

## การศึกษาเชิงตัวเลขของการเผาไหม้มีเทนด้วย RNG $k-\epsilon$ Turbulence Eddy Dissipation Concept

### Numerical Simulation of Methane Combustion Using RNG $k-\epsilon$ Turbulence Eddy Dissipation Concept

มงคล แก้วบำรุง<sup>1\*</sup>

Mongkol Kaewbumrung<sup>1\*</sup>

Received: 11 July 2019; Revised: 13 August 2019; Accepted: 10 September 2019

#### บทคัดย่อ

การเผาไหม้เป็นกระบวนการที่สำคัญเป็นอย่างมากสำหรับการเปลี่ยนพลังงานจากเชื้อเพลิงชนิดต่างๆ เป็นพลังงานความร้อน ซึ่งการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นล้วนเกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาทางเคมีที่ซับซ้อน การไหลในห้องเผาไหม้เป็นแบบปั่นป่วนและต้องใช้ต้นทุนสูงสำหรับเครื่องมือในการทดลอง เพื่อเพิ่มความเข้าใจในขั้นตอนการเผาไหม้ของมีเทน ( $\text{CH}_4$ ) ที่เกิดขึ้น ปฏิสัมพันธ์ความปั่นป่วนของการเผาไหม้แบบ RNG  $k-\epsilon$  Turbulence Eddy Dissipation Concept สำหรับกลไกการเผาไหม้แบบละเอียดของมีเทนซึ่งมีองค์ประกอบทางเคมี 53 ชนิด 325 ปฏิกิริยา จะนำมาศึกษาในครั้งนี้ โดยผลของอุณหภูมิที่ได้จากกรณีศึกษาแบบสองมิติจะเปรียบเทียบกับผลการทดลอง สำหรับตัวแปรที่สนใจต่อการเปลี่ยนแปลง พลังงานความร้อน การปลดปล่อยไฮดรอกซิล (OH), คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และ คาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) ได้แก่ ความเร็วการไหลเข้า มุมการฉีด อุณหภูมิ ของมีเทนและอากาศ จากการศึกษาพบว่า ความเร็วการไหลเข้าและมุมการฉีดของก๊าซมีเทนมีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปทรงของเปลวไฟที่เกิดขึ้น และอุณหภูมิทำให้อัตราการเกิด OH, CO และ  $\text{CO}_2$  อย่างมีนัยสำคัญ ด้วยข้อมูลดังกล่าวสามารถสรุปได้ว่าค่าคุณสมบัติที่ทางเข้ามีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีของการเผาไหม้และปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นหลังการเผาไหม้ เพื่อความเข้าใจในเชิงวิชาการถึงกระบวนการปฏิสัมพันธ์ของคุณสมบัติความปั่นป่วนต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ แบบจำลองความปั่นป่วนแบบ Large Eddy Simulation – Dynamics Structure เป็นแบบจำลองที่เหมาะสมสำหรับการศึกษาในอนาคต

**คำสำคัญ:** กลไกการเผาไหม้แบบละเอียด ปฏิสัมพันธ์ความปั่นป่วนของการเผาไหม้ Large Eddy Simulation

#### Abstract

Combustion is a very important process for changing energy from various fuels. High heat from combustion is employed for various engineering applications. However, analysis of combustion processes is very complex, since physical mechanisms are related to many chemical reaction equations and various scales of turbulent motions. In order to save costs for experimental set up and understanding in more detail, a numerical study of combustion was performed in the study. The combustion of methane ( $\text{CH}_4$ ) using turbulence interaction of RNG  $k-\epsilon$  combustion with detailed kinetic mechanism, 53 species and 325 reactions was chosen in this work. The results of the temperature predictions from a two-dimensional case are compared with the available experimental data from Sandia National Laboratories. The inlet velocity, angle of injection and temperature of methane and air are the main parameters to predict heat

<sup>1</sup> อาจารย์, สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ตำบลหันตรา อำเภอพระนครศรีอยุธยา จังหวัดพระนครศรีอยุธยา 13000 ติดต่อ: E-mail, mongkol.kaewbumrung@gmail.com, เบอร์โทรศัพท์ 02-979-6999

<sup>1</sup> Lecture, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering and Architecture, Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi. 60 Moo 3 Asian Highway, Phranakhon Si Ayutthaya 13000

\* Corresponding author: Mongkol Kaewbumrung,

release and reaction rate of hydroxyl (OH), carbon monoxide (CO) and carbon dioxide (CO<sub>2</sub>). It was found that the flow velocity and the injection angle of methane influenced changes in the shape of the flame while the temperature increased the reaction rate of CO, CO<sub>2</sub> and OH significantly. It can be concluded that the physical properties at the inlet have an effect to the rate of chemical reactions of combustion and the amount of product gas generated after combustion. For academic understanding of the combustion process on the rate of reaction, however, large eddy simulation with dynamics structure is a suitable choice for future studies.

