

เตาเผาไหม้วัสดุพูน Part 2: อิทธิพลของอากาศส่วนเกิน

Porous Media Combustor: Effect of Excess Air

อาวุธ ลภีรัตนกุล^{1*} จารุวัตร เจริญสุข²

^{1*} ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร ถ.เชื่อมสัมพันธ์ เขตหนองจอก กรุงเทพฯ 10530 โทร 0-2988-3655

E-mail: umkmitl39@hotmail.com

² ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ถ.ฉลองกรุง เขต
ลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520 โทร 0-2737-3000

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาพฤติกรรมการเผาไหม้ของก๊าซ LPG ที่เกิดขึ้นภายในวัสดุพูนในแง่ของสมรรถนะของเตาเผาไหม้ อันได้แก่ ประสิทธิภาพการเผาไหม้ (η_c) องค์ประกอบของก๊าซไอเสียที่เกิดจากการเผาไหม้และการกระจายตัวของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นภายในเตาเผาไหม้ โดยได้ทำการปรับเปลี่ยนอากาศส่วนเกินเป็น 110% 150% และ 180% ตามลำดับ ซึ่งในอากาศส่วนเกินแต่ละเงื่อนไขจะทำการปรับเปลี่ยนสัดส่วนของอากาศส่วนที่สามต่ออากาศทั้งหมด (λ) เท่ากับ 0 และ 0.96 ตามลำดับจากการทดลองพบว่าการเพิ่มปริมาณอากาศส่วนเกินจะเป็นการเพิ่มอัตราการผสม ทำให้เกิดการปลดปล่อยพลังงานความร้อนออกมาเพิ่มขึ้น เนื่องจากเม็ดวัสดุสร้างความพูนมีส่วนช่วยให้เกิดความปั่นป่วนย่อยในช่องว่างระหว่างเม็ดวัสดุ ทำให้อัตราการผสมกันระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงดีขึ้น จึงเป็นสาเหตุให้ปริมาณ C_xH_y มีปริมาณลดลง นอกจากนี้ยังเป็นการเพิ่มพจน์ของการพา ซึ่งทำให้ปฏิกิริยาขยับไปด้าน downstream แต่ถ้ามหาอากาศส่วนเกินมากเกินไปก็จะส่งผลให้อุณหภูมิที่ได้จากการเผาไหม้ลดลงเนื่องจากการเพิ่มภาระให้กับระบบ และยังส่งผลให้อัตราการเกิด Thermal NO_x และ Prompt NO_x เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังส่งผลให้ระยะเวลาในการเผาไหม้ลดลง จึงทำให้ปริมาณ CO เพิ่มขึ้น เนื่องจากไม่มีระยะเวลาในเผาไหม้เป็น CO_2

คำสำคัญ: หัวเผาวัสดุพูน / การเผาไหม้ / วัสดุพูน / อากาศส่วนเกิน

¹ Corresponding author

Abstract

This study investigated the combustion of LPG in a porous media in terms of performance, such as; combustion efficiency gas emissions and temperature distribution at different excess air from 110%, 150% to 180% for two distinctive ratios of secondary to tertiary air, λ , which are 0.0 and 0.96. The experimental results showed that by increasing the excess air, although leading to increasing in thermal loading, the increase in furnace temperature was found because of the small turbulent “eddies” mixing between the reactant and hot product at higher rate when increasing the bulk gas velocity. As a consequence, C_xH_y also decrease. Moreover, the reaction zone has moved toward the downstream location due to an increase in convection effect. On the other hand, higher amount of excess air leads to an increase in NO emission. As combustion proceeds, the point is reached where thermal load exceeds reaction enhancement as a decrease in flue gas temperature is observed with increasing excess air at the positions downstream of the combustor. The increase of CO concentrations was found because of shorter residence time less allowing the conversion of CO to CO_2 .

