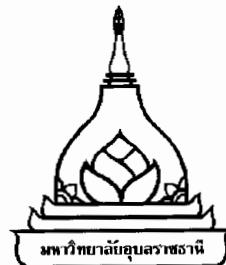


การจำลองลักษณะการเผาไหม้ของหัวเตาแก๊สแอลพีจี
สำหรับการหุงต้มในครัวเรือน



อิสรະ คงทวี

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ปีการศึกษา 2559
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี



**COMBUSTION CHARACTERISTICS SIMULATION OF LPG-DOMESTIC
COOKING BURNER**

ITSARA KONGTAWEE

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENTS
FOR THE DEGREE OF MASTER OF ENGINEERING
MAJOR IN MECHANICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
UBON RATCHATHANI UNIVERSITY
ACADEMIC YEAR 2016
COPYRIGHT OF UBON RATCHATHANI UNIVERSITY**



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
บริษัทวิศวกรรมศาสตร์มหาบันจิต
สาขาวิชาบริหารเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์

เรื่อง การจำลองลักษณะการเผาไหม้ของหัวเตาแก๊สแอลพีจีสำหรับการหุงต้มในครัวเรือน

ผู้วิจัย นายอิสรະ คงทวี

คณะกรรมการสอบ

รองศาสตราจารย์ ดร.สุทธิศักดิ์ พงศ์ธนาพาณิช

ประธานกรรมการ

รองศาสตราจารย์ ดร.ธนรัช ศรีวีระกุล

กรรมการ

รองศาสตราจารย์ ดร.อนิรุตต์ มัธยจักร

กรรมการ

อาจารย์ที่ปรึกษา

(รองศาสตราจารย์ ดร.ธนรัช ศรีวีระกุล)

.....
(รองศาสตราจารย์ ดร.กุลเชษฐ์ เพียรทอง)

.....
คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

.....
(รองศาสตราจารย์ ดร.อริยาภรณ์ พงษ์รัตน์)

.....
รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

ปีการศึกษา 2559

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้เนื่องจากความกรุณาจาก รองศาสตราจารย์ ดร.นันรัช ศรีวีระกุล
อาจารย์ที่ปรึกษาที่ให้ความช่วยเหลือและคำแนะนำที่เป็นประโยชน์ต่อการดำเนินงานวิจัยเป็นอย่างดี
มาโดยตลอดระยะเวลาที่ทำการศึกษา อีกทั้งให้ทักษะในการทำงานวิจัยได้เป็นอย่างดี จึง
ขอขอบพระคุณอย่างสูงไว้ ณ ที่นี่

รวมทั้งขอขอบพระคุณอาจารย์ ดร.อภินันต์ นามเขต ที่ให้คำปรึกษาและความรู้ทางด้านอุปกรณ์
การทดลอง ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.อนิรุตต์ มัทธุจักร ที่ให้ความช่วยเหลือทางด้าน^๑
ข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการเพาใหม่และเอกสาร บทความทางวิชาการ ที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์
ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต กฤตากม ที่ให้ความกรุณาร่วมเป็นประธานกรรมการ
สอบหัวข้อวิทยานิพนธ์ ขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.สุทธิศักดิ์ พงศ์ธนาพาณิช ที่ให้ความ
กรุณาร่วมเป็นประธานกรรมการสอบป้องกันวิทยานิพนธ์ ขอขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชา^๒
วิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี รุ่นพี่ รุ่นน้อง และเพื่อนๆ บุณฑิตศึกษาร่วมไปถึงรุ่น^๓
น้องนักศึกษาระดับปริญญาตรีที่มีส่วนเกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์ทุกท่าน ที่มีส่วนร่วมในการดำเนินงาน
วิจัยสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี และที่สำคัญขอขอบพระคุณพ่อ-แม่ ครอบครัวที่เคยเป็นกำลังใจและ
สนับสนุนการทำวิทยานิพนธ์ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

อิสรະ คงทวี

ผู้วิจัย

บทคัดย่อ

| | |
|------------------|---|
| เรื่อง | : การจำลองลักษณะการเผาไหม้ของหัวเตาแก๊สแอลพีจีสำหรับกรุ่งต้มในครัวเรือน |
| ผู้วิจัย | : อิสระ คงทวี |
| ชื่อปริญญา | : วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต |
| สาขาวิชา | : วิศวกรรมเครื่องกล |
| อาจารย์ที่ปรึกษา | : รองศาสตราจารย์ ดร.ธนรัฐ ศรีวิรากุล |
| คำสำคัญ | : หัวเตาแก๊สกรุ่งต้ม KB-5, พลศาสตร์ของไอลเซิงคำนวน, การเผาไหม้เตาแก๊สกรุ่งต้ม |

วิทยานิพนธ์นี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทำการศึกษาลักษณะการเผาไหม้ของหัวเตาแก๊สกรุ่งต้มแอลพีจี (LPG) ที่ใช้สำหรับกรุ่งต้มในครัวเรือน ประเภทแรงดันสูง ขนาด KB-5 ด้วยวิธีพลศาสตร์ของไอลเซิงคำนวน (CFD) ในรูปแบบการไอลแบบปั๊บปัวน $k-e$ ชนิด RNG คำนวนร่วมกับแบบจำลอง species transport แบบมีปฏิกิริยาการเผาไหม้ จากการเปรียบเทียบผลการจำลองกับผลการทดลองของหัวเตาแบบทั่วไป (CB) ที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิง เท่ากับ 9.48 กิโลวัตต์ พบร้า มีค่าความคลาดเคลื่อนของปริมาณ mass fraction ของแก๊สออกซิเจน (O_2), แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) เท่ากับร้อยละ 7.68, 12.73 และ 15.78 ตามลำดับ ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จากรูปแบบการจำลองสามารถยอมรับได้ จึงนำรูปแบบการจำลองไปใช้ในการทำนายลักษณะการเผาไหม้ของหัวเตาแก๊สกรุ่งต้ม ขนาด KB-5 ที่สภาวะการทำงานต่างๆ และขนาดรูปร่างต่างๆ ของหัวเตา ทั้งนี้พบว่าขนาดรูทางออกของเบลวไฟ (D_p) มีอิทธิพลต่อลักษณะการเผาไหม้ โดยสำหรับหัวเตาทั่วไปที่ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางรูทางออกของเบลวไฟ (D_p) เท่ากับ 2.0 มิลลิเมตร ให้อุณหภูมิสูงสุดของเบลวไฟ เท่ากับ 1854.33 เคลวิน นอกจากนี้ยังได้ทำการจำลองการเผาไหม้ ที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิงต่างๆ กับหัวเตาแบบหมุนวน (SB) ขนาด KB-5 เปรียบเทียบกับหัวเตาแบบทั่วไป พบว่าที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิงเท่ากับ 9.48, 11.06, 12.48 และ 13.48 กิโลวัตต์ หัวเตาแบบหมุนวนให้ค่าอุณหภูมิสูงสุดของเบลวไฟ เท่ากับ 1887.17, 1910.34, 1911.34 และ 1921.98 เคลวิน ตามลำดับ ซึ่งสูงขึ้นเมื่อเทียบกับหัวเตาแบบทั่วไป ในทางทฤษฎี อุณหภูมิสูงสุดของเบลวไฟที่สูงกว่าจะให้ค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อน (η_{th}) ที่สูงกว่าด้วย ทั้งนี้ได้ทำการพิสูจน์ด้วยการวัดค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนจากการทดลอง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนที่ได้จากหัวเตาแบบหมุนวนมีค่าเพิ่มขึ้น 3.91, 3.45, 5.78 และ 6.02 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนของหัวเตาแบบทั่วไป ที่ทุกอัตราการป้อนเชื้อเพลิง อีกทั้งได้มีการนำเสนอผลกระทบของมุมเอียง (α) และมุมเงย (β) ของรูทางออกเบลวไฟ ต่อลักษณะการเผาไหม้ของหัวเตาแบบหมุนวน โดยพบว่า

หัวเตาแบบหมุนวนที่มีมุมเอียงเท่ากับ 15° และมุมเบยเท่ากับ 26° ที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิง 9.48 กิโลวัตต์ ให้ค่าอุณหภูมิสูงสุดของเปลวไฟเท่ากับ 1889 เคลวิน

ABSTRACT

TITLE : COMBUSTION CHARACTERISTICS SIMULATION OF LPG-DOMESTIC COOKING BURNER

AUTHOR : ITSARA KONGTAWEE

DEGREE : MASTER OF ENGINEERING

MAJOR : MECHANICAL ENGINEERING

ADVISOR : ASSOC. PROF. THANARAT TSRIVEERAKUL, Ph.D.

KEYWORDS : KB-5 GAS COOKING BURNER, CFD, COMBUSTION.

The purpose of this thesis is to study combustion characteristics of a high pressure liquefied petroleum gas (LPG) domestic cooking burner KB-5 using the Computational Fluid Dynamics (CFD) method. The Renormalization Group (RNG) $k - \varepsilon$ turbulence model and species transport with combustion reaction model were assigned. When compared the simulation results with the experimental results, it was found that for the conventional burner (CB) at the firing rate of 9.48 kW, the errors in mass fractions of O₂, CO₂, CO are 7.68%, 12.73% and 15.78%, respectively. It can be said that the CFD results produced acceptable solutions, thus, the simulation method was further used to predict the combustion characteristics of the KB-5 domestic gas cooking burner with various operating conditions and burner's geometries. For the conventional burner, the results indicate that size of burner's flame exit hole (D_p) affect the combustion characteristics. The conventional burner with its burner's flame exit hole of 2 mm in diameter produced maximum flame temperature of 1854.33 K. Moreover, the simulations of the KB-5 swirl burner (SB) at different firing rates were also investigated and compared with the conventional burner (CB). At all firing rates of 9.48 kW, 11.06 kW, 12.48 kW and 13.48 kW the swirl burner produce higher maximum flame temperature of 1887.17 K, 1910.34 K, 1911.34 K and 1921.98 K compared to the results obtain from the conventional burner. In theory, the higher maximum flame temperature will produce the higher thermal efficiency (η_{th}). This was proved by the experiment results of thermal efficiency. Increments in thermal efficiency when using swirl burner instead of conventional burner at different firing

rates were found to be 3.91%, 3.45%, 5.78% and 6.02%. Also, the effects of different inclined angle (α) and lift angle (β) of the swirl burner to the combustion characteristics are presented. The swirl burner with inclined angle of 15° and lift angle of 26° at a firing rate of 9.48 kW provide maximum flame temperature of 1889 K.

สารบัญ

| | หน้า |
|---|------|
| กิตติกรรมประกาศ | ก |
| บทคัดย่อภาษาไทย | ข |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ | ง |
| สารบัญ | ฉ |
| สารบัญตาราง | ช |
| สารบัญภาพ | ญ |
| คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ | ท |
| บทที่ 1 บทนำ | |
| 1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย | 1 |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย | 3 |
| 1.3 ขอบเขตการศึกษาของงานวิจัย | 3 |
| 1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ | 4 |
| บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง | |
| 2.1 แก๊สบิโตรเลียมเหลว | 5 |
| 2.2 การจำแนกเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือน | 5 |
| 2.3 โครงสร้างและการทำงานของเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือน ประเภทแรงดันสูง | |
| ขนาด KB-5 | 7 |
| 2.4 ปริมาณอากาศต่อเขื้อเพลิงของการเผาไหม้ที่แบบสมบูรณ์ | |
| ทางทฤษฎี (Stoichiometry) | 8 |
| 2.5 สมการที่ใช้ในการศึกษา | 10 |
| 2.6 แบบจำลองความปั่นป่วนที่ใช้ในการศึกษา | 14 |
| 2.7 การทดสอบประสิทธิภาพเชิงความร้อน (Thermal Efficiency) | 15 |
| 2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง | 16 |
| บทที่ 3 ระเบียบวิธีวิจัย | |
| 3.1 ขั้นตอนระเบียบวิธีวิจัย | 28 |
| 3.2 การสร้างแบบจำลอง | 29 |
| 3.3 อุปกรณ์การทดลอง | 36 |
| 3.4 วิธีการทำการทดลอง | 41 |

หน้า

บทที่ 4 ผลและการวิเคราะห์ผล

| | |
|--|----|
| 4.1 การเปรียบเทียบผลของการจำลองและการทดลอง | 42 |
| 4.2 อิทธิพลของการเพิ่มอัตราการป้อนเชื้อเพลิงแอลพีจี (LPG) ที่มีผลต่อลักษณะ การเผาไหม้ของแบบจำลองสำหรับเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือน ขนาด KB-5 | 43 |
| 4.3 อิทธิพลขนาดรูทางออกของเบลว่าไฟที่มีผลต่อลักษณะเผาไหม้ของการจำลอง สำหรับเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือน ขนาด KB-5 | 47 |
| 4.4 อิทธิพลการเผาไหม้สำหรับหัวเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือน ขนาด KB-5 ในรูปแบบหัวเตาแก๊สหุงต้มทั่วไป (CB) และแบบหมุนวน (SB) | 53 |
| 4.5 อิทธิพลขนาดของมุมเอียง (α) รูทางออกของเบลว่าไฟที่มีผลต่อลักษณะ การเผาไหม้ของการจำลองสำหรับเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือน ขนาด KB-5 | 60 |
| 4.6 การเปรียบเทียบลักษณะการเผาไหม้ของรูปแบบการจำลองสำหรับเตาแก๊สหุงต้ม ที่มีขนาดมุมเอียง (β) เท่ากับ 26° และขนาดมุมเอียง (α) เท่ากับ 15° | 67 |

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

| | |
|--------------------|----|
| 5.1 สรุปผลการวิจัย | 75 |
| 5.2 ข้อเสนอแนะ | 77 |

เอกสารอ้างอิง

78

ภาคผนวก

| | |
|--|----|
| ก การคำนวณอัตราการป้อนเชื้อเพลิงและการแปลงปริมาณ mass fraction | 82 |
| ข การเปรียบเทียบปริมาณ mass fraction ของการจำลองและการทดลอง | 86 |
| ค บทความทางวิชาการ | 89 |

ประวัติผู้วิจัย

98

สารบัญตาราง

| ตารางที่ | หน้า |
|---|------|
| 2.1 ลักษณะของหัวเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือน ประเภทแรงดันต่ำ | 6 |
| 2.2 ลักษณะของเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือน ประเภทแรงดันสูง | 6 |
| 2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือน | 24 |
| 3.1 ข้อมูลของเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือน ประเภทแรงดันสูง ขนาด KB-5 | 30 |
| 3.2 ขอบเขตทางเข้า (Inlet) ของรูปแบบการจำลอง | 32 |
| 3.3 ขอบเขตผนัง (Wall Treatment) | 33 |
| 3.4 ขอบเขตรูปแบบการเผาไหม้ (Combustion Model) | 33 |
| 4.1 การเปรียบเทียบผลของการจำลองสำหรับเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือน ประเภทแรงดันสูง ขนาด KB-5 ที่ได้หลังจากการจำลองกับผลการทดลองจริง | 42 |
| 4.2 ขนาดรูทางออกของเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือนแบบทั่วไป (CB) | 48 |
| 4.3 อุณหภูมิสูงสุดของเบลวไฟฟ์ ที่ขนาดรูทางออกของเบลวไฟฟ์ (D_p) | 52 |
| 4.4 Contour อุณหภูมิสูงสุดของเบลวไฟฟ์ ที่ขนาดรูทางออกของเบลวไฟฟ์ (D_p) | 53 |
| 4.5 แบบจำลองของหัวเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือน ขนาด KB-5 | 54 |
| 4.6 อุณหภูมิสูงสุดของเบลวไฟฟ์ที่ได้หลังจากการเผาไหม้ของการจำลอง ที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิง เท่ากับ 9.48 kW (ที่ 0.5 bar) | 58 |
| 4.7 Contour อุณหภูมิสูงสุดของเบลวไฟฟ์ที่ได้หลังจากการเผาไหม้ของการจำลอง ที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิง เท่ากับ 9.48 kW (ที่ 0.5 bar) | 59 |
| 4.8 ลักษณะมุมเอียงรูทางออกของเบลวไฟฟ์ที่มีผลต่อลักษณะการเผาไหม้ | 60 |
| 4.9 อุณหภูมิสูงสุดของเบลวไฟฟ์ที่ได้หลังจากการเผาไหม้ของการจำลอง ที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิงและพีจี (LPG) เท่ากับ 9.48 kW (ที่ 0.5 bar) และที่มุมเอียง (α) เท่ากับ 10° , 15° , 20° และ 30° (ด้านข้าง) | 64 |
| 4.10 Contour ของอุณหภูมิสูงสุดของเบลวไฟฟ์ที่ได้หลังจากการเผาไหม้ของการจำลอง ที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิงและพีจี (LPG) เท่ากับ 9.48 kW (0.5 bar) และที่มุมเอียง (α) เท่ากับ 10° , 15° , 20° และ 30° (ด้านข้าง) | 65 |

สารบัญตาราง

| ตารางที่ | หน้า |
|--|------|
| 4.11 อุณหภูมิสูงสุดของเปลวไฟที่ได้หลังจากการเผาไหม้ของการจำลอง ที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิงแอลพีจี (LPG) เท่ากับ 9.48 kW (0.5 bar) และที่มุมเอียง (α) เท่ากับ $10^\circ, 15^\circ, 20^\circ$ และ 30° (ด้านบน) | 66 |
| 4.12 รูปแบบการจำลองสำหรับเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือน ขนาด KB-5 ที่มีลักษณะมุมเฉย (β) เท่ากับ 26° และมุมเอียง (α) เท่ากับ 15° | 67 |
| 4.13 อุณหภูมิสูงสุดของเปลวไฟ (Flame Temperature) ที่ได้หลังจากการเผาไหม้ ของการจำลองสำหรับเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือน ขนาด KB-5 ที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิง แอลพีจี (LPG) เท่ากับ 9.48 kW (ที่ 0.5 bar) (ด้านบน) | 73 |
| 4.14 อุณหภูมิสูงสุดของเปลวไฟ (Flame Temperature) ที่ได้หลังจากการเผาไหม้ ของการจำลองสำหรับเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือน ขนาด KB-5 ที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิง แอลพีจี (LPG) เท่ากับ 9.48 kW (0.5 bar) (ด้านข้าง) | 74 |
| ก.1 การแปลงหน่วยปริมาณ mass fraction (9.48 kW (ที่ 0.5 bar)) | 83 |
| ก.2 การแปลงหน่วยปริมาณ mass fraction (11.06 kW (ที่ 1.0 bar)) | 84 |
| ก.3 การแปลงหน่วยปริมาณ mass fraction (12.48 kW (ที่ 1.5 bar)) | 84 |
| ก.4 การแปลงหน่วยปริมาณ mass fraction (13.48 kW (ที่ 2.0 bar)) | 85 |

สารบัญภาพ

| ภาพที่ | หน้า |
|---|------|
| 2.1 โครงสร้างเตาหุงต้มในครัวเรือนที่ใช้แก๊สแอลพีจีเป็นเชื้อเพลิง [4] | 8 |
| 2.2 ปริมาตรควบคุมของของเหลวเพื่อความสามารถอนุรักษ์ (a) [13] | 10 |
| 2.3 ปริมาตรควบคุมของของเหลวเพื่อความสามารถอนุรักษ์ (b) [13] | 11 |
| 2.4 แผนผังแสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง [2] | 16 |
| 2.5 ชุดการทดลองของเตาด้านแบบประสิทธิภาพสูง PRRB [2] | 16 |
| 2.6 การปรับปรุงหัวเตาแก๊สหุงต้มแบบ SB [3] | 17 |
| 2.7 อุปกรณ์และการติดตั้งของการทดลอง [4] | 17 |
| 2.8 รูปแบบการทำงานของหัวเตาแก๊สหุงต้มร่วมกับ PRRB [5] | 18 |
| 2.9 ลักษณะของหัวเตาแก๊สหุงต้มที่ใช้ในการศึกษา [6] | 18 |
| 2.10 การทดสอบประสิทธิภาพเชิงความร้อนของหัวเตาแก๊สแรงดันต่ำ [7] | 19 |
| 2.11 แผนผังกระบวนการทดสอบปริมาณอากาศส่วนแรก (PA) [8] | 19 |
| 2.12 ทิศทางการให้ลมของอากาศที่ผสมกับเชื้อเพลิงภายในเตาแก๊สหุงต้ม [9] | 20 |
| 2.13 ขั้นตอน pre-processor โดยการเลือกพื้นที่และกำหนดเมช [10] | 21 |
| 2.14 อุณหภูมิเปลวไฟที่ได้จากการจำลอง [10] | 21 |
| 2.15 ตำแหน่งที่ต้องการศึกษาการถ่ายเทความร้อนของเตาไฟฟ้ากับภาชนะ [11] | 22 |
| 2.16 ทิศทางการให้ลมของการถ่ายเทความร้อนของเตาไฟฟ้า [11] | 22 |
| 2.17 การถ่ายเทความร้อนของเตาในเชิงพาณิชย์ [12] | 23 |
| 3.1 แผนผังระเบียบวิธีวิจัย | 28 |
| 3.2 หัวเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือนที่ใช้แอลพีจี (LPG) เป็นเชื้อเพลิง ในรูปแบบท่อไป (CB) | 30 |
| 3.3 บริเวณที่เลือกใช้ในการศึกษาของแบบจำลอง | 31 |
| 3.4 การสร้างเมช (Mesh generation) แบบสามเหลี่ยมสี่หน้า (Tetrahedrons) | 31 |
| 3.5 ปริมาณ mass fraction ของ CO | 34 |
| 3.6 ปริมาณ mass fraction ของ CO ₂ | 35 |
| 3.7 ปริมาณ mass fraction ของ O ₂ | 35 |
| 3.8 อุณหภูมิสูงสุดของเปลวไฟ | 35 |
| 3.9 หัวเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือน ประเภทแรงดันสูง ขนาด KB-5 | 36 |
| 3.10 ถังบรรจุแก๊สแอลพีจี (LPG) ขนาด 48 kg | 36 |

สารบัญภาพ (ต่อ)

| ภาพที่ | หน้า |
|--|------|
| 3.11 อุปกรณ์ควบคุมความดัน (Pressure Regulator) | 37 |
| 3.12 เครื่องวัดอัตราการไหลโดยปริมาตรของแก๊ส (Gas flow meter) | 37 |
| 3.13 อุปกรณ์วัดไอเสีย (hood) | 38 |
| 3.14 เครื่องวิเคราะห์ไอเสีย (Exhaust gas analyzer) | 38 |
| 3.15 อุปกรณ์บันทึกข้อมูล (Data Logger) | 39 |
| 3.16 นาฬิกาจับเวลาดิจิตอล | 39 |
| 3.17 ภาชนะ (หม้อ) ขนาดมาตรฐาน เบอร์ 45 | 40 |
| 3.18 เทอร์โมมิเตอร์ (Thermometer) | 40 |
| 4.1 การเพิ่มอัตราการป้อนเชื้อเพลิงแอลพีจี (LPG) ที่มีผลต่อ ปริมาณ mass fraction ของแก๊สออกซิเจน (O_2) | 44 |
| 4.2 การเพิ่มอัตราการป้อนเชื้อเพลิงของแอลพีจี (LPG) ที่มีผลต่อ ปริมาณ mass fraction ของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) | 45 |
| 4.3 การเพิ่มอัตราการป้อนเชื้อเพลิงแอลพีจี (LPG) ที่มีผลต่อ ปริมาณ mass fraction ของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) | 46 |
| 4.4 การเพิ่มอัตราการป้อนเชื้อเพลิงแอลพีจี (LPG) ที่มีผลต่ออุณหภูมิสูงสุดของเปลวไฟ | 47 |
| 4.5 เตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือนแบบทั่วไป (CB) (ด้านบน) | 48 |
| 4.6 เตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือนแบบทั่วไป (CB) (ด้านข้าง) | 48 |
| 4.7 ปริมาณ mass fraction ของแก๊สออกซิเจน (O_2) ที่มีขนาดรูทางออก ของเปลวไฟ (D_p) เท่ากับ 1.8, 2.0 และ 2.2 mm | 49 |
| 4.8 ปริมาณ mass fraction ของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ที่มีขนาดรูทางออกของเปลวไฟ (D_p) | 50 |
| 4.9 ปริมาณ mass fraction ของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ที่มีขนาดรูทางออกของเปลวไฟ (D_p) | 51 |
| 4.10 อุณหภูมิสูงสุดของเปลวไฟที่มีขนาดรูทางออกของเปลวไฟ (D_p) เท่ากับ 1.8, 2.0 และ 2.2 mm | 51 |
| 4.11 แบบจำลองของหัวเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือนแบบทั่วไป (CB) (A) | 54 |
| 4.12 แบบจำลองของหัวเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือนแบบหมุนวน (SB) (B) | 54 |
| 4.13 ขนาดของมุมเบย์ (β) เท่ากับ 55° ที่ใช้ในการศึกษา | 55 |

สารบัญภาพ (ต่อ)

| ภาพที่ | หน้า |
|---|------|
| 4.14 การเปรียบเทียบปริมาณ mass fraction ของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (O_2) สำหรับหัวเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือนแบบท่อไป (CB) และแบบหมุนวน (SB) | 55 |
| 4.15 การเปรียบเทียบปริมาณ mass fraction ของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO_2) สำหรับหัวเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือนแบบท่อไป (CB) และแบบหมุนวน (SB) | 56 |
| 4.16 การเปรียบเทียบปริมาณ mass fraction ของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) สำหรับหัวเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือนแบบท่อไป (CB) และแบบหมุนวน (SB) | 57 |
| 4.17 อุณหภูมิสูงสุดของเปลวไฟ (Flame Temperature) | 58 |
| 4.18 ค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อน (Thermal efficiency) | 59 |
| 4.19 ปริมาณ mass fraction ของแก๊สออกซิเจน (O_2) ที่ได้หลังจากการเผาไหม้ของรูปแบบการจำลอง | 61 |
| 4.20 ปริมาณ mass fraction ของแก๊สออกซิเจน (CO_2) ที่ได้หลังจากการเผาไหม้ของรูปแบบการจำลอง | 62 |
| 4.21 ปริมาณ mass fraction ของคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ที่ได้หลังจากการเผาไหม้ของรูปแบบการจำลอง | 63 |
| 4.22 ค่าอุณหภูมิของเปลวไฟสูงสุด (Flame Temperature) ที่ได้จากการศึกษาลักษณะของมุมอุ่ยของรูทางออกที่มีผลต่อลักษณะการเผาไหม้ | 63 |
| 4.23 เตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือนแบบหมุนวน (Swirl Burner) ขนาด KB-5 ที่มีขนาดมุมเบย์ (β) เท่ากับ 26° และขนาดมุมอุ่ย (α) เท่ากับ 15° | 68 |
| 4.24 เตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือนแบบหมุนวน (Swirl Burner) ขนาด KB-5 ที่มีขนาดมุมเบย์ (β) เท่ากับ 26° และขนาดมุมอุ่ย (α) เท่ากับ 15° (ด้านข้าง) | 68 |
| 4.25 ปริมาณ mass fraction ของแก๊สออกซิเจน (O_2) ที่ได้หลังการเผาไหม้สำหรับเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือน ขนาด KB-5 ที่มีขนาดมุมเบย์ (β) เท่ากับ 26° และขนาดมุมเบย์ (β) เท่ากับ 55° | 69 |
| 4.26 ปริมาณ mass fraction ของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ที่ได้หลังการเผาไหม้สำหรับเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือน ขนาด KB-5 ที่มีขนาดมุมเบย์ (β) เท่ากับ 26° และขนาดมุมเบย์ (β) เท่ากับ 55° | 70 |

สารบัญภาพ (ต่อ)

| ภาพที่ | หน้า |
|--|------|
| 4.27 ปริมาณ mass fraction ของแก๊สคาร์บอนออกไซด์ (CO) ที่ได้หลังการเผาไหม้ สำหรับเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือน ขนาด KB-5 ที่มีขนาดมุมเบย์ (β) เท่ากับ 26° และขนาดมุมเบย์ (β) เท่ากับ 55° | 71 |
| 4.28 อุณหภูมิสูงสุดของเปลวไฟ (Flame Temperature) ที่ได้หลังการเผาไหม้ สำหรับเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือน ขนาด KB-5 ที่มีขนาดมุมเบย์ (β) เท่ากับ 26° และขนาดมุมเบย์ (β) เท่ากับ 55° | 72 |

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

| สัญลักษณ์และอักษรย่อ | ความหมาย |
|--------------------------------|--|
| LPG | = แก๊สเชื้อเพลิงปิโตรเลียมเหลว (Liquefied Petroleum Gas) |
| CB | = รูปแบบเตาแก๊สหุงต้มแบบทั่วไป (Conventional Burner) |
| SB | = รูปแบบเตาแก๊สหุงต้มแบบหมุนวน (Swirl Burner) |
| CFD | = วิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics) |
| kW | = กิโลวัตต์ |
| mm | = มิลลิเมตร |
| mm ² | = ตารางมิลลิเมตร |
| KB-5 | = เตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือนที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ของหน้าตัด 5 นิ้ว |
| C ₃ H ₈ | = สารประกอบ propane (Propane) |
| C ₄ H ₁₀ | = สารประกอบบิวเทน (Butane) |
| CO | = แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (Carbon monoxide) |
| CO ₂ | = แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon dioxide) |
| O ₂ | = แก๊สออกซิเจน (Oxygen) |
| N ₂ | = ไนโตรเจน (Nitrogen) |
| H ₂ O | = น้ำ (Water) |
| D _n | = ขนาดรูทางออกของหัวฉีดเชื้อเพลิงแอลพีจี (LPG) |
| D _p | = ขนาดรูทางออกของหัวเตาแก๊สหุงต้ม |
| D | = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง |
| α | = มุมเอียง (Swirl Angle) |
| β | = มุมเบย (Inclination Angle) |
| A/F _{stoi} | = อัตราส่วนระหว่างอากาศต่อเชื้อเพลิงแอลพีจี ของการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ในทางทฤษฎี |
| η_{th} | = ประสิทธิภาพเชิงความร้อน |
| m_{water} | = มวลของน้ำ |
| $C_{p,water}$ | = ค่าความจุความร้อนของน้ำ |

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

สัญลักษณ์และอักษรย่อ

ความหมาย

| | | |
|---------------|---|--|
| $T_{water,i}$ | = | อุณหภูมิของน้ำเริ่มต้น |
| V | = | อัตราการไหเลเชิงปริมาตรของแก๊ส |
| LHV | = | ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง |
| t | = | เวลาที่ใช้ในการทดสอบ |
| Q_{fuel} | = | อัตราการป้อนเชื้อเพลิง |
| \dot{m} | = | อัตราการถ่ายโอนมวล |
| ρ | = | ความหนาแน่น |
| u | = | ความรีวแกน x |
| v | = | ความรีวแกน y |
| w | = | ความรีวแกน z |
| x | = | ระบบพิกัดแกน x |
| y | = | ระบบพิกัดแกน y |
| z | = | ระบบพิกัดแกน z |
| q''' | = | พลังงานที่เกิดจากปฏิกิริยาเคมีต่อหน่วยปริมาตรของไหเล |
| D_A | = | การถ่ายโอนมวล |
| \dot{W}''' | = | อัตราการเกิดปฏิกิริยาต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร |
| α | = | ค่าสภาพการแพร่กระจายความร้อนของวัสดุ |
| k | = | ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน |
| ρ | = | ความหนาแน่น |
| c | = | ค่าความจุความร้อนจำเพาะ |

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย

ปัจจุบันเชื้อเพลิงบีโตรเลียมเหลวหรือแก๊สแอลพีจี (LPG) ที่รู้จักกันโดยทั่วไป มีส่วนผสมของสารประกอบโพร์เพน (Propane) และ บีวเทน (Butane) ซึ่งมีคุณสมบัติที่ให้ค่าความร้อนสูงและเป็นเชื้อเพลิงที่ความสะอาด จึงเป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายทั้งภาคครัวเรือนและภาคอุตสาหกรรม จากข้อมูลสถิติปริมาณการใช้เชื้อเพลิงแอลพีจี (LPG) ภายในประเทศไทย สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน [1] ในปี พ.ศ. 2559 พบว่า สัดส่วนปริมาณการใช้เชื้อเพลิงแอลพีจี (LPG) มากที่สุด คือ ภาคครัวเรือน คิดเป็นร้อยละ 34 ของปริมาณการใช้เชื้อเพลิงทั้งหมดภายในประเทศไทย รองลงมา คือ ภาคบีโตรเคมี คิดเป็นร้อยละ 30, ภาคการขนส่ง คิดเป็นร้อยละ 24, ภาคอุตสาหกรรม คิดเป็นร้อยละ 9 และภาคอื่นๆ คิดเป็นร้อยละ 3 ตามลำดับ จากข้อมูลดังกล่าวจึงทราบได้ว่าปริมาณการใช้เชื้อเพลิงแอลพีจี (LPG) ในภาคครัวเรือนสูงที่สุด ดังนั้นควรหาแนวทางในการลดปริมาณการใช้เชื้อเพลิงและเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของเชื้อเพลิงแอลพีจี (LPG) ให้มากที่สุดเพื่อเป็นการประหยัดพลังงาน จากเชื้อเพลิงแอลพีจี (LPG) ที่ถูกนำมาใช้ในภาคครัวเรือนจำเป็นต้องทำงานร่วมกับเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือนเพื่อเป็นอุปกรณ์ในการเปลี่ยนค่าความร้อนของเชื้อเพลิงให้กลายเป็นความร้อนให้แก่ภาชนะหุงต้มในรูปแบบของเปลวไฟ โดยทั่วไปลักษณะของเปลวไฟที่ให้ความร้อนแก่ภาชนะหุงต้มมีลักษณะเปิดสู่บรรยากาศ จึงทำให้เกิดการสูญเสียความร้อนเป็นจำนวนมาก อีกทั้งไม่สามารถนำความร้อนมาใช้ประโยชน์ได้อย่างเต็มที่เนื่องจากการถ่ายเทความร้อนถูกจำกัดโดยการพากความร้อนซึ่งมีผลต่อปริมาณการใช้งานของเชื้อเพลิงและส่งผลให้ค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนต่ำ จึงได้มีการศึกษาที่เกี่ยวข้องกับการเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือนอย่างแพร่หลาย สามารถแบ่งออกได้ 4 ประเภท คือ ประเภทที่หนึ่ง การนำเทคโนโลยีวัสดุพรุนเข้ามาประยุกต์ใช้เข้ากับเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือน ณัฐวุฒิ รังสิมันตุชาติ [2] โดยหน้าที่ของวัสดุพรุน คือ เป็นหัวตัวรับและแผ่รังสีความร้อน จึงสามารถช่วยเพิ่มอุณหภูมิของการเผาไหม้และส่งผลถึงการเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อนได้ ต่อมา ประเภทที่สอง ได้ทำการศึกษาลักษณะรูทางออกของหัวเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือน โดยเปลี่ยนหัวเตาแก๊สหุงต้มแบบทั่วไป (Conventional Burner, CB) มาเป็นหัวเตาแก๊สหุงต้มแบบหมุนวน (Swirl Burner, SB) A. Tamir, R. Elperin, and S. Yotzer [3] พบว่า ลักษณะการปรับปรุงรูทางออกของหัวเตาแก๊สหุงต้มที่มีมุมเบี่ยง (β) เท่ากับ 26 องศา มุมเอียง (α) เท่ากับ 15 องศา ให้ค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงขึ้นจากเดิมร้อยละ 6 วัสันต์ โยคเสนะกุล [4]

ได้นำหลักการเดียวกันมาประยุกต์เข้ากับเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือน ขนาด KB-10 ทำงานร่วมกับ PRRB และภาชนะกันแบบ พบว่า ประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงสุดของภาชนะกันแบบ (หม้อ) คิดเป็นร้อยละ 45.02 และภาชนะกันโถง คิดเป็นร้อยละ 44.27 ในปีถัดมา จารุณี จำกกลาง [5] ได้นำหลักการนำหลักการเดียวกันมาพัฒนาเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือน ขนาด KB-5 ทำงานร่วมกับภาชนะ (หม้อและกระทะ) พบว่า ค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนของภาชนะ (หม้อ) ให้ค่าสูงกว่าภาชนะ (กระทะ) มีค่าเท่ากับร้อยละ 20 ประเภทที่สาม ได้ทำการศึกษาและพัฒนาโดยมุ่งเน้นถึงสมรรถนะของหัวเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือน U. Makmool et al. [6] ทำการทดสอบประสิทธิภาพเชิงความร้อนของหัวเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือนประเภทแรงดันต่ำ ($<5.78 \text{ kW}$) ภายในประเทศไทย เปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการทดสอบด้วยวิธี PIV พบว่า ค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนและไอเสียจากแก๊สที่ได้จากหัวเตามีความสอดคล้องกับทิศทางความเร็วที่ได้จากการทดสอบ อนิรุตต์ มัธรุจักร และ จรินทร์ เจนจิตต์ [7] ได้ทำการศึกษาและรวบรวมวิธีการเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือนประเภทแรงดันต่ำ ($<5.78 \text{ kW}$) พบว่า ค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนที่ของเตาแก๊สหุงต้มที่ใช้ในการศึกษาให้ค่าไม่เกินร้อยละ 50 จึงได้ทำการปรับปรุงด้วยวิธีด้วยการลดการสูญเสียความร้อน การอุ่นอากาศและการปรับปรุงลักษณะของหัวฉีด พบว่า วิธีดังกล่าวสามารถช่วยเพิ่มค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาแก๊สหุงต้มที่ใช้ในการศึกษาเพิ่มสูงขึ้นจากเดิมเท่ากับร้อยละ 15, 11 และ 6 ตามลำดับ A. Namkhat and S. Jugjai [8] ได้ศึกษาคุณลักษณะของการเหนี่ยวนำอากาศ ส่วนแรก (Primary aeration, PA) ของเตาแก๊สหุงต้มในรูปแบบ Self-Aspirating ประเภทแรงดันสูง ($>5.78 \text{ kW}$) ด้วยวิธีการทดลองแบบ Hot test และ Cold test ทำการตรวจวัดการเหนี่ยวนำของอากาศโดยใช้ Oxygen sensor และ PIV เปรียบเทียบผลการทดลองกับแบบจำลองเชิงทฤษฎี โดยมีเมนตัมและหลักการอนุรักษ์พลังงาน พบว่า ผลการทดลองกับแบบจำลองเชิงทฤษฎีมีค่าใกล้เคียงกัน แต่เนื่องจากปริมาณอากาศส่วนแรกขึ้นอยู่กับอัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิง มิติของหัวฉีด, มิติของท่อผสานและมิติของหัวเผา ดังนั้นผลที่ได้จากการทดลองแบบ Hot test จึงต่ำกว่าแบบ Cold test ร้อยละ 22 ต่อมาก ประเภทสุดท้าย การศึกษาด้วยวิธีพลศาสตร์ของไฟลเซิงคำนวน (CFD) ประยุกต์เข้ากับเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือน ณรงค์ศักดิ์ ปิยะไพรและคณะ [9] จึงได้ศึกษาคุณลักษณะการไฟลผสาน กันระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศสำหรับหัวเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือนประยุกต์เข้ากับเตาแก๊สหุงต้ม ในครัวเรือน ประเภทแรงดันสูง ($>5.78 \text{ kW}$) ขนาด KB-5 ด้วยวิธีพลศาสตร์ของไฟลเซิงคำนวน (CFD) ในรูปแบบการไฟลปั่นป่วน $k - \epsilon$ ชนิด RNG คำนวณร่วมกับแบบจำลอง species transport แบบไม่มีปฏิกิริยาการเผาไหม้ เปรียบเทียบกับทฤษฎีพบว่าผลที่ได้จากการจำลองมีความคาดเคลื่อนของค่าปริมาณอากาศส่วนแรก (PA) คิดเป็นร้อยละ 8.33, 6.07 และ 4.21. P. Boggavarapu, B. Ray, and R.V. Ravikrishna [10] ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพของเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือนประเภทแรงดันต่ำ ($<5.78 \text{ kW}$) ที่มีข่ายในประเทศไทยเดียว โดยใช้เชื้อเพลิงแล็ปเจ็ส (LPG) และพีเอ็นจี (PNG) ด้วย

