

การศึกษาเชิงทดลองอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนประสิทธิภาพสูง Experimental Research of High Efficiency Heat Exchanger

ชานนท์ ชื่นจิตร์ สำเร็จ จักรใจ

ห้องปฏิบัติการวิจัยเครื่องยนต์และการเผาไหม้

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

91 ถ.ปราชูทิศ(สุขสวัสดิ์ 48) แขวงบางมด เขตทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140

โทร (662)470-9111 โทรสาร (662)470-9111 E-Mail: isumgjai@cc.kmutt.ac.th

Chanon Chuenchit, Sumrerng Jugjai

Combustion and Engine Research Laboratory (CERL)

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi

91 Prachauthit Road (Suksawad 48) Bangmod, Thung Khru District, Bangkok 10140

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสู่อากาศ โดยอาศัยเทคนิคการเผาไหม้แบบ multiphase combustion ของเชื้อเพลิงแก๊สในวัสดุพรุน (porous medium) ทนความร้อนที่มีช่องอากาศไหลรับความร้อนอยู่รอบนอกของผนังห้องเผาไหม้และไหลผ่านแผ่น porous medium ทรงกระบอกซึ่งห่อหุ้มผนังห้องเผาไหม้อีกชั้นหนึ่ง ในการศึกษาจะใช้เทคนิคการสลับทิศทางการไหลของไอติดอย่างเป็นจังหวะแทนการไหลแบบทางเดียว เพราะความเร็วของไอที่เข้าสู่ห้องเผาไหม้แบบไหลทางเดียวนั้นมีค่าจำกัด ถ้าใช้ความเร็วสูงเกินไปจะเกิดการเป่าดับ (blow off) ของเปลวไฟ และไม่สามารถที่จะเผาเชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนต่ำๆได้ ทำให้มีประสิทธิภาพการเผาไหม้และการถ่ายเทความร้อนมีค่าต่ำ ในการศึกษาได้ทำการออกแบบและสร้างอุปกรณ์ทดลองเพื่อที่จะศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่าง ๆ เช่นความเร็วการไหลของไอดี เวลาที่ใช้ในการสลับทิศทางการไหลของไอติดอย่างเป็นจังหวะ ค่า equivalence ratio ค่าความหนาเชิงแสง (optical thickness) ของวัสดุพรุน เป็นต้น ซึ่งส่งผลต่อโครงสร้างความร้อนภายในของวัสดุพรุน และค่า net radiative heat flux ที่ถ่ายเทสู่อากาศ จากเทคนิคการเผาไหม้ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว ได้สมรรถนะการถ่ายเท

ความร้อนที่สูงกว่ากรณีการเผาไหม้แบบไหลทางเดียวซึ่งจะนำไปสู่การออกแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนประสิทธิภาพสูงเพื่อประหยัดพลังงานในอุตสาหกรรมต่อไปในอนาคตได้

Abstract

This paper presents a study of heat transfer enhancement to a cooling air by using multiphase combustion technique in a porous medium. This can be done by using a cyclic flow reversal combustion (CFRC) technique in a porous medium instead of the one way flow combustion (OWFC). Since the OWFC has a problem concerning a narrow operating range, which has not been solved yet. If supply velocity is higher than a limited value the flame blow off occurs. The cooling air is heated by the cylindrical porous medium that covers the hot combustion wall. Experimental apparatus is designed and built for studying effects of varies parameter, i.e. flow velocity, half-period, equivalence ratio and optical thickness on the formation of temperature profile in the porous body and net

radiative heat flux that transferred to the cooling air. The CFRC technique yielded a better heat transfer performance than the OWFC. This will help to design the high efficient heat exchanger for industry in the future.

1. NOMENCLATURE

- Q_L = heat supply [kW]
 C_p = (air) specific heat at constant pressure [J kg⁻¹ K⁻¹]
 Q_a = heat transfer to air [kW]
 $T_{a,in}$ = air temperature at entrance of heat exchanger [°C]
 $T_{a,out}$ = air temperature at exit of heat exchanger [°C]
 T_d = downstream temperature [°C]
 T_u = upstream temperature [°C]
 $T_{m,in}$ = inlet mixture temperature [°C]
 T_{ex} = exhaust temperature [°C]
 t_{hp} = half-period [s]
 u = (gas) velocity [m s⁻¹]
 V_a = air flow rate [m³ min⁻¹]
 X = length [mm]
 Y = length [mm]
 Φ = equivalence ratio

