

# การศึกษาเชิงตัวเลขของพฤติกรรมการกระจายเปลวไฟด้วยการไหลปั่นป่วน ในเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยประกายไฟ

## Numerical Investigation of Turbulent Induce Flame Propagation in SI Engine.

ชโลธร ธรรมแท้<sup>1</sup> และ ธนัญชัย ตรีทิพย์สถิตย์<sup>2</sup>

<sup>1</sup>สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต

1761 ถ.พัฒนาการ เขตสวนหลวง กรุงเทพฯ 10250

โทร 0-23216930-9 ต่อ 1203 โทรสาร 0-23214444 E-mail: chalothorn\_t@hotmail.com, ch\_thumt@kbu.ac.th

<sup>2</sup>บริษัท แอดวานซ์ซีเอ็มบิชั่น

Chalothorn THUMTHAE<sup>1</sup> and Tananchai Treetipsatid<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Kasembundit University

1761 Pattanakon Rd. Sounlung Bangkok 10250

Tel: 0-23216930-9 Ext.1203 Fax: 0-23214444 E-mail: chalothorn\_t@hotmail.com, ch\_thumt@kbu.ac.th

<sup>2</sup>Advance Simulation Co. LTD.

### บทคัดย่อ

บทความนี้เป็นงานวิจัยที่ศึกษาถึงพฤติกรรมการกระจายเปลวไฟด้วยการไหลแบบปั่นป่วนในเครื่องยนต์ SI โดยใช้แบบจำลองเชิงตัวเลขโดยใช้ซอฟต์แวร์เปิด OpenFOAM ทำการคำนวณเชิงตัวเลขกับสมการอนุพันธ์ มวล โมเมนตัม พลังงาน ควบคู่ไปกับแบบจำลองความปั่นป่วน RNG k-epsilon และแบบจำลองการเผาไหม้ b -  $\Xi$  ผลที่ได้ใกล้เคียงกับการทดลองก่อนหน้าแสดงให้เห็นถึงความแม่นยำเพียงพอ จึงนำไปใช้ในการทำนายผลการเผาไหม้ของห้องเผาไหม้อีกสองรูปทรงคือ Pentroof และ Bowl-in-piston พบว่าการไหลปั่นป่วนที่เกิดจาก Squish และ Reverse-Squish มีส่วนช่วยในการกระจายเปลวไฟอย่างมาก ซึ่ง Bowl-in-piston จะให้คุณลักษณะการเผาไหม้ที่เร็วกว่า ทำให้ได้ความดันในจังหวะทำงานมากขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่ารูปร่างห้องเผาไหม้มีผลต่อประสิทธิภาพเครื่องยนต์

### Abstract

This paper reports a research about the behavior of turbulent that induces flame propagation in spark-ignition engine. The open-source code, OpenFOAM, is used as a tool for investigation combustion phenomena. The results are carried out with solving numerically of mass, momentum and energy equations coupling with RNG k-epsilon turbulence model and b -  $\Xi$  combustion model. Predicted cylinder pressure histories agree well with the experimental result from previous study. So it is used to predict combustion of Pentroof and Bowl-in-piston chamber. Squish and Reverse-Squish from turbulence flow have a highly effect to flame propagation. Burning rate of bowl-in-piston is higher than pentroof, the bowl-in-piston give higher cylinder pressure at

power stroke. Therefore the combustion characteristics are determined by chamber geometry.

### 1.บทนำ

ได้มีการนำเสนอบทความด้านการจำลองการเผาไหม้ ในการประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 18 [1] โดยเป็นการศึกษาเบื้องต้นถึงความสามารถของ CFD ในการจำลองการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ SI แต่ยังไม่ได้มีการแสดงถึงความถูกต้องของแบบจำลองที่ใช้ และแสดงแบบจำลองไม่ชัดเจนนัก ทั้งนี้บทความดังกล่าว ผู้วิจัยได้พบว่าพฤติกรรมที่มีผลอย่างมากต่อการเผาไหม้คือ การเนี่ยวนำการกระจายเปลวไฟด้วยการไหลแบบปั่นป่วน ซึ่งพบว่าความปั่นป่วนที่สูง อันเนื่องมาจากรูปทรงของห้องเผาไหม้แบบ Squish ทำให้เกิดการไหลบับ และช่วยในการกระจายเปลวไฟ ในการวิเคราะห์ผลลัพธ์จากเวกเตอร์การไหลในสองมิติ ทำให้เกิดการสรุปเบื้องต้นว่า ห้องเผาไหม้แบบรูปทรง bowl in piston จะให้ความเร็วของเปลวไฟและการกระจายของเปลวไฟได้ดีกว่าห้องเผาไหม้ทรง pent roof เนื่องจาก การไหลบับ(squish) ของห้องเผาไหม้ทรง blow in piston ให้ทิศทางการไหลที่เสริมการกระจายเปลวไฟ แต่ห้องเผาไหม้ทรง pent roof ให้ทิศทางการไหลที่ต้านการกระจายเปลวไฟ

ในบทความนี้จะเป็นการนำเสนอ การศึกษาอย่างต่อเนื่อง เพื่อให้ผลลัพธ์ที่มีความน่าเชื่อถือมากขึ้น เพิ่มทฤษฎีที่ชัดเจน และแสดงผลที่สมบูรณ์ขึ้น โดยมุ่งไปที่พฤติกรรมการเนี่ยวนำการกระจายเปลวไฟด้วยการไหลแบบปั่นป่วน ซึ่งน่าจะเป็นสิ่งสำคัญที่จะเพิ่มประสิทธิภาพเครื่องยนต์ให้สูงขึ้น

## 2. แบบจำลองการเผาไหม้

ในการจำลองการเผาไหม้นั้นสามารถทำได้หลายวิธี โดยอาจจะแบ่งพฤติกรรมของการเผาไหม้ได้หลักๆสองชนิดคือ Turbulence Controlled Combustion เป็นการเผาไหม้ที่ถูกควบคุมโดยการไหลแบบปั่นป่วน และ Kinetically controlled combustion เป็นการเผาไหม้ที่ถูกควบคุมโดยปฏิกิริยาเคมี ทั้งนี้ก็ได้มีการพัฒนาเอาคุณสมบัติทั้งสองอย่างนี้เข้าด้วยกันเป็นแบบจำลอง Finite-Rate/Eddy-Dissipation Concept [2], pPDF model [3], และ laminar-flamelet model [4].