วิธีพลาสต์ของไอลเชิงคำนวนและทำการทดสอบความนำเข้าอีของแบบจำลองกับผลการทดลอง หลังจากนั้นจึงทำการศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อนของแบบจำลองเตาแก๊สหุงต้มดังกล่าว โดยการปรับเปลี่ยนรูปแบบหัวเตาแก๊สและความสูงระหว่างกันภายนะกับหัวเตาในแบบจำลอง พบร่วมจากการปรับเปลี่ยนรูปแบบหัวเตาแก๊สและความสูงระหว่างกันภายนะกับหัวเตาในแบบจำลอง พบร่วม ประสิทธิภาพเชิงความร้อนที่ได้จากการศึกษาของแบบจำลองของเชื้อเพลิงแอลพีจี (LPG) เพิ่มสูงขึ้น ร้อยละ 2.5 และเชื้อเพลิงพีเอ็นจี (PNG) เพิ่มสูงขึ้นร้อยละ 10 เมื่อเทียบกับแบบจำลองหัวเตาแก๊สหุงต้มก่อนปรับปรุง J. Francisco et al. [11] ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพเชิงความร้อนของภายนะบนเตาไฟฟ้าด้วยวิธีพลาสต์ของไอลเชิงคำนวน (CFD) โดยทำการเปรียบเทียบผลการจำลองกับการทดลอง พบร่วม ผลการจำลองที่ได้จากการศึกษามีค่าความคลาดเคลื่อนกับผลที่ได้จากการทดลอง ไม่เกินร้อยละ 15 V. Hindasageri et al. [12] ได้ทำการศึกษาการถ่ายเทความร้อนของเปลวไฟ สำหรับหัวเตาที่มีรูพรุนด้วยวิธีการทดลองและการจำลองและใช้มีเนนสมกับอากาศในรูปแบบ Premixed เป็นเชื้อเพลิง พบร่วม ผลจากการทดลองให้ค่าเฉลี่ยของพลังค์ความร้อน (Heat flux) ที่มี บริเวณพื้นที่ 250 mm^2 และระยะพิท เท่ากับ 7 mm สอดคล้องกับผลการจำลอง อีกทั้งรูปแบบการจำลองยังสามารถอธิบายถึงค่าพลังค์ความร้อนได้ชัดเจน

จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่ามีการศึกษาที่เกี่ยวข้องกับเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือนหลากหลายรูปแบบเพื่อการเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อน แต่เนื่องจากผลที่ได้จากการทดลองที่ผ่านมาไม่สามารถอธิบายคุณลักษณะการเผาไหม้ได้อย่างชัดเจน เช่น อิทธิพลของความดันของการปล่อยแก๊สเชื้อเพลิง แอลพีจี (LPG) ปริมาณของ mass fraction ของไอเสียที่ได้จากการเผาไหม้และอุณหภูมิของเปลวไฟ ดังนั้นจึงเป็นที่มาของงานวิจัยนี้โดยการนำวิธีพลาสต์ของไอลเชิงคำนวน (CFD) เข้ามาประยุกต์ใช้ในการศึกษาคุณลักษณะการเผาไหม้ที่มีผลต่อประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือน ขนาด KB-5

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาลักษณะการเผาไหม้ระหว่างเชื้อเพลิงแอลพีจี (LPG) กับอากาศสำหรับเตาก๊าซหุงต้มในครัวเรือน ขนาด KB-5 โดยวิธีพลาสต์ของไอลเชิงคำนวน (CFD)

1.2.2 เพื่อศึกษาและอธิบายอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อลักษณะการเผาไหม้

1.3 ขอบเขตการศึกษาของงานวิจัย

1.3.1 เลือกใช้เตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือน ขนาด KB-5 ตามมาตรฐาน มอก. 2312-2549 ที่มีขนาดฐานรองหัวฉีด (D_n) เท่ากับ 0.9 mm

1.3.2 สร้างแบบจำลองหัวเตาแก๊สหุงต้มในรูปแบบ 3 มิติ เท่ากับขนาดจริง

- 1.3.3 รูปแบบการจำลองมีอัตราส่วนผสมของสารประกอบเชื้อเพลิงและพีจี (LPG) ระหว่างไฟฟ้าและบิวเทน คือ ร้อยละ 60 : 40 โดยปริมาตร
- 1.3.4 ขนาดของมุมเบน (Inclination Angle, β) เท่ากับ 26° และ 55°
- 1.3.5 ประเภทของหัวเตาแก๊สหุงต้มที่ใช้ในการศึกษา ได้แก่ หัวเตาแก๊สหุงต้มแบบหัวไป (Conventional Burner, CB) และ หัวเตาแก๊สหุงต้มแบบหมุนวน (Swirl Burner, SB)
- 1.3.6 ตัวแปรสำหรับการศึกษา ได้แก่
- 1.3.6.1 อัตราการป้อนเชื้อเพลิงและพีจี (LPG) เท่ากับ 9.48 kW (ที่ 0.5 bar), 11.06 kW (ที่ 1.0 bar), 12.48 kW (1.5 bar) และ 13.43 kW (2.0 bar)
 - 1.3.6.2 ขนาดรูทางออกของหัวเตา (D_p) เท่ากับ 1.8, 2.0 และ 2.2 mm
 - 1.3.6.3 ขนาดของมุมเอียง (Swirl Angle, α) เท่ากับ 10° , 15° , 20° และ 30°
- 1.3.7 ศึกษาลักษณะการเผาไหม้ ได้แก่ ปริมาณ mass fraction ของแก๊สไอเสียที่ได้หลังจาก การเผาไหม้ อุณหภูมิของเปลวไฟที่มีผลต่อลักษณะของการเผาไหม้ระหว่างอากาศและแก๊สเชื้อเพลิง และพีจี (LPG)

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ

- 1.4.1 ทราบถึงพฤติกรรมการเผาไหม้ระหว่างอากาศและก๊าซเชื้อเพลิงและพีจี (LPG) ของเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือน ขนาด KB-5 ด้วยวิธีพลศาสตร์ของไฟลเซิงคำนวณ (CFD)
- 1.4.2 ทราบถึงลักษณะที่การเผาไหม้ที่มีผลต่อประสิทธิภาพเชิงความร้อน
- 1.4.3 เป็นแนวทางในการพัฒนาและปรับปรุงประสิทธิภาพของหัวเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือน ต่อไป

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 แก๊สบีโตรเลียมเหลว

เชื้อเพลิงบีโตรเลียมเหลวหรือแก๊สแอลพีจี (Liquefied Petroleum Gas, LPG) ที่เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการหมักประเทกหนึ่ง โดยมีสารประกอบหลักที่สำคัญ 2 ชนิด ได้แก่ โพรเพน (Propane) และบิวเทน (Butane) ซึ่งมีคุณสมบัติพิเศษ คือ ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น ให้ค่าความร้อนสูง เป็นเชื้อเพลิงที่ความสะอาด ดังนั้นจึงเป็นที่นิยมนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายทั้งด้านอุตสาหกรรม พานิชย์ และในครัวเรือน

2.2 การจำแนกเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือน

เชื้อเพลิงแอลพีจี (LPG) จำเป็นต้องทำงานร่วมกับเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือน สามารถแบ่งได้ 2 ประเภท คือ เตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือนประเภทแรงดันต่ำและแรงดันสูง

2.2.1 ประเภทเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือน ประเภทแรงดันต่ำ (ที่มีอัตราการป้อนเชื้อเพลิงไม่เกิน 5.78 kW)

โดยลักษณะของเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือนประเภทแรงดันต่ำที่สามารถเห็นได้ตามบ้านเรือนเป็นเตาแก๊สหุงต้มระบบอัตโนมัติที่มีลูกบิดเอาไว้เปิดและปิด ทำการปรับระดับของเบลว่าไฟเพื่อจ่ายต่อการใช้งาน เตาแก๊สหุงต้มประเภทนี้ได้ถูกออกแบบมาเพื่อไว้ใช้งานสำหรับในครัวเรือน มีความปลอดภัยสูง อายุการใช้งานที่ยาวนานและประหยัดปริมาณการใช้เชื้อเพลิงได้อีกด้วย จึงสามารถแบ่งลักษณะของหัวเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือน ประเภทแรงดันต่ำ ได้ 3 ลักษณะ คือ หัวเตาแก๊สแบบเตาทองเหลือง, แบบเตาอินฟารेडและแบบเตาแก๊สเทอร์โบ ดังตารางที่ 2.1

2.2.2 ประเภทเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือน ประเภทแรงดันสูง (ที่มีอัตราการป้อนเชื้อเพลิงมากกว่า 5.78 kW)

เตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือนประเภทแรงดันสูงที่สามารถพบได้ตามอุตสาหกรรมขนาดเล็ก ภัตตาคาร และร้านอาหารทั่วไป มีลักษณะการใช้งานสำหรับประกอบอาหารประเภทหนักที่จำเป็นต้องใช้เบลว่าไฟที่มีแรงดันสูง ปรับเร่งเบลว่าไฟได้ง่ายและให้ความร้อนแก่การประกอบอาหารอย่างรวดเร็ว ใหม่ สามารถแบ่งออกได้หลากหลายรูปแบบ ได้แก่ เตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือน ประเภทแรงดันสูง ขนาด KB-5, KB-7, KB-8 และ KB-10 ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.1 ลักษณะของหัวเตาแก๊สหุ้งต้มในครัวเรือน ประเภทแรงดันต่ำ

| รูปแบบ | ลักษณะของหัวเตาแก๊สหุ้งต้มแรงดันต่ำ |
|--------------------|-------------------------------------|
| แบบหัวเตาทองเหลือง | |
| แบบหัวเตาอินฟารेड | |
| แบบหัวเตาเทอร์โบ | |

ตารางที่ 2.2 ลักษณะของเตาแก๊สหุ้งต้มในครัวเรือน ประเภทแรงดันสูง

| ประเภทเตาแก๊สหุ้งต้มแรงดันสูง | ขนาดของหัวเตาแก๊สหุ้งต้มแรงดันสูง |
|--|-----------------------------------|
| ขนาด KB-5 ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางพื้นที่หน้าตัดของหัวเตา แก๊สหุ้งต้มในครัวเรือน 5 นิว | |

ตารางที่ 2.2 ลักษณะของเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือน ประเภทแรงดันสูง (ต่อ)

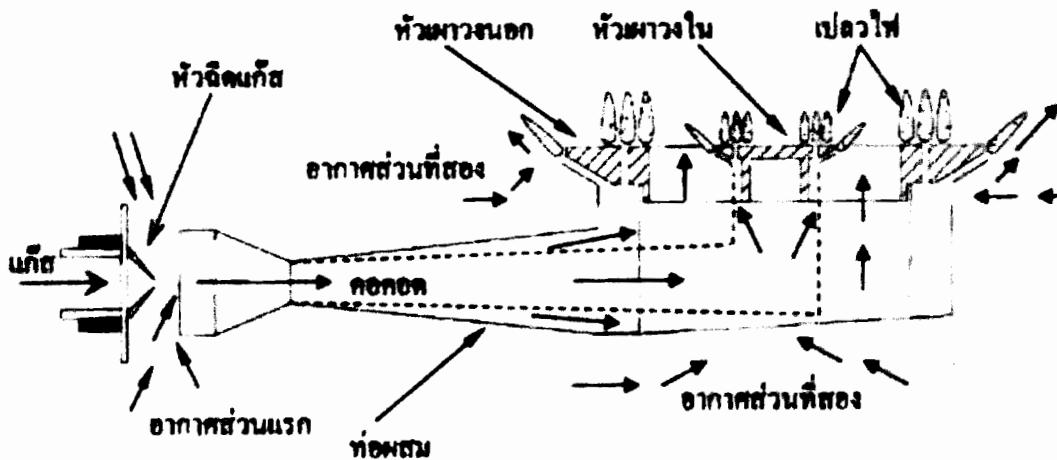
| ประเภทเตาแก๊สหุงต้มแรงดันสูง | ขนาดของหัวเตาแก๊สหุงต้มแรงดันสูง |
|--|----------------------------------|
| ขนาด KB-7 ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางพื้นที่หน้าตัดของหัวเตา แก๊สหุงต้มในครัวเรือน 7 นิ้ว | |
| ขนาด KB-8 ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางพื้นที่หน้าตัดของหัวเตา แก๊สหุงต้มในครัวเรือน 8 นิ้ว | |
| ขนาด KB-10 ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางพื้นที่หน้าตัดของหัวเตา แก๊สหุงต้มในครัวเรือน 10 นิ้ว | |

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการเลือกศึกษาเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือน ประเภทแรงดันสูง ขนาด KB-5 ที่มีการใช้งานกันอย่างแพร่หลายทั่วไปภาครุตสาหกรรมเล็กและภาคครัวเรือน อีกทั้งสามารถเคลื่อนย้ายได้ง่าย มีน้ำหนักเบา

2.3 โครงสร้างและการทำงานของเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือน ประเภทแรงดันสูง ขนาด KB-5

ลักษณะโครงสร้างเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือน ประเภทแรงดันสูงขนาด KB-5 ที่ใช้ในการศึกษาพบว่า มีส่วนประกอบหลักที่สำคัญ 3 ส่วน [5] คือ ท่อผสม (Mixing tube), พอร์ตหัวเตา (Burner Head หรือ Cap) และหัวฉีดแก๊สเชื้อเพลิง (Nozzle) ที่มีขนาดต่างๆ ซึ่งลักษณะเตาแก๊สหุงต้มประเภทนี้ได้ถูกสร้างขึ้นจากเหล็กหล่อที่สามารถทนความร้อนได้เป็นอย่างดีและได้มีการออกแบบลดขนาดของ

พื้นที่หน้าตัดให้มีลักษณะเป็นคอกออด (Throat) บริเวณทางเข้าของแก๊สเชื้อเพลิงกับอากาศส่วนแรก เพื่อเป็นการเพิ่มความเร็วระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศผสมเข้าด้วยกัน



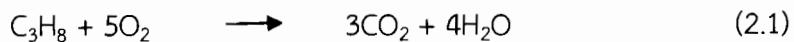
ภาพที่ 2.1 โครงสร้างเดาหุ่งต้มในครัวเรือนที่ใช้แก๊สแอลพีจีเป็นเชื้อเพลิง [4]

การทำงานของเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือนประเภทแรงดันสูง โดยทั่วไปใช้เพลิงแอลพีจี (LPG) ให้ผลผ่านรูหัวฉีดแก๊สเชื้อเพลิงที่มีความเร็วสูง จึงเกิดการเหนี่ยวนำอากาศส่วนแรกมาผสานกันในบริเวณท่อผสม (Mixing tube) และจึงเกิดการเผาไหม้บริเวณพอร์ตทางออกของหัวเตาแก๊สหุงต้มที่มีการเหนี่ยวนำอากาศส่วนที่สอง

2.4 ปริมาณอากาศต่อเข็มเพลิงของการเผาไหม้ที่แบบสมบูรณ์ทางทฤษฎี (Stoichiometry)

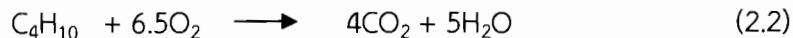
ปริมาณแก๊สออกซิเจนที่ผสมอยู่ในอากาศโดยทั่วไป เท่ากับ 21% โดยปริมาตร (23% โดยมวล) ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญสำหรับการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ จากกรณีแก๊สเชื้อเพลิงเหลวพีจี (LPG) ทำปฏิกิริยา กับอากาศแล้วจะจึงเกิดการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ สามารถเขียนสมการเคมีสูตรสำเร็จของระบบ CHON- เชื้อเพลิง-อากาศได้ [13]

สมการเคมีการเผาไหม้ของสารประกอบโพรเพน (Propane) คือ



| | | |
|--|---|----------------|
| จากสมการเผาไหม้ของสารประภูมิบิน (C ₃ H ₈) | 1 | หน่วย |
| มีความต้องการปริมาตรของออกซิเจนในการเผาไหม้ | 5 | หน่วย |
| ดังนั้น (C ₃ H ₈) 1 m ³ ต้องการ ออกซิเจนที่ใช้ในการเผาไหม้ | 5 | m ³ |

ปริมาตรอากาศของการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ เท่ากับ 5/21% เท่ากับ 23.81 m^3
สมการเคมีการเผาไหม้ของสารประกอบบิวเทน (Butane) คือ



จากสมการเผาไหม้ของสารประกอบบิวเทน (C_4H_{10}) 1 หน่วย

มีความต้องการปริมาตรของ ออกซิเจนในการเผาไหม้ 6.5 หน่วย

ดังนั้น (C_4H_{10}) 1 m^3 ต้องการออกซิเจนที่ใช้ในการเผาไหม้ เท่ากับ 6.5 m^3

จากสมการการเผาไหม้ของสารประกอบโพรเพน (Propane) และสารประกอบบิวเทน (Butane)
ดังกล่าว พบร้า สารประกอบโพรเพน (Propane) และสารประกอบบิวเทน (Butane) ที่มีความ
ต้องการปริมาณอากาศที่จำเป็นต่อเผาไหม้ที่สมบูรณ์ มีค่าเท่ากับ 5 เท่า และ 6.5 เท่าของ
สารประกอบ ดังนั้นจากการณ์เชื้อเพลิงแอลพีจี (LPG) ได้มีสารประกอบโพรเพน (C_3H_8) 60% โดย
ปริมาตร และบิวเทน (C_4H_{10}) 40% โดยปริมาตร ทำปฏิกิริยากับอากาศแล้วจึงเกิดการเผาไหม้ ดังนี้

**2.4.1 สมการเคมีการเผาไหม้ของโพรเพน (C_3H_8) เท่ากับร้อยละ 60 และ บิวเทน (C_4H_{10})
เท่ากับร้อยละ 40% โดยปริมาตร (by volume) คือ**



ในเชื้อเพลิงแอลพีจี 1 m^3 มีความต้องการออกซิเจน (O_2) เท่ากับ 5.6 m^3
ดังนั้น อัตราส่วนระหว่างอากาศต่อเชื้อเพลิงแอลพีจีของการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ในทาง
ทฤษฎี (A/F_{sto}) เท่ากับ $26.67/1$

**2.4.2 สมการเคมีการเผาไหม้ของโพรเพน (C_3H_8) เท่ากับร้อยละ 60 และบิวเทน (C_4H_{10})
เท่ากับร้อยละ 40 โดยมวล (by mass) คือ**



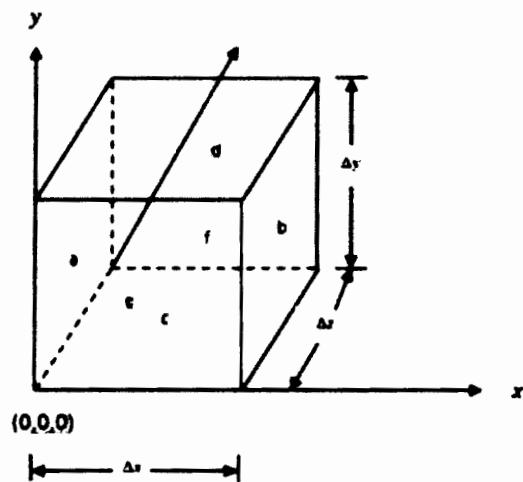
ในเชื้อเพลิงแอลพีจี 1 m^3 มีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย เท่ากับ 0.0496 kg .

จึงทราบได้ว่าปริมาณของอากาศ เท่ากับ 0.818 kg . ดังนั้น อัตราส่วนระหว่างอากาศต่อ เชื้อเพลิงแอลพีจีของการเผาไหม้ที่แบบสมบูรณ์ในทางทฤษฎี (A/F_{stoi}) เท่ากับ 15.48 โดยมวล

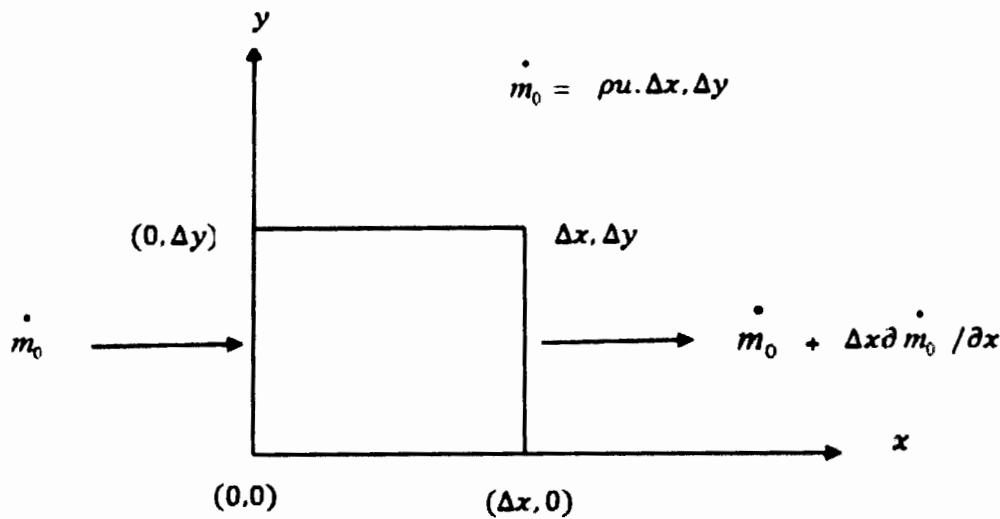
2.5 สมการที่ใช้ในการศึกษา

โดยทั่วไปสมการที่เกี่ยวข้องในการแก้ปัญหาการไหลของของไหลจะประกอบด้วย สมการอนุรักษ์มวล สมการอนุรักษ์โมเมนตัมหรือสมการการเคลื่อนที่ สมการอนุรักษ์พลังงาน ในกรณีที่เป็นปัญหาการไหลที่เกิดการเผาไหม้จะต้องใช้สมการที่เกี่ยวข้องเพิ่มเติม เช่น สมการอนุรักษ์มวลย่อย (Chemical species' equation) และสมการปฏิกิริยาเคมี (Chemical reaction equation) ร่วมในการคำนวณ [13]

2.5.1 สมการอนุรักษ์มวล



ภาพที่ 2.2. ปริมาตรควบคุมของของไหลเพื่อหาสมการอนุรักษ์ (a) [13]



ภาพที่ 2.3 ปริมาตรควบคุมของของไหลเพื่อหาสมการอนุรักษ์ (b) [13]

จากปริมาตรควบคุมขนาด $\Delta x, \Delta y$ และ Δz ดังรูปที่ 2.2 โดยการกำหนดให้ค่า u, v และ w คือความเร็วการไหลตามแนวแกน x, y และ z ตามลำดับ สมมติให้ผลคูณ $\Delta x, \Delta y$ ของปริมาตรควบคุมมีค่าเท่ากับหนึ่ง ซึ่งหมายถึงพื้นที่ของด้าน a และ b ซึ่งตั้งฉากกับแกน x c และ d คือพื้นที่ของปริมาตรที่ตั้งฉากกับแกน y ขณะที่ e และ f คือพื้นที่ของปริมาตรควบคุมที่ตั้งฉากกับแกน z เนื่องจากการไหลเกิดขึ้นในทิศทางทั้งสามแกนหรือสามมิติ ดังนั้นเพื่อเป็นการสะดวกจะทำการพิจารณาการไหลในหนึ่งมิติก่อน โดยเริ่มจากแกน x ก่อน ดังภาพที่ 2.2 (b)

ปริมาณการไหลที่เข้าปริมาตรควบคุมที่ผิว a ที่ $x = 0$

$$\dot{m}_0 = \rho u \cdot \Delta y \cdot \Delta z = \rho u \quad (2.7)$$

ปริมาณการไหลที่เข้าปริมาตรควบคุมที่ผิว b ที่ $x = 0$

$$\dot{m}_0 - \dot{m}_{\Delta x} = -\Delta x \cdot \frac{\partial \dot{m}_0}{\partial x} \quad (2.8)$$

เมื่อมีการเพิ่มอัตราการเพิ่มขึ้นของความหนาแน่นในปริมาตรควบคุม มีค่าเท่ากับ

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} \cdot \Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z = \frac{\partial \rho}{\partial t} \Delta x \quad (2.9)$$

ดังนั้นจะได้ว่า

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u}{\partial x} = 0 \quad (2.10)$$

หากในกรณีการไหลแบบสามมิติได้

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u}{\partial x} + \frac{\partial \rho v}{\partial y} + \frac{\partial \rho w}{\partial z} = 0 \quad (2.11)$$

หากในกรณีไหลอยู่ในสภาวะคงที่ $\frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$

$$\frac{\partial \rho u}{\partial x} + \frac{\partial \rho v}{\partial y} + \frac{\partial \rho w}{\partial z} = 0 \quad (2.12)$$

2.5.2 สมการอนุรักษ์โมเมนตัม

สมการอนุรักษ์โมเมนตัม คือการสมดุลแรงทั้งหมดที่กระทำต่อปริมาตรควบคุม ดังภาพที่ 2.2 (b) ซึ่งมีค่าเท่ากับอัตราการเปลี่ยนแปลงของโมเมนตัมที่เป็นไปตามกฎข้อที่สองของนิวตัน (Newton's law of motion) ดังสมการที่ 2.13

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho v \frac{\partial u}{\partial y} + \rho w \frac{\partial u}{\partial z} = - \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \quad (2.13)$$

อย่างไรก็ตาม ถ้าการไหลอยู่ในสภาวะคงที่ $\left(\frac{\partial u}{\partial t} = 0 \right)$ อัตราการเร่งของของไหลจะมีค่าเท่ากับศูนย์จึงทำให้ผลรวมของแรงมีค่าเป็นศูนย์

2.5.3 สมการอนุรักษ์พลังงาน

สมการอนุรักษ์พลังงานที่เกี่ยวข้องกับปัญหาที่ทำการวิเคราะห์จะประกอบไปด้วย สมการอนุรักษ์พลังงานสำหรับของไหลที่มีการเผาไหม้และถ่ายเทความร้อนไปยังของไหลที่อยู่บริเวณด้านล่างของก้นภาชนะ และสมการอนุรักษ์พลังงานสำหรับการถ่ายเทความร้อนจากด้านนอกของก้นภาชนะไปยังด้านในของก้นภาชนะ สมการอนุรักษ์พลังงานสำหรับของไหลที่มีการเผาไหม้นั้นใช้หลักการดุลสมการของพลังงานที่เข้าและออกจากรูปร่างของของไหลแสดงในภาพที่ 2.2 (b) เนื่องจากการเผาไหม้ที่เกิดขึ้น ดังนั้นความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้มีเพียงเกิดการนำและการพาความร้อนแต่ยัง

เกิดปฏิกิริยาเคมี นอกจากนี้ยังมีการแพร่งสีและความร้อนจากการเสียดทานแต่ในที่นี้จะไม่นำมาคิดเพื่อเป็นการลดความยุ่งยาก ดังนั้นปริมาตรของของไหลอยู่ที่สภาวะคงที่จะได้ว่าผลรวมของพลังงานเคลื่อนที่เข้าและออกเท่ากับศูนย์ ดังนี้

สมการอนุรักษ์พลังงานสำหรับการไหลที่มีการเผาไหม้ม้าเกี่ยวข้องในระบบพิกัด 3 มิติ ($x-y-z$) จึงสามารถเขียนให้อยู่ในรูปดังสมการที่ 2.14

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + q'' \quad (2.14)$$

ในกรณีภาวะคงที่ $\frac{\partial T}{\partial t} = 0$ จะได้สมการอนุรักษ์พลังงาน ตามสมการที่ (2.14)

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + q'' \quad (2.15)$$

เมื่อ $q'' = \dot{W}_A \Delta H =$ พลังงานที่เกิดจากปฏิกิริยาเคมีต่อหน่วยปริมาตรของไหล
 $\alpha = \frac{k}{\rho c}$ ค่าสภาพการแพร่กระจายความร้อนของวัสดุ

จากสมการที่ (2.15) จะเห็นได้ว่าค่าตัวแปรที่มือทิพลต่อการถ่ายเทพลังงานในของไหล ประกอบด้วยหลายตัวแปรด้วยกัน เช่น ความเร็วของของไหล ผลต่างอุณหภูมิภายในก้อนของไหล เป็นต้น

สำหรับสมการอนุรักษ์พลังงานในการถ่ายเทความร้อนผ่านผนังภาชนะที่เป็นของแข็งซึ่งเป็นปัญหาเกี่ยวกับการนำความร้อน ใช้สมการต่อไปนี้

$$\frac{q''}{k} = - \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.16)$$

เมื่อ $\alpha = \frac{k}{\rho c}$

α คือ ค่าสภาพการแพร่กระจายความร้อนของวัสดุ

k คือ ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน

ρ คือ ความหนาแน่น

c คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะ

2.5.4 สมการอนุรักษ์มวลย่อย

เนื่องจากการถ่ายเทพลังงานและการถ่ายโอนมวลที่มีความคล้ายกัน ดังนั้นด้วยวิธีการเดียวกันกับการหาสมการอนุรักษ์พลังงาน สมการอนุรักษ์มวลย่อย (chemical species) ดังสมการที่ 2.17

$$\rho u \frac{\partial Y_A}{\partial x} + \rho v \frac{\partial Y_A}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} \rho D_A \frac{\partial Y_A}{\partial y} + \dot{W}_A \quad (2.17)$$

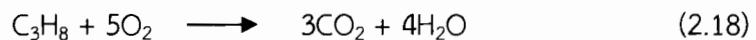
เมื่อ Y_A คือ เศษส่วนมวล

\dot{W}_A คือ พลักษ์มวล

2.5.5 สมการปฏิกิริยาการเผาไหม้

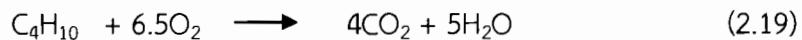
รูปแบบปฏิกิริยาเคมีสำหรับการเผาไหม้ที่มีสารประกอบของโพรเพน (Propane) และสารประกอบบิวเทน (Butane) ดังต่อไปนี้

สารประกอบโพรเพน (Propane)



$$R_i = \frac{d[C_3H_8]}{dt} = -8.6 \times 10^{11} \exp\left[\frac{-30}{R_u T}\right] [C_3H_8]^{0.1} [O_2]^{1.65}$$

สารประกอบบิวเทน (Butane)



$$R_i = \frac{d[C_4H_{10}]}{dt} = -7.4 \times 10^{11} \exp\left[\frac{-30}{R_u T}\right] [C_4H_{10}]^{0.15} [O_2]^{1.60}$$

2.6 แบบจำลองความปั่นป่วนที่ใช้ในการศึกษา

แบบจำลองความปั่นป่วนที่ใช้ในการศึกษา คือ แบบจำลองนี้สร้างจากเทคนิคที่เรียกว่า Renormalization group theory เมื่อเทียบกับแบบจำลองความปั่นป่วน Standard $k-\varepsilon$ พบว่า

เทอมของ ε จะทำให้ค่าของความถูกต้องและแม่นยำสูงกว่าสำหรับกรณีการไหลแบบ Rapidly stained flows แบบจำลองนี้ได้รวมอิทธิพลของการหมุนวนจากการไหลแบบปั่นป่วนเข้าไปพิจารณาด้วย จึงทำให้ค่าการคำนวณที่แม่นยำของกรณีของการไหลหมุนวนด้วยเช่นกัน นอกจากนี้ยังประกอบด้วยสมการเชิงอนุพันธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์เชิงทฤษฎีของค่า Effective viscosity ที่เกิดจากอิทธิพลของการไหลที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ต่ำๆ จึงให้ค่าการคำนวณที่แม่นยำสำหรับการไหลที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ต่ำๆ และการไหลบริเวณใกล้ผนัง ในขณะที่แบบจำลองความปั่นป่วน Standard $k - \varepsilon$ จะเหมาะสมสำหรับการไหลที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์สูงๆ จะเห็นได้ว่าสำหรับปัญหาของการไหลที่เกิดขึ้นจริงโดยทั่วไปแล้ว แบบจำลองความปั่นป่วน $k - \varepsilon$ ชนิด RNG จะคำนวณได้แม่นยำกว่าแบบจำลองความปั่นป่วน Standard $k - \varepsilon$

2.7 การทดสอบประสิทธิภาพเชิงความร้อน (Thermal Efficiency)

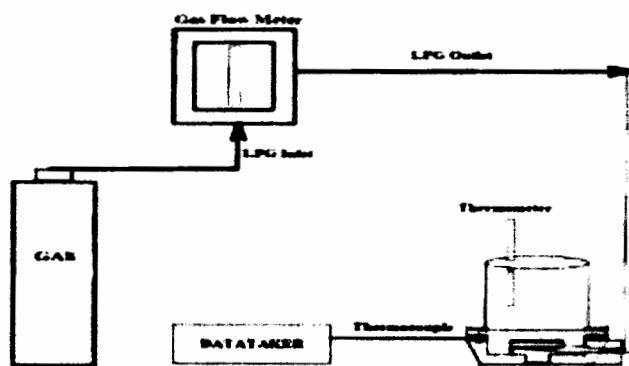
วิธีการทดสอบประสิทธิภาพเชิงความร้อนสำหรับเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือน ได้ทำการอ้างอิงจากมาตรฐาน DIN EN 203-2 [14] แต่เนื่องจากมาตรฐานดังกล่าวหมายความสำหรับเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือนประเภทแรงดันต่ำ จึงต้องใช้วิธีการขยาย (Extrapolation) เพื่อให้ช่วงการทำงานเหมาะสมสำหรับเตาแก๊สหุงต้มแรงดันสูง ซึ่งพอที่จะประมาณค่าอ้างอิงตามมาตรฐานได้ โดยวิธีการเริ่มทดสอบทำให้น้ำเดือดจากอุณหภูมิห้องจนใกล้จุดเดือดของน้ำ (ประมาณ 90 องศาเซลเซียส) และทำการวัดค่าอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงกับปริมาณของความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้เชื้อเพลิง ซึ่งหาได้จากเวลาที่ใช้ในการทำให้น้ำเดือดและอัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิง จากนั้นคำนวณหาค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนดังสมการที่ 2.20

$$\eta_{th} = \frac{m_{water} C_{p,water} (363 - T_{water,i})}{V \times LHV \times t} \quad (2.20)$$

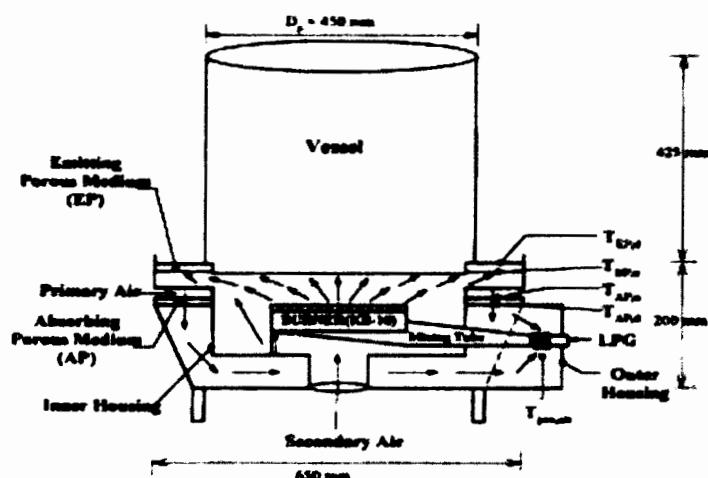
| | | |
|-------|---------------|---|
| เมื่อ | η_{th} | คือ ประสิทธิภาพเชิงความร้อน (%) |
| | m_{water} | คือ มวลของน้ำ (kg) |
| | $C_{p,water}$ | คือ ค่าความถูกความร้อนของน้ำ (kJ/kg.K) |
| | $T_{water,i}$ | คือ อุณหภูมิของน้ำเริ่มต้น (K) |
| | V | คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตรของแก๊ส (m^3/s) |
| | LHV | ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง (kJ/m ³) |
| | t | เวลาที่ใช้ในการทดสอบ (s) |

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาประสิทธิภาพเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือน สามารถแบ่งประเภทของการศึกษาได้ 4 ประเภท คือ งานวิจัยประเภทกลุ่มที่หนึ่ง การศึกษาและพัฒนาการนำความร้อน หมุนวนกลับมาใช้ใหม่โดยอาศัยเทคโนโลยีของวัสดุพูนเข้ามาประยุกต์ใช้ ณ ฐานวิจัย รังสิตมั่นตุชาติ (2544) [2] ได้ทำการศึกษาโดยนำเทคโนโลยีวัสดุพูนมาประยุกต์ใช้เพื่อช่วยส่งเสริมประสิทธิภาพเชิงความร้อนให้สูงขึ้นสำหรับเตาแก๊สหุงต้ม ขนาด KB-10 หน้าที่หลักที่สำคัญของวัสดุพูนคือเป็นได้ทั้งตัวรับและตัวแพร่งสีความร้อนเพื่อใช้แลกเปลี่ยนความร้อนจากแก๊สไฮดروเจนที่ได้จากการศึกษาพบว่า สามารถเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อนเพิ่มขึ้นคิดเป็นร้อยละ 11.92 และคิดเป็นอัตราการประหยัดโดยเฉลี่ยร้อยละ 30 เมื่อเปรียบเทียบกับเตาแก๊สหุงต้มขนาด KB-10 ที่ใช้กันโดยทั่วไป

