

## การจำลองพฤติกรรมการเผาไหม้ของเตาทรงกระบอกด้วยเชื้อเพลิงแก๊สธรรมชาติอัด โดยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

### Simulation on Combustion Behavior of Tubular Burner using Natural Gas by Computational Fluid Dynamics

ภูธนศ แซ่จิว<sup>1</sup> ศักดา ธรรมรักษ์<sup>1</sup> อนิรุต์ มัทธูจักษ์<sup>1\*</sup> สารสิน โคตรธาดา<sup>1</sup> ธนรัฐ ศรีวีระกุล<sup>1</sup> และ สุทธิศักดิ์ พงศ์ธนาพานิช<sup>2</sup>  
Pootanet Saechio<sup>1</sup>, Sakda Thammarak<sup>1</sup>, Anirut Mattujak<sup>1\*</sup>, Sarasin Khotthada<sup>1</sup>, Thanarat Sriveerakul<sup>1</sup>  
and Sutthisak Pongthanapanich<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ห้องปฏิบัติการการประยุกต์ใช้ลำเจ็ตและการเผาไหม้ (CJARL) ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี  
<sup>2</sup>ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

<sup>1</sup>Combustion and Jet Application Research Laboratory, (CJARL) Department of Mechanical Engineering Faculty of engineering, Ubon Ratchathani University.

<sup>2</sup>Department of Mechanical Engineering Technology College of Industrial Technology,  
King mongkut's university of technology north bangkok.

\*E-mail: anirut.m@ubu.ac.th

#### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมการไหลและการเผาไหม้ของเตาทรงกระบอกด้วยการใช้เชื้อเพลิงแก๊สธรรมชาติด้วยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณทำการสร้างแบบจำลอง 3 มิติ ที่มีขนาดเท่ากับเตาทรงกระบอกที่ใช้งานจริง โดยทำการศึกษาพฤติกรรมการไหลและการเผาไหม้ ที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิงแก๊สธรรมชาติเท่ากับ 12.30 kW ซึ่งพฤติกรรมการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นจะถูกแสดงผลในรูปของแถบสีอุณหภูมิและเวกเตอร์ความเร็ว การจำลองจะถูกยืนยันผลความน่าเชื่อถือกับการทดลอง ด้วยการวัดความเร็วของของไหลและอุณหภูมิการเผาไหม้รอบภาชนะ จากการศึกษาพบว่าความเร็วของของไหล และการกระจายตัวของอุณหภูมิการเผาไหม้ที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของเตาทรงกระบอกที่ได้จากแบบจำลอง และการทดลองมีความสอดคล้องกันโดยมีค่าความคลาดเคลื่อนไม่เกินร้อยละ 5.07 เมื่อเทียบกับอุณหภูมิกับการทดลอง โดยมีความเร็วสูงสุดของแก๊สเท่ากับ 203.56 m/s และอุณหภูมิสูงสุด 1140.39 K ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า แบบจำลองที่สร้างขึ้นสามารถอธิบายพฤติกรรมการไหลและการเผาไหม้ของเตาทรงกระบอกได้อย่างชัดเจน นอกจากนี้ สามารถใช้แบบจำลองดังกล่าวไปประยุกต์ใช้เพื่อออกแบบและปรับปรุงประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาทรงกระบอกให้สูงขึ้นต่อไปในอนาคต

**คำสำคัญ:** เตาทรงกระบอก แก๊สธรรมชาติ พฤติกรรมการเผาไหม้ พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

#### Abstract

The objective of this research is to study the flow feature and combustion behavior of the tubular burner when using natural gas as a fuel. Effects of gas flow rate at 12.30 kW on the combustion behavior were investigated by the velocity vector and temperature contour. The simulation results were verified by velocity and temperature measurement. From CFD results, it was found that the error of CFD results were 5.07% comparing temperature measurement, respectively. The flow feature and combustion behavior of

the tubular burner was clearly clarified by this CFD Model. The maximum velocity and temperature is 203.56 m/s and 1140.39 K, respectively. Therefore, it can be concluded that the CFD model of the tubular burner using natural gas can be applied to design and improve the thermal efficiency in the further work.