**Keywords:** Detail Chemistry Mechanism, Large Eddy Simulation, Turbulence Eddy Dissipation Concept.

## บทนำ

การเผาไหม้เป็นปัญหาทางวิศวกรรมที่ได้รับความสนใจเป็นอย่างมากในปัจจุบันโดยมีจุดประสงค์หลักเพื่อลดอัตราการปล่อยแก๊สพิษออกสู่บรรยากาศ ละอองขนาดเล็กที่มีผลต่อสุขภาพ (PM 2.5) และการเพิ่มประสิทธิภาพการเผาไหม้เป็นต้น ในหลายปีที่ผ่านมา นักวิทยาศาสตร์และวิศวกรได้ออกแบบและศึกษาปฏิกิริยาเคมีของการเผาไหม้ที่ซับซ้อนมากขึ้น ประกอบกับความเจริญก้าวหน้าทางเทคโนโลยีการคำนวณที่สามารถประมวลผลได้อย่างรวดเร็ว ทำให้เกิดองค์ความรู้ใหม่เกี่ยวกับกลไกการเผาไหม้แบบละเอียด (Detail Kinetic Mechanism) อย่างมากมาย เช่น Waszkiewicz<sup>1</sup> ศึกษากลไกการเผาไหม้แบบละเอียดสำหรับ 48 องค์ประกอบทางเคมี 213 ปฏิกิริยา สามารถใช้ทำนายประสิทธิภาพการเผาไหม้ระหว่าง มีเทน (CH<sub>4</sub>) และ ออกซิเจน (O<sub>2</sub>) ต่ออัตราการเกิดน้ำ (H<sub>2</sub>O) และ คาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) ได้อย่างถูกต้อง เช่นเดียวกับ Kim<sup>2</sup> ใช้การวิเคราะห์เชิงตัวเลขเพื่อศึกษาการเผาไหม้ของมีเทนห้าแบบคือ 3-STEP, WD4, SKELETAL, DRM-19 และ GRI-2.11 โดยพิจารณาการไหลเป็นแบบสองมิติ ใช้สมการความปั่นป่วนแบบปรับปรุงของ Standard  $k - \epsilon$  มีปฏิสัมพันธ์กับการเผาไหม้แบบ Eddy Dissipation Concept. (EDC) พบว่า DRM-19 (21 องค์ประกอบทางเคมี, 84 ปฏิกิริยา) และ GRI-2.11 (49 องค์ประกอบทางเคมี, 279 ปฏิกิริยา) ซึ่งเป็นกลไกการเผาไหม้แบบละเอียดที่ให้ผลการคำนวณคุณสมบัติของการเผาไหม้และก๊าซที่เกิดขึ้นสอดคล้องกับการทดลองการเผาไหม้ของมีเทน และ Zohra<sup>3</sup> พบว่าการเผาไหม้ของมีเทนจะให้ผลการศึกษาที่ถูกต้องเมื่อใช้แบบจำลองความปั่นป่วนแบบ Standard  $k - \epsilon$  มีปฏิสัมพันธ์กับการเผาไหม้แบบ Eddy Dissipation Concept. (EDC) มากกว่า Finite Rate Combustion ในทำนองเดียวกัน Aboje<sup>4</sup> เปรียบเทียบแบบจำลองความปั่นป่วนสำหรับการก่อมลพิษจากการเผาไหม้ของมีเทนและอากาศด้วยอัตราการเกิดคาร์บอนไดออกไซด์ และ ออกไซด์ของไนโตรเจน (NO<sub>x</sub>) พบว่าการจำลองความปั่นป่วนแบบ Renormalized group (RNG)

$k - \epsilon$  และ SST  $k - \omega$  ให้ผลอุณหภูมิและความเข้มข้นขององค์ประกอบทางเคมีสอดคล้องกับการทดลองเช่นเดียวกับกับผลของ Farokhi<sup>5</sup> และ การศึกษาของ Emami<sup>11</sup> ศึกษาการเผาไหม้ของมีเทนถึงการปล่อยออกไซด์ของไนโตรเจน ด้วยการจำลองความปั่นป่วนแบบ RNG  $k - \epsilon$  ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป ANSYS FLUENT ในห้องเผาไหม้สำหรับอุตสาหกรรมแสดงให้เห็นว่าเมื่ออุณหภูมิของอากาศที่เข้ามาผสมสูงขึ้นส่งผลให้ความเข้มข้นของออกไซด์ของไนโตรเจนมีปริมาณสูงขึ้นและรูปแบบการไหลในห้องเผาไหม้จะสัมพันธ์กับการเพิ่มของอุณหภูมิส่งผลให้เกิดการเผาไหม้แบบสมบูรณ์ได้เป็นอย่างดี