### 2.1 Eddy Break-Up Model

แบบจำลองการเผาไหม้ Eddy Break-Up(EBU) เสนอโดย Spalding [5] อาศัยหลักการที่กระแสไหลวน หรือ turbulence eddy นั้นทำให้เปลวไฟกระจายจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่ง ซึ่งในกรณีนี้ความเร็วเปลวไฟปั่นป่วน (Turbulence Flame Speed) จะมีค่าสูงกว่าความเร็วการเกิดปฏิกิริยามากๆ จึงทำให้สามารถละเลยผลของความเร็วของปฏิกิริยาเคมีของการเผาไหม้ได้ อย่างไรก็ตามต้องอยู่ภายใต้สมมติฐานที่ว่า ความหนาของเปลวไฟ จะมากกว่า Kolmogorov micro scale (ระยะของ eddy ที่เล็กที่สุด) แต่ไม่เกิน Integral scale (ระยะของ Large eddy)[6] โดย Spalding ได้เสนอความสัมพันธ์ไว้ดังนี้

$$\frac{\partial \bar{p}\tilde{c}}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{p}\tilde{U}\tilde{c}) - \nabla \cdot (\bar{p}\tilde{D}_{c_i}\nabla\tilde{c}) = \tilde{w} \quad (1)$$

เมื่อ  $c$  คือ progress variable หมายถึงเศษส่วนมวลเชื้อเพลิงที่กำลังเผาไหม้ โดย  $0 \leq c \leq 1$ ,  $\tilde{D}_{c_i}$  คือ diffusion coefficient. สัญลักษณ์ overbar ( $\bar{\phantom{x}}$ ) และ tilda overbar ( $\tilde{\phantom{x}}$ ) หมายถึง ensemble และ density weighted ensemble ตามลำดับ. ตัวแปร  $\tilde{w}$  คืออัตราการเกิดปฏิกิริยา (Reaction Rate) โดยที่

$$\tilde{w} = \bar{\rho}_A \tilde{c} (1 - \tilde{c}) / \tau_t \quad (2)$$

เมื่อ  $\tau_t$  คือ turbulence dissipation time scale หาได้จากความสัมพันธ์ของ turbulence kinetic energy  $\tilde{k}$  กับ dissipation rate  $\tilde{\epsilon}$  โดย  $\tau_t = \tilde{k} / \tilde{\epsilon}$ . หรืออาจเขียนให้อยู่ในอีกรูปแบบหนึ่งคือ

$$\tau_t = \frac{l}{u'} \quad (3)$$

เมื่อ  $u'$  คือ root mean square (rms.) turbulent velocity และ  $l$  คือ turbulent integral length scale. ซึ่งสมการ (2) แสดงให้เห็นว่าอัตราการเผาไหม้ แปรผันตรงกับ ความเร็วปั่นป่วน

พิจารณาที่บริเวณใกล้ๆผนัง, ความเร็วของ ของไหลจะลดลงจนหยุดนิ่งภายใต้ชั้นขีตผิว ดังนั้น turbulence length scale ก็จะลดลงจนเป็นศูนย์เช่นเดียวกัน ทำให้ turbulence time scale ลดลงสัมพันธ์กับ turbulence length scale ในสมการที่ (3). เมื่อ  $\tau_t$  ลดลงเข้าใกล้ศูนย์ที่ผนัง ทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยามีค่าเข้าสู่อันต์ ในสมการที่ (2). นี่เป็นข้อผิดพลาดของแบบจำลอง EBU model. เพื่อที่จะแก้ปัญหานี้ จะต้องมีการปรับปรุงความสัมพันธ์ของ  $\tilde{w}$  ในสมการที่ (2) ซึ่งแบบจำลองที่ปรับปรุงความสัมพันธ์ของ  $\tilde{w}$  ให้มีความสมบูรณ์มากขึ้นเพื่อแก้ปัญหการเผาไหม้บริเวณชั้นขีตผิว ได้เสนอในหลายรูปแบบ [7-8]. โดยอัตราการเกิดปฏิกิริยา  $\tilde{w}$  จะถูกเปลี่ยนให้เป็นฟังก์ชันของ ความหนาแน่นของพื้นที่เปลวไฟ  $\Sigma$  แบบแปรผกผันตรง ที่บริเวณชั้นขีตผิว  $\Sigma$  จะลดลงตามความเร็วเปลวไฟแบบปั่นป่วนที่ลดลง จึงทำให้  $\tilde{w}$  ลดลงตามไปด้วย ซึ่งเป็นพฤติกรรมที่ถูกต้อง

### 2.2 Wrinkle Flame Model (b - $\Xi$ model)

หนึ่งในแบบจำลองการเผาไหม้ที่ปรับปรุง EBU เพื่อให้สามารถทำนายกระบวนการเผาไหม้บริเวณชั้นขีตผิวได้คือ Weller Wrinkle Flame model. ซึ่งพัฒนาโดย Weller [9], ได้มีการเปลี่ยนแปลงตัวแปรเพื่อใช้อธิบายเปลวไฟเป็น regress variable “b” โดย  $b = 1 - c$ . หมายถึงเศษส่วนมวลของแก๊สเชื้อเพลิงที่ยังไม่เผา

$$\tilde{b} = \frac{\tilde{f} - f_b}{f_u - f_b} \quad (4)$$

นั่นคือ b จะตรงข้ามกับ c โดยที่  $b = 1$  คือบริเวณที่ยังไม่เผาไหม้ ส่วนที่  $b = 0$  คือบริเวณที่การเผาไหม้สิ้นสุดลงไปแล้ว และบริเวณที่  $0 < b < 1$  คือส่วนที่กำลังเกิดการเผาไหม้อยู่ และบริเวณในช่วงนี้หมายถึง ความหนาของเปลวไฟ (flame thickness) โดยที่ Weller ได้เสนอสมการอนุพันธ์ของ b ไว้ดังนี้

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{\rho}\tilde{b}}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{\rho}\tilde{U}\tilde{b}) - \nabla \cdot (\bar{\rho}\tilde{D}_{b_i}\nabla\tilde{b}) \\ = -\bar{\rho}_u \Xi S_l |\nabla\tilde{b}| \end{aligned} \quad (5)$$

