



## การออกแบบหัวเผาวัสดุพอรุนแบบวงแหวนที่มีการเหนี่ยวนำอากาศด้วยตนเอง โดยใช้เชื้อเพลิงเหลว

### Design of a self-aspirating liquid fuel annular porous burner (SLAPB)

อติวิชญ์ สิริวิชัยกุล, อุษา มากมูล และ สำเริง จักรใจ<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ 126 ถนน ประชาอุทิศ แขวง บางมด เขต ทุ่งครุ กรุงเทพมหานคร 10140

\*ติดต่อ: E-mail sumrueng.jug@kmutt.ac.th, เบอร์โทรศัพท์ (662) 4709128, เบอร์โทรสาร (662) 4709111

#### บทคัดย่อ

ในภาคครัวเรือนมีการบริโภคพลังงานจากเชื้อเพลิง LPG สูงที่สุดในประเทศไทย แต่เนื่องจาก LPG เป็นเชื้อเพลิงที่ใช้แล้วหมดไปจึงเป็นพลังงานที่ไม่ยั่งยืน ดังนั้นเพื่อการบริโภคพลังงานที่ยั่งยืน จึงจำเป็นที่จะต้องหาพลังงานทางเลือกมาช่วยในการลดปริมาณการใช้ LPG ลง ซึ่งก็คือเอทานอล เอทานอลนั้นเป็นพลังงานทางเลือกที่สามารถผลิตได้จากผลผลิตทางการเกษตรของประเทศไทย เช่น อ้อย มันสำปะหลัง เป็นต้น ซึ่งการนำเอทานอลมาใช้กับเตาหัวเผาวัสดุพอรุนนั้นอาศัยข้อดีของวัสดุพอรุนที่มีการหมุนเวียนความร้อน ช่วยทำให้อุณหภูมิการเผาไหม้สูงกว่าอุณหภูมิการเผาไหม้ที่ไม่มีการหมุนเวียนความร้อน งานวิจัยนี้จึงได้ทำการออกแบบหัวเผาวัสดุพอรุนแบบวงแหวนที่ใช้เชื้อเพลิงเหลวขึ้นใหม่ โดยกำหนดให้ขนาดของหัวเผา และขนาดของท่อผสมยังคงเหมือนเดิมซึ่งมีจำหน่ายตามท้องตลาด และทำการออกแบบ Packed bed ของวัสดุพอรุนใหม่ โดยออกแบบให้ความเร็วในการไหลของส่วนผสมในวัสดุพอรุนมีค่าเท่ากับความเร็วในการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง ผลที่ได้พบว่าเปลวไฟของเชื้อเพลิง LPG และเชื้อเพลิงเอทานอล สามารถเผาไหม้และติดเสถียรอยู่ในวัสดุพอรุนได้ และ เมื่อนำความเร็วของส่วนผสมที่ได้จากการทดลองมาเปรียบเทียบกับผลการออกแบบ พบว่าความเร็วของส่วนผสมที่ได้จากการทดลองมีค่าสูงกว่าค่าที่ได้จากการออกแบบ โดยมีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยอยู่ที่ 8.24% และทำการเปรียบเทียบมิติและผลการทดลองกับหัวเผาเดิม พบว่าหัวเผาที่ได้ทำการออกแบบใหม่ มีปริมาตรของหัวเผาลดลง 61.56% และน้ำหนักของหัวเผาลดลง 45.10% และให้อุณหภูมิการเผาไหม้ที่สูงกว่าหัวเผาเดิมที่ค่าความร้อนป้อนเท่ากัน เป็นผลมาจากการออกแบบให้ความเร็วในการไหลของส่วนผสมในช่องว่างเพิ่มสูงขึ้น จึงทำให้สามารถเพิ่มปริมาตรของอากาศส่วนแรกที่เข้าไปเผาไหม้ได้มากขึ้น

**คำหลัก:** หัวเผาวัสดุพอรุน; เชื้อเพลิงเหลว; การเหนี่ยวนำอากาศด้วยตนเอง

#### Abstract

A household sector is the highest LPG consumption in Thailand. However, LPG is a non-renewable energy. For sustainable energy usage, an alternative energy is the way to reduce LPG consumption. So, the one important reduction solution is ethanol energy, because it can be produced from agricultural product of Thailand such as sugar cane and cassava. Ethanol usage as a fuel of the porous burner can reduce LPG consumption as well, taking into account the advantage of porous



burner in heat recirculation that can increase the flame temperature higher than non-recirculation system. For this reason, this paper is to design and develop a self-aspirating liquid fuel annular porous burner. With using the same nozzle size and mixing tube dimension as those of the conventional burners available in the market. New design of burner was focusing on flame stabilized into porous media with condition of flow velocity must be equally with burning velocity of fuel. The results shows, flame of LPG and ethanol was maintained into porous media as same as initial condition in before. Comparison between analytical, Interstitial velocity from experimental was higher than analytical with percentage of error around 8.24 and previously experimental, present burner has lower volume and total weight but higher combustion temperature at same firing rate/heat input (kW) because of it can be inducing highly primary air and leading combustion process nearly stoichiometry more than the old one.

**Keywords:** Porous burner; Liquid fuel; Self-aspirating

### 1. บทนำ

ในภาคครัวเรือนมีปริมาณการบริโภคเชื้อเพลิง LPG สูงที่สุดในประเทศไทย [1] แต่เนื่องจากเชื้อเพลิง LPG เป็นเชื้อเพลิงที่ใช้แล้วหมดไป จึงเป็นพลังงานที่ไม่ยั่งยืน ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องหาพลังงานทางเลือกมาช่วยในการลดปริมาณการใช้เชื้อเพลิง LPG ลง ซึ่งก็คือเอทานอล โดยเอทานอลนั้นเป็นพลังงานทางเลือกที่สามารถผลิตได้จากผลผลิตทางการเกษตรของประเทศไทย เช่น อ้อย มันสำปะหลัง เป็นต้น แต่เนื่องจากหัวเผาในภาคครัวเรือนที่มีขายอยู่ตามท้องตลาดนั้นเป็นหัวเผาแบบเหนียวนำอากาศด้วยตนเอง การจะนำเอทานอลซึ่งเป็นเชื้อเพลิงเหลวมาใช้ร่วมกับหัวเผาชนิดนี้นั้น จำเป็นที่จะต้องใช้แรงดันในการจ่ายเชื้อเพลิงที่สูง เพื่อให้เอทานอลเหลวแตกตัวเป็นละอองฝอย ดังนั้นทางห้องปฏิบัติการเครื่องยนต์และการเผาไหม้ (CERL) จึงได้พัฒนาหัวเผาวัสดุพอร์น [2] และหัวเผาวัสดุพอร์นแบบวงแหวน [3] ซึ่งเป็นหัวเผาที่พัฒนามาจากหัวเผาที่มีขายอยู่ตามท้องตลาด เนื่องจากข้อดีของวัสดุพอร์นที่มีการหมุนเวียนความร้อน [4] โดยการนำความร้อนที่สูญเสียไปกับแก๊สไอเสียกลับมาช่วยในการอุ่นไอดีหรือส่วนผสมระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิง ซึ่งทำให้ได้