Keyword: Porous media burner / combustion / Porous media / Excess air

1. บทนำ

ปัญหาภาวะโลกร้อนกำลังเป็นปัญหาใหญ่ของโลกเราในปัจจุบัน สังเกตได้จากอุณหภูมิ ของโลกที่เพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆ ทำให้สภาพอากาศเปลี่ยนแปลงอย่างมากจนเกิดภัยพิบัติต่างๆ ซึ่งสาเหตุหลักของปัญหานี้เกิดมาจากมลพิษที่มนุษย์ก่อขึ้นเช่น การปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซเรือนกระจก (NO_x , CFC , CH_4 เป็นต้น) ในกิจกรรมประจำวันของมนุษย์ โดยเมื่อมลพิษดังกล่าวถูกปล่อยออกมาสู่ชั้นบรรยากาศโลก จะส่งผลให้ความร้อนจากแสงอาทิตย์ถูกกักเก็บไว้ไม่ให้คายออกไปสู่อวกาศ จึงทำให้อุณหภูมิของบรรยากาศโลกสูงขึ้น จากปัญหาดังกล่าวจึงได้มีการศึกษาวิจัยและพัฒนาเกี่ยวกับเทคโนโลยีสะอาดเพื่อลดภาวะโลกร้อนและลดมลพิษที่เกิดขึ้น โดยหนึ่งในเทคโนโลยีดังกล่าวคือเทคโนโลยีเซลล์เชื้อเพลิง ซึ่งเป็นระบบที่สามารถผลิตพลังงานได้แต่มีมลพิษต่ำ โดยปัจจุบันได้มีการพัฒนาระบบของเซลล์เชื้อเพลิงเพื่อให้สามารถผลิตพลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น ด้วยการติดตั้ง reformer เข้าไปในระบบเพื่อช่วยในการอุ่นก๊าซออกซิเจนและสังเคราะห์ก๊าซไฮโดรเจนก่อนเข้าทำปฏิกิริยา ซึ่งแหล่งพลังงานความร้อนที่ป้อนให้กับ reformer ได้มาจากการติดตั้งเตาเผาไหม้เพิ่มเข้าไปในระบบ โดยเตาเผาไหม้ที่ติดตั้งในระบบควรเป็นเตาเผาไหม้ที่มีการกระจายอุณหภูมิในเตามีความสม่ำเสมอ เกิดขึ้นในบริเวณที่กว้างและมีมลพิษต่ำ ซึ่งเตาเผาไหม้วัสดุพูนแบบหลายชั้น เป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่สามารถนำมาติดตั้งเข้ากับระบบของเซลล์เชื้อเพลิง เนื่องจากการเผาไหม้ที่เสถียรเกิดขึ้นในบริเวณที่กว้างและสามารถควบคุมอุณหภูมิสูงสุดที่เกิดขึ้นได้ ส่งผลให้อัตราการเกิด Thermal NO_x มีปริมาณลดลง [1] โดยได้มีการศึกษาค้นคว้าและพัฒนาเกี่ยวกับเตาเผาไหม้วัสดุพูนที่มีการจ่ายของผสมระหว่างอากาศและเชื้อเพลิงเป็นชั้น [2,3,4,5] พบว่าสามารถควบคุมอุณหภูมิสูงสุดที่เกิดขึ้นได้ ส่งผลให้อัตราการเกิด Thermal NO_x มีปริมาณลดลง นอกจากงานวิจัย ยังได้มีการวิจัยเกี่ยวกับการเผาไหม้ภายในเตาเผาไหม้วัสดุพูนที่มีการจ่ายอากาศเป็นชั้น [6] พบว่าปริมาณ NO_x ที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ภายในเตาเผาไหม้วัสดุพูนแบบสองชั้นมีค่าต่ำประมาณ 10 vppm นอกจากนี้อีกเหตุผลหนึ่งที่ทำให้ปริมาณ NO_x ที่เกิดจากการเผาไหม้มีค่าต่ำคือ วัสดุพูนที่อยู่ภายในเตาเผาไหม้มีส่วนช่วยทำให้เกิดการไหลแบบปั่นป่วนภายในเตาเผาไหม้ทั้งบริเวณห้องเผาไหม้ในส่วนแรกและส่วนที่สอง จึงทำให้เกิดการผสมเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogenous mixing) ระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศ ส่งผลให้เกิดการเผาไหม้ที่เป็นเนื้อเดียวกัน ทำให้เป็นการลดอุณหภูมิการเผาไหม้สูงสุดที่เกิดขึ้น

จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าได้มีการวิจัยเกี่ยวกับเตาเผาไหม้วัสดุพูนแบบหลายชั้นกันอย่างแพร่หลาย แต่ทั้งนี้จะเห็นได้ว่างานวิจัยส่วนใหญ่กล่าวถึงเฉพาะผลของการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนผสมในแต่ละชั้นที่มีผลต่อมลพิษ (CO และ NO_x) และอุณหภูมิสูงสุดที่เกิดขึ้น โดยไม่ได้กล่าวถึงสมรรถนะในด้านอื่น เช่นการกระจายตัวของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นภายในเตาเผาไหม้ ซึ่งดัชนีนี้จะเป็นตัวที่บ่งบอกถึงบริเวณของการเผาไหม้ที่เกิดขึ้น รวมถึงประสิทธิภาพการเผาไหม้และปริมาณ C_xH_y ที่เกิดขึ้น ซึ่งสมรรถนะดังกล่าวเป็นดัชนีที่จำเป็นต้องศึกษาเพื่อที่จะนำเตาเผาไหม้วัสดุพูนที่มีการจ่ายอากาศเป็นชั้นมา

ประยุกต์ใช้ติดตั้งเข้ากับระบบของเซลล์เชื้อเพลิงเพื่อใช้เป็นแหล่งพลังงานความร้อนในการอุ่นอากาศและไฮโดรเจนก่อนเข้าทำปฏิกิริยาภายในเซลล์เชื้อเพลิง ดังนั้นวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือทำการศึกษาพฤติกรรมการเผาไหม้ของก๊าซ LPG ที่เกิดขึ้นภายในเตาเผาไหม้แบบวัสดุพูนที่มีการจ่ายอากาศเป็นชั้น ในแง่ของสมรรถนะความร้อนอันได้แก่ประสิทธิภาพการเผาไหม้ (η_c) การกระจายอุณหภูมิและปริมาณมลพิษที่เกิดขึ้น (CO , C_xH_y และ NO_x) โดยในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของอากาศส่วนเกินที่มีผลต่อสมรรถนะของเตาเผาไหม้