เมื่อ  $\Xi$  คือ flame wrinkle factor นิยามของมันคือ พื้นที่ความหยักของผิวเปลวไฟ (wrinkle flame surface area)หารด้วย พื้นที่ตั้งฉากหนึ่งหน่วย. โดย  $\Xi$  สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของ ความหนาแน่นของพื้นที่เปลวไฟ  $\Sigma$  หรือเป็นอัตราส่วนของ  $S_l$  กับ  $S_p$ .

$$\Xi = \frac{\Sigma}{|\nabla\tilde{b}|} \quad (6)$$

Ξ สามารถที่จะคำนวณได้จากสมการ transport ของตัวมันเอง

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Xi}{\partial t} + \bar{U}_s \cdot \nabla \Xi - \nabla \cdot \bar{D}_I \nabla \Xi = G \Xi - R \Xi^2 \\ + \Xi \hat{n} \cdot \nabla \bar{U}_s \cdot \hat{n} - \frac{1}{\Xi} \hat{n} \cdot \nabla \bar{U}_s \cdot \hat{n} \\ + (S_I(\Xi^2 - 1) \bar{D}_I \nabla \Xi) \frac{\nabla |\nabla \bar{b}|}{|\nabla \bar{b}|} \end{aligned} \quad (7)$$

เมื่อ  $G \Xi$  และ  $R \Xi^2$  อัตราการเกิดความหยักเปลวไฟจากการไหลปั่นป่วน และอัตราการสลายความหยักเปลวไฟจากการกระจายเปลวไฟตามลำดับ  $G$  และ  $R$  เป็นค่าสัมประสิทธิ์ที่ต้องจำลองเพิ่มเติมซึ่งจะยิ่งมีความยุ่งยากในการหาสมการอนุพันธ์ของ  $G$  และ  $R$  เพื่อความสะดวกจึงจำลองด้วยสมการพีชคณิตง่าย ๆ ที่ได้การทดลอง หรือการคำนวณโดยตรง โดย  $G = 0.28 / \tau_\eta$  และ  $R = G / \Xi_{eq}$  เมื่อ  $\tau_\eta$  คือ Kolmogorov time scale และ  $\Xi_{eq}$  คือ  $\Xi$  ที่สภาวะสมดุล กล่าวคือที่อัตราการเกิดความหยักเท่ากับอัตราการสลายพอดี โดย  $\Xi_{eq}$  มีความสัมพันธ์ดังนี้

$$\Xi_{eq} = \frac{S_t}{S_l} = 1 + \frac{u'}{S_l} \quad (8)$$

โดย  $S_t / S_l$  สามารถหาได้จากความสัมพันธ์การศึกษาเชิงทดลอง ซึ่งเสนอไว้หลายความสัมพันธ์ เช่น สูตรของ Damkohler สูตรของ Klimov หรือสูตรของ Clavin และ Williams โดยทั้งหมดเป็นความสัมพันธ์ที่ต้องใช้ความเร็วเปลวไฟแบบราบเรียบ  $S_l$  นิยมใช้สูตรของ Gulder (ดู [6])

ภายใต้สมมุติฐานการสมดุลของ  $\Xi$  ซึ่งอัตราการเกิดความหยักเท่ากับอัตราการสลายพอดี สามารถแทนค่า  $\Xi$  ของสมการที่ (5) ด้วย  $\Xi_{eq}$  จากสมการที่(8) ได้ ทำให้เหลือสมการการเผาไหม้เพียงสมการเดียว การคำนวณจะสะดวกกว่าเพราะใช้สมการเดียวในการอธิบายการเผาไหม้ แต่ผลที่ได้จะสูงกว่าความเป็นจริง เนื่องจากการเผาไหม้จริง  $\Xi$  จะไม่อยู่ในสภาวะสมดุล[10-11] หากต้องการความแม่นยำยิ่งขึ้น จะต้องหาผลเฉลยของสมการ(5) กับสมการ(7) พร้อมกัน ซึ่งเรียกว่า b -  $\Xi$  model ซึ่งแสดงให้เห็นแล้วว่าผลที่ได้มีความถูกต้องมากกว่า[12]

### 3. ซอร์ฟแวร์ OpenFOAM

โปรแกรม OpenFOAM1.1<sup>\*</sup> พัฒนาโดย Weller และ คณะ[13-14] เป็นซอร์ฟแวร์เปิด (open-source) สำหรับการคำนวณเชิงตัวเลขทางด้านกลศาสตร์ความต่อเนื่อง(Computational Continuum Mechanics) สามารถ download ใช้ฟรีได้ที่ [www.openfoam.org](http://www.openfoam.org) ทำงานบนระบบ

Linux ตัวแปรโปรแกรมเขียนด้วยภาษา C++ ในลักษณะของ Object Oriented Programming ตัวอย่างเช่นสมการโมเมนตัมของ ของไหลแบบนิวโตเนียน

$$\frac{\partial \rho U}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U U) - \nabla \cdot \mu \nabla U = -\nabla p \quad (9)$$

สามารถเขียนเป็นโปรแกรมได้ดังนี้

```
solve
(
    fvm::ddt(rho,U) + fvm::div(phi, U)
    - fvm::laplacian(mu, U)
    == - fvm::grad(p)
);
```

อัลกอริทึมที่ใช้ในการหาผลเฉลยของ กลุ่มสมการอนุพันธ์ เป็น SIMPLE และ PISO สำหรับปัญหาการไหลแบบคงตัว และ ไม่คงตัวตามลำดับ ซึ่งในปัจจุบันได้พัฒนาให้ครอบคลุมปัญหาการไหลได้มากมาย แต่ยังคงต้องได้รับการพัฒนาต่อเนื่องต่อไป สำหรับปัญหาด้านการแผ่รังสีความร้อน และการนำความร้อน

