉีด การเพิ่มการหมุนวนของสเปร์ยเพื่อให้ผสมกับอากาศได้มากขึ้นด้วยเทคนิคต่าง ๆ ดังนั้นเพื่อตอบสนองกับการพัฒนาเหล่านี้ งานวิจัยนี้จึงพัฒนาต่อยอด โดยสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายการเผาไหม้ของสเปร์ยที่เกิดขึ้นจากงานวิจัยข้างต้น ความสำเร็จของแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น จะช่วยลดค่าใช้จ่ายในการทดลองลงได้มาก และช่วยในการออกแบบ และปรับปรุงประสิทธิภาพการเผาไหม้ภายในเครื่องยนต์ดีเซล หรืออุปกรณ์ทางอุตสาหกรรมต่อไป

แบบจำลองนี้จะเริ่มพัฒนาจากแบบจำลองสเปร์ยของ Beck [1] ซึ่งอาศัยหลักการสถิติของโมเมนต์ของการกระจายตัวของจำนวนละอองสเปร์ยขนาดต่าง ๆ โดยลักษณะทางกายภาพของสเปร์ยจะนำเสนอในรูปของโมเมนต์ 4 ตัว ซึ่งในแต่ละโมเมนต์จะแสดงถึงปริมาตรทั้งหมดของของเหลว พื้นผิว รัศมีและจำนวนของ

ละอองตามลำดับ โดยที่โมเมนต์เหล่านี้จะเป็นตัวแปรสำคัญในแบบจำลองย่อยซึ่งประกอบไปด้วยการแตกตัวของละออง การชนกันของละออง การระเหยของละออง และการปฏิสัมพันธ์ระหว่างก๊าซและของเหลว โดยรายละเอียดจะไม่ขอกล่าวในที่นี้

ส่วนแบบจำลองการจุดระเบิดเองและการเผาไหม้จะถูกพัฒนาขึ้นมา ซึ่งจะใช้แบบจำลอง laminar flamelet โดยแบบจำลองนี้ มีความน่าเชื่อถือสูง และไม่สิ้นเปลืองทรัพยากรการคำนวณมาก เนื่องจากข้อมูลของค่าเฉลี่ยของตัวแปรเคมีเชิงความร้อนจะถูกเก็บไว้ใน flamelet library โดยแบบจำลองนี้ เริ่มต้นถูกคิดค้นโดย Peters [4] ซึ่งสมมุติว่า ชั้นการแพร่ซึ่งยึดอยู่ภายในบริเวณการไหลแบบปั่นป่วนที่ไม่เกิดปฏิกิริยานั้น บางมาก ดังนั้นปฏิกิริยาเคมีและการแพร่ของโมเลกุลทั้งหมด จะสามารถพิจารณาได้ว่าเป็นโครงสร้างแบบลามินาร์ โดยในแต่ละ flamelet จะแสดงถึงพฤติกรรมการยืดตัวและการยับยนของเปลวเนื่องจากอิทธิพลของ scalar dissipation rate โดยรูปแบบของแบบจำลองนี้ ที่นิยมใช้ในการทำนายการเผาไหม้จะเสนออยู่ในรูปของ steady flamelet model (SFM) และ unsteady flamelet model (UFM) สำหรับแบบจำลอง SFM โครงสร้างของเปลวจะสามารถอธิบายได้จากค่า mixture fraction และ scalar dissipation rate ซึ่งแบบจำลองนี้ ได้รับความนิยมในการทำนายการเผาไหม้แบบปั่นป่วน [5-9] เนื่องจากความซับซ้อนที่น้อย และใช้เวลาในการคำนวณไม่มาก แต่แบบจำลองนี้ ก็ไม่สามารถรองรับการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วของ scalar dissipation rate ได้ [9-12] ดังนั้นแบบจำลอง SFM จึงไม่สามารถทำนายการจุดระเบิดหรือการดับลงของเปลวได้ ซึ่งจะส่งผลโดยตรงต่อการทำนายระยะเปลวลอยตัว (lift-off) ที่คลาดเคลื่อน

เพื่อกำจัดจุดด้อยนี้ แบบจำลองการเผาไหม้จึงถูกดัดแปลงเป็น Unsteady Flamelet Model ซึ่งมีตัวแปรของเวลาถูกพิจารณาเพิ่มเข้าไป ทำให้สามารถทำนายสภาวะไม่คงตัวของเปลวไฟที่ลุกไหม้ได้ นอกจากนี้ ยังต้องนำ reaction progress variable (RPV) มาใช้ช่วยเป็นตัวระบุระดับของปฏิกิริยาการเผาไหม้ด้วย จากที่กล่าวมาข้างต้น จึงเป็นที่มาของวัตถุประสงค์ในงานวิจัยนี้ คือ เพื่อพัฒนาแบบจำลองที่ใช้สำหรับทำนายการจุดระเบิดเอง และเปลวลอยตัวของสเปร์ยดีเซล ด้วยแบบจำลองการเผาไหม้ UFM ร่วมกับ RPV

