

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 24  
20-22 ตุลาคม 2553 จังหวัดอุบลราชธานี

## ผลของการแบ่งสัดส่วนการป้อนปริมาณอากาศเพื่อควบคุมช่วงการเผาไหม้ภายในเตาเผาแบบวัสดุพรุนขนาด 10 กิโลวัตต์

### Effect of staged air on temperature distribution in a 10 kW porous burner

วิทยา วงษ์กลาง\*<sup>1</sup>, นิตินัย ปัญญาบุศยกุล<sup>2</sup> และ จารุวัตร เจริญสุข<sup>1</sup>, สุมิตรา จรัสโรจน์กุล<sup>3</sup>

<sup>1</sup> ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เลขที่ 3 หมู่ 2 ถ.ฉลองกรุง เขต  
ลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

[wittayaw@mtec.or.th](mailto:wittayaw@mtec.or.th), [kcjarruw@kmitl.ac.th](mailto:kcjarruw@kmitl.ac.th)

<sup>2</sup> ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

51 หมู่ 1 ถ. เข็มสัมพันธ์ แขวงกระทุ่มราย เขตหนองจอก กรุงเทพฯ 10530

อีเมล: [nitinai\\_oak1@hotmail.com](mailto:nitinai_oak1@hotmail.com)\*

<sup>3</sup> ห้องปฏิบัติการวัสดุและงานระบบเพื่อประโยชน์ทางพลังงานไฟฟ้าเคมี ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ อุทยานวิทยาศาสตร์ประเทศไทย  
อ.คลองหลวง จ.ปทุมธานี 12120

[sumitrc@mtec.or.th](mailto:sumitrc@mtec.or.th)

\* ติดต่อ: โทรศัพท์: (662) 5646500 ต่อ 4118, โทรสาร: (662) 5646501

#### บทคัดย่อ

บทความนี้แสดงถึงพฤติกรรมการเผาไหม้ของแก๊สหุงต้ม (LPG) ภายในเตาเผาแบบวัสดุพรุน ซึ่งบรรจุเม็ดอะลูมินาทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มิลลิเมตร ควบคุมการกระจายตัวของอุณหภูมิตามความสูงของเตา โดยการแบ่งสัดส่วนการป้อนปริมาณอากาศสำหรับการเผาไหม้ออกเป็นลำดับขั้น โดยแบ่งปริมาณอากาศออกเป็นสามส่วน คือ ส่วนที่หนึ่ง (Premixed stage) ป้อนเข้าผสมกับเชื้อเพลิงโดยตรง ส่วนที่สอง (Secondary stage) และส่วนที่สาม (Tertiary stage) ป้อนอากาศเข้าตามแนวรัศมีและตามความสูงของเตาที่ตำแหน่ง 50 และ 300 มิลลิเมตร ตามลำดับ จากแผนกระจายส่วนผสม ผลการวิจัยพบว่าเมื่อปรับเปลี่ยนปริมาณอากาศส่วนเกิน 30% 40% และ 50% ในแต่ละ Stage ทำให้ได้ประสิทธิภาพการเผาไหม้ที่อากาศส่วนเกินที่ 50% ที่ Stage 2<sup>nd</sup> และ Stage 3<sup>rd</sup> ได้ 99.8 % และมีการกระจายตัวของอุณหภูมิที่สภาวะคงที่สูง โดยมีอุณหภูมิอยู่ระหว่าง 800 – 1060°C ตลอดความสูงของเตา 600 มิลลิเมตร

**คำสำคัญ:** เตาเผาแบบวัสดุพรุน, การเผาไหม้, วัสดุพรุน, ประสิทธิภาพ

#### Abstract

The behavior of LPG combustion in the porous burner with air proportional was studied. The burner was filled with 25 mm spherical alumina which has high heat capacity and separated the burning zone. The controlling of combustion zone was conducted by varying the level of air supply to the height of the burner. The air injection was separated into three zones. In the first zone, air was directly mixed with fuel. In the second and third, air was injected into radial of burner at 50 and 300 mm height. From the

study, we found that when the amount of excess air was varied at 30, 40 and 50% in each stage, the combustion efficiency of excess air 50% in each stage was between 92.5-99.8%. The temperature inside the burner was in the range of 800 - 1060°C along entire height of burner (600 mm).