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 แสดงชุดทดสอบพฤติกรรมการเผาไหม้และสมรรถนะของเตาเผาไหม้วัสดุพูนที่มีการจ่ายอากาศเป็นชั้นโดยใช้แอลพีจีเป็นเชื้อเพลิง โดยเตาเผาไหม้วัสดุพูนนี้ถูกสร้างขึ้น ให้มีการเผาไหม้แบบผสมก่อน (premixed) โดยการทดสอบจะแบ่งอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ออกเป็นสามส่วน โดยอากาศส่วนที่หนึ่งจะถูกจ่ายเพื่อผสมกับเชื้อเพลิงก่อนป้อนเข้าสู่เตาเผาไหม้ อากาศส่วนที่สองจะถูกป้อนเข้าเตาเผาไหม้ที่ระดับความสูง 0 mm. จากตะแกรงกระจายเชื้อเพลิง และอากาศส่วนสามจะถูกป้อนเข้าเตาเผาไหม้ที่ระดับความสูง 100 mm. จากตะแกรงกระจายเชื้อเพลิง นอกจากนี้ยังทำการติดตั้งระบบจุดระเบิดที่ระดับความสูง 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 นอกจากนี้เมื่ออุณหภูมิเข้าสู่สภาวะคงตัวทั่วทั้งก๊าซไอเสียโดยใช้เครื่องวัดก๊าซที่บริเวณท่อทางออกที่ระดับความสูง 300 mm จากแผ่นกระจายของผสมระหว่างเชื้อเพลิงและอากาศ ซึ่งก๊าซไอเสียที่ทำการเก็บผลได้แก่ O_2 , CO_2 , CO , NO_x และ C_xH_y เพื่อนำไปใช้ในการหาค่าประสิทธิภาพการเผาไหม้ (η_c)

ในการหาสมรรถนะของเตาเผาไหม้จะนำค่าประสิทธิภาพการเผาไหม้ (η_c) มาเป็นดัชนีในการชี้วัดสมรรถนะของหัวเผา โดยสามารถคำนวณได้จาก

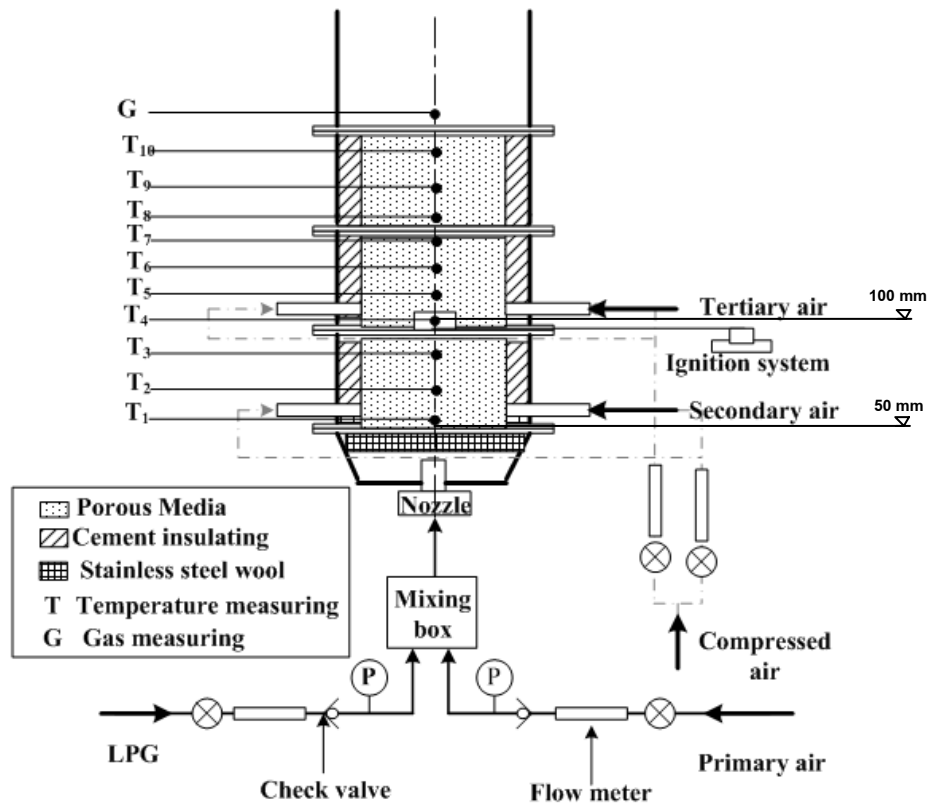
- ประสิทธิภาพการเผาไหม้ของเตาเผาไหม้นิยามได้ด้วยสมการดังนี้

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

Q_{fuel} คือ ความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้เชื้อเพลิง

$Q_{loss,HC}$ คือ ปริมาณความร้อนที่สูญเสียจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ของไฮโดรคาร์บอน

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



รูปที่ 1 แสดงชุดทดสอบพฤติกรรมเผาไหม้และสมรรถนะของเตาเผาไหม้วัสดุพอร์ซเลนที่มีการจ่ายอากาศเป็นชั้น

ตารางที่ 1 ตารางแสดงเงื่อนไขการทดลอง

Energy input (kw)	%EA	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	0.00	4	106	0	3.63	96.37	0
		0.96	4	0.00	106	3.63	0.00	96
	150	0.00	4	106	0	3.63	96.37	0
		0.96	4	0.00	106	3.63	0.00	96
	180	0.00	4	106	0	3.63	96.37	0
		0.96	4	0.00	106	3.63	0.00	96

4. ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในหัวเผาวัสดุพรุน

รูปที่ 2 แสดงแสดงอิทธิพลของอากาศส่วนเกินที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตามระดับความสูงโดยในการทดลองได้ทำการปรับเปลี่ยนอากาศส่วนเกินเป็น 110% 150% และ 180% ตามลำดับ ซึ่งในอากาศส่วนเกินแต่ละเงื่อนไขจะทำการปรับเปลี่ยน สัดส่วนของอากาศส่วนที่สามต่ออากาศทั้งหมด (λ) เท่ากับ 0 และ 0.96 ตามลำดับ ซึ่งเมื่อทำการเผาไหม้ที่ $\lambda = 0$ พบว่า กรณีอากาศส่วนเกิน 150% และ 180% มีช่วง reaction zone ชยับลึกไปทาง downstream มากกว่ากรณีอากาศส่วนเกินเท่ากับ 110% ซึ่งถือว่าอากาศส่วนเกินเท่ากับ 110% เป็นกรณีที่มีช่วงการเผาไหม้ที่ยาว (Long flame temperature) แต่มีอุณหภูมิการเผาไหม้ต่ำที่สุดมีค่าประมาณ 1100°C ในขณะที่กรณีอากาศส่วนเกิน 150% อุณหภูมิการเผาไหม้มีค่าต่ำในช่วงระดับความสูง 0-100 mm จากแผนกระจายของผลระหว่างอากาศและเชื้อเพลิง จากนั้นอุณหภูมิการเผาไหม้มีค่าสูงขึ้นจนมีค่าอุณหภูมิสูงที่สุดในช่วงตั้งแต่ระดับความสูง 100mm เป็นต้นไป โดยมีค่าอุณหภูมิสูงที่สุดเท่ากับ 1250°C ส่วนกรณีอากาศส่วนเกิน 180 % พบว่ามีค่าอุณหภูมิการเผาไหม้สูงในช่วงระดับความสูง 0-100 mm จากแผนกระจายของผลระหว่างอากาศและเชื้อเพลิง จากนั้นอุณหภูมิการเผาไหม้จะมีค่าลดลง โดยมีค่าประมาณ 1180°C

แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตลอดความสูงของเตาเผาไหม้ อันเกิดจากการปรับเปลี่ยนปริมาณอากาศส่วนเกินดังกล่าว เมื่อนำมาพิจารณาพร้อมกับทฤษฎีการไหลแบบปั่นป่วนที่ความเร็วของการหมุนวน (Eddy velocity) แปรตามความเร็วเฉลี่ยของระบบ ก็จะพบว่ามีความน่าสนใจที่จะนำทฤษฎีนี้มาใช้อธิบาย กล่าวคือเมื่อทำการเพิ่มปริมาณอากาศส่วนเกิน จะส่งผลให้ความเร็วของการหมุนวน (Eddy velocity) ที่เกิดขึ้นที่บริเวณด้านหลังของเม็ดอนุภาคนั้น มีค่าเพิ่มมากขึ้น จึงทำให้อัตราการผสม (Mixing rate) กันระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศและก๊าซไอเสียที่มีอุณหภูมิสูงมีค่าสูงขึ้น นอกจากนี้การเพิ่มปริมาณอากาศส่วนเกินยังส่งผลให้พจน์ของการพา (Convection term) มีค่าเพิ่มมากขึ้นอีกด้วย ปัจจัยทั้งสองนี้ส่งผลต่อการกระจายอุณหภูมิต่างกัน กล่าวคืออัตราการผสมจะสัมพันธ์กับอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่ปลดปล่อยความร้อน ณ บริเวณนั้นๆ แต่การพาจะเลื่อนบริเวณของการทำปฏิกิริยาขึ้นด้านบนให้มีระยะห่างจากฐานเตาออกไป ดังนั้นเมื่อพิจารณารูปที่ 2 พบว่า ในช่วงระดับความสูง 0-100 mm จากแผนกระจายของผลระหว่างอากาศและเชื้อเพลิง อัตราการผสม (Mixing rate) มีอิทธิพลต่อเงื่อนไขอากาศส่วนเกิน 180% มากกว่า กรณีอากาศส่วนเกิน 150% จึงทำให้อุณหภูมิการเผาไหม้มีค่าสูงกว่ากรณีอากาศส่วนเกิน 150% จากนั้นในช่วงตั้งแต่ระดับความสูง 100mm เป็นต้นไป พบว่าพจน์ของการพา (Convection term) มีอิทธิพลต่อทั้งอากาศส่วนเกิน 180% และ 150% แต่เนื่องจากกรณีอากาศส่วนเกิน 180% มีปริมาณอากาศมาก ซึ่งเป็นการเพิ่มภาระให้กับปริมาณความร้อนที่ผลิตได้ จึงทำให้อุณหภูมิมีค่าลดลงมากกว่ากรณี 150% ส่วนในกรณีอากาศส่วนเกิน 110% มีอัตราการไหลของอากาศน้อยกว่ากรณีอื่น ซึ่งอัตราการผสม (Mixing rate) และพจน์ของการพา (Convection term) มีค่าต่ำกว่า จึงทำให้อุณหภูมิ