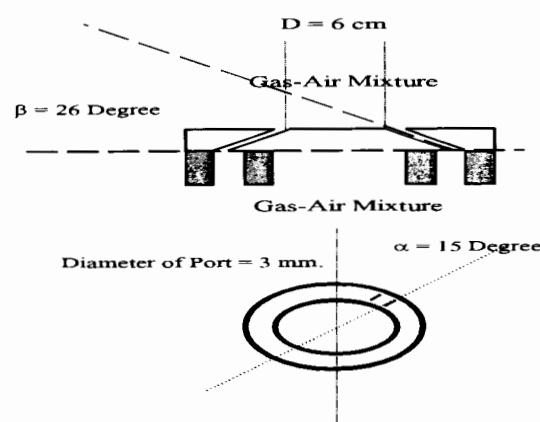


ภาพที่ 2.4 แผนผังแสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง [2]



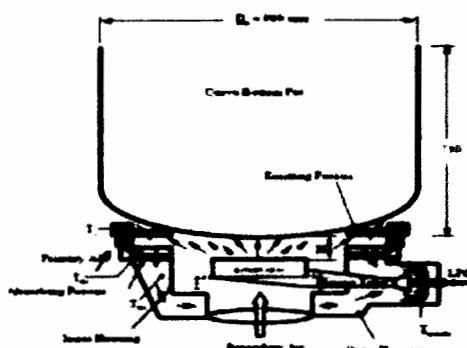
ภาพที่ 2.5 ชุดการทดลองของเตาด้านแบบประสิทธิภาพสูง PRRB [2]

ต่อมางานวิจัยประเภทกลุ่มที่สอง คือได้มีการศึกษาลักษณะทิศทางทางออกของหัวเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือน A. Tamir, I. Elperin, and S. Yotzer (1989) [3] ได้ทำการศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อนสำหรับเตาแก๊สหุงต้มโดยใช้แก๊สธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิง โดยเปลี่ยนหัวเตาแก๊สหุงต้มแบบทั่วไป Conventional Burner (CB) เป็นหัวเตาแก๊สหุงต้มแบบ Swirl Burner (SB) ที่มีลักษณะมุมเบย์ (β) เท่ากับ 26 องศา มุมเอียง (α) เท่ากับ 15 องศา พบร่วมกับว่า มีค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนเพิ่มสูงขึ้น 6 % เมื่อเทียบกับเตาแก๊สหุงต้มแบบ CB



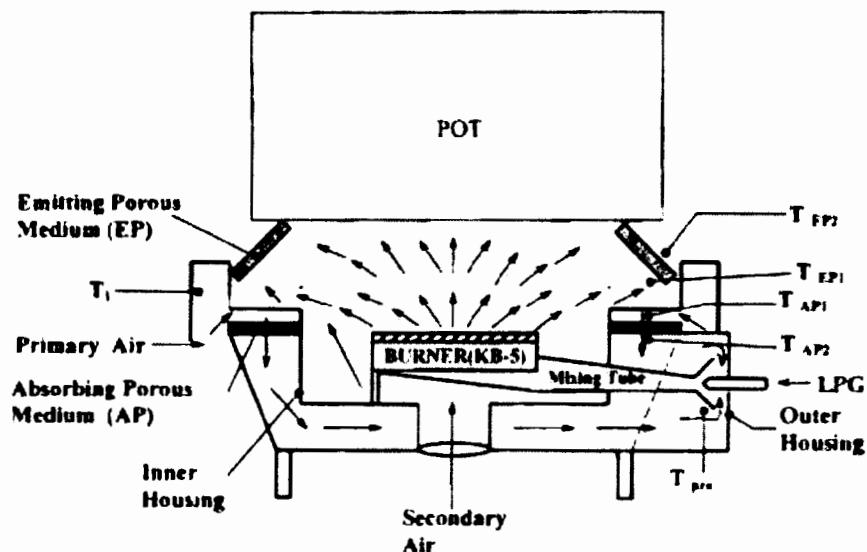
ภาพที่ 2.6 การปรับปรุงหัวเตาแก๊สหุงต้มแบบ SB [3]

วสันต์ โยคเสนะกุล (2547) [4] จึงได้นำแนวคิดมาทำการปรับปรุงและพัฒนาเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือน ประเภทแรงดันสูง ขนาด KB-10 ในรูปแบบการเปลี่ยนหัวเตาแก๊สหุงต้มทั่วไป (CB) มาเป็นหัวเตาแก๊สหุงต้มแบบหมุนวน (SB) ประกอบร่วมกับของการชุดทดลองที่ทำงานร่วมกับเทคโนโลยีวัสดุพรุนและทำการศึกษาร่วมกับภาชนะก้นแบบ (หม้อ) และ ก้นโคล้ง (กะทะ) พบร่วมกับว่า ประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงสุดของภาชนะก้นแบบ (หม้อ) มีค่าเท่ากับร้อยละ 45.02 และก้นโคล้ง มีค่าเท่ากับร้อยละ 44.27



ภาพที่ 2.7 อุปกรณ์และการติดตั้งของการทดลอง [4]

จารุณี จาบกลาง (2549) [5] ได้นำหลักการเดียวกันมาใช้ศึกษาร่วมกับหัวเตาแก๊สหุงต้ม ประเภท แรงดันสูง ขนาด KB-5 ทำงานร่วมกับ PRRB และภาชนะก้นแบบ (หม้อ) และก้นโถ้ง (กะทะ) พบร้า ประสิทธิภาพเชิงความร้อนที่ได้จากการศึกษาร่วมกับภาชนะก้นแบบ (หม้อ) มีค่าเท่ากับร้อยละ 60 และภาชนะก้นโถ้ง (กะทะ) มีค่าเท่ากับร้อยละ 40



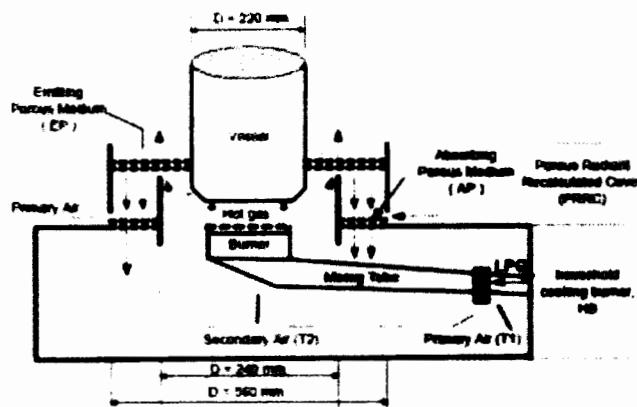
ภาพที่ 2.8 รูปแบบการทำงานของหัวเตาแก๊สหุงต้มร่วมกับ PRRB [5]

งานวิจัยประเภทกลุ่มที่สาม การศึกษาที่เกี่ยวข้องกับการมุ่งเน้นถึงสมรรถนะและประสิทธิภาพการทำงานของหัวเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือน U. Makmool et al. (2007) [6] ทำการทดสอบประสิทธิภาพเชิงความร้อนของหัวเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือนที่มีอยู่ในประเทศไทยแล้วทำการเปรียบเทียบผลที่มีการทดสอบด้วยวิธี PIV อ้างอิงตามมาตรฐาน European standards EN 203-1:1992 and EN 203-2:1995 พบร้า ประสิทธิภาพเชิงความร้อนและค่าแก๊สไอเสียที่ได้จากหัวเตาแก๊สหุงต้มสองคอลั่มกับทิศทางความเร็วที่ได้จากวิธีการทดสอบด้วย PIV โดยลักษณะทางออกรูแก๊สของหัวเตามีผลกระทบต่อทิศทางการไหลของเพลวไฟและประสิทธิภาพเชิงความร้อน



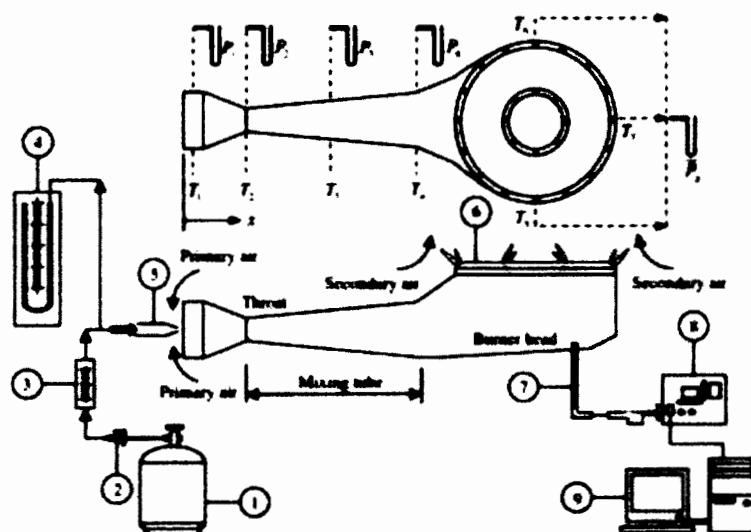
ภาพที่ 2.9 ลักษณะของหัวเตาแก๊สหุงต้มที่ใช้ในการศึกษา [6]

อนิรุตต์ มัธธุจักร และจรินทร์ เจนจิตต์ (2552) [7] ทำการศึกษาและรวมวิธีการเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือน ประเภทแรงดันต่ำ (อัตราการป้อนเชื้อเพลิงไม่เกิน 5.78 kW) ที่มีอยู่ในประเทศไทย อ้างอิงตามมาตรฐานอุตสาหกรรม มอก. 2312-2549



ภาพที่ 2.10 การทดสอบประสิทธิภาพเชิงความร้อนของหัวเตาแก๊สแรงดันต่ำ [7]

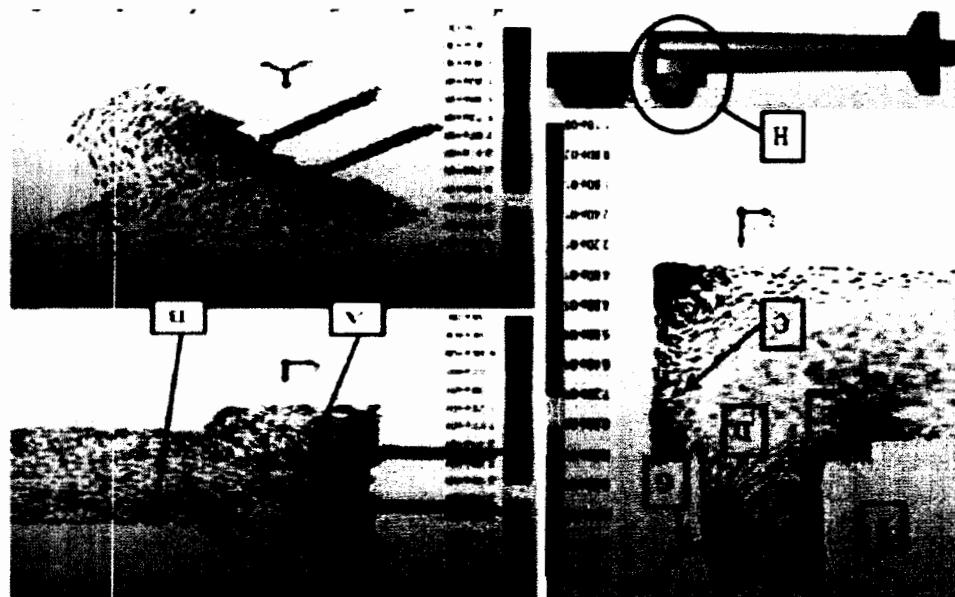
จากการศึกษา พบว่า ค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนที่ได้โดยทั่วไปมีค่าไม่เกินร้อยละ 50 จึงได้ทำการปรับปรุงด้วยวิธีการลดการสูญเสียความร้อน การอุ่นอากาศ และทำการปรับปรุงลักษณะของหัวฉีด เชื้อเพลิง พบว่า สามารถเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงขึ้นจากเดิม เท่ากับร้อยละ 15, 11 และ 6 นอกจานั้น A. Namkhat and S. Jugjai (2010) [8] ได้ศึกษาคุณลักษณะของการเหนี่ยวนำอากาศ ส่วนแรก (Primary aeration, PA) ของเตาแก๊สหุงต้มแบบ Self-Aspirating ด้วยวิธีการทดลองแบบ Hot test และ Cold test



ภาพที่ 2.11 แผนผังกระบวนการทดสอบปริมาณอากาศส่วนแรก (PA) [8]

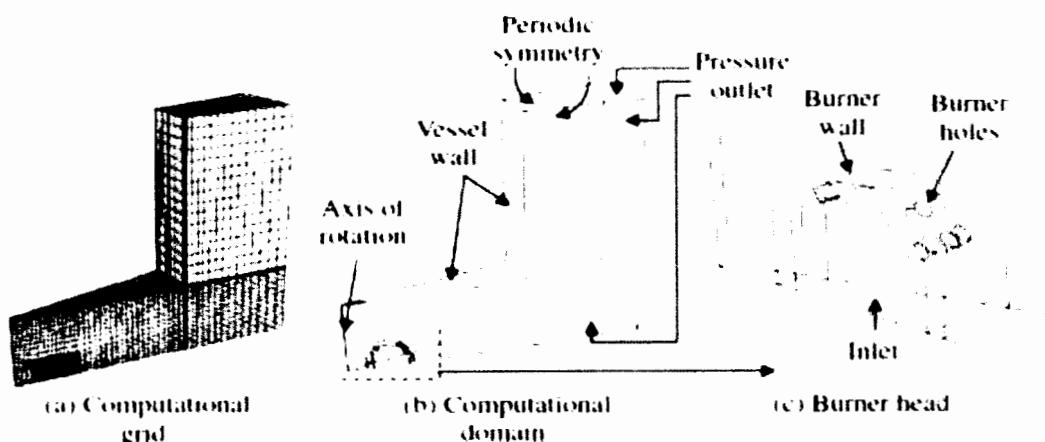
P. Boggavarapu et al. (2013) [10] have used a similar model to predict the performance of a 2.78 kW (91% LPG) dual-fuel generator. The results are shown in Figure 11. The predicted performance curves are shown in Figure 11(a) and the experimental results are shown in Figure 11(b). The predicted results are in good agreement with the experimental results.

2.12 និង 2.13 នឹងបានរាយការណ៍នៃការស្វែងរកការងារដែលត្រូវបានរាយការណ៍ [៩]

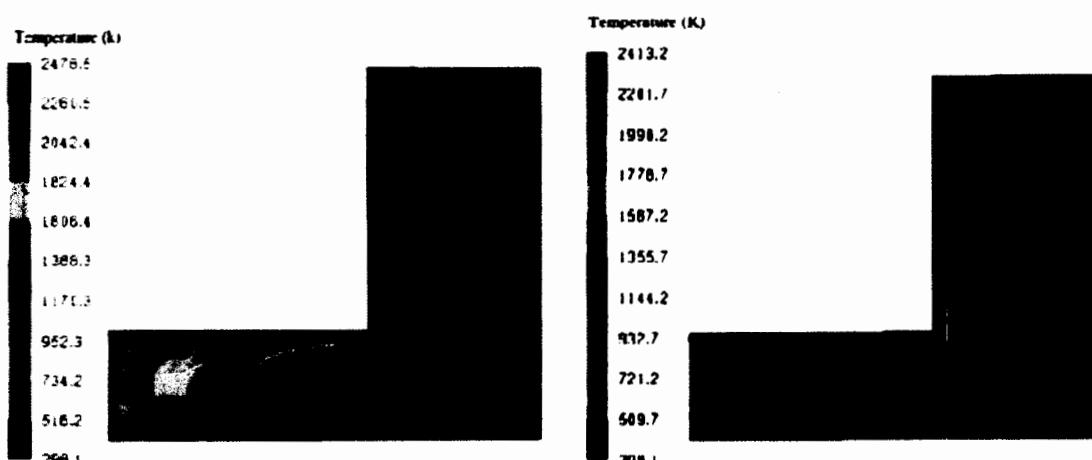


۱۱۷۶ ۴.۲۱

ภาชนะกับหัวเตาในแบบจำลอง พบร่วมกับ ประสิทธิภาพเชิงความร้อนที่ได้จากการศึกษาของแบบจำลองของเชื้อเพลิงแอลพีจี (LPG) เพิ่มสูงขึ้นร้อยละ 2.5 และเชื้อเพลิงพีเอ็นจี (PNG) เพิ่มสูงขึ้นร้อยละ 10 เมื่อเทียบกับแบบจำลองหัวเตาแก๊สหุงต้มก่อนปรับปรุง

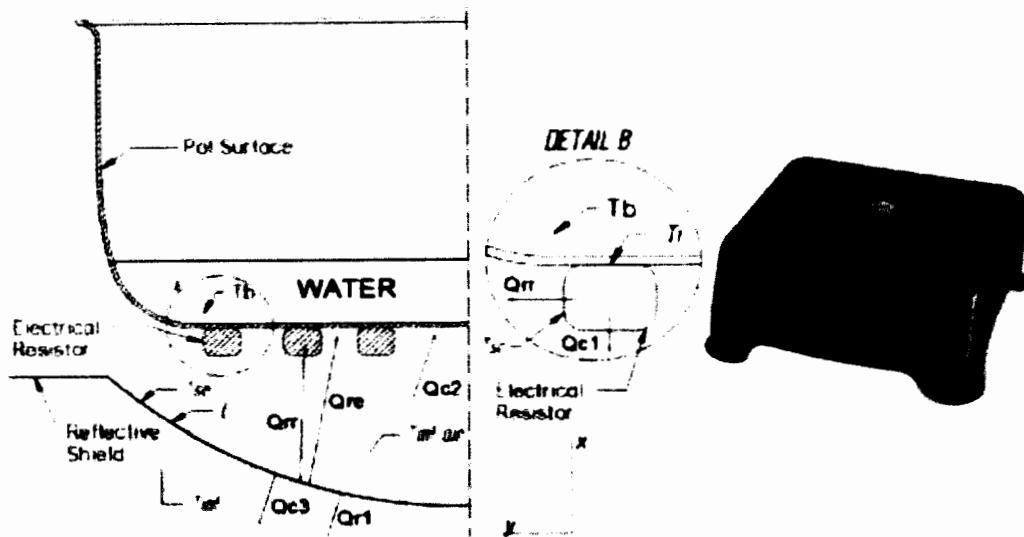


ภาพที่ 2.13 ขั้นตอน pre-processor โดยการเลือกพื้นที่และกำหนดเมช [10]

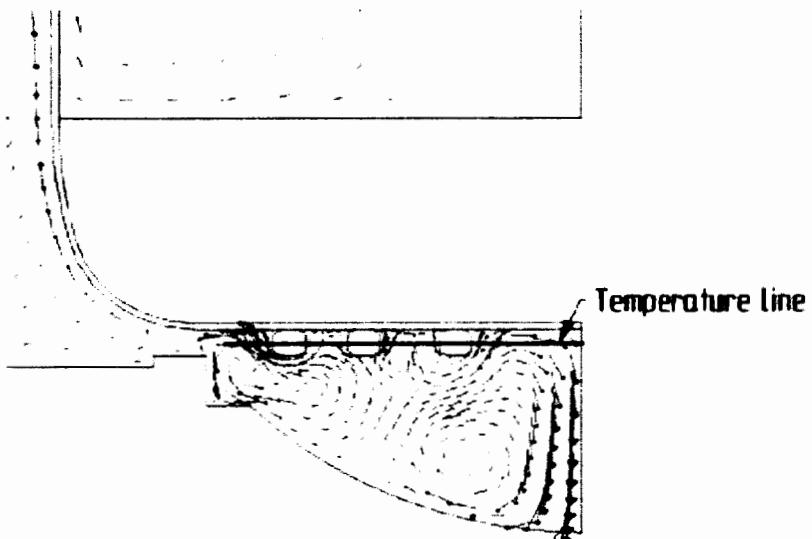


ภาพที่ 2.14 อุณหภูมิเปลวไฟที่ได้จากการจำลอง [10]

J. Francisco et al. (2014) [11] ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพเชิงความร้อนของภาชนะ (หม้อ) บนเตาไฟฟ้า โดยใช้หลักการถ่ายเทความร้อนคือ การนำความร้อน การพาความร้อน และการแผ่รังสี ความร้อนโดยใช้วิธีพลศาสตร์ของไฟล์ในการนำเสนอเปรียบเทียบกับการทดลอง พบร่วมกับผลจากการจำลองได้มีความสอดคล้องกับการทดลอง

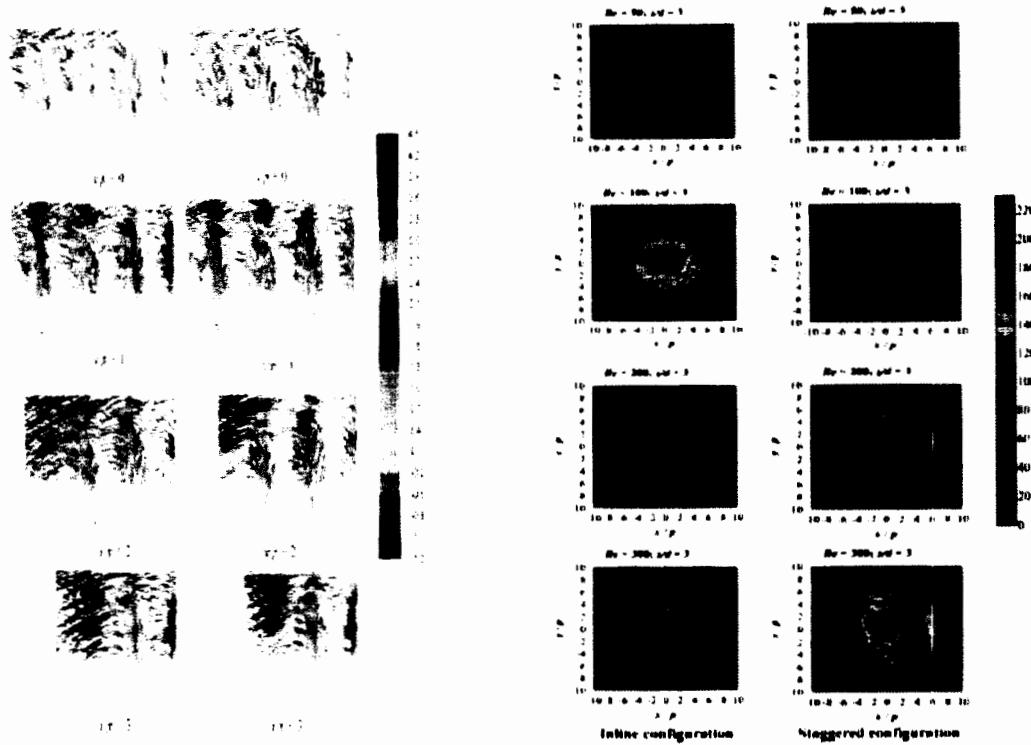


ภาพที่ 2.15 ตำแหน่งที่ต้องการศึกษาการถ่ายเทความร้อนของเตาไฟฟ้ากับภาชนะ [11]



ภาพที่ 2.16 ทิศทางการไหลของการถ่ายเทความร้อนของเตาไฟฟ้า [11]

V. Hindasageri et al. (2015) [12] ได้ทำการศึกษาการถ่ายเทความร้อนของเปลวไฟสำหรับหัวเตาที่มีรูปrunด้วยวิธีการทดลองและการจำลองและใช้มีเทนผสมกับอากาศในรูปแบบ Premixed เป็นเชื้อเพลิง พบว่า ผลจากการทดลองให้ค่าเฉลี่ยของพลังช์ความร้อน (Heat flux) ที่มีบริเวณพื้นที่ 250 mm^2 และระยะพิท เท่ากับ 7 mm สอดคล้องกับผลการจำลอง อีกทั้งรูปแบบการจำลองยังสามารถอธิบายถึงค่าพลังช์ความร้อนได้ชัดเจน



ภาพที่ 2.17 การถ่ายเทความร้อนของเตาในเชิงพาณิชย์ [12]

จากการศึกษาที่ได้กล่าวมาข้างต้น ได้มีการศึกษาและพัฒนาประสิทธิภาพสำหรับเตาแก๊สหุงต้ม ในครัวเรือนที่หลากหลายรูปแบบ จึงสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือน

| งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง | ปี | ประเภท เตา | ผลการศึกษาของงานวิจัย |
|--|--------------|---------------|---|
| ณัฐวุฒิ รังสิมันตุชาติ [2] | พ.ศ. 2544 | แรงดันสูง | การนำเทคโนโลยีวัสดุพรุนมาประยุกต์ใช้ในการเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อนสำหรับเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือน ขนาด KB-10 ทำงานร่วมกับ PRRB ด้วยวิธีการทดลองต้มน้ำเดือด (Water Boiling Test) พบว่า ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงขึ้นจากเดิมร้อยละ 11.92 และคิดอัตราประหยัดพลังงาน เท่ากับร้อยละ 30 |
| A. Tamir, R. Elperin, and S. Yotzer [3] | ค.ศ. 1989 | แรงดันสูง | ทำการศึกษาเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อนสำหรับเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือน ขนาด KB-5 โดยเปลี่ยนหัวเตาแก๊สแบบท่อไป (CB) มาเป็นแบบหมุนวน (SB) ทำงานร่วมกับแก๊สธรรมชาติ ที่มีลักษณะมุมเบย 26° และมุมเอียง 15° ทดสอบด้วยวิธีการทดลองต้มน้ำเดือด (Water Boiling Test) พบว่า สามารถเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อนจากเตาแบบท่อไป (CB) เท่ากับร้อยละ 6 |
| วงศ์สันต์ โยคเสนะกุล [4] | พ.ศ. 2547 | แรงดันสูง | ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อนสำหรับเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือน โดยเปลี่ยนหัวเตา KB-10 รูปแบบ CB มาเป็น SB ประกอบเข้ากับโครงสร้าง PRRB ทำงานร่วมกับภาชนะก้นแบบ-ก้นโค้ง ทำการทดสอบด้วยวิธีการทดลองต้มน้ำเดือด (Water Boiling Test) พบว่า สามารถเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อนที่ทำงานร่วมกับภาชนะก้นแบบ เท่ากับร้อยละ 45.02 และก้นโค้งเท่ากับร้อยละ 44.27 |

ตารางที่ 2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือน (ต่อ)

| งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง | ปี | ประเภท เตา | ผลการศึกษาของงานวิจัย |
|---|--------------|---------------|---|
| จารุณี ชาบกลาง [5] | พ.ศ. 2549 | แรงดันสูง | ทำการศึกษาและพัฒนาหัวเตาแก๊สหุงต้ม ขนาด KB-5 โดยการเปลี่ยนรูปหัวเตาแก๊สหุงต้มแบบ CB มาเป็น SB ประกอบเข้ากับ PRRB ทำงานร่วมกับภาชนะก้นแบบ-ก้นโคงภาชนะด้วยวิธีการทดลอง ด้วยวิธีการต้มน้ำเดือด (Water Boiling Test) พบร่วมกับภาชนะก้นแบบ มีค่าสูงกว่า PRRB (SB) ทำงานร่วมกับภาชนะก้นโคง เท่ากับร้อยละ 20 |
| U. Makmool et al. [6] | ค.ศ. 2007 | แรงดันต่ำ | ทำการทดสอบประสิทธิภาพเชิงความร้อนของหัวเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือน ประเภทแรงดันต่ำ ที่มีอยู่ในประเทศไทยแล้วทำการเปรียบเทียบผลการทดสอบด้วยวิธี PIV พบร่วม ค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนที่ได้จากเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือนผลที่ได้สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ด้วยวิธี PIV |
| อนิรุตต์ มัธชุจาร์ และ จรินทร์ เจนจิตต์ [7] | พ.ศ. 2552 | แรงดันต่ำ | ศึกษาวิธีการเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาแก๊สหุงต้มประเภทแรงดันต่ำ ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก.2312-2549 วิธีการทดลองด้วยวิธีการต้มน้ำเดือด (Water Boiling Test) พบร่วม ศึกษาเพิ่มเติมวิธีการลดการสูญเสียความร้อน อุ่นอากาศ และปรับปรุงลักษณะการฉีดแก๊ส พบร่วม ให้ค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนเพิ่มสูงขึ้นเท่ากับร้อยละ 15, 11 และ 6 |

ตารางที่ 2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือน (ต่อ)

| งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง | ปี | ประเภท เตา | ผลการศึกษาของงานวิจัย |
|---|--------------|---------------|---|
| A. Namkhat and S. Jugjai [8] | ค.ศ. 2010 | แรงดันสูง | ทำการศึกษาคุณลักษณะการเหนี่ยวนำอากาศส่วนแรก (PA) ของหัวเผาในรูปแบบ Self-Aspirating ด้วยวิธีการทดสอบแบบ Hot test และ Cold test เปรียบเทียบผลกับแบบจำลองเชิงทฤษฎีโนเมนตัม และหลักการอนุรักษ์พลังงาน พบว่า ผลทำนายทางทฤษฎีสอดคล้องกับผลการทดลอง ซึ่งการเหนี่ยวนำอากาศส่วนแรกขึ้นอยู่กับอัตราการไหล เชือเพลิงแก๊สอากาศส่วนแรก (PA) ร้อยละ 22 |
| ณรงค์กิตติ์ ปิยะไพร และคณะ [9] | พ.ศ. 2556 | แรงดันสูง | ทำการศึกษาพฤติกรรมการไหลของอากาศที่ผสมกับเชือเพลิงในห้องสมุดของหัวเตา ขนาด KB-5 ด้วยวิธีพลศาสตร์ของไอลเชิงคำนวณ (CFD) เปรียบเทียบกับผลการคำนวณเชิงทฤษฎี พบว่า ปริมาณอากาศส่วนแรก (PA) เท่ากับร้อยละ 8.33, 6.07 และ 4.21 |
| P. Boggavarapu, B. Ray, and R.V. Ravikrishna [10] | ค.ศ. 2013 | แรงดันสูง | ทำการศึกษาประสิทธิภาพของเตาแก๊สหุงต้มที่ใช้เชือเพลิงแอลพีจี (LPG) และพีเอ็นจี (PNG) ด้วยวิธีการทดลองและการจำลองด้วยวิธีพลศาสตร์ของไอลเชิงคำนวณ (CFD) พบว่า ประสิทธิภาพเชิงความร้อนที่ได้จากการศึกษาของแบบจำลองของเชือเพลิงแอลพีจี (LPG) เพิ่มสูงขึ้นเท่ากับร้อยละ 2.5 และเชือเพลิงพีเอ็นจี (PNG) เพิ่มสูงขึ้นเท่ากับร้อยละ 10 เมื่อเทียบกับแบบจำลองหัวเตาแก๊สหุงต้มก่อนปรับปรุง |

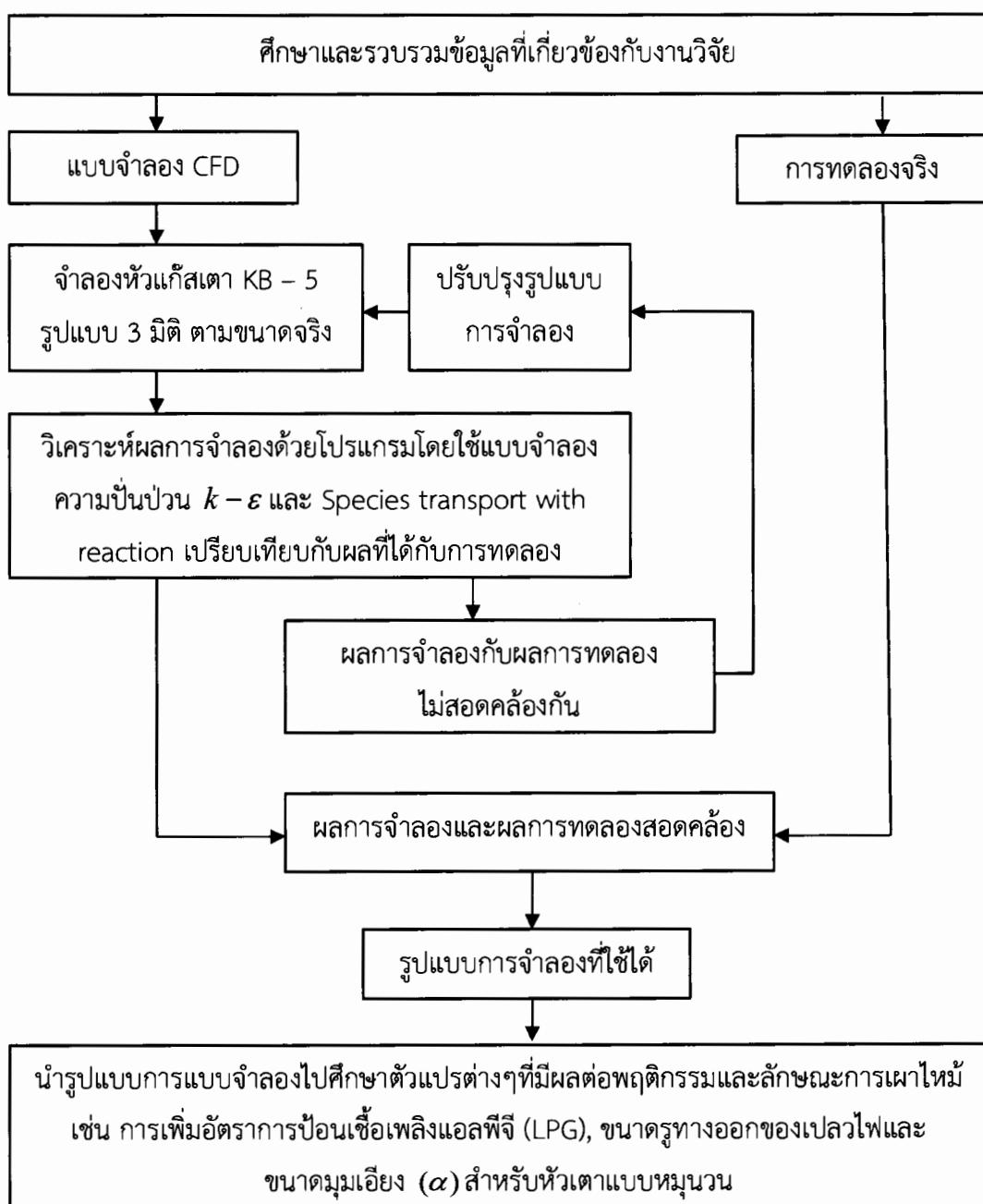
ตารางที่ 2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือน (ต่อ)

| งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง | ปี | ประเทศ | ผลการศึกษาของงานวิจัย |
|----------------------------|-----------|------------------|--|
| J. Francisco et al [11] | ค.ศ. 2014 | เตาไฟฟ้า | ทำการศึกษาประสิทธิภาพเชิงความร้อนของภาชนะ (หม้อ) บนเตาไฟฟ้า โดยใช้หลักการถ่ายเทความร้อนคือ การนำความร้อน, การพาความร้อน และการแพร่รังสีความร้อนด้วยวิธีการทดลองเปรียบเทียบกับการจำลอง พบร่วมผลจากการทดลองได้มีความสอดคล้องกับการทดลอง |
| V. Hindasageri et al. [12] | ค.ศ. 2015 | เตาในเชิงพาณิชย์ | ทำการศึกษาการถ่ายเทความร้อนของเปลวไฟสำหรับหัวเตาที่มีรูพรุน โดยใช้สารบินเทนผสมกับอากาศในรูปแบบ Premixed เป็นเชื้อเพลิง ด้วยวิธีการทดลองเปรียบเทียบกับการจำลอง พบร่วมผลจากการทดลองให้ค่าเฉลี่ยของพลังค์ความร้อน (Heat flux) ที่มีบริเวณพื้นที่ 250 mm^2 และระยะพิท เท่ากับ 7 mm สอดคล้องกับผลการจำลอง |

บทที่ 3

ระเบียบวิธีวิจัย

3.1 ขั้นตอนระเบียบวิธีวิจัย



ภาพที่ 3.1 แผนผังระเบียบวิธีวิจัย

จากพัฒนาระบบการเผาไหม้ระหว่างเชื้อเพลิงแอลพีจี (LPG) กับอากาศสำหรับเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือน ประเภทแรงดันสูง ขนาด KB-5 สามารถอธิบายลักษณะของเปลวไฟที่ได้จากการทดลองจริงค่อนข้างยาก เนื่องจากปริมาณแก๊สเชื้อเพลิงแอลพีจี (LPG) ผสมกับอากาศบริเวณภายในท่อผสมก่อนที่จะออกมาทางพอร์ตทางออกนั้นไม่สามารถบ่งบอกได้อย่างชัดเจนว่าปริมาณของแก๊สเชื้อเพลิงที่ผสมกับอากาศมีอัตราการใช้พลังงานงานมากน้อยเพียงใด ซึ่งอาจจะทำให้เกิดการสูญเสียเชื้อเพลิงโดยไม่จำเป็น ปัจจุบันได้มีการนำวิธีพลศาสตร์ของไนเซิงคำนวน (Computational Fluid Dynamics, CFD) เข้ามาประยุกต์ใช้กับงานหลากหลายด้านเพื่อใช้การอธิบายกระบวนการที่มีความซับซ้อนและผลที่ได้จากการนำวิธีพลศาสตร์ของไนเซิงคำนวน (CFD) สามารถให้ผลเป็นที่ยอมรับได้ จากราฟที่ 3.1 แสดงแผนผังการดำเนินงานวิจัย เป็นการศึกษาด้วยวิธีพลศาสตร์ของไนเซิงคำนวน (CFD) เปรียบเทียบกับผลการทดลองจริง โดยเริ่มจากการสร้างแบบจำลองของหัวเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือน ประเภทแรงดันสูง ขนาด KB-5 ที่มีขนาดเท่ากับหัวเตาแก๊สที่ใช้ในงานวิจัย จากนั้นทำการเลือกใช้แบบจำลองความปั่นป่วน $k - \epsilon$ ทำงานร่วมกับ Species transport with reaction วิเคราะห์ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป (CFD) ที่เหมาะสมกับการจำลองในรูปแบบการเผาไหม้ ซึ่งผลที่ได้จากการจำลองนำมาเปรียบเทียบกับผลการทดลองจริงแล้วจึงนำรูปแบบจำลองไปศึกษาตัวแปรต่างๆ ของงานวิจัย หากผลของการจำลองให้ค่าที่สอดคล้องกับผลของการทดลองจริง แสดงว่าแบบจำลองสามารถนำมาศึกษาคุณลักษณะการเผาไหม้ระหว่างแก๊สเชื้อเพลิงแอลพีจี (LPG) กับอากาศรวมไปถึงการปรับเปลี่ยนลักษณะของพอร์ตทางออกหัวเตาที่มีผลต่อประสิทธิภาพเชิงความร้อน