**Keyword:** porous media burner, combustion, porous media, alumina, efficiency

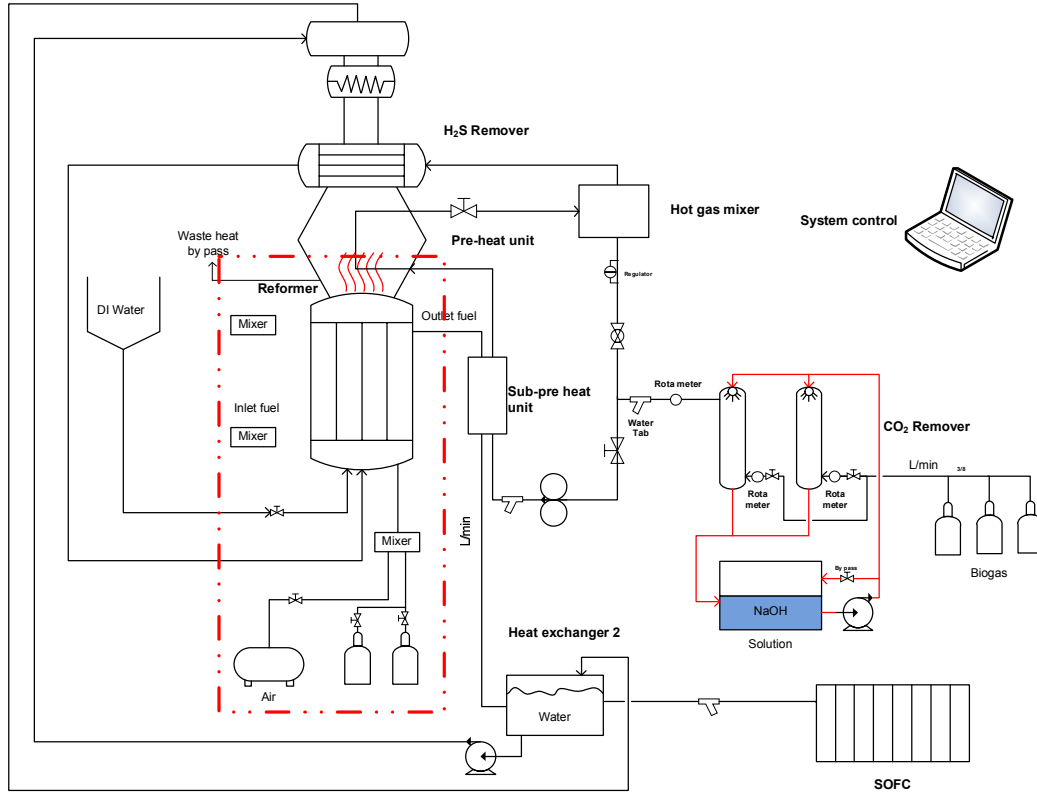
## 1. บทนำ

ในปัจจุบันนี้ได้มีการพัฒนาพลังงานทดแทนอย่างหลากหลายและระบบหนึ่งที่ได้รับ ความสนใจคือ ระบบการปฏิรูปเชื้อเพลิงจากก๊าซชีวภาพ (รูปที่ 1) หรือจากเอทานอล เพื่อปฏิรูปเชื้อเพลิงไฮโดรคาร์บอนสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์ของแข็ง ทั้งนี้ระบบประกอบด้วยส่วนหลักๆ ได้แก่ ระบบดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ ระบบดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ ระบบปฏิรูปเชื้อเพลิง (Reformer) และเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์ของแข็ง (SOFC) การศึกษานี้สนใจในส่วนของระบบปฏิรูปเชื้อเพลิง ซึ่งระบบปฏิรูปเชื้อเพลิงต้องอาศัยแหล่งพลังงานความร้อนที่มีความเสถียรภาพ รวมทั้งต้องมีความแตกต่างของอุณหภูมิในระบบปฏิรูปเชื้อเพลิงน้อย เพื่อป้องกันความเสียหายที่เกิดขึ้นกับตัวเร่งปฏิกิริยาภายในระบบปฏิรูปเชื้อเพลิง รวมทั้งจะต้องควบคุมอุณหภูมิให้เหมาะสมกับการทำปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยา และใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา คือ Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> มีอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาสูงระหว่าง 700-1000°C [6] แหล่งพลังงานความร้อนสำหรับระบบปฏิรูปเชื้อเพลิงสามารถทำได้โดยติดตั้งระบบปฏิรูปเชื้อเพลิงไว้ภายในเตาเผาไหม้หรือติดตั้งไว้ภายนอกเตาเผาไหม้ขึ้นอยู่กับความเหมาะสม และสมรรถนะของเตาเผาไหม้ [1, 2]