**Keywords:** Tubular Burner, Natural Gas, Combustion Behavior, CFD

## บทนำ

จากสถานการณ์ในปัจจุบันทั่วโลกประสบปัญหาวิกฤตการณ์ด้านพลังงานเนื่องจากพลังงานที่ใช้มีปริมาณลดลง และราคาพลังงานยังมีมูลค่าเพิ่มสูงขึ้น ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งในการใช้พลังงานให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด จากสถิติการใช้พลังงานของกระทรวงพลังงาน (สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน, 2561) พบว่า ประเทศไทยมีการใช้เชื้อเพลิงปิโตรเลียมเหลวหรือแก๊ส LPG (Liquefied Petroleum Gas, LPG) อย่างกว้างขวาง ซึ่งแก๊ส LPG เป็นส่วนผสมของโพรเพน (Propane) และบิวเทน (Butane) หรือเป็นอย่างใดอย่างหนึ่ง เนื่องจากแก๊ส LPG มีความร้อนสูง เป็นเชื้อเพลิงสะอาดเผาไหม้ได้สมบูรณ์ และสะดวกต่อการใช้งาน จึงเป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายทั้งในครัวเรือน ร้านอาหาร อุตสาหกรรม รถยนต์ และอื่น ๆ โดยภาคครัวเรือนจะเป็นภาคส่วน ที่มีปริมาณการใช้แก๊ส LPG สูงเป็นอันดับหนึ่งหรือสองของทุก ๆ ปี ซึ่งจะถูกนำไปใช้ในเตาแก๊สหุงต้มเพื่อเปลี่ยนค่าความร้อน ของเชื้อเพลิงให้กลายเป็นพลังงานความร้อนในรูปแบบของเปลวไฟ แต่เนื่องจากลักษณะของเปลวไฟของเตาแก๊สหุงต้มที่ใช้ เป็นแบบพุ่งชน (Impinging flame jet) ซึ่งจะให้อัตราการถ่ายเทความร้อนที่สูง และต้องใช้ปริมาณแก๊ส LPG ค่อนข้างมาก (Dong et al, 2002) แต่ด้วยลักษณะของเปลวไฟที่ให้ความร้อนแก่ภาชนะ เป็นลักษณะเปิดสู่บรรยากาศ จึงทำให้เกิดการสูญเสียความร้อนเป็นจำนวนมาก ทำให้ไม่สามารถนำความร้อนมาใช้ประโยชน์ได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ อีกทั้งยังมีการสูญเสียความร้อนเป็นจำนวนมากไปกับแก๊สไอเสีย ทำให้เตาแก๊ส หุงต้มที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันมีประสิทธิภาพเชิงความร้อน (Thermal efficiency) ที่ค่อนข้างต่ำเฉลี่ยร้อยละ 35 (วิเชียร, 2541) ดังนั้นที่ผ่านมาจึงมีการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาแก๊สหุง ต้มในครัวเรือนอย่างแพร่หลาย

Tamir et al. (1992) ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาหุงต้มที่ใช้แก๊สธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิง โดยการปรับปรุงจากหัวเตาแก๊สแบบทั่วไป (Conventional Burner, CB) ให้เป็นหัวเตาแก๊สแบบหมุนวน (Swirl Burner, SB) ซึ่งพบว่า เตาแบบ SB ที่ให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงสุดจะมีลักษณะเฉพาะคือ มีมุมเงย (Inclination Angle, IA) เท่ากับ 26 องศา และมุมเอียง (Swirl Angle, SA) เท่ากับ 15 องศา โดยประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาแบบ SB เพิ่มขึ้นร้อยละ 6 ซึ่งเป็นผลจากการหมุนวนของเปลวไฟ โดยแรงเฉือนจะส่งเสริมปัจจัยบวกต่าง ๆ คือ ระยะเวลาในการผสมของเชื้อเพลิง และอากาศ เวลาในการสัมผัสของเปลวไฟกับภาชนะ และการดึงดูดอากาศส่วนที่สอง (Secondary air) เพิ่มขึ้น ต่อมามานะและคณะ (2561) ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของการไหลแบบหมุนวนของการฉีดแก๊สบนหัวเตาแก๊ส แรงดันสูงต่อพฤติกรรม การเผาไหม้ของเตาแก๊สประหยัดพลังงานด้วย CFD ในรูปแบบ 3 มิติ และทำการยืนยันผลของแบบจำลองกับผลการทดลอง โดยการวัดอุณหภูมิที่จุดต่าง ๆ บริเวณหัวเตาและภาชนะพบว่า เตาแก๊สที่มีเปลวไฟไหลแบบหมุนวน (Swirl Energy-Saving Gas Stove, SESS) มีอุณหภูมิ ความเร็ว และ Heat flux สูงกว่า เตาแก๊ส แบบเดิมที่มีเปลวไฟไหลตามแนวรัศมี (Radius Energy-Saving Gas Stove, RESS) โดย SESS มีอุณหภูมิ ความเร็ว และ Heat flux สูงสุดเท่ากับ 1,455 K, 1.83 m/s และ 28.39 kW/m<sup>2</sup> ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่า SESS มีพฤติกรรมการเผาไหม้ และการถ่ายเทความร้อนสู่ภาชนะดีกว่า RESS โดยผลการจำลองมีค่าความคลาดเคลื่อนจากผลการทดลองไม่เกิน 5.75% ต่อมาภัทรารธรรมและคณะ (2562) ได้ศึกษา พฤติกรรมการเผาไหม้ของเตาประหยัดแก๊ส S-10 ด้วย CFD ในรูปแบบ 3 มิติ โดยทำการศึกษาอิทธิพลของความดันแก๊ส LPG ต่อพฤติกรรมการเผาไหม้ และทำการยืนยันผลของแบบจำลองกับผล การทดลองโดยการวัดอุณหภูมิที่จุดต่าง ๆ พบว่า เมื่อความดันแก๊ส LPG สูงขึ้น ความเร็ว อุณหภูมิ และ Heat flux มีค่าสูงขึ้น โดยมีค่าสูงสุดเท่ากับ 4.05 m/s, 1438.3 K