2. แบบจำลองการเผาไหม้ UFM/RPV

สมการ flamelet จะแสดงค่าสัดส่วนเชิงมวล (mass fraction) ของ species ต่าง ๆ และอุณหภูมิ เป็นฟังก์ชันกับ mixture fraction Z, scalar dissipation rate χ และเวลา τ ดังนี้

$$\frac{\partial Y_i}{\partial \tau} = \frac{\chi}{2}\frac{1}{Le_i}\frac{\partial^2 Y_i}{\partial Z^2} + \frac{\dot{\omega}_i}{\rho} \tag{1}$$

$$\rho\frac{\partial T}{\partial \tau} - \rho\frac{\chi}{2}\left(\frac{\partial^2 T}{\partial Z^2} + \frac{1}{c_p}\frac{\partial c_p}{\partial Z}\frac{\partial T}{\partial Z}\right) = -\frac{1}{c_p}\sum_{i=1}^{N} h_i\dot{\omega}_i \tag{2}$$

เมื่อ τ, c_p, Y_i, h_i และ $\dot{\omega}_i$ คือ เวลา, ความจุความร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่, สัดส่วนเชิงมวล, เอนทัลปีและอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีของ species i ตามลำดับ

รูปแบบสมการของ scalar dissipation rate โดยทั่วไปแล้ว จะสมมุติในรูปของ inverse error function ดังนี้

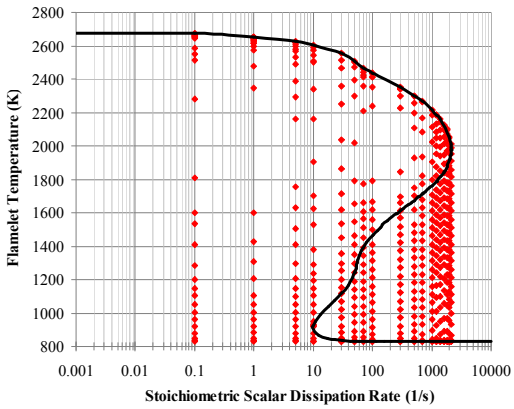
$$\chi(Z) = \frac{a_s}{\pi}\exp\left\{-2\left[erfc^{-1}(2Z)\right]^2\right\} \tag{3}$$

เมื่อ a_s คือ strain rate ซึ่งแสดงถึงเกรเดียนความเร็วสูงสุด และ $erfc^{-1}$ คือ inverse error function เพื่อกำจัดตัวแปร a_s ออก โดยทำเป็นสัดส่วนที่สภาวะ stoichiometric จะได้

$$\chi(Z) = \chi_{st}\frac{\exp\left\{-2\left[erfc^{-1}(2Z)\right]^2\right\}}{\exp\left\{-2\left[erfc^{-1}(2Z_{st})\right]^2\right\}} \tag{4}$$

รูปโค้งตัว S ซึ่งได้จากผลลัพธ์การคำนวณของแบบจำลอง UFM ดังแสดงในรูปที่ 1 จะเห็นได้ว่า ที่ค่า χ_{st} ใด ๆ จะมีผลลัพธ์ของ flamelet (จุดสีแดง) มากกว่าหนึ่งค่า ดังนั้นจึงต้องใช้ตัวแปร RPV, C มาช่วยระบุตำแหน่งของผลลัพธ์ของ flamelet ให้ชัดเจนมากยิ่งขึ้นและครอบคลุมทุกบริเวณความเป็นไปได้ ของผลลัพธ์ โดยทั่วไปแล้ว RPV จะนิยามเป็นผลรวมของก๊าซผลิตภัณฑ์ ซึ่งชนิดของก๊าซที่เลือกจะแตกต่างกันไปบ้าง [13-16] ในที่นี้ จะเลือกเฉพาะก๊าซผลิตภัณฑ์หลักตามนิยามของ Ihme และ Pitsch [15] คือ

$$C = Y_{CO_2} + Y_{CO} + Y_{H_2O} + Y_{H_2} \tag{5}$$



รูปที่ 1 ผลลัพธ์ของแบบจำลอง UFM จากการเผาไหม้ n-heptane และอากาศ (T_f=298 K, T_a=830 K, 27 bar)