อุณหภูมิในการเผาไหม้สูงกว่าการเผาไหม้ที่ไม่มีการหมุนเวียนความร้อน และได้ทำการพัฒนาหัวเผาวัสดุพอร์นที่สามารถใช้ร่วมกับเชื้อเพลิงเหลว (SLAPB) [6] โดยการติดตั้งท่อระเหยเข้าไปอยู่ใน Packed bed เพื่อนำความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้มาช่วยระเหยเอทานอลเหลวให้กลายเป็นไอ ก่อนที่จะไหลเข้าสู่หัวฉีดและเกิดการเผาไหม้ต่อไป แต่เนื่องจากหัววัสดุพอร์นแบบวงแหวนที่ใช้เชื้อเพลิงเหลว [6] นั้นมีขนาดของหัวเผาที่ใหญ่เมื่อเทียบกับค่าความร้อนป้อนของเชื้อเพลิงที่ทำได้ จึงทำให้มีความเข้มของการเผาไหม้ที่ต่ำและความเฉื่อยทางอุณหภูมิ (Thermal inertia) ที่สูง จึงทำให้ยังไม่เหมาะสมที่จะนำไปใช้ภายในภาคครัวเรือน

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการออกแบบหัวเผาวัสดุพอร์นแบบวงแหวนที่ใช้เชื้อเพลิงเหลว (SLAPB) ขึ้นใหม่ โดยทำการออกแบบมิติของ Packed bed ขึ้นใหม่ ซึ่งมีหลักการออกแบบให้ความเร็วของส่วนผสมระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงภายในช่องว่างของวัสดุพอร์น (Interstitial velocity) มีค่าเท่ากับความเร็วในการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง (Burning velocity) โดยที่มีมิติของหัวฉีดกับท่อผสมเท่ากันกับของหัวเผาเดิม [6] และตัว



แปรที่ทำการศึกษได้แก่ การกระจายตัวของอุณหภูมิภายใน Packed bed, อุณหภูมิของเอทานอลที่ไหลออกจากท่อระเหย, ความแตกต่างของความดันภายในห้องผสมเทียบกับบรรยากาศ และนำข้อมูลที่ได้มาเปรียบเทียบกับผลการคำนวณและผลการทดลองของ K. Pontree [6]

## 2. ขั้นตอนการออกแบบหัวเผาวัสดุพูนแบบ (SLAPB)

### 2.1 การออกแบบมิติของ Packed bed

การออกแบบหัวเผาวัสดุพูนนั้น ควรออกแบบให้เปลวไฟติดเสถียรอยู่ในวัสดุพูน เพื่อช่วยให้มีอุณหภูมิและความเร็วในการเผาไหม้ที่เพิ่มสูงขึ้น [4] การทำให้เปลวไฟสามารถเผาไหม้อยู่ภายในช่องว่างของวัสดุพูนได้นั้น จำเป็นต้องทราบค่าของ Peclet number [7] ดังแสดงในสมการที่ (1) ซึ่งถ้าหาก  $Pe > 65$  เปลวไฟสามารถจะเผาไหม้อยู่ภายในช่องว่างของวัสดุพูนได้ แต่ถ้าหาก  $Pe \leq 65$  เปลวไฟจะไม่สามารถเผาไหม้อยู่ภายในช่องว่างของวัสดุพูนได้ เนื่องจากขนาดของช่องว่างที่เล็กเกินกว่า Quenching distance ของเชื้อเพลิง

$$Pe = \frac{S_L d_c \rho}{k} \quad (1)$$

และเพื่อความเสถียรของเปลวไฟควรออกแบบให้ความเร็วในการไหลของส่วนผสมที่ไหลผ่านช่องว่างของวัสดุพูน (Interstitial velocity) มีค่าเท่ากับความเร็วในการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง (Burning velocity) ซึ่งถ้าหากค่าทั้งสองไม่เหมาะสมกันแล้วอาจส่งผลให้เปลวไฟเกิดการ Blow off หรือ Flash back ได้ ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องทราบค่าความเร็วของส่วนผสมที่ไหลผ่านช่องว่างของวัสดุพูน โดย Addamane และคณะ [8] ได้สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ที่สามารถทำนายปริมาตรการไหลของอากาศส่วนแรกที่ถูกเหนี่ยวนำไปเผาไหม้ของหัวเผาวัสดุพูนแบบเหนี่ยวนำอากาศด้วยตนเองได้ โดยพบว่าปริมาตรการไหลของอากาศส่วนแรกขึ้นอยู่กับ คุณสมบัติทางกายภาพของอากาศและเชื้อเพลิง, มิติของหัวฉีด, มิติ

ของท่อผสม, ขนาดของเม็ดวัสดุพูน และมิติของ Packed bed ดังแสดงในสมการที่ (2) ถึง (8)

$$0 = a\phi^2 + b\phi + c \quad (2)$$

$$a = \rho_f \left( \frac{1}{A_i A_i} - \frac{1}{2A_i^2} (1+k_{eff}) - \frac{1}{2A_p^2} \left( \frac{T_h}{T_i} \right)^2 - N \right) - \frac{M}{Q_f} \quad (3)$$

$$b = (\rho_a + \rho_f) \left( \frac{1}{2A_i^2} (1+k_{eff}) - \frac{1}{2A_p^2} \left( \frac{T_h}{T_i} \right)^2 - N \right) - \frac{M}{Q_f} \quad (4)$$

$$c = \rho_a \left( \frac{1}{2A_i^2} (1+k_{eff}) - \frac{1}{2A_p^2} \left( \frac{T_h}{T_i} \right)^2 - N \right) \quad (5)$$

$$M = 150 \frac{\mu_m CL}{A_p d_p^2} \left( \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \right) \left( \frac{T_m}{T_i} \right)^2 \quad (6)$$