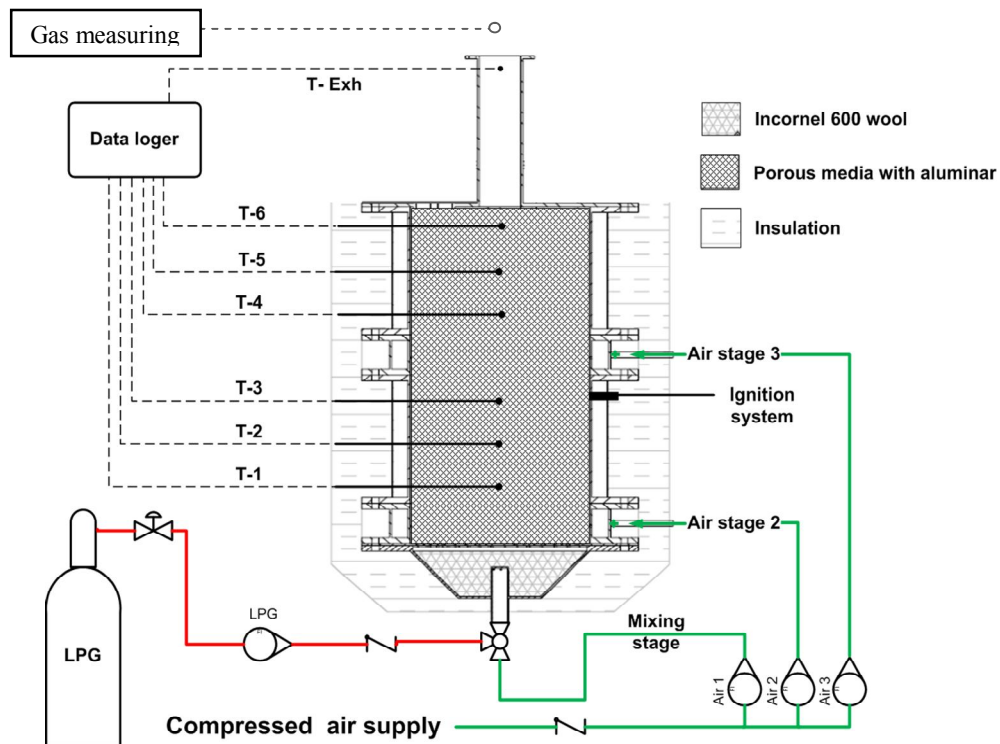
จากการศึกษาพบว่า การนำเทคนิคของเตาเผาแบบวัสดุพรุน (Porous media burner) มาติดตั้งร่วมกับระบบปฏิรูปเชื้อเพลิง ทำให้การเผาไหม้เกิดเสถียรภาพ นั่นคือ สามารถรักษาระดับความแตกต่างของอุณหภูมิภายในระบบปฏิรูปเชื้อเพลิงได้ดี รวมทั้งอัตราการก่อเกิดมลพิษต่ำ ซึ่งเป็นคุณลักษณะเด่นของ

การเผาไหม้ร่วมกับการใช้วัสดุพรุน ก่อให้เกิด Super adiabatic flame อาศัยหลักการของการถ่ายเทความร้อน การนำ การพา และการแผ่รังสีความร้อนเข้าไว้ด้วยกัน โดยจะเกิดการถ่ายเทความร้อนจากช่วงการเผาไหม้ส่งผ่านมายังอากาศและเชื้อเพลิงในตำแหน่ง up stream ทำให้ได้อุณหภูมิจากการเผาไหม้สูงขึ้นมากกว่าการเผาไหม้แบบไม่ใช้วัสดุพรุน รวมทั้งทำให้ Turbulent mixing rate เพิ่มขึ้นช่วยให้เกิดการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ขึ้น [4,5,7] จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่เตาเผาวัสดุพรุนแบบ Multi-Stage สามารถควบคุม Combustion zone และอุณหภูมิตามระดับความสูงของเตาได้ดี โดยควบคุมจากการแบ่งปริมาณอากาศที่ป้อนให้กับเชื้อเพลิงในแต่ละระดับความสูงของเตาเผาไหม้ [3] จึงไม่ก่อให้เกิดความเสียหายกับตัวเร่งปฏิกิริยาที่อยู่ในระบบปฏิรูปเชื้อเพลิงที่ติดตั้งอยู่ภายในเตาเผาไหม้

โครงการนี้เป็นงานวิจัยต่อเนื่องจากการพัฒนาเตาเผาแบบวัสดุพรุนขนาด 3 กิโลวัตต์ [7] โดยจะศึกษาการเพิ่มขนาด (Up-scale) เตาเผาวัสดุพรุนแบบ multi-stage ขนาด 10 กิโลวัตต์ โดยมีท่อทำปฏิกิริยาประกอบอยู่ภายในเตาตามแนวรัศมีจำนวน 6 ท่อ และได้ศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการปรับเปลี่ยนปริมาณอากาศส่วนที่สอง (Stage 2<sup>nd</sup>) และ สาม (Stage 3<sup>rd</sup>) ต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิ มลพิษ (O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, CO และ HC) และประสิทธิภาพที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้จากเตาเผาแบบวัสดุพรุน โดยผลที่ได้จะถูกนำไปใช้ควบคุมความร้อนที่ป้อนให้กับระบบปฏิรูปเชื้อเพลิงจากแก๊สชีวภาพสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์ของแข็ง (SOFC) ต่อไป



รูปที่ 1 ระบบปฏิรูปเชื้อเพลิงสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์ของแข็ง