ในการสร้าง flamelet library ค่า C และ χ_{st} จะสมมุติว่าเป็นตัวแปรอิสระกับ Z ดังนั้นผลลัพธ์ของแต่ละ flamelet จึงขึ้นอยู่กับ Z, C และ χ_{st} โดยการกระจายตัวของ mixture fraction ในที่นี้จะสมมุติว่าเป็นแบบ beta และการกระจายตัวแบบ delta สำหรับ RPV และ scalar dissipation rate มีการกระจายตัวแบบ delta ดังนั้นค่าเฉลี่ยสเกลาร์ $\tilde{\phi}$ ซึ่งหาได้จากผลลัพธ์ชั่วขณะของ flamelet เฉลี่ยถ่วงน้ำหนักกับค่า PDF จึงเขียนได้ดังนี้

$$\tilde{\phi} = \int_0^{\chi_q}\int_0^{C_{\max}}\int_0^{1} \phi(Z,C,\chi_{st})\tilde{P}\left(Z;\tilde{Z},\widetilde{Z''^2}\right)\tilde{P}\left(C;\tilde{C}\right) \tilde{P}\left(\chi_{st};\widetilde{\chi_{st}}\right) dZdCd\chi_{st} \quad (6)$$

เมื่อ χ_q คือ quenching strain rate จากสมการนี้ flamelet library ของค่าเฉลี่ยสเกลาร์ $\tilde{\phi}$ ต่าง ๆ ที่สร้างขึ้นจะเป็นฟังก์ชันกับค่า $\tilde{Z}$, $\widetilde{Z''^2}$, $\tilde{C}$ และ $\widetilde{\chi_{st}}$ ซึ่งค่าเหล่านี้ สามารถคำนวณได้จากสมการส่งถ่ายดังต่อไปนี้

สำหรับการเผาไหม้สเปร์ย mixture fraction จะไม่เป็นสเกลาร์ที่คงตัวอีกต่อไป เนื่องจากการระเหยของละอองฝอยของสเปร์ย [17, 18] ดังนั้นอิทธิพลจากการระเหยจึงต้องเพิ่มเข้าไปในสมการส่งถ่ายของ mixture fraction ดังนี้

$$\frac{\partial\bar{\rho}\tilde{Z}}{\partial t} + \frac{\partial\bar{\rho}\tilde{U}_i\tilde{Z}}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i}\left\{\left(\bar{\rho}D_Z + \frac{\mu_t}{Sc_Z}\right)\frac{\partial\tilde{Z}}{\partial x_i}\right\} + S_m \quad (7)$$

เมื่อ D คือค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ Sc คือ Schmidt number และ S_m คืออัตราการระเหยของละอองฝอย และ mixture fraction ในที่นี้จะนิยามตาม Bilger [19]

ส่วนค่าความแปรปรวนของ mixture fraction จะถูกใช้ในการคำนวณหารูปร่างของ PDF แบบ beta ซึ่งมีผลอย่างมากต่อการเกิดปฏิกิริยา โดยสมการส่งถ่ายสำหรับค่าความแปรปรวนของ mixture fraction นั้นแสดงได้ดังนี้

$$\frac{\partial\bar{\rho}\widetilde{Z''^2}}{\partial t} + \frac{\partial\bar{\rho}\tilde{U}_i\widetilde{Z''^2}}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i}\left\{\left(\bar{\rho}D_{\widetilde{Z''^2}} + \frac{\mu_t}{Sc_{\widetilde{Z''^2}}}\right)\frac{\partial\widetilde{Z''^2}}{\partial x_i}\right\} + 2\frac{\mu_t}{Sc_{\widetilde{Z''^2}}}\left(\frac{\partial\tilde{Z}}{\partial x_i}\right)^2 - \bar{\rho}C_\chi\frac{\tilde{\varepsilon}}{\tilde{k}}\widetilde{Z''^2} \quad (8)$$

โดยที่ค่า Schmidt number สำหรับค่าเฉลี่ยและค่าความแปรปรวนของ mixture fraction โดยทั่วไปแล้ว มีค่าทั้งคู่เท่ากับ 0.9 และ C_χ เท่ากับ 2.0 [20]

ส่วนสมการส่งถ่ายสำหรับ RPV มีรูปแบบดังนี้

$$\frac{\partial\bar{\rho}\tilde{C}}{\partial t} + \frac{\partial\bar{\rho}\tilde{U}_i\tilde{C}}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i}\left\{\left(\bar{\rho}D_C + \frac{\mu_t}{Sc_{\tilde{C}}}\right)\frac{\partial\tilde{C}}{\partial x_i}\right\} + \bar{\dot{\omega}}_{\tilde{C}} \quad (9)$$