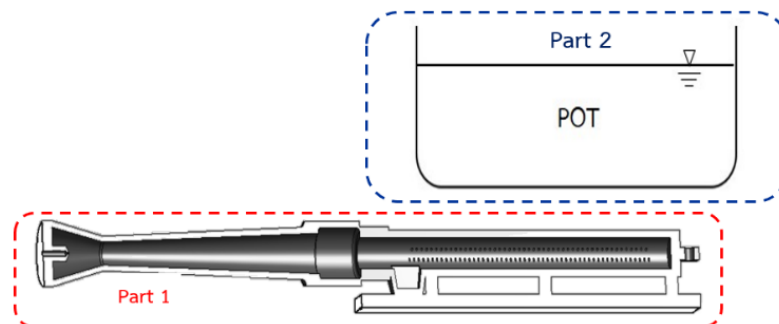
และ 67.40 kW/m<sup>2</sup> ตามลำดับ แต่ประสิทธิภาพเชิงความร้อนมีค่าลดลง ณัฐพลและคณะ (2563) ได้ศึกษาพฤติกรรมการเผาไหม้ของเตาประหยัด พลังงาน EB-10 ด้วย CFD ในรูปแบบ 3 มิติ โดยทำการศึกษาอิทธิพลของความดันแก๊ส LPG ต่อพฤติกรรมการเผาไหม้ และทำการยืนยันผลของแบบจำลองกับผลการทดลองโดยการวัดอุณหภูมิที่จุดต่าง ๆ พบว่าเมื่อความดันแก๊ส LPG สูงขึ้น ความเร็ว อุณหภูมิ และฟลักซ์ความร้อนมีค่าสูงขึ้น โดยมีค่าสูงสุดเท่ากับ 4.72 m/s, 1,257.46 K และ 29.4 kW ตามลำดับ แต่ประสิทธิภาพเชิงความร้อนมีค่าลดลง

จากการศึกษาวิจัยพบว่า การพัฒนาประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาแก๊สส่วนใหญ่จะเป็นการศึกษาในด้านการจำลองและการทดลอง ถึงแม้ว่าจะมีการศึกษาด้วยวิธีการจำลองพฤติกรรมการเผาไหม้ด้วยพลศาสตร์การไหลเชิงคำนวณ (Computation Fluid Dynamics, CFD) ส่วนใหญ่จะเป็นการจำลองด้วยเชื้อเพลิง LPG แต่เตาแก๊สที่ได้ทำการศึกษาวิจัยส่วนใหญ่จะเป็นเตาแก๊ส KB-5 หรือขนาดเทียบเท่า KB-5 เท่านั้นโดยเตาแก๊ส KB-5 คือ เตาแก๊สที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 5 นิ้ว (หจก. โสม โมเตอรันแก๊ส, 2533) โดยเป็นเตาแก๊สที่ถูกใช้งานในครัวเรือนและร้านอาหาร ที่ผ่านมาเป็นการศึกษาในด้านการทดลองเท่านั้น โดยเตากระบอกนิยมใช้ในโรงพยาบาล-โรงแรม (โซบผ้า) ใช้กับโรงงานที่ใช้ตู้บอยเลอร์ ซึ่งมีการใช้เชื้อเพลิงในอัตราที่ค่อนข้างสูง ซึ่งเตาทรงกระบอกยังไม่มีการศึกษาพฤติกรรมการเผาไหม้ด้วย CFD ร่วมกับการทดลองด้วยเชื้อเพลิงแก๊สธรรมชาติอัด (Compressed Natural Gas, CNG) เนื่องจากแก๊ส CNG มีปริมาณของคาร์บอนน้อยกว่าเชื้อเพลิงชนิดอื่น (PTT Public Company Limited., 2555) และมีคุณสมบัติเป็นแก๊ส ทำให้การเผาไหม้สมบูรณ์ ปริมาณไอเสียที่ปล่อยออกจากเครื่องยนต์ต่ำกว่าเชื้อเพลิงชนิดอื่น อีกทั้งยังเป็นเชื้อเพลิงที่สะอาดไม่ก่อให้เกิดควันดำ หรือสารพิษที่เป็นอันตรายต่อสุขภาพของคนทั่วไป จึงสามารถลดปัญหามลพิษทางอากาศซึ่งนับวันจะทวีความรุนแรงมา

ดังนั้น วิจัยนี้จึงมีแนวคิดที่จะนำวิธีการทางพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics, CFD) มาใช้ในการศึกษาพฤติกรรมการเผาไหม้ของเตากระบอกเมื่อใช้ แก๊สธรรมชาติอัด (Compressed Natural Gas, CNG) เป็นเชื้อเพลิง เพื่อเป็นแนวทางในการเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตากระบอกในอนาคตต่อไป

### วิธีการวิจัย

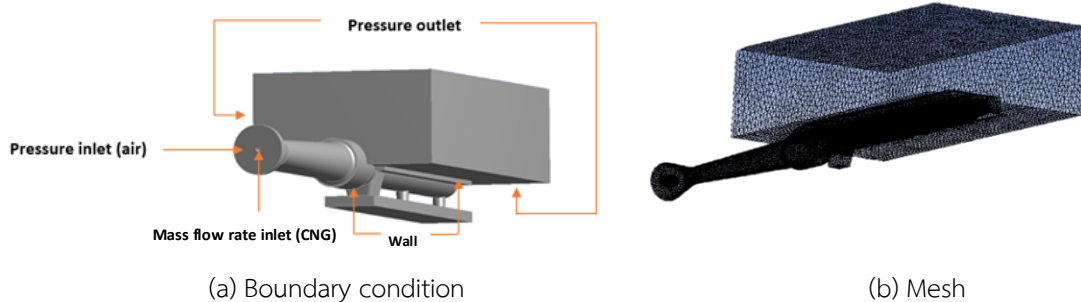
การจำลองด้วย CFD ของการศึกษานี้แบ่งขอบเขตของการศึกษาเป็น 2 ส่วน (Part) คือ Part 1 เป็นการจำลองเพื่อศึกษาพฤติกรรมการไหลของของไหลภายในเตา กรณีไม่มีการเผาไหม้ จะใช้เป็นข้อมูล mass flow rate และ mass fraction ไปใช้ใน Part 2 เป็นการจำลองเพื่อศึกษาพฤติกรรมการกระจายอุณหภูมิ การกระจายความเร็ว การถ่ายเทความร้อนสู่ภาชนะ เตาทรงกระบอกกรณีมีการเผาไหม้ ดังแสดงในภาพที่ 1 ในการวิเคราะห์ ประมวลผล และแสดงผลของการจำลอง Part 1 และ Part 2 จะใช้ FLUENT โดยขั้นตอนก่อนการวิเคราะห์ ประมวลผล และแสดงผลนั้นจะทำการสร้างขอบเขตพื้นที่กริด กำหนดเงื่อนไขขอบเขต และค่าตัวแปรต่าง ๆ ให้กับกริด ของของไหลใน Part 1 และ Part 2 ที่แตกต่างกัน



ภาพที่ 1 บริเวณที่ใช้ในการศึกษาของแบบจำลองพฤติกรรมการเผาไหม้ของเตาทั้ง 2 ส่วน

### 1. การจำลองใน Part 1 กรณีไม่มีการเผาไหม้ (Cold test simulation)

การจำลองของ Part 1 มีจุดประสงค์คือ เพื่อนำผล Mass fraction ของ  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2$  และ  $\text{O}_2$  และ Mass flow rate ของ mixture (CNG + air) ที่ได้จาก Part 1 บริเวณทางออกของรูหัวเตาไปกำหนดเป็น inlet data ของการจำลองใน Part 2 การศึกษา Part 1 เริ่มจากการศึกษาและสร้างขอบเขตพื้นที่ ของอากาศภายในเตาทรงกระบอก ของแบบจำลอง ในลักษณะ 3 มิติ (3D-Model) ที่มีขนาดเท่ากับเตาทรงกระบอกที่ใช้งานจริง รูปแบบกริด (Mesh) เป็นรูปทรงสามเหลี่ยมสี่ด้าน (Tetrahedral grid) แสดงในภาพที่ 2(b) จากการศึกษากริดที่เหมาะสมพบว่า จำนวนกริดที่ 3,984,516 elements มีความเหมาะสมที่สุด



ภาพที่ 2 (a) เงื่อนไขขอบเขตการคำนวณ Part 1 (b) กริด Part 1

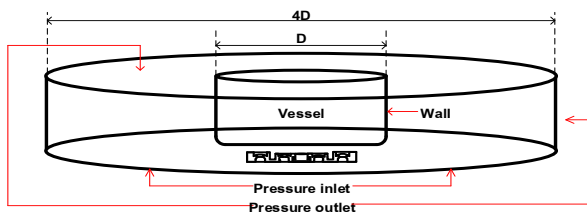
สำหรับเงื่อนไขขอบเขตของ Part 1 กำหนดให้ทางเข้าในส่วนของ CNG กำหนดเป็น mass flow rate inlet (CNG) คือเทียบเท่ากับอัตราการป้อนเชื้อเพลิงที่เป็น LPG เท่ากับ 12.30 kW เพื่อทำการยืนยันกับผลการทดลองของเชื้อเพลิง LPG ที่ใช้ในการทดลองบริเวณ Primary air และบริเวณ Secondary air กำหนดเป็น Pressure inlet (air) ปากเตาด้านบนกำหนดเป็น Pressure outlet และบริเวณหัวเตา กำหนดเป็น wall แบบจำลองความปั่นป่วนแบบ RNG K-e วิเคราะห์ ร่วมกับ Species transport model ซึ่งเป็นการไหลแบบผสมและไม่มีการทำปฏิกิริยากัน และไม่มีการเผาไหม้กำหนดอัตราส่วน  $\text{CH}_4$ :  $\text{CO}_2$  เป็น 89: 11 (Kaewsimok and Santikunaporn, 2018) และพิจารณาการไหลแบบคงที่ (Steady state) ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 เงื่อนไขขอบเขตการคำนวณ Part 1