นอกจากนี้สำหรับการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงแบบสองชนิดในกระบอกสูบสำหรับมีเทนมีจุดประสงค์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องยนต์โดยการฉีดเชื้อเพลิงผสมระหว่าง ดีเซล - มีเทน และทำนายการเผาไหม้และการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในกระบอกสูบด้วยความปั่นป่วนแบบ Renormalization group (RNG)  $k - \epsilon$  ของ Aniello<sup>9</sup> พบว่าผลของความดัน อุณหภูมิ และอัตราการปล่อยพลังงานความร้อน ให้ผลสอดคล้องกับการทดลองได้เป็นอย่างดี, Chen<sup>6</sup> ศึกษาความสัมพันธ์ของความร้อนในห้องเผาไหม้มีเทนขนาดเล็กด้วยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณแบบสองมิติ พบว่า ความร้อนที่ผนังห้องเผาไหม้ อัตราการไหลและส่วนผสมของมีเทน มีผลต่อความสัมพันธ์ของอุณหภูมิในห้องเผาไหม้อย่างมีนัยสำคัญ, Shi<sup>7</sup> ทดลองและเปรียบเทียบผลที่ได้จากการศึกษาเชิงตัวเลขถึงผลกระทบของออกซิเจนต่อความถี่เสียงรบกวนของเปลวไฟที่เกิดจากการเผาไหม้ของมีเทนพบว่าอัตราส่วนของออกซิเจนที่มีค่าไม่เกิน 0.30 จะให้ความถี่เสียงรบกวนของเปลวไฟที่ดีที่สุด และเมื่ออัตราส่วนดังกล่าวอยู่ในช่วงระหว่าง 0.40 - 0.45 การเผาไหม้จะไม่มีเสียงรบกวนเนื่องจากความไม่สมดุลกันของปฏิกิริยาเคมี และ Mithun<sup>10</sup> พบว่าเสียงรบกวนของเปลวไฟจากการเผาไหม้ของมีเทนจะสูญเสียความเป็นสมมาตรมากขึ้นเมื่อค่าเลขเรย์โนลด์มากกว่า 153 ซึ่งการทดลองและผลที่ได้จากการคำนวณเชิงตัวเลขให้ผลที่สอดคล้องกันเป็นอย่างดี และเช่นเดียวกับ Plengsa-Ard<sup>8</sup> ศึกษาการเผาไหม้ในกระบอกสูบและการกระจายตัวของความ

ร้อนที่ผนังกระบอกสูบด้วยแบบจำลองความปั่นป่วน RNG  $k-\epsilon$  โดยค่าของ ความดัน และ อัตราการปล่อยพลังงาน ความร้อน ให้ผลที่สอดคล้องกับการทดลอง ซึ่งแสดงให้เห็นว่า RNG  $k-\epsilon$  เหมาะสมกับการศึกษาการเผาไหม้

สำหรับงานวิจัยนี้มุ่งเน้นเพื่อทำนายการไหลในห้องเผาไหม้ของมีเทน ( $CH_4$ ) มีปฏิสัมพันธ์ความปั่นป่วนของการเผาไหม้แบบ RNG  $k-\epsilon$  Turbulence Eddy Dissipation Concept มีกลไกการเผาไหม้แบบละเอียดมีองค์ประกอบทางเคมี 53 ชนิด 325 ปฏิกิริยา โดยผลของอุณหภูมิที่ได้จากกรณีศึกษาแบบสองมิติจะเปรียบเทียบกับผลการทดลอง สำหรับตัวแปรที่สนใจต่อการเปลี่ยนแปลง พลังงานความร้อน การปลดปล่อยไฮดรอกซิล (OH), คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และ คาร์บอนไดออกไซด์ ( $CO_2$ ) ได้แก่ ความเร็วการไหลเข้า มุมการฉีด อุณหภูมิ ของมีเทนและอากาศ

**แบบจำลองทางคณิตศาสตร์**

ในการศึกษาครั้งนี้จะพิจารณาการไหลแบบสองมิติในระบบพิกัด  $x-y$  ภายใต้กรอบอ้างอิงการเคลื่อนที่แบบ Eulerian Reference Frame โดยในเชื้อเพลิงที่ใช้คือก๊าซมีเทน ซึ่งประกอบด้วยองค์ประกอบทางเคมี 53 ชนิด 325 ปฏิกิริยา<sup>12,13,14</sup> โดยกรณีศึกษาเพื่อเปรียบเทียบผลที่ได้จากการคำนวณกับผลการทดลอง และระบบสมการที่ใช้ในการคำนวณประกอบด้วยแบบจำลองความปั่นป่วนแบบ RNG  $k-\epsilon$ , กฎการอนุรักษ์องค์ประกอบทางเคมี (Species Transport Equations) และแบบจำลองปฏิสัมพันธ์ความปั่นป่วนของการเผาไหม้ (Turbulence-Chemistry Interaction) ตามลำดับ กริดที่ใช้ศึกษาห้องเผาไหม้ขนาดความกว้าง 0.44 เมตร สูง 3 เมตร ดัง Figure 1 เป็นแบบ Quadrilateral Element หลังจากทำ Grid Independent Test แล้ว พบว่ากริดจำนวน 532,167 กริด ไม่มีผลกับคำตอบที่ได้ ซึ่งที่บริเวณผนังห้องเผาไหม้มีการปรับกริดให้มีความละเอียดเพื่อเพิ่มความถูกต้องของการคำนวณแรงเฉือนที่ผิวผนังห้องดัง Figure 2