### 4. แบบจำลองเครื่องยนต์

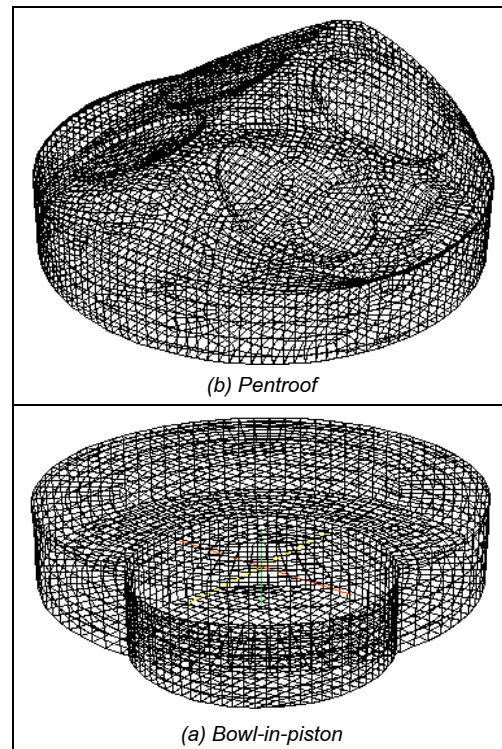
งานวิจัยนี้จะการศึกษาแบ่งเป็นสองส่วน ส่วนที่หนึ่งสำหรับยืนยันความถูกต้องของแบบจำลอง โดยใช้ข้อมูลจากการทดลองของ Witze และคณะ.[15] เป็นเครื่องยนต์สูบเดี่ยวที่มีชื่อว่า Sandia Engine ทดสอบที่ Sandia National Laboratory ข้อมูลเครื่องยนต์และสภาวะทดสอบแสดงไว้ใน Table 1. การศึกษาในส่วนที่สองจะเป็นกรณีศึกษาที่สนใจเกี่ยวกับห้องเผาไหม้สองรูปทรงที่ใช้ในเครื่องยนต์ SI ในปัจจุบัน นั่นคือรูปทรงแบบ Pentroof และ Bowl-in-piston ข้อมูลต่างๆแสดงใน Table 2. โดยรูปทรงของห้องเผาไหม้ที่ทำการเมชแล้วแสดงอยู่ใน Figure 1.

สมการที่ใช้คำนวณจะใช้แบบจำลองการเผาไหม้แบบสองสมการ Weller b -  $\Xi$  model คำนวณคู่ไปกับสมการอนุพันธ์ มวล โมเมนตัม พลังงาน และ สมการอนุพันธ์ความปั่นป่วน RNG k-epsilon สำหรับสมการพลังงาน ค่าความจุความร้อนจะแปรผัน โดยทำการคำนวณจากความสัมพันธ์กับอุณหภูมิ โดยใช้ค่าจาก JANAF thermodynamic table[16] การคำนวณจะอยู่ภายใต้สมมุติฐานว่า เชื้อเพลิงผสมกับอากาศอย่างสมบูรณ์ ไม่มีไอเสียตกค้างอยู่ในห้องเผาไหม้ เครื่องยนต์ทำงานที่ภาวะสูงสุด ไม่คิดผลของวาล์วไอดีไอดีเสีย เนื่องจากการคำนวณจะเริ่มหลังจากวาล์วไอดีปิดไปแล้ว และสิ้นสุดการคำนวณก่อนที่วาล์วไอเสียจะเปิด โดยจะกำหนดค่าเริ่มต้น ณ ตำแหน่งที่เริ่มคำนวณให้สอดคล้องกับความเป็นจริง

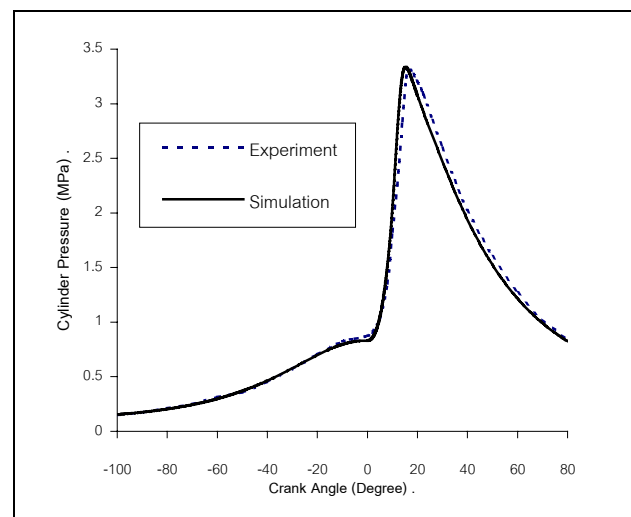
<sup>\*</sup> FOAM= Field Operation And Manipulation

**Table 1.** Geometrical and computational parameter for validation.

| Engine Geometry and operating condition     |          |
|---------------------------------------------|----------|
| Displacement                                | 462 cc   |
| Bore                                        | 76.2 mm  |
| Stroke                                      | 82.55 mm |
| Connecting Rod                              | 202 mm   |
| Clearance at TDC                            | 18.76 mm |
| Compression ratio                           | 5.4:1    |
| Engine Speed                                | 1200 RPM |
| Spark Timing                                | 7 ° bTDC |
| Spark location                              | central  |
| Fuel                                        | Propane  |
| Equivalence ratio                           | 1.0      |
| Initial and boundary condition at 100° bTDC |          |
| Initial temperature                         | 500 K    |
| Initial pressure                            | 154 kPa  |
| Initial rms turbulence velocity             | 2.75 m/s |
| Wall temperature                            | 350 K    |

**Figure 1.** Computational mesh at 40° bTDC.**Table 2.** Engine parameter for case study

|                   |                           |
|-------------------|---------------------------|
| Bore              | 81.0 mm                   |
| Stroke            | 86.0 mm                   |
| Connecting Rod    | 147 mm                    |
| Compression ratio | 11.2:1                    |
| Engine Speed      | 1500 RPM                  |
| Spark Timing      | 30 ° bTDC                 |
| Spark location    | central                   |
| Fuel              | Methane                   |
| Equivalence ratio | 1.0                       |
| Type of chamber   | Pentroof & Bowl-in-piston |