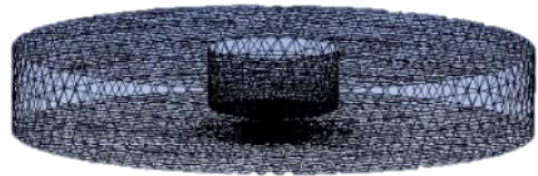
BOUNDARY CONDITION	MODEL
INLET BOUNDARY CONDITION	AIR GAUGE PRESSURE INLET = 0 PA CNG MASS FLOW RATE INLET = 12.3 KW
OUTLET BOUNDARY CONDITION	PRESSURE OUTLET (AIR GAUGE, PRESSURE OUTLET = 0 PA)
SOLVER	PRESSURE BASE
TIME	STEADY STATE
NEAR-WALL TREATMENT METHOD	STANDARD WALL FUNCTION
TURBULENCE MODEL	RNG K-e MODEL
OTHER	SPECIES TRANSPORT
METHANE: CARBON DIOXIDE	89: 11

### 2. การจำลองใน Part 2 กรณีมีการเผาไหม้ (Hot test simulation)

การจำลองของ Part 2 มีจุดประสงค์คือ เพื่อยืนยันผลของอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่าง ๆ จาก CFD กับการทดลองของเชื้อเพลิง LPG โดยทำการศึกษาที่ความดัน 4 psi ที่เทียบเท่ากับการจำลองของ CNG ที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิงเท่ากับ 12.30 kW เพื่อดูพฤติกรรมของการเผาไหม้ การศึกษาใน Part 2 เริ่มจากการศึกษาและสร้างขอบเขตพื้นที่ของอากาศรอบ ๆ หัวเตาทรงกระบอกและหม้อ ของแบบจำลองในลักษณะ 3 มิติ (3D-Model) ที่มีขนาดเท่ากับเตาทรงกระบอกที่ใช้จริง รูปแบบกริดเป็นรูปทรงสามเหลี่ยมสี่ด้าน (Tetrahedral grid) จำนวน 2,692,428 Elements แสดงในภาพที่ 3 (b) จากการศึกษากริดที่เหมาะสม



(a) Boundary conditions



(b) Mesh

ภาพที่ 3 (a) เงื่อนไขขอบเขตการคำนวณ Part 2 (b) กริด (Mesh) Part 2

สำหรับเงื่อนไขขอบเขตของ Part 2 กำหนดให้ขอบเขตของอากาศรอบ ๆ หัวเตาเป็น Pressure outlet หม้อเหนือหัวเตามีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (D) 450 mm (หม้อเบอร์ 45 cm) และมีความสูงเท่ากับระดับน้ำในหม้อที่ใช้ในการทดลอง คือ 210 mm กำหนดให้ผนังหม้อมีอุณหภูมิคงที่เท่ากับ 300 K เนื่องจากงานนี้เป็นงานที่เกี่ยวข้องกับการเผาไหม้ซึ่งจะมีการกระจายอุณหภูมิที่บริเวณหัวเตาระยะที่ห่างจากหม้อจึงสำคัญ งานวิจัยนี้กำหนดระยะห่างจากผนังหม้อเท่ากับ 4D แสดงภาพที่ 4 สำหรับผนังของหัวเตากำหนดเป็น wall และกำหนดรูหัวเตาเป็น Mass flow inlet ซึ่ง Mass fraction ของ  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2$  และ  $\text{O}_2$  และ Mass flow rate ของ CNG ได้จากผลการคำนวณ CFD ของ Part 1 สำหรับเงื่อนไขการคำนวณของ CFD แสดงในตารางที่ 2 โดยทั่วไปสมการที่เกี่ยวข้องในการแก้ปัญหากลศาสตร์ของไหลจะประกอบด้วย สมการอนุรักษ์มวล (Mass-conservation equation), สมการอนุรักษ์พลังงาน (Energy conservation equation), และสมการอนุรักษ์โมเมนตัม (Momentum conservation equation) ในการคำนวณ ดังนี้

$$1. \text{ สมการอนุรักษ์มวล ในกรณีไหลอยู่ในสภาวะคงที่ } \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$$

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

$$2. \text{ สมการอนุรักษ์พลังงานในกรณีภาวะ } \frac{\partial T}{\partial t} = 0$$

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} + \epsilon \sigma (T_s^4 - T_s^\infty) = \alpha \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + q'' \quad (2)$$

โดยที่

$q'' = \dot{W}_A \Delta H$  คือ พลังงานที่เกิดจากปฏิกิริยาเคมีต่อหน่วยปริมาตรของของไหล

