เตาเผาไหม้วัสดุพรุนกับเตาเผาไหม้แบบหมุนวน (Part 1)

Porous Media Combustor Versus Swirl Combustor

อาวุธ ลภิรัตนากูล[1*] จารุวัตร เจริญสุข [2]

[1*] ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร ถ.เชื่อมสัมพันธ์ เขตหนองจอก กรุงเทพ 10530 โทร 0-2988-3655

E-mail: umkmitl39@hotmail.com

[2] ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ถ.ฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพ 10520 โทร 0-2737-3000

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ทำการเปรียบเทียบพฤติกรรมการเผาไหม้ของก๊าซ LPG ที่เกิดขึ้นภายในเตาที่ออกแบบมาสำหรับห้องปฏิกิริยาสร้างไฮโดรเจนโดยเปรียบเทียบการเผาไหม้ในวัสดุพรุนกับการจ่ายอากาศแบบหมุนวนในแง่ของสมรรถนะของเตาเผาไหม้อันได้แก่ประสิทธิภาพการเผาไหม้ (η_C) องค์ประกอบของก๊าซไอเสียที่เกิดจากการเผาไหม้และการกระจายตัวของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นภายในเตาเผาไหม้ จากการทดลองเมื่อทำการเผาไหม้ด้วยเตาเผาไหม้วัสดุพรุนพบว่าอุณหภูมิที่ได้จากการเผาไหม้และประสิทธิภาพการเผาไหม้มีค่ามากกว่ากรณีเผาไหม้ด้วยเตาเผาไหม้แบบหมุนวนเนื่องจากวัสดุสร้างความพรุนภายในเตาเผาไหม้วัสดุพรุนมีส่วนช่วยส่งเสริมการเผาไหม้ เช่น ทำให้อัตราการผสมเพิ่มขึ้นและยังทำให้เกิดการอุ่นของผสมบริเวณ upstream ให้มีอุณหภูมิสูงขึ้น ส่งผลให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ จึงทำให้ปริมาณ CO และ C_xH_y NO_x ที่เกิดขึ้น มีปริมาณน้อย ซึ่งถึงแม้ว่าการกระจายอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในกรณีเผาไหม้ด้วยเตาเผาไหม้แบบหมุนวนมีความคงที่มากกว่า แต่ปริมาณมลพิษที่เกิดขึ้นมีมากและเกิดเขม่าเกาะตัวกันเป็นก้อน ดังนั้นหากต้องใช้การเผาไหม้แบบกระแสหมุนวนกับระบบเซลเชื้อเพลิงแล้ว ควรต้องมีการปรับปรุงให้มีสมรรถนะดีขึ้นกว่าที่เป็นอยู่ อย่างไรก็ดี ผลการทดลองการศึกษาสมรรถนะของเตาเผาไหม้ทั้งสองประเภทที่ได้จากงานวิจัยนี้มีข้อจำกัดเฉพาะเงื่อนไขการทดสอบและลักษณะโครงสร้างของเตาเผาไหม้ในงานวิจัยนี้เท่านั้น

คำสำคัญ: เตาเผาไหม้วัสดุพรุน /การเผาไหม้ / วัสดุพรุน

[1] Corresponding author

Abstract

This study investigated the combustion behaviors of LPG inside a porous media combustor and swirl combustor designed for hydrogen reformer in terms of preliminary performances, such as; combustion efficiency, gas emissions and temperature distribution. The experimental results showed that the combustion efficiency and temperature of porous media combustor are higher than swirl combustor for this particular operating condition. This is due to mixing enhancement caused by an introduction of ceramic spheres in the combustion chamber. This porous domain also helps in preheating the mixture in upstream region thus promoting the ignition mechanism. Although temperature distribution is more stable in a swirl combustor but higher emission and soot deposition is observed. It requires further modification if swirl combustor is to be used for hydrogen reforming process in the SOFC system. By the way, these results have a specific for only operating condition and this geometry of combustor.