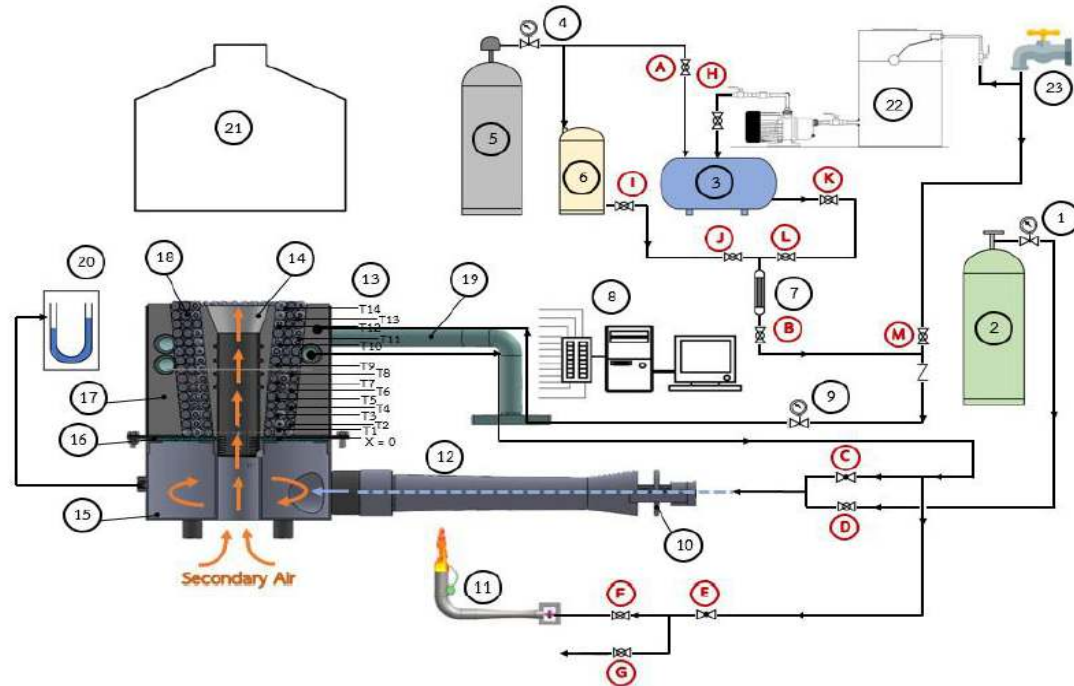
$$N = 1.75 \frac{LC^2}{A_p^2 d_p} \left( \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3} \right) \left( \frac{T_m}{T_i} \right)^2 \quad (7)$$

เมื่อทราบปริมาตรการไหลของอากาศส่วนแรกที่ถูกเหนี่ยวนำและปริมาตรการไหลของเชื้อเพลิงที่ไหลเข้าสู่หัวเผาแล้ว สามารถคำนวณหาความเร็วของส่วนผสมที่ไหลผ่านช่องว่างของวัสดุพูนได้ และนำค่าที่ได้มาเปรียบเทียบกับค่าความเร็วในการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง

### 2.2. ออกแบบความยาวของท่อระเหย

ท่อระเหยทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (Heat exchanger) โดยนำความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ถ่ายเทไปสู่เอทานอลเหลวจนเกิดการระเหยกลายเป็นไอ ซึ่งท่อระเหยถูกติดตั้งอยู่ใน Packed bed และถูกฝังอยู่ในผนังของปูนทนไฟ โดยการหาความยาวของท่อระเหย จึงต้องทราบค่าความร้อนที่เอทานอลต้องการ เพื่อใช้ในการเปลี่ยนสถานะจากของเหลวกลายเป็นไอ ดังแสดงในสมการที่ (8) และการถ่ายเทความร้อนจากเปลวไฟไปสู่เอทานอลหาได้ดังแสดงในสมการที่ (9) และ (10)

[5] โดยสมมุติให้ระบบอยู่ในสภาวะ Steady state และ เอทานอล, ท่อระเหยและผนังปูนคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตาม อุณหภูมิที่ผนังท่อระเหยคงที่, คุณสมบัติทางกายภาพของ



รูปที่ 1 แผนภาพอุปกรณ์การทดลอง

1. Pressure regulator (LPG), 2. LPG tank, 3. Water tank, 4. Pressure regulator (N<sub>2</sub>), 5. Nitrogen tank,
6. Ethanol tank, 7. Rota meter, 8. Data logger, 9. Pressure gauge, 10. Primary air adjuster,
11. Auxiliary burner, 12. Mixing tube, 13. Packed bed, 14. Secondary air pipe, 15. Mixing chamber,
16. Perforate plate, 17. Refractory mortar, 18. Alumina oxide, 19. Vaporizer, 20. Barometer, 21. Hood,
22. Water tank supply, 23. Water tap

อุณหภูมิ

$$\dot{Q}_{Total} = \dot{Q}_{Liquid} + \dot{Q}_{Latentheat} + \dot{Q}_{Vapor} \quad (8)$$

$$Q = UA_s \Delta T_{lm} \quad (9)$$

$$Q = Sk(T_{flame} - T_s) \quad (10)$$

### 3. อุปกรณ์และขั้นตอนการทดลอง

ในรูปที่ 1 แสดงแผนภาพอุปกรณ์การทดลองของ หัวเผาวัสดุพูนแบบวงแหวนที่มีการเหนี่ยวนำอากาศ ด้วยตนเองโดยใช้เชื้อเพลิงเหลว ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วนใหญ่ๆ ได้ดังนี้

#### 3.1. อุปกรณ์ของหัวเผาวัสดุพูนแบบวงแหวน

ซึ่งประกอบไปด้วย หัวฉีดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.0 mm, Primary air adjuster, ท่อผสมที่มีความยาว 304 mm และเส้นผ่านศูนย์กลางที่ตำแหน่งคอคออด 23.5 mm, ห้องผสมที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 180 mm และความสูง 92 mm, Packed bed ซึ่งมีหน้าตัดทางด้านขาเข้าและขาออกเป็นแบบวงแหวน ซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางด้านนอก 110 mm, 135 mm และเส้นผ่านศูนย์กลางด้านใน 50 mm, 75 mm ตามลำดับ และมีความสูง 143 mm, Alumina oxide ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 mm ถูกบรรจุอยู่ภายใน Packed bed และท่อระเหยซึ่งมีขนาดเส้นผ่าน



