

# ประสิทธิภาพการเผาไหม้และก๊าซไอเสียของเตาเผาไหม้วัสดุพรุน แบบจ่ายของผสมระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศเป็นชั้น

## Combustion efficiency and Emission on Fuel – Air Mixture Staged Porous Media Combustor

สรรเพชญ พุกกะษริตานนท์ จารุวัตร เจริญสุข

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

### บทคัดย่อ

บทความนี้เป็นการพัฒนาเตาเผาไหม้วัสดุพรุน โดยแบบจ่ายของผสมระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศเป็นชั้น (Fuel-Air Mixture Staged combustor) ซึ่งวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อศึกษาถึงประสิทธิภาพการเผาไหม้และก๊าซไอเสียที่เกิดขึ้นของเตาเผาไหม้วัสดุพรุนแบบจ่ายของผสมระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศเป็นชั้น เมื่อทำการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนสมมูลของเชื้อเพลิงกับอากาศชั้นแรกในย่านเชื้อเพลิงหนา จากการทดลองพบว่า ปริมาณก๊าซ CO และ NO<sub>x</sub> ที่เกิดขึ้นของเตาเผาไหม้วัสดุพรุนแบบจ่ายของผสมระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศเป็นชั้น มีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 21 - 4000 ppm และ 11 - 28 ppm ที่มาตรฐาน O<sub>2</sub> 6% ตามลำดับ ทั้งนี้เมื่อปรับเปลี่ยนอัตราส่วนสมมูลชั้นแรกเป็น 1.7 ปริมาณการปลดปล่อย CO มีมากถึง 4000 ppm ส่งผลอย่างมากต่อประสิทธิภาพการเผาไหม้ ทำให้ทราบถึงขีดจำกัดของเตาเผาไหม้วัสดุพรุนที่ใช้ในการทดลองว่าควรมีอัตราส่วนสมมูลของเชื้อเพลิงกับอากาศชั้นแรกไม่เกิน 1.5 เพื่อที่จะรักษาประสิทธิภาพการเผาไหม้ไม่ให้ต่ำกว่า 95 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อคำนวณประสิทธิภาพการเผาไหม้ที่อัตราส่วนสมมูล 1.3 พบว่า มีค่าประสิทธิภาพการเผาไหม้ที่ดีที่สุดโดยมีค่ามากกว่า 99%

**คำสำคัญ :** เตาเผาไหม้วัสดุพรุนแบบจ่ายของผสมระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศเป็นชั้น / เตาเผาไหม้วัสดุพรุนแบบจ่ายอากาศเป็นชั้น / วัสดุพรุน

### Abstract

This study concerns with the investigation on the development of fuel - air mixture staged porous media combustor for LPG combustion. The purpose of this study is to examine the efficiency and emission of porous media combustor when the first-stage equivalent ratio has been changed within the rich limit-from 1.3 to 1.7. CO and NO<sub>x</sub> emissions vary between 21 to 4000 ppm and 11 to 28 ppm based on 6 % O<sub>2</sub> respectively. When the first-stage equivalent ratio is increased from 1.5 to 1.7, CO emission increases abruptly from 700 to 4000 ppm., thus significantly affects to the combustion efficiency. This indicates that the first section equivalent ratio of the combustor under this particular level of thermal throughput should be limited up to 1.5 to maintain the combustion efficiency of the combustor being greater than 95 %. Of all cases investigated in this work the maximum combustion efficiency at 99 percent corresponds to the operating condition with first stage equivalent ratio of 1.3

**Keywords :** Fuel and Air mixture stage porous media combustor / Air Stage porous media combustor / Porous Media  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1. บทนำ