Keyword: Porous media combustor / combustion / Porous media

1. บทนำ

ปัญหาภาวะโลกร้อนกำลังเป็นปัญหาใหญ่ของโลกเราในปัจจุบัน สังเกตได้จากอุณหภูมิ ของโลกที่เพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆ ทำให้สภาพอากาศเปลี่ยนแปลงอย่างมากจนเกิดภัยพิบัติต่างๆ ซึ่งสาเหตุหลักของปัญหานี้เกิดมาจากมลพิษที่มนุษย์ก่อขึ้นเช่น การปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซเรือนกระจก (NO_x CFC CH_4 เป็นต้น)ในกิจวัตรประจำวันของมนุษย์ โดยเมื่อมลพิษดังกล่าวถูกปล่อยออกมาสู่ชั้นบรรยากาศโลก จะส่งผลให้ความร้อนจากแสงอาทิตย์ถูกกักเก็บไว้ไม่ให้คายออกไปสู่บรรยากาศ จึงทำให้อุณหภูมิของบรรยากาศโลกสูงขึ้น จากปัญหาดังกล่าวจึงได้มีการศึกษาวิจัยและพัฒนาเกี่ยวกับเทคโนโลยีสะอาดเพื่อลดภาวะโลกร้อนและลดมลพิษที่เกิดขึ้น โดยหนึ่งในเทคโนโลยีดังกล่าวคือเทคโนโลยีเซลล์เชื้อเพลิง ซึ่งเป็นระบบที่สามารถผลิตพลังงานได้แต่มีมลพิษต่ำ โดยปัจจุบันได้มีการพัฒนาระบบของเซลล์เชื้อเพลิงเพื่อให้สามารถผลิตพลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น ด้วยการติดตั้ง reformer เข้าไปในระบบเพื่อช่วยในการอุ่นก๊าซออกซิเจนและสังเคราะห์ก๊าซไฮโดรเจนก่อนเข้าทำปฏิกริยา ซึ่งแหล่งพลังงานความร้อนที่ป้อนให้กับ reformerได้มาจากการติดตั้งเตาเผาไหม้เพิ่มเข้าไปในระบบ โดยเตาเผาไหม้ที่ติดตั้งในระบบควรเป็นเตาเผาไหม้ที่มีการกระจายอุณหภูมิในเตามีความสม่ำเสมอ เกิดขึ้นในบริเวณที่กว้างและมีมลพิษต่ำ ซึ่งเตาเผาไหม้วัสดุพรุนแบบหลายขั้น เป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่สามารถนำมาติดตั้งเข้ากับระบบของเซลล์เชื้อเพลิง เนื่องจากการเผาไหม้ที่เสถียรเกิดขึ้นในบริเวณที่กว้างและสามารถควบคุมอุณหภูมิสูงสุดที่เกิดขึ้นได้ ส่งผลให้อัตราการเกิด Thermal NO_x มีปริมาณลดลง [1] โดยได้มีการศึกษาค้นคว้าและพัฒนาเกี่ยวกับเตาเผาไหม้วัสดุพรุนที่มีการจ่ายของผสมระหว่างอากาศและเชื้อเพลิงเป็นขั้น [2,3,4,5] พบว่าสามารถควบคุมอุณหภูมิสูงสุดที่เกิดขึ้นได้ ส่งผลให้อัตราการเกิด Thermal NO_x มีปริมาณลดลง นอกจากงานวิจัย ยังได้มีการวิจัยเกี่ยวกับการเผาไหม้ภายในเตาเผาไหม้วัสดุพรุนที่มีการจ่ายอากาศเป็นขั้น [6] พบว่าปริมาณ NO_x ที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ภายในเตาเผาไหม้วัสดุพรุนแบบสองขั้นมีค่าต่ำประมาณ 10 vppm นอกจากนี้อีกเหตุผลหนึ่งที่ทำให้ปริมาณ NO_x ที่เกิดจากการเผาไหม้มีค่าต่ำคือ วัสดุพรุนที่อยู่ภายในเตาเผาไหม้มีส่วนช่วยทำให้เกิดการไหลแบบปั่นป่วนภายในเตาเผาไหม้ทั้งบริเวณห้องเผาไหม้ในส่วนแรกและส่วนที่สอง จึงทำให้เกิดการผสมเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogenous mixing) ระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศ ส่งผลให้เกิดการเผาไหม้ที่เป็นเนื้อเดียวกัน ทำให้เป็นการลดอุณหภูมิการเผาไหม้สูงสุดที่เกิดขึ้น

จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าได้มีการวิจัยเกี่ยวกับเตาเผาไหม้วัสดุพรุนแบบหลายขั้นกันอย่างแพร่หลาย แต่ทั้งนี้จะเห็นได้ว่างานวิจัยส่วนใหญ่กล่าวถึงเฉพาะผลของการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนสมมูลในแต่ละชั้นที่มีผลต่อมลพิษ (CO และ NO_x) และอุณหภูมิสูงสุดที่เกิดขึ้น โดยไม่ได้กล่าวถึงสมรรถนะในด้านอื่น เช่นการกระจายตัวของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นภายในเตาเผาไหม้ ซึ่งดัชนีนี้จะเป็นตัวที่บ่งบอกถึงบริเวณของการเผาไหม้ที่เกิดขึ้น รวมถึงประสิทธิภาพการเผาไหม้และปริมาณ C_XH_Y ที่เกิดขึ้น ซึ่งสมรรถนะดังกล่าวเป็นดัชนีที่จำเป็นต้องศึกษาเพื่อที่จะนำเตาเผาไหม้วัสดุพรุนที่มีการจ่ายอากาศเป็นขั้นมาประยุกต์ใช้ติดตั้งเข้ากับระบบของเซลล์เชื้อเพลิงเพื่อใช้เป็นแหล่งพลังงานความร้อนในการอุ่นอากาศและไฮโดรเจนก่อนเข้าทำปฏิกิริยาภายในเซลล์เชื้อเพลิง ดังนั้นวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือทำการศึกษาพฤติกรรมการเผาไหม้ของก๊าซ LPG ที่เกิดขึ้นภายในเตาเผาไหม้แบบวัสดุพรุนที่มีการจ่ายอากาศเป็นขั้น ในแง่ของสมรรถนะความร้อนอันได้แก่ประสิทธิภาพการเผาไหม้ (η_C) การกระจายอุณหภูมิและปริมาณมลพิษที่เกิดขึ้น (CO C_XH_Y และ NO_x) โดยได้ทำการเปรียบเทียบสมรรถนะระหว่างเตาเผาไหม้วัสดพรุนแบบที่มีการจ่ายอากาศเป็นขั้นกับเตาเผาแบบหมุนวนทั่วไป

2.องค์ประกอบเชื้อเพลิง

เชื้อเพลิงที่เลือกใช้ในงานวิจัยนี้ คือ LPG โดยในการทดลองจะก๊าซหุงต้มของการปิโตรเลียมแห่งประเทศไทย ซึ่งองค์ประกอบของ LPG นี้ประกอบด้วย โพรเพน (C_3H_8) 60 mol% และบิวเทน (C_4H_{10}) 40% โดยมีค่าความร้อน (LHV) เท่ากับ 45.6 MJ/kg (ที่มา: การปิโตรเลียมแห่งประเทศไทย) ซึ่งจะเห็นได้ว่าองค์ประกอบของ LPG มีก๊าซไฮโดรคาร์บอนเป็นส่วนประกอบหลัก ไม่มีองค์ประกอบของไนโตรเจนและซัลเฟอร์