ศูนย์กลางภายใน 15.76 mm ในส่วนของการเก็บข้อมูลของหัวเผาวัสดุพูนนั้น มีการวัดค่าการกระจายตัวของอุณหภูมิภายใน Packed bed โดยใช้ Thermocouple type N จำนวน 3 ตัว ( $T_1 - T_3$ ) และ Thermocouple type B จำนวน 11 ตัว ( $T_4 - T_{14}$ ) ซึ่งมีความคลาดเคลื่อนอยู่ที่  $\pm 0.75\%$  และ  $0.5\%$  ตามลำดับ โดยติดตั้งตามแนวแกนของ Packed bed และทำการวัดความแตกต่างของความดันที่ตำแหน่งของห้องผสมด้วย Barometer กับวัดค่าอุณหภูมิของส่วนผสมที่ไหลเข้ามาภายในห้องผสม โดยใช้ Thermocouple type N และทำการวัดค่าอุณหภูมิของน้ำและเอทานอลที่ตำแหน่งทางขาออกของท่อระเหย โดยใช้ Thermocouple type N และเก็บข้อมูลโดยใช้ Data logger ยี่ห้อ Data taker รุ่น DT85 series 3

### 3.2. อุปกรณ์ของระบบจ่ายเชื้อเพลิงและน้ำหล่อเย็น

ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ส่วนย่อยๆ ดังนี้

3.2.1 ระบบจ่ายเชื้อเพลิง LPG ประกอบไปด้วย ถังแก๊ส LPG และ Pressure regulator 3.2.2 ระบบจ่ายเชื้อเพลิงเอทานอลและน้ำหล่อเย็น ประกอบไปด้วย ถังแก๊สไนโตรเจน, Pressure regulator, ถังเก็บเอทานอล, Rota meter ที่มีปริมาตรการไหลอยู่ในช่วง 0 – 5 LPH และได้ทำการ Calibrate ค่าแล้ว, ก๊อกน้ำ, ถังน้ำ และถังเก็บน้ำสำรอง

### 3.3 การทดลองเผาไหม้เชื้อเพลิง LPG

เริ่มต้นการทดลองเปิดน้ำจากก๊อกน้ำ (23) เพื่อหล่อเย็นท่อระเหยและทำการจ่ายเชื้อเพลิง LPG (2) ผ่าน Pressure regulator (1) ที่ความดันเกจ 0.5 bar และเปิดวาล์ว (D) เพื่อให้แก๊ส LPG ไหลผ่านไปสู่หัวฉีด โดยที่ตำแหน่งของ Primary air adjuster (10) อยู่ที่ตำแหน่งปิด ในขณะที่เดียวกันก็มีเปลวไฟล่ออยู่ที่ตำแหน่งทางออกของ Packed bed เมื่อแก๊ส LPG ไหลมาปะทะกับเปลวไฟล่อจะเกิดการเผาไหม้และให้เปลวไฟแบบแพร์ หลังจากนั้นจึงค่อยๆทำการเปิด Primary air adjuster และ สังเกต ตำแหน่ง เปลวไฟ ผ่าน

Thermocouple โดยสังเกตจากตำแหน่งที่มีอุณหภูมิสูงที่สุดภายใน Packed bed เมื่อทำการเปิด Primary air adjuster จนสุด ตำแหน่งของเปลวไฟจะอยู่ใน Packed bed ภายใต้ท่อระเหย รอจนอุณหภูมิภายใน Packed bed เข้าสู่สภาวะ Steady state แล้วจึงทำการเปลี่ยนน้ำจากก๊อกน้ำ (23) เป็นน้ำที่อัดแรงดันด้วยไนโตรเจน (3) จากถังไนโตรเจน (5) โดยทำการปิดวาล์ว (M) และเปิดวาล์ว (A), (K), (L), (B) โดยน้ำที่อัดแรงดันจะไหลเข้าสู่ Rota meter (7) โดยคุมปริมาตรการไหลของน้ำให้มีค่าเท่ากับปริมาตรการไหลของเอทานอลที่ 23 kW เพื่อตรวจสอบอุณหภูมิของไอน้ำที่ทางออกว่าสามารถทำให้เอทานอลระเหยกลายเป็นไอได้หรือไม่ รอจนทุกอย่างเข้าสู่สภาวะ Steady state จึงทำการเก็บค่าการกระจายตัวของอุณหภูมิภายใน Packed bed ความแตกต่างของความดันภายในห้องผสมเทียบกับบรรยากาศ และอุณหภูมิของน้ำที่ทางออกของท่อระเหย

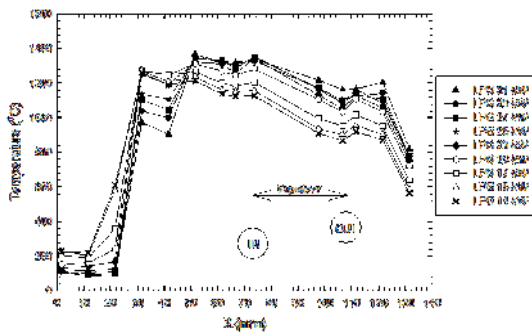
### 3.4 การทดลองเผาไหม้เชื้อเพลิง Ethanol

เป็นขั้นตอนหลังจากการอุ่นเตาด้วยเชื้อเพลิง LPG และใช้น้ำอัดแรงดันเพื่อตรวจสอบอุณหภูมิของน้ำที่ไหลออกจากท่อระเหยว่าสามารถระเหยเอทานอลจนกลายเป็นไอได้แล้ว ในขณะที่ทุกอย่างเข้าสู่สภาวะ Steady state ทำการเปลี่ยนระบบจากน้ำอัดแรงดัน (3) ไปเป็นเอทานอล (6) ที่มีการอัดแรงดันด้วยไนโตรเจน โดยการปิดวาล์ว (A), (K), (L) และเปิดวาล์ว (I), (J) โดยเอทานอลจะไหลเข้าสู่ Rota meter (7) โดยควบคุมอัตราการไหลของเอทานอลให้มีปริมาตรการไหลเท่ากับค่าความร้อนป้อนที่ 23 kW รอจนเอทานอลระเหยกลายเป็นไอแห้งดีแล้ว จึงทำการปิดวาล์ว (G) และเปิดวาล์ว (F) เพื่อให้เอทานอลไหลเข้าสู่หัวเผาช่วยและตรวจสอบว่าเอทานอลสามารถเผาไหม้ได้หรือไม่ โดย Primary air adjuster อยู่ในตำแหน่งปิด ในขณะที่เดียวกันก็มีไฟล่ออยู่ที่ทางออกของหัวเผาช่วย เมื่อเอทานอลเกิดการเผาไหม้จึงทำการเปิด Primary air adjuster ประมาณ  $90^\circ$  รอจนเปลวไฟของเอทานอล