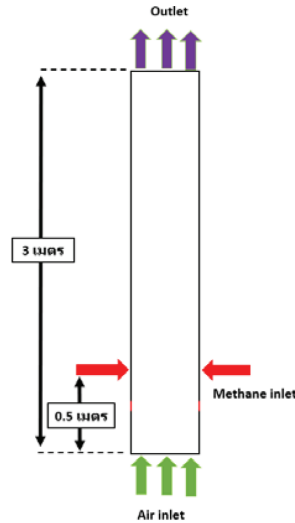


Figure 1 Computational geometry

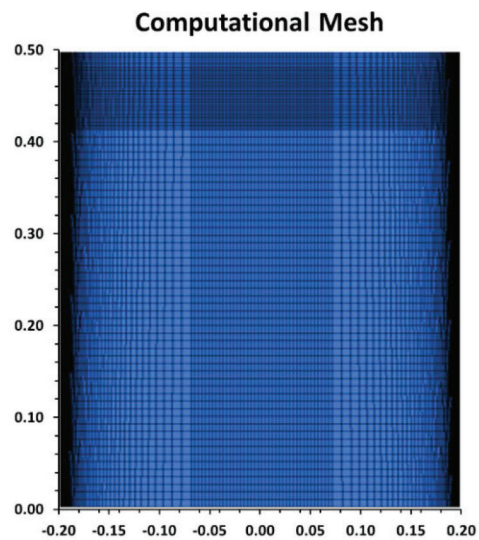


Figure 2 Computational grid

**1. แบบจำลองความปั่นป่วน RNG  $k-\epsilon$**

จากการศึกษาที่ผ่านมา<sup>5,8,11</sup> แสดงให้เห็นว่าสมการจำลองความปั่นป่วนแบบ RNG  $k-\epsilon$  ให้ผลที่ถูกต้องและสอดคล้องกับการทดลองเป็นอย่างดี โดยแบบจำลองความปั่นป่วนดังกล่าวนี้เกิดจากการจัดรูปแบบสมการใหม่ของ STD  $k-\epsilon$  ด้วยการประยุกต์คุณสมบัติทางสถิติของการไหลเรียกว่า Renormalization Group Theory<sup>16</sup> ทำให้สามารถเพิ่มความถูกต้องของการไหลแบบหมุนและเกิดการเปลี่ยนแปลงความเครียดของการไหลอย่างรวดเร็ว (Rapidly Strained Flows)<sup>16</sup> โดยระบบสมการดังกล่าวสามารถเขียนได้ดัง สมการที่ (1) และ (2)

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) - \overline{\rho u'_i u'_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \rho \epsilon \tag{1}$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \alpha_\epsilon \mu_{eff} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right) + 1.42 \left( \overline{\rho u'_i u'_j} \frac{\epsilon}{k} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \rho \left( 1.68 + \frac{0.0845 \eta^3 (1 - \eta / \eta_0)}{1 + \beta \eta^3} \right) \frac{\epsilon^2}{k} \tag{2}$$

เมื่อ

$$\eta \equiv Sk / \epsilon, \quad \eta_0 = 4.38, \quad \beta = 0.012$$

### 2. กฎการอนุรักษ์องค์ประกอบทางเคมี (Species Transport Equations)

เนื่องจากความซับซ้อนของการไหลและกลไกการเผาไหม้แบบละเอียดของมีเทนการหาคำตอบของแต่ละปฏิกิริยาสามารถเขียนอยู่ในรูปพจน์ของการพาได้ตั้งสมการที่ 3

$$\nabla \cdot (\rho \bar{v} Y_i) = -\nabla \cdot \bar{J}_i + R_i \tag{3}$$

เมื่อ

$R_i$  คือ Net rate of production species  $i$

$\bar{J}_i$  คือ Diffusion flux of species  $i$

ในงานวิจัยนี้พิจารณาการเผาไหม้แบบปั่นป่วนตั้งนั้น พจน์การแพร่ของมวลที่เกิดขึ้นแต่ละองค์ประกอบ (Species) สามารถเขียนระบบสมการที่เกี่ยวข้องกันได้ตั้งสมการที่ 4 และสมการที่ 5 ตามลำดับ

$$\bar{J}_i = -(\rho D_{i,m} + 1.428 \mu_i) \nabla Y_i - D_{T,i} \frac{\nabla T}{T} \tag{4}$$

$$\bar{H}_i = \nabla \cdot \left( \sum_{i=1}^n h_i \bar{J}_i \right) \tag{5}$$

### 3. แบบจำลองปฏิสัมพันธ์ความปั่นป่วนของการเผาไหม้ (Turbulence-Chemistry Interaction)

สำหรับแบบจำลองปฏิสัมพันธ์ความปั่นป่วนของการเผาไหม้แบบ Eddy Dissipation-Concept เป็นแบบจำลองที่เป็นส่วนขยายของ Eddy-Dissipation Model<sup>16</sup> โดยสมมติให้การเผาไหม้เกิดขึ้นในโครงสร้างการไหลขนาดเล็ก (Small Turbulent Structure) ดังนั้น Length Fraction of the Small