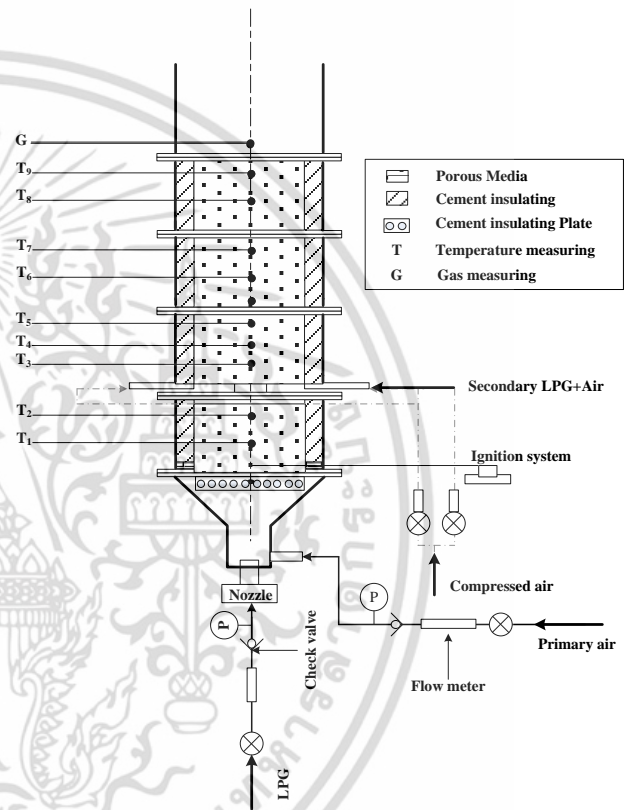
ในปัจจุบันพบว่าอัตราการใช้พลังงานได้มีอัตราเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ทำให้เกิดวิกฤตด้านความต้องการและราคาของพลังงาน จึงทำให้เกิดความสนใจในพลังงานทางเลือกขึ้น โดยปัจจุบันพลังงานทางเลือกที่ได้รับความสนใจคือระบบของเซลล์เชื้อเพลิง ซึ่งงานวิจัยนี้เป็นส่วนหนึ่งโดยเน้นด้านการพัฒนาเตาเผาไหม้วัสดุพอรุนที่ใช้สำหรับระบบของเซลล์เชื้อเพลิง โดยเตาเผาไหม้ที่พัฒนาขึ้นนั้นต้องทำให้เกิดการเผาไหม้ที่เสถียร มลพิษต่ำ โดยจากการวิจัยด้านการพัฒนาเตาเผาไหม้วัสดุพอรุนที่ผ่านมานั้นได้พบประเด็นปัญหาต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็นประเด็นของอุณหภูมิที่ลดต่ำลงเมื่อฉีดอากาศระหว่างชั้นเข้าไปในเตาเผาไหม้, อุณหภูมิที่ลดต่ำลงเมื่อความสูงของเตาสูงขึ้น, การเกิด  $\text{NO}_x$  ในปริมาณที่มาก, การกระจายตัวของอุณหภูมิไม่คงที่ตลอดทั้งเตาเผาไหม้ หรืออุณหภูมิที่สูงไม่เพียงพอต่อการนำไปใช้งานเมื่อติดตั้งอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนภายในเตา จึงทำให้เกิดการพัฒนางานวิจัยขึ้นนี้ขึ้น โดยได้พัฒนาเตาเผาไหม้วัสดุพอรุนให้มีการจ่ายของผสมระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศเป็นชั้น โดยจากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมในการนำไปประยุกต์ใช้กับระบบของเซลล์เชื้อเพลิง ต้องมีอุณหภูมิสูงกว่า  $800\text{ }^{\circ}\text{C}$  [1] ในส่วนของการปรับปรุงและพัฒนาเตาเผาไหม้วัสดุพอรุนของการศึกษานี้ได้ปรับปรุงจากเตาเผาไหม้วัสดุพอรุนแบบจ่ายอากาศเป็นชั้น เป็นแบบการจ่ายเชื้อเพลิงผสมโดยการจ่ายเป็นชั้น เนื่องจากการจ่ายเชื้อเพลิงเป็นชั้นนั้น จะก่อให้เกิดมลพิษน้อย [1,2] โดยจ่ายส่วนผสมของเชื้อเพลิงกับอากาศเป็นแบบ Fuel-Rich ในชั้นแรก [3,4,5] และจ่ายส่วนผสมของเชื้อเพลิงกับอากาศเป็นแบบ Fuel-Lean ในชั้นที่ 2 [3,4,5] โดยวัตถุประสงค์ของการวิจัยขึ้นนี้คือ การพัฒนาเตาเผาไหม้ให้มีประสิทธิภาพสูง และมีมลพิษน้อย เพื่อให้เตาเผาไหม้วัสดุพอรุนเป็นทางเลือกหนึ่งในการนำไปใช้ในระบบของเซลล์เชื้อเพลิงต่อไป