$\alpha = \frac{k}{\rho c}$  คือ ค่าสภาพการแพร่กระจายความร้อนของวัสดุ

$\varepsilon \sigma (T_s^4 - T_s^\infty)$  คือ สมการการแผ่รังสีความร้อน

3. สมการอนุรักษ์โมเมนตัมในกรณีสถานะคงที่  $\frac{\partial u}{\partial t} = 0$

$$\rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho v \frac{\partial u}{\partial y} + \rho w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \mu \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \quad (3)$$

โดยที่

$\rho$  คือ ความหนาแน่น

$\mu$  คือ ความเร็วของของไหลในแนวแกน x

$v$  คือ ความเร็วของของไหลในแนวแกน y

$w$  คือ ความเร็วของของไหลในแนวแกน z

4. สมการอนุรักษ์มวลย่อย

เนื่องจากการถ่ายเทพลังงานและการถ่ายโอนมวลที่มีความคล้ายกัน ดังนั้นด้วยวิธีการเดียวกันกับการหาสมการอนุรักษ์พลังงาน, สมการอนุรักษ์มวลย่อย ดังสมการที่ 4

$$\rho u \frac{\partial Y_A}{\partial x} + \rho v \frac{\partial Y_A}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} \rho D_A \frac{\partial Y_A}{\partial y} + \dot{W}_A''' \quad (4)$$

5. สมการปฏิกิริยาการเผาไหม้

รูปแบบปฏิกิริยาเคมีสำหรับการเผาไหม้ CNG (Kaewsimok and Santikunapom, 2018) ที่มีสารประกอบมีเทน (Metane) ดังต่อไปนี้



ตารางที่ 2 เงื่อนไขขอบเขตการคำนวณ Part 2

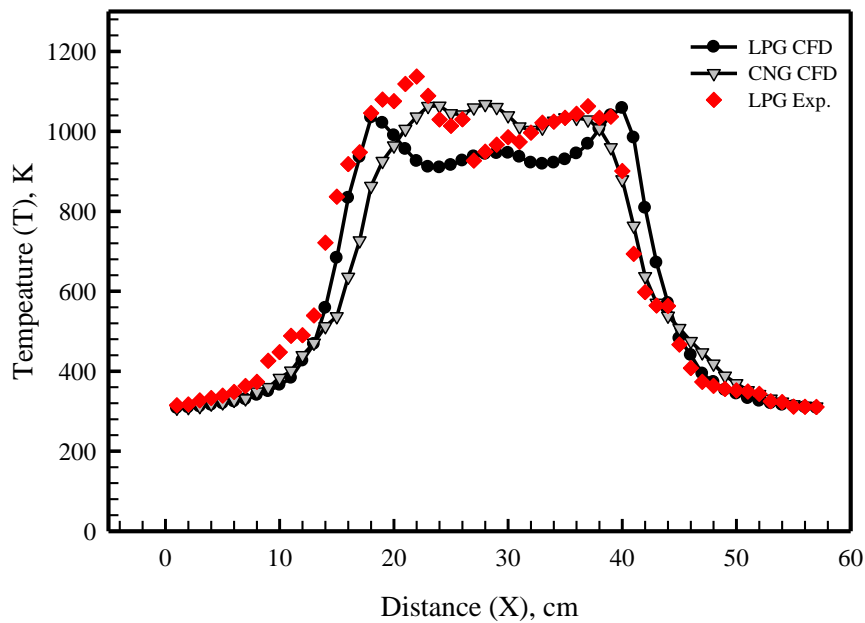
BOUNDARY CONDITION	MODEL
INLET BOUNDARY CONDITION	MASS FLOW INLET (Part 1) MASS FRACTION OF CH4, CO2, N2 and O2 (Part 1)
OUTLET BOUNDARY CONDITION	PRESSURE OUTLET (AIR GAUGE, PRESSURE OUTLET = 0 PA)
SOLVER	PRESSURE BASE
TIME	STEADY STATE
NEAR-WALL TREATMENT METHOD	STANDARD WALL FUNCTION
TURBULENCE MODEL	STANDARD K-e MODEL

BOUNDARY CONDITION	MODEL
RADIATION MODEL	DISCRETE ORDINATES (DO) RADIATION MODEL
COMBUSTION MODEL	EDDY DISSIPATION MODEL

## ผลการวิจัย

### 1. การยืนยันผลการจำลอง

ภาพที่ 4 แสดงการยืนยันผลการจำลองของเตาทรงกระบอก ในกรณีที่มีการเผาไหม้ (Part 2) โดยทำการวัดอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่าง ๆ ที่เป็นผลการยืนยันที่ทำการจำลองกับการทดลองที่เป็นเชื้อเพลิง LPG แล้ว เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับ การจำลองที่เป็นเชื้อเพลิง CNG ที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิง 12.30 kW ดังแสดงในภาพที่ 4 พบว่า อุณหภูมิทั้งเชื้อเพลิง 2 ชนิด มีแนวโน้มใกล้เคียงกัน โดยมีอุณหภูมิสูงสุดจากการจำลองของเชื้อเพลิง LPG และ CNG เท่ากับ 1,125.61 K และ 1,140.39 K ตามลำดับ โดยเมื่อคิดเป็นค่าความคลาดเคลื่อนเท่ากับร้อยละ 5.07 เมื่อเทียบกับการทดลอง