ในการเผาไหม้มีค่าต่ำที่สุด และอัตราการเพิ่มอุณหภูมิในช่วงต้น 50 mm แรก สูงสุด

เมื่อทำการเผาไหม้ที่ $\lambda = 0.96$ พบว่า ทุกเงื่อนไขการทดลองอุณหภูมิที่ได้จากการเผาไหม้มีมีค่าต่ำกว่าที่ $\lambda = 0$ โดยมีค่าค่อนข้างคงที่ตั้งแต่ระดับความสูง 100mm เป็นต้นไป เนื่องจากเป็นบริเวณที่เริ่มมีการจ่ายอากาศส่วนที่สอง ซึ่งกรณีอากาศส่วนเกิน 110% อุณหภูมิการเผาไหม้มีค่าสูงที่สุดเท่ากับ 980°C รองลงมาคือกรณีอากาศส่วนเกิน 150 % อุณหภูมิมีค่าประมาณ 650°C ส่วน กรณีอากาศส่วนเกิน 180 % อุณหภูมิมีค่าประมาณ 620°C เหตุที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากช่วงของการเผาไหม้มีช่วงสั้น ทำให้ระยะเวลาในการเผาไหม้ (Residence time) มีค่าต่ำกว่ากรณีที่ไม่มีการแบ่งจ่ายอากาศ ซึ่งหมายถึงการผสมในช่วง 100mm แรกมีค่าสูงกว่า 800°C มีความสำคัญมากในการรักษาระดับอุณหภูมิที่สูงในช่วงที่เหลือน้อยของเตา เพราะในกรณีที่จ่ายอากาศที่ 110% $\lambda = 0.96$ นั้นถึงแม้จะมีการจ่ายอากาศที่ตำแหน่ง 100 mm ก็ไม่ทำให้อุณหภูมิของเตาตกลง แต่กลับมีค่าสูงขึ้นนั้นหมายถึงการผสมกันของแก๊สร้อนที่มีเชื้อเพลิงผสมอยู่กับอากาศที่เข้ามาใหม่นั้นเกิดการเผาไหม้ได้อย่างต่อเนื่อง แต่ในกรณีที่มีการจ่ายอากาศที่ 150% และ 180% นั้น การฉีดอากาศในช่วงที่ 2 ไม่ทำให้อุณหภูมิสูงขึ้นมากนัก และอุณหภูมิมีค่าลดลงที่ระยะห่างออกไป โดยในกรณีดังกล่าว อัตราการผสมส่งผลน้อยเนื่องจากแก๊สไอเสียไม่ร้อนพอที่จะทำให้อัตราการจุดติดของส่วนผสมเชื้อเพลิงและอากาศไม่สูงพอที่จะเพิ่มอุณหภูมิได้ และเมื่อไม่ทำปฏิกิริยา อากาศก็กลายเป็นภาระของการทำความร้อน ทำให้ระดับอุณหภูมิกรณีอากาศส่วนเกิน 180% มีอุณหภูมิต่ำกว่า กรณี 150% จึงทำให้เมื่อเพิ่มปริมาณอากาศส่วนเกินแล้วทำอุณหภูมิการเผาไหม้มีค่าต่ำลงตามลำดับ

เมื่อทำการพิจารณาผลของการเพิ่ม λ จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิที่ได้จากการเผาไหม้มีแนวโน้มลดลงในทุกเงื่อนไขของอากาศส่วนเกิน คาดว่าเนื่องมาจากการเพิ่ม λ ซึ่งเป็นการจ่ายเฉพาะอากาศส่วนที่สามและไม่จ่ายอากาศส่วนที่สอง จะทำให้การเผาไหม้เกิดขึ้นช้าลงและทำให้ระยะเวลาเฉลี่ยในการเผาไหม้ภายในเตาเผาไหม้ลดน้อยลง อีกเหตุผลหนึ่งการเพิ่ม λ คือการจ่ายอากาศเย็นเข้าเตาเผาไหม้ที่ระดับความสูง 100mm จากแผนกระจายการกระจายอากาศและเชื้อเพลิง ซึ่งมีผลทำให้เกิดการสูญเสียความร้อนที่ผลิตได้ให้กับอากาศเย็นที่ฉีดเข้าเตาเผาไหม้

ตารางที่ 2 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิที่ได้จากการเผาไหม้สูงสุดที่ได้จากการทดลองกับอุณหภูมิอะเดียแบติกที่ได้จากการคำนวณ ซึ่งพบว่าอุณหภูมิที่ได้จากการเผาไหม้ในกรณีอากาศส่วนเกินเท่ากับ 150% และ 180% มีค่าสูงกว่าอุณหภูมิอะเดียแบติก เนื่องจากวัสดุพรุนที่ใส่เข้าไปในเตาเผาไหม้นั้นมีส่วนช่วยให้อุณหภูมิการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นมีความเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogenization of temperature) ตลอดหน้าตัดของ porous matrix จึงทำให้ความร้อนส่วนหนึ่งถูกป้อนกลับ (Heat recirculation) มาสู่ของผสมระหว่างอากาศและเชื้อเพลิงที่อยู่บริเวณ Upstream ทำให้มีอุณหภูมิสูงขึ้น ดังนั้นจึงทำให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ยิ่งขึ้น ซึ่งพฤติกรรมเช่นนี้ถูกเรียกว่าในหมู่นักวิจัยว่า excess enthalpies หรือ super adiabatic flame temperature [7] ส่วนกรณีอากาศส่วนเกินเท่ากับ 110% พบว่าอุณหภูมิสูงสุดที่ได้จากการเผาไหม้

มีค่าน้อยกว่าอุณหภูมิอะเดียแบติก คาดว่าเกิดจากการที่เกิดการปลดปล่อยพลังงานภายในออกมาสู่ระบบน้อย เนื่องจากพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน (Dissipation of turbulent kinetic energy) มีค่าต่ำกว่ากรณีอื่น

ตารางที่ 2 แสดง การเปรียบเทียบอุณหภูมิสูงสุดที่ได้จากการเผาไหม้ที่ได้กับอุณหภูมิอะเดียแบติกที่ได้จากการคำนวณ

Excess Air (%)	Peak Flame Temperature (°C)	Adiabatic Flame Temperature (°C)
110	1,100	1,211
150	1,250	1,046
180	1,180	952