## 2. องค์ประกอบเชื้อเพลิง

เชื้อเพลิงที่เลือกใช้ในงานวิจัยนี้คือ LPG โดยในการทดลองใช้ก๊าซหุงต้มของการปิโตรเลียมแห่งประเทศไทย เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งองค์ประกอบของ LPG นี้ประกอบด้วย โพรเพน ( $\text{C}_3\text{H}_8$ ) 60 % และบิวเทน ( $\text{C}_4\text{H}_{10}$ ) 40 % โดยมีค่าความร้อน (HHV) เท่ากับ  $45.6\text{ MJ/kg}$  (ที่มา: การปิโตรเลียมแห่งประเทศไทย) ซึ่งจะเห็นได้ว่าองค์ประกอบของ LPG มีก๊าซไฮโดรคาร์บอนเป็นส่วนประกอบหลัก ไม่มีองค์ประกอบของไนโตรเจนและซัลเฟอร์

## 3. วิธีการทดลอง



รูปที่ 1 แสดงชุดทดลองเตาเผาวัสดุพอรุน

รูปที่ 1 แสดงชุดทดสอบพฤติกรรมเตาเผาไหม้และสมรรถนะเบื้องต้นของเตาเผาไหม้วัสดุพอรุนโดยแบบจ่ายของผสมระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศเป็นชั้น โดยใช้ก๊าซปิโตรเลียมเหลว (LPG) เป็นเชื้อเพลิง โดยเตาเผาไหม้วัสดุพอรุนนี้ถูกสร้างขึ้นให้มีการเผาไหม้แบบผสม (Premixed Combustor) ซึ่งมีขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเตาเผาประมาณ 4 นิ้ว สูง 35 mm โดยสามารถแบ่งเตาเผาออกได้เป็นสองส่วนคือ ส่วนที่หนึ่งเป็นส่วนที่เป็นห้องผสม (Mixing Zone) กั้นระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศ ส่วนที่สองเป็นส่วนของห้องเผาไหม้ ซึ่งในการทดสอบจะแบ่ง

การจ่ายเชื้อเพลิงกับอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ออกเป็นสองส่วน โดยจ่ายอากาศเข้าเตาเผาในส่วนที่หนึ่งที่มีบริเวณด้านข้างของห้องผสมอากาศส่วนแรก (First Mixing Zone) และส่วนที่สองที่ระดับความสูง 100 mm จากตะแกรงจ่ายเชื้อเพลิง (Mixture Distribution Plate) ดังรูปที่ 1 ส่วนการป้อนเชื้อเพลิงเข้าเตาเผาจะใช้หัวฉีดเป็นอุปกรณ์ในการป้อนเชื้อเพลิง และทำการติดตั้งระบบจุดระเบิดที่มีบริเวณระหว่างรอยต่อของเตาเผาส่วนที่สองและส่วนที่สาม

ในการทดลองทำการปรับอัตราการใช้ของอากาศและเชื้อเพลิงให้สอดคล้องกับเงื่อนไขการทดลอง ดังแสดงในตารางที่ 1 โดยใช้ปั๊มลมเป็นต้นกำลังในการทำให้เกิดอัตราการใช้ของอากาศและใช้ Flow Meter เป็นอุปกรณ์ในการวัดและควบคุมอัตราการใช้ของอากาศและในการควบคุมอัตราการใช้ของเชื้อเพลิงจะใช้ Flow Meter เป็นอุปกรณ์ในการวัดและควบคุมอัตราการใช้เช่นเดียวกัน โดยเมื่ออุณหภูมิเข้าสู่สภาวะคงตัว จะวัดก๊าซไอเสียโดยใช้เครื่องวัดก๊าซ วัดที่บริเวณท่อทางออกดังรูปที่ 1 โดยก๊าซที่ได้จากการเผาไหม้ที่บันทึกในงานวิจัยนี้ ได้แก่ ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO), ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>), ก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ (NO<sub>x</sub>) และออกซิเจน (O<sub>2</sub>)