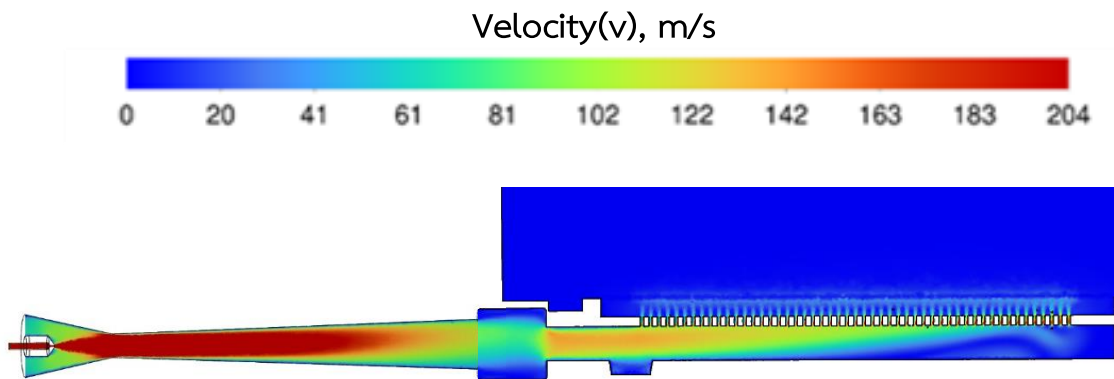


ภาพที่ 4 ผลยืนยันการจำลองของเชื้อเพลิง LPG กับ CNG

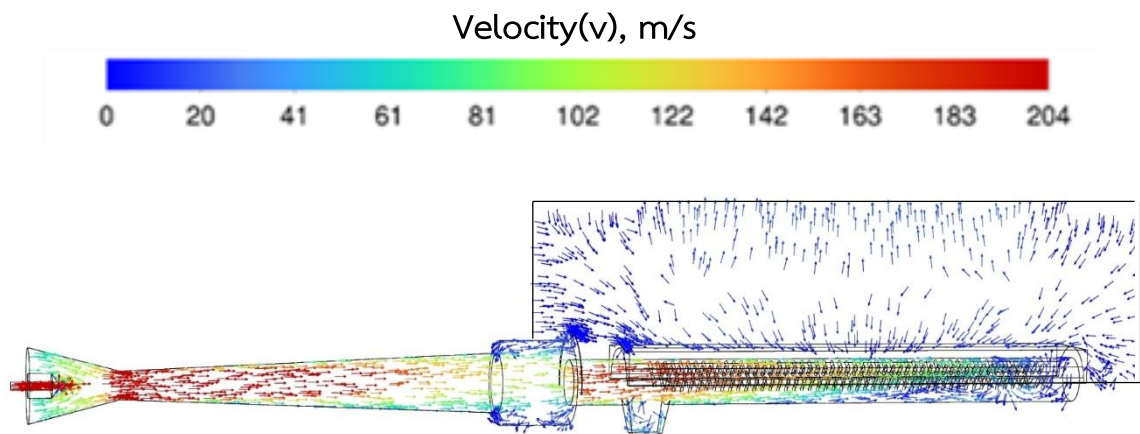
### 2. ผลการจำลอง Part 1

จากแบบจำลองใน ภาพที่ 5 และภาพที่ 6 แสดงแถบสีและเวกเตอร์ความเร็วที่ระนาบกึ่งกลางเตาตามลำดับพบว่า การกระจายตัวของความเร็วที่ตำแหน่งต่าง ๆ โดยบริเวณหัวฉีดมีความเร็วสูงกว่าตำแหน่งอื่น ๆ เนื่องจากแก๊ส CNG ถูกปล่อย จากถังแก๊สด้วยแรงดันสูงผ่านหัวฉีดจึงทำให้เกิดความเร็วสูงบริเวณหัวฉีดซึ่งมีความเร็ว เท่ากับ 203.56 m/s จากนั้น จะเหนี่ยวนำอากาศบริเวณ Primary air เข้ามาผสมในท่อผสมก่อน เพื่อใช้ในกระบวนการเผาไหม้ และบริเวณห้องเผาไหม้ยังมี ช่องสำหรับ Secondary air เพื่อช่วยเพิ่มอากาศในกระบวนการเผาไหม้ให้ดียิ่งขึ้น ซึ่งจะมีทิศทางการเคลื่อนที่ของอากาศ ส่วน Secondary air จะไหลเข้ามาแทนที่ของอากาศที่ถูกเหนี่ยวนำขึ้นไปข้างบนสำหรับการเผาไหม้ต่อไป ดังแสดงในภาพที่ 6