รูปที่ 2 แสดงชุดทดสอบเตาเผาแบบวัสดุพรุนขนาด 10 กิโลวัตต์

## 2. องค์ประกอบของเชื้อเพลิงและอากาศ

เชื้อเพลิงที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือLPG หรือ (Liquid Petroleum Gas) ซึ่งมีองค์ประกอบหลักคือ โพรเพน และบิวเทน [9] โดยใช้ LPG เป็นเชื้อเพลิงสำหรับระบบปฏิรูปเชื้อเพลิงจากก๊าซชีวภาพ โดยค่าคุณสมบัติของเชื้อเพลิงและอากาศ [7] ที่ใช้ในการทดลอง แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของเชื้อเพลิงและอากาศ

	Density (kg/m <sup>3</sup> )	LHV (MJ/kg)	Pressure (bar)
LPG (C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> ) 60 mol% C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> ) 40 mol%	2.011	45.6	-
Air	1.125	-	4

## 3. เงื่อนไขและขั้นตอนการทดลอง

การศึกษาเตาเผาวัสดุพูนแบบ Multi-stage ขนาด 10 กิโลวัตต์ โดยเงื่อนไขการทดลองให้อยู่ในช่วงการเผาไหม้ให้อยู่ในช่วงของอัตราส่วนผสมของเชื้อเพลิงกับอากาศที่เบาบางที่สามารถติดไฟได้ [8] ตามตารางที่ 2

ตารางที่ 2 เงื่อนไขการทดลอง

Energy input (kW)	EA (%)	Flow rate of air (L/min)			Flow rate of fuel (L/min)
		Stage 1 <sup>st</sup>	Stage 2 <sup>nd</sup>	Stage 3 <sup>rd</sup>	
10	30	50	<b>100</b>	100	7
	40	50	<b>120</b>	100	
	50	50	<b>140</b>	100	
	30	50	100	<b>100</b>	
	40	50	100	<b>120</b>	
	50	50	100	<b>140</b>	
A/F ratio	15.6				

ทั้งนี้อุปกรณ์การทดลองประกอบไปด้วย เตาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 220 มิลลิเมตร ความสูง 600

มิลลิเมตร ใช้เม็ดอลูมินา (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) ทรงกลมขนาด 25 มิลลิเมตรเป็นวัสดุพูน ขณะที่ multi-stage มีด้วยกันสามส่วนคือ ส่วนที่หนึ่ง (Stage 1<sup>st</sup>) ส่วนที่สอง (Stage 2<sup>nd</sup>) และ ส่วนที่สาม (Stage 3<sup>rd</sup>) โดยเงื่อนไขของการจ่ายอากาศแบบ multi-stage ถูกแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 เงื่อนไข multi-stage แต่ละส่วน

Stage	เงื่อนไขการทำงาน	ตำแหน่ง
1 <sup>st</sup>	ป้อนเชื้อเพลิง และ อากาศ (Premix combustion)	ด้านล่างเตา
2 <sup>nd</sup>	ป้อนอากาศตามแนวรัศมี (มี: Ignition system) (ห้องเผาไหม้ที่ 1)	50 mm*
3 <sup>rd</sup>	ป้อนอากาศตามแนวรัศมี (ห้องเผาไหม้ที่ 2)	300 mm*

หมายเหตุ \*ระยะห่างจากตะแกรงกระจายส่วนผสม

อุปกรณ์การทดลองและการบันทึกผล แสดงดังรูปที่ 2 ในการทดลองจะทำการปรับอัตราการไหลของอากาศและเชื้อเพลิงให้สอดคล้องกับเงื่อนไขการทดลอง ตามตารางที่ 2 และใช้ Rota meter ควบคุมอัตราการไหลของเชื้อเพลิงและอากาศ การบันทึกค่าอุณหภูมิ (Grant Data logger รุ่น 2010 Series) จะบันทึกอุณหภูมิทั้งหมด 6 จุด (Thermocouple type K) มีระยะจากแผ่นกระจายส่วนผสม 80 150 230 380 440 และ 510 มิลลิเมตร ตามลำดับความสูงจากแผ่นกระจายส่วนผสม โดยจะบันทึกทุกๆ 10 วินาที เมื่ออุณหภูมิเข้าสู่ภาวะคงตัวจะทำวัดก๊าซไอเสียโดยใช้เครื่องวัดก๊าซ (TECHNOTEST Type STARGAS 898) ที่บริเวณท่อทางออก ซึ่งก๊าซไอเสียที่ทำการเก็บผลได้แก่ O<sub>2</sub> CO<sub>2</sub> และ CO และ HC เพื่อนำไปใช้ในการหาค่าประสิทธิภาพการเผาไหม้ ( $\eta_c$ ) โดยประสิทธิภาพการเผาไหม้สามารถนิยามได้ด้วยสมการดังนี้

$$\eta_c = \left[ \frac{Q_{fuel} - Q_{loss,co} - Q_{loss,HC}}{Q_{fuel}} \right] \times 100 \quad (1)$$

$Q_{fuel}$  คือ ความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้เชื้อเพลิง