3.2 การสร้างแบบจำลอง

การศึกษาพัฒนาระบบการเผาไหม้ระหว่างเชื้อเพลิงแอลพีจี (LPG) กับอากาศ โดยใช้วิธีพลศาสตร์ของไนเซิงคำนวน (CFD) นำประยุกต์ใช้ มีระเบียบขั้นตอนการทำงานอยู่ 3 ขั้นตอน คือ

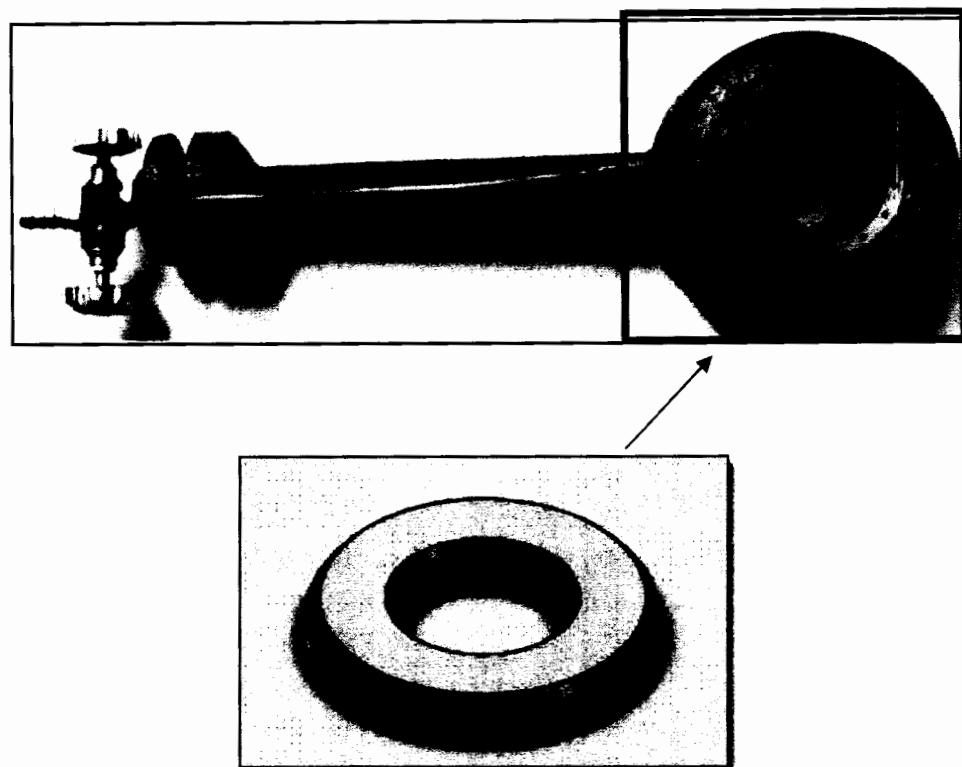
- 3.2.1 ขั้นตอนก่อนประมวลผล (Pre-processor)
- 3.2.2 ขั้นตอนการคำนวน (Processor)
- 3.2.3 ขั้นตอนการแสดงผล (Post-processor)

3.2.1 ขั้นตอนก่อนการประมวลผล (Pre-processor)

3.2.1.1 แบบจำลองเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือน ประเภทแรงดันสูง ขนาด KB-5

การสร้างรูปแบบจำลองของหัวเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือน ประเภทแรงดันสูง ขนาด KB-5 สร้างจากโปรแกรมเขียนแบบสำเร็จรูปที่มีรายละเอียดของเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือนเท่ากับขนาดจริง ดังภาพที่ 3.2 และตารางที่ 3.1 พบร้า ระยะเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีดเชื้อเพลิง เท่ากับ 0.9 mm พื้นที่ทางออกของเปลวไฟรวมทั้งหมด เท่ากับ 242.28 mm^2 นอกจากนี้ ช่วงระยะห่างระหว่างหัวเตา

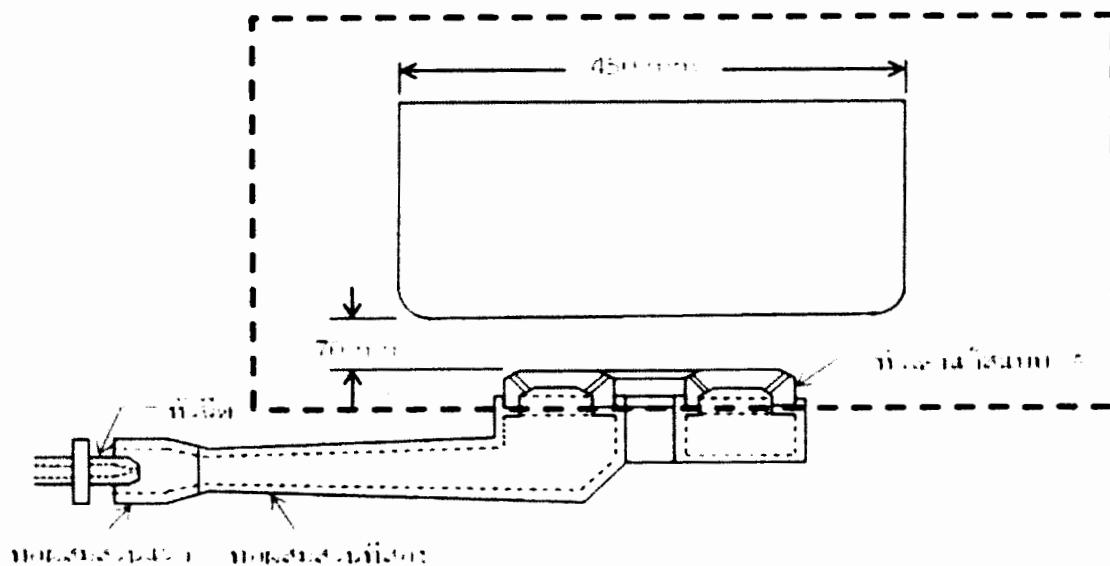
ถึงด้านล่างของภาชนะที่ใช้ในการศึกษา เท่ากับ 70 mm ทำงานร่วมกับภาชนะ (หม้อ) เบอร์ 45 ตาม มาตรฐานอุตสาหกรรม (มอก) 2312-2549 ดังภาพที่ 3.3



ภาพที่ 3.2 หัวเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือนที่ใช้แอลพีจี (LPG) เป็นเชื้อเพลิงในรูปแบบทั่วไป (CB)

ตารางที่ 3.1 ข้อมูลของเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือน ประเภทแรงดันสูง ขนาด KB-5

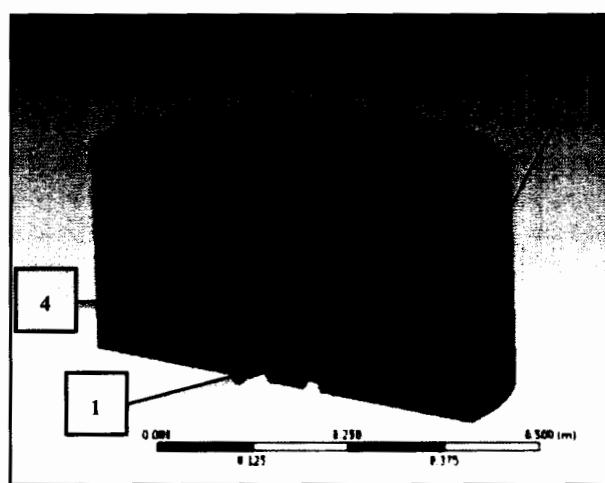
| ข้อมูล | ค่า |
|---|--------|
| ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีด (mm) | 0.9 |
| ขนาดพื้นที่รวมพอร์ตทางออก (mm^2) | 242.28 |
| ระยะห่างหัวฉีดกับคอคอด (mm) | 22 |
| ความยาวของหัวผสานส่วนแรก (mm) | 23 |
| ความยาวของหัวผสานส่วนที่สอง (mm) | 165 |
| ระยะห่างระหว่างหัวเตาถึงด้านล่างของภาชนะ (mm) | 70 |
| ขนาดของภาชนะ เบอร์ 45 (mm) | 450 |



ภาพที่ 3.3 บริเวณที่เลือกใช้ในการศึกษาของแบบจำลอง

3.2.1.2 การกำหนดเมช (Mesh)

ขั้นตอนการกำหนดเมช (Mesh Generation) ของแบบจำลอง โดยการกำหนดของขอบเขตทำการพิจารณาเฉพาะบริเวณหัวเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือนจนถึงบริเวณด้านล่างของภาชนะ (หม้อ) ขนาดเบอร์ 45 ตามขนาดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 2312-2549 โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป CFD เป็นการกำหนดเมช (Mesh) ก่อนที่จะทำการประมวลผล ดังภาพที่ 3.4



หมายเลข 1 คือ กำหนดทางเข้า

หมายเลข 3 คือ กำหนดผนัง

หมายเลข 2 คือ กำหนดทางออก

หมายเลข 4 คือ กำหนด symmetry

ภาพที่ 3.4 การสร้างเมช (Mesh generation) แบบสามเหลี่ยมลีมสี่หน้า (Tetrahedrons)

กำหนดลักษณะของเมช (Mesh) แบบทรงสามเหลี่ยมสี่หน้า (Tetraedrons) สามมิติในรูปแบบ Skewness ซึ่งหมายความว่ารูปแบบ Geometry ที่ใช้ในการศึกษา โดยมีความซับซ้อนและความละเอียดสูงในการคำนวณ ดังนี้ เมช (Mesh) ที่ได้จากการคำนวณมีความละเอียดของ element เท่ากับ 1,061,655 element และ จำนวน node เท่ากับ 198,261 node มีขนาดความละเอียดต่ำที่สุด เท่ากับ 8.035×10^{-7} mm และสูงที่สุด เท่ากับ 0.828 mm ค่าเฉลี่ยของเมชที่ได้เท่ากับ 0.236 mm เมื่อเปรียบเทียบคุณภาพของเมช (Quality Mesh) อยู่ระหว่าง 0 ถึง 0.25 ซึ่งถือว่าขนาดเมช (Mesh) ที่ใช้มีคุณภาพที่ดี

3.2.1.3 การกำหนดขอบเขตเงื่อนไข (Boundary Condition)

การกำหนดขอบเขตเงื่อนไข (Boundary Condition) สำหรับแบบจำลองการเผาไหม้สำหรับเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือน ขนาด KB-5 ที่ใช้ในการศึกษา สามารถแสดงรายละเอียดได้ดังนี้

- 1) ขอบเขตทางเข้า (Inlet) และทางออก (Outlet) ของรูปแบบการจำลอง

โดยทำการศึกษาการไหลผสมระหว่างเชื้อเพลิงแอลพีจี (LPG) กับอากาศภายในท่อผสมสำหรับเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือน ขนาด KB-5 [10] โดยโปรแกรม CFD พบว่า พบรูทางออกหัวเชื้อเพลิงแอลพีจี (LPG) เท่ากับ 0.9 mm และที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิง เท่ากับ 9.48 kW (ที่ 0.5 bar) สามารถแสดงผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลอง ได้แก่ Mass flow rate (kg/s), ปริมาณ mass fraction ของสารประกอบ propane (C_3H_8), บีวีเทน (C_4H_{10}) และออกซิเจน (O_2) ดังตารางที่ 3.2 และแสดงการกำหนดทางเข้า (Inlet) คือ หมายเลขที่ 1 และ การกำหนดทางออก (Outlet) คือหมายเลข 2 ดังภาพที่ 3.4 โดยกำหนดอุณหภูมิเริ่มต้นของการเผาไหม้สำหรับเชื้อเพลิง แอลพีจี (LPG) กับอากาศของรูปแบบการจำลอง เท่ากับ 300 K

ตารางที่ 3.2 ขอบเขตทางเข้า (Inlet) ของรูปแบบการจำลอง

| Boundary Type | Inlet |
|--|-------------|
| Mass flow rate (kg/s) | 0.001319214 |
| C ₃ H ₈ mass fraction | 0.059382606 |
| C ₄ H ₁₀ mass fraction | 0.039589018 |
| O ₂ mass fraction | 0.20720699 |
| Static Temperature (K) | 300 |
| Boundary Type | Outlet |
| Location | Opening |
| Mass and Momentum (Pa) | 0 |
| Static Temperature (K) | 300 |

2) ขอบเขตทางเข้า (Inlet) และทางออก (Outlet) ของรูปแบบการจำลอง

การกำหนดขอบเขตผนัง (Wall Treatment) ของรูปแบบการจำลองสำหรับการเผาไหม้ โดยเลือกกำหนด Standard wall function ในรูปแบบ No-slip wall เนื่องจากรูปแบบของการจำลองไม่มีการเคลื่อนที่ ดังนั้นจึงกำหนดค่าให้เป็น 0 แล้วกำหนดค่าอุณหภูมิสูงสุด เท่ากับ 395 K สำหรับการเผาไหม้ เนื่องจากสมมติฐานว่าอุณหภูมิที่ขอบผนังจำเป็นต้องสูงกว่าอุณหภูมิอุณหภูมิจุดเดือด

ตารางที่ 3.3 ขอบเขตผนัง (Wall Treatment)

| Boundary Type | Wall |
|------------------------|--------------|
| Standard wall function | No slip wall |
| Temperature (K) | 395 |

3) กำหนดรูปแบบการเผาไหม้ (Combustion Model)

รูปแบบการจำลองของการเผาไหม้แบบ Partially Premixed Model โดยการกำหนดเชื้อเพลิงแอลพีจี (LPG) ที่มีส่วนผสมระหว่างโพรเพน (C_3H_8) และบิวเทน (C_4H_{10}) ในรูปแบบ LPG Air Mixture ดังตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 ขอบเขตรูปแบบการเผาไหม้ (Combustion Model)

| รูปแบบการเผาไหม้ (Combustion Model) | |
|-------------------------------------|-----------------------------|
| | โพรเพน (C_3H_8) |
| | บิวเทน (C_4H_{10}) |
| | คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) |
| ส่วนประกอบของการเผาไหม้ | คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) |
| | น้ำ (H_2O) |
| | ไนโตรเจน (N_2) |
| | ออกซิเจน (O_2) |

ส่วนประกอบของการเผาไหม้เชื้อเพลิงแอลพีจี (LPG) ประกอบด้วยเชื้อเพลิงแอลพีจี (LPG) ทำปฏิกิริยากับอากาศ (O_2) จึงเกิดการเผาไหม้ โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้หลังจากการเผาไหม้ ได้แก่

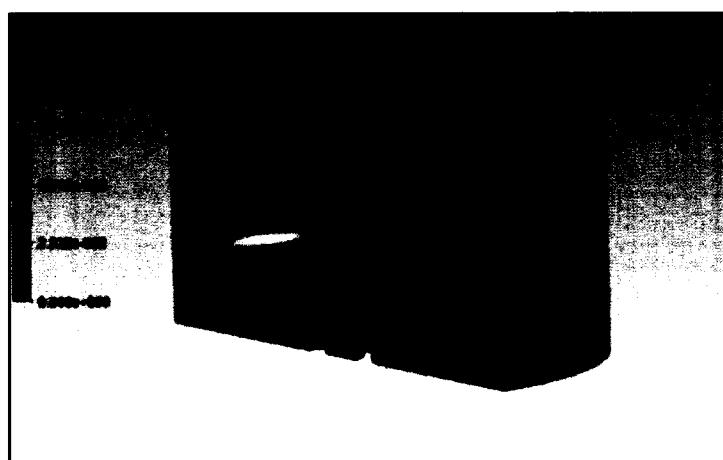
แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO), คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2), น้ำ (H_2O) และไนโตรเจน (N_2) เนื่องจาก การเผาไหม้แก๊สในไนโตรเจน (N_2) เป็นสารประกอบที่มีค่าคงที่ จึงกำหนดค่าให้เท่ากัน ดังสมการที่ 2.5

3.2.2 การประมวลผล (processor)

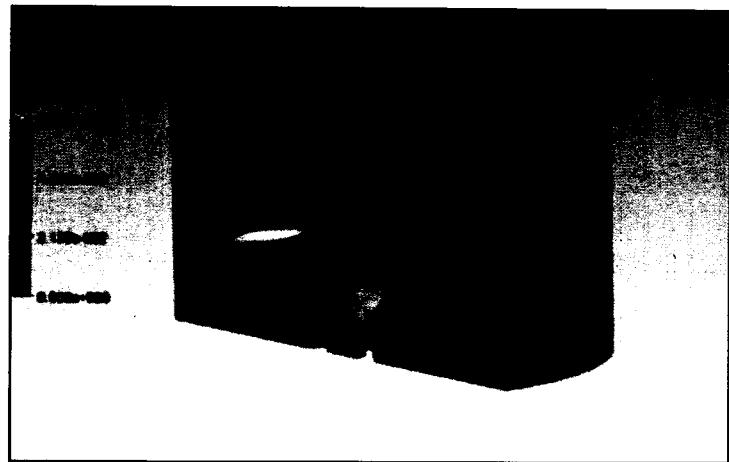
การประมวลผลของแบบจำลองการเผาไหม้ของเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือน ประเภท แรงดันสูง ขนาด KB-5 โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป CFD ที่เหมาะสมสำหรับการอธิบายผลของผลิตภัณฑ์ที่ได้หลังจากการเผาไหม้ของรูปแบบการจำลอง โดยกำหนดค่าความแม่นยำของเส้นกราฟที่ได้จากการ คำนวณ (Convergence Criteria) เท่ากับ 10^{-6} เมื่อการทำนายผลของเส้นกราฟที่ลู่เข้าสู่ค่า Convergence Criteria จะกระทำการคำนวณซ้ำค่าเดิมที่เกิดขึ้นถือว่านำผลที่ได้มาใช้ในกระบวนการที่การ เผาไหม้ได้ โดยมีค่าการทำนาย เท่ากับ 500 Iteration ต่อจานนั้นได้ทำการแสดงผล (Report) ที่ได้ จากการคำนวณ

3.2.3 การแสดงผล (Report)

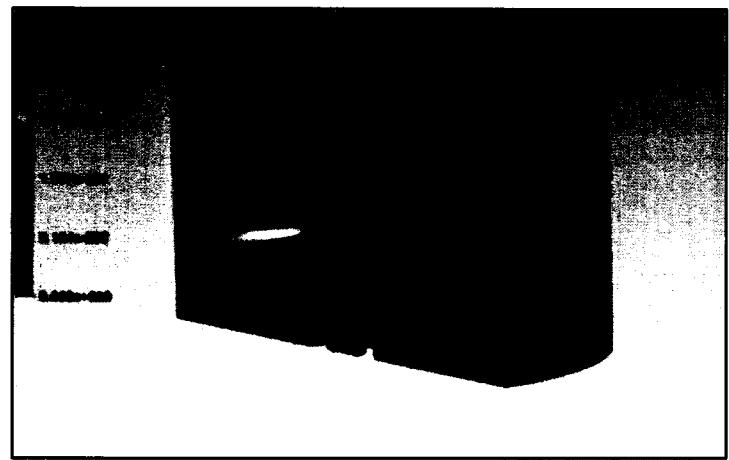
ผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณแสดงอยู่ในรูปแบบปริมาณ mass fraction ของสารประกอบ ต่างๆ และสามารถทราบถึงค่าอุณหภูมิเบลาไฟสูงสุดได้ ดังภาพที่ 3.5, 3.6, 3.7, และ 3.8



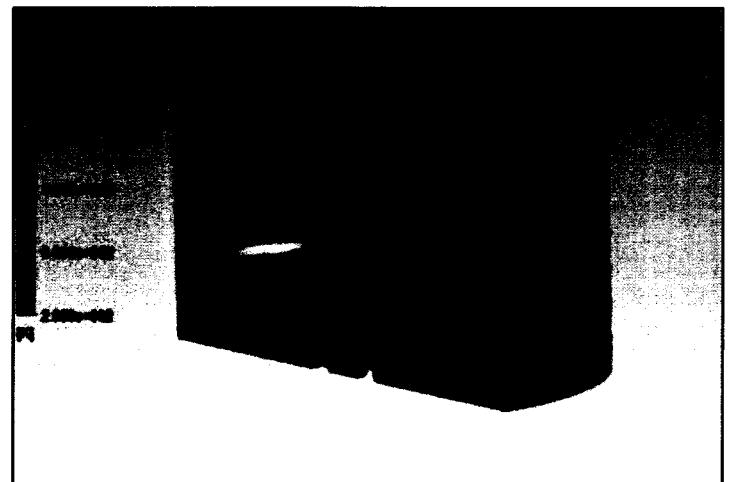
ภาพที่ 3.5 ปริมาณ mass fraction ของ CO



ภาพที่ 3.6 ปริมาณ mass fraction ของ CO_2



ภาพที่ 3.7 ปริมาณ mass fraction ของ O_2

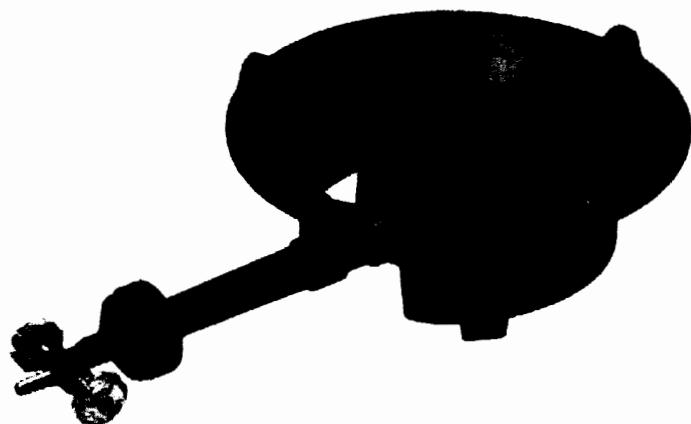


ภาพที่ 3.8 อุณหภูมิสูงสุดของเปลวไฟ

3.3 อุปกรณ์การทดลอง

3.3.1 หัวเตาแก๊สหุงต้มแรงดันสูง ขนาด KB-5

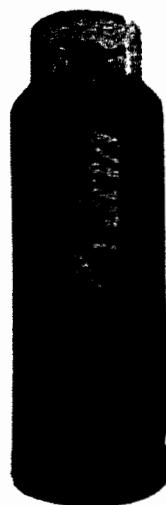
หัวเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือนประเภทแรงดันสูง (CB) ที่มีช่วงการทำงานอยู่ที่ 6-25 kW



ภาพที่ 3.9 หัวเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือน ประเภทแรงดันสูง ขนาด KB-5

3.3.2 ระบบป้อนเชื้อเพลิง

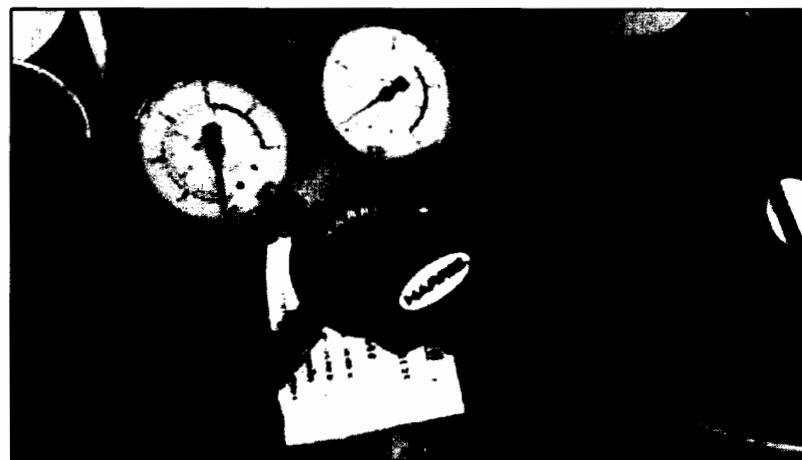
แก๊สเชื้อเพลิงถูกบรรจุในถังขนาด 48 kg ซึ่งมีอุปกรณ์ใช้สำหรับควบคุมปริมาณการไหลของแก๊สเชื้อเพลิง (Pressure Regulator) เชื่อมต่อกับหัวฉีดเชื้อเพลิงสำหรับเตาแก๊สหุงต้มด้วยสายยางที่เหมาะสมกับการทำงานของแก๊ส



ภาพที่ 3.10 ถังบรรจุแก๊สแอลพีจี (LPG) ขนาด 48 kg

3.3.3 อุปกรณ์ควบคุมความดัน (Pressure Regulator)

อุปกรณ์ควบคุมความดัน (pressure regulator) LPG ยี่ห้อ HARRIS รุ่น 801B-4-LP เป็นตัวควบคุมความดันของแก๊สสูงสุด 40 bar



ภาพที่ 3.11 อุปกรณ์ควบคุมความดัน (Pressure Regulator)

3.3.4 เครื่องวัดอัตราการไหลของแก๊สเชือเพลิง (Gas flow meter)

เครื่องวัดอัตราการไหลของแก๊สเชือเพลิง ยี่ห้อ Nitto รุ่น DK800s-6 [Air] เป็นเครื่องวัดแบบลูกกลอย ใช้วัดอัตราการไหลของอากาศในช่วงระหว่าง 100 – 1000 L/h



ภาพที่ 3.12 เครื่องวัดอัตราการไหลโดยปริมาตรของแก๊ส (Gas flow meter)

3.3.5 อุปกรณ์ดักไอเสีย (Hood)

อุปกรณ์ดักไอเสียออกแบบให้มีลักษณะและขนาดตามมาตรฐานอ้างอิง DIN EN 203-2 ใช้วางครอบด้านบนของหน้า เพื่อป้องกันอากาศภายนอกเข้ามาผสมกับแก๊สไอเสีย



ภาพที่ 3.13 อุปกรณ์วัดไอเสีย (hood)

3.3.6 เครื่องวิเคราะห์แก๊สไอเสีย (Exhaust Analyzer)

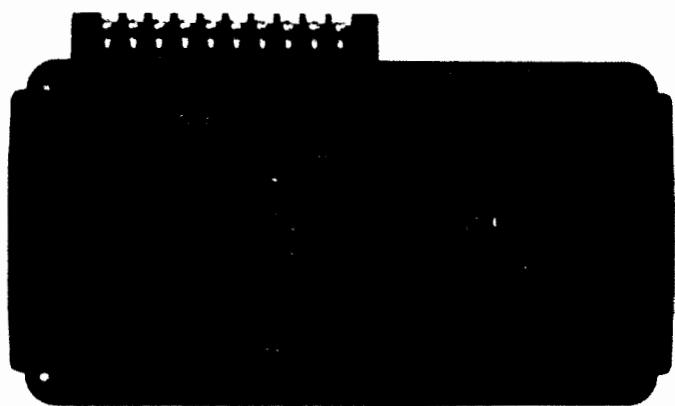
เครื่องวิเคราะห์แก๊สไอเสีย (Exhaust Analyzer) ใช้วัดแก๊สไอเสียที่เกิดจากการเผาไหม้ ยี่ห้อ Testo 350 สามารถวัดค่า CO, CO₂ และ O₂ ซึ่งค่าที่วัดได้จะมีความคลาดเคลื่อน 0.05% โดยวัดที่ทางออกของไอเสีย



ภาพที่ 3.14 เครื่องวิเคราะห์ไอเสีย (Exhaust gas analyzer)

3.3.7 อุปกรณ์บันทึกข้อมูล (Data Logger)

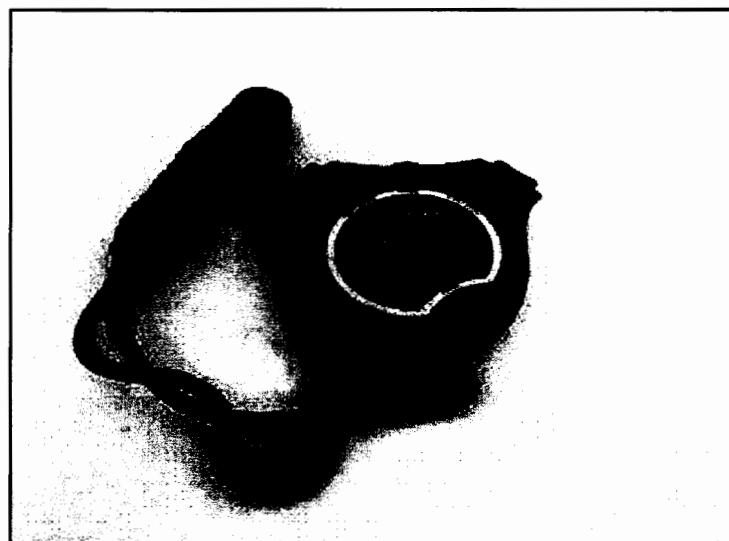
อุปกรณ์บันทึกข้อมูลที่ใช้งานร่วมกับสายวัดอุปกรณ์วัดอุณหภูมิ (Thermocouple) ประเภทคี (K) ซึ่งประกอบด้วยสายบวกทำจากโลหะผสมระหว่างนิกเกิล 10% และโครเมียม 90% ส่วนสายลบทำจากโลหะผสมระหว่างนิกเกิล 95% ของส่วนผสมระหว่างอลูมิเนียม แมงกานีส และชิลิกอน สามารถวัดอุณหภูมิได้จาก -180 °C ถึงประมาณ 1,350 °C



ภาพที่ 3.15 อุปกรณ์บันทึกข้อมูล (Data Logger)

3.3.8 นาฬิกาจับเวลาดิจิตอล

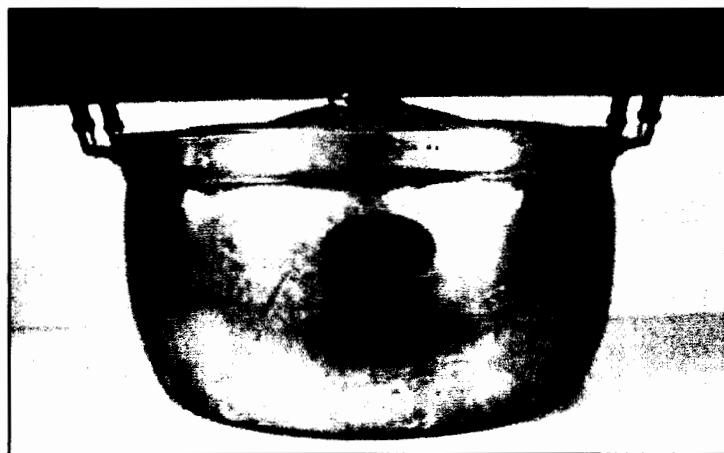
นาฬิกาจับเวลา หน้าปัดแบบดิจิตอล สามารถจับเวลาได้ละเอียดถึง 0.01 วินาที



ภาพที่ 3.16 นาฬิกาจับเวลาดิจิตอล

3.3.9 ภาชนะ (หม้อ)

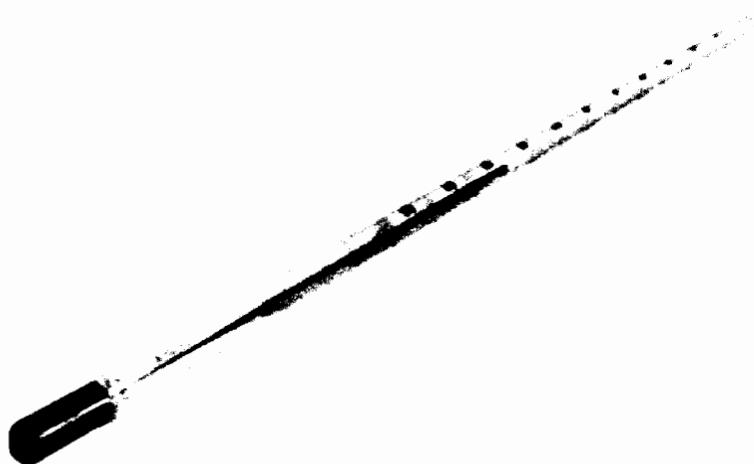
ภาชนะอะลูมิเนียมแบบมีหู เบอร์ 45 (ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางก้นหม้อ 45 เซนติเมตร) บรรจุปริมาณน้ำ 30.6 กิโลกรัม อ้างอิงตามมาตรฐานอ้างอิง DIN EN 203-2 เพื่อทดสอบประสิทธิภาพ เชิงความร้อนของเตาแก๊สหุงต้ม โดยผาหม้อทำการเจาะรูเพื่อติดตั้งเทอร์โมมิเตอร์เพื่อใช้วัดอุณหภูมิของน้ำ



ภาพที่ 3.17 ภาชนะ (หม้อ) ขนาดมาตรฐาน เบอร์ 45

3.3.10 เทอร์โมมิเตอร์ (Thermometer)

อุปกรณ์วัดอุณหภูมิขอน้ำที่ใช้ในการทดสอบ ช่วงการวัดของอุณหภูมิ เท่ากับ $0 - 100^{\circ}\text{C}$



ภาพที่ 3.18 เทอร์โมมิเตอร์ (Thermometer)

3.4 วิธีการทำการทดลอง

การทดสอบประสิทธิภาพเชิงความร้อน อ้างอิงตามมาตรฐานเยอรมัน DIN EN 203-2 [14] โดยทำการประยุกต์เข้าร่วมกับเตาแก๊สหุงต้มแอลพีจี (LPG) ประเภทแรงดันสูง ซึ่งมีวิธีการดังนี้

3.4.1 ติดตั้งวัสดุและอุปกรณ์ที่จำเป็นเพื่อใช้ในการทดสอบ เช่น ฐานรองภาชนะ เตาแก๊สหุงต้ม ในครัวเรือน ประเภทแรงดันสูง ขนาด KB-5 ถังแก๊สแอลพีจี (LPG), ภาชนะ (หม้อ) เบอร์ 45 ที่มีขนาด 45 เซนติเมตร

3.4.2 ทำการเปิดหัวเตาแก๊สหุงต้มเพื่ออุ่นหัวเตาเป็นเวลาประมาณ 10 นาที

3.4.3 ชั้งปริมาณน้ำ (อ้างอิงตามมาตรฐาน DIN EN 203-2) ที่มีมวลของน้ำ เท่ากับ 30.6 kg ใส่ลงในภาชนะ พร้อมเริ่มทำการบันทึกอุณหภูมิเริ่มต้นของน้ำ

3.4.4 ทำการปรับอัตราการไหลของแก๊สที่ Pressure Regulator ที่ความดันที่ใช้ในการศึกษา พร้อมเริ่มจับเวลาในการต้มน้ำเดือดแล้วทำการบันทึกผล

3.4.5 ต้มน้ำให้เดือดจนกระทั้งอุณหภูมิของน้ำ ประมาณ 90 องศาเซลเซียสแล้วทำการบันทึก ข้อมูลของเวลา

3.4.6 ทำการวัดปริมาณแก๊สไออกไซด์ที่ได้หลังจากการเผาไหม้โดยใช้เครื่องวิเคราะห์แก๊สไออกไซต่อ บริเวณปล่องระบายน้ำของไออกไซด์ (h_2O) และทำการวัดค่าปริมาณของ O_2 , CO_2 และ CO

บทที่ 4

ผลและการวิเคราะห์ผล

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาลักษณะการเผาไหม้สำหรับเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือน ขนาด KB-5 ประเภทแรงดันสูง ด้วยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD) ในรูปแบบการไหลปั่นป่วน $k-\varepsilon$ ชนิด RNG คำนวณร่วมกับแบบจำลอง species transport แบบเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ แสดงรายละเอียดดังนี้

4.1 การเปรียบเทียบผลของการจำลองและผลการทดลอง

การเปรียบเทียบผลที่ได้จากรูปแบบการจำลองการเผาไหม้สำหรับเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือน ประเภทแรงดันสูง ขนาด KB-5 กับผลที่ได้จากการทดลองจริง ที่มีขนาดรูทางออกของหัวฉีดเชื้อเพลิง แอลพีจี (LPG) (D_n) เท่ากับ 0.9 mm และที่อัตราการป้อนแก๊สเชื้อเพลิงแอลพีจี (LPG) เท่ากับ 9.48 kW (ที่ 0.5 bar) ในตำแหน่งด้านล่างของขอบภาชนะ (ก้นหม้อ) ซึ่งแสดงผลลัพธ์ในรูปแบบปริมาณ mass fraction ของผลิตภัณฑ์ของแก๊สไอเสียที่ได้หลังจากการเผาไหม้ เช่น ปริมาณ mass fraction ของแก๊สออกซิเจน (O_2), แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) อีกทั้งสามารถแสดงอุณหภูมิสูงสุดของเปลวไฟ (Flame Temperature) สำหรับเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือน ในรูปแบบทั่วไป (Conventional Burner, CB) ดังตารางที่ 4.1 และภาคผนวก ข.