สามารถเผาไหม้ได้สมบูรณ์ จึงทำการจ่ายเอทานอลเข้าสู่หัวฉีดหลักแทนเชื้อเพลิง LPG (2) โดยเริ่มจากการปิด Primary air adjuster (10) ของหัวฉีดหลักและทำการปิดวาล์ว (D), (F) และเปิดวาล์ว (C) เมื่อเอทานอลไหลเข้าไปเผาไหม้ภายในหัวเผาหลักแล้วจึงทำการค่อยๆ เปิด Primary air adjuster (10) โดยควบคุมให้ตำแหน่งของเปลวไฟอยู่ภายใต้ท่อระเหย รอจนทุกอย่างเข้าสู่สภาวะ Steady state แล้วจึงทำการเก็บค่าการกระจายตัวของอุณหภูมิภายใน Packed bed ความแตกต่างของความดันภายในห้องผสมเทียบกับบรรยากาศ และอุณหภูมิของน้ำที่ทางออกของท่อระเหย

4. ผลการทดลอง

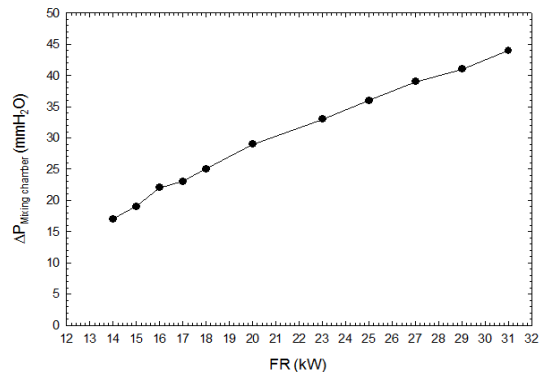
4.1 การทดลองเผาไหม้เชื้อเพลิง LPG



รูปที่ 2 การกระจายตัวของอุณหภูมิภายใน Packed bed ของเชื้อเพลิง LPG

รูปที่ 2 แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิภายใน Packed bed ของการเผาไหม้เชื้อเพลิง LPG ที่ค่าความร้อนป้อนต่างๆ ผลที่ได้พบว่า เปลวไฟสามารถเผาไหม้และติดเสถียรอยู่ภายในวัสดุพูนได้ โดยที่ตำแหน่งของเปลวไฟอยู่ภายใต้ท่อระเหยที่ทุกๆ ค่าความร้อนป้อนของเชื้อเพลิง และที่ค่าความร้อนป้อนที่ 14 kW ถึง 17 kW ตำแหน่งของเปลวไฟอยู่ที่ตำแหน่ง  $T_4$  และเมื่อทำการเพิ่มค่าความร้อนป้อนไปที่ 18 kW ถึง 31 kW พบว่าตำแหน่งของเปลวไฟเคลื่อนที่ไปอยู่ที่  $T_6$  ทั้งนี้เป็นผลมาจากการเพิ่มค่าความร้อนป้อนของเชื้อเพลิง ทำให้มวลและโมเมนตัมของแก๊ส LPG ที่ไหลออกจากหัวฉีด

เพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้สามารถเหนี่ยวนำอากาศส่วนแรกเข้ามาผสมได้มากขึ้น ทำให้มีปริมาตรของส่วนผสมไหลเข้าสู่ Packed bed เพิ่มมากขึ้นและทำให้ความเร็วในการไหลของส่วนผสมเพิ่มขึ้นจนเอาชนะความเร็วในการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง ทำให้เปลวไฟเคลื่อนที่ไปทางด้าน Downstream มากขึ้น และเมื่อค่าความร้อนป้อนเพิ่มสูงขึ้น พบว่าทำให้อุณหภูมิทางด้าน Upstream ลดลง ในขณะที่อุณหภูมิทางด้าน Downstream เพิ่มสูงขึ้น ทั้งนี้เป็นผลมาจากค่าความร้อนป้อนที่เพิ่มขึ้น ทำให้มีปริมาตรของส่วนผสมที่ไหลเข้าสู่ Packed bed เพิ่มมากขึ้น ซึ่งส่งผลทำให้มี Cooling effect ทางด้าน Upstream เพิ่มมากขึ้น และทำให้แก๊สไอเสียที่ไหลออกจาก Packed bed มี Resident time ลดลง จึงทำให้มีความร้อนสูญเสียไปทางด้าน Downstream เพิ่มมาก

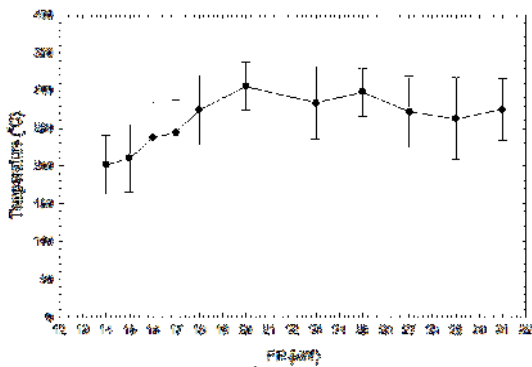


รูปที่ 3 ความแตกต่างของความดันภายในห้องผสมเทียบกับบรรยากาศของเชื้อเพลิง LPG

รูปที่ 3 แสดงความแตกต่างของความดันภายในห้องผสมเทียบกับบรรยากาศ ผลที่ได้พบว่าความแตกต่างของความดันภายในห้องผสมเพิ่มมากขึ้น เมื่อค่าความร้อนป้อนของเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เป็นผลมาจากการเพิ่มค่าความร้อนป้อนของเชื้อเพลิง ทำให้มีปริมาตรของส่วนผสมไหลเข้าสู่ห้องผสมเพิ่มมากขึ้น จึงทำให้ความแตกต่างของความดันภายในห้องผสมเพิ่มมากขึ้น

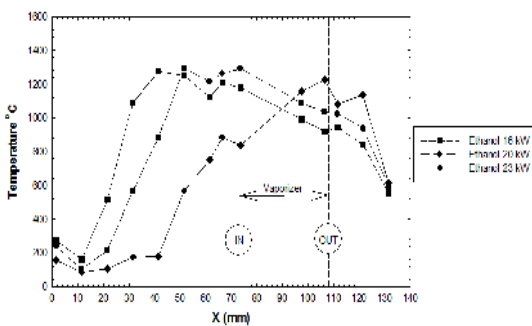
รูปที่ 4 แสดงอุณหภูมิของน้ำที่ทางออกของท่อระเหย ที่ค่าความร้อนป้อนต่างๆ โดยปริมาตรการไหล