3.วิธีการทดลอง

รูปที่ 1 แสดงชุดทดสอบพฤติกรรมการเผาไหม้และสมรรถนะของเตาเผาไหม้วัสดุพรุนที่มีการจ่ายอากาศเป็นขั้นโดยใช้แอลพีจีเป็นเชื้อเพลิง โดยเตาเผาไหม้วัสดุพรุนนี้ถูกสร้างขึ้น ให้มีการเผาไหม้แบบผสมก่อน (premixed) โดยการทดสอบจะแบ่งอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ออกเป็นสามส่วน โดยอากาศส่วนที่หนึ่งจะถูกจ่ายเพื่อผสมกับเชื้อเพลิงก่อนป้อนเข้าสู่เตาเผาไหม้ อากาศส่วนที่สองจะถูกป้อนเข้าเตาเผาไหม้ที่ระดับความสูง 0 mm. จากตะแกรงกระจายเชื้อเพลิง และอากาศส่วนสามจะถูกป้อนเข้าเตาเผาไหม้ที่ระดับความสูง 100 mm. จากตะแกรงกระจายเชื้อเพลิง นอกจากนี้ยังทำการติดตั้งระบบจุดระเบิดที่ที่ระดับความสูง 100 mm. จากตะแกรงกระจายเชื้อเพลิงและใช้แอลพีจีเป็นเชื้อเพลิงในการจุดและอุ่นเตาเผาไหม้

ในการทดลองทำการปรับอัตราการไหลของอากาศและเชื้อเพลิงให้สอดคล้องกับเงื่อนไขการทดลอง โดยใช้ปั๊มลมเป็นต้นกำลังในการทำให้เกิดอัตราการไหลของอากาศและใช้ Flow meter (0-300 L/m) เป็นอุปกรณ์ในการวัดและควบคุมอัตราการไหลของอากาศและในการควบคุมอัตราการไหลของเชื้อเพลิงจะใช้ Flow meter (0-5 L/m) เป็นอุปกรณ์ในการวัดและควบคุมอัตราการไหลเช่นเดียวกัน ส่วนในการบันทึกค่าอุณหภูมิจะบันทึกอุณหภูมิทั้งหมด 10 ระดับความสูงทุกๆ 5 นาทีโดยใช้ Thermocouple type K และใช้ Data logger เป็นอุปกรณ์ในการบันทึกผล นอกจากนี้เมื่ออุณหภูมิเข้าสู่สภาวะคงตัวทำวัดก๊าซไอเสียโดยใช้เครื่องวัดก๊าซที่บริเวณท่อทางออกที่ระดับความสูง 300 mm จากแผ่นกระจายของผสมระหว่างเชื้อเพลิงและอากาศ ซึ่งก๊าซไอเสียที่ทำการเก็บผลได้แก่ O_2, CO_2, CO, NO_x และ C_xH_y เพื่อนำไปใช้ในการหาค่าประสิทธิภาพการเผาไหม้ (η_c)

ในการหาสมรรถนะของเตาเผาไหม้จะนำค่าประสิทธิภาพการเผาไหม้ (η_C) มาเป็นดัชนีในการชี้วัดสมรรถนะของหัวเผา โดยสามารถคำนวณได้จาก

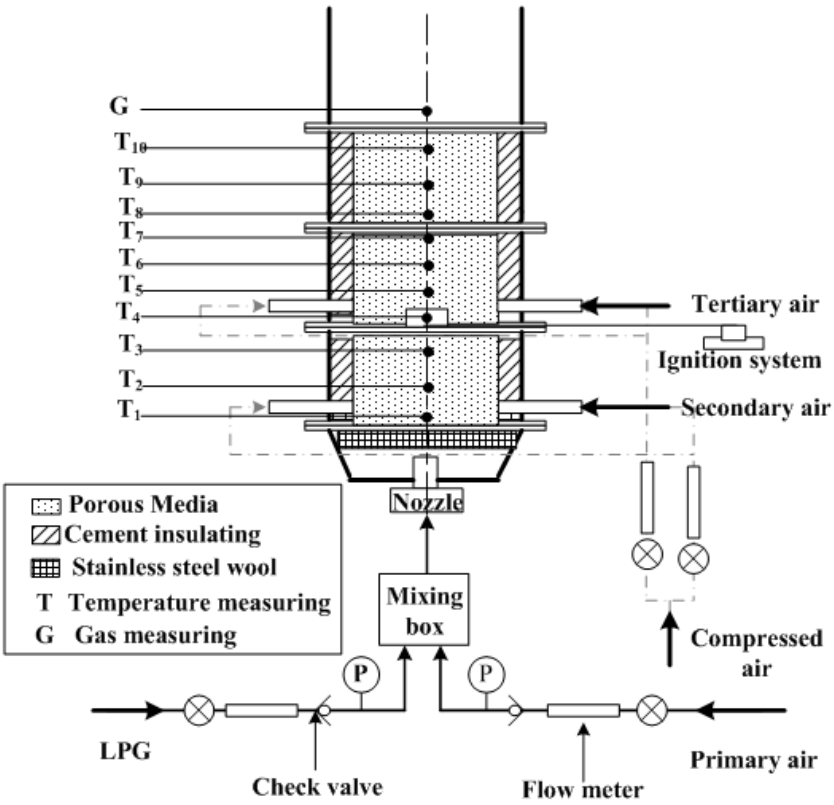
- ประสิทธิภาพการเผาไหม้ของเตาเผาไหม้นิยามได้ด้วยสมการดังนี้

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

Q_{fuel} คือ ความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้เชื้อเพลิง

$Q_{loss,HC}$ คือ ปริมาณความร้อนที่สูญเสียจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ของไฮโดรคาร์บอน