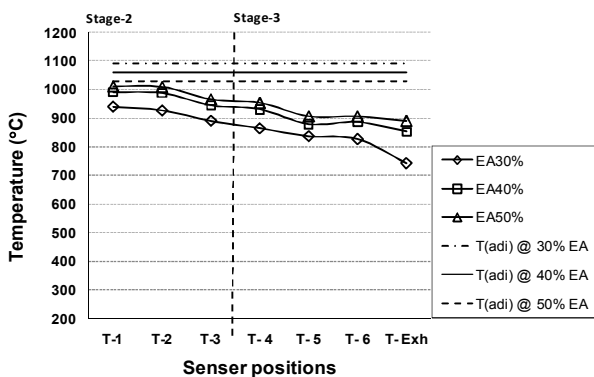
$Q_{loss,HC}$  คือ ปริมาณความร้อนที่สูญเสียจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ของไฮโดรคาร์บอน

$Q_{loss,co}$  คือ ปริมาณความร้อนที่สูญเสียจากการที่ CO ไม่ถูกเผาไหม้เป็น  $CO_2$

#### 4. ผลการทดสอบและวิจารณ์ผล

##### 4.1 การกระจายตัวของอุณหภูมิเนื่องจากการปรับเปลี่ยนปริมาณอากาศส่วนที่สอง (Stage 2<sup>nd</sup>)

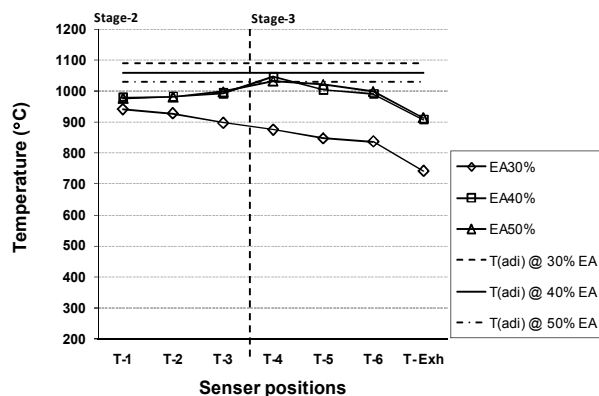
ปริมาณอากาศในส่วนที่หนึ่ง และสาม (Stage 1<sup>st</sup>, 3<sup>rd</sup>) ถูกควบคุมไว้คงที่ที่ 50 และ 100 ลิตรต่อนาทีตามลำดับ ขณะเดียวกันได้ทำการปรับเปลี่ยนปริมาณอากาศในส่วนที่สอง (Stage 2<sup>nd</sup>) ที่อัตรา 100 120 และ 140 ลิตรต่อนาที จากการทดลองพบว่าการกระจายตัวของอุณหภูมิตามความสูงของตัวเตามีการกระจายตัวตั้งแต่ 800-1000°C โดยอุณหภูมิมิมีแนวโน้มลดลงตามความสูงของตัวเตา ซึ่งเป็นผลอันเนื่องมาจากอัตราการเผาไหม้ลดลง และการถ่ายเทความร้อนให้กับอากาศที่ป้อนในตำแหน่งที่สาม (Stage 3<sup>rd</sup>) ด้วยอัตราที่ลดลงค่อนข้างคงที่ ทำให้อุณหภูมิในช่วงของห้องเผาไหม้ที่สองมีแนวโน้มลดลง ดังรูปที่ 3 โดยที่ EA 30% พบว่าแนวโน้มของอุณหภูมิจะต่ำกว่าที่ EA 50%



รูปที่ 3 ผลของอากาศส่วนเกิน (Stage 2<sup>nd</sup>) ต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิ

##### 4.2 การกระจายตัวของอุณหภูมิเนื่องจากการปรับเปลี่ยนปริมาณอากาศส่วนที่สาม (Stage 3<sup>rd</sup>)

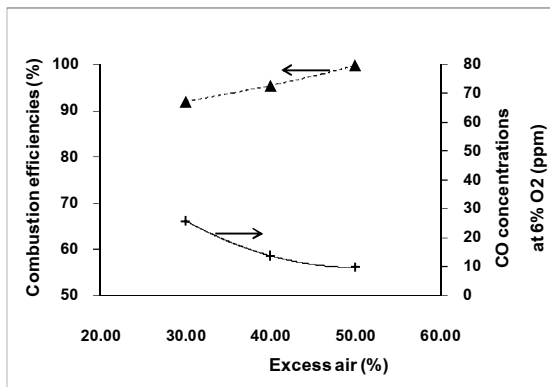
ปริมาณอากาศส่วนที่หนึ่ง และสอง (Stage 1<sup>st</sup>, 2<sup>nd</sup>) ถูกรักษาไว้คงที่ที่ 50 และ 100 ลิตรต่อนาทีตามลำดับ โดยได้ทำการปรับเปลี่ยนปริมาณอากาศส่วนที่สาม (Stage 3<sup>rd</sup>) ที่อัตรา 100 120 และ 140 ลิตรต่อนาที ทำให้การกระจายตัวของอุณหภูมิในช่วง up stream จนถึง down stream สำหรับ กรณี EA 30% ยังคงมีแนวโน้มลดลงตามความสูงของเตา แต่เมื่อมีการป้อนอากาศเพิ่มขึ้นพบว่า การกระจายตัวของอุณหภูมิมิมีแนวโน้มสูงขึ้น (EA 40-50%) ทั้งนี้เป็นผลเนื่องจากการเพิ่มอากาศเข้าไปหลังจากเกิดการเผาไหม้จากห้องเผาไหม้ที่หนึ่ง พบว่าไฮโดรคาร์บอนที่เหลืออยู่ (ไฮโดรคาร์บอน ของ Stage 3<sup>rd</sup> ต่ำกว่า Stage 2<sup>nd</sup> ที่ EA 40-50%, รูปที่ 7) จะทำปฏิกิริยากับอากาศที่ Stage 3<sup>rd</sup> ที่มีปริมาณ EA 40-50% ที่มากพอที่ทำให้เกิดการคลุกเคล้าของเชื้อเพลิงและอากาศที่สูงขึ้นส่งผลให้อัตราการเผาไหม้รุนแรงขึ้นและเกิดการคายพลังงานความร้อนจากการเผาไหม้ไฮโดรคาร์บอนทำให้อุณหภูมิในตำแหน่ง T- 4 เพิ่มขึ้นเข้าใกล้ค่าอุณหภูมิ adiabatic flame temperature และค่อยๆ ลดลงเนื่องจากการสูญเสียความร้อนตามลำดับความสูงของเตา การเพิ่มปริมาณอากาศส่วนเกินเข้าไปทำให้อุณหภูมิในส่วนของห้องเผาไหม้ที่สองสูงขึ้นอยู่ระหว่าง 900-1060°C ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 ผลของอากาศส่วนเกิน (Stage 3<sup>rd</sup>) ต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิ

### 4.3 ผลของอากาศส่วนเกิน (Stage 2<sup>nd</sup>) ต่อความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์และประสิทธิภาพการเผาไหม้

ผลความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์มีแนวโน้มลดลงตามปริมาณการป้อนอากาศส่วนเกินใน (Stage 2<sup>nd</sup>) จากรูปที่ 5 เมื่อป้อนอากาศส่วนเกินมากขึ้นใน (Stage 2<sup>nd</sup>) ทำให้เกิดการเผาไหม้สมบูรณ์ โดยเห็นได้ชัดจากแนวโน้มของค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ลดลงตามอัตราการป้อนอากาศที่เพิ่มขึ้น จากการทดลองพบว่าการป้อนอากาศใน Stage 2<sup>nd</sup> พบประสิทธิภาพการเผาไหม้ระหว่าง 92-99 % ตามลำดับ และมีค่าความเข้มข้นของคาร์บอนมอนอกไซด์สูงสุดที่ 28 ppm ที่ EA= 30 % ที่มาตรฐาน O<sub>2</sub> 6%

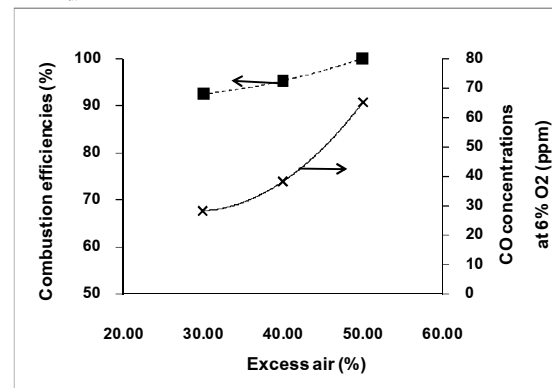


รูปที่ 5 ผลของอากาศส่วนเกิน (Stage 2<sup>nd</sup>) ต่อความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์และประสิทธิภาพการเผาไหม้ ที่มาตรฐาน 6% ออกซิเจน

### 4.4 ผลของอากาศส่วนเกิน (Stage 3<sup>rd</sup>) ต่อความเข้มข้นของคาร์บอนมอนอกไซด์และประสิทธิภาพการเผาไหม้

ผลความเข้มข้นของคาร์บอนมอนอกไซด์เมื่อมีการป้อนอากาศ Stage 3<sup>rd</sup> สามารถทำให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้สูงดังรูปที่ 6 ผลความเข้มข้นของคาร์บอนมอนอกไซด์ มีแนวโน้มสูงขึ้นโดยที่ประสิทธิภาพการเผาไหม้ยังคงสูงตาม เนื่องมาจากอากาศที่ป้อนให้กับการเผาไหม้ในห้องเผาไหม้ที่หนึ่งมีการคลุกเคล้าและเกิดอัตราการเผาไหม้น้อย ทำให้มี