Scales  $\xi^*$  จะถูกเพิ่มในการคำนวณ Detail Chemical Mechanism สำหรับความปั่นป่วนในการเผาไหม้ โดยสามารถเขียนได้เป็น

$$R_i = \frac{\rho (\xi^*)^2}{0.4082 [1 - (\xi^*)^3]} \sqrt{\frac{\epsilon}{\nu}} (Y_i^* - Y_i) \tag{6}$$

$$\xi^* = 2.1377 \left( \frac{\nu \epsilon}{k^2} \right)^{1/4} \tag{7}$$

เมื่อ

$Y_i^*$  คือ the fine-scale species mass fraction

### ระเบียบวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

เนื่องจากการคำนวณการเผาไหม้สำหรับองค์ประกอบทางเคมี 53 ชนิด 325 ปฏิกิริยา แบบปั่นป่วนมีความไม่เชิงเส้นตั้งนั้น เพื่อเพิ่มความถูกต้องของการศึกษา ผู้วิจัยจะใช้ผลของกริดศึกษามาตรฐานของการเผาไหม้มีเทนที่ได้จากการจำลองด้วยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณเปรียบเทียบกับการทดลองของ Barlow<sup>12</sup> ดัง Figure 3 พบว่าเงื่อนไขขอบเขตและการตั้งค่าเชิงตัวเลขให้ผลสอดคล้องกับการทดลองเป็นอย่างดี โดยการตั้งค่าการคำนวณเป็นไปดัง Table 1

Table 1 Numerical setting

| P-V Coupling | Couple                       |
|--------------|------------------------------|
| Gradient     | Least Squares Cell Based     |
| Pressure     | PRESTO!                      |
| Momentum     | 2 <sup>nd</sup> Order Upwind |
| Energy       | 2 <sup>nd</sup> Order Upwind |
| Species      | 2 <sup>nd</sup> Order Upwind |
| TKE          | 2 <sup>nd</sup> Order Upwind |
| TDR          | 2 <sup>nd</sup> Order Upwind |

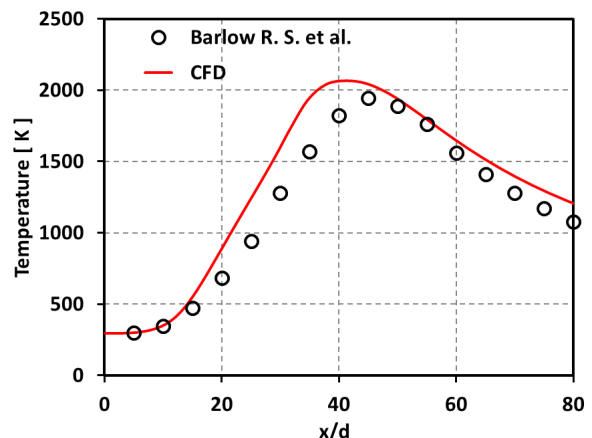


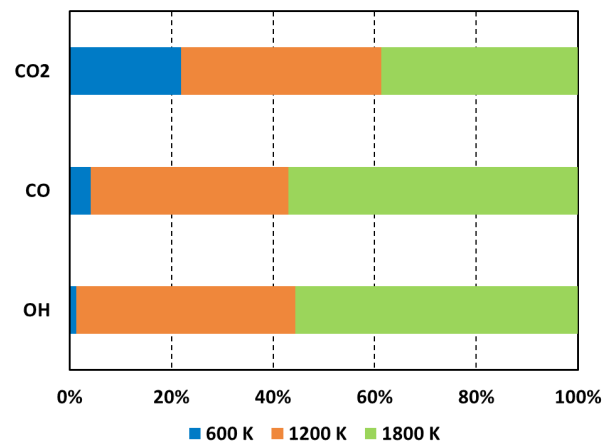
Figure 3 Results of the validation study<sup>12</sup>

**ผลการจำลอง**

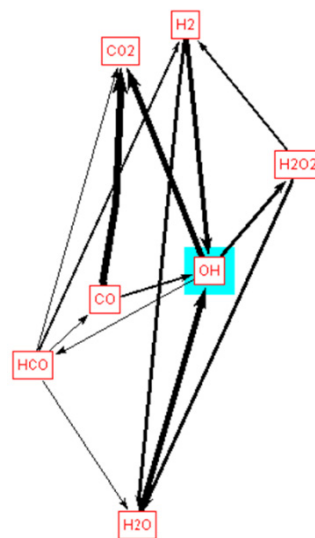
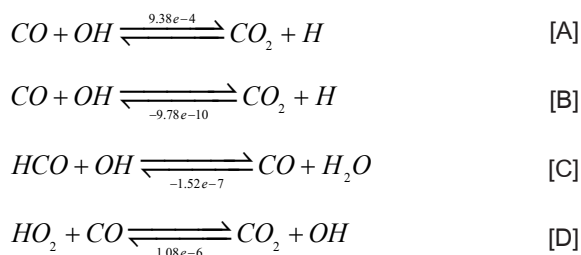
สำหรับงานวิจัยนี้ศึกษาการเผาไหม้มีเทนด้วย RNG  $k - \epsilon$  Turbulence Eddy Dissipation Concept ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป ANSYS FLUENT R2019R1 ซึ่งใช้ระเบียบวิธีปริมาตรจำกัด (Finite Volume Method, FVM) เพื่อทำนายพฤติกรรมของการเปลี่ยนแปลงของพลังงานความร้อน การปลดปล่อยคาร์บอนมอนนอกไซด์ (CO), คาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) และ ไฮดรอกซิล (OH) เนื่องจาก ความเร็วการไหลเข้าของอากาศ อุณหภูมิ และมุมการฉีดมีเทนผลการศึกษาพบว่า