เมื่อ $\bar{\dot{\omega}}$ คืออัตราการเกิดปฏิกิริยาของ $\tilde{C}$ ซึ่งเป็นผลรวมของอัตราการเกิดก๊าซผลิตภัณฑ์หลักดังนี้

$$\bar{\dot{\omega}}_C = \bar{\dot{\omega}}_{CO_2} + \bar{\dot{\omega}}_{CO} + \bar{\dot{\omega}}_{H_2O} + \bar{\dot{\omega}}_{H_2} \quad (10)$$

3. ระเบียบวิธีการคำนวณเชิงตัวเลข

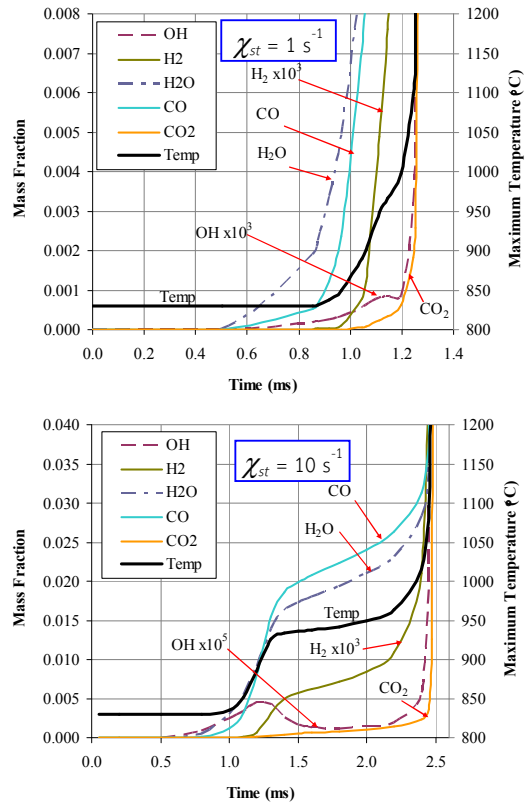
รูปร่างลักษณะของห้องเผาไหม้ จะกำหนดเป็นทรงกระบอกสมมาตร และระเบียบวิธี Favre-averaged Navier-Stokes จะถูกใช้เพื่อแก้ปัญหาของปฏิสัมพันธ์ระหว่างความปั่นป่วนและปฏิกิริยาเคมี โดยอาศัยเทคนิค finite volume ชุดสมการส่งถ่ายต่าง ๆ สำหรับทั้งสถานะก๊าซและของเหลวที่ใช้ในการแก้ปัญหาจะอยู่ในรูปของ Eulerian และการเรียงตัวของกริด staggered จะถูกใช้สำหรับความเร็วของทั้งสถานะก๊าซ และของเหลว วิธี Euler implicit temporal differencing และ hybrid upwind/central spatial differencing จะถูกใช้ในการดีสครีตชุดสมการส่งถ่าย ให้อยู่ในรูปของ finite volume สำหรับแบบจำลองความปั่นป่วนจะเลือกใช้

standard k-ε เนื่องจากต้องการเวลาการคำนวณน้อย ประกอบกับการเผาไหม้ของสเปร์ยมีค่า Reynolds number ค่อนข้างสูง ส่วนอิทธิพลของการไหลใกล้ผนังจะเลือกใช้ wall function ของ Launder และ Spalding [21] เข้ามาจัดการ สำหรับกระบวนการหาคำตอบ จะอ้างอิงกระบวนการ PISO (Pressure Implicit with Splitting of Operators) ของ Issa [22] โดยมีการเพิ่มสมการของเหลวเข้าไป กระบวนการ PISO นั้น เป็นการหาคำตอบแบบ non-iterative ที่มีสิทธิภาพ โดยจะปรับค่าความดัน และความเร็วให้สอดคล้องกันโดยอาศัยเทคนิค operator splitting แล้วหาคำตอบของสมการโมเมนตัม ตามแนวทาง predictor-corrector

4. ผลลัพธ์ของการคำนวณและการวิเคราะห์

flamelet library จะต้องถูกสร้างขึ้นมาก่อน โดยในที่นี้จะใช้ FlameMaster code [23] ช่วยในการคำนวณ โดยจะใช้กลไกจลนศาสตร์ทางเคมีแบบโครงร่างของ Liu และคณะ [2] ซึ่งใช้เชื้อเพลิง n-heptane แทนดีเซล เนื่องจากมีค่าออกเทนใกล้เคียงกัน มีจำนวนส่วนประกอบเคมี 43 ชนิดและสมการเคมีที่เกี่ยวข้องทั้งสิ้น 185 สมการ โดยใน flamelet library ที่สร้างขึ้นนี้ประกอบด้วย flamelet จำนวน 522 ชุด ใช้บันทึกข้อมูล 1,545,642 ตำแหน่งตลอดช่วงพิกัดของ $\widetilde{Z}$, $\widetilde{Z''^2}$, $\widetilde{C}$ และ $\widetilde{\chi_{st}}$ โดยในแต่ละตำแหน่งจะบรรจุข้อมูล ได้แก่ อุณหภูมิเปลว สัดส่วนเชิงมวลของ species ต่าง ๆ ความหนาแน่นของก๊าซผสม และอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีไว้ ดังนั้นจึงมั่นใจได้ว่า ข้อมูลของตัวแปรอุณหภาพเชิงเคมีต่าง ๆ ที่ถูกเรียกใช้งานนั้น จะครอบคลุมตลอดทุกมิติของการจุดระเบิด การเผาไหม้ และการดับลงของเปลว

เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและก๊าซผลิตภัณฑ์ในขณะเกิดการจุดระเบิดเองดังแสดงในรูปที่ 2 พบว่า ที่ χ_{st} ต่ำ ๆ เวลาหน่วงของการจุดระเบิดเองจะสั้นกว่ากรณีที่ χ_{st} สูง เนื่องมาจากอิทธิพลของการผสมกันของสารตั้งต้น แต่ที่น่าสังเกตคือ ในช่วงก่อนการจุดระเบิด ก๊าซ CO จะถูกแตกตัวออกมาเป็นจำนวนมาก ส่วนก๊าซ CO_2 จะเข้ามาแทนที่เมื่อเกิดการลุกไหม้แล้ว เนื่องจากการออกซิไดซ์ก๊าซ CO นอกจากนี้ปรากฏการณ์ของเปลวเย็น (cool flame) จะเห็นเด่นชัดเมื่อ χ_{st} สูงขึ้น โดยปรากฏการณ์นี้ พันธะย่อยที่ได้จากการสลายโมเลกุลใหญ่จะรวมตัวเข้าด้วยกันเอง จึงทำให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นเล็กน้อย [2] และเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นจนเพียงพอ การเกิดปฏิกิริยาก็จะรุนแรงมากขึ้นจนเกิดการลุกไหม้ต่อไป โดยก๊าซผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่ที่เกิดขึ้นได้แก่ CO_2, H_2O, CO และ H_2 ตามลำดับ