ตารางที่ 1 ตารางแสดงเงื่อนไขการทดลอง

Run No.	Energy input (kW)	Excess Air (%)	Equivalent Ratio of 1 <sup>st</sup> Stage	Equivalent Ratio of 2 <sup>nd</sup> Stage
1	3	110	1.3	0.291
2			1.5	0.283
3			1.7	0.277

ในการหาสมรรถนะของเตาเผาจะนำค่าประสิทธิภาพการเผาไหม้ ( $\eta_c$ ) มาเป็นดัชนีในการชี้วัดสมรรถนะของเตาเผา โดยสามารถคำนวณได้จากประสิทธิภาพการเผาไหม้ของเตา นิยามได้ด้วยสมการดังนี้

$$\eta_c = \left[ \frac{E_F - E_{fg}}{E_F} \right] \times 100 \quad (1)$$

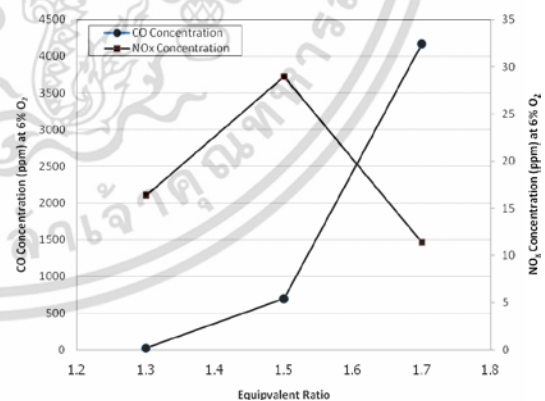
$E_F$  = ปริมาณความร้อนที่ได้จากเชื้อเพลิงที่เผาไหม้  
เตาเผาไหม้ (MW)

$E_{fg}$  = ปริมาณความร้อนที่สูญเสียไปกับคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ในก๊าซเสีย (MW)

#### 4. ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ทำการศึกษาศมรรถนะเบื้องต้นของเตาเผาไหม้แบบจ่ายของผสมระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศเป็นชั้น รวมถึงพฤติกรรมการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นภายในเตาเผา โดยทำการคงที่พลังงานความร้อนที่ป้อนให้กับเตาเผาเท่ากับ 3 กิโลวัตต์ (kW) และคงที่ปริมาณอากาศส่วนเกินเท่ากับ 110 % และทำการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนสมมูลของเชื้อเพลิงกับอากาศชั้นแรก (1<sup>st</sup> Stage) ไว้เท่ากับ 1.3, 1.5 และ 1.7 ตามลำดับ และทำการบันทึกค่าก๊าซไอเสียที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ โดยจะเริ่มทำการบันทึกภายหลังจากจุดเตา เมื่ออุณหภูมิการเผาไหม้เข้าสู่สภาวะคงตัว

##### 4.1 องค์ประกอบของก๊าซไอเสีย



รูปที่ 2 แสดงปริมาณ CO และ NO<sub>x</sub> ที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้