**Figure 2.** Pressure histories of validating case

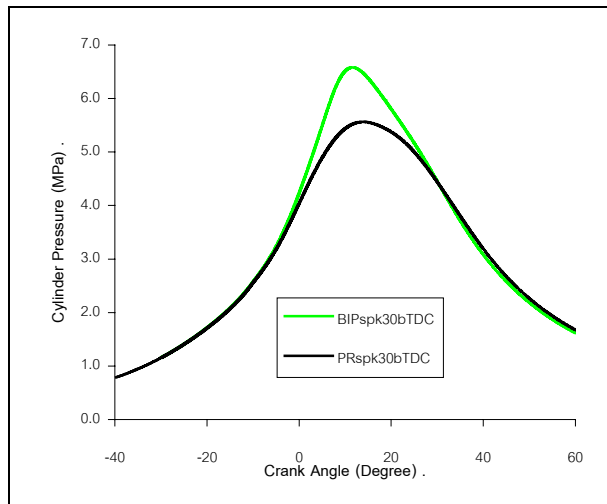


Figure 3. Pressure histories of case study

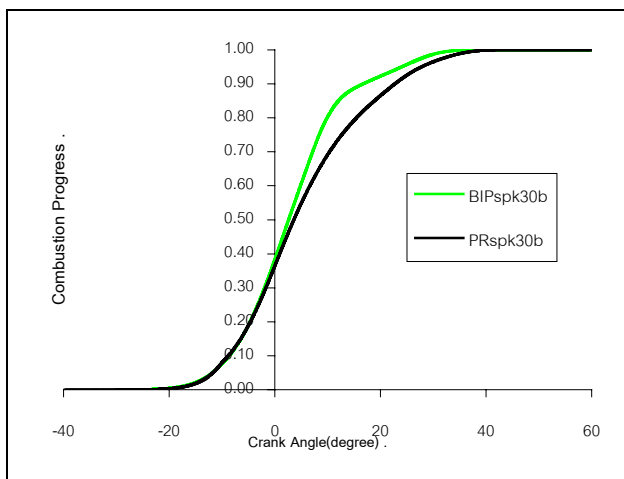


Figure 4. Burning rate histories of case study

## 5. ผลและการวิเคราะห์

Figure 2. แสดงถึงค่าเฉลี่ยของความดันในกระบอกสูบที่ตำแหน่งเพลวข้อเหวี่ยงต่างๆ เปรียบเทียบกันระหว่างการทดลองกับการคำนวณเชิงตัวเลข ผลที่ได้แสดงให้เห็นถึงความสอดคล้องกันดีมาก โดยในช่วงจังหวะอัด การคำนวณให้ผลที่ถูกต้องมาก จะเกิดความผิดพลาดเล็กน้อยในการจำลองการจุดระเบิด โดยผลจากการคำนวณจะต่ำกว่าเล็กน้อย ในช่วงการเผาไหม้ที่ความดันเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วพบว่า ผลจากการคำนวณจะให้ค่าความดันสูงสุดที่สูงกว่าเล็กน้อย และถึงตำแหน่งความดันสูงสุดเล็กน้อยเช่นกัน หลังจากถึงจุดสูงสุดของความดันแล้วความดันที่ได้จากการคำนวณจะมีค่าน้อยกว่าการทดลองเล็กน้อยในช่วงจังหวะกำลัง ทั้งนี้ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองมีความแม่นยำที่เพียงพอต่อการใช้นำมาพยากรณ์การเผาไหม้ในเครื่องยนต์แบบจุดระเบิดด้วยประกายไฟ

พิจารณาผลที่ได้จากการคำนวณเชิงตัวเลขใน Figure 3 แสดงการเปรียบเทียบความดันในกระบอกสูบที่ได้จากห้องเผาไหม้ Pentroof และ Bowl-in-piston ผลการคำนวณแสดงให้เห็นว่าห้องเผาไหม้แบบ Bowl-in-piston ให้ความดันในกระบอกสูบที่สูงกว่า ห้องเผาไหม้

Pentroof อย่างชัดเจน แต่ในช่วงปลายของการเผาไหม้ ความดันจาก Bowl-in-piston จะต่ำกว่าเล็กน้อย Figure 4 แสดงถึงเศษส่วนมวลของการเผาไหม้ที่ตำแหน่งเพลวข้อเหวี่ยงต่างๆ ในช่วงของการเผาไหม้ก่อนลูกสูบจะถึงศูนย์ตายบน พบว่าอัตราการเผาไหม้จะใกล้เคียงกันมากระหว่างห้องเผาไหม้ทั้งสองแบบ หลังจากศูนย์ตายบนไปแล้ว Bowl-in-piston จะให้อัตราการเผาไหม้ที่สูงกว่าอย่างชัดเจน ดังนั้นการเผาไหม้จาก Bowl-in-piston จะสิ้นสุดก่อน

ก่อนจะพิจารณาถึงการมองเห็นกระบวนการเผาไหม้ในกระบอกสูบ จะขอกล่าวถึงนิยามของ Squish และ Reverse-squish ก่อน นิยามของ Squish คือ การไหลของแก๊สที่เข้าปะทะกันในแวนวาล์ว โดยของไหลจะถูกบีบจากปริมาตรด้านนอกที่เรียกว่า squish region สู่ปริมาตรภายใน ซึ่งอาจจะเป็นหลุมในลูกสูบ (bowl-in-piston) หรืออาจจะเป็น หลุมในฝาสูบ (bowl-in-head) ดังนั้น Squish จึงเกิดที่ปลายจังหวะอัด และเป็นตัวช่วยให้เชื้อเพลิงมารวมกันอยู่บริเวณกลางห้องเผาไหม้ หลังจากที่ถูกสูบเริ่มเคลื่อนที่ลงจากศูนย์ตายบน ปริมาตรของห้องเผาไหม้ก็จะเพิ่มขึ้น แก๊สที่เผาไหม้แล้วก็จะถูกดันออกไปยัง squish region อีกครั้งในลักษณะการไหลที่ตรงข้ามกับ Squish จึงเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า Reverse-squish[17] ซึ่งจะเป็นตัวช่วยให้เกิดการกระจายเปลวไฟในช่วงปลายของการเผาไหม้