2. บทนำ

จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่า การเผาไหม้ในวัสดุพรุน (porous medium)[1] เป็นการเผาไหม้แบบสองสถานะ ประกอบด้วยสถานะของแข็ง (solid phase) ซึ่งก็คือวัสดุพรุน และสถานะก๊าซ (gas phase) เนื่องจากวัสดุพรุนดังกล่าวมีลักษณะเด่นคือ มีอัตราส่วนพื้นที่ผิวต่อปริมาตรสูง มีค่าการแผ่รังสีและดูดกลืนรังสีความร้อน (emissivity and absorptivity) ที่สูงกว่าสถานะก๊าซมาก ทำให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมี (Chemical reaction) และการถ่ายเทความร้อน (heat transfer) ได้สูงกว่าการเผาไหม้ในสถานะก๊าซทั่วไป จากนั้น R.Echigo และคณะ [2] ได้ทำการทดลองการเผาไหม้ในวัสดุพรุนแบบสลับทิศทางการไหลของไอติดอย่างเป็นจังหวะ แทนการไหลในทิศทางเดียวพบว่าสามารถแก้ปัญหาความเร็วของไอติด (u) ที่เข้าสู่ห้องเผาไหม้ให้มีช่วงกว้างขึ้น และช่วยแก้

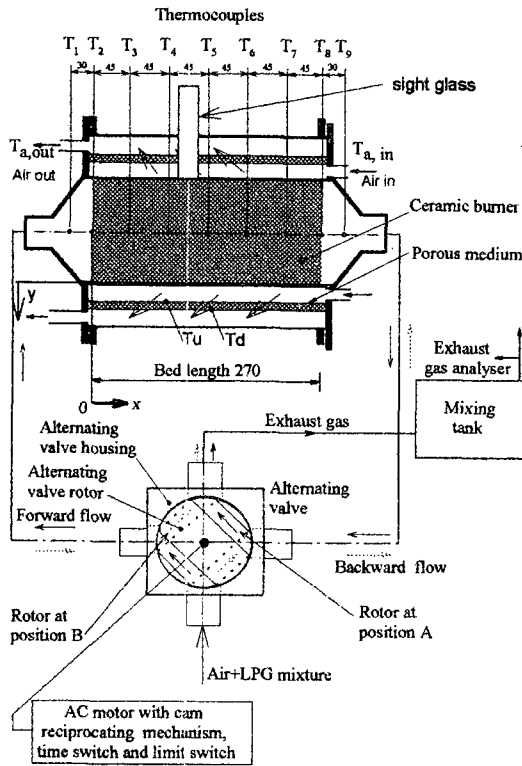
ปัญหาการเป่าดับ (blow off) ของเปลวไฟในกรณีที่ใช้ไอติดแบบทิศทางเดียวได้ และสามารถเผาเชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนต่ำมาก ๆ ได้

จากเหตุผลที่ได้กล่าวมาแล้ว เป็นที่มาของการศึกษาเชิงทดลองอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนประสิทธิภาพสูงนี้ โดยใช้เทคนิคการเผาไหม้ในวัสดุพรุน เพื่อที่จะเพิ่มสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสู่อากาศ ซึ่งจะพิจารณาเทคนิคการสลับทิศทางการเผาไหม้ในวัสดุพรุนอย่างเป็นจังหวะ (cyclic flow reversal combustion, CFRC) เป็นหลัก แทนการเผาไหม้แบบไหลทางเดียว (one way flow combustion, OWFC) การศึกษากระทำโดยการสร้างอุปกรณ์ทดลอง และทำการทดลองเก็บข้อมูล เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างระบบไหลทางเดียวและระบบไหลสลับทิศทาง ศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ เช่นความเร็วการไหลของไอติด (u) เวลาที่ใช้ในการสลับทิศทางการไหลของไอติดอย่างเป็นจังหวะ (half period, t_{hp}) และอิทธิพลของค่า equivalence ratio (Φ) ที่มีต่อโครงสร้างความร้อนภายในของวัสดุพรุน และคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนสู่อากาศ ทั้งนี้เพื่อนำไปสู่การประยุกต์ใช้งานจริงต่อไปในโรงงานอุตสาหกรรมประเภทที่ต้องการใช้พลังงานความร้อนโดยการใช้อากาศเป็นตัวกลางในการส่งผ่านความร้อน

3. อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

รูปที่ 1 แสดงอุปกรณ์ทดลองซึ่งสามารถทำงานได้ทั้งแบบ CFRC และ OWFC โดยที่ผนังเตาทำจากสแตนเลสภายในบรรจุแผ่นวัสดุพรุน ceramic หน้าตัดรูปร่างกลมเส้นผ่าศูนย์กลาง 14.7 ซม. หนาแผ่นละ 15 มม. เรียงต่อกันจำนวน 18 แผ่น คิดเป็นความยาวห้องเผาไหม้ 270 ซม. เพื่อทำหน้าที่เป็นห้องเผาไหม้ภายนอกผนังเตา มีแผ่นมุงลวดมีคุณสมบัติเป็นวัสดุพรุนวางเรียงซ้อนกันหนา 1 ซม. เพื่อทำหน้าที่เป็นเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนห่อหุ้มอยู่ภายนอก เว้นระยะห่างระหว่างผนังห้องเผาไหม้และแผ่นมุงลวด 2 ซม. ระยะห่างระหว่างแผ่นเปลือกนอกกับมุงลวดมีค่า 2 ซม. ที่ด้านหน้าแปลนมีท่อสำหรับให้ไอติดและไอเสียไหลเข้าและออกห้องเผาไหม้และมีท่ออากาศสำหรับให้อากาศไหลเข้าออกอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน เชื้อเพลิงที่ใช้คือ LPG ใช้เทอร์โมคัปเปิ้ล Type N ติดตั้ง 13 จุด ตามแนวแกนตลอดห้องเผาไหม้ (9 จุด) ที่ผนังมุงลวดของส่วนแลกเปลี่ยนความร้อนด้านในและด้านนอก (2 จุด) และที่ทางเข้าและทางออกของอุปกรณ์

แลกเปลี่ยนความร้อน (2 จุด) ใต้อิฐถูกกำหนดทิศทางการไหลอย่างเป็นจังหวะด้วยวาล์วสลับทิศทาง (alternating valve) โดยกำหนดค่า half-period ไว้สองค่า คือ $t_{hp} = 15s$ และ $t_{hp} = 30s$



รูปที่ 1 อุปกรณ์ทดลอง

เมื่ออุปกรณ์ถูกต่อเข้ากับชุดวัดอัตราการไหลของเชื้อเพลิงและอากาศ รวมทั้งชุดวัดสัญญาณอุณหภูมิแสดงผลด้วยคอมพิวเตอร์เรียบร้อยแล้ว เริ่มจุดเตาโดยใช้เปลวไฟจ่อลงไปที่ช่องดูเปลวไฟ (sight glass) โดยปรับส่วนผสมของไอดีที่ค่า equivalence ratio เริ่มต้นใกล้เคียงหนึ่ง โดยเริ่มต้นทดลองแบบ OWFC รอจนกระทั่งเตาเข้าสู่สภาวะคงที่ แล้วจึงเริ่มทำการปรับค่าต่าง ๆ ตามเงื่อนไขการทดลองที่ได้กำหนดไว้ โดยกำหนดค่าที่คือ $C_L = 3.8 \text{ kW}$ $\Phi = 0.33$ และ $u = 0.29 \text{ m/s}$

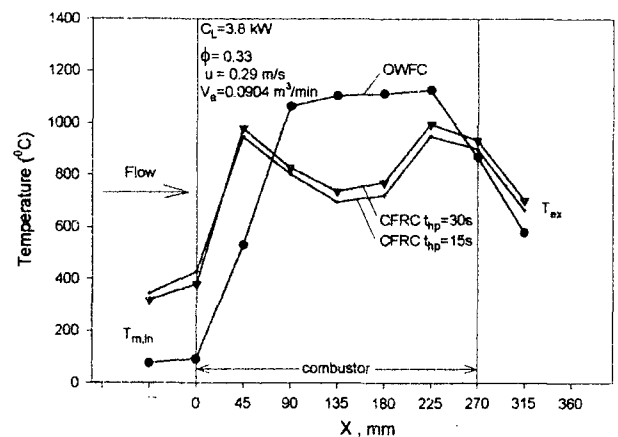
4. ผลการทดลอง

4.1 อิทธิพลของระบบ OWFC กับ CFRC

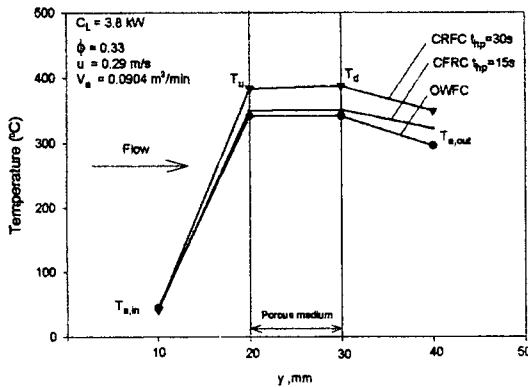
รูปที่ 2 แสดงตัวอย่างโครงสร้างทางความร้อนในห้องเผาไหม้โดยโครงสร้างความร้อนของการเผาไหม้แบบ OWFC ให้อุณหภูมิสูงสุดมีค่า 1126°C แต่มีอุณหภูมิการเผา