รูปที่ 2 แสดงอิทธิพลของอัตราส่วนสมมูลของเชื้อเพลิงกับอากาศชั้นแรกที่มีผลต่อปริมาณความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ (CO) และปริมาณความเข้มข้นของก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ (NO<sub>x</sub>) ที่เกิดขึ้นจากการเผา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใหม่ โดยทำการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนสมมูลของเชื้อเพลิงกับอากาศชั้นแรก เท่ากับ 1.3, 1.5 และ 1.7 โดยจากรูปที่ 2 พบว่าปริมาณความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO) มีค่าในกรณีของอัตราส่วนสมมูลของเชื้อเพลิงกับอากาศชั้นแรกเท่ากับ 1.3 โดยมีปริมาณความเข้มข้นของ CO เท่ากับ 22 ppm ที่มาตรฐาน 6% O<sub>2</sub> และมีค่าเพิ่มมากขึ้นในกรณีอัตราส่วนสมมูลของเชื้อเพลิงอากาศชั้นแรก เท่ากับ 1.5 และ 1.7 ตามลำดับ โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 700 – 4000 ppm ที่มาตรฐาน 6% O<sub>2</sub> โดยจากผลการทดลองดังกล่าวได้มีประเด็นที่น่าสนใจ กล่าวคือในกรณีที่อัตราส่วนสมมูลของเชื้อเพลิงกับอากาศชั้นแรกเท่ากับ 1.7 มีอุณหภูมิที่จุดตรวจวัด T<sub>8</sub> และ T<sub>9</sub> ต่ำลงอย่างชัดเจน ที่เงื่อนไขการทดลองนี้ถึงแม้สัดส่วนอากาศที่ผสมมากับเชื้อเพลิงส่วนที่สองจะมีสูง เกิดการเร่งการคลุกเคล้าระหว่างไอเสียร้อนและส่วนผสมที่เกิดอุณหภูมิสูงในช่วงแรกของการเผาไหม้ แต่อุณหภูมิกลับลดลงอย่างรวดเร็ว (อันเป็นผลจากการเกิดการแตกตัวด้วยความร้อนหรือที่เรียกว่า Thermal Cracking) โดยอุณหภูมิที่ต่ำกว่านี้เอง อัตราการเกิดปฏิกิริยาระหว่าง CO กับออกซิเจนที่หลงเหลืออยู่จึงลดต่ำลง ส่งผลให้มีค่าปริมาณความเข้มข้นของ CO ที่ทางออกสูงถึง 4000 ppm บ่งชี้ถึงการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์

จากปริมาณความเข้มข้นของ CO ที่ได้จากการทดลองเราสามารถสรุปได้ว่าการเพิ่มอัตราส่วนสมมูลของเชื้อเพลิงกับอากาศที่ช่องทางเข้าแรกนั้นส่งผลทางอ้อมต่อการเพิ่มขึ้นของ CO โดยมีสาเหตุมาจากอุณหภูมิที่ลดต่ำลงในช่วงสุดท้ายของการเผาไหม้ ส่งผลให้การเผาไหม้มีช่วงเวลาที่ยาวไม่เพียงพอต่อการกำจัด CO จึงทำให้เกิดการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ (Incomplete Combustion)

ปริมาณความเข้มข้นของก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ (NO<sub>x</sub>) ที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ในทุกกรณีศึกษานั้น อยู่ในช่วง 11 – 28 ppm ที่มาตรฐาน 6% O<sub>2</sub> ซึ่งอุณหภูมิที่เกิดขึ้นของการศึกษานี้ไม่เกิน 1400 °C ทำให้โอกาสในการเกิด Thermal NO<sub>x</sub> (Zeldovich Mechanism) มีน้อย เนื่องจาก NO<sub>x</sub> ประเภทนี้ จะเกิดขึ้นในช่วงที่มีการเผาไหม้ในช่วงที่มีอุณหภูมิสูง (High Temperature Combustion)

กว่า 1500 °C [6] แต่ก็ไม้อาจจะเลยได้เนื่องจากการเผาไหม้นี้เป็นแบบปั่นป่วน ซึ่งมีโอกาสที่จะเกิดอุณหภูมิสูงถึงระดับที่ก่อให้เกิด Thermal NO<sub>x</sub> ได้ในช่วงเวลาสั้นๆ และด้วยเหตุที่เชื้อเพลิงที่ใช้เป็นก๊าซปิโตรเลียม (LPG) ทำให้ไม่เกิด Fuel NO<sub>x</sub> เช่นเดียวกัน ดังนั้นปริมาณ NO<sub>x</sub> ที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้จึงมีปริมาณต่ำ ทำให้ปริมาณ NO<sub>x</sub> ที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่น่าจะเกิดขึ้นมาจาก Prompt NO<sub>x</sub> โดย NO<sub>x</sub> ลักษณะนี้จะเกิดขึ้นมาจากการทำปฏิกิริยากันระหว่างไฮโดรคาร์บอนกับไนโตรเจนในของผสมระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศ โดยปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิที่ก่อให้เกิด Thermal NO<sub>x</sub>