ของน้ำค้างที่อยู่ 3.91 LPH ผลที่ได้พบว่าเมื่อค่าความร้อนป้อนเพิ่มสูงขึ้น ส่งผลทำให้อุณหภูมิของน้ำเพิ่มสูงขึ้น ทั้งนี้เป็นผลมาจากค่าความร้อนป้อนที่เพิ่มขึ้น ทำให้ตำแหน่งของเปลวไฟเคลื่อนที่ไปทางด้าน Downstream และทำให้ตำแหน่งของเปลวไฟเข้าใกล้กับท่อระเหยมากขึ้น จึงทำให้มีการถ่ายเทความร้อนจากเปลวไฟไปสู่ น้ำได้มากขึ้น



รูปที่ 4 อุณหภูมิของน้ำอัดแรงดันที่ทางออกของท่อระเหย

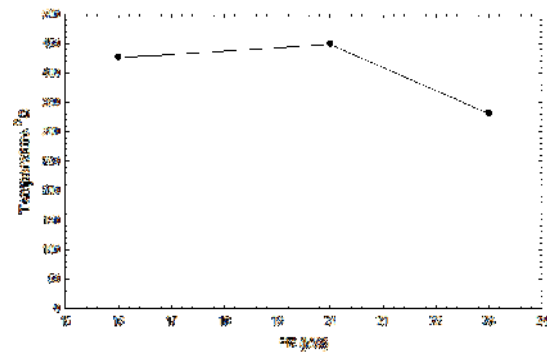
4.2 การทดลองเผาไหม้เชื้อเพลิงเอทานอล



รูปที่ 5 การกระจายตัวของอุณหภูมิภายใน Packed bed

รูปที่ 5 แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิภายใน Packed bed ของการเผาไหม้เชื้อเพลิงเอทานอล ที่ค่าความร้อนป้อนต่างๆ ผลที่ได้พบว่าเปลวไฟของเอทานอลสามารถเผาไหม้และติดเสถียร Packed bed ได้โดยตำแหน่งของเปลวไฟยังอยู่ภายใต้ท่อระเหย และเมื่อค่าความร้อนป้อนของเอทานอลเพิ่มขึ้นตำแหน่งของเปลว

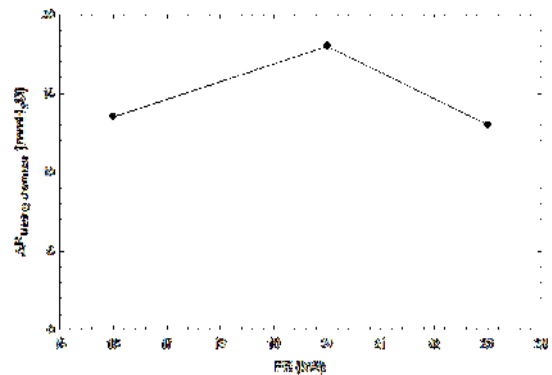
ไฟเคลื่อนที่ไปทางด้าน Downstream มากขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากเมื่อค่าความร้อนป้อนของเอทานอลเพิ่มขึ้น ทำให้มีปริมาตรการไหลของส่วนผสมเพิ่มขึ้นและทำให้ความเร็วในการไหลของส่วนผสมภายในช่องว่างของวัสดุพอร์ซเลนเพิ่มขึ้นตามไปด้วย จนเอาชนะความเร็วในการเผาไหม้ของเอทานอล จึงทำให้ตำแหน่งของเปลวไฟเคลื่อนที่ไปทางด้าน Downstream แต่ที่ค่าความร้อนป้อนที่ 23 kW พบว่าเปลวไฟเคลื่อนที่ไปอยู่เหนือท่อระเหยซึ่งจะขออธิบายเหตุผลในย่อหน้าถัดไป



รูปที่ 6 อุณหภูมิของเอทานอลที่ไหลออกจากท่อระเหย

รูปที่ 6 แสดงอุณหภูมิของเอทานอลที่ทางออกของท่อระเหยที่ค่าความร้อนป้อนต่างๆ ผลที่ได้พบว่า เมื่อค่าความร้อนป้อนของเอทานอลเพิ่มขึ้น ส่งผลทำให้อุณหภูมิของเอทานอลที่ทางออกของท่อระเหยเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากการเพิ่มค่าความร้อนป้อน ทำให้ตำแหน่งของเปลวไฟเคลื่อนที่ไปทางด้าน Downstream และเข้าใกล้กับท่อระเหยมากขึ้น จำทำให้มีการถ่ายเทความร้อนสู่เอทานอลเพิ่มมากขึ้น แต่ที่ค่าความร้อนป้อนที่ 23 kW มีอุณหภูมิของเอทานอลที่ต่ำเนื่องจากตำแหน่งของเปลวไฟเคลื่อนที่ไปอยู่เหนือท่อระเหย เป็นผลมาจากการเกิด Decomposition ของเชื้อเพลิงเอทานอล ที่ค่าความร้อนป้อนที่ 16 kW และ 20 kW โดยที่พบว่ามีอุณหภูมิของเอทานอลที่ทางออกของท่อระเหยอยู่ที่ 426 °C และ 449 °C ตามลำดับ ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้เกิดการ Decomposition ของเชื้อเพลิงเอทานอล

แต่ไม่ส่งผลต่อการทำงานของหัวเผา และเมื่อเกิดการ Decomposition มากขึ้น ที่ 20 kW ทำให้เมื่อทำการเพิ่มค่าความร้อนป้อนของเอทานอลไปที่ 23 kW พบว่าเขม่าของเอทานอลที่เกิดการ Decomposition ไหลเข้าไปอุดตันอยู่ที่ตำแหน่งของหัวฉีดหลัก ส่งผลให้มวลของเอทานอลไหลออกจากหัวฉีดได้น้อยลงและส่งผลกระทบต่อความเร็วของอากาศส่วนแรก ทำให้ความเร็วในการเผาไหม้ของเอทานอลลดลงและตำแหน่งของเปลวไฟเคลื่อนที่ไปอยู่เหนือท่อระเหย ดังแสดงในรูปที่ 5 แต่หัวเผายังคงสามารถทำงานได้เนื่องจากที่ 23 kW อุณหภูมิของเอทานอลที่ไหลออกจากท่อระเหยต่ำกว่าจุดย่อยสลายของเชื้อเพลิง จึงไม่เกิดการย่อยสลายมาอุดตันหัวฉีดเพิ่มเติม