**1. ผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิทางเข้าของอากาศก่อนการเผาไหม้**

เพื่อศึกษาผลกระทบของความร้อนต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ อุณหภูมิทางเข้าของอากาศก่อนการเผาไหม้ ประกอบด้วย 600 เคลวิน, 1,200 เคลวิน และ 1,800 เคลวิน โดยมีความเร็วของอากาศ 20 เมตรต่อวินาที ผลจากการศึกษาแสดงดัง Figure 4 และ Figure 5 พบว่าที่อุณหภูมิ 600 เคลวิน มีอัตราการเกิด OH ในปริมาณที่น้อยและมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากอุณหภูมิมิผลต่อเส้นทางการเกิดปฏิกิริยาเคมีของการเผาไหม้ (Reaction Path of Combustion) ดังในสมการ [A] – [D] จากการใช้โปรแกรม CHEMKIN 2019R1 ศึกษาเพิ่มเติมถึงเส้นทางการเกิดปฏิกิริยาพบว่าผลที่ได้สอดคล้องกับการศึกษาของ Egolfopolous<sup>14</sup>



**Figure 4** The rate of occurrence of OH, CO and CO<sub>2</sub> at the difference inlet temperature



**Figure 5** The reaction path of OH, CO and CO<sub>2</sub> at the difference inlet temperature

**2. ผลของการเปลี่ยนความเร็วของอากาศ**

สำหรับความเร็วอากาศที่ศึกษาในครั้งนี้ประกอบด้วย 5 เมตรต่อวินาที, 10 เมตรต่อวินาที และ 20 เมตรต่อวินาที โดยมีอุณหภูมิ 1,800 เคลวิน ผลแสดงดัง Figure 6 พบว่าเมื่อที่ความเร็วต่ำอัตราการเกิด OH ซึ่งเป็นสารที่บ่งบอกถึงเกิดการเผาไหม้มีปริมาณที่น้อยเมื่อเทียบกับสารอื่นๆ แต่เมื่อความเร็วของอากาศเพิ่มขึ้น OH มีอัตราการเกิดเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด แสดงให้เห็นว่าความเร็วของอากาศมีผลกับอัตราการเผาไหม้ของมีเทนอย่างชัดเจน และนอกจากนี้ผลจากการทำนายเส้นทางการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้จาก Figure 7 พบว่า OH เกิดจากปฏิกิริยา [E] แต่ในขณะเดียวกัน OH ก็เป็นสารตั้งต้นให้กับปฏิกิริยา [F] ในอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่ใกล้เคียงกัน ทำให้ OH เกิดขึ้นน้อย นอกจากนี้ความเร็วของอากาศมีผลกับการผสมระหว่างอากาศและมีเทนก่อนการเผาไหม้ หากสารผสมดังกล่าวไม่เหมาะสมหรือไม่สม่ำเสมอจะส่งผลให้เกิดการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์<sup>13</sup>

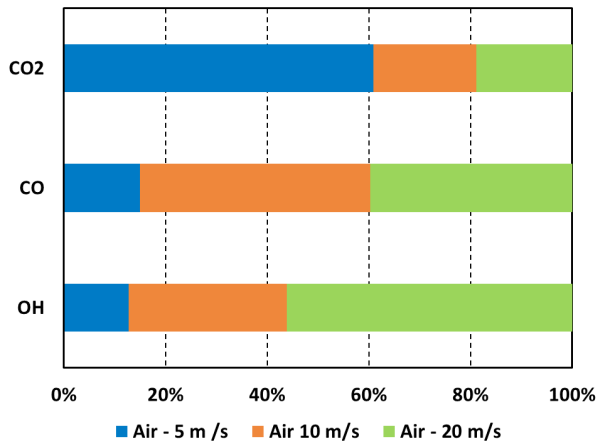


Figure 6 The rate of occurrence of OH, CO and CO<sub>2</sub> at the difference inlet velocity

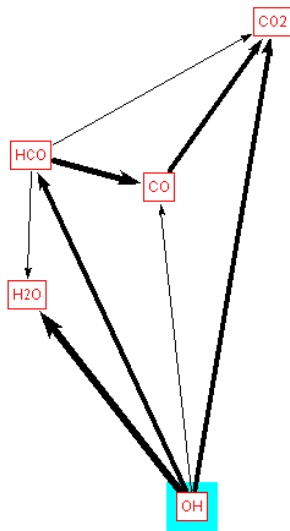
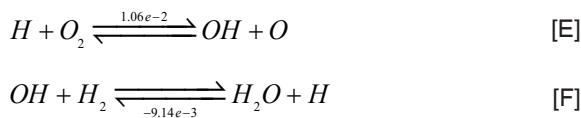