ไหม้สูงอยู่ในช่วงแคบ ทำให้มีพื้นที่การถ่ายเทความร้อนสู่อากาศรอบผนังเตาน้อย ในขณะที่การเผาไหม้แบบ CFRC ที่ $t_{hp} = 15s$ ให้อุณหภูมิสูงสุดมีค่า 952°C และที่ $t_{hp} = 30s$ ให้อุณหภูมิสูงสุดมีค่า 996°C แต่มีช่วงที่กว้างกว่า ทำให้สามารถถ่ายเทความร้อนสู่อากาศเย็นในวัสดุพอร์นได้ดีกว่า ดังแสดงในรูปที่ 3

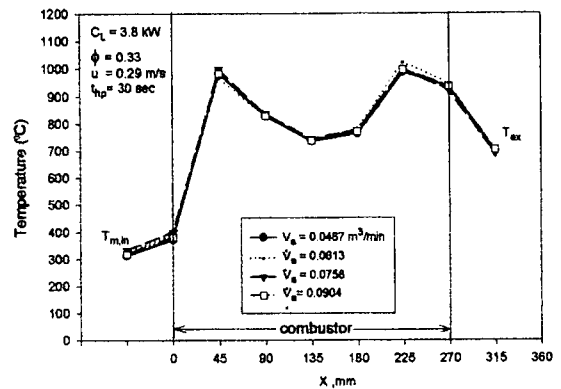
เป็นที่น่าสังเกตว่าขณะที่ระบบ OWFC มีโครงสร้างทางความร้อนภายในห้องเผาไหม้บริเวณกึ่งกลางสูงกว่าระบบ CFRC มากก็ตาม แต่การถ่ายเทความร้อนสู่อากาศในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนมีค่าน้อยกว่าระบบ CFRC อาจเนื่องมาจากทิศทางการไหลของการเผาไหม้และอากาศที่เข้ามารับความร้อนของระบบ OWFC ยังไม่สัมพันธ์กันดีนัก กล่าวคือ ตามรูปที่ 1 ไอดีไหลเข้าห้องเผาไหม้ด้านซ้ายเกิดการเผาไหม้แล้วออกทางด้านขวา ซึ่งจะทำให้ห้องเผาไหม้ด้านซ้ายมีอุณหภูมิต่ำและด้านขวาอุณหภูมิสูง ในขณะเดียวกันที่อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนอากาศเข้ามารับความร้อนจากด้านขวา แล้วออกทางด้านซ้าย อาจจะส่งผลให้อากาศที่ออกมามีอุณหภูมิต่ำกว่าเมื่อเทียบกับระบบ CFRC ซึ่งมีการสลับทิศทางการไหลอย่างเป็นจังหวะ ทำให้อุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้มีการเปลี่ยนแปลงอย่างทั่วถึง (ดูรูปที่ 2) จึงส่งผลให้อากาศที่ออกจากอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนมีอุณหภูมิสูงกว่าดังแสดงในรูปที่ 3 จากผลดังกล่าวจึงจะทำการศึกษาระบบ OWFC โดยที่มีไอดีและอากาศเข้ามารับความร้อนมีทิศทางการไหลเข้าอุปกรณ์ทดลองในทิศทางเดียวกันซึ่งจะได้ดำเนินการในขั้นต่อไป



รูปที่ 2 โครงสร้างทางความร้อนในห้องเผาไหม้



รูปที่ 3 โครงสร้างทางความร้อนในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน



รูปที่ 4 โครงสร้างทางความร้อนในห้องเผาไหม้เมื่อเปลี่ยนแปลงปริมาณอากาศ (V_a)

4.2 อิทธิพลของค่า Half-period (t_{hp})