ตารางที่ 4.1 การเปรียบเทียบผลของการจำลองสำหรับเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือน ประเภทแรงดันสูง ขนาด KB-5 ที่ได้หลังจากการจำลองกับผลการทดลองจริง

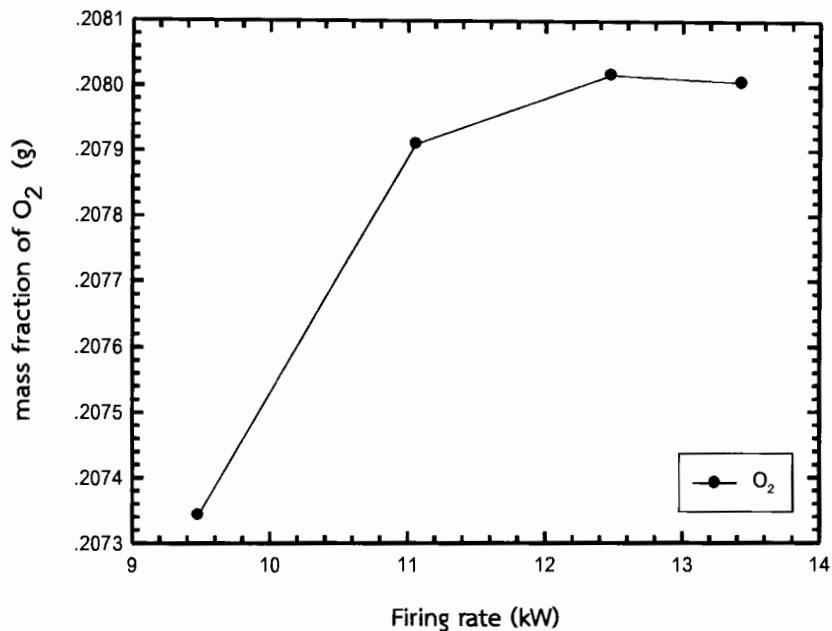
| อัตราการป้อน เชื้อเพลิง (kW) | ปริมาณ mass fraction ของแก๊สไอเสียที่ได้หลังจากการเผาไหม้ของแบบจำลอง (g) | ผลการจำลอง (g) | ผลการทดลอง (g) | ค่าความคลาดเคลื่อน (%) |
|------------------------------------|--|-------------------|-------------------|------------------------|
| 9.48 | ออกซิเจน (O_2) | 0.207343 | 0.191417 | 7.68 |
| | คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) | 0.0315491 | 0.035567 | 12.73 |
| | คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) | 0.000388191 | 0.00032361 | 15.78 |
| | อุณหภูมิของเปลวไฟ (K) | 1854.33 | - | - |

ซึ่งผลจากการจำลองเปรียบเทียบกับผลการทดลอง พบร้า ผลิตภัณฑ์ของแก๊สไอเสียที่ได้หลังจากการเผาไหม้ของการจำลอง ที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิงแอลพีจี (LPG) เท่ากับ 9.48 kW (ที่ 0.5 bar) ได้แก่ ปริมาณ mass fraction ของแก๊สออกซิเจน (O_2) มีค่าเท่ากับ 0.207343 g, ปริมาณ mass fraction ของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) มีค่าเท่ากับ 0.0315491 g และ ปริมาณ mass fraction ของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) มีค่าเท่ากับ 0.000388191 g และผลิตภัณฑ์ของแก๊สไอเสียที่ได้หลังจากการเผาไหม้สำหรับการทดลองจริง ได้แก่ ปริมาณ mass fraction ของแก๊สออกซิเจน (O_2) มีค่าเท่ากับ 0.191417 g, ปริมาณ mass fraction ของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) มีค่าเท่ากับ 0.035567 g และ ปริมาณ mass fraction ของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) มีค่าเท่ากับ 0.00032361 g จากนั้นทำการเปรียบเทียบผลของผลิตภัณฑ์ที่ได้หลังจากการเผาไหม้สำหรับรูปแบบการจำลองและการทดลอง พบร้า มีค่าความคลาดเคลื่อน เท่ากับร้อยละ 7.68, 12.73 และ 15.78 ตามลำดับ ซึ่งค่าความคลาดเคลื่อนสามารถยอมรับได้ นอกจากนี้รูปแบบของการจำลองสามารถแสดงค่าอุณหภูมิสูงสุดของเปลวไฟที่ได้หลังจากการเผาไหม้ เท่ากับ 1854.33 K

4.2 อิทธิพลของการเพิ่มอัตราการป้อนเชื้อเพลิงแอลพีจี (LPG) ที่มีผลต่อลักษณะการเผาไหม้ของแบบจำลองสำหรับเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือน ขนาด KB-5

จากการทดสอบความน่าเชื่อถือของรูปแบบการจำลองที่สามารถยอมรับได้ในหัวข้อที่ผ่านมา จึงนำรูปแบบการจำลองมาใช้ทำนายอิทธิพลการเพิ่มอัตราการป้อนเชื้อเพลิงแอลพีจี (LPG) ที่มีผลต่อลักษณะการเผาไหม้สำหรับเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือน ขนาด KB-5 ในรูปแบบหัวเตาแก๊สหุงต้มท่อไป (CB) ที่มีอัตราการป้อนเชื้อเพลิงแอลพีจี (LPG) เท่ากับ 9.48 kW (ที่ 0.5 bar), 11.06 kW (ที่ 1.0 bar), 12.48 kW (ที่ 1.5 bar) และ 13.48 kW (ที่ 2.0 bar) ตามลำดับ พบร้า ปริมาณ mass fraction ของแก๊สออกซิเจน (O_2) ที่ได้หลังจากการเผาไหม้ของรูปแบบการจำลอง มีค่าเพิ่มขึ้นตามอัตราการป้อนเชื้อเพลิงแอลพีจี (LPG) ที่เพิ่มขึ้น โดยมีปริมาณ mass fraction ของแก๊สออกซิเจน (O_2) มีค่าเท่ากับ 0.207343 g, 0.207910 g, 0.208017 g และ 0.208006 g ตามลำดับ ดังภาพที่ 4.1 เมื่อนำปริมาณ mass fraction ของแก๊สออกซิเจน (O_2) ที่ได้หลังจากการเผาไหม้ของรูปแบบการจำลองมาในทางทฤษฎีการเผาไหม้สมบูรณ์ (%โดยมวล) พบร้า ผลลัพธ์ปริมาณแก๊สออกซิเจน (O_2) ที่ได้อยู่ในช่วงของการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ ซึ่งอยู่ระหว่างร้อยละ 15 ถึง 20 โดยมวล จึงทราบได้ว่าปริมาณแก๊สออกซิเจน (O_2) เพียงพอต่อการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ และจากภาพที่ 4.1 ปริมาณ mass fraction ของแก๊สออกซิเจน (O_2) ที่ได้หลังจากการเผาไหม้ของรูปแบบการจำลอง พบร้า ช่วงที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิงแอลพีจี (LPG) เท่ากับ 9.48 kW (ที่ 0.5 bar) ถึง 11.06 kW (ที่ 1.0 bar) มีปริมาณ mass fraction ของแก๊สออกซิเจน (O_2) ที่ได้หลังจากการเผาไหม้เพิ่มสูงขึ้นได้อย่างชัดเจนและหลังจากนั้น

ปริมาณ mass fraction ของแก๊สออกซิเจน (O_2) มีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย เนื่องจากช่วงการเผาใหม่ที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิงที่สูงจะทำให้เกิดการเผาใหม่ที่ไม่สมบูรณ์

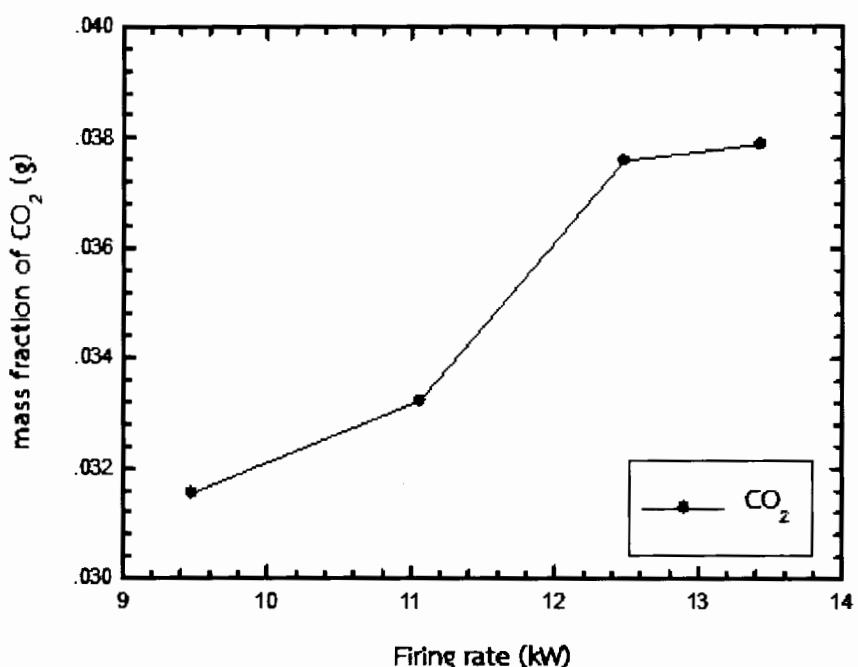


ภาพที่ 4.1 การเพิ่มอัตราการป้อนเชื้อเพลิงแอลพีจี (LPG) ที่มีผลต่อปริมาณ mass fraction ของแก๊สออกซิเจน (O_2)

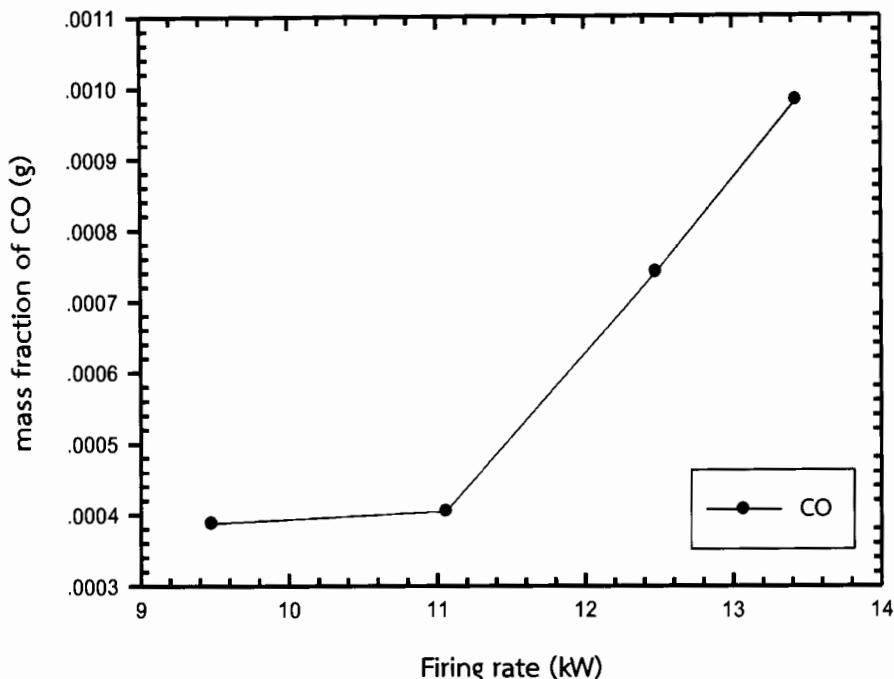
ต่อมาผลลัพธ์ที่ได้จากรูปแบบการจำลองสามารถอธิบายถึงปริมาณ mass fraction ของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ดังภาพที่ 4.2 สามารถทราบได้ว่าเมื่อมีการเพิ่มอัตราการป้อนเชื้อเพลิงแอลพีจี (LPG) ที่สูงขึ้น พบว่า ปริมาณ mass fraction ของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ที่เพิ่มสูงขึ้นตามอัตราการป้อนเชื้อเพลิงแอลพีจี (LPG) และนอกจากนั้นสามารถทราบได้อีกว่าที่ช่วงอัตราการป้อนเชื้อเพลิงแอลพีจี (LPG) เท่ากับ 9.48 kW (ที่ 0.5 bar) ถึง 12.48 kW (ที่ 1.5 bar) พบว่า ปริมาณ mass fraction ของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) มีค่าเพิ่มขึ้นได้อย่างชัดเจน ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.0315491 g, 0.0332293 g, และ 0.0375788 g ตามลำดับ หลังจากนั้นในช่วงอัตราการป้อนเชื้อเพลิงแอลพีจี (LPG) เท่ากับ 12.48 kW (ที่ 1.5 bar) ถึง 13.48 kW (ที่ 2.0 bar) พบว่า ปริมาณ mass fraction ของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) มีการเปลี่ยนแปลงที่เพิ่มขึ้นเล็กน้อย

ซึ่งจากการที่ 4.3 อธิบายลักษณะการเพิ่มอัตราการป้อนเชื้อเพลิงแอลพีจี (LPG) ที่มีผลต่อปริมาณ mass fraction ของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) พบว่า ปริมาณ mass fraction ของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ที่ได้หลังจากการเผาใหม่ของการจำลอง ที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิงแอลพีจี (LPG) เท่ากับ 9.48 kW (ที่ 0.5 bar) ถึง 11.06 kW (ที่ 1.0 bar) มีปริมาณ mass fraction ของ

คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ที่มีปริมาณค่อนข้างต่ำ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.000388191 g ถึง 0.000402508 g เนื่องจากปริมาณแก๊สออกซิเจน (O_2) ในช่วงการเผาไหม้ดังกล่าวได้มีการปล่อยปริมาณ mass fraction ของแก๊สออกซิเจน (O_2) ที่เพียงพอต่อการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ จึงส่งผลกระทบต่อปริมาณ mass fraction ของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) หลังจากนั้นที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิงแอลพีจี (LPG) เท่ากับ 11.06 kW (ที่ 1.0 bar) ถึง 13.48 kW (ที่ 2.0 bar) มีปริมาณ mass fraction ของ แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ที่เพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง

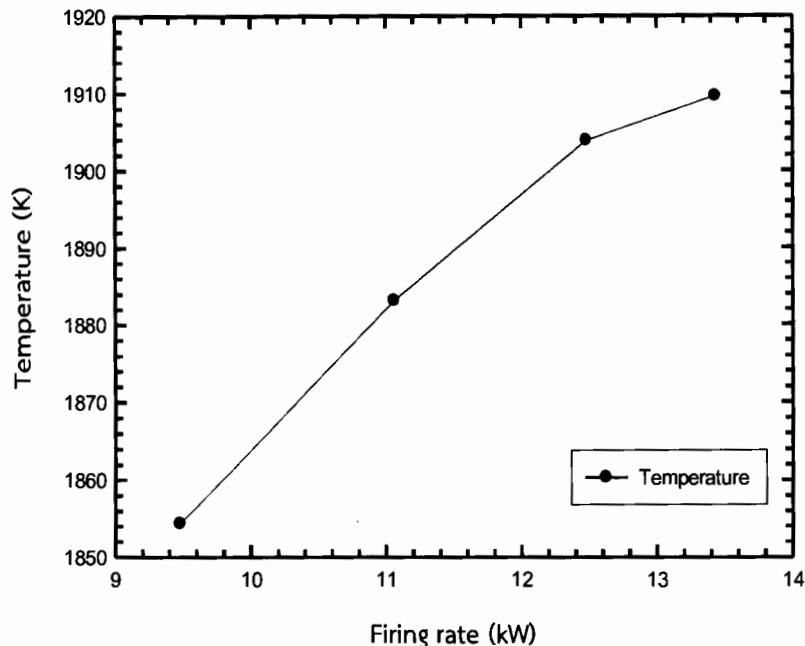


ภาพที่ 4.2 การเพิ่มอัตราการป้อนเชื้อเพลิงของแอลพีจี (LPG) ที่มีผลต่อปริมาณ mass fraction ของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2)



ภาพที่ 4.3 การเพิ่มอัตราการป้อนเชื้อเพลิงแอลพีจี (LPG) ที่มีผลต่อปริมาณ mass fraction ของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO)

ดังนั้นจึงทราบได้ว่า ปริมาณ mass fraction ของผลิตภัณฑ์ที่ได้หลังจากการเผาไหม้ของรูปแบบการจำลองสำหรับเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือน ขนาด KB-5 ในรูปแบบหัวเตาแก๊สหุงต้มทั่วไป (CB) สามารถบ่งบอกการเผาไหม้ที่ดีในช่วงอัตราการป้อนเชื้อเพลิงแอลพีจี (LPG) เท่ากับ 9.48 kW (ที่ 0.5 bar) ถึง 11.06 kW (ที่ 1.0 bar) เนื่องจากปริมาณ mass fraction ของแก๊สออกซิเจน (O_2) เพียงพอต่อการเผาไหม้จึงส่งผลต่อปริมาณ mass fraction ของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ที่ค่อนข้างต่ำทำให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ นอกจากนี้ยังส่งผลต่ออุณหภูมิเบลาไฟและประสิทธิภาพเชิงความร้อนได้ดีอีกด้วย จากรูปแบบการจำลองสามารถทำนายอุณหภูมิสูงสุดของเบลาไฟที่ได้หลังจากการเผาไหม้มีค่าเท่ากับ 1854.33 K, 1883.72 K, 1903.87 K และ 1909.59 K ตามลำดับ ดังภาพที่ 4.4 พบว่า ที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิงแอลพีจี (LPG) เท่ากับ 9.48 kW ถึง 11.06 kW มีค่าอุณหภูมิสูงสุดของเบลาไฟเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว



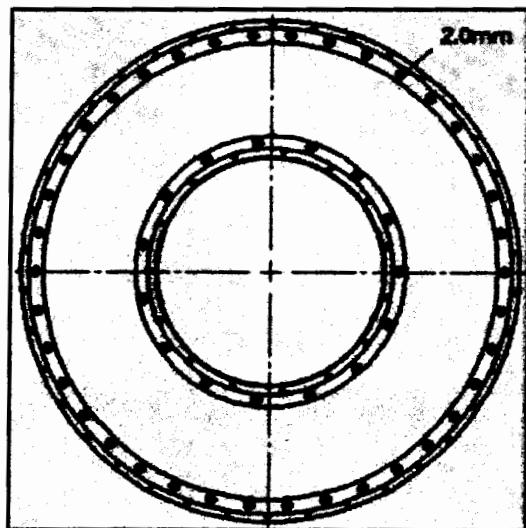
ภาพที่ 4.4 การเพิ่มอัตราการป้อนเชื้อเพลิงแก๊สโซลินอยด์ (LPG) ที่มีผลต่ออุณหภูมิสูงสุดของเปลวไฟ

4.3 อิทธิพลขนาดรูทางออกของเปลวไฟที่มีผลต่อลักษณะเผาไหม้ของการจำลองสำหรับเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือน ขนาด KB-5

จากรูปแบบการจำลองสามารถนำมาประยุกต์ใช้สำหรับเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือน ขนาด KB-5 ที่มีขนาดรูทางออกของเปลวไฟ (D_p) สำหรับเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือน ขนาด KB-5 ที่มีผลต่อลักษณะการเผาไหม้ของการจำลอง โดยมีลักษณะพอร์ตหัวเตาแก๊สหุงต้มแบบหัวไป (CB) ที่มีขนาดรูทางออกของเปลวไฟ (D_p) เท่ากับ 2.0 mm มีขนาดของมุมเบี้ย (β) เท่ากับ 55° และขนาดของมุมเอียง (α) เท่ากับ 0° ตามขนาดจริงที่มีข่ายตามห้องทดลอง ดังภาพที่ 4.5 และ 4.6 จึงได้ทำการศึกษาอิทธิพลขนาดรูทางออกของเปลวไฟ (D_p) เท่ากับ 1.8, 2.0 และ 2.2 mm และที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิงแก๊สโซลินอยด์ (LPG) เท่ากับ 9.48 kW (ที่ 0.5 bar), 11.06 kW (ที่ 1.0 bar), 12.48 kW (ที่ 1.5 bar) และ 13.48 kW (ที่ 2.0 bar) ตามลำดับ ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ขนาดรูทางออกของเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือนแบบทั่วไป (CB)

| ประเภทของเตา | ขนาดรูทางออกของหัวเตา (mm) | ขนาดพื้นที่รูทางออกของหัวเตา (mm^2) |
|--------------|----------------------------|--|
| CB | 1.8 | 215.60 |
| CB | 2.0 | 242.28 |
| CB | 2.2 | 278.40 |



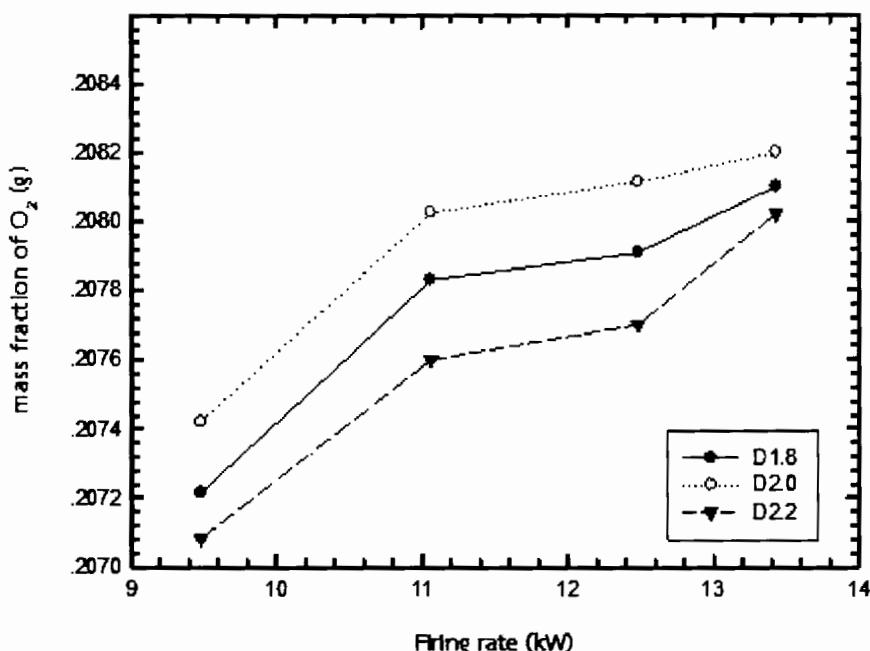
ภาพที่ 4.5 เตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือนแบบทั่วไป (CB) (ด้านบน)



ภาพที่ 4.6 เตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือนแบบทั่วไป (CB) (ด้านข้าง)

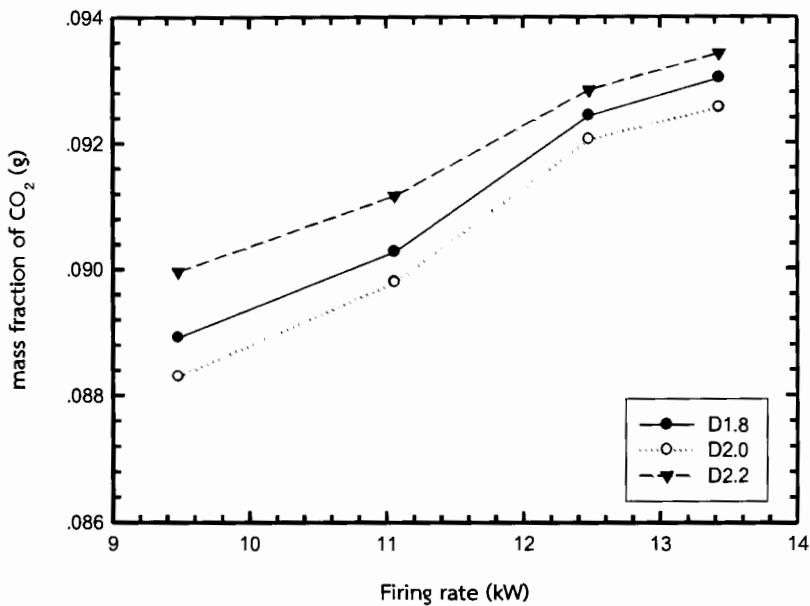
จากรูปแบบการสามารถคำนวณอิทธิพลขนาดรูทางออกของเบลาไฟ (D_p) ที่มีผลกระทบต่อลักษณะเผาไหม้ พบว่า ปริมาณ mass fraction ของแก๊สออกซิเจน (O_2) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอัตราการป้อนเชื้อเพลิงแอลพีจี (LPG) เป็นไปในทิศทางเดียวกันทุกรูทางออกของเบลาไฟ (D_p) โดยช่วงการทำงานที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิงแอลพีจี (LPG) เท่ากับ 9.48 kW (ที่ 0.5 bar) ถึง 11.06 kW

(ที่ 1.0 bar) มีปริมาณ mass fraction ของแก๊สออกซิเจน (O_2) ที่เพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วสำหรับทุกขนาดของรูทางออกของเปลวไฟ



ภาพที่ 4.7 ปริมาณ mass fraction ของแก๊สออกซิเจน (O_2) ที่มีขนาดรูทางออกของเปลวไฟ (D_p)

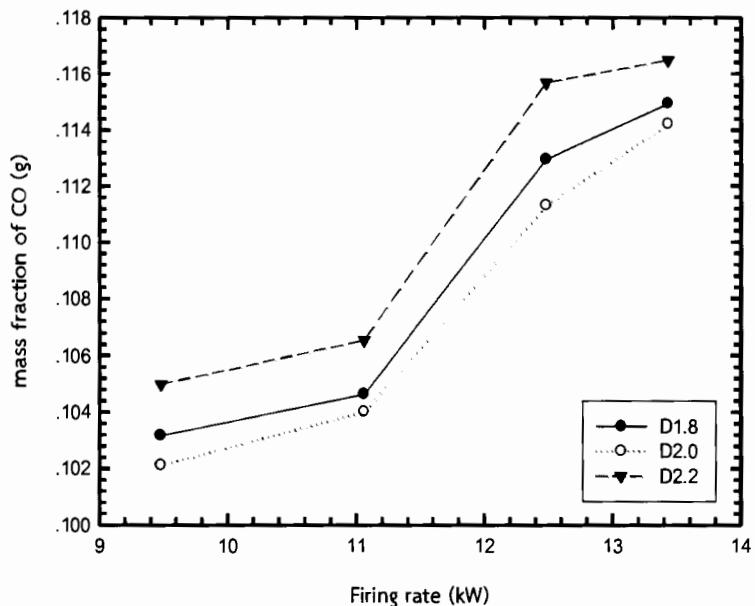
ยังทราบได้ว่าที่ขนาดรูทางออกของเปลวไฟ (D_p) เท่ากับ 2.0 mm มีปริมาณ mass fraction ของแก๊สออกซิเจน (O_2) ที่เพียงพอต่อการเผาไหม้ที่สมบูรณ์มากที่สุด จากนั้นได้ผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองสามารถอธิบายปริมาณ mass fraction ของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) จากภาพที่ 4.8 สามารถอธิบายปริมาณ mass fraction ของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ที่ได้หลังจากการเผาไหม้ของรูปแบบการจำลองสำหรับเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือนที่มีขนาดรูทางออกของเปลวไฟ (D_p) เท่ากับ 1.8, 2.0 และ 2.2 mm พบร้า ปริมาณ mass fraction ของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอัตราการป้อนเชื้อเพลิงและพีจี (LPG) ที่เพิ่ม โดยที่ขนาดรูทางออกของเปลวไฟ เท่ากับ 2.0 mm มีค่าปริมาณ mass fraction ของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ต่ำกว่าขนาดรูทางออก 1.8 mm และ 2.2 mm ทุกรอบอัตราการป้อนเชื้อเพลิง เนื่องจากขนาดรูทางออกของเปลวไฟมีความเหมาะสมสำหรับการเผาไหม้สมบูรณ์เตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือนที่ใช้ในการศึกษา จึงส่งผลให้ปริมาณ mass fraction ของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ที่ต่ำ



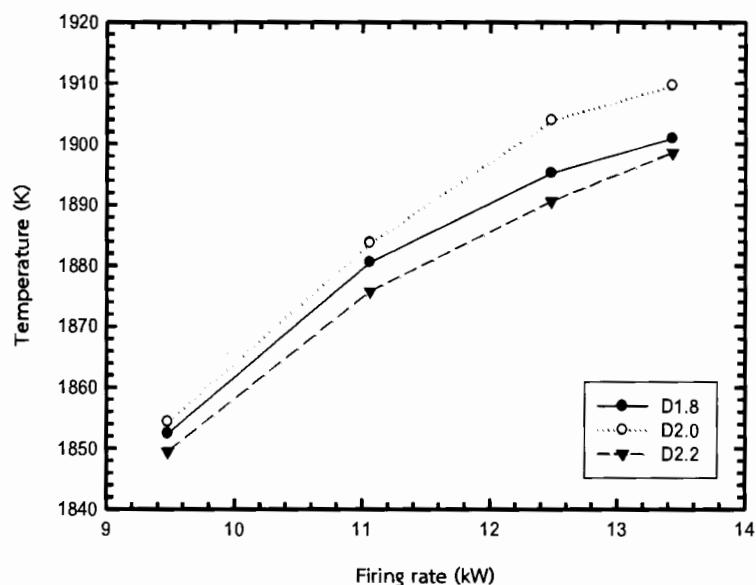
ภาพที่ 4.8 ปริมาณ mass fraction ของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ที่มีขนาดรูทางออกของเพลวไฟ (D_p)

โดยจากความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ mass fraction ของแก๊สออกซิเจน (O_2) และปริมาณ mass fraction ของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ที่ได้ก่อตัวมาข้างต้นจึงส่งผลต่อปริมาณ mass fraction ของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) จากภาพที่ 4.9 พบว่า ปริมาณ mass fraction ของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ที่ได้หลังจากการเผาไหม้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอัตราการป้อนเชื้อเพลิง แอลพีจี (LPG) สำหรับทุกขนาดรูทางออกของเพลวไฟ (D_p) ที่ใช้ในการศึกษา โดยเฉพาะช่วงอัตราการป้อนเชื้อเพลิงแอลพีจี (LPG) เท่ากับ 9.48 kW (ที่ 0.5 bar) ถึง 11.06 kW (ที่ 1.0 bar) พบว่า ปริมาณ mass fraction ของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ที่มีปริมาณค่อนข้างต่ำ หลังจากนั้นช่วงอัตราการป้อนเชื้อเพลิงมีปริมาณ mass fraction เพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ซึ่งมีค่าปริมาณ mass fraction ที่ขนาดพื้นที่รูทางออกของเพลวไฟ (D_p) เท่ากับ 2.0 mm มีปริมาณ mass fraction ของผลิตภัณฑ์ที่ต่ำกว่าขนาดรูทางออกของเพลวไฟ (D_p) เท่ากับ 2.2 mm. และ 1.8 mm. ซึ่งจากการวิเคราะห์ผลของการจำลองสำหรับการเผาไหม้ระหว่างเชื้อเพลิงแอลพีจี (LPG) กับอากาศ ที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิงแอลพีจี (LPG) เท่ากับ 9.48 kW (ที่ 0.5 bar), 11.06 kW (ที่ 1.0 bar), 12.48 kW (ที่ 1.5 bar) และ 13.48 kW (2.0 bar) ตามลำดับ ทำการพิจารณาปริมาณ mass fraction ของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ในปริมาณที่น้อย ซึ่งจะส่งผลที่ดีต่อการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ อีกทั้งยังส่งผลต่ออุณหภูมิเพลวไฟและประสิทธิภาพเชิงความร้อนได้ สามารถยืนยันผลการทำนาย ดังภาพที่ 4.10, ตารางที่ 4.3 และ 4.4 ที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิงแอลพีจี (LPG) เท่ากับ 9.48 kW (ที่ 0.5 bar) พบร้า

ที่ขนาดรูทางออกของเพลวไฟ (D_p) เท่ากับ 2.0 mm ให้ค่าอุณหภูมิสูงสุดของเพลวไฟสูงกว่าขนาดรูทางออกของเพลวไฟ (D_p) เท่ากับ 1.8 mm และ 2.2 mm

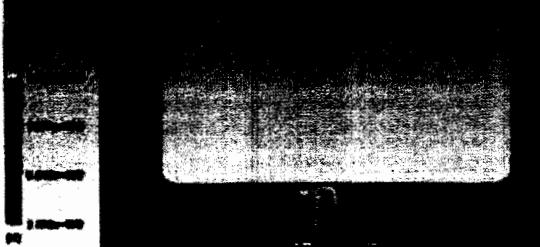
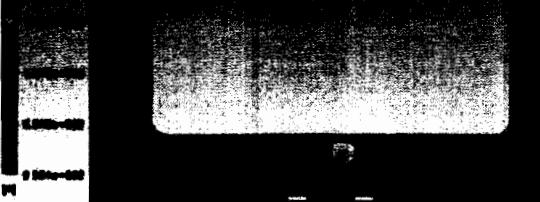


ภาพที่ 4.9 ปริมาณ mass fraction ของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ที่มีขนาดรูทางออกของเพลวไฟ (D_p)

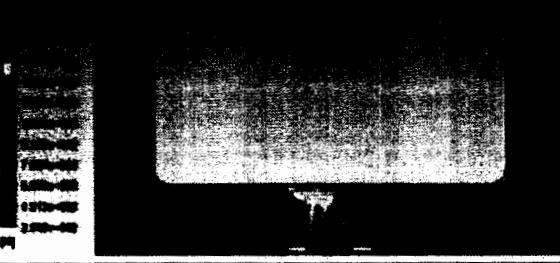
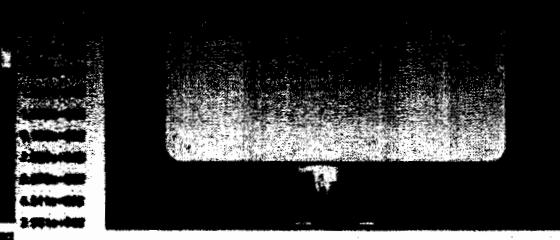
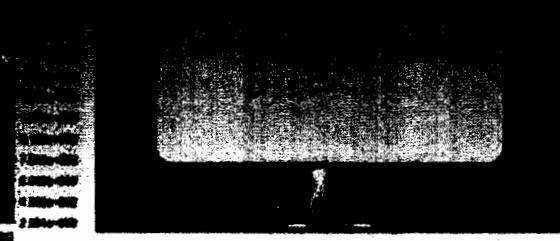


ภาพที่ 4.10 อุณหภูมิสูงสุดของเพลวไฟที่มีขนาดรูทางออกของเพลวไฟ (D_p)

ตารางที่ 4.3 อุณหภูมิสูงสุดของเปลวไฟ ที่ขนาดรูทางออกของเปลวไฟ (D_p)

| ขนาดรูทางออกของ เปลวไฟ (D_p) (mm) | แสดงผล | อุณหภูมิ เปลวไฟ (K) |
|---|--|---------------------------|
| D1.8 |  | 1852.44 |
| D2.0 |  | 1854.33 |
| D2.2 |  | 1849.51 |

ตารางที่ 4.4 Contour อุณหภูมิสูงสุดของเปลวไฟ ที่ขนาดรูทางออกของเปลวไฟ (D_p)

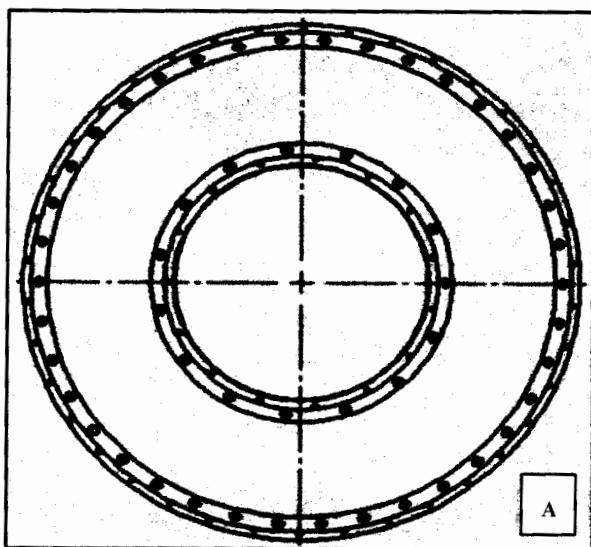
| ขนาดรูทางออกของเปลวไฟ (D_p) (mm) | แสดงผล | อุณหภูมิเปลวไฟ (K) |
|---|--|--------------------|
| D1.8 |  | 1852.44 |
| D2.0 |  | 1854.33 |
| D2.2 |  | 1849.51 |

4.4 อิทธิพลการเผาไหม้สำหรับหัวเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือน ขนาด KB-5 ในรูปแบบหัวเตาแก๊สหุงต้มทั่วไป (CB) และแบบหมุนวน (SB)

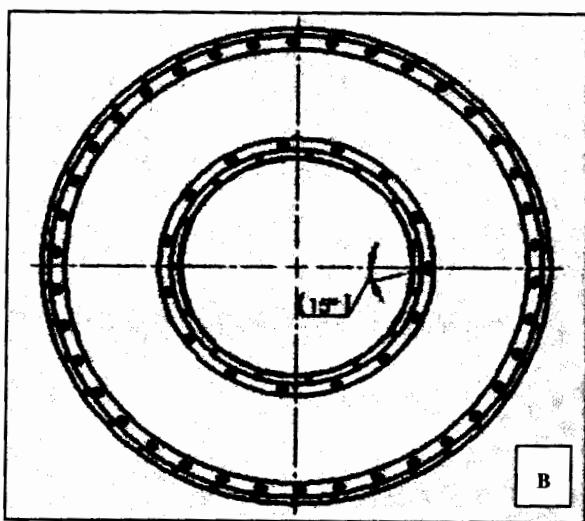
จากการหัวข้อที่ผ่านมาได้ทำการศึกษาถึงอิทธิพลขนาดรูทางออกของเปลวไฟ (D_p) ที่มีผลกระทบต่อลักษณะการเผาไหม้ของการจำลองสำหรับหัวเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือน ขนาด KB-5 ในรูปแบบหัวเตาแก๊สหุงต้มทั่วไป (CB) ในหัวข้อนี้จึงได้นำรูปแบบการจำลองมาประยุกต์ใช้ในการท่านายลักษณะรูทางออกของหัวเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือน ขนาด KB-5 ในรูปแบบหัวเตาแก๊สหุงต้มแบบทั่วไป (CB) ที่มีขนาดของมุมเบี่ยงทางออกของเปลวไฟ (β) เท่ากับ 55° และขนาดของมุมเอียง (α) เท่ากับ 0° และหัวเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือน ในรูปแบบหมุนวน (SB) ที่มีขนาดมุมเบี่ยงของรูทางออกของเปลวไฟ (β) เท่ากับ 55° และมุมเอียง (α) เท่ากับ 15° ดังภาพที่ 4.11 ถึง 4.13 โดยอ้างอิงจากมุมเอียง (α) จากงานวิจัย [3] ที่สามารถปรับปรุงลักษณะรูทางออกของเปลวไฟที่มีผลต่ออุณหภูมิเปลวไฟและประสิทธิภาพเชิงความร้อน

ตารางที่ 4.5 แบบจำลองของหัวเตาแก๊สหุ้งต้มในครัวเรือน ขนาด KB-5

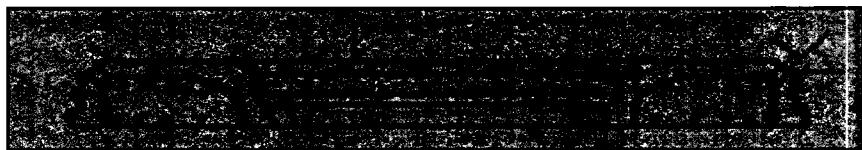
| ประเภทของเตา (α) | ขนาดรูทางออกของเปลวไฟ (mm) | ขนาดพื้นที่รูทางออก ของหัวเตา (mm^2) |
|------------------------------|-------------------------------|---|
| CB ($SB0^\circ$) | | |
| SB15° | 2.0 | 242.28 |



ภาพที่ 4.11 แบบจำลองของหัวเตาแก๊สหุ้งต้มในครัวเรือนแบบทั่วไป (CB) (A)