Figure 5. และ Figure 6. แสดงผลการคำนวณในลักษณะของการมองเห็นการไหลในสามมิติ คำนวณกับการตัดผ่าครึ่งเพื่อแสดงผลในสองมิติ โดยทำการแสดงการกระจายเปลวไฟโดยใช้ regress variable  $\tilde{b}$  เป็นตัวแปรที่แสดงให้เห็นถึงเปลวไฟที่กระจายออกไป เมื่อ  $\tilde{b} = 1$  คือบริเวณที่ยังไม่เผาไหม้ ส่วนที่  $\tilde{b} = 0$  คือบริเวณที่การเผาไหม้สิ้นสุดลงไปแล้ว และบริเวณที่  $0 < \tilde{b} < 1$  คือส่วนที่กำลังเกิดการเผาไหม้อยู่ ซึ่งระยะนี้บ่งบอกถึงความหนาของเปลวไฟ (flame thickness) ทั้งนี้ทำการแสดงผลร่วมกับเวกเตอร์ของความเร็วเพื่อให้เห็นถึงทิศทางการไหลของแก๊สในกระบอกสูบด้วย ในช่วงเริ่มต้นของการเผาไหม้ แสดงใน Figure 5. Squish ที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะแตกต่างกันระหว่าง bowl-in-piston กับ pentroof สำหรับ bowl-in-piston การไหลที่เกิดขึ้น แก๊สจะถูกบีบจากบริเวณปริมาตรด้านนอก (Squish region) ในลักษณะการไหลวนแบบ tumble รอบๆ เปลวไฟที่กำลังกระจายออกมา ซึ่งการไหลวนนี้จะช่วยในการกระจายผิวหน้าของเปลวไฟให้กว้างมากขึ้น สำหรับ pentroof การไหลบีบของแก๊สจาก Squish Region จะพุ่งขึ้นไปปะทะกับเปลวไฟที่กำลังกระจายออกมา ทำให้เกิดการเหนี่ยวนำให้ทิศทางการไหลกระจายออกไปในแนวตั้งฉาก (ในทิศของแกน Y) จึงทำให้รูปร่างของเปลวไฟในกรณีนี้มีลักษณะเป็นทรงรี ซึ่งต่างกับกรณีของ bowl-in-piston ที่ห้องเผาไหม้มีความสมมาตรในทุกทิศทาง เปลวไฟจึงมีลักษณะทรงกลม อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาเทียบกับกราฟอัตราการเผาไหม้ ใน Figure 4 จะพบว่ารูปร่างของห้องเผาไหม้ทั้งสองแบบนี้ให้ผลลัพธ์ในการกระจายเปลวไฟได้ไม่แตกต่างกันมากนัก

ที่ช่วงท้ายของการเผาไหม้โดยเริ่มตั้งแต่ลูกสูบเริ่มเคลื่อนที่ลงหรือจังหวะขยาย ผลลัพธ์แสดงอยู่ใน Figure 6, แสดงให้เห็นถึงผลของ Reverse squish ที่มีต่อการเผาไหม้ สำหรับ bowl-in-piston การกระจายเปลวไฟด้วย Reverse squish จะเกิดขึ้นรอบๆ หลุมในลูกสูบ

ซึ่งต่างกับ pentroof ที่ Reverse squish จะเกิดขึ้นในทิศทาง แกน+X และ -X เท่านั้น ตามตำแหน่งของ Squish region ที่มีอยู่ ด้วยเหตุที่ blow-in-piston มี Squish region ที่กว้างกว่า จึงทำให้การกระจายเปลวไฟในช่วงท้ายของการเผาไหม้ ดีกว่า pentroof ซึ่งผลจากการมองเห็นทิศทางการไหลนี้ ไปสอดคล้องกับกราฟอัตราการเผาไหม้ของ blow-in-piston มีอัตราการเผาไหม้ที่สูงกว่า จึงทำให้ได้ความดันในกระบอกสูบที่สูงกว่าด้วยเช่นกัน

งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าการแสดงผลด้วยการมองเห็นการไหลด้วยนั้น ทำให้สามารถเข้าใจพฤติกรรมต่างๆที่เกิดขึ้นได้ดีมากขึ้น โดยหากพิจารณาเฉพาะปริมาณทาง Thermodynamics เพียงอย่างเดียวนั้น ไม่เพียงพอที่จะอธิบายปรากฏการณ์ที่ซับซ้อนของการเผาไหม้ในเครื่องยนต์ได้ ทั้งนี้จะขอกล่าวถึงปัญหาที่เป็นสองมิติกับสามมิติด้วย เพื่อความสะดวกรวดเร็วในการคำนวณแล้ว บ่อยครั้งที่นักวิจัยจะมองปัญหาให้เป็นเพียงสองมิติ ซึ่งในบางปัญหาอาจทำได้ ดังเช่นพฤติกรรมการเผาไหม้ในกระบอกสูบ เมื่อพิจารณาปัญหาเป็นสามมิติ ก็ควรที่จะแสดงผลเป็นสามมิติด้วย เนื่องจากหากแสดงผลเป็นเพียงสองมิติ อาจจะทำให้เกิดความเข้าใจคลาดเคลื่อนได้ เช่นใน Figure 5. กรณีของ pentroof ที่ตำแหน่ง  $10^\circ$  bTDC หากพิจารณาเฉพาะผลในสองมิติ(ระนาบที่ตัดกลาง) จะเห็นว่าเวกเตอร์จาก squish ไปชนกับ เวกเตอร์จากเปลวไฟแล้วหยุดนิ่ง ซึ่งจริงๆแล้วเมื่อพิจารณาในสามมิติจะพบว่า เมื่อแก๊สไหลปะทะกันแล้วจะเกิดการเหนี่ยวนำให้ไหลไปในทิศตั้งฉากที่ไม่มีการต้านการไหล ดังนั้นในงานประยุกต์การคำนวณเชิงตัวเลขในเชิงวิศวกรรม