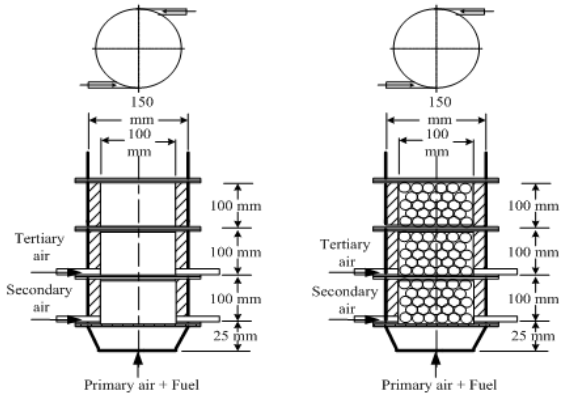
$Q_{loss,co}$ คือ ปริมาณความร้อนที่สูญเสียจากการที่ CO ไม่ถูกเผาไหม้เป็น CO_2



รูปที่ 1 แสดงชุดทดสอบพฤติกรรมการเผาไหม้และสมรรถนะของเตาเผาไหม้วัสดุพรุนที่มีการจ่ายอากาศเป็นขั้น

ตารางที่ 1 ตารางแสดงเงื่อนไขการทดลอง

Energy input (kw)	%EA	Optional	Lamda (λ)	Volume flow rate of air (L/min)			Volume Flow rate Fraction of Air (%)		
				1 st Air	2 nd Air	3 rd Air	1 st Air	2 nd Air	3 rd Air
3 kw	110	Porous Media Combustor	0.00	4	106	0	3.63	96.37	0
			0.50	4	51	55	3.63	46.37	50
			0.96	4	0.00	106	3.63	0.00	96
		Swirl Combustor	0.00	4	106	0	3.63	96.37	0
			0.50	4	51	55	3.63	46.37	50
			0.96	4	0.00	106	3.63	0.00	96



(a) Swirl Combustor (b) Porous Media Combustor

รูปที่ 2 แสดงการเปรียบเทียบลักษณะของเตาเผาไหม้ทั้งสองประเภท

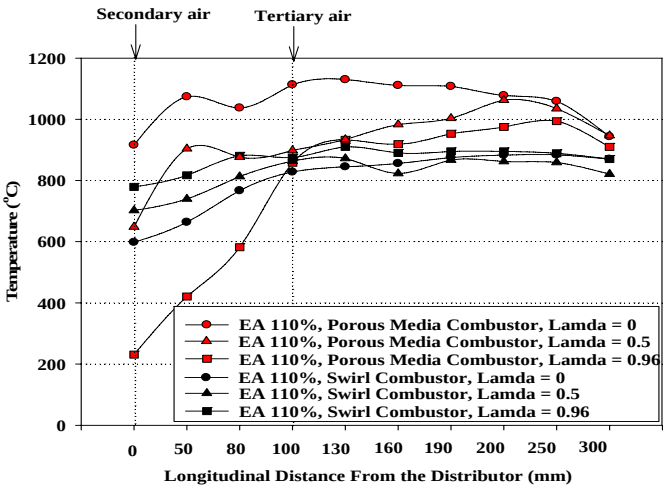
รูปที่ 2 แสดงการเปรียบเทียบลักษณะของเตาเผาไหม้ทั้งสองประเภท ซึ่งจะเห็นได้ว่าในการทดสอบจะใช้เตาเผาไหม้ตัวเดียวกัน มีตำแหน่งและลักษณะการจ่ายอากาศเหมือนกันและรันที่เงื่อนไขการทดลองเดียวกัน แต่ต่างกันตรงที่เตาเผาไหม้วัสดุพรุนจะทำการใส่เม็ดอะลูมิน่า เพื่อเป็นวัสดุช่วยสร้างความพรุน ดังนั้นผลของการหมุนวนของอากาศที่ถูกจ่ายเข้ามาในแนวสัมผัสจะลดลง เนื่องจากมีวัสดุสร้างความพรุนกั้นขวางแนวการหมุนวนของอากาศที่ถูกจ่ายเข้าเตาเผาไหม้

4. ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในหัวเผาวัสดุพรุน

รูปที่ 3 เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตามระดับความสูงระหว่างเตาเผาไหม้วัสดุพรุนกับเตาเผาไหม้แบบหมุนวน ซึ่งในแต่ละกรณีทำการปรับเปลี่ยนสัดส่วนของอากาศส่วนที่สามต่ออากาศทั้งหมด (λ) เท่ากับ 0 0.5 และ 0.96 ตามลำดับ และทำการคงที่ปริมาณอากาศส่วนเกินไว้เท่ากับ 110% ซึ่งจากรูป 2 จะเห็นได้ว่า เมื่อพิจารณาเตาเผาไหม้วัสดุพรุนพบว่าที่กรณี λ เท่ากับ 0 อุณหภูมิที่ได้จากการเผาไหม้มีค่าสูงที่สุด ประมาณ 1130 °C และอุณหภูมิจะมีค่าลดลงเมื่อทำการเพิ่ม λ เป็น 0.5 และ 0.96 ซึ่งมีค่าอุณหภูมิเท่ากับ 1050 และ 990 °C ตามลำดับ โดยในกรณี λ เท่ากับ 0.5 และ 0.96 อุณหภูมิเริ่มคงที่ตั้งแต่ระดับความสูง 100mm จากตะแกรงกระจายของผสมระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงเป็นต้นไป ในขณะที่เมื่อพิจารณาเตาเผาไหม้แบบหมุนวนพบว่าอุณหภูมิที่ได้จากการเผาไหม้มีแนวโน้มค่อนข้างคงที่ตลอดความสูงของเตาเผาไหม้ แต่ทุกเงื่อนไขการทดลองมีค่าอุณหภูมิค่อนข้างต่ำ ซึ่งในช่วงตั้งแต่ระดับความสูง 100mm จากตะแกรงกระจายของผสมระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิง (ช่วงที่อุณหภูมิค่อนข้างคงที่) อุณหภูมิที่ได้จากการเผาไหม้ของเตาเผาไหม้แบบหมุนวน มีค่าอุณหภูมิเฉลี่ยมีค่าอยู่ในช่วง 800-920 °C ซึ่งอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิที่ได้จากการเผาไหม้ของเตาเผาไหม้แบบวัสดุพรุนอย่างเห็นได้ชัด