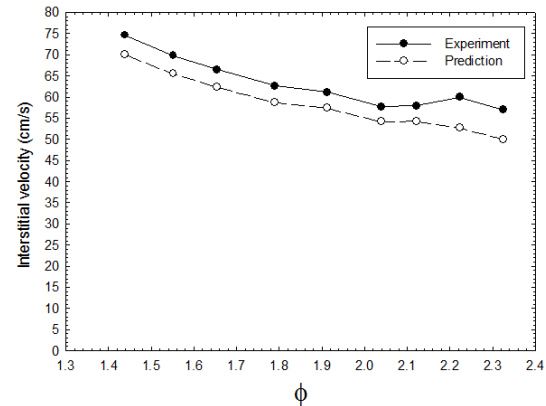


รูปที่ 7 ความแตกต่างของอุณหภูมิภายในห้องผสมเทียบกับบรรยากาศของเชื้อเพลิงเอทานอล

รูปที่ 7 แสดงความแตกต่างของอุณหภูมิภายในห้องผสมเทียบกับบรรยากาศ ผลที่ได้พบว่ามีแนวโน้มที่เหมือนกับเชื้อเพลิง LPG เนื่องมาจากการเพิ่มค่าความร้อนป้อนของเชื้อเพลิงเอทานอลให้สูงขึ้น ทำให้มีมวลของเอทานอลและอากาศส่วนแรกที่ไหลเข้าไปสู่ห้องผสมเพิ่มขึ้นและทำให้ความแตกต่างของอุณหภูมิภายในห้องผสมเพิ่มสูงขึ้น แต่ที่ค่าความร้อนป้อนที่ 23 kW พบว่ามีค่าต่ำกว่าที่ 16 kW และ 20 kW ทั้งนี้เป็นผลมาจากการเกิดการ Decomposition ของเอทานอลกลายเป็นเขม่าสีดำที่ค่าความร้อนป้อน 16 kW และ 20 kW จึงทำให้ที่ค่าความร้อนป้อนที่ 23 kW มีเขม่ามาอุดตันที่

ตำแหน่งของหัวฉีด และทำให้มวลของเอทานอลไหลออกจากหัวฉีดได้น้อยลง ส่งผลให้ปริมาตรของอากาศส่วนแรกลดลงและปริมาตรของส่วนผสมที่ไหลเข้าสู่ห้องผสมลดลง

4.3 เปรียบเทียบผลการออกแบบกับผลการทดลอง



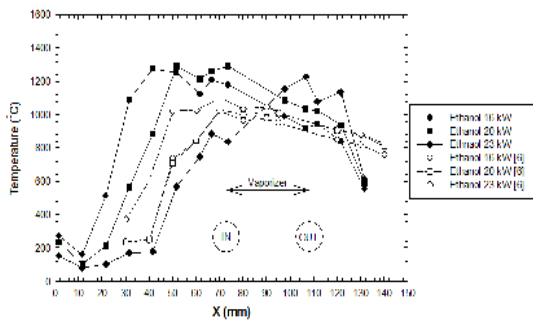
รูปที่ 8 เปรียบเทียบความเร็วในช่องว่างของส่วนผสมของเชื้อเพลิง LPG

ในรูปที่ 8 เป็นการเปรียบเทียบความเร็วในช่องว่างของส่วนผสมที่ได้จากการทดลองเชื้อเพลิง LPG กับค่าที่ได้จากการคำนวณ ผลที่ได้พบว่าความเร็วของส่วนผสมที่ได้จากการทดลองมีค่าสูงกว่า ค่าที่ได้จากการคำนวณ ทั้งนี้เป็นผลมาจาก ในการออกแบบได้นำข้อมูลจากผลการทดลองของ K. Pontree [6] มาใช้ในการทำนายค่าอุณหภูมิของส่วนผสมที่ได้รับจากการพาและการแผ่รังสีความร้อนจากวัสดุพอร์น เพื่อนำไปหาค่าความเร็วในการเผาไหม้ของของเชื้อเพลิง แต่เนื่องจากมิติของ Packed bed ที่แตกต่างกันจึงทำให้อุณหภูมิของส่วนผสมเปลี่ยนแปลงไปจากข้อมูลเดิม ส่งผลทำให้ตำแหน่งของเปลวไฟที่ได้จากการทดลองอยู่ต่ำกว่าตำแหน่งที่ได้ออกแบบไว้จากการคำนวณ เนื่องจากมีความเร็วในการเผาไหม้ที่สูงกว่า โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยอยู่ที่ 8.24%



4.4 เปรียบเทียบผลกับหัวเผาของ K. Pontree [6]

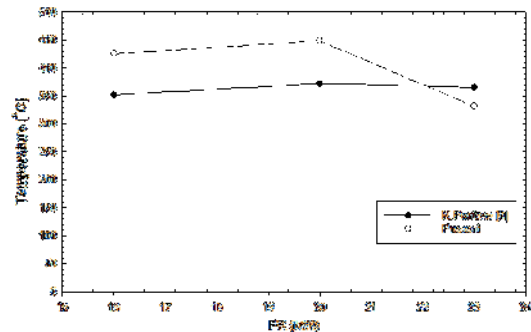
จากการออกแบบหัวเผาใหม่ในงานวิจัยนี้ พบว่าหัวเผาที่ออกแบบใหม่มีปริมาตรลดลง 61.56% และน้ำหนักลดลง 45.10% เมื่อเทียบกับหัวเผาของ K. Pontree [6] และจากรูปที่ 9 เปรียบเทียบการกระจายตัวของอุณหภูมิภายใน Packed bed ผลที่ได้พบว่าอุณหภูมิการเผาไหม้ใน Packed bed ของหัวเผาที่ออกแบบใหม่มีค่าสูงกว่าของ K. Pontree [6] เนื่องจากหัวเผาใหม่ถูกออกแบบให้มีความเร็วในการไหลภายในช่องว่างของส่วนผสมที่สูงกว่า ทำให้สามารถเพิ่มปริมาณอากาศส่วนแรกเข้ามาเผาไหม้ได้มากกว่าหรือก็คือมีสัดส่วนของอากาศต่อเชื้อเพลิงเข้าใกล้สโตยคิโอเมทรีมากกว่า ของ K. Pontree [6] จึงทำให้มีอุณหภูมิในการเผาไหม้ที่สูงกว่า ในขณะที่ค่าความร้อนป้อนของเชื้อเพลิงเท่ากัน