นอกจากจะต้องมองปัญหาเป็นสามมิติแล้ว การแสดงผลยังต้องเป็นสามมิติอีกด้วย

การเผาไหม้ที่รวดเร็วเป็นคุณลักษณะที่สำคัญของเครื่องยนต์แบบจุดระเบิดด้วยประกายไฟ ซึ่งสามารถวิเคราะห์ตามวัฏจักร Otto ได้ ซึ่งในอุดมคติแล้วต้องการการเผาไหม้ที่รวดเร็วเพื่อประสิทธิภาพเชิงความร้อนที่เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามในความเป็นจริงการเผาไหม้จะกินเวลาในระยะหนึ่ง เชื้อเพลิงมีเทนเป็นไฮโดรคาร์บอนที่มีพันธะที่แข็งแรงเนื่องจากแขนของ คาร์บอนอะตอม ไปจับกับ ไฮโดรเจน 4 อะตอมพอดี ทำให้มีโมเลกุลเป็นรูป tetrahedral[6] การสลายพันธะเพื่อทำปฏิกิริยาในการเผาไหม้จึงต้องใช้พลังงานสูง เป็นเหตุให้มีเทนมีความเร็วของเปลวไฟแบบราบเรียบที่ค่อนข้างต่ำกว่าเชื้อเพลิงอื่นๆ เมื่อนำมาใช้กับเครื่องยนต์จึงต้องปรับให้มีการจุดระเบิดล่วงหน้ามากขึ้น ประเทศไทยได้เริ่มมีการหันมาใช้แก๊สธรรมชาติกับรถยนต์มากขึ้น โดยอยู่ในรูปของ Compressed Natural Gas(CNG) องค์ประกอบหลักของ CNG คือแก๊สมีเทนประมาณ 80% ที่เหลือเป็นแก๊สเฉื่อย ซึ่งจะทำให้ความเร็วเปลวไฟลดลงมากกว่าเดิมเมื่อเทียบกับ มีเทน 100% ดังนั้นในการออกแบบ พัฒนา และปรับปรุงเครื่องยนต์ที่ใช้แก๊สมีเทนเป็นองค์ประกอบ จึงควรพิจารณาการปรับปรุงห้องเผาไหม้ให้มี Squish region ให้มากขึ้นด้วย เพื่อช่วยในการเผาไหม้ในช่วงหลังศูนย์ตายบนไปแล้ว