เหตุที่อุณหภูมิที่ได้จากการเผาไหม้ของเตาเผาไหม้แบบวัสดุพรุนมีค่ามากกว่ากรณีเผาไหม้ด้วยเตาเผาไหม้แบบหมุนวน คาดว่าเนื่องมาจากเม็ดวัสดุสร้างความพรุนที่ใส่เข้าไปในเตาเผาไหม้วัสดุพรุนนั้น จะมีส่วนช่วยให้เกิดความปั่นป่วนย่อยๆในช่องว่างระหว่างเม็ดวัสดุทำให้อัตราการผสมกันระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงเป็นไปได้ด้วยดี อีกทั้งยังช่วยอุ่น (Preheating) ของผสมระหว่างอากาศและเชื้อเพลิงทางด้าน upstreamให้มีอุณหภูมิสูงขึ้น และยังทำหน้าที่เป็นตัวสะสมความร้อน หรือ Temperature Flywheel ช่วยให้ความร้อนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาการเผาไหม้ไม่สูงเกินไปในขณะที่ช่วยป้อนความร้อนกลับมายังส่วนผสมเชื้อเพลิงและอากาศที่ยังไม่เผาไหม้ไปพร้อมๆกัน ดังนั้นคาดว่าการใส่เม็ดวัสดุสร้างความพรุนในเตาเผาไหม้นั้น จะช่วยในการส่งเสริมการเผาไหม้ให้ดีขึ้น ช่วยให้การเผาไหม้สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับอุณหภูมิที่ได้จากการเผาไหม้ ในขณะที่การเผาไหม้ด้วยเตาเผาไหม้แบบหมุนวน จะมีอัตราการผสมกันระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงลดลง จึงทำให้อุณหภูมิที่ได้จากการเผาไหม้มีค่าต่ำ ซึ่งพฤติกรรมการเผาไหม้ที่เกิดแสดงดังรูปที่ 4 โดยเปลวไฟมีลักษณะหมุนควงด้วยความเร็วรอบผนังเตาเผาไหม้ และขณะทำการเผาไหม้มีเขม่าเป็นจำนวนมากดังแสดงในรูป 5 โดยเขม่าที่เกิดขึ้นนี้จะจับตัวกันเป็นก้อนที่ตัววัดอุณหภูมิ (Thermo couple) ดังแสดงในรูป 6 แสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์



รูปที่ 3 เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตามระดับความสูง ระหว่างเตาเผาไหม้วัสดุพรุนกับเตาเผาไหม้แบบหมุนวน

รูปที่4 แสดงลักษณะของเปลวไฟที่ได้จากการเผาไหม้ของเตาเผาไหม้แบบหมุนวน

รูปที่ 5 แสดงเขม่าที่เกิดขึ้นขณะทำการเผาไหม้ด้วยเตาเผาไหม้แบบหมุนวน

รูปที่ 6 แสดงลักษณะของเขม่าที่จับตัวกันเป็นก้อน เมื่อทำการเผาไหม้ด้วยเตาเผาไหม้แบบหมุนวน

4.2 ปริมาณก๊าซไอเสียที่เกิดขึ้น

รูปที่ 7 แสดงการเปรียบเทียบปริมาณก๊าซไอเสียที่ได้จากการเผาไหม้ระหว่างเตาเผาไหม้วัสดุพรุนกับเตาเผาไหม้แบบหมุนวน โดยเมื่อพิจารณารูปที่ 7a พบว่าปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ที่เกิดขึ้นในกรณีเผาไหม้ด้วยเตาเผาไหม้วัสดุพรุน มีปริมาณน้อยกว่ากรณีเผาไหม้ด้วยเตาเผาไหม้แบบหมุนวนอย่างเห็นได้ชัด คาดว่าเกิดจากการที่เมื่อทำการเผาไหม้โดยใช้วัสดุสร้างความพรุนนั้น จะมีระยะเวลาที่ใช้ในการเผาไหม้นาน จึงทำให้การเผาไหม้เกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ อุณหภูมิที่ได้จากการเผาไหม้มีค่าสูง นอกจากนี้เมื่อทำการเพิ่มสัดส่วนของอากาศส่วนที่สามต่ออากาศทั้งหมด (λ) แล้วแนวโน้มปริมาณ CO ที่เกิดขึ้นของกรณีเผาไหม้ด้วยเตาเผาไหม้วัสดุพรุนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามการเปลี่ยนแปลง λ เนื่องจากการเพิ่ม λ จะส่งผลให้ระยะเวลาในการเผาไหม้ลดน้อยลง ทำให้มีระยะเวลาไม่เพียงพอที่ CO จะถูกเผาไหม้กลายเป็น CO_2 จึงทำให้เกิดการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ ได้อุณหภูมิการเผาไหม้มีค่าต่ำดังรูป 3 โดยปริมาณ CO มีค่าสูงที่สุดที่ λ เท่ากับ 0.96 มีค่าประมาณ 550 ppm คิดที่มาตรฐาน O_2 6% และ มีค่าต่ำที่สุดที่ λ เท่ากับ 0 มีค่าประมาณ 11 ppm คิดที่มาตรฐาน O_2 6% ส่วนกรณีเผาไหม้ด้วยเตาเผาไหม้แบบหมุนวนเมื่อทำการเพิ่ม λ แล้วพบว่าปริมาณ CO มีแนวโน้มลดลง เนื่องจากการเพิ่ม λ คาดว่าจะส่งผลให้ระยะเวลาในการเผาไหม้เพิ่มมากขึ้น เพราะเมื่อทำการเพิ่ม λ ปริมาณอากาศบางส่วนอาจจะเคลื่อนที่ลงไปบริเวณ Upstream ก่อนที่จะเคลื่อนที่กลับมาสู่บริเวณ Downstream เป็นการเกิดการหมุนวนในแนวตั้ง โดยปริมาณ CO มีค่าสูงที่สุดที่ λ เท่ากับ 0 มีค่าประมาณ 2,780 ppm คิดที่มาตรฐาน O_2 6% และ มีค่าต่ำที่สุดที่ λ เท่ากับ 0.96 มีค่าประมาณ 750 ppm คิดที่มาตรฐาน O_2 6%