Figure 7 The reaction path of OH, CO and CO<sub>2</sub> at the difference inlet velocity

3. ผลของการเปลี่ยนมุมการไหลเข้าของมีเทน การเผาไหม้ของมีเทนนอกจากความเร็วของอากาศทางเข้า และ อุณหภูมิ จะมีผลกับการเผาไหม้ที่เกิดขึ้น การผสมกันระหว่างมีเทนกับอากาศเป็นตัวแปรที่สำคัญเช่นกันของประสิทธิภาพการเผาไหม้และสสารที่เกิดขึ้น ซึ่ง Figure 8 แสดงผลกระทบของการเปลี่ยนมุมการฉีดมีเทนที่แตกต่างกัน ประกอบด้วย 0°, 30° และ 45° ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าเมื่อมุมการไหลของมีเทนเท่ากับ 45° มีอัตราการเกิด OH มากที่สุดเมื่อเทียบกับมุมอื่นๆ ซึ่งจากการศึกษาของ Barlow<sup>12</sup> พบว่า

OH คือสสารที่บ่งบอกได้ถึงจุดเริ่มต้นการเผาไหม้และเป็นสสารที่แสดงถึงประสิทธิภาพในการเผาไหม้ ดังนั้นจากการศึกษามุมการฉีดมีเทนแสดงให้เห็นว่าที่มุมการฉีด 45° เป็นมุมที่ดีที่สุดสำหรับการศึกษาในครั้งนี้ สำหรับผลกระทบของเปลวไฟที่เกิดขึ้น มุมการฉีด 0° และ 45° ให้ลักษณะของเปลวไฟที่เกิดขึ้นใกล้เคียงกัน แต่มุม 30° มีความยาวของเปลวไฟที่สั้นที่สุด อย่างไรก็ตาม ลักษณะของเปลวไฟที่เกิดขึ้นยังคงต้องการจำลองความปั่นป่วนที่ขึ้นกับเวลาเพื่อพิจารณารูปทรงของเปลวไฟเมื่อเวลาเปลี่ยนแปลงไป เช่น Large Eddy Simulation with Dynamics Structure เป็นต้น

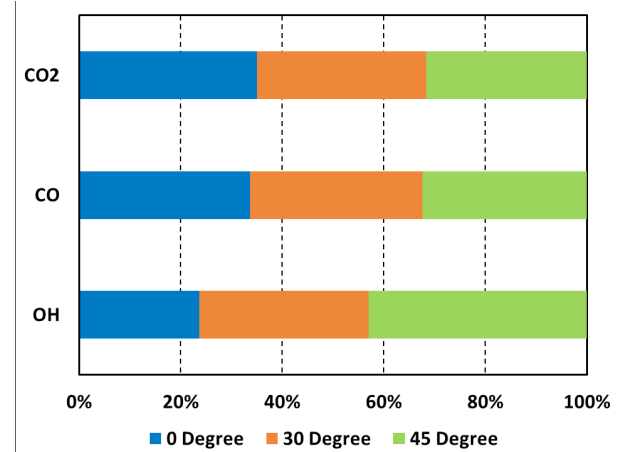


Figure 8 The rate of occurrence of OH, CO and CO<sub>2</sub> at the difference methane inject angle

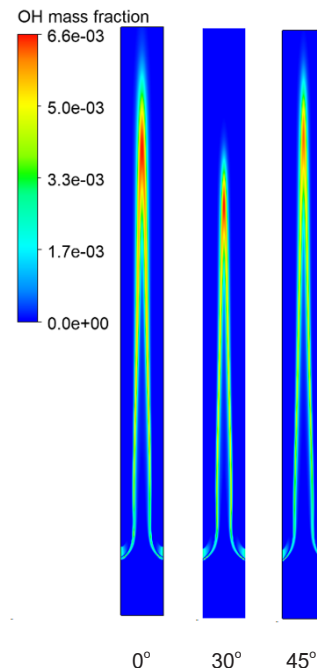


Figure 9 The contour of OH, CO and CO<sub>2</sub> at the difference methane inject angle