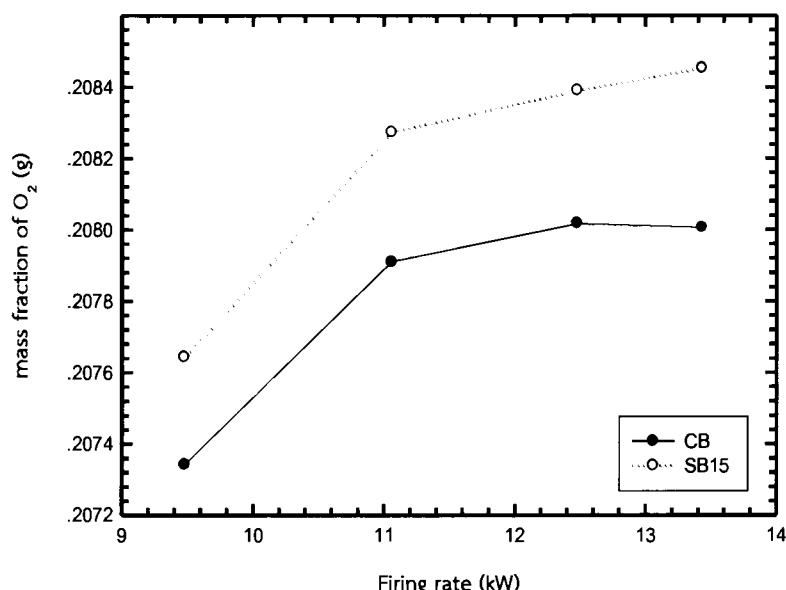


ภาพที่ 4.12 แบบจำลองของหัวเตาแก๊สหุ้งต้มในครัวเรือนแบบหมุนวน (SB) (B)



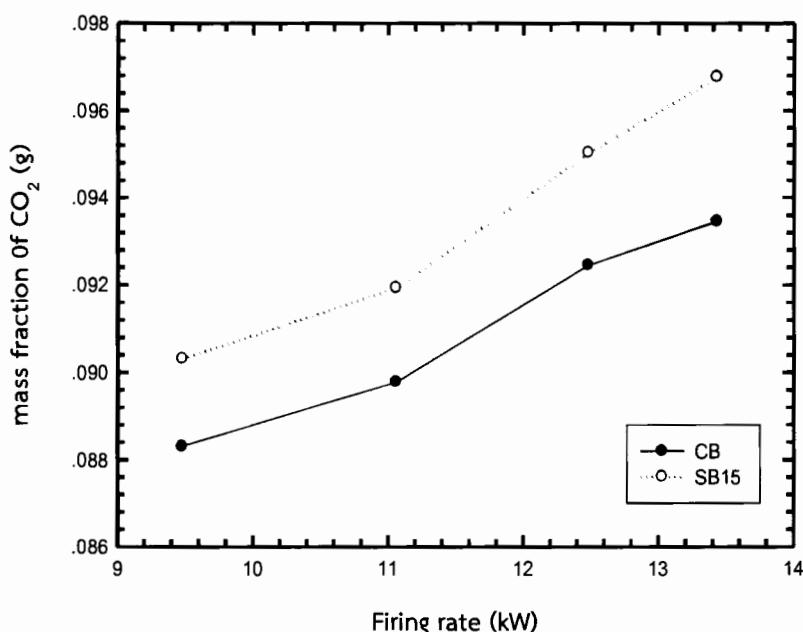
ภาพที่ 4.13 ขนาดของมุนเยย (β) เท่ากับ 55° ที่ใช้ในการศึกษา

รูปแบบการจำลองการเผาไหม้สำหรับหัวเตาแก๊สหุงต้มแบบทั่วไป (CB) ที่มีขนาดของมุนเยยของรูทางออกของเพลวไฟ (β) เท่ากับ 55° และขนาดของมุนเยียง (α) เท่ากับ 0° และแบบหมุนวน (SB) ที่มีขนาดมุนเยย (β) เท่ากับ 55° และมุนเยียง (α) เท่ากับ 15° สามารถแสดงผลลัพธ์ในรูปแบบปริมาณ mass fraction ของแก๊สออกซิเจน (O_2), แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2), แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และอุณหภูมิสูงสุดของเพลวไฟ พบร้า ปริมาณ mass fraction ของออกซิเจน (O_2) ที่ได้หลังจากการเผาไหม้ของการจำลอง อธิบายได้ว่าจากภาพที่ 4.14 พบร้า ปริมาณ mass fraction ของแก๊สออกซิเจน (O_2) มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตามอัตราการป้อนเชื้อเพลิงแอ็ลฟีจี (LPG) โดยปริมาณ mass fraction ของออกซิเจน (O_2), สำหรับหัวเตาแก๊สหุงต้มแบบหมุนวน (SB) ที่มีค่าสูงกว่าเตาแก๊สหุงต้มแบบทั่วไป (CB) เนื่องจากลักษณะการหมุนวน (Swirl) ของหัวเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือนแบบหมุนวน (SB) ให้มีการเหนี่ยวนำอากาศส่วนที่สอง (Secondary air) เข้ามาผสมกับการเผาไหม้ที่ดีขึ้น จึงส่งผลต่อปริมาณ mass fraction ของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ที่เพิ่มขึ้นตัวอย่างจากภาพที่ 4.15

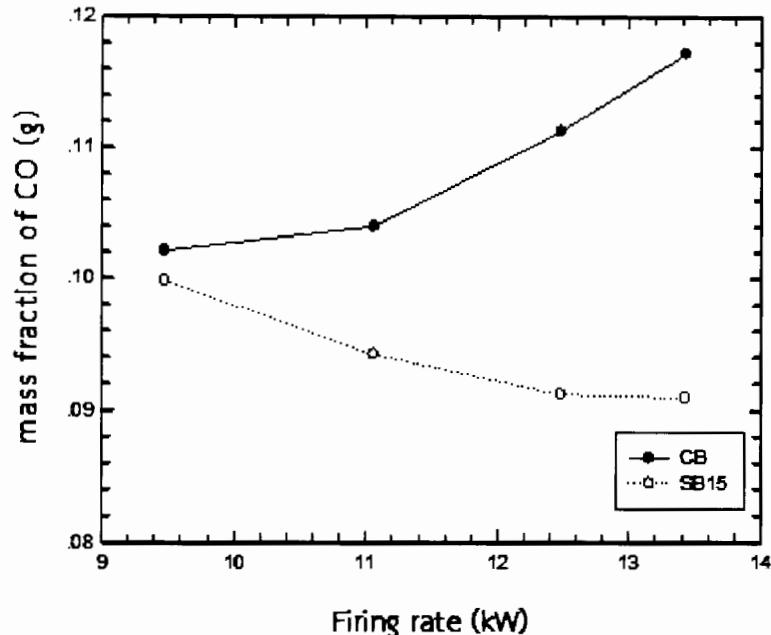


ภาพที่ 4.14 การเปรียบเทียบปริมาณ mass fraction ของแก๊สออกซิเจน (O_2)
สำหรับหัวเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือนแบบทั่วไป (CB) และแบบหมุนวน (SB)

ปริมาณ mass fraction ของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ที่ได้หลังจากการเผาไหม้ของรูปแบบการจำลอง ที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิงแอลพีจี (LPG) เท่ากับ 9.48 kW (ที่ 0.5 bar), 11.06 kW (ที่ 1.0 bar), 12.48 kW (ที่ 1.5 bar) และ 13.48 kW (ที่ 2.0 bar) ตามลำดับ พบว่า ปริมาณ mass fraction ของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) เพิ่มขึ้นตามอัตราการป้อนเชื้อเพลิงแอลพีจี (LPG) และเป็นในลักษณะทิศทางเดียวกัน โดยปริมาณ mass fraction ของหัวเตาแก๊สหุงต้มแบบหมุนวน (SB) ที่มีค่าสูงกว่าเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือนแบบทั่วไป (CB) เนื่องจากผลิตภัณฑ์ของแก๊ส ไอเสียที่ได้จากการเผาไหม้มีปริมาณ mass fraction ของแก๊สออกซิเจน (O_2) ที่เพิ่มขึ้นจึงส่งผลต่อปริมาณ mass fraction ของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO_2) จากภาพที่ 4.16 อธิบายปริมาณ mass fraction ของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ที่ได้หลังจากการเผาไหม้ของการจำลอง ที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิงแอลพีจี (LPG) เท่ากับ 9.48 kW (ที่ 0.5 bar), 11.06 kW (ที่ 1.0 bar), 12.48 kW (ที่ 1.5 bar) และ 13.48 kW (ที่ 2.0 bar) ตามลำดับ พบว่า ปริมาณ mass fraction ของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) สำหรับเตาแก๊สหุงต้มแบบหมุนวน (SB) มีค่าลดลง ตามอัตราการป้อนเชื้อเพลิงแอลพีจี (LPG) ที่เพิ่มขึ้นและค่าปริมาณ mass fraction ของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) สำหรับหัวเตาแก๊สหุงต้มแบบทั่วไป (CB) ที่มีค่าเพิ่มสูงตามอัตราการป้อนเชื้อเพลิงแอลพีจี (LPG)

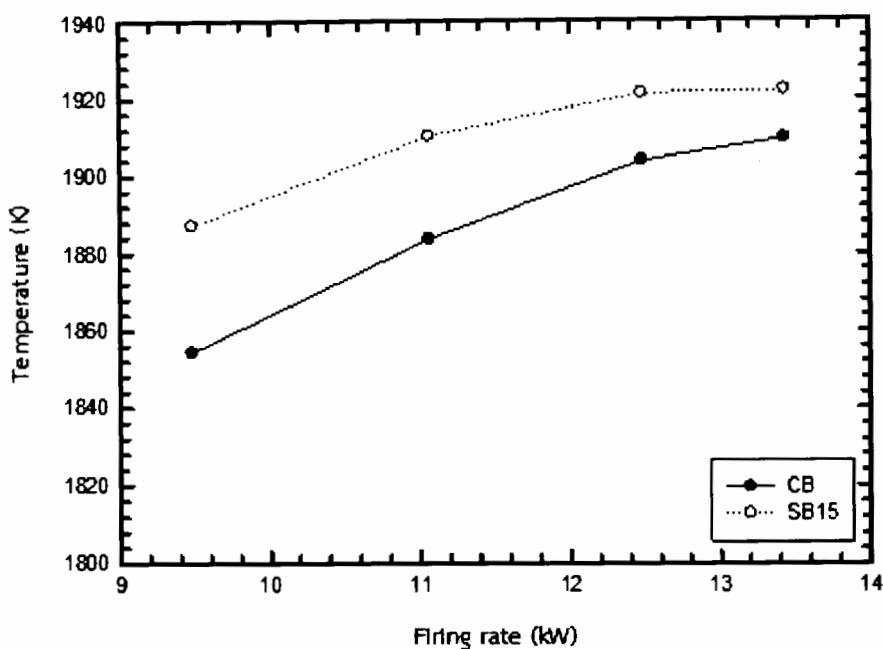


ภาพที่ 4.15 การเบรียบเทียบปริมาณ mass fraction ของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) สำหรับหัวเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือนแบบทั่วไป (CB) และแบบหมุนวน (SB)



ภาพที่ 4.16 การเปรียบเทียบปริมาณ mass fraction ของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) สำหรับหัวเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือนแบบท่อไป (CB) และแบบหมุนวน (SB)

จึงทราบได้ว่าลักษณะของเตาแก๊สหุงต้มแบบหมุนวน (SB) มีการปล่อยปริมาณ mass fraction ของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ต่ำกว่าหัวเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือนแบบท่อไป (CB) เนื่องจากลักษณะของหัวเตาแก๊สหุงต้มแบบหมุนวน (SB) ได้มีการเหนี่ยวนำอากาศส่วนที่สอง (Secondary Air) เข้าผสมกับการเผาไหม้เพื่อช่วยส่งเสริมการเผาไหม้ให้สมบูรณ์ จึงส่งผลต่ออุณหภูมิสูงสุดเป็นไฟและประสิทธิภาพเชิงความร้อน ดังภาพที่ 4.16, 4.17 และจากภาพที่ 4.17 อธิบายอุณหภูมิสูงสุดของเป็นไฟ (Flame Temperature) ที่ได้หลังจากการเผาไหม้ของการจำลอง ที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิงและ LPG เท่ากับ 9.48 kW (ที่ 0.5 bar), 11.06 kW (ที่ 1.0 bar), 12.48 kW (ที่ 1.5 bar) และ 13.48 kW (ที่ 2.0 bar) ตามลำดับ ด้วยกราฟพิก พบร้า อุณหภูมิสูงสุดของเป็นไฟสำหรับเตาแก๊สหุงต้มแบบหมุนวน (SB) มีค่าอุณหภูมิของเป็นไฟที่สูงกว่าเตาแก๊สหุงต้มแบบท่อไป (CB) ดังตารางที่ 4.6 และ 4.7



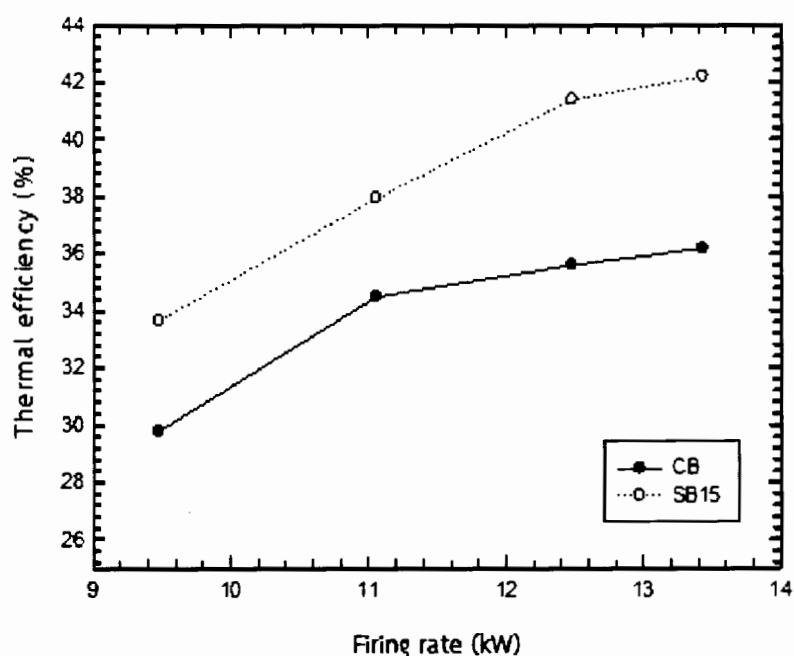
ภาพที่ 4.17 อุณหภูมิสูงสุดของเปลวไฟ (Flame Temperature)

ตารางที่ 4.6 อุณหภูมิสูงสุดของเปลวไฟที่ได้หลังจากการเผาไหม้ของรูปแบบการจำลอง
ที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิง เท่ากับ 9.48 kW (ที่ 0.5 bar)

| ลักษณะของเตา | แสดงผล | อุณหภูมิเปลวไฟ (K) |
|----------------------|--------|--------------------|
| CB ($SB0^{\circ}$) | | 1854.33 |
| $SB15^{\circ}$ | | 1887.17 |

ตารางที่ 4.7 Contour อุณหภูมิสูงสุดของเปลวไฟที่ได้หลังจากการเผาไหม้ของการจำลอง
ที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิง เท่ากับ 9.48 kW (ที่ 0.5 bar)

| ประเภทของเตา | แสดงผล | อุณหภูมิเปลวไฟ (K) |
|--------------------|---|--------------------|
| CB ($SB0^\circ$) |  | 1854.33 |
| SB15° |  | 1887.17 |



ภาพที่ 4.18 ค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อน (Thermal efficiency)

นอกจากนี้ยังสามารถยืนยันผลการจำลองสำหรับหัวเตาแก๊สหุงต้มแบบทั่วไป (CB) และหัวเตาแก๊สหุงต้มแบบหมุนวน (SB) ด้วยวิธีการทดสอบต้มน้ำเดือด (Water Boiling Test) ซึ่งจากการที่ 4.18 แสดงประสิทธิภาพเชิงความร้อน (η) สำหรับเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือน ขนาด KB-5 ที่ได้จากการทดลองจริง อ้างอิงตามมาตรฐาน DIN EN203-2 [15] ที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิงแอลพีจี (LPG) เท่ากับ 9.48 kW (ที่ 0.5 bar), 11.06 kW (ที่ 1.0 bar), 12.48 kW (ที่ 1.5 bar) และ 13.48 kW (ที่ 2.0 bar) ตามลำดับ พบว่า ประสิทธิภาพเชิงความร้อนสำหรับเตาแก๊สหุงต้มแบบหมุนวน (SB) เท่ากับร้อยละ 33.67, 37.95, 41.38, และ 42.2 ตามลำดับ และประสิทธิภาพเชิงความร้อนสำหรับเตาแก๊สหุงต้มแบบทั่วไป (CB) มีค่าเท่ากับร้อยละ 29.79, 34.5, 35.6 และ 36.18 ตามลำดับ จึงทราบได้ว่าค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนสำหรับเตาแก๊สหุงต้มแบบหมุนวน (SB) สูงกว่า เตาแก๊สหุงต้มแบบทั่วไป (CB)

ดังนั้นจากรูปแบบจำลองสามารถอธิบายลักษณะการเผาไหม้สำหรับเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือนแบบทั่วไป (CB) และแบบหมุนวน (SB) ที่ใช้ในการศึกษา พบว่า เตาแก๊สหุงต้มแบบหมุน (SB) ที่มีขนาดมุมเฉียง (β) เท่ากับ 55° และมุมเอียง (α) เท่ากับ 15° ให้ค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงกว่า เตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือนแบบทั่วไป (CB)

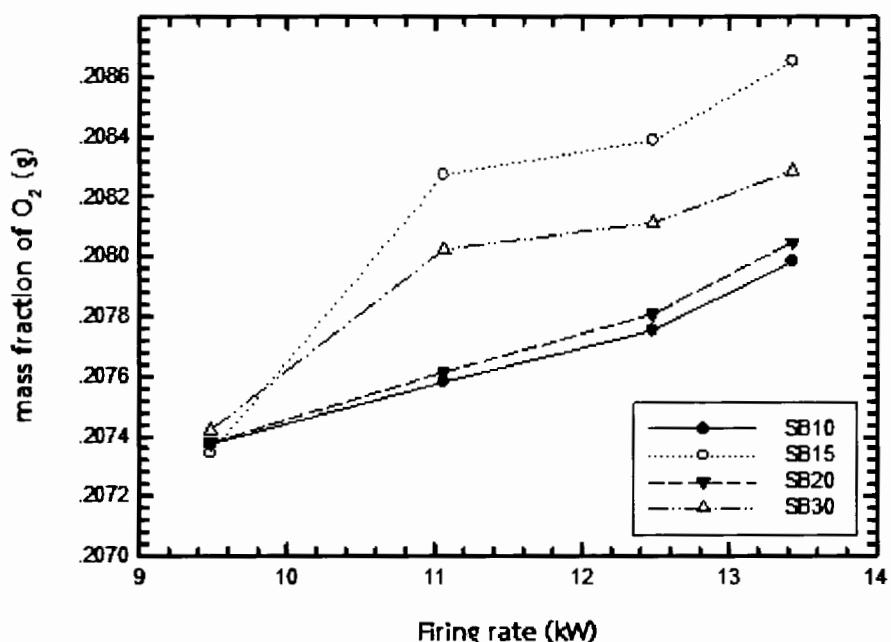
4.5 อิทธิพลขนาดของมุมเอียง (α) รูทางออกของเปลวไฟที่มีผลต่อลักษณะการเผาไหม้ของการจำลองสำหรับเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือน ขนาด KB-5

จากประเด็นที่ใช้ในการศึกษาหัวข้อ 4.4 จึงได้ทำการจำลองลักษณะของมุมเอียง (α) สำหรับเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือน ขนาด KB-5 ที่มีขนาดมุมเอียง (α) เท่ากับ 10° , 15° , 20° และ 30° ตามลำดับ และที่ขนาดมุมเฉียง (β) เท่ากับ 55° นอกจากนี้ยังมีขนาดรูทางออกของเปลวไฟ เท่ากับ 2.0 mm ดังตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 ลักษณะมุมเอียงรูทางออกของเปลวไฟที่มีผลต่อลักษณะการเผาไหม้

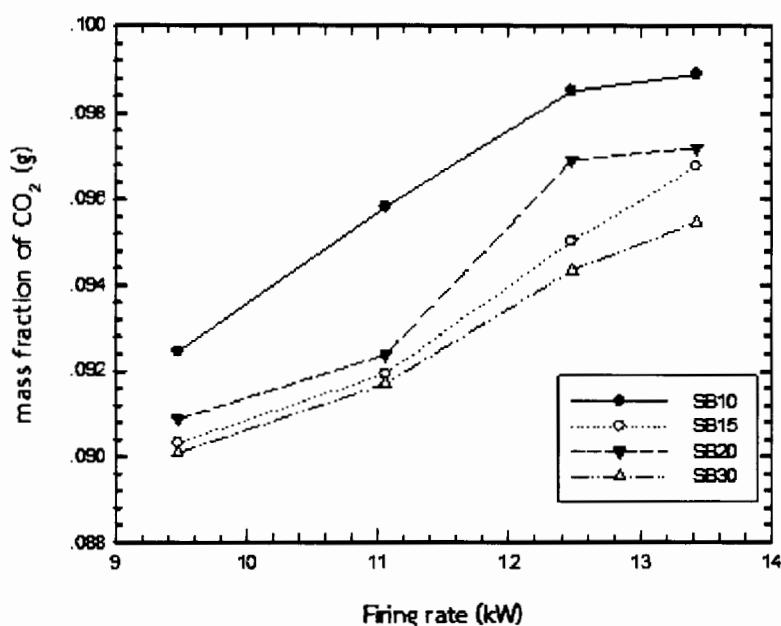
| ขนาดของมุมเอียง (α) | ขนาดรูทางออกของเปลวไฟ (mm) | ขนาดพื้นที่รูทางออกของหัวเตา (mm^2) |
|------------------------------|----------------------------|---|
| SB 10° | | |
| SB 15° | | |
| SB 20° | 2.0 | 242.28 |
| SB 30° | | |

โดยผลิตภัณฑ์ของแก๊สไอเสียที่ได้หลังจากการเผาไหม้ของการจำลองเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือนขนาด KB-5 ที่มีขนาดรูทางออกของเปลวไฟ (D_p) เท่ากับ 2.0 mm สามารถอธิบายรูปแบบปริมาณ mass fraction ต่างๆ ได้ดังต่อไปนี้ คือ จากภาพที่ 4.19 พบว่า ปริมาณ mass fraction ของแก๊สออกซิเจน (O_2) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอัตราการปล่อยเชื้อเพลิงแอลพีจี (LPG) สำหรับทุกขนาดของมุนเอียงที่ใช้ในการศึกษา แต่เนื่องจากขนาดของมุนเอียง (α) ที่ 15° มีปริมาณ mass fraction ของแก๊สออกซิเจน (O_2) เพิ่มขึ้นสูงกว่าขนาดมุนเอียงเท่ากับ 30°, 20° และ 10° ตามลำดับ จากภาพที่ 4.20 แสดงปริมาณ mass fraction ของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ที่ได้หลังจากการเผาไหม้ของการจำลองการเผาไหม้ของหัวเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือน พบร่วมค่าปริมาณ mass fraction ของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ที่มีขนาดมุนเอียง (α) เท่ากับ 10°, 15°, 20° และ 30° ตามลำดับ มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตามอัตราการปล่อยเชื้อเพลิงแอลพีจี (LPG) และสามารถทราบได้ว่า ที่ขนาดมุนเอียง (α) เท่ากับ 10° มีปริมาณ mass fraction ของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) สูงขึ้นมากกว่าขนาดมุนเอียง (α) เท่ากับ 15°, 20° และ 30° ตามลำดับ เนื่องจากตำแหน่งขององศาในการทำมุนเอียงน้อย จึงส่งผลให้เกิดการเหนี่ยวนำของอากาศมาผสมกับการเผาไหม้ได้ค่อนข้างน้อย



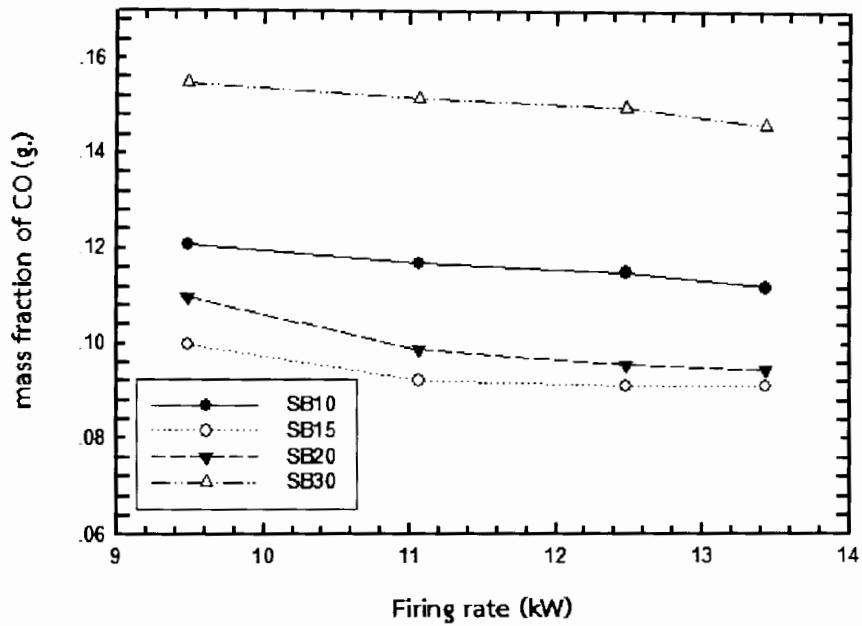
ภาพที่ 4.19 ปริมาณ mass fraction ของแก๊สออกซิเจน (O_2) ที่ได้หลังจากการเผาไหม้ของรูปแบบการจำลอง

จากนี้ได้แสดงปริมาณ mass fraction ของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ที่ได้หลังจากการเผาไหม้ของแบบจำลอง ที่มีขนาดของมุ่มอุจจาระ (α) เท่ากับ $10^\circ, 15^\circ, 20^\circ$ และ 30° ขนาดฐานของออกซิเจน (D_p) เท่ากับ 2.0 mm ดังภาพที่ 4.21 พบว่า ปริมาณ mass fraction ของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) มีแนวโน้มลดลงตามอัตราการป้อนเชื้อเพลิงที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากหลักการออกแบบหมุนวน (SB) สามารถช่วยลดปริมาณ mass fraction ของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และเพิ่มอุณหภูมิของเปลวไฟให้มีการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ได้ นอกจากนี้ยังสามารถทราบได้อีกว่าที่ขนาดมุ่มอุจจาระ 15° ให้ค่าปริมาณ mass fraction ที่ต่ำที่สุด

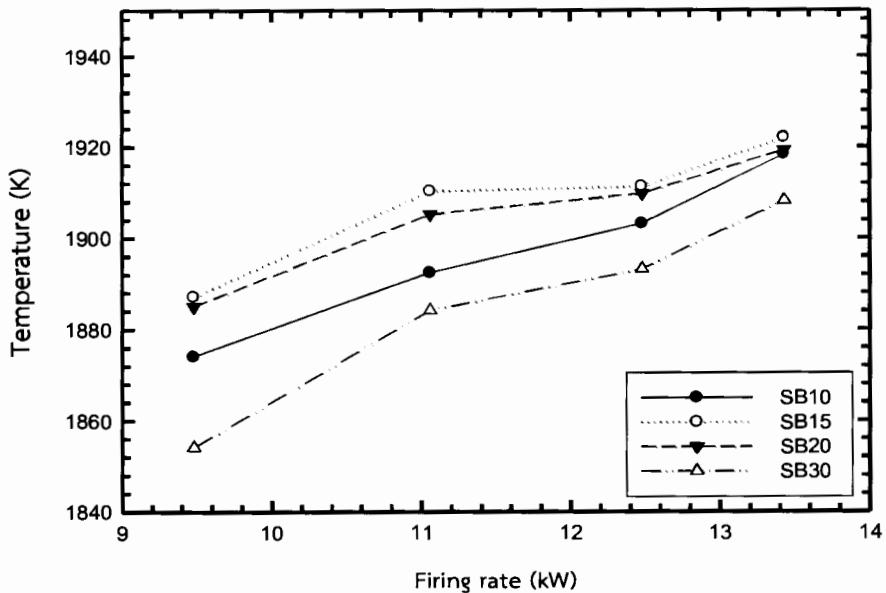


ภาพที่ 4.20 ปริมาณ mass fraction ของแก๊สออกซิเจน (CO_2) ที่ได้หลังจากการเผาไหม้ของรูปแบบการจำลอง

นอกจากนี้ สามารถทราบถึงอุณหภูมิสูงสุดของเปลวไฟที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิงแอลพีจี (LPG) พบร่วมกับ ที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิงแอลพีจี (LPG) เท่ากับ 9.48 kW (ที่ 0.5 bar) มีอุณหภูมิสูงสุดของเปลวไฟที่ลักษณะมุ่มอุจจาระ (α) เท่ากับ $10^\circ, 15^\circ, 20^\circ$ และ 30° มีค่าเท่ากับ 1874.09 K, 1887.17 K, 1885.06 K และ 1854.17 K ตามลำดับ ดังภาพที่ 4.22 และตารางที่ 4.9, 4.10 และ 4.11

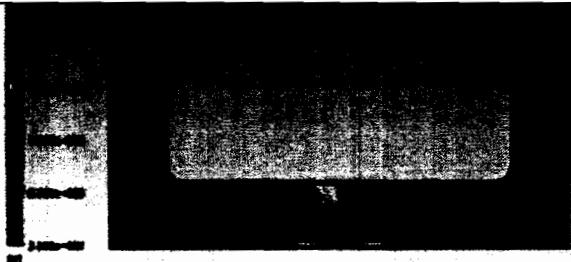
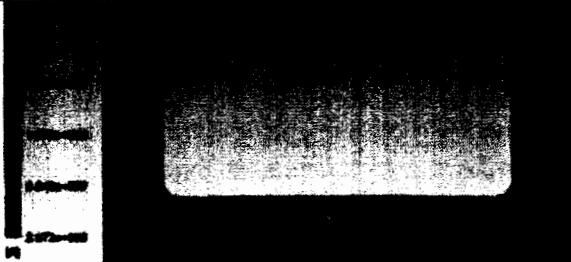
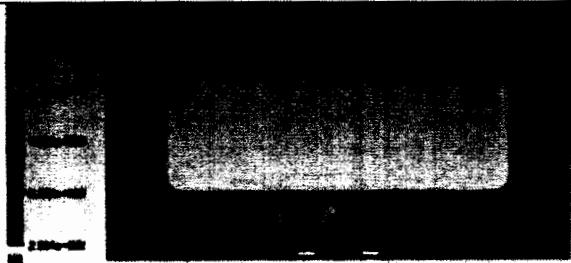
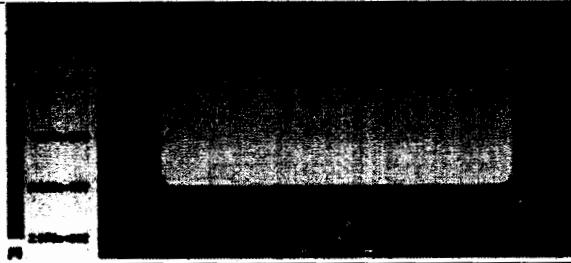


ภาพที่ 4.21 ปริมาณ mass fraction ของคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ที่ได้หลังจากการเผาไหม้ของรูปแบบการจำลอง

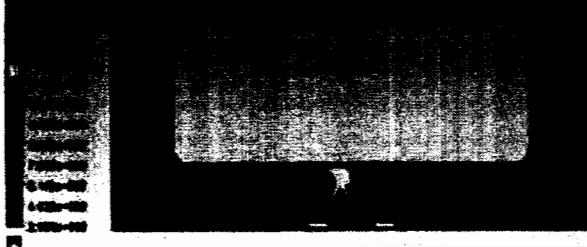
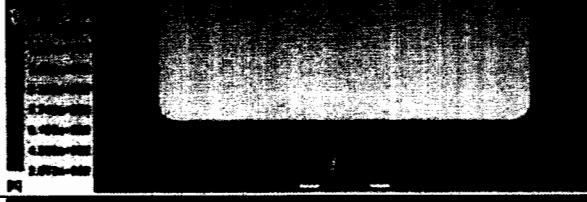
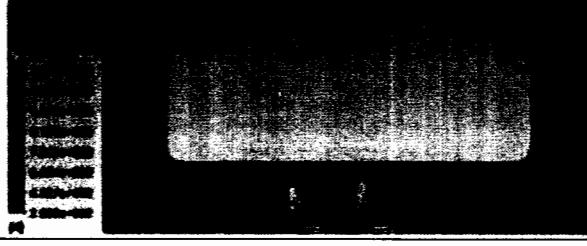


ภาพที่ 4.22 ค่าอุณหภูมิของเปลวไฟสูงสุด (Flame Temperature)

ตารางที่ 4.9 อุณหภูมิสูงสุดของเปลวไฟที่ได้หลังจากการเผาไหม้ของการจำลอง
ที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิงแอลพีจี (LPG) เท่ากับ 9.48 kW (ที่ 0.5 bar)
และที่มีมุมเอียง (α) เท่ากับ $10^\circ, 15^\circ, 20^\circ$ และ 30° (ด้านข้าง)

| ประเภทองมุนเอียง | แสดงผล | อุณหภูมิเปลวไฟ (K) |
|------------------|--|--------------------|
| 10° |  | 1874.09 |
| 15° |  | 1887.17 |
| 20° |  | 1885.06 |
| 30° |  | 1854.17 |

ตารางที่ 4.10 Contour ของอุณหภูมิสูงสุดของเปลวไฟที่ได้หลังจากการเผาไหม้ของรูปแบบการจำลอง ที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิงแอลพีจี (LPG) เท่ากับ 9.48 kW (0.5 bar) และที่มุมเอียง (α) เท่ากับ $10^\circ, 15^\circ, 20^\circ$ และ 30° (ด้านข้าง)

| ประเภทองมุมเอียง | แสดงผล | อุณหภูมิเปลวไฟ(K) |
|------------------|--|-------------------|
| 10° |  | 1874.09 |
| 15° |  | 1887.17 |
| 20° |  | 1885.06 |
| 30° |  | 1854.17 |

ตารางที่ 4.11 อุณหภูมิสูงสุดของเปลวไฟที่ได้หลังจากการเผาไหม้ของการจำลอง
ที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิงแอลพีจี (LPG) เท่ากับ 9.48 kW (0.5 bar)
และที่มุมเอียง (α) เท่ากับ $10^\circ, 15^\circ, 20^\circ$ และ 30° (ด้านบน)

| ประเภทองมุมเอียง | แสดงผล | อุณหภูมิเปลวไฟ (K) |
|------------------|--------|--------------------|
| 10° | | 1874.09 |
| 15° | | 1887.17 |
| 20° | | 1885.06 |
| 30° | | 1854.17 |

จากการคำนวณลักษณะของมุมเอียง (α) สำหรับหัวเตาแก๊สหุงต้มที่มีขนาดมุมเอียง (α) เท่ากับ $10^\circ, 15^\circ, 20^\circ$ และ 30° และมีขนาดมุมเบย์ (β) เท่ากับ 55° และมีขนาดรูทางออกของเปลวไฟ (D_p) เท่ากับ 2.0 mm พบร่วมกับ ลักษณะขนาดของมุมเอียง (α) เท่ากับ 15° มีค่าอุณหภูมิของเปลวไฟสูงสุดเนื่องจากค่าปริมาณ mass fraction ของแก๊สออกซิเจน (O_2) มีปริมาณเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเพียงต่อต่อการเผาไหม้ที่สมบูรณ์และนอกจากนั้นค่าปริมาณ mass fraction ของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์

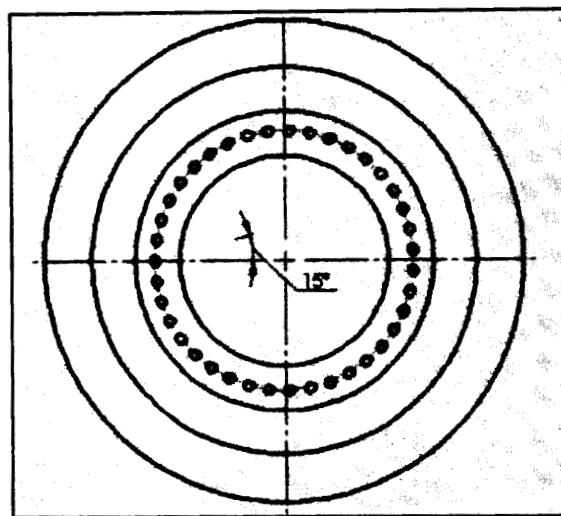
(CO) มีปริมาณที่ต่ำกว่ามุนอียง (α) ที่ 10° , 20° และ 30° ตามลำดับ เนื่องจากลักษณะการหมุนวน มีการเหนี่ยวนำอากาศส่วนที่สอง (Secondary Air) เข้ามาสมกับการเผาไหม้ที่เหมาะสม จึงส่งผลให้ ปริมาณ mass fraction ของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) มีปริมาณต่ำ ดังนั้นจึงสามารถทราบได้ว่า ลักษณะของมุนอียง (α) เท่ากับ 15° ให้ค่าอุณหภูมิของเบโลว์สูงสุดสำหรับหัวเตาแก๊สหุงต้มใน ครัวเรือนที่ใช้ในการศึกษา

4.6 การเปรียบเทียบลักษณะการเผาไหม้ของรูปแบบการจำลองสำหรับเตาแก๊สหุงต้ม ที่มีขนาดมุนเมย (β) เท่ากับ 26° และขนาดมุนอียง (α) เท่ากับ 15°

จากการศึกษาในหัวข้อที่ 4.5 ได้ทำการศึกษาลักษณะการเผาไหม้สำหรับเตาแก๊สหุงต้มใน ครัวเรือน ขนาด KB-5 ที่มีขนาดของมุนเมย (β) เท่ากับ 55° และขนาดมุนอียง (α) เท่ากับ 10° , 15° , 20° และ 30° พบร่วมกันว่า ลักษณะการเผาไหม้สำหรับเตาแก๊สหุงต้มที่มีขนาดมุนเมย (β) เท่ากับ 55° และขนาดมุนอียง (α) เท่ากับ 15° สามารถแสดงลักษณะที่บ่งบอกถึงการเผาไหม้และอุณหภูมิสูงสุด ของเบโลว์ส์ได้เป็นอย่างดี ดังนั้นในหัวข้อนี้จึงได้ทำการเปรียบเทียบผลการจำลองลักษณะการเผาไหม้ สำหรับเตาแก๊สหุงต้มที่มีขนาดของมุนเมย (β) เท่ากับ 26° และขนาดมุนอียง (α) เท่ากับ 15° [3] ดังตารางที่ 4.12