จากผลการทดลองมีปรากฏการณ์ที่น่าสนใจ คือ ค่า NO<sub>x</sub> ที่เกิดขึ้นไม่ได้แปรผันตามระดับสูงสุดของอุณหภูมิที่วัดได้ในเตาเผาไหม้ หรือแม้กระทั่งอุณหภูมิที่ทางออกของเตา เพื่อให้ได้ภาพที่ชัดเจนขึ้น ถึงกลไกในการก่อเกิด Prompt NO<sub>x</sub> และการสลายตัวของ NO<sub>x</sub> จำเป็นต้องพิจารณาถึง Fenimore mechanism [6] โดยลักษณะการเกิด NO<sub>x</sub> ประเภทนี้สามารถอธิบายได้จากสมการ ดังนี้

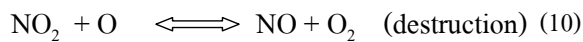
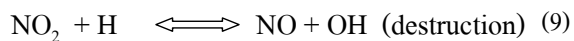
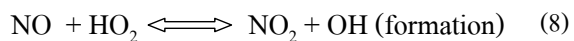


จากสมการข้างต้นเมื่อเกิดการปฏิกิริยาการเผาไหม้ขึ้น อนุโมลอิสระของไฮโดรคาร์บอนจะทำปฏิกิริยากับโมเลกุลของไนโตรเจนเพื่อสร้างสารประกอบอินทรีย์ที่มีสารประกอบไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบ (amines) และ cyano โดยต่อมาจะเปลี่ยนเป็นสารประกอบที่เกิดขึ้นระหว่างการเผาไหม้ (intermediate compounds)



ในสภาพบรรยากาศโดยทั่ว ๆ ไปการเกิด Nitric Oxide เกิดการออกซิไดซ์จากไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO<sub>x</sub> = NO + NO<sub>2</sub>) ซึ่งมีรูปแบบการเกิดและการสลาย ดังสมการต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เราจะพบว่าเมื่อมีอนุมูลอิสระของไฮโดรคาร์บอนเหลืออยู่กับอนุมูลอิสระที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบ ก็จะส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาการก่อตัวของ NO (formation) และหากอนุมูลอิสระไฮโดรเจนทำปฏิกิริยากับ NO ก็จะส่งผลให้มีการสลาย NO (destruction) ซึ่งสะท้อนให้เห็นถึงผลกระทบของ Intermediate Species ที่เกิดขึ้นและอุณหภูมิของการเผาไหม้ต่อการก่อตัวและการสลายตัวของ NO

ด้วยเหตุที่การปลดปล่อย NO ที่วัดได้ที่ทางออกเป็นผลสุทธิของการก่อกำเนิดและการสลายตัวของ NO ตลอดช่วงของห้องเผาไหม้ เมื่อพิจารณาจากปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นในเตาเผาไหม้วัสดุพุนในส่วนแรกที่เป็นแบบ Rich Combustion (Equivalent Ratio > 1.0) บริเวณนี้จึงมีการก่อตัวของอนุมูลอิสระ HCN และองค์ประกอบของไฮโดรคาร์บอนอื่น ๆ ในปริมาณมาก อนุมูลอิสระชนิดนี้เมื่อทำปฏิกิริยากับ NO (ที่เกิดจาก Prompt NO formation) ก็จะสลาย NO และสร้างอนุมูลอิสระอื่น ๆ รวมทั้ง  $\text{N}_2$  ในการเผาไหม้ที่ช่วงต่อมาซึ่งเป็นแบบ Lean Combustion (Equivalent Ratio < 1.0) หากมีอนุมูลอิสระที่หลงเหลือจากการเผาไหม้และการทำปฏิกิริยากับ NO ในช่วงแรก อนุมูลเหล่านี้ก็จะเกิดปฏิกิริยากับออกซิเจนไปเป็น NO และมีการสูญเสียของ NO ไปพร้อมกันจากการทำปฏิกิริยาของ NO กับอนุมูลอิสระที่มีไฮโดรเจนเป็นองค์ประกอบ