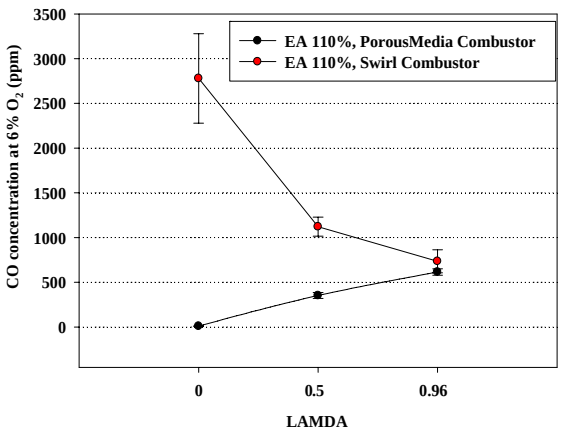
รูปที่ 7b แสดงการเปรียบเทียบปริมาณก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ที่ได้จากการเผาไหม้ระหว่างเตาเผาไหม้วัสดุพรุนกับเตาเผาไหม้แบบหมุนวน จากรูปจะเห็นได้ว่าปริมาณ NO_X ที่เกิดขึ้นในกรณีเผาไหม้ด้วยเตาเผาไหม้วัสดุพรุน มีปริมาณน้อยกว่ากรณีเผาไหม้ด้วยเตาเผาไหม้แบบหมุนวน คาดว่าเกิดจากเมื่อทำการเผาไหม้ด้วยเตาเผาไหม้แบบหมุนวน จะมีระยะเวลาในการเผาไหม้น้อยกว่าเมื่อเทียบกับเผาไหม้ด้วยเตาเผาไหม้วัสดุพรุน จึงทำให้การเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ สอดคล้องกับอุณหภูมิการเผาไหม้ดังรูปที่ 3 นอกจากนี้เมื่อทำการเพิ่มสัดส่วนของอากาศส่วนที่สามต่ออากาศทั้งหมด (λ) แล้วแนวโน้มปริมาณ NO_X ที่เกิดขึ้นของกรณีเผาไหม้ด้วยเตาเผาไหม้วัสดุพรุน มีแนวโน้มลดลงตามการเปลี่ยนแปลง λ เหตุที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากการเพิ่ม λ ส่งผลให้อุณหภูมิที่ได้จากการเผาไหม้มีค่าลดลง ทำให้โอกาสเกิด Thermal NO_X ลดน้อยลง โดยปริมาณ NO_X มีค่าสูงที่สุดที่ λ เท่ากับ 0 มีค่าประมาณ 43 ppm คิดที่มาตรฐาน O_2 6% และ มีค่าต่ำที่สุดที่ λ เท่ากับ 0.5 มีค่าประมาณ 36 ppm คิดที่มาตรฐาน O_2 6% ส่วนกรณีเผาไหม้ด้วยเตาเผาไหม้แบบหมุนวน เมื่อทำการเพิ่ม λ จาก 0 เป็น 0.5 แล้วพบว่าปริมาณ NO_X มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นประมาณ 8 ppm คิดที่มาตรฐาน O_2 6% เนื่องจากอุณหภูมิที่ได้จากการเผาไหม้มีค่าเพิ่มขึ้น ทำให้โอกาสเกิด Thermal NO_X เพิ่มมากขึ้น จากนั้นเมื่อทำการเพิ่ม λ เป็น 0.96 พบว่าปริมาณ NO_X มีปริมาณลดลงจนเหลือประมาณ 40 ppm คิดที่มาตรฐาน O_2 6% ทั้ง ๆ ที่ เงื่อนไขนี้มีอุณหภูมิที่ได้จากการเผาไหม้สูงที่สุดในกรณีเผาไหม้ด้วยเตาเผาไหม้แบบหมุนวน ซึ่งในกรณีนี้ทางผู้วิจัยยังไม่สามารถหาข้อสรุปได้