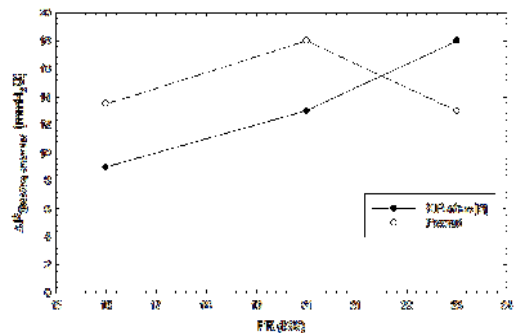
รูปที่ 9 เปรียบเทียบอุณหภูมิในการเผาไหม้ใน Packed bed

จากรูป 10 เปรียบเทียบอุณหภูมิของเอทานอลที่ทางออกของท่อระเหย ผลที่ได้พบว่าอุณหภูมิของเอทานอลที่ทางออกของท่อระเหยมีค่าสูงกว่าของ K. Pontree [6] เป็นผลมาจากอุณหภูมิของการเผาไหม้ภายใน Packed bed และความเร็วในการไหลของส่วนผสมที่มีค่าสูงกว่า ส่งผลให้มีการถ่ายเทความร้อนไปสู่เอทานอลได้มากกว่าของ K. Pontree แต่ที่ 23 kW พบว่ามีอุณหภูมิของเอทานอลต่ำกว่า เนื่องมาจากสาเหตุที่ได้อธิบายไปแล้วในรูปที่ 6

จากรูป 11 เปรียบเทียบความแตกต่างของความดันภายในห้องผสม ผลที่ได้พบว่าความแตกต่างของความดันมีค่าสูงกว่าของ K. Pontree [6] เป็นผลมาจากการออกแบบหัวเผาให้มีความเร็วในการไหลของส่วนผสมที่สูงกว่า ทำให้สามารถเพิ่มปริมาตรของอากาศส่วนแรกที่จะถูกเหนี่ยวนำเข้ามาเผาไหม้ได้มากขึ้น จึงทำให้ความแตกต่างของความดันภายในห้องผสมที่มากกว่าของ K. Pontree [6]



รูปที่ 10 เปรียบเทียบอุณหภูมิของเอทานอลที่ทางออกของท่อระเหย



รูปที่ 11 เปรียบเทียบความแตกต่างของความดันภายในห้องผสม

5. สรุปผล

งานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบหัวเผาวัสดุพูนแบบวงแหวนที่มีการเหนี่ยวนำอากาศด้วยตนเองโดยใช้เชื้อเพลิงเหลว โดยมีหลักการออกแบบให้ความเร็วในการไหลของส่วนผสมภายในช่องว่างมีค่าเท่ากับความเร็วในการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง ซึ่งจากผลการ



ทดลอง พบว่าประสบความสำเร็จในการออกแบบให้เปลวไฟของเชื้อเพลิง LPG และเชื้อเพลิงเอทานอลสามารถเผาไหม้และติดเสถียรอยู่ภายในวัสดุพรุนได้ และเมื่อทำการเปรียบเทียบค่าความเร็วของส่วนผสมที่ได้จากการทำนายกับผลการทดลอง พบว่าความเร็วของส่วนผสมที่ได้จากการทดลองมีค่าสูงกว่าค่าที่ได้จากการทำนาย โดยมีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยอยู่ที่ 8.24% เมื่อทำการเปรียบเทียบมิติของหัวเผาและผลการทดลองกับงานวิจัยของ K. Pontree [6] พบว่าหัวเผาที่ออกแบบใหม่มีปริมาตรของหัวเผาลดลง 61.56% และมีน้ำหนักของหัวเผาลดลง 45.10% และให้อุณหภูมิในการเผาไหม้ที่สูงกว่า เนื่องจากการออกแบบหัวเผาใหม่มีความเร็วของส่วนผสมที่สูงกว่าของ K. Pontree [6] จึงทำให้สามารถเพิ่มปริมาตรของอากาศส่วนแรกที่นำมาใช้ในการเผาไหม้ได้มากกว่า ให้ข้อเสนอแนะในการแก้ไขการเกิด Decomposition ของเชื้อเพลิงเอทานอล ซึ่งต้องควบคุมอุณหภูมิของเอทานอลให้ไม่สูงเกินจุด Decomposition โดยการลดการถ่ายเทความร้อนสู่เอทานอล ด้วยเพิ่มความหนาของผนังปูนที่ใช้ฝังเอทานอลให้เพิ่มมากขึ้น, ในกรณีของเชื้อเพลิงเอทานอลสามารถเคลื่อนตำแหน่งของเปลวไฟให้อยู่ห่างจากท่อระเหยมากขึ้นโดยการปรับ Primary air adjuster หรือลดค่าความร้อนป้อนของเชื้อเพลิง LPG ลงเพื่อให้อุณหภูมิการเผาไหม้ใน Packed bed ลดต่ำลง

## 6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ ห้องปฏิบัติการเครื่องยนต์และการเผาไหม้ (CERL) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี (KMUTT) ผู้ให้การสนับสนุนและทุนวิจัยของงานวิจัยนี้

## 7. เอกสารอ้างอิง

[1] สำนักงานนโยบายและแผนพลังงานกระทรวงพลังงาน (2545), ข้อมูลพลังงาน, URL:

<http://www.eppo.go.th/index.php/th/energy-information>, เข้าดูเมื่อวันที่ 06/01/2560

[2] W. Yoksenakul, and S. Jugjai, (2011). Design and development of a self-aspirating porous medium burner with a submerged flame, Energy, vol. 36, March 2011, pp. 3092-3100.

[3] A. Pech Achawin and S. Jugjai, (2014). Development of self-aspirating porous burner, The 5<sup>th</sup> TSME International Conference on Mechanical Engineering, Chiang Mai, Thailand.

[4] Weinberg, FJ. Combustion Temperature: the future nature 1971; 233:239-241

[5] Yunus A. Cengel, Afshin J. Ghajar (2015). Heat and Mass Transfer: Fundamental & Applications, 5<sup>th</sup> edition, McGraw-Hill, United State of America.

[6] K. Pontree, and S. Jugjai, (2014). Self-aspirating liquid fuel annular porous burner, The 5<sup>th</sup> TSME International Conference on Mechanical Engineering, Chiang Mai, Thailand.

[7] Babkin, VS. Korzhavin AA. Bunev VA. Propagation of premixed gaseous explosion flames in porous media. Combustion and Flame, 1991; 87(2): 182-90.

[8] S.R. Addaman, M. Hajilou, E.L. Belmont, (2016), Experimental and analytical study of a porous media reformer with passive air entrainment, International journal of hydrogen energy, vol. 41, 12738-12746.