ในกรณีที่มีการป้อนส่วนผสมส่วนแรกของห้องเผาไหม้ที่ค่าอัตราส่วนสมมูลเท่ากับ 1.7 นั้น มีการตรวจพบปริมาณการปลดปล่อย CO ที่สูง ถึง 4000 ppm ด้วยเช่นกัน สะท้อนให้เห็นถึงปริมาณอนุมูลอิสระของไฮโดรเจนที่ยังเผาไหม้ไม่หมดในบริเวณห้องเผาไหม้ในกรณีนี้ด้วย สิ่งนี้นอกจากจะส่งเสริมให้เกิดกระบวนการก่อตัวของ NO เนื่องจากเป็นช่วงของส่วนผสมบางแล้ว ก็ยังส่งเสริมให้เกิดการสลายตัวของ NO ด้วยเช่นกัน ในช่วงที่สองนี้โดยค่า

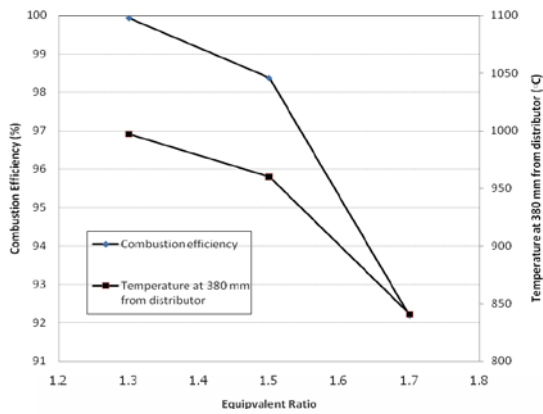
ของการปลดปล่อย NO โดยเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 11 ppm ที่มาตรฐาน 6%  $\text{O}_2$

การสลายตัวของ NO จากการทำปฏิกิริยากับอนุมูลอิสระที่มีองค์ประกอบของไฮโดรเจนกรณีแบ่งอากาศป้อนเข้าห้องเผาไหม้ส่วนแรกพร้อมกับเชื้อเพลิงที่อัตราส่วนสมมูล 1.5 นั้นจะไม่มากเท่ากับกรณีอัตราส่วนสมมูล 1.7 ทั้งนี้เพราะปริมาณของอนุมูลอิสระในช่วงที่ 2 ของห้องเผาไหม้จะต่ำกว่าซึ่งสะท้อนให้เห็นได้จากการพิจารณาการปลดปล่อยของ CO ซึ่งมีค่าเท่ากับ 700 ppm การปลดปล่อย NO ในกรณีนี้จึงมีค่าสูงกว่าโดยมีค่าเท่ากับ 28 ppm.

ที่เงื่อนไขการแบ่งอากาศเพื่อผสมกับเชื้อเพลิงในส่วนแรกเท่ากับอัตราส่วนสมมูล 1.3 นั้น ปริมาณอนุมูลอิสระที่มีองค์ประกอบของไฮโดรเจนจะมีน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับสองกรณีที่ได้กล่าวมา ในขณะเดียวกันเงื่อนไขที่ก่อให้เกิด Prompt  $\text{NO}_x$  ก็จะน้อยกว่าเช่นกัน เนื่องจาก Prompt  $\text{NO}_x$  จะเกิดได้มากที่การเผาไหม้ภายใต้เงื่อนไขเชื้อเพลิงหนาแน่น จึงสังเกตเห็นปริมาณ NO ที่ 16 ppm ที่ทางออก โดยสรุปปริมาณของ NO ที่วัดได้เป็นปฏิภาคผกผันกับปริมาณ CO สำหรับกรณีอัตราส่วนสมมูลส่วนแรก 1.5 และ 1.7 บ่งชี้ถึงอิทธิพลของกระบวนการสลาย NO จากการทำปฏิกิริยากับอนุมูลอิสระที่มีไฮโดรเจนเป็นองค์ประกอบ ในขณะที่กรณีอัตราส่วนสมมูลส่วนแรก 1.3 การก่อตัวของ Prompt  $\text{NO}_x$  มีน้อย สาเหตุมาจากส่วนผสมที่หนาแน่นที่สุด ทั้งนี้กระบวนการก่อตัวและการสลายตัวในช่วงต่อมาของการเผาไหม้มีน้อยกว่าในกรณีอื่น

## 4.2 ประสิทธิภาพการเผาไหม้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการเผาไหม้และอุณหภูมิภายในเตาเผาวัสดุพอรุน