4.2 ปริมาณก๊าซไอเสียที่เกิดจากการเผาไหม้

รูปที่ 3 แสดงอิทธิพลของอากาศส่วนเกินที่มีผลต่อปริมาณก๊าซไอเสียที่ได้จากการเผาไหม้ ซึ่งจะเห็นได้ว่าอากาศส่วนเกินมีอิทธิพลต่อปริมาณก๊าซไอเสียที่เกิดขึ้น โดยเมื่อพิจารณารูปที่ 3a พบว่าทั้งกรณี λ เท่ากับ 0 และ 0.96 ความเข้มข้นของคาร์บอนมอนอกไซด์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มปริมาณอากาศส่วนเกิน โดยเมื่อพิจารณากรณี λ เท่ากับ 0 พบว่าปริมาณ CO มีค่าต่ำที่สุดที่ปริมาณอากาศส่วนเกิน 110% โดยมีค่าเท่ากับ 11 ppm คิดที่มาตรฐาน O_2 6% คาดว่าเนื่องจากเงื่อนไขนี้เป็นการเผาไหม้ที่มีช่วงของการเผาไหม้กว้างที่สุด (Long flame temperature) ดังแสดงในรูปที่ 2 จึงทำให้มีระยะเวลาเพียงพอที่ CO จะถูกเผาไหม้กลายเป็น CO_2 เป็นสาเหตุให้ปริมาณ CO มีค่าต่ำ จากนั้นเมื่อเพิ่มปริมาณอากาศส่วนเกินเป็น 150% และ 180% ปริมาณ CO มีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มปริมาณอากาศส่วนเกินส่งผลให้ระยะเวลาในการเผาไหม้มีค่าลดลง โดยเฉพาะกรณีอากาศส่วนเกินเท่ากับ 180% มีผลของปริมาณอากาศ ซึ่งมีปริมาณมากเกินไป จึงทำให้เป็นการเพิ่มภาระให้กับปริมาณความร้อนที่ผลิตได้ ทำให้อุณหภูมิมีค่าลดลง จึงเป็นอีกเหตุผลหนึ่งที่ทำให้ปริมาณ CO มีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนกรณี λ เท่ากับ 0.96 พบว่าปริมาณ CO ค่าสูงมากเมื่อเทียบกับกรณี λ เท่ากับ 0 คาดว่าเนื่องมาจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ มีระยะเวลาในการเผาไหม้สั้นมาก ได้อุณหภูมิการเผาไหม้มีค่าต่ำ จึงทำให้ปริมาณ CO มีค่าสูงขึ้นตามลำดับ โดยมีค่าสูงที่สุดเท่ากับ 3200 ppm คิดที่มาตรฐาน O_2 6% ที่ปริมาณอากาศส่วนเกิน 180% λ เท่ากับ 0.96

ในขณะที่ ปริมาณความเข้มข้นของก๊าซไนโตรเจนออกไซด์รูปที่ 3b เมื่อพิจารณาที่กรณี λ เท่ากับ 0 พบว่า ปริมาณ NO_x มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มปริมาณอากาศส่วนเกินโดยคาดว่าปริมาณ NO_x ที่เกิดขึ้น เกิดมาจาก NO_x สองชนิดคือ Thermal NO_x (เนื่องจากอุณหภูมิที่ได้จากการเผาไหม้มีค่าสูง) และ Prompt NO_x ซึ่งเมื่อเพิ่มปริมาณอากาศส่วนเกิน ส่งผลให้อุณหภูมิที่ได้จากการเผาไหม้จะมีค่าสูงขึ้นและปริมาณก๊าซไนโตรเจนในอากาศมีปริมาณสูงขึ้น จึงทำ

ให้ออกาสที่จะเกิด NO_x ทั้งสองชนิดนี้มีมากขึ้น จึงเป็นสาเหตุให้ปริมาณ NO_x มีปริมาณสูงขึ้น ซึ่งกรณีปริมาณอากาศส่วนเกินเท่ากับ 180% มีปริมาณ NO_x มากที่สุดเท่ากับ 65 ppm ที่มาตรฐาน O_2 6% และมีปริมาณน้อยที่สุดเท่ากับ 43 ppm ที่มาตรฐาน O_2 6% ที่ปริมาณอากาศส่วนเกินเท่ากับ 110% ตามลำดับ ส่วนกรณี λ เท่ากับ 0.96 พบว่า ปริมาณ NO_x มีแนวโน้มลดลงตามการเพิ่มปริมาณอากาศส่วนเกิน เนื่องจากการเพิ่มปริมาณอากาศส่วนเกินจะส่งผลให้ อุณหภูมิที่ได้จากการเผาไหม้มีค่าต่ำลงพิจารณาจากรูปที่ 2 ทำให้ออกาสเกิด Thermal NO_x มีน้อยลง โดยมีปริมาณน้อยสุดเท่ากับ 33 ppm ที่มาตรฐาน O_2 6% ที่ปริมาณอากาศส่วนเกินเท่ากับ 180% นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบปริมาณ NO_x ระหว่างกรณี λ เท่ากับ 0 และ 0.96 พบว่ากรณี λ เท่ากับ 0.96 ปริมาณ NO_x มีปริมาณน้อยกว่าเนื่องมาจากอุณหภูมิที่ได้จากการเผาไหม้มีค่าต่ำ ทำให้อิทธิพลของ Thermal NO_x ลดน้อยลง