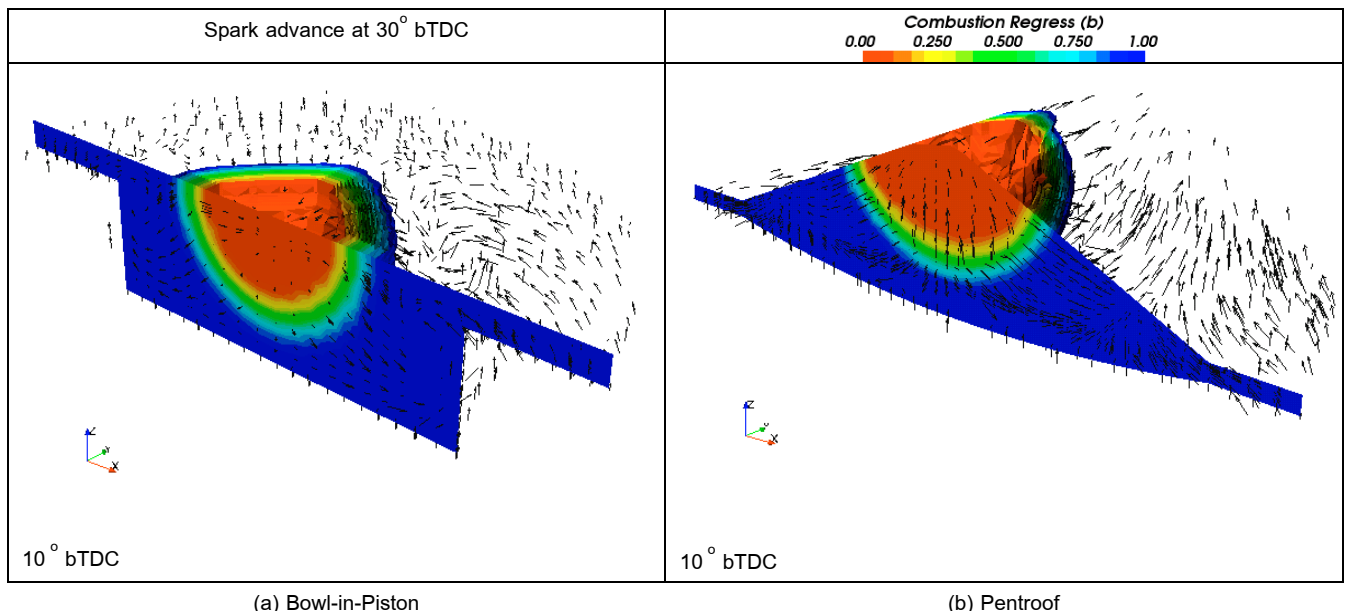


Figure 5. Flame and flow visualization at the early stage of combustion

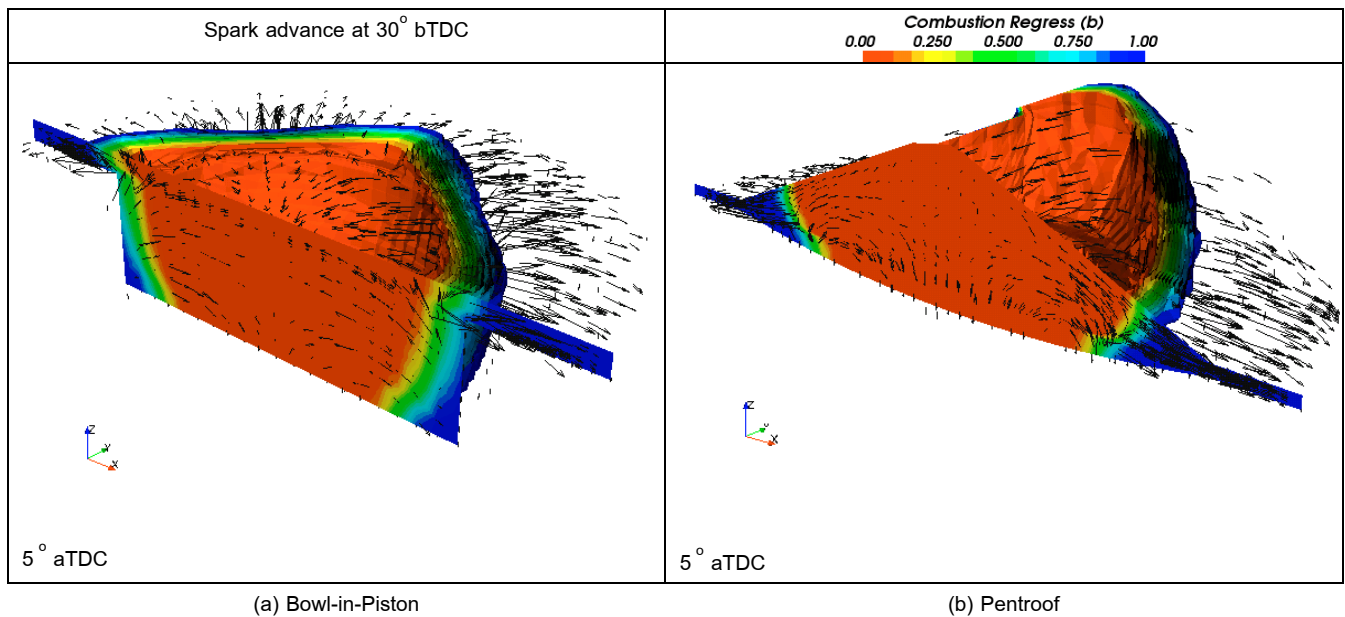


Figure 6. Flame and flow visualization at the lately stage of combustion

## 6. สรุป

จากการศึกษาคุณลักษณะการเผาไหม้ในห้องเผาไหม้สองรูปทรงสองลักษณะของเครื่องยนต์แบบจุดระเบิดด้วยประกายไฟ ด้วยซอฟต์แวร์แบบเปิดชื่อว่า OpenFOAM ซึ่งใช้วิธีเชิงตัวเลขในการหาผลเฉลยของ สมการอนุพันธ์ มวล โมเมนตัม พลังงาน ควบคู่ไปกับแบบจำลองความปั่นป่วน RNG k-epsilon และแบบจำลองการเผาไหม้ b -  $\Xi$  สรุปได้ดังนี้

- ผลลัพธ์เมื่อเปรียบเทียบระหว่างการคำนวณกับการทดลอง มีค่าที่ใกล้เคียงกันมาก แสดงให้เห็นถึงวิธีการคำนวณเชิงตัวเลขให้ความแม่นยำเพียงพอในการทำนายกระบวนการเผาไหม้ในเครื่องยนต์ SI
- ห้องเผาไหม้แบบรูปทรง Bowl-in-piston ให้ความดันในกระบอกสูบที่สูงกว่า เนื่องจากเผาไหม้ได้เร็วกว่า ซึ่งเป็นผลมาจากรูปร่างของห้องเผาไหม้แบบ Bowl-in-piston มีพื้นที่ของ Squish Region ที่มากกว่า Pentroof
- ผลของ Squish ทำให้เปลวไฟมีรูปทรงที่แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับทิศทางของ Squish โดย Bowl-in-piston จะให้รูปร่างเปลวไฟในลักษณะทรงกลม และ Pentroof จะให้รูปร่างเปลวไฟในลักษณะทรงรี
- Reverse-Squish อย่างมากต่อการช่วยในการกระจายเปลวไฟในช่วงปลายของการเผาไหม้

บทความนี้แสดงให้เห็นถึงผลของการไหลแบบปั่นป่วนที่ช่วยในการเหนี่ยวนำการกระจายเปลวไฟ ซึ่งการไหลปั่นป่วนที่เกิดขึ้นมาจากรูปทรงของห้องเผาไหม้ ดังนั้นรูปร่างของห้องเผาไหม้จะมีผลอย่างมากต่อประสิทธิภาพเครื่องยนต์

## เอกสารอ้างอิง

- [1] ชโลธร ธรรมแท้ และ จินดา เจริญพรพาณิชย์ "การหาคุณลักษณะการเผาไหม้ของเครื่องยนต์แก๊สธรรมชาติ ส่วนผสมเนื้อเดียวแบบจุดระเบิดด้วยประกายไฟ ด้วยวิธีเชิงตัวเลข" การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 18, จ.ขอนแก่น
- [2] B. F. Magnussen, "On the Structure of Turbulence and a Generalized Eddy Dissipation Concept for Chemical Reaction in Turbulent Flow", *Nineteenth AIAA Meeting*, St. Louis, 1981.
- [3] R. Borghi, and D. Dutouy, "On the Scale of the fluctuations in Turbulent Combustion", *In 17<sup>th</sup> Symposium (International) on Combustion*, The combustion Institute, pp 235-244, 1978,
- [4] N. Peters, "Laminar Flamelet Concepts in Turbulent Combustion", *In 21<sup>st</sup> Symposium (International) on Combustion*, The combustion Institute 1231-1250, 1986.
- [5] D. B. Spalding, "Mixing and Chemical Reaction in Steady Confined Turbulent Flames", *13<sup>th</sup> Symposium (International) on Combustion*, The Combustion Institute, pp 649-657, 1970.
- [6] S. R. Turn., "An Introduction to Combustion Concepts and Application", McGraw-Hill: 1996
- [7] G. M. Abu-Orf, and R. S. Cant, " A Turbulent Rate Model for Premixed Turbulent Combustion in Spark-Ignition Engines",

*Combustion and Flame*, No. 122, The Combustion Institute, pp 233-252, 2000.

- [8] X. Zhao, et. al., "Three-Dimensional Numerical Simulation of Flame Propagation in Spark Ignition Engines", *SAE Papers#932713*, 1993.
- [9] H. G. Weller, "The Development of a New Flame Area Combustion Model Using Conditional Averaging", *Thermo-Fluids Section Report TF/9307*, Imperial College, 1993.
- [10] H. G. Weller, et al., "Prediction of Combustion in Homogeneous-Charge Spark-Ignition Engines", *International Symposium COMODIA 94*, 1994.
- [11] B. Heel, et. al., "Validation of SI Combustion Model over Range of Speed, Load, Equivalence Ratio and Spark Timing", *The 4<sup>th</sup> International Symposium COMODIA 98*, 1998.
- [12] H. G. Weller, et al., "Application of a Flame-Wrinkling LES Combustion Model to a Turbulent Mixing Layer", the 27<sup>th</sup> Symposium(International) on Combustion, p899-907, Combustion Institute: 1998.
- [13] "OpenFOAM User Guide", <http://www.openfoam.org>
- [14] H. G. Weller, et. al., "A tensorial approach to computational continuum mechanics using object orientated techniques" *Computers in Physics*, Vol.12, No.6, pp620-631, 1998.
- [15] P. O. Witze, et al., "Measurements and Predictions of the Precombustion Fluid Motion and Combustion Rates in Spark Ignition Engine", *SAE Paper#831679*, 1993
- [16] M. W. Chase, "NIST-JANAF Thermochemical Table", Amer. Inst of Physics, 2000.
- [17] W. W. Pulkrabek, "Engineering Fundamental of The Internal Combustion Engine", Prentice Hall, 1997.