ไฮโดรคาร์บอน เหลือหลังจากการเผาไหม้จากห้องเผาไหม้ที่หนึ่ง เมื่อเพิ่มอากาศ Stage 3<sup>rd</sup> จึงทำให้เกิดการคลุกเคล้าและส่งผลให้เกิดการเผาไหม้ที่รุนแรงขึ้น เห็นได้ชัดจากรูปที่ 4 ค่าอุณหภูมิบริเวณ T-4 เพิ่มขึ้นใกล้เคียงกับค่า T<sub>adi</sub> แต่ในทางกลับกันค่าความเข้มข้นของคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ EA=40% และ EA=50% เพิ่มขึ้น เป็นที่น่าสังเกตว่าคาร์บอนมอนอกไซด์กรณีป้อนอากาศ Stage 3<sup>rd</sup> จะมีค่าสูงกว่ากรณีที่ป้อนอากาศ Stage 2<sup>nd</sup> ซึ่งเป็นผลมาจากการเผาไหม้ไฮโดรคาร์บอน ในช่วง T-4 ทำให้ค่าความเข้มข้นของคาร์บอนมอนอกไซด์สูงกว่ากรณีป้อนอากาศ Stage 2<sup>nd</sup> โดยมีค่าสูงสุดที่ 64 ppm ที่ EA= 50 % ที่มาตรฐาน O<sub>2</sub> 6%

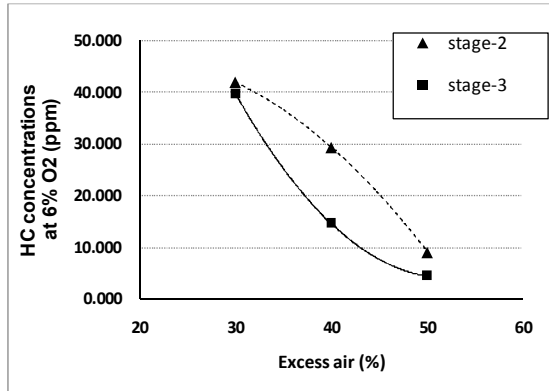


รูปที่ 6 ผลของอากาศส่วนเกิน (Stage 3<sup>rd</sup>) ต่อความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์และประสิทธิภาพการเผาไหม้ ที่มาตรฐาน 6% ออกซิเจน

### 4.5 ผลของอากาศส่วนเกินต่อความเข้มข้นของไฮโดรคาร์บอน

จากรูปที่ 7 ผลจากการเผาไหม้โดยการปรับเปลี่ยนปริมาณอากาศทั้งสองกรณี มีค่าความเข้มข้นของไฮโดรคาร์บอนที่การปรับเปลี่ยนปริมาณอากาศ (Stage 2<sup>nd</sup>) มีค่ามากกว่าค่าความเข้มข้นของไฮโดรคาร์บอนที่ได้จากการปรับเปลี่ยนปริมาณอากาศ (Stage 3<sup>rd</sup>) ที่ EA = 40% และ EA=50% เป็นผลจากอัตราการเผาไหม้ในห้องเผาไหม้ที่หนึ่งจากการป้อนอากาศตั้งแต่ต้นทางทำให้อัตราการเผาไหม้สูงตั้งแต่นั้นของเตาและค่อย ๆ ลดลงตามลำดับความสูงของเตา แต่เมื่อปรับเปลี่ยนการป้อนอากาศที่ (Stage 3<sup>rd</sup>) ทำให้

เกิดการเผาไหม้ที่รุนแรงในบริเวณ T-4 ดังรูปที่ 4 เกิดการเผาไหม้ของไฮโดรคาร์บอนอย่างรุนแรงเกิดการแตกตัวของไฮโดรคาร์บอนในอัตราที่สูง และส่งผลให้ค่าคาร์บอนมอนอกไซด์เพิ่มขึ้นตามไป เนื่องจากมีช่วงเวลากการเผาไหม้ที่สั้น ด้วยดังรูปที่ 6

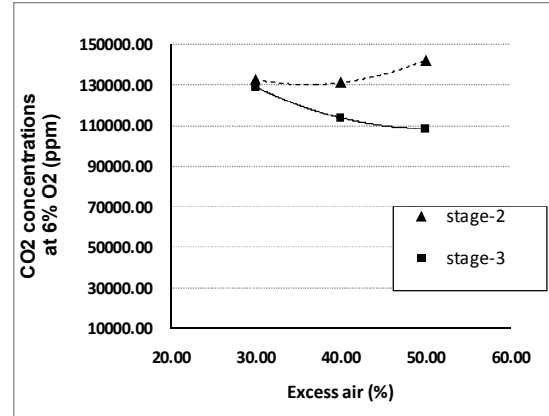


รูปที่ 7 ผลของอากาศส่วนเกิน (Stage 2<sup>nd</sup>, 3<sup>rd</sup>) ต่อความเข้มข้นของไฮโดรคาร์บอนที่ 6% ออกซิเจน