ภาพที่ 5 แถบสีแสดงความเร็วที่ระนาบกึ่งกลางเตา



ภาพที่ 6 เวกเตอร์แสดงความเร็วที่ระนาบกึ่งกลางเตา

### 3. ผลการจำลอง Part 2

ภาพที่ 7 แสดงแถบสีอุณหภูมิที่ระนาบกึ่งกลางเตา จากผลของแบบจำลองพบว่า การกระจายตัวของอุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลองมีการกระจายตัวของอุณหภูมิเปลวไฟจากกึ่งกลางของหัวเตาแล้วจะค่อย ๆ ลอยตัวขึ้นไปด้านบนตามขอบของภาชนะ โดยมีอุณหภูมิการเผาไหม้สูงสุดของตำแหน่งกึ่งกลางเตามีค่าเท่ากับ 1,140.39 K อุณหภูมิบริเวณหัวเตาค่อนข้างจะใกล้เคียงกันและค่อย ๆ ลดลงตามระยะทางที่ออกห่างจากหัวเตา และภาพที่ 8 แสดงเวกเตอร์แสดงความเร็วที่ระนาบกึ่งกลางเตาพบว่า ของผสมของแก๊ส CNG และอากาศที่ไหลออกจากรูของหัวเตา ซึ่งจะมีความเร็วสูงสุดบนระนาบกึ่งกลางเท่ากับ 4.10 m/s โดยของผสมดังกล่าวจะเกิดการเผาไหม้และจะดึงอากาศส่วนที่สอง (Secondary air) เข้ามาช่วยในการเผาไหม้ในบริเวณหัวเตา ซึ่งเป็นส่วนที่ทำให้เกิดการเผาไหม้สมบูรณ์มากขึ้น นอกจากนี้จะพบการเกิด Vortex ที่บริเวณหัวเตา ซึ่งเป็นที่ทราบกันดีว่าการเกิด Vortex จะช่วยส่งเสริมการเผาไหม้และช่วยส่งเสริมการถ่ายเทความร้อนไปยังภาชนะอีกด้วย





## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ที่ให้ความอนุเคราะห์การใช้โปรแกรมสำหรับการศึกษาวิจัยในครั้งนี้

## เอกสารอ้างอิง

- ณัฐพล ชูจิตร, อนิรุตต์ มัทธจักร์, ธนรัฐ ศรีวีระกุล และเสฏฐวรรธ สุจริตภวัตสกุล. (2563). การศึกษาอิทธิพลของความดันแก๊ส LPG ต่อพฤติกรรมการเผาไหม้ของเตาประหยัดพลังงาน EB-10 ด้วยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ. *การประชุมเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 34* (น. 149-157).
- ภัทราวรรณ ชิมชม, อนิรุตต์ มัทธจักร์, มานะ วิชางาม, ธนรัฐ ศรีวีระกุล และเสฏฐวรรธ สุจริตภวัตสกุล. (2562). การศึกษาอิทธิพลของความดันแก๊ส LPG ต่อพฤติกรรมการเผาไหม้ของเตาประหยัดแก๊ส S-10 ด้วยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณร่วมกับการทดลอง. *การประชุมเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 33* (น. 165-176).
- มานะ วิชางาม, อนิรุตต์ มัทธจักร์, ธนรัฐ ศรีวีระกุล, เสฏฐวรรธ สุจริตภวัตสกุล และสุทธิศักดิ์ พงศ์ธนาพาณิช. (2561). อิทธิพลของการไหลแบบหมุนวนต่อพฤติกรรมการเผาไหม้ของเตาแก๊สหุงต้มแรงดันสูง โดยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ. *การประชุมเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 32* (น. 70-81).
- วิเชียร ตรีเวชอักษร. (2541). *การปรับปรุงประสิทธิภาพเตาหุงต้ม LPG มาตรฐาน* [วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี].
- สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน. (2563, 20 กรกฎาคม). *การใช้เชื้อเพลิงปิโตรเลียมเหลวหรือแก๊ส*. <https://goo.gl/GCGy2G>
- หจก.โฮม โมเดิร์นแก๊ส. (2563, 26 สิงหาคม). *เตาแก๊สที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 5 นิ้ว*. [https://goo.gl/2mrw7S](https://homegasstove.com/blog/Dong, L. L., Cheung, C. S. and Leung, C. W. (2002). Heat transfer from an impinging premixed butane/air slot flame jets. <i>International Journal of Heat and Mass Transfer</i>, 45, 979-992.</a></p><p>PTT Public Company Limited. (2562, 26 สิงหาคม). <i>ก๊าซธรรมชาติ คือ อะไร</i>. <a href=)
- Kaewsimok, S. and Santikunaporn, M. (2018). Burner design for improvement of combustion for ceramic kiln. *Thai Science and Technology Journal (TSTJ)*, 28, 733-742.
- Tamir, A., Elperin, R. and Yotzer, S. (1992). Performance characteristics of a gas burner with a swirl central flame. *Energy*, 14(5), 347-362.