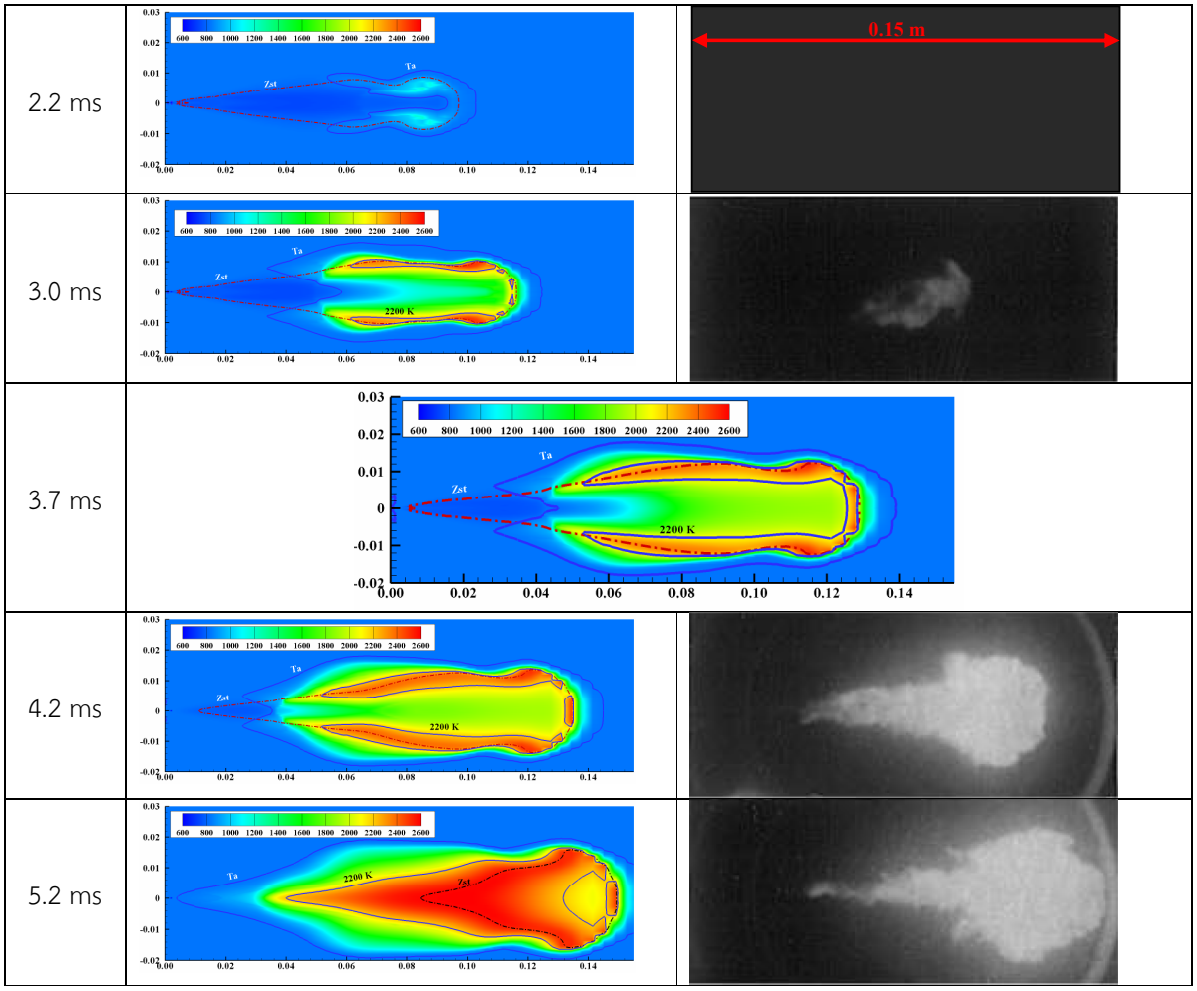


รูปที่ 2 การพัฒนาตัวของอุณหภูมิและก๊าซผลิตภัณฑ์ในขณะเกิดการจุดระเบิดเอง

เพื่อทดสอบความถูกต้องของแบบจำลอง UFM/RPV ที่พัฒนาขึ้นมา จึงได้ทำการเปรียบเทียบกับผลการทดลองของ Akiyama และคณะ [3] ดังแสดงในรูปที่ 3 โดยใช้หัวฉีดขนาด 0.18 มม. มีความดันสูงสุด 80 MPa ฉีดเข้าไปในห้องเผาไหม้ที่มีอุณหภูมิ 830 K และความดัน 27 บาร์ ปริมาณน้ำมันดีเซลที่ใช้ 28 มก. ภายในช่วงเวลา 3.8 ms ปฏิกิริยาการเผาไหม้จะเริ่มเกิดขึ้นที่บริเวณ stoichiometric contour ของสเปร์ยดังแสดงด้วยอุณหภูมิที่สูงกว่า เวลาหน่วงของการจุดระเบิดเองทำนายได้ประมาณ 2.2 ms และเกิดขึ้นในบริเวณใกล้กับส่วนหัวของสเปร์ย แต่จากผลการทดลองซึ่งนิยามการจุดระเบิดเองว่า คือช่วงเวลาที่ความดันของห้องเผาไหม้เริ่มสูงขึ้น มีค่าประมาณ 1.4 ms แต่อย่างไรก็ตาม ประกายไฟแรกที่ปรากฏในภาพถ่ายจะเริ่มเกิดขึ้นที่เวลา 2.8 ms หลังจากเกิดการจุดระเบิดแล้ว เปลวจะขยายไปยังบริเวณใกล้เคียงจนครอบคลุมผิวด้านนอกทั้งหมดของสเปร์ย

ยกเว้นบริเวณใกล้หัวฉีด ซึ่งเปลวลักษณะนี้เรียกว่า เปลวลอยตัว โดยที่บริเวณด้านในของตำแหน่งการลอยตัวของเปลว อุณหภูมิจะค่อย ๆ เพิ่มสูงขึ้นไปตามทิศทางการไหล เนื่องจากการเผาไหม้แบบ partially premixed และเป็นที่น่าสังเกตว่า อุณหภูมิเปลวสูงสุดจะเกิดขึ้นในบริเวณ stoichiometric contour เป็นไปตามหลักการของเปลว non-premixed