ตารางที่ 4.12 รูปแบบการจำลองสำหรับเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือน ขนาด KB-5 ที่มีลักษณะมุนเมย (β) เท่ากับ 26° และมุนอียง (α) เท่ากับ 15°

| ประเภทหัวเตาแก๊สหุงต้ม | จำนวนรูทางออกของหัวเตาแก๊สหุงต้ม (D_p) | | พื้นที่ทางออกรวม (mm^2) |
|------------------------------------|--|----------------------|-----------------------------|
| | มุนเมย (β) | มุนอียง (α) | |
| เตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือน ขนาด KB-5 | 55° | 15° | 242.28 |
| | 26° | 15° | 247.400 |

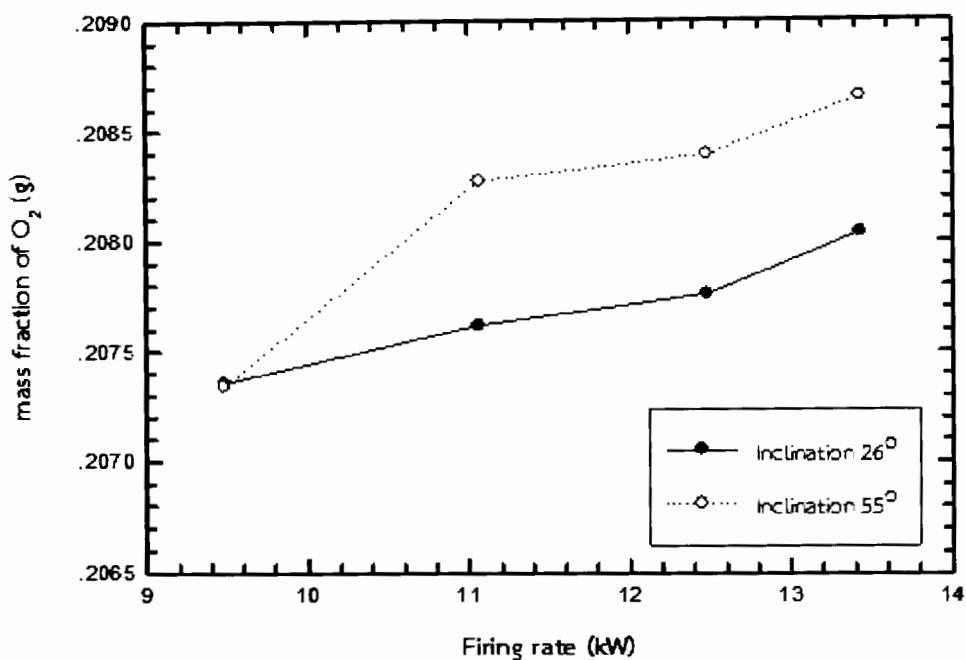


ภาพที่ 4.23 เตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือนแบบหมุนวน (Swirl Burner) ขนาด KB-5
ที่มีขนาดมุมเบย์ (β) เท่ากับ 26° และขนาดมุมเอียง (α) เท่ากับ 15°



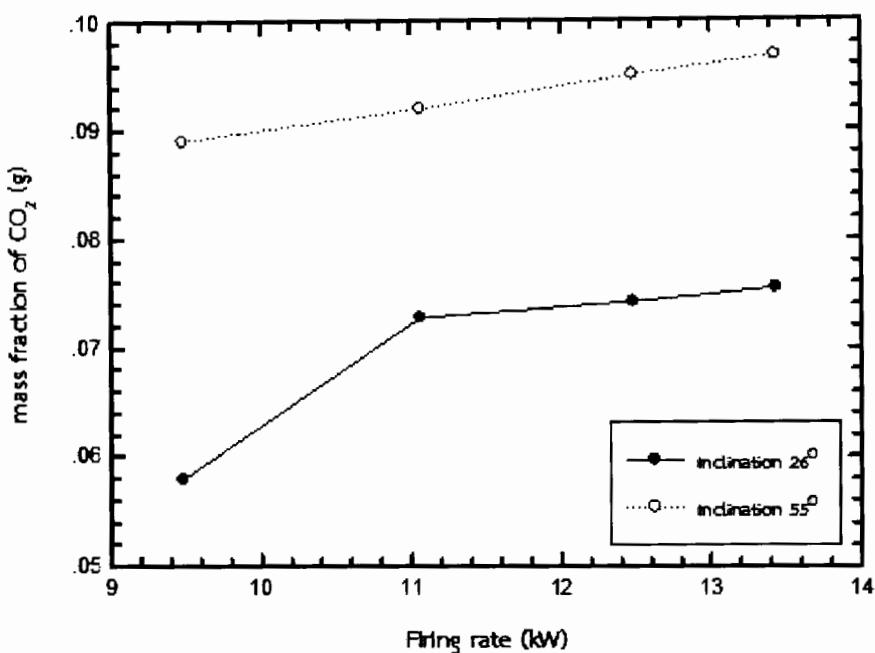
ภาพที่ 4.24 เตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือนแบบหมุนวน (Swirl Burner) ขนาด KB-5
ที่มีขนาดมุมเบย์ (β) เท่ากับ 26° และขนาดมุมเอียง (α) เท่ากับ 15° (ด้านข้าง)

จากลักษณะการเผาใหม่สำหรับเตาแก๊สหุงต้มที่มีขนาดมุมเบย์ (β) เท่ากับ 55° และขนาดมุมเอียง (α) เท่ากับ 15° เปรียบเทียบกับเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือน ขนาด KB-5 ที่มีขนาดมุมเบย์ (β) เท่ากับ 26° และขนาดมุมเอียง (α) เท่ากับ 15° มีค่าเท่ากับ 0.207356 g, 0.207618 g, 0.207788 g, และ 0.208037 g และที่ขนาดมุมเบย์ (β) เท่ากับ 55° และขนาดมุมเอียง (α) เท่ากับ 15° มีค่าเท่ากับ 0.207443 g, 0.208273 g, 0.20839 g, และ 0.208653 g ตามลำดับ ที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิงแอลพีจี (LPG) เท่ากับ 9.48 kW (ที่ 0.5 bar), 11.06 kW (ที่ 1.0 bar), 12.48 kW (ที่ 1.5 bar) และ 13.48 kW (ที่ 2.0 bar) ตามลำดับ ดังภาพที่ 4.25 พบว่า ปริมาณ mass fraction ของแก๊สออกซิเจน (O_2) มีค่าเพิ่มขึ้นตามอัตราการปล่อยเชื้อเพลิงแอลพีจี (LPG)



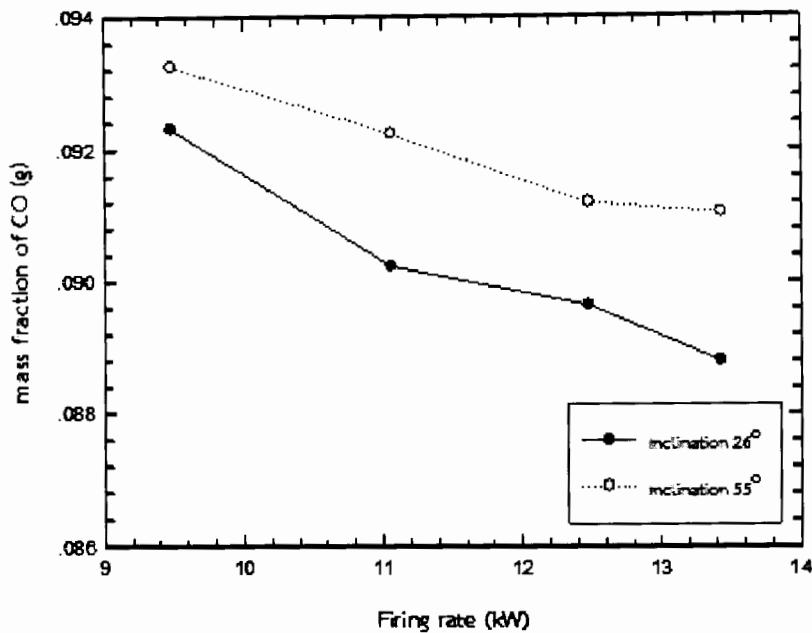
ภาพที่ 4.25 ปริมาณ mass fraction ของแก๊สออกซิเจน (O_2) ที่ได้หลังการเผาไหม้ สำหรับเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือน ขนาด KB-5 ที่มีขนาดมุมเบียง (β) เท่ากับ 26° และขนาดมุมเบียง (β) เท่ากับ 55°

จากภาพที่ 4.26 แสดงปริมาณ mass fraction ของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ที่ได้หลังจากการเผาไหม้ของการจำลองที่มีขนาดมุมเบียง (β) เท่ากับ 26° และขนาดมุมเบียง (α) เท่ากับ 15° พบว่า ปริมาณ mass fraction ของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) มีลักษณะเพิ่มขึ้นตามอัตราการป้อนเชื้อเพลิงแอลพีจี (LPG) เมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณ mass fraction ของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) สำหรับเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือน ขนาด KB-5 ที่มีขนาดมุมเบียง (β) เท่ากับ 55° และขนาดมุมเบียง (α) เท่ากับ 15° มีค่าปริมาณ mass fraction น้อยกว่า เนื่องจากขนาดขององศาที่น้อยจึงทำให้เกิดเปลวไฟหมุนวนมากกว่าขึ้นและทำให้เกิดการเหนี่ยวแน่นของอากาศ มาผสมกับเชื้อเพลิงการเผาไหม้ที่มากขึ้น จึงส่งผลต่อปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ที่ปล่อยออกมากหลังจากการเผาไหม้ที่น้อยลง ดังนั้นทราบได้ว่าปริมาณ mass fraction ของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ที่ได้หลังจากการเผาไหม้ของแบบจำลองสำหรับเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือน ขนาด KB-5 ที่มีขนาดมุมเบียง (β) เท่ากับ 26° และขนาดมุมเบียง (α) เท่ากับ 15° มีค่าปริมาณ mass fraction น้อยกว่าเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือน ขนาด KB-5 ที่มีขนาดมุมเบียง (β) เท่ากับ 55° และขนาดของมุมเบียง (α) เท่ากับ 15°



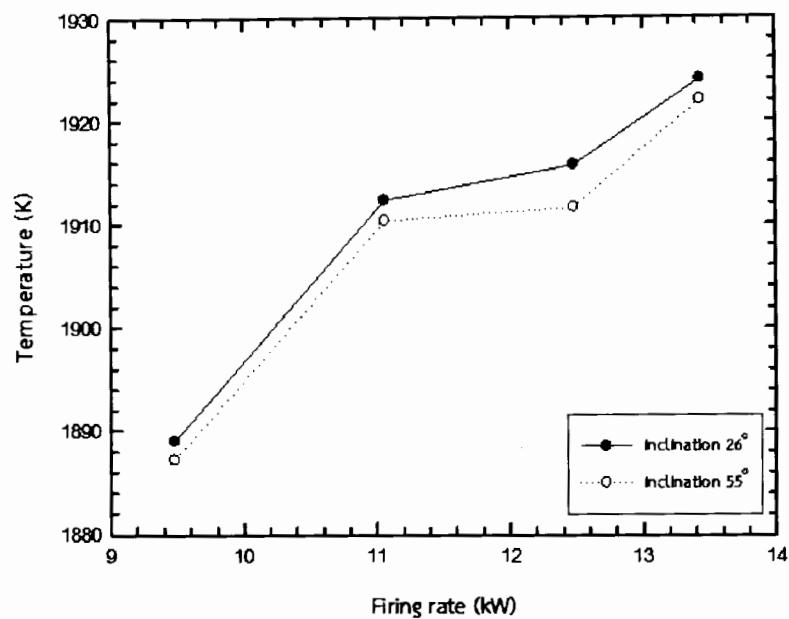
ภาพที่ 4.26 ปริมาณ mass fraction ของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ที่ได้หลังการเผาไหม้ สำหรับเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือน ขนาด KB-5 ที่มีขนาดมุ่งเมี้ยง (β) เท่ากับ 26° และขนาดมุ่งเมี้ยง (β) เท่ากับ 55°

จากภาพที่ 4.27 แสดงปริมาณ mass fraction ของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ที่ได้หลังจากการเผาไหม้ของการจำลองที่มีขนาดมุ่งเมี้ยง (β) เท่ากับ 26° และขนาดมุ่งเอียง (α) เท่ากับ 15° พบร้า ปริมาณ mass fraction ของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) มีแนวโน้มลดลง ซึ่งแปรผันตามอัตราการป้อนเชื้อเพลิงและพีจี (LPG) ที่เพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับค่าปริมาณ mass fraction ของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) สำหรับเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือน ขนาด KB-5 ที่มีขนาดมุ่งเมี้ยง (β) เท่ากับ 55° และขนาดมุ่งเอียง (α) เท่ากับ 15° พบร้า มีปริมาณ mass fraction ที่น้อยกว่า ซึ่งจากการหลักการออกแบบการหมุนวนสามารถทำให้ปริมาณ mass fraction ของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ที่ลดลง โดยมีการเพิ่มพื้นที่ของปริมาณอากาศจากการเหนี่ยวนำมากขึ้น จึงทำให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์มากขึ้น ดังนั้นจึงทราบได้ว่าค่าปริมาณ mass fraction ของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ที่ได้หลังจากการเผาไหม้ของแบบจำลองสำหรับเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือน ขนาด KB-5 ที่มีขนาดมุ่งเมี้ยง (β) เท่ากับ 26° และขนาดมุ่งเอียง (α) เท่ากับ 15° มีค่าของปริมาณแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) น้อยกว่าเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือน ขนาด KB-5 ที่มีขนาดมุ่งเมี้ยง (β) เท่ากับ 55° และขนาดมุ่งเอียง (α) เท่ากับ 15°



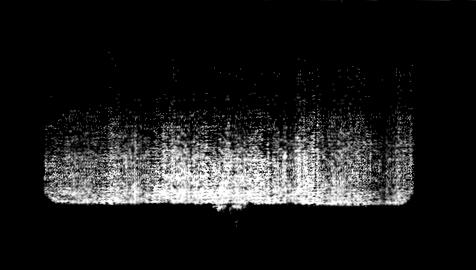
ภาพที่ 4.27 ปริมาณ mass fraction ของแก๊สคาร์บอนออกไซด์ (CO) ที่ได้หลังการเผาไหม้ สำหรับเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือน ขนาด KB-5 ที่มีขนาดมุมเบย์ (β) เท่ากับ 26° และขนาดมุมเบย์ (β) เท่ากับ 55°

นอกจากนั้นสามารถทราบถึงค่าอุณหภูมิสูงสุดของเปลวไฟ (Flame Temperature) ที่ได้หลังจากการเผาไหม้ของแบบจำลองสำหรับเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือน ขนาด KB-5 ที่มีขนาดมุมเบย์ (β) เท่ากับ 26° และขนาดมุมเบย์ (α) เท่ากับ 15° พบร่วมกับ มีค่าอุณหภูมิสูงสุดของเปลวไฟ (Flame Temperature) เท่ากับ 1889 K, 1913 K, 1915.7 K, และ 1925 K ตามลำดับ โดยมีอัตราการป้อนเชื้อเพลิงแอลพีจี (LPG) เท่ากับ 9.48 kW (0.5 bar), 11.06 kW (1.0 bar), 12.48 kW (1.5 bar) และ 13.48 kW (2.0 bar) ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิสูงสุดของเปลวไฟ (Flame Temperature) ที่ได้หลังจากการเผาไหม้ของแบบจำลองสำหรับเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือน ขนาด KB-5 ที่มีขนาดมุมเบย์ (β) เท่ากับ 55° และขนาดมุมเบย์ (α) เท่ากับ 15° พบร่วมกับ มีค่าอุณหภูมิสูงสุดของเปลวไฟ (Flame Temperature) ที่สูงกว่า แสดงดังกราฟในภาพที่ 4.28 และกราฟพิกในตารางที่ 4.12 และ 4.13 เนื่องจากลักษณะของเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือน ขนาด KB-5 ที่มีขนาดมุมเบย์ (β) เท่ากับ 26° และขนาดมุมเบย์ (α) เท่ากับ 15° ให้ค่าการเผาไหม้ที่สมบูรณ์มากกว่า จึงส่งผลกระทบต่ออุณหภูมิการเผาไหม้และประสิทธิภาพเชิงความร้อนได้อย่างดี



ภาพที่ 4.28 อุณหภูมิสูงสุดของเปลวไฟ (Flame Temperature) ที่ได้หลังการเผาไหม้สำหรับเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือน ขนาด KB-5 ที่มีขนาดมุมเบย์ (β) เท่ากับ 26° และขนาดมุมเบย์ (β) เท่ากับ 55°

ตารางที่ 4.13 อุณหภูมิสูงสุดของเปลวไฟ (Flame Temperature) ที่ได้หลังจากการเผาไหม้ของการจำลองสำหรับเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือน ขนาด KB-5 ที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิงแอลพีจี (LPG) เท่ากับ 9.48 kW (ที่ 0.5 bar) (ด้านบน)

| ประเภทของเตา | แสดงผล | อุณหภูมิเปลวไฟ (K) |
|--|--|--------------------|
| เตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือน ขนาด KB-5 ที่มีขนาดมุมเบย์ (β) เท่ากับ 26° และมุมเอียง (α) เท่ากับ 15° |  | 1889 |
| เตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือน ขนาด KB-5 ที่มีขนาดมุมเบย์ (β) เท่ากับ 55° และมุมเอียง (α) เท่ากับ 15° |  | 1887.17 |

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาลักษณะการเผาไหม้สำหรับเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือน ประเภท KB-5 ด้วยวิธีพลศาสตร์ของไฟลเชิงคำนวน (CFD) ในรูปแบบการไฟลปั่นปวน $k-\epsilon$ ชนิด RNG คำนวนร่วมกับแบบจำลอง species transport แบบเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ ทดสอบความน่าเชื่อถือของแบบจำลองเบรียบเทียบกับผลการทดลองจริงที่มีขนาดฐานทางออกของหัวฉีดเชื้อเพลิง (D_h) เท่ากับ 0.9 mm และท่อตราชาระดับป้อนเชื้อเพลิงแอลพีจี (LPG) เท่ากับ 9.48 kW (ที่ 0.5 bar) พบว่า ค่าความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองกับผลการทดลอง เท่ากับร้อยละ 7.68, 12.73 และ 15.78 ตามลำดับ ซึ่งมีความน่าเชื่อถือได้ จึงนำรูปแบบการจำลองมาใช้ในการทำนายตัวแปรต่างๆ ที่มีอิทธิพลต่อกุญแจลักษณะการเผาไหม้สำหรับเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือนของแบบจำลอง ได้แก่

5.1.1 การเพิ่มอัตราการป้อนเชื้อเพลิงแอลพีจี (LPG) เท่ากับ 9.48 kW (ที่ 0.5 bar), 11.06 kW (ที่ 1.0 bar), 12.48 kW (ที่ 1.5 bar) และ 13.48 kW (ที่ 2.0 bar) ตามลำดับ พบว่า ผลิตภัณฑ์ที่ได้หลังจากการเผาไหม้ของแบบจำลองสามารถแสดงรูปแบบปริมาณ mass fraction เช่น แก๊สออกซิเจน (O_2), แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอัตราการป้อนเชื้อเพลิงแอลพีจี (LPG) สำหรับเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือนแบบทั่วไป (CB) นอกจากนี้ยังทราบถึงช่วงการทำงานที่สามารถส่งผลที่ดีต่อประสิทธิภาพเชิงร้อนสำหรับเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือน เท่ากับ 9.48 kW (ที่ 0.5 bar) ถึง 11.06 kW (ที่ 1.0 bar)

5.1.2 ทำการศึกษาอิทธิพลขนาดฐานทางออกของเปลวไฟ (D_p) เท่ากับ 1.8, 2.0 และ 2.2 mm ที่มีผลต่อลักษณะการเผาไหม้สำหรับเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือนแบบทั่วไป (CB) พบว่า ผลิตภัณฑ์ที่ได้หลังหลังจากการเผาไหม้ของแบบจำลองที่ขนาดฐานทางออก เท่ากับ 2.0 mm มีอุณหภูมิการเผาไหม้ของเปลวไฟสูงที่สุดทุกอัตราการป้อนเชื้อเพลิงแอลพีจี (LPG) อีกทั้งยังสามารถปล่อยปริมาณ mass fraction ของคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ที่ต่ำกว่าทุกขนาดฐานทางออกที่ใช้ในการศึกษา จึงสามารถบ่งบอกที่ขนาดฐานทางออกของเปลวไฟ เท่ากับ 2.0 mm เนماะสมสำหรับการเผาไหม้ที่ดีและส่งผลต่อประสิทธิภาพเชิงความร้อนได้ดีอีกด้วย

5.1.3 ทำการศึกษาหัวเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือนในรูปแบบทั่วไป (CB) และแบบรูปแบบหมุนวน (Swirl Angle) พบว่า ผลิตภัณฑ์ที่ได้หลังจากการเผาไหม้ของแบบจำลองสำหรับหัวเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือนแบบหมุนวน (Swirl Angle) ที่มีขนาดมุมเบยของฐานทางออกของเปลวไฟ (β) เท่ากับ 55°

และมูมอี้ยง (α) เท่ากับ 15° สามารถบ่งบอกค่าปริมาณ mass fraction ของผลิตภัณฑ์ที่ได้หลังจากการเผาไหม้ได้ดีกว่าหัวเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือนในรูปแบบทั่วไป (CB) ที่มีขนาดมูมเงยของรูทางออกของเปลวไฟ (β) เท่ากับ 55° และขนาดมูมอี้ยง (α) เท่ากับ 0° อีกทั้งยังสามารถแสดงค่าอุณหภูมิสูงสุดของเปลวไฟ เท่ากับ 1887.17 K , 1910.34 K , 1911.07 K และ 1921.98 K นอกจากนี้ยังสามารถถึงการเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อนสำหรับเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือน เท่ากับ 3.91% , 3.45% , 5.78% และ 6.02% ตามลำดับ

5.1.4 ทำการศึกษาเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือนที่มีขนาดมูมอี้ยง (α) ของรูทางออกของเปลวไฟ เท่ากับ 10° , 15° , 20° และ 30° ตามลำดับ และที่มีขนาดมูมเงย (β) เท่ากับ 55° ที่มีผลต่อลักษณะการเผาไหม้สำหรับเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือนของแบบจำลอง พบร้า ผลิตภัณฑ์ที่ได้หลังจากการเผาไหม้ของแบบจำลองสำหรับหัวเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือนที่มีขนาดมูมอี้ยง (α) เท่ากับ 15° ให้ปริมาณ mass fraction ที่มีค่าบ่งบอกถึงการเผาไหม้ที่ดีที่สุด

5.1.5 จากการศึกษาในข้อที่ 5.14 จึงนำลักษณะแก๊สหุงต้มดังกล่าวมาเปรียบเทียบกับเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือนที่มีขนาดมูมอี้ยง (α) เท่ากับ 15° และขนาดมูมเงย (β) เท่ากับ 26° โดยอ้างอิงจากงานวิจัย [3] พบร้า ปริมาณ mass fraction ของผลิตภัณฑ์ที่ได้หลังจากการเผาไหม้สำหรับเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือนของแบบจำลอง ที่มีขนาดมูมอี้ยง (α) เท่ากับ 15° และมูมเงย (β) เท่ากับ 26° สามารถบ่งบอกถึงปริมาณผลิตภัณฑ์ที่ดีกว่าเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือน ที่มีขนาดมูมอี้ยง (α) เท่ากับ 15° และมูมเงย (β) เท่ากับ 55° อีกทั้งยังสามารถแสดงค่าอุณหภูมิสูงสุดของเปลวไฟ (Flame Temperature) ที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิงต่างๆ เท่ากับ 1889 K , 1913 K , 1915.7 K และ 1925 K ตามลำดับ

ดังนั้นงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการเผาไหม้สำหรับเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือน ประเภทแรงดันสูงขนาด KB-5 ด้วยวิธีพลศาสตร์ของไฟลเชิงคำนวน (CFD) พบร้า สามารถแสดงผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองสอดคล้องกับผลการทดลอง นอกจากนั้นยังสามารถอธิบายถึงการเผาไหม้ได้อย่างชัดเจน ช่วยประหยัดเวลาในการหาผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลอง จึงกล่าวได้ว่าการศึกษาด้วยวิธีดังกล่าวสามารถเป็นเครื่องมือที่นำไปใช้ทำนายการปรับปรุงสำหรับเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือนได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 วิธีพลศาสตร์ของไฟลเชิงคำนวณ (CFD) สามารถเป็นเครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาที่ช่วยลดระยะเวลาแทนการทดลองได้เป็นอย่างดี

5.2.2 สามารถนำรูปแบบการจำลองไปใช้ทำนายอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ ได้แก่ การปรับเปลี่ยนพื้นที่รับความร้อน (ขนาดของหม้อ) การเพิ่มวัสดุพูน (Porous) เป็นต้น

5.2.3 การทดลองสำหรับการวัดค่าผลิตภัณฑ์ของปริมาณแก๊สไฮเสียที่ได้หลังจากการเผาไหม้โดยไม่ควรให้เครื่องมือสักสัมผัสกับอุณหภูมิของ lava ไฟเป็นเวลานาน เนื่องจากมีความต้านทานมีข้อจำกัด

ବେଳାରୁକୁଣ୍ଡଳୀ

เอกสารอ้างอิง

- [1] สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน. “ข้อมูลพลังงาน(Energy Database)”, สถิติการใช้พลังงานแก๊ส LPG ในประเทศไทย.
<http://www.eppo.go.th/info/index.html>. 27 มีนาคม, 2559.
- [2] ณัฐวุฒิ รังสิมันตุชาติ. การประยุกต์ใช้วัสดุพรุนเพื่อการประหยัดพลังงานในเตาแก๊สหุงต้ม. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2544.
- [3] A. Tamir, R. Elperin, and S. Yotzer. “Performance Characteristics of A Gas Burner with A Swirl Central Flame”, *Energy*. 14(5): 347-362, 1992.
- [4] วงศ์ โยคเสนะกุล. หัวเผาเชื้อเพลิงแก๊สที่มีการหมุนเวียนความร้อนและการให้ผลแบบหมุนวน. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2548.
- [5] จารุณี จำกกลาง. การพัฒนาเตาแก๊สหุงต้มประสิทธิภาพสูงชนิดมีการหมุนเวียนความร้อน. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2549.
- [6] U. Makmool, S. Jugjai, S. Tia, P. Vallikul and B. Fungtammasan. “Performance and Analysis by Particle Image Velocimetry (PIV) of Cooker-Top Burners in Thailand”, *Energy*. 32(10): 1986-1995, 2007.
- [7] อนิรุตต์ มัธชัจกร และจรินทร์ เจนจิตต์. “เตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือนในประเทศไทยและแนวทางการเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อน”, ใน การประชุมเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 23. น.7. เชียงใหม่: โรงเรียนคิดอิมพิเรียลเมปิง, 2552.
- [8] A. Namkhat, S. Jugjai. “Primary air entrainment characteristics for a self-aspirating burner: model and experiments”, *Energy*. 35(4): 1701-1708, 2010.
- [9] ณรงค์กิตติ์ ปิยะไพร และคณะ. “การศึกษาการให้ผลของอากาศที่ผ่านกับเชื้อเพลิงในท่อผ่านของหัวเตาแก๊สหุงต้ม ขนาด KB-5 โดยใช้วิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ”. ใน การประชุมเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 27. น.134. ชลบุรี: โรงเรียนดุสิตธานี พัทยา, 2556.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [10] P. Boggavarapu, B. Ray, and R.V. Ravikrishna. “Thermal Efficiency of LPG and PNG-fired burners: Experimental and numerical studies”, **Fuel**. 166: 709-715, 2014.
- [11] J. Francisco et al. “Numerical and experimental methodology to measure the thermal efficiency of pots on electrical stoves”, **Energy**. 73(14): 258-263; August, 2014.
- [12] Vijaykumar Hindasageri et al. “An experimental and numerical investigation of heat transfer distribution of perforated plate burner flames impinging on a flat plate”, **International Journal of Thermal Sciences**. 94: 156-169; February, 2015.
- [13] สำเริง จักรใจ. การเผาไหม้ (combustion). กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2547.
- [14] German Standard and Technical Rules. **Gas-heated catering Equipment**. P.17. DIN. EN 203-2, 1997.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

การคำนวณอัตราการป้อนเข้าเพลิงและการแปลงปริมาณ mass fraction

ก.1 การคำนวณอัตราการป้อนเชื้อเพลิงแอลพีจี (LPG)

จากการณ์ตัวอย่างที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิงแอลพีจี (LPG) เท่ากับ 9.48 kW (ที่ 0.5 bar)

$$Q_{fuel} = VxLHV \quad (1)$$

โดยที่ค่าความร้อนทางต่ำ (LHV) เท่ากับ 113770 kJ/m^3

$$\begin{aligned} Q_{fuel} &= 0.0000833 (\text{m}^3/\text{s}) \times 113770 (\text{kJ/m}^3) \\ &= 9.48 \text{ kW} \end{aligned}$$

ดังนั้นที่ความดันแก๊สเชื้อเพลิงแอลพีจี (LPG) เท่ากับ 0.5 bar มีค่าอัตราการป้อนเชื้อเพลิง เท่ากับ 9.48 kW

ก.2 การคำนวณการแปลงหน่วยปริมาณ mass fraction

จากการวัดปริมาณแก๊สไออกไซด์ที่ได้จากการทดลองด้วยวิธีการทดสอบต้มน้ำเดือด (WBT) พบว่า ที่ อัตราการป้อนเชื้อเพลิง เท่ากับ 9.48 kW (ที่ 0.5 bar) มีปริมาณ mass fraction ของแก๊สไออกไซด์ที่ได้ จากการทดลอง ดังตารางที่ ก.1

ตารางที่ ก.1 การแปลงหน่วยปริมาณ mass fraction (9.48 kW (ที่ 0.5 bar))

| ปริมาณแก๊สไออกไซด์ที่ได้จากการทดลอง | % โดยปริมาตร | % เชิงปริมาณ \times น้ำหนักโมเลกุล | โดยมวล |
|-------------------------------------|--------------|--------------------------------------|------------|
| O_2 | 17.39 | $17.39 \times 32 = 556.48$ | 0.191417 |
| CO_2 | 2.35 | $2.35 \times 48 = 112.8$ | 0.035567 |
| CO^* | 336 | $0.0336 \times 28 = 0.9408$ | 0.00032361 |
| N_2 | 80.226 | $80.226 \times 28 = 2247.448$ | 0.772699 |
| รวม | 100.0 | 2917.66 | 1.00 |

*ปริมาณ mass fraction ของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) มีหน่วย ppm

ตารางที่ ก.2 การแปลงหน่วยปริมาณ mass fraction (11.06 kW ที่ 1.0 bar)

| ปริมาณแก๊สไอ เสียที่ได้จาก การทดลอง | % โดยปริมาตร | % เชิงปริมาตร \times น้ำหนักโมเลกุล | โดยมวล |
|---|--------------|--|-------------|
| O ₂ | 17.53 | 17.53×32 = 560.96 | 0.19224389 |
| CO ₂ | 2.40 | 2.40×48 = 115.2 | 0.03947963 |
| CO* | 343 | 0.0343×28 = 0.9604 | 0.000329134 |
| N ₂ | 80.035 | 80.035×28 = 2240.98 | 0.76799599 |
| รวม | 100.00 | 2917.96 | 1.00 |

* ปริมาณ mass fraction ของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) มีหน่วย ppm

ตารางที่ ก.3 แปลงหน่วยปริมาณ mass fraction (12.48 kW ที่ 1.5 bar)

| ปริมาณแก๊สไอ เสียที่ได้จาก การทดลอง | % โดยปริมาตร | % เชิงปริมาตร \times น้ำหนักโมเลกุล | โดยมวล |
|---|--------------|--|------------|
| O ₂ | 17.64 | 17.64×32 = 564.48 | 0.19322438 |
| CO ₂ | 2.54 | 2.54×48 = 121.92 | 0.04173398 |
| CO* | 400 | 0.0400×28 = 1.12 | 0.00038338 |
| N ₂ | 79.780 | 79.78×28 = 2233.84 | 0.76465755 |
| รวม | 100.00 | 2921.36 | 1.00 |

* ปริมาณ mass fraction ของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) มีหน่วย ppm

ตารางที่ ก.4 แปลงหน่วยปริมาณ mass fraction (13.48 kW (ที่ 2.0 bar))

| ปริมาณแก๊สไอ เสียที่ได้จาก การทดลอง | % โดยปริมาตร | % เชิงปริมาตร X นำหนักโมเลกุล | โดยมวล |
|---|--------------|------------------------------------|-------------|
| O ₂ | 17.67 | 17.67×32 = 565.44 | 0.19346163 |
| CO ₂ | 2.61 | 2.61×48 = 125.28 | 0.04286374 |
| CO* | 456 | 0.0456×28 = 1.2768 | 0.00043684 |
| N ₂ | 79.67 | 79.67×28 = 2230.76 | 0.763240099 |
| รวม | 100.00 | 2922.75 | 1.00 |

* ปริมาณ mass fraction ของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) มีหน่วย ppm

ภาคผนวก ข

การเปรียบเทียบปริมาณ mass fraction ของการจำล่องและการทัดล่อง

ข.1 การเปรียบเทียบปริมาณ mass fraction ของการจำลองและการทดลอง

การเปรียบเทียบผลของการจำลองและการทดลองในรูปแบบปริมาณ mass fraction ผลิตภัณฑ์ที่ได้หลังจากการเผาไหม้สำหรับเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือน ประเภทแรงดันสูง ขนาด KB-5 ที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิงแอลพีจี (LPG) เท่ากับ 9.48 kW (ที่ 0.5 bar), 11.06 kW (ที่ 1.0 bar), 12.48 kW (ที่ 1.5 bar) และ 13.48 kW (ที่ 2.0 bar) ตามลำดับ ดังตารางที่ ข.1 ถึง ข.4

ตารางที่ ข.1 การเปรียบเทียบปริมาณ mass fraction (9.48 kW (ที่ 0.5 bar))

| ปริมาณ mass fraction (g) | ผลการจำลอง (g) | ผลการทดลอง (g) | ค่าความคลาดเคลื่อน (%) |
|--------------------------------|-------------------|-------------------|---------------------------|
| O ₂ | 0.207343 | 0.191417 | 7.68 |
| CO ₂ | 0.0315491 | 0.035567 | 12.73 |
| CO | 0.000388191 | 0.00032361 | 15.78 |

ตารางที่ ข.2 การเปรียบเทียบปริมาณ mass fraction (11.06 kW (ที่ 1.0 bar))

| ปริมาณ mass fraction (g) | ผลการจำลอง (g) | ผลการทดลอง (g) | ค่าความคลาดเคลื่อน (%) |
|--------------------------------|-------------------|-------------------|---------------------------|
| O ₂ | 0.20791 | 0.19224389 | 7.53 |
| CO ₂ | 0.0349845 | 0.03947963 | 12.84 |
| CO | 0.00038910 | 0.000329134 | 15.41 |

ตารางที่ ข.3 การเปรียบเทียบปริมาณ mass fraction (12.48 kW (ที่ 1.5 bar))

| ปริมาณ mass fraction (g) | ผลการจำลอง (g) | ผลการทดลอง (g) | ค่าความคลาดเคลื่อน (%) |
|--------------------------------|-------------------|-------------------|---------------------------|
| O ₂ | 0.208017 | 0.19322438 | 7.11 |
| CO ₂ | 0.047595 | 0.04173398 | 12.31 |
| CO | 0.000454306 | 0.00038338 | 15.61 |

ตารางที่ ข.4 การเปรียบเทียบปริมาณ mass fraction (13.48 kW (ที่ 2.0 bar))

| ปริมาณ mass fraction (g) | ผลการจำลอง (g) | ผลการทดลอง (g) | ค่าความคลาดเคลื่อน (%) |
|--------------------------------|-------------------|-------------------|---------------------------|
| O ₂ | 0.208006 | 0.19346163 | 6.99 |
| CO ₂ | 0.0491562 | 0.04286374 | 12.80 |
| CO | 0.000519217 | 0.00043684 | 15.86 |

ภาคผนวก ค
บทความทางวิชาการ

ENETT12-ET-70

การจำลองคุณลักษณะการเผาไหม้ของหัวเตาแก๊สหุงต้มที่ใช้สำหรับการหุงต้มในครัวเรือน
Simulation of Combustion Characteristics of a LPG-Domestic Cooking Burner

อิสรร คงทิว์ ศรีวิชัยกุล อนิรุทธิ์ มัธดุจกุล และอภินันต์ นามเขต

¹ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี อ.วารินชำราบ จ.อุบลราชธานี 34190

*E-mail: itsara.k@hotmail.com, โทรศัพท์ 0-4535-3309

บทคัดย่อ

บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำวิธีพลศาสตร์ของ流体เชิงคำนวณ (CFD) มาประยุกต์ใช้ในการจำลองการเผาไหม้สำหรับหัวเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือน ขนาด KB-5 ในรูปแบบการไหลเป็นปานวน k-E RNG คำนวณร่วมกับแบบจำลอง species transport แบบกิตติภูมิการเผาไหม้ ทดสอบความแม่นยำของแบบจำลองเบรียบเทียบกับผลการทดลองจริงที่มีขนาดฐานทางออกของหัวฉีดเชื้อเพลิง เท่ากับ 0.9 mm และความดันการปล่อยแก๊สเชื้อเพลิงแอลพีจี (LPG) เท่ากับ 0.5 bar พบร่วมค่าปริมาณ mass fraction ของ O₂, CO₂ และ CO มีค่าความคาดเดาก่อนกับผลการทดลอง เท่ากับ 7.68%, 12.73% และ 15.78% ตามลำดับ จึงสามารถนำแบบจำลองไปทำนายคุณลักษณะการเผาไหม้ที่ความดันการปล่อยเชื้อเพลิงแอลพีจี (LPG) เท่ากับ 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 bar พบร่วมช่วงการทำงานเหมาะสมอยู่ในช่วง 0.5 ถึง 1.0 bar จึงในช่วงดังกล่าวมีการปล่อยปริมาณไอเสียที่ได้จากการเผาไหม้ที่มีปริมาณน้อยและยังส่งผลกระทบต่ออุณหภูมิของเปลวไฟที่สูงอย่างรวดเร็ว นอกจากนี้สามารถแสดงอุณหภูมิของเปลวไฟได้หลังจากการเผาไหม้สูงสุดของแบบจำลองเท่ากับ 1909.59 K. ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่าการจำลองทฤษฎีกรรมการเผาไหม้ระหว่างจากกับเชื้อเพลิงแอลพีจี (LPG) มีแนวโน้มทิศทางเดียวกันและยังสามารถใช้เป็นแนวทางการปรับปรุงประสิทธิภาพเชิงความร้อนต่อไปได้

คำสำคัญ: เตาแก๊สหุงต้ม KB-5 วิธีพลศาสตร์ของ流体เชิงคำนวณ การเผาไหม้ สัดส่วนโดยมวล

Abstract

The objective of this applies Computational Fluid Dynamics (CFD) technique to simulate the combustion behavior of a KB-5 domestic gas cooking burner. The RNG k-E turbulence model and species transport with combustion reaction model were applied to simulate model. The reliability of the model was verified with the experimental results for the gas burner with its nozzle diameter of 0.9 mm and at released LPG pressure of 0.5 bar. It was found that the errors of the prediction mass fraction of O₂, CO₂ and CO are 7.68%, 12.73% and 15.78%, respectively. It can bring the model to predict the combustion characteristics of release LPG pressure of 0.5, 1.0, 1.5 and 2.0 bar. It was found that appropriate range in the 0.5 to 1.0 bar. Find the appropriate work in the 0.5 to 1.0 bar. Which the release quantity of the exhaust from the combustion with low volume, and also affect the flame temperature higher quickly. Moreover, the maximum flame temperature of CFD results is 1909.59 K. Therefore; it might be said that this LPG-air combustion model is likely the same and it can be further used as a tool to improve the thermal efficiency of the gas burner.