ส่วนปริมาณความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรคาร์บอน รูปที่ 3c เมื่อพิจารณาที่กรณี λ เท่ากับ 0 พบว่า ปริมาณ C_xH_y มีแนวโน้มลดลงตามการเพิ่มปริมาณอากาศส่วนเกิน โดยเมื่อเพิ่มปริมาณอากาศส่วนเกินจาก 110 % เป็น 150% ปริมาณ C_xH_y มีค่าลดลงประมาณ 4400 ppm คาดว่าเกิดจากการเผาไหม้ที่สมบูรณ์มากขึ้น ได้อุณหภูมิของการเผาไหม้มีค่าสูงขึ้นตามปริมาณอากาศส่วนเกินที่เพิ่มขึ้น จากนั้นเมื่อทำการเพิ่มปริมาณอากาศส่วนเกินเป็น 180% พบว่า ปริมาณ C_xH_y มีปริมาณลดลงจนเหลือประมาณ 64 ppm ที่มาตรฐาน O_2 6% ซึ่งเกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงไม่หมดทำให้เกิดการผลิตก๊าซไฮโดรคาร์บอนออกมาเพียงบางส่วน ในขณะที่กรณี λ เท่ากับ 0.96 ปริมาณ C_xH_y มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มปริมาณอากาศส่วนเกิน เนื่องจากการเพิ่มปริมาณอากาศส่วนเกินส่งผลให้ มีระยะเวลาในการเผาไหม้สั้นลง อัตราการจุดติดต่ำโดยเฉพาะในกรณี อากาศส่วนเกิน 150% และ 180% ดังที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 6.2.1 ก่อนหน้านี้ ซึ่งเกิดการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ อุณหภูมิที่ได้จากการเผาไหม้มีค่าต่ำดังแสดงในรูปที่ 2 โดยปริมาณ C_xH_y มีค่าสูงสุดที่ ปริมาณอากาศส่วนเกิน 180% มีค่าประมาณ 10,250 ppm ที่มาตรฐาน O_2 6% และมีค่าน้อยที่สุดที่ปริมาณอากาศส่วนเกิน 110% มีค่าประมาณ 1100 ppm ที่มาตรฐาน O_2 6%

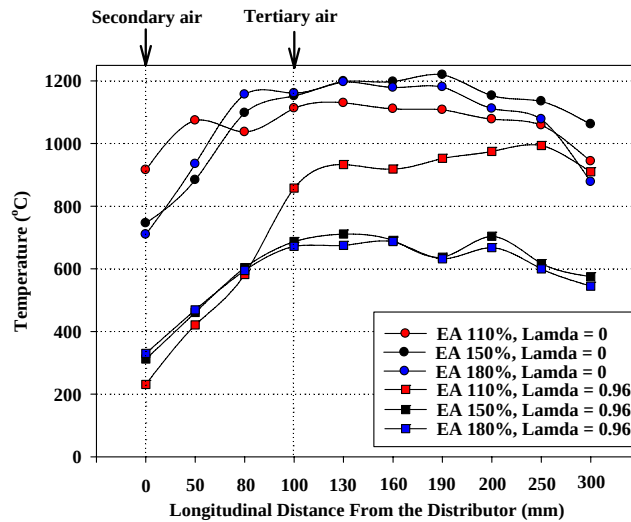
4.3 ประสิทธิภาพการเผาไหม้

รูปที่ 4 แสดงอิทธิพลของอากาศส่วนเกินที่มีผลต่อประสิทธิภาพการเผาไหม้ ซึ่งจากรูปจะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มปริมาณอากาศส่วนเกินในกรณี λ เท่ากับ 0 ประสิทธิภาพการเผาไหม้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยประสิทธิภาพการเผาไหม้มีค่าสูงที่สุดเท่ากับ 99% ที่อากาศส่วนเกินเท่ากับ 180% ขณะที่ในกรณี λ เท่ากับ 0.96 ประสิทธิภาพการเผาไหม้มีแนวโน้มลดลง โดยประสิทธิภาพการเผาไหม้มีค่าสูงที่สุดเท่ากับ 91% ที่ อากาศส่วนเกินเท่ากับ 110%

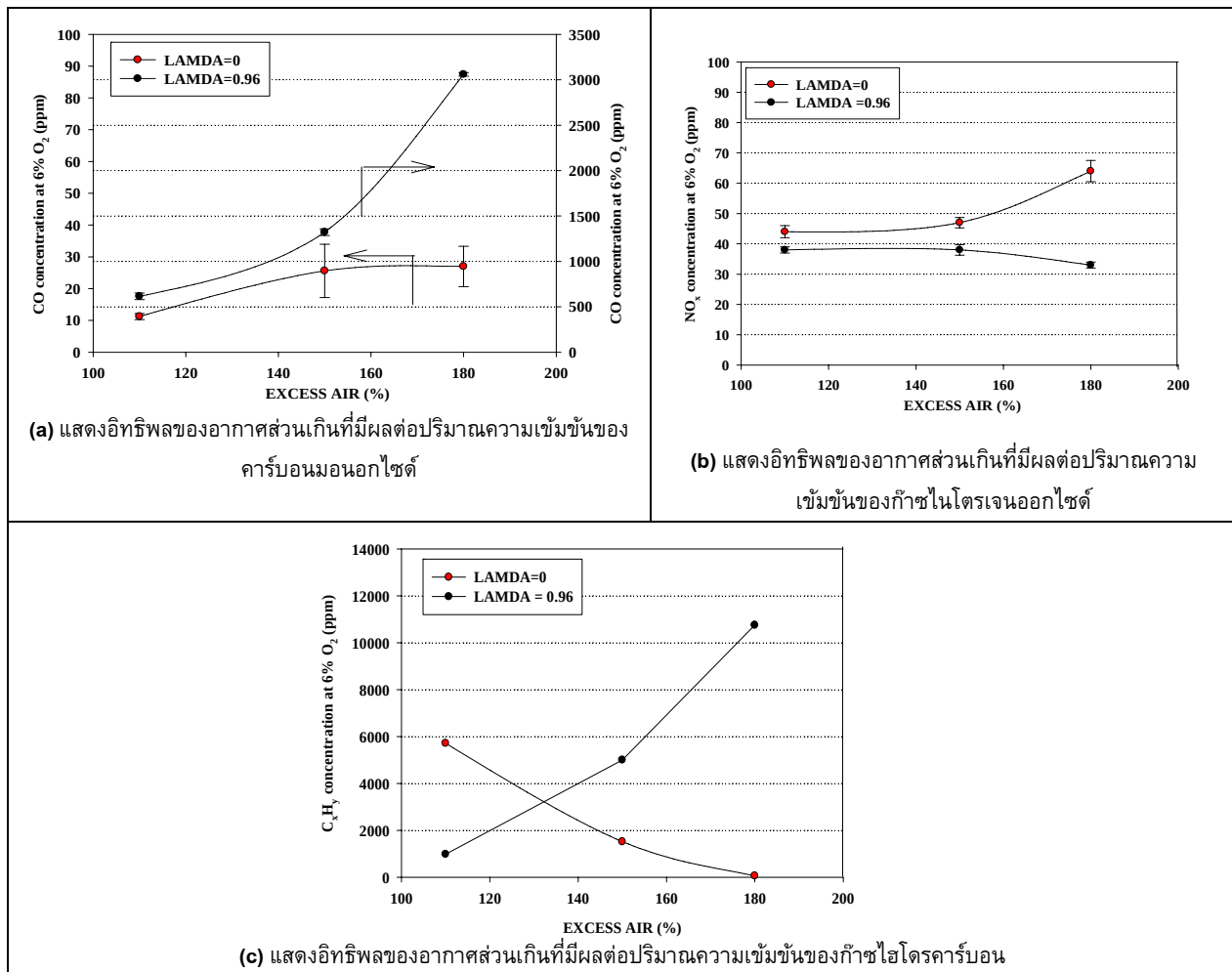
เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของประสิทธิภาพการเผาไหม้พบว่า สอดคล้องกับปริมาณ CO และ C_xH_y ดังแสดงในรูปที่ 3a และ 3c ซึ่งในกรณี λ เท่ากับ 0 ปริมาณ C_xH_y มีแนวโน้มลดลง ในขณะที่ปริมาณ CO มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น นั้นแสดงให้เห็นว่าอิทธิพลของปริมาณ