#### 4.6 ผลของอากาศส่วนเกินต่อความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์

จากรูปที่ 8 ผลจากการเผาไหม้โดยการปรับเปลี่ยนปริมาณอากาศทั้งสองกรณี พบว่าความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ ที่การปรับเปลี่ยนปริมาณอากาศ Stage 2<sup>nd</sup> มีแนวโน้มสูงขึ้น และมากกว่าการป้อนอากาศที่ Stage 3<sup>rd</sup> ที่ EA = 40% และ EA=50% ซึ่งเป็นผลจากอัตราการเผาไหม้ในห้องเผาไหม้ที่แตกต่างกันในแต่ละช่วง เมื่อเพิ่มการป้อนอากาศ Stage 2<sup>nd</sup> ทำให้อัตราการเผาไหม้สูงตั้งแต่วินาทีแรกและค่อยๆ ลดลงตามลำดับความสูงของเตา เมื่อมีการเผาไหม้ผ่านไปยังห้องเผาไหม้ส่วนที่สองของเตา (T-4 T-5 และT-6) ทำให้การเผาไหม้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

การป้อนเป็นอากาศ Stage 3<sup>rd</sup> ทำให้เกิดการเผาไหม้ไฮโดรคาร์บอนที่รุนแรงในบริเวณ T-4 ดังรูปที่ 4 ส่งผลให้ประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น แต่ทำให้คาร์บอนมอนอกไซด์ที่ไม่ได้เผาไหม้เพิ่มขึ้น (รูปที่ 6) เนื่องจากช่วงเวลากการเผาไหม้สั้นก่อนถึงจุดวัดแก๊สไอเสีย และส่งผลให้คาร์บอนไดออกไซด์ลดลงดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 ผลของอากาศส่วนเกิน (Stage 2<sup>nd</sup>, 3<sup>rd</sup>) ต่อความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ 6% ออกซิเจน

### 5. สรุปผลการทดลอง

- 1) การเผาไหม้ภายในเตาเผาแบบวัสดุพุนด้วยเทคนิคการแบ่งอากาศเป็นลำดับขั้นนี้สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการเผาไหม้ได้ถึง 92.5 - 99.8 %
- 2) สามารถควบคุมการกระจายตัวของอุณหภูมิจากการเผาไหม้ตลอดความสูงของตัวเตาที่อุณหภูมิระหว่าง 800-1060°C
- 3) การเพิ่มปริมาณการป้อนอากาศส่วนเกินใน Stage 3<sup>rd</sup> เป็นผลทำให้ปริมาณความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์เพิ่มขึ้นมากกว่าการเพิ่มอากาศใน Stage 2<sup>nd</sup> โดยได้ประสิทธิภาพการเผาไหม้ใกล้เคียงกัน เป็นผลจากช่วงเวลากการเผาไหม้ไม่เพียงพอตามระยะความสูงของเตาจนถึงจุดวัดไอเสีย
- 4) การปรับเปลี่ยนอากาศส่วนเกินในการเผาไหม้ Stage 2<sup>nd</sup>, 3<sup>rd</sup> สามารถใช้ร่วมกับระบบปฏิรูปเชื้อเพลิงสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์ของแข็งเพื่อควบคุมการกระจายตัวของอุณหภูมิของห้องปฏิรูปเชื้อเพลิงได้ และมีมลพิษน้อย

### 6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) ที่ให้การสนับสนุนทุนด้านอุปกรณ์การวิจัยและภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ช่วยให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

## 7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Michael, P., Arpad, H., Martin, P. and Dennis, P., 2004. Integrated module for solid oxide fuel cell systems. United States Patent. US 6,749,958 B2.
- [2] Kelley, M. and Grover, T., 2003. Solid-oxide fuel cell system having an integrated air supply system. United States Patent. US 6,608,463 B1.
- [3] Senetor, J., Towler, P. and Harness, R., 2002. Multi-state combustion for fuel processing for use with fuel cell. United States Patent. US 6,342,197 B1.
- [4] Howell, J.R., Hall, M.J. and Ellzey, J.L., 1996. Combustion of hydrocarbon fuels within porous inert media. Prog. Energy Combust. Sci. Vol . 22 . pp. 121–145.
- [5] Hsu, P., Evans, F. and Howell, J.R., 1993. Experimental and Numerical Study of Premixed Combustion with Non homogeneous Porous Ceramic. Combustion Science Technology. Vol. 90. pp. 149-172.
- [6] B. Khemthong, R. Suwanwarangkul<sup>1</sup>, A. Manonukul and S. Charojrochkul 2009, Catalytic steam reforming of simulated biogas for use in solid oxide fuel cell system, pp. 687-690
- [7] อารุช ลภีรัตน์ากุล และ จารุวัตร เจริญสุข, 2009, หัวเผาวัสดุพอรุนแบบจ่ายของผสมระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศเป็นชั้นและหัวเผาวัสดุพอรุนแบบจ่ายอากาศเป็นชั้น, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 23
- [8] D.P. Mishra, A. Rahman, 2003, An experimental study of flammability limits of LPG/air mixtures, Fuel 82. pp. 863–866
- [9] การปิโตรเลียมแห่งประเทศไทย