Keywords: KB-5 Burner, Computational Fluid Dynamics (CFD), Combustion, Mass fraction

1. บทนำ

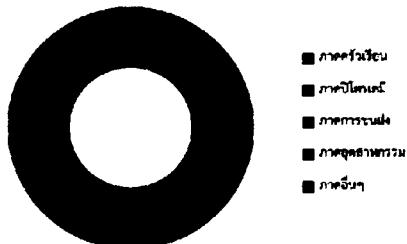
ปัจจุบันเชื้อเพลิงปิโตรเลียมเหลวหรือแก๊สแอลพีจี (LPG) ที่รู้จักกันโดยทั่วไป มีร่วนผสมของสารประกอบปิโตรเคน (Propane) และ บีตานี (Butane) ซึ่งมีคุณสมบัติที่ให้ความ

ร้อนสูง เป็นเชื้อเพลิงที่ความสะอาด ซึ่งเป็นที่นิยมนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายทั่วภาคตะวันออกเฉียงใต้และภาคอุตสาหกรรม จากสถิติบริษัทการใช้เชื้อเพลิงแอลพีจี (LPG) ของประเทศไทย ของสำนักงานแผนและนโยบาย[1] ในปี พ.ศ. 2559 สามารถ



แสดงสัดส่วนปริมาณการใช้เชื้อเพลิงแอลพีจี (LPG) มากที่สุด ในภาคครัวเรือนคิดเป็น 34% ของปริมาณการใช้เชื้อเพลิง ห้องน้ำ รองลงมา คือ ภาคป่าไม้ 30%, ภาคการเกษตร 24%, ภาคอุตสาหกรรม 9% และภาคอื่นๆ 3% ตามลำดับ

สัดส่วนปริมาณการใช้เชื้อเพลิงแอลพีจี



รูปที่ 1 สัดส่วนการใช้เชื้อเพลิงแอลพีจี (LPG) ในปี พ.ศ. 2559

จากสัดส่วนปริมาณการใช้เชื้อเพลิงแอลพีจี (LPG) ที่สูง มากในภาคครัวเรือนดังที่กล่าวมาแล้วนี้ จึงควรหาแนวทาง เพิ่มประสิทธิภาพการใช้งานเชื้อเพลิงแอลพีจี (LPG) ให้คุ้มค่า และมีประสิทธิภาพมากที่สุด โดยเชื้อเพลิงแอลพีจี (LPG) ที่ถูก นำมาใช้ในภาคครัวเรือนจำเป็นต้องทำงานร่วมกับเตาแก๊สหุง ต้มเพื่อเป็นอุปกรณ์ในการเปลี่ยนค่าความร้อนของเชื้อเพลิงให้ กลายเป็นความร้อนให้แก่ภาชนะหุงต้มสำหรับการประกอบ อาหาร แต่ในปัจจุบันลักษณะของเปลวไฟที่ได้จากการเผาไหม้ สำหรับเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือนมีลักษณะเป็นสีสุ่บร้ายกาฬ จึงทำให้เกิดการสูญเสียความร้อนเป็นจำนวนมากและเป็นการ สั่นเปลือยเชื้อเพลิง

การศึกษาที่เกี่ยวข้องกับเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือน หลักหลาตรูปแบบ ประเภทที่ 1 การนำเข้าในโลหะสุดทุรุณา ประยุกต์กับเตาแก๊สหุงต้มเพื่อช่วยเพิ่มการถ่ายเทความร้อน ของการเผาไหม้ โดยหน้าที่หลักของวัสดุหุ้นส่วนจะเป็นทั้ง ตัวรับความร้อนและแผ่นรับสีความร้อนที่ได้จากไออกไซด์มาอุ่น อากาศเพื่อช่วยเพิ่มอุณหภูมิของการเผาไหม้ให้สูงขึ้นซึ่งมีผลต่อ ประสิทธิภาพเชิงความร้อน[3] ต่อมา ประเภทที่ 2 ได้มี การศึกษาลักษณะทางออกแบบหัวเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือน โดยเปลี่ยนหัวเตาแก๊สหุงต้มแบบหัวไป (CB) มาเป็นหัวเตาแก๊ส หุงต้มแบบหมุน (SB)[4]และ[5] ซึ่งเป็นอิทธิพลสามารถช่วย เพิ่มระยะเวลาการสัมผัสร่องเปลวไฟกับภาชนะในการถ่ายเท ความร้อนจึงส่งผลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อน ประเภทที่ 3 ทำการศึกษาระดับและประสิทธิภาพเชิง ความร้อนของเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือน โดยอนิรุตต์ มัธยจักร และจรินทร์ เจนจิตต์[6] ทำการศึกษาวิธีการเพิ่มประสิทธิภาพ เชิงความร้อนของเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือน ประเภทแรงดันต่ำ ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก.2312-2549 โดยใช้

หลักการทดสอบการต้มน้ำเดือด พบว่า ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาแก๊สหุงต้มประเภทแรงดันต่ำที่นำไปใช้ค่าไม่เกินร้อยละ 50 ซึ่งยังคงสูงเท่าที่ควร จึงได้มีการศึกษาเพิ่มเติม พบว่า ปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาแก๊สหุงต้ม ที่ใช้ในการศึกษา ได้แก่ การลดการสูญเสียความร้อน, การอุ่น อากาศ และปรับปรุงลักษณะการฉีดแก๊ส สามารถเพิ่ม ประสิทธิภาพเชิงความร้อน ท่ากับ 15%, 11% และ 6% ตามลำดับ จากนั้น A. Namkhat and S. Jugjai [7] ได้ศึกษา คุณลักษณะของการเหนี่ยวนำอากาศส่วนแรก (Primary aeration, PA) ของเตาแก๊สหุงต้มแบบ Self-Aspirating ด้วย วิธีการทดลองแบบ Hot test และ Cold test ทำการตรวจดู การเหนี่ยวนำของอากาศโดยใช้ Oxygen sensor และ PIV เปรียบเทียบผลการทดลองกับแบบจำลองเชิงทฤษฎีใน-men ต้ม และหลักการอุบัติภัยหลังงาน พบว่า ผลการทดลองกับ แบบจำลองเชิงทฤษฎีกับอุบัติภัยเดียวกัน แต่เนื่องจากปริมาณอากาศส่วนแรกขึ้นอยู่กับอุตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิง มีติ ของหัวอัด มีติของหัวผลและมีติของหัวเผา ดังนั้นผลที่ได้จาก การทดลองแบบ Hot test จึงต่ำกว่าแบบ Cold test 22% และ ประเภทสุดท้าย ได้มีการศึกษาด้วยการนำวิธี พลศาสตร์ของเหลวเชิงคำนวณ (CFD) มาประยุกต์เข้ากับเตา แก๊สหุงต้มเพื่อช่วยในการวิเคราะห์ Azeman Mustafa and Noor Shawal [8] ได้ศึกษาคุณลักษณะการไหลของรูปทรงหัว เชื้อเพลิงกับอากาศของหัวเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือนแรงดันต่ำ ด้วยวิธีพลศาสตร์ของเหลวเชิงคำนวณ (CFD) พบว่า ผลจากการ จำลองสอดคล้องกับการทำงานจริงในท่อผ่าน ณ รัศมีศักดิ์ ปี泻 ไห่ และคุณ [9] จึงได้นำแนวคิดมาศึกษาโดยการจำลอง คุณลักษณะการไหลของอากาศผ่านกับเตาแก๊สเชื้อเพลิงในท่อผ่าน ของหัวเตาแก๊สหุงต้มครัวเรือนประเภทแรงดันสูง โดยใช้วิธี พลศาสตร์ของเหลวเชิงคำนวณ (CFD) ในรูปแบบการไหล ปั๊มปั๊ม k-epsilon RNG คำนวณร่วมกับ species transport แบบไม่มีปฏิกิริยาการเผาไหม้เพียงกับผลการ คำนวณเชิงทฤษฎี พบว่า มีค่าความคาดเคลื่อนของปริมาณอากาศส่วนแรก (PA) เท่ากับ 8.33%, 6.07%, และ 4.21% Prasad Boggavarapu และคุณ[10] ได้ศึกษาประสิทธิภาพ เชิงความร้อนของเตาแก๊สหุงต้มในประเทศไทยเดียว ประเภทแรงดันต่ำ 2.78 kW (91 ลิตรต่อชั่วโมง LPG) ที่ใช้เชื้อเพลิง แอลพีจี (LPG) และพีเอ็นจี (PNG) โดยการสร้างแบบจำลอง พลศาสตร์ของเหลวและทำการทดสอบความนำเชื้อตือของ แบบจำลองกับผลการทดลอง หลังจากนี้จึงทำการศึกษาการ เพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อนของแบบจำลองเตาแก๊สหุงต้ม ดังกล่าวโดยการปรับเปลี่ยนรูปแบบหัวเตาแก๊สและความสูง ระหว่างกันของหัวเตาในแบบจำลอง พบว่า ประสิทธิภาพเชิงความร้อนที่ได้จากการศึกษาของแบบจำลอง



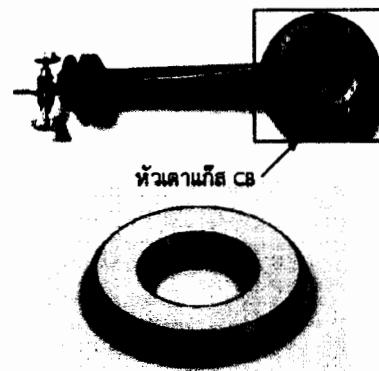
ของเชื้อเพลิงแอลพีจี (LPG) เพิ่มสูงขึ้น 2.5% และเชื้อเพลิงพีเอ็นจี (PNG) เพิ่มสูงขึ้น 10% เมื่อเทียบกับแบบจำลองหัวเตาแก๊สทุกตัวก่อนปรับปรุง

จากการวิจัยที่ผ่านมาพบว่ามีการศึกษาและพัฒนาเทคโนโลยีทุกตัวในครัวเรือนหลากหลายแบบ แต่เนื่องจากการผลิตด้วยวัสดุเป็นต้องใช้รับยานาน มีอุปกรณ์ราคาแพง อีกทั้งยังมีข้อจำกัดบางประการของผลการทดลองที่ไม่สามารถอธิบายคุณลักษณะและพฤติกรรมการเผาไหม้ เช่น ปริมาณของ mass fraction ของไออกไซด์ไดออกไซด์ที่ได้จากการเผาไหม้ หัวเตาของเปลวไฟ และอุณหภูมิของเปลวไฟได้อย่างชัดเจน ดังนั้นจึงเป็นที่มาของงานวิจัยนี้ โดยในงานวิจัยนี้จะนำวิธีพลศาสตร์ของโครงสร้างค่าณวน (CFD) เข้ามาระบุกด้วยในการศึกษาคุณลักษณะการเผาไหม้ที่จะส่งผลต่อประสิทธิภาพเผาความร้อนของหัวเตาแก๊สทุกตัวในครัวเรือนประเภทแรงดันสูง ขนาด KB-5

2. ทฤษฎีที่ใช้ในการวิจัย

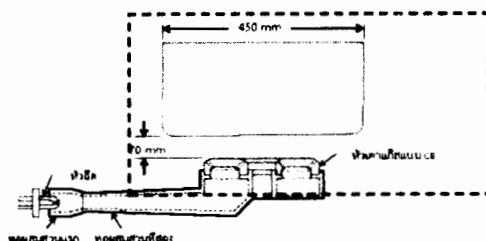
แก๊สเชื้อเพลิงแอลพีจี (LPG) ที่ได้จากธรรมชาติ มีสารประกอบหลักสำคัญ ได้แก่ ไพรอพาน (Propane) สูตรทางเคมี คือ C_3H_8 และบูตาน (Butane) สูตรทางเคมี คือ C_4H_{10} โดยมีอัตราส่วนผสมของเชื้อเพลิงแอลพีจี (LPG) จะห่างไกลระหว่างไพรอพานและบูตาน 60 : 40 โดยประมาณ จึงสามารถเขียนสมการดูดบุบบิกิริยาของเผาไหม้ได้ดังนี้ $C_3H_8 + 5.6O_2 \rightarrow 3.4CO_2 + 4.4H_2O$ (1)

จากสมการที่ 1 เชื้อเพลิง 1 mole มีน้ำหนักในเกลือกเฉลี่ยเท่ากับ 0.0496 kg และปริมาณของอากาศ เท่ากับ 0.818 kg. พบว่าอัตราส่วนระหว่างอากาศต่อเชื้อเพลิงของการเผาไหม้แบบสมบูรณ์ทางทฤษฎี (A/F_{sto}) เท่ากับ 15.48 โดยมวลของระบบ CHONS-เชื้อเพลิง-อากาศ[2] ได้ดังสมการ



รูปที่ 2 ส่วนประกอบเตาแก๊สทุกตัว ขนาด KB-5

ห้องสักขีษะของหัวเตาแก๊สทุกตัวในครัวเรือนแบบตั้งเดิมที่ใช้ในการศึกษามีขนาดที่กว้าง 242.28 mm² บริเวณที่ใช้ในการศึกษาคือบริเวณที่อยู่ระหว่างพอร์ตหัวเตาแก๊สทุกตัวกับด้านล่างและด้านซ้ายของภาชนะทุกตัว (หม้อ) เบอร์ 45 ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางของภาชนะ 45 cm ตามมาตรฐานการทดสอบ DIN 203-2 [11] โดยกำหนดการวางภาชนะทุกตัวให้หัวเตาแก๊สทุกตัวที่ระยะห่างระหว่างพอร์ตหัวเตาแก๊สทุกตัวกับด้านล่างของหม้อ (ก้นหม้อ) เท่ากับ 7 cm ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 แบบจำลองหัวเตาแก๊สทุกตัวในครัวเรือน

3. การจำลอง

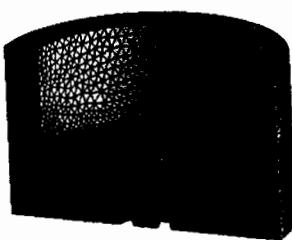
3.1 แบบจำลองของหัวเตาแก๊สทุกตัว

ส่วนประกอบหลักสำหรับเตาแก๊สทุกตัวในครัวเรือนได้แก่ หัวฉีดแก๊ส (Nozzle), ท่อผสม (Mixing Tube) และหัวเตา (Burner Head) ในงานวิจัยนี้จะทำการสร้างแบบจำลองการเผาไหม้รูปทรง 3 มิติ ของหัวเตาแก๊สทุกตัวประเภทแรงดันสูง KB-5 ที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางหัวฉีด 0.9 mm หัวที่ทางออกของหัวฉีด 0.64 mm² หัวที่หัวคอดเท่ากับ 283.53 mm² และระยะห่างหัวฉีดกับหัวคอด 22 mm มีความยาวของท่อผสมส่วนแรกและส่วนที่สองเท่ากับ 23 และ 165 mm ตามลำดับ หัวเตาที่ใช้เป็นแบบดั้งเดิม (Conventional Burner, CB) ดังรูปที่ 2

3.2 การสร้างตาข่ายสามมิติ (3D-Mesh)

จากการกำหนดบริเวณที่ใช้ในการศึกษาในหัวขอที่ผ่านมา จึงได้ทำการสร้างโครงข่ายสามเหลี่ยมสี่หน้า (Tetrahedral Mesh) ในรูปแบบ Skewness ลงในแบบจำลองดังแสดงในรูปที่ 4





รูปที่ 4 รายละเอียดของการกำหนดค่าข่าย (Mesh)

ซึ่งจากการทำ Mesh Analysis พบว่า จำนวนของเซลล์รูปทรงลูกศรที่มีความเหมาะสมที่จะใช้ค่ากำหนดผลต์ไกล์คิองกับผลของการทดลอง คือ 998,976 element และ 186,535 node ซึ่งขนาดความละเอียดของ mesh ที่ต่ำที่สุดมีค่าเท่ากับ 0.0001327 mm และสูงที่สุดมีค่าเท่ากับ 0.8492 mm โดยค่าเฉลี่ยขนาดของ mesh ที่ใช้ในการศึกษามีค่าเท่ากับ 0.23 mm ซึ่งอยู่ในช่วงมาตรฐาน (Mesh) ที่มีคุณภาพดีที่สุด ซึ่งระดับของ Quality Mesh อยู่ระหว่าง 0 ถึง 0.25

3.3 รูปแบบจำลองความปั่นป่วน

จากหลักการทำงานของเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือนที่มีการฉีดแก๊สไปโดยเลี้ยงเหลาผ่านหัวฉีดเพื่อเร่งความเร็วและไม่เน้นต้มของแก๊สจึงสามารถเห็นได้ว่าอากาศบริเวณรอบข้างมาสูบกับเชื้อเพลิงและพาร์ฟี (LPG) แบบ Premixed บริเวณข้อท่อผัดลมของหัวเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือนแล้วจึงเกิดการเผาไหม้ที่พร่องท้องของหัวเตา ซึ่งลักษณะและพฤติกรรมการไฟล์ผัดลมนี้ เป็นการไฟล์แบบปั่นป่วน ที่เหมาะสมกับแบบจำลองความปั่นป่วน RNG k-ε model คำนวณร่วมกับ Species Transport [9] แบบมีการผิดปฏิภูติการเผาไหม้

3.4 รูปแบบการกำหนดขอบเขตและเงื่อนไข

เงื่อนไขขอบเขตที่รูปแบบการจำลองเพื่อใช้อธิบายพฤติกรรมการเผาไหม้สำหรับเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือน ขนาด KB-5 ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CFD โดยกำหนดเชื้อเพลิงที่มีการผัดลมกันระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศในรูปแบบ LPG-air mixture ประกอบด้วยสารประกอบหลัก ได้แก่ ไฮโดรเจน, บิวเทน และอากาศ สำหรับรูปแบบการผัดร่วงสีความร้อนเลือกใช้ P1-Radiation เนื่องจากเหมาะสมสำหรับการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงที่มีการถ่ายเทความร้อนสูง

จากรูปแบบจำลองการไฟล์ผัดลมระหว่างเชื้อเพลิงและพาร์ฟี (LPG) และอากาศภายในห้องผัดลมสำหรับเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือน ขนาด KB-5[9] พบว่า ที่ขนาดรูทางออกหัวฉีด เชื้อเพลิงและพาร์ฟี (LPG) เท่ากับ 0.9 mm และที่ความดันการปล่อยเชื้อเพลิง เท่ากับ 0.5 bar สามารถแสดงอัตราการไฟล์

เชิงมวล (Mass flow rate) และ mass fraction ของสารตั้งต้นของการเผาไหม้ ได้แก่ mass fraction ของ ไฮโดรเจน, บิวเทน และอากาศ ดังตารางที่ 1 ซึ่งถูกกำหนดเป็นเงื่อนไขขอบเขตที่ทางเข้าของแบบจำลองการเผาไหม้ในงานวิจัยนี้

ตารางที่ 1 ขอบเขตทางเข้า (inlet) ที่ความดันการปล่อยเชื้อเพลิง เท่ากับ 0.5 bar

| ขอบเขตเงื่อนไข | |
|--|-------------|
| กำหนดขอบเขต | ทางเข้า |
| Mass flow rate (kg/s) | 0.001319214 |
| C ₃ H ₈ mass fraction | 0.059382606 |
| C ₄ H ₁₀ mass fraction | 0.039589018 |
| O ₂ mass fraction | 0.20720699 |
| Static Temperature (K) | 300 |

3.5 การถ่ายรูปและสแกนจากแบบจำลอง

รูปแบบการจำลองด้วยวิธีพลศาสตร์ของไฟล์เชิงคำนวณ (CFD) ดำเนินการกำหนดเงื่อนไขในการถ่ายรูปของผลเฉลย เพื่อใช้ในการท่านายความแม่น้ำของผลการจำลอง พบว่า ลักษณะ Geometry ของแบบจำลองที่ใช้ในการศึกษามีความละเอียดและซับซ้อนเป็นอย่างมาก ดังนั้นจึงได้กำหนดค่าการถ่ายรูปของผลเฉลย เท่ากับ $1e^{-6}$ [12] ซึ่งมีความเหมาะสมสำหรับรูปแบบที่มีความซับซ้อน

3.6 วิธีการทดสอบ

ในที่นี้ได้ทำการทดสอบความน่าเชื่อถือของผลเฉลยที่ได้ จากแบบจำลองด้วยวิธีการเปรียบเทียบผลกับการทดลองของเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือน โดยอ้างอิงตามมาตรฐาน DIN EN 203-2 ประยุกต์กับเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือน ขนาด KB-5 ที่มีรูทางออกของหัวฉีดเชื้อเพลิง เท่ากับ 0.9 mm ด้วยวิธีการต้มน้ำเดือด (Water Boiling) ที่อุณหภูมิห้องจะตั้งทั้งอุณหภูมิของน้ำเดือด (ประมาณ 90 องศาเซลเซียส) จากนั้นทำการวัดค่าอุณหภูมิของน้ำที่มีเปลี่ยนแปลงและวัดปริมาณแก๊สไอเสียที่ได้หลังจากการเผาไหม้โดยใช้เครื่องวิเคราะห์แก๊สไอเสีย (Exhaust Gas Analyzer)

4. ผลการจำลองและการวิเคราะห์ผล

รูปแบบการจำลองสามารถอธิบายคุณลักษณะการเผาไหม้สำหรับเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือน ขนาด KB-5 ที่มีขนาดของรูทางออกของหัวฉีดแก๊สเชื้อเพลิง เท่ากับ 0.9 mm พบว่า ค่าปริมาณ mass fraction ของผลิตภัณฑ์ที่ได้หลังจากการเผาไหม้ ได้แก่ ปริมาณ mass fraction ของ อออกซิเจน (O_2) คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และ

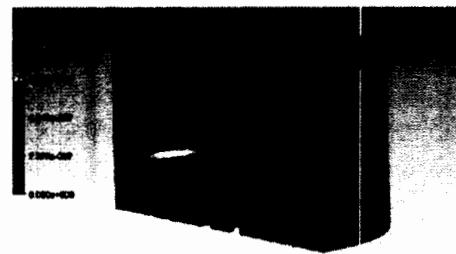


อุณหภูมิของเปลวไฟ (Flame Temperature) และ
รายละเอียดตั้งตารางที่ 2 พบว่า ที่ความดันการปั๊อยแก๊ส
เชื้อเพลิงแอลพีจี (LPG) เท่ากับ 0.5 bar ของแบบจำลองให้ค่า
ปริมาณ mass fraction ของผลิตภัณฑ์ของแก๊สไฮเดรตได้
หลังจากการเผาไหม้ของเทาแก๊สทุกตัวในครัวเรือน

รูปที่ 6 ปริมาณ mass fraction ของ CO_2

ตารางที่ 2 แสดงข้อมูลปริมาณ mass fraction ต่างๆ และ
อุณหภูมิของเปลวไฟ ที่ความดัน 0.5 bar

| ข้อมูล | ค่า |
|--|-------------|
| ปริมาณ mass fraction ของ O_2 (g.) | 0.207343000 |
| ปริมาณ mass fraction ของ CO_2 (g.) | 0.031549100 |
| ปริมาณ mass fraction ของ CO (g.) | 0.000388191 |
| อุณหภูมิเปลวไฟ (K) | 1854.33 |



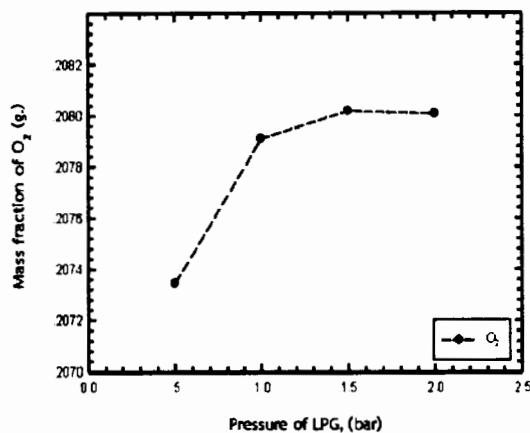
รูปที่ 7 ปริมาณ mass fraction ของ CO

ได้แก่ ปริมาณ mass fraction ของแก๊สออกซิเจน (O_2)
มีค่าเท่ากับ 0.207343000 g., ปริมาณ mass fraction ของ
แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) มีค่าเท่ากับ 0.031549100 g.,
ปริมาณ mass fraction ของ คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) มีค่า
เท่ากับ 0.000388191g. อิกที่ยังสามารถแสดงอุณหภูมิสูงสุด
ของเปลวไฟที่ได้หลังจากการเผาไหม้ มีค่าเท่ากับ 1854.33 K.
ซึ่งผลลัพธ์ของปริมาณ mass fraction ของ O_2 , CO_2 และ CO
ที่ได้หลังจากการเผาไหม้และค่าอุณหภูมิตามจุดต่างๆ สามารถ
นำมาแสดงในรูปแบบของแผนก ดังภาพที่ 5 ถึง
ภาพที่ 8

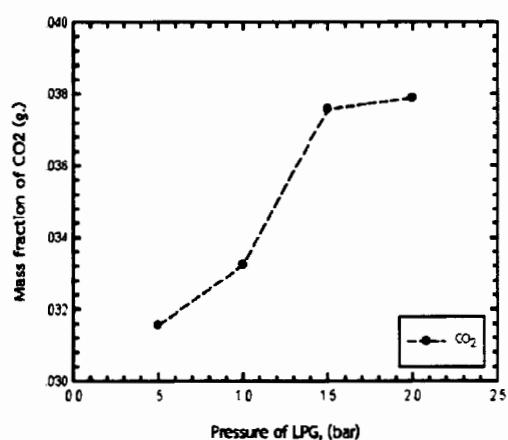
รูปที่ 5 ปริมาณ mass fraction ของ O_2 

รูปที่ 6 อุณหภูมิเปลวไฟ เท่ากับ 1854.33 K

ทั้งนี้ยังสามารถแสดงถึงความเร็วของการไหลของแก๊ส
ผลิตภัณฑ์และเปลวไฟในแบบจำลองการเผาไหม้ ที่ส่งผลต่อ
อัตราการถ่ายเทความร้อนของอุณหภูมิเปลวไฟสู่ด้านล่างของ
ภาชนะ ดังรูปที่ 9 พบว่า ที่ความดันการปั๊อยเชื้อเพลิงแอลพีจี
(LPG) ที่ 0.5 bar พบว่า ที่ความดันการปั๊อยเชื้อเพลิงแอลพีจี
(LPG) ที่ 0.5 bar ให้ค่าความเร็วสูงสุดของเปลวไฟที่หลอกออก
บริเวณรูทางออกของเทาแก๊สทุกตัวที่มีขนาดเล็ก มีค่าสูงสุด
เท่ากับ 15 m/s ซึ่งทำให้เกิดการเหนี่ยววนกากคลื่นที่สอง
(Secondary air) และการหมุนวนของเปลวไฟในบริเวณตรง
กลางของหัวเทาแก๊สทุกตัว จากนั้นเปลวไฟได้ไหลผ่านบน



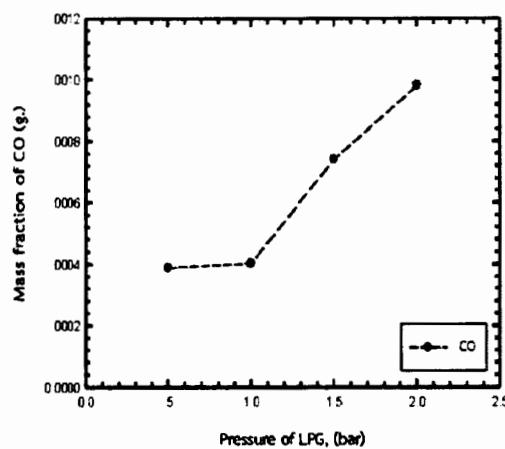
รูปที่ 11 กราฟแสดงปริมาณ mass fraction ของออกซิเจน (O_2) ที่ความดันการปล่อยแก๊สเชื้อเพลิง 0.5 ถึง 2.0 bar



รูปที่ 12 กราฟแสดงปริมาณ mass Fraction ของ คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ที่ความดันการปล่อยแก๊สเชื้อเพลิง 0.5 ถึง 2.0 bar

กราฟรูปที่ 13 แสดงปริมาณ mass fraction ของแก๊ส คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ที่ได้หลังจากการเผาไหม้ของ แบบจำลอง ที่ความดันการปล่อยแก๊สเชื้อเพลิงแอลพีจี (LPG) เท่ากับ 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 bar พนวณ ปริมาณ mass fraction ของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ที่ได้หลังจาก การเผาไหม้ของแบบจำลอง มีค่าเท่ากับ 0.000388191 (g.), 0.000402508 (g.), 0.000739843 (g.) และ 0.000980566 (g.) ตามลำดับ ซึ่งผลที่ได้จากการจำลอง พบว่า ปริมาณ mass fraction ของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ที่ความดันการ ปล่อยแก๊สเชื้อเพลิงแอลพีจี (LPG) 0.5 bar ถึง 1.0 bar ให้ค่า ปริมาณ mass fraction ที่มีปริมาณค่อนข้างต่ำ และหลังจาก

ช่วงความดันการปล่อยแก๊สเชื้อเพลิง 1.0 bar นั้น พบว่า ค่า ปริมาณ mass fraction มีปริมาณเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง นอกเหนือนี้แบบจำลองสามารถแสดงผลการทำงานอยุ่หมู่ของ เพลลาไฟสูงสุดที่ได้หลังจากการเผาไหม้สำหรับตำแหน่งที่ตั้งใน ครัวเรือน ที่ความดันการปล่อยเชื้อเพลิงแอลพีจี (LPG) 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 bar พบว่า ค่าอุณหภูมิของเพลลาไฟสูงสุด ของเพลลาไฟ มีค่าเท่ากับ 1854.33 (K.), 1883.72 (K.), 1903.87 (K.) และ 1909.59 (K.) ตามลำดับ ดังรูปที่ 14 และ ค่าอุณหภูมิเพลลาไฟสูงสุดที่ได้จากแบบจำลอง พบว่า ค่า อุณหภูมิของเพลลาไฟเพิ่มขึ้นตามความดันการปล่อยเชื้อเพลิง แอลพีจี (LPG) (LPG)

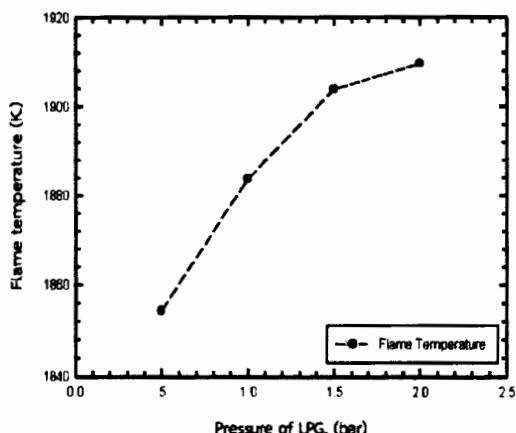


รูปที่ 13 กราฟแสดงปริมาณ Mass fraction ของ คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ที่ความดันการปล่อยแก๊สเชื้อเพลิง 0.5 ถึง 2.0 bar

นอกเหนือนี้แบบจำลองสามารถแสดงผลการทำงานอยุ่หมู่ของเพลลาไฟสูงสุดที่ได้หลังจากการเผาไหม้สำหรับตำแหน่งที่ตั้งในครัวเรือน ที่ความดันการปล่อยเชื้อเพลิงแอลพีจี (LPG) 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 bar พบว่า ค่าอุณหภูมิของเพลลาไฟสูงสุดของเพลลาไฟ มีค่าเท่ากับ 1854.33 (K.), 1883.72 (K.), 1903.87 (K.) และ 1909.59 (K.) ตามลำดับ ดังรูปที่ 14 และ ค่าอุณหภูมิเพลลาไฟสูงสุดที่ได้จากแบบจำลอง พบว่า ค่า อุณหภูมิของเพลลาไฟเพิ่มขึ้นตามความดันการปล่อยเชื้อเพลิง แอลพีจี (LPG)

โดยเฉพาะที่ความดันการปล่อยเชื้อเพลิงแอลพีจี (LPG) 0.5 bar ถึง 1.5 bar ให้ค่าอุณหภูมิของเพลลาไฟเพิ่มขึ้นอย่าง รวดเร็วและหลังจากการปล่อยเชื้อเพลิงแอลพีจี 1.5 bar นั้น ค่า อุณหภูมิของเพลลาไฟมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย จึงทราบได้ว่า ช่วงความดันการปล่อยเชื้อเพลิงแอลพีจี (LPG) 0.5 bar ถึง 1.5 bar จะมีผลกระทบต่อการถ่ายเทความร้อนสู่ภายนอกและ

ยังส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพเชิงความร้อนได้



รูปที่ 14 ความดันการปล่อยแก๊สเชื้อเพลิงแมลงพีจี (LPG) ที่มีผลต่ออุณหภูมิเปลวไฟ (Flame Temperature)

สรุป

จากการศึกษารูปแบบจำลองด้วยวิธีพลศาสตร์ของไอล.ซิงคำนวณ (CFD) ประยุกต์เข้ากับหัวเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือน ขนาด KB-5 รูปแบบการไอลบันปวน k-e ชนิด RNG คำนวณร่วมกับแบบจำลอง species transport แบบการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ ทดสอบความนำร่องเชื่อมต่อของแบบจำลอง โดยการเปรียบเทียบผลการจำลองกับผลการทดลองจริง ที่ความดันการปล่อยเชื้อเพลิงแมลงพีจี (LPG) เท่ากับ 0.5 bar และที่ขนาดรูทางออกหัวฉีดเชื้อเพลิงแมลงพีจี (LPG) เท่ากับ 0.9 mm พบว่า ค่าปริมาณ mass fraction ของผลิตภัณฑ์ที่ได้หลังจากการเผาไหม้ ได้แก่ ปริมาณ mass fraction ของแก๊สออกซิเจน (O_2) .แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ที่มีค่าความคาดเคลื่อนของแบบจำลองกับผลการทดลอง เท่ากับ 7.68%, 12.73% และ 15.78% ที่สามารถยอมรับได้ จึงได้นำรูปแบบจำลองไปใช้ ทำนายคุณลักษณะการเผาไหม้ที่ความดันการปล่อยเชื้อเพลิง 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 bar พบว่า ที่ความดันการปล่อยเชื้อเพลิงแมลงพีจี (LPG) 0.5 ถึง 1.0 bar ให้ค่าปริมาณ mass fraction ของออกซิเจน (O_2) เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและมีการปล่อยปริมาณ mass fraction ของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) กับแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ที่ค่อนข้างน้อย นองจากนี้ยังสามารถแสดงผลการทำงานอย่างดีของแก๊สหุงต้ม สูงสุด พบว่าช่วงการปล่อยความดันเชื้อเพลิงแมลงพีจี (LPG) ตั้งแต่ 0.5 ถึง 1.0 bar ให้ค่าอุณหภูมิของเปลวไฟเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งสามารถส่งผลต่อการถ่ายเทความร้อนและประสิทธิภาพเชิงความร้อนได้เป็นอย่างดี

ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่าผลที่ได้จากการประชุมวิชาการฯ ใหม่ของเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือนมีค่าความคาดเคลื่อนเล็กน้อยและยังสามารถใช้เป็นแนวทางเพื่อการปรับปรุงประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาแก๊สหุงต้มต่อไปได้

6. กิจกรรมประจำ

ขอบคุณอาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ที่ได้ให้คำปรึกษา, แนะนำและให้การสนับสนุนเป็นอย่างดี ซึ่งเป็นประโยชน์ต่องานวิจัยนี้

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] สำนักงานนโยบายและแผนพัฒนา (2559). ข้อมูลพัฒนา[ระบบออนไลน์], แหล่งที่มา <http://www.eppo.go.th/info/index-statistics.html>, เข้าดูเมื่อวันที่ 17/03/2559.
- [2] สำเริง จักรใจ (2547). การเผาไหม้ สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ
- [3] ณัฐรุณ รัตน์นันต์ชาติ (2544). การประยุกต์ใช้สัดส่วนเพื่อการประยุกต์พัฒนาในเตาแก๊สหุงต้ม, วิทยานิพนธ์หลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ วิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่[ระบบออนไลน์]
- [4] วสันต์ ไยกะเสนาถุกุล (2547). หัวเผาเชื้อเพลิงแก๊สที่มีการหมุนเวียนความร้อนและการไอลบันวน, วิทยานิพนธ์หลักสูตรปริญญา วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ วิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่[ระบบออนไลน์]
- [5] จาเรฟ จาบกลาง (2549). การพัฒนาเตาแก๊สหุงต้มประสิทธิภาพสูงชนิดมีการหมุนเวียนความร้อน, วิทยานิพนธ์หลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่[ระบบออนไลน์]
- [6] อนิรุทธ์ มัทตุจักรและจรินทร์ เจนจิตต์ (2550). เตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือนในประเทศไทยและแนวทางการเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อน, RSU JET
- [7] A. Namkhat & S. Jugjai (2010). Primary air entrainment characteristic for a self-aspirating burner: Model and Experiment, Energy, vol.35, pp.1701-1708.
- [8] Azeman Mustafa and Noor Shawal Nasri (2003). Computational Studies of Fuel and Air Mixing Characteristics of a Low Pressure Domestic Gas Appliance, Universiti Teknologi Malaysia, 2003