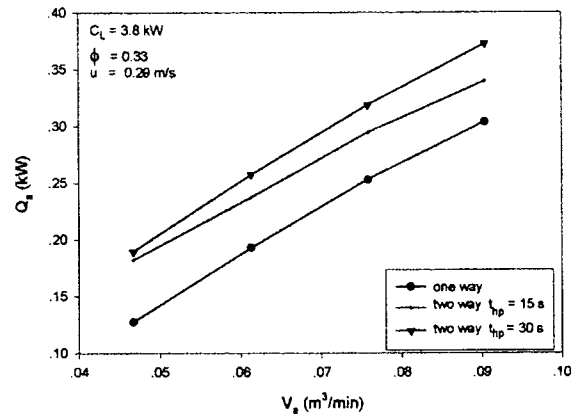
รูปที่ 2 แสดงอิทธิพลของช่วงเวลาในการกลับทิศทางการไหลของไอดี (t_{hp}) มีผลต่อโครงสร้างความร้อนในห้องเผาไหม้โดยที่ $t_{hp} = 15$ s ลักษณะของโครงสร้างความร้อนจะมีค่าต่ำกว่าของ $t_{hp} = 30$ s โดยพิจารณาเฉพาะทิศทางการไหลของไอดีจากซ้ายไปขวา เนื่องจากเมื่อค่า t_{hp} มีค่ามากขึ้น จะทำให้ตำแหน่งของเปลวไฟยับยั้งเข้าไปในห้องเผาไหม้อยิ่งขึ้น[2] ความร้อนที่สูญเสีย (loss) ที่ด้านทางเข้าไอดี (upstream) น้อยลง ส่งผลให้อุณหภูมิการเผาไหม้เพิ่มสูงขึ้น และทำให้อุณหภูมิอากาศเย็นทางด้านขาออกของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสูงมากขึ้น(ดูรูปที่ 3 ประกอบ)

4.3 อิทธิพลของปริมาตรอากาศที่เข้าอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (V_a)

ปริมาตรอากาศที่เข้าสู่อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนได้ทำการทดลองที่ค่า 0.0467, 0.0613, 0.0758, 0.0904 m^3/min ตามลำดับ พบว่าที่ค่า V_a ต่าง ๆ มีผลต่อโครงสร้างความร้อนภายในห้องเผาไหม้น้อยมากทั้งระบบ OWFC และ CFRC ดังตัวอย่างแสดงในรูปที่ 4 (CFRC $t_{hp}=30s$) กล่าวคือ เมื่อปริมาตรอากาศเพิ่มขึ้น โครงสร้างทางความร้อนยังมีลักษณะเหมือนเดิม แต่จะมีผลต่อปริมาณความร้อน ที่ถ่ายเทสู่อากาศ (Q_a) โดยที่

$$Q_a = p v_c (T_{a,out} - T_{a,in}) \quad (1)$$

ดังแสดงดังรูปที่ 5 จะเห็นได้ว่าระบบ CFRC ให้ค่า Q_a สูงกว่าระบบ OWFC ในทุกค่า V_a ทั้ง $t_{hp}=15s$ และ $30s$



รูปที่ 5 ปริมาณความร้อนที่อากาศได้รับ

5. สรุปผล

จากผลการทดลองเบื้องต้น จะเห็นว่าเมื่อเปรียบเทียบระบบ OWFC กับ CFRC นั้น ระบบ CFRC จะถ่ายเทความร้อนสู่อากาศได้ดีกว่า และเมื่อเปรียบเทียบในระบบ CFRC เหมือนกัน พบว่า ที่ค่า $t_{hp}=30s$ จะถ่ายเทความร้อนสู่อากาศได้ดีกว่าที่ $t_{hp} = 15$ s และ ค่า Q_a จะมีค่าสูงขึ้นเมื่อค่า V_a มีค่าสูงขึ้น การศึกษานี้จะยังคงดำเนินการต่อไปเพื่อหาทางพัฒนาอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นเพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมต่อไปในอนาคต

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ สำนักงานคณะกรรมการนโยบายพลังงานแห่งชาติ (สพช.) ที่ได้ให้ทุนสนับสนุนในการทำงานวิจัยประจำปี 2542

7. เอกสารอ้างอิง

[1] Jugjai, S., et al, "Multimode Heat Transfer in Cyclic Flow Reversal Combustion in a Porous Medium" International Journal of Energy Research, Vol. 23, No. 3, pp. 183-206, 1999

[2] R. Echigo, J.G. Hoffmann, H. Yoshida and S. Tada "Experimental Study on Combustion in Porous Media with a Reciprocating Flow" , The collected papers of Ryozo Echigo, Vol.2, pp.1-181