รูปที่ 3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการเผาไหม้และอุณหภูมิภายในเตาเผาวัสดุพอรุน โดยจากการทดลองพบว่าในเงื่อนไขการทดลองเมื่อปรับเปลี่ยนอัตราส่วนสมมูลของเชื้อเพลิงกับอากาศชั้นแรก เท่ากับ 1.3 และ 1.5 ประสิทธิภาพการเผาไหม้มากกว่า 98 % ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นอย่างค่อนข้างสมบูรณ์ โดยน่าจะเกิดจากของสัดส่วนที่เหมาะสมในการเผาไหม้ ทำให้เกิดการเผาไหม้ที่มีประสิทธิภาพ แต่เมื่อปรับเปลี่ยนอัตราส่วนสมมูลของเชื้อเพลิงกับอากาศชั้นแรก เท่ากับ 1.7 ประสิทธิภาพการเผาไหม้มีค่าต่ำ เท่ากับ 92 % ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ เมื่อเทียบกับค่าการทดลองที่ได้กล่าวมา โดยน่าจะมีผลมาจากอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในการเผาไหม้มีค่าต่ำ ซึ่งส่งผลต่อปริมาณของ CO ที่สูงขึ้น ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพของเตา

## 5. สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้มุ่งเน้นการศึกษาสมรรถนะของเตาเผาไหม้วัสดุพอรุน รวมถึงพฤติกรรมการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นภายในเตาเผา ซึ่งจากทดลองพบว่า

1. การเพิ่มอัตราส่วนสมมูลของเชื้อเพลิงกับอากาศที่ช่องทางเข้าแรกนั้นส่งผลทางอ้อมต่อการเพิ่มขึ้นของ CO โดยมีสาเหตุมาจากอุณหภูมิที่ลดต่ำลงในช่วงสุดท้ายของการเผาไหม้

2. ปริมาณของ NO ที่วัดได้เป็นปฏิภาคผกผันกับปริมาณ CO

3. องค์ประกอบของปริมาณ CO ในกรณีค่าอัตราส่วนสมมูลเท่ากับ 1.3 มีค่าต่ำสุดเท่ากับ 22 ppm

4. องค์ประกอบของปริมาณ NO ในกรณีค่าอัตราส่วนสมมูลเท่ากับ 1.7 มีค่าต่ำสุดเท่ากับ 11 ppm

5. ประสิทธิภาพการเผาไหม้ลดลงเมื่ออัตราส่วนสมมูลในส่วนแรกของการเผาไหม้สูงขึ้น มีผลโดยตรงจากอัตราการเกิด CO เพิ่มขึ้น โดยมีค่าสูงสุดมากกว่า 98 % ในกรณีค่าอัตราส่วนสมมูลเท่ากับ 1.3 และ 1.5

## 6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) ที่ให้การสนับสนุนทุนที่ช่วยให้งานวิจัยนี้สำเร็จ ล่วงไปได้ด้วยดี

## 7. เอกสารอ้างอิง

- [1] อาวุธ ลภีรัตนากุลและจารุวัตร เจริญสุข (2551), “เตาเผาไหม้วัสดุพอรุน Part 2 : อิทธิพลอากาศส่วนเกิน”, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 22, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต จังหวัดกรุงเทพฯ ๑
- [2] อาวุธ ลภีรัตนากุลและจารุวัตร เจริญสุข (2550), “พฤติกรรมการณ์เผาไหม้หัวเผาวัสดุพอรุน”, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 21, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต จังหวัดกรุงเทพฯ ๑
- [3] Ronald, D., William, C. and John R., “Apparatus and Method for Combustion within porous matrix elements”. United States Patent. US5,160,254.
- [4] Ronald, D., William, C. and John R., “Combustion Method and Apparatus for Staged Combustion within Porous Matrix Elements”. United States Patent. US5,080,577.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [5] Mark J., Hamid A. and Thomas D., “Staged Combustion in a porous-matrix surface combustor to promote ultra-low NO<sub>x</sub> emissions”. United States Patent. US5,476,375.
- [6] Stephen R.T., “An Introduction to Combustion Concepts and Applications”. McGraw-Hill, Inc. New York.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้