ที่เวลา 3.0 ms อุณหภูมิเปลวที่คำนวณได้จะมีค่าสูงกว่าผลการทดลอง ทั้งนี้เนื่องมาจาก การปรากฏของเปลวที่ล่าช้าจากการทดลองทำให้การพัฒนาตัวของเปลวช้ากว่า สำหรับระยะเปลวลอยตัว ซึ่งนิยามจากระยะจากหัวฉีดมายังอุณหภูมิอ้างอิง ในที่นี้จะกำหนดอุณหภูมิอ้างอิงนี้เท่ากับ 2,200 K ตามงานวิจัยของ [24, 25] ที่เวลา 3.7 ms ซึ่งเป็นช่วงเวลาก่อนที่จะสิ้นสุดกระบวนการฉีดน้ำมัน ระยะเปลวลอยตัวจากแบบจำลองมีค่าประมาณ 52 มม. ส่วนระยะเปลวลอยตัวที่วัดโดยตรงจากภาพถ่ายจะให้ค่าประมาณ 48 มม. ที่เวลา 4.2 ms เนื่องเป็นช่วงเวลาที่ใกล้เคียงสุด นอกจากนี้ จากสหสัมพันธ์ของ Siebers และคณะ [26, 27] ที่ใช้ในการทำนายระยะเปลวลอยตัว ก็ให้ค่าออกมาประมาณ 40-55 มม. ซึ่งสอดคล้องกับผลการทำนายของแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น ต่อมาที่เวลา 4.2 ms เปลวไฟที่ได้จากแบบจำลองจะมีความยาวของเปลวที่ใกล้เคียงกับภาพถ่าย แต่ขนาดของหางเปลวจากภาพถ่ายจะแคบกว่าก่อนที่เปลวไฟจะกระทบกับผนังของห้องเผาไหม้ ที่เวลา 5.2 ms รูปร่างของเปลวไฟที่ได้จากแบบจำลอง จะใกล้เคียงกับภาพถ่าย ยกเว้นขนาดที่ยังคงเล็กกว่า จากการเปรียบเทียบข้างต้น จะเห็นได้ว่าแบบจำลอง UFM



รูปที่ 3 ผลการเปรียบเทียบการกระจายตัวของอุณหภูมิเปลวและภาพถ่ายเปลวไฟจาก [3]

ร่วมกับ RPV สามารถทำนายการจุดระเบิด และการเผาไหม้ของสเปร์ยดีเซลได้ค่อนข้างดี โดยสามารถอธิบายปรากฏการณ์โดยหลักของเปลวไฟได้อย่างครบถ้วน

5. สรุป

ในงานวิจัยนี้ ได้พัฒนาแบบจำลองการเผาไหม้ unsteady flamelet ใช้งานร่วมกับ reaction progress variable เพื่อทำนายการจุดระเบิดและการเผาไหม้ของสเปร์ยสำหรับประยุกต์ใช้ในเครื่องยนต์ดีเซล ซึ่งผลการคำนวณจากแบบจำลองแสดงให้เห็นว่า สามารถอธิบายปรากฏการณ์การเผาไหม้ของสเปร์ยได้อย่างสมบูรณ์ เช่น การจุดระเบิดเอง การพัฒนาตัวของเปลว รวมถึงการลอยตัวของเปลว นอกจากนี้ แบบจำลองนี้ ยังสามารถทำนายกระบวนการเผาไหม้ของสเปร์ยได้เป็นที่น่าพึงพอใจเมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองของ Akiyama และคณะ [3] โดยรูปร่างของเปลวไฟที่ทำนายได้จะใกล้เคียงกับผลการทดลอง ยกเว้นแต่ขนาดของเปลวที่เล็กกว่า ส่วนระยะเปลวลอยตัวที่ทำนายได้จากแบบจำลองนี้ ก็สอดคล้องกับผลการทดลอง

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย และมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ที่สนับสนุนทุนในการทำวิจัยครั้งนี้ ภายใต้สัญญา MRG5480198 และขอขอบคุณ Professor H. Pitsch ที่อนุเคราะห์ FlameMaster code