รูปที่ 7c แสดงการเปรียบเทียบปริมาณความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรคาร์บอนที่ได้จากการเผาไหม้ระหว่างเตาเผาไหม้วัสดุพรุนกับเตาเผาไหม้แบบหมุนวน จากรูปจะเห็นได้ว่าปริมาณ C_XH_Y ที่เกิดขึ้นในกรณีเผาไหม้ด้วยเตาเผาไหม้วัสดุพรุน มีปริมาณน้อยกว่ากรณีเผาไหม้โดยด้วยเตาเผาไหม้แบบหมุนวน คาดว่าเกิดจากเมื่อทำการเผาไหม้ด้วยเตาเผาไหม้แบบหมุนวน จะมีระยะเวลาในการเผาไหม้น้อยกว่าเมื่อเทียบกับเผาไหม้ด้วยเตาเผาไหม้วัสดุพรุน จึงทำให้การเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ สอดคล้องกับอุณหภูมิการเผาไหม้ดังรูปที่ 3 นอกจากนี้เมื่อทำการเพิ่มสัดส่วนของอากาศส่วนที่สามต่ออากาศทั้งหมด (λ) แล้วแนวโน้มปริมาณ C_XH_Y ที่เกิดขึ้นของกรณีเผาไหม้ด้วยเตาเผาไหม้วัสดุพรุน มีแนวโน้มลดลงตามการเปลี่ยนแปลง λ เหตุที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากการเพิ่ม λ ส่งผลให้ระยะเวลาในการเผาไหม้ลดน้อยลง ทำให้ไม่มีระยะเวลาเพียงพอที่เชื้อเพลิงจะถูกเผาไหม้กลายเป็น C_XH_Y ได้หมดจึงทำให้ปริมาณ C_XH_Y ที่เกิดขึ้นมีปริมาณต่ำโดยปริมาณ C_XH_Y มีค่าสูงที่สุดที่ λ เท่ากับ 0 มีค่าประมาณ 3,100 ppm คิดที่มาตรฐาน O_2 6% และ มีค่าต่ำที่สุดที่ λ เท่ากับ 0.96 มีค่าประมาณ 1500 ppm คิดที่มาตรฐาน O_2 6% ส่วนกรณีเผาไหม้ด้วยเตาเผาไหม้หมุน

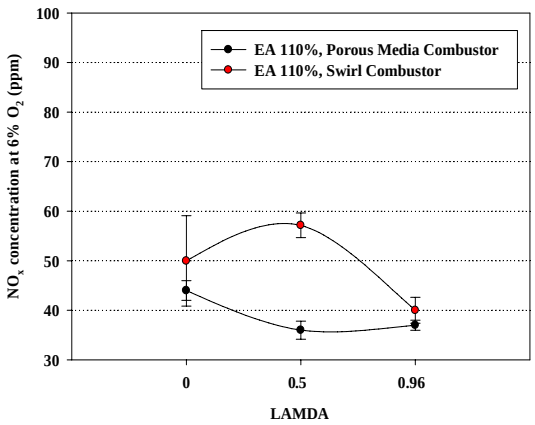
วน เมื่อทำการเพิ่ม λ จาก 0 เป็น 0.5 แล้วพบว่าปริมาณ C_XH_Y มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นประมาณ 3,000 ppm คิดที่มาตรฐาน O_2 6% เหตุที่เป็นเช่นนี้คาดว่าเนื่องมาจากเมื่อทำการเผาไหม้ที่ λ เท่ากับ 0.5 เชื้อเพลิงจะถูกเผาไหม้กลายเป็นก๊าซไฮโดรคาร์บอนตั้งแต่ที่ระดับความสูง 0 mm จากแผ่นกระจายของผสมระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศ จากนั้นเมื่อเกิดการเผาไหม้จนถึงที่บริเวณระดับความสูง 100mm อากาศเย็นจะถูกจ่ายเข้ามาในเตาเผาไหม้ เป็นเหตุให้การเผาไหม้เกิดการชะลอ จึงทำให้ C_XH_Y ไม่สามารถเผาไหม้ต่อจนกลายเป็นก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ได้ C_XH_Y จึงมีปริมาณเพิ่มขึ้น จากนั้นเมื่อทำการเพิ่ม λ เป็น 0.96 พบว่าปริมาณ C_XH_Y มีปริมาณลดลงจนเหลือประมาณ 2000 ppm คิดที่มาตรฐาน O_2 6% เหตุที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากการเพิ่ม λ ส่งผลให้เกิดการคลุกเคล้าของก๊าซไอเสีย เนื่องจากการหมุนวนในแนวตั้งดังที่ได้กล่าวมาแล้วที่มีผลให้ การเผาไหม้ดีขึ้น ทำให้ปริมาณ C_XH_Y ที่เกิดขึ้นมีปริมาณต่ำลง

4.3 ประสิทธิภาพการเผาไหม้

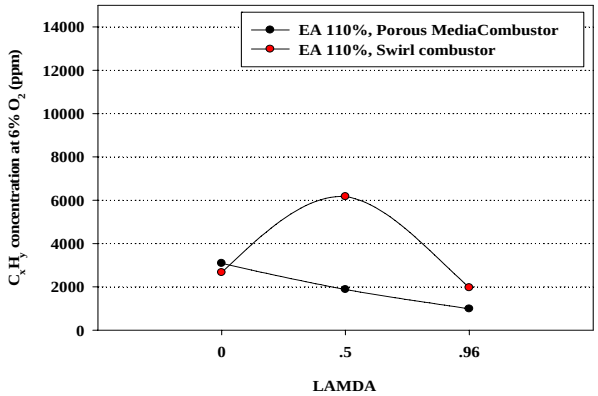
รูปที่ 8 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการเผาไหม้ระหว่างเตาเผาไหม้วัสดุพรุนกับเตาเผาไหม้แบบหมุนวน ซึ่งจะเห็นได้ว่าที่ λ เท่ากับ 0 ประสิทธิภาพการเผาไหม้ของเตาเผาไหม้แบบหมุนวนมีค่าสูงกว่าเตาเผาไหม้วัสดุพรุน โดยมีค่าเท่ากับ 91 % เนื่องจากปริมาณ C_XH_Y มีค่าต่ำ ในขณะที่เมื่อเพิ่ม λ เป็น 0.5 และ 0.96 ประสิทธิภาพการเผาไหม้ของเตาเผาไหม้วัสดุพรุนมีค่าสูงกว่าเตาเผาไหม้แบบหมุนวน เนื่องจากปริมาณ C_XH_Y และ CO ดังแสดงในรูป 6a และ 6c ที่เกิดขึ้นในกรณีเผาไหม้ด้วยเตาเผาไหม้วัสดุพรุนมีค่าน้อยกว่ากรณีเผาไหม้ด้วยเตาเผาไหม้แบบหมุนวนอย่างเห็นได้ชัด นอกจากนี้ยังพบว่าเตาทั้งสองประเภทเมื่อเพิ่ม λ เป็น 0.5 และ 0.96 ประสิทธิภาพการเผาไหม้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณ CO และ C_XH_Y โดยเมื่อเพิ่ม λ เป็น 0.5 และ 0.96 ปริมาณ C_XH_Y มีแนวโน้มลดลง ส่วนปริมาณ CO กรณีเผาไหม้ด้วยเตาเผาไหม้แบบหมุนวนปริมาณ CO มีแนวโน้มลดลง แต่ กรณีเผาไหม้ด้วยเตาเผาไหม้วัสดุพรุนปริมาณ CO มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าอิทธิพลของปริมาณ C_XH_Y ที่เกิดขึ้นส่งผลต่อประสิทธิภาพการเผาไหม้มากกว่าอิทธิพลของปริมาณ CO ดังนั้นประสิทธิภาพการเผาไหม้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามลำดับ



(a) ปริมาณความเข้มข้นของคาร์บอนมอนอกไซด์

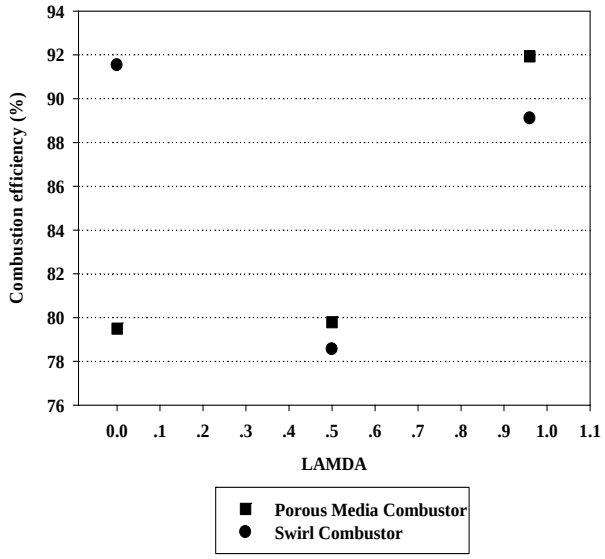


(b) ปริมาณความเข้มข้นของก๊าซไนโตรเจนออกไซด์



(c) ปริมาณความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรคาร์บอน

รูปที่ 7 แสดงการเปรียบเทียบปริมาณก๊าซไอเสียที่ได้จากการเผาไหม้ระหว่างเตาเผาไหม้วัสดุพรุนกับเตาเผาไหม้แบบหมุนวน



รูปที่ 8 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการเผาไหม้ระหว่างเตาเผาไหม้วัสดุพรุนกับเตาเผาไหม้แบบหมุนวน

5.สรุปผลการทดลอง

เมื่อทำการเผาไหม้ด้วยเตาเผาไหม้วัสดุพรุนพบว่าอุณหภูมิที่ได้จากการเผาไหม้และประสิทธิภาพการเผาไหม้มีค่ามากกว่ากรณีเผาไหม้ด้วยเตาเผาไหม้แบบหมุนวนเนื่องจากวัสดุสร้างความพรุนภายในเตาเผาไหม้วัสดุพรุนมีส่วนช่วยส่งเสริมการเผาไหม้ เช่น ทำให้อัตราการผสมเพิ่มขึ้นและยังทำให้เกิดการอุ่นของผสมบริเวณ upstream ให้มีอุณหภูมิสูงขึ้น ส่งผลให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ จึงทำให้ปริมาณ CO และ C_xH_y NO_x ที่เกิดขึ้น มีปริมาณน้อย ซึ่งถึงแม้ว่าการกระจายอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในกรณีเผาไหม้ด้วยเตาเผาไหม้แบบหมุนวนมีความคงที่มากกว่า แต่ปริมาณมลพิษที่เกิดขึ้นมีมากและเกิดเขม่าเกาะตัวกันเป็นก้อน ดังนั้นหากต้องใช้การเผาไหม้แบบกระแสหมุนวนกับระบบเซลเชื้อเพลิงแล้ว ควรต้องมีการปรับปรุงให้มีสมรรถนะดีขึ้นกว่าที่เป็นอยู่ อย่างไรก็ดี ผลการทดลองการศึกษาสมรรถนะของเตาเผาไหม้ทั้งสองประเภทที่ได้จากงานวิจัยนี้มีข้อจำกัดเฉพาะเงื่อนไขการทดสอบและลักษณะโครงสร้างของเตาเผาไหม้ในงานวิจัยนี้เท่านั้น

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (mtec) ที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัยและนักศึกษามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานครที่ช่วยให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

7. เอกสารอ้างอิง

[1] 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.

[2] Chaffin, C. 1991. Reduction of NO_x emissions using the technique of two-stage combustion within porous inert media, M.S. Thesis, August, The thermal fluid group, Dept. of Mechanical Engineering, The university of Texas, Austin

[3] Janet, L. E. and Rakesh, G. 1995, EMISSIONS OF CO AND NO FROM A TWO STAGE POROUS MEDIA BURNER, Combustion Science and Technology, Volume 107, Issue 1 - 3 , pp 81 – 91

[4] Ronald, D.B., William, C.G. and Howell, J.R. 1992, Combustion method and apparatus for staged combustion within porous matrix elements, United States Patent. US005080577A. Jun. 14

[5] Ronald, D.B., William, C.G. and Howell, J.R. 1992, Apparatus and method for combustion within porous matrix element. United States Patent. US005160254A. Nov.3.

[6] Mark, J., Hamid, A. and Thomas, D. 1995, Staged combustion in a porous-matrix surface combustor to promote ultra-low NO_x emission, United States Patent. US005476375A. Dec 19.