## สรุปและข้อเสนอแนะ

ในการศึกษานี้มุ่งเน้นทำนายการไหลในห้องเผาไหม้ของมีเทน ( $\text{CH}_4$ ) มีปฏิสัมพันธ์ความปั่นป่วนของการเผาไหม้แบบ RNG  $k-\epsilon$  Turbulence Eddy Dissipation Concept มีกลไกการเผาไหม้แบบละเอียดมีองค์ประกอบทางเคมี 53 ชนิด 325 ปฏิกิริยา โดยผลของอุณหภูมิต่างกันจากกรณีศึกษาแบบสองมิติ ให้ผลที่สอดคล้องกับการศึกษาของ Barlow<sup>16</sup> ดัง Figure 3 เป็นอย่างดี สำหรับตัวแปรที่สนใจต่อการเปลี่ยนแปลงพลังงานความร้อน การปลดปล่อยไฮดรอกซิล (OH), คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO), คาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) ได้แก่ ความเร็วการไหลเข้ามุมการฉีด อุณหภูมิ ของมีเทนและอากาศ จากการศึกษาพบว่า ความเร็วการไหลของอากาศที่ทางเข้า 20 เมตรต่อวินาทีให้อัตราการเกิด OH มากที่สุด และ ที่ความเร็วทางเข้า 5 เมตรต่อวินาทีให้อัตราการเกิด  $\text{CO}_2$  มากที่สุด และมุมการฉีดมีเทน  $45^\circ$  มีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปทรงของเปลวไฟที่เกิดขึ้นและทำให้อัตราการเกิด OH, CO และ  $\text{CO}_2$  อย่างมีนัยสำคัญ ด้วยข้อมูลดังกล่าวสามารถสรุปได้ว่าค่าคุณสมบัติที่ทางเข้ามีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีของการเผาไหม้และปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นหลังการเผาไหม้ เพื่อความเข้าใจในเชิงวิชาการถึงกระบวนการปฏิสัมพันธ์ของคุณสมบัติความปั่นป่วนต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ แบบจำลองความปั่นป่วนแบบ Large Eddy Simulation – Dynamics Structure เป็นแบบจำลองที่เหมาะสมสำหรับการศึกษาในอนาคต

## กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนโปรแกรม ANSYS FLUENT จากห้องวิจัยการเผาไหม้ขั้นสูง ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ภายใต้การควบคุมของ ดร. เฉลิมพล เป็ล่งสอาด

## เอกสารอ้างอิง

- Boukhalfa N. (2016). Chemical Kinetic Modeling of Methane Combustion. 4<sup>th</sup> International Conference on Process Engineering and Advance Materials. Procedia Engineering, 148, 1130-1136.
- Kim Y.J., Oh C.B., & Fujita O. (2013). Prediction Performance of Chemical Mechanisms for Numerical Simulation of Methane Jet MILD Combustion. Advance in Mechanical Engineering, Article ID 138729, 16 pages.
- Zohra K.F., Mounir A. , & Salah C. (2017). Numerical Simulation of  $\text{CH}_4\text{-H}_2\text{-AIR}$  Non-premixed Flame Stabilized by a Bluff Body. International Conference on Materials and Energy 2015, Energy Procedia, 139, 530-536.
- Aboje A.A., Garba M.U., Abdulkareem A.S. Muzenda E., & Faruq A.A. (2017) Numerical Modeling of Pollutant Formation in a Lifted Methane-Air Vertical Diffusion Flame. Cogent Environmental Science, 3, 1302543.
- Farokhi M. , & Birouk M. (2019). A hybrid EDC/Flamelet Approach for Modelling Biomass Combustion of Grate-Firing Furnance. Combustion Theory and Modeling, 1741 – 3559.
- Chen J., Song W. , & Xu D. (2017) Computational Fluid Dynamics Simulation of the Thermal Uniformity in Catalytic Micro-Combustors. Frontiers in Heat and Mass Transfer. DOI: 10.5098/hmt.8.21.
- Shi B., Peng W., Li B., Hu J., Wang N. & Ishizuka S. (2017) .  $\text{CO}_2$  diluted propane/oxygen combustion in a rapidly mixed tubular flame burner. Proceedings of the Combustion Institute, 36, 4261-4268.
- Plengsa-ard C. & Kaewbumrung M. (2018). CFD Modelling Wall Heat Transfer Inside a Combustion Chamber Using ANSYS Forte. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering ,297. 012036.
- Aniello A., Bartolucci L., Cordiner A., Mulone V., Krishnan S.R., & Srinivasan K.K. (2018). CFD Analysis of Diesel-Methane Dual Fuel Low Temperature Combustion at Low and High Methane Substitution, Proceedings of the ASME 2018 Internal Combustion Engine Division Fall Technical Conference, November 4-7, 2018, San Diego, CA, USA.
- Mithun J., Sundararajan T., & Srinivasan K. (2019): Transition from Symmetric to asymmetric Flame Anchoring in Two-Dimensional Channels with Sudden Expansion. Combustion Science and Technology, 1563 – 521X.
- Emami M.D., Shahbazian H., & Sunden B. (2018). Effect of Operational Parameters on Combustion and Emissions in an Industrial Gas Turbine Combustor. ASME. J. Energy Resour. Technol. , 141(1):012202-012202-14. doi:10.1115/1.4040532.

12. Barlow, R. S., Frank, J. H., A. N. Karpetis, & Chen J.Y., (2005) "Piloted Methane/Air Jet Flames: Scalar Structure and Transport Effects," *Combust. Flame* 143(4), 433-449.
13. Schneider, Ch., Dreizler, A., & Janicka, J., (2003) "Flow Field Measurements of Stable and Locally Extinguishing Hydrocarbon-Fuelled Jet Flames" *Combust. Flame*, 135,185-190.
14. F.N. Egolfopolous et al. (1988). *Proceedings of Combustion Institute*, 23, 471.
15. ANSYS, 2018, ANSYS FLUENT-Solver Theory Guide. ANSYS FLUENT Release 2019R1, Ansys Inc., Canonsburg, PA.