7. เอกสารอ้างอิง

1. Beck, J.C., 2000, Computational Modelling of Polydisperse Sprays without Segregation into Droplet Size Classes, Ph.D. Thesis, UMIST, Manchester.
2. Liu, S., Hewson, J.C., Chen, J.H., and Pitsch, H., 2004, "*Effects of Strain Rate on High-Pressure Nonpremixed n-Heptane Autoignition in Counterflow*", Combustion and Flame, Vol. 137, pp. 320-339.
3. Akiyama, H., Nishimura, H., Ibaraki, Y., and Iida, N., 1998, "*Study of Diesel Spray Combustion and Ignition using High-Pressure Fuel Injection and a Micro-Hole Nozzle with a Rapid Compression Machine: Improvement of Combustion using Low Cetane Number Fuel*", Society of Automotive Engineers of Japan, Vol. 19, pp. 319-327.
4. Peters, N., 1984, "*Laminar Diffusion Flamelet Models in Non-Premixed Combustion*", Progress in Energy and Combustion Science, Vol. 10, pp. 319-339.
5. Liew, S.K., Bray, K.N.C., and Moss, J.B., 1984, "*A stretched laminar flamelet model of turbulent nonpremixed combustion*", Combustion and Flame, Vol. 56, pp. 199-213.
6. Drake, M.C., 1988, "*Stretched laminar flamelet analysis of turbulents H2 and CO/H2/N2 diffusion flames*", Symposium (International) on Combustion, Vol. 21, pp. 1579-1589.
7. Hollmann, C. and Gutheil, E., 1998, "*Flamelet-modeling of Turbulent Spray Diffusion Flames based on a Laminar Spray Flame Library*", Combustion Science and Technology, Vol. 135, pp. 175–192.
8. Hossain, M., 1999, CFD Modeling of Turbulent Non-premixed Combustion, Loughborough University, UK.
9. Ferreira, J.C., 2001, "*Steady and Transient Flamelet Modelling of Turbulent Non-premixed Combustion*", Progress in Computational Fluid Dynamics, Vol. 1, pp. 29-42.
10. Darabiha, N., 1992, "*Transient Behavior of Laminar Counterflow Hydrogen-air Diffusion Flames with Complex Chemistry*", Combustion Science and Technology, Vol. 86, pp. 163-181.
11. Egolfopoulos, F.N. and Campbell, C.S., 1995, "*Unsteady Counterflowing Strained Diffusion Flames: Diffusion-limited Frequency Response*", Journal of Fluid Mechanics, Vol. 318, pp. 1–29.
12. Park, J. and Shin, H.D., 1997, "*Experimental Investigation of the Developing Process of an Unsteady Diffusion Flame*", Combustion and Flame, Vol. 110, pp. 67-77.
13. Bekdemir, C., 2008, Numerical Modeling of Diesel Spray Formation and Combustion, Eindhoven University of Technology, Netherlands.
14. Baba, Y. and Kurose, R., 2008, "*Analysis and Flamelet Modelling for Spray Combustion*", Journal of Fluid Mechanics, Vol. 612, pp. 45-79.
15. Ihme, M. and Pitsch, H., 2008, "*Prediction of Extinction and Reignition in Nonpremixed Turbulent Flames using a Flamelet/progress Variable Model 2; Application in LES of Sandia Flames D and E*", Combustion and Flame, Vol. 155, pp. 90–107.
16. Sadasivuni, S.K., Malalasekera, W., and Ibrahim, S.S. *Validation of Unsteady Flamelet/progress Variable Methodology*

for Non-premixed Turbulent Partially Premixed Flames. in *Proceedings of the ECM 2009 Fourth European Combustion Meeting, Vienna University of Technology, Austria*. 2009.

17. Watanabe, H., Kurose, R., Hwang, S., and Akamatsu, F., 2007, "*Characteristics of Flamelet in Spray Flames Formed in a Laminar Counterflow",* Combustion and Flame, Vol. 148, pp. 234–248.
18. Watanabe, H., Kurose, R., Komori, S., and Pitsch, H., 2008, "*Effects of Radiation on Spray Flame Characteristics and Soot Formation",* Combustion and Flame, Vol. 152, pp. 2–13.
19. Bilger, R.W., Stårner, S.H., and Kee, R.J., 1990, "*On Reduced Mechanisms for Methane---air Combustion in Nonpremixed Flames",* Combustion and Flame, Vol. 80, pp. 135-149.
20. Pitsch, H., Barths, H., and Peters, N., *Three-Dimensional Modeling of NOx and Soot Formation in DI-Diesel Engines using Detailed Chemistry Based on the Interactive Flamelet Approach*, in *SAE Technical Paper Series No. 9620571*996.
21. Launder, B.E. and Spalding, D.B., *Lectures in Mathematical Models of Turbulence*1972, London: Academic Press.
22. Issa, R.I., 1986, "*Solution of the Implicitly Discretised Fluid Flow Equations by Operator-Splitting",* Journal of Computational Physics, Vol. 62, pp. 40-65.
23. Pitsch, H., *A C++ Computer Program for 0-D and 1-D Laminar Flame Calculations*, in *RWTH Aachen*1988.
24. Tap, F.A. and Veynante, D., 2005, "*Simulation of Flame Lift-off on a Diesel Jet using a Generalized Flame Surface Density Modeling Approach",* Proceedings of the Combustion Institute, Vol. 30, pp. 919-926.
25. Senecal, P.K., Pomraning, E., Richards, K.J., Briggs, T.E., Choi, C.Y., McDavid, R.M., and Patterson, M.A., *Multi-Dimensional Modeling of Direct-Injection Diesel Spray Liquid Length and Flame Lift-off using CFD and Parallel Detailed Chemistry*, in *SAE Technical Paper Series No. 2003-01-10432*003.
26. Siebers, D.L. and Higgins, B.S., *Flame Lift-off on Direct-Injection Diesel Sprays under Quiescent Conditions*, in *SAE Technical Paper Series No. 2001-01-05302*001.
27. Siebers, D.L., Higgins, B.S., and Pickett, L.M., *Flame Lift-off on Direct Injection Diesel Fuel Jets: Oxygen Concentration Effects*, in *SAE Technical Paper Series No. 2002-01-08902*002.