C_xH_y ส่งผลมากกว่าอิทธิพลของ ปริมาณ CO จึงทำให้ประสิทธิภาพ การเผาไหม้มีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนในกรณี λ เท่ากับ 0.96 ทั้งปริมาณ C_xH_y และ CO มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น จึงส่งผลให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้

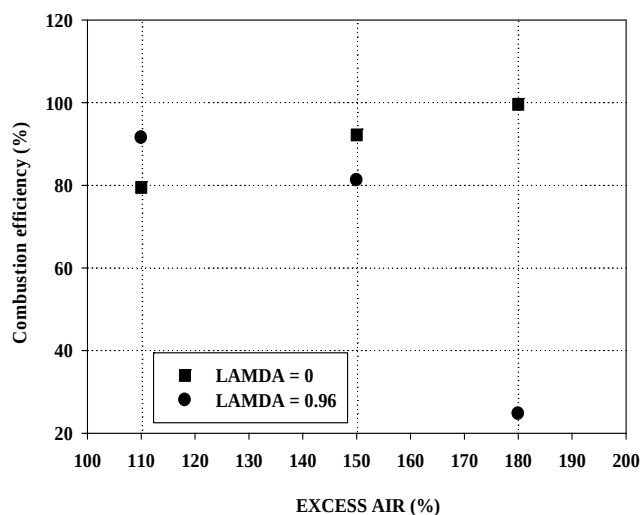
มีค่าลดลง ซึ่งสาเหตุในการเปลี่ยนแปลงแนวโน้มของปริมาณ CO และ C_xH_y นั้นได้กล่าวไว้แล้วในหัวข้อที่ 4.2



รูปที่ 2 แสดงอิทธิพลของอากาศส่วนเกินที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตามระดับความสูง



รูปที่ 3 แสดงปริมาณก๊าซไอเสียที่เกิดขึ้น



รูปที่ 4 แสดงอิทธิพลของอากาศส่วนเกินที่มีผลต่อประสิทธิภาพการเผาไหม้

5.สรุปผลการทดลอง

การเพิ่มปริมาณอากาศส่วนเกินจะเป็นการเพิ่มอัตราการผสม ทำให้เกิดการปลดปล่อยพลังงานความร้อนออกมามากขึ้น เนื่องจากเม็ดวัสดุสร้างความพ่นมีส่วนช่วยให้เกิดความปั่นป่วนน้อยๆ ในช่องว่างระหว่างเม็ดวัสดุ ทำให้อัตราการผสมกันระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงดีขึ้น จึงเป็นสาเหตุให้ปริมาณ C_xH_y มีปริมาณลดลง นอกจากนี้ยังเป็นการเพิ่มพจน์ของการพา ซึ่งทำให้ปฏิกิริยาขยับไปด้าน downstream แต่ถ้าปริมาณอากาศส่วนเกินมากเกินไปก็จะส่งผลให้อุณหภูมิที่ได้จากการเผาไหม้ลดลงเนื่องจากการเพิ่มภาระให้กับระบบ และยังส่งผลให้อัตราการเกิด Thermal NO_x และ Prompt NO_x เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังส่งผลให้ระยะเวลาในการเผาไหม้ลดลง จึงทำให้ปริมาณ CO เพิ่มขึ้น เนื่องจากไม่มีระยะเวลาในเผาไหม้เป็น CO_2

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.
- [7] Tekeno, T., Sato, K. and Hase, K, 1981. A theoretical study on an excess enthalpy flame, Eighteenth International Symposium on combustion. The combustion institute. Waterloo. pp 465-472, 